

PRINT ISSN 0916-4405  
ONLINE ISSN 2189-9363

# 森林総合研究所研究報告

Vol.17 No.1 (No.445)

## BULLETIN

of the  
Forestry and  
Forest Products  
Research Institute



March 2018



国立研究開発法人 森林研究・整備機構  
森林総合研究所  
Forestry and Forest Products Research Institute

## The Chief Editor

根田 仁 Hitoshi NEDA (Principal Research Director, FFPRI)

## The Vice- Chief Editor

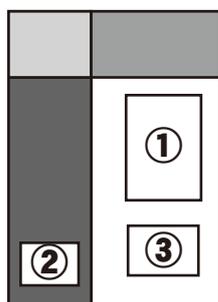
片岡 厚 Yutaka KATAOKA (Public Relations Division, FFPRI)

## Editor

韓 慶民 Qingmin HAN (Department of Plant Ecology, FFPRI)  
伊原 徳子 Tokuko IHARA (Department of Forest Molecular Genetics and Biotechnology, FFPRI)  
石塚 成宏 Shigehiro ISHIZUKA (Department of Forest Soils, FFPRI)  
河村 文郎 Fumio KAWAMURA (Department of Forest Resource Chemistry, FFPRI)  
倉本 恵生 Shigeo KURAMOTO (Department of Forest Vegetation, FFPRI)  
丸山 温 Yutaka MARUYAMA (College of Bioresource Sciences, Nihon University)  
松村 ゆかり Yukari MATSUMURA (Department of Wood Properties and Processing, FFPRI)  
野口 正二 Shoji NOGUCHI (Disaster Prevention, Meteorology and Hydrology, FFPRI)  
岡 輝樹 Teruki OKA (Department of Wildlife Biology, FFPRI)  
岡野 通明 Michiaki OKANO (Disaster Prevention, Meteorology and Hydrology, FFPRI)  
砂川 政英 Masahide SUNAGAWA (Department of Mushroom Science and Forest Microbiology, FFPRI)  
鷹尾 元 Gen TAKAO (Forestry Division, JIRCAS)  
高務 淳 Jun TAKATSUKA (Department of Forest Entomology, FFPRI)  
高山 範理 Norimasa TAKAYAMA (Department of Forest Management, FFPRI)  
谷口 亨 Toru TANIGUCHI (Forest Tree Breeding Center, FFPRI)  
山口 浩和 Hirokazu YAMAGUCHI (Department of Forest Engineering, FFPRI)

This journal is indexed in CAB Abstracts.

### 表紙写真 Photographs in Cover



- ① 奈良井国有林のヒノキコンテナ苗植栽地（長野県）  
Plantation of containerized Hinoki (*Chamaecyparis obtusa*) seedlings at Narai National Forest in Nagano Prefecture.
- ② カラマツ材を使用した木造庁舎（長野県長和町）  
Wooden town hall constructed with Japanese Larch (*Larix kaempferi*) at Nagawa Town, Nagano Prefecture
- ③（本文91～109ページ）  
北海道空知地方における人工林での保持林業：針葉樹人工林の主伐時に広葉樹を残す大規模野外操作実験  
Retention Experiment for Plantation Forestry in Sorachi, Hokkaido (REFRESH):  
A large-scale experiment for retaining broad-leaved trees in conifer plantations

目次

総説	
我が国の製材規格と許容応力度の変遷 井道 裕史	1
論文	
低樹齡ヤナギ属樹木の樹皮タンニンの化学特性及び効率的抽出法（英文） 牧野 礼、橋田 光	35
指数平滑法と ARIMA 法予測の精度評価 —スギとヒノキ丸太月次価格の予測を例に 道中 哲也、岡 裕泰、久保山 裕史、山本 伸幸	43
常陸太田試験地内の源頭部小流域における間伐が樹冠遮断量、 蒸発散量および流出量に与える影響（英文） 久保田 多余子、坪山 良夫、延廣 竜彦	63
スギ、ヒノキコンテナ苗育苗培地への木質バイオマス燃焼灰混合が 苗木の成長と養分状態におよぼす影響 長倉 淳子、小笠 真由美、山田 毅、平井 敬三	75
短報	
東大雪天然林における風倒後 60 年間の林分動態 石橋 聰、古家 直行、佐々木 尚三、高橋 正義	85
研究資料	
北海道空知地方における人工林での保持林業： 針葉樹人工林の主伐時に広葉樹を残す大規模野外操作実験（英文） 山浦 悠一、明石 信廣、雲野 明、対馬 俊之、 長坂 晶子、長坂 有、尾崎 研一	91
2017 年 7 月九州北部豪雨における斜面崩壊と雨量分布の関係について 村上 亘、安田 幸生	111

**Bulletin of FFPRI, Vol.17, No.1 (No.445) March 2018**

**CONTENTS**

*Review article*

- History of sawn lumber standards and allowable stresses in Japan  
Hirofumi IDO ..... 1

*Original article*

- Chemical characterization and efficient extraction of condensed tannin from the bark of juvenile *Salix* species  
Rei MAKINO and Koh HASHIDA ..... 35

- Measuring forecasting accuracy for exponential smoothing and ARIMA models: a case of forecasting monthly prices of Japanese *sugi* and *hinoki* logs  
Tetsuya MICHINAKA, Hiroyasu OKA, Hirofumi KUBOYAMA and Nobuyuki YAMAMOTO ..... 43

- Effects of thinning on canopy interception loss, evapotranspiration, and runoff in a small headwater *Chamaecyparis obtusa* catchment in Hitachi Ohta Experimental Watershed in Japan  
Tayoko KUBOTA, Yoshio TSUBOYAMA and Tatsuhiko NOBUHIRO ..... 63

- Effect of woody ash mixing to growing media on the growth and nutrient condition of containerized Sugi (*Cryptomeria japonica*) and Hinoki (*Chamaecyparis obtusa*) seedlings  
Junko NAGAKURA, Mayumi Y. OGASA, Tsuyoshi YAMADA and Keizo HIRAI ..... 75

*Short communication*

- Sixty-year stand dynamics of a forest stand damaged by Typhoon Toyamaru in Higashitaisetsu natural forest, central Hokkaido, Japan  
Satoshi ISHIBASHI, Naoyuki FURUYA, Shozo SASAKI and Masayoshi TAKAHASHI ..... 85

*Research record*

- Retention Experiment for Plantation Forestry in Sorachi, Hokkaido (REFRESH): A large-scale experiment for retaining broad-leaved trees in conifer plantations  
Yuichi YAMAURA, Nobuhiro AKASHI, Akira UNNO, Toshiyuki TSUSHIMA, Akiko NAGASAKA, Yu NAGASAKA and Kenichi OZAKI ..... 91

- Relationship between landslides and rainfall distribution in the torrential rain in northern Kyushu in 2017  
Wataru MURAKAMI and Yukio YASUDA ..... 111

## 総説 (Review article)

# 我が国の製材規格と許容応力度の変遷

井道 裕史<sup>1)\*</sup>

### 要旨

我が国では明治の近代化以降、製材や許容応力度に関する全国的な規格が整備され始めた。それらは膨大な回数 of 制定・改正・廃止を経て現在まで受け継がれている。ところが長年に渡る改正等のため、その経緯や規格に示された数値等の根拠について、現在では理解されていなかったり、既にわからなくなってしまうものも多い。そこで本報では、製材規格と許容応力度について、明治以降の変遷とその根拠について可能な限り明らかにすることを目的とした。

キーワード：規格、製材、許容応力度、変遷

### 1. はじめに

古来より人類は木材を構造物や土木の材料として用いてきた。それは木材が身近にあり人間の力で容易に加工できる材料であったことが大きい。その際に使用される木材の寸法、品質、さらにはその木材が負担することのできる荷重は、長年の経験により判断されてきた。その後、明治維新以降の近代化を迎えた我が国では、構造物の材料として用いられる木材について全国的な法令や規格等が制定され始めた。それらは膨大な回数 of 制定・改正・廃止を経て現在まで受け継がれている。ところが長年に渡る改正等のため、改正に至った経緯や規格に示された数値等の根拠について、現在では理解されていなかったり、既にわからなくなってしまうものも多い。

そこで本報では、構造物として使用される木質材料の基本である製材とその製材がどれだけの外力を負担してよいかを数値として示した許容応力度について、明治以降の変遷とその根拠についてまとめた。なお特に記載がない限り、曲げ、圧縮、引張り、せん断、めり込みの長期許容応力度をそれぞれ  $f_b$ 、 $f_c$ 、 $f_t$ 、 $f_s$ 、 $f_{cv}$ 、基準強度をそれぞれ  $F_b$ 、 $F_c$ 、 $F_t$ 、 $F_s$ 、 $F_{cv}$  で示す。ただし、長期・短期の区分が示されていなかった昭和 23 (1948) 年以前の許容応力度についてもそれぞれ  $f_b$ 、 $f_c$ 、 $f_t$ 、 $f_s$ 、 $f_{cv}$  で示した。また当時は  $\text{kg}/\text{cm}^2$  で示されていた単位は  $\text{kgf}/\text{cm}^2$  に統一した。その他の記号については、その都度意味を示した。

### 2. 市街地建築物法と木材規格の制定

(明治 39 ~ 昭和 12 (1906 ~ 1937) 年)

大正 8 (1919) 年 4 月 4 日、法律第 37 号により市

街地建築物法が公布された。この法律が我が国初の建築に関する総合的かつ体系的な制度であり、後の建築基準法の前身となるものである。これに伴い、大正 9 (1920) 年 9 月 29 日、勅令第 438 号により市街地建築物法施行令が制定された。また同年 11 月 9 日、内務省令第 37 号により市街地建築物法施行規則が制定され、その第 102 条において我が国で初めてとなる木材の許容応力度が示されている。

木材の許容応力度がどのようにして定められたかは明確ではないが、以下のような経緯を辿ったようである。明治 39 (1906) 年、東京市長の依頼により、建築学会は東京市建築条例案の検討を始め、大正 2 (1913) 年に成案 (白石 1982 に所収) が東京市長に提出されている。これは、欧米 17 か国 40 都市の建築条例を参考にして作成されたものであった (大橋・橋川 1987a, b)。特に明治 32 (1899) 年に施行されたニューヨーク市建築条例には構造計算規定が定められており、東京市建築条例案の安全応力強度 (許容応力度) の単位が  $\text{lb}/\text{in}^2$  であることやその値が似通っていることから、ニューヨーク市建築条例が東京市建築条例案に与えた影響が見て取れる。

東京市建築条例案の第 3 編「材料及結構」は佐野利器が原案を作成しており、その中の第 6 章「強弱計算標準」において、材料の安全応力強度が示されている。その中から木材を取り出し、これを  $\text{kgf}/\text{cm}^2$  単位に換算して 5 単位で丸めたものを加えて Table 1 に示す。また、石川・平田 (1990a) によると、「木材では、震災予防調査会や帝国大学での材料試験結果が、学会案 [東京市建築条例案] の応曲力度値に反映されたと推測しうる」と記載されている。佐野 (1906) の報告にも、

原稿受付：平成 29 年 5 月 19 日 原稿受理：平成 29 年 9 月 19 日

1) 森林総合研究所 構造利用研究領域

\* 森林総合研究所 構造利用研究領域 〒305-8687 茨城県つくば市松の里 1

本報の一部は、日本木材学会木材強度・木質構造研究会春季研究会 (2017 年 3 月 19 日、福岡) において発表した。

「黒松の安全応折強度を仮に  $800 \text{ lb/in}^2$  と考える。これは、震災予防調査会あるいは帝国大学等における試験から得られた応折強度が  $5,000 \sim 12,000 \text{ lb/in}^2$  であったことから、これに安全率  $1/10$  を取って  $800 \text{ lb/in}^2$  と仮定したのである」という趣旨の内容が記載されており、ここでマツの曲げ許容応力度を  $800 \text{ lb/in}^2$  とした根拠と思われる値が示されている（ただし、石川・平田の報告によると、複数ある「東京市建築条例案」の許容応力度はそれぞれの案で異なっており、当初案は最終案の  $800 \text{ lb/in}^2$  とは異なっていたようである）。

結果的にこの条例案は実現しなかったが、これはその後笠原敏郎や内田祥三らによって作成される市街地建築物法施行規則の原型とされた（大橋・橋川 1987a, b）。また当時材料強度値が記載された法令等としては、上述した東京市建築条例案、市街地建築物法施行規則のほか、東京府建築取締規則案、大連市建築規則などがあったが、各法令等における木材の材料強度値や単位はそれぞれ異なっており（石川・平田 1989, 1990a）興味深い。

市街地建築物法施行規則第 102 条に示された許容応力度を Table 2 に示す。杉山（1985）は、『ティンバーエンジニアリング読本』の中で木質構造とその歴史について解説しており、また、戦前から戦後にかけての我が国および米国の木材の許容応力度の変遷について『AWCOM』にまとめている（杉山 1977a, b, c, d, e, f, g）。『AWCOM』では、市街地建築物法施行規則第 102 条の許容応力度についても考察しており、これを参考に、Table 2 から読み取れることを列挙すると以下の通りとなり、我が国初の許容応力度は非常にシンプルなものであった。

- ・針葉樹が 3 樹種群、広葉樹が 1 樹種群からなっている。
- ・唯一の外国産材として、オレゴンパインすなわちベイマツが記載されている。北海道マツの類はエゾマツ・トドマツを想定していると思われる。
- ・ $f_c = f_t = f_b$  である。
- ・ $f_s$  は他の許容応力度の  $1/10$  となっている。

また、同規則第 108 条には座屈に対する考慮として、圧縮木材に対する荷重は  $P = Af_c(1 - 0.02(l/d))$  式から算出したものを超えてはならないとしている。ここで、 $P$  は荷重、 $A$  は断面積、 $f_c$  は第 102 条に示された圧縮の許容応力度、 $l$  は主要な支点間の距離、 $d$  は断面の最小径である。上記の式はテトマイヤー式と呼ばれるものであるが、同規則でこの式が採用される以前には複数の案があり、石川・平田（1990b）によりその経緯が詳しく解説されている。

その 17 年後の昭和 12（1937）年 6 月 21 日、内務省令第 25 号により市街地建築物法施行規則の改正が行わ

れ、木材の許容応力度も改正された。この時中心的な役割を果たしたのが森徹である。『建築雑誌』に掲載された森の講演録（森 1937）によると、「長足の進歩を遂げました構造力学の発達の結果、木構造におきましても精密な強度計算を行うのが常道となって参りましたので、従来 of 我国法規のごとき低い許容応力度では、経済的ないしは実際問題と致しまして木構造を設計し得なくなりましたので、ここに木材許容応力度改正となったのであります」と改正の理由が示されている。

改正された木材の許容応力度を Table 3 に示す。同様に杉山（1977b）の報告を参考にして改正の主な内容を列挙すると以下の通りとなる。

- ・広葉樹の樹種群が 1 から 3 に増加し、針葉樹・広葉樹ともに 3 樹種群となった。
- ・樹種の数が増加した（「北海道マツの類」を 1 つとすると）から 19 と大きく増加した。針葉樹で追加された樹種の大部分は米材である。
- ・全体として許容応力度の値が大きくなったが、ケヤキ・クリの  $f_c$  は小さくなった。
- ・各種許容応力度間の関係は、改正前は針葉樹、広葉樹ともに  $f_c = f_t = f_b, f_s = 0.1f_c$  であったものが概ね、 $1.2f_c = f_t = f_b, f_s = 0.12f_c$ （針葉樹）、 $1.4f_c = f_t = f_b, f_s = 0.15f_c$ （広葉樹）となった。

また、森（1937）の報告から、以前の市街地建築物法施行規則では明確ではなかった繊維に垂直方向の圧縮の許容応力度が、繊維に平行方向のそれと同値であったことがわかる（ただし、部分圧縮すなわちめり込みと全面横圧縮との関係は不明であるので、ここでは便宜的に  $f_{cv}$  として扱う）。また、時期尚早であるとして法律化はされなかったが、 $f_{cv} = 0.5f_c$ （針葉樹）、 $f_{cv} = 0.7f_c$ （広葉樹）が提案されていた。

許容応力度の誘導の根拠についても森（1938a）の報告に詳細に示されている。以下にその概要を示す。元データとなったものは、大正 3（1914）年発行の『建築用本邦産木材及石材』（大蔵省臨時建築部 1914）に記載された強度値である。この強度値を  $F$  とし、 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  をそれぞれ相加平均偏差係数、欠点係数、時間効果係数とする。相加平均偏差係数  $\alpha$  とは、大蔵省臨時建築部の曲げ試験結果によると、曲げ強度の分布は正規分布をしておらず、平均値は最頻値よりも大きい。そのため、平均値を基準とすると無欠点材の標準強度の値が過大になるおそれがあるため、平均値を低減するとしたものである。これを圧縮、曲げ、せん断ともに  $0.9$  としている。欠点係数  $\beta$  は、森の引張り強度に及ぼす節の影響（森 1938b）などの結果を参考に、 $0.6$ （圧縮）、 $0.5$ （曲げ、せん断）を採用している。時間効果係数  $\gamma$  とは、いわゆる荷重継続期間の影響のことであるが、欠点材に対する荷重の時間効果に関する研究

がないため、無欠点材の結果が用いられている。森三郎によるクリーブ載荷後の試験体に対する静的曲げ試験の結果から、圧縮、曲げ、せん断ともに0.85を採用している。さらに安全率 $\nu$ を3としている。その結果、無欠点材の強度と許容応力度の比である低減率 $R = \nu / (\alpha \times \beta \times \gamma)$ は、圧縮では、 $R = 3 / (0.9 \times 0.6 \times 0.85) = 6.5$ 、曲げ、せん断では $R = 3 / (0.9 \times 0.5 \times 0.85) = 8$ となる。『建築用本邦産木材及石材』の強度値とそれを低減率で除して算出した森による許容応力度の案をTable 4に示す。この表の値が元になり、改正された許容応力度が定められた。

ところで、この間の大正15(1926)年10月26日、商工省告示第30号により、工業品規格のうちの木材規格(日本標準規格JES: Japanese Engineering Standardに所収)が定められている。これは、針葉樹の素材および主として建築に使う製材に適用する目的とされ(山井1989)、後の製材の日本農林規格に繋がるものである。山井の記述に従って木材規格の概要を記すと以下の通りとなる。

- ・製材の断面寸法および形状により、材種はひき角、ひき割、板、盤の4種類に区分されている。
- ・品等の区分は、例えばひき角では、1等、2等、3等、4等、次1等、次2等、次3等、次4等としている。
- ・製材の品等を区分する際の主要な因子は、節、丸身、木口割れ、目まわり、その他の欠点である。節の大きさは長径で表している。
- ・製材の厚さ、幅、長さの標準寸法が規定されているばかりでなく、主な出来合い品の標準寸法も示されている。
- ・製材は木理の状況により、柾目、板目、柵目の3種に、樹心の有無により心持ちおよび心去りの2種に、赤身の程度により赤、赤勝(70%以上の赤身)、交じりの3種に区分している。

ただし、この木材規格は、他の工業品との関連において制定を見たもので、木材規格として本来の性格を持ったものではなかった(林業新聞社1943)。そのためであるかは不明だが、林業発達史調査会の資料によれば、制定はされたものの、実際の取引面ではほとんど問題にされなかったとのことである。また、建築の分野での木材の許容応力度の採用にも関わらず、木材規格では、節などの欠点を製材の強度と直接結びつけて評価するという考えはなかったようである(山井1989)。

### 3. 戦中の製材関連規格と臨時日本標準規格

(昭和12～19(1937～1944)年)

昭和12(1937)年に日中戦争が勃発し、同13年に国家動員法が、同14年には価格統制法が制定された。

これら一連の動きに関連して、同12年9月、輸出入品等に関する臨時措置に関する法律(法律第92号)が制定され、その第2条の規定により、同14年9月27日、用材生産統制規則(農林省令第45号)が公布された(山井1989)。この規則によれば、用材(一般材)は、同年10月13日に制定された用材規格規定(農林省告示第367号)に従って生産し、かつ道府県の行う検査に合格したものでなければ、譲渡することも、使用することもできないことになった(山井1989, 林業新聞社1943)。用材規格規定は、農林省による木材関係の最初の規格として知られている。このような措置がとられるようになったのは、日中戦争の進展とともに、木材の需要が急増し、その価格の高騰が目立つようになり、需要者側から木材の公定価格を定めてほしいという要請が強くなってきたが、木材は寸法や品質が複雑多岐にわたり、公定価格が定めにくい状態であったので、規格を統一するとともに、用途を指定し、需給の円滑化を図る必要に迫られたからである(山井1989)。以下、山井(1989)の報告を元に、品質区分についての一部を示すと以下のようになる。

- ・材種は、板類(板、小幅板、斜面板、厚板、盤)、ひき割類(小割、中割、割)、ひき角類(正角、平角)に分けられる。
- ・小幅板の一部を除き、各材種とも品質は、1等、2等、3等の3階級に区分されている。
- ・製材の品質を区分する欠点は、①節、②丸身、③木口割れまたは目まわり、④抜け節、腐れ節、抜けやすい節、腐れ、きず、穴、虫喰い、材面における欠け、汚痕、入り皮、やにつぼ、⑤あて、ねじれ、反り、変色等で顕著なもの。
- ・1等は節以外の欠点個数がないもの、2等は丸身の欠点が2個(ただし、ひき角類にあっては1個)および木口割れまたは目まわりの欠点が2個で、その他の欠点個数がないもの、3等は丸身の欠点が3個(ただし、ひき角類にあっては2個)、木口割れまたは目まわりの欠点が3個またはその他の欠点個数が1個以上のもの。

この措置にも関わらず、木材価格は上昇した。そこで、軍および軍需産業に必要な資材を重点的に割り当てるため、昭和15(1940)年10月に用材配給統制規則(農林省令第87号)が制定された。さらに、翌年3月に制定された木材統制法(法律第66号)に続き、木材統制法施行令、木材統制法施行規則が制定され、木材、製材業の営業はすべて許可制になった(山井1989)。

用材規格規定は、昭和16(1941)年の改正(農林省告示第321号)で潤葉樹(広葉樹)が追加され、同18(1943)年の改正(農林省告示第469号)で規格品等

の単純化が図られた。主な改正点としては、品等が4階級区分となり、等級の決定に際し、欠点個数を加算して行う方法が改められた。節の程度の表示に百分率が採用された。針葉樹製材の欠点に、「曲、反り、または幅反り」が加えられた。その後、戦局が不利に向かい、木材の確保も難しくなってきたので、昭和19(1944)年7月、品等区分停止に関する告示(農商省告示第825号)が公布され、ついに同20年8月終戦を迎えた(山井1989)。

一方、戦時下において主要資材の節約を図る目的から、昭和14(1939)年から臨時日本標準規格が定められ、木材の許容応力度関連では、昭和19(1944)年8月に公布された臨時日本標準規格第532号「建築物の荷重」、同第533号「建築物強度計算の基本」(建築学会1944)が用いられることとなった。これにより市街地建築物法は全面的に停止された。これらの規格は建築学会が原案作成を担当し、成案報告が建築雑誌第58集第712・3号(昭和19年8・9月合併号)(建築学会1944)に掲載されている。「建築物強度計算の基本」に示された許容応力度とヤング係数をそれぞれTable 5、6に示す。1937年版市街地建築物法施行規則第102条(Table 3)と比較すると以下の通りである。

- ・ベイマツやベイヒなどの外国産樹種が削除された。
- ・ $f_c$ 、 $f_t$ 、 $f_b$ が2倍となり、 $f_s$ は針葉樹で1.4~1.6倍、広葉樹で2倍となった( $f_s$ が2倍でない理由は後述)。
- ・Table 5には記載していないが、針葉樹のめり込みの許容応力度 $f_{cv}$ が追加され、材中間部が $1/3f_c$ 、材端が $1/4f_c$ となった。先の森の提案が $1/2f_c$ であったから、規格はこの割合よりも小さくなっている。
- ・繊維の角度により、 $0\sim 10^\circ$ は $f_c$ を、 $70\sim 90^\circ$ は $f_{cv}$ を、 $10\sim 70^\circ$ は直線補完の値を用いることとされた。
- ・座屈の許容応力度も定められ、 $\lambda$ を有効細長比、 $f_k$ を許容座屈応力度とすると、 $\lambda \leq 100$ の場合は $f_k = f_c(0.007\lambda)$ 、 $\lambda > 100$ の場合は $f_k = 0.3f_c/(\lambda/100)^2$ により算出する。また、「建築物強度計算の基本」と同号に掲載されている「木造建築物の強度計算成案報告」では、但し書きとして、 $\lambda < 20$ の場合は $f_c = f_k$ としてよいと記載されている。
- ・針葉樹のヤング係数が定められた。ただし、樹種群は許容応力度のものとは異なっている。

#### 4. 終戦直後の許容応力度の統合

(昭和21~24(1946~1949)年)

戦後の昭和21(1946)年5月以降、日本建築学会(昭和22年に建築学会から日本建築学会に改称している)の構造標準委員会で、戦時中の臨時日本標準規格第532、533号が再検討された。その結果、両規格は統合され、昭和22(1947)年3月、工業標準調査会建築部

会においてこの改正案が可決された。その後、日本建築規格・建築3001「建築物の構造計算」として、昭和23(1948)年4月30日に商工省・建設院告示第1号として告示された。本規格の大きな特徴は、短期および長期の2本建ての許容応力度体系になったことである(Table 7)。しかも、臨時日本標準規格第533号と一時は廃棄された市街地建築物法施行規則の許容応力度が、それぞれ短期および長期の許容応力度となっている(針葉樹の長期の $f_s$ を除く)。このことについて、昭和23(1948)年12月30日に日本建築学会から発行された『日本建築規格・建築3001建築物の構造計算解説』(日本建築学会1948)では、「戦時中定められた2つの規格[臨時日本標準規格第532、533号]では許容応力度は短期荷重に相当するもの1本でとらえられ、長期荷重に対してはその応力の方を2倍して同一の許容応力度で検算することとなっている。これは短期荷重に対する許容応力度を一律に長期荷重に対するその2倍にとってあるために、便宜上このような方法によったもので、許容応力度2本建ての根本主旨には変わりはない」と説明している。また、長期許容応力度については、クリープ性能に関する資料が不足しており、「従来の建築物法の許容応力度が多年の経験からクリープに対して特に障害を生じなかったということから一応それ等の値をそのまま採用することとした。従って長期荷重に対する許容応力度は今後の研究により逐次改正せらるべきものである」とある。

以下に『建築物の構造計算解説』に従って、許容応力度の誘導方法についての根拠を示す。短期許容応力度については以下のように記載されている。まず短期許容応力度は降伏点(比例限度と同意)を基準とする。次いで、我が国におけるスギおよびアカマツの無欠点材の圧縮・曲げについて統計的に概ね下限と思われる値を無欠点材の強度の下限値として、スギ圧縮250 kgf/cm<sup>2</sup>、スギ曲げ350 kgf/cm<sup>2</sup>、アカマツ圧縮350 kgf/cm<sup>2</sup>、アカマツ曲げ450 kgf/cm<sup>2</sup>と想定している。欠点と比較的多い材の低減率を圧縮0.6、曲げ0.5とする。次に比例限度を両応力の破壊強度の2/3とする。すなわち欠点と比較的多い材のスギ圧縮は $250 \times 0.6 \times 2/3 = 100$  kgf/cm<sup>2</sup>となる。同様に計算すると、スギ曲げ120 kgf/cm<sup>2</sup>、アカマツ圧縮140 kgf/cm<sup>2</sup>、アカマツ曲げ150 kgf/cm<sup>2</sup>となる。これらの値はいずれも1937年版市街地建築物法施行規則の許容応力度の1.7倍前後となっているが、最弱の材でしかも欠点の比較的多い場合はまれであろうとの見解から、1.7を2.0に割り増して、短期許容応力度は、長期許容応力度、すなわち1937年版市街地建築物法施行規則の許容応力度の2倍の値を採用している。

ところで、針葉樹の $f_s$ は、従来(1937年)の許容応力度に対して低下している(例えばスギ等7→5、ヒバ等8→6、ヒノキ等9→7 kgf/cm<sup>2</sup>)。これは、従来

の許容せん断応力度は小試験体から求めた値を基礎としているが、この解説を執筆した竹山謙三郎の実験（竹山 1944）によれば、通常使用する長さであるせん断長（合掌尻の鼻の出）が 20 ～ 30 cm のものになると、せん断長が 0 cm の標準試験体に対してせん断強度が 1/4 程度に低下するという影響を考慮したものである。まず実験から圧縮強度が 250、350 kgf/cm<sup>2</sup> 程度の下限強度のすぎおよびアカマツのせん断強度はそれぞれ 15、21 kgf/cm<sup>2</sup> とした。次にせん断は応力変形曲線が破壊するまで直線であるが、安全を見込んで、破壊強度の 2/3 を許容応力度ととらえた。以上より、すぎおよびアカマツの短期の許容せん断応力度としてそれぞれ 10、14 kgf/cm<sup>2</sup> を導いた。なお、欠点による強度の低下はせん断では比較的少ないため、この影響は考えていない。また、広葉樹については、実用に関しても小さな材が用いられるため、 $f_s$  は変えていない。

針葉樹のめり込みに関しては、まず全面横圧縮の比例限度を繊維平行方向の 1/8 と見ている。部分横圧縮、すなわちめり込みの場合はその 50% 程度の上昇を見込み、めり込みの許容応力度を圧縮のその 1/5 と定めた。また備考として、「めり込み変形が構造物に支障を生じない時は 1/5 の値を適当に増してよい」としており、解説には具体的な値が記載されている。

座屈に関しては、従来の市街地建築物法施行規則に定められていた  $P = Af_c (1 - 0.02(l/d))$  式について、細長比  $\lambda$ （または  $l/d$ ）の大きい範囲で危険な値となることはすでに知られていた。そのため、実際に使用する材料は欠点材である、圧縮力が偏心に加わることは不可避である、両端は純然たるピンではなく半固定の状態であるなどの条件に加えて、これらの条件の影響は  $\lambda$  の小さい塑性範囲と  $\lambda$  の大きい弾性範囲では異なることなども考慮して、「建築物強度計算の基本」に記載されたものと同じ許容座屈応力度式に改正された。

『建築物の構造計算』が作成されたのとはほぼ同時期の昭和 22（1947）年 11 月 28 日、後の『木質構造設計規準』の前身となる『木構造計算規準』が、鋼構造、鋼筋コンクリート構造とともに『各種構造計算規準』に内包される形で、日本建築学会から出版された（日本建築学会 1947）。この原案作成当時の木構造分科会の主査は竹山謙三郎、幹事は久田俊彦、原案作成担当者は後藤一雄であった。『木構造計算規準』は建築雑誌の昭和 19 年 8・9 月合併号「木造建築物の強度計算」（建築学会 1944）を再検討し改正したものであったが、内容としては前述の『建築物の構造計算』と同様であり、第 1 章 1 条にも「この規準は日本建築規格 3001 建築物の構造計算に基づいて定められたもので一般木造建築物の構造計算に適用する」と記載されている。ただし、めり込みの許容応力度は『建築物の構造計算』の解説で提案されていた値が記載されている（Table 8）。その後、昭和 24（1949）年 3 月 10 日に『木構造計算規準・

同解説』（日本建築学会 1949）が解説および木造学校建築規格の構造計算を付して独立して発行されているが、許容応力度は変更されていない。

## 5. 建築基準法と用材の日本農林規格の制定と改正 （昭和 25 ～ 36（1950 ～ 1961）年）

昭和 25（1950）年 5 月 24 日、法律第 201 号により建築基準法が制定された。これにより市街地建築物法は廃止となった。続いて同年 11 月 16 日には建築基準法施行令が定められ、その第 89 条には『木構造計算規準』と同じ許容応力度が示された。

製材規格に関しては、終戦後、用材生産統制規則は廃止されたが、用材規格規定は継続して用いられていた。昭和 23（1948）年 8 月に制定された指定農林物資検査法（法律第 210 号）に基づいて、翌年 8 月新たな用材規格規定（農林省告示第 239 号）が制定され、内容も一部改正されている（山井 1989）。さらに昭和 25（1950）年 5 月 11 日、法律第 175 号により、農林物資規格法が制定された。いわゆる JAS 法である。そしてこれに基づく新しい規格を作成することが妥当であるとの判断から、用材規格規定を一部改正した上で、昭和 28（1953）年 11 月 10 日、用材の日本農林規格（農林省告示第 769 号）が新たに制定された。ただし、品等が一部変更になった他は、新規格の内容は旧規格のそれと同じである。

ところで、用材の日本農林規格では尺貫法が用いられていた。しかし、計量法の規定により、特別の理由があるものを除いて昭和 34（1959）年 1 月 1 日以降計量はすべてメートル法によらなければならないことになった。ただし、木材関係は、改正作業期間、改正規格に対する生産、需要界の習熟期間等が考慮され、特別に昭和 36（1961）年 1 月 1 日まで実施が延期されていた。またこれに加え、需要動向の急速な変化にもなって生産事情も大きく変動しているにも関わらず改正が遅れていた実情もあり、昭和 33（1958）年より、林野庁長官の諮問機関としての「木材関係規格改正協議会」および農林大臣の諮問機関としての「農林物資規格調査会」が中心となり検討審議が行われ、昭和 35（1960）年 7 月 30 日農林省告示第 694 号により、新たな用材の日本農林規格が制定された（藤縄 1960、木材規格特別委員会 1960）。新たな用材の日本農林規格の針葉樹製材の材種は、板類、ひき割類、ひき角類の 3 種類であるが、ひき角類を心持ち角と心去り角に区分しているのが特徴であった。この点について、藤縄（1960）は以下のように解説している。「心持ち角は一般的に小丸太から製材されるが、心去り角は天然木の大丸太から製材されることが多いため、製材方法が異なり、節等の欠点について同一の品等区分を行うことは適当でなく、材質的にも異なるほか取引においても区分されているのが実情であるところから、それぞれ

について実態に即した品等区分を行っている。すなわち、心持ち角は材の一般的強さということに重点をおいて節の制限は今回初めて「長径とその存する材幅との比ではなく」節の径比によることとするとともに、現行規格とはかなり異なった見方によるように改正している。しかしながら心去り角については、その製材方法からみて心持ち角のそれと同様な制限を行うことは無理であるため、従来の概念による美観を重点に制限がなされている。その他丸身についても心持ち角は、心去り角よりやや緩和して規定がなされている。

一方この間、日本建築学会も木材規格の改正を重視し、昭和33(1958)年11月に「メートル法と建築モジュール委員会」に「木材規格特別委員会」を設け、木材関係規格改正協議会の使用者側としての建築関係委員を助けて、建築界の総意を反映させる方針を立て、調査・検討・審議を行っていた(木材規格特別委員会1960)。

さらに、許容応力度についても日本建築学会の木構造分科会内で審議が行われた。その結果、昭和34(1959)年12月4日、政令第344号建築基準法施行令の一部を改正する政令により、建築基準法施行令第89条の許容応力度の改正が行われた。これをTable 9に示す。大きな変更点は、これまでは針葉樹3樹種群、広葉樹3樹種群であったものが、針葉樹2樹種群、広葉樹2樹種群へと圧縮されたことである。すなわち、針葉樹では、ヒバ、ベイヒ、カラマツの許容応力度が大きくなり、アカマツ、ヒノキ等の樹種群に組み込まれた。広葉樹では、クリ、ナラ、ブナの曲げと引張りの許容応力度が大きくなり、逆にケヤキの許容応力度が小さくなり両者の樹種群は統一された。カシの曲げと引張りの許容応力度も大きくなった。

またその2年後の昭和36(1961)年、日本建築学会により『木構造設計規準・同解説』(日本建築学会1961)が発行された。日本建築学会は、これまで、昭和22(1947)年に『木構造計算規準』を、その2年後に『木構造計算規準・同解説』を発行していたが、その後、「学問技術の進歩に伴い従来の規準内容の改訂が必要となり、一方木造建築で比較的小規模のものではいわゆる構造計算の過程を経ないで設計建設されるものも多いのかんがみ、構造計画ならびに各部構造に対する合理的な規準が要望されてきた」(1961年版『木構造設計規準・同解説』序文)ため、新たに名称を「計算規準」から「設計規準」に改めて出版したものである。

1961年版『木構造設計規準・同解説』に記載された許容応力度およびヤング係数をTable 10～13に示す。『木構造設計規準・同解説』がその2年前に改正された建築基準法施行令第89条と大きく異なる点は、『木構造設計規準・同解説』では、木材使用の合理化を目的として、構造用木材を「普通構造材」と「上級構造材」の2等級に分け、それぞれに対する品等規定・許容応

力度・ヤング係数などが与えられたことである。普通構造材は下限品質の構造用木材(ただし、日本建築学会による『建築工事標準仕様書 JASS11 木工事』の規定を満足しなければならない)、上級構造材は平均品質の構造用木材(『木構造設計規準・同解説』には、「特に強度および剛性が大きく品質優良な構造材」と定義されている)とされている。ただし、上級構造材の許容応力度は針葉樹の繊維方向のみに設定されており、広葉樹は建物の骨組として使用される機会が少ないという理由で見送られている。一方、ヤング係数は上級構造材の中に広葉樹が含まれている。これは、日本建築学会が木材の変位計算が構造計算の中で重要な位置を占めていることを認め、合理的な設計を目指しているという理由による(杉山1962)。また、『木構造設計規準・同解説』では、建築基準法施行令第89条の樹種に加えて、許容応力度およびヤング係数にアピトンとラワンが追加されている。

ここで建築基準法施行令第89条と『木構造設計規準・同解説』の改正の根拠について、『木構造設計規準・同解説』の解説および杉山(1962)の報告に沿って概説する。基本的には『木構造設計規準・同解説』についての記載であるが、建築基準法施行令第89条も同様な考え方だと思われる。

まず、樹種群が圧縮されたことについて、杉山は、「樹種間の強度の差異よりも同樹種内の強度のばらつきの方が大きいことなどを考慮し思い切って針葉樹、広葉樹の分類をそれぞれ2種類に圧縮した。改定の仕事は主としてこの分類にあった訳で、許容応力度の数字は経験的に不妥当の所がないという理由から、大体旧数値を継承した」と説明している。『木構造設計規準・同解説』には、林業試験場その他林学関係機関で行われた広範な実験結果に基づいて分類しなおした結果であるとの記載がある。

続いて許容応力度設定の根拠であるが、始めに許容応力度誘導の元データとなった無欠点木材の強度 $\sigma_F$ をTable 14に示す。これらを用いて各許容応力度の算出式を示すと以下ようになる。

$$\sigma_f = \sigma_F \times 2/3 \times \alpha \quad (1)$$

$$\sigma_l = \beta \times \sigma_f \quad (2)$$

ここで、 $\sigma_f$ : 短期許容応力度、 $\sigma_l$ : 長期許容応力度、 $\sigma_F$ : 無欠点木材の強度(普通構造材に対してはTable 14の最低品質値、上級構造材に対してはTable 14の平均品質値)、 $\alpha$ : 欠点による低減係数、 $\beta$ : 長期許容応力度の短期許容応力度に対する比率である(ここで $\alpha$ 、 $\beta$ は1章で示した相加平均偏差係数 $\alpha$ 、欠点係数 $\beta$ とは異なる)。

なお、 $\sigma_F \times 2/3$ は、圧縮・曲げにおいては比例限度、

引張り・せん断においてはほぼ破壊強度の2/3を意味すると考える点は、従来の許容応力度の考えと同様である。ただし、せん断で引き裂きを伴う場合には、 $f$ を1/3.5に低下して扱うこととしている。次に、欠点による低減係数 $\alpha$ は $k_k, k_w, k_g$ をそれぞれ節によるもの、丸身によるもの、繊維の傾斜によるものとして、最も不利な場合は以下のように表される。

$$\alpha = k_k \times k_w \times k_g \quad (3)$$

$k_k, k_w, k_g$ の値は久田俊彦らの実験によるものであるとしている(杉山1971)。針葉樹のI、II類について以上の点をまとめるとTable 15となる。

長期許容応力度 $f$ については、無欠点材のクリープ限度とその静的強度との比は圧縮0.5～0.6、曲げ0.4～0.5、引張り0.6～0.7としている。欠点材の場合も同じ比率と考え、概ね破壊強度に対して0.5、すなわち比例限度応力に対して0.75となり、これをさらに低減して $\beta$ を0.5としている。この点について杉山(1962)は、「 $\beta$ の値がやや小さきに失する感がある」と評している。

建築基準法施行令にはなく『木構造設計規準・同解説』のみに示されているヤング係数の数値も大きく変わった。旧規準では針葉樹の繊維方向のヤング係数しか規定されていなかったが、新規準では諸外国にならって繊維と直角方向のヤング係数が規定されている。

## 6. 製材の日本農林規格の制定と改正 (昭和36～48(1961～1973)年)

用材の日本農林規格は、昭和35(1960)年に、新たに生まれ変わって制定された後、昭和36(1961)年6月15日農林省告示第620号、昭和40(1965)年3月26日農林省告示第406号により一部改正された。昭和40(1965)年の改正は、規格の普及を積極的に推進するため、JAS認定工場制度(国がJASマークを表示するための一定の基準を定め、この基準に適合した工場に対して認定を行い、認定を受けた工場は自社製品を自主格付によってJASマークを表示する制度)を確立することを目標としたものでもあり、従来の規格と比較して一般に厳しい制限に改められた(中沢1965)。

さらに、「天然産物である『素材(丸太)』と工場生産品である『製材』が用材の規格として同一規定の中に規定されているため、今後、JAS認定工場制度による格付検査制度を発足させ、格付検査の円滑な実施を図る上にも障害となる点が多々あるなどのことから」(坂本1968)、昭和42(1967)年12月8日、農林省告示第1840号で用材の日本農林規格は廃止され、同日第1841号、第1842号により素材の日本農林規格と製材の日本農林規格が区分して制定された。製材の日本農林規格は、用材の日本農林規格のうちの製材の規格

を基本的に準用しており、従来の規格においては、輸入木材によって製材された製品は適用除外とされていたが、本規格では、針葉樹、広葉樹を問わず、国産材と輸入材の区別なく適用を受けることとなった(坂本1968)。

次いで昭和47(1972)年には、強度面からの等級付けを行うとともに、生産、流通、需要の実態に即して、製材の日本農林規格が全面的に改正された(昭和47年10月14日農林省告示第1892号)。主な改正点は以下の通りである。

- ・針葉樹の製材は建築用構造材として使用できるように強度面からの等級付けをし、「特等、1等、2等」の3階級とした。特等および1等は、建築基準法施行令第89条の許容応力度に適合する。
- ・強度等級のみでは流通段階で混乱が生じ、規格が守られないおそれがあるため、化粧面からの規定(無節、上小節、小節の区分)を選択事項として表示できるようにした。
- ・規格全体についての最下位等級を設け規格全体のレベルアップを図り、規格に該当しないものは不合格とすることとした。
- ・人工乾燥を施した旨の表示をしたものに対しては、針葉樹については含水率15%以下、広葉樹については13%以下と規定した。

これらの他、材種の区分の変更、節の測定方法の変更、繊維走向の傾斜と平均年輪幅の測定追加等が行われた(坂元1972, 1973)。

ところで従前、ひき角類については心持ち角と心去り角の区分がされていたが、林業試験場等の試験結果から強度的にさほど相違が見られないという結果に基づき、ひき角類の心持ち角、心去り角の区分が削除されている(坂元1973)。この改正から約45年が経過した現在では、当時と比べて丸太が大径化し、それらの丸太から採材される心去り角の研究が改めて行われている。心持ち角と心去り角に強度特性の違いがあることも指摘されており、当時の状況とはやや異なってきたようである。

また改正前の規格では、節の長径および節径比の測定において抜け節、腐れ節、抜けやすい節については、その実測した径の1.5倍(他材面に貫通したものにあっては2.0倍)として計算されていたが、林業試験場等の試験結果から生き節もこれらの死節も強度的にあまり差がないところから、この節の換算についてはすべて削除し、実測値によることとされた(坂元1973)。

さて、前述したように昭和36(1961)年に日本建築学会は『木構造設計規準・同解説』を出版していたが、その改訂版が12年後の昭和48(1973)年4月に出された(日本建築学会1973)。これは主に、「1961年の

改訂以後、学問技術の進歩や本学会と関連する分野における「構造用集成木材の製造規準」および「構造用合板の日本農林規格」の制定にかんがみ、また、数多くの耐力壁に関する研究の結果、耐力壁における転倒現象の重要性の認識などが深まってきたので、従来、付録的に収録されていた「集成木材構造設計規準」を充実して半ば独立せしめ、また合板を用いた構造の解説を示し、それについての解説も充実するなどした(1973年版『木構造設計規準・同解説』序文)ものであった。製材に関する部分では、許容応力度およびヤング係数の針葉樹Ⅱ類にスプルースが追加された他は変更点はない。また、山井(1973)は英米の応力等級区分法との比較を行いつつ、我が国の構造用木材の等級区分法について解説している。

### 7. 枠組壁工法のオープン化に伴う規格の制定 (昭和49～52(1974～1977)年)

昭和49(1974)年、我が国の製材規格に大きな転換点が訪れた。枠組壁工法のオープン化である。昭和49年7月27日建設省告示第1019号により、枠組壁工法の技術基準が制定された。それに先立つ7月8日には、農林省告示第600号で枠組壁工法構造用製材の日本農林規格が制定されている。それまで枠組壁工法は、当時の建築基準法第38条(特殊な材料又は構法)に基づいて建築大臣が認定を与えて建設されていたが、上記告示により技術基準が示され、一般的な工法として認められることになった。枠組壁工法の技術基準等の変遷は日本ツーバイフォー建築協会発行の『十年の歩み』(1986)に詳しい。

技術基準を定める告示では、枠組壁工法に用いられる製材品についての許容応力度は設定されていなかった。一方、建設省の建築技術審査委員会は、昭和49～50(1974～1975)年にかけて総合技術開発プロジェクト「小規模住宅の新施工法の開発」を実施した。このプロジェクトでは、財団法人国土開発技術研究センターとの間に研究開発に関する委託契約が行われ、同センター内に小規模住宅構造委員会(委員長: 杉山英男東京大学教授)が設置され、官学民共同の総合的な研究開発が進められた。昭和49(1974)年度に、許容応力度算定法の検討および木質材料の許容応力度の算定が行われ、各種材料の許容応力度が提案された。その成果は昭和50(1975)年3月に報告書(建設省建築研究所1975)として取りまとめられている。本プロジェクトにより「我国および米国、カナダにおける木材の強度試験の結果および本委員会が実施したHEM-FIRの実大試験の結果から、枠組壁工法構造用製材規格に示す品等区分に対する応力等級区分は十分可能であろうと考えられる」との結果を得、以下の6つの手順により許容応力度の算定法の提案がなされた。

- ① 無欠点木材の強度値 ${}_0F$ を日本、米国、カナダの資料からとり出し、含水率などの調整を行い、樹種群ごとに算出した。
- ② 等級区分と寸法形状による強度比 $\alpha$ (従来の欠点による低減係数 $\alpha$ とは意味合いが異なる)を算出し、曲げの実大試験の結果から十分安全であることを認めた。
- ③ 各樹種毎の強度値 ${}_0F$ と等級、寸法区分による強度比 $\alpha$ をかけることによって、枠組壁工法構造用製材規格に示す等級に対応する樹種ごとの基準強度 ${}_0F\alpha$ を定める。
- ④ 長期許容応力度の算定は基準強度 ${}_0F\alpha$ をもとにして次のように行う。長期許容応力度の算定のための基礎データには日本建築学会発行『木構造設計規準・同解説』にみられるように、木材のクリープ限度を用いる必要があり、その値は我が国および諸外国の研究成果からほぼ5/8の値を示す。また、実際の取扱上から判断して、従来考慮されていなかった安全率を考慮し、その値を1.5とし、併せて木材の強度的性質のばらつきによる低減を4/5とみて、実用上の長期許容応力度( ${}_L F$ )は次式から求める。

$${}_L F = 4/5 \times {}_0 F \times \alpha \times 5/8 \times 1/1.5 = 1/3 {}_0 F \alpha \quad (4)$$

- ⑤ 短期許容応力度の算出は次のようにする。風、地震等の短期間の応力時に木材の変形が急増せず、長期にわたって建物の安全を計るためには比例限度を基本にする必要がある。これは、一般に破壊強度の7/10とされる。また、木材の強度的材質のばらつきによる低減を長期の場合と同様に4/5とみる。一方、短期荷重の継続時間による割増係数は約1.1であるので、短期応力に対する許容応力度( ${}_S F$ )は次式により求めることができる。

$${}_S F = 4/5 \times {}_0 F \times \alpha \times 7/10 \times 11/10 \doteq 2/3 {}_0 F \alpha \quad (5)$$

(4)式および(5)式から短期許容応力度( ${}_S F$ )は長期許容応力度( ${}_L F$ )のほぼ2倍になる。

- ⑥ せん断の場合は割りさきを考慮して、さらに1/1.5を乗じて値を算出する。

ここで、(4)式のクリープの係数5/8(0.625)は、米国で9/16の1割増し(9/16×11/10=0.619)として扱われているものに相当すると思われる。この1割増しの考え方について杉山(1977e)は、「アメリカ合衆国では古くNewlinのときから、約10年の継続荷重に対応するクリープ破壊荷重は、標準試験時の破壊荷重の9/16(約56%)であると決められてきた。しかしな

がら全最大設計荷重が10年間も加わるような条件を考えるのはシビヤー過ぎるとする考えが1950年代に入って強く現われ出し（中略）9/16が10%だけアップされたのである」と説明している。また、(5)式の短期荷重の継続時間による割増係数11/10は、標準試験時間を地震動等の時間に置き換える際の割増しと思われる。

さて、①から⑥の手順によって許容応力度案が算出され、さらに実用化を考慮して数字および寸法型式（または形式、以下型式で統一）等がまとめられた。これをTable 16に示す。

これらの成果を踏まえて、昭和52年7月12日建設省告示第1017号により告示の改正がなされた。今回の調査では改正された告示自体を確認することはできなかったが、『十年の歩み』の中の当改正告示について解説している章では、「総プロ」の許容応力度案からめり込みとヤング係数を除いた表が掲載されている。なお、新告示の制定により、以前の技術基準を定めた告示は廃止された。

また、枠組壁工法の工事仕様を定めた『住宅金融公庫融資住宅 枠組壁工法住宅工事共通仕様書』（住宅金融公庫建設指導部1974）が昭和49（1974）年に制定され、昭和52（1977）年8月1日に改訂版（住宅金融公庫建設指導部1977）が出版された。初版には許容応力度が記載されていなかったが、改訂版ではスパン表の中で甲種枠組材1級および2級の許容応力度が示されている。これらの値はTable 16とほぼ同様であるが、S-P-FとW Cedarがまとめられ、値はW Cedarのものを採用している。

ところで、枠組壁工法枠組材の許容応力度の設定がなかった昭和49～52（1974～1977）年頃の取扱いが明瞭ではないが、昭和50（1975）年発行の『枠組壁工法とその技術規準の原点』（渡部・新井1975）によると、枠組壁工法用製材の日本農林規格による分類のうち、SIは『木構造設計規準・同解説』の針葉樹I類、SIIは同II類の許容応力度が使用できると記されており（建築基準法施行令の許容応力度も同値）、従来の製材の許容応力度を援用していたものと思われる。なお、針葉樹I類はベイマツ、ベイヒを含む樹種群、針葉樹II類はベイスギ、ベイツガを含む樹種群を指している。

## 8. 「新耐震基準」による許容応力度の改正 （昭和55～63（1980～1988）年）

昭和56（1981）年、木材の許容応力度が大きく変更された。前年の7月14日、政令196号により建築基準法施行令がいわゆる「新耐震基準」へ改正され、翌年6月1日に施行された。この際、木材の許容応力度も大幅に見直された（Table 17）。変更点としては、針葉樹の樹種群が2から4群になったこと、アカマツ、クロマツ、ヒノキ、ツガ、ベイマツ、ヒバ、ベイヒ、カラマツの $f_c$ が低くなり、他の許容応力度は概ね大きな

値に変更になったことが挙げられる。また、構造計算によって建物の保有耐力を求めるときなどに必要となる数値として、木材の材料強度が建築基準法施行令第95条に盛り込まれた（鈴木1982）。材料強度の値は一律長期許容応力度の3倍（短期許容応力度の1.5倍）となっている。すなわち、材料強度というものを荷重継続時間の効果と安全率を考えない場合の基準強さと同じ数値と考えているということを意味している（鈴木1982）。

木材の許容応力度が変更された根拠については『ティンバーエンジニアリング読本—木質構造建築のすべて』（木質構造研究会1985）に記されている。ちなみにこの書籍ができた経緯について簡単に説明すると、当時の杉山英男東京大学教授が中心となり、木質構造に興味を抱く関東在住の日本木材学会の会員及び民間会社により「木質構造研究会」が結成された。1981年に第1回の研究会が開かれている。そして研究会会員により『建築士と実務』誌に執筆された連載をまとめたものが『ティンバーエンジニアリング読本』となった。

許容応力度の算出方法は、基本的には従来の方法と変わっていない。許容応力度の元データとなった樹種群の基準強度値をTable 18（『ティンバーエンジニアリング読本』の表10.10）に示す。これらの値は、既往のデータをもとに、個々の樹種の強度的性質の変動等を考慮に入れて調整されたものである。ここで言う既往のデータとは『ティンバーエンジニアリング読本』においても表10.3「主な木材の強度的性質」として示されているが、日本木材加工技術協会発行の『日本の木材』（木材工業編集委員会1966）によるものと思われる（一部は『改訂3版 木材工業ハンドブック』（改訂3版 木材工業ハンドブック編集委員会1982）による）。この基準強度値に対してばらつきの係数4/5（正規分布を仮定すると変動係数12%程度）を乗じることによって、無欠点材の強度 $\sigma_F$ を誘導している。

欠点による低減係数 $\alpha$ について、1961年版（1973年版も同値）の『木構造設計規準・同解説』の普通構造材の値と改正された値とを比較すると、圧縮0.63→0.62、曲げ0.43→0.45と若干変化している（この $\alpha$ の値自体は後述する1988年版『木構造計算規準・同解説』と同一だが、その意味が『ティンバーエンジニアリング読本』では欠点による低減係数、『木構造計算規準・同解説』では強度比とされている）。また、せん断については、従来は $\alpha$ が1で、引き裂きを伴う場合として無欠点材の強度 $\sigma_F$ に1/3.5が乗じられていたが、『ティンバーエンジニアリング読本』では、材が二分された最悪の場合を想定して $\alpha$ を0.50とし、さらに割りさきを伴う場合として $\sigma_F$ に1/1.5を乗じている。許容応力度の試算例をTable 19（『ティンバーエンジニアリング読本』の表10.11）に示す。

ところで、従来の建築基準法施行令第 89 条第 4 項および第 5 項に示されていためり込みと座屈の許容応力度は本政令により一旦削除されたが、昭和 55 (1980) 年 12 月 1 日、建設省告示第 1799 号木材のめり込み及び圧縮材の座屈の許容応力度等を定める件により別途定められた (Table 20)。『木構造設計規準・同解説』とは異なり、従来の告示のめり込みの許容応力度は針葉樹のみに定められており、その値も一様に  $f_c$  の 1/5 (土台と柱の仕口その他これらに類するめり込み変形によって構造耐力上の支障を生ずるおそれのない仕口においては 1/4) であったものが、広葉樹を含めた樹種群ごとに許容応力度が定められた。この時のめり込みの許容応力度設定の基礎データとなったのが、中井ら (中井・山井 1982) や山井ら (農林省林業試験場 1973) による強度試験結果である (中井 1993)。ただし、曲げ等では別々の樹種群であったツガ、ベイツガの樹種群とモミ等の樹種群はめり込みにおいては統合され、同じ許容応力度となっている。

また従来の座屈の許容応力度は、有効細長比  $\lambda$  が 100 以下と 100 より大きい場合の 2 種類で計算式が分けられていたが、 $\lambda \leq 30$ 、 $30 < \lambda \leq 100$ 、 $\lambda > 100$  の 3 つの場合で計算式を分けることとなった。 $\lambda \leq 30$  では  $f_k = f_c$ 、 $30 < \lambda \leq 100$  では  $f_k = f_c (1.3 - 0.01 \lambda)$ 、 $\lambda > 100$  では  $f_k = 0.3 f_c (\lambda / 100)^2$  とされた。ここで  $\lambda$  は有効細長比、 $f_k$  は圧縮材の座屈の許容応力度である。これらの計算式の意味については、後の『木構造計算規準・同解説』 (日本建築学会 1988) の中で詳しく解説されている。

### 9. 実大材による強度データの採用

(昭和 62 ~ 63 (1987 ~ 1988) 年)

昭和 62 (1987) 年 10 月 6 日、政令 348 号により建築基準法施行令が改正された (Table 21)。この中で、 $f_i = f_b$  であったものが  $f_i = 0.6 f_b$  に変更された。この点については以前から、「無欠点小試験体の強度試験では、[強度を  $F$  とすると]  $F_i > F_b > F_c$  であるため、 $f_i > f_b > f_c$  となるところを  $f_i = f_b > f_c$  として安全側であるとみなしているのが問題点として挙げられる。最近行われるようになった実大材の強度試験結果からは、 $f_i = f_b$  の関係は妥当であるとはいえない。むしろ  $f_i < f_b$  とすべきであろう。(中井 1982)」や、「多くの樹種について行われた無欠点小試験体の強度試験結果から、[強度を  $\sigma$  とすると]  $\sigma_c: \sigma_b: \sigma_i \doteq 1: 2: 3$  の関係が認められている。1937 年以降  $f_i = f_b$  としていた理由はここにあり、このことによって  $f_i$  の値を安全側であると考えていた (中井 1993)」との指摘がなされていた。

中井 (1993) は、 $f_i$  が改正された根拠について以下のように解説している。「実大材の強度は、 $\sigma_b > \sigma_c > \sigma_i$  となっており無欠点小試験体の場合と異なっていることがわかる。木構造の設計に必要とされている 5th

パーセントイル値の比をとると、曲げ : 圧縮 : 引張り = 1.00 : 0.84 : 0.64 が得られた。この事実をもとにして、1987 年には引張り許容応力度の値が、曲げのその約 60% に改定されたのである」。

また、その 1 年後に出版された『木構造計算規準・同解説』 (日本建築学会 1988) および 1995 年版『木質構造設計規準・同解説』 (日本建築学会 1995) (木材の許容応力度の項に関しては 1988 年版『木構造計算規準・同解説』の記述とほぼ同様) では同じく  $f_i = 0.6 f_b$  としており、次のような解説が記載されている。「許容引張り応力度は、一連の実大材の引張り強度試験の結果を参考に、許容曲げ応力度に一定の比率をかけて誘導した。同一産地のスギ正角材の曲げ・縦引張り試験の結果、5th percentile 値で見ると、縦引張り強度は曲げ強度の 0.64 倍となっていたため、これを丸めて 0.60 とし、スギを含む針葉樹 IV 類の許容引張り応力度は許容曲げ応力度の 0.6 倍とした (筆者注: 『木構造計算規準・同解説』では針葉樹 III 類と記載されているが、1995 年版『木質構造設計規準・同解説』では針葉樹 IV 類に修正されている)。曲げと引張りの比較実験を行っていない針葉樹 I、II、III 類にも同じ比率を適用したが、針葉樹 I 類の許容引張り応力度は、破壊形態がかなり脆性的であることを勘案して、II 類の許容引張り応力度と同じとした」。

ちなみに、『木構造計算規準・同解説』が発行された経緯については、前書きで次のように記されている。「社会に目を転じると、昨秋、建築基準法が改定され、それを受けて大規模木造、3 階建木造等の建築を希求する社会の願いには差し迫ったものがあり、これを可能にするためには、up to date な計算体系を早急に提供する必要性が痛感される。この観点に立つと、「設計規準・同解説」の改定は先送りとし、とりあえず木材・集成材等の許容応力度と部材・接合部の設計法を収録する「計算規準」の刊行を考えざるを得なかったのである」。

『木構造計算規準・同解説』で  $f_i = 0.6 f_b$  としたことは上記の通りであるが、同書ではこの他に新たな変更点がいくつかある。従来の『木構造設計規準・同解説』が建築基準法施行令と異なる点は、「製材の日本農林規格」1 等相当の普通構造材と同特等相当の上級構造材の区分を設けていたことであるが、普通構造材の許容応力度は建築基準法施行令のそれと同一であった。しかしながら、今回の『木構造計算規準・同解説』では、基本的に従来の『木構造設計規準・同解説』と同様、無欠点小試験体による基準強度をベースとしているものの、当時の国公立林業試験場・大学などで行われ始めた実大材の強度試験の結果を部分的に取り入れ、建築基準法施行令の許容応力度とは異なる樹種群を設定している (Table 22 ~ 24)。すなわち、アカマツ、クロマツが III 類 (施行令では I 類相当) に、カラマツを

ソ連産カラマツと日本産カラマツに分け、前者をⅠ類、後者をⅢ類（施行令ではカラマツとしてⅡ類相当）に分類している。

また、これまで欠点による低減係数 $\alpha$ は、節による $k_k$ 、丸身による $k_w$ 、繊維走向の傾斜による $k_g$ の積、 $\alpha = k_k \times k_w \times k_g$ とされてきたが、今回からは、無欠点小試験体の強度に対する実大材の強度の比、すなわち強度比とすることに考え方が変更されている。普通構造材の低減係数 $\alpha$ は『ティンバーエンジニアリング読本』に示されたものと同じで、曲げ、圧縮、せん断でそれぞれ0.45、0.62、0.50である。上級構造材の $\alpha$ はそれぞれ0.56、0.75、0.50となっている。 $\sigma_F$ は無欠点材の樹種群に対する基準強度値（平均値）にばらつきの係数4/5（下限値を想定）を乗じたものであるが、せん断の上級構造材は無欠点材の強度 $\sigma_F$ の値として4/5を乗じずに基準強度値の平均値を取ることによって許容せん断応力度を普通構造材より高くしている。木材の繊維に直角方向の許容応力度は、めり込みと全面圧縮の値を示し、材端におけるめり込みは調整係数を乗じて材中間部に対して応力度を低減する方法を採用している。

ヤング係数（Table 25）に関しては、針葉樹の樹種群が2つから4つに増加したことにより、一部の樹種で値が変更された。また、木材の繊維に直角方向のヤング係数は、従来の『木構造設計規準・同解説』では個別に設定されていたが、繊維方向：半径方向：接線方向＝100：10：4～5の関係から、一律繊維方向のヤング係数の1/25となった。ただし、この値は全面圧縮に対しては適用できるが、めり込みの変位の計算に用いるのは適当でないとしている。さらに、せん断弾性係数は実験に基づきヤング係数の1/15とされた。

ところで『木構造計算規準・同解説』が発行された同年同月の昭和63（1988）年11月には、『ティンバーエンジニアリング読本』が、建築基準法や日本農林規格の改正を踏まえて改定した上、書名を『木質構造建築読本 ティンバーエンジニアリングのすべて』（木質構造研究会1988）と改めて刊行されている。

## 10. 針葉樹の構造用製材の日本農林規格の制定

（昭和63～平成4（1988～1992）年）

1980年代後半から1990年代の初頭、年間新設住宅着工戸数は160万戸を超え、業界は非常に活況を呈していた。一方、当時は若齢林分であった人工林資源から得られる並材を効率的に利用する必要があること、部材のプレカット化等により品質・性能が保証された部材の提供が必要となること、林産物規格の国際化に伴い木材強度等級区分の明確化が必要であることなどの問題が指摘されていた（三村1991）。そこで林野庁では、これらの変化に適切に対応し、木材の生産・流通の合理化等木材産業の体質改善を促進する観点から、

現行の製材規格を抜本的に見直すため、製材関係の有識者からなる「製材規格研究会」を設置し、新しい構造用製材規格の必要性を提示した。そして（財）日本住宅・木材技術センターに設置された「建築用木材性能評価委員会」（委員長：大熊幹章東京大学教授）において、昭和63（1988）年7月から平成元（1989）年6月まで製材規格研究会を開催し、「新しい製材規格のあり方について」（日本住宅・木材技術センター1989aに所収）のレポートをとりまとめた（春川1989）。その内容は、①用途別規格の策定、②寸法の規定化、簡素化、③乾燥区分の明確化、④強度等級区分の合理化、⑤大断面木造建築物等への対応の5点を骨子としたものであった。これにより、新しい製材規格の方向が決定された。①～④の内容（春川1989, 1991, 日本住宅・木材技術センター1989a, b）を列挙すると以下のようになる。

### ① 用途別規格

現行の製材規格から、建築構造用製材規格を独立させ、強度等級区分の明確化や寸法、乾燥等の規定の整備等を行うことにより、木造建築物の構造設計に使いやすい合理的な新しい製材規格の実現を図る。

### ② 寸法の規定化

標準寸法の考え方を改め、新しい製材規格では、断面寸法（厚さ、幅）については規定寸法とする。また、現行の寸法精度（出荷時寸法に対する許容差）はマイナス側のみ規定しているが、新しい製材規格ではプラス側・マイナス側とも規定する。

### ③ 乾燥区分

現行の乾燥材の任意表示を改め、新しい製材規格では乾燥材と未乾燥材を明確に区分し、未乾燥材についても必ずその旨を表示する。乾燥表示は段階的に4段階に区分する（筆者注：制定された規格では最終的に15%、20%、25%の乾燥基準が設けられた）。

### ④ 強度等級区分

従来の等級区分は主として無欠点材の強度から強度比を用いて整理したものであるが、新しい製材規格では、製材の強度性能をより合理的に保証するため、主として実大材の強度データから等級区分する。

これらの主旨を踏まえて、平成3（1991）年1月31日、農林水産省告示第143号により針葉樹の構造用製材の日本農林規格が制定された。この規格は、建築物の構造耐力上主要な部分に使用するものとしての「構造用製材」を対象としたものであった。そのため、従来の製材の日本農林規格も非構造用製材を対象とした規格として存続した。

山井（1991）による技術的背景の報告を参考に本規格のポイントを示すと以下の通りである。

- ・目視等級区分製材については、まず主として高い曲げ性能を必要とする部分に使用されるもの（甲種構造材）と、主として圧縮性能を必要とする部分に使用されるもの（乙種構造材）とに分けられ、引張り性能を必要とする部分に使用されるものは、高い曲げ性能を必要とする部分に使用されるものに含まれている。また甲種構造材は、木口の断面寸法により構造用I、構造用IIに分けられている。
- ・次に強度等級は3階級区分とし、1級は日本建築学会の上級構造材の強度を、2級は同学会の普通構造材（建築基準法施行令第89条の木材の許容応力度に近似）の強度を目安としている。3級は当時の資源事情を考慮して、多少強度が低くても、構造材として用いられるようにしてほしいとの要望に基づいて、2級の70%程度の強度に相当するものが想定されている。これらのことから、2級の強度を1.00とすれば、各等級の強度の関係は、1級：2級：3級＝1.25：1.00：0.70となる。

以上の2点を基礎に、本規格では、製材品の強度に影響する因子と考えられている節、丸身、繊維の傾斜、割れ、平均年輪幅などについて、等級別の制限値を設け、その等級に該当する実大材の測定結果を当てはめ、各等級の出現本数を求めるとともに、各等級に属する試験体の強度から統計的下限值（5%下限値）を求め、それとその等級の材料強度に相当する基準値（日本建築学会の長期許容応力度の3倍）とを比較する方法がとられている。

以上の点について飯島（2016）は単独節の制限節径比を旧製材の日本農林規格と比較し、「旧JASの特・1・2等と新JASの1・2・3級の制限値が非常に類似しているのは、新JASの2級の品質を旧JASの1等に見合うように、さらに新JAS各等級の強度の関係を、1級：2級：3級＝1.25：1.00：0.70になるように、実大材の実験データを眺めながら設定したからであって、決して「偶然」そうだったわけではない」と解説している。

一方で、節の大きさと強度との間には樹種によらず同じ関係があるであろうとの仮定は、実大材の強度試験の結果からすべての樹種に対しては適合しないことも判明した。例えば、曲げ強度に対する節径比の単相関係係数は、アカマツやカラマツでは0.6程度であったが、スギやヒノキでは0.1～0.2程度にすぎない（中井1993）。本規格における節径比は全ての樹種で一定であり、強度に対する節の影響が大きい樹種が基準となっていると推測される。そのため、節径比の影響が小さいスギやヒノキでは許容応力度に対する節径比の基準が比較的厳しくなっていると思われる。

機械等級区分製材については、製材の曲げヤング係数と曲げ強度との間に正の相関があることから、曲げヤング係数を測定して製材の強度を推定するものである。曲げヤング係数が40 tf/cm<sup>2</sup>以上の6区分からなっており、本規格に定められた方法で曲げヤング係数を測定し、20 tf/cm<sup>2</sup>ごとの中間値の等級（E50～E150）で表示することとしている。ただし、機械等級区分された製材であっても目視等級区分製材の乙種構造材の3級の基準をおおむね満たさなければならない。また、本規格では、3区分の乾燥基準が設けられ、含水率15%以下をD15、20%以下をD20、25%以下をD25と表示すると定められた。

さらに当時の状況として、「1990年6月の日米貿易委員会における日米合意に端を発するJAS規格の国際的調整は、我が国の国際貿易上の緊急の課題としてクローズアップされた。特に構造用パネル、構造用大断面集成材、MSR [Machine Stress Rated] 製材等の調整が強く要求されていた」（農林水産省消費経済課1992）とあるように、国際化対応が大きな流れとなっていた。日米林産物交渉および第1回JAS技術委員会において、カナダよりFJ（フィンガージョイント）材、米国よりMSR材の日本農林規格を制定し、2×4住宅等の建築部材に使用できるようにしてほしいとの要請がなされた。これを受けて農林水産省は、国内外の試験データおよび諸外国の規格等を分析し、その結果、枠組壁工法構造用たて継ぎ材の日本農林規格（平成3年5月27日農林水産省告示第701号）および機械による曲げ応力等級区分を行う枠組壁工法構造用製材の日本農林規格（平成3年5月27日農林水産省告示第702号）が新たに制定されることとなった。また、両者の許容応力度については、平成4（1992）年4月7日建設省住指発第120号建設省住宅局建築指導課長通知「枠組壁工法の技術的基準の運用について」により設定された。

## 11. 針葉樹の構造用製材の日本農林規格に対応した

### 許容応力度の設定（平成4～8（1992～1996）年）

平成3（1991）年に公布され、同年7月31日付けで施行されていた針葉樹の構造用製材の日本農林規格に対して、平成4（1992）年1月31日、建設省住指発第16号建設省住宅局建築指導課長通知として「針葉樹の構造用製材の取扱いについて」が出された。これは針葉樹の構造用製材の日本農林規格に適合する許容応力度を建築基準法施行令第89条第1項の強度試験の結果として定められた数値として取り扱って差し支えないとしており、事実上許容応力度の数値を定めたものであった（Table 26, 27）。

これに関して長尾（2012）は以下のように評している。「[本規格の]特筆すべき点は、目視等級区分製材（甲種構造材、乙種構造材）、機械等級区分製材に対して、建設省からそれぞれ等級ごとに許容応力度が設定され

た点である。それまで、木材の許容応力度は樹種群ごとに無欠点小試験体による強度試験結果から算出され、設定されていたが、同一樹種であっても品質によって異なり、かつ実大材の強度値に基づいた許容応力度が設定されたことは画期的な改正であった。その背景に、全国の多くの公立試験研究機関で木材用治具を持った大型材料試験機が整備され、精力的な実大材による強度試験が実施された結果、多くの強度データが蓄積されていた点が大きな推進力となったことは言うまでもない。

以上のように、針葉樹の構造用製材の日本農林規格の制定とそれに続く許容応力度の設定は、我が国の製材規格において非常に大きな変換点であったことがうかがえる。

許容応力度の設定については、建設省総合技術開発プロジェクト「新木造建築技術の開発 報告書 第2巻 構造設計に関する技術開発」（平成4年3月）（建設省1992）による成果が一部採用されている。これと中島の報告（2000a）、さらに当時の資料を参考にして、以下に目視等級区分製材と機械等級区分製材の許容応力度の誘導方法を解説する。

まず目視等級区分製材の許容応力度の基本的考え方は、「構造用製材の日本農林規格により等級区分された実大材の曲げ試験による強度の下限5%値を基準とし、許容応力度を設定する」とされている。具体的には、正角と平角の実験値をプールしたものの5%下限値（各5%下限値の加重平均）が許容応力度の算出基準とされた。5%下限値は、ASTM D2915（ASTM 1990）および総プロ報告書の「木材の機械的等級区分法（案）」に示された方法で、75%信頼水準の5%下限値としている。

甲種構造用Ⅰについては、曲げ試験結果からほぼ甲種構造用Ⅱの曲げ強度と同等以上であることがわかったため、甲種構造用Ⅰの曲げ強度＝甲種構造用Ⅱの曲げ強度の値とした。乙種構造用については、乙種構造用ⅠおよびⅡの曲げ試験の結果を甲種構造用Ⅱのそれと比較した結果、乙種構造用の曲げ強度＝ $0.8 \times$ 甲種構造用Ⅱの曲げ強度とした。さらに既往のデータから、甲種構造用の圧縮強度＝ $0.8 \times$ 甲種構造用の曲げ強度、乙種構造用の圧縮強度＝甲種構造用の圧縮強度、引張り強度＝ $0.6 \times$ 曲げ強度の関係が用いられた。

材料強度（長期許容応力度の3倍）に関して以上の関係をまとめるとTable 28となる。すなわち、実質的には甲種の曲げの材料強度を実験値により求め、他の材料強度値はそれに対する割合から算出されていることとなる。

次に機械等級区分製材の許容応力度の基本的考え方は、「特定の母集団を有する構造用製材について、実験によりMOE [Modulus Of Elasticity] とMOR [Modulus Of Rupture] の関係を求め、これより機械的に測定し

たMOEに対して所定の許容応力度をあたえる」とされている。初期試験の方法は、総プロ報告書の「木材の機械的等級区分法（案）」に記載されたものを用いる。ただし、スギ、ヒノキ、カラマツ、ベイマツ等の特定の樹種については既に実験データが存在していたため、これを元に許容応力度を定めている。すなわち、まず樹種群ごとの実験データにより求められたMORの5%下限値とMOEとの関係から、各等級のMOE(E70など)に適合するMORを求め、材料強度を算出する。次いで既往のデータによる引張り強度＝ $0.6 \times$ 曲げ強度、圧縮強度＝ $0.8 \times$ 曲げ強度の関係から、両材料強度が算出される。最終的に数値が丸められて各材料強度が導かれ、その結果許容応力度が算出される。

その後、平成8（1996）年5月23日付け建設省住指発第195号建設省住宅局建築指導課長通達「針葉樹の構造用製材の取扱いについて」により、針葉樹の構造用製材の許容応力度の追加がなされた（Table 29, 30）。変更された内容は、ヒバ、アカマツ、エゾマツ・トドマツの追加、ソ連カラマツがダフリカカラマツに名称変更、目視等級区分の3級の追加である。

これらも実大材の曲げ試験によるデータに基づき設定された。その結果、目視等級区分製材は、Table 28の注で示したように、3級の一部の樹種では甲種・乙種の相互関係が若干異なることとなった。また既存の樹種等級についても、針葉樹の構造用製材の日本農林規格に基づいて節の評価を行った新たなデータを用いて許容応力度が再検証され、その結果変更なしとされた。

機械等級区分製材は、ヒバ、アカマツ、エゾマツ・トドマツについてのMOEとMORとの関係が求められた結果、アカマツおよびエゾマツ・トドマツはベイマツ等の樹種群に、ヒバはカラマツ等の樹種群に新たに追加された。

ところでこの間、昭和48（1973）年に発行されていた『木構造設計規準・同解説』が、平成7（1995）年1月25日、『木質構造設計規準・同解説』と名称を改めて発行されている。これは昭和63（1988）年の『木構造計算規準・同解説』で積み残しになっていた構造計画等に関する部分の内容を再検討し、新たな項目を追加したものである。許容応力度関係については『木構造計算規準・同解説』を踏襲している。

## 12. 建築基準法の性能規定化と基準強度の設定 （平成10～20（1998～2008）年）

平成10（1998）年6月12日、建築基準法の一部を改正する法律（法律第100号）により建築基準法が全面的に改正された。これは昭和25（1950）年に建築基準法が制定されて以来の抜本的な改正であった。その内容の一つとして、素材・仕様・規格を詳細に指定するこれまでの「仕様規定」から、一定の性能さえ満た

せば多様な材料・設備・構造方法を採用できる「性能規定」への見直しがあった。改正された建築基準法は3度に分けて施行されたが、性能規定化部分については2年後（最終段階）の平成12（2000）年6月1日施行とされた。

一方、枠組壁工法を用いた建築物の技術基準については、規制緩和推進計画（平成8（1996）年3月閣議決定）および住宅建設コスト低減のための緊急重点計画（平成8（1996）年3月）に基づき、先行して平成8（1996）年度に性能規定化を図ることとされていた。このため、平成9（1997）年3月に枠組壁工法技術基準告示について、構造計算より安全性を確認したものについては、従来の仕様の規定によらなくても良いこととする基準（性能規定化）を制定するとともに、仕様の規定の一部改正を行った（枠組壁工法建築物設計の手引・構造計算指針編集委員会1998）。これに関連して、平成9（1997）年5月30日、建設省住指発第255号住宅局建築指導課長通知「枠組壁工法の技術的基準の運用について」により、枠組壁工法の構造計算に用いる木材の許容応力度が、最新の試験結果等に基づいて改正された（Table 31）。許容応力度は従来のものに比べて全体的に低減され、寸法効果（サイズファクター）係数が追加された。これらの変更について、河合（1997）は以下のように解説している。

「従来の構造用製材の許容応力度は、無欠点小試験体より求めた材料強度をもとに樹種別・グレード別に許容応力度が定められていたが、新告示により〔北米においてディメンションランバーを対象として実施された〕イングレードテストの結果により許容応力度を決めている。従ってサイズファクターによる係数が導入されサイズが大きくなるに従って許容応力度は小さくなり、従来定められた値よりも小さくなるケースもある。又樹種群別の数値も現状の樹種強度を反映してかなり数値の変更が行われて、特にD Fir-Lの数値の低下が著しい。このように全般的に許容応力度が低く定められる一方、曲げについては複数の製材が合板等で固定された屋根や床は版としての一体性があることによるマルチプル効果が設計に導入でき、見かけ上許容応力度の数値が上がることになる」。

また、ディメンションランバーのデータ元は樹種群によって幾分異なっており、D Fir-LとHem-Firについては米国のイングレードテストデータ、S-P-Fについてはカナダのイングレードテストデータ、Hem-TamとW CedarについてはNational Design Specificationに示されているDesign Stress（設計応力度）の値を元としている（中島2000a）。

ところでこれに先立つ平成8～9（1996～1997）年にかけて、建設省住宅局建築指導課長通達により、米国の格付機関やカナダのNLGA（National Lumber Grades Authority）等、海外の一般的な規格に適合する

木材を枠組壁工法に適合する材料として建設大臣が認定している。

平成10（1998）年の建築基準法の改正に伴い、建築基準法施行令第89条（許容応力度）および第95条（材料強度）がともに改正された（平成12年4月26日政令第211号）。これにより、従来のように樹種群ごとに許容応力度の数値を示すのではなく、許容応力度と材料強度を基準強度の関数として示す方式が採用され、基準強度の具体的な数値は告示で定めることとなった。さらに、従来の許容応力度は長期・短期の2本建てであったが、荷重継続時間に対する木材の強度特性を考慮すると、長期・短期の許容応力度体系では、風荷重や短期の積雪荷重に対しては危険側、長期の積雪荷重に対しては安全側に片寄せた評価になっていた可能性もあったため（中島2000a）、改正された建築基準法施行令では長期（ $1.1/3 \times$ 基準強度）、短期（ $2/3 \times$ 基準強度）、長期積雪（ $1.43/3 \times$ 基準強度）、短期積雪（ $1.6/3 \times$ 基準強度）の4本建てとなった。なお、この後に発行される2002年版『木質構造設計規準・同解説』（日本建築学会2002）では、荷重継続期間影響係数を短期2.00、中短期1.60、中長期1.43、長期1.10として、建築基準法施行令の値と整合させており、この係数の根拠を解説している（なお1998年版『枠組壁工法建築物構造計算指針』には、長期許容応力度に乗じる調整係数としてすでにこの値が記載されている）。結論としては、マディソンカーブを参考にして、荷重継続期間10分と3か月とを直線で結び、強度比が50%になる点を基準として、この荷重継続時間は250年であるとする。この直線に従って250年に対する10分（短期）、3日（中短期）、3か月（中長期）、50年（長期）の比を求めて、荷重継続期間影響係数としている。長期の係数1.10については、上記の荷重継続時間250年（ほぼ永久）に対する曲げ強度比を1.00としたときに荷重継続時間50年（建物のおおよその寿命）に対する曲げ強度比が約1.10であるということをも勘案しているという考え方と、北米で基準強度を誘導する際に適用している荷重の存在確率を勘案した1割の割り増しという2通りの解釈がある（中島2000b）。

基準強度の値は、平成12（2000）年5月31日、建設省告示第1452号により針葉樹の構造用製材の日本農林規格、枠組壁工法構造用製材の日本農林規格、枠組壁工法構造用たて継ぎ材の日本農林規格、機械による曲げ応力等級区分を行う枠組壁工法構造用製材の日本農林規格、無等級材に対応した圧縮、引張り、曲げ、せん断の各基準強度が定められた。これらのうち、針葉樹の構造用製材の日本農林規格の目視・機械等級区分製材、枠組壁工法構造用製材の日本農林規格、無等級材の基準強度に、『木質構造設計規準・同解説』に記載された基準弾性係数を加えたものをそれぞれTable 32～35に示す。次いで平成13（2001）年6月12日、

国土交通省告示第 1024 号により、めり込みおよび座屈の許容応力度、基準強度が定められた。木材のめり込みの基準強度を Table 36 に示す。

基準強度はこれまでの建築基準法施行令第 89 条や建設省住宅局建築指導課長通達に示されていた長期許容応力度の値の概ね 3 倍となっている。ただし、単位を従来の  $\text{kgf/cm}^2$  から  $\text{N/mm}^2$  に変更する際に多少のずれが生じている。また、従来は  $5 \text{ kgf/cm}^2$  で数値を丸めていたが、基準強度は圧縮、引張り、曲げ、めり込みは  $0.6 \text{ N/mm}^2$  で、せん断は  $0.3 \text{ N/mm}^2$  で丸められており、丸め方の違いにより数値が多少異なっている（中島 2000a を一部改変）。

また、めり込みに関して、平成 20（2008）年 2 月 8 日、国土交通省告示第 117 号で、通常の木造軸組構法などで使用される土台等の横架材であって、めり込みによって他の部材の応力状態に変化を生じさせない場合においては、材厚の 5% がめり込んだとしても当該材料が損傷したものと扱わず、構造安全上支障がないものとして、建築物の部分限定として許容応力度等の緩和（長期・中長期： $1.5/3 \times F_{cv}$ 、中短期・短期： $2/3 \times F_{cv}$ ）を行っている（植本 2008）。

さて、『木質構造設計規準・同解説』が 1995 年に発行されて以降、日本農林規格や建築基準法の改正、SI 単位の導入などにより、木質材料に関わる強度特性値が大きく変化してきた。これに対応するため、日本建築学会は、木質構造運営委員会の下に設置された「木質構造部材・接合小委員会」において検討されていた規準改定案のうち、原案の完成している部分である材料の許容応力度および弾性係数についてだけ先行改定することとし、書籍の名称も副題を付けて『木質構造設計規準・同解説—許容応力度・許容耐力設計法—』として、2002 年 10 月 20 日に第 3 版が出版された（日本建築学会 2002 改定の序）。巻末に記載されている設計資料では日本農林規格に適合する特性値を規定しており、『木質構造設計規準・同解説』の基準材料強度と告示の基準強度は同一の値となっている。ただし、『木質構造設計規準・同解説』の普通構造材は告示の無等級材と品質において同程度のものとされているが、その樹種群は 1995 年版『木質構造設計規準・同解説』において、告示の無等級材のそれとは一部異なる樹種群を設定していた。2002 年版『木質構造設計規準・同解説』の普通構造材の樹種群は 1995 年版のそれと変更がないため、告示の無等級材の樹種群とは一部異なっていることには変わりがない。また、上級構造材の基準特性値が削除されている。

その後の 2006 年 12 月 1 日には、「接合部の設計」に関する大幅な改定と、前回の改定において積み残しとなっていた諸点について改定した上で、『木質構造設計規準・同解説—許容応力度・許容耐力設計法—』第 4 版（日本建築学会 2006）が出版された。ただし、製

材の基準特性値の項目についての変更はない。

### 13. 新たな製材の日本農林規格と枠組壁工法構造用製材及び枠組壁工法構造用たて継ぎ材の日本農林規格の制定（平成 19～27（2007～2015）年）

製材関係の日本農林規格は、これまで針葉樹の構造用製材、針葉樹の下地用製材、針葉樹の造作用製材および広葉樹製材が定められていた。しかし、これらは製材工場等においてほぼ同一の製造条件で製造され、試験方法等共通の部分が多いこと等から利用者の利便性を図るため、平成 16（2004）年度から行われた見直しの検討の結果、これらの日本農林規格を一つの規格に統合し、新たに製材の日本農林規格を制定することとし、平成 19（2007）年 8 月 29 日に告示、同 11 月 27 日施行された（中田 2008）。また「押角」、「耳付材」および「まくら木」の各日本農林規格については、格付率が低いなどの理由で廃止する一方、規格の利用実態も考慮し、製材の日本農林規格の中の一基準として規定されることとなった（中田 2008）。

新たな製材の日本農林規格では、業界の要望により、伝統的家屋の梁などの横架材として使用されている「たいこ材」が構造用製材の中に規定された。また、従来の「板類」および「角類」に加えて、木製ガードレールなどの土木用材等として利用されている「円柱類（丸棒）」が、材種の一つとして追加された。

これに伴い、平成 19（2007）年 11 月 27 日、国土交通省告示第 1524 号および第 1525 号において、円柱材の圧縮、引張り、曲げ、せん断の基準強度がそれぞれ追加された。ただし、樹種はスギ、カラマツ、ヒノキに限っており、基準強度の値も製材のそれと同一である。

さらに平成 25（2013）年 6 月 12 日には、農林水産省告示第 1920 号により製材の日本農林規格が改正され、実務者、製造業者等からの要望に対応して、天然乾燥処理（含水率基準 30% 以下）をしたものの表示が可能となった。

また耐久性が高いという利点から、住宅の土台等としてベイヒバの利用が拡大していたものの、基準強度は設定されていなかった。実大材を用いたベイヒバの試験データが得られたことから（井道 2010、井道・長尾 2010）、平成 27 年（2015）年 8 月 4 日、国土交通省告示第 910 号により、無等級材およびめり込みの基準強度に対して、カラマツ、ヒバ等が含まれる樹種群にベイヒバが追加された。

一方、枠組壁工法の日本農林規格は、平成 27（2015）年に、枠組壁工法構造用製材の日本農林規格の改正という形をとり、枠組壁工法構造用製材の日本農林規格と枠組壁工法構造用たて継ぎ材の日本農林規格とが統合され、枠組壁工法構造用製材及び枠組壁工法構造用たて継ぎ材の日本農林規格となった（平成 27 年 3 月 9

日農林水産省告示第 512 号)。なお、この規格の改正に伴い、従来の枠組壁工法構造用たて継ぎ材の日本農林規格は廃止された。その経緯と概要(横田 2015a, b)は以下の通りである。

枠組壁工法構造用たて継ぎ材の日本農林規格では、「品質」の基準について、枠組壁工法構造用製材の日本農林規格を参照している項目が多くあり、以前から枠組壁工法構造用たて継ぎ材の日本農林規格に明記するよう要望があった。このことについて、利害関係者と学識経験者からなる原案作成委員会の検討の結果、製品の仕様用途が同じであり、枠組壁工法構造用たて継ぎ材の原料である枠組壁工法構造用製材の「品質」を別々の規格に明記することは望ましくないことから、規格を統合して利用者の利便性を図ることとした。また、MSR 区分した材料をたて継ぎするという方法で作られた MSR たて継ぎ材の規格を追加することとした。

ところで国産樹種を追加する際、改正前はその強度性能の基準値に近いと考えられる樹種群にそれらは割り振られていた。例えば、ヒノキおよびカラマツは、それらの強度性能の基準値に近い Hem-Tam の樹種群に属していた。しかし、国内および海外から、別の樹種群として強度性能の基準を再設定することが望まれていた。そこで、平成 21 (2009) 年度林野庁補助事業により「2×4 住宅部材の開発事業」(全国木材協同組合連合会 2011) が全国の事業者により実施された。その後、試験データの提出のあったヒノキ、スギ、カラマツの 3 樹種について、それぞれ JS I、JS II、JS III とした樹種群を新たに作成して、強度性能の基準の再設定を行った。また、サザンイエローパイン (SYP) については、北米での強度性能の基準値の見直しがあったことから、日本農林規格でも樹種群と強度性能の基準値を新たに作成した。その他強度関係では、平均年輪幅による制限の見直し、MSR 等級に下位等級の追加、曲げ強度性能の基準の見直しなどが行われた。これらの樹種群の基準強度は、平成 27 (2015) 年 6 月 30 日国土交通省告示第 816 号により追加されている。さらに、平成 27 (2015) 年 8 月 4 日には、国土交通省告示第 910 号により、枠組壁工法構造用製材について寸法型式 304、306、406 が追加された。以上の改正を踏まえた枠組壁工法構造用製材および枠組壁工法構造用たて継ぎ材の基準強度に、『木質構造設計規準・同解説』に記載された基準弾性係数を加えたものを Table 37 に示す。

最後に、製材に関する主な関連規格および関連書籍の年表を Table 38 に示す。

#### 14. おわりに

明治 39 (1906) 年から平成 27 (2015) 年までの 109 年間にわたる、我が国の製材規格および許容応力度・基準強度の変遷をたどった。これらの変遷を改めて眺

めると、我が国の森林の状況、建築に対するニーズの変化、技術の高度化、あるいは海外の市場参入など、常に時代の要請に従って、規格は制定、改正を繰り返してきたことがわかる。

製材関連規格では、大正 15 (1926) 年の木材規格に始まり、用材規格規定、製材の日本農林規格、針葉樹の構造用製材の日本農林規格を経て、新たな製材の日本農林規格が制定されて現在に至るといのが大まかな流れであった。

許容応力度関連規格では、大正 9 (1920) 年の市街地建築物法があり、戦後に建築基準法、建築基準法施行令が成立し、幾度かの大きな改正を経て現在に至っている。許容応力度の値は脈々と過去の経緯を引き継いできており、特に戦時中の臨時日本標準規格第 533 号および市街地建築物法施行規則の許容応力度が、戦後それぞれ短期および長期の許容応力度となり、それが無等級材の許容応力度として現在まで受け継がれているのが印象的である。その中で、平成 3 (1991) 年の針葉樹の構造用製材の日本農林規格の制定とそれに伴う強度等級区分ごとの許容応力度の設定は、大きな転換点であった。さらに日本建築学会が、その初期においては法令の決定に大きな影響力を持ち、その後は、上級構造材など法令とは異なる学会基準を設定して、独自の理念により許容応力度を設定してきたこともうかがえた。

さて、本報の主な目的は、規格の成立した経緯や、示された数値等の根拠について、可能な限り明らかにすることであった。その結果、例えば許容応力度の設定では、詳細な実験に基づいて導かれたものもあれば、今ではその根拠がよくわからなくなってしまったものもあった。貴重な資料を埋もれさせないためにも、これらの情報を文書の形で残しておくことが非常に重要である。最近では過去の文献を Web 上に電子ファイルとして公開しているところも多く、特に、国土交通省の告示検索、日本建築学会図書館デジタルアーカイブス、国立国会図書館デジタルコレクションは、本稿を執筆する上で非常に有用であった。一方で、既に改正や廃止となった告示や通達は Web 上からも削除されているため、必要な情報に到達することができなかった場合もあった。

また規格を調べていくうちに、現行規格の課題も見えてきた。例えば、現在の大径化した丸太からは、断面の大きな製材品を採取することができる。断面が大きくなると寸法効果により強度が低下することは既に知られている。しかし現在の製材の許容応力度は、枠組壁工法構造用製材を除いて、寸法効果の影響は取り入れられていない。また大径材からは心去り材も採取できるが、心持ち材と心去り材では強度の違いがある場合や、心去り材が曲げを受ける際に加力方向により強度が異なることも報告されている。これら木取りに

よる強度の違いについては規格には反映されていない。さらに、製材の日本農林規格の目視等級区分に対応した各基準強度の比率は、曲げ：圧縮：引張り＝1：0.8：0.6となっているが、これはスギのみのデータから導かれたものである。この比率が他の樹種にも同様に当てはまるかの検証は十分なされていない。加えて、実大材の強度の変動係数は概ね、引張り＞曲げ＞圧縮の順であるため、等級により各強度の比率が異なることが予想できるが、現行では一律の比率を用いており、この点についても十分な検証はなされていない。広葉樹に関しては、そもそも日本農林規格に対応した基準強度が設定されていない。これらの点などについては規格に盛り込むべきか否かも含めて再検討する必要があると思われる。

現在構造用製材のJAS格付率は約20%程度であり(飯島 2012)、日本農林規格に適合した製材品は十分に普及しているとはいえない状況にある。しかし、2010年のいわゆる「公共建築物木材利用促進法」の施行以来、公共建築物等でJAS製品の使用が求められることが多くなってきた。そのため今後は、製材規格の重要性がますます増加すると考えられる。本稿が製材規格および許容応力度を理解する上での一助となれば幸いである。

### 謝 辞

本稿を執筆するにあたり、森林総合研究所構造利用研究領域・長尾博文チーム長からは、製材関係規格の制定・改正に深く関わった経験をもとに貴重な助言を頂いた。記して感謝する。また本稿は、日本建築学会木質構造運営委員会木質材料強度検証小委員会(2016年4月～2020年3月、主査：中島史郎)の一環として取りまとめたものである。

### 引用文献

- ASTM (1990) D2915-90: Standard practice for evaluating allowable properties for grades of structural lumber. "1991 Annual book of ASTM standard, Volume 04.09 Wood", 430-440.
- 藤縄 文明 (1960) 用材の日本農林規格の改正について. 木材工業, 15 (12), 2-5.
- 春川 真一 (1989) 新しい製材規格のあり方について — 製材規格研究会報告の概要—. 木材工業, 44 (9), 25-30.
- 春川 真一 (1991) 新しいJASと木材工業の今後の展開. 住宅と木材, 163, 12-13.
- 井道 裕史 (2010) ベイヒバ製材品の強度性能 — 曲げ, 縦圧縮, 縦引張り, せん断, めり込み—. 森林総合研究所研究報告, 9 (3), 125-148.
- 井道 裕史・長尾 博文 (2010) 第4章 ベイヒバの基準強度に関する検討. "木造長期優良住宅の総合的検証事業 材料分科会 平成21年度 報告書". 平成22年3月, 43-53.
- 飯島 泰男 (2012) JAS規格材の現状と矛盾. 木の建築, 33, 1-5.
- 飯島 泰男 (2016) 「無等級材の基準強度」って? . 住宅と木材, 464, 28-29.
- 石川 孝重・平田 京子 (1989) 東京市建築条例学会案から市街地建築物法施行規則に至る立案過程とその特徴 — 構造関連規定の成立過程に関する研究—. 日本建築学会構造系論文報告集, 406, 13-23.
- 石川 孝重・平田 京子 (1990a) 東京市建築条例学会案から市街地建築物法施行規則に至る構造計算にかかわる数値規定の変遷とその根拠 — 構造関連規定の成立過程に関する研究—. 日本建築学会構造系論文報告集, 412, 19-29.
- 石川 孝重・平田 京子 (1990b) 東京市建築条例学会案から市街地建築物法施行規則に至る構造計算にかかわる算出式規定の変遷とその背景 — 構造関連規定の成立過程に関する研究—. 日本建築学会構造系論文報告集, 415, 21-29.
- 住宅金融公庫建設指導部 (1974) "住宅金融公庫融資住宅 枠組壁工法住宅工事共通仕様書", 住宅金融普及協会, 101pp.
- 住宅金融公庫建設指導部 (1977) "住宅金融公庫融資住宅 枠組壁工法住宅工事共通仕様書", 住宅金融普及協会, 181pp.
- 改訂3版 木材工業ハンドブック編集委員会 (1982) "改訂3版 木材工業ハンドブック". 農林水産省林業試験場 監修, 丸善, 1009pp.
- 河合 誠 (1997) 枠組壁工法の技術基準改正 — 仕様規定から性能規定へ—. 木材工業, 52 (10), 498-500.
- 建設省 (1992) "建設省総合技術開発プロジェクト 新木造建築技術の開発 報告書 第2巻 構造設計に関する技術開発". 87pp.
- 建設省建築研究所 (1975) "昭和49年度総合技術開発プロジェクト 小規模住宅の新施工法の開発". 93pp.
- 建築学会 (1944) 臨時日本標準規格(第533号) 建築物強度計算の基本. 建築雑誌, 712・3, 286-288.
- 三村 龍圓 (1991) 針葉樹構造用製材のJAS規格について. 森林組合, 249, 9-11.
- 木質構造研究会 (1985) "ティンバーエンジニアリング読本 — 木質構造建築のすべて —". オーム社, 224pp.
- 木質構造研究会 (1988) "木質構造建築読本 ティンバーエンジニアリングのすべて". 井上書院, 270pp.
- 木材工業編集委員会 (1966) "日本の木材". 日本木材加工技術協会, 101pp.
- 木材規格特別委員会 (1960) 用材の日本農林規格について. "建築工事標準仕様書・同解説F" に所収. 日本建築学会, 30pp.
- 森 徹 (1937) 木材の許容応力度に就て. 建築雑誌, 628, 25-27.

- 森 徹 (1938a) 建築用木材の許容応力度に就て. 建築学会論文集, 8, 11-20.
- 森 徹 (1938b) 木材の引張強度に及ぼす節の影響に関する研究. 建築学会論文集, 8, 1-10.
- 長尾 博文 (2012) 日本における製材規格の変遷. 木の建築, 33, 6-9.
- 中井 孝 (1982) 許容応力度. 木材工業, 37 (11), 30-31.
- 中井 孝 (1993) 構造用製材の強度性能. 研究ジャーナル, 16 (3), 6-11.
- 中井 孝・山井 良三郎 (1982) 日本産主要樹種の性質 日本産主要 35 樹種の強度的性質. 林業試験場研究報告, 319, 13-46.
- 中島 史郎 (2000a) 木材の基準強度. 建築技術, 608, 112-115.
- 中島 史郎 (2000b) “平成 12 年度 木をまなぶ会 第 2 回 テキスト 改正建築基準法と木材の許容応力度”. 平成 12 年 7 月 27 日, 39pp.
- 中田 直 (2008) 製材の JAS 規格. 木材工業, 63 (5), 222-225.
- 中沢 俊 (1965) 用材 (うち製材) の日本農林規格の改正. 木材工業, 20 (5), 13-16.
- 日本住宅・木材技術センター (1989a) “建築用木材性能評価事業報告書”. 65pp. (筆者注: 報告書の発行年は昭和 63 (1988) 年となっているが, 平成元 (1989) 年の誤りと思われる)
- 日本住宅・木材技術センター (1989b) “建築用木材性能評価事業報告書 (I) — 建築構造用製材規格の考え方 —”. 65pp.
- 日本建築学会 (1947) “各種構造計算規準 (I)”. 6 版, 73pp.
- 日本建築学会 (1948) “日本建築規格・建築 3001 建築物の構造計算解説”. 34pp.
- 日本建築学会 (1949) “木構造計算規準・同解説 附 木造学校建物規格の構造計算”. 81pp.
- 日本建築学会 (1961) “木構造設計規準・同解説”. 292pp.
- 日本建築学会 (1973) “木構造設計規準・同解説”. 461pp.
- 日本建築学会 (1988) “木構造計算規準・同解説”. 236pp.
- 日本建築学会 (1995) “木質構造設計規準・同解説”. 第 2 版, 342pp.
- 日本建築学会 (2002) “木質構造設計規準・同解説 — 許容応力度・許容耐力設計法 —”. 第 3 版, 352pp.
- 日本建築学会 (2006) “木質構造設計規準・同解説 — 許容応力度・許容耐力設計法 —”. 第 4 版, 412pp.
- 日本ツーバイフォー建築協会 (1986) “十年の歩み”. 339pp.
- 農林水産省消費経済課 (1992) 最近の JAS 規格の制定, 改正 [I]. 木材工業, 47 (7), 332-335.
- 農林省林業試験場 (1973) 表 2.101 日本産主要樹種の強度的性質. “新版 木材工業ハンドブック”, 丸善, 234-235.
- 大橋 雄二・橋川 容治 (1987a) 法令における構造関係規定の変遷 (その 3). 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2685.
- 大橋 雄二・橋川 容治 (1987b) 法令における構造関係規定の変遷 (その 4). 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2686.
- 大蔵省臨時建築部 (1914) “建築用本邦産木材及石材 第 1 編 木材之部”. 建築世界社, 871pp.
- 林業新聞社 (1943) “改正木材規格全集”. 林業経済研究所, 187pp.
- 坂本 嚙成 (1968) 素材および製材の日本農林規格の制定ならびに耳付き材の日本農林規格の改正について. 木材工業, 23 (3), 28-31.
- 坂元 嚙成 (1972) 製材の日本農林規格の改正について. 木材工業, 27 (11), 42.
- 坂元 嚙成 (1973) 製材の日本農林規格の改正について. 木材工業, 28 (1), 28-29.
- 佐野 利器 (1906) 建築構造強弱學 (六). 建築雑誌, 231, 143-147.
- 白石 博三 (1982) 明治以後の建築法令. “建築関連法令の研究 11”. 日本建築学会, 88-209.
- 杉山 英男 (1962) 木材の許容応力度について. 木材工業, 17 (11), 17-21.
- 杉山 英男 (1971) “建築構造学大系 22 木構造”. 彰国社, 142.
- 杉山 英男 (1977a) 木材の許容応力度の変遷 その 1 — 戦後の日本. AWCOC, 28, 10-13.
- 杉山 英男 (1977b) 木材の許容応力度の変遷 その 2 — 戦前の日本. AWCOC, 29, 4-8.
- 杉山 英男 (1977c) 木材の許容応力度の変遷 その 3 — アメリカ合衆国 (I). AWCOC, 30, 4-6.
- 杉山 英男 (1977d) 木材の許容応力度の変遷 その 4 — アメリカ合衆国 (II). AWCOC, 31, 4-7.
- 杉山 英男 (1977e) 木材の許容応力度の変遷 その 5 — アメリカ合衆国 (III). AWCOC, 32, 8-13.
- 杉山 英男 (1977f) 木材の許容応力度の変遷 その 6 — アメリカ合衆国 (IV). AWCOC, 33, 8-12.
- 杉山 英男 (1977g) 木材の許容応力度の変遷 その 7 — アメリカ合衆国 (V). AWCOC, 34, 4-7.
- 杉山 英男 (1985) 第 1 章 木質構造とその歴史. 木質構造研究会編 “ティンバーエンジニアリング読本 — 木質構造建築のすべて —”. オーム社, 2-24.
- 鈴木 秀三 (1982) 連載講座・木造住宅の構造 (5) 木材の許容応力度. 建築士と実務, 昭和 57 年 5 月号, 99-103.
- 竹山 謙三郎 (1944) 針葉樹材の剪断強度に関する実験的研究. 建築学会論文集, 33, 4-5.
- 槌本 敬大 (2008) 製材等のめり込みの許容応力度・材料強度の変更. 住宅と木材, 369, 4-6.
- 枠組壁工法建築物設計の手引・構造計算指針編集委員会 (1998) “枠組壁工法建築物 設計の手引”. 建設省住宅局建築指導課・木造住宅振興室監修, 日本ツーバイ

- フォー建築協会, 13-15.
- 渡部 広徳・新井 信吉 (1975) “枠組壁工法とその技術  
規準の原点”. 杉山 英男監修, 総合科学出版, 187-192.
- 山井 良三郎 (1973) 構造用木材の応力等級区分について.  
材料, 22, 882-886.
- 山井 良三郎 (1989) わが国の建築構造用製材規格の変遷.  
建築保全, 62, 67-79.
- 山井 良三郎 (1991) 新しい製材JAS の技術的背景. 住宅  
と木材, 163, 24-28.
- 横田 俊峰 (2015a) 枠組壁工法構造用製材及び枠組壁  
工法構造用たて継ぎ材の日本農林規格の改正の概要.  
Journal of Timber Engineering, 28 (3), 77-82.
- 横田 俊峰 (2015b) 枠組壁工法構造用製材のJAS 規格の  
改正概要. 木材工業, 70 (8), 353-356.
- 全国木材協同組合連合会 (2011) “平成 21 年度林野庁補助  
事業 2×4 住宅部材の開発事業 成果報告書”, 平成 23  
年 3 月, 1000pp.

Table 1. 木材の安全応力強度（許容応力度）（1913年）

樹種	安全応力強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	
	$f_c$	$f_b, f_b$
針葉樹 マツ、ベイマツ	50 (700)	55 (800)
針葉樹 ヒノキ、ヒバ	40 (550)	50 (700)
針葉樹 スギ	35 (500)	45 (650)
広葉樹 ケヤキ、クリ	65 (900)	70 (1000)

大正2年5月 東京市建築条例案第142条  
注: カッコ内の数値は換算前の値 (lb/in<sup>2</sup>)

Table 2. 木材の許容応力度（1920年）

樹種	許容応力度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	
	$f_c, f_b, f_b$	$f_s$
針葉樹 マツ	75	7.5
針葉樹 ヒノキ、ヒバ、オレゴンパイン	65	6.5
針葉樹 スギ、北海道マツの類	50	5
広葉樹 ケヤキ、クリ	90	9

大正9年11月9日 市街地建築物法施行規則第102条

Table 3. 木材の許容応力度（1937年）

樹種	許容応力度 (kgf/cm <sup>2</sup> )		
	$f_c$	$f_b, f_b$	$f_s$
針葉樹 ヒノキ、アカマツ、クロマツ、ツガ、ベイマツ	80	90	9
針葉樹 ヒバ、ペイヒ	70	80	8
針葉樹 スギ、エゾマツ、トドマツ、トウヒ、ベイスギ、ペイツガ	60	70	7
広葉樹 アカガシ、シラガシ	90	125	14
広葉樹 ケヤキ	80	110	12
広葉樹 クリ、ナラ、ブナ	70	95	10

昭和12年6月21日 市街地建築物法施行規則第102条

Table 5. 木材の許容応力度（1944年）

樹種	許容応力度 (kgf/cm <sup>2</sup> )		
	$f_c$	$f_b, f_b$	$f_s$
針葉樹 ヒノキ、アカマツ、クロマツ、ツガ	160	180	14
針葉樹 ヒバ	140	160	12
針葉樹 スギ、モミ、エゾマツ、トドマツ、カラマツ	120	140	10
広葉樹 カシ	180	250	28
広葉樹 ケヤキ	160	220	24
広葉樹 クリ、ナラ、ブナ	140	190	20

昭和19年8月9日 臨時日本標準規格第533号「建築物強度計算の基本」

Table 4. 『建築用本邦産木材及石材』による木材の強度と森による許容応力度の案（1938年）

I	II 樹種	III 比重	IV 圧縮 (kgf/cm <sup>2</sup> ) 強度		V 曲げ (kgf/cm <sup>2</sup> ) 強度/6.5		VI 曲げ (kgf/cm <sup>2</sup> ) 強度		VII せん断 (kgf/cm <sup>2</sup> ) 強度/8		VIII 強度の比 VI/IV VIII/IV		IX 許容応力度の比 VII/V IX/V	
			強度	強度/6.5	強度	強度/8	強度	強度/8	強度の比	許容応力度の比				
針葉樹	サハラ (サワラ)	0.33	340	52	470	59	49	6.1	1.38	0.144	1.13	0.117		
	スギ	0.39	400	62	580	73	52	6.5	1.45	0.130	1.18	0.105		
	エゾマツ	0.41	460	71	590	74	59	7.4	1.28	0.128	1.04	0.104		
	トウヒ	0.41	370	57	580	73	63	7.9	1.57	0.170	1.28	0.139		
	トドマツ	0.47	430	66	690	86	71	8.9	1.60	0.165	1.39	0.135		
	モミ	0.43	450	69	640	80	65	8.1	1.42	0.144	1.16	0.117		
	ヒバ	0.43	380	58	600	75	72	9.0	1.58	0.190	1.29	0.155		
	ヒノキ	0.46	520	80	800	100	72	9.0	1.54	0.138	1.25	0.112		
	ヒメコマツ	0.47	370	57	630	79	69	8.6	1.70	0.186	1.39	0.151		
	アカマツ	0.53	520	80	730	91	82	10.2	1.40	0.158	1.14	0.128		
広葉樹	ツガ	0.52	550	85	750	94	83	10.4	1.36	0.151	1.11	0.122		
	クロマツ	0.54	440	68	700	88	76	9.5	1.59	0.173	1.29	0.140		
	カラマツ	0.61	640	99	830	104	90	11.2	1.30	0.141	1.05	0.113		
	平均	—	—	—	—	—	—	—	1.47	0.155	1.20	0.126		
	クリ	0.50	350	54	580	73	64	8.0	1.66	0.183	1.35	0.148		
	ブナ	0.71	490	75	950	119	98	12.3	1.94	0.200	1.59	0.164		
	ケヤキ	0.68	530	82	870	109	97	12.1	1.64	0.183	1.33	0.148		
	オホナラ (ミズナラ)	0.80	460	71	790	99	79	9.9	1.72	0.172	1.39	0.140		
	アカガシ	1.06	510	79	1110	139	120	15.0	2.18	0.235	1.76	0.190		
	シラガシ	0.99	640	99	1180	147	123	15.4	1.84	0.192	1.48	0.156		
平均	—	—	—	—	—	—	—	1.83	0.194	1.48	0.158			

森徹, 建築用木材の許容応力度に就て. 建築学会論文集, 8, 11-20.

Table 6. 木材のヤング係数（1944年）

樹種	ヤング係数 (kgf/cm <sup>2</sup> )
アカマツ、クロマツ、ツガ	90000
ヒノキ、トドマツ、カラマツ	80000
スギ、モミ、ヒバ、エゾマツ	70000

昭和19年8月9日 臨時日本標準規格第533号「建築物強度計算の基本」

Table 7. 木材の許容応力度 (1948 年)

樹種	長期許容応力度 (kgf/cm <sup>2</sup> )		
	$f_c$	$f_t, f_b$	$f_s$
針葉樹 ヒノキ、アカマツ、クロマツ、ツガ、ベイマツ	80	90	7
ヒバ、ベイヒ	70	80	6
スギ、モミ、エゾマツ、トドマツ、カラマツ、ベイスギ、ベイツガ	60	70	5
広葉樹 カシ	90	125	14
ケヤキ	80	110	12
クリ、ナラ、ブナ	70	95	10

昭和 23 年 4 月 30 日 日本建築規格・建築 3001「建築物の構造計算」  
注：短期許容応力度は長期許容応力度の数値の 2 倍。

Table 9. 木材の許容応力度 (1959 年)

樹種	長期許容応力度 (kgf/cm <sup>2</sup> )		
	$f_c$	$f_t, f_b$	$f_s$
針葉樹 アカマツ、クロマツ、カラマツ、ヒバ、ヒノキ、ツガ、ベイマツ、ベイヒ	80	90	7
スギ、モミ、エゾマツ、トドマツ、ベイスギ、ベイツガ	60	70	5
広葉樹 カシ	90	130	14
ケヤキ、クリ、ナラ、ブナ	70	100	10

昭和 34 年 12 月 4 日 建築基準法施行令第 89 条  
注：短期許容応力度は長期許容応力度の数値の 2 倍。

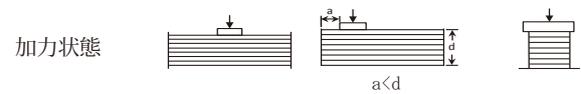
Table 11. 上級構造材 (針葉樹) の許容応力度 (1961 年)

樹種	長期許容応力度 (kgf/cm <sup>2</sup> )		
	$f_c$	$f_t, f_b$	$f_s$
針葉樹 I 類 アカマツ、クロマツ、カラマツ、ヒバ、ヒノキ、ツガ、ベイマツ、ベイヒ	100	120	9
II 類 スギ、モミ、エゾマツ、トドマツ、ベイスギ、ベイツガ、スプルース*	80	90	7

1961 年版『木構造設計規準・同解説』  
\*スプルースは 1973 年版『木構造設計規準・同解説』で追加された。  
注：短期許容応力度は長期許容応力度の数値の 2 倍。

Table 8. 木材の繊維に直角の許容応力度 (1947 年)

樹種	許容めり込み応力度	許容圧縮応力度
針葉樹	$1/5f_c$	$1/6f_c$
広葉樹	$1/3f_c$	$1/4f_c$



昭和 22 年 11 月 28 日「木構造計算規準」

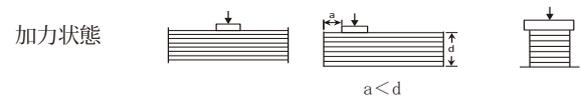
Table 10. 普通構造材の許容応力度 (1961 年)

樹種	長期許容応力度 (kgf/cm <sup>2</sup> )		
	$f_c$	$f_t, f_b$	$f_s$
針葉樹 I 類 アカマツ、クロマツ、カラマツ、ヒバ、ヒノキ、ツガ、ベイマツ、ベイヒ	80	90	7
II 類 スギ、モミ、エゾマツ、トドマツ、ベイスギ、ベイツガ、スプルース*	60	70	5
広葉樹 I 類 カシ	90	130	14
II 類 クリ、ナラ、ブナ、ケヤキ、アピトン	70	100	10
III 類 ラワン	70	90	6

1961 年版『木構造設計規準・同解説』  
\*スプルースは 1973 年版『木構造設計規準・同解説』で追加された。  
注：低品質のスギ(気乾比重 0.3 以下または平均年輪幅 6mm 以上)に対しては表記の値の 70%をとる。  
ナラ、ケヤキについては平均年輪幅 1mm 以上のものとする。  
短期許容応力度は長期許容応力度の数値の 2 倍。

Table 12. めり込みの許容応力度 (1961 年)

樹種	許容めり込み応力度	許容圧縮応力度
針葉樹	$0.2f_c$	$0.125f_c$
広葉樹	$0.33f_c$	$0.2f_c$



1961 年版『木構造設計規準・同解説』

Table 13. 木材のヤング係数 (1961 年)

(単位:  $10^3 \text{kgf/cm}^2$ )

		樹種	$E_{//}$	$E_{\perp}$
普通構造材	針葉樹	I類 アカマツ、クロマツ、カラマツ、ヒバ、ヒノキ、ツガ、ベイマツ、ベイヒ	90	2.5
		II類 スギ、モミ、エゾマツ、トドマツ、ベイスギ、ベイツガ、スプルース*	70	
	広葉樹	I類 カシ	100	4
		II類 クリ、ナラ、ブナ、ケヤキ、アピトン	80	
		III類 ラワン	70	
	上級構造材	針葉樹	I類 アカマツ、クロマツ、カラマツ、ヒバ、ヒノキ、ツガ、ベイマツ、ベイヒ	100
II類 スギ、モミ、エゾマツ、トドマツ、ベイスギ、ベイツガ、スプルース*			80	
広葉樹		I類 カシ	100	4.5
		II類 クリ、ナラ、ブナ、ケヤキ、アピトン	90	
		III類 ラワン	80	

1961 年版『木構造設計規準・同解説』

\*スプルースは 1973 年版『木構造設計規準・同解説』で追加された。

注: 低品質のスギ(気乾比重 0.3 以下または平均年輪幅 6mm 以上) に対しては表記の値の 70%をとる。

ナラ、ケヤキについては平均年輪幅 1mm 以上のものとする。

Table 14. 無欠点木材の強度

(単位:  $\text{kgf/cm}^2$ )

		樹種	圧縮強度 $F_c$	引張強度 $F_t$	曲げ強度 $F_b$	せん断強度 $F_s$	ヤング係数 $\times 10^3$	
							$E_{//}$	$E_{\perp}$
針葉樹	I	アカマツ、クロマツ、カラマツ、ヒバ、ヒノキ、ツガ、ベイマツ、ベイヒ	350 ~ 450 ~ 550	700 ~ 1000 ~ 1300	650 ~ 850 ~ 1100	70 ~ 80(90) ~ 110	65 ~ 80 ~ 120	2.5 ~ 4
	II	スギ、モミ、エゾマツ、トドマツ、ベイスギ、ベイツガ	250 ~ 350 ~ 450	500 ~ 700 ~ 1000	450 ~ 650 ~ 850	50 ~ 70 ~ 90	55(50) ~ 70 ~ 100	
広葉樹	I	カシ	450 ~ 600 ~ 750	950 ~ 1500 ~ 2000	900 ~ 1200 ~ 1500	80 ~ 100 ~ 130	80 ~ 100 ~ 140	3 ~ 5
	II	クリ、ナラ、ブナ、ケヤキ、アピトン	300 ~ 450 ~ 550(500)	600 ~ 1000 ~ 1600	500 ~ 800 ~ 1000	60 ~ 80 ~ 100	60 ~ 80 ~ 120	~ 7
	III	ラワン	300 ~ 400 ~ 500	600 ~ 1100 ~ 1300	450 ~ 750 ~ 1000	50 ~ 70 ~ 90	55 ~ 80 ~ 120	3 ~ 4 ~ 6

1961 年版『木構造設計規準・同解説』

注: 枠内の値は、最低品質値~平均品質値~上品質値

カッコ内の値は 1973 年版『木構造設計規準・同解説』による。

Table 15. 許容応力度の算出方法

(単位:  $\text{kgf/cm}^2$ )

		$k_k$	$k_w$	$k_g$	$\alpha$	$2/3 \alpha$	${}_0F$	$2/3 \alpha {}_0F$	$s_f$ (規準)
圧縮材 (柱)	普通	0.7	0.9	1.0	0.63	0.42	350 250	147 105	160 (I類) 120 (II類)
	上級	0.7	0.95	1.0	0.67	0.445	450 350	200 156	200 160
曲げ材 (はり)	普通	0.5	0.95	0.9	0.43	0.29	650 450	190 130	180 140
	上級	0.6	0.98	0.95	0.56	0.37	850 650	320 240	240 180
							700	180	180
引張材	普通	0.45	0.95	0.9	0.385	0.26	500	130	140
	上級	0.5	0.98	0.95	0.47	0.31	1000 700	310 220	240 180
せん断材	普通	—	—	—	1	2/3	$1/3.5 \times 70$	13	14
							$1/3.5 \times 50$	10	10
							$1/3.5 \times 90$	17	18
	上級						$1/3.5 \times 70$	13	14

1961 年版『木構造設計規準・同解説』

$s_f$ : 短期許容応力度

${}_0F$ : 無欠点木材の強度

$\alpha$ : 欠点による低減係数

$k_k$ 、 $k_w$ 、 $k_g$ : それぞれ節、丸身、繊維の傾斜による低減係数

Table 16. 枠組壁工法枠組材の許容応力度案 (1975年)

樹種グループ	樹種	等級	長期許容応力度 (単位: kgf/cm <sup>2</sup> )				ヤング係数 (×10 <sup>3</sup> )		
			f <sub>c</sub>	f <sub>b</sub> , f <sub>b</sub>	f <sub>s</sub>	f <sub>cv</sub>			
SI	D Fir-L	特級	100	140	8	30	110		
		甲種	1級	95	120	8	30	110	
			2級	75	100	8	30	100	
			3級	45	55	8	30	90	
		乙種	コンストラクション	85	75	8	30	90	
			スタンダード	70	40	8	30	90	
	ユーティリティ		45	20	8	30	90		
	Hem-Tam	Hem-Fir	特級	90	130	7	25	100	
			甲種	1級	80	110	7	25	100
				2級	65	90	7	25	90
				3級	40	50	7	25	80
			乙種	コンストラクション	75	70	7	25	80
スタンダード				60	40	7	25	80	
ユーティリティ		40		20	7	25	80		
SII		S-P-F	特級	90	120	7	25	90	
			甲種	1級	80	100	7	25	90
				2級	65	90	7	25	80
				3級	40	50	7	25	70
			乙種	コンストラクション	75	65	7	25	70
	スタンダード			60	35	7	25	70	
	ユーティリティ	40		15	7	25	70		
	W Cedar	W Cedar	特級	75	110	6	20	85	
			甲種	1級	65	95	6	20	85
				2級	50	75	6	20	75
				3級	30	45	6	20	70
			乙種	コンストラクション	60	60	6	20	70
スタンダード				50	35	6	20	70	
ユーティリティ	30	15		6	20	70			

昭和49年度総合技術開発プロジェクト 小規模住宅の新施工法の開発  
注: 短期許容応力度は長期許容応力度の数値の2倍。

Table 17. 木材の許容応力度 (1980年)

樹種	長期許容応力度 (kgf/cm <sup>2</sup> )			
	f <sub>c</sub>	f <sub>b</sub> , f <sub>b</sub>	f <sub>s</sub>	
針葉樹	アカマツ、クロマツ、ベイマツ	75	95	8
	カラマツ、ヒバ、ヒノキ、ベイヒ	70	90	7
	ツガ、ベイツガ	65	85	7
	モミ、エゾマツ、トドマツ、ベニマツ、スギ、ベイスギ、スプルース	60	75	6
	広葉樹	カシ	90	130
広葉樹	クリ、ナラ、ブナ、ケヤキ	70	100	10

昭和55年7月14日 建築基準法施行令第89条  
注: 短期許容応力度は長期許容応力度の数値の2倍。

Table 18. 無欠点小試験体の基準強度値 (単位: kgf/cm<sup>2</sup>)

樹種	縦圧縮	曲げ	せん断	
	強さ	強さ	強さ	
針葉樹	I アカマツ、クロマツ、ベイマツ	450	800	90
	II カラマツ、ヒバ、ヒノキ、ベイヒ	425	750	80
	III ツガ、ベイツガ	400	700	80
	IV モミ、エゾマツ、トドマツ、ベニマツ、スギ、ベイスギ、スプルース	350	650	70
広葉樹	I カシ	550	1100	160
	II クリ、ナラ、ブナ、ケヤキ	430	850	110

1985年『ティンバーエンジニアリング読本』表10.10

Table 19. 許容応力度の算出方法 (単位: kgf/cm<sup>2</sup>)

圧縮: $f_c = {}_0F \times \alpha \times 2/3 \times 1/2 (\alpha = 0.62)$				
	${}_0F$	$f_c$	(丸めて)	$f_c$
針葉樹	I類	360	→	75
	II類	340	→	70
	III類	320	→	65
	IV類	280	→	60
曲げ: $f_b = {}_0F \times \alpha \times 2/3 \times 1/2 (\alpha = 0.45)$				
	${}_0F$	$f_b$	(丸めて)	$f_b$
針葉樹	I類	640	→	95
	II類	600	→	90
	III類	560	→	85
	IV類	520	→	75
せん断: $f_s = {}_0F \times \alpha \times 2/3 \times 1/2 \times 1/1.5 (\alpha = 0.5)$				
	${}_0F$	$f_s$	(丸めて)	$f_s$
針葉樹	I類	70	→	8
	II類	65	→	7
	III類	65	→	7
	IV類	55	→	6

1985年『ティンバーエンジニアリング読本』表10.11

$f_c$ : 長期許容応力度

${}_0F$ : 無欠点材の樹種群に対する基準強度にばらつき係数4/5をかけたもの

$\alpha$ : 欠点による低減係数

Table 20. 木材のめり込みの許容応力度 (1980年)

	樹種	長期許容応力度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	
針葉樹	アカマツ、クロマツ、ベイマツ	30	
	カラマツ、ヒバ、ヒノキ、ベイヒ	25	
	ツガ、ベイツガ、モミ、エゾマツ、トドマツ、ベニマツ、スギ、ベイスギ、スプルース	20	
	カシ	40	
広葉樹	クリ、ナラ、ブナ、ケヤキ	35	

昭和55年12月1日建設省告示第1799号 木材のめり込み及び圧縮材の座屈の許容応力度等を定める件  
注: 短期許容応力度は長期許容応力度の数値の2倍。

Table 21. 木材の許容応力度 (1987年)

	樹種	長期許容応力度 (kgf/cm <sup>2</sup> )			
		$f_c$	$f_t$	$f_b$	$f_s$
針葉樹	アカマツ、クロマツ、ベイマツ	75	60	95	8
	カラマツ、ヒバ、ヒノキ、ベイヒ	70	55	90	7
	ツガ、ベイツガ	65	50	85	7
	モミ、エゾマツ、トドマツ、ベニマツ、スギ、ベイスギ、スプルース	60	45	75	6
広葉樹	カシ	90	80	130	14
	クリ、ナラ、ブナ、ケヤキ	70	60	100	10

昭和62年10月6日建築基準法施行令第89条  
注: 短期許容応力度は長期許容応力度の数値の2倍。

Table 22. 普通構造材の許容応力度 (1988年)

	樹種	長期許容応力度 (kgf/cm <sup>2</sup> )			
		$f_c$	$f_t$	$f_b$	$f_s$
針葉樹	I類 ベイマツ、ソ連カラマツ	75	55	95	8
	II類 ヒバ、ヒノキ、ベイヒ	70	55	90	7
	III類 アカマツ、クロマツ、カラマツ、ツガ、ベイツガ	65	50	85	7
	IV類 モミ、エゾマツ、トドマツ、ベニマツ、スギ、ベイスギ、スプルース	60	45	75	6
広葉樹	I類 カシ	90	80	130	14
	II類 クリ、ナラ、ブナ、ケヤキ、アビトン	70	60	100	10
	III類 ラワン	70	50	90	6

1988年版『木構造計算規準・同解説』  
注: 気乾比重0.3以下のスギに対しては表記の値の70%をとる。  
ナラ、ケヤキについては平均年輪幅1mm以上のものとする。  
短期許容応力度は長期許容応力度の数値の2倍。

Table 23. 上級構造材 (針葉樹) の許容応力度 (1988年)

	樹種	長期許容応力度 (kgf/cm <sup>2</sup> )			
		$f_c$	$f_t$	$f_b$	$f_s$
針葉樹	I類 ベイマツ、ソ連カラマツ	90	65	120	10
	II類 ヒバ、ヒノキ、ベイヒ	85	65	110	9
	III類 アカマツ、クロマツ、カラマツ、ツガ、ベイツガ	80	60	105	9
	IV類 モミ、エゾマツ、トドマツ、ベニマツ、スギ、ベイスギ、スプルース	75	55	95	7

1988年版『木構造計算規準・同解説』  
注: 短期許容応力度は長期許容応力度の数値の2倍。

Table 24. 木材の繊維に直角方向の許容応力度 (1988年)

	樹種	長期許容応力度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	
		許容部分圧縮 (めり込み) 応力度	許容全面圧縮 応力度
針葉樹	I類 ベイマツ、ソ連カラマツ	30	9.5
	II類 ヒバ、ヒノキ、ベイヒ	25	9.0
	III類 アカマツ、クロマツ、カラマツ、ツガ、ベイツガ	25	8.0
	IV類 モミ、エゾマツ、トドマツ、ベニマツ、スギ、ベイスギ、スプルース	20	7.5
広葉樹	I類 カシ	40	18
	II類 クリ、ナラ、ブナ、ケヤキ、アビトン	35	14
	III類 ラワン	30	14

1988年版『木構造計算規準・同解説』  
注: 短期許容応力度は長期許容応力度の数値の2倍。

加力状態による調整係数

樹種	許容部分圧縮 (めり込み) 応力度	
針葉樹	1.00	0.80
広葉樹	1.00	0.75
	材中間部	材端

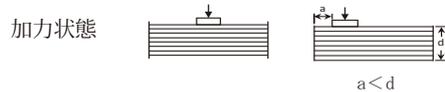


Table 25. 木材の繊維方向のヤング係数 (1988 年)

(単位:  $10^3 \text{kgf/cm}^2$ )

樹種	$E_{//}$		
	普通構造材	上級構造材	
針葉樹	I類 ベイマツ、ソ連カラマツ	100	110
	II類 ヒバ、ヒノキ、ベイヒ	90	100
	III類 アカマツ、クロマツ、カラマツ、ツガ、ベイツガ	80	90
	IV類 モミ、エゾマツ、トドマツ、ペニマツ、スギ、ベイスギ、スプルー	70	80
広葉樹	I類 カシ	100	110
	II類 クリ、ナラ、ブナ、ケヤキ、アビトン	80	90
	III類 ラワン	70	80

1988 年版『木構造計算規準・同解説』

注: 気乾比重 0.3 以下のスギに対しては表記の値の 70% をとる。  
ナラ、ケヤキについては平均年輪幅 1mm 以上のものとする。

Table 26. 「針葉樹の構造用製材の日本農林規格」目視等級区分製材の許容応力度 (1992 年)

樹種	区分	等級	長期許容応力度 ( $\text{kgf/cm}^2$ )		
			$f_c$	$f_t$	$f_b$
ベイマツ	甲種構造材	1 級	90	65	110
		2 級	60	45	75
	乙種構造材	1 級	90	55	90
		2 級	60	35	60
カラマツ	甲種構造材	1 級	75	60	95
		2 級	65	50	85
	乙種構造材	1 級	75	45	75
		2 級	65	40	65
ソ連カラマツ	甲種構造材	1 級	95	70	120
		2 級	80	60	105
	乙種構造材	1 級	95	55	95
		2 級	80	50	80
ヒノキ	甲種構造材	1 級	100	75	125
		2 級	90	65	115
	乙種構造材	1 級	100	60	100
		2 級	90	55	90
ベイツガ	甲種構造材	1 級	70	50	85
		2 級	70	50	85
	乙種構造材	1 級	70	40	70
		2 級	70	40	70
スギ	甲種構造材	1 級	70	50	90
		2 級	65	50	85
	乙種構造材	1 級	70	40	70
		2 級	65	40	65

平成 4 年 1 月 31 日 建設省住指発第 16 号建設省住宅局建築指導課長通知

注: 短期許容応力度は長期許容応力度の数値の 2 倍。  
 $f_b$  は建築基準法施行令第 89 条による。

Table 27. 「針葉樹の構造用製材の日本農林規格」機械等級区分製材の許容応力度 (1992 年)

樹種	等級	長期許容応力度 ( $\text{kgf/cm}^2$ )		
		$f_c$	$f_t$	$f_b$
ベイマツ、ソ連カラマツ、ベイツガ	E50	—	—	—
	E70	30	20	35
	E90	55	40	70
	E110	80	60	100
	E130	105	80	130
カラマツ、ヒノキ	E150	130	95	165
	E50	35	25	45
	E70	55	40	70
	E90	80	60	100
	E110	100	75	130
スギ	E130	125	95	155
	E150	145	110	185
	E50	60	45	75
	E70	75	55	95
	E90	90	70	115
	E110	105	80	135
	E130	120	90	155
	E150	140	105	175

平成 4 年 1 月 31 日 建設省住指発第 16 号建設省住宅局建築指導課長通知

注: 短期許容応力度は長期許容応力度の数値の 2 倍。  
 $f_b$  は建築基準法施行令第 89 条による。

Table 28. 「針葉樹の構造用製材の日本農林規格」目視等級区分製材の材料強度の相互関係

	曲げ	引張り	圧縮
甲種	$F$	$0.6F$	$0.8F$
乙種	$0.8F^{(1)}$	$0.48F^{(2)}$	$0.8F$

材料強度を  $F$  とする。<sup>1)</sup> カラマツ 3 級は  $0.75F$ 、ヒバ 3 級は  $0.7F$ 、エゾマツ・トドマツ 3 級は  $0.5F$ <sup>2)</sup> カラマツ 3 級は  $0.45F$ 、ヒバ 3 級は  $0.42F$ 、エゾマツ・トドマツ 3 級は  $0.3F$

Table 29. 「針葉樹の構造用製材の日本農林規格」目視等級区分製材の許容応力度（1996年）

樹種	区分	等級	長期許容応力度 (kgf/cm <sup>2</sup> )			樹種	区分	等級	長期許容応力度 (kgf/cm <sup>2</sup> )		
			$f_c$	$f_t$	$f_b$				$f_c$	$f_t$	$f_b$
アカマツ	甲種構造材	1級	90	65	110	ヒノキ	甲種構造材	1級	100	75	125
		2級	55	40	65			2級	90	65	115
		3級	35	25	45			3級	75	55	95
	乙種構造材	1級	90	50	90		乙種構造材	1級	100	60	100
		2級	55	30	55			2級	90	55	90
		3級	35	20	35			3級	75	45	75
ベイマツ	甲種構造材	1級	90	65	110	ベイツガ	甲種構造材	1級	70	50	85
		2級	60	45	75			2級	70	50	85
		3級	45	35	55			3級	55	40	70
	乙種構造材	1級	90	55	90		乙種構造材	1級	70	40	70
		2級	60	35	60			2級	70	40	70
		3級	45	25	45			3級	55	35	55
カラマツ	甲種構造材	1級	75	60	95	エゾマツ、 トドマツ	甲種構造材	1級	90	65	115
		2級	65	50	85			2級	75	55	95
		3級	60	45	75			3級	45	35	55
	乙種構造材	1級	75	45	75		乙種構造材	1級	90	55	90
		2級	65	40	65			2級	75	45	75
		3級	60	35	55			3級	45	15	25
ダフリカカラマツ	甲種構造材	1級	95	70	120	スギ	甲種構造材	1級	70	50	90
		2級	80	60	105			2級	65	50	85
		3級	75	55	90			3級	60	45	75
	乙種構造材	1級	95	55	95		乙種構造材	1級	70	40	70
		2級	80	50	80			2級	65	40	65
		3級	75	45	75			3級	60	35	60
ヒバ	甲種構造材	1級	90	70	115	平成8年5月23日 建設省住指発第195号建設省住宅局建築指導課長通達					
		2級	90	70	115	注: 短期許容応力度は長期許容応力度の数値の2倍。					
		3級	75	55	95	$f_b$ は建築基準法施行令第89条による。					
	乙種構造材	1級	90	55	90						
		2級	90	55	90						
		3級	75	40	65						

Table 30. 「針葉樹の構造用製材の日本農林規格」機械等級区分製材の許容応力度（1996年）

樹種	等級	長期許容応力度 (kgf/cm <sup>2</sup> )		
		$f_c$	$f_t$	$f_b$
アカマツ、ベイマツ、 ダフリカカラマツ、ベイツ ガ、エゾマツ、トドマツ	E50	—	—	—
	E70	30	20	35
	E90	55	40	70
	E110	80	60	100
	E130	105	80	130
	E150	130	95	165
カラマツ、ヒノキ、ヒバ	E50	35	25	45
	E70	55	40	70
	E90	80	60	100
	E110	100	75	130
	E130	125	95	155
	E150	145	110	185
スギ	E50	60	45	75
	E70	75	55	95
	E90	90	70	115
	E110	105	80	135
	E130	120	90	155
	E150	140	105	175

平成8年5月23日 建設省住指発第195号建設省住宅局建築指導課長通達

注: 短期許容応力度は長期許容応力度の数値の2倍。

$f_b$ は建築基準法施行令第89条による。

Table 31. 枠組壁工法構造用製材の許容応力度（1997年）

樹種 グループ	樹種	規格・等級	長期許容応力度 (kgf/cm <sup>2</sup> )				
			$f_c$	$f_t$	$f_b$	$f_s$	
SI	D Fir-L	特級	87	81	122	8	
		甲種枠組材	1級	74	55	82	8
			2級	65	49	72	8
			3級	37	28	42	8
		乙種枠組材	コンストラクション	72	37	55	8
			スタンダード	59	21	31	8
	ユーティリティ		38	10	14	8	
	Hem-Tam	特級	61	45	98	7	
		甲種枠組材	1級	51	28	61	7
			2級	42	22	45	7
			3級	24	12	28	7
		乙種枠組材	コンストラクション	47	15	33	7
スタンダード			38	9	18	7	
ユーティリティ	24		4	9	7		
SII	Hem-Fir	特級	80	75	115	7	
		甲種枠組材	1級	69	49	78	7
			2級	63	41	69	7
			3級	36	24	40	7
		乙種枠組材	コンストラクション	67	31	52	7
			スタンダード	56	17	29	7
	ユーティリティ		36	8	14	7	
	S-P-F	特級	69	56	102	6	
		甲種枠組材	1級	61	40	74	6
			2級	58	37	72	6
			3級	34	22	42	6
		乙種枠組材	コンストラクション	62	28	54	6
スタンダード			53	16	30	6	
ユーティリティ	34		7	14	6		
W Cedar	特級	51	47	79	6		
	甲種枠組材	1級	42	33	57	6	
		2級	33	33	55	6	
		3級	19	20	32	6	
	乙種枠組材	コンストラクション	38	23	39	6	
		スタンダード	29	14	22	6	
ユーティリティ		19	6	11	6		

平成9年5月30日 建設省住指発第255号住宅局建築指導課長通知  
注: 寸法型式が104、203、204、404の場合。

短期許容応力度は長期許容応力度の数値の2倍。

104、203、204、404以外の寸法型式の場合

上記の表の数値に、寸法型式および応力の種類に応じて以下の表に掲げる数値を乗じた数値とする。

寸法型式	圧縮	引張り	曲げ	せん断
106 206 406	0.96	0.84	0.84	1.00
208 408	0.93	0.75	0.75	
210	0.91	0.68	0.68	
212	0.89	0.63	0.63	

Table 32. 「針葉樹の構造用製材の日本農林規格」目視等級区分製材の基準強度（2000年）と基準弾性係数（2002年）

樹種	区分	等級	基準強度 (N/mm <sup>2</sup> )				基準弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )			樹種	区分	等級	基準強度 (N/mm <sup>2</sup> )				基準弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )		
			F <sub>c</sub>	F <sub>t</sub>	F <sub>b</sub>	F <sub>s</sub>	E <sub>0</sub>	E <sub>0.05</sub>	G <sub>0</sub>				F <sub>c</sub>	F <sub>t</sub>	F <sub>b</sub>	F <sub>s</sub>	E <sub>0</sub>	E <sub>0.05</sub>	G <sub>0</sub>
アカマツ	甲種構造材	1級	27.0	20.4	33.6	2.4	10.0	6.5	2.1	ヒノキ	甲種構造材	1級	30.6	22.8	38.4	11.0	8.5		
		2級	16.8	12.6	20.4							乙種構造材	2級	27.0	20.4			34.2	
		3級	11.4	9.0	14.4								乙種構造材	1級	30.6			18.6	30.6
	1級	27.0	16.2	26.4	乙種構造材						2級			27.0	16.2			27.0	
	2級	16.8	10.2	16.8							乙種構造材	3級		23.4	13.8			23.4	
	3級	11.4	7.2	11.4								乙種構造材	1級	21.0	15.6			26.4	
ベイマツ	甲種構造材	1級	27.0	20.4	34.2	2.4	12.0	8.5	ベイツガ	甲種構造材			2級	21.0	15.6	26.4	2.1	9.5	6.5
		2級	18.0	13.8	22.8						乙種構造材		3級	17.4	13.2	21.6			
		3級	13.8	10.8	17.4							乙種構造材	1級	21.0	12.6	21.0			
	1級	27.0	16.2	27.0	乙種構造材					2級			21.0	12.6	21.0				
	2級	18.0	10.8	18.0						乙種構造材	3級		17.4	10.2	17.4				
	3級	13.8	8.4	13.8							乙種構造材	1級	27.0	20.4	34.2				
カラマツ	甲種構造材	1級	23.4	18.0	29.4	2.1	9.5	6.0	E <sub>0</sub> の 1/15			エゾマツ、 トドマツ	甲種構造材	2級	22.8	17.4	28.2	1.8	10.0
		2級	20.4	15.6	25.8					乙種構造材				3級	13.8	10.8	17.4		
		3級	18.6	13.8	23.4						乙種構造材			1級	27.0	16.2	27.0		
	1級	23.4	14.4	23.4	乙種構造材								2級	22.8	13.8	22.8			
	2級	20.4	12.6	20.4						乙種構造材			3級	13.8	5.4	9.0			
	3級	18.6	10.8	17.4							乙種構造材		1級	21.6	16.2	27.0			
ダフリカ カラマツ	甲種構造材	1級	28.2	21.6	36.0	2.1	13.0	9.0	スギ			甲種構造材	2級	20.4	15.6	25.8	1.8	7.0	4.5
		2級	25.2	18.6	31.2					乙種構造材			3級	18.0	13.8	22.2			
		3級	22.2	16.8	27.6						乙種構造材		1級	21.6	13.2	21.6			
	1級	28.8	17.4	28.8	乙種構造材							2級	20.4	12.6	20.4				
	2級	25.2	15.0	25.2						乙種構造材		3級	18.0	10.8	18.0				
	3級	22.2	13.2	22.2							乙種構造材	1級	28.2	21.0	34.8				
ヒバ	甲種構造材	2級	27.6	21.0	34.8	2.1	10.0	7.5	ヒバ			甲種構造材	3級	23.4	18.0	29.4	2.1	10.0	7.5
		1級	28.2	16.8	28.2					乙種構造材			1級	28.2	16.8	28.2			
		2級	27.6	16.8	27.6						乙種構造材		2級	27.6	16.8	27.6			
	3級	23.4	12.6	20.4	乙種構造材							3級	23.4	12.6	20.4				

平成12年5月31日建設省告示第1452号

注: 基準弾性係数は2002年版『木質構造設計規準・同解説』による。

E、Gはそれぞれ繊維方向の弾性係数、せん断弾性係数、添字の0、0.05はそれぞれ信頼水準75%における50、5%下側許容限界値。

Table 33. 「針葉樹の構造用製材の日本農林規格」機械等級区分製材の基準強度（2000年）と基準弾性係数（2002年）

樹種	等級	基準強度 (N/mm <sup>2</sup> )				基準弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )		
		F <sub>c</sub>	F <sub>t</sub>	F <sub>b</sub>	F <sub>s</sub>	E <sub>0</sub>	E <sub>0.05</sub>	G <sub>0</sub>
アカマツ、ベイマツ、ダフリカ カラマツ、ベイツガ、エゾマツ、 トドマツ	E50	-	-	-	-	-	-	-
	E70	9.6	7.2	12.0		6.9	5.9	
	E90	16.8	12.6	21.0		8.8	7.8	
	E110	24.6	18.6	30.6		10.8	9.8	
	E130	31.8	24.0	39.6		12.7	11.8	
	E150	39.0	29.4	48.6		14.7	13.7	
カラマツ、ヒノキ、ヒバ	E50	11.4	8.4	13.8	樹種ごとに 目視と同値	4.9	3.9	E <sub>0</sub> の1/15
	E70	18.0	13.2	22.2		6.9	5.9	
	E90	24.6	18.6	30.6		8.8	7.8	
	E110	31.2	23.4	38.4		10.8	9.8	
	E130	37.8	28.2	46.8		12.7	11.8	
	E150	44.4	33.0	55.2		14.7	13.7	
スギ	E50	19.2	14.4	24.0		4.9	3.9	
	E70	23.4	17.4	29.4		6.9	5.9	
	E90	28.2	21.0	34.8		8.8	7.8	
	E110	32.4	24.6	40.8		10.8	9.8	
	E130	37.2	27.6	46.2		12.7	11.8	
	E150	41.4	31.2	51.6		14.7	13.7	

平成12年5月31日建設省告示第1452号

注: 基準弾性係数は2002年版『木質構造設計規準・同解説』による。

E、Gはそれぞれ繊維方向の弾性係数、せん断弾性係数、添字の0、0.05はそれぞれ信頼水準75%における50、5%下側許容限界値。

Table 34. 枠組壁工法構造用製材の基準強度（2000年）と基準弾性係数（2002年）

樹種 グループ	樹種	区分	等級	基準強度 (N/mm <sup>2</sup> )				基準弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	
				$F_c$	$F_t$	$F_b$	$F_s$		
SI	D Fir-L	甲種	特級	25.8	24.0	36.0	2.4	12.6	
			1級	22.2	16.2	24.6		11.7	
			2級	19.2	15.0	21.6		10.7	
		3級	11.4	8.4	12.6	9.5			
		コンストラクション	21.6	11.4	16.2	10.0			
		乙種	スタンダード	17.4	6.6	9.6		9.1	
	ユーティリティ	11.4	3.0	4.2	8.5				
	Hem-Tam	甲種	特級	18.0	13.8	29.4	2.1	8.2	
			1級	15.0	8.4	18.0		7.5	
			2級	12.6	6.6	13.8		7.5	
		3級	7.2	3.6	8.4	6.2			
		コンストラクション	14.4	4.8	10.2	6.9			
乙種		スタンダード	11.4	3.0	5.4	6.2			
ユーティリティ	7.2	1.2	3.0	5.5					
Hem-Fir	甲種	特級	24.0	22.2	34.2	2.1	10.6		
		1級	20.4	15.0	23.4		9.8		
		2級	18.6	12.6	20.4		9.1		
		3級	10.8	7.2	12.0		8.1		
		コンストラクション	19.8	9.6	15.6		9.9		
		乙種	スタンダード	16.8	5.4		9.0	9.0	
	ユーティリティ	10.8	2.4	4.2	8.4				
	SII	S-P-F	甲種	特級	20.4	16.8	30.0	1.8	10.5
				1級	18.0	12.0	22.2		10.0
				2級	17.4	11.4	21.6		9.6
			3級	10.2	6.6	12.6	9.3		
			コンストラクション	18.6	8.4	16.2	9.8		
乙種			スタンダード	15.6	4.8	9.0	8.9		
ユーティリティ		10.2	2.4	4.2	8.3				
W Cedar		甲種	特級	15.0	14.4	23.4	1.8	7.5	
			1級	12.6	10.2	16.8		6.9	
			2級	10.2	10.2	16.2		6.9	
		3級	6.0	6.0	9.6	6.2			
		コンストラクション	11.4	7.2	12.0	6.2			
	乙種	スタンダード	9.0	4.2	6.6	5.5			
ユーティリティ	6.0	1.8	3.6	5.5					

平成 12 年 5 月 31 日建設省告示第 1452 号

注: 寸法型式が 104、203、204、404 の場合。それ以外の場合は Table 31 の係数に従う。

基準弾性係数は 2002 年版『木質構造設計規準・同解説』による。

E は繊維方向の弾性係数、添字の 0 は信頼水準 75% における 50% 下側許容限界値。

Table 35. 無等級材の基準強度（2000年）と基準弾性係数（2002年）

樹種	基準強度 (N/mm <sup>2</sup> )				基準弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )		
	$F_c$	$F_t$	$F_b$	$F_s$	$E_0$	$E_{0.05}$	$G_0$
針葉樹	アカマツ、クロマツ、ベイマツ	22.2	17.7	28.2	2.4		
	カラマツ、ヒバ、ヒノキ、ベイヒ	20.7	16.2	26.7	2.1		
	ツガ、ベイツガ	19.2	14.7	25.2	2.1		
	モミ、エゾマツ、トドマツ、ベニマツ、スギ、ベイスギ、スプルース	17.7	13.5	22.2	1.8		
	カシ	27.0	24.0	38.4	4.2		
広葉樹	クリ、ナラ、ブナ、ケヤキ	21.0	18.0	29.4	3.0		
	針葉樹	ベイマツ、ダフリカカラマツ	10.0	6.5			
	ヒバ、ヒノキ、ベイヒ	9.0	6.0				
針葉樹	アカマツ、クロマツ、カラマツ、ツガ、ベイツガ	8.0	5.5				
針葉樹	モミ、エゾマツ、トドマツ、ベニマツ、スギ、ベイスギ、スプルース	7.0	4.5			$E_0$ の 1/15	
広葉樹	カシ	10.0	6.5				
広葉樹	クリ、ナラ、ブナ、ケヤキ、アビトン	8.0	5.5				
広葉樹	ラワン	7.0	4.5				

平成 12 年 5 月 31 日建設省告示第 1452 号

注: 基準弾性係数は 2002 年版『木質構造設計規準・同解説』による。

E、G はそれぞれ繊維方向の弾性係数、せん断弾性係数、添字の 0、0.05 はそれぞれ信頼水準 75% における 50、5% 下側許容限界値。

Table 36. 木材のめり込みの基準強度 (2001 年)

a 目視等級区分製材、機械等級区分製材、無等級材

樹種		基準強度 (N/mm <sup>2</sup> )
針葉樹	アカマツ、クロマツ、バイマツ	9.0
	カラマツ、ヒバ、ヒノキ、ベイヒ	7.8
	ツガ、ベイツガ、モミ、エゾマツ、トドマツ、ベニマツ、スギ、ベイスギ、スプルース	6.0
	カシ	12.0
広葉樹	クリ、ナラ、ブナ、ケヤキ	10.8

b 枠組壁工法構造用製材

樹種グループ	樹種	基準強度 (N/mm <sup>2</sup> )
SI	D Fir-L	9.0
	Hem-Tam	7.8
SII	Hem-Fir	6.0
	S-P-F	6.0
	W Cedar	6.0

平成 13 年 6 月 12 日国土交通省告示第 1024 号

Table 37. 枠組壁工法構造用製材および枠組壁工法構造用たて継ぎ材の基準強度 (2015 年) と基準弾性係数 (2002 年)

樹種	区分	等級	基準強度 (N/mm <sup>2</sup> )				基準弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	樹種	区分	等級	基準強度 (N/mm <sup>2</sup> )			
			F <sub>c</sub>	F <sub>t</sub>	F <sub>b</sub>	F <sub>s</sub>					F <sub>c</sub>	F <sub>t</sub>	F <sub>b</sub>	F <sub>s</sub>
D Fir-L	甲種	特級	25.8	24.0	36.0	2.4	12.6	SYP	甲種	特級	24.1	26.2	39.0	
		1 級	22.2	16.2	24.6		11.7			1 級	20.7	16.1	24.4	
		2 級	19.2	15.0	21.6		10.7			2 級	18.7	11.9	18.5	
		3 級	11.4	8.4	12.6		9.5			3 級	10.7	6.8	10.6	
		コンストラクション	21.6	11.4	16.2		10.0			コンストラクション	19.9	8.9	13.9	
	乙種	スタンダード	17.4	6.6	9.6	2.1	9.1		乙種	スタンダード	16.5	5.0	7.8	
		ユーティリティ	11.4	3.0	4.2		8.5			ユーティリティ	10.7	2.3	3.7	
		たて枠用たて継ぎ材	17.4	6.6	9.6		9.2			たて枠用たて継ぎ材	16.5	5.0	7.8	
		特級	18.0	13.8	29.4		8.2			甲種	特級	24.9	20.6	33.6
		1 級	15.0	8.4	18.0		7.5				1 級	21.1	14.1	23.7
2 級	12.6	6.6	13.8	7.5	2 級	18.2	12.5	22.2						
3 級	7.2	3.6	8.4	6.2	3 級	10.6	7.3	12.9						
コンストラクション	14.4	4.8	10.2	6.9	コンストラクション	19.8	9.5	16.9						
Hem-Tam	スタンダード	11.4	3.0	5.4	2.1	6.2	乙種	スタンダード	16.0	5.3	9.3			
	ユーティリティ	7.2	1.2	3.0		5.5		ユーティリティ	10.6	2.5	4.4			
	たて枠用たて継ぎ材	11.4	3.0	5.4		6.2		たて枠用たて継ぎ材	16.0	5.3	9.3			
	特級	24.0	22.2	34.2		10.6		甲種	特級	15.7	16.0	28.4		
	1 級	20.4	15.0	23.4		9.8			1 級	15.7	12.2	20.4		
2 級	18.6	12.6	20.4	9.1	2 級	15.7	12.2		19.5					
3 級	10.8	7.2	12.0	8.1	3 級	9.1	7.1		11.3					
コンストラクション	19.8	9.6	15.6	9.9	コンストラクション	15.7	9.3		14.8					
Hem-Fir	スタンダード	16.8	5.4	9.0	2.1	9.0	乙種	スタンダード	13.8	5.1	8.2			
	ユーティリティ	10.8	2.4	4.2		8.4		ユーティリティ	9.1	2.4	3.9			
	たて枠用たて継ぎ材	16.8	5.4	9.0		9.9		たて枠用たて継ぎ材	13.8	5.1	8.2			
	特級	20.4	16.8	30.0		10.5		甲種	特級	20.9	16.9	22.5		
	1 級	18.0	12.0	22.2		10.0			1 級	18.3	11.3	16.1		
2 級	17.4	11.4	21.6	9.6	2 級	17.0	9.7		15.5					
3 級	10.2	6.6	12.6	9.3	3 級	9.8	5.7		11.8					
コンストラクション	18.6	8.4	16.2	9.8	コンストラクション	17.9	7.4		6.5					
S-P-F	スタンダード	15.6	4.8	9.0	1.8	8.9	乙種	スタンダード	14.9	4.1	6.5			
	ユーティリティ	10.2	2.4	4.2		8.3		ユーティリティ	9.8	1.9	3.1			
	たて枠用たて継ぎ材	15.6	4.8	9.0		8.9		たて枠用たて継ぎ材	14.9	4.1	6.5			
	特級	15.0	14.4	23.4		7.5		甲種	特級	10.6	7.3	12.9		
	1 級	12.6	10.2	16.8		6.9			1 級	10.6	7.3	12.9		
2 級	10.2	10.2	16.2	6.9	2 級	18.2	12.5		22.2					
3 級	6.0	6.0	9.6	6.2	3 級	10.6	7.3		12.9					
コンストラクション	11.4	7.2	12.0	6.2	コンストラクション	19.8	9.5		16.9					
W Cedar	スタンダード	9.0	4.2	6.6	1.8	5.5	乙種	スタンダード	16.0	5.3	9.3			
	ユーティリティ	6.0	1.8	3.6		5.5		ユーティリティ	10.6	2.5	4.4			
	たて枠用たて継ぎ材	9.0	4.2	6.6		5.5		たて枠用たて継ぎ材	16.0	5.3	9.3			
	特級	15.0	14.4	23.4		7.5		甲種	特級	15.7	16.0	28.4		
	1 級	12.6	10.2	16.8		6.9			1 級	15.7	12.2	20.4		
2 級	10.2	10.2	16.2	6.9	2 級	15.7	12.2		19.5					
3 級	6.0	6.0	9.6	6.2	3 級	9.1	7.1		11.3					
コンストラクション	11.4	7.2	12.0	6.2	コンストラクション	15.7	9.3		14.8					

平成 27 年 8 月 4 日国土交通省告示第 910 号  
 基準弾性係数は 2002 年版『木質構造設計規準・同解説』による。  
 E は繊維方向の弾性係数、添字の 0 は信頼水準 75% における 50% 下側許容限界値。  
 注: 寸法型式が 104、203、204、304、404 の場合 (枠組壁工法構造用製材)  
 寸法型式が 203、204 の場合 (枠組壁工法構造用たて継ぎ材)

上記以外の寸法型式の場合  
 上記の表の数値に、寸法型式および応力の種類に応じて以下の表に掲げる数値を乗じた数値とする。

寸法型式	圧縮	引張り	曲げ	せん断
106 205 206 306 406	0.96	0.84	0.84	1.00
208 408	0.93	0.75	0.75	
210	0.91	0.68	0.68	
212	0.89	0.63	0.63	

Table 38. 製材に関する主な関連規格および関連書籍

公布日等	番号等	JAS 規格関連	関連書籍	内容	概要
大正 8(1919)年 4 月 4 日	法律第 37 号	市街地建築物法	建築規格関連	制定	我が国初の建築に関する総合的かつ体系的な制度
大正 9(1920)年 9 月 29 日	勅令第 438 号	市街地建築物法施行令	市街地建築物法	制定	木材の許容応力度が我が国の法令に初めて示される
大正 9(1920)年 11 月 9 日	内務省令第 37 号	市街地建築物法施行規則	市街地建築物法施行規則	制定	第 102 条で針葉樹 3 樹種群、広葉樹 1 樹種群の許容応力度を設定
大正 15(1926)年 10 月 26 日	商工省告示第 30 号	木材規格 (JES、日本標準規格)		制定	針葉樹の素材および建築に使う製材に適用する目的で制定
昭和 12(1937)年 6 月 21 日	内務省令第 25 号	市街地建築物法施行規則		改正	木材の許容応力度の改正
昭和 14(1939)年 9 月 27 日	農林省令第 45 号	用材生産統制規則		公布	用材は用材規格規定によって生産し、道府県が行う検査を経なければならなくなった
昭和 14(1939)年 10 月 13 日	農林省告示第 367 号	用材規格規定		制定	農林省による木材関係の最初の規格
昭和 15(1940)年 10 月	農林省令第 87 号	用材配給統制規則		制定	木材の自由な流通が停止された
昭和 16(1941)年 3 月	法律第 66 号	木材統制法		制定	木材、製材業の営業が許可制となった
		木材統制法施行令		制定	
		木材統制法施行規則		制定	
昭和 16(1941)年 5 月 28 日	農林省告示第 321 号	用材規格規定		改正	広葉樹の追加等
昭和 18(1943)年 8 月 25 日	農林省告示第 469 号	用材規格規定		改正	規格品等の単純化
昭和 19(1944)年 8 月 9 日	内閣告示第 21 号	臨時日本標準規格第 532 号		制定	「建築物の荷重」
		臨時日本標準規格第 533 号		制定	「建築物強度計算の基本」市街地建築物法に代わり適用、許容応力度の大幅な増加
昭和 22(1947)年 11 月 28 日	内閣告示第 22 号	木構造計算規程		発行	日本建築学会、「各種構造計算規程」内
昭和 23(1948)年 4 月 30 日	商工省・建設院告示第 1 号	日本建築規格・建築 3001「建築物の構造計算」		制定	臨時日本標準規格第 532、533 号を再検討して一本化
昭和 24(1949)年 3 月 10 日		木構造計算規程・同解説		発行	日本建築学会、附 木造学校建築物の構造計算
昭和 25(1950)年 5 月 11 日	法律第 175 号	農林物資規格法		制定	JAS 法。指定農林物資検査法に代わるもの
昭和 25(1950)年 5 月 24 日	法律第 201 号	建築基準法		制定	市街地建築物法に代わるもの
昭和 25(1950)年 11 月 16 日	政令第 338 号	建築基準法施行令		制定	第 89 条に針葉樹 3 樹種群、広葉樹 3 樹種群の許容応力度が設定
昭和 28(1953)年 11 月 10 日	農林省告示第 769 号	用材の日本農林規格		制定	農林物資規格法に基づき制定
昭和 33(1958)年 12 月 15 日		木材工業ハンドブック		発行	林業試験場
昭和 34(1959)年 12 月 4 日	政令第 344 号	建築基準法施行令の一部を改正する政令		改正	針葉樹 2 樹種群、広葉樹 2 樹種群への圧縮
昭和 35(1960)年 7 月 30 日	農林省告示第 694 号	用材の日本農林規格		制定	尺貫法からメートル法への変換
				制定	生産、流通、消費の動向に即した規格に改め制定
昭和 36(1961)年 1 月 10 日			木構造設計規程・同解説	発行	日本建築学会
				制定	構造用木材を普通構造材と上級構造材に分け、それぞれに許容応力度等を設定
昭和 42(1967)年 12 月 8 日	農林省告示第 1842 号	製材の日本農林規格		制定	用材の JAS が素材の JAS と製材の JAS に区分
昭和 47(1972)年 10 月 14 日	農林省告示第 1892 号	製材の日本農林規格		改正	全面的改正。針葉樹の製材に強度面からの等級付けをし、特等、1 等、2 等とした
昭和 48(1973)年 1 月 15 日			木材工業ハンドブック	発行	林業試験場、新版(第 2 版)
昭和 48(1973)年 4 月 25 日			木構造設計規程・同解説	発行	日本建築学会、スプルーソの許容応力度を追加
昭和 49(1974)年 7 月 8 日	農林省告示第 600 号	枠組壁工法構造用製材の日本農林規格		制定	枠組壁工法技術基準に先立ち制定
昭和 49(1974)年 7 月 27 日	建設省告示第 1019 号	枠組壁工法技術基準		制定	枠組壁工法のオープン化
昭和 55(1980)年 7 月 14 日	政令第 196 号	建築基準法施行令		改正	新耐震基準、針葉樹の樹種群が 4 群へ一部樹種の $\sigma_c$ が低くなった他はやや大きな許容応力度へ改正
昭和 55(1980)年 12 月 1 日	建設省告示第 1799 号	木材のめり込み及び圧縮材の座屈の許容応力度等を定める件		制定	政令第 196 号で削除されていた木材のめり込み及び圧縮材の座屈の許容応力度を設定
昭和 57(1982)年 6 月 30 日			木材工業ハンドブック	発行	林業試験場、改訂 3 版
昭和 60(1985)年 4 月 5 日			ティンバーエンジニアリング読本 一本質構造建築のすべて	発行	木質構造研究会
昭和 62(1987)年 10 月 6 日	政令第 348 号	建築基準法施行令		改正	第 89 条の木材の許容応力度の改正。縦引張り強度が油
昭和 63(1988)年 11 月 1 日			木構造計算規程・同解説	発行	日本建築学会

Table 38. 製材に関する主な関連規格および関連書籍(つづき)

公布日等	番号等	JAS 規格関連	建築規格関連	関連書籍	内容	概要
昭和 63(1988)年 11 月 25 日				木質構造建築読本 ティンバーエンジニアリングのすべて	発行	木質構造研究会
平成 3(1991)年 1 月 31 日	農林水産省告示第 143 号	針葉樹の構造用製材の日本農林規格			制定	用途別規格、寸法の規定化、乾燥区分、強度等級区分等の設定
平成 3(1991)年 5 月 27 日	農林水産省告示第 701 号	枠組壁工法構造用たて継ぎ材の日本農林規格			制定	第 1 回 IAS 技術委員会における要請に応えたもの
平成 3(1991)年 5 月 27 日	農林水産省告示第 702 号	機械による曲げ応力等級区分を行う枠組壁工法構造用製材の日本農林規格			制定	第 1 回 IAS 技術委員会における要請に応えたもの
平成 4(1992)年 1 月 31 日	建設省住指発第 16 号 建設省住指発第 120 号 建設省住宅局建築指導課長通知	針葉樹の構造用製材の取扱いについて			通達	針葉樹の構造用製材の日本農林規格に適合する許容応力度を設定
平成 4(1992)年 4 月 7 日	建設省住宅局建築指導課長通知	枠組壁工法の技術的基準の運用について			通知	たて継ぎ材、MSR 製材、LVL の許容応力度を設定
平成 7(1995)年 1 月 25 日	建設省住指発第 195 号 建設省住宅局建築指導課長通達	針葉樹の構造用製材の取扱いについて			発行	日本建築学会。第 2 版
平成 8(1996)年 5 月 23 日	建設省住指発第 960 号	枠組壁工法技術基準			通達	目視等級区分・機械等級区分製材の許容応力度の欄種の追加と目視等級区分製材の 3 級を追加
平成 9(1997)年 3 月 28 日	建設省告示第 960 号	枠組壁工法技術基準			改正	性能規定化に先行対応して構造計算規定の整備
平成 9(1997)年 5 月 30 日	建設省住指発第 255 号 建設省住宅局建築指導課長通知	建築基準法			通知	許容応力度の低減、寸法効果係数の追加
平成 10(1998)年 6 月 12 日	法律第 100 号	建築基準法			改正	昭和 25 年以後の抜本的改革。性能規定化
平成 12(2000)年 4 月 26 日	政令第 211 号	建築基準法施行令			改正	第 89 条(許容応力度)、第 95 条(材料強度)を数式に改正
平成 12(2000)年 5 月 31 日	建設省告示第 1452 号	木材の基準強度Fc、Ft、Fb 及びFs を定める件			制定	針葉樹の構造用製材、枠組壁工法構造用製材、無等級材等の基準強度の設定
平成 13(2001)年 6 月 12 日	建設省告示第 1024 号	特殊な許容応力度及び特殊な材料強度を定める件			制定	木材のめり込み及び木材の圧縮材の座屈の許容応力度の設定
平成 14(2002)年 10 月 20 日	建設省告示第 1024 号	特殊な許容応力度及び特殊な材料強度を定める件			発行	日本建築学会。第 3 版。許容応力度と弾性係数の改定
平成 16(2004)年 3 月 30 日	建設省告示第 1024 号	特殊な許容応力度及び特殊な材料強度を定める件			発行	森林総合研究所。改訂 4 版
平成 18(2006)年 12 月 1 日	建設省告示第 1024 号	特殊な許容応力度及び特殊な材料強度を定める件			発行	日本建築学会。第 4 版。接合部の改定
平成 19(2007)年 8 月 29 日	農林水産省告示第 1083 号	製材の日本農林規格			制定	7 つの規格を統合。たいこ材、円柱類の追加
平成 19(2007)年 11 月 27 日	国土交通省告示第 1524 号				改正	円柱類の追加
国土交通省告示第 1525 号					改正	円柱類の追加
平成 20(2008)年 2 月 8 日	国土交通省告示第 117 号				改正	積雪時のめり込みの許容応力度の改正
平成 24(2012)年 6 月 5 日				新・木質構造建築読本 ティンバーエンジニアリングの実践と展開	発行	木質構造研究会
平成 25(2013)年 6 月 12 日	農林水産省告示第 1920 号	製材の日本農林規格			改正	天然乾燥処理の追加等
平成 27(2015)年 3 月 9 日	農林水産省告示第 512 号	枠組壁工法構造用製材及び枠組壁工法構造用たて継ぎ材の日本農林規格			改正	2 つの規格を統合。MSR たる継ぎ材の追加等
平成 27(2015)年 6 月 30 日	国土交通省告示第 816 号				改正	JSI、JSII、JSIII の基準強度の追加等
					改正	JSI、JSII、JSIII の基準強度の追加等
平成 27(2015)年 8 月 4 日	国土交通省告示第 910 号				改正	寸法型式の追加、ベイヒバの追加等

# History of sawn lumber standards and allowable stresses in Japan

Hirofumi IDO<sup>1)\*</sup>

## Abstract

Nationwide standards about sawn lumber and allowable stresses have improved since the Meiji era in Japan. These standards and allowable stresses were inherited through a large number of establishments and amendments. However, the background and basis of values in many standards and allowable stresses remain unclear or unknown. This paper aims to discuss the history and basis of sawn lumber standards and allowable stresses in Japan.

**Key words:** standard, sawn lumber, allowable stress, history

---

Received 19 May 2017, Accepted 19 September 2017

1) Department of Wood Engineering, Forestry and Forest Products Research Institute (FFPRI)

\* Department of Wood Engineering, FFPRI, 1 Matsunosato, Tsukuba, Ibaraki, 305-8687 JAPAN; e-mail: ido@ffpri.affrc.go.jp



---

**論文 (Original article)**

---

## Chemical characterization and efficient extraction of condensed tannin from the bark of juvenile *Salix* species

Rei MAKINO<sup>1)\*</sup> and Koh HASHIDA<sup>1)</sup>

### Abstract

Short-rotation harvesting of *Salix* species has been studied for potential biomass resources because of their great bud flush. The chemical characteristics and extractability of bark extractives, especially condensed tannin, from 1-2- and 3-5-year-old *Salix pet-susu* and *Salix sachalinensis* trees were investigated. Among the results, the yields of 70% acetone aqueous extractives from the bark of *S. pet-susu* and *S. sachalinensis* were 29.0% and 25.8% (based on oven dried bark), respectively; and the tannin polymer contents of the extractives of *S. pet-susu* and *S. sachalinensis* were 43.4% and 39.4% (based on 70% acetone aqueous extractives), respectively. The chemical characteristics of the tannin polymers were determined by <sup>13</sup>C-NMR, Py-GC/MS, and GPC analyses, and the tannins of *S. pet-susu* and *S. sachalinensis* consisted mainly of procyanidin and prodelphinidin. The approximate degree of polymerization was calculated as 6 (*S. pet-susu*) and 5 (*S. sachalinensis*). From the results of total extractives with water extraction at various temperatures, and with organic solvent extraction, the highest yields of total extractives and total polyphenols were obtained with 100 °C water extraction. On the other hand, those of total flavanols were observed with 70% acetone extraction. In order to consider an alternative treatment for debarking and grinding treatment, crush treatment was conducted, and the results indicated that such treatment raised the yields of total extractives, total polyphenols, and total flavanols to those from powder form. Additionally, it is evident that a 2-hour extraction time was the most effective to obtain condensed tannin from the crushed sample of *S. sachalinensis* and a 1-hour extraction time was adequate in the case of *S. pet-susu*. Based on the results, we conclude that short-rotation harvested *Salix* trees are potentially valuable natural resources for useful chemicals, especially condensed tannin.

**Key words:** bark, condensed tannin, juvenile *Salix* species, crush pretreatment

### 1. Introduction

*Salices* are fast growing tree species, with advantages for biomass production because of their great bud flush. Recently, short-rotation harvesting of *Salix* species has been investigated for potential biomass resources, such as fuel wood materials and raw materials for pulp and bioethanol production (Willebrand et al. 1993, Kopp et al. 2001, Sassner et al. 2008). In Japan, short-rotation plantation has been carried out using *Salix pet-susu* and *Salix sachalinensis* in Hokkaido and the harvesting is performed in 3 years cycle (Utsugi et al. 2015). Since *Salix pet-susu* and *Salix sachalinensis* are widely distributed from upstream to downstream along the river in Hokkaido, the short-rotation plantation is possible to be carried out in various site locations. For efficiency concerning cultivation, these tree species are harvested in less than 5 years, and the standard felling age in Hokkaido is politically set to 5 years (Hokkaido government 2017). Therefore, it is important to make clear the characteristics of juvenile *Salix* species for usage of these species in Hokkaido (Orihashi et al. 2014).

The bark of the *Salix* species is well known to contain a variety of useful compounds, including salicin, salicylates, polyphenols, and cinnamic acid derivatives (Pearl and Darling 1970, Kammerer et al. 2005, Forster et al. 2010). Some *Salix* species such as *Salix rorida* contain rich amounts of condensed tannin in the bark (Ohara and Yanagi 1995). Condensed tannin has various useful properties, such as antioxidant activity (Rice-Evans et al. 1996, Yokozawa et al. 1998, Kahkonen et al. 1999), antiherbivore activity (Ayres et al. 1997), antifeedant activity (Ohmura et al. 2000) and antimicrobial activity (Scalbert 1991). Little study has been done on bark extractives from juvenile trees, including short-rotation *Salix* species. Therefore, it is important to characterize bark extractives from juvenile trees of the *Salix* species, with an eye to promoting the utilization of extractives with high added value. In this study, the amounts and chemical characteristics of bark extractives (in particular, condensed tannin) of juvenile *Salix* species, and the extractability of condensed tannins under various conditions, were investigated.

---

Received 8 June 2017, Accepted 2 October 2017

<sup>1)</sup> Department of Forest Resource Chemistry, Forestry and Forest Products Research Institute (FFPRI)

\* Department of Forest Resource Chemistry, FFPRI, Matsunosato 1, Tsukuba, Ibaraki, 305-8687 JAPAN; e-mail: remak@ffpri.affrc.go.jp

## 2. Materials and methods

### 2.1 Plant materials

Bark samples were collected from *Salix pet-susu* and *Salix sachalinensis* grown in Hokkaido. Branches of these *Salix* trees were separated into 1-2-year-old and 3-5-year-old groups. The bark samples were air-dried, ground in a cutting mill, and passed through a 2 mm mesh.

### 2.2 Extraction and purification of condensed tannin polymers

Condensed tannin polymers were prepared according to Ohara et al. (1994). Milled samples (10 g) were extracted four times with 200 ml of 70% acetone aqueous solution at room temperature for 6-12 hours, and the extractives were recovered by centrifugation. Then, acetone was removed on a rotary evaporator, and the solutions were freeze-dried to produce the corresponding 70% acetone extractives.

The portion of 70% acetone extractives was dissolved in water and extracted successively with *n*-hexane and ethyl acetate (EtOAc). The EtOAc-soluble fractions were dried on a rotary evaporator to yield EtOAc extractives. The water-soluble portion was freeze-dried, then dissolved in 50% methanol aqueous solution, and applied to a Sephadex LH20 column. The column was eluted with 50% methanol aqueous solution until the eluate was colorless, and then eluted with 50% acetone aqueous solution. The 50% acetone eluate was evaporated and freeze-dried to obtain tannin polymers (Fig. 1).

### 2.3 Characterization of condensed tannin polymers

**<sup>13</sup>C-NMR spectra** <sup>13</sup>C-NMR spectra were recorded on an ALPHA-500 spectrometer (JEOL, Japan) using acetone-*d*<sub>6</sub>-D<sub>2</sub>O (9/1, v/v) as a solvent.

**Pyrolysis-GC/MS analysis (Py-GC/MS)** Py-GC/MS analysis was performed with a Curie-point pyrolyzer (JHP-3, Japan Analytical Industry, Japan). Py temperature: 500°C; time: 4 s. The pyrolyzer was interfaced (interface temperature 270°C) with a GC/MS system consisting of a Shimadzu GC-17A and

QP5000 (Shimadzu, Japan) operating under the conditions as reported by Ohara et al. (2003). The molar ratios of pyrogallol type B-ring to catechol type B-ring was calculated according to the following equation:

$$\text{Pyrogallol/catechol} = \frac{[\text{pyrogallol yield (mol)} + 5\text{-methypyrogallol yield (mol)}]}{[\text{catechol yield (mol)} + 4\text{-methylcatechol yield (mol)}]}$$

### Gel permeation chromatography (GPC) analysis

Condensed tannin polymers were acetylated with pyridine-acetic anhydride (1/1, v/v) at room temperature. The average molecular weights of the acetyl derivatives were measured by GPC analysis. GPC analysis was performed with a LC-VP HPLC system (Shimadzu, Japan). Analysis conditions: column, Shodex KF-802, KF-803, KF804 column (i.d. 8 mm x 300 mm, Showa denko, Japan); column temperature, 40 °C; mobile phase, THF; flow rate, 1 ml min<sup>-1</sup>; detection, UV absorbance at 280 nm; molecular weight standards, polystyrenes.

### 2.4 Water extraction

Milled samples (1 g) were extracted with 200 ml of water at 25, 50, 80, and 100 °C, in a reflux condenser for three hours. The extractives were then recovered by filtration through a 1G3 glass filter. The total amount of extractives was determined by weighing the freeze-dried filtrate. The filtrate was used as the test solution for quantitative analyses of total polyphenols and total flavanols.

### 2.5 Organic solvent extraction

Milled samples (1 g) were extracted with 200 ml of 70% acetone or 50% ethanol aqueous solution at room temperature for three hours. The extractives were then recovered using the same procedure as in water extraction, and the filtrate was used for quantitative analyses.

### 2.6 Total polyphenols and flavanols in extractives

Total polyphenols and flavanols in the extractives were determined according to the Folin-Ciocalteu method (Julkunen

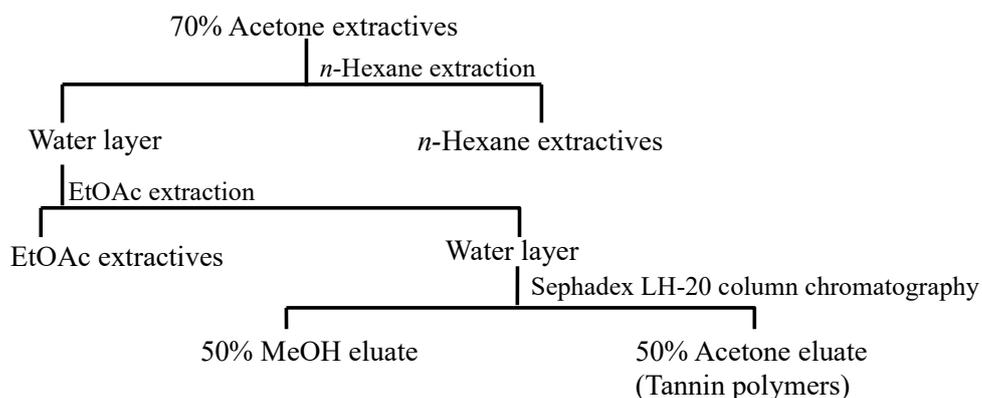


Fig. 1. Purification of tannin polymers



**Fig. 2.** Untreated, crushed, and ground branch samples of 1-2-year-old *Salix* species

1985) and the vanillin-HCl method (Broadhurst and Jones 1978), respectively. The calibration curve was determined using catechin as the standard sample. The experiment was carried out in duplicate.

### 2.7 Crush treatment of branch as a pre-treatment for extraction

The branch samples with bark of 1-2-year-old *Salix* species were cut into a 3-cm length chip and then beaten with a hammer, or ground in a Wiley mill to pass through a 2 mm pass (Fig. 2). Three grams of the sample were added to 200 ml of water. Then 100 °C water extraction was performed for three hours.

## 3. Results and discussion

### 3.1 Chemical characteristics of condensed tannin in bark of *Salix pet-susu* and *Salix sachalinensis*

As is seen in Table 1, the yields of 70% acetone aqueous extractives from the bark of *S. pet-susu* and *S. sachalinensis* were 29.0% and 25.8%, respectively. The yields of 70% acetone aqueous extractives from benzene extracted barks of four Japanese *Salix* species varied between 27.2% and

34.9% (Ohara and Yanagi 1995). In the present study, the 70% acetone aqueous extractives from juvenile trees of the *Salix* species showed a similar range to reported amounts. The tannin polymer contents of these extractives from *S. pet-susu* and *S. sachalinensis* were 43.4% and 39.4%, respectively. The yields of EtOAc extractives, which contain mainly low-molecular weight polyphenols, from *S. pet-susu* and *S. sachalinensis* were 15.0% and 16.0%, respectively. The two studied *Salix* species contained higher amounts of tannin polymers than the amounts of low-molecular weight polyphenols. From the results of 50% methanol eluates, *S. pet-susu* and *S. sachalinensis* can be assumed to contain high amounts of sugar and glycosides as well as the amounts of condensed tannin.

The chemical characteristics of the tannin polymers were determined by <sup>13</sup>C-NMR, Py-GC/MS, and GPC analyses, and these results are listed in Table 2. Through comparison of the chemical shifts in the <sup>13</sup>C-NMR spectrum with corresponding data in the literature (Foo 1984, Ohara et al. 1994, Ohara and Yanagi 1995), the tannins of *S. pet-susu* and *S. sachalinensis* consisted mainly of procyanidin and prodelphinidin (Fig. 3). The molar ratios of pyrogallol type B-ring to catechol type B-ring of *S. pet-susu* and *S. sachalinensis* calculated by Py-GC/

**Table 1.** Yields of 70% acetone extractives from the bark of 3-5-year-old *Salix* species and fractionation of the extractives

Species	70% Acetone aqueous extractives <sup>a</sup>	<i>n</i> -Hexane extractives <sup>b</sup>	EtOAc extractives <sup>b</sup>	50% MeOH eluates <sup>b</sup>	Tannin polymers <sup>b</sup>
			(%)		
<i>S. pet-susu</i>	29.0	1.7	15.0	42.2	43.4
<i>S. sachalinensis</i>	25.8	1.5	16.0	43.6	39.4

<sup>a</sup> % based on the oven-dried bark

<sup>b</sup> % based on the 70% acetone aqueous extractives

**Table 2.** Abundant structures of condensed tannin polymers, ratio of pyrogallol type B-ring to catechol type B-ring, and average molecular weight of their acetates

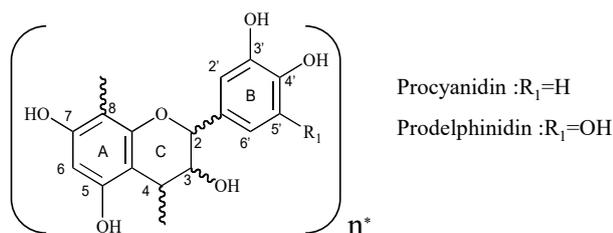
Species	Abundant proanthocyanidins <sup>a</sup>	P/C <sup>b</sup>	Mn <sup>c</sup>	Mw <sup>d</sup>	Mw/Mn
<i>S. pet-susu</i>	Procyanidin and prodelphinidin	1.1	3200	8000	2.5
<i>S. sachalinensis</i>	Procyanidin and prodelphinidin	0.9	2600	7900	3.0

<sup>a</sup> Determined by <sup>13</sup>C-NMR spectroscopy

<sup>b</sup> [pyrogallol yield (mol)+ 5-methylpyrogallol yield (mol)]/[catechol yield (mol)+ 4-methylcatechol yield (mol)] determined by Py-GC/MS

<sup>c</sup> Number-average molecular weight of acetylated tannin polymers

<sup>d</sup> Weight-average molecular weight of acetylated tannin polymers



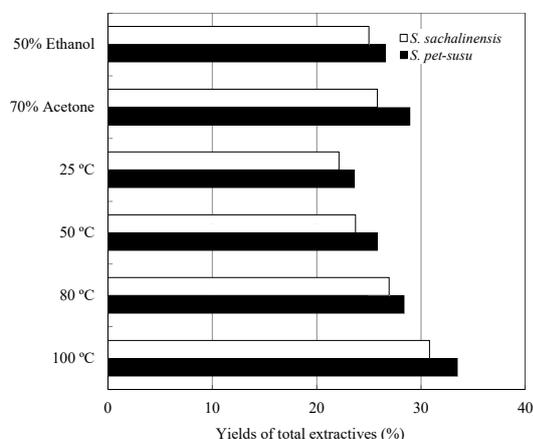
\*n: the number of repeating unit

**Fig. 3. Chemical structure of condensed tannin from bark of *Salix* species**

MS were 1.1 and 0.9, respectively, indicating that the relative abundance of pyrogallol type B-ring and catechol-type B-ring is almost the same. The characteristics of the tannin polymers obtained by Py-GC/MS were consistent with those obtained by <sup>13</sup>C-NMR spectroscopy. From the results of GPC analysis of the acetylated tannins, the approximate degree of polymerization can be calculated as 6 (*S. pet-susu*) and 5 (*S. sachalinensis*). The dispersivity (Mw/Mn) of *S. pet-susu* was close to that of *S. sachalinensis*, and their Mw/Mn values show a larger molecular weight distribution than that of *Salix rorida* (Liu et al 2008).

### 3.2 Water extraction at various temperatures

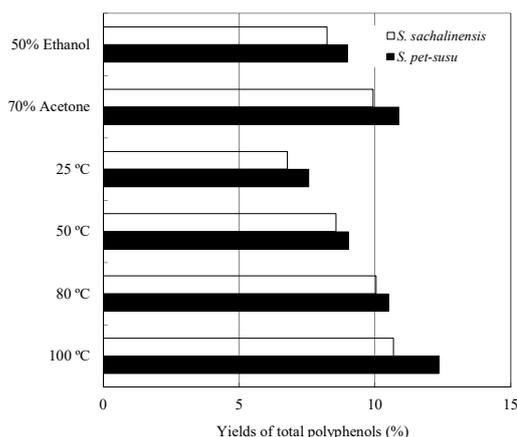
In the present extraction conditions (Fig. 4), the yields of total extractives of *S. pet-susu* and *S. sachalinensis* were similar, at 22.1-33.5%. The yields of total extractives with water extraction depended on the extraction temperature. The highest yields of total extractives were obtained with 100 °C water extraction: 33.5% and 30.8% for *S. pet-susu* and *S. sachalinensis*, respectively. In the case of organic solvent extraction, the yields of total extractives with 70% acetone were slightly higher than those with 50% ethanol, for both *Salix* species. Extraction with 70% acetone was effective



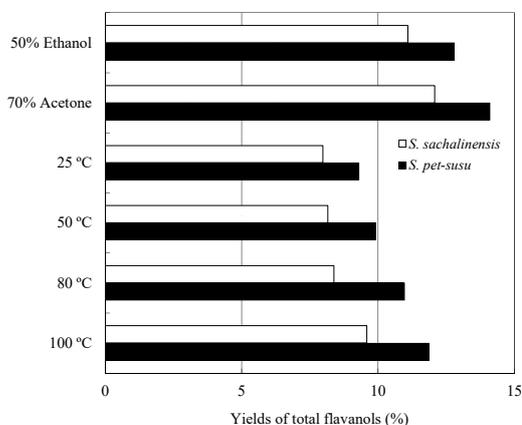
**Fig. 4. Yields of total extractives with water extraction and organic solvent extraction from bark of 3-5-year-old *Salix* species**

for obtaining tannin (Ohara et al. 1994), while ethanol is considered preferable for food utilization due to its safety for humans. The yields of organic solvent extractives were similar or less than those of 80 °C water extraction. Therefore, 100 °C water extraction was found to be most effective for the juvenile trees of the *Salix* species.

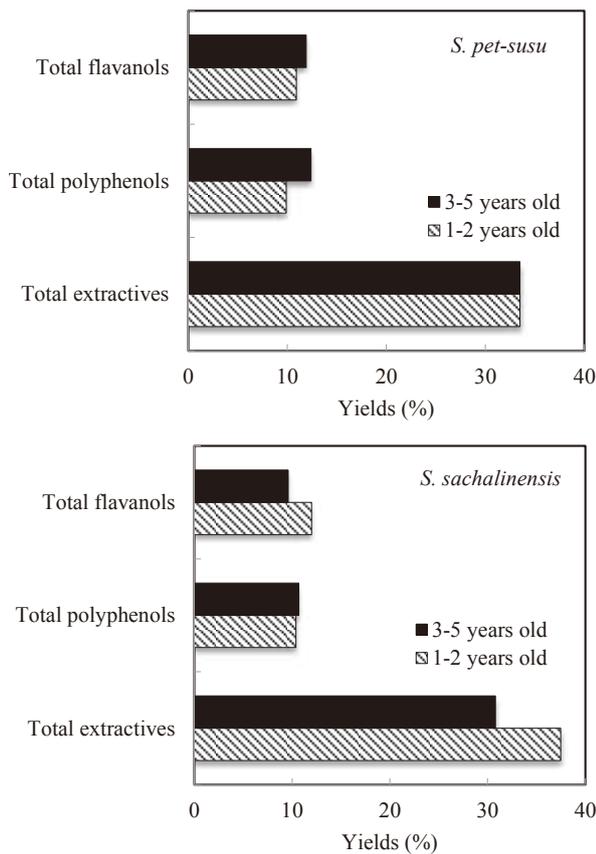
Like the yields of total extractives, the yields of polyphenols depended on the extraction temperature (Fig. 5). The highest yields of total polyphenols were obtained with 100 °C water extraction: 12.4% and 10.7% for *S. pet-susu* and *S. sachalinensis*, respectively. In contrast to the results for total extractives and total polyphenols, the highest yields of total flavanols were obtained with 70% acetone extraction: 14.1% and 12.1% for *S. pet-susu* and *S. sachalinensis*, respectively (Fig. 6). However, the overall extraction results for total flavanols and total polyphenols were similar to each other. Therefore, it is suggested that the polyphenols consist mainly of flavanol units such as condensed tannin. Next, 100 °C water extractives for the two tree-age ranges were examined.



**Fig. 5. Yields of total polyphenols with water extraction and organic solvent extraction from bark of 3-5-year-old *Salix* species**



**Fig. 6. Yields of total flavanols with water extraction and organic solvent extraction from bark of 3-5-year-old *Salix* species**

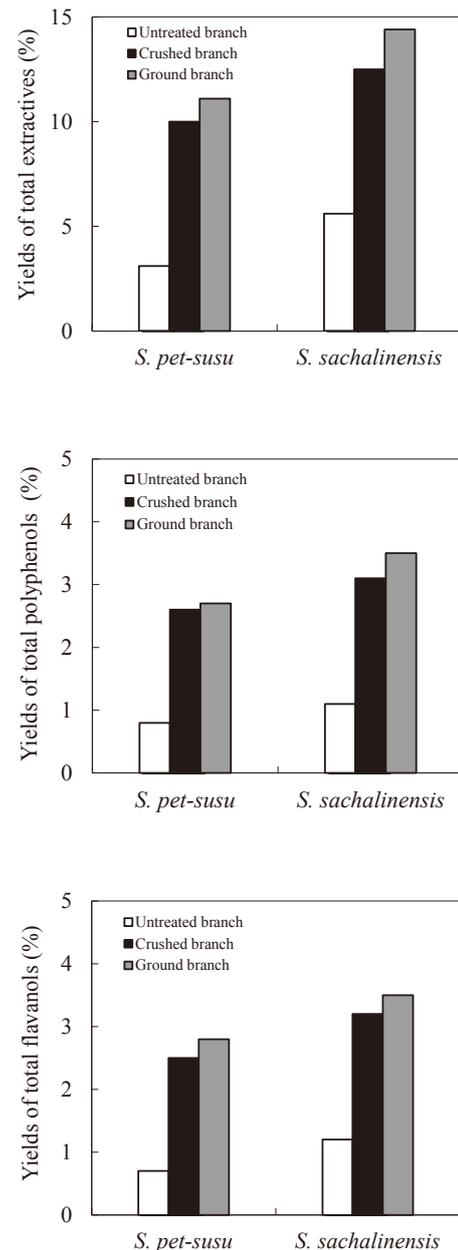


**Fig. 7. Yields of total extractives, total polyphenols, and total flavanols obtained from different tree-age samples with 100°C hot-water extraction**

The results for both species showed that the yields of total extractives, total polyphenols, and total flavanols were similar for samples with less than six years of growth (Fig. 7).

### 3.3 Efficiency of crush treatment for extraction

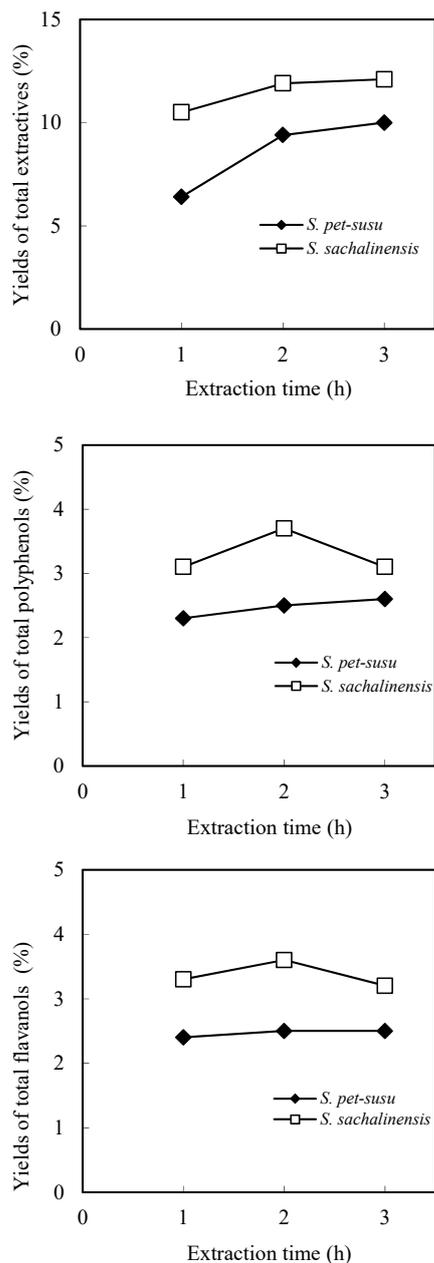
The extractability of the extractives with crush treatment was examined. The yields of 100°C water extractives from untreated, crushed, and ground branch samples are shown in Fig. 8. The yields of total extractives from ground samples of *S. pet-susu* and *S. sachalinensis* were 11.1% and 14.4%, respectively; and the yields from untreated samples of the two species were very low. On the other hand, the yields from crushed samples were 10% and 12.5%, respectively, indicating that crush treatment raised the yields of the extractives to levels near those from powder form. In the same manner, the yields of total polyphenols and total flavanols from crushed samples and ground samples were broadly similar for *S. pet-susu* and *S. sachalinensis*. These results demonstrate that crush treatment has the advantage of obtaining condensed tannin, probably because the crushing helps the solvent penetrate more easily into the bark and wood. In addition, the effect of extraction time was examined for crushed samples (Fig. 9). The yields of total extractives for both *Salix* species showed the yields increased



**Fig. 8. Yields of total extractives, total polyphenols, and total flavanols obtained from untreated, crushed, and ground branch samples of 1-2-year-old *Salix* species with 100°C hot-water extraction**

from 1-hour to 2-hour extraction; however, little difference between 2-hour and 3-hour extraction. Although the yields of total polyphenols and flavanols for *S. sachalinensis* showed a slight increase with 2-hour extraction, those for *S. pet-susu* were roughly the same. Therefore, it is evident that a 2-hour extraction time was the most effective to obtain condensed tannin for *S. sachalinensis* and a 1-hour extraction time was adequate for *S. pet-susu*.

Based on the results of chemical characterization, extractives yields, and crush treatment efficiency, we conclude that short-rotation harvested *Salix* trees are a potentially



**Fig. 9. Yields of total extractives, total polyphenols, and total flavanols obtained from crushed branch samples of 1-2-year-old *Salix* species with 100°C hot water extraction for 1, 2, and 3 hours**

valuable natural resource for useful chemicals, especially condensed tannin; and the findings of this study may help to promote the utilization of high added-value extractives.

#### References

Ayres, M. P., Clausen, T. P., MacLean, S. F., Redman, A. M. and Richard, P. B. (1997) Diversity of structure and antiterbivore activity in condensed tannins. *Ecol.*, 78, 1696-1712.

Broadhurst, R. B. and Jones, W. T. (1978) Analysis of condensed tannins using acidified vanillin. *J. Sci. Fd.*

*Agric.*, 29, 788-794.

Foo, L. Y. (1984) Condensed tannins: co-occurrence of procyanidins, prodelphinidins and profisetinidins in the heartwood of *Acacia baileyana*. *Phytochem.*, 23, 2915-2918.

Forster, N., Ulrichs, C., Zander, M., Katzel, R. and Mewis, I. (2010) Factors influencing the variability of antioxidative phenolic glycosides in *Salix* species. *J. Agric. Food Chem.*, 58, 8205-8210.

Hokkaido government (2017) "Regional forest plans", <http://www.pref.hokkaido.lg.jp/sr/srk/sinrin/02-03keikakusyotokekomi.htm>, (accessed 2017\_05\_01).

Julkunen-Titto, R. (1985) Phenolic constituents in the leaves of northern willows: methods for the analysis of certain phenolics. *J. Agric. Food Chem.*, 33, 213-217.

Kahkonen, M. P., Hopia, A. I., Vuorela, H. J., Rauha, J. P., Pihlaja, K., Kujala, T. S. and Heinonen, M. (1999) Antioxidant activity of plant extracts containing phenolic compounds. *J. Agric. Food Chem.*, 47, 3954-3962.

Kammerer, B., Kahlich, R., Biegert, C., Gleiter, C. H. and Heide, L. (2005) HPLC-MS/MS analysis of willow bark extracts contained in pharmaceutical preparations. *Phytochem. Anal.*, 16, 470-478.

Kopp, R. F., Abrahamson, L. P., White, E. H., Volk, T. A., Nowak, C. A. and Fillhart, R. C. (2001) Willow biomass production during ten successive annual harvests. *Biomass Bioenergy.*, 20, 1-7.

Liu, J., Ando, R., Shimizu, K., Hashida, K., Makino, R., Ohara, S. and Kondo, R. (2008) Steroid 5 $\alpha$ -reductase inhibitory activity of condensed tannins from woody plants. *J. Wood Sci.*, 54, 68-75.

Ohara, S., Suzuki, K. and Ohira, T. (1994) Condensed tannins from *Acacia mearnsii* and their biological activities. *Mokuzai Gakkaishi*, 40, 1363-1374.

Ohara, S. and Yanagi, K. (1995) Polyphenols in *Salix* species I. polyphenols from the bark of *Salix rorida* Lackschewitz. *Mokuzai Gakkaishi*, 41, 406-413.

Ohara, S., Yasuda, Y. and Ohi, H. (2003) Structure elucidation of condensed tannins from barks by pyrolysis/gas chromatography. *Holzforschung*, 57, 145-149.

Ohmura, W., Doi, S., Aoyama, M. and Ohara, S. (2000) Antifeedant activity of flavonoids and related compounds against the subterranean termite *Coptotermes formosanus* Shiraki. *J. Wood Sci.*, 46, 149-153.

Orihashi, K., Akutsu, H., Fukuda, Y. and Yano, K. (2014) Study on selection of superior willow clones for production of energy and chemicals. *For. Tree Breed. Hokkaido.*, 56, 30-34.

Pearl, I. A. and Darling, S. F. (1970) Phenolic extractives of *Salix purpurea* bark. *Phytochem.*, 9, 1277-1281.

- Rice-Evans, C. A., Miller, N. J. and Paganga, G. (1996) Structure-antioxidant activity relationships of flavonoids and phenolic acids. *Free Radic. Biol. Med.*, 20, 933-956.
- Sassner, P., Galbe, M. and Zacchi, G. (2008) Techno-economic evaluation of bioethanol production from three different lignocellulosic materials. *Biomass Bioenergy*, 32, 422-430.
- Scalbert, A. (1991) Antimicrobial properties of tannins. *Phytochem.*, 30, 3875-3883.
- Utsugi, H., Matsui, T., Takahashi, M., Uemura, A., Harayama, H., Ito, E., Furuya, N., Ishihara, M., Sayama, M., Matsuura, Y. and Han, Q. (2015) The usage of *Salix* species for biomass energy in Hokkaido, Japan. *Boreal For. Res.*, 63, 15-17.
- Willebrand, E., Ledin, S. and Verwijst, T. (1993) Willow coppice systems in short rotation forestry: effects of plant spacing, rotation length and clonal composition on biomass production. *Biomass Bioenergy*, 4, 323-331.
- Yokozawa, T., Chen, C. P., Dong, E., Tanaka, T., Nonaka, G. and Nishioka, I. (1998) Study on the inhibitory effect of tannins and flavonoids against the 1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl radical. *Biochem. Pharmacol.*, 56, 213-222.

## 低樹齡ヤナギ属樹木の樹皮タンニンの化学特性及び効率的抽出法

牧野 礼<sup>1)\*</sup>、橋田 光<sup>1)</sup>

### 要旨

早生樹であるヤナギは、挿し木栽培が可能であり、萌芽再生能が高いことから、バイオマス資源としての利用が着目されている。ヤナギ樹皮には、ポリフェノール等の有用成分が多く含まれるため、エネルギー利用だけでなく、より高付加価値な利活用の可能性が考えられる。本研究では、低樹齡のエゾノキヌヤナギ及びオノエヤナギについて、樹皮タンニンの化学特性及び効率的抽出法を検討した。樹皮を70%アセトン水で抽出し、タンニンを精製した後、各種機器分析に供した。エゾノキヌヤナギ、オノエヤナギの樹皮に含まれる70%アセトン抽出物量は29.0%、25.8%であり、その中でタンニン量はそれぞれ43.4%、39.4%に達し、高いタンニン含有量であることが分かった。タンニンの主要構成単位は、procyanidin及びprodelphinidinであった。有機溶媒抽出と25-100℃の水抽出の抽出効率を比較した結果、100℃の水抽出で最も高い抽出物量及びポリフェノール量が得られ、水抽出で効率的に抽出物が得られることが分かった。また、抽出工程を簡便にするため、樹皮と木部を分別せず圧潰する処理を前処理として検討した。その結果、圧潰処理では、粉碎処理と同程度の抽出物量が得られた。低樹齡ヤナギ樹木では、圧潰処理を用いることで、樹皮付の試料で効率的に抽出成分を得られることが明らかになった。

キーワード：樹皮、タンニン、低樹齡ヤナギ属樹木、圧潰前処理

原稿受付：平成29年6月8日 原稿受理：平成29年10月2日

1) 森林総合研究所 森林資源化学研究領域

\* 森林総合研究所 森林資源化学研究領域 〒305-8687 茨城県つくば市松の里1

## 論文 (Original article)

# 指数平滑法と ARIMA 法予測の精度評価— スギとヒノキ丸太月次価格の予測を例に

道中 哲也<sup>1)\*</sup>、岡 裕泰<sup>1)</sup>、久保山 裕史<sup>1)</sup>、山本 伸幸<sup>1)</sup>

### 要旨

本研究では、2002年1月から2016年12月までの月次データを用いて、2010年1月から2016年12月までの期間において、指数平滑法とARIMA法によるスギとヒノキ中丸太の月次価格の予測精度を評価した。その結果、2つの予測手法に関しては、指数平滑法とARIMA法との間で誤差の大きさに有意な差がないことが判明した。また、予測期間が長くなると、予測精度が低くなるが、その関係について定量的に明らかにした。さらに、予測期間が8カ月以内の場合、指数平滑法とARIMA法予測の平均絶対誤差が価格変動の平均絶対変動額より小さいことを5%の有意水準で検出し、単純法予測より有効な予測手法だと言える。しかし、単純季節調整法予測の誤差と比べると、指数平滑法とARIMA法予測の平均絶対誤差が単純季節調整法予測より小さいことは、予測期間が2カ月以内のヒノキ価格予測の場合しか、5%の有意水準で検出されなかった。3カ月以上先の予測になると、単純季節調整法予測と比べて指数平滑法とARIMA法による予測は精度が高いとは言えないことが示唆された。

キーワード：丸太価格、予測精度、指数平滑法、ARIMA法、単純季節調整法、交差検証

### 1. はじめに

国内外の政治や経済、社会環境の変化、住宅建設などの関連産業の発展、消費傾向などの変化により、丸太月次価格は変動している。2008～09年の世界金融危機の影響で丸太価格が低下したこともあれば、2012年春の需給ミスマッチによる丸太価格下落もあった(遠藤 2013)。木造住宅のヒノキ利用における消費者ニーズの減少の影響で、ヒノキ丸太の価格の下落傾向が長年見られた一方、2013年末には消費税増税による駆け込み需要の影響で、丸太価格が高騰した時期もあった。丸太価格の不安定性は、森林所有者や素材生産事業者さらには製材工場の経営の継続性に大きく影響する。この不安定な価格の問題を解決するため、需給双方の協定価格の導入が多く見られた(堀 2011, 久保山 2011, 小池・興梠 2011, 多田 2012)。言うまでもなく、この協定価格は需給関係を無視するわけではなく、近い将来の需給状況を見通して決定される。適当な価格予測分析ができれば、素材生産業者も、木材加工業者も、将来の価格の変動について有益な情報を得て、協定価格の策定に重要な参考になるであろう。また、価格変動が正常な範囲を逸脱するまえに、事前対応を実施して、マイナスの影響を最小限にすることが重要である。原木価格の変動は需給関係を反映しているので、如何に原木価格の変動を把握して森林所有者や加工業者等の経営リスクを回避し、さらに多面的な機能を持つ森

林の持続可能な発展に貢献できるかが課題である。

木材価格変動に関する研究は、少なくとも1920年代に始まっていた(望月 1929)。木材価格の季節変動も注目されてきた(三井 1938, 森 1970, 松下・半田 1981, 行武 1981, 松下 1984, 行武ら 2004, 久保山・立花 2014等)。しかし、丸太価格の予測研究は少ない。もともと、商品の価格は需給関係に依存する。そして需給関係を統合した均衡モデルがいくつか構築されたが、その均衡モデルで価格を予測することは難しい。重回帰分析で、モデルを構築して、過去の価格変動を様々な要因に基づいて説明することはしばしば行われている。しかし過去の変動の説明に使った各関連の要素の将来値を予測すること自体が難しいので、過去の価格変動要因を反映したモデルを使っても、精度の高い価格予測結果を得ることが難しい。一方で、価格を予測する際に、価格だけを分析対象として、1変量(単変量)時系列分析を行うことによって、ある程度の予測結果を得ることが可能である。森(1970)は木材価格変動を傾向変動、季節変動、循環変動、不規則変動に分解し、再びそれぞれ原系列変動に還元することで価格変動の予測を提示した。行武ら(2004)はARIMA法を用いて九州の民間2市場の木材価格の予測を行なった。Michinaka et al. (2016)は指数平滑法とARIMA法を用いて、スギ、ヒノキ、カラマツ中丸太の月次価格の予測を行なった。しかしながら、丸太の月次価格の予

原稿受付：平成29年6月16日 原稿受理：平成29年11月10日

1) 森林総合研究所 林業経営・政策研究領域

\* 森林総合研究所 林業経営・政策研究領域 〒305-8687 茨城県つくば市松の里1

測において、そこまでの先行研究に見られなかった指数平滑法と ARIMA 法の予測精度の評価に関しては、Michinaka et al. (2016) は、1 カ月から 12 カ月までの予測期間において、それぞれ 10 回の予測を行って予測精度を評価したが、予測精度の評価は十分とは言えない。本研究では、2002 年 1 月から 2016 年 12 月までのスギとヒノキ中丸太月次名目価格データを用いて、指数平滑法と ARIMA 法でのスギとヒノキ丸太の月次価格の予測精度を評価することを目的とする。

本論文は全 6 節からなる。第 2 節では研究対象とデータについて述べる。第 3 節では時系列データの分解手法の紹介のあと、STL 分解法を用いて、スギとヒノキ中丸太の月次価格の季節変動、傾向変動、循環変動、不規則変動について分析を行う。第 4 節では時系列データ予測の主要な手法である予測指数平滑法と ARIMA 法を用いてスギとヒノキ月次価格の予測を行う。第 5 節ではトレーニングデータを用いて予測を行って予測結果をテストデータと比べて予測精度を評価する。最後、第 6 節では全体のまとめと考察を行う。

## 2. 研究対象とデータ

時間の順序に従って並べられた観察値の列を時系列という(竹内 1989)。自然現象に関する時系列もあるし、社会経済現象に関する時系列もある。本研究の対象となる丸太価格は、農林水産省のホームページで、毎月 5 日ごろに公表される前月の木材価格統計調査結果の月次時系列価格である(農林水産省 2017)。具体的には、製材用の国産材スギとヒノキの中丸太(材長 3.65 ~ 4.0m、直径 14 ~ 22cm、A 材 B 材など区分なし、全国加重平均値)を研究対象とする。対象期間は 2002 年 1 月から 2016 年 12 月までの 15 年間の 180 カ月である。対象期間における物価水準の変動が小さいので、実質化せずに、月次名目価格を用いる。この期間は、2002 年に素材生産量と木材自給率が最低水準になったあと、徐々に回復してきた時期にあたる。

## 3. 時系列データの分解

時系列データの変動は、傾向変動(趨勢変動、トレンド)、循環変動(サイクル)、季節変動、不規則変動からなる(森 1970, 廣松ら 2006 等)。傾向変動は長期的な上昇または下降の傾向であって、直線的あるいは滑らかに推移する性質の変動である。短期的な趨勢で 1 年以内にほとんど消えてしまうような変動もある。循環変動は、景気循環によって傾向変動のまわりで上昇、下降を繰り返すものである。循環変動の周期は固定的ではなく変化するが、一般的に 2 年以上とされている(Hyndman and Athanasopoulos 2013)。季節変動は季節的に上昇、下降を繰り返すパターンを持っている。季節性がある月次データの場合は、月ごとに変動の特徴がある。この季節変動は、天候だけではなく、

社会経済活動の季節性にもかかわっている。最後に、不規則変動がある。傾向変動、循環変動、季節変動で説明しえない変動は、不規則変動であって、ランダム変動である。一般的には、原データを  $y_t$  に、傾向変動を  $T_t$  に、循環変動を  $C_t$  に、季節変動を  $S_t$  に、不規則変動を  $E_t$  にすれば、下記の加法式または乗法式で表すことができる:

$$\text{加法式: } y_t = T_t + C_t + S_t + E_t; \text{ あるいは、} y_t = T_t + S_t + E_t; \quad (1)$$

$$\text{乗法式: } y_t = T_t \times C_t \times S_t \times E_t; \text{ あるいは、} y_t = T_t \times S_t \times E_t; \quad (2)$$

長期的な傾向を示す傾向変動なのか、景気循環による循環変動なのか、分析対象の時系列データの長さによって判別しにくい場合がある。傾向変動と循環変動を区別することが難しい場合には、循環変動と傾向変動を一緒に考えることが多い(Hyndman and Athanasopoulos 2013)。時系列データの分解には、加法式か、乗法式かを、時系列データの変動性によって選ぶことができる。

時系列データの分解の手法は、米国センサス局の X-13ARIMA-SEATS 法、日本の EPA 法と DECOMP 法、ヨーロッパの TRAMO-SEATS 法などが挙げられる。木材価格の変動分析の先行事例として、三井(1938)は Link-relatives 法を用いて、1928 年から 1933 年までの木材価格の季節変動指数を算出した。行武(1981)は木材価格の変動分析には EPA 法を用いた。松下(1984)はスペクトル分解の MEM 法を用いて製材・木製品価格などについて分析を行った。久保山(2012)と久保山・立花(2014)はセンサス局 I 法を用いて、全国平均のスギとヒノキ中丸太価格及び秋田スギ、宮崎スギ、宮崎ヒノキ、岡山ヒノキ中丸太価格分析を行った。林・立花(2013)は木材価格に対して、X-13ARIMA-SEATS 法を用いて分析を行ったあと、林・立花(2016)は、北川源四郎が開発した DECOMP を用いて、11 種の丸太と製材品の月次価格に対してトレンド、定常 AR 成分、季節成分及び、定常 AR 成分と季節成分における類似性を分析した。本研究においては、Cleveland et al. (1990)が開発した STL 法でスギとヒノキ中丸太の月次価格変動を分析する。STL は、Seasonal and Trend decomposition using Loess の省略である。移動平均だけでなく、非線形関係を扱う Loess 法(局所的に重み付けされた平滑化)(Cleveland 1979)も導入している。STL 法は、他の分解法と比べて、四半期や月次以外の時系列データの分解もできるし、移動平均計算のスパンの調整によって季節変動と傾向(循環)変動の平滑化も実現できる(Hyndman and Athanasopoulos 2013)。STL 法は、曜日効果・祝日効果などの分析はできないが、木材価格の分析においては、曜日効果・祝日効果など

Table 1. STL 法で得た月次丸太価格の季節変動

Seasonal component of monthly prices of logs by STL decomposition												単位:円
	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
スギ	329	213	56	-70	-276	-522	-568	-286	50	305	401	368
ヒノキ	883	654	85	-401	-780	-1,134	-960	-397	101	589	658	702

注: 12カ月の季節変動の合計がゼロ円になる。ただし、年度間季節変動の幅の変動が許されれば、連続の12カ月の季節変動の合計がゼロ円にならない場合がある。

の影響はわずかであろう(林・立花 2013)。

R 言語の *stl* 関数で時系列データの分解ができる(R Core Team 2016, 道中・久保山 2015)。本研究では、年度間季節変動の幅が変わらないこととし、傾向変動(循環変動を含む)抽出のスパンをデフォルト値とし、加法式で分解を行った。分解の結果の季節変動が Table 1 に示される。スギ丸太価格の季節変動を見ると、7月の-568円が最低で、その後上がって11月の401円が最高になっており、変動の幅が969円ほどであった。ヒノキの場合は、6月の-1,134円が最低で、1月の883円が最高となっており、変動の幅は2,017円であった。加法式分解のため、季節変動の幅はそのまま金額で示される(乗法式なら、パーセンテージで表されることが多い)。

次に、傾向変動を見よう。Fig.1の黒い線は、それぞれスギとヒノキ中丸太月次価格の原時系列データの推移である。赤の線は STL 法の分解で得た傾向変動(循環変動も含む)である。この傾向変動の結果は、実際の価格変動に合っているので、平滑化の強度が適当だと判断される。谷や山の存在は、循環変動があることを示している。スギの場合は、2010年ごろまで下降傾向が見られるが、2013年10月から消費税増税による駆け込み需要が生じた後、上昇の傾向が見られる。ヒノキの場合は、下降の傾向が続いていたが、2015年から下降の傾向に歯止めがかかったように見える。スギとヒノキの価格の上下のタイミングは近い。これは、スギとヒノキの主な用途が、木材住宅の建設で共通しているためであろう。Fig.1の青い線は loess 法で平滑化した原時系列データの傾向である(STL 法分解傾向変動に対して loess 法を用いて平滑化しても数円か数十円しか変わらない)。この傾向変動は、2002年1月から2016年12月までの期間全体の傾向を示している。スギの場合は、2011年初めごろまで下がってきたが、そのあと、上昇の傾向が見られる。ヒノキの場合は、全体的に下がる傾向が見られるが、下降の程度は緩やかな方向に変わっている。

Fig.1の赤の線で示された STL 分解法による傾向変動は、青い線の平滑化による傾向よりもっと細かい傾向を表現している。ここでは、松下・半田(1981)にならない、STL 分解法で得た傾向変動に対して、循環変動を分析してみた(Table 2)。1つの谷から次の谷までの期間を1つの周期と考える。スギ価格は上昇期が10カ月から22カ月まで(平均18カ月)の長さになり、

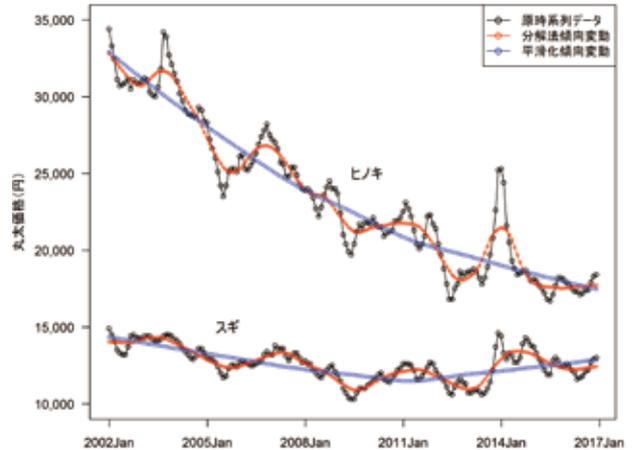


Fig. 1. スギとヒノキ中丸太月次価格の傾向変動  
Trend movement of monthly prices of sugi and hinoki logs

Table 2. スギとヒノキ月次価格の循環変動  
Cyclical movements of monthly prices of sugi and hinoki logs

時系列	循環番号	転換点(年、月)			上昇(月)	下降(月)	周期(月)
		谷	山	谷			
スギ	1	2002.9	2003.7	2005.9	10	26	36
	2	2005.9	2007.5	2009.7	20	26	46
	3	2009.7	2011.5	2013.1	22	20	42
	4	2013.1	2014.7	2016.3	18	20	38
		平均			18	23	41
ヒノキ	1	2003.1	2003.9	2005.11	8	26	34
	2	2005.11	2006.11	2009.9	12	34	46
	3	2009.9	2010.11	2012.11	14	30	36
	4	2012.11	2014.1	2015.11	14	22	36
		平均			12	28	38

下降期が20カ月から26カ月まで(平均23カ月)の長さになり、1つの周期が36カ月から46カ月まで(平均41カ月)になり、3年から4年の長さとなっている。ヒノキの場合は、上昇期が8カ月から14カ月まで(平均12カ月)の長さになり、下降期が22カ月から34カ月まで(平均28カ月)の長さになり、1つの周期は約3年から4年となっている。先行研究によると、1950年から1979年までは、循環変動の周期はほぼ3年間で、5、6年間の場合もあった(松下・半田 1981)のに対して、2002年から2016年までの間では、3年から4年であった。行武(1981)は経済の高成長期には、その周期が長く、低成長期には短くなる傾向があることを指摘し

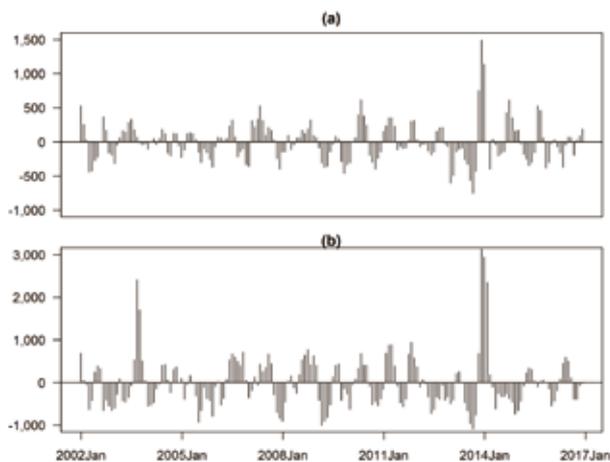


Fig. 2. STL法で得た不規則変動(単位:円): (a)スギ; (b)ヒノキ

Irregular component of monthly prices of logs by STL decomposition (Yen): (a) sugi; (b) hinoki

た。また、本研究の対象期間中、多くの場合は、下降期が上昇期より長かったことがわかった。

時系列変動の最後の部分は、不規則変動である。Fig.2にそれぞれ、スギとヒノキの結果を示した。一番規模の大きい不規則変動は、2014年4月からの消費税増税にむけて、2013年10月からの駆け込み需要による価格の高騰である。2013年10月、11月、12月におけるスギ丸太価格の不規則変動額はそれぞれ、754円、1,494円、1,140円であった。ヒノキの場合は、2013年12月、2014年1月、2月のそれが、それぞれ、3,129円、2,940円、2,345円であった。ヒノキ価格は高騰した後すぐ下向きになったため、高騰の後はマイナスの不規則変動になった。もう1つの大きい不規則変動は、2003年秋のヒノキ価格の高騰であった。それは、住宅ローン減税の政策変動による住宅の駆け込み需要によるヒノキ価格の高騰である。Fig.2の不規則変動の推移を見ると、世界金融危機の時期や、いわゆる2012年春の価格下落の時期の不規則変動は、規模が大きくなかったと考えられる。これらの時期の下落は、景気循環の変動として扱える。

#### 4. 予測手法

##### 4.1 指数平滑法 (ETS 法)

指数平滑法の基本的な概念は、下記の式で表すことができる。

$$\hat{y}_{t+1|t} = \hat{y}_{t|t-1} + \alpha (y_t - \hat{y}_{t|t-1}),$$

$$\text{あるいは、} \hat{y}_{t+1|t} = \alpha y_t + (1-\alpha)\hat{y}_{t|t-1} \quad (3)$$

前者は、 $t+1$ 期の予測値 ( $\hat{y}_{t+1|t}$ ) を、 $t$ 期の予測値 ( $\hat{y}_{t|t-1}$ ) と、 $t$ 期の予測誤差 ( $y_t - \hat{y}_{t|t-1}$ ) を用いて計算する方法である。後者は、 $t$ 期の実測値と予測値の重み付き平均値

である。いずれにしても、 $\alpha$ が1の場合、今期の実測値が次期の予測値となるが、 $\alpha$ が0の場合には、今期の予測値が次期の予測値となる。式(3)の后者をさらに展開すれば、

$$\hat{y}_{t+1|t} = \alpha y_t + \alpha(1-\alpha)y_{t-1} + \alpha(1-\alpha)^2 y_{t-2} + \dots \quad (4)$$

になって、係数の指数変化が見られるので、 $\alpha$  ( $0 < \alpha < 1$ ) が平滑指数と呼ばれてきた。直近の実測値の重みが大きいことがわかる。この手法は1950年代に開発されたが (Brown 1959, Holt 2004, Winters 1960)、1980年代以来、状態空間モデルの導入により、点予測だけでなく、区間予測 (予測値の信頼区間) の獲得、赤池情報量基準 (AIC) によってモデルの選択ができるなど多くの進歩が見られた (Hyndman et al. 2008)。更に R 言語の *forecast* パッケージ (version 7.3) (Hyndman and Khandakar 2008, Hyndman 2016a) の開発で、時系列データの指数平滑法予測がやりやすくなった。さらに Excel 2016 でも実行可能となった。Hyndman and Athanasopoulos (2013) が指数平滑法を ETS 法 (E: エラー、不規則変動。T: 傾向変動。S: 季節変動。ETS は Exponential Smoothing の略語) と表記し、状態空間モデルの形で予測モデルを体系化した。傾向変動には、傾向無し (N)、加法傾向変動 (A)、減衰加法傾向変動 (Ad)、乗法傾向変動 (M)、減衰乗法傾向変動 (Md) といった五つのパターンがある。季節変動には、季節性なし (N)、加法季節変動 (A)、乗法季節変動 (M) と3つのパターンがある。合わせて、15セットの式がある (Hyndman and Athanasopoulos 2013)。エラー (E) も加法なのか乗法なのか2つのパターンがあって、全部で30種のモデルになる。エラーの状況は、区間予測に影響を与えるが、エラーの期待値はゼロであるため、点予測のモデルには反映されない。つまり、点予測は、傾向変動と季節変動の状況によって行われる。AIC 基準で、15セットのモデルの中からインデックスの小さい最適なモデルを選ぶことができる。この計算は、*forecast* パッケージの中の関数 *ets* で行った。線形指数平滑法は ARIMA 法の特殊ケースと考えられるが、非線形指数平滑法は ARIMA 法に包含されない独自の手法である (Hyndman and Athanasopoulos 2013)。

2002年1月から2015年9月までの月次データを用いた分析の結果、スギ丸太価格の変動は、ETS (M,N,A) になっている (Michinaka et al. 2016)。エラーは乗法変動 (M)、傾向変動は傾向なし (N)、季節変動は加法季節変動 (A) であった。また、ヒノキのモデル推定の結果は、ETS (M, Ad, A): 乗法エラー、減衰加法傾向変動、加法季節変動になっている。スギ丸太価格の予測モデルは下記の式 (5) ~ (7) に、ヒノキ丸太価格の予測モデルは式 (8) ~ (11) に示される (Hyndman and Athanasopoulos 2013)。

$$y_t = (l_{t-1} + s_{t-m})(1 + \varepsilon_t) \tag{5}$$

$$l_t = l_{t-1} + \alpha (l_{t-1} + s_{t-m}) \varepsilon_t \tag{6}$$

$$s_t = s_{t-m} + \gamma (l_{t-1} + s_{t-m}) \varepsilon_t \tag{7}$$

$$y_t = (l_{t-1} + \varphi b_{t-1} + s_{t-m})(1 + \varepsilon_t) \tag{8}$$

$$l_t = l_{t-1} + \varphi b_{t-1} + \alpha (l_{t-1} + \varphi b_{t-1} + s_{t-m}) \varepsilon_t \tag{9}$$

$$b_t = \varphi b_{t-1} + \beta (l_{t-1} + \varphi b_{t-1} + s_{t-m}) \varepsilon_t \tag{10}$$

$$s_t = s_{t-m} + \gamma (l_{t-1} + \varphi b_{t-1} + s_{t-m}) \varepsilon_t \tag{11}$$

ここでは、 $y_t$  が  $t$  期の予測値、 $l_t$  が傾向変動の水準（レベル）の部分、 $b_t$  が傾向変動の成長の部分、 $s_t$  が季節変動の部分、 $l_{t-1}$  が前期の水準、 $b_{t-1}$  が前期の成長、 $s_{t-m}$  が前年度同期の季節値、 $m$  が 1 年間に含む季節の数（ここでは、 $m = 12$ ）、 $\varepsilon_t$  がエラーである。また、 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 、 $\varphi$  は、それぞれ、水準、成長、季節変動、減衰傾向変動の平滑パラメータである。一般的には、 $0 < \alpha, \beta, \gamma, \varphi < 1$  を設定する。スギ価格の予測には  $\alpha = 0.9999$ 、 $\gamma = 0.0001$  と推定された。ヒノキ価格の予測には  $\alpha = 0.9999$ 、 $\beta = 0.1412$ 、 $\gamma = 0.0001$ 、 $\varphi = 0.8007$  と推定された。

#### 4.2 ARIMA 法

ARIMA 法とは、自己回帰和分移動平均（ARIMA）モデルのことである。ARIMA モデルは、自己回帰（AR）、移動平均（MA）、和分（I）といった 3 つの構成要素で時系列の変動を表す。1 次自己回帰過程（AR (1)）は、下記のようなモデルで表記できる。

$$y_t = c + \varphi_1 y_{t-1} + \varepsilon_t, \quad \varepsilon_t \sim W.N.(\sigma^2) \tag{12}$$

1 次移動平均過程（MA (1)）は、下記のようなモデルで表記できる。

$$y_t = \mu + \varepsilon_t + \theta^1 \varepsilon_{t-1}, \quad \varepsilon_t \sim W.N.(\sigma^2) \tag{13}$$

また、経済分野によくある非定常な時系列データを定常化するため、階差を取ることを和分過程と言う。1 次階差は

$$y_t' = y_t - y_{t-1} \tag{14}$$

となり、季節階差は

$$y_t' = y_t - y_{t-m} \quad (\text{月次データの場合、} m = 12) \tag{15}$$

となる。Hyndman and Athanasopoulos (2013) は季節性のある時系列データに対して、ARIMA モデルを下記のように表記した。

$$ARIMA(p, d, q)(P, D, Q)_m \tag{16}$$

$(p, d, q)$  は季節変動以外の変動の構成要素であり、 $(P, D, Q)_m$  は季節変動の構成要素である。 $p$  と  $P$  は自己回帰過程の次数、 $d$  と  $D$  は和分過程の階数、 $q$  と  $Q$  は移動平均過程の次数、 $m$  は月次データの場合、12 である。 $p, d, q, P, D, Q$  は非負整数であり、いろいろな組み合わせでそれぞれのモデルを得ることができる。指数平滑法と同じように AIC が小さいモデルを選択する。

ADF 検定により、スギとヒノキ丸太価格の原系列では単位根の存在を棄却できず、非定常時系列であるが、1 次階差では単位根が存在するという帰無仮説が棄却された (Michinaka et al. 2016)。ARIMA 法の分析は、R ソフトの *forecast* パッケージの関数 *Arima* で行った。2002 年 1 月から 2015 年 9 月までの月次データを用いた分析によると、スギ丸太価格は、ARIMA (2, 1, 0) (2, 1, 1)<sub>12</sub> に適合していた (Michinaka et al. 2016)。非季節性の自己回帰要素は 2 つ、季節性の自己回帰要素も 2 つ、季節性移動平均要素は 1 つ、それぞれの推定値が 0.457(0.079)、0.245(0.085)、-0.595(0.145)、-0.441(0.118)、-0.367(0.165) であった。カッコの中の数字は、標準誤差である。すべてのパラメータは 1% の水準で有意になった。非季節性も季節性の変動も、1 回の階差を取った。関数式で表すと、予測モデルは、

$$y_t = 1.457y_{t-1} - 0.702y_{t-2} + 0.245y_{t-3} + 0.405y_{t-12} - 0.590y_{t-13} + 0.284y_{t-14} - 0.099y_{t-15} + 0.154y_{t-24} - 0.224y_{t-25} + 0.108y_{t-26} - 0.038y_{t-27} + 0.441y_{t-36} - 0.643y_{t-37} + 0.310y_{t-38} - 0.108y_{t-39} + \varepsilon_t - 0.367\varepsilon_{t-1} \tag{17}$$

になった。ここで注意すべきことは、

$$\begin{aligned} & y_{t-1}, y_{t-2}, y_{t-3} \text{ の係数の和が、} 1.457 - 0.702 + 0.245 = \\ & (1 + 0.457) - (0.457 + 0.245) + 0.245 = 1 \\ & y_{t-12}, y_{t-13}, y_{t-14}, y_{t-15} \text{ の係数の和が、} 0.405 - 0.590 + \\ & 0.284 - 0.099 = 0 \\ & y_{t-24}, y_{t-25}, y_{t-26}, y_{t-27} \text{ の係数の和が、} 0.154 - 0.224 + \\ & 0.108 - 0.038 = 0 \\ & y_{t-36}, y_{t-37}, y_{t-38}, y_{t-39} \text{ の係数の和が、} 0.441 - 0.643 + \\ & 0.310 - 0.108 = 0 \\ & y_{t-1}, y_{t-13}, y_{t-25}, y_{t-37} \text{ の係数の和が、} 1.457 - 0.590 - 0.224 \\ & - 0.643 = 0 \\ & y_{t-2}, y_{t-14}, y_{t-26}, y_{t-38} \text{ の係数の和が、} -0.702 + 0.284 \\ & + 0.108 + 0.310 = 0 \\ & y_{t-3}, y_{t-15}, y_{t-27}, y_{t-39} \text{ の係数の和が、} 0.245 - 0.099 - 0.038 \\ & - 0.108 = 0 \end{aligned}$$

$$y_{t-12}, y_{t-24}, y_{t-36} \text{ の係数の和が、} 0.405+0.154+0.441=1$$

$$1.457y_{t-1}-0.702y_{t-2}+0.245y_{t-3}=y_{t-1}+0.457(y_{t-1}-y_{t-2})-$$

$$0.245(y_{t-2}-y_{t-3})$$

となる。今月の価格の予測値は、おおむね前月の価格に対して、前々月から前月にかけての上昇（下落）幅よりもかなり小さい幅で上昇（下落）させた値となる。この特徴から長期的な趨勢変動は認められず、短期的に減衰する趨勢変動が認められることが分かる。

ヒノキ丸太価格の場合は、ARIMA (2, 1, 1) (0, 1, 2)<sub>12</sub> に推定された。非季節性の自己回帰要素は 2 つ、移動平均要素は 1 つ、季節性の移動平均要素は 2 つ、それぞれの推定値は、1.306(0.087)、-0.398(0.076)、-0.932(0.057)、-1.104(0.092)、0.352(0.109) であった。すべてのパラメータは 1% の水準で有意になった。非季節性も季節性の変動も、1 回の階差を取った。関数式で表すと、予測モデルは、下記ようになった。

$$y_t=2.306y_{t-1}-1.704y_{t-2}+0.398y_{t-3}+y_{t-12}-2.306y_{t-13}$$

$$+1.704y_{t-14}-0.398y_{t-15}+ \varepsilon_t-0.932 \varepsilon_{t-1}-1.104 \varepsilon_{t-12}+1.029$$

$$\varepsilon_{t-13}+0.352 \varepsilon_{t-24}-0.328 \varepsilon_{t-25} \quad (18)$$

ここで注意すべきことは、

$$y_{t-1}, y_{t-2}, y_{t-3} \text{ の係数の和が、} 2.306-1.704+0.398=1$$

$$y_{t-12}, y_{t-13}, y_{t-14}, y_{t-15} \text{ の係数の和が、} 1-2.306+1.704$$

$$-0.398=0$$

$$y_t=y_{t-12}+2.306(y_{t-1}-y_{t-13}) -1.704(y_{t-2}-y_{t-14})+0.398(y_{t-3}$$

$$-y_{t-15})+ \varepsilon_t-0.932 \varepsilon_{t-1}-1.104 \varepsilon_{t-12}+1.029 \varepsilon_{t-13}+0.352 \varepsilon_{t-24}$$

$$-0.328 \varepsilon_{t-25} \quad (18')$$

$$(y_{t-1}-y_{t-13}), (y_{t-2}-y_{t-14}), (y_{t-3}-y_{t-15}) \text{ の係数の和が、}$$

$$2.306-1.704+0.398=1$$

となっていることである。今月の価格の予測値は、おおむね前年同期の価格に対して、最近 3 カ月の価格水準とその 1 年前の価格水準の差を（拡大も縮小もせずにそのまま）加えた値になる。この特徴から、短期的に減衰する趨勢変動だけでなく、長期的な趨勢変動（この場合は下落傾向）が認められることが分かる。

### 5. 予測精度の評価

#### 5.1 交差検証

Shmueli (2010) は、予測モデルが説明モデルや記述モデルと異なることを強調している。予測モデルは、構造や因果関係の解明を目的とせず、将来に向けて、X と Y との関連性を重視し、予測の精度に関心を寄せる。指数平滑法や ARIMA 法は短期予測に使えるが、時系列データの変動の要因を説明する機能がない。ま

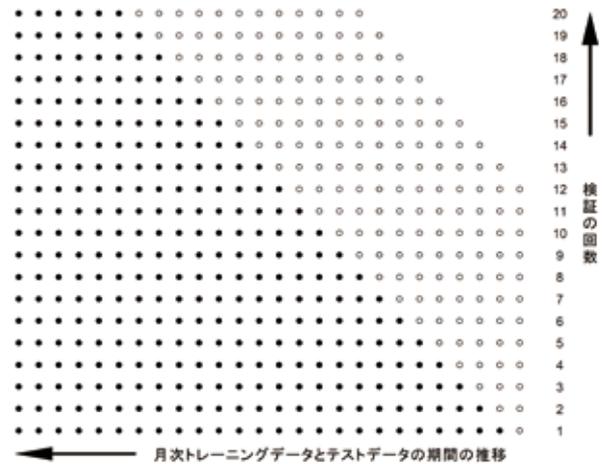


Fig. 3. 交差検証の概念図  
Conceptual diagram of cross validation applied in the research

- 注：(1) 左側の黒い点がトレーニングデータ、右側の中空の円がテストデータである。
- (2) Hyndman (2016b) を参考に作成した。

た、Hyndman (2011) は予測モデルを構成する変数のパラメータの有意水準の検定が必要ではないと主張する。1 つ目の理由は、AR モデルで使われる変数が独立していないことである。もう 1 つの理由は、t 検定では、サンプル数が十分に大きければ、変動が大きくて係数が小さい変数も、係数がゼロである帰無仮説を一定の有意水準で棄却することができる。

本研究では、スギとヒノキ中丸太の月次価格を対象として、交差検証 (cross validation) を行なって、指数平滑法や ARIMA 法の予測精度を評価する。交差検証にあたっては、対象となったデータをトレーニングデータ (training data あるいは in-sample data) とテストデータ (test data あるいは out-of-sample data) に分ける。トレーニングデータは予測モデルの構造とパラメータの決定に用いられ、テストデータは予測精度評価の際に予測値と比較される実測値として使われる。本研究では、2002 年 1 月から 2016 年 12 月までの 180 カ月の期間のデータを用いる。予測期間は 1 カ月から 12 カ月までの 12 個の期間を設定しているため、テストデータの期間の長さは 12 カ月を最大とする。また、予測精度評価の期間を 2010 年 1 月から 2016 年 12 月までの 7 年間 84 カ月とする。本研究では、トレーニングデータが更新すると、指数平滑法の場合も ARIMA 法の場合も、改めて予測モデルを構築し予測を行うこととする。

具体的には、1 つ目のデータセットは、2002 年 1 月から 2016 年 11 月までのデータをトレーニングデータとし、残った 2016 年 12 月のデータをテストデータとする (Fig.3 の下から 1 行目)。2 つ目では、1 カ月ずらして、2002 年 1 月から 2016 年 10 月までのデータをト

レーニングデータとし、残った 2016 年 11 月と 12 月のデータをテストデータとする。このような設定を続けて、12 個目では、2002 年 1 月から 2015 年 12 月までのデータをトレーニングデータとし、2016 年 1 月から 12 月までのデータをテストデータとする。それから、予測期間の最大値を 12 にキープして、トレーニングデータとテストデータの設定を繰り返して、最後に、2002 年 1 月から 2009 年 1 月までのデータをトレーニングデータとし、2009 年 2 月から 2010 年 1 月までのデータをテストデータとする。ここで上述のように、検証期間は 2010 年 1 月からなので、テストデータの中で 2010 年 1 月からの結果だけを検証の対象とし、2009 年のデータは検証対象に含めない。結局、2002 年 1 月から 2016 年 12 月までのデータを用いて、予測期間を 1 カ月から 12 カ月までの 12 個に設定して、最終的に、2010 年 1 月から 2016 年 12 月までの 7 年間 84 カ月に対して、 $12 \times 84 = 1,008$  個の誤差が得られる。

5.2 予測精度評価の指標

予測精度を評価する際に、一般的に、下記の式で誤差を定義する：予測誤差 ( $e_t$ ) = 実測値 ( $Y_t$ ) - 予測値 ( $F_t$ )。プラスの誤差は過少予測で、マイナスの誤差は、過大予測となる。また、相対的に誤差の大きさを表すときに、パーセンテージの誤差も重要である：パーセント誤差： $p_t = 100e_t / Y_t$ 。さらに、実測値からの距離を考えると、絶対値で表現した方が良い場合がある：絶対誤差： $AE_t = |e_t| = |Y_t - F_t|$ 。絶対パーセント誤差： $Ap_t = |p_t| = 100 \times |AE_t / Y_t|$ 。もちろん、誤差が小さければ小さいほど予測の精度が高い。予測誤差 ( $e_t$ ) と絶対誤差 ( $AE_t$ ) の単位は円になるが、パーセント誤差 ( $p_t$ ) と絶対パーセント誤差 ( $Ap_t$ ) 統計量の単位はパーセントである。

また、予測精度を総合的に評価する際に、別に評価指標が必要になる。評価指標は多数提案・使用されている (Hyndman and Koehler 2006) が、本研究では、平均絶対誤差 (MAE, Mean Absolute Error)、平均二乗平方根誤差 (RMSE, Root Mean Square Error)、平均絶対パーセント誤差 (MAPE, Mean Absolute Percentage Error) を用いて、予測精度を評価する。なお、MAE と RMSE 統計量の単位は円で、MAPE の単位はパーセントである。

$$MAE = \text{mean}(|e_t|); RMSE = \sqrt{\text{mean}(e_t^2)}; MAPE = \text{mean}(|p_t|) \tag{19}$$

RMSE がよく使われるが、誤差の二乗を取ることから、外れ値の RMSE 統計量への影響が MAE より大きい。MAE と RMSE がスケールに依存するのに対して、MAPE はスケールに依存しないので、違う時系列の予測精度評価の時に比較することができる。

5.3 予測精度評価の結果

一般的には、予測期間が長くなると、不確定要素が多くなるため、予測誤差が大きくなって、予測精度が低くなり、予測区間も広がっていく (Hyndman and Athanasopoulos 2013, Michinaka et al. 2016)。違う時系列においては、同じ予測期間の場合でも予測誤差が違うだけではなく、予測期間の増加につれて誤差が拡大する仕方も違う。評価期間内の指数平滑法と ARIMA 法のスギとヒノキのそれぞれの予測期間の予測誤差は、Fig.4 に示されている。

5.3.1 1 カ月先の予測の精度

ここでまずは、予測期間が 1 カ月の場合の予測精度を見てみる。Fig.5 に示したのは、スギ丸太価格の 2010 年 1 月から 2016 年 12 月までの実測値と、1 カ月

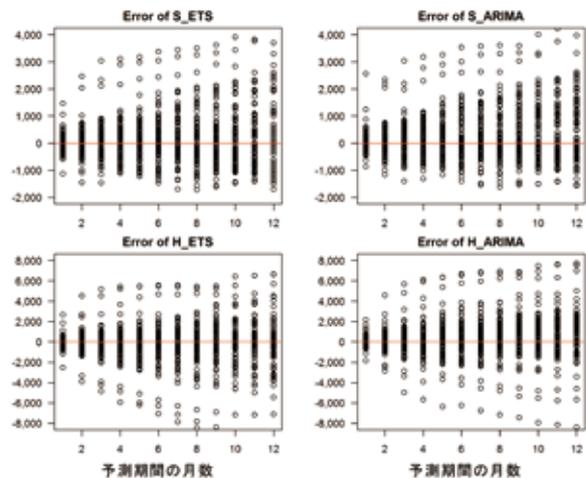


Fig. 4. スギ (S)、ヒノキ (H) の指数平滑法、ARIMA 法の予測誤差 (単位: 円)  
Forecast errors for prices of sugi (S) and hinoki (H) logs by ETS and ARIMA (Yen)

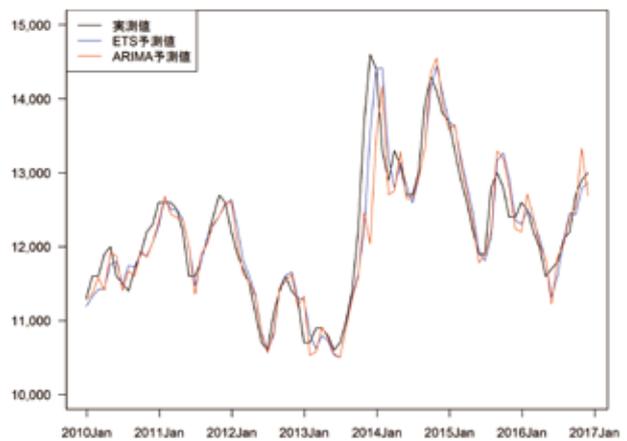


Fig. 5. スギ丸太価格の実測値と予測期間が 1 カ月の時の予測値 (円)  
Actual prices of sugi logs and their one-month-ahead forecasts (Yen)

前までのデータを用いて計算した予測値である。Fig.5 に示したように、指数平滑法と ARIMA 法の予測値は実測値と近い。指数平滑法と ARIMA 法の差は大きくない。Fig.6 には、スギ丸太価格予測のこの2つの手法の予測誤差 ( $e_t$ ) を示す。誤差の90%が-500円~500円の間にある。しかし、ARIMA法の絶対誤差が小さい場合があれば、指数平滑法の絶対誤差が低い場合もある。2013年11月から2014年1月までの間では、消費税増税により駆け込み需要が生じたため、予測誤差が大きい。また、Fig.7に示された絶対パーセント誤差のサイズをチェックしてみると、指数平滑法の場合が94%、ARIMA法の場合が93%の絶対パーセント誤差が5%以内であり、また、指数平滑法の場合が80%、ARIMA法の場合が78%の誤差が3%以内になっている。2013年11月から2014年1月までの間では、絶対

パーセント誤差が10%を超えている。つまり、社会経済環境が大きく変化するときには、精度の高い予測が難しい。

Fig.8からFig.10までは、ヒノキ丸太価格予測の1カ月前の予測値と予測の精度を示している。スギ丸太価格予測と同じく、Fig.8に示されたように、1カ月前までのデータを用いて行ったヒノキ丸太価格の予測においても、指数平滑法とARIMA法の予測値は実測値に沿って変動している。Fig.9は、指数平滑法の場合が94%、ARIMA法の場合が93%の誤差が-1,000円~1,000円の間にあることを示している。その中でも-500円~500円の間になる場合が多い(指数平滑法が81%、ARIMA法が76%)。また、消費税増税の影響で、2013年末の過少予測と2014年初めの過大予測が生じた。Fig.10に示されたように、指数平滑法の場合

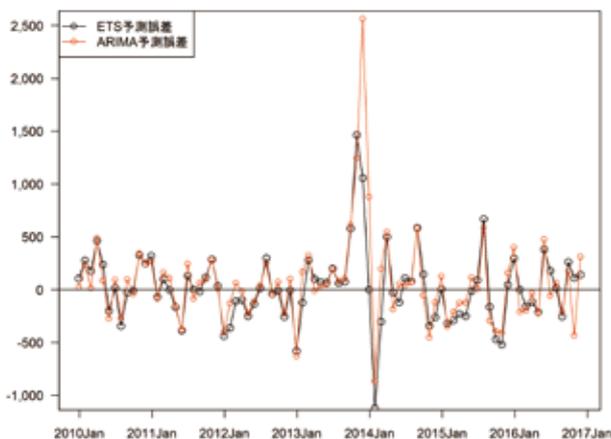


Fig. 6. スギ丸太価格の1カ月前の予測誤差 ( $e_t$ , 円)  
One-month-ahead forecast errors of prices of sugi logs (Yen)

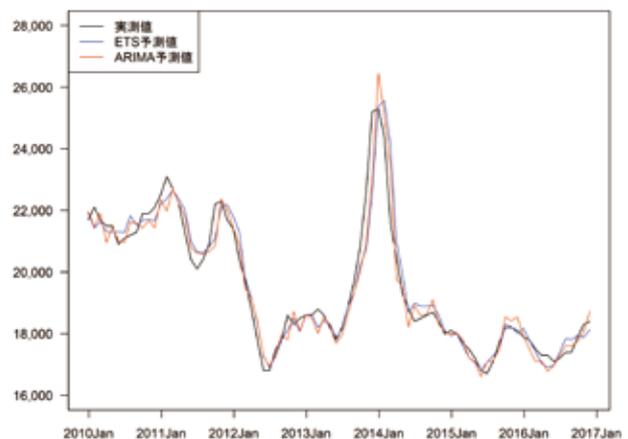


Fig. 8. ヒノキ丸太価格の実測値と予測期間が1カ月の時の予測値 (円)  
Actual prices of hinoki logs and their one-month-ahead forecasts (Yen)

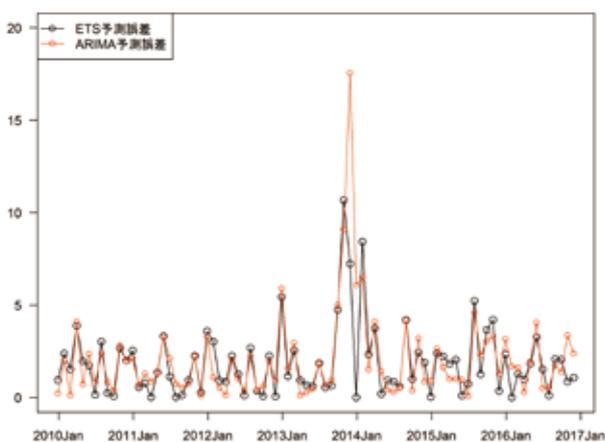


Fig. 7. スギ丸太価格の1カ月前の予測の絶対パーセント誤差 ( $Ap_t$ , %)  
Absolute percentage errors for one-month-ahead forecasts of prices of sugi logs (%)

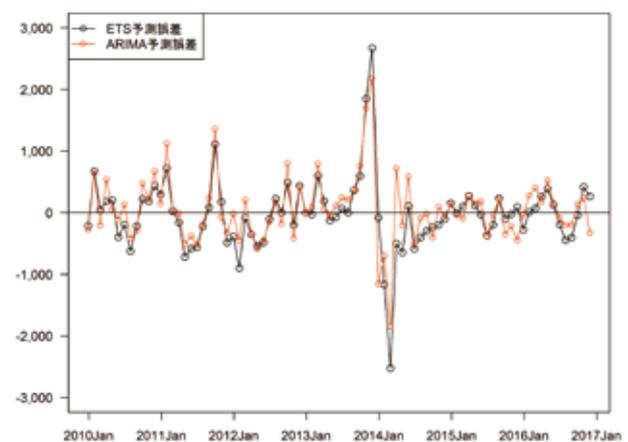


Fig. 9. ヒノキ丸太価格の1カ月前の予測誤差 ( $e_t$ , 円)  
One-month-ahead forecast errors of prices of hinoki logs (Yen)

が 86%、ARIMA 法の場合が 83%の絶対パーセント誤差が 5%以内にある。特に、2014 年半ば以降は、大きい社会経済環境の変化がないため、良い予測値を得ている。

Fig.11 が 1 カ月先のスギの指数平滑法と ARIMA 法及びヒノキの指数平滑法と ARIMA 法の予測誤差（それぞれ、S\_ETS1、S\_ARIMA1、H\_ETS1、H\_ARIMA1）のヒストグラムである。基本的には、予測誤差が-500 円～ 500 円の間にあることがわかった。正規性を確認するために、Shapiro-Wilk 検定を行なった。W 値が 0.79 以上、p-value が 0.001 以下という結果を得て、正規分布ではないことが判明した。歪度はそれぞれ、0.76、2.66、0.56、0.64 となり、正の歪みである結果を得た。これは、予測誤差の頻度分布のピークが平均よりもマイナス側にあるが、一部の予測誤差が

プラス側の大きい値を持つことを意味している。この問題が、特にスギ丸太の ARIMA 法の予測に存在する。また正規分布の時の尖度値 3 を引いた尖度統計量は 4.10、13.71、7.88、3.65 であり、正規分布に比べて両裾の厚い急尖的分布ということがわかった。しかし、2013 年末から 2014 年初までの異常値を外すと、両裾が狭まり、正規分布に近づく。S\_ETS1、S\_ARIMA1、H\_ETS1、H\_ARIMA1 それぞれの歪度が 0.15、0.03、0.24、0.80 になり、尖度が-0.11、0.82、0.19、0.65 になった。Shapiro-Wilk 検定を改めて実施すると、W 値が 0.95 以上で、p-value が、0.791、0.383、0.858、0.006 になり、H\_ARIMA1 だけが正規分布という仮説を 1% の有意水準で棄却したが、S\_ETS1、S\_ARIMA1、H\_ETS1 では正規分布の仮定が棄却されなかった。Fig.4、Fig.6、Fig.9 と合わせて見ると、消費税増税の影響のある時期の最初は大幅な過少予測となりやすい、その

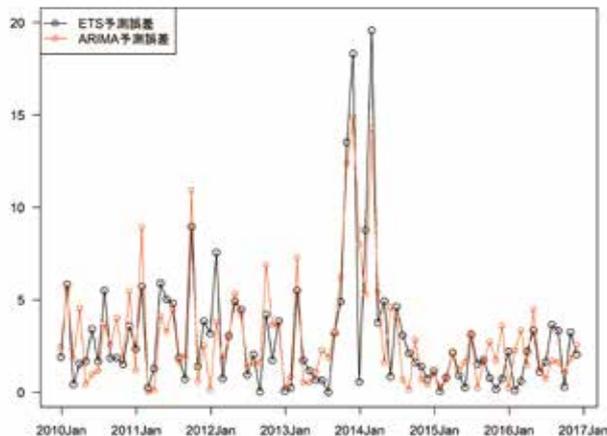


Fig. 10. ヒノキ丸太価格の 1 カ月先の予測の絶対パーセント誤差 ( $Ap_e$ , %)   
 Absolute percentage errors for one-month-ahead forecasts of prices of hinoki logs (%)

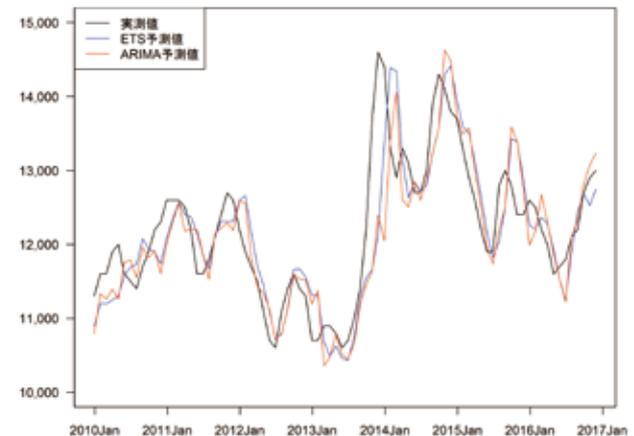


Fig. 12. スギ丸太価格の実測値と予測期間が 2 カ月の時の予測値 (円)   
 Actual prices of sugi logs and their two-month-ahead forecasts (Yen)

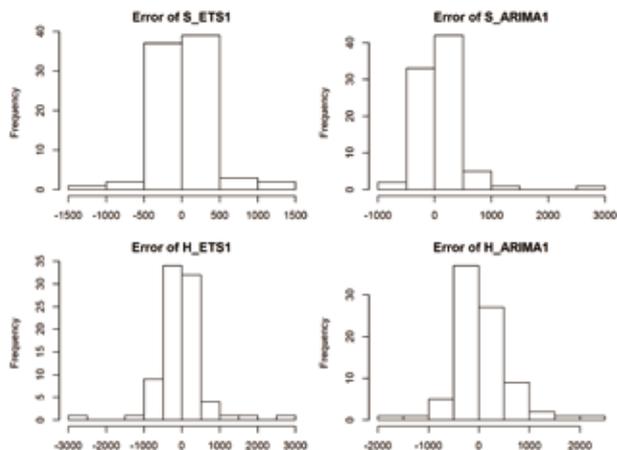


Fig. 11. 1 カ月先の価格予測の予測誤差のヒストグラム   
 Histogram of one-month-ahead forecast errors

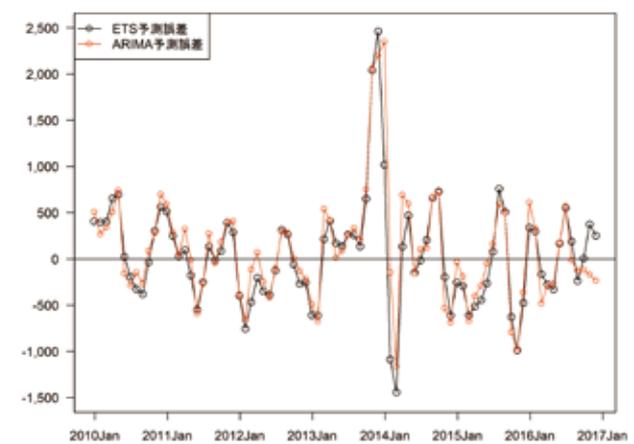


Fig. 13. スギ丸太価格の 2 カ月先の予測誤差 ( $e_e$ , 円)   
 Two-month-ahead forecast errors of prices of sugi logs (Yen)

後、大幅な過大予測となりやすい（特にヒノキ価格予測の場合）、その期間を除外すると予測の過大・過少は対称的になり、消費税増税の影響が大きいことがわかった。

### 5.3.2 2 カ月先の予測の精度

5.3.1 で 1 カ月先の価格予測の精度を検討したが、ここで、2 カ月先の価格予測の精度を検討しよう。Fig.12 に示すように、1 カ月先の価格予測と近い結果で、指数平滑法と ARIMA 法の予測値の間には大きな差がない。この点については、Fig.13 に明確に示されている。しかし、2012 年春の価格下落の時には、ARIMA 法の方が精度が少し高かった。Fig.14 に絶対パーセント誤差を示した。スギ丸太価格の 2 カ月先の予測の絶対パーセント誤差は、指数平滑法の場合が 83%、ARIMA 法の場合が 82% の絶対パーセント誤差は 5% 以内にあるが、5% を超えた時もしばしばあった。1 カ月先の価格予測の誤差より、2 カ月先の価格予測の方が精度が低い。1 カ月先の予測と同じく、消費税増税の影響を受けた時期において、絶対誤差と絶対パーセント誤差が大きくなった。

ヒノキ丸太価格の 2 カ月先予測と観測値の関係および誤差の状況を Fig.15 ~ 17 に示した。多くの場合は、ヒノキの予測誤差が -1,000 円 ~ 1,000 円の間にあるが、この範囲を超える例がいくつか存在する (Fig.16)。絶対パーセント誤差が、5% 以内の場合もあれば（指数平滑法が 57%、ARIMA 法が 58%）、5% から 10% まで（指数平滑法が 31%、ARIMA 法が 28%）、また、10% を超える時もある（指数平滑法が 12%、ARIMA 法が 14%）。ヒノキ丸太価格の方も、1 カ月先の価格予測の誤差より、2 カ月先の価格予測の方が精度が低い。

Fig.18 に 2 カ月先の価格予測の予測誤差の分布を示す。スギの場合は、多くの誤差が -500 円と 500 円の間にあるが、この範囲を超えた誤差が生じる頻度も増えた。ヒノキの場合は、多くの場合に誤差が -1,000 円と 1,000 円の間にあるが、この範囲を超えた誤差が生じる頻度も増えた。Shapiro-Wilk 検定によると、 $w$  値が 0.88 以上で、 $p$ -value が 0.001 以下という結果を得て、正規分布ではないことが判明した。歪度がそれぞれ、1.05、1.34、0.36、0.67 で、正の歪みである結果を得た。これは 1 カ月先の予測と同様である。この問題が、特にスギ丸太価格の ARIMA 法の予測に存在する。尖度統計量は 4.06、3.81、5.50、4.44 であり、両裾の厚い急尖的分布ということがわかった。2013 年末から 2014 年初までの異常値を外したら、歪度がそれぞれ、-0.13、-0.17、-0.09、0.19 になり、尖度が -0.79、-0.72、-0.73、-0.40 になり、Shapiro-Wilk 検定の  $w$  値が 0.98 以上になり、 $p$ -value が 0.22 以上で、正規分布という仮説を棄却できなくなった。これでは、予測期間が 1 カ月の場合と同じく、消費税増税の影響のある期間を除外す

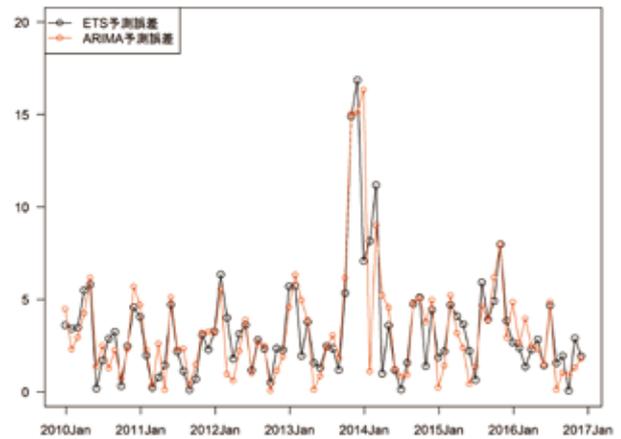


Fig. 14. スギ丸太価格の 2 カ月先の予測の絶対パーセント誤差 ( $A_p$ , %)   
 Absolute percentage errors for two-month-ahead forecasts of prices of sugi logs (%)

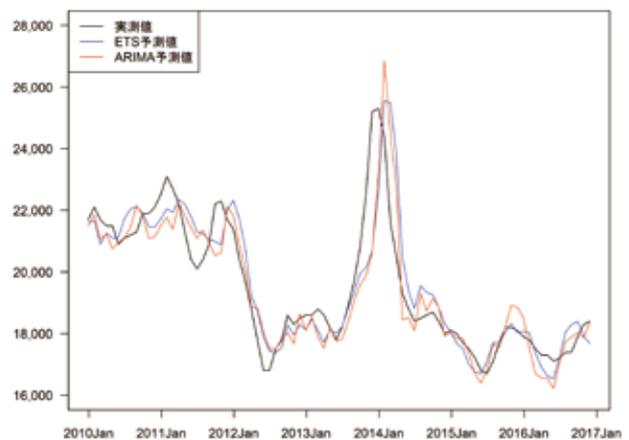


Fig. 15. ヒノキ丸太価格の実測値と予測期間が 2 カ月の時の予測値 (円)   
 Actual prices of hinoki logs and their two-month-ahead forecasts (Yen)

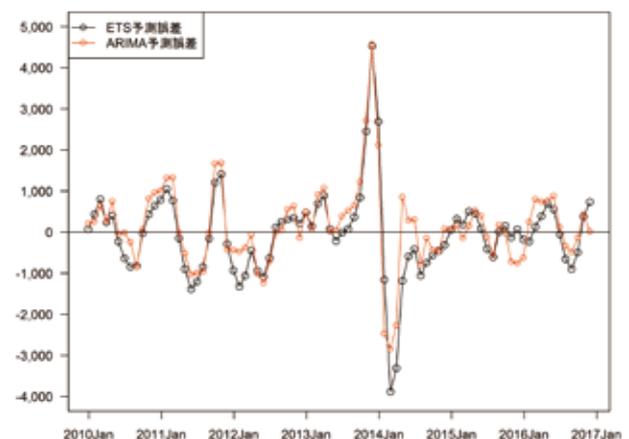


Fig. 16. ヒノキ丸太価格の 2 カ月先の予測誤差 ( $e_t$ , 円)   
 Two-month-ahead forecast errors of prices of hinoki logs (Yen)

ると予測の過大・過少は対称的になり、消費税増税の影響が大きいことがわかった。

5.3.3 6 カ月先と 12 カ月先の予測の精度

次にスギとヒノキ丸太価格の 6 カ月先と 12 カ月先の予測の精度を見てみよう。Fig.19 と Fig.20 はスギ丸太価格の実測値と、予測期間が 6 カ月の時の予測値と予測誤差を示している。指数平滑法と ARIMA 法の予測誤差は同じような動きをしている。指数平滑法が 54%、ARIMA 法が 51% の頻度で -500 円 ~ 500 円の間にあるが、-1,000 円 ~ 1,000 円の範囲を超えている場合もある（指数平滑法が 20%、ARIMA 法が 21%）。世界金融危機からの回復の時代には、過少予測が多かった。しかし、2012 年春から夏までの価格下落の時期には過大予測のことが多くなった。Fig.21 と Fig.22 はヒノキ丸太価格の実測値と予測の状況を示している。ス

ギに比べてヒノキは価格水準が高いが、予測誤差についてもやや幅が広い結果であった。

6 カ月先予測の時の予測誤差の頻度分布を Fig.23 に示す。Shapiro-Wilk 検定によると、w 値が 0.93 以上で、p-value が 0.001 以下という結果を得て、正規分布ではないことが判明した。歪度がそれぞれ、1.02、1.06、-0.42、0.27 で、尖度がそれぞれ、1.76、1.74、2.27、2.37 であった。2013 年末から 2014 年初めまでの異常値を外したら、歪度がそれぞれ、0.08、0.25、-0.54、-0.14 になり、尖度がそれぞれ、-0.43、-0.45、-0.40、-0.48 になった。Shapiro-Wilk 検定によると、H\_ETS6 だけが 5% の有意水準で正規分布という仮説が棄却されたが、S\_ETS6、S\_ARIMA6、H\_ARIMA6 が正規分布という仮説は棄却できなかった。つまり、S\_ETS6、S\_ARIMA6、H\_ARIMA6 においては、消費税増税の影響がなければ、予測誤差の分布は対称的になる。

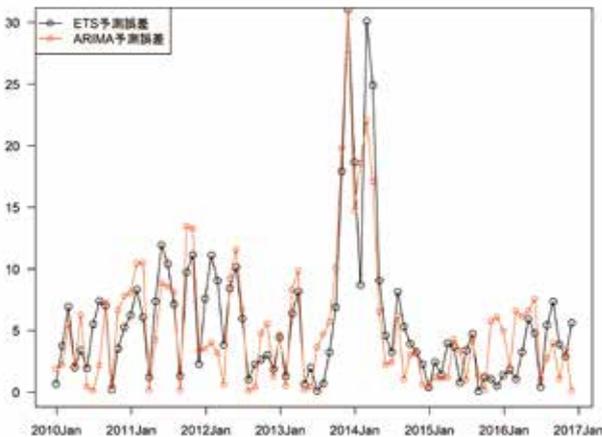


Fig. 17. ヒノキ丸太価格の 2 カ月先の予測の絶対パーセント誤差 ( $Ap_t$ , %) Absolute percentage errors for two-month-ahead forecasts of prices of hinoki logs (%)

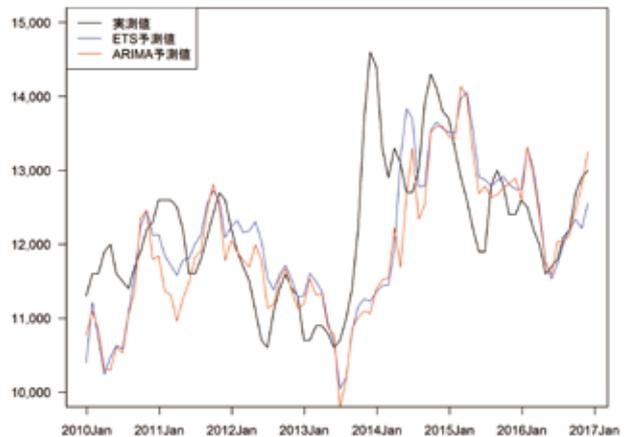


Fig.19. スギ丸太価格の実測値と予測期間が 6 カ月時の予測値 (円) Actual prices of sugi logs and their six-month-ahead forecasts (Yen)

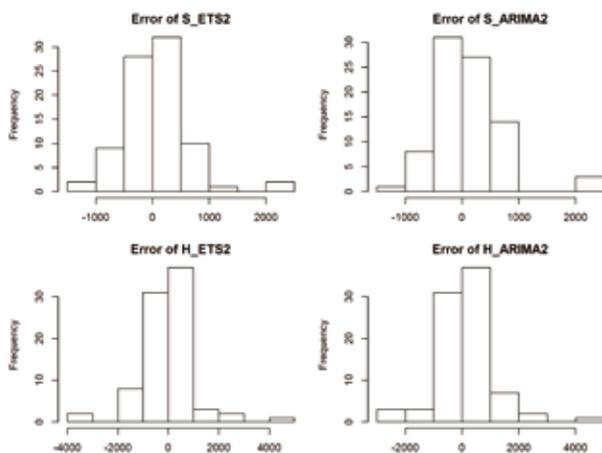


Fig. 18. 2 カ月先の価格予測の予測誤差のヒストグラム Histogram of two-month-ahead forecast errors

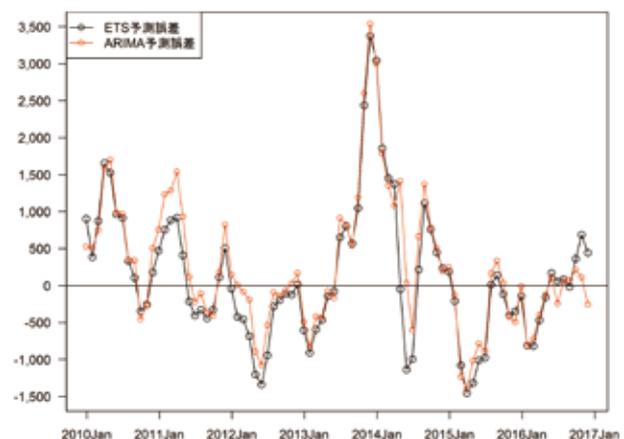


Fig. 20. スギ丸太価格の 6 カ月先の予測誤差 ( $e_t$ , 円) Six-month-ahead forecast errors of prices of sugi logs (Yen)

次に、12 カ月先の予測の精度を見てみる。Fig.24 はスギ丸太価格の実測値と予測期間が12カ月の時の予測値を示した。Fig.25 に示されたように、スギの予測誤差は、-1,000 円～1,000 円の間にあることが多かったが（指数平滑法が57%、ARIMA法が60%）、この範囲を超える誤差もあった（指数平滑法が43%、ARIMA法が40%）。Fig.26 はヒノキ丸太価格の実測値と予測期間が12カ月の時の予測値を示した。Fig.27 に示したように、ヒノキの予測誤差は、-2,000 円～2,000 円の間にあることが多かったが（指数平滑法が63%、ARIMA法が68%）、この範囲を超える予測誤差があった（指数平滑法が37%、ARIMA法が32%）。つまり、予測期間が12カ月になると、予測精度がさらに低いということとなる。

スギとヒノキ丸太価格の12カ月先予測の予測誤差の

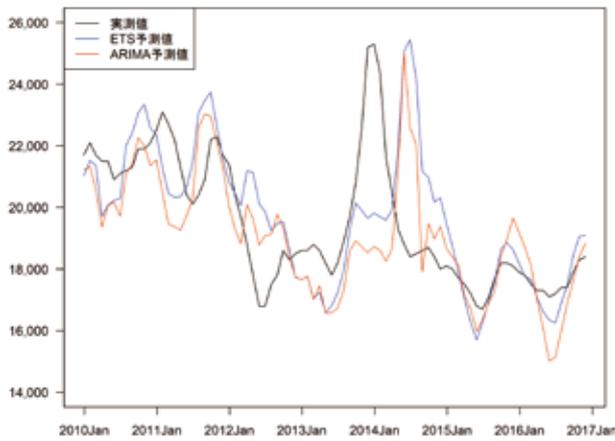


Fig. 21. ヒノキ丸太価格の実測値と予測期間が6カ月の時の予測値 (円)  
Actual prices of hinoki logs and their six-month-ahead forecasts (Yen)

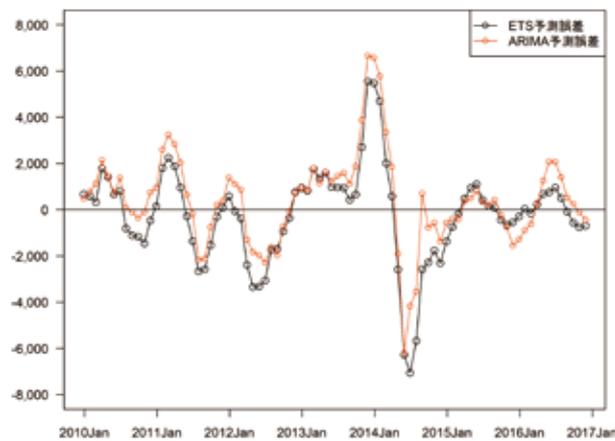


Fig. 22. ヒノキ丸太価格の6カ月先の予測誤差 (e, 円)  
Six-month-ahead forecast errors of prices of hinoki logs (Yen)

ヒストグラムをFig.28に示した。Shapiro-Wilk検定によると、w値が0.93以上で、p-valueが0.001以下という結果を得て、正規分布という仮説が棄却された。スギ指数平滑法、スギARIMA法、ヒノキ指数平滑法、ヒノキARIMA法の歪度はそれぞれ、0.68、0.54、-0.56、-0.23で、尖度がそれぞれ、-0.45、-0.53、2.14、2.75であった。2013年末からの消費税増税の影響を配慮しても、それぞれ、1%や10%の有意水準で誤差の分布が正規分布という仮説は棄却された結果となった。つまり、12カ月先の予測誤差の分布は、消費税増税と関係なく、正規分布ではないことがわかった。

5.3.4 絶対誤差と絶対パーセント誤差

Table 3には絶対誤差統計量、Table 4には絶対パーセント誤差統計量が示されている。0.80分位数統計量

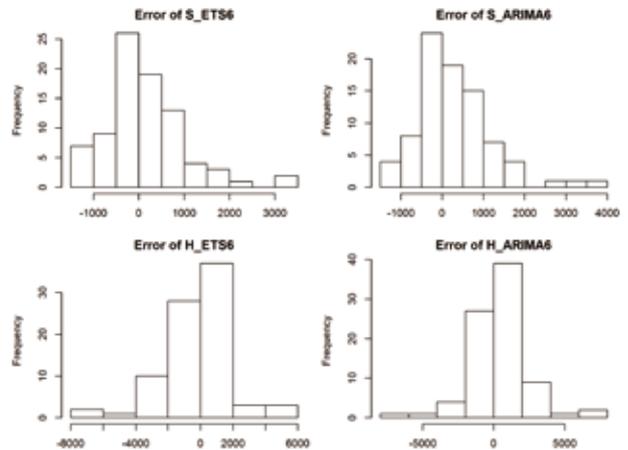


Fig. 23. 6カ月前価格予測の予測誤差のヒストグラム  
Histogram of six-month-ahead forecast errors

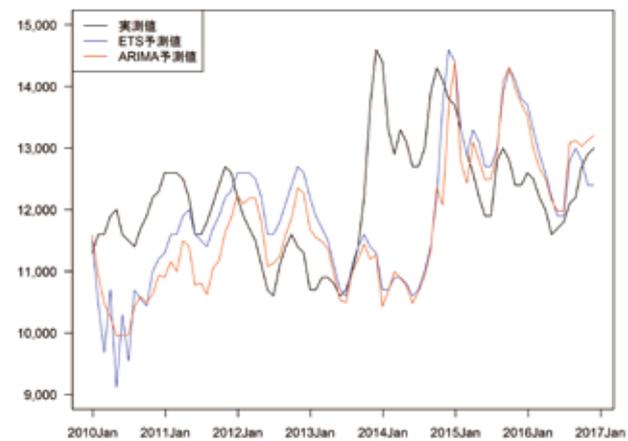


Fig. 24. スギ丸太価格の実測値と予測期間が12カ月の時の予測値 (円)  
Actual prices of sugi logs and their 12-month-ahead forecasts (Yen)

は 80% の頻度で誤差がこの水準以内にあることを示している。例えば、スギの指数平滑法での 1 カ月先予測の絶対誤差の 0.80 分位数は 332 円であるが、これは 80% の確率で予測誤差の絶対値が 332 円以下になることを示している。スギの指数平滑法での 1 カ月先予測の絶対パーセント誤差の 0.80 分位数が 2.67% で、80% の予測の絶対パーセント誤差が 2.67% 以内になることを示している。しかし、予測期間が 2 カ月になると、スギの指数平滑法での 0.80 分位数が 609 円、4.71% になり、6 カ月先予測の場合は、1,000 円、8.40% になり、12 カ月先予測の場合は、1,500 円、12.84% になっている。予測期間が長くなると、このように次第に予測誤差が大きくなる。また、すべての平均値が同じ手法、同じ予測期間の中央値より高いことが分かった。これは、絶対値の高い誤差が存在するため、すでに

尖度について論じたとおりでである。また、指数平滑法と ARIMA 法の予測誤差の大きさを比較するため、絶対誤差及び絶対パーセント誤差に対して、データの正規分布を要求しないノンパラメトリック検定法のウィルコクソンの符号順位検定 (Wilcoxon signed rank test) を実施した。その結果は、同じ樹種、同じ予測期間の場合、指数平滑法と ARIMA 法の間には 5% の有意水準で有意な差を検出できなかった。

### 5.3.5 平均絶対誤差、平均二乗平方根誤差、平均絶対パーセント誤差

今まで予測誤差 ( $e_t$ )、絶対誤差 ( $AE_t$ )、絶対パーセント誤差 ( $Ap_t$ ) について検討したが、ここでは、平均絶対誤差 (MAE)、平均二乗平方根誤差 (RMSE)、平均絶対パーセント誤差 (MAPE) を用いて、予測精

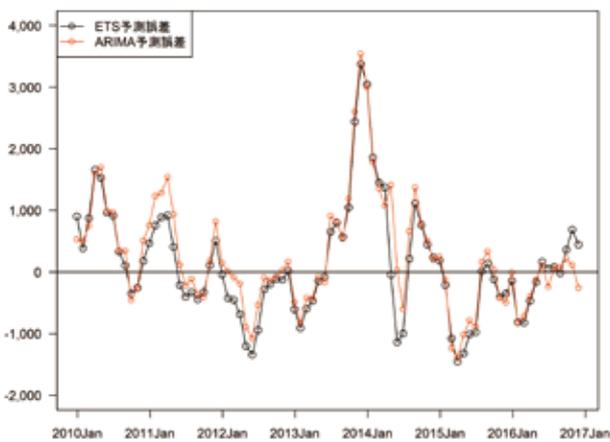


Fig. 25. スギ丸太価格の 12 カ月先の予測誤差 ( $e_t$ , 円)  
Twelve-month-ahead forecast errors of prices of *sugi* logs (Yen)

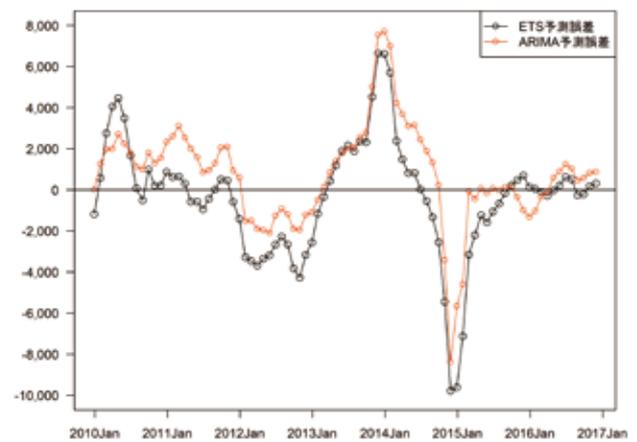


Fig. 27. ヒノキ丸太価格の 12 カ月先の予測誤差 ( $e_t$ , 円)  
Twelve-month-ahead forecast errors of prices of *hinoki* logs (Yen)

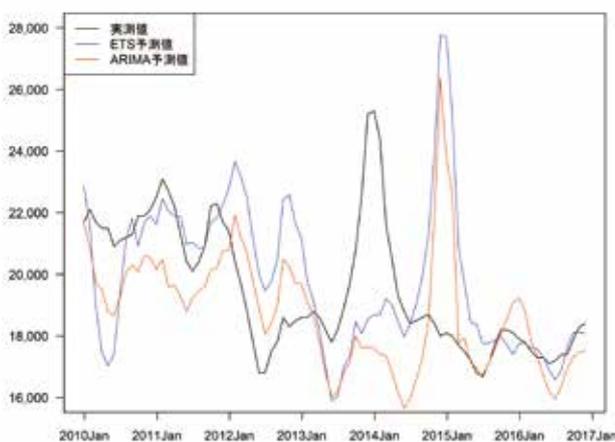


Fig. 26. ヒノキ丸太価格の実測値と予測期間が 12 カ月の時の予測値 (円)  
Actual prices of *hinoki* logs and their 12-month-ahead forecasts (Yen)

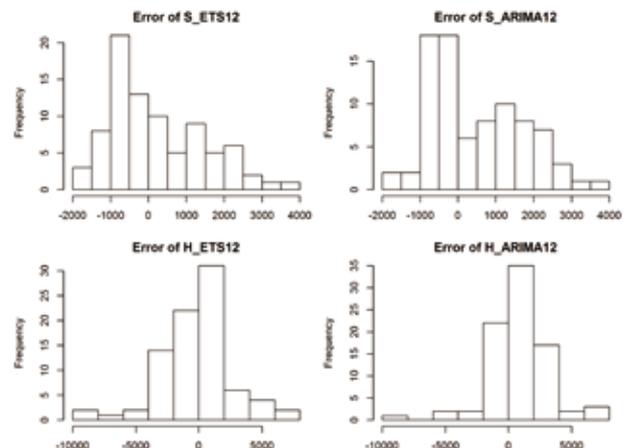


Fig. 28. 12 カ月先価格予測の予測誤差のヒストグラム  
Histogram of 12-month-ahead forecast errors

Table 3. 絶対誤差統計量

Some descriptive statistics values of absolute errors (Yen)

単位:円

		1	2	3	4	5	6	9	12
S_ETS	0.25 分位数	72	194	250	272	188	206	333	500
	平均値	232	413	515	579	616	665	800	1,018
	中央値	164	306	408	467	498	461	573	800
	0.80 分位数	332	609	730	870	933	1,000	1,211	1,500
	標準偏差	251	391	482	522	576	629	722	791
S_ARIMA	0.25 分位数	76	158	215	230	236	170	291	474
	平均値	257	418	522	576	636	660	815	1,027
	中央値	171	294	460	486	506	493	633	837
	0.80 分位数	386	604	701	839	937	1,040	1,382	1,615
	標準偏差	336	424	471	527	577	656	736	798
H_ETS	0.25 分位数	102	222	446	452	442	500	552	461
	平均値	369	701	1,001	1,207	1,335	1,436	1,707	1,905
	中央値	224	484	804	888	922	936	1,116	1,100
	0.80 分位数	518	931	1,373	1,683	1,943	2,260	2,505	3,214
	標準偏差	459	791	1,042	1,224	1,364	1,476	1,780	2,097
H_ARIMA	0.25 分位数	136	147	392	487	452	512	544	855
	平均値	373	678	1,002	1,221	1,352	1,455	1,660	1,851
	中央値	234	494	720	898	1,036	1,107	1,176	1,368
	0.80 分位数	519	973	1,443	1,713	1,801	2,047	2,440	2,551
	標準偏差	401	753	1,050	1,225	1,344	1,419	1,595	1,744

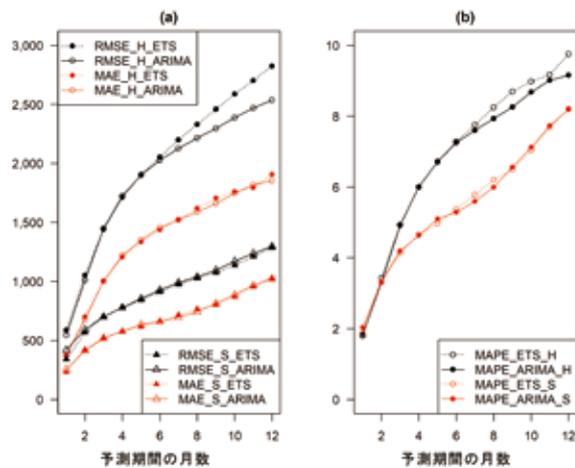


Fig. 29. スギとヒノキの指数平滑法と ARIMA 法の誤差 : (a) RMSE と MAE (円); (b) MAPE (%)  
Forecast errors of prices of sugi and hinoki logs: (a) RMSE and MAE (Yen); (b) MAPE (%)

度を評価しよう。Fig.29 (a) に示されたように、スギの指数平滑法と ARIMA 法の RMSE と MAE および MAPE はかなり近い。ヒノキの場合は、6 カ月の予測期間までは、指数平滑法と ARIMA 法の RMSE と MAE および MAPE が近い結果を得た。7 カ月からは、多くの場合は指数平滑法より ARIMA 法の方が RMSE と MAE および MAPE が低いことを示している。MAPE で評価すると、スギの方がヒノキより誤差が低いことが分かった (Fig.29 (b))。この結果が Michinaka et al. (2016) と違う原因は、本研究の評価期間には消費税増税の影響があった時期も含むためである。

### 5.3.6 価格変動額と予測誤差

予測には、単純法 (Naive method) という簡単な予測手法がある。単純法とは、今期の実測値を次期及び次期以降の予測値とする手法である。この手法の予測誤差が実際の価格の変動額である。ここでは、指数平滑法と ARIMA 法の予測精度を評価するために、指数平滑法と ARIMA 法の予測誤差を価格の変動額と比較したい。

まずは、原時系列データに対して、今月の価格を先月、先々月、引き続いて、最後に 12 カ月前の価格と比べて、それぞれの変動額を計算した。計算の期間は、予測誤差評価の期間と同じ期間を設定した。この変動額は、価格が上昇の場合はプラスの結果になり、価格が下降の場合はマイナスの結果になる。価格変動額の符号をチェックしてみると、スギの場合は、1,008 個の価格変動額の中に、0 円変動額の結果が 36 回、上昇が 497 回、下降が 475 回であるので、価格がやや上昇の傾向があると考えられる。ヒノキの場合は、0 円変動額の結果が 33 回、価格上昇が 438 回、下降が 537 回であるので、価格が下降の傾向が見られる。これに対して、スギ価格の ARIMA 法の予測誤差は、過少予測 (プラスの誤差) が 556 回で、過大予測 (マイナスの誤差) が 451 回で、合わせて、過少予測の結果となった。指数平滑法の予測誤差は、過少予測が 510 回で、過大予測が 494 回で、前者がわずかに多かったため、やや過少予測になった。ヒノキ価格の ARIMA 法の場合は、過少予測が 614 回で、過大予測が 394 回で、過少予測の結果となった。しかし、指数平滑法予測の場合は、過少予測が 508 回で、過大予測が 499 回で、前者がわずかに多かった。この結果を見ると、本研究で扱った

Table 4. 絶対パーセント誤差統計量

Some descriptive statistics values of absolute percentage errors (%)

単位:円

		1	2	3	4	5	6	9	12
S_ETS	0.25 分位数	0.61	1.57	2.22	2.32	1.53	1.64	2.78	3.92
	平均値	1.87	3.31	4.14	4.66	4.97	5.37	6.49	8.20
	中央値	1.32	2.58	3.46	3.87	4.18	3.80	4.68	6.81
	0.80 分位数	2.67	4.71	5.84	7.13	8.11	8.40	10.16	12.84
	標準偏差	1.89	2.84	3.47	3.78	4.26	4.70	5.42	5.95
S_ARIMA	0.25 分位数	0.66	1.30	1.81	1.90	2.06	1.44	2.35	3.88
	平均値	2.03	3.33	4.19	4.63	5.10	5.29	6.56	8.19
	中央値	1.40	2.49	3.94	4.30	4.19	3.97	5.36	7.22
	0.80 分位数	3.10	4.90	5.71	6.59	7.63	8.49	11.74	13.39
	標準偏差	2.39	3.05	3.40	3.80	4.19	4.85	5.49	5.84
H_ETS	0.25 分位数	0.58	1.13	2.39	2.44	2.27	2.70	2.58	2.28
	平均値	1.80	3.43	4.93	6.00	6.71	7.28	8.69	9.75
	中央値	1.19	2.69	4.01	4.60	4.88	5.00	6.00	5.80
	0.80 分位数	2.81	4.76	6.76	8.34	9.97	10.75	12.34	17.30
	標準偏差	2.01	3.47	4.70	5.71	6.61	7.38	9.17	10.81
H_ARIMA	0.25 分位数	0.66	0.84	2.02	2.54	2.40	2.96	3.12	4.46
	平均値	1.83	3.31	4.91	6.01	6.71	7.25	8.26	9.16
	中央値	1.24	2.62	3.94	4.42	5.28	5.29	6.22	7.43
	0.80 分位数	2.70	4.86	6.72	8.29	10.08	10.44	11.66	12.53
	標準偏差	1.75	3.25	4.59	5.39	6.03	6.44	7.44	8.19

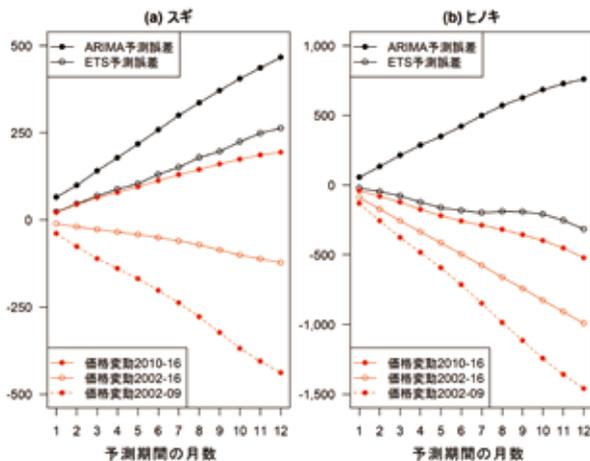


Fig. 30. 価格変動額と予測誤差( $e_t$ ) (平均値; 単位: 円): (a) スギ; (b) ヒノキ

Average price changes and average forecast errors (Yen): (a) sugi; (b) hinoki

期間のデータでは、指数平滑法の予測より、ARIMA 法の方が過少予測の程度が大きいことがわかる。

また、過少予測と過大予測のバランスを検討するために、予測誤差と変動額の平均値を Fig.30 にまとめた。Fig.30 (a) に示したように、スギ価格の予測では、ARIMA 法と指数平滑法ともに、過少予測の側に偏っていたが、指数平滑法の方がその程度が小さかった。本研究に用いられるデータの期間の全体は 2002 年 1 月から 2016 年 12 月までであるが、2008 年から 2009 年までの世界金融危機から 2010 年に回復が始まったので、2002 年から 2016 年までの期間を 2002 年から 2009 年まで (前期) と、2010 年から 2016 年まで (後期) との 2 つの期間に分けて、それぞれの平均変動額

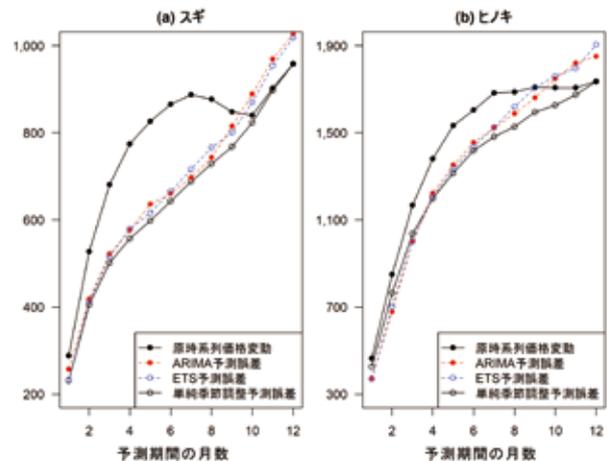


Fig. 31. 価格変動と平均絶対誤差 (MAE): (a) スギ; (b) ヒノキ

Average price changes and mean absolute errors: (a) sugi; (b) hinoki

を計算した。スギの場合は、全期間では価格がわずかに下降したが、前期では価格が下降しており、後期では価格が上昇してきたことがわかった。この下降傾向の期間のデータを含めたデータで得られたモデルを用いて、後期の上昇傾向の期間について予測した結果は、ARIMA 法も指数平滑法も過少予測となった。ヒノキの場合は、全期間で下降の傾向であったが、前期では価格の下降が深刻で、後期では価格の下降が弱まったことがわかった。スギの場合と同じく、ヒノキ価格の ARIMA 法の予測も過少予測となった。一方、ヒノキ価格の指数平滑法の予測は、頻度で見ると過小予測の回数の方がわずかに多かったが、平均で見るとやや過大予測となった。

次に、平均絶対変動額を、指数平滑法と ARIMA 法の予測期間の 1 カ月、2 カ月、そして、最後に 12 カ月予測の平均絶対誤差 (MAE) と比較を行った (Fig.31)。結果は、スギ予測の平均絶対誤差が予測期間 9 カ月まで、ヒノキ予測の平均絶対誤差が予測期間 8 カ月まで、それぞれの平均絶対変動額より小さかった。この結果は、スギの場合は予測期間が 9 カ月まで、ヒノキの場合は予測期間が 8 カ月まででは、指数平滑法も ARIMA 法も、価格変動を良く扱えており、単純法予測より良い、有効な予測手法だといえる。9~10 カ月以上になると、ARIMA 法と指数平滑法の予測精度が、単純法予測より高いとは言えない結果だった。

最後に、月次丸太価格の変動には、季節変動があるので、季節変動の要素を配慮して、単純季節調整法で予測を行って、予測誤差を計算した。単純季節調整法とは、ベースとなる実測値の月度と予測月度の季節変動値 (Table 1 参照) の差でベース月の実測値を調整する手法である。予測に使われた季節変動データは 2002 年から 2009 年までのデータの分解結果である。具体的には、例えば、2014 年 5 月の実際価格に 5 月から 6 月への季節変動値の増額分を加えたら、2014 年 6 月の予測値となり、5 月から 7 月への季節変動値の増額分を加えたら、7 月の予測値となるというふうに予測ができる。スギ及びヒノキの丸太価格に対して、予測期間ごとの単純季節調整法の平均絶対誤差を計算した。結果は、Fig.31 に示したように、スギの場合は ARIMA 法及び指数平滑法と単純季節調整法の平均絶対誤差の差が 1 円から 69 円までで、ヒノキの場合は -86 円から 170 円までであった。単純季節調整法予測の絶対誤差と ARIMA 法及び指数平滑法予測の絶対誤差の差に対して、ウィルコクソンの符号順位検定 (Wilcoxon signed rank test) を実施した。その結果は、スギの場合、すべての予測期間で、5% の有意水準で有意な差を検出できなかった。ヒノキの場合、予測期間が 2 カ月までは ARIMA 法及び指数平滑法予測の平均絶対誤差が小さく、5% の有意水準で有意な差を検出したが、4 カ月からは単純季節調整法予測の平均絶対誤差はやや小さいが有意な差を検出できなかった。

## 6. 考 察

状態空間モデルの導入や AIC 情報量基準の応用、統計ソフトの開発などで、伝統的な指数平滑法と ARIMA 法での単変量時系列データの予測が容易になってきた。本研究では、指数平滑法と ARIMA 法を用いたスギとヒノキ中丸太の月次価格の短期予測の結果に対して、予測精度の評価を行った。2010 年から 2016 年までの 7 年間に於いて、国内外の経済情勢の変化 (例えば、世界金融危機からの回復) と国内政策の変化 (例えば、消費税増税の実施) を含む複雑な環境の中で、また、予測期間の拡大につれて、指数平滑法と ARIMA 法の

予測精度がどうだったかについて実証的に分析を行った。

まず、2013 年 10 月に公表され、翌年 4 月に実施された消費税増税による駆け込み需要が、木造住宅に使われるヒノキとスギの価格に大きな影響を与えたため、この間の月次価格の予測は、誤差が大きかったことがわかった。また消費税増税ショックで高騰した直後の価格の予測が難しかったことから、トレーニングデータの最後が 2013 年 10 月から 2014 年 1 月までの間になった場合も、将来予測誤差が大きかった。また、世界金融危機からの回復時期には、過少予測が発生した。他方、2012 年春から夏までの下落時期において、過大予測が発生したが、消費税増税より影響が小さかった。一般的に価格変化には需要側、供給側の双方の要因が考えられるが、消費税増税の影響のある期間の価格変動は主として需要側の変動が要因になっているものと推察される。

また、Table 3、Table 4、Fig.29 に示したように、予測期間が長くなると誤差の各統計量 (絶対値) が増えていくことも明確に示されている。これは、予測期間を決めるときに参考になるであろう。例えば、スギ価格を予測するときに、絶対誤差を 80% の確率で 500 円範囲内に抑えたいければ、1 カ月先までしか予測に使えない。それに対して、範囲を 600 円以内にすればあるいは 5% 以内とすれば、2 カ月先までの予測に使える。さらに、6% 以内とすれば、3 カ月先までの予測に使えるであろう。つまり、予測精度の要求に応じて有効な予測期間の長さが決まる。

第 3 に、指数平滑法と ARIMA 法のどちらの予測精度が高いかについては、一概には言えない結果となった。スギ価格予測の場合は、指数平滑法と ARIMA 法の RMSE、MAE、MAPE がそれぞれ同程度という結果を得た。ヒノキの場合は、予測期間が 6 カ月以上になると ARIMA 法の RMSE、MAE、MAPE が指数平滑法より若干小さい。しかし、絶対誤差及び絶対パーセント誤差に対して、ウィルコクソンの符号順位検定を実施した結果は、指数平滑法と ARIMA 法の間には 5% の有意水準で有意な差が認められなかった。

Fig.6、Fig.9、Fig.13、Fig.16 などに示された予測誤差をみると、スギの場合もヒノキの場合も、指数平滑法も ARIMA 法も、正の誤差 (過少予測)、または負の誤差 (過大予測) が連続して生じやすいことが確認できる。これはいわば、自己相関の問題が存在するためである。予測誤差の間に相関があるということは、前の時期の誤差 (エラー) に関する情報が新しい予測の誤差を最小にするように使われていないことになる。予測期間が 1 カ月の場合は、S\_ETS、S\_ARIMA、H\_ETS、H\_ARIMA の自己相関係数 (ピアソン) がそれぞれ、0.410、0.328、0.498、0.150 であり、さほど高くない。それらの p-value はそれぞれ、0.000、0.002、

0.000、0.175 であった。つまり、S\_ETS、S\_ARIMA、H\_ETS の予測誤差には自己相関が存在するが、H\_ARIMA には、自己相関が存在していないという仮説を棄却できないこととなった。予測期間が2カ月先の場合は、誤差の自己相関係数がそれぞれ、0.599、0.529、0.704、0.590 になり、相関関係が強くなった。p-value も全部 0.01 より小さく、1%の水準で有意になった。予測期間が長くなると、自己相関係数も上がる。一般には自己相関問題があれば、モデルに改善の余地があることを示している。特に予測期間が1カ月の場合は、最近の動向がモデルに十分に反映されておらず、モデルの改善の余地があるのか、あるいはトレーニング期間とテスト期間で価格変動系列の性質に変化があったことを示している。しかし、予測期間が長い時には、前月、前々月などの動向がわからない時点で予測しなければならぬので、誤差の自己相関が避けられない。

第4に、原時系列データの価格変動額の分析によって、指数平滑法と ARIMA 法予測は、8カ月以下の短期予測では単純法より予測精度が高いことがわかった。しかし、単純季節調整法の平均絶対誤差と比べると、指数平滑法と ARIMA 法予測は、ヒノキの1、2カ月以内の予測期間の場合に限って、誤差が小さくて、5%の有意水準で有意な差が認められた。他の場合、指数平滑法及び ARIMA 法予測と単純季節調整法予測の絶対誤差の間に有意な差を検出できなかった。傾向変動を配慮した指数平滑法と ARIMA 法は、単純季節調整法予測より多少なりとも精度が高い結果を期待したが、今回のデータではそれが検証できなかった。その原因は Fig.1 に示されているように、2002年から2009年までの価格変動の傾向が2010年から2011年あたりを境に傾きが変化したためと思われる。また、一般に1カ月から2カ月までの短期の予測であれば、指数平滑法や ARIMA 法による予測は、短期の傾向変動が考慮されることなどにより、単純季節調整法予測よりも精度が高いと期待されるが、3カ月以上先の予測になると、単純季節調整法予測と比べて精度が高いとは言えないことが示唆された。

第5に、Fig.1 に示したように、2002年以来、建築用材、合板への利用、バイオマス利用などの需要の拡大により、スギ丸太の価格に下落の傾向が見られないことに対して、ヒノキ丸太の価格には、長期的に減衰下落の傾向が見られるという違いがあり、予測モデルの構造も2つの樹種で異なるものとなった。スギとヒノキでは価格水準が違うので、平均絶対パーセント誤差 (MAPE) を用いて、Fig.29 に示されたそれぞれの丸太価格の予測誤差を見てみると、多くの場合、前者の方が低いことがわかった。ヒノキの方が価格の予測誤差が大きくなった原因の1つには、5.3.6 に分析したように、前期 (2002～2009年) と比べて、後期 (2010～2016年) においては価格の下落傾向が緩やかなもの

に変化したことがあると考えられる。

最後に、この分析には、消費税増税の影響で、予測の絶対誤差が大きい時期があったため、誤差の分布が正規分布と比べて両裾 (とくにプラス側) の厚い急尖的分布であり、消費税増税の影響のない時期よりも、誤差が大きくなった。これは指数平滑法や ARIMA 法のような時系列分析の予測手法の限界であろう。過去の価格以外の変数を組み込んだモデルを使うことによって予測精度を向上させられる可能性があるが、前述のように、他の変数を組み込む場合にはモデルの構築だけではなく、これらの変数の予測が必要となる。誰もが最良と認める手法が存在しないため、いくつかの予測結果から総合的に判断することも1つの改善法となりうる。

本研究の対象は、全国平均値のスギとヒノキ中丸太の価格としたが、この手法は全国平均だけでなく、県別の違う樹種、材種の丸太及び製材品などの価格変動の分析及び予測分析にも応用可能である。

## 謝 辞

丸太価格の変動についての現地調査でご協力をくださった宮崎県森林組合連合会の田之上裕明氏、宮崎大学の大地俊介氏、森林総合研究所東北支所の天野智将氏を始め、製材工場や原木市場の関係者の皆様に、心より感謝いたします。

## 引用文献

- Brown, R. G. (1959) Statistical forecasting for inventory control. McGraw/Hill, New York, NY, USA, 223pp.
- Cleveland, W. S. (1979) Robust locally weighted regression and smoothing scatterplots. *Journal of the American Statistical Association*, 74 (368), 829-836.
- Cleveland, R. B., Cleveland, W. S., McRae, J. E. and Terpenning, I. (1990) STL: A seasonal-trend decomposition procedure based on loess. *Journal of Official Statistics*, 6, 3-73.
- 遠藤 日雄 (2013) 丸太価格の暴落はなぜ起こるか: 原因とメカニズム, その対策. 全国林業改良普及協会, 144pp.
- 林 宇一・立花 敏 (2013) 木材価格変動に関する分析. 林業経済学会 2013 年秋季大会要旨集, D28.
- 林 宇一・立花 敏 (2016) 木材価格における季節要素の析出と構成要素の類似性の検討. *林業経済*, 69 (9), 1-17.
- 廣松 毅・浪花 貞夫・高岡 慎 (2006) 経済時系列分析. 多賀出版, 404pp.
- Holt, C. C. (2004) Forecasting seasonals and trends by exponentially weighted moving averages (a reprinted version). *International Journal of Forecasting*, 20, 5-10.

- 堀 靖人 (2011) 素材生産業における直納化の動き. 森林総合研究所編 “山・里の恵みと山村振興: 市場経済と地域社会の視点から”. 日本林業調査会, 97-102.
- Hyndman, R. J. and Koehler, A. B. (2006) Another look at measures of forecast accuracy. *International Journal of Forecasting*, 22 (4), 679-688.
- Hyndman, R. J. and Khandakar, Y. (2008) Automatic time series forecasting: the forecast package for R. *Journal of Statistical Software*, 27 (3), 1-22.
- Hyndman, R. J., Koehler, A. B., Ord, J. K. and Snyder, R. D. (2008) *Forecasting with exponential smoothing: The state space approach*. Springer, 359pp.
- Hyndman, R. J. (2011) Statistical tests for variable selection. Hyndsight: A blog. <http://robjhyndman.com/hyndsight/tests2/> (accessed 2017-03-24).
- Hyndman, R. J. and Athanasopoulos, G. (2013) *Forecasting: principles and practice*. OTexts, Melbourne, Australia. <http://otexts.org/fpp/> (accessed 2017-04-11).
- Hyndman, R. J. (2016a) Forecast: Forecasting functions for time series and linear models. R package version 7.3, <http://github.com/robjhyndman/forecast>.
- Hyndman, R. J. (2016b) Cross-validation for time series. Hyndsight: A blog. <http://robjhyndman.com/hyndsight/tscv/> (accessed 2017-03-24).
- 小池 芙美・興梠 克久 (2011) 原木市売市場の機能に関する一考察—株式会社伊万里木材市場を事例に—. *林業経済*, 63 (10), 2-16.
- 久保山 裕史 (2011) 大規模製材工場の素材調達方法の変化とその要因. 森林総合研究所編 “山・里の恵みと山村振興: 市場経済と地域社会の視点から”. 日本林業調査会, 75-83.
- 久保山 裕史 (2012) スギ・ヒノキ丸太価格の変動傾向と最近の価格下落について. *木材情報*, 258, 5-9.
- 久保山 裕史・立花 敏 (2014) 針葉樹丸太の価格変動傾向に関する統計分析. *関東森林研究*, 65 (1), 9-12.
- 松下 幸司・半田 良一 (1981) 木材価格の循環変動分析. *京都大学農学部演習林報告*, 53, 76-86.
- 松下 幸司 (1984) 木材価格の周期変動. *日林論*, 95, 17-18.
- 道中 哲也・久保山 裕史 (2015) 分解法による木材価格変動分析. 第5回関東森林学会大会講演要旨集, 117.
- Michinaka, T., Kuboyama, H., Tamura, K., Oka, H. and Yamamoto, N. (2016) Forecasting monthly prices of Japanese logs. *Forests*, 2016, 7 (5), 94.
- 三井 鼎三 (1938) 木材価格の季節変動に就いて. *林業経済政策資料第三輯*, 社団法人全国山林会連合会, 43-56.
- 望月 峯 (1929) 主要林産物の価格変動に就いて 殊に其の統計的研究. *東大農演報*, 7, 1-65.
- 森 義昭 (1970) 木材の価格変動分析. *日林誌*, 52 (8), 227-237.
- 農林水産省 (2017) 木材価格統計調査. <http://www.maff.go.jp/j/tokei/kouhyou/mokuryu/kakaku/> (参照 2017-01-23).
- R Core Team (2016) R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>
- Shmueli, G. (2010) To explain or to predict?. *Statistical Science*, 25 (3), 289-310.
- 竹内 啓 (1989) *統計学辞典*. 東洋経済新報社, 1185pp.
- 多田 忠義 (2012) 東北地方における合板向け国産材供給体制の実態. *林業経済研究*, 58 (1), 68-77.
- Winters, P.R. (1960) Forecasting sales by exponentially weighted moving averages. *Management Science*, 6 (3), 324-342.
- 行武 潔 (1981) 木材価格の周期性. *木材工業*, 36 (5), 203-209.
- 行武 潔・吉本 敦・樋口 幸浩 (2004) 九州の民間2市場における木材価格の時系列分析. *森林計画誌*, 38 (2), 61-74.

# Measuring forecasting accuracy for exponential smoothing and ARIMA models: a case of forecasting monthly prices of Japanese *sugi* and *hinoki* logs

Tetsuya MICHINAKA<sup>1)\*</sup>, Hiroyasu OKA<sup>1)</sup>, Hirofumi KUBOYAMA<sup>1)</sup> and Nobuyuki YAMAMOTO<sup>1)</sup>

## Abstract

Exponential smoothing (ETS) method and autoregressive integrated moving average (ARIMA) models have been applied to forecasting monthly price of logs, *sugi* (Japanese cedar, *Cryptomeria japonica* D. Don) and *hinoki* (Japanese cypress, *Chamaecyparis obtusa* (Sieb. et Zucc.) Endl.). In this research, we evaluated the forecast accuracy of these two approaches through cross validation. Monthly current price data from January 2002 to December 2016 were used. The results show that the forecast accuracy of ARIMA models was not statistically significantly different from that of ETS method at 5% level for the period from January 2010 to December 2016 under all 12 forecast horizons of one month to 12 months. By comparing with the amount of changes in original prices, it was found that both ETS method and ARIMA models forecasted with smaller mean absolute errors than mean absolute amount of changes in prices within 8 months of forecast horizons at 5% level, which showing that ETS method and ARIMA models outperformed naive method. However, by comparing with seasonally adjusted naive method, ARIMA model showed better forecast accuracy only for forecast horizons of 1 and 2 months for *hinoki* at 5% level of statistical significance, while ARIMA model at other horizons and ETS method did not outperform seasonally adjusted naive method in forecast accuracy.

**Key words:** price of logs, forecast errors, exponential smoothing, ARIMA models, seasonally adjusted naive method, cross validation

---

Received 16 June 2017, Accepted 10 November 2017

1) Department of Forest Policy and Economics, Forestry and Forest Products Research Institute (FFPRI)

\* Department of Forest Policy and Economics, FFPRI, 1 Matsunosato, Tsukuba, Ibaraki, 305-8687 JAPAN; e-mail: michinaka.t@affrc.go.jp



---

**論文 (Original article)**

---

# Effects of thinning on canopy interception loss, evapotranspiration, and runoff in a small headwater *Chamaecyparis obtusa* catchment in Hitachi Ohta Experimental Watershed in Japan

Tayoko KUBOTA<sup>1)\*</sup>, Yoshio TSUBOYAMA<sup>2)</sup> and Tatsuhiko NOBUHIRO<sup>3)</sup>

## Abstract

The effects of thinning on canopy interception loss, evapotranspiration, and runoff were investigated by a paired catchment experiment in a small headwater catchment in Japan. A 0.88-ha catchment covered with a *Chamaecyparis obtusa* plantation that was planted in 1986 was intensively thinned in March 2009 following a 3-year calibration period (2006-2008). To avoid disturbing the soil surface, thinning was conducted by forest workers using chainsaws, and the thinned trees were left on the forest floor where they fell. Thinning removed 50 % of the trees, 30 % of the timber volume, and 22.5 % of the basal area. Canopy interception loss decreased by 4 % in the first year after thinning, and it returned gradually to the pre-thinning level for 3 years. The maximum increase in the annual runoff, 147 mm, occurred in the second year after thinning. The mean annual increase in the runoff during the post-thinning period (2010-2012) was 54 mm, although this was not statistically significant. The mean annual evapotranspiration significantly reduced by 140 mm, and the reduction was especially large during the growing season. In conclusion, it seemed that the intensive thinning in a small headwater plantation was effective to increase net precipitation and stream water for a short period.

**Key words:** thinning, canopy interception loss, evapotranspiration, runoff, paired catchment experiment

## 1. Introduction

Devastation of abandoned forests has been a concern since the late 1990s in Japan (Japanese Forestry Agency 1998). High stand densities in unmanaged forests may reduce tree growth and understory vegetation by blocking sunlight, which may cause surface erosion (Onda et al. 2010). The Japanese Forestry Agency promotes thinning activities to improve forests and to meet Japan's commitment to reduce greenhouse gas emissions under the Kyoto Protocol (Japanese Forestry Agency 2013). Intensive thinning, which removes more than 40 % of trees, is also promoted to reduce operating cost. Following the promotion of forest thinning, the effects of thinning on water yield have recently become a concern in Japan.

The effects of timber harvesting, including thinning, on water yields in catchments have been examined by a lot of paired catchment experiments throughout the world (Bosch and Hewlett 1982, Brown et al. 2005). Although experiments to determine the effects of clear cutting or partial cutting on water yield have been conducted in several experimental watersheds in Japan (Nakano 1971), most studies on the effects of thinning on hydrological change in Japan focused on plot-scale investigations of evapotranspiration (Hattori and Chikaarashi

1988, Murai 1970, Nanko et al. 2015) and on transpiration (Komatsu et al. 2013, Morikawa et al. 1986). Kubota et al. (2013) investigated the change of evapotranspiration by thinning in a basin scale, however they did not describe the change of canopy water balance or water yield by thinning. Therefore, to develop a reliable management plan for untended forests to prevent flooding and increase available water, more case studies in Japan should focus on the interactions between various thinning intensities and hydrological changes on catchment scales.

The objective of this study was to determine the effects of intensive thinning on canopy interception loss, evapotranspiration, and runoff in the *Chamaecyparis obtusa* small headwater catchment in Japan using a paired catchment experiment.

## 2. Methods

### 2.1 Study area

The Hitachi Ohta Experimental Watershed is located about 140 km northeast of Tokyo (36°34' N and 140°35' E) (Fig. 1a). Its altitude ranges from 283 to 341 m. The two catchments, which are designated HA (control) and HV (thinning), are 0.84

---

Received 6 March 2017, Accepted 14 December 2017

1) Tohoku Research Center, Forestry and Forest Products Research Institute (FFPRI)

2) Principal Research Director, FFPRI

3) Hokkaido Research Center, FFPRI

\* Tohoku Research Center, FFPRI, 92-25 Nabeyashiki, Shimokuriyagawa, Morioka, Iwate, 020-0123 JAPAN; e-mail: ktayoko@affrc.go.jp

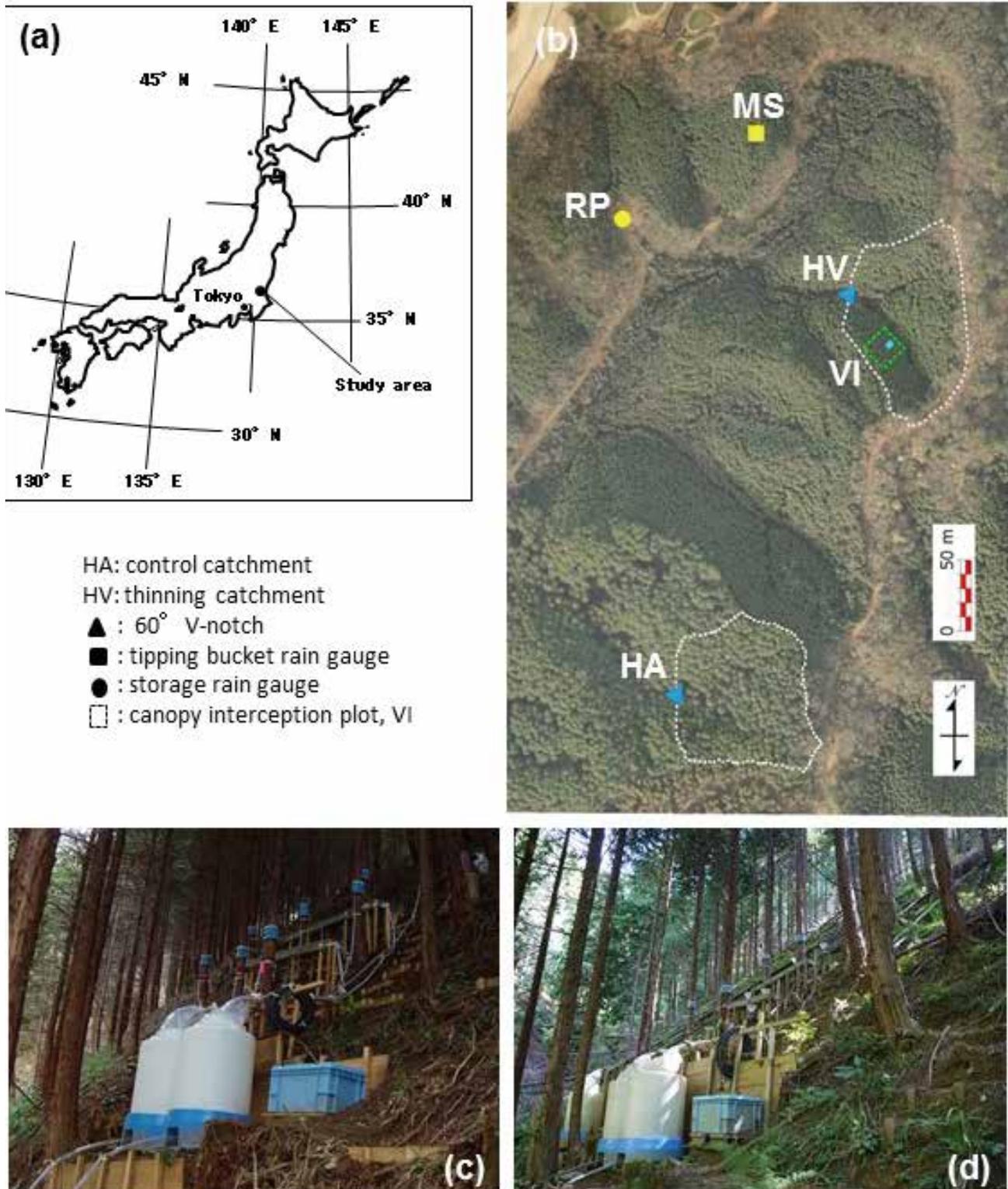


Fig. 1. Hitachi Ohta Experimental Watershed. (a) Location of study site; (b) control and thinning catchments; (c) canopy interception plot before thinning; (d) canopy interception plot after thinning.

ha and 0.88 ha, respectively (Fig. 1b).

The surficial geology in the study area is metamorphic, primarily consisting of schist and amphibolite (Sidle et al. 1995, Tsuboyama 2006). Soils are clay loam derived from volcanic ash. Soil pits were excavated to bedrock at total nine sites

within HA and HV, and the mean soil depth was  $0.68 \pm 0.34$  m (Tsuboyama 2006). Mean hillslope gradient in HA and HV was  $26.8^\circ \pm 9.9^\circ$  and  $31.1^\circ \pm 11.1^\circ$ , respectively.

*Chamaecyparis obtusa* and *Cryptomeria japonica* were artificially planted in catchments HA and HV in 1924 and 1986,

respectively. *C. obtusa* covered most of the catchment and *C. japonica* existed only along streambanks. Hardwood species (e.g., *Quercus serrata*) exist at the upstream edge in HV (Fig. 1b). The main understory vegetation in HA contains *Hydrangea hirta*, *Hydrangea involucrata*, and *Microlepis marginata* (Kato et al. 1995, Murakami et al. 2000). While there was little understory vegetation except in HV, although *Eurya japonica* and *Callicarpa mollis* (1-3 m height) were mainly found in gaps.

There are two major periods of rainfall: a rainy season in early summer and an autumn typhoon season. Although sporadic snowfall occurs, there is no persistent snowpack. The snow is only a minor component of the hydrological budget (Tsuboyama 2006). The monthly mean air temperature from 2006 to 2012 ranged from 2.0°C in January to 23.6°C in August, with an annual average of 12.4°C.

Observation period was from 2006 to 2012. We defined that the pre-thinning period was from 2006 to 2008 and the post-thinning period was from 2010 to 2012. The year 2009 was eliminated from the analysis due to the thinning year.

## 2.2 Thinning operation

About half of the trees in HV were thinned mostly on 9 March 2009. To adjust the tree reduction ratio to 50 % of trees and 30 % of timber volume, a small number of trees were thinned again on 26 May 2009. Although the trees to be thinned were randomly selected, relatively smaller trees were removed (Table 1). All thinning was performed by forest workers using chainsaws to minimize the disturbance of the soil surface. A skid trail was not constructed. The thinning timbers were left randomly where they fell; they were neither arranged to the contour line nor removed.

## 2.3 Precipitation and other meteorological observations

Precipitation was measured using a tipping bucket rain gauge (TE525MM; Campbell Scientific, USA; capacity 0.5 mm of water), with a gauge (RT-5E; Ikeda, Japan; capacity 0.1

mm) as backups, at the meteorological station (MS; Fig. 1b). Precipitation was logged every 10 min. The MS is an open site on a ridgetop with a size of approximately 15 m × 7 m. Because grown trees surround the MS intercept precipitation, a storage rain gauge was placed in a more open site, RP, to correct precipitation data (Fig. 1b). This gauge consists of a 0.2-m diameter polyethylene funnel connected to a 10-L polyethylene bottle.

## 2.4 Throughfall, stemflow, and runoff

Throughfall and stemflow were measured approximately every 10 days at the interception plot VI (20 m × 20 m) (Figs. 1b-1d). Throughfall was collected by two troughs (4 m (L) × 0.26 m (W) × 0.12 m (H)). Stemflow was collected by a urethane collar surrounding the tree. Stemflow was measured on 10 trees before thinning and on five residual trees after thinning. The collected throughfall and stemflow were directed into 100-L tanks (one for throughfall and two for stemflow) by hoses. The water level in the tank was measured every 10 min by pressure-type water gauges (CS450; Campbell Scientific, USA) recorded by a data logger (CR10X; Campbell Scientific, USA), and converted to water head. Streamflow was monitored using gauging weirs (60°, V-notch) at the outlets of the HV and HA (Fig. 1b).

## 2.5 Canopy water balance

To compare the canopy water balance before and after thinning, the following equation was used:

$$P = I + T + S \quad (1)$$

where  $P$  is precipitation (mm),  $I$  is canopy interception loss (mm),  $T$  is throughfall (mm), and  $S$  is stemflow (mm).

## 2.6 Evapotranspiration

To estimate the variation in evapotranspiration, a short-term water budget method (Suzuki 1985) was used:

$$E = P - Q = \int_{t_1}^{t_2} p(t)dt - \int_{t_1}^{t_2} q(t)dt, \quad (2)$$

where  $E$  is evapotranspiration (mm),  $p(t)$  is the precipitation intensity (mm day<sup>-1</sup>) and  $q(t)$  is the runoff rate (mm day<sup>-1</sup>).  $t$  is the time in days.  $t_1$  and  $t_2$  are the first and final days, respectively, of the hydrologic period used to calculate the water budget. The procedure described by Suzuki (1985) was used to determine the hydrologic period to calculate the water budget. If multiple estimated values were obtained on the same day, they were averaged.

## 2.7 Estimation of annual water yield by paired catchment experiment

Simple linear regression was used to relate annual runoff

**Table 1. Canopy structure in the HA control catchment and the HV thinning catchment.**

	HA <sup>1</sup>	HV	
		Pre-thinning <sup>2</sup> 2006-2008	Post-thinning <sup>3</sup> 2010-2012
Planted year	1924	1986	1986
Stand density (stem ha <sup>-1</sup> )	783	2229	1132
Basal area (m <sup>2</sup> ha <sup>-1</sup> )	63	32.4	25.1
Tree height (m)	18	10.8	12.1
DBH (cm)	32	13.6	16.8
Total volume (m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> )	553	308	218

<sup>1</sup> Values surveyed in 1993 (Murakami et al. 2000).

<sup>2</sup> Values surveyed in 2008.

<sup>3</sup> Values calculated for residual trees.

measured in HA and HV during the pre-thinning period 2006-2008, as follows.

$$Q_{HV} = aQ_{HA} + b, \quad (3)$$

where  $Q$  is runoff (mm),  $a$  and  $b$  are empirical coefficients, and subscripts HA and HV indicate the two catchments. Equation (3) was used to predict runoff in HV during the post-thinning period 2010-2012, as if there had been no thinning. The difference between the predicted value and measured values was quantified to indicate the magnitude of any response to the treatment.

### 3. Results

#### 3.1 Precipitation and runoff during the observation period

The mean annual precipitation was almost the same between the pre- and post-thinning periods (Table 2), however the monthly precipitation pattern differed (Fig. 2a). In 2006, precipitation was high throughout the year and especially monthly precipitation in June was high. Precipitation in May 2012, when is the onset of the rainy season, was very high, although the annual precipitation in 2012 was normal compared to the average. Variation of runoff corresponded precipitation well both in HA and HV (Fig. 2b). The effect of thinning on runoff increase might not appear on monthly runoff pattern.

#### 3.2 Change in canopy interception

Precipitation, throughfall, stemflow, interception loss, and their ratios to precipitation ( $T/P$ ,  $S/P$ , and  $I/P$ , respectively) during the pre- and post-thinning periods are listed in Table 2. The mean  $T/P$  ratio was 72 % during the pre-thinning period and increased to 78 % during the post-thinning period. They were not significantly different ( $p=0.07$  by Student's  $t$ -test). The  $T/P$  ratio did not return to the pre-thinning level in the third

years from the thinning. The mean  $S/P$  ratio was 8 % during the pre-thinning period and decreased to 4 % during the post-thinning period. They were significantly different between pre- and post-thinning periods ( $p=0.005$  by Student's  $t$ -test). The  $I/P$  ratio decreased in the first and second year after the thinning and returned to the pre-thinning level in the third year after the thinning. The mean  $I/P$  ratio was 20 % during the pre-thinning period and decreased to 18 % during the post-thinning period. They were not significantly different ( $p=0.3$  by Student's  $t$ -test). The mean interception loss had seemingly nearly unchanged following the thinning, because the increase in throughfall and

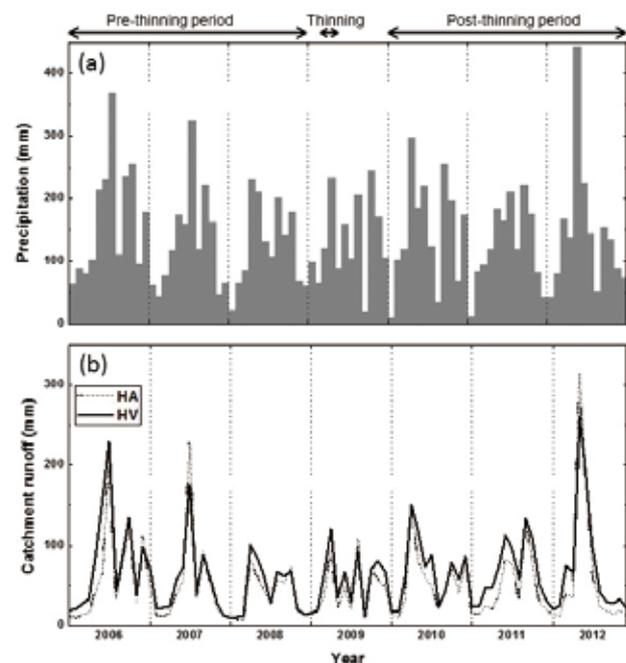


Fig. 2. (a) Monthly precipitation and (b) monthly runoff in the HA control and the HV thinning catchments during the pre- and post-thinning periods.

Table 2. Change in throughfall, stemflow and canopy interception loss due to thinning in the HV thinning catchment.

	$P^1$ mm	$T^1$ mm	$S^1$ mm	$I^1$ mm	$T/P$ %	$S/P$ %	$I/P$ %
Pre-thinning							
2006	2020	1452	179	389	72	9	19
2007	1571	1095	134	342	70	9	22
2008	1499	1104	113	282	74	8	19
Mean	1697	1217	142	338	72	8	20
Post-thinning							
2010	1783	1417	89	277	79	5	16
2011	1500	1181	59	260	79	4	17
2012	1735	1329	54	351	77	3	20
Mean	1672	1309	67	296	78	4	18

<sup>1</sup>  $P$ ,  $T$ ,  $S$ , and  $I$  represent precipitation rainfall, throughfall, stemflow, and canopy interception loss, respectively. Missing data of throughfall and stemflow, were completed using the following regression lines;  $T=0.82P-0.85$  ( $r^2=0.99$ ,  $n=316$ ) and  $S=0.10P-0.28$  ( $r^2=0.92$ ,  $n=280$ ) for the pre-thinning period (2006-2008);  $T=0.83P-0.52$  ( $r^2=0.96$ ,  $n=403$ ) and  $S=0.06P-0.18$  ( $r^2=0.81$ ,  $n=381$ ) for the post-thinning period (2010-2012).

the decrease in stemflow canceled each other in the equation (1).

### 3.3 Change in evapotranspiration

The monthly mean of daily evapotranspiration in HV was significantly different between the pre- and the post-thinning period ( $p=0.01$  by Student's  $t$ -test; Fig. 3). The annual reduction in evapotranspiration in HV was 140 mm, and especially large during the growing season (April to October). The total evapotranspiration during the growing season was 598 mm during the pre-thinning period and 495 mm during the post-thinning period. While the monthly evapotranspiration in HA was not significantly different between the pre- and the post-thinning period ( $p=0.1$  by Student's  $t$ -test).

### 3.4 Change in runoff

The mean annual runoff increased following the thinning. The result of the paired catchment experiment was summarized

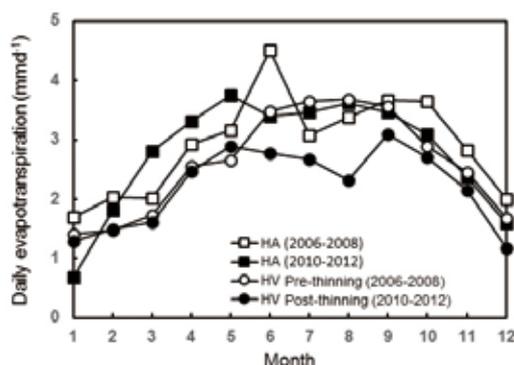


Fig. 3. Mean daily evapotranspiration in the HA control and the HV thinning catchments during the pre- and post-thinning periods.

in Table 3 and shown in Fig. 4. The measured annual runoff in HV was larger than the runoff predicted by the equation (3) in the first and especially second year after the thinning, and returned to the pre-thinning level in the third year after the thinning. The mean increases in the annual runoff (measured-predicted runoff) were 93 mm and 54 mm for first 2 years and during the post-thinning period, respectively. These were not significant compared with those during the pre-thinning period ( $p > 0.05$  by Student's  $t$ -test).

## 4. Discussion

### 4.1 Effects of thinning on canopy water balance and evapotranspiration

The annual  $T/P$  did not return to the pre-thinning level in the third year after the thinning (Table 2). Nobuhiro et al. (2013)

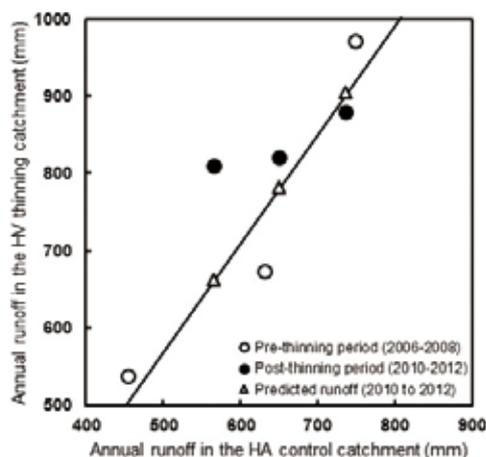


Fig. 4. Relationship between annual runoff for the HA control and the HV thinning catchments. The regression line is for the pre-thinning data;  $Q_{HV}=1.4Q_{HA}-138.8$  ( $r^2=0.9$ ).

Table 3. Annual precipitations, runoffs, and runoff rates in the HA control catchment and the HV thinning catchment, and the effect of thinning on runoff in HV estimated by the paired catchment experiment.

	Precipitation (mm)	HA control catchment		HV thinning catchment			Water yield <sup>2</sup> (mm)
		Runoff (mm)	Runoff rate (%)	Measured runoff (mm)	Runoff rate (%)	Predicted runoff <sup>1</sup> (mm)	
Pre-thinning							
2006	2020	749	37	971	48	923	48
2007	1571	630	40	674	43	754	-80
2008	1499	455	30	538	36	506	32
Mean	1697	611	36	728	42	728	0
Thinning year							
2009	1613	545	34	669	41	727	36
Post-thinning							
2010	1783	650	36	821	46	783	38
2011	1500	565	38	809	54	662	147
2012	1735	736	42	880	51	905	-25
Mean	1672	650	39	837	50	783	54

<sup>1</sup> Predicted runoff is based on a regression equation for the pre-thinning period (2006–2008):  $Q_{HV}=1.4Q_{HV}-139$  ( $r^2=0.90$ ).

<sup>2</sup> Water yield was calculated by subtracting predicted runoff from measured runoff

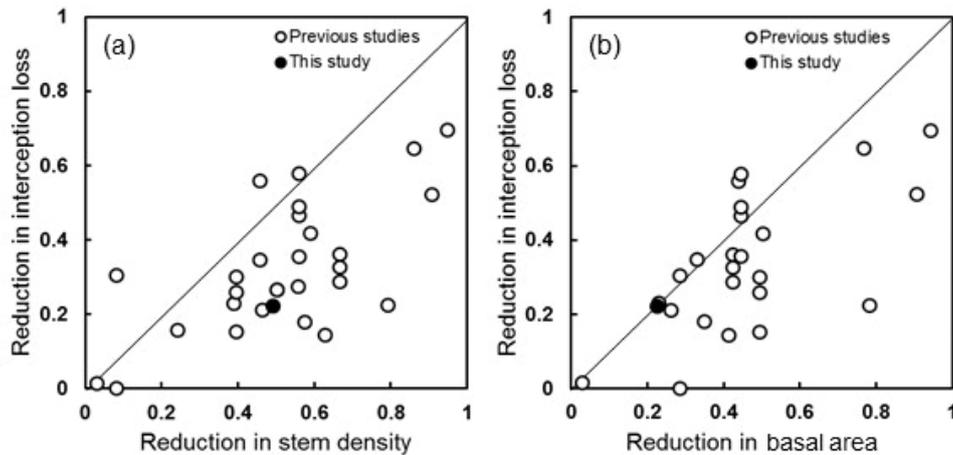


Fig. 5. The relationship between interception loss and (a) the reduction in stem density following thinning, and (b) the reduction in basal area.

measured the leaf area index (LAI) with a plant canopy analyzer (LAI 2000, LI-COR, USA), as well as the horizontal canopy area, several times every month at nine points within the canopy interception plot VI (Figs. 1b-1d) from 2007 through 2011. The mean annual LAI was 4.7 during the pre-thinning period. It decreased to 2.7 in March 2009 after thinning, and recovered to 3.4 by 2011, but it did not return to the pre-thinning level. In contrast, the total horizontal area of the canopy in VI was 593 m<sup>2</sup> during the pre-thinning period, and it decreased to 364 m<sup>2</sup> in March 2009 after thinning. It constantly recovered to 582 m<sup>2</sup> by February 2010, and continued to increase to 706 m<sup>2</sup> until August 2011. Thus, the horizontal canopy area quickly returned to the pre-thinning level, but the total amount of foliage probably recovered slowly because LAI did not recover to the pre-thinning level. Therefore, not only the horizontal canopy closure but also the total amount of foliage has an impact on throughfall volume.

The relation between the reduction of canopy interception loss and the reduction of stem density or basal area in the first year after the thinning in this study was compared to those of the previous studies in a similar manner to Nanko et al. (2015) (Fig. 5). The basal area reduction was 22.5 % in this study. This was relatively small because of poor tree growth in this study area. The reduction of interception loss related to the reduction of stem density was average compared with the previous studies and that related to the reduction of basal area was high in this study. These were attributed to small reduction of the basal area in spite of 50 % removal of trees.

Evapotranspiration during the growing season reduced from 598 mm to 495 mm (a 17 % decrease) due to the thinning in this study. Morikawa et al. (1986) measured transpiration before and after thinning in a *C. obtusa* stand in Japan by the heat pulse method. They showed that transpiration per a tree increased following the thinning whereas transpiration of the

stand decreased after thinning during the growing season (April to September). The reduction of evapotranspiration in HV following the thinning was likely owed to the reduction of total transpiration due to the reduction of trees, because the mean interception loss did not change following to the thinning in this study.

#### 4.2 Effect of thinning on runoff increase

The famous review of 94 paired catchment experiments by Bosch and Hewlett (1982) concluded that yield increased with decreasing forest cover and yield decreased with increasing forest cover. They suggested that the approximate magnitude of water yield change could be estimated by the percentage of the reduction of forest cover. There was, however, no relationship between the mean annual runoff increases following uniform thinning and the reductions of basal area (Fig. 6, Table 4), although the increase was more or less in proportion to the

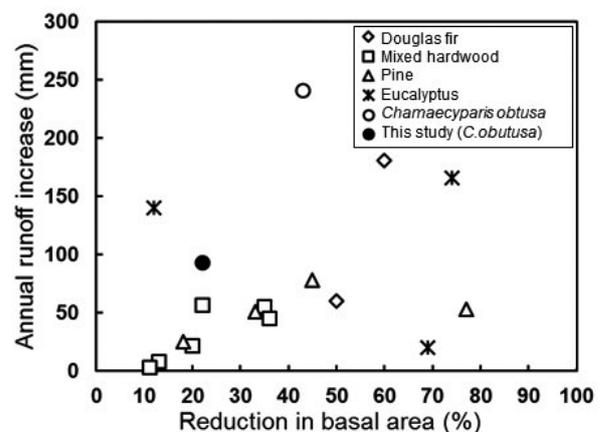


Fig. 6. Relationship between reduction in basal area and mean increases in annual runoff following uniform thinning in previous paired catchment experiment studies and this study.

**Table 4. A summary of worldwide paired catchment experiments on uniform thinning effects.**

Catchment	Area (ha)	Vegetation and soils	Description of cut	Mean annual precipitation (mm)	Reduction of basal area (%)	Runoff increases by years following thinning (mm)					References	
						1st	2nd	3rd	4th	5th		mean
H.J. Andrews, Oregon, USA												
HJA-7	15	Douglas fir; unaltered volcanic lastics	1974, shelterwood cut	2190	60	191	243	172	211	91	181	(1)
Coweeta, North Carolina, USA												
19	28	Mixed hardwoods; granitic origin, deeply weathered sandy clay loam up to 6 m	1949, understorey cut	2001	22	101	61	66	20	37	57	(2)
41	29		1955, selective cutting	2009	35	Averaged 55 mm per year					(3)	
Fermow, West Virginia, USA												
2	15	Mixed hardwoods; sandstone and shale, stoney silt loam, 1-1.5 m deep	1957-1958, trees over 43 cm DBH cut	1500	36	25	64				45	(4)
5	36		1957-1958, trees over 28 cm DBH cut	1473	20	25	18				22	(4)
3	34		1957-1958, trees over 13 cm DBH cut	1500	13	-3	8				8	(4)
Alum Creek, Ark., USA												
WS2	1	Pine with hardwood under story; stoney loam soils 0.75-1 m deep	1970, thinned, under-growth killed by herbicide application	1333	45	107	58	89	58		78	(3)
Coyote Creek, Oregon, USA												
CC-1	69	Douglas fir; mixed conifers; well-drained gravelly loam derived from breccia parent material, 150 cm deep	1971, shelterwood cut	1229	50	60 (average over 5 yr.)					(5)	
Beaver Creek, Utah, USA												
17	121	ponderosa pine; volcanic basalt, cinder parent materials, stony clay loam and stony silt loam, less than 1 m	1969-1970, overstorey cut	722	77	63	58	53	48	43	53	(6)
8	730		1974-1975, overstorey cut	744	33	70	61	52	42	32	51	(6)

(1) Harr et al. (1982), (2) Johnson and Kovner (1956), (3) Bosch and Hewlett (1982), (4) Reinhart et al. (1963), (5) Harr et al. (1979), (6) Baker (1986), (7) Ruprecht et al. (1991), (8) Stoneman (1993), (9) Lane and Mackey (2001), (10) Lesch and Scott (1997), (11) Özyuvaci et al. (2004), (12) Dung et al. (2012)

Table 4. A summary of worldwide paired catchment experiments on uniform thinning effects (continued).

Catchment	Area (ha)	Vegetation and soils	Description of cut	Mean annual precipitation (mm)	Reduction of basal area (%)	Runoff increases by years following thinning (mm)					References	
						1st	2nd	3rd	4th	5th		mean
Western Australia												
Hansen	80	Eucalyptus with small-leaved sclerophyllous shrubs understory; duricrust and fine pisolitic gravels.	1985, thinning	1300	74	65	129	304			166	(7)
Yarragil 4L	126	Eucalyptus; lateritic duricrust and lateritic gravels	1983, thinning	1120	69	4	31	9	6	48	20	(8)
Tantawangalo Creek catchment, Southern Australia												
Willbob	85.6	Eucalyptus mixed forest; shallow loam-clay-loam A horizons overlies deep sandy clay loam to clay B2 horizons, 0.9-2.0 m	1989, selective thinning	1100	12	140 (converted to yearly runoff from monthly deviation of total streamflow over 52 months)						(9)
South Africa												
Biesievlei	27.2	Pinus radiata plantation; deeply weathered Cape Granite, with shale lens, overlying sand stone	1964, 2nd thinning after 1st thinning in 1954	1427	18	5	29	42			25	(10)
Belgrad Forest, Turkey												
W II	77.5	Oak and beech, mixed hardwood; carboniferous clay schists and Neogene loamy gravelly deposits	1986, standard individual selective cutting	1091	11 (in volume)			3 (average over 10 yr.)				(11)
Japan												
M5	0.35	Chamaecyparis obtusa; Cambisol soils ranging from 0.6 to 1.8 m, underlying by schist	2006, thinning	1732	43	320	162				241	(12)
HV	0.88	Chamaecyparis obtusa; metamorphic consisting of schist and amphibolite, clay loam derived from volcanic ash	2009, thinning	1685	22	38	147	-25			93	This study

(1) Harr et al. (1982), (2) Johnson and Kovner (1956), (3) Bosch and Hewlett (1982), (4) Reinhart et al. (1963), (5) Harr et al. (1979), (6) Baker (1986), (7) Ruprecht et al. (1991), (8) Stoneman (1993), (9) Lane and Mackay (2001), (10) Lesch and Scott (1997), (11) Özyuvaci et al. (2004), (12) Dung et al. (2012)

severity of the cutting in the mixed hardwood and the pine forests. Lane and Mackay (2001) concluded that the percentage of basal area removed was not an indicator of the magnitude of flow increases, because mean annual runoff increase was 70 mm in the patch cutting conducted at the 22 % reduction of basal area, while it was 140 mm in the selective thinning conducted at the 12 % reduction of basal area in eucalyptus forests in Southern Australia. These were because the rate of increase in catchment runoff after thinning were attributed to the regeneration rate and the annual precipitation in addition to the rates of the reduction of basal area.

In eucalypt plantations, observable runoff increases following thinning were small due to the high growth rate and rapidly increasing water consumption predominate (Lane and Mackay 2001, Lesch and Scott 1997). In oak and beech mixed hardwood in Turkey, there was not any significant increase during the later month after cutting because the replenishment of the understory buffered the effects of reduced crown closure and in turn the interception and transpiration losses (Özyuvaci et al. 2004). In this study the understory species seemingly had not regenerated vigorously and regeneration had not effect of the annual runoff increase.

Reinhart et al. (1963) summarized that usually the results of treatment were more pronounced in well-watered area, such as the Fernow, Coweeta Hydrologic Laboratory in North Carolina, and Kamabuchi in Japan, while areas of low precipitation were likely to show less effect, such as Wagon Wheel Gap in Colorado and Sierra Ancha Experimental Forest in Arizona. Stoneman (1993) indicated that the smaller increase from Yarragil 4L catchment compared to Hansen catchment was attributed to less rainfall (Table 4). Baker (1986) reported that the potential for increasing water yield in ponderosa pine was small because pine forest inherently occurs on drier sites. On the other hand, the removal of 43 % of the basal area of 0.35-ha *C. obtusa* plantation forest produced extreme water yield (241 mm) in Mie prefecture, Japan, where the mean precipitation is approximately 2000 mm (Dung et al. 2012). The Authors explained that precipitation occurred during the growing season might directly contribute to runoff increase. The removal of 22.5 % of the basal area yielded the maximum annual runoff increase 147 mm in this study. The thinning in *C. obtusa* plantations in areas of high precipitation likely yield relatively large amount of runoff increase.

Bosch and Hewlett (1982) also concluded that the largest increase was generally found in the first couple of years following treatment, and the water yield later diminished as the forest regrew and leaf area increased. The water yield was large in the second year (2011) after thinning in this study (Table 3). Most of the previous experiments reported that forest crown closure recovered relatively quickly. The crown closure in

this study recovered the pre-thinning level for one year in this study (Table 3). The canopy interception loss recovered the pre-thinning level in the third year after thinning. The reduction of total transpiration in the stand likely has a longer effect on runoff increase than the reduction of canopy interception loss. However, the annual runoff returned to the pre-thinning level simultaneously with the recovery of the canopy interception loss in this study. In conclusion, it seemed that the intensive thinning in small *C. obtusa* headwater plantation was effective to increase net precipitation and stream water for a short period.

#### Acknowledgments

This study was supported by the project "Practical Technology Development" of the Agriculture, Forestry, and Fishery Research Council in Japan. We thank the staff of the Ibaraki Prefectural Forestry Office for their excellent assistance during the thinning. We thank Drs. Koji Tamai, Takanori Shimizu, Shin'ichi Ida, and Naoki Kabeya for their tremendous help in conducting the field measurement, and two anonymous reviewers and an Associate Editor for providing critical comments.

#### References

- Baker, Jr. M. B. (1986) Effects of ponderosa pine treatments on water yield in Arizona. *Water Resour. Res.*, 22, 67-73.
- Bosch, J. M. and Hewlett, J.D. (1982) A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration. *J. Hydrol.*, 55, 3-23.
- Brown, A. E., Zhang, L., McMahon, T. A., Western, A. W. and Vertessy, R. A. (2005) A review of paired catchment studies for determining changes in water yield resulting from alterations in vegetation. *J. Hydrol.*, 310, 28-61.
- Dung, B. X., Gomi, T., Miyata, S., Sidle, R. C., Kosugi, K. and Onda, Y. (2012). Runoff responses to forest thinning at plot and catchment scales in a headwater catchment draining Japanese cypress forest. *J. Hydrol.*, 444-445, 51-62.
- Harr, R. D., Fredriksen, R. L. and Rothacher, J. (1979) Changes in streamflow following timber harvest in southwestern Oregon. U.S. Dep. Agric. For. Serv. Res. Pap., PNW-249, 1-22.
- Harr, R. D., Levno, A. and Mersereau, R. (1982) Streamflow changes after logging 130-year-old Douglas fir in two small watersheds. *Water Resour. Res.*, 18, 637-644.
- Hattori, S. and Chikaarashi, H. (1988) Effect of thinning on canopy interception in a hinoki stand. *J. Jpn. For. Soc.*, 70, 529-533 (in Japanese).
- Japanese Forest Agency (1998) Annual Report on Forest and Forestry in Japan. Fiscal year 1997.
- Japanese Forest Agency (2013) Annual Report on Forest and

- Forestry in Japan. Fiscal year 2012.
- Jonson, E. A. and Kovner, J. L. (1956) Effect on streamflow of cutting a forest understory, *For. Sci.*, 2, 82-91.
- Kato, M., Onodera, S. and Kobayashi, M. (1995) Dynamics of nitrate nitrogen concentrations in soil solutions and spring water on a forested watershed. *J. Jpn. For. Soc.*, 77, 516-526 (in Japanese with English abstract).
- Komatsu, H., Shinohara, Y., Nogata, M., Tsuruta, K. and Otuki, K. (2013) Changes in canopy transpiration due to thinning of a *Cryptomeria japonica* plantation. *Hydrol. Res. Letters.*, 7, 60-65.
- Kubota, T., Tsuboyama Y. and Nobuhiro T. (2013) Change of evapotranspiration due to stand thinning in the Hitachi Ohta Experimental watershed. *J. Jpn. For. Soc.*, 95: 37-41 (in Japanese with English abstract).
- Lane, P. N. J. and Mackay, S.M. (2001) Streamflow response of mixed-species eucalypt forests to patch cutting and thinning treatments. *For. Ecol. Manag.*, 143, 131-142.
- Lesch, W. and Scott, D. F. (1997) The response in water yield to the thinning of *Pinus radiate*, *Pinus patula* and *Eucalyptus grandis* plantations. *For. Ecol. Manag.*, 99, 295-307.
- Morikawa, Y., Hattori, S. and Kiyono, Y. (1986) Transpiration of a 31-year-old *Chamaecyparis obtusa* Endl. Stand before and after thinning. *Tree Physiol.*, 2, 105-114.
- Murai, H. (1970) Studies on precipitation interception by forest vegetation. *Bull. Gov. For. Exp. Stn.*, 232, 25-64 (in Japanese with English summary).
- Murakami, S., Tsuboyama, T., Shimizu, T., Fujieda, M. and Noguchi, S. (2000) Variation of evapotranspiration with stand age and climate in a small Japanese forested catchment. *J. Hydrol.*, 227, 114-127.
- Nakano, H. (1971) Effect on streamflow of forest cutting and change in regrowth on cut-over area. *Bull. Gov. For. Exp. Sta.* 240, 1-251 (in Japanese with English summary).
- Nanko, K., Onda, Y., Kato, H. and Gomi, T. (2015) Immediate change in throughfall spatial distribution and canopy water balance after heavy thinning in a dense mature Japanese cypress plantation. *Ecohydrol* Published online in Wiley Online Library, DOI: 10.1002/eco.1636.
- Nobuhiro, T., Tsuboyama, Y., Kubota, T. and Tamai, K. (2013) Change in canopy structure and throughfall accompanying thinning in a Japanese cypress forest, in northern Ibaraki. *Kanto J. For. Res.*, 64, 41-44 (in Japanese with English abstract).
- Onda, Y., Gomi, T., Mizugaki, S., Nonoda, T. and Sidle, R. C. (2010) An overview of the field and modelling studies on the effects of forest devastation on flooding and environmental issues. *Hydrol. Process.*, 24, 527-534.
- Özyuvaci, N., Özhan, F., Gökbulak, F., Serengil, Y. and Balci A. N. (2004) Effect of selective cutting on streamflow in an oak-beech forest ecosystem. *Water Res. Manag.* 18, 249-262.
- Reinhart, K. G., Eschner, A. R., Trimble, Jr. G. R. (1963) Effect on streamflow of four forest practices in the mountains of West Virginia. *U.S. Agric. For. Serv. Res. Pap.*, NE, 1-59.
- Ruprecht, J. K., Schofield, N. J., Crombie, D. S., Vertessy, R. A., and Stoneman, G. L. (1991) Early hydrological response to intense forest thinning in southwestern Australia. *J. Hydrol.*, 127, 261-277.
- Sidle, R. C., Tsuboyama, Y., Noguchi, S., Hosoda, I., Fujieda, M. and Shimizu, T. (1995) Seasonal hydrologic response at various spatial scales in a small forested catchment, Hitachi Ohta, Japan. *J. Hydrol.*, 168, 227-250.
- Stoneman, G. L. (1993) Hydrological response to thinning a small jarrah (*Eucalyptus marginata*) forest catchment. *J. Hydrol.*, 150, 393-407.
- Suzuki, M. (1985) Evapotranspiration estimates of forested watersheds in Japan using the short-term period water-budget method. *J. Jpn. For. Soc.*, 67, 115-125 (in Japanese with English abstract).
- Tsuboyama, Y. (2006) An experimental study on temporal and spatial variability of flow pathways in a small forested catchment, *Bull. For. For. Prod. Res. Inst.*, 5, 135-174.

## 常陸太田試験地内の源頭部小流域における間伐が樹冠遮断量、蒸発散量および流出量に与える影響

久保田 多余子<sup>1)\*</sup>、坪山 良夫<sup>2)</sup>、延廣 竜彦<sup>3)</sup>

### 要旨

源頭部小流域における間伐が樹冠遮断量、蒸発散量および流出量に及ぼす影響を対照流域法によって調べた。1986年に植栽したヒノキ林を3年間のキャリブレーション期間(2006-2008年)の後、2009年3月に強度に間伐した。土壌表面の攪乱を防ぐため、間伐はチェーンソーを用いて人力で行い、間伐木はその場に切り捨てた。間伐強度は本数で50%、材積で30%、また胸高断面面積合計で22.5%であった。樹冠遮断量は間伐後最初の年に4%減少し、徐々に回復して間伐3年後には間伐前の水準に戻った。年流出量の増加量は間伐2年目に最大値となり、147mmであった。間伐後(2010-2012年)の年流出量の増加量の平均値は54mmであった。この増加量は有意ではなかった。間伐後の平均年蒸発散量は有意に140mm減少し、特に蒸散期の減少量が大きかった。このように、源頭部小流域における強度間伐は、短期間でみれば、林内降雨量を増やし、流出量を増すのに効果的であると考えられた。

キーワード：間伐、樹幹遮断量、蒸発散量、流出量、対照流域法

---

原稿受付：平成29年3月6日 原稿受理：平成29年12月14日

1) 森林総合研究所 東北支所

2) 森林総合研究所 研究コーディネータ

3) 森林総合研究所 北海道支所

\* 森林総合研究所 東北支所 〒020-0123 岩手県盛岡市下厨川字鍋屋敷 92-25



## 論文 (Original article)

# スギ、ヒノキコンテナ苗育苗培地への木質バイオマス燃焼灰混合が苗木の成長と養分状態におよぼす影響

長倉 淳子<sup>1)\*</sup>、小笠 真由美<sup>2)</sup>、山田 毅<sup>1)</sup>、平井 敬三<sup>1)</sup>

### 要旨

木質バイオマス発電所から産出される燃焼灰(以下、燃焼灰と略す)は、そのほとんどが産業廃棄物として処理されているが、燃焼灰はCaやK等の肥料元素を含有しているため土壌資材として有効利用できる可能性がある。本研究では、燃焼灰のコンテナ育苗培地としての利用可能性を探るため、燃焼灰の混合率(体積比)を変えた培地(0%(対照)区、5%区、10%区、25%区)でスギとヒノキを8-9カ月間育成し、苗木の成長と養分状態を調べた。スギ、ヒノキとも燃焼灰の混合が個体の成長を促進することはなかった。燃焼灰の混合率が成長に及ぼす影響は樹種によって異なり、スギでは25%区、ヒノキでは10%区と25%区で、苗高、直径、乾重の成長が対照区に比べ著しく抑制された。掘り取り時の交換性Mg、Na含有量は燃焼灰の混合率が高い培地ほど低かった。燃焼灰の混合率が高い処理区ほどスギ葉のCa含有量は高くなったが、スギ、ヒノキ葉のMg、K含有量やヒノキ葉のCa含有量に有意な処理間差はみられなかった。以上の結果から、培地への燃焼灰混合によるスギ、ヒノキ苗の成長促進効果はみられないこと、苗の成長を大きく損なうことなくコンテナ育苗培地資材として培地に燃焼灰を混合できる割合の上限値は、スギでは10%、ヒノキでは5%であることが明らかとなった。今後は燃焼灰を培地に混合したコンテナ苗を林地に植栽した後の健全性に関する研究が必要である。

キーワード：燃焼灰、コンテナ苗、ヒノキ、スギ、養分吸収、施肥

### 1. はじめに

2012年に再生可能エネルギー固定価格買取制度(FIT)が開始されて以降、木質バイオマス発電所の需要が高まっている(林野庁2017)。大型の木質バイオマス発電所の稼働に伴い、燃料となる木質バイオマスが不足し、幹材部だけでなく枝葉も燃料として利用され始めている。同時に、木質バイオマス発電所から産出される燃焼灰(以下、燃焼灰と略す)も増加している。燃焼灰は、そのほとんどが産業廃棄物として処理されており、発電事業の採算性を低下させる一因となっている。しかし、平成25年6月に環境省から、木質ペレット又は木質チップを専焼ボイラーで燃焼させて生じた焼却灰のうち、有効活用が確実で、かつ不要物とは判断されない焼却灰は、産業廃棄物に該当しない、との通知が出された(環産産第1306282号)。燃焼灰はカリウム(K)やカルシウム(Ca)等の肥料元素を含有しているため(Sano et al. 2013)、燃焼灰を肥料や土壌資材として有効利用できる可能性がある。その場合、産業廃棄物としての処理コストの削減が見込まれ、発電事業の採算性の向上が期待される。しかし、燃焼灰は肥料元素の他に重金属も含有するため、利用する前

に安全性を確認し、樹木の成長への影響を調べる必要がある。

現在、戦後の拡大造林期に造成された人工林が主伐期を迎えており、再造林の必要性が増している。再造林のコスト削減のため、伐採から植栽までの作業を一貫しておこなう「一貫作業システム」が提案されており(今富2011)、植栽苗としてのコンテナ苗の普及に向けた実証試験が進んでいる(梶本・宇都木2016)。コンテナ苗は根鉢が付いた状態で流通している点で、裸苗に比べて運搬や植栽作業の利便性が優れている。一方、露地栽培の裸苗と異なり、コンテナ苗の栽培には根鉢を形成するための培地(培土)や肥料が不可欠であるため、資材コストが高く、苗木単価も高い傾向がある(鹿又・上村2011)。そこで、燃焼灰をコンテナ苗の培地に混合して、培地資材および肥料として利用することができれば、燃焼灰の有効利用とコンテナ育苗苗のコスト削減が可能となる。しかし、木質燃焼灰の施用が植物の成長に及ぼす影響に関する報告は少なく(折橋ら2011, 和田・内山2016)、培地への燃焼灰混合がコンテナ苗の成長・生残や培地の化学性に及ぼす影響についてはまだ明らかになっていない。

原稿受付：平成29年10月5日 原稿受理：平成29年12月15日

1) 森林総合研究所 立地環境研究領域

2) 森林総合研究所 植物生態研究領域

\* 森林総合研究所 立地環境研究領域 〒305-8687 茨城県つくば市松の里1

本研究では、コンテナ育苗苗培地への混合資材としての燃焼灰の利用可能性を探るため、培地への灰の混合率を変えてスギとヒノキの育成試験を行なった。具体的には、1) 燃焼灰の混合が樹体の成長に及ぼす影響、2) 燃焼灰が樹体や培地の化学性に及ぼす影響、3) 培地に燃焼灰を混合できる割合の3点について検討した。

## 2. 材料と方法

### 2.1 コンテナ苗材料

スギとヒノキの種子をそれぞれ512穴のエクセルトレイ（エクセルソイル、イワタニアグリグリーン）2つに播種し、茨城県つくば市の森林総合研究所温暖化影響実験棟において昼28℃、夜23℃、毎日2回灌水の条件下で発芽させたスギおよびヒノキの実生苗を材料として用いた。スギとヒノキの種子は共に森林総合研究所千代田苗畑（茨城県かすみがうら市）で2011年10月に採取され、-5℃で保管されたものである。スギ、ヒノキともに2016年2月15日に播種したが、ヒノキの発芽率が良くなかったため、同年4月5日に再度播種を行った。両樹種とも発芽から約1カ月後、苗木をエクセルトレイの培地ごと300ccリブ型マルチキャビティコンテナ（JFA-300）に植え替えた。植え替えは、スギは2016年4月14日、ヒノキは同年5月17日に行った。JFA-300はキャビティ数が24個、コンテナのサイズは45cm×30cm×15cmである。

### 2.2 燃焼灰の混合率を変えたコンテナ苗の育成

本研究では、コンテナに充填する培地への燃焼灰の混合率を変えた4つの処理区を作った。基本培地はピートモス（カナダ産）とパーライトを9:1の体積比で混合したものを用いた。基本培地に加える燃焼灰の混合率は、体積比で0%（対照区）、5%（5%区）、10%（10%区）、25%（25%区）の4段階とした。使用したピートモス、パーライト、燃焼灰の仮比重は、それぞれ0.10、0.11、1.46（ $\text{g cm}^{-3}$ ）である。ここに元肥として市販の固形肥料（オスモコートエグザクトミニ；N16-P8-K11, Scotts社）を培地1Lにつき2gの割合で混ぜ込んだ。成分は、N: 15%、P: 2.6%、K: 9.1%、Mg: 2%、Mn: 0.05%、B: 0.02%、Fe: 0.4%、Cu: 0.05%、Mo: 0.02%、Zn: 0.018%である。この固形肥料の肥効期間は3~4カ月とされている。燃焼灰にはNがほとんど含まれておらずPも少ないため、NやPの欠乏による成長阻害を抑制することを目的として、スギは2016年7月27日と11月15日に、ヒノキは同年9月6日に、この固形肥料をキャビティあたり約0.2g培地表面に追肥した。ヒノキはスギより播種・植え替え時期が約1カ月遅く、樹体も小さかったため、追肥の回数は一回とした。コンテナ苗の培地に混合する燃焼灰にはグリーン大分発電の木質バイオマス発電所から2015年9月に

産出された主灰を用いた。この主灰の材料はスギ未利用材である。この燃焼灰等について、平成15年3月環境省告示第18号による溶出試験、含有量を同第19号による含有試験を行い、土壤汚染対策法により規定された特定有害物質の溶出量および含有量を調べた。その結果、含有試験においてはすべての項目が基準値を下回り、溶出試験において六価クロム濃度（ $0.2 \text{ mg L}^{-1}$ ）は基準値（ $0.05 \text{ mg L}^{-1}$ ）を上回ったものの、揮発性有機化合物、農薬等および六価クロム以外の重金属等は土壤汚染対策法の基準値を下回った。使用した燃焼灰について、pH、EC、N、C、K、Ca、Mg、P含有量を測定した結果をTable 1に示す。本研究では、燃焼灰を実験系外に出さないという条件のもと、コンテナ苗の培地への混合資材として本燃焼灰を用いることとした。

燃焼灰混合率の異なる培地をコンテナごとに充填し、1キャビティにつき1本の苗木を移植した。各処理区につき2つのコンテナを作成した。コンテナに植え替えた後は、森林総合研究所内のビニルハウス内において毎日朝夕2回10分ずつスプリンクラーで灌水しながら育成した。

移植時の個体サイズを求めるため、スギは移植後12日後、ヒノキは3日後に、移植しなかった個体から各樹種10本の苗木を掘り取り、苗高、根長、根元直径を測定し、70℃で48時間以上乾燥して個体乾重を測定した（Table 2）。

### 2.3 成長測定

各処理区につき1つのコンテナの苗木（24本）を成長追跡個体として、スギは2016年6月から12月まで、ヒノキは2016年7月から12月まで、毎月1回苗高を測定し、あわせて生残を確認した。測定期間中に枯死した個体は解析から除外した。

Table 1. コンテナ苗培地に使用した燃焼灰のpH、ECおよび養分元素濃度

pH	EC $\text{mS m}^{-1}$	g $\text{kg}^{-1}$					
		N	C	K	Ca	Mg	P
11.9	326	<0.1	2.6	9.3	20.1	3.9	1.4

pH、ECは灰：脱イオン水=1:10（重量比）で測定

Table 2. スギおよびヒノキのコンテナへの移植時の個体サイズ（スギ、2016年4月26日；ヒノキ、2016年5月20日）

	根元直径 (mm)	苗高 (cm)	根長 (cm)	個体乾重 (mg)
スギ	0.64 ± 0.04	1.70 ± 0.12	4.46 ± 0.12	8.3 ± 1.1
ヒノキ	0.48 ± 0.02	1.61 ± 0.10	2.84 ± 0.28	2.9 ± 0.3

平均値±標準誤差（n=10）

## 2.4 掘り取り調査

一生育期間を経過した2017年2月24日に、スギ、ヒノキともに成長追跡個体以外のコンテナから各処理区10本ずつ掘り取り、根元直径と苗高を測定し、地上部と地下部に分けて、蒸留水で培地等を洗い落として70°Cで48時間以上乾燥後、部位別に乾重を測定した。本研究では苗高を根元直径で除した値を形状比として算出した。掘り取った各処理区10本のうち5本を養分分析用に微粉碎した。掘り取り時にはスギ、ヒノキともに葉の大部分は赤褐色であり、茎との境界が不明瞭だったため、地上部は葉と茎に分けずに全体を粉碎したものを、葉試料として養分分析に供した。主要な養分元素であるN、P、K、Mg、Ca、必須元素のC、微量必須元素であり重金属でもあるCu、Mn、Mo、Zn、重金属のCd、Cr、Ni、一部の植物にとっての必須元素であるAl、およびKと同じアルカリ金属のNa、Rb、Csを測定対象とした。全炭素(C)・全窒素(N)含有量はNCアナライザ(Sumigraph NC-22F, 住化分析センター)により測定した。K、Ca、Mg、P、Al、B、Cd、Cr、Cs、Cu、Fe、Mn、Mo、Na、Ni、Rb、Zn含有量は、試料を硝酸と過酸化水素で湿式灰化した後、分解液中の各元素の濃度をICP質量分析計(Agilent7700, Agilent Technologies)を用いて定量した。

## 2.5 培地の化学性

4つの処理区について、苗木移植前の培地(n=1)、および苗木掘り取り時(2017年2月24日)の培地(n=5)を採取した。苗木移植前の培地は、風乾後に分析に供した。苗木掘り取り時の培地は、根や生育期間に表面に発生したコケ等を取り除き、風乾後に2mmの円孔篩を通過したものを分析に供した。これらの培地試料についてpH(H<sub>2</sub>O)、pH(KCl)、全炭素(C)・全窒素(N)含有量、交換性Na、K、Ca、Mg含有量を測定した。pH(H<sub>2</sub>O)、pH(KCl)は風乾した培地:水比(w:v)を1:15としてガラス電極法で測定した。C、N含有量はNCアナライザ(Sumigraph NC-22F, 住化分析センター)により測定した。交換性Na、K、Ca、Mgは、pH 7.0、1.0 mol L<sup>-1</sup>の酢酸アンモニウム溶液を用いた振とう浸出法(村本ら 1992)に準じて抽出した。苗木移植前の培地については、1試料につき4反復で抽出した。抽出液中のNa、K、Ca、Mg各イオンはICP発光分光分析装置(Optima8300, PerkinElmer)で定量した。

## 2.6 統計解析

スギ、ヒノキそれぞれについて充分活着した移植3カ月後の苗高、掘り取り時の個体サイズ、培地の化学性および葉の元素含有量における処理区間の違いを一元配置の分散分析(one-way ANOVA)により解析した。処理による差が有意であった場合( $p < 0.05$ ) Tukey HSD 検定によって処理区間の差を多重比較した。ただ

し、ヒノキの10%区と25%区は個体が小さかったため、葉の元素含有量の分析を行う際に10個体をまとめて1サンプルとした。したがって、ヒノキの葉の元素含有量については、10%区と25%区に繰り返しが無いため、対照区と5%区についてt検定を行った。これらの計算には統計ソフト(JMP8.0, SAS Institute)を使用した。

## 3. 結果

### 3.1 苗高と生残率の経時変化

スギの苗高は、5%区と10%区は対照区と同様に成長したが、25%区では成長が著しく小さかった(Fig. 1)。移植3カ月後(2016年7月)の25%区では他の処理区に比べて苗高が有意に小さかった( $p < 0.05$ ) (Photo 1)。一方、ヒノキの苗高は、5%区で対照区と同様に成長したのに対し、10%区と25%区ではほとんど伸長成長が認められなかった(Fig. 2)。移植3カ月後(2016年8月)のヒノキでは、25%区と10%区の苗高が、対照区と5%区に比べて有意に小さかった( $p < 0.05$ ) (Photo 2)。

スギ25%区の生残率は移植2カ月後(6月)には100%だったが、3カ月後(7月)には大きく低下して71%となり、一生育期間終了時(12月)には58%で、4つの処理の中で最も低かった。また、5%区および10%区の生残率も6カ月後(10月)には63%まで低下した。一方、対照区は3カ月後(7月)には4つの処理区の中で最も低く79%だったが、5カ月後(9月)に75%になって以降は変化しなかった。そのため、一生育期間終了時(12月)にはスギの生残率は対照区が最も高かった(Fig. 3)。

ヒノキの生残率は、移植3カ月後(8月)から、5%区 > 対照区 > 10%区 > 25%区で逆転しなかった(Fig. 4)。

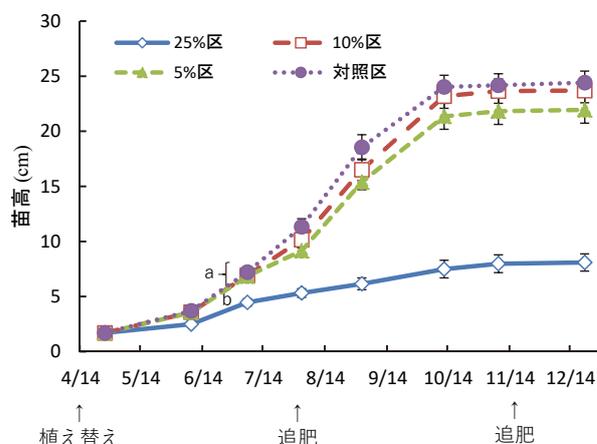


Fig. 1. 各処理区におけるスギコンテナ苗の苗高の経時変化

異なるアルファベットは移植3カ月後(7月)において処理区間で有意差があることを示す(Tukey HSD 検定、 $p < 0.05$ )

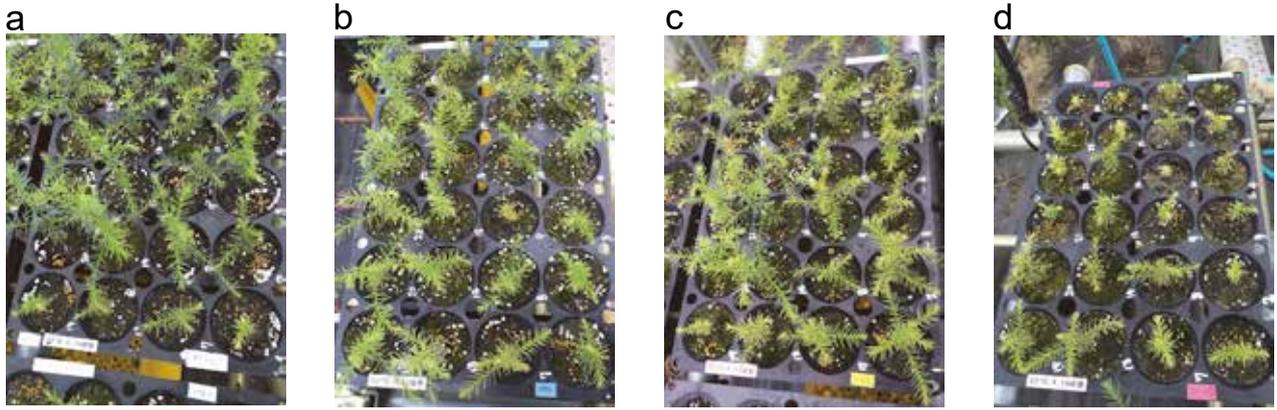


Photo 1. 移植3カ月後（2016年7月）のスギコンテナ苗の様子。  
a. 対照区, b. 5%区, c. 10%区, d. 25%区

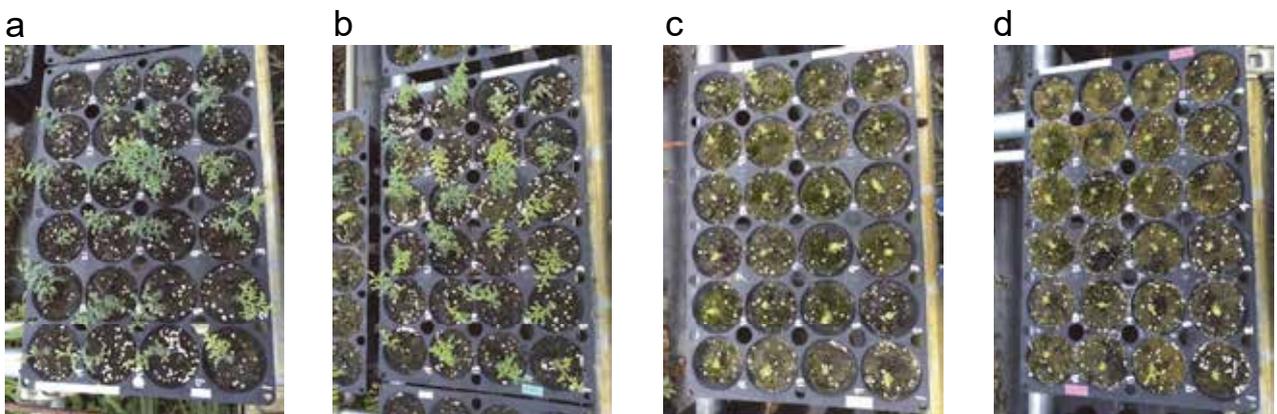


Photo 2. 移植3カ月後（2016年8月）のヒノキコンテナ苗の様子。  
a. 対照区, b. 5%区, c. 10%区, d. 25%区

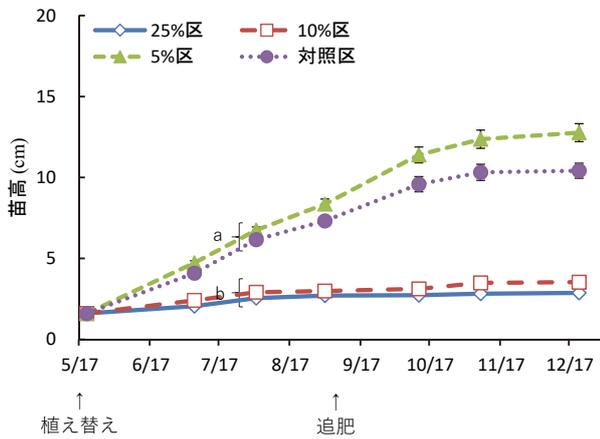


Fig. 2. 各処理区におけるヒノキコンテナ苗の苗高の経時変化  
異なるアルファベットは移植3カ月後（8月）において処理区間で有意差があることを示す（Tukey HSD 検定、 $p < 0.05$ ）

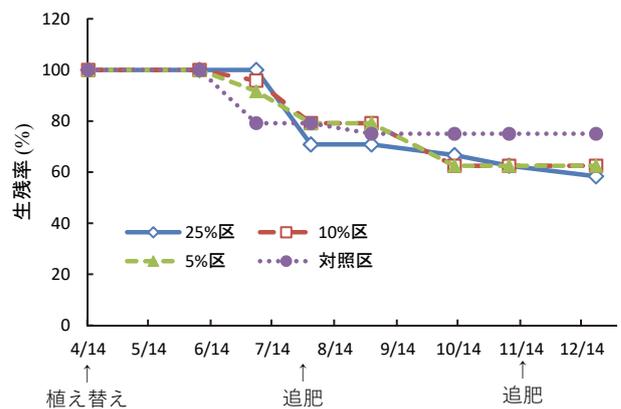


Fig. 3. 各処理区におけるスギコンテナ苗の生残率の経時変化

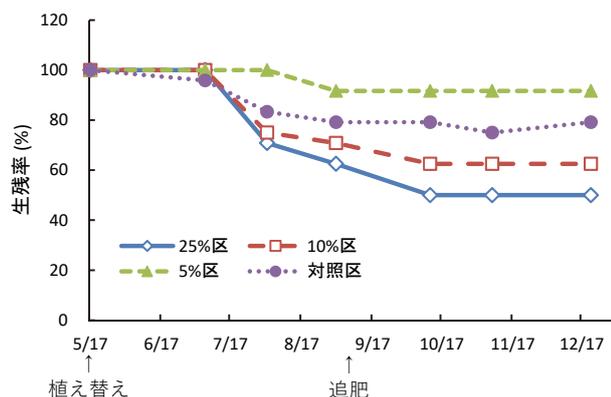


Fig. 4. 各処理区におけるヒノキコンテナ苗の生残率の経時変化

一生育期間終了時（12月）のヒノキの生残率は、5%区が92%、対照区が79%、10%区が63%、25%区が50%だった。ヒノキの5%区と対照区の生残率は、スギで最も生残率の高かった対照区（75%）よりも高かった。

### 3.2 個体サイズ

コンテナへの移植時の個体サイズは、スギよりもヒノキが小さかったが（Table 2）、苗高に処理間差はみられなかった（Fig. 1）。一生育期間終了後の掘り取り時（2017年2月）のスギ、ヒノキコンテナ苗の個体サイズをTable 3に示す。スギの25%区では他の処理区に比べて根元直径、苗高、地上部乾重、地下部乾重、

および個体乾重が有意に小さかった（ $p < 0.05$ ）（Table 3）。スギの形状比は培地への燃焼灰の混合率が高いほど小さかったが、TR比には燃焼灰の混合率の違いによる有意な差はみられなかった（ $p = 0.10$ ）。掘り取り時のヒノキでは、10%区と25%区の根元直径、苗高、地上部乾重、地下部乾重、および個体乾重が、対照区と5%区に比べて有意に小さかった（ $p < 0.05$ ）（Table 3）。ヒノキの形状比とTR比は、25%区が他の処理区よりも小さい傾向があった。

### 3.3 培地の化学性

苗木移植前の培地は、燃焼灰の混合率が高いほどpH（ $H_2O$ ）およびpH（KCl）が高く、CおよびNの含有量が低く、交換性CaおよびK含有量が高かった（Table 4）。一生育期間終了後の苗木掘り取り時におけるスギとヒノキの培地の化学性をTable 5に示す。スギ、ヒノキともに培地への灰の混合率が高いほどpH値が高く、C、N含有量および交換性Mg、Na含有量が低い傾向を示した。交換性CaおよびK含有量に灰の混合率による明瞭な違いは認められなかったが、スギの対照区の交換性Ca含有量は他の処理区に比べ高く、ヒノキの対照区および5%区の交換性K含有量は他の処理区より低かった。

### 3.4 葉の養分状態

一生育期間終了後の苗木掘り取り時のスギとヒノキの葉試料のC、N、K、Ca、Mg、P、Na、Fe、Al、B、Cd、Cr、Cs、Cu、Mn、Mo、Ni、RbおよびZnの含

Table 3. スギおよびヒノキコンテナ苗の一生育期間終了時における個体サイズ

		根元直径 (mm)	苗高 (cm)	地上部乾重 (g)	地下部乾重 (g)	個体乾重 (g)	T/R	形状比
スギ	対照区	3.4 ± 0.1 <sup>a</sup>	25.8 ± 1.4 <sup>a</sup>	3.19 ± 0.25 <sup>a</sup>	1.60 ± 0.12 <sup>a</sup>	4.79 ± 0.35 <sup>a</sup>	2.0 ± 0.1 <sup>a</sup>	76 ± 3 <sup>a</sup>
	5%区	2.9 ± 0.1 <sup>a</sup>	21.5 ± 1.3 <sup>ab</sup>	2.38 ± 0.23 <sup>a</sup>	1.17 ± 0.08 <sup>a</sup>	3.55 ± 0.30 <sup>a</sup>	2.0 ± 0.1 <sup>a</sup>	73 ± 4 <sup>ab</sup>
	10%区	3.3 ± 0.1 <sup>a</sup>	20.8 ± 1.2 <sup>b</sup>	2.56 ± 0.36 <sup>a</sup>	1.16 ± 0.16 <sup>a</sup>	3.72 ± 0.52 <sup>a</sup>	2.2 ± 0.1 <sup>a</sup>	64 ± 3 <sup>b</sup>
	25%区	1.9 ± 0.1 <sup>b</sup>	8.1 ± 0.9 <sup>c</sup>	0.63 ± 0.10 <sup>b</sup>	0.35 ± 0.06 <sup>b</sup>	0.98 ± 0.16 <sup>b</sup>	1.8 ± 0.1 <sup>a</sup>	41 ± 3 <sup>c</sup>
ヒノキ	対照区	1.8 ± 0.15 <sup>a</sup>	12.3 ± 1.4 <sup>a</sup>	1.03 ± 0.18 <sup>a</sup>	0.49 ± 0.07 <sup>a</sup>	1.52 ± 0.26 <sup>a</sup>	2.0 ± 0.1 <sup>a</sup>	66 ± 3 <sup>a</sup>
	5%区	1.6 ± 0.11 <sup>a</sup>	11.3 ± 0.8 <sup>a</sup>	0.71 ± 0.11 <sup>a</sup>	0.34 ± 0.05 <sup>a</sup>	1.06 ± 0.15 <sup>a</sup>	2.1 ± 0.1 <sup>a</sup>	72 ± 3 <sup>a</sup>
	10%区	0.7 ± 0.04 <sup>b</sup>	4.2 ± 0.4 <sup>b</sup>	0.08 ± 0.01 <sup>b</sup>	0.05 ± 0.01 <sup>b</sup>	0.13 ± 0.01 <sup>b</sup>	1.7 ± 0.2 <sup>ab</sup>	59 ± 4 <sup>a</sup>
	25%区	0.7 ± 0.06 <sup>b</sup>	2.7 ± 0.3 <sup>b</sup>	0.05 ± 0.01 <sup>b</sup>	0.03 ± 0.01 <sup>b</sup>	0.08 ± 0.01 <sup>b</sup>	1.3 ± 0.1 <sup>b</sup>	37 ± 3 <sup>b</sup>

注：平均値±標準誤差（n=10）

異なるアルファベットは各樹種について処理区間で有意差があることを示す（Tukey HSD 検定、 $p < 0.05$ ）。

Table 4. 苗木移植前における各処理区の培地の化学性

	pH( $H_2O$ )	pH(KCl)	C g kg <sup>-1</sup>	N g kg <sup>-1</sup>	C/N	交換性 Ca cmolc kg <sup>-1</sup>	交換性 Mg cmolc kg <sup>-1</sup>	交換性 K cmolc kg <sup>-1</sup>	交換性 Na cmolc kg <sup>-1</sup>
0%区	3.4	2.8	447	10.3	43.5	3.2 ± 0.0 <sup>d</sup>	8.3 ± 0.1 <sup>c</sup>	2.12 ± 0.07 <sup>d</sup>	1.75 ± 0.05 <sup>b</sup>
5%区	6.5	6.4	235	5.3	44.2	62.2 ± 2.3 <sup>c</sup>	18.5 ± 0.6 <sup>b</sup>	7.26 ± 0.21 <sup>c</sup>	2.15 ± 0.06 <sup>a</sup>
10%区	7.7	7.9	136	3.3	41.6	75.1 ± 3.5 <sup>b</sup>	21.8 ± 0.6 <sup>a</sup>	9.86 ± 0.31 <sup>b</sup>	2.25 ± 0.08 <sup>a</sup>
25%区	8.8	9.0	73	1.5	48.1	98.2 ± 2.0 <sup>a</sup>	18.8 ± 0.7 <sup>b</sup>	12.99 ± 0.89 <sup>a</sup>	1.92 ± 0.13 <sup>ab</sup>

C、N、C/Nについては2反復で測定した平均値

交換性Ca、Mg、K、Naについては4反復で抽出した平均値±標準誤差

異なるアルファベットは処理区間で有意差があることを示す（Tukey HSD 検定、 $p < 0.05$ ）。

Table 5. スギおよびヒノキコンテナ苗の一生育期間終了時における各処理区の培地の化学性

		pH(H <sub>2</sub> O)	pH(KCl)	C g kg <sup>-1</sup>	N g kg <sup>-1</sup>	C/N	交換性 Ca cmolc kg <sup>-1</sup>	交換性 Mg cmolc kg <sup>-1</sup>	交換性 K cmolc kg <sup>-1</sup>	交換性 Na cmolc kg <sup>-1</sup>
スギ	対照区	6.3 ± 0.1 <sup>d</sup>	5.7 ± 0.1 <sup>d</sup>	473 ± 3 <sup>a</sup>	7.5 ± 0.1 <sup>a</sup>	63.1 ± 0.9 <sup>a</sup>	74.4 ± 3.4 <sup>a</sup>	28.8 ± 0.3 <sup>a</sup>	1.23 ± 0.08 <sup>b</sup>	2.66 ± 0.02 <sup>a</sup>
	5%区	7.1 ± 0.1 <sup>c</sup>	6.4 ± 0.1 <sup>c</sup>	167 ± 7 <sup>b</sup>	3.0 ± 0.1 <sup>b</sup>	55.5 ± 0.5 <sup>b</sup>	39.6 ± 0.7 <sup>b</sup>	9.1 ± 0.2 <sup>b</sup>	1.02 ± 0.05 <sup>c</sup>	1.04 ± 0.02 <sup>b</sup>
	10%区	7.6 ± 0.1 <sup>b</sup>	7.0 ± 0.1 <sup>b</sup>	107 ± 4 <sup>c</sup>	2.0 ± 0.1 <sup>c</sup>	52.4 ± 1.0 <sup>c</sup>	39.5 ± 1.4 <sup>b</sup>	7.4 ± 0.3 <sup>c</sup>	1.36 ± 0.03 <sup>ab</sup>	0.96 ± 0.02 <sup>c</sup>
	25%区	9.2 ± 0.0 <sup>a</sup>	8.7 ± 0.1 <sup>a</sup>	42 ± 1 <sup>d</sup>	0.8 ± 0.0 <sup>d</sup>	50.7 ± 0.5 <sup>c</sup>	46.2 ± 1.7 <sup>b</sup>	4.8 ± 0.2 <sup>d</sup>	1.52 ± 0.02 <sup>a</sup>	0.58 ± 0.01 <sup>d</sup>
ヒノキ	対照区	5.0 ± 0.1 <sup>d</sup>	4.2 ± 0.1 <sup>d</sup>	486 ± 6 <sup>a</sup>	7.3 ± 0.1 <sup>a</sup>	66.9 ± 0.8 <sup>a</sup>	39.3 ± 2.8 <sup>a</sup>	25.3 ± 0.9 <sup>a</sup>	0.91 ± 0.02 <sup>b</sup>	3.14 ± 0.06 <sup>a</sup>
	5%区	7.2 ± 0.1 <sup>c</sup>	6.5 ± 0.1 <sup>c</sup>	160 ± 2 <sup>b</sup>	2.7 ± 0.1 <sup>b</sup>	59.5 ± 1.0 <sup>b</sup>	42.4 ± 0.9 <sup>a</sup>	10.9 ± 0.4 <sup>b</sup>	0.99 ± 0.02 <sup>b</sup>	1.19 ± 0.04 <sup>b</sup>
	10%区	8.1 ± 0.1 <sup>b</sup>	7.6 ± 0.2 <sup>b</sup>	88 ± 7 <sup>c</sup>	1.6 ± 0.1 <sup>c</sup>	54.5 ± 1.0 <sup>c</sup>	37.4 ± 2.9 <sup>a</sup>	5.6 ± 0.4 <sup>c</sup>	1.19 ± 0.05 <sup>a</sup>	0.72 ± 0.05 <sup>c</sup>
	25%区	9.4 ± 0.0 <sup>a</sup>	9.0 ± 0.1 <sup>a</sup>	36 ± 1 <sup>d</sup>	0.7 ± 0.0 <sup>d</sup>	53.6 ± 0.2 <sup>c</sup>	44.8 ± 2.0 <sup>a</sup>	6.0 ± 0.3 <sup>c</sup>	1.23 ± 0.01 <sup>a</sup>	0.48 ± 0.02 <sup>d</sup>

平均値±標準誤差 (n = 5)

異なるアルファベットは各樹種について処理区間で有意差があることを示す (Tukey HSD 検定、 $p < 0.05$ )。

有量を Table 6 に示す。スギでは、培地への燃焼灰の混合率が高いほど葉の Ca、B、Cs、Zn、および Rb の含有量が高かった。しかし、N、K、Mg、P、Na、Cr、Cu、Mo および Ni の含有量に処理の有意な影響は認められなかった。スギ 25%区は、他の処理区よりも葉の Al および Mn の含有量が有意に高く ( $p < 0.05$ )、Fe 含有量も高い傾向がみられた。また、スギでは燃焼灰を混合したすべての処理区で葉の Cd 含有量が対照区よりも有意に高かった ( $p < 0.05$ )。スギの葉の C 含有量は他の 3 処理区に比べ、25%区で有意に低かったが ( $p < 0.05$ )、N には処理区間で違いが認められなかった。ヒノキでは、培地への燃焼灰の混合率が高いほど Ca、Na および B の含有量が高い傾向がみられた。しかし、K、Mg、P、Mn および Zn の含有量に処理の有意な影響は認められなかった。ヒノキの Fe、Al、Cr、Cu および Ni の含有量は他の 3 処理区に比べ、25%区で高かった。ヒノキの葉試料のうち、繰り返しのある対照区と 5%区を比較した場合、P、B、Cs、Mo および Rb の含有量が対照区より 5%区で有意に高かった ( $p < 0.05$ )。ヒノキの C 含有量に処理区間で明瞭な違いは認められなかったが、N は 10%区と 25%区で高い傾向があった。スギとヒノキを比較すると、ヒノキはスギに比べて、数倍葉の Mn 含有量が高かった。

#### 4. 考 察

培地の pH (H<sub>2</sub>O) は、苗木掘り取り時には 5%区で 7.0 以上、25%区では 9.0 以上であり、対照区の培地 (6.3 : スギ, 5.0 : ヒノキ) と比較して著しく高かった (Table 4, 5)。培地に混合した燃焼灰の pH は 11.9 であり (Table 1)、培地は燃焼灰の混合率を反映して高 pH 化したと考えられ、これがスギ、ヒノキコンテナ苗の主な成長抑制要因であると推察された。燃焼灰には Ca と K が多く含まれており (Table 1)、苗木移植前の培地の交換性 Ca および K 含有量は燃焼灰の混合率の増加と同調して高まった (Table 4)。しかし、苗木掘り取り時の培地の交換性 K 含有量は両樹種ともに燃焼灰の混合率の増加と同調しておらず (Table 5)、葉の K

含有量にも有意な処理区間差はみられなかった (Table 6)。交換性 K は流亡しやすいため、一生育期間後にはその多くが流亡したためと考えられる。苗木掘り取り時の対照区の交換性 Ca および Mg 含有量は、苗木移植前より増加していた (Table 4, 5)。対照区は基本培地であるピートモスとパーライトおよび元肥のみで構成されているため、有機質で軽いのに対し、他の処理区は培地に燃焼灰が混入しているために相対的に重く、対照区は単位重量あたりの体積が大きいいため、培地中のわずかな養分量の変化で乾重あたりの養分量の変動が大きくなっていると考えられる。また、対照区は苗木の成長が良いため細根量も多く、Ca や Mg を含む根リターが多く培地に供給されたが、培地自体が有機質のため、培地から根リターを充分除去できなかったために、交換性 Ca および Mg 含有量が高かったのかもしれない。培地の C および N の含有量は培地への燃焼灰の混合率が低い処理区ほど高かった (Table 4, 5)。これは、燃焼灰には C と N はほとんど含まれないが、基本培地であるピートモスは有機物であり C と N を含むため、燃焼灰の混合割合がこれら元素の含有量の違いとして反映された結果であると考えられた。この N 含有量は全 N 量であり植物が利用しやすい無機態 N の量ではないが、培地への燃焼灰の混合率が高い処理区ほど培地の N 含有量が低いことが、燃焼灰の混合率が高い処理区での苗木の成長抑制に影響している可能性がある。また、培地への燃焼灰の混合率が高いほど交換性 Mg、Na 含有量が低い傾向がみられたが (Table 5)、培地への燃焼灰の混合率が高いほど保肥力の高いピートモス (加藤 1998) の割合が低くなるため、塩基が保持されにくかったと考えられる。

コンテナ苗培地への燃焼灰の混合が、スギ、ヒノキコンテナ苗の成長に及ぼす影響は、樹種により異なった。一生育期間終了時の掘り取り個体について対照区と同程度の根元直径および個体乾重がみられたのは、スギでは 5%区と 10%区であったのに対し、ヒノキでは 5%区のみであった (Table 3)。スギの苗高は、経時変化を測定していた個体では 5%区と 10%区は対照区

Table 6. スギおよびヒノキコンテナ苗の一生育期間終了時における葉の元素含有量

	C	N	K	Ca	Mg	P	Na	Fe
	g kg <sup>-1</sup>	g kg <sup>-1</sup>	g kg <sup>-1</sup>	g kg <sup>-1</sup>	g kg <sup>-1</sup>	g kg <sup>-1</sup>	g kg <sup>-1</sup>	g kg <sup>-1</sup>
スギ								
対照区	474.6 ± 1.8 <sup>a</sup>	13.8 ± 1.5	13.0 ± 1.2	10.0 ± 0.4 <sup>b</sup>	2.76 ± 0.12	1.26 ± 0.12	0.90 ± 0.08	0.45 ± 0.22 <sup>ab</sup>
5%区	476.4 ± 1.7 <sup>a</sup>	12.9 ± 1.2	12.1 ± 0.7	11.7 ± 0.8 <sup>b</sup>	2.15 ± 0.16	1.51 ± 0.10	0.90 ± 0.10	0.52 ± 0.15 <sup>ab</sup>
10%区	473.2 ± 1.2 <sup>a</sup>	12.2 ± 1.2	13.7 ± 1.0	14.7 ± 1.3 <sup>ab</sup>	2.10 ± 0.16	1.34 ± 0.13	1.19 ± 0.12	0.31 ± 0.10 <sup>b</sup>
25%区	456.2 ± 4.6 <sup>b</sup>	14.6 ± 1.5	14.7 ± 1.5	17.9 ± 1.8 <sup>a</sup>	2.52 ± 0.32	1.23 ± 0.15	1.18 ± 0.18	1.29 ± 0.35 <sup>a</sup>
ヒノキ								
対照区	484.3 ± 3.3	11.4 ± 1.2	9.3 ± 0.5	8.1 ± 0.3	1.51 ± 0.14	1.35 ± 0.15 <sup>B</sup>	0.45 ± 0.15	0.33 ± 0.04
5%区	479.1 ± 3.1	10.9 ± 0.4	11.7 ± 0.9	11.2 ± 1.5	1.79 ± 0.18	3.36 ± 0.24 <sup>A</sup>	0.58 ± 0.20	0.40 ± 0.13
10%区	475.3	19.1	8.9	11.0	1.58	4.18	1.05	0.21
25%区	478.0	18.5	7.1	14.1	2.44	2.44	3.11	0.64

	Al	B	Cd	Cr	Cs	Cu	Mn	Mo	Ni	Zn	Rb
	mg kg <sup>-1</sup>	mg kg <sup>-1</sup>	mg kg <sup>-1</sup>	mg kg <sup>-1</sup>	mg kg <sup>-1</sup>	mg kg <sup>-1</sup>	mg kg <sup>-1</sup>	mg kg <sup>-1</sup>	mg kg <sup>-1</sup>	mg kg <sup>-1</sup>	mg kg <sup>-1</sup>
スギ											
対照区	69.4 ± 25.6 <sup>b</sup>	24.0 ± 1.1 <sup>b</sup>	0.032 ± 0.007 <sup>b</sup>	61.0 ± 43.1	0.006 ± 0.003 <sup>c</sup>	3.45 ± 1.08	22.7 ± 6.7 <sup>b</sup>	1.32 ± 0.57	19.9 ± 18.9	10.5 ± 1.7 <sup>b</sup>	2.20 ± 0.42 <sup>b</sup>
5%区	67.3 ± 18.5 <sup>b</sup>	26.6 ± 1.3 <sup>ab</sup>	0.093 ± 0.012 <sup>a</sup>	71.0 ± 32.9	0.019 ± 0.003 <sup>b</sup>	3.93 ± 0.95	32.5 ± 3.0 <sup>b</sup>	2.14 ± 0.43	18.5 ± 15.7	14.3 ± 0.7 <sup>ab</sup>	4.01 ± 0.51 <sup>ab</sup>
10%区	54.2 ± 4.2 <sup>b</sup>	27.3 ± 1.4 <sup>ab</sup>	0.132 ± 0.021 <sup>a</sup>	40.0 ± 21.5	0.034 ± 0.003 <sup>a</sup>	2.98 ± 0.46	28.6 ± 2.5 <sup>b</sup>	1.48 ± 0.25	11.2 ± 9.6	14.5 ± 1.4 <sup>ab</sup>	4.71 ± 0.79 <sup>ab</sup>
25%区	148.8 ± 21.1 <sup>a</sup>	30.2 ± 0.4 <sup>a</sup>	0.096 ± 0.008 <sup>a</sup>	143.4 ± 78.6	0.035 ± 0.003 <sup>a</sup>	5.87 ± 1.89	58.4 ± 6.1 <sup>a</sup>	2.67 ± 1.08	55.4 ± 32.0	16.3 ± 1.5 <sup>a</sup>	6.20 ± 0.84 <sup>a</sup>
ヒノキ											
対照区	77.1 ± 11.9	20.2 ± 1.0 <sup>B</sup>	0.070 ± 0.022	26.0 ± 4.8	0.015 ± 0.002 <sup>B</sup>	1.66 ± 0.17	184.8 ± 50.1	0.85 ± 0.05 <sup>B</sup>	0.5 ± 0.1	20.5 ± 2.4	2.65 ± 0.13 <sup>B</sup>
5%区	63.8 ± 9.3	29.5 ± 2.3 <sup>A</sup>	0.113 ± 0.012	35.9 ± 10.4	0.033 ± 0.003 <sup>A</sup>	1.62 ± 0.26	184.0 ± 36.4	1.64 ± 0.25 <sup>A</sup>	0.8 ± 0.1	17.3 ± 1.1	6.63 ± 0.41 <sup>A</sup>
10%区	88.3	35.5	0.109	20.8	0.026	2.81	155.3	1.66	0.6	28.0	4.81
25%区	174.4	43.9	0.075	62.5	0.040	4.42	101.6	2.04	1.5	22.7	4.52

ヒノキの10%区、25%区は個体が小さく、10個体をまとめて1サンプルとしたため、繰り返しがない。その他は平均値±標準誤差 (n = 5)。スギについて、異なるアルファベットは各元素含有量に処理区間で有意差があることを示す (Tukey HSD 検定,  $p < 0.05$ )。ヒノキについて、異なるアルファベットは各元素含有量に対照区と5%区で有意差があることを示す (t 検定,  $p < 0.05$ )。アルファベットのついていない元素は処理間に有意差がなかった。

と同程度の成長がみられたが (Fig. 1, 2)、一生育期間終了時の掘り取り個体では10%区の苗高は対照区より低かった (Table 3)。ヒノキの苗高は5%区でのみ、対照区と同程度であった。両樹種ともに、燃焼灰の混合によって個体の成長が対照区よりも促進されることはなく、むしろ抑制された。このことから、少なくとも本試験のように固形肥料も与える条件では、培地への燃焼灰混合によるスギ、ヒノキ苗の成長促進効果はみられないことが明らかとなった。苗木移植前の培地では燃焼灰の混合率が高いほど培地の交換性CaおよびK含有量が高かったが (Table 4)、苗木掘り取り時 (移植から約10カ月後) には培地の交換性CaおよびK含有量に灰の混合率による明瞭な違いは認められなかった (Table 5)。

燃焼灰の混合率が高い処理区ほど、スギ葉のCa含有量は高まったものの、スギ、ヒノキ葉のMg、K含有量やヒノキ葉のCa含有量に有意な処理間差はみられず、すべての個体ではないが葉にCr、Cd、Niといった重金属、Fe、Cu、Mn、Znといった微量必須重金属およびAlの含有量が高まる個体がみられた (Table 6)。苗の成長を大きく損なうことなくコンテナ苗培地資材として燃焼灰を混合できる割合は、スギでは10%程度であるのに対し、ヒノキでは5%程度であることが明らかとなった。

スギ25%区では他の処理区に比べ、葉のC含有量が低く、Fe、Mn、Znといった微量必須重金属の含有量とともに、必須ではないAlの含有量も高い傾向があった (Table 6)。Alは土壌や土壌溶液中で低濃度の場合には成長に有益に働くが、過剰になるとCaやMgの吸収や根の成長を抑制することが知られている (Marschner 1995)。しかし、他の処理区と比べ、スギ25%区で葉のCaとMg含有量は低くなく (Table 6)、T/Rも高くなくことから根の成長が抑制されたわけではなかった (Table 3)。このことから、25%区ではAlの過剰害は生じていなかったと考えられる。スギでは燃焼灰を混合したすべての処理区で葉のCd含有量が対照区よりも有意に高かったが、燃焼灰の混合割合を反映しているわけではなかった (Table 6)。重金属ではあるが、Fe、Cu、Mn、Znといった微量必須元素は酵素反応などに必要であり、Niは必須元素ではないが酵素の構造と維持に働いている (茅野・小畑 1991)。燃焼灰の混合率が高い処理区でも重金属の含有量が高まらなかった個体もあったことから、燃焼灰の混合率が高い処理区でのスギ、ヒノキコンテナ苗の成長抑制に重金属の影響培地への燃焼灰の混合により、燃焼灰に含有されるCa、KおよびMgの植物体への吸収量が増加することが見込まれたが、スギ、ヒノキ葉のMg、K含有量やヒノキ葉のCa含有量に有意な処理間差はみられなかった (Table 6)。燃焼灰を混合していない対照区で良好な成長がみられたことから、苗木の成長には元肥

と追肥で与えた固形肥料に含まれる養分量で充分だったために、培地への燃焼灰の混合による苗木の成長および葉のMg、K、Ca含有量に対する施肥効果が小さかったと考えられた。しかしながら、スギでは燃焼灰の混合率が高い処理区ほど葉のCa含有量は高くなった (Table 6)。成木ではリター中のCa含有量がヒノキに比べスギで多いことが報告されていることから (澤田・加藤 1993)、スギはCaの要求量が高い樹種である可能性がある。そのために燃焼灰の混合率が高い処理区ではCa吸収が増え、葉のCa含有量に反映されたと考えられる。

1) スギ、ヒノキともに、培地への燃焼灰の混合によって個体の成長が対照区よりも促進されることはなくむしろ抑制され、スギでは25%区、ヒノキでは10%区と25%で、根元直径、苗高、乾重が対照区に比べて著しく小さかった、2) 燃焼灰の混合によって、培地のpHは上昇し、交換性CaおよびMg含有量は増加し、N、C含有量は減少し、葉中のFe、Mn、Zn等の重金属やAlの含有量が高まる個体があった、3) これらのことを考慮すると、苗の成長を大きく損なうことなく土壌資材として燃焼灰を利用するには、コンテナ苗培地への燃焼灰の混合率 (体積比) の上限値をスギでは10%、ヒノキは5%に設定することが適切であると考えられた。将来的に燃焼灰を培地に混合したコンテナ苗の流通を検討するためには、引き続き苗木の成長の追調査を行うとともに、コンテナ苗の林地植栽に伴う培地からの重金属の溶出を調査するなど、コンテナ苗の健全性および安全性に関するさらなる研究が必要である。

## 謝 辞

木質バイオマス発電所からの燃焼灰の調達では吉田貴紘氏にお世話になった。苗木の成長調査では田中(小田)あゆみ氏、酒井恵子氏にご協力いただいた。また、植物・土壌試料の調整では根本美千代氏、勝井祥江氏、吉田佳氏のお世話になった。本研究は(国研)森林研究・整備機構森林総合研究所交付金プロジェクト「木質バイオマス発電事業の安定的な拡大手法の開発」(課題番号201423)により行われ、研究の一部に森林総合研究所の「家族責任がある研究者のための支援制度」による研究支援を受けた。

## 引用文献

- 今富 裕樹 (2011) スギ再造林の低コスト化を目指した技術開発 (1) 伐採・地拵え・植栽の一貫作業による低コスト化. 現代林業, 542, 52-55.
- 梶本 卓也・宇都木 玄 (2016) プロジェクト「コンテナ苗を活用した低コスト再造林技術の実証研究」の紹介. 森林遺伝育種, 5, 101-105.
- 鹿又 秀聡・上村 佳奈 (2011) スギのコンテナ苗の低

- コスト化の可能性. 日本森林学会大会発表データベース 第122回日本森林学会大会, 67.
- 加藤 哲郎 (1998) 用土. 藤原 俊六郎・安西 徹郎・小川 吉雄・加藤 哲郎編 “新版 土壤肥料用語事典”. 農村漁村文化協会, 238-246.
- 茅野 充男・小畑 仁 (1991) 元素の生理作用. 茅野 光男編 “現代植物生理学 5 物質の輸送と貯蔵”. 朝倉書店, 89-127.
- Marschner, H. (1995) Mineral Nutrition of Higher plants second edition, Academic press, 889pp.
- 村本 穰司・後藤 逸男・蜷木 翠 (1992) 振とう浸出法による土壤の交換性陽イオンおよび陽イオン交換容量の迅速分析. 日本土壤肥科学雑誌, 63, 210-215.
- 折橋 健・山田 敦・高橋 徹・田代 直明・古賀 信也 (2011) 木質バイオマス燃焼灰の林地還元に向けた基礎知見. 九大演報, 92, 13-18.
- 林野庁 (2017) 平成29年版森林・林業白書. 全国林業改良普及協会, 174-175.
- Sano, T., Miura, S., Furusawa, H., Kaneko, S., Yoshida, T., Nomura, T. and Ohara, S. (2013) Composition of inorganic elements and the leaching behavior of biomass combustion ashes discharged from wood pellet boilers in Japan. J Wood Sci, 59, 307-320.
- 澤田 智志・加藤 秀正 (1993) スギおよびヒノキ林下の土壤における塩基の蓄積要因. 日本土壤肥科学雑誌, 64, 296-302.
- 和田 健太郎・内山 知二 (2016) 製材残材を燃料とするボイラーから排出された木質燃焼灰の肥料効果. 日本土壤肥科学雑誌, 87, 40-44.

## Effect of woody ash mixing to growing media on the growth and nutrient condition of containerized Sugi (*Cryptomeria japonica*) and Hinoki (*Chamaecyparis obtusa*) seedlings

Junko NAGAKURA<sup>1)\*</sup>, Mayumi Y. OGASA<sup>2)</sup>, Tsuyoshi YAMADA<sup>1)</sup> and Keizo HIRAI<sup>1)</sup>

### Abstract

Most of the combustion ash produced from the woody biomass power plant has been considered as industrial waste. However, ash contains nutrients such as Ca and K and may be reusable as a fertilizer and/or soil material for cultivating seedlings. To evaluate the feasibility of using ash as container growing media, we measured the growth and nutrient status of Sugi (*Cryptomeria japonica*) and Hinoki (*Chamaecyparis obtusa*) seedlings planted in containers with different mixing ratios of 0% (as a control), 5%, 10% or 25% of ash application (by volume). Ash application did not increase the seedling size of both Sugi and Hinoki. The height, diameter, and biomass growth of Sugi treated with 25% ash application were significantly restricted compared with those of other treatments. In Hinoki, the height, diameter, and biomass growth were significantly restricted with 10% and 25% ash application. The exchangeable Mg and Na contents in the growing media at the end of the growing season were lower in the seedlings treated with a higher ash mixing ratio. Needle Ca content of Sugi was increased with a higher ash mixing ratio, whereas that of Hinoki was comparable among treatments. No significant difference was observed in needle Mg and K contents of both Sugi and Hinoki among treatments. These results suggested that ash could be mixed up to 10% and 5% for Sugi and Hinoki, respectively, into container growing media without restricting seedling growth. It would be necessary to investigate whether ash-mixed seedlings grow well after planting in a forest.

**Key words:** biomass combustion ash, containerized seedling, fertilization, hinoki, nutrient absorption, sugi

---

Received 5 October 2017, Accepted 15 December 2017

1) Department of Forest Soils, Forestry and Forest Products Research Institute (FFPRI)

2) Department of Plant Ecology, FFPRI

\* Department of Forest Soils, FFPRI, 1 Matsunosato, Tsukuba, Ibaraki, 305-8687 JAPAN; e-mail: kurya@affrc.go.jp

## 短 報 (Short communication)

### 東大雪天然林における風倒後 60 年間の林分動態

石橋 聰<sup>1)\*</sup>、古家 直行<sup>1)</sup>、佐々木 尚三<sup>1)</sup>、高橋 正義<sup>2)</sup>

#### 要旨

北海道中央部東大雪の三股風害跡試験地において、風倒後 60 年間の林分動態を検討した。風倒 60 年後の林分状況は、立木本数 1,230 本/ha、胸高断面積合計 46.15m<sup>2</sup>/ha、林分材積 423.4m<sup>3</sup>/ha の針葉樹林で、林分材積は風倒前の 1.8 倍になっていた。立木本数は風倒後増加を続け、37 年後をピークに減少に転じた。風倒後の本数増加には前生樹の進界が大きく寄与し、その後の減少過程は個体間競争による枯死と進界木の減少によると考えられた。これらより、当林分の発達段階は風倒後 40 年前後で林分成立段階から若齢段階に移行したと考えられた。

キーワード：針葉樹天然林、更新、林分発達段階、風倒

#### 1. はじめに

1954 (昭和 29) 年 9 月に北海道に來襲した台風 15 号 (洞爺丸台風) は、北海道中央部大雪山系の天然林を中心に甚大な風倒被害をもたらした。その被害量は同年 5 月の低気圧の暴風による被害とあわせ 2,500 万 m<sup>3</sup>、当時の年間伐採量の 3.8 年分とされる (北海道風害森林総合調査団 1959)。北海道国有林の各営林局では、この風倒後の林分推移を調べるため、固定調査地を設置し調査を行ってきた (北海道営林局 1982) が、風倒後 60 年目となった 2014 年まで継続調査が行われてきたのは 3 カ所 (苫小牧、定山溪、十勝三股) のみである。この内、苫小牧および定山溪調査地はすでに報告 (Kosugi et al. 2016) されたので、本報では残りの北海道中央部東大雪に位置する十勝三股調査地における調査データを用いて、風倒後 60 年間の林分再生経過を明らかにする。このことにより、北方天然林における風倒による大規模攪乱後の林分動態の解明に資するとともに、今後の施業管理の一助としたい。

#### 2. 調査地およびデータ

##### 2.1 調査地

調査地は北海道森林管理局十勝西部森林管理署東大雪支署管内十勝三股国有林 184 林班は小班 (北緯 43° 32' 00"、東経 143° 10' 14") にある三股風害跡試験地 (以下「試験地」という) である。当地は 1954 年の風倒被害の実態を調べるため、1956 年に北海道風害総合森林調査の調査区画 (50 m × 100 m) が設置された場所だったが、調査団が調査資料を持ち帰ったため、1960 年 6 月に同所とみられる場所に新たに調査区画を設定

し、この区画を含む周囲林分を試験地とした。試験地は当時の風倒被害地の代表的な場所であることに加え、他の被害地で行われた被害木の搬出がないことが特長である。

試験地全体の面積は 20.18ha であり、調査区は 50 m × 100 m の長方形で、面積は 0.5ha である。標高 710 m、方位は北西、傾斜は 0 ~ 5° で山麓河岸段丘上のほぼ平坦地にある。近隣のぬかびら源泉郷のアメダスデータ (1981 年 ~ 2010 年の平均値) によると、年平均気温 3.7°C、年降水量 1,315mm、最深積雪深 103cm である。地質は火山灰、土壌型は B<sub>D</sub> 型である。林床の大部分はスゲ類、シダ類、コケ類に覆われているが、一部の疎開地ではクマイザサが疎生している。調査区および周囲では今日まで伐採は行われていない。

1960 年の設定以降、調査地の調査は旧帯広営林局、旧北海道営林局帯広営林支局、旧北海道森林管理局帯広分局によって行われてきたが、2005 年からは森林総合研究所北海道支所が引き継ぎ、北海道森林管理局の協力を得ながら調査を行っている。

##### 2.2 調査データと算出方法

###### 2.2.1 毎木調査

毎木調査は 1960 年 6 月の設定時以降、1976 年 6 月、1981 年 6 月、1991 年 9 月、2001 年 10 月、2005 年 6 月、2010 年 6 月、2014 年 9 月の 8 回実施した。調査区内の胸高直径 (山側地際から 1.3m) 5cm 以上の全生立木について、番号札による個体識別のうえ樹種の同定および直径巻尺による胸高直径の測定を行った。ただし、各調査時における樹種同定の際、エゾヤマザクラとミ

原稿受付：平成 29 年 9 月 22 日 原稿受理：平成 29 年 12 月 25 日

1) 森林総合研究所 北海道支所

2) 森林総合研究所 森林災害・被害研究拠点

\* 森林総合研究所 北海道支所 〒062-8516 北海道札幌市豊平区羊ヶ丘 7

ヤマザクラは樹種区別していないため、これらは「サクランブ」とした。なお、調査年の表記は、成長期間年数を反映させるため秋を基準とし、春に調査が実施された場合は前年の表記とした。

### 2.2.2 幹材積

立木の幹材積は、毎木調査により得られた胸高直径と、樹高曲線により算出した樹高により2変数幹材積表(帯広営林局 1961)から求めた。樹高曲線は2010年に調査区内で樹高を抽出調査し、トドマツ、エゾマツ(アカエゾマツ含む)、広葉樹別に作成した。

樹高曲線式は Näsund 式を使用した。

$$H = 1.3 + \frac{D^2}{(a + bD)^2}$$

ここで、H: 樹高 (m)、D: 胸高直径 (cm)、a、b は定数である。

樹種区分ごとのパラメータは Table 1 に示す。

Table 1. 樹種区別樹高曲線パラメータ

樹種区分	a	b	決定係数
トドマツ	1.48953	0.18425	0.87
エゾマツ (アカエゾマツ含む)	1.85053	0.17016	0.92
広葉樹	1.38093	0.18429	0.84

### 2.2.3 胸高直径階の定義

本報では立木の胸高直径を6cmごとにくくり「胸高直径階」とする。たとえば、胸高直径階8cmは5cm以上11cm未満、14cmは11cm以上17cm未満を示し、62cm ≤ は59cm以上を示す。

### 2.2.4 風倒前後の林分状況

1960年の調査区設定時に風倒被害木について胸高直径、樹種(アカエゾマツはエゾマツに含む)、被害形態(根返り、幹折れ、立枯れ)を記録するとともに、風倒木位置図を作成した(帯広営林局計画課試験調査係 1961)。ただし、被害形態については1954年の風倒発生から5成長年経過しており、形態が変化したり(例えば「立枯れ」→「幹折れ」)この間の自然枯死木が含まれている可能性がある。

風倒被害量は風倒被害木の胸高直径から上記2.2.2の方法により幹材積を算出し、集計した。また、風倒前の立木本数、林分材積を以下の手順により推計した。設定調査時の各生立木について、①1959年の胸高直径とその次の調査である1975年の胸高直径との差から年平均直径成長量を計算、②その数値に1954年から1959年の成長期間である5年を乗じて直径成長量を計算、③その数値を1959年の胸高直径から減じて風倒前の各立木の胸高直径を計算、④これらのうち5cm以上のものを生立木とし、これらの胸高直径から上記2.2.2

の方法により幹材積を算出した。そしてこれらの生立木と風倒被害木を集計し、風倒前の立木本数、林分材積とした。これらの数値は推計値であるが、風倒前の林相と被害強度の推定に利用した。

## 3. 結果と考察

### 3.1 風倒被害の状況

風倒前の林分は、材積割合がエゾマツ、アカエゾマツが58%、トドマツが41%、広葉樹が1%の針葉樹林で、林分材積は234m<sup>3</sup>/haと推計された。風倒による被害材積は208m<sup>3</sup>/haで、調査区内の被害率は89%だった。また、風倒被害木の形態をみると、8割が根返りであり、倒れた方角をみると、多くは北～東方向で、南～西方向からの暴風によって被害が発生したとみられた(帯広営林局計画課試験調査係 1961)。調査区付近で調査された北海道風害森林総合調査団の音更風害林固定標準地の調査結果(北海道風害森林総合調査団 1959)では、生立木と被害木を合計した林分材積は224m<sup>3</sup>/ha、被害材積は180m<sup>3</sup>/haで被害率は80%とされており、今回の推計値と大きな差はなかった。

### 3.2 林分の再生経過

Fig.1に立木本数と林分材積の60年間の推移を示した。立木本数は風倒後増加を続けたが、1991年に最大となりその後減少に転じたことがわかる。一方、林分材積は風倒後2009年まで一貫して増加し、風倒前の1.8倍となったが、2014年には横ばいとなった。しかし、調査区内では2013年秋に湿雪による幹折れ被害木が発生し、これが主な要因となり林分材積は横ばいになったとみられ、今後林分材積は再び増加傾向を示す可能性がある。Fig.2には胸高直径階本数分布の変化を示した。風倒発生後5年後の1959年には針葉樹を主体に8cm階の本数が多かった。また、立木本数が最大となった1991年には、20cm階以下の小径木が大きく増加して逆J字型の分布形状になっていた。これはこの間に針葉樹主体の多数の進界木があらわれ、これらが

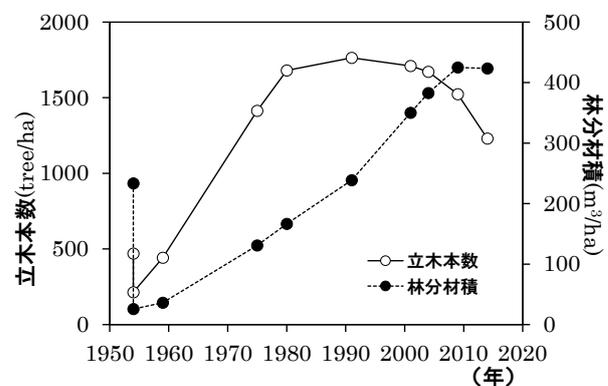


Fig. 1. 立木本数および林分材積の推移

1954年の風倒前後の値は推計値である。

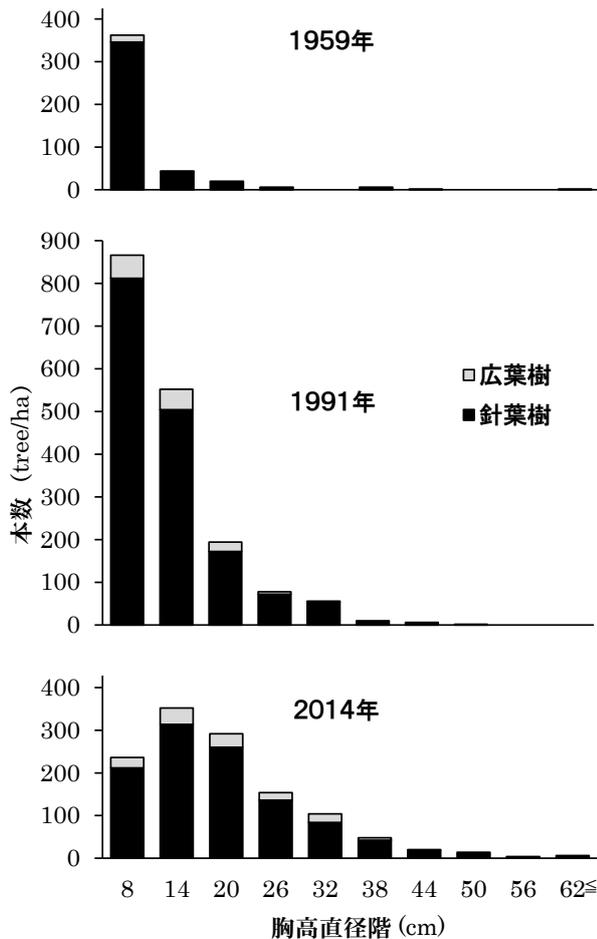


Fig. 2. 胸高直径階本数分布の変化

胸高直径階 8cm は 5cm 以上 11cm 未満、14cm は 11cm 以上 17cm 未満を示す。62cm ≤ は 59cm 以上である。

成長して上位に進階していることを示している。一方、風倒発生後 60 年目となった 2014 年をみると、8cm 階、14cm 階では立木本数が大きく減少し、逆 J 字型の分布形状が崩れてきていた。林冠の閉鎖にともなう進界木の減少、小径の直径階を中心とした個体間競争による枯死木の発生、および個体の直径成長が分布形状の変化に影響していると考えられる。

Oliver (1981) などをもとにした藤森 (2002) による林分発達段階では、大きな攪乱を受けた後の天然林の林分発達段階を、林分成立段階、若齢段階、成熟段階、老齢段階に区分しており、本調査地は風倒後進界により密度が増加する林分成立段階を経て、37 年前後で個体間競争により密度が減少する若齢段階に入り、現在に至っていると考えられる。このような大規模な風倒攪乱後 40 年前後で立木密度が減少し若齢段階に移行する現象は、更新後の林相が広葉樹林の苫小牧調査地、針広混交林の定山溪調査地 (Kosugi et al. 2016) のほか、トドマツ主体の針葉樹林である支笏湖畔シシャモナイ調査地 (石橋ら 2015) でも同様にあらわれており、樹種構成によらない北海道内天然林での一般的な現象の可能性があり、今後も調査例を増やすなど検証を進める必要がある。

Table 2 には樹種構成の変化を示した。1959 年から 2014 年の針葉樹比率の変化をみると、本数 (95% → 88%)、胸高断面積 (98% → 89%)、材積 (99% → 89%) とともにやや減少する傾向がみられるが、針葉樹主体の林分という点では 60 年間の大きな変化はなかった。ただし、少数ではあるが先駆樹種のシラカンバ、バッコヤナギが増える傾向がみられた。これらの樹種については、設定時には稚幼樹がみられなかった (帯広営林局計画課試験調査係 1961) ことや、1954 年の風倒による根返り木のマウンド上に多くみられることなどから、設定当時に存在した 3 本のシラカンバを除き、風倒を契機に更新が起きたと考えられる。一方、設定当時に針葉樹の前生稚幼樹が多数存在したとの記

Table 2. 樹種構成の変化

樹種	本数 (tree/ha)			胸高断面積 (m <sup>2</sup> /ha)			材積 (m <sup>3</sup> /ha)		
	1959	1991	2014	1959	1991	2014	1959	1991	2014
トドマツ	364 (82)	1350 (77)	846 (69)	2.58 (56)	20.63 (70)	26.79 (58)	18.0 (50)	164.1 (69)	238.9 (56)
エゾマツ	6 (1)	20 (1)	18 (1)	0.79 (17)	0.45 (2)	0.49 (1)	8.5 (23)	3.9 (2)	4.7 (1)
アカエゾマツ	54 (12)	262 (15)	226 (18)	1.14 (25)	6.36 (21)	13.64 (30)	9.4 (26)	54.4 (23)	134.1 (32)
ミズナラ	2 (0)	4 (0)	6 (0)	0.01 (0)	0.07 (0)	0.10 (0)	0.0 (0)	0.5 (0)	0.8 (0)
シナノキ	-	2 (0)	2 (0)	-	0.03 (0)	0.06 (0)	-	0.2 (0)	0.5 (0)
シラカンバ	6 (1)	46 (3)	58 (5)	0.02 (0)	0.99 (3)	3.29 (7)	0.1 (0)	7.8 (3)	30.5 (7)
イタヤカエデ	6 (1)	16 (1)	28 (2)	0.04 (1)	0.21 (1)	0.49 (1)	0.2 (1)	1.4 (1)	3.7 (1)
サクラ類*	-	2 (0)	2 (0)	-	0.05 (0)	0.12 (0)	-	0.4 (0)	1.1 (0)
ナナカマド	4 (1)	4 (0)	-	0.02 (0)	0.05 (0)	-	0.1 (0)	0.3 (0)	-
バッコヤナギ	-	58 (3)	44 (4)	-	0.82 (3)	1.15 (2)	-	5.8 (2)	9.2 (2)
計	442	1764	1230	4.60	29.66	46.15	36.3	238.8	423.4

\* エゾヤマザクラまたはミヤマザクラ

注 1) 端数処理のため計の値が一致しない場合がある。

2) ( ) 内は調査区計に占める割合。単位：%

録（帯広営林局計画課試験調査係 1961）や、標準的なトドマツ進界木の樹齢を調べた結果、風倒前から存在した前生樹だった（佐々木・西村 1992）こと、さらに風倒被害木の搬出がなくこれら前生樹の損壊がなかったことから、調査期間前半の針葉樹進界木の多くは風倒前の前生樹由来とみられる。これらのことから、この風倒林分の再生には針葉樹前生樹が大きく寄与しており、一部に先駆樹種のマウンド更新などが加わっていると考えられる。風倒後の再生林分の樹種構成については、苫小牧調査地、定山溪調査地はそれぞれ針葉樹林から広葉樹林、針広混交林から広葉樹林へと再生しており（Kosugi et al. 2016）、針葉樹林から針葉樹林へと再生した今回の調査地とは異なる。この要因としては、それぞれの立地条件や前生樹の状態などが考えられるが、他の調査例を含めた今後の検討が必要である。

#### 4. おわりに

今回、東大雪天然林における風倒による大規模攪乱後 60 年間の林分再生経過を明らかにしたが、長期にわたる森林動態の中では短期間に過ぎないといえる。そのため、今後も調査を継続してさらに追跡するとともに、倒木更新などの詳細な調査による更新機構の解明を進める必要がある。このことにより、今後も起こりうる大規模風倒後の施業管理方法の検討に貴重な知見を提供できると思われる。

本調査地の設定と長年にわたり調査を続けてきた旧帯広営林局、旧北海道営林局帯広営林支局、旧北海道森林管理局帯広分局、北海道森林管理局の職員各位に敬意を表するとともに感謝申し上げます。また、調査

等に協力頂いた鷹尾元、八巻一成、立花敏、倉本恵生、飯田滋生各氏の他、森林総合研究所北海道支所職員各位に感謝申し上げます。

#### 引用文献

- 藤森 隆郎（2002）新たな森林管理技術の構築—多様な機能の発揮に向けて—。森林計画学会誌, 36 (2), 99-112.
- 北海道営林局（1982）風害森林試験地調査報告（中間報告）。北海道営林局, 56pp.
- 北海道風害森林総合調査団（1959）北海道風害森林総合調査報告。日本林業技術協会, 535pp.
- 石橋 聡・佐野 真琴・鷹尾 元（2015）支笏湖畔シヤマナイ天然林における風倒被害後の森林再生。北方森林研究, 63, 13-14.
- Kosugi, R., Shibuya, M. and Ishibashi, S. (2016) Sixty-year post-windthrow study of stand dynamics in two natural forests differing in pre-disturbance composition. *Ecosphere*, 7 (11), e01571.10.1002/ecs2.1571
- 帯広営林局（1961）立木幹材積表。帯広営林局, 22pp.
- 帯広営林局計画課試験調査係（1961）帯広営林局管内試験地の概要第 4 報計画課担当分（風害試験林の部）。樹氷, 11 (11), 82-91.
- Oliver, C. D. (1981) Forest development in north America following major disturbances. *Forest Ecology and Management*, 3, 153-168.
- 佐々木 信彦・西村 栄三（1992）昭和 29 年台風被害跡地の現況。平成 3 年度帯広営林支局業務研究発表集, 7-16.



Photo 1. 風倒 60 年後の林相 (2014 年 9 月)

現況は針葉樹中小径木主体の林分で、林冠は閉鎖し枯立木がみられる。右のシラカンバはマウンド上に更新し 1975 年の調査時に進界した個体で、2014 年の胸高直径は 34.3cm である。



Photo 2. 地表の状況 (2014 年 9 月)

倒木の幹表面はコケ類などに覆われているが、実生はみられるものの稚幼樹は少ない。中央上および手前右の傾斜木はマウンド上に更新したバッコヤナギである。

# Sixty-year stand dynamics of a forest stand damaged by Typhoon Toyamaru in Higashitaisetsu natural forest, central Hokkaido, Japan

Satoshi ISHIBASHI<sup>1)\*</sup>, Naoyuki FURUYA<sup>1)</sup>, Shozo SASAKI<sup>1)</sup> and Masayoshi TAKAHASHI<sup>2)</sup>

## Abstract

The stand dynamics of a natural coniferous forest during 60 years after severe wind damage in 1954 was examined in the Higashitaisetsu area, central Hokkaido. This stand had a standing tree density of 1,230 trees/ha, a basal area of 46.15 m<sup>2</sup>/ha, and a stand volume of 423.4 m<sup>3</sup>/ha in 2014, 60 years after the wind damage. The stand volume was 1.8 times greater than before the wind damage. The number of trees increased in the first 37 years after the wind damage, probably largely due to the growth of advance regeneration; however, subsequently the number of trees began to decrease, probably due to the competition among trees and the decrease in ingrowth rate. Based on a stand development stage after a replacing disturbance, we considered that the forest stand was in the stand initiation stage about 40 years after the wind damage and then moved to the stem exclusion stage.

**Key words:** natural coniferous forest, regeneration, stand development stage, wind damage

---

Received 22 September 2017, Accepted 25 December 2017

1) Hokkaido Research Center, Forestry and Forest Products Research Institute (FFPRI)

2) Center for Forest Damage and Risk management, FFPRI

\* Hokkaido Research Center, FFPRI, 7 Hitsujigaoka, Toyohira, Sapporo, Hokkaido, 062-8516 JAPAN; e-mail: sa9267@ffpri.affrc.go.jp

---

**研究資料 (Research record)**


---

## Retention Experiment for Plantation Forestry in Sorachi, Hokkaido (REFRESH): A large-scale experiment for retaining broad-leaved trees in conifer plantations

Yuichi YAMAURA<sup>1)2)\*</sup>, Nobuhiro AKASHI<sup>3)</sup>, Akira UNNO<sup>3)</sup>, Toshiyuki TSUSHIMA<sup>3)</sup>,  
Akiko NAGASAKA<sup>3)</sup>, Yu NAGASAKA<sup>3)</sup> and Kenichi OZAKI<sup>4)</sup>

### Abstract

Retention forestry, a part of silvicultural system that retains important forest structures and organisms at harvest time, is a promising way to conserve biodiversity in managed forests. This harvesting method is being widely adopted in many countries and tested in field experiments. A large number of conifer plantations in Japan are reaching the planned harvest age, and their harvest is expected to help meet the domestic demand for wood. On the other hand, the restoration of conifer plantations to natural broad-leaved forests and the maintenance and enhancement of ecosystem services other than wood production are required in plantation landscapes. In this context, we launched a large-scale retention forestry experiment (the REFRESH project) in Sakhalin fir (*Abies sachalinensis*) plantations in central Hokkaido, northern Japan. The REFRESH project has six treatments (clear-cutting, three levels of dispersed retention, aggregated retention with a 0.36 ha intact patch, and gap cutting) and two controls (unharvested natural forest and unharvested plantation) with three replicates each. In dispersed retention, naturally regenerated broad-leaved trees are retained at three levels to maintain and restore elements of natural forests. After harvesting, fir seedlings are planted in the harvested area. We conducted pre- and post-harvest surveys on water and soil conservation; forestry efficiency; and the diversity of plants, arthropods, and birds. The initial surveys indicate how tree retention provides continuity in the forest structure in the harvested area, and long-term surveys until the next harvest will reveal the degree of structural and compositional enrichment of the plantations.

**Key words:** biodiversity conservation, forestry efficiency, planted forest, retention forestry, water and soil conservation

### 1. Introduction

Forests cover 31% of the earth's land surface (FAO 2015) and play significant roles in the environment (Perry 1994). Forests harbor large areas of global biodiversity and provide various indispensable ecological goods and services, e.g., wood fiber, water purification, soil conservation, recreational locations, carbon storage, and biodiversity conservation (Nelson et al. 2009, Raudsepp-Hearne et al. 2010). These ecosystem services undergo change due to anthropogenic activity in forests (Wilcove et al. 2013, Renard et al. 2015) and are likely to continue to change in the future (Bateman et al. 2013, Lawler et al. 2014). Society has therefore increasingly responded to these changes by various schemes such as sustainable forest management (Butchart et al. 2010).

In previous decades, planted forests, which are established through planting or seeding, have increased in area and now

cover 7% of the world's forested area (FAO 2015). Half of all planted forests exist in Asia, particularly in East Asia (FAO 2006), where they are rapidly increasing (FAO 2015). Planted forests produce 50% of the world's wood products (FAO 2007) and are likely to increase their dominance in the near future (FAO 2015). A recently proposed concept of 'planted forest' involves fully and partially regenerating planted forests through planting and seeding; the former indicates a traditional plantation (FAO 2006), and the latter may be referred to as a semi-natural plantation. Here, plantations contain forests planted with native and introduced species, and we focus on the traditional tree (or forestry) plantation because of its potential impact on biodiversity and ecosystem services (Carnus et al. 2006, Brockerhoff et al. 2008, Paquette and Messier 2010).

Forest ecosystem services, including biodiversity conservation, depend greatly on tree species diversity (Gamfeldt

---

Received 18 August 2017, Accepted 11 October 2017

1) Department of Forest Vegetation, Forestry and Forest Products Research Institute (FFPRI)

2) Fenner School of Environment and Society, Australian National University

3) Forestry Research Institute, Hokkaido Research Organization

4) Principal Research Director, FFPRI

\* Author for correspondence: Department of Forest Vegetation, FFPRI, 1 Matsunosato, Tsukuba, Ibaraki, 305-8687 JAPAN; e-mail: yamaura@ffpri.affrc.go.jp

et al. 2013, Liang et al. 2016) and vertical stratification (Franklin 1988, Hunter 1990). Plantations are typically managed to have only one or a few tree species, to have simple stand structure, and to attain high wood productivity by compromising other ecosystem services (Sedjo and Botkin 1997, Paquette and Messier 2010). Plantations can dominate the landscape by replacing the native vegetation and degrading the biota in the remnants of native vegetation (Lindenmayer et al. 2002, Yamaura et al. 2009); therefore, the reconciliation of biodiversity conservation in plantation landscapes is currently a subject of debate (Brockerhoff et al. 2008, Paquette and Messier 2010, Yamaura et al. 2012).

Japan holds a leading position in this growing era of plantation forestry, as Japanese plantations occupy the fifth-largest area (10 million ha) and the second-highest proportion (42%) of forested area in the world (FAO 2006). Although plantations are now being actively established around the world, Japanese plantations are reaching the planned harvest age since most were established after World War II (WWII) between 1950 and 1980 (Yamaura et al. 2012). In harvesting plantations, their contribution to meeting the domestic demand for wood is expected (Forestry Agency 2017), while their restoration and services other than wood production are also of social concern (Yamaura et al. 2012). Plantation landscapes are required to be multifunctional.

Retention forestry is a part of silvicultural system that retains important forest structures and organisms at harvest time and is widely practiced in many parts of the world (Gustafsson et al. 2012, Lindenmayer et al. 2012). It was developed in North America more than 25 years ago to accommodate the non-timber values of managed forests (Franklin 1989). We undertook a large-scale manipulative experiment called the Retention Experiment for Plantation Forestry in Sorachi, Hokkaido (REFRESH) to examine the efficacy of retention forestry in Sakhalin fir (*Abies sachalinensis*) plantations in central Hokkaido, northern Japan. We retained naturally regenerated broad-leaved trees at the final harvest to maintain and restore biodiversity and ecosystem services, and we planted fir seedlings in harvested areas with retained broad-leaved trees. In this paper, we offer an overview of the context, objective, experimental design, management prescriptions, and prospects of the REFRESH project.

## 2. Concepts and practices of retention forestry

Establishing nature reserves is insufficient to conserve biodiversity in forested landscapes (Franklin 1993, Franklin and Lindenmayer 2009); thus, biodiversity should be accommodated in managed forests (Hansen et al. 1991, Lindenmayer and Franklin 2002). Organisms, organic materials, and organically generated environmental patterns that persist

through natural disturbances are called “biological legacies” and play important roles in maintaining and restoring biodiversity in disturbed areas (Franklin et al. 2000, Turner et al. 2003). However, few biological legacies can remain in harvested areas since silvicultural practices (e.g., site preparation, prescribed burning) simplify the stand structure (Franklin et al. 2000, 2002), especially in plantations. Franklin (1989) proposed an alternative to the stark choice between wood production (e.g., tree farms) and nature reserves to resolve the conflicts between timber and non-timber products, i.e., intentionally retaining biological legacies in harvested areas.

In contrast to traditional selective cutting, retention forestry selects trees (including snags and logs) with more emphasis on what is retained over the long term than what is removed (Franklin 1989). Retention forestry is highly adaptable and has great variations in its application, including the pattern and amount of retention. The practice includes retaining single trees (dispersed retention) and/or retaining small intact forest patches (aggregated retention). The important issues are therefore what structures to retain, how much of them to retain, and the spatial pattern of the retention (Franklin et al. 1997). Retention forestry can also be an effective tool for restoring impoverished or degraded forests that have few old trees via the creation of high stumps and the long-term retention of even comparatively young trees (Gustafsson et al. 2012).

Retention forestry has three major nonexclusive objectives (Franklin et al. 1997). The first is to lifeboat species and processes immediately after the harvest by providing habitat structure, ameliorating microclimates, and providing energetic substances for non-autotrophic organisms. The second is to enrich the structural complexity of regenerated forests through the next rotation. This approach is important when the rotation is shorter than the period required for some habitat structures (e.g., large old trees with hollows) to be re-created after the harvest and their retention dictates their maintenance and habitat quality in managed forests (Gibbons et al. 2010). The third is to enhance the connectivity of the harvested landscape. Dispersal is a fundamental ecological process that is likely to play an important role in the persistence of biodiversity in (unharvested) habitat remnants (cf. MacArthur and Wilson 1967, Hanski 1999); indeed, empirical studies showed that the quality of the surrounding areas (matrix) has a prominent effect on biodiversity in habitat remnants (Prugh et al. 2008, Watling et al. 2011).

Retention forestry has attracted the attention of forestry communities since its advent and is currently practiced on more than 150 million ha of boreal and temperate forests (Gustafsson et al. 2012). For example, retention forestry is practiced by all landowners in Sweden because of a stipulation of the Forestry Act and requirements for certification (Simonsson et al. 2014).

Other Fennoscandian countries, Finland and Norway, as well as Germany and Canada have widely adopted retention harvesting, which is led by forestry companies and state and federal agencies (Gustafsson et al. 2012). Certification organizations such as the Forest Stewardship Council (FSC) play an important role in the adoption of retention forestry (Gustafsson et al. 2012); for example, in the United States, FSC certification holders are required to retain large live trees, decaying trees, and snags in harvested areas (indicator 6.3.f: FSC-US 2010).

Field experiments to test the effectiveness of retention forestry are being conducted (Gustafsson et al. 2012, Lindenmayer et al. 2012, Koivula et al. 2014, Soler et al. 2016). Recent meta-analyses show that retention forestry is effective for maintaining the abundance and species richness of forest species (Fedrowitz et al. 2014) and is more effective than selective cutting (Mori and Kitagawa 2014). However, they also show strong geographical biases in studies on retention forestry. Most studies have been conducted in North America and northern Europe, and virtually none have been conducted in Asia. Furthermore, most study sites are naturally regenerated forests or those with partial plantings. Schieck and Song (2006) reviewed studies performed in western North America and found large variations in the effects of tree retention on bird communities. They supposed that differences in tree species composition and landscape structure among the studies may have been the cause of the inconsistent effects, suggesting the importance of performing studies in East Asian plantations.

### 3. Retention forestry and plantation

Retention forestry has been developed and basically practiced outside of tree plantations (intensive management zones) and strict nature reserves (set-aside lands) (Gustafsson et al. 2012, Lindenmayer et al. 2012). That is, areas used for retention forestry are not specialized either for wood production or biodiversity conservation and are called semi-natural forests (Lindenmayer et al. 2012) or extensively managed or ecosystem management zones (Seymour and Hunter 1999, MacLean et al. 2009). These areas are expected to perform multiple ecosystem services simultaneously, and retention forestry is an important tool of the sustainable forest management, multiple-use forestry, or balanced/ecological forestry in them.

Plantations are usually established to produce wood, and their establishment is promoted as a method to protect or spare the remaining natural forests (typically old growth) from harvesting (Brockerhoff et al. 2008, Paquette and Messier 2010). However, ecosystem services other than wood production cannot be overlooked in plantations and in landscapes dominated by plantations (Payn et al. 2015). In such cases, even landscape-level ecosystem services likely hinge on the vast plantations and their management rather than on

tiny remnants of natural forests (cf. Fahrig 2001, Ruffell et al. 2017). For example, in Japan, the Forestry Agency (2016) formed a plan that 1/3 of 10 million ha of conifer plantations is to be restored to mixed forests with broad-leaved trees to enhance social values.

O'Hara et al. (1994) viewed silvicultural systems that reconcile timber and non-timber products as a structural gradient from clear-cut to single-tree selection, and O'Hara and Ramage (2013) suggested that stands with trees of more than one age and diverse trees are more resistant to and resilient against disturbances than even-aged (single-species) stands. It is also suggested that simple forests specialized for wood production cannot adapt to changes of environment, including wood markets (Puettmann et al. 2012, Messier et al. 2015). These suggestions indicate the possibility that retention forestry can be applied to plantations; indeed, retaining trees, including snags, has been suggested as an important method to conserve biodiversity in plantations (Moore and Allen 1999, Hartley 2002). Because of the increasing dominance of plantations in the United States, Demarais et al. (2017) recently suggested that the retention of habitat elements is one of the promising options for conserving vertebrate diversity in plantations. Furthermore, the FSC-US requires that in some regions, biological legacies (live trees and other native vegetation) be retained within harvested sites larger than specified areas (e.g., 4 ha in Appalachia, 0.8 ha in the Ozarks, and 8 ha in the Mississippi alluvial valley region) when even-aged management (comparable to plantation forestry) is used (indicator 6.3.g.1: FSC-US 2010).

### 4. Retention forestry in conifer plantations

Although plantations are established using various species, coniferous trees are important constituents of such forests, especially in temperate and boreal regions. In tropical and subtropical regions, broad-leaved species of *Eucalyptus* and *Acacia* are widely planted, while coniferous species (e.g., *Pinus*) are quite common in Europe and North America (FAO 2006). In Japan, conifer plantations are largely composed of Japanese cedar (*Cryptomeria japonica*), Japanese cypress (*Chamaecyparis obtusa*), Japanese larch (*Larix kaempferi*), and Sakhalin fir were established to meet increased wood demands. Although these coniferous species are native to Japan and can form locally dominant forests (e.g., Franklin et al. 1979, Maeda 1983), they were artificially and widely planted under intensive silvicultural practices and replaced grasslands and natural forests (Nagaike and Kamitani 1997, Miyamoto and Sano 2008). They are structurally and compositionally highly different from non-planted natural forests composed mainly of broad-leaved trees (e.g., Nagaike 2002).

Coniferous trees/forests are generally known to harbor

impoverished plant (Glenn-Lewin 1977, Barbier et al. 2008) and phytophagous (plant-eating) insect communities (Ozanne 1999, Mizutani and Hiji 2002) compared to broad-leaved trees/forests, with some exceptions (Barbier et al. 2008). Harris and Skoog (1980) and Hunter (1990) raised some possible reasons that coniferous trees/forests have impoverished biota. First, conifer foliage and trunks are less palatable due to distasteful chemicals such as terpenes (Langenheim 1994, Trapp and Croteau 2001). Terpene compositions can affect the diversity and composition of phytophagous insect communities (Hatcher 1994, Ricklefs 2008), and phytophagous insects are quite important in forest biodiversity since they are major food resources for predators at higher trophic levels (Huston and Wolvert 2009). Second, the difference in branch structures and lateral branching in broad-leaved trees provide diverse foraging and nesting habitats, and self-pruning in conifers leads to fewer opportunities for cavity formation (cf. Kikuchi et al. 2013). Third, the coevolution history of angiosperms (most broad-leaved trees) means that many plant and animal species developed together through seed dispersal, pollination, and herbivory (Regal 1977).

In Japan, conifer plantations occasionally include naturally regenerated broad-leaved trees that reach the canopy layers (Yamaura et al. 2008, Yoshii et al. 2015), and thinning provides an important opportunity for regeneration (Utsugi et al. 2006, Nonoda et al. 2008, Seiwa et al. 2012). Although conifer plantations degrade the biota compared to natural forests, conifer plantations with broad-leaved trees have diverse bird (Yui and Suzuki 1987, Ohno and Ishida 1997, Yamaura et al. 2008, Yoshii et al. 2015) and beetle (Ohsawa 2007) communities, which generally is likely to occur (Bibby et al. 1989, Nájera and Simonetti 2010, Lindbladh et al. 2017). In Sweden, when possible, FSC requires forest managers to maintain at least 10% of broad-leaved trees in the production forests during the management prescription (criterion 6.3.8: FSC Sweden 2010).

Furthermore, some broad-leaved trees in conifer plantations were presumably retained when the plantations were established (Yoshida et al. 2005, Ohsawa 2007); for example, we found large broad-leaved trees in our studied plantations (Fig. S1). These trees were likely retained due to the high cutting costs and their low economic value when the plantations were established. These observations suggest that retaining broad-leaved trees in conifer plantations has already been practiced and is technically feasible. Therefore, there are opportunities to retain broad-leaved trees in conifer plantations at the final harvest, and this practice is likely to be effective in maintaining and restoring the diversity of harvested areas.

Notably, retention forestry is easy to understand and can be applied by foresters owning only small forest parcels. This

advantage is particularly important since 58% of the forests in Japan are privately owned, and 88% of private foresters own <10 ha forests (Forestry Agency 2017) for historical reasons (Akao 2002). It would be more feasible in many cases for individual owners to retain these small natural features (broad-leaved trees) in conifer plantations than for aggregated owners to set aside (spare) some areas from forestry by managing intensive plantations in the other areas (cf. Hunter et al. 2017).

Although retention forestry is expected to maintain various ecosystem processes (Franklin et al. 1997, Gustafsson et al. 2012), functionally different broad-leaved trees in conifer plantations may have disproportionate effects on varied ecosystem services predicted by their amounts, as in the large old trees in repeatedly logged areas and in agricultural and urban landscapes (Lindenmayer 2017). For example, Liang et al. (2016) showed that tree species richness has concave effects on forest productivity; that is, increasing species richness has a greater role when the species richness is low. Bird abundance in plantations is similarly valued by citizens (Yamaura et al. 2016): increasing bird abundance entails higher economic values when the bird abundance is low. Therefore, retaining small amounts of broad-leaved trees may have significant returns in enhancing the ecological and social (see below as well) values of conifer plantations.

Retention forestry in plantations may also be effective for retaining carbon and alleviating landslides, as suggested in proposals for reduced impact logging and partial cutting, respectively (Dhakal and Sidle 2003, Putz et al. 2008). In landscapes dominated by plantations, other possible benefits of retention forestry for biodiversity are to capture diverse environments and spread risks (Gustafsson et al. 2012), for example, as in the benefits of establishing several small nature reserves in fragmented landscapes (Tschardt et al. 2002, McCarthy et al. 2005). Risk spreading is an important consideration in the land-use specialization of wood production (e.g., adding other values to plantations) since wood prices can fluctuate greatly (Lindenmayer and Franklin 2002, Koh et al. 2009).

A final consideration is the social acceptability of clear-cuts. Although dispersed and aggregated retention can have contrasting values (Ribe 2005, Ford et al. 2009), citizens consistently rate harvested areas with retained trees more highly than clear-cuts as scenic and recreational sites (Brunson and Shelby 1992, Tönnes et al. 2004, Shelby et al. 2005). The visual quality of forested landscapes has been overlooked by the forestry community; however, this social dimension of forest value greatly affects the social acceptability of harvest practices (Sheppard et al. 2004). Edwards et al. (2012) showed that European people prefer forests with large trees and a number of tree species. Therefore, retained broad-leaved trees in harvested

areas or, more generally, conifer plantations with broad-leaved trees may play an important role in the social acceptability of and public support for plantation forestry in Japan.

## 5. Experimental outline

### 5.1 Forests and forestry in Hokkaido

Hokkaido is the second-largest island in Japan and comprises one of the 47 prefectures in the country. The history of forestry in Hokkaido started during the Meiji Restoration (1870s) when exploitative forestry was developed with land reclamation and with commercial capital from Honshu island (the largest island in Japan) (Koseki 1962). Hokkaido had exported large amounts of coniferous and broad-leaved trees (e.g., *Picea jezoensis*, *Quercus crispula*, *Tilia japonica*, *Kalopanax septemlobus*), not only to Honshu island but also to China, Australia, North America and Europe, especially after the 1890s (*Q. crispula* was highly valued in western countries), and was known as the most important conifer-producing area in Japan (Hokkaido 1953).

The transition from exploitative to plantation forestry occurred after WWII (approximately 1950), and artificial regeneration (establishment of conifer plantations) quickly increased (Hokkaido 1983). Currently, approximately 71% of the land in Hokkaido is covered by forests (Forestry Agency 2014). Among the forests, 27% are planted (Fig. 1a), which is less than the percentage for Japan as a country (41%). However,

the plantation area in Hokkaido is the largest among all the prefectures in Japan (1,494,000 ha), more than three times the area in the second-largest prefecture, Iwate (495,000 ha); indeed, 15% of the Japanese plantations are in Hokkaido, and Hokkaido has continued to produce the largest quantity of wood among all the prefectures since WWII (13-26% share of Japan's wood production from 1952 to 2014: Fig. 1b).

The native broad-leaved and mixed forests in Hokkaido were actively replaced by conifer plantations from 1950 to 1980 (Fig. 1a), and Sakhalin fir was consistently used as the main plantation species (Fig. 1c). Currently, more than half (52%) of the plantations in Hokkaido are composed of Sakhalin fir (the second-most-common plantation species is Japanese larch: 28%), and their age distribution is concentrated in the 35-55-year range (in 2012), as in other Japanese plantations. Although logs harvested from natural forests dominated until the 1980s, the volume of logs from plantations has constantly been increasing and exceeded that from natural forests in 1997 (Fig. 1d). Logs from plantations currently account for >90% of harvested logs. Since the 2000s, the volume of logs from the final harvests of plantations has reached that from thinning (Fig. 1d), suggesting that plantations in Hokkaido have entered the mature stage. Sakhalin fir trees are relatively short-lived (~200 years: Watanabe 1970, Asai et al. 1980), and old Sakhalin fir plantations are vulnerable to root rot disease (Tokuda 2005, Tokuda et al. 2007). Tokuda (2011) surveyed the infection

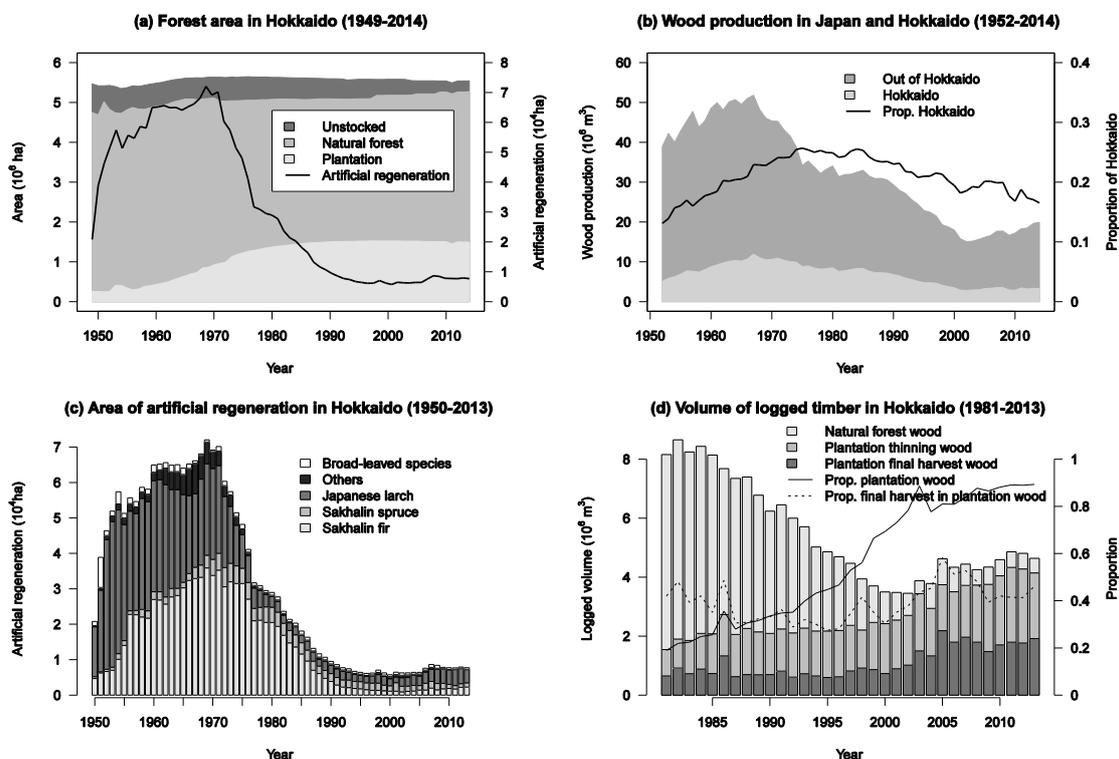


Fig. 1. Forests and forestry in Hokkaido.

All data except those for wood production (Forestry Agency 1954-2016) are from Fishery and Forestry Department (1949-2014).

rates of fir individuals from root rot disease in 51 Sakhalin fir plantations (24-72 years old) and found increasing infection rates in older plantations (the mean infection rate was 14%); therefore, long-rotation harvesting is not suitable for Sakhalin fir plantations.

The Hokkaido prefectural government administers 600,000 ha of forests. The main objective of forest management changed in 2002 from wood production to the maintenance and enhancement of ecosystem functions of public interest, such as disaster prevention, water purification, and biodiversity conservation. Since this policy change, plantations have been harvested using gap cutting of less than 1 ha, selective cutting, and long rotation (Tsuchiya 2013). However, these harvesting methods are somewhat inefficient in wood production compared to traditional clear-cutting. Thus, a harvesting method that reconciles wood production and other ecosystem services, including biodiversity conservation, is urgently needed.

## 5.2 Study area

Our REFRESH project is being conducted in the Irumukeppu highland area (ca. 6 km × 12 km, overlapping the municipalities of Ashibetsu, Fukagawa, and Akabira) in the Sorachi management district of the Hokkaido prefectural forest (43°34'37"-39°26"N, 142°05'27"-09°33"E). This area includes the largest spread of plantations in the prefectural forest, and we planned to locate the experimental units with replicates there (Fig. 2). Mt. Irumukeppu (864 m a.s.l.) is in the northern part of the area, and gentle slopes run eastward and southward from the mountaintop. According to the climatological normals (1981-2010) at Ashibetsu (90 m a.s.l.), the monthly mean maximum and minimum temperatures are 27.1°C (August) and -11.9°C (January), respectively; the annual precipitation is 1,093 mm, and August has the most precipitation. Snow first falls in October, is approximately 1.5-2 m in depth during the winter, and disappears in mid-April to early May. The natural forests are composed of *Tilia japonica*, *Quercus crispula*, and other broad-leaved tree species, including *Acer pictum*, *Fraxinus mandshurica* and *Ulmus davidiana*, and *Abies sachalinensis*. The high elevation area surrounding Mt. Irumukeppu is dominated by *Betula ermanii*. The forest floor is covered by dwarf bamboos; *Sasa senanensis* and *Sasa kurilensis* are major species at lower- and higher-elevation sites, respectively. Lowlands surrounding the study area are used as cultivated land for rice paddies, crops, and pasture. Fish farms exist in the watershed, and water resources from the study area are utilized for tap and agricultural water. Many people visit the area to climb Mt. Irumukeppu for recreation, fish in the streams, and pick edible plants.

Since a large part of this area (1,930 ha) suffered from a forest fire (of unknown cause) more than 100 years ago

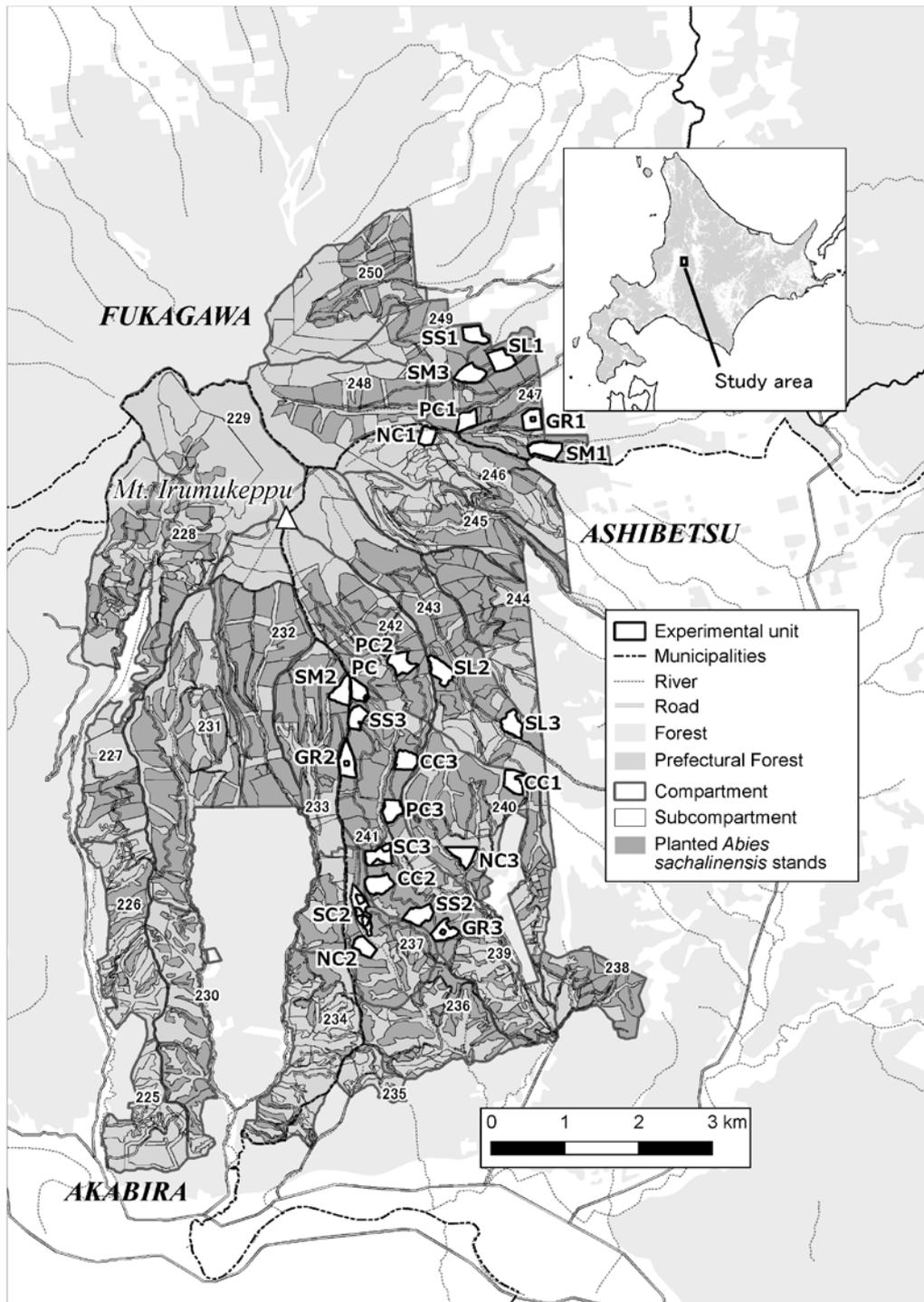
(in 1911: Hokkaido 1956), artificial reforestation began in the 1920s. Most plantations were established during 1950-1970, and the entire planted area was prepared by clearing underbrush and artificial burning before planting the seedlings. Plantations (3,481 ha) now make up 59% of the forests (5,884 ha), and 79% of the plantations consist of Sakhalin fir (12% and 4% consist of Japanese larch and Sakhalin spruce, *Picea glehnii*, respectively). Approximately 2,165 ha (62%) of the fir plantations were planted during 1961-1980 and the number of mature stands reaching their final harvest age is increasing.

## 5.3 What to retain?

We will now discuss the three issues of the experiment: what structures to retain, how much of them to retain, and the spatial pattern of retention. As described above, we decided to retain broad-leaved trees to maintain and restore elements of the original broad-leaved or mixed forests in Hokkaido (Table 1). We postulated that broad-leaved canopy trees are particularly in decline for organisms dependent on forests in the plantation-dominated landscape, so broad-leaved canopy trees were selected as retained trees. In addition, Sakhalin fir may not be a suitable retention target for dispersed retention, as it is more vulnerable to wind damage than broad-leaved trees. However, we retained Sakhalin firs in the aggregated retention areas described below.

## 5.4 Spatial retention pattern

We used dispersed retention for the broad-leaved trees because broad-leaved trees are usually distributed in a scattered manner in conifer plantations. Although we acknowledge studies that simultaneously adopted multiple spatial patterns and the possible significance of their combinations (Aubry et al. 2009, Koivula et al. 2014, Lee et al. 2017), we could not adopt both (dispersed and aggregated) retention types for broad-leaved trees. Instead, we used aggregated retention for Sakhalin fir (Table 1). The aim of aggregated retention is to maintain an intact canopy and forest floor to provide refugia for forest-floor vegetation. We also established a gap-cutting treatment in which one-third of the experimental unit was harvested by cutting 1 ha clear-cut openings. This harvesting method has been used in the study area since 2002. The dispersed and aggregated retention areas have contrasting expected ecosystem services and management issues (Franklin et al. 1997); however, empirical evidence of the relative benefits is not sufficient or distinct (Fedrowitz et al. 2014). Aggregated retention likely provides fewer operational constraints (Franklin et al. 1997); i.e., the harvesting costs are expected to be lower in those areas than in dispersed retention areas. However, the effects of dispersed retention are generalized over the total harvested area, which may be meaningful for the large harvest



**Fig. 2.** Study area and experimental units of the REFRESH project.

See Table 1 for the control/treatment abbreviations. Numbers (225-250) represent the compartment. "PC" denotes the control site without harvesting in the planted stand used for watershed monitoring only.

areas. In sum, we placed a higher research priority on dispersed retention. Nevertheless, we established an aggregated retention treatment because of the likely high acceptance by foresters (cf. Neyland et al. 2012) and because retention patches of Sakhalin fir can be established even when few broad-leaved trees are present in conifer plantations.

### 5.5 How much to retain?

The final item of consideration is the amount of retention. In their meta-analysis, Fedorowitz et al. (2014) found that retention levels were 2%-88% (mean  $\pm$  SD: 36.4%  $\pm$  25%), and a positive relationship existed between the proportion of retained trees and forest species richness. In contrast, Mori and

**Table 1. Controls and treatments of REFRESH project**

Control/treatment	Description
Unharvested natural forest (NC)	Reference
Unharvested plantation (PC)	Control
Clear-cutting (CC)	No retained trees
Small amount of dispersed retention (SS)	10 broad-leaved trees (/ha) are retained
Medium amount of dispersed retention (SM)	50 broad-leaved trees (/ha) are retained
Large amount of dispersed retention (SL)	100 broad-leaved trees (/ha) are retained
Aggregated (or group) retention (GR)	A 0.36 ha (60 m × 60 m square) undisturbed patch composed mostly of Sakhalin fir is retained at the center of the experimental unit
Gap cutting (or group selection cutting: SC)	1/3 of the experimental unit is harvested by clear-cutting 1 ha openings*

\*Only two replications are available.

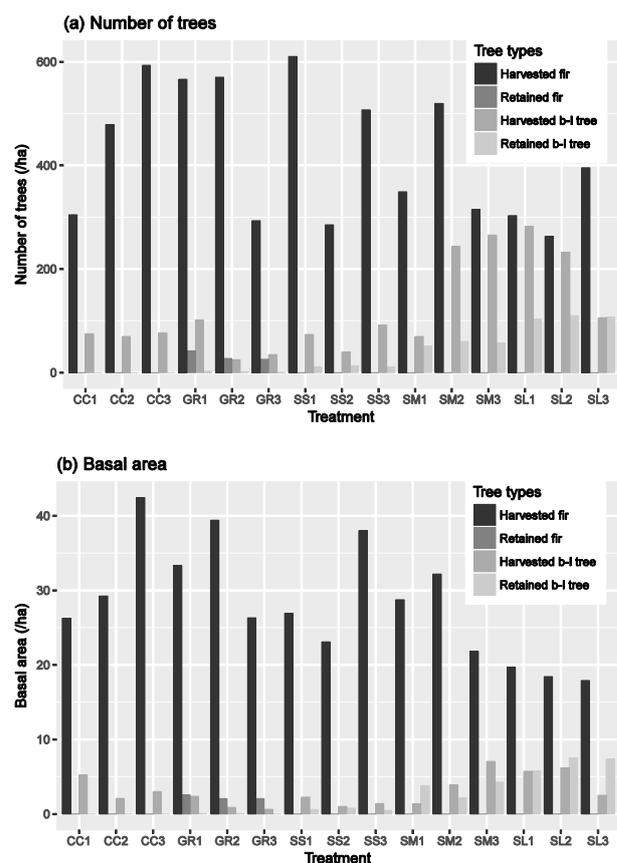
Kitagawa (2014) observed few effects of retention level on the species richness of various taxa in a meta-analysis. Gustafsson et al. (2012) suggested that retention levels of 5-10% are a strict minimum to achieve the objective of retention forestry, and Hunter (1990) and Newton (1994) suggested retaining 5-10 snags per ha to maintain populations of cavity users. These figures (5%-10%, or 5-10 trees/ha) may represent feasible targets to reconcile production and conservation. From these suggestions, we adopted three retention levels for dispersed retention: small, medium, and large amounts of retention corresponding to 10, 50, and 100 retained trees/ha, respectively (Table 1). These levels correspond to 2-18% and 1-27% on a number and basal area basis, respectively (Fig. 3). We established a 0.36 ha (60 m × 60 m) undisturbed forest patch at the center of the experimental unit as the aggregated retention area. The maximum tree height of Sakhalin fir was 28 m in this region, and the distance from the edge of the retention patch was more than one tree length at the center.

### 5.6 Control and replicates

We established three control types: unharvested natural forest, unharvested plantation, and clear-cutting. The first control was a natural reference, indicating a possible target of biodiversity conservation. The latter two controls were established to directly assess the treatment effects. Following the terminology of Bennett and Adams (2004), the natural forest and unharvested plantation controls in our experiment were a reference and a control, respectively. Replication and control are the most important features of harvest experiments to adequately test and infer the treatment effects (Johnson 2002, Bennett and Adams 2004); in our case, each treatment has three replicates (first-third set) except gap cutting, which had two replicates in the second and third sets (Fig. 2).

### 5.7 Site selection and experimental schedule

We selected experimental units (5-8 ha) from large stands that had reached harvest age. The experimental units were set at >5 ha to avoid edge effects and were spaced at least 200 m apart to prevent a pseudo-replication problem (Hurlbert 1984).



**Fig. 3. (a) Number (/ha) and (b) basal area ( $m^2/ha$ ) of harvested and retained trees in the 15 major treatment units.**

See Table 1 for unit name abbreviations. Data were based on a field survey that measured all harvested and retained trees ( $\geq 5$  cm DBH) and on Akashi et al. (2017). Sakhalin fir and broad-leaved trees are shown separately.

However, two pairs of treatments (SM2-SS3 and CC2-SC2; see Table 1 for the abbreviations of the treatments) had an edge-to-edge distance of only  $\sim 150$  m (Fig. 2). Seven experimental units (CC2, SS2, SM2, SL2, GR3, SS3, and SM3) included small watersheds to evaluate the effects of retention harvesting on water quality and quantity and stream macro-invertebrates. The pre-harvest basal area in each experimental unit was 24-45  $m^2/ha$  (Akashi et al. 2017). Broad-leaved trees occupied 2%-

Replicates	2012	2013	2014	2015	2016	2017
First set	Site selection	Selection of retained trees Pre-harvest sampling	Harvest Site preparation	Planting Weeding	Weeding	Weeding
Second set		Site selection	Selection of retained trees Pre-harvest sampling	Harvest Site preparation	Planting Weeding	Weeding
Third set			Site selection	Selection of retained trees Pre-harvest sampling	Harvest Site preparation	Planting Weeding

**Fig. 4.** Treatment and experimental schedule for the REFRESH project.

43% of this basal area, and abundant broad-leaved trees were probably retained at the time of the stand establishment and/or regenerated (and retained afterward) where planted fir trees had died due to canker diseases.

We selected the broad-leaved trees to retain 1 year before harvest. Because most of the naturally regenerated broad-leaved trees in conifer plantations were early-successional species, such as birch, late-successional species (e.g., *Quercus crispula* and *Tilia japonica*) were prioritized during the selection of retained trees. Trees were harvested from spring to summer by being felled with chain saws, delimbed and cut with harvesters, and transported using forwarders. The harvested areas were prepared for tree planting until winter (snowfall). Logging slash was piled along some of the skidding trails (Fig. S2). Sakhalin fir seedlings were planted the next spring in rows at 3 m intervals (2,400-2,700 trees/ha), and weeding was conducted during the summer. Areas 1.5-2 m wide along the planting rows were weeded (Fig. S2), which is a typical weeding practice for Sakhalin fir plantations in Hokkaido (in a larch plantation, the entire area is usually weeded). Weeding is conducted once or twice annually, depending on the growth of herbs and shrubs. Tree harvesting occurred during different years for each replicate (2014 for the first set, 2015 for the second set, and 2016 for the third set: Fig. 4). We established a staircase experimental design (Walters et al. 1988) so that each replicate reflected different starting conditions to control time-treatment interactions.

We conducted the field survey 1 year before harvest (pre-harvest sampling). Most field surveys (other than harvesting efficiency and stream survey) were not conducted during the harvest year to ensure operational safety. As our experimental design has replicates and includes pre- and post-harvest surveys, it was described as multiple samplings before and after the harvests in more than one harvested and control

stands design (Bennett and Adams 2004). We aim to continue the experiment until the next final harvest (50 years). On May 2013, the Hokkaido government, the Hokkaido University Department of Forest Science, Forestry and Forest Products Research Institute Hokkaido Research Center, and Hokkaido Research Organization Forestry Research Institute implemented the REFRESH project.

## 6. Field survey

### 6.1 Biodiversity

Plants build physical habitat structures for organisms. Evergreen conifers and deciduous broad-leaved trees form quite different environments under their canopies, which affect the understory plants (Barbier et al. 2008). We established 20 m × 20 m plots to survey trees with a diameter at breast height ≥ 1 cm, with 5 m × 5 m quadrats at the center of each plot to survey the understory plants. We placed 4-8 plots at 50 m intervals at every site except the aggregated retention sites. At some sites, one plot was placed outside the harvest area to examine edge effects. Five or six plots were placed in the harvest area of the aggregated retention sites, and nine were arranged to cover the retention area (60 m × 60 m). Species of vascular plants were identified for each 1 m × 1 m section of each quadrat. We have completed pre-harvest surveys for three replicates and will conduct post-harvest surveys at the same plots every few years.

Arthropods comprise a large proportion of forest biodiversity. In particular, deadwood-associated (or saproxylic) species, which play important roles in nutrient cycling, are sensitive to forest harvesting (Siitonen and Martikainen 1994). Forest harvesting also changes the soil-litter interface, which reveals the assemblage structure, abundance, and diversity of litter-dwelling arthropods (Spence et al. 2008). We have collected saproxylic arthropods, such as longicorn beetles, with Malaise traps and litter-dwelling arthropods with pitfall

traps. We also have surveyed arthropods in tree canopies using aerial Malaise traps because tree retention provides refugia for arthropods inhabiting tree canopies.

Birds are dependent on the forest structure and composition (MacArthur and MacArthur 1961, Brokaw and Lent 1999) and have long been studied in relation to forestry harvest; indeed, they were included as a separate taxon in the abovementioned retention forestry meta-analyses. We have surveyed birds using the standard census techniques of line census and point count in all treatment and control stands. The line census covers the entire area of the stand, and both techniques required visiting each stand six times during the breeding season per year. We have completed the pre-harvest surveys for three replicates and will conduct post-harvest surveys for at least 3 years in the short term.

## 6.2 Water and soil conservation

Water and soil conservation are of great concern to forest managers and citizens, in part because of biodiversity conservation issues. We established 16 small watershed monitoring sites (with 6-10 ha areas), including the seven experimental units described before, and are monitoring water discharge, water quality, and stream macro-invertebrates. We also established four water sampling points with 200-1,000 ha catchment areas to evaluate the downstream effects of forest practices. The seven experimental units were selected within the second and third sets because we needed pre-harvest data for more than 1 year. Continuous water levels have been recorded using a data logger since the summer of 2013, and water samples have been collected every 2 weeks and analyzed for major anions, cations, and dissolved organic carbon. Hydrological, physical, and biogeochemical changes caused by harvesting are expected to affect riparian ecosystems. We have also surveyed streambed conditions (substrates, organic materials, water velocity, etc.) and macro-invertebrates every autumn since 2013 to evaluate the effects of the retention harvest on riparian biota.

## 6.3 Forestry efficiency

The increase in silvicultural costs for tree retention is relevant in relation to the feasibility of retention forestry (Yamaura et al. 2016). Our primary interest at this harvesting stage is the possible increase in the cost of harvesting operations. We have surveyed productivity using daily reports of operations and analyzed production time by video recording harvesting operations. All tree harvesting occurred after snowmelt (May) and until September (i.e., the snow-free season). Most trees were felled manually with chain saws (partially with a feller buncher) and bunched with a grapple loader. Then, the trees were processed on a strip road,

loaded on a rubber-track forwarder (without a knuckle-boom loader), transported, and unloaded and piled at the landings. As described above, the retained trees were marked using flagging tape before the harvest, and the operators harvested or retained trees based on the tape.

## 7. Discussion

### 7.1 Development of retention forestry in plantations

REFRESH seeks a way to reconcile wood production, other ecosystem services and biodiversity conservation in plantations using a globally featured harvesting practice - retention forestry (Fig. 5). The issues to resolve before practicing retention forestry are the services to be maintained, the types of tree to be retained (e.g., the retention target, its amount, and its spatial pattern), and whether the opportunity cost (economic costs required to achieve retention forestry) can be offset by the benefits. The responses of individual ecosystem services to the retention level would help identify the adequate retention level. If there is a clear threshold in the response form (cf. Ellis and Betts 2011), it would be a candidate for the possible lower limit of the retention level (Gustafsson et al. 2012).

However, many studies suggest that retention forestry is not a panacea. For example, species that are highly sensitive to harvesting would not be conserved even with high retention levels, and their conservation would require strict uncut reserve areas (Vanderwel et al. 2007). Mori et al. (2017) recently used a meta-analysis to show that the effectiveness of retention forestry can depend on the surrounding landscape structure. Early-successional species can be effectively conserved in a harvested area with fewer retained trees (Fedrowitz et al. 2014). Plantation landscapes in varied ecological and social contexts may require a hybrid of intensive plantations (no retention), semi-natural plantations (plantations with retained or regenerated broad-leaved trees), and old-growth natural forests to enhance multiple ecosystem services (Koh et al. 2009, Butsic and Kueemmerle 2015, Law et al. 2017, Triviño et al. 2017). This idea is parallel to the TRIAD zoning system developed in North America (Seymour and Hunter 1999, MacLean et al. 2009, Côté et al. 2010).

Nevertheless, we note that retention forestry is adopted in all managed forests in Sweden, and these forests are mostly plantations with native tree species (L. Gustafsson, pers. comm.). This simple adoption of retention forestry would help increase its feasibility. In addition, although retention of many trees unlikely contributes to the conservation of early-successional species (Fedrowitz et al. 2014), Viljur and Teder (2016) found 81% of regional (=65 species) and 79% of grassland butterfly species (=26 species) in 35 harvested areas with dispersed retention (2-10 years old with 0.3-2.5 ha).

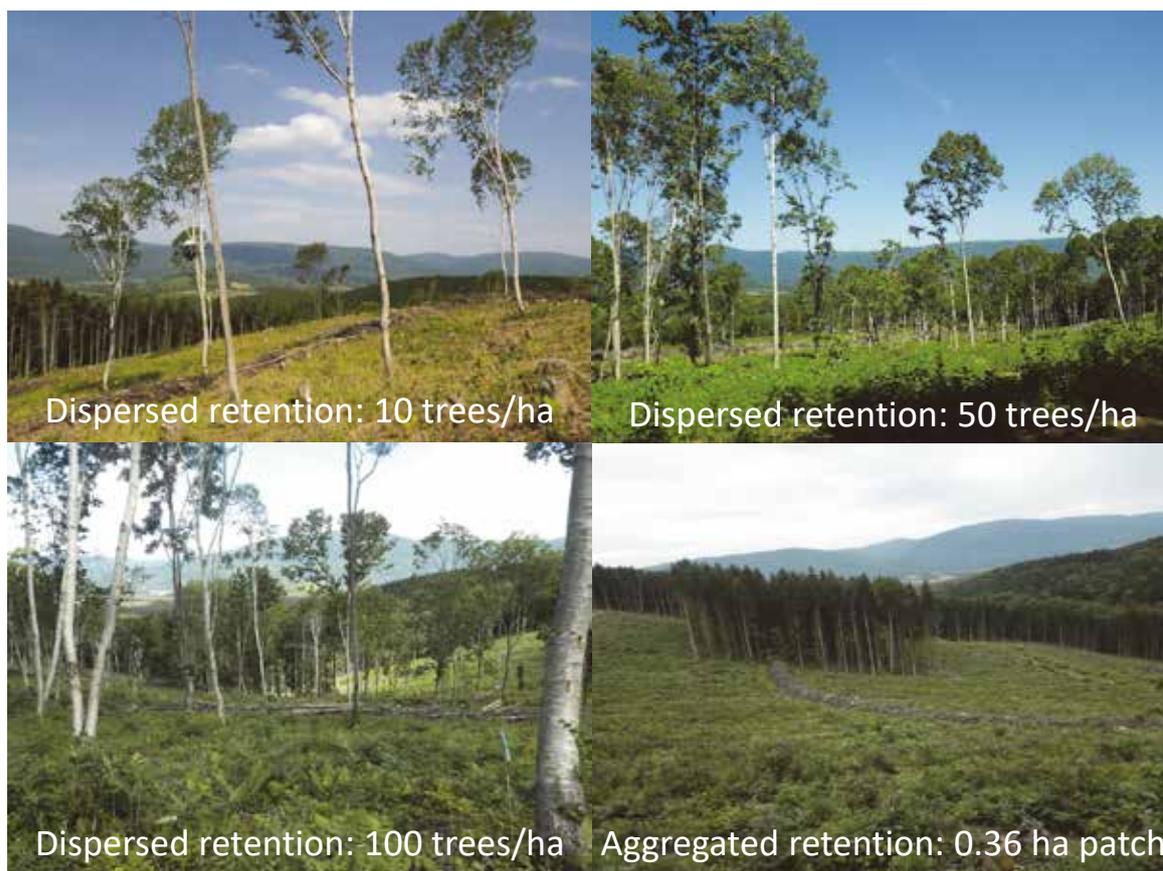


Fig. 5. Post-harvest experimental units of the first set.

This result suggests that retention forestry can conserve early-successional and forest species simultaneously in harvested areas. Furthermore, Lindbladh et al. (2017) recently showed that small increases of broad-leaved trees (<15%) in Norway spruce (*Picea abies*) production forests increase bird species richness, indicating the feasibility and benefits of retaining broad-leaved trees in conifer plantations.

## 7.2 Prospects of the REFRESH project

The collection of the pre-harvest REFRESH data was completed in 2015, and the initial post-harvest assessments will be completed within 2-3 years after the harvest. Future surveys will be conducted at several 10-year intervals until the next final harvest to fully understand the potential effects of retention forestry on the plantations. Initial surveys up to 10 years after the harvest will indicate how tree retention provides continuity in the forest structure in the harvested area, and long-term surveys until the next harvest will show how tree retention increases the structural and compositional complexity and restores the native biota in the plantations.

In this respect, the continuity of the project is the most important. Broad-leaved trees are retained in the harvested area in an isolated manner and will grow in an environment different from that before harvest. Light conditions will be

greatly improved, but other physiological pressures will be stronger, which may lead to the loss of retained trees (McComb and Lindenmayer 1999, Hämäläinen et al. 2016). Retention levels at harvest time can be determined by accounting for the subsequent loss (Gibbons et al. 2010). On the other hand, trees that survive the stressful period will become irreplaceable components of the forests - large old trees (Lindenmayer et al. 2014, Lindenmayer and Laurance 2017), especially in plantations; retained trees may also increase plant diversity by increasing seed dispersal by birds (Yoshida et al. 2005). These expectations can be tested only by future work. The overall efficacy of the retention method will be revealed when the plantations mature.

Cooperation among researchers and forest managers is the core of REFRESH. In this project, forest managers are the forestry officials of the Hokkaido prefectural government, and regular contact among researchers and officials will be indispensable for planning and implementing the project. REFRESH represents the first opportunity for most of them to participate in such a large-scale harvest experiment. These collaborations have presented some challenges because of different objectives and approaches among researchers and managers, and some compromises were required in the number and assignment of experimental units. Fortunately, the

managers understood the purpose of the experiment and have been willing to implement rigid treatments in most cases. The harvest units are larger and the silvicultural practices are more rigid and systematic than in ordinary implementations. We believe both researchers and managers will benefit from direct involvement in the REFRESH project, and the research results will be transferred directly from researchers to managers. The researchers understand the constraints under which the managers must work, and the experiences gained from this project will help them to understand the information needs of managers. This sharing of knowledge and the close working relationships are important for developing new silvicultural systems in plantations.

### 7.3 Concluding remarks

Vast plantations in Japan are now maturing and reaching the planned harvest age. To be socially supported, plantation landscapes ideally are multifunctional. They are desired to perform possibly conflicting ecosystem services - producing wood with economic efficiency and maintaining or enhancing other ecosystem services via the restoration of conifer plantations. Given the continuity of plantation forestry, there are not many options to achieve these objectives, and the adoption of retention forestry, especially the retention of broad-leaved trees at the final harvest, is promising. We hope that this cooperative large-scale replicated and manipulative experiment can contribute to the world's knowledge of sustainable forest management in this plantation era.

### Acknowledgements

Forestry practices have been conducted as an enterprise of the Hokkaido prefectural forests. We thank the officials of the Fishery and Forestry Department of Hokkaido Prefecture and the local branch of the Sorachi Forest Office for their deep understanding and substantial help with this project. Earth-Growing Corp. accommodated our field survey. F. Nakamura, M. Shibuya, and J. Morimoto have made many useful suggestions from the beginning of this project. Comments from an anonymous reviewer and L. Gustafsson greatly improved the manuscript. This study was supported by the Mitsui & Co., Ltd. Environment Fund Grant Numbers R12-G2-225 and R15-0025 and JSPS KAKENHI Grant Numbers JP25252030 and JP16H03004.

### References

- Akao, K. (2002) Private forestry. In: Iwai, Y. (ed) *Forestry and forest industry in Japan*. UBC Press, Vancouver, 24-40.
- Akashi, N., Tsushima, T., Unno, A., Nagasaka, A., Nagasaka, Y., Ohno, Y., Nitta, N., Watanabe, I., Minamino, K., Yamada, K., Ishihama, N., Takiya, M., Tsuda, T., Takeuchi, F., Ishizuka, W., Fukuchi, M., Yamaura, Y., Ozaki, K., Hironaka, Y. and Inari, N. (2017) Composition of trees before harvesting in the Retention Experiment for plantation FoREstry in Sorachi, Hokkaido (REFRESH) sites. *Bull. Hokkaido For. Res. Inst.*, 54, 31-45 (in Japanese).
- Asai, T., Kikuzawa, K., Fukuchi, M. and Mizutani, E. (1980) Structure and growth of natural conifer and deciduous hardwood mixed forest stand at Urahoro district in Hokkaido. *Bull. Hokkaido For. Exp. Stat.*, 18, 25-41 (in Japanese).
- Aubry, K. B., Halpern, C. B. and Peterson, C. E. (2009) Variable-retention harvests in the Pacific Northwest: a review of short-term findings from the DEMO study. *For. Ecol. Manage.*, 258, 398-408.
- Barbier, S., Gosselin, F. and Balandier, P. (2008) Influence of tree species on understory vegetation diversity and mechanisms involved—a critical review for temperate and boreal forests. *For. Ecol. Manage.*, 254, 1-15.
- Bateman, I. J., Harwood, A. R., Mace, G. M., Watson, R. T., Abson, D. J., Andrews, B., Binner, A., Crowe, A., Day, B. H., Dugdale, S., Fezzi, C., Foden, J., Hadley, D., Haines-Young, R., Hulme, M., Kontoleon, A., Lovett, A. A., Munday, P., Pascual, U., Paterson, J., Perino, G., Sen, A., Siriwardena, G., van Soest, D. and Termansen, M. (2013) Bringing ecosystem services into economic decision-making: land use in the United Kingdom. *Science*, 341, 45-50.
- Bennett, L. T. and Adams, M. A. (2004) Assessment of ecological effects due to forest harvesting: approaches and statistical issues. *J. Appl. Ecol.*, 41, 585-598.
- Bibby, C. J., Aston, N. and Bellamy, P. E. (1989) Effects of broadleaved trees on birds of upland conifer plantations in north Wales. *Biol. Conserv.*, 49, 17-29.
- Brockerhoff, E., Jactel, H., Parrotta, J., Quine, C. and Sayer, J. (2008) Plantation forests and biodiversity: oxymoron or opportunity? *Biodivers. Conserv.*, 17, 925-951.
- Brokaw, N. V. L. and Lent, R. A. (1999) Vertical structure. In: Hunter, M. L., Jr. (ed) *Maintaining biodiversity in forest ecosystems*. Cambridge University Press, Cambridge, 373-399.
- Brunson, M. and Shelby, B. (1992) Assessing recreational and scenic quality: how does new forestry rate? *J. For.*, 90, 37-41.
- Butchart, S. H. M., Walpole, M., Collen, B., van Strien, A., Scharlemann, J. P. W., Almond, R. E. A., Baillie, J. E. M., Bomhard, B., Brown, C., Bruno, J., Carpenter, K. E., Carr, G. M., Chanson, J., Chenery, A. M., Csirke, J., Davidson, N. C., Dentener, F., Foster, M., Galli, A., Galloway, J. N., Genovesi, P., Gregory, R. D., Hockings, M., Kapos, V.,

- Lamarque, J.-F., Leverington, F., Loh, J., McGeoch, M. A., McRae, L., Minasyan, A., Morcillo, M. H., Oldfield, T. E. E., Pauly, D., Quader, S., Revenga, C., Sauer, J. R., Skolnik, B., Spear, D., Stanwell-Smith, D., Stuart, S. N., Symes, A., Tierney, M., Tyrrell, T. D., Vie, J.-C. and Watson, R. (2010) Global biodiversity: indicators of recent declines. *Science*, 328, 1164-1168.
- Butsic, V. and Kuemmerle, T. (2015) Using optimization methods to align food production and biodiversity conservation beyond land sharing and land sparing. *Ecol. Appl.*, 25, 589-595.
- Côté, P., Tittler, R., Messier, C., Kneeshaw, D. D., Fall, A. and Fortin, M.-J. (2010) Comparing different forest zoning options for landscape-scale management of the boreal forest: possible benefits of the TRIAD. *For. Ecol. Manage.*, 259, 418-427.
- Carnus, J.-M., Parrotta, J., Brockerhoff, E., Arbez, M., Jactel, H., Kremer, A., Lamb, D., O'Hara, K. and Walters, B. (2006) Planted forests and biodiversity. *J. For.*, 104, 65-77.
- Demarais, S., Verschuyf, J. P., Roloff, G. J., Miller, D. A. and Wigley, T. B. (2017) Terrestrial vertebrate biodiversity and intensive forest management in the U.S. *For. Ecol. Manage.*, 385, 308-330.
- Dhakal, A. S. and Sidle, R. C. (2003) Long-term modelling of landslides for different forest management practices. *Earth Surf. Process. Landf.*, 28, 853-868.
- Edwards, D., Jay, M., Jensen, F. S., Lucas, B., Marzano, M., Montagné, C., Peace, A. and Weiss, G. (2012) Public preferences for structural attributes of forests: towards a pan-European perspective. *For. Policy Econ.*, 19, 12-19.
- Ellis, T. M. and Betts, M. G. (2011) Bird abundance and diversity across a hardwood gradient within early seral plantation forest. *For. Ecol. Manage.*, 261, 1372-1381.
- Fahrig, L. (2001) How much habitat is enough? *Biol. Conserv.*, 100, 65-74.
- FAO (2006) *Global planted forests thematic study: results and analysis*. Forestry Department, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.
- FAO (2007) *State of the world's forests 2007*. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.
- FAO (2015) *Global forest resources assessment 2015*. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.
- Fedrowitz, K., Koricheva, J., Baker, S. C., Lindenmayer, D. B., Palik, B., Rosenvald, R., Beese, W., Franklin, J. F., Kouki, J., Macdonald, E., Messier, C., Sverdrup-Thygeson, A. and Gustafsson, L. (2014) Can retention forestry help conserve biodiversity? A meta-analysis. *J. Appl. Ecol.*, 51, 1669-1679.
- Fishery and Forestry Department. (1949-2014) *Hokkaido forestry statistics*. Fishery and Forestry Department, Hokkaido Prefecture, Sapporo (in Japanese).
- Ford, R. M., Williams, K. J. H., Bishop, I. D. and Hickey, J. E. (2009) Public judgements of the social acceptability of silvicultural alternatives in Tasmanian wet eucalypt forests. *Aust. For.*, 72, 157-171.
- Forestry Agency (1954-2016) *Handbook of forest/forestry statistics*. Forestry Agency, Ministry of Agriculture, Forestry and Fishery, Japan, Tokyo (in Japanese).
- Forestry Agency (2014) *Status of forest resources*. Forestry Agency, Ministry of Agriculture, Forestry and Fishery, Japan, Tokyo. <http://www.rinya.maff.go.jp/j/kouhou/toukei/index.html> (in Japanese).
- Forestry Agency (2016) *Basic plan for forest and forestry*. Forestry Agency, Ministry of Agriculture, Forestry and Fishery, Japan, Tokyo. <http://www.rinya.maff.go.jp/j/kikaku/plan/> (in Japanese).
- Forestry Agency (2017) *White paper on forestry and forests, 2016*. Japan Forestry Association, Tokyo (in Japanese)
- Franklin, J. F. (1988) Structural and functional diversity in temperate forests. In: Wilson, E. O. (ed) *Biodiversity*. National Academy Press, Washington DC, 166-175.
- Franklin, J. F. (1989) Toward a new forestry. *Am. For.*, 95, 37-44.
- Franklin, J. F. (1993) Preserving biodiversity: species, ecosystems, or landscapes? *Ecol. Appl.*, 3, 202-205.
- Franklin, J. F., Berg, D. R., Thornburgh, D. A. and Tappeiner, J. C. (1997) Alternative silvicultural approaches to timber harvesting: variable retention harvest systems. In: Kohm, K. A., Franklin, J. F. (eds.) *Creating a forestry for the 21st century: the science of ecosystem management*. Island Press, Washington, D.C., 111-139.
- Franklin, J. F., Lindenmayer, D., MacMahon, J. A., McKee, A., Magnuson, J., Perry, D. A. and Waide, R. (2000) Threads of continuity. *Conserv. Biol. Pract.*, 1, 8-16.
- Franklin, J. F. and Lindenmayer, D. B. (2009) Importance of matrix habitats in maintaining biological diversity. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 106, 349-350.
- Franklin, J. F., Maeda, T., Ohsumi, Y., Matsui, M., Yagi, H. and Hawk, G. M. (1979) Subalpine coniferous forests of central Honshu, Japan. *Ecol. Monogr.*, 49, 311-334.
- Franklin, J. F., Spies, T. A., Van Pelt, R., Carey, A. B., Thornburgh, D. A., Berg, D. R. and Lindenmayer, D. B. (2002) Disturbance and structural development of natural forest ecosystems with silvicultural implications, using Douglas-fir forests as an example. *For. Ecol. Manage.*, 155, 399-423.
- FSC-US (2010) *FSC-US forest management standard (v1.0)*. Forest Stewardship Council U.S. (FSC-US), Minneapolis, <https://us.fsc.org/download.fsc-us-forest-management-standard-v1-0.95.htm>.

- FSC Sweden (2010) *Swedish FSC standard for forest certification including SLIMF indicators*. Forest Stewardship Council, <http://ic.fsc.org/download.fsc-std-swe-02-02-2010-en.1703.htm>.
- Gamfeldt, L., Snäll, T., Bagchi, R., Jonsson, M., Gustafsson, L., Kjellander, P., Ruiz-Jaen, M. C., Froberg, M., Stendahl, J., Philipson, C. D., Mikusinski, G., Andersson, E., Westerlund, B., Andren, H., Moberg, F., Moen, J. and Bengtsson, J. (2013) Higher levels of multiple ecosystem services are found in forests with more tree species. *Nat. Commun.*, 4, 1340.
- Gibbons, P., McElhinny, C. and Lindenmayer, D. B. (2010) What strategies are effective for perpetuating structures provided by old trees in harvested forests? A case study on trees with hollows in south-eastern Australia. *For. Ecol. Manage.*, 260, 975-982.
- Glenn-Lewin, D. C. (1977) Species diversity in North American temperate forests. *Vegetatio*, 33, 153-162.
- Gustafsson, L., Baker, S. C., Bauhus, J., Beese, W. J., Brodie, A., Kouki, J., Lindenmayer, D. B., Löhmus, A., Pastur, G. M., Messier, C., Neyland, M., Palik, B., Sverdrup-Thygeson, A., Volney, W. J. A., Wayne, A. and Franklin, J. F. (2012) Retention forestry to maintain multifunctional forests: a world perspective. *BioSci.*, 62, 633-645.
- Hämäläinen, A., Hujo, M., Heikkala, O., Junninen, K. and Kouki, J. (2016) Retention tree characteristics have major influence on the post-harvest tree mortality and availability of coarse woody debris in clear-cut areas. *For. Ecol. Manage.*, 369, 66-73.
- Hansen, A. J., Spies, T. A., Swanson, F. J. and Ohmann, J. L. (1991) Conserving biodiversity in managed forests: lessons from natural forests. *BioSci.*, 41, 382-392.
- Hanski, I. (1999) *Metapopulation ecology*. Oxford University Press, Oxford.
- Harris, L. D. and Skoog, P. J. (1980) Some wildlife habitat-forestry relations in the southeastern coastal plain. In: Chabreck, R. H., Mills, R. H. (eds.) *Integrating timber and wildlife management in southern forests*. Louisiana State University, Baton Rouge, 103-119.
- Hartley, M. J. (2002) Rationale and methods for conserving biodiversity in plantation forests. *For. Ecol. Manage.*, 155, 81-95.
- Hatcher, P. E. (1994) The importance of needle terpene composition in determining the macrolepidoptera species richness of Canadian conifers. *Oikos*, 71, 526-534.
- Hokkaido (1953) *History of Hokkaido forestry*. Iwahashi Press, Sapporo (in Japanese).
- Hokkaido (1956) *50-year history of Hokkaido prefectural forests*. Nakanishi Picture Publishing, Sapporo (in Japanese).
- Hokkaido (1983) *History of Hokkaido forestry after World War II*. Hokkaido Forestry Hall, Sapporo (in Japanese).
- Hunter, M. L., Jr. (1990) *Wildlife, forests, and forestry: principles of managing forests for biological diversity*. Prentice Hall, New Jersey.
- Hunter, M. L., Jr., Acuña, V., Bauer, D. M., Bell, K. P., Calhoun, A. J. K., Felipe-Lucia, M. R., Fitzsimons, J. A., González, E., Kinnison, M., Lindenmayer, D., Lundquist, C. J., Medellín, R. A., Nelson, E. J. and Poschlod, P. (2017) Conserving small natural features with large ecological roles: a synthetic overview. *Biol. Conserv.*, 211, Part B, 88-95.
- Hurlbert, S. H. (1984) Pseudoreplication and the design of ecological field experiments. *Ecol. Monogr.*, 54, 187-211.
- Huston, M. A. and Wolverton, S. (2009) The global distribution of net primary production: resolving the paradox. *Ecol. Monogr.*, 79, 343-377.
- Johnson, D. H. (2002) The importance of replication in wildlife research. *J. Wildl. Manage.*, 66, 919-932.
- Kikuchi, K., Akasaka, T., Yamaura, Y. and Nakamura, F. (2013) Abundance and use of cavity trees at the tree- and stand-levels in natural and plantation forests in Hokkaido, Japan. *J. For. Res.*, 18, 389-397.
- Koh, L. P., Levang, P. and Ghazoul, J. (2009) Designer landscapes for sustainable biofuels. *Trends Ecol. Evol.*, 24, 431-438.
- Koivula, M., Kuuluvainen, T., Hallman, E., Kouki, J., Siitonen, J. and Valkonen, S. (2014) Forest management inspired by natural disturbance dynamics (DISTDYN) - a long-term research and development project in Finland. *Scand. J. For. Res.*, 29, 579-592.
- Koseki, T. (1962) The processes of development of forestry in Hokkaido. *Res. Bull. Hokkaido Univ. For.*, 22, 25-94 (in Japanese).
- Langenheim, J. H. (1994) Higher plant terpenoids: a phytocentric overview of their ecological roles. *J. Chem. Ecol.*, 20, 1223-1280.
- Law, E. A., Bryan, B. A., Meijaard, E., Mallawaarachchi, T., Struebig, M. J., Watts, M. E. and Wilson, K. A. (2017) Mixed policies give more options in multifunctional tropical forest landscapes. *J. Appl. Ecol.*, 54, 51-60.
- Lawler, J. J., Lewis, D. J., Nelson, E., Plantinga, A. J., Polasky, S., Withey, J. C., Helmers, D. P., Martinuzzi, S., Pennington, D. and Radeloff, V. C. (2014) Projected land-use change impacts on ecosystem services in the United States. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 111, 7492-7497.
- Lee, S.-I., Spence, J. R. and Langor, D. W. (2017) Combinations of aggregated and dispersed retention improve conservation of saproxylic beetles in boreal white spruce stands. *For. Ecol. Manage.*, 385, 116-126.

- Liang, J., Crowther, T. W., Picard, N., Wiser, S., Zhou, M., Alberti, G., Schulze, E.-D., McGuire, A. D., Bozzato, F., Pretzsch, H., de-Miguel, S., Paquette, A., Hérault, B., Scherer-Lorenzen, M., Barrett, C. B., Glick, H. B., Hengeveld, G. M., Nabuurs, G.-J., Pfautsch, S., Viana, H., Vibrans, A. C., Ammer, C., Schall, P., Verbyla, D., Tchebakova, N., Fischer, M., Watson, J. V., Chen, H. Y. H., Lei, X., Schelhaas, M.-J., Lu, H., Gianelle, D., Parfenova, E. I., Salas, C., Lee, E., Lee, B., Kim, H. S., Bruelheide, H., Coomes, D. A., Piotta, D., Sunderland, T., Schmid, B., Gourlet-Fleury, S., Sonké, B., Tavani, R., Zhu, J., Brandl, S., Vayreda, J., Kitahara, F., Searle, E. B., Neldner, V. J., Ngugi, M. R., Baraloto, C., Frizzera, L., Bałazy, R., Oleksyn, J., Zawila-Niedzwiecki, T., Bouriaud, O., Bussotti, F., Finér, L., Jaroszewicz, B., Jucker, T., Valladares, F., Jagodzinski, A. M., Peri, P. L., Gonmadje, C., Marthy, W., O'Brien, T., Martin, E. H., Marshall, A. R., Rovero, F., Bitariho, R., Niklaus, P. A., Alvarez-Loayza, P., Chamuya, N., Valencia, R., Mortier, F., Wortel, V., Engone-Obiang, N. L., Ferreira, L. V., Odeke, D. E., Vasquez, R. M., Lewis, S. L. and Reich, P. B. (2016) Positive biodiversity-productivity relationship predominant in global forests. *Science*, 354, aaf8957.
- Lindbladh, M., Lindström, Å., Hedwall, P.-O. and Felton, A. (2017) Avian diversity in Norway spruce production forests - how variation in structure and composition reveals pathways for improving habitat quality. *For. Ecol. Manage.*, 397, 48-56.
- Lindenmayer, D. B. (2017) Conserving large old trees as small natural features. *Biol. Conserv.*, 211, 51-59.
- Lindenmayer, D. B., Cunningham, R. B., Donnelly, C. F., Nix, H. and Lindenmayer, B. D. (2002) Effects of forest fragmentation on bird assemblages in a novel landscape context. *Ecol. Monogr.*, 72, 1-18.
- Lindenmayer, D. B. and Franklin, J. F. (2002) *Conserving forest biodiversity: a comprehensive multiscaled approach*. Island Press, Washington, D. C.
- Lindenmayer, D. B., Franklin, J. F., Löhmus, A., Baker, S. C., Bausch, J., Beese, W., Brodie, A., Kiehl, B., Kouki, J., Pastur, G. M., Messier, C., Neyland, M., Palik, B., Sverdrup-Thygeson, A., Volney, J., Wayne, A. and Gustafsson, L. (2012) A major shift to the retention approach for forestry can help resolve some global forest sustainability issues. *Conserv. Lett.*, 5, 421-431.
- Lindenmayer, D. B. and Laurance, W. F. (2017) The ecology, distribution, conservation and management of large old trees. *Biol. Rev.*, 92, 1434-1458.
- Lindenmayer, D. B., Laurance, W. F., Franklin, J. F., Likens, G. E., Banks, S. C., Blanchard, W., Gibbons, P., Ikin, K., Blair, D., McBurney, L., Manning, A. D. and Stein, J. A. R. (2014) New policies for old trees: averting a global crisis in a keystone ecological structure. *Conserv. Lett.*, 7, 61-69.
- MacArthur, R. H. and MacArthur, J. W. (1961) On bird species diversity. *Ecology*, 42, 594-598.
- MacArthur, R. H. and Wilson, E. O. (1967) *The theory of island biogeography*. Princeton University Press, Princeton, New Jersey.
- MacLean, D. A., Seymour, R. S., Montigny, M. K. and Messier, C. (2009) Allocation of conservation efforts over the landscape: the TRIAD approach. In: Villard, M.-A., Jonsson, B. G. (eds) *Setting conservation targets for managed forest landscapes*. Cambridge University Press, Cambridge, 283-303.
- Maeda, T. (1983) Natural distribution. In: Sakaguchi, K. (ed) *All of Japanese cedar*. Zenkoku Ringyou Kairyoku Hukyo Kyokai, Tokyo, 8-27 (in Japanese).
- McCarthy, M. A., Thompson, C. J. and Possingham, H. P. (2005) Theory for designing nature reserves for single species. *Am. Nat.*, 165, 250-257.
- McComb, W. and Lindenmayer, D. (1999) Dying, dead, and down trees. In: Hunter, M. L., Jr. (ed) *Maintaining biodiversity in forest ecosystems*. Cambridge University Press, Cambridge, 335-372.
- Messier, C., Puettmann, K., Chazdon, R., Andersson, K. P., Angers, V. A., Brotons, L., Filotas, E., Tittler, R., Parrott, L. and Levin, S. A. (2015) From management to stewardship: viewing forests as complex adaptive systems in an uncertain world. *Conserv. Lett.*, 8, 368-377.
- Miyamoto, A. and Sano, M. (2008) The influence of forest management on landscape structure in the cool-temperate forest region of central Japan. *Landsc. Urban Plann.*, 86, 248-256.
- Mizutani, M. and Hijii, N. (2002) The effects of arthropod abundance and size on the nestling diet of two *Parus* species. *Ornithol. Sci.*, 1, 71-80.
- Moore, S., E. and Allen, H. L. (1999) Plantation forestry. In: Hunter, M. L., Jr. (ed) *Maintaining biodiversity in forest ecosystems*. Cambridge University Press, Cambridge, 400-433.
- Mori, A. S. and Kitagawa, R. (2014) Retention forestry as a major paradigm for safeguarding forest biodiversity in productive landscapes: a global meta-analysis. *Biol. Conserv.*, 175, 65-73.
- Mori, A. S., Tatsumi, S. and Gustafsson, L. (2017) Landscape properties affect biodiversity response to retention approaches in forestry. *J. Appl. Ecol.*, 54, 1627-1637.
- Nájera, A. and Simonetti, J. A. (2010) Enhancing avifauna in commercial plantations. *Conserv. Biol.*, 24, 319-324.
- Nagaike, T. (2002) Differences in plant species diversity between conifer (*Larix kaempferi*) plantations and broad-

- leaved (*Quercus crispula*) secondary forests in central Japan. *For. Ecol. Manage.*, 168, 111-123.
- Nagaike, T. and Kamitani, T. (1997) Factors affecting changes in a landscape structure dominated by both primary and coppice forests in the *Fagus crenata* forest region of central Japan. *J. For. Res.*, 2, 193-198.
- Nelson, E., Mendoza, G., Regetz, J., Polasky, S., Tallis, H., Cameron, D., Chan, K. M. A., Daily, G. C., Goldstein, J., Kareiva, P. M., Lonsdorf, E., Naidoo, R., Ricketts, T. H. and Shaw, M. R. (2009) Modeling multiple ecosystem services, biodiversity conservation, commodity production, and tradeoffs at landscape scales. *Front. Ecol. Environ.*, 7, 4-11.
- Newton, I. (1994) The role of nest sites in limiting the numbers of hole-nesting birds: a review. *Biol. Conserv.*, 70, 265-276.
- Neyland, M., Hickey, J. and Read, S. M. (2012) A synthesis of outcomes from the Warra Silvicultural Systems Trial, Tasmania: safety, timber production, economics, biodiversity, silviculture and social acceptability. *Aust. For.*, 75, 147-162.
- Nonoda, S., Shibuya, M., Saito, H., Ishibashi, S. and Takahashi, M. (2008) Invasion and growth processes of natural broadleaved trees and influences of thinning on the processes in an *Abies sachalinensis* plantation. *J. Jpn. For. Soc.*, 90, 103-110 (in Japanese).
- O'Hara, K. L. and Ramage, B. S. (2013) Silviculture in an uncertain world: utilizing multi-aged management systems to integrate disturbance. *Forestry*, 86, 401-410.
- O'Hara, K. L., Seymour, R. S., Tesch, S. D. and Guldin, J. M. (1994) Silviculture and our changing profession: leadership for shifting paradigms. *J. For.*, 92, 8-13.
- Ohno, Y. and Ishida, A. (1997) Differences in bird species diversities between a natural mixed forest and a coniferous plantation. *J. For. Res.*, 2, 153-158.
- Ohsawa, M. (2007) The role of isolated old oak trees in maintaining beetle diversity within larch plantations in the central mountainous region of Japan. *For. Ecol. Manage.*, 250, 215-226.
- Ozanne, C. M. P. (1999) A comparison of the canopy arthropod communities of coniferous and broad-leaved trees in the United Kingdom. *Selbyana*, 20, 290-298.
- Paquette, A. and Messier, C. (2010) The role of plantations in managing the world's forests in the Anthropocene. *Front. Ecol. Environ.*, 8, 27-34.
- Payn, T., Carnus, J.-M., Freer-Smith, P., Kimberley, M., Kollert, W., Liu, S., Orazio, C., Rodriguez, L., Silva, L. N. and Wingfield, M. J. (2015) Changes in planted forests and future global implications. *For. Ecol. Manage.*, 352, 57-67.
- Perry, D. A. (1994) *Forest ecosystems*. Johns Hopkins University Press, Baltimore.
- Prugh, L. R., Hodges, K. E., Sinclair, A. R. E. and Brashares, J. S. (2008) Effect of habitat area and isolation on fragmented animal populations. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 105, 20770-20775.
- Puettmann, K. J., Coates, K. D. and Messier, C. (2012) *A critique of silviculture: managing for complexity*. Island Press, Washington, D. C.
- Putz, F. E., Zuidema, P. A., Pinard, M. A., Boot, R. G. A., Sayer, J. A., Sheil, D., Sist, P., Elias and Vanclay, J. K. (2008) Improved tropical forest management for carbon retention. *PLoS Biol.*, 6, e166.
- Raudsepp-Hearne, C., Peterson, G. D. and Bennett, E. M. (2010) Ecosystem service bundles for analyzing tradeoffs in diverse landscapes. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 107, 5242-5247.
- Regal, P. J. (1977) Ecology and evolution of flowering plant dominance. *Science*, 196, 622-629.
- Renard, D., Rhemtulla, J. M. and Bennett, E. M. (2015) Historical dynamics in ecosystem service bundles. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 112, 13411-13416.
- Ribe, R. G. (2005) Aesthetic perceptions of green-tree retention harvests in vista views: the interaction of cut level, retention pattern and harvest shape. *Landsc. Urban Plann.*, 73, 277-293.
- Ricklefs, R. E. (2008) Foliage chemistry and the distribution of Lepidoptera larvae on broad-leaved trees in southern Ontario. *Oecologia*, 157, 53-67.
- Ruffell, J., Clout, M. N. and Didham, R. K. (2017) The matrix matters, but how should we manage it? Estimating the amount of high-quality matrix required to maintain biodiversity in fragmented landscapes. *Ecography*, 40, 171-178.
- Schieck, J. and Song, S. J. (2006) Changes in bird communities throughout succession following fire and harvest in boreal forests of western North America: literature review and meta-analyses. *Can. J. For. Res.*, 36, 1299-1318.
- Sedjo, R. A. and Botkin, D. (1997) Using forest plantations to spare natural forests. *Environment*, 39, 14-30.
- Seiwa, K., Etoh, Y., Hisita, M., Masaka, K., Imaji, A., Ueno, N., Hasegawa, Y., Konno, M., Kanno, H. and Kimura, M. (2012) Roles of thinning intensity in hardwood recruitment and diversity in a conifer, *Cryptomeria japonica* plantation: a 5-year demographic study. *For. Ecol. Manage.*, 269, 177-187.
- Seymour, R. S. and Hunter, M. L., Jr. (1999) Principles of ecological forestry. In: Hunter, M. L., Jr. (ed) *Maintaining biodiversity in forest ecosystems*. Cambridge University Press, Cambridge, 22-61.
- Shelby, B., Thompson, J. R., Brunson, M. and Johnson, R.

- (2005) A decade of recreation ratings for six silviculture treatments in Western Oregon. *J. Environ. Manage.*, 75, 239-246.
- Sheppard, S. R. J., Achiam, C. and D'Eon, R. G. (2004) Aesthetics: are we neglecting a critical issue in certification for sustainable forest management? *J. For.*, 102, 6-11.
- Siitonen, J. and Martikainen, P. (1994) Occurrence of rare and threatened insects living on decaying *Populus Tremula*: a comparison between Finnish and Russian Karelia. *Scand. J. For. Res.*, 9, 185-191.
- Simonsson, P., Gustafsson, L. and Östlund, L. (2014) Retention forestry in Sweden: driving forces, debate and implementation 1968-2003. *Scand. J. For. Res.*, 30, 154-173.
- Soler, R. M., Schindler, S., Lencinas, M. V., Peri, P. L. and Martínez Pastur, G. (2016) Why biodiversity increases after variable retention harvesting: a meta-analysis for southern Patagonian forests. *For. Ecol. Manage.*, 369, 161-169.
- Spence, J. R., Langor, D. W., Jacobs, J. M., Work, T. T. and Volney, W. J. A. (2008) Conservation of forest-dwelling arthropod species: simultaneous management of many small and heterogeneous risks. *Can. Entomol.*, 140, 510-525.
- Tönnies, S., Karjalainen, E., Löfström, I. and Neuvonen, M. (2004) Scenic impacts of retention trees in clear-cutting areas. *Scand. J. For. Res.*, 19, 348-357.
- Tokuda, S. (2005) Occurrence and damage of butt rot in Todo fir plantation and its control. *Forest Pests*, 54, 219-226 (in Japanese).
- Tokuda, S. (2011) Rot of Todo fir. In: Boreal Forest Society (ed) *Hokkaido forest*. Hokkaido Shimbun Press, Sapporo, 48-52 (in Japanese).
- Tokuda, S., Ota, Y. and Hattori, T. (2007) Root and butt rot of Todo fir (*Abies sachalinensis*) caused by *Heterobasidion annosum* s.l. in Hokkaido, Japan. *For. Pathol.*, 37, 155-166.
- Trapp, S. and Croteau, R. (2001) Defensive resin biosynthesis in conifers. *Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.*, 52, 689-724.
- Triviño, M., Pohjanmies, T., Mazziotta, A., Juutinen, A., Podkopaev, D., Le Tortorec, E. and Mönkkönen, M. (2017) Optimizing management to enhance multifunctionality in a boreal forest landscape. *J. Appl. Ecol.*, 54, 61-70.
- Tscharntke, T., Steffan-Dewenter, I., Kruess, A. and Thies, C. (2002) Contribution of small habitat fragments to conservation of insect communities of grassland-cropland landscapes. *Ecol. Appl.*, 12, 354-363.
- Tsuchiya, T. (2013) A new practice of plantations in Hokkaido prefectural forests. *Agri. Econ.*, 79(12), 91-96 (in Japanese).
- Turner, M. G., Romme, W. H. and Tinker, D. B. (2003) Surprises and lessons from the 1988 Yellowstone fires. *Front. Ecol. Environ.*, 1, 351-358.
- Utsugi, E., Kanno, H., Ueno, N., Tomita, M., Saitoh, T., Kimura, M., Kanou, K. and Seiwa, K. (2006) Hardwood recruitment into conifer plantations in Japan: effects of thinning and distance from neighboring hardwood forests. *For. Ecol. Manage.*, 237, 15-28.
- Vanderwel, M. C., Malcolm, J. R. and Mills, S. C. (2007) A meta-analysis of bird responses to uniform partial harvesting across North America. *Conserv. Biol.*, 21, 1230-1240.
- Viljur, M.-L. and Teder, T. (2016) Butterflies take advantage of contemporary forestry: clear-cuts as temporary grasslands. *For. Ecol. Manage.*, 376, 118-125.
- Walters, C. J., Collie, J. S. and Webb, T. (1988) Experimental designs for estimating transient responses to management disturbances. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 45, 530-538.
- Watanabe, S. (1970) On the succession pattern of naturally regenerated forests in Hokkaido. I. North. *For.*, 22, 349-356 (in Japanese).
- Watling, J. I., Nowakowski, A. J., Donnelly, M. A. and Orrock, J. L. (2011) Meta-analysis reveals the importance of matrix composition for animals in fragmented habitat. *Global Ecol. Biogeogr.*, 20, 209-217.
- Wilcove, D. S., Giam, X., Edwards, D. P., Fisher, B. and Koh, L. P. (2013) Navjot's nightmare revisited: logging, agriculture, and biodiversity in Southeast Asia. *Trends Ecol. Evol.*, 28, 531-540.
- Yamaura, Y., Ikeno, S., Sano, M., Okabe, K. and Ozaki, K. (2009) Bird responses to broad-leaved forest patch area in a plantation landscape across seasons. *Biol. Conserv.*, 142, 2155-2165.
- Yamaura, Y., Katoh, K. and Takahashi, T. (2008) Effects of stand, landscape, and spatial variables on bird communities in larch plantations and deciduous forests in central Japan. *Can. J. For. Res.*, 38, 1223-1243.
- Yamaura, Y., Oka, H., Taki, H., Ozaki, K. and Tanaka, H. (2012) Sustainable management of planted landscapes: lessons from Japan. *Biodivers. Conserv.*, 21, 3107-3129.
- Yamaura, Y., Shoji, Y., Mitsuda, Y., Utsugi, H., Tsuge, T., Kuriyama, K. and Nakamura, F. (2016) How many broadleaved trees are enough in conifer plantations? The economy of land sharing, land sparing and quantitative targets. *J. Appl. Ecol.*, 53, 1117-1126.
- Yoshida, T., Hasegawa, M., Taira, H. and Noguchi, M. (2005) Stand structure and composition of a 60-year-old larch (*Larix kaempferi*) plantation with retained hardwoods. *J. For. Res.*, 10, 351-358.

- Yoshii, C., Yamaura, Y., Soga, M., Shibuya, M. and Nakamura, F. (2015) Comparable benefits of land sparing and sharing indicated by bird responses to stand-level plantation intensity in Hokkaido, northern Japan. *J. For. Res.*, 20, 167-174.
- Yui, M. and Suzuki, Y. (1987) The analyses of structure of the woodland bird communities in Japan. IV. Density, species richness and diversity of breeding community in various forest types. *J. Yamashina Inst. Ornith.*, 19, 13-27 (in Japanese).

### Supplementary Date

Supplementary date can be found at <https://www.affrc.go.jp/pubs/bulletin/445/index.html>

### Fig. S1. Post-harvest experimental units.

Abbreviations: SM (medium amount of dispersed retention); GR (aggregated retention); CC (clear-cutting). Numbers (1 or 2) in abbreviated names indicate that they are experimental units of the first or second set, respectively. The last inset figure (d) indicates the large broad-leaved trees presumed to have been retained when the first-generation fir plantation was established (1940-1960).

### Fig. S2. Preparation, tree planting, and weeding in the REFRESH project

## 北海道空知地方における人工林での保持林業： 針葉樹人工林の主伐時に広葉樹を残す大規模野外操作実験

山浦 悠一<sup>1)2)\*</sup>、明石 信廣<sup>3)</sup>、雲野 明<sup>3)</sup>、対馬 俊之<sup>3)</sup>、  
長坂 晶子<sup>3)</sup>、長坂 有<sup>3)</sup>、尾崎 研一<sup>4)</sup>

### 要旨

主伐の際に重要な森林の構造などを残す施業は保持林業と呼ばれ、木材生産を行なう森林で生物多様性を保全するための有望な方法の一つである。この伐採手法は多くの国で採用され、野外実験により検証が行なわれている。日本では、戦後造成された針葉樹人工林が伐期を迎えつつあり、主伐することにより木材自給へ貢献することが期待されている。一方で、針葉樹人工林の広葉樹天然林への再生や木材生産以外の生態系サービスの維持や向上も人工林が広がる景観では求められている。このような状況で、私たちは北海道のトドマツ *Abies sachalinensis* 人工林で保持林業の大規模操作実験 (REFRESH プロジェクト) を立ち上げた。本プロジェクトは6つの処理区 (皆伐、3つのレベルの単木保持、0.36 ha の非伐採区を有する群状保持、受光伐) と伐採を行なわない2つの対照区 (天然林対照区、人工林対照区) を有しており、各処理区・対照区はそれぞれ3つの繰り返しがある。単木保持では、天然更新由来の広葉樹を3つの異なる量 (10 本/ha、50 本/ha、100 本/ha) で保持し、天然林要素の維持と再生を目指している。処理区では伐採後に再度トドマツを植林し、通常の造林作業を行っている。伐採前と伐採後に、私たちは以下の項目を調べている: 水土保持機能、林業生産性、植物、節足動物、鳥類の多様性。伐採前後の調査により、樹木の保持が伐採地で森林の構造の連続性をいかに提供するのか、そして次の伐期までの長期的な調査により、人工林の構造と組成がどの程度豊かになるのかが示されるだろう。

キーワード: 生物多様性保全、林業生産性、人工林、保持林業、水土保持

原稿受付: 平成 29 年 8 月 18 日 原稿受理: 平成 29 年 10 月 11 日

1) 森林総合研究所 森林植生研究領域

2) オーストラリア国立大学環境社会学部

3) 北海道立総合研究機構林業試験場

4) 森林総合研究所 研究ディレクター

\* 森林総合研究所 森林植生研究領域 〒 305-8687 茨城県つくば市松の里 1



## 研究資料 (Research record)

# 2017年7月九州北部豪雨における斜面崩壊と雨量分布の関係について

村上 亘<sup>1)\*</sup>、安田 幸生<sup>1)</sup>

### 要旨

2017年7月5日から6日にかけて福岡県と大分県を中心とした九州北部において発生した豪雨(平成29年7月九州北部豪雨)にともなう斜面崩壊の発生位置と当時の雨量分布との関係について、災害後に撮影された空中写真と気象庁発表のレーダー解析雨量から明らかにした。これまでの調査から、崩壊は12時間で500mm以上の雨量が観測された福岡県朝倉市南東部から東峰村南部の東西約15km、南北約5kmの狭い範囲で集中的に発生したことが判断された。

キーワード：平成29年7月九州北部豪雨、斜面崩壊、降雨分布、空中写真

### 1. はじめに

2017年7月5日から6日にかけて福岡県と大分県を中心とした九州北部において発生した豪雨(平成29年7月九州北部豪雨)により、多数の斜面崩壊が発生した。筆者らは斜面崩壊の分布と当時の雨量分布との関係について、災害後に撮影された空中写真と気象庁発表のレーダー解析雨量を用いて検討した。今回の災害については素因と誘因の両面から、今後多くの議論が行わ

れると考えられるが、そのための基礎資料を提供するため、崩壊分布と雨量の解析結果について、取り急ぎ報告する。

### 2. 被災地の概要

豪雨による斜面崩壊は福岡県朝倉市および東峰村から大分県日田市にかけて多数発生した(Photo 1)。被害発生時は、台風3号の通過後、対馬海峡付近に



Photo 1. 豪雨により発生した福岡県朝倉市奈良ヶ谷川上流の斜面崩壊の状況(黒川 潮氏提供、7月10日撮影)

原稿受付：平成29年8月30日 原稿受理：平成29年12月12日

1) 森林総合研究所 森林防災研究領域

\* 森林総合研究所 森林防災研究領域 〒305-8687 茨城県つくば市松の里1

停滞した梅雨前線に向かって暖かく湿った空気が流れ込んだ影響で西日本において記録的な大雨となり、アメダス気象観測所「朝倉」と「日田」でそれぞれ129.5mm、87.5mmの1時間最大雨量、日最大雨量で、516.0mm、336.0mmの豪雨となった（気象庁 2017）。産業総合研究所（2009）によると被災地の地質は朝倉市周辺では中生代三畳紀後期からジュラ紀後期に形成された変成岩である泥質片岩と中生代白亜紀後期に形成された花崗閃緑岩が主に分布し、東峰村から日田市周辺では新生代第三紀中新世から鮮新世に形成された安山岩・玄武岩質安山岩・火砕岩が分布する。被災地の植生の大半は常緑針葉樹のスギ・ヒノキ・サワラの植林地となっている（防災科学技術研究所 2017）。

### 3. 調査方法

崩壊地の判読は、国土地理院によって7月13日に撮影された空中写真（オルソ画像：[http://maps.gsi.go.jp/#12/33.408660/130.751724/&base=std&ls=std%7C20170705typhoon3\\_dol\\_all%7Cexperimental\\_anno&disp=111&lcd=experimental\\_anno&vs=c1j010u0t0z0r0f0](http://maps.gsi.go.jp/#12/33.408660/130.751724/&base=std&ls=std%7C20170705typhoon3_dol_all%7Cexperimental_anno&disp=111&lcd=experimental_anno&vs=c1j010u0t0z0r0f0)）を狭域防災情報サービス協議会（2017）が提供するArcGIS Online上で表示するサービスより利用した。判読範囲はFig. 1に示すとおりである。判読方法は崩壊発生域の崩壊幅を計測し、その計測幅の中心を崩壊発生地点として抽出した（Fig. 2）。対象とした崩壊は崩壊幅10m以上とした。写真判読の際に、発生源は複

数認められるが斜面下方で合流して連続した一つの崩壊として認識されるような崩壊についても、可能な限り発生源ごとに複数の崩壊に分けて判読を行った。雨量分布のデータには、気象庁が配信するレーダー解析雨量を用いた。レーダー解析雨量は1kmメッシュの1

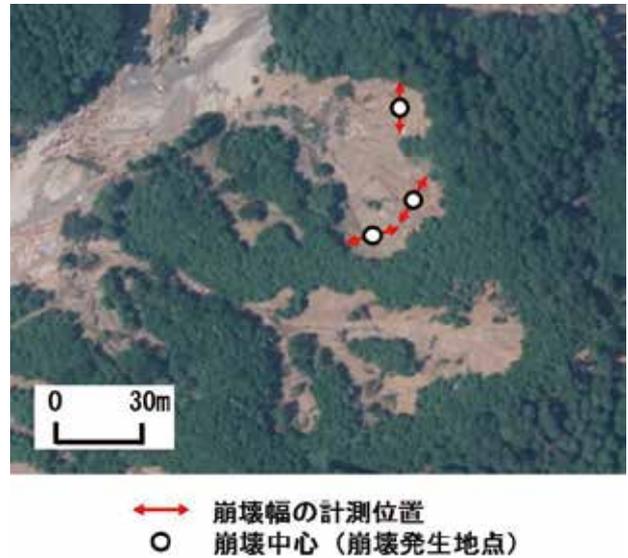


Fig. 2. 崩壊地の判読方法

崩壊発生域の崩壊幅（10m以上）を計測し、その計測幅の中心を崩壊発生地点として抽出した。画像は国土地理院が7月13日に撮影した空中写真（オルソ画像）。



Fig. 1. 調査範囲

等高線は50m間隔(国土地理院の10mDEMより作成)。背景図は国土地理院基盤地図情報より作成した。



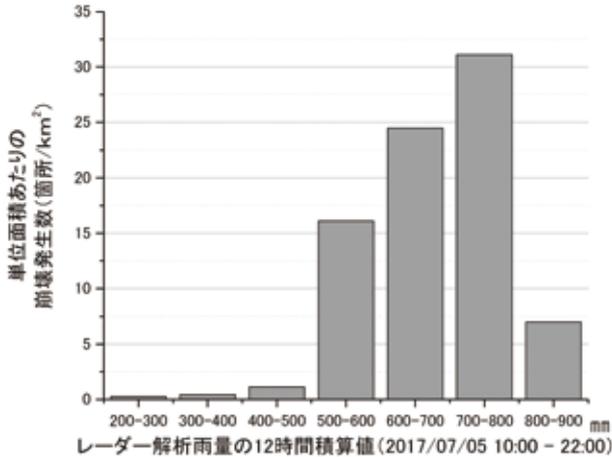


Fig. 4. 単位面積あたりの崩壊発生数とレーダー解析雨量の12時間積算値との関係

フである。グラフからもレーダー解析雨量の12時間積算値が500mmを超えた地点で崩壊の発生が急増していることが示された。なお、800mm以上の雨量での崩壊発生数が少なくなっているが、これについては調査範囲において観測された800mm以上の雨量の分布する範囲が狭いこと、分布範囲が主に平野部に位置しており、崩壊が発生する斜面が少なかったことなどが理由として推察される。以上のことから、今回の崩壊については12時間で500mm以上の雨量が観測された狭い範囲で集中的に発生したと判断される。

## 謝 辞

解析雨量に関する受信システムの構築とデータ整備は、勝島隆史主任研究員（森林総合研究所十日町試験地）が行ったものである。ここに記して謝意を表す。

## 引用文献

- 防災科学研究所（2017）2017年（平成29年）7月の豪雨により九州北部地方（福岡県・大分県）および島根県で発生した土砂・洪水災害の現地調査報告. 44pp.
- 気象庁（2017）梅雨前線及び台風第3号による大雨と暴風 平成29（2017）年6月30日～7月10日（速報）.  
[http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/bosai/report/2017/20170711/jyun\\_sokuji20170630-0710.pdf](http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/bosai/report/2017/20170711/jyun_sokuji20170630-0710.pdf)（参照2017-08-17）.
- 狭域防災情報サービス協議会（2017）平成29年7月九州北部豪雨における被災前後画像.  
<http://mmdin1.maps.arcgis.com/apps/webappviewer/index.html?id=8f26a36a114e441f85c1869299eaa687>（参照2017-07-19）.
- 産業総合研究所（2009）20万分の1シームレス地質図DVD版.

# Relationship between landslides and rainfall distribution in the torrential rain in northern Kyushu in 2017

Wataru MURAKAMI<sup>1)\*</sup> and Yukio YASUDA<sup>1)</sup>

## Abstract

Many landslides occurred in the torrential rain hit in the northern Kyusyu Island (Fukuoka and Oita Prefectures) from July 5th to 6th 2017. We investigated the relationship between the distribution of the landslides interpreted by aerial photographs and the radar rainfall data by the Japan Meteorological Agency. Most of landslides had occurred in the narrow area (approximately 5 km in length from the north to the south and approximately 15 km from the east to the west) where total rainfall reached to 500 mm in 12 hours.

**Key words:** the torrential rain in northern Kyushu in 2017, landslide, rainfall distribution, aerial photograph

---

Received 30 August 2017, Accepted 12 December 2017

1) Department of Disaster Prevention, Meteorology and Hydrology, Forestry and Forest Products Research Institute (FFPRI)

\* Department of Disaster Prevention, Meteorology and Hydrology, FFPRI, 1 Matsunosato, Tsukuba, Ibaraki, 305-8687 JAPAN; e-mail: [wmura@ffpri.affrc.go.jp](mailto:wmura@ffpri.affrc.go.jp)



# 森林総合研究所研究報告の基本方針

## 1. 審 査

投稿された論文（論文、短報、ノート、総説、研究資料）は、すべて審査を受けてその採否が決定される。論文の審査方針を次のように定める。

### 1. 審査の目的

投稿された論文（論文、短報、ノート、総説、研究資料）が、審査の基準に照らして掲載可能か否かを判断することが審査の目的である。

### 2. 審査の基準

- (1) 新規性：論文の内容が、公知、既発表、または既知のことから容易に導き得るものでないこと。
- (2) 有用性：論文の内容が、学術的に、または実用上なんらかの意味で価値があること。
- (3) 信頼性：論旨が通っており、結論等を信頼するに十分な根拠が示されていること。  
さらに、論文はその内容が読者に十分理解できるように簡潔かつ明瞭に記述され、その内容に誤りないことが必要で投稿規程及び執筆要領に規定されたとおりに論文が構成され、記述されていなければならない。

### 3. 査読者

投稿された論文の査読者2名（ノート及び研究資料の場合1人）は、担当編集委員が選定し、森林総合研究所研究報告編集委員会（以下、「委員会」という）において決定する。査読者の氏名は公表しない。著者との連絡はすべて委員会が行い、査読者は著者と直接連絡しないこととする。

### 4. 査読の結果

論文は、上記の各項の基準に照らして総合的に審査され、次のいずれかに判定される。

- (1) このまま掲載可。
- (2) 指摘の点を検討・修正の上、編集委員の了承をもって掲載可。
- (3) 指摘の点を検討・修正の上、再審査の必要あり。
- (4) 却下した方がよい（掲載するほどの内容を含まない場合及び掲載すべきでない場合）。
- (5) その他。

(1) から (4) のいずれかに判定し難い時は、(5) と判定されるが、その場合は担当編集者によって、その理由が具体的に示される。

(2)、(3) と判定された論文の場合は、掲載条件が具体的に示されるので、指摘に沿って原稿を修正する。(2) の判定の場合は、重要な内容の訂正を掲載条件としないことを原則とする。2人の査読者がともに(1) または(2) と判定すれば、査読は終了し、掲載可とする。2人の査読者がともに(4) と判定した場合は、却下とする。

1人が(4) と判定し、担当編集者が必要と認めた場合は別の査読者によってさらに査読を行い、その査読者も(4) と判定すれば却下となります。その査読者が掲載可と判定すれば査読は終了し、掲載可となります。(5) については、その理由により委員会の討議を経て、編集委員長が著者及び査読者と協議して対応します。

(2017年3月31日)

## 2. 投 稿

### 1. 投稿資格

投稿者は原則として国立研究開発法人森林研究・整備機構森林総合研究所、森林総合研究所林木育種センター、森林総合研究所森林バイオ研究センター（以下「森林総合研究所等」という。）の在職職員とする。その他、元職員、依頼研究員及び共同研究者等が、森林総合研究所等あるいは森林総合研究所等と関係のある場所において研究した成果を含む内容も投稿できる。

### 2. 原稿の種類

原稿の種類は論文、総説、短報、ノート、及び研究資料とする。論文は、原著論文として他の出版物に投稿または掲載されていないものに限る。総説は特定の課題に関する研究を広くかつ普遍的に総括・説明したものとする。短報は、速報性の高いものを刷り上がり4頁以内にまとめる。ノートは、価値のある新事実または結論を含むものを刷り上がり2頁以内にまとめる。研究資料は観測データ、調査資料等とする。

### 3. 原稿の提出

投稿者は、別に定める執筆要領に基づき作成した原稿を「研究報告原稿提出書」とともに広報普及科編集刊行係に提出する。なお、共著原稿の提出にあたっては、共著者全員の同意を得ることとする。提出する原稿は電子ファイルとする。

原稿の提出先 〒305-8687 つくば市松の里1  
国立研究開発法人 森林研究・整備機構  
森林総合研究所 広報普及科  
編集刊行係  
Tel：029-829-8373 Fax：029-873-0844  
E-mail：kanko@ffpri.affrc.go.jp

### 4. 原稿の修正

修正原稿が2ヶ月以内に、短報及びノートでは3週間以内に再提出されない場合には受付を取り消す。なお、特別な理由により期限内に提出できない場合は、期間延長を編集委員長に文書で申し入れる。

### 5. 原稿の却下

再審査を終えても受理されない論文等については委員会により却下されることがある。

### 6. 使用言語

使用言語は日本語または英語とする。

### 7. 著作権

報告の著作権は国立研究開発法人森林研究・整備機構森林総合研究所に帰属する。掲載論文の全体または一部を他の著作物に利用する場合、事前に編集刊行係に申し出て、編集委員長の許可を得るものとする。

(2017年12月20日)

### 3. 執筆要領

#### 1. 原稿の書式

原稿は Word®形式の電子ファイルとし、次の書式に従う。

- 1) 和文原稿は、A4 判白紙に、天地左右各 30mm 程度の余白を残し、原則として 10.5 ポイントの文字を使用し、40 字詰め 20 行で横書きで印字する。語や句を区切る際には、「、」「。」を使用。
- 2) 英文原稿は、A4 判白紙に、天地左右各 30mm 程度の余白を残し、原則として 10.5 ポイントの文字を使用し、25 行で印字する。

#### 2. 原稿の構成

原稿の構成は次の順による。

- 1) 和文原稿
    - (1) 表紙<原稿の種類・表題・著者名・所属・英文表題・英文著者名・英名所属・和文ランニングタイトル(全角 25 文字以内)>
    - (2) 英文要旨 (Abstract)、英語キーワード
    - (3) 和文要旨、日本語キーワード
    - (4) 本文
    - (5) 引用文献
    - (6) 図・表・写真の表題と説明・注釈(和文、英文または和英併記)
    - (7) 補足電子資料 (Supplementary data) の表題と説明・注釈
    - (8) 図・表・写真 (別添)
  - 2) 英文原稿
    - (1) 表紙<原稿の種類・表題・著者名・所属・英文ランニングタイトル(空白含め半角 50 文字以内)>
    - (2) 英文要旨 (Abstract)、英語キーワード
    - (3) 本文
    - (4) 引用文献
    - (5) 和文要旨<和文表題・和文著者名・和名所属を含む>、日本語キーワード
    - (6) 図・表・写真の表題と説明・注釈
    - (7) 補足電子資料 (Supplementary data) の表題と説明・注釈
    - (8) 図・表・写真 (別添)
- ただし、ノートは表題・著者名・所属、キーワード、本文(目的、方法、結果などの項目は付けない)、引用文献、図表の表題と説明・注釈、補足電子資料の表題と説明・注釈の順に記述する。原則として、図、表、引用文献は必要最少限とする。

#### 3. 表題

英文表題(サブタイトルを含む)の記載は、先頭の

単語の頭文字を大文字とし、その他の単語は小文字とする。

#### 4. 著者名

英文の場合、著者名の記載は執筆者が通常使用しているローマ字で、名(頭文字を大文字、以後は小文字)、姓(大文字)を記載する(例:Taro SHINRIN)。共著者のあるときは“, ”で区切り、最後の共著者の前に and を入れる。

#### 5. 所属と連絡先

著者の所属は、論文が受付された時点の所属とする。退職者については退職時の所属(和文にのみ元をつける)とする。なお、著者の所属をその対応が容易にわかるように著者の右肩に 1)、2)の番号を付し、脚注に森林総合研究所、研究領域・支所・試験地名等を記載する。また、著者のうち 1 名を連絡先 (corresponding author) とし右肩に所属の番号等に続いて \* (アスタリスク) を付し、脚注に連絡先(現在の所属、住所、E-mail アドレス(推奨))を入れる。所属が無い場合は、個人の連絡先(住所または E-mail アドレス等)とする。

#### 6. 要旨

要旨は、論文の目的、方法、結果などを和文では 600 字(短報は 300 字)、英文では 300 語(短報は 150 語)以内で簡潔に記述する。その際、原則として改行は避け、できるだけ略語、慣用語を用いない。また、原則として表、図、式などを本文中の番号で引用しない。

長文のものについては、和文の場合英文摘要を巻末に、英文の場合和文要旨のかわりに和文摘要を掲載することが出来る。なお、摘要は目的、方法、結果などの要点を簡潔に記述する。

ノートについては、要旨は不要とする。

#### 7. キーワード

原稿の内容を的確に表すキーワード(論文、短報、総説及び研究資料は 7 語以内、ノートは 5 語以内)を記載する。キーワードの選定は検索に用いられることを考慮し(調査年等は不適)、英語と日本語を対応させ、記載の順序を揃える。英語は、固有名詞の最初の文字を除き、すべて小文字で書く。

#### 8. 本文/見出し

本文の区分けの表題は中央に 1 行取りで書く。

表題をさらに細分化する場合は、左詰めにしてゴシック指定にする。

見出しで必要な場合は、ポイントシステムを採用し

てもよい。

英文の見出しは、英文表題の記載と同様に最初の単語の頭文字を大文字表記とする。

## 9. 英文字記号および英数字

本文中、引用文献中ともに、括弧( )、アポストロフィ( ' )、ピリオド( . )、セミコロン( ; )等の英文記号を使う場合には、すべて半角で記述する。ローマ数字も半角アルファベットの組み合わせとして記述する。括弧の前後や記号の後には原則として半角スペースを入れる。

具体的には下記の例を参照( \_ は半角スペースを表す)。

- ・・・であると考えられる(堀・河合\_1965a,b, Dropkin et al.\_1979)。
- ・・・堀ら\_(1965)\_の報告がある。
- ・・・ウスバシロチョウ\_(別名ウスバアゲハ)\_は、・・・

## 引用文献

Ahmad, Q. A. (1952) Fungi of East Bengal. *Pakist. J. For.*, 2, 91-115.

## 10. 引用文献

1) 本文中の引用文献の記載は下記の例に従う。

( \_ は半角スペースを表す)

本文末につける場合

(Ahmad\_1952)(堀\_1965)(Ahmad\_1952, 堀\_1965)

文中での説明の場合

Ahmad\_(1952)\_は～ 近年、堀\_(1965)\_は～

著者が複数の場合等

- ・連名の場合：(Ahmad\_and\_Baker\_1952)(堀・川合\_1965a,b) 中点は全角
- ・著者が3名以上の場合：第1著者名の後に「et al.」または「ら」を付す。  
(Dropkin\_et\_al.\_1979)(Dropkinら\_1979)
- ・複数の文献の場合：年代順に記載し、同年の文献については、著者名のアルファベット順に記載し、単名を先行とする。また、同名の著者は年代順にまとめて記載する。同名で同年の文献については、年の後に a, b をつけて記載する。  
(田中\_1984, 1989, 石塚\_1988, 1990a, b)

削除

- ・訳本の場合：原著者名(訳本の表記に従い、原著者のファミリーネーム)と原著発行年を引用する。  
(ブレーヌ\_1989)

2) 引用文献リストは著者名のアルファベット順に記載し、単名を先行とする。同名の著者は年代順に記載する。詳細は下記の例に従う。( \_ は半角スペースを表す)

## ①雑誌を引用する場合

例 Ahmad, Q. A. (1952) Fungi of East Bengal. *Pakist. J. For.*, 2, 91-115.

Baker, C. F. (1914a) A review of some Philippine plant diseases. *Philipp. Agr. & For.*, 3, 157-164.

Baker, C. F. (1914b) First supplement to the list of the lower fungi of the Philippine Islands. *Leaflet. Philipp. Bot.*, 7 (Art113), 2417-2542.

Dropkin, V. H. and Foudin, A. S. (1979) Report of the occurrence of *Bursaphelenchus lignicolus* induced pine wilt disease in Missouri. *Plant Dis. Rep.*, 63, 904-905.

Reunanen, M., Ekman, R. and Heinonen, M. (1989) Analysis of Finnish pine tar from the wreck of Frigate St. Nikolai. *Holzforschung*, 43, 33-39.

- ・誌名の略記法は慣例にならう。
- ・氏名が和文体の場合は、姓と名の間に全角スペースを入れる。(■は全角スペースを、\_ は半角スペースを表す)

例 森■章\_(2001)\_イチイガシの種子生産における同化産物投資. *日林誌*, 83, 93-100.

堀■高夫\_(1965)\_路網計画のための図上地形判定について. *日林誌*, 47, 168-170.

上野■洋二郎\_(2000)\_森林計画における森林諸機能の最適配分. *日林誌*, 82, 360-363.

田島■正啓・宮島■寛・宮崎■安貞\_(1977)\_ヒノキパーオキシターゼ・アイソザイムの遺伝子分析. *日林誌*, 59, 173-177.

- ・巻の定めがなく、号のみが定められた雑誌の場合、以下のように表記する。

例 岡田■恵子\_(2013)\_国民の意識の変化の的確な把握に向けて: 内閣府の世論調査から. *社会と調査*, 10, 87-96.

猪内■正雄\_(2001)\_森林作業の機械化が森林環境にどんな影響を及ぼすのか. *森林科学*, 32, 25-33.

## ②書籍を引用する場合

例 (本一冊を引用する場合)

三浦■伊八郎・西田■屹二\_(1948)\_木材化学. 丸善, 690pp.

(複数の著者によって書かれた編集本の特定部分を引用する場合)

沼田■真\_(1967)\_植物的環境の解析と評価. 森下■正明・吉良■竜夫編. “自然: 生態学的研究”. 中央公論社, 163-187.

(叢書の特定部分を引用する場合)

川合■眞一・田中■早苗\_(1963)\_“実用化学講座 17 卷有機化合物の反応(下)”. 第2版. 日本化

学会編, 丸善, 210-212.

(欧文の単行書のタイトルはイタリックとする)

Ishii, M. (1996b) Decline and conservation of butterflies in Japan. In Ae, S. A., Hirowatari, T., Ishii, M. and Brower L. P. (eds.) "Decline and Conservation of Butterflies in Japan III". The Lepidopterological Society of Japan, Osaka, 157-167.

(訳本を引用する場合は、原著者名(訳本の表記に従い, 姓・名の順)や原著発行年等を引用する) プレーヌ■ジャン\_(1989)(永塚鎮男訳, 2011) 人は土をどうとらえてきたか: 土壌学の歴史とペドロジスト群像, 農山漁村文化協会, 415pp.

- ③ Web ページの引用は、適当な文献資料が利用できないか、または電子テキスト利用の利便性が特に高い場合に限る。引用する場合には、文献の発行年にあたる部分は、当該 Web ページの公表年(更新年)とするが、公表年が無い場合は筆者が当該ページを確認した年次とし、URL と参照日を記載する。ただし、官公庁等の冊子体資料がそのまま PDF ファイル等の形態で公表されている場合には、冊子体の発行年、発行所、ページ数等を引用し、URL のみを併記する。一連の資料・文書が別ファイル化されている場合には、トップページのみ典拠すればよい。

例 環境省 (2004) “農林水産省と環境省の連携による田んぼの生きもの調査”,

<http://www.env.go.jp/nature/satoyama/tanbo.html>, (参照 2008-01-24).

Finger Lakes Resource Conservation & Development Council (2007) “Forest land best management practices in the Finger Lakes Region of New York State”,

<http://www.dnr.cornell.edu/ext/bmp/index.html>, (accessed 2007-11-30).

環境省 (2002) “平成 13 年度オゾン層等の監視結果に関する年次報告書”, 環境省, 122 pp,

<http://www.env.go.jp/earth/report/h14-03/index.html>.

- 3) 私信扱いの情報は、下記の例に従い、本文中に記載する。( \_ は半角スペースを表す)

なお、所属については、省略することができる。

(氏名, \_ 所属, \_ 私信)

(Name, \_ Affiliation, \_ pers, \_ comm.)

## 11. 英文校閲

英文原稿及び和文原稿の英文摘要は原稿提出前に必ず英文校閲を受ける。

## 12. 図・表・写真

1) 図・写真はなるべく高解像度の Jpeg、表は Excel ®形式とする。表については、表題は表の上部に、説明・注釈は表の下部に記載し、図・写真については、表題及び説明・注釈は本文末にまとめて記載する(印刷では図・写真の下部に記載される)。和文原稿の場合は、表題、説明・注釈及び図表は和文、英文または和英併記とする。また、本文中では「Fig.」「Table」「Photo」を使用。

2) 印刷時の図・写真の大きさは、段組幅(82 mm)か頁幅(170 mm)のどちらかを明示する。なお、図・表・写真の挿入箇所を本文に朱書きで明示する。

3) 原則として、表には縦の罫線を用いない。

## 13. 補足電子資料 (Supplementary data)

紙面の都合上掲載できない図表は、補足電子資料として引用文献の後に付記することができ、本文中にも引用できる。印刷版には引用文献の後に図表の表題と公開 URL を、電子版には全てを公開する(例; Fig.\_S1, Table\_ S1)。

補足電子資料の掲載は、論文、短報、ノート、総説、研究資料の全てが対象となる。

## 14. 付録 (Appendix)

本文の内容に補足して掲載したい図表を、付録として誌面の引用文献の後に掲載することができ、本文中にも引用できる(例; Appendix\_Fig.1, Appendix\_Table\_1)

また付録の掲載対象は、論文、総説、研究資料とする。

(2017 年 12 月 20 日)



担当者 御中  
To the person concerned

国立研究開発法人 森林研究・整備機構 森林総合研究所  
Forestry and Forest Products Research Institute

森林総合研究所研究報告を送付させていただきますのでお受け取り下さい。  
貴刊行物と交換願えれば幸いです。なお、貴研究所の名称、住所などを変更  
された場合は、下記まで連絡を御願ひ致します。

Please find an enclosed Bulletin of the Forestry and Forest Products Research Institute.  
We greatly appreciate receiving any relevant publications in exchange.  
Let us know when the name of your institution and mailing address are changed.

Officer in charge at publication section  
Forestry and Forest Products Research Institute  
1 Matsunosato, Tsukuba, Ibaraki, 305-8687 Japan  
Tel : + 81-29-829-8373 Fax : + 81-29-873-0844  
e-mail : kanko@ffpri.affrc.go.jp

---

2018年3月 発行 森林総合研究所研究報告 第17巻1号 (通巻445号)

編 集 人 森林総合研究所研究報告編集委員会

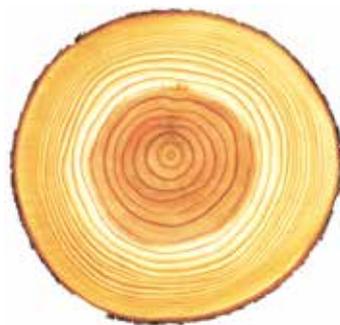
発 行 人 国立研究開発法人 森林研究・整備機構 森林総合研究所  
〒305-8687 茨城県つくば市松の里1番地  
電話 : 029-829-8373 Fax : 029-873-0844

製 版・印 刷 前田印刷株式会社  
〒305-0836 茨城県つくば市山中152-4  
電話 : 029-875-6696 Fax : 029-875-6698

©2018 Forestry and Forest Products Research Institute

---

本誌から転載・複写する場合は、森林総合研究所の許可を得てください。



## page1

我が国の製材規格と許容応力度の変遷  
:井道 裕史

History of sawn lumber standards and allowable stresses in Japan  
by Hirofumi IDO

## page35

低樹齢ヤナギ属樹木の樹皮タンニンの化学特性及び効率的抽出法 (英文)  
:牧野 礼、橋田 光

Chemical characterization and efficient extraction of condensed tannin  
from the bark of juvenile *Salix* species  
by Rei MAKINO and Koh HASHIDA

## page43

指数平滑法とARIMA法予測の精度評価—スギとヒノキ丸太月次価格の予測を例に  
:道中 哲也、岡 裕泰、久保山 裕史、山本 伸幸

Measuring forecasting accuracy for exponential smoothing and ARIMA models  
: a case of forecasting monthly prices of Japanese *sugi* and *hinoki* logs  
by Tetsuya MICHINAKA, Hiroyasu OKA, Hirofumi KUBOYAMA and Nobuyuki YAMAMOTO

## page63

常陸太田試験地内の源頭部小流域における間伐が樹冠遮断量、蒸発散量および  
流出量に与える影響 (英文)

:久保田 多余子、坪山 良夫、延廣 竜彦

Effects of thinning on canopy interception loss, evapotranspiration, and runoff in a small  
headwater *Chamaecyparis obtusa* catchment in Hitachi Ohta Experimental Watershed in Japan  
by Tayoko KUBOTA, Yoshio TSUBOYAMA and Tatsuhiko NOBUHIRO

## page75

スギ、ヒノキコンテナ苗育苗培地への木質バイオマス燃焼灰混合が  
苗木の成長と養分状態におよぼす影響

:長倉 淳子、小笠 真由美、山田 毅、平井 敬三

Effect of woody ash mixing to growing media on the growth and nutrient condition of  
containerized Sugi (*Cryptomeria japonica*) and Hinoki (*Chamaecyparis obtusa*) seedlings  
by Junko NAGAKURA, Mayumi Y. OGASA, Tsuyoshi YAMADA and Keizo HIRAI

## page85

東大雪天然林における風倒後60年間の林分動態

:石橋 聡、古家 直行、佐々木 尚三、高橋 正義

Sixty-year stand dynamics of a forest stand damaged by Typhoon Toyamaru  
in Higashitaisetsu natural forest, central Hokkaido, Japan  
by Satoshi ISHIBASHI, Naoyuki FURUYA, Shozo SASAKI and Masayoshi TAKAHASHI

## page91

北海道空知地方における人工林での保持林業

:針葉樹人工林の主伐時に広葉樹を残す大規模野外操作実験 (英文)

:山浦 悠一、明石 信廣、雲野 明、対馬 俊之、長坂 晶子、長坂 有、尾崎 研一

Retention Experiment for Plantation Forestry in Sorachi, Hokkaido (REFRESH)  
: A large-scale experiment for retaining broad-leaved trees in conifer plantations  
by Yuichi YAMAURA, Nobuhiro AKASHI, Akira UNNO, Toshiyuki TSUSIMA,  
Akiko NAGASAKA, Yu NAGASAKA and Kenichi OZAKI

## page111

2017年7月九州北部豪雨における斜面崩壊と雨量分布の関係について

:村上 亘、安田 幸生

Relationship between landslides and rainfall distribution in the torrential rain  
in northern Kyushu in 2017  
by Wataru MURAKAMI and Yukio YASUDA