

PRINT ISSN 0916-4405
ONLINE ISSN 2189-9363

森林総合研究所研究報告

Vol.16 No.4 (No.444)

BULLETIN

of the
Forestry and
Forest Products
Research Institute



December 2017



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

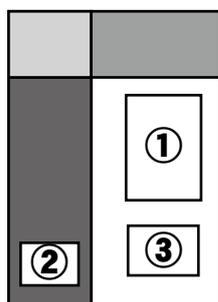
片岡 厚 Yutaka KATAOKA (Public Relations Division, FFPRI)

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 トラス梁とラチス壁を使用した木造庁舎 (岩手県住田町)
Wooden town hall constructed with truss beams and lattice walls (Sumita Town, Iwate Prefecture)
- ② アラスカ内陸部のクロトウヒ林火災跡地に生育するウマスギゴケ
Polytrichum commune in a black spruce stand in interior Alaska after wildfire
- ③ (本文213~224ページ)
層構成とラミナの等級の違いがスギCLTの面内方向の曲げヤング係数と曲げ強さに及ぼす影響
Effects of layup and grade of lumber on bending Young's modulus and bending strength of sugi (*Cryptomeria japonica*) cross laminated timber under in-plane loading

目次

論文

層構成とラミナの等級の違いがスギ CLT の面内方向の曲げヤング係数と曲げ強さに及ぼす影響

平松 靖、宮武 敦、玉置 教司、新藤 健太、井道 裕史、
長尾 博文、原田 真樹、小木曾 純子 ……………213

強度間伐が行われたスギ高齢人工林における林分および個体の成長

杉田 久志、梶本 卓也、福島 成樹、
高橋 利彦、吉田 茂二郎 ……………225

都市林におけるガバナンスの評価に関する検討：野幌国有林を事例として

八巻 一成 ……………239

短報

海岸防災林再生事業で造成された盛土の深耕による硬度と透水性の変化

篠宮 佳樹、今矢 明宏、坂本 知己 ……………249

スギ人工林においてマレーズトラップで捕獲された社会性カリバチ類(英文)

牧野 俊一、滝 久智、槇原 寛 ……………257

ノート

雄性不稔遺伝子をヘテロ保有するスギ個体の簡易な探索方法

—自殖家系における雄性不稔個体の分離を利用した試行—

河合 慶恵、久保田 正裕、遠藤 圭太、磯田 圭哉 ……………265

CONTENTS

Original article

- Effects of layup and grade of lumber on bending Young's modulus and bending strength of sugi (*Cryptomeria japonica*) cross laminated timber under in-plane loading
Yasushi HIRAMATSU, Atsushi MIYATAKE, Takashi TAMAKI,
Kenta SHINDO, Hirofumi IDO, Hirofumi NAGAO,
Masaki HARADA and Junko OGISO213

- Stand and individual growth in an old *Cryptomeria japonica* plantation after intensive thinning
Hisashi SUGITA, Takuya KAJIMOTO, Shigeki FUKUSHIMA,
Toshihiko TAKAHASHI and Shigejiro YOSHIDA225

- A study on assessing the governance of urban forests: A case study of nopporo national forest
Kazushige YAMAKI239

Short communication

- The variation of hardness and permeability by deep tillage on embankment in the coastal forest restoration project
Yoshiki SHINOMIYA, Akihiro IMAYA
and Tomoki SAKAMOTO249

- Social wasps collected with Malaise traps in Japanese cedar (*Cryptomeria japonica*) plantations (Hymenoptera, Vespidae)
Shun'ichi MAKINO, Hisatomo TAKI
and Hiroshi MAKIHARA257

Note

- Trial of efficient method for screening *Cryptomeria japonica* trees heterozygous for male-sterile gene by segregation of male-sterile seedlings derived from self-pollinated progeny.
Yoshie KAWAI, Masahiro KUBOTA, Keita ENDOH
and Keiya ISODA265

論文 (Original article)

層構成とラミナの等級の違いがスギ CLT の面内方向の
曲げヤング係数と曲げ強さに及ぼす影響平松 靖^{1)*}、宮武 敦¹⁾、玉置 教司²⁾、新藤 健太¹⁾、
井道 裕史³⁾、長尾 博文³⁾、原田 真樹³⁾、小木曾 純子⁴⁾

要旨

スギを用いたクロス・ラミネイティド・ティンバー (CLT) について、ラミナ構成、ラミナの強度等級、外層のラミナの方向が、ラミナの積層接着面に平行方向 (面内方向) の曲げヤング係数、曲げ強さに及ぼす影響を明らかにするために、強度等級を Mx60、層構成を 3 層 3 プライ、3 層 4 プライ、5 層 5 プライ、5 層 7 プライ、7 層 7 プライの 5 構成、外層のラミナの方向を長辺方向に対して平行方向 (強軸方向)、直交方向 (弱軸方向) の 2 方向とした 10 シリーズの試験体を、幅 105 mm × 厚さ 30 mm のラミナ (ラミナ同士の幅はぎはしていない) を用いて作製し、縦振動法及び曲げたわみ振動法 (T. G. H. 法) を用いて動的なヤング係数の測定をした後、面内方向の曲げ試験に供した。その結果、以下のことが明らかになった。(1) CLT の面内方向の曲げヤング係数、曲げ強さは、層構成、ラミナの等級、全プライ数に対する強軸方向のプライ数の割合に影響をうける、(2) ラミナの曲げヤング係数、曲げ強さから CLT の面内方向の曲げヤング係数、曲げ強さをおおよそ推定可能である、(3) CLT の面内方向の静的な曲げヤング係数は、動的な測定方法により推定することが可能である、(4) CLT の見かけの曲げヤング係数と曲げ強さの相関は高い、(5) 破壊形態は強軸方向のプライの引張り側にあるフィンガージョイントを含むものが多く、試験体の上部まで破断するものが多かった。

キーワード：直交集成板、スギ、面内、曲げ、層構成、強度等級

1. はじめに

クロス・ラミネイティド・ティンバー (CLT) は 1996 年にドイツとオーストリアで開発され、以来、欧州では建築構造部材として中層集合住宅や学校、高齢者用住宅、商業用建築物に広く普及している (武川 2010)。欧州では 2005 年に CUAP (Common Understanding of Assessment Procedure, European Technical Assessments (ETA) 2005) が、2015 年に欧州規格 (European committee for standardization 2015) が制定された。北米では 2011 年に ANSI/APA 規格 (APA - The Engineered Wood Association 2011) が制定され、さらに CLT の構造設計、耐火設計、振動特性、音伝達、建物外皮、環境性能を網羅した CLT Handbook (FPInnovations 2011) が出版される等、CLT の普及に向けた制度が整えられてきた。

日本国内では、1990 年から 1993 年に実施された農林水産技術会議の特別研究において、大断面部材の開発を目的として、厚さ 20 mm、33 mm のひき板を幅方向にならべ、それらを直交方向に 3 層、あるいは 5 層積層接着させ

た材料 (直交積層板) について、寸法安定性の評価、FRP を用いた接合について検討された (藤井・宮武 1995)。また、スギ中径木を利用した意匠性も有した仕上げ材料となり得て、耐力壁、剛床を構成する部材となる構造用面材の開発を目的として、厚さ 12 mm 程度のひき板を幅はぎし、幅はぎ板を直交方向に 3 枚積層接着したスギ 3 層クロスパネル及びその製造機械の開発が行われ (社団法人全国木工機械工業会 1998, 1999, 2000)、優良木質建材認証 (AQ 認証) において「床用 3 層パネルの品質性能試験の試験項目、試験方法及び判定基準」(財団法人日本住宅・木材技術センター 1999) が定められたほか、壁倍率の大臣認定 (建設省静住指発第 6 号 2000) を取得した企業もある。曲げ強度性能、耐力壁や床利用のための研究、寸法安定性、温度特性に関する研究 (池田ら 2000, 朴ら 2001, 2002, 2005, 内迫ら 2002, 川上ら 2005a, b, 2007) も進められ、スギだけでなく、内層にスギ、外層にヒノキやアカマツを使用した 3 層クロスパネルの曲げ強度特性についても検討がなされている (後藤ら 2014)。

日本国内において欧州のように建物の主要構造部に

原稿受付：平成 28 年 11 月 2 日 原稿受理：平成 29 年 7 月 19 日

1) 森林総合研究所 複合材料研究領域

2) 愛媛県農林水産研究所 林業技術センター

3) 森林総合研究所 構造利用研究領域

4) 林野庁林政部 木材利用課

* 森林総合研究所 複合材料研究領域 〒305-8687 茨城県つくば市松の里 1

CLT を利用することについては、“木の家づくりから林業再生を考える委員会”（国土交通省住宅局）第4回（2010年6月30日）においてCLTが紹介されたのを一つの契機とし、それ以降、産学官が連携した材料規格や構造設計法などの整備に向けた取り組みが急ピッチで進められ（宮武2013）、接着性能の評価（例えば、森林総合研究所2014）、材料強度データの整備（例えば、森林総合研究所ほか2015）、接合部性能の検証（例えば、木構造振興株式会社2012）等がプロジェクトや事業で実施された。2013年にCLTを対象とする直交集成板の日本農林規格（農林水産省2013）が制定され、ラミナの強度等級区分、直交集成板の層構成、強度等級等に関する基準が示され、2016年にCLT材料の品質（国土交通省2016a）及び強度（国土交通省2016b）、CLTを用いた建築物の一般設計法（国土交通省2016c）に関して建築基準法に基づく告示が公布・施行された。

CLTはひき板（ラミナ）をその繊維方向を直交させ積層接着した材料であるため、荷重を受ける方向、ラミナの向き、ラミナの強度等級、層構成によってその強度特性は異なると考えられる。CLTを壁などの鉛直構面に使用して開口部を設けた場合、CLTは、はりやまぐさとして使用される。そのため、ラミナの積層接着面に平行方向（面内方向）の荷重に対するCLTの強度特性を明らかにする必要がある。Flaig and Blass（2014）は厚さの異なるノルウェースプルース（*Picea abies*）ラミナで構成されたCLTの面内方向の曲げ強度に関して、長さ方向のラミナの強度に対する直交層の補強効果、強軸方向の層数やせいの方向のラミナの枚数の影響、シミュレーションによる検討を行った。平松ら（2013）は全層にスギ（*Cryptomeria japonica*）を用いた5層5プライ、7層7プライの同一等級構成、異等級構成CLTの面内方向の曲げ試験（面内曲げ試験）を行い、CLT試験体の長さ方向に配置されたラミナが主としてCLTの強度性能に寄与し、それらのラミナの強度性能と層数から、CLTの面内曲げ強度特性をおおむね推定できるとしている。しかしながら、ラミナの等級区分やラミナの等級構成は直交集成板の日本農林規格に従ったものではなかった。また、平松ら（2014）は全層にスギ、及び外層にヒノキ（*Chamaecyparis obtusa*）、内層にスギを用いた5層5プライのCLTを直交集成板の日本農林規格に基づいて作製し、CLT試験体の長さ方向に配置されたラミナが主としてCLTの強度性能に寄与すること、外層の強軸方向に強度性能の高いラミナを配置することにより、CLTの面内及び面外方向の強度性能を向上させられること、ラミナの強度性能からCLTの面内曲げ強度性能をおおむね推定できるが、弱軸方向の強度性能についてはさらに検討が必要であることを明らかにした。

このように国産材を用いたCLTの面内方向の曲げ強度特性に関しては、5層5プライ、7層7プライの2種

類の構成についてしか検討されておらず、特に直交集成板の日本農林規格に従ったものは5層5プライしか検討されていない。そこで本研究では、ラミナ構成、ラミナの強度等級、外層のラミナの方向が面内方向の曲げヤング係数及び曲げ強さに及ぼす影響を検討することを目的として、直交集成板の日本農林規格に従って、3層3プライ、3層4プライ、5層5プライ、5層7プライ、7層7プライの5種類のラミナ構成のスギCLTを作製し、面内方向の曲げ試験（面内曲げ試験）を実施した。

2. 試験体及び試験方法

2.1 試験体の作製

連続式グレーディングマシンを用いてスギラミナの曲げヤング係数の長さ方向の平均値を測定し、測定された曲げヤング係数（ E_{gm} ）が6.0～9.0 kN/mm²のラミナを直交集成板の日本農林規格における強度等級M60A、2.5～6.0 kN/mm²のラミナをM30Aとして区分した。強度等級区分したラミナを垂直型フィンガージョイント（フィンガー長さ15.0 mm）によってたて継ぎした後、幅105 mm×厚さ30 mmに仕上げた。たて継ぎ用の接着剤には、水性高分子ーイソシアネート系樹脂接着剤（株式会社オーシカ製 主剤MK200、硬化剤H-30）を用いた。

たて継ぎしたスギラミナを用いて、Fig. 1に示すCLTパネルを作製した。強度等級は外層にM60Aのラミナ、内層にM30Aのラミナを用いた直交集成板の日本農林規格におけるMx60とし、層構成は、3層3プライ（パネル寸法：厚さ90 mm×短辺1995 mm×長辺6030 mm）、3層4プライ（パネル寸法：厚さ120 mm×短辺2110 mm×長辺6030 mm）、5層5プライ（パネル寸法：厚さ150 mm×短辺2310 mm×長辺6030 mm）、5層7プライ（パネル寸法：厚さ210 mm×短辺2625 mm×長辺6030 mm）、7層7プライ（パネル寸法：厚さ210 mm×短辺2625 mm×長辺6030 mm）の5構成とし、外層のラミナの方向を長辺方向に対して平行（強軸方向）、長辺方向に対して直交方向（弱軸方向）の2方向とした計10シリーズのCLTパネルをそれぞれ3枚、銘建工業株式会社にて作製した。CLTパネルの積層接着時の圧縮圧力は、3層3プライ及び3層4プライについては0.6 N/mm²、その他の構成については0.8 N/mm²とし、圧縮時間は層構成によらず40分とした。ラミナの積層接着には水性高分子ーイソシアネート系樹脂接着剤（アイカ工業株式会社製 主剤AUX160、硬化剤AUH16）を用いた。なお、ラミナの幅方向の接着（幅はぎ）は行わなかった。

各CLTパネルから、積層方向の厚さはパネル寸法のまま、短辺方向（試験体の高さ）300 mm、長辺方向（試験体の長さ）6030 mmの試験体を2体切り出し、各シリーズについて計6体の試験体を準備した。各シリー

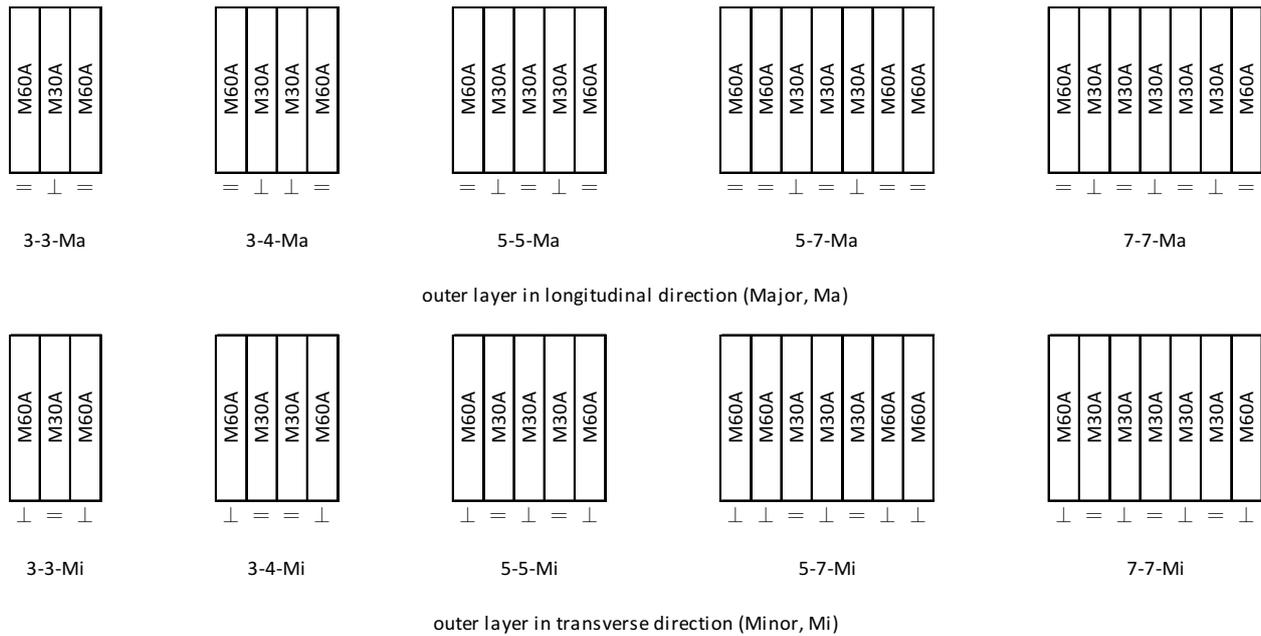


Fig. 1. CLT パネルの層構成

Layups of the CLT panels

Abbreviations for the type of CLT, refer to Table 1

= : layer in longitudinal direction

⊥ : layer in transverse direction

Table 1. CLT試験体の寸法
Dimensions of CLT specimens

Abbreviated name	Layup	Direction of outer layers	Thickness (mm)	Beam Depth (mm)	Length (mm)
3-3-Ma	3-layer 3-ply	Major	90	300	6030
3-3-Mi		Minor			
3-4-Ma	3-layer 4-ply	Major	120	300	6030
3-4-Mi		Minor			
5-5-Ma	5-layer 5-ply	Major	150	300	6030
5-5-Mi		Minor			
5-7-Ma	5-layer 7-ply	Major	210	300	6030
5-7-Mi		Minor			
7-7-Ma	7-layer 7-ply	Major	210	300	6030
7-7-Mi		Minor			

“Major” corresponds to the general direction of the grain, wherein the outer layer is in longitudinal direction of the CLT.

“Minor” corresponds to the general direction of the grain, wherein the outer layer is in transverse direction of the CLT.

ズの試験体の寸法を Table 1 に示す。なお、各試験体の高さ方向の端部の切り出し位置はラミナの幅方向のほぼ中央とした。

2.2 非破壊試験

縦振動法（財団法人日本住宅・木材技術センター 2011）により試験体の縦方向ヤング係数 (E_{tr}) を、Timoshenko のたわみ理論に基づく Goens-Hearmon 回帰法による曲げたわみ振動法（T. G. H. 法）（財団法人日本住宅・木材技術センター 2011）により、試験体のラミナの積層面に平行方向（面内方向）の曲げヤング

係数 (E_{t-h}) とせん断弾性係数 (G_{t-h})、及び積層面に直交方向（面外方向）の曲げヤング係数 (E_{t-v}) とせん断弾性係数 (G_{t-v}) を求めた。両測定法において、共振周波数は高速フーリエ変換 (FFT) コンパレータ（株式会社小野測器製 CF-4500）を用いて求め、縦振動法については 1 次の共振周波数を、T. G. H. 法については 1 ~ 9 次の共振周波数のうち、明確に判別できた周波数を用いて各ヤング係数、弾性係数を求めた。ただし、3 層 3 プライ及び 3 層 4 プライの弱軸方向の試験体については、T. G. H. 法による測定において、面外方向での共振周波数の判別が困難であったため、 E_{t-v} と G_{t-v} は算出しなかった。

2.3 面内曲げ試験

面内曲げ試験の概略を Fig. 2 に、試験の様子の一例を Fig. 3 に示す。試験は、最大容量が 200 kN の実大強度試験機（株式会社東京衡機製造所製）を用いて、3 等分点 4 点荷重方式で実施した。全スパンは試験体の高さ 300 mm の 18 倍の 5400 mm とし、荷重点間距離は 1800 mm とした。試験機の荷重点幅は 150 mm、支点の幅は 180 mm であった。全スパン中央部のたわみは、試験体の長さ及び高さの中央に L アンクルをビス留めし、試験体の両側面ですれぞれ変位計（株式会社東京測器研究所製 SDP-200D あるいは CDP-100）の測定子を L アンクルに上部から接触させて測定した。見かけの曲げヤング係数 (E_{a-h}) は、最大荷重の 10 ~

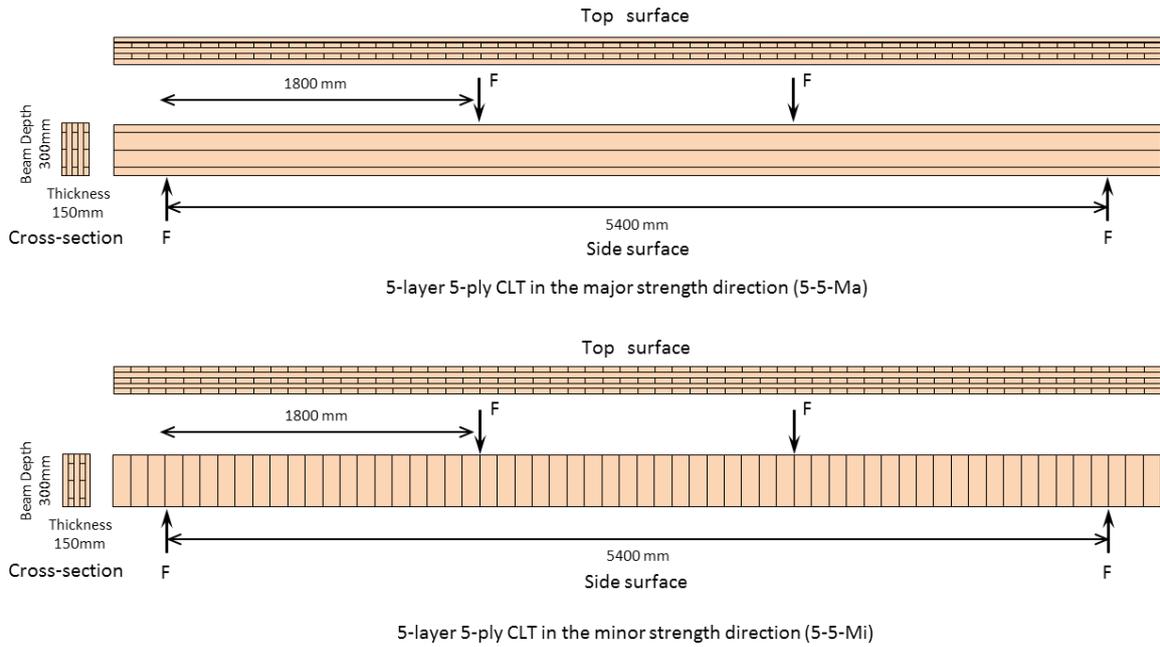
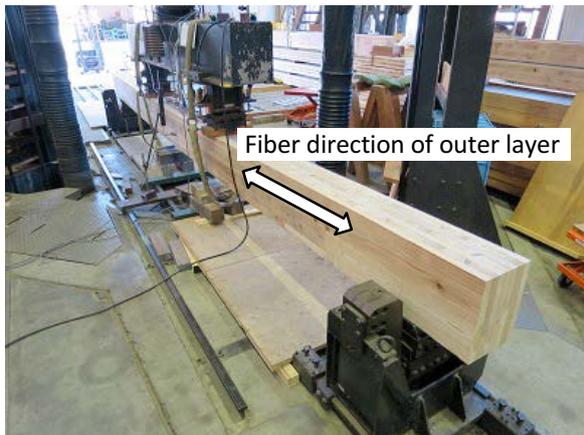
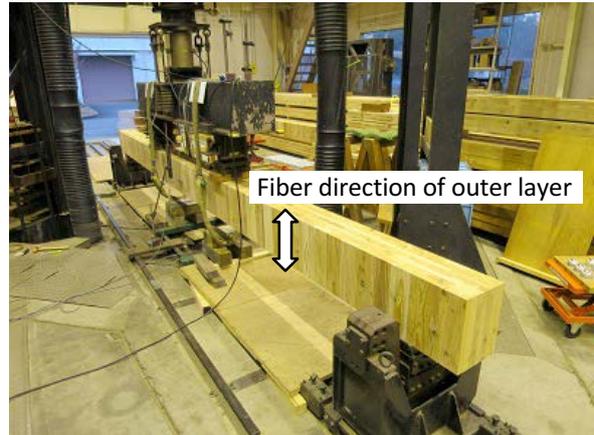


Fig. 2. CLT 試験体の面内曲げ試験（5層5プライの例）
In-plane bending test of the CLT specimens (Examples of 5-layer 5-ply CLT specimens)
 Abbreviations for the type of CLT, refer to Table 1



7-layer 7-ply CLT in the major strength direction (7-7-Ma)



5-layer 7-ply CLT in the minor strength direction (5-7-Mi)

Fig. 3. CLT 試験体の面内曲げ試験の様子
Examples of in-plane bending test of the CLT specimens
 Abbreviations for the type of CLT, refer to Table 1

40%の範囲における荷重と全スパン中央部のたわみとの関係から求め、最大荷重から曲げ強さ (σ_{b-h}) を算出した。また、試験体の荷重点間上部中央にスパン 1000 mm のはかま型治具を設置して、その中央の相対変位を変位計（株式会社東京測器研究所製 CDP-10）で測定し、最大荷重の 10 ~ 40% の範囲における荷重と相対変位との関係から真の曲げヤング係数 (E_{true-h}) を求めた。なお、試験時の荷重、たわみ、相対変位は静ひずみ測定器（株式会社東京測器研究所製 TDS-303）

を用いて 1 秒間隔で収録した。試験後、破壊部の近傍から長さ方向に約 30mm の材を切り出し、全乾法で含水率を求めた。なお、非破壊試験、面内曲げ試験による各係数を求める際には試験体の全断面積を用いた。

2.4 CLT の面内方向の見かけの曲げヤング係数、曲げ強さの推定

CLT パネルの製造に使用したラミナと同じロットの垂直型フィンガージョイントラミナの平使い (FW) 方

向の曲げ試験の結果、M60A ラミナの見かけの曲げヤング係数、曲げ強さはそれぞれ 7.09 kN/mm²、38.4 N/mm²、M30A ラミナの見かけの曲げヤング係数、曲げ強さはそれぞれ 5.58 kN/mm²、31.1 N/mm²であった(森林総合研究所ほか 2015)。これらの値を用いて、既報(平松ら 2013, 2014)と同じ式(式 1、式 2)により、CLT の見かけの曲げヤング係数と曲げ強さを推定した。その際、フィンガージョイントラミナの FW 方向に対する縦使い(EW)方向の見かけの曲げヤング係数及び曲げ強さの比(K_{e-edge} 、 K_{s-edge})は、幅 140mm×厚さ 38 mm(206材)のスギフィンガージョイント材の FW 方向、EW 方向の曲げ試験結果(全国木材協同組合連合会 2011)を参考にして、それぞれ 0.95、0.80 とした。求めた推定値と実験値を比較した。

$$\begin{aligned} (\text{CLT 試験体の見かけの曲げヤング係数}) = & (\text{CLT 試験体の強軸方向の各等級のラミナの FW 方向の見かけの曲げヤング係数の平均値}) \times (\text{強軸方向の各等級のラミナの全断面積に占める割合}) \times K_{e-edge} \end{aligned} \quad (\text{式 1})$$

$$\begin{aligned} (\text{CLT 試験体の曲げ強さ}) = & (\text{CLT 試験体の強軸方向の各等級のラミナの FW 方向の曲げ強さの平均値}) \times (\text{強軸方向の各等級のラミナの全断面積に占める割合}) \times K_{s-edge} \end{aligned} \quad (\text{式 2})$$

ここで、 $K_{e-edge}=0.95$ 、 $K_{s-edge}=0.80$ である。

3. 結果と考察

3.1 非破壊試験結果

試験体の密度及び非破壊試験の結果を Table 2 に示す。強軸方向の試験体においては、密度、縦振動法によるヤング係数(E_{fr})、T. G. H. 法による面内方向の曲げヤング係数(E_{t-h})、面外方向の曲げヤング係数(E_{t-v})、面内方向のせん断弾性係数(G_{t-h})、面外方向のせん断弾性係数(G_{t-v})は、3層3プライ構成の G_{t-v} を除いて、すべての項目の値のばらつきは小さかった。それぞれの層構成の CLT において、 E_{fr} と E_{t-h} はほぼ同じ値であった。一方、 E_{t-v} は E_{t-h} よりも高い値となった。外層のラミナの強度等級が高く、変形が生じにくいことが影響していると考えられる。 G_{t-h} は G_{t-v} よりも高く、層構成による差はあまり見られなかった。同様に G_{t-v} も層構成による差はあまり見られなかった。

弱軸方向の試験体においては、密度、 E_{fr} 、 E_{t-h} 、 E_{t-v} 、 G_{t-h} 、 G_{t-v} は5層5プライ構成の G_{t-h} 、5層7プライ構成の G_{t-v} をのぞいて、すべての項目の値のばらつきは小さかった。それぞれの層構成の CLT において、強軸方向の試験体と同様に E_{fr} と E_{t-h} はほぼ同じ値であった。 E_{t-v} は E_{t-h} より低い値となった。外層ラミナが長さ方向に対して直交して配置されており、変形しやすかったためと思われる。 G_{t-h} は強軸方向の試験体に比べて、各層構成の CLT 間での差が大きく、特に5層7プライ構成の G_{t-h} は他に比べて低い値となった。 G_{t-v} は強軸方向の試験体と同程度であった。

Table 2. CLT試験体の非破壊試験および面内曲げ試験結果の平均値
Average of non-destructive tests and in-plane bending tests for CLT specimens

Type of CLT	ρ (kg/m ³)	Non-destructive Test						Bending Test			MC (%)
		E_{fr} (kN/mm ²)	In-plane			Out-of-plane		In-plane			
		E_{t-h} (kN/mm ²)	G_{t-h} (kN/mm ²)	E_{t-v} (kN/mm ²)	G_{t-v} (kN/mm ²)	E_{a-h} (kN/mm ²)	E_{true-h} (kN/mm ²)	σ_{b-h} (N/mm ²)			
3-3-Ma	417	5.92	5.71	0.828	7.90	0.275	5.34	5.69	23.0	12.0	
	(2.21)	(5.09)	(5.35)	(3.17)	(3.83)	(21.70)	(4.75)	(6.35)	(17.3)	(5.73)	
3-4-Ma	411	4.52	4.35	0.818	7.07	0.196	4.08	4.40	16.5	12.0	
	(1.39)	(4.22)	(3.53)	(5.33)	(5.35)	(9.93)	(4.20)	(4.57)	(3.61)	(2.80)	
5-5-Ma	413	4.67	4.65	0.863	6.58	0.250	4.27	4.52	19.8	11.8	
	(1.98)	(4.66)	(2.61)	(3.91)	(6.69)	(3.58)	(3.02)	(3.30)	(11.8)	(6.82)	
5-7-Ma	414	5.74	5.60	0.838	7.13	0.305	5.23	5.58	21.4	11.8	
	(2.19)	(1.67)	(1.94)	(3.22)	(3.60)	(3.91)	(2.33)	(1.15)	(6.37)	(2.79)	
7-7-Ma	407	4.33	4.17	0.837	5.63	0.263	3.82	3.95	16.1	11.0	
	(1.01)	(3.92)	(3.22)	(2.58)	(4.60)	(2.35)	(4.15)	(4.91)	(9.11)	(2.67)	
3-3-Mi	416	2.46	2.42	0.732	-	-	2.22	2.32	10.8	12.0	
	(1.07)	(6.54)	(4.83)	(6.05)	-	-	(5.19)	(7.94)	(14.6)	(4.89)	
3-4-Mi	412	3.39	3.22	0.968	-	-	3.01	3.16	13.6	11.3	
	(1.45)	(5.62)	(6.74)	(11.0)	-	-	(6.54)	(6.31)	(12.5)	(2.22)	
5-5-Mi	406	2.69	2.60	0.882	1.55	0.172	2.42	2.48	11.7	12.0	
	(1.41)	(4.53)	(6.58)	(16.80)	(4.38)	(7.00)	(5.69)	(6.19)	(7.31)	(2.11)	
5-5-Mi	412	2.14	2.15	0.562	0.720	0.250	1.85	1.94	8.60	11.5	
	(1.17)	(6.72)	(4.05)	(9.12)	(3.68)	(17.40)	(2.47)	(3.28)	(5.63)	(3.35)	
7-7-Mi	407	2.92	2.82	0.786	2.01	0.213	2.52	2.61	12.8	11.5	
	(0.75)	(4.58)	(5.19)	(3.20)	(5.65)	(11.70)	(6.86)	(7.77)	(9.69)	(4.06)	

Values in bracket shows the coefficient of variation, in %. Abbreviations for the type of CLT, refer to Table 1.

ρ density at the test, E_{fr} Young's modulus determined by using the longitudinal vibration method, E_{t-h} true in-plane bending Young's modulus determined by T. G. H. method, G_{t-h} in-plane shear modulus determined by T. G. H. method, E_{t-v} true out-of-plane bending Young's modulus determined by T. G. H. method, G_{t-v} out-of-plane shear modulus determined by T. G. H. method, E_{a-h} apparent bending Young's modulus determined by static in-plane bending test, E_{true-h} true Young's modulus determined by static in-plane bending test, σ_{b-h} in-plane bending strength, MC moisture content determined by using the oven-dry method

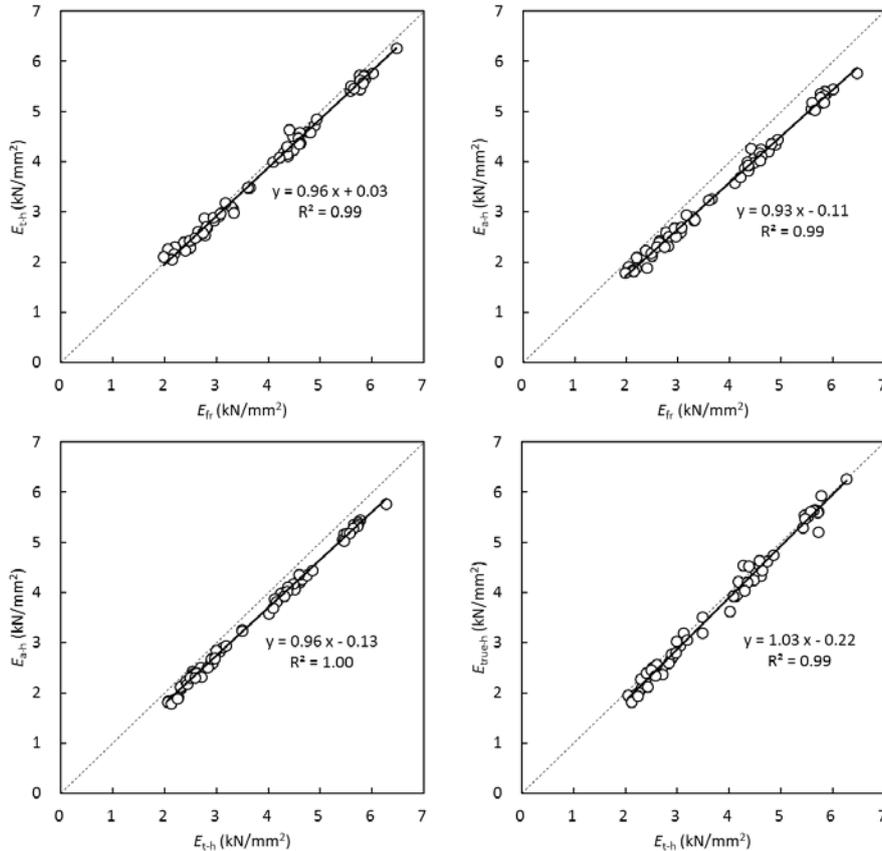


Fig. 4. 動的な方法で測定したヤング係数 (E_{fr} 、 E_{t-h}) と面内曲げ試験時に測定したヤング係数 (E_{a-h} 、 E_{true-h}) の関係 Relationships among Young's moduli measured by the dynamic method and the in-plane bending tests

E_{fr} Young's modulus determined by using the longitudinal vibration method, E_{t-h} true in-plane bending Young's modulus determined by T. G. H. method, E_{a-h} apparent bending Young's modulus determined by static in-plane bending test, E_{true-h} true Young's modulus determined by static in-plane bending test

3.2 面内曲げ試験結果

3.2.1 ヤング係数と曲げ強さの関係

面内曲げ試験の結果を Table 2 に示す。強軸方向、弱軸方向のいずれの試験体も層構成によらず、面内曲げ試験による E_{a-h} のばらつきは小さかった。 σ_{b-h} は 3 層 3 プライを除いて、各構成においてばらつきは小さかった。

各層構成の試験体について、非破壊試験で求めた E_{fr} 及び E_{t-h} と面内曲げ試験で求めた E_{a-h} 及び E_{true-h} との関係を Fig. 4 に示す。それぞれ相関が高く、CLT の面内方向の静的な曲げヤング係数は、動的な測定方法により推定できることがわかる。CLT 試験体の E_{a-h} 及び σ_{b-h} の関係を Fig. 5 に示す。これらの相関は高く、Fig. 4 の結果もあわせて考えると、動的あるいは静的な測定方法によって求めた CLT の面内方向のヤング係数から、CLT の面内方向の曲げ強さをおおよそ推定できると考えられる。

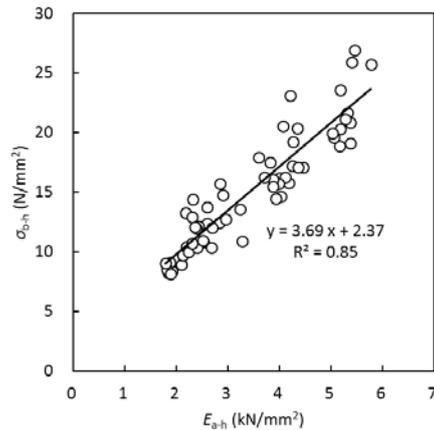


Fig. 5. CLT 試験体の見かけの曲げヤング係数 (E_{a-h}) と曲げ強さ (σ_{b-h}) の関係 Relationship between E_{a-h} and σ_{b-h} of CLT specimens
 E_{a-h} apparent bending Young's modulus determined by static in-plane bending test, σ_{b-h} in-plane bending strength

3.2.2 層構成の曲げヤング係数、曲げ強さへの影響

Ido ら (2016) が CLT の層構成と引張り強さの関係を検討した方法と同様の方法で、層構成と E_{a-h} 及び σ_{b-h} との関係について検討した。その結果を Fig. 6 に示す。強軸方向の試験体のほうが、弱軸方向試験体に比べて E_{a-h} 、 σ_{b-h} とも高く、また、全プライ数に対する強軸方向のプライ数の割合が高いほど、 E_{a-h} 、 σ_{b-h} は高い傾向にある。これらの結果から、強軸方向のラミナが CLT の面内方向の曲げヤング係数及び曲げ強さに寄与し、弱軸方向のラミナの寄与は強軸方向に比べてかなり小さいと考えられる。全プライ数に対する強軸方向のプライ数の割合がともに 0.50 である 3 層 4 プライの試験体を比較すると、 E_{a-h} も σ_{b-h} も強軸方向の試験体のほうが高い。これは強軸方向の試験体では外層を構成する M60A のラミナの曲げヤング係数及び曲げ強さの寄与が大きく、弱軸方向の試験体では外層の M60A のラミナの寄与はかなり小さく、内層の M30A が曲げ荷重を負担しているからであろう。これらの結果は、CLT の面内方向の曲げヤング係数及び曲げ強さが、全プライ数に対する強軸方向のプライ数の割合、及び強軸方向に配置されたラミナの強度等級の影響を受けることを示している。

3.2.3 荷重変形関係と破壊形態

各シリーズの試験体について、面内曲げ試験時の荷重と全スパン中央部のたわみの関係を Fig. 7 に示す。層構成、強軸方向、弱軸方向ごとの最大荷重時の全スパン中央部のたわみの平均値は 90 mm ~ 109 mm であった。各層構成内で比較すると、強軸方向では 3 層 3 プライ、5 層 5 プライ、5 層 7 プライで、最大荷重時の全スパン中央部のたわみが最大のものと最小のものとで約 30 mm の差が見られ、弱軸方向では 3 層 3 プライ、

3 層 4 プライ、7 層 7 プライで、最大荷重時の全スパン中央部のたわみが最大のものと最小のものとで 40 mm 以上の差が見られた。

CLT 試験体の破壊形態の例を Fig. 8 に示す。CLT 試験体の破壊は、強軸試験体では 30 体のうち 29 体が、弱軸試験体では 30 体のうち 25 体が試験体下部にあるフィンガージョイントを含む破壊であった。弱軸試験体では外層あるいは内層の弱軸方向のラミナのつなぎ目に沿って破壊する際に、内層の強軸方向のラミナがフィンガージョイントからはなれた本層で破壊した状態も見られた。そのほか材縁部の節の影響が考えられる破壊は 3 体 (5 層 5 プライ強軸試験体 2 体、7 層 7 プライ強軸試験体 1 体) であった。全試験体 60 体のうち 35 体は荷重点間で、18 体は荷重点下で、7 体はその両方で破壊が生じた。強軸試験体では全 30 体のうち 20 体で Fig. 8 のように上部まで破断が生じた。弱軸試験体ではすべての試験体で上部まで破断が生じた。

3.3 面内方向の見かけの曲げヤング係数、曲げ強さの推定

CLT の面内方向の見かけの曲げヤング係数及び曲げ強さの推定値と実験値の平均値との関係を Fig. 9 に示す。見かけの曲げヤング係数及び曲げ強さの推定値は実験値よりもやや低く、見かけの曲げヤング係数については強軸、弱軸方向それぞれ実験値の 0.87 倍、0.86 倍であり、曲げ強さについては強軸、弱軸方向それぞれ実験値の 0.93 倍、0.84 倍であった。これらの結果から、ラミナの見かけの曲げヤング係数及び曲げ強度から CLT の面内方向の見かけの曲げヤング係数及び曲げ強度をおおよそ推定できると考えられる。

本報告と同じ方法で 5 層 5 プライ、スギ異等級構成の CLT の面内方向の見かけの曲げヤング係数及び曲げ

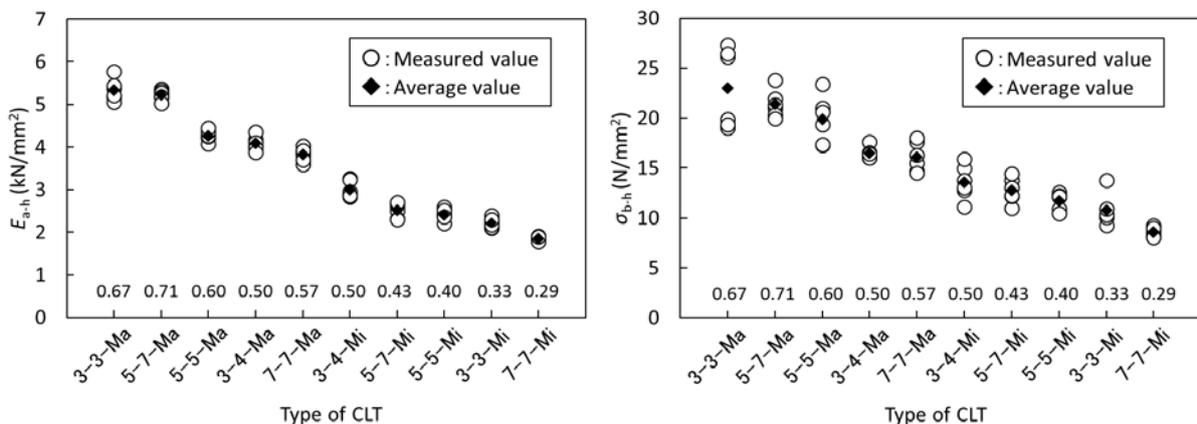


Fig. 6. CLT 試験体の層構成と見かけの曲げヤング係数 (E_{a-h}) および曲げ強さ (σ_{b-h}) の関係

Relationship between the layout of CLT and E_{a-h} and σ_{b-h}

The numerical values in the graph are ratios of the major strength direction in the crosssection. Abbreviations for the type of CLT, refer to Table 1.

E_{a-h} apparent bending Young's modulus determined by static in-plane bending test, σ_{b-h} in-plane bending strength

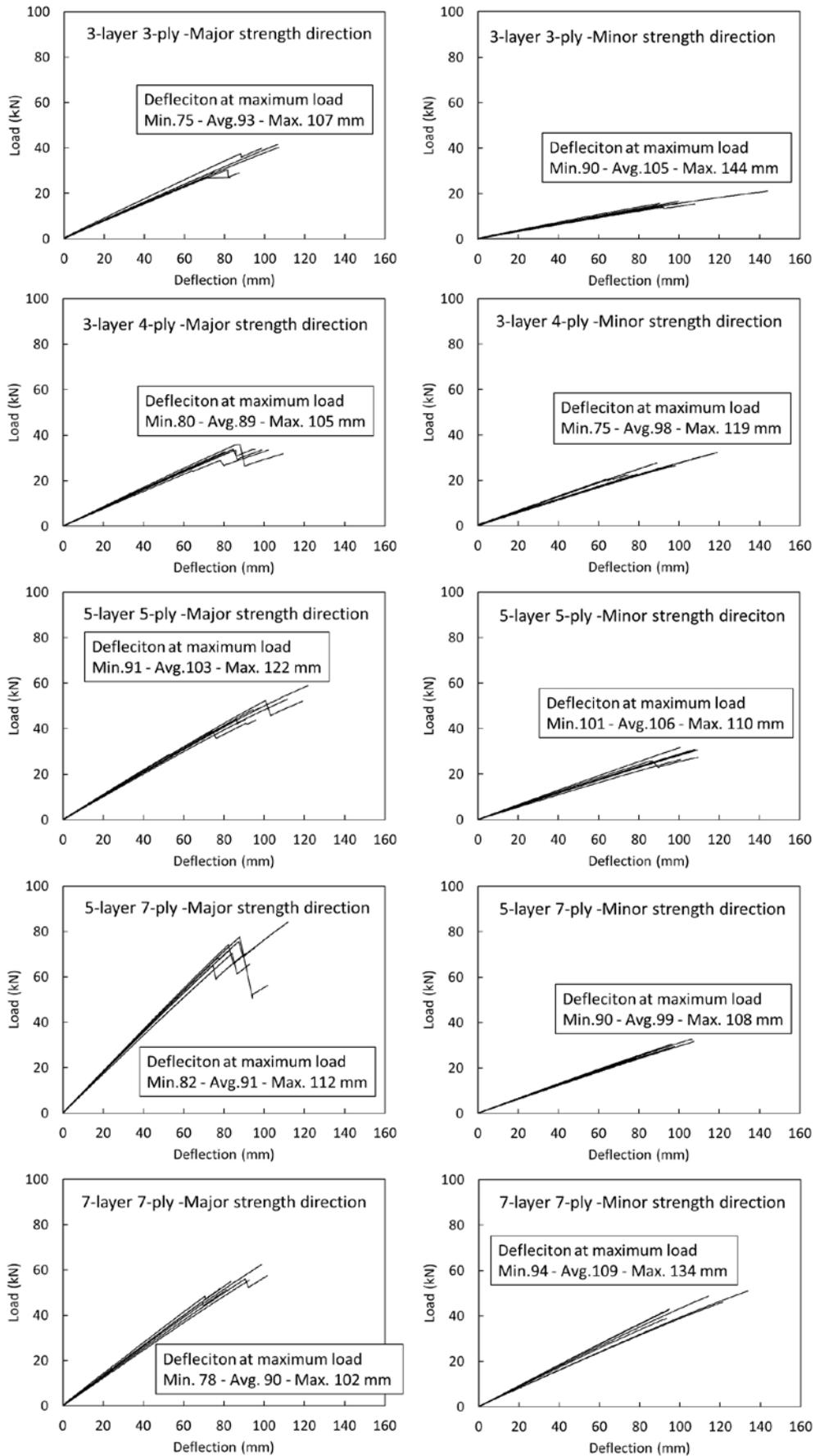


Fig. 7. 面内曲げ試験における CLT 試験体の荷重と全スパン中央部のたわみの関係
Relationships between load and deflection for each type of CLT specimens under in-plane loading



7-layer 7-ply CLT in the major strength direction
(7-7-Ma)



5-layer 7-ply CLT in the minor strength direction
(5-7-Mi)

Fig. 8. CLT 試験体の破壊の様子
Examples of failure of CLT specimens

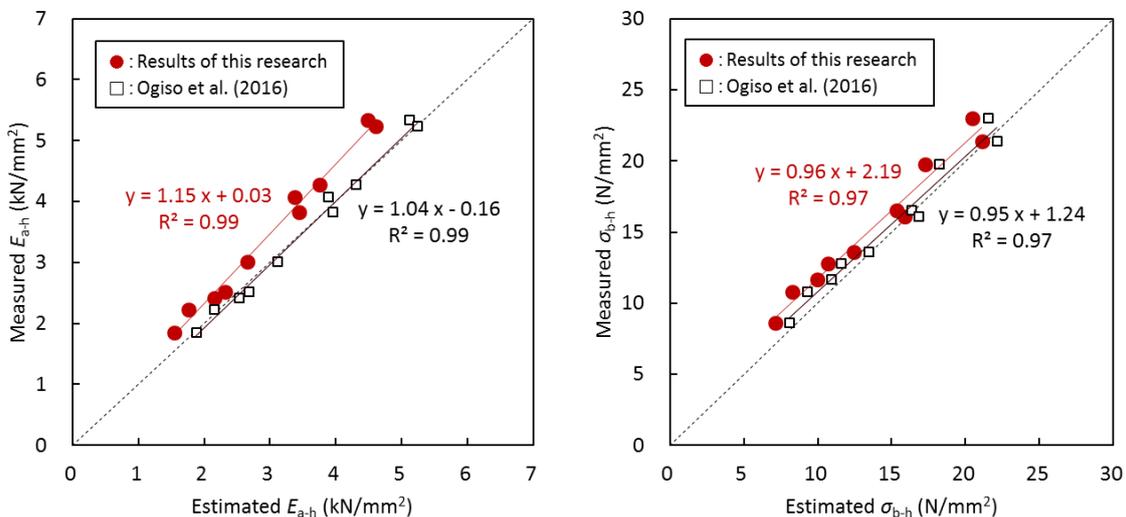


Fig. 9. CLT の面内曲げ試験における見かけのヤング係数 (E_{a-h}) および曲げ強さ (σ_{b-h}) の推定値と実測値の比較
Comparison between the estimated and measured E_{a-h} and σ_{b-h}

E_{a-h} apparent bending Young's modulus determined by static in-plane bending test, σ_{b-h} in-plane bending strength

強さについて推定を行った既報（平松ら 2014）の結果では、強軸方向については見かけの曲げヤング係数、曲げ強さはそれぞれ実験値の 0.97 倍と 0.99 倍、弱軸方向ではともに 0.71 倍であった。

小木曾ら（2016）は、本報告で CLT パネルに使用したラミナと異なるロットのスギフィンガージョイントラミナ（幅 105 mm × 厚さ 30 mm）について、FW 方向と EW 方向の曲げ試験を行い、FW 方向に対する EW 方向の見かけの曲げヤング係数、曲げ強さの比はそれぞれ 1.07、0.83 であるという結果を得た。さらに、これらの比と本報告で CLT パネルの作製に使用したラミナと同ロットのラミナの曲げ試験結果（森林総合研究所ほか 2015）を用いて、CLT の面内方向の見かけの曲げヤング係数及び曲げ強さを推定し、実験値と比較した。その結果を Fig. 9 に示す。見かけの曲げヤン

グ係数及び曲げ強さの推定値は実験値のそれぞれ 1.01 倍、0.96 倍であり、推定値と実験値がほぼ等しいという結果を得て、精度の高い推定が可能であることを示している。

本報告と小木曾ら（2016）の推定結果に差が生じた要因として、推定に用いたラミナの見かけの曲げヤング係数の EW 方向と FW 方向の比の影響が考えられる。また、弱軸方向のラミナの見かけの曲げヤング係数を強軸方向の 30 分の 1 とした小木曾ら（2016）の推定値と実験値がかなり近いこと、平松ら（2014）の弱軸方向の推定値が実験値の約 0.7 倍と低いことから、今後、弱軸方向のラミナの寄与について、より詳細に調べる必要がある。

本研究の結果から、幅 105 mm、厚さ 30 mm のスギラミナを使用し、幅はぎをしていない CLT の面内方向

の見かけの曲げヤング係数及び曲げ強さを、各等級のラミナの見かけの曲げヤング係数及び曲げ強さから、おおよそ推定できると考えられる。一方、CLTの強度特性への影響が考えられる因子は、樹種、ラミナの強度特性、ラミナの幅や厚さ及びそれらの比、ラミナ同士の幅はぎ(幅はぎプライ)、CLTの層・プライ構成等、多数あることから、本研究で用いた推定式が、本研究で試験したCLTとは異なるCLTについても適用可能であるかどうか、その適用範囲を検討し、適用範囲の広い推定方法を確立していくことが今後の課題であると考えられる。

4. おわりに

本研究では、ラミナ構成、ラミナの強度等級、外層のラミナの方向が、CLTの面内方向の曲げヤング係数および曲げ強さに及ぼす影響を明らかにするために、強度等級をMx60、層構成を3層3プライ、3層4プライ、5層5プライ、5層7プライ、7層7プライの5構成、外層のラミナの方向を強軸方向、弱軸方向としたスギCLT試験体を幅105 mm、厚さ30 mmのフィンガージョイントラミナを用いて作製し、面内方向の曲げ試験を行った。その結果、以下のことが明らかになった。(1) CLTの面内方向の曲げヤング係数及び曲げ強さは、層構成、ラミナの等級、全プライ数に対する強軸方向のプライ数の割合に影響をうける、(2) ラミナの見かけの曲げヤング係数及び曲げ強さからCLTの面内方向の見かけの曲げヤング係数及び曲げ強さをおおよそ推定することが可能である、(3) CLTの面内方向の静的な曲げヤング係数は動的な測定法により推定することが可能である、(4) CLTの面内方向の見かけの曲げヤング係数と曲げ強さの相関は高い、(5) 破壊形態は強軸方向のプライの引張り側にあるフィンガージョイントを含むものが多く、試験体の上部まで破断するものが多かった。

謝辞

本研究は平成25年度補正林野庁委託事業「CLT等新製品・新技術利用促進事業のうちCLT実用化促進(強度データの収集・分析)」により実施した。

引用文献

- APA – The Engineered Wood Association (2011) ANSI/APA PRG 320-2011: Standard for Performance-Rated Cross-Laminated Timber.
- European Technical Assessments (ETA) (2005) CUAP (Common Understanding of Assessment Procedure), ETA request No. 03.04/06, Version June 2005: Solid wood slab element to be used as a structural element in buildings.
- European committee for standardization (2015) EN 16351:2015 Timber structures. Cross laminated timber.

- Flaig, M. and Blass, H. J. (2014) Bending strength of cross laminated timber beams loaded in plane. Proceedings of WCTE 2014 (World Conference on Timber Engineering).
- FPIInnovations (2011) CLT Handbook. Chapter 1-12.
- 藤井 毅・宮武 敦 (1995) 2. 大断面材の集成加工技術及び耐久処理技術の開発. 農林水産技術会議事務局研究成果 296 木質系新素材による高強度・高耐久, 環境調和型架橋技術の開発, 19-36.
- 後藤 崇志・福島 亮・中山 茂生・古野 毅 (2014) スギを内層に構成した異樹種3層CLTの曲げ性能. 木材学会誌, 60 (6), 336-345.
- 平松 靖・宮武 敦・新藤 健太・渡部 博 (2013) スギを用いたCLTの面内曲げ性能. 木材工業, 68(11), 532-537.
- 平松 靖・宮武 敦・松原 恵理・末吉 修三・井道 裕史・長尾 博文・高麗 秀昭・新藤 健太・原田 真樹・加藤 英雄・上川 大輔・中島 洋・藤田 和彦・野沢 浩二 (2014) スギ及びヒノキを用いたCLTの面内曲げ性能. 木材工業, 69 (9), 384-389.
- Ido, H., Nagao, H., Harada, M., Kato, H., Ogiso, J., Miyatake, A. (2016) Effects of the width and lay-up of sugi cross-laminated timber (CLT) on its dynamic and static elastic moduli, and tensile strength. J. Wood Sci., 62, 101-108
- 池田 潔彦・溝口 忠・宇田 孝彦・浅井 正幸 (2000) スギ3層クロスボードの開発. 木材工業, 55 (6), 280-284.
- 川上 敬介・古川 郁夫 (2005a) 住宅部材としてのスギ3層クロスパネルの曲げおよび反り特性. 森林バイオマス利用学会誌, 1 (1), 9-14.
- 川上 敬介・古川 郁夫 (2005b) スギ3層クロスパネルの反りに及ぼす温湿度の影響. 木材工業, 60 (5), 218-223.
- 川上 敬介・古川 郁夫・西野 吉彦 (2007) スギ3層クロスパネルの住宅用下地材としての温度特性. 木材工業, 62 (5), 207-212.
- 建設省静住指発第6号 (2000) “認定書”.
- 国土交通省 (2016a) “建築物の基礎, 主要構造部等に使用する建築材料並びにこれらの建築材料が適合すべき日本工業規格又は日本農林規格及び品質に関する技術的基準を定める件” 平成12年建設省告示第1446号 (最終改正: 平成28年3月31日).
- 国土交通省 (2016b) “特殊な許容応力度及び特殊な材料強度を定める件” 平成13年国土交通省告示第1024号 (最終改正: 平成28年3月31日).
- 国土交通省 (2016c) “CLTパネル工法を用いた建築物又は建築物の構造部分の構造方法に関する安全上必要な技術的基準を定める件” 平成28年国土交通省告示第611号.
- 宮武 敦 (2013) 1. CLT・直交集成板の定義. 木材工業, 68 (11), 468-471.

- 木構造振興株式会社 (2012) “CLT パネルを用いた中高層建築物の構造計画と接合部性能の検証事業報告書”.
- 農林水産省 (2013) 直交集成板の日本農林規格 (制定: 平成 25 年 12 月 20 日農林水産省告示第 3079 号, 最終改正: 平成 28 年 8 月 30 日).
- 小木曾 純子・井道 裕史・長尾 博文・原田 真樹・加藤 英雄・宮武 敦・平松 靖 (2016) CLT 用スギフィンガージョイントラミナの加力方向による曲げ強度性能の違い. 森林総合研究所研究報告, 15 (3), 59-64.
- 朴 漢文・伏谷 賢美・大塚 武・中島 岳彦・佐藤 敬一・卞 熙燮 (2001) スギ材を用いた直交型積層材の静的曲げ強度性能に及ぼす年輪傾角の影響. 木材学会誌, 47 (1), 22-32.
- 朴 漢文・伏谷 賢美・久保 隆文・佐藤 敬一・卞 熙燮 (2002) スギ材を用いた直交型積層材の曲げクリープ性能. 木材学会誌, 48 (3), 166-177.
- 朴 漢文・伏谷 賢美 (2005) スギ材を用いた直交型 3 層積層材の曲げクリープ性能に及ぼす表・中層ラミナの構成割合の影響. 木材工業, 60 (12), 636-641.
- 社団法人全国木工機械工業会 (1998) “平成 9 年度住宅資材性能規定化対策事業成果報告書 (自動製材機等トータルシステム開発事業)”. 1-28.
- 社団法人全国木工機械工業会 (1999) “平成 10 年度住宅資材性能規定化対策事業成果報告書 (自動製材機等トータルシステム開発事業)”. 1-37.
- 社団法人全国木工機械工業会 (2000) “平成 11 年度住宅資材性能規定化対策事業成果報告書 (自動製材機等トータルシステム開発事業)”. 1-33.
- 森林総合研究所 (2014) “森林総合研究所交付金プロジェクト研究 成果 No.56 スギ造林大径木を公共建築等において利用拡大するための技術開発”, 1-4.
- 森林総合研究所・北海道立総合研究機構・日本 CLT 協会 (2015) “平成 25 年度補正林野庁委託事業「CLT 等新製品・新技術利用促進事業のうち CLT 実用化促進 (強度データの収集・分析)」成果報告書”, 1-122.
- 武川 朋子 (2010) クロスラミナパネルと大規模木造建築物. *Journal of Timber Engineering*, 23 (2), 53-56.
- 内迫 貴幸・徳田 迪夫・鈴木 直之・泉 貴史 (2002) スギ素材を仕上げに利用した木質面材料の開発—スギ板積層ボードの材質特性—. 三重大学生物資源学部演習林報告, 25, 19-33.
- 財団法人日本住宅・木材技術センター (1999) 優良木質建材等の品質性能評価基準 (品質性能試験の試験項目, 試験方法及び判定基準). 117-126.
- 財団法人日本住宅・木材技術センター (2011) 構造用木材の強度試験マニュアル. 61-71.
- 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”. 343-390.

Effects of layup and grade of lumber on bending Young's modulus and bending strength of sugi (*Cryptomeria japonica*) cross laminated timber under in-plane loading

Yasushi HIRAMATSU^{1)*}, Atsushi MIYATAKE¹⁾, Takashi TAMAKI²⁾, Kenta SHINDO¹⁾, Hirofumi IDO³⁾, Hirofumi NAGAO³⁾, Masaki HARADA³⁾ and Junko OGISO⁴⁾

Abstract

Recently, in Japan, cross laminated timber (CLT) has been attracting attention as a structural material. Based on this, more test data are required on CLT consisting of Japanese wood species. CLT consists of several layers of lumber that are laminated by the gluing of longitudinal and transverse layers; therefore, their strength properties are influenced by the load direction, the direction of lumber, the grade of lumber, and layups. In this study, we prepared CLT specimens (symmetrical composition, 3-layer 3-ply, 3-layer 4-ply, 5-layer 5-ply, 5-layer 7-ply, and 7-layer 7-ply layups, and the Mx60 strength grade according to the Japanese Agricultural Standard for CLT) consisting of sugi (*Cryptomeria japonica*) finger jointed lumber (width 105 mm and thickness 30 mm), and conducted the bending tests under in-plane loading. The results were as follows: (1) Layers loaded parallel to the grain are mainly effective for the bending Young's modulus and bending strength of CLT panels under in-plane loading. (2) Bending Young's modulus and bending strength of CLT panels under in-plane loading can be estimated from those of lumber and number of layers loaded parallel to the grain. (3) Bending Young's modulus of CLT panels under in-plane loading can be measured by dynamic testing. (4) Bending Young's modulus and bending strength of CLT panels under in-plane loading are strongly correlated. (5) Finger joints in lumber in the longitudinal direction on the tension side between loading points play a significant role in specimen failure.

Key words: cross laminated timber, sugi, in-plane, bending, layup, grade

Received 2 November 2016, Accepted 19 July 2017

1) Department of Wood-based Materials, Forestry and Forest Products Research Institute (FFPRI)

2) Ehime Forestry Research Center

3) Department of Wood Engineering, FFPRI

4) Wood Utilization Division, Forest Policy Planning Department, Forestry Agency

* Department of Wood-based Materials, FFPRI, 1 Matsunosato, Tsukuba, Ibaraki 305-8687, Japan; yash@ffpri.affrc.go.jp

論文 (Original article)

強度間伐が行われたスギ高齢人工林における林分および個体の成長

杉田 久志^{1)*}、梶本 卓也²⁾、福島 成樹³⁾、高橋 利彦⁴⁾、吉田 茂二郎⁵⁾

要旨

林齢 90 年生時に本数で 64%、材積で 53%の強度間伐が実施された岩手県のスギ高齢人工林において、その後 114 年生までの林分および個体の成長を復元し、間伐が成長に及ぼした影響と個体の成長のばらつきをもたらす要因について検討した。間伐前の立木密度は 458 本/ha、収量比数 0.55 で比較的疎であり、樹冠長率は 45.0%であった。間伐により立木密度は 167 本/ha、収量比数 0.27 へと低下した。間伐後に枯損した個体はなく、樹高成長速度は 0.15m/年で、間伐前後で変わらなかった。胸高直径の成長速度は間伐前の 0.21cm/年から 0.43cm/年に増加した。間伐後の林分材積成長速度は 8.20m³/ha/年で、間伐直前の 8.55 m³/ha/年からあまり低下しなかった。期首直径と直径成長速度との関係では、間伐前にみられた正の相関が間伐後にみられなくなったが、間伐 20 年後には再びみられるようになった。個体間競争が胸高断面積成長速度に及ぼす影響は、間伐後に一方向的な競争の影響がみとめられ、樹冠を接している個体の中で最大サイズのものの成長が旺盛であった。一方、双方向的な競争関係の影響はみられなかった。以上のことから、比較的低い密度で管理されてきたスギ高齢人工林において、強度の間伐を行ってその後きわめて低い密度で管理して超長伐期施業をめざす施業は、大径材や年輪幅からみた高品質材を生産する観点からも、一つの選択肢になり得ると考えられる。

キーワード：スギ、高齢人工林、強度間伐、成長、サイズ依存、個体間競争

1. はじめに

我が国の針葉樹人工林の多くは戦後の拡大造林期に造成され、40～60 年を経て伐期を迎えつつあるが、木材価格の低下や経営コストの上昇による林業経営の悪化、林業従事者の減少などにより皆伐が控えられ、結果的に標準伐期齢を超えて高齢化が進行している(桜井 2002)。また、伐期を 150 年ないしは 200 年に設定して大径木生産をめざす超長伐期施業も模索されている。人工林施業が長伐期へ移行すると、従来の短伐期・一斉皆伐施業で築き上げられた林分密度管理図や収穫予想表をベースにした育林施業体系はそのままでは適用することが難しくなると考えられる。林齢 80 年以上といった高齢人工林を適切に管理する育林技術体系を確立するためには、その基礎として高齢人工林の成長特性を明らかにすることが重要である。

高齢人工林の成長に関しては、固定試験地のモニタリングや伐倒木の年輪解析による成長経過の解析が進められ、とくにスギについて多くの報告がある(丹下ら 1987, 田中 1992, 西村ら 1992a, b, 國崎ら 1999, 大住ら 2000, 吉田ら 2002, 竹内・伊東 2003, 竹内 2005, Masaki et al. 2006, 西園ら 2008, Nisizono et al. 2008, 正木ら 2013, 2015)。これらの事例からは、高齢人工林で

は個体の直径成長が従来考えられてきた以上に持続し、林分単位でも高い材積成長速度を維持していることが明らかにされつつある。また、間伐は個体間競争を緩和して残存木の成長を促し、不良形質木を取り除いて林分の質的向上を図る重要な保育作業であり、間伐実施スケジュールについては、比較的若い段階で間伐を実施しておくことが高蓄積かつ良質材生産可能な高齢人工林を造成するうえで有効であることが指摘されている(鈴木ら 2009)。

しかしながら、高齢期に入ってから実施された間伐の効果について検討した研究は少ない。加齢にともない樹高成長や枝の伸長が低下して葉量の増加が期待できないこと(丹下ら 1987)からその効果を疑問視する見解もあるが、実際に間伐後の成長を解析して評価した事例(國崎ら 1999, 正木ら 2011)はわずかしかない。とくに立木密度を低下させるのに効率的な強度間伐の効果については実施事例が稀でほとんど検討されていない。その効果は間伐履歴や葉量の状況によって異なると考えられるので、いろいろな事例について検討する必要がある。また個体による成長速度のばらつきをもたらす要因を明らかにすることは、高齢人工林の成長予測をするために必要であり、期首のサイズ(田中

原稿受付：平成 29 年 2 月 14 日 原稿受理：平成 29 年 8 月 7 日

1) 元 森林総合研究所 四国支所

2) 森林総合研究所 植物生態研究領域

3) 千葉県農林総合研究センター森林研究所

4) 木工舎「ゆい」

5) 九州大学大学院農学研究院

* E-mail: sugitahisasi@gmail.com

1992, 竹内 2005) や樹冠構造 (吉田・石井 1993)、個体間競争 (國崎・藁谷 2006, Masaki et al. 2006, 宮本ら 2015) の影響について議論されているが、高齢期に入ってから強度間伐が実施された場合について検討した研究はみられない。そのような間伐後の成長特性は、伐期が 150 年さらには 200 年といった超長伐期施業について考えるうえで参考になるものと考えられる。

そこで本研究は、林齢 90 年生時に強度間伐が実施され、それ以来疎な密度で管理されている岩手県のスギ高齢人工林において、114 年生までの林分および個体の成長を解析した。とくに、1) 90 年生という高齢期に実施された強度間伐が成長に及ぼす効果、2) 個体による成長のばらつきをもたらず要因について検証し、それに基づいて 3) 高齢人工林の施業における強度間伐の有効性について検討した。

2. 調査地

調査地は、岩手県滝沢市滝沢の岩手大学農学部滝沢演習林 4 林班つ小班である。北上川沿いの丘陵地の浅い谷に位置し、標高は 210 m、段丘状の平坦面で、中央に小沢が蛇行して流れる谷底面を含む。基盤は古生層であるが、秋田駒ヶ岳や岩手山の火山噴出物に厚く覆われている。土壌は、適潤性黒色土 Bl_b であり、小沢に沿って湿性黒色土 Bl_f がみられる (山谷 1983)。滝沢演習林庁舎前露場 (標高 210m) の気象観測資料によると、年平均気温 8.2℃、年降水量は 1060mm である。最深積雪深は、気象庁メッシュ気候値によれば 27cm である。

調査林分は 1902 年植栽のスギ人工林で、当初は農商務省管轄の国有林であったが、1913 年に盛岡高等農林学校の演習林に編入された。保育履歴は不詳であるが、1975 年以降は間伐が行われなかったようである。1992 年 1～3 月 (90 年生時) に強度の間伐が実施され、同年 5 月にスギ下木が植栽されてスギ・スギ複層林が造成された。2007 年 (16 年生) におけるスギ下木の本数、平均樹高、平均胸高直径は、それぞれ 666 本/ha、9.7m、10.1cm であった (杉田ら 2014)。この林分の概要は西村ら (1992b)、吉田・石井 (1993)、杉田ら (2014) に記述されている。

3. 方法

3.1 現地調査

調査林分には、1989 年に 30m × 40m の固定プロットが設置され、1990 年 10 月 (89 年生、間伐 1 年前) に毎木・伐倒調査が行われ、現存量や成長量が推定されている (西村ら 1992b, 吉田・石井 1993)。毎木調査では胸高直径 (以下、直径とする)、樹高、枝下高 (最下生枝の基部の高さ) が測定され、34 個体 (全個体の 62%) については 4 方向の樹冠半径が測定された (吉田・石井 1993)。伐倒調査ではさまざまなサイズから

供試木 8 本が選定され、高さ 0.2m、1.2m、それ以上は 2m おきに採取された円盤について 5 年ごとに年輪解析が行われた (西村ら 1992b)。

間伐から 16 年後の 2007 年秋 (106 年生) にこの調査プロットを復元し、スギ上木の直径、樹高、枝下高を再び測定した。直径の測定はスチールメジャー、樹高と枝下高の測定はバーテックスⅢを用いた。その後、2011 年 (間伐 20 年後、110 年生) と 2015 年 (間伐 24 年後、114 年生) にも測定を行った。樹冠半径は 2013 年 (間伐 22 年後、112 年生) に全個体について 4 方向の測定を行った。下木については 2007 年 (16 年生) および 2015 年 (24 年生) に直径と樹高を測定した。

個体の空間的配置に基づく個体間競争の影響を検討するために、プロット内の樹木位置図を作成した。プロット外周部でも、プロット内の個体から 10m 以内に位置する個体については、位置を測定し、2007 年以降の直径・樹高等の測定も行った。

3.2 解析

3.2.1 林分構造パラメータの算出

単木幹材積は、青森、岩手、宮城地方のスギ (人工林) の材積表 (林野庁計画課 1970) により求めた。先枯れした個体の幹材積は、前回の樹高測定値を用いて求めた。地位の判定は岩手県林業水産部 (1983)、林齢・地位に応じた林分構造パラメータ目標値の算定は岩手県民有林スギ林分収穫予想表 (木戸口・栗野 2007) を用いた。収量比数は、表東北地方スギ密度管理図 (林野庁 1979) を用い、立木本数と上層木平均樹高により求めた。

個体のある測定量 Z の定期平均成長量 (以下、成長速度) GZ は、以下の式で定義した。

$$GZ(t) = (Z(t+n) - Z(t))/n$$

Z : 樹高 H (m)、直径 D (cm)、単木胸高断面面積 ba (m²) あるいは単木幹材積 v (m³)

t : 林齢 (年)、 n : 測定間隔 (年)

林分胸高断面面積 BA (m²/ha) および林分幹材積 V (m³/ha)、それらの成長速度 GBA (m²/ha/年) および GV (m³/ha/年) と林分幹材積成長率 GRV は以下の式により求めた。

$$BA = (\sum ba)/S$$

$$V = (\sum v)/S$$

$$GBA(t) = (BA(t+n) - BA(t))/n$$

$$GV(t) = (V(t+n) - V(t))/n$$

$$GRV(t) = (V(t+n)/V(t))^{1/n} - 1$$

S : プロット面積 (=0.12ha)

間伐前の成長速度は、西村ら (1992b) の年輪解析の結果に基づいて供試木 8 本を対象に、伐倒時 (1990 年、89 年生、間伐 1 年前) からさかのぼる 10 年ごとの期間に分けて算出した。間伐後の成長速度は、プロット内のすべての個体 ($n=20$) を対象に毎木調査データ

を用いて算出した。

林冠の閉鎖程度の指標として樹冠占有率を考え、1990年および2013年におけるプロット内の各個体の4方向の平均樹冠半径から円形近似で求めた樹冠占有面積を合計し、プロットの面積(0.12ha)で除して算出した。1990年に樹冠半径が測定されなかった個体については、その時の測定データから導いた直径と平均樹冠半径の直線回帰式を用いて、当時の直径を代入して樹冠半径を推定した。

樹冠表面積 KMF (m^2) を吉田・石井(1991)の式により1990年と2013年について算出した。2013年の算出に際しては、樹冠長は2011年の値を用いた。

$$KMF = 4/3 \cdot \pi \alpha (CL + \alpha^2/4)^{1.5}$$

$$\alpha = CR/CL^{0.5}$$

CR : 樹冠半径 (m)、 CL : 樹冠長 (m)

3.2.2 個体間競争の影響の解析

平均個体間距離として、各個体から最も近い他個体までの距離の平均値を求めた。さらに、各個体と樹冠が隣接していない周辺木のうちで最も近いものまでの距離の平均値を求めた。

成長に及ぼす個体間競争の影響については、Masaki et al. (2006)、宮本ら(2015)の方法にならって解析した。まず、対象木を中心とする半径 d (m) の円形の区域内で、以下の2つの競争指数を個体ごとに算出した。なお110年生時の下木の直径は、106年生と114年生の測定値の平均値として求めた。

BA_L : 直径が対象木より大きい他個体の胸高断面面積合計 (m^2)

BA_T : すべての他個体の胸高断面面積合計 (m^2)

また、 BA_L に関連して、その値に応じて以下の離散値をとる指数 BA_L' も設けた。

BA_L' : $BA_L = 0$ の時、 $BA_L' = 0$ 、 $BA_L > 0$ の時、 $BA_L' = 1$

競争の影響が競合範囲の大きさでどのように変わるか検討するために、距離 d を5mから10mまで1m間隔で変化させ、それぞれについて89年生、106年生、110年生時点の各競争指数を求め、 d にともなう競争指数と胸高断面面積成長速度との間の決定係数 R^2 の変化を検討した。決定係数の有意水準については、無作為化検定(Thomas and Weiner 1989)により検討した。 BA_L については解析対象の個体の成長速度を固定して位置をランダムに置き換え、 BA_T については位置を固定して成長速度を置き替えた。試行回数は2000回とした。

次いで、間伐後の時間の経過に伴う胸高断面面積成長速度に影響を及ぼす要因の変化を解析するため、林齢90~106年、107~110年、111~114年の3つの期間について各個体の胸高断面面積成長速度 Gba ($m^2/年$) を応答変数とし、期首直径 D (cm) と競争指数 (BA_L 、 BA_L' あるいは BA_T) を説明変数とする以下の4つの一

般化線形モデルを構築した。応答変数は正規分布に従うと仮定した。4つのモデルのうちで自由度調整済み決定係数が最大のものを最良モデルとして選んだ。

Dモデル: $Gba(t) \sim D(t)$

BA_L モデル: $Gba(t) \sim D(t) * BA_L(t, d)$

BA_L' モデル: $Gba(t) \sim D(t) * BA_L'(t, d)$

BA_T モデル: $Gba(t) \sim D(t) * BA_T(t, d)$

競争指数を取り入れることによりDモデルと比べてモデルがどの程度改善されたのかを評価するために、壁谷ら(2015)の方法により無作為化検定を行って p 値を算出した。

4. 結果

4.1 林分レベルの成長経過

上層木平均樹高の推移を Fig. 1 に示す。間伐前の地位級は3であったが、間伐木の樹高が残存木よりもやや低かった ($p=0.052$, t 検定) ため、間伐時に上層木平均樹高は26.3mから27.3mへと増加した。その後、地位級3の樹高成長曲線よりも旺盛な成長を示して地位級2に近づき、114年生時には上層木平均樹高30.8m(最大値37.6m)となった。

林分構成値の推移を Fig. 2 に示す。間伐1年前には、本数458本/ha、平均直径40.1cm、林分材積768.2 m^3 /ha、収量比数0.55、平均枝下高14.5m、平均樹冠長11.8m、平均樹冠長率45.0%、平均樹冠半径2.2mであった。岩手県民有林の収穫予想表(100年伐期)の地位級2の値と比較すると、本数は若干高く、平均直径、林分材積、収量比数は同等であった。間伐により本数は167本/ha、林分材積は364.4 m^3 /ha、収量比数は0.27、樹冠占有率は34.6%となり、間伐率は本数で64%、材積で53%に達した。間伐木の直径分布が残存木のそれよりも有意に小径に偏っていた ($p=0.0004$, t 検定) ため、平均直径は46.3cmへと増加し、平均樹冠長も12.3m、平均樹冠長率45.8%、平均樹冠半径2.5mへ増加した。林分樹冠表面積は2.17ha/haであった。

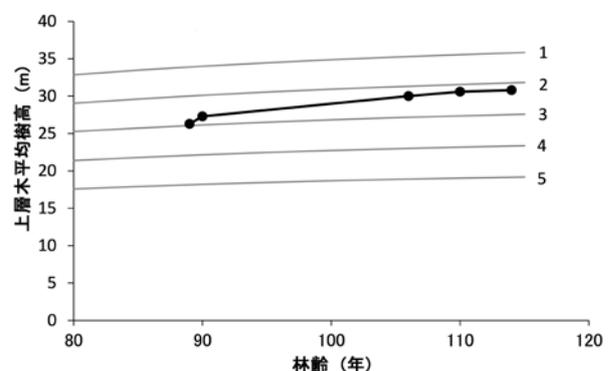


Fig. 1. 上層木平均樹高の推移

曲線は岩手県民有林スギ林の地位級別樹高成長曲線。岩手県林業水産部(1983)による。

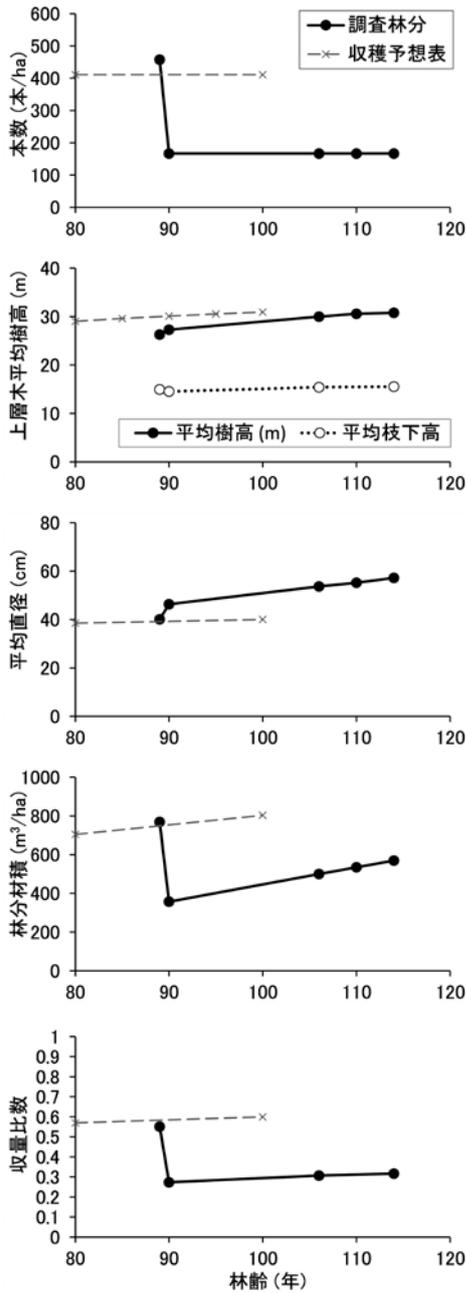


Fig. 2. 林分構成値の推移

破線は100年伐期の施業における目標値（地位級2）を示す。岩手県民有林スギ林分収穫予想表（木戸口・栗野 2007）による。

間伐から24年後（114年生）までに枯損した個体はまったくみられなかった（Fig. 2）。収量比数はわずかに増加したが、24年後でも0.32という低いレベルが持続していた。樹高成長は林齢とともに低下して、60年生以降は0.10～0.20m/年程度になり、間伐後もあまり変化せずほぼ同じ成長を維持した（Fig. 3）。樹高成長速度は90～106年生時に0.16m/年、107～114年生時に0.13m/年、90～114年生時の平均で0.15m/年であった（Table 1）。間伐24年後には先枯れしたもの

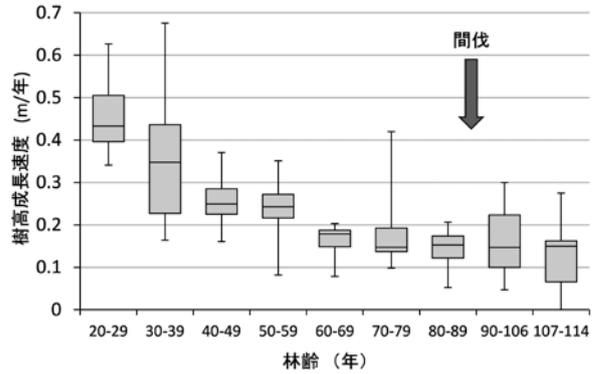


Fig. 3. 樹高成長速度の推移を示す箱ひげ図

間伐前は西村ら（1992b）の年輪解析データに基づき作成（ $n=8$ ）。
間伐後は毎木調査データに基づき作成（ $n=20$ ）。

Table 1. 各種成長速度の推移

林齢 (年) 間伐後 (年)	間伐前 ¹⁾	間伐後 ⁴⁾	
		90-106 前 1-16	107-114 17-24
平均樹高成長速度 (m/年)	0.13 ²⁾	0.16	0.13
平均直径成長速度 (cm/年)	0.21 ²⁾	0.43	0.44
林分胸高断面積成長速度 ($m^2/ha/年$)	—	0.58	0.65
林分材積成長速度 ($m^3/ha/年$)	8.55 ³⁾	7.98	8.64
林分材積成長率 (%/年)	1.13 ³⁾	1.88	1.63

- 1) 西村ら（1992b）の年輪解析データ（ $n=8$ ）による
- 2) 林齢80-89（間伐11-2年前）、間伐後とサイズを揃えるため小径の2本を除外（ $n=6$ ）
- 3) 林齢85-89（間伐6-2年前）
- 4) 毎木調査データ（ $n=20$ ）による

が2本出現した。平均枝下高は間伐直後14.9m、24年後15.5mでほとんど変化しなかった（Fig. 2）。樹高の増加に伴って樹冠長および樹冠長率が増加し、平均樹冠長は間伐16年後14.6m、24年後15.3mとなり、平均樹冠長率は16年後48.3%、24年後49.6%となった。平均樹冠半径、樹冠占有率、林分樹冠表面積は22年後にそれぞれ3.4m、61.4%、3.64ha/haに増加した。

直径成長速度は林齢とともに低下し、間伐前の80～89年生時には平均値が0.21cm/年まで低下したが、間伐後は大幅に増加した。90～106年生時に0.43cm/年、107～114年生時に0.44cm/年を示し、間伐後を通して一定の旺盛な成長を示した（Fig. 4、Table 1）。間伐後の林分材積成長速度は、90～106年生時7.98 $m^3/ha/年$ 、107～114年生時8.64 $m^3/ha/年$ 、90～114年生時の平均で8.20 $m^3/ha/年$ であり、材積成長率は90～106年生時1.9%/年、107～114年生時1.6%/年、90～114年生生を通して1.8%/年であった（Table 1）。24年後の時点で林分材積は間伐直後の1.56倍となり、間伐前の75%まで回復した（Fig. 2）。

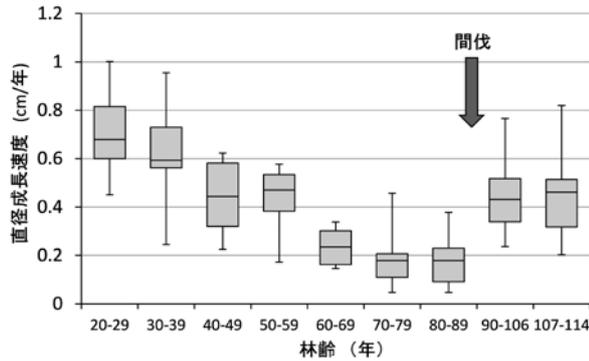


Fig. 4. 直径成長速度の推移を示す箱ひげ図
 間伐前は西村ら (1992b) の年輪解析データに基づき作成 ($n=8$)。
 間伐後は毎木調査データに基づき作成 ($n=20$)。

4.2 個体レベルの成長と期首サイズとの関係

期首直径と樹高成長速度との関係は、間伐前には有意な相関がなかったが、間伐後の林齢 90 ~ 106 年生時に正の相関がみられた。しかし、107 年生以降は相関がみられなくなった (Fig. 5)。なお、期首樹高と樹高成長速度との間にはいずれの期間でも相関がなかった

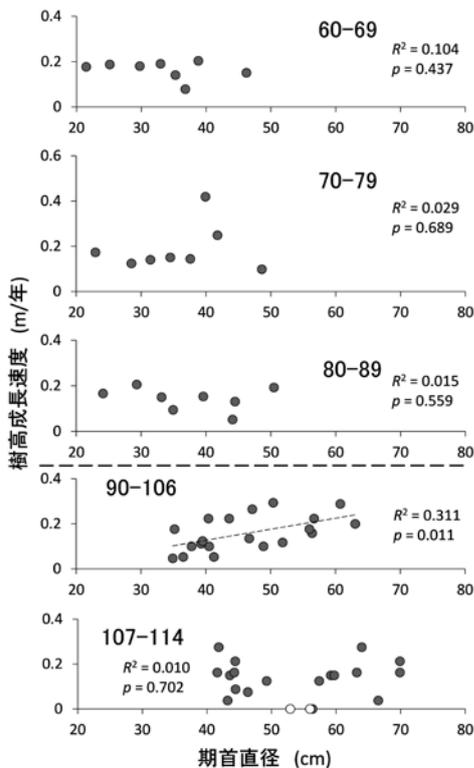


Fig. 5. 林齢別の期首直径と樹高成長速度との関係
 破線：強度間伐実施、白丸：先枯れ木
 間伐前は西村ら (1992b) の年輪解析データに基づき作成 ($n=8$)。
 間伐後は毎木調査データに基づき作成 ($n=20$)。

($p > 0.05$)。

期首直径と樹冠パラメータの増加速度との関係では、樹冠長は間伐時の直径が大きい個体ほど間伐後の増加が大きい傾向がみられたが、樹冠半径、樹冠表面積ではともに有意な正の相関がなく、樹冠半径ではむしろ相関係数が負値 ($R = -0.482$) を示した (Fig. 6)。

期首直径と直径成長速度との関係は、林齢 80 年までは有意な相関がなかったが、間伐直前の 80 ~ 89 年になって正の相関がみられた。強度間伐後には相関がみられなくなったが、間伐 21 年後 (111 年生) 以降に再び正の相関がみとめられた (Fig. 7)。

期首直径と単木胸高断面積成長速度との関係は、70 ~ 79 年生の期間を除き、間伐前、間伐後のいずれでも顕著な正の相関を示した (Fig. 8)。期首直径と単木材積成長速度との間にも同様の関係があった。

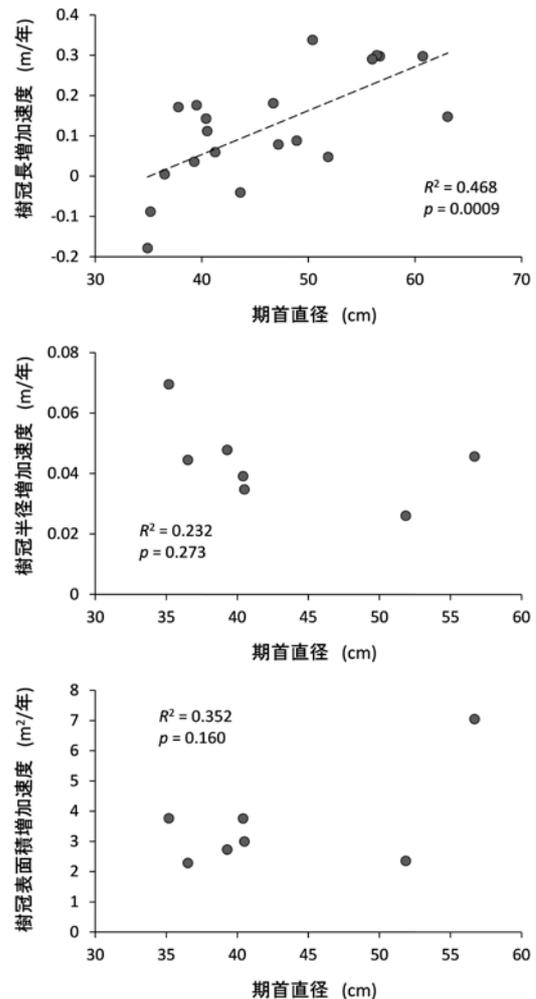


Fig. 6. 期首直径と樹冠長、樹冠半径、樹冠表面積の増加速度との関係
 対象期間は、樹冠長が 90-110 年生、樹冠半径と樹冠表面積が 90-112 年生。

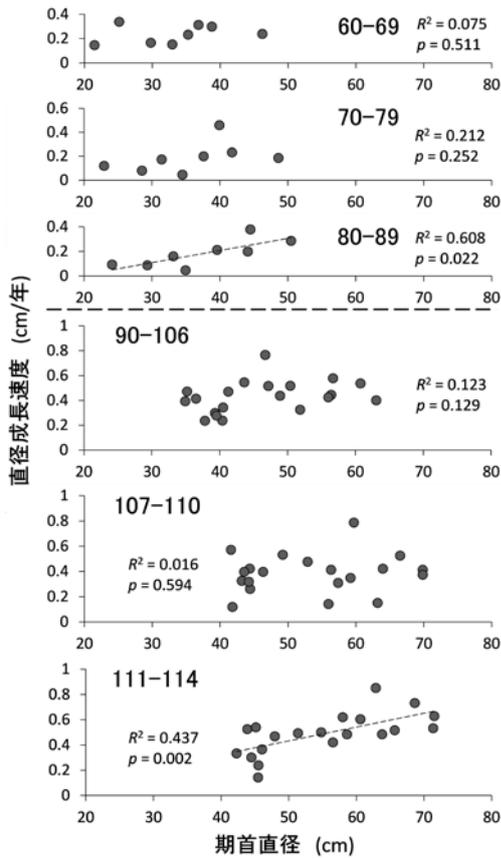


Fig. 7. 林齢別の期首直径と直径成長速度との関係
凡例については Fig. 5 を参照。

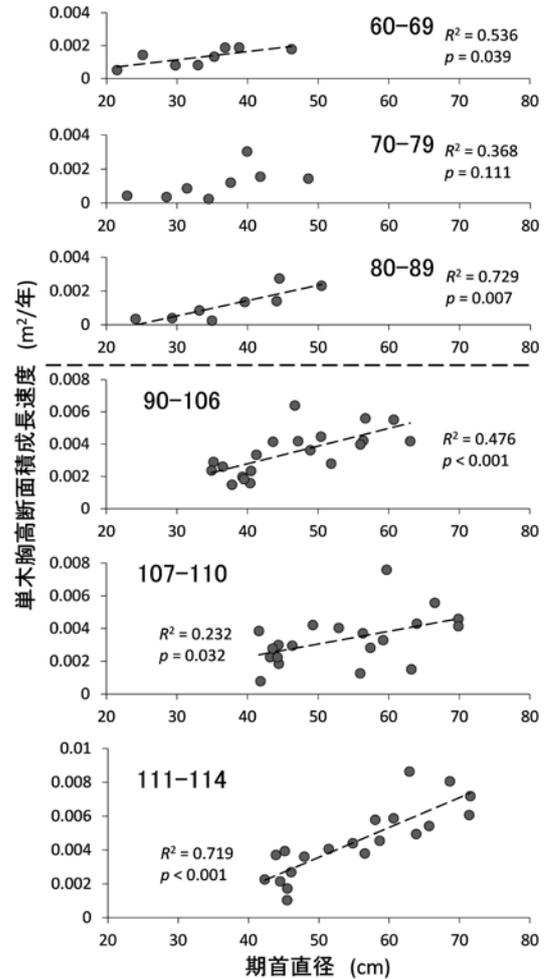


Fig. 8. 林齢別の期首直径と単木胸高断面成長速度との関係
凡例については Fig. 5 を参照。

4.3 個体レベルの成長と樹冠構造との関係

期首の樹冠構造パラメータと直径成長速度との関係では、期首樹冠半径、期首樹冠長率、期首樹冠長および期首樹冠表面積のいずれも、どの期間にも有意な相関はなかった ($p > 0.05$)。胸高断面成長速度との間でも、期首樹冠半径と期首樹冠長率はどの期間にも有意な相関を示さなかった。期首樹冠長、期首樹冠表面積は、90～106年生時に有意ではなかったが、111～114年生時になってともに有意な相関がみられた (Fig. 9)。

4.4 個体レベルの成長と競争指数との関係

各個体から最も近い他個体までの距離の平均値は 5.6 ± 1.3 m、樹冠が隣接していない周辺木のうち最も近いものまでの距離の平均値は 8.4 ± 0.6 m であった。

距離 d ともなう各競争指数と胸高断面成長速度との決定係数の変化を Fig. 10 に示す。 BA_L では、いずれの期間でも $d=9$ m で決定係数が最大となった。90

～106年生の $d=9$ m および 111～114年生の $d=8$ m では $p < 0.05$ のレベルで有意となったが、111～114年生では有意なものはみられなくなった (無作為化検定)。それぞれの期間において有意と判定されたもののなかで決定係数が最大となる d の値における BA_L と胸高断面成長速度との関係を Fig. 11 に示す。 $BA_L=0$ 、つまり対象木自身よりも大きな個体が半径 8～9m の円内に存在しない個体は $BA_L > 0$ の個体よりも有意に胸高断面成長速度が高かった (90～106年生: $p=0.0003$; 107～110年生: $p=0.0004$; 111～114年生: $p=0.0002$, t 検定)。 $BA_L > 0$ の個体のなかではいずれの期間でも有意な相関はみられなかった (90～106年生: $p=0.132$; 107～110年生: $p=0.647$; 111～114年生: $p=0.130$)。一方、 BA_T についてはどの期間でも d にかかわらず決定係数が低く、有意ではなかった (Fig. 10)。なお、下木を含めないで算出した場合でも結果は同様であった。

胸高断面成長速度を応答変数とする一般化線形モ

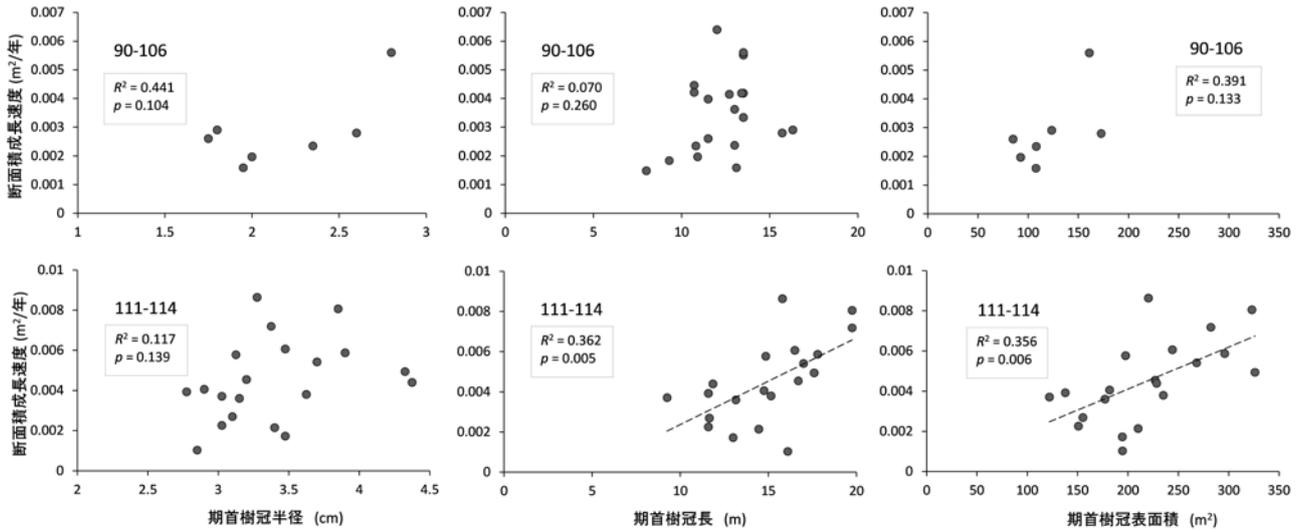


Fig. 9. 期首樹冠半径、期首樹冠長および期首樹冠表面積と胸高断面積成長速度との関係

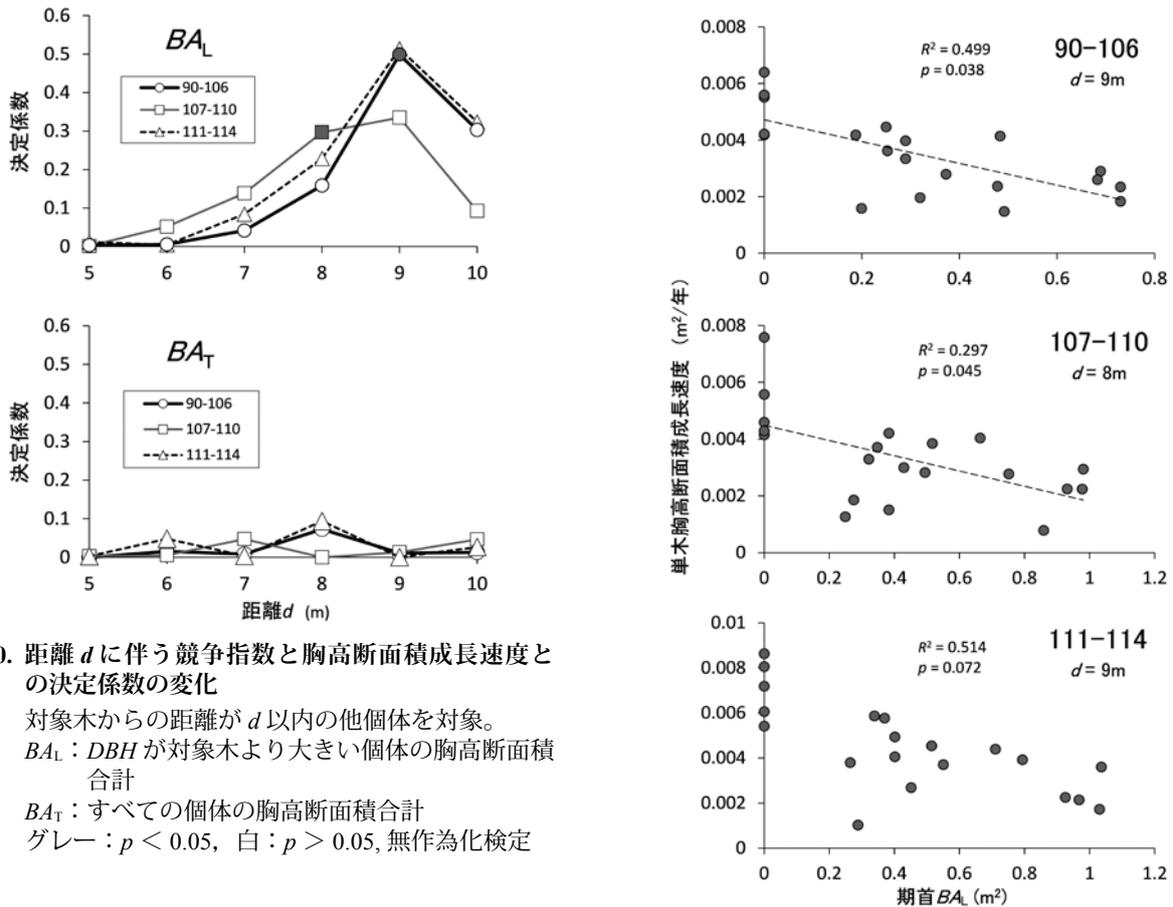


Fig. 10. 距離 d に伴う競争指数と胸高断面積成長速度との決定係数の変化

対象木からの距離が d 以内の他個体を対象。
 BA_L : DBH が対象木より大きい個体の胸高断面積合計
 BA_T : すべての個体の胸高断面積合計
 グレー: $p < 0.05$, 白: $p > 0.05$, 無作為化検定

Fig. 11. 林齢別の期首 BA_L と胸高断面積成長速度との関係
 無作為化検定で有意 ($p < 0.05$) なもののなかで決定係数が最大となる d の場合を示す。有意な値が得られなかった場合 (111-114 年生) は決定係数が最大となる d の場合を示す。

Table 2. 一般化線形モデルで採択された変数と自由度調整済み決定係数

林齢	D モデル			BA _L モデル			BA _{L'} モデル			BA _T モデル				
	変数	決定係数	d (m)	変数	決定係数	p	d (m)	変数	決定係数	p	d (m)	変数	決定係数	p
90-106	D	0.447	9	D+BA _L	0.498	0.119	9	D*BA _{L'}	0.686	0.014	8	D+BA _T	0.422	0.732
107-110	D	0.190	8	D+BA _L	0.316	0.067	8	D+BA _{L'}	0.487	0.008	7	D+BA _T	0.321	0.069
111-114	D	0.704	9	D+BA _L	0.690	0.654	9	D*BA _{L'}	0.752	0.101	8	D+BA _T	0.695	0.727

モデル内で自由度調整済み決定係数が最大となるdを採用。

p : Dモデルとの決定係数の差のp値 (無作為化検定)

下線 : 最良モデル (モデル間で自由度調整済み決定係数が最大)

デルの解析により、それぞれの期間に各モデルにおいて自由度調整済み決定係数が最大となったものを Table 2 に示す。いずれの期間でも BA_{L'} モデルが最良モデルに採択され、そのうち 90～106 年生と 107～110 年生時は D モデルより有意に自由度調整済み決定係数が高かったが、111～114 年生時には有意ではなくなった。一方、BA_T モデルは、90～106 年生時と 111～114 年生時には D モデルより自由度調整済み決定係数が低く、107～110 年生時には D モデルより高い値を示したが有意な差ではなかった ($p > 0.05$)。

5. 考 察

5.1 林分の成長経過に及ぼす強度間伐の効果

調査林分の林分構造パラメータは、間伐前の 89 年生時点には、岩手県民有林において伐期 100 年の施業を行う場合の目標値にほぼ合致しており (Fig. 2)、平均樹冠長率も 45% に達していた。樹冠長率は、長伐期化を目指す場合、個体の成長を維持するために必要な葉量の指標になると考えられており、例えば、その値は最低でも 30% が必要、50～60% を目標とするのが望ましい (藤森 2006)、40% を目標としたい (千葉 2009)、あるいは 40% 以下では混み過ぎ (准フォレスト 研修基本テキスト作成委員会 2013) といった具体的な目安が示されている。本研究の調査林分の平均樹冠長率はこれらの値を超えており、長伐期施業を目指すための条件を満たしていたと考えられる。

90 年生時に行われた間伐は、複層林造成のために本数で 64%、材積で 53% を伐採して収量比数を 0.27 まで下げたもので、通常よりもはるかに強度のものである。その結果、直径成長は間伐後に明瞭な促進効果がみられ、成長速度は同等の直径のもので比較しても間伐前の 0.21cm/年から 0.43cm/年へと倍増した (Fig. 4、Table 1)。100 年生以上のスギ高齢人工林の直径成長速度の調査事例としては、奈良県の 127～232 年生の林で 0.27～0.37cm/年 (竹内 2005)、三重県で 168～180 年生時に 0.37cm/年 (田中 1992) という値が報告されており、本事例の間伐後の値はこれら既報の値と比べるとやや大きめの値である。高齢期に入ってから実施された間伐の効果については、岩手県のスギ人工林で 145 年生時に行われた間伐 (國崎ら 1999) や、奈

良県のスギ人工林で 100 年生頃および 160 年生頃に行われた間伐 (高橋・竹内 2001)、岩手県のアカマツ人工林で 94 年生時に行われた間伐 (正木ら 2011) において直径成長の改善が報告され、高齢人工林であっても間伐が成長促進効果をもたらすことが報告されている。ただし、岩手のアカマツ林の事例のような過密林分 (収量比数 0.9、樹冠長率 20～40%) では、大径木を含む林型に到達するには成長促進が不十分で、長伐期施業が可能かどうかは疑問であるとされている (正木ら 2011)。本事例では、間伐による成長促進効果が顕著にみられ、旺盛な直径成長が 20 年以上継続している。それには、間伐前の樹冠長率が高く十分な葉量があったこと、間伐率が高くて未だに閉鎖していないことが関与していると考えられる。

樹高成長は、60 年生以降はその後強度間伐を経ても 0.10～0.20m/年と、ほぼ同じ程度の成長速度を維持していた (Fig. 3)。100 年生以上のスギ人工林の樹高成長については、奈良県吉野の 228 年生林分でも毎年樹高の成長が確認されており、成長が小さい個体では林齢によらず 0.05～0.06m でほぼ一定であるが、成長が大きな個体では 124 年生林の 0.16m/年から 228 年生林の 0.10m/年まで林齢に伴って徐々に低下している (竹内・伊東 2003)。それと比較すると、本研究の事例は 100～130 年生の林分としてはほぼ同等である。間伐が樹高成長に及ぼす影響については、成長促進効果が直径成長に対するほどではないことが指摘されている (安藤 1982)。さらには間伐により樹高成長が抑制された事例も報告され (河原ら 1989、深田ら 2009)、間伐の強度が高いほどその低下が早く現れ、低下の度合いも著しいことが指摘されている (正木ら 2013)。本研究の調査林分において間伐による樹高成長抑制が見られなかったこと (Table 1) は、これらの報告とは異なる傾向を示している。既報は若齢～壮齢期に、本研究は 90 年生の高齢期に行われた間伐を対象としており、このような間伐実施林齢のちがいによって樹高成長に及ぼす間伐の影響が異なる可能性が考えられる。また強度な下層間伐が行われたため間伐前からすでに優勢木であったもののみが残存木となったことも関係しているかもしれない。

高齢人工林では樹高や枝の伸長が低下して葉量の増

加が期待できない(丹下ら 1987)とされてきた。しかし本研究では、間伐後に枝の枯れ上りがほとんど起こらず枝下高があまり変化しなかった一方で、樹高が緩やかながら成長を持続したため、平均樹冠長率は間伐後もさらに増加して約 50%に達した (Fig. 2)。平均樹冠半径は、間伐直後の 2.1m から間伐 22 年後の 3.4m へと大きく拡張し、樹冠表面積も 1.68 倍に増加した。本事例は、高齢林分でも間伐後に樹冠の拡大がみとめられることを示している。この林分は間伐前から樹冠長率が比較的高く、一定量の葉量が確保されていたことがその拡大をもたらしたと考えられる。秋田県の樹高 20m 以上のスギ高齢人工林では、樹冠半径が樹高の 5~10%の範囲にあり、収量比数が低いほどこの値が大きくなることから、目安として樹冠半径が樹高の約 10%となるように管理することが提案されている(澤田 2004)。本事例では、この樹冠半径/樹高の割合は間伐 1 年前が 7.8%、間伐 22 年後が 11.1%であり、間伐後の値は秋田の高齢人工林における目標値を超えている。

林分の材積成長については、成長率でみると間伐直前に 1.1%/年、間伐後には 1.6~1.9%/年となり、間伐による明瞭な促進効果がみとめられた。また、成長速度でも、間伐直前が 8.55m³/ha/年(西村ら 1992b)、間伐後が 7.98~8.64m³/ha/年と、間伐により林分材積が半減したにもかかわらず残存木の大幅な成長促進により間伐後もほぼ同じ値を示した (Table 1)。高齢スギ人工林の林分材積成長速度の測定事例として、高知県で 80 年生時に 10.3 m³/ha/年(西村ら 1992a)、秋田県の 94~95 年生の林分で 16~27 m³/ha/年(大住ら 2000)、千葉県で 122~126 年生時に 11.1 m³/ha/年(丹下ら 1987)、岩手県で 143~153 年生時に 10.3~11.9 m³/ha/年(國崎ら 1999)、三重県で 168~180 年生時に 6.0 m³/ha/年(田中 1992)、奈良県の 127~177 年生の林で 16~19 m³/ha/年、232 年生の林で 12 m³/ha/年(竹内 2005)という値が報告されており、100 年生以上になっても 10 m³/ha/年前後、あるいはそれ以上の場合が多い(竹内 2005)。本事例の値は、これらの既報と比べると、やや小さいがその範囲に含まれている。

間伐率と林分の材積成長速度の関係については、間伐率がある値より低ければ、材積成長速度は間伐率にかかわらず無間伐区と大差ないが、それを超える強度の間伐では低下することが指摘されており、その閾値は材積間伐率で 40%程度とされている(小坂ら 1967, 菊沢・浅井 1979, 清和ら 1986, 菊沢 1987, 菊地 1991)。本研究では、この閾値を超える強度の間伐が実施されたにもかかわらず、林分材積成長速度が間伐前からあまり低下しておらず、既報で指摘されている面積当たりの成長量低下がそれほど問題にならない場合があることが示唆される。ただし、高齢期に実施された強度間伐は事例が少ないので、今後さらに調査事例を増や

し、材積成長速度に及ぼす影響について間伐履歴による葉量のちがいなどに着目して、どのような条件下で成長が維持、促進されるかを検討する必要がある。

5.2 個体による成長のばらつきをもたらした要因

5.2.1 期首サイズの効果

多くのスギ高齢人工林で個体の直径成長速度と期首の直径との間には正の相関がみられ、高齢になっても一般に個体の直径成長がサイズ依存的なことが報告されている(田中 1992, 竹内 2005, 國崎 2001, 國崎・藁谷 2006, Masaki et al. 2006, 宮本ら 2015)。その原因として、大きな個体ほど樹冠長、樹冠半径が大きく、着葉量が多いことがあげられている(竹内 2005)。本研究においても期首直径と直径成長速度の間には正の相関がみられたが、その関係が顕著な期間は限定的で、強度間伐直前の 10 年間と間伐から 20 年以降の 2 つの期間のみであった (Fig. 7)。間伐前の最も混み合った期間にその傾向が顕れ、強度間伐の実施によって消滅したように見受けられる。つまり、上述した従来の報告は比較的弱度の間伐が行われてきた事例であり、本事例で異なる挙動がみられたのはきわめて強度の間伐が行われたことが原因と考えられる。そのメカニズムのひとつは、間伐により劣勢木が除かれ、ある程度葉量を保持した個体ばかりになるので、個体サイズへの成長の依存性が不明瞭になったことがあげられる。もうひとつの可能性は、強度な間伐では小径木でも光環境が大いに改善されて成長が促進されたことが影響したことである。菊沢(1987)は 21 年生ヨーロッパトウヒ林で行われた間伐試験について、横軸に間伐直後の直径、縦軸にその 4 年後の直径をとって直線で回歸すると、無間伐区(本数間伐率 0%)から弱度区(15%)、中度区(31%)そして強度間伐区(50%)までは原点付近を通る直線となり、間伐率が増すとともにその勾配が増加していくのに対し、超強度間伐区(78%)は原点をはずれて無間伐区の直線を平行移動したような直線になることを報告している。つまり、ある程度の範囲までは間伐率の増加とともに期首直径が大きいほど成長も大きくなるが、それを超えて超強度な間伐になるとサイズ依存性が弱くなることを意味している。菊沢(1987)は、「大径木は強度間伐ですでに満度に光を得ているので、超強度間伐になってもそれ以上には成長しないが、小径木では超強度間伐になってもようやく満度に光を得るだろう。その結果、強度と超強度との間では大径木の成長はあまり差がないが、小径木の成長は超強度のほうが大きいので超強度間伐区の成長速度が直径にかかわらず一定になる」と解釈している。本事例でも、このようなメカニズムで強度間伐が成長と直径との相関を不明瞭にしたと考えられ、比較的小径の個体でも強度の被陰を免れ、梢端・枝を伸長させて葉量を増やし、大径木と遜色ない直径成長をす

ることができたと考えられる。葉量の増加を指標すると考えられる樹冠半径や樹冠表面積の増加が必ずしも間伐時の直径に応じているわけではなく、樹冠半径の増加はむしろ小径のものの方が大きい傾向がみられたこと (Fig. 6) も、関連した現象であると考えられる。

一方、期首直径と単木の胸高断面成長速度 (Fig. 8) および材積成長速度との間には間伐後を通して顕著な正の相関がみられた。この林分では、伐倒調査木の解析データから、間伐前の時点においても直径と材積成長の間に同様の関係がみとめられている (西村ら 1992b)。直径と材積成長速度との正の相関は他のスギ高齢人工林でも報告されている (丹下ら 1987, 渡邊・茂木 2007)。個体サイズが同化器官である葉の量を規定し、着葉量が体積や重量としての成長量を規定するため、間伐時にすでに多くの葉量を保持していた大きな個体は、間伐後にも良好な成長が維持・促進されたものと考えられる。

5.2.2 樹冠構造の効果

樹冠長、樹冠半径、樹冠表面積といった樹冠構造は直接的に着葉量を反映し、成長に関係するパラメータであると考えられている。とくに樹冠表面積は着葉量と密接な関係があり、成長量と相関があることが報告されている (梶原 1985, 1990)。本林分においても、吉田・石井 (1993) が間伐直前 (89 年生時) に樹冠表面積と材積成長の間に直線的な関係があることを報告しており、高齢になってもその関係がみられることが示されている。しかしながら、強度間伐後にはこれらのパラメータと胸高断面成長との関係は期首直径が示したほどは明瞭ではなく、とくに 90 ~ 106 年生にはいづれパラメータも有意な相関を示さなかった (Fig. 9)。その原因は強度間伐の何らかの影響であると考えられるが、詳細は不明である。ひとつの可能性として、一次枝枯損後に発生した萌芽枝の着葉量が無視できないほど大きく、樹冠構造パラメータが必ずしも着葉量を反映していなかったことが考えられる。間伐後 20 年を経過した 111 年生以降に期首樹冠長と期首樹冠表面積が有意な相関を示すようになった (Fig. 9) のは、陽樹冠部の着葉量が増加して樹冠構造パラメータと着葉量との関係が明瞭になったためかもしれない。

5.2.3 個体間競争の効果

以上議論してきた個体自身のサイズや樹冠構造とともに、近隣木との個体間競争の影響も個体の成長に影響を及ぼす要因として重要である (宮本・天野 2002, 國崎・藁谷 2006, Masaki et al. 2006, Inoue et al. 2008, 宮本ら 2015)。競争関係には、光を巡って優勢木が劣勢木を被陰するような自身より大きな木からのみ影響を受ける一方向的なもの、水分や養分を巡る競争のように大きな木からも小さな木からも影響を受ける

双方向的なものがある (Weiner 1990)。Masaki et al. (2006) は秋田県のスギ人工林において、前者の指標として BA_L を、後者の指標として BA_T を用いて対象木から半径 8m の範囲内での競争効果を解析し、壮齢期には一方向的競争と双方向的競争の両方が影響を及ぼすが、より高齢の 61 ~ 73 年生になると双方向的競争主体へとシフトし、83 年生ではどちらの影響もみられなかったことを報告している。宮本ら (2015) も高知県のスギ林において、壮齢期 ~ 65 年生には半径 8 ~ 10m 程度の競合範囲で一方向的競争と双方向的競争の両方が影響を及ぼし、65 ~ 75 年生には双方向的競争の影響が顕著になり、75 ~ 91 年生になるとどちらの効果もみられなくなったことを報告している。

本研究の結果では、一方向的な競争の指標である BA_L と胸高断面成長速度との間に顕著な関係がみとめられ (Fig. 10)、間伐後を通して BA_L' を組み込んだモデルが最良モデルに採択されて、間伐 20 年後までは D モデルよりも有意に改善されていた (Table 2)。顕著な関係を示した d の値は 8 ~ 9m 程度で (Fig. 10)、各個体と樹冠が隣接していない周辺木のうちで最も近いものまでの距離の平均値 8.4m に相当しており、樹冠の接する範囲が競合範囲となっていることを示している。 $BA_L=0$ の個体が $BA_L>0$ の個体より直径成長速度が高かったことは、その範囲のなかで最大のサイズをもち隣接樹冠から側圧されていない個体の成長が促進されたことを意味している。ただし、間伐 20 年後以降には BA_L' を組み込むことによるモデルの改善が有意ではなくなっており、一方向的競争の影響が明瞭ではなくなってきた傾向がみられる。強度間伐は、劣勢の小径木の成長を促進させて直径一直径成長の相関関係を不明瞭にすると同時に、大径の優勢木のなかでもとくに周辺木からの側圧を受けていない優勢木の成長を促進させる方向にも作用し、やがて期首直径と直径成長との相関を復活させ (Fig. 7)、一方向的競争の影響の重要性を相対的に低下させるに至ったと考えられる。

一方、双方向的競争の指標である BA_T と胸高断面成長速度との間には一貫して明瞭な関係がみられなかった (Fig. 10, Table 2)。強度間伐が水や養分を巡る競争を緩和したことが考えられるが、間伐前からすでにそのような競争があまりなかった可能性もある。本研究の結果は、Masaki et al. (2006)、宮本ら (2015) が報告した、壮齢期に一方向的競争と双方向的競争の両方の影響がみられ、その後双方向的競争主体へとシフトするというパターンとは異なっている。そのちがいが林齢のちがいによるものか、間伐強度のちがいによるものなのか、事例を増やして論議する必要がある。

5.3 高齢人工林の施業における強度間伐の有効性

長伐期施業により大径材生産を行うためには成長を

持続させる必要があり、そのためには低い密度で管理して個体あたりの着葉量を確保する必要がある。ヒノキ人工林では、林齢 50 年生までに 500 ~ 1000 本/ha 以下に密度を低下させておけば、その後に間伐を省略しても高蓄積の人工林を造成することが可能であることが指摘されている（鈴木ら 2009）。スギ人工林でも、林齢 70 ~ 80 年生までに 400 ~ 700 本/ha 程度まで密度が低下した林分において、さらに 100 年生以降に 200 本/ha 程度にまで減少させたような林分が高齢人工林として存続できるという施業スケジュールも提示されている（千葉 2008）。低い立木密度にするためには間伐を何度も実施する必要があり、吉野林業では弱い間伐を繰り返している（高橋・竹内 1999）が、経費や人手の関係で頻繁な間伐が困難な場合には、強度間伐は密度を一気に低下させるのに効率的な方法である。ただし、過度に強度な間伐は林分材積成長速度をかえって低下させることがある（菊沢 1987）。

本研究で行われた強度間伐では、きわめて強度の間伐を行ったにもかかわらず林分の材積成長速度が顕著には低下しなかった（Table 1）。個体レベルの成長においても、間伐後に年輪幅 2mm 前後の直径成長が 20 年以上持続しており（Fig. 4）、この程度の年輪幅が高品質大径材の条件とされること（鈴木 1995、高橋・竹内 2007）を考えると、材質的にも良好な結果をもたらしたと考えられる。立木密度が 167 本/ha、収量比数 0.3 程度という疎林状態となり、すでに主伐時の目標とされる本数まで密度を落としたことになるため、今後さらに密度管理のために経費をかける必要はないと考えられる。以上のことから、高齢スギ人工林の施業スケジュールとして、100 年生前後に一度強度間伐を行い、その後きわめて低い密度で伐期 150 年、さらには 200 年といった超長伐期施業をめざすことは、経営的に大径材や年輪幅からみた高品質材を生産する観点からも、一つの選択肢になり得ると考えられる。本調査林分はその可能性を検証することができる試験地であり、今後も長期的にモニタリングを継続することが望まれる。ただし、本林分は強度間伐以前から比較的低い本数密度で管理されたものであり、それゆえ着葉量の目安とされる樹冠長率も高かった事例であることに留意する必要がある。最近、従来の短伐期施業のもと十分に密度管理がなされないまま壮齢あるいは高齢に達した林分が増えつつある。そうした林分を長伐期林へ移行させることも考えると、どのような条件の高齢人工林をどの段階で、しかもどの程度の間伐で密度を低下させれば超長伐期施業が可能なのか、さらに事例を増やして検討する必要がある。

謝 辞

本研究の調査対象となったスギ高齢人工林の間伐試験地を設定し貴重なデータを残してくださった元岩手

大学農学部の故安藤 貴博士に深く敬意を表す。森林総合研究所の宮本和樹博士には解析方法で多大なご協力をいただいた。2 名の査読者には有益・適切なコメントをいただいた。森林総合研究所の正木 隆博士、西園朋広博士、富山県農林水産公社の嘉戸昭夫博士、富山県農林水産総合技術センター森林研究所の岡子光太郎博士には、研究を進めるにあたり貴重なご助言をいただいた。岩手大学農学部滝沢演習林の齋藤 誠、濱道寿幸、藤田泰崇の各氏には現地調査にご協力いただいた。岩手大学農学部附属寒冷フィールドサイエンス教育研究センター各位には調査に便宜をはかっていただいた。以上の方々に深く感謝する。本研究の一部は、森林総合研究所運営費交付金プロジェクト（課題番号：201108）により補助を受けた。

引用文献

- 安藤 貴（1982）林分の密度管理. 農林出版, 東京, 126pp.
- 千葉 幸弘（2008）長伐期化への道筋を考える（I）—高齢林の成長特性. 森林技術, 801, 9-15.
- 千葉 幸弘（2009）長伐期化への道筋を考える（II）—樹冠長を目安とした高齢林の管理. 森林技術, 802, 11-17.
- 藤森 隆郎（2006）長伐期施業の意義と課題. 全林協編“長伐期林を解き明かす”. 全林協, 東京, 12-32.
- 深田 英久・渡辺 直史・宮田 弘明・山崎 敏彦（2009）強度間伐が残存木の成長および材質等に与える影響. 高知県森林セ研報, 34, 56-83.
- Inoue, S., Shirota, T., Mitsuda, Y., Ishii, H. and Gyokusen, K. (2008) Effects of individual size, local competition and canopy closure on the stem volume growth in a monoclonal Japanese cedar (*Cryptomeria japonica* D. Don) plantation. *Ecological Research*, 23, 953-964.
- 岩手県林業水産部（1983）岩手県民有林スギ収穫予想表等作成に関する基礎調査書. 86pp.
- 准フォレスター研修基本テキスト作成委員会編（2013）准フォレスター研修基本テキスト. 林野庁, 278pp.
- 壁谷 大介・太田 敬之・正木 隆・梶本 卓也（2015）立木の競争指標の評価方法. 関東森林研究, 66, 139-142.
- 梶原 幹弘（1985）樹冠量と幹材積生長量との関係に関する過去の調査結果. 京都府大演報, 29, 83-90.
- 梶原 幹弘（1990）スギ, ヒノキ同齢林分内における単木の陽樹冠表面積と幹材積, 胸高直径および樹高の各成長量との相関. 京府大演報, 34, 41-45.
- 河原 輝彦・加茂 皓一・井鷲 裕司・清野 嘉之（1989）スギ, ヒノキ若齢林の利用間伐試験. 森林総研研報, 356, 47-62.
- 木戸口 佐織・粟野 義之（2007）岩手県民有林におけるスギ高齢林の現状と収穫予想表の作成. 岩手県林業セ研報, 15, 1-8.

- 菊地 健 (1991) ブナ二次林の上層木伐採試験 — 林分構造と7年間の林分成長量 —. 北林試報, 29, 63-70.
- 菊沢 喜八郎 (1987) ヨーロッパトウヒの間伐試験. 北林試報, 25, 28-35.
- 菊沢 喜八郎・浅井 達弘 (1979) 日高地方における広葉樹林の林分構造と生長量. 北林試報, 16, 1-17.
- 小坂 淳一・寺崎 康正・都築 和夫・金 豊太郎 (1967) 林分成長量からみた間伐方法. 日林講, 78, 60-61.
- 國崎 貴嗣 (2001) 樹木同齡単純林における胸高直径分布とその動態 — 針葉樹を中心として —. 森林計画誌, 35, 31-45.
- 國崎 貴嗣・藁谷 紀恵 (2006) 岩手山麓のスギ高齢人工林における幹直径成長量の個体間差. 岩大演報, 37, 47-55.
- 國崎 貴嗣・藁谷 紀恵・柴田 信明 (1999) 岩手山麓におけるスギ高齢林の林分構造と成長. 日林誌, 81, 346-350.
- 正木 隆・櫃間 岳・八木橋 勉・野口 麻穂子・柴田 銃江・高田 克彦 (2013) スギ林における壮齡時の間伐は樹高の長期的な成長にどのように影響するか? 日林誌, 95, 227-233.
- 正木 隆・森 茂太・梶本 卓也・相澤 州平・池田 重人・八木橋 勉・柴田 銃江・櫃間 岳 (2011) 高齢・高密度のアカマツ林の間伐は個体の成長を改善するか. 日林誌, 93, 48-57.
- Masaki, T., Mori, S., Kajimoto, T., Hitsuma, G., Sawata, S., Mori, M., Osumi, K., Sakurai, S. and Seki, T. (2006) Long-term growth analyses of Japanese cedar trees in a plantation: neighborhood competition and persistence of initial growth deviations. J For Res, 11, 217-225.
- 正木 隆・大住 克博・関 剛・森 茂太・梶本 卓也・櫃間 岳・八木橋 勉・柴田 銃江・野口 麻穂子 (2015) 添畑沢スギ間伐試験地における45年生から104年生までの長期成長データ. 森林総研研報, 14, 65-72.
- 宮本 麻子・天野 正博 (2002) 立木の空間分布および生育条件が個体成長に及ぼす影響. 森林総研研報, 2, 163-178.
- 宮本 和樹・酒井 敦・大谷 達也・松岡 真如・山崎 敏彦 (2015) 四国地方の高齡級スギ・ヒノキ人工林における個体間競争が植栽木の成長に及ぼす影響. 日林誌, 97, 171-181.
- 西村 武二・吉川 賢・池本 彰夫・永森 通雄 (1992a) 高齡スギ人工林の現存量と成長経過 (1) 高知県本川村奥南川山国有林80年生スギ林の場合. 高知大演報, 19, 73-81.
- 西村 武二・吉川 賢・池本 彰夫・永森 通雄・安藤 貴 (1992b) 高齡スギ人工林の現存量と成長経過 (2) 岩手大学滝沢演習林89年生スギ林の場合. 高知大演報, 19, 83-97.
- 西園 朋広・田中 邦宏・粟屋 善雄・大石 康彦・林 雅秀・横田 康裕・天野 智将・久保山 裕史・八巻 一成・古井戸 宏通 (2008) 秋田地方のスギ人工林における林分材積成長量の経年推移. 日林誌, 90, 232-240.
- Nishizono, T., Tanaka, K., Hosoda, K., Awaya, Y. and Oishi, Y. (2008) Effects of thinning and site productivity on culmination of stand growth: results from long-term monitoring experiments in Japanese cedar (*Cryptomeria japonica* D. Don) forests in northeastern Japan. J For Res, 13, 264-274.
- 大住 克博・森 麻須夫・桜井 尚武・斉藤 勝郎・佐藤 昭敏・関 剛 (2000) 秋田地方で記録された高齡なスギ人工林の成長経過. 日林誌, 82, 179-187.
- 林野庁 (1979) 表東北地方スギ密度管理図. 日本林業技術協会, 東京.
- 林野庁計画課 (1970) 立木幹材積表 東日本編. 日本林業調査会, 東京, 176pp.
- 桜井 尚武 (編著) (2002) 長伐期林の実際 — その効果と取り扱い技術 —. 林業科学技術振興所, 東京, 173pp.
- 澤田 智志 (2004) 長期育成循環施業に対応する森林管理技術の開発. 秋田県森技研報, 13, 65-88.
- 清和 研二・浅井 達弘・水井 憲雄・菊沢 喜八郎 (1986) カラマツ人工林の間伐試験 — 強度間伐の有効性 —. 日林北支講, 35, 122-124.
- 杉田 久志・高橋 利彦・齋藤 誠・濱道 寿幸・藤田 泰崇 (2014) スギースギ複層林で発生した下木の冠雪害被害に対する形状比および上木樹冠との位置関係の影響. 日林誌, 96, 6-11.
- 鈴木 正 (1995) 大径材生産の林業. 全国林業改良普及協会, 東京, 175pp.
- 鈴木 和次郎・池田 伸・平野 辰典・須崎 智広・和佐 英二・石神 智生 (2009) 高齡級ヒノキ人工林の林分構造にみる間伐履歴の影響. 日林誌, 91, 9-14.
- 高橋 絵里奈・竹内 典之 (1999) 東吉野村におけるスギ人工林の密度管理 (II) — 東吉野村における除間伐の特徴 —. 森林応用研究, 8, 121-124.
- 高橋 絵里奈・竹内 典之 (2001) 奈良県川上村上多古および高原における高齡スギ人工林の現状と今後の施業方針. 森林研究, 73, 59-66.
- 高橋 絵里奈・竹内 典之 (2007) 吉野林業地における長伐期高品質大径材生産林の陽樹冠管理. 日林誌, 89, 107-112.
- 竹内 郁雄 (2005) スギ高齡人工林における胸高直径成長と林分材積成長. 日林誌, 87, 394-401.
- 竹内 郁雄・伊東 宏樹 (2003) スギ高齡林の樹高成長. 日林誌, 85, 121-125.
- 田中 和博 (1992) 平倉演習林藤堂スギ林分の林齡168年から180年までの定期成長. 三重大演報, 17, 211-231.

- 丹下 健・山中 征夫・鈴木 誠 (1987) スギ高齢人工林の成長と現存量. 演習林 (東大), 25, 243-259.
- Thomas, S. C. and Weiner, J. (1989) Including competitive asymmetry in measures of local interference in plant populations. *Oecologia*, 80, 349-355.
- 渡邊 仁志・茂木 靖和 (2007) 92年生スギ人工林における成長経過と現存量. 岐阜県森林研研報, 36, 1-7.
- Weiner, J. (1990) Asymmetric competition in plant populations. *Trends in Ecol. Evol.* 5, 360-364.
- 山谷 孝一 (1983) 岩手大学農学部滝沢演習林土壌調査報告. 岩大演報, 14, 33-60.
- 吉田 茂二郎・石井 弘 (1991) スギ高齢林分の樹冠構造について. 鹿大演報, 19, 19-30.
- 吉田 茂二郎・石井 弘 (1993) スギ高齢林分の樹冠構造について (II) 岩手大学滝沢演習林 89年生林分の場合. 鹿大農学術報, 43, 87-95.
- 吉田 茂二郎・安元 岳玄・溝上 展也・今田 盛生・寺岡 行雄 (2002) 白鹿岳間伐試験地におけるスギ高齢林の間伐効果について — 相対幹距比を基礎にした分析 —. 九大演報, 83, 53-61.

Stand and individual growth in an old *Cryptomeria japonica* plantation after intensive thinning

Hisashi SUGITA^{1)*}, Takuya KAJIMOTO²⁾, Shigeki FUKUSHIMA³⁾,
Toshihiko TAKAHASHI⁴⁾ and Shigejiro YOSHIDA⁵⁾

Abstract

Stand- and individual-level growth responses after intensive thinning were investigated in a 114-year-old *Cryptomeria japonica* plantation in Iwate Prefecture, focusing on the effects of relatively late thinning (when the stand was 90-year-old) on growth, and on factors causing variation in individual diameter growth. Before this late thinning, stem density, the relative yield index, and the crown length ratio (crown/height) were 458 trees ha⁻¹, 0.55, and 0.45, respectively, indicating that the stand was not crowded. The thinning removed 64% and 53% of trees in terms of number and volume, respectively, and reduced stem density and the relative yield index to 167 trees ha⁻¹ and 0.27. The mean annual height growth rate after the thinning was almost the same as the value before the thinning. The mean annual diameter growth rate was 0.21 cm year⁻¹ before the thinning, and increased to 0.43 cm year⁻¹ after the thinning. The stand-level stem volume growth rate after the thinning was 8.20 m³ ha⁻¹ year⁻¹, which was not greatly lower than the pre-thinning value, 8.55 m³ ha⁻¹ year⁻¹. The diameter growth rate at the individual level before the thinning was found to correlate significantly with the initial diameter size at the beginning of each census period. However, this correlation became unclear after the thinning, and then re-emerged at 20 years after the thinning. Analysis using a neighborhood inter-tree competition model recognized effects of one-sided competition on diameter growth after the thinning, while the effects of two-sided competition were not observed. These results suggest that, in a well-managed old *C. japonica* plantation, intensive thinning at a relatively late growth stage (ca. 100 years) to keep the stand at extremely low density may be a good option for producing large-sized and high quality timber in the future when a hyper-long rotation is applied (e.g., >150 years).

Key words: *Cryptomeria japonica*, old plantation, intensive late-thinning, growth, size-dependence, neighborhood competition

Received 14 February 2017, Accepted 7 August 2017

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

2) Department of Plant Ecology, FFPRI

3) Forestry Research Institute, Chiba Prefectural Agriculture and Forestry Research Center

4) Woodworks "Yui"

5) Faculty of Agriculture, Kyushu University

* E-mail: sugitahisai@gmail.com

論文 (Original article)

都市林におけるガバナンスの評価に関する検討： 野幌国有林を事例として

八巻 一成^{1)*}

要旨

多種多様なニーズが求められる都市林で持続可能な森林管理を実現していくためには、利害関係者の参加と協働による森林ガバナンスの確立が重要な課題となってきた。本研究は、都市林におけるより良いガバナンスの実現のために、ガバナンスの現状を評価する手法の検討を行った。まず、森林におけるガバナンスの概念的な検討を行い、次にガバナンスの評価手法について考察した。続いて、野幌国有林を事例として、森林再生やその他の保全管理活動に関わる市民団体に対して実施した意識調査の中から、ガバナンス評価に利用可能な14の指標を抽出し、評価を試みた。その結果、ガバナンスの評価は全体的にはあまり高い値を示しておらず、特に財政的支援に対する評価が低い値となった。また、市民団体と国有林との関わり方の違いによって、評価に差が見られた。以上より、森林との関わり方の違いによって、ガバナンスに対する関係者の評価は異なってくると考えられることから、より包括的な評価を行うためには多様な関係者を対象とした評価を実施する必要がある。

キーワード：森林、ガバナンス、評価、市民、野幌国有林

1. はじめに

1990年にブラジルで開催された地球サミットでの森林原則声明の採択を一つの契機として、持続可能な森林管理を実現していくことが世界的な関心となっている。都市の近郊に位置する森林（以下、都市林とする）でも状況は変わらない。都市近郊に位置し、かつては農用林としての利用が主たるものであった森林では、都市の拡大や発展に伴い、近隣住民や都市住民によるレクリエーションの場としての利用が盛んになってきている。また、都市近郊に位置する希少な自然環境としての重要性も認識されるようになり、生物多様性保全の場としても位置付けられるなど、都市林に対する多くの市民の関心が集まってきている。このように、都市林に対する多種多様なニーズが求められるようになってきている中、森林管理に自らが積極的に関わっていかうとする都市住民のニーズも高まってきている。こうしたことから、都市林の管理をめぐるのは、行政が中心のかつ独占的に行うという従来の形態から脱却し、市民参加や市民と行政との協働による森林管理が重要な課題となっている。つまり、森林ガバナンスの確立が強く求められるようになってきているのである。

では、参加と協働による森林ガバナンスとは一体どのようなものなのだろうか。本論ではまず、森林ガバナンスが意味するものについて概念的な検討を行う。次に、より良い森林ガバナンスを実現していくためには、森林ガバナンスの状態を的確に把握するとともに、

その状態をさらに向上させていくことが重要であるが、それにはガバナンスが適切な状態にあるかどうかのチェックに加えて、課題を発見するためのガバナンス評価が有効である（宮内 2017）。そこで、森林ガバナンス評価手法のあり方について検討した上で、北海道札幌市に隣接する都市林である野幌国有林を事例として、ガバナンスの評価を試論的に行い、今後の評価のあり方や課題について考察した。

なお、わが国における森林ガバナンスに関する研究動向を見てみると、柿澤（2010）が森林ガバナンス研究の現状と課題について展望を示しているほか、林業経済学会では、「ガバナンス論の地平—森林からの二つのアプローチ」と題する研究会を開催している（林業経済学会 2012）。一方、都市林を対象としたガバナンス研究については、海外で研究が始められつつあるものの（Lawrence et al. 2013）、わが国での事例は管見の限り見られない。また、井上（2010）、宮内（2013、2017）、藤井（2012）、八巻ら（2011）、Yamaki（2015）は自然資源ガバナンス全般に関する研究事例として挙げられるものの、森林を対象としたガバナンス研究の蓄積は必ずしも十分とは言えない。このようなことから本論は、わが国における森林ガバナンス研究、および森林ガバナンス評価手法についての新たな知見と方向性を提示するものである。

原稿受付：平成 29 年 6 月 9 日 原稿受理：平成 29 年 9 月 19 日

1) 森林総合研究所 森林管理研究領域

* 森林総合研究所 森林管理研究領域 〒 305-8687 茨城県つくば市松の里 1

2. 森林ガバナンスと「良いガバナンス」

よく知られるように、1980年代に発生した知床国有林における天然林伐採や白神山地区における大規模林道建設問題は、大きな社会的論争を引き起こした。これらの問題では、政府が中心行的に行ってきた森林開発行為に対して、世論を巻き込んだ反対運動が展開された。ここで露わとなったのが、政府のトップダウンによる一元的な統治の限界である。こうした問題を教訓として、その後、行政によるトップダウンではなく、民間セクターや市民を加えた統治の重要性が認識されるようになった。そこで注目されたのが、多様な関係者を含むガバナンスのあり方である。

一般的にガバナンスは、政府のみならず市民や民間セクターを含む多様な関係者間の関係性によって生じる、統治のあり方を捉えるための概念として理解される。松下（2007）はガバナンスを「上（政府）からの統治と下（市民社会）からの自治を統合し、持続可能な社会の構築に向け、関係者がその多様性と多元性を生かしながら積極的に関与し、問題解決を図るプロセス」と定義している。ここで示されているのは、中央集権的な政府による一元的な統治ではなく、関係者による水平、対等な関係による協働統治の形である。これに加えて、ガバナンスには政府によるフォーマルな行政活動の他に、様々な関係者による活動や、行政とこうした関係者間のインフォーマルな関係性も大きく関わっている。つまりガバナンスとは、公共および市民、民間セクターが互いに協議、協力しながら、広範な課題の解決を図っていくために用いられるフォーマル、インフォーマルな制度やルール、メカニズム、意思決定プロセスの総体と言える（Tacconi 2011）。こうしたもののうち、森林を対象とした様々なセクターによって形作られるガバナンスを、森林ガバナンスとする。

さて、持続可能な森林管理の実現にはグローバル、ナショナル、ローカルの各レベルに応じたガバナンスのあり方が問われてくる。たとえば、グローバルレベ

ルでは、森林減少の抑制や生物多様性の保全、違法伐採木の輸出入禁止といった取り組みに各国が協力していく必要がある。ナショナルレベルでは、持続可能な森林管理を可能とするような法令、制度、計画等の整備が求められる。一方、ローカルレベルの場合には、グローバル、ナショナルレベルでのガバナンスに対応しながら、現地の実情に応じたガバナンスのあり方を構築していく必要がある（Rametsteiner 2009）。このように、ガバナンスはグローバル、ナショナル、ローカルといった多様なレベルごとに、多様な関係者や多様なセクターが関わり合いながら構成されているのである。

ガバナンスと類似の用語にマネジメント（管理）がある。そこで両者の違いについて見ておこう。森林ガバナンスと言った場合、上述のことから森林における政策課題を具体的な施策に落とし込む際、意思決定に関わる領域を指す。そこでは、国や都道府県、市町村、地元NPOといった様々な関係者間の利害関係や、意思決定に至るプロセスのあり方等が問われる。一方、こうして具現化された施策を実施するための領域がマネジメントである（Fig. 1）。マネジメントでは、施策を実行していく上での取り組みの具体的な進め方や内容等が問題となってくる。「マネジメント」は目標達成に向けた手段や具体的な実施方法、「ガバナンス」はそのための意思決定、政策プロセスのあり方に注目した概念であると言えるだろう（Borrini-Feyerabend et al. 2013）。つまり、持続可能な森林管理を実現していくためには、ガバナンスとマネジメントが両輪となって自然や社会の不確実性に柔軟に対応していく、順応的なプロセス（宮内 2017）が不可欠と言える。

なお、ガバナンスやマネジメントには「良い」と「悪い」ものがある。一例として、希少種が生息する森林でのガバナンスとマネジメントについて考えてみよう。ここでは、希少種が生息する森林において、希少種の保護と住民による森林利用の両立をどのように図るかという問題を取り上げ、①希少種を厳正に保

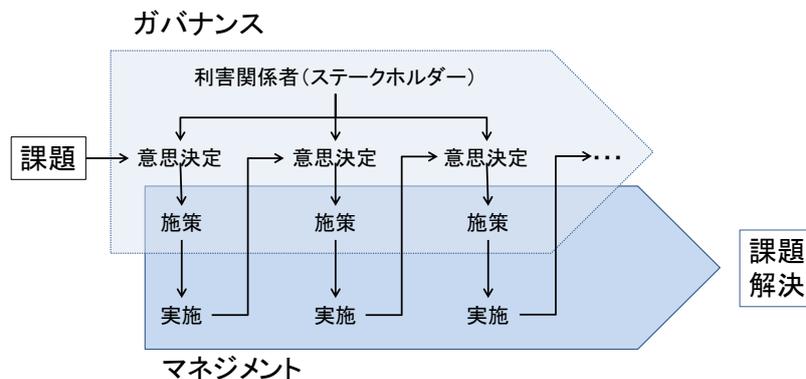


Fig. 1. ガバナンスとマネジメントの関係

護するために、森林利用を政府がトップダウンで規制する場合と、②住民の意見を最大限に尊重するため、希少種の生息に影響を及ぼす恐れのある森林利用を規制しない場合、の2つのケースを考えてみよう。前者の場合、希少種を保護するための取り組みがうまく行けばマネジメントは「良い」と評価できるかもしれないが、住民の意向は全く尊重されておらずガバナンスという点では問題がある。一方、後者の場合、住民の意向が尊重されているという点では「良い」ガバナンスと言えるかもしれないが、希少種の生息が脅かされるリスクが生じ、マネジメントという点では問題である。

さて、持続可能な森林管理を実現していくためには、それにふさわしいガバナンスの具体像を明らかにしていく必要がある。そこで、「良いガバナンス」とはどのようなものであるのかについての検討が、これまで進められてきた。そして、規範的な意味での「良いガバナンス」を目標として設定し、対象とするガバナンスの達成度合いを測定しようとするのがガバナンスの評価である。

一方、上述したように、ガバナンスの視点はグローバル、ナショナル、ローカルといったスケールによって異なることから、ガバナンス評価も各レベルごとに行う必要がある。また、ローカルレベルで見た場合、森林を取り巻く状況や森林に期待される役割が異なることから、実現すべきガバナンスのあり方も森林によって違ってくることが予想される。たとえば、国有林におけるガバナンスと民有林、私有林のそれでは、関係する主体やセクター、森林に期待される役割が異なることから、望ましいガバナンスの姿も異なってくるだろう。つまり、地域社会にとって望ましい持続可能な森林管理の実現には、ローカルレベルでのより「良いガバナンス」のあり方を明らかにすることが重要となる。

なお、ガバナンスに対する認識は、関係者の立場によって異なると考えられる。例えば、施策の立案に関わった行政担当者は、自らが関与した政策立案のプロセスを肯定的に評価するかもしれない。一方、地域住民や施策に関わる利害関係者は、意思決定プロセスにおける自分たちの意向の反映され方によって、行政担当者とは異なる様々な認識を抱くに違いない。そのように考えると、ガバナンスの評価は立場の違いによって異なってくるだろう。つまり、ガバナンスを評価する際には、誰がどのように評価しているのかという点も重要であると言える。

3. 森林ガバナンス評価手法の検討

それでは「良いガバナンス」とはどのようなものであるか。どのような森林ガバナンスが「良いガバナンス」であるのかについては、まだ十分な共通認識が醸成されているとは言えないが、「良いガバナンス」を実現していく上で考慮すべき原則としてよく引用されるのが、UNDP (1997) の「ガバナンス原則」である。ここでは、10の原則が取り上げられており (Table 1)、これらが望ましい状態に達した時に、「良いガバナンス」が実現されると考えられている (Eagles et al. 2013)。こうした原則がどのような状態にあるのかを測るための物差しが、ガバナンス評価指標である。

森林ガバナンス評価指標の開発は、主に開発途上国における違法伐採や政府の腐敗をチェックし、政府による森林ガバナンスの向上を目指して行われてきた。その中でまず挙げられるのが、World Bank (2009) であるが、ここではガバナンスを評価するための原則ごとに検討すべき複数の項目が提示されている。これを発展させ、具体的な評価指標の作成を行ったのが PROFOR (2012) であり、ガバナンス原則として説明責任、有効性、効率性、公正性・公平性、参加、透明性が取り上げられ、これら6つの原則に沿ったガ

Table 1. 「良いガバナンス」のための原則

原則	説明
1. 市民参加 (Participation)	全ての人が、自分たちの利害を意思決定過程で、直接もしくは間接的に表明する機会を持っている。
2. 合意形成 (Consensus orientation)	グループ間で異なる利害の対立を解決し、合意に導くことができる。
3. 戦略的ビジョン (Strategic vision)	状況ごとの歴史的、文化的、社会的複雑性を踏まえた上で、建設的に将来を展望することができる。
4. 反応性 (Responsiveness)	利害関係者からの苦情や批判が生じた際、先を見通した視点で制度やプロセスを対応させることができる。
5. 有効性 (Effectiveness)	組織としての目的を達成可能な能力を持っている。
6. 効率性 (Efficiency)	最小限の無駄や出費、不必要な努力を抑えながら、資源や行動、生産能力を効率的に活用することができる。
7. 説明責任 (Accountability)	当局者は利害関係者に対して、所有物の処分や義務について答えることができ、かつ批判や要求に対して対応するとともに、失敗や無能力、偽りに対する責任を持っている。
8. 透明性 (Transparency)	情報を共有するとともに、オープンなやり方で行動することができる。
9. 公平性 (Equity)	類似の事案については、同じやり方で対応することができる。
10. 法規則 (Rule of law)	法的枠組みは公正にかつ不公平なく執行される。

出典：Eagles et al. (2013)

バナンス評価指標が作成されている。また、Davis et al. (2013) では、透明性、参加、説明責任、調整、能力の5原則にもとづいたガバナンス評価指標の開発が試みられている。

これらの事例は、途上国における森林ガバナンスを想定したものであるが、途上国と先進国では森林ガバナンスの熟度が異なることから、用いるべき指標も異なってくる。そこで Secco et al. (2011b) は、先進国の事例としてイタリアを対象に、参加、透明性、説明責任、能力の4つの原則に着目しながら、ガバナンスの定性的な評価を試みている。なお、ガバナンス指標の検討は、ナショナル、リージョナル、ローカルレベルごとに行っていく必要があるが、World Bank (2009) や PROFOR (2012) はナショナルレベルでの適用を念頭にしたものである。一方、Secco et al. (2011b) ではナショナル、リージョナル、ローカルレベルごとのガバナンス評価を試みているほか、Secco et al. (2011a) はローカルレベルでの具体的な指標の検討を行っており、これらをもとに Secco et al. (2014) はイタリアを事例としたローカルレベルでの森林ガバナンス評価指標の開発を試みている。以上のように、対象とする地域やレベルに応じて、適切なガバナンス評価指標の開発を行っていく必要があるが、先進国を対象とするローカルレベルでの森林ガバナンス評価指標の開発はまだ取り組みが始まったばかりであり、あまり研究蓄積があるとは言えない状況である。

さて、ガバナンスの評価方法としては大きく、公式の文書や統計といった既存の資料を用いた定性的、定量的評価のほかに、関係者へのインタビューやアンケート調査に基づいた評価方法がある¹⁾。会議記録や報告書といった公式文書を用いる場合、文書の入手可能性とともに、記述内容をいかに客観化するかが課題となる。公式統計の場合、ガバナンス評価に利用可能なデータとしてどのようなものがあるかを精査する必要があるが、会議の開催数や参加者数、窓口対応回数といった情報も、ガバナンスを定量的に評価するための指標として活用可能である。

一方、インタビュー調査による場合は、公式文書や統計のみでは十分には把握できない関係者の認識を明らかにすることができる。特に、ガバナンスに直接的に関わっている関係者のガバナンスに対する認識は、実際のガバナンスに大きな影響を与えるものであると考えられるため (Turner et al. 2014)、関係者の認識はガバナンスを評価する上で最も重要なファクターと言える。しかしインタビューに基づく定性的な評価の場合、被験者の発言内容の正確さとともに、その内容を如何に客観化するかが課題となる。一方、アンケート調査による場合は、より広く多くの被験者からデータを集めることが可能であり、かつ客観的な意識評価を行うことができる。しかしながら、ガバナンスの中心

部分に位置していない被験者は、ガバナンスの実態についての確には評価できない可能性があり、評価の信頼性が課題となってくる。

このように、ガバナンス評価指標として利用可能なデータソースには、それぞれ一長一短がある。わが国における森林ガバナンスの評価に際しては、どのような指標の選択が適切であるのかについて、今後さらに詳しく検討していく必要があるだろう。

なお、ガバナンス評価指標に類似のものとして、モントリオール・プロセスによる持続可能な森林管理のための基準・指標や (矢口 2010)、森林認証で用いられている基準・指標があり (長池 2014)、森林ガバナンス評価のための原則・指標とも関わりが深い。しかし、これらは森林管理の持続可能性に着目した指標であるため、マネジメント (管理) に焦点を当てた指標で構成されている。一方、ガバナンスの領域とマネジメントのそれとの間には重複する部分もあり (Lockwood 2010)、ガバナンスに関わりの深い指標も一部には含まれるものの、ガバナンスを包括的に評価するために開発されたものではないため、ガバナンス原則として提示されている内容を網羅しているわけではない。「ガバナンス」は政策立案におけるプロセスや意思決定のあり方、「マネジメント」はそのアウトプットとして具体化された目標の実現に向けた手段や具体的な実施方法に着目している点に注意する必要がある。

以下では、都市林を対象としたガバナンス評価の試論として、北海道札幌市郊外に位置する野幌国有林を事例として取り上げ、検討を試みる。

4. 野幌国有林を事例としたガバナンス評価

4.1 対象事例の概要

野幌国有林は、北海道札幌市の郊外に広がる平地林である。本森林一帯は道立自然公園「野幌森林公園」に指定され、公園面積約 2,000ha のうち国有林がおよそ 8 割を占める。1968 年 (昭和 43) に明治開拓 100 年を記念して道立自然公園に指定されたことに加えて、翌年には自然休養林に指定されている。札幌市に隣接していることから、都市住民のレクリエーションに盛んに利用されている。こうした中、2013 年に一般会計化された国有林野事業では、「国民の森林」として公益的機能の一層の発揮が求められ、地域住民や市民、国民のニーズを反映した森林の管理がますます重要性を増してきており、この点でも参加と協働による森林ガバナンスのあり方が問われるようになってきている。

さて、2004 年に北海道を襲った大型の台風 18 号は、本国有林に 71ha の風倒被害をもたらした。そこで、野幌国有林を所管する北海道森林管理局は「野幌森林再生プロジェクト」を立ち上げ、専門家や地域関係者を含む検討委員会を組織し、100 年後を目指して原生林を再生させるという目標を定めた報告書を 2005 年にま

とめた。この報告書にもとづき、一般市民が参加する植樹や下刈り活動に加えて、森林管理局と市民、企業12団体（現在は9団体）が協定を締結し、風倒被害地の森林を協働で再生させる活動が展開されている。

国有林では計画的な森林の管理経営を行うため、全国レベルで「国有林野の管理経営に関する基本計画」が、また、流域レベルでは「地域管理経営計画」および「国有林野施業実施計画」が策定されている。流域レベルの計画については、森林法にもとづいた「国有林の地域別の森林計画」も併せて策定されており、これらの計画ではすべてパブリック・コメントが実施され、ホームページ上で計画案の閲覧に供される。対象地域を含む石狩空知森林計画区の計画策定に当たっては、一般市民を対象とした意見交換会が実施され、事前にプレスリリースやホームページでの広報が行われた。

風倒被害地における森林再生のあり方を検討する目的で、2004～2005年にかけて開催された野幌森林再生検討会は、学識経験者および関係機関が参加した上で公開され、一般市民も傍聴者として参加できた。この検討会によって、森林再生の目標として、「100年後の原生林の再生を目指す」ことが明確にされた。

これを受けて開始された市民団体との協定による森林再生活動では、活動に参加する団体相互の情報交換を行うための野幌森林再生活動連絡会が、年1回定期的に開催されている。さらに、本プロジェクトを着実に実施していくことを目的に、地元関係者や有識者からなる野幌プロジェクトフォローアップ委員会が2005～2010年の間開催された。この委員会も公開とされ、希望する市民は傍聴を行うことができた。また、これら会議の記録等については、いずれもホームページ上で公開されている。

4.2 既存の資料にもとづくガバナンス評価

ここでは、インターネットを含む既存資料から得られた情報に依拠しながら、UNDP（1997）のガバナンス原則に沿って対象地域のガバナンス評価を行う。はじめに「市民参加」であるが、森林計画策定過程におけるパブリック・コメントが実施されており、森林計画については誰でも意見を表明できるようになっている。また、台風による風倒被害地の森林を再生させるために、国有林の募集に応じて集まった森林再生に関わっている団体（森林再生団体）と森林管理局との間では年1回の意見交換会が開催され、行政との意見交換の機会を持っている。一方、その他団体にはフォーマルな参加の機会には特に設けられておらず、団体からの要望に応じて個別に対応している状況である。「合意形成」については、問題が生じる度に委員会等が設置され、課題解決へ向けての検討が行われてきている。また、森林再生活動を含めた森林管理は森林管理局が

主体となって実施しているが、対象地域は道立自然公園にも指定されており、自然環境保全やレクリエーション利用といった面での森林管理局と北海道との調整能力が重要となっている。「戦略的ビジョン」については、上述のように森林の将来目標が設定されており、森林管理の方向性が明確にされている。「有効性」については、森林再生団体は森林管理局と連携しながら活動を行っており、参加と協働による森林管理の取り組みが進められている。「説明責任」については、上述の森林計画案に関するパブリック・コメントにおいて、意見に対する対応結果について森林管理局側の回答を公表することが義務付けられている。「透明性」については、委員会等は原則公開とされ、一般市民の傍聴も可能となっていた。また、森林計画案への意見に対する対応結果についてホームページ上で公開されたほか、野幌森林再生検討会による森林再生の方向性が、議論の過程が公開された上で明確に示されており、計画や方向性の決定過程の透明性はかなりの程度確保されていると言える。「法規則」については、少なくともルール上は法的な枠組みに沿って法制度が執行されていると考えられる。なお、「反応性」、「効率性」、「公平性」についての具体的な現状については不明である。

以上のように、既存情報をもとにした分析結果から、事例地におけるガバナンスの現状は一定程度の水準にあると評価できる。

4.3 市民団体の認識にもとづくガバナンス評価

4.3.1 調査方法

上で述べたように、対象地域では市民との協働による森林管理の取り組みが積極的に進められているが、森林管理に関わる市民団体はガバナンスをどのように認識し評価しているのだろうか。そこで次に、市民団体によるガバナンス評価についての検討を行う。なお、分析に使用するデータであるが、本論では行政との協働に関する市民団体への意識調査を目的として実施したアンケート調査（Yamaki 2016）の中から、ガバナンス評価に利用可能な項目を抽出し試論的に用いた。アンケート調査は、国有林が把握している対象地域で活動を行っている市民団体、および道立自然公園を管理する北海道が把握している市民団体のリストを入手し、それらの団体を対象に実施した。調査の実施期間は2012年6～7月であり、リストに掲載されている全48団体にアンケート調査票を郵送した。その結果、32部が回収され、無記入欄が多かった1部を除いた31部を分析に用いた（有効回答率64.6%）。

ガバナンス評価に用いた質問は、Table 2に示す7原則に対応した14指標である。指標の評価は「全くそう思わない」を1点、中間を3点、「とてもそう思う」を5点として、各団体に回答を依頼した。なお、本研究で用いたアンケート調査データは、ガバナンスの評価

Table 2. 質問に用いた項目

原則	No.	質問文
1. 市民参加	1	行政と連携や情報交換を行う機会は十分にある。
	2	行政に対して、意見や要望を発言する機会は十分にある。
3. 戦略的ビジョン	3	森の整備や管理に関する目標や方向性は明確だ。
4. 反応性	4	行政は自分たちの意見をよく聞いてくれる。
	5	森の整備や管理について、行政はリーダーシップを発揮している。
5. 有効性	6	行政からの技術支援は十分だ。
	7	行政からの財政的支援は十分だ。
	8	行政との連携・協力はうまくいっている。
	9	行政と団体との連携、協力は、全体としてうまくいっている。
	10	行政機関どうしの連携、協力は、全体としてうまくいっている。
7. 説明責任	11	決定された施策は合理的かつ妥当なものだ。
8. 透明性	12	行政からの情報提供は十分だ。
	13	施策が決定されるプロセスの透明性は高い。
9. 公平性	14	施策の実施にあたっては、特定の団体に偏りなく意見や要望が反映されている。

を直接的な目的としたものではない。したがって、ガバナンス原則全般の把握を当初から目論んだものではないため、今後は今回の試論的な分析をもとに内容をさらに精査し、ガバナンス評価により適した質問文に改良していく必要がある。

上述したように、森林再生団体は、森林管理に対するフォーマルな参加の機会を持っており、それ以外の団体とはガバナンスに対する意識が異なることが予想される。そこで、前者に属する9団体およびその他22団体に分け、評価の違いを比較した。

4.3.2 結果

回答のあった団体の構成は、森林再生団体では市民団体が6、民間企業が3、その他団体では市民団体が18、学校が3、大学が1であった。活動目的を見ると、森林再生団体では「自然環境を整備、保全するため」が9団体（100%）と最も多く、次いで「社会貢献の一環として」が7団体（77.8%）、「人々とのふれあいの機会を得るため」が6団体（66.7%）となっていた（Table 3）。その他団体では、「希少な動植物を保護するため」が12団体（54.5%）と最も多く、「自然環境を整備、保全するため」が11団体（50.0%）、「人々とのふれあいの機会を得るため」が10団体（45.5%）と続いていた。一方、その他団体で最上位を占めていた「希少な

動植物を保護するため」が、森林再生団体では1団体（11.1%）にとどまっていた。森林再生団体には社会的貢献を目的とした民間企業も含まれており、そのため自然環境の整備・保全、社会貢献といった活動目的が多く、自然環境の再生を目指した社会活動を志向していると考えられる。一方、その他団体では希少な動植物の保護、自然環境の整備・保全が多く、動植物を含む自然環境の保全を志向する団体が多いことが推察される。

活動をする上での課題の有無については、17団体（54.8%）で課題の存在を指摘した。具体的な内容は、森林再生団体では「構成員数の減少、新規入会が少ない」が3団体（33.3%）、「構成員の高齢化」が2団体（22.2%）であった（Table 4）。その他団体では、「構成員の高齢化」が11団体（50.0%）と半数の団体からの指摘があり、「構成員数の減少、新規入会が少ない」、「活動資金」がともに6団体（27.3%）と続いていた。

ガバナンスの評価結果を全体的に見ると、評価結果の平均値が中間値の3.0を上回ったのは行政のリーダーシップ（No.5）のみであり、ガバナンスの評価は総じてあまり高いとは言えない結果となった（Fig. 1）。全体評価について項目間の比較を行うと、ウィルコクソンの符号順位検定の結果、財政的支援（No.7）は他の項目よりも有意に低い評価値を示した（Table 5）。

Table 3. 活動目的（複数回答）

	森林再生団体	その他団体	合計
自然環境を整備、保全するため	9	11	20
人々とのふれあいの機会を得るため	6	10	16
社会貢献の一環として	7	8	15
希少な動植物を保護するため	1	12	13
余暇、楽しみとして	4	6	10
健康維持のため	2	3	5
その他	0	7	7
合計	9	22	31

Table 4. 活動をする上での課題（複数回答）

	森林再生団体	その他団体	合計
構成員の高齢化	2	11	13
構成員数の減少、新規入会が少ない	3	6	9
活動資金	1	6	7
行政との関係	1	4	5
活動に新規性が乏しく停滞してきている	0	4	4
その他	3	3	6
合計	4	13	17

Table 5. 項目間の得点分布の差の有意確率

No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
2	0.739												
3	0.710	0.495											
4	0.052	0.109	0.718										
5	0.179	0.325	0.225	0.022*									
6	0.057	0.107	0.861	0.627	0.075								
7	0.002**	0.004**	0.036*	0.013*	0.004**	0.032*							
8	0.405	0.660	0.820	0.405	0.108	0.107	0.003**						
9	0.883	0.767	0.497	0.219	0.635	0.150	0.006**	0.923					
10	0.319	0.644	0.232	0.712	0.538	0.634	0.047*	0.624	0.118				
11	0.564	0.739	0.589	0.705	0.329	0.317	0.030*	0.564	0.293	0.218			
12	0.025*	0.106	0.923	0.593	0.068	0.763	0.012*	0.135	0.082	0.971	0.792		
13	0.177	0.608	0.776	1.000	0.101	0.601	0.023*	0.346	0.063	0.166	0.705	0.705	
14	0.057	0.100	0.477	0.206	0.118	0.608	0.083	0.190	0.070	0.053	0.257	0.603	0.206

**は1%水準、*は5%水準で有意。

つぎに、森林再生団体とその他団体の比較を行うと、その他団体の方が評価の低い項目が多い傾向にあった。ウィルコクソンの順位和検定の結果、「行政との連携・協力はうまくいっている (No.8)」でその他団体の評価が1%水準で有意に低かったが、他の項目では有意差が見られなかった。

4.4 考察

既存資料にもとづく分析から、対象地域のガバナンスはまずまずの状況にあると評価された。しかし、市民団体に対する評価結果では、ガバナンスに対する評価は総じて高い水準にあるとは必ずしも言えない状況にあった。項目別では財政的支援に対する評価 (Fig. 2, No.7) が特に低かった。その他団体は、活動をする上での課題として活動資金を上位に挙げており、市民団体のエンパワメントを向上させていく上での課題の一つと考えられる。しかしながら、財政逼迫の中、そうした支援を行政が行うのも現状ではなかなか難しい状況にあると思われる。

森林再生団体とその他団体の評価を比較すると、行

政との連携・協力に対する前者の評価の方が有意に高かった。これは、前者が国有林からの呼びかけに応募してきた団体であり、行政との連携・協力関係を比較的容易に築くことができた一方で、後者にはそうした国有林との関係とは一線を画する団体が含まれているためではないかと推察される。本地域では以前に、市民団体が支障木の伐採や間伐に対して反対したことがあり、その他団体の中には行政に対してネガティブな印象を抱いている団体がある程度含まれているものと思われる。しかし、両者とも行政との連携・協力することは重要であると認識しており、しかもその評価には差がないことから (Yamaki 2016)、その他団体と行政との連携・協力の機会を増やしていくことが必要ではないかと考えられる。

一方、その他団体は森林再生団体のように行政との定期的な意見交換の場を持っておらず、「市民参加」に対する評価が低いのではないかと予想されたが、森林再生団体に比べて評価がやや低いものの有意差は見られなかった。この背景には、行政が必要に応じて市民団体との協議を積み重ねてきたことで、市民参加に対

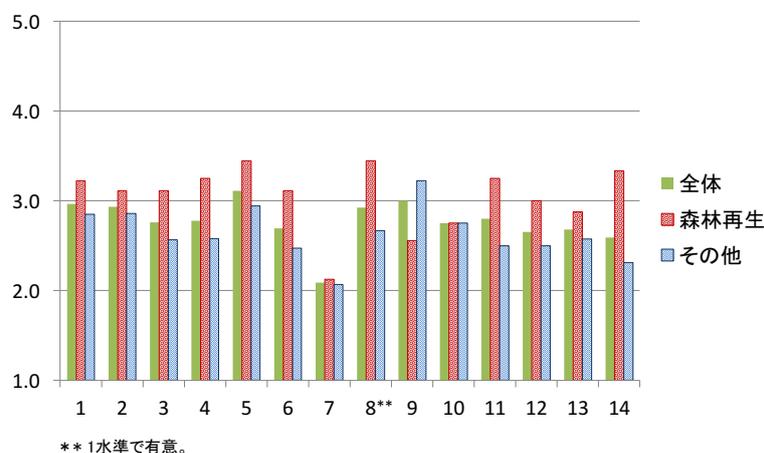


Fig. 2. 各項目の評価結果

して一定の評価が得られてきていることがあるものと思われる。

既存資料にもとづくガバナンス評価からはまずまずの評価が得られた一方、市民団体による評価では総じて高い評価が得られなかった。以上のことは、既存資料による評価のみではなく関係者を対象とした評価も併せて実施し、総合的に評価することが重要であることを示している。なお、関係者に対する今回の評価結果をもって、本地域における森林ガバナンスの水準が低いと直ちに結論すべきではない。どの程度なら良いガバナンスと言えるのかといった判断基準がまだないからであり、今後は同様の指標を用いて他の森林と比較検討したり、他のデータソースの利用可能性を検討するなどして、より総合的な評価を行っていく必要があるだろう。

5. おわりに：都市林を対象とした森林ガバナンス評価へ向けて

本研究では、参加と協働によるガバナンスが重視される都市林におけるより良いガバナンスの実現に向けて、森林ガバナンス概念についてまず検討するとともに、森林ガバナンス評価手法のあり方を探った。続いて、野幌国有林を事例として市民団体の認識をもとに試行的な評価を行った。その結果、既存資料にもとづく評価と市民団体の認識との間には違いが見られた。このことから、公式文書や統計等の既存資料に加えて、関係者の認識をもとにしたガバナンスの総合的かつ客観的な評価手法のあり方を検討していく必要がある。その一方で、ガバナンスは権力や関係者間の関係性が深く関わった言説の中に存在するものであり、客観的でなどあり得ないという指摘がある (Lawrence et al. 2013)。また、Turner et al. (2014) が指摘するように、ガバナンスに関与する関係者のガバナンスに対する認識は、ガバナンスそれ自体にも大きく影響する。以上のことから、利害関係者の認識に基づいたガバナンス評価を中心としつつ、既存資料等を用いながら客観性を確保した評価体系の構築を図っていくことが重要であろう。

市民団体のガバナンスに対する評価は、市民団体の国有林への関わり方の違いによって違いが見られた。このことは、森林に関わる立場の違いによって、ガバナンスに対する認識が異なっていることを意味している。全ての関係者にとって森林のより「良いガバナンス」を目指すためには、幅広い関係者を対象にしたさらに包括的な評価を実施していくことが求められるだろう。なお、今回は既存のアンケートデータを用いて、ガバナンス評価を試論的に試みたが、質問内容について今後さらに精査を進め、ガバナンスを適切に評価できるように改善させていく必要がある。

市民団体を対象とした今回の分析結果では、ガバナ

ンスの評価は必ずしも高いとは言えなかった。しかし、すべての項目の評価が高い理想的なガバナンスなど現実的に存在するのだろうか。理想的なガバナンスであると言われる事例であっても、指標の値が高くない可能性もある。また、そもそも「良いガバナンス」とはどのようなものなのであるだろうか。全てのガバナンス指標の評価が高ければ「良いガバナンス」と言えるのだろうか。ガバナンス指標と「良いガバナンス」との関係についても、多くの事例を取り上げながら検討を進め、「良いガバナンス」の判断基準を明らかにしていく必要がある。

なお、ガバナンス評価はある一時期の状態について評価したものに過ぎない。様々な条件が変化していくにしたがって、ガバナンスの状態も順応的に変えていく必要がある。そのためには、ガバナンスの状態を定期的に観測、評価し、最善の状態を実現すべくガバナンスを柔軟に対応させていくことが重要であろう。

本論では、ガバナンス原則に基づいた森林ガバナンス指標開発に関する既往研究を踏まえながら、都市林におけるガバナンス評価指標の検討を行った。多様な利害関係者が存在し、かつ多様なニーズへの対応が求められる都市林において、持続的な森林管理を実現していくためには、参加と協働によるより「良いガバナンス」の構築が不可欠となっている。その実現に向けて、包括的なガバナンス評価のための枠組みや手法の検討を今後ともさらに進めていくことが重要である。さらに、「マネジメント」に関する評価手法と融合させながら、持続的な森林管理の達成度合いを総合的に評価するための手法の開発を進めていくことも、今後の重要な課題と言えるだろう。

注1) 菊地ら (2017) は、当事者どうしでワークショップ形式によりガバナンスを評価する方法を提案している。こうした様々な評価手法の可能性についても、今後さらに踏み込んで検討していく必要がある。

引用文献

- Borrini-Feyerabend, G., N. Dudley, T. Jaeger, B. Lassen, N. Pathak Broome, A. Phillips and T. Sandwith (2013) Governance of protected areas: from understanding to action. Best Practice Protected Area Guidelines Series No. 20, Gland, Switzerland, IUCN, 124pp.
- Davis, C., Williams, L.G., Lupberger, S. and Daviet, F. (2013) Assessing forest governance: the governance of forests initiative indicator framework. World Resources Institute, Washington DC, 68pp.
- Eagles, P.F., Romagosa, F., Buteau-Duitschaefer, W.C., Havitz, M., Glover, T.D. and McCutcheon, B. (2013) Good governance in protected areas: an evaluation of stakeholders' perceptions in British Columbia and Ontario

- Provincial Parks. *Journal of Sustainable Tourism*, 21, 60-79.
- 藤井 康平 (2012) 自然資源経済ガバナンス論の射程：従来のガバナンス論との比較検討を中心に. 一橋経済学, 6 (1), 61-78.
- 井上 真 (2010) 自然資源ガバナンス論へのアプローチ：森林コモンズから考える. 寺西 俊一・石田 信隆編 “農林水産業の再生を考える”. 経済社, 東京, 235-254.
- 柿澤 宏昭 (2010) 森林ガバナンス研究の展望. 林業経済, 63 (2), 1-15.
- 菊地 直樹・敷田 麻実・豊田 光世・清水 万由子 (2017) 自然再生の活動プロセスを社会的に評価する：社会的評価ツールの試み. 宮内 泰介編 “どうすれば環境保全はうまくいくのか：現場から考える「順応的ガバナンス」の進め方”. 新泉社, 東京, 248-277.
- Lawrence, A., De Vreese, R., Johnston, M., van den Bosch, C. C. K., and Sanesi, G. (2013) Urban forest governance: towards a framework for comparing approaches. *Urban Forestry & Urban Greening*, 12(4), 464-473.
- Lockwood, M. (2010) Good governance for terrestrial protected areas: A framework, principles and performance outcomes. *Journal of Environmental Management*, 91, 754-766.
- 松下 和夫編著 (2007) 環境ガバナンス論. 京都大学出版会, 317pp.
- 宮内 泰介編著 (2013) なぜ環境保全はうまくいかないのか：現場から考える「順応的ガバナンス」の可能性. 新泉社, 東京, 360pp.
- 宮内 泰介編著 (2017) どうすれば環境保全はうまくいくのか：現場から考える「順応的ガバナンス」の進め方. 新泉社, 東京, 352pp.
- 長池 卓男 (2014) 森林認証制度に関する研究動向と展望：特に森林の生物多様性保全に果たす役割に関して. 日本森林学会誌, 96 (5), 267-273.
- PROFOR (2012) Assessing and monitoring forest governance: a user's guide to a diagnostic tool. Program on Forests, World Bank, Washington DC, 115pp.
- Rametsteiner, E. (2009) Governance concepts and their application in forest policy initiatives from global to local levels. *Small-scale Forestry*, 8(2), 143-158.
- 林業経済学会 (2012) ガバナンス論の地平：森林からの二つのアプローチ (林業経済学会第 22 回研究会 Box), 林業経済, 64 (10), 18-29.
- Secco, L., Da Re, R., Gatto, P. and Tassa, D. T. (2011a) How to measure governance in forestry: key dimensions and indicators from emerging economic mechanisms. *Allgemeine Forst-und Jagdzeitung*, 182, 69-81.
- Secco, L., Pettenella, D. and Gatto, P. (2011b) Forestry governance and collective learning process in Italy: likelihood or utopia?. *Forest Policy and Economics*, 13(2), 104-112.
- Secco, L., Da Re, R., Pettenella, D. M. and Gatto, P. (2014) Why and how to measure forest governance at local level: a set of indicators. *Forest Policy and Economics*, 49, 57-71.
- Tacconi, L. (2011) Developing environmental governance research: the example of forest cover change studies. *Environmental Conservation*, 38(2), 234-246.
- Turner, R.A., Fitzsimmons, C., Forster, J., Mahon, R., Peterson, A. and Stead, S.M. (2014) Measuring good governance for complex ecosystems: perceptions of coral reef-dependent communities in the Caribbean. *Global Environmental Change*, 29, 105-117.
- UNDP (1997) Governance for sustainable human development. URL <http://www.pogar.org/publications/other/undp/governance/undppolicydoc97-e.pdf>
- World Bank. (2009) Roots for good forest outcomes: an analytical framework for governance reforms. World Bank, Washington DC, 47pp.
- 矢口 克也 (2010) 「持続可能な森林経営」の基準と指標. レファレンス, 60(10), 31-49.
- 八巻 一成・庄子 康・林 雅秀 (2011) 自然資源管理のガバナンス：レブンアツモリソウ保全を事例に. 林業経済研究, 57(3), 2-11.
- Yamaki, K. (2015) Network governance of endangered species conservation: a case study of Reibun Lady's-Slipper, *Journal for Nature Conservation*, 24, 83-92
- Yamaki, K. (2016) Role of social networks in urban forest management collaboration: a case study in northern Japan. *Urban Forestry & Urban Greening*, 18, 212-220.

A study on assessing the governance of urban forests: A case study of nopporo national forest

Kazushige YAMAKI^{1)*}

Abstract

Establishing forest governance through stakeholders' participation and collaboration is becoming an important issue for realizing sustainable management of urban forests that receive diverse demands. This study examined a method for assessing governance to ensure better governance in urban forests. First, the paper discussed the concept of governance of forests and then examined methods to assess the present condition of governance. Next, Nopporo National Forest was assessed using 14 indicators available to assess governance that were extracted from a questionnaire survey distributed to citizen groups that are involved in a forest regeneration activity and other forest related management and conservation activities as a case. It was found that the governance condition was not highly evaluated as a whole, and financial support, in particular, was lowly evaluated. Moreover, evaluations were different between the citizen groups that had different relationships with the National Forest Office. The study indicated that governance evaluations of stakeholders differ by their relational differences with the forest, which suggests the necessity of conducting a more comprehensive assessment that involves diverse stakeholders.

Key words: forest, governance, assessment, citizen, Nopporo National Forest

Received 9 June 2017, Accepted 19 September 2017

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

* Department of Forest Management, FFPRI, 1 Matsunosato, Tsukuba, Ibaraki 305-8687, Japan; e-mail: yamaki@ffpri.affrc.go.jp

短 報 (Short communication)

海岸防災林再生事業で造成された盛土の深耕による 硬度と透水性の変化

篠宮 佳樹^{1)*}、今矢 明宏²⁾、坂本 知己³⁾

要旨

東日本大震災後の海岸防災林再生事業で造成された生育基盤盛土の一部では、水溜まりの発生や盛土の硬さが問題となり、改善作業が実施されている。本研究では、宮城県名取市の盛土におけるスケルトンバケット式バックホウによる深耕の効果とその持続性について明らかにするため、透水性及び硬度を調査した。硬度は長谷川式土壌貫入計を用いて、透水性は採土円筒により非攪乱状態の盛土を持ち帰り、定水位法で測定した。その結果、深耕による盛土の硬度の低下と透水性の改善を確認した。深耕から3か月、6か月経過後、0～10 cmの最表層で再硬化と透水性の低下が認められたが、10 cm以深の盛土は柔らかく、深耕の効果が持続していた。

キーワード：深耕、盛土、海岸林再生、締固め

1. はじめに

東日本大震災で被災した海岸防災林の再生に際して、津波に対して根返りにくい林帯を造成するため、地下水位から一定の地盤高を確保した盛土が造成されている(林野庁 2013, 坂本 2015)。しかし、盛土の一部で地表面に水溜まりがみられ、植栽木の健全な生育が懸念される事態が生じた(伊藤 2015)。

重機で造成された植栽基盤では根の伸長阻害などが起きやすいことが指摘されている(長谷川ら 1984, 長谷川 2008, 長谷川・猪俣 2015)。これを回避するための手段の一つとして深耕が挙げられる。深耕とは、通常深さ40～60 cm以上の耕起のことを指す(国土交通省都市局 2009)。千葉県九十九里浜の低湿地における海岸林造成のため盛土を施工した事例では、植栽から10年経過したクロマツの根系の発達が深耕を実施しなかった箇所より実施した箇所のほうが良好であったことが報告されている(野原・高橋 2007)。以上の報告から、重機により造成された盛土は締固まりやすいが、深耕することで盛土の生育基盤としての適性が改善されると考えられる。

仙台森林管理署でも、盛土地表面の水溜まりの改善と盛土内に形成された硬い土層の破碎を目的として、リッパードザーやバックホウを用いて盛土の深耕を実施している。ただし、盛土の施工から3～4か月経過して何日か降雨があると表面付近が再硬化する。そのため、深耕を行った後、再硬化が進まないうちに期間を空けないで直ちに植栽するといった施工スケ

ジュールの制約が生じている(伊藤 2015)。造成後の盛土における植栽木の健全な生育と、迅速な再生事業の遂行のため、盛土における深耕の効果の持続性を検証することが必要である。本報では、盛土における透水性と硬さからみた深耕の効果とその持続性について深耕から6か月間の変化について明らかにする。

2. 研究方法

2.1 調査地

調査地を宮城県名取市の台林国有林 89 林班にある、海岸防災林復旧事業名取 10 工区に設定した(Fig. 1)。調査地点は汀線から約 450 m、防潮堤から約 300 m ほど内陸に位置する。アメダス観測点「名取」(調査地から南西へ約 2 km)の年降水量は 1159.6 mm、年平均気温 12.4℃(2003～2010 年)である(気象庁 2016)。盛土材は海岸から 10～30 km 離れた宮城県岩沼市、山元町の丘陵地帯から採取された砂岩が主体の山砂であり、盛土は 2014 年に完成した。盛土は地下水位から 2.4 m 高く造成されることになっている(村上 2015)。また、後述するように盛土断面調査を実施した範囲(深さ 1 m)においては、震災前の地表面である海砂が現れることは一度もなかった。深耕作業は 2015 年 3 月 10～23 日に実施された。作業はスケルトンバケット式バックホウ(KOMATSU 製 PC200 バケット容量 0.8m³)により行われ、工区の最奥部から作業道の出入り口へ後退しながらバケットの大きさである深さ 70 cm 程度まで深耕された。スケルトンバケットはバケッ

原稿受付：平成 29 年 6 月 15 日 原稿受理：平成 29 年 8 月 29 日

1) 森林総合研究所 震災復興・放射性物質研究拠点

2) 国際農林水産業研究センター

3) 森林総合研究所 森林防災研究領域

* 森林総合研究所 震災復興・放射性物質研究拠点 〒 305-8687 茨城県つくば市松の里 1

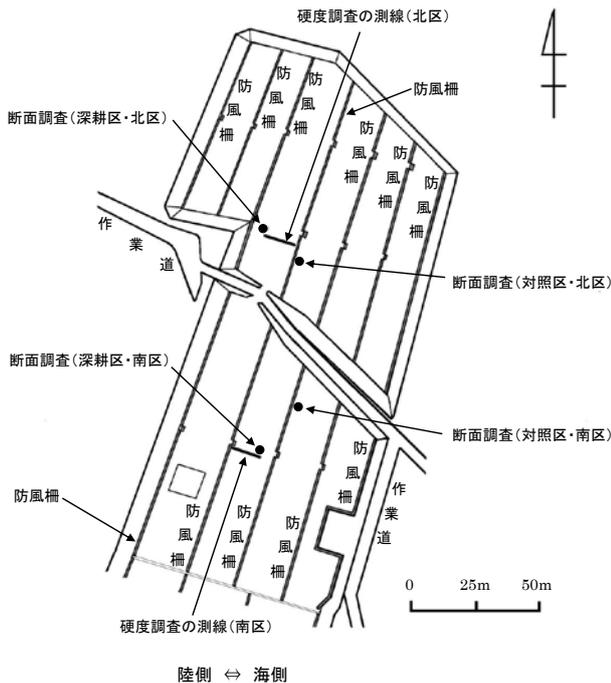


Fig. 1. 試験地の位置
The location of research site

トにスリットが入っていて、細かな土塊は落ちる構造になっている。森林管理署の情報では、深耕作業後、地表面にできた凹凸はバケツで軽く均されている。続いて素掘り水路（幅約 50 cm、深さ約 30 cm）が防風柵と防風柵の間（概ね 20 m）に 1 本の割合で作設された。この作業のため、小型バックホウ（HITACHI 製 ZX-120 0.5m³）が水路をまたぐ形で走行した。2015 年 6 月にクロマツ（*Pinus thunbergii*）、アカマツ（*Pinus densiflora*）が 1ha あたり 5000 本の密度で植栽された。植栽後の 6 月下旬～7 月中旬にかけて静砂垣（日本海岸林学会（2016）によれば、静砂垣は垣内の風速を弱めて飛砂の発生を防ぎ、この垣内に植栽されたクロマツ幼齡木等の植栽木を守るために作られる）が設置された。その際、杭の打ち込みのため、アタッチメントを取り付けた小型バックホウ（KUBOTA 製 形式不詳）が静砂垣と平行に走行した。

2.2 盛土断面調査

名取 10 工区を東西に横断する作業道を挟んで南北に 1 か所ずつ、合計 2 か所（以降、南区、北区と表示）で盛土断面調査を行った（Fig. 1）。調査は深耕前（2015 年 3 月 6 日北区のみ）、直後（4 月 3 日北区、4 月 8 日南区）、3 か月後（6 月 30 日南区のみ）、6 か月後（9 月 28～29 日）に行った。盛土断面調査では、深さ 1m の試孔を設け、断面の形態的特徴を記載後、粒径分析用試料及び非攪乱試料（400 mL 採土円筒、A=100 cm²、h=4 cm）を 2、10、20、30、50、70、90 cm の深さより 1 個ずつ採取した。ただし、深さ 20 cm につ

いては深耕直後より試料採取を開始した。深耕前の深さ 2 cm と 90 cm については 100 mL 採土円筒（A=19.6 cm²、h=5.1 cm）を用いて 1 個ずつ、深耕直後の北区の深さ 70、90 cm については 100 mL 採土円筒を用いて 2 個ずつ採取した。対照として同様の調査を、防風柵があるために深耕されなかった場所（以降、対照区と表示）でも行った（北区の深耕直後の対照区の深さ 70、90 cm も 100 mL 採土円筒で 2 個ずつ採取）。

2.3 物理性の測定

採取した円筒試料（n=80）について、河田・小島（1979）に従って一般物理性を測定した。今回の試料はほぼ砂で構成されていたので、石英や長石の真比重に相当する値 2.65 を土粒子の比重とみなした。飽和透水係数の測定には定水位法（100 mL 円筒試料は変水位法）を、粗空隙率の測定には素焼板を用いた。粒径分析はピペット法にて行い、国際土壌学会法により土性を決定した。日本造園学会（2000）では、植栽基盤の透水性の「良」、「不良」の境界について 10⁻³ cm s⁻¹ = 36 mm h⁻¹ を基準にしており、本研究でもこの基準に従った。

2.4 硬度の測定

硬度の測定には、長谷川式土壤貫入計（ダイトウテクノグリーン製 H-100SE）を用いた。長谷川式土壤貫入計は試孔を掘らなくても硬度の測定ができること、硬度が樹木の根の伸長と関連づけられていることに特徴があり、植栽基盤の基準（国土交通省都市局 2009、日本造園学会 2000 など）や土壤硬度の研究（増田ら 1991、河口・堀 2002、魚井ら 2013 など）に広く利用されている。長谷川式土壤貫入計による硬度は柔らか度（S 値）と呼ばれる、1 打撃（2 kg の錘を 50 cm の高さから落下）あたりの貫入量（cm drop⁻¹）で表される（以降、S 値の単位は省略する）。S 値が小さいと硬く、S 値が大きいと柔らかいことを意味する。S 値 1 以下が 10 cm 以上続いた場合、根の侵入が困難と判断され、S 値 4 以上の場合には乾燥害や支持力低下の懸念があるとされている（長谷川・猪俣 2015）。

硬度の測定は深耕前（2015 年 2 月 3 日北区、3 月 6 日南区）、直後（4 月 2 日）、3 か月後（6 月 30 日～7 月 2 日）、6 か月後（10 月 1～2 日）に行った（Fig. 1）。試孔に近い場所で長さ 10 m 程度の測線を南区、北区にそれぞれ 1 本ずつ設定し、深耕前は 2 m 間隔、深耕後は 0.25 m 間隔で深さ 1 m まで測定した。なお、水平距離は測線の陸側端を起点（0 m）として表示した（Fig. 1 では、測線の左側端が起点である）。北区の水平距離 8.25～10.75 m は地表に木材チップが積まれており、深耕されていない。深耕から 3～4 か月経過した頃、南区の測線の水平距離約 7.6 m 付近および、北区の測線の水平距離約 2.2 m 付近に 1 本ずつ測線に直交する

方向に静砂垣が設置された。この他、盛土断面調査の試孔付近（1 m 以内）でも長谷川式土壌貫入計により硬度を測定した。

3. 結果及び考察

3.1 調査地の盛土の一般物理性

盛土断面の形態的特徴として、土壌構造の発達はなく、深さ 1 m 以内では海砂など、盛土材である山砂以外の出現はなかった。深耕前の土層は全般的に緻密であったが、深耕後は間隙が目視できた。採土円筒に含まれている礫（2 mm 以上）の体積含有率は平均 3.0%（最小 0.1%～最大 10.7%）であった。全空隙率は概ね 35～50%、粗空隙率は 5～30% の範囲にあった。深耕前（2015 年 3 月 6 日北区のみ）、深耕直後（4 月 3 日北区、4 月 8 日南区）に採取された試料の粒径組成は採取深度に関わらず概ね砂 80%、シルト 10%、粘土 10% の重量比で、土性は砂壤土であった。深耕直後から 3 か月、6 か月経過してもシルトや粘土の含有率が明確に増加した箇所は認められなかった。

3.2 深耕前後の盛土の飽和透水係数

深耕前及び対照区の飽和透水係数の鉛直分布を Fig. 2a に示す。飽和透水係数は一部に採取時期による差異がみられたが、これは経時変化によるものではなく、採取箇所によるばらつきを反映したものであると考えられた。深耕前及び対照区の飽和透水係数は深さ 10～30 cm の浅い部分を中心にほぼ 36 mm h⁻¹ 以下であった。特に深さ 10、20 cm の試料は全て 36 mm h⁻¹ 以下で、

最小値（1.3 mm h⁻¹）も同深度に存在した。50 cm より深い層の飽和透水係数は 3～231 mm h⁻¹ とばらつきがみられた。

深耕後の飽和透水係数の鉛直分布を Fig. 2b に示す。深耕直後の北区の深さ 10 cm の結果（8 mm h⁻¹）を除けば、深さ 50 cm より浅い部分では、深耕直後、3 か月、6 か月経過しても飽和透水係数は 36 mm h⁻¹ 以上と良好な透水性を示した。ただし、深さ 10～50 cm の飽和透水係数が深耕直後、3 か月後、6 か月後と時間経過に伴い低下するようことはなかったのに対して、6 か月後の最表層（深さ 2 cm）の飽和透水係数は南区及び北区ともそれぞれ 43、38 mm h⁻¹ と、深耕直後（457、258 mm h⁻¹）、深耕 3 か月後（南区のみ 187 mm h⁻¹）に比べて低下していた。深耕後の深い部分（50～90 cm）の飽和透水係数は 21～321 mm h⁻¹ で、明確な経時変化が認められなかった。なお、深耕直後の北区の深さ 10 cm の試料で飽和透水係数が 8 mm h⁻¹ と低かった理由として、深耕の影響を免れた硬い土塊から試料を採取した、深耕作業後、地表面の凹凸を均す際に固められた箇所から採取したなどが考えられる。

3.3 飽和透水係数に及ぼす深耕の効果と持続性

深耕前及び対照区の深さ 50 cm 以深は飽和透水係数 3～231 mm h⁻¹ と、日本造園学会（2000）の指標による「不良」、「良」が混在していたが、深耕前及び対照区の盛土の深さ 10～30 cm は 17 試料中 16 試料で飽和透水係数が 36 mm h⁻¹ 未満であった。これらのことから、深耕前の盛土は主に深さ 10～30 cm の範囲では

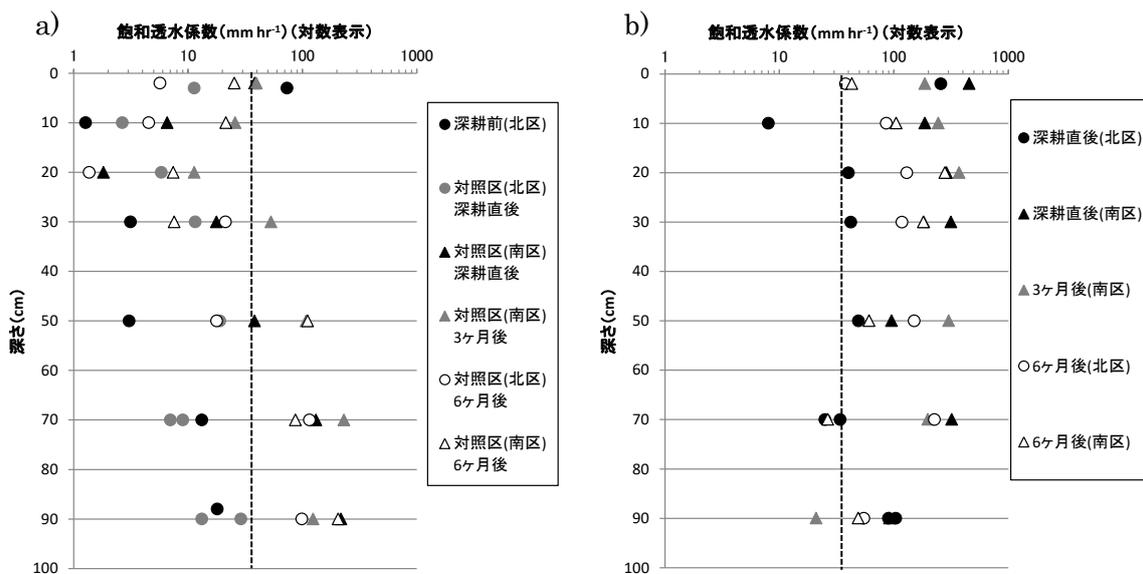


Fig. 2. 飽和透水係数の鉛直分布 (a) 深耕前及び対照区、(b) 深耕後
 The vertical variation in saturated hydraulic conductivities (a) before deep tillage and control plot, (b) after deep tillage
 点線は飽和透水係数 36 mm h⁻¹ を示す
 Dotted lines represent 36 mm h⁻¹ in saturated hydraulic conductivity

透水性が「不良」であることが示された。深耕後、深さ 10～30 cm では 15 試料中 14 試料で飽和透水係数 36 mm h^{-1} 以上の「良」であった。このように深耕後の透水性は深耕前及び対照区より改善していることから、深耕の効果が認められた。

6 か月後、南区及び北区とも最表層（深さ 2 cm）の透水性の低下がみられた。一方で、深さ 10～50 cm では深耕から 6 か月の間に透水性の低下は認められず、かつ飽和透水係数は 36 mm h^{-1} 以上であった。以上より、6 か月経過しても最表層を除けば、飽和透水係数に関して深耕の効果が維持されていることを確認できた。

3.4 深耕前後の盛土の硬度分布

深耕前及び対照区の盛土の S 値の鉛直分布を Fig. 3 に示す。深耕前及び対照区では、深さ 10～50 cm にかけて S 値はほぼ 1.0 以下で、深さ 10、20、30、40、50、60 cm における S 値の平均 ($n=18$) はそれぞれ 0.5、0.5、0.5、0.7、0.7、0.9 と、深さ 10～30 cm において最小を示した。70 cm 以深の S 値は 0.4～3.3 の範囲にあって、S 値の平均 ($n=18$) は深さ 70、80、90、100 cm でそれぞれ 1.0、1.2、1.3、1.5 と、1.0 を超えていた。

深耕直後から 6 か月経過後までの S 値の変化を Fig. 4a 及び 4b に示す。深さ 10～50 cm の S 値は深耕前にはほぼ 1.0 以下であったが、深耕直後には大部分が 1.0 を超えていた (Fig. 4a、4b)。ただし、北区 (Fig. 4a) において、地表にウッドチップが積まれ、深耕されなかった部分である、水平距離 8.25～10.75 m では深さ 0～70 cm くらいまで S 値 1.0 以下となっている。S 値 4.0 を超す部分は、深耕から 3 か月、6 か月と経過するにつれて、南区及び北区ともに少なくなった。深耕直後、3 か月後、6 か月後の南区の S 値の最大はそれぞれ 40.1、40.7、37.2 であったが、S 値 10.0 以上の出現回数は深耕直後、3 か月後、6 か月後の順に 31 回、11 回、10 回と少なくなった。同様に北区の S 値の最大は深耕直後、3 か月後、6 か月後の順にそれぞれ 18.9、8.4、7.1 と低下した。北区の S 値 10.0 以上の出現回数は深耕直後に 4 回あったものの、3 か月後、6 か月後では 0 回であった。

Fig. 5 に S 値と飽和透水係数の関係を示す。これは試孔付近で測定された硬度 (S 値) の結果と盛土断面調査の際に採取された円筒を用いて測定された飽和透水係数の結果を採取深度で対応させたもので、南北両区の深耕前、対照区、深耕直後、深耕 3 か月後、深耕 6 か月後のすべての深さのデータ ($n=72$) を示した。ただし、深さ 2 cm について土壤貫入計の自重でこの深さに達した場合は検討対象から除外した。また、北区の深耕 6 か月後の深さ 70 cm の S 値について、深さ 54.3 cm から 70.3 cm まで 1 打撃で貫入したため、S 値は 16.0 であった。しかし、深さ 70.3 cm から 72.2 cm まで S 値 1.9、深さ 72.2 cm から 74.3 cm まで S 値は 2.1

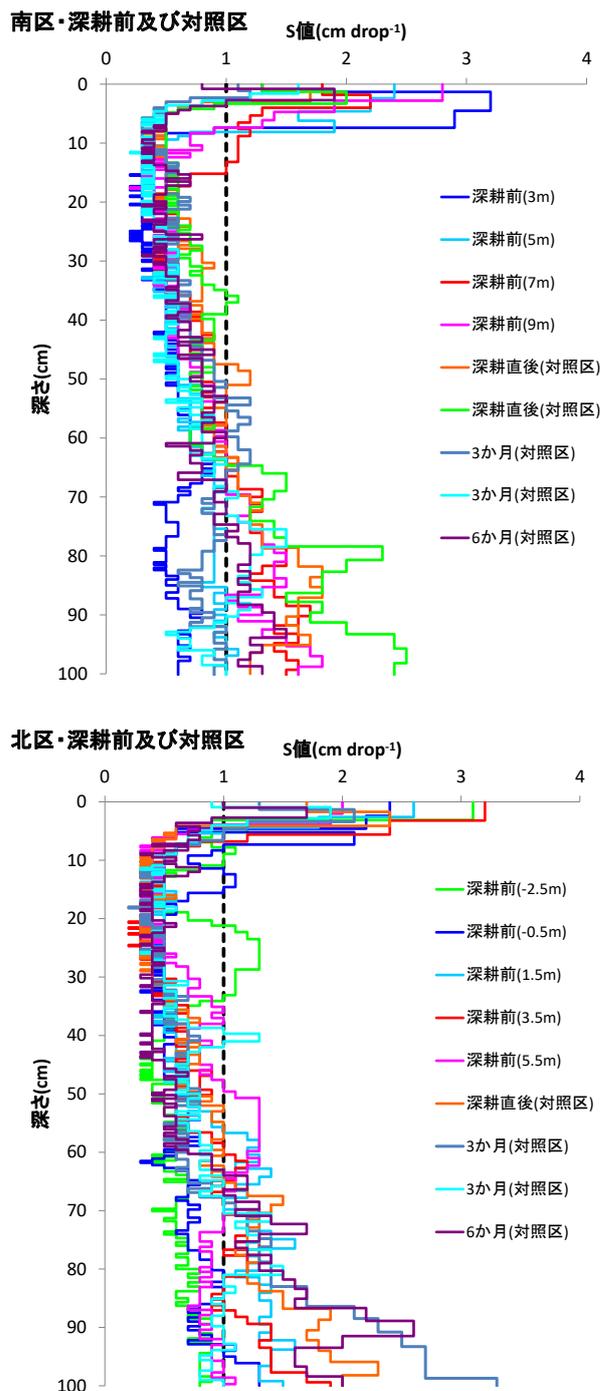


Fig. 3. 深耕前及び対照区の盛土の S 値の鉛直分布

The vertical variation of the S-value in the embankment before deep tillage and control plot
括弧内の数値 (単位: m) は側線の起点からの距離を示す

Number (unit: m) in the parenthesis shows the distance from the starting point of the measuring line

であったことを考慮すると、円筒の採取深さ 68～72 cm を代表する S 値はもっと小さい可能性がある。そのため、これも対象から除外した。なお、同じ深度にデータが複数ある場合は算術平均値を示した。飽和透水係数は、S 値 ≤ 0.5 ($n=15$) では $3 \sim 86 \text{ mm h}^{-1}$ 、 $0.5 <$

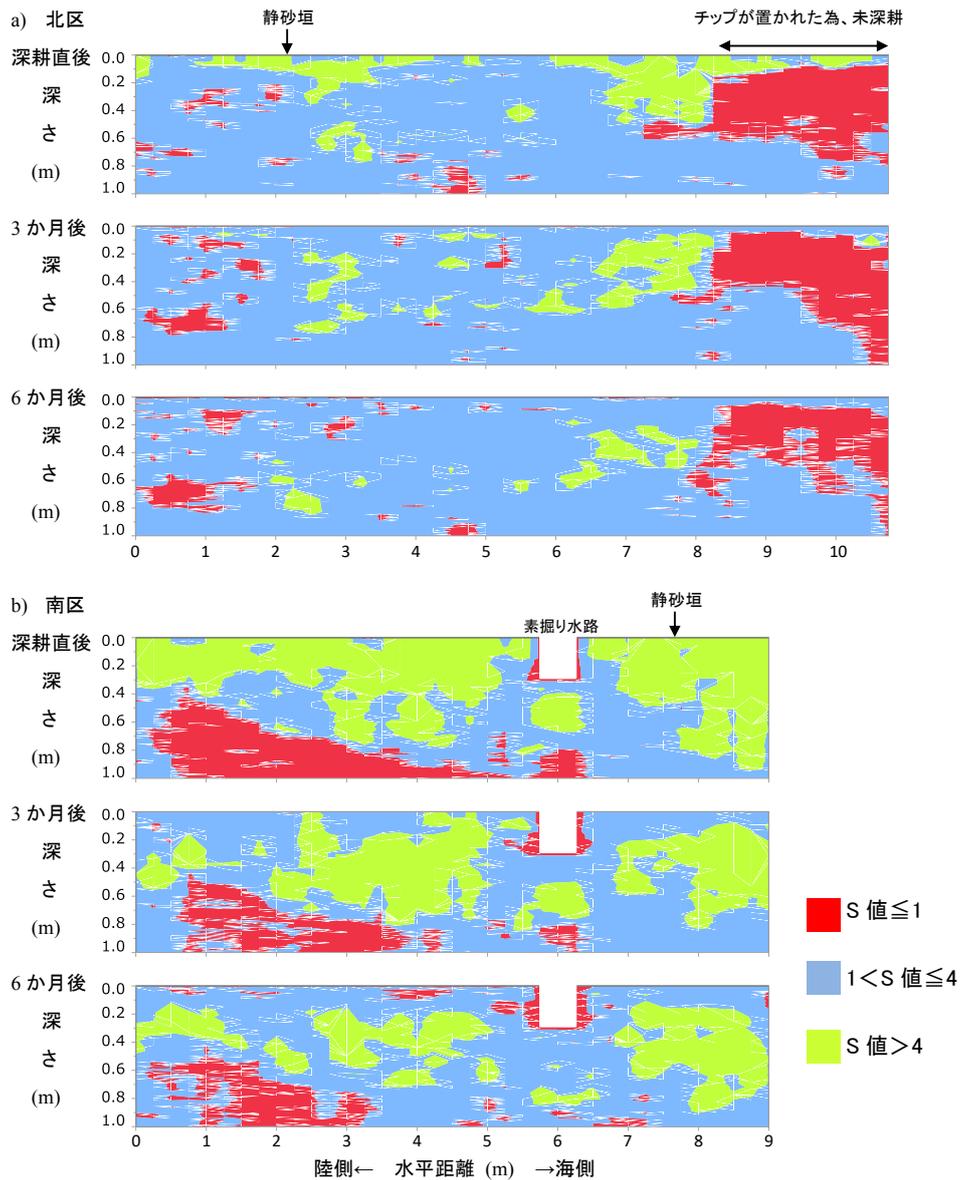


Fig. 4. 深耕直後から6か月経過後までのS値の時間変化 a) 北区、b) 南区
The temporal variation of the S-value for six months after deep tillage a) North plot, b) South plot

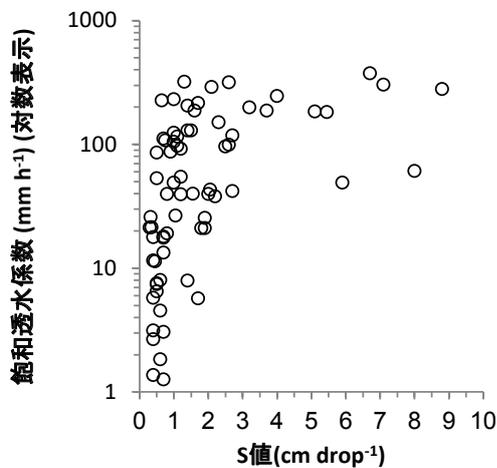


Fig. 5. S値と飽和透水係数の関係
The relationship between the S-value and saturated hydraulic conductivity

S値 ≤ 1.0 (n=18) では 2 ~ 231 mm h⁻¹、1.0 < S値 ≤ 2.0 (n=19) では 8 ~ 321 mm h⁻¹、S値 > 2.0 (n=20) では 42 ~ 374 mm h⁻¹ であった。S値 ≤ 0.5、0.5 < S値 ≤ 1.0、1.0 < S値 ≤ 2.0、S値 > 2.0 の各範囲において飽和透水係数 36 mm h⁻¹ 以下を示す割合は、それぞれ 87%、50%、32%、0% であり、S値が小さいほど、低い飽和透水係数を示す地点の割合が増加していた。以上のように全体に S値が小さいと飽和透水係数が低い傾向が認められた。S値 2.0 以上であれば、飽和透水係数は 38 mm h⁻¹ 以上を満足した。なお、S値が 1.0 以下であっても透水性が良い地点があったが、これについては硬度の測定場所と円筒試料の採取場所が一致していないこと、円筒の採取時や輸送時に隙間ができてしまった等の可能性が考えられる。

3.5 硬度に関する深耕の効果と持続性

深耕前の 70 cm 以深においては S 値 0.4 ~ 3.3 と、硬い箇所と比較的柔らかい箇所が混在していたが、深耕前の盛土の深さ 10 ~ 50 cm にかけて S 値はほとんど 1.0 以下であり、根の侵入が困難と判断される程度にまで土層が硬いことが示された。Fig. 2a および Fig. 3 より、飽和透水係数が 36 mm h^{-1} 以下と低い値を示す深度（深さ 10 ~ 30 cm）と S 値が 1.0 未満の値を示す深度（深さ 10 ~ 50 cm）とが概ね一致していた。

深耕直後の S 値 > 4.0 の分布（Fig. 4a 及び 4b）から判断して、深耕はおおよそ深さ 60 ~ 90 cm まで及んでいるとみられる。ただし、南区（Fig. 4b）の水平距離 0 ~ 3 m 付近では S 値 > 4.0 を示す深さが浅くなっている（水平距離 0 m で約 40 cm、水平距離 1.5 m で約 50 cm）。これは測線（水平距離 0 ~ 1 m）の近傍に防風柵があり、十分に深耕作業ができなかったためと推定される。深耕前に比較して、深耕後の盛土は柔らかくなっていることから、深耕は硬化した土層の破碎に効果があると認められた。

膨軟過ぎて、乾燥の恐れがあるとされる S 値 > 4.0 の部分は北区、南区ともに深耕直後、3 か月、6 か月と経過するにつれて減少し、S 値の最大値や大きな S 値（10.0 以上）の出現回数も低下した。このように全体的に膨軟な状態は改善されてきている。最表層（0 ~ 10 cm 深）について、S 値 > 4.0 の部分は 3 か月後には縮小した。6 か月経過時点では S 値 > 4.0 の部分は消滅し、S 値 1.0 以下の部分も認められるようになった。このことから、時間経過に伴って地表面が硬化する傾向がみられた。6 か月後の最表層（深さ 2 cm）で飽和透水係数の低下がみられたことも調和的である（Fig. 2b）。ヒレル（1998）、西村・取手（1999）でも述べられているように、これは雨滴衝撃により盛土の土塊が崩壊し、分散した細粒な粒子が間隙を目詰まりさせたことが要因として考えられる。素掘り水路、静砂垣施工時の重機走行（木村・藤原 1995、阿部ら 2015）や作業による踏圧（森本・増田 1975、大貫ら 1999）などの要因の可能性も局所的に考えられる。

一方で、盛土内部の深さ 10 cm より深い範囲では、深耕後 S 値 1.0 以下の部分が散見されるものの、6 か月後においても大部分（深耕 6 か月後の硬度測定を実施した 70 地点の深さ 10、20、30、40、50、60、70、80、90、100 cm の 688 点のうち 85%）は S 値が 1.0 を超えていた。今回の深耕では土層内部に局所的に硬度の高い部分が残るものの、盛土全体として固結した状態は解消されたと考えられた。

以上より、深耕による物理性改良の効果は、最表層を除けば、6 か月経過しても維持されていることを確認できた。深耕後に最表層が再硬化するものの、それより下部の盛土は柔軟であることから、例えばコンテナ苗を用いた植栽であっても根鉢の深さが 10 ~ 15 cm

であることから、今後の植栽木の根系の伸長に問題は生じないと考えられる。このことは、深耕の施工時期は必ずしも植栽時期にあわせる必要がないことを示している。

4. まとめ

盛土への深耕の施工は、緻密であった土層を破碎し、盛土を柔らかくし、透水性を向上させることを確認した。深耕から 3 か月、6 か月経過するにつれ、最表層（0 ~ 10 cm 深）で再硬化と透水性低下の傾向が認められた。その一方で深耕から 6 か月後でも盛土内部は柔らかい状態を維持していた。以上の結果から、深耕の効果は 6 か月間持続していると考えられた。深耕を実施した盛土では、局所的に降雨時に水溜まりが生じる箇所はあるが、乾燥により亀裂が生じていたり、雑草の侵入が顕著になってきたりしている。亀裂が形成されたり草本の根系が発達したりすることで、雨水の地表面下への浸透は促進される可能性が考えられる。今後、当初計画したように根系発達が進み、海岸林の再生が着実に進んでいるか把握するため、植栽木の根系の発達状況を観察していくことが重要である。

謝 辞

本研究の遂行に際して、林野庁東北森林管理局および仙台森林管理署には試験地使用のご承認をいただき、当時の森林総合研究所東北支所の小野賢二主任研究員、齋藤武史チーム長、阿部俊夫主任研究員、久保田多余子主任研究員には調査に多大なご協力をいただいた。以上の方に深く感謝の意を表します。本研究は森林総合研究所運営交付金プロジェクト「海岸林再生における盛土土壌の湛水原因の解明と改善策の提案」によって行われた。

引用文献

- 阿部 俊夫・相澤 州平・橋本 徹・佐々木 尚三（2015）ハーベスタ・フォワードシステムによる間伐跡地からの濁水発生一生涯田原国有林の事例一。北方森林研究, 63, 53-56.
- 長谷川 秀三（2008）土壌診断の方法について。グリーンエイジ, 416, 18-21.
- 長谷川 秀三・猪俣 景悟（2015）陸前高田松原再生の成功に向けた植栽基盤造成試験の取組。日本緑化学会誌, 41 (2), 336-340.
- 長谷川 秀三・田畑 衛・小澤 徹三・佐藤 吉之（1984）重機造成地の植栽基盤の物理性と活力度の関係について一高速道路植栽地を例にして一。造園雑誌, 48, 104-122.
- ダニエル ヒレル（1998）（岩田 進午・内嶋 善兵衛 監訳, 2001）環境土壌物理学Ⅲ環境問題への土壌物理学の応用。農林統計協会, 322pp.

- 伊藤 智弥 (2015) 盛土を伴う海岸防災林復旧工事と植栽までの手順. 治山研究発表会論文集, 54, 83-89.
- 河田 弘・小島 俊郎 (1979) 環境測定法IV—森林土壌—. 共立出版, 190pp.
- 河口 智志・堀 良通 (2002) 海岸砂丘における土壌貫入試験によるS値の変化について—人工海岸クロマツ林の根系分布調査への応用—. 日本砂丘学会誌, 48 (3), 121-128.
- 木村 陽登・藤原 多見夫 (1995) 造成樹園地の土壌の物理性改良効果持続に関与する要因の解析. 土壌の物理性, 72, 13-17.
- 気象庁 (2016) “過去の気象データ検索”, <http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>, (参照 2016-02-03).
- 国土交通省都市局 (2009) 植栽基盤整備技術マニュアル改訂2版, 日本緑化センター, 202pp.
- 増田 拓朗・守屋 均・梶田 嘉宣 (1991) 坂出緩衝緑地におけるクスノキの生育と土壌条件 (1) —土壌条件と根系分布—. 日本緑化工学会誌, 16 (3), 11-17.
- 森本 幸裕・増田 拓朗 (1975) 踏圧による土壌の圧密と樹木の生育状態について. 造園雑誌, 39, 34-42.
- 村上 卓也 (2015) 盛土を伴う海岸林防災林復旧工事と植栽までの手順. 日本緑化工学会誌, 41 (2), 341-343.
- 野原 咲江・高橋 孝之 (2007) 海岸保安林における湿地対策としての盛土工法の評価—クロマツ 10年生の根系発達—. 千葉県森林研究センター研究報告, 2, 1-6.
- 日本海岸林学会 (2016) “海岸林用語集”, <http://jscf.jp/glossary/index.html>, (参照 2017-08-03).
- 日本造園学会 (2000) 緑化事業における植栽基盤整備マニュアル. ランドスケープ研究, 63 (3), 224-241.
- 西村 拓・取手 伸夫 (1999) 土のコロイド現象の基礎と応用 (その12) —コロイドから見た土の透水性と侵食—. 農業土木学会誌, 67 (3), 277-284.
- 大貫 靖浩・酒井 正治・稲垣 昌宏 (1999) 屋久島登山道における難透水層の形成. 地形, 20, 541-550.
- 林野庁 (2013) “平成24年度森林・林業白書”, http://www.rinya.maff.go.jp/j/kikaku/hakusyo/24hakusyo_h/all/a11.html, (参照 2016-02-22).
- 坂本 知己 (2015) 津波による海岸林の被害と海岸林再生で盛土をする理由. 日本緑化工学会誌, 41 (2), 334-335.
- 魚井 夏子・渡邊 眞紀子・村田 智吉 (2013) 都市緑地における鉛直方向の土壌硬度分布と過去の土地利用, 造成手法および現在の整備形態との関係—皇居外苑北の丸地区を事例として—. 日本緑化工学会誌, 39 (3), 412-421.

The variation of hardness and permeability by deep tillage on embankment in the coastal forest restoration project

Yoshiki SHINOMIYA^{1)*}, Akihiro IMAYA²⁾ and Tomoki SAKAMOTO³⁾

Abstract

After the Great East Japan Earthquake, an embankment was built along the coast as a planting base by the Coastal Forest Restoration Project. It is feared that a rain pool and the hardness in a part of embankment inhibits the growth of planted trees. Thus, deep tillage has been conducted on the embankment. The effect of deep tillage and its sustainability were investigated in Natori city, Miyagi Prefecture, Japan. Deep tillage was carried out by an excavator with a skeleton bucket. Hardness and permeability were measured by a Hasegawa-type soil penetrometer and the constant level method, respectively. This deep tillage softened the embankment and increased its permeability. After 3 to 6 months, the embankment became hard again at a depth of 0-10 cm. In contrast, the embankment remained soft below 10 cm deep, indicating that the effects of deep tillage were sustained at that depth for 6 months.

Key words: deep tillage, embankment, coastal forest restoration, compaction

Received 15 June 2017, Accepted 29 August 2017

1) Center for Forest Restoration and Radioecology, Forestry and Forest Products Research Institute (FFPRI)

2) Japan International Research Center for Agricultural Sciences

3) Department of Disaster Prevention, Meteorology and Hydrology, FFPRI

* Center for Forest Restoration and Radioecology, FFPRI, 1 Matsunosato, Tsukuba, Ibaraki 305-8687, Japan; e-mail: sinomiya@affrc.go.jp

短 報 (Short communication)

Social wasps collected with Malaise traps in Japanese cedar (*Cryptomeria japonica*) plantations (Hymenoptera, Vespidae)

Shun'ichi MAKINO^{1)*}, Hisatomo TAKI²⁾ and Hiroshi MAKIHARA³⁾

Abstract

Social wasps, which are important agents of ecosystem services (as predators) and disservices (as stinging pests), were collected with Malaise traps in Japanese cedar (*Cryptomeria japonica*) plantations in three regions of Japan (Tohoku, Shikoku, and Kyushu). Each region had 12 study stands that were categorized into the following four types based on the type of management: 1) unthinned, old-age stands (78–102 y; OA); 2) unthinned stands (41–51 y; UT); 3) stands thinned 2–4 y before the study (36–50 y) with felled logs left on forest floors (TL) and 4) stands similar to 3, but felled logs were removed (TR). A total of 350 individuals of 13 species (nine of Vespinae and four of Polistinae) were collected in the three regions. For Vespinae, *Vespa simillima* and *Vespula shidai* predominated in every region, making up 38–55% and 32–52% of all vespine wasps collected, respectively. Generalized linear model (GLM) analyses, in which the type of management was used as the fixed factor and regions as the blocking factor, showed that the type of management did not affect the number of species but did affect abundance of *V. simillima* and *V. shidai*: OA, UT and TR had larger catches over TL in the former, and OA and UT had larger catches over TL and TR in the latter. We discussed the possible reasons why these wasps did not respond positively to thinning, which was different from the results reported for other groups of insects.

Key words: hornet, yellowjacket, paper wasp, *Cryptomeria japonica*, plantation, thinning

1. Introduction

Social wasps are important agents of ecosystem services and disservices from the viewpoint of forest management. On the one hand, these wasps play roles as predators of various forest pests (Matsuura and Yamane 1990), but on the other hand stings have been serious problems among forest workers. A total of 32,341 sting accidents including six deaths occurred between 1986 and 2004 in national forests in Japan (Matsuura et al. 2005). We need to learn the abundance and species composition of social wasps in various forests as basic information to correctly assess their roles because those variables are expected to change with type or management condition of the forests.

Some studies have collected social wasps using Malaise traps or attractant traps in forests in Japan. Most of these studies focused on monitoring in broad-leaved forests (e.g., Maeto and Makihara 1999, Totok et al. 2002, Yamauchi and Watanabe 2013). However, over 40% of the forested area in Japan is occupied by man-made plantations (Forest Agency 2017) and nearly half (44%) of the plantations are coniferous stands of Japanese cedar (*Cryptomeria japonica*) or hinoki cypress (*Chamaecyparis obtusa*). Because plantations generally require

more intensive and frequent management than natural forests, more information on social wasps in those forests is needed so that their ecosystem services and disservices can be quantified.

Here, we report species composition of social wasps (hornets, yellowjackets, and paper wasps) based on collections using Malaise traps in Japanese cedar plantations in three different geological regions in Japan (Tohoku, Shikoku, and Kyushu). Thinning is an important procedure to produce quality logs of Japanese cedar and is known to affect abundance and assemblages of various forest insects (Taki et al. 2010), as well as stand age (Makino et al. 2007). However, responses of social wasps to the thinning of Japanese cedar plantations have scarcely been studied (Maleque et al. 2007a). Therefore, we collected specimens with Malaise traps in thinned and unthinned stands (40–50 y), and in old stands (80–100 y) to compare the abundance and assemblages of social wasps among them.

2. Materials and methods

Social wasps were collected by H. M. in 12 monoculture stands of Japanese cedar in each of three regions in Japan, that

Received 2 July 2017, Accepted 29 August 2017

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

2) Department of Forest Entomology, FFPRI

3) Isumi, Chiba, Japan

* Center for Biodiversity, FFPRI, Matsunosato 1, Tsukuba, Ibaraki 305-8687, Japan; E-mail: makino@ffpri.affrc.go.jp

is, Tohoku (Yamagata Prefecture), Shikoku (Kochi Prefecture), and Kyushu (Kumamoto and Miyazaki Prefectures) in 2009 (Appendix Table 1). The 12 stands were grouped into the following four categories, each with three replicates, according to management type: 1) unthinned, old-age stands (OA: 78–102 y), 2) unthinned stands (UT: 41–51 y), 3) stands thinned 2–4 y before the study with felled logs left on forest floors (TL: 36–50 y), and 4) stands similar to 3, but felled logs were removed from the stand (TR). We used two Malaise traps with a collection bottle (Golden Owl Publishers, Lexington, MD, USA: 180 cm long, 120 cm wide, 200 cm high) at each stand, separated by approximately 50 m. The traps were set in mid-May in Tohoku, and mid-March in Shikoku and Kyushu, depending on the flight season of the social wasps and were removed in mid-October from all sites. Trapped insects were collected at intervals of 2–4 weeks: the total number of collections was five, eight, and seven in Tohoku, Shikoku, and Kyushu, respectively.

We analyzed the number of species as a randomized block design where the management type was a fixed factor and the regions were treated as the block. We used generalized linear models (GLMs) with a Poisson error distribution in R 3.3.2. (R Development Core Team 2017). We compared a model with the fixed factor and a model without the fixed factor, using the values of Akaike's information criterion (AIC) to examine the effect of management type. We also analyzed the numbers of individuals of predominant species of social wasps. Similar to the analysis of the number of species, we used a randomized block design where management type was a fixed factor and regions were treated as the block. We conducted GLMs with a Poisson error distribution and compared the models with the AIC values. We performed post-hoc analyses to examine the effects of the four management types (OS, UT, TL, and TR) when the effect of management was detected. GLMs were prepared for all combinations of the four management types and compared with the AIC values. For example, a part of the model variations was as follows: (OS UT TL TR): null model; (OS) (UT) (TL) (TR): all four types were included; (OS) (UT TL TR), (UT) (OS TL TR), (TL) (OS UT TR), and (TR) (OS UT TL): three of the four classes were combined; and so on.

3. Results

A total of 350 social wasps belonging to nine species in the subfamily Vespinae and four in the subfamily Polistinae were collected at the study sites (Table 1, Appendix Table 2). For Vespinae, *Vespa simillima* accounted for 47% of the total catch at all sites combined, followed by *Vespula shidai* (41%). These two species were predominant in all regions, accounting for 79% (Tohoku), 97% (Shikoku), and 87% (Kyushu) of vespine specimens collected in respective regions. Catches of other vespines (*Vespa analis*, *V. crabro*, *V. mandarinia*, *V.*

Table 1. Numbers of social wasps collected with Malaise traps in Japanese cedar (*Cryptomeria japonica*) plantations in three regions of Japan.

Species	Region			Total
	Tohoku	Shikoku	Kyushu	
Vespinae				
<i>Vespa simillima</i>	23	40	57	120
<i>Vespa ducalis</i>	0	1	4	5
<i>Vespa analis</i>	0	1	3	4
<i>Vespa crabro</i>	0	0	1	1
<i>Vespa mandarinia</i>	0	0	1	1
<i>Vespula shidai</i>	25	46	33	104
<i>Vespula flaviceps</i>	1	0	4	5
<i>Vespula rufa</i>	7	1	0	8
<i>Dolichovespula media</i>	5	0	0	5
Polistinae				
<i>Parapolybia crocea</i>	3	18	52	73
<i>Parapolybia varia</i>	2	6	8	16
<i>Polistes nipponensis</i>	1	0	4	5
<i>Polistes rothneyi</i>	0	0	3	3
Total	67	113	170	350

Data are pooled for 12 study stands in each region.

ducalis, *Dolichovespula media*, *Vespula rufa*, and *Vl. flaviceps*) were much smaller than the two predominant species, and some did not occur at one or two regions. For Polistinae, *Parapolybia crocea* accounted for 74% of the total catch at all sites combined, followed by *Parapolybia varia* (16%). *P. crocea* was most abundant at Kyushu, followed by Shikoku, while only a few individuals were collected at Tohoku. Catches of the genus *Polistes* were much smaller compared with those of *Parapolybia*, and all *Polistes* specimens (*P. nipponensis* and *P. rothneyi*) were collected in Kyushu, except a single *P. nipponensis* at Tohoku.

Management type did not affect the number of species. The AIC value of the model with the effect of management was 138.1, whereas the model without the effect of management had a lower AIC value of 134.2 (Fig. 1). We selected two species, *V. simillima* and *Vl. shidai*, for the analysis of management type on the number of individuals because they were predominant in all regions. Management type affected the numbers of individuals of both species. The lowest AIC values (216.4 and 224.0) were obtained from the models of (OA UT TR) (TL) and (OA UT) (TL) (TR) in *V. simillima* and *Vl. shidai*, respectively, and the AIC values of the models without the effect of management of these species were 219.2 and 259.8, respectively.

4. Discussion

This study shows that *V. simillima* and *Vl. shidai* are predominant social wasps in Japanese cedar plantations in various parts of Japan. Maeto and Makihara (1999) also showed that 69% of social wasps collected with Malaise traps in a *C. japonica* stand (57 y old) were *Vl. shidai*, followed by *Vl. flaviceps* and *V. simillima* in northern Kanto, central Japan.

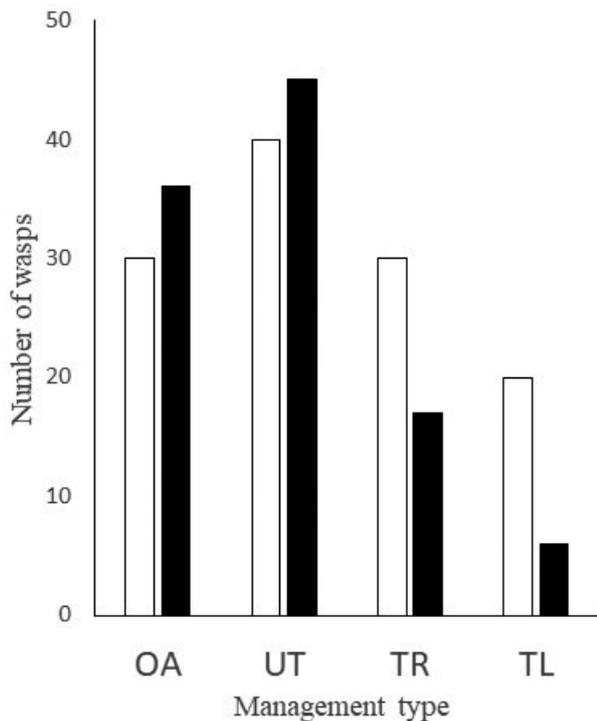


Fig. 1. Total number of individual of *Vespa simillima* (white columns) and *Vespa shidai* (black columns) in 36 stands of four different management types.

OA: old-age stands; UT: unthinned stands; TR: thinned stands deprived of felled trees; TL: thinned stands with felled trees left on stand floor.

The predominance of *V. simillima* and *Vl. shidai* or *Vl. flaviceps* in Malaise trap samples has also been reported in natural deciduous forests in Kanto (Maeto and Makihara 1999, Totok et al. 2002).

V. simillima and the two *Vespa* species have some biological characteristics in common, such as large colony size, long nesting season, and wide ranges of prey (Matsuura and Yamane 1990). Their omnivorous habit may contribute to their dominance in Japanese forests over other vespine species (Totok et al. 2002), especially in coniferous plantations where diversity and abundance of prey may be suboptimal compared with natural forests.

Paper wasps of the genus *Polistes* usually nest on small plants, preferring open and sunny sites to closed and shaded ones (Matsuura et al. 2005). In contrast, *Parapolybia* species nest in more shaded locations, and preferentially nest on the undersides of leaves on the forest floor (Matsuura et al. 2005). This may explain the numerical dominance of *Parapolybia* over *Polistes* species in this study of coniferous plantations.

The management type of stand did not affect the number of species of social wasps, but it influenced the number of individuals of the two predominant species *V. simillima* and *Vl. shidai*. GLM analyses showed that thinned stands (TL in

V. simillima; TL and TR in *Vl. shidai*) formed different groups from the OA and UT stands. In both species, OA and UT showed larger catches than TR or TL, though the largest catch in Tohoku was obtained in TR stands (Fig. 1).

The results of the GLM analysis do not agree with what is expected from the previous studies which indicate that thinning of Japanese cedar stands increases species richness and/or abundance of various hymenopterans (Maleque et al. 2007a, Taki et al. 2010). One of the possible reasons of the positive effect of thinning may be an increase in the abundance of understory vegetation triggered by thinning, which provides food and/or habitat for insects (Maleque et al. 2007a,b). However, it has also been reported that the extent to which thinning affects insect diversity or abundance varies among taxa. Indeed, Maleque et al. (2007a) showed that vespine wasps in thinned and unthinned stands do not change in abundance, whereas bees and some parasitic wasps respond positively to thinning. The numerical response of vespine wasps to thinning may be weak among insects; landscape structures surrounding the study stands may be important, because vespine workers often make foraging flights over 1 km from their nests (Matsuura and Yamane 1990).

Our results are based on GLMs in which the regions were treated as blocks. This was because we focused our analysis on how thinning of *C. japonica* plantations affects the abundance of social wasps of particular species by setting aside regional effects. However, the three regions showed different distributions in the abundance of wasps among the stands of different management types. It is possible that the effect of management type differed from region to region. We emphasize the need for a more thorough study of plantations in various parts of Japan

On the other hand, the lower catches in thinned stands (TL and TR) than in unthinned (UN) or old-age (OA) stands may be an artifact resulting from a characteristic of the trap. Our Malaise traps were set on the ground surface and captured only those insects that fly low. The thinning of coniferous stands often increases biomass and abundance of understory plants (Maleque et al. 2007a,b); flourishing vegetation on the stand floor could be obstacles for insects flying near the ground, thus making their catches smaller than the actual abundance. Although this hypothesis has not been tested, the characteristics of the trap are an important factor in a biodiversity study, and we must be careful when interpreting results obtained using various types of traps.

Acknowledgments

We thank Messrs. Matsubara and Fukuda of the Japan Forest Technology Association for their help with the insect collection during the study.

References

- Forest Agency (2017) [Data on plantations of *Cryptomeria japonica* and *Chamaecyparis obtusa* in Japan] http://www.rinya.maff.go.jp/j/sin_riyou/kafun/data.html, (accessed 2017-2-17). (in Japanese)
- Maeto, S. and Makihara, H. (1999) Changes in insect assemblages with secondary succession of temperate deciduous forests after clear-cutting. *Jpn. J. Ent. (N.S.)*, 3, 11-26. (in Japanese)
- Makino, S., Goto, H., Hasegawa, M., Okabe, K., Tanaka, H., Inoue, T. and Okochi, I. (2007) Degradation of longicorn beetle (Coleoptera, Cerambycidae, Disteniidae) fauna caused by conversion from broad-leaved to man-made conifer stands of *Cryptomeria japonica* (Taxodiaceae) in central Japan. *Ecol. Res.*, 22, 372-381.
- Maleque, M. A., Ishii, H. T. and Maeto, K. (2007a) Line thinning fosters the abundance and diversity of understory Hymenoptera (Insecta) in Japanese cedar (*Cryptomeria japonica* D. Don) plantations. *J. For. Res.*, 12, 14-23.
- Maleque, M. A., Ishii, H. T., Maeto, K. and Taniguchi, S. (2007b) Line thinning enhances diversity of Coleoptera in overstocked *Cryptomeria japonica* plantations in central Japan. *Arthropod Plant Interact.*, 1, 175-185.
- Matsuura, M. and Yamane, Sk. (1990) *Biology of the Vespine Wasps*. Springer, Berlin, 323pp.
- Matsuura, M., Ohtaki, N. and Sasaki, S. (2005) [*Prevention and Treatment of Stings by Social Wasps and Bees. 2nd ed.*], Forestry and Timber Manufacturing Safety & Health Association, Tokyo, 391pp. (in Japanese)
- R Development Core Team (2017) R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.
- Taki, H., Inoue, T., Tanaka, H., Makihara, H., Sueyoshi, M., Isono, M. and Okabe K. (2010) Responses of community structure, diversity, and abundance of understory plants and insect assemblages to thinning in plantations. *For. Ecol. Manage.*, 259, 607-613.
- Totok, M. U., Makino, S. and Goto, H. (2002) Species compositions and seasonal changes in the number of social wasps collected with Malaise traps in natural deciduous forests in and near the Ogawa research forest, northern Kanto, Japan (Hymenoptera, Vespidae). *Bulletin of FFPRI*, 1, 135-139.
- Yamauchi, T. and Watanabe, M. (2013) Species compositions of social wasps (Hymenoptera: Vespidae) collected with Malaise traps at three different altitudes of Toyama Prefecture, Japan. *Pestology*, 28, 13-16.

Appendix Table 1. Characteristics of the study stands

Stand#	Region	Age	Area (ha)	Altitude (m)	Management type*	Latitude(N)	Longitude (E)
1	Tohoku	42	5.1	410	TL	38° 54' 49.27"	140° 24' 30.39"
2	Tohoku	40	6.9	250	TL	38° 52' 48.94"	140° 09' 14.81"
3	Tohoku	36	3.1	300	TL	38° 58' 54.74"	140° 13' 58.74"
4	Tohoku	42	2.5	400	TR	38° 59' 43.96"	140° 18' 52.43"
5	Tohoku	40	4.7	250	TR	38° 58' 51.75"	140° 18' 00.06"
6	Tohoku	42	2.4	240	TR	38° 55' 59.54"	140° 18' 10.28"
7	Tohoku	42	8.7	440	UT	38° 59' 38.22"	140° 18' 48.46"
8	Tohoku	42	5.5	250	UT	38° 53' 23.65"	140° 08' 19.27"
9	Tohoku	44	3.2	360	UT	38° 53' 07.08"	140° 24' 12.97"
10	Tohoku	78	43.4	300	OA	38° 59' 01.22"	140° 20' 18.61"
11	Tohoku	80	6.8	390	OA	38° 56' 48.55"	140° 22' 24.11"
12	Tohoku	90	3.9	350	OA	38° 52' 23.19"	140° 24' 30.88"
13	Shikoku	44	8.3	600	TL	33° 31' 51.74"	133° 59' 48.49"
14	Shikoku	44	11.7	500	TL	33° 31' 23.60"	133° 59' 55.90"
15	Shikoku	45	16.4	350	TL	33° 29' 44.33"	134° 05' 13.46"
16	Shikoku	50	85.8	650	TR	33° 38' 59.86"	134° 05' 25.68"
17	Shikoku	50	52.8	650	TR	33° 36' 21.34"	134° 02' 18.43"
18	Shikoku	50	21.4	200	TR	33° 31' 56.02"	134° 15' 39.47"
19	Shikoku	41	4.3	500	UT	33° 38' 14.96"	134° 06' 13.52"
20	Shikoku	40	42.0	650	UT	33° 39' 17.80"	134° 08' 42.60"
21	Shikoku	44	31.8	550	UT	33° 36' 16.54"	134° 05' 25.88"
22	Shikoku	85	21.6	600	OA	33° 39' 11.80"	134° 05' 17.20"
23	Shikoku	85	1.4	700	OA	33° 38' 27.80"	134° 05' 16.40"
24	Shikoku	97	67.8	700	OA	33° 32' 11.73"	134° 01' 15.28"
25	Kyushu	44	12.8	900	TL	32° 28' 48.12"	130° 46' 33.53"
26	Kyushu	45	12.7	850	TL	32° 28' 23.02"	130° 44' 30.79"
27	Kyushu	46	9.8	640	TL	32° 09' 04.24"	130° 42' 02.48"
28	Kyushu	50	21.1	250	TR	32° 10' 14.61"	130° 46' 38.15"
29	Kyushu	40	17.2	510	TR	32° 08' 09.27"	130° 46' 25.85"
30	Kyushu	46	11.8	730	TR	32° 06' 07.51"	130° 45' 01.41"
31	Kyushu	47	11.9	610	UT	32° 07' 11.18"	130° 48' 19.20"
32	Kyushu	51	14.0	650	UT	32° 06' 00.52"	130° 48' 22.99"
33	Kyushu	51	7.9	620	UT	32° 04' 35.53"	130° 42' 48.37"
34	Kyushu	86	3.4	500	OA	32° 08' 19.72"	130° 38' 26.83"
35	Kyushu	92	16.4	700	OA	31° 56' 45.93"	130° 55' 25.44"
36	Kyushu	102	5.9	370	OA	31° 49' 53.68"	131° 12' 35.63"

*OA: old-age stands; UT: unthinned stands; TR: thinned stands deprived of felled trees; TL: thinned stands with felled trees left on stand floor.

Appendix Table 2. Numbers of social wasps collected with Malaise traps at the study stands

Stand#	<i>Vespa simillima</i>		<i>Vespa ducalis</i>		<i>Vespa analis</i>		<i>Vespa crabro</i>		<i>Vespa mandarinia</i>		<i>Vespula shidai</i>		<i>Vespula flaviceps</i>		<i>Vespula rufa</i>		<i>Dolichovespula media</i>		<i>Parapolybia crocea</i>		<i>Parapolybia varia</i>		<i>Polistes nipponensis</i>		<i>Polistes rothneyi</i>		Total
	Q	W	Q	W	Q	W	Q	W	Q	W	Q	W	Q	W	Q	W	Q	W	F	M	F	M	F	M	F	M	
1	1										1	3															5
2		1																									1
3																											0
4	1	2										1				4											8
5	2	2										9				1			1					1			16
6		2										1		1								2					6
7	3	1									1	1															6
8	1																										1
9	2										1					1											4
10		1																									1
11		2									1	1				1	1	3	2								11
12	1	1									3	2					1										8
13	1										1								2								4
14		1										1							6								8
15	2																			1							3
16	5	1																1									7
17	2										2	3															7
18			1																								1
19	1										2	11							1		2						17
20	5	13									9	8							4		1						40
21	3	1										2			1				1								8
22											1	2							1		2						6
23	1				1							1						1		1							5
24	2	2									2	1															7
25		2		1															4								7
26		1		1															2								4
27	3	8											1						7		4			1			24
28				1			1		1										2					2		1	8
29		2																	8	1			1				12
30	1	10										1							2		1						15
31						1													6						2		9
32																			7								7
33	1	9		1								10		2					3								26
34	1	9			1						6	2							3		1						23
35	1	6									2	12	1						1		2						25
36		3			1														6								10
Total	40	80	1	4	1	3	0	1	0	1	32	72	1	4	1	7	2	3	71	2	16	0	5	0	3	0	350

Q, W, F, and M stand for queen, worker, female (worker or queen), and male, respectively.

スギ人工林においてマレーズトラップで捕獲された 社会性カリバチ類

牧野 俊一^{1)*}、滝 久智²⁾、槇原 寛³⁾

要旨

森林害虫等の捕食者として働く一方、刺傷事故をもたらす要因でもある社会性カリバチ類（スズメバチ類およびアシナガバチ類）について、東北、四国、九州の3地域（各12林分）のスギ人工林でマレーズトラップを用いた採集を行った。これら12林分は管理方法の異なる4カテゴリー（各3林分）に分けられた。1) 無間伐の老齢林（78-102年生；OAと略記）、2) 無間伐林（41-51年生；UT）、3) 調査から2-4年前に切り捨て間伐を行った林分（36-50年生；TL）、4) 同じく伐出間伐を行った林分（TR）。捕獲された社会性カリバチは合計13種（スズメバチ亜科9種、アシナガバチ亜科4種）、350個体であった。スズメバチ亜科においてはいずれの地域でもキイロスズメバチ *Vespa simillima* とシダクロスズメバチ *Vespula shidai* が優占的であり、各地域の同亜科総捕獲数のそれぞれ38-55%、32-52%を占めた。管理方法を固定要因、地域をブロックとした一般化線型モデルにより解析したところ、管理方法は種数には影響を与えなかったが、優占種であるキイロスズメバチとシダクロスズメバチの個体数には影響を与えた。すなわちキイロスズメバチではOA、UTおよびTHにおいて個体数がTLよりも大きく、シダクロスズメバチではUTとOAにおいて、TLとTRよりも個体数が大きかった。過去に報告された昆虫類の多くと異なり、なぜ間伐林で個体数が少なかったのかについて可能な原因を議論した。

キーワード：スズメバチ類、クロスズメバチ類、アシナガバチ類、スギ、人工林、間伐

原稿受付：平成29年7月12日 原稿受理：平成29年8月29日

1) 森林総合研究所 生物多様性研究拠点

2) 森林総合研究所 森林昆虫研究領域

3) 千葉県いすみ市

* 森林総合研究所 生物多様性研究拠点 〒305-8687 茨城県つくば市松の里1

ノート (Note)

雄性不稔遺伝子をヘテロ保有するスギ個体の簡易な探索方法 — 自殖家系における雄性不稔個体の分離を利用した試行 —

河合 慶恵^{1)*}、久保田 正裕¹⁾、遠藤 圭太²⁾、磯田 圭哉²⁾

キーワード：スギ、雄性不稔性、ヘテロ接合体、自殖

スギ (*Cryptomeria japonica* D. Don) は我が国の重要な造林樹種の一つである。しかし現在、人口の約30%がスギ花粉症を発症しており、花粉飛散量の低減が重要な課題となっている。今後もスギを活用するうえで、育種による花粉生産量抑制のための遺伝的改良が根本的対策として期待されており、森林総合研究所林木育種センターでは、スギの少花粉品種や無花粉(雄性不稔)品種の開発を行っている。特に、遺伝的な雄性不稔性を保有した無花粉スギの活用は、環境や樹齢によらず花粉を飛散させないことから、将来の空中花粉量を軽減させるうえで有効な手段となる(斎藤 2010)。林木育種センター関西育種場(以下、関西育種場とする)では無花粉スギ品種として2007年に「スギ三重不稔(関西)1号(以下、三重不稔という)」を開発した。さらに精英樹「上浮穴16号」が三重不稔と相同な雄性不稔遺伝子をヘテロで保有する(以下、雄性不稔ヘテロという)ことを発見した(磯田ら 2013)。三重不稔は無花粉スギ「爽春」や、富山県で開発された我が国最初の無花粉スギ品種「はるよこい」の不稔原因遺伝子と相同な雄性不稔遺伝子を保有し(河合(宗原)ら 2009, 斎藤 2010, 磯田ら 2014)、1対の劣性遺伝子に支配される核遺伝子型雄性不稔である(Taira et al. 1999)。

関西育種場では、三重不稔と上浮穴16号を用いて優良な無花粉品種の開発を進めている。しかし、育種素材となる不稔遺伝子保有個体がわずか2個体であることから、新たな雄性不稔ヘテロ個体の探索を行っている。探索には、①人工交配を用いる手法、②遺伝マーカーの利用、の二つが考えられる。①では、雄性不稔個体と探索個体を交配して得られるF₁家系に不稔個体が含まれるかを検定する方法が用いられてきた(Fig. 1a)。しかしこの方法は交配作業に多くの労力が必要である。一方、②は育種年限の短縮に資する強力なツールとなると期待されるが、分析機器を保有しない機関において遺伝マーカーの利用は難しい。

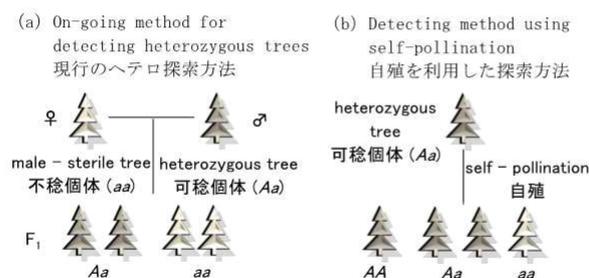


Fig. 1. 雄性不稔ヘテロ個体の探索に利用する交配家系の作出

Breeding designs for finding heterozygous male-sterile tree.

現行の探索方法(a)と自殖を利用した探索方法(b)
On-going method (a) and (b) self-pollination method

雄性不稔ヘテロ個体(Aa)に対し自家受粉させることで、正常な花粉を有する個体(AA, Aa)と不稔個体(aa)が分離すると期待されることから(Fig. 1b)、探索対象個体を自殖させることで不稔遺伝子保有の検定が可能と考えた。そこで人工交配で作出した雄性不稔ヘテロ個体(Aa)から自殖家系を作成し、これを用いて自殖を利用したヘテロ個体探索手法の有効性を検討した。

モデルとして使用する雄性不稔遺伝子をヘテロ型で保有する個体を作成するため、2008年3月に三重不稔を母樹として精英樹(伊都3号、飯南5号、神崎15号、いずれもAA(磯田ら 2013))の花粉を授粉させた。得られた種子を養苗し、家系あたり10~15個体を温室内に鉢上げした。自家受粉を行うため、2011年7月上旬と8月上旬に、これらのヘテロ家系に対し、ジベレリン液剤(100ppm)を葉面散布し雄花と雌花の着花誘導を行った。2012年1月から2月に、雄花と雌花が両方着生した枝にグラシン袋(交配袋の代替として使用)をかけ、同年10月に自殖種子を得た。同一家系内の複数個体から採種した場合は、家系ごとにまとめた。これらの種子を2013年4月に苗畑へ播種し、翌年4月に床替えした。床替苗に同年7月上旬にジベ

Trial of efficient method for screening *Cryptomeria japonica* trees heterozygous for male-sterile gene by segregation of male-sterile seedlings derived from self-pollinated progeny.

Yoshie KAWAI^{1)*}, Masahiro KUBOTA¹⁾, Keita ENDOH²⁾ and Keiya ISODA²⁾

原稿受付：平成29年7月13日 原稿受理：平成29年9月5日

1) 森林総合研究所 林木育種センター関西育種場

2) 森林総合研究所 林木育種センター遺伝資源部

* 森林総合研究所 林木育種センター関西育種場 〒709-4335 岡山県勝田郡勝央町植月中1043

Kansai Regional Breeding Office, Forest Tree Breeding Center, Forestry and Forest Products Research Institute, 1043 Uetsukinaka, Sho-oh, Katsuta, Okayama, 709-4335 Japan; e-mail: munehara@affrc.go.jp

レリン液剤 (100ppm) を散布した。2015 年 2 月に個体ごとに雄花を採取し実体顕微鏡下で観察した。正常な花粉粒が観察されなかった個体を対象に、雄花の凍結切片を作製し (Kawamoto and Shimizu 2000)、FAA で化学固定した雄花から得られた切片をヘマトキシリンで約 2 分、エオジンで約 10 秒染色した後、永久プレパラートを作製し、光学顕微鏡を用いて花粉の有無を調べた。

播種した 3 家系のうち三重不稔×伊都 3 号の自殖家系は、発芽苗が 1 年以内に全て枯死した。2 年生苗が得られた 2 家系のうち、三重不稔×神崎 15 号の自殖家系では調査した 15 個体のうち葯の中に粒状の花粉が全く見られない雄性不稔個体が 3 個体出現した (Table 1, Fig. 2a)。なお、三重不稔×飯南 5 号の自殖家系では 1 個体のみ着花し、正常な花粉を有していた。以上のように雄性不稔ヘテロ個体の自殖種子から不稔個体が分離したことから、自殖による雄性不稔遺伝子保有の検定が可能と考えられた。

Table 1. スギ自殖家系における雄花稔性調査の結果
Segregation ratio between sterile and normal seedlings derived from self-pollinated seeds of *C. japonica*.

家系名	採取種子重(g)	調査個体数	正常花粉		判定保留	雄花無し
			有り	無し		
(三重不稔×神崎 15 号) 自殖	0.9	15	11	3	1	
(三重不稔×飯南 5 号) 自殖	2.2	2	1			1
(三重不稔×伊都 3 号) 自殖	0.3	—				

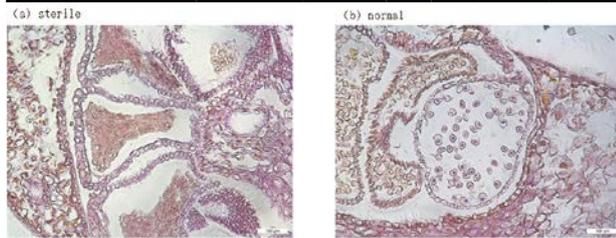


Fig. 2. 三重不稔 (関西) 1 号×神崎 15 号の F₁ 個体の自殖家系で観察された雄性不稔個体 (a) と可稔個体 (b)
Male flower of sterile (a) and normal (b) seedling derived from the self-pollinated seeds of *C. japonica*.

これまでの関西育種場におけるヘテロ探索では、Fig. 1a で示した現行の探索法を用いており、52 系統の検定用種子を得るために 4 年間かけて人工交配を行っている (磯田ら 2013)。これは、人工交配における様々な制限要因があるためである。現行の探索法では、三重不稔のみが母樹として用いられることから、人工交配に供する雌花数が不足し、制限要因の一つとなっている。また、授粉する花粉を検定系統それぞれについて採集、精選する必要があり、人工授粉作業とともに大きな労力を必要としている。(Table 2)。一方、自殖による探索 (Fig. 1b) では、交配母樹が検定個体であるため、母樹数の制限を受けない。さらに、交配袋内に雌花と雄花があり、人工授粉、花粉採集、精選作業が不要となる (Table 2)。また、これまで 4 種類のスギ雄性不稔遺伝子が同定されているが、全て 1 対の男性遺伝子に支配される核遺伝子型雄性不稔であった (斎藤 2010)。現行の探索方法 (Fig. 1a) では 4 種類の不稔遺伝子それぞれについて、検定交配を実施する必要があるが、自殖によるヘテロ探索では (Fig. 1b)、いずれの遺伝子かをヘテロ保有している場合には不稔個体が出現することが期

待できる。さらに、未知の不稔遺伝子も検出できる可能性がある。こうしたことから、自殖による探索手法を用いることにより、現行よりもはるかに簡便にヘテロ個体探索が可能と期待される。よって今後は今回の手法を活用し、スギ精英樹における雄性不稔遺伝子のヘテロ保有の有無をスクリーニングしていく考えである。

Table 2. ヘテロ保有個体探索方法の比較
Comparison of methods to find trees heterozygous for male-sterility gene.

探索方法	必要な作業				メリット	デメリット
	花粉採取	花粉精選	袋かけ	人工授粉		
不稔個体との人工交配	要	要	要	要	・遺伝子の種類を同定できる	・労力が大きい
自殖家系を利用	不要	不要	要	不要	・労力が小さい ・母樹数による制限無し	・得苗率が低い

ところで三重不稔×伊都 3 号、三重不稔×飯南 5 号、三重不稔×神崎 15 号を自殖して得た 3 家系の、播種した種子重量当たり 1 年生苗得苗本数はそれぞれ 0.0、1.8、22.2 本/g であり (平均 8.0 本/g)、同時に播種したスギ精英樹間の人工交配 10 家系 (平均 63.8 本/g) と比較し著しく低い値を示した。このためいずれの家系でも、雄性不稔個体の分離比検定に十分な苗を得られなかった。これは自殖により、胚致死遺伝子がホモ接合化し種子の稔性が低下したことが原因と考えられる (河崎 1990)。ヘテロ保有の検定に必要な苗を効率的に得苗するため、このようなデメリットへの対策についても検討する必要がある。

本研究では、雄花内細胞組織の観察について森林総合研究所森林バイオ研究センターの小長谷賢一博士の指導を頂いた。また、関西育種場の三浦真弘博士と岩泉正和博士には懇切な助言を頂いた。ここに深謝する。なお、本研究の一部は、森林総合研究所エンカレッジモデルによる研究支援を受けた。

引用文献

- 磯田 圭哉・河合 慶恵・山口 和穂・久保田 正裕・山田 浩雄 (2013) 関西育種基本区におけるスギ雄性不稔遺伝子保有個体の探索. 林木育種センター年報, 2013, 55-59.
- 磯田 圭哉・河合 慶恵・山田 浩雄 (2014) 三重不稔 (関西) 1 号と「爽春」の保有する雄性不稔遺伝子の同一性の確認. 応用森林学会大会研究発表要旨集, 65, 27.
- 河合 (宗原) 慶恵・平岡 祐一郎・三浦 真弘・河崎 久男・渡邊 敦史 (2009) 雄性不稔スギ「爽春」と相同な不稔遺伝子を保有する系統の探索と新たな雄性不稔品種の開発. 日本森林学会関東支部大会講演要旨集, 61, 19.
- Kawamoto, T. and Shimizu, M. (2000) A method for preparing 2- to 50- μ m-thick fresh-frozen sections of large samples and undecalcified hard tissues. *Histochem. Cell. Biol.*, 113, 331-339.
- 河崎 久男 (1990) スギにおける胚致死遺伝子の検出法に関する研究. 林育研報, 8, 1-67.
- 斎藤 真己 (2010) スギ花粉症対策品種の開発. 日林誌, 92, 316-323.
- Taira, H., Saito, M. and Furuta Y. (1999) Inheritance of the trait of male sterility in *Cryptomeria japonica*. *J. For. Res.*, 4, 271-273.

森林総合研究所研究報告Vol. 14-No. 2 (No.435) 79 ページに誤りがありました。

訂正申し上げます。

p. 79、謝辞

誤：本研究は、ブラッドレー G. リダウト博士、元リーダー、建築環境プログラム、森林研究所、ニュージーランド (Dr. Bradley G. Ridoutt, Former Leader. Built Environment Programme, Forest Research, New Zealand) との共同研究 (2001 年 9 月 24 日～同 10 月 10 日) の一環として行った。面接調査の準備から実施まで分担していただいた宮崎良文博士 (元チーム長、樹木化学研究領域) ならびに被験者や調査場所の確保にご尽力いただいた半田高博士 (元筑波大学) に謝意を表す。

正：本研究は、ブラッドレー G. リダウト博士、ニュージーランド、森林研究所、建築環境プログラム、元リーダー (Dr. Bradley G. Ridoutt, Former Leader. Built Environment Programme, Forest Research, New Zealand) との共同調査 (2001 年 9 月 24 日～同 10 月 10 日) の一環として行った。聞き取り調査の準備や実施にご尽力いただいた関係者に謝意を表す。

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 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

2017年12月 発行 森林総合研究所研究報告 第16巻4号 (通巻444号)

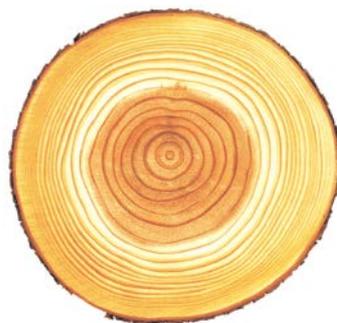
編集人 森林総合研究所研究報告編集委員会

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

©2017 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。



page213

層構成とラミナの等級の違いがスギCLTの面内方向の曲げヤング係数と曲げ強さに及ぼす影響

: 平松 靖、宮武 敦、玉置 教司、新藤 健太、井道 裕史、長尾 博文、原田 真樹、小木曾 純子
Effects of layup and grade of lumber on bending Young's modulus and bending strength of sugi (*Cryptomeria japonica*) cross laminated timber under in-plane loading
by Yasushi HIRAMATSU, Atsushi MIYATAKE, Takashi TAMAKI, Kenta SHINDO, Hirofumi IDO, Hirofumi NAGAO, Masaki HARADA and Junko OGISO

page225

強度間伐が行われたスギ高齢人工林における林分および個体の成長
: 杉田 久志、梶本 卓也、福島 成樹、高橋 利彦、吉田 茂二郎

Stand and individual growth in an old *Cryptomeria japonica* plantation after intensive thinning
by Hisashi SUGITA, Takuya KAJIMOTO, Shigeki FUKUSHIMA, Toshihiko TAKAHASHI and Shigejiro YOSHIDA

page239

都市林におけるガバナンスの評価に関する検討: 野幌国有林を事例として
: 八巻 一成

A study on assessing the governance of urban forests: A case study of nopporo national forest
by Kazushige YAMAKI

page249

海岸防災林再生事業で造成された盛土の深耕による硬度と透水性の変化
: 篠宮 佳樹、今矢 明宏、坂本 知己

The variation of hardness and permeability by deep tillage on embankment in the coastal forest restoration project
by Yoshiki SHINOMIYA, Akihiro IMAYA and Tomoki SAKAMOTO

page257

スギ人工林においてマレーズトラップで捕獲された社会性カリバチ類 (英文)
: 牧野 俊一、滝 久智、槇原 寛

Social wasps collected with Malaise traps in Japanese cedar (*Cryptomeria japonica*) plantations (Hymenoptera, Vespidae)
by Shun'ichi MAKINO, Hisatomo TAKI and Hiroshi MAKIHARA

page265

雄性不稔遺伝子をヘテロ保有するスギ個体の簡易な探索方法
—自殖家系における雄性不稔個体の分離を利用した試行—

: 河合 慶恵、久保田 正裕、遠藤 圭太、磯田 圭哉

Trial of efficient method for screening *Cryptomeria japonica* trees heterozygous for male-sterile gene by segregation of male-sterile seedlings derived from self-pollinated progeny.
by Yoshie KAWAI, Masahiro KUBOTA, Keita ENDOH and Keiya ISODA