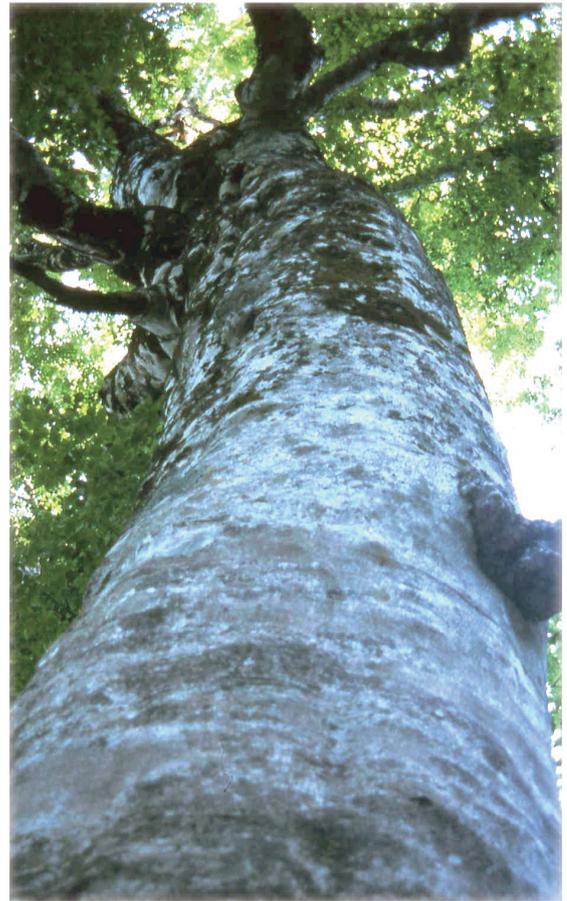


# 森林総合研究所研究報告

Vol.11-No.4(No.425)

BULLETIN

of the  
Forestry and  
Forest Products  
Research Institute



**December 2012**

独立行政法人 森林総合研究所  
Forestry and Forest Products Research Institute

### The Chief Editor

篠原 健司 SHINOHARA Kenji (Principal Research Coordinator,FFPRI)

### The Vice-Chief Editor

赤間 亮夫 Akama Akio (Forest Radioecology Coordinator,FFPRI)

### Editor

立花 敏 TACHIBANA Satoshi (Graduate School of Life and Environmental Sciences, University of Tsukuba)  
佐藤 明 SATO Akira (Faculty of Regional Environment Science, Tokyo University of Agriculture)  
飛田 博順 TOBITA Hiroyuki (Department of Plant Ecology,FFPRI)  
稲垣 善之 INAGAKI Yoshiyuki (Department of Forest Site Environment,FFPRI)  
神崎 菜摘 KANZAKI Natsumi (Department of Forest Microbiology,FFPRI)  
佐藤 大樹 SATO Hiroki (Department of Forest Entomology,FFPRI)  
村田 仁 MURATA Hitoshi (Department of Applied Microbiology,FFPRI)  
毛綱 昌弘 MOZUNA Masahiro (Department of Forest Engineering,FFPRI)  
原田 真樹 HARADA Masaki (Department of Wood Engineering,FFPRI)  
齋藤 英樹 SAITO Hideki (Department of Forest Management,FFPRI)  
溝口 康子 MIZOGUCHI Yasuko (Hokkaido Research Center,FFPRI)  
堀野 眞一 HORINO Shinichi (Tohoku Research Center,FFPRI)  
黒川 潮 KUROKAWA Ushio (Kansai Research Center,FFPRI)  
衣浦 晴生 KINUURA Haruo (Kansai Research Center,FFPRI)  
倉本 哲嗣 KURAMOTO Noritsugu (Forest Tree Breeding Center,FFPRI)  
秦野 恭典 HATANNO Yasunori (Research Information Division,FFPRI)

This journal is indexed in CAB Abstracts.

表紙写真 Photograph in Cover

青森県白神山地津軽峠のブナ  
*Fagus crenata* tree in Shirakami Mountains, Aomori Prefecture.

福島県南会津のブナ林  
*Fagus crenata* forest in Minami-Aizu district, Fukushima Prefecture.

(本文252ページ)  
森林総合研究所モデル木造住宅における騒音測定  
Noise measurement in the wooden house constructed in the FFPRI.

目次

論文

花粉の少ないスギ品種をクローンおよび実生で  
普及した場合における雄花減少量の予測  
玉城 聡、栗延 晋 ..... 197

日本の森林における枯死木、堆積有機物、土壌の炭素蓄積量：  
森林土壌インベントリの第1報(英文)  
鶴川 信、高橋 正通、森貞 和仁、竹内 学、松浦 陽次郎、  
吉永 秀一郎、荒木 誠、田中 永晴、池田 重人、三浦 覚、  
石塚 成宏、小林 政広、稲垣 昌宏、今矢 明宏、南光 一樹、  
橋本 昌司、相澤 州平、平井 敬三、岡本 透、溝口 岳男、  
鳥居 厚志、酒井 寿夫、大貫 靖浩、金子 真司 ..... 207

四国のヒノキ強度間伐林分における残存木の葉の水分特性  
宮本 和樹、奥田 史郎、野口 麻穂子、  
伊藤 武治、佐藤 重穂 ..... 223

近赤外域ハイパースペクトルカメラを用いた、  
樹木葉代謝物質の解析方法の提案  
北岡 哲、宇都木 玄、松田 修、上村 章、  
原山 尚徳、飛田 博順、射場 厚 ..... 233

20年前に高速道路沿いに建設された  
カラマツ製遮音壁の防音性能(英文)  
末吉 修三、塩田 正純、坂田 淳、  
柴田 直明、吉野 安里 ..... 243

短報

森林総合研究所モデル木造住宅の性能評価  
—空気音および床衝撃音遮断性能—  
末吉 修三、宇京 斉一郎、原田 真樹 ..... 249

CONTENTS

*Original article*

- Prediction of pollen reduction using selected less pollen variety of Sugi (*Cryptomeria japonica*) propagated by clonal cuttings and open pollinated progenies from clonal seed orchards  
TAMAKI Satoshi and KURINOBU Susumu ..... 197
- Carbon stocks of dead wood, litter, and soil in the forest sector of Japan: general description of the National Forest Soil Carbon Inventory  
UGAWA Shin, TAKAHASHI Masamichi,  
MORISADA Kazuhito, TAKEUCHI Manabu,  
MATSUURA Yojiro, YOSHINAGA Shuichiro,  
ARAKI Makoto, TANAKA Nagaharu, IKEDA Shigeto,  
MIURA Satoru, ISHIZUKA Shigehiro, KOBAYASHI Masahiro,  
INAGAKI Masahiro, IMAVA Akihiro, NANKO Kazuki,  
HASHIMOTO Shoji, AIZAWA Shuhei, HIRAI Keizo,  
OKAMOTO Toru, MIZOGUCHI Takeo, TORII Atsushi,  
SAKAI Hisao, OHNUKI Yasuhiro and KANEKO Shinji ..... 207
- Leaf water relations of residual trees in heavily thinned hinoki cypress stands in Shikoku, Japan  
MIYAMOTO Kazuki, OKUDA Shiro, NOGUCHI Mahoko,  
ITOU Takeharu and SATO Shigeho ..... 223
- Near-infrared hyper-spectral techniques for the quantification of starch and sucrose in the leaves of cool temperate deciduous broad-leaved trees  
KITAOKA Satoshi, UTSUGI Hajime, MATSUDA Osamu,  
UEMURA Akira, HARAYAMA Hisanori,  
TOBITA Hiroyuki and IBA Koh ..... 233
- Sound insulation performance of wood (*Larix kaempferi*) sound barriers constructed along an expressway twenty years ago  
SUEYOSHI Shuzo, SHIODA Masazumi, SAKATA Jun,  
SHIBATA Naoaki and YOSHINO Anri ..... 243

*Note*

- Performance evaluation of the wooden house constructed in the Forestry and Forest Products Research Institute - Airborne and floor-impact sound insulation -  
SUEYOSHI Shuzo, UKYO Seiichiro and HARADA Masaki ..... 249

## 論文 (Original article)

# 花粉の少ないスギ品種をクローンおよび実生で普及した場合における雄花減少量の予測

玉城 聡<sup>1)\*</sup>、栗延 晋<sup>2)</sup>

## Prediction of pollen reduction using selected less pollen variety of Sugi (*Cryptomeria japonica*) propagated by clonal cuttings and open pollinated progenies from clonal seed orchards

Satoshi TAMAKI<sup>1)\*</sup> and Susumu KURINOBU<sup>2)</sup>

### Abstract

To evaluate the effect of selection for less pollen Sugi (*Cryptomeria japonica*) for alleviating the social problem of pollinosis, reduction in pollen productivity was predicted in two ways; direct selection assuming a vegetative propagation of the selected clone and indirect selection assuming seedling production from an orchard of the selection. Abundance of male flowering was evaluated individually with a subjective five grade scores from 1 to 5 and then the plot means were calculated for the subsequent analysis. The measurement was done at 3 clone banks, 22 clonal tests and 5 open pollinated progeny tests in the Kansai Breeding Region. This region was divided into three sub-regions, thus the data analysis was done by each sub-region. Repeatability of clonal mean ranged from 0.47 to 0.64, and family mean heritability were 0.43 to 0.82. Parent-offspring correlation was 0.41. These results suggest that the male flowering ability of Sugi was under the strong genetic control. Genetic gain by direct selection of less pollen clone was 0.34-0.46 on the five grade scoring scale, and the gain by indirect selection was 0.14-0.16. Then the gains were converted to the male flower weight by the published quadratic regression equation. The use of clonal cuttings of less pollen Sugi would reduce pollen production around 2.3-5.2% to those of unselected Sugi, whereas the use of progeny of the selection would reduce around 45.4-47.7%.

**Key words :** male flowering ability, indirect selection, genetic gain, pollinosis, heritability

### 要旨

花粉の少ないスギ品種を利用した花粉症対策の効果を検証するため、花粉の少ないスギ品種をさし木苗等のクローンで普及する場合および実生苗で普及する場合を想定し、前者はクローンの直接選抜、後者は家系の間接選抜の手法によって遺伝獲得量を算出し、花粉生産の減少量を試算した。着花性調査は個体ごとに1~5の5段階で評価し、解析にはこれらのデータのプロット平均値を用いた。着花性調査は、関西育種基本区内の育種素材保存園(クローン集植所)3箇所、さし木検定林22箇所、および実生検定林5箇所で行われた。これらの調査地を3地域に区分し、地域ごとに解析を行った。クローン平均値の反復率は0.47~0.64、家系平均値の遺伝率は0.43~0.82といずれも高い値であった。また、着花性の親子相関は0.41と算出された。したがって、スギの雄花着花性は遺伝的に強く支配された形質であることが示された。雄花着花指数の遺伝獲得量は、クローンの直接選抜では0.34~0.46、家系の間接選抜では0.14~0.16であった。これらの値を雄花重量に実数変換した結果、花粉の少ないスギ品種を植栽した場合に無選抜の母集団を100%とすると、クローンでは2.3~5.2%に、実生では45.4~47.7%に減少すると試算された。

**キーワード :** 雄花着花性、間接選抜、遺伝獲得量、スギ花粉症、遺伝率

原稿受付：平成24年2月28日 Received 28 February 2012 原稿受理：平成24年8月23日 Accepted 23 August 2012

1) 森林総合研究所林木育種センター東北育種場 Touhoku Regional Breeding Office, Forest Tree Breeding Center, Forestry and Forest Products Research Institute (FFPRI)

2) 森林総合研究所林木育種センター Forest Tree Breeding Center, Forestry and Forest Products Research Institute (FFPRI)

\* 森林総合研究所林木育種センター東北育種場 〒020-0173 岩手県岩手郡滝沢村滝沢字大崎95番地 Touhoku Regional Breeding Office, Forest Tree Breeding Center, Forestry and Forest Products Research Institute 95 Oosaki, Azatakiyawa, Takizawa, Iwate-gun, Iwate 020-0173, Japan, e-mail: tamakis@affrc.go.jp

### 1. はじめに

スギ花粉症の罹病者は、依然として増加傾向にある中で、未だに根本的な治療法は確立されておらず、花粉との接触を避けることが最も確実な対策となっている。空中花粉の飛散量と花粉症の症状の重さや患者数との関係は疫学調査の結果からも有意な正の相関として報告されており (Ozasa et.al 2002)、スギ林から発生するスギ花粉を減少させることは、社会的な強い要請となっている。これに対する林木育種分野での取り組みとして、1) 雄花着生量が極めて少ない「花粉の少ないスギ品種」(以下、少花粉スギとする)の選抜、2) 雄性不稔スギを利用した採種園の造成 (斎藤・平 2005, 斎藤 2009)、3) 花粉中のアレルゲン含有量の変異の測定 (後藤ら 1999) などが進められている。このうち、2) の雄性不稔スギについては、花粉を全く出さないため、究極的な花粉症対策である。その一方で、いまだ雄性不稔個体はわずかししか発見されておらず育種母材に限られていること、およびそれらの成長特性が不明な場合には、精英樹との人工交配家系を創出する必要があることから、現段階では大量に種苗を供給する体制は整っていない。1) については、これまでに全国で 131 品種が選抜されており (林木育種センター 2010)、すでに種苗生産が始まっている (津田 2007)。少花粉スギは精英樹の中から選抜されたために成長や通直性などの林業的特性が明らかであり、実用化に向けた懸案は少ない。その一方で、少花粉スギは雄花の着生量は少ないものの雄性不稔スギとは異なり、雄花から正常な花粉を出すことから、着花特性の再現性が高いことが重要である。すなわち、少花粉スギによる花粉症対策効果を推定するためには、一般的な量的形質と同様に、実験計画法に則った解析により表現型分散を遺伝分散と環境分散に分割し、遺伝的支配の大きさを推定する必要がある。

これまでにスギ精英樹の雄花着花性の遺伝性に関する報告として、クローン間に有意差があることが数多く報告されている (例えば増田ら 1993, 戸田ら 1996)。また、調査年次間の変動はあるものの、調査年次とクローンとの交互作用は有意ではないか (増田ら 1993, 遠藤・藤林 2006)、有意であってもその分散成分はクローン間の分散成分と比べて小さいことが報告されている (戸田ら 1996)。さらに、広義の遺伝率の推定 (戸田ら 1996) や検定林において着花量の少ない系統の上位集団を切断選抜した場合の遺伝獲得量の推定がなされている (遠藤ら 2001)。これらの報告は、雄花着花性は遺伝的な支配が大きい形質であり、育種による改良が可能であることを示したが、少花粉スギを植栽した場合にどの程度の改良効果があるかについて、一般化できる結論を得るには至っていない。また、これまでのスギ精英樹の雄花着花性に関する研究はクローンを対象としたものがほとんどであるが、実際の

普及の際にはクローンであるさし木苗ではなく、コスト面で優れた実生苗を選択することも想定される。つまり、少花粉スギを実生で植栽した場合の遺伝獲得量についても予測する必要がある。

そこで本研究では、関西育種基本区内で実施したスギ精英樹クローンおよび実生の着花性調査データを用いて、複数試験地を統合した解析による遺伝パラメータを推定した。さらに、遺伝獲得量を推定し、少花粉スギをクローンで普及した場合と実生で普及した場合のそれぞれについて、雄花生産量の減少効果を予測した。少花粉スギの選抜の際に用いた大部分のデータは精英樹クローンの着花調査によるものである。したがって、クローンで普及した場合の遺伝獲得量は、クローンの着花調査データから求めたパラメータを用いて直接選抜により予測できる。一方、実生で普及する場合については、精英樹による選抜樹齢の違い等が着花性に影響していると予想されるので、精英樹クローンとその後代の実生家系との親子相関を算出し、クローン (X) の選抜が実生 (Y) に生じる反応を相関反応 (Correlated Response : Falconer and Mackay 1996) とみなした間接選抜による遺伝獲得量を試算した。

## 2. 材料と方法

### 1. 材料と着花調査の方法

雄花着花性調査は、1994 年から 2006 年にかけて関西育種場、山陰増殖保存園および四国増殖保存園の 3 箇所の育種素材保存園 (クローン集植所) で実施した (Table 1)。また、これまでに林野庁の委託事業により実施されたスギ精英樹の雄花着花性調査結果が公表されていることから (林野庁 2002)、その中の関西育種基本区内で実施されたデータを解析に供した。このデータは、さし木検定林 22 箇所、実生検定林 5 箇所において、1996 年から 2001 年に調査した結果である。調査地の設計は、育種素材保存園は反復の無い列状植栽であり、検定林は 3 反復の乱塊法であった。

調査個体として、検定林では標準的な成長を示した個体を 5 個体、育種素材保存園では、各プロットから 3 個体ずつ選定し、着花調査をおこなった。雄花着花性の評価は、林野庁 (1994) の「雄花着花性に関する調査実施要領」に準じておこなった。この評価方法は、樹冠に占める雄花について、着花した枝の割合と枝あたりの雄花の量を指数で記録し、それらを総合して個体ごとに 1~5 の 5 段階の評価をおこなうものである。評価値の 1 は雄花の着生量がほとんどないことを表し、5 に近づくに従って雄花の着生範囲および着生量がより多いことを表す。

少花粉スギの実際の普及範囲をもとに調査地を 3 地域に区分し、地域ごとにデータを解析した。各地域はそれぞれ、日本海岸東部育種区と日本海岸西部育種区を含む日本海岸地域、近畿育種区と瀬戸内海育種区を

Table 1 雄花着花性調査を実施した調査地の概要  
Table 1 Description of the sites used in testing of male flowering characteristic.

地域 Region	調査地名 Site	設定年 Established year	設計 Experimental Design	増殖形態 Propagation	供試系統数 Number of Strain	所在地 Location	標高 Altitude (m)
日本海岸 Japan Sea coast	山陰増殖保存園	1963-1964	RP	C	303	鳥取県智頭町	400
	西石 1	1969	RBD	C	10	石川県門前町	225
	西石 3	1970	RBD	C	10	石川県珠洲市	300
	西福 3	1970	RBD	C	18	福井県朝日町	90
	西福 6	1972	RBD	C	19	福井県大野市	110
	西滋スギ 3	1977	RBD	C	21	滋賀県多賀町	640
	西兵 13	1973	RBD	C	10	兵庫県養父町	275
	西鳥 1	1970	RBD	C	20	鳥取県智頭町	700
	鳥取県林試	1981	RBD	P	32	鳥取県鳥取市	50
近畿・瀬戸内海 Kinki and Setouchi Districts	関西育種場	1967-1972	RP	C	492	岡山県勝央町	140
	西三 9	1976	RBD	C	7	三重県熊野市	480
	西三 10	1977	RBD	C・P	C12・P16	三重県大宮町	120
	西滋スギ 1	1975	RBD	C	18	滋賀県土山町	555
	西兵 8	1972	RBD	C	8	兵庫県山南町	200
	西奈スギ 5	1973	RBD	C	10	奈良県西吉野村	280
	西奈スギ 11	1976	RBD	C	8	奈良県榛原町	650
	西岡 27	1977	RBD	C	35	岡山県美甘村	600
	西山 19	1982	RBD	C	15	山口県徳地町	450
	西岡 43	1980	RBD	P	19	岡山県八束町	520
四国 Sikoku island	四国増殖保存園	1969-1972	RP	C	294	高知県香美市	50
	四愛 1・2・3	1970	RBD	C	18	愛媛県北条市	775
	四愛 53	1974	RBD	C	5	愛媛県伊予三島市	450
	四愛 57	1974	RBD	C	6	愛媛県城辺町	425
	四愛 5	1970	RBD	C	11	愛媛県野村町	600
	四愛 59	1975	RBD	C	4	愛媛県内子町	200
	四愛 54	1974	RBD	C	6	愛媛県西条市	350
	四愛 4	1974	RBD	C	7	愛媛県野村町	400
	四高 27 号	1977	RBD	P	14	高知県室戸市	420
	四高 35 号	1980	RBD	P	16	高知県室戸市	420

RP, 列状試験区; RBD, 乱塊法による試験区; C, さし木苗; P, 実生苗。  
RP, Row Plot; RBD, Randomized Block Design; C, Clonal cuttings; P, Progenies.

含む近畿・瀬戸内海地域、および四国北部育種区と四国南部育種区を含む四国地域とした。なお、各育種素材保存園および各検定林の供試系統は、今回区分した地域内で選抜された精英樹により構成されている。

## 2. 遺伝パラメータの推定

クローンの着花性の解析は、育種素材保存園とさし木検定林のプロット平均値を用いて、前述の地域ごとに以下の線型モデルを仮定して分散分析をおこなった。

$$x_{ijkl} = \mu + s_i + r(s)_{ij} + y(s)_{ik} + c_l + (c \times s)_{il} + \varepsilon_{ijkl} \quad (1)$$

ここで  $x_{ijkl}$  は  $i$  番目の調査地の  $j$  番目の反復の  $k$  番目の調査年次の  $l$  番目のクローンのプロット平均値、 $\mu$ 、 $s_i$ 、 $r(s)_{ij}$ 、 $y(s)_{ik}$ 、 $c_l$ 、 $(c \times s)_{il}$  および  $\varepsilon_{ijkl}$  はそれぞれ、全体平均、調査地  $i$  の効果、調査地  $i$  の反復  $j$  の効果、調査地  $i$  の調査年次  $k$  の効果、クローン  $l$  の効果、クローン  $l$  と調査地  $i$  の GE 交互作用、誤差である。

式 (1) の解析結果と平均平方の期待成分をもとに分

散成分を推定し、クローン平均値の反復率 ( $h_x^2$ ) を以下の式により推定した。

$$h_x^2 = \sigma_c^2 / (\sigma_c^2 + \sigma_{cs}^2 / s + \sigma_e^2 / rsy) \quad (2)$$

ここで、 $\sigma_c^2$  はクローン分散、 $\sigma_{cs}^2$  はクローンと調査地の GE 交互作用分散、 $\sigma_e^2$  は誤差分散、 $s$  は調査地数、 $r$  は調査地あたりの反復数、 $y$  は調査年数である。

実生家系の着花性の解析は、調査地の数が少ないことに加えて調査地間の供試系統の重複が少なかったため、個別の調査地ごとに以下の線型モデルを仮定して分散分析をおこなった。

$$x_{ijk} = \mu + r_i + y_j + f_k + \varepsilon_{ijk} \quad (3)$$

ここで  $x_{ijk}$  は  $i$  番目の反復の  $j$  番目の調査年次の  $k$  番目の家系のプロット平均値、 $\mu$ 、 $r_i$ 、 $y_j$ 、 $f_k$ 、および  $\varepsilon_{ijk}$  はそれぞれ、全体平均、反復  $i$  の効果、調査年次  $j$  の効果、家系  $k$  の効果、誤差である。この分散分析は検定林単位でおこなったため、そこから求めた遺伝分散 ( $\sigma_f^2$ ) には GE 交互作用分散が含まれている。そこで、GE 交互作用分散を除いた遺伝分散 ( $\sigma_f^2$ ) を推定するた

め、クローンの解析で得られた遺伝分散と GE 交互作用分散の割合が実生でも同じであると仮定し、実生の遺伝分散 ( $\sigma_f^2$ ) を GE 交互作用分散 ( $\sigma_{fs}^2$ ) と交互作用を除いた遺伝分散 ( $\sigma_r^2$ ) に分割した。

推定した遺伝分散、GE 交互作用分散および誤差分散を用いて、家系平均値の遺伝率 ( $h_y^2$ ) を以下の式により推定した。

$$h_y^2 = \sigma_r^2 / (\sigma_r^2 + \sigma_{fs}^2 / s + \sigma_e^2 / ry) \quad (4)$$

ここで、 $\sigma_r^2$  は家系分散、 $\sigma_{fs}^2$  は家系と調査地の GE 交互作用分散である。なお、以上の分散分析と平均平方の構造式の算出には、農林水産研究情報総合センターの統計解析ソフト SAS の GLM プロシジャを用いた。

クローンの着花性 (x) と実生の着花性 (y) の表現型相関を次式で求めた。各地域の実生検定林の数は 1 ~ 2 箇所と少なかったことから、より信頼性の高い相関を求めるため、次式により 3 地域計 5 か所のデータを統合した相関を求めた。

$$r_{x,y} = \sum \text{cov}(x,y) / (\sum \sigma_x^2 \times \sum \sigma_y^2)^{1/2} \quad (5)$$

クローンと実生の試験地が別の場所にある場合には、両者のデータの間の環境相関はゼロとみなせる (Adams et. al 2001)。このため、(5) 式で推定した表現型相関 ( $r_{x,y}$ ) をもとに、クローンの着花性 (x) と実生の着花性 (y) の遺伝相関を次式により求めた (Burdon 1977)。

$$r_{gx,y} = r_{x,y} / (h_x \times h_y) \quad (6)$$

ここで、 $h_x$  はクローン平均値の反復率の平方根、 $h_y$  は家系平均値の遺伝率の平方根である。

### 3. 遺伝獲得量の予測

少花粉スギの選抜の際には、クローンの着花性調査結果をもとに評価し、選抜している。そこで、少花粉スギをさし木苗等のクローンで普及した場合の遺伝獲得量 ( $\Delta G_x$ ) は、クローンの着花性調査データをもとに算出したパラメータを用いる以下の式により計算した。

$$\Delta G_x = i \times h_x^2 \times \sigma_{px} \quad (7)$$

ここで、 $i$  は少花粉スギの選抜強度、 $h_x^2$  はクローン平均値の反復率、 $\sigma_{px}$  はクローン平均値の標準偏差である。少花粉スギの選抜の際には、複数年かつ複数年箇所調査されたクローンの中から選抜した。このため、少花粉スギの選抜強度の算出にあたっては、調査したクローンの中でこの条件を満たしたクローン数に対する、少花粉スギの選抜数の割合から計算した。

少花粉スギを実生で普及した場合の育種効果は、前述のとおりクローンの着花性をもとに選抜しているため、実生の着花性調査データを用いて直接計算するのは適切ではない。この遺伝獲得量 ( $\Delta G_y$ ) は、クローン (x) の選抜に伴い実生 (y) に生じる相関反応とみなして、以下の間接選抜の予測式により計算した (Falconer and Mackay 1996)。

$$\Delta G_y = i \times h_x \times h_y \times r_{gx,y} \times \sigma_{py} \quad (8)$$

ここで、 $i$  は少花粉スギの選抜強度、 $h_x$  はクローン平均値の反復率の平方根、 $h_y$  は家系平均値の遺伝率の平方根、 $\sigma_{py}$  は家系平均値の標準偏差である。

算出した雄花着花指数の遺伝獲得量を用いて、クローンを直接選抜した場合の選抜後の集団の雄花着花指数の予測値 ( $P_x$ ) と間接選抜した場合の実生の選抜後の集団の予測値 ( $P_y$ ) を以下の式により求めた。

$$P_x = \mu_x - \Delta G_x \quad (9)$$

$$P_y = \mu_y - \Delta G_y \quad (10)$$

ここで、 $\mu_x$  は選抜前の集団の雄花着花指数の全クローン平均値、 $\Delta G_x$  はクローンの直接選抜による遺伝獲得量、 $\mu_y$  は選抜前の集団の雄花着花指数の全家系平均値、 $\Delta G_y$  は間接選抜による実生の遺伝獲得量である。 $\mu_x$  については、クローンの調査地の数が多いために地域ごとに平均値を計算したが、 $\mu_y$  については実生の調査地の数が少ないため、地域を代表した平均値として扱うことは適切でないと考え、3 地域をまとめて全家系平均値を計算した。

選抜後の集団の雄花着花指数の予測値について、遠藤・藤林 (2006) の二次回帰式を用いて個体あたりの雄花重量 (Y) に実数変換した。なお、遠藤・藤林 (2006) の調査基準では 0 ~ 3 の 4 段階の指数であるのに対して、今回は 1 ~ 5 の 5 段階の指数で調査を実施している。予備試験として、4 段階の指数 ( $\alpha$ ) と 5 段階の指数 ( $\beta$ ) の 2 種類の基準により複数の同一個体を対象に着花調査を行い、両者の関係を調べた結果、以下の一次回帰式で近似できた ( $r = 0.93$ )。

$$\alpha = 1.06\beta - 1.02 \quad (11)$$

式 (11) をもとに遠藤・藤林の二次回帰式を一部変更し、以下の式を用いて実数変換した。

$$Y = 264.14(P - 1)^2 + 73.539(P - 1) \quad (12)$$

ここで、 $P$  は式 (9) による  $P_x$ 、あるいは式 (10) による  $P_y$  であり、 $P_x$  の実数変換値を  $Y_x$ 、 $P_y$  の実数変換値を  $Y_y$  と表記する。

## 3. 結果と考察

### 1. 雄花着花指数の全系統平均と系統間の差異

クローンと実生の雄花着花指数の全系統平均値、平均値ベースの標準偏差および変動係数を Table 2 に示す。地域ごとのクローン平均値は 1.20 ~ 1.56、家系平均値は 1.16 ~ 2.31 であり、いずれも四国地域で着花量が多い傾向があった。また、クローンと実生の平均値を比較すると、日本海岸地域ではクローンがわずかに高かったが、近畿・瀬戸内海地域と四国地域では実生が高かった。一般に実生の造林地と比べてさし木造林地では着花量が少ないことが知られており、今回のデータからも概ねその傾向が示された。系統間のばらつきを大きさを表す変動係数は、クローンでは 31.1 ~ 42.8%、実生では 11.5 ~ 19.4% といずれも高い値

Table 2 雄花着花指数の平均値、標準偏差および変動係数  
Table 2 Mean, standard deviation and coefficient of variation of male flowering scores.

地域 Region	クローン clonal cuttings			実生 Progenies		
	平均値 Mean	$\sigma_{Px}$	変動係数 (%) Coefficient of variation C.V.(%)	平均値 Mean	$\sigma_{Py}$	変動係数 (%) Coefficient of variation C.V.(%)
日本海岸 Japan Sea coast	1.39	0.43	31.1	1.16	0.22	19.4
近畿・瀬戸内海 Kinki and Setouchi districts	1.20	0.52	42.8	1.59	0.21	13.0
四国 Sikoku island	1.56	0.53	34.2	2.31	0.27	11.5
全地域 All regions	1.38			1.69		

$\sigma_{Px}$ , クローン平均値ベースの標準偏差;  $\sigma_{Py}$ , 家系平均値ベースの標準偏差。

$\sigma_{Px}$ , Standard deviation based on variation among clonal means;  $\sigma_{Py}$ , Standard deviation based on variation among family means.

であり、特にクローンでは系統間に大きな変異があることが示された。

複数の調査地を統合した線形モデル式 (1) によりクローンの着花データを分散分析した結果を Table 3 に示す。クローン間差は全ての地域で有意であった ( $p < 0.01$ )。一方、日本海岸地域と近畿・瀬戸内海地域では、クローンと調査地間の GE 交互作用も有意であり ( $p < 0.01$ )、その分散成分はクローン間分散成分と同程度に大きかった。唯一 GE 交互作用が有意ではなかった四国地域では、調査地が愛媛県と高知県の隣接する 2 県に集中していたのに対して、有意であった 2 地域では、調査地が広域に分散していた (Table 1)。一般的な傾向として、調査地間の距離が離れるに従って、相互の環境要因の違いが大きくなると考えられる。スギの雄花着生量は、花芽分化期の気象条件の影響を受けることが報告されており (横山・金指 1993)、地域内で気象条件の違いが大きければ、場所によって着花量の豊凶に変動が生じると考えられる。調査地が広域に分散していた 2 地域においては、調査地間で豊凶の不一致が生じ、それにより着花量のクローン間分散の大きさが不均一になり、GE 交互作用として検出された可能性がある。

実生の着花データを線形モデル式 (2) により分散分析した結果を Table 4 に示す。全ての調査地で家系間差は有意であった ( $p < 0.01$ )。先に述べた理由により、家系の分散成分をクローンの分散成分の比率をもとに  $\sigma_P^2$  と  $\sigma_{Ps}^2$  に分割した結果、日本海岸地域では 16.9% と 18.5%、近畿・瀬戸内海地域では 5.5% と 4.8%、四国地域では 6.5% と 0.6% となった。

## 2. 遺伝パラメータと雄花減少量の予測

分散分析結果から求めたクローン平均値の反復率 ( $h_x^2$ ) は 0.47 ~ 0.64 であり (Table 3)、家系平均値の遺伝率 ( $h_y^2$ ) は 0.43 ~ 0.82 であった (Table 4)。これまでに、スギ精英樹クローンの雄花着花性の遺伝パラ

メータを試験地ごとに求めた事例として、広義の遺伝率は 0.076 ~ 0.263 (増田ら 1993, 戸田ら 1996)、クローン平均値の反復率は 0.667 (遠藤ら 2001) という報告がある。このような試験地ごとのクローンの解析に加えて、今回の複数試験地を統合したクローンの解析、および実生家系の解析においても、雄花着花性は遺伝的支配をかなりの程度受けている形質であることが確認された。

各種パラメータと遺伝獲得量、および少花粉スギの選抜による雄花の減少量の予測結果を Table 5 に示す。母樹であるクローンとその後代の実生家系の親子相関を式 (5) により求めた結果、相関係数は 0.41 であった。さらに、遺伝相関を式 (6) により求めた結果、相関係数は 0.56 ~ 0.86 であった。スギ精英樹の雄花着花調査データについて親子相関を求めた報告として、増田ら (1993) は相関係数は 0.532 と報告しており、齋藤・明石 (1998) は 0.271 ~ 0.451 と報告している。また、遠藤ら (2003) はヒノキ精英樹の親子相関について、相関係数は 0.119 ~ 0.834 と報告している。今回算出した相関係数は、既報と同程度の値であった。

少花粉スギをクローンで普及した場合の雄花着花指数の遺伝獲得量 ( $\Delta G_x$ ) と実生で普及した場合の遺伝獲得量 ( $\Delta G_y$ ) は、それぞれ 0.34 ~ 0.46、および 0.14 ~ 0.16 となった。少花粉スギの選抜においては、母集団の中で雄花着花指数が小さいクローンを選抜するため、マイナス方向の選抜である。このため、選抜後の集団の雄花着花指数の予測値は母集団平均からこれらの遺伝獲得量を減じた値であり、クローンの予測値 ( $P_x$ ) は 0.74 ~ 1.11、実生の予測値 ( $P_y$ ) は 1.53 ~ 1.55 となった (Table 5)。このように、選抜集団の雄花着花指数の予測値は母集団平均値と比べて低下し、花粉症対策の効果が期待できることが示された。

さらに、母集団平均値と選抜集団の予測値を雄花着花指数から雄花重量に変換し、雄花重量での花粉症対策効果を検討した。母集団の実数変換の結果、クロー

Table 3 クロンの着花性の分散分析結果、分散成分の寄与率およびクローン平均値の反復率

Table 3 ANOVA results for male flowering scores of clonal cuttings, percentages of variance components and repeatability of clonal means.

要因 Source of variation	日本海岸 Japan Sea coast				近畿・瀬戸内海 Kinki and Setouchi districts				四国 Sikoku island			
	df	MS	VC (%)	$h_x^2$	df	MS	VC (%)	$h_x^2$	Df	MS	VC (%)	$h_x^2$
クローン Between clones	316	0.88**	18.9	0.47	535	0.77**	19.5	0.54	294	1.18**	25.2	0.64
調査地 Between sites	7	5.04**	11.7		8	2.89**	27.2		6	5.55**	13.6	
調査地内反復 Between blocks within sites	14	0.51**	0.9		16	0.34**	0.6		10	0.35 <sup>ns</sup>	0.0	
調査地内年次 Between years within sites	34	3.56**	14.0		43	2.92**	12.3		18	4.03**	9.0	
クローン×調査地 (GE 交互作用) Interaction between clones and sites	87	0.76**	20.6		83	0.47**	19.3		46	0.47 <sup>ns</sup>	2.4	
誤差 Error	1961	0.16	33.9		2014	0.11	21.1		1051	0.36	49.8	

df, 自由度; MS, 平均平方; VC, 分散成分の寄与率;  $h_x^2$ , クローン平均値の反復率; \*\*,  $p < 0.01$ ; ns,  $p > 0.05$ 。式 (1) の線型モデルによる分散分析をおこなった。

df, degree of freedom; MS, mean square; VC, percentages of variance component;  $h_x^2$ , repeatability of clonal means; \*\*,  $p < 0.01$ ; ns,  $p > 0.05$ . ANOVA was calculated by the linear model of eq.(1).

Table 4 実生の着花性の分散分析結果、分散成分の寄与率および家系平均値の遺伝率

Table 4 ANOVA results for male flowering scores of progenies, percentages of variance components and family mean heritabilities.

地域 Region	調査地 Site	変動因 Source of variation	df	MS	VC (%)	$\sigma_f^2$ (%)	$\sigma_{fs}^2$ (%)	$h_y^2$
日本海岸 Japan Sea coast	鳥取県林試	家系 Family	31	0.91**	35.3	16.9	18.5	0.52
		年次 Year	5	0.10 <sup>ns</sup>	0.3			
		反復 Block	2	2.75**	10.6			
		誤差 Error	537	0.06	53.8			
近畿・瀬戸内海 Kinki and Setouchi districts	西三 10	家系 Family	15	0.43**	7.7	4.1	3.6	0.39
		年次 Year	3	6.98**	51.5			
		反復 Block	2	0.34*	1.4			
		誤差 Error	163	0.13	39.4			
	西岡 43	家系 Family	18	0.95**	13.0	6.9	6.0	0.48
		年次 Year	5	2.81**	13.7			
		反復 Block	2	11.07**	28.1			
		誤差 Error	316	0.19	45.2			
平均 Mean					5.5	4.8	0.43	
四国 Sikoku island	四高 35 号	家系 Family	15	1.06**	7.4	6.8	0.6	0.83
		年次 Year	4	32.59**	79.0			
		反復 Block	2	0.83**	1.1			
		誤差 Error	218	0.09	12.5			
	四高 27 号	家系 Family	13	1.07**	6.8	6.2	0.6	0.80
		年次 Year	4	29.16**	76.3			
		反復 Block	2	0.67*	0.8			
		誤差 Error	190	0.14	16.0			
平均 Mean					6.5	0.6	0.82	

df, 自由度; MS, 平均平方; VC, 分散成分の寄与率;  $\sigma_f^2$ , 家系分散;  $\sigma_{fs}^2$ , GE 交互作用分散;  $h_y^2$ , 家系平均値の遺伝率; \*\*,  $p < 0.01$ ; \*,  $p < 0.05$ ; ns,  $p > 0.05$ 。式 (3) の線型モデルによる分散分析をおこなった。式 (1) の線型モデルによる分散分析から推定したクローン分散と GE 交互作用分散の割合を家系の分散成分  $\sigma_f^2$  にも適用し、 $\sigma_f^2$  と  $\sigma_{fs}^2$  に分割した。

df, degree of freedom; MS, mean square; VC, percentages of variance component;  $\sigma_f^2$ , variance component of family means;  $\sigma_{fs}^2$ , variance component of GE interaction;  $h_y^2$ , family mean heritability; \*\*,  $p < 0.01$ ; \*,  $p < 0.05$ ; ns,  $p > 0.05$ . ANOVA was calculated by the linear model of eq.(3).  $\sigma_f^2$  and  $\sigma_{fs}^2$  were calculated by the ratio of variance component of clonal means and that of GE interaction from ANOVA result of the linear model of eq.(1).

ンの平均値は 136.8 ~ 225.3g であり、実生の平均値は 30.8 ~ 566.3g であった。実生では、地域間の変動が大きかったため、3 地域をまとめた値の 248.7g を共通の母集団平均として以後の解析に用いた。選抜集団である少花粉スギのクローンの予測値 ( $P_x$ ) の実数変換値 ( $Y_x$ ) は、日本海岸地域では 3.7g、四国地域では 11.7g となった。近畿・瀬戸内海地域ではマイナスの値となり、正確な予測値が得られなかった。少花粉スギの実生の予測値 ( $P_y$ ) の実数変換値 ( $Y_y$ ) は 112.9 ~ 118.6g となった。これらの値と実数変換した母集団平均値との比率は、クローンでは 2.3 ~ 5.2%、実生では 45.4 ~ 47.7% であった。すなわち、少花粉スギをクローンで普及した場合に、一般のスギを植えた場合の 5% 以下程度に、実生で普及した場合には 50% 以下程度に、それぞれ雄花重量を減少できることが示された。クローンの予測において、近畿・瀬戸内海地域では正確な予測値が得られなかったが、その原因として、調査データに含まれる不作年のデータの影響により母集団平均値が過小に推定されたことが考えられる。

遠藤・藤林 (2006) は、クローン検定林と実生検定

林における豊作年 3 年間の着花調査データを解析し、着花量が少ない上位系統を選抜した場合の雄花重量の減少効果について試算している。3 段階の異なる選抜割合で試算した結果、選抜集団の雄花重量は、クローン検定林では 8~53% に、実生検定林では 37~70% に減少することを報告している。このうち、本研究と同程度の選抜割合に相当する基準 (着花個体率 5% 未満) で試算した結果では、クローン検定林では対照の地スギの 8% に、実生検定林では地スギの 37% にそれぞれ雄花重量が減少することを示している。今回の試算結果では、クローンについては、遠藤らの報告した値と大きな開きは無かったが、実生については遠藤らの報告と比べ 10% ほど減少効果が少なく試算された。実生での試算結果の違いは、直接選抜と間接選抜の違いによるものと考えられる。すなわち、遠藤らは実生検定林の着花性評価をもとに上位の家系を直接選抜しているのに対して、本研究ではクローンの着花性の評価をもとに家系を間接選抜しており、親子間の遺伝相関を積算している分だけ遺伝獲得量が小さく算出されたものと考えられる。

Table 5 花粉の少ないスギ品種の選抜強度、クローンと家系の親子相関と遺伝相関、選抜前の母集団の雄花着花指数と雄花重量の平均、遺伝獲得量および選抜後の集団の雄花着花指数と雄花重量の予測値

Table 5 Intensity of selection of less pollen variety of Sugi, phenotypic and genetic correlation of offspring and one parent, genetic gain and predicted value of male flowering scores and male flower weights from response to selection.

地域 Region	i	$r_{x,y}$	$r_{gx,y}$	$\mu_x$	クローン Clonal cuttings					実生 Progenies					
					母集団の平均 Population mean	選抜後の集団の予測値 Predicted values from response to selection				母集団の平均 Population mean	選抜後の集団の予測値 Predicted values from response to selection				
					雄花重量 Weight (g)	$\Delta G_x$	$P_x$	$Y_x$ (g)	母集団平均との比率 Ratio of $Y_x$ / mean (%)	$\mu_y$	雄花重量 Weight (g)	$\Delta G_y$	$P_y$	$Y_y$ (g)	母集団平均との比率 Ratio of $Y_y$ / mean (%)
日本海岸 Japan Sea coast	1.71	—	0.83	1.39	159.1	0.34	1.04	3.7	2.3	1.16	30.8	0.16	1.53	112.9	45.4
近畿・瀬戸内海 Kinki and Setouchi districts	1.67	—	0.86	1.20	136.8	0.46	0.74	—	—	1.59	149.1	0.14	1.54	117.7	47.3
四国 Sikoku island	1.30	—	0.56	1.56	225.3	0.44	1.11	11.7	5.2	2.31	566.3	0.14	1.55	118.6	47.7
全地域 All regions		0.41		1.38	173.8					1.69	248.7				

i, 選抜対象としたクローン数に対する花粉の少ないスギ品種の割合から求めた選抜強度;  $r_{x,y}$ , クローンと家系の親子相関;  $r_{gx,y}$ , クローンと家系の遺伝相関;  $\mu_x$ , 雄花着花指数の全クローン平均値;  $\Delta G_x$ , クローンの直接選抜による遺伝獲得量;  $P_x$ , クローンを直接選抜した場合の選抜後の集団の雄花着花指数の予測値;  $Y_x$ ,  $P_x$  を個体あたりの雄花重量に実数変換した値;  $\mu_y$ , 雄花着花指数の全家系平均値;  $\Delta G_y$ , 実生の間接選抜による遺伝獲得量;  $P_y$ , 実生を間接選抜した場合の選抜後の集団の雄花着花指数の予測値;  $Y_y$ ,  $P_y$  を個体あたりの雄花重量に実数変換した値。  $P_x$  は式 (9) により、  $P_y$  は式 (10) により計算した。雄花着花指数から雄花重量への実数変換には式 (12) を用いた。なお、実生では地域ごとの調査箇所数が少なかったため、母集団の平均値は 3 地域を統合して求めた。

i, intensity of selection of the less pollen variety of Sugi which is calculated from the proportion of the population included in the selected group;  $r_{x,y}$ , phenotypic correlation of offspring and one parent;  $r_{gx,y}$ , genetic correlation of offspring and one parent;  $\mu_x$ , population mean of the male flowering scores of clonal cuttings;  $\Delta G_x$ , genetic gain of direct selection of clone;  $P_x$ , predicted male flowering score of selected clones;  $Y_x$ , converted value of  $P_x$  to male flower weight;  $\mu_y$ , population mean of the male flowering scores of progenies;  $\Delta G_y$ , genetic gain of indirect selection of family;  $P_y$ , predicted male flowering score of selected families;  $Y_y$ , converted value of  $P_y$  to male flower weight.  $P_x$  was calculated by eq.(9) and  $P_y$  was calculated by eq.(10). Conversion from the male flowering scores to the male flower weight was performed by eq.(12). Since progeny test sites per region were few, population mean of male flowering scores of progenies were calculated with pooled data of 3 regions.

### 3. 実際の事業的普及に対応した予測結果の解釈

少花粉スギの普及方法としては、採種園産のさし木苗を利用する方式、および少花粉スギにより構成されるミニチュア採種園産の実生を利用する方式が取られている(岩見ら 2007, 中村・渡邊 2010)。前者の普及方法については、今回のクローンの予測結果がそのまま適用できるが、後者については、今回の実生の予測結果とは対応していない部分がある。今回の実生の予測モデルに用いた調査地は、精英樹採種園産の自然交配家系であり、着花性については無選抜の素材である。このため、そこから求めた遺伝獲得量は、母樹ごとの半兄弟家系間の遺伝的変動のみを考慮して計算しており、これは母樹の改良効果に相当する。しかし、実際のミニチュア採種園産の種苗は、両親ともに少花粉スギであるため、今回推定した母樹の改良効果に加えて、花粉親の改良効果も期待できるので、採種園構成クローンを改良した後の遺伝獲得量は、改良前の採種園で推定したものの2倍が見込まれる(Namkoong 1966)。したがって、少花粉スギで構成されるミニチュア採種園産種苗については、外部からの花粉の汚染が深刻でなければ、今回推定した実生の予測値と比べてさらに大きな雄花生産量の減少効果が期待できると考えられる。

実生で普及した場合の予測では、複数の試験地をまとめた解析ができなかったため、遺伝分散とGE交互作用分散を分離できなかった。そのため、実生については両分散の比率はクローンの解析から推定された比率と同じであると仮定して計算した。一般的に、環境の異質性に対する緩衝作用は遺伝変異が大きいほど高いと考えられるため、GE交互作用の生じやすさは産地、家系、クローンの順に大きくなるといわれている(Kleinschmit 1979)。したがって、実際は実生検定林のほうがGE交互作用分散が小さく、遺伝分散の割合が高いことが推測される。このため、実生で試算した遺伝獲得量は、実際よりも若干控えめな値の可能性はある。

本研究により、雄花着花性は系統間変異が大きいこと(Table 2)、および遺伝的支配が大きい形質であることが示された(Table 3, 4)。また、少花粉スギを植栽した場合に、どの程度の雄花生産量を減少可能かについて、クローンと実生の普及方法別に具体的な予測値を得ることができた(Table 5)。これらの知見は、少花粉スギの普及を推進する行政機関等が少花粉スギのユーザーへ説明する際の情報として、有効に活用されることが期待される。近年、全国規模の花粉飛散量のモニタリング調査データや風向等の気象データから数理モデルを構築し、都市部に飛散する花粉の発生源となる地域を推定する試みが進められている(林野庁 2009, 金指・鈴木 2010)。本研究の試算結果から、少

花粉スギをクローンで普及した場合に雄花の減少効果が特に高いことが示されたことから、花粉発生源と推定される地域にはさし木苗を優先して普及することが効果的であると考えられる。今後の課題としては、すでに生産の始まっている少花粉スギの着花性をモニタリングすることが必要である。また、雄花生産量は地域間の変動が大きいことが報告されていることから(林野庁 2009)、地域によって母集団平均が異なることが予想される。したがって、今回解析した関西育種基本区以外の地域についても、少花粉スギを植栽した場合の雄花生産量の減少効果を試算することが必要と考えられる。

### 謝辞

本研究で解析に用いた雄花着花性調査データのうち、関西育種場、山陰増殖保存園および四国増殖保存園のものは、関西育種場の職員が調査した。また、その他のデータについては、石川県林業試験場、福井県総合グリーンセンター、三重県林業研究所、滋賀県森林センター、兵庫県森林林業技術センター緑化センター、奈良県森林技術センター、鳥取県農林総合研究所林業試験場、岡山県農林水産総合センター森林研究所、山口県農林総合技術センター、愛媛県農林水産研究所林業研究センター、高知県立森林技術センターで行われた雄花着花性調査のデータを解析に用いさせていただいた。以上の関係各位に深く感謝申し上げます。

### 引用文献

- Adams, W. T., Aitken, S. N., Joyce, D. G., Howe, G. T. and Vargas-Hernandez, J. (2001) Evaluating efficacy of early testing for stem growth in coastal Douglas-fir. *Silvae Genet*, 50(3-4), 167-175.
- Burdon, R.D. (1977) Genetic correlation as a concept for studying genotype-environment interaction in forest tree breeding. *Silvae Genetica* 26, 168-175.
- 遠藤良太・小平哲夫・川村忠士・明石孝輝 (2001) スギ雄花量のクローン間変動量. 林木の育種「特別号」2001, 16-18.
- 遠藤良太・明石孝輝 (2003) ヒノキ採種園と次代検定林の雄花着花状況から推定した遺伝率と育種効果. *日林誌*, 85, 241-244.
- 遠藤良太・藤林範子 (2006) 千葉県におけるスギ精英樹の大豊作年の雄花着花性. *千葉森セ研報*, 1, 1-5.
- Falconer, D. S. and Mackay, T. F. C. (1996) *Introduction to quantitative genetics*, 4th edn.

- Addison Wesley Longman Limited, UK, 464pp.
- 後藤陽子・近藤禎二・安枝 浩 (1999) 関東地方周辺のスギ精英樹花粉における Cry j 1 含量の変異. 日本花粉学会会誌, 45 (1), 149-152.
- 岩見洋一・益子義明・田村景子・引田裕之 (2007) 花粉の少ないスギミニチュア採種園の雌雄花着花性と結果率について. 林木の育種「特別号」2007, 1-3.
- 金指達郎・鈴木基雄 (2010) 都市域への影響の高いスギ花粉放出源の推定. 日林誌, 92, 298-303.
- Kleinschmit, J. (1979) Limitations for restriction of the genetic variation. *Silvae genet*, 28(2-3), 61-67.
- 増田勝巳・小平哲夫・明石孝輝 (1993) 千葉県におけるスギ精英樹雄花量の遺伝的変動. 千葉林誌研報, 7, 1-10.
- 中村博一・渡邊敦史 (2010) 少花粉スギミニチュア採種園から生産した実生苗木の雄花着花特性について. 林木の育種「特別号」2010, 31-34.
- Namkoong, G., Snyder, E. B. and Stonecypher, R. W. (1966) Heritability and gain concepts for evaluating breeding systems such as seedling orchards. *Silvae Genet*, 15, 76-84.
- Ozasa, K., Dejima, K. and Takenaka, H. (2002) Prevalence of Japanese cedar pollinosis among schoolchildren in Japan. *Int. Arch. Allergy Immunol*, 128, 165-167.
- 林木育種センター (2010) 林木育種センター平成 21 年度年報. 林木育種センター, 174pp.
- 林野庁 (1994) 雄花着花性に関する調査実施要領. 平成 6 年林野普及 63 号林野庁長官通達.
- 林野庁 (2002) 雄花着花性に関する調査報告書. 林野庁, 308pp.
- 林野庁 (2009) 平成 20 年度スギ花粉発生源調査事業報告書 (平成 18 ~ 20 年度調査). 林野庁, 123pp.
- 斉藤真己・平 英彰 (2005) 雄性不稔遺伝子をヘテロ型で保有するスギ個体を用いたモデルミニチュア採種園の造成. 日林誌, 87, 383-386.
- 斉藤真己 (2009) 雄性不稔遺伝子を保有したスギの列状配置型室内ミニチュア採種園の有効性. 日林誌, 91, 168-172.
- 齋藤央嗣・明石孝輝 (1998) スギ雄花着生性の選抜効果. 日林論, 109, 359-362.
- 戸田忠雄・竹内寛興・西村慶二・藤本吉幸 (1996) 九州におけるスギ精英樹クローンの雄花着花性. 林育研報, 14, 77-88.
- 津田京子 (2007) 今後の花粉発生源対策の推進方策について—花粉発生源対策プロジェクトチーム検討報告—. 林木の育種, 225, 17-18.
- 横山敏孝・金指達郎 (1993) スギ人工林における雄花生産量と気象条件との関係. 日林論, 104, 445-446.



## 論文 (Original article)

# Carbon stocks of dead wood, litter, and soil in the forest sector of Japan : general description of the National Forest Soil Carbon Inventory

Shin UGAWA<sup>1)\*</sup>, Masamichi TAKAHASHI<sup>2)</sup>, Kazuhito MORISADA<sup>3)</sup>, Manabu TAKEUCHI<sup>4)</sup>, Yojiro MATSUURA<sup>5)</sup>, Shuichiro YOSHINAGA<sup>6)</sup>, Makoto ARAKI<sup>2)</sup>, Nagaharu TANAKA<sup>1)</sup>, Shigeto IKEDA<sup>1)</sup>, Satoru MIURA<sup>1)</sup>, Shigehiro ISHIZUKA<sup>6)</sup>, Masahiro KOBAYASHI<sup>1)</sup>, Masahiro INAGAKI<sup>6)</sup>, Akihiro IMAYA<sup>1)</sup>, Kazuki NANKO<sup>1)</sup>, Shoji HASHIMOTO<sup>1)</sup>, Shuhei AIZAWA<sup>3)</sup>, Keizo HIRAI<sup>7)</sup>, Toru OKAMOTO<sup>8)</sup>, Takeo MIZOGUCHI<sup>9)</sup>, Atsushi TORII<sup>9)</sup>, Hisao SAKAI<sup>10)</sup>, Yasuhiro OHNUKI<sup>1)</sup>, Shinji KANEKO<sup>1)</sup>

### Abstract

The aims of this study were to report the C stocks of dead wood, litter, and soil at 0–30 cm in the forest sector of Japan, to clarify the spatial distribution of those C stocks according to prefecture units and to determine the ratio of soil C stock at 0–30 cm to that at 0–100 cm. To achieve these objectives, data collected by the National Forest Soil Carbon Inventory Project, which surveyed the C stocks of dead wood, litter, and soil at 0–30 cm and at 0–100 cm throughout the forest sector of Japan, were analyzed. The C stock (mean  $\pm$  sample standard deviation) of dead wood, litter, and soil at 0–30 cm was  $0.42 \pm 0.67$ ,  $0.49 \pm 0.32$ , and  $6.94 \pm 3.25$  kg m<sup>-2</sup>, respectively. This study did not detect any clear tendency in the latitudinal distribution of the C stocks of dead wood and litter, although the litter C stock was lower in prefectures with a higher annual mean temperature. On the other hand, the C stock of soil at 0–30 cm was higher in northern Japan and lower in southern Japan. Exceptions to this pattern included a high C stock in some prefectures in the volcanic regions of southern Japan. Thus, we suggest that the soil C stock at 0–30 cm is regulated by a macroscale factor, i.e., temperature, as well as by the distribution of volcanic ash soils. The soil C stock at 0–100 cm was  $14.29 \pm 8.38$  kg m<sup>-2</sup> (mean  $\pm$  sample standard deviation) and the ratio of the soil C stock at 0–30 cm to that at 0–100 cm was  $0.59 \pm 0.31$  (mean  $\pm$  sample standard deviation), suggesting that the soil C stock at 0–30 cm in the forest sector of Japan accounts for a larger portion of that at 0–100 cm compared with worldwide average.

**Key words** : carbon stock, dead wood, litter, soil, national forest inventory, systematic sampling, Kyoto Protocol

### 1. Introduction

The carbon (C) stock of a forest is the basic datum for evaluating the C sink function of the forest ecosystem. Therefore, the parties ratifying the United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) were asked to report the C stock in the forest sector of their countries. The C stock of the total area of the forest sector is estimated using a model that describes the relationship between actual measurement data and external data prepared for the entire mesh area of the country. Thus, recent, transparent, and verifiable measurement data should be collected throughout the entire forest sector of the country for accurate estimation of the C stock in the forest sector of the country.

The main C pools in forest ecosystems are aboveground and belowground biomass, dead wood, litter, and soil (IPCC 2006). In Japan, measurement data on the C stock of aboveground and belowground biomass have been collected throughout the entire forest sector (Forestry Agency of Japan 2012). On the other hand, the C stocks of dead wood and litter have yet to be surveyed throughout the entire forest sector of Japan, although C stocks of dead wood and litter in forests dominated by major tree species were summarized by Takahashi et al. (2010). The C stock of soil was estimated by Morisada et al. (2004) throughout the entire forest land of Japan using soil profile data collected from 1950s to 1970s, but these soil profile data cannot be said to be recent. Therefore, measurement data for the C

原稿受付 : 平成 24 年 3 月 12 日 Received 12 March 2012 原稿受理 : 平成 24 年 8 月 22 日 Accepted 22 August 2012

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

2) Department of Research Planning and Coordination, Forestry and Forest Products Research Institute (FFPRI)

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

4) Chubu Regional Forest Office, Forestry Agency of Japan

5) Bureau of International Partnership, Forestry and Forest Products Research Institute (FFPRI)

6) Kyushu Research Center, Forestry and Forest Products Research Institute (FFPRI)

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

8) Kiso Experiment Station, Forestry and Forest Products Research Institute (FFPRI)

9) Kansai Research Center, Forestry and Forest Products Research Institute (FFPRI)

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

\* Department of Forest Site Environment, Forestry and Forest Products Research Institute (FFPRI), Matsunosato 1, Tsukuba, Ibaraki 305-8687, Japan; e-mail: ushin@ffpri.affrc.go.jp

stocks of dead wood, litter, and soil should be collected throughout the entire forest sector of Japan, and the mean C stocks of the three pools in the forest sector of Japan should be determined.

As a subsequent step, the heterogeneity of the C stocks of the three pools should be determined because C stocks of the total area of the forest sector are estimated using a model that explains this heterogeneity. The heterogeneity of C stocks is a result of many factors of site environment and tree community. Thus, the factors that strongly influence the C stocks should be delineated. Many of these factors can be classified as macroscale factors such as temperature or microscale factors such as forest management. Therefore, it is prudent to determine whether a macroscale factor strongly influences the C stocks, that is, whether a macroscale pattern exists in the spatial distribution of the C stocks. This study focused on the heterogeneity among prefectures to detect any spatial patterns throughout the entire forest sector of Japan.

The UNFCCC requests reporting of the C stock of soil from the soil surface to a depth of 30 cm. However, soil

C is also stored in deeper soil layers, and this C storage is related to the C sink function of forest ecosystems. Soil C stock generally decreases with depth as a result of C influx from decomposing litter and dead roots in the upper soil layer and low decomposition rates in the lower soil layer. Moreover, the vertical distribution of soil C stock varies with climate, soil type, vegetation type, and volcanic ash content (Batjes 1996, Jobbágy and Jackson 2000, Yang et al. 2010, Imaya et al. 2010a, b). Thus, the vertical distribution of soil C stock indicates the character of soil C accumulation in the forest sector of Japan.

The goals of this study were to (i) report the C stocks of dead wood, litter, and soil to a depth of 30 cm in the forest sector of Japan, (ii) clarify the spatial distribution of the C stocks of the three pools at a prefecture level, and (iii) determine the ratio of the soil C stock in the 0–30-cm interval to that in the 0–100-cm interval. To achieve these objectives, measurement data collected by the National Forest Soil Carbon Inventory Project, which surveyed C stocks of dead wood, litter, and soil at 0–30 cm and 0–100 cm in FY2006–2010, were analyzed.

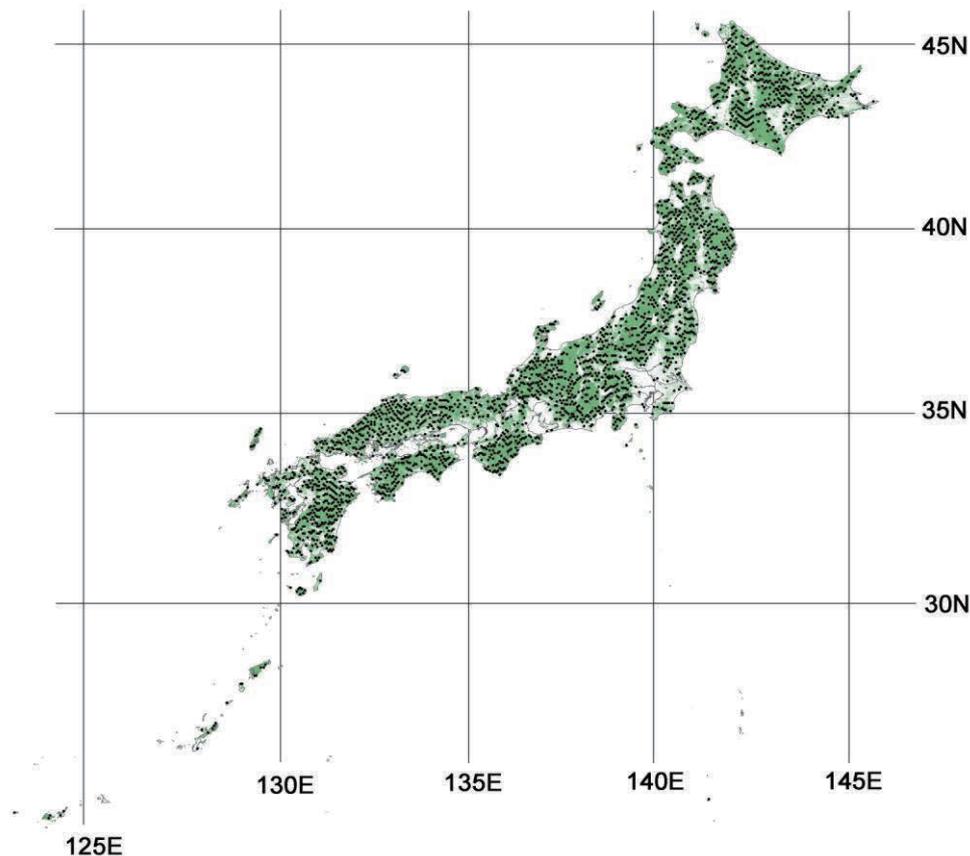


Fig. 1 Location of survey plots (solid circles) in forest sector (green area) of Japan. Forest sector is shown according to National Land Numerical Information provided by the National and Regional Planning Bureau of the Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism.

## 2. Materials and Methods

The C stock of dead wood, litter, and soil was surveyed in the National Forest Soil Carbon Inventory Project using the survey methods described below.

### Survey Plot

The 4×4-km grid points over the forest sector of Japan were systematically selected for the Forest Resources Monitoring Survey, in which tree censuses were conducted during FY1999–2003 (Forestry Agency of Japan 2012). One-fifth of these survey sites were selected in the National Forest Soil Carbon Inventory Project, giving a total of 2919 grid points (Fig. 1). A 1000-m<sup>2</sup> circular plot was established in each grid point (Fig. 2), and the C stock of dead wood, litter, and soil at 0–30 cm was surveyed in each plot. The soil C stock at 0–100 cm was surveyed in 992 of the survey plots, which were selected from every third survey plot on a north–south grid line.

### Dead Wood C Stock

According to the IPCC guidelines (IPCC 2006), dead wood includes coarse woody debris, dead coarse roots, and standing dead trees ≥10 cm in diameter. However, in this project, fallen boles and branches, stumps, and inclined dead stems ≥5 cm in diameter at the point where it

intersected a line (see below), were defined as dead wood because non-commercial thinning felled stunted trees, which usually are <10 cm in diameter in plantation forest of Japan (Sakai et al. 2008).

In each survey plot, a north–south line and an east–west line were established, and their horizontal lengths were measured (Fig. 2). Dead wood that intersected the lines at heights between 0 and 150 cm was divided into four species categories: conifer, broadleaved, unidentified woody, and bamboo. Then, the decay class of each piece of dead wood was determined according to appearance using Tables 1 and 2, and the diameter at the point where it intersected a line was measured (Fig. 3).

The C stock of dead wood was calculated for each species category and decay class by Formula 1 using the line intersect method (Warren and Olsen 1964, Van Wagner 1968, Brown 1974), where  $D$  (cm) is the diameter of dead wood,  $L_{ns}$  (m) is the horizontal length of the north–south line,  $L_{ew}$  (m) is the horizontal length of the east–west line,  $M$  (g cm<sup>-3</sup>) is the wood density of each species category and decay class (Table 3),  $CC$  (kg kg<sup>-1</sup>) is the C concentration of the dry wood (equal to 0.5), and the subscript  $i$  indicates individual dead wood, respectively. The dead wood C stocks of all species categories and decay classes were summed to give the dead wood C stock in a survey plot, although dead wood C stock was not calculated for survey plots with missing data.

Dead wood C stock for each species category and decay class (kg m<sup>-2</sup>)

$$= \frac{\pi^2 \times \sum_i D_i^2}{8 \times (L_{ns} + L_{ew})} \times M \times CC \times 10^{-1} \quad [\text{Formula 1}]$$

### Litter C Stock

The IPCC guidelines define *litter* an organic horizon (all leaves, twigs, small branches, fruits, flowers, roots, and bark) on the mineral soil surface (IPCC 2006), although the term *litter* differs in soil science, where its meaning is restricted to fallen dead leaves (e.g., Wild 1971). However, in this study, *litter* was defined as an organic horizon that is divided into four litter types: fine woody debris, which includes fallen boles, branches, twigs <5 cm maximum diameter, strobilus, and bark; fresh leaves; the fermentation layer and the humus layer. We defined the humus layer as continuously stocked humus ≥1 cm in depth.

In each survey plot, slope inclination was measured at four points, one each in the northern, eastern, southern, and western parts of the plot (Fig. 2). At each point, a sample of each litter type was taken from a 0.5-m square (Fig. 4).

These samples were oven dried at 70°C for 48 h, and weighed. Then, the samples of the same litter type were

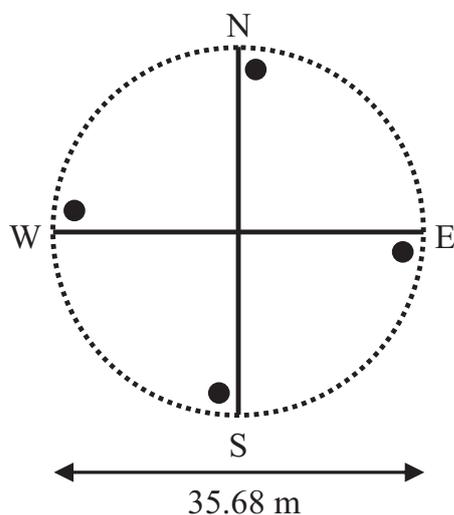


Fig. 2 Two lines (solid lines) for surveying dead wood C stock and four points (solid circles) for measuring C stock of litter and soil at 0–30 cm in a survey plot (dotted line). The diameter of the circular plot is a horizontal distance of 35.68 m. Dead wood C stock was surveyed along the north–south and the east–west lines using the line intersect method, and the C stocks of litter and soil at 0–30 cm were measured at four points, in the northern, eastern, southern, and western parts of the plot.

Table 1 Criteria determining the decay class of dead wood for conifer and broadleaved species

Decay class	Appearance of dead wood
0	No decay Branches, twigs, and leaves remain
1	Slightly decayed Only cambium decayed Branches and twigs remain
2	Most bark and branches present Some parts of wood are softened by decay
3	Moderately decayed All parts of dead wood are softened by decay Some bark is gone in conifer species Moss has sometimes adhered
4	Some parts of wood are gone Initial form is recognizable Brown rot is observed in conifer species
5	Wood collapsed ≥50% of wood is gone Some parts of wood are buried in soil Some bark remains in broadleaved species



Fig. 3 Field survey for dead wood C stock. The diameter of dead wood was measured where it intersected a line (white tape).

Table 2 Criteria determining the decay class of dead bamboo culm

Decay class	Appearance of dead culm
0	Culm separated from ground surface
1	Culm in contact with ground surface Culm is still hard
2	Culm is soft Culm is destroyed easily by a stepping

Table 3 Wood density ( $\text{g cm}^{-3}$ ) of dead wood in each species category and decay class. These values were determined by data from Forestry Agency of Japan (2007) and Sakai et al. (2008)

Decay class	Species category			
	Conifer	Broadleaved	Unidentified*	Bamboo
0	0.347	0.495	0.421	0.224
1	0.347	0.495	0.421	0.209
2	0.278	0.399	0.339	0.154
3	0.206	0.303	0.255	—
4	0.148	0.207	0.178	—
5	0.112	0.112	0.112	—

\* Dead wood that was impossible to identify as a conifer or broadleaved species was categorized to "Unidentified."



Fig. 4 Litter stock in a sampling point. Litter samples were taken from a 0.5-m square.

mixed across all sampling points of a survey plot and ground into fine particles ( $\leq 0.25$  mm) using a cutting mill and mortar. A portion of the fine particles (0.4–0.6 g) was put into a weighing bottle, and the bottle was weighed. The weighing bottle was then oven dried at  $70^{\circ}\text{C}$  for 24 h and weighed again. The water content of the fine particles was determined using Formula 2, where  $W_{bottle}$  (g) is the weight of the weighing bottle, and  $W_{before}$  (g) and  $W_{after}$  (g) are the weights of the weighing bottle containing fine particles before and after oven drying, respectively. If the resulting water content was  $>20\%$ , the sample was air dried, and the water content was measured again. These steps were repeated until the water content was  $\leq 20\%$ . The C content was measured from a different portion of the fine particles by the dry-combustion method using elemental analyzers. The C concentration was calculated using Formula 3, where  $W_{carbon}$  (kg) is C content,  $W_{sample}$  (kg) is sample weight, and  $WC$  (%) is water content. The C concentration was measured for more than two splits of fine particles, and the C concentration of a mixed sample was determined by obtaining an intermediate value of two

repeated measurement values as long as the values met the requirements of Table 4.

$$\text{Water content (\%)} = \frac{W_{before} - W_{after}}{W_{before} - W_{bottle}} \times 100 \quad [\text{Formula 2}]$$

$$\text{C concentration (kg kg}^{-1}\text{)} = \frac{W_{carbon}}{W_{sample}} \left( 1 + \frac{WC}{100} \right) \quad [\text{Formula 3}]$$

We calculated the C stock of each sampling point using Formula 4, where  $W$  (kg) is dry weight of the sample,  $CC$  ( $\text{kg kg}^{-1}$ ) is the C concentration,  $\theta$  (radians) is the slope inclination,  $S$  ( $\text{m}^2$ ) is the sampling area (equal to 0.25), and the subscript  $i$  indicates the litter type. Then, the mean C stock across sampling points was calculated to obtain the litter C stock for a survey plot. Sampling points containing a litter sample with missing data or anomalous data were excluded from the calculations (see *Quality Control of Data* section).

Litter C stock at each sampling point ( $\text{kg m}^{-2}$ )

$$= \sum_i \left( \frac{W_i}{(S \times \cos \theta)} \times CC_i \right) \quad [\text{Formula 4}]$$

#### Soil C Stock at 0–30 cm

Soil C stock at 0–30 cm was surveyed at the same points where litter was sampled, i.e., the northern, eastern, southern, and western parts of each survey plot (Fig. 2). At each point, a soil profile of  $>30$  cm depth was made and then divided into three soil layers, 0–5, 5–15, and 15–30 cm (Fig. 5). For each soil layer, the ratio of gravel area to the area of soil profile was recorded, and a volumetric sample and also a sample for analyzing C concentration were taken. For the volumetric samples, a  $400\text{-cm}^3$  cylindrical core (height, 4 cm; area,  $100\text{ cm}^2$ ) was sampled from a soil layer having low gravel content, whereas the soil sample was taken from a cuboid space (including gravels) in a soil layer having high gravel content (Fig. 5).

Table 4 Accuracy criteria for measuring carbon concentrations in litter and soil samples. The criteria were applied to two repeated measurements

Intermediate value	Accuracy criteria *
$\geq 0 \text{ g kg}^{-1}$ and $< 10 \text{ g kg}^{-1}$	Difference between two values is $\leq 1.13 \text{ g kg}^{-1}$
$\geq 10 \text{ g kg}^{-1}$ and $< 50 \text{ g kg}^{-1}$	Coefficient of variance of two values is $\leq 8\%$
$\geq 50 \text{ g kg}^{-1}$ and $\leq 600 \text{ g kg}^{-1}$	Coefficient of variance of two values is $\leq 4\%$
$> 600 \text{ g kg}^{-1}$	Re-analysis as anomalous data

\* The criteria were based on the data of Ugawa et al. (2010).



Fig. 5 Field survey for soil C stock. A soil profile of >30 cm depth was made (a). For the volumetric sample, a 400-cm<sup>3</sup> cylindrical core was sampled from a soil layer having low gravel content (b), whereas the soil sample was taken from a cuboid space in a soil layer having high gravel content (c).

The volumetric samples were oven dried at 105°C for 24 h and then weighed. The soil particles in a sample were washed out through a sieve (2-mm mesh) using water. The remaining gravels and plant roots were oven dried at 105°C for 24 h and weighed. Bulk density was calculated using Formula 5, where  $W_t$  (g) is the total weight of the volumetric sample,  $W_g$  (g) is the weight of gravels,  $W_r$  (g) is the weight of plant roots, and  $V$  (cm<sup>3</sup>) is the spatial volume of the volumetric sample, i.e., 400 cm<sup>3</sup> of cylindrical core or the volume of a cuboid space that included gravel.

$$\text{Bulk density (Mg m}^{-3}\text{)} = \frac{W_t - W_g - W_r}{V} \quad [\text{Formula 5}]$$

The samples for analyzing C concentration were air dried and sieved (2-mm mesh). The soil particles  $\leq 2$  mm in diameter were ground into fine particles ( $\leq 0.25$  mm) using an agate mortar. A split of the fine particles (2–3 g) was put into a weighing bottle, and the bottle was weighed. The weighing bottle then was oven dried at 105°C for 24 h and weighed again. Then, the water content of the fine particles was determined using the same methods as described earlier (see *Litter C Stock* section). The C concentration of a soil sample was also determined using the same methods as described in *Litter C Stock* section.

The C stock of each soil layer was calculated using Formula 6, where  $BD$  (Mg m<sup>-3</sup>) is bulk density,  $T$  (cm) is the thickness of the soil layer,  $CC$  (kg kg<sup>-1</sup>) is the C concentration,  $G$  (%) is the ratio of gravel area to the area of soil profile. The ratio of gravel area is taken as 0% for the soil layers from which we took the volumetric sample from a cuboid space containing gravels to avoid double counting of gravel content. Additionally, we considered the soil C stock as 0 kg m<sup>-2</sup> for a soil layer from which a soil profile could not be obtained due to bedrock or a large boulder. The C stock of each soil layer was summed for each sampling point, and the mean C stock across sampling points was calculated to give the soil C stock at 0–30 cm in a survey plot. Sampling points containing a soil layer with missing data, anomalous data, or outlier data were excluded from the calculations (see *Quality Control of Data* section).

Soil C stock in each soil layer (kg m<sup>-2</sup>)

$$= BD \times T \times CC \times \left(1 - \frac{G}{100}\right) \times 10 \quad [\text{Formula 6}]$$

#### Soil C Stock at 0–100 cm

Soil C stock at 0–100 cm was surveyed in the representative soil profile of >100 cm depth. A representative soil profile was made at a point with

significant microtopography and vegetation cover after an observation of the survey plot. For the representative soil survey, a soil profile was divided into generic soil horizons (e.g., A1, A2, B1, B2, and C horizons). The thickness of each soil horizon and the ratio of gravel area to the area of the soil profile were obtained. A volumetric sample and a sample for analyzing C concentration were taken from each soil horizon and bulk density, and C concentrations of these samples were determined using the same methods as described earlier (see *Soil C Stock at 0–30 cm* section).

The C stock of each soil horizon was calculated using the same methods as described in the *Soil C Stock at 0–30 cm* section and these were then summed to give the soil C stock of a representative soil profile. Representative soil profiles containing a soil horizon with missing or anomalous data were excluded from the calculation (see *Quality Control of Data* section).

#### Quality Control of Data

Criteria have been established to detect anomalous data for C concentration of a litter sample, bulk density, and C concentration of a soil sample at 0–30 cm and at 0–100 cm. Criteria have also been established to detect outlier data for bulk density and C concentration of a soil sample at 0–30 cm and at 0–100 cm.

The C concentration of a litter sample is considered anomalous if the value is  $<0.2 \text{ kg kg}^{-1}$  because organic material is defined as having a C concentration  $\geq 0.2 \text{ kg kg}^{-1}$  (Soil Survey Staff 1999). For soil samples, a bulk density  $>2.0 \text{ Mg m}^{-3}$  is considered anomalous because a

bulk density of sandy loam compacted by heavy traffic, i.e.,  $1.9 \text{ Mg m}^{-3}$ , is considered extreme in the forestry field (Lal 2002). According to Soil Survey Staff (1999), mineral soil contains  $<20\%$  organic carbon. However, in this study, a soil C concentration  $>0.25 \text{ kg kg}^{-1}$  is considered anomalous because a C concentration of  $>0.2 \text{ kg kg}^{-1}$  is often observed in Andosols, which are distributed widely in the forest land of Japan.

For soil samples at 0–30 cm, outlier data were determined statistically. Outlier values of bulk density were detected among the values in a survey plot using the Smirnov–Grubbs outlier test (upper-tail probability  $\leq 0.005$ ) and taken as outlier data of bulk density. Outlier values of C concentration among the values in a survey plot were also detected with the Smirnov–Grubbs test (upper-tail probability  $\leq 0.005$ ), and outlier values in soil layers of 5–15 cm and 15–30 cm are considered outlier data of C concentration because the soil layer at 0–5 cm is frequently disturbed, and the C concentration varies largely.

#### Results

Carbon stock of dead wood, litter, and soil at 0–30 cm were determined in 2438, 2432, and 2404 survey plots, respectively. The C stock could not be surveyed in 457 survey plots (Table 5), and the C stock of dead wood, litter, and soil at 0–30 cm could not be calculated in 24, 30 and 58 survey plots, respectively, due to missing, anomalous, and outlier data. The C stock (mean  $\pm$  sample standard deviation) for dead wood, litter, and soil at 0–30 cm was  $0.42 \pm 0.67$ ,  $0.49 \pm 0.32$ , and  $6.94 \pm 3.25 \text{ kg m}^{-2}$ , respectively (Table 6).

Table 5 Reasons for failure to complete survey and the breakdown in the number of plots. The number of plots included in soil survey at 0–100 cm is shown in parentheses

Reason for failure to complete survey	Number of plots
No way to contact land owner	70 (23)
Refusal by land owner or law regulation	113 (39)
No way to reach survey plot (e.g., collapse of road or snow coverage)	111 (40)
Land use other than forest (e.g., building site or orchard)	27 (10)
Failure to complete tree census (Forest Resource Monitoring Project)	131 (44)
Others	5 (0)
<b>Total</b>	<b>457 (156)</b>

Table 6 Carbon stocks of dead wood, litter, and soil at 0-30 cm and 0-100 cm

Carbon pool	Number of plots	Carbon stock (kg m <sup>-2</sup> )			Sample SD	Coefficient of variance (%)
		Minimum	Mean	Maximum		
Dead wood	2438	0	0.42	8.67	0.67	158.6
Litter	2432	0	0.49	2.84	0.32	64.6
Soil at 0–30 cm	2404	0	6.94	35.66	3.25	46.8
Soil at 0–100 cm	676	0.99	14.29	48.94	8.38	58.6

The C stocks of dead wood, litter, and soil at 0–30 cm in each prefecture (and each district) are shown in Table 7. These C stocks are classified into four groups: <25th percentile; ≥25th percentile and < median; ≥ median and <75th percentile; and ≥75th percentile, as shown in Fig. 6. The C stock for dead wood in each prefecture ranged from 0.08 kg m<sup>-2</sup> of Kagawa Prefecture to 0.66 kg m<sup>-2</sup> of Akita Prefecture. Dead wood C stock was high in the Hokkaido District, the central highland of the Chubu District, and the northern part of the Kinki District, but dead wood C stock was low in the eastern part of the Tohoku District, the Hokuriku area of the Chubu District, and the Shikoku and Kyushu Districts. The C stocks for litter in each prefecture ranged from 0.25 kg m<sup>-2</sup> of Kanagawa and Okinawa Prefectures to 0.63 kg m<sup>-2</sup> of Wakayama Prefecture. Litter C stock was high in the Hokkaido District, the central highland of the Chubu District, the southern part of the Kinki District and the Chugoku District, but low in the southern part of the Kanto District, the Hokuriku area of the Chubu District, and the Kyushu District. The C stock for soil at 0–30 cm in each prefecture ranged from 2.95 kg m<sup>-2</sup> of Kagawa Prefecture to 9.16 kg m<sup>-2</sup> of Ibaraki Prefecture. High C stock was observed in the Hokkaido, Tohoku, and Kanto Districts, whereas low values were observed in the Kinki, and Shikoku Districts. Soil C stock was also high in some prefectures located in the volcanic regions of the Chugoku and Kyushu Districts, such as Tottori, Shimane, Nagasaki, Oita, and Kagoshima Prefectures.

Soil C stock at 0–100 cm was determined in 676 survey plots. The soil C stock at 0–100 cm could not be surveyed in 156 survey plots (Table 5) and could not be calculated in 160 survey plots due to missing and anomalous data. The representative soil profile did not reach 100 cm in 136 survey plots due to bedrock or a large boulder. The digging depth in these plots was 62 ± 22 cm (mean ± sample standard deviation). The soil C stock at 0–100 cm was 14.29

± 8.38 kg m<sup>-2</sup> (mean ± sample standard deviation) across the 676 survey plots (Table 6). The ratio of soil C stock at 0–30 cm to that at 0–100 cm could be calculated in 667 survey plots and was 0.59 ± 0.31 (mean ± sample standard deviation).

## Discussion

### Dead Wood C Stock

The mean dead wood C stock, 0.42 kg m<sup>-2</sup> (Table 6), was within the mean values of forests dominated by the major tree species of Japan, 0.42–2.47 kg m<sup>-2</sup> (Takahashi et al. 2010). The mean C stock of dead wood ≥10 cm in diameter was estimated to be 0.69 kg m<sup>-2</sup> in Asia (FAO 2006). This value would be higher if dead wood ≥5 cm in diameter were included. We therefore suggest that dead wood C stock in the forest sector of Japan ranks low in Asia.

Dead wood C stock is higher in regions with higher altitude or higher latitude because of lower temperature (Woodall et al. 2008). In this study, high C stock was observed in some regions with low temperature, including the Hokkaido District and the central highland of Chubu District; low C stock was observed in regions with high temperature, including the Shikoku and Kyushu Districts (Fig. 6 and Table 7). However, some exceptional circumstances were observed. These include low C stock in the eastern part of the Tohoku District and the Hokuriku area of the Chubu District and high C stock in the northern part of the Kinki District. Additionally, the dead wood C stock was not related to annual mean temperature and annual precipitation in the prefectures (Fig. 7;  $p = 0.069$  and  $p = 0.893$ , respectively) when the data in Table 7 were analyzed using the Spearman rank correlation coefficient. Dead wood occurs not only by natural disturbance but also by forest management (e.g., Fridman and Walheim 2000, Siitonen 2000, Gibb et al. 2005, Lombardi et al. 2008).

Table 7 Climate condition and carbon stocks (kg m<sup>-2</sup>) of dead wood, litter, and soil at 0-30 cm in each prefecture

District	Prefecture number	Prefecture name	Mean temperature* (°C)	Annual precipitation* (mm)	Dead wood			Litter			Soil		
					Number of plots	Mean	Sample SD	Number of plots	Mean	Sample SD	Number of plots	Mean	Sample SD
Hokkaido	1	Hokkaido	4.9	1254	487	0.53	0.88	483	0.54	0.34	470	7.57	2.98
		Subtotal	4.9	1254	487	0.53	0.88	483	0.54	0.34	470	7.57	2.98
Tohoku	2	Aomori	8.2	1520	62	0.37	0.88	62	0.43	0.25	60	7.91	2.82
	3	Iwate	7.8	1434	102	0.30	0.37	104	0.57	0.36	100	8.58	2.98
	4	Miyagi	9.6	1450	42	0.21	0.37	43	0.38	0.26	42	7.00	2.52
	5	Akita	8.4	2001	94	0.66	0.73	95	0.54	0.26	94	7.97	2.90
	6	Yamagata	8.5	2189	58	0.44	0.77	59	0.47	0.30	57	8.53	3.17
	7	Fukushima	8.7	1508	89	0.25	0.39	91	0.46	0.25	87	8.14	3.20
	Subtotal	8.4	1673	447	0.39	0.62	454	0.49	0.29	440	8.11	2.99	
Kanto	8	Ibaraki	11.9	1397	24	0.35	0.50	24	0.43	0.22	24	9.16	2.95
	9	Tochigi	9.3	1597	34	0.48	0.67	34	0.48	0.28	32	7.96	3.29
	10	Gunma	8.1	1489	40	0.39	0.80	40	0.53	0.37	39	8.66	4.45
	11	Saitama	10.5	1401	14	0.57	0.53	13	0.35	0.19	13	5.07	2.18
	12	Chiba	14.2	1676	17	0.47	0.43	17	0.37	0.23	17	7.37	2.21
	13	Tokyo	12.0	1877	9	0.48	0.49	9	0.40	0.21	9	4.09	1.91
	14	Kanagawa	11.9	2138	10	0.18	0.11	11	0.25	0.16	10	4.80	2.92
Subtotal	10.3	1577	148	0.42	0.61	148	0.44	0.28	144	7.56	3.65		
Chubu (Hokuriku area)	15	Niigata	9.8	2504	63	0.31	0.68	63	0.37	0.19	63	7.11	2.82
	16	Toyama	8.9	2732	20	0.30	0.37	19	0.57	0.38	21	8.00	6.93
	17	Ishikawa	11.2	2454	35	0.26	0.27	35	0.42	0.20	32	7.52	2.31
	18	Fukui	11.3	2518	33	0.44	0.42	33	0.34	0.11	33	5.91	1.92
Subtotal	10.2	2532	151	0.33	0.52	150	0.40	0.22	149	7.06	3.49		
Chubu (central highland)	19	Yamanashi	8.8	1693	32	0.28	0.42	31	0.46	0.49	32	7.89	3.84
	20	Nagano	7.5	1765	93	0.53	0.81	93	0.53	0.28	89	6.56	3.58
	21	Gifu	9.2	2474	81	0.63	1.03	80	0.53	0.42	80	6.05	3.59
Subtotal	8.3	2001	206	0.53	0.87	204	0.52	0.37	201	6.57	3.66		
Chubu (Tokai area)	22	Shizuoka	11.7	2594	49	0.44	0.59	48	0.54	0.44	49	7.23	5.11
	23	Aichi	12.7	1958	20	0.33	0.54	19	0.51	0.35	20	5.31	2.58
	24	Mie	13.0	2402	35	0.26	0.30	35	0.45	0.20	35	7.19	3.40
Subtotal	12.3	2440	104	0.36	0.50	102	0.51	0.35	104	6.85	4.22		
Kinki	25	Shiga	11.6	2044	22	0.50	0.82	22	0.48	0.34	22	5.55	2.39
	26	Kyoto	12.3	1757	22	0.58	0.69	22	0.51	0.26	22	5.51	2.34
	27	Osaka	13.2	1447	3	0.10	0.04	3	0.45	0.10	4	3.27	1.07
	28	Hyogo	12.3	1672	38	0.46	0.57	38	0.46	0.27	38	4.58	2.26
	29	Nara	10.9	2206	32	0.44	0.46	32	0.57	0.44	32	4.94	2.19
	30	Wakayama	13.3	2416	41	0.47	0.67	34	0.63	0.38	41	5.06	1.74
Subtotal	12.2	1961	158	0.47	0.63	151	0.53	0.35	159	5.01	2.15		
Chugoku	31	Tottori	11.1	2089	25	0.59	0.69	28	0.51	0.32	28	7.17	2.82
	32	Shimane	12.2	1910	65	0.29	0.32	65	0.61	0.37	63	6.92	2.61
	33	Okayama	11.7	1478	50	0.46	0.65	50	0.60	0.35	49	5.59	2.89
	34	Hiroshima	11.6	1656	66	0.41	0.51	66	0.62	0.36	66	6.53	3.91
	35	Yamaguchi	13.1	1955	49	0.35	0.40	51	0.49	0.26	51	4.70	1.68
Subtotal	12.0	1783	255	0.39	0.51	260	0.57	0.34	257	6.15	3.04		
Shikoku	36	Tokushima	12.1	2414	33	0.40	0.44	32	0.52	0.42	33	6.17	2.29
	37	Kagawa	14.0	1207	9	0.08	0.11	9	0.37	0.29	9	2.95	1.27
	38	Ehime	12.9	1900	45	0.32	0.53	46	0.48	0.34	46	5.42	2.58
	39	Kochi	13.0	2820	57	0.33	0.51	57	0.53	0.28	57	6.34	2.06
Subtotal	12.9	2301	144	0.33	0.49	144	0.50	0.33	145	5.80	2.39		
Kyushu	40	Fukuoka	13.6	2062	33	0.46	0.35	34	0.51	0.25	34	6.16	1.51
	41	Saga	13.7	2233	14	0.30	0.23	13	0.36	0.14	13	7.84	3.04
	42	Nagasaki	14.9	2103	29	0.20	0.29	29	0.45	0.18	28	6.06	2.45
	43	Kumamoto	13.0	2489	57	0.34	0.54	58	0.29	0.17	58	5.81	3.18
	44	Oita	13.0	2054	61	0.35	0.36	61	0.29	0.14	59	7.49	3.76
	45	Miyazaki	13.4	2749	71	0.25	0.37	70	0.35	0.18	70	6.04	2.98
	46	Kagoshima	16.3	2687	62	0.55	0.94	62	0.36	0.17	62	7.05	3.11
47	Okinawa	21.9	2405	11	0.26	0.28	9	0.25	0.09	11	5.02	3.02	
Subtotal	14.4	2438	338	0.36	0.54	336	0.35	0.19	335	6.49	3.10		

\* Mean values of forest sector in 1971–2000 (Japan Meteorological Agency 2002).

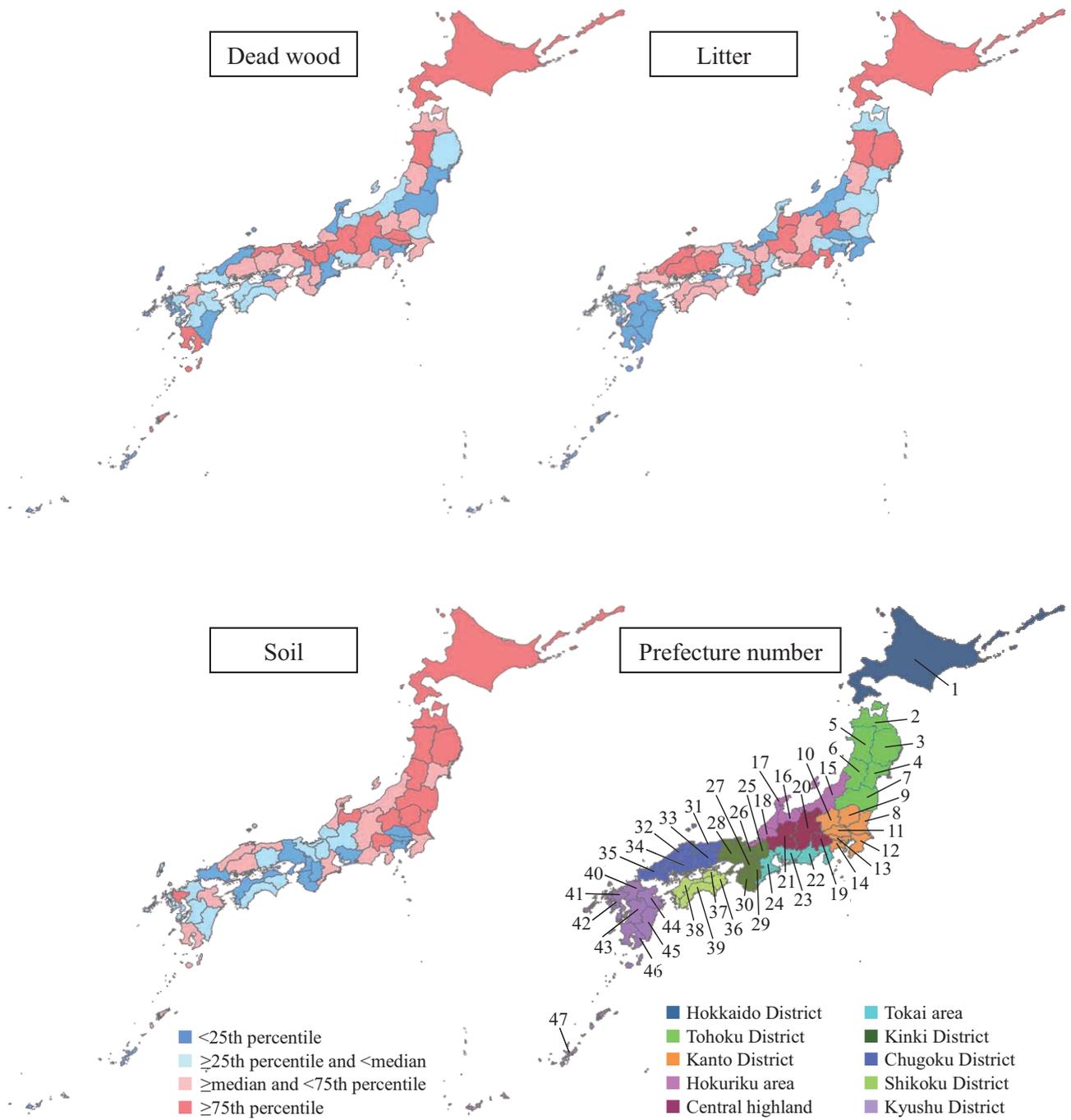


Fig. 6 Distribution of carbon stocks of dead wood, litter, and soil at 0–30 cm. Carbon stocks of the three pools in each prefecture were classified into four groups: <25th percentile; ≥25th percentile and <median; ≥median and <75th percentile; and ≥75th percentile.

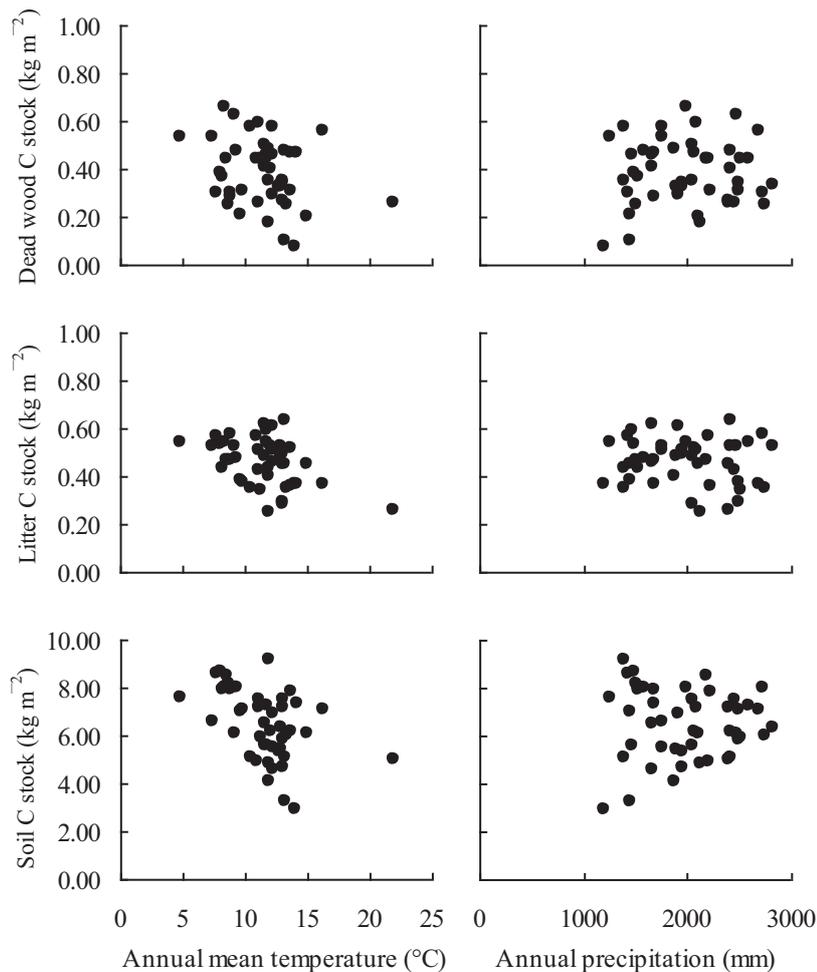


Fig. 7 Carbon stocks of dead wood, litter, and soil at 0–30 cm in each prefecture with annual mean temperature and annual precipitation of the forest sector. The annual mean temperature and annual precipitation are the mean values for 1971–2000, which were calculated using data from Japan Meteorological Agency (2002). The C stocks of litter and soil at 0–30 cm decreased with increasing annual mean temperature (Spearman rank-correlation coefficient:  $p = 0.004$  and  $p < 0.001$ , respectively).

The amount of dead wood also varies among stands with different dominant tree species (Takahashi et al. 2010). Thus, we speculate that the dead wood C stock is influenced by microscale factors such as tree community structure and forest management rather than by macroscale factors such as temperature.

#### Litter C Stock

The mean litter C stock,  $0.49 \text{ kg m}^{-2}$  (Table 6), was within the mean values of forests dominated by the major tree species of Japan,  $0.42\text{--}1.15 \text{ kg m}^{-2}$  (Takahashi et al. 2010). The mean litter C stock was estimated to be  $0.29 \text{ kg m}^{-2}$  in Asia (FAO 2006). We therefore suggest that the litter C stock in the forest sector of Japan ranks high in Asia.

Litter is decomposed easily in regions with high temperature but is decomposed with difficulty in regions with low temperature (Coûteaux et al. 1995, Aerts 1997, Trofymow et al. 2002). This pattern is consistent with the high C stock in the Hokkaido District and the central highland of the Chubu District and also with low C stock in the Kyushu District (Fig. 6 and Table 7). Moreover, the litter C stock was lower in prefectures with a higher annual mean temperature (Fig. 7;  $p = 0.004$ ). These results imply that the litter C stock is influenced to some extent by a macroscale factor, i.e., temperature. On the other hand, some exceptional instances were noted. These include low C stock in the southern part of the Kanto District and the Hokuriku area of the Chubu District and high C

stock in the southern part of the Kinki District and the Chugoku District. Litter C stock varies among dominant tree species (Takahashi et al. 2010). The exceptional results in the spatial distribution of litter C stock may be caused by microscale factors such as tree community structure (Takahashi et al. 2010). Further study is needed to determine these microscale factors precisely.

#### Soil C Stock at 0–30 cm

The mean soil C stock at 0–30 cm,  $6.94 \text{ kg m}^{-2}$  (Table 6), was lower than the value of  $9.0 \text{ kg m}^{-2}$  estimated by Morisada et al. (2004), who compiled soil profile data collected from 1950s to 1970s in national forest soil survey projects. In previous studies, the soil survey point was chosen by surveyors as a representative soil profile in which genetic soil horizons were typical in the survey plot (Government Forest Experiment Station 1955). Thus, well-developed soils with high C stock may have been selected in the soil survey, resulting in a higher mean value for soil C stock in previous studies than in our study. Additionally, the methods used to measure gravel content, soil mass, and C concentration are different between the previous work and our study. Therefore, it is not necessarily appropriate to suggest that the difference in soil C stock reflects the passage of time. Careful discussion is needed to interpret the difference in soil C stock.

We suggest that the soil C stock at 0–30 cm in the forest sector of Japan ranks slightly high in Asia because the mean soil C stock at 0–30 cm was estimated to be  $6.61 \text{ kg m}^{-2}$  in Asia (FAO 2006). Soil C stock at 0–30 cm tends to be higher in regions with higher altitude or higher latitude because of the lower temperature (e.g., Batjes 2002, Liski et al. 2002). The results of this study are generally consistent with this pattern. Soil C stock at 0–30 cm was high in northern Japan, i.e., in the Hokkaido, Tohoku, and Kanto Districts, and low in southern Japan, i.e., in the Kinki and Shikoku Districts (Fig. 6 and Table 7). This tendency was also supported by the lower soil C stock in the prefectures with higher annual mean temperature (Fig. 7;  $p < 0.001$ ). Thus, we suggest that the soil C stock is regulated by a macroscale factor, i.e., temperature. Exceptions to this pattern included high C stock observed in Tottori and Shimane Prefectures of the Chugoku District, and Nagasaki, Oita, and Kagoshima Prefectures of the Kyushu District. Active volcanoes (i.e., Mt. Daisen, Mt. Sanbesan, Mt. Unzendake, Mt. Sakurajima, and Mt. Aso) are located in Tottori, Shimane, Nagasaki, and Kagoshima Prefectures, and at the southwest border of Oita Prefecture, respectively, and have supplied volcanic ash in the last 20

years (Machida and Arai 2003). Soil derived from volcanic ash (i.e., Andosols) is known to accumulate large amounts of organic C (Shoji et al. 1993, Morisada et al. 2004). This indicates that the exceptional instance of high C stock can be explained by the existence of volcanic ash soils.

#### Ratio of Soil C Stock at 0–30 cm to Soil C Stock at 0–100 cm

The mean soil C stock at 0–100 cm,  $14.29 \text{ kg m}^{-2}$  (Table 6), was lower than the value of  $18.8 \text{ kg m}^{-2}$  reported by Morisada et al. (2004), and the mean ratio of soil C stock at 0–30 cm to that at 0–100 cm, 0.59, was higher than 0.48, the value estimated by Morisada et al. (2004). However, as discussed in an earlier section (*Soil C Stock at 0–30 cm*), the survey methods may explain the difference in the soil C stock at 0–100 cm and in the ratio of soil C stock at 0–30 cm to that at 0–100 cm between the result in this study and that reported by Morisada et al. (2004). On the other hand, the mean ratio of soil C stock at 0–30 cm to that at 0–100 cm was estimated to be 0.52 in *Cambisols* and 0.44 in *Andosols* worldwide (Batjes 1996), and these two soil types are distributed dominantly in the forest land of Japan (Morisada et al. 2004). Therefore, the ratio of soil C stock at 0–30 cm to that at 0–100 cm in the forest sector of Japan is higher than the world average, that is, the C stock of soil at 0–30 cm accounts for a larger portion of that at 0–100 cm compared with ratios worldwide. Jobbágy and Jackson (2000) reported that the ratio of soil C stock at 0–20 cm to that at 0–100 cm increased with increasing annual precipitation. The high ratio of soil C stock at 0–30 cm may reflect the monsoon climate and high humidity of Japan (Kottek et al. 2006).

#### Organic Soil

In this study, we excluded a soil layer with C concentration  $>0.25 \text{ kg kg}^{-1}$  from the calculations of soil C stock due to anomalous data resulting from a mistake in the field survey. However, according to the criteria, some organic soils were probably excluded from our count, which may have decreased the mean soil C stock at 0–30 cm. Organic soils are not common in the forest sector of Japan: the soil C stock of the Peaty Soil Group (Forest Soil Division 1976), corresponding to Histosols, was estimated to be 13 Tg at 0–30 cm depth and occupied just 0.6% of total C stock in the forest sector. On the other hand, Histosols are a major global soil type; the total extent of Histosols is estimated to be 325–375 million ha, and they are mainly observed in the boreal, subarctic, and low arctic regions of the northern hemisphere (IUSS Working Group WRB 2006). We therefore need to identify organic soils

using a description of the soil profile and evaluate the C stock of organic soils in the forest sector of Japan in future studies.

### Conclusion

In this study, we found that the C stock of dead wood, litter, and soil in the forest sector of Japan was  $0.42 \pm 0.67$ ,  $0.49 \pm 0.32$ , and  $6.94 \pm 3.25 \text{ kg m}^{-2}$ , respectively. For dead wood and litter, this study detected no latitudinal tendency in the distribution of C stocks throughout Japan. However, soil C stock at 0–30 cm was generally higher in northern Japan and lower in southern Japan. This is supported by the lower soil C stock in prefectures with a higher annual mean temperature. On the other hand, high C stock was observed in some prefectures of the volcanic region of southern Japan. We thus suggest that the soil C stock is regulated by macroscale factors, i.e., temperature, as well as by the distribution of volcanic ash soils. Additionally, our results indicate that the soil C stock at 0–30 cm in the forest sector of Japan accounts for a larger portion of that at 0–100 cm compared with forest soils around the world.

### Acknowledgements

We are grateful to researchers of the prefectural forest research institutes for collecting field data and samples. We also thank the members of the Department of Forest Site Environment and the Bureau of Climate Change of the Forestry and Forest Product Research Institute for supporting this study. This study was a result of the National Forest Soil Carbon Inventory managed by the Forestry Agency of Japan.

### References

- Aerts, R. (1997) Climate, leaf litter chemistry and leaf litter decomposition in terrestrial ecosystems: a triangular relationship. *Oikos*, 79, 439–449.
- Batjes, N. H. (1996) Total carbon and nitrogen in the soils of the world. *Eur. J. Soil Sci.*, 47, 151–163.
- Batjes, N. H. (2002) Carbon and nitrogen stocks in the soils of Central and Eastern Europe. *Soil Use Manag.*, 18, 324–329.
- Brown, J. K. (1974) Handbook for inventorying downed woody material, Gen. Tech. Rep. INT-16. USDA For. Serv., Ogden, UT, 24 pp.
- Coûteaux, M. C., Bottner, P. and Berg, B. (1995) Litter decomposition, climate and litter quality. *Trends Ecol. Evol.*, 10, 63–66.
- FAO (2006) Global forest resources assessment 2005. FAO Forestry Paper 147. FAO, Rome, 320 pp.
- Forestry Agency of Japan (2007) Implementation report of the National Forest Carbon Inventory in FY2007. Forestry Agency of Japan, Tokyo, 39–59. (In Japanese)
- Forestry Agency of Japan (2012) "Forest Resources Monitoring Survey in 1999–2008", <http://www.rinya.maff.go.jp/j/keikaku/monitar/index.html>, (accessed 2012-03-07).
- Forest Soil Division (1976) Classification of forest soil in Japan. *Bull. Gov. For. Exp. Sta.*, 280, 1–28. (In Japanese with English summary)
- Fridman, J. and Walheim, M. (2000) Amount, structure, and dynamics of dead wood on managed forestland in Sweden. *For. Ecol. Manag.*, 131, 23–36.
- Governmental Forest Experiment Station (1955) The manual for forest soil survey in the national forest. Governmental Forest Experiment Station of Japan Forest Agency, Tokyo, 47 pp. (In Japanese)
- Gibb, H., Ball, J. P., Johansson, T., Atlegrim, O., Hjältén, J. and Danell, K. (2005) Effects of management on coarse woody debris volume and composition in boreal forests in northern Sweden. *Scand. J. For. Res.*, 20, 213–222.
- Imaya, A., Yoshinaga, S., Inagaki, Y., Tanaka, N. and Ohta, S. (2010a) Proposal for advanced classification of brown forest soils in Japan with reference to the degree of volcanic ash additions. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 56, 454–465.
- Imaya, A., Yoshinaga, S., Inagaki, Y., Tanaka, N. and Ohta, S. (2010b) Volcanic ash additions control soil carbon accumulation in brown forest soils in Japan. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 56, 734–744.
- IPCC (2006) 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. The Institute for Global Environmental Strategies (IGES), Hayama, 83 pp.
- IUSS Working Group WRB (2006) World reference base for soil resources 2006. 2nd edition. World Soil Resources Reports No. 103. FAO, Rome, 128 pp.
- Japan Meteorological Agency (2002) Mesh climatic data 2000. Japan Meteorological Agency, Tokyo. (In Japanese)
- Jobbágy, E. G. and Jackson, R. B. (2000) The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. *Ecol. Appl.*, 10, 423–436.
- Kottek, M., Grieser, J., Beck, C., Rudolf, B., Rubel, F. (2006) World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorol. Z.*, 15, 259–263.
- Lal R. (2002) Encyclopedia of soil science. second edition. Marcel Dekker, Inc., New York, 1476 pp.
- Liski, J., Perruchoud, D. and Karjalainen, T. (2002) Increasing carbon stocks in the forest soils of western Europe. *For. Ecol. Manag.*, 169, 159–175.

- Lombardi, F., Lasserre, B., Tognetti, R. and Marchetti, M. (2008) Deadwood in relation to stand management and forest type in central Apennines (Molise, Italy). *Ecosystems*, 11, 882–894.
- Machida, H., Arai, F. (2003) Atlas of tephra in and around Japan. University of Tokyo Press, Tokyo, 336 pp. (In Japanese)
- Morisada, K., Ono, K. and Kanomata, H. (2004) Organic carbon stock in forest soils in Japan. *Geoderma*, 119, 21–32.
- Sakai, Y., Takahashi, M., Ishizuka, S., Inagaki, Y., Matsuura, Y., Unno, A., Nakata, K., Nagasaka, A., Niwa, H., Sawata, S., Houjyou, Y., Tamaki, Y., Kasetani, T., Takeda, H., Aiura, H., Yamanouchi, M., Shimada, H., Iwatsuki, T., Yamada, A., Yamada, T., Maeda, H. and Muro, M. (2008) Estimating decay rates of dead wood by changes in wood density in coniferous plantation in Japan. *Jpn. J. For. Environ.*, 50, 153–165. (In Japanese with English summary)
- Shoji, S., Nanzyo, M. and Dahlgren, R. A. (1993) Volcanic ash soils: genesis, properties and utilization. *Developments in Soil Science* 21. Elsevier Science Publishers B. V., Amsterdam, 312 pp.
- Siitonen, J., Martikainen, P., Punttila, P. and Rauh, J. (2000) Coarse woody debris and stand characteristics in mature managed and old-growth boreal mesic forests in southern Finland. *For. Ecol. Manag.*, 128, 211–225.
- Soil Survey Staff (1999) *Soil Taxonomy*, second edition. USDA-Natural Resources Conservation Service, Washington, 869 pp.
- Takahashi, M., Ishizuka, S., Ugawa, S., Sakai, Y., Sakai, H., Ono, K., Hashimoto, S., Matsuura, Y. and Morisada, K. (2010) Carbon stock in litter, deadwood and soil in Japan's forest sector and its comparison with carbon stock in agricultural soils. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 56, 19–30.
- Trofymow, J. A., Moore, T. R., Titus, B., Prescott, C., Morrison, I., Siltanen, M., Smith, S., Fyles, J., Wein, R., Camiré, C., Duschene, L., Kozak, L., Kranabetter, M. and Visser, S. (2002) Rates of litter decomposition over 6 years in Canadian forests: influence of litter quality and climate. *Can. J. For. Res.*, 32, 789–804.
- Ugawa, S., Hashimoto, T., Aizawa, S., Kaneko, S. and Takahashi, M. (2010) Accuracy criteria for measuring carbon and nitrogen concentrations in forest soil and litter samples. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 56, 466–475.
- Van Wagner, C. E. (1968) The line intersect method in forest fuel sampling. *For. Sci.*, 14, 20–26.
- Warren, W. G. and Olsen, P. F. 1964. A line intersect technique for assessing logging waste. *For. Sci.*, 13, 267–276.
- Wild, S. A. (1971) Forest humus: its classification on genetic basis. *Soil Sci.*, 111, 1–12.
- Woodall, C. W., Heath, L. S. and Smith, J. E. (2008) National inventories of down and dead woody material forest carbon stocks in the United States: challenges and opportunities. *For. Ecol. Manag.*, 256, 221–228.
- Yang, Y. H., Fang, J. Y., Guo, D. L., Ji, C. J. and Ma, W. H. (2010) Vertical patterns of soil carbon, nitrogen and carbon: nitrogen stoichiometry in Tibetan grasslands. *Biogeosciences Discuss.*, 7, 1–24.

## 日本の森林における枯死木、堆積有機物、土壌の炭素蓄積量： 森林土壌インベントリの第1報

鶴川 信<sup>1)\*</sup>、高橋 正通<sup>2)</sup>、森貞 和仁<sup>3)</sup>、竹内 学<sup>4)</sup>、松浦 陽次郎<sup>5)</sup>、吉永 秀一郎<sup>6)</sup>、  
荒木 誠<sup>1)</sup>、田中 永晴<sup>1)</sup>、池田 重人<sup>1)</sup>、三浦 覚<sup>1)</sup>、石塚 成宏<sup>6)</sup>、小林 政広<sup>1)</sup>、  
稲垣 昌宏<sup>6)</sup>、今矢 明宏<sup>1)</sup>、南光 一樹<sup>1)</sup>、橋本 昌司<sup>1)</sup>、相澤 州平<sup>3)</sup>、平井 敬三<sup>7)</sup>、  
岡本 透<sup>8)</sup>、溝口 岳男<sup>9)</sup>、鳥居 厚志<sup>9)</sup>、酒井 寿夫<sup>10)</sup>、大貫 靖浩<sup>1)</sup>、金子 真司<sup>1)</sup>

### 要旨

本研究では、日本の森林における枯死木、堆積有機物および土壌（深さ 0–30 cm）の炭素蓄積量を明らかにすること、炭素蓄積量の空間分布を都道府県単位で示すこと、深さ 0–100 cm の土壌炭素蓄積量に占める深さ 0–30 cm の土壌炭素蓄積量の割合を示すことを目的とした。これらの目的を達成するため、2006–2010 年度に実施した林野庁森林吸収源インベントリ情報整備事業（日本全国の森林における枯死木、堆積有機物および土壌の炭素蓄積量調査）のデータを解析した。枯死木、堆積有機物および土壌（深さ 0–30 cm）の炭素蓄積量（平均 ± 標本標準偏差）は、それぞれ  $0.42 \pm 0.67$ 、 $0.49 \pm 0.32$ 、 $6.94 \pm 3.25 \text{ kg m}^{-2}$  であった。各都道府県の枯死木および堆積有機物の炭素蓄積量は、緯度方向の分布傾向を示さなかった。しかしながら、統計解析では、年平均気温が高い都道府県ほど堆積有機物炭素蓄積量が低くなる傾向が検出された。土壌炭素蓄積量は、北日本で高く、南西日本で低くなる傾向がみられ、年平均気温が高い都道府県ほど土壌炭素蓄積量が低くなることが確認された。他方、火山帯に位置する南西日本の都道府県で土壌炭素蓄積量が高くなる傾向がみられた。このことから、深さ 0–30 cm の土壌炭素蓄積量は、気温のみならず、火山灰の分布によっても規定されることが窺われた。加えて、深さ 0–100 cm の土壌炭素蓄積量は  $14.29 \pm 8.38 \text{ kg m}^{-2}$ （平均 ± 標本標準偏差）であり、これに占める深さ 0–30 cm の土壌炭素蓄積量の割合は  $0.59 \pm 0.31$ （平均 ± 標本標準偏差）であった。この割合は、世界の平均値よりも高かった。

キーワード：炭素蓄積量、枯死木、堆積有機物、土壌、インベントリ、システムティックサンプリング、京都議定書

- 
- 1) 森林総合研究所立地環境研究領域
  - 2) 森林総合研究所企画部
  - 3) 森林総合研究所北海道支所
  - 4) 林野庁中部森林管理局
  - 5) 森林総合研究所国際連携推進拠点
  - 6) 森林総合研究所九州支所
  - 7) 森林総合研究所東北支所
  - 8) 森林総合研究所木曾試験地
  - 9) 森林総合研究所関西支所
  - 10) 森林総合研究所四国支所

\* 森林総合研究所立地環境研究領域 〒305-8687 茨城県つくば市松の里 1 e-mail: ushin@ffpri.affrc.go.jp



## 論文 (Original article)

### 四国のヒノキ強度間伐林分における残存木の葉の水分特性

宮本 和樹<sup>1)\*</sup>、奥田 史郎<sup>2)</sup>、野口 麻穂子<sup>3)</sup>、伊藤 武治<sup>1)</sup>、佐藤 重穂<sup>1)</sup>

#### Leaf water relations of residual trees in heavily thinned hinoki cypress stands in Shikoku, Japan

Kazuki MIYAMOTO<sup>1)\*</sup>, Shiro OKUDA<sup>2)</sup>, Mahoko NOGUCHI<sup>3)</sup>,  
Takeharu ITOU<sup>1)</sup>, Shigeho SATO<sup>1)</sup>

#### Abstract

Leaf water relations derived from pressure–volume ( $P-V$ ) curves were compared between two hinoki cypress (*Chamaecyparis obtusa*) plantations at low elevations (210 and 320 m a.s.l.) in Kochi prefecture, Shikoku, southwestern Japan. The objective of this study was to evaluate the effect of heavy thinning on the leaf water status and mortality of residual trees. Our study sites included a stand with a northwest-facing slope and no dead trees after thinning (called “Karakawa”), and a stand with a south-facing slope and many dead trees after thinning (called “Kochi-west”, ca. 23% of trees died). Mean values of dawn and midday leaf water potentials and the  $P-V$  parameters did not show any significant differences either between sites or between treatments (thinned vs. unthinned for Karakawa; upper slope vs. lower slope for Kochi-west). However, a significant difference was found in regression intercepts between the two sites when the relationship between osmotic potential at full turgor ( $\psi_s^{\text{sat}}$ ) and water potential at the turgor loss point ( $\psi_w^{\text{tp}}$ ) was plotted at the individual tree level, suggesting that the surviving trees at Kochi-west were more drought-resistant than those at Karakawa. Our results basically suggest that there was no clear difference in the leaf water status of hinoki cypress trees between sites or between treatments in this study. However, the signs of higher water stress observed at Kochi-west at the individual tree level may partly account for tree mortality in hinoki cypress stands at low elevations on south-facing slopes. Therefore, heavy thinning of such stands should be avoided.

**Key words :** hinoki cypress, thinning, water potential,  $P-V$  curve, water stress

#### 要旨

強度間伐が残存木の葉の水分特性と立ち枯れの発生に及ぼす影響を評価するため、高知県内の低標高域（標高 210 m および 320 m）のヒノキ人工林 2 か所を対象に、 $P-V$  曲線による水分特性値の比較を行った。調査は、強度間伐後も残存木の状態が健全な北西斜面の林分（辛川）と強度間伐後に残存木の立ち枯れが発生した南斜面の林分（高知西、枯死率約 23%）で実施した。明け方と日中の水ポテンシャルおよび  $P-V$  曲線による水分特性値を平均値で比較した場合には、サイト間および処理区間（辛川では間伐の有無、高知西では斜面上部と下部）で有意差はみられなかった。一方、個体レベルで飽水時の浸透ポテンシャル ( $\psi_s^{\text{sat}}$ ) と圧ポテンシャルを失う時の水ポテンシャル ( $\psi_w^{\text{tp}}$ ) の関係を見ると、サイト間で切片が有意に異なる回帰直線が得られた。同じ  $\psi_s^{\text{sat}}$  でも  $\psi_w^{\text{tp}}$  の値が高知西で低かったことから、現在生存している高知西の個体は辛川と比べて耐乾性が高くなっている可能性も考えられた。本研究では、基本的にサイト間および処理区間において残存木の葉の水分特性に明瞭な差は生じていないと考えられるが、高知西のように低標高の南斜面などの立地条件では、残存木に水ストレスを生じやすい傾向も見られ、これが個体の枯死を引き起こす可能性もあるため、このような林分では強度間伐を避ける方が望ましいであろう。

**キーワード :** ヒノキ、間伐、水ポテンシャル、 $P-V$  曲線、水ストレス

原稿受付：平成 24 年 6 月 7 日 Received 7 June 2012 原稿受理：平成 24 年 10 月 10 日 Accepted 10 October 2012

1) 森林総合研究所四国支所 Shikoku Research Center, Forestry and Forest Products Research Institute (FFPRI)

2) 森林総合研究所関西支所 Kansai Research Center, Forestry and Forest Products Research Institute (FFPRI)

3) 森林総合研究所東北支所 Tohoku Research Center, Forestry and Forest Products Research Institute (FFPRI)

\* 森林総合研究所四国支所 〒 780-8077 高知市朝倉西町 2-915 Shikoku Research Center, Forestry and Forest Products Research Institute (FFPRI), 2-915 Asakura-nishimachi, Kochi 780-8077, Japan; e-mail: mkazuki@affrc.go.jp

## 1. はじめに

近年増加している間伐遅れ林分を省力的に間伐し、針広混交林への誘導や森林の多面的機能を向上させる目的で、従来よりも強度な間伐が一部で実施されている。強度間伐にはこれまでのところ統一された定義はないが、森林総合研究所四国支所 (2010) では目安として、収量比数 ( $R_y$ ) が 0.8 以上になる混み合った林分に本数間伐率で 40% 以上の間伐を行う場合としている。水ストレスによる残存木の枯死はこのような間伐遅れの過密人工林に対して強度間伐を行う際に懸念されるリスクのひとつである (Bladon et al., 2006)。強度間伐にともなう林冠部の疎開は、風速、飽差や日射量など樹木周辺の急激な環境変化を引き起こし、個体レベルでの蒸発散量の増加をまねいて水収支に悪影響を及ぼす可能性がある (村上, 2003; Bladon et al., 2006)。また、経験的にヒノキはスギと比べて、強度な枝打ちや間伐後に枯損木が生じやすいとも言われている (上田, 2010)。

ただし、強度な間伐の影響が水ストレスとして顕著に表れるのは、本数間伐率が 75% (森林総合研究所四国支所, 2010) や 90% (Bladon et al., 2006) など極端に高い場合であることが多く、林業の現場で実施されている 40–50% 程度の強度間伐では、これまでのところ残存木の顕著な水ストレスの徴候はあまり報告されていない (例えば、宮本ら, 2009; 森林総合研究所四国支所, 2010)。また、間伐後には競争緩和の効果により土壌水分が増加したとする報告が多い (荒木ら, 2002; 篠宮ら, 2004, 2006)。

しかし、実際には 40% 以上の強度間伐後の残存木に生理的要因による樹脂流出 (渡辺ら, 2008) や、虫害と関連した枯死木が発生する事例も見られることから (森林総合研究所四国支所, 2010; 佐藤ら, 2012)、立地条件によっては強度間伐後の水ストレスが残存木の衰弱を引き起こし、その結果として二次性害虫の加害等による枯損を生じる場合もあると考えられる (Ueda and Shibata, 2005; 佐藤ら, 2012)。

$P-V$  曲線法 (Tyree and Hammel, 1972; 丸山・森川, 1983) により得られる飽水時の浸透ポテンシャル ( $\psi_s^{\text{sat}}$ ) や圧ポテンシャルを失う時の水ポテンシャル ( $\psi_w^{\text{wp}}$ ) とした葉の水分特性値は耐乾性の指標として有効であり (水永, 1988)、強い乾燥にさらされている樹木ほどこれらの水分特性値が低く維持されていることが予想される。本研究では低標高のヒノキ人工林を対象に、強度間伐後に残存木が健全な林分 (間伐区と無間伐区) と立ち枯れが発生した林分 (斜面上部と下部) において、葉の水ポテンシャル測定および  $P-V$  曲線法により得られる水分特性値を比較し、強度間伐が残存木の葉の水分特性と立ち枯れの発生に及ぼす影響を斜面方位や斜面位置といった立地環境の点から評価した。

## 2. 調査地と方法

### 2.1 調査地

本研究の調査地は高知県内 2 か所のヒノキ人工林である。ひとつは土佐清水市の辛川山国有林の 35 年生ヒノキ林分である (以下、「辛川」)。もうひとつは高知県西部に位置し、間伐後に残存木の立ち枯れが発生した約 40 年生のヒノキ林分 (以下「高知西」) である。辛川の年平均気温と年間降水量はそれぞれ 14.1°C、2,964 mm、高知西では 15.3°C、2,707 mm である (気象庁, 2002)。調査地の標高は辛川が 320 m、高知西が 210 m で、共に暖温帯常緑広葉樹林域に属している。

辛川の北西斜面には 2007 年に強度間伐試験地が設置されており、試験地内のヒノキについて、胸高直径、樹高、枯れの有無を毎年記録している。辛川の斜面は急傾斜 (32–41°) であり、斜面の下部ほどヒノキの平均樹高が大きくなる傾向にある (Miyamoto et al., in press)。本研究では、斜面下部に隣接する無間伐区と間伐区 (それぞれ 20 m × 20 m) を用いた。立木密度はヘクタール当たり 1700 本以上と過密であったが、2008 年 1 月に本数間伐率約 60% の強度間伐が実施された (Table 1)。間伐前の調査区内の林冠は完全に閉鎖しており、林内にはホソバタブやヤブツバキの稚樹をはじめ常緑広葉樹の稚樹と実生が若干生育しているものの、全体として林内の植生は少なかった (Noguchi et al., 2011)。間伐区では、間伐実施直後にアカメガシワなどの先駆種を主体として林床植生の被度が増加したのち、次第に減少していった (Noguchi et al., 2011)。なお、強度間伐後 5 生育期目にあたる 2012 年 7 月時点に至るまで、辛川の間伐区では残存木の立ち枯れが発生していない。そのほか辛川試験地の調査区の詳細については、宮本ら (2009)、Inagaki et al. (2011)、Noguchi et al. (2011)、Miyamoto et al. (in press) などを参照されたい。

高知西は傾斜約 38° の南斜面に位置し、2002 年に本数間伐率約 40% の間伐が実施された林分である (Table 1)。高知西の概況を把握するため、2010 年 1 月に斜面上部から下部にかけて 25 m × 21 m の区画を設置し、毎木調査を行った。林分の立ち枯れ率は約 23% と多くみられ、特に斜面上部でその頻度が高い (Table 1, 佐藤ら, 2012)。斜面下部では林冠がほぼ閉鎖していたものの斜面上部では枯死木によってギャップが形成されていた。林床にはウラジロが出現し、特に斜面上部で密生していた。間伐前の立木密度および間伐率を残存木と切り株から推定し、残存木について胸高直径、樹高および個体の生存・枯死を記録した (Table 1)。

本研究では、辛川の無間伐区、間伐区および高知西の区画を斜面上部と斜面下部に分けた合計 4 か所を調査区とよび、水分特性値を調査区間で比較した。これにより、不完全なデザインではあるが、それぞれのサイトで葉の水分特性値に及ぼす間伐の有無や微地形の影響を評価した。

Table 1. 調査地の概要  
Summary of study sites.

調査区 Plot	面積 Area (m <sup>2</sup> )	方位 Slope aspect	林齢 (2009 年時) Stand age in 2009 (years)	立木密度 Tree density (trees ha <sup>-1</sup> )			間伐年 Year of thinning	間伐後の枯死率 Mortality after thinning (%) <sup>a</sup>
				間伐前 Before thinning	間伐後 After thinning	間伐率 Thinning rate (%)		
辛川 Karakawa								
無間伐区 Unthinned	400	NW	35	1775	1775	0.0	—	—
間伐区 Thinned	400	NW	35	1700	725	57.4	2008	0.0 (0/29)
高知西 Kochi-west								
斜面上部 Upper slope	262.5	S	c. 40	1714	1143	33.3	2002	35.7 (10/28)
斜面下部 Lower slope	262.5	S	c. 40	1714	952	44.4	2002	8.0 (2/25)
林分全体 Total	525	S	c. 40	1714	1048	38.9	2002	22.6 (12/53)

<sup>a</sup> 括弧の中の数値は、[間伐後の枯死木の個体数]/[間伐直後の残存木の総個体数]を示す。被圧木は計算から除外している。高知西のデータは佐藤ら (2012) による。

[number of dead trees]/[total number of remaining trees] is shown in parentheses; suppressed trees were eliminated from the calculation. Data in the Kochi-west stand is from Sato et al. (2012).

## 2.2 測定方法

### 2.2.1 葉のサンプリング実施日の気象条件

本研究では、2009年9月8日に辛川、9日に高知西で葉のサンプリングを実施した。水ポテンシャルやP-V曲線から得られる水分特性値は生育地の水分前歴、低温、葉齢など様々な要因による影響を受けることが知られている。晩夏のサンプリングは、低温に対する浸透調節の影響を回避できるほか、葉が成熟しているため葉齢の違いによる影響を受けにくい点で有効であると考えられる (水永, 1986)。辛川の無間伐区と間

伐区に設置した土壌水分センサー (ECH<sub>2</sub>O, Decagon Device 社) で測定した2009年4月1日から2010年4月1日までの土壌水分の季節変化 (Fig. 1) によれば、サンプリング実施日は年間で最も乾燥が進んだ期間の初期と位置づけられ、土壌含水率は2009年12月下旬から2010年1月の乾燥した時期の値と同程度であった。当日2日間の天候は晴天で、辛川から最寄りのアメダス気象観測地点である三崎のデータによれば、9月4日深夜1:00以降当日まで、0.5 mm以上のまとまった降雨は観測されなかった (気象庁, 2009; Fig. 1)。

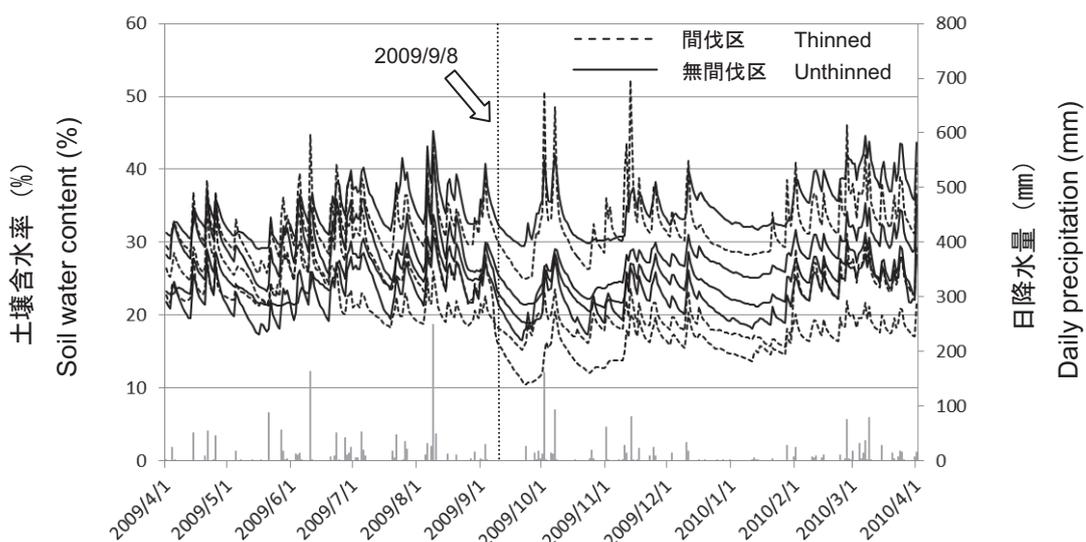


Fig. 1. 辛川のヒノキ人工林における土壌含水率 (実線、破線) および三崎 (最寄りの気象観測地点) における日降水量 (棒) の季節変化; 各折れ線は一つの水分センサー (ECH<sub>2</sub>O, Decagon Device 社) の測定値を示す  
Seasonal patterns of soil water content in the hinoki cypress stand at Karakawa (solid and broken lines) and daily precipitation at Misaki (bars), the nearest meteorological station. Each line indicates the soil water content measured by soil moisture probes (ECH<sub>2</sub>O, Decagon Device Inc.).

### 2.2.2 明け方と日中の水ポテンシャル

葉の水ポテンシャルの測定に使用する樹木は辛川の間伐区、無間伐区および高知西の斜面上部と斜面下部からそれぞれ3個体ずつ選定した (Table 2)。供試木のサイズは、高知西の斜面下部における個体の胸高直径が辛川の間伐区と無間伐区に比べて有意に大きかった (Tukey の多重比較法、 $p < 0.05$ ) ほかは、樹高、枝下高および樹冠長率に有意差はみられなかった。当日の明け方 (5:50–6:40) と日中 (12:10–12:50) に、各個体の樹冠上部の日当たりの良い場所で、長さ約 20cm 程度の枝葉の先端部分を3枚ずつサンプリングした。サンプルは直後にラップで全体を包んだのち、アルミホイルで内張りをしたポリ袋に入れた。さらに、その中に水を含ませた濾紙を入れ蒸散を抑制した状態で測定まで保管した。水ポテンシャルの測定にはプレッシャーチャンバー (PMS600, PMS 社) を用いた。

使用したサンプルは水ポテンシャル測定後にスケヤナで葉面積を求め、乾燥重量 (75°C で 72 時間以上乾燥) を測定した。これらの測定値から、葉の厚さの指標となる葉面積あたりの乾燥重量 (LMA) を求めた。LMA は乾燥した立地に生育する個体ほど高い値を示す傾向にあり (Pooter et al., 2009)、 $P-V$  曲線から得られる水分特性値とともに立地条件の違いに応じた変化を特定する目的で測定した。

### 2.2.3 $P-V$ 曲線と水分特性値

前述の明け方の水ポテンシャルの測定に用いる葉のサンプリングの際に、 $P-V$  曲線作成用の枝葉を各個体の樹冠上部の日当たりの良い場所から1つずつサンプリングした。サンプルは、水ポテンシャル測定用のものよりもやや大きめにサンプリングした。サンプルは水切りし、ビニール袋をかぶせ暗くした状態で5時間程度吸水させたのち、再度長さ約 20cm 程度の先端部分を切り取り、プレッシャーチャンバーを用いて水ポテンシャルを繰り返し測定し  $P-V$  曲線を作成した。実際の測定手法は丸山・森川 (1983) に従った。作成した  $P-V$  曲線から、圧ポテンシャルを失う時の水ポテンシャル ( $\psi_w^{dp}$ ) と相対含水率 (RWC<sup>dp</sup>)、飽水時の浸透ポテンシャル ( $\psi_s^{sat}$ ) および細胞の体積弾性率 ( $\epsilon$ ) を求めた。これらは耐乾性の指標となり、 $\psi_w^{dp}$  と  $\psi_s^{sat}$  の値が低いほど葉の含水率が大きく低下しても圧ポテンシャルを維持して乾燥に耐えることができる (水永, 1988)。また、一般に  $\epsilon$  の値が高いほど細胞壁が固く柔軟性に乏しいために水分の低下による膨圧変化が大きく、反対に  $\epsilon$  の値が低いほど細胞壁の柔軟性が高く水分の低下による膨圧変化も小さいとされている (丸山・森川, 1983)。体積弾性率はいくつかの算出方法が提案されているが、本研究では Jane and Green (1983) の方法に従って体積弾性率の最大値 ( $\epsilon_{max}$ ) を求めた。

Table 2. 供試木の胸高直径 (DBH)、樹高 (H)、枝下高 ( $H_b$ ) および樹冠長率 (CLR)  
Diameter at breast height (DBH), tree height (H), the height to the lowest live branch ( $H_b$ ) and crown length ratio (CLR,  $[H - H_b]/H$ ) of sample trees.

調査区 Plot	No.	DBH (cm)	H (m)	$H_b$ (m)	CLR (%)
辛川 無間伐区 Karakawa unthinned	127	20.4	16.0	10.3	35.6
	128	23.8	17.8	9.6	46.1
	136	19.4	14.2	10.1	28.9
辛川 60%間伐区 Karakawa 60%-thinned	290	26.9	15.4	7.1	53.9
	292	19.5	15.8	9.4	40.5
	294	23.8	15.8	9.4	40.5
高知西 斜面上部 (40%間伐) Kochi-west upper slope (40%-thinned)	1	22.7	15.7	10.3	34.4
	2	29.2	16.8	7.4	56.0
	3	23.2	16.5	8.5	48.5
高知西 斜面下部 (40%間伐) Kochi-west lower slope (40%-thinned)	4	29.2	17.9	8.7	51.4
	5	33.3	17.3	7.8	54.9
	6	32.5	17.9	7.6	57.5

### 3. 結果

#### 3.1 明け方と日中の水ポテンシャル

明け方の水ポテンシャルは各処理の平均値で $-0.45$  MPa から $-0.43$  MPa の値を示した。日中の水ポテンシャルは $-1.62$  MPa から $-1.49$  MPa の値を示した。明け方、日中共に、サイト間および調査区間で水ポテンシャルに有意差はみられなかった (Fig. 2)。

#### 3.2 LMA と水分特性値

LMA および  $P-V$  曲線から得られる水分特性値の調査区別平均値を Table 3 に示す。LMA は辛川の 60% 間伐区が他の調査区に比べて有意に低い値を示した (Tukey の多重比較法、 $p < 0.05$ ; Table 3)。水分特性値については、いずれの値も調査区間で有意差はみられなかった。RWC<sup>up</sup> は 0.76 から 0.78 を示し、4 つの調査区間でばらつきが非常に小さかった。 $\psi_s^{\text{sat}}$  は $-1.23$  MPa から $-0.97$  MPa、 $\psi_w^{\text{up}}$  は $-1.70$  MPa から $-1.46$  MPa を示した。 $\psi_s^{\text{sat}}$  と  $\psi_w^{\text{up}}$  はいずれも、辛川では無間伐区の方が間伐区よりも値が低く、高知西では斜面上部の方が斜面下部よりも値が低かった。 $\epsilon_{\text{max}}$  は 4.82 MPa から 8.45 MPa となり、辛川では間伐区で、高知西では斜面下部で低い値を示した。辛川の 60% 間伐区における  $\psi_s^{\text{sat}}$  と  $\psi_w^{\text{up}}$  は 4 つの調査区のうちで最も高く、逆に  $\epsilon_{\text{max}}$  は最も低い値を示した。

個体レベルで  $\psi_s^{\text{sat}}$  と  $\psi_w^{\text{up}}$  との関係をプロットすると、 $\psi_s^{\text{sat}}$  の上昇に伴い  $\psi_w^{\text{up}}$  も上昇するパターンが得られた (Fig. 3)。さらに、サイト間で切片が有意に異なる

回帰直線が得られた (ANCOVA,  $p = 0.038$ )。回帰直線の切片は辛川の方が高知西よりも高かった。辛川のパターンに着目すると、60% 間伐区のすべての個体の  $\psi_s^{\text{sat}}$  が無間伐区の個体よりも高い傾向を示した。一方、高知西では  $\psi_s^{\text{sat}}$  と  $\psi_w^{\text{up}}$  いずれの水分特性値も斜面上部と斜面下部で明瞭な違いはみられなかった。

### 4. 考察

ヒノキ個体の水ポテンシャルおよび  $P-V$  曲線から得られる水分特性値に関する平均値の比較では、サイト間および処理区間で有意差は検出されなかった (Fig. 2, Table 3)。したがって、本研究の 2 か所のヒノキ人工林においては基本的に、サイト間、処理区間いずれの場合においても個体の耐乾性に明瞭な違いはないと考えられる。土壌含水率の低下パターン (Fig. 1) やサンプリング前の約 4 日間は降雨が観測されなかったこと、およびサンプリング実施日は晴天であったことを考慮すると、今回の水ポテンシャルや各種水分特性値は、比較的乾燥した時期におけるヒノキ個体の水分状態を反映したのと考えられる。しかし、その後さらに乾燥が進み、約 10 日後に乾燥のピークを迎えていたことから (Fig. 1)、このピーク時にサンプリングを実施した場合には今回とは異なる結果が得られた可能性がある。ただし、 $\psi_w^{\text{up}}$  や  $\psi_s^{\text{sat}}$  は新葉の成熟後から秋にかけては比較的安定した値を示すこと (水永, 1986) や斜面上部と下部の間に通年で明け方の水ポテンシャルに差がみられた 8 年生ヒノキ林の事例 (玉泉・

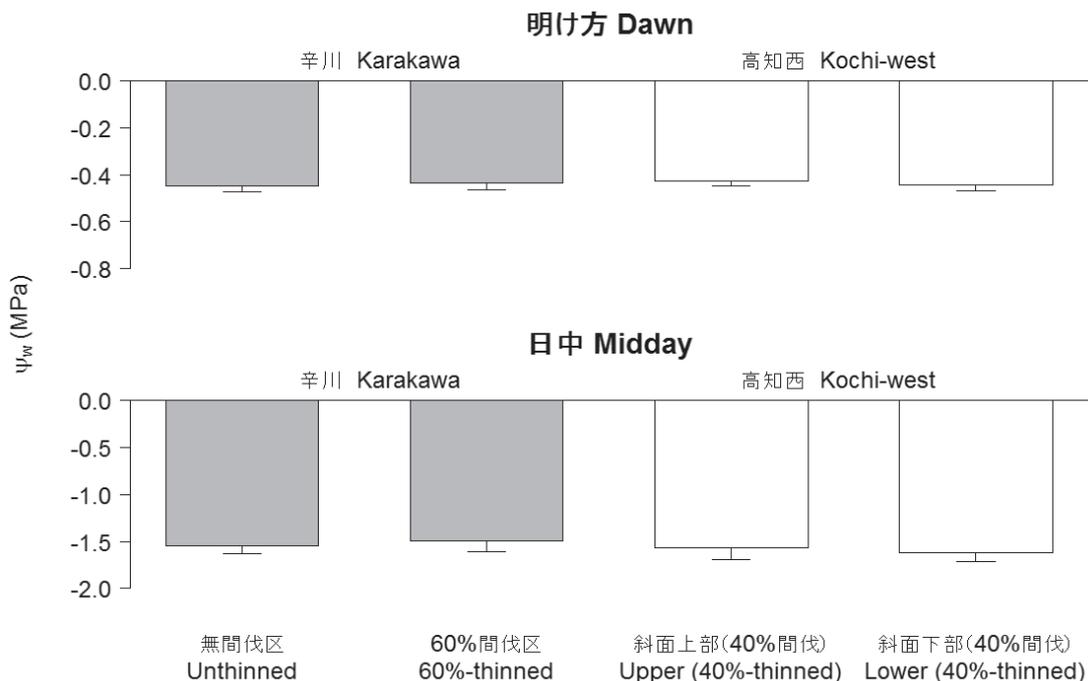


Fig. 2. サイト間および処理区間の明け方 (上) と日中 (下) の水ポテンシャルの比較  
Comparisons of dawn and midday water potentials between sites and treatments.

Table 3. ヒノキのLMA ( $\text{g m}^{-2}$ ) および  $P-V$  曲線によって得られた葉の水分特性値の平均値 (標準偏差); 原形質分離を起こす時の相対含水率 ( $\text{RWC}^{\text{tip}}$ ) と水ポテンシャル ( $\psi_w^{\text{tip}}$ , MPa)、飽水時の浸透ポテンシャル ( $\psi_s^{\text{sat}}$ , MPa) および細胞の体積弾性率の最大値 ( $\epsilon_{\text{max}}$ , MPa)

Mean (SD) values of LMA ( $\text{g m}^{-2}$ ) and leaf water parameters of Hinoki cypress trees calculated from  $P-V$  curves; relative water content at turgor loss point ( $\text{RWC}^{\text{tip}}$ ), water potential at turgor loss point ( $\psi_w^{\text{tip}}$ , MPa), osmotic potential at full turgor ( $\psi_s^{\text{sat}}$ , MPa) and the maximum bulk modulus of elasticity ( $\epsilon_{\text{max}}$ , MPa).

調査区 Plot	LMA ( $n = 21$ )*	葉の水分特性値 Leaf water parameters ( $n = 3$ )			
		$\text{RWC}^{\text{tip}}$	$\psi_w^{\text{tip}}$	$\psi_s^{\text{sat}}$	$\epsilon_{\text{max}}$
辛川 無間伐区 Karakawa, unthinned	176.6 <sup>a</sup> (16.4)	0.77 (0.06)	-1.63 (0.13)	-1.23 (0.11)	8.45 (3.51)
辛川 60%間伐区 Karakawa, 60%-thinned	158.0 <sup>b</sup> (12.6)	0.77 (0.04)	-1.46 (0.07)	-0.97 (0.15)	4.82 (1.79)
高知西 斜面上部 (40%間伐) Kochi-west, upper slope (40%-thinned)	182.7 <sup>a</sup> (9.5)	0.78 (0.03)	-1.70 (0.14)	-1.22 (0.28)	7.94 (3.98)
高知西 斜面下部 (40%間伐) Kochi-west, lower slope (40%-thinned)	179.5 <sup>a</sup> (12.3)	0.76 (0.07)	-1.62 (0.06)	-1.03 (0.15)	5.27 (2.51)

\*高知西の斜面下部は  $n = 20$ 。異なるアルファベットは4調査区間の有意差 (Tukeyの多重比較法,  $p < 0.05$ )。

\* $n = 20$  for lower slope at Kochi-west. Different letters indicate significant differences among four plots (Tukey's HSD test,  $p < 0.05$ ).

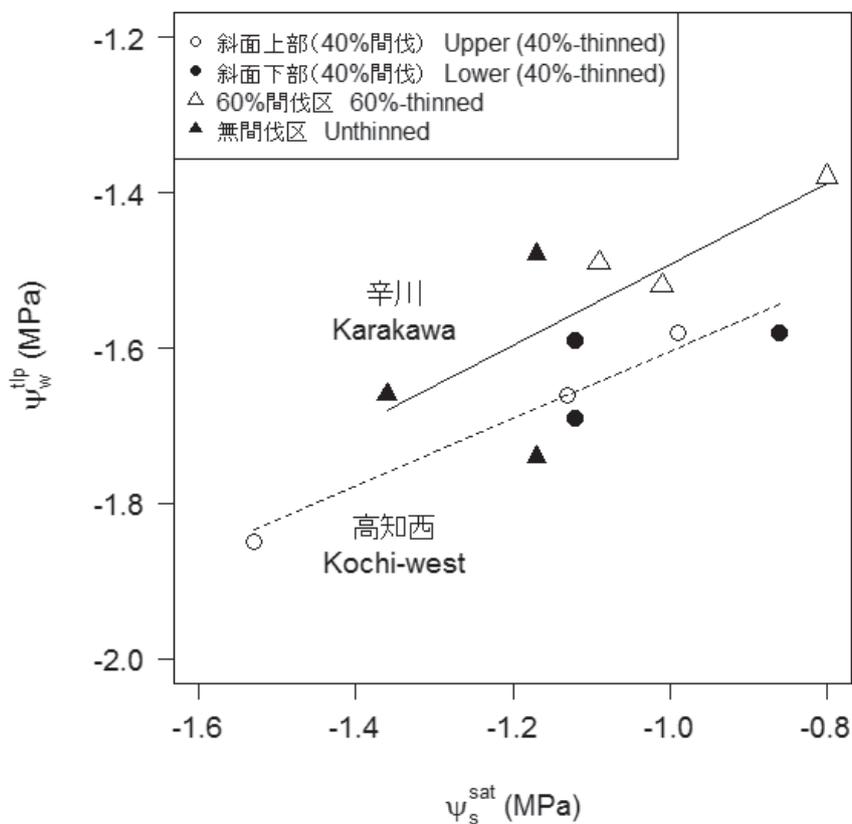


Fig. 3. 飽水時の浸透ポテンシャル ( $\psi_s^{\text{sat}}$ ) と圧ポテンシャルを失う時の水ポテンシャル ( $\psi_w^{\text{tip}}$ ) との関係 (実線は辛川、破線は高知西の回帰直線)

Relationship between osmotic potential at full turgor ( $\psi_s^{\text{sat}}$ ) and water potential at turgor loss point ( $\psi_w^{\text{tip}}$ ). Solid and dashed lines indicate regression lines for Karakawa and Kochi-west.

須崎, 1983) もあることから、降雨イベントや土壌含水率の変化だけでは一概に個体の水ストレスの状態を判断できないと考えられる。

明け方および日中の水ポテンシャルは、いずれの調査区もこれまでヒノキで報告されている値(水永, 1986; 宮本ら, 2009)と同程度であった。明け方の水ポテンシャルはいずれの調査区でも $-0.4\text{MPa}$ 程度で、ヒノキで水ストレスによる光合成能力の低下が始まるといわれている $-0.9\text{MPa}$ から $-0.8\text{MPa}$ (水永, 1986)よりもかなり高かった。このことから、測定時の調査対象木は水ストレスを受けておらず、蒸散による日中の水ポテンシャルの低下から回復できていたと考えられる。一方、日中に野外で気孔が閉じ始める時の水ポテンシャルは、常緑針葉樹で $-1.8\text{MPa}$ から $-1.0\text{MPa}$ (田崎, 1978)、土地生産性の低い受蝕土壌に生育する11年生ヒノキ林では約 $-1.5\text{MPa}$ (水永, 1986)と報告されており、今回の日中の水ポテンシャルの値とほぼ一致する。したがって、本研究の調査区でも日中は気孔閉鎖を生じていたと考えられ、土壌水分が十分でも晴天日であったため蒸散量が過大であったことがうかがえる。

今回得られた $\text{RWC}^{\text{up}}$ は、これまでにヒノキで報告されている値の範囲内ではあるが、比較的値が高く、4調査区間でのばらつきが非常に小さかった(Table 3)。 $\text{RWC}^{\text{up}}$ はその値が低いほど、葉内の水分が失われても葉が萎れないことを示すが(渥美ら, 2002)、水欠差に対する耐性を考える際には、 $\psi_w^{\text{up}}$ や $\psi_s^{\text{sat}}$ 、さらには $\text{RWC}$ の変化に対する膨圧の変化などを考慮する必要があり、 $\text{RWC}^{\text{up}}$ のみで単純な比較はできない(丸山・森川, 1984)。また、 $\psi_w^{\text{up}}$ や $\psi_s^{\text{sat}}$ とは異なり、気温や乾燥など環境条件との明瞭な関係が見出されていない(水永, 1986; 丸山ら, 1996)。

一方で、 $\psi_w^{\text{up}}$ と $\psi_s^{\text{sat}}$ の関係について個体ごとの値をプロットし、同じ $\psi_s^{\text{sat}}$ で比較した場合には、高知西の残存木は辛川よりも $\psi_w^{\text{up}}$ が有意に低くなり、耐乾性が高い傾向がうかがえた(Fig. 3)。1日分の違いはあるが、測定日までの気象条件の前歴や当日の天候は2つのサイトで大きく異ならなかった(方法参照; Fig. 1)。したがって、無間伐区の有無や間伐からの経過年数が異なるため一概には言えないものの、同じ低標高の強度間伐林分でも、北西斜面の辛川と比べて南斜面の高知西の方が水ストレスにさらされやすい傾向にあることを示唆している。

細胞の膨圧維持のメカニズムには、細胞内液の浸透ポテンシャルの変化による調節(浸透調節)と、細胞の体積弾性率による調節の2つがあり、 $\psi_w^{\text{up}}$ は、浸透ポテンシャルだけでなく体積弾性率( $\epsilon$ )によっても影響を受ける(Saito and Terashima, 2004; 原ら, 2008)。同じ $\psi_s^{\text{sat}}$ の範囲で見た場合に、 $\psi_w^{\text{up}}$ が高知西で低いこ

とから、このことだけを考えれば、今回調査した個体では浸透調節よりもむしろ体積弾性率の方が細胞の膨圧の維持に貢献していると予想される。しかし、 $\psi_s^{\text{sat}}$ と $\epsilon_{\text{max}}$ の関係および $\epsilon_{\text{max}}$ と $\psi_w^{\text{up}}$ の関係を個体レベルでプロットしてみると、全体としては有意な回帰直線が得られるものの、いずれの関係でもサイト間の有意差はみられなかった。このように、今回の結果だけでは膨圧維持に対する浸透調節と体積弾性率の貢献の度合いを特定することはできず、今後の検討を要する点である。

$P-V$ 曲線から得られる水分特性値は、事前の吸水処理に影響を受け、無吸水のサンプルと比べると $\psi_s^{\text{sat}}$ や $\psi_w^{\text{up}}$ は高めの値を、逆に $\text{RWC}^{\text{up}}$ や $\epsilon$ は低めの値を示すことが指摘されている(Evans et al., 1990; Kubiske and Abrams, 1991)。本研究において処理間で水分特性値に差が出なかった要因のひとつとして、この影響を考慮する必要がある。本研究では、通常(12時間程度)よりも短い5時間程度の吸水時間で処理を行ったが、辛川の試料で12時間程度の吸水処理を行った宮本ら(2009)の結果と比べてほとんど差はみられなかった。過去の事例では、水分特性値に対する吸水処理の影響が顕著にみられる樹種がある(Evans et al., 1990; Kubiske and Abrams, 1991)一方で、異なる吸水処理時間による影響がみられない事例(Harayama et al., 2006)もあり、樹種によってさまざまである。本研究では実施しなかったが、さらに短い時間(1–2時間)での処理や無吸水処理の場合を考慮する必要がある。

辛川の強度間伐林分の水ポテンシャルと各種水分特性値に関しては、前年に行った予備調査(宮本ら, 2009)と同様に今回も間伐処理の有無で水分特性値に差がみられなかった。先述のように、乾燥状態の前歴や吸水処理時間の影響など考慮すべき点はあるものの、辛川の強度間伐林分においては、間伐後残存木に顕著な水ストレスが生じていないことが示唆される。これは、調査区が間伐区、無間伐区ともに斜面下部に位置していることと、林分が北西斜面に位置しており、乾燥の影響を受けにくい立地条件であることが要因のひとつと考えられる。また、前年の結果と異なった点として、葉の厚さの指標であるLMAが間伐区で有意に低くなったことが挙げられる(Table 3)。これは、有意差はなかったものの、辛川の間伐区における $\psi_s^{\text{sat}}$ と $\psi_w^{\text{up}}$ の値が高知西を含めた4調査区間で最も高く、逆に $\epsilon_{\text{max}}$ は最も低かったことと関係していると考えられ(Table 3)、間伐による競争緩和で耐乾性が低下する傾向にあると推察される。強度間伐後の林分の土壌水分を調べた事例では、間伐後土壌水分が間伐前と比べて変わらない(宮本ら, 2009; 篠宮ら, 2012)もしくは増加する傾向を報告している(篠宮ら, 2004,

2006; 稲垣ら, 2008)。

高知西においては、斜面位置の違いに着目した比較となったが、枯死木が多かった斜面上部と比較的少なかった斜面下部とで残存木の水分特性値に明らかな差は検出されなかった。間伐直後は斜面位置の違いによって水ストレスの違いが生じ、斜面上部でより多くの個体が衰退し、マダクロホシタマムシのような二次性の害虫による被害を受けて枯死に至ったと推察されるが(佐藤ら, 2012)、本研究では間伐直後の測定データが無く、枯死の要因やプロセスを明らかにすることはできなかった。高知西は間伐後7年が経過しており、林冠の閉鎖度合いをはじめ間伐直後とは環境条件が異なっていると考えられる。現在生存している個体は南斜面の乾燥しやすい立地条件にすでに順応し耐乾性の高い葉を着けていると考えられるが、これについても今後の検討が必要である。

今回はサンプル数が少なく統計的に有意ではなかったが、Table 3における $\psi_w^{up}$ と $\psi_s^{sat}$ の値に着目すると、高知西では斜面下部よりも斜面上部の方が低い傾向を示していた。また $\epsilon_{max}$ は、斜面上部で高い傾向を示した。これは、斜面上部という乾燥しやすい立地条件に対する葉の適応の表れであると考えられる。辛川の間伐区に対する無間伐区の水分特性値の傾向もこれらと同様と考えられる(Table 3)。Saito and Terashima (2004)は、コナラとミズナラを対象とした野外実験から、成熟葉が一時的な強い水ストレスを受けた場合は、体積弾性率( $\epsilon$ )を低くして膨圧を維持するよう反応するのに対し、水ストレス下で葉が展開するような条件下では、 $\epsilon$ を高くして速やかに膨圧を変化させる傾向を指摘している。このことから、辛川の無間伐区や高知西の斜面上部における高い $\epsilon_{max}$ は、施業や立地条件に起因する水ストレス環境下で葉が展開した影響ととらえられるのかも知れない。

以上のように、本研究の結果からは基本的に、サイトの違いや間伐の有無、斜面位置の違いによるヒノキ残存木への明瞭な水ストレスの影響は認められなかった。しかし、現時点では十分なデータが得られておらず、今回の結果のみで強度間伐の残存木への影響評価やさまざまな立地環境、施業履歴をもつ林分への適用可能性を一般的に論じることはできない。一方、個体レベルで水分特性値のパターンをみた場合には、高知西のように残存木がやや高い耐乾性を示す傾向もみられた。佐藤ら(2012)は高知県内で強度間伐がおこなわれた28林分を調査し、標高600m以下で南向き斜面(南東、南西斜面を含む)の林分で残存木の立ち枯れが著しいことを示した。本研究で示された、高知西における水ストレスの徴候は、このような立地条件でヒノキ枯死木を発生させる要因のひとつとして注目すべき点である。このような林分に対しては、通常の間

伐をおこない間伐率を高くしないよう注意が必要である。本研究では、高知西に無間伐区が設定されていないため、残存木の枯死が間伐によるものなのか、斜面方位などの立地環境要因によるものなのかを特定することはできなかった。この点については、更なるデータの蓄積により今後明らかにしていく必要がある。

## 5. 謝辞

本研究の実施にあたり、四国森林管理局、同四万十森林管理署、土佐清水市森林組合の皆様には、調査に関して便宜を図っていただいた。

日本大学の丸山温教授には、水ポテンシャルの測定法に関してご教示いただいた。また、森林総合研究所の篠宮佳樹博士、同四国支所の酒井寿夫博士には土壤水分センサーの使用法をご指導いただくとともに、有益なご助言をいただいた。ここに感謝申し上げる。本研究は森林総合研究所交付金プロジェクト#200701「管理水準低下人工林の機能向上のための強度間伐施業技術の開発」(平成19~21年度)により実施した。

## 引用文献

- 渥美裕子・玉井重信・山本福壽・山中典和(2002) 冷温帯構成樹種20種の葉の水分特性. 日本林学会誌, 84, 271-275.
- 荒木誠・加藤正樹・宮川清・小林繁男・有光一登(2002) ヒノキ林における皆伐および間伐が表層土壌水分状態に及ぼす影響. 森林立地, 44, 1-8.
- Bladon, K. D., Silins, U., Landhausser, S. M. and Liefers, V. J. (2006) Differential transpiration by three boreal tree species in response to increased evaporative demand after variable retention harvesting. *Agricultural and Forest Meteorology*, 138, 104-119.
- Evans, R. D., Black, R. A. and Link, S. O. (1990) Rehydration-induced changes in pressure-volume relationships of *Artemisia tridentata* Nutt. ssp. *tridentata*. *Plant Cell and Environment*, 13, 455-461.
- 玉泉幸一郎・須崎民雄(1983) 土壌水分環境が植物群落の分布におよぼす影響について(VII) 斜面位置による水分状態の比較. 日本林学会九州支部研究論文集, 36, 81-82.
- 原有香里・張文輝・杜盛・玉井重信・山中典和(2008) 中国黄土高原における緑化用樹種4種の水分生理特性. 日本林学会誌, 90, 247-252.
- Harayama, H., Ikeda, T., Ishida, A. and Yamamoto, S.-I. (2006) Seasonal variations in water relations

- in current-year leaves of evergreen trees with delayed greening. *Tree Physiology*, 26, 1025-1033.
- 稲垣善之・篠宮佳樹・鳥居厚志 (2008) 間伐施業が土壌水分と窒素資源に及ぼす影響. *森林応用研究*, 17, 37-40.
- Inagaki, Y., Miyamoto, K., Okuda, S., Noguchi, M., Itou, T. and Noguchi, K. (2011) Stem productivity in relation to nitrogen concentration and  $\delta^{13}\text{C}$  in leaves of hinoki cypress (*Chamaecyparis obtusa* Endlicher) plantations in Shikoku district, Japan. *Soil Science and Plant Nutrition*, 57, 710-718.
- Jane, G. T. and Green, T. G. A. (1983) Utilization of pressure-volume techniques and non-linear least-squares analysis to investigate site induced stresses in evergreen trees. *Oecologia*, 57, 380-390.
- 気象庁 (2002) メッシュ気候値 2000. CD-ROM, 気象業務支援センター.
- 気象庁 (2009) “気象統計情報”, 気象庁, <http://www.jma.go.jp/jma/menu/report.html>.
- Kubiske, M. E. and Abrams, M. D. (1991) Rehydration effects on pressure-volume relationships in four temperate woody species: variability with site, time of season and drought conditions. *Oecologia*, 85, 537-542.
- 丸山温・森川靖 (1983) 葉の水分特性の測定 -  $P-V$  曲線法 -. *日本林学会誌*, 65, 23-28.
- 丸山温・森川靖 (1984) ミズナラ, ダケカンバ, ウラジロモミの葉の水分特性の季節変化. *日本林学会誌*, 66, 499-505.
- 丸山温・松本陽介・森川靖 (1996) スギ樹冠上部と下部の葉の水分特性と形態的特徴. *日本林学会誌*, 78, 427-432.
- 宮本和樹・奥田史郎・野口麻穂子・伊藤武治 (2009) 強度間伐後のヒノキの葉の水分特性に関する予備試験. *森林応用研究*, 18, 27-31.
- Miyamoto, K., Okuda, S., Inagaki, Y., Noguchi, M. and Itou, T. (in press) Within- and between-site variations in leaf longevity in hinoki cypress (*Chamaecyparis obtusa*) plantations in southwestern Japan. *Journal of Forest Research*, DOI 10.1007/s10310-012-0346-1.
- 水永博己 (1986) 受蝕土壌条件下におけるヒノキの葉の水分特性と水分状態. *日本林学会誌*, 68, 454-461.
- 水永博己 (1988)  $P-V$  曲線法を用いたヒノキの耐乾性検定. *日本林学会誌*, 70, 362-366.
- 村上茂樹 (2003) 森林からの蒸発散と林齢・葉量・林分構造との関係 - 水源林管理への応用に向けて -. *水利科学*, 46, 1-28.
- Noguchi, M., Okuda, S., Miyamoto, K., Itou, T. and Inagaki, Y. (2011) Composition, size structure and local variation of naturally regenerated broad leaved tree species in hinoki cypress plantations: a case study in Shikoku, south-western Japan. *Forestry*, 84, 493-504.
- Poorter, H., Niinemets, U., Poorter, L., Wright, I.J., Villar, R. (2009) Causes and consequences of variation in leaf mass per area (LMA): a meta-analysis. *New Phytologist*, 182, 565-588.
- Saito, T. and Terashima, I. (2004). Reversible decreases in the bulk elastic modulus of mature leaves of deciduous *Quercus* species subjected to two drought treatments. *Plant Cell and Environment*, 27, 863-875.
- 佐藤重穂・松本剛史・奥田史郎 (2012) 強度間伐を実施したヒノキ林における立枯れ発生と立地条件. *樹木医学研究*, 16, 9-14.
- 篠宮佳樹・稲垣善之・深田英久 (2004) 間伐がヒノキ林の表層土壌水分に及ぼす影響. *森林応用研究*, 13, 137-142.
- 篠宮佳樹・豊田信行・中岡圭一・奥田史郎・稲垣善之 (2006) 間伐・小面積皆伐がヒノキ林の表層土壌水分に及ぼす影響. *森林応用研究*, 15, 93-99.
- 篠宮佳樹・稲垣善之・野口麻穂子・奥田史郎・宮本和樹・伊藤武治 (2012) 強度間伐したヒノキ人工林の表層土壌の物理性. *森林総合研究所研究報告*, 11, 175-180.
- 森林総合研究所四国支所 (2010) 間伐遅れの過密林分ための強度間伐施業のポイント. *森林総合研究所四国支所*, 20 pp.
- 田崎忠良 (1978) 環境植物学. 朝倉書店, 138 pp.
- Tyree, M. Y. and Hammel, H. Y. (1972) The measurement of the turgor pressure and the water relations of plants by the pressure bomb technique. *Journal of Experimental Botany*, 23, 267-282.
- Ueda, M. and Shibata, E. (2005) Water status of hinoki cypress, *Chamaecyparis obtusa*, attacked by secondary woodboring insects after typhoon strike. *Journal of Forest Research*, 10, 243-246.
- 上田正文 (2010) ヒノキの取り扱いには注意が必要. *樹木医学研究*, 14, 146-147.
- 渡辺直史・深田英久・塚本次郎 (2008) ヒノキ強度間伐林分の残存木樹幹表面における樹脂流出と間伐強度および立地要因との関係. *森林立地*, 50, 117-123.



## 論文 (Original article)

### 近赤外域ハイパースペクトルカメラを用いた、 樹木葉代謝物質の解析方法の提案

北岡 哲<sup>1)\*</sup>、宇都木 玄<sup>1,3)</sup>、松田 修<sup>2)</sup>、上村 章<sup>1)</sup>、  
原山 尚徳<sup>1)</sup>、飛田 博順<sup>3)</sup>、射場 厚<sup>2)</sup>

### Near-infrared hyper-spectral techniques for the quantification of starch and sucrose in the leaves of cool temperate deciduous broad-leaved trees

Satoshi KITAOKA<sup>1)\*</sup>, Hajime UTSUGI<sup>1,3)</sup>, Osamu MATSUDA<sup>2)</sup>,  
Akira UEMURA<sup>1)</sup>, Hisanori HARAYAMA<sup>1)</sup>, Hiroyuki TOBITA<sup>3)</sup>, Koh IBA<sup>2)</sup>

#### Abstract

In the presence of elevated CO<sub>2</sub> levels, the accumulation of sugar and starch in leaves induces the downregulation of the photosynthetic rate. Therefore, it is important to develop a rapid and convenient system for the measurement of the concentrations of sugar and starch. This study evaluated the use of near infrared (NIR) spectral analysis, which is based on wavelengths longer than 1000 nm, for the determination of the soluble sugar and starch concentrations in the leaves of the dominant deciduous broad-leaved tree species in cool temperate forests. We analyzed three tree species that were grown in the presence of 370 ppm and 720 ppm CO<sub>2</sub>, and we compared the mass base sugar and starch concentrations determined by chemical analysis with the concentrations based on the light absorption rates in the NIR spectral analysis. We found that after removing the water by freeze-drying the leaves, there was a strong relationship between the light absorption rates and the soluble sugar concentration in the leaf dry mass base ( $r = 0.80$ ).

**Key words :** near infrared spectral analysis, deciduous broad-leaved tree, soluble sugar, starch, elevated CO<sub>2</sub>

#### 要旨

高 CO<sub>2</sub> 条件下では光合成産物が葉内に蓄積し光合成速度の低下が生じる現象が示唆されており、光合成産物蓄積量の簡便迅速な評価が課題である。本論文では、冷温帯主要落葉樹三種を対象に高 CO<sub>2</sub> 下の可溶性糖類とデンプンの濃度分析について、その特性が明瞭になる波長 1000 nm 以上の近赤外分光解析の適用を試みた。CO<sub>2</sub> 暴露栽培をおこなった試料を約 5 nm の分解能を持つ近赤外ハイパースペクトルカメラで撮影し、化学分析による定量と比較した。その結果、凍結乾燥によって水分を取り除くことで、重さあたりの可溶性糖類濃度と吸光度の間に樹種を統一した検量線を作成でき(重相関係数  $r = 0.80$ )、可溶性糖類濃度の簡便な予測が可能になったと考えられた。

**キーワード :** 近赤外分光解析、落葉広葉樹、可溶性糖類、デンプン、高 CO<sub>2</sub>

#### 1. はじめに

温暖化は CO<sub>2</sub> 濃度の上昇が原因となるため、植物による CO<sub>2</sub> 吸収能の増大に期待が寄せられている。植物の光合成による同化作用は CO<sub>2</sub> と水を基質とするため、高 CO<sub>2</sub> 条件は同化作用を促進すると考えられていた。たとえばイネ、ムギ、マメ類、コンニャクなどの作物では高 CO<sub>2</sub> 下で多収性が確認されており(今井 1988)、植物工場などでも高 CO<sub>2</sub> の利用例が見られる(池田ほか 1984)。しかし土壌養分、特に窒素が不

足した場合、高 CO<sub>2</sub> を十分に生かす事ができず収量が増加しない例が観察されている(Arp 1991, Oren et al. 2001)。森林を構成する樹木の場合、土壌養分が制限となり高 CO<sub>2</sub> による同化速度の著しい増大が認められない報告がある(Lavola and Tütto 1994, Körner 2000)。葉内での同化速度は CO<sub>2</sub> と水から糖・デンプンへの炭酸同化作用だけではなく、同化産物のタンパク質への合成・転流効率にも影響される。

この論文では落葉広葉樹林を形成する樹木を対象に

原稿受付：平成 24 年 6 月 8 日 Received 8 June 2012 原稿受理：平成 24 年 8 月 28 日 Accepted 28 August 2012

1) 森林総合研究所北海道支所 Hokkaido Research Center for Forestry and Forest Products Research Institute (FFPRI)

2) 九州大学 理学研究院 生物科学部門 Department of Biology, Faculty of Sciences, Kyushu University

3) 森林総合研究所 Forestry and Forest Products Research Institute (FFPRI)

\* 森林総合研究所北海道支所 〒062-8516 北海道札幌市羊ヶ丘 7 Hokkaido Research Center, Forestry and Forest Products Research Institute (FFPRI), Hitsujigaoka 7, Toyohira, Sapporo, Hokkaido 062-8516, Japan.

高 CO<sub>2</sub> 下での光合成による代謝産物量解析手法に焦点を当てた。落葉広葉樹林は高緯度地帯の森林を形成し高 CO<sub>2</sub> 等の環境変動の影響をより多く受ける生態系であると考えられる (Paster and Post 1988, Bonan 2008)。光合成により糖・デンプンが生成されるが、それらはミトコンドリアの TCA 回路において中間代謝物質である 2- オキソグルタル酸に合成される。2- オキソグルタル酸はグルタミン脱水素酵素の働きによって植物体に吸収された窒素 (アンモニウムイオン) と反応し、窒素同化に重要なグルタミン酸へと合成される (テイツ・ザイガー 2002)。しかし高 CO<sub>2</sub> 下で窒素が不足した場合、糖・デンプンがタンパク質合成に利用されずに葉内に蓄積してしまい (Lavola and Tütto 1994, Curtis et al. 2000)、光合成速度の低下 (ダウンレギュレーション) が生じる可能性が示唆されている (Stitt 1991, Tissue et al. 1993)。また樹種により窒素利用形態が多様であるため (Reich et al. 1995)、高 CO<sub>2</sub> 下で生じる代謝産物の生産量に差が生じ、ダウンレギュレーションの強弱に樹種間差があると考えられる (Ceulemans and Mousseau 1994)。そのため多くの樹種を高 CO<sub>2</sub> 下で生育し、光合成速度の変化と葉内の糖デンプン蓄積量の関係を明らかにする必要がある。一個体内の個葉においても葉序により光合成能力や窒素濃度が異なるため (Koike 1990, Ellsworth and Reich 1992)、ハイスループット (高い処理能力) で糖・デンプン濃度を測定することは、個体や樹種の高 CO<sub>2</sub> に対する反応の理解に必要かつ重要である。また解析において非破壊的に糖デンプンを定量化できれば、同部位の窒素やリンの定量分析に供することができる。

これまで述べたように高 CO<sub>2</sub> 下での光合成反応の解析には葉内の代謝産物の定量化が重要である。近年物質の状態や濃度を解析する手法として分光特性の利用があげられる。これまでの分光特性を用いたハイスループット解析手法として、可視域を利用した葉面温度の測定から、高 CO<sub>2</sub> に対する気孔応答欠如ミュータントの摘出を行った例 (Negi et al. 2008) や、衛星画像からの広域のクロロフィル活性評価 (NDVI) も分光特性を活かしたハイスループット解析手法である (近藤 2004)。近赤外域 (700 - 2500nm) の分光解析は分子振動による光吸収原理を利用した非破壊的物質測定法であり、医学分野や、農学、食物科学分野に広く用いられている (河野 1996, 西村 2009, Takahashi et al. 2011)。例えば穀物の水分量やタンパク質・脂質などの主要成分の定量化がすでに実用化されている (河野 1996, 近藤 2007, 平川・棟加登 2008)。近赤外のうちでも長波長域は糖やデンプン、タンパク質などに高い反射率を示すが、同時に水分の影響でその反応が隠されてしまうことが多い (西村 2009, 西沢ほか 2009)。特に植物葉は糖・デンプンなどの濃度がコメやダイズ種子などに比べて低く、水分含有量はその微量な変化

を解析する障害となっている。このため従来は樹木葉における長波長域は水分特性のみを表すと考えられてきた (Slaton et al. 2001)。本論文では高 CO<sub>2</sub> 下で育てられた樹木葉について、近赤外分光法を用いた代謝異常の検討をおこなうために必要な解析手法を論じる。具体的には超高解像度 (5 nm) のハイパースペクトルカメラを用い、凍結乾燥により水分条件を除外した糖・デンプンの非破壊的分析システムを考案し、定量化の性能を評価する。ハイパースペクトルカメラは対象物の近赤外光の長波長域の分光特性を高分解能のカメラで撮影し、二次元画像として解析することができる。この解析手法の確立によって、代謝物質の局在と代謝異常を生じている特定部位の面的評価を効率的におこなうことができると考える。

## 2. 材料と方法

近赤外分光分析計として SWIR200-R (Emerging Technologies, MS, USA) を用いた。本計測器は 1250 nm - 2500 nm を波長バンド幅 5 nm で分光し、解像度は 320 (水平) × 256 (垂直) の 8 万画素であり 14 bit 階調のダイナミックレンジを持つ。対象物の測定サイズは 8 × 6 cm となり、SWIR200-R の後ろ側方 2 地点からハロゲンランプによる照射と対象物からの分光反射率を SWIR200-R によって測定する。測定システム全体像を写真 1 に、撮影画面例を写真 2 に示す。SWIR200-R はビデオカメラほどの重量とサイズであり (写真 1)、光源システムを準備できれば、簡単に移動可能である。

北方系落葉広葉樹樹種であるエゾキヌヤナギ、シラカンバ、イタヤカエデの 3 樹種を対象に実験を行った。森林総合研究所北海道支所内の環境調節棟を用い、2009 - 2011 年の各年それぞれ 5 月 10 日から 370 ppm (現状 CO<sub>2</sub>) およびその約 2 倍の 720 ppm (高 CO<sub>2</sub>) で各樹種の実生を CO<sub>2</sub> 暴露栽培した。CO<sub>2</sub> 処理開始から 14 週間後の早朝に葉のサンプルを採集した。両 CO<sub>2</sub> からそれぞれ 5 個体を無作為に選択し、主軸の先端から 5 番目の葉を対象とした。採集した葉は速やかに各々封筒に入れ -45 °C で 48 時間凍結乾燥させた (FD-5N, EyELA, 東京理化学機器、東京)。また比較として凍結乾燥を行わなかったサンプルも用意した。各樹種 5 枚の葉について SWIR200-R を用いて撮影し、スペクトローム解析を行った。次に各材料の撮影部位をサンプリングし、乳鉢、乳棒を用いて粉碎し 2 mm メッシュの篩にかけた。篩にかけた粉末試料約 3 mg を重さあたりの可溶性糖類 (グルコース、フルクトース、シクロロースなどの 80 % エタノールに可溶性示糖類を本研究では可溶性糖類と定義する) およびデンプン濃度の定量に供した。80 % のエタノール 500 μl を粉末試料の入った 2 ml のエッペンチューブに加えて攪

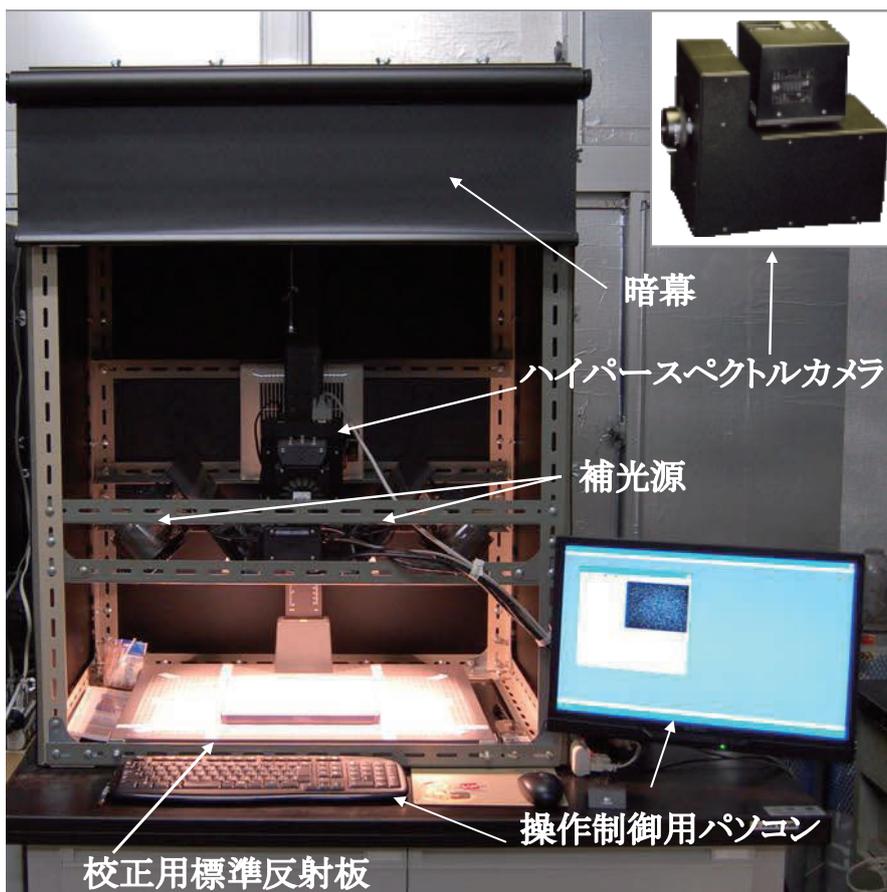


写真1 近赤外ハイパースペクトルカメラの測定システム

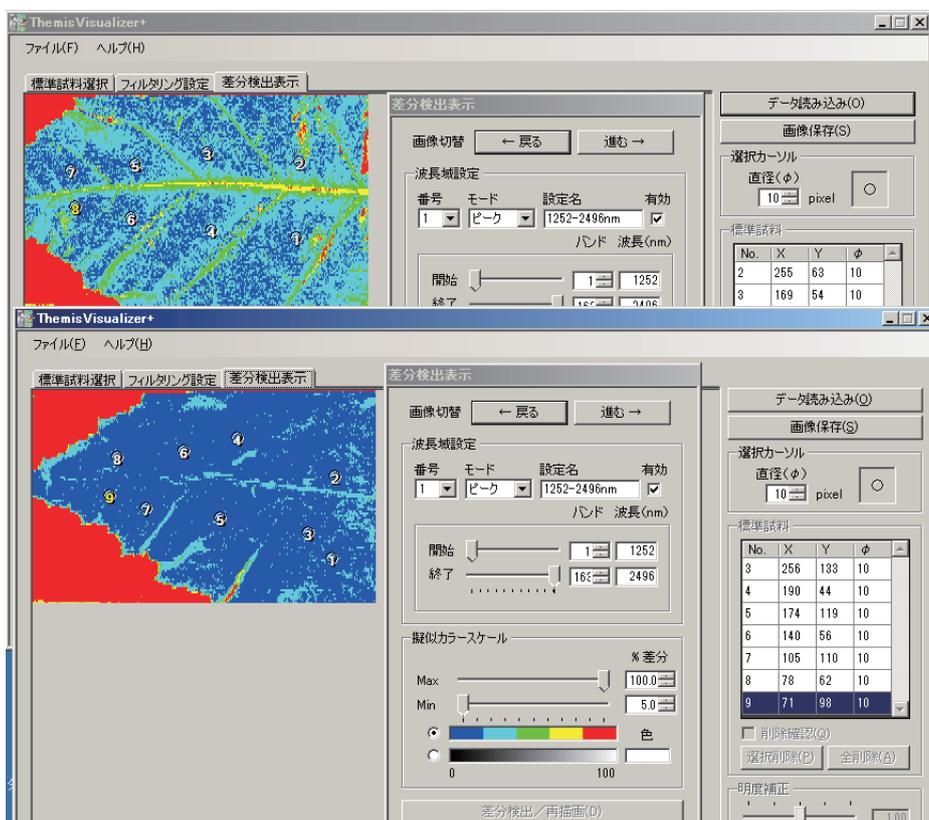


写真2 シラカンバの撮影画面の例 (上: 生葉、下: 凍結乾燥葉)

拌し、遠心分離器 (15000 rpm、15 分) にかけて上澄みと残渣にわけた。この作業を 3 回繰り返した後、上澄みを可溶性糖類濃度の定量に供し、残渣はデンプン濃度の定量に供した。

可溶性糖類の試料である上澄みは 55 °C の恒温槽に静置してエタノールを完全に蒸発させた後、超純水 1 ml を加えて攪拌したものをフェノール硫酸法で定量した (Kabeya and Sakai 2003)。試験管に試料水溶液 500  $\mu$ l を取り、フェノール試薬を 500  $\mu$ l 加え攪拌し、濃硫酸を 2.5 ml 加えた。試料を室温に 5 分間静置したのち、分光光度計 (U-1900, 日立製作所、東京) で 490 nm の吸光度を測定した。

デンプンの試料である残渣には 0.2 N の水酸化カリウムを 500  $\mu$ l 加えて 100 °C で 30 分加熱した。加熱した試料を 5 分間静置した後、1 N の酢酸 200  $\mu$ l を加えて中和した。中和した試料に酵素であるアミログルコシターゼ溶液 500  $\mu$ l を加えて攪拌し、55 °C の恒温槽に 30 分間置いた。その後ただちに取り出し、沸騰水中に 1 分間浸してアミログルコシターゼを失活させた。試料を室温で冷却した後、遠心分離機にかけ (15000 rpm、20 分)、その上澄みをデンプン抽出区分として定量に供した。デンプン濃度の定量にはムロターゼ・GOD 法 (グルコース CII- テストワコー、和光純薬、東京) を用いた。試料 100  $\mu$ l にグルコーステストワコー発色液 3 ml を加え 37 °C で 5 分間反応させたのち、分光光度計で 505 nm の吸光度を測定した。可溶性糖類濃度、デンプン濃度の標準試料にはグルコース CII- テストワコーのブドウ糖標準液 I を用いて検量線を作成した (決定係数  $r^2 = 0.97$ : 可溶性糖類、0.99: デンプン)。統計解析には R (R developing core team, Vienna, Austria) を用いた。可溶性糖類濃度、デンプン濃度についての検定は分散分析を用いた。またハイパースペクトルカメラより得られた吸光度と可溶性糖類濃度、デンプン濃度の関係の統計解析には R の部分最小二乗 (partial least square: PLS) 回帰解析パッケージ (pls) を用いて解析を行った。PLS 回帰解析法は近年計量化学の分野で広く用いられはじめてきた解析法で、主成分分析よりも高い予測精度が得られる (相島 1996)。

### 3. 結果と考察

各樹種の個葉について可溶性糖類濃度の範囲は 105 - 255  $\text{mg g}^{-1}$ 、デンプン濃度は 75 - 270  $\text{mg g}^{-1}$  であった (図 1)。この値は、これまで現状  $\text{CO}_2$  (約 370ppm) 下で生育する木本樹種から得られた糖・デンプン濃度 (Eguchi et al. 2008) より高い濃度が含まれており、それらは高  $\text{CO}_2$  で得られた試料によるものであった。シラカンバとエゾノキヌヤナギでは高  $\text{CO}_2$  下で可溶性糖類およびデンプン濃度が有意に高い値を示した (図 1)。また高  $\text{CO}_2$  下でも樹種によって糖・デンプンの濃

度には差がみられ、高  $\text{CO}_2$  下における個葉生産量を解析する上で、多くの糖・デンプン濃度と光合成速度・窒素濃度との関係解析が必要となる。

シラカンバの 370 ppm で育てた試料の生葉と凍結乾燥葉の吸収スペクトル、そして 720 ppm で育てた凍結乾燥葉の吸収スペクトル (吸光度) を図 2a に示す。凍結乾燥葉に対する生葉の吸収スペクトルはどの波長域にいても非常に高い。図 2b には 370 ppm で育てた生葉と凍結乾燥葉の各波長における吸光度の二次微分スペクトル (尾崎 1996) を示したが、水の分光特性がみられる 1870 nm 付近と 1920 nm 付近 (尾崎 1996) で生葉の二次微分スペクトルの変化が大きくなっている。これらのことは、生葉に含まれる水による光の吸収が強く表れることで、他の物質の吸光特性の検出が困難になることを示している (図 2a, b)。370 ppm と 720 ppm の凍結乾燥葉を比べると、1900 nm 以上の波長域の一部で、両者の吸光度が異なる場所が見られた (図 2a)。したがって凍結乾燥葉による解析から、 $\text{CO}_2$  処理による水以外の葉の構成物の変動を検知できる可能性が考えられた。糖やデンプンなどの炭水化物の分光特性は 1900 - 2500 nm の波長域に現れてくるといわれており (須田 2008)、特にグルコースやデンプンは 1900 nm、2100 nm、2470 nm 付近に吸光度のピークがみられる (尾崎 1996)。よってこの波長域の吸光度の二次微分スペクトルを図 2c に示した。370 ppm で育てた葉と 720 ppm で育てた葉で二次微分スペクトルが明瞭に異なる箇所が認められた。この傾向はエゾノキヌヤナギ及びミズナラについても同様であった。この波長域の吸光度を用いて可溶性糖類濃度、デンプン濃度についての PLS 解析を行った (表 1)。

その結果、検量線式が得られ、シラカンバの可溶性糖類では重相関係数が 0.93、同様にデンプンで 0.95 という高い値が得られた。またエゾノキヌヤナギの可溶性糖類でも重相関係数 0.97、同様にデンプンで 0.85 という高い重相関係数が得られた。一方イタヤカエデでは可溶性糖類の重相関係数が 0.93 と高かったが、デンプンでは 0.67 とやや低い値であった。3 種をプールした PLS 解析の結果において、可溶性糖類では 0.8 という高い重相関係数が得られたが、デンプンでは 0.46 と低い値となった。リンゴ果実中の可溶性糖類の定量例 (Cho et al. 1998) を見ると、グルコースについての重回帰分析の結果では 2108、2248、2100 nm の波長における吸光度が説明変数として得られ (重相関係数:  $R = 0.84$ )、ショ糖についての重回帰分析は 1672、1720、2276、2300、2396、2408、2420、2472 nm の吸光度が説明変数として得られている (重相関係数:  $R = 0.86$ )。本研究における単一樹種を用いた可溶性糖類の検出精度は、既存の研究成果に対して充分であり、また複数樹種を用いた場合の利用にも耐えることができると言えよう。一方サトイモのデンプン濃度の測定

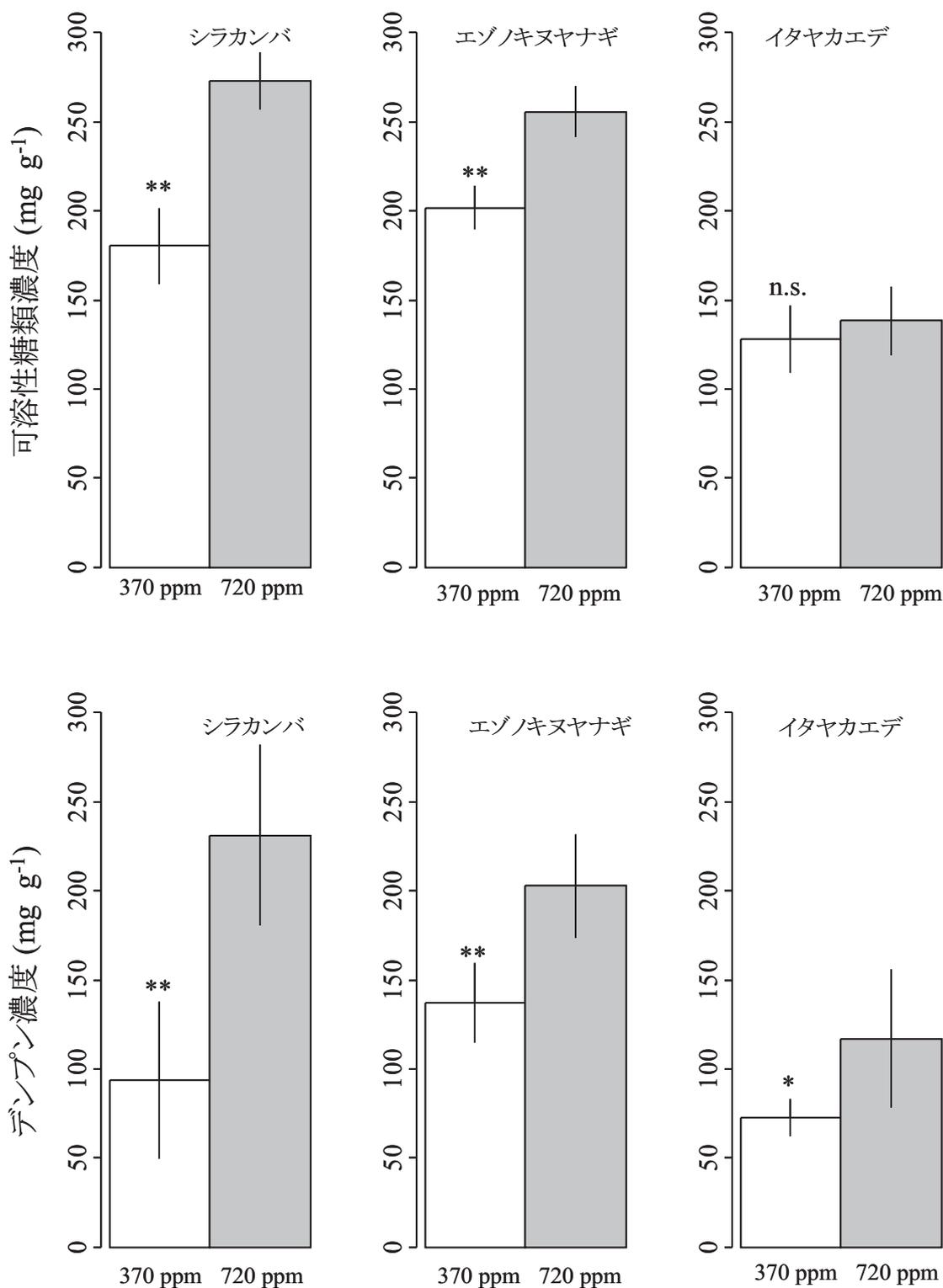


図1 370 ppmと720 ppmのCO<sub>2</sub>濃度で育てたシラカンバ、エゾノキヌヤナギ、イタヤカエデの可溶性糖類濃度およびデンプン濃度。図中の記号は分散分析の結果を示す、\*:  $p < 0.05$ , \*\*:  $p < 0.01$ , n.s.: 有意差なし、である。

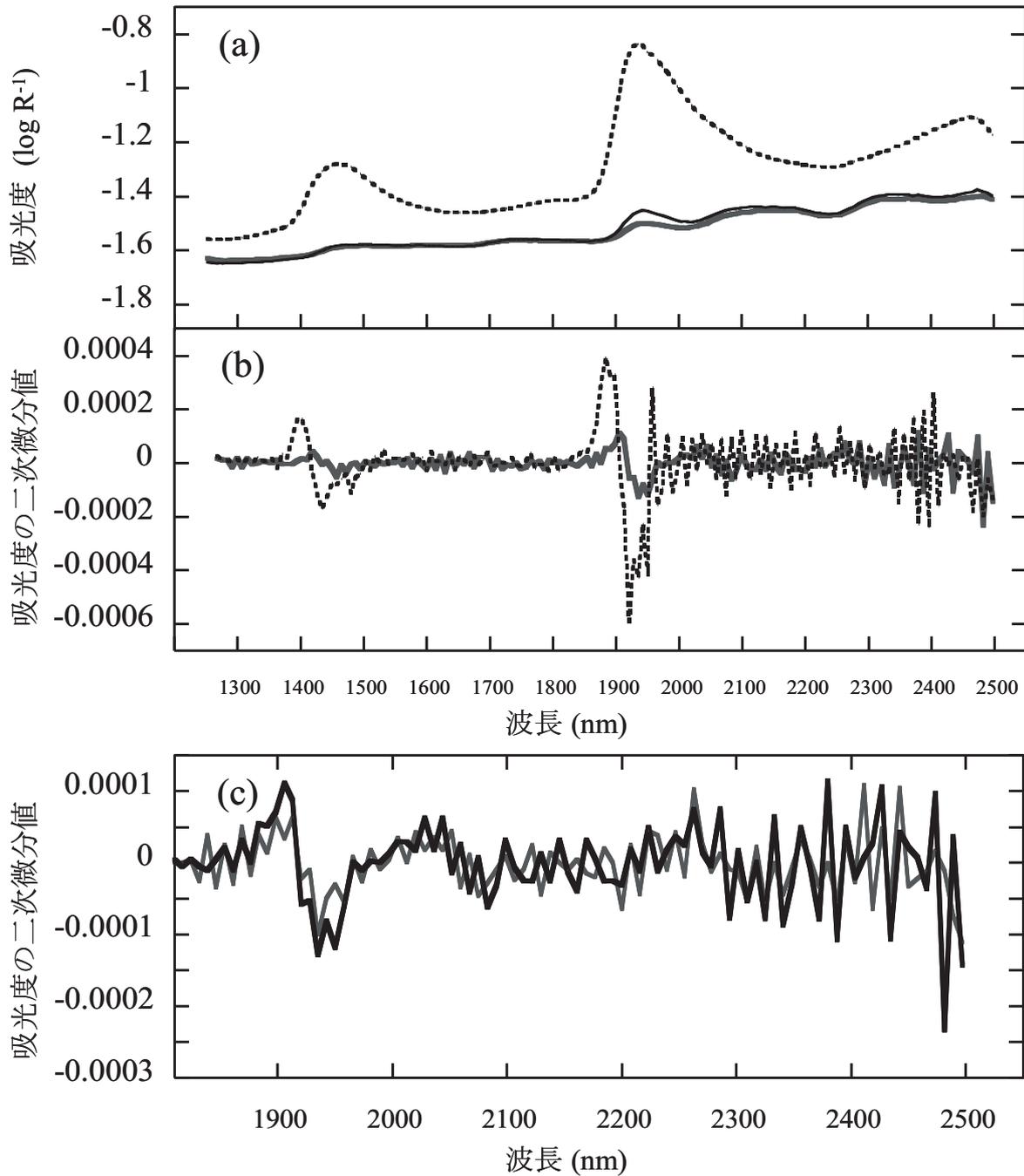


図2 (a): シラカンバの生葉、凍結乾燥葉の波長 (1250 - 2500 nm) における吸光度 ( $\log R^{-1}$ ), R: は反射率である。370 ppm の生葉 (破線)、370 ppm の凍結乾燥葉 (灰実線)、720 ppm の凍結乾燥葉 (黒実線) である。  
 (b): 370 ppm で育てたシラカンバの生葉と凍結乾燥葉の波長 (1250 - 2500nm) における吸光度の二次微分値。生葉 (破線)、凍結乾燥葉 (実線) である。  
 (c): 370 ppm (灰実線) と 720 ppm (黒実線) で育てたシラカンバ凍結乾燥葉の波長 (1900 - 2500 nm) における吸光度の二次微分値。

表1 PLS 回帰解析法による検量線の作成結果

樹種名	目的変数	RMSEP <sup>1)</sup>	R <sup>2)</sup>	SEC <sup>3)</sup>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>e</i>
シラカンバ	可溶性糖類	4.60 (4)	0.93	0.11	426.18	-58.73	41.99	372.56	1188.60
	デンプン	6.68 (4)	0.95	0.09	870.39	-112.70	137.73	636.31	2309.30
エゾノキヌヤナギ	可溶性糖類	1.43 (3)	0.97	0.07	120.94	125.59	1.45	156.15	144.71
	デンプン	5.26 (3)	0.85	0.15	96.79	255.80	-16.52	-147.68	325.03
イタヤカエデ	可溶性糖類	2.17 (4)	0.93	0.10	716.60	-219.61	-139.96	139.65	872.39
	デンプン	5.69 (2)	0.67	0.17	12.19	-23.92	50.89	-120.48	54.86
シラカンバ・ イタヤカエデ・ エゾノキヌヤナギ	可溶性糖類	4.00 (2)	0.80	0.67	9.01	10.52	-0.65	71.98	149.80
	デンプン	7.30 (1)	0.46	0.24	16.81	26.12	18.28	27.08	144.45

1): 予測値の平均自乗誤差, 2): 重相関係数, 3): 検量線の標準誤差, である。検量線式は  
 目的変数 ( $y$ ) =  $a \times abs_{1450} + b \times abs_{1920} + c \times abs_{2106} + d \times abs_{2473} + e$  ;  
 ただし  $abs_{1450}$  は波長 1450nm における吸光度、 $abs_{1920}$  は波長 1920nm における吸光度、 $abs_{2106}$  は波長 2106nm における吸光度、 $abs_{2473}$  は波長 2473nm における吸光度である。

例 (須谷 2008) では吸光度とデンプン濃度の関係に産地によるばらつきがみられ、最も相関性の高いもので、1026、1244、2338、2416 nm の吸光度が説明変数として得られている (重相関係数:  $R = 0.48$ )。

今回は 5 nm 程度の分解能のハイパースペクトルカメラを用い、凍結乾燥によって水分を取り除くことで、可溶性糖類と吸光度の間に樹種を統一した検量線を作成でき、可溶性糖類濃度の簡便な予測が可能になったと考えられる。しかし樹種を統一した場合デンプンと吸光度の重相関係数が小さく、デンプンに関してはハイスループットな定量方法を開発できなかった。この理由として樹種によるデンプン構成の相違が考えられる。デンプンはグルコースが直鎖状に結合したアミロースと網状に結合したアミロペクチンという、構造の異なるグルコースの結合体が多数重合したものである。例えば作物では種や品種によって、デンプン中のアミロース、アミロペクチン含有率が異なる (Bewley and Black 1994)。アミロースとアミロペクチンの分光特性も考慮した解析手法の確立が今後の課題である

う。しかし可溶性糖類に関してはハイパースペクトルカメラで面としてその局在を特定できることから、代謝的に異常を示す樹木葉、またはその部位をあらかじめ特定することができ、より効率的な分析をおこなうことができると考えられる。さらに既存の糖類の分析法であるフェノール硫酸法は、腐食性の極めて強い劇物である濃硫酸を多量に用いるが、このような取り扱いに慎重を期す分析回数を軽減することができる。現状ハイパースペクトルカメラの値段が高い事、撮影までに多少の手間がかかることが問題点としてあげられる。しかし、この機器を室内作業専用として設置することで、多くの樹木葉の代謝物定量の簡便迅速化と局在探索のために有効な手法になると考えられる。

#### 謝辞

本研究は生研センターのイノベーション創出基盤的研究推進事業の支援を受けた。また材料の提供にご協力頂いた北海道下川町の皆様に感謝申し上げます。

## 引用文献

- 相島鐵郎 (1996) 近赤外分光の応用 - 農業・食品分析 -. 尾崎幸洋・河田聡編 “日本分光学会 測定法シリーズ 32: 近赤外分光法”. 学会出版センター, 109-118.
- Arp, W. J. (1991) Effects of source-sink relations on photosynthetic acclimation to elevated CO<sub>2</sub>. *Plant Cell Environ.*, 14, 869-875.
- Bewley, J. D. and Black, M. (1994) *Seeds: Physiology of Development and Germination. Second edition.* Plenum Press, New York, 460pp.
- Bonan, G. B. (2008) Nature forests and climate change: forcing, feedbacks and the climate benefits of forests. *Science*, 320, 1444-1449.
- Ceulemans, R. and Mousseau, M. (1994) Effects of elevated atmospheric CO<sub>2</sub> on woody plants. *New Phytol.*, 127, 425-446.
- Cho, R. K., Sohn, M. R. and Kwon, Y. K. (1998) New observation of nondestructive evaluation for sweetness in apple fruit using near infrared spectroscopy. *J. Near. Infrared Spectrosc.*, 6, A75-A78.
- Curtis, P. S., Vogel, C. S., Wang, X., Pregitzer, K. S., Zak, D. R., Lussenhop, J., Kubiske, M. and Terri, J. A. (2000) Gas exchange, leaf nitrogen, and growth efficiency of *Populus Tremuloides* in a CO<sub>2</sub>-enriched atmosphere. *Ecol. Appl.*, 10, 3-17.
- Eguchi, N., Karatsu, K., Ueda, T., Funada, R., Takagi, K., Hiura, T., Sasa, K. and Koike, T. (2008) Photosynthetic responses of birch and alder saplings grown in a free air CO<sub>2</sub> enrichment system in northern Japan. *Trees Struc. Func.*, 22, 437-447.
- 平川達也・棟加登きみ子 (2008) 近赤外分析計を用いた飼料イネの試料成分迅速推定法. *福岡農試研報*, 27, 81-85.
- 池田 彰・江崎謙治・中山繁樹 (1984) 全方向照射における植物生育特性 I. サラダ菜生長速度に及ぼす光強度, 炭酸ガス濃度および気温の影響. *生物環境調節*, 22, 71-77.
- 今井 勝 (1988) 二酸化炭素と作物生産. *日作紀*, 57, 380-391.
- Kabeya, D. and Sakai, S. (2003) The Role of Roots and Cotyledons as Storage Organs in Early Stages of Establishment in *Quercus crispula*: a Quantitative Analysis of the Nonstructural Carbohydrate in Cotyledons and Roots. *Ann. Bot.*, 92, 537-545.
- 河野澄夫 (1996) 近赤外分光の応用 - 農業・食品分析 -. 尾崎幸洋・河田聡編 “日本分光学会 測定法シリーズ 32: 近赤外分光法”. 学会出版センター, 157-172.
- Koike, T. (1990) Autumn coloring, photosynthetic performance and leaf development of deciduous broad-leaved trees in relation to forest succession. *Tree Physiol.*, 7, 21-32.
- 近藤昭彦 (2004) グローバルリモートセンシングによる植生・土地被覆変動の抽出とその要因解析. *水文・水資源学会誌*, 17, 459-467.
- Körner, Ch. (2000) Biosphere responses to CO<sub>2</sub>-enrichment. *Ecol. Appl.*, 10, 1590-1619.
- Krapp, A., Hofmann, B., Shafer, C. and Stitt, M. (1993) Regulation of the expression of *rbcS* and other photosynthetic genes by carbohydrates: a mechanism for the “sink” regulation of photosynthesis. *Plant J.*, 3, 817-828.
- Negi, J., Matsuda, O., Nagasawa, T., Oba, Y., Takahashi, H., Kawai-Yamada, M., Uchimiya, H., Hashimoto, M. and Iba, K. (2008) CO<sub>2</sub> regulator SLAC1 and its homologues are essential for anion homeostasis in plant cells. *Nature*, 452, 483-486.
- Lavola, A. and Tütto, R. J. (1994) The effect of elevated carbon dioxide and fertilization on primary and secondary metabolites in birch, *Betula pendula* (Roth). *Oecologia*, 99, 315-321.
- 西村吾朗 (2009) 近赤外生体分光法の展望 -1μm 波長域の可能性. *脈管学* 49, 139-145.
- 西沢 隆・森 佑子・福島慎也・夏賀元康・丸山康広 (2009) 近赤外分光法によるイチゴ果実糖組成の非破壊測定. *日食化誌*, 56, 229-235.
- Oren, R., Ellsworth, D., Johnsen, K., Phillips, N., Ewers, B., Maier, C., Schäfer, K., McCarthy, H., Hendrey, G., McNulty, S. and Katul, G. (2001) Soil fertility limits carbon sequestration by forest ecosystems in a CO<sub>2</sub>-enriched atmosphere. *Nature*, 411, 469-472.
- 尾崎幸洋 (1996) 近赤外分光の基礎. 尾崎幸洋・河田聡編 “日本分光学会 測定法シリーズ 32: 近赤外分光法”. 学会出版センター, 11-57.
- Pastor, J. and Post, W. M. (1988) Responses of northern forests to CO<sub>2</sub> induced climate change. *Nature*, 334, 55-58.
- Paul, M. J. and Driscoll, S. P. (1997) Sugar repression of photosynthesis: the role of carbohydrates in signaling nitrogen deficiency through source-sink imbalance. *Plant Cell Environ.*, 20, 110-115.
- Reich, P. B., Kloeppel, B. D., Ellsworth, D. S. and Walters, M. B. (1995) Different photosynthesis-nitrogen relations in evergreen conifers and

- deciduous hardwood tree species. *Oecologia*, 104, 24–30.
- Salton, M. R., Hunt, E. R. Jr. and Smith, W. K. (2001) Estimating near-infrared leaf reflectance from leaf structural characteristics. *Am. J. Bot.*, 88, 278–284.
- Sheen, J. (1990) Metabolic repression of transcription in higher plants. *Plant Cell*, 2:1027–1038.
- Stitt, M. and Krapp, A. (1999) The interaction between elevated carbon dioxide and nitrogen nutrition: the physiological and molecular background. *Plant Cell Environ.*, 22, 583–621.
- 須田和子 (2008) 近赤外分光法によるサトイモのデンプン測定. 園田学園女子大学論文集, 42, 211–216.
- Takahashi, A., Shimada, T. and Kawano, S. (2011) Nondestructive determination of tannin content in intact individual acorns by near-infrared spectroscopy. *Ecol. Res.*, 26, 679–685.
- L. テイツ・E. ザイガー 編 (2002) (西谷和彦・島崎研一郎監訳, 2004) 植物生理学 (第3版), 培風館, 696 pp.
- Tissue, D. T., Thomas, R. B. and Strain, B. R. (1993) Long-term effects of elevated CO<sub>2</sub> and nutrients on photosynthesis and Rubisco in loblolly pine seedlings. *Plant Cell Environ.*, 16, 859–865.



---

論文 (Original article)

---

## Sound insulation performance of wood (*Larix kaempferi*) sound barriers constructed along an expressway twenty years ago

Shuzo SUEYOSHI<sup>1)\*</sup>, Masazumi SHIODA<sup>2)</sup>, Jun SAKATA<sup>2)</sup>,  
Naoaki SHIBATA<sup>3)</sup> and Anri YOSHINO<sup>3)</sup>

### Abstract

The sound transmission loss of Japanese larch sound barriers, which were constructed along an expressway twenty years ago, was measured to investigate their acoustic durability. When large gaps at the joints of the wood sound barriers were filled with oil clay, their sound transmission loss increased and complied with the sound barrier regulation for Japanese expressways. Moreover, filling all the joints with oil clay further improved the sound transmission loss. These results indicated that the solid part of the wood sound barriers showed sufficient sound insulation performance. Therefore, wood sound barriers, which are well-designed and maintained to ensure no gaps emerge at the joints, will perform adequately as expressway sound barriers for at least twenty years.

**Key words** : Wood sound barrier, Japanese larch, Sound transmission loss

### 1. Introduction

Installing barriers is one of the most efficient and frequently used methods to control road traffic noises (Ekici et al., 2003). The theoretical concepts of noise attenuation by barriers have also been investigated. Though field tests involving sound barriers are expensive and require careful monitoring of many variables, they have been conducted to determine the actual sound barrier performance. Various kinds of sound barriers have been developed and many standards have either already been implemented or are being drafted in Europe. Such concrete and metal sound barriers have been developed as permanent structures.

As for wood sound barriers, wood is a basic building material which can be used as an acoustical insulator (Bucur, 2006), but we should always consider its durability, which is affected by weathering and decay. The properties of wood sound barriers were reported as follows: Weathering causes gaps to develop in the barriers due to dimensional changes in the wood, while decay causes the wood to decompose. Preservative treatments are commonly used to resist weathering and decay, both of which affect sound transmission loss. Wood sound barriers have an expected service life of 15 to 25 years when treated with preservative

(Boothby et al., 2001).

In Japan, most expressway sound barriers are constructed using concrete, metal and/or combinations of the two as permanent structures. Wood sound barriers along the expressway have been constructed in certain locations on a small scale and trial basis. Although the initial sound insulation performance of wood sound barriers has already been confirmed as meeting the sound barrier regulation for Japanese expressways (hereinafter referred to as the sound barrier regulation, stipulating sound transmission loss of 25 dB and over at 400 Hz, and 30 dB and over at 1000 Hz respectively.), few experimental results exist showing their durability as stable structures (Machida et al., 2007; Sueyoshi et al., 2007; Shibata et al., 2008; Sueyoshi et al., 2008; Machida et al., 2009; Shibata et al., 2009 and Sueyoshi et al., 2011).

In this research, we had the opportunity to measure the sound insulation performance of sound barriers made from Japanese larch (*Larix kaempferi*) twenty years after their installation. Measuring the sound transmission loss of these old sound barriers based on Japanese Industrial Standards, data to facilitate the maintenance control of wood sound barriers were obtained.

---

原稿受付：平成 24 年 9 月 28 日 Received 28 September 2012 原稿受理：平成 24 年 10 月 24 日 Accepted 24 October 2012

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

2) Kogakuin University

3) Nagano Prefecture Forestry Research Center

\* Department of Wood Engineering, Forestry and Forest Products Research Institute (FFPRI), Matsunosato 1, Tsukuba, Ibaraki 305-8687, Japan; e-mail: sue@ffpri.affrc.go.jp

### Experimental

Some of the Japanese larch sound barriers (hereinafter referred to as the wood sound barriers), which were installed south of the Iida Interchange of the Chuo Expressway in the early spring of 1986, were replaced with new sound barriers of equivalent specification and used for this experiment. Each sound barrier unit consisted of five components of Japanese larch timber, which were sawn and fastened with bolts and nuts as shown in Fig. 1. Wood components were treated with preservative (PF3, Phosphorus trifluoride).

Fig. 2 shows a schematic diagram measuring sound transmission loss as an index of the sound insulation performance of the wood sound barriers. Acoustic tests were performed in the experimental facility, where two reverberation chambers specified as type I in JIS A 1416 (JIS Committee, 2000) were connected. As shown in Photo 1, this involved installing H-shaped steel frames, with openings 1990 and 720mm wide to the space (2710mm wide, and 3600mm high) of the portion connecting the two reverberation chambers. The test specimen consisting of wood sound barriers 1960 and 680mm wide were set in the space of the connection portion. One reverberation chamber was used as a sound source room, in which 1/3 octave-band noises were generated using equipment consisting of a noise generator (RION, SA-28), amplifier (ONKYO, A-977) and speaker (ONKYO, D-77MRX). The other reverberation chamber was used as a sound receiving room. The sound pressure levels were simultaneously measured using five sound level meters (RION, NA-20) and sound level recorders (RION, LR-07) in each chamber. The sound transmission loss,  $R$  was calculated by the following equation:

$$R = (L_1 - L_2) + 10 \log(S/A)$$

$$A = 0.16V/T$$

where  $L_1$  was the average sound pressure level in the sound source room (dB),  $L_2$  the average sound pressure level in the sound receiving room (dB),  $S$  the area of the specimen ( $m^2$ ),  $A$  the equivalent absorption area of the sound receiving room ( $m^2$ ),  $V$  the volume of the sound receiving room ( $m^3$ ) and  $T$  the reverberation time in the sound receiving room (s).

Filling the gaps at the joints of the wood sound barriers with oil clay step by step, the sound transmission loss was measured to investigate the influence of the gaps on sound transmission and determine the sound insulation performance of the solid part of the wood sound barrier. The oil clay was temporarily used to fill gaps during experiment.

### Results and discussion

The sound transmission loss of the wood sound barriers is shown in Fig. 3. As a reference, the sound transmission loss of the initial wood sound barrier measured twenty years ago via a procedure equivalent to that of this experiment, described in JIS A 1416 (Takei et al., 1991), was plotted. The initial wood sound barrier was offered for an experiment to determine the specification of the wood sound barrier before the on-site construction and had the same structure as the wood sound barrier in this study. However, the units of the initial wood sound barrier differed from those of the wood sound barrier used in this experiment. The initial sound insulation performance was close to the theoretical line of a mass law ( $TL = 18 \log(fm) - 44$ ,  $TL$ : sound transmission loss,  $f$ : frequency (Hz),  $m$ : surface density ( $kg/m^2$ )) and satisfied the sound barrier regulation.

When the gaps at the joints of the wood sound barriers were not filled with any oil clay, as shown in Photo 1, the sound transmission loss was lower than that prescribed by

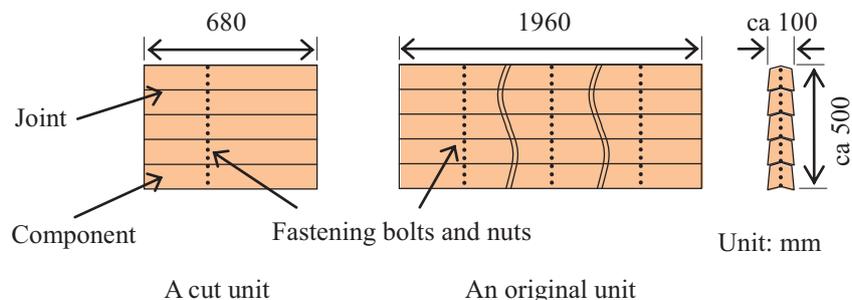


Fig. 1 Schematic diagram of units of Japanese larch sound barriers.

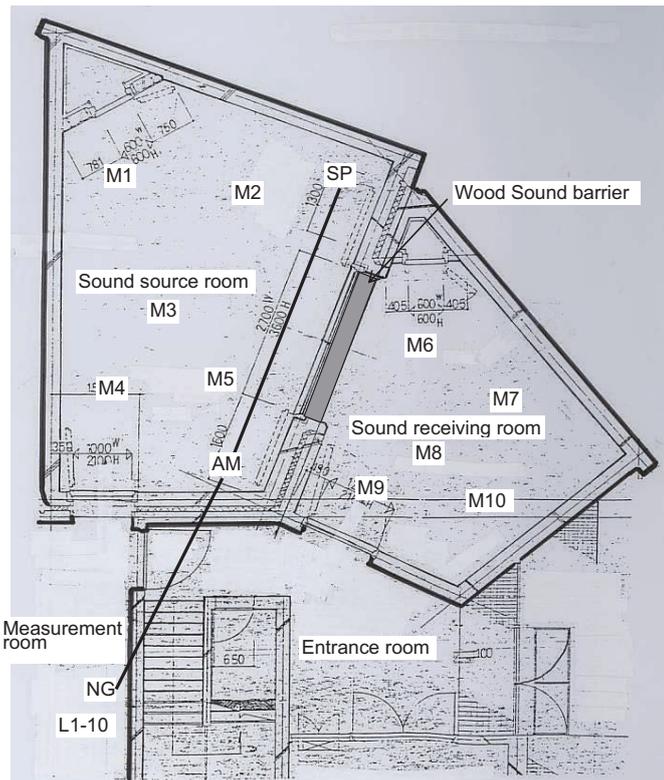


Fig. 2 Schematic diagram showing measurement of sound transmission loss.  
 M1-10: Sound level meter, L1-10: Sound level recorder, SP: Speaker,  
 AM: Amplifier, NG: Noise generator.  
 The sound level meters are connected to the sound level recorders, respectively.

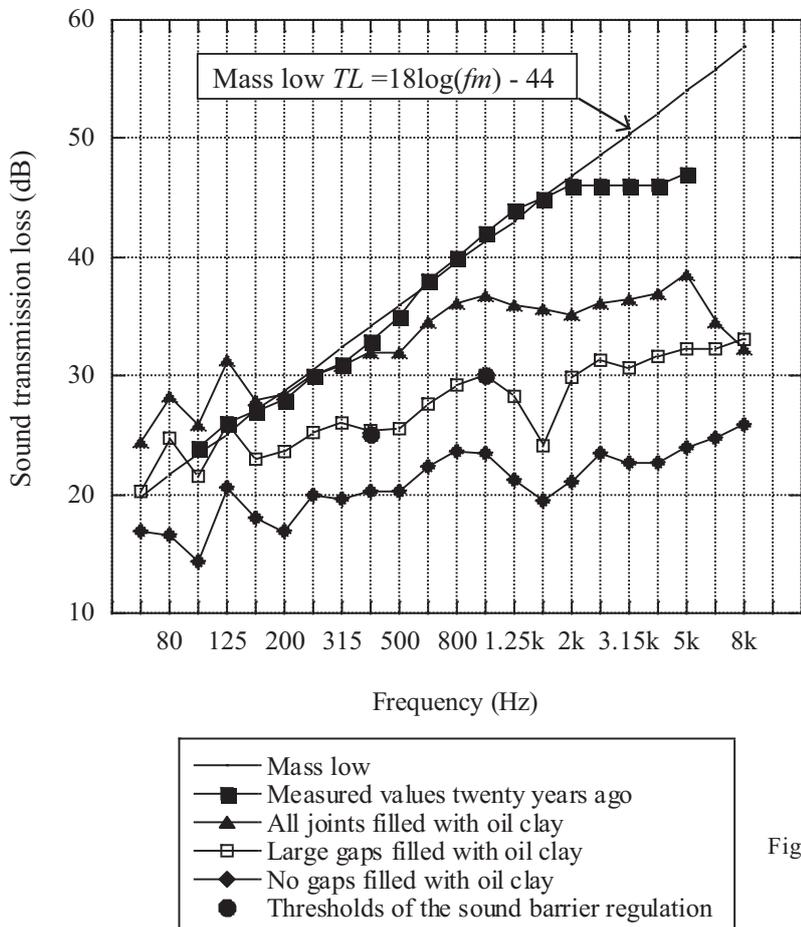


Fig. 3 Sound transmission loss of Japanese larch sound barriers  
 R: Sound transmission loss (dB),  $f$ : frequency (Hz),  $m$ : surface density ( $\text{kg/m}^2$ )



Photo 1 Japanese larch sound barrier without oil clay at the joints.



Photo 2 Japanese larch sound barrier of which the gaps allowing light through were filled with oil clay.



Photo 3 Japanese larch sound barrier, the joints of which were entirely filled with oil clay.

the sound barrier regulation. Where the gaps allowing light through were filled with oil clay as shown in Photo 2, the sound transmission loss exceeded the level specified in the sound barrier regulation. Furthermore, when all the joints were filled with oil clay, as shown in Photo 3, the sound transmission loss was further improved and attained the level of 20 years ago up to 400Hz. These results indicated that the solid part of the wood sound barriers satisfied the sound insulation performance provided by the sound barrier regulation.

### Conclusion

The results obtained suggest that the sound insulation performance of the wood sound barriers, which were properly maintained to suppress the gaps at the joints, would satisfy the sound barrier regulation. Therefore, if Japanese larch sound barriers are adequately designed and maintained to eliminate any gap at their joints, they can be used as expressway sound barriers for at least twenty years.

## References

- Boothby, T. E., Burroughs C. B., Bernecker, C. A., Manbeck, H. B., Ritter, M. A., Grgurevich, S., Cegelka, S., and Lee, P. D. (2001) Design of Wood Highway Sound Barriers, USDA Forest Products Laboratory Research Paper FPL-RP-596: 1-66.
- Bucur, V. (2006) Acoustics of Wood, Second Edition, Springer, p.23-30.
- Ekici, I., and Bougdah, H. (2003) A Review of Research on Environmental Noise Barriers, Building Acoustics 10: 289-323.
- Japanese Industrial Standard Committee (2000) Acoustics-Method for laboratory measurement of airborne sound insulation of building elements, JIS A 1416. (in Japanese)
- Machida, H., Oguro, S., Goto, Y., Sueyoshi, S., Morikawa, T., and Ukyo, S. (2007) Evaluation of wood sound barriers constructed along an expressway in Gunma Prefecture Part 4 – Initial degradation of accelerated deteriorating wood sound barriers by fungus cellar test - In: Abstracts of the 57th Annual Meeting of the Japan Wood Society, Hiroshima, PN004, p. 146. (in Japanese)
- Machida, H., Oguro, S., Kudo, Y., Sueyoshi, S., Morikawa, T., and Ukyo, S. (2009) Evaluation of wood sound barriers constructed along an expressway in Gunma Prefecture Part 7 - Degradation of accelerated deteriorating wood sound barriers for 12-24months - In: Abstracts of the 59th Annual Meeting of the Japan Wood Society, Matsumoto, PN012, p. 155.(in Japanese)
- Shibata, N., Yoshino, A., and Hashizume, T. (2008) Evaluation of wood (*Larix kaempferi*) sound barriers constructed along an expressway twenty years ago Part 1 – Non-destructive evaluations - In: Abstracts of the 58th Annual Meeting of the Japan Wood Society, Matsumoto, N18-1400, p. 76. (in Japanese)
- Shibata, N., Yoshino, A., Hashizume, T., and Toda, K. (2009) Evaluation of wood (*Larix kaempferi*) sound barriers constructed along an expressway twenty years ago Part 3 – Dimensional change and bending strength - In: Abstracts of the 59th Annual Meeting of the Japan Wood Society, Matsumoto, PN016, p. 156. (in Japanese)
- Sueyoshi, S., Morikawa, T., Ukyo, S., Machida, H., Oguro, S., and Goto, Y. (2007) Evaluation of wood sound barriers constructed along an expressway in Gunma Prefecture Part 5 – Initial acoustic performance of accelerated deteriorating wood sound barriers - In: Abstracts of the 57th Annual Meeting of the Japan Wood Society, Hiroshima, PN005, p. 146. (in Japanese)
- Sueyoshi, S., Shioda, M., Sakata, J., Shibata, N., and Yoshino, A. (2008) Evaluation of wood (*Larix kaempferi*) sound barriers constructed along an expressway twenty years ago Part 2 – Acoustic performance - In: Abstracts of the 58th Annual Meeting of the Japan Wood Society, Matsumoto, N18-1415, p. 76. (in Japanese)
- Sueyoshi, S., Morikawa, T., Ukyo, S., Machida, H., Oguro, S., and Kudo, Y. (2009) Evaluation of wood sound barriers constructed along an expressway in Gunma Prefecture Part 8 - Acoustic performance of accelerated deteriorating wood sound barriers for 12-24months - In: Abstracts of the 59th Annual Meeting of the Japan Wood Society, Matsumoto, PN017, p. 156.(in Japanese)
- Sueyoshi, S., Morikawa, T., Ukyo, S., Machida, H., Kojima, T., Oguro, S., and Kudo, Y. (2011) Evaluation of wood sound barriers constructed along an expressway in Gunma Prefecture Part 10 - Acoustic performance of accelerated deteriorating wood sound barriers for 42 months -In: Abstracts of the 61st Annual Meeting of the Japan Wood Society, Kyoto, N19-P-AM20, p. 162. (in Japanese)
- Takei, F., Yoshida, T., Hashizume, T., Yoshino, A., Mimura, N., and Okumura, S. (1991) Experimental production of wooden noiseproof-fence and its efficiency test, Wood Industry, **46**, 17-22. (in Japanese)

## 20年前に高速道路沿いに建設されたカラマツ製遮音壁の防音性能

末吉 修三<sup>1)\*</sup>、塩田 正純<sup>2)</sup>、坂田 淳<sup>2)</sup>、柴田 直明<sup>3)</sup>、吉野 安里<sup>3)</sup>

### 要旨

20年前に高速道路沿いに設置された木製遮音壁の音響的耐久性を調べるため、音響透過損失を測定した。木製遮音壁の構成要素の接続部分の大きな隙間を油粘土で埋めると、音響透過損失は改善され、日本の高速道路の遮音壁設置基準を満たした。さらに、すべての接続部分を油粘土で埋めると、音響透過損失は一段と改善された。これらの結果は、木製遮音壁の木材部分には十分な遮音性能があることを示している。したがって、隙間ができにくいデザインで、しかも隙間ができにくいように適切に維持管理されれば、木製遮音壁の遮音性能は少なくとも20年間は保たれるであろう。

キーワード：木製遮音壁、カラマツ、音響透過損失

---

1) 森林総合研究所構造利用研究領域

2) 工学院大学

3) 長野県林業総合センター

\* 森林総合研究所構造利用研究領域 〒305-8687 茨城県つくば市松の里1 e-mail: sue@ffpri.affrc.go.jp

## 短報 (Note)

# 森林総合研究所モデル木造住宅の性能評価 — 空気音および床衝撃音遮断性能 —

末吉 修三<sup>1)\*</sup>、宇京 斉一郎<sup>1)</sup>、原田 真樹<sup>1)</sup>

## Performance evaluation of the wooden house constructed in the Forestry and Forest Products Research Institute - Airborne and floor-impact sound insulation -

Shuzo SUEYOSHI<sup>1)\*</sup>, Seiichiro UKYO<sup>1)</sup>, and Masaki HARADA<sup>1)</sup>

### Abstract

The Forestry and Forest Products Research Institute (FFPRI) conducted a wooden house design competition, emphasizing safety, comfort, durability and energy saving, and then constructed the best work as a two-story wooden house. Sugi (*Cryptomeria japonica*) thick structural plywood is used in the walls and floors to improve earthquake resistance. The beams and subfloor of the second floor are visible in the first floor, while the first and second floors are sharing the space built in a wellhole style. These house configurations not only made a visual impact but also had favorable natural lighting and air circulation. However, several sound transmission paths were detected by measuring both airborne and floor-impact sound pressure levels. This wooden house is, therefore, one of the full scale models of a detached single family house where high sound insulation performance is not required.

**Key words :** wooden house, airborne sound, floor-impact sound, sound insulation

### 1. はじめに

森林総合研究所では、安全性・快適性・耐久性・省エネルギー性を重視した木造住宅の設計コンペを実施し、その最優秀作品（森林総合研究所 2009）をモデル木造住宅として建設した。モデル木造住宅の壁や床には、耐震性を高めるため構造用スギ厚物合板が使われている。また、蓄熱と吸放湿効果が見込まれる土壁や蓄熱土間が組み込まれており、室内の温熱環境の改善の工夫が施されている。このような仕様では、通常の木造住宅より外壁の遮音性は高いと考えられる。しかし、1階の天井を設置しないで梁あらかわしの床構造となっていることや階段部分を含めて一部が吹抜になっていることから、屋内では高い遮音性を発揮させるというより、デザインを重視するとともに採光や換気を考慮した設計となっている。

このようなモデル木造住宅の音環境の性能を把握するため、2階の各室と1階の食堂居間ならびに2階の寝室と子供室の空間音圧レベル差を測定するとともに、2階の各室を音源室として食堂居間で床衝撃音レベルを測定した結果を報告する。

### 2. 実験方法

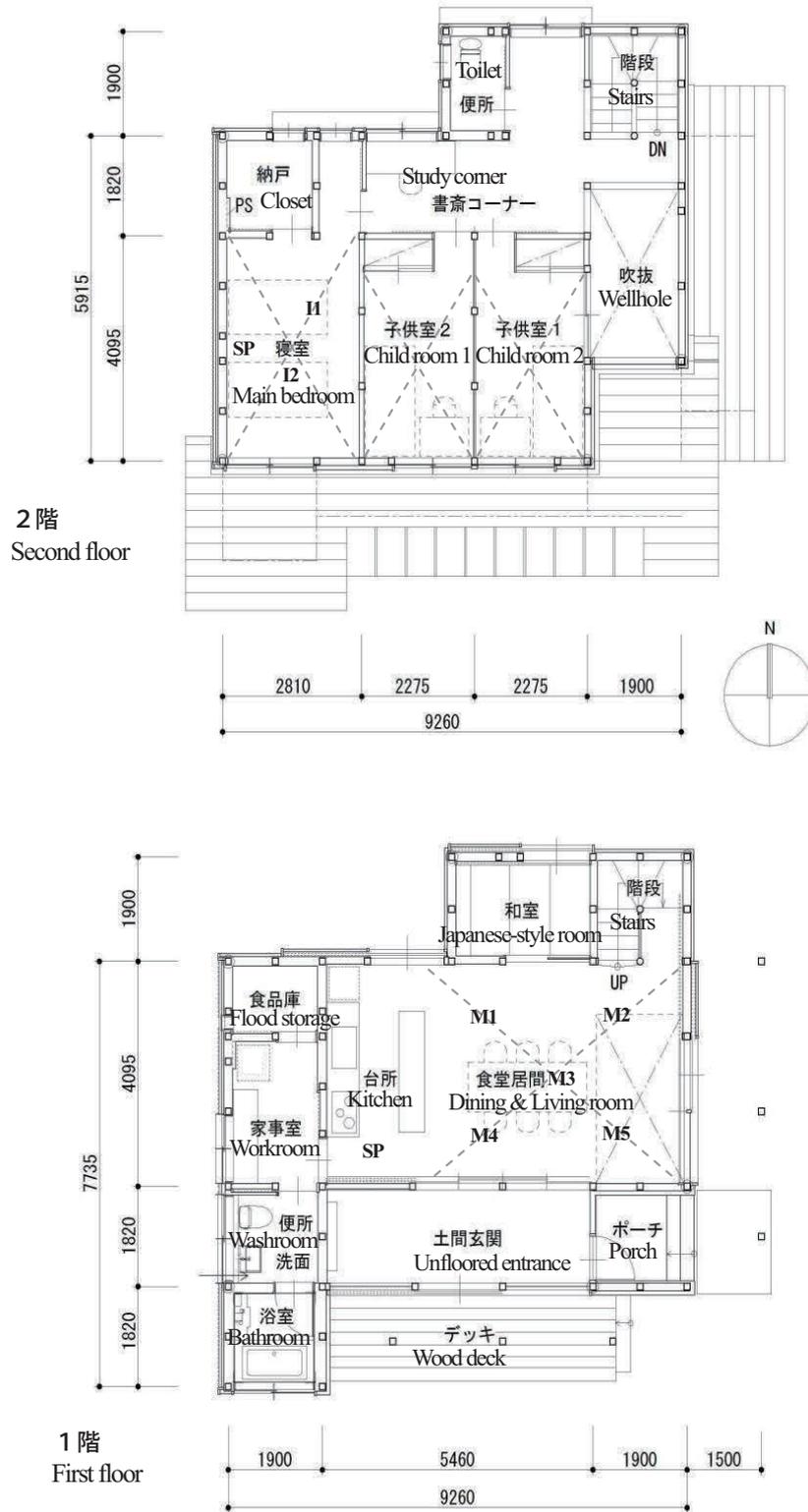
空間音圧レベル差と床衝撃音レベルの測定は、それぞれ JIS A 1417:2000 「建築物の空気音遮断性能の測定方法」、および JIS A 1418-1,-2:2000 「建築物の床衝撃音遮断性能の測定方法—第1部標準軽量衝撃源による方法・第2部標準重量衝撃源による方法」に準拠して行った。また、遮音性能評価は、JIS A 1419-1,-2:2000 「建築物及び建築部材の遮音性能の評価方法—第1部空気音遮断性能・第2部床衝撃音遮断性能」に基づいて行った。

モデル木造住宅の平面図および2階床の断面図を、それぞれ Fig. 1 と Fig. 2 に示す。空間音圧レベル差については、音響計測装置 (Brüel & Kjær PULSE Type 3560C) でスピーカー (Brüel & Kjær Omni Power Source 4292) を介してホワイトノイズを台所の一角で発生させ、2台の騒音計 (Brüel & Kjær Type 2250) で各室の等価騒音レベルを同時に10秒間測定し、各室5カ所の等価騒音レベルのパワー平均値の差から求めた。Fig.1中の食堂居間に示すように、破線で示した対角線の4等分点および中央の5カ所 (M1 ~ M5) を受音点とした。2階の各室についても同様に受音点を定めた。

原稿受付：平成24年10月4日 Received 4 October 2012 原稿受理：平成24年10月16日 Accepted 16 October 2012

1) 森林総合研究所構造利用研究領域 Department of Wood Engineering, Forestry and Forest Products Research Institute (FFPRI)

\* 森林総合研究所構造利用研究領域 〒305-8687 茨城県つくば市松の里1 Department of Wood Engineering, Forestry and Forest Products Research Institute (FFPRI), 1 Matsunosato, Tsukuba, Ibaraki 305-8687, Japan, e-mail: sue@ffpri.affrc.go.jp



I1,I2: 加振点 Floor impact point, M1~M5: 受音点 Sound receiving point, SP: スピーカー Speaker

図 1. 森林総合研究所モデル木造住宅の平面図  
Fig. 1. Floor plan of the wooden house constructed in the FFPRI.

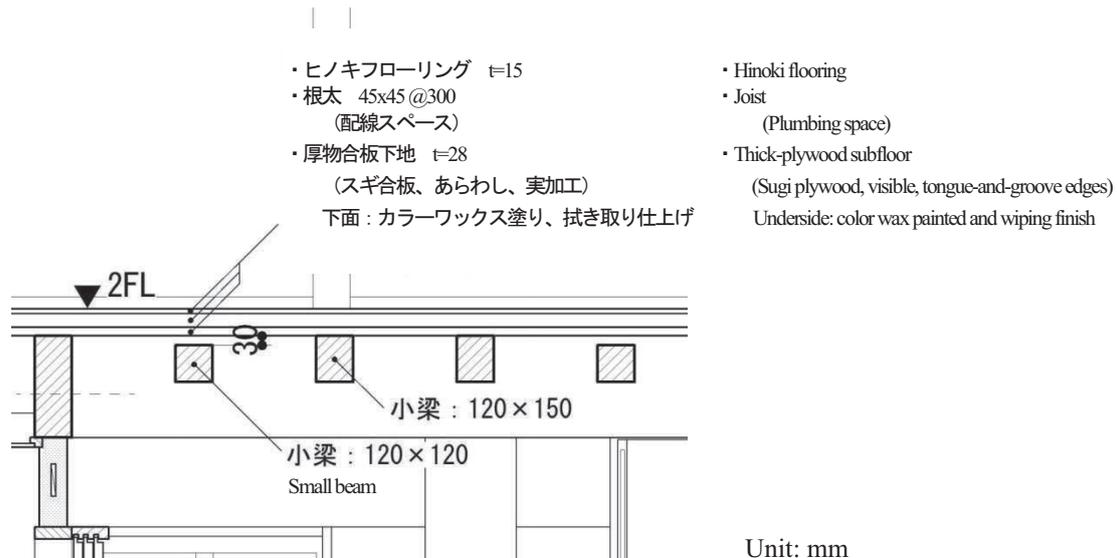


図 2. 森林総合研究所モデル木造住宅の 2 階床の断面図  
Fig. 2. Cross section of the second floor of the wooden house constructed in the FFPRI.

騒音計のマイクロホン、約 1.2m の高さに設置した。2 階の寝室と子供室 2 の間については、寝室側を音源室とした。Photo 1 は、スピーカーと騒音計を食堂居間に設置した状況を示している。

床衝撃音レベルについては、2 階の各室の対角線の 4 等分点の 1 カ所と中央を加振点 (I1,I2) とし、重量衝撃源としてインパクトボール (Photo 2)、軽量衝撃源としてタッピングマシン (Photo 3) をそれぞれ用いて、上述の音響計測装置によって測定した。重量床衝撃音については、マイクロホン (Brüel & Kjær Type 4190-L-001) を図 1 中の M1-M5 の位置に順次設置して測定した。軽量床衝撃音については、マイクロホンローテーター (Brüel & Kjær Type 3923) を 32 秒周期で回転させ、64 秒間測定した。

### 3. 結果及び考察

#### 3.1 空気音遮断性能

2 階の各室と 1 階の食堂居間、および 2 階の寝室と子供室 2 の室間音圧レベル差を測定した結果は、Fig. 3 に示す通りである。JIS A 1419-1 による遮音等級は、上下階の寝室と食堂居間で Dr-20、子供室 2 と食堂居間で Dr-15、子供室 1 と食堂居間で Dr-15 以下、2 階の寝室と子供室 2 で Dr-20 であった。子供室 1 と食堂居間および寝室と子供室 2 との間では、1kHz ~ 2kHz のオクターブ帯域で室間音圧レベル差が横ばいになっていることから、一部の音は吹抜 (Photo 4) あるいは Fig. 1 では示されていない出入口の木製板戸の隙間から迂回して伝搬していると考えられる。

#### 3.2 床衝撃音遮断性能

2 階の各室を音源室とし、1 階の食堂居間を受音室とし

て重量および軽量床衝撃音レベルを測定した結果は、それぞれ Fig. 4 と Fig. 5 に示す通りである。JIS A 1419-2 による遮音等級 (LH: 重量、LL: 軽量) は、二つの子供室でそれぞれ LH-75、LL-85、寝室については LH-70、LL-80 に達した。このような床衝撃音遮断性能の水準は、デザインを重視して梁あらわしの床構造とするため 1 階の天井を設けていないこと、あるいは Fig 2 に示すように軸材に直貼りされた 28mm 厚の構造用スギ厚物合板下地の上に 45mm の配管スペースを設けて 15mm 厚のヒノキ単層フローリングが張られた二重床構造であることに起因すると推察される。

### 4. まとめ

本モデル木造住宅には空気音や床衝撃音が伝わりやすい部分があることから、楽器演奏やオーディオ機器の再生などには音量の調整が必要になったり、家族構成によっては騒音を発生させない工夫が求められたりする場合も考えられる。したがって、本モデル木造住宅は、高遮音性を必要としない一世帯向け戸建て住宅のモデルの一つに位置付けられる。

### 謝辞

本研究は、森林総合研究所運営費交付金プロジェクト (200903 : 地域材を利用した安全・快適住宅の開発と評価) による。

### 引用文献

森林総合研究所 (2009) “森林総合研究所設計コンペ「近未来の木造住宅」—安全・快適・高耐久、省エネ— 受賞作品集”、森林総合研究所第 2 期中期計画成果 9 (安全・安心—5) .



写真 1. 室間音圧レベル差測定のために 1 階の食堂居間に設置された無指向性スピーカーと騒音計  
 Photo 1. The Omnidirectional speaker and sound level meter which were installed in the dining & living room to measure the sound pressure level difference between the rooms.



写真 2. インパクトボール（重量床衝撃源）  
 Photo 2. Impact ball (heavy floor-impact source).



写真 3. タッピングマシン（軽量床衝撃源）  
 Photo 3. Tapping machine (light floor-impact source).



写真 4. 食堂居間から見た吹抜  
Photo 4. A wellhole from the dining & living room.

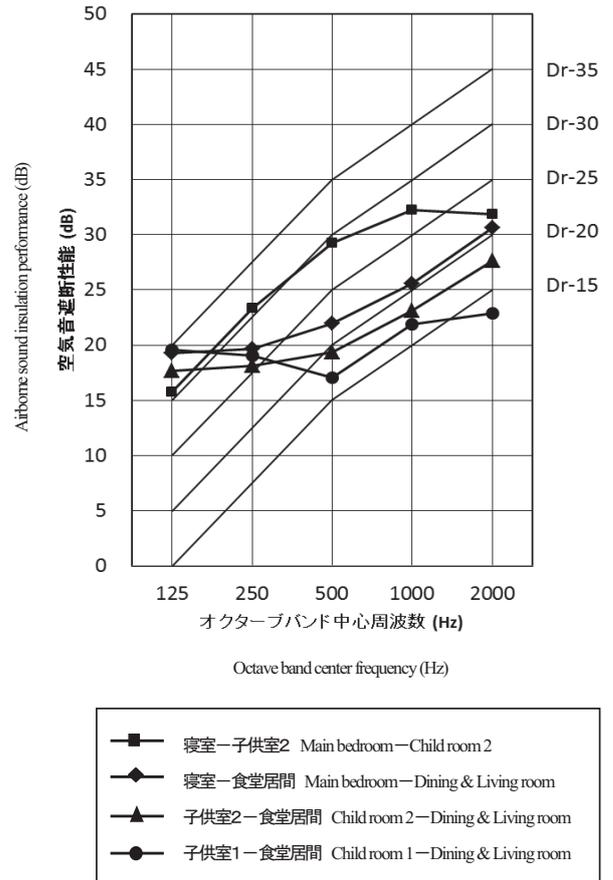


図 3. 森林総合研究所モデル木造住宅の空気音遮断性能  
Fig. 3. Airborne sound insulation performance of the wooden house constructed in the FFPRI.

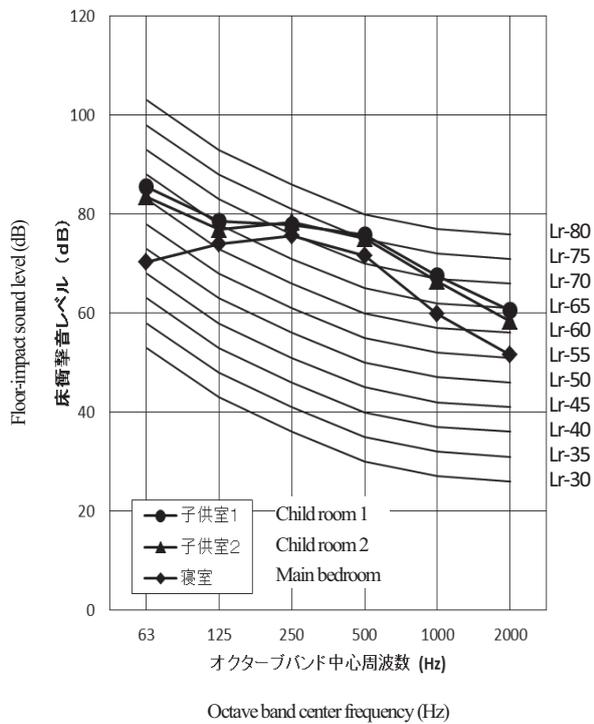


図 4. 森林総合研究所モデル木造住宅の重量床衝撃音遮断性能  
Fig. 4. Heavy floor-impact sound insulation performance of the wooden house constructed in the FFPRI.

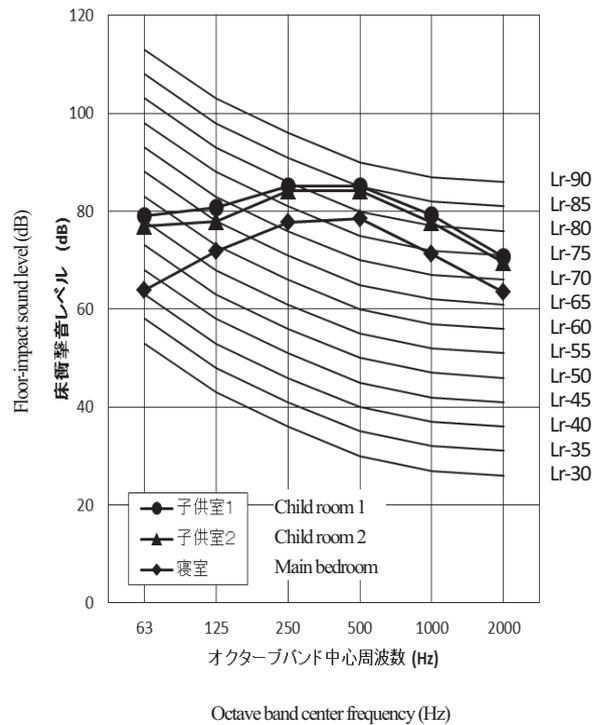


図 5. 森林総合研究所モデル木造住宅の軽量床衝撃音遮断性能  
Fig. 5. Light floor-impact sound insulation performance of the wooden house constructed in the FFPRI.



担当者 御中  
To the person concerned

独立行政法人 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い致します。

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 : + 81-29-873-3211 Fax : + 81-29-873-0844  
e-mail : kanko@ffpri.affrc.go.jp

---

2012年12月 発行 森林総合研究所研究報告 第11巻4号 (通巻425号)

編 集 人 森林総合研究所研究報告編集委員会

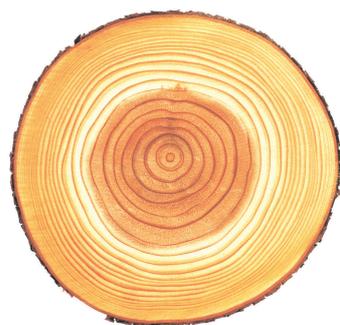
発 行 人 独立行政法人 森林総合研究所  
〒305-8687 茨城県つくば市松の里1番地  
電話 : 029-873-3211 Fax : 029-873-0844

製 版・印 刷 松枝印刷株式会社  
〒303-0034 茨城県常総市水海道天満町2438  
電話 : 0297-23-2333 Fax : 0297-23-5865

©2012 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下さい。



## page197

花粉の少ないスギ品種をクローンおよび実生で普及した場合における雄花減少量の予測  
：玉城 聡、栗延 晋

Prediction of pollen reduction using selected less pollen variety of Sugi (*Cryptomeria japonica*)  
propagated by clonal cuttings and open pollinated progenies from clonal seed orchards  
by TAMAKI Satoshi and KURINOBU Susumu

## page207

日本の森林における枯死木、堆積有機物、土壌の炭素蓄積量：森林土壌インベントリの第1報（英文）  
：鶴川 信、高橋 正通、森貞 和仁、竹内 学、松浦 陽次郎、吉永 秀一郎、荒木 誠、田中 永晴、  
池田 重人、三浦 寛、石塚 成宏、小林 政広、稲垣 昌宏、今矢 明宏、南光 一樹、橋本 昌司、  
相澤 州平、平井 敬三、岡本 透、溝口 岳男、鳥居 厚志、酒井 寿夫、大貫 靖浩、金子 真司

Carbon stocks of dead wood, litter, and soil in the forest sector of Japan:

general description of the National Forest Soil Carbon Inventory

by UGAWA Shin, TAKAHASHI Masamichi, MORISADA Kazuhito, TAKEUCHI Manabu,  
MATSUURA Yojiro, YOSHINAGA Shuichiro, ARAKI Makoto, TANAKA Nagaharu, IKEDA Shigeto,  
MIURA Satoru, ISHIZUKA Shigehiro, KOBAYASHI Masahiro, INAGAKI Masahiro, IMAYA Akihiro,  
NANKO Kazuki, HASHIMOTO Shoji, AIZAWA Shuhei, HIRAI Keizo, OKAMOTO Toru,  
MIZOGUCHI Takeo, TORII Atsushi, SAKAI Hisao, OHNUKI Yasuhiro and KANEKO Shinji

## page223

四国のヒノキ強度間伐林分における残存木の葉の水分特性  
：宮本 和樹、奥田 史郎、野口 麻穂子、伊藤 武治、佐藤 重穂

Leaf water relations of residual trees in heavily thinned hinoki cypress stands in Shikoku, Japan  
by MIYAMOTO Kazuki, OKUDA Shiro, NOGUCHI Mahoko, ITOU Takeharu and SATO Shigeho

## page233

近赤外域ハイパースペクトルカメラを用いた、樹木葉代謝物質の解析方法の提案  
：北岡 哲、宇都木 玄、松田 修、上村 章、原山 尚徳、飛田 博順、射場 厚

Near-infrared hyper-spectral techniques for the quantification of starch  
and sucrose in the leaves of cool temperate deciduous broad-leaved trees

by KITAOKA Satoshi, UTSUGI Hajime, MATSUDA Osamu, UEMURA Akira,  
HARAYAMA Hisanori, TOBITA Hiroyuki and IBA Koh

## page243

20年前に高速道路沿いに建設されたカラマツ製遮音壁の防音性能（英文）  
：末吉 修三、塩田 正純、坂田 淳、柴田 直明、吉野 安里

Sound insulation performance of wood (*Larix kaempferi*)  
sound barriers constructed along an expressway twenty years ago  
by SUEYOSHI Shuzo, SHIODA Masazumi, SAKATA Jun,  
SHIBATA Naoaki and YOSHINO Anri

## page249

森林総合研究所モデル木造住宅の性能評価  
—空気音および床衝撃音遮断性能—  
：末吉 修三、宇京 斉一郎、原田 真樹

Performance evaluation of the wooden house constructed  
in the Forestry and Forest Products Research Institute  
- Airborne and floor-impact sound insulation -  
by SUEYOSHI Shuzo, UKYO Seiichiro and HARADA Masaki