森林総合研究所研究報告

Vol.10-No.3(No.420)

BULLETIN

of the
Forestry and
Forest Products
Research Institute









September 2011 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

藤枝 基久 FUJIEDA Motohisa (Associate Research Coordinator, FFPRI)

Editor

立花 敏 TACHIBANA Satoshi (Graduate School of Life and Environmental Sciences, University of Tsukuba)

豊川 勝生 TOYOKAWA Katsumi (Graduate School of Agriculture, Tokyo University of Agriculture)

森 茂太 MORI Shigeta (Department of Plant Ecology, FFPRI)

稲垣 善之 INAGAKI Yoshiyuki (Department of Forest Site Environment, FFPRI) 清水 貴範 SHIMIZU Takanori (Department of Soil and Water Conservation, FFPRI) 中井裕一郎 NAKAI Yuitiro (Department of Meteorological Environment,FFPRI) 神崎 菜摘 KANZAKI Natsumi (Department of Forest Microbiology, FFPRI) 佐藤 大樹 SATOU Hiroki (Department of Forest Entomology, FFPRI) 仁

村田 MURATA Hitoshi (Department of Applied Microbiology, FFPRI) 藤原 健 FUJIWARA Takeshi(Department of Wood Properties, FFPRI)

奥田 裕規 OKUDA Hironori (Department of Forest Policy and Economics, FFPRI)

堀野 眞一 HORINO Shinichi (Tohoku Research Center, FFPRI) 磯野 昌弘 ISONO Masahiro (Tohoku Research Center, FFPRI)

倉本 哲嗣 KURAMOTO Noritsugu (Forest Tree Breeding Center, FFPRI)

荒木 誠 ARAKI Makoto (Research Information Division, FFPRI)

This journal is indexed in CAB Abstracts.

表紙写真 Photograph in Cover

新潟県苗場山のブナ林

Fagus crenata trees in Mt.Naeba, Niigata Prefecture.

青森県八甲田山(高田大岳)のオオシラビソ林

Mt.Takadaodake (Abies mariesii forest), Hakkodasan, Aomori Prefecture.

(本文165ページ)

人工採食場で収集されたアカネズミによるコナラ種子の食痕

Feeding remains of Quercus serrata by Apodemus speciosus collected at the artificial feeding site.

森林総合研究所研究報告 第10巻3号(通巻420号)2011.9

目 次

HIII	~
	日本の枯死針葉樹材の分解度による材密度の推定
	酒井 佳美・高橋 正通・石塚 成宏・稲垣 善之・松浦 陽次郎・
	雲野 明・中田 圭亮・長坂 晶子・丹羽 花恵・澤田 智志・
	北条 良敬・玉木 泰彦・白井 珠美・武田 宏・相浦 英春・
	山内 仁人・島田 博匡・岩月 鉄平・山場 淳史・山田 隆信・
	前田 一·室 雅道 ······ 135
	去川森林理水試験地における流出水の水質
	吉永 秀一郎・稲垣 善之・山田 毅・
	三浦 覚・清水 晃・清水 貴範・
	小川 泰浩・宮縁 育夫 ······ 147
短	報 アカネズミの食性調査手法の簡易化と環境教育における利用の試み 林 典子・井上 真理子・大石 康彦
研究	資料
	ベイヒバ無欠点小試験体の強度性能
	一曲げ、縦圧縮、せん断、めり込み —
	井道 裕史・長尾 博文・加藤 英雄 173

Bulletin of FFPRI, Vol.10. No.3 (No.420) September 2011 CONTENTS

Original article

	Estimate of wood densities of dead wood by decay classes in Japan SAKAI Yoshimi, TAKAHASHI Masamichi, ISHIZUKA Shigehiro, INAGAKI Yoshiyuki, MATSUURA Yojiro, UNNO Akira, NAKATA Keisuke, NAGASAKA Akiko, NIWA Hanae, SAWATA Satoshi, HOUJYOU Yoshitaka, TAMAKI Yasuhiko, SHIRAI Tamami, TAKEDA Hiroshi, AIURA Hideharu, YAMANOUCHI Masato, SHIMADA Hiromasa, IWATSUKI Teppei, YAMABA Atsushi, YAMADA Takanobu,
	Maeda Hajime and Muro Masamichi 135
	Streamwater chemistry at the Sarukawa Experimental Watershed YOSHINAGA Shuichiro, INAGAKI Yoshiyuki, YAMADA Tsuyoshi, MIURA Satoru, SHIMIZU Akira, SHIMIZU Takanori, OGAWA Yasuhiro and MIYABUCHI Yasuo
Note	
	Simple methods for gathering food remains of wood mice and trials in education programs HAYASHI Noriko, INOUE Mariko and OISHI Yasuhiko
Rese	arch material
	Strength properties of the yellow cypress for small clear specimens - Bending strength, compressive strength parallel to the grain, shear strength parallel to the grain, and compressive strength perpendicular to the grain - IDO Hirofumi, NAGAO Hirofumi and KATO Hideo

文 (Original article) 論

日本の枯死針葉樹材の分解度による材密度の推定

酒井佳美 ^{1)*}、高橋正通 ²⁾、石塚成宏 ³⁾、稲垣善之 ¹⁾、松浦陽次郎 ⁴⁾、雲野 明 ⁵⁾、中田圭亮 ⁵⁾、長坂晶子 ⁵⁾、丹羽花恵 ⁶⁾、澤田智志 ⁷⁾、北条良敬 ⁸⁾、玉木泰彦 ⁹⁾、白井珠美 ¹⁰⁾、武田 宏 ¹¹⁾、相浦英春 ¹²⁾、山内仁人 ¹³⁾、島田博匡 ¹⁴⁾、岩月鉄平 ¹⁵⁾、山場淳史 ¹⁶⁾、山田隆信 ¹⁷⁾、前田 一 ¹⁸⁾、室 雅道 ¹⁹⁾

Estimate of wood densities of dead wood by decay classes in Japan

Yoshimi SAKAI^{1)*}, Masamichi TAKAHASHI²⁾, Shigehiro ISHIZUKA³⁾, Yoshiyuki INAGAKI¹⁾, Yojiro MATSUURA⁴⁾, Akira UNNO⁵⁾, Keisuke NAKATA⁵⁾, Akiko NAGASAKA⁵⁾, Hanae NIWA⁶⁾, Satoshi SAWATA⁷⁾, Yoshitaka HOUJYOU⁸⁾, Yasuhiko TAMAKI⁹⁾, Tamami SHIRAI ¹⁰⁾, Hiroshi TAKEDA¹¹⁾, Hideharu AIURA¹²⁾, Masato YAMANOUCHI¹³⁾, Hiromasa SHIMADA¹⁴⁾, Teppei IWATSUKI¹⁵⁾, Atsushi YAMABA¹⁶⁾, Takanobu YAMADA¹⁷⁾, Hajime Maeda¹⁸⁾ and Masamichi Muro¹⁹⁾

In systematic surveys for estimating dead wood biomass in forest ecosystems, the dead wood biomass is calculated by multiplying the volume by the wood density of the decay classes. In this study, we measured the mean wood densities in each decay class using dead wood provided by the non-commercial thinning of coniferous plantation forests. In addition, we compared the wood densities of 5 coniferous species (Cryptomeria japonica, Chamaecyparis obtusa, Larix kaempferi, Picea glehnii and Abies sachalinensis), three states (fallen logs, stumps, and snags), prefectures and diameter classes (5-10cm, 10-15cm, 15-20cm, 20-40cm) to clarify the effects of the parameters to variations in wood density. The mean wood density (g cm³) measured from decay classes 1 to 4 were 0.33, 0.27, 0.19, 0.18 for C. japonica, 0.38, 0.31, 0.22, 0.17 for C. obtusa and 0.37, 0.32, 0.23, 0.13 for L. kaempferi. We found that in early decay classes, wood density significantly differs by tree species, diameter classes and states. However, in later decay classes, we cannot detect significant difference in the wood densities because of increased variations. The site effects on the wood densities did not show in early decay process among tree species. These results suggest that independent wood densities should be applied by tree species, diameter classes and state in decay class and 2 for the accurate estimation of dead wood biomass in forest ecosystems. Then, we should also consider the variations of wood density by sites in decay class 3, 4 and 5 due to the different decay processes under different climate conditions.

Key words: wood density, Japanese cedar, Hinoki cypress, decay class, carbon stock

原稿受付:平成 22 年 12 月 27 日 Received 27 December 2010 原稿受理: 平成 23 年 6 月 3 日 Accepted 3 June 2011

- 1) 森林総合研究所立地環境研究領域 Department of Forest Site Environment, Forestry and Forest Products Research Institute
- 2) 森林総合研究所研究企画科 Research Planning and Coordination Department, Forestry and Forest Products Research Institute
- 3) 森林総合研究所九州支所 Kyushu Research Center, Forestry and Forest Products Research Institute
- 4) 森林総合研究所**国際**連携推進拠点 Bureau of International Partnership, Forestry and Forest Products Research Institute 5) 北海道立総合研究所國際構森林研究本部林業試験場 Hokkaido Forestry Research Institute

- 6) 岩手県農林水産部林業振興課 Agriculture, Forestry and Fisheries Division, Iwate prefecture
 7) 秋田県農林水産技術センター森林技術センター Institute of Forestry, Akita Prefectural Agriculture, Forestry and Fisheries Research Center
 8) 茨城県県北農林事務所 Ibaraki Prefectural Kenpoku Agriculture and Forestry Management Office
 9) 埼玉県農林総合研究センター Saitama Prefecture Agriculture and Forestry Research Center
- 10) 千葉県森林課 Forest Division Office, Chiba Prefectural Government
- 11) 新潟県森林研究所 Niigata Prefectural Forest Research Institute
- 12) 富山県農林水産総合技術センター森林研究所 Forestry Research Institute, Toyama Prefectural Agricultural, Forestry & Fisheries Research Center
- 13) 長野県林業総合センター Nagano Prefectural Forestry Research Center
- 14) 三重県林業研究所 Mie Prefectural Science and Technology Promotion Center, Forestry Research Division
- 15) 京都府立大学生命環境学部附属演習林本部 University Forests Office, Faculty of Life and Environmental Sciences, Kyoto Prefectural University

- | Frefectural Oniversity | 16 | 広島県立総合技術研究所林業技術センター | Hiroshima Prefectural Technology Research Institute, Forestry Research Center | 17 | 山口県森林企画課 | Forestry Planning Division, Yamaguchi Prefectural Government | 18 | 長崎県農林技術開発センター | Nagasaki Agriculture and Forestry Technical Development Center | 19 | 元大分県農林水産研究センター | Oita Prefectural Agriculture, Forestry and Fisheries Research Center | * 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 Department of Forest Site Environment, Forestry and | Forestry Indiana | Forestry Indian Forest Products Research Institute (FFPRI), 1 Matsunosato, Tsukuba, Ibaraki 305-8687, Japan, e-mail: yoshimis@ffpri.affrc.go.jp

要旨

我が国全体の人工林の枯死木量の推定精度を向上させるため、針葉樹の間伐放置材を利用して分解度別の材密度を測定した。材密度は樹種(スギ,ヒノキ,カラマツ,アカエゾマツ,トドマツ)や形態(倒木,根株,立枯木)、地域(15 道府県)および直径クラス(5-10cm, 10-15cm, 15-20cm, 20-40cm)に分けて比較した。分解度 1 から分解度 4 までの樹種別の平均材密度(g cm³)は、スギでは、順に 0.33、0.27、0.19、0.18、ヒノキは、0.38、0.31、0.22、0.17、カラマツは、0.37、0.32、0.23、0.13 であった。材密度は分解度 1~2 の分解初期には、樹種や直径クラス、形態で有意な差があったが、分解度 3~4 になるとばらつきが大きくなり有意差はなかった。また、樹種や分解度における材密度の地域間差は、分解初期にはみられず、分解度 2 以上は一部で有意な場合もあったが、全体の傾向としては明瞭でなかった。これらの結果から、枯死木現存量の推定精度を向上させるためには、分解度 1 と 2 については樹種、直径クラス、形態に分けて材密度を適用することが望ましい。また、分解度 3 以上では、林分間のばらつきが大きくなるため、地域間差を生じる原因の解明が今後の研究として期待される。

キーワード:材密度、スギ、ヒノキ、分解度、炭素量

1 はじめに

枯死木は森林生態系の重要な構成要素であり、その 形態から倒木、立枯木、そして根株に分けられる。枯 死木は様々な機能を持っており、例えば、森林生態系 の炭素循環における重要な炭素プールとして機能して いる。さらに、枯死木は様々な生物の生息場所となっ ており、生物多様性の維持に重要な役割を果たしてい る (Harmon et al., 1986; 阿部, 2007)。 欧米では生物 多様性を保全するため、人工林においても伐採後に材 を放置する、もしくは林地残材として放置する事例も みられる (Ekbom et al., 2006; Jönsson and Jonsson, 2007)。一方、間伐木をバイオマスエネルギーなどに 積極的に利用しようとする考えもあり(迫田ら,2001; 石栗ら, 2006; 鈴木ら, 2007)、我が国でも取り組みが 増えている。そのため、養分循環や炭素固定、生物多 様性の保全等の森林の機能を維持しつつ枯死木を利用 するためには、その適正な管理が求められている。

人工林の経営においては、伐採方法や間伐の強度、 材搬出後の林地残材の処理方法の違いによって、枯死 木の現存量は大きく変動する。また、人工林の枯死木 現存量は時間に伴って変化し、皆伐直後の新植した若 齢林では林地残材によって最大の現存量となり、その 後残材の分解により徐々に減少し、老齢になるにつれ て自然枯死により再び増加するU字型のカーブを描く ことが知られている (Covington, 1981; Howard et al., 2004)。台風や竜巻による風倒害などの大規模な攪乱 イベントも枯死木の現存量変化に影響する(酒井ら、 2004)。また、一般に天然林は人工林に比べて枯死木 現存量が多いことも報告されている (Siitonen et al., 2000; Rouvinen et al., 2002; Gibb et al., 2005)。 枯死 木の分解は時間がかかるため、長期にわたる連続的な 観測が難しいが、分解度を指標として枯死木の分解程 度やその変化を把握することができる (Graham and Cromack, 1982; Harmon et al., 1986; Sollins et al., 1987; Harmon et al., 1995; Skovsgaard et al., 2006). 分解度は、倒木の枝や樹皮の状態、苔の付着の程度や 辺材や心材への分解の進行程度から、5 段階 (Graham and Cromack, 1982; Sollins, 1982; Harmon et al., 1986; Baker et al., 2007)、8 段階 (Hofgaard, 1993)、6 段階 (林野庁計画課, 1999)の区分が提案されているが、Graham and Cromack (1982)の5 段階の方法を基礎にしたものが世界的に広く多く用いられている。

枯死木は森林生態系における重要な炭素プールであるため、京都議定書では報告しなければならない炭素量となっている。そのため、全国にわたる広域の枯死木現存量の推定方法の開発と精度向上が求められている(Gibb et al., 2005; Böhl and Brändli, 2007; Ter-Mikaelian et al., 2008)。枯死木現存量の最も一般的な推定方法は、材積と分解度ごとに測定された材密度との積として計算される。そこで、分解度ごとの枯死木の材密度データを全国的に収集し、推定精度の向上を図る必要がある。

本研究では、日本の枯死木現存量の推定精度を高めるため、スギ、ヒノキ、カラマツ、アカエゾマツ、トドマツの枯死木の分解度別の材密度を15道府県で測定し、地域(道府県)や形態(倒木、根株、立枯木)、材の直径クラス間による材密度の違いを比較した。これらの結果から、分解度を用いて枯死木現存量を判定するために必要な材密度の推定について考慮すべき問題を検討した。

2調查地

間伐などの施業履歴が明らかな人工林を選び、2005年6月から2006年2月の間に調査を行った。調査対象樹種の植栽面積や地域の気象条件を考慮し、日本を南北に広く網羅するように15の道府県で調査を行った。アカエゾマツとトドマツは北海道、カラマツは北海道、岩手県、長野県、スギは秋田県、茨城県、千葉県、富山県、山口県、大分県、ヒノキは新潟県、埼玉県、三重県、京都府、広島県、長崎県に調査地を設定した(Table 1)。各道府県における林分の選定では、間伐後の経過年数が1年以内、3~5年、6~10年、そ

Table 1 調査地の概要

Table 1 Data set for study sites

植裁樹種	ŭ	道府県名	調査 林分数	緯度	経度	標高	間伐後 経過年
Planted species	Prefecture		Number of site	Location N. Lat.	E. Long.	Elevation (m (a.s.l.))	Years since death (years)
				Min ~ Max	Min ~ Max	Min ~ Max	Min ~ Max
スギ	秋田	Akita	10	39°42' ~ 40°16'	140°24' ~ 140°41'	$110 \sim 450$	1 ~ 20
Cryptomeria japonica	茨城	Ibaraki	15	36°35' ~ 36°36'	140°30' ~ 140°34'	$130 \sim 390$	1 ~ 17
	千葉	Chiba	24	35°09' ~ 35°15'	139°57' ~ 140°03'	110 ~ 300	1 ~ 10
	富山	Toyama	8	36°33' ~ 36°33'	137°10' ~ 137°11'	$165 \sim 210$	0 ~ 6
	山口	Yamaguchi	8	34°05' ~ 34°14'	131°22' ~ 131°32'	150 ~ 390	1 ~ 18
	大分	Oita	8	33°08' ~ 32°54'	131°33' ~ 131°54'	$130 \sim 470$	1 ~ 13
ヒノキ	埼玉	Saitama	8	36°00' ~ 36°05'	138°52' ~ 139°09'	430 ~ 930	1 ~ 15
Chamaecyparis obtusa	新潟	Niigata	15	37°37' ~ 38°32'	138°49' ~ 139°38'	60 ~ 155	1 ~ 6
	三重	Mie	8	34°20' ~ 34°24'	136°20' ~ 136°24'	135 ~ 693	0 ~ 13
	京都	Kyoto	8	35°14' ~ 35°20'	135°05' ~ 135°30'	80 ~ 450	1 ~ 20
	広島	Hiroshima	8	34°31' ~ 35°03'	132°51' ~ 133°10'	295 ~ 748	1 ~ 13
	長崎	Nagasaki	19	32°49' ~ 32°58'	130°01' ~ 130°11'	50 ~ 820	1 ~ 18
カラマツ	北海道 1	Hokkaido1	8	43°05' ~ 43°11'	142°47' ~ 142°53'	260 ~ 360	1 ~ 12
Larix kaempferi	岩手	Iwate	8	39°43' ~ 39°46'	141°00 ~ 141°21'	225 ~ 816	1 ~ 14
**	長野	Nagano	15	36°10' ~ 36°12'	138°04' ~ 138°07'	1035 ~ 1625	1 ~ 18
アカエゾマツ	北海道 2	Hokkaido2	8	44°31' ~ 44°42'	142°20' ~ 142°33'	250 ~ 420	1 ~ 7
Picea glehnii							
トドマツ Abies sachalinensis	北海道 3	Hokkaido3	8	41°46' ~ 41°49'	140°59' ~ 141°02'	35 ~ 312	1 ~ 11

して $11 \sim 20$ 年となる林分に、それぞれ 2 林分以上の設定を目標としたが、一部の地域では 1 林分または欠測となった。調査地の基本情報の詳細は酒井ら (2008) に掲載した。

3 調査方法

試料採取と分解度の判定

各調査林分では、その林分の枯死木を代表する平均的な場所を目視で選び10m×10mの方形調査区を設定した。区内に存在する放置された直径5cm以上の倒木と根株、そして立枯木を調査対象木とした。本調査では、人工林の間伐後の放置材を対象としており、枯死木は直径が細いものが多いと想定されたため、調査対象木を直径5cm以上と設定した。

枯死木の分解度は、1 本の倒木でも場所によって異なることがある。本研究では、分解度と材密度の関係を明らかにするため、分解度判定は倒木・根株・立枯木の全体ではなく、密度測定用の円板を採取した部分で行った。分解度 (Dc) は Grahum and Cromack (1982) によって定義された $1\sim5$ 段階を使用した (Table 2)。倒木は 4 段階 (5-10cm, 10-15cm, 15-20cm, 20-40cm) の直径に分け、そのクラスごとの採取枚数が 1 調査区当たり $3\sim5$ 枚の円板を採取した。原則として、1 本の倒木から 1 つの直径クラスのみを選定して円板を採取したが、調査区内の倒木が少なく規定の枚数に達しない場合には、同じ個体から複数の直径クラスの円板を採取した。根株については、根株の高さの 1/2 付近の直径を基準に 4 段階の直径クラスに分け、

Table 2 枯死木の外観の変化と分解度の判定基準 (Graham and Cromack, 1982)

Table 2 Decay classes for categorizing dead wood based on Graham and Cromack (1982)

外観の特徴		5.	分解度 Decay cla	SS		
Appearance	1	2	3	4	5	
幹と枝	幹の構造はしっか りしている。大部 分の枝が残る。	辺材の色が分解に よって変色。一部 の枝は残る。	辺材も心材も分解 によって材が変色。 幹の一部は形が崩 れ沈下し始める	大部分が分解に よって変質。幹は 形状が崩れて大き く沈下しする	材の大部分は表層 土壌に被われる	
樹皮	樹皮は幹全体に しっかりと付着	樹皮の大部分は残るが、部分的には がれる	広範囲に樹皮がな いところがある	ほとんどなし	なし	
幹の硬さと 形状	幹は硬い	辺材が部分的に柔 らかくなる	大きなブロック状 に割れる	小さなブロック状 に割れる。一部に もろいところがあ る。	幹全体に分解が進 み、スポンジのよ うに柔らかい部分 がある。破片は細 かくなる。	
苔,草本と 稚樹や実生	なし	苔が一部に発生	苔に被われる部分 が増え、一部に草 本や実生が発生	幹の大部分が苔や リターに被われ、 草本や稚樹が生育	幹の大部分が苔や リターに被われ、 草本や幼樹が生育	

その位置の円板を採取した。採取枚数は倒木と同様 $3 \sim 5$ 枚とした。立枯木は根元で切り倒し、倒木と同様に処理した。なお、円板の厚さは直径が 5-10cm の材については 10-15cm 程度、直径 10cm 以上の材については 3-8cm 程度となるように採取した。

材密度の計算

採取した円板は現場で、あるいは研究室に持ち帰った後できるだけ早く、円板の全生重量 (g) を測定し、厚さと樹皮を含む直径を測定して体積を算出した。体積 (V) はスマリアン式を用いて算出した (大内,1989)。

$$V = \frac{\pi}{4} l \left(\frac{d_b^2 + d_u^2}{2} \right)$$
 (1)

l は円板の厚さ、 d_b は円板の上面の直径、 d_u は円板の下面の直径、 π は円周率である。円板は 70° で一週間程度乾燥し重量 (g) を測定した。円板の乾燥重量に対する採取時の水分重量の比を含水比とした。円板の体積と乾燥重量からと材密度 Wd $(g\ cm^{-3})$ を計算した。

倒木の材密度の全国平均推定

倒木、根株と立枯木のうち、近似式を作成するのに十分な試料が得られた倒木についておこなった。本調査では分解度 4 や分解度 5 の試料が得られない地域が多かった。そこで、測定できなかった材密度を、得られたデータを用いて作成した近似式から推定した。分解度 Dc (1 \sim 4) と材密度 Wd (g cm⁻³) の関係を指数関数を用いて近似し、分解度 $1\sim$ 4 の材密度を推定した。

$$Wd = a \exp(-k Dc)$$
 (2)

a、k は定数である。

材密度は分解度 $1 \sim 4$ の道府県別の各調査林分内平均材密度を用いて計算した。さらに分解度 5 に至るまで近似式 (2) に従って分解すると仮定して、分解度 5 の材密度を推定した。なお、アカエゾマツの場合、分解度 $1 \sim 2$ の試料しか採取できなかった。アカエゾマツの分解度と材密度の既往の報告はないので、Picea 属であるエゾマツ(Picea jezoensis)のデータを加えて、アカエゾマツ・エゾマツとして材密度を推定した。エゾマツは、北海道上川南部森林管理署内の幾寅天然林択伐試験地で採取した。試験地内の分解度 $3 \sim 4$ の倒木から厚さ 5cm 程度の円板を採取し、直径と厚さを測定したあとに、70C° で一週間程度乾燥し重量 (g) を測定した。(1) 式を用いて計算した円板の体積と乾燥重量からと材密度 Wd (g cm⁻³)を計算した。なお、これらの試料は直径によるクラス分けはしていない。

統計

材密度は全て分解度別に計算した。地域(道府県)

ごとに樹種別の倒木と根株の材密度を計算した。具体的には、調査林分内で採取された複数枚の円板を用いて調査林分内平均材密度を計算し、それぞれ道府県に分けて平均値を計算した。地域をまとめた樹種ごとの材密度平均値は、上記の調査林分内平均材密度を形態ごとに分けて全て用いて平均値を計算した。立枯木については、試料を得られた調査林分が非常に少ないため地域別の集計は行わなかった。立枯木の樹種別の平均材密度結果は Table 4 に記載し、形態間の比較にとどめた。

樹種別に材密度の形態間差、直径クラス間差の比較には一元配置分散分析 (ANOVA) を用いて群間の比較を行った。同様に、樹種と形態 (倒木、または根株) ごとに各分解度における材密度の地域間差の比較、および時間経過に伴う材密度変化の地域間差の比較を ANOVA による群間の比較で行った。ANOVA の F 検定で p < 0.05 で有意だった場合には、Tukey's test を用いて多重比較を行った。形態間の比較で立枯木のデータがない場合には、倒木と根株の平均材密度の比較を t 検定でおこなった。これらの比較では、比較対象とする材密度データを取得した調査林分が 2 林分以上である道府県のデータを用いた。

4 結果

各分解度における材密度の地域間差

倒木と根株について分解度ごとに材密度の地域間差 (道府県間差)を比較した (Fig. 1、Table 3)。樹種別に 材密度の地域間差をみると、倒木ではスギの分解度 3 (p=0.01)、根株ではスギの分解度 2 (p=0.04)、カラマツの分解度 1 (p=0.02) と 2 (p=0.01) で有意な差があった。いずれの樹種も、分解度が高くなるにつれて平均値のばらつきは大きくなり、標準偏差も大きくなる傾向にあった。このように、樹種や分解度によって地域間差が有意な場合もあるが、全体の傾向としては樹種や分解度における地域間差は明瞭でなかった。そこで、これより後の解析結果では道府県別には分けずに分析した。

材密度の樹種間差

分解の進行にともなう材密度の変化を明らかにするため倒木と根株に分けて樹種別に比較した。分解初期には倒木も根株も材密度の樹種間差が見られたが、倒木では分解度 3 以降、根株では分解度 4 以降では材密度の有意差は見られなくなった (Fig. 2)。また、分解度が大きくなるにつれて標準偏差は大きくなった。樹種ごとに初期材密度 (スギ; $0.314~\rm g~cm^3$, $\rm L/$ +; $0.401~\rm g~cm^3$, $\rm h)$ $\rm -2$ $\rm -2$ $\rm -3$ $\rm -$

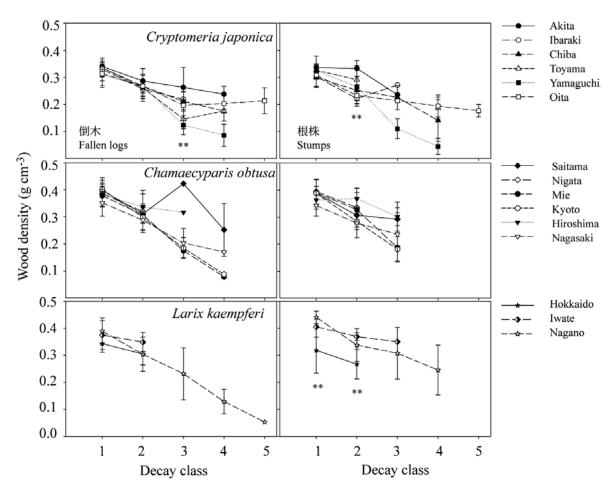


Fig. 1 地域別に比較した倒木と根株の分解度の進行に伴う材密度の変化 地域間の材密度を、調査林分数が 2 林分以上ある道府県について一元配置分散分析で比較した。 **: p < 0.05, Error bar: S.D.

Fig. 1 Comparison among prefectures of wood density differences by decay classes.

The ANOVA was used to compare the mean wood density among prefectures which have more than two sites. **: p < 0.05, Error bar: S.D.

材密度の形態間差

形態による材密度の違いを樹種別に比較した (Table 4)。立枯木は倒木と根株よりも材密度が高かった。倒木と根株とを比較すると、カラマツ、アカエゾマツ、トドマツは根株の方が倒木よりも材密度が高かった。ヒノキでは、分解度 1 と分解度 2 の材密度は、倒木と根株ではほぼ等しい値であったが、分解度 3 以降は根株の材密度の方が高かった。スギは他の樹種と異なり、分解度 3 を除いて倒木の材密度の方が高い傾向にあった。しかし、有意差がみられたのは、同じ分解度を3 つの形態間で比較した場合のスギの分解度 1 と (p=0.03)、倒木と根株間を比較した分解度 1 のアカエゾマツ (p<0.01) とトドマツ (p=0.04) のみであった (Table 4)。

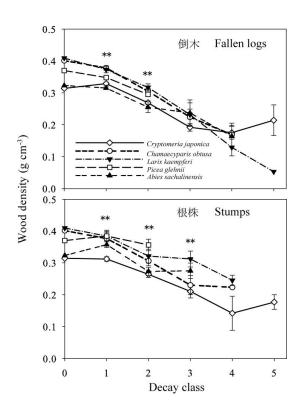
材密度の直径クラス間差

材の直径の違いと平均材密度との関係を分解度別に 比較した。分解度 1 では直径クラスの違いによって倒 木のヒノキ (5-10cm; 0.393 g cm⁻³, 10-15cm; 0.381 g cm⁻³, 15-20cm; 0.368 g cm⁻³, 20-40cm; 0.354 g cm⁻³, ANOVA, p = 0.02)、そして根株のスギ (5-10cm; 0.356 g cm⁻³, 10-15cm; 0.334 g cm⁻³, 15-20cm; 0.315 g cm⁻³ , 20-40cm; 0.304 g cm⁻³, ANOVA, p < 0.01) と ∀ /‡ (5-10cm; 0.449 g cm⁻³, 10-15cm; 0.392 g cm⁻³, 15-20cm; 0.363 g cm⁻³, 20-40cm; 0.349 g cm⁻³, ANOVA, p < 0.01) の材密度に有意差があった。分解度2では 倒木のカラマツ (5-10cm; 0.291 g cm⁻³, 10-15cm; 0.332 g cm⁻³, 15-20cm; 0.342 g cm⁻³, 20-40cm; 0.375 g cm⁻³, ANOVA, p < 0.01) で直径クラス間の差が有意であっ た。分解度3以上では直径クラス間の有意差はなか った。そこで、直径の影響が顕著に認められる分解 度1について、直径クラスと平均材密度との関係を 倒木と根株に分けて樹種間で比較した (Fig. 3)。倒木 では、スギとヒノキは直径が大きくなるにつれて材密 度は低下し、特に、ヒノキの倒木の 20-40cm の材密 度は 5-10cm よりも有意に低かった (p = 0.02) (Fig. 3, Table 5)。反対に、カラマツは直径が大きくなるにつ

Table 3 調査を行った道府県ごとの分解度別の材密度 (g cm⁻³)

Table 3 Wood density for various decay classes in the prefecture studied

Table 5 Wood dell				Fallen logs	倒木		Stumps ħ	艮株
植栽樹種	分解度	道府県名	林分数	平均材密度 (g cm ⁻³)	標準偏差	林分数	平均材密度 (g cm ⁻³)	標準偏差
Species	Decay class	Prefecture	Number of stands	Mean	SD	Number of stands	Mean	SD
スギ	1	秋田	5	0.341	0.018	6	0.336	0.043
Cryptomeria japonica		茨城	12	0.330	0.042	12	0.303	0.036
		千葉	18	0.335	0.029	15	0.300	0.037
		富山	5	0.336	0.019	5	0.326	0.017
		山口	7	0.310	0.039	5	0.325	0.022
	2	大分	6	0.314	0.051	4	0.308	0.042
	2	秋田 茨城	5 3	0.287 0.257	0.046 0.025	4 2	0.333 0.222	0.029 a ⁽¹⁾ 0.017 b
		天城 千葉	19	0.268	0.023	21	0.222	0.017 b
		富山	5	0.262	0.050	5	0.291	0.051 ab
		山口	3	0.267	0.045	5	0.266	0.033 ab
		大分	4	0.268	0.023	3	0.233	0.019 ab
	3	秋田	2	0.264	0.074 a ⁽¹⁾	1	0.236	-
		茨城	2	0.219	0.027 ab	2	0.272	0.005
		千葉	8	0.212	0.036 ab	15	0.226	0.045
		富山	2	0.146	0.036 b	-	-	-
		山口	4	0.124	0.036 b	4	0.111	0.037
		大分	3	0.197	0.016 ab	1	0.214	-
	4	秋田	1	0.238	_(2)	-	-	-
		千葉	1	0.176	-	4	0.141	0.076
		富山	2	0.176	0.008	2	0.187	0.040
		山口	2	0.087	0.041	2	0.045	0.030
	_	大分	4	0.204	0.064	2	0.194	0.040
 ヒノキ	5	大分	2	0.214	0.048	2	0.177	0.023
	1	埼玉	4 12	0.398	0.047	4 12	0.388	0.050
Chamaecyparis obtusa		新潟		0.386	0.049		0.395	0.046
		三重 京都	7 4	0.379 0.402	0.042 0.011	7 2	0.390 0.388	0.022 0.002
		広島	6	0.402	0.011	5	0.363	0.002
		長崎	12	0.352	0.049	10	0.343	0.034
	2	埼玉	4	0.311	0.032	4	0.307	0.033
	-	新潟	4	0.319	0.066	6	0.335	0.072
		三重	5	0.307	0.012	5	0.327	0.063
		京都	3	0.299	0.050	6	0.284	0.030
		広島	4	0.337	0.061	3	0.368	0.039
		長崎	12	0.288	0.046	12	0.278	0.054
	3	埼玉	1	0.423	-	2	0.293	0.024
		三重	1	0.175	-	1	0.187	-
		京都	4	0.185	0.038	5	0.182	0.046
		広島	1	0.317	-	2	0.302	0.054
	_	長崎	4	0.203	0.054	3	0.236	0.098
	4	埼玉	2	0.252	0.097	-	-	-
		三重	1	0.079	-	-	-	-
		京都 長崎	1 2	0.088 0.170	0.001	- 1	0.223	-
	<u>1</u>		···· <u>2</u>	0.170	0.001	<u>1</u> 5	0.223	0.084 a
Larix kaempferi	1	岩手	6	0.343	0.052	5	0.318	0.034 a 0.038 ab
		長野	10	0.373	0.033	4	0.440	0.038 ab
	2	北海道	6	0.304	0.040	7	0.267	0.055 a
	_	岩手	6	0.349	0.035	6	0.369	0.014 b
		長野	9	0.304	0.063	6	0.338	0.061 b
	3	岩手	-	-	-	1	0.350	-
		長野	7	0.232	0.097	8	0.307	0.096
	4	長野	3	0.129	0.045	3	0.245	0.092
アカエゾマツ	<u>5</u> 1	長野	<u>1</u> 8	0.053	0.015	- 6	0.384	0.044
Picea glehnii	2	北海道 北海道	8	0.348	0.013		0.384	0.044
トドマツ	···- 2	北海坦 北海道	<u>3</u>	0.293	0.008	<u>3</u>	0.356	0.039
Abies sachalinensis	2	北海道	2	0.313	0.008	2	0.337	0.030
suchuttitetists	3	北海道	3	0.237	0.024	2	0.275	0.025
	4	北海道	1	0.164	-	-	-	-
エゾマツ ⁽³⁾	· :	北海道	1	0.188	0.005	-	-	- -
Picea jezoensis	4	北海道	1	0.118	0.027	-	-	-
(I)								



れて材密度は高くなる傾向を示した (Fig. 3)。アカエゾマツとトドマツでは 5-10cm から 10-20cm にかけて材密度が上昇し、20-40cm で再び低くなった (Fig. 3)。根株の場合も、カラマツは直径が大きくなるにつれて材密度は高くなった (Fig. 3)。他の樹種では根株直径の増加にともない材密度が低くなる傾向が認められた (Fig. 3)。特に、スギとヒノキの根株の 20-40cm の材密度は、5-10cm と 10-15cm よりも有意に低かった ($p=0.01\sim0.04$) (Fig. 3, Table 5)。

分解度ごとの倒木の材密度の推定

倒木の分解度と材密度の関係について、樹種ごとに指数回帰式で近似した (Table 6, Fig. 4)。樹種別に分解度 1 から 4 までの材密度 (g cm⁻³) の変化を近似式で推定すると、スギでは順に 0.32、0.26、0.21、0.17 であった。ヒノキは、0.39、0.30、0.23、0.18、カラマツは、0.39、0.29、0.21、0.15、アカエゾマツ・エゾマツが、0.36、0.26、0.18、0.13、トドマツは 0.32、0.26、0.22、0.18、と推定された。推定値と実測の平均値とを比較すると、傾きが 1 の直線上にほぼ分布した (Fig. 5, R^2 = 0.92 ~ 0.99, p = 0.01 ~ 0.03)。

Fig. 2 樹種ごとに比較した倒木と根株の分解度の進行に伴う材密度変化 分解度 0 は初期材密度 (藤原ら , 2004) を示す。**: p < 0.05, Error bar: S.D.

Fig. 2 Differences in mean wood density among decay classes for each tree species Decay class 0 indicates initial wood densities (Fujiwara et al., 2004) **: p < 0.05, Error bar: S.D.

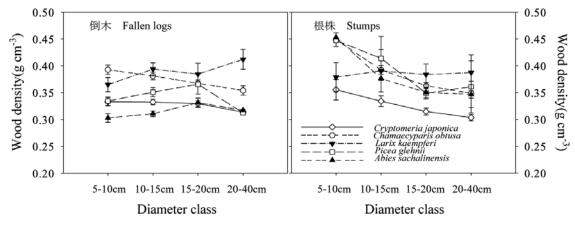
Table 4 樹種ごとに計算した形態 (倒木,根株,立枯木)別の平均材密度と標準偏差

Table 4 The mean wood densities and SD calculated for each state (fallen logs, stumps and snags) of coniferous species.

		侄	小木 Fai	llen logs		ħ	艮株	Stumps			立枯木	Snags	S
植栽樹種	分解度	調査林 分数	材密度 平均値	標準偏差		調査林 分数	材密度 平均値	標準偏差		調査林 分数	材密度 平均値	標準偏差	p値(1)
			(g cm ⁻³)				(g em ⁻³)				(g cm ⁻³)		
Species	Decay class	Number of stands	Mean	SD		Number of stands	Mean	SD		Number of stands	Mean	SD	p value
スギ	1	53	0.329	0.035	$a^{(2)}$	47	0.312	0.036	a	10	0.337	0.048	0.03**
Cryptomeria japonica	2	39	0.269	0.038	ab	40	0.264	0.055	ab	4	0.275	0.037	0.85
	3	21	0.192	0.054	c	23	0.210	0.062	bc	_(3)	-	-	0.33
	4	10	0.175	0.064	c	10	0.142	0.074	c	-	-	-	0.37
	5	2	0.214	0.048	c	2	0.177	0.023	c	-	-	-	0.43
ヒノキ	1	45	0.378	0.046	a	40	0.376	0.043	a	9	0.405	0.042	0.20
Chamaecyparis obtusa	2	32	0.305	0.046	b	36	0.306	0.058	b	7	0.328	0.066	0.58
	3	11	0.224	0.084	c	13	0.230	0.073	c	2	0.267	0.048	0.78
	4	6	0.169	0.036	c	1	0.223	-		1	0.240	-	-
カラマツ	1	22	0.373	0.048	a	14	0.384	0.075	a	8	0.391	0.015	0.68
Larix kaempferi	2	21	0.317	0.052	a	19	0.321	0.064	ab	3	0.372	0.030	0.30
	3	7	0.232	0.097	b	9	0.312	0.091	ab	-	-	-	0.11
	4	3	0.129	0.045	c	3	0.245	0.092	b	-	-	-	0.12
	5	1	0.053	-		-	-	-		-	-	-	-
アカエゾマツ	1	8	0.348	0.015	a	6	0.384	0.044		1	0.520	-	0.00**
Picea glehnii	2	3	0.295	0.013	b	3	0.356	0.039		-	-	-	0.06
トドマツ	1	4	0.315	0.008		4	0.357	0.030		-	-	-	0.04**
Abies sachalinensis	2	2	0.255	0.024		2	0.273	0.025		-	-	-	0.56
	3	3	0.237	0.072		2	0.275	0.035		-	-	-	0.55
	4	1	0.164	-		-	-	-		-	-	-	-

^{(0):} p 値は倒木、根株、立枯木の3つの形態間で比較できる場合は平均材密度の差を一元配置分散分析によって計算し、2つの形態間での比較の場合は平均材密度の差をt検定によって計算した。 (2): 同一樹種内の分解度間の平均材密度の比較を一元配置分散分析を用いておこなった。 ANOVA の F 検定で p < 0.05 で有意であった場合に、Tukey の多重検定をおこなった。アルファベットが等しいもの同士は有意な差がない (α = 0.05)。 (3): No data, **: p < 0.05

^{(1):} The p value was derived from the ANOVA to compare mean wood densities among 3 states and was derived from t-test to compare mean wood densities between 2 states. (2): The ANOVA was used to compare mean wood densities among decay classes. If the ANOVA was significant, Tukey's test was used. Alphabet letters show significance ($\alpha = 0.05$). (3): No data, **: p < 0.05



樹種別に比較した倒木と根株の分解度1の直径クラスによる材密度変化

Fig. 3 Wood density changes along diameter classes at decay class1 Error bar: S.D.

Table 5 分解度 1 における樹種ごとの材密度が直径クラス間で有意であった場合の多重比較結果 Table 5 The results of Tukey's test of diameter classes at decay class 1.

形態	樹種	直径クラス		p 値 p value	
State	Species	Diameter class	10-15cm	15-20cm	20-40cm
倒木 Fallen logs	ヒノキ	5-10cm	0.67	0.09 *	0.02 **
		10-15cm	-	0.62	0.21
		15-20cm	-	-	0.78
根株 Stumps	スギ	5-10cm	0.57	0.05 *	0.01 **
		10-15cm	-	0.36	0.04 **
		15-20cm	-	-	0.66
根株 Stumps	ヒノキ	5-10cm	<0.01 **	<0.01 **	<0.01 **
-		10-15cm	-	0.06 *	<0.01 **
		15-20cm	-	-	0.58

樹種ごとおこなった一元配置分散分析の結果が有意であった直径クラス間 (p < 0.05) を Tukey's test で多重比較をおこなった。

If the ANOVA was significant among diameter classes (p < 0.05) in every tree species, Tukey's test was used. **: p < 0.05, *: p < 0.10

Table 6 倒木の材密度と分解度の指数回帰分析結果

Table 6 Coefficients of the single-exponential regression lines $(Wd = a \exp(-kDc))$ between the wood density (Wd) of fallen logs and decay class (Dc).

樹種	試料数(2)	係数	標準誤差	係数	標準誤差	残差平方和	AIC
Species	$n^{(2)}$	а	SE	k	SE	SSR	AIC
スギ							
Cryptomeria japonica	23	0.41	0.03	0.23	0.03	0.03	-82.3
ヒノキ							
Chamaecyparis obtusa	21	0.51	0.05	0.26	0.05	0.08	-52.1
カラマツ							
Larix kaempferi	8	0.49	0.04	0.26	0.05	0.01	-27.7
アカエゾマツ・エゾマツ ⁽¹⁾							
Picea glehnii & Picea jezoensis (1)	4	0.50	0.06	0.32	0.06	< 0.01	-14.0
トドマツ							
Abies sachalinensis	4	0.38	0.03	0.19	0.04	< 0.01	-17.3

回帰分析には分解度 $1\sim4$ の道府県別の平均材密度をもちいた。 「い」回帰分析に使用した材密度には、本研究での調査結果に加えてエゾマツのデータを使用した。 (2): Table 3 での分解度 $1\sim4$ の材密度値がある道府県の数を示す。

The single-exponential regression analysis were calculated using average wood densities by prefectures in decay classes. (1): The results obtained from the present study by themselves were insufficient for analyzing the wood densities used in the regression analysis, so some data of Picea jezoensis were also included. (2): Sum of the number of prefectures which wood density data was collected in decay class 1~4 in Table3.

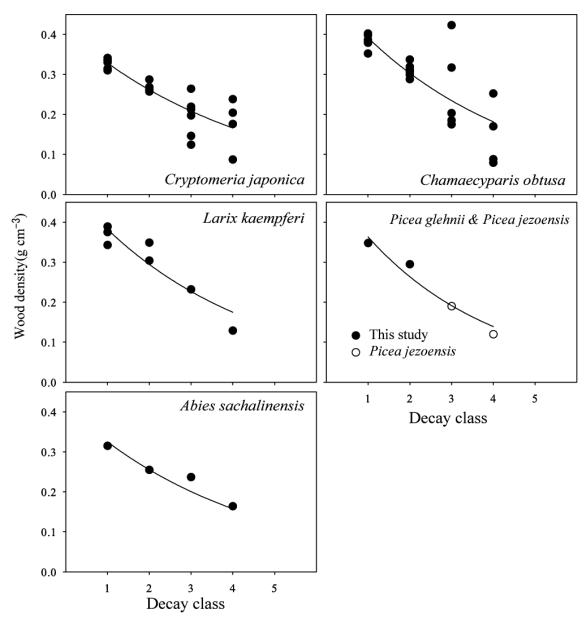


Fig. 4 倒木の分解度と材密度の関係 曲線は指数関数 ($Wd = a \exp(-kDc), a, k$ は定数) を用いて得られた回帰線

Fig. 4 Relationship between decay class and wood density

The exponential curve shows single-exponential regression lines $(Wd = a \exp(-kDc))$ for the wood density (Wd) of fallen logs and the decay class (Dc).

5考察

地域と形態が材密度へ与える影響

分解度ごとの材密度に与える地域(道府県)、形態(倒木,根株,立枯木)の影響を樹種別に検討した。

地域の影響は倒木ではスギの分解度3のみ、根株ではスギの分解度2、カラマツの分解度1と分解度2のみに限られ、大部分では認められなかった(Table 3)。生立木の場合、樹種別の材密度の地域間差は小さいと報告されているので(Fujiwara et al., 2007)、一般には分解初期の材の地域間差は小さいと考えられる。ただし、カラマツの根株では分解初期に地域間差が認め

られ、特に北海道の材密度は低く、倒木の材密度よりもさらに低かった (Table3)。カラマツでは生立木の根株腐朽被害や(大沢・勝屋,1986; 黒田ら,1991)、野ネズミの幹地際部分の食害が知られている(中田,2000)。北海道の材密度のばらつきが大きかったことから(Table 3)、採取した試料には材密度の低い病害や食害の被害木が含まれ、分解度1の判定と材密度が一致しなかった可能性がある。根株の分解度の判定には、病害や食害の特徴を判定項目に加えることでその精度向上は可能だろう。被害木の混入は、地域内あるいは地域間での材密度の変動要因になる可能性がある

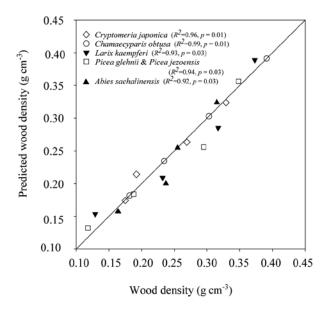


Fig. 5 倒木の分解度 1 ~分解度 4 の平均材密度と材密度推定値 との関係 推定は Table 6 の指数回帰分析によって得られた回帰式 を用いた

Fig. 5 Relationships between mean wood densities measured and predicted wood densities in tree species from decay classes 1 to 4

The predicted wood densities were calculated by single-exponential regression in tree species between the wood density (Wd) of fallen logs and decay class (Dc) (Table 6).

ので、調査地域での被害発生の有無を確認することが 求められる。一方、スギの倒木は分解が中程度の分解 度3で地域間の材密度に差が生じた。これは、分解度 が同じでも重量減少は地域間で異なることを示してい る。スギのように広く植栽されている樹種には試料採 取地の立地条件、品種の差やそこに生息する分解者の 違いが影響している可能性がある。さらに、中程度の 分解度の材は分解状況が最も多様なため、材密度のば らつきが大きくなったと考えられる。本調査において、 スギ以外の樹種は地域内での調査林分数が少なく、ス ギと同様の結果は得られなかった。しかし、分解度3 の材密度については地域間の平均値のばらつきは大き い傾向にあり、材密度の不確実性は大きい。これらの 不確実性を小さくするためには、より多くのデータが 必要になると考えられる。分解度4や5については、 十分なデータが無いが、立地条件や分解者の違いとい った周辺環境の影響をより長期間うけるため、環境要 因と材密度との関係を明らかにしていくことが重要と なる。但し、本論文のデータからこれらの因果関係は 推測できず、現時点では地域間差を考慮せずに平均値 を適用することが適当と考えられる。

材密度の形態間差は、分解度1でのみ有意差が認められた(Table 4)。また、立枯木は材密度が最も高いこ

とと、倒木と根株の材密度の差が樹種によって異なる傾向が示された (Table 4)。このように形態の違いにより初期材密度が異なると考えられる。ただし、立枯木の試料数は少ないので、生立木との比較も加えて、今後検討する必要がある。

材密度への直径クラスの影響

直径クラスの材密度への影響は、分解度1において 最も顕著であった (Fig. 3)。分解度1の材密度が直径 クラス間で異なっていたのは、枯死木の初期条件とな る生立木の材密度が直径によって変化するため(藤原 ら, 2004) と考えられる。既報によると、生立木の材 密度は髄から 15 年輪程度まで存在する未成熟材の密 度の影響を強く受けており、スギやヒノキでは未成熟 材の材密度が高く、直径が小さいほど生立木の材密度 は高くなり、逆にカラマツとアカエゾマツ、トドマツ では、未成熟材の材密度が低く直径が小さいほど材密 度は低くなる (渡辺, 1978;藤原ら, 2004)。今回の結 果で示された分解度1における倒木直径に依存した材 密度の変化は生立木の報告と一致しており、分解がほ とんど進んでいない状態のため、生木時の材密度の傾 向を強く反映した結果と考えられる。分解度2以上の 場合に直径クラス間差が見られなくなるのは (Table 5)、分解の進行により材密度にばらつきが生じること によるものと考えられる。このように分解度1の材密 度は、直径の違いにも留意が必要である。

倒木の分解度ごとの材密度推定

今回の調査による倒木の材密度の推定近似式から得 られた値と実測の平均値とを比較すると、若干の過小 評価、あるいは過大評価の場合が認められるものの、 推定値はほぼ一致しており (Fig. 5, $R^2 = 0.92 \sim 0.99$, $p = 0.01 \sim 0.03$)、本研究の推定式は妥当であると考 えられた。一方、分解度5の材密度をこの指数関数の 回帰式を外挿して求めた材密度推定値 (g cm⁻³) は、ス ギは 0.14、ヒノキが 0.14、カラマツは 0.11、アカエ ゾマツ・エゾマツが 0.10、トドマツは 0.15 と推定さ れた。本調査で測定された分解度5の平均材密度は、 スギで 0.214、カラマツで 0.053 であった (Table 4)。 分解度1~4より推定精度は良くないが、サンプル数 が少ないこともあり検証が必要である。さらに分解度 5の誤差要因として、試料採取の問題がある。分解度 5になると、材は原形が崩れて元の形をとどめないこ とが多い。そのため、採取した円板試料の体積を正確 に測定することは難しい。その場合、土壌採取円筒な ど一定体積を確保できる容器を使用するなど、体積を 正確に取得する方法が有効と考えられる。また、測定 数を増やし信頼性を高めることも必要である。

材密度の推定に考慮すべき要因

本調査結果から、材密度を精度良く取得する場合の考慮すべき要因をまとめる。今回測定した針葉樹 5 種について、分解度ごとの材密度を適用する場合に

は、樹種別に適用することが望まれる。さらに、分解 度1では直径クラスによる生木時の材密度の違いが あるため、直径クラスごとの材積の情報が利用可能で あれば、直径クラス毎に異なる材密度を適用して推定 すると精度の向上が期待される。具体的には、分解度 1のヒノキの倒木及びスギとヒノキの根株では直径ク ラス 5-10cm と 20-40cm で有意な差 (p < 0.05) があ り (Table 5)、直径の太い樹幹の下部と細い上部とで は5~10%の材密度差が生じる(藤原ら,2004)。こ のことを考慮すると、直径 10cm または 20cm 程度で 直径クラスを分けることが適当であり、それにより分 解初期の枯死木現存量の推定精度を向上できる。形態 間差については、分解度1では分けて材密度を適用し た方が精度の向上が見込まれる。また、立枯木は他の 分解度においても倒木と根株よりも材密度が高い傾向 を示したので分けた方が精度の向上が見込まれる。地 域間差は分解度1と2ではほとんど発生しない。しか し、地域に特有の病害などの被害木が存在する場合に は、外観から判定された分解度から推定される材密度 よりも実際の材密度の方が低いものが含まれる可能性 があり、これらの評価については今後の研究が必要で ある。分解度3以降の地域間差については、広域に植 栽されている樹種は分解の進行のばらつきが大きくな るので、推定精度を向上させるためには環境要因と材 密度の関係を明らかにする必要がある。

まとめ

本研究では日本の針葉樹の枯死木現存量推定に必要 な材密度を樹種(スギ、ヒノキ、カラマツ、アカエゾ マツ,トドマツ)、地域(道府県)、形態(倒木,根株 , 立枯木) に分けて分解度ごとに測定し、分解度1~ 5の平均材密度を求めた。枯死木の材密度は分解度1 では、樹種による生木時の材密度の特徴が顕著に影響 していた。しかし、分解が進むにつれて材密度は低下 し、標準偏差が大きくなり、樹種や直径、形態による 違いは見られなくなった。一方、地域の影響は、ほと んど認められなかった。針葉樹人工林の枯死木現存量 を計算するにあたり、分解が進んでいない材について は、樹種、直径クラスそして形態別の材密度を使用し た方が推定精度は高くなると考えられた。ただし、場 合によっては病害などの被害の影響や立地条件の違い も考慮すべき要因となる。一方、分解が進行するにつ れて、樹種間や直径クラス間の材密度の違いは小さく なるが、地域間のばらつきが大きくなる。枯死木現存 量の精度向上には、これらを考慮するために材密度の 地域間差に関する研究が今後重要である。

本研究で得られた枯死木の分解度ごとの材密度は、森林生態系における枯死木による炭素蓄積量を推定するための基礎データとして有効である。本研究は林地 残材の有効利用や人工林の炭素収支の解明に役立つも のと期待される。

謝辞

本調査は林野庁平成17年度森林吸収源計測・活用体制整備強化事業によって行われた。その結果をもとにして、森林総研実行課題イイa10103、および日本学術振興会科学研究費補助金(課題番号20380095)で解析を行った。また、解析の一部には森林総研プロジェクト課題アウa312で得られた結果を使用した。調査は機関代表の著者の他に多くの方々と林野庁の協力のもと行われたものであり、ここに謝意を示す。

引用文献

- 阿部俊夫 (2007) 小流域における渓畔林の喪失とサクラマス幼魚の生息環境悪化,日林誌,89,85-91.
- Böhl, J. and Brändli, U.-B. (2007) Deadwood volume assessment in the third Swiss National Forest Inventory: methods and first results, Eur. J. For. Res., 126, 449-457.
- Baker, T. R., Coronado, E. N. H., Phillips, O. L., Martin, J., van der Heijden, G. M. F., Garcia, M. and Espejo, J. S. (2007) Low stocks of coarse woody debris in a southwest Amazonian forest, Oecologia, 152, 495-504.
- Covington, W. W. (1981) Changes in forest floor organic matter and nutrient content following clear cutting in northern hardwoods, Ecology, 62, 41-48.
- Ekbom, B., Schroeder, L. M. and Larsson, S. (2006) Stand specific occurrence of coarse woody debris in a managed boreal forest landscape in central Sweden, For. Ecol. Manage., 221, 2-12.
- 藤原健,山下香菜,平川泰彦(2004)収穫試験地における主要造林木の全乾容積密度及び気乾密度の樹幹内変動,森林総合研究所研究報告,3,341-348.
- Fujiwara, T., Yamashita, K. and Kuroda, K. (2007) Basic densities as a parameter for estimating the amount of carbon removal by forests and their variation, Bulletin of FFPRI, 6, 215 - 226.
- 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.
- Graham, R. L. and Cromack Jr., K. (1982) Mass, nutrient content, and decay rate of dead boles in rain forest of Olympic National Park, Can. J. For. Res., 12, 511-521.
- Harmon, M. E., Franklin, J. F., Swanson, F. J., Sollins,

P., Gregory, S. V., Lattin, J. D., Anderson, N. H., Cline, S. P., Aumen, N. G. and Sedell, J. R. (1986) Ecology of coarse woody debris in temperate ecosystems, Adv. Ecol. Res., 15, 133-302

- Harmon, M. E., Whigham, D. F., Sexton, J. and Olmsted, I. (1995) Decomposition and mass of woody detritus in the dry tropical forests of the northeastern Yucatan peninsula, Mexico, Biotropica, 27, 305-316.
- Hofgaard, A. (1993) Structure and regeneration patterns in a virgin *Picea abies* forest in northern Sweden, J. Vegetation Science, 4, 601-608.
- Howard, E. A., Gower, S. T., Foley, J. A. and Kucharik, C. J. (2004) Effects of logging on carbon dynamics of a jack pine forest in Saskatchewan, Canada, Global Change Biol., 10, 1267-1284.
- 石栗太,榮澤純二,齊藤康乃,飯塚和也,横田信三,吉 澤伸夫(2006)異なる樹齢及び地上高から採取さ れたヒノキ小径丸太の木材性質の比較,木材学会 誌,52,383-388.
- Jönsson, M. T. and Jonsson, B. G. (2007) Assessing coarse woody debris in Swedish woodland key habitats: Implications for conservation and management, For. Ecol. Manage., 242, 363-373.
- 黒田吉雄,大沢正嗣, 勝屋敬三(1991)カラマツ根株 心腐病菌の樹幹内での進展,日本林学会誌,73, 232-237.
- 中田圭亮 (2000) 中高齢カラマツ林分における野ネズミ被害の量的評価と立木の空間分布-被害林分の取り扱いに向けて,北海道カラマツ・トドマツ等人工林材対策協議会季報,9,1-36.
- 大沢正嗣・勝屋敬三 (1986) カラマツ根株心腐病羅病 木および健全木樹幹内の菌類相とその遷移,筑波 大学農林技術センター演習林報告,2,17-29.
- 大内幸夫 (1989) 3 伐採木の測定,大隅眞一編 "森林計 測学講義",養賢堂,28-47.
- 林野庁計画課 (1999) 森林資源モニタリング調査実施マニュアル . 林野庁計画課, p. 60.
- Rouvinen, S., Kuuluvainen, T. and Karjalainen, L. (2002) Coarse woody debris in old *Pinus sylvestris* dominated forests along a geographic and human impact gradient in boreal Fennoscandia, Can. J. For. Res., 32, 2184-2200.

- 酒井佳美,田中永晴,石橋聡,鷹尾元,高橋正義,山口 岳広,阿部真,佐々木尚三(2004)幾寅天然林にお ける47年間の粗大有機物の蓄積,日本林学会北 海道支部会講演論文集,52,96-98.
- 酒井佳美,高橋正通,石塚成宏,稲垣善之,松浦陽次郎 ,雲野明,中田圭亮,長坂晶子,丹羽花恵,澤田智 志,北条良敬,玉木泰彦,綛谷珠美,武田宏,相浦 英春,山内仁人,島田博匡,岩月鉄平,山場淳史, 山田隆信,前田一,室雅道(2008)材密度変化によ る主要な針葉樹人工林における枯死木の分解速度 推定,森林立地,50,153-165.
- 迫田章義,望月和博,安部郁夫,片山葉子,川井秀一, 沢田達郎,棚田成紀,中崎清彦,中村嘉利,藤田晋輔,舩岡正光,三浦正勝,吉田孝(2001)ゼロエミッションのための未利用植物バイオマスの資源化,環境科学会誌,14,383-390.
- Siitonen, J., Martikaine, 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. Manage., 128, 211-225.
- Skovsgaard, J. P., Nordfjell, T. and Sørensen, I. H. (2006) Precommercial thinning of beech (*Fagus sylvatica L.*): Early effects of stump height on growth and natural pruning of potential crop trees, Scand. J. For. Res., 21, 380-387.
- Sollins, P. (1982) Input and decay of coarse woody debris in coniferous forest stands in western Oregon and Washington, Can. J. For. Res., 12, 18–28.
- Sollins, P., Cline, S. P., Verhoeven, T., Sachs, D. and Sphcher, G. (1987) Patterns of log decay in oldgrowth Douglas-fir forests, Can. J. For. Res., 17, 1585-1595.
- 鈴木保志,宮田大輔,秦野瑶子,山口達也,吉井二郎, 後藤純一(2007)林地残材丸太から切削式チッパ により作られたチップの寸法分布と樹種および丸 太形状との関係,日本森林学会誌,89,92-101.
- Ter-Mikaelian, M. T., Colombo, S. J. and Chen, J. (2008) Amount of downed woody debris and its prediction using stand characteristics in boreal and mixedwood forests of Ontario, Canada, Can. J. For. Res., 38, 2189-2197
- 渡辺治人 (1978) 木材理学総論. 640pp., 農林出版株式会社, 東京.

文 (Original article) 論

去川森林理水試験地における流出水の水質

吉永秀一郎 ^{1)*} • 稲垣善之 ²⁾ • 山田 毅 ³⁾ • 三浦 覚 ²⁾ • 清水 晃 ¹⁾ • 清水貴範 ⁴⁾ • 小川泰浩 ⁴⁾ • 宮縁育夫 ⁵⁾

Streamwater chemistry at the Sarukawa Experimental Watershed

Shuichiro YOSHINAGA¹⁾, Yoshiyuki INAGAKI²⁾, Tsuyoshi YAMADA³⁾, Satoru MIURA²⁾, Akira SHIMIZU¹⁾, Takanori SHIMIZU⁴⁾, Yasuhiro OGAWA⁴⁾, and Yasuo MIYABUCHI⁵⁾

Abstract

Streamwater chemistry at the Sarukawa Experimental Watershed was observed to investigate its variation as a function of runoff rate and to evaluate annual nutrient runoff characteristics. The Sarukawa Experimental Watershed, located in Miyazaki Prefecture, southwestern Japan, consists of three forested watersheds that experience high annual precipitation of more than 2500 mm. Most precipitation fell during the summer and autumn, resulting in seasonal variations in the runoff rate, which was high during the summer and autumn and low during the winter. Most solute concentrations in the streamwater also showed seasonal variation, with a strong negative correlation with the runoff rate. The streamwater chemistry is thus influenced by variations in hydrological characteristics. Annual nutrient runoff rates of Na⁺, Mg²⁺, Ca²⁺ and sulfur in the watersheds exceeded the annual atmospheric inputs observed at the Tano Station near the study watersheds, suggesting that most of these components are released from the soil and bedrock within the watershed by chemical weathering. On the other hand, annual nitrogen runoff rate at No.2 and No.3 watersheds from 1997 to 1999, and at No.1 watershed in 1997 and 1998, were lower than the annual atmospheric N input owing to retention by the plants within the watershed. However, at No.1 watershed in 1999, where annual precipitation reached 4375 mm, the annual N runoff rate exceeded the annual atmospheric nitrogen input, although streamwater nitrate concentrations in 1999 were similar to those in 1997 and 1998. This phenomenon is likely to be caused by rapid nitrate leaching from surface soils during a storm event, indicating that hydrological processes strongly affect nutrient budgets, particularly the nitrogen budget, within the watershed.

Key words: Sarukawa Experimental Watershed, streamwater chemistry, nutrient runoff rate, nitrogen budge

要旨

温暖多雨地帯に位置する去川森林理水試験地の3試験流域において、1997年4月より2000年3 月にかけて実施した流出水質の分析結果をもとに、日流出水量と流出水質との関係を明らかにした。 去川森林理水試験地では日流出水量は夏期に多く、冬期に少ないという季節変動を示し、これに支配されて、多くの溶存成分濃度は夏期に低下し、冬期に上昇する季節変動を示した。さらに、去川 森林理水試験地における年流出負荷量を近傍の田野における年流入負荷量と比較して溶存成分の収 支を解析した。無機態窒素を除く多くの溶存成分の年流出負荷量は年流入負荷量を上回ることから、 これらの溶存成分は流域内において土壌や岩石から風化によって生成され、流出していると考えら れた。一方、無機熊窒素は I 号沢では 1997 年ならびに 1998 年に、 II 号沢ならびに III 号沢では 3 年 間ともに年流入負荷量よりも年流出負荷量が少なく、植物による吸収・固定によって流域内に保持 されていた。しかし、 I 号沢では年降水量が著しく多かった 1999 年には NO、濃度は他の年と同等 のレベルであったが、無機態窒素の年流出負荷量は年流入負荷量を超過した。これらのことから、 去川森林理水試験地では平年には無機態窒素を流域内に保持する機能が働いているものの、平年を 大きく上回る多雨の年には、土壌中の NO;の雨水による流出によって突発的な無機態窒素の年流 出負荷量の増加が起こることが示唆された。

キーワード: 去川森林理水試験地、流出水質、年流出負荷量、窒素収支

原稿受付:平成 23 年 3 月 23 日 Received 23 March 2011 原稿受理: 平成 23 年 5 月 23 日 Accepted 23 May 2011

¹⁾ 森林総合研究所九州支所 Kyushu Research Center, Forestry and Forest Products Research Institute (FFPRI)

²⁾ 森林総合研究所立地環境研究領域 Department of Forest Site, 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) 4)森林総合研究所水土保全研究領域 Department of Soil and Water Conservation, Forestry and Forest Products Research Institute (FFPRI)

^{*} 森林総合研究所九州支所 〒 860-0862 熊本県熊本市黒髪 4 丁目 11 番 16 号 Kyushu Research Center, Forestry and Forest Products Research Institute (FFPRI), Kurokami 4-11-16, Kumamoto 860-0862, Japan; e-mail: yoshinag@ffpri.affrc.go.jp

1. はじめに

流域の源流部に位置する森林に対しては、安全で安 心な水を供給する水源かん養機能ならびに水質保全機 能の発揮が求められている。これらの機能を評価する ために、日本各地において森林流域の流出水の量を測 定する量水試験が展開され、また、多くの森林流域で 流出水の溶存成分濃度が測定されてきた。特に水質保 全機能を適切に評価するためには、定性的な溶存成分 濃度の測定に加えて、量水試験が実施されている森林 流域において流出負荷量を定量的に評価することが望 ましい。このような観点から、現在では、多くの量水 試験が実施されている森林流域において流出負荷量を 評価することが行われつつある(生原・相場、1982; Muraoka and Hirata, 1988; 浅野ら、2000; 金子ら、 2002 など)。しかし、これらの研究で対象としている 森林流域の大半は年降水量が 2000mm 以下にある。一 方、西南日本太平洋側には梅雨前線や台風による豪雨 によって年降水量が 2500mm を越す地域が広がる。こ のような多雨地域において量水試験と流出水質の測定 が継続的に実施されている森林流域は少なく、流出負 荷量の測定結果の蓄積が求められている。

本稿では、温暖多雨地帯における森林の水源かん養機能解明のために、林業試験場九州支場(現森林総合研究所九州支所)が1957年に宮崎県大淀川上流の高

岡営林署(現宮崎森林管理署)管内の去川国有林内に設置した去川森林理水試験地において、1997年4月より2000年3月にかけて実施した流出水の水質の分析結果を報告する。さらに、量水試験の結果と統合して解析することにより、日流出水量と流出水の水質との関係を明らかにするとともに、溶存成分の年流出負荷量を評価する。

2. 研究手法

1) 試験地の概要

去川森林理水試験地は宮崎県宮崎市高岡町宇和石の去川国有林(北緯 31°51′、東経 131°13′)内において10 ha 以下の面積を有する3 試験流域から構成されている (Fig. 1、清水ら、2008 など)。最近傍の海岸線までは約25 kmの内陸に位置する。3 試験流域はそれぞれ I 号沢(面積:6.56 ha、標高:260~370 m)、 II号沢(面積:9.17 ha、標高:230~360 m)、II号沢(面積:8.18 ha、標高200~290 m)と名付けられている。去川森林理水試験地の地質は中生界四万十層群からなり、頁岩が広く分布する(丸山ら、1960)。土壌は褐色森林土からなり、尾根部で乾性褐色森林土 (B_a)ならびに弱乾性褐色森林土 (B_c)が、谷沿いに沿って適潤性褐色森林土 (B_b)が分布する(白井ら、1965)。植生は3試験流域で植栽、施業履歴などが異なる(白井

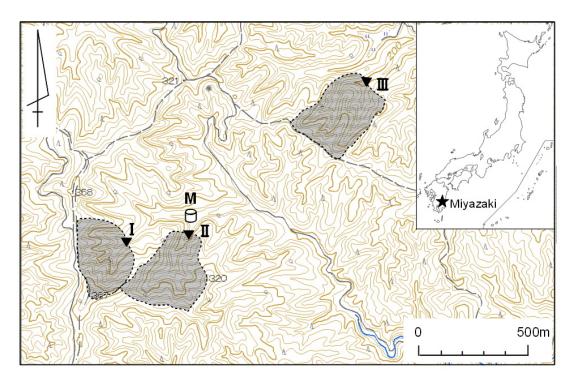


Fig. 1 去川森林理水試験地の位置と地形の概略 I:I号沢、Ⅱ:Ⅱ号沢、Ⅲ:Ⅲ号沢、M:気象観測露場 国土地理院発行1:25,000 地形図「有水」の一部を使用

Fig. 1 Location of the Sarukawa Experimental Watershed
I: Watershed No. 1, II: Watershed No. 2, III: Watershed No. 3 and M: Meteorological station.
Part of "Arimizu" 1:25,000 topographic map published by the Geographical Survey Institute was used.

ら、1962)。 Ⅰ号沢とⅡ号沢は1920年前後に皆伐され、 天然下種更新もしくは萌芽更新が図られ、また、Ⅲ号 沢は広葉樹粗放択伐残存林地にスギを植林したが、そ の後放置された。1960年代における林況はⅠ号沢とⅡ 号沢はシイ・カシ類を主とした常緑広葉樹林であり、 Ⅲ号沢はスギを主林木とする針広混交林であった。そ の後、1965年から1966年にかけてⅠ号沢とⅢ号沢を 皆伐し、1967年にⅠ号沢にはヒノキを、Ⅲ号沢には スギを植栽した。したがって、本研究の調査開始期の 1997年には樹齢はほぼ30年である。一方、Ⅱ号沢は 標準区として無処理で残置されたが、1982年に流域 の中央部分 (43%) を部分伐採し、伐採後は植栽を行わ ず、萌芽・天然更新による植生の回復が行われた。清 水ら (2008) によれば、 I 号沢の 1996 年における林相 は谷沿いに広葉樹の二次林が、山腹斜面・尾根部には ヒノキ植栽林が分布している。Ⅲ号沢の1996年の林 相は、谷部には一部にスギ林が分布するものの、広葉 樹二次林が広がっており、山腹斜面・尾根部にはスギ・ ヒノキ混交林が分布している。これに対してⅡ号沢で は 1992 年には流域の中央部では広葉樹萌芽林が広が り、それ以外には広葉樹二次林が分布している。

各試験流域には角度 60°、直高 2 m の V 型ノッチを 用いた量水堰堤が設置され、水位が観測され、流出水 量に変換されている。降水量はⅠ・Ⅱ号沢合流点近傍 にある平坦地において転倒升型の雨量計によって計測 されている。1987年から2000年までの14年間にお ける各試験流域における日流出水量ならびに日降水量 は清水ら(2008)によって報告されている。この14年 間における年降水量は最大 5710 mm (1993 年)、最小 1913 mm (1994年)、平均 3294 mm である。調査期 間である 1997 年 4 月より 2000 年 3 月までの間の日流 出水量の欠測は、 1 号沢では 1997 年 3 月 19 日、3 月 29 日~4月3日、11月18日~12月5日、2000年2 月23日以降、Ⅱ号沢では1997年11月18日~12月 16 日、2000 年 2 月 23 日以降、Ⅲ号沢では 1997 年 11 月 18 日~ 12 月 4 日、1998 年 1 月 25 日~ 2 月 5 日、 11月17日、2000年2月23日以降である。

2) 試料の採取

水質分析用の試料は、各試験流域の量水堰堤の上流側に設置された沈砂地への流入口において、流水を250 mL ポリ瓶を用いて採取した。採取は宮崎森林管理署高岡森林事務所に委託し、1997 年 4 月より2000年3月まで原則として毎月の第1週に行ったが、都合により前月の最終週に採取したこともある。3 試験流域の採取に要する時間は2時間程度であるが、この間に降雨が始まった採水日も含まれる。調査期間内における試料数は各試験流域ともに36である。採取した試料は冷蔵宅配便によって四国支所に送付した。四国支所では分析まで約4℃で冷蔵保存した。

3) 水質分析

水質試料は、電気伝導度 (EC) を白金電極法 (TOA 社、CM-40V) で、pH を ガ ラ ス 電 極 法 (TOA 社、HM-26S) により測定した。 $0.45~\mu m$ のフィルターで ろ 過 し た 後、Na $^+$ 、NH $_4$ $^+$ 、K $^+$ 、Cl $^-$ 、NO $_3$ $^-$ 、SO $_4$ 2 濃度をイオンクロマトグラフ法 (YOKOGAWA 社、IC7000D)、Mg $^{2+}$ 、Ca $^{2+}$ 、Si 濃度を ICP 発光分光分析法 (PerkinElmer 社、Optima3000XL) により測定した。また、溶存無機炭素 (DIC) 濃度を $0.01~M-H_2SO_4$ による滴定法で測定した pH 4.8~Pルカリ度から推定した。なお、分析結果は EANET (2000) に従って精度を検証し、良好な結果が得られている。

4) 年流出負荷量の算出

試験流域毎に流出水の各溶存成分濃度と採水日の日流出水量を用いて日流出水量と各溶存成分流出量の関係式 (L-Q 式)を作成した。各試験流域において欠測期間に該当する採水日がそれぞれ2日ずつあったため、L-Q 式は34試料の結果より作成した。次に作成されたL-Q 式を用いて、日流出水量より各溶存成分の日流出負荷量を算出し、1年分積算して1997年、1998年、1999年の年流出負荷量を算出した。日流出水量の欠測日は積算より除外した。なお、流出水の溶存有機態窒素は測定していないため、窒素に関しては溶存無機態窒素(DIN)の年流出負荷量として算出した。

5) 統計解析

試験流域間の溶存成分濃度の比較には、試験流域を要因とした一元配置の分散分析をおこない、平均値の違いを Tukey-Kramer の HSD 検定による多重比較法で解析した。また、流出水の各溶存成分濃度間の解析には相関分析 (Pearson の相関係数)を用いた。統計解析には JMP5.0.1J (SAS Institute Japan 株式会社)を用いた。

3. 結果

1) 水文特性

去川森林理水試験地における1997年、1998年、1999年の年降水量はそれぞれ3169 mm、2859 mm、4375 mm であり、1999年の年降水量は1987年から2000年までの14年間で1993年に次ぐ多雨の年であった(清水ら、2008)。一方、1997年、1998年は平均よりもやや少雨の年であった。 I 号沢における1997年、1998年、1999年の年流出水量はそれぞれ1565 mm、1672 mm、3371 mm、 II 号沢における年流出水量はそれぞれ1508 mm、1511 mm、3157 mm、 II 号沢における年流出水量はそれぞれ1611 mm、1753 mm、3008 mm であった(清水ら、2008)。年流出水量については、1999年は多雨の影響を受けて3試験流域ともに3000 mm以上の高い値を示した。1997年ならびに1998年は1500~1750 mm 程度であり、

1999年の半分程度の年流出水量であった。各年における年流出水量の試験流域間の差は年降水量の1割以下と少ない。

降水は年間を通じて認められるが、1月、2月は少なく、これに対して、6月~9月の夏期には月降水量が400 mmを越すことが多い (Fig.2、3、4)。ただし、1998年7月、8月は月降水量が100 mm以下と寡雨であった。このような降水量の季節変化の影響を受け、日流出水量も全体としてみれば3試験流域ともに夏期に高く、冬期に低い季節変化を示す。特に冬期は連続した降水も少ないため、日流出水量は0.5 mm以下で推移した。

年降水量と年流出水量の差である年消失水量については、1997年は1550~1650 mm と高い値を示したが、1998年ならびに1999年は1000~1300 mm 程度であった。鈴木 (1985)が短期水収支法によって推定した去川森林理水試験地における1967~1976年の平均年蒸発散量は913~1121 mm であり、これと比較すると1998年ならびに1999年は同程度か若干大きく、1997年は顕著に大きい値となった。なお、1997年は11月から12月にかけて20日から30日程度の日流出水量の欠測日があるが、欠測期間中の降水量は120mm 程度であり、かりに降水量が全量流出したとしても年消失水量は1998年、1999年に比べて大きい傾向を示す。

2) 試験流域毎の各溶存成分濃度の差ならびに季節変動

各試験流域における pH、EC ならびに各溶存成分濃度の平均値を Table 1 に示す。pH は 3 試験流域ともに 7.3 程度であり、顕著な差は認められなかった。一方、EC は I 号沢が 7.49 mS m^{-1} 、II 号沢が 6.97 mS m^{-1} 、II 号沢が 6.83 mS m^{-1} であり、 I 号沢で高い傾向が認められた。溶存成分濃度について 3 試験流域を比較すると、 I 号沢で Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 NO_3 、 SO_4^{2-} 濃度が高く、Si 濃度が低く、II 号沢では Na^+ 、 K^+ 、 CI^- 濃度が高い値を示した。II 号沢は全体的に溶存成分濃度が低い傾向を示した。II 号沢は全体的に溶存成分濃度が低い傾向を示した。II 日記では II 別のII 温度が 3 試験流域で最も低い傾向を示した。II DIC 濃度については試験流域間の明瞭な差は認められなかった。

調査期間における溶存成分濃度の変化を Fig. 2(I号沢)、Fig. 3(II号沢)、Fig. 4(II号沢)に示した。 3 試験流域において明瞭な季節変化が認められたのは、 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 SO_4^{2-} 、DIC、Si 濃度である。 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 SO_4^{2-} 、DIC 濃度は同調して夏期に低下し、冬期に上昇する傾向を示した。これに対して、Si 濃度は夏期に上昇し、冬期に低下する傾向を示した。一方、 K^+ 、 CI^- 、 NO_3^- 濃度については明瞭な季節変化は認められなかった。特に、 K^+ は濃度の変化が少なく0.01 \sim 0.02 mmol L^{-1} で推移し、また、 CI^- 濃度もスパイク状の急激な濃度の低下が認められるものの、I号

沢では $0.10 \sim 0.12 \text{ mmol L}^{-1}$ 、 II 号沢では $0.11 \sim 0.13$ mmol L⁻¹、Ⅲ号沢では 0.09 ~ 0.11 mmol L⁻¹ で推移し た。CI 濃度が3試験流域ともに急激に低下したのは 日降水量が99.5 mmであった1998年6月2日、なら びに当日の降水量は 1.5 mm と少ないものの、7月 25 日より12日間連続して降水が観測され、この期間の 総降水量が 465 mm に達し、日流出水量が 100 mm を 越す高水位であった 1999 年 8 月 5 日である。これら の日には Cl^{-} 濃度のみならず Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 SO_{4}^{-2-} 、Si、 DIC 濃度も低下していた。また、NO3 濃度について は、 Ⅰ号沢、 Ⅱ号沢ともに 1997年11月26日、1998 年10月2日に顕著なスパイク状の濃度上昇が認めら れた。前者は前日に 42 mm、当日に 38 mm の降水量 が観測された降水イベントであり、後者は、当日は無 降雨であったが9月29日より前日までの3日間に70 mm の降水が記録されていた。しかし、Ⅲ号沢では両 日ともに顕著な濃度の上昇は認められなかった。

各試験流域における各溶存成分濃度の相関行列を Table 2、3、4 に示す。各試験流域ともに Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 SO_4^{2-} 、DIC 濃度間の相関係数 r は 0.8 以上 (p<0.01) と極めて高く、また、これらの溶存成分濃度と Na^+ 濃度との相関係数 r も高い値を示した。 NO_3 濃度は K^+ 濃度と I 号沢では弱い相関 (r=0.296, p<0.05)、 II 号沢と III 号沢ではやや強い相関 (r=0.467, 0.592、共に p<0.01) が認められた。また、 II 号沢では NO_3 濃度と Si 濃度との間には弱い負の相関が認められたが、 I 号沢ならびに III 号沢では相関が認められなかった。 Si 濃度は Na^+ 、 K^+ 、 CI^- 、 SO_4^{2-} 濃度と弱い相関が認められた。

3) 日流出水量と溶存成分濃度との関係

Si、 NO_3 濃度については、日流出水量の変化に伴う系統的な濃度の変化は認められなかった (Fig.5)。また、 K^+ 濃度については調査期間を通じて低い濃度であり、かつ濃度の変動が小さい。このため、 K^+ 濃度と日流出水量との間には明瞭な関係は認められなかった。CI 濃度も変動は小さいが、I 号沢と Π 号沢では日流出水量の対数値 log(Q) との間に弱い負の相関が認められた。これに対して、 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 SO_4^{2-} 、DIC 濃度は 3 試験流域ともに日流出水量の対数値との間に強い負の相関が有意 (p<0.01) に認められ、日流出水量が増加するにつれて濃度が減少する傾向が認められた (Fig.5、Table 2、3、4)。

4) 溶存成分の年流出負荷量

各試験流域において各溶存成分について作成した L-Q 式に基づいて算出した年流出負荷量を Table 5 に 示す。各試験流域における年流出水量には大きな違い はないために、各溶存成分の年流出負荷量は、濃度 の平均値の違いを反映したものとなった。その結果、 DIN 以外の溶存成分は II 号沢で年流出負荷量が多く、 I 号沢、III 号沢は同等の年流出負荷量を示した。なお、 Si については II 号沢とIII 号沢で年流出負荷量が多く、

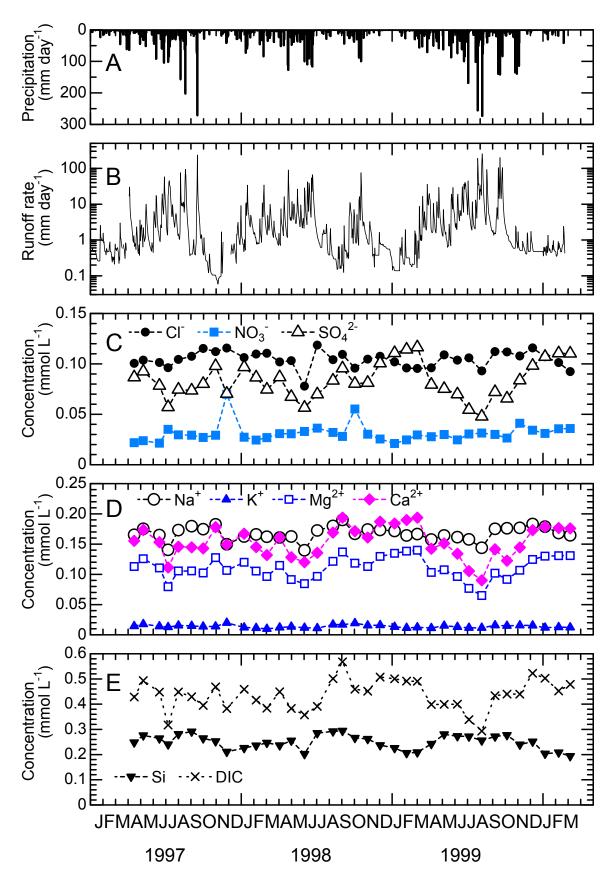


Fig. 2 I 号沢における (A) 日降水量、(B) 日流出水量、(C) Cl ・NO₃ ・SO₄ ² 濃度、(D) Na ⁺・K ⁺・Mg ²⁺・Ca ²⁺ 濃度、(E) Si・DIC 濃度の変化

Fig. 2 Variations of (A) daily precipitation, (B) daily runoff rate, (C) Cl⁻, NO₃⁻ and SO₄²⁻ concentrations, (D) Na⁺, K⁺, Mg²⁺ and Ca²⁺ concentrations and (E) Si and DIC concentrations at Watershed No. 1

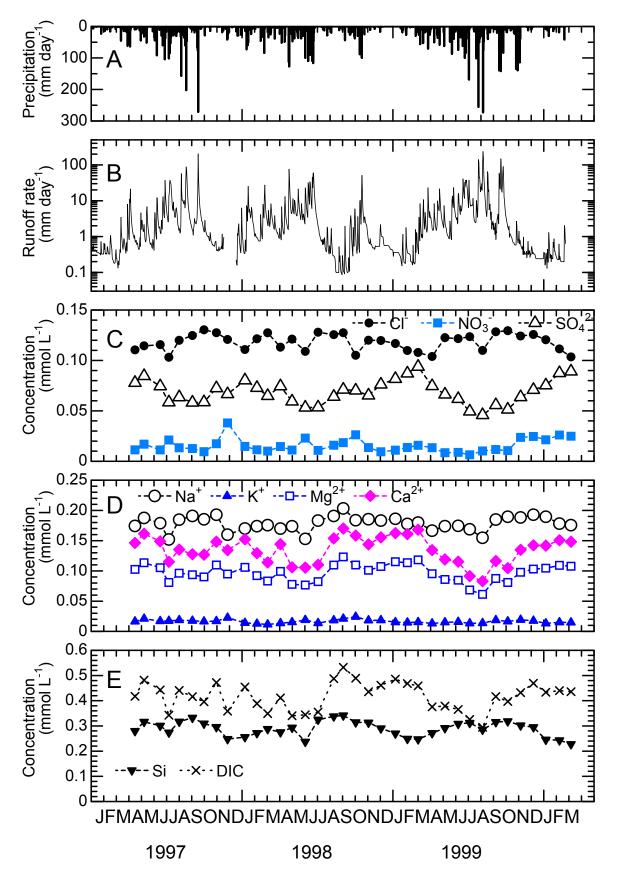


Fig. 3 Ⅱ号沢における (A) 日降水量、(B) 日流出水量、(C) Cl ・NO₃ ・SO₄ ²⁻ 濃度、(D) Na ⁺・K ⁺・Mg ²⁺・Ca ²⁺ 濃度、(E) Si・DIC 濃度の変化

Fig. 3 Variations of (A) daily precipitation, (B) daily runoff rate, (C) Cl $^{\cdot}$, NO $_3^{\cdot}$ and SO $_4^{2^{\cdot}}$ concentrations, (D) Na $^{\cdot}$, K $^{\cdot}$, Mg $^{2^{+}}$ and Ca $^{2^{+}}$ concentrations and (E) Si and DIC concentrations at Watershed No. 2

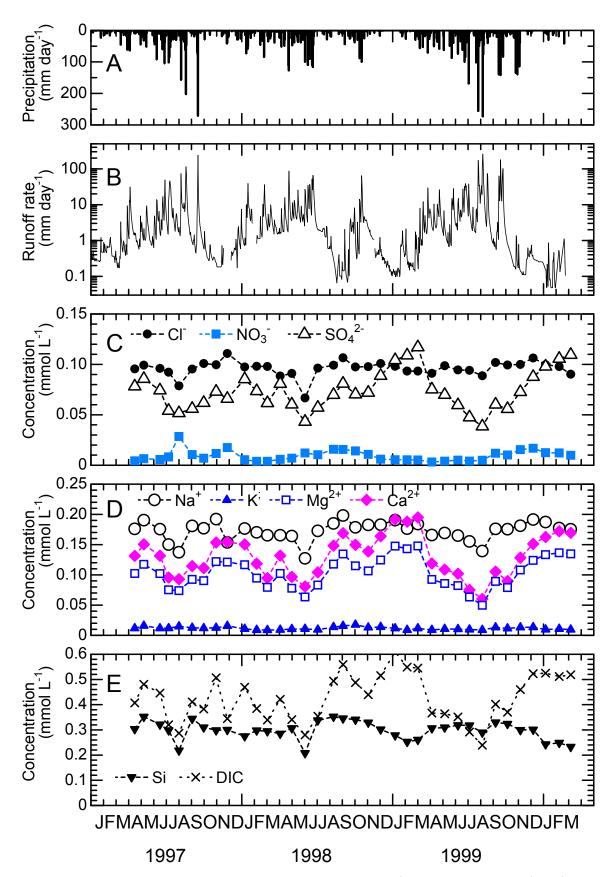


Fig. 4 皿号沢における (A) 日降水量、(B) 日流出水量、(C) Cl ・ NO_3 ・ SO_4 濃度、(D) Na^+ ・ K^+ ・ Mg^{2+} ・ Ca^{2+} 濃度、(E) Si ・ DIC 濃度の変化

Fig. 4 Variations of (A) daily precipitation, (B) daily runoff rate, (C) Cl $^{\cdot}$, NO $_3^{\cdot}$ and SO $_4^{2\cdot}$ concentrations, (D) Na $^{+}$, K $^{+}$, Mg $^{2+}$ and Ca $^{2+}$ concentrations and (E) Si and DIC concentrations at Watershed No. 3

Table 1 各試験流域における各溶存成分濃度 算出平均 (標準偏差)を示す (n=36)。異なるアルファベットは試験流域間で有意な違いがあることを示す (Tukey-Kramer の HSD 検定、p<0.01)

Table 1 Solute concentrations for each watershed Arithmetic means (standard deviations) are shown. Different letters show the significant difference (p<0.01)

Watershed	pН	EC	Na ⁺	K^{+}	Mg^{2+}	Ca ²⁺	Cl	NO_3	SO_4^{2-}	Si	DIC
	·-	(mS m ⁻¹)					(mmol L ⁻¹)				
No.1	7.38	7.49 a	0.1674 ^b	0.0139 b	0.1106 a	0.1536 a	0.1043 b	0.0311 a	0.0835 a	0.2495 b	0.4366 a
	(0.15)	(0.91)	(0.0115)	(0.0024)	(0.0185)	(0.0257)	(0.0081)	(0.0091)	(0.0178)	(0.0287)	(0.0595)
No.2	7.34	6.97 ab	0.1787 a	0.0165 a	0.0968 a	0.1350 ab	0.1182 a	0.0156 b	0.0687 b	0.2888 a	0.4165 a
	(0.15)	(0.77)	(0.0117)	(0.0029)	(0.0146)	(0.0221)	(0.0082)	(0.0067)	(0.0120)	(0.0305)	(0.0557)
No.3	7.33	6.83 b	0.1725 ab	0.0117 °	0.1036 a	0.1305 b	0.0959 °	0.0093 °	0.0737 ab	0.2981 a	0.4249 a
	(0.20)	(1.27)	(0.0159)	(0.0023)	(0.0257)	(0.0346)	(0.0076)	(0.0054)	(0.0195)	(0.0367)	(0.0922)

Table 2 I 号沢における日流出水量 (log(Q)) ならびに各溶存成分濃度の相関行列 (* は p<0.05、** は p<0.01 で有意な相関であることを示す) Table 2 Correlation matrix for streamwater chemistry and runoff rate (log(Q)) at Watershed No. 1. Significant level: *p<0.05, **p<0.01

NO.1									
	Na ⁺	K ⁺	Mg^{2+}	Ca ²⁺	Cl	NO ₃	SO ₄ ²⁻	Si	DIC
K	0.541 *								
Mg^{2+}	0.627 **	0.313							
Ca^{2+}	0.615 **	0.349	0.995 **						
Cl	0.707 **	0.162	0.142	0.129					
NO_3	-0.046	0.296 *	-0.116	-0.082	-0.114				
SO_4^{2-}	0.516 **	0.089	0.954 **	0.933 **	0.128	-0.177			
Si	0.371 *	0.526 *	-0.267	-0.246	0.478 **	0.035	-0.471 **		
DIC	0.777 **	0.490 *	0.921 **	0.920 **	0.266	-0.112	0.818 **	-0.043	
log(Q)	-0.744 **	-0.201	-0.831 **	-0.809 **	-0.420 *	0.147	-0.811 **	0.111	-0.779 **

No.2									
	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Cl	NO_3	SO ₄ ²⁻	Si	DIC
K ⁺	0.396								
Mg^{2+}	0.605 **	0.367							
Ca^{2+}	0.526 **	0.365	0.991 **						
Cl	0.630 **	-0.011	-0.129	-0.213					
NO_3	0.120	0.467 **	0.389	0.374	-0.322				
SO_4^{2-}	0.230	-0.013	0.840 **	0.860 **	-0.403 **	0.275			
Si	0.531 **	0.466 *	-0.073	-0.107	0.612 **	-0.257 *	-0.479 **		
DIC	0.734 **	0.539 *	0.946 **	0.922 **	0.044	0.395	0.662 **	0.137	
log(Q)	-0.728 **	-0.139	-0.844 **	-0.802 **	-0.200	-0.315	-0.660 **	0.012	-0.831 **

Table 4 田号沢における日流出水量 ($\log(Q)$) ならびに各溶存成分濃度の相関行列 (* は p<0.05、** は p<0.01 で有意な相関であることを示す) Table 4 Correlation matrix for streamwater chemistry and runoff rate ($\log(Q)$) at Watershed No. 3. Significant level: *p<0.05, **p<0.01 No.3

110.5									
	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Cl	NO ₃	SO_4^{2-}	Si	DIC
K ⁺	0.376								
Mg^{2+}	0.795 **	0.300							
Ca^{2+}	0.756 **	0.294	0.994 **						
Cl	0.846 **	0.260 *	0.489 **	0.433 *					
NO_3	-0.005	0.592 **	0.072	0.033	-0.092				
SO_4^{2-}	0.657 **	0.056	0.934 **	0.938 **	0.387	-0.131			
Si	0.460 *	0.354 *	-0.062	-0.078	0.608 *	-0.154	-0.219		
DIC	0.856 **	0.368	0.981 **	0.966 **	0.570 **	0.084	0.871 **	0.061	
log(Q)	-0.827 **	-0.317	-0.833 **	-0.786 **	-0.614 **	-0.255	-0.714 **	-0.048	-0.852 **

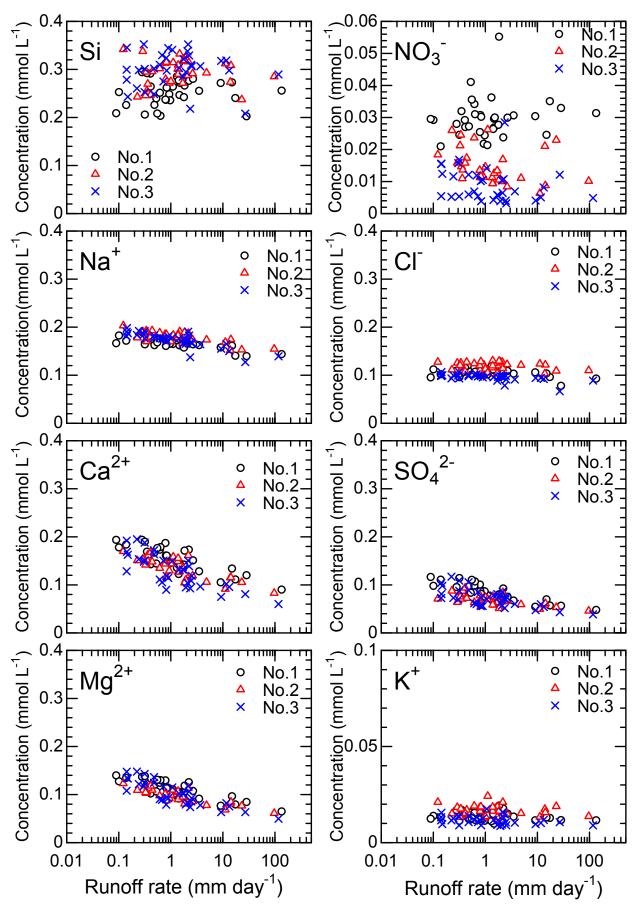


Fig. 5 溶存成分濃度と日流出水量との関係

Fig. 5 Relationship between solute concentrations and daily runoff rate

Table 5 各森林流域における溶存成分の年流出負荷量

宮崎県内における年流入負荷量ならびに日本各地における年流出負荷量も示す

*1: 高木・野上 (2001)、*2: 環境省・酸性雨対策検討会 (2002)、*3: 井倉ら (1994)、*4: 平田・村岡 (1991)、*5: Baba and Okazaki (1998)、*6: Ikeda and Miyanaga (2001)、*7: Kunimatsu et al. (2001)、*8: 浅野ら (2000)、*9: 国松ら (1992) による Table 5 Nutrient runoff rates for each watershed.

Atmospheric input near the Sarukawa experiment watershed and results of nutrient runoff rates in other region in Japan were also shown.

*1: Takagi and Nogami (2001), *2: Committee of Acid Rain Monitoring Survey, Ministry of Environment (2002), *3: Inokura et al. (1994), *4: Hirata and Muraoka (1991), *5: Baba and Okazaki (1998), *6: Ikeda and Miyanaga (2001), *7: Kunimatsu et al. (2001), *8: Asano et al. (2000) and *9: Kunimatsu et al. (1992)

Site	Year	Precipitation	Runoff rate	Na ⁺	K^{+}	Mg^{2+}	Ca ²⁺	Cl	DIN	S	Si	DIC
		mm	mm				kn	nol ha ⁻¹ y	-1 /			
Nutrient runoff at the	e Sarukawa											
No.1	1997		1565	2.38	0.20	1.30	1.81	1.53	0.49	0.92	4.02	5.52
	1998		1672	2.59	0.22	1.45	2.03	1.65	0.51	1.04	4.28	6.12
	1999		3371	5.03	0.43	2.63	3.68	3.25	1.06	1.85	8.70	11.38
	mean	3468	2202	3.34	0.28	1.79	2.51	2.15	0.69	1.27	5.67	7.67
No.2	1997	3169	1508	3.47	0.33	1.59	2.19	2.44	0.23	1.16	6.16	7.16
	1998		1511	3.53	0.33	1.66	2.29	2.45	0.24	1.20	6.16	7.41
	1999		3157	7.11	0.68	3.12	4.28	5.07	0.46	2.29	12.91	14.18
	mean	3468	2059	4.70	0.45	2.13	2.92	3.32	0.31	1.55	8.41	9.58
No.3	1997	3169	1611	3.00	0.09	1.35	1.69	1.75	0.12	1.01	5.90	5.94
	1998		1753	3.34	0.11	1.56	1.95	1.94	0.14	1.16	6.44	6.81
	1999		3008	5.43	0.13	2.31	2.88	3.21	0.21	1.74	10.99	10.27
	mean		2124	3.92	0.11	1.74	2.17	2.30	0.15	1.30	7.78	7.68
Atmospheric input no				1.6	0.1	0.2	0.4	2.0	0.7	0.5		
Tano*1	1997-1999	3417		1.6	0.1	0.2	0.4	2.0	0.7	0.5		
Ebino*2	2000			0.95	0.05	0.11	0.25	0.93	0.63	0.60		
Shiiba-A*3	1991	4537		0.61	0.04	0.07	0.18	0.71	0.23	0.43		
Shiiba-B*3	1991	5014		0.52	0.13	0.09	0.23	0.61	0.46	0.81		
Nutrient runoff in otl	ner regions											
Tsukuba (Ibaraki)*4	1985-1988		721	1.99	0.17	0.52	0.65	1.22	0.92	0.27	2.58	
Hakyuchi (Tokyo)*5	1995		410	0.70	0.02	0.57	0.56	0.75	0.95	0.26	1.60	
Jingahata (Yamanashi))*6 1990		1979	1.32	0.27	0.18	0.90	0.41	0.17	0.30	2.92	2.93
Chugu (Ishikawa)*6	1988		2518	4.41	0.62	2.08	9.47	3.22	0.94	1.63	3.13	21.10
Aburahi-N (Shiga)*7	1989-1991		1062	2.64	0.25	0.74	2.19	1.36	0.32	0.00	2.67	
Aburahi-S (Shiga)*7	1995-1998		772	1.94	0.09	0.52	1.09	1.31	0.21	0.17	1.87	
Myokoji (Shiga)*7	1991-1992		1265	2.24	0.25	0.23	0.21	0.90	0.19	0.21	2.73	
Kiryu (Shiga)*8	1995-1997		763	2.33	0.14	0.28	0.26	0.83	1.08	1.00	0.74	0.36
Jakujo (Shiga)*8	1995-1997		611	1.75	0.14	0.22	0.24	0.50	0.05	1.77	0.52	0.33
Rachidani (Shiga)*8	1995-1997		937	1.47	0.06	0.07	0.08	0.50	0.06	0.79	1.64	0.42
Asahinomori-R (Shiga)*5 1989		1636	2.80	0.13	0.46	0.29	2.46	0.09	0.29	1.75	
Asahinomori-L (Shiga			1140	1.75	0.05	0.37	0.27	1.59	0.06	0.19	1.08	
Higashidani (Kochi)*6	1994		1821	1.20	0.15	0.56	4.62	0.82	0.28	1.16	1.15	7.56

I号沢で低い傾向を示した。一方、DIN の年流出負荷量は I 号沢が最も多く、次いで II 号沢、III 号沢の順となった。また、3 試験流域ともに 1999 年の年流出水量は 1997 年ならびに 1998 年の約 2 倍となっているため、その影響を受けて 1999 年の各溶存成分の年流出負荷量も 1997年ならびに 1998年の約 2 倍に増加した。

4. 考察

1)西南日本太平洋側の他流域における溶存成分濃度 との比較

西南日本太平洋側は秩父帯もしくは四万十帯の堆積岩から構成される急傾斜の山地が広がり、地質条件は

類似している。この地域において森林流域の流出水の溶存成分濃度を継続して計測した流域としては、東から奈良県十津川村護摩壇山試験地(福島・徳地、2008; Fukushima and Tokuchi, 2009)、高知県檮原町鷹取山試験地(篠宮ら、2006a; 2006b)、高知県四万十町葛籠川流域市ノ又試験地(森貞・平井、1995; 1996)、宮崎県田野町清武川流域宮崎大学農学部田野演習林(現附属自然共生フィールド科学教育研究センター田野フィールド、以下田野と略する; 野上ら、1998; 高木ら、2004) が挙げられる。なお、田野は去川森林理水試験地より約10 km南に位置し、地形、地質、気候条件は類似していると考えられる。これらの流域を比較す

ると、全体として溶存成分組成は類似しているが、海 塩の影響を示す Cl 濃度は海からの距離を反映して田 野で高く、去川森林理水試験地はそれに次ぐ高い濃度 を示した。また、去川森林理水試験地の Mg²⁺、Ca²⁺、 SO₄²⁻ 濃度は田野よりは低いものの、護摩壇山試験地 よりも高く、鷹取山試験地ならびに市ノ又試験地とは 同等の値を示した。NO、濃度については、I号沢が護 摩壇山試験地の若齢林分の流域と同レベルである 0.03 mmol L⁻¹ 程度の高い値を示したが、Ⅱ号沢とⅢ号沢は、 それ以外の流域と同レベルの低い値を示した。さらに、 去川森林理水試験地の結果は小林 (1961) による宮崎 県内を流れる清武川、大淀川における溶存成分組成と 類似した結果を示した。これらのことから、去川森林 理水試験地における溶存成分組成は西南日本太平洋側 の森林流域のそれと調和的であり、この地域の特徴を 示していると考えられる。

2) 溶存成分濃度の変動要因

従来、流出水に溶存する CI 濃度は顕著な季節変化は認められず、降水イベント時に濃度が急激に低下する以外には年間を通じて濃度変化の少ない成分であることが知られている (たとえば、金子ら、2002; 志知ら、2005 など)。去川森林理水試験地における CI 濃度も、これらの研究と同様に明瞭な季節変動を示さず、降水イベント時にスパイク状に低下した以外には濃度は安定している。 CI 濃度は日流出水量が増加しても単調に減少していない (Fig. 5)。このことは、降雨イベント時の急激な濃度低下は地下水や地中流などの中間流出成分の増加に起因するだけではなく、地表流の流入や河道内降水といった雨水による直接的な希釈の影響を受けたものと考えられる。

これに対して、Na⁺、Mg²⁺、Ca²⁺、SO₄²⁻、DIC 濃度 は夏期に低下し、冬期に上昇する明瞭な季節変動を示 した (Fig. 2、3、4)。また、これらの溶存成分濃度は 日流出水量の対数値と強い負の相関を示した。これら のことは、去川森林理水試験地におけるこれらの溶存 成分濃度は、大局的に見れば水文特性の季節変動、す なわち日流出水量が夏期に多く、冬期に少ないという 変動に支配されていることを示している。さらに、こ れらの溶存成分濃度は季節変動に加えて、降水イベ ント時に低下する傾向を示した。Na⁺、Mg²⁺、Ca²⁺、 DIC などの成分は流域内において風化によって基盤岩 石や土壌から溶出し、渓流へと流出する。このため、 これらの溶存成分濃度は降水、土壌水、地下水・流出 水の順に濃度が上昇する(平田・村岡、1988など)。 したがって、日流出水量の増加にともなって、これら の溶存成分濃度が減少することは、基底流出を構成す る地下水に比べて相対的に溶存成分濃度の低い土壌水 や降水の混入の影響を示唆する。また、一般に流出水 に含まれる SO₄²⁻ の起源としては、降水に溶存して供 給されたものと、基盤岩石にもともと含まれている硫

黄(S)が酸化したもの、ならびに土壌に吸着されてい るものが想定される。堆積岩、特に海成の泥岩、頁岩 には黄鉄鉱として硫黄が含まれていることが知られて おり (寺島ら、1981)、去川森林理水試験地に分布す る基盤岩石にも硫黄が含まれていると考えられる。先 に示したように、SO₄²⁻ 濃度は Na⁺、Mg²⁺、Ca²⁺、DIC 濃度と同様の変化を示している。このことは去川森林 理水試験地の流出水に含まれる SO₄2 の主体は、降水 によるものではなく、風化に伴って基盤岩石から Na⁺、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} とともに溶出したものである可能性が高い。 一方、Siも基盤岩石ならびに土壌から溶出され渓流 に流出する。しかし、Si 濃度と Mg²⁺、Ca²⁺、DIC 濃 度とは相関が認められず、季節変化も夏期に高く、冬 期に低い逆位相の変化を示す。また、Si 濃度と日流出 水量との間に明瞭な関係も認められない。一方、Si 濃 度は Cl 濃度と同様に降水イベント時にスパイク状に 濃度が低下し、CI 濃度との間には弱い正の相関も認 められる。これらのことは、Siの溶出過程がMg²⁺、 Ca²⁺と異なることを示唆する。Si 濃度に見られる夏 期に高く、冬期に低い季節変化は、Siの溶出過程が一 義的には温度条件に支配されていることを示唆してい る。Mg²⁺、Ca²⁺ 濃度が Si 濃度と異なった季節変化を 示すのは、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} の流出には基盤岩石からの溶出 のみならず、土壌におけるイオン交換や降水による供 給の影響が関与しているためと推定され、今後、詳細 な検討が必要であると考える。

NO, は系統的な濃度の変化は少なく、降雨イベン ト時にスパイク状の濃度上昇が認められることもあっ た。また、日流出水量との関係も認められない。降 雨イベントに伴ってNO₃ 濃度の急激な上昇が認め られることは日本各地で認められており (Muraoka and Hirata, 1988; 勝山ら、2000、2004; Shibata et al, 2001; 篠宮ら、2006a、2006bなど)、田野でも認め られている (高木ら、2004)。これらの流域では降雨 イベントの増水過程で NO、濃度の急激な上昇が起こ るものの、減水過程では速やかに濃度は低下すること が報告されている。去川森林理水試験地において降水 量が認められた採取日のNO、濃度が必ずしも高い値 を示さないのは、降雨による流出水位の変動傾向と採 取した時間との関係によるものと考えられる。すなわ ち、降雨初期の増水過程に採取した試料では濃度の上 昇が起こり、減水過程で採取した試料では平水時と同 レベルまで濃度が低下したと推定される。このことは、 NO₃ 濃度の変動を解析するためには、時間や分単位 の降水量、流出水量を用いた解析が必要になることを 示している。

以上に記したように、去川森林理水試験地における 流出水質は Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 SO_4^{2-} 、DIC などの溶 存成分濃度は日流出水量の季節変動に支配された変動 を、Si は温度条件に支配された変動を示す。また、去 川森林理水試験地が位置する西南日本太平洋側では強度の強い降水イベントが頻繁に発生し、それに伴う流出水量の変動による希釈あるいは増水過程における洗い出しにより、上に掲げた成分に加えて、Cl⁻、Si、NO₃ などの成分濃度が変化すると考えられる。

3) 試験流域間の流出水質の違いと植生との関係

植生の違いが流出水質に与える影響については多 くの関心が寄せられ、古くより植生や林齢の影響 (Vitousek, 1977 など) や、森林伐採の影響 (Likens et al., 1970; Vitousek and Melillo, 1979 など) が調べら れてきた。森林伐採については、植生の消長にともな う養分の吸収量の変化により、特にNO₃ 濃度に影響 が現れることが日本においても知られている(浜端、 2005; 浦川ら、2005; 福島・徳地、2008 など)。本研 究で対象とした3試験流域は近接しており、基盤地質・ 地形・土壌には大きな違いはないが、植生は異なる。 I号沢は谷沿いに広葉樹二次林が、山腹斜面・尾根部 にはヒノキ植栽林が分布する。Ⅱ号沢は流域の中央部 に広葉樹萌芽林が、それ以外には広葉樹二次林が分布 する。Ⅲ号沢は、谷部の一部にスギ林が分布するもの の、広葉樹二次林が広がっており、山腹斜面・尾根部 にはスギ・ヒノキ混交林が分布している。一方、各試 験流域における溶存成分組成は、 I 号沢では EC なら びに Mg²⁺、Ca²⁺、SO₄²⁻ 濃度がやや高く、Si 濃度がや や低い値を示し、Ⅲ号沢は全体的に溶存成分濃度が低 く、Ⅱ号沢は両者の間の値を示す。植生の影響の違い を最も受けやすいと予想される NO; 濃度も I 号沢で 最も高く、Ⅲ号沢で低い傾向を示すが、3試験流域に おける植生の違いから NO、濃度の差異の要因を示唆 するような証拠は得られなかった。また、1996年に おける3試験流域における植生の蓄積量は1号沢の 約 160 m³ha⁻¹、Ⅲ号沢の約 140 m³ha⁻¹ に比べて、Ⅱ号 沢は約260 m³ha-1 と倍近い値を示すが、1992 年から 1996年にかけての蓄積の増加量は3試験流域ともに 類似していた (清水ら、2008)。このことは、植物に よる養分の吸収量が3試験流域において同程度である ことを意味する。このため、3試験流域における各溶 存成分濃度は、Fig.5 に示したように Si と NO、以外 の溶存成分濃度には顕著な差が認められないのであろ う。一方、3試験流域の地質には大きな差がないにも かかわらず、 I 号沢において Si 濃度が低いことは、地 中における水の移動過程における土壌水・地下水と基 盤岩石・土壌との反応時間が相対的に少なく、溶出量 が少ないことを示している。 I 号沢において NO₃ 濃 度が高い理由については不明であるが、降雨流出機構 の違いがNO、濃度の差異に現れている可能性がある。 Ⅰ号沢は形状係数がⅡ号沢、Ⅲ号沢より大きく、急激 な出水が生じやすい地形であることも指摘されている (丸山ら、1960)。今後、土壌水の流出への寄与ならび に渓流内における脱窒などの影響も含めて、3 試験流 域における溶存成分の形成機構の違いを詳細に検討する必要がある。

4) 年流出負荷量の評価

去川森林理水試験地では本研究の調査期間中に降水の量は測定したが、その溶存成分組成は計測しなかった。そのため年流入負荷量が算出できず、流域としての個々の溶存成分の収支を評価することはできない。そこで、溶存成分の収支を評価するために、同時期に近隣で行われた観測結果の利用を検討した。

田野においては調査期間がほぼ同一の1997年~1999年に年流入負荷量が計測されている(Table 5、野上ら、1998;高木・野上、2001)。また、Table 5には去川森林理水試験地より約40km西に位置する「えびの」において、環境庁第4次酸性雨対策調査によって2000年~2001年に計測された年流入負荷量(環境省・酸性雨対策検討会、2002)、ならびに去川森林理水試験地より約70km北の椎葉村に位置する九州大学宮崎演習林(以下、椎葉と略する)において1991年に測定された年流入負荷量(井倉ら、1994)も示した。

えびのと椎葉の年流入負荷量は、測定時期の違いは あるものの、より内陸の椎葉において海塩起源の Na⁺ と CI、ならびに DIN が低い傾向を示す以外は、類似 した値を示す。これに対して、田野における各溶存成 分の年流入負荷量は $S と K^+$ を除いてえびのと椎葉Bにおける年流入負荷量より多い。特に Na⁺ と Cl⁻ の年 流入負荷量が高い値を示していることは、田野では海 岸線からの距離が 15 km と他の 2 地点よりも近いこと によって海塩由来の成分の負荷の影響を強く受けてい るためであると考えられる。一方、DIN の年流入負荷 量は田野では 0.5 kmol ha⁻¹y⁻¹ と環境庁第 4 次酸性雨対 策調査における全国観測点の平均値である 0.52 kmol ha⁻¹y⁻¹とほぼ同等である。また、えびのならびに椎葉 では多少の違いはあるものの、全国観測点の値のばら つきの範囲に収まっている。これに対してSの年流入 負荷量は環境庁第4次酸性雨対策調査における全国観 測点の平均値である 0.29 kmol ha⁻¹y⁻¹ に比べて、いず れの地点においても高い値を示し、特に、えびのは環 境庁第4次酸性雨対策調査における最大値を示してい た。このように、田野における年流入負荷量はえびの ならびに椎葉におけるそれとは大きな差異はなく、宮 崎県中南部の値として妥当な年流入負荷量であると考 えられる。また、田野における調査期間の年降水量の 平均値は、同期間の去川における年降水量の平均値と 同等である (Table 5)。これらのことから、田野におけ る年流入負荷量を用いて、去川森林理水試験地におけ る溶存成分の収支を検討した。

3 試験流域ともに 1997 \sim 1999 年の平均値で見た場合、 Na^+ 、 Mg^{2^+} 、 Ca^{2^+} 、S の年流出負荷量は田野における年流入負荷量より大きな値を示した。また、 K^+ の

年流出負荷量はⅠ号沢、Ⅱ号沢では年流入負荷量より も大きな値を示したが、Ⅲ号沢では年流入負荷量と同 等であった。Cl の年流出負荷量はⅡ号沢では年流入 負荷量より大きな値を示したが、Ⅰ号沢ならびにⅢ号 沢では年流入負荷量と同等であった。これらに対して、 DIN の年流出負荷量は I 号沢では年流入負荷量と同等 であったが、Ⅱ号沢ならびにⅢ号沢では年流入負荷量 よりも小さな値を示した。これらの結果から DIN なら びにCI以外の溶存成分は、流域内において土壌なら びに岩石から風化にともなって溶出し、流出している と推定される。一方、DIN については少なくとも Ⅱ号 沢ならびにⅢ号沢では植物による吸収・固定によって 流域内に保持されていると考えられる。Cl について は、もともと岩石ならびに土壌中にほとんど含まれて なく、風化によって生成されることがないということ に加えて、土壌における吸脱着や植物による吸収の影 響も大きくないと考えられるので、降水によって負荷 された CI は最終的にはすべて流出しているため、収 支の差が少ないであろう。ただし、細かく見ると Cl-は年流出負荷量の方が年流入負荷量に比べてやや高い 傾向を示している。このことは、降水に溶存した形で 流域に供給される Cl に加えて、海塩などの乾性沈着 としての Cl の負荷も起こっていることを示唆してい

なお、上に記したようにⅡ号沢ならびにⅢ号沢に おける DIN の年流出負荷量は $0.1\sim0.5~\mathrm{kmol~ha^{-1}y^{-1}}$ であり、窒素飽和現象の発現が指摘されている筑波 (Muraoka and Hirata, 1988) や東京都西部の東京農工 大学波丘地利用実験実習施設 (現農学部附属広域都市 圏・フィールドサイエンス教育研究センター、FM 多 摩丘陵; Baba and Okazaki, 1998) などの流域を除け ば、日本の多くの森林流域からの DIN 年流出負荷量 と同程度に低い値を示している (Table 5)。これに対し て、 I 号沢では 1997年、1998年における DIN 年流 出負荷量は 0.5 kmol ha⁻¹y⁻¹ 程度であったが、1999 年 は 1.06 kmol ha⁻¹y⁻¹ と窒素飽和現象の発現が指摘され ている流域と同程度の大きな値を示した。1999年は 降水量が 4375 mm と多く、そのため各試験流域の年 流出水量も3008~3371 mm と多くなり、1997年、 1998年の年流出水量の約2倍に増加した。一方、各 試験流域ともに 1999 年の流出水の NO、濃度は 1997 年、1998年とほぼ同レベルの濃度を示した。このため、 1999年の DIN 年流出負荷量は年流出水量の増加の影 響を受けて、1997年、1998年の約2倍に達した。先 に述べたように、Ⅱ号沢ならびにⅢ号沢における NO² 濃度と比べて I 号沢の NO、濃度が高い理由は不明で あるが、I号沢のNO、濃度の3年間の平均値である $0.03 \text{ mmol } L^{-1}$ という値は決して高い値ではない。し かし、去川森林理水試験地では年降水量が多いため、 I号沢については年流出負荷量として算出した時に結

果的に DIN 収支が均衡ないしは流出が超過した。た だし、 I 号沢では 1997 年ならびに 1998 年の DIN 年 流出負荷量は日本の他の森林流域と比べて比較的高い 値を示すが、収支としてみれば年流入負荷量は年流出 負荷量を上回っている。このことは、平年値程度の年 降水量ならびに年流出水量が観測される年にはI号沢 でも試験流域内に DIN が保持されていることを示し ている。しかし、平年値を大きく上回る年降水量なら びに年流出水量が観測される年には、土壌中で硝化に よって生成された NO、が植物に吸収されるのと並行 して雨水によって流亡し、結果として森林流域からの 物質の流出が増加するのであろう。田野における年流 入負荷量は 1997 ~ 1999 年の平均値であり、単年毎の 値ではない。年降水量の多かった 1999 年の年流入負 荷量が 1997 年ならびに 1998 年に比べて大きい可能性 は残されているものの、このような降水量の変動によ って収支の傾向が異なるといった現象が起こるのが、 温暖かつ多雨地域の森林流域における溶存成分収支の 特徴であると考えられる。

また、去川森林理水試験地の年流出負荷量を主溶 存成分に加えて Si の年流出負荷量も報告されている 13 流域における結果 (Table 5) と比較すると、年流 出水量の多い中宮ならびに東谷 (Ikeda and Miyanaga, 2001) 以外の流域に比べて、去川森林理水試験地では ほとんどの成分、なかでも Si と DIC の年流出負荷量 が多いことが特徴的である。岩石の風化過程において、 ケイ酸塩鉱物から Si や塩基を溶脱する過程で、これら の溶存成分の量に見合った DIC が流出する。したがっ て、去川森林理水試験地において Si と DIC の年流出 負荷量が多いことは、多雨の影響を受けて流出水量が 多いために、Siの流出をもたらす岩石、土壌からの風 化による溶出量が増加し、それに付随して Ca²⁺ などの 成分も溶出、流出も増加することを示唆している。こ のことも、多雨地域の森林流域における物質収支の特 徴であると考えられる。流出水量と年流出負荷量の関 係については、事例を増やして今後詳細に検討したい。

5. まとめ

年降水量が 2500 mm を越す多雨地域である西南日本太平洋岸における森林流域からの流出水質と日流出水量との関係ならびに年流出負荷量を明らかにするために、宮崎県の去川森林理水試験地において流出水質の測定を行った。去川森林理水試験地の I 号沢、II 号沢、II 号沢における流出水質は、それぞれの試験流域ごとに多少の違いが認められたものの、3 試験流域ともに、 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 SO_4^{2-} 、DIC 濃度は夏期に低下し、冬期に上昇する明瞭な季節変動を示した。さらに、これらの成分濃度は日流出水量の対数値と強い負の相関を示した。これらのことから、去川森林理水試験地における流出水質は、降水量ならびに日流出水量

が夏期に多く、冬期に少ないという水文特性の季節変動に支配されていることが明らかになった。

また、3試験流域における年流出負荷量と去川森林 理水試験地の近傍に位置し測定期間がほとんど重なっ て計測された田野における年流入負荷量と比較する と、Na⁺、Mg²⁺、Ca²⁺、Sの年流出負荷量は年流入負 荷量より大きな値を示した。このことはこれらの成分 が土壌ならびに岩石から風化にともなって溶出し、流 出していることを示唆している。一方、「号沢では年 降水量が著しく多かった 1999 年には NO、濃度に顕著 な変化は認められなかったものの、結果的に DIN の流 出が流入を超過した。しかし、1997年ならびに1998 年は年流入負荷量よりも年流出負荷量が少ない。また、 Ⅱ号沢ならびにⅢ号沢でも DIN の年流入負荷量より 年流出負荷量が少なく、植物による吸収・固定によっ て DIN は流域内に保持されていた。このように、温 暖多雨地域においても森林は窒素を保持する機能を果 たしている。しかし、平年を大きく上回る多雨の年に は、土壌中のNO3が雨水によって流亡して突発的に 年流出負荷量が増加したと考えられた。

また、去川森林理水試験地では日本の他の森林流域 と比較するとほとんどの溶存成分の年流出負荷量が多いという特徴を示した。これらのことは、ある森林流域における流出水量が多いほど、岩石、土壌からの風化による溶出量が増加し、溶存成分の年流出負荷量も増加することを示唆している。

謝辞

試料を採取し、四国支所に送付していただいた宮崎森林管理署高岡森林事務所に厚く御礼申し上げます。 本研究は農林水産技術会議・総合的開発研究「農林水産業及び農林水産物貿易と資源・環境に関する総合研究」において実施した。

引用文献

- 浅野友子・大手信人・内田太郎・勝山正則 (2000) H⁺ 収支を用いた森林植生が酸中和機構に与える影響の評価,日本林学会誌,82,20-27.
- Baba, M. and Okazaki, M. (1998) Acidification in nitrogen-saturated forested catchment, Soil Science and Plant Nutrition, 44, 513-525.
- EANET (2000) Quality Assurance/Quality Control (QA/QC) Program for Wet Deposition Monitoring in East Asia, 29pp., http://www.eanet.cc/product/qaqc/qaqcwet.pdf.
- 福島慶太郎・徳地直子 (2008) 皆伐・再造林施業が渓 流水質に与える影響 - 集水域単位で林齢の異な るスギ人工林を用いて-, 日本森林学会誌, 90, 6-16.

- Fukushima, K. and Tokuchi, N. (2009) Factors controlling the acid-neutralizing capacity of Japanese cedar forest watershed in stands of various ages and topographic characteristics, Hydrological Processes, 23, 259-271.
- 生原喜久雄・相場芳憲 (1982) スギ・ヒノキ壮齢林小 流域における養分の循環とその収支, 日本林学会 誌, 64, 8-14.
- 浜端悦治 (2005) 森林伐採と渓流水一朽木における森 林伐採実験から,滋賀県琵琶湖研究所所報,22, 31-39
- 平田健正・村岡浩爾 (1988) 森林域における物質循環 特性の渓流水質に及ぼす影響,土木学会論文集, 399, 131-140.
- 平田健正・村岡浩爾 (1991) 筑波森林試験地における 土壌水質及び渓流水質の季節変化について,水工 学論文集,35,105-110.
- Ikeda, H. and Miyanaga, Y. (2001) Comparison of acid neutralization by chemical weathering between acidified and non-acidified watersheds, Water, Air, and Soil Pollution, 131, 407-436.
- 井倉洋二・吉村和久・久保田勝義・中尾登志雄・荒上 和利 (1994) 九州山地中央部における降水および 樹幹流の pH と溶存成分,九州大学演習林報告, 71,1-12.
- 金子真司・服部重昭・後藤義明・玉井幸治 (2002) 竜 の口山森林理水試験地の渓流水質,水文・水資源 学会誌,15,472-485.
- 環境省・酸性雨対策検討会 (2002) 第 4 次酸性雨対策 調査とりまとめ、114 pp, http:// www.acap.asia/ acapjp/doc/4th rain measure investigation.pdf.
- 勝山正則・大手信人・内田太郎・浅野友子・木本秋津 (2000) 降雨流出過程の相違が渓流水質形成機構に 与える影響,水文・水資源学会誌,13,227-239.
- 勝山正則・大手信人・小杉賢一朗 (2004) 風化花崗岩 山地源流域の渓流水 NO₃ 濃度形成に対する水文 過程のコントロール,日本林学会誌,86,27-36.
- 小林 純 (1961) 日本の河川の平均水質とその特徴に 関する研究, 農学研究, 48, 63-106.
- 国松孝男・須戸 幹・島田佳津比古・海老沢秀夫 (1992) 朽木「朝日の森」落葉広葉樹二次林におけ る水質形成機構に関する研究(I)隣接する2試 験流域から流出する渓流水の水質特性の比較,森 林文化研究,13,81-94.
- Kunimatsu, T., Hamabata, E., Sudo, M. and Hida, Y. (2001) Comparison of nutrient budgets between three forested mountain watersheds on granite bedrock, Water Science and Technology, 44, 129-140
- Likens, G. E., Bormann, F. H., Johnson, N. M.,

- Fisher, D. W. and Pierce, R. S. (1970) Effects of forest cutting and herbicide treatment on nutrient budgets in the Hubbard Brook watershedecosystem, Ecological Monographs, 40, 23-47.
- 丸山岩三・遠藤 尚・吉筋正二・浅田正朗 (1960) 去 川理水試験第1回報告,去川試験地の地形と地質, 林試研報,123,45-70.
- 森貞和仁・平井敬三 (1995) 市ノ又山国有林流域の渓 流水質,日本林学会関西支部論文集,4,55-59.
- 森貞和仁・平井敬三 (1996) 高知県葛籠川流域における水質変動,日本林学会関西支部論文集,5,37-38
- Muraoka, K. and Hirata, T. (1988) Streamwater chemistry during rainfall events in a forested basin, Journal of Hydrology, 235, 235-253.
- 野上寛五郎・佐藤盛樹・川口秀義・村本康治・仲川正勝・ 伊藤 哲・谷口義信 (1998) 宮崎大学農学部付属 演習林における渓流水と雨水の溶存成分 - 1997 年のいくつかの渓流水と雨水の pH、EC と数種の イオン濃度-,日本林学会九州支部研究論文集, 51,115-116.
- Shibata, H., Kuraji, K., Toda, H. and Sasa, K. (2001) Regional comparison of nitrogen export to Japanese forest streams, The Scientific World, 1, 572-580.
- 志知幸治・橋本徹・三浦覚・相澤州平・池田重人 (2005) 東北地方内陸部の森林流域における年間及 び融雪期の渓流水質,日本森林学会誌,87,340-350.
- 清水 晃·宮縁育夫·清水貴範·小川泰浩·大丸裕武· 佐藤 保·竹下 幸 (2008) 去川森林理水試験地 観測報告 (1987年1月~2000年12月),森林総 合研究所研究報告,7,13-61.
- 篠宮佳樹・山田 毅・吉永秀一郎・鳥居厚志 (2006a) 四万十川源流部の森林における大雨時の渓流水の NO₃-N 濃度変動,水文・水資源学会誌,19,55-60.

- 篠宮佳樹・山田 毅・稲垣善之・鳥居厚志 (2006b) 四万十川源流部の森林における降雨時の硝酸態窒 素流出特性,水環境学会誌,29,723-729.
- 白井純郎・岡 国夫・浅田正朗 (1962) 去川理水試験 第2回報告,試験地の植生の概要について,林試 研報,140,89-99.
- 白井純郎・浅田正朗・竹下 幸 (1965) 去川理水試験 第3回報告,試験地の土壌の概要について,林試 研報,176,89-99.
- 鈴木雅一 (1985) 短期水収支法による森林流域からの 蒸発散量推定,日本林学会誌,67,115-125.
- 高木正博・野上寛五郎 (2001) 南九州地方におけるコジイ林とスギ論の酸中和能の比較,森林立地, 43,53-58.
- 高木正博・野上寛五郎・仲川泰則 (2004) 南日本太平 洋側の山地小流域における降水に伴う増水時の渓 流水の成分濃度の変化,日本林学会誌,86,279-282.
- 寺島 滋・稲積章生・石原舜三 (1981) 中国・四国地 方の泥質岩中の炭素と硫黄, 地質調査書月報, 32(3), 167-181.
- 浦川梨恵子・戸田浩人・生原喜久雄 (2005) 高齢化したスギ・ヒノキ人工林小流域の斜面下部伐採が土壌および渓流の水質に及ぼす影響,日本森林学会誌,87,471-478.
- Vitousek, P. M. (1977) The regulation of element concentrations in mountain streams in the northeastern United States, Ecological Monographs, 47, 65-87
- Vitousek, P. M. and Melillo, J. M. (1979) Nitrate losses from disturbed forests: patterns and mechanisms, Forest Science, 25, 605-619

短 報 (Note)

アカネズミの食性調査手法の簡易化と環境教育における利用の試み

林 典子 1)* • 井上真理子 1) • 大石康彦 1)

Simple methods for gathering food remains of wood mice and trials in education programs

Noriko HAYASHI^{1)*}, Mariko INOUE¹⁾ and Yasuhiko OISHI¹⁾

Abstract

Wood mice, *Apodemus speciosus*, are useful materials for environmental education programs because they are distributed in various types of forests throughout Japan, and are known to play important roles in local ecosystems such as disperser and predator for plant seeds and preys for top predators. In the present study, we set the artificial feeding sites for the wood mice in order to monitor the relative abundance of wood mice and their food consumption. This simple method was tried in environmental education programs and its efficiency was discussed.

Key words: Apodemus speciosus, feeding sites, seeds, environmental education

はじめに

夜行性で個体数が少ない哺乳類を、環境教育の現場で扱う事例は未だ少ないが、一方で哺乳類は参加者の興味をひきつける格好の素材でもある。従来の環境教育では直接観察をとおして、哺乳類の保護を啓蒙普及して来たが、動物への影響や指導者の不足などの問題をかかえ、多くの現場で活用されている状況ではない(小林,1999)。動物に影響を与えず、哺乳類の生活を知るための身近な環境教育素材が求められている。

アカネズミ(Apodemus speciosus)は日本固有種であるが、北海道から九州までの各地の森林や河川敷などに普通に見られる身近な動物である(阿部,2008)。アカネズミと主要な食物である種子との関わりについての研究事例は多い。ブナの結実量の年変動はアカネズミの個体群動態に影響を与えることが知られている(箕口,1996)。アカネズミは、ミズナラ(Quercus crispula)の堅果を落下した母樹の直下から短期間で持ち去り、巣穴や落葉下へ貯蔵する(Kanazawa & Nishikata, 1976; Miyaki & Kikuzawa,1988)。また、そうして運搬されたコナラ(Q. serrata)、マテバシイ (Pasania edulis)、オニグルミ(Juglans ailanthifolia)は、食べ残されることによって種子散布されることが野外実験によっ

て実証されている (Iida, 1996; Sone & Kohno, 1996; Tamura,2001)。アカネズミが種子を選択し、適切な環 境に運び、適切な深さに埋める行動をとることによっ て、植物の更新に寄与していることが明らかになった (Seiwa et al., 2002; 平田ほか, 2007)。一方、アカネズミ などネズミ類は植物の実生を採食することも知られてい る(北畠・梶,2000)。特にササが林床を覆うような環 境ではネズミ類の生息数が多く、ブナ (Fagus crenata) やミズナラの実生がほとんど生き残ることができない (Ida & Nakagoshi, 1996)。このような研究から、アカネ ズミは森林生態系の中で、消費者あるいは種子散布者と して重要な役割をしめていると考えられている。生物間 相互作用を実証的に示した大台ケ原における一連の研究 においても、アカネズミ、ニホンジカ、ミヤコザサ、種 子の更新が互いに関わり合っていることが示されている (日野ほか,2003)。

しかし、実際に野外でアカネズミがどのような食物を どのような頻度で利用しているのかといった調査事例は 少ない。夜行性で採食活動を野外で観察することが難し いこと、食痕や糞などを野外で採集することが難しいこ とがその原因である。捕殺した個体の胃の内容物から、 植物の根茎部、実生と種実、漿果、昆虫類を主な食物と し、特に夏には昆虫類、秋から春には植物質が多く摂取されることが明らかになっている(村上,1980)。しかし、アカネズミの捕獲には、それが生け捕りであっても、あるいは捕殺であっても、捕獲許可を受けるなどの法的な手続きが必要である。したがって、だれでもどこでも簡単に捕獲調査が始められるというわけではない。

そこで捕殺すること無く、野外でどのような食物を巣に持ち込み、利用しているのかを定量的に知る試みが開発された(曽根・高野、1991;奥村、2008)。これらの研究では、塩化ビニールパイプで作った人工巣を地中に埋設し、細いパイプやチューブを繋げてアカネズミが出入りできる構造にしている。この装置によって、自然環境下で巣内に持ち込まれた食物痕跡を収集でき、アカネズミの食物を調査できることが明らかになった。

アカネズミの分布は下層植生の被度と関係があり、ササ類、イネ科草本などが繁茂している所に好んで生息する傾向がある(村上,1980; Nishikata,1981; Shioya et al. 1990; 関島,1999)。林床で採食活動をおこなうアカネズミにとって、捕食者から身を隠せる茂みや物陰が必須だからである。したがって、林床に適切な隠れ場所を提供することによって、アカネズミの採食場所を作ることが

可能となり、採食物を効率的に収集できることが予想された。そこで、本研究では人工巣穴を埋設するのではなく、簡易な採食筒を地上に設置する手法を開発し、その有効性を試験した。

方 法

1. 調查地

調査は東京都多摩市に位置する独立行政法人森林総合研究所連光寺実験林において行った。連光寺実験林は、多摩川に接した多摩丘陵の一角にあり、標高 $80 \sim 120$ m、面積 5.1ha の孤立林である。周囲は主に住宅によって囲まれているが、公園や緑地が点在する。実験林はコナラ (Quercus serrata)、ヤマザクラ (Prunus jamasakura)、イヌシデ (Carpinus tschonoskii) が優占する二次林であり、中層にはシラカシ (Q. myrsinaefolia)、シロダモ (Neolitsea sericea)、ヒサカキ (Eurya japonica)、下層にはアオキ (Aucuba japonica)、アズマネザサ (Pleioblastus chino) が繁茂している(小林・石井、1982)。調査は実験林の東側斜面の林内約 2ha において、2009年 3 月から 2011年 1 月にかけて行った (Fig.1)。2007年に実験林の北東斜面約 1.5 ha の下層は全て刈り払われた。刈り

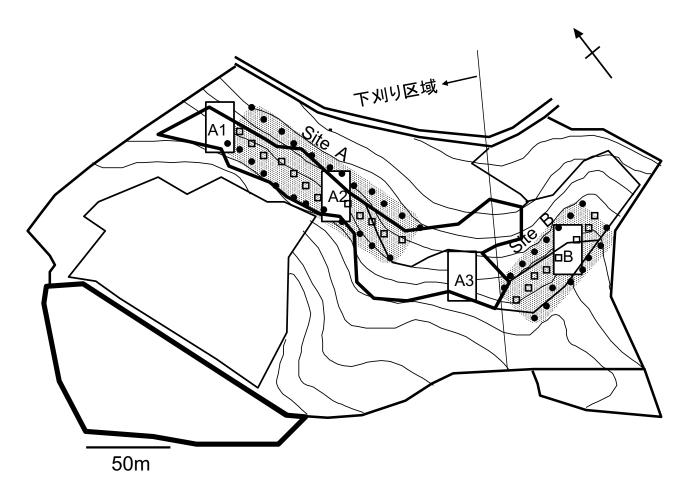


Fig.1 調査地の概要

図中の●は、シャーマントラップを設置した位置、□は塩化ビニール管を設置した位置をそれぞれ示す。また、A1,A2,A3の範囲で、小学生が竹筒を自由に設置した。

払われた北東部と、刈り払われず下層が繁茂した南東部にそれぞれ調査区 A と B を設定した。刈り払われた調査区 A でも、調査を開始した 2009 年の時点で、すでに下層が生育し始めているが、特に中層の常緑木であるヒサカキやシロダモが多い北側ほど下層本数は少なく、中上層が乏しい南へ向かうほどアズマネザサが回復している。こうした植生環境の違いを明らかにするために、調査区 A1、A2、A3、B 地区それぞれに、20 m \times 10 m 0 プロットを取り、樹高 2 m 以上の木本類の毎木調査を行った。また、それぞれのプロット内に 1 m \times 1 m の区画を 10 箇所作り、アズマネザサの桿数密度を調査した。

2. 捕獲調査

2009 年 3 月、5 月、8 月、11 月、2010 年 4 月、7 月、10 月、2011 年 1 月の 8 シーズンにおいて、シャーマントラップを用いてネズミ類の捕獲調査を行い、捕獲個体数の変動を記録した。トラップは約 10 m の間隔で 40 個設置し、各シーズン 2 晩ずつ捕獲を試みた。トラップの配置は、調査区 A に 24 個、調査区 B に 16 個で、斜面に沿って 2 列に並べた(Fig.1)。トラップの最外郭面積は A 地区で 1100 m^2 、B 地区で 700 m^2 である(Fig.1 灰色部分)。餌はヒマワリと落花生を用いた。捕獲された個体は、体重を測定し、性別を記録した。また、再捕獲個体か新規個体かを判別するために、左右の耳介を微量切り込んで個体識別したのち放逐した。また、捕獲個

3. 採食筒の設置と回収

採食場所として、直径 10 cm 長さ 30 cm の塩化ビニール管を設置した。これを 10 m おきに 20 箇所 (調査区 A に 12 個、調査区 B に 8 個)、林床に置き、転がらないように枝などを刺して固定した (Fig.1)。 2009 年 1 月に設置された塩化ビニール管の中身は、 $3\sim5$ ヶ月間隔で回収した。回収月は 2009 年 5 月、8 月、11 月、2010 年 4 月、7 月、10 月、2011 年 1 月の 7 回である。

それぞれの採食筒から回収した中身は全てビニール袋に入れて、室内に持ち帰り、バットの中で食痕を識別し、種類ごとに数を数えた。筒の中には、枯れ葉や未食状態の種子が入っていることがあり、ネズミ類が運び入れた可能性はあるが、偶然、入り込んだ可能性もあるため、ネズミ類の食痕以外の混入物は解析から除外した。コナラやクヌギの食痕では、堅果がいくつもの破片に齧り分けられているので、ドングリの基部にある維管束痕(photo1)の数を数えて個数を示した。また、ネズミ類はヤマザクラの種子の中身を食べる際に、種皮を半分割



Photo1 アカネズミによるコナラ種子の食痕と維管束痕

するので、破片の数の半分の値を採食個数とした。

4. 環境教育現場での試行

2009年7月に、小学校5年生23人および指導者1人の合計24人がそれぞれ2個ずつ、合計48個の採食場所を設置した。採食場所として、塩化ビニール管のかわりに、竹を30cmの長さに切り、節を除いた竹筒を用いた。用いた48個の竹筒の平均直径は8.3cm±1.2(SD)、最小6cm、最大11cmであった。竹筒は調査区A1、A2、A3地区の範囲にそれぞれ16個ずつ設置した(Fig.1)。設置ポイントは、調査区の範囲内で自由に選ばせた。2009年9月に、小学生たちが中身の回収作業を行った。回収方法や種子の数え方は、上述の塩化ビニール管のときと同様、中身を全てビニール袋に入れて室

内に持ち帰り、小学生たちがバットの中で食痕を識別する作業をおこなった。この際、著者らによって、回収物の種の同定を指導した。2009 年 10 月の授業では、全ての竹筒の中に認められた食痕の種や頻度を集計し、調査地の林でネズミ類がどのようなものを餌資源として利用しているのかをまとめた。小学生の授業での取り組みはここまでで終了するが、竹筒は同じ場所に設置し続け、2009 年 11 月、2010 年 4 月、7 月、10 月、2011 年 1 月に、著者らによって中身の回収を継続した。

結 果

植生調査の結果を Table 1 に示す。A1 地区では 20 m × 10 m のプロット内に 8 種類 36 本の上・中層木が確認された。コナラが上層を占め、中層にシラカシやシロ

Table1. 調査地の植生環境(20mx 10mの植性調査プロット内に出現した樹種とその胸高断面積合計と本数)

Site	Species		Basal Area(cm²)	No. trees
Site A1	コナラ	Quercus serrata	8164	6
	シロダモ	Neolitsea sericea	1948	10
	シラカシ	Quercus myrsinaefolia	1823	3
	ヒサカキ	Eurya japonica	500	12
	ホオノキ	Magnolia hypoleuca	491	1
	イヌシデ	Carpinus rschonoskii	113	1
	ネズミモチ	Ligustrum japonicum	29	2
	アオキ	Aucuba japonica	16	1
Site A2	ヤマザクラ	Prunus japasakura	4915	3
	コナラ	Quercus serrata	4643	2
	ウワミズザクラ	Prunus grayama	951	1
	ケヤキ	Zelkova serrata	915	2
	ヒサカキ	Eurya japonica	899	14
	シロダモ	Neolitsea sericea	438	4
	エゴノキ	Styrax japonica	79	1
	シラカシ	Quercus myrsinaefolia	87	1
	イヌシデ	Carpinus rschonoskii	48	1
	イロハモミジ	Acer palmatum	33	1
	アオキ	Aucuba japonica	29	2
	ホオノキ	Magnolia hypoleuca	16	1
Site A3	コナラ	Quercus serrata	2493	3
· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	クヌギ	Quercus acutissima	1885	1
	イヌシデ	Carpinus rschonoskii	1480	8
	ウワミズザクラ	Prunus grayama	266	1
		Callicarpa japonica	99	5
	シロダモ	Neolitsea sericea	47	4
	アオキ	Aucuba japonica	18	3
	ァイヤ ネズミモチ			ა 1
		Ligustrum japonicum	10	•
	ホオノキ	Magnolia hypoleuca	7	1
	イボタノキ	Ligustrum obtusifolium	5	1
	ケヤキ	Zelkova serrata	5	1
	ヒイラギ	Osmanthus heterophyllus	3	1
Site B	コナラ	Quercus serrata	6462	6
	クヌギ	Quercus acutissima	2861	2
	エンコウカエデ	Acer mono	1006	2
	ヤマザクラ	Prunus japasakura	907	1
	ケヤキ	Zelkova serrata	254	1
	ヒサカキ	Eurya japonica	235	7
	エゴノキ	Styrax japonica	211	2
	アオキ	Aucuba japonica	62	10
	イヌシデ	Carpinus rschonoskii	33	1
	ムラサキシキブ	Callicarpa japonica	26	3
	サンショウ	Zanthoxylum piperitum	13	1
	シロダモ	Neolitsea sericea	5	1

ダモが多くみられた。A2 地区は、12 種類 33 本の上・中層木があり、コナラとヤマザクラが上層に混在した。中層にはヒサカキが多く認められたが、そのほかケヤキ、イロハモミジ、シロダモなど多様な樹種も混在した。A3 地区は 12 種 30 本の上・中層木があった。上層のコナラやクヌギの本数密度は低く、中層木の本数も少なく、開けた環境であった。B 地区は、12 種 37 本の上・中層木が見られた。上層はコナラが優占しているが、クヌギ、エンコウカエデ、ヤマザクラも混在した。中層にアオキが多く見られたが、そのほかヒサカキ、ムラサキシキブ、サンショウなど多様であった。

林床のアズマネザサの桿数は、A1地区では平均 1.3± $2.4(SD)/m^2$ 、A2地区では $15.9\pm 8.5(SD)/m^2$ 、A3地区では $24.7\pm 10.0(SD)/m^2$ 、B地区では $29.3\pm 7.7(SD)/m^2$ であった。アズマネザサの高さは A1地区では 0.5m以下、A2地区では $0.5\sim 1.0$ m、A3地区では 1.0m、B地区では $1.5\sim 1.8$ mであった。下刈りをしている A地区に比べて、B地区ではアズマネザサが高く密生していた。また、下刈りした A地区でも上・中層木による被陰の影響で、A1地区ではほとんどササが見られない開けた林床であったが、A2ではササが伸長している部分があり、さらに A3地区ではササの本数は全域に渡ってかなり繁茂していた。

本調査地で捕獲されたネズミ類は全てアカネズミであった。80 ワナ日(40 個のワナ×2 晩)当たりの捕獲個体数は 0 個体から 18 個体まで、大きく変動した(Fig.2)。2009 年 8 月に標識再捕獲調査によって個体数を推定した。1回目の捕獲では、A 地区では 4 個体、B 地区では 3 個体がそれぞれ標識を付けられた。2回目の捕獲では A 地区では 10 個体(期間中の再捕獲を含めるとのべ 15 個体)が捕獲され、2 個体(のべ 3 個体)がすでに前回捕獲され、標識を付けられた個体であった。B 地区では 8 個体(のべ 10 個体)が捕獲され、2 個体(のべ 2 個

体)がすでに前回捕獲され、標識を付けられた個体であった。したがって、その標識率から推定される個体数は A 地区では 20 個体(N= n*t/s= 4*10/2)/1100m²(ワナの最外郭面積)、B 地区では 12 個体(3*8/2)/700m²(ワナの最外郭面積)であった。捕獲個体数は A 地区では 平均 0.19 ± 0.21 (SE) 個体/ワナ、B 地区では平均 0.16 ± 0.23 (SE) 個体/ワナであり、両地区の捕獲個体数には相関が認められたが(R=0.89, P<0.01)、両者の間で有意差は認められなかった(対応のある t 検定、t=0.76, P=0.48)。捕獲個体数は夏季に多くなり、冬季に少なくなる傾向が見られた。体重 20 g 以下の未成熟個体が捕獲された時期は 2009 年 5 月に 1 個体、8 月に 3 個体、2010 年 4 月に 4 個体、7 月に 1 個体であった。

設置した塩化ビニール管 20 個のうち、アカネズミの 食痕が確認されたのは、2009年5月には4個、8月に は10個、11月に10個、2010年4月に8個、7月に10 個、10月に7個、2011年1月に0個であった(Table 2)。 調査区Aに設置した12個の筒の利用頻度は全7期間 の合計で 37 個 / 84 個 (44%)、一方、B 地区に設置し た8個の筒の利用頻度は全7期間の合計で12個/56個 (21%)であり、下層が乏しい A 地区での方が筒を頻繁 に利用する傾向があった (Pearson χ^2 =7.56 P<0.01)。全 7 期間を通して、利用されなかった塩化ビニール管は4個 で、いずれも調査区Bに設置したものであった。全期 間を通して食痕数がもっとも多かったのは、ヤマザクラ の種子で合計 165 個、次がコナラ堅果で合計 90 個、ク ヌギ堅果で合計 25 個であった (Fig.3)。しかし、頻度で 最も多かったのはコナラで、全7期間をとおして35個 の筒で食痕が見られた。そのほか、エゴノキ、イヌシデ、 ギンナンなどの種子の食痕も見られた。さらに、アブラ ゼミやカメムシなどの食痕、アカネズミのフンが入って いる塩化ビニール管もあった。季節的には、ヤマザクラ の種子の利用が春から夏にかけて多く、コナラなどのド

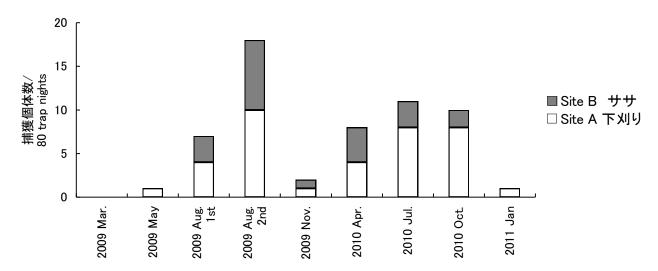
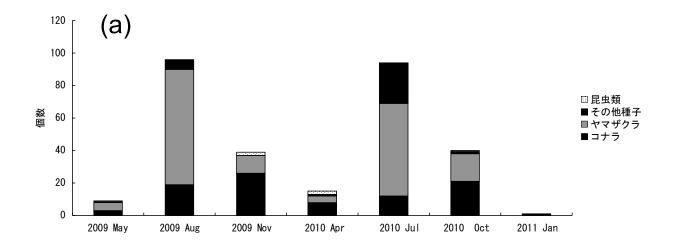


Fig.2 捕獲されたアカネズミの個体数の季節変化

Table	指び答ね田!	た何合担正にお	マ同原せわたマカ	ネズミの食痕の種類と個	可米石
Table 2	現と官が用し	いた採食場所におし) (「スストの食根の神料と作	51 <i>2</i> ;V

塩ビ管No.	調査区	2009 May	2009 Aug	2009 Nov	2010 Apr	2010 Jul	2010 Oct	2011 Jan
1	Α		サクラ1				アブラゼミ1、(フン)	
2	Α		コナラ4、エゴノキ2					
3	Α			カメムシ1			コナラ10	
4	Α		サクラ9、コナラ3	コナラ4、サクラ3	コナラ1	サクラ1	コナラ2、サクラ1	
5	Α		サクラ8、コナラ4		サクラ3、イヌシデ1	サクラ3		
6	Α		コナラ1、サクラ2、エゴノキ1	コナラ1	コナラ1		コナ ラ 5	
7	Α		ギンナン1、コナラ1	アブラゼミ1				
8	Α		イヌシデ1、ミズキ1				コナラ3	コナラ1
9	Α	サクラ3	サクラ50、コナラ2	サクラ8	サクラ1、カメムシ1	サクラ36、コナラ2	サクラ16、エゴノキ1	
10	Α			コナラ12	カメムシ1、(フン)	コナラ3、クヌギ1		
11	Α	コナラ1、サクラ2				サクラ12、コナラ1		
12	Α	コナラ1		コナラ2	コナラ3、(フン)	コナラ1、サクラ1		
13	В		コナラ3	コナラ4		クヌギ1		
14	В							
15	В		サクラ1、コナラ1、(フン)	コナラ2		コナラ2		
16	В			コナラ1	コナラ1	コナラ3、クヌギ23、サクラ4	コナラ1	
17	В	アオオサムシ1、コナラ1			コナラ2			
18	В						(フン)	
19	В							
20	В							



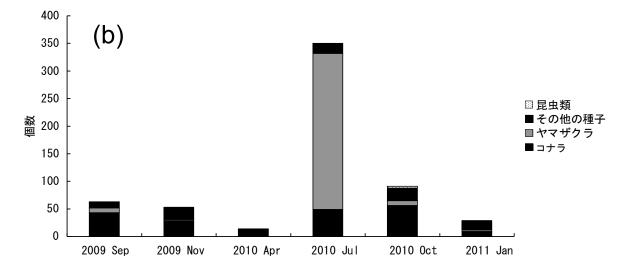


Fig.3 各季節に回収された採食筒の中身

- (a) 塩化ビニール管 20 個の結果
- (b) 竹筒 48 個の結果

ングリ類が夏から秋にかけて増えた。食痕数がもっとも多かったのは両年の夏で、2009 年 5 月から 8 月の設置期間で合計 96 個、次が 2010 年 4 月から 7 月で 94 個であった。一方、冬季の利用は減る傾向があり、2009 年 1 月から 5 月、2009 年 11 月から翌年 4 月、2010 年 10 月から翌年 1 月にそれぞれ 9 個、15 個、1 個と食痕数が少なかった。捕獲個体数と食痕数とは、正の相関関係が認められた $(Y=5.04X+5.25, R^2=0.68, P<0.05)$ (Fig.4)。

小学生によって A1、A2、A3 の調査区内で無作為に設置した竹筒相互の最小距離を求めたところ、0m(隣同士で繋げた事例)から 8.2m であり、平均すると A1では 2.83 ± 2.55 (SD)m、A2では 2.25 ± 1.75 (SD)m、A3では 2.62 ± 1.71 (SD)m であり、調査地間で差はなかった (ANOVA F=0.33, P=0.72)。設置した竹筒 48 個の利用状況を Table 3 に示した。下層植生が乏しい A1地区に設置した竹筒の利用率が最も高く、全期間通すと 43個 / 96個(16個×6シーズン)(45%)であった。やや下層が認められる A2地区では、全期間では 33個 / 96個 (34%)であった。下層が繁茂している A3地区では利用率は 35個 / 96個 (37%)であった。しかし、A1、A2、A3地区の竹筒利用率には有意な差は無かった(Pearson χ^2 =2.46, P=0.29)。

48 個の竹筒でもっとも多くの食痕数が回収されたのはヤマザクラで合計 306 個、次がコナラで 199 個、クヌギは 24 個であった (Fig.4, Photo2)。このほか、ミズキ、エゴノキ、エンコウカエデ、イヌシデの種子、アブラゼミの食痕も見られた。ヤマザクラの食痕は集中して195 個あるいは 54 個も回収された筒があったため、合計数は多くなったが、頻度をみると、もっとも多く確認されたのはコナラで、全期間を通して 79 個の筒で回収

された。ヤマザクラは次いで 24 個の筒で、クヌギは 15 個の筒でそれぞれ回収された。ヤマザクラは 4 月から 7 月の設置期間でもっとも多く見られ、コナラは 7 月から 9 月の設置期間でもっとも多かった。調査区全体で、食痕数がもっとも多かったのは、2010 年 4 月から 7 月の設置期間で 350 個(25 / 48 筒)、2009 年 7 月から 9 月までの設置期間で 64 個(26/48 筒)、もっとも少なかったのは 2009 年 11 月から翌 4 月までの設置期間で 14 個 (7/48 筒)であった。この傾向は上記、塩化ビニール管の結果と同調していた。

考 察

従来、ネズミの食痕を採集する手法として行われてき た埋設式巣穴では、ネズミによる利用率が60%(20個 設置中 12 個で食痕が回収された;曽根・高野、1991)、 あるいは78%以上であった(61個設置;奥村ほか、 2008)。これらはいずれも、茨城県北部に位置する小川 学術参考林において行われた調査結果である。今回、東 京都多摩市で地上に設置した簡易タイプの塩化ビニール 管では利用率が21~44%、竹筒では34~45%であった。 簡易な地上採食場の設置では、埋設式に比較して少なめ の利用率となっていた。こうした人工採食場の利用率に は、装置の設置密度、アカネズミの生息密度、植生環境 など多くの要因が関わっていることが予想される。した がって、異なる地域で得られた利用率の結果を直接比較 することはできない。たとえば、設置密度についてみる と、先行研究では 100 ha の広さの小川学術参考林の中 に20個あるいは61個の装置を設置しているのに対し て、今回は 5.1 ha の広さに 68 個の竹筒と塩化ビニール 管を設置したことになる。効率的な人工採食場の設置密 度は、今後検討する必要がある。しかし、簡易な地上採

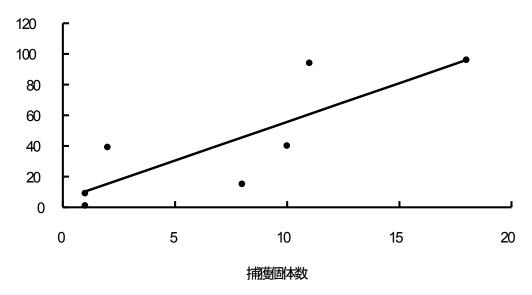


Fig.4 ワナによる捕獲個体数と採食筒に入っていた食痕種子数との関係

Table 3. 竹筒を用いた採食場所において回収されたアカネズミの食痕の種類と個数

竹筒No.	調査区	2009 Sep	2009 Nov	2010.Apr	2010 Jul	2010 Oct	2011 Jan
1	A1						
2	A1	コナラ1	コナラ1			コナラ1、ミズキ1、(フン)	
3	A1		ヒマワリ6、エンコウカエデ1		サクラ7、コナラ3		
4	A1	コナラ3	コナラ2	コナラ1	コナラ1	コナラ6	ケヤキ3, コナラ1
5	A1		コナラ1				コナラ1
6	A1	コナ ラ 6	クヌギ1、コナラ1	コナラ1		コナラ2	コナラ1
7	A1	コナラ3、カナブン1、エゴノキ1	コナラ1		コナラ3	コナラ3	コナラ2
8	A1	コナラ1					
9	A1					コナラ4	コナラ1
10	A1	コナラ1			コナラ2、(フン)		コナラ1
11	A1					アブラゼミ1、コナラ3	
12	A1	コナラ5	コナラ3、クヌギ2、エンコウカエデ1		コナラ1	コナラ13、サクラ1、ミズキ1	クヌギ2, サクラ1
13	A1	コナラ7、(フン)	コナラ6、エンコウカエデ1				クヌギ1
14	A1						
15	A1	コナラ1					
16	A1	コナラ1			コナラ4、サクラ1	コナラ2	コナラ1
17	A2						
18	A2		ミズキ1				ミズキ11
19	A2	サクラ1	サクラ1		サクラ3、 ネズミモチ 5	サクラ1、ウワミズザクラ12	
20	A2				コナラ8	アブラゼミ1、ミズキ2、コナラ2	
21	A2					, , , , , , , , , , , , , , , , , , , ,	サクラ1
22	A2	エゴノキ2、クヌギ1、サクラ1	コナラ1		サクラ9、コナラ1		7771
23	A2	クヌギ1	37.71		コナラ6、サクラ6	コナラ4	
24	A2	2241			=7,500,77,50	ウワミズザクラ1、コナラ1	
25	A2				コナラ1	コナラ5	
26	A2			コナラ2	37.71	1 7 /3	
27	A2	コナラ1	コナラ2	J / /2	サクラ54、コナラ1	アオオサムシ1、ウワミズザクラ3、コナラ1	サクラ1
28	A2	コナラ3、サクラ2	-1,) <u>.</u>		コナラ5、サクラ4	744 7421(772/ 7730(473)	7771
29	A2	サクラ1			サクラ195、(フン)	サクラ7、ウワミズザクラ1	
30	A2	,,,,,	ミズキ3		7771000 (727)	,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,	
31	A2		(フン)		コナラ4、カメムシ1、サクラ1		
32	A2 A2	サクラ4	ミズキ1、サクラ1		a) 74, 77, 47, 1, 19771		
33	A2 A3	9 7 74	ベイド、リンフ !				
34	A3	コナラ1		(フン)	クヌギ5、コナラ1、(フン)		
35	A3	クヌギ2		(11)	コナラ2、(フン)	コナラ1	
36	A3	10-1.7	クヌギ1	(フン)	-1 12.(12)	-/ <i>/</i> /	
37	A3	クヌギ1	2201	(11)			
38	A3	コナラ1		コナラ6、(フン)		クヌギ2	
39	A3	4//	クヌギ1、コナラ1	a, 70.(77)	クヌギ1	7076	
40	A3	コナラ1	(フン)		サクラ1、コナラ1	コナラ2	
41	A3	コナラ1、クヌギ1	コナラ1	イヌシデ1、コナラ1	クヌギ1	コナラ1	
41	A3	コナラ1	コノラ ウワミズザクラ2	1/2/11/2/2/	クヌギ1	-1 / /1	
42	A3	4) //	(プンミスサクラ2		クヌギ2 クヌギ2	コナラ5	
43	A3		(プグ) アブ ラゼ ミ1		7242	J / J3	
44	A3		/ / / / / /		¬+=4 ++/1=0		¬+=1
45 46		コナニュ カマギュ	¬+=4	±=1	コナラ4、サクラ2 クヌギ2		コナラ1
46	A3 A3	コナラ5、クヌギ1	コナラ4 (フン)	コナラ1	シメイン		
48	A3		コナラ5	コナラ1	コナラ1		



Photo2 竹筒に入っていたアカネズミの食痕。 コナラ種子の食痕などがまとまって認められる。

食場の設置でも採食物の収集が可能であることは確認できた。

今回設置した地上採食場の利用は、冬季に減少する傾向が見られた。地上採食場の利用率は、生息個体数の増減に影響されている可能性がある。本調査地での捕獲個体数は、春から夏にかけて増加し、秋から冬に減少して行く結果となった。同様の傾向は、他の調査地でも報告されており、春から夏にかけての増加は、繁殖とそれに引き続く分散活動によるものと考えられている(前島、1996;田中・柴田、2006)。本調査においても、未成熟個体は春から夏に捕獲された。捕獲調査と同じ場所に設置した塩化ビニール管内の食痕数は、捕獲個体数と正の相関を示した。捕獲個体が多い時期には多くの食痕が回収され、少ない時期にはほとんど食痕が回収できなかった。採食場の設置によって、捕獲すること無く、アカネズミの個体数の増減をモニタリングできる可能性がある。

地上採食場の利用率には、林床の植生環境も関わることが示唆された。アカネズミは林床植生が繁茂した環境を好んで利用する傾向があると言われている(Nishikata,1981)。本研究でアカネズミの捕獲数は、下刈りをした A 地区と下刈りをしていない B 地区で差が見られなかった。ササの稈高、稈密度、稈乾燥重量とアカネズミの捕獲個体数との関係を調べた田中ほか(2006)の研究でも、アカネズミの捕獲数とササの形態は関係が認められなかったが、下層がシカによって著しく食害されているプロットと比較して、防鹿柵内では多くのアカネズミが捕獲された。したがって、アカネズミはある程度下層が存在する環境に多く生息するが、下層の繁茂状態についてはあまり敏感な選択性はないと考えられる。

一方、アカネズミが採食活動を安全に行うためには、捕食者から身を隠すヤブや倒木などが必要である。特にそうした下層植生が乏しい環境では、アカネズミにとって隠れ場となる筒を利用するメリットは大きいことが予想される。実際、本研究では下層が乏しい A 地区での方が、下層が繁茂している B 地区に比べて利用率が高い傾向が認められた。さらに、A 地区の中でも最もアズマネザサの本数密度が低い A1 地区で利用率が高かった。以上の結果から、下層が激しく繁茂した環境では、人工的な地上採食場の利用が低くなることが予想される。

アカネズミの食痕から、本調査地では、コナラ、ヤマザクラ、クヌギの種子を主要な餌として利用していることが明らかになった。現存する植生と比べてみると、3種とも調査地でもっとも優占する上層木であった。さらに調査区ごとに利用種子を見てみると、A1地区ではコナラが多く、A2地区ではヤマザクラの比率が上がり、A3地区でクヌギが増えるなど、現存する植生環境と対応した種子利用が見られた。奥村(2008)によると、ブナ、

イヌブナ、ミズナラ、コナラが優占する小川学術参考林では、通常の年にはコナラをもっとも多く利用したが、ブナやクリの豊作年にはそれらの占める割合が増える。アカネズミの食物利用は頻度依存的で、多い種を多く利用すると考えられる(奥村 2008)。また、今回の手法では、昆虫類の一部が認められたが、アカネズミが持ち込んで捕食したものか、竹筒や管に侵入して死亡したものなのか判断できない物が多く、それらは解析から除外した。また、漿果や根茎部など痕跡が残り難い食物は過小評価される可能性があった。したがって本手法は、痕跡が残りやすい堅果類の解析に有効な方法である。

さらに、ネズミ類などでは一般に、素早く食べられる小さな種子などはその場で食べるが、採食時間がかかる大きな堅果類などは、その場で食べず運んで貯食したり、安全な採食場所まで運んでから食べることが知られている(Vander Wall 1990)。採食場の設置で安全な採食場所が提供された場合、全ての食物を運び込むのではなく、比較的、採食に時間がかかる大型種子に偏ることが予想される。したがって、採食場の設置によって必ずしも、全ての餌メニューを把握できるわけではなく、偏りが見られることもあらかじめ注意しなくてはならない。

本調査地では地上に設置した人工採食場を利用する動物はアカネズミのみに限られたが、地域によってはヒメネズミや他の小型動物が利用する状況も考えられる。食痕だけから利用している動物の種を判定することは困難であるため、自動撮影カメラなどとの併用によって、利用動物を特定する必要もある。

今回の調査では、小学生によって竹筒の採食場を設置してもらい、その中身の回収を行う試みをした。小学生が無作為に設置した竹筒の利用率と、10 m間隔で設置した塩化ビニール管の利用率には差が無かった。また、両手法で利用率の季節変動も同調した。筒の材質、設置間隔、設置密度などに敏感に影響されないため、比較的容易に、幅広く環境教育的な現場で利用できると考えられる。

謝辞

本研究は、多摩市立連光寺小学校 5 年生の総合的な学習の時間の中で、一部行われた。ご協力頂いた羽澄ゆり子先生はじめ連光寺小学校諸先生方、生徒のみなさまに感謝申し上げる。アカネズミの捕獲許可に際し、東京都多摩環境事務所自然環境課にお世話になった。植物の同定については森広信子氏、大中みちる氏、昆虫類の同定については井上大成氏、長谷川元洋氏にお世話になった。現場作業は、繁田真由美氏にご協力いただいた。心よりお礼申し上げる。本研究は独立行政法人森林総合研究所交付金プロジェクト「都市近郊林の保全・利用のための生態系機能モニタリングを融合した環境教育活動モデルの開発」によって行われた。

引用文献

- 阿部永 (2008) アカネズミ, 日本の哺乳類 (改訂 2版), p137, 東海大学出版会.
- 日野輝明・古澤仁美・伊東宏樹・上田明良・高畑義啓・ 伊藤雅道 (2003) 大台ケ原における生物間相互作用 にもとづく森林生態系管理, 保全生態学研究, 8, 145-158.
- 平田令子・高松希望・中村麻美・渕上未来・畑邦彦・曽根晃一(2007)アカネズミによるスギ人工林へのマテバシイの堅果の二次散布,日林誌,89,113-120.
- Ida, H. and Nakagoshi, N.(1996) Gnawing damage by rodents to the seedlings of *Fagus crenata* and *Quercus mongolica var grosserrata* in a temperate *Sasa* grassland-deciduous forest series in southwestern Japan, Ecological Research, 11, 97-103.
- Iida, S.(1996) Quantitative analysis of acorn transportation by rodents using magnetic locator, Vegetatio, 124,39-43
- Kanazawa, Y. and Nishikata, S. (1976) Disappearance of acorns from the floor in *Quercus crispula* Forests, J. Jap. For., 58,52-56.
- 北畠啄郎・梶 幹男(2000) ブナ・ミズナラ移植実生 の生残過程における捕食者ネズミ類の生息地選択 の影響,日本森林学会誌,82,57-61.
- 小林毅 (1999) 哺乳類を素材とした環境教育—アニマルウオッチングのガイドラインづくり—, 哺乳類科学, 39,88.
- 小林善雄・石井幸夫 (1982) 浅川実験林多摩試験地の植物, 林業試験場浅川実験林年報, No.4,27-43.
- 前畠郁子 (1996) 照葉樹林と落葉樹林におけるネズミ相 およびアカネズミの繁殖活動と個体数の季節変動 について, 奈良教育大学付属自然環境教育センター 紀要, 1, 21-32.
- 箕口秀夫 (1996) 野ネズミからみたブナ林の動態—ブナ の更新特性と野ネズミの相互関係—, 日本生態学会 誌,46,185-189.
- Miyaki, M. and Kikuzawa, K. (1988) Dispersal of *Quercus mongolica* acorns in a broadleaved deciduous forest. 2. Scatterhoarding by mice, Forest Ecology and Management, 25, 9-16.

- 村上興正 (1980) アカネズミの生態,遺伝,34,75-81.
- Nishikata, S. (1981) Habitat preference of *Apodemus speciosus* and *A. argenteus*, J. Jap. For. Soc.,63, 151-155.
- 奥村みほ子 (2008) 堅果—森のネズミの冬の食料—, 山林 2008,1,46-49.
- 奥村みほ子,安田雅俊,福井晶子,柴田銃江,正木隆,箕口秀夫(2008)冬,ネズミはドングリしか食べない? 第55回日本生態学会大会講演要旨集,428.
- Seiwa, K., Watanabe, A., Irie, K., Kanno, H., Saito, T., and Akasaka, S. (2002) Impact of site-induced mouse caching and transport behaviour on regeneration in *Castanea crenata*, Journal of Vegetation Science, 13, 517-526.
- 関島恒夫 (1999) ヒメネズミ *Apodemus argenteus* とアカネズミ *A. speciosus* の微生息環境利用の季節的変化,哺乳類科学, 39, 229-237.
- Shioya, K., Shiraishi, S. and Uchida, A. (1990) Microhabitat segregation between *Apodemus* argenteus and A. speciosus in northern Kyushu, J. Mamm.Soc.Japan, 14,105-118.
- Sone, K. and Kohno, A. (1996) Application of radiotelemetory to the survey of acorn dispersal by *Apodemus* mice, Ecological Research, 11, 187-192.
- 曽根晃一・高野肇 (1991) 人工巣穴の野ネズミ個体群の 調査への応用の可能性(予報),日林誌,73,238-241.
- 田中美江・柴田叡式 (2006) 人工林における野ネズミの 生息状況および微生息環境選択性,名大森研,25, 1-6.
- 田中美江・斉藤麻衣子・大井圭志・福田秀志・柴田叡弌 (2006) 大台ケ原におけるササの繁殖とネズミ類の 生息状況―特に防鹿柵の設置と関連づけて一, 日林 誌, 88, 348-353.
- Tamura N. (2001) Walnut hoarding by the Japanese field mouse, *Apodemus speciosus* Temminck, J. For. Res., 6, 187-190.
- Vander Wall S.B. (1990) Food hoarding in animals, The University of Chicago Press, 445pp.

研究資料(Research material)

井道裕史 1)*、長尾博文 1)、加藤英雄 1)

Strength properties of the yellow cypress for small clear specimens - Bending strength, compressive strength parallel to the grain, and compressive strength perpendicular to the grain -

Hirofumi IDO^{1)*}, Hirofumi NAGAO¹⁾ and Hideo KATO¹⁾

Abstract

Recently, the yellow cypress (*Chamaecyparis nootkatensis*) has been increasingly used in constructing the foundations of homes due to its durability. However, at present, the standard strength requirements of yellow cypress, which are essential for structural design, remain unconfirmed and this must be urgently rectified. In the previous paper, we performed strength tests of bending, compression parallel to the grain, tension parallel to the grain, shear parallel to the grain and compression perpendicular to the grain. We concluded that the yellow cypress should be classed in the species group of "karamatsu, hiba, hinoki and beihi" if it were added to the present standard strength requirements for non-graded timber are supposed to be derived from the characteristic strength value of small clear specimens. In this study, we performed various strength tests using small clear specimens taken from the timber of the yellow cypress we used in the previous paper, and inspected the consistency of the standard strength requirements from the perspective of small clear specimens. The tested strength was compared with the characteristic strength value of the small clear specimens, and we concluded that yellow cypress should be classed in the species group of "karamatsu, hiba, hinoki and beihi" of the present standard strength requirements for non-graded timber as well as the result of the full-scale timber test.

Key words: yellow cypress, small clear specimen, bending strength, compressive strength parallel to the grain, shear strength parallel to the grain, compressive strength perpendicular to the grain

要 旨

近年、耐久性が高いという利点から、住宅の土台等としてベイヒバ (Chamaecyparis nootkatensis) の利用が拡大している。しかし、ベイヒバは現時点では構造設計に不可欠な基準強度が設定されておらず、その設定が強く求められている。筆者らは既報において、ベイヒバ製材品を用いて、曲げ、縦圧縮、縦引張り、せん断、めり込みの各強度試験を行った。その結果、ベイヒバを現行の無等級材の基準強度の樹種群に追加する場合、「からまつ、ひば、ひのき、べいひ」と同じ樹種群に含めることが適当であると結論づけた。一方、現行の無等級材の基準強度は、無欠点小試験体によって得られた基準強度値に基づいて誘導されていると考えられる。そこで、本報では既報で用いたベイヒバ製材品の非破壊部分から無欠点小試験体を採取して各強度試験を行い、無欠点小試験体の観点から、基準強度の整合性を検証した。得られた各強度を、無欠点小試験体による基準強度値と比較した結果、実大試験の結果と同様に、無欠点小試験体においても、ベイヒバを、現行の無等級材の基準強度の「からまつ、ひば、ひのき、べいひ」の樹種群に含めることが適当であると考えた。

キーワード:ベイヒバ、無欠点小試験体、曲げ強度、縦圧縮強度、せん断強度、めり込み強度

原稿受付:平成 23 年 6 月 6 日 Received 6 June 2011 原稿受理:平成 23 年 6 月 24 日 Accepted 24 June 2011 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), Ibaraki, Japan, 305-8687; e-mail: ido@ffpri.affrc.go.jp

1. はじめに

通常、建築物の設計をする場合、国土交通省が樹種あるいは樹種群ごとに定めた基準強度を用いる。近年、耐久性が高いという利点から、住宅の土台等としてベイヒバ(Chamaecyparis nootkatensis)の利用が拡大している。しかし、ベイヒバは現時点では構造設計に不可欠な基準強度が設定されておらず、その設定が強く求められている。筆者らは既報(井道ら,2010)において、ベイヒバ製材品を用いて曲げ、縦圧縮、縦引張り、せん断、めり込みの各試験を行った。その結果、ベイヒバを現在の無等級材の樹種群に追加する場合、「からまつ、ひば、ひのき、べいひ」と同じ樹種群に含めることが適当であると結論づけた。

一方、現行の無等級材の基準強度は、無欠点小試験体によって得られた基準強度値に基づいて誘導されていると考えられる。本報では既報で用いたベイヒバ製材品(実大試験体)の非破壊部分から無欠点小試験体を採取し、各強度試験を行った。無欠点小試験体から得られた各強度を製材品から得られた各強度と比較するとともに、無欠点小試験体から算出した基準強度値を現行の樹種群の基準強度値と比較し、ベイヒバの基準強度の設定における整合性を検証した。

2. 実験

2.1 供試材

既報で示したように、材長が 4000mm、断面寸法が 105mm×105mmのベイヒバ製材品 200 本を供試材とした。すべての供試材は北米から輸入された丸太を国内で製材(内地挽き)し、人工乾燥したものを購入した。供試材の木取りは心持ち材と心去り材が混在していた。本試験で用いたベイヒバは年輪幅が非常に狭く、肉眼では年輪の判別が困難であったため、平均年輪幅は測定しなかった。

2.2 曲げ試験

試験終了後の実大曲げ試験体のうち、非破壊部分が存在する試験体について、可能な限り JIS Z 2101(日本規格協会,2009)の曲げ試験に従った無欠点小試験体を採取した。試験体の採取個所は、実大試験体(断面寸法 105mm×105mm)の木口面における髄側、樹皮側の2個所とした。木口面から見た無欠点小試験体の採取位置を Fig. 1 に示す。試験体寸法は 25mm (R 方向)×25mm (T 方向)×400mm (L 方向)とした。曲げ試験に先立ち、すべての試験体に対して縦振動法によるヤング係数を測定した。JIS Z 2101に従って、スパン 350mmで中央集中荷重による曲げ試験を行った。加力には最大容量が 1tf のオルセン式材料試験機(森試験機製作所製)を用いた。また、試験体中央下部に変位計(東京測器研究所製、CDP-50)を設置して、データロガー(東京測器研究所製、TDS-601)を介して荷重とともに加力時の

変位を測定した。

2.3 縦圧縮試験

試験終了後の曲げ無欠点小試験体の非破壊部分から、可能な限り JIS Z 2101 の縦圧縮試験に従った無欠点小試験体を採取した。試験体寸法は 25mm (R 方向) × 25mm (T 方向) × 75mm (L 方向) とした。最大容量が5tfのオルセン式万能試験機(森試験機製作所製)を用いて、JIS Z 2101 に従って縦圧縮試験を行った。また、両板目面の中央部分にゲージ長が 20mm のひずみゲージ(東京測器研究所製、PFL-20-11) を貼付し、データロガー(東京測器研究所製、TDS-601) を介して荷重とともに加力時のひずみを測定した。

2.4 せん断試験

試験終了後の曲げ無欠点小試験体の非破壊部分から、可能な限り JIS Z 2101 のせん断試験に従った無欠点小試験体を採取した。1 体の曲げ無欠点小試験体から、せん断面が柾目面および板目面の2種類の試験体を採取した。すなわち、髄側の試験体と樹皮側の試験体を含めると、1 体の実大試験体から最大4 体のせん断無欠点小試験体を採取した。せん断面の寸法は25mm×25mmとした。最大容量が5tfのオルセン式万能試験機を用いて、JIS Z 2101 に従ってせん断試験を行った。

2.5 めり込み試験

試験終了後の曲げ無欠点小試験体の非破壊部分から、 可能な限り JIS Z 2101 のめり込み試験(部分圧縮試 験)に従った無欠点小試験体を採取した。試験体寸法は 25mm (R 方向) × 25mm (T 方向) × 75mm (L 方向) と した。「3. 結果と考察」の項で触れるように、曲げ試験 の結果から樹皮側の試験体と髄側の試験体において各物 性値の差は見られなかったため、樹皮側の試験体と髄側 の試験体とを、試験体番号順に交互に2グループに振 り分け、一方を半径方向に加力する試験体とし、他方を 接線方向に加力する試験体とした。なお、試験体採取に 際して、追柾に近い試験体が、半径方向に加力する試験 体で12体(13%)、接線方向に加力する試験体で10体 (11%) あった。最大容量が5tfのオルセン式万能試験機 を用いて、JIS Z 2101 に従ってめり込み試験を行った。 加圧板の両端に変位計(東京測器研究所製、CDP-50)を 設置し、データロガー(東京測器研究所製、TDS-601) を介して荷重とともに加力時の変位を測定した。

3. 結果と考察

3.1 曲げ試験

曲げ試験の結果を Table 1 に示す。Table 1 に示した 樹皮側の試験体と髄側の試験体におけるすべての物性 値は、有意水準 95%において平均値に有意差はなかっ た。ただし、樹皮側の試験体と髄側の試験体は 105mm

Fig.1. 製材品の木口面から見た無欠点小試験体の採取位置 Collecting places of the small clear specimens from the view on the cross section of timber

Table 1. 曲げ試験の結果 Results of bending tests

		MC	ρ	$E_{ m fr}$	$E_{ m b-ap}$	$\sigma_{ m bp}$	$\sigma_{\rm b}$
		(%)	(kg/m^3)	(kN/mm^2)	(kN/mm^2)	(N/mm^2)	(N/mm^2)
全試験体	n	136	136	136	136	136	136
All specimens	Mean	11.6	505	11.6	10.5	44.7	86.2
	Min.	10.5	420	4.33	3.87	23.0	60.1
	Max.	12.5	633	16.6	15.0	62.2	117
	S.D.	0.449	42.0	2.23	1.88	7.10	10.6
	C.V.(%)	3.87	8.30	19.2	17.9	15.9	12.3
樹皮側試験体	n	68	68	68	68	68	68
Specimens on the bark side	Mean	11.6	503	11.7	10.7	44.7	86.6
	Min.	10.6	420	4.33	3.87	23.0	60.1
	Max.	12.5	633	16.6	15.0	62.2	117
	S.D.	0.448	43.2	2.40	2.02	7.96	11.8
	C.V.(%)	3.87	8.58	20.5	18.9	17.8	13.6
髄側試験体	n	68	68	68	68	68	68
Specimens on the pith side	Mean	11.6	508	11.4	10.4	44.6	85.8
	Min.	10.5	421	4.62	4.13	29.5	61.6
	Max.	12.5	623	15.5	13.7	57.0	109
	S.D.	0.452	40.9	2.04	1.74	6.18	9.40
	C.V.(%)	3.90	8.06	17.9	16.7	13.8	11.0

n: 試験体数 Number of specimens, S.D.: 標準偏差 Standard deviation, C.V.: 変動係数 Coefficient of variation, MC: 含水率 Moisture content, ρ : 気乾密度 Density, $E_{\rm f}$: 縦振動法のヤング係数 Young's modulus by longitudinal vibration method, $E_{\rm b-ap}$: みかけの曲げヤング係数 Apparent Young's modulus in static bending, $\sigma_{\rm bp}$: 曲げ比例限度応力 Bending stress at the proportional limit, $\sigma_{\rm b}$: 曲げ強度 Bending strength

176 IDO, H. et al.

× 105mm 角の製材品から採取したため、両試験体間の 半径方向の距離が比較的近く、その影響が小さかった可 能性も考えられる。

全試験体の曲げ強度の平均値 86.2N/mm²を用いて、無等級材の基準強度との比較を行った。Table 2 に無等級材の基準強度を定める際の基礎データとなった、無欠点小試験体による基準強度値(木質構造研究会,1988)を示す。各基準強度値は平均値であると考えられる。本実験により得られた曲げ強度の平均値を KGS 単位に換算すると、880kgf/cm²となる。この値は、針葉樹 I 群の「あかまつ、くろまつ、べいまつ」の樹種群の基準強度値である 800kgf/cm²を上回った。

次に、実大試験体と実大試験体と同一の試験体から採取した無欠点小試験体について、実大試験体の等級区分ごとに強度比(実大試験体の強度/無欠点小試験体の強度)を算出した。実大試験体の等級区分は「製材の日本農林規格」(農林水産省,2007)の甲種構造材 II の目視等級区分に従った。実大試験体の全長における等級区分に対する強度比、実大試験体の荷重点間における等級区分に対する強度比をそれぞれ Table 3、Table 4 に示す。各等級の試験体数は異なり、かつ試験体数も少ないものの、全長における等級区分および荷重点間における等級区分に対して、おおむね等級が低下するのに従って強度

比も低下することがわかった。等級に係わらず全試験体で見ると、強度比は 0.59 となり、無等級材 (普通構造材)における曲げの強度比 0.45 よりも大きかった。

3.2 縦圧縮試験

縦圧縮試験の結果を Table 5 に示す。縦圧縮ヤング係数、縦圧縮比例限度応力、縦圧縮強度について、樹皮側の試験体と簡側の試験体との平均値には、有意水準95%において有意差はなかった。現行の無等級材の基準強度の基礎データとなった樹種群の基準強度値と、本試験体の平均値とを比較した。本試験の全試験体の平均値45.7N/mm²を KGS 単位に変換すると 466kgf/cm²となる。この値は、針葉樹 I 群「あかまつ、くろまつ、べいまつ」の縦圧縮強度 450kgf/cm² をやや上回っていた。

次に、実大試験体と、実大試験体と同一の試験体から 採取した無欠点小試験体について、強度比を算出した。 全試験体で見ると、強度比の平均値は 0.63 となり、無 等級材(普通構造材)における縦圧縮の強度比 0.62 と ほぼ同程度であった。

3.3 せん断試験

せん断試験の結果を Table 6 に示す。せん断強度について、柾目面試験体、板目面試験体、樹皮側の試験体、

Table 2. 樹種群の基準強度値 Characteristic strength value of the small clear specimens (単位 unit: kgf/cm²)

		樹 種	縦圧縮強度	曲げ強度	せん断強度	
		Species	Compressive	Bending	Shear strength	
			strength parallel	strength	parallel to the	
			to the grain		grain	
	I	あかまつ、くろまつ、べいまつ	450	800	90	
		Akamatsu, Kuromatsu, Douglas fir	450	800	90	
		からまつ、ひば、ひのき、べいひ				
	II	Karamatsu, Hiba, Hinoki, Port	425	750	80	
		Onford cedar				
針葉樹	III	つが、べいつが	400	700	80	
Softwood		Tsuga, Western hemlock	400	700	80	
		もみ、えぞまつ、とどまつ、べにまつ、				
		すぎ、べいすぎ、スプルース		650		
	IV	Momi, Yezomatsu, Todomatsu,	350		70	
		Benimatsu, Sugi, Western red cedar,				
-		Spruce				
	Ι	かし	550	1100	160	
広葉樹	1	Kashi	000	1100	100	
Hardwood	II	くり、なら、ぶな、けやき	430	850	110	
-	11	Kuri, Nara, Buna, Keyaki	400	000	110	

Table 3. 実大試験体の全長における等級区分に対する強度比 (実大試験体 / 無欠点小試験体)
Strength ratio (full-scale specimens / small clear specimens) of full-scale specimens in full-length by visual grading according to the Japanese agricultural standards for sawn lumber

		_	
実大試験体の等級	試験体数	強度比	強度比
Visual grade of	Number of	(無欠点小試験体樹皮側)	(無欠点小試験体髄側)
full-scale specimens	specimens	Strength ratio	Strength ratio
	(割合(%))	(bark side of small clear	(pith side of small clear
		specimens)	specimens)
1級 1st	7 (10)	0.62	0. 67
2級 2nd	25 (38)	0.62	0. 62
3級 3rd	25 (38)	0. 56	0. 57
格外 Out of grade	11 (16)	0.54	0. 51
全試験体 All specimens	68 (100)	0.58	0. 59

Table 4. 実大試験体の荷重点間における等級区分に対する強度比 (実大試験体 / 無欠点小試験体) Strength ratio (full-scale specimens / small clear specimens) of full-scale specimens in loading span by visual grading according to the Japanese agricultural standards for sawn lumber

実大試験体の等級	試験体数	強度比	強度比
Visual grade of	Number of	(無欠点小試験体樹皮側)	(無欠点小試験体髄側)
full-scale specimens	specimens	Strength ratio	Strength ratio
	(割合(%))	(bark side of small clear	(pith side of small clear
		specimens)	specimens)
1級 1st	21 (31)	0.58	0. 62
2級 2nd	27 (40)	0.60	0.61
3級 3rd	17 (25)	0.57	0. 54
格外 Out of grade	3 (4)	0.50	0. 45
全試験体 All specimens	68 (100)	0.58	0. 59

髄側の試験体のすべての組み合わせに対して、有意水準 95% において平均値に有意差はなかった。現行の無等級材の基準強度の基礎データとなった樹種群の基準強度値と、本試験体の平均値とを比較した。本試験の全試験体の平均値 $10.8 \, \text{N/mm}^2$ を KGS 単位に変換すると $110 \, \text{kgf/cm}^2$ となる。この値は、針葉樹 I 群「あかまつ、くろまつ、べいまつ」のせん断強度 $90 \, \text{kgf/cm}^2$ を上回っていた。せん断強度に対しては、密度が大きな影響を及ぼすが、密度においても、すべての組み合わせで平均値に優位差はなかった。中井ら (1982) は、密度と柾目面せん断強度との実験式 $\tau_R = -19.3 + 252 \, R_u$ を示している。ここで、 τ_R は柾目面せん断強度、 R_u は比重である。この式に、本柾目面試験体の比重の平均値 0.496 を代入すると、 $\tau_R = 106 \, \text{kgf/cm}^2$ となり、本試験体の平均値 $110 \, \text{kgf/cm}^2$ にほぼ適合した。

本試験および既報において、いす型せん断試験による全試験体から得られた強度比は 0.64 であった。この値

を、実大試験体および同一の試験体から採取した無欠点小試験体を用いていす型せん断試験を行った、他樹種の結果(井道ら,2006)と比較した。ただし、無欠点小試験体の採取位置やせん断面積は若干異なる。その結果、強度比はスギが0.85、ベイマツが0.80、ベイツガが0.79であり、ベイヒバの強度比は他樹種に比べて小さかった。

3.4 めり込み試験

めり込み試験の結果を Table 7 に示す。めり込み比例限度応力は、有意水準 95% において、半径方向加力の平均値と接線方向加力の平均値との間には有意差はなかった。辺長の 5% めり込み強度は、有意水準 95% において、半径方向加力の平均値が接線方向加力の平均値よりも大きかった。めり込み強度は、曲げ、縦圧縮、せん断強度とは異なり、現行の無等級材の基準強度の基礎データとなった無欠点小試験体による樹種群の基準強度値

178 IDO, H. et al.

は示されていない。ただし、現行のめり込み基準強度は、無欠点小試験体によって得られた比例限度応力の平均値を1.5 倍した値であると考えられる(長尾,2010)。製材のめり込みの基準強度(国土交通省,2001)を Table 8 に示す。本試験における、半径方向加力と接線方向加力とのめり込み比例限度応力の平均値は 5.75N/mm²であり、これを1.5 倍して有効数字 3 桁に四捨五入すると8.63N/mm²となる。この値は、「からまつ、ひば、ひのき、べいひ」の樹種群のめり込みの基準強度 7.8N/mm²を上回り、より上位の「あかまつ、くろまつ、べいまつ」の樹種群の基準強度 9.0N/mm² は下回った。

4. まとめ

ベイヒバを現行の無等級材の基準強度に追加すること を想定し、ベイヒバ製材品から採取した無欠点小試験体 を用いて、各強度試験を行った。得られた各強度を、現 行の無等級材の基準強度の基礎データとなった無欠点小試験体による各樹種群の基準強度値と比較した結果、曲げ、縦圧縮、せん断強度は「あかまつ、くろまつ、べいまつ」の樹種群相当であった。めり込み強度は「からまつ、ひば、ひのき、べいひ」の樹種群相当であった。各強度で相当する樹種群は異なったが、安全側に判断して基準強度の小さい樹種群に揃えることを考えると、ベイヒバは、無欠点小試験体においても、実大試験の結果と同様、「からまつ、ひば、ひのき、べいひ」樹種群に含めることが適当であると考えられる。

謝辞

本研究は、国土交通省「平成 22 年度 木のまち・木のいえ整備促進事業 木造長期優良住宅の総合的検証委員会 材料分科会」の一部として行った。

Table 5. 縦圧縮試験の結果 Results of compressive tests parallel to the grain

		MC	ρ	$E_{ m c}$	$\sigma_{\rm cp}$	$\sigma_{\rm c}$
		(%)	(kg/m^3)	(kN/mm^2)	(N/mm^2)	(N/mm^2)
全試験体	n	179	179	179	179	179
All specimens	Mean	12.2	500	11.5	31.5	45.7
	Min.	11.1	410	4.80	12.0	26.5
	Max.	13.1	689	17.2	52.6	63.0
	S.D.	0.337	46.0	2.42	7.18	5.80
	C.V.(%)	2.75	9.19	21.1	22.8	12.7
樹皮側試験体	n	90	90	90	90	90
Specimens on the bark side	Mean	12.2	495	11.8	32.0	46.0
	Min.	11.2	411	4.91	12.0	26.5
	Max.	13.1	623	17.2	52.6	63.0
	S.D.	0.353	42.5	2.46	7.13	6.33
	C.V.(%)	2.89	8.59	20.9	22.3	13.8
髄側試験体	n	89	89	89	89	89
Specimens on the pith side	Mean	12.3	504	11.1	31.0	45.5
	Min.	11.1	410	4.80	15.6	33.0
	Max.	13.0	689	15.7	50.3	59.1
	S.D.	0.318	49.0	2.34	7.24	5.23
	C.V.(%)	2.59	9.72	21.0	23.4	11.5

n: 試験体数 Number of specimens, S.D.: 標準偏差 Standard deviation, C.V.: 変動係数 Coefficient of variation, MC: 含水率 Moisture content, ρ : 気乾密度 Density, E_c : 縦圧縮ヤング係数 Compressive Young's modulus parallel to the grain, σ_{cp} : 縦圧縮比例限度応力 Compressive stress parallel to the grain at the proportional limit, σ_{c} : 縦圧縮強度 Compressive strength parallel to the grain

Table 6. せん断試験の結果 Results of shear tests parallel to the grain

			MC	ρ	τ
			(%)	(kg/m^3)	(N/mm ²
柾目面	全試験体	n	166	166	16
Radial surface	All specimens	Mean	12.3	496	10.
		Min.	11.5	404	5.7
		Max.	13.2	635	17.
		S.D.	0.374	43.4	1.9
		C.V.(%)	3.04	8.75	18.
	樹皮側試験体	n	86	86	8
	Specimens on the bark side	Mean	12.3	493	10.
		Min.	11.5	407	6.9
		Max.	13.1	621	15.
		S.D.	0.391	42.0	1.7
		C.V.(%)	3.18	8.51	16.
	髄側試験体	n	80	80	8
	Specimens on the pith side	Mean	12.4	499	10.
		Min.	11.5	404	5.7
		Max.	13.2	635	17.
		S.D.	0.351	44.7	2.1
		C.V.(%)	2.83	8.96	19.
板目面	全試験体	n	177	177	17
Tangential surface	All specimens	Mean	12.2	497	10.
		Min.	11.3	399	7.4
		Max.	13.1	663	15.
		S.D.	0.356	44.9	1.7
		C.V.(%)	2.90	9.03	15.
	樹皮側試験体	n	89	89	8
	Specimens on the bark side	Mean	12.2	493	10.
		Min.	11.3	408	7.4
		Max.	13.1	625	15.
		S.D.	0.366	42.5	1.6
		C.V.(%)	2.99	8.61	15.
	髄側試験体	n	88	88	8
	Specimens on the pith side	Mean	12.3	501	11.
		Min.	11.3	399	7.9
		Max.	13.0	663	15.
		S.D.	0.344	46.9	1.7
		C.V.(%)	2.81	9.36	15.

n: 試験体数 Number of specimens, S.D.: 標準偏差 Standard deviation, C.V.: 変動係数 Coefficient of variation, MC: 含水率 Moisture content, ρ : 気乾密度 Density, τ : せん断強度 Shear strength parallel to the grain

180 IDO, H. et al.

Table 7. めり込み試験の結果 Results of compressive tests perpendicular to the grain

		MC	ρ	$\sigma_{ m ep}$	$\sigma_{\mathrm{e}5\%}$
		(%)	(kg/m^3)	(N/mm^2)	(N/mm^2)
半径方向加力	n	90	90	90	90
Loading in the radial direction	Mean	12.4	501	5.84	11.1
	Min.	11.4	409	3.58	5.98
	Max.	13.5	644	14.3	24.3
	S.D.	0.452	45.4	1.60	2.67
	C.V.(%)	3.66	9.06	27.4	24.0
接線方向加力	n	90	90	89	90
Loading in the tangential direction	Mean	12.4	500	5.66	10.3
	Min.	11.2	405	2.94	5.06
	Max.	13.5	624	12.7	20.9
	S.D.	0.431	44.6	1.93	2.61
	C.V.(%)	3.48	8.92	34.0	25.3

n: 試験体数 Number of specimens, S.D.: 標準偏差 Standard deviation, C.V.: 変動係数 Coefficient of variation, MC: 含水率 Moisture content, ρ : 気乾密度 Density, $\sigma_{\rm ep}$: めり込み比例限度応力 Compressive stress parallel to the grain at the proportional limit, $\sigma_{\rm es%}$: 辺長の 5% めり込み強度 Compressive strength when compressed to 5% of side length

Table 8. 製材のめり込みの基準強度 Standard requirements for compressive strength perpendicular to the grain for lumber

	樹種	基準強度		
	如 但 Species	Standard strength requirements (N/mm^2)		
	あかまつ、くろまつ、べいまつ	9. 0		
	Akamatsu, Kuromatsu, Douglas fir			
	からまつ、ひば、ひのき、べいひ	7. 8		
針葉樹	Karamatsu, Hiba, Hinoki, Port Onford cedar			
Softwood	つが、べいつが、もみ、えぞまつ、とどまつ、			
	べにまつ、すぎ、べいすぎ、スプルース	6.0		
	Tsuga, Western hemlock, Momi, Yezomatsu, Todomatsu	6. 0		
	Benimatsu, Sugi, Western red cedar, Spruce			
	かし	19 0		
広葉樹	Kashi	12. 0		
Hardwood	くり、なら、ぶな、けやき	10.8		
	Kuri, Nara, Buna, Keyaki	10. 8		

引用文献

- 井道裕史・長尾博文・加藤英雄 (2006) 試験方法の違い による製材品のせん断強度の評価,木材学会誌, 52(5), 293-302.
- 井道裕史・長尾博文・加藤英雄 (2010) ベイヒバ製材品 の強度性能 —曲げ、縦圧縮、縦引張り、せん断、 めり込み—,森林総合研究所研究報告,9(3),125-148
- 国土交通省 (2001) "特殊な許容応力度及び特殊な材料強度を定める件",平成13年6月12日国土交通省告示第1024号.
- 木質構造研究会 (1988) "木質構造建築読本 ティンバーエンジニアリングのすべて", 木質構造研究会, 井上書院, 119.

- 長尾博文 (2010) 製材のせん断及びめり込み基準強度の 誘導根拠についての検討, "木造長期優良住宅の総 合的検証事業 材料分科会 平成 21 年度 報告書" 50-53.
- 中井孝・山井良三郎 (1982) 日本産主要樹種の性質 日本産主要 35 樹種の強度的性質, 林業試験場報告, 319, 13-46.
- 日本規格協会 (2009) "JIS Z 2101 木材の試験方法",日本規格協会,66pp.
- 農林水産省 (2007) "製材の日本農林規格", 平成 19 年 8 月 29 日農林水産省告示第 1083 号.

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

2011年9月 発行 森林総合研究所研究報告 第10巻3号 (通巻420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

©2011 Forestry and Forest Products Research Institute

BULLETIN

of the Forestry and Forest Products Research Institute

森林総合研究所研究報告

Vol.10-No.3(No.420)



page135

日本の枯死針葉樹林の分解度による材密度の推定

: 酒井 佳美・高橋 正通・石塚 成宏・稲垣 善之・松浦 陽次郎・雲野 明・中田 圭亮・長坂 晶子・丹羽 花恵・澤田 智志・北条 良敬・玉木 泰彦・白井 珠美・武田 宏・相浦 英春・山内 仁人・島田 博匡・岩月 鉄平・山場 淳史・山田 隆信・前田 一・室 雅道

Estimate of wood densities of dead wood by decay classes in Japan by SAKAI Yoshimi, TAKAHASHI Masamichi, ISHIZUKA Shigehiro, INAGAKI Yoshiyuki, MATSUURA Yojiro, UNNO Akira, NAKATA Keisuke, NAGASAKA Akiko, NIWA Hanae, SAWATA Satoshi, HOUJYOU Yoshitaka, TAMAKI Yasuhiko, SHIRAI Tamami, TAKEDA Hiroshi, AIURA Hideharu, YAMANOUCHI Masato, SHIMADA Hiromasa, IWATSUKI Teppei, YAMABA Atsushi, YAMADA Takanobu, Maeda Hajime and Muro Masamichi

page147

去川森林理水試験地における流出水の水質 : 吉永 秀一郎・稲垣 善之・山田 毅・ 三浦 覚・清水 晃・清水 貴範・ 小川 泰浩・宮縁 育夫

Streamwater chemistry at the Sarukawa Experimental Watershed by YOSHINAGA Shuichiro, INAGAKI Yoshiyuki, YAMADA Tsuyoshi, MIURA Satoru, SHIMIZU Akira, SHIMIZU Takanori, OGAWA Yasuhiro and MIYABUCHI Yasuo

page163

アカネズミの食性調査手法の簡易化と環境教育における利用の試み: 林 典子・井上 真理子・大石 康彦

Simple methods for gathering food remains of wood mice and trials in education programs by HAYASHI Noriko, INOUE Mariko and OISHI Yasuhiko

page173

ベイヒバ無欠点小試験体の強度性能 - 曲げ、縦圧縮、せん断、めり込み -: 井道 裕史・長尾 博文・加藤 英雄

Strength properties of the yellow cypress for small clear specimens

- Bending strength, compressive strength parallel to the grain, shear strength parallel to the grain, and compressive strength perpendicular to the grain - by IDO Hirofumi, NAGAO Hirofumi and KATO Hideo





URL http://www.ffpri.affrc.go.jp/

