

論文 (Original article)

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 SHIRAI¹⁰⁾, Hiroshi TAKEDA¹¹⁾, Hideharu AIURA¹²⁾,
Masato YAMANOUCHI¹³⁾, Hiromasa SHIMADA¹⁴⁾, Teppei IWATSUKI¹⁵⁾,
Atsushi YAMABA¹⁶⁾, Takanobu YAMADA¹⁷⁾, Hajime Maeda¹⁸⁾ and Masamichi Muro¹⁹⁾

Abstract

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 cm^{-3}) 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 1 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) 北海道立総合研究機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

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 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 cm^{-3})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 調査地

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

植栽樹種 Planted species	道府県名 Prefecture	調査 林分数 Number of site	緯度 Location N. Lat.		経度 E. Long.		標高 Elevation (m (a.s.l.))	間伐後 経過年 Years since death
			Min ~ Max		Min ~ Max		Min ~ Max	Min ~ Max
			Min	Max	Min	Max	Min	Max
スギ <i>Cryptomeria japonica</i>	秋田	Akita	10	39°42' ~ 40°16'	140°24' ~ 140°41'	110 ~ 450	1 ~ 20	
	茨城	Ibaraki	15	36°35' ~ 36°36'	140°30' ~ 140°34'	130 ~ 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 ~ 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 ~ 470	1 ~ 13	
ヒノキ <i>Chamaecyparis obtusa</i>	埼玉	Saitama	8	36°00' ~ 36°05'	138°52' ~ 139°09'	430 ~ 930	1 ~ 15	
	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 <i>Larix kaempferi</i>	北海道1	Hokkaido1	8	43°05' ~ 43°11'	142°47' ~ 142°53'	260 ~ 360	1 ~ 12	
	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 <i>Picea glehnii</i>	北海道2	Hokkaido2	8	44°31' ~ 44°42'	142°20' ~ 142°33'	250 ~ 420	1 ~ 7	
	トドマツ <i>Abies sachalinensis</i>	北海道3	Hokkaido3	8	41°46' ~ 41°49'	140°59' ~ 141°02'	35 ~ 312	1 ~ 11

して11～20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Graham and Cromack(1982)によって定義された1～5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3～5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 Appearance	分解度 Decay class				
	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、スポンジのようにならぬ部分がある。破片は細くなる。
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3～5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)。

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

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°C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 (1～4) 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1～4の材密度を推定した。

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

a 、 k は定数である。

材密度は分解度1～4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1～2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3～4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、70°C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 g cm^{-3} 、ヒノキ; 0.401 g cm^{-3} 、カラマツ; 0.409 g cm^{-3} 、アカエゾマツ; 0.370 g cm^{-3} 、トドマツ; 0.323 g cm^{-3} (藤原ら, 2004))と分解度1～4までの平均材密度を比較すると、分解度1から2にかけては、樹種間の初期材密度の差が維持されていた(Fig. 2)。

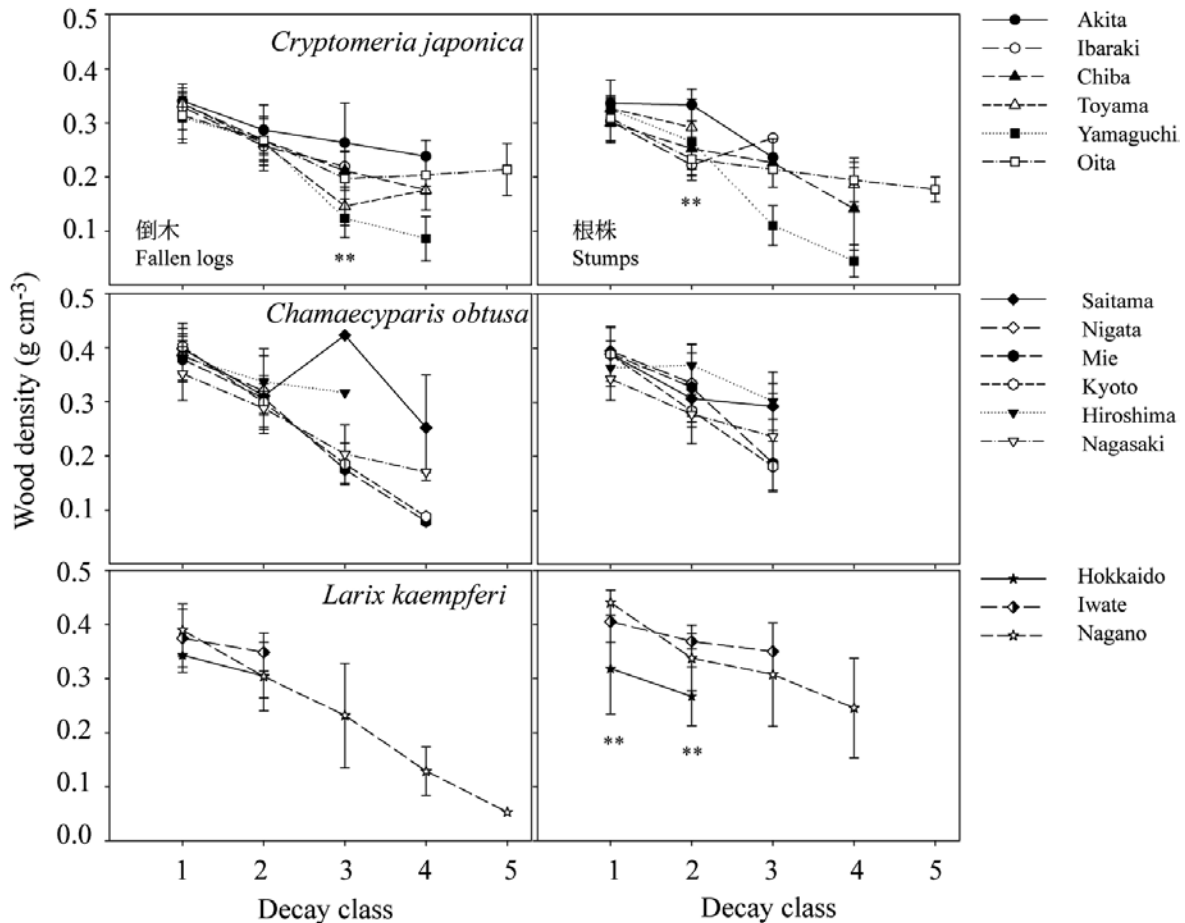


Fig. 1 地域別に比較した倒木と根株の分解度の進行に伴う材密度の変化
地域間の材密度を、調査林分数が2林分以上ある道府県について一元配置分散分析で比較した。
**: $p < 0.05$, Error bar: S.D.

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, $p < 0.01$) とヒノキ (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

植栽樹種	分解度	道府県名	Fallen logs 倒木			Stumps 根株		
			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 <i>Cryptomeria japonica</i>	1	秋田	5	0.341	0.018	6	0.336	0.043
		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
		秋田	5	0.287	0.046	4	0.333	0.029 a ⁽¹⁾
		茨城	3	0.257	0.025	2	0.222	0.017 b
		千葉	19	0.268	0.039	21	0.253	0.051 ab
		富山	5	0.262	0.050	5	0.291	0.053 ab
	3	山口	3	0.267	0.045	5	0.266	0.071 ab
		大分	4	0.268	0.023	3	0.233	0.019 ab
		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
	4	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	-
		秋田	1	0.238	- ⁽²⁾	-	-	-
		千葉	1	0.176	-	4	0.141	0.076
5	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	
	大分	2	0.214	0.048	2	0.177	0.023	
	ヒノキ <i>Chamaecyparis obtusa</i>	1	埼玉	4	0.398	0.047	4	0.388
新潟	12		0.386	0.049	12	0.395	0.046	
三重	7		0.379	0.042	7	0.390	0.022	
京都	4		0.402	0.011	2	0.388	0.002	
広島	6		0.383	0.043	5	0.363	0.034	
2	長崎	12	0.352	0.049	10	0.343	0.039	
	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	
3	広島	4	0.337	0.061	3	0.368	0.039	
	長崎	12	0.288	0.046	12	0.278	0.054	
	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	
4	広島	1	0.317	-	2	0.302	0.054	
	長崎	4	0.203	0.054	3	0.236	0.098	
	埼玉	2	0.252	0.097	-	-	-	
	三重	1	0.079	-	-	-	-	
	京都	1	0.088	-	-	-	-	
カラマツ <i>Larix kaempferi</i>	1	北海道	6	0.343	0.032	5	0.318	0.084 a
		岩手	6	0.375	0.053	5	0.405	0.038 ab
		長野	10	0.389	0.049	4	0.440	0.023 b
	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
	3	長野	9	0.304	0.063	6	0.338	0.061 b
		岩手	-	-	-	1	0.350	-
	4	長野	7	0.232	0.097	8	0.307	0.096
		長野	3	0.129	0.045	3	0.245	0.092
	5	長野	1	0.053	-	-	-	-
アカエゾマツ <i>Picea glehnii</i>	1	北海道	8	0.348	0.015	6	0.384	0.044
	2	北海道	3	0.295	0.013	3	0.356	0.039
トドマツ <i>Abies sachalinensis</i>	1	北海道	4	0.315	0.008	4	0.357	0.030
	2	北海道	2	0.255	0.024	2	0.273	0.025
	3	北海道	3	0.237	0.072	2	0.275	0.035
	4	北海道	1	0.164	-	-	-	-
エゾマツ ⁽⁵⁾ <i>Picea jezoensis</i>	3	北海道	1	0.188	0.005	-	-	-
	4	北海道	1	0.118	0.027	-	-	-

⁽¹⁾: 同一樹種内の地域間の平均材密度を一元配置分散分析を用いて比較した。ANOVA の F 検定で $p < 0.05$ で有意であった場合に、Tukey's test をおこなった。アルファベットが等しいものは有意な差がない ($\alpha = 0.05$)。⁽²⁾: No data ⁽³⁾: 北海道の幾寅天然林採伐試験地で採取したデータ

⁽⁴⁾: The ANOVA was used to compare mean wood densities among sites. If the ANOVA was significant ($p < 0.05$), Tukey's test was used. Alphabet letters show significance ($\alpha = 0.05$). ⁽⁵⁾: The data was collected at a natural forest in Ikutora, central Hokkaido.

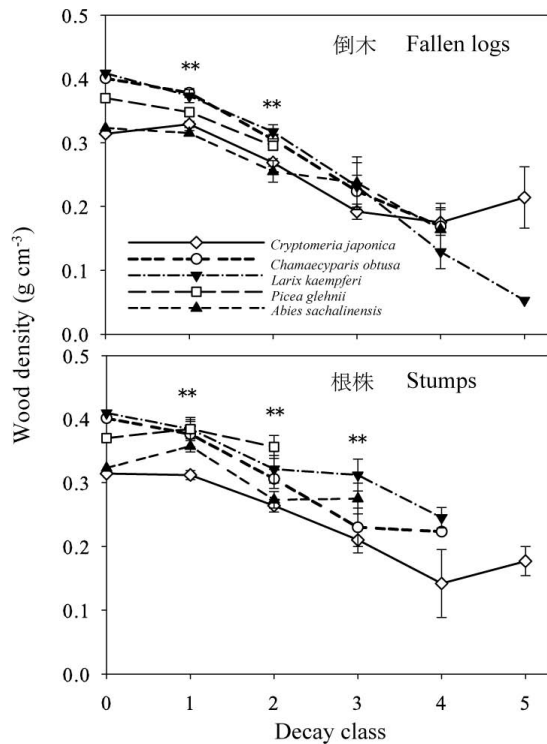


Fig. 2 樹種ごとに比較した倒木と根株の分解度の進行に伴う材密度変化

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.

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 ($p = 0.01 \sim 0.04$) (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, $R^2 = 0.92 \sim 0.99$, $p = 0.01 \sim 0.03$)。

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.

植栽樹種	分解度	調査林 分数	倒木 Fallen logs		根株 Stumps			立枯木 Snags			p 値 ⁽¹⁾		
			材密度 平均値 (g cm^{-3})	標準偏差	調査林 分数	材密度 平均値 (g cm^{-3})	標準偏差	調査林 分数	材密度 平均値 (g cm^{-3})	標準偏差			
Species	Decay class	Number of stands	Mean	SD	Number of stands	Mean	SD	Number of stands	Mean	SD	p value		
スギ <i>Cryptomeria japonica</i>	1	53	0.329	0.035	a ⁽²⁾	47	0.312	0.036	a	10	0.337	0.048	0.03**
	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 <i>Chamaecyparis obtusa</i>	1	45	0.378	0.046	a	40	0.376	0.043	a	9	0.405	0.042	0.20
	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 <i>Larix kaempferi</i>	1	22	0.373	0.048	a	14	0.384	0.075	a	8	0.391	0.015	0.68
	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 <i>Picea glehnii</i>	1	8	0.348	0.015	a	6	0.384	0.044	-	1	0.520	-	0.00**
トドマツ <i>Abies sachalinensis</i>	2	3	0.295	0.013	b	3	0.356	0.039	-	-	-	-	0.06
1	4	0.315	0.008	-	4	0.357	0.030	-	-	-	-	0.04**	
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	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	

⁽¹⁾: 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は有意な差がない($\alpha = 0.05$)。⁽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, **: $p < 0.05$

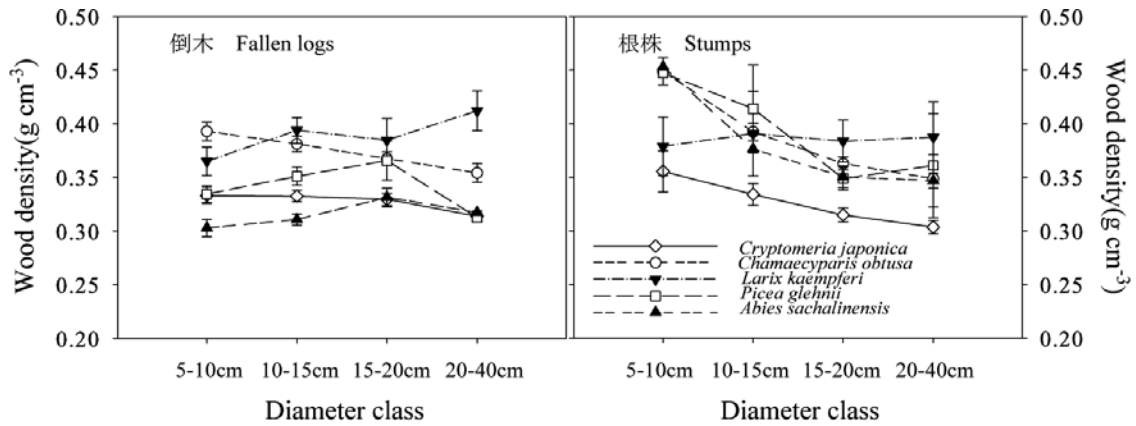


Fig. 3 樹種別に比較した倒木と根株の分解度 1 の直径クラスによる材密度変化
 Error bar: S.D.
 Fig. 3 Wood density changes along diameter classes at decay class 1
 Error bar: S.D.

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		
			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	$n^{(2)}$	a	SE	k	SE	SSR	AIC
スギ							
<i>Cryptomeria japonica</i>	23	0.41	0.03	0.23	0.03	0.03	-82.3
ヒノキ							
<i>Chamaecyparis obtusa</i>	21	0.51	0.05	0.26	0.05	0.08	-52.1
カラマツ							
<i>Larix kaempferi</i>	8	0.49	0.04	0.26	0.05	0.01	-27.7
アカエゾマツ・エゾマツ ⁽¹⁾							
<i>Picea glehnii</i> & <i>Picea jezoensis</i> ⁽¹⁾	4	0.50	0.06	0.32	0.06	<0.01	-14.0
トドマツ							
<i>Abies sachalinensis</i>	4	0.38	0.03	0.19	0.04	<0.01	-17.3

回帰分析には分解度 1 ~ 4 の道府県別の平均材密度をもちいた。
⁽¹⁾: 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⁾: Table3 での分解度 1 ~ 4 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.

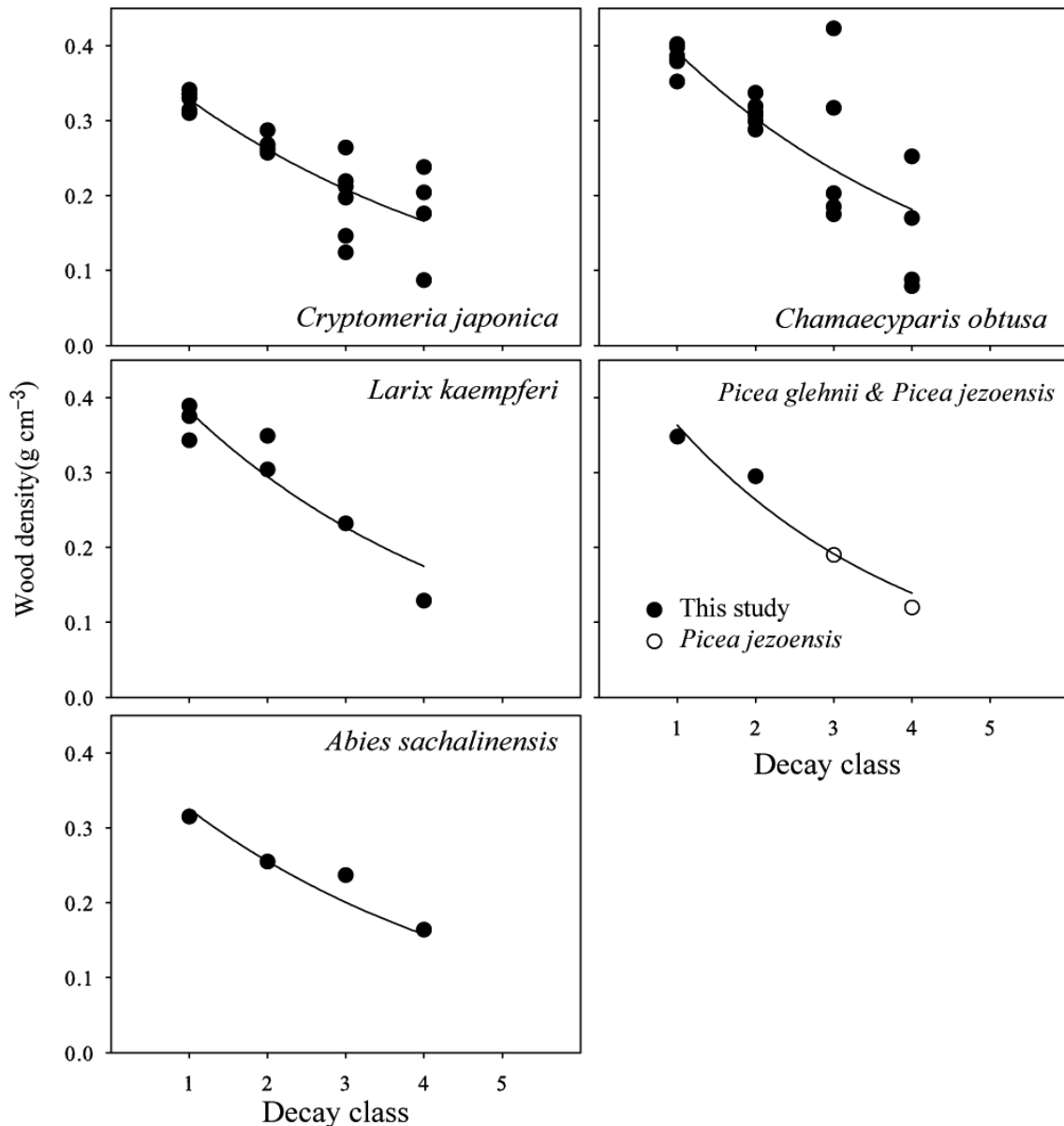


Fig. 4 倒木の分解度と材密度の関係
 曲線は指数関数 ($Wd = a \exp(-kDc)$, a, k は定数) を用いて得られた回帰線

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 (Table 3)。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

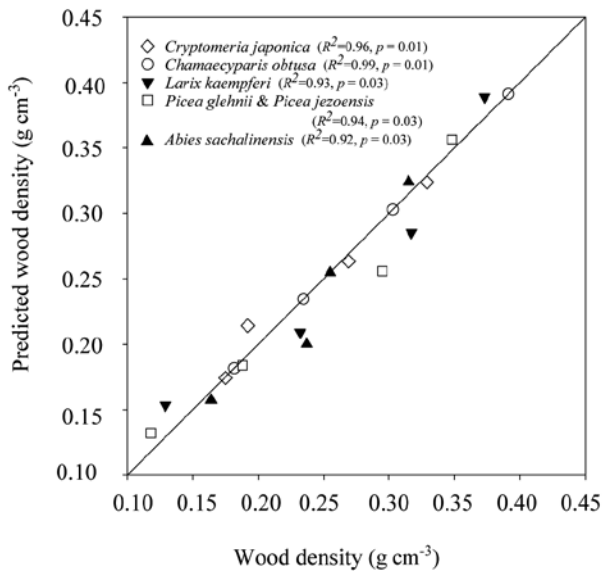


Fig. 5 倒木の分解度1～分解度4の平均材密度と材密度推定値との関係
推定はTable 6の指数回帰分析によって得られた回帰式を用いた

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、材密度の不確か性は大きい。これらの不確か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、生立木の材密度は髓から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和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) 小流域における溪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.
- Ekbohm, 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) 中高齡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, 総谷珠美, 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, 船岡正光, 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., Martikainen, P., Punttila, P. and Rauh, J. (2000) Coarse woody debris and stand characteristics in mature managed and old-growth boreal mesic forests in southern Finland, *For. Ecol. 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 old-growth Douglas-fir forests, *Can. J. For. Res.*, 17, 1585-1595.
- 鈴木保志, 宮田大輔, 秦野瑤子, 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プ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.