論文

過密人工林分における地上部バイオマス推定に関する誤差要因の検証 —40年生ヒノキ人工林における伐倒調査による事例研究—

光田 靖^{1,*}・井上 昭夫²・北原 文章¹
門田 春夫¹・弘田 孝行¹

光田 靖・井上昭夫・北原文章・門田春夫・弘田孝行：過密人工林分における地上部バイオマス推定に関する誤差要因の検証—40年生ヒノキ人工林における伐倒調査による事例研究—，森林計画誌46：15～24，2012
40年生時点で本数密度が2,800本という過密なヒノキ人工林分において伐倒調査によって地上部バイオマスの測定を行い，京都議定書に定められた方式による推定値との比較を行った。その結果，5本のサンプル木のうち4本の推定値が過小であった。推定誤差に偏りが生じた原因に関して，樹幹形状，材積式の適合性，比重およびバイオマス拡大係数について検証したところ，樹幹形状に過密林分特有の特徴はある程度みられたものの，材積式による推定はおおむね偏りなく正確な推定となっていた。一方で，比重およびバイオマス拡大係数は京都議定書報告に用いる値よりも高い値をとる傾向にあった。今回の結果は1つの林分から採取されたわずから5本のサンプル木によるものであり，直ちに一般化することはできない。さらなるデータ蓄積に元づく研究の必要性が示された。

Yasushi Mitsuda, Akio Inoue, Fumiaki Kitahara, Haruo Kadota and Takayuki Hirota: **Examination of factors affecting the error of aboveground biomass estimation in overcrowded planted stands - A case study using sample felled trees from a 40-year-old Hinoki (*Chamaecyparis obtusa*) planted stand-** Jpn. J. For. Plann. 46: 15~24, 2012 We felled sample trees in a 40-year-old Hinoki (*Chamaecyparis obtusa*) planted stand where stand density was quite high (2,800 trees/ha), in order to measure aboveground tree biomass. The measured values of aboveground tree biomass were compared to those estimated using the method defined in the Kyoto Protocol. The estimated aboveground biomass values were lower than the measured values for four of five trees. The stem form of the sample trees was a common stem form frequently observed in crowded coniferous planted stands. The normal tree volume function, however, could estimate tree volume very well. On the other hand, the calculated basic wood densities and biomass expansion factors for each sample tree were higher than the standard values. Our results were based on only five sample trees, therefore it is necessary to collect more data to examine factors affecting the errors in estimating aboveground biomass.

I. はじめに

近年，気候変動緩和のための方策として，森林の二酸化炭素吸収機能に期待が集まっている。気候変動に関する国際連合枠組条約の京都議定書では，条約締結国は2008年から2012年までの第一約束期間において温室効果ガスの排出と吸収の目録（インベントリ）を条約事務局に提出する義務を有し，その中で「土地利

用，土地利用変化および林業分野」として森林からの炭素排出および吸収を報告することになっている（GIO, 2011）。

このような国家規模の炭素吸収だけでなく，例えば高知県における事例のように（三好，2011），企業のCSR活動に関連したカーボン・オフセットのために個別の林分や地域の森林について炭素吸収量を算定する機会が増加している。京都議定書で義務づけられた

* 連絡・別刷請求先（Corresponding author）E-mail: mitsuda@cc.miyazaki-u.ac.jp

1 独立行政法人森林総合研究所四国支所 Shikoku Research Center, Forestry and Forest Products Research Institute, 2-915 Asakuranishimachi, Kochi 780-8077（現所属：宮崎大学農学部）

2 熊本県立大学環境共生学部 Faculty of Environmental & Symbiotic Sciences, Prefectural University of Kumamoto

温室効果ガスインベントリ報告における日本国の採用する森林炭素吸収量算定方法では、林分の生立木（幹、枝、葉および根）に蓄積された林分炭素蓄積量は林分材積×比重×バイオマス拡大係数×地上部・地下部比×炭素含有率により計算される。この算定手法の詳細については、松本ら（2007）およびGIO（2011）を参照されたい。炭素含有率は一律に0.5を用い、比重、バイオマス拡大係数および地上部・地下部比については膨大なデータから樹種別にパラメータ値が決められている（以降、京都議定書パラメータと称す）。これらのパラメータは同一樹種であっても林分の違いによって変動するものであり、京都議定書報告に際してはこれらパラメータの不確実性も評価されている。つまり、京都議定書パラメータはあくまで日本全国を対象とした炭素蓄積量推定を目的として設計されたパラメータであって、個々の林分について炭素蓄積量を推定するために国家レベルのパラメータ値を用いる場合には、ある程度の推定誤差が生じていることを意識しておかなければならない。推定誤差は当然生じるものであり、そこに偏りが生じなければ問題は無い。日本全国について推定する場合には、そのために設計されたパラメータであり、かつ林分数が膨大であることから推定誤差に偏りは生じない。しかし、個別の林分について推定する場合には、立地条件や林分状況によって推定に偏りが生じる危険性がある。

京都議定書第3条第4項において適切な森林管理が温室効果ガス削減のための有効な人為活動として認められており、森林管理を受けた林分についてのみ炭素吸収量を温室効果ガスインベントリ報告において計上することができる。すなわち京都議定書パラメータは適切な森林管理を受けた林分に適用するためのものである。一方で、林業活動の低下から間伐されないまま放置された人工林が大きな問題となっている（藤掛, 2005）。間伐されず過密になった林分に対して京

都議定書パラメータを用いることは適用範囲外であり、推定誤差に大きな偏りが生じる危険性が大きくなると予想される。例えば、日本のオフセット・クレジット（J-VER）制度の中では森林管理による炭素吸収量に対してクレジットが発行される森林管理プロジェクトがあるが、そのうち間伐促進型プロジェクトでは2007年以降に間伐を受けた林分が対象となる。J-VER制度における炭素吸収量算定手法は京都議定書報告に準じるものであり、対象が新たに間伐を受けた林分であることから、京都議定書パラメータが過密林分に適用される可能性があるだろう。なお、J-VER制度についての詳細は環境省のwebサイト（環境省, 2008）および解説記事（現代林業編集部, 2009）を参照されたい。そこで、本研究では過密林分において京都議定書パラメータを利用した炭素蓄積量推定に偏りが生じる可能性について、伐倒調査によるバイオマス計測によって検証することを目的とする。

なお、研究の実施にあたっては、樹木を構成する物質の構成から炭素含有率を一律に0.5とすることは妥当であると考えられるので、炭素蓄積量ではなくバイオマス（乾燥重量）を対象とする。また、伐倒調査において根のバイオマスを正確に計測することが困難なことから、地上部バイオマス（幹、枝および葉バイオマス）を対象とする。対象林分において全ての個体を伐倒調査することは現実的ではないため、サンプル木を選定して伐倒調査を行う。そもそも京都議定書パラメータは林分に対して適用するものであるが、単木を対象とした検証をとおして、林分レベルにおける推定誤差の偏りに言及する。

Ⅱ. 資料

本研究で用いた資料は森林総合研究所四国支所実験林内の40年生ヒノキ（*Chamaecyparis obtusa*）人工林（0.03 ha）において伐倒された5本のサンプル木である。対象林分の概要を表-1に示す。対象林分において下刈りや除伐等の保育作業は行われたが、この20年間に於いて間伐が行われた記録はない。そのため立木密度がヘクタール当たり2,800本、収量比数が0.885および相対幹距比が14.88%となっている。高知県調製のヒノキ収穫表（平成19年度調製）と比較すると、最も平均樹高の近い地位5等で林齢40年生において立木密度1,990本、収量比数0.777および相対幹距比17.79%となっている。これらのことから、いずれの林分密度指標も高密度であることを示しており、対象林分が過密林分となっていることがわかる。

対象林分において、林分調査による樹高測定結果および隣接木との競争関係から、優勢木2本（No.1,

表-1 伐倒調査を行った林分の概要

	林齢 (年)	平均胸高 直径 (cm)	平均樹高 (m)	立木密度 (本/ha)
四国支所	40	14.2	12.7	2800
蒜山演習林	23	16.7	10.6	1300
	36	18.2	14.5	1850
	29	15.2	10.7	2300
	37	19.1	13.5	2050
	34	18.0	14.1	1550
	27	17.0	10.5	1900
	39	27.0	16.8	750
	39	18.4	12.2	2000
	38	21.8	15.0	1750
	39	24.0	16.0	1350

表－2 伐倒調査木の概要

No.	胸高直径 (cm)	樹高 (m)	枝下高 (m)	幹材積 (m ³)	地上部 バイオマス (kg)	幹重量 (kg)	枝重量 (kg)	葉重量 (kg)
1	19.3	15.9	8.5	0.232	123.5	92.7	13.9	16.9
2	10.3	12.3	8.7	0.050	26.7	23.2	2.0	1.5
3	12.5	14.1	9.7	0.092	53.4	44.9	4.0	4.5
4	19.7	15.3	7.7	0.232	136.1	98.9	23.5	13.7
5	11.5	13.8	10.1	0.075	45.4	37.2	4.2	4.0

No.4), 中間木 1 本 (No.3) および劣勢木 2 本 (No.2, No.5) を選定して, 2011 年 9 月に伐倒調査を行った。伐倒調査木の概要を表－2 に示す。伐倒調査木については伐倒前に胸高直径 (1.2 m) を測定し, 伐倒直後に樹高を計測した。樹幹については胸高位置, 地際から 2 m, 以降 1 もしくは 2 m 間隔で玉切りして生重量を計測した。その後, 末口部で円盤を採取して皮付き直径を計測し, 含水率を測定するためのサンプルを採取した。枝については高さ別に生重量を計測し, 含水率を測定するためのサンプルを採取した。葉についても同様に, 高さ別に生重量計測および含水率測定サンプルの採取を行った。含水率を測定するためのサンプルは乾燥前の重量を計測した後, ドライオーブンに入れ 85℃ で 3 日間乾燥させて乾燥重量を計測した (森林総合研究所, 2005)。なお, 幹のサンプルについては乾燥中の重量を測定したが, 変化がみられなかったため 3 日間で乾燥を打ち切った。乾燥前後のサンプル重量比から高さ別の含水率を算出し, 幹, 枝および葉について高さ別の乾燥重量を算出して各個体の部位別バイオマスを求めた。

本研究においてはバイオマス推定を行う上で問題となるような特徴が, 過密林分における個体で顕著にみられるのか検証することを目的としている。そこで樹幹形状に関する比較対象として, 鳥取大学蒜山演習林内の 10 林分から 5 本ずつサンプルされた計 50 本の伐倒調査による樹幹細りデータ (井上・黒川, 2001; INOUE et al., 2001) を用いた (表－1)。このデータにおいては樹幹の細りを計測するため, 相対高 0.1 ごとの直径が計測されている。なお, 鳥取大学蒜山演習林での伐倒調査が行われた林分について林分密度の指標を計算したところ, 収量比数の平均値が 0.698, 最大値が 0.803 であり, 相対幹距比の平均が 19.03%, 最小値が 15.93% であり, 本研究において伐倒調査を行った林分と比較して林分密度が低いことがわかる。以降, 森林総合研究所四国支所実験林で採取された伐倒調査木データを四国支所データ, 鳥取大学蒜山演習林で採取された伐倒調査木データを蒜山演習林データと称す。

Ⅲ. 方法

1. 幹形検証

京都議定書方式による炭素蓄積量推定においては, 材積をいかに精度良く推定できるのかが問題となる。材積推定には林野庁によって調製された立木幹材積表 (林野庁計画課, 1970) もしくはそれに記載された材積式を用いるのが一般的である。過密林分においては樹高に対して直径の小さい, すなわち形状比の高い個体が多いことが予想されるが, そのような個体が標準的な個体より偏った樹幹形をとる場合, 立木幹材積表や材積式を用いると推定に偏りが生じる危険がある。そこでまず, 過密林分における個体について樹幹形状にどのような特徴がみられるのか検証する必要がある。ここでは樹幹形状の代表的な指標と考えられる形状比, 正形数および正常相対幹曲線パラメータを用いて伐倒木の形状を評価する (梶原, 1993)。幹形に関する解析については四国支所データだけでなく, 蒜山演習林データにも適用して比較した。

形状比は胸高直径に対する樹高の比率として次式で表現される (例えば, 梶原, 1993)。

$$R_{hd} = \frac{h}{d_b} \quad (1)$$

ここで, R_{hd} は形状比, h は樹高および d_b は胸高直径を示す。

正形数は任意の高さにおける直径と樹高で計算される円柱体積に対する, 幹材積の比率として次式で表現される (例えば, 梶原, 1993)。

$$\lambda_x = \frac{v}{w} = \frac{v}{\pi d_x^2 h / 4} \quad (2)$$

ここで, λ_x は相対高 x についての正形数, w は円柱体積, v は幹材積および d_x は相対高 x における直径を示す。本研究において相対高については梢端部を 0, 地際部を 1 と定義して, 相対高 $x=0.5$ および 0.7 について正形数 ($\lambda_{0.5}$ および $\lambda_{0.7}$) を求めた。なお, 幹材積は四国支所データについては区分求積法により, 蒜山演習林データについては 5 次式の幹曲線式を用いて (井上・黒川, 2001), それぞれ算出した。

正常相対幹曲線は相対高と任意の高さにおける直径を基準とした相対直径との関数として表現される (例

えば、梶原, 1993)。相対高 $x=0.9$ おける直径 ($d_{0.9}$) を基準直径とし、幹曲線式を基準直径に対する相対半径 y ($= d_x/2d_{0.9}$) と相対高 x との関数として KUNZE 式により定式化した (例えば、井上・黒川, 2001)。

$$y^2 = ax^b \quad (3)$$

ここで、 a および b はパラメータである。なお、四国支所データについては相対高 0.9 における直径を測定していないので線形補間によって $d_{0.9}$ を求めた。

四国支所データと蒜山演習林データにおける樹幹形状の差を表現するため、正常相対幹曲線のパラメータ a および b に階層構造を以下のような手順で導入した (参照、丹後, 2000)。まず、一般的なヒノキの樹幹形を表現する超パラメータを設定する。この超パラメータから、四国支所データおよび蒜山演習林データそれぞれの平均的なパラメータ (以降、地域レベルパラメータと称す) を派生させる。次に、地域レベルパラメータから各林分における平均的な樹幹形状を表現する林分レベルパラメータを派生させる。なお、四国支所データについては同一の林分からのみデータを採取したため、林分レベルパラメータを地域レベルパラメータと等しいとして取り扱った。さらに、各伐倒調査木の樹幹形を表現するパラメータ (以降、個体レベルパラメータと称す) を、それぞれの個体が所属していた林分レベルパラメータから派生させる。超パラメータの事前分布は平均値 0 および分散 100 の正規分布とした (参照、丹後, 2000)。その他のパラメータについては、上位のパラメータを平均値とする正規分布を事前分布とした。また、各事前分布の分散パラメータはそれぞれ独立な逆ガンマ分布 (パラメータは二つとも 0.001) を事前分布とした (参照、丹後, 2000)。以上より、後述する MCMC 法によるベイズ推定を行うための事前分布は以下のように定式化される。

$$a_{hyp} \sim N(0,100) \quad (4)$$

$$a_{rgn}[i] \sim N(a_{hyp}, \sigma_{rgn}^2) \quad (5)$$

$$a_{stn}[ii] \sim N(a_{rgn}[i], \sigma_{sgn}^2) \quad (6)$$

$$a_{ind}[iii] \sim N(a_{stn}[ii], \sigma_{ind}^2) \quad (7)$$

$$1/\sigma_{rgn}^2 \sim Ga(0.001, 0.001) \quad (8)$$

$$1/\sigma_{stn}^2 \sim Ga(0.001, 0.001) \quad (9)$$

$$1/\sigma_{ind}^2 \sim Ga(0.001, 0.001) \quad (10)$$

ここで a_{hyp} , a_{rgn} , a_{stn} および a_{ind} はそれぞれ超パラメータ、地域レベルパラメータ、林分レベルパラメータお

よび個体レベルパラメータを示す。 σ_{rgn}^2 , σ_{stn}^2 および σ_{ind}^2 は地域レベル、林分レベルおよび個体レベルの分散パラメータをそれぞれ示す。 i , ii および iii は地域、林分および個体を示す。上記ではパラメータ a について階層構造を説明したが、パラメータ b も同様の構造を持つ。階層化されたパラメータによって KUNZE 式を書き直すと、個体 iii における相対半径 (y_{iii}) と相対高 (x_{iii}) との関係は次式で表される。

$$y_{iii}^2 = a_{ind}[iii] \cdot x_{iii}^{b_{ind}[iii]} \quad (11)$$

このような階層構造をもつパラメータを推定するため、マルコフ連鎖モンテカルロ法 (以降、MCMC 法と称す) を用いたベイズ推定を適用した。MCMC 法は繰り返しシミュレーションによって推定対象とする未知パラメータについて、事後分布 (データが与えられた条件での未知パラメータの確率分布) からの標本とみなすことができる擬似標本 (以降、MCMC 標本と称す) を得る手法である (参照、豊田, 2008)。この MCMC 標本について代表値 (平均値, 中央値, 分散および 95% 信頼区間など) を求めて未知パラメータの性質を推定する。本研究においては WinBUGS (SPIEGELHALTER et al., 1996) を用いて MCMC 法を適用した。シミュレーションの繰り返し回数は 10 万回とし、初期値の影響を取り除くため後半 2 万回の標本のみを用いた。

2. 材積推定

区分求積法による材積の計算値を真値として、材積式などにより推定された材積と比較した。比較対象とするのは、林野庁による材積式 (林野庁計画課, 1970) (以降、経験的材積式と称す)、井上・黒川 (2001) により導出された理論的材積式および正常相対幹曲線式を用いて計算した回転体体積である。なお、経験的材積式については細田ら (2010) による補正を行った。回転体体積の計算に用いる相対幹曲線式としては KUNZE 式に加えて、適用されることの多い BEHRE 式 (例えば、INOUE, 2001; 井上, 2002) を用いた。

3. 地上部バイオマス推定

京都議定書に定められた方式に従って、経験的材積式により推定された材積を元に、比重およびバイオマス拡大係数を用いて地上部バイオマスを推定し、実測のバイオマスと比較する。なお、比重およびバイオマス拡大係数についての京都議定書パラメータの値は、それぞれ 0.407 ton/m³ および 1.24 ton/ton である (GIO, 2011)。

さらに、バイオマス推定における誤差要因を明らかにするため、比重およびバイオマス拡大係数をサン

ル木データの計測値から算出し、京都議定書パラメータと比較する。本研究においては単純に、個体の幹バイオマスを幹材積で割ったものを比重とし、地上部バイオマスを幹バイオマスで割ったものをバイオマス拡大係数とした。

4. 部位別バイオマス推定

近年、自然エネルギー利用推進の一環として、木材としては用いられない端材、枝および葉など、これまで林地残材として利用されなかったバイオマスを木質エネルギーとして利用することが提案されている（例えば、久保山, 2012）。木質エネルギー利用推進のためには、利用可能なバイオマスを推定することが必要となる。そのため、幹だけでなく枝・葉のバイオマスも推定する必要が生じている。

本研究においては、FUKUDA et al. (2003) による部位別バイオマス割合推定式（以降、FUKUDA モデルと称す）および HOSODA and IEHARA (2010) による部位別バイオマス推定式（以降、HOSODA モデルと称す）を用いて枝および葉のバイオマスを推定し、実測値と比較する。なお、FUKUDA モデルによる推定の際には経験的材積式による材積推定値および京都議定書パラメータの比重による幹バイオマスの推定値を入力値として用いた。

Ⅳ. 結果と考察

1. 幹形検証

四国支所データにおいて計測された形状比は 0.78 から 1.21 と高く、特に劣勢木として選定された個体 (No.2 および No.5) で著しく高い値であった (表-3)。また、蒜山演習林データと比較しても高い値を示した (図-1)。高い形状比の値は樹高に対して直径の細い幹形であることを示しており、一般に言われる高密度林分の特徴と合致している (安藤ら, 1968; 竹内ら, 1997)。例えば、渋谷ら (2011) は風害のリスクが高くなる基準として形状比 0.7 を林分密度管理の基準として提示している。伐倒調査を行った林分の平均樹高および平均直径から算出した形状比は 0.89 であり、

表-3 伐倒調査木の樹幹形状に関する指標値

No.	形状比	正形数		幹曲線パラメータ	
		相対高 0.5	相対高 0.7	<i>a</i>	<i>b</i>
1	0.82	0.97	0.69	0.282	1.139
2	1.19	1.08	0.74	0.271	1.174
3	1.13	0.97	0.61	0.287	1.077
4	0.78	1.00	0.69	0.279	1.142
5	1.21	0.94	0.70	0.286	1.071

高知県調製の収穫表において 40 年生時の平均樹高および平均直径から形状比数を計算すると地位 1 等から 5 等で 0.76 から 0.81 の値をとる。これらのことから、林分平均値でみても本研究の対象林分は過密な林分であることが確認できる。

サンプル木から計算された正形数は相対高 0.5 について 0.84 から 0.98, 相対高 0.7 について 0.61 から 0.74 の値を示した (表-3)。ヒノキを含む針葉樹一般では相対高 0.5 における正形数は 1.0, 相対高 0.7 における正形数は 0.7 で安定するとされている (梶原, 1993; 井上・黒川, 2001)。四国支所データの正形数はこれらの標準的な値と近い値をとっており、著しく偏った樹幹形状をしているわけではないと考えられる。また、四国支所データにおける正形数の値は、蒜山演習林データにおいて計測された正形数の範囲に収まっており (図-1), このことから正形数からみ

図-1 形状比と正形数との関係

て四国支所データは著しく偏った樹幹形をしているわけではない。

KUNZE 式による正常相対幹曲線のパラメータを MCMC 法により推定したところ、MCMC 標本の時系列変動および収束判断のための Gelman-Rubin 統計量 (GELMAN et al., 2003) から、全てのパラメータは収束しているとみなすことができた。四国支所データの個体レベルパラメータについて、得られた MCMC 標本の中央値を推定量として表-3に示す。また、地域レベルと個体レベルのパラメータ a および b について MCMC 標本の分布を図-2に示す。地域レベルパラメータでは a および b ともに、蒜山演習林データよりも四国支所データで相対的に小さい傾向にあった (図-2a および c)。両パラメータともに、地域レベルパラメータの MCMC サンプルが 95% 範囲で重なっておらず、四国支所についての地域パラメータが小さい傾向は明瞭であるとする。個体レベルパラメータは地域レベルパラメータの中央値から極端に大きく離れることもなかったことから (図-2b および d)、四国支所実験林で採取されたサンプル木では正常相対幹曲線を表現する KUNZE 式のパラメータが小さい傾向にあるといえる。KUNZE 式パラメータ b は樹幹形状

を表現するパラメータであり、0 のときに円柱体、1 のときに放物線体、2 のときに円錐体および 3 のときにナイロイドとなり、一般に 1 から 2 の値をとるとされる (梶原, 1993)。KUNZE 式パラメータ b の地域レベルパラメータについて MCMC 標本の中央値を計算したところ、四国支所データでは 1.12 であり、蒜山演習林データでは 1.54 であった。このことは四国支所データにおける個体のほうが、蒜山演習林データの個体と比較して平均的に円錐体よりも放物線体により近い形状をしており、より完満な樹幹形状であることを示している。さらに、これらの中央値を地域レベルパラメータの推定値として KUNZE 式に代入して、四国支所データおよび蒜山演習林データにおける平均的な正常相対幹曲線を描いた (図-3)。なお、パラメータ a および b を独立に推定しているため $x=0.9$, $y=0.5$ の点は通過しない。四国支所データにおける平均的なパラメータによる正常相対幹曲線は、蒜山演習林データのものより根元から梢端へ向けての直径減少 (細り) が緩やかであり、完満な幹形であることを示している。これは林分密度が継続して高いため陽樹冠が小さいまま成長を続けてきた結果であると考えられる (梶原, 1993)。

注: 図中で黒色は四国支所, 灰色は蒜山演習林を示す。実線は地域レベルパラメータの MCMC 標本における中央値, 破線は地域レベル (a, c) および個体レベル (b, d) での MCMC 標本の分布密度を示す。

図-2 MCMC 法により推定された KUNZE 式パラメータの分布密度

図－3 推定された地域レベルパラメータを用いた
KUNZE 式による正常相対幹曲線

以上をまとめると、形状比および正常相対幹曲線パラメータの数値は、森林総合研究所四国支所実験林内の過密な林分から採取されたサンプル木の樹幹形状において、過密な林分に起因する特徴があったことを示している。一方で、サンプル木の正形数は標準的な値を示していた（図－1）。相対高 0.5 および 0.7 における正形数は一般的に変動の少ない指標であるが（井上・黒川，2001），形状比や正常相対幹曲線において明らかな特徴がみられる個体についても安定した値となった。本研究においては一般的に用いられている幹材積式を過密林分の個体に適用する是非を検討する材料として、過密林分において樹幹形状に特異性がみられるのかを検討した。その意味においては、材積を基礎として算出される正形数が標準的な値であったことは、他の指標と比較して重要であると考えることができる。このことについては、以降において材積推定の結果とあわせて検討する。

2. 材積推定

区分求積法による材積の計測値と 4 つの方式によって推定された材積とを比較したところ、いずれの方式によっても材積は正確に推定できていた（表－4）。当然ながら各サンプル木の幹曲線式に基づいて計算した回転体体積が実測値に最も近い値となったが、経験的および理論的材積式による推定値も実測値に近い値となっていた。地域別に調製されたわけでもなく、針

葉樹で共通のパラメータを用いる理論的材積式が、過密林分の個体について正確に材積推定できたことは特筆に値する。これは、前節でみたように、正形数の値が標準的な値であり、理論的材積式を誘導する際の仮定（ $\lambda_{0.7}=0.7$ および $\lambda_{0.5}=1.0$ ）を満足していたことで説明できる。ただし、被圧個体であるサンプル木 No.2 について、経験的および理論的材積式の両方で幹材積を過大推定し、その誤差が比較的大きかったことは、過密林分における被圧個体について更なる検証が必要であることを示している。

サンプル木は極端に形状比の高い個体であり、また過密林分に特徴的とされるより完満な樹幹形状であったので材積推定に偏りが生じることが危惧されたが、結果として材積推定に偏りは生じなかった。先にも論じたように、材積推定に深く関連する樹幹形状の指標である正形数が一般的な値を示していることから、材積式の適用範囲から著しく逸脱しているわけではないと考えるのが妥当かもしれない。また、形状比および正常相対幹曲線パラメータから特異的な樹幹形状をしていると判断される個体についても正形数が定常的であったことから、改めて理論的材積式の妥当性が示されたといえる。

3. 地上部バイオマス推定

伐倒調査による重量と含水率の計測によって求めた地上部バイオマスと京都議定書方式によって推定した地上部バイオマスとを比較したところ、サンプル木 5 本中 4 本の推定値が過小であった（表－5）。このうち 1 本は拡大係数が京都議定書パラメータに比べて高かったことによるもので、2 本は比重が高かったことによるもの、残りの 1 本は両方の要因によるものであった。地上部バイオマスが過大推定となっていたサンプル木 No.2 については、計測された比重の値が高いという過小推定する要因があったものの、それ以上に材積を過大推定しており、その結果としての過大推定であった。

材積と乾燥重量の計測値より計算された比重は 5 本中 4 本で、京都議定書パラメータ（0.407）より大き

表－4 幹材積の推定結果

No.	計測値	経験的 材積式	理論的 材積式	回転体体積	
				KUNZE 式	BEHRE 式
1	0.232	0.235	0.233	0.235	0.232
2	0.050	0.056	0.054	0.051	0.050
3	0.092	0.091	0.090	0.092	0.092
4	0.232	0.235	0.232	0.235	0.232
5	0.075	0.077	0.076	0.074	0.074

注：単位は全て m^3 である。

表－5 地上部バイオマスの推定結果および比重・
バイオマス変換パラメータの計算値

No.	地上部バイオマス		比重 (ton/m^3)	バイオマス 拡大係数 (ton/ton)
	計測値 (kg)	推定値 (kg)		
1	123.5	118.6	0.400	1.33
2	26.7	28.3	0.468	1.15
3	53.4	45.9	0.487	1.19
4	136.1	118.6	0.426	1.38
5	45.4	38.9	0.499	1.22

い値をとった。これは、例えばスギ精英樹クローンで報告されているように（田村ら，2006），植栽されたヒノキ苗木の遺伝的な性質である可能性もあるが，過密林分では比重が高くなるという報告もある（伊東ら，1980）。林分密度が高いために肥大成長が抑制され，行き場のなくなった余剰光合成生産物が比重を高める方向に利用されたとすれば，過密林分において京都議定書パラメータを用いたバイオマス推定を行うと偏って過小推定してしまう可能性がある。ただし，これは一つの林分から得られたデータによる結果であり，過密林分における事例を蓄積して検証する必要がある。

バイオマス拡大係数については，優勢木として選定されたサンプル木 No.1 および No.4 で京都議定書パラメータより高くなり，劣勢木として選定された個体サイズが特に小さく強い被圧を受けていると考えられるサンプル木 No.2 で京都議定書パラメータより低くなった。この結果については，偏りのある結果ではないことから，林分内におけるバラツキの範囲内と捉えることができると考えられる。被圧木でバイオマス拡大係数が低いということは，被圧木において幹に対する枝・葉の重量が低いことを意味しており，過密林分だけでなく一般的な林分でも観測される状況であるといえる。

個体材積についてはほとんど偏りなく推定できていたことから，過密林分における地上部バイオマス推定に偏りを生じさせる要因としては，比重および拡大係数における偏りが重要であると考えられる。特に比重に関しては，京都議定書パラメータに対して偏りのある計測結果であったことから，より注意が必要である。

4. 部位別バイオマス推定

伐倒調査による幹，枝および葉の部位別バイオマスの計測値と FUKUDA モデルおよび HOSODA モデルによる推定値とを比較したところ，両モデルともに枝・葉重量の推定値が過小となる傾向にあった（表－6）。FUKUDA モデルは部位別バイオマスの割合を林齢の関数で推定するモデルであるため，全てのサンプル木に同じ部位別割合を適用している。そこで，FUKUDA モ

デルによる林齢 40 年生における部位別割合からバイオマス拡大係数を計算したところ 1.21 となり，京都議定書パラメータの 1.24 より小さな値となった。また，経験的材積式による材積の推定値から京都議定書パラメータの比重を用いて幹バイオマスを推定し，それを基にして部位別バイオマスを推定しているため，比重の影響で幹バイオマスを過小推定した影響が伝播している。幹バイオマスに対する枝および葉バイオマスの割合が比較的 low，さらに幹バイオマスを過小推定していることから，FUKUDA モデルによる枝および葉バイオマスの推定は過小となったと考えられる。一方で，直径および樹高から部位別バイオマスを直接推定する HOSODA モデルでも同様に過小推定する傾向にあった。幹バイオマスに関しては，モデル構築のデータセットと比較して，四国支所データの比重が高く偏っていたことに起因する可能性が高い。枝および葉バイオマスについては，植栽された苗木の遺伝的な形質なのか，過密林分の特徴であるのかは判断できない。今後のデータ蓄積が期待される。

両モデルで共通して枝および葉バイオマスを過大推定していたのは，被圧個体であるサンプル木 No.2 であった。この個体は隣接木からの被圧が厳しく，樹冠を展開する空間が非常に限られており，葉およびそれを支える枝のバイオマスが小さかったことは妥当である。また，優勢木であり比較的大きな樹冠を形成していたサンプル木 No.1 および No.4 では枝および葉バイオマスを大きく過小推定していた。バイオマス拡大係数と同様に，劣勢木で枝・葉が少なく，優勢木で枝・葉が多いことは林分内における個体間競争の結果であり，間伐直後でなければ，どのような林分でも存在する妥当なバラツキである。一方で，中間木のサンプル木 No.3 や劣勢木として選定されたサンプル木 No.5 についても，枝および葉バイオマスを過小推定していたことは注意が必要である。妥当なバラツキの範囲内であるのか，過密林分の特徴であるのか，今後の研究が待たれる。

表－6 部位別バイオマスの推定結果

No.	計測値			HOSODA モデル			FUKUDA モデル		
	幹重量	枝重量	葉重量	幹重量	枝重量	葉重量	幹重量	枝重量	葉重量
1	92.7	13.9	16.9	93.4	10.4	9.0	95.6	10.5	9.9
2	23.2	2.0	1.5	23.9	2.3	2.9	22.8	2.5	2.4
3	44.9	4.0	4.5	38.6	3.4	4.0	37.0	4.1	3.8
4	98.9	23.5	13.7	92.1	11.3	9.6	95.6	10.5	9.9
5	37.2	4.2	4.0	32.7	2.8	3.4	31.3	3.4	3.2

注：単位は全て kg である。

V. おわりに

40年生時点で本数密度が2,800本という過密なヒノキ人工林分において伐倒調査によって地上部バイオマスの測定を行い、京都議定書に定められた方式による推定値との比較を行った。その結果、5本のサンプル木のうち4本の推定値が過小であった。過小推定の主な要因は、比重が京都議定書における森林炭素蓄積量に関する報告のために定められた値と大きく異なることであった。当初の検証項目であった過密な林分密度に起因する樹幹形状の特異性がおよぼす材積推定への影響については、材積推定に大きな誤差は生じていなかった。今回の結果は1つの林分から採取されたわずか5本のサンプル木によるものであり、直ちに一般化することはできない。先にも述べたように、京都議定書報告に用いられるパラメータの値は日本全国で森林炭素蓄積量を推定するために設計されたものであり、個別の事例に適用する場合に信頼性を保証するものではない。ただ、本研究で示唆されたように、過密林分における炭素蓄積量の推定に際しては、比重や拡大係数といったパラメータが大きく影響する可能性がある。林分密度が高いまま成長した林分において比重や拡大係数がどのような挙動を見せるのか、さらなるデータ蓄積および論理的なアプローチにより明らかにする必要がある。また、比重が極端に高い個体が5個体中4個体あったことは、生産される木材の質という点からも研究を進めていく必要性を示しているのではないだろうか。間伐遅れの過密林分は相当数ある可能性があり（西林寺，2000），そのような林分における個体の性質を把握することは、炭素吸収機能の面からのみならず，その他の多面的機能の面からも重要な課題であると考えられる。

謝辞

本研究は農林水産技術会議委託プロジェクト研究「農林水産分野における地球温暖化対策のための緩和及び適応技術の開発」によって行われた。また，データの収集にあたっては森林総合研究所四国支所スタッフのみなさん（三宮奈津さん，弘田哲男さん，門田淳さん，野瀬 穎さん，横山琴美さん，上田百合子さん，友村俊一さん）に多大なご協力をいただいた。ここに記して深甚なる謝意を表明します。

引用文献

安藤 貴・蜂屋欣二・土井恭次・片岡寛純・加藤善忠・坂口勝美 (1968) スギ林の保育形式に関する研究。

林試研報 209: 1-76.

藤掛一郎 (2005) 間伐遅れと実質立木価格－初回間伐までの経過時間の比例危険率モデルによる分析－. 日林誌 87: 323-330.

FUKUDA, M., IEHARA, T., and MATSUMOTO, M. (2003) Carbon stock estimates for sugi and hinoki forests in Japan. *For. Ecol. Manage.* 184: 1-16.

GELMAN, A., CARLIN, J.B., STERN, H.S., and RUBIN, D.B. (2003) *Bayesian Data Analysis*, Second Edition. 668pp, Chapman and Hall/CRC, New York.

現代林業編集部 (2009) J-VER (森林管理プロジェクト) の仕組みと手順. 現代林業 517: 26-28.

GIO (国立環境研究所地球環境研究センター 温室効果ガスインベントリオフィス) 編 (2011) 日本国温室効果ガスインベントリ報告書. 556pp, 国立環境研究所, つくば市.

HOSODA, K. and IEHARA, T. (2010) Aboveground biomass equations for individual trees of *Cryptomeria japonica*, *Chamaecyparis obtusa* and *Larix kaempferi* in Japan. *J. For. Res.* 15: 299-306.

細田和男・光田 靖・家原敏郎 (2010) 現行立木幹材積表と材積式による計算値との相違およびその修正方法. 森林計画誌 44: 23-40.

伊東隆夫・山口和穂・黒田宏之・島地 謙・角谷和男 (1980) ヒノキおよびスギの材質におよぼす植栽密度の影響. 木材研究・資料 15: 45-60.

INOUE, A. (2001) Can the relative stem taper curve be estimated theoretically only from tree height and diameter at breast height. *J. For. Plann.* 7: 89-94.

井上昭夫 (2002) 針葉樹における材積表，細り表および林分表の調製ソフトの開発. 森林計画誌 36: 133-136.

井上昭夫・黒川泰亨 (2001) 針葉樹における二変数材積式の理論的誘導. 日林誌 83: 130-134.

INOUE, A., KISHIMOTO, M., MATSUOKA, A., KODANI, K., OHTSUKA, K., MATSUBARA, K., and KUROKAWA, Y. (2001) A report of the measurement of stem taper for *Cryptomeria japonica* and *Chamaecyparis obtusa* tree in the Hiruzen experimental forest of Tottori University. *Bull. Fac. Agric., Tottori Univ.* 54: 1-6.

梶原幹弘 (1993) 相対幹形－その実態と利用－. 138pp, 森林計画学会出版局, 東京.

環境省 (2008) オフセット・クレジット (J-VER) 制度. <http://www.j-ver.go.jp> (2012年6月30日調査).

久保山裕史 (2012) 木質バイオマスのエネルギー利用。

- (改訂森林・林業・木材産業の将来予測. 森林総合研究所編, 日本林業調査会, 東京). 73-100.
- 松本光朗・栗屋善雄・家原敏郎・高橋正通・藤原 健・細田和男・金森匡彦・堀 修二鈴木 圭・松原吉隆・今野知樹・林 真智・七海 崇 (2007) 国家森林資源データベースの設計と開発状況. 森林資源管理と数理モデル 6: 141-163.
- 三好一樹 (2011) 森林資源を活用した地球温暖化対策－オフセット・クレジット (J-VER) 制度活用による森林整備推進・地域経済活性化を目指して－. 木材保存 37: 139-145.
- 林野庁計画課 (1970) 立木幹材積表－西日本編. 319pp, 日本林業調査会, 東京.
- 西林寺隆 (2000) 緊急間伐総合対策について. 森林組合 356: 4-7.
- 渋谷正人・浦田 格・鳥田宏行・飯島勇人 (2011) 北海道中央部の針葉樹人工林における風倒被害と樹形. 森林立地 53: 53-59.
- 森林総合研究所編 (2005) 平成 16 年度森林吸収源計測・活用体制整備強化事業調査報告書 (1) 森林吸収源データ収集・森林吸収量算定手法の開発. 165pp, 森林総合研究所, つくば市.
- SPIEGELHALTER, D., THOMAS, A., BEST, N., and GILKS, W. (1996) BUGS: Bayesian Inference using Gibbs Sampling, Version 0.50. 59pp, MRC Biostatistics Unit, Cambridge.
- 竹内郁雄・川崎達郎・森茂太 (1997) ヒノキ若齢人工林における形状比の変化. 日林誌 79: 137-142.
- 田村 明・栗延 晋・武津英太郎・飯塚和也 (2006) スギ精英樹クローンにおける炭素貯蔵量の選抜効果の試算. 日林誌 88: 15-20.
- 丹後俊郎 (2000) 統計モデル入門. 246pp, 朝倉書店, 東京.
- 豊田秀樹 (2008) マルコフ連鎖モンテカルロ法. 265pp, 朝倉書店, 東京.
- (2012 年 6 月 1 日受付)
- (2012 年 7 月 3 日受理)