 ノート

[木材学会誌 Vol. 53, No. 2, p. 99-103 (2007)]

軟 x 線デンシトメトリによるスギ樹幹の年間重量成長量の推定^{*1}藤原 健^{*2}Estimation of Annual Increase of Oven-dried Weight of Sugi (*Cryptomeria japonica*) Trunks^{*1}Takeshi FUJIWARA^{*2}

In order to estimate changes of carbon absorption by trees, a method for calculating annual increases of oven-dried weight of individual trunks from width and mean density of annual rings was established. Discs at 1 m intervals above 0.2 m high from 24 sugi (*Cryptomeria japonica* D. Don) trees were collected after measuring green weight of 1 m long logs. Radial strips including the pith were cut from the discs for soft x-ray densitometry and the other parts of the discs were used for measuring oven-dried weight of the discs. Cross-sections 2 mm thick processed from the strips were exposed to soft x-rays followed by densitometry for measuring width and mean density of each annual ring. The weights calculated from the area and mean density of each annual ring and log length were significantly correlated with the oven-dried weights of the logs. Therefore, the densitometry was applicable for calculating the oven-dried weight of trees. It is believed that ring width and mean density can be used to estimate the annual increase of oven-dried weight of the tree trunks. The annual increase of the oven-dried weight calculated as accumulation of weight of each annual ring was influenced by the ring width, because it changed with variation of area of annual rings. Density variation seemed to affect the fluctuation of weight gain and its effects was considered to be smaller than the ring width.

Keywords: Estimation of biomass, *Cryptomeria japonica*, densitometry, ring width, mean density.

樹木の炭素吸収能力の経年変化を推定するために、年輪幅と年輪内平均密度から樹幹全乾重量の増加量の年変動を推定する方法を検討することを目的とした。スギ24個体について、地上0.2 m 部位から頂端までを1 m ごとに玉切った丸太の元口から約5~10 cm 厚さの円盤を採取した。このうち直径が約10 cm 以上の円盤について髄を含むストリップを作製し、軟 x 線デンシトメトリにより年輪幅及び年輪内平均密度を測定した。また、残りの部分を用いて円盤の全乾重量を測定し、試料採取時の丸太と円盤の重量比により1 m 丸太の全乾重量に換算した。年輪幅から求めた各年輪の面積に、その年輪の年輪内平均密度を乗じたものを合算し、それに丸太長を乗じて求めた丸太の推定重量は、実測の全乾重量と有意な直線関係にあり、年輪幅と年輪内平均密度から丸太の全乾重量の推定が可能であると考えられた。

1. はじめに

人為的活動による温室効果ガス濃度の上昇により温暖化が進行しつつあり、気象災害をもたらす異常

気象の頻発が心配されている。このため、国際的に温室効果ガスの排出削減に取り組む動きが加速し、各国で地球環境変動に関する国際連合枠組み条約(京都議定書)が批准されつつある。京都議定書第3条は、直接的かつ人為的な土地利用変化及び林業活動から生じる温室効果ガスの排出・除去の純変化を約束の履行のために用いること、温室効果ガスの発生源による排出と吸収源による除去は、透明かつ検証可能な方法で報告されることを定めている。樹

^{*1} Received; May 22, 2006; accepted October 10, 2006. 本研究の一部は第53回日本木材学会大会(2003年3月, 福岡)において発表した。

^{*2} 森林総合研究所 Forestry and Forest Products Research Institute, Tsukuba 305-8687

木による二酸化炭素の吸収量を推定しようとする場合には、樹体の重量を測定するとともに、年間の重量成長量を推定する必要がある。

樹幹の重量成長については古くから研究が行われており、年輪幅と容積密度数を用いた平井らの一連の研究では、重量成長は主として肥大成長に影響されるとしている¹⁻⁸⁾。また、胸高直径や樹高などのパラメータから現存量を推定する研究も行われてきた^{9,10)}。重量成長が主として肥大成長に影響されるとしても、重量成長量の変動を検討するためには、密度の年変動を考慮しなければならないと考えられるが、これらの報告では形成された木部の材密度の影響を考慮した場合にも5年単位での計算であり¹⁻⁷⁾、一年単位で重量成長量を推定した例は平井らのドロノキ属についての研究⁸⁾以外に見あらず、密度の年変動を加味した研究が十分に行われているとは言い難い。

軟x線デンシトメトリによる密度計測は、年輪ごとの値が得られる、年輪幅も計測できるなどの利点から、多くの研究が行われてきた¹¹⁻¹⁵⁾。この方法によれば、年間の肥大成長量と形成された木部の平均密度を同時に得ることができ、重量成長への肥大成長量と材密度の影響を検討する目的に合致すると考えられる。本研究では、樹幹基部から高さ1mごとに試料を採取し、樹幹全乾重量を測定するとともに軟x線年輪解析の手法によって得た年輪幅と年輪内平均密度から重量成長量を推定することを目的とした。

なお、本研究は環境省地球環境保全研究費「透明かつ検証可能な手法による吸収源の評価に関する研究」によって行った。

2. 試料と方法

2.1 樹幹重量の測定

スギ人工林に設定された収穫試験地6試験区(林齢43~82年, 平均胸高直径19.4~34.7 cm)から一試験区あたり4個体(計24個体)を選別して試料とした(Table 1)。収穫試験地は、スギの材積成長の増加量を計測するために設定された林分で、5年ごとに毎木調査が行われている。これらの調査林分から選別した個体を伐倒したのち、0.2 mから頂端まで1 m長さの丸太に玉切りし、各丸太元口から約5~10 cm厚さの測定用円盤を採取した。なお、丸太の全乾重量を求めるために、玉切り前の丸太の生重量と円盤の生重量を測定し、それらの比を記録した。直径が約10 cm以上の円盤については、髄を含む密度測定用ストリップを作製し、残余の部分を全乾重量測定用試料とし、それ以下の直径のものについては密度測定用ストリップを採取しなかった。試料分割時に全乾重量測定用試料の円盤に対する重量比を測定しておき、乾燥後の全乾重量測定用試料の重量からその重量比によって円盤全体の重量に換算した。全乾重量測定用試料を積み重ねて自然乾燥させた後、定温送風乾燥機で全乾まで乾燥した。全乾までのスケジュールは、60℃で24時間、8時間で60℃から102℃に昇温、102℃で5日間とした。乾燥させた試料は上皿電子天秤(メトラートレド, PG4002-S)を用いて重量を測定した。円盤の全乾重量からサンプル採取時の重量比により、1 m丸太の全乾重量に換算した。

2.2 軟x線による年輪幅及び密度の測定

密度測定用ストリップを積み重ねて自然乾燥させた後、2 mm厚さの木口薄片を作製した。木口薄片を気温20℃、相対湿度65%に調整した恒温恒湿室内

Table 1. Basic information of stands where the sample trees were collected.

Test stand	Prefecture	Stand age (years)	DBH ^{a)} (cm)	Height (m)	BD ^{b)} (kg/m ³)
Uchino	Gunma	46	23.4	17.9	314
Uchino	Gunma	46	19.4	17.8	320
Kogesawa	Tokyo	43	21.8	16.6	316
Fujisato	Nagano	47	24.9	19.1	322
Fujisata	Nagano	47	24.4	22.1	337
Oginoiri	Shizuoka	82	32.0	21.1	310
Agiena	Gifu	50	26.6	21.1	308
Nishimatahigashimatayama	Kochi	51	28.3	24.7	266
Nishimatahigashimatayama	Kochi	52	22.7	22.8	298
Kudarukawayama	Kochi	45	34.7	28.8	326
Kudarukawayama	Kochi	45	27.2	26.3	332

Note: ^{a)} Mean diameter at breast height, ^{b)} Mean basic density at breast height.

で調湿し、同室内に設置された軟x線撮影装置 (Softex, EMBW 特型) を用いて軟x線撮影を行った (18 kVp, 14 mA, 4 分)。撮影したx線のネガフィルムを年輪構造解析装置 (Walesch Electronic, Dendro2003) でスキャンし、密度既知の標準吸収体との比較によってフィルムの光学濃度を密度に換算し、密度プロファイルを得た。密度プロファイルに密度変動によって年輪界を設定し、年輪幅及び1年輪ごとの平均密度を計算した。年輪幅の測定値を用いて試験地ごとにクロスデットを行い、各年輪の形成年を特定した。

2.3 年輪幅及び年輪内平均密度からの丸太全乾重量の推定

年輪幅を用いてクロスデットを行い、円盤に含まれる各年輪の形成年を確定したのち、年輪幅と年輪内平均密度からの丸太重量の推定を試みた。1 m 間隔で採取した円盤は丸太元口に当たるため、丸太が元口を底面とする円柱であると仮定して、その内部の各年輪の面積と密度から重量に換算する方法をとった。年輪幅から各年輪の面積を求め、それに年輪内平均密度を乗じたものを髄から最外年輪まで加算し、その合計に丸太長を乗じたものを推定丸太重量とした (式1)。

$$W_{\log} = \pi \sum_{n=1}^{NT} \left[\left\{ \left(\sum_{i=1}^n RW_i \right)^2 - \left(\sum_{i=1}^{n-1} RW_{i-1} \right)^2 \right\} \times MD_n \right] \times L_{\log} \times 10^{-3} \quad (\text{式1})$$

$W_{\log}$: 推定丸太重量 (kg), RW : 年輪幅 (mm), MD : 年輪内平均密度 (g/cm^3), $L_{\log}$: 丸太長 (m), NT : 年輪数

3. 結果と考察

3.1 丸太推定重量と実測重量の関係

式1によって計算により求めた344本の1 m 丸太の推定重量と実測重量との関係を Fig. 1 に示す。推定重量と実測重量の関係は直線関係にあったが、その傾きは1よりも小さくなった。このことは、年輪幅と年輪内平均密度から推定した重量が実際の重量よりも大きいことを意味する。この原因として、推定重量の計算に用いた密度が気乾密度であるために材内に含まれる水の重量が加算されていること、推定重量が元口の面積を基準に計算されているために元口と末口の寸法差によって重量がやや過大に計算されていることが考えられる。これらの誤差を生じさせる因子は直線の傾きのみに影響すると考えて、切片を0とする回帰式 ($y = 0.874x$) を求めて推定重量の補正を行った。補正済みの推定値の誤差を評価

Fig. 1. Relationship between estimated and measured oven-dried weight of 344 logs.

するために、推定値と実測値の差を求め、その絶対値の平均値を高さごとに求めた (Fig. 2)。補正済みの推定値と実測値の差は樹幹の低部位で大きい、高部位では小さく、元口と末口の寸法差が大きい地際部を除けば、両者の差は1 m 丸太あたり約1 kg 程度と見積もられた。従って、年輪幅と年輪内平均密度からの重量推定は、補正を行うことによって丸太あたり ± 1 kg の平均誤差程度の精度で可能であるといえる。今後、末口と元口の直径の差に代表され

Fig. 2. Mean absolute value of deviation between estimated and measured weight of logs. Estimated weights are adjusted by the equation $y = 0.874x$ indicated in Fig. 1.

る樹幹のテーパーによる丸太形状を補正する手法を開発することによって、精度を向上させることができる可能性がある。

3.2 全乾重量の経年増加量の推定

前項の方法によって、ある程度の精度で密度の年変動を加味した重量推定が可能となったので、年間の重量増加量の推定を試みた。前項と同様に年輪幅から各年輪の面積を求め、年輪内平均密度と丸太長を乗じて年輪ごとに重量を計算し、各円盤の同じ年に形成された年輪の重量を合算して1年あたりの重量増加量を推定した。なお、各円盤での髄を含む年輪（1年輪目）の重量は、その円盤の年輪数と直上円盤の年輪数との差で円盤間隔の1mを按分した高さの円錐として計算した。例として西又東又山の4個体についての約30年生までの加齢に伴う樹幹重量推定値の変化と52年生時（伐採時）の実測重量をFig. 3に示す。なお、Fig. 3に示した推定値は、円盤直径が約10cmに満たない部分については年輪解析を行っていないために約30年生までが算出されている。いずれの個体においても若齢時の樹幹重量は緩やかに増加し、その後直線的に増加する傾向がうかがえる。Fig. 3に示した樹幹重量推定値について、前年との差を順次算出すると1年あたりの重量増加量となる。1年あたりの重量増加量は若齢時には小さく、直線的に増加するが、15~20年輪目付近から増加傾向が鈍化し、変化量が小さくあるいはほぼ一定となった（Fig. 4）。成長の初期にあつては個体に

Fig. 3. Variation of estimated weight of 4 trunks.
Note: Values of ring 52 are measured weights of trunks. Lines demonstrate estimated trends by quadratic regression for 20 to 30 rings of each trunk.

Fig. 4. Annual increase of estimated weight of 4 trunks.

よる重量増加量の差はほとんどみられなかったが、伐採時に小さかった個体ほど年間重量増加の鈍化が初期に生じた。伐採時の樹幹重量が大きい個体では、1年あたりの重量増加量が増加する成長初期の期間が長く、その後の増加量も大きかった。1年あたりの重量成長量がほぼ安定となる20年生時から30年生時までの樹幹重量推定値の変化傾向を二次式で近似し、外側部分について回帰式を用いて52年生時まで延長すると、52年生時の実測値に近い値となった。このことから、年間の重量増加量の推定値が実際のものから大きくはずれていることはないと考えられる。

樹幹の基部である0.2m部位における各年の年輪面積、年輪内平均密度及び1年あたりの重量増加量を比較して、重量増加量、肥大成長量および密度の関係を検討した（Fig. 5）。密度がほぼ一定の水準上を変動するのに対して、重量増加量及び年輪面積は、約30年間を通して増加傾向にあった。したがって、1年あたりの重量増加量は、主として年輪面積（肥大成長量）に追従して変化しており、樹幹総重量の増加量としてみた場合には密度の年変動の影響は無視できると考えられる。しかしながら、樹幹重量は、材積と密度の積であるため、密度が異なる品種や樹種を比較する場合には密度が必要となる。さらに、個体内の樹幹重量増加量の年変動に与える外的因子の影響を検討しようとする場合には、密度の年変動を加味して検討する必要がある。例えば、重量増加量と年輪面積、年輪内平均密度を簡便に回帰直線との比によって標準化して指数化し、年変動のみを取り出して比べてみると（Fig. 6）、重量成長量

Fig. 5. Variation of ring area, mean density and annual increase of weight.

Legend: ■ : ring area, ● : mean density, □ : annual increase of weight.

指数は概ね年輪面積指数の変動に連動しているものの、密度指数の変動に追従している年も存在した (Fig. 6 矢印)。これが、直ちに密度変動の影響であるか不明ではあるが、重量増加量の年変動について解析する場合には、密度変動を考慮した方がよいと考えられる。

文 献

- 1) 平井信二：東大演報 No. 35, 91-105 (1941).
- 2) 平井信二：東大演報 No. 38, 139-152 (1950).
- 3) 平井信二：東大演報 No. 39, 219-234 (1951).
- 4) 平井信二：東大演報 No. 45, 203-220 (1953).
- 5) 平井信二：東大演報 No. 48, 221-235 (1955).
- 6) 平井信二：東大演報 No. 54, 199-217 (1958).
- 7) 平井信二：東大演報 No. 57, 189-201 (1962).

Fig. 6. Variation of indices of ring area, mean density and annual increase of weight.

Legend: ■ : ring area, ● : mean density, □ : annual increase of weight.

Note: arrows indicate the year that changes of annual increase of weight follow the changes of mean density.

- 8) 平井信二, 相沢エイ子：東大演報 No. 62, 189-196 (1966).
- 9) 高田和彦：新潟大演報 No. 23, 11-17 (1990).
- 10) 大島誠一：京大演報 No. 63, 23-36 (1991).
- 11) H. Polge: *Tree-Ring Bull.* **30**, 1-9 (1970).
- 12) 太田貞明：木材学会誌 **24**(7), 429-434 (1978).
- 13) 太田貞明：木材学会誌 **25**(9), 564-566 (1979).
- 14) 太田貞明：木材学会誌 **27**(3), 157-162 (1981).
- 15) 藤原 健, 山下香菜, 平川泰彦：森林総研研報 **3**(4), 341-348 (2004).