横打撃共振法によるスギ立木の心材色の推定^{*1}陶山大志^{*2}Nondestructive Evaluation of the Heartwood Color
of Standing Sugi Trees by Using
the Lateral Impact Vibration Method^{*1}Hiroshi SUYAMA^{*2}

The heartwood color of standing sugi (*Cryptomeria japonica*) trees was evaluated using the lateral impact vibration method. Evaluations were obtained using the diagnostic index (DF_r), which is the product of the diameter D of a stem and the resonance frequency F_r obtained when the stem is laterally impacted. The heartwood color was evaluated on the basis of the following assumptions. A lower DF_r implies a higher moisture content (M_c) in the heartwood, and a higher M_c implies lower brightness (L^*) of the heartwood color. Therefore, a low DF_r might imply a low L^* . Seven hundred trees were measured using this method. Seventy of the 700 trees were cut to check the color of the heartwood. The increase or decrease rate R in the DF_r of each tree against the regression line of D and DF_r for all the cut trees was calculated as the index for evaluating L^* . The calculations revealed a negative correlation between R and M_c ($r=0.71$) and between M_c and L^* ($r=0.70$). Further, a positive correlation ($r=0.53$) was observed between R and L^* . The correlation coefficient between R and M_c was not high, but the brightness of the heartwood color (L^*) of the standing sugi trees could be classified into three groups by using the index R . The use of heartwood color evaluation by this method in thinning is also discussed.

Keywords : lateral impact vibration, sugi, heartwood color, moisture content, thinning.

横打撃共振法によるスギ立木の心材色の推定を試みた。本法は樹幹直径 D と打撃された樹幹の振動の共振周波数 F_r の積 DF_r を診断の指標としている。 DF_r が低いと心材含水率 M_c は高くなり、 M_c が高いと心材の明度 L^* は低くなる、それゆえ DF_r が低いと L^* は低くなる可能性がある—という仮定に基づいて推定を行った。本法によって700本を測定し、うち70本を伐採し心材色を調査した。伐採木の D と DF_r の回帰直線に対する各個体の DF_r の増減率 $R(\%)$ を算出し、 R を L^* を推定する指標とした。その結果、 R と M_c ($r=0.71$) および M_c と L^* ($r=0.70$) に負の相関が、 R と L^* に正の相関 ($r=0.53$) が認められた。 R と L^* の相関係数は高くなかったが、 R によって心材の明度 L^* を3階級にグループ分けすることが可能であった。そして、間伐施業において本法による心材色を推定する意義について考察した。

1. 諸 言

スギの心材は通常、淡紅色から赤橙色であり、これらは赤心と呼ばれる。これに対して黒褐色から黒色を帯びている場合があり、黒心と呼ばれている。赤心材は化粧性が高く、造作材や板類としての用途が高い。直径30 cm 未満の小・中径丸太は主として柱材として利用されるが、その丸太から製材した柱材の表面に心材が現れることは少ない。このため、

^{*1} Received March 18, 2013 ; accepted July 17, 2013.

^{*2} 鳥根県中山間地域研究センター Shimane Prefecture Mountainous Region Research Center, Shimane 690-3405, Japan

Corresponding author : H. Suyama (suyama-hiroshi@pref.shimane.lg.jp)

同直径の大径の丸太は心材色によって価格差が生じることは少ない^{1, 2)}。一方、直径30 cm以上の丸太は構造材や合板用材として利用されるほか、赤心であれば化粧性の高い造作材としての用途が加わる。このため、同直径の赤心の丸太は黒心と比較して高い価格で取引される場合が多い^{1, 2)}。さらに、黒心は含水率が高いため^{1, 3-5)}、乾燥に時間・コストを要し、乾燥の仕上がりのばらつきの原因にもなる。したがって、スギを長期間育成して化粧性の高い赤心の良質材を生産することを施業目標とする場合、黒心は価格差のない小・中径木のうちに選択的に間伐・利用し、主伐時に赤心材を収穫することは林業経営上の意義がある。

スギ心材の含水率と材色には関連があることが知られており、心材は含水率が高くなるにつれ、 L^* a^* b^* 表色系の明度 L^* が低くなり黒色を帯びることが報告されている^{1, 3-5)}。したがって、立木状態で心材含水率が推定できれば、推定した心材含水率から心材色を非破壊的に推定することが可能と考えられる。この原理に基づいた心材色の非破壊診断法として、電気伝導率、超音波伝播速度あるいは γ 線透過率を用いた手法が検討されている¹⁾。しかし、これら手法は測定に際して幹に傷を付ける、計測が長時間、精度が不十分あるいは計測機器が高額といった問題点から実用化には課題が残っている。これに対して、横打撃共振法^{6, 7)}は立木の心材含水率^{6, 8-10)}を簡易かつ非破壊的に推定できる方法である。また、樹幹内部の腐朽・空洞の大きさについても推定でき¹¹⁾、専用の診断装置も開発されている^{12, 13)}。さらに、中～大径木の診断も可能であることが示されている¹⁴⁾。したがって、1) 本法によって心材含水率の推定が可能である、2) 心材含水率

が高くなるにつれ心材の明度 L^* は低下し黒色化する—という前提に基づけば、本法によってスギ立木の心材色を推定できる可能性がある。しかし、本法による心材色の推定が試みられた例はない。そこで、本研究では島根県内のスギ7林分において横打撃共振法による計測と伐採調査を行い、本法によってスギ立木の心材の明度 L^* を推定できるか検討した。そして、実際の施業において本法を用いて心材色を推定する実用上の意義について考察した。

2. 試験方法

2.1 横打撃共振法による測定

2008年1～2月および2012年6月、島根県内の樹齢33～56年生のスギ7林分を調査林分として設定した(Table 1)。調査木の胸高直径は12.1～69.5 cmで、平均28.3 cmであった。各調査林分において100本(以下、測定木と呼ぶ。)を設定し、横打撃共振法による測定をつぎのようにして行った。調査木の地上高1.2 mで樹幹の直径 D を計測し、同地上高で樹幹を木製ハンマーで打撃した。ハンマーは市販の小型木製ハンマー(有堂内製、頭部径:4 cm、重量:180 g、カシ類製)を使用した。この時の樹幹の振動を同地上高で加速度センサー(小野測器製 DP-4120)を用いて検出し、横打撃共振周波数をFFTアナライザー(同社製、CF-1200)を用いて読み取った。FFT(高速フーリエ変換)の解析条件はサンプル数:256、周波数レンジ1～2000 Hz、分解能:20 Hzに設定した。打撃方向とセンサーの位置は樹幹に対して互いに90°とした。

本法によって樹幹を打撃したときの横打撃共振周波数 F_r と樹幹直径 D の積 DF_r には次式が成り立つ^{6, 7)}。

Table 1. Measurement values of sample trees in each stand.

Stands studied	Location	Tree age	DBH ^{a)}	Trees measured ^{b)}		n	Trees cut	
				Average DF_r	r^c		Average DF_r	r^c
Misato1	Chihara, Misato-cho	35	16.6-47.5 (26.5) ^{e)}	30.2a ^{d)}	-0.67**	8	32.3a ^{d)}	-0.64
Misato2	Kami-kawado, Misato-cho	33	12.1-28.6 (19.5)	27.8b	-0.11	14	29.0b	-0.49*
Misato3	Yukakae, Misato-cho	33	14.0-35.4 (22.6)	27.9b	-0.25**	11	27.4b	-0.28
Kawamoto1	Inbara, Kawamoto-cho	43	14.7-48.6 (28.5)	27.1c	-0.32**	14	28.0b	-0.59*
Kawamoto2	Inbara, Kawamoto-cho	43	16.1-56.9 (30.3)	25.9d	-0.29**	8	27.1b	-0.30
Oda	Yamaguchi-cho, Oda city	43	18.0-53.5 (32.3)	28.1b	-0.21*	10	30.0ab	-0.63
Iinan	Shimokizima, Iinan-cho	56	22.4-69.5 (38.5)	24.0e	-0.05	9	23.4c	-0.35
Total			12.1-69.5 (28.3)	27.3	-0.34***	74	28.2	-0.42***

^{a)} Diameter at breast height. ^{b)} One hundred trees were measured in each stand. ^{c)} Average diameter at breast height. ^{d)} Values with the same letter are not significantly different at $p < 0.05$ by Tukey's test. ^{e)} Coefficient of correlation between D and DF_r . *Significant at $p < 0.05$; ** $p < 0.01$; *** $p < 0.001$.

$$DF_r = \sqrt{\frac{E}{\rho k}} \quad (1)$$

ここで、 D ：樹幹直径 (cm)， F_r ：横打撃共振周波数 (Hz)， E ：樹幹横断面方向のヤング率 (Pa)， ρ ：見かけの密度 (g/cm^3)， k ：形状係数。

E と ρ の比 E/ρ が一定値であれば DF_r は概ね一定値となるが、 E/ρ の変動に伴って DF_r は変化する。 DF_r は、心材含水率が高くなり ρ が高くなるにつれ、低くなること理論的に示されている⁶⁾。したがって、 DF_r を指標とすれば、心材含水率を推定できる。

2.2 心材の含水率と材色

2008年3～4月および2012年6月、各調査林分において測定木のうち無作為に選抜した8～15本、計74本（以下、伐採木と呼ぶ。）を伐倒した。伐倒後、本法によって測定した地上高の1.2 mで、厚さ5 cmの円板を採取し、島根県中山間地域研究センターに持ち帰った。円板は計測時を除いてポリエチレン製の袋に密封し、冷暗所に保管して乾燥を防止した。なお、円板の木口面を観察したところ、被圧による枯死、スギカミキリの加害あるいは木部の腐朽が生じた円板が4個あり、これら円板を採取した木は調査対象の伐採木から除外した。

各円板について心材含水率と心材色を測定した。測定は円板の採取後1週間以内に行った。円板から髓を含むようにして長径方向に幅2 cm、厚さ5 cmのストリップを採取した。このストリップを心材と辺材に分割したのち、長さ2 cm間隔で切断して円板断面方向に対して2(幅)×5(厚さ)×2(長さ) cmの材片を得た。各材片を105℃で48時間、乾燥したのち各材片の生材含水率を全乾法により算出した。各円板の心材の材片の平均含水率を算出し、これを各伐採木の心材含水率 M_c とした。

心材色はつぎの方法によって評価した。乾燥後の心材部各材片の1枚目面に対して分光式色彩計 (Spectro Color Meter SE-2000, 日本電色) を用いて、 $L^*a^*b^*$ 表色系の各値 L^* 、 a^* 、 b^* を測定した。測定は1枚目面につき3か所行い、その平均値を各材片の値とした。心材色は明度 L^* のほか、色相 b^*/a^* 、彩度 $(a^{*2} + b^{*2})^{0.5}$ についても算出した。

3. 結 果

全測定木と全伐採木の DF_r は13.8～37.0 $\text{cm} \cdot \text{kHz}$ 、14.3～34.2 $\text{cm} \cdot \text{kHz}$ に及んだ。測定木と伐採木の平均 DF_r は林分によって有意な差があった (Tukey's test, $p < 0.05$) (Table 1)。全測定木と全伐採木の両者において樹幹直径 D と DF_r に負の相関がそれぞ

れ認められた ($r = -0.34$, $p < 0.01$; $r = -0.42$, $p < 0.01$)。

Figure 1 に全測定木と全伐採木の DF_r の分布を示す。全伐採木における D と DF_r の回帰直線は $y = -0.20x + 32.9$ ($r = -0.42$, $p < 0.01$) であり、 D が大きくなるにつれ DF_r が低下する傾向であった。また、各林分の林齢と平均 DF_r の回帰直線は全測定木で $y = -0.19x + 35.2$ ($r = -0.81$, $p < 0.05$)、全伐採木で $y = -0.24x + 37.9$ ($r = -0.69$, $p > 0.05$) であり、林齢が高くなるにつれ DF_r が低下する傾向であった。

既往の報告では、心材含水率の指標として $1/(DF_r)^2$ あるいは $1/DF_r$ が用いられている^{6, 9, 10)}。前述したように DF_r も指標とすることができ、これら3つの指標は同義である。これらの指標は、心材含水率などの材質が変化しなければ、直径 D の大きさに依らず一定であることを前提としている。しかし、本調査結果では D が大きくなるにつれ DF_r が低下する傾向であった。 D と心材含水率 M_c には相関が認められなかったことから ($r = 0.11$, $p > 0.05$)、直径 D が大きくなるにつれ、 M_c 以外のなんらかの材質が変化して、 DF_r が低下したものと考えられる。このため、 DF_r を指標とすれば、 D に伴う DF_r の低下を考慮できず、 M_c の推定誤差が大きくなる。そこで、この D と DF_r の関係を考慮するため、Fig. 1 の回帰直線を基準にして各伐採木の DF_r の増減率 R (%) を次式によって算出し、 M_c を推定する指標とした。そして、 R を M_c および心材色の明度、色相、彩度と比較した。

$$R = \frac{DF_r - (-0.20D + 32.9)}{-0.20D + 32.9} \times 100 \quad (\%) \quad (2)$$

Fig. 1. Distribution of DF_r in trees measured and trees cut. D : diameter of stem; F_r : resonance frequency.

DF_r の増減率 R と心材含水率 M_c に負の相関が認められた ($r = -0.71, p < 0.01$) (Fig. 2)。 M_c と明度 L^* に負の相関が認められた ($r = -0.70, p < 0.01$) (Fig. 3)。 M_c と彩度 $(a^{*2} + b^{*2})^{0.5}$ にやや低い負の相関が認められた ($r = 0.54, p < 0.01$)。 M_c と色相 b/a に相関は認められなかった ($r = 0.18$)。そして、Fig. 4 に示すように、 R と L^* にやや低い正の相関が認められた ($r = 0.53, p < 0.01$)。

DF_r の増減率 R の階級別の心材含水率 M_c の出現割合を示す (Fig. 5)。4 つ以上の R の階級で M_c を区分した場合には、階級間で M_c に有意な差のない組み合わせがあったことから、3 つの階級に区分した。その結果、 R が $-50\% \sim -5\%$ の階級では M_c が $100 \sim 241\%$ と高い個体が約 7 割を占めたが、 $-5 \sim 5\%$ と $5 \sim 30\%$ の階級では M_c が $52 \sim 100\%$ と低い

個体が 7, 9 割を占めた。 R の各階級の平均 M_c は階級が上がるにつれ、高くなる傾向で、各階級には有意な差があった (Tukey's test, $p < 0.05$)。

DF_r の増減率 R の階級別の L^* の出現割合を示す (Fig. 6)。4 つの以上の R の階級で L^* を区分した場合には、階級間で L^* に有意な差のない組み合わせがあったことから、3 つの階級に区分した。その結果、 $-50 \sim -5\%$ の階級では明度 L^* が $65 \sim 70$ と低い個体が約 3 割と多く、ほかの 2 つの階級では 65

Fig. 2. Relationship between rate R of increase or decrease in DF_r and heartwood moisture content M_c .

Fig. 3. Relationship between heartwood moisture content M_c and heartwood brightness L^* .

Fig. 4. Relationship between rate R of increase or decrease in DF_r and heartwood brightness L^* .

Fig. 5. Proportion of heartwood moisture content M_c in each class of the rate R of increase or decrease in DF_r .

Right panels indicate average M_c in each class of R ; different letters indicate significant differences (Tukey's test, $p < 0.05$).

Fig. 6. Proportion of heartwood brightness L^* in each class of the rate R of increase or decrease in DF_r . Right panels indicate average L^* in each class of R ; different letters indicate significant differences (Tukey's test, $p < 0.05$).

～70の個体はないか、僅かであった。明度 L^* が70～77の個体は R の階級が上がるにつれ多くなる傾向であった。 R の各階級の平均 L^* は階級が上がるにつれ、高くなる傾向で、各階級には有意な差があった (Tukey's test, $p < 0.05$)。

4. 考 察

伐採木の DF_r の増減率 R と心材含水率 M_c には負の相関 ($r = 0.71$) が、 M_c と明度 L^* には負の相関 ($r = 0.70$) があることが確認された。そして、 R と L^* には正の相関 ($r = 0.54$) が認められた。 R と L^* の相関係数はあまり高くなく、 L^* の値そのものを推定するには誤差が大きいと考えられる。しかし、 R の値を3階級に分けると、 R の低い階級では L^* の低い個体の出現率が高かったのに対し、 R の高い階級では L^* の高い個体の出現率が高くなる傾向であった。また、 R の各階級の平均 L^* には有意な差があった。したがって、 DF_r の増減率 R によって心材の明度 L^* を3階級にグループ分けすることは可能であることが示された。

樹幹直径 D 、林齢と DF_r に負の相関が認められたが、これは樹幹の直径成長と林齢に伴って DF_r が低下すること意味している。このため、本研究では心材含水率を推定する指標として DF_r の値そのものではなく、 DF_r の増減率 R を採用した。しかし、既往の報告^{6, 8, 9)} では D に伴って DF_r が低下する傾向は確認されていない。この原因としては、本研究の調査木の D は30 cm 以上 (樹齢: 33～56年生) が約4割を占めたのに対し、既往の報告^{6, 8, 9)} ではほとんどの調査木が30 cm 未満 (樹齢: 20～30年生)

と小さかったためと考えられる。

直径成長と林齢に伴って DF_r が低下することが示されたが、これは式(1)から考えると、直径成長と林齢に伴って樹幹横断面方向のヤング率と見かけの密度の比 E/ρ が低下したものと考えられる。直径成長と林齢に伴う材質の変化を見かけの密度とヤング率に分けて考えてみる。見かけの密度についてであるが、直径成長と林齢に伴って辺材より含水率の低い心材の割合が増える。このため、この直径成長に伴う見かけの密度の変化は DF_r を高くする方向に働き、 DF_r を低下させる要因になっているとは考えられない。つぎにヤング率についてである。樹幹断面方向のヤング率には放射方向と接線方向のヤング率が主として関与するものと考えられる。放射方向と接線方向のヤング率は仮道管二次壁中層のミクロフィブリル傾斜角(MFA)が大きくなるにつれ、高くなることが報告されている¹⁵⁾。また、MFAは髓で最大で外方へ向かうにつれ小さくなることが知られている¹⁶⁾。したがって、直径が小さいうちはMFAが大きく樹幹断面方向のヤング率が高いが、直径成長と林齢に伴ってMFAが小さくなり同方向のヤング率が低下し、その結果 DF_r が低下することが考えられる。ただし、直径成長や樹齢に伴って DF_r が低下する原因については今後の詳細な検討が必要である。

本法を用いればスギ林を間伐する場合に、材色を考慮した選木が可能となる。さらに、冒頭で述べたように、心材含水率や腐朽・空洞の発生の有無も同時に診断することが可能である。ただし、林分の立木本数が多い場合は計測には相応の労力がかかる。人工林の施業方法のうち、主伐木をあらかじめ決定し、これを長期に育成したのち収穫する施業がある¹⁷⁾。この施業では、主伐木は最終的な大きな収入になるため、その選木には細心の注意を払う必要がある。外観から形質の良いものを見分けたのち、本法によって樹幹内部の黒心などの材色を含む材質を判定した上で主伐木を決定することは林業経営上、意義があると考えられる。

文 献

- 1) “品質管理型林業のためのスギ黒心対策技術の開発”，農林水産省農林水産技術会議事務局，東京，1997，p. 93.
- 2) 駒木高彰：スギ黒心材の利用および施業，日林東北支誌 47, 115-116 (1995).
- 3) 森川 岳，小田一幸，松村順司，堤 壽一：スギ樹幹における黒心材形成と灰分 (第2報)

- －スギ3品種心材の性質－. 九州演報 74, 41-49 (1996).
- 4) 藤原新二, 岩神正郎: スギおよびヒノキ材の生材含水率と心材色の関係について. 高知大農演報 16, 19-23 (1989).
- 5) 松山将壮: 吉野スギの黒心材, 第26回日本木材学会研究発表要旨集, 1976, p. 39.
- 6) 釜口明子, 中尾哲也, 小玉泰義: 横打撃共振法によるスギ立木の心材含水率非破壊的推定. 木材学会誌 46, 13-19 (2000).
- 7) 小玉泰義, 釜口明子, 中尾哲也, 原田照太: 横打撃共振法による樹幹内空洞の検出. 樹木医学研究 3, 5-9 (1999).
- 8) 釜口明子, 中尾哲也, 中井毅尚, 田村 明: 横打撃共振法によるスギ立木の心材含水率の測定 含水率計との比較および各品種の高さ方向の分布. 木材学会誌 47, 235-241 (2001).
- 9) 中田了五, 田村 明: スギ心材含水率の遺伝的改良への横打撃共振法の適用. 木材学会誌 52, 137-144 (2006).
- 10) 井城泰一, 田村 明, 飯塚和也: 横打撃共振法によるトドマツの心材生材含水率の非破壊的評価. 木材学会誌 56, 33-40 (2010).
- 11) 陶山大志, 永石憲道, 坂越浩一: 横打撃共振法によるクロマツ樹幹内部の腐朽・空洞面積率の推定. 日本森林学会誌 94, 161-166 (2012).
- 12) 陶山大志: 打撃音樹内腐朽簡易診断装置「ぼん太」. グリーンエージ 38(7), 19-22 (2011).
- 13) 陶山大志: 樹幹内診断方法及び装置, 特許第4669928号 (2011).
- 14) 陶山大志, 桐田龍一, 物部英樹: 横打撃共振法による9樹種大径木の共振周波数の検出に及ぼすハンマー質量の影響. 木材学会誌 59, 105-111 (2013).
- 15) Qing, H., Mishnaevsky, L., Jr.: 3D multiscale micromechanical model of wood: From annual rings to microfibrils. *International J. Solids and Struc.* 47, 1253-1267 (2010).
- 16) 渡辺借人: “樹幹丸太の特性”, 九大農木材理學教室, 福岡, 1967, p. 33.
- 17) 藤森隆郎編著: “将来木施業と径級管理－その方法と効果”, 全国林業普及協会, 東京, 2013, pp. 18-78.