周波数分析による丸太区分とその製品生産工程への応用[†]

有馬孝禮* 丸山則義** 早村俊二***
中村昇* 名波直道****

Classification of Log Based on Sound Analysis and its Application in Product Processing

by

Takanori ARIMA*, Noriyoshi MARUYAMA**, Shunji HAYAMURA***

Noboru NAKAMURA* and Naomichi NANAMI****

To make the use of timber more efficient, it is considered that the log should be selected based on the structural characteristics before carried into the saw mill, and the log-sawing design should be determined suitable to the wood products in the mill. The natural frequency of longitudinal wave due to sound when hitting cross section of log and lumber was measured to determine the modulus of elasticity (E_t). E_t was recognized to be highly linear to the modulus of elasticity due to static bending test (E_s). The potential application of the relationship between the E_t of log and that of sawn lumber and laminae gained from the log was discussed from practical aspect.

As a high correlation between E_t of log and structural properties of sawn lumber is recognized, measuring E_t of log could be one of the mechanical gradings which would be effective and easy to conduct on site before carrying to the saw mill. Since E_t of log practically was presented as the average value of E_t of laminae, the design of sawing for laminae should be considered based on the estimated distribution of modulus of elasticity of laminae within log. It could be effective as a rough classification for mechanical grading of lumber and quality control of selecting log for the laminae of glue laminated lumber in the mill.

Key words: Longitudinal wave, Laminae, Saw mill, Glue laminated lumber,
Mechanical gradings, Modulus of elasticity

1 緒 言

木材資源をより適正に使用するには生産収率を上げること、生産工程および判断技術が最終用途の要求に合うように最適化を図ることが必要である。すなわち、エンドユーザーが要求する性能を担保するための技術を可能な限り、木材生産者である山元に近づけ、その接点で相互の理解を深めることが重要である。そのために丸太から最終製品までを追跡した研究が重要であることが明らかになってきた。¹⁾

木材の木口面の打撃音の固有振動数から求めた縦振動ヤング係数は曲げヤング係数と高い相関があり、木取りや形状のような多くの要素を含んだ実大材でも比較的容易に測定が可能であることが示されている。^{1), 5)} しかも短い材でも縦振動から動的ヤング係数の算出が可能で、曲げヤング係数のようにスパンと断面寸法の影響を受けない。得られたヤング係数は材中に分布する

ヤング係数の平均的な数値になり、木材中に含まれる水分は木材実質の重量と同じに扱え、栈積みされたような状態でも測定が可能であることを示した。^{2), 6)} 本研究は打撃音の周波数分析を基礎にして、丸太材のヤング係数によるグレーディングシステムを製材、集成材ラミナなどのヤング係数の推定や強度等級区分へ応用し、用途区分への展開を目的としたものである。具体的には次のような展開を意図したものである。

(1) 丸太材の強度等級区分法として、打撃音によるヤング係数の計測を適用し、原木丸太の段階すなわち貯木土場で用途区分の簡易選別をする。

(2) 製材、ラミナの等級区分と丸太材の等級区分の相関を明らかにし、材質特性から選別と木取りなどに適正利用すること。

2 供試材および試験方法

供試した材は丸太や、それから製材された断面寸法

[†] 原稿受理 平成4年5月6日 Received May 6, 1992

* 正会員 東京大学農学部林産学科 〒113 東京都文京区弥生, Dept. of Forest Products, Tokyo Univ., Bunkyo-ku, Tokyo, 113

** 鹿島建設(株)技術研究所 〒182 調布市飛田給, Tech. Res. Inst. Co. Kajima, Hidakyu, Chofu, 182

*** 団体会員 静岡大学農学部森林資源学科 〒422 静岡市大谷, Dept. of Forest Resources Sci., Shizuoka Univ., Ohya, Shizuoka, 442

**** 東京大学農学部林産学科 〒113 東京都文京区弥生, Dept. of Forest Products, Tokyo Univ., Bunkyo-ku, Tokyo, 113

の異なる製材品でスギ, ヒノキ, ベイマツの製材品, 集成材ラミナなどで寸法, 形状などは後述するとおりである。既報で垂木, 根太, 梁, 足場板, たいこ材などの各種断面寸法, 含水率の実大材の縦振動ヤング係数 Et と静的曲げヤング係数 Es の関係を示したが, 広い範囲にわたって高い相関がみられており, 製材品については寸法, 重量, 固有振動数を測定すれば, 縦振動ヤング係数から静的曲げヤング係数をかなりの精度で推定できることを示した。縦振動ヤング係数は材の寸法が短くてもヤング係数を求めることが可能であることから, 丸太についても同様に扱えるともて差し支えない。

測定法は材の木口面をハンマーで打撃し, 反対側の木口面付近に設置したマイクロフォンで材中を伝ばした縦振動波をとらえ, FFT アナライザーでスペクトル解析し, 基本振動数を求めた。また, 小荷重を中央集中で作用させて求めた静的曲げヤング係数を測定した。

縦振動による 1 次固有振動数 f と縦振動ヤング係数 Et の関係は次式のようになる。

$$Et = (2\ell \cdot f)^2 \rho / g$$

ℓ : 長さ, g : 重力加速度, ρ : 密度

なお, 密度は木材の全乾状態の値でなく水分を含んだ状態のものである。この打撃音による固有振動数と水分を含んだ状態の重量から算出したヤング係数は自由水領域においても静的試験からえられるヤング係数の傾向と一致している。すなわち, 繊維飽和点以上の自由水の増加ではほとんどヤング係数が変化しない。既存の超音波などの伝ば速度よりヤング係数を算出するために全重量を用いると, 繊維飽和点以上の自由水の増加でヤング係数が増加するという静的試験によるヤング係数とのちがいがあり, その伝達機構の差異が論議されている⁷⁾。

3 試験結果

3.1 丸太の縦振動ヤング係数と樹幹内のヤング係数分布

Fig. 1 はスギ丸太の縦振動ヤング係数と, それを半割した左右から製材された厚さ 35 mm の挽き板のヤング係数 (丸太の両脇に示す), さらにそれを幅 20 mm に小割した材のヤング係数 (丸太内に示す) の分布を示した例である。¹⁾ このようにスギの樹幹内のヤング係数分布は広範囲に渡っており, 従来からいわれているように未成熟部がみられている。縦振動から得られた動的ヤング係数は材中に分布するヤング係数の平均的な数値になることを既報で認めたが, この図の全般的な傾向も同様であるといえよう。したがって製材時の木取りは製材品のヤング係数の重要な要素となることが認められよう。製材品, 集成材ラミナについて

Fig. 1. Distribution of Et of components within log of Sugi.

Et : modulus of elasticity due to the natural frequency of longitudinal wave ($\times 10^{-3}$ kg/cm²).

詳細を後述したい。

3.2 各種製材の縦振動ヤング係数と曲げヤング係数

Fig. 2 はたいこ材, たるき材, 母屋角材および根太材, 足場板など製材品の縦振動ヤング係数 Et と静的曲げヤング Es の関係を示している。いずれも相関係数は 0.95 以上で, 静的曲げヤング係数は縦振動ヤング係数の 90% 程度になっている。これは粘弾性的な効果があること, 既報に示したように曲げヤング係数がスパンと断面寸法からせん断などの影響を受けてヤング係数が低下することなども推定される。この比率についてはスパン, 寸法形状で補正することが必要で, ここに示された部材では縦振動ヤング係数の 90% 程度を想定しておけば良いことになる。

3.3 丸太の縦振動ヤング係数 Et と心持角材の曲げ強度特性

Fig. 3 は丸太の径が 16~20 cm スギ丸太の縦振動の 1 次から 3 次までの固有振動数とそれから製材された心持柱角 10.8~12 cm の縦振動固有振動数の関係を示したものである (長さは同じ)。わずかに丸太の方が固有振動数が大きい傾向にある。

Fig. 4 は Table I に示すスギ, ヒノキおよびベイマツ丸太の縦振動ヤング係数とそれから製材された母屋角および平角の静的曲げヤング係数の関係を示している。その相関性はきわめて高いが, Fig. 2 の母屋角の縦振動ヤング係数と静的曲げヤング係数の関係と比較すると, 製材された母屋角の静的ヤング係数が丸太のそれより低くなっており, 80% 近くになっていることが認められる。これは Fig. 1 の樹幹内のヤング係数分布から推測されるようにヤング係数の高い最外層の

Fig. 2. Relationship between E_t (longitudinal wave) and E_s (static bending).

除去が寄与していると思われる。既報で述べたように縦振動ヤング係数は各層の平均的な値となる。母屋角

を製材するような小径材であれば、製材することによって角材は丸太材に比較して未成熟部の占める比率

Fig. 3. Relationship between natural frequency of log and that of sawn lumber trimmed removing outer layer of the log.

(First, second and third-term in figure show the natural frequency for each mode.)

- Beams of Sugi and Douglas fir.
- Column of Sugi and Hinoki.

Regression line: E_t of sawn lumber = 0.909
(E_t of log) - 5.68 ($r = 0.964$).

Fig. 4. Relationship between E_t of log and E_t of sawn lumber (See Table I).

(First, second and third-term in figure show the natural frequency for each mode.)

- Beams of Sugi and Douglas fir.
- Column of Sugi and Hinoki.

Regression line: E_t of sawn lumber = 0.909
(E_t of log) - 5.68 ($r = 0.964$).

Table I. Specification of log and lumber sawn from the log.

Lumber	Species	Diameter of log (cm)	Number	Size of lumber (cm)
Column	Sugi	11-12	20	9 x 9 x 400
	Hinoki	11-12	20	9 x 9 x 400
Beam	Sugi	24-28	6	10.5 x 21 x 600
	Douglas fir	27-34	8	12 x 24 x 400

Column
Sugi
Hinoki

Beam
Sugi
Douglas fir

Fig. 5. Relationship between E_s MOR of column in bending and E_t of the log.

(First, second and third-term in figure show the natural frequency for each mode.)

○ Hinoki ● Sugi

Regression line: $E_s = 0.829E_t - 7.1$ ($r = 0.950$).

MOR = $0.00388E_t + 48.1$ ($r = 0.830$).

は高くなるので、丸太よりもヤング係数の低下する傾向は強まろう。一方、静的曲げヤング係数は表層付近のヤング係数に支配されるので、縦振動ヤング係数のように平均値では評価できないが、スギの樹幹内分布から考慮すれば、丸太に比較して角材が低下することが当然予想される。丸太の静的曲げヤング係数はこのシリーズでは計測していないので別途検討中であり、

E_t of laminae, $\times 10^3$ kgf/cm²

Fig. 6. Distribution of E_t of laminae within log.

Fig. 7. E_t of all laminae and E_t of the outer layer laminae within log.
(Outer layer laminae are two pieces cut from the outside of log.)

樹幹内分布をもとにすれば木取りによるヤング係数の推定は可能であろう。

Fig. 5は丸太の縦振動ヤング係数とスギおよびヒノキ母屋角の静的曲げヤング係数および曲げ強度の関係を示している。この相関はきわめて高く、製材での静的曲げヤング係数と曲げ強度の関数に匹敵するもので、樹種、丸太寸法、製材寸法についてこのような関係をあらかじめ導いておけば、丸太段階で心持ち製材の強度等級区分を予測することが十分可能であると思われる。

3・4 丸太の縦振動ヤング係数と集成材用ラミナなどのヤング係数分布

Fig. 6は静岡県春野町産スギ丸太（長さ380 cm）から切りだした厚さ3 cm ラミナの静的ヤング係数の

Fig. 8. Relationship between Et of log and Et laminae.

Fig. 9. Average Et of laminae within log and Et the log.

樹幹内分布を示したものである⁸⁾。大半がいわゆる中目材（末口径 20～28 cm）で、末口年輪数は 30～50 年である。丸太級径別にみたラミナの樹幹内分布はいずれも丸太中心部で低く、外周部が高い傾向を示し、その差はおおよそ $2 \times 10^4 \text{ kgf/cm}^2$ である。そこで、製材段階で選別可能な方法として考えられる各丸太の最外層の 2 枚のラミナのヤング係数の分布を全体の分布と比較してみたのが Fig. 7 である。斜線部で示された各丸太の最外層の 2 枚のラミナのヤング係数の平均が全体より若干上がる程度である。このように丸太間の差異の方が大きいので、丸太区分の重要性が看取される。

Fig. 8 は長さ 4 m のスギ丸太の縦振動ヤング係数とそれから採取した厚さ 3～3.5 cm のラミナの縦振動ヤング係数の関係を示したものである⁹⁾。ラミナのヤング係数はほぼ丸太の 80% 以上のところに存在することになる。Fig. 9 は丸太の縦振動ヤング係数とそれから採取したラミナの縦振動ヤング係数の平均値との関係を示している。前述したように丸太のヤング係数はその構成材のほぼ平均値に相当していることがここで

Fig. 10. Distribution of Et of laminae classified by Et of log.

も認められた。Fig. 10 は丸太の区分を大雑把に $10 \times 10^4 \text{ kgf/cm}^2$ で行ったとき、それから採取されたラミナのヤング係数の分布を示す。平均で $2 \times 10^4 \text{ kgf/cm}^2$ の差になり、ラミナの性能基準からみると 2 ランクの違いとなる。すなわち、高いヤング係数のラミナを必要とするときには丸太区分がなされた上で、木取りによる選別をすることが有効となることを示している。

3・5 スギ材の適正利用のための丸太区分の展開

すでに述べたように丸太でえられたヤング係数は強度メンバーの原材料として要求されている程度のヤング係数の区分に対応するには十分な場合もあり、たとえそれがラフな区分であったとしても、現在の無区分の集荷のリスクに比べれば用途区分としての有用性は極めて大きい。とくに用途の時代的変遷あるいは多様化の中で、要求される強度条件への適切選択と無駄のない量の確保、径級との組み合わせと並んで重要な指標となる。たとえば以下のようなことが考えられる。

(a) 用途別の要求されるヤング係数、強度と寸法と木取り 足場板、柱、構造部材、集成材ラミナなどでは、用途別、製造上必要とされる適切なヤング係数と級径の選択が行われる。それに対応するように丸太段階のヤング係数が区分されれば、歩留りに関連する寸法と木取りがより正確に設定されうる。

(b) 集荷段階への適用 丸太のヤング係数の区分は樹幹内の材質分布や節や樹幹の形状などからみて比較

的ラフな区分であることは否めない。しかしながら現在、強度メンバーとして要求されている程度のヤング係数の区分には十分であり、たとえそれが90%以上を満足しなかったとしても、現在の無区分の状態における集荷のリスクに比べればはるかに小さくなることは間違いない。とくに、ある強度のヤング係数のような品質を有するものの量のまとまりを要求する集成材工業のラミナの原木の集荷などでは重要な意味をもつ。原木市場のような丸太の段階でヤング係数の区分がなされていることは現段階においてもきわめて有効である。また、集荷する林地が個別散在になっているときなどはある品質の材の量的なまとまりを確保することが困難であることが多い。すなわち、径級別、ヤング係数区分の選別とストックがなされるならば国産材の強度部材としての銘柄化として位置づけられるであろう。

これらはスギ材を用いた公共的な木造建築物の建設に係わった集成材製造あるいは建設施工、設計者サイドから多く指摘されている点でもある。すなわち、ある品質のスギを量的に確保する困難さを克服しないかぎり、国産材の集成材構造あるいは木材に強度を期待する新しい木造建築物へ対応は困難である。その整備こそ林業から木材工業、さらに建設関係の連携と理解の基本でもあろう。

4 結 論

丸太材の打撃音による固有振動数からヤング係数を算出し、製材、集成材ラミナなどのヤング係数の推定や強度等級区分へ応用し、用途区分への展開を検討した。

(1) 丸太材の強度等級区分法として、打撃による固有振動数からの縦振動ヤング係数の計測は有効である。とくに木材中に含まれる水分は木材実質の重量と同じに扱えるので、重量、寸法、周波数から縦振動ヤング係数が得られる。

(2) 丸太の縦振動ヤング係数は材を構成する部位のヤング係数の平均的な数値になる。

(3) 丸太の縦振動ヤング係数と心持角材の静的曲げヤング係数や強度の相関は極めて高く、丸太段階で心持ち製材の強度等級区分を予測することが十分可能である。

(4) スギ丸太の縦振動ヤング係数とそれから採取される集成材用ラミナのヤング係数との相関は高く、丸

太のヤング係数はラミナのヤング係数の平均を示す。ラミナの樹幹内分布があるので、丸太のヤング係数区分と製材の木取りを組合すことが有効である。

(5) 丸太でえられたヤング係数は強度メンバーの原材料として要求されている程度のヤング係数の区分に対応するには十分な場合もあり、たとえそれがラフな区分であったとしても、現在の無区分の集荷のリスクに比べれば用途区分としての有用性は極めて大きい。径級別、ヤング係数区分による選別とストックがなされるならば国産材の強度部材としての銘柄化として位置づけられる可能性がある。

本研究の一部は文部省科学研究費補助金試験研究「打撃音分析による丸太材のグレーディングシステム開発と木材乾燥制御への応用」(代表者有馬孝礼)による。

(1990年10月 ITEC(東京), 1991年9月 ITEC(ロンドン)にて講演)

参 考 文 献

- 1) 有馬孝禮, 平成元年度科学研究費補助金試験研究研究成果報告書「打撃音分析による丸太材のグレーディングシステム開発と木材乾燥制御への応用」(1990).
- 2) 有馬孝禮, 丸山則義, 早村俊二, 宮沢俊輔, 古沢 信, 材料, **39**, 1228 (1990).
- 3) Takanori Arima, Noboru Nakamura, Noriyoshi Murayama, Syuji Hayamura, 1990 International Timber Engineering Conference Tokyo, 527 (1990).
- 4) Takanori Arima, Noboru Nakamura, Noriyoshi Murayama, Syunji Hayamura, 1991 International Timber Engineering Conference London, 2. 266-2. 273, (1991).
- 5) Takashi Nakai, Toshinari Tanaka, Hirofumi Nagao, 1991 International Timber Engineering Conference London, 2. 236-2. 241 (1991).
- 6) 荒武志朗, 迫田忠芳, 有馬孝禮, 持永和郎, 久保国弘, 中村徳孫, 第42回日本木材学会大会要旨集, 147 (1992).
- 7) たとえば, 南沢明子, 酒井春江, 高木堅志郎, 第38回日本木材学会大会研究発表要旨集, p. 67 (1988); 名波直道, 有馬孝禮, 中村 昇, 第42回日本木材学会大会研究発表要旨集, p. 105 (1992).
- 8) 静岡県集成材工業会. 昭和61年度国産針葉樹多目的利用促進事業報告書 (1987).
- 9) 静岡県集成材工業会. 昭和62年度国産針葉樹多目的利用促進事業報告書 (1988).