

はい積みされたスギ大径丸太を対象とした 簡易ヤング係数測定技術の検討[†]

小島瑛里奈*, 加藤英雄*, 井道裕史*, 長尾博文*, 松村ゆかり*

Investigation of Young's Modulus Measurement Technique for Large Diameter Sugi (*Cryptomeria Japonica*) Logs in Piled Condition

Erina Kojima*, Hideo Kato*, Hirofumi Ido*,

Hirofumi Nagao*, Yukari Matsumura*

*Forestry and Forest Products Research Institute

The purpose of this study was to investigate a more convenient method of measuring Young's modulus for large-diameter sugi logs. The natural frequencies of 5 m long sugi logs were measured by the longitudinal vibration method using commercial equipment while the logs were in the piled condition. Since it is difficult to measure the density of logs in the piled condition, it is necessary to estimate Young's modulus by assuming a density. Therefore, the measurement accuracy of Young's modulus was examined by substituting values for density as a variable. The results showed that the measurement accuracy using second- and third-order natural frequencies was higher than that using first-order natural frequencies. In addition, when considering the evaluation of the safety side in the sorting operation in the piled condition, it was considered appropriate to set a smaller value than the actual measured density (700 kg/m³ in this study) as the assumed value of density.

1. はじめに

近年、国内の人工林は高齢化をむかえており、特にスギは直径 30 cm を超える大径材の供給が増加している。このスギ大径材を建築用材として有効活用することは、国内の持続可能な人工林施業に繋がる

[†]本研究の一部は日本木材加工技術協会第 40 回記念年次大会で発表した。

* 森林総合研究所

Corresponding author : E. KOJIMA

のみならず、世界各国で重要視されている炭素貯蔵効果の発揮にも大きく繋がる。特に、大径材は木取りのバリエーションが多いため、丸太段階で品質を評価することができれば、需要に応じた効率的な製材の生産が可能となる。このようなことから、スギ大径丸太の段階で製材品の強度を予測する技術開発が行われてきた^{1), 2)}。

丸太段階における品質の区分および用途に応じた選別は、丸太の径に関わらず製材の効率的な製造に寄与するため重要である³⁾。丸太の品質に関しては、素材の日本農林規格⁴⁾（以降、素材 JAS と称す

る)において、縦振動法により測定されたヤング係数に基づき等級区分し、表示することが可能とされている。丸太段階での縦振動法によるヤング係数の測定については、以前から測定効率および精度の向上を目的に様々な研究がなされてきた。例えば、縦振動法によるヤング係数の測定では丸太を1本ずつ運び出す作業に労力を要する。荒武らは、この作業の省略を目指し、丸太をはい積み状態のまま測定した場合の固有振動数と、緩衝材を用いて一点支持した状態(素材 JAS⁴⁾の測定方法)の固有振動数を比較し、高次の振動次数を用いた場合、両者は大差ないことを明らかにした^{5), 6)}。また、縦振動法によるヤング係数の測定精度の向上を目指し、丸太を円錐台とみなし体積を算出する場合(素材 JAS⁴⁾の計算方法)と、丸太の細りの曲率を考慮し体積を算出した場合とを比較したものもある⁷⁾。近年では、より簡便なヤング係数の測定を目的としたハンディタイプの簡易測定器が市販されており、これを導入し丸太のヤング係数の測定を試みた例もある⁸⁾。

しかし、スギ大径丸太を対象に縦振動法によるヤング係数の測定を試みた場合、従来のスギ小・中径丸太よりも重量や寸法が大きいと、取り扱いがより困難になることが予想される。したがって、スギ大径丸太に関しても、縦振動によるヤング係数に準じた、より簡便なヤング係数の測定方法の開発や、その評価法の検討が求められるが、このような取り組みはまだ十分ではない。そこで本研究では、スギ大径丸太を対象に、丸太を1本ずつ吊り下げた場合と、はい積みにした場合の縦振動法によるヤング係数を比較した。また、2種類の市販器を用いることで、これらの測定精度も検証した。さらにははい積み状態の丸太では、密度や長さの測定が困難なので、実際の現場では一定の仮定値を入力することが想定される⁸⁾。本研究では、はい積み状態におけるヤング係数の測定について、この想定される密度を代入した場合のヤング係数の測定精度を調べ、密度の仮定値の妥当性も併せて検討した。

2. 実験

2.1 供試丸太

福島県塙市内に集積された、公称長さが5 mで末口径が27.5 cm~52.1 cm、測定時重量が262 kg~932

kgのスギ大径丸太114本を供試丸太とした。丸太の末口、元口、中央部の円周を測定し、丸太を2つの円錐台と仮定し求めた体積と、重量を用いて算出し、本研究ではこれを丸太の密度(ρ)とした。

2.2 ヤング係数の測定

スギ大径丸太の縦振動法によるヤング係数の分布を把握するため、写真1に示すように、グラップルを用いて供試丸太を1本ずつ吊り下げ、丸太の重量、寸法を測定するとともに、固有振動数を測定した。固有振動数は、丸太の片側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縦振動波を捉え、FFT コンパレータ(CF-4500, 株式会社小野測器製)によって1次の固有振動数を測定した。この時の1次の固有振動数および丸太の長さ、密度を用いて次式⁴⁾により算出したヤング係数を E_{fr} と称す。

$$E_{fr} = (2 \times L \times f)^2 \times \rho$$

ここで、 L は丸太の長さ、 f は1次の固有振動数、 ρ は密度である。

すべての供試丸太について E_{fr} を測定した後、写真2に示すように、供試丸太をはい積みにした状態で固有振動数を測定した。ここでは、FFT コンパレータによる測定に加え、より簡便な測定方法として、市販されている2種類の測定器を用いた。用いた測定器は簡易型構造用製材・原木強度測定器(HG-2020sp, 株式会社エーティーエー製)およ



写真1 縦振動法による固有振動数の測定の様子

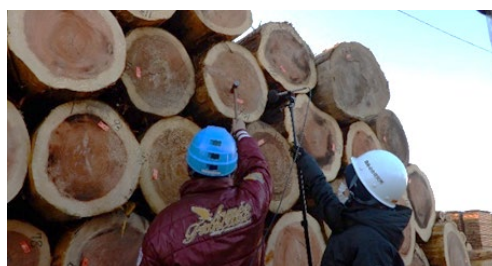


写真2 はい積み時の固有振動数の測定の様子

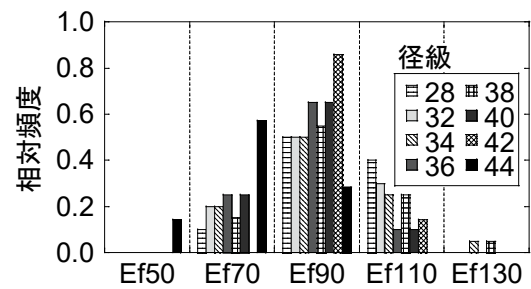
び携帯型木材強度区分機（GM-10、マイクロメジャー株式会社製）である。以降、それぞれのはい積み状態で測定方法を F 法（CF-4500）、C_A 法（HG-2020sp）、C_M 法（GM-10）と称する。この際、ハンマーで叩く木口面と固有振動数を収録する木口面は同じ面とした（写真 2）。なお、末口径 24.5 cm～27.5 cm のスギ中目丸太を対象とした荒武らの研究では、丸太をはい積みした際、1 次の固有振動数はいい積みの影響を大きく受け、高次の固有振動数はいい積みの影響を受けにくいことが明らかになっている⁵⁾。このため、本研究においても、F 法および C_A 法では 1 次～3 次の固有振動数を測定のうえ、2 次振動数 f_2 は 2 で除し、3 次振動数 f_3 は 3 で除すことで¹⁰⁾、2.2 に示した式によりはい積み状態における各振動次数でのヤング係数 (E_{P-fr}) を算定し、 E_{fr} と比較して精度を検証した。なお、C_M 法では測定器の仕様上、1 次の固有振動数のみを測定した。なお、本研究でのはい積み段数は最大で 6 段であったが、最上段の丸太は測定器が届かず測定できなかった。はい積み状態で測定した丸太の本数は 82 本であった。

なお、前述したように、はい積み状態で丸太のヤング係数による選別を試みる場合、丸太の重量および寸法を 1 本ずつ測定するのは現実的ではなく、ヤング係数の算出に必要な密度および長さは仮定した値を用いることが多い。本研究では、これについて想定し得る値を代入した際のヤング係数の測定精度を調べ、丸太密度と長さの仮定値の妥当性を検討した。

3. 結果

3.1 大径丸太のヤング係数分布

丸太を吊り下げた状態でヤング係数 (E_{fr}) を測定した結果、供試丸太全体での平均値および標準偏差は 8.71 ± 1.27 GPa であった。素材 JAS⁴⁾ に基づく縦振動ヤング係数区分の分布を径級別に第 1 図に整理した。径級毎の試験体数は、径級 28 cm, 32 cm, でそれぞれ 10 本、径級 34 cm, 36 cm, 38 cm, 40 cm でそれぞれ 20 本、径級 42 cm, 44 cm でそれぞれ 7 本であった。概ね径級による違いは認められず、Ef90 を頂点とした左右対称に近い分布形を有した。しかしながら、径級の大きい 44 cm の丸太のみ Ef70

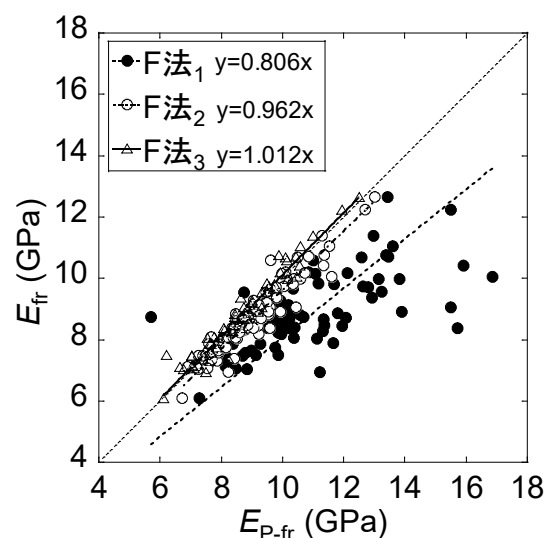


第 1 図 径級別縦振動ヤング係数区分

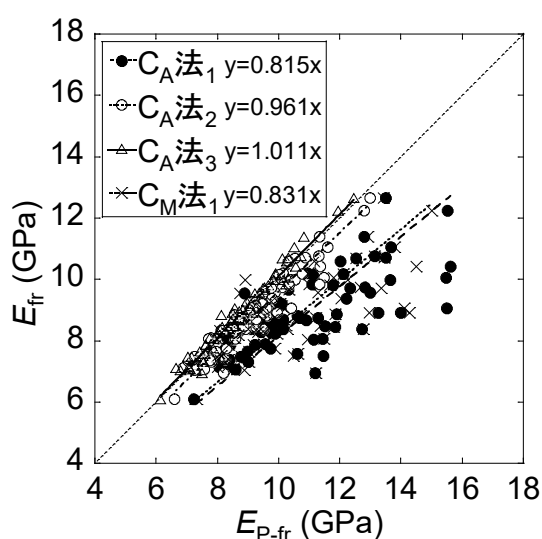
に頂点を取り、他の径級と比較して E_{fr} は低かった。

3.2 はい積み状態でのヤング係数の測定

丸太のはい積みがヤング係数の測定精度に及ぼす影響を検討した。まず、吊り下げ時に測定した縦振動法による E_{fr} と、はい積み状態での F 法による測定結果 (E_{P-fr}) の関係を調べた。結果を第 2 図に示す。図中の縦軸は E_{fr} を、横軸は E_{P-fr} を示しており、凡例は測定方法で、下付きの数字は用いた振動次数を示す。凡例の右隣には、切片を 0 とした線形回帰を行った際の近似式を示した。また、ここでの E_{P-fr} の算出には E_{fr} と同様の吊り下げ時に測定した密度および長さを用いた。この図より、1 次の固有振動数を用いた場合 (●プロット)、 E_{P-fr} は E_{fr} に対して概ね高い値を示しており、測定精度は低いことがわかる。一方、2 次以上の固有振動数を用いた場合には、1 次の場合よりも顕著に $y=x$ の直線に近い



第 2 図 吊り下げ時の E_{fr} とはい積み時の E_{P-fr} の関係 (F 法)

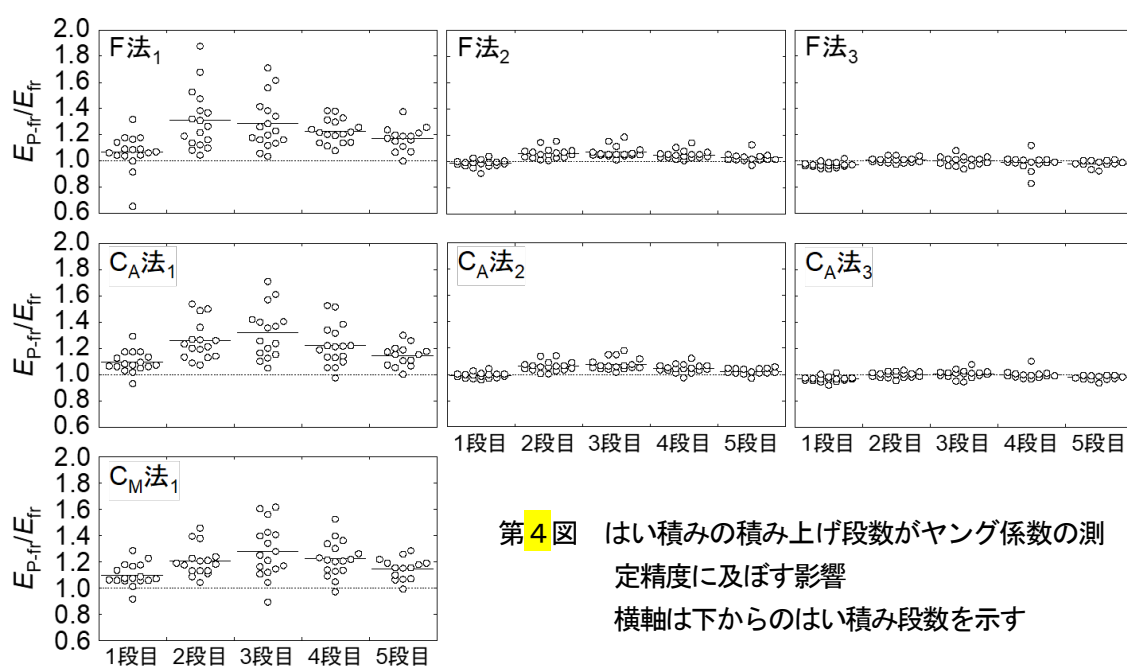


第3図 吊り下げ時の E_{fr} とはい積み時の E_{P-fr} の関係（ C_A 法および C_M 法）

た。スギの中目丸太や製材品を対象とした既往の研究によると、1次の固有振動数と比較して高次の固有振動数を用いた場合は、はい積みの影響を受けにくいことが報告されており^{5), 9)}、スギ大径材を用いた本研究においても同様の結果となった。さらに、市販器を用いた結果を第3図に示すが、市販器による測定でもF法と同様の傾向となることが示された。すなわち、 C_A 法、 C_M 法ともにはい積みの影響を受ける1次の固有振動数を用いた場合、 E_{P-fr} は E_{fr} に対して高い値を示し、測定精度は低かった。一方、

C_A 法においては、2次以上の固有振動数を用いた場合の E_{P-fr} と E_{fr} との関係は $y=x$ の直線に近づいた。なお、 E_{fr} に対する E_{P-fr} の比率を調べたところ、1次の固有振動数を用いた場合、その平均値はF法および C_A 法で1.21、 C_M 法で1.19であり、2次の固有振動数を用いた場合は、F法および C_A 法ともに1.04であり、 E_{P-fr} は E_{fr} よりも大きい傾向にあった。これに対し、3次の固有振動数を用いた場合はF法および C_A 法ともに0.99であり、 E_{P-fr} は E_{fr} よりも若干小さい傾向はみられるものの、ほぼ一致することがわかった。

ここで、丸太をはい積みした場合、はい積みした段数によって、その拘束条件は大きく異なる。本研究では、それぞれの測定方法において丸太のはい積みの段数がヤング係数に及ぼす影響を検討した。結果を第4図に示す。縦軸は E_{fr} に対する E_{P-fr} の比率を、横軸ははい積み時の下からの段数を示しており、図中の実線は平均値を示す。図中左側に示す1次の固有振動数を用いた場合、いずれの測定方法においても、すべての段で E_{P-fr} は E_{fr} よりも大きく、比率の平均値は1以上だった。また、特に下から2～4段目でヤング係数の比率が大きく、概ね平均値で1.2～1.4を示した。下から1段目および5段目の丸太の比率は平均値で1.1～1.2を示しており、下から2～4段目と比べると1に近い。下から5段目の丸太は、上部からかかる丸太の重量が下段の丸太と比較



第4図 はい積みの積み上げ段数がヤング係数の測定精度に及ぼす影響
横軸は下からのはい積み段数を示す

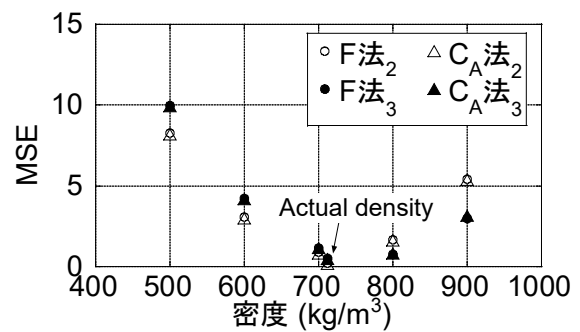
して小さいため、はい積みによる影響が小さかったと考えられる。これに対して、下から1段目の丸太は上部からかかる重量が最も大きく、はい積みによる拘束の影響が大きいと予想された。しかしながら、予想に反して、2～4段目の丸太と比較して1段目の丸太は比較的高い測定精度を示した。これは地面と1段目の丸太との間に栈木が設置されており、1段目の地面側はある程度自由な状態であったことが要因として考えられる。

2次および3次の固有振動数を用いた場合、1次を用いた場合と比較して、はい積みの影響は小さく、下からのはい積み段数に依らず概ね1に近い値を示した。また、2次と3次を比較すると、特に2～4段目の丸太では、3次の固有振動数を用いた方が平均値は1に近くなり、高い測定精度を示すことが明らかになった。以上のことより、スギ大径丸太をはい積みした際には、測定方法に依らず3次の固有振動数からヤング係数を算出するのが適切であると考ええる。

ここで、はい積み状態で測定した丸太の本数は、下から1段目～4段目がそれぞれ17本、5段目が14本であった。これらについて、1次および2次の固有振動数は全ての丸太で測定できたのに対し、3次の固有振動数は次に挙げる丸太で測定できなかった。F法では2段目で1本、3段目で1本、4段目で2本、5段目で2本。C_A法では4段目で3本、5段目で2本。これらの欠測の原因については、現段階では下からのはい積み段数や径級などの影響が認められず、明確な理由を推察することはできないが、条件によっては3次の固有振動数の測定が難しい場合もあることがわかった。

3.3 丸太の密度の仮定値の検討

はい積み状態で丸太の選別作業を想定した際、丸太の密度および長さを一本ずつ測定するには大変な労力を要するため、それぞれ一定値と仮定してヤング率を算定する場合がある。本研究では、丸太の長さを公称長さである5mで統一し、密度を変数として様々な値を代入した場合のはい積み状態におけるヤング係数(E_{P-F})を算出し、これと E_F の誤差を数値解析した。その結果を第5図に示す。ここでは、これまでの結果からはい積み状態でも高い測定精度を示したF法およびC_A法の2



第5図 密度の代入値と測定誤差の関係

次および3次の固有振動数でのみ検討した。図中の、横軸は変数として代入した密度を、縦軸は E_F に対する E_{P-F} の平均二乗誤差 (Mean Squared Error, 以下 MSE と称す) を示した。また、図中の Actual density は、実測した密度を用いた場合の値を示した (横軸は実測密度の平均値 712 kg/m^3 とした)。図より、密度の実測値を用いた場合の MSE が最も小さく、密度の仮定値が実際の密度の平均値から離れるとともに MSE は増加していることがわかる。その MSE の増加の程度は代入値が実際の密度の平均値よりも小さい場合 ($<712 \text{ kg/m}^3$) と大きい場合 ($>712 \text{ kg/m}^3$) で異なった。すなわち、代入値が 712 kg/m^3 よりも大きい場合の方が、小さい場合よりも MSE の増加の程度が緩やかであった。本研究における供試丸太の長さの実測値は概ね $5.1 \sim 5.2 \text{ m}$ であり、仮定値 (5 m) はこれよりも小さい。したがって、密度の仮定値が 712 kg/m^3 よりも大きい場合は、長さの誤差が密度の誤差と相殺され MSE の増加の程度が緩やかになり、また密度の仮定値が 712 kg/m^3 より小さい場合はこれらの誤差が相乗されたため、MSE の増加の程度が急になったと考えられる。しかしながら、実際の密度よりも代入値が大きい場合、算出される E_{P-F} は E_F よりも大きい値となるため、ヤング係数を過度に見積もる危険側の評価となることが懸念される。また、本研究において、前述したように、実測した長さおよび密度を用いても2次の固有振動数によるヤング係数は E_F よりも高いのに対して、3次の固有振動数におけるヤング係数は E_F よりも若干小さくなる傾向が示された。この傾向から、密度の仮定値が実測値よりも小さい場合は、 E_F より若干高いヤング係数を示す2次の固有振動数を、

仮定値が実測値よりも大きい場合は E_f より若干低いヤング係数を示す 3 次の固有振動数を用いた方が誤差は小さくなった。

以上の結果を総合的にまとめると、はい積み状態での作業を想定した際には、安全側に評価することを考慮して、密度は実際の値よりも小さめに設定し（本研究においては密度 700 kg/m^3 ）、測定精度が比較的良好、かつ測定が容易である 2 次の固有振動数を用いるのが妥当であると考えられる。

4. まとめ

長さ 5 m のスギ大径丸太を対象に、縦振動法によるヤング係数の分布を調べるとともに、はい積みにした際の測定精度について検討した。その結果、丸太のヤング係数は、最も大きい 44 cm の径級を除いた全ての径級で、 E_{f90} を頂点とした左右対称の分布形を有した。また、丸太をはい積みにした場合、2 次および 3 次の固有振動数から算出したヤング係数は、概ね E_f と一致し、はい積みによる影響は 1 次の固有振動数を用いた場合と比較して顕著に小さくなった。この傾向は測定方法に依らなかった。次に、丸太の長さを 5 m とし、密度の仮定値とそのときの測定誤差の関係を調べた。その結果、実際の密度よりも低い仮定値を設定し、測定誤差が小さくかつ測定の容易な 2 次の固有振動数を用いることが妥当と判断された。

謝 辞

本研究は（国研）森林研究・整備機構森林総合研究所交付金プロジェクト（課題番号 202102）の研究成果である。なお、本試験を遂行するにあたり協和木材株式会社にご協力いただいた。ここに謝意を表する。

文 献

- 1) 長尾博文, 加藤英雄, 井道裕史, 原田真樹: 木材工業, **76** (11), 434-439 (2021)
- 2) 加藤英雄, 長尾博文: 木材工業, **76** (11), 484-487 (2021)
- 3) 有馬孝禮, 丸山則義, 早村俊二, 中村昇, 名波直道: 材料, **42** (473), 141-146 (1993)
- 4) 素材の日本農林規格, 農林水産省告示 1052 号, 2022 年 4 月 15 日
- 5) 荒武志朗, 有馬孝禮, 迫田忠芳, 中村徳孫: 木材学会誌, **38** (11), 995-1001 (1992)
- 6) 荒武志朗, 有馬孝禮: 木材学会誌, **40** (9), 1003-1007 (1994)
- 7) Y. Kubojima, Y. Matsumura, Y. Suzuki: Bioresources.com, **13** (1), 1035-1041 (2018)
- 8) 山裾伸浩: 和歌山県令和 3 年度林業試験場成果発表会要旨, 5-6 (2022)
- 9) 有馬孝禮, 早村俊二, 丸山則義, 宮沢俊輔, 古沢信: 材料, **39** (444), 44-50 (1990)
- 10) 公益財団法人日本住宅・木材技術センター: 構造用木材の強度試験マニュアル, 62 (2011)