



Title	改良した立木曲げ試験によって測定した造林木の樹幹ヤング率の検証
Author(s)	日置, 絵里香; 小泉, 章夫; 佐々木, 義久 他
Citation	Mokuzai gakkai shi : 木材学会誌, 64(3), 115-121 https://doi.org/10.2488/jwrs.64.115
Issue Date	2018
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/70993
Rights	© 2018 一般社団法人 日本木材学会
Type	journal article
File Information	64_115.pdf



改良した立木曲げ試験によって測定した造林木の 樹幹ヤング率の検証*¹

日置絵里香*², 小泉章夫*³, 佐々木義久*³, 鳥田宏行*⁴

Verification of Trunk Modulus of Elasticity Obtained by Improved Tree Bending Tests*¹

Erika HEKI*², Akio KOIZUMI*³, Yoshihisa SASAKI*³ and Hiroyuki TORITA*⁴

The tree bending test is a non-destructive method for evaluating the Young's modulus (modulus of elasticity, MOE) of a tree trunk. We attempted to improve the method to obtain increased accuracy of the estimated MOE. In the proposed method, the load-deflection relationship was graphically displayed on a tablet PC, and the MOE was calculated using the linear section of the load-deflection relationship. As a result, errors caused by wind pressure or contact with neighboring tree crowns could be easily eliminated. The proposed tree bending tests were conducted at plantations of todomatsu (*Abies sachalinensis*), karamatsu (*Larix kaempferi*), and larch hybrid. The calculated trunk MOEs were compared with the results obtained from stress wave velocity measurements of the trunks, as well as dynamic MOE obtained by longitudinal vibration tests of the logs harvested after the tree tests. The correlation between the trunk MOE and the dynamic MOE for logs was found to be as high as that obtained for the correlation between the square of the stress wave velocity and the log MOE. The results demonstrated that the trunk MOE obtained by the proposed tree bending test could be used as a practical reference index for the mechanical properties of the wood. The dynamic MOE for log specimens obtained by the longitudinal vibration tests was approximately 30% lower than the trunk MOE. This could be partially explained by the high MOE of the mature wood formed at the outer part of the trunk, which might affect the trunk MOE.

Keywords: nondestructive test, modulus of elasticity, coniferous plantation, stress wave velocity, longitudinal vibration

立木のヤング率を測定する非破壊試験の一つとして立木曲げ試験法がある。その測定精度の向上を目指して、現場で荷重変位関係を表示し直線域の存在を確認して樹幹ヤング率を計算するように測定方法を改良した。この改良によって風や隣接木との接触などの影響を容易に排除できることが確かめられた。また、トドマツ、カラマツ、グイマツ雑種 F1 の 3 樹種について、樹幹ヤング率を応力波伝播速度試験や丸太の縦振動試験の結果と比較して、その実用性を検討した。その結果、樹幹ヤング率は供試木を伐採して得た丸太の動的ヤング率との相関が高く、実用的な材質指標として使えると考えられた。縦振動試験によって求めた丸太の動的ヤング率は樹幹ヤング率より 30% 程度、小さな値となった。その理由の一つとして、樹幹ヤング率では外縁部に形成された成熟材部の高いヤング率が影響して縦振動試験によるヤング率より大きくなったことが考えられた。

*¹ Received March 31, 2017; accepted December 25, 2017. 本研究の一部は第64回日本木材学会大会（2014年3月，松山），および第65回日本木材学会大会（2015年3月，東京）において発表した。

*² 北海道大学農学研究科 Graduate School of Agriculture, Hokkaido University, Sapporo, 060-8589, Japan

*³ 北海道大学農学研究院 Research Faculty of Agriculture, Hokkaido University, Sapporo, 060-8589, Japan

*⁴ 北海道立総合研究機構林業試験場道南支場 Donan Branch, Forest Research Institute, Hokkaido Research Organization, Hakodate, 041-0801, Japan

Corresponding author: A. Koizumi (akoizumi@for.agr.hokudai.ac.jp)

1. はじめに

近年、地球温暖化防止の努力が求められている中で、炭素ストックの増加をねらいとして、集合住宅などへの木質構造物の普及促進がはかられている。同時に、木造建築設計の性能規定化に伴って、強度設計可能な集成材やMSRランバーの利用が増えることが期待される。これらの材料ではヤング率を指標とした製材を基本単位とした強度等級区分が行われており、遡って原木丸太^{1, 2)}や立木段階^{3, 4)}でのヤング率評価も試みられている。

このうち、立木段階でのヤング率の非破壊評価は林分単位のマテリアル評価のほか、環境影響や遺伝変異の評価といった林木育種的手段に使うことが期待できる^{5, 6)}。立木樹幹のヤング率を評価方法として、これまでに、応力波伝播速度の測定試験⁷⁾と樹幹の曲げ剛性試験^{8, 9)}が提案されている。

前者は市販の測定機器を用いて簡便に測定できる利点があるが、測定される応力波の伝播速度をヤング率に換算するには応力波伝播経路の密度を測定する必要がある。また、2個のセンサーを樹幹に打ち込む必要があり、木部に傷が残ることは避けられない。

一方、立木曲げ試験法は樹幹から吊り下げた荷重棒によってモーメント負荷した樹幹の区間たわみから曲げヤング率を求める方法である⁸⁾。ただし、曲げ試験なので大径木に適用することは難しい。また、従来の方法⁸⁾では試験時に荷重～たわみ関係を確認できないので、風による樹幹の振動や、隣接木との樹冠の接触が樹幹の曲げたわみへ及ぼす影響を排除できない問題があった。そこで、本研究では測定現場で荷重～たわみグラフを携帯型のパソコン画面上に表示できるようにし、その場で確認した弾性域(直線域)のデータを用いてヤング率を計算するようにした。

本研究の目的は、改良した立木曲げ試験によって求めた造林木の樹幹ヤング率を応力波伝播速度試験や丸太の縦振動試験の結果と比較することで、その

実用性を検証することである。

2. 材料と試験方法

2.1 供試材料

北海道の代表的造林樹種であるトドマツ (*Abies sachalinensis*) とカラマツ (*Larix kaempferi*) のほか、グイマツ雑種 F1 (*Larix gmelinii* var. *japonica* × *L. kaempferi*) の3樹種を供試材料とした。トドマツとカラマツは北海道砂川市および新十津川町の一般民有林、グイマツ雑種 F1は挿し木を植栽した北海道林業試験場の試験林(三笠市)の立木である(Table 1)。立木時の実験は、対象林地で伐採が実施された機会を利用して、2013年と2014年の9月に行った。なお、供試木は各林地の伐採予定木のうちで比較的通直な個体から、胸高直径の範囲ができるだけ広くなるように供試木を選定した。供試木数はトドマツとカラマツについて各17本、グイマツ雑種 F1について40本の合計74本である。

2.2 立木曲げ試験

全供試木について、Fig. 1に示す立木曲げ試験を行った。従来の方法⁸⁾では試験者の体重を死荷重として樹幹にモーメントを負荷し、載荷時の樹幹の曲げ変位と体重測定値から樹幹ヤング率を計算していた。今回の方法もモーメント荷重を負荷する方法と樹幹の一定区間の曲げ矢高を用いる測定原理は同じだが、現場で荷重～変位関係をグラフで確認できるように改良した。従来の方法では、不適切な荷重によって樹幹がたわみ振動を起こして設置した矢高測定器がずれたり、あるいは、風や隣接木との接触によって負荷中に樹幹の変位が変化して、弾性的な挙動を示していなくても確認するすべがなかったが、この改良によって樹幹の弾性変形を確認してヤング率を計算できるようになった。また、従来の体重載荷方法ではたわみが大きくなりすぎて測定できなかった小径木でも、全体重を負荷せず、荷重～変位関係の直線性を確認した時点で除荷できるようになったため、ヤング率の計測が可能となった。以下、試験手順を具体的に述べる。

Table 1. Outline of sample trees.

Species	Stand age	Location	Number of samples	$H^a)$ (m)		DBH ^{b)} (cm)	
				Mean	SD	Mean	SD
Todomatsu ^{c)}	41, 42	Sunagawa	17	16.4	2.41	19.5	4.20
Karamatsu ^{d)}	30, 31	Shintotsukawa	17	14.7	1.58	19.7	2.36
Hybrid larch ^{e)}	19	Mikasa	40	12.8	1.05	16.5	1.49

Note: ^{a)} Average tree height, ^{b)} Average diameter at breast height, ^{c)} *Abies sachalinensis*, ^{d)} *Larix kaempferi*,

^{e)} *Larix gmelinii* var. *japonica* × *L. kaempferi*.

樹幹に巻いた荷役用スリングからターンバックルとロープを介して吊り下げた木製の荷重棒 (Fig. 1 の Lever bar) を高さ約170 cm で樹幹に突き当て、荷重棒の先端に体重を利用して下向きに300~600 N 程度の負荷をかけた。荷重棒から下の樹幹に作用する一様なモーメント (M) は、負荷量 (P) に負荷位置から樹幹中心までの水平距離 (L) を乗じて求められる。ここで L は今回用いた荷重棒の載荷点までの長さ120 cm に載荷高さで測定した樹幹周囲長から算出した樹幹半径を加えた値とした。

加力による樹幹の曲げ変位は、矢高ゲージ (Fig. 2) の中心が高さ120 cm になるように紐で樹幹に結わえ、ゲージの中央矢高 (δ) を変位計 (DTH-A5, 共和電業, 調布市) で測定した。変位はレバーの先端から垂らしたロープにセットしたロードセル (LTZ-100KA, 共和電業, 調布市) で検出した荷重 (P) とともに、5Hz のサンプリング速度でタブレット型パソコン (ThinkPad, Lenovo Japan, 東京都) を電源とした動ひずみレコーダ (EDX10A,

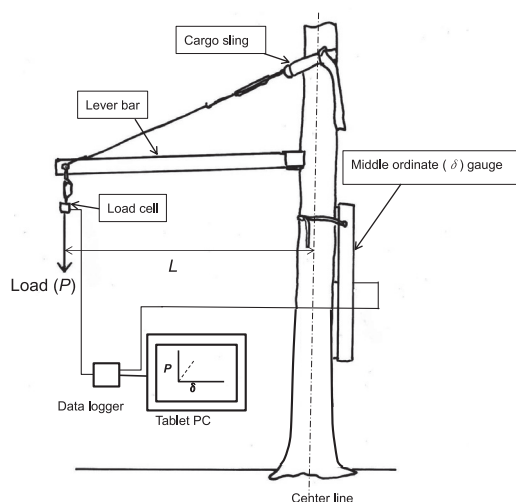


Fig. 1. Schematic diagram of the tree bending test.

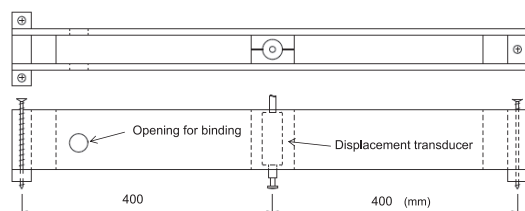


Fig. 2. A middle-ordinate gauge, which was bound on a stem with a rope placed through the opening. Note: A displacement transducer was frictionally held at the mid-span of the gauge.

共和電業, 調布市) に記録した。試験時はタブレット画面上で荷重~変位関係をグラフ表示し、その直線性を確認できるまで負荷を繰り返した。試験は各供試木について直交2方向で行い、荷重変位関係の直線部分の傾きの平均値を樹幹剛性 (P/δ) とした。

樹幹の曲げヤング率 (E_s) は式(1)から求められる⁸⁾。

$$E_s = \frac{s^2 M}{8 I \delta} = \frac{s^2 L}{2 \pi r^4} \times \frac{P}{\delta} \quad (1)$$

ここで、 s : 矢高ゲージのスパン、 I : 樹幹の120 cm 高さの断面2次モーメント、 r : 120 cm 高さの木部半径である。木部半径は (樹幹周囲長/ 2π) から精密ドライバーを挿入して測定した樹皮厚を差し引いて算出した。

なお、試験に要した時間は風の状況などにもよるが、機材の設置時間も含めて1本あたり5分程度であった。

2.3 応力波伝播速度の測定

応力波伝播速度の測定には市販の測定機器の一つである Fakopp (Fakopp, エフティーエス, 東京都) を使用した。樹幹の高さ70 cm に打ち込んだ START センサーをハンマーで打撃し、170 cm の高さに打ち込んだ STOP センサーまでの応力波伝播時間を計測し、伝播速度 (v) を算出した。予備試験を行って、センサーの打ち込み深さが測定値に及ぼす影響を検討した結果に基づき、打ち込み長さが約15 mm になるように、センサーにスリーブをはめて調整した。

v は式(2)のように動的ヤング率 (E_v) の関数として表せる⁷⁾。

$$v = \sqrt{\frac{E_v}{\rho}} \quad (2)$$

ここで、 ρ : 応力波伝播経路の密度。

2.4 丸太の縦振動試験

立木で測定した E_s , v^2 , および E_v と丸太のヤング率を比較する目的で、立木での試験後、供試木を伐倒して地上高50~230 cm から採取した180 cm 長さの丸太について、縦振動試験を行った。丸太木口面の打撃による一次の共振周波数を FFT アナライザ (SA77, RION, 国分寺市) で読み取って、別途、測定した質量と合わせて動的ヤング率 ($E_{\log}$) を算出した。

2.5 辺材密度、無欠点小試験体の曲げヤング率、および旋回木理の測定

曲げヤング率である E_s は樹幹外縁部の材質に重みがついている。また、応力波の伝播経路も樹幹外

縁部である。そこで、これらの性質への樹幹外縁部の性質の影響を検討するために供試木の一部（トドマツとカラマツは各10本、グイマツ雑種 F1 は全40本）について、以下の試験を行った。

丸太の地上高85~90 cm 区間で円板を採取し、辺材と心材に分けて直方体の試料を切削したのち、ただちに生材時の質量を測定し、生材密度を求めた。さらに、地上高100~140 cm 区間から髓を通る30 mm 厚の両耳付きの柁目板を採材し、気乾状態まで乾燥した後、両樹皮側から20×20 mm 断面の無欠点小試験体を連続的に切り出した。試験体数はトドマツ、カラマツ、グイマツ雑種 F1 について、それぞれ、93, 79, 133体であった。これらの小試験体は断面中央で髓からの年輪数を記録した上で、JIS Z 2101¹⁰⁾ に従って曲げ破壊試験に供した。

以上の実験に加えて、カラマツとグイマツ雑種 F1 については、丸太の地上高90~100 cm から採取した円板について、割裂法で辺材部の最大繊維傾斜角を測定した。

3. 結果と考察

3.1 弾性変形の確認

今回の立木曲げ試験で得られた荷重～変位関係の例を Fig. 3 に示す。(a)は载荷中に風もなく、比較的きれいな弾性関係が見られた例である。このような場合、原則として最大荷重の10~80%のデータを線形回帰してその傾きを式(1)の P/δ として用いた。(b)は载荷中に風の影響を受けるなどして直線域が判然としなかった例である。このような場合は、直線域が確認できるまで载荷を繰り返した。(c)は荷重が300 N を越えてから曲線の傾きが急になっており、原因として、樹幹を曲げたことによって隣接木と樹冠同士が接触したことが考えられた。このような場合は直線域内のデータ（この例では約300 N まで）を用いた。この例の場合、従来の方法のように体重負荷（最大荷重）時のたわみを用いてヤング率を算出すると11%の過大評価になる。なお、

Fig. 3 では見やすくするため、最大荷重付近で荷重～たわみ曲線の描画を打ち切っているが、試験時には除荷時に負荷時と同じ傾きで戻ることを確認している。

このように、今回の測定法の改良によって、従来確認できなかった荷重～変位の弾性関係が確認できるようになった結果、樹幹ヤング率推定の信頼性が高まったと考えられた。

3.2 E_s と E_{log} の比較

Table 2 に樹幹と丸太について各種の方法で測定したヤング率の樹種ごとの平均値と標準偏差を示した。 E_s の平均値は40年生台のトドマツが12.9 GPa と約30年生のカラマツの11.8 GPa よりやや高かった。19年生で未成熟材部を多く含んでいると考えられるグイマツ雑種 F1 は10.6 GPa とやや低い値であった。また、トドマツの E_s は他樹種と比べてバラツキが小さい傾向が見られたが、胸高直径と E_s の相関では、トドマツについてのみ5%の有意水準で負の相関が認められた（相関係数：-0.586）。

E_s の実用性を検証するために E_{log} との相関を調べた結果、樹種を混みにした場合と樹種別のいずれ

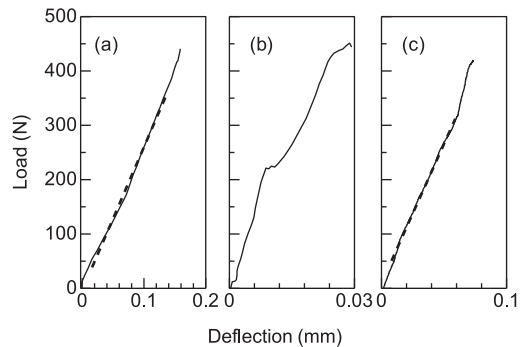


Fig. 3. Examples of load (P) -deflection (δ) curves observed in tree bending tests.

Note: (a) Karamatsu No. 4, (b) Todomatsu No. 4, (c) Hybrid larch No.3. Broken lines are regression lines fitted on the linear ranges for the curves.

Table 2. Elastic characteristics of tree and log specimens.

Species	E_s (GPa) ^{a)}		E_{log} (GPa) ^{b)}		E_v (GPa) ^{c)}		v^2 ($10^6 \text{m}^2/\text{s}^2$) ^{d)}	
	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD
Todomatsu	12.92	1.57	9.28	0.85	17.11	1.47	11.4	1.25
Karamatsu	11.84	1.96	8.06	1.15	12.39	4.61	10.96	3.13
Hybrid larch	10.60	2.37	7.32	1.09	9.06	1.43	9.13	1.41

Note: ^{a)} Static Young's modulus obtained by tree bending tests, ^{b)} Dynamic Young's modulus for logs obtained by longitudinal vibration tests, ^{c)} Dynamic Young's modulus calculated from stress wave velocity and sapwood density, ^{d)} Square of stress wave velocity measured on a tree stem.

についても1%水準で有意な相関が認められた (Fig. 4, Table 3)。 $E_{\log}$ は縦振動法によって求めた動的ヤング率であり、曲げ試験によって求めた静的ヤング率の E_s と同列に比較することはできない。しかし、丸太の縦振動試験は山元での材質評価方法として使われている方法であり、それとの相関が高いことは立木の材質指標として望ましいものといえる。

従来、立木の材質指標として一定の評価が得られている v^2 と $E_{\log}$ の相関について調べた結果、両者の相関は1%水準で有意であった (Fig. 4, Table 3)。応力波伝播速度法で材質を評価する場合、 E_v の代わりに v^2 をそのまま材質指標として使うことが多い。これは林地で密度を測定することが困難なためだが、本研究では応力波の伝播経路と考えられる辺材部の密度を測定しているの、この密度を v^2 に乗じて算出した E_v と $E_{\log}$ との相関についても検討した。その結果、樹種を混みにした場合に1%水準で有意な相関が認められたが、その相関係数 (0.416) は v^2 と $E_{\log}$ のそれ (0.502) と比べて高くはなかった (Table 3)。

この理由については、本研究で計算に用いた辺材

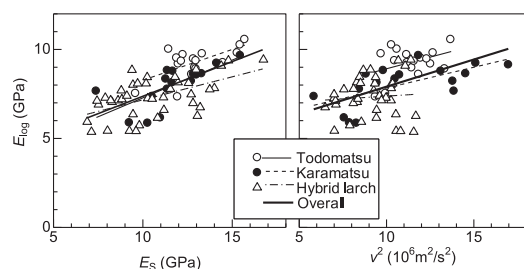


Fig. 4. Correlations of dynamic Young's modulus for log specimens ($E_{\log}$) with Young's modulus obtained by tree bending test (E_s) and the square of stress wave velocity measured on a tree stem (v^2).

Note: Regression expressions in the figure are obtained for each species and overall data.

Table 3. Correlation coefficients between $E_{\log}$ and E_s , E_v and v^2 .

Species	$E_s^{a)}$	$E_v^{b)}$	$v^2^{c)}$
Todomatsu	0.643**	0.175	0.387
Karamatsu	0.724**	0.584*	0.635**
Hybrid larch	0.561**	0.089	0.080
Overall	0.688**	0.416**	0.502**

Note: ^{a)-c)} See Table 2, *Significant at 5% level, **Significant at 1% level.

部密度は辺材部全体の密度であったため、応力波の伝播経路と考えられる辺材部外層の密度とは異なっていたことが影響したかもしれない。また、辺材密度の変動係数はトドマツ、カラマツ、グイマツ雑種 F1 について、それぞれ、5.9, 12.7, および3.1%とカラマツを除いて小さく、 E_v に及ぼす密度の影響が小さかったことも理由として考えられた。従来の研究でも、林分内の辺材密度の差は小さく、 E_v の代わりに v^2 を材質指標として使えることが示されている¹¹⁾。 E_s が v^2 と同様に $E_{\log}$ と高い相関を示すことは、材質指標としての E_s の実用性を示すものと考えられる。

3.3 旋回木理の影響

Table 3 において、グイマツ雑種 F1 について、 $E_{\log}$ と v^2 および E_v の相関係数が特に低かった理由として、旋回木理が影響したことも考えられた。すなわち、グイマツ雑種 F1 の林齢は19年と若く、辺材部の旋回木理がまだ大きかった可能性が考えられた。応力波伝播速度の測定では2つのセンサーを樹幹の鉛直方向に配置しているため、旋回木理が大きいと伝播時間が増加することが予想される。そこで、旋回木理が顕著なカラマツ属の2樹種について、辺材部の最大繊維傾斜角と $E_{\log}/E_v$ の関係を調べた (Fig. 5)。しかし、いずれの樹種についても両者の相関関係は認められず (相関係数はカラマツとグイマツ雑種 F1 について、それぞれ、0.123および0.095)、今回の試験では旋回木理の影響は確認できなかった。

3.4 E_s と辺材木部の曲げヤング率の関係

3.2節で述べたように E_s と $E_{\log}$ の相関は高かった。通常、両者を比較すると、変位に遅延弾性成分を含まない動的ヤング率の方が静的ヤング率より大きくなることが多い。しかし、Table 2 に示すように、動的ヤングである $E_{\log}$ の方が静的ヤング率である

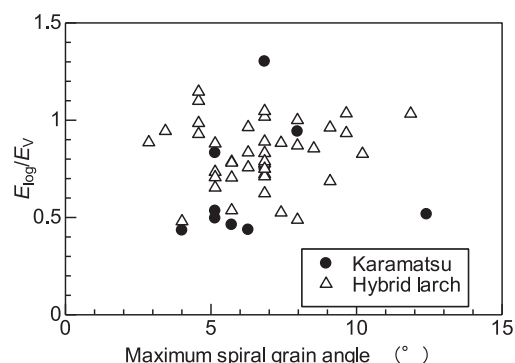


Fig. 5. Relationship between maximum spiral grain angle for sapwood and $E_{\log}/E_v$ ratio.

E_S より30%程度小さかった (E_{log}/E_S の全供試木平均値: 0.710)。この理由として、縦振動法で求めた E_{log} が髄付近の未成熟材の影響も受けるのに対し、曲げ試験で求めた E_S は外側に形成された成熟材の材質が大きく寄与する結果、 E_{log} が E_S より小さくなったことが考えられた。無欠点小試験体の形成層年齢と曲げヤング率の関係を見ると、形成層年齢が10年以上になるまで、ヤング率が増加している傾向が窺えた (Fig. 6)。そこで、形成層年齢10年以上の無欠点小試験体の丸太ごとの曲げヤング率平均値 (E_{b-m}) と E_S の関係を調べた (Fig. 7)。ここで、形成層年齢10年以上としたのは19年生のグイマツについて無欠点小試験体の断面中央の形成層年齢は11年が最大であったためである。

無欠点小試験体は気乾状態であり、旋回木理による目切れや曲げたわみにせん断付加たわみが含まれるため、生材である樹幹ヤング率と同列に比較する

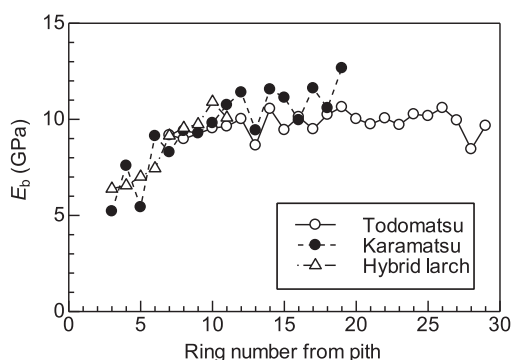


Fig. 6. Average Young's modulus for small clear specimens (E_b) trends associated with cambial age.

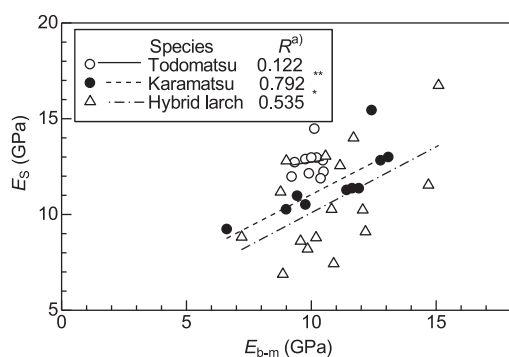


Fig. 7. Relationship between average Young's modulus for specimens outside 10 rings from the pith (E_{b-m}) and E_S .

Note: ^{a)} Correlation coefficient, *Significant at 5% level, **Significant at 1% level.

ことはできない。しかし、 E_{b-m} の出現範囲が狭かったトドマツを除いて E_{b-m} と E_S の相関は高く、 E_S がこれから生産される成熟材部のヤング率を指示していることが示唆された (Fig. 7)。形成層年齢の増加に伴う E_{b-m} の増加が顕著でなかったトドマツについて、 E_S/E_{b-m} 比が他の2樹種と比べて大きかったこともこの結果を支持していると考えられる (Fig. 7)。

4. 結 論

トドマツ、カラマツ、およびグイマツ雑種 F1 の造林地で、改良した立木曲げ試験によって求めた樹幹の曲げヤング率を応力波伝播速度、丸太の動的ヤング率などと比較し、その適用性について検討した。得られた主な知見は以下の通りである。

1. 試験方法の改良によって荷重とたわみの関係を試験時に確認できるようになった結果、風や隣接木との接触などの影響を排除して、弾性的な挙動域から樹幹ヤング率を評価できることが確かめられた。
2. 樹幹ヤング率は原木の材質指標として用いられることがある縦振動法による丸太の動的ヤング率との相関が高かった。また、立木の材質評価法として一定の評価を得ている応力波の伝播速度と同様に丸太の動的ヤング率との相関が高かった。これらのことから、立木の非破壊ヤング率測定法として実用性があると考えられた。ただし、その適用範囲を確認できたのは、今回供試した胸高直径 9 ~ 26 cm の範囲の立木である。
3. 縦振動法による丸太の動的ヤング率は樹幹の曲げヤング率より30%程度、小さな値であった。その理由の一つとして、外縁部に形成された成熟材部のヤング率が樹幹ヤング率に大きく影響したことが示唆された。

謝 辞

本研究の一部は科学研究費補助金(基盤研究(C), 課題番号25450234)によって行われた。

文 献

- 1) 荒武志朗, 有馬孝禮, 迫田忠芳, 中村徳孫: 桎積み状態における丸太の高次固有振動数からの製材品MORとMOEの推定—スギ足場板への適用. 木材学会誌 38(11), 995-1001 (1992).
- 2) 小泉章夫, 飯島泰男, 佐々木貴信, 川井安生, 岡崎泰男, 中谷 浩: 秋田県産スギ材の強度特性

- (1) 丸太のヤング率. 木材学会誌 43(1), 46-51 (1997).
- 3) 池田潔彦, 有馬孝禮: 応力波伝播速度による立木材質の評価と適用 (2) 応力波伝播速度によるスギ林分の評価と平角製材への適用. 木材学会誌 46(3), 189-196 (2000).
- 4) Koide, T., Koizumi, A., Gaman, S., Prawira, Y., Saito, H.: Mechanical-quality evaluation for young plantations of *Shorea balangeran*. Proceedings of International Symposium on Wild Fire and Carbon Management in Peat-Forest in Indonesia, Bogor, Indonesia, 2012, pp. 149-154.
- 5) 宮下久哉, 織田春紀, 半田孝俊: 若齢時におけるスギクロンの材質評価. 木材学会誌 55(3), 136-145 (2009).
- 6) 三嶋賢太郎, 井城泰一, 平岡裕一郎, 宮本尚子, 渡辺敦史: 関東育種基本区におけるスギ精英樹クロンの立木材質の評価. 木材学会誌 57(5), 256-264 (2011).
- 7) 名波直道, 中村 昇, 有馬孝禮, 大熊幹章: 応力波による立木の材質測定 (1) 測定方法と応力波の伝播経路. 木材学会誌 38(8), 739-746 (1992).
- 8) 小泉章夫, 上田恒司: 立木の曲げ試験による材質評価 (1) 樹幹曲げ剛性の測定. 木材学会誌 32(9), 669-676 (1986).
- 9) Launay, J., Rozenberg, P., Paques, L., Dewitte, J.M.: A new experimental device for rapid measurement of the trunk equivalent modulus of elasticity on standing trees. *Ann. For. Sci.* 57, 351-359 (2000).
- 10) JIS Z 2101: 木材の試験方法. 日本規格協会 (2009).
- 11) 名波直道, 中村 昇, 有馬孝禮, 大熊幹章: 応力波による立木の材質測定 (3) 林分としての立木材質評価. 木材学会誌 39(8), 903-909 (1993).