

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 17 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25450234

研究課題名(和文) 静荷重方式による若齢造林木のヤング率測定法の開発

研究課題名(英文) In situ method for tree trunk Young's modulus measurements in young plantations

研究代表者

小泉 章夫 (KOIZUMI, Akio)

北海道大学・(連合)農学研究科(研究院)・教授

研究者番号：40183040

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：造林木の強度材質の指標となる樹幹のヤング率を高い精度で測定する非破壊試験法を開発した。立木樹幹にモーメントを負荷し、荷重と樹幹の区間矢高の関係をタブレット上で確認しながら、ヤング率を測定する方法とした。北海道の主要造林樹種である、カラマツ、トドマツ、グイマツ雑種F1を対象として、立木状態で測定した樹幹ヤング率と応力波伝播速度を、伐採した丸太について縦振動法で測定した動的ヤング率と比較し、さらに無欠点小試験体を採取して材質を測定した。その結果、開発した試験法によって、高い精度で樹幹のヤング率を測定できることがわかった。

研究成果の概要(英文)：Nondestructive test method for evaluating tree stem Young's modulus was developed. The stem Young's modulus is calculated considering the elastic relations between applied bending moment and stem deflections, which can be observed on a tablet PC. The stem Young's modulus and stress wave propagation speed measured for karamatsu, todomatsu, and guimatsu hybrid trees planted in Hokkaido and were compared with dynamic Young's modulus tested for the logs harvested after the tree tests, as well as the mechanical properties tested for small clear specimens prepared from the logs. As a result, the Young's modulus of trees can be estimated from the proposed tree bending tests with high accuracy.

研究分野：森林科学

キーワード：非破壊試験 ヤング率 造林木 材質 立木 応力波伝播速度 縦振動試験

1. 研究開始当初の背景

国産材の持続的安定供給を実現して、用材生産を目的とした林業の国際競争力を向上させるためにも、造林木の強度材質を伐採前の早期にかつ正確に評価しておくことが望まれる。

従来、木材の強度特性の精度の高い非破壊指標としてヤング率が用いられてきた。これを立木に適用して、樹幹のヤング率を評価する方法として、応力波の伝播速度を利用する方法^{1,2)}と樹幹の曲げ試験によって静的ヤング率を評価する方法^{3,4)}があった。

前者は測定に手間がかからず測定値の再現性が高い。しかし、伝播速度は(動的ヤング率/密度)の平方根であって、ヤング率を決定するためには応力波の伝播経路にあたる木部の密度を測定しなければならない。伝播経路にあたる辺材部が飽水状態と仮定すれば、水分を含む見かけの密度の差はそれほど大きくなると考えられる。したがって、同一樹種内での相対評価は可能だが、ヤング率の値は評価できない。また、2個の接触子を樹幹木部に打ち込む必要があるため、完全な非破壊試験ではない。

後者の立木曲げ試験は立木樹幹に体重载荷によるモーメントを负荷し、試験者の体重と载荷時の区間たわみの関係から静的ヤング率を算出する方法である。この方法は完全な非破壊試験であるが、変位計の初期変位のずれ、風によるたわみ、隣接木との樹冠の接触によるたわみ量の変化、などの影響を現場で確認することができないため、風のある日の測定、立木密度の高い林地での測定は信頼性が低くなる欠点があった。

2. 研究の目的

強度材質指標としての樹幹ヤング率の測定法を確立することを目的とした。改良した試験方法を用いて測定した実測値の比較対照として、林木育種分野で材質指標として利用されている応力波の伝播速度も測定し、両者を丸太のヤング率などと比較することで、測定精度などを検討した。

3. 研究の方法

(1) 静荷重試験による立木ヤング率測定法の開発

体重载荷方式の試験法を改良して、静荷重方式の試験装置を製作した。加力は図1に示す梃子先端部を体重を利用して下向きに引張り、荷重をロードセルで検出した。梃子の樹幹からの吊り下げ部は市販の荷役用ベルトを利用して着脱を容易にした。樹幹の曲げたわみは樹幹の加力とは反対側に取付けた矢高ゲージで測定する。矢高ゲージの中央に設置したひずみゲージ式変位センサーで測定した区間矢高は、荷重とともにタブレットを電源とした携帯型データロガーに記録

し、荷重-矢高関係をタブレットの画面で確認できるようにした。

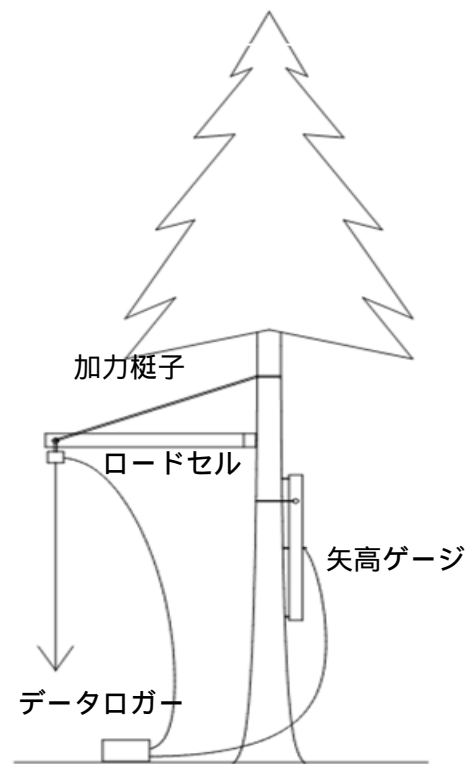


図1 立木曲げ試験方法

(2) 応力波伝播速度試験方法の検討

応力波伝播速度は市販の機器で林木育種関連研究で利用されているファコップを用いた。ファコップは打撃の強さなどで測定値にバラツキがあるので、センサーの打ち込み深さ、打撃の強さ、を変えた予備試験を行って、打撃方法を検討した。ここで、打撃強さは打撃するセンサーに加速度計を接着して測定した打撃加速度を指標に用いた。

(3) 供試木と実験内容

造林木のヤング率測定はトドマツの2林分(砂川市, 41, 42年生)17本, カラマツ2林分(新十津川町, 30, 31年生)17本, およびグイマツF1の1林分(三笠市, 19年生)40本の計74本を対象に行った。供試木の直交2方向について樹幹ヤング率を測定した後、同じ位置で樹幹の応力波伝播速度を測定した(図2,3)。測定後、伐採して地上高50-230cmから長さ180cmの丸太を玉切りし、縦振動法によって動的ヤング率を測定した。さらに丸太を分割して、辺心材別の含水率・密度の測定、無欠点小試験体を製作して曲げ性能試験を行ったほか、カラマツとグイマツF1については割裂法によって繊維傾斜を測定した。



図2 立木曲げ試験



図3 応力波伝播速度試験

4. 研究成果

(1) 静荷重試験による立木ヤング率測定法

開発した曲げ試験法によって、比較的短時間（1本あたり5分程度）で立木樹幹のヤング率を測定することができた。風の影響や樹冠が隣接木に接触する影響を排除するために、タブレット画面で荷重-変位関係の直線性を確認することで精度の高い剛性試験を行うことができることが確かめられた。タブレットの電源も40本程度の実験であれば、途中で充電することなく連続的に測定することができた。

(2) 応力波伝播速度試験の打撃条件

はじめに打撃センサーの打ち込み深さの影響を検討した結果、打ち込み深さが深いほど伝播時間は短く、測定を繰り返したときのバラツキと測定エラーの発生率も低下した。打ち込み深さ10mm時の伝播時間は25mm打ち込み時の約1.3倍に長くなり、かつバラツキも大きくなった。そこで実際の実験では打撃センサーに治具をつけて打ち込み深さを18mmで固定できるようにした。次に打撃強さの影響では打撃時の主観的な3段階（弱・中・強）の強さと打撃による加速度には相関が認められた。図4に示したように打撃強さが大きくなるほど伝播時間は短く、バラツキは小さくなった。ただし、測定エラーの頻度は増加した。以上のことから、打撃強さは中程度で一定にすべきであり、本研究では中程度の

強さで実験を行った。

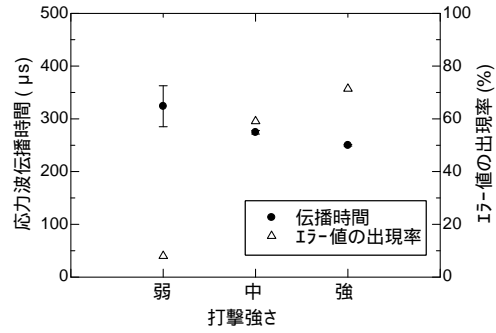


図4 打撃強さと応力波伝播時間の関係。打撃加速度の平均値は弱:7.3,中:11.5,強:15.3 (m/s²)

(3) 丸太の動的ヤング率との関係

立木の樹幹ヤング率と丸太の動的ヤング率の間には5林分中、4林分で有意な相関が認められ、5林分を混みにした場合でも1%水準で有意な相関 ($r=0.69$) が認められ、樹種に関わらず、高い精度で丸太のヤング率を推定できることがわかった（図5）。相関が認められなかった1林分はドドマツ1でヤング率の分布範囲が狭かったためである。樹幹ヤング率は丸太の動的ヤング率の1.3倍程度大

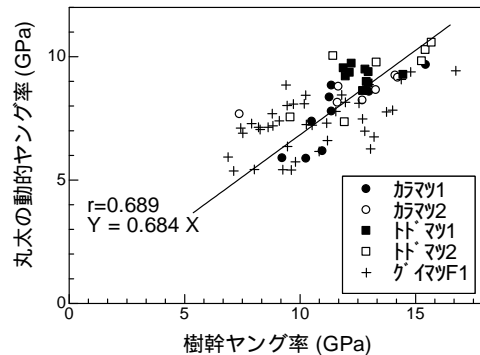


図5 樹幹ヤング率と丸太ヤング率の相関

きな値であった。これは丸太のヤング率が断面平均値であるのに対し、樹幹ヤング率は曲げ試験であるため、外縁部に形成された成熟材のヤング率を反映している影響と考えられた。

応力波伝播速度の2乗値と丸太ヤング率の相関の有意性は1林分でしか認められなかった。5林分を混みにしたときの相関は1%水準で有意であったが、相関係数は0.5と小さかった（図6）。

(4) 林齢の影響

ゲイマツ林分について、丸太の動的ヤング率と樹幹ヤング率の相関は1%水準で有意であったが、相関係数は0.56と大きくなかった。また、応力波伝播速度の2乗値とは無相関であった。この理由として、トドマツとカラマツの林分の林齢は30~42年であったのに対し、ゲイマツF1は19年生の若齢林であったことが影響したと考えられた。

丸太外縁部の無欠点小試験体の動的ヤン

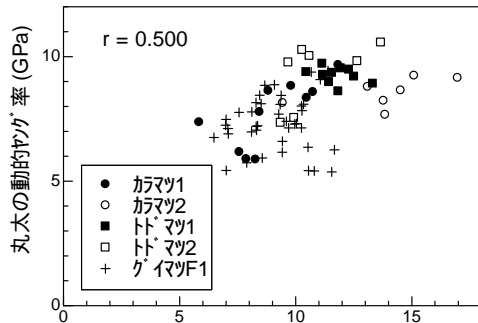


図6 応力波伝播速度と丸太ヤング率の相関

グ率と心材部の動的ヤング率の相関はグイマツで小さく、形成層年齢の若い未成熟材で外縁部の材質が安定していないことが窺われた。その結果、外縁部の材質を反映する樹幹ヤング率や応力波伝播速度と丸太の平均ヤング率との相関が小さくなったと考えられた。グイマツ F1 の外縁部から採材した小試験体断面中央の平均形成層年齢は9.1年と若く、上記の考察を裏付けるものであった。

樹幹ヤング率によって丸太の平均ヤング率を評価するには樹齢20年以上が望ましいといえる。

(5) 形状比の影響

立木曲げ試験は負荷時に樹冠重心が移動することによる付加モーメントが加わるため、形状比(樹高/胸高直径)の大きな立木ではヤング率を過小評価するおそれがある。しかし、形状比とヤング率比(樹幹ヤング率/丸太ヤング率)との間に相関は認められず、形状比100程度の供試木ではその影響が小さいと言える。

(6) まとめ

提案した立木曲げ試験は樹種にかかわらず、応力波伝播速度試験と比較して、高い精度で樹幹ヤング率を測定できることが明らかとなった。

立木曲げ試験によって求めた樹幹ヤング率は樹幹外縁部の材質の影響を大きく受ける結果、丸太の動的ヤング率より1.3倍程度大きな値が測定された。

樹齢20年未満の供試木では樹幹内の未成熟材の割合が大きくなる結果、樹幹ヤング率と丸太のヤング率の相関はそれほど大きくなかった。

立木曲げ試験は樹幹形状比(樹高/胸高直径)の影響を受けることが予想されたが、形状比100以下の供試木ではその影響は認められなかった。

<引用文献>

池田潔彦: 応力波伝播速度による立木ヤング係数評価の現状とその適用, 木材工業, 57, 374-379 (2002).

Chuang, ST; Wang, SY: Evaluation of standing tree quality of Japanese cedar grown with different spacing using stress-wave and ultrasonic-wave methods, J. Wood Sci. 47, 245-253 (2001).

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, 669-676 (1986).

Launay, J; Rozenberg, P; Paques, L; Dewitte, JM: A new experimental device for rapid measurement of the trunk equivalent modulus of elasticity on standing trees, Ann. For. Sci. 57, 351-359 (2000).

5. 主な発表論文等

(研究代表者, 研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表](計5件)

中谷一枝, 小泉章夫, 佐々木義久, 鳥田宏行, 脇田陽一: 緑化木の抗力係数の評価法の検討, 第66回日本木材学会大会, 名古屋大学(愛知県・名古屋市) (2016.3.28)

日置絵里香, 小泉章夫, 鳥田宏行: 造林木ヤング率の非破壊測定法の検討 - 曲げ試験と応力波伝播速度試験, 第47回日本木材学会北海道支部研究発表会, 日本木材学会北海道支部講演集47: 31-32, 旭川地場産業振興センター(北海道・旭川市) (2015.11.13)

日置絵里香, 小泉章夫, 鳥田宏行: 造林木の樹幹曲げヤング率の測定精度に及ぼす形状比の影響, 第65回日本木材学会大会, 夕ヶホール船堀(東京都・江戸川区) (2015.3.17)

日置絵里香, 小泉章夫, 佐々木義久, 鳥田宏行: 立木の応力波伝播時間の測定における打撃条件の影響, 第46回日本木材学会北海道支部研究発表会, 日本木材学会北海道支部講演集46: 31-32, 札幌コンベンションセンター(北海道・札幌市) (2014.11.12)

日置絵里香, 小泉章夫, 鳥田宏行: 造林木の樹幹ヤング係数の評価を目的とした各種非破壊試験の比較検討, 第64回日本木材学会大会, 愛媛大学(愛媛県・松山市) (2014.3.13)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小泉章夫 (KOIZUMI, Akio)

北海道大学・大学院農学研究院・教授
研究者番号: 40183040

(2) 連携研究者

澤田 圭 (SAWATA, Kei)

北海道大学・大学院農学研究院・講師
研究者番号: 10433145

鳥田 宏行 (TORITA, Hiroyuki)

北海道立総合研究機構・森林研究本部・林業試験場・研究主幹
研究者番号: 50414264