

スギ，ヒノキの若齢期におけるヤング率の個体間差と 樹幹放射方向におけるヤング率変動[†]

池田潔彦¹⁾・山本茂弘¹⁾・近藤 晃¹⁾

¹⁾ 農林技術研究所森林・林業研究センター

Young Modulus Variations of Sugi and Hinoki in the Early Growth Period and in the Direction of the Trunk Radiation

Kiyohiko Ikeda¹⁾, Shigehiro Yamamoto¹⁾ and Akira Kondo¹⁾

¹⁾ Forestry and Forest Products Research center / Shizuoka Res.Inst.of Agric.and For.

Abstract

The objective of this study was to explore the modulus of elasticity (MOE) variations of sugi (*Cryptomeria japonica* D.Don) and hinoki (*Chamaecyparis obtusa* Endl) in the early growth period using the acoustic method. Moreover, we examined the MOE change from the early growth period to the mature period, and the characteristics of the MOE change in the direction of the trunk radiation. As for the dynamic MOE in 5-year old sugi and in 11-year old sugi and hinoki, a remarkable difference was found among the trees in the stand. Good agreement was confirmed between static MOE and dynamic MOE of tree by the stress wave method and log by the longitudinal vibration method. The correlation was identified in the dynamic MOE and the density between from pith to the 5th annual ring and the perimeter part of the trunk. Therefore, it suggested that the high dynamic MOE of the tree when it was young was possibility to form similar wood quality in the mature period; also sugi trees that showed the highest dynamic MOE in the forest for more than 30-years can be selected as the mother tree cultivar.

キーワード：スギ，ヒノキ，材質，ヤング率，若齢期

I 緒 言

良質な林木生産や高い公益機能を発揮する森林を造成するためには、適確な施業を実施するとともに、育種による林木形質の遺伝的な向上や改善が必要である。静岡県内では、スギ、ヒノキの優良品種育成と森林資源の収穫増進を目的とした「精英樹選抜育種事業」が1955年に開始され、優れた成長形質や耐病性等を有する系統選抜と次代検定林における形質評価が行われ、採種園造成等により精英樹交配系統の実生苗が県内に植栽されている。

しかし、近年、林木育種の目標は、各種木材用途に適した材質を有する品種、花粉症対策に向けた少花粉品種、及びCO₂吸収性の高い炭素含有率の大きな品種、それらの特性と成長形質を併せ持った品種等の作出など多様化、高度化している¹⁴⁾。また、産地間競争に対処するためにも、特徴を有した木材産地としてブランド化や差

別化を図り、早急に、育種により優れた材質を有した品種の作出に向けた取組みが必要になっている。

優良材質品種の作出を行う際、母樹候補木を選抜した後、それらのクローン系統や交配した実生家系の材質やその遺伝性を評価し、更に選抜、交配の繰り返しを行うため、苗木植栽後の早期段階で材質評価を行うことができれば品種作出を効率良く進められる。しかし、既往の評価方法^{15,19)}では、樹幹内の組織材質が樹齢増に伴い変化するため、それらが安定する成熟期の段階に間伐伐倒木等で実施していた。このため、既往の方法では、植栽後に長い年月を要するとともに、供試木サンプル数等に制約があるなど問題点が多い。また、若齢期から成熟期に至る林齢増（加齢）に伴う材質変動を継続的に把握するには、伐倒せず立木状態で評価する手法が必要である。

一方、静岡県産のスギ、ヒノキの大半は住宅等の建築用材として利用されているが、特にスギでは、海外から

[†] 本報告の一部は、2005年度日本木材学会中部支部大会（福井市）で発表した。

輸入され用途が競合する針葉樹等と比べて、ヤング率や密度が小さいこと、心材含水率が高く乾燥性が悪いことなど材質面の問題点が顕在化している。特に、ヤング率は、柱や梁などの構造材として利用する際の重要な材質指標であるため育種により向上を図る必要がある。また、ヤング率は、他の材質や生長形質と比べて遺伝率が高く、特にクローンでは大きな遺伝獲得量を得られる可能性が高いことから^{1,15)}、育種による向上効果が期待できる。静岡県産スギのヤング率は、丸太や柱や梁製材品の実大材強度試験データ⁶⁾や県内の製材工場に導入されているグレーディングマシンのデータによると、スギ全国平均値⁹⁾の7kN/mm² (JAS 構造用製材機械等級: E70) と比べて10kN/mm² (同 E110) 以上の大きな値を示す個体がみられる。それらは、高ヤング率の品種作出に向けた新たな材質育種用母樹として活用できるため、林分内でそれら立木を探索するための情報が必要である。

これらの背景に基づき、本研究では、若齢期におけるスギ、ヒノキの立木ヤング率評価の可能性と同一林分内における個体間差、若齢期に形成される未成熟材と林齢増に伴い樹幹外周に形成される成熟材のヤング率の関連性、及び高ヤング率スギの樹幹内変動の特徴について検討し、将来の育種による高ヤング率の品種作出と早期検定評価に活かすことを目的とした。

II 試験体及び試験方法

1. スギ、ヒノキ若齢木のヤング率と密度等の測定

スギは5年生(浜松市浜北区根堅)の挿し木クローン苗25系統による林分と11年生(周智郡森町三倉)の精英樹5系統を母樹親、花粉親としたダイアレル交配による実生苗の林分、ヒノキは林齢11年生(静岡市駿河区大沢)の精英樹実生交配苗による林分に生育する立木を供試した。各林分ともに植栽密度が4500本/haで、苗木植栽以降に除伐等の施業は行われていない。ただし、各林分ともに試験林として設定されていないため、系統や家系が確認できない個体が多く、系統毎の立木植栽本数が異なる。このため、本試験では、同一林分集団における個体間差の評価等を目的として、供試立木を無作為に選び、スギ5年生が50本、11年生が110本で、ヒノキ11年生が150本とした。

供試立木は胸高直径と応力波伝播法^{2,6,12)}による動的ヤング率(以下、立木Ev)を測定した。胸高直径は輪尺を用い2方向で計測した。立木Evの測定には携帯型立木ヤング率測定器Tree Checker(日本ビニロン(株))を用いた。その際、立木の山側面で根元から約30cmに

受信センサーを、同130cmの位置に発信センサーを立木に対し約45度の角度で取付け、繊維方向の伝播速度を計測し、有効密度900kg/m³一定値とし、(1)式から立木Evを求めた。

$$E_v = V_p^2 \times \rho_{ett} \quad (1)$$

Ev: 応力波伝播法によるヤング率 (kN/mm²)

Vp: 繊維方向の応力波伝播速度 (km/sec),

ρ_{ett} : 有効密度 (kg/m³)

立木調査後に供試木を伐倒し、胸高部位付近より材長85cmの丸太を採取した。丸太は、材積、重量、平均年輪幅、タッピング法による動的ヤング率(以下、Efr)を計測した。また、5年生の丸太は3等分点4点荷重方式による曲げ試験により静的ヤング率(以下、MOE)を計測した。その後、丸太末口より厚さ3cmの円板試片を採材し、それらを全乾状態にして秤量法による容積密度数(以下、全乾密度)を計測した。

2. 樹芯部試片と樹幹外周部試片のヤング率、密度の測定

前項で供試した11年生スギ、ヒノキの丸太より、図1に示すように、髓から5年輪目の樹芯部1片と6年輪目から最外形成層年輪目までの樹幹外周部4片の材長80cmの棒状試片を採材し、前項と同様の方法により生材状態のEfrと全乾密度を測定した。

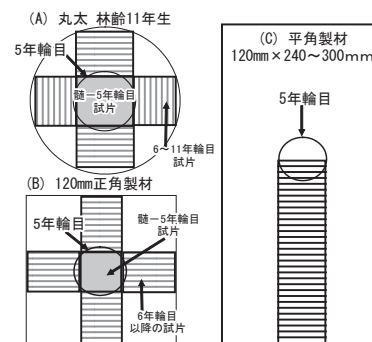


図1 丸太、正角と平角製材の試験片採材方法

県内の製材工場にて、人工乾燥後にグレーディングマシンでヤング率が計測された120mm正角製材(材長3m)より、浜松市天竜区龍山町産と島田市川根町産のスギ120mm正角製材各100本、富士市産と島田市川根町産のヒノキ120mm正角製材各50本を、ヤング率の変動幅が生じるように選んだ。製材工場での聞き取り調査によると、それらを製材した原木の大半は林齢40~50年生の2番玉であり、正角製材は人工乾燥により含水率が約20%に仕上げられている。正角製材の末口より材長80cmの部位を採材し、それらより11年生と同様に髓から5年輪目の1試片、6年輪目から材縁に至る4試片を採材し試験体とした。それらのEfrと密度及び髓から最外層年輪までの年輪数を目視により計測した。

3. スギ樹幹放射方向におけるヤング率変動の測定

林齢 60 ~ 80 年生の浜松市天竜区龍山町産のスギ原木から幅 120mm, 厚 240 ~ 300mm に製材した平角を用いて試験体を作成した。平角は、人工乾燥により含水率を約 20% に仕上げた後、曲げ荷重式のグレーディングマシンを用いて JAS 構造用製材に準じて機械等級区分した。それらより、E 110 以上 (ヤング率 10kN/mm²以上) 10 本, E 90 (同 8kN/mm²以上, 10kN/mm²未満) 20 本, E 70 以下 (同 8kN/mm²未満) 10 本を選び供試体作成に用いた。それらを末口より長さ 80cm に切断して Efr を計測した後、年輪数が最も多い放射方向について髓から 5 年輪目の部位 1 試片を採材した後、図 1 に示すように外周までの年輪数が最も多い放射方向について、厚 10mm 毎に分割して試験体とした。それらの試片は、前項と同様の方法にて Efr と各試片の髓から最外層年輪までの年輪数を目視により計測した。

III 結果及び考察

1. 若齢林分におけるヤング率の個体間差と立木評価手法

表 1 に各林分における立木と丸太で測定した各値の平均値と変動係数等を示す。立木 Ev と丸太 Efr は、挿し木クローン苗スギ 5 年生の個体間に約 2 ~ 6kN/mm² の変動幅がみられ、交配実生苗 11 年生のスギでは約 4 ~ 10kN/mm², 同ヒノキでは約 3 ~ 13kN/mm² の変動幅がみられる。立木 Ev の変動係数は 3 林分ともに約 20% であり全乾密度のそれと比べて大きく、筆者らの既報¹⁷⁾ による林齢 30 年生林分内の精英樹 1 系統 (家系) 当たりの同値、挿し木クローン 6 ~ 10%, 実生家系 10 ~ 15%

と比べても大きいことから、各林分ともヤング率の個体間差が現れていると思われる。

Lindstorm ら³⁾ は 3 年生の, Matheson ら⁴⁾ は 8 年生のラジアタパインにおいて、樹幹全体が未成熟材で占められる若齢期にクローン系統間のヤング率や仮道管 S2 層のマイクロフィブリル傾角 (以下, MFA) に顕著な差が認められ、いずれも早期段階でヤング率を評価できることを報告している。また、ヤング率は、成熟材では容積密度数と MFA が相互に影響するが、未成熟材が形成される若齢期では MFA の影響が大きいことが報告されている^{5, 13, 16)}。更に、中田らは、スギについて胸高部位付近の髓から 2 年輪目の MFA にクローン系統間差が認められ、高ヤング率の選抜指標として MFA の可能性を示唆している¹¹⁾。これらのことから、スギやヒノキでも 5 ~ 11 年生の若齢期林分等でヤング率の個体間差が評価できると考えられた。

図 2 に胸高直径と全乾密度、胸高直径と丸太 Efr との関係、全乾密度と丸太 Efr との関係を示す。胸高直径と全乾密度間には有意な相関関係が認められた反面、丸太 Efr との間には認められなかった。胸高直径とヤング率は、藤澤らは両者間に明確な負の関係がみられないことから、両者が独立した形質であると考察している¹⁾。密度と丸太 Efr にはスギ 5 年生では相関関係が認められたが、11 年生ではスギ、ヒノキともに相関係数が有意でなかった。若齢期では密度とヤング率との相関関係が見られない場合が多く^{13, 16)}、本試験でも同様な結果となったことから、5 年生や 11 年生の丸太 Efr に個体間における差異が現れた主要因として、MFA の違いによる影響が大きいものと推定された。

表 1 若齢期におけるスギ、ヒノキの胸高直径、立木 Ev、丸太 Efr 及び全乾密度

	胸高直径 (cm)			立木 Ev (kN/mm ²)			丸太 Efr (kN/mm ²)			全乾密度 (kg/m ³)		
	5年生 スギ	11年生 スギ	11年生 ヒノキ	5年生 スギ	11年生 スギ	11年生 ヒノキ	5年生 スギ	11年生 スギ	11年生 ヒノキ	5年生 スギ	11年生 スギ	11年生 ヒノキ
平均値	3.5	8.9	8.1	4.02	6.70	8.40	3.75	6.08	6.72	387	404	462
最小値	1.8	4.5	3.2	2.54	4.44	4.81	2.29	3.88	2.86	321	310	376
最大値	6.4	16.7	13.8	5.93	9.69	13.01	5.57	8.99	10.29	473	517	552
変動係数 (%)	26	23	30	19	20	19	20	21	22	9	10	8

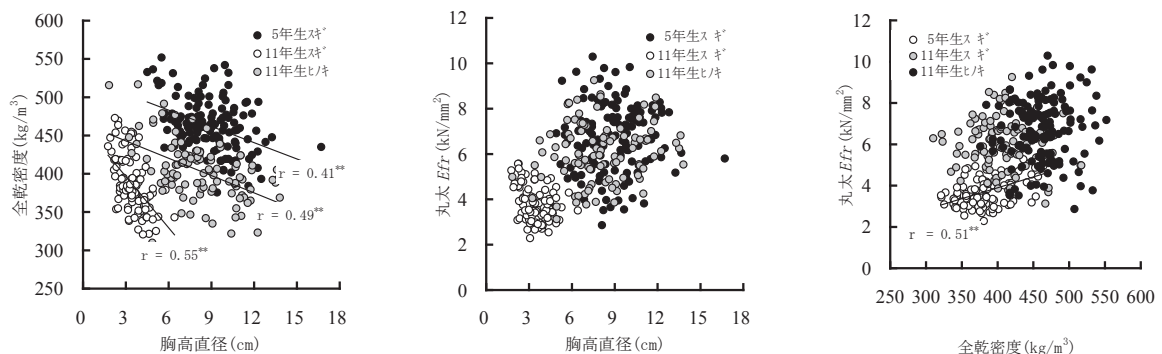


図 2 若齢期におけるスギ、ヒノキの胸高直径と密度、丸太 Efr の関係及び全乾密度と丸太 Efr の関係 **1%危険率で相関係数が有意

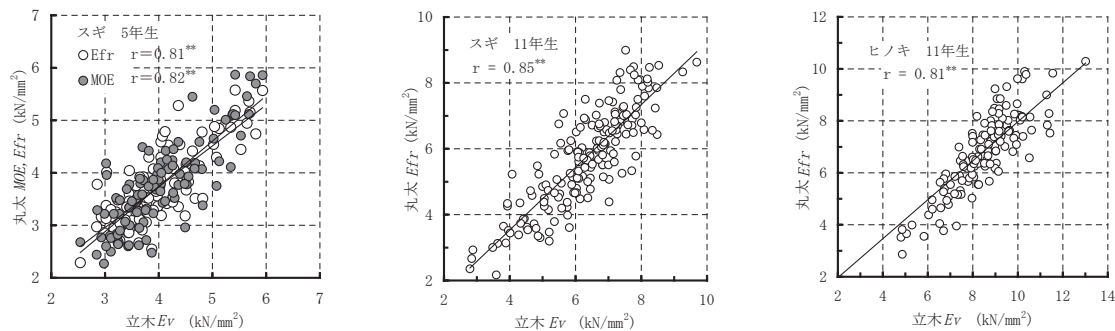


図3 若齢期におけるスギ、ヒノキの立木Evと丸太Efr (MOE)との関係 **1%危険率で相関係数が有意

図3にスギ5年生とスギとヒノキ11年生の立木Evと丸太のMOE及びEfrとの関係を示す。5年生スギでは、立木Evと丸太MOE間及び立木Evと丸太Efr間にそれぞれ相関係数0.8以上の有意な相関関係が認められた。同様に11年生でも立木Evと丸太Efrに高い相関関係が認められた。これまでも、宮下が10年生のスギクロンで¹⁰⁾、Lindstormらが3年生のラジアタパインで³⁾、立木Evと伐倒した丸太Efrとの間に高い相関関係が認められることを報告している。これらのことから、若齢期の段階において、立木Evの計測により樹幹ヤング率を精度良く評価できると思われた。以下でその要因を考察する。

図4に11年生のスギとヒノキについて、立木Evと髓～5年輪目までの試片と6年輪目以降の試片(4試片の平均値)のEfrの関係を示す。

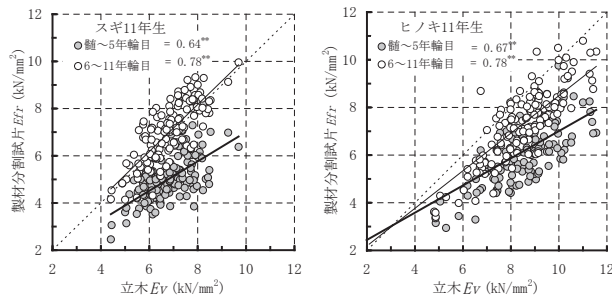


図4 若齢期スギ、ヒノキの立木Evと分割製材試片Efrとの関係 **1%危険率で相関係数が有意

スギ、ヒノキともに立木Evと6年輪目以降の試片のEfrとの相関係数は髓～5年輪目までの試片のEfrとのそれと比べて大きく、各図中に示したY軸値=X軸値を示す直線に6年輪目以降の試片が近い所にデータが分布している。これまで、立木や丸太など繊維方向における応力波の伝播経路はセンサーを打ち込んだ表層付近を直線的に進むことが報告されており^{8,12)}、応力波伝播法による立木Evは樹幹外周部付近のヤング率を表すと考えられる。若齢期の立木では、樹幹全体に占める外周部材積の比率が大きく、樹幹半径方向におけるヤング率変動の影響が成熟期の立木と比べて小さい。このため、樹幹外周部付近のヤング率を表す立木Evと樹幹全体の平均

を示す丸太Efrとが近い値を示したと推測され、立木Evが樹幹のヤング率を精度良く評価できる要因と考えられた。

以上のことから、若齢期の林分において、立木ヤング率が精度良く計測できること、ヤング率の個体間差が現れること、更にヤング率の遺伝率が高いことを考え合わせると、クロン系統間や実生家系間におけるヤング率の差違、その後の林齢増に伴う経時変動の評価、それらに及ぼす遺伝や生育環境の要因分析等が行えると思われ、今後、それらの解明を進める予定である。

2. 若齢期と成熟期におけるヤング率の関係

図5に11年生のスギとヒノキの丸太より採材した髓～5年輪目の試片と6～11年輪目の4試片のEfrもしくは密度の平均値を比較した結果と、40～60年生のスギ、ヒノキ正角製材より同様に分割した試片間のEfrについて比較した結果を示す。同様に、密度について両者間の関係を図6に示す。11年生の分割試片では、スギ、ヒノキともに髓～5年輪目のEfrが大きき個体は6～11年輪目のEfrが大きき有意な相関関係が認められた。また、正角製材のスギ、ヒノキでも髓～5年輪目の試片と6年輪目以降の外周部試片のEfr間にも有意な相関関係が認められた。また、各Efrの相関係数は林齢、未成熟材と成熟材の違いに関わらずほぼ同値であった。同様に密度でも、樹芯付近と樹幹外周部の試片間にスギ、ヒノキともに有意な相関関係が認められた。蓬田らは同様な結果等から早期段階における密度評価の可能性を示唆している¹⁸⁾。

このように樹芯付近と樹幹外周部の放射方向を比較するとEfrと密度ともに関連性が認められたことから、若齢期の段階でヤング率が大きき個体はその後同様な木部組織を樹幹外周に形成することでヤング率がより向上すると思われる。ただし、樹芯付近の材質が林齢増に伴い辺材から心材への移行等により変化する場合が予想されるため、前述の結論に至るのは早計である。そこで、試片全体が未成熟材で占められる11年生と40～50年生の成熟材部を有した正角製材との関係を比較した。髓

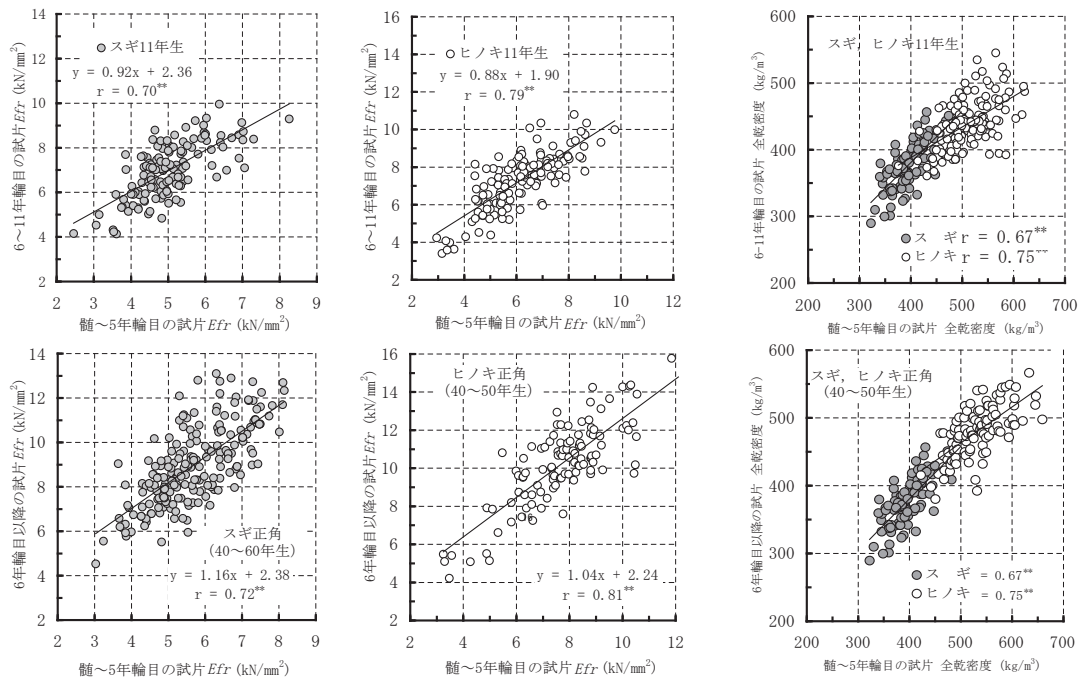


図5 髓～5年輪目と6年輪目以降試片のEfr及び全乾密度の関係 **1%危険率でr相関係数が有意

から5年輪目のEfrと外周部Efrとの直線回帰式の傾きは正角製材が11年生丸太よりも大きく、正角製材試片のEfrは成熟材部の形成に伴う材質向上に伴い、回帰式上のEfr値は11年輪目のそれと比べて約1kN/mm²、ヒノキでは約2kN/mm²それぞれ向上している。一方、スギ、ヒノキの11年生丸太と40～50年生正角製材の髓から5年輪目までのEfrの変動幅は、何れも両者間には大きな差がみられない。また、図3に示した11年生スギの立木Evの変動幅は正角製材の髓から5年輪目のEfr変動幅とほぼ同じ範囲にある。樹幹内に成熟材が多く形成された林齢40年生以上の立木でも樹芯付近には根元から梢端にかけて、未成熟材部が円柱状、MFAが円錐状に存在することから、ヤング率の小さな部位が有ること⁵⁾を併せて考えると、樹芯(髓)付近のヤング率は林齢増や辺材から心材に移行した場合においても向上が小さいことや、髓から5年輪目までの試片のEfrは、植栽後に形成した林齢時のEfrに近い値である可能性が高いと推察される。

このため、若齢期の段階でヤング率が大きな個体はその後も樹幹外周にヤング率の大きな材質を形成する可能性が高いと考えられた。また、年輪目=林齢と仮定すると、例えば、図5に示した正角製材の結果において、高ヤング率のスギを選抜し挿し木等で増殖した立木のヤング率を評価する場合に、5年生時のヤング率が6kN/mm²、7kN/mm²以上を示す立木は成熟期に達した以降にそれぞれ8kN/mm²、10kN/mm²(JAS構造用製材の機械等級でE90、E110)以上を示す可能性の高いことが推定される。

3. 高ヤング率スギの樹幹方向におけるEfr変動

図6に林齢60～80年生のスギ平角より分割した試片のEfrを示す。横軸の年輪数は試片の髓から最外層年輪数の値である。JAS機械等級でE110の平角による試片の5年輪目のEfrは最小のものでも5.2kN/mm²と他の機械等級のものと比較して大きな値を示し、前項までの結果と同様に若齢期に大きな値を示していたものと考えられる。

ただし、林齢増に伴うEfr変動のパターンが個体間で図に示すように異なっており、ヤング率の早期検定評価の精度を高めるには、植栽後、5年生時と10年生時に2度、応力波伝播法等による立木ヤング率の評価を行う必要があると考えられた。

髓から外周部にかけてのEfr変動は、高ヤング率のE110やE90の等級では大半が10～20年輪目まで急速に向上し、特にE110の等級ではその後30年輪目まで向上しており、この時期までに他の機械等級との差が明確に表れている。これまでに高林齢のスギと同様の調査を行った結果でも、成熟材の形成後にヤング率がやや減少する個体も見られるが、大半の個体はその後、ほぼ同様な値の材の形成が行われている⁷⁾。応力波伝播法による立木Evは、樹幹外周部付近のヤング率を示すことから、高ヤング率の母樹候補木を同手法により探査する場合、年輪目=林齢と仮定すると林齢30年生以降の立木Evが10kN/mm²以上の個体を母樹候補木として選抜できると考えられた。

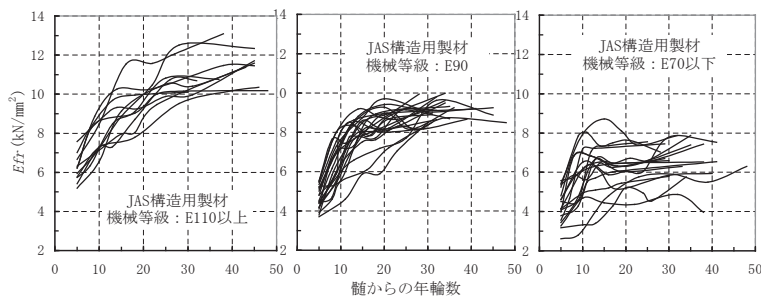


図6 スギ平角製材の樹幹放射方向におけるEfrの変動

IV 摘要

若齢期におけるスギ、ヒノキの立木ヤング率評価の可能性と同一林分内における個体間差と、若齢期に形成される未成熟材と林齢増に伴い樹幹外周に形成される成熟材のヤング率の関連性、及び高ヤング率スギの樹幹内変動について検討した。その結果、林齢5年生スギと11年生のスギ、ヒノキのヤング率(立木Ev、丸太Efr)に個体間差がみられた。また、立木Evと丸太Efr間には高い相関関係が認められ、若齢期においてスギ、ヒノキのヤング率を応力波伝播法で精度良く立木状態で評価できると考えられた。また、スギ、ヒノキの髄～5年輪目までの樹芯部と樹幹外周部の試片間のEfrと全乾密度に有意な相関関係が認められたことから、若齢期にヤング率の大きな個体はその後も同様な材質形成をなす可能性が高いと考えられた。また、林齢が30年生以降の林分において立木Evが10kN/mm²以上を示す個体を高ヤング率スギ品種の母樹候補木として選抜できると考えられた。

謝辞

本研究を実施する際、大井川小径木加工事業協同組合、龍山森林組合、中部農林事務所の関係各位より多大なご協力とご支援を頂いた。ここに謝意を表する。

引用文献

- 1) 藤澤義武・太田貞明・西村慶二・田島正啓 (1992) スギの材質と遺伝, 木材学会誌 38, Vol. 7, 638-644.
- 2) 藤澤義武・倉本哲嗣・平岡裕一郎・柏木学・井上雄二郎 (2005) : FAKKOPによる立木ヤング率評価手法のヒノキへの応用, 九州森林研究, 58, 142-143.
- 3) Lindstorm, H., Harris, P., Sorensen, C. T. and Evans, R (2004) : Stiffness and wood variation of 3-year old Pinus radiata clones, Wood Sci Technol, 38, 579-597.
- 4) Matheson, A. C., Gapare, J., Ilic, W. J. and Wu, H.

X (2008) : Inheritance and genetic gain in wood stiffness in radiata pine assessed acoustically in young standing trees. Silvae Genetica, 57. Vol. 12, 56-64.

- 5) 平川泰彦・藤澤義武 (1996) : スギの晩材仮道管S2層のマイクロフィブリル傾角の樹高方向における変動, 木材学会誌 42, Vol. 2. 997-1003.
- 6) 池田潔彦 (2002) 応力波伝播速度による立木材質の評価と適用, 静林技セ研報 : 29, 1-63
- 7) 池田潔彦・山本茂弘・祖父江信夫 (2007) : スギ高齢林分の立木ヤング率と樹幹内変動. 静林技セ研報, 35, 27-40.
- 8) 小玉泰義 (1990) : 音速による変断面形状を有する木材のヤング率推定手法, 木材学会誌 36, Vol. 11. 997-1003.
- 9) 強度性能研究会 (2006) : 製材品の強度性能に関するデータベース (7) 森林総合研究所, 筑波 8-56.
- 10) 宮下久哉 (2008) : 若齢時におけるスギクローンの材質形質の推定, 第58回木材学会大会要旨集, 14.
- 11) 中田了五・藤澤義武・平川泰彦 (2003) : ミクロフィブリル傾角でスギクローンを選抜したときの丸太ヤング係数の改良効果, 第53回木材学会大会要旨集, 58.
- 12) 名波直道・中村昇・有馬孝禮・大熊幹章 (1992) : 応力波による立木の材質測定, 木材学会誌 38. Vol. 8. 739-746.
- 13) 太田貞明・渡辺治人・松本勲・堤寿一 (1968) : ヒノキ樹幹における材質判定因子の変動と力学的性質について, 木材学会誌 14. Vol. 5. 261-267.
- 14) 林木育種協会 (2004) : 林木育種プロジェクト, 林木育種協会, 東京, 129pp.
- 15) 林野庁 (1992) 精英樹の材質評価手法に関する調査報告書, 東京, 115pp.
- 16) 鈴木智弘・祖父江信夫・池田潔彦 (2004) : スギ精英樹の幼齢木における材質の樹幹内分布, 木材学会中部支部大会要旨集, 14, 4-5.
- 17) 山本茂弘・池田潔彦 (2005) : 材質の優れた品種の創出と早期評価の可能性, 中部森林研究, 53, 53-54.
- 18) 蓬田英俊・栗延晋 (1993) : ヒノキ精英樹の比重に関する早期検定の可能性の検討, 日林論 104, 405-406.
- 19) Zobel, B. J., Jett, J. B. (1995) : Genetics of wood production, Berlin, Springer, 337pp.