

論文

コウヨウザンにおける応力波伝播速度の林分内および林分間の変異^{*1}

藤澤義武^{*2}・口脇信人^{*2}・牛島竜希^{*2}・永井純一^{*2}
大塚二郎^{*3}・磯田圭哉^{*3}・近藤禎二^{*3}

藤澤義武・口脇信人・牛島竜希・永井純一・大塚二郎・磯田圭哉・近藤禎二：コウヨウザンにおける応力波伝播速度の林分内および林分間の変異 九州森林研究 72：33－36, 2019 スギ、ヒノキを補完する造林材料として、コウヨウザンに注目が集まっている。筆者らは構造材利用を念頭においた材質の評価を進めてきており、本報告では、コウヨウザンの材質優良個体を選抜するための基盤情報として、九州から東海地方に至る4林分（53年生から58年生）で応力波伝播速度を測定した。その結果、①応力波伝播速度の林分内変異は大きく、さし木林分の庄原を除き、胸高直径との間に強い負の相関関係はなかった。②浜松が突出した高い値を示したほかは林分間に大きな変異はなかったが、これには浜松で辺材の生材含水率が低いことが影響した可能性が考えられた。これらから、林分単位では応力波伝播速度によって材質優良候補個体を効率的・効果的にスクリーニングすることが可能であるが、最終評価は生材含水率・密度の併用などで、見かけ上高い値を示す個体の排除を考慮しておく必要があると考えられた。

キーワード：コウヨウザン、応力波伝播速度、早生樹、針葉樹、構造材利用、優良個体選抜

I. はじめに

コウヨウザン (*Cunninghamia lanceolata*) は台湾から中国南部を原産とする針葉樹で、通直な樹幹を持ち、胸高直径1m以上、樹高30m以上に達する。材は耐朽性、耐蟻性に優れるところから中国では古くから建築材、船材、棺材などに広く利用され、現在は長江以南の地域における重要な造林樹種となっている。我が国には江戸時代末期に移入されたとされ、各地の寺社林等に巨木が点在するほか、戦後には各地で試験的に植栽されており、阿蘇山麓の植栽林では30年生時にスギと比べて胸高直径で14%、樹高で12%上回っており、材積では41%も上回っていたことが報告されている（森田ほか、1988）。このように優れたコウヨウザンの成長特性によって伐期や下刈り期間の短縮を図り、造林コストの縮減につなげることを期待する向きがあり、近年はこれに伴った技術・研究開発が盛んになってきた。筆者らはコウヨウザンの需要の喚起と優良品種選抜の基礎情報の収集を目的として、我が国に生育するコウヨウザンについての材質データを蓄積して

きた。この中で、コウヨウザンの材質が構造材利用ではスギよりも優れ、むしろヒノキに迫ることを示すデータが得られつつある（藤澤ほか、2015；浦嶋ほか、2017）。

今回は優良品種選抜の基盤情報を得ることを目的とし、構造用製材利用で重要な材質の指標となるヤング率と相関の高い応力波伝播速度を、九州から東海地方にいたる4箇所の林分で測定した。その結果、いくつかの知見を得たので報告する。

II. 材料と方法

1) 供試材料：供試した林分は、未成熟材部の影響による測定値の偏りを少なくするため、壮齢で林齢が近く、比較的まとまった個体数を持つ林分を探索し、霧島（鹿児島県）、菊池（熊本県）、庄原（広島県）、浜松（静岡県）の4林分を対象とした。供試林分の概要を表-1に示した。ここに示したとおり、調査時の林齢は庄原の53年生から霧島、浜松の58年生であった。胸高直径の林分平均値は、浜松の24.8cmから庄原の38.8cm、同じく樹高は浜松の18.3mから庄原の27.4mまでの変異があり、調査時に最も若齢であった庄原の成長が最も良く、最も高齢の浜松の成長が最も悪かった。庄原の年平均気温は12.4℃で、他の林分が16℃前後であったのに対して最も低かった。なお、種苗の由来は霧島、浜松が中国東部、菊池、庄原が台湾であった。また、庄原林分のみがさし木苗で造成されており、他の3林分は実生苗で造成されている。

2) 測定方法：応力波伝播速度とヤング率との関係を式1に示す。このように、関係式では密度は1乗なのに対して応力波伝播速度は2乗なのでヤング率への影響が大きい。さらには立木の辺材部は飽水状態かこれに近い状態にあり、生材密度の変動は小さ

表-1. 調査時における供試林分の概要

林分	霧島	菊池	庄原	浜松
調査時林齢 (年生)	58	56	53	58
年平均気温 (℃)	16.1	15.6	12.4	16.6
年平均降水量 (mm)	3474	1882	1467	2169
樹高 (m)	23.2	18.7	27.4	18.3
胸高直径 (cm)	32.7	30.0	38.8	24.8
苗木由来	中国東部	台湾	台湾	中国東部
調査個体数	298	133	254	155

^{*1} Fujisawa, Y., Kuchiwaki, N., Ushijima, R., Nagai, J., Ohtsuka, J., Isoda, K., and Kondo, T.: Variation of Stress Wave Velocity in a stand and among stands on Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*).

^{*2} 鹿児島大学 Kagoshima University, Kagoshima 890-8580, Japan

^{*3} 森林総合研究所 林木育種センター Forest Tree Breeding Center, Forestry and Forest Products Research Institute, Ibaraki 319-1301, Japan

い。これらのこともあって、ヤング率と応力波伝播速度との間には強い正の相関関係が得られており（藤澤ほか、2003）、コウヨウザンにおいても $r=0.84$ の高い正の相関関係が得られている（藤澤ほか、2017）。

式 1

$$Ed(P) = V(m/sec)^2 \cdot \rho(kg/m^3)$$

Ed: ヤング率
V: 応力波伝播速度
 ρ : 材の密度

応力波伝播速度は FAKOPP（FAKOPP Enterprise 社製：ハンガリー国）を用いた常法に従って測定した。すなわち、樹幹の地上部 70 cm から 170 cm 部位における応力波の伝播時間を FAKOPP によって μ 秒単位で測定して秒速を得た。具体的には樹幹の地上高 70 cm 部位と 170 cm 部位の 2 箇所に FAKOPP のスタートセンサーとストップセンサーを打ち込み、スタートセンサーをハンマーで軽く打撃することによって発生させた応力波がストップセンサーを通過するまでの時間を μ 秒単位で読み取る。これによって、樹幹の短径方向の 2 箇所それぞれ 5 回測定し、その結果を平均して個体毎の測定値とした。

データの解析は Mathematica 11.3 に付随する Statistic パッケージ等によって行った。

Ⅲ. 結果と考察

胸高直径と応力波伝播速度の測定結果を林分毎の相対頻度分布図として図-1 に示した。ここに示したとおり、応力波伝播速度、胸高直径ともに林分毎には大きな変異があるが、胸高直径は林分間においても大きな変異が認められるのに対して、応力波伝播速度では、浜松を除いた 3 林分間に大きな変動は認められなかった。また、分布型は概ね正規分布と見なせるものであったが、庄原、浜松では応力波伝播速度、胸高直径ともに頻度分布が若干歪んでいた。そこで、正規分布への適合度をクラメール・フォン・ミーゼス検定、シャピロー・ウィルク検定の双方で検定した。その結果、

表-2. 応力波伝播速度の林分内及び林分間変異

	霧島	菊池	庄原	浜松	林分間
平均	3563	3552	3504	4075	3674
標準偏差	298	446	325	289	269
変動係数 (%)	8.4	12.6	9.3	7.1	7.3
最大値	4312	4748	5006	4682	4075
最小値	2746	2280	2562	3255	3504

単位：m/sec

表-3. 胸高直径の林分内及び林分間の変異

	霧島	菊池	庄原	浜松	林分間
平均	32.7	30.7	38.8	24.1	31.6
標準偏差	9.7	10.1	9.9	11.1	6.1
変動係数 (%)	29.7	32.9	25.5	46.1	19.2
最大値	69.4	58.5	68.9	55.0	38.8
最小値	15.1	8.3	25.0	2.3	24.1

単位：cm

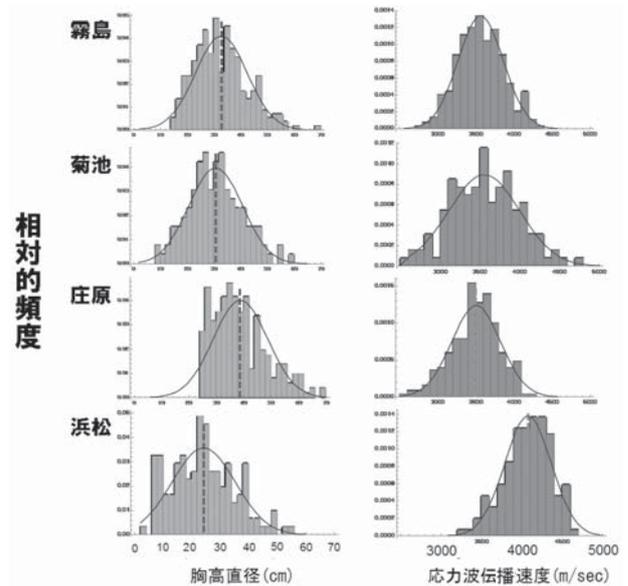
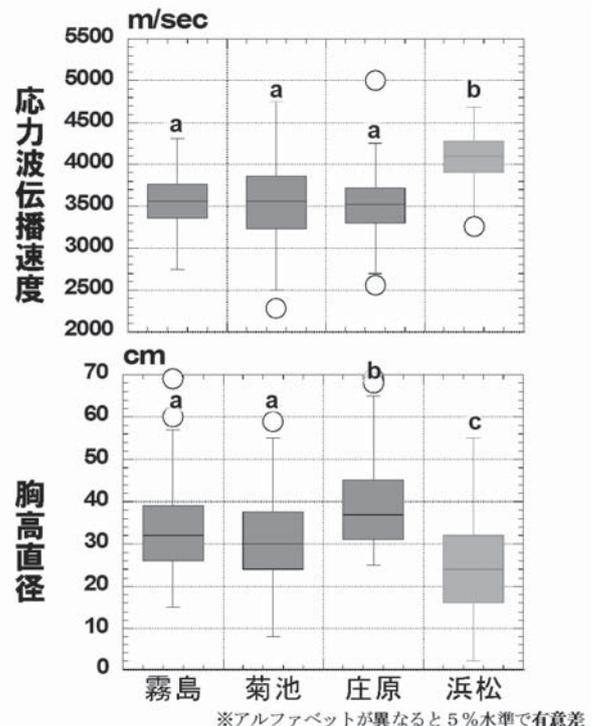


図-1. 胸高直径と応力波伝播速度の林分毎の頻度分布

応力波伝播速度ではいずれの林分の測定結果も正規分布は否定されなかったが、胸高直径では庄原の測定結果がいずれの検定法においても正規分布を否定する結果となった。当該林分では、保育作業が不十分でアカマツなどに被圧された尾根筋の部分を除き、間伐、枝打ちなどの保育作業が手厚く行われた部分を調査対象としており、被圧木などの劣性木がない。このことが胸高直径の頻度分布の歪みに影響した可能性がある。

応力波伝播速度の林分平均値、標準偏差と変動係数、最大値と最小値及びこれらの林分間での平均値、標準偏差、変動係数および林分平均値の最大値と最小値を表-2 に、胸高直径の同様の値を表-3 に示した。正規分布への適合の検定結果から、庄原の胸



※アルファベットが異なると 5%水準で有意差

図-2. 応力波伝播速度と胸高直径の林分毎の箱ひげ図

高直径値は参考として挙げる。

表-2 から、林分平均値は庄原の 3,504 m/sec から浜松の 4,075 m/sec までの変異があった。また、それぞれの林分における変動係数は浜松の 7.1 % から菊池の 12.6 % までの変異があり、変動幅では浜松が 3,255 m/sec から 4,682 m/sec、菊池が 2,746 m/sec から 4,312 m/sec となり、最小値に対する最大値の比は 1.4 から 2.1、ヤング率に換算すると、概ね 3 から 4 で、個体間で大きく変動していた。また、林分間の変異も大きく、変動係数で 7.3 % であったが、これは、浜松の値が突出して大きいために変動が大きくなっており、浜松を除いた霧島、菊池、庄原の 3 林分間では 3,504 m/sec から 3,563 m/sec の変異幅で、変動係数では 0.9 % にすぎなかった。すなわち、浜松が他の林分の値に比べて突出した値を示した影響が大きいことを示唆する。これら林分平均値間の変異について統計的な有意性の検定を行った。パートレット検定で等分散性が否定されたので、スティールドワズ検定で平均値相互間の有意差を検定した。その結果、図-3 に示すとおり、浜松と他の 3 林分との相互間には有意差が認められたが、浜松を除く 3 林分の相互間には有意差が認められなかった。すなわち、浜松が突出して値が高いことにより、林分間の変動が大きくなっていることを示唆した。これは、浜松林分のような林分を優良個体の重点的な選抜対象とすることで、より効果的にヤング率に優れた個体を選抜できる可能性にもつながる。そこで、このことについて検討を行った。

表-3 から、胸高直径の林分平均値については、浜松の 24.1 cm から庄原の 38.8 cm までの変異があり、応力波伝播速度値が突出して大きかった浜松は 4 林分の中で最も林齢が高いが、胸高直径は最も小さかった。前述の通り、庄原の胸高直径測定値は正規分布への適合が否定される結果となっているが、各林分の測定数は十分に大きいので、庄原についても正規分布と見なし、平均値間の差の有意性を応力波伝播速度と同じくスティールドワズ検定で平均値相互間の有意差を検定した。その結果、応力波伝播速度の結果とは異なり、霧島と菊池の組み合わせを除き、全ての林分間に有意差が認められた。すなわち、浜松は林齢が霧島と並んで最も高いが、胸高直径の林分平均値は最も小さく、成長に劣っていた。これが突出して高い応力波伝播速度に影響した可能性もある。そこで、胸高直径と応力波伝播速度との相互関係をみるために、林分ごとの散布図で示したのが図-3 である。

この図-3 から、庄原を除き、胸高直径と応力波伝播速度との間には明確な負の相関関係はない。これは、応力波伝播速度及び肥大成長の双方に優れた個体を選抜できる可能性を示唆するものである。一方、庄原は胸高直径が正規分布から歪んでいるため、参考程度にとらえるべきであるが、明らかな負の相関関係が認められた。庄原のみさし木で造成されており、比較的少数のクロンが主体を占めていることが明らかになっていることから、このことはスギクロン林分におけるヤング率と胸高直径の関係と同様に解釈できる可能性がある (Fujisawa *et al.* 1992)。すなわち、遺伝的に均一な同一クロン内では早材部、晩材部の性能は概ね同じである。しかも、肥大成長量の差は早材幅に大きく影響するが、晩材幅はそれほど変化しない。このため、成長が抑制された個体では、相対的に晩材率が上がり、さらには半径方向の同一の長さに含まれる晩材の数も多くなる。晩材部は弾性や強度への影

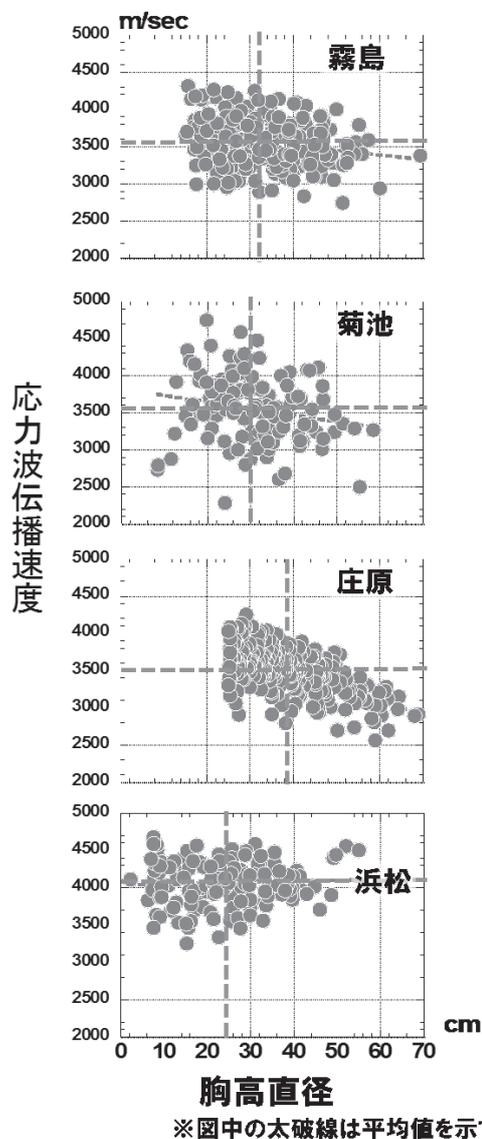


図-3. 林分毎の胸高直径と応力波伝播速度の相関関係

響が強いため、ヤング率は高まる。このようなことから、同一クロン内では胸高直径とヤング率との間に負の相関関係が強く認められる。これに対して、実生林分では早材、晩材、早材幅すべての性質において個体ごとに大きく変異するため、前述した年輪構成効果の影響は強くないと考えられる。

霧島、浜松についてはそれぞれ 2017 年 7 月と 8 月に測定した生材含水率と容積密度値のデータがあり、応力波伝播速度に強く影響すると考えられる辺材部の生材含水率と容積密度の両林分の値とともに応力波伝播速度を図-4 に示した。材の密度は木材中に占める実質の量を示すため、樹種に係わらず強度やヤング率と正の相関があり、製材利用時における材の理学・力学的性質への影響が強い。この辺材密度は霧島が 0.383 g/m³、浜松が 0.349 g/m³ で浜松の方が 9 % 低い。したがって、浜松の個体群は応力波伝播速度値が高いものの、霧島の個体群よりもヤング率の高い集団であるとは考え難い。また、ヤング率が両林分で同じと仮定し、密度の差が応力波伝播速度に与える影響を単純に試算すると密度の差 9 % の平方根 4 % 程度、応力波伝播速度が上昇することに

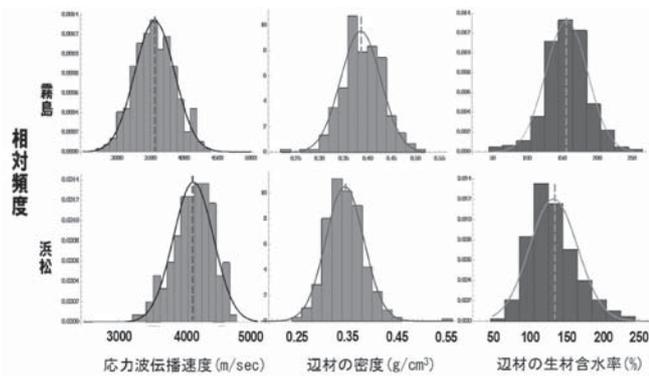


図-4. 霧島と浜松との間における応力波伝播速度、辺材の密度および生材含水率の比較

なるが、両林分の応力波伝播速度の差、11%に比べるとかなり小さい。

一方、応力波伝播速度は立木状態で測定しているため、測定時は辺材部の生材密度に強く影響され、生材密度は材の密度そのものよりも含水率の影響が大きい。すなわち、立木状態では辺材部は概ね飽水状態にあり、この部分の変動が少ないことから、ヤング率の推定に有効であるとするのが応力波伝播速度によるヤング率推定の基本的な考え方となっている。逆に、材のヤング率そのものに変化がなくても、測定時の生材密度が変化すると応力波伝播速度も変化し、密度が高いと応力波伝播速度は低く、密度が低いと高くなる。そこで、辺材部の生材含水率をみると、霧島の林分平均値が157%であるのに対して浜松では128%とかなり低い。先述の通り、密度は浜松の方が低いので、木材の空隙にたいしてどれだけ自由水が占めるのかを相対含水率として示すと、霧島は81%と飽水に近い状態にあるのに対し、浜松では58%とかなり低くなっていた。仮に霧島と浜松のヤング率の林分平均値が同様の値であるとしてこのことが音速にどの程度影響するのかを試算すると、前述した容積密度と含水率から算出した生材密度は霧島が0.97 g/m³、浜松が0.79 g/m³で霧島が23%高く、その平方根の11%が応力波伝播速度を低下させる効果となる。これは、霧島が浜松よりも応力波伝播速度が14%低かったことに近い。これらの結果は浜松の応力波伝播速度が突出して高くなった原因として、肥大成長量が抑制されたことで年輪構成効果があらわれた

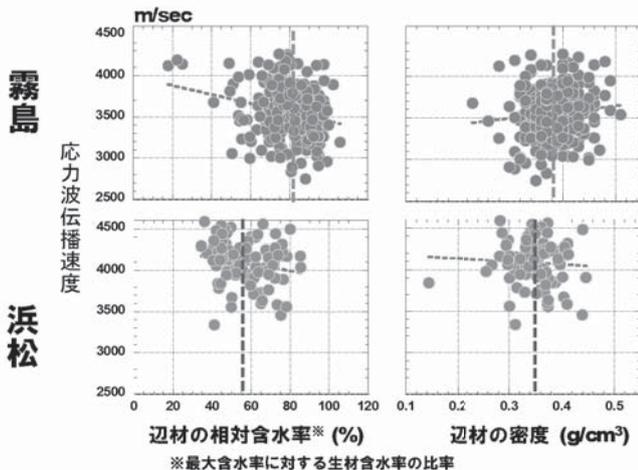


図-5. 霧島と浜松における辺材の相対含水率および密度と応力波伝播速度との相関関係

と考えるよりも、生材含水率が低いことが関与していると考えの方が穏当であることを示唆する。

生材に含まれる自由水は理学・力学的性質には全く関与しない上に、振動数が早くなると振動に十分に追従できなくなるため、応力波伝播速度の測定では振動に関与する水分比率はかなり低くなることを祖父江が指摘している(祖父江, 1993)。このため、単純に結論づける事は出来ないが、コウヨウザンでは浜松のように辺材部の含水率が比較的低下する可能性があること、それが応力波伝播速度に影響した可能性が示唆された。このことは、データを蓄積してより詳細に検討しておく必要がある。

IV. まとめ

コウヨウザンの4林分で応力波伝播速度を測定した結果次の結果が得られた。

- ①林分内変異は比較的大きく、さし木林分の庄原を除き、胸高直径との間に強い負の相関関係はなかった。
- ②突出して高い値を示した浜松を除くと林分間に大きな変異はなかったが、浜松で値が高くなっていたのには、辺材の生材含水率が低かったことが影響した可能性があった。

以上から、林分単位では応力波伝播速度によって材質優良候補個体を効率的・効果的にスクリーニングすることが可能である。ただし、生材含水率・密度の併用するなどによって、見かけ上高い値を示す個体を排除できるように考慮しておく必要がある。

引用文献

Fujisawa Y・Ohta S・Nishimura K・Tajima M (1992), Wood characteristics and its genetic variation in Sugi (*Crypromeria japonica* D. Don) Clonal differences and correlation between locations of dynamic modulus of elasticity and diameter growth in plus tree clones., 木材学会誌, 38 (7) : 638-644

藤澤義武・倉本哲嗣・平岡裕一郎・柏木学・井上雄二郎 (2003) FAKOPPによるスギクロンの非破壊的材質評価, 第53回日本木材学会大会研究発表要旨集, 5

藤澤義武・牛島竜希・大塚二郎・近藤禎二 (2017) 茨城県に生育する21年生コウヨウザンによる材質評価法の検討, 第67回日本木材学会大会研究発表要旨集, B17-04-1515

藤澤義武・佐藤新一・山田浩雄・近藤禎二 (2015) 北関東で生育する19年生コウヨウザンの木材性質とその家系間変異. 関東森林研究 63 (1) : 59-62

森田正彦・冬野劬一・西村慶二・部正勝 (1988) コウヨウザン30年生林分についてのスギとの成長比較. 九州林木育種場年報 17 : 91-98

祖父江信夫 (1993) シミュレーションによる繊維飽和点以上の木材中における応力波伝播速度の検討, 木材学会誌 39 (3) : 271-276

涌嶋 智・渡辺靖崇 (2017) コウヨウザンの材質, 森林遺伝育種, 6巻, 148-154

(2018年11月19日受付; 2018年12月15日受理)