

森林総合研究所

交付金プロジェクト研究 成果集 35

スギ中・大径材製材の生産能率向上の
ための材質選別・製材・乾燥の
システム化

独立行政法人 森林総合研究所
2011. 12

「交付金プロジェクト」は、平成13年度に森林総合研究所が独立行政法人となるにあたり、これまで推進してきた農林水産技術会議によるプロジェクト研究（特別研究など）の一部、および森林総合研究所の経費による特別研究調査費（特定研究）を統合し、研究所の運営費交付金により運営する新たな行政ニーズへの対応、中期計画の推進、所の研究基盤高揚のためのプロジェクト研究として設立・運営するものである。

この成果集は、交付金プロジェクト研究の終了課題について、研究の成果を研究開発や、行政等の関係者に総合的且つ体系的に報告することにより、今後の研究と行政の連携協力に基づいた効率的施策推進等に資することを目的に、「森林総合研究所交付金プロジェクト研究成果集」として公表するものである。

ISSN1349-0605

森林総合研究所交付金プロジェクト研究成果集35

「スギ中・大径材製材の生産能率向上のための材質選別・
製材・乾燥のシステム化」

発行日 平成23年12月31日

発 行 独立行政法人森林総合研究所

〒305-8687茨城県つくば市松の里1番地

電話 029-873-3211（代表）

研究課題：スギ中・大径材製材の生産能率向上のための材質選別・製材・乾燥のシステム
化

目 次

研究の要約-----	1
第1章 中・大径材の含水率選別技術の開発と評価-----	6
第2章 中・大径材の選別・製材・乾燥システムの設計-----	18

研 究 の 要 約

I 研究年次及び予算区分

平成 21～22 年度（2 カ年）

運営交付金（交付金プロジェクト）

II 主任研究者

主査：加工技術研究領域長 黒田尚宏（平成 21～22 年度）

取りまとめ責任者：加工技術研究領域長 黒田尚宏

III 研究場所

森林総合研究所 本所

IV 研究目的

スギ原木の需要は、これまで主であった製材に加え、合板や集成材の生産へと拡大するとともに、製材工場の大型化が進み、同時に生産される材種の多様化も進んでいる。一方で、戦後造成されてきた人工林の成長に伴って、原木の主体が小・中径木から中・大径木へと移行し、製品品質に影響する原木の形質や材質が変化してきている。これらの諸情勢を背景にして、製材工場には、中・大径材原木の供給体制・質の変化や市場における強度や含水率等の品質ニーズの厳格化等に対応することが求められている。その基本的な対応策として、材質のばらつきが大きなスギ原木を含水率やヤング率の大小によって選別し、原木の付加価値の向上と製材工場における乾燥材の生産効率・品質の向上を図ることが考えられる（森林総合研究所交付金プロジェクト研究成果集 8、スギ材の革新的高速乾燥システムの開発、2006）が、現場に適用できる実用的な含水率選別技術が確立されていないため、材質選別を導入した製材・乾燥システムが構築されるには未だ至っていない。

このため、本研究プロジェクトでは、国産材製材工場に導入可能な簡易で実用的な大径材材質選別技術の開発と、その材質選別の導入が製材・乾燥の効率化に与える効果の検証とを行い、原木選別工程、製材工程、及び乾燥工程を有機的に連携させた効率性の高い乾燥材生産システムを設計することを目的としている。

V 研究方法

（1）中・大径材の含水率選別技術の開発と評価

栃木県森林組合連合会共販所及び茨城県森林組合連合会共販所から購入したスギ丸太を試験対象とし、栃木県スギ丸太は径級分布がほぼ等しくなるように 2 グループ（製材試験用と非破壊試験用）に分けた 25 本を、茨城県スギ丸太は元玉を中心に 35 本を試験材として選んだ。まず、打撃法（縦振動法）によって求めた丸太の動的ヤング率を測定し、容積密度数（ kg/cm^3 ）との関係性を求め、ヤング率測定から求められる容積密度数を使って重量法（密度法）による推定含水率を

補正する方法について検討した。次いで、栃木県スギ丸太については丸太の中間部と、中間部から上下に各 1 m の部位の計 3 カ所において、横打撃共振周波数及び水平方向の応力波伝播速度の測定を、また丸太の 4 カ所でインピーダンス等の電気特性を測定した。茨城県の丸太については、丸太両端から約 60cm 部位について横打撃共振周波数を測定した。横打撃共振周波数は、加速度ピックアップを丸太側面に接触させ、ピックアップから円周上で 90～120° 離れた丸太側面を打撃し、FFT アナライザで測定した。応力波伝播速度の測定には ARBOTOM を用い、丸太側面同一円周上の 8 方向に約 45° ごとに設置したセンサーをハンマーで打撃し、センサー間の応力波伝播速度を測定した。電気的特性（インピーダンス、電気容量及び位相角）は、現場での様々な測定環境を想定し、挟み込み式、押し当て式、アンテナ式の 3 種類の電極により測定を行った。

なお、これらの測定部から円盤を採取し、割断した小ブロックについて全乾法により生材含水率を、浮力法により容積密度数を測定した。丸太の平均含水率及び平均容積密度数は、採取した 2 枚または 3 枚の円盤の平均含水率及び容積密度数の平均値として求めた。

（２）中・大径材の選別・製材・乾燥システムの設計

（１）と同様に栃木県森林組合連合会共販所及び茨城県森林組合連合会共販所から購入したスギ大丸太 75 本（末口径 30.3cm～43.8cm（平均末口径 34.8cm）、長さ 3.0m 及び 3.65m）を挽き材試験用供試丸太とした。製材試験の前に、丸太の見かけの密度により推定含水率を求めるとともに、動的ヤング率を打撃法により測定した。挽き材試験では、1200mm 自動送材車帯鋸盤と 1100mm 自動ローラ帯鋸盤を使用して、心去り正角を主製品とする木取りで挽き材を行った。挽き材したすべての製材品について製材の日本農林規格に準じて等級格付けし、さらに構造用材については曲がり、含水率、動的ヤング率を測定し、丸太段階におけるヤング率や推定含水率（（１）の方法による）との関係について検討を行い、選別が材種別ヤング率、含水率等の品質に与える影響を評価した。また、スギ心去り正角の乾燥において、乾燥前に含水率による選別を行うことによる経済効果について検討するために、愛媛県産スギ心去り正角を供試材とし、乾燥試験を一般的な乾燥スケジュール（70～80℃）によって行い、乾燥日数を推定した。これを基にして丸太段階における含水率選別の導入が乾燥材生産コスト等に与える効果を評価した。

（研究計画表）

研究課題	実施年度		担当
	21年	22年	場所、研究領域等
1. 中・大径材の含水率選別技術の開発と評価	←→		木材特性研究領域
2. 中・大径材の選別・製材・乾燥システムの設計	←→		加工技術研究領域

Ⅵ 研究結果

（１）中・大径材の含水率選別技術の開発と評価

重量法、丸太ヤング率による容積密度補正法、横打撃振動法、応力波伝播速度法を用いて非破壊的に含水率を推定する方法を試みた。

丸太の動的ヤング率によって容積密度数を推定することができ（推定式：容積密度数＝ $14.9 \times$ ヤング率＋196）、その推定値を用いて重量法による推定値を補正した場合（補正後の含水率＝（みかけの密度／容積密度数－1） $\times 100$ ）、補正後の含水率と実測含水率との間で最も良い相関（ $R^2=0.79$ ）が認められた。また、推定値と実測値の差の絶対値の平均値は 12.1%であり、重量法では 16.0%であったことと比較すると、明らかに推定精度が向上した。なお、縦振動法による丸太のヤング率と容積密度数との関係について、中小径材と大径材とでは異なるが、中大径の栃木県産と茨城県産とでは違いがないことを確認している。

横打撃振動法では、共振周波数と丸太直径の積の逆数と丸太の平均含水率及び心材平均含水率との間にはある程度関係を認めたが（丸太含水率： $R^2=0.40$ 、心材含水率： $R^2=0.33$ ）、推定含水率と実測含水率との差の絶対値の平均は 42.3%に達し、重量法を超える精度は得られなかった。

丸太の直径に沿った応力波伝播速度と接線方向の応力波伝播速度との差と心材の生材密度との間には負の関係が認められたものの有意な相関ではなく、含水率の定量的推定が可能な精度は得られなかった。応力波 CT による解析では、心材含水率が極端に多い場合と少ない場合には異なるイメージが得られ、含水率分布を定性的には表示できる可能性が示唆された。

電氣的測定を用いる方法では、挟み込み電極による丸太のインピーダンスの対数値と測定周波数は直線関係となり、直線の勾配が 1 以上か未満かによって辺材と心材のいずれの含水率が高いかの判断が可能であると考えられ、位相角を指標として加えることでさらに細分化し、結果としてインピーダンス及び位相角による選別フローチャートを作成した。押し当て電極によれば、心材の含水率が辺材より低いかどうかの判定は可能で、またアンテナ式電極では、辺材・心材含水率比を推定するとともに、心材含水率を 100%以下と以上に選別できる可能性が示された。

（２）中・大径材の選別・製材・乾燥システムの設計

供試したスギ丸太の平均ヤング係数は 7.17GPa（標準偏差 1.02GPa）、平均推定含水率は 91.9%（標準偏差 19.5%）であった。心去り正角を主製品とする木取りによる形量歩止り、価値歩止りの高低は、1 本の丸太から挽き材された正角の数の多少と一致した。これは、正角の数が多いた方が挽き道による歩止りの低下が少ないことによる。心去り正角の曲がりや、心持ち正角と比較して大きくなる傾向があり、分増しを大きくするなどの対応が必要であると考えられた。また、丸太のヤング係数と製品のヤング係数には高い相関が認められ、（１）において検討された打撃法による丸太の推定含水率と挽き材直後の製品含水率にも相関が認められた。重量法（みかけの密度により算出）による丸太の推定含水率よりも、打撃法により補正した推定含水率の方が、製品含水率との関係における決定係数 R^2 の大きいことがわかった。このことから、丸太含水率の推定に打撃法を応用することにより、正角製品の挽き材直後の含水率推定の精度を高めることができることが明らかとなった。

心去り正角の標準的な乾燥方法として中温乾燥を取り上げ、乾燥試験を行った。初期含水率が 40～200%の材を乾燥する場合、選別を行わない場合は全ての材を 27 日で、120%の上下で選別を行う場合は 40～120%の材は 16 日で乾燥でき、この条件に基づいて乾燥の経済効果を試算した。その結果、木質バイオマスボイラーを導入した工場では、含水率選別を行った場合は、行わない場合に比べて 20%強のコスト削減が見込まれ、重油ボイラーを導入した場合においても、選別を行った場合の乾燥経費は 13,832 円となり、行わない場合に比べて木材 1 m^3 あたり、約 1,600 円（約 12%）の経費節減が見込まれた。これは、初期含水率による選別で過乾燥材を減らせることにより、生産が向上できることが主な要因であると考えられた。

中大径材を加工する製材工場を設計する場合、年間原木消費量約 24,000m³ の規模では、ノーマンツイン帯鋸盤を主機とし、リングバーカ、オートテーブル帯鋸盤、横型帯鋸盤、ツインリップ、ダブルエジャ、チップなどから構成されるラインが考えられ、そのラインにおいて、人工乾燥してモルダ掛けした仕上げ材の製造経費は 62,614 円/製品 m³ となった。

(3) 結果のまとめ（製材・乾燥システムへの材質選別の導入に向けて）

この研究では、国産材製材工場に導入可能な簡易で実用的な材質選別技術の開発と、その材質選別工程の導入が製材製品の品質や歩止り、さらには乾燥工程の効率化に与える効果を検討した。その結果、大径材の標準的な木取りとして心去り正角を生産する場合、原木丸太の含水率選別を製材品の含水率に反映でき、ひいては「乾燥前の含水率の選別効果＝乾燥コストの低減」につながることを明らかにすることができた。また、中・大径丸太の具体的な含水率選別方法には、すでにインラインで使用可能な打撃法を応用できることが明らかとなったため、ヤング率と含水率の同時測定システムを現場に構築できることになり、今後製材生産と乾燥材供給の効率化につながるものと期待される。

これらの結果を踏まえて、改めて原木選別工程、製材工程、及び乾燥工程を有機的に連携させた乾燥材生産システムの全体構図を図 1 に示している。

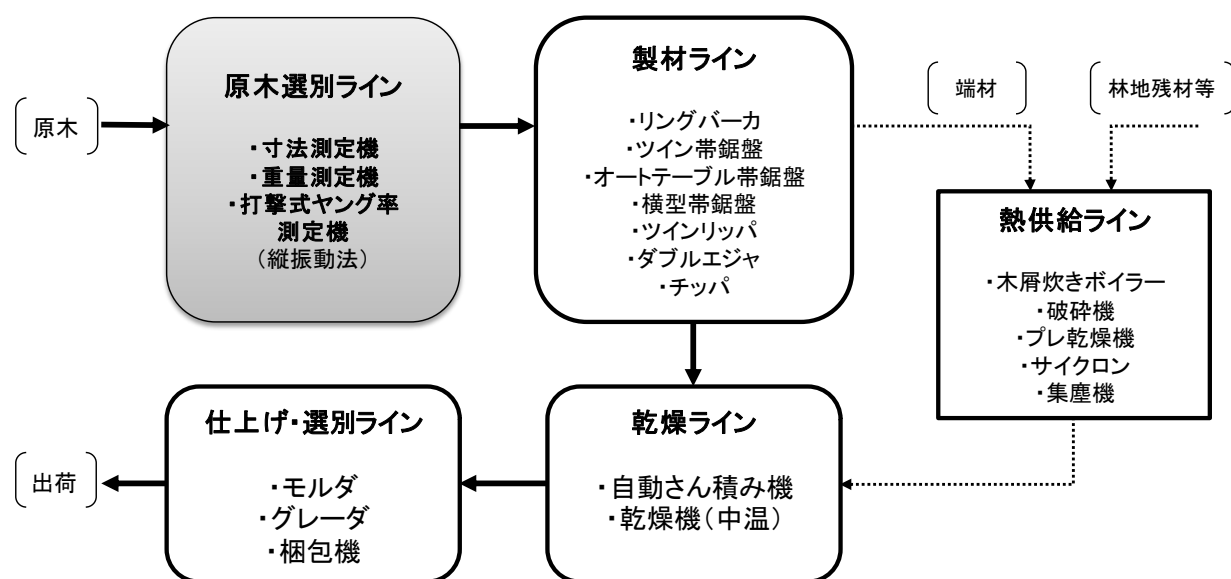


図 1 原木の材質選別ラインを導入した製材・乾燥ラインの概略図

VII 成果の利活用

材質選別のための非破壊評価法、大径材木取りや製材品の品質、乾燥材の生産コスト等の情報など普及に移し得る成果については、実務者向けの各種講習会テキストに取り入れ、また国産材需要拡大のための工場設計指針や技術マニュアル等の整備に活用する。さらに、高品質の乾燥材生産とその効率向上に向け、中・大径材に対応した製材工場において、材質選別を付加した生産ラインの導入を図っていくための参考資料として活用される。

VIII 今後の問題点

本研究では、今後供給が進むと予測されるスギの中・大径木を対象とし、丸太の打撃法による動的ヤング率と容積密度数との基本的な関係を用いて重量法による含水率の推定精度を向上させる方法を明らかにし、ヤング率と含水率による実用的な丸太の選別技術を提案することができた。さらに、中・大径木から木取った心去り正角（小・中径木から木取り、これまで主流であった心持ち正角ではない）の乾燥材生産において、この新たな丸太の含水率選別方法の導入が乾燥コスト低減に与える効果を明らかにし、一連の選別・製材・乾燥システムを提案することができた。

一方で、大径材の製材では、柱材用の正角の他に様々な断面・形状を有する製材、例えば30cmを超える大断面の平角から1~2cm厚の板材までの多様な木取りが可能になるとともに、原木の材質と木取りによる付加価値の多様性も生じると考えられる。今後は、大径材の付加価値向上を図るうえで、それらの多様な断面を有する材種を効率よく生産するための選別・製材・乾燥システムの構築が課題である。

IX 研究発表

- 1) 伊神裕司、村田光司、松村ゆかり（2009）：スギ中・大径原木の仕分け方法と製材歩止り、日本木材学会中部支部大会講演要旨集、第19号、30-31
- 2) Murata Kohji, Ikami Yuji, Matsumura Yukari (2010): Conversion of sugi logs into sawn lumber: sawing yield of medium quality middle and large logs, The International Forestry Review, 294
- 3) 松村ゆかり、村田光司、伊神裕司（2011）：スギ大径材の挽き材試験-心去り正角木取りにおける製材歩止りと製品品質-、日本木材学会研究発表要旨集、61:28
- 4) Matsumura Yukari, Murata Kohji, Ikami Yuji (2011) : Influence of sawing pattern on relationship between log and lumber quality in sugi large logs, Proceedings of the 20th International Wood Machining Seminar, 234-240
- 5) 小林功(2011)：乾燥における割れの抑制と過熱水蒸気処理、2011 年度木質物性研究会・木材と水研究会合同講演会要旨集、83-100
- 6) Suzuki Y., Ikeda K., Woodhead I. (2011): Evaluation of Moisture Content Gradient in a Log Using Impedance Models, Proceedings of 9th International Conference on Electromagnetic Wave Interaction with Water and Moist Substances, 42-46
- 7) 松村ゆかり、村田光司、伊神裕司、松村順司（2011）：スギ大径材における丸太材質の樹幹放射方向変動と製材品質、第29回日本木材加工技術協会年次大会講演要旨集、83-84

X 研究担当者

第1章

藤原健（組織材質研究室長）、鈴木養樹（物性研究室長）

第2章

村田光司（木材機械加工研究室長）、伊神裕司、松村ゆかり（木材機械加工研究室）、小林功（加工技術研究領域チーム長）

第1章 中・大径材の含水率選別技術の開発と評価

(1) 振動的性質を応用した原木丸太の含水率推定法の開発

ア 研究目的

初期含水率のバラツキは製材の仕上がり含水率のバラツキや乾燥コストに影響を及ぼす。とくにスギの心材含水率は品種やクローンによって変異が大きいことが明らかになっており(中田ら、1998; 平川ら、2004)、このような心材含水率の変異が製材の含水率の変異に影響する。したがって、スギ製材を低コストで効率的に乾燥させるためには、製材の初期含水率や丸太のヤング率等によって原木丸太を仕分けし、要求される強度的性能や乾燥効率を考慮して製材の種類を選択することが有効である(伊神、2011)。すでに、丸太木口を打撃して共振周波数を測定してヤング率を求める方法は実用化されているものの、丸太の含水率を推定する方法は確立されていない。

そこで、本研究では、ヤング率と含水率による原木選別のための実用的な非破壊測定技術を開発することを目的とした。

イ 研究方法

栃木県産スギ丸太 50 本、茨城県産スギ丸太 79 本を用いた。スギ丸太の動的ヤング率を縦振動法により求めた。栃木県産スギ丸太は径級分布がほぼ等しくなるように 2 グループに分けた 25 本を用い、茨城県産スギ丸太は元玉を中心に 35 本を選んだ。栃木県産スギ丸太については丸太の中間部とそこから上下に各 1 m の部位の計 3 カ所において、横打撃共振周波数及び水平方向の応力波伝播速度の測定を行った。茨城県産の丸太については、丸太両端から約 60cm 部位について横打撃共振周波数を測定した。これらの測定部から円盤を採取し、髄を含む幅約 30mm のストリップを採取し、髄から約 20mm ごとに切断した小ブロックについて全乾法により生材含水率を浮力法により容積密度数 (kg/cm^3) を測定した。なお、測定は心材、白線帯及び辺材に区別して行った。横打撃共振周波数は、加速度ピックアップを丸太側面に接触させ、ピックアップから円周上で $90 \sim 120^\circ$ 離れた丸太側面を打撃して得られる横振動の共振周波数を FFT アナライザ(小野測器、CF-1200)で測定した。応力波伝播速度の測定には Rinntech 社製 ARBOTOM を用い、丸太側面同一円周上の 8 方向に約 45° ごとに設置したセンサーをハンマーで打撃し、センサー間の応力波伝播速度を測定した。丸太の平均含水率及び平均容積密度数は、ストリップから切断した小ブロックの髄からの距離によって面積で重み付けして求めた 2 枚または 3 枚の円盤の平均含水率及び容積密度数の平均値として求めた。

ウエ 結果及び考察

(1) 重量法による含水率推定

生材丸太の重量には木材実質の重量と、木材中の水の重量が含まれる。このため、木材の容積密度数に大きな変動がなければ生材密度は木材中の水の量を反映していることになる。さらに、含水率推定に必要なパラメータが材積と丸太重量で特別な器具・装置を必要とせず、比較的簡便に測定が可能であることから、生材丸太の密度から生材含水率の推定が行われてきた。しかしな

がら、精英樹クローンや品種を用いた研究では、容積密度数にクローンや品種による差があることが明らかになっている。このため、クローンや品種等による容積密度数の差が重量法による含水率推定に誤差を生じさせる要因であると考えられる。供試した丸太 64 本について丸太重量と材積から求めたみかけの密度と含水率との関係を見たところ、正の相関 ($R = 0.81$) が認められた (図 1-1-1)。また、回帰式から得られる丸太密度からの推定含水率と実測含水率との偏差は平均で 16.0%であった。

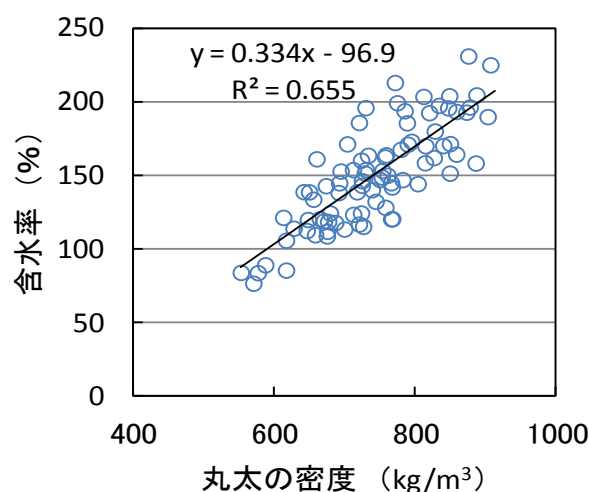


図 1-1-1 生材丸太のみかけ密度と丸太の含水率との関係

(2) 容積密度推定値による含水率の補正
非破壊的に測定できるパラメータとして丸太ヤング率を取り上げ、密度と丸太ヤング率との関係から容積密度の推定を試みた。まず、既往の中小径材の丸太ヤング率及び容積密度の測定値 (平川ら 2003a、2003b) を用いて丸太ヤング率と容積密度数との関係を検討した。次いで、大径材についての測定値を用いて同様の検討を行った。中小径材と大径材とを比較すると、同程度の丸太ヤング率に対して中小径材の容積密度数が高く、丸太ヤング率と容積密度数との関係が異なっていた。これは、丸太に含まれる高密度の未成熟材の比率が中小径材で高いのに対して大径材では低くなっていることに起因すると考えられ (藤原ら 2004)、大径材については大径材の容積密度推定式が必要なことが明らかになった (図 1-1-2)。

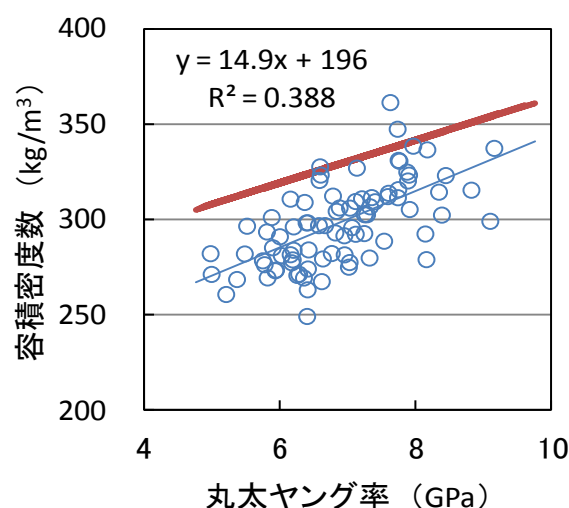


図 1-1-2 丸太ヤング率と容積密度数との関係
太線はスギ精英樹クローンにおける両者の関係を示す。

また、栃木県産材と茨城県産材とでは丸太ヤング率と容積密度数との関係に違いがなく、両者は同一の推定式をあてはめてもよいと考えられた (図 1-1-3)。そこで、大径材について得られた丸太ヤング率と容積密度数との以下の回帰式を丸太ヤング率から容積密度数を推定する際の推定式として用いた。

$$D_{\text{est}} = 14.9 \times E_{\text{log}} + 196 \quad (1)$$

$$MC_{\text{est}} = (D_g - D_{\text{est}}) / D_{\text{est}} \times 100 \quad (2)$$

D_{est} : 推定容積密度数 (kg/m^3)、 E_{log} : 丸太ヤング率 (GPa)、 MC_{est} : 推定含水率 (%)、 D_g : 生材密度 (kg/m^3)

式 (1) をあてはめて推定した容積密度数と生材密度を使って、式 (2) により推定含水率を求めたところ、実測含水率との間に高い相関 ($R^2=0.79$) が認められた (図 1-1-4)。また、推定値の実測値からの偏差の絶対値の平均値は 12.1%であった。これらの数値は、丸太の生材密度から求めた推定含水率と実測含水率との間でそれぞれが 0.66、16.0%であったことと比較すると重量法よりも推定精度が向上したと判断できる。

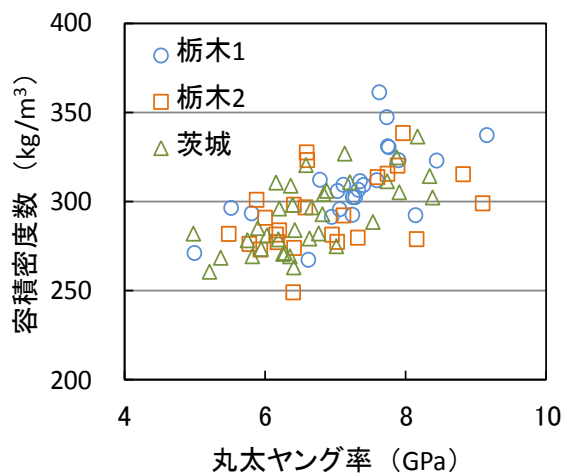


図 1-1-3 丸太ヤング率と容積密度数との関係

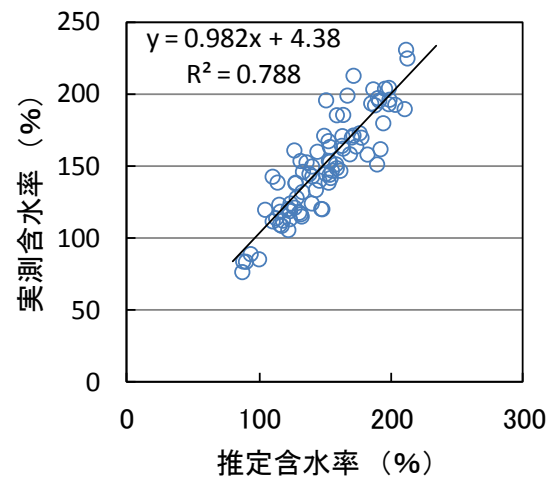


図 1-1-4 推定含水率と実測含水率との関係

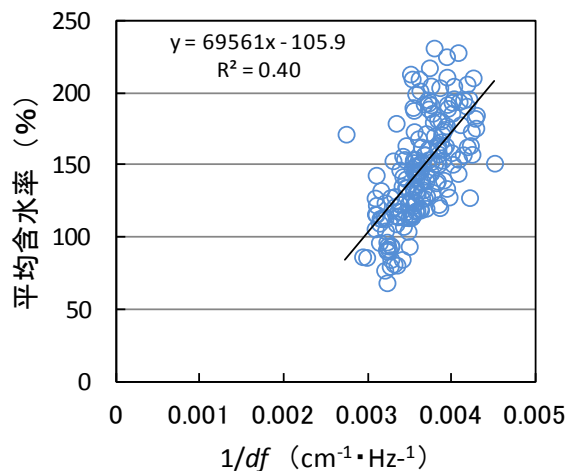


図 1-1-5 $1/df$ と丸太平均含水率との関係

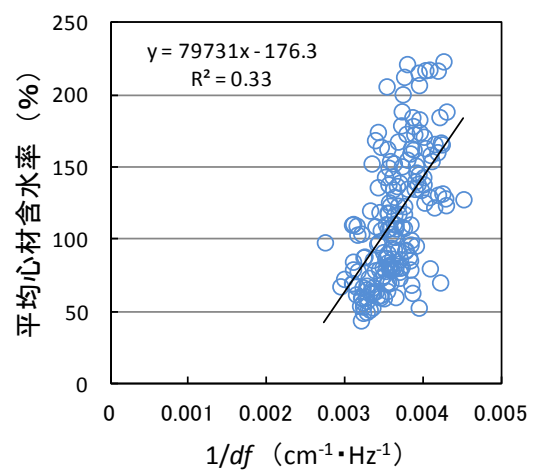


図 1-1-6 $1/df$ と心材平均含水率との関係

(3) 横打撃共振周波数による含水率の推定

丸太側面を打撃して得られる横打撃振動周波数 (f) と周波数測定部位における丸太直径 (d) から丸太含水率及び心材含水率の推定法について検討した。丸太直径と横打撃共振周波数と立木の心材含水率の目安とされている $1/df$ 及び $1/(df)^2$ について (釜口ら、2000; 中田・田村、2006)、平均含水率及び平均心材含水率との関係をみたところ、平均含水率との間には $1/df$ 及び $1/(df)^2$ ともに $R^2=0.40$ 程度、平均心材含水率との間には $R^2=0.33$ 程度の相関は認められた (図 1-1-5、1-1-6)。一方、丸太の平均含水率と心材含水率との間には $R^2=0.70$ 程度の相関が認められたこと (図 1-1-7)、 $1/df$ 及び $1/(df)^2$ それぞれから推定した心材含水率と実測心材含水率との偏差の絶対値の平均は 42.3% に達することから推定精度は不十分であると考えられた。

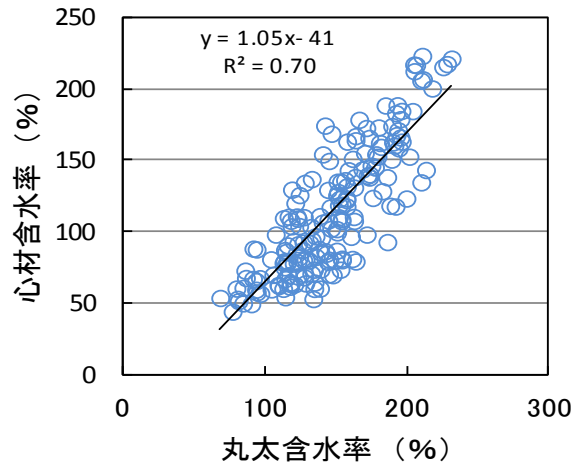


図 1-1-7 丸太の平均含水率と心材含水率との関係

(4) 応力波伝播速度による含水率の推定

丸太の直径に沿った応力波伝播速度と接線方向の応力波伝播速度との間には約 100~400 m/s 程度の差があった。この速度差に心材の生材密度が反映されていると考えて、速度差と心材の生材密度との関係を検討した。しかしながら、伝播速度の差と心材の生材密度との間には負の関係がみられたものの有意ではなく、含水率の定量的推定が可能な精度が得られなかった。応力波 CT による解析では、心材含水率が極端に多いあるいは少ない場合には異なるイメージが得られており、含水率分布を定性的に表示できる可能性は示唆された。

オ 今後の問題点

重量法による含水率推定法を丸太ヤング率と容積密度数との関係を用いて補正する方法を用いることにより、重量法よりも含水率の推定精度を向上させることができた。これは丸太ヤング率と容積密度数との高い相関関係があることが前提となっており、本研究で得られた大径材における相関関係が全国のスギに適用できるかは明らかではなく、今後の課題である。一方、心材のみの含水率推定を目指して取り組んだ横打撃振動法では、心材含水率と横打撃共振周波数ともに重量法を超える精度は得られなかった。このため、振動的性質を応用した中・大径丸太の含水率選別方法の実用化に当たっては、現場への応用がしやすい縦振動法の活用を進めることが課題になると考えられる。

カ 要約

スギ製材を低コストで効率的に乾燥させるためには、製材の初期含水率や丸太のヤング率等によって原木丸太を仕分けし、要求される強度的性能や乾燥効率を考慮して製材の種類を選択する

ことが有効である。本研究では、ヤング率・含水率による原木選別のための実用的な非破壊測定技術を開発することを目的とした。茨城県産及び栃木県産スギ丸太を用い、重量法、丸太ヤング率による容積密度補正法、横打撃振動法、応力波伝播速度法を用いて非破壊的な含水率の推定を試みた。丸太ヤング率によって容積密度数を推定し、その推定値を用いて重量法を補正する方法では、推定含水率と実測含水率との間で最もよい相関 ($R^2=0.79$) が認められた。また、推定値と実測値の差の絶対値の平均値は 12.1%であった。横打撃振動法では、共振周波数と丸太直径の積の逆数と丸太の平均含水率及び心材平均含水率との間にはある程度の関係が認められたが（丸太含水率： $R^2=0.40$ 、心材含水率： $R^2=0.33$ ）、推定含水率と実測含水率との差の絶対値の平均は 42.3%に達し、重量法を超える精度は得られなかった。

キ 引用文献

- 藤原 健、山下香菜、平川泰彦（2004）収穫試験地における主要造林木の全乾容積密度及び気乾密度の樹幹内変動、森林総合研究所研究報告、3(4):341-348.
- 平川泰彦、藤澤義武、中田了五、山下香菜（2003a）関東育種基本区から選抜されたスギ精英樹クローンの材質、森林総合研究所研究報告、2(1):31-41.
- 平川泰彦、藤澤義武、中田了五、山下香菜（2003b）関東育種基本区から選抜されたスギ精英樹クローンの材質に関する解析試料、森林総合研究所研究報告、2(1):65-74.
- 平川泰彦、中田了五、藤澤義武（2004）スギ造林木の心材含水率の変動、木材工業、59:159-165.
- 伊神裕司（2011）国産材資源の変化と製材技術、木材工業、66(9):386-391.
- 釜口明子、中尾哲也、児玉泰義（2000）横打撃共振法によるスギ立木の心材含水率非破壊的推定、木材学会誌、46(1):13-19.
- 中田了五、田村 明（2006）スギ心材含水率の遺伝的改良への横打撃共振法の適用、木材学会誌、52(3):137-144
- 中田了五、藤澤義武、平川泰彦、山下香菜（1998）スギの生材含水率の個体内樹高方向での変化、木材学会誌、44:395-402.

（木材特性研究領域組織材質研究室 藤原 健）

（２）電氣的測定による丸太水分の推定方法の開発

ア 研究目的

これまで、様々な場面での水分評価に電氣的な手法が応用されてきており、丸太含水率の測定についても試みられてきた（上村 1961、鈴木 2004、鈴木 2005）が、原木選別のための実用的な非破壊測定に適用できるには至っていない。特に、丸太内部の水分分布の評価については、土場や製材工場などそれぞれの丸太選別の現場に適した評価手法が確立されていない。そこで、本研究では、丸太内水分評価への電氣測定の活用方法について検討することを主な目的としている。

イ 研究方法

（１）試験材料

栃木産スギ丸太 25 本（直径 32～42cm、長さ 3.75m）を用いた。重量・寸法・打撃法等試験を行った後、さらに 1m ごとに玉切りした。玉切りした丸太の寸法・電氣的測定などを行った後、それぞれの丸太から厚さ 5-10cm の円盤を切り出した。円盤から髄を通るようにタイコ材を作製し、含水率・密度測定のために 2cm ブロックごとに分割した。ブロックの生材重量を測定した後、水中での重量を測定して置換法による生材体積を求めた。さらに、105℃の乾燥器で乾燥させ、全乾法による含水率を求めた。

（２）電氣的測定の方法

現場での様々な測定環境を想定し、以下の①、②、③の方法を用いて、丸太のインピーダンス Z 、電氣容量 C 及び位相角 θ の測定を行い、丸太円盤の辺材・心材部位ごとの全乾含水率との関係を求め、測定値を直接的に丸太含水率の選別に適用する方法について検討した。

①対向式挟み込み電極による方法(Suzuki、2007 ; Suzuki ら、2009)

製材工場等の土場に平面的に置かれた状態での評価を想定し、対向式挟み込み電極による方法を検討した。図 1-2-1 に示すように、幅 2cm 長さ 10cm の銅シートを取り付けた電極板を丸太の横から挟み込むように固定し、電極は LCR-メーター（HIOKI 製 3531）に接続した。周波数 50Hz から 1MHz の範囲の約 50 ポイント数で、インピーダンス Z (Ω) と位相角 θ ($^{\circ}$) の 2 つのパラメータを、丸太 1 本 1 本について測定した。

②押し当て電極による方法

簡便に土場で積まれた状態でも横から心材含水率の判定ができるように、押し当て電極による方法を採用し、できるだけ簡便にできるように測定装置の小型化について検討した。厚さ 2mm のゴムシート 2 枚に横 5cm×縦 20cm のアルミ接着シートをそれぞれ貼り付けて、1 組の電極として、ハンディタイプの LCR メーター（A&D 製）に接続した（図 1-2-2）。2 枚のゴムシートを一定の間隔（10cm）に保ったまま、丸太の側面に緋

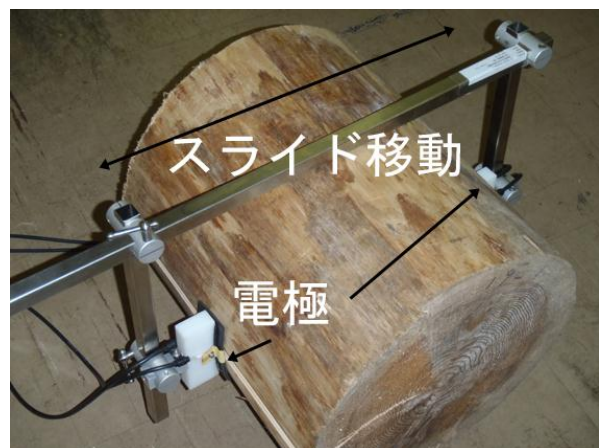


図 1-2-1 挟み込み電極と治具の丸太への固定方法

縦方向に対して平行に押し当てて、周波数 1kHz と 10kHz で、それぞれの電気容量 C (μF)、位相差 θ ($^{\circ}$) を読み取った。



図 1-2-2 押し当て電極による方法

a) ハンディタイプの測定器と電極 b) 丸太への電極の設置方法

③アンテナ式電極による方法

土場において、長さ方向における含水率分布を測定する可能性について検討した。幅 2cm、厚さ 1.5cm、長さ 1m の 2 本のアルミ角材を 15cm～20cm の間隔で平行に並べ、その一端を LCR メーター (HIOKI 製 3531) に接続し、周波数 50Hz から 1MHz までの範囲で約 50 点数のインピーダンス Z (Ω) と位相角 θ ($^{\circ}$) を測定した (図 1-2-3)。



図 1-2-3 アルミアンテナ電極と丸太への配置例

a) 横から見た場合 b) 上側から見た場合

ウェ 結果と考察

(1) 挟み電極による含水率評価

水分が強く影響する電導性を評価するには、インピーダンス、位相角と周波数との関係がよく検討されている (Titta, M. 2003)。そこで、丸太内部の含水率分布の推定のために、挟み込み電極を使用して、インピーダンス及び位相角と周波数との関係を求めた。

その結果、心材と辺材の含水率の違いによって、インピーダンスと位相角について色々なパターンの周波数特性が得られた（図 1-2-4）。

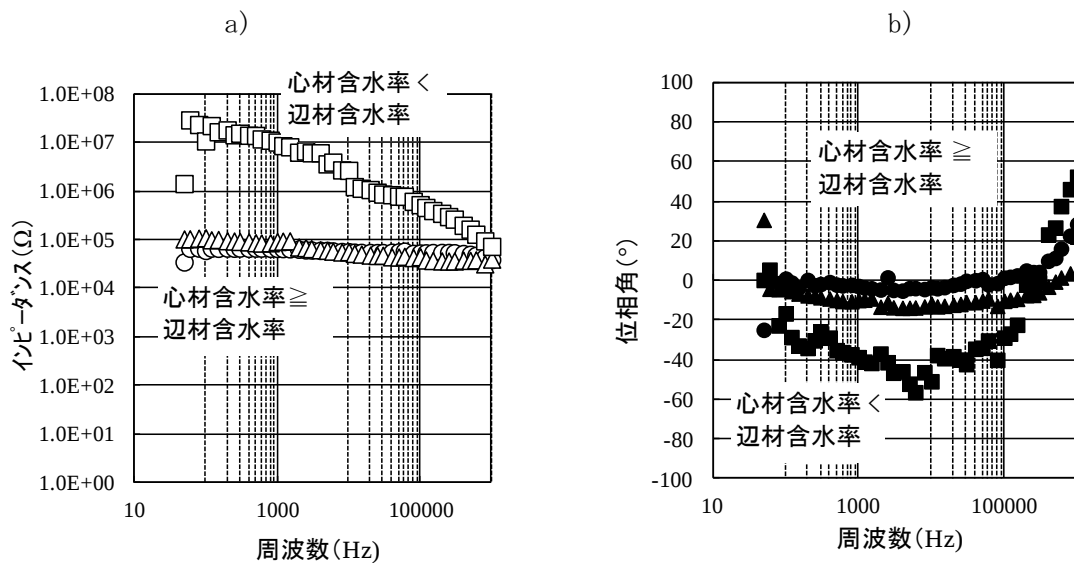


図 1-2-4 挟み込み電極による電気特性値の周波数依存性

a) インピーダンスと周波数との関係 b) 位相角と周波数との関係

これらのインピーダンス、位相角、周波数の関係と、心材と辺材の含水率状態との関係を 25 本の丸太について検討すると、それぞれ、心材の含水率が辺材よりも高い場合、同じくらいの場合、もしくは心材の含水率が辺材よりも低い場合とによってパターンが異なることが明らかになった。

すなわち、500、1000、5000、10000、50000、100000Hz の 6 点のインピーダンス Z と周波数 f (Hz) との関係について、指数関数 $y = Ae^{Bx}$ で表される関係が得られたが、ここで係数 B の大きさに着目すると、1 未満であれば、心材含水率 100% 以下で辺材含水率が心材含水率より高い確率が高く、一方、1 以上であれば、辺材含水率 100% 以上で心材含水率 50%～80% である確率が高かった。また、 B が 1 未満の場合、周波数 10kHz の位相角の大きさが 10 以下の場合、心材含水率が約 70% で辺材含水率が約 120% である確率が高く、10 より大きいと心材含水率約 50% で辺材含水率が約 100% になる確率が高かった。一方で、 B が 1 以上の場合、周波数 10kHz の位相角の大きさが 30 未満の場合、心材含水率が約 60% で辺材含水率が 120% 以上になる確率が高く、30 以上では心材含水率が概ね 60%、辺材含水率が 100% である確率が高かった。

これらの結果に基づいて、心材と辺材の水分状態をインピーダンスと位相角の測定によって仕分ける手順をフローチャートにし、図 1-2-5 に示している。

この仕分け手順の最終的な成功率は約 70% であった。ただし、本研究で用いた丸太は心材含水率が 100% を超える試験体が少なく、この選別手法での高含水率心材抽出の可能性についてはさらに検討が必要である。

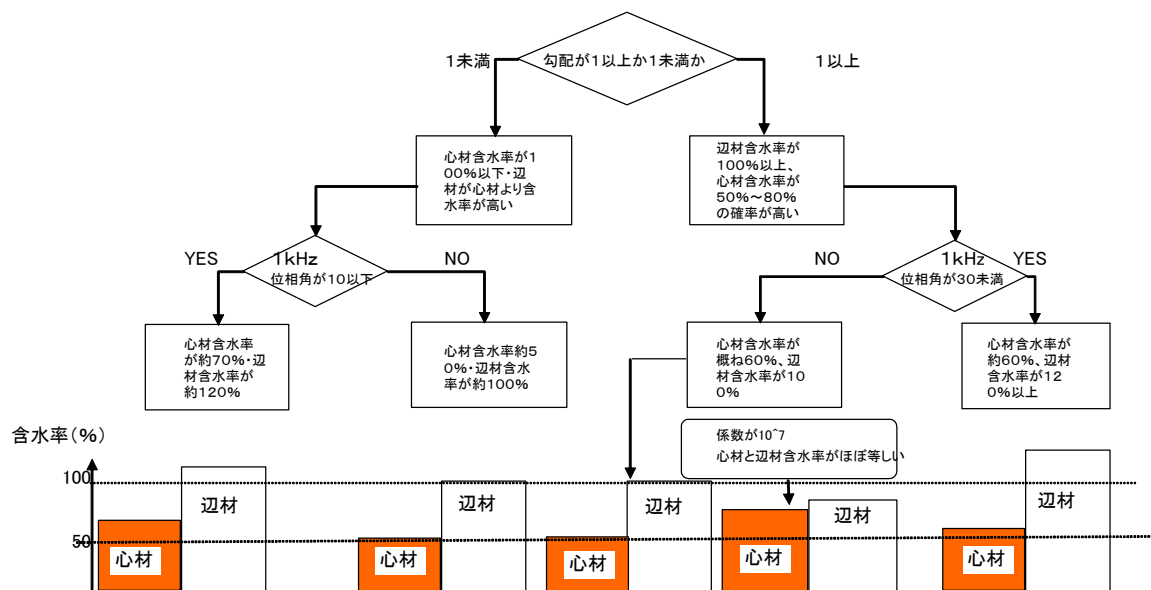


図 1-2-5 係数と位相角を用いた丸太内部の含水率選別フローチャート

(2) ハンディタイプ押し当て電極による含水率評価

通常、原木市場や製材工場では、丸太は積み上げられている。そのままの状態において、丸太内部の含水率評価をする場合などでは、簡易型の小型装置が望ましい。そこで、ハンディタイプの押し当て電極を用いた方法について検討した。

周波数 1kHz と 10kHz での電気容量と位相角について測定を行い、その結果の一例を図 1-2-6 に示している。周波数と電気容量との関係は、関数 $y = Ae^{Bx}$ で表すことができ、この式中の係数 B と心材と辺材の含水率及び両者の比との関係を求めると、図 1-2-7 に示す結果となった。

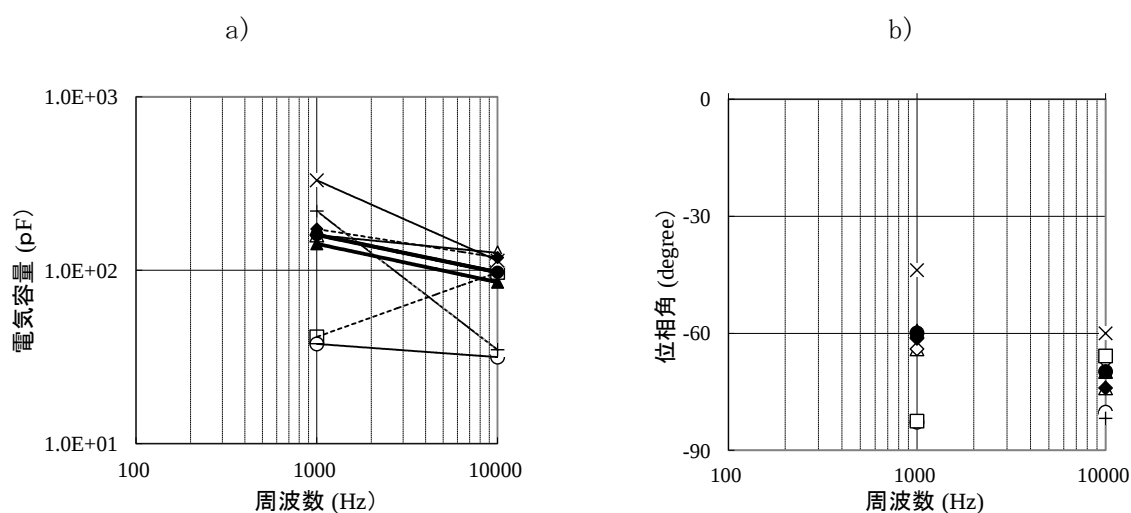


図 1-2-6 電気容量及び位相角と周波数との関係

a) 電気容量 b) 位相角

図 1-2-7 では、個体数が限られているため、辺材の含水率が 200% 付近に多く分布しているが、心材含水率は 2 周波数の係数 B の増加により低下する傾向が示されている。その結果、心材と辺材の含水率比によって係数 B が変化することから、係数 B によっておよそ心材と辺材の水分状態が推測可能であることがわかった。

本手法は、現場において心材が辺材よりも高い含水率を示すのか否かを簡便に判別する方法として活用できると考えられる。実用的な選別方法としては、土場で積み上げられた丸太を測定しながら、重量測定、寸法測定及び打撃法（縦振動）との組み合わせによる判定手法に組み込むことができると考えられる。

(3) アンテナ電極による含水率評価

製材工場等での原木選別ラインにおける活用を目指し、アンテナ電極を用いた場合について検討した。これは、アンテナに見立てたアルミ角材 2 本の電極上に丸太を置き、その時のインピーダンスの周波数特性を測定する方法である。この方法の利点は、丸太を電極上に転がすことによって測定できる点である。

図 1-2-8 に、周波数とインピーダンス及び位相角の関係について測定の 1 例を示す。このインピーダンスと位相角の周波数特性を用いて、丸太の心材含水率

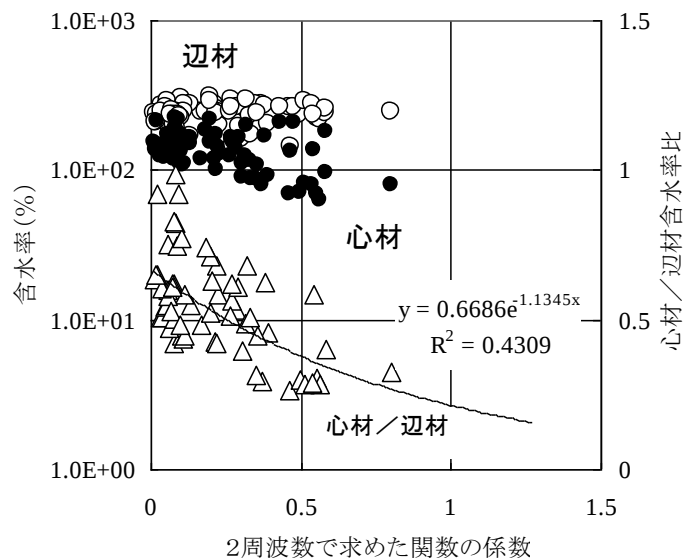


図 1-2-7 2 周波数による係数 B と含水率との関係

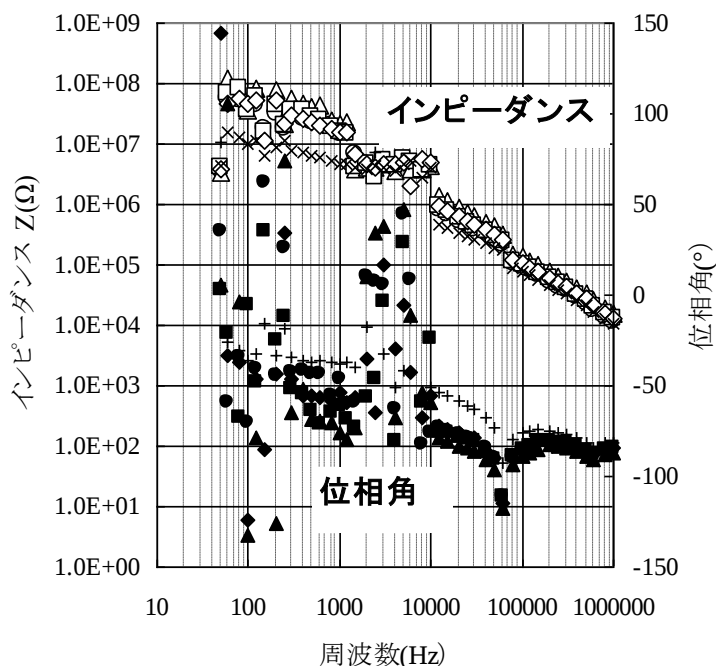
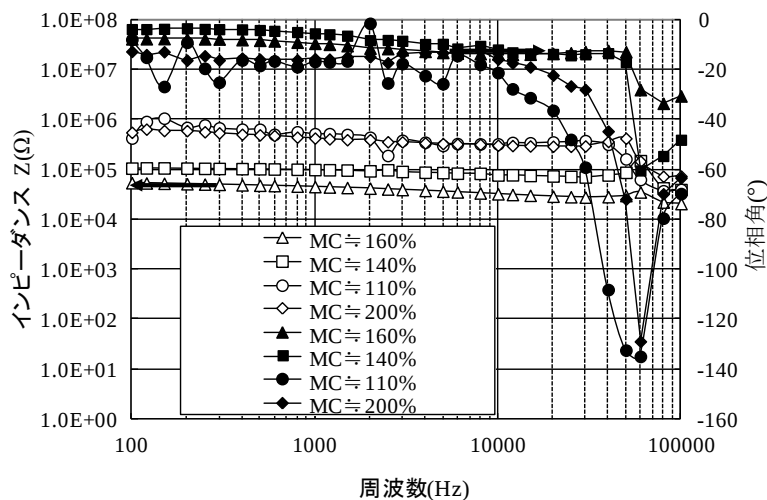


図 1-2-8 周波数とインピーダンス及び位相角の関係

が 100%以下か 100%よりも大きいかでそれぞれの特性を分析した。

すなわち、心材含水率を 100%で区別すると、図 1-2-9 のような周波数特性のパターンの違いが得られた。100%以上の場合の特徴として、インピーダンスは 100Hz から 100kHz の範囲では変動せず、一方の位相角は、10kHz 付近まで 0 から -20° の範囲である。100%以下では、同じ周波数範囲で、インピーダンスが周波数の上昇とともに減少し、また、位相角も -60 から -80° 付近で変動する特徴を持つことが明らかになった。

a) 心材含水率 100%より大



b) 心材含水率 100%より小

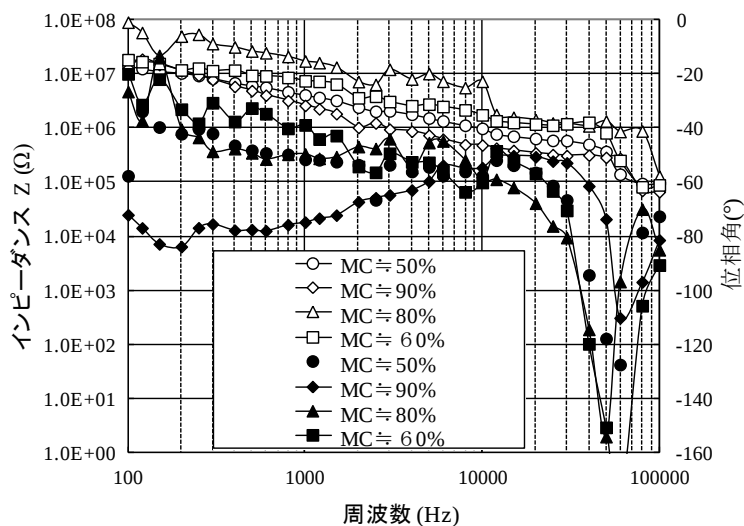


図 1-2-9 アンテナ電極によるインピーダンス周波数特性
 図中：白抜きがインピーダンス、黒が位相角を示す。

このような周波数特性の説明には、電気等価回路を用いていることが多い。これは、抵抗、コンデンサー、コイルの 3 種類の電子部品の組み合わせで、材料の特性を評価するものである。抵抗は、周波数に対して位相差はなく、コンデンサーは位相差が負（遅れ）を示す。コイルは位相差が正（進み）となる特徴を持っている。

木材は、通常抵抗とコンデンサーの並列接続で近似することが多く、コンデンサーと抵抗の値によって、インピーダンスと位相角の周波数特性が変わる。含水率が高い場合のように、抵抗が小さく、コンデンサーの値が大きいとインピーダンスは抵抗と同じような周波数に対して平坦な特性を持ち、位相角は 0° 付近になる。含水率が低くなり、抵抗が大きく、コンデンサーの値が小さいとインピーダンスは周波数の対数値の増加に対して直線的に減少するとともに、位相角は -90° 付近を示す傾向にある。図 1-2-9 の結果は、これらの挙動を裏付けており、ある周波数に対する抵抗またはコンデンサーの値

と全乾含水率との関係を前もって求めておけば、インピーダンスの値から直接含水率を導くことができると考えられる。

オ 今後の問題点

今回用いた丸太の含水率分布は、辺材部が 200%以上の含水率を持つものが多く、さらに心材含水率が 100%より低い材が少ないため、さらに水分状態の選別制度を高めるためには広範囲な含水率分布を持つ材を集め、そのインピーダンス特性を測定する必要がある。また、現場に応用するにあたっては、電極構造や走査速度、インラインへの組み込み方法など、実用的な含水率選別技術の確立に向けた検討を進める必要がある。

カ 要約

原木選別のための実用的な非破壊測定技術を開発するために、丸太内部の水分分布と電気的特性との関係を求め、土場や製材工場などそれぞれの丸太選別現場に適した材内水分評価手法について検討した。異なる 3 タイプの電極によってインピーダンス測定を行い、その特性と含水率との関係を求め、次のようなことを明らかにした。

挟み込み電極による丸太のインピーダンスの対数値と測定周波数は直線関係となり、直線の勾配が 1 以上か未満かによって辺材と心材のいずれの含水率が高いかの判断が可能であることが明らかになった。また、位相角によりさらに細分化でき、インピーダンス及び位相角による選別フローチャートが作成できた。押し当て電極による評価では、心材含水率が辺材含水率より低いかどうかを判定することができた。アンテナ式電極では、辺材・心材含水率比を推定し、さらに心材含水率が 100%以下または以上に選別することが可能になった。

キ 引用文献

上村武(1961)パルプ原木の重量検収について、木材工業、16 (7)、321-326

鈴木養樹(2004)研究最前線「丸太の水分を計る」、APAST、14、52-57

鈴木養樹(2005)電気的手法による木材中の水分量評価、木材工業、60 (10)、483-488

Suzuki Y. (2007)Development of Estimating Method of Moisture Content or Water Distribution for Sugi(Japanese cedar) Log Using Impedance Measurements, Proceedings of 7th International Conference on Electromagnetic Wave Interaction with Water and Moist Substances, pp.107-113

Suzuki Y.、Ikeda K. (2009) Proceedings of 8th International Conference on Electromagnetic Wave Interaction with Water and Moist Substances, Estimation of Water Distribution in Sugi (Japanese cedar) Log Using Impedance Models, pp.289-294

Titta M. (2003) Electrical Impedance Spectroscopy Application for Wood Moisture Gradient Measurement, Proceedings of 5th International Conference on Electromagnetic Wave Interaction with Water and Moist Substances, p277-283

(木材特性研究領域 鈴木養樹)

第2章 中・大径材の選別・製材・乾燥システムの設計

ア 研究目的

戦後植林された針葉樹造林木は着実に成熟し、すでに標準伐期齢を過ぎた針葉樹人工林、とくにスギ人工林が増加している。これにより、供給されるスギ製材用原木が小中径材から中大径材へと移行することが予想されている。一方、国産材製材品は、依然として、外材製材品や外材集成材などの競合品との厳しい競争にさらされている。今後、品質・性能の確かな競争力のある国産材製材の供給拡大を実現するためには、中大径材を対象として製材品生産への材質選別、特に含水率選別工程の導入による生産の効率化を早期に検証し、選別・製材・乾燥の一連の生産システムの確立を促進することが必要である。

このため、本研究では、材質選別工程を導入した場合の製材及び乾燥の効率性向上効果を検証し、スギ中大径材を対象とした効率の良い原木選別・製材・乾燥システムを設計することを目標としている。

イ 研究方法

栃木県森林組合連合会共販所及び茨城県森林組合連合会共販所から購入したスギ大丸太 75 本（末口径 30.3cm～43.8cm（平均末口径 34.8cm）、長さ 3.0m 及び 3.65m）を挽き材試験用供試丸太とした。表 2-1 に供試丸太の諸元を示す。供試丸太の見かけの密度により推定含水率を求めるとともに、動的ヤング率を打撃法（縦振動法）により測定した。

$$V = \frac{(l_t^2 + 2l_m^2 + l_b^2 + l_t l_m + l_m l_b) \times L}{24\pi} \quad \dots (1)$$

$$\rho = \frac{g}{V} \quad \dots (2)$$

$$u_e = \frac{\rho - 0.374}{0.374} \times 100 \quad \dots (3)$$

$$E_{fr} = 4 \times L^2 \times fr^2 \times \rho \quad \dots (4)$$

ここで、 $V(\text{cm}^3)$ は丸太材積、 $l_t(\text{cm})$ は末口の周囲長、 $l_m(\text{cm})$ は中央部の周囲長、 $l_b(\text{cm})$ は元口の周囲長、 L は材長 (cm)、 ρ は見かけの密度 (g/cm^3)、 u_e は推定含水率 (%）、 g は丸太の重量 (g)、 $0.374(\text{g}/\text{cm}^3)$ は過去の研究¹⁾で求めたスギの平均全乾密度、 $E_{fr}(\text{GPa})$ は動的ヤング率、 $fr(\text{Hz})$ は縦振動の一次固有振動数。

表 2-1 供試丸太の諸元

	最小	最大	平均	標準偏差
末 口 径 (cm)	30.3	43.8	34.8	2.5
元 口 径 (cm)	33.4	49.2	38.7	3.1
材 積 (m^3)	0.3185	0.6542	0.3937	0.0602
心材半径 (cm)	9.0	16.5	11.5	1.3
平均年輪幅 (mm)	2.4	4.2	3.2	0.4
曲がり率 (%)	1.0	9.3	3.7	1.8
節 数	0	14	2.4	3.4

挽き材試験では、1200mm 自動送材車帯鋸盤と 1100mm 自動ローラ帯鋸盤を使用して挽き材を行った。使用した木取りは、心去り正角を主製品とする木取りである（図 2-1）。挽き材したすべての製材品について製材の日本農林規格準じて等級格付けし、さらに構造用材については曲がり、含水率、動的ヤング率を測定した。

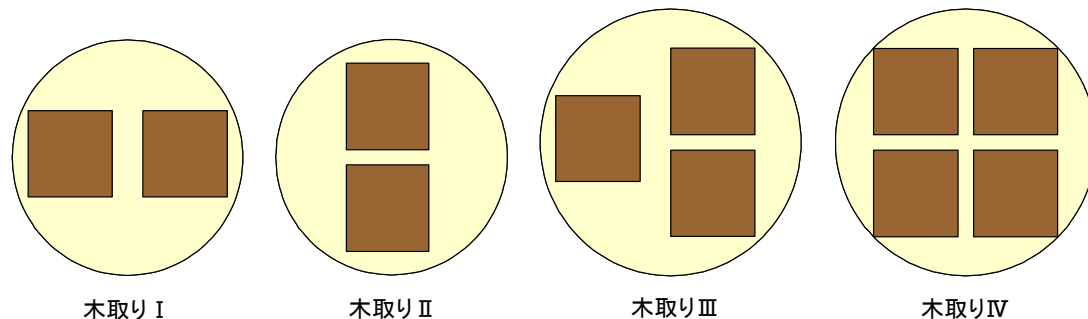


図 2-1 標準木取り

また、スギ心去り正角の乾燥において、乾燥前に含水率による選別を行うことによる経済効果について検討するために、愛媛県産スギ心去り正角を供試材とし、乾燥試験を一般的な乾燥スケジュール（70～80℃）によって行い、乾燥日数を推定した。

ウエ 結果と考察

図 2-2 に丸太推定含水率 u_e の頻度分布を示す。丸太推定含水率 u_e は 57.6～144.2%（平均 91.9%、標準偏差 19.5%）で、ほぼ正規分布を示した。この結果は、中大丸太の推定結果の 25～130%（平均 77.6%、標準偏差 20.7%）（村田ら、2010a）と比べると高い結果となった。本研究においても長期間土場に保管されていたと思われる丸太が含まれていたが、70%未満の占める割合が比較的少なかったことが丸太推定含水率 u_e の平均を高くした。

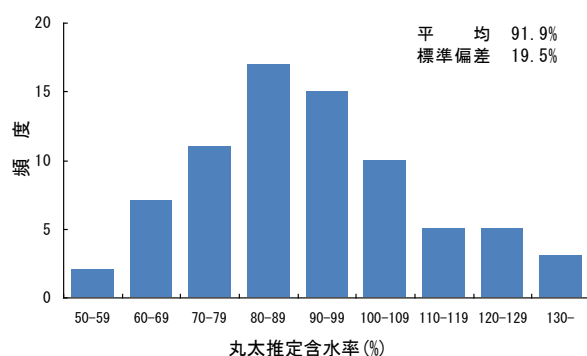


図 2-2 丸太推定含水率 u_e の頻度分布

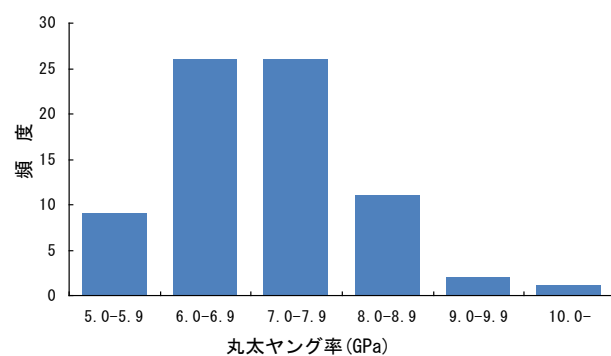


図 2-3 丸太ヤング率の頻度分布

図 2-3 に丸太の動的ヤング率 E_{fr} の頻度分布を示す。丸太の動的ヤング率 E_{fr} は、5.1～10.0GPa（平均 7.2GPa、標準偏差 1.0GPa）であり、7.0GPa 未満の丸太が 47%とほぼ半数を占めた。中大丸太の結果の 4.7～11.6GPa（平均 7.5GPa、標準偏差 1.4GPa）（村田ら、2010a）と比べると若干低

い結果となった。

形量歩止りの結果を表 2-2 に示す。表中の粗挽きとは乾燥による収縮や仕上げ加工による削り代を考慮して目標寸法（仕上げ寸法）に歩増した粗挽き寸法の製品材積で算出歩止りを示しており、仕上げは仕上げ寸法の製品材積で算出した歩止りを示している。形量歩止りは、木取りⅠ<木取りⅡ<木取りⅢ<木取りⅣという順であった。これは、1本の丸太から挽き材された正角の数の大小と一致している。本研究では、断面寸法の大きな正角を挽き材した丸太の残り部分から比較的断面寸法の小さい板類や挽き割類を挽き材したが、板類や挽き割類を多く挽き材するほど、挽き道による歩止りの低下が大きくなる。このため、正角を2本挽き材した木取りⅠや木取りⅡより3本挽き材した木取りⅢや4本挽き材した木取りⅣのほうが挽き道による歩止りの低下が少なく、形量歩止りが高くなった。

表 2-2 形量歩止り (%)

木取り	本数	粗挽き		仕上げ	
		平均	標準偏差	平均	標準偏差
I	9	67.2	2.2	56.8	1.6
II	17	68.4	2.4	57.7	2.6
III	36	69.5	2.1	60.3	2.4
IV	13	71.0	3.5	62.0	3.2

表 2-3 価値歩止り (%)

木取り	本数	粗挽き		仕上げ	
		平均	標準偏差	平均	標準偏差
I	9	69.2	4.5	58.3	3.2
II	17	71.5	3.3	60.0	3.2
III	36	76.3	3.2	65.9	3.1
IV	13	77.7	5.9	67.3	5.2

価値歩止りの結果を表 2-3 に示す。価値歩止りも形量歩止りと同様に、木取りⅠ<木取りⅡ<木取りⅢ<木取りⅣという順であった。製品の品質が同程度であれば価値歩止りは形量歩止りにほぼ比例することによる。また、丸太の径が大きくなると節の少ない小割類を得られる確率が高くなるため、価値歩止りが丸太径に比例して木取りⅠ<木取りⅡ<木取りⅢ<木取りⅣという順になったとも考えられる。

図 2-4 に製品の等級別出現率を示す。3.8×13.0cm では1級が69%、2級が30%、3級が1%、5.3×13.0cm では1級が76%、2級が21%、3級が3%、13.0×13.0cm では1級が38%、2級が58%、3級が4%であった。

表 2-4 は、挽き材直後の製品の曲がり率を示している。挽き材直後の曲がり率の平均は、bow が 3.8×13.0cm で 0.17%、5.3×13.0cm で 0.18%、crook が 3.8×13.0cm で

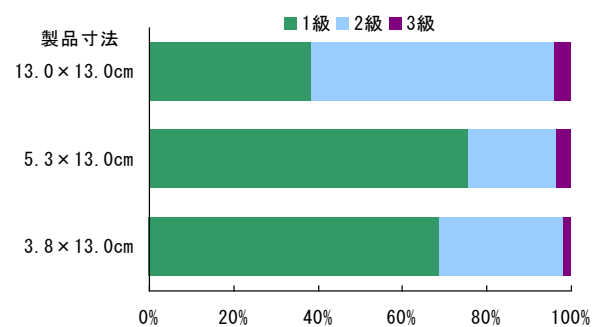


図 2-4 製品の等級別出現割合

表 2-4 製品の曲がり率（挽き材直後）

製品寸法	Bow (%)		Crook (%)	
	平均	標準偏差	平均	標準偏差
3.8 × 13.0 cm	0.17	0.10	0.12	0.08
5.3 × 13.0 cm	0.18	0.10	0.08	0.04
13.0 × 13.0 cm	0.13	0.09	0.14	0.09

13.0×13.0cmでは丸太の曲がり方向の曲がりをbow、その直角方向の曲がりをcrookとした。

0.12%、5.3×13.0cmで0.08%であった。前報（松村ゆかり他、2004）では、bowにおいて、3.8cm厚の挽き割より5.3cm厚の挽き割のほうが小さくなる傾向を示したが、本研究ではほとんど差がなかった。crookがbowより小さいという傾向は同様であった。13.0×13.0cmの心去り正角の場合、曲がり率の平均が丸太の曲がりの方向と同方向（表2-4中ではbow）で0.13%、直角方向（表2-4中ではcrook）で0.14%であり、丸太の曲がり方向の影響は認められなかった。心去り正角の場合、心持ち正角と比較して曲がりが大きくなる傾向があるので分増しを大きくするなどの対応が必要であると考えられる。

表2-5は、乾燥後の製品の曲がり率を示している。挽き材直後の曲がり率の平均は、bowが3.8×13.0cmで0.18%、5.3×13.0cmで0.10%、crookが3.8×13.0cmで0.08%、5.3×13.0cmで0.08%であった。挽き材直後と比較して、5.3×13.0cmのbowと3.8×13.0cmのcrookが小さくなったが、5.3×13.0cmのcrookと3.8×13.0cmのbowはあまり変わらなかった。乾燥中に荷重をかけて製品の変形を抑えた効果が出たようである。13.0×13.0cmの心去り正角の場合、曲がり率の平均が丸太の曲がりの方向と同方向（表2-5中ではbow）で0.19%、丸太の曲がりの方向と直角方向（表2-5中ではcrook）で0.12%であり、丸太の曲がりの方向と同方向の曲がりが大きくなった。挽き割と比較して、正角では乾燥中の荷重の効果が現れなかったのかもしれない。

表2-5 製品の曲がり率（人工乾燥後）

製品寸法	Bow (%)		Crook (%)		含水率 (%)	
	平均	標準偏差	平均	標準偏差	平均	標準偏差
3.8×13.0 cm	0.18	0.11	0.08	0.06	10.6	3.1
5.3×13.0 cm	0.10	0.07	0.10	0.04	14.9	6.9
13.0×13.0 cm	0.19	0.10	0.12	0.08	27.3	12.8

13.0×13.0cmでは丸太の曲がり方向の曲がりをbow、その直角方向の曲がりをcrookとした。
含水率は高周波型木材水分計で測定した。

丸太の動的ヤング率 E_{fr} と製品の動的ヤング率 E_{fr} の関係を図2-5に示す。丸太の動的ヤング率 E_{fr} と製品の動的ヤング率 E_{fr} には高い相関があり、これまで指摘されているように（村田ら、2010a、2010b）、丸太の動的ヤング率 E_{fr} は製品の動的ヤング率 E_{fr} を見積もる指標となり得る。

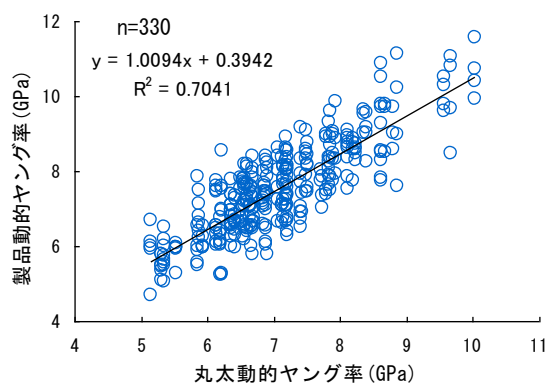


図2-5 丸太動的ヤング率と製品動的ヤング率の関係

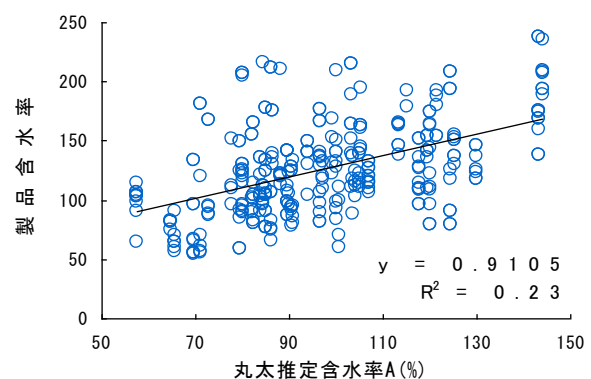


図2-6 丸太推定含水率Aと製品含水率（全乾法）の関係（丸太50本）

図 2-6 は、(3)式から求めた丸太推定含水率 u_e と高周波型木材水分計で測定した挽き材直後の製品含水率の関係を示している。決定係数 R^2 が 0.3223 であり、相関が高いとはいえない。高周波型木材水分計による含水率の測定では、表面と少し内側の含水率しか測定できず、高含水率では精度が落ちてしまう。そこで、丸太 25 本から挽き材した製品について、全乾法により挽き材直後の製品含水率を求め、丸太推定含水率 u_e との関係を示したのが、図 2-7 である。決定係数 R^2 は 0.2094 で、丸太推定含水率 u_e と高周波型木材水分計で測定した挽き材直後の製品含水率の関数と比較して、相関関係が低くなった。丸太含水率の推定の精度がより高いと考えられる 1 章で用いた丸太ヤング率から求めた丸太推定含水率 u_{ey} と全乾法による製品含水率の関数を示したのが、図 2-8 である。決定係数 R^2 は 0.309 と、(3)式から求めた丸太推定含水率 u_e の場合と比較して、決定係数 R^2 が大きくなったものの、相関が高いとはいえない。これは、丸太内部の含水率はその位置によって変動しており、製品含水率はその木取り位置により変動するが、推定含水率は丸太内の平均的な含水率を推定したものであるためと考えられる。

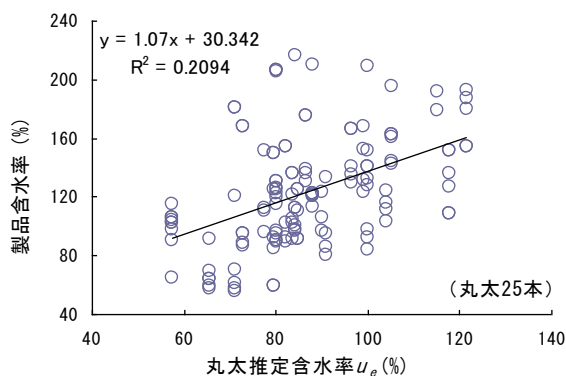


図 2-7 丸太推定含水率 u_e と製品含水率 (全乾法) との関係

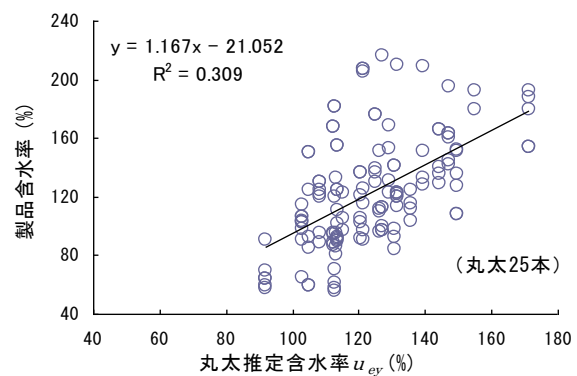


図 2-8 丸太推定含水率 u_{ey} と製品含水率 (全乾法) との関係

そこで、製品の中でも比較的断面寸法が大きく、丸太に占める割合が大きい正角のみを対象に同様な関係を示したのが、図 2-9 と図 2-10 である。

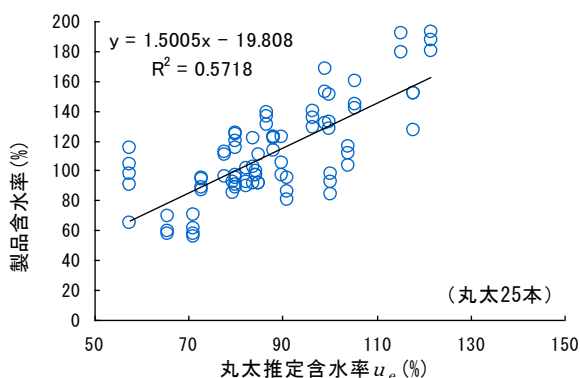


図 2-9 丸太推定含水率 u_e と製品含水率 の関係 (正角)

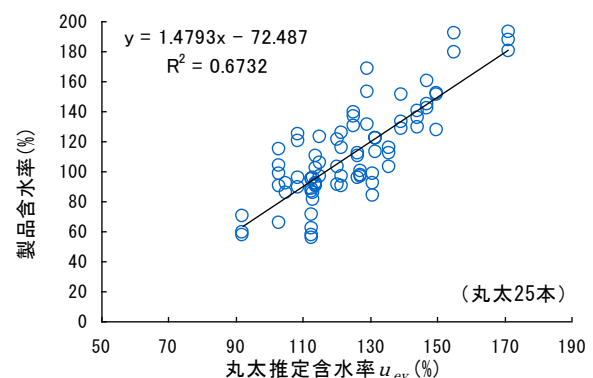


図 2-10 丸太推定含水率 u_{ey} と製品含水率 の関係 (正角)

丸太推定含水率 u_e の場合の決定係数 R^2 が 0.5718、丸太推定含水率 u_{ey} の場合の決定係数 R^2 が 0.6732 であり、丸太推定含水率と正角含水率とは相関が高いといえるであろう。また、丸太推定含水率 u_e の場合より丸太推定含水率 u_{ey} の場合の決定係数 R^2 が大きいことから、丸太推定含水率 u_{ey} のほうが正角含水率との相関が高いといえるであろう。このことから、丸太含水率の推定に丸太ヤング率を応用することにより、正角製品の挽き材直後の含水率推定の精度を高めることができると考えられる。

中大径材を加工する製材工場として、年間原木消費量約 24,000 m^3 の規模では、ノーマンツイン帯鋸盤を主機とし、リングバーカ、オートテーブル帯鋸盤、横型帯鋸盤、ツインリップ、ダブルエジャ、チップなどから構成されるラインが考えられ、家屋、乾燥装置等を含めた投資額は約 12 億円となる。年間原木消費量約 8,500 m^3 の規模では、自動送材車付帯鋸盤を主機とし、リングバーカ、オートテーブル帯鋸盤、ダブルエジャ、チップなどから構成されるラインが考えられ、家屋等を含めた投資額は約 5 億円となる。表 2-6 は、スギ中大径材を図 2-11 に示す木取りを標準木取りとして製材したときの製造経費を、聞き取り調査結果の各経費額に基づいて計算した例を示している。年間原木消費量約 24,000 m^3 の規模の A 工場では、人工乾燥してモルダ掛けした仕上げ材の製造経費は 62,614 円/製品 m^3 である。フル生産により年間原木消費量を 36,000 m^3 に増加させると、仕上げ材の製造経費は 62,614 円/製品 m^3 となる。年間原木消費量約 8,500 m^3 の規模の B 工場では、未乾燥材の製造経費は 43,310 円/製品 m^3 となる。原価償却が終了した場合、未乾燥材の製造経費は 28,846 円/製品 m^3 となる。減価償却費を低く抑えることができると製造経費を低く抑えることができる。また、乾燥・モルダ掛けには約 11,000 円/製品 m^3 にかかることから、この経費をいかに製品価格に反映させることができるかが重要である。

表 2-6 スギ中大径材の製材経費の例

□	A 工場		B 工場	
	①	②	①	②
設備投資額 (円)	12億	12億	5億	0
原木消費量 (m^3 /年)	24,000	36,000	8,500	8,500
最終製品歩止り (%)	45	45	61	61
製品生産量 (m^3 /年)	10,800	16,200	5,185	5,185
原木費用 (円/製品 m^3)	28,888	28,888	21,311	21,311
労 務 費 (円/製品 m^3)	6,111	4,074	7,637	7,637
減価償却費 (円/製品 m^3)	16,667	11,111	14,464	0
電 力 費 (円/製品 m^3)	2,607	2,612	1,629	1,629
副産物収入 (円/製品 m^3)	-2,489	-2,489	-1,731	-1,731
乾燥・モルダ掛け経費 (円/製品 m^3)	10,830	10,830	0	0
製造経費 (円/製品 m^3)	62,614	55,026	43,310	28,846

各経費に関し、製品当たりの費用は、A 工場は仕上げ材、B 工場は未乾燥材

A 工場の②はフル生産した場合

B 工場の②は減価償却が終了した場合

標準木取りとして、図2-11を採用した場合

スギ心去り正角の乾燥において、乾燥前に含水率による選別を行うことによる経済効果について検討を行った結果を表 2-7 に示す。乾燥工程は、1 機の乾燥機（導入費 25,000 千円）で初期含水率が 40～200%の材を乾燥するものとし、選別を行わない場合は全ての材を 27 日で、選別を行う場合は 40～120%の材とそれ以上の材とに分けて交互に 16 日及び 27 日で乾燥するとして生産量を決定し、経費を算出した。

なお、それぞれの乾燥工程において木材は装置の最大許容量（50m³）を乾燥し、年間稼働可能日数 344 日、スギ心去り正角の容積密度数を 320kg/m³と仮定した。含水率選別を行った場合は、選別を行った場合の乾燥経費は 13,832 円となり、行わない場合に比べて木材 1m³あたり、約 1,600 円（約 12%）の経費節減が見込まれた。これは、初期含水率による選別で過乾燥材を減らせることが主な要因である。実際の装置導入では補助金が使えることがあり、またここでは人件費や諸経費を多めに見積もっているため経費の絶対値としての評価には改善の余地があるが、含水率による選別が経費節減効果をもたらすことは明らかである。

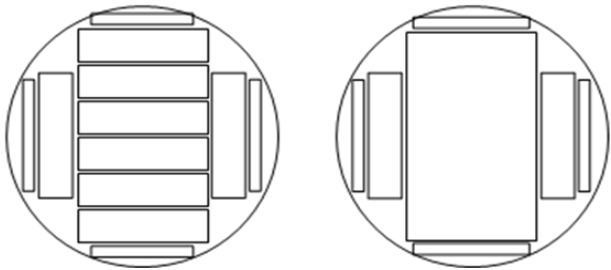


図 2-11 スギ中大径材の木取り 末口径 28cm

表 2-7 含水率選別の有無による乾燥経費の違い

項 目	単 位	選別なし	選別あり	
			低含水率	高含水率
乾 燥 日 数	日/回	27	16	27
年 間 回 転 数	回/年	12	8	8
年 間 生 産 量	m ³ /年	600	400	400
月 間 生 産 量	m ³ /月	50	33	33
初 期 含 水 率	%	120	75	145
目 標 含 水 率	%	20	20	20
生材1m ³ あたり脱水量	kg/m ³	288	176	400
不 良 品 率	%	4	2	2
乾 燥 経 費	円/m ³	15,359	10,062	17,344
乾 燥 経 費 (平均)	円/m ³	15,359	13,703	

オ 今後の問題点

中・大径木を対象とした効率の良い選別・製材・乾燥システムを提案することができた。しか

し、今後供給が見込まれる大径材から生産可能な大断面製材品の製材・乾燥システムの構築には至っていない。大径材から大断面製材品を生産するための製材・乾燥システムを確立することが必要とされる。

カ 要約

スギ大丸太 75 本（末口径 30.3cm～43.8cm（平均末口径 34.8cm）、長さ 3.0m 及び 3.65m）を挽き材試験用供試丸太とした。供試丸太の推定含水率 u_e は 57.6～144.2%（平均 91.9%、標準偏差 19.5%）で、動的ヤング率 E_{fr} は、5.1～10.0GPa（平均 7.2GPa、標準偏差 1.0GPa）であった。心去り正角を主製品とする 4 種類の木取りにより挽き材試験を行った。また、スギ心去り正角の乾燥において、乾燥前に含水率による選別を行うことによる経済効果について検討するために、スギ心去り正角を供試材とし、乾燥試験を一般的な乾燥スケジュール（70～80℃）によって行い、乾燥日数を推定した。

木取りによる形量歩止り、価値歩止りの大小は、1 本の丸太から挽き材された正角の数の大小と一致した。これは、正角の数が多い方が挽き道による歩止りの低下が少ないことによる。心去り正角の場合、心持ち正角と比較して曲がりが大きくなる傾向があるので分増しを大きくするなどの対応が必要であると考えられる。見かけの密度より算出した丸太推定含水率 u_e の場合より丸太ヤング率を応用して算出した丸太推定含水率 u_{ey} の場合に丸太推定含水率と製品含水率との関係の決定係数 R^2 が大きいことから、丸太含水率の推定に丸太ヤング率を応用することにより、正角製品の挽き材直後の含水率推定の精度を高めることができると考えられる。中大径材を加工する製材工場として、年間原木消費量約 24,000m³ の規模では、ノーマンツイン帯鋸盤を主機とし、リングバーカ、オートテーブル帯鋸盤、横型帯鋸盤、ツインリップ、ダブルエジャ、チップなどから構成されるラインが考えられ、そのラインにおいて、人工乾燥してモルダ掛けした仕上げ材の製造経費は 62,614 円/製品 m³ となる。

含水率選別を行った場合は、選別を行った場合の乾燥経費は 13,832 円となり、行わない場合に比べて木材 1m³ あたり、約 1,600 円（約 12%）の経費節減が見込まれた。これは、初期含水率による選別で過乾燥材を減らせることが主な要因である。

キ 引用文献

松村ゆかり他（2004）木材工業、59(12)、591-594

村田光司、伊神裕司、松村ゆかり（2010a）森林総合研究所交付金プロジェクト研究成果集、No. 26、7-11

村田光司、伊神裕司、松村ゆかり（2010b）森林総合研究所交付金プロジェクト研究成果集、No. 8、30-35

（森林総合研究所加工技術研究領域 村田光司、伊神裕司、松村ゆかり、小林功）