

## 資 料

## 縦振動ヤング率を用いたスギ中径材および粗挽き平角材の含水率推定方法の検討

## Examination of moisture content estimation methods for medium-diameter sugi logs and rough-sawn square timbers using dynamic modulus of elasticity by longitudinal vibration

山吉栄作<sup>1)</sup>\*・中山伸吾<sup>1)</sup>Eisaku Yamayoshi<sup>1)</sup>\* and Shingo Nakayama<sup>1)</sup>

**要旨：**スギ中径材を対象に、丸太の段階で非破壊かつ比較的容易に測定できる縦振動ヤング率を用いて、丸太の含水率と、製材後の粗挽き平角材の含水率の推定を試みた。丸太の縦振動ヤング率と容積密度数を調査した結果、両者の間には高い相関が確認されたため、その相関より求めた推定容積密度数と生材密度から丸太の含水率を推定した。その推定含水率と実測含水率の間には高い相関が認められ、丸太の含水率は縦振動ヤング率を測定することで推定できることが示された。また、丸太の推定含水率は、製材後の粗挽き平角材の実測含水率との間にも高い相関が認められ、さらに丸太を番玉別に区分することでより高い相関が得られることが確認された。これより、粗挽き平角材の含水率は、番玉別で求めた丸太の推定含水率より推定可能であることが示された。

**キーワード：**スギ中径材、縦振動ヤング率、容積密度数、粗挽き平角材、生材密度、含水率、番玉

## はじめに

本県は、県土面積の約 64 % (約 37 万 2 千 ha) が森林であり、うち民有林率が 93.7 % と、全国平均の 69.2 % に比べ非常に高い。また、民有林における人工林率は 62.5 % であり、その主要林木であるスギ、ヒノキの蓄積量は全体の 95 % を占め、森林資源として豊富に有している (三重県 2025)。しかし、民有人工林のスギ・ヒノキの齢級別森林資源構成では、11 齢級以上の合計面積が全体の 8 割以上を占めており、標準伐期齢に達しても主伐が進まず、年々、高齢級化している状況にある。

そのため、今後、高齢級林から伐出されるスギ中・大径材の利活用が喫緊の課題であり、柱材だけでなく、梁桁等の平角材や板類としての用途拡大を図っていく必要がある。その際に、スギ中・大径材から心持ち平角材 (以下、平角材) を採材し、梁桁として利用する場合に課題となるのが乾燥である。平角材のように断面の大きな材の場合、乾燥割れの発生を抑制しつつ、中心まで均一に乾燥させることが難しいため、その有効な乾燥方法の一つとして、乾燥初期に蒸煮と高温低湿処理 (ドラインセット) で表面割れの発生を抑制しつつ、その後、中温低湿の乾燥スケジュールまたは天然乾燥で内部割れの発生を抑えながら、目標とする含水率まで乾燥させる方法が研究されてきている (福本ら 2011, 日高ら 2015, 豆田・田口 2012, 武智・越智 2004, 吉田ら 2004)。しかし、製材直後のスギ平角材の含水率は、ばらつきが大きく、高いものは 100 % を超えているため、これらを総じて同一の乾燥スケジュールで人工乾燥を行った場合、仕上がり含水率が揃わず、過乾燥材や未乾燥材を生じる可能性が高くなる。したがって、人工乾燥を行う際は、乾燥前に、含水率と相関のある重量で選別を行い、各重量区分に応じた

<sup>1)</sup> 三重県林業研究所

Mie Prefecture Forestry Research Institute

\* E-mail: yamaye00@pref.mie.lg.jp

乾燥スケジュールで行うことが有効である（伊藤 2006, 海本・寺西 2008, 三好・村口 1998, 寺西ら 2011）。一方、平角材のような大断面材において、乾燥前の含水率が 100 %を超えるような高含水率材は、乾燥させるのに時間とエネルギーを多く消費し、乾燥コストの増大につながるため、比較的乾燥の容易な板類や小断面材の用途に切り替えた方が効率的かつ経済的である。ただし、一旦、平角材に製材してから挽き直しが必要となるため、製材効率や歩留まりが落ちることが課題である。そのため、製材前の丸太の段階で、製材後の粗挽き平角材の含水率を推定することができれば、求められる粗挽き平角材の含水率に応じて丸太を選別することが可能となり、製材時のロスを抑えることが期待できる。

そこで、本試験では、スギ中径材（以下、丸太）を対象に、比較的容易に測定可能な縦振動ヤング率を用いて丸太の含水率を推定するとともに、その推定含水率と製材後の粗挽き平角材の含水率の関係を調査し、丸太の推定含水率から粗挽き平角材の含水率が推定できるか検討を行った。

## 材料と方法

### 1. 縦振動ヤング率を用いた丸太の含水率の推定

#### 1. 1. 供試丸太

供試丸太は、末口径 24~26 cm, 材長 4 m の伐倒直後のものを、2 回に分けて県内 7 地域から調達を行った。なお、調達対象の地域と本数は、1 回目（2015 年 6 月）が鈴鹿市産 10 本、津市（美杉町）産 20 本、松阪市（飯高町）産 20 本で 3 地域から計 50 本（全て元玉）、2 回目（2015 年 11 月）が伊賀市産、大紀町産、尾鷲市産、熊野市産の 4 地域から各 10 本ずつの計 40 本（元玉と 2 番玉の混在）とした。

#### 1. 2. 丸太の縦振動ヤング率の測定

供試丸太の生材密度  $D_{\log}$  は、丸太をスリングで吊ってクレーンスケール OCS-L300 kg（クレーンスケール本舗）で計測した生材重量  $W_{\log}$  と、丸太を円錐台とみなして (1) 式より算出した生材体積  $V_{\log}$  を用いて、(2) 式より求めた。なお、末口径  $D_t$  と元口径  $D_b$  は直径巻尺、材長  $L$  は巻尺を用いて計測した。また、丸太の縦振動ヤング率  $E_{\log}$  は、タッピング法を用いて、木口打撃により発生した固有振動周波数  $f$  を FFT アナライザ CF-4210Z（小野測器）で測定し、(3) 式より求めた。

$$V_{\log} = 1/3 \times \pi \times \{ (D_t / 200)^2 + (D_t / 200) \times (D_b / 200) + (D_b / 200)^2 \} \times L \quad (1)$$

$V_{\log}$ : 丸太（円錐台）の生材体積 ( $\text{m}^3$ ),  $D_t$ : 末口径 (cm),  $D_b$ : 元口径 (cm),  $L$ : 材長 (m)

$$D_{\log} = W_{\log} / V_{\log} \quad (2)$$

$D_{\log}$ : 丸太の生材密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ),  $W_{\log}$ : 丸太の生材重量 (kg)

$$E_{\log} = (2 \times L \times f)^2 \times D_{\log} / 10^9 \quad (3)$$

$E_{\log}$ : 丸太の縦振動ヤング率 (GPa),  $f$ : 固有振動周波数 (Hz)

#### 1. 3. 丸太の容積密度数と含水率の測定

丸太の容積密度数と含水率の測定にあたり、丸太から 3 枚の円盤を採取した。円盤の採取は、木口端部から長さ方向に約 1 m 間隔となる位置において、それぞれ約 3 cm 厚の円盤を 1 枚ずつ採取した。その後、各円盤をブロック片に分割し、各ブロック片の容積密度数  $\rho_{\text{blk}}$  と含水率  $U_{\text{blk}}$  を測定した。なお、分割においては、調達 1 回目の円盤は、最初に円盤の髓を通る任意の直径方向において約 3 cm 幅の棒



写真-1. 浮力法を用いた各ブロック片の生材体積の測定状況

状片を採取し、さらにその髓を基点に、両外側（樹皮側）に向かって約 2 cm 幅の等間隔で、サイコロ状のブロック片（サイコロ片）に鉋を用いて分割した（藤原 2011）。一方、調達 2 回目の円盤は、円盤の髓を中心に、中心角 45° の 8 等分で、扇形状のブロック片（扇形片）に鉋を用いて分割した。

また、各ブロック片の容積密度数は、浮力法を用いて測定した生材体積  $V_g$ （写真-1）と、 $103 \pm 2$  °C の温度で恒量に達するまで乾燥させた時の全乾重量  $W_0$  を用いて、(4) 式により算出した（藤原 2014）。なお、生材体積は、水の密度を  $1.0$  ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) とし、ブロック片を水中に沈めることで増加した分の秤量値と生材体積は等しいと見なして求めた。

次に、各ブロック片の含水率は、電子秤で測定した生材重量  $W_g$  と全乾重量  $W_0$  を用いて、(5) 式より算出した。

$$\rho_{\text{blk}} = W_0 / V_g \times 1000 \quad (4)$$

$\rho_{\text{blk}}$  : ブロック片の容積密度数 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ),  $W_0$  : 全乾重量 (g),  $V_g$  : 生材体積 ( $\text{cm}^3$ )

$$U_{\text{blk}} = (W_g - W_0) / W_0 \times 100 \quad (5)$$

$U_{\text{blk}}$  : ブロック片の含水率 (%),  $W_g$  : 生材重量 (g)

円盤全体の容積密度数と含水率は、調達 1 回目の場合、サイコロ片の各測定値を、髓から採取位置までの距離に応じて、髓を対称とする半円盤に占める部分の面積により重み付けし、それらの合計値を半円盤の面積で除すことで算出した各半円盤の数値の平均値より求めた。

一方、調達 2 回目の方は、扇形片の各測定値を、扇形片の生材体積を用いて重み付けし、それらの合計値を生材体積の合計値で除すことで、円盤全体の平均値として求めた。

また、丸太の実測容積密度数  $\rho_{\text{log-mv}}$  と実測含水率  $U_{\text{log-mv}}$  は、同一丸太から採取された円盤 3 枚の各数値の平均値より求めた。

#### 1. 4. 丸太の含水率の推定

丸太の推定含水率  $U_{\text{log-ev}}$  は、丸太の縦振動ヤング率と実測容積密度数の相関（単回帰式）から求めた推定容積密度数  $\rho_{\text{log-ev}}$  と、丸太の生材密度  $D_{\text{log}}$  を用いて、(6) 式より求めた。

$$U_{\text{log-ev}} = \{ (D_{\text{log}} - \rho_{\text{log-ev}}) / \rho_{\text{log-ev}} \} \times 100 \quad (6)$$

$U_{\text{log-ev}}$  : 推定含水率 (%),  $\rho_{\text{log-ev}}$  : 推定容積密度数 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

## 2. 丸太の推定含水率から粗挽き平角材の含水率の推定

### 2. 1. 粗挽き平角材の含水率の測定

粗挽き平角材の採材は、円盤採取後の長さ約1mの丸太から、木取り位置が同じになるように丸太の向きを揃えながら、各丸太の中心部から断面135mm×195mm角で製材する方法で行い、元丸太1本あたり材長約1mの粗挽き平角材4本を取得した。その後、粗挽き平角材の含水率は、材長方向の中央付近の無節部分から約3cm厚の角盤を1枚採取し、その角盤の含水率を全乾法により求めた。

また、丸太から材長そのまま断面135mm×195mm角で製材されたと想定した時の粗挽き平角材の実測含水率は、元丸太が同じ角盤4枚の平均値より求めた。

### 2. 2. 粗挽き平角材の含水率の推定

(6)式より求めた丸太の推定含水率と粗挽き平角材の実測含水率の相関を調べ、丸太の推定含水率から粗挽き平角材の含水率の推定を行った。

## 結果と考察

### 1. 縦振動ヤング率を用いた丸太の含水率の推定

供試丸太の各測定結果を表-1、表-2に示す。

表-1. 県内3地域産スギ中径材の各測定値（調達1回目）

スギ中径材	末口径	元口径	長さ	生材密度	容積密度数 (サイロ片基準)		含水率		縦振動 ヤング率
					$\rho \log\text{-mv}$	$\rho \log\text{-ev}$	$U \log\text{-mv}$	$U \log\text{-ev}$	
元玉 ( $n = 50$ )	$D_t$ (cm)	$D_b$ (cm)	$L$ (m)	$D \log$ ( $\text{kg/m}^3$ )	$\rho \log\text{-mv}$ ( $\text{kg/m}^3$ )	$\rho \log\text{-ev}$ ( $\text{kg/m}^3$ )	$U \log\text{-mv}$ (%)	$U \log\text{-ev}$ (%)	$E \log$ (GPa)
最小値	24.7	28.1	4.026	496	272	298	72.0	51.9	5.81
平均値	25.9	31.1	4.053	678	328	328	114.2	107.4	8.05
最大値	28.1	34.1	4.086	864	385	360	180.5	171.5	10.50
標準偏差	0.7891	1.627	0.0141	71.12	25.31	14.45	25.76	23.65	1.088
変動係数	3.0%	5.2%	0.3%	10.5%	7.7%	4.4%	22.6%	22.0%	13.5%

表-2. 県内4地域産スギ中径材の各測定値（調達2回目）

スギ中径材	末口径	元口径	長さ	生材密度	容積密度数 (扇形片基準)		含水率		縦振動 ヤング率
					$\rho \log\text{-mv}$	$\rho \log\text{-ev}$	$U \log\text{-mv}$	$U \log\text{-ev}$	
元玉 ( $n = 15$ )	$D_t$ (cm)	$D_b$ (cm)	$L$ (m)	$D \log$ ( $\text{kg/m}^3$ )	$\rho \log\text{-mv}$ ( $\text{kg/m}^3$ )	$\rho \log\text{-ev}$ ( $\text{kg/m}^3$ )	$U \log\text{-mv}$ (%)	$U \log\text{-ev}$ (%)	$E \log$ (GPa)
最小値	24.8	29.6	4.045	596	296	306	78.5	86.3	7.06
平均値	26.1	32.5	4.051	707	331	325	116.4	117.6	8.42
最大値	27.7	34.5	4.060	786	359	353	146.9	145.5	10.35
標準偏差	0.9088	1.253	0.0046	73.04	19.21	13.48	23.24	23.02	0.9573
変動係数	3.5%	3.9%	0.1%	10.3%	5.8%	4.1%	20.0%	19.6%	11.4%
スギ中径材	末口径	元口径	長さ	生材密度	容積密度数 (扇形片基準)		含水率		縦振動 ヤング率
2番玉 ( $n = 25$ )	$D_t$ (cm)	$D_b$ (cm)	$L$ (m)	$D \log$ ( $\text{kg/m}^3$ )	$\rho \log\text{-mv}$ ( $\text{kg/m}^3$ )	$\rho \log\text{-ev}$ ( $\text{kg/m}^3$ )	$U \log\text{-mv}$ (%)	$U \log\text{-ev}$ (%)	
最小値	25.1	27.4	4.030	683	291	306	84.6	99.8	7.06
平均値	26.0	29.4	4.050	806	337	340	124.9	137.4	9.45
最大値	27.1	32.1	4.063	963	394	388	156.5	194.8	12.90
標準偏差	0.5553	1.258	0.0076	81.35	25.89	19.36	19.36	23.72	1.375
変動係数	2.1%	4.3%	0.2%	10.1%	7.7%	5.7%	15.5%	17.3%	14.5%

また、丸太の縦振動ヤング率と実測容積密度数の関係を、容積密度数の測定時に用いた円盤のブロック片の種類別（サイコロ片，扇形片）に図-1に示す。相関係数 $r$ は、サイコロ片基準の場合0.571 ( $P < 0.01$ )，扇形片基準の場合0.791 ( $P < 0.01$ )であり，両者とも高い相関が見られたが，縦振動ヤング率との関係は扇形片を用いて測定した容積密度数の方がより高い相関を示すことが確認された。この要因としては，容積密度数の測定において，円盤の一部のブロック片を用いたサイコロ片基準より，円盤全てのブロック片を用いた扇形片基準の方が，より真に近い丸太の容積密度数を表しているためと考えられた。

以上より，丸太の容積密度数は丸太の縦振動ヤング率から推定可能であるが，推定においては扇形片基準の単回帰式（図-1b）を用いた方が，より精度良く推定できることが示された。

次に，図-1の各単回帰式を基に，丸太の縦振動ヤング率から推定した各推定容積密度数と生材密度を用いて（6）式より丸太の推定含水率を算出し，その推定含水率と全乾法より求めた丸太の実測含水率の

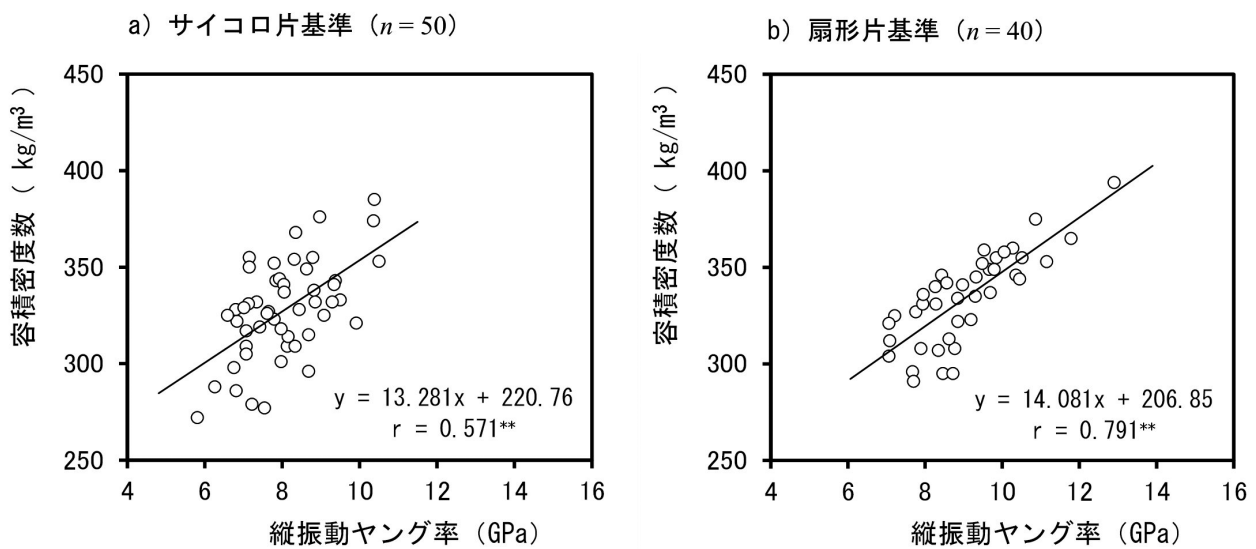


図-1. 丸太の縦振動ヤング率と容積密度数（実測）の関係

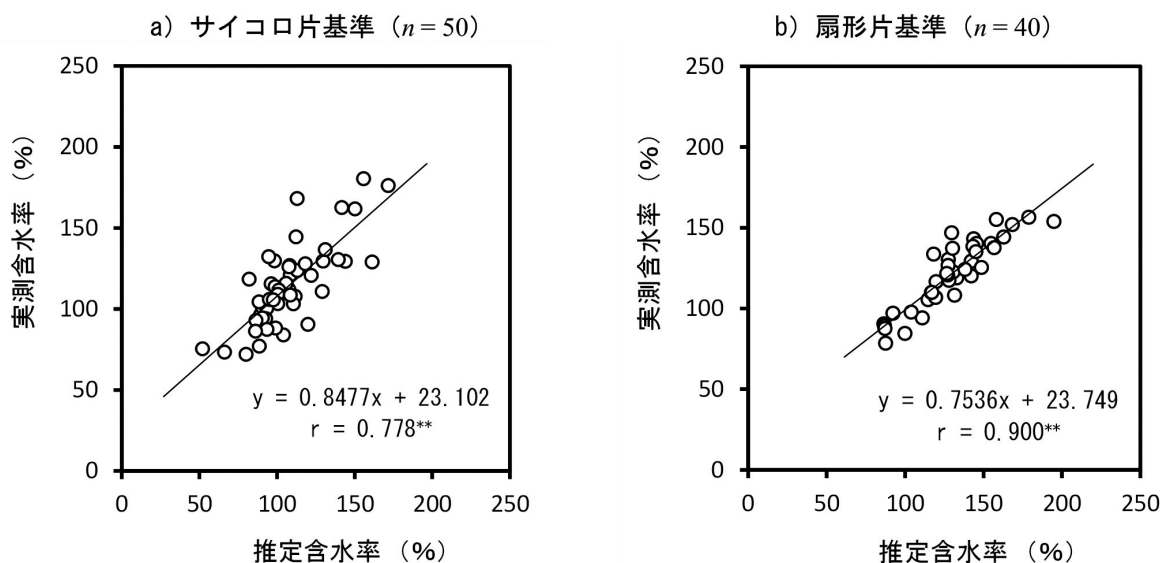


図-2. 丸太の推定含水率と実測含水率の関係

関係を図-2 に示す. その結果, サイコロ片基準, 扇形片基準ともに両者の間には有意な相関が見られたが, 特に扇形片基準の相関係数は 0.900 ( $P < 0.01$ ) と非常に高い相関が認められた. これは, 図-3 に示す丸太の生材密度と実測含水率 (扇形片基準) の相関係数 0.713 ( $P < 0.01$ ) より高く, 生材密度から推定するより推定精度が向上すると判断できる. このことは, 藤原 (2011) の試験結果においても同様の報告が見られる.

以上より, 丸太の縦振動ヤング率と容積密度数の相関が明らかとなれば, 丸太の含水率は, 丸太の縦振動ヤング率から推定した容積密度数と生材密度より精度良く推定できることが示された.

本結果において, より相関の高かった扇形片基準の単回帰式 (図-1b) を用いて, 全ての丸太を対象に, 縦振動ヤング率から容積密度数を推定し, その推定容積密度数と生材密度から丸太の推定含水率を求めた. その丸太の推定含水率と粗挽き平角材の実測含水率の関係を図-4 に示す. さらに, 丸太の番玉別に区分したものを図-5 に示す.

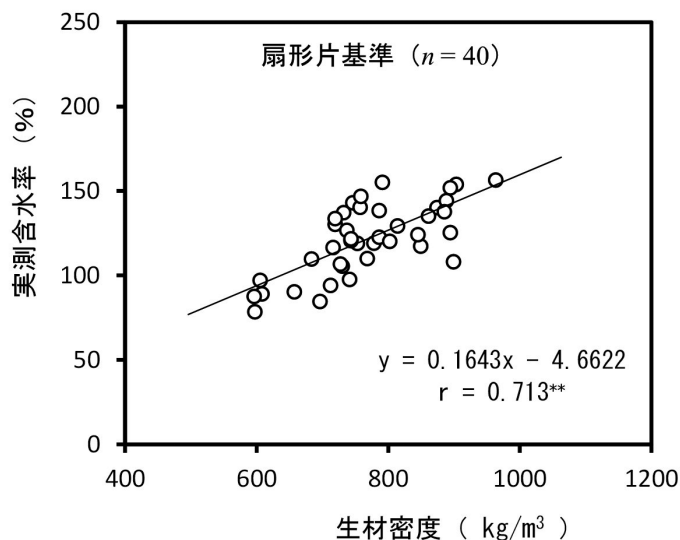


図-3. 丸太の生材密度と実測含水率の関係

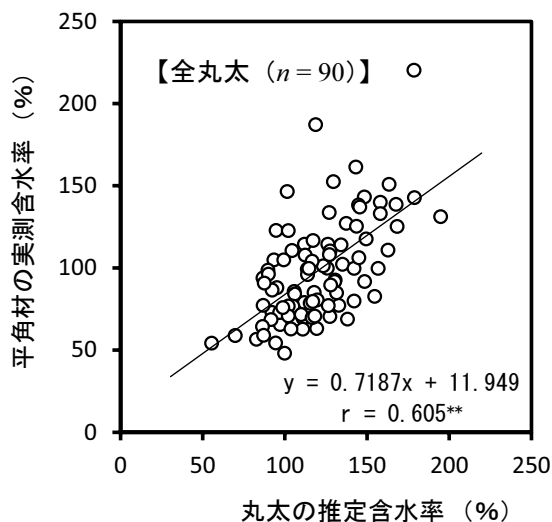


図-4. 丸太の推定含水率と平角材の実測含水率の関係

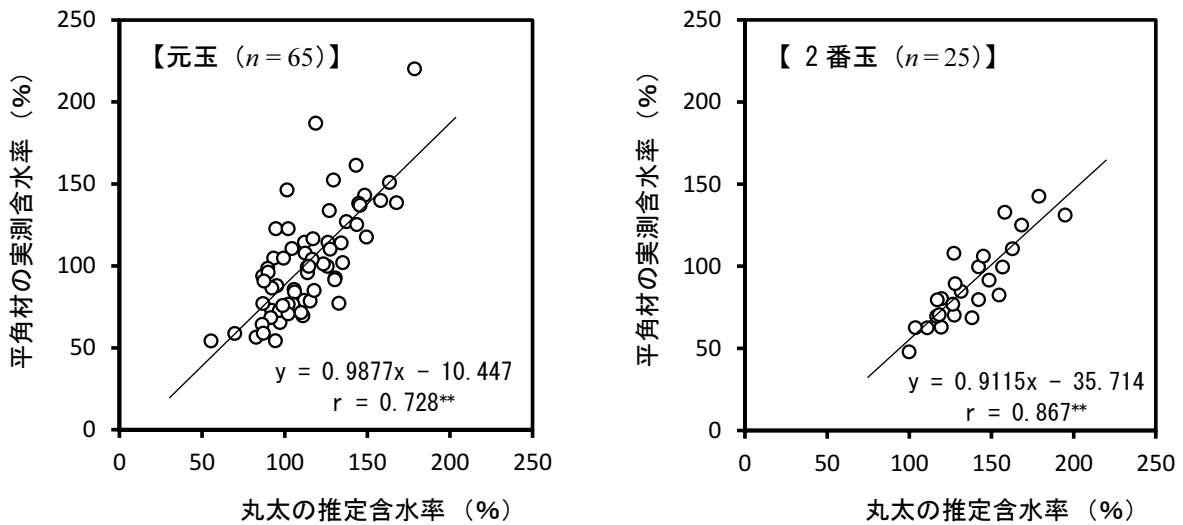


図-5. 丸太（番玉別）の推定含水率と平角材の実測含水率の関係

丸太の推定含水率と粗挽き平角材の実測含水率の間には、全丸太、元玉、2番玉のいずれも有意な相関が見られたが、番玉別に区分した方がより高い相関が得られた。また、元玉の場合、丸太の推定含水率と粗挽き平角材の実測含水率はほぼ1:1の関係であるのに対し、2番玉の場合、粗挽き平角材の実測含水率は、丸太の推定含水率より50%程度低かった。この要因としては、2番玉の含水率は、丸太断面の半径方向において水分傾斜が大きく、平角材を採材する中心部より、外周部の方が高かったためと考えられる。

以上のことから、丸太の推定含水率から粗挽き平角材の含水率を推定する際は、番玉で区分した方が推定精度が向上し、また初期含水率の低い粗挽き平角材は、元玉より2番玉の丸太から採材した方が調達しやすいことが示唆された。

### おわりに

以上、縦振動ヤング率を用いた丸太の含水率の推定について検討を行ったが、この推定法は丸太の縦振動ヤング率と容積密度数の関係が概知であることが前提となる。藤原(2011)は、この両者の関係は中小径材と大径材で異なるため、それぞれの容積密度推定式が必要になると報告している。このため、今後、大径材に適用する際は改めて調査し、推定式(単回帰式)の妥当性を検討する必要があること、また丸太の番玉の違いにより推定式が変わるのかを検証することが重要であり、これらは今後の課題である。

### 謝辞

本研究は、公益財団法人岡三加藤文化振興財団の研究助成を受けたものである。また、本研究の実施にあたり、井面美義氏(元職員)、浅井俊次氏をはじめ三重県林業研究所の多くの職員に多大なるご尽力をいただいた。ここに記し、感謝の意を表す。

### 引用文献

藤原 健(2011) 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. 森林総合研究所交付金プロジェクト研究成果集 35:6-10.

- 藤原 健 (2014) 木材の密度について. 海外の森林と林業 90 : 37-39.
- 福本浩士・中山伸吾・宮本正行 (2011) 表面割れと内部割れの少ない三重県産スギ平角材の乾燥スケジュールの開発. 三重県林業研報 3: 1-12.
- 日高富男・福留重人・中原 亨・山角達也・山之内清竜 (2015) 大径材から得られるスギ製材品の最適な乾燥技術の確立 (第 1 報) -心持ち平角材の乾燥技術-. 鹿児島県工技セ研報 29:59-62.
- 伊藤憲吾 (2006) 高周波・蒸気複合乾燥によるスギ心持ち平角の乾燥特性. 静岡県林技セ研報 34 : 31-35.
- 海本 一・寺西康浩 (2008) スギ柱材の中温乾燥における重量選別基準の検討 (第 1 報). 奈良県森技セ研報 37 : 55-58.
- 豆田俊治・田口孝男 (2012) スギ平角材の最適乾燥材生産システムの開発 -大分方式乾燥および高周波蒸気複合乾燥による期間短縮-. 大分県農林水産研究指導センター研報 2 : 1-7.
- 三重県 (2025) 令和 5 年度版 森林・林業統計書. 三重県農林水産部
- 三好誠治・村口良範 (1998) スギ正角の選別による乾燥について. 愛媛県林試研報 19: 65-69.
- 武智正典・越智仁夫 (2004) スギ心持ち角材の高温乾燥スケジュール. 愛媛県林技研報 22: 46-56.
- 寺西康浩・海本 一・大森 拓 (2011) スギ柱材の高温乾燥における重量選別の効果. 奈良県森技セ研報 40 : 21-26.
- 吉田孝久・橋爪丈夫・武田孝志・徳本守彦・印出 晃 (2004) スギ心持ち無背割り柱材の高温乾燥における高温セット法の割れ防止効果について. 材料 53 : 364-369.