

令和6年度 木材製品の消費拡大対策のうち

CLT建築実証支援事業のうちCLT等木質建築部材技術開発・普及事業

「天然乾燥材を JAS 機械等級区分構造用製材の含水率基準で
選別する技術の開発」

報告書

令和8年2月
株式会社 フジイチ

〈目次〉

はじめに	- 1 -
第1章 事業の概要	- 3 -
1 目的	- 3 -
2 検討委員会の構成.....	- 4 -
3 実施体制	- 5 -
4 検討委員会の開催.....	- 6 -
第2章 試験内容	- 7 -
1 試験方法	- 7 -
1.1 試験の流れ	- 7 -
1.2 試験体の選定.....	- 7 -
1.3 端部の全乾密度・含水率の測定.....	- 12 -
1.4 含水率の測定.....	- 13 -
1.5 検量線の作成.....	- 17 -
1.6 水分傾斜	- 18 -
1.7 材面割れ	- 19 -
2 試験結果	- 20 -
2.1 試験体の選定状況.....	- 20 -
2.2 端部の全乾密度・含水率.....	- 25 -
2.3 検量線	- 27 -
2.4 測定精度の検証.....	- 35 -
2.5 携帯型高周波押し当て式水分計での測定結果.....	- 44 -
2.6 水分傾斜	- 45 -
2.7 材面割れ	- 47 -
第3章 まとめ	- 49 -
1 試験成果のまとめ.....	- 49 -
2 今後の課題・展開等.....	- 49 -
参考文献	- 49 -

はじめに

かつての木造建築は、内外を問わず全て天然乾燥材だったといっても過言ではない。それがいつしか、時代の要請やニーズの変化により、人工乾燥材による供給に対する要望が強くなり、年々その比率は高まっている。これにより、生産者は品質の確かな乾燥材供給を目指すには天然乾燥よりも人工乾燥を選択する機会が増え、設計者は含水率管理が確かな人工乾燥材を要求する傾向が強くなり、消費者は品質の確かな人工乾燥材による木造建築を手に入れることが当たり前の時代を迎えるようになった。

一方、社会的動向は、画一的な価値観から多様化の時代に移行しつつあり、木造建築分野も例外ではなく、住宅供給が専らだった時代から純木造ビルが都会に出現するなど正に木造建築多様化の時代を迎えつつある。これにより、木造建築分野が今後益々拡大していく可能性が高いが、そのために必要不可欠なのは、品質の確かな木材製品を供給できる体制である。

品質の確かな木材製品で木造建築分野の拡大に対応するには、例えば、ヤング係数・含水率・品質管理が明確な JAS の機械等級区分構造用製材が有効であるが、現行の製材 JAS 規格では、生産する製材を機械等級区分構造用製材として格付けできるのは、人工乾燥材のみで天然乾燥材はできない。そのため、多くの選択肢が存在することが望まれる木造建築分野において、天然乾燥材の利用は、伝統建築や在来軸組工法の一部に限定されるに留まり、多様化する社会に十分対応しているとは言い難い。言い換えると、人工乾燥した人工乾燥材には人工乾燥の、天然乾燥した天然乾燥材には天然乾燥のそれぞれ良さと悪さが存在するのだから、それらを同じ基準で評価できる仕組みこそが、多様化する社会にとって重要と考える。

そして、このような状況に対応していくには、生産者にとっては、2025 年に改正した製材の日本農林規格 (JAS1083:2025) で新たに規定した曲げヤング係数の平均値基準への対応はもちろんのこと、非破壊含水率計の精度向上、天然乾燥の標準品質管理マニュアルの整備に取り組む必要がある。また、設計者にとっては、従来の住宅分野から非住宅分野に市場を展開する上で、部材ごとに要求される強度や乾燥区分の把握に努め、単一の等級や乾燥区分に固執するのではなく、入手可能な上位等級、入手しやすい標準もしくは下位等級を適材適所で使い分けするのはもちろん、天然乾燥材であるが故の現し納まりにおける含水変化に伴う材面割れの許容範囲の明確化が重要となる。更に、消費者にとっては、品質の確かな JAS 材を使うことで木造建築の構造安全性と快適性を得ることは当然のことながら、天然乾燥材ならではのこだわりの質感とアピールに繋げられるかが課題である。

本事業は、これらの課題解決に取り組むものだが、その推進にあたっては、静岡県農林技術研究所 森林・林業研究センターの長瀬亘氏をはじめ多くのスタッフには、お忙しい中、膨大な数の現地測定を実施して頂き、天然乾燥に関する貴重な実験データを得ることができた。また、マイクロメジャー（株）の杉山晃広氏にはマイクロ波による木材の含水率に関する非破壊評価に多大なるご協力を頂いた。この場を借りて、お礼申し上げます。

最後に、本事業の実施にあたり、基本構想を打ち立てた（株）フジイチ社長の石野秀一氏に敬意を表するとともに、事務局の主軸を担った（株）フジイチの小峰裕美氏、大内稔也氏と両氏にご協力頂いたスタッフの皆様に感謝申し上げます。

「天然乾燥材を JAS 機械等級区分構造用製材の含水率基準で選別する技術の開発」

検討委員会

委員長

森林総合研究所 構造利用研究領域 チーム長

加藤英雄

第1章 事業の概要

1 目的

天然乾燥処理は、環境負荷を抑える乾燥方法として注目されており、住宅用構造材市場においても一定の利用実績がある。一方で、設計者等からは、乾燥品質の観点において、グリーン材に近い含水率のまま提供されているのではないかとの懸念が示されている。

実際、現行の JAS 規定では天然乾燥処理の基準含水率は 30%とされており、構造材としての利用を考慮すると乾燥材としての対応は十分とは言い難い。

また、天然乾燥処理は、人工乾燥機を使用せず自然の外気で乾燥を行う方法であるため、自然環境に左右されやすく、人工乾燥処理とは異なり、乾燥条件を一定に保つことは困難である。このため、測定機器を用いて、最終製品の含水率を全数検査で選別する必要があると考えられる。マイクロ波透過型の含水率計では、20%以下であれば全乾法の含水率との非常に強い相関が確認されており¹⁾、測定器として期待できる。しかし、天然乾燥材と人工乾燥材では、水分傾斜が異なる等の理由から、人工乾燥材とは異なる検量線を設ける必要があると考えられる。

本事業では、天然乾燥材の含水率の品質評価手法を確立し、計器による含水率評価の検証を行うことで、天然乾燥材が JAS の機械等級区分構造用製材に対応可能となる技術開発を目的とする。

2 検討委員会の構成

敬称略、順不同

区 分	氏 名	所 属
委員長	加藤英雄	国立研究開発法人森林研究・整備機構
委 員	村野朋哉	国立研究開発法人森林研究・整備機構
	小林研治	東京大学 大学院農学生命科学研究科
	小川敬多	静岡大学大学院農学領域
	杉山晃広	マイクロメジャー株式会社
	長瀬亘	静岡県農林技術研究所森林・林業研究センター
	白井達也	静岡県農林技術研究所森林・林業研究センター

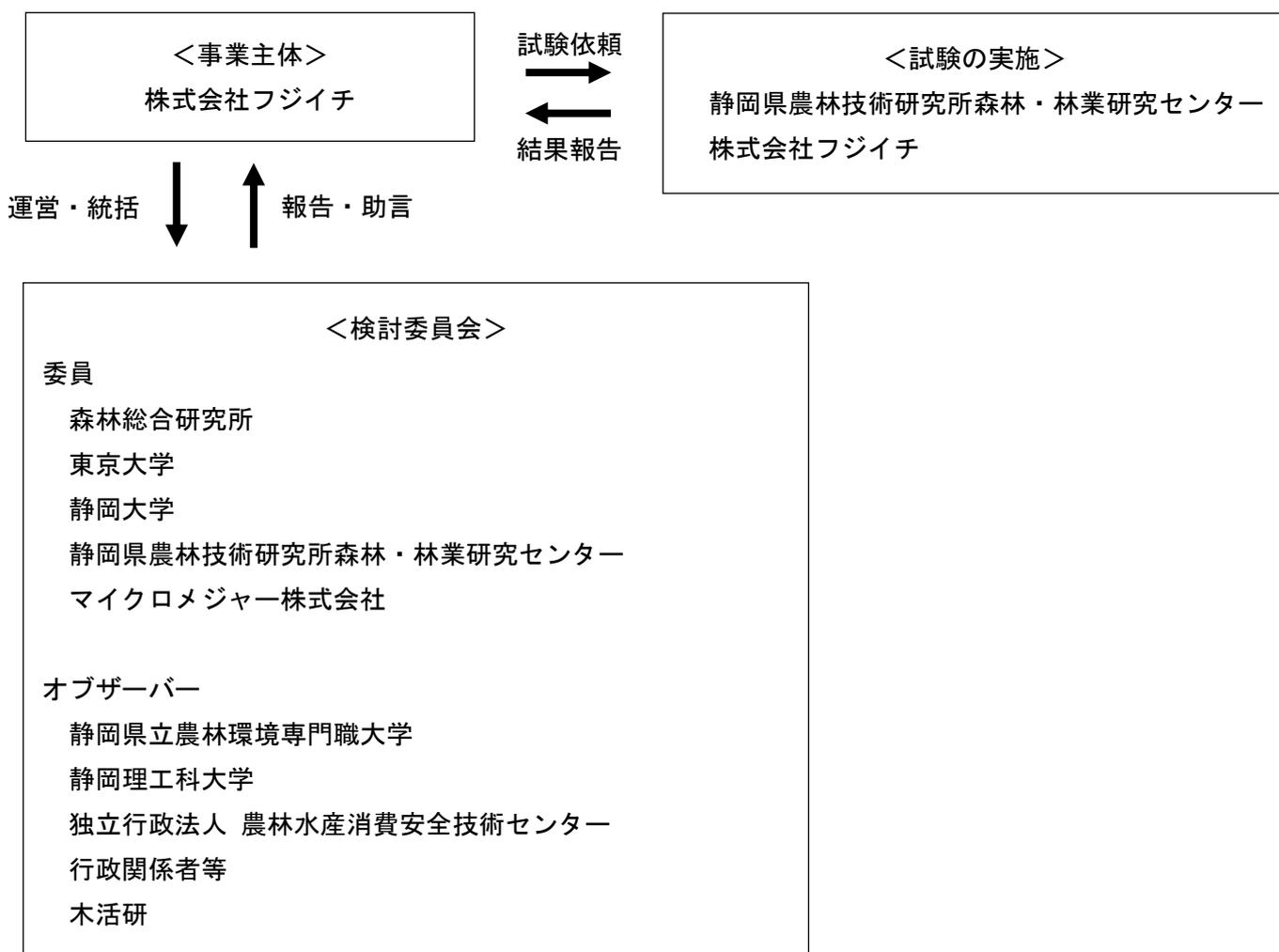
区 分	氏 名	所 属
オブザーバー	今村正輝	独立行政法人 農林水産消費安全技術センター
オブザーバー	佐藤秀憲	農林水産省大臣官房 食品製造課
オブザーバー	田村堯大	農林水産省大臣官房 食品製造課
オブザーバー	川原聡	林野庁林政部 木材産業課
オブザーバー	田中香織	林野庁林政部 木材産業課
オブザーバー	森口幹太	林野庁林政部 木材産業課
オブザーバー	藤本清彦	静岡県立農林環境専門職大学
オブザーバー	石川春乃	静岡理工科大学理工学部建築学科
オブザーバー	平原章雄	木構造振興株式会社
事務局	小峰裕美	株式会社フジイチ

3 実施体制

事業の実施にあたっては、事業主体である株式会社フジイチを事務局として、事業全体の実施計画書を作成および事業の進行・管理を行った。

また、木材乾燥、木材・木材加工分野の有識者、公設試験機関、JAS 製品登録認証機関の担当者、関連行政担当者等を構成員とする検討委員会を設置し、試験手法の検討や試験結果に関する助言を受けた。

【実施体制図】



4 検討委員会の開催

検討委員会は3回開催し、主な内容を以下のとおりである。

第1回検討委員会

- 日 時： 令和7年7月25日（金）15時-17時
形 式： 対面とオンラインによるハイブリット形式
場 所： CSA ペガサート貸会議室（静岡市葵区御幸町）およびWeb（Zoom 利用）
出席者： 22名
主な内容：
 - ・今年度事業概要と天然乾燥材製造状況説明
 - ・今年度試験内容のご説明
 - ・今後の展開について
 - ・質疑応答

第2回検討委員会

- 日 時： 令和7年12月4日（木）14時-16時
形 式： 対面とオンラインによるハイブリット形式
場 所： (株)フジイチ会議室(静岡県浜松市天竜区)およびWeb 開催(Zoom 利用)
出席者： 25名
主な内容：
 - ・調査結果について
 - ・今年度の報告書と成果報告会について
 - ・今年度の今後の予定について
 - 他県の状況と来年度の調査について
 - ・質疑応答

第3回検討委員会

- 日 時： 令和8年2月3日（火）15時-17時
形 式： 対面とオンラインによるハイブリット形式
場 所： アクトシティ浜松コンgresセンター（浜松市中央区板屋町）およびWeb（Zoom 利用）
出席者： 38名
主な内容：
 - ・報告書の概要説明
 - ・リーフレットについて
 - ・成果物の扱いについて
 - ・来年度試験内容について

第2章 試験内容

1 試験方法

1.1 試験の流れ

試験の流れを表 1.1-1 に示す。まず、天然乾燥土場より、固有振動数および携帯型水分計による事前の測定結果を用いて、水分計で測定可能な範囲の試験体を選定した。次に、端部より試験片を採取し、水分計の密度設定および検量線作成用と測定精度の検証用に分けるため、全乾密度および含水率の測定を行った。その後、静岡県内3箇所に設置された設置型水分計および携帯型水分計による測定を実施し、全乾法による含水率の測定を行った。最後に、検量線作成用の試験体について検量線を作成し、測定精度の検証用試験体では、検量線から算出した値と全乾法による含水率との比較を行った。なお、一部の試験体については、水分傾斜および材面割れの測定も実施した。

表 1.1-1 試験の流れ

段階	概要
1 試験体の選定	・固有振動数、携帯型水分計の測定で試験体を選定
2 端部の全乾密度・含水率の測定	・水分計の設定、検量線作成用と検証用の選別 (端部の全乾密度・含水率の測定)
3 含水率測定	・設置型水分計および、携帯型水分計での測定 ・全乾法による含水率の測定
4 検量線の作成	・検量線の作成と検証 ・測定精度の検証

1.2 試験体の選定

天然乾燥の状況を図 1.2-1 に示す。天然乾燥は、静岡県浜松市天竜区両島に所在する2箇所（阿多古、棚久保）の土場で実施しており、高さ約240mmの敷木の上に材料を積み、その上にトタン屋根を載せて保管している。天然乾燥材は、図 1.2-2 に示すとおり、ロット番号を付与しており、ロットごとの製造年月、ロット内の本数、製品時の寸法、心去・心持の別が分かるように管理されている。このうち、表 1.2-1 に示す試験体を水分計の測定範囲である含水率10～25%にばらつくよう選定するため、事前の測定を行った。なお、スギ平角については、測定結果によって断面を選定しなかったため、仕上げ材の断面寸法が、120mm×150mm（スギ150と称する）および120mm×210mm（スギ210と称する）の材料もこの段階では測定している。

在庫の含水率の概要を把握するため、積みしたままの状態、3次固有振動数の測定を行った。固有振動数の測定状況を図 1.2-3 に示す。固有振動数の測定には、スマートフォン型のGM-10（マイクロメジャー(株)製）を用いた。また、式(1.2-1)より、3次固有振動数が

ら密度を推定した。

$$\rho_{\text{est}} = \frac{E_{\text{fr}}}{(2Lf_3/3)^2} \cdot \cdot \cdot (1.2-1)$$

ここで、 ρ_{est} : 推定密度、 E_{fr} : 動的ヤング係数（スギ：7.0GPa、ヒノキ：10.0GPa と仮定）、 L :材の長さ（4.1m と仮定）、 f_3 : 3次固有振動数

固有振動数を測定した試験体のうち、水分計での測定範囲にばらつくよう試験体を最終的に選定するため、天然乾燥土場から材料を取り出し、図 1.2-4 に示すように寸法、質量および携帯型マイクロ波水分計（HM-10、マイクロメジャー(株)製）を用いて事前の測定を行った。HM-10 での密度、係数 a(傾き)、係数 b(切片) および厚さの設定値は、過去に人工乾燥材で実施された事例¹⁾を参考に、スギで、密度：0.36g/cm³、係数 a：0.362、係数 b：7.101、ヒノキで密度 0.44g/cm³、係数 a：0.470、係数 b：4.343 とし、厚さは材料の寸法に合わせて 137mm とした。HM-10 の測定位置は、両木口から内側に 30cm と中央部を測定した。HM-10 の測定値より試験体を選定し、試験体は図 1.2-5 に示すような修正挽きとモルダー加工を実施した。



図 1.2-1 天然乾燥の状況（上：阿多古、下：栩久保）



図 1.2-2 ロット番号での管理状況

表 1.2-1 試験体の寸法および数量

試験体の名称	樹種	仕上げ材の断面寸法	長さ	試験体数
スギ 120	スギ	120mm × 120mm	4m	50 本 (検量線作成用：20 本、 測定精度の検証用：30 本)
スギ 180	スギ	120mm × 180mm	4m	
スギ 240	スギ	120mm × 240mm	4m	
ヒノキ 120	ヒノキ	120mm × 120mm	4m	



図 1.2-3 固有振動数の測定状況

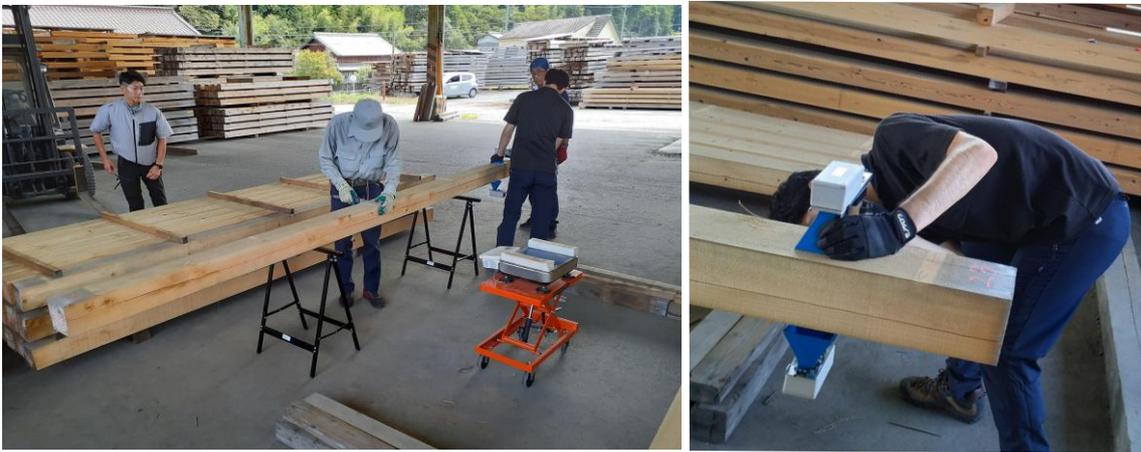


図 1.2-4 試験体選定のための寸法・質量および水分計による測定の状況



図 1.2-5 修正挽きの状況

1.3 端部の全乾密度・含水率の測定

マイクロ波水分計は、全乾密度を設定して測定するため、水分計での測定をする前に材料の端部から試験片を採取し全乾密度を測定した。また、検量線作成用と測定精度の検証用の試験体を、全乾密度と含水率のばらつくように選別するため、含水率の測定も行った。全乾密度設定用の試験片採取位置を図 1.3-1 に示す。ここでの試験片は、材端から 150 mm の位置を目安に、なるべく節のない位置で厚さ約 40 mm の試験片を採取した。測定した試験片を図 1.3-2 に示す。採取した試験片は、髓の位置をずらして 2 分割し、全乾時に変形が少ない方を用いて、寸法および質量から全乾密度を測定した。含水率は、2 分割した試験片の質量の総和から全乾法で測定した。

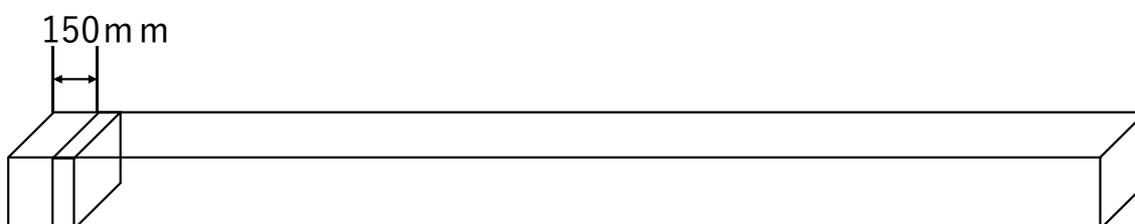


図 1.3-1 全乾密度設定用の試験片採取位置



図 1.3-2 端部から採取した試験片（全乾後）

1.4 含水率の測定

測定に用いた水分計を表 1.4-1 および図 1.4-1～図 1.4-4 に示す。使用した水分計はいずれも（公財）日本住宅・木材技術センターの認定機種である。設置型マイクロ波水分計については、機種は同一であるが、静岡県内の 3 工場に設置された異なる個体を用いて測定した。材料がライン上を長さ方向に移動する間、その中央部を連続的に測定し、得られたデータから製材 1 本につき 1 つの測定値を記録した。携帯型水分計および全乾法における含水率の測定位置を図 1.4-5 に示す。図 1.4-5 の位置を目安としたが、節を可能な限り避けたため、実際の測定位置は多少前後している。携帯型マイクロ波水分計は HM-10 の 1 機種を使用し、下側ホーンを材料中央部に接触させて測定した。携帯型高周波押し当て式では、各測定位置において表側および裏側の 2 か所を測定し、その平均値を当該測定位置の値とした。

水分計の設定画面を図 1.4-6 に示す。マイクロ波水分計の密度設定値には、各樹種・各断面について 1.3 節で測定した全乾密度の平均値を用い、係数 a は 1、係数 b は 0 とした。携帯型高周波押し当て式の 2 機種については、ばらつきが大きいことが予想されたため、検量線の作成は行わず、しずおか優良木材の密度設定値（HS-300：スギ 0.35、ヒノキ 0.40、HM-540：スギモード・ヒノキモード）を用いて測定した。

水分計での測定終了後、携帯型水分計で測定した位置から厚さ約 40mm の試験片を採取し、1.3 節と同様の方法により含水率および全乾密度を測定した。また、製材 1 本当たりの含水率は、両端から 300mm 内側の位置と中心の位置の 3 つの試験片の平均値とした。

表 1.4-1 使用した水分計

水分計の種類	機種名
設置型マイクロ波水分計	LA-1（マイクロメジャー（株）製）
携帯型マイクロ波水分計	HM-10（マイクロメジャー（株）製）
携帯型高周波押し当て式水分計	HS-300（マイクロメジャー（株）製）
	HM-540（（株）ケット科学研究所製）



図 1.4-1 使用した水分計 (LA-1)



図 1.4-2 使用した水分計 (HM-10)



図 1.4-3 使用した水分計 (HS-300)



図 1.4-4 使用した水分計 (HM-540)

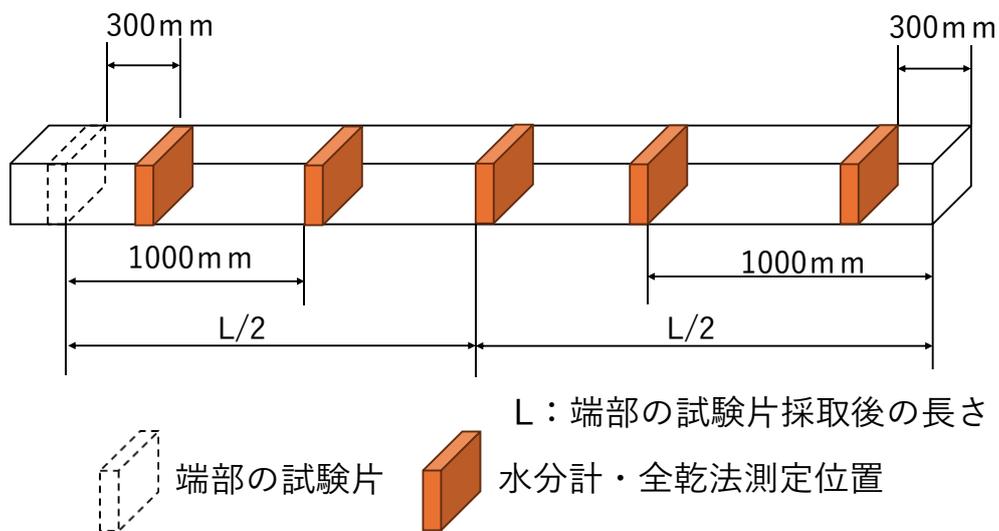


図 1.4-5 携帯型水分計および全乾法における含水率の測定位置

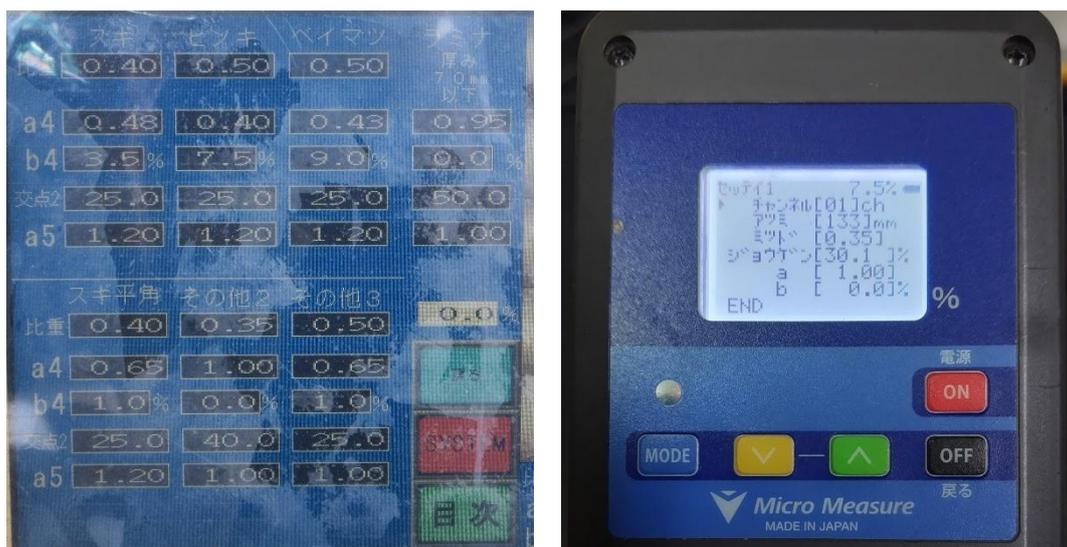


図 1.4-6 マイクロ波水分計設定画面 (左 : LA-1、右 : HM-10)

1.5 検量線の作成

1.3 節で測定した含水率と全乾密度の関係で散布図を作成し、含水率と全乾密度がばらつくように検量線作成用の試験体を選別した。含水率 25%を超えると、直線回帰が難しくなる恐れがあったため、検量線作成用の試験体には、1.3 節の試験片の含水率が 25%を超えるものを除外した。検量線作成用は各樹種・各断面で 20 本（携帯型は 100 測点）、測定精度の検証用は、各樹種・各断面で 30 本（携帯型は 150 測点）である。

測定精度の検証では、検量線作成用の試験体で得られた直線回帰式を用いた水分計の測定値と、全乾法による含水率とを比較した。測定精度は、二乗平均平方根誤差 RMSE（式(1.5-1)）を用いて評価した。

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \cdots (1.5-1)$$

ここで、 y_i : i 番目の実測値（全乾法の含水率）、 \hat{y}_i : i 番目の予測値（水分計の推定値）、 n : 試験体数

1.6 水分傾斜

含水率分布の状況を示すため、補足的に水分傾斜を測定した。試験体のうち、1.3 節で測定した含水率がばらつくように、各樹種・各断面から 10 体ずつ（ただしスギ 240 は 11 体）を選定し、水分傾斜の測定を行った。水分傾斜の測定は、長さ方向の中央部から厚さ約 25mm の試験片を採取して実施した。図 1.6-1 に示すように、各断面をナタで分割し、全乾法により含水率を測定した。

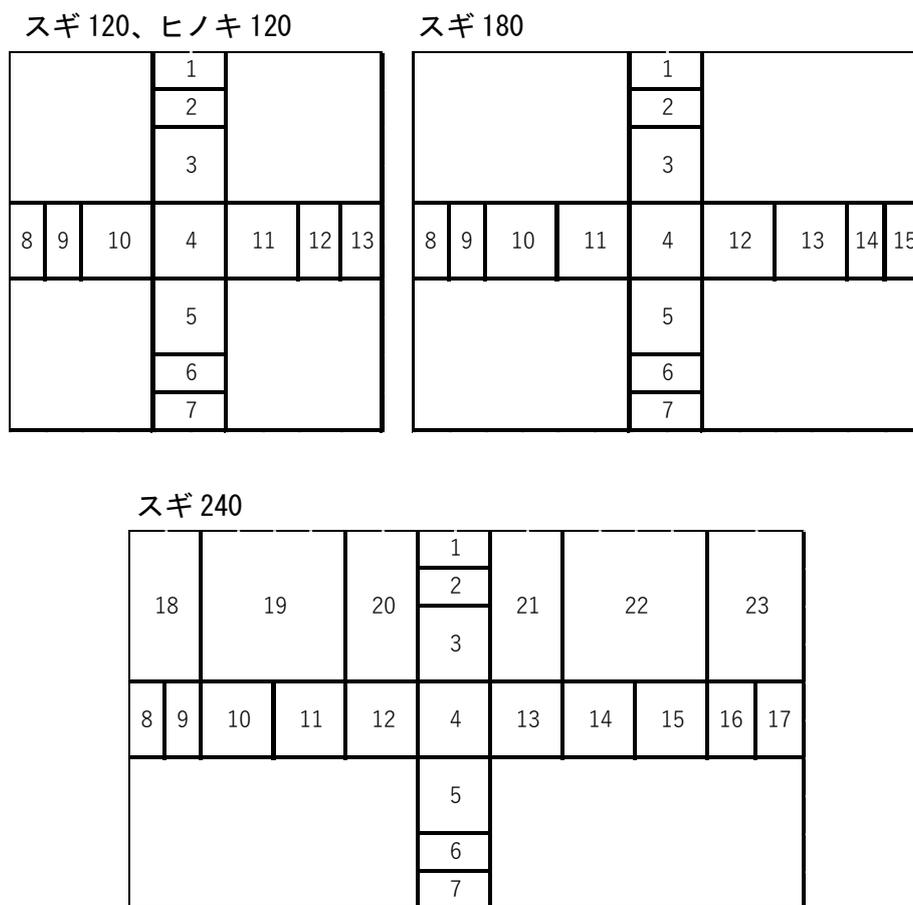


図 1.6-1 水分傾斜の試験片の分割方法

1.7 材面割れ

水分傾斜を測定した試験体は、予め材面割れを測定した。材面の割れの測定方法を図 1.7-1 に示す。割れの長さは物差しを用いて測定し、長さが 300mm を超える場合は、コンベックスを用いて測定した。最大幅はクラックゲージを用いて測定し、割れの幅が 2mm を超える場合は、ノギスを使用して測定した。割れの面積を、割れの長さ×最大幅 / 2 として計算した。

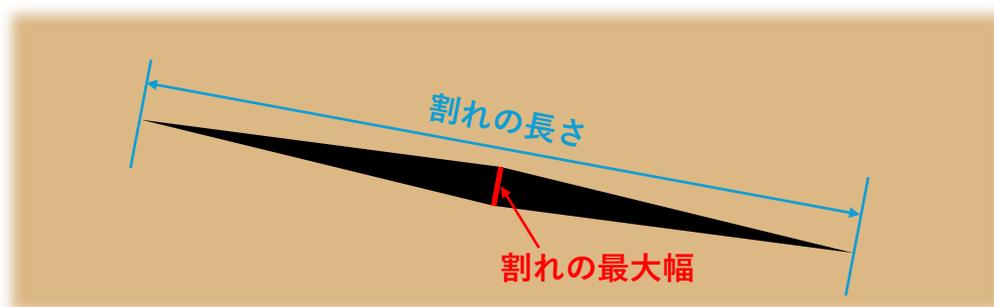


図 1.7-1 材面割れの測定方法

2 試験結果

2.1 試験体の選定状況

天然乾燥土場の在庫状況（保管期間別）を図 2.1-1 に示す。スギ 240 およびヒノキ 120 は、保管期間が 1.5 年未満の材料が存在したが、それ以外は大半が 1.5 年以上の状況であった。固有振動数の測定個体数を図 2.1-2 に示す。固有振動数の測定は、合計 2532 体で実施した。固有振動数から求めた推定密度と保管期間の関係を図 2.1-3 に示す。スギ 240 の保管期間が 10 カ月のグループで推定密度が高い傾向を示したが、その他においてはほぼ変わらない結果となった。これより、含水率 30%以上の含水率が高い個体は少ないことが予想されたため、経過月数がばらつくように密度・水分計での事前測定用のロットを抽出した。

密度・水分計の事前測定を実施した個体数を図 2.1-4 に示す。密度・水分計での事前測定は、合計 715 体で実施した。測定途中で、含水率の範囲が狭いことが予想されたため、スギ 180 については、保管期間の短い 6m材を追加して測定した。6m材は、端部から 4.1mの位置でチェーンソーを使って切断した。チェーンソーで切断する位置で HM-10 での測定（人工乾燥材での設定）を行い、端材を採取し、全乾法での含水率の測定を実施した。6m 材の端部から 4.1mの位置の HM-10 の測定値と全乾法含水率との関係を図 2.1-5 に示す。この関係の回帰直線の傾きと切片を用いて、試験体選定用の推定値とした。

試験体選定用の含水率推定値の分布を図 2.1-6 に示す。スギ 180 およびスギ 240 は、含水率 21～26%の範囲での存在が確認できたため、スギ 150 およびスギ 210 は試験体としては不採用とした。スギ 120 の含水率の範囲は、16～19%で狭いことが予想された。また、ヒノキ 120 は、保管期間が 3 カ月の個体も存在するが、20%以下が多い予想となった。全体的にみると、含水率推定値が 15%を下回る個体は存在しなかった。一方で、含水率 20%以下の個体は、十分に存在することが予想された。試験体として選定された個体を図 2.1-7 および図 2.1-8 に示す。選定用の含水率推定値を四捨五入して整数化し、その整数値ごと均等に試験体を選定した。また、スギ 180 は、56%が 6m材から切断した材料となった。図 2.1-9 に、試験体選定前の含水率推定値と全乾法の含水率との関係を示す。試験終了後に、全乾法による含水率と試験体選定前に推定した含水率とを比較した結果、全乾法の含水率が 25%以下の範囲では、RMSE は 1.4%となり、一定程度の推定精度が確保されていると判断できる。このことから、仕上がり前の段階で含水率の傾向を把握する目的において、マイクロ波水分計による測定は有用であると考えられる。

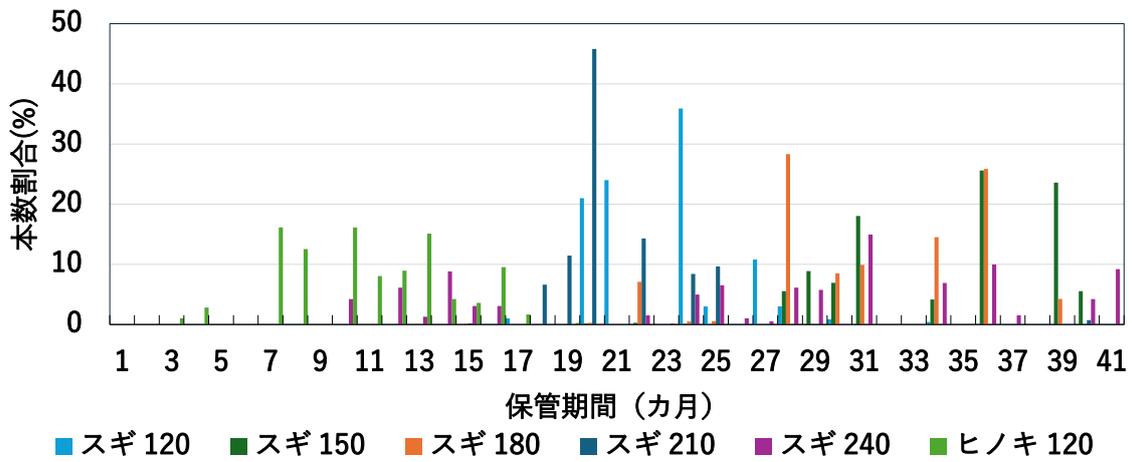


図 2.1-1 天然乾燥土場の在庫状況（保管期間別）

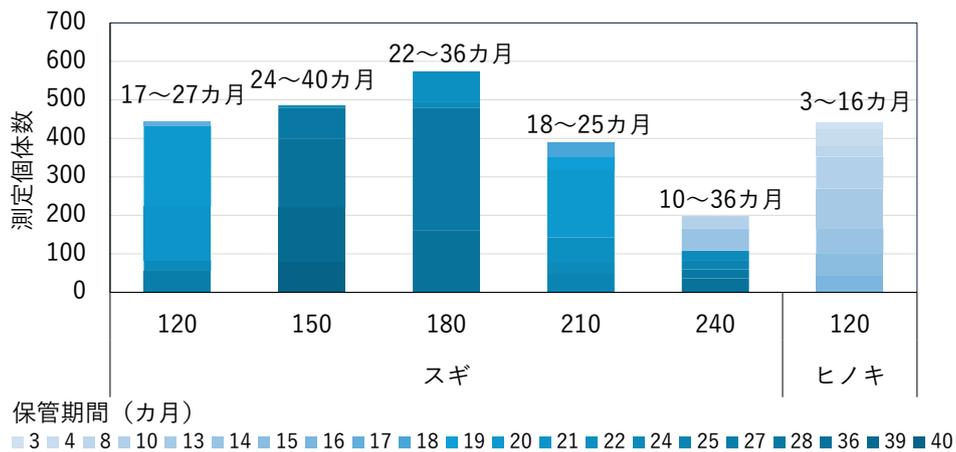


図 2.1-2 固有振動数の測定個体数

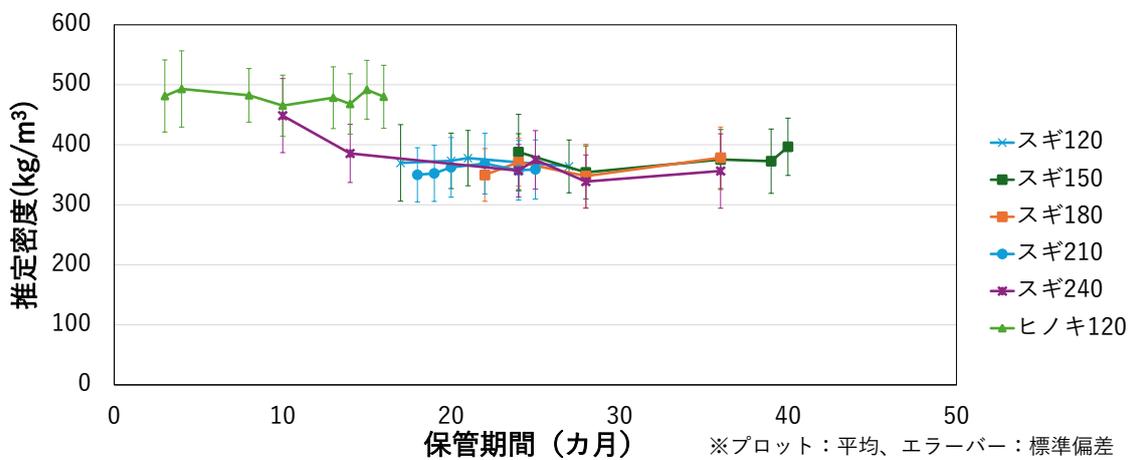


図 2.1-3 固有振動数から求めた推定密度と保管期間の関係

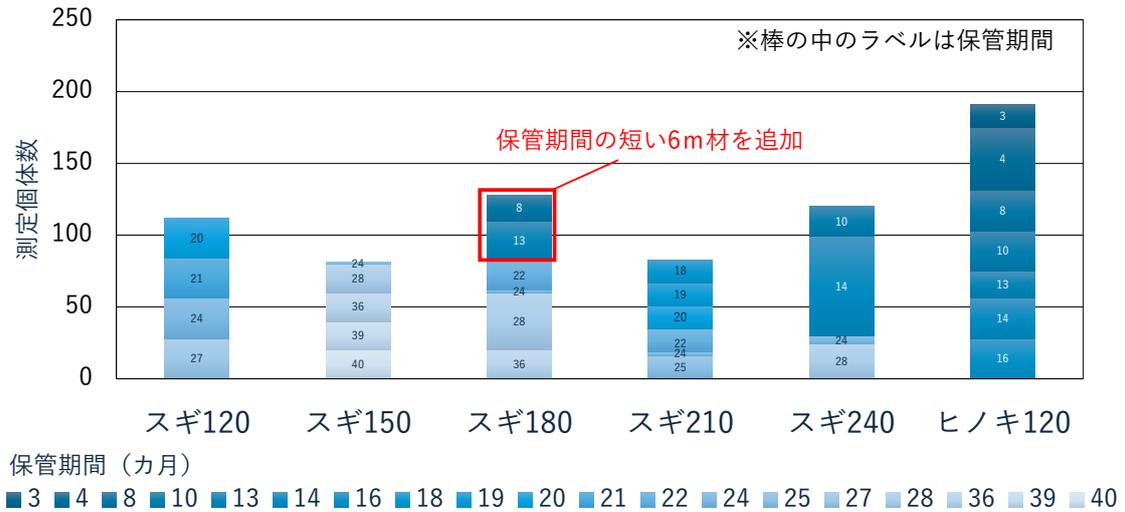


図 2.1-4 密度・水分計の事前測定を実施した個体数

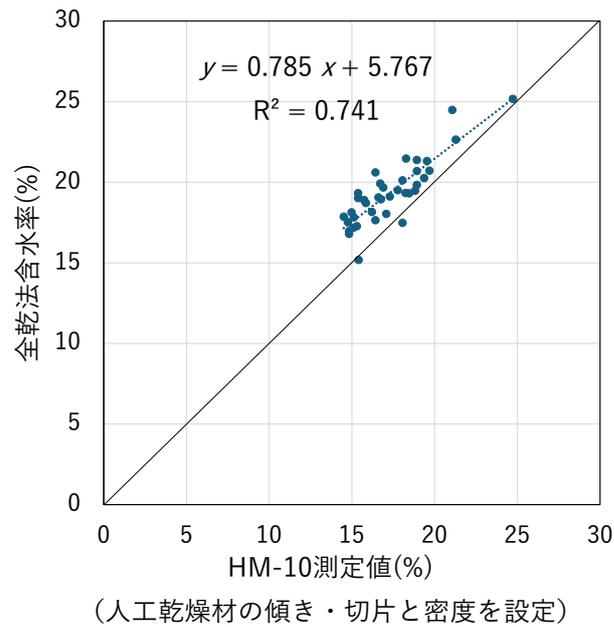


図 2.1-5 6m材の端部から4.1mの位置のHM-10の測定値と全乾法含水率との関係

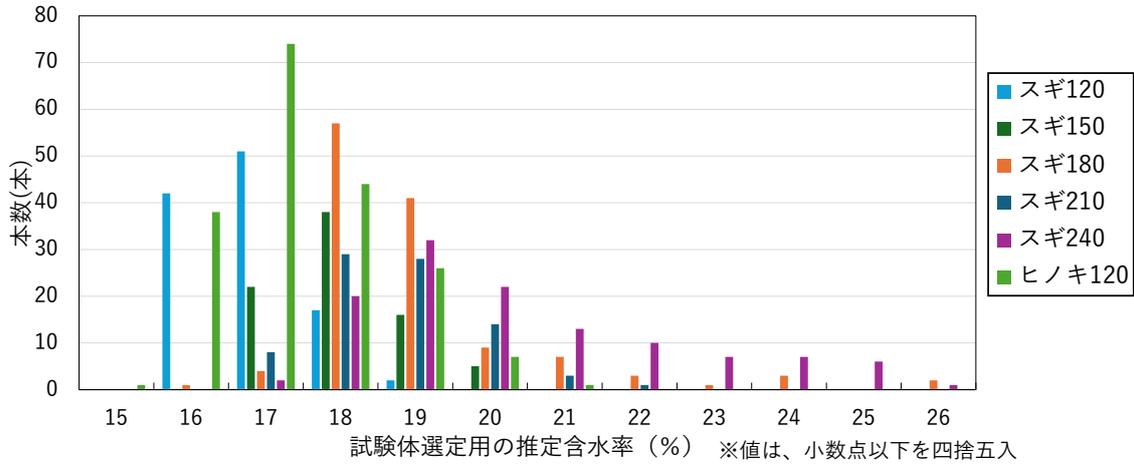


図 2.1-6 試験体選定用の含水率推定値の分布

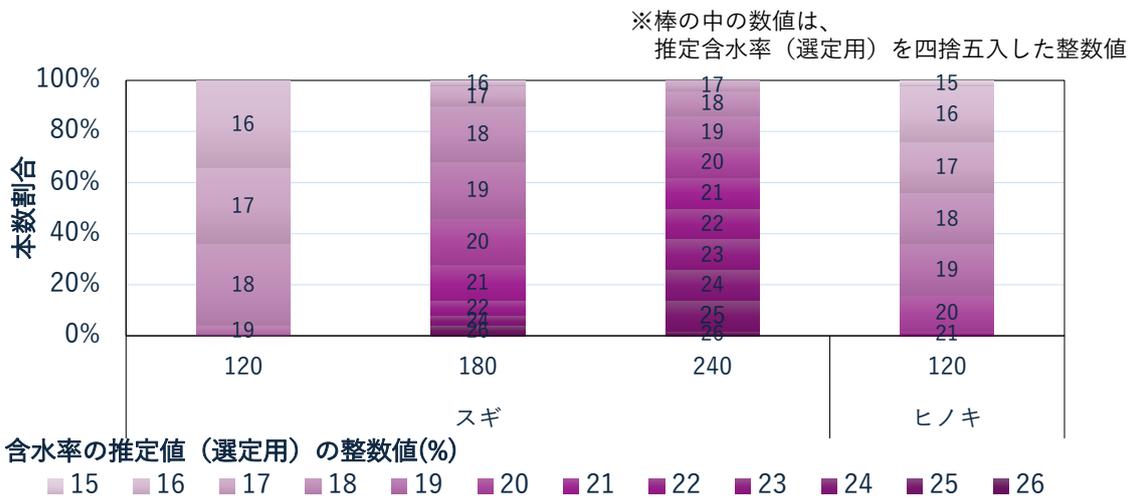


図 2.1-7 試験体として選定された個体（含水率の推定値別）

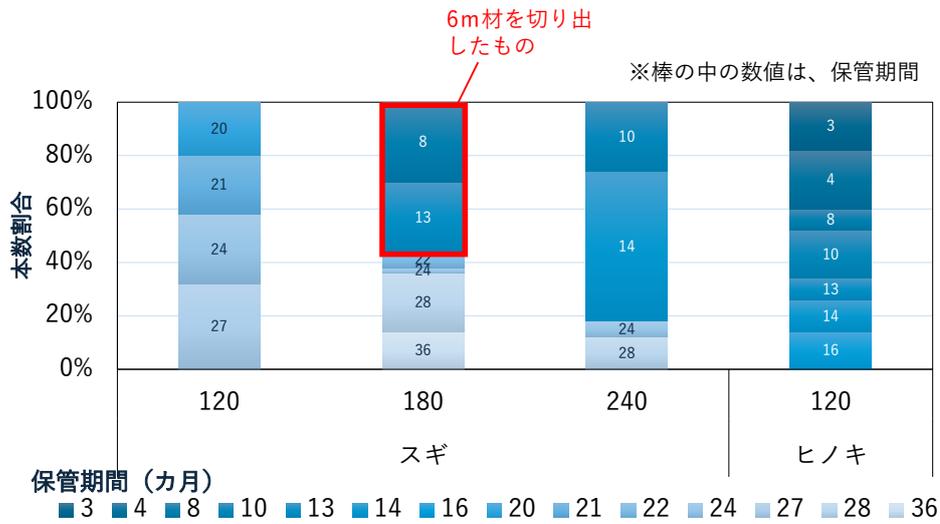


図 2.1-8 試験体として選定された個体（保管期間別）

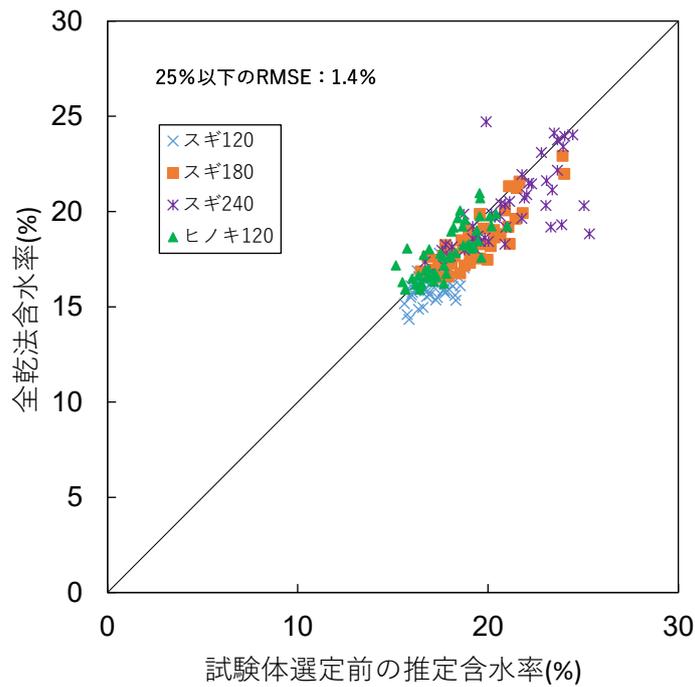


図 2.1-9 試験体選定前の含水率推定値と全乾法の含水率との関係
(全乾法の含水率 25%以下)

2.2 端部の全乾密度・含水率

密度設定用の試験片の含水率および全乾密度の測定結果を表 2.2-1 に、含水率と全乾密度の関係を図 2.2-1 に示す。水分計に用いる密度の設定値は、表 2.2-1 における全乾密度の平均を用いた。含水率 25%を超えるものは、検量線作成用には含めず、測定精度の検証用とした。また、スギ正角は天然乾燥期間が1年半以上のものしか調達できなかったため、含水率の範囲は14.7～18.2%で狭かった。

表 2.2-1 密度設定用の試験片の含水率および全乾密度

		スギ 120	スギ 180	スギ 240	ヒノキ 120
全乾密度 (g/cm ³)	平均	0.37	0.35	0.35	0.45
	最小値	0.26	0.27	0.28	0.39
	最大値	0.50	0.45	0.41	0.54
	標準偏差	0.05	0.04	0.03	0.03
含水率 (%)	平均	16.6	20.5	21.8	18.9
	最小値	14.7	16.9	16.2	16.2
	最大値	18.2	72.7	56.5	29.8
	標準偏差	0.7	7.7	6.0	2.4

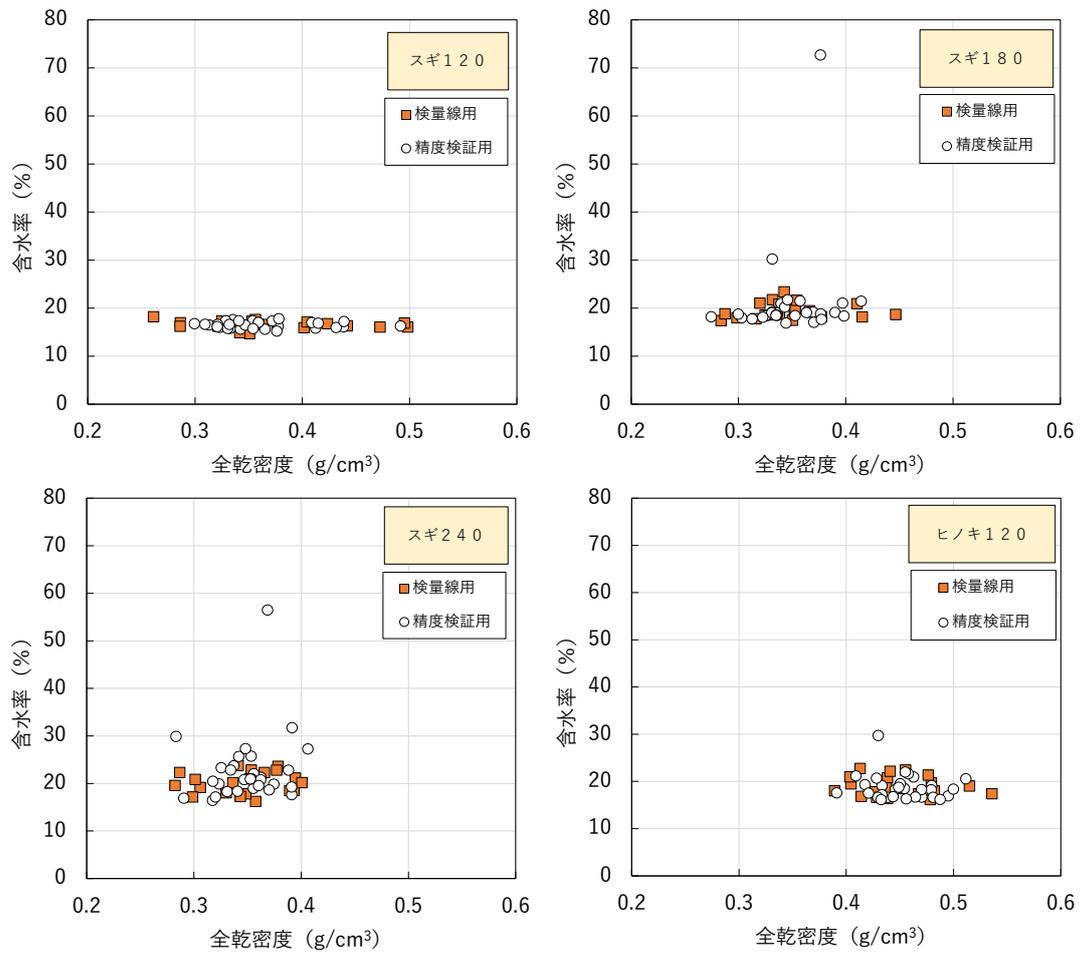


図 2.2-1 密度設定用の試験片の含水率と全乾密度の関係

2.3 検量線

各樹種・各断面の水分計の測定値と全乾法による含水率の関係を図 2.3-1～図 2.3-8 に示す。B 社では測定器の不具合により測定値に異常があることが確認されたため、以降の解析ではこれらを補正した。スギ 120 は含水率の範囲が狭く明確な傾向を示さなかったが、いずれの水分計においても両者は概ね直線関係にあり、この関係から求めた回帰式を検量線とした。設置型の水分計は同種のマイクロ波方式を採用していたが、回帰直線の傾きと切片に差があり、設置工場による違いが確認された。

樹種および断面別に検量線を作成することは多大な労力を要するため、全条件を統合した検量線を作成した。検量線の作成に際しては、全乾密度の設定方法として、(1)条件ごとに全乾密度を個別に設定する方法と、(2)全条件の平均値である 0.38g/cm^3 を一律に用いる方法の 2 パターンを採用した。さらに、人工乾燥材を対象として示されている設定値を天然乾燥材の測定値に適用することで両者の間に一定の関係が得られる可能性があると考え、この設定値を適用した場合に得られる検量線も併せて作成した。人工乾燥材の設定値を表 2.3-1 に示す。これらの設定値は、設置型マイクロ波水分計では各社が提示する人工乾燥材の設定値を、携帯型マイクロ波水分計では人工乾燥材に関する既報値¹⁾を採用したものである。以上の 3 種類の設定方法における測定値と全乾法含水率の関係を図 2.3-9～図 2.3-11 に示す。いずれの設定でも決定係数 R^2 は 0.7～0.8 程度で、高い値を示した。

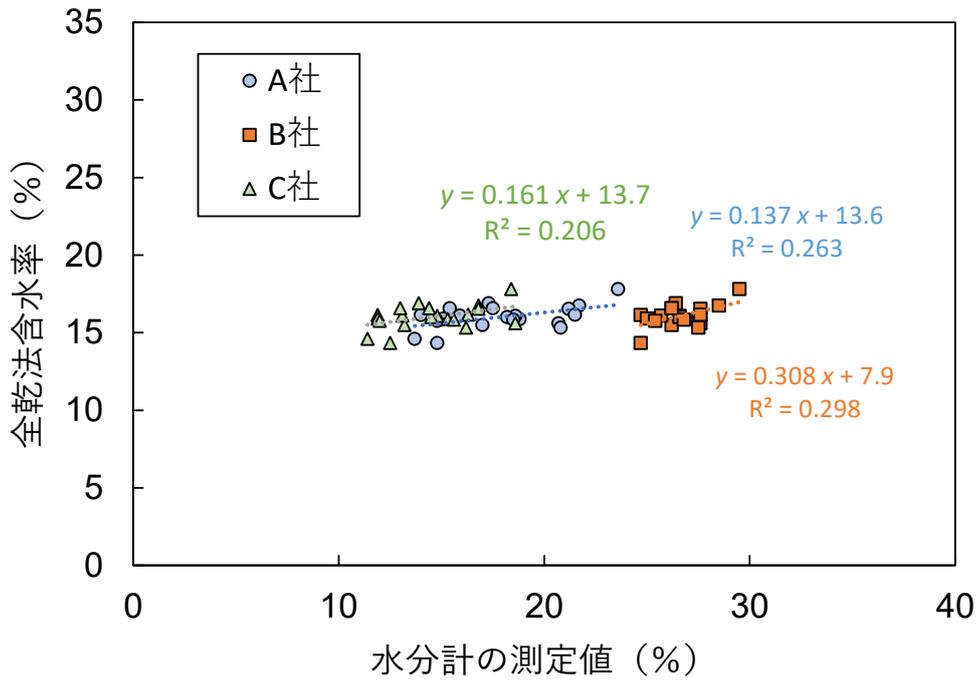


図 2.3-1 水分計の測定値と全乾法による含水率の関係
(スギ 120、設置型マイクロ波水分計)

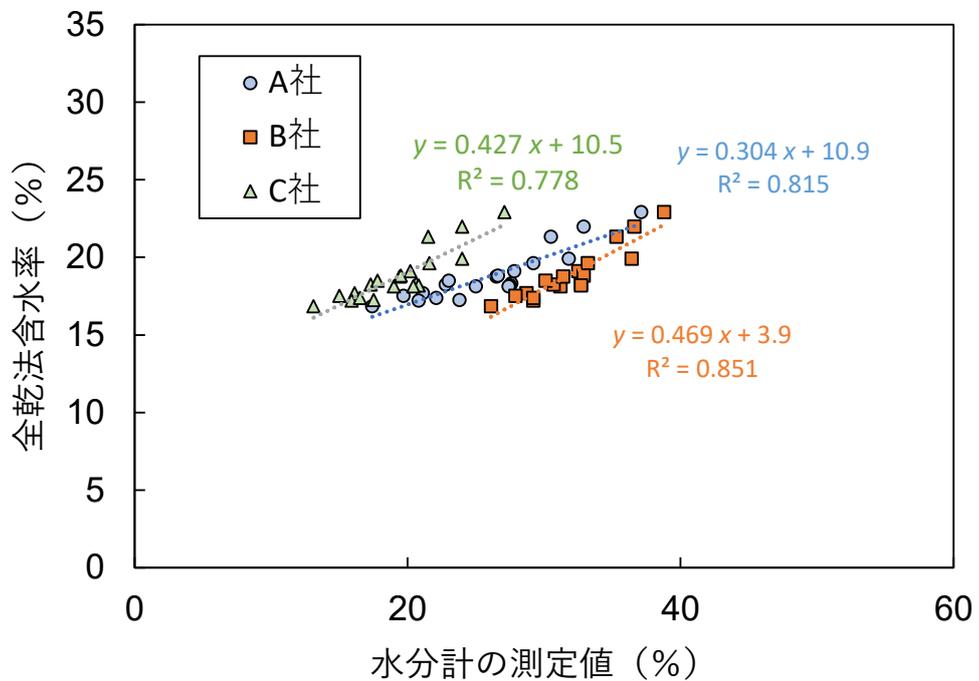


図 2.3-2 水分計の測定値と全乾法による含水率の関係
(スギ 180、設置型マイクロ波水分計)

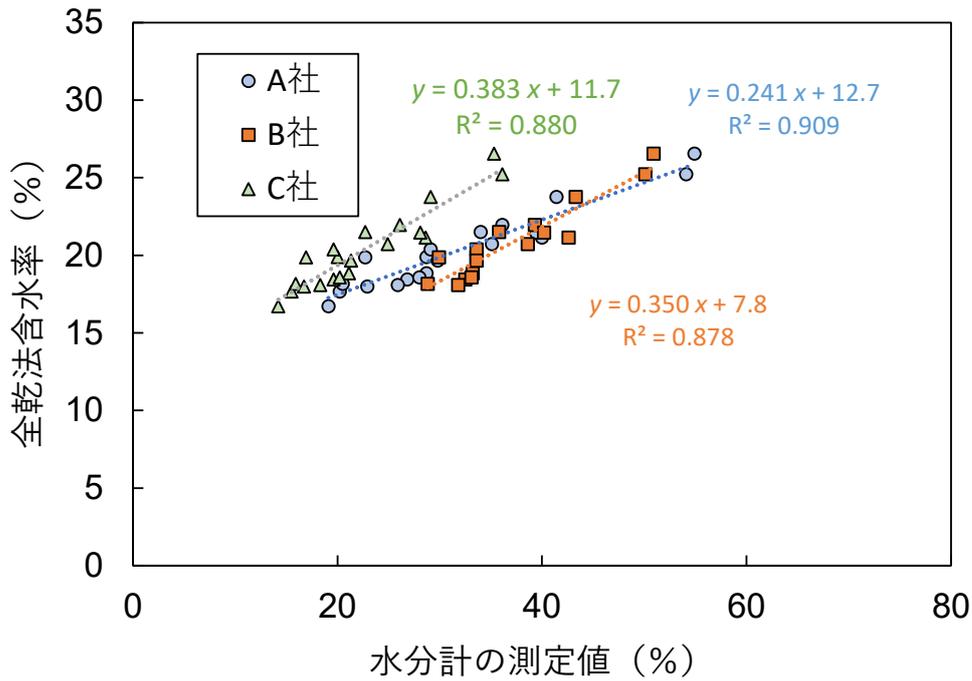


図 2.3-3 水分計の測定値と全乾法による含水率の関係
(スギ 240、設置型マイクロ波水分計)

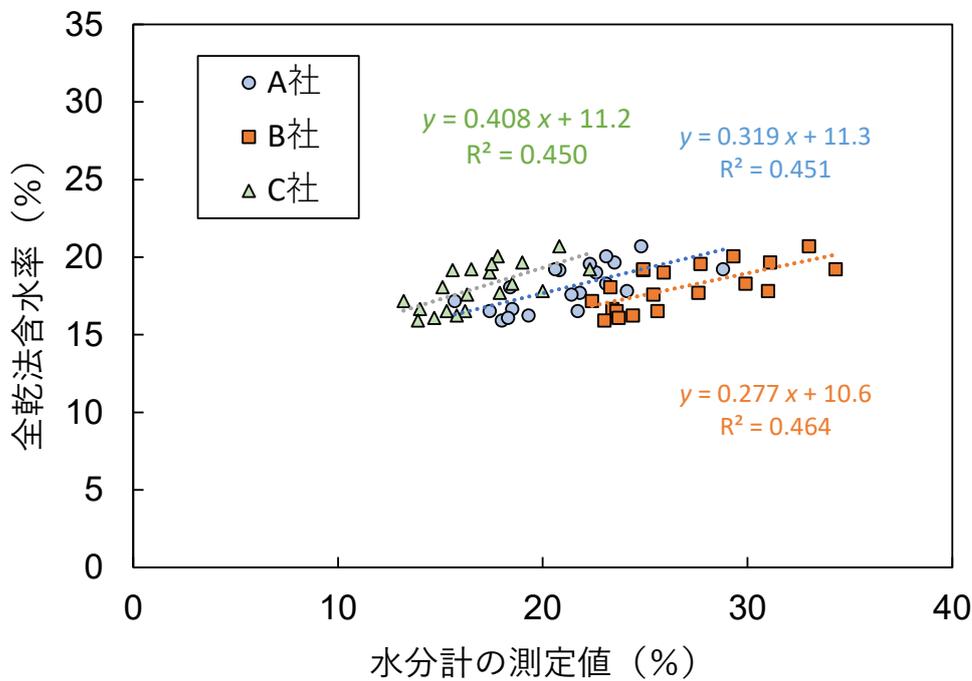


図 2.3-4 水分計の測定値と全乾法による含水率の関係
(ヒノキ 120、設置型マイクロ波水分計)

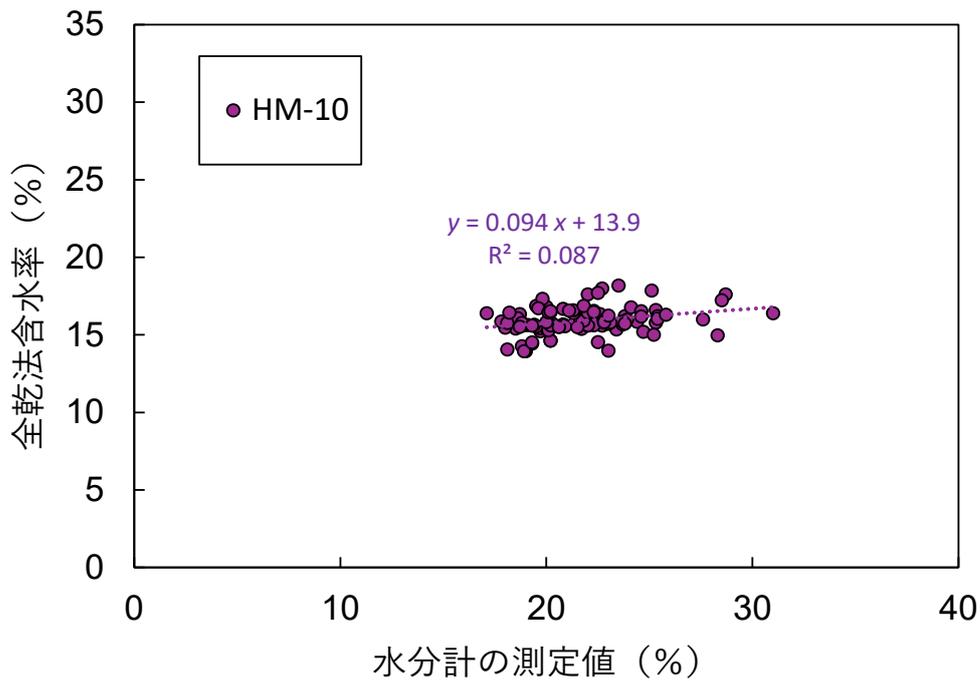


図 2.3-5 水分計の測定値と全乾法による含水率の関係
(スギ 120、携帯型マイクロ波水分計)

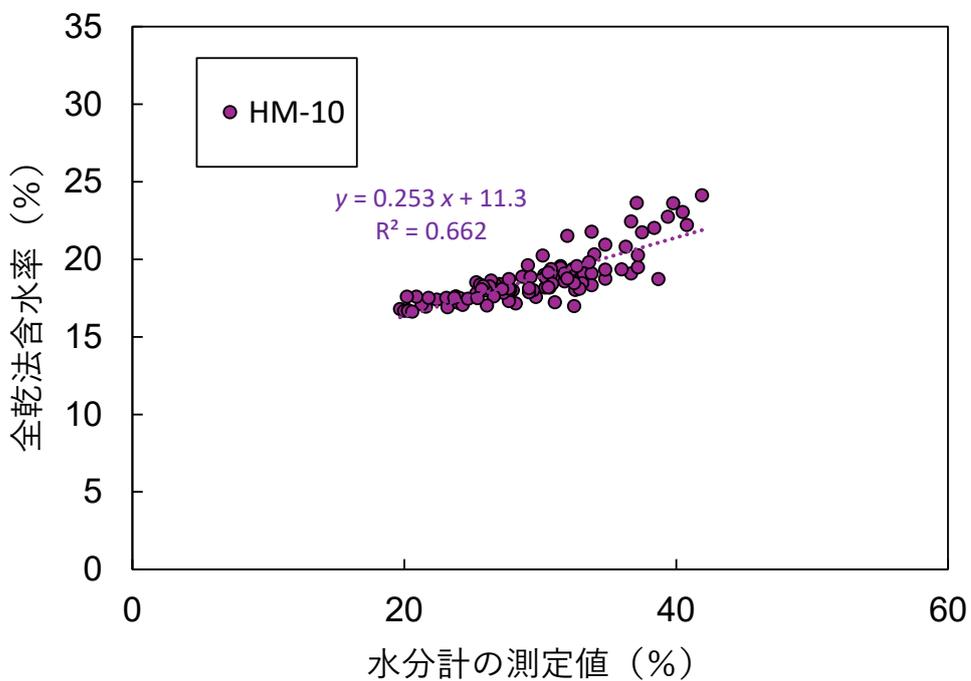


図 2.3-6 水分計の測定値と全乾法による含水率の関係
(スギ 180、携帯型マイクロ波水分計)

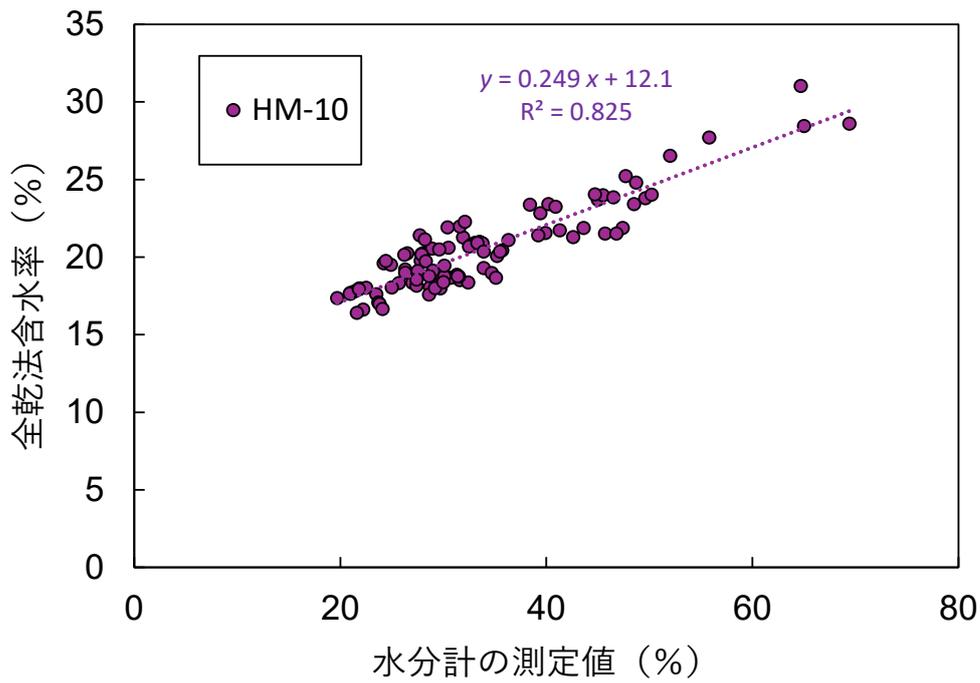


図 2.3-7 水分計の測定値と全乾法による含水率の関係
(スギ 240、携帯型マイクロ波水分計)

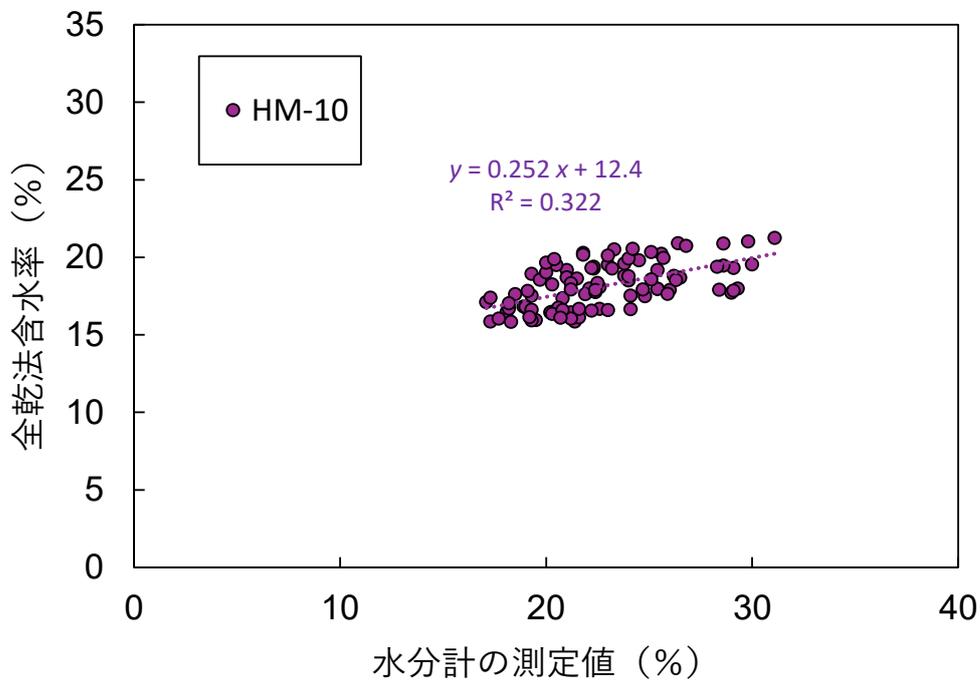


図 2.3-8 水分計の測定値と全乾法による含水率の関係
(ヒノキ 120、携帯型マイクロ波水分計)

表 2.3-1 人工乾燥材の設定値

水分計	設定値	スギ120	スギ180	スギ240	ヒノキ120
A社	傾きa	0.65	0.65	0.48	0.4
	切片b (%)	1	1	3.5	7.5
	全乾密度 (g/cm ³)	0.40	0.40	0.40	0.50
B社	傾きa	0.4	0.4	0.4	0.4
	切片b (%)	1	1	1	1
	全乾密度 (g/cm ³)	0.35	0.35	0.35	0.45
C社	傾きa	1	1	1	0.85
	切片b (%)	1	1	1	1
	全乾密度 (g/cm ³)	0.35	0.35	0.35	0.45
HM-10	傾きa	0.36	0.36	0.36	0.47
	切片b (%)	7.1	7.1	7.1	4.3
	全乾密度 (g/cm ³)	0.36	0.36	0.36	0.44

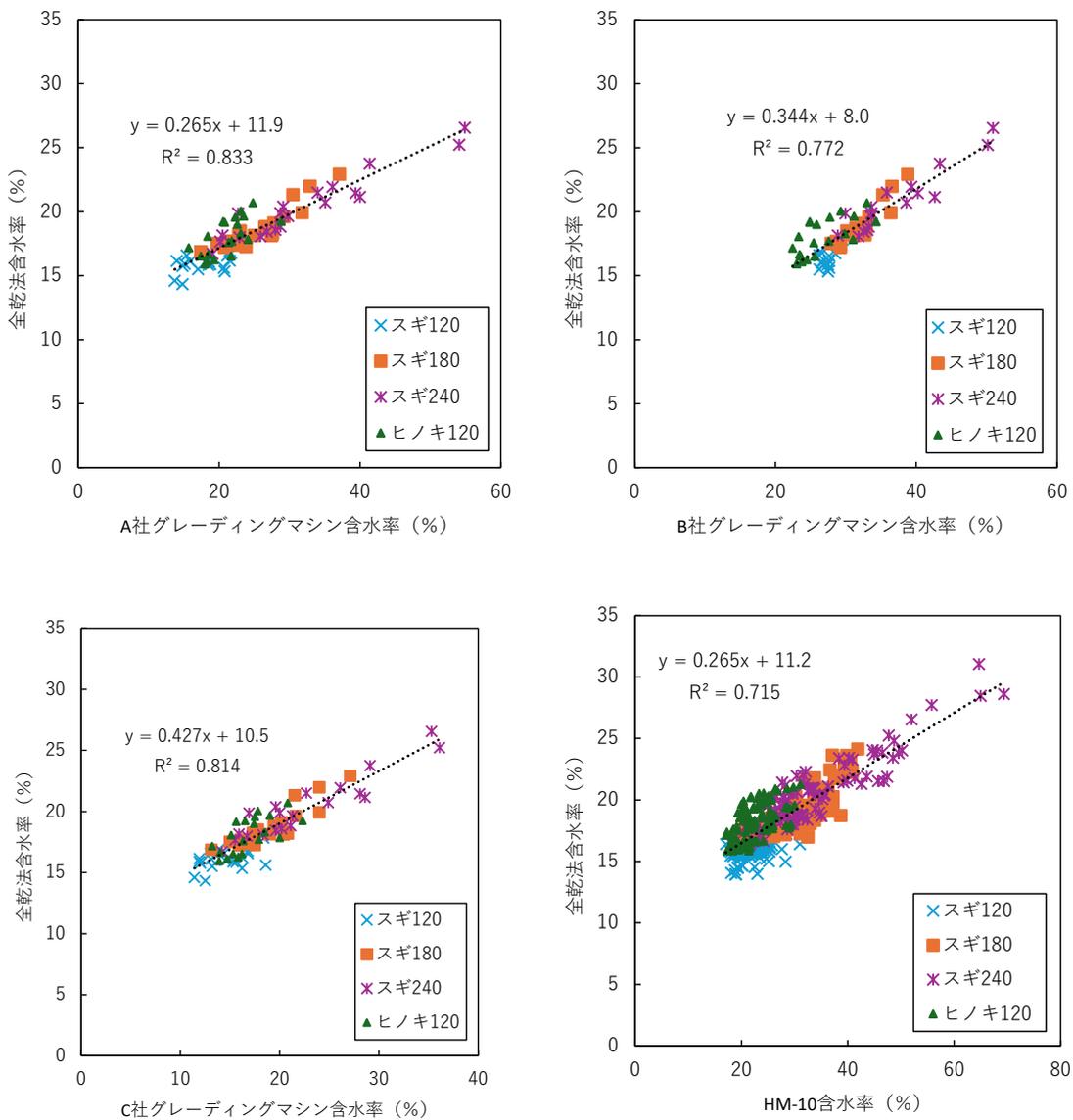


図 2.3-9 全乾密度を個別に設定した測定値と全乾法含水率の関係

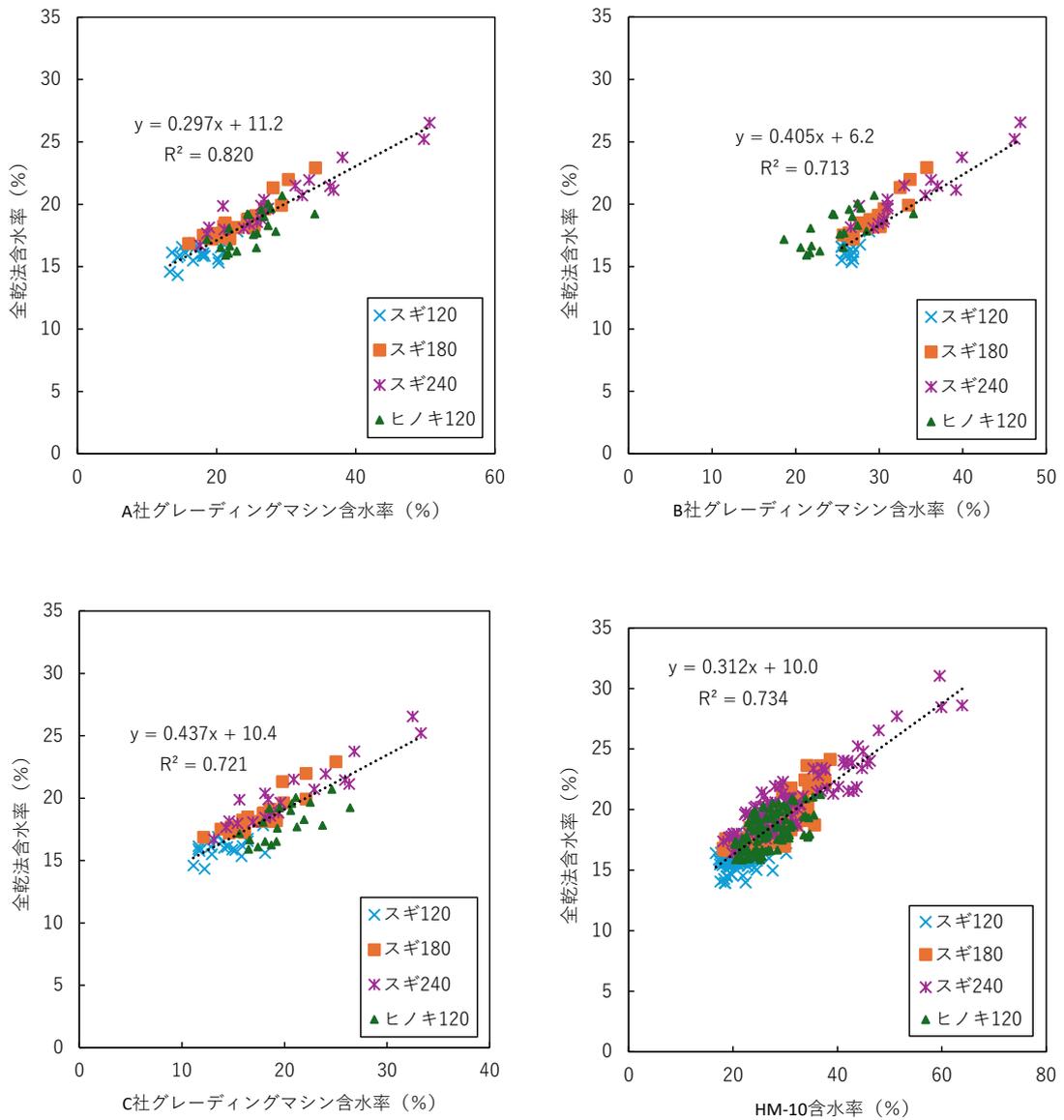


図 2.3-10 平均全乾密度 (0.38 g/cm³) 設定による測定値と全乾法含水率の関係

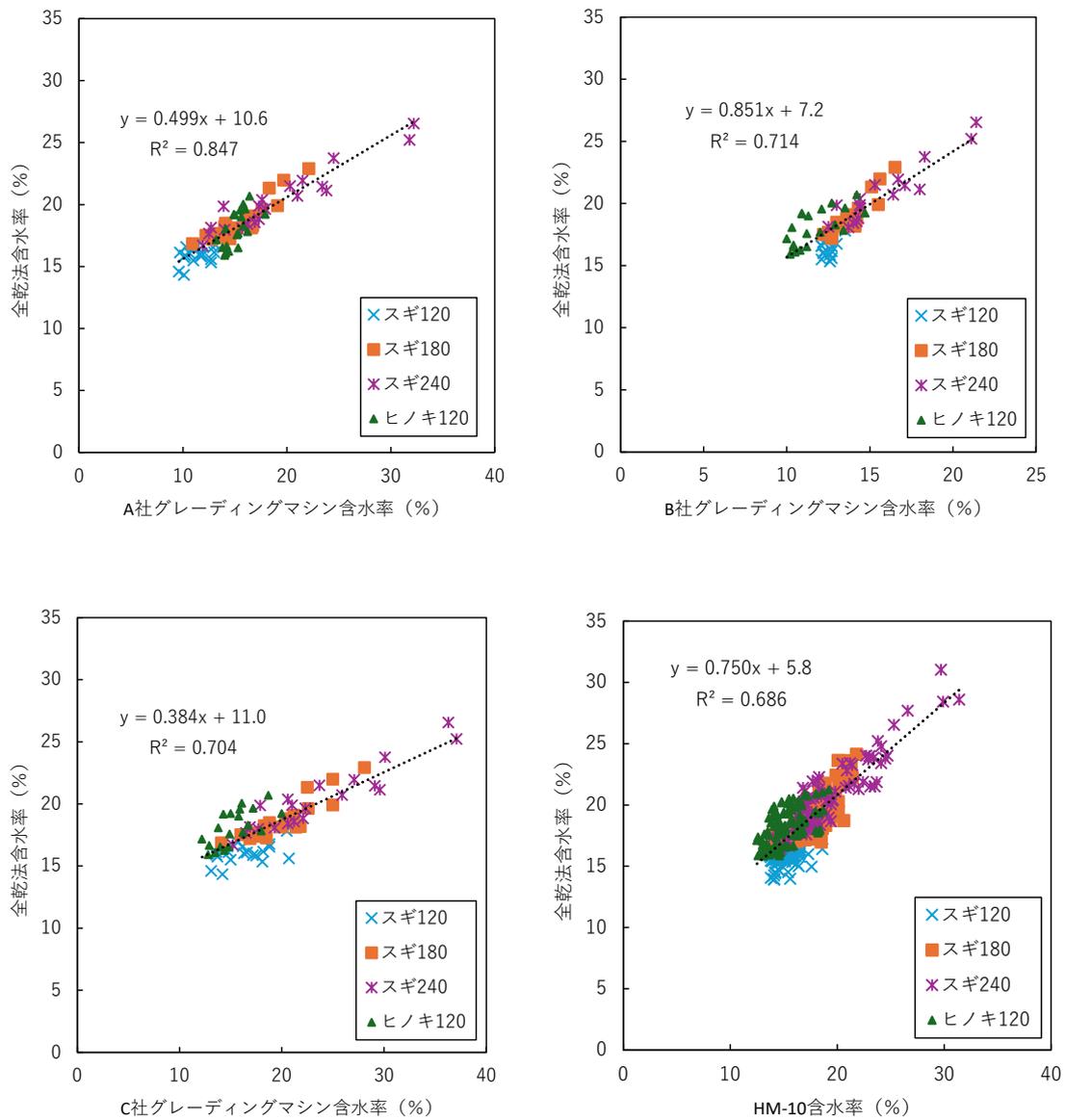


図 2.3-11 人工乾燥材設定値適用時の測定値と全乾法含水率の関係

2.4 測定精度の検証

各樹種・各断面の検量線を適用した水分計の測定値と全乾法による含水率との関係を図 2.4-1～図 2.4-8 に、各樹種・各断面の検量線を適用した水分計の測定精度（RMSE）一覧を表 2.4-1 に示す。いずれの条件も、含水率 20%以下の範囲では RMSE は概ね 1%程度であった。この傾向は人工乾燥材でも同様であり、検量線の作成に含水率が一定の範囲を確保できれば、天然乾燥材においてもマイクロ波水分計による精度の高い測定が可能であることが確認された。

全条件を統合した検量線（個別に全乾密度を設定、一律に全乾密度を設定、人工乾燥材の設定値を適用）を適用した水分計の測定値と全乾法による含水率との関係を図 2.4-9～図 2.4-11 に、測定精度（RMSE）一覧を表 2.4-2～表 2.4-4 に示す。図 2.4-9～図 2.4-11 では、スケール外の結果も存在するが、表示は 30%の範囲に統一している。含水率 20%以下の範囲では、RMSE は全体として 1%前後の値を示した。一方、全乾密度を一律に設定した場合にはヒノキ 120 において、また人工乾燥材の設定値を適用した場合にはスギ 120 において、RMSE が 1.5 以上となる条件が確認された。

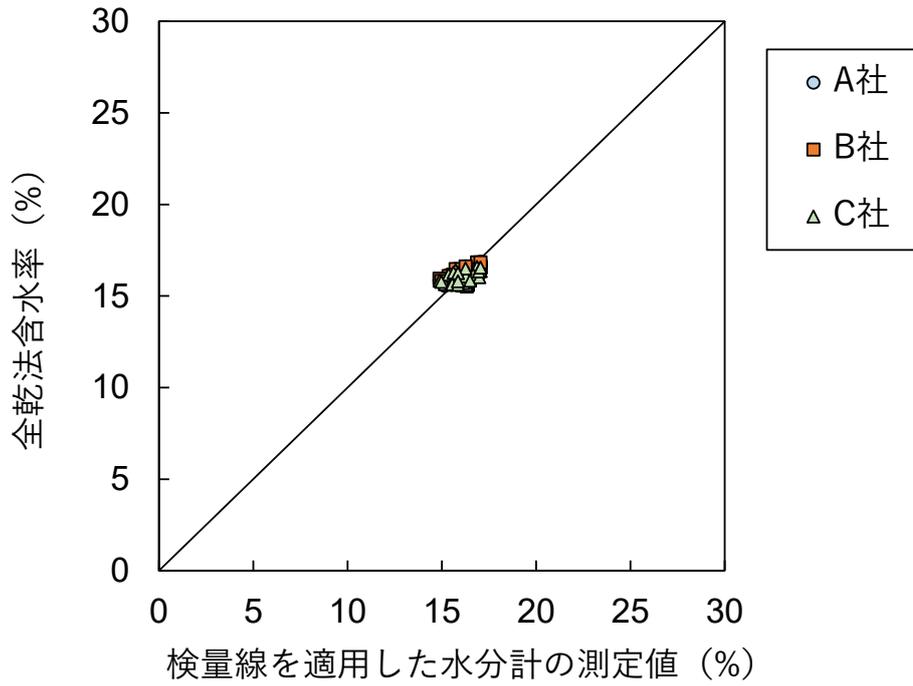


図 2.4-1 各樹種・各断面の検量線を適用した水分計の測定値と全乾法による含水率の関係（スギ 120、設置型マイクロ波水分計）

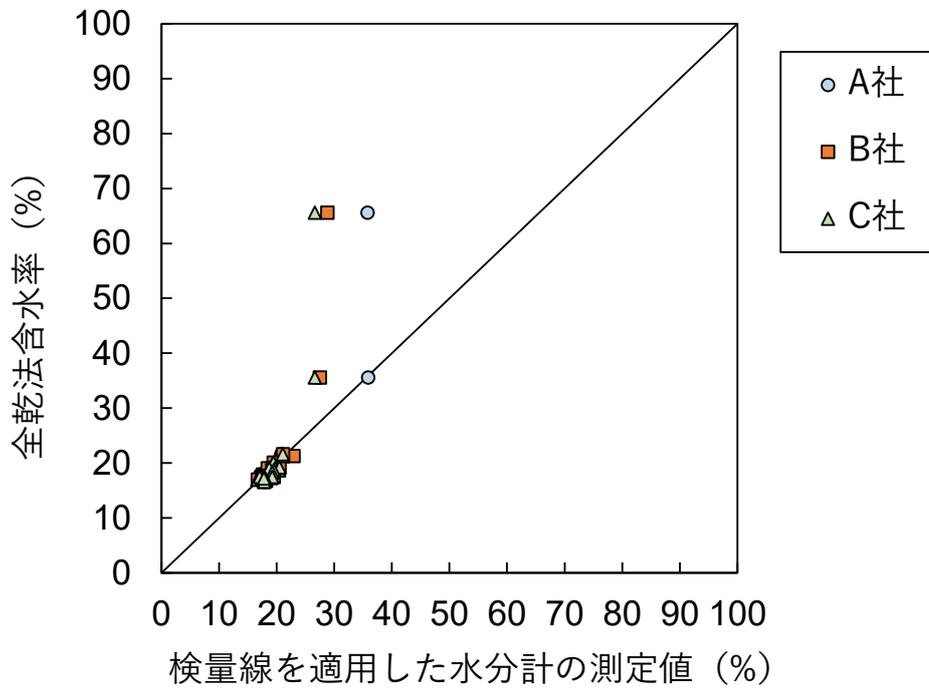


図 2.4-2 各樹種・各断面の検量線を適用した水分計の測定値と全乾法による含水率の関係（スギ 180、設置型マイクロ波水分計）

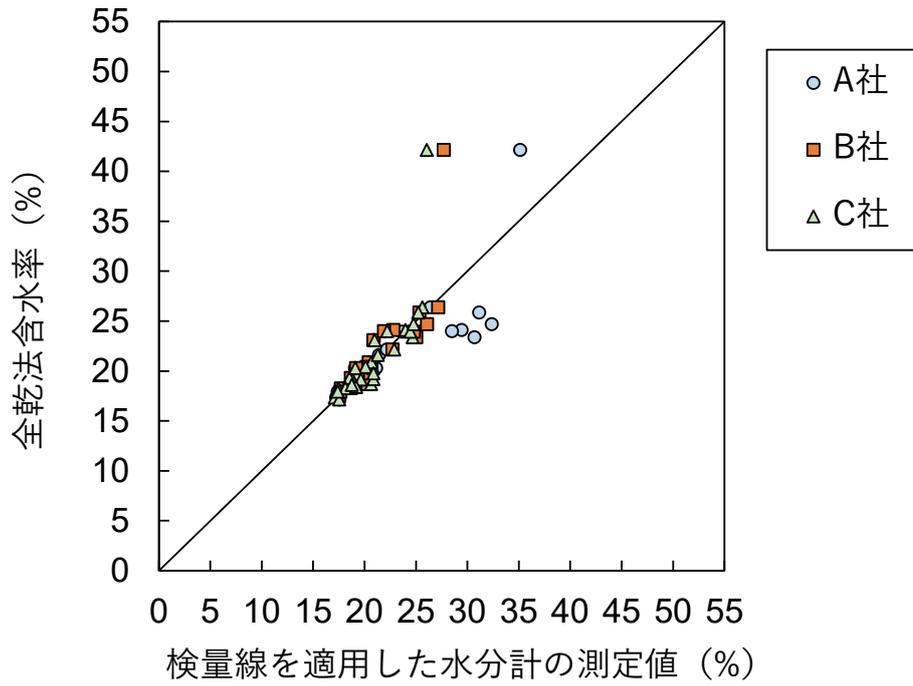


図 2.4-3 各樹種・各断面の検量線を適用した水分計の測定値と全乾法による含水率の関係（スギ 240、設置型マイクロ波水分計）

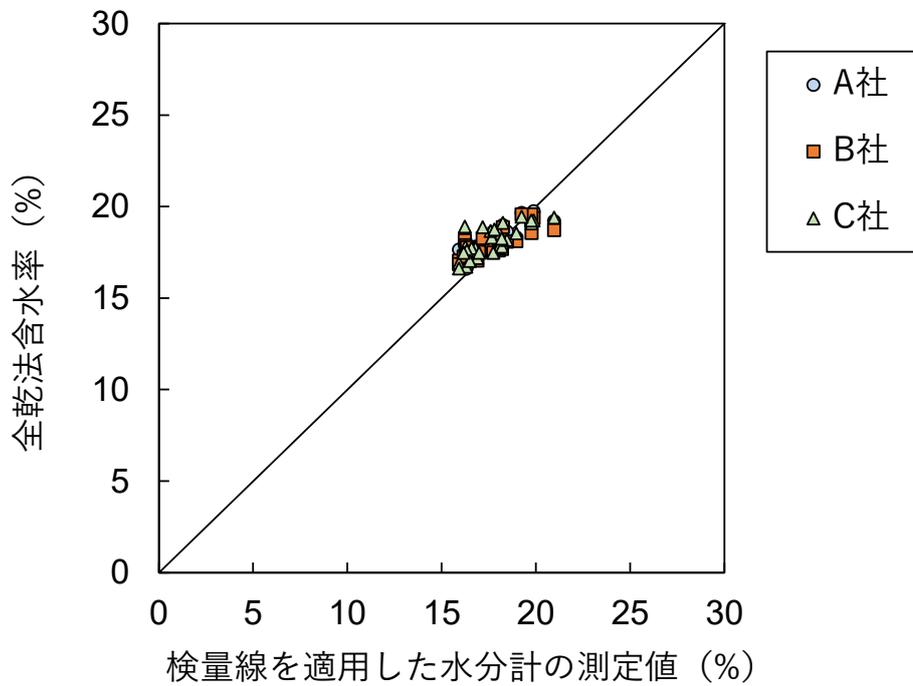


図 2.4-4 各樹種・各断面の検量線を適用した水分計の測定値と全乾法による含水率の関係（ヒノキ 120、設置型マイクロ波水分計）

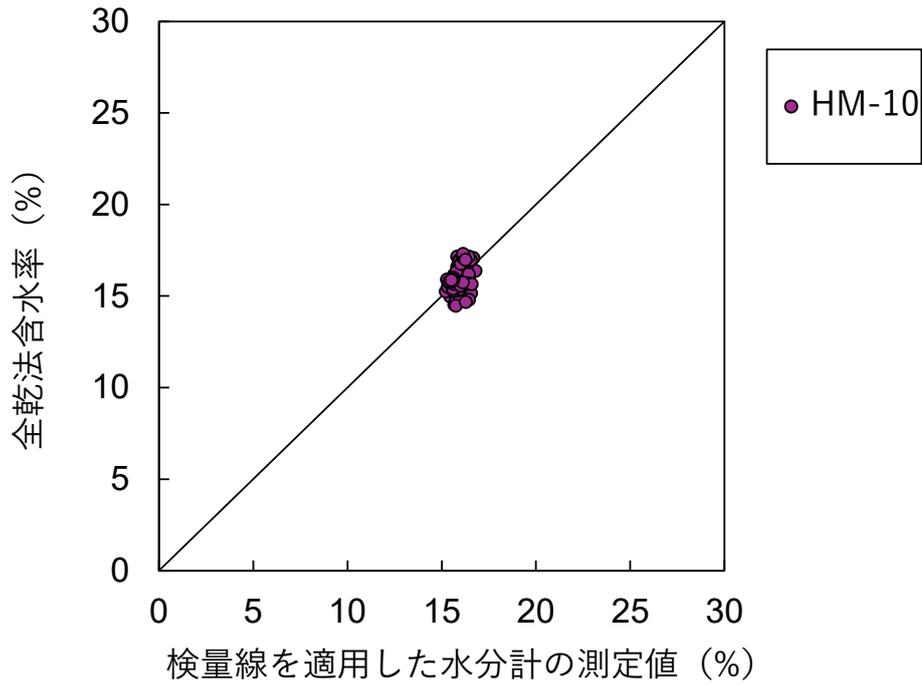


図 2.4-5 各樹種・各断面の検量線を適用した水分計の測定値と全乾法による含水率の関係（スギ 120、携帯型マイクロ波水分計）

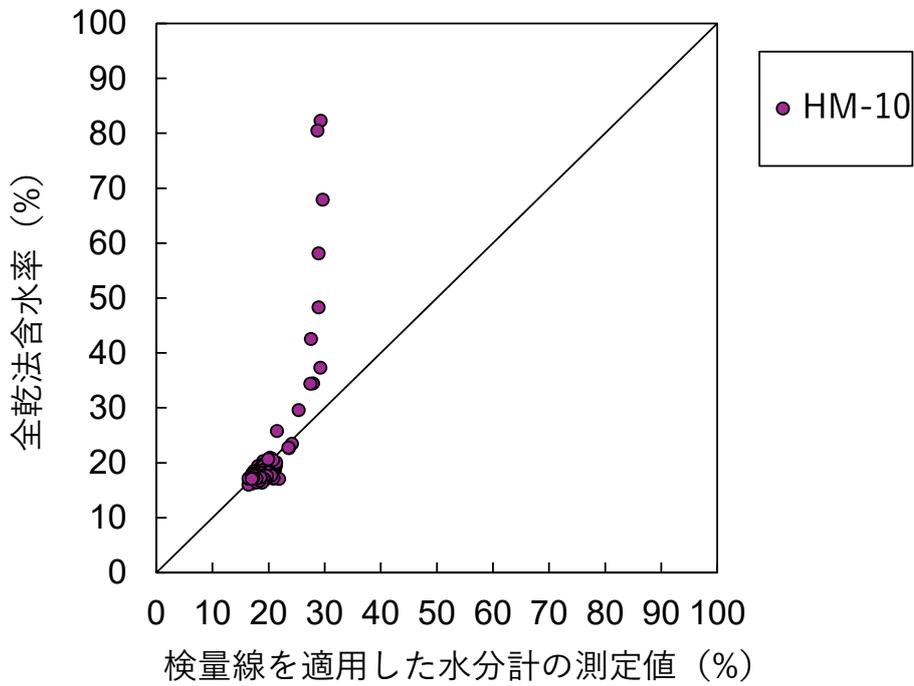


図 2.4-6 各樹種・各断面の検量線を適用した水分計の測定値と全乾法による含水率の関係（スギ 180、携帯型マイクロ波水分計）

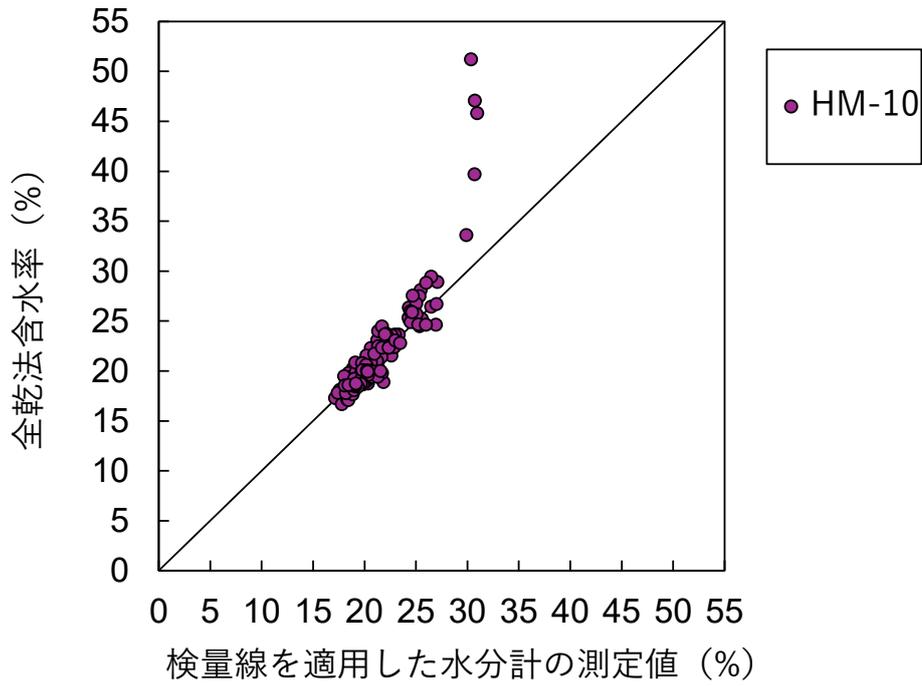


図 2.4-7 各樹種・各断面の検量線を適用した水分計の測定値と全乾法による含水率の関係（スギ 240、携帯型マイクロ波水分計）

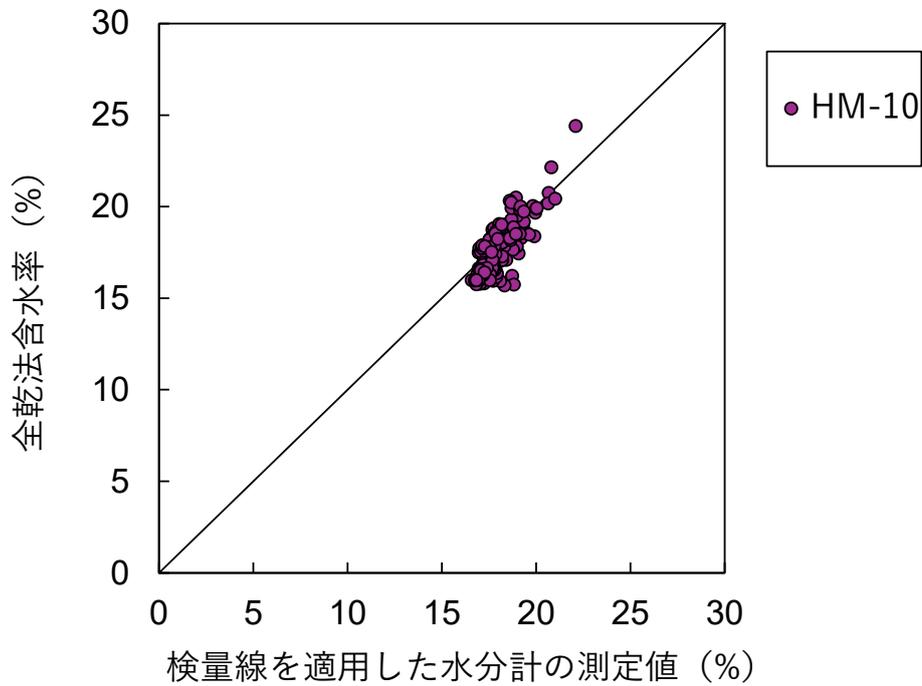
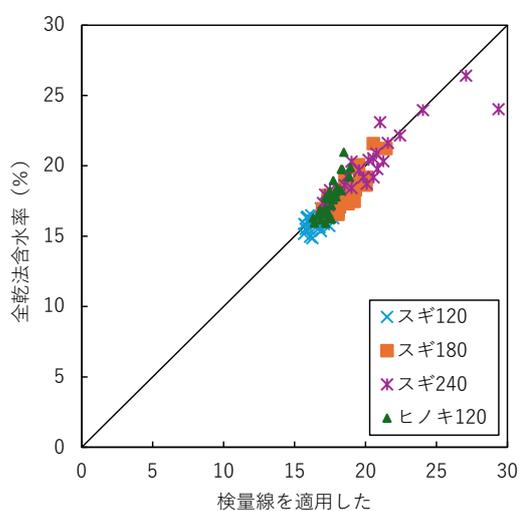


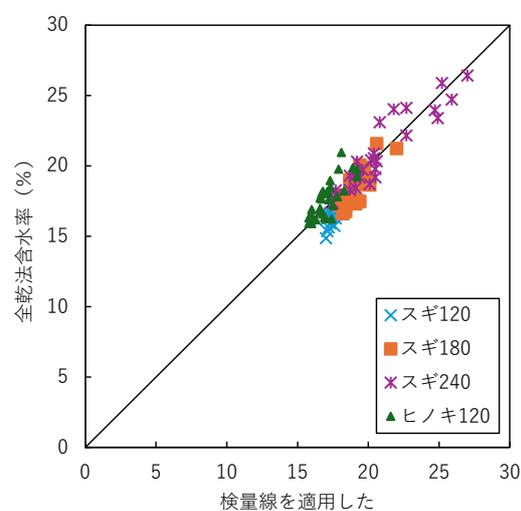
図 2.4-8 各樹種・各断面の検量線を適用した水分計の測定値と全乾法による含水率の関係（ヒノキ 120、携帯型マイクロ波水分計）

表 2.4-1 各樹種・各断面の検量線を適用した水分計の測定精度 (RMSE) 一覧

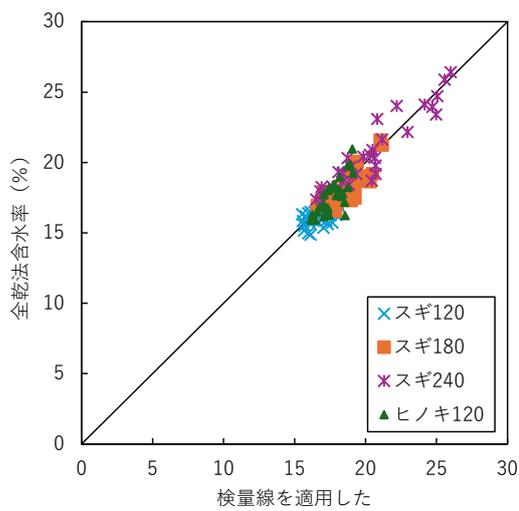
試験体の種類	指標	設置型水分計			携帯型水分計
		A社	B社	C社	HM-10
スギ120	RMSE (%)	0.7	0.5	0.8	0.6
スギ180	RMSE (%)	5.5	7.5	7.3	7.5
	25%以下RMSE (%)	0.9	1.0	0.9	1.1
スギ240	RMSE (%)	2.9	2.9	3.1	2.8
	25%以下RMSE (%)	2.5	1.0	0.9	0.9
	20%以下RMSE (%)	0.7	0.7	0.9	0.9
ヒノキ120	RMSE (%)	0.9	0.9	1.0	0.9



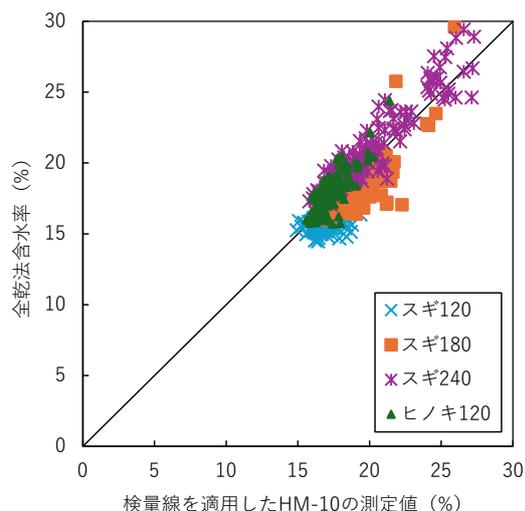
A社グレーディングマシン含水率 (%)



B社グレーディングマシン含水率 (%)



C社グレーディングマシン含水率 (%)



検量線を適用したHM-10の測定値 (%)

図 2.4-9 全条件を統合した検量線(個別に全乾密度を設定)を適用した水分計の測定値と全乾法による含水率との関係

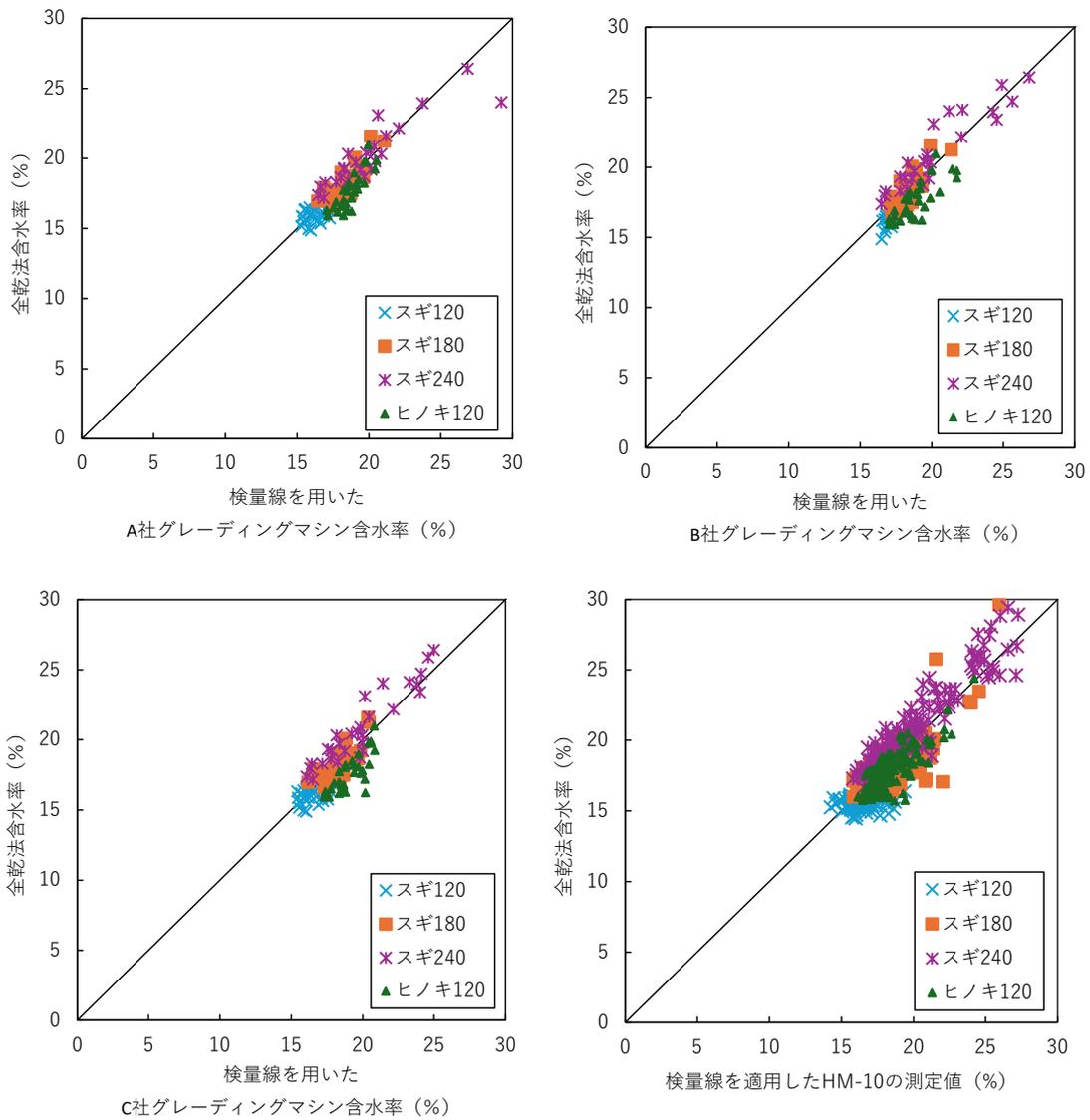


図 2.4-10 全条件を統合した検量線(一律に全乾密度を設定)を適用した水分計の測定値と全乾法による含水率との関係

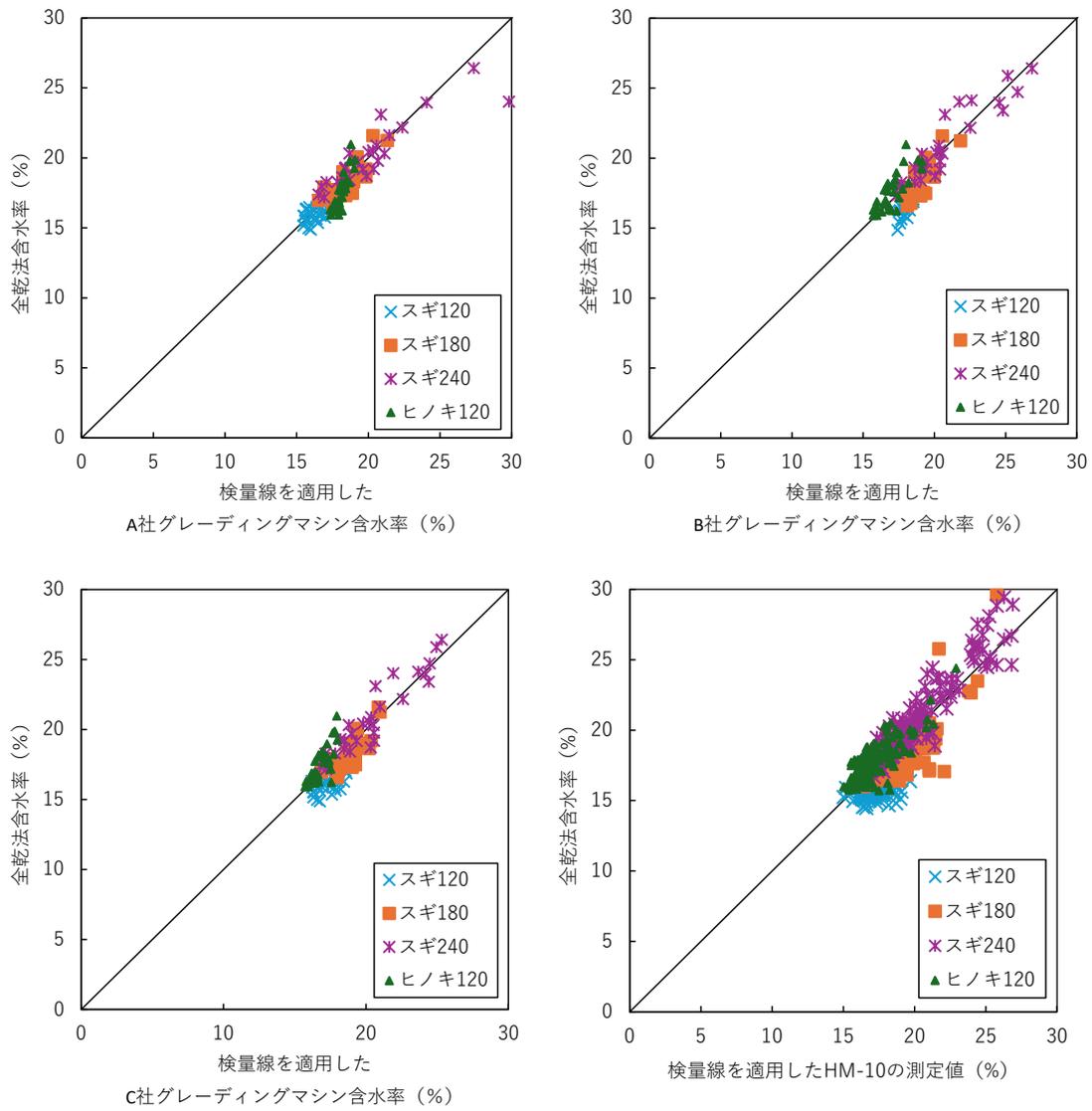


図 2.4-11 全条件を統合した検量線(人工乾燥材の設定値を適用)を適用した水分計の測定値と全乾法による含水率との関係

表 2.4-2 全条件を統合した検量線(個別に全乾密度を設定)を
適用した水分計の測定精度 (RMSE) 一覧

試験体の種類	指標	設置型水分計			携帯型水分計
		A社	B社	C社	HM-10
スギ120	RMSE (%)	0.8	1.2	0.9	1.4
スギ180	RMSE (%)	5.9	8.2	7.3	7.5
	25%以下RMSE (%)	0.9	1.1	0.9	1.4
スギ240	RMSE (%)	3.2	3.0	3.0	2.8
	25%以下RMSE (%)	2.9	1.0	1.0	1.0
	20%以下RMSE (%)	0.7	0.7	1.0	0.8
ヒノキ120	RMSE (%)	0.9	1.0	0.9	1.0
全体	RMSE (%)	3.4	4.5	4.0	4.1
	25%以下RMSE (%)	1.6	1.1	0.9	1.2
	20%以下RMSE (%)	0.8	1.0	0.9	1.2

表 2.4-3 全条件を統合した検量線(一律に全乾密度を設定)を
適用した水分計の測定精度 (RMSE) 一覧

試験体の種類	指標	設置型水分計			携帯型水分計
		A社	B社	C社	HM-10
スギ120	RMSE (%)	0.7	0.8	0.9	1.2
スギ180	RMSE (%)	5.9	8.2	7.6	7.4
	25%以下RMSE (%)	0.7	0.8	0.8	1.2
スギ240	RMSE (%)	3.2	3.1	3.3	2.8
	25%以下RMSE (%)	2.9	1.3	1.3	1.3
	20%以下RMSE (%)	0.8	0.9	1.2	1.1
ヒノキ120	RMSE (%)	1.3	1.5	1.7	1.1
全体	RMSE (%)	3.4	4.5	4.2	4.1
	25%以下RMSE (%)	1.7	1.2	1.2	1.2
	20%以下RMSE (%)	0.9	1.1	1.2	1.1

表 2.4-4 全条件を統合した検量線(人工乾燥材の設定値を適用)を
適用した水分計の測定精度 (RMSE) 一覧

試験体の種類	指標	設置型水分計			携帯型水分計
		A社	B社	C社	HM-10
スギ120	RMSE (%)	0.6	1.7	1.4	1.5
スギ180	RMSE (%)	5.8	8.2	7.5	7.6
	25%以下RMSE (%)	0.8	1.0	0.9	1.3
スギ240	RMSE (%)	3.4	3.0	3.1	2.9
	25%以下RMSE (%)	3.2	1.0	1.0	1.1
	20%以下RMSE (%)	0.8	0.7	0.9	0.9
ヒノキ120	RMSE (%)	1.1	1.0	1.2	1.0
全体	RMSE (%)	3.4	4.5	4.2	4.2
	25%以下RMSE (%)	1.7	1.2	1.1	1.3
	20%以下RMSE (%)	0.8	1.1	1.1	1.3

2.5 携帯型高周波押し当て式水分計での測定結果

携帯型高周波押し当て式水分計の計測値と全乾法含水率の関係を図 2.5-1 に示す。本図には、検量線作成用および測定精度検証用のすべてのデータを示しており、各プロットは製材 1 本ごとの測定結果である。水分計の表示値が 20%以下であり、かつ全乾法による含水率が 20%以下であった個体の割合は、水分計の表示値が 20%以下であった個体全体に対して、HS-300 で 94%、HM-540 で 93%であった。この結果から、表示値のみを用いた判定では、全体として比較的安全側の測定がなされていると考えられる。一方で、全乾法による含水率が 20%を超える個体が多く含まれるスギ 240 のみを対象とした場合、同様の割合は HS-300 で 67%、HM-540 で 73%に低下した。このことから、特に含水率 20%近傍の個体については、より詳細な検証が必要であると考えられる。また、水分計の表示値が 20%を超えているにもかかわらず、全乾法による含水率が 20%以下であった個体の割合は、水分計の表示値が 20%を超えた個体全体に対して、HS-300 で 73%、HM-540 で 60%と比較的高い値を示した。これは、本来 20%以下で基準を満たしている個体であっても、水分計の測定誤差により基準外と判定される個体が多く含まれる傾向があることを示している。天然乾燥材は平衡含水率以下までの過乾燥が困難な材料であるため、水分計の表示値のみを基準とした判定を行った場合、歩留まり低下を招く可能性があると考えられる。

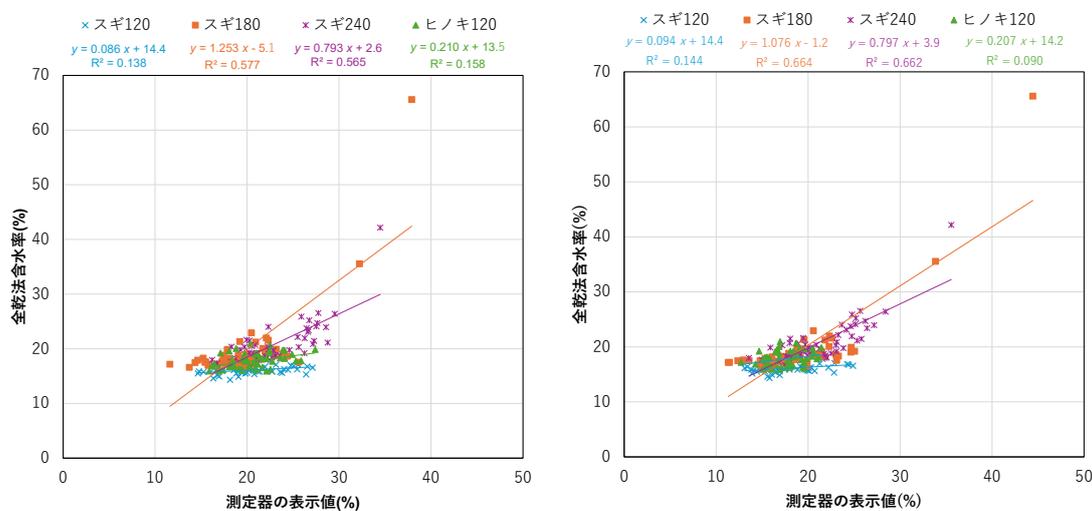


図 2.5-1 携帯型高周波押し当て式水分計の表示値と全乾法の含水率との関係
(左 : HS-300、右 : HM-540)

2.6 水分傾斜

各樹種、各断面における長さ方向、断面方向の含水率の分布例を図 2.6-1～図 2.6-4 に示す。なお、長さ方向と断面方向の図は同じ個体を示す。長さ方向では、端部の含水率が顕著に低いといった明確な傾向はみられなかった。一方断面方向では、どの断面においても断面中央部の含水率が高く、外側で含水率が低い傾向が見られた。また、含水率が高いほど中央部と外側の水分傾斜が大きいことが分かった。全乾法で含水率が 20%以下の個体は、断面中央部も含水率が 20%以下であり、十分に乾燥されていた。

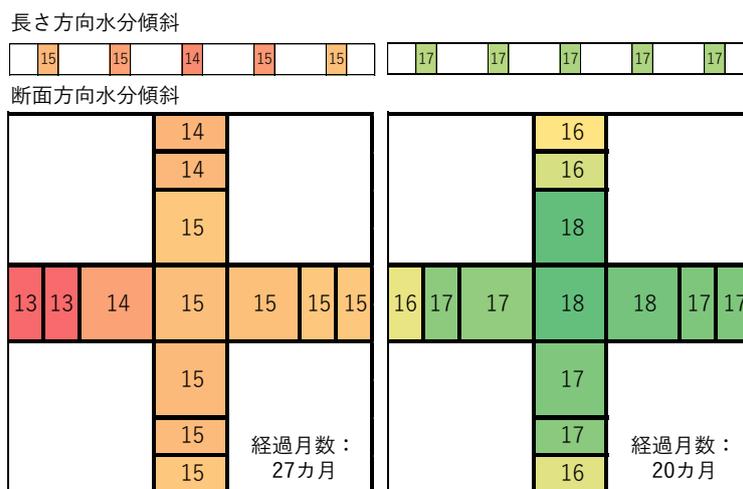


図 2.6-1 長さ方向、断面方向の含水率分布例

(スギ 120、図中の数字は含水率の整数値、低含水率：赤、高含水率：緑)

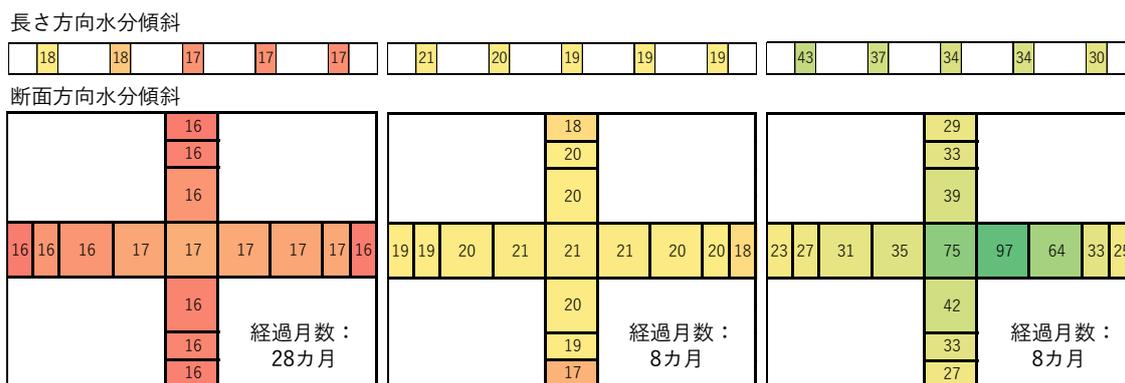
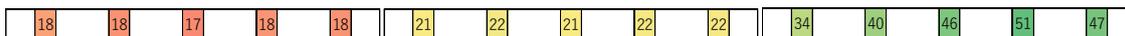


図 2.6-2 長さ方向、断面方向の含水率分布例

(スギ 180、図中の数字は含水率の整数値、低含水率：赤、高含水率：緑)

長さ方向水分傾斜



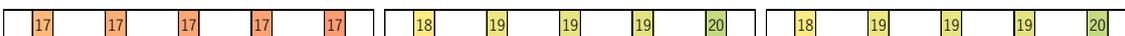
断面方向水分傾斜



図 2.6-3 長さ方向、断面方向の含水率分布例

(スギ 240、図中の数字は含水率の整数値、低含水率：赤、高含水率：緑)

長さ方向水分傾斜



断面方向水分傾斜

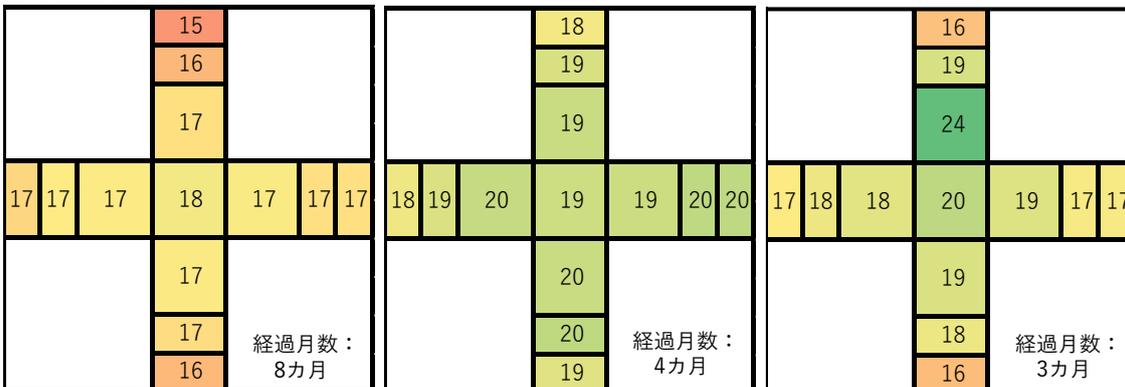


図 2.6-4 長さ方向、断面方向の含水率分布例

(ヒノキ 120、図中の数字は含水率の整数値、低含水率：赤、高含水率：緑)

2.7 材面割れ

材面割れの総長さを図 2.7-1 に、材面割れの総面積を図 2.7-2 に、材長に対する材面割れ長さの比を図 2.7-3 に示す。材面割れの総長さは、各樹種および各断面において平均値が材長 5000mm を超える大きな値を示した。材面割れの総面積についても、各樹種・各断面で平均値は 3000mm² を超えており、比較的大きかった。材長に対する材面割れ長さの比は、各条件の中央値がおおむね 0.7~0.9 に分布し、スギ 240 のみ 0.8 を下回った。全乾法含水率と材面割れの総長さとの関係を図 2.7-4 に示す。含水率が 30% を超える個体では、材面割れが比較的小さい傾向であった。含水率 20% を超える個体を除外し再集計した材面割れの総長さ、材面割れの総面積および材長に対する材面割れ長さの比を図 2.7-5~ 図 2.7-7 に示す。除外後は、材面割れの総長および総面積が全体として上昇し、材長に対する材面割れ長さの比は全条件で中央値が 0.8 以上となった。

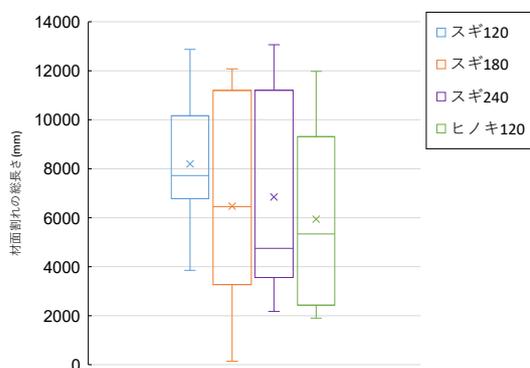


図 2.7-1 材面割れの総長さ

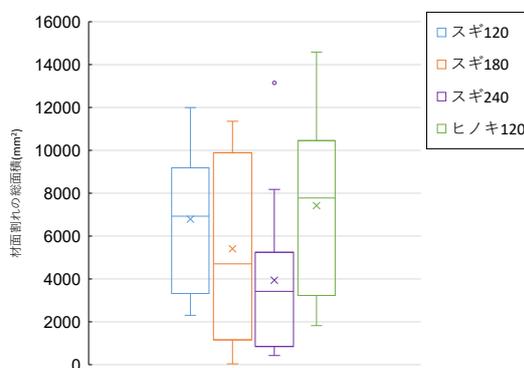


図 2.7-2 材面割れの総面積

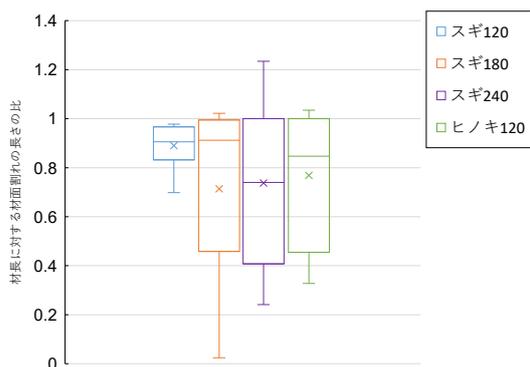


図 2.7-3 材長に対する材面割れの長さの比 (各材面のうちの最大値)

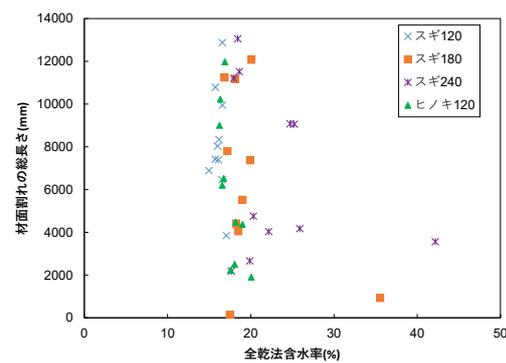


図 2.7-4 全乾法含水率と材面割れの総長さとの関係

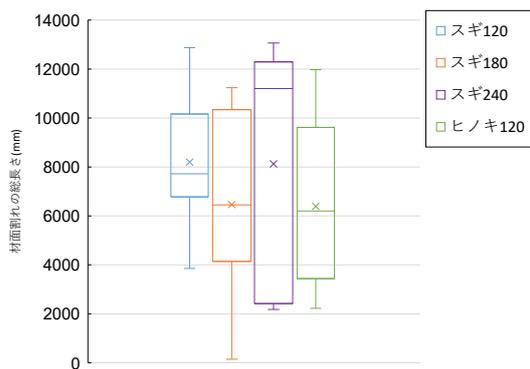


図 2.7-5 材面割れの総長さ
(含水率 20%以下)

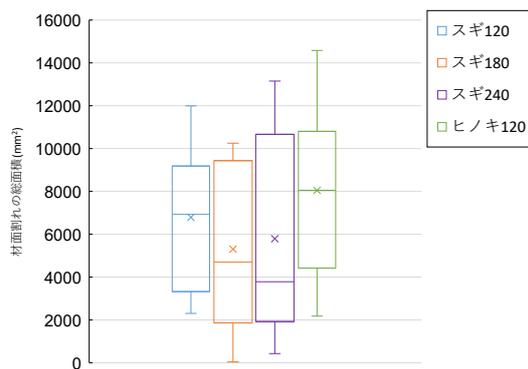


図 2.7-6 材面割れの総面積
(含水率 20%以下)

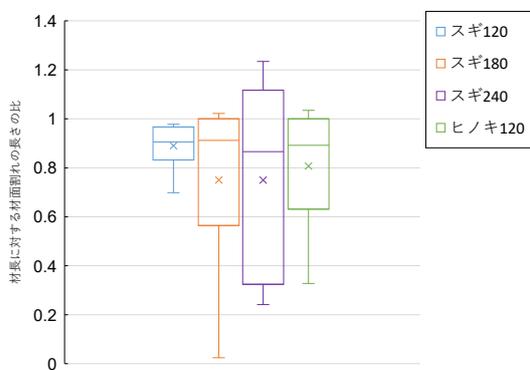


図 2.7-7 材長に対する材面割れの長さの比
(含水率 20%以下、各材面のうちの最大値)

第3章 まとめ

1 試験成果のまとめ

- (1) 天然乾燥材（スギ・ヒノキ）についてマイクロ波水分計の検量線を作成し、全乾法と比較した結果、含水率 20%以下の範囲では測定精度（RMSE）は概ね 1%程度であり、高精度な測定が可能であることを確認した。
- (2) 設置型の水分計は同種のマイクロ波方式を採用していたが、検量線の傾きと切片に差があり、設置工場による違いが確認された。
- (3) 天然乾燥土場での在庫の事前測定および試験体選定結果から、含水率 15%以下の個体は本試験では確認されず、天然乾燥材では 15%未満まで含水率が低下する事例は少ないことが示唆された。一方で、含水率 20%以下の個体は十分に存在することが予想された。
- (4) 樹種・断面ごとの検量線を適用した場合に加え、条件を統合した検量線においても、含水率 20%以下の範囲で RMSE は概ね 1%前後であった。
- (5) 水分傾斜の測定では、断面中央部の含水率が外周部より高い傾向が確認されたが、全乾法含水率が 20%以下の個体では断面中央部も 20%以下であり、内部まで乾燥が進んでいることが確認された。
- (6) 材面割れは各樹種・各断面において比較的大きく、材長に対する割れ長さの比の中央値は 0.7~0.9 程度であった。

2 今後の課題・展開等

- (1) スギ 120 で含水率の範囲が狭くなったため、含水率が 20~25%の範囲にある材料を確保し、引き続き検証試験を行う必要がある。
- (2) より簡易な検量線の作成方法を検討し、他の地域でも同様にマイクロ波水分計での測定が可能か検証する必要がある。
- (3) 天然乾燥材を JAS 機械等級区分構造用製材に適用するため、含水率管理に関する品質管理手法や仕上げ材の寸法変化を人工乾燥材と比較検証する必要がある。
- (4) 天然乾燥材製造に関する CO₂ 排出用の調査を実施し、天然乾燥材の製造に関する環境負荷を明らかにする。
- (5) 天然乾燥材の利用実態を調査し、試験による検証が必要な品目・寸法の検討を行う。
- (6) 天然乾燥材が JAS の機械等級区分構造用製材として格付けできるようにするために必要な技術的課題の解決に取り組み JAS の改正に必要な論点を明らかにする必要がある。

参考文献

- (1) (一社)全国木材組合連合会：製材 J A S の格付け率向上に資する検査方法案の検討事業報告書，2024.

令和6年度 木材製品の消費拡大対策のうち
CLT建築実証支援事業のうちCLT等木質建築部材技術開発・普及事業
「天然乾燥材をJAS機械等級区分構造用製材の含水率基準で
選別する技術の開発」
報告書

発行： 株式会社フジイチ

編集： 株式会社フジイチ

静岡県農林技術研究所森林・林業研究センター

発行日： 令和8年2月