

携帯型高周波式含水率計を用いた奈良県産スギ・ヒノキの正角および平角の水分管理(第2報)* —含水率傾斜が含水率計による測定に及ぼす影響—

成瀬達哉・寺西康浩

携帯型高周波式含水率計を用いて県産スギ・ヒノキの正角および平角の水分管理を適切に行うため、含水率傾斜が含水率計による測定に及ぼす影響について検討した。含水率傾斜は乾燥方法により異なると考えられるため、スギ正角に対しては天然乾燥、中温乾燥および高温セット乾燥を、ヒノキ正角に対しては天然乾燥、初期温度 45°Cでの乾燥（以下、低温乾燥と記す。）、中温乾燥および高温セット乾燥を行い、乾燥方法別に全乾法による含水率値と含水率計の測定値との関係を調べるとともに、含水率分布を調べた。

その結果、天然乾燥、低温乾燥および中温乾燥では、含水率計の測定値が全乾法による含水率値に概ね近似したが、高温セット乾燥では、含水率計の測定値が全乾法による含水率値よりも低かった。これは、材表層部の含水率が低く、かつ含水率傾斜が大きいことが影響したと考えられた。そこで、高温セット乾燥材については、含水率計の測定値を全乾法による含水率値に近似させる方法の一つとして、含水率計の測定値と全乾法による含水率値との関係を示す回帰式を用いて、含水率計の測定値から含水率を推定する方法を提案した。

1. はじめに

携帯型高周波式含水率計(以下、含水率計と記す。)は、製品の水分管理を行う上で必要性が高く、利便性も高いことから広く普及しており、多くの工場で使用されている。しかし、含水率計による測定は木材密度の影響を受けるため、含水率計の測定値(以下、含水率計値と記す。)と全乾法により求めた含水率値(以下、全乾法値と記す。)との間に差が生じる場合があることが指摘されている¹⁾。そこで、前報²⁾では、県産スギ・ヒノキの正角および平角の天然乾燥材を用いて、県産スギ・ヒノキ材に応じた密度補正值について検討した。

含水率計による測定に影響を及ぼす要因として、木材密度以外に含水率傾斜も挙げられる。含水率計は測定深度に限りがあるため、木材の断面寸法が大きい場合には材内部の含水率が測定値に反映されず、含水率傾斜の大きな材では、含水率計値が全乾法値よりも低くなる傾向があることが指摘されている³⁾。含水率傾斜の大小は、乾燥方法によって異なると考えられる。そこで、同一のスギ正角あるいはヒノキ正角から採取した試験体に対し、異なる方法を用いて乾燥し、乾燥方法別に全乾法値と含水率計値との関係を調べるとともに、含水率分布を調べ、含水率傾斜が含水率計での測定に及ぼす影響について検討した。

2. 材料と方法

2.1 材料

奈良県内で生産された未乾燥状態のスギ心持ち無背割り正角 9 本およびヒノキ心持ち無背割り正角 12 本を使用した。いずれも、木口断面は 135×135mm で、長さは約 4000mm であった。図 1 に、試験体の調製方法を示す。スギ正角からは、繊維方向に連続する長さ 960mm の試験体を 3 体ずつ、ヒノキ正角からは長さ 840mm のそれを 4 体ずつ採取した。試験体の採取後、両木口面にコニシ株式会社製エポキシ樹脂系接着剤ボンドクイックセット 30 を塗布し、乾燥経過が実大材のそれに近づくように工夫した。併せて、スギ正角からは a～d の位置で、ヒノキ正角からは a～e の位置で長さ 30mm の初期含水率測定用試片を採取した。これら試片の含水率を全乾法により求めた。各試験体と隣接する 2 つの試片の平均含水率を、その試験体の初期含水率とした。

2.2 試験体の乾燥

スギ正角およびヒノキ正角に生じた含水率傾斜が含水率計での測定に及ぼす影響を調べるため、同一のスギ正角あるいはヒノキ正角から採取した試験体に対し、異なる方法を用いて乾燥した。今回用いた乾燥方法は、天然乾燥、低温乾燥、中温乾燥および高温セット乾燥である。スギ正角に対しては天然乾燥、中温乾燥および高温セット乾燥を、ヒノキ正角に対しては天然乾燥、低温乾燥、中温乾燥および高温セット乾燥を適用した。各乾燥方法の詳細は表 1 に示すとおりである。

長さ約 4000mm のスギ正角およびヒノキ正角から各乾燥方法に供する試験体を 1 体ずつ設定するため、図 1

*本研究の一部は第 67 回日本木材学会年次大会(福岡 2017)において発表した。

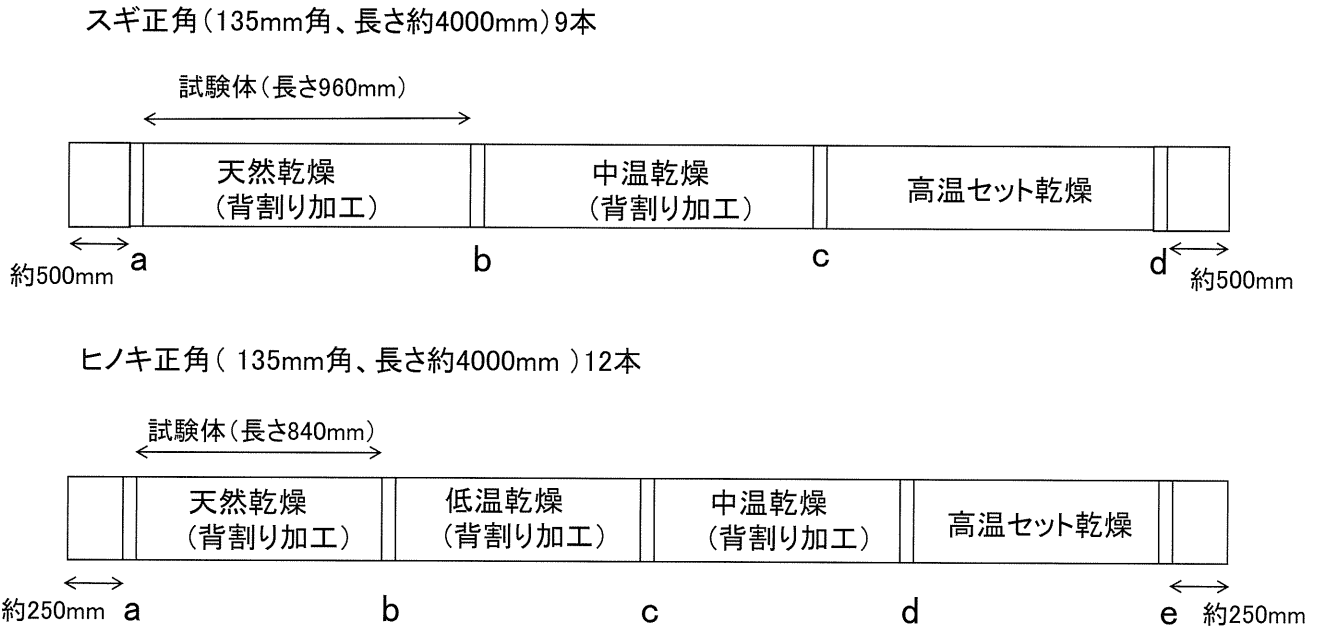


図1 試験体の調製方法
a~e: 初期含水率測定用試片(長さ30mm)

表1 乾燥条件

樹種	スギ			ヒノキ			
乾燥方法	天然乾燥	中温乾燥	高温セット乾燥 ⁴⁾	天然乾燥	低温乾燥	中温乾燥	高温セット乾燥 ⁴⁾
乾燥条件	・屋内(6月~翌年3月) ・気温(平均18.8℃,最高36.3℃,最低1.2℃) ・相対湿度(平均60.7%,最高92.0%,最低26.0%)	スケジュールA ⁵⁾	高温セット(乾球温度120℃,湿球温度90℃24h)+中温(乾球温度90℃,湿球温度60℃)	・屋内(10月~翌年3月) ・気温(平均13.4℃,最高27.0℃,最低2.7℃) ・相対湿度(平均57.6%,最高90.0%,最低26.0%)	スケジュールB ⁵⁾	スケジュールC ⁵⁾	高温セット(乾球温度120℃,湿球温度90℃18h)+中温(乾球温度90℃,湿球温度60℃)

スケジュールA ⁵⁾				スケジュールB ⁵⁾				スケジュールC ⁵⁾			
含水率範囲(%)	乾球温度(℃)	湿球温度(℃)	乾湿球温度差(℃)	含水率範囲(%)	乾球温度(℃)	湿球温度(℃)	乾湿球温度差(℃)	含水率範囲(%)	乾球温度(℃)	湿球温度(℃)	乾湿球温度差(℃)
生材~70	50	47.5	2.5	生材~30	60	56.5	3.5	生材~30	45	41.5	3.5
70~65	50	47	3	30~28	62	57	5	30~28	47	43	4
65~60	50	46.5	3.5	28~26	65	58	7	28~26	50	45	5
60~55	50	46	4	26~24	68	59	9	26~24	53	46.5	6.5
55~50	50	45.5	4.5	24~22	71	60	11	24~22	56	47.5	8.5
50~45	50	45	5	22~20	75	62	13	22~20	60	49	11
45~40	50	44	6	20~17	75	60	15	20~17	60	47	13
40~35	55	47.5	7.5	初期蒸煮: 乾球温度60℃乾湿球温度差0℃,8h				初期蒸煮: 乾球温度45℃乾湿球温度差0℃,8h			
35~30	55	45.5	9.5								
30~25	60	48	12								
25~15	60	45	15								

に示すような試験体の割り付けを行った。今回の検討ではスギ正角を9本、ヒノキ正角を12本使用したことから、各乾燥方法に供した試験体数は、スギ正角は9体、ヒノ

キ正角は12体であった。試験体の割り付けを行う際、試験体の初期含水率が乾燥方法間で差が認められないようにした。なお、天然乾燥、低温乾燥および中温乾燥を行

う試験体については表面割れが生じないように、あらかじめ幅約3mm、深さ67mmの背割り加工を施した。

乾燥装置は、高温セット乾燥の高温セット処理のみ山本ビニター株式会社製蒸気・高周波複合乾燥機D-WELLを使用し、高周波の印効は行わずに蒸気単独による高温セット処理を実施した。その他の人工乾燥では株式会社エスペック製恒温恒湿器PR-4Jを使用した。天然乾燥は実験棟内に積み重ねて行った。積み重ね付近の温度と相対湿度を株式会社ティアンドデイ製温湿度データロガーRTR-503を用いて計測した。

2.3 含水率計値および全乾法値の測定

図2に示す方法に従い、含水率水準a~cにおいて含水率計による測定と、それに対応する全乾法による測定を行った。乾燥期間中の含水率は、試験体の重量と、初期含水率および初期重量から推定した全乾重量をもとに全乾法により算出した。まず、含水率水準aに達した時点で、試験体の一端から試片A(長さ:スギ材320mm, ヒノキ材280mm。)を採取し、繊維方向の中央付近で含水率計による測定を行った。次に、その測定箇所から図3

に示す長さ30mmの含水率分布測定用試片を採取し、全乾法により含水率分布を調べた。試片Aを採取した残りの試験体は、直ちに木口面にエポキシ樹脂系接着剤を塗布し、含水率水準bに達するまで引き続き乾燥を行った。含水率水準b、含水率水準cにおける測定も同じ要領で行った。

含水率計による測定は、背割りのない向かい合った2材面について行い、平均値を求めた。含水率計は、前報²⁾で使用した3機種(以下、含水率計A、含水率計B、含水率計Cという。)のうち、スギ材では2機種(含水率計A、含水率計B)、ヒノキ材では3機種(含水率計A、含水率計B、含水率計C)を使用した。密度補正値は、前報において検討した県産スギ・ヒノキ材に応じた補正値を用いた。すなわち、県産スギ・ヒノキ材の全乾密度の母平均の推定値をもとに定めた密度補正値(以下、母平均補正値という。スギ材0.37g/cm³,ヒノキ材0.47g/cm³。)を用い、含水率計Bおよび含水率計Cを用いたヒノキ材の測定に限り、含水率計メーカーが樹種毎に定めた密度補正値(以下、メーカー補正値という。)を

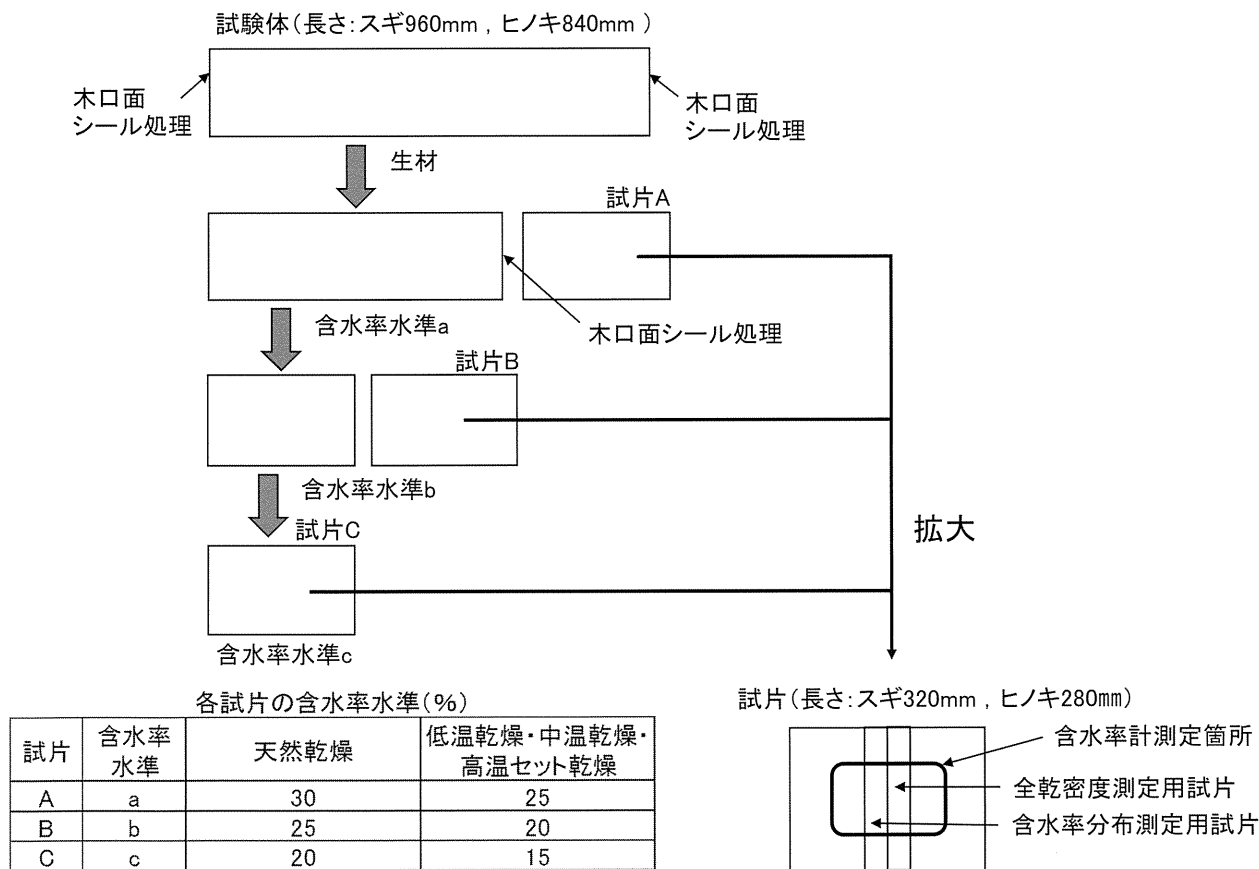


図2 試験の方法

用いた。

なお、含水率分布測定用試片と隣接して長さ 30mm の全乾密度測定用試片を採取し、全乾密度を測定した。まず、温度 105 °C に調整したエスペック株式会社製熱風恒温乾燥機 PH-401 を用いて試片を全乾付近まで乾燥し、その時点で直方体に調製した。次に、それを全乾まで乾燥し、直ちに質量および体積の測定を行った。

木口断面

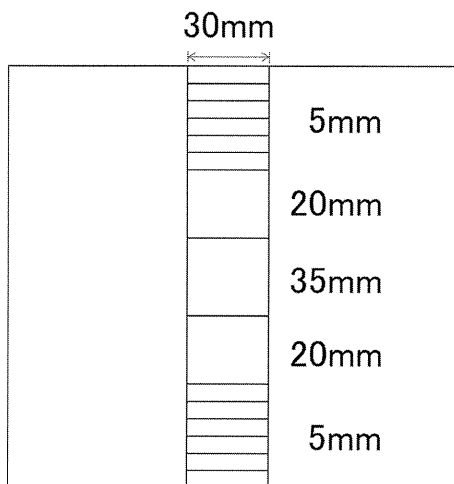


図3 含水率分布測定用試片の採取方法

3. 結果と考察

3.1 スギ材の全乾法値と含水率計値との関係

図4に、スギ材の全乾法値と含水率計値との関係を乾燥方法別に示す。なお、含水率計の中には、含水率30%以上は参考値として取り扱われている機種が存在するため、いずれの機種についても含水率計値30%以上のデータは含まれていない。

両機種ともに、天然乾燥および中温乾燥では含水率計値が全乾法値に概ね近似し、天然乾燥の含水率計値は中温乾燥のそれよりも若干高い傾向があった。高温セット乾燥の含水率計値は全乾法値よりも低かった。なお、試験材の全乾密度は、平均 0.37g/cm^3 、標準偏差 0.03g/cm^3 であり、前報²⁾で推定した県産スギ材の全乾密度の母平均(ρ_s)の95%信頼区間 $0.365 \leq \rho_s \leq 0.370$ に平均値が含まれていた。このような材に対して、県産スギ材に応じ

た密度補正値を用いたため、木材密度の要因による含水率計値と全乾法値との差は小さかったと考えられる。

3.2 スギ材の含水率分布

図5に、スギ材の含水率分布を含水率範囲別に示す。マーカ―は含水率分布試片の各採取位置における全乾法値の平均値を、エラーバーは標準偏差を示している。

まず、材表層部の含水率に着目すると、いずれの含水率範囲でも中温乾燥に比べ天然乾燥では高く、高温セット乾燥では低かった。これは、材表層部では材中心部よりも早く乾燥が進み、周囲の温度と相対湿度の条件に応じた平衡含水率に近づくと考えられるため、それぞれの乾燥条件における平衡含水率の違いが材表層部の含水率に影響を及ぼしたと考えられる。

材表層部の含水率が天然乾燥、中温乾燥、高温セット乾燥の順に高かったことが含水率計値に影響を及ぼし、図4で示したとおり含水率計値も同様に、天然乾燥、中温乾燥、高温セット乾燥の順に高かったと推定される。

次に、材表面付近と材内部の含水率差で示される含水率傾斜に着目すると、天然乾燥では中温乾燥よりも小さく、高温セット乾燥では中温乾燥よりも大きかった。高温セット乾燥の含水率傾斜が大きかったのは、高温低湿条件の高温セット処理により、表層部が急激に乾燥したためと考えられる。

また、いずれの乾燥方法でも高い含水率範囲ほど含水率傾斜が大きかったが、高温セット乾燥では含水率20%以上において材中心部の含水率が他の乾燥方法に比べ大幅に高く、含水率傾斜が大きかった。

これらのことから、高温セット乾燥では他の2つの乾燥方法よりも材表層部の含水率が低かったことに加え、含水率傾斜が大きかったことが影響し、図4で示したとおり含水率計値が全乾法値よりも低かったと考えられる。

さらに、含水率分布試片の各採取位置における含水率の標準偏差で示されるばらつきに着目すると、いずれの乾燥方法でも材中心部は材表層部よりもばらつきが大きく、高い含水率範囲ほどばらつきが大きい傾向があった。高温セット乾燥では他の2つの乾燥方法よりもばらつきが大きく、特に材中心部では大きかった。材中心部の含水率のばらつきは、含水率計値に対する全乾法値のばらつきに影響を及ぼすと考えられるが、高温セット乾燥では他の2つの乾燥方法よりもそれが大きいと推定された。

3.3 ヒノキ材の全乾法値と含水率計値との関係

図6に、ヒノキ材の全乾法値と含水率計値との関係を乾燥方法別に示す。なお、スギ材の場合と同様に、いず

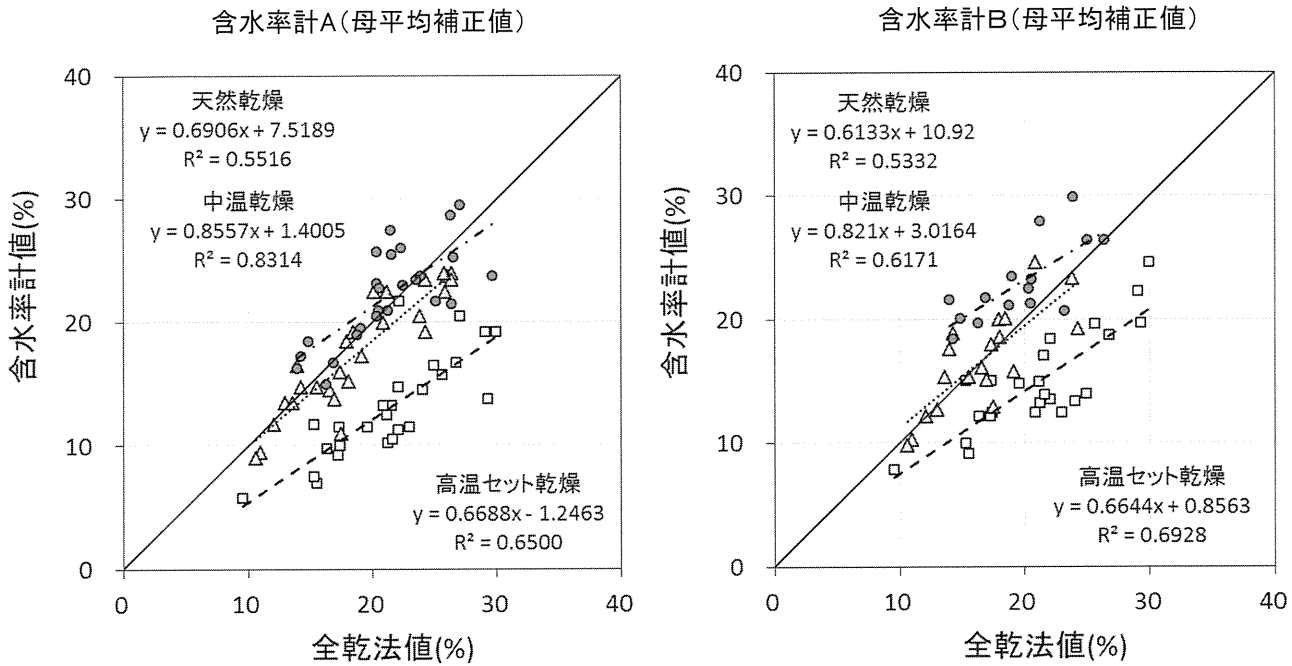
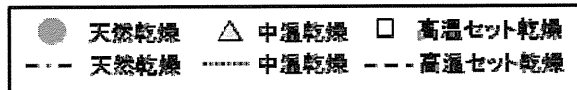


図4 スギの全乾法値と含水率計値との関係



れの機種についても含水率計値30%以上のデータは含まれていない。

いずれの機種でも、天然乾燥、低温乾燥および中温乾燥の含水率計値は概ね全乾法値に近似したが、全乾法値よりも若干低い傾向があった。これは、県産ヒノキ材に応じた密度補正值を用いたのに対し、試験材の全乾密度は平均0.45g/cm³、標準偏差0.03g/cm³であり、前報²⁾で推定した県産ヒノキ材の全乾密度の母平均(ρ_H)の95%信頼区間0.464 ≤ ρ_H ≤ 0.473よりも平均値がやや低かったことが原因の一つと考えられる。また、天然乾燥では、低温乾燥および中温乾燥よりも含水率計値が高い傾向があり、低温乾燥と中温乾燥との間には、明らかな差は認められなかった。高温セット乾燥の含水率計値は、低温乾燥および中温乾燥のそれよりも低かった。

3.4 ヒノキ材の含水率分布

図7に、ヒノキ材の含水率分布を含水率範囲別示す。マーカーは含水率分布試片の各採取位置における全乾法値の平均値を、エラーバーは標準偏差を示している。

まず、材表層部の含水率に着目すると、低温乾燥および中温乾燥に比べ天然乾燥では高く、高温セット乾燥で

は低かった。低温乾燥と中温乾燥との間には明らかな差は認められなかった。

次に、含水率傾斜に着目すると、低温乾燥および中温乾燥に比べ天然乾燥では小さく、高温セット乾燥では大きかった。低温乾燥と中温乾燥との間には明らかな差は認められなかった。いずれの含水率範囲でも、表層部の含水率はスギ材と同程度であったが、中心部の含水率はスギ材よりも低かった。これは、一般にヒノキ心材の生材含水率は、スギ心材のそれよりも低い⁶⁾とされていることから、心材の存在する中心部の生材含水率が、ヒノキ材ではスギ材よりも低かったためと推定される。

スギ材の場合と同様に、高温セット乾燥では他の3つの乾燥方法よりも材表層部の含水率が低かったことに加え、含水率傾斜が大きかったことが影響し、図6で示したとおり含水率計値が全乾法値よりも低かったと考えられる。

さらに、含水率分布試片の各採取位置における含水率のばらつきに着目すると、いずれの乾燥方法でも、スギ材に比べて小さかった。そのため、このばらつきが含水率計値に対する全乾法値のばらつきに及ぼす影響は、ス

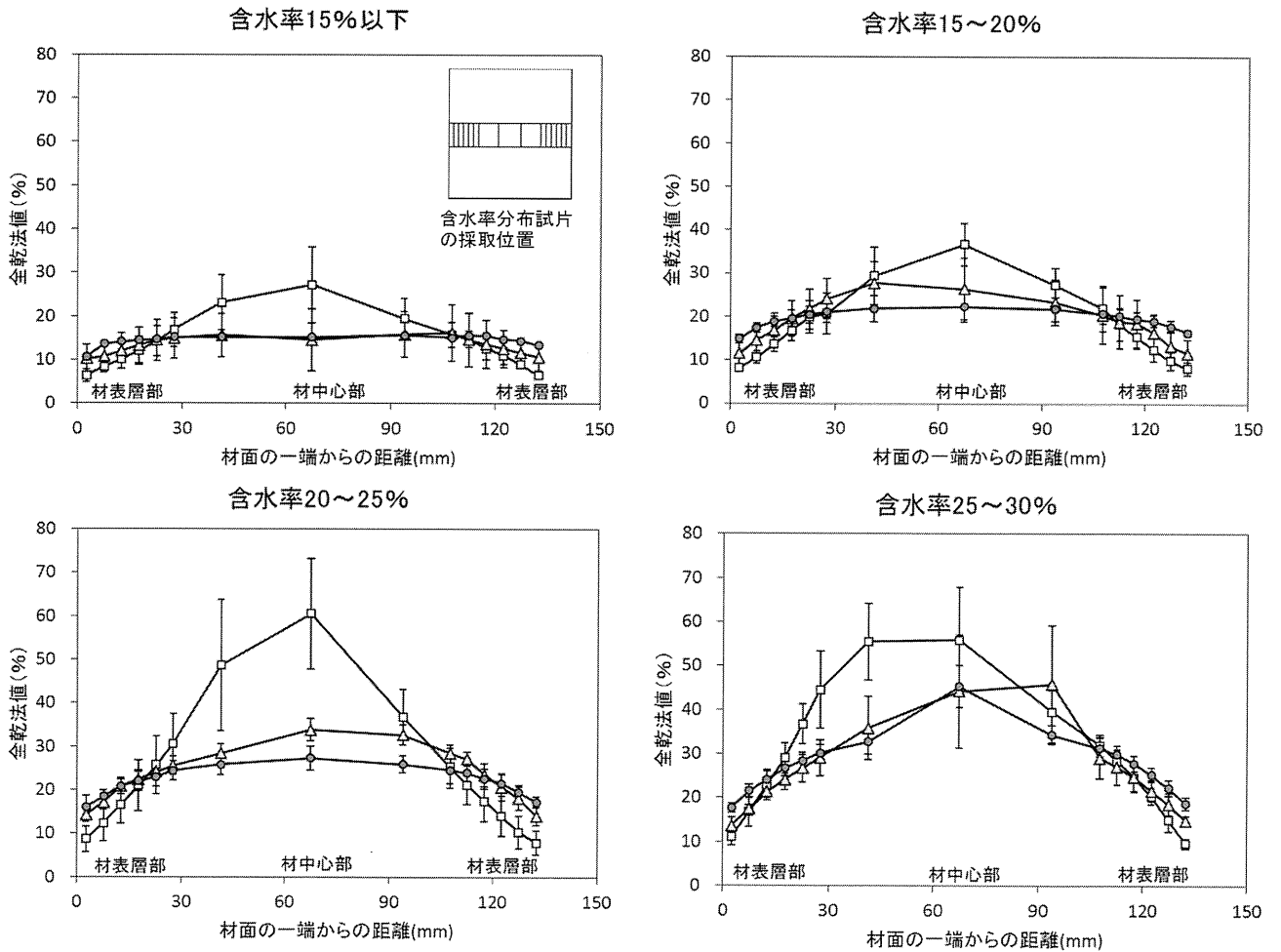


図5 スギ正角の含水率分布

● 天然乾燥 △ 中温乾燥 □ 高温セット乾燥

注：エラーバーは標準偏差。

ギ材に比べて小さいと推定された。

3.5 高温セット乾燥材の水分管理方法に関する考察

スギ材、ヒノキ材ともに、高温セット乾燥では含水率計値が全乾法値よりも低い値を示したため、その含水率計値をもとに水分管理を行った場合、乾燥が不十分となる恐れが考えられた。含水率計値を全乾法値に近似させるための方法の一つとして、含水率計値と全乾法値との関係を示す回帰式を用いて、含水率計値から含水率を推定する方法が考えられる。

例として、高温セット乾燥を行ったスギ・ヒノキ材の含水率計A（母平均補正値）による値と全乾法値との関係（図8）に対し、この方法を試みた。図8における含水率計値と全乾法値との関係を示す回帰式（スギ材

$y=0.9718x+8.6922$ 、ヒノキ材 $y=1.7517x-0.1665$ ）の x に含水率計値を代入し、得られた推定の含水率値と全乾法値との関係を図9に示す。スギ材、ヒノキ材ともに、推定の含水率値は全乾法値に概ね近似した。

また、含水率値の推定に用いた回帰式は、乾燥後の養生をほとんど行わずに測定した結果から得られたものである。しかし、乾燥後の養生期間中に含水率傾斜が小さくなる⁷⁾に伴い、材中心部の含水率のばらつきも減少すると推測される。そのため、材中心部の含水率のばらつきが大きかったスギの高温セット乾燥材では、乾燥後の養生期間を設けた場合の回帰式を検討することにより、含水率の推定精度が向上する可能性があると考えられる。

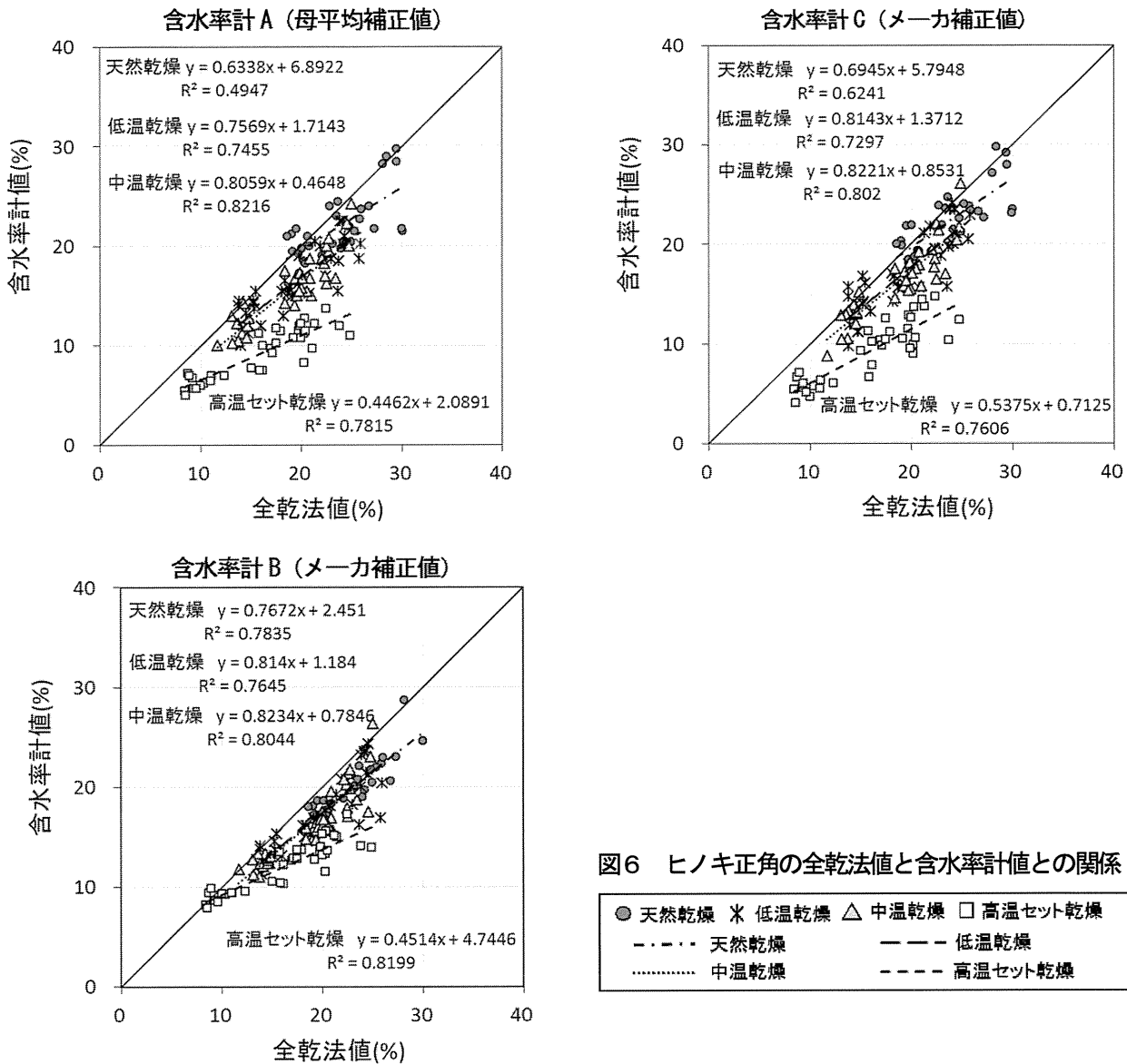


図6 ヒノキ正角の全乾法値と含水率計値との関係

まとめ

携帯型高周波式含水率計を用いて県産スギ・ヒノキの正角および平角の水分管理を適切に行うため、スギ正角およびヒノキ正角に生じた含水率傾斜が含水率計での測定に及ぼす影響を調べた。得られた結果は以下のとおりである。

1) スギ材では、天然乾燥および中温乾燥の含水率計値は全乾法値に概ね近似し、天然乾燥の含水率計値は中温乾燥のそれよりも若干高い傾向があった。高温セット乾燥の含水率計値は中温乾燥のそれよりも低く、全乾法値よりも低かった。

2) ヒノキ材では、天然乾燥、低温乾燥および中温乾燥の含水率計値は全乾法値に概ね近似した。天然乾燥で

は、低温乾燥および中温乾燥よりも含水率計値が高い傾向があり、低温乾燥と中温乾燥との間には、明らかな差は認められなかった。高温セット乾燥の含水率計値は、低温乾燥および中温乾燥のそれよりも低く、全乾法値よりも低かった。

3) スギ材、ヒノキ材ともに、材表層部の含水率は低温乾燥および中温乾燥に比べ天然乾燥では高く、高温セット乾燥では低かった。この材表層部の含水率が含水率計値に影響を及ぼしたと推測された。また、含水率傾斜は低温乾燥および中温乾燥に比べ天然乾燥では小さく、高温セット乾燥では大きかった。高温セット乾燥では他の3つの乾燥方法よりも材表層部の含水率が低かったことに加え、含水率傾斜が大きかったことが影響し、含水率計値が全乾法値よりも低かったと考えられた。

4) スギ材、ヒノキ材ともに、高温セット乾燥では含

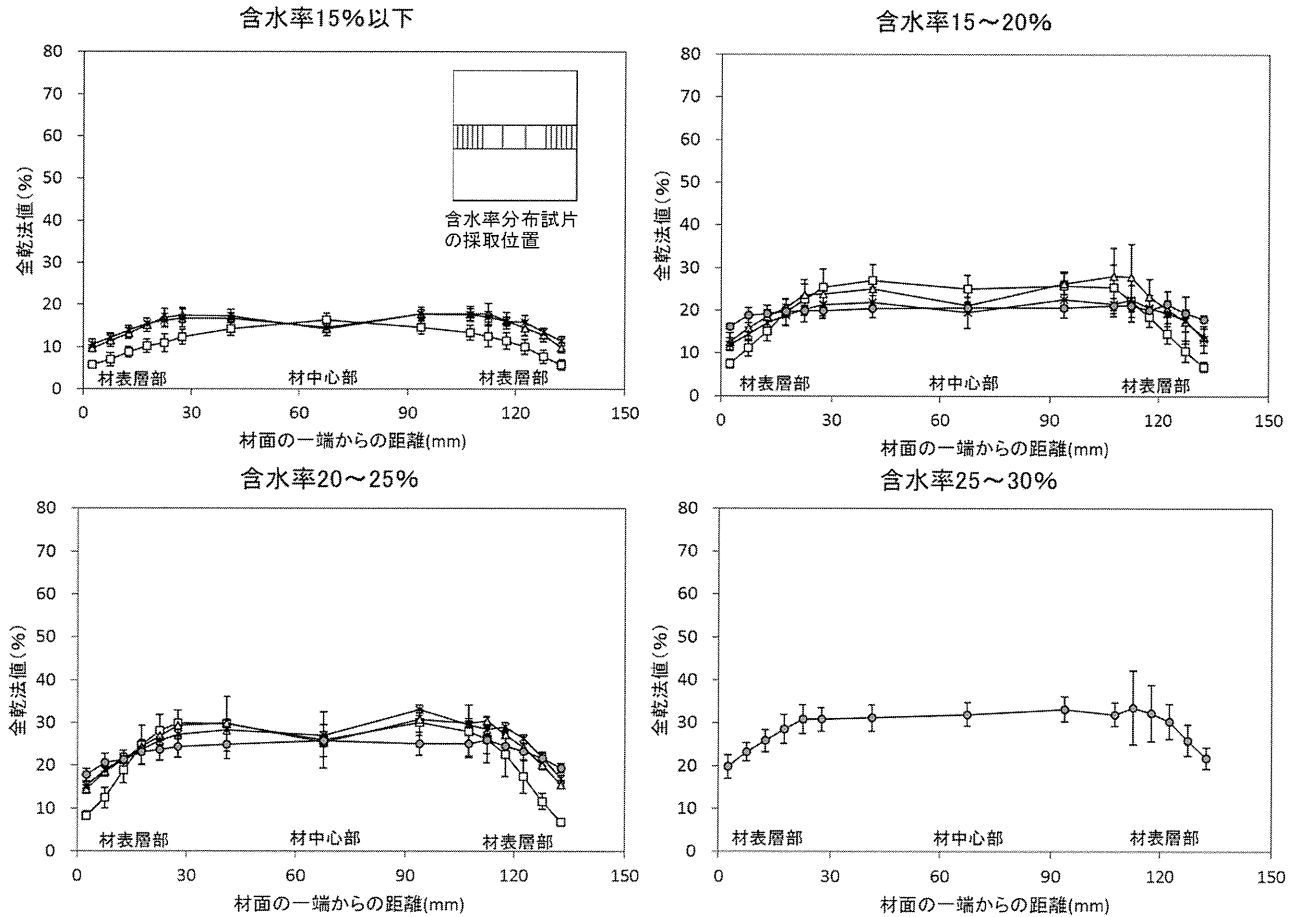
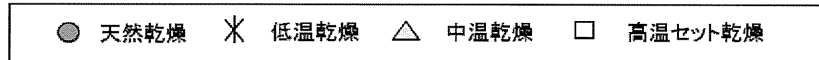


図7 ヒノキ正角の含水率分布



注：エラーバーは標準偏差。

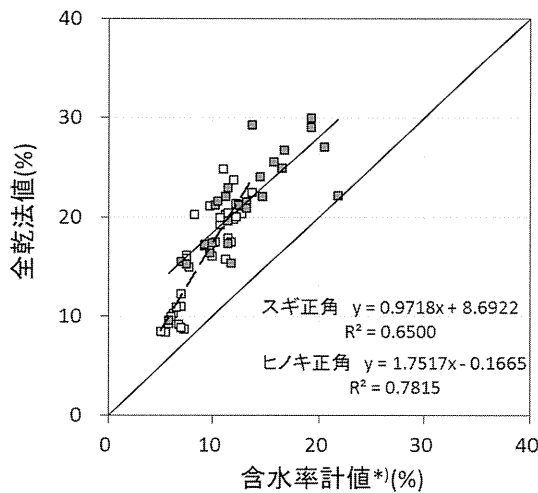
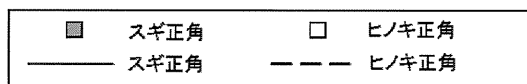


図8 スギ・ヒノキの正角（高温セット乾燥）の含水率計値と全乾法値との関係



*) : 含水率計A（母平均補正值）による値。

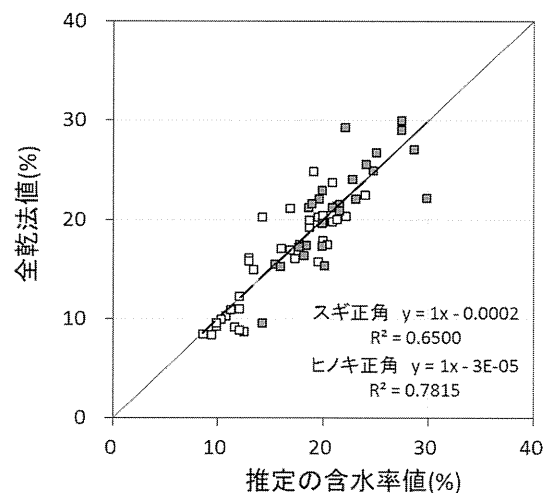
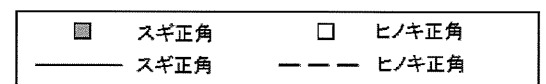


図9 回帰式*)より推定した含水率値と全乾法値との関係



*) : 図8における含水率計値と全乾法値との関係を示す回帰式。

水率計値が全乾法値よりも低い値を示すため、その含水率計値をもとに水分管理を行った場合、乾燥が不十分となる恐れが考えられた。含水率計値を全乾法値に近似させるための方法の一つとして、含水率計値と全乾法値との関係を示す回帰式を用いて、含水率計値から含水率を推定する方法を提案した。

引用文献

- 1) 野々田稔郎：携帯型高周波式含水率計によるヒノキ柱材の水分管理方法の検討：三重県科学技術振興センター林業研究部研究報告 18, 43-51 (2006)
- 2) 成瀬達哉, 寺西康浩：携帯型高周波式含水率計を用いた奈良県産スギ・ヒノキの正角および平角の水分管理 (第1報) -天然乾燥材に対する適切な密度補正值の検討-：奈良県森技セ研報 46, 31-37 (2017)
- 3) 久田卓興：高周波式含水率計の測定精度調査. 木材工業, 41(1), 24-27(1986)
- 4) 「安全・安心な乾燥材生産技術の開発」研究グループ：安全・安心な乾燥材の生産・利用マニュアル. 石川, 石川県林業試験場 石川ウッドセンター, 2012, 14, 16.
- 5) 社団法人全国木材組合連合会：わかりやすい樹種別乾燥材生産の技術マニュアル. 東京, 全国木材協同組合連合会, 2004, 23, 34, 39.
- 6) 寺澤眞：木材乾燥のすべて. 滋賀, 海青社, 1994, 593.
- 7) 河崎弥生：-建築用針葉樹製材のための-人工乾燥材生産技術入門. 岡山, 岡山県木材加工技術センター, 1996, 222-225.

(2018年3月29日受理)

