

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

An examination of the moisture control method of the hinoki lumber
using the portable high frequency type moisture meter.

野々田稔郎¹⁾

Toshiro NONODA

要旨：携帯型高周波式含水率計により、ヒノキ柱材の含水率を正確に把握し、適正な水分管理を行うことを目的に試験を実施した。1年間室内に放置し、平衡含水率となったヒノキの短柱を用いた測定では、試験材の全乾比重と含水率計設定比重の差が大きいほど、含水率計測定値の全乾法含水率に対する誤差も大きい傾向を示した。また、試験材の全乾比重に応じて、含水率計の設定比重を変更すれば、比較的正確な値を得られることが確認できた。しかし、実際の生産現場で、測定材の全乾比重を把握することは困難であることから、含水率計設定比重を一定として含水率計含水率を測定し、測定材の重量と寸法から求められる比重を同時に求め、この両測定値から全乾法含水率を推定する方法を提案し、その適合性について検討を行った。その結果、含水率計の測定値に比べ、より正確な全乾法含水率の推定が可能であると考えられた。

はじめに

木材及び木材製品の含水率は、日本農林規格(以後 JAS という)において、使用目的別にその適正値が定められている。針葉樹構造材に関しては、1991年1月に D25(含水率 25%以下)、D20(含水率 20%以下)、D15(含水率 15%以下)の3水準が定められた。しかし、この水準では、乾燥材であっても寸法変化が大きく、建築後のトラブルが生じるケースが多く見られたこと等から、2001年11月に寸法仕上げ材については SD20(含水率 20%以下)、SD15(含水率 15%以下)の2基準とする JAS の一部改正が行われ、建築後の寸法安定化を図ることとなった(久田 2003)。このような寸法安定化が求められる背景には、近年の部材プレカット化等によって建築期間が短縮化し、その間の自然乾燥が望めなくなったことや、断熱性・気密性や耐震性等の住宅の高性能化に対する市場ニーズが高まっていることがあげられる(黒田 2003)。さらに、2000年1月に施行された「住宅の品質確保に関する法律」では、保証期間を10年間とする瑕疵保証の義務化が定められ、高度に品質管理された住宅部材が建築業界から求められるようになったことも大きな原因であると考えられる。

このような状況から、乾燥材生産現場では、以前にも増してより低含水率に管理された乾燥材生産を行う必要が生じている。従来、製材品の水分管理は JAS では全乾法による方法が原則とされている。

¹⁾ 三重県科学技術振興センター林業研究部

Forestry Research Division, Mie Prefectural Science and Technology Promotion Center
E-mail : nonodt00@pref.mie.jp

しかし、この方法はロットからの抽出検査であり、試験片を採取して含水率を測定するため、実際の生産現場では取り組みにくく、一般に非破壊的な方法として含水率計が用いられる(久田 1996)。含水率計は、測定方式により、高周波式、マイクロ波式等に分かれ、また、設置型と携帯型に分類されるが、三重県内では、携帯型高周波式含水率計(以下、高周波式含水率計という)が最も多く使用され、生産現場で活用されている。

ところでこの高周波式含水率計は、測定可能深度が材表面から約 5 cm 程度までであるため、材断面が大きく、中心部に水分が残存しやすい構造材等では、表面の水分のみが測定され、全乾法含水率に比較して過小の値となることが指摘されている(例えば久田 1986, 増馬 1997)。

また、この含水率計は、木材の含水率と誘電率の間に相関関係があることを原理としており、測定された誘電率を水分量に換算して含水率を推定している。このため、同じ含水率でも測定材の全乾比重が異なれば誘電率も異なった値となり、測定値と全乾法の間には乖離がみられ(斉藤 2004)、含水率計の設定比重を変化させれば、同一測定材でも異なった値を示す(山田ら 1994)。したがって、この含水率計を用いて、全乾比重の個体間差の影響を小さく、正確な測定値を得るためには、個体毎の全乾比重に合わせて設定比重を変更して測定する必要があるが、乾燥材生産現場では適応し難い。

このようなことから、ここではヒノキ柱材を用いて、全乾比重の個体間のばらつきが高周波式含水率計の測定値に及ぼす影響を検討し、柱材の含水率をより正確に測定する方法について若干の考察を試みた。

材料と試験方法

柱材の全乾比重のばらつきが高周波式含水率計の測定値に及ぼす影響を検討するため、以下に示す 3 種類の測定及び計算を行った。なお、ここで用いた含水率計は、(財)日本住宅・木材技術センター認定機種(認定番号 1-02-001)である。

1. 測定 1 : 比重の異なる測定材の含水率測定

1 年間室内に放置し、ほぼ平衡含水率となったヒノキ 15 本の短材(12 cm 角, 1 m 材)について、両木口から 30 cm の距離にある背割り面を除く 3 材面(合計 6 点)を測点とし、高周波式含水率計により測定を行った。含水率計の設定比重は、ヒノキの樹種毎に定められた値で一定として測定した。含水率計による測定後は、測定箇所から厚さ 5 cm の試験片を採取し、全乾法含水率 U_0 と試験片比重 GU を測定した。

2. 測定 2 : 含水率計設定比重の変化に対する含水率測定

1 年間室内に放置し、ほぼ平衡含水率となったヒノキ短材(12 cm 角, 0.5 m 背割り材) 6 本を用い、木口から 25 cm の背割り面を除く 3 材面を測点とし、含水率計設定比重を 0.1-0.6 の範囲で変化させ含水率を測定した。合わせて含水率測定箇所から厚さ 5 cm の試験片を採取し、全乾法含水率 U_0 と試験片比重 GU を測定した。

3. 測定 3 : 実大材を用いた含水率測定

試験材にヒノキ柱材(11 cm 角, 3 m 背割り材) 48 本を用い、両木口から 0.5 m 及び両木口から等し

い 1.5 m の背割り面を除く 3 材面, 合計 9 箇所を測点とし, 含水率計含水率, 材面幅(背割り面を含む), 重量を測定した。測定した試験材は, 人工乾燥(温度 50-60 °C, 7 日間)を行い, 乾燥前と同様の項目について測定した後, 測点から厚さ 5 cm の試験片を採取し, 全乾法含水率 U_0 を測定した。

4. 全乾比重 G_0 の算出方法

信田ら(1990)は, 試験片採取時の全乾法含水率 U_0 とそのときの試験片比重 GU の関係は, 全乾比重 G_0 が既知の場合, 含水率 0-25% の範囲では以下の(1)式の関係がよく知られているとして, この式を含水率推定に用いている。本試験においては(1)式を次の(2)式に変形し, 試験片採取時の全乾法含水率 U_0 と試験片比重 GU から全乾比重 G_0 を求めることとした。

$$GU = G_0(100 + U_0) / (100 + 0.84 \cdot G_0 \cdot U_0) \quad (1)$$

$$G_0 = 100 \cdot GU / \{100 + U_0(1 - 0.84 \cdot GU)\} \quad (2)$$

結果と考察

1. 全乾比重の異なる試験材の含水率計含水率と全乾法含水率の関係

測定 1 におけるヒノキ試験材から採取した試験片の全乾法含水率 U_0 は, 13-17%(平均 15%)であった。また, 採取試験片を用いて先の(2)により求めた全乾比重 G_0 は, 0.40-0.57 (平均 0.47)であり, 一般的な気乾比重(日本木材学会・物理・工学編編集委員会 1985)から同様に計算される全乾比重 0.31-0.50 (平均 0.40)よりやや高めの値を示した。これは, 年輪幅の狭い材であったことによると思われる。また最低値と最大値にはヒノキで 0.17 程度の差があり, ばらつきが見られた。

図-1 は, これら試験材(測定 1)における含水率計含水率 U_y と全乾法含水率 U_0 の関係を示している。なお, この測定では, 含水率の設定比重 G_x は, 通常測定するヒノキ比重(= 0.38)で一定値を設定して測定している。全乾法含水率 U_0 と含水率計含水率 U_y の値が等しければ, 図中に示した $U_0 = U_y$ の直線上に測定値がプロットされることになる。同図において, 試験材の全乾法含水率 U_0 は, 1 年間室内に放置されていることから, ほぼ平衡状態の 15% 前後の値となっているのに対し, 含水率計含水率 U_y は, 12-25% の範囲にばらついていることがわかる。このばらつきの原因が, 高周波式含水率計の測定深度が浅く, 内部の残存水分を測定しきれないことに起因するのであれば, 含水率計含水率 U_y は, 全乾法含水率 U_0 に比較して過小の値となり(久田 1986), 図中 $U_0 = U_y$

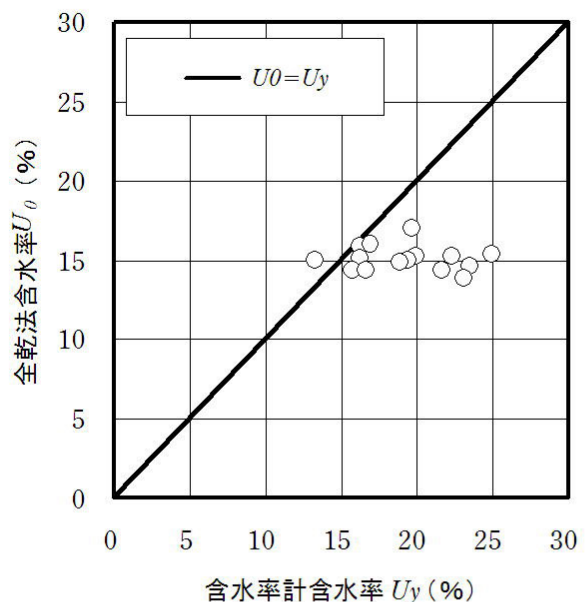


図-1. ヒノキ短柱材における含水率計含水率と全乾法含水率の関係

の直線の左側にプロットされるはずである。しかし、同図では、その多くの測定値が直線の右側にプロットされていること、1年間室内に放置され、ほぼ平衡含水率となり、試験材内部に水分傾斜が生じていないと考えられること等から、含水率計含水率 U_y の測定値のばらつきは、試験材個々の全乾比重 G_0 のばらつきに起因するものと考えられる。

図-2は図-1に示した全乾法含水率 U_0 がほぼ一定にもかかわらず、含水率計含水率 U_y の測定値がばらつく原因が、全乾比重 G_0 のばらつきにあることを確認するため、全乾比重 G_0 と全乾法含水率 U_0 に対する含水率計含水率 U_y の適合率 U との関係を示したものである。なおこの適合率は $U=(U_y/U_0)$ によって表している。また、図中の直線は、ヒノキ試験材に対する回帰直線であり、以下の関係が得られた。

$$U=4.080 \cdot G_0 - 0.631 \quad (3) \quad (r^2=0.676^{***})$$

ヒノキ試験材の全乾法含水率 U_0 と含水率計含水率 U_y が等しい値であれば、全乾比重 G_0 の値に関係なく $U=1$ の直線上に測定値がプロットされることになる。同図によれば、全乾比重 G_0 の増加にともなって、含水率適合率 U の値も増加する傾向にある。上述の(3)式と $U=1$ の交点における G_0 の値を求めると $GP=0.40$ が得られ、含水率計設定比重 G_x とほぼ同値となった。このことから、全乾法含水率 U_0 と含水率計含水率 U_y の間には以下の関係が認められる。

$$\begin{aligned} G_0 < GP \text{ のとき } & U_0 > U_y \quad (U < 1) \\ G_0 = GP \text{ のとき } & U_0 = U_y \quad (U = 1) \\ G_0 > GP \text{ のとき } & U_0 < U_y \quad (U < 1) \end{aligned}$$

上の関係は、試験材の全乾比重 G_0 が含水率計設定比重 G_x (この場合は $=GP$)に近い値であれば、含水率計含水率 U_y は全乾法含水率 U_0 と比較的近い値を示すが、(3)式の関係が示すように、全乾比重 G_0 と $G_x(=GP)$ の差が大きいほど、含水率計含水率 U_y と全乾法含水率 U_0 の測定値は乖離が大きくなることになる。これらから、図-1に示す全乾法含水率 U_0 に対する含水率計含水率 U_y のばらつきは、試験材の全乾比重 G_0 のばらつきに起因すると考えられる。

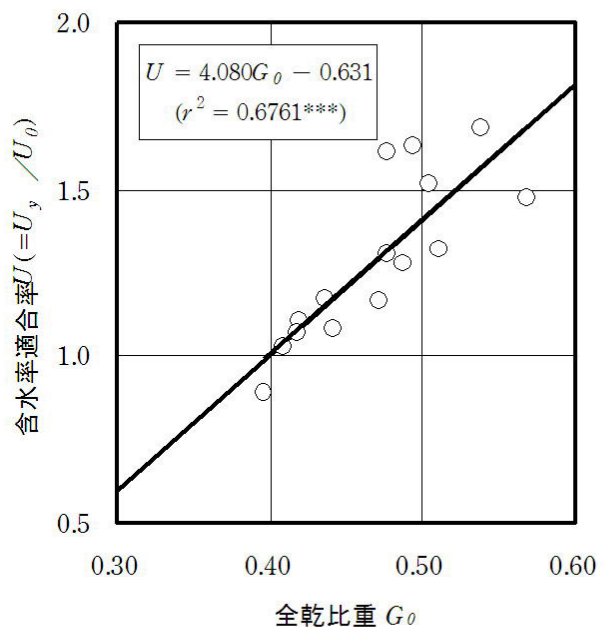


図-2. ヒノキ短柱材における全乾比重と含水率適合率の関係

*** 危険率0.1%で有意を示す。

2. 含水率計設定比重と含水率測定値の関係

前述したとおり、含水率計設定比重 G_x と試験材の全乾比重 G_0 の差が含水率適合率 U の値に影響を及ぼしていることから、ヒノキ短材 6本を試験材として、含水率計設定比重 G_x を 0.1-0.6 の範囲で変化させ、含水率計含水率 U_y と全乾法含水率 U_0 を測定した(測定 2)。試験材 6本の全乾法含水率 U_0 は 11-12%、先の(2)式より求めた全乾比重 G_0 は、0.385-0.476(平均 0.414)であった。

図-3は、この測定結果のうち 2 試験木について示した例であり、他の試験木 4 本についても同様

の傾向を示した。なお、図中の△印は、試験材から採取した試験片の実際の全乾法含水率 U_0 と全乾比重 G_0 の値をプロットしたものである。同図によれば、含水率計設定比重 G_x を高く設定するほど、含水率測定値は直線的に減少する傾向を示し、試験材で切片は異なるが、ほぼ同じ傾きを示す。

一方、試験片実測値(△)はいずれも、ほぼこの直線上にプロットされ、試験材の全乾比重 G_0 に応じて、含水率計比重 G_x を設定すれば、含水率計含水率 U_y は全乾法含水率 U_0 と近い値を示すことが解る。ここで、含水率計の設定比重 G_x を試験材 No.1(□)の全乾比重である 0.38(図中破線： $G_x=G_0$)と設定して測定すれば、破線と実線の交点である含水率計含水率 U_y (=10.5%)が測定され、全乾法含水率 U_0 (=11%)とほとんど差が生じない。しかし、この含水率計設定比重 G_x (=0.38)を用い、試験材 No.3(○)を測定すると、実際の全乾比重 G_0 (=0.456)と異なるため、全乾法含水率 U_0 (=11%)に対して、含水率計含水率 U_y (=14%)とずれが生じる。この試験材 No.3(○)の場合、含水率計設定比重 G_x を実際の全乾比重 G_0 (=0.46)に設定すると、図-3 より含水率計含水率 U_y (=11%)が求めることができる。

以上の測定結果から、測定材の全乾比重 G_0 のばらつきに起因して、含水率計含水率と全乾法含水率の間に生じる測定誤差は、測定材の全乾比重 G_0 を測定し、含水率計設定比重 G_x を対応させれば、比較的回避できる可能性が示されたものと考えられる。しかし、測定材の全乾比重 G_0 を測定し、この値に応じて含水率計設定比重を変更することは、非常に手間のかかる作業であり、生産現場では実施し難い。そこで、含水率計設定比重 G_x は、従前のヒノキ材の一般的な設定比重($G_x=0.38$)として測定し、全乾比重 G_0 を測定後に求めて、含水率計含水率 U_y から正確な全乾法含水率を推定する方法を検討した。

図-4 は、図-3 に示した各試験材の関係を x 軸を各試験材の全乾比重 G_0 と含水率計設定比重 G_x とを用いて、 $G=(G_x / G_0)$ とし、 y 軸を全乾法含水率 U_0 と含水率計含水率 U_y とを用いて、 $U=(U_y / U_0)$ (前述の含水率適合率)としてそれぞれ表し、6 試験材の測定値を合わせて示したものである。 G と U の間には以下(4)式の関係が認められた。

$$U = a \cdot G + b \quad (4) \quad (r^2=0.978^{***})$$

ここに、 a (= - 1.342)、 b (=2.332)は係数である。

上の(4)式と $G=(G_x / G_0)$ 、 $U=(U_y / U_0)$ の関係を用いれば、次の(5)式が得られる。

$$U_{0i}^* = G_0 \cdot U_{yi} / (a \cdot G_x + b \cdot G_{0i}) \quad (5)$$

ここに、 U_{0i}^* ：推定全乾含水率、 i ：計算の繰り返し回数を表す添え字である。上の(5)式は、ある含

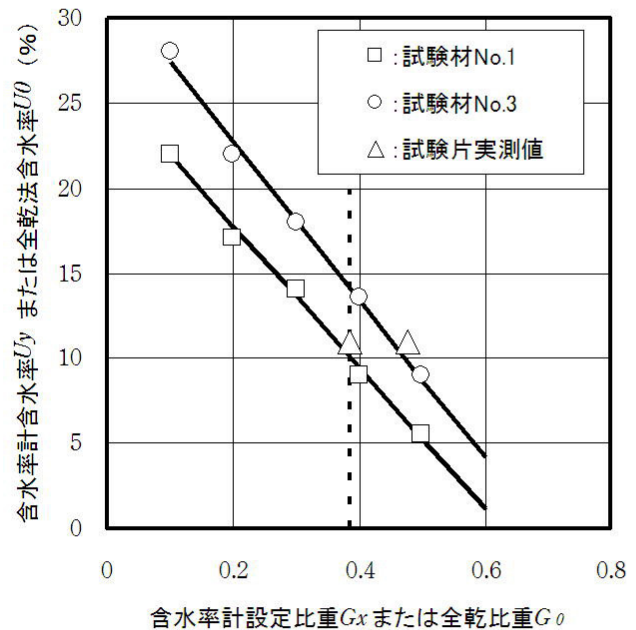


図-3. ヒノキ短柱材における含水率計設定比重と含水率計含水率の関係

--- $G_x = 0.38$ を示す。

含水率計設定比重(=Gx)を用いて、測定材の含水率計含水率 U_y を測定し、同時に測定材の重量と寸法から全乾比重 G_0 を求め、それぞれ(5)式に代入すれば、両辺が等しくなる全乾法含水率(=U0*)を数値計算により推定することが可能であることを示している。測定・計算手順は、以下のとおりである。

- ①含水率計設定比重 G_x を定めて試験材の含水率計含水率 U_{y1} を測定する。
- ②同時に含水率計含水率 U_{y1} 時点の比重 G_{U1} を測定する。
- ③全乾法含水率 U_{01}^* が含水率計含水率 U_{y1} と等しい($U_{01}^* = U_{y1}$)と仮定し、前述(2)式に G_{U1} , U_{01} を代入して全乾比重 G_{01} を求める。
- ④(5)式右边に G_{01} , U_{y1} , G_{x1} , a , b の値を代入して、全乾法含水率 U_{02}^* を算出する。
- ⑤ $U_{01}^* = U_{02}^*$ であれば、推定全乾法含水率 U_{0i}^* が求まり、計算を終了。
- ⑥ $U_{01}^* \neq U_{02}^*$ であれば、計算された U_{02}^* を(2)式に再度代入して G_{02} を求め、(5)式により新たな U_{03}^* を計算する。
- ⑦左辺=右辺となるまで③-⑥の手順を繰り返す。

3. 実大材を用いた全乾法含水率 U_0 の推定

ここまで、ヒノキ短材を用いた試験結果をもとに、含水率計含水率 U_y が、測定材個々の比重のばらつきに影響を受け、含水率計設定比重 G_x と全乾比重 G_0 の差が大きいほど測定誤差が生じることが確認できた。さらに、このような測定誤差が生じた場合に、正確な全乾法含水率 U_0 を推定する方法を検討し、その方法として先の(5)式を提案した。このことから、ここでは、実大材(ヒノキ柱材：11 cm角，3 m背割り材，48本)を用いて、測定1，2と同様の測定(測定3)を行い、(5)式によって全乾法含水率を推定し、その適合性を検討した。なお、本測定にあたっては、含水率計設定比重 G_x を0.40に設定している。

図-5は、含水率計含水率 U_y と全乾法含水率 U_0 の関係について、人工乾燥前後の測定値を併せて示したものである。人工乾燥前の試験材含水率(全乾法)は、24-57%(平均24%)であり、人工乾燥後の含水率は、16-26%(平均20%)であった。また全乾比重 G_0 は、0.438-0.589(平均0.500)であった。

図-6は、図-5に示した測定値のうち、人工乾燥後の測定値のみを示している。図中の実線はプロットデータの回帰直線である。同図では、 $U_y=U_0$ より下側にプロットされる試験材が多く存在し、含水率計含水率 U_y が、全乾法含水率 U_0 に比べて高い値を示し、過大となっている。これは、ヒノキ

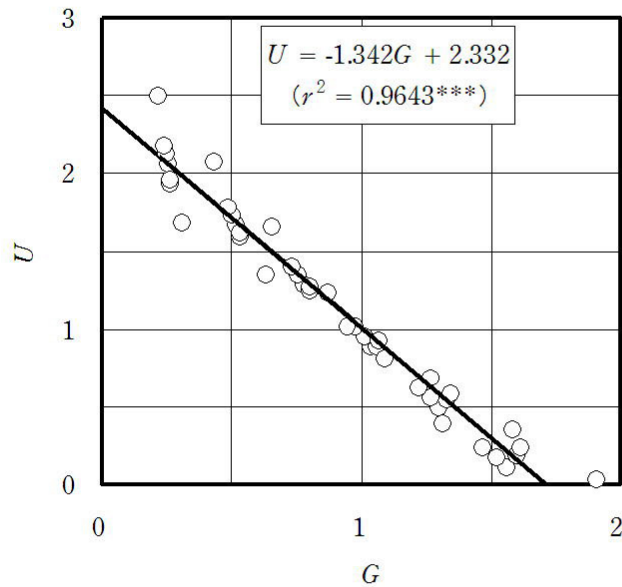


図-4. ヒノキ短柱材における G と U の関係

$G=G_x / G_0$, $U=U_y / U_0$, *** 0.1%の危険率で有意を示す。

がスギ等に比べ心材部の含水率が元々低く、乾燥後の水分傾斜が小さいこと、試験材の全乾比重が 0.438-0.589(平均 0.500)と含水率計設定比重 G_x より高いためであると考えられる。また、回帰直線を見てみると、傾きが 1 より小さく、含水率が高い材ほど含水率計含水率 U_y は、過大な測定値を示す傾向にある。

図-7 は、前述の(5)式を用いる方法によって全乾法含水率 U_0^* を推定し、実測全乾法含水率 U_0 との関係を示したものである。図中実線は破線はプロットデータの回帰直線である。同図によれば、推定値 U_0^* は、図-6 に比べ $U_0 = U_0^*$ よりやや上側にプロットされている。これは、(5)式の係数 a, b を求めた 6 試験材(短材)の全乾比重が 0.385-0.476(平均 0.414)と測定した実大材の比重 0.438-0.589(平均 0.500)に比べて小さいためではないかと考えられ、比重範囲を考慮して、さらに測定を行い係数 a, b を再度求める必要がある。ただし、回帰線の傾きは、1 に近く $U_0 = U_0^*$ の直線にほぼ平行であるとともに近接し適合しているように見える。また、図-6 に示す相関係数 ($r^2=0.4169$) よりも高く ($r^2=0.479$)、切片のずれが補正されれば、より正確な値を推定できるものと考えられる。一方、直線を中心に± 5%程度のばらつきが見られ、より精度を向上させる必要がある。これらは、係数 a, b の再設定と合わせて今後の検討課題である。

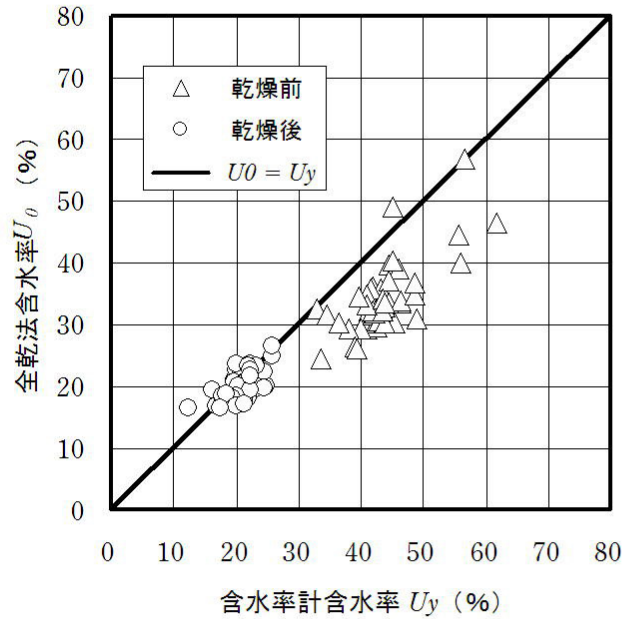


図-5. ヒノキ柱材における含水率計含水率と全乾法含水率の関係

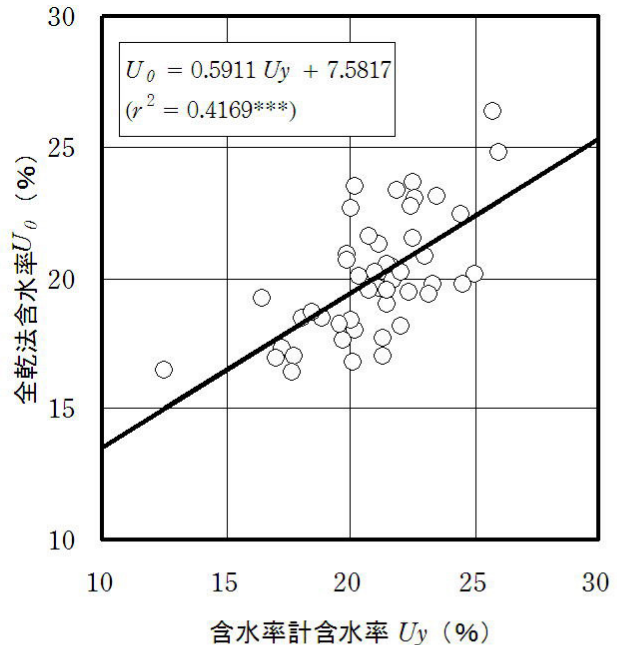


図-6. 人工乾燥後のヒノキ柱材における含水率計含水率と全乾法含水率の関係

*** 危険率0.1%で有意を示す。

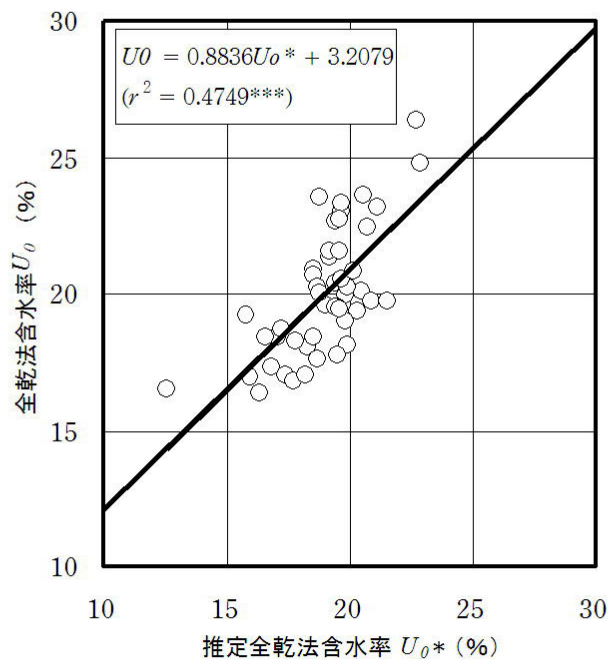


図-7. ヒノキ柱材における推定含水率と全乾法含水率の関係

***危険率0.1%で有意であることを示す。

おわりに

今回、県内の乾燥材生産現場で、最も多く使用されている携帯型高周波式含水率計を用いて、比重の固体間差に起因する測定誤差を補正する方法について検討を行った。その結果、含水率計の測定値に比較して、より正確な含水率を推定できる可能性が示唆された。ただし、今後より精度向上のためには、測定例を増やして検討を進める必要がある。

また、今回用いた試験材が、ヒノキ柱材であるため、生材時の内部水分が比較的 low であり、乾燥後も水分傾斜がつきにくい特性がある。このため、従来から本含水率計に対して指摘されている内部の残存水分を測定できないために生じる誤差を補正する方法については検討していない。今後、今回の方法と併せて検討するとともに、生材時の内部水分の乾燥後の水分傾斜の大きいスギ柱材についても検討を進める必要がある。

引用文献

- 久田卓興, 1986. 高周波式含水率計の測定精度調査—乾燥方法の異なるスギ角材—, 木材工業, 41(1):24-27.
- 久田卓興, 1996. 針葉樹構造用製材の乾燥をとりまく現状, 木材工業, 51(11):481-484.

- 久田卓興. 2003. 国産材の乾燥材需要増大とスギ材乾燥技術の進歩. 山林, (1426) : 64-70.
- 黒田尚宏. 2003. スギの乾燥—概説—. 林業技術, (736) : 8-13.
- 日本木材学会 物理・工学編編集委員会. 1985. 木材の性質. (日本木材学会編: 木材科学実験書 I 物理・工学編) pp367. 中外産業調査会, 東京.
- 増馬浩志. 1997. 厚材の水分計測. (日本木材学会 木材と水研究会編: 資料集 針葉樹材の乾燥とその周辺環境) pp94-95. 秀巧社, 東京.
- 齊藤周逸. 2004. スギ材を対象とした携帯型含水率計の精度. 第 55 回日林関東支論, 339-340.
- 信田 聡・中嶋 厚・奈良直哉. 1990. 製材含水率の容積重による推定. 木材学会誌, 36(12) : 1019-1026.
- 山田英之・久保健・小林好紀. 1994. 高周波容量式木材水分計の比重補正值による含水率の差異. 奈良県林試木材加工資料, 23 : 15-17.