火災加熱される木質部材内部の含水率計測手法の開発研究

DEVELOPMENT OF DYNAMIC MOISTURE CONTENT MEASUREMENT SYSTEM
FOR WOODEN MEMBERS EXPOSED TO FIRE HEATING鈴木達朗^{*1}, 長谷見雄二^{*2}, 上川大輔^{*3},
安井昇^{*4}, 加來千紘^{*4}, 鈴木淳一^{*5}Tatsuro SUZUKI, Yuji HASEMI, Daisuke KAMIKAWA,
Noboru YASUI, Chihiro KAKU and Jun-ichi SUZUKI

A small sensor for the dynamic measurement of local moisture content within a wooden member exposed to fire heating is developed. The measurement is based on the unique dependence of electric resistance of wood on moisture content and temperature. Relationship between those is obtained by experiments for temperature between 20°C and 90°C, and moisture content between 6.9% and 232.8% for *Cryptomeria japonica*, *Larix leptolepis*, *Pseudotsuga menziesii* and *Zelkova serrata*. Electric resistance is represented with temperature and moisture content for each tree species. The measurement is found to be most effective within the moisture content 10% - 30%.

Keywords : *Wooden Members, Heat and Water Transfer, Mechanical Property, Moisture Content Sensor, Electric Resistance*

木質部材, 熱水分移動, 力学的性能, 含水率計, 電気抵抗

1 はじめに

木造による大規模建築・中高層建築を可能とする法整備や技術開発が進められているが、建築物が大規模化・高層化すれば、個々の部材への火災の影響が建物全体の安全性に及ぼす影響が大きくなり、火災後の再利用の可能性を追求する必要も大きくなる。そのため、火災加熱を受ける木造部材の力学的性能の予測評価は重要性を増していくであろう。

木材は、部材温度がセルロースの分解温度を超えれば炭化して力学的に有効な断面が減少する^{1),2)}うえ、ヤング係数等の力学的性能は温度・含水率の影響を受ける^{3),4)}ため、火災加熱で部材内部の温度が上昇したり物質移動により含水率が変化したりすると、部材としての力学的性能は構造設計時に想定する常温時とは異なってくる可能性がある。これらの影響は、樹種、製材や工業用木材等の別によっても異なると考えられるが、これまで、炭化による有効断面の減少が予想される場合は、燃えしろ設計において断面減少が一定の速度で進むと仮定して、所定の時間の加熱後に必要な力学的性能を確保している程度で、火災加熱されても炭化に至らない部分の力学的性能の変化が十分に評価されてきたとは言い難い。

特に火災加熱時の力学的性能に対する水分の影響は、問題となる

のが 100°C 以下だけであるため最近までほとんど研究されてこなかった。Euro Code においても断面内部の物質移動は考慮されておらず、木質部材の力学的性能は温度との関係として整理されているのみである⁵⁾。しかし、高温では常温時よりも含水率上昇による力学的性能の低下が顕著で、例えば、飽水状態のスギの含水率を変化させずに温度を上昇させた場合、95°Cでのヤング係数の常温時に対する低下率は、全乾状態で 200°Cまで上昇させた時の低下率と同程度であることがわかっている⁴⁾。また、木材中の水分の移動や相変化は部材内の伝熱性状や熱分解性状にも影響し^{6),7)}、含水率の上昇は木造部材の炭化速度を低下させることが報告されている^{1),2),8)}。さらに、木材が内装材として用いられる場合には着火・燃焼発熱性状に関する火災安全性に無視できない影響を及ぼす可能性もある。

火災加熱を受ける木材中の水分は、温度と含水率の勾配を駆動力として移動する⁹⁾ため加熱表面付近から比較的低温の非加熱面側に水分が移動すると考えられ、木造部材の防耐火性能に対する含水率の影響を系統的に把握するためには、水分移動を把握できるようにする必要がある。そのためには、高温となる部材内部の局所的な含水率の変化を計測できることが望ましいが、熱電対による温度測定と同様に、簡便に含水率を計測できる汎用的な装置はなく、含水

^{*1} 大成建設技術センター 修士(工学)(当時、早稲田大学)

^{*2} 早稲田大学理工学術院 教授・工博

^{*3} 国立研究開発法人森林研究整備機構 博士(工学)

^{*4} 早稲田大学理工学術院総合研究所 招聘研究員・博士(工学)

^{*5} 国土技術政策総合研究所 博士(工学)

Technology Center, Taisei Corp., M.Eng. (Formerly, Waseda Univ.)

Prof., Faculty of Science and Engineering, Waseda Univ., Dr.Eng.

Forestry Research and Management Organization, Ph.D.

Adjunct Researcher, RISE Waseda Univ., Ph.D.

National Institute for Land and Infrastructure Management, Ph.D.

率の防耐火性能への影響を把握する妨げとなっている。本研究では、筆者らが開発した局所的な含水率の時間変化を計測でき、かつ加熱実験時の高温にも耐え得る計測手法^{10),11)}について報告する。

2 検討指針

2.1 局所的な含水率の計測手法

時々刻々と変化する火災加熱時の木質部材内部の含水率を計測するためには、局所的な含水率を計測でき、かつ非破壊の計測手法である必要がある。加熱直後に木材を細かく裁断し、それぞれを乾燥させれば含水率分布を調べることが可能だが、ある瞬間の含水率分布しか算出できず、火災加熱を受ける木質部材の含水率の時間変化を把握することもできない。一方、非破壊で含水率を計測する手段としては、木材に X 線を透過させその減衰から含水率を逆算する手法があり、Fredlund はコーンカロリメーターに X 線放出・検出器を併設して、定常加熱下の含水率分布の変化を計測した事例を報告している⁹⁾。ただし、耐火炉等で非定常加熱時の含水率分布の変化を把握するためには、装置の設置や耐熱性の確保等に大きな困難がある。その他の非破壊で含水率を計測する手法としては、木材に穿孔等を行わずに、木材表面に探知部を押し当てて誘電率から含水率を逆算する手法^{12),13)}等があるが、厚み方向の分布は計測できない。

ところで、木材と同様に多孔質部材であるコンクリート内部の水分移動に関しては、試験体に電極を埋設し、電気抵抗から加熱中の局所的な含水率を逆算する計測手法が用いられている¹⁴⁾。木材内部の電気抵抗も含水率と高い相関があること^{15),16)}が知られており、木材内部についても電気抵抗から局所的な含水率の時間変化が逆算できる可能性があると考えた。本研究では、木材内部の任意の箇所に電極を埋設し、電極から測定した電気抵抗から含水率を推定することを試みる。

2.2 電気抵抗による含水率計の開発指針

計測装置は、電気抵抗により非破壊で部材内部の局所的な含水率を計測するため、予め埋設した電極から電気抵抗を計測し、電気抵抗と含水率の関係を表す校正曲線から含水率を逆算するものとした。

まず、木材中に埋設する電極は、局所的な含水率の変化を測定するため小型である必要がある。それに適した測定法として、常温での高含水率状態による腐朽のリスクを管理する目的で先端部のみが電極となるように銅線を埋設し、電気抵抗から含水率を計測する装置が開発されている¹⁵⁾。しかし、その計測装置は常温下の計測を前提としており、高温下の実験で用いるには先端の電極から計測器まで電気的絶縁と耐熱性を確保する必要がある。そこで本研究では、文献¹⁵⁾の測定装置及び測定方法を、火災加熱を想定した実験でできるように改良する。

次に、木材の常温時及び高温時の電気抵抗と含水率の関係を実験により把握する。計測結果から回帰分析を行い、電気抵抗と温度から含水率を算出する校正曲線を導出し、常温・高温での電気抵抗と含水率の関係に対する影響要因を検討する。また、常温時における電気抵抗と含水率の関係は、含水率が高い場合、含水率の変化に対する電気抵抗の変化が小さくなるため、誤差が増大することが考えられる^{15),16)}。含水率は、一般的に繊維飽和点以上では力学的性能に影響しないが、炭化速度や伝熱性状に対しては高含水率でも影響を及ぼす^{2),6)-8)}ため、計測可能範囲と誤差について検討を行う。

文献¹⁵⁾ではノルウェイスプルース (Norway spruce : 英名、全乾密度 0.393g/cm³) を対象とし、常温時の校正曲線を誘導しているが、電気抵抗と含水率の関係は樹種によって異なると予想されたため、本研究では、大断面木質部材に一般的に用いられる針葉樹材としてスギ、カラマツ及びベイマツに加え、大断面製材として用いられることの多い広葉樹材としてケヤキの計 4 種類を対象とした。ケヤキについては、大断面製材の乾燥は困難で伝統様式の建築物に使われる場合は含水率が高いままである例も多くみられる⁸⁾。

3 計測方法

3.1 電極の仕様

3.1.1 高温下での計測に向けた改良

Fig.1 に本研究の含水率計の仕様を示す。常温下の測定を想定した文献¹⁵⁾の仕様を改良し、電極の設置箇所から電気抵抗の測定装置までを、電気的絶縁と耐熱性を確保して配線することを可能とした。

文献¹⁵⁾における基本的な計測手法は、先端 1mm のみが通電するような電極を 10mm 間隔で一対埋設しておき、電気抵抗を計測するものである。先端のみを電極とするためのセンサーの設置方法として、木材に穴を空け、予め絶縁性のチューブを奥まで差しこんだ後 1mm 分引き上げ、シリンジで先端部に導電性の接着剤を注入、銅の単線を挿入している¹⁵⁾。電気抵抗計測の結果、心材・辺材、早材・晩材、及び密度の違いが電気抵抗に影響しないことが報告されており¹⁵⁾、本研究では電極間距離を文献¹⁵⁾と同じ 10mm とすることで、それらの影響を考慮しないこととした。

高温となる耐火炉内で測定を可能にするため、本研究では文献¹⁵⁾の仕様に対して 2 点の改良を行った。まず、配線の電気的な絶縁性と耐熱性を確保するため、文献¹⁵⁾の銅の単線を、市販のふっ素樹脂及び ETFE で被覆されたニッケル単線(以下、絶縁導線と称する)に置き換えた。次に、キャピラリーチューブは、文献¹⁵⁾では木材表面より突出しているが、本研究では試験体の表面や集成材のラミナ間の配線を可能にするためキャピラリーチューブは木材表面位置で切断するものとした。

また、高温時の含水率と電気抵抗の関係を調べるためには、試験体を加熱した状態で電気抵抗を計測する必要がある。試験体は、水を含浸させた後、加熱による水分移動の影響を抑えるため予め全面をシリコンでシーリングを行った。熱電対を設置し恒温炉で目標の温度に達するまで加熱した後、電気抵抗を計測するものとした。

なお、絶縁導線に用いる金属の電気抵抗も、温度上昇により変化するが¹⁷⁾、絶縁導線の金属の温度上昇による電気抵抗の変化を木材と比べると最大でも 0.1% 以下であり、その影響は小さい^{注 1)}。

3.1.2 電極の仕様と埋設方法

本研究の含水率計の設置方法を以下 i) ~ iv) に示す。電極の耐熱温度は、キャピラリーチューブが 260℃、絶縁導線及び接着剤が 150℃であるため、絶縁導線が 150℃以下になるように配線を行う必要がある。

i) 木材に所定の深さまで φ1.6mm の穴を 2 箇所、10mm 間隔で空ける。

ii) 穿孔した穴より 1mm 短く切断しておいたキャピラリーチューブを穴に挿入し、穴の先端 1mm 以外を絶縁する。

率計は、Fig.3 に示すように含水率勾配を生じさせた試験体の長さ方向に 20mm 間隔で並べて設置することで、多様な含水状態における電気抵抗を計測する。

樹種ごとの試験体 A,B の含水率を Table1 に示す。ただし、スギは試験体 A で最大 232.8%と十分に高い含水率が得られたため、試験体 B は用いなかった。スギ以外の 3 樹種では、試験体 A,B をそれぞれ一体ずつ用いた。

試験体には Fig.3 の箇所に熱電対を設置し、内部温度を計測する。試験体の内部温度が 20,50,70 及び 90℃の時に電気抵抗を計測する。スギのみ 80℃においても電気抵抗を計測している。

Table 1 Moisture content of specimens A and B

Tree species	Misture Content[%]				
	Specimen A			Specimen B	
	Ave.	Min.	Max.	Ave.	Min. - Max.
Cryptomeria Japonica (スギ)	66.0	6.9	232.8	—	—
Larix leptolepis (カラマツ)	19.9	8.8	59.4	38.7	17.5 - 71.8
Pseudotsuga menziesii (ベイマツ)	21.0	9.5	74.7	43.0	21.0 - 76.7
Zelkova serrata (ケヤキ)	22.5	8.5	63.9	47.1	22.1 - 68.6

3.3.2 常温時及び高温時の電気抵抗計測

加熱を行わない 20℃の試験体は、温度 20℃、相対湿度 40%の室内の中で電気抵抗を計測する。20℃以外の加熱を行う試験体は、試験体を目標の温度より 1℃高く設置した恒温炉内に設置、加熱する。

Fig.3 の箇所に設置した熱電対の温度が目標の温度に達した時点で、試験体全体が目標の温度に達したとみなし、電気抵抗を計測する。本計測法による含水率の計測精度を評価するために、電気抵抗を計測後、計測箇所近傍の幅及び長さ 20mm、高さ 30mm の直方体をそれぞれ切り出して質量を計測した後、105℃の恒温炉で乾燥させ、全乾法で含水率を算出して、電気抵抗から算出される含水率と比較することとした。含水率計近傍の含水率は、直方体内部の含水率分布は考慮せずに算出するものとした。

なお、試験体の加熱中及び切断時の水分の蒸発による断面内部の含水率の変化を最小限にするため、試験体に熱電対及び含水率計を取り付けた後に、表面を 6 面ともシリコンでシーリングし、加熱を行った。また、切断から質量計測までの時間を極力短くするため、シリコンが試験体に塗布されたまま質量を計測し、乾燥後にシリコンを剥がしその分の質量を差し引いた。また、試験体切断時の水分の蒸発を最小限にするため、試験体の切断は水分の蒸発が激しいと考えられる高含水率側から行い、順次質量を計測した。

4 計測結果と考察

4.1 計測結果

各樹種の温度ごとの含水率と電気抵抗の計測結果を Fig.4~7 に示す。縦軸は電気抵抗の自然対数、横軸は含水率を表す。実験結果を近似する実線、破線については 4.2 で述べる。含水率は、全乾質量を分母とする (1)式を用いた。

$$M = \frac{W_{wet} - W_{dry}}{W_{dry}} \times 100 \quad (1)$$

M : moisture content [%]
W_{wet} : weight (wet) [g] W_{dry} : weight (dry) [g]

試験体の平均全乾密度はスギ 0.334g/cm³、カラマツ 0.526g/cm³、ベイマツ 0.482g/cm³、ケヤキ 0.688g/cm³であった。

いずれの樹種でも、含水率及び温度が高いほど電気抵抗が減少した。ただし、ケヤキの含水率 10~15%付近では、70℃の電気抵抗の計測値が 90℃の電気抵抗の計測値に近づいた。

Fig.4~7 には、ノルウェイスプラースの 20℃での校正曲線¹⁵⁾を一点鎖線で併記している。ノルウェイスプラースと比較すると、スギ、常温の含水率 15%以下の範囲を除いて、電気抵抗は本実験の方が低い結果となった。電極間距離、電極先端の大きさ及び導電性接着剤は同一である他、電気抵抗が計測された温度も 20℃と本研究と同一のため、この違いは樹種によると考えられる。

4.2 回帰分析による校正曲線の誘導

電気抵抗及び温度から含水率を逆算可能にするため、実験結果から回帰分析を行い、校正曲線を導出する。本研究で電気抵抗を計測した温度は 4 条件のみだが、火災加熱時の木質部材内部で温度は連続的に変化するため、校正曲線は温度ごとに表すのではなく、温度及び含水率の連続した関数として表す必要がある。そのため、まず温度ごとに回帰分析を行ったのちに、その回帰式の温度依存性を分析する。

(1) 計測温度ごとの回帰分析

温度ごとの回帰分析にあたっては、文献¹⁵⁾に従い(2)式を想定した。回帰分析の際には、(3)式のように含水量を無次元で表した比(以下、含水比と称する)を用いた。Fig.4~7 には、温度ごとの回帰分析結果を実線で示している。

$$\ln(R) = a + b \cdot u + c \cdot \exp(d \cdot u) \quad (2)$$

where $b \leq 0$
R : electric resistance [Ω]
a, b, c : constant [Ω]
d : dimensionless constant [-]

$$u = \frac{W_{wet} - W_{dry}}{W_{dry}} \quad (3)$$

u : moisture content ratio
(dimensionless moisture ratio) [-]

(2) 温度依存性を考慮した校正曲線の一般化

次に、校正曲線を温度及び含水率の関数として表すため、(2)式における係数 a,b,c,d を温度の一次関数とし、係数 a,b,c,d が変化した際に電気抵抗を最も適切に表せるように再度回帰分析を行った。回帰分析により得た、係数 a,b,c,d と温度 T[℃]の関数を Table2 に示す。Fig.4~7 には、Table2 に示す係数 a,b,c,d を(2)式に代入した校正曲線を点線で示し、括弧内にそれらの決定係数(R 二乗値)を併記している。

ただし、係数 b が正の値をとると、含水率の上昇に伴い ln(R)は横ばいになった後増加し、重解となってしまうため、必ず 100℃以下で 0 以下となるものとした。スギでは温度上昇によって係数 b が上昇し、高温時に正となったため、100℃で 0 となるように回帰分析を行った。ケヤキでは温度上昇によって係数 b が低下していくが切片が正となったため、切片を 0 として回帰分析を行った。

Fig.4 Calibration curve (Cryptomeria japonica, スギ)

Fig.8 Error of Calibration curve (Cryptomeria japonica, スギ)

Fig.5 Calibration curve (Larix leptolepis, カラマツ)

Fig.9 Error of Calibration curve (Larix leptolepis, カラマツ)

Fig.6 Calibration curve (Pseudotsuga menziesii, ペイマツ)

Fig.10 Error of Calibration curve (Pseudotsuga menziesii, ペイマツ)

Fig.7 Calibration curve (Zelkova serrata, ケヤキ)

Fig.11 Error of Calibration curve (Zelkova serrata, ケヤキ)

Table 2 Constants a,b,c,d in formula (2) and (4)

Cryptomeria Japonica (スギ)	Pseudotsuga menziesii (バイマツ)
a = - 0.034573 ·T + 13.60	a = - 0.013924 ·T + 13.76
b = 0.005882 ·T - 0.5882	b = - 0.026222 ·T - 0.3084
c = - 0.610560 ·T + 73.912	c = 0.004951 ·T + 15.423
d = 0.008439 ·T - 16.475	d = - 0.085326 ·T - 7.241
Larix leptolepis (カラマツ)	Zelkova serrata (ケヤキ)
a = - 0.022509 ·T + 14.18	a = - 0.014081 ·T + 13.78
b = - 0.021199 ·T - 0.2484	b = - 0.040137 ·T
c = - 0.186304 ·T + 33.947	c = 1.200793 ·T + 8.704
d = - 0.007789 ·T - 13.710	d = - 0.313521 ·T - 6.892

T: Temperature [°C]

Fig.4~7 において、温度ごとに回帰分析を行った結果と、校正曲線はおおむね一致したが、温度ごとに回帰分析を行った結果では含水率が30%を超える付近から、含水率の上昇に伴い温度ごとの電気抵抗の大小が逆転する箇所が4樹種の中で3箇所見られた。原因として高含水率領域では誤差が増える可能性や、計測点が不足している可能性が考えられる。校正曲線では係数 a,b,c,d を温度の一次関数としているため、電気抵抗の大小は逆転しない。また、校正曲線の決定係数は最低でもバイマツ・90℃時の0.84と、係数 a,b,c,d を温度の一次関数とした場合でも高い相関性を示した。

常温時の校正曲線の電気抵抗は、含水率15%ではスギが最も高く $\ln(R)=18.2$ であるのに対し、含水率100%ではスギが最も低く $\ln(R)=12.4$ となり、スギが他の3樹種に比べ含水率上昇に対する電気抵抗の低下が大きくなっている。90℃の校正曲線についても同様で、含水率15%ではスギが $\ln(R)=12.3$ と最も高く、含水率100%ではスギが $\ln(R)=10.4$ と最も低くなった。校正曲線の100℃以下の範囲で最も電気抵抗が低くなったのは、90℃時のケヤキで、 $\ln(R)=8.9$ となった。

4.3 含水率の算出

電気抵抗と含水率の関係は、電気抵抗を求める(2)式において回帰分析を行ったため、含水率を求めるためには逆関数に直す必要がある。含水比から電気抵抗を求める(2)式を、電気抵抗から含水比を求める逆関数に直し、係数を整理すると(4)式で表すことができる。ただし、式を簡単にするため、定数項をまとめて α としている。

$$u = \alpha - \frac{W\left[\frac{cd}{b} \exp(\alpha d)\right]}{d} \quad \text{where} \quad \alpha = \frac{\ln(R)-a}{b} \quad (4)$$

W[y] : Lambert W function

(inverse function of $x \cdot \exp(x) = y$)

(4)式を用いて含水率を算出するためには、まず含水率計を設置した箇所と同等の温度 T[°C] を Table2 に代入し、係数 a,b,c,d を算出する。算出した係数 a,b,c,d と、計測した電気抵抗の自然対数 $\ln(R)$ を(4)式に代入することで含水比 u[-]を得る。含水比 u[-]を百分率に直すことで、一般的に用いられる含水率[%]となる。

4.4 含水率計の適用可能性

4.4.1 計測可能範囲

Fig.4~7 を見ると、木材の電気抵抗は含水率が低ければ含水率の低下に対して指数的に増加し、含水率が高ければ含水率の変化に対する変化が小さくなる。そのため、計測可能な含水率の下限は電気抵抗の計測上限で決まり、本実験では、使用したデータロガーで計

測のできる抵抗の上限が約 $10G\Omega$ であることから、 $\ln(R) = 23.0$ が計測上限となる。樹種、温度により異なるが、含水率が約10%以下で計測が不可能となる。一方、含水率が大きいと電気抵抗の変化が小さくなって、誤差が増加して正確な計測が困難となる。

Fig.8~11 に、樹種ごとの含水率と校正曲線から算出した含水率の誤差を示す。誤差は、計測した電気抵抗及び温度から校正曲線を用いて含水率を算出し、その値から、電気抵抗計測後に全乾法で求めた含水率を引いた値を示している。すなわち、縦軸上側が校正曲線による計算値が実際の含水率よりも高く算出されていることを示す。

また、グラフ中の折線は、温度の影響は考えず樹種ごとに、含水率をそれぞれ20%以下、20~30%、30~40%、40~50%、50%以上の5グループに分け、それぞれのグループについて標準偏差と平均含水率を算出し、標準偏差の2倍値を正負にプロットして結んだものを示す。折線で囲まれた領域に95%以上の確率で校正曲線による計算値が入ること意味している^{注2)}。本研究では、含水率のグループ分けを温度ごとに行うと、計測点が不足し標準偏差を算出できないグループが生じたため、温度の影響は考えずに標準偏差を算出した。ただし、スギについては全ての温度条件の計測点を含めても含水率30~50%の間に計測値が2点しか得られなかったため、含水率20%以下、20~30%、30%以上の3グループから算出した値をプロットした。

含水率15%では、標準偏差の2倍値は、スギ0.9%、カラマツ1.5%、バイマツ及びケヤキが1.6%である。ノルウェイスプールの常温時の校正曲線から求められた標準偏差の2倍値は、含水率15%時に約1.2%であり¹⁵⁾、気乾状態付近の精度は差さない。

含水率が計測可能な上限は、樹種により含水率の増加に伴う誤差の増加傾向が異なるため、樹種と目標とする精度により異なると考えられる。例えば標準偏差の2倍値を5%まで許容した場合は、計測可能な含水率の上限は、スギは33%、カラマツ、バイマツ及びケヤキは27%となり、火災加熱により含水率がこれらの値を超えて上昇した場合誤差はさらに増大していくこととなる。

含水率50%時の標準偏差の2倍値は、スギが最も低く10.1%に対し、常温時のノルウェイスプールの5.3%となっている¹⁵⁾。本研究では高温時の電気抵抗を含めて校正曲線を算出しているが、気乾状態では常温時のノルウェイスプールの値と比べても誤差に大きな差はないことから、高温・高含水率状態での電気抵抗測定において誤差が増大したこととなる。原因として試験体が高温であることにより、試験体切断時の水分蒸発や、含水率計近傍の直方体内部の含水率分布にばらつきが生じた可能性が挙げられる。予め含水率分布を均一とした試験体の電気抵抗を計測し、切断せずに質量を計測すれば、高温・高含水率状態の誤差を小さくできる可能性があるが、試験体数は増大することとなる。また、含水率50%時の標準偏差の2倍値は、ケヤキ、カラマツ、バイマツ、スギと全乾密度の高い順に大きくなっている。含水率は全乾密度を分母に算出しているため、全乾密度が大きいほど含水量自体は多いこととなり、そのことが誤差が大きくなる要因となっている可能性がある。

4.4.2 火災加熱を受ける木材を想定した含水率の計測精度

火災時における木質部材内部の含水率を計測する主な目的は、力学的性能、及び炭化速度や燃焼性状への含水率の影響を明らかにすることにある。含水率がこれらの性質に影響を与える含水率の範囲

はそれぞれ異なるため、計測目的によって含水率計測に求められる計測可能範囲と精度が異なってくると考えられる。

まず、力学的性能に木質部材内部が高温・高含水率状態となることがどう影響するかを考えると、含水率 30%以上では高温時の力学的性能は含水率にほぼ依存しなくなる⁴⁾から、含水率の把握は 30%以下の範囲で最も重要である。加熱前の状態から含水率が増減する過程を計測するためには、加熱前の状態で含水率を計測できている必要があるが、加熱前の状態を気乾状態とすると、含水率 15%で標準偏差の 2 倍値は、ベイマツ及びケヤキが最大で 1.6%である。

加熱により含水率が低下する場合、含水率の低下に伴い誤差は減少する。ただし、含水率の低下に伴い電気抵抗は上昇するため、装置の計測可能な電気抵抗を上回ると計測ができなくなり、その限界は含水率約 10%である。火災加熱により気乾状態から含水率が上昇する場合、含水率 20%時の標準偏差の 2 倍値は、スギ及びカラマツは 1.8%、ベイマツは 2.6%、ケヤキは 2.8%と最大でも 3%以内に収まっている。よって、気乾状態から含水率が上昇する過程は含水率 20%までは高い精度で計測することが可能と考えられる。ただし、断面が四周から加熱され中央に水分が集中する場合や炭化して高温となる領域に対して残存断面が小さい場合は比較的含水率が上昇しやすいと考えられる。20%を超えてさらに含水率が上昇した場合、含水率の増加に伴い誤差は増加するため、樹種や目標とする計測精度によっては正確な計測が困難となると考えられる。

また、人工乾燥された集成材や小断面の製材等であれば、加熱前の含水率は気乾状態程度であると考えられるが、大断面製材のように内部の含水率分布が不均一で、加熱前から気乾状態よりも含水率が高い場合も考えられる。例えば、ケヤキの大断面製材の含水率が 30.4%であった例があり⁸⁾、ケヤキの標準偏差の 2 倍値は含水率 30%時に 8.9%と、加熱前から誤差が大きい。その場合、電気抵抗と温度の変化から相対的に含水率の変化を算出することは可能だが、正確な含水率を得られない可能性が高いと考えられる。

一方、炭化速度や燃焼性状は含水率が 30%以上でも含水率の影響を受ける^{2),6)-8)}ため、高含水率領域においても含水率が測定できることが望ましい。しかし、高含水率領域では含水率の変化に対する電気抵抗の変化が小さい^{15),16)}ことが知られており、本研究においても含水率上昇に伴い誤差が増大している。含水率 50%時の標準偏差の 2 倍値は、スギが最小で 10.1%、ケヤキが最大で 30.1%となっている。このように、高含水率領域における含水率測定は、電気抵抗から算出すると誤差が大きく、含水率の大小に精度が左右されない

別の手法が適していると考えられる。木材の質量と関係なく存在する常温時の水分量のみを計測できる手法としては、二重 X 線による計測手法²⁰⁾があり、今後計測原理を活用し高温下で計測が可能となれば、含水率に精度が依存せず計測ができる可能性がある。

4.5 計測精度への樹種・温度の影響

4.5.1 校正曲線における支配率の定義

本含水率計測における計測精度への樹種・温度の影響を検証するため、樹種ごとの校正曲線における係数 a, b, c, d と温度の関係をそれぞれ Fig.12~15 に示す。

(2)式における係数 a, b, c, d と電気抵抗の変化の関係について、電気抵抗の変化は定数である a には影響を受けず、第二項 $b u$ 及び第三項 $c \exp(d u)$ により変化する。以下、第二項 $b u$ を線形項、第三項 $c \exp(d u)$ を指数項と呼ぶ。指数項は、 d が負の値を取ることから、含水率上昇に伴い、比較的低含水率となる領域では指数的に電気抵抗が減少し、高含水率となる領域では電気抵抗の変化が緩やかに 0 に近づいていくことを表す項である。つまり、低含水率領域では指数項が支配的となり高含水率領域では線形項が支配的になると考えられる。含水率上昇によって指数項の変化が小さくなると、含水率変化時の電気抵抗の応答が減少し、計測精度が低下すると考えられる。そのため、力学的性能に影響する低含水率領域において、指数項が支配的である境界を調べるため、(5)式で指数項の支配率を定義する。指数項の支配率は(2)式において含水率が 1%上昇した際の $\ln(R)$ の変化のうち指数項の変化の割合を示す(以下、本文中では「支配率」と略す)。(5)式の $\Delta c \exp(d u)$ 及び $\Delta b u$ はいずれも負の値であるが、校正曲線においては含水率変化時の電気抵抗の応答の大きさを表すため、絶対値を取り正の値で表現した。

指数項の支配率 Dominant ratio of exponential term

$$= \frac{|\Delta c \exp(d u)|}{|\Delta \ln(R)|} = \frac{|\Delta c \exp(d u)|}{|\Delta b u| + |\Delta c \exp(d u)|} \quad (5)$$

$|\Delta y|$: 含水率 1%上昇時の各項の変化量

change of y by 1% increase of moisture content

4.5.2 樹種・温度による支配率の差異と計測精度への影響

含水率が木材の力学的性能に及ぼす影響を検討する必要のある上下限として、0℃及び 100℃における各樹種の含水率と支配率の関係を Fig.16 に示す。実線で 0℃、点線で 100℃における支配率を示し

Fig.12 Temperature vs. const. a

Fig.13 Temperature vs. const. b

Fig.14 Temperature vs. const. c

Fig.15 Temperature vs. const. d

ている。係数 b はどの温度でも 0 以下となるように回帰分析をしており、スギは 100℃、ケヤキは 0℃で 0 となり、支配率は 1 で一定となった。

Fig.16 Moisture content vs. dominant ratio of exponential term in Equation (5)

0℃において、いずれの樹種においても含水率 30%以下では支配率が 0.9 を超えている。このことは、支配率が高いことは誤差が少ないことを意味すると考えると、4.4 節における比較的低含水率の領域では誤差が少ないという考察と合致する。

0℃と比較して 100℃では、スギを除いて、比較的低含水率から支配率が減少し、含水率 30%で約 0.5 以下となっている。温度上昇により支配率が減少する要因は、(5)式における線形項の変化量の増加、及び指数項の変化量の減少である。線形項においては、係数 b の減少に伴い変化量が増加する。指数項においては、係数 c が減少すると変化量は減少し、係数 d が減少すると校正曲線は下に凸となり、低含水率領域での電気抵抗の減少が著しくなる。よって、温度上昇による低含水率領域の指数項の支配率の減少は、係数 b, c, d の減少に起因する。ただし、係数 b, c, d はそれぞれが独立した温度との関数であり、3 つの係数が同時に減少または増加するとは限らないため、樹種ごとに係数 b, c, d の温度依存性と支配率への影響について考察を行う。

スギは、Fig.16 において温度上昇に伴い支配率は増加している。温度上昇に伴い係数 b は増加、係数 c, d は減少していることから、係数 b のみが温度上昇に伴い支配率が上昇する傾向を有している。スギの係数 b は、Fig.12 に示すように温度上昇に伴い増加し 100℃で 0 になることから、線形項の変化量が極小化していき、支配率が増加したと考えられる。ただし、温度上昇に伴い係数 c, d は減少していることから指数項の変化量も減少しており、線形項と指数項の双方の変化量が減少している。よって、温度上昇に伴い低含水率領域における含水率変化時の電気抵抗の応答は低下している。支配率の増加が線形項の極小化に起因する場合は、支配率の上昇が計測精度の増加を意味するとは限らないと言える。

カラマツ、バイマツ及びケヤキは、Fig.16 において温度上昇に伴い支配率は減少している。カラマツ及びバイマツについては、カラマツの係数 d とバイマツの係数 c は温度によらずほぼ一定であり、その他の係数は温度上昇により減少しているため、支配率が温度上昇により減少したと考えられる。ケヤキについて、温度上昇に対し

て係数 d は減少、係数 c は増加するが、支配率は温度上昇により減少している。特に係数 c, d の温度上昇による変化は他の樹種に比べて著しい。係数 d の減少に伴い高含水率領域での含水率の変化がほとんど見られなくなり、係数 c が増加しても支配率に影響しなかったものと考えられる。Fig.15 において、係数 d の 0℃から 100℃の変化はケヤキ、バイマツ、カラマツの順に大きい、Fig.16 における 0℃から 100℃の支配率の変化も、係数 d の変化と同じ順に大きく、係数 d が支配率の変化に大きく影響すると考えられる。

以上より、校正曲線は力学的性能に影響する低含水率領域において、低温時には樹種によらず指数項が支配するが、温度上昇による指数項の支配率の増減は樹種により異なった。力学的性能の含水率依存が顕著な含水率 30%以下では、0℃ではいずれの樹種も 0.9 より大きい割合で指数項が支配しているが、100℃ではスギ以外の樹種では支配率が 0.5 以下に減少した。スギについても、支配率の温度上昇による増加は線形項の極小化に起因しており、温度変化に対する電気抵抗の変化は減少していることとなった。よって、いずれの樹種においても、低含水率領域において、含水率に対する電気抵抗の応答は高温時になると低下する傾向を有することが明らかとなった。今後、温度ごとの誤差の違いを検証する必要があるが、本研究では計測点数の不足から温度によらず校正曲線の誤差を算出しているため、計測点数を増す必要がある。

また、校正曲線の係数の温度依存性は本研究で計測を行った 4 樹種で異なった。心材・辺材、早材・晩材、及びそれらによる密度の差異は電気抵抗に影響しないことから、これら 4 樹種間の差異は試験体ごとのばらつきではなく、樹種の違いによるものと考えられる。よって、本研究で検討していない樹種に本測定法を適用する場合には改めて校正曲線を得ておく必要がある。

5 総括

本研究では、加熱実験時の木質部材の任意の箇所に設置し、内部の含水率の時間変化を計測できる含水率計の開発を行った。含水率計の計測原理は、木材内部の計測位置における電気抵抗及び温度を計測し、含水率を校正曲線から逆算するものであり、以下の成果と知見を得た。

- (1) 耐熱性を有する装置を開発し、電気的な絶縁を計測部まで保ち配線できるようにした。木材内部に埋め込む電極近傍の耐熱温度、及び配線に用いた絶縁導線の耐熱温度は 150℃となり、大気圧付近では、含水率の計測に支障なく使用できる。
- (2) スギ、カラマツ、バイマツ及びケヤキを対象に 20℃から 90℃で電気抵抗と含水率の関係を計測した。電気抵抗は低含水率領域では含水率の上昇に伴い指数的に減少し、いずれの樹種でも含水率及び温度の上昇に伴い電気抵抗は減少した。計測結果から回帰分析を行い、電気抵抗及び温度から含水率を算出する校正曲線を樹種ごとに導出した。
- (3) 提示した含水率測定法で計測可能な下限は約 10%、上限は樹種や要求精度により異なるが、含水率 20%で誤差は最大 2.8%となった。従って、高温時の力学的性能に影響する比較的低含水率の領域に関して、気乾状態付近から含水率が減少、または増加する過程を計測することが可能となった。一方、高含水率となる領域では、含水率の変化に対する電気抵抗の変化が減少するため誤差が増加し、

発熱速度や熱容量への含水率の影響を調査する際は計測精度が不十分となる可能性がある。

(4) 校正曲線は、高温時になると低含水率領域における含水率変化に対する電気抵抗の応答が減少する傾向があり、温度上昇に伴い低含水率領域の計測精度が低下している可能性がある。

(5) 校正曲線を定める係数の温度依存性は樹種ごとに異なり、本研究で校正曲線を得ていない樹種について含水率計を用いる場合は校正曲線を新たに得る必要がある。

今後の課題として、計測手法の妥当性の検証や木質部材内部で起こる熱水分移動の予測モデルの確立を進めるために、熱・物質移動に関する境界条件を単純化できる定常加熱下で含水率分布の変化を実測し、絶乾法により求めた含水率分布や木材中の熱水分移動モデルから予想される状況と比較することが必要である。火災加熱時の木質部材内部の含水率の力学的性能への影響を評価するためには、耐火炉内で実際の火災を想定した加熱下における含水率分布の変化を計測する必要があり、そのための測定方法の改良も課題である。

謝辞

本研究内の実験は、科学研究費基盤研究「大断面木質部材の防耐火性能設計の工学モデル」及び「大規模居室における内装の燃焼拡大性状の予測と火災規模の局限化に関する研究」(いずれも代表研究者：長谷見雄二)の一環として行いました。試験体製作には、共同組合遠野グルーラムの菊池和貴氏に甚大なるご協力を賜りました。含水率計の開発にあたり、飯島泰男氏(秋田県立大学名誉教授)、原田和典氏(京都大学教授)、田中孝氏(静岡大学助教)、遠藤智紀氏(当時、早稲田大学大学院)、渡辺秀太氏(当時、早稲田大学大学院)、その他様々な方々に貴重なご助言、ご協力を賜りました。記して深く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) Forest Products Laboratory : Wood Handbook, pp.5-36, 2010
- 2) Naruse, T. Nakamura, K. Yusa, S. Masuda, H. Harada, T. Yamada, M. Sato, A.: Fire Resistance of Structural Timber Part 1 : Charring Rate of Cedar and Larch, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, A-2, pp.11-12, 2004.7 (in Japanese)
成瀬友宏, 中村賢一, 遊佐秀逸, 増田秀昭, 原田寿郎, 山田誠, 佐藤章 : 構造用製材の耐火性能 その1 : スギとカラマツの炭化速度, 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-2, pp.11-12, 2004.7
- 3) Kaku, C. Hasemi, Y. Yasui, N. Yasukawa, M. Kamikawa, D. Kameyama, N. Ono, T. Koshihara, M. and Nagao, H.: Influence of Fire Exposure on the Mechanical Properties of Wood -Exposure temperature dependence of Young's modulus and bending strength of Cryptomeria japonica, Larix leptolepis, Pseudotsuga menziesii and Zelkova serrata under and after heating-, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), Vol.79, No.701, pp.1065-1072, 2014.7 (in Japanese)
加来千紘, 長谷見雄二, 安井昇, 保川みずほ, 上川大輔, 亀山直央, 小野徹郎, 腰原幹雄, 長尾博文 : 火災加熱が木材の力学的性能に及ぼす影響 一加熱した針葉樹材及び広葉樹材の高温時及び加熱冷却後のヤング係数・曲げ強度の測定一, 日本建築学会構造系論文集 79巻 701号, pp.1065-1072, 2014.7
- 4) Suzuki, T. Kaku, C. Hasemi, Y. Kamikawa, D. Yasui, N. Kameyama, N. Koshihara, M. and Nagao, H.: Influence of Water Content on the Mechanical Properties of Wood under Heating Part1: Exposure temperature and Water Content dependence of Young's modulus and bending strength of cedar, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, Fire Safety, pp.135-138, 2015.9 (in Japanese)
- 鈴木達朗, 加来千紘, 長谷見雄二, 上川大輔, 安井昇, 亀山直央, 腰原幹雄, 長尾博文 : 木材の含水率が高温時の力学的性能に及ぼす影響 : (その1) 針葉樹材(スギ)の高温時ヤング係数・曲げ強度の把握, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 防火, pp.135-138, 2015.9
- 5) BS EN1995-1-2: 2004, Eurocode 5 Design of timber structures, Part1-2: General-Structural fire design
- 6) Fredlund, B. : A Model for Heat and Mass Transfer in Timber Structures During Fire, Lund University Sweden, 1985, Ph.D. thesis
- 7) Kikuchi, S. Kawarasaki, M.: Influence of Density and Moisture Content on Heat Release Properties of Wood, J. Hokkaido For. Prod. Res. Inst., Vol.22, No.2, 2008.3 (in Japanese)
菊地伸一, 河原崎政行 : 木材の発熱性に対する密度, 水分の影響, 林産試験場報, 第22巻, 第2号, 2008.3
- 8) Yasukawa, M. Yasui, N. Suzuki, A. Hasemi, Y. Kameyama, N. Toyoda, K. Kadooka, N. Kamikawa, D. Koshihara, M. and Ono, T.: Experiments for the Verification of the Predict Ability of Structural Fire Resistance of Heavy Hard Wood (Zelkova) Columns, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), Vol.685, pp.633-638, 2013.3 (in Japanese)
保川みずほ, 安井昇, 鈴木あさ美, 長谷見雄二, 亀山直央, 豊田康二, 門岡直也, 上川大輔, 腰原幹雄, 小野徹郎 : 大断面広葉樹(ケヤキ)製材による軸組柱の防耐火性能予測に関する研究, 日本建築学会構造系論文集 第685号, pp.633-638, 2013.3
- 9) Tanaka, T. : Recent Trend of Scientific Researches and Problems on Understanding and Modeling of Moisture Transport in Wood, Wood Industry, Vol.67, No.6, pp.242-247, 2012.6 (in Japanese)
田中孝 : 木材中の水分移動機構の解明とそのモデル化に関する近年の研究動向と課題, 木材工業, 第67巻, 第6号, pp.242-247, 2012.6
- 10) Suzuki, T. Kaku, C. Kamikawa, D. Yasui, N. Hasemi, Y. Suzuki, J.: Development Research of Water Transfer Measurement Method of Wood under Heating, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, Fire Safety, pp.19-20, 2016.8 (in Japanese)
鈴木達朗, 加来千紘, 上川大輔, 安井昇, 長谷見雄二, 鈴木淳一 : 火災加熱される木質部材内部の水分移動計測手法の開発研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 防火, pp.19-20, 2016.8
- 11) Suzuki, T. Kamikawa, D. Yasui, N. Hasemi, Y. Kaku, C. Endo, T. Watanabe, S. Suzuki, J.: Influence for the Mechanical Property of Wood Exposed Fire caused by Water Transfer, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, Fire Safety, pp.353-356, 2017.8 (in Japanese)
鈴木達朗, 加来千紘, 上川大輔, 安井昇, 長谷見雄二, 鈴木淳一 : 火災時の木質部材断面における水分移動状況の把握と力学的性能への影響評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 防火, pp.353-356, 2017.8
- 12) Wood moisture sensor by high-frequency capacitance: HM520, Manufactured by Kett
<http://www.kett.co.jp/> (accessed 2019.4.24.)
高周波容量式木材水分計 : HM520, Kett 製
- 13) Contact timber moisture meter : LG6NG, Manufactured by LOGICA H&S
<https://www.logica-hs.com/en/> (accessed 2019.4.24.)
- 14) Harada, K. Terai, T. : A Model of Heat and Mass Transfer in Concrete during Fire, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), No.477, pp.185-190, 1995.11 (in Japanese)
原田和典, 寺島俊夫 : 火災時のコンクリート内部の熱水分移動のモデル, 日本建築学会構造系論文集, 477号, pp.185-190, 1995.11
- 15) Fredriksson, M. Wadso L. Johansson, P. : Small resistive wood moisture sensors: a method for moisture content determination in wood structures, European Journal of Wood and Wood Products, Vol.71, Issue 4, pp.515-524, 2013.7
- 16) Du, Q.P., Geissen, A. Noack, D.: Moisture resistance characteristics of some commercial wood species and their measurability by DC type moisture meters, Holz als Roh- und Werkstoff, Vol.49, pp.305-311, 1991.1 (in Germany)
- 17) Japan Society of Mechanical Engineers: JSME Data Book Heat Transfer 4th Edition, p315, Maruzen, 1986.10 (in Japanese)

日本機械学会：伝熱工学資料 改訂第4版,p315,丸善 1986.10

18) Epoxy Technology Inc. : Data Sheat of E4110

http://www.epotek.com/site/administrator/components/com_products/assets/files/Style_Uploads/E4110.pdf (accessed 2019.4.24.)

19) Ogura, T. Onuma, K.: On the computation of moisture distribution in wood by means of electric resistance, Research Report of Forestry and Forest Products Research Institute, Vol.53, pp.83-101, 1952.7 (in Japanese)

小倉武夫,大沼加茂也:電気抵抗による木材水分分布の推定について,森林総合研究所研究報告,第53号,pp83-101,1952.7

20) Tanaka, T.: Evaluation of solid wood moisture content based on dual-energy X-ray absorptiometry, Wood industry, Vol.70, No.3, pp132-135, 2015.3. (in Japanese)

田中孝:実験講座(23)二重エネルギーX線吸収法による木材の含水率測定,木材工業第70号,第3巻,pp132-135,2015.3

注

注1) 木材の電気抵抗を、今回計測している電気抵抗の下限値よりも明らかに低い $\ln(R) = 8 [\Omega]$ 、すなわち約 $3000[\Omega]$ とする。今回用いたニッケル線を 100m 、電気抵抗率を $300[\text{K}]$ で $7.6[\mu\Omega \cdot \text{cm}]$ 、 $600[\text{K}]$ で $25.3[\mu\Omega \cdot \text{cm}]$ とすると¹⁷⁾、電気抵抗はそれぞれ $0.076[\Omega]$ $0.25[\Omega]$ となる。電線と木材の合成抵抗に反比例して電流が流れるとすると、ニッケル線の電気抵抗の変化は合成抵抗に対して 0.1% 以下となる。

注2) 正規分布を仮定した場合、一般的に 95% の信頼区間は標準偏差の 1.96 倍を用いて算出される。本研究の含水率計は、常温下での計測を前提とした文献¹⁵⁾の使用を改良して開発されているが、文献¹⁵⁾では標準偏差の 2 倍値を用いている。本研究においても、文献¹⁵⁾と誤差を比較するため、及び 1.96 倍よりも大きな値であれば誤差を過少評価することにならないため、標準偏差の 2 倍値を用いた。

DEVELOPMENT OF DYNAMIC MOISTURE CONTENT MEASUREMENT SYSTEM FOR WOODEN MEMBERS EXPOSED TO FIRE HEATING

Tatsuro SUZUKI^{*1}, *Yuji HASEMI*^{*2}, *Daisuke KAMIKAWA*^{*3},
Noboru YASUI^{*4}, *Chihiro KAKU*^{*4} and *Jun-ichi SUZUKI*^{*5}

^{*1} Technology Center, Taisei Corp., M.Eng. (Formerly, Waseda Univ.)

^{*2} Prof., Faculty of Science and Engineering, Waseda Univ., Dr.Eng.

^{*3} Forestry Research and Management Organization, Ph.D.

^{*4} Adjunct Researcher, RISE Waseda Univ., Ph.D.

^{*5} National Institute for Land and Infrastructure Management, Ph.D.

A small sensor for the dynamic measurement of local moisture content within a wooden member exposed to fire heating is developed. Time variation of local moisture content of a wooden member during fire tests has not been grasped for the lack of non-destructive measurement system suitable for high temperature. This work intends to develop a heat resistive small sensor applicable to wooden specimen for fire tests to make it possible to monitor the distribution and time variation of moisture content within a wooden specimen just as thermocouples commonly used for the measurement of the distribution and time variation of temperature of a specimen.

Importance of the measurement of local moisture content of a wooden specimen during fire tests comes from the recent advance in the recognition of the importance of moisture content in the high temperature performance of wood, e.g. significant influence of moisture content on the mechanical properties especially at high temperature and on the thermal decomposition as well as for the possible significant transfer of water within heated porous material such as wood due to the vaporization and re-condensation during fire. The possible influence of moisture content of wood may affect not only the charring rate of load bearing members but ignition and flame spread above wood based interior surface.

The proposed measurement system is based on the unique dependence of electric resistance of wood on the moisture content and temperature. The present work consists of the design of a small heat resistant electrical resistance sensor and the development of calibration curves by experiments for the correlation of electrical resistance against temperature and moisture content for most typical tree species for building construction: *Cryptomeria japonica*, *Larix leptolepis*, *Pseudotsuga menziesii* and *Zelkova serrata* are chosen. Main results as follows.

First, the specifications of the heat resistant sensor are shown in Fig.1, which essentially monitor the electric resistance between the couples of the wires. Copper wire reported in a previous work for the measurement at room temperature (Fredriksson et al, 2013) is replaced by electrically insulated nickel wire for the improvement of heat resistance. The upper temperature limit of electrodes the proposed sensor is 150°C; electrically insulated wires need to be wired not to be exposed to temperature higher than 150°C during measurement.

Second, the proposed sensors are applied to wooden plate specimens with the moisture content gradient from 6.9% to 232.8% conditioned at test temperatures from 20°C to 90°C, for the determination of the relationship between electrical resistance and moisture content at each test temperature. The specimen was cut after the test to take samples around each sensor couples to confirm the moisture content by comparing the weight before and after drying. Relations between electric resistance and moisture content are found to differ for tree species.

Finally, the measurement is found to be most effective within the moisture content 10% - 30%: below the lower limit, about 10%, electric resistance rises rapidly with decrease of moisture content, while above the upper limit electric resistance becomes insensitive to moisture content.

In the future, time variation of local moisture content of wooden specimens under steady heating should be measured with the proposed sensors and measurement results should be compared with actual distributions of moisture content calculated from bone-dry weight to verify the validity of the measurement system and improve the prediction of heat and water transfer. Time variation of local moisture content of wooden members during fire furnaces test need to be measured with the sensor to evaluate influence of moisture content on mechanical properties.

(2018年12月10日原稿受理, 2019年4月22日採用決定)