

# 博士論文概要

火災加熱を受ける木質部材内部の  
熱水分同時移動が  
力学的性能へ及ぼす影響の評価に  
関する研究

Evaluation of Influence of Heat and Water  
Transfer in Wooden Members Exposed to  
Fire Heating

申請者

鈴木 達朗

Tatsuro SUZUKI

近年、国内外で木造建築物の大規模化が急速に進んでいる。背景として、建築物への木材の活用が、建材として使用されることによる炭素の固定や、林業の健全化等の観点から重要な課題となっていることが挙げられる。また、2020年には建築基準法が改正され、これまで耐火建築物でしか建築できなかった規模や用途の建築物が、耐火建築物以外でも建築可能となっている。よって、大規模化する木造建築物の火災安全に対する信頼性の確保や、適正な大きさの断面を設計する必要性から、木質部材の耐火性能の予測・評価がより重要となっている。これまで、火災時の木質部材の力学的性能は、炭化による断面減少と、温度による耐力低下を加味して予測されてきた。しかし、木材は水分を含む材料であり、常温時においても含水率が上昇すると力学的性能が低下する。火災時に内部が高温となると、蒸発した水分が内部に移動、凝縮することで含水率が上昇するだけでなく、含水率の力学的性能への影響は高温時に増大する。よって、部材内部の水分移動による含水率の上昇は、力学的性能の顕著な低下を招いていると考えられ、その影響を評価することが望まれている。

そこで、本論文では火災加熱を受ける木質部材内部で起こる熱水分移動に着目し、その力学的性能への影響の定量的な評価を目的とした。本論文は以下の7章より構成され、各章の概要を以下に述べる。

第1章「序論」では、研究背景及び目的について述べた。火災加熱を受ける木質部材の力学的性能を変化させる要因を整理した上、既往研究やその中で用いられた解析手法の特徴を述べた。それらと比較して本論文は、木造部材内部の熱水分移動を実験・解析により明らかにし、温度と含水率の双方の依存性を考慮して力学的性能の変化を予測することが大きな特徴であることを述べた。最後に、本論文の構成を示した。

第2章「小型含水率計の開発」では、加熱実験時にも使用可能な、木質部材内部の局所的な含水率の変化を測定できる装置の開発を行った。これまで加熱実験時の部材内部の温度は、熱電対によって測定することが可能であったが、含水率を測定できる汎用的な装置はなく、水分移動の状況を把握するための大きな妨げとなっていた。そこで、熱電対が温度測定を行うのと同様に、部材内部の局所的な含水率を測定できる装置の開発を行った。含水率計の基本的な測定原理は、小型の電極を木材内部に埋設し、電気抵抗から含水率を逆算するものである。加熱実験時の高温に耐えうる仕様とするため、常温下での使用を想定した既往研究の使用に、耐熱性を向上させる仕様の改良を行った。さらに、電気抵抗から含水率を逆算するため、温度及び含水率による電気抵抗の変化を実験により測定し、実験結果を対象とした回帰分析により校正曲線を導出した。校正曲線は、スギ、カラマツ、ベイマツ及びケヤキについて導出された。最後に、測定可能範囲と精度

について考察を行い、約 10%～30%で最も有効であることを示した。

第 3 章「小型含水率計による含水率の変化の測定」では、2 章にて開発した含水率計を用いて、定常加熱、または非定常過熱を受ける木材平板内部の含水率分布の変化を実際に測定した。樹種はいずれもスギとした。定常加熱を与えた実験では、コーンカロリメーターを用いて、熱電対及び含水率計を設置した試験体（100mm 角×厚 45mm）に板目面から 4.5、または 20kW/m<sup>2</sup>の加熱を与えた。4.5kW/m<sup>2</sup>の加熱では、試験体の表面でも炭化や熱分解が生じないような比較的低温であったが、部材内部では含水率が徐々に上昇したため、部材内部の加熱面から離れた入熱の小さい部分でも含水率が上昇する可能性があることを示した。20 kW/m<sup>2</sup>の加熱では、内部で含水率が一時的に上昇したのち、低下する現象が確認された。これは、加熱面付近での水分の蒸発、水蒸気の移動、再凝集によって含水率が増加したのち、加熱面からの炭化の進行と内部温度の上昇に伴い蒸発が盛んになることで含水率が低下する現象を測定できたものと考えられる。非定常加熱を与えた実験では、壁状の試験体（幅 600mm×高さ 480mm×厚 120mm）に、小型炉を用いて ISO834 標準加熱曲線に準じた 90 分の加熱を与えた。実大の加熱実験時を想定して、ラミナ内部に熱電対及び含水率計を設置、配線したのち、ラミナ同士を接着することにより試験体を作成した。非定常加熱においても、加熱面付近における含水率の一時的な上昇、及び加熱面から比較的離れた箇所における含水率の緩やかな上昇が確認され、火災加熱を受ける部材内部で含水率が上昇することを実験により把握した。

第 4 章「熱水分同時移動モデルによる温度・含水率分布の変化の予測」では、火災加熱時の木造部材内部の温度と含水率の変化を予測可能にするため、熱水分同時移動モデルにより解析を行い、第 3 章の実験結果と比較した。解析では、熱、水分、混合ガス（水蒸気と空気）及び水蒸気について収支式を立て、それぞれ、温度、含水率、全圧及び水蒸気圧の連成した差分式を導いた。内部の含水率の上昇は、加熱面付近での水分の蒸発による水蒸気の発生、非加熱面側への水蒸気の移動、水蒸気分圧が増加することによる相対湿度の増加、相対湿度の増加による平衡含水率の上昇、最後に、平衡含水率に近づくために含水率が上昇するというモデルにより再現されている。解析の結果、熱水分同時移動モデルにより含水率の上昇を再現することができ、実験結果とも概ね一致した。

第 5 章「高温時の力学的性能の温度・含水率依存性の定量化」では、温度・含水率依存性を考慮して、加熱前と比較した力学的性能の残存率を算出する式を導出した。これまで、火災加熱時を受けた残存断面の力学的性能の低下は、温度依存性のみが専ら考慮されてきた。しかし、高温時には、力学的性能の含水率依存性が増大することから、火災時に荷重を保持する残存断面の力学的性能を、含水率依存性を考慮して評価する必要がある。筆者らは、温度及び含水率をパラメ

ータとした、小試験体（20mm角×320mm）を用いた曲げ試験結果によって、木材の力学的性能の温度・含水率依存性に関する基礎的なデータをこれまでに蓄積してきた。本章では、これらの小試験体の曲げ試験結果を対象に回帰分析を行い、加熱後の温度と含水率を引数として力学的性能の残存率を算出できる式を導出した。力学的性能として、曲げ試験結果から算出できるヤング係数及び曲げ強度を対象とした。回帰式は、既往の知見と、温度を段階的に増加させながら、各温度でヤング係数を測定する曲げ試験を行った結果により決定した。回帰分析の結果、導出した回帰式と実験結果はよく一致し、温度・含水率依存性を考慮してヤング係数及び曲げ強度の残存率を算出できることとなった。

第6章「実大部材における熱水分同時移動解析による力学的性能予測のケーススタディ」では、第4章の熱水分同時移動解析と、第5章の力学的性能の残存率の計算式を用いて、火災加熱を受ける実大部材内部の、含水率の力学的性能への影響の評価例を示した。評価の手法として、まず、実大部材の断面を有限要素に分割し、熱水分同時移動解析を行って、各要素の温度及び含水率分布の推移を算出した。次に、各要素の力学的性能の残存率を、熱水分同時移動解析によって得られた温度及び含水率から算出した。最後に、断面全体で発揮できる耐力を求めた。本章では、評価例として、加熱実験の行われているスギ梁、ケヤキ柱の2例を対象とした。いずれの場合も、含水率を考慮した場合の解析結果では、実験結果よりも早く部材の崩壊時間を予測したのに対し、含水率を考慮しない場合は崩壊時間を実験よりも長く予測する結果となった。以上より、熱水分同時移動解析を用いて含水率を考慮した火災時耐力の予測が可能であること、含水率依存性を考慮して火災時耐力を予測する必要があることを示した。

第7章「総括」では、各章で得られた知見を整理し、本論分の成果を総括した。また、第4章及び第6章の熱水分同時移動モデルによる解析結果を踏まえ、今後の改良点をまとめた。

以上を要するに、本論文では、火災加熱を受ける木質部材内部の含水率の変化を開発した装置により実測した上、熱水分同時移動モデルによる再現と、その力学的性能への影響評価を可能とした。これまで明らかにされてこなかった火災加熱を受ける木質部材内部の水分移動の力学的性能への影響を定量的に評価できるようにしたことは、木造建築物の火災時の安全性の向上や、耐火性能の工学的な予測手法の確立に向けて大きな貢献をもたらしている。

## 早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

氏名 鈴木 達朗 印

(2020年12月 現在)

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
論文	<p>(○印は、本論文を担う主要な業績を示す。)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 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、日本建築学会構造系論文集 第84巻 第762号 pp.1123-1133、2019年8月、<u>鈴木達朗</u>・長谷見雄二・上川大輔・安井昇・加來千紘・鈴木淳一</li> <li>○ 火災加熱される木質部材内部の温度・含水率によるヤング係数残存率計算式の導出、日本建築学会構造系論文集 第85巻 第770号 pp.651-661 2020年4月、<u>鈴木達朗</u>・長谷見雄二・上川大輔・安井昇・加來千紘・渡辺秀太</li> <li>○ 定常加熱を受ける木材平板内部の温度・含水率分布の測定と熱水分同時移動解析による再現、日本建築学会構造系論文集 第85巻 第778号 pp.891-901、2020年12月、<u>鈴木達朗</u>・並木淳・長谷見雄二・高瀬椋・上川大輔・安井昇・加來千紘（掲載決定）</li> <li>・ 含水率が火災加熱を受ける木材の力学的性能へ及ぼす影響 -多様な含水率状態におけるスギ及びケヤキの高温時ヤング係数・曲げ強度の測定-、日本建築学会構造系論文集 第82巻 第732号 pp.299-308、2017年2月、加來千紘・長谷見雄二・上川大輔・<u>鈴木達朗</u>・安井昇・腰原幹雄・長尾博文</li> <li>・ 多様な樹種の木材の力学的性能に対する温度・含水率の影響の把握と予測可能性 -構造用主要樹種に関するデータ構築と全乾密度に基づく予測可能性の検討-、日本建築学会構造系論文集 第84巻 第761号 pp.1011-1020、2019年7月、渡辺秀太・<u>鈴木達朗</u>・長谷見雄二・加來千紘・上川大輔・安井昇・宮本康太</li> </ul>
講演	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ INFLUENCE OF WATER CONTENT ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF WOOD EXPOSED TO FIRE - Young's modulus and bending strength of Cryptomeria Japonica and Zelkova serrate under various water-containing states at elevated temperature-, 14th World Conference on Timber Engineering（世界木質構造会議2016）・研究発表、2016年8月、Chihiro KAKU・Yuji HASEMI・Daisuke KAMIKAWA・<u>Tatsuro SUZUKI</u>・Noboru YASUI・Mikio KOSHIHARA・Hirofumi NAGAO</li> <li>・ 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年7月、<u>鈴木達朗</u>・加來千紘・長谷見雄二・上川大輔・安井昇・亀山直央・腰原幹雄・長尾博文</li> <li>・ 木材の含水率が高温時の力学的性能に及ぼす影響（その2）広葉樹材（ケヤキ）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年7月、加來千紘・<u>鈴木達朗</u>・長谷見雄二・上川大輔・安井昇・亀山直央・腰原幹雄・長尾博文</li> <li>・ 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年8月、<u>鈴木達朗</u>・加來千紘・上川大輔・安井昇・長谷見雄二・鈴木淳一</li> </ul>

## 早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
講演	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 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年7月、<u>鈴木達朗</u>・上川大輔・安井昇・長谷見雄二・加來千紘・遠藤智紀・渡辺秀太・鈴木淳一</li> <li>• 木材の含水率が高温時の力学的性能に及ぼす影響（その3）カラマツ及びベイマツ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. 333-334、2017年7月、渡辺秀太・<u>鈴木達朗</u>・長谷見雄二・上川大輔・加來千紘・安井昇・宮本康太</li> <li>• 火災加熱を受ける針葉樹部材における密度・含水率の曲げ剛性への影響、日本建築学会大会学術講演梗概集(防火) pp. 395-396、2018年7月、渡辺秀太・<u>鈴木達朗</u>・長谷見雄二・加來千紘・上川大輔・安井昇・宮本康太</li> <li>• 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（その2）小型含水率計及び絶乾法により算出した含水率分布の比較、日本建築学会大会学術講演梗概集(防火) pp. 393-394、2018年7月、<u>鈴木達朗</u>・安井昇・長谷見雄二・上川大輔</li> <li>• 火災加熱を受ける小型スギ試験体内部の含水率の動的測定に関する研究、日本建築学会大会学術講演梗概集(防火) pp. 185-186、2019年7月、並木淳・長谷見雄二・渡辺秀太・<u>鈴木達朗</u>・高瀬椋・加來千紘</li> <li>• 火災加熱を受ける木質部材の熱水分同時移動解析による力学的性能予測、日本建築学会大会学術講演梗概集(防火) pp. 183-184、2020年7月、<u>鈴木達朗</u>・長谷見雄二</li> <li>• 燃え止まり型木質耐火構造部材の耐火性能影響要因に関する研究（その1）荷重支持部の含水率が加熱後の力学的性能に及ぼす影響、日本建築学会大会学術講演梗概集(防火) pp. 179-180、2020年7月、並木淳・青山源・<u>鈴木達朗</u>・齊吉大河・長谷見雄二・鈴木淳一・鍵屋浩司</li> <li>• 火災時を想定した木材内部の含水率測定法の開発研究 -計測範囲の拡大と長時間測定に向けた検討-、日本建築学会大会学術講演梗概集(防火) pp. 177-178、2020年7月、赤熊隆一・並木淳・長谷見雄二・<u>鈴木達朗</u>・高瀬椋</li> </ul>
その他 （博士論文に直接関係ない講演）	<ul style="list-style-type: none"> <li>• スパンの異なる木質床部材における防耐火性能予測に関する研究、日本建築学会大会学術講演梗概集(防火)、pp. 11-14、2016年8月、遠藤智紀・安井昇・鈴木淳一・加來千紘・長谷見雄二・<u>鈴木達朗</u></li> <li>• 小型木質梁の加熱実験による載荷加熱した実大梁の内部温度分布の推定可能性、日本建築学会大会学術講演梗概集(防火) pp. 329-330、2017年7月、遠藤智紀・安井昇・鈴木淳一・加來千紘・長谷見雄二・<u>鈴木達朗</u></li> <li>• 超高強度繊維補強コンクリート柱の耐火性能、日本建築学会大会学術講演梗概集(防火) pp. 37-38、2019年7月、<u>鈴木達朗</u>・加藤雅樹・馬場重彰・阪井由尚</li> <li>• 超高強度繊維補強コンクリートの熱間圧縮試験、日本建築学会大会学術講演梗概集(防火) pp. 37-38、2019年7月、加藤雅樹・<u>鈴木達朗</u>・馬場重彰・黒岩秀介</li> <li>• 有限オートマトンを用いたマルチエージェント型人流シミュレーションの開発 -施設内における歩行者流動シミュレーション開発 その1-、日本建築学会大会学術講演梗概集(防火) pp. 1091-1092、2020年7月、山田武志・池島由華・<u>鈴木達朗</u></li> </ul>

## 早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
その他 （博士論文に直接 関係ない 講演）	<ul style="list-style-type: none"><li>• 通路状空間と開口部の歩行性状 -施設内における歩行者流動シミュレーション開発その2-、日本建築学会大会学術講演梗概集（防火） pp.1093-1094、2020年7月、池畠由華・鈴木達朗・山田武志</li></ul>