

令和 4 年 6 月 21 日現在

機関番号：32689

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19H00798

研究課題名(和文) 火災加熱下の木造部材における熱・水分移動とその力学的影響に関する実証的研究

研究課題名(英文) Validation of the Heat and Moisture Transfer within Wooden Building Assemblies under Fire Exposure and its Mechanical Impact on the Building Structure

研究代表者

長谷見 雄二 (Hasemi, Yuji)

早稲田大学・理工学術院・名誉教授

研究者番号：40298138

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 23,900,000円

研究成果の概要(和文)：火災加熱される木造部材内部の含水率測定法、熱・水分移動モデル、木材中の水分移動が部材の力学的挙動に及ぼす影響について、以下の成果を得た。(1)木造部材の含水率測定法については、常温・気乾状態から標準耐火加熱した場合の含水率変化を追跡できる程度に改良できた。(2)熱・水分移動に係わる木材の高温での熱伝導率が木材繊維方向に著しく大きい値となること等を明らかにした。(3)木造梁の火災時の変形とスパンの関係が鋼材等と異なる傾向を示す事、火災加熱時の炭化速度と強度の変化が矛盾する傾向を示す事など、従来、原因不明とされた多くの特徴が水分移動に起因することを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

実用化が期待されている火災加熱下の木材の含水率測定法については、実際的な火災加熱条件下で常温から沸点まで、更に自然冷却の過程までの動的測定が可能となった。この成果は今後の木質部材の耐火性能予測に関する研究の推進に多大な影響を及ぼすと考える。火災加熱下の木造部材における熱水分移動モデルについて、高温での熱伝導率の異方性が顕著なこと、熱分解時に発熱を伴うことなど、新しい知見を得た。これらを通じ、従来、原因不明だった火災加熱下での木造部材の特異な挙動のいくつかについて原因を明らかにした。今後、木構造の耐火性能の合理的開発・評価の確立に寄与すると考える。

研究成果の概要(英文)：The limit for the measurement of moisture content of wooden members has been expanded to the extent that changes in moisture content could be traced from air-drying conditions at ambient temperature to the end of standard fire-resistance test. Thermal conductivity of wood at high temperature at different fiber directions was measured for the development of heat/moisture transfer model, resulting in the extremely strong anisotropy in the fiber directions; it strongly suggests that the transfer of water in axial direction of a wooden load bearing member can affect its mechanical performance. From these results, several mysteries in the fire behavior of wood such as the fact that the relationship between the deformation and span of wooden beams during a fire tends to be different from that of steel or concrete, and the inconsistency between the charring rate and the mechanical performance of wood during fire heating have been found to be caused by moisture transfer due to fire heating.

研究分野：建築学

キーワード：大規模木造 火災 力学的性能 熱・水分移動 含水率 入射熱

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

CO₂排出抑制や建築・森林資源の持続可能性の向上を目的として2010年代以降、大規模木造建築の開発の促進が政策化されてきたが、防火性能の改善には多くの課題がある。特に火災加熱下での木造部材の力学的性能の維持には不明確な点が多く残されている。その典型は、木造部材の性能への火災の影響の予測の困難性であり、従来、この問題を回避する常套的な方法は、部材断面を計算上の必要断面より増加させて安全率を高めるといった方法であった。しかし、この方法では木材を必要以上に使用することになる可能性が多いうえに、荷重・可燃物量の増加は、構造部材の負担や火災継続時間の増加を結果的に招くため、大スパン建築等では却って防火的に不利になる可能性がある。大規模木造建築の開発を促進するには、火災加熱下の木造部材の力学的性能の予測精度を向上させ、木材の合理的な利用によって必要な防火性能を担保できるようにする必要が大きい。

木材の火災加熱下の挙動に関する既往研究では、火災時の木造部材の性能の不明確性の要因として木材に含まれる水分の相変化・移動とそれが強度に及ぼす影響が考えられた。しかし、加熱中の木材の含水率の測定技術が未整備であり、木材の熱水分移動を支配するパラメータ等も把握できていなかった。そのため、高温の木材の含水率の測定法の開発、木材の熱水分移動モデルの開発・パラメータ推定、水分の相変化・移動が部材の力学的性能に及ぼす影響の機構の解明が重大な課題となった。

2. 研究の目的

木造の防耐火性能評価において、100℃未満では強度低下への影響は長い間、無視されてきた。しかし、近年の研究では水分の蒸発とその低温側への移動により100℃付近で含水率の高い層が形成され易いことが予想され、100℃付近では木材の強度が含水率の影響を強く受け、飽和状態では常温・気乾状態の1/2未満になること等が判明した。

この強度低下を把握できていないことが木造の耐火性能予測の困難の重要な要因と考えるが、この研究の遅れは、高温の木材の含水率測定法の未発達にも起因する。本研究では、研究代表者が開発した耐熱性の動的含水率測定法を耐火加熱実験に適するよう改良して、耐火加熱時の部材内部の温度・含水率及び載荷時の変形の測定を行い、代表的な樹種の熱・水分移動に関するパラメータの同定と火災加熱時の部材の力学的性能の予測モデルの検証を行う。火災時の水分移動は木材の燃焼性状にも影響するため、木質内外装の燃焼性状予測へも活用可能にする。

3. 研究の方法

研究内容は、実験の内容と分析の方法論により、以下の3通りに分けられる。

(1) 高温の木造部材の含水率の測定法の改良と耐火加熱試験における実大部材の含水率の動的測定法の開発

小型試験体による実験で測定可能な含水率の範囲の拡大・精度向上を図った。また、耐火炉による大規模木造部材の加熱実験に適用できるように測定法を改良し、実験的にその精度等を検証する。

(2) 実大木造梁の標準耐火加熱時の熱・力学的応答の実測と、それらに対する水分移動の影響の分析評価

標準耐火加熱を受ける実大木造梁について表面入射熱分布・内部温度・載荷による変形・崩壊を複数回の実験で把握し、部材への入熱から変形・崩壊に至る経過における水分移動の影響を分析して、木構造部材の耐火性能に対する水分移動の影響を評価するとともに、従来、予測精度が低かった火災加熱時の木造部材の力学的応答の予測・制御可能性を改良する。

(3) 火災加熱を受ける木材内部の熱水分移動モデルの開発

含水率測定を踏まえて高温での木造部材内部の熱水分移動を支配する各種パラメータを同定し、火災加熱される木造部材内部の温度・含水率予測モデルを開発して、実大実験により検証する。

4. 研究成果

(1) 加熱される木造部材中の含水率測定法

電気抵抗から含水率を求めるため、電気抵抗の上限、含水率に対する抵抗の感度により測定可能範囲が定まる。本研究では含水率測定範囲の下限を拡大し、気乾状態の木材については標準耐火加熱とその後の放冷の間の含水率の変化を把握できるようにした(図1)。一方、耐火炉による大型試験体の加熱実験では、多くの測定点で含水率の測定値にズレが見られたものの相変化に伴う含水率の増減等は的確に再現される結果となった(図1)。このズレの正確な原因は未解明で、今後の課題である。

(2) 実大木造梁の標準耐火加熱時の熱・力学的応答の実測と、それらに対する水分移動の影響の分析評価

難燃処理木材被覆の耐火構造では、荷重支持部の初期含水率が内部の温度・含水率の推移に無視できない影響を与え、加熱終了後の強度に著しい影響を与え得ることを明らかにした(図 1)。

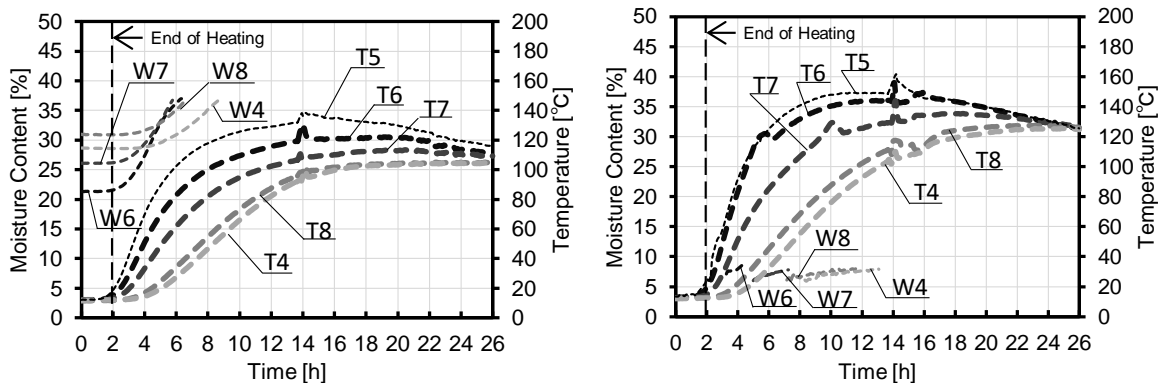


図 1 2時間耐火構造木造梁荷重支持部の温度・含水率変化(2時間加熱後、24時間放冷)
[左:気乾状態, 右:初期含水率6%, Tは温度、Wは含水率 実験は非載荷]

燃えしろ設計等の大断面木造梁では、スパンと変形の関係が Euler 式に従わないことが知られていたが、それが、スパンによる木材断面のヤング係数の時間的変化の違いに起因することを明らかにした(図 2~4, 試験体は、燃えしろ設計を想定した断面で、4m, 8m の二通り)。それは更に水分の材軸方向の移動に対するスパンの影響に起因すると仮定すると、炭化速度のスパンによる違いを含め合理的に説明できることを明らかにした。これらを通じ、従来、原因不明だった木造部材の火災加熱時の力学的挙動の予測困難性の多くが水分移動に起因する可能性が大きいことを明らかにした。

なお、本実験の付随的な成果として、梁の加熱試験を行う水平炉では、梁に対する入射熱が梁側面より梁下面で著しく小さく、炭化により有効断面が減少する木造部材では断面 2 次モーメントの変化が現実の室火災の特徴を再現し得ているかについての疑義を提示した。この問題は炉の加熱特性を建物火災実験例等と比較して検討されるべき今後の課題である。

(3) 火災加熱を受ける木材内部の熱水分移動モデルの開発

木材の熱伝導率が繊維に対して著しい方向性を有し、柱・梁では従来、無視されていた材軸方向の水分移動が部材としての力学的性能に重大な影響を与え得ること、木材中の水蒸気の移動を支配する透気係数は従来の経験値が実態と大きく異なるが力学的性能への影響は小さいことを明らかにした。図 5~7 は小規模試験体の一面定常加熱時の年輪の半径方向、接線方向、材軸方向の温度・含水率の変化を示すが、繊維方向との関係により、温度・含水率の推移に著しい差が現れている。このうち、木材の材軸方向(木材の繊維方向)の熱伝導率・水分移動が極めて大きいという研究結果は、木造梁において、断面が同じなら、

スパンによって火災加熱後の残存水分量(体積当たり)が異なることを意味しており、これによって、木造梁のスパンと変形の関係が Euler 式に従わないことの理由が明らかとなった。

更に、加熱される木造部材内の温度には 100°C を超える部分で特異な温度上昇が生じる事例があった。そこで、小規模試験体により試験体表面に引火しない範囲で加熱実験を行ったところ、木材に着火しなくても、外部加熱の直接的影響を超えて昇温が生じる例が見られた(図 8, L290)。同じ条件で熱伝導のみを考慮した温度計算と比較し、この現象が、試験体木材の熱分解時に同時に木材から酸素が放出されることにより発熱反応が生じることに起因するとの推定を行った。

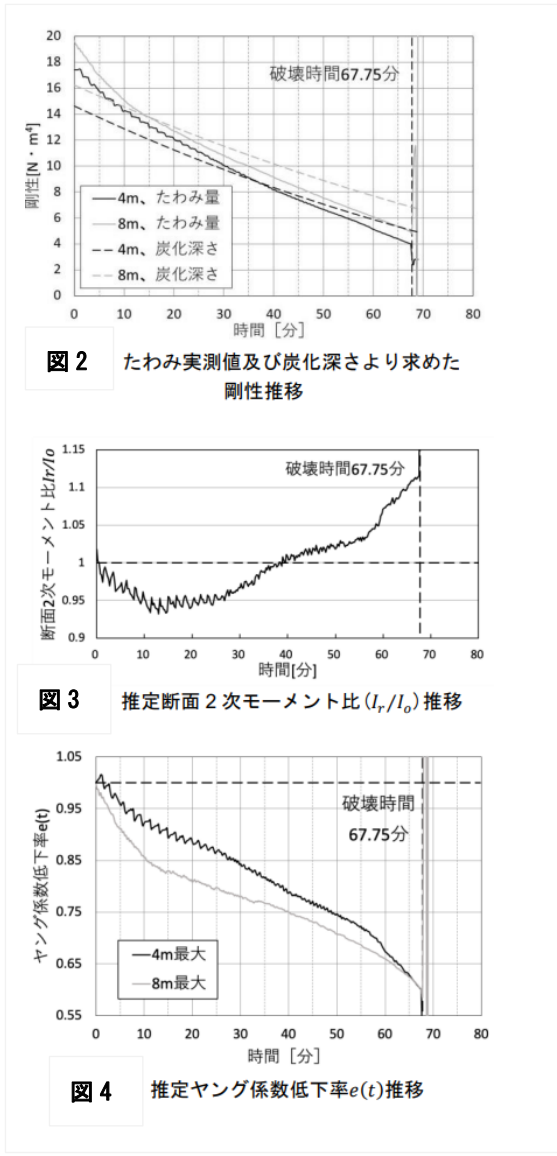


図 2 たわみ実測値及び炭化深さより求めた剛性推移

図 3 推定断面 2 次モーメント比 (I_r/I_0) 推移

図 4 推定ヤング係数低下率 $e(t)$ 推移

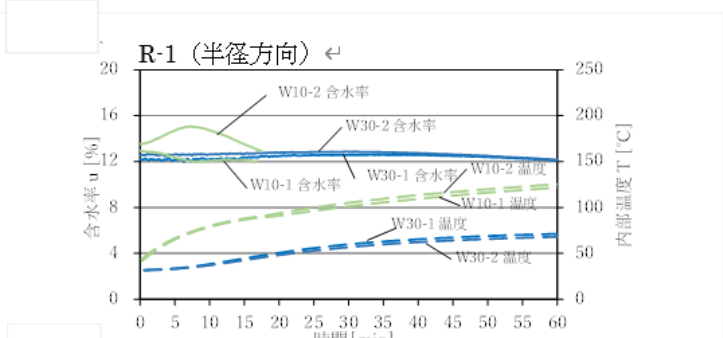


図5 □半径方向の含水率及び内部温度時間変化（気乾状態）

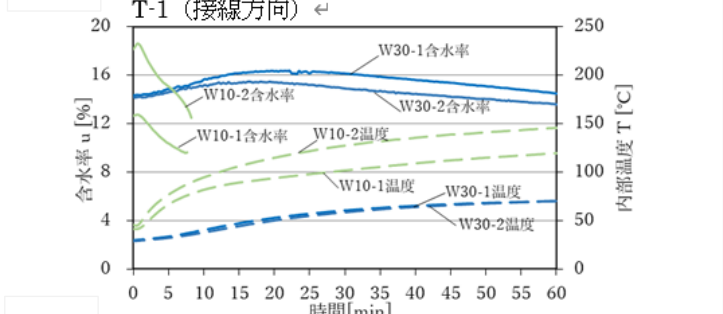


図6 □接線方向の含水率及び内部温度時間変化（気乾状態）

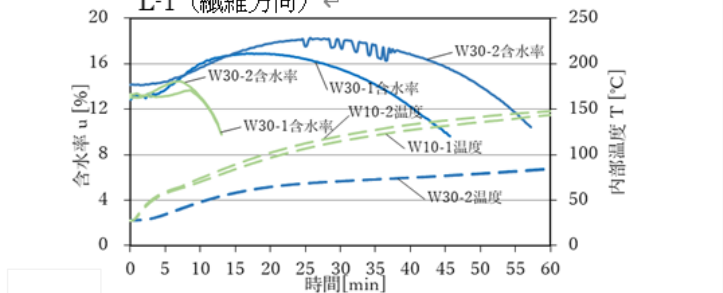


図7 □繊維方向の含水率及び内部温度時間変化（気乾状態）

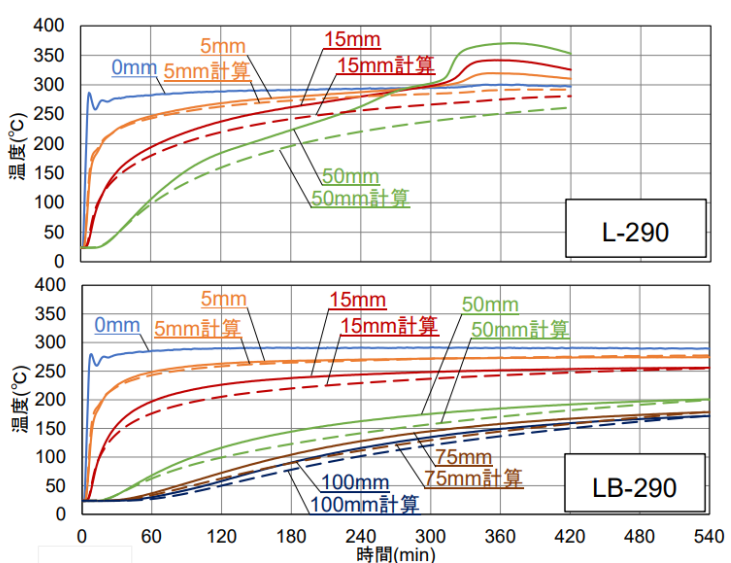


図8 試験体の内部温度推移（実験値と計算値の比較）

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 SAIYOSHI Taiga, HASEMI Yuji, HOKIBARA Tomoyo, AOYAMA Gen, TAKASE Ryo, KAMIKAWA Daisuke, SUZUKI Jun-ichi	4. 巻 86
2. 論文標題 MINIMIZATION OF THE VOLUME OF THE WOOD-BASED BARRIER FOR 2-HOUR FIREPROOF WOODEN BEAM	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Environmental Engineering (Transactions of AIJ)	6. 最初と最後の頁 1~11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3130/aije.86.1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 SUZUKI Tatsuro, NAMIKI Jun, HASEMI Yuji, TAKASE Ryo, KAMIKAWA Daisuke, YASUI Noboru, KAKU Chihiro	4. 巻 85
2. 論文標題 MEASUREMENT OF DISTRIBUTION OF TEMPERATURE AND MOISTURE CONTENT WITHIN WOODEN PLATE UNDER STEADY HEATING AND NUMERICAL REPRODUCTION WITH HEAT AND WATER TRANSFER ANALYSIS	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Environmental Engineering (Transactions of AIJ)	6. 最初と最後の頁 891~901
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3130/aije.85.891	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 SUZUKI Tatsuro, HASEMI Yuji, KAMIKAWA Daisuke, YASUI Noboru, KAKU Chihiro, WATANABE Shuta	4. 巻 85
2. 論文標題 DEVELOPMENT OF AN EQUATION CALCULATING YOUNG'S MODULUS REMAINING RATIO WITH TEMPERATURE AND MOISTURE CONTENT WITHIN WOODEN MEMBERS EXPOSED TO FIRE HEATING	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ)	6. 最初と最後の頁 651~661
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3130/aijs.85.651	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計27件（うち招待講演 0件／うち国際学会 2件）

1. 発表者名 赤熊隆一、並木淳、長谷見雄二、鈴木達朗、高瀬椋
2. 発表標題 火災時を想定した木材内部の含水率測定法の開発研究 - 計測範囲の拡大と加熱中の動的測定に向けた検討 -
3. 学会等名 日本建築学会関東支部研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 種子田裕之、青山源、斉吉大河、伯耆原智世、長谷見雄二、上川大輔、高瀬棕
2. 発表標題 火災加熱を受ける絶乾状態の木材における内部温度推移と含水率が木材の自己発熱と炭化性状に及ぼす影響-木質耐火構造部材の荷重支持部を想定した小型試験体による検討-
3. 学会等名 日本建築学会関東支部研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 木村熙克、赤熊隆一 並木淳、長谷見雄二、鈴木達朗
2. 発表標題 火災時木材内部の水分移動に気体透過性が及ぼす影響の検討 含水率・接着層を条件とした比透気率の測定と解析モデルへの適用
3. 学会等名 日本建築学会関東支部研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 赤熊隆一、並木淳、長谷見雄二、鈴木達朗、高瀬棕
2. 発表標題 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 -
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 並木淳、鈴木達朗、長谷見雄二、鍵屋浩司、青山源、斉吉大河、鈴木淳一
2. 発表標題 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
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 青山源、並木淳、長谷見雄二、鍵屋浩司、斉吉大河、鈴木淳一
2. 発表標題 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2）梁部材において載荷が燃え止まり性と炭化深さに及ぼす影響
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 種子田裕之、斉吉大河、長谷見雄二、高瀬棕、青山源、伯耆原智世、上川大輔
2. 発表標題 一面加熱される絶乾状態の木材平板における内部温度推移と自己発熱性状
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中島勇佑・種子田裕之・遠藤智紀・長谷見雄二・鈴木淳一・鍵屋浩司
2. 発表標題 耐火試験用水平炉のスパンに応じた梁試験体の入射熱特性の把握（その1）研究概要および実験結果（炉内温度・炉壁床温度・試験体近傍温度）
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 種子田裕之・中島勇佑・遠藤智紀・長谷見雄二・鈴木淳一・鍵屋浩司
2. 発表標題 耐火試験用水平炉のスパンに応じた梁試験体の入射熱特性の把握（その2）実験結果（入射熱）
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 赤熊隆一、長谷見雄二、鈴木達朗、鍵屋浩司、鈴木淳一
2. 発表標題 火災加熱を受ける集成材梁内部における含水率分布の変化の測定
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 鈴木達朗・長谷見雄二
2. 発表標題 火災加熱を受ける木造部材の熱水分同時移動モデルの改良研究（その1）モデルの課題と吸脱着速度に関する改良
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 木村熙克・長谷見雄二・鈴木達朗・赤熊隆一
2. 発表標題 火災加熱を受ける木造部材の熱水分同時移動モデルの改良研究（その2）含水率と接着層を変数とした比透気率の測検討検討
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 木村熙克・赤熊隆一・並木淳・長谷見雄二・鈴木達朗
2. 発表標題 火災時木材内部の水分移動に気体透過性が及ぼす影響の検討 含水率・接着層を条件とした比透気率の測定と解析モデルへの適用
3. 学会等名 日本建築学会関東支部研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中島勇佑、青山源、種子田裕之、遠藤智紀、長谷見雄二、鍵屋浩司
2. 発表標題 スパンに応じた水平炉の入射熱分布の把握と木質梁の炭化速度に与える影響
3. 学会等名 日本建築学会関東支部研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山本芽依・遠藤智紀・中島勇佑・伯耆原智世・長谷見雄二・鈴木淳一・鍵屋浩司
2. 発表標題 耐火炉試験による大スパン木造梁の非損傷性の予測可能性～木造梁試験体のスパンが載荷加熱時の変形・断面性能に及ぼす影響に関する実験的検討～
3. 学会等名 日本建築学会関東支部研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 關根勝人・種子田裕之・伯耆原智世・長谷見雄二・上川大輔・高瀬棕
2. 発表標題 加熱される木材の熱分解が部材内部の昇温に与える影響 木材の1次元加熱実験と熱伝導計算の比較による検討
3. 学会等名 日本建築学会関東支部研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Gen Aoyama, Yuji Hasemi, Tomoyo Hokibara, Taiga Saiyoshi, Daisuke Kamikawa, Ryo Takase, Jun-ichi Suzuki
2. 発表標題 Design Methodology of Total Timber 2-Hour Fire-Resistive Structural Beam on Sacrifice Layer Concept
3. 学会等名 World Conference on Timber Engineering 2020(on line) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Jun Namiki, Yuji Haseni, Shuta Watanabe, Tatsuro Suzuki, Ryo Takase
2. 発表標題 Measurement of Moisture Distribution inside a Timber Exposed to Fire Heating
3. 学会等名 World Conference on Timber Engineering 2020(on line) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 關根勝人・種子田裕之・伯耆原智世・長谷見雄二・上川大輔・高瀬棕
2. 発表標題 加熱される木材の熱分解が部材内部の昇温に与える影響 -木材の1次元加熱実験と熱伝導計算の比較による検討
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 中島勇佑・山本芽依・遠藤智紀・伯耆原智世・長谷見雄二・鈴木淳一・鍵屋浩司
2. 発表標題 実用耐火炉による大スパン木造梁の非損傷性の予測可能性 (その1)研究計画・方法
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 遠藤智紀・中島勇佑・山本芽依・伯耆原智世・長谷見雄二・鈴木淳一・鍵屋浩司
2. 発表標題 実用耐火炉による大スパン木造梁の非損傷性の予測可能性 (その2) 実験結果
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山本芽依・遠藤智紀・中島勇佑・伯耆原智世・長谷見雄二・鈴木淳一・鍵屋浩司
2. 発表標題 実用耐火炉による大スパン木造梁の非損傷性の予測可能性 (その3)たわみ・破壊と試験体の炭化・内部温度及び試験体入射熱の関係の分析
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 鈴木聡馬・木村熙克・赤熊隆一・長谷見雄二・伯耆原智世・鈴木達朗・高瀬椋
2. 発表標題 火災加熱を受ける木造部材の異方性が熱水分移動に与える影響 -異なる方向から定常加熱を受ける木材内部の温度・含水率分布の測定
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 鈴木達朗・長谷見雄二
2. 発表標題 火災加熱を受ける木造部材内部で蒸発した水分の再凝縮量の推定
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 木村熙克・鈴木達朗・伯耆原智世・長谷見雄二・鈴木淳一・鍵屋浩司
2. 発表標題 火災加熱を受ける実大集成材梁内部の材軸方向における温度・含水率分布の測定
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 鈴木聡馬・木村熙克・赤熊隆一・長谷見雄二・伯耆原智世・鈴木達朗・高瀬棕
2. 発表標題 火災加熱を受ける木質構造部材の異方向性が熱水分移動へ与える影響の把握 - 異なる方向から定常加熱を受ける木材内部の温度・含水率分布の測定 -
3. 学会等名 日本建築学会関東支部研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 鈴木達朗・長谷見雄二
2. 発表標題 火災加熱を受ける木材内部の温度・含水率による ヤング係 数残存率の変化の簡易的予測法
3. 学会等名 日本火災学会研究発表会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 長谷見 雄二	4. 発行年 2019年
2. 出版社 早稲田大学出版部	5. 総ページ数 194
3. 書名 木造防災都市	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担者	鍵屋 浩司 (Kagiya Koji) (90298191)	東北工業大学・建築学部・教授 (31303)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	伯耆原 智世 (Hokibara Tomoyo) (70908061)	早稲田大学・理工学術院・専任講師 (32689)	
研究分担者	板垣 直行 (Itagaki Naoyuki) (00271891)	秋田県立大学・システム科学技術学部・教授 (21401)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関