

令和 4 年 6 月 6 日現在

機関番号：12501

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19H02281

研究課題名(和文)木質構造の梁端ピン接合部の火災時耐力と破壊メカニズムの解明

研究課題名(英文) Fire Resistance and Failure Mechanism of steel-to-timber dowelled connections at the end of glulam beams

研究代表者

平島 岳夫 (Hirashima, Takeo)

千葉大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：20334170

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、木質構造接合部の火災時挙動および耐力を明らかにするため、構造用集成材を用いた木質構造フレームの荷重加熱実験を実施した。そして、(1)木質構造フレームの火災時破壊時間に及ぼす樹種・梁断面寸法・接合部仕様の影響、(2)梁端ピン接合部の火災時せん断耐力および破壊性状、(3)ドリフトピン接合部の高温時における支圧強度とめり込み剛性、を明らかにした。更に、(4)木質金物接合部の火災時における非線形回転バネモデル、(5)接合金物での熱橋を考慮した三次元伝熱解析手法、(6)火災時に長時間破壊しない柱梁接合部の耐火補強方法、を提案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、木質構造が本来有する火災時耐力に立脚した耐火設計方法を構築するため、その構築に不可欠である柱梁接合部の火災時挙動および耐力に関する知見を蓄積した。また木質構造の火災時挙動の予測に不可欠な接合部の伝熱解析手法および力学的挙動モデルを提案した。それらは、国産材のスギとカラマツを用いて検討された。以上の知見および提案が大規模建築物の耐火性能を把握するための一助となり、国産材の有効利用につながることを期待される。

研究成果の概要(英文)：In this study, load-bearing fire tests of timber frames using structural glued laminated timbers to clarify the structural fire behaviors and fire resistance of the timber connection. Then, the followings are clarified: (1) the influence of tree species, beam cross-sectional dimensions, and connections on the failure time of the timber frame exposed to fire heating, (2) shear strength and failure behavior of the connections in fire, and (3) embedding strength and stiffness of the dowelled connections at high temperature. Furthermore, the followings are suggested: (4) a non-linear rotational spring model of the timber connections, (5) a three-dimensional heat transfer analysis method considering a heat bridge at the joint metal, and (6) fire-resistance reinforcement methods of the timber connections.

研究分野：建築構造、耐火構造

キーワード：木質構造 接合部 耐火性能 火災 耐力 回転剛性 破壊性状 伝熱解析

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年、森林の保全・再生に向けた国産木材の有効利用の観点から、大規模建築物を木質構造で設計するニーズが高まっている。大規模建築物では耐火性能を確保・把握することが重要であり、木質構造の火災時破壊時間を把握するためには、柱・梁などの部材の火災時耐力を把握するとともに、その接合部の火災時挙動および耐力の把握が不可欠である。本研究では、木質構造が本来有する火災時耐力に立脚した耐火設計方法を構築するため、その構築に不可欠である柱梁接合部の火災時挙動および耐力の解明に取り組んだ。

2. 研究の目的

本研究の目的は、木質構造接合部の火災時挙動および耐力を明らかにすることである。そのために、以下4項目を具体的な目的として設定した。

- 1) 木質構造フレームの火災時挙動と耐力に及ぼす樹種・梁断面寸法・接合部の影響把握。
- 2) 梁端ピン接合部で木材が割裂・せん断破壊する場合の火災時耐力と破壊性状の把握。
- 3) 木質構造の数値解析に用いる梁端ピン接合部の火災時回転バネモデルの提案。
- 4) 耐火被覆なしでも火災発生から長時間破壊しない柱梁接合部の耐火補強方法の提案。

上記を木質構造フレームの載荷加熱実験にて調べる際、火災加熱中のみならず、木材の自己燃焼が継続する加熱後放冷過程での挙動についても調べた。

3. 研究の方法

本研究では、図1に示すような木質構造フレームの載荷加熱実験（以下、フレーム実験）を実施し、火災時破壊時間に及ぼす梁端ピン接合部の影響および、当該接合部で木材の割裂・せん断破壊を伴う火災時耐力の把握を試みた。柱と梁は構造用集成材とした。図2に示すように梁端ピン接合部における接合金物が直接火炎に曝されないよう木材で被覆し、その被覆厚さは加熱時間と燃えしろを考慮して設定した。樹種はスギとカラマツの2種類、梁断面寸法は420×210mmと600×360mmの2種類、接合部の金物仕様はT型とT型底付の2種類とした。梁断面寸法420×210mmでは同フレームの常温実験および単純支持梁の載荷加熱実験も実施し、常温時と火災時の耐力を比較するとともに、両端部の接合部が梁の耐火性能に及ぼす影響を検討した。

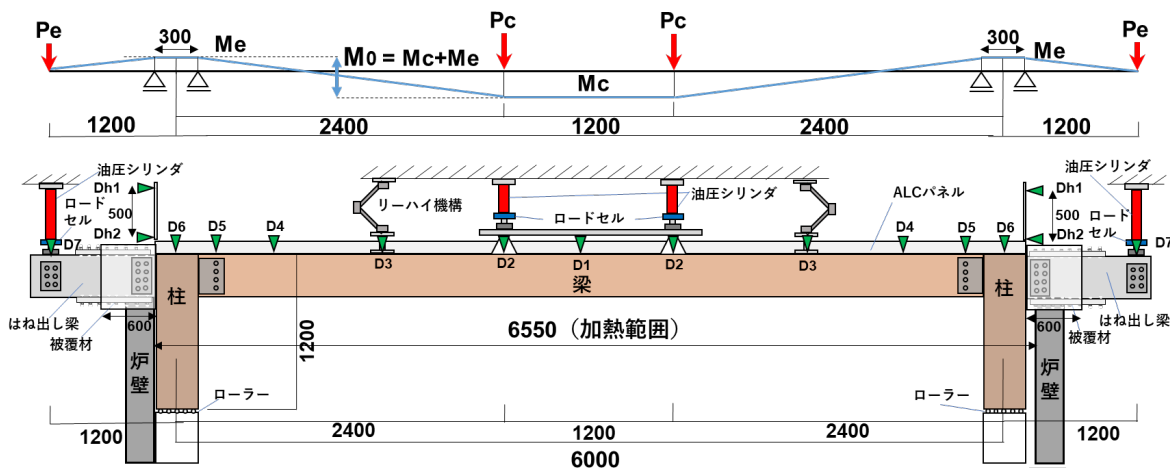
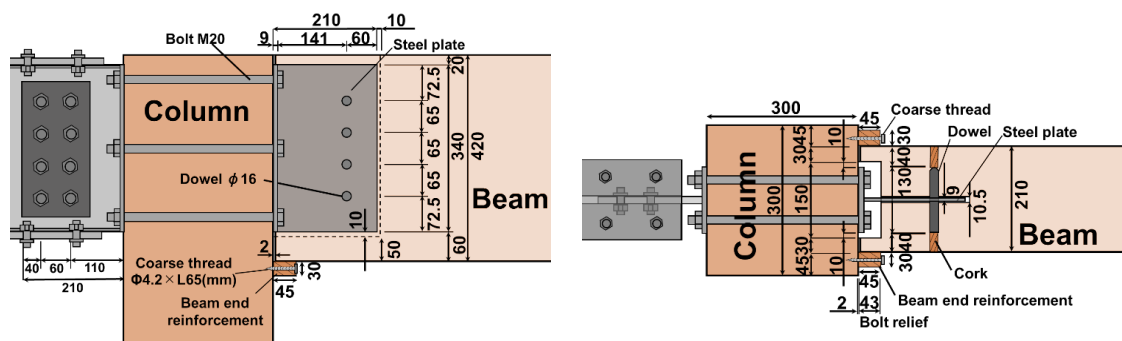


図1 木質構造フレームの載荷加熱実験に用いた試験体、実験装置、加力モデル



(a) 梁幅中央部の側面図

(b) 見下げ図

図2 梁端ピン接合部の詳細 (T型金物の例)

フレーム実験に用いた梁端ピン接合部の火災時せん断耐力を検討するため、別途、ドリフトピン接合部の高温要素実験（以下、要素実験）を実施し、スギとカラマツの繊維方向および繊維直交方向における高温時支圧強度およびめり込み剛性の把握を試みた。またそれらの要素実験結果に基づき、梁端ピン接合部の火災時における非線形回転バネモデルを提案し、フレーム実験で得られた結果との比較を試みた。更に、梁端ピン接合部の火災時における応力分布を把握するための構造解析に向けて、汎用ソフト Marc を用いて木材の直交異方性を考慮した力学的特性モデルを検討し、要素実験結果との比較を試みた。

梁端ピン接合部の耐火性能の検討では、力学的挙動に加えて、熱的挙動についても把握する必要がある。本研究では、火災加熱を受ける当該接合部の内部温度分布を把握するため、接合金物での熱橋を考慮した三次元伝熱解析手法を提案し、フレーム実験より得た接合部での温度結果との比較を試みた。

以上の検討から得られた成果を下記 6 項目に大別した。次章にて各成果の概要を述べる。

- (1) 木質構造フレームの火災時破壊時間に及ぼす樹種・梁断面寸法・接合部仕様の影響
- (2) 梁端ピン接合部の火災時せん断耐力および破壊性状
- (3) ドリフトピン接合部の高温時における支圧強度とめり込み剛性
- (4) 木質金物接合部の火災時における非線形回転バネモデルの提案
- (5) 接合金物での熱橋を考慮した三次元伝熱解析手法の提案
- (6) 火災時に長時間破壊しない柱梁接合部の耐火補強方法の提案

#### 4. 研究成果

##### (1) 木質構造フレームの火災時破壊時間に及ぼす樹種・梁断面寸法・接合部仕様の影響

###### [梁端ピン接合部の影響]

フレーム実験では梁端ピン接合部での回転抵抗によって、同条件下で実施した単純支持梁に比べて破壊時間が延びた。図 3 は、断面寸法 420×210mm・荷重レベルを長期許容荷重の 2/3 とし、60 分の標準火災加熱を与えた後に炉内放冷した例である。スギ・カラマツとも、フレーム実験では梁中央たわみが小さくなり、破壊時間が 1.3 倍程度延びた。カラマツのフレーム実験より得た曲げモーメントの推移の一例を図 4 に示す。梁端部のモーメントは梁中央部に比べて小さいが、徐々に増加し、その分だけ梁中央部の曲げモーメントが減少する。この実験では、240 分後に荷重を漸増させたときに梁中央部で破壊した。このように梁中央部で曲げ破壊する場合において、梁端部における回転拘束がフレームの火災時破壊時間を延長させることを定量的に示した。

###### [樹種・梁断面寸法の影響]

図 3 に示すようにスギとカラマツを比較すると、部材単体における既往実験と同様、耐火性能に優れるカラマツの破壊時間が長かった。スギ・断面寸法 600×360mm にてフレーム実験を実施した結果、90 分の加熱中およびその後の放冷過程を含めて 300 分以上荷重を支持し続けた。これより梁断面寸法が大きいほど破壊時間が延びることが再確認された。一方、梁端接合部における負曲げモーメントの増加割合は、420×210mm のものに比べて小さかった。

###### [接合部仕様の影響]

今回のフレーム実験では、接合部よりも梁中央部での破壊が先行したため、T 型金物とそれを底板で補強した T 型底付金物で結果の違いは見られなかった。接合金物に対する木材被覆の必要厚さは加熱時間によって異なる。ドリフトピンの場合、60 分加熱では 40mm、90 分加熱では 60mm 確保すれば、加熱後放冷過程まで含めてドリフトピンの温度が 150℃程度にまで抑えられ、T 型金物を用いた接合部にてせん断力を伝達できることが確認された。

##### (2) 梁端ピン接合部の火災時せん断耐力および破壊性状

梁断面寸法 420×210mm の実験では、接合部の長期許容せん断耐力の 82% のせん断力を接合部に生じさせた。この接合部における荷重比 82% は梁中央部における長期許容曲げモーメントに対する荷重比 67% (2/3) より大きかったが、実験では梁中央部の曲げ破壊が先行した。これより、火災時における接合部のせん断耐力の低下は、梁中央部の曲げ耐力の低下ほどではなかったと考えられる。梁断面寸法 600×300mm でも同様、接合部の荷重比の方が大きかったが、接合部で

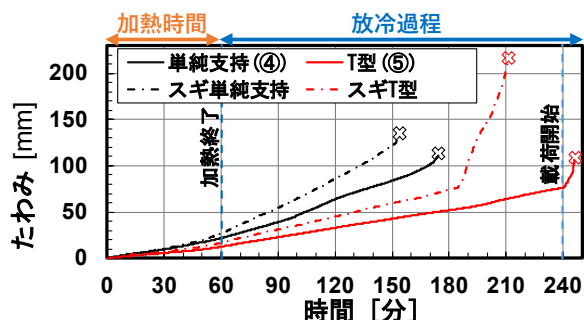


図 3 フレーム実験と単純支持梁実験の比較

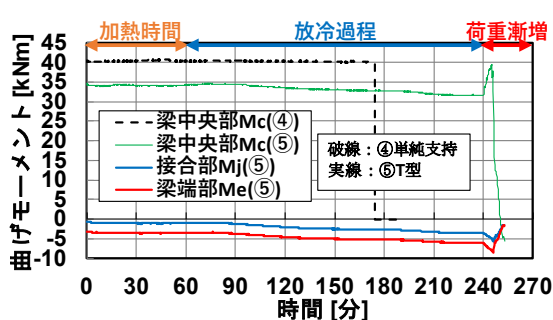


図 4 フレーム実験での曲げモーメントの推移

(注：単純支持(④)と T 型(⑤)はカラマツの結果。T 型とは T 型金物を用いたフレーム実験の結果)

の破壊は見られなかった。

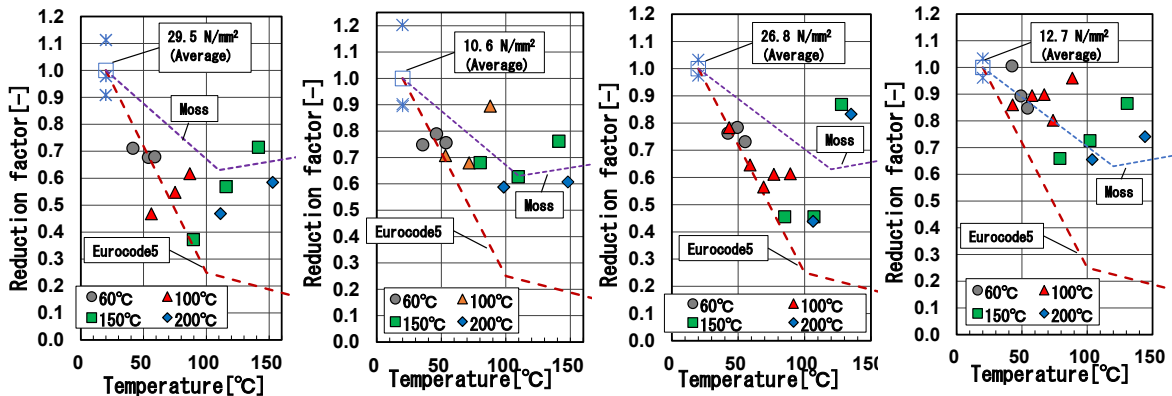
したがってカラマツで梁断面寸法が 420×210mm の 1 体のみ、梁中央部に耐火被覆を施し、接合部で破壊させるフレーム実験を実施した。その実験での接合部のせん断力は、長期許容せん断耐力の 132%で、長期の許容荷重を上回る値とした。にもかかわらず標準加熱で 112 分まで荷重を保持した。そして木部の割裂破壊によって梁が崩落した。そのときのドリフトピンの温度は全測定点で 260℃を超えていた。木材の炭化温度に至るまで接合部で荷重を伝達しつづけた結果は意外であった。今回のフレーム実験においては、梁端ピン接合部の火災時せん断耐力の低下は緩やかであり、火災時に接合部での破壊は生じにくいという結果であった。一方、既往の単純支持梁の荷重加熱実験では、梁が曲げ破壊する前に端部でせん断破壊した事例も報告されている。今後は接合部における応力状態を解析によって調べ、その破壊メカニズムを検討する予定である。

### (3) ドリフトピン接合部の高温時における支圧強度とめり込み剛性

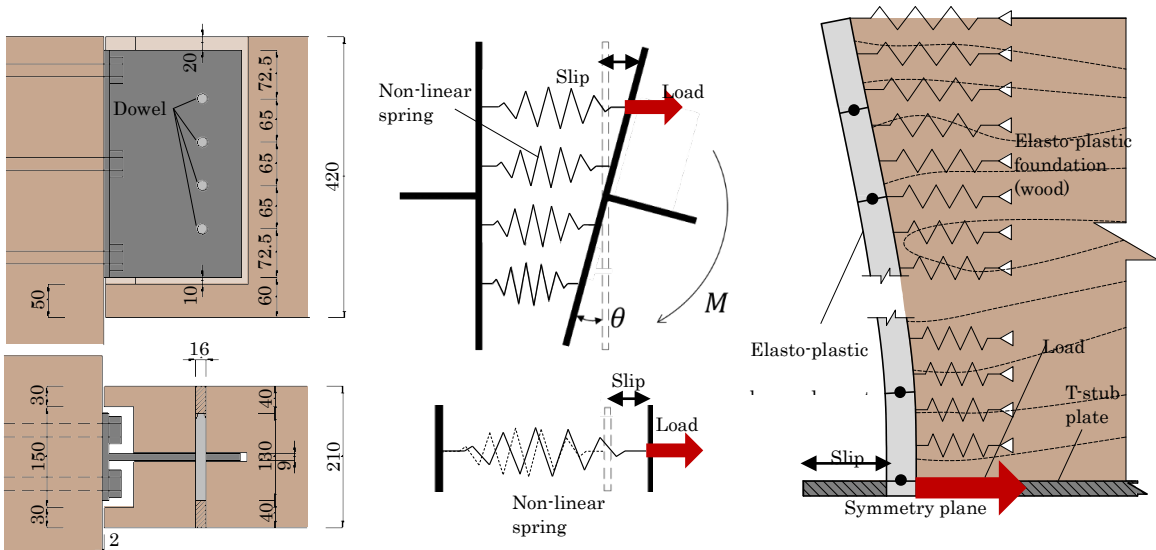
前述した火災時における梁端ピン接合部の回転抵抗およびせん断耐力を定量的に検討するには、ドリフトピンまわりの木部における高温下での支圧強度とめり込み剛性が重要となる。梁の接合部での曲げモーメントに対する抵抗を検討するには繊維方向の支圧強度とめり込み剛性、せん断力に対する抵抗を検討するには繊維直交方向の支圧強度が必要となる。本研究ではそれらの情報を要素実験より取得した。図 5 は支圧強度の高温時残存率の結果である。100℃以下における繊維方向の支圧強度残存率の結果は、Eurocode5 の繊維方向の圧縮強度残存率と概ね対応した。一方、繊維直交方向の支圧強度残存率は、繊維方向よりも大きかった。めり込み剛性の高温時残存率に関しては、繊維方向と繊維直交方向で大きな差は見られなかった。

### (4) 木質金物接合部の火災時における非線形回転バネモデルの提案

木質金物接合部の火災時における曲げモーメントー回転角モデル ( $M-\theta$  モデル) を図 6 に示す。常温時に用いられる線形モデルを、火災時では塑性後の挙動も把握できるように非線形モデルに改良した。木材の支圧挙動を示す弾塑性床バネは、各節点の温度に依存する荷重ーすべり関係で与え、その関係式は成果(3)の要素実験に基づき設定した。このモデルによる解析結果は、図 7 に示すように、フレーム実験で得た接合部の  $M-\theta$  関係を概ね追跡した。



(a) スギ, 繊維方向 (b) スギ, 繊維直交方向 (c) カラマツ, 繊維方向 (d) カラマツ, 繊維直交方向  
図 5 構造用集成材のドリフトピン接合部における高温時支圧強度



(a) 梁端ピン接合部 (T 型) (b) 非線形  $M-\theta$  モデル (c) 弾塑性床の上の梁の増分解析モデル  
図 6 木質金物接合部の火災時における非線形回転バネモデル

この接合部バネモデルを火災応答フレーム解析プログラムに組み込むことで、接合部の回転抵抗を考慮した木質構造フレームの火災時たわみ挙動の解析が可能となる。本研究ではそのための解析モデルを提案した。

(5) 接合金物での熱橋を考慮した三次元伝熱解析手法の提案

本研究では、火災加熱を受ける木質金物接合部の内部温度分布を把握するため、図8に示すような2次元有限要素解析と1次元差分法解析を組み合わせたモデルを用いて、接合金物での熱橋を考慮した3次元伝熱解析手法を提案した。この伝熱解析により、図9に示すように木質構造接合部の温度をより精確に求められ、また図10に示すように接合部全体の温度分布を把握できるようになった。

(6) 火災時に長時間破壊しない柱梁接合部の耐火補強方法の提案

成果(1)と(2)で述べたように、フレーム実験で採用した一般的な金物接合部の仕様でも、金物までの木材被覆厚さを確保すれば火災時の破壊時間を延ばせる可能性を示した。また成果(4)と(5)で述べたような解析モデルを提案し、より合理的な接合部の耐火補強方法およびフレームとしての耐火性能を数値解析によって検討できるようにした。

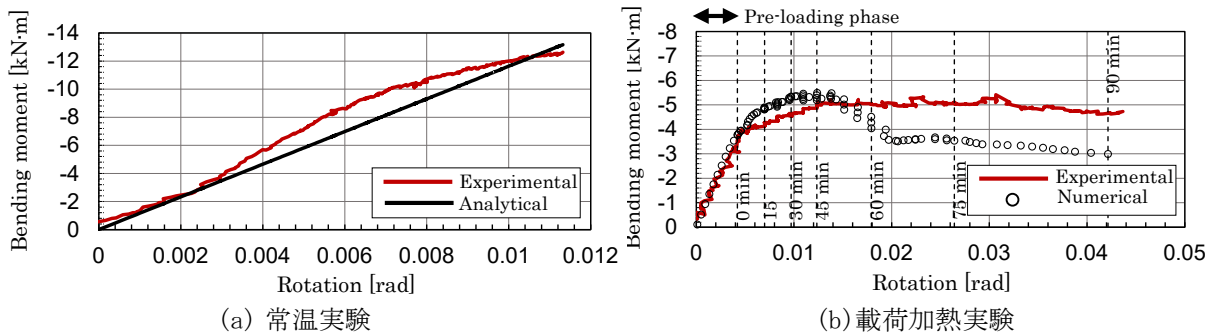


図7 フレーム実験より得た  $M-\theta$  関係と本提案モデルによる解析結果の比較

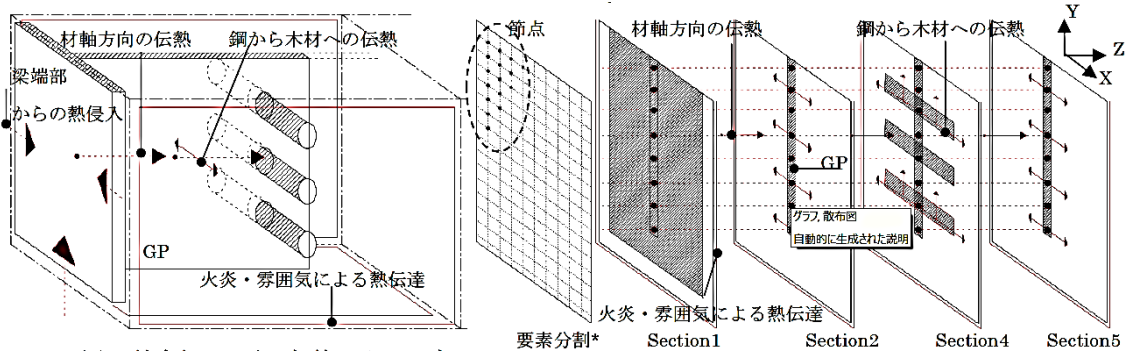


図8 断面内2次元有限要素解析と材軸方向1次元差分法解析を組み合わせた3次元伝熱解析モデル

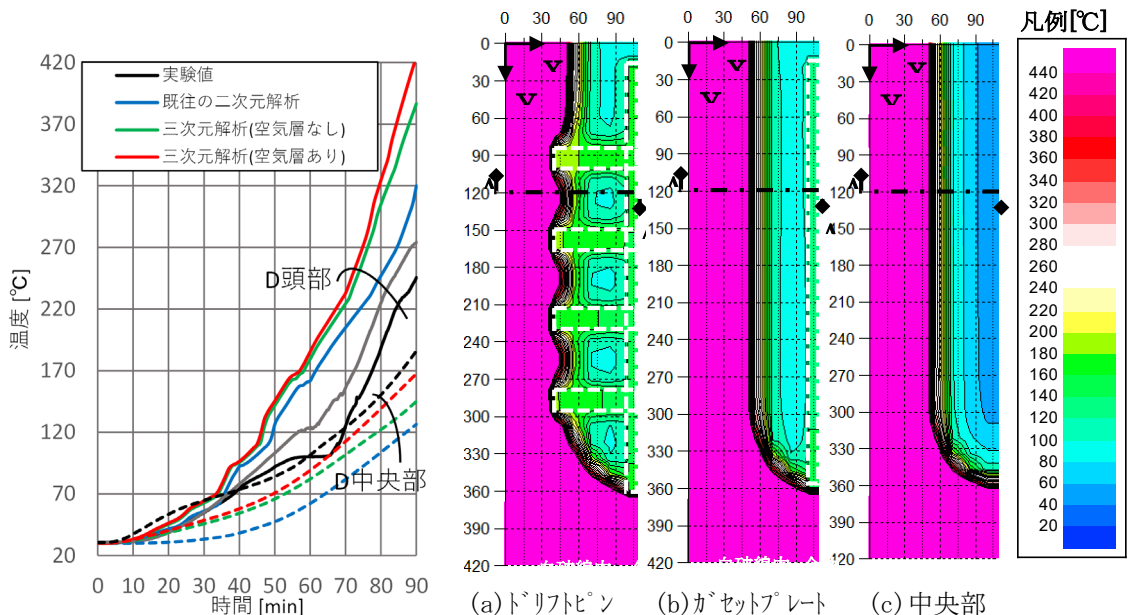


図9 ドリフトピン(D)温度での比較

図10 梁の断面内温度分布の解析値 (90分加熱後)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 KAWARABAYASHI Futa, KIKUCHI Takayuki, TOTSUKA Marina, HIRASHIMA Takeo	4. 巻 87
2. 論文標題 EMBEDDING BEHAVIORS OF A DOWELLED CONNECTION IN STRUCTURAL GLULAM TIMBERS AT HIGH TEMPERATURE	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ)	6. 最初と最後の頁 498 ~ 509
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3130/aijs.87.498	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24件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 吉璋杰、河原林風太、菊地毅之、平島岳夫
2. 発表標題 スギ構造用集成材のドリフトピン接合部の高温圧縮実験（その1 実験概要）
3. 学会等名 令和2年度日本火災学会研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 河原林風太、吉璋杰、菊地毅之、平島岳夫
2. 発表標題 スギ構造用集成材のドリフトピン接合部の高温圧縮実験（その2 実験結果）
3. 学会等名 令和2年度日本火災学会研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 菊地毅之、河原林風太、吉璋杰、平島岳夫
2. 発表標題 スギ構造用集成材のドリフトピン接合部の高温圧縮実験（その1 実験概要）
3. 学会等名 2020年度日本建築学会大会（関東）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 吉璋杰、河原林風太、菊地毅之、平島岳夫
2. 発表標題 スギ構造用集成材のドリフトピン接合部の高温圧縮実験（その2 実験結果）
3. 学会等名 2020年度日本建築学会大会（関東）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 河原林風太、吉璋杰、菊地毅之、平島岳夫
2. 発表標題 スギ構造用集成材のドリフトピン接合部の高温圧縮実験（その3 高温時の支圧強度）
3. 学会等名 2020年度日本建築学会大会（関東）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 吉璋杰、菊地毅之、四元順也、平島岳夫
2. 発表標題 梁端ピン接合部を有するスギ構造用集成材の耐火性能に関する実験的研究
3. 学会等名 2020年度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 菊地毅之、河原林風太、吉璋杰、平島岳夫
2. 発表標題 カラマツ構造用集成材のドリフトピン接合部の高温時圧縮実験
3. 学会等名 2020年度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 石田雄大、菊地毅之、平島岳夫
2. 発表標題 木質構造ドリフトピン接合部の火災時伝熱解析
3. 学会等名 令和3年度日本火災学会研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 四元順也、菊地毅之、吉璋杰、平島岳夫
2. 発表標題 火災時における構造用集成材ドリフトピン接合部の断面内温度と炭化性状（その1 スギ実験の概要）
3. 学会等名 令和3年度日本火災学会研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 菊地毅之、四元順也、吉璋杰、平島岳夫
2. 発表標題 火災時における構造用集成材ドリフトピン接合部の断面内温度と炭化性状（その2 スギ実験の結果）
3. 学会等名 令和3年度日本火災学会研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 平島岳夫、菊地毅之、四元順也
2. 発表標題 構造用集成材梁の耐火性能に梁端ドリフトピン接合部が及ぼす影響（その1 研究目的およびスギ実験の概要）
3. 学会等名 2021年度日本建築学会大会（東海）
4. 発表年 2021年



1. 発表者名 四元順也、菊地毅之、平島岳夫
2. 発表標題 構造用集成材梁の耐火性能に梁端ドリフトピン接合部が及ぼす影響（その2 常温載荷実験の結果）
3. 学会等名 2021年度日本建築学会大会（東海）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 菊地毅之、四元順也、平島岳夫
2. 発表標題 構造用集成材梁の耐火性能に梁端ドリフトピン接合部が及ぼす影響（その3 載荷加熱実験の結果）
3. 学会等名 2021年度日本建築学会大会（東海）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 河原林風太、菊地毅之、平島岳夫
2. 発表標題 構造用集成材のドリフトピン接合部における高温時の支圧強度とめり込み剛性
3. 学会等名 2021年度日本建築学会大会（東海）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 石田雄大、菊地毅之、四元順也、平島岳夫
2. 発表標題 火災加熱を受ける木質構造ドリフトピン接合部の被覆厚さに関する解析的検討
3. 学会等名 2021年度日本建築学会大会（東海）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 河原林風太、菊地毅之、中山征人、四元順也、戸塚真里奈、平島岳夫
2. 発表標題 梁端ピン接合を有するカラマツ構造用集成材フレームの載荷加熱実験（その1 実験概要および常温載荷実験の結果）
3. 学会等名 2021年度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 菊地毅之、河原林風太、中山征人、四元順也、戸塚真里奈、平島岳夫
2. 発表標題 梁端ピン接合を有するカラマツ構造用集成材フレームの載荷加熱実験（その2 カラマツ載荷加熱実験結果）
3. 学会等名 2021年度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 石田雄大、戸塚真里奈、平島岳夫
2. 発表標題 火災加熱を受ける木質構造金物接合部の三次元伝熱解析
3. 学会等名 2021年度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 四元順也、菊地毅之、河原林風太、戸塚真里奈、平島岳夫
2. 発表標題 火災時における構造用集成材ドリフトピン接合部の断面内温度と炭化性状（その3 カラマツ実験の概要）
3. 学会等名 令和4年度日本火災学会研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 菊地毅之、河原林風太、四元順也、戸塚真里奈、平島岳夫
2. 発表標題 火災時における構造用集成材ドリフトピン接合部の断面内温度と炭化性状（その4 カラマツ実験の結果）
3. 学会等名 令和4年度日本火災学会研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 石田雄大、平島岳夫、戸塚真里奈
2. 発表標題 三次元伝熱解析による木質構造金物接合部の温度分布
3. 学会等名 令和4年度日本火災学会研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 中山征人、戸塚真里奈、平島岳夫
2. 発表標題 火災加熱を受ける木質金物接合部のM - モデル
3. 学会等名 令和4年度日本火災学会研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 川井悠雅、戸塚真里奈、平島岳夫
2. 発表標題 FEM解析に用いるスギ・カラマツの高温時力学的特性
3. 学会等名 令和4年度日本火災学会研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Takayuki Kikuchi, Futa Kawarabayashi, Marina Totsuka, Takeo Hirashima
2. 発表標題 Embedment Strength and Stiffness of Structural Glued Laminated Timbers at Dowel-type Connections Below 200 °C
3. 学会等名 AOSFST 2021, 12th Asia-Oceania Symposium on Fire Science and Technology (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔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	戸塚 真里奈  (Totsuka Marina)  (60893774)	千葉大学・大学院工学研究院・助教    (12501)	

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
---------	---------