

令和6年度 森林・林業・木材産業グリーン成長総合対策補助金等
建築用木材供給・利用強化対策のうち
CLT・LVL等の建築物への利用環境整備事業のうち
「CLT・LVL等を活用した建築物の低コスト化・検証等」

～耐火性能が要求される屋根の
木造化促進のための可燃物燃焼データの整理～

令和7年3月

木構造振興株式会社

目次

第 1 章	事業概要	
1.1	本事業の目的	1
1.2	令和 5 年度の事業内容	2
1.3	今年度の事業概要	4
第 2 章	木質床・壁の燃焼実験	
2.1	実験の目的	5
2.2	実験計画	6
2.3	実験結果～ [実験 A] 椅子の前後への 燃え拡がり性状確認実験	8
2.3.1	実験概要	8
2.3.2	試験体及び実験方法	8
2.3.3	実験結果-椅子単体の燃え拡がり	11
2.3.4	実験結果-椅子 6 脚の燃え拡がり	20
2.4	実験結果～ [実験 B] 床の燃え抜け抑 制・床裏の燃え拡がり性状確認実験	31
2.4.1	実験概要	31
2.4.2	試験体及び実験方法	31
2.4.3	実験結果-床ブランク実験-1,2	36
2.4.4	実験結果-床の燃え抜け抑制	46
2.4.5	実験結果-燃え抜け後の床裏の燃え 拡がり抑制	67
2.5	実験結果～ [実験 C] 床上面の 燃え拡がり実験	73
2.5.1	実験概要	73
2.5.2	試験体及び実験方法	73
2.5.3	実験結果-床上の燃え拡がり（柔道用畳）	75
2.6	実験結果～ [実験 D] 壁上方への 燃え拡がり実験	82
2.6.1	実験概要	82
2.6.2	試験体及び実験方法	82
2.6.3	実験結果-壁ブランク実験	86
2.6.4	実験結果-壁上方への燃え拡がり	90
2.7	まとめ	105
2.8	CCM 試験	106
2.8.1	試験概要	106
2.8.2	木材試験体の試験結果	106
2.8.3	柔道畳の試験結果	110

第3章	実務設計への反映	
3.1	はじめに	113
3.2	木質床および木質壁の燃焼	115
3.2.1	木質床	115
3.2.2	床上可燃物	117
3.2.3	木質壁	125
3.3	煙層内温度の計算	133
3.3.1	本項の目的	133
3.3.2	煙層内の温度の算定	134
3.4	計算事例	148
第4章	耐火性能検証法（Cルート検証法）の普及に向けて	155
4.1	想定する設計業務の流れ	155
4.2	過去二年間の事業の内容	155
4.3	今後の普及に向けて	159

委員名

油野健志 株式会社 関西建築防災研究所
土屋伸一 株式会社 明野設備研究所
宮林正幸 有限会社ティーイーコンサルティング
安井 昇 桜設計集団一級建築士事務所

事務局

原田浩司 木構造振興株式会社

第1章 事業概要

1.1 本事業の目的

令和 12 年の基準法改正後、耐火性能検証法により木造化された建築物は、平 12 建告 1433 号によって実施する検証法（以下、B ルート検証法）によるものが 9 件（表 1.1 参照）、工学的手法による検証法（以下、C ルート検証法）は 28 件（表 1.2 参照）である。

B ルート検証法による事例が少ないのは、検討項目が例示化されているため、検証作業及び手続きは比較的容易ではあるが、著しく設計の自由度を下げてしまうことが要因である。

一方、C ルート検証法が 1～2 件／年程度に留まっている理由は下記と考えられる。

- ① 検証の判断に必要な、局所火源を条件とした場合の、木材等の可燃物の燃焼に関するデータが著しく不足しており、検証と評定審査に時間を要する要因となっている。
- ② 本検証法を活用するためには工学的知識が必要であり、この手法を活用できる技術者は希少で、首都圏に集中している。
- ③ 検証に時間と手間がかかるため、検証にかかる費用が嵩み、設計事務所が経営面を理由に木造案が回避される。
- ④ 第三者審査機関による性能評価を経て、大臣認定に至るまでのプロセスを、与えられた実施設計の期間では消化するのが困難である。

まず①については令和 5 年度の事業において調査および技術委員会内で議論した結果、局所火源の条件下における可燃物で仕上げた床や壁と収納可燃物の燃え方のデータが著しく不足しており、火災工学に精通する技術者であっても検証及び評定作業において苦労が伺われる状況になっていることがあきらかになった。また①～③は、手順書およびチェックリストを作成し公開することができれば、かなり解消されると期待される。

本事業では、上記の課題解決を図り、耐火建築物としなければならない大型建築物の屋根の木造化を、耐火被覆することなく可能とする、工学的手法による耐火性能検証法（通称、C ルート検証法）を活用して、大空間を構成する屋根への CLT・LVL をはじめとする木質材料の利用促進が図られることを目的とする。

表 1.1 B ルート検証法によって木造化された建築物一覧表

あけのベドーム「森の館」	兵庫県大屋町	全天候型運動場
一戸町コミュニティセンター	岩手県二戸郡一戸町	集会施設等
サンドーム日向	宮崎県日向市	屋内運動場
南郷くろしおドーム	宮崎県南那珂郡南郷町	屋内運動場
ウッドエナジー（協）集成材工場	宮崎県南那珂郡南郷町	工場・倉庫
天福球場スタンド	宮崎県日向市	観覧場
綾てるはドーム	宮崎県東諸県郡綾町	屋内スポーツ練習場
二本松市城山市民プール	福島県二本松市	水泳場・集会施設
ジューテック本社ビル	東京都港区	事務所

表 1.2 C ルート検証法によって木造化された建築物一覧表

令和 5 年 12 月現在

建物名	建設地	用途
愛媛県立武道館	愛媛県松山市	競技施設（武道場）
所沢市民体育館	埼玉県所沢市	体育館
秋田県立武道館	秋田県秋田市	体育館
タクミアリーナ	秋田県大館市	スポーツ施設
ひなた木の花ドーム	宮崎県宮崎市	ドーム球場
秋田拠点センター「AL☆VE」	秋田県秋田市	事務所等
西条市総合福祉センター	愛媛県西条市	福祉施設
ビーラインスポーツパーク始良（市総合運動公園）	鹿児島県始良市	体育館・観覧場
二ツ井総合体育館	秋田県能代市	体育館・集会場
日本放送協会新秋田放送会館	秋田県秋田市	放送局
JR高知駅	高知県高知市	鉄道/駅舎
高知学芸高等学校体育館	高知県高知市	学校体育館
能代市立二ツ井小学校体育館	秋田県能代市	学校体育館
東京新木場「木材会館」	東京都江東区	事務所・集会場
秋葉山公園県民水泳場 あきばさんプール	和歌山県和歌山市	屋内水泳場
このはなアリーナ（草薙総合運動場体育館）	静岡県静岡市	体育館
みんなの森 ぎふメディアコスモス	岐阜県岐阜市	図書館等
五條市上野公園総合体育館シダーアリーナ	奈良県五條市	体育館・集会場
栃木県総合スポーツゾーン新武道館	栃木県宇都宮市	武道場
室戸広域公園屋内運動場	高知県室戸市	屋内運動場
レゾナック武道スポーツセンター	大分県大分市	体育館
エコピコアリーナふくやま	広島県福山市	体育館
長野県立武道館	長野県佐久市	多目的施設
みなとテラス境港市民交流センター	鳥取県境港市	公会堂等
有明GYM-EX（有明展示場）	東京都江東区	体育館、展示場
秋田ノーザンゲートスクエア	秋田県秋田市	体育館
アスリートタウン延岡アリーナ	宮崎県延岡市	体育館

1.2 令和 5 年度の事業内容

令和 5 年度は、耐火性能検証法の普及を目指し、下記を実施した。

- ① 法令・出版物を参考とした耐火性能検証法の手順の整理
- ② 体育館の床に使用されているフローリング材の CCM 試験（写真 1.1 参照）
- ③ 局所火源による体育館の床に使用されているフローリング材の燃焼試験（写真 1.2、図 1.1 参照）
- ④ 体育館に使用されている椅子の燃焼試験（写真 1.3 参照）



写真 1.1.1 試験装置

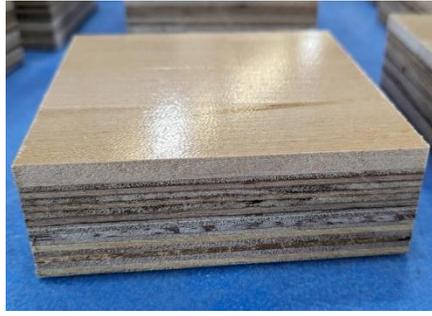


写真 1.1.2 試験体



写真 1.1.3 試験状況

写真 1.1 コーンカロリメータ (CCM) 試験



写真 1.2.1 ガスバーナー火源



写真 1.2.2 クリブ火源

写真 1.2 床の燃焼試験状況

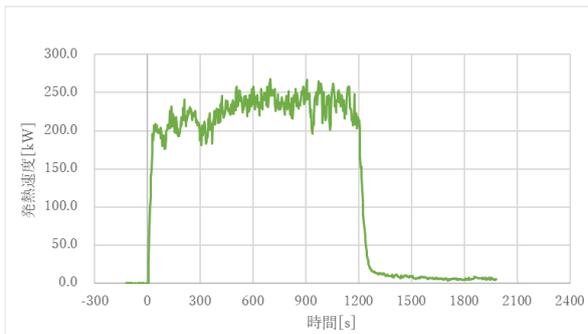


図 1.1.1 ガスバーナー火源

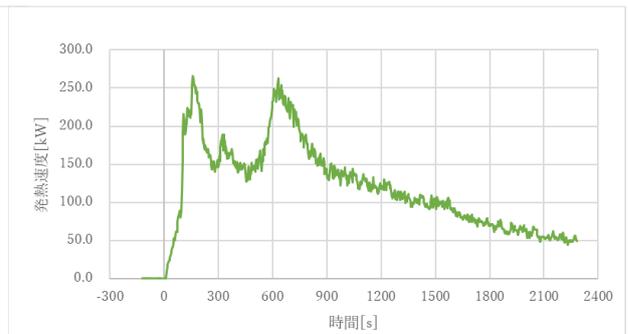


図 1.1.2 クリブ火源

図 1.1 床の燃焼試験の発熱速度



写真 1.3.1 椅子 (単体)



写真 1.3.2 椅子 (3脚)

写真 1.3 椅子の燃焼試験状況

1.3 今年度の事業概要

今年度は引き続き、局所火源を条件とした下記の実験を実施し、工学的手法による検証法（以下、Cルート検証法）を進めるにあたり、必要な情報を整理する。

- ① 令和5年度実施した椅子を前後に配置しての燃焼試験（写真1.4）
- ② 武道場に用いられる柔道畳の燃焼試験（写真1.5）
- ③ 床材の種類、下地材の厚さや種類等を変えた、局所火源を条件とした木製フローリングの燃焼試験（写真1.6）
- ⑤ 局所火源を条件とした木質壁の燃焼試験（写真1.7）

また令和5年度に作成した「Cルート検証法の手順書（たたき台）」および「チェックリスト（たたき台）」を作成したが、令和5年度、令和6年度の燃焼試験の実験結果も踏まえ、木製床および木製壁の燃焼も含めた検証の手法を整理した。



写真 1.4 椅子（2列×3脚）の燃焼試験



写真 1.5 柔道畳の燃焼試験



写真 1.6 局所火源を条件とした
木製フローリングの燃焼試験



写真 1.7 局所火源を条件とした
木製フローリングの燃焼試験

第2章 木質床・壁の燃焼実験

2.1 実験の目的

耐火建築物の要求のある建築物の屋根や横架材の木造化を、仕様規定の耐火構造（ルートA）によらず、ルートCの耐火性能検証法により実現しようとするならば、木質化された壁や床が燃焼した場合、その火炎が局所にとどまることの確認と、燃焼による発熱の影響を、主要構造部への入射熱流の算出の際、考慮する必要が生じる。しかし、局所火源火災を条件とした木質系の壁および床の燃焼実験は、希有な状況にある。

そこで2023年度には、表2.1-1に記載する木質化された床を対象に燃焼試験を実施し、火炎伝播性状と発熱速度の計測を実施した。今年度は、昨年度に引き続き、木質床及び木質壁の燃焼実験を実施し床の燃え拡がりや床裏面の燃え拡がり、壁上方への燃え拡がりを計測する。

表 2.1-1：実験一覧（2023年度実施）

実験名	実験日	床材	熱源	加熱条件	加熱時間	目的	測定項目
予備実験1-1	3月13日	ケイカル板 厚25mm	プロパンガス バーナー500角	200kW	20分	熱流の計測 (ブランク試験)	床表面：熱流計3箇所+熱電対3箇所 火炎面：熱流計1箇所+熱電対1箇所 発熱速度・総発熱量 ※予備実験2-1は熱流束データ未計測
予備実験1-2	3月14日						
予備実験2-1	3月11日		木製クリブ	1ヶ	火源が燃え 尽きるまで	着火方法の検討 発熱速度把握	発熱速度・総発熱量
予備実験2-2	3月11日			2ヶ重ね			
床実験1	3月13日	スギ厚物合板 厚28mm	プロパンガス バーナー500角	200kW	20分	燃え拡がり性状	床表面：熱流計3箇所+熱電対3箇所 火炎面：熱流計1箇所+熱電対1箇所 発熱速度・総発熱量
床実験2	3月13日						
床実験3	3月11日		木製クリブ	2ヶ重ね	火源が燃え 尽きるまで	燃え抜け性状 燃え拡がり性状	床表面：熱流計2箇所+熱電対2箇所 床断面：熱電対3本 発熱速度・総発熱量
床実験4	3月12日			1ヶ			
床実験5	3月14日	フローリング 厚18mm+ 構造用合板厚15mm	プロパンガス バーナー500角	200kW	20分	燃え拡がり性状	床表面：熱流計3箇所+熱電対3箇所 火炎面：熱流計1箇所+熱電対1箇所 発熱速度・総発熱量
床実験6	3月12日		木製クリブ	2ヶ重ね	火源が燃え 尽きるまで	燃え抜け	床表面：熱流計2箇所+熱電対2箇所 床断面：熱電対3本 発熱速度・総発熱量
床実験7	3月12日			1ヶ			
床実験8	3月13日	塗装フローリング 厚18mm +構造用合板15mm	プロパンガス バーナー500角	200kW	20分	燃え拡がり性状	床表面：熱流計3箇所+熱電対3箇所 火炎面：熱流計1箇所+熱電対1箇所 発熱速度・総発熱量

2.2 実験計画

今年度の実験は、表 2.2-1 に示す A～D の 4 つに分けて計画した (表 2.2-1)。

実験 A は、局所火源を想定したプロパンガスバーナー火源を用いて、椅子単体及び 6 脚 (3 脚×2 列) の燃え広がりを確認する実験とした (写真 2.2-1)。

実験 B は、床の燃え抜けの抑制を検証するため、木製クリブ火源 (発熱速度が時系列に変化する) を用いて、より現実に近い収納可燃物の燃焼を再現し、床上を構成する面材をパラメータとし、4 仕様の燃焼実験を実施した (写真 2.2-2)。また、針葉樹合板 15mm 厚 + 複合フローリング 18mm 厚の床にて、床裏へ燃え抜けた後を想定した床裏面の燃え広がりの抑制効果を検証するため、ファイアーストップとなる横架材を再現した試験体で実施した。

実験 C は、昨年度の実験に引き続き、床上の燃え広がりを検証するため、局所火源を想定したプロパンガスバーナー火源 (一定の発熱速度 = 200kW (実発熱速度は 150kW であった)) を用いて、床上を針葉樹合板 28mm 厚 + 柔道用畳 60mm 厚 (発泡プラスチック芯材) の燃焼実験を実施した (写真 2.2-3)。

実験 D は、体育館等の天井が高い大空間の床近傍の壁を想定し、構造用合板 9mm 厚の上にスギまたはヒノキの製材 12mm 厚を張った仕様で、壁上方への燃え広がりを検証した (写真 2.2-4)。

日程 : 2024 年 10 月 28 日 (月) ~ 30 日 (水) 実験 A・B

2024 年 12 月 9 日 (月)・11 日 (水) 実験 C・D

場所 : (一財) 建材試験センター中央試験所・多目的実験スペース



写真 2.2-1 実験 A・椅子の燃焼実験



写真 2.2-2 実験 B・床の燃え抜け実験



写真 2.2-3 実験 C
床上の燃え広がり実験



写真 2.2-4 実験 D
壁上方の燃え広がり実験

表 2.2-1 実験一覧 (2024 年度実施)

実験 A								
実験名	実験日	床材 [mm]	可燃物	熱源	加熱条件	加熱時間	目的	計測項目
24椅子単-1	10月28日	ケイカル板	椅子単体1	180角バーナー (床上)	20kW ↓ 40kW	1分30秒	椅子の燃焼性状	火炎面：熱流計2箇所＋熱電対2箇所 発熱速度 インターバル写真・ビデオ映像 ※椅子単2は発熱速度のデータ未計測
24椅子単-2			椅子単体2					
24椅子単-3			椅子単体3					
24椅子6-前		針葉樹合板28	椅子6脚	180角バーナー (床上・前方着火)			椅子の 燃え拡がり性状	火炎面：熱流計2箇所＋熱電対2箇所 発熱速度 インターバル写真・ビデオ映像
24椅子6-後	針葉樹合板28	椅子6脚	180角バーナー (床上・後方着火)					
実験 B								
実験名	実験日	床材 [mm]	熱源	加熱条件	加熱時間	目的	計測項目	
24床-B1	12月9日	ケイカル板	木製クリブ	1段	火源が 燃え尽きるまで	発熱速度測定 (ブランク実験)	床表面：熱流計1箇所＋熱電対1箇所 火炎面：熱流計1箇所＋熱電対1箇所 発熱速度 インターバル写真・ビデオ映像	
24床-B2	10月29日			2段積み				
24床-1	10月29日	針葉樹合板28の上に 複合フローリング18	木製クリブ	1段	火源が 燃え尽きるまで	床の燃え抜け性状 (試験体の裏面開放)	床表面：熱流計2箇所＋熱電対2箇所 火炎面：熱流計1箇所＋熱電対1箇所 発熱速度 インターバル写真・ビデオ映像	
24床-2		針葉樹合板28の上に 無垢フローリング18						
24床-3	10月30日	パーティティクルボード20の上に 複合フローリング18						
24床-4		パーティティクルボード20の上に 無垢フローリング18						
24床抜-1	10月30日	針葉樹合板15の上に 複合フローリング18	木製クリブ	1段	火源が 燃え尽きるまで	床燃え抜け後の 裏面燃え拡がり抑制 (試験体の裏面閉塞)	床表面：熱電対3箇所 火炎面：熱流計1箇所＋熱電対1箇所 発熱速度 インターバル写真・ビデオ映像	
実験 C								
実験名	実験日	床材 [mm]	熱源	加熱条件	加熱時間	目的	計測項目	
24床上一	12月9日	針葉樹合板28の上に柔道用畳60	500角バーナー (床材上面)	200kW	20分	床上の燃え拡がり性状	床表面：熱流計2箇所＋熱電対2箇所 火炎面：熱流計1箇所＋熱電対1箇所 発熱速度 インターバル写真・ビデオ映像	
実験 D								
実験名	実験日	床材 [mm]	熱源	加熱条件	加熱時間	目的	計測項目	
24壁-B	12月9日	ケイカル板12	500角バーナー (床上)	200kW	20分	発熱速度測定 (ブランク実験)	壁表面：熱流計4箇所＋熱電対4箇所 発熱速度 インターバル写真・ビデオ映像	
24壁-1	12月11日	構造用合板9の上に スギ12(働き幅102) ＋グラスウール16K105充てん				壁上方への燃え拡がり (スギ材)		
24壁-2		構造用合板9の上に ヒノキ12(働き幅87) ＋グラスウール16K105充てん				壁上方への燃え拡がり (ヒノキ材)		
24壁-3		構造用合板9の上に スギ12(働き幅102) ＋ファイヤーストップ45×105設置				壁上方への燃え拡がり (スギ材)		

以降に、実験 A～D ごとに実験内容及び結果を報告する。

2.3 実験結果～〔実験 A〕 椅子の前後への燃え拡がり性状確認実験

2.3.1 実験概要

2023 年度の検証では、パイプ椅子の単体の燃焼性状及び横方向への燃え拡がりを確認した。本事業では、引き続き椅子の単体の燃焼及び前後方向への燃え拡がり性状を確認した。椅子の前後方向への燃え拡がり性状については、前列の椅子に着火した場合と後列の椅子に着火した場合をそれぞれ実施した。表 2.3-1 に実験 A の概要一覧を記載する。

表 2.3-1 実験 A の概要一覧

実験 A								
実験名	実験日	床材 [mm]	可燃物	熱源	加熱条件	加熱時間	目的	計測項目
24椅子単-1	10月28日	ケイカル板	椅子単体1	180角バーナー (床上)	20kW	1分30秒	椅子の燃焼性状	火炎面：熱流計2箇所＋熱電対2箇所 発熱速度 インターバル写真・ビデオ映像 ※椅子単2は発熱速度のデータ未計測
24椅子単-2			椅子単体2		↓			
24椅子単-3			椅子単体3		40kW			
24椅子6-前	10月28日	針葉樹合板28	椅子6脚	180角バーナー (床上・前方着火)	20kW	1分30秒	椅子の 燃え拡がり性状	火炎面：熱流計2箇所＋熱電対2箇所 発熱速度 インターバル写真・ビデオ映像
24椅子6-後		針葉樹合板28	椅子6脚	180角バーナー (床上・後方着火)	↓ 40kW			

2.3.2 試験体及び実験方法

試験体及び試験装置を図 2.3-1～2、写真 2.3-1～2 に示す。椅子は一般的なパイプ椅子としてスタッキングチェア (NSF-002F-05SET-BL,amazon にて入手) を用いて、椅子の前後方向への燃え拡がりの検証では、前後の椅子の間隔は 800mm とした。いずれの実験も燃焼している椅子が燃え尽きるまで実施した。

また火源は、局所火源火災で一般的に想定される代表火源であるプロパンガスバーナー 180mm 角を使用し、椅子の直下に設置した。発熱速度は 20kW を目標に制御し、実験開始 1 分後に発熱速度 40kW にした後、開始 1 分 30 秒後にバーナーを除去した。

計測機器は、水冷式熱流束計 (フランジ無しタイプのシュミッド・ボエルター型、Hukseflux 社製、品番：CHF-SBG03-200、常用測定レンジ 200kW/m²、最高測定レンジ 300kW/m²) と K タイプの CA 熱電対を火炎からの放射熱測定用に 2 箇所設置し、熱流束及びその付近の温度 (熱流計端部より 10mm の位置) を測定した。また、発熱速度を試験体上部に設けたフードを用いて、酸素消費法により測定するとともに、目視による観察、ビデオ及びカメラによる撮影を行った。

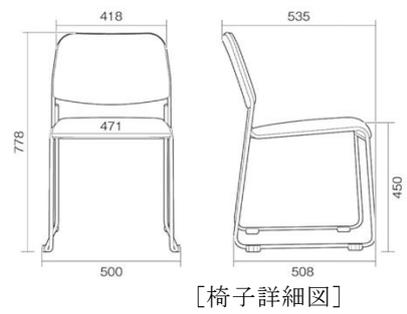


写真 2.3-1 椅子単体の燃焼実験



写真 2.3-2 椅子6脚の燃焼実験





[椅子詳細図]

図 2.3-1 椅子単体の燃焼実験の試験体概要図 (単位 : mm)

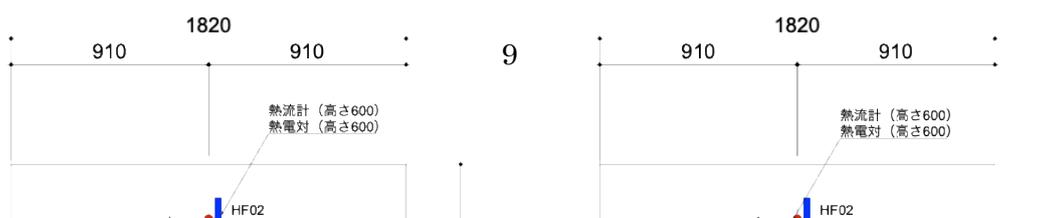


図 2.3-2 椅子 6 脚の燃焼実験の試験体概要図 (単位 : mm)

※椅子詳細 (品番 : NSF-002F-05SET-BL)

【サイズ】 W500×D535×H778mm / SH450mm 【重量】 4.3kg

【材質】 フレーム : スチール (粉体塗装) 張り材 : ファブリック、合成皮革
クッション材 : ウレタンフォーム

【付属品】 すべり止め兼連結用樹脂 【機能】 スタッキング : 8 脚まで / 横連結可能

2.3.3 実験結果-椅子単体の燃え広がり

発熱速度、温度、熱流速の計測結果と、実験の記録画像を下記に示す。なお、椅子単体2の発熱速度は、計測不良により測定値なし。

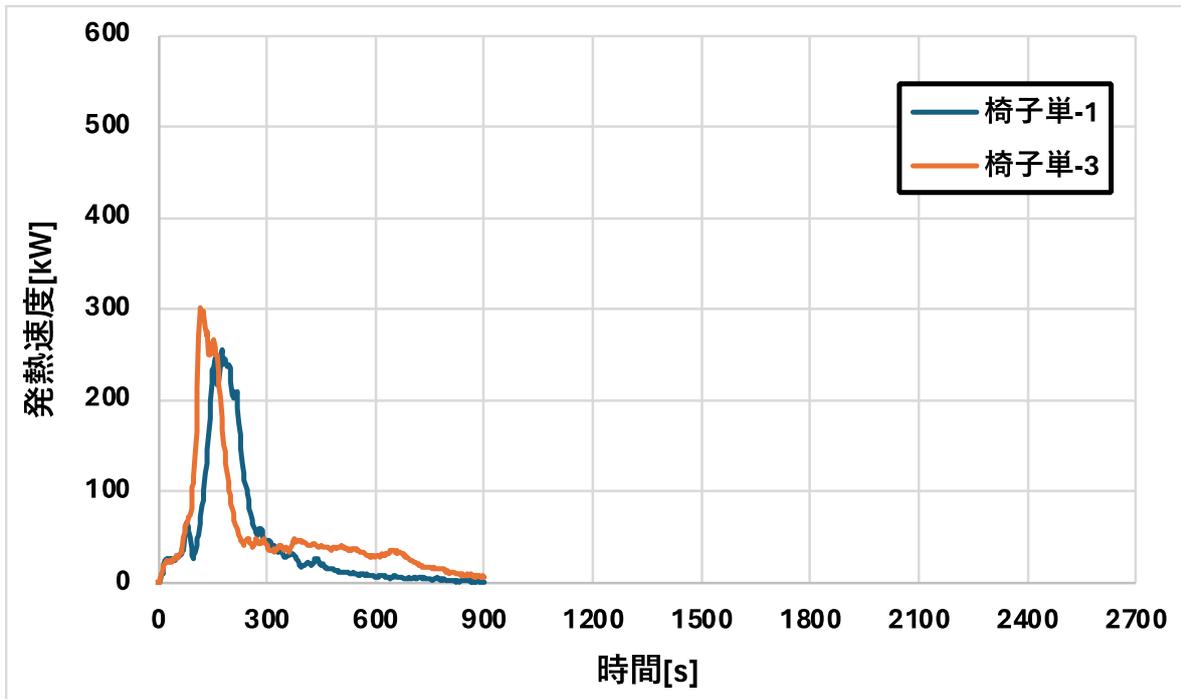


図 2.3-3 発熱速度の推移 (椅子単体実験-1,3)

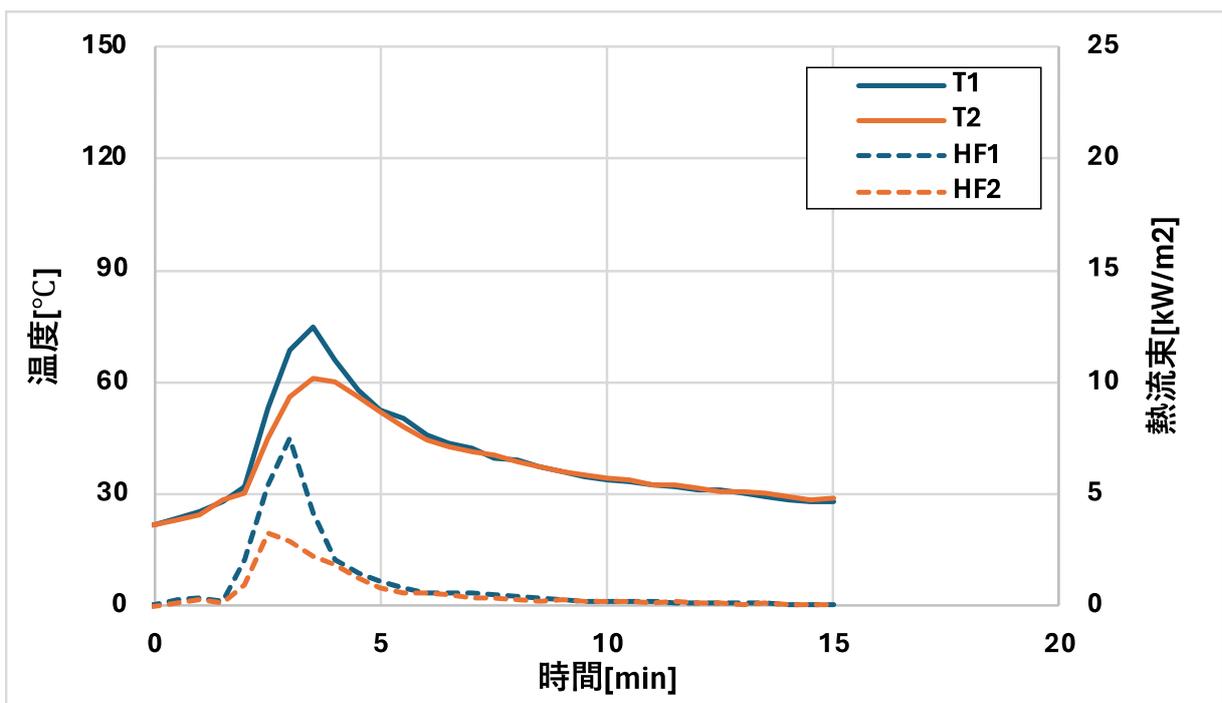


図 2.3-4 温度・熱流速の推移 (椅子単体実験-1)

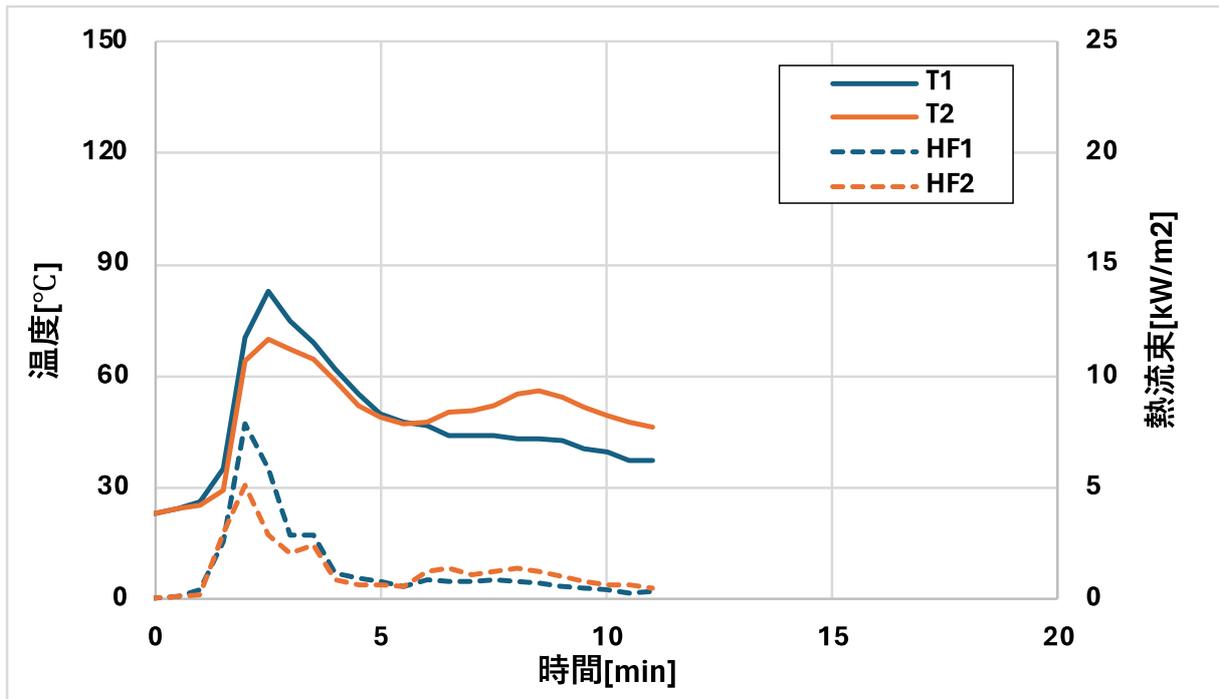


図 2.3-5 温度・熱流束の推移（椅子単体実験-2）

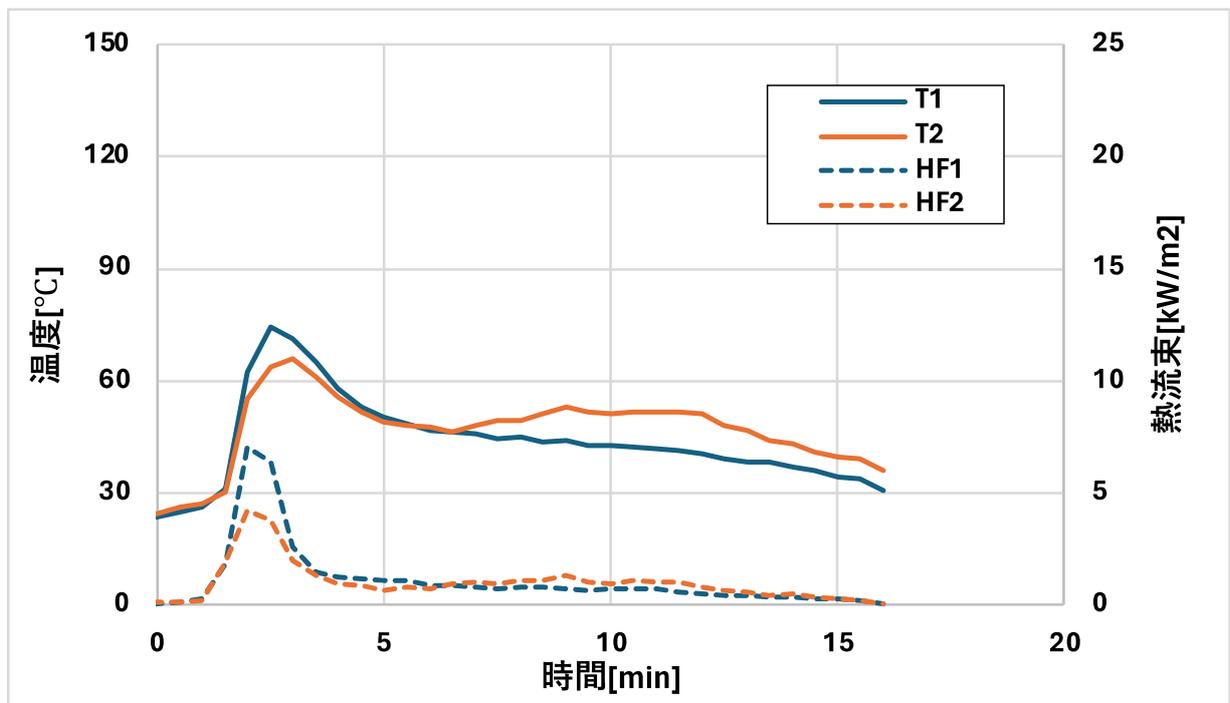


図 2.3-6 温度・熱流束の推移（椅子単体実験-3）



写真 2.3-3-1 実験開始
(着火 0 分後)

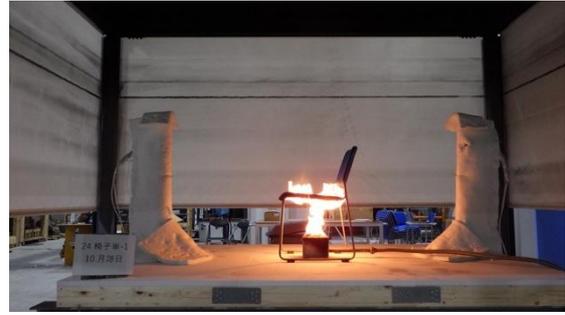


写真 2.3-3-2 着火 1 分後
(20kW→40kW)



写真 2.3-3-3 着火 2 分後
(椅子の背に着火)



写真 2.3-3-4 着火 3 分後
(椅子の背裏に着火)



写真 2.3-3-5 着火 4 分後



写真 2.3-3-6 着火 5 分後



写真 2.3-3-7 着火 6 分後



写真 2.3-3-8 着火 7 分後

写真 2.3-3 椅子単体実験 1 記録画像 (その 1)



写真 2.3-3-9 着火 8 分後

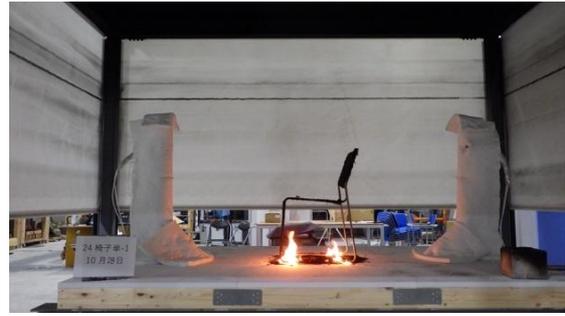


写真 2.3-3-10 着火 9 分後

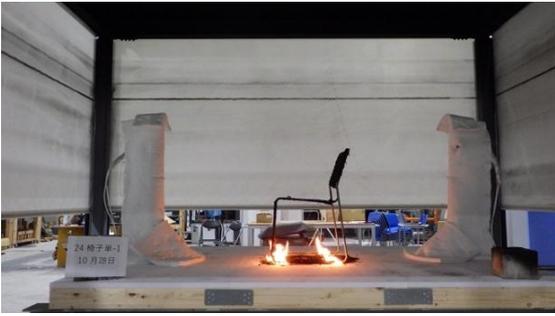


写真 2.3-3-11 着火 10 分後



写真 2.3-3-12 着火 12.5 分後

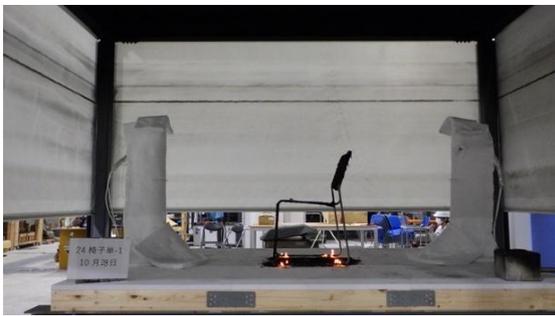


写真 2.3-3-13 着火 15 分後
(計測終了)

写真 2.3-3 椅子単体実験 1 記録画像 (その 2)



写真 2.3-4-1 実験開始
(着火 0 分)

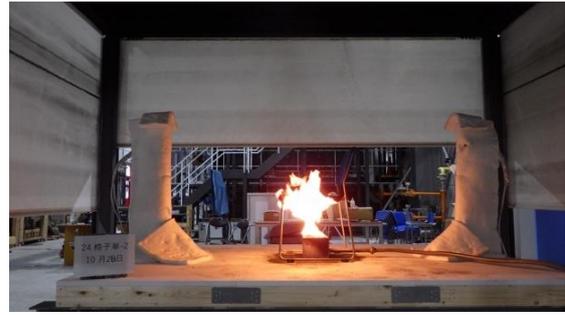


写真 2.3-4-2 着火 1 分後
(20kW→40kW)



写真 2.3-4-3 着火 2 分後



写真 2.3-4.4 着火 3 分後



写真 2.3-4-5 着火 4 分後



写真 2.3-4-6 着火 5 分後



写真 2.3-4-7 着火 6 分後



写真 2.3-4-8 着火 7 分後

写真 2.3-4 椅子単体実験 2 記録画像 (その 1)



写真 2.3-4-9 着火 8 分後



写真 2.3-4-10 着火 9 分後

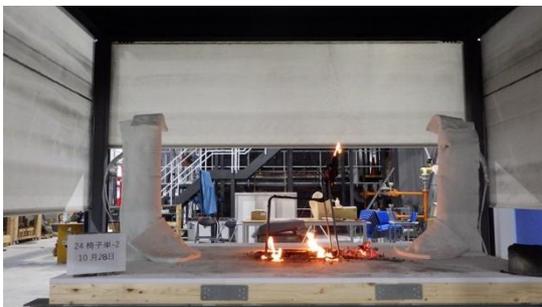


写真 2.3-4-11 着火 10 分後



写真 2.3-4-12 着火 11 分後
(計測終了)

写真 2.3-4 椅子単体実験 2 記録画像 (その 2)

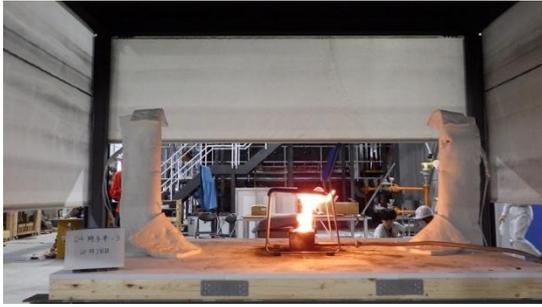


写真 2.3-5-1 実験開始
(着火 0 分)



写真 2.3-5-2 着火 1 分後
(20kW→40kW)



写真 2.3-5-3 着火 2 分後



写真 2.3-5-4 着火 3 分後



写真 2.3-5-5 着火 4 分後



写真 2.3-5-6 着火 5 分後



写真 2.3-5-7 着火 6 分後
(椅子の背部の火炎が大きくなる)



写真 2.3-5-8 着火 7 分後

写真 2.3-5 椅子単体実験 3 記録画像 (その 1)



写真 2.3-5-9 着火 8 分後



写真 2.3-5-10 着火 9 分後



写真 2.3-5-11 着火 10 分後



写真 2.3-5-12 着火 12.5 分後



写真 2.3-5-13 着火 15 分後
(計測終了)

写真 2.3-5 椅子単体実験 3 記録画像 (その 2)

表 2.3-2 観察記録 (椅子単体実験 1)

0:00:00	着火
0:01:00	バーナーの出力変更 (20kW→40kW)
0:01:10	椅子の座面に着火
0:01:15	バーナーを椅子の下から抜く
0:02:00	椅子の背に着火
0:03:00	椅子の背の裏側へ着火
0:05:25	椅子の背からの発炎がおさまる (背の合板・MDF が部分的に燃え残る)
0:09:15	椅子の座面からの発炎がおさまる (脚の連結パーツのみ延焼継続)
0:15:00	実験終了

表 2.3-3 観察記録 (椅子単体実験 2)

0:00:00	着火
0:01:00	バーナーの出力変更 (20kW→40kW)
0:01:10	椅子の座面に着火
0:01:30	バーナーを椅子の下から抜く
0:01:40	椅子の背に着火
0:02:40	椅子の背の裏側へ延焼する
0:03:00	椅子の座面がほぼ焼失
0:06:40	椅子の背 (MDF) が脱落
0:11:00	実験中止 (発熱速度計測不良のため)

表 2.3-4 観察記録 (椅子単体実験 3)

0:00:00	着火
0:01:00	バーナーの出力変更 (20kW→40kW)
0:01:10	椅子の座面に着火
0:01:30	バーナーを椅子の下から抜く / 椅子の背に着火
0:01:50	椅子の背の裏側へ延焼する
0:03:00	椅子の座面がほぼ焼失
0:05:00	椅子の背からの発炎が大きくなる (合板へ着火)
0:09:02	椅子の背 (MDF) が脱落
0:11:00	椅子の背 (合板) が部分的に脱落
0:15:00	実験終了

2.3.4 実験結果-椅子 6 脚の燃え広がり

発熱速度、温度、熱流速の計測結果と、実験ごとの記録画像、炭化図を以降に示す。

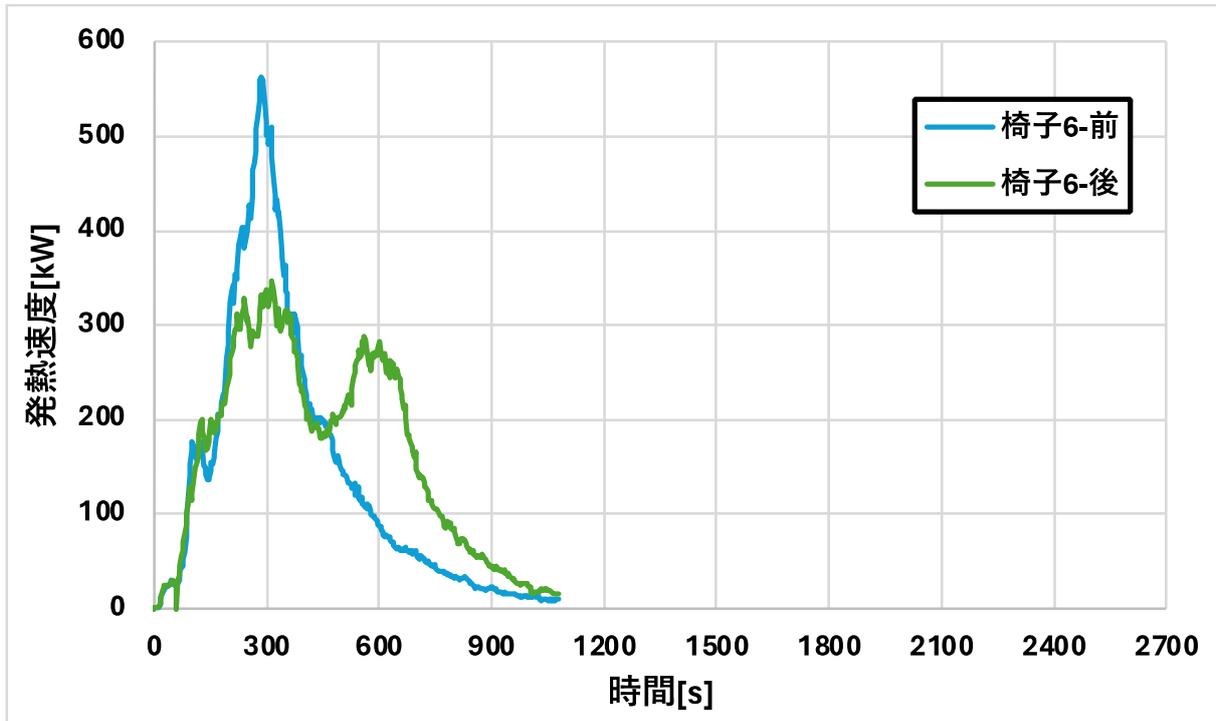


図 2.3-7 発熱速度の推移 (椅子 6 脚実験-前方着火と後方着火)

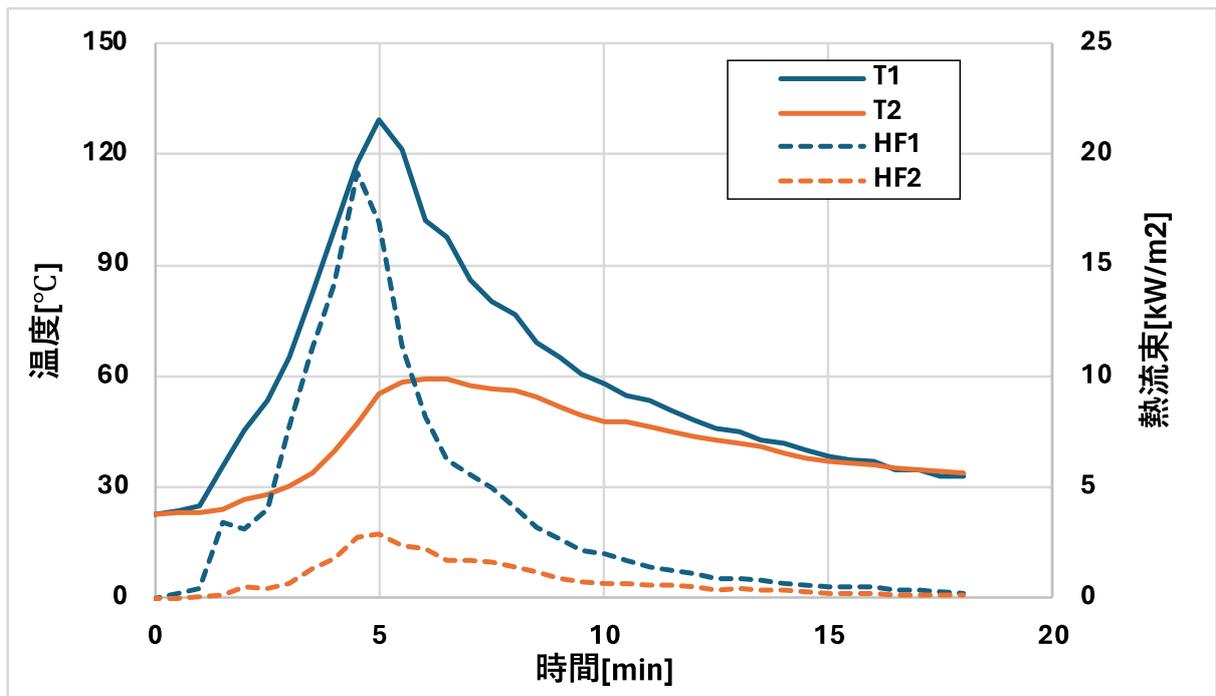


図 2.3-8 温度・熱流速の推移 (椅子 6 脚実験-前方着火)

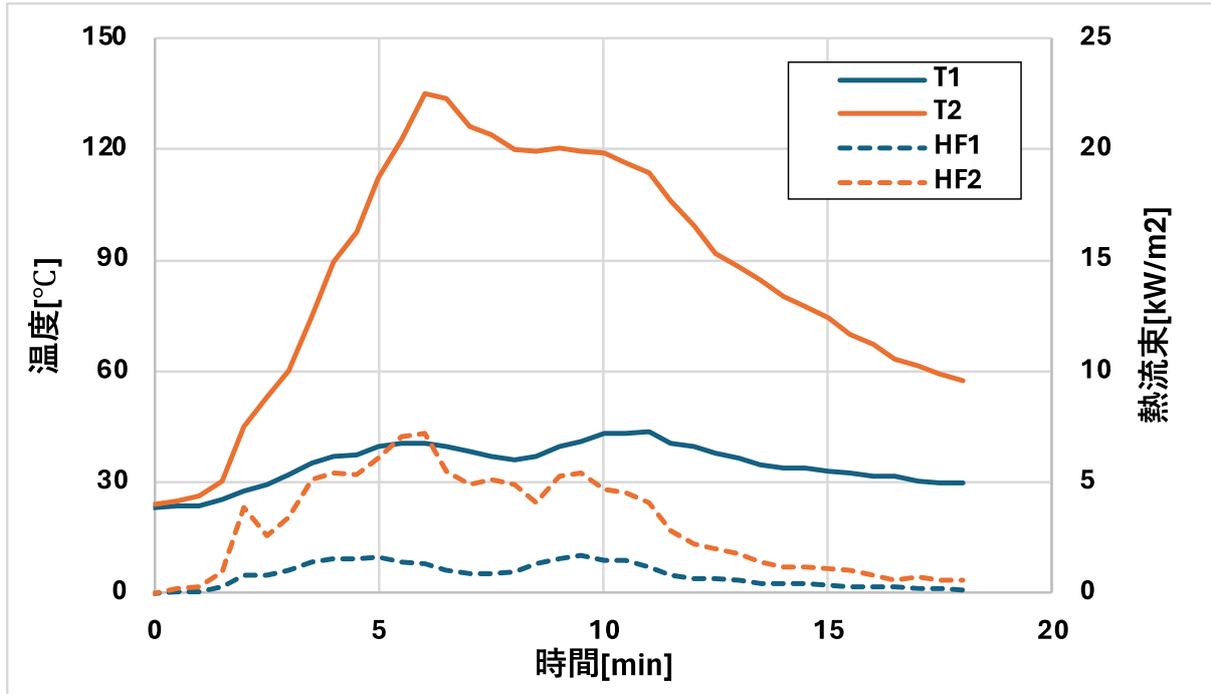


図 2.3-9 温度・熱流束の推移 (椅子 6 脚実験-後方着火)



写真 2.3-6-1 実験開始
(着火 0 分)



写真 2.3-6-2 着火 1 分後
(20kW→40kW)



写真 2.3-6-3 着火 2 分後



写真 2.3-6-4 着火 3 分後



写真 2.3-6-5 着火 4 分後



写真 2.3-6-6 着火 5 分後



写真 2.3-6-7 着火 6 分後



写真 2.3-6-8 着火 7 分後

写真 2.3-6 椅子 6 脚実験(前方着火) 記録画像 (その 1)



写真 2.3-6-9 着火 8 分後



写真 2.3-6-10 着火 9 分後



写真 2.3-6-11 着火 10 分後



写真 2.3-6-12 着火 11 分後



写真 2.3-6-13 着火 12 分後



写真 2.3-6-14 着火 13 分後

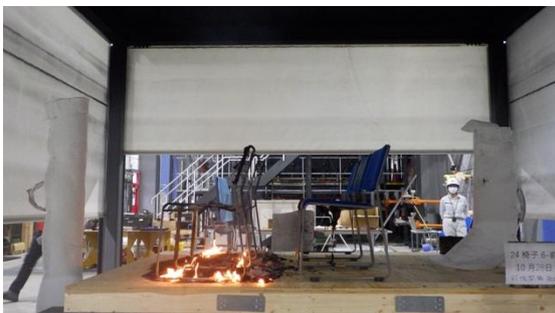


写真 2.3-6-15 着火 14 分後

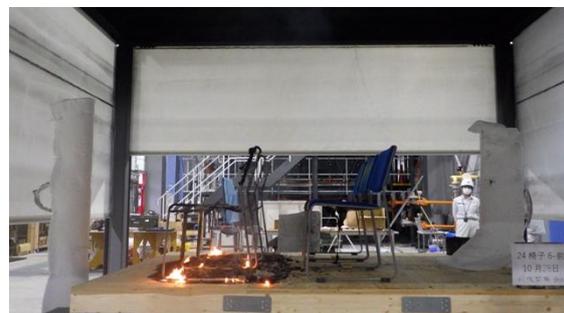


写真 2.3-6-16 着火 15 分後

写真 2.3-6 椅子 6 脚実験(前方着火) 記録画像 (その 2)



写真 2.3-6-17 着火 16 分後



写真 2.3-6-18 着火 17 分後



写真 2.3-6-19 着火 18 分後
(実験終了)



写真 2.3-6-20 実験後
椅子の残存の様子



写真 2.3-6-21 実験後
椅子（後列背面）の残存の様子



写真 2.3-6-22 実験後
床面の燃焼範囲

写真 2.3-6 椅子 6 脚実験(前方着火) 記録画像 (その 3)

表 2.3-5 観察記録（椅子 6 脚実験（前方着火））

0:00:00	着火
0:01:00	バーナーの出力変更（20kW→40kW）
0:01:10	椅子の座面に着火
0:01:30	バーナーを椅子の下から抜く
0:01:40	椅子③の座面に着火
0:01:52	椅子①の座面に着火
0:02:10	椅子①の背表に着火
0:03:22	椅子③の背表に着火
0:03:30	椅子①の背裏へ延焼
0:03:56	椅子②の背（MDF）が脱落
0:04:00	椅子⑤の座面から発煙
0:04:40	椅子④-⑥の全ての座面前方から発煙
0:06:00	椅子①-③の座面焼失
0:06:25	椅子①の背（MDF）が脱落
0:07:00	椅子⑤の背表が変色し始める
0:07:05	椅子③の背（MDF+合板）が脱落
0:07:40	椅子④,⑤の座面裏が融解
0:08:20	椅子①-③の全ての背が焼失
0:08:40	椅子⑥の座面裏が融解
0:09:25	椅子①-③から火の粉（小）が飛散
0:10:07	椅子④の背の縁（⑤側）が変色
0:13:00	椅子①-③の発炎おさまる
0:18:00	実験終了



写真 2.3-7-1 実験開始
(着火 0 分)



写真 2.3-7-2 着火 1 分後
(20kW→40kW)



写真 2.3-7-3 着火 2 分後



写真 2.3-7-4 着火 3 分後



写真 2.3-7-5 着火 4 分後



写真 2.3-7-6 着火 5 分後



写真 2.3-7-7 着火 6 分後



写真 2.3-7-8 着火 7 分後

写真 2.3-7 椅子 6 脚実験(後方着火) 記録画像 (その 1)



写真 2.3-7-9 着火 8 分後



写真 2.3-7-10 着火 9 分後



写真 2.3-7-11 着火 10 分後



写真 2.3-7-12 着火 11 分後



写真 2.3-7-13 着火 12 分後



写真 2.3-7-14 着火 13 分後



写真 2.3-7-15 着火 14 分後

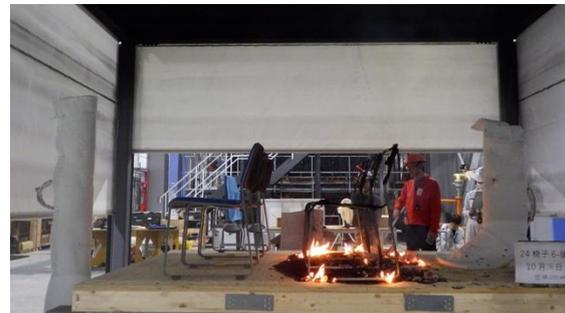


写真 2.3-7-16 着火 15 分後

写真 2.3-7 椅子 6 脚実験(後方着火) 記録画像 (その 2)



写真 2.3-7-17 着火 16 分後



写真 2.3-7-18 着火 17 分後



写真 2.3-7-19 着火 18 分後



写真 2.3-7-20 実験後
椅子（前列背面）の残存の様子



写真 2.3-7-21 実験後
椅子（前列前面）の残存の様子



写真 2.3-7-22 実験後
床面の燃焼範囲

写真 2.3-7 椅子 6 脚実験(後方着火) 記録画像 (その 3)

表 2.3-6 観察記録（椅子 6 脚実験（後方着火））

0:00:00	着火
0:01:00	バーナーの出力変更（20kW→40kW）
0:01:10	椅子の座面に着火
0:01:30	バーナーを椅子の下から抜く
0:01:40	椅子⑤の背表に着火
0:02:00	椅子⑥の座面に着火
0:03:00	椅子⑤の背裏へ延焼
0:03:11	椅子⑥の背表に着火
0:03:50	椅子②の座面後方から発煙・背裏変色
0:04:28	椅子⑤の背（MDF）剥離
0:04:30	椅子③の座面後方から発煙・背裏変色
0:04:44	椅子④の背表に着火
0:04:55	椅子⑤の背（MDF）脱落
0:06:14	椅子④の座面に着火
0:07:15	椅子⑥の背（MDF+合板）が脱落
0:09:40	椅子①の座面後方から発煙
0:10:15	椅子④の背（MDF）が脱落
0:11:00	椅子⑥焼失（発炎おさまる）
0:14:30	椅子④焼失（発炎おさまる）
0:11:00	椅子⑤焼失（発炎おさまる）
0:14:30	椅子④焼失（発炎おさまる）

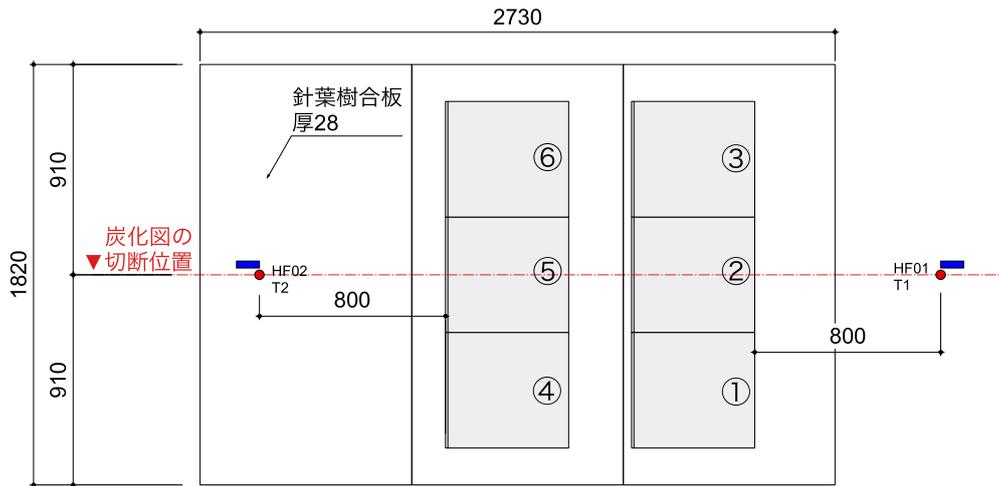


図 2.3-10 炭化図の切断位置（前方着火・後方着火共通）

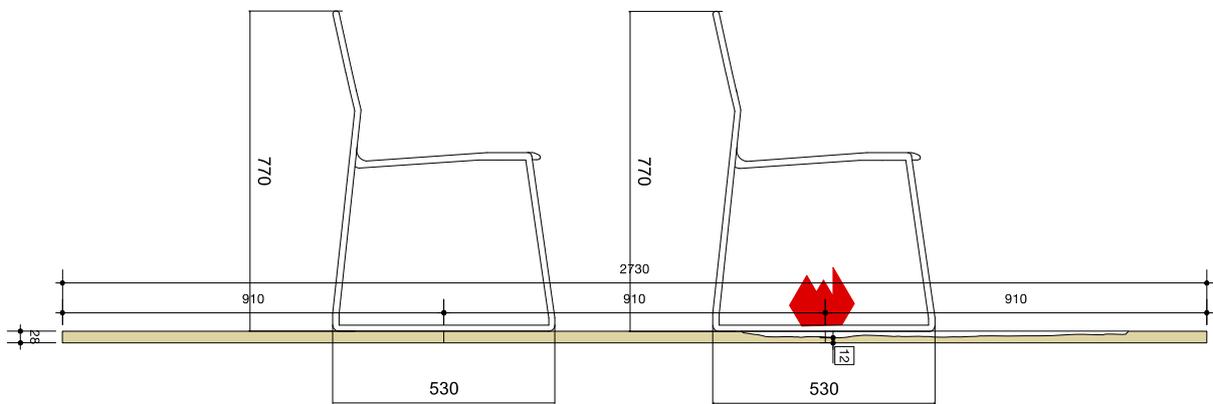


図 2.3-11 炭化図・断面（椅子 6 脚実験（前方着火））

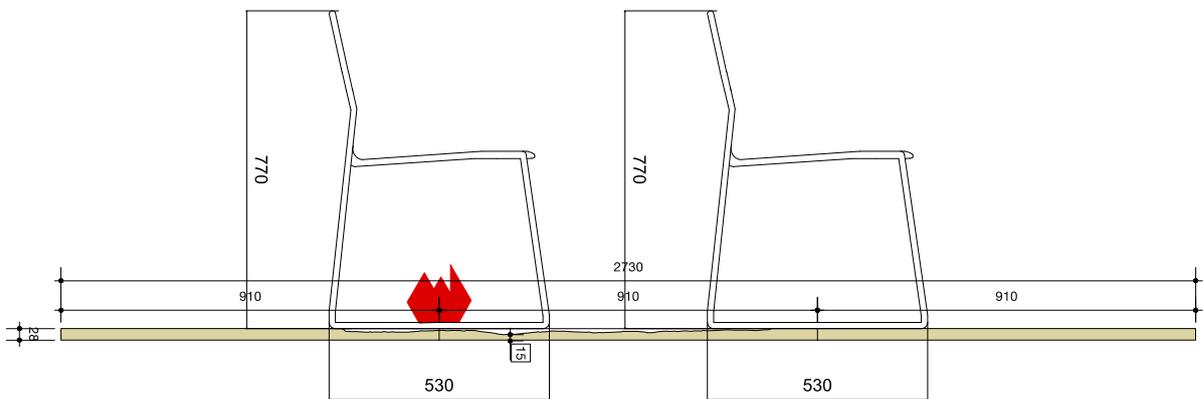


図 2.3-12 炭化図・断面（椅子 6 脚実験（後方着火））

2.4 実験結果～〔実験 B〕床の燃え抜け抑制・床裏の燃え拡がり性状確認実験

2.4.1 実験概要

本実験では、4仕様の床材をパラメータとし、床の燃え抜け性状の検証（床実験-1～4）を実施した。また、代表的な針葉樹合板+複合フローリングの仕様にて、床材が燃え抜けた後の、床裏面の空間内を燃え拡がりの有無について確認した（床抜実験-1）。なお、予備実験として木製クリブの発熱速度、床への熱流束を把握するブランク試験（床ブランク実験 1,2）を実施した。表 2.4-1 に実験 B の概要一覧を記載する。

表 2.4-1 実験 B の概要一覧

実験B							
実験名	実験日	床材 [mm]	熱源	加熱条件	加熱時間	目的	計測項目
24床-B1	12月9日	ケイカル板	木製クリブ	1段	火源が燃え尽きるまで	発熱速度測定 (ブランク実験)	床表面：熱流計1箇所+熱電対1箇所 火炎面：熱流計1箇所+熱電対1箇所 発熱速度 インターバル写真・ビデオ映像
24床-B2	10月29日			2段横積み			
24床-1	10月29日	針葉樹合板28の上に 複合フローリング18	木製クリブ	1段	火源が燃え尽きるまで	床の燃え抜け性状 (試験体の裏面開放)	床表面：熱流計2箇所+熱電対2箇所 火炎面：熱流計1箇所+熱電対1箇所 発熱速度 インターバル写真・ビデオ映像
24床-2		針葉樹合板28の上に 無垢フローリング18					
24床-3	10月30日	パーティクルボード20の上に 複合フローリング18					
24床-4		パーティクルボード20の上に 無垢フローリング18					
24床抜-1	10月30日	針葉樹合板15の上に 複合フローリング18	木製クリブ	1段	火源が燃え尽きるまで	床燃え抜け後の 裏面燃え拡がり抑制 (試験体の裏面閉塞)	床表面：熱電対3箇所 火炎面：熱流計1箇所+熱電対1箇所 発熱速度 インターバル写真・ビデオ映像

2.4.2 試験体及び実験方法

試験体及び試験装置を図 2.4-1～3、写真 2.4-1～3 に示す。床試験体の外形は、W 1820×D1820mm とした。床材は、下地材は針葉樹合板 28mm 厚またはパーティクルボード 20mm 厚のいずれか、仕上げ材は複合フローリング 18mm 厚または無垢フローリング 18mm 厚のいずれかの組み合わせとした。また火源は、局所火源火災で想定される収納可燃物を模した外寸 750mm×750mm の木製クリブ(スギ製材 30×105×750×20 本、約 17.5kg～18kg) とし、2023 年度の検証と同様に床試験体の中心に設置し、着火剤(木材繊維質+灯油、約 180g) を用いて着火することとした。その際、水冷式熱流束計(フランジ無しタイプのシュミット・ボエルター型、Hukseflux 社製、品番：CHF-SBG03-200、常用測定レンジ 200kW/m²、最高測定レンジ 300kW/m²) と K タイプの CA 熱電対を床への入射熱測定用に 2 箇所に設置して、熱流束及びその付近の温度(熱流計端部より 10mm の位置)を測定した。また、発熱速度を試験体上部に設けたフードを用いて、酸素消費法により測定するとともに、目視による観察、ビデオ及びカメラによる撮影を行った。

なお、2023 年度の検証実験では、主に床上の燃え拡がり性状を把握することを目的としていたため、火源(木製クリブ)がほぼ燃え尽き床材が一部でも燃え抜けた時点で、消火し実験を終了したが、今年度は、床下地に針葉樹合板またはパーティクルボードを設けた上で、火源(木製クリブ)及び床材のいずれも燃え尽きるまで、または火源(木製クリブ)が燃え尽きた後、床材が自消するまで実験を継続することとした。



写真 2.4-1 実験 B の試験装置全景（床実験-1 の例）



写真 2.4-2 熱流計と床試験体裏面の様子

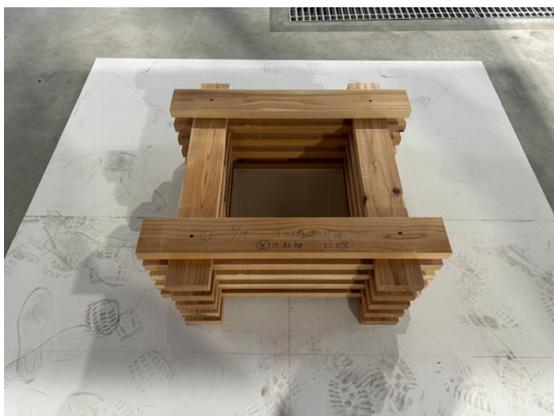


写真 2.4-3 実験 B の火源（木製クリブと着火剤）

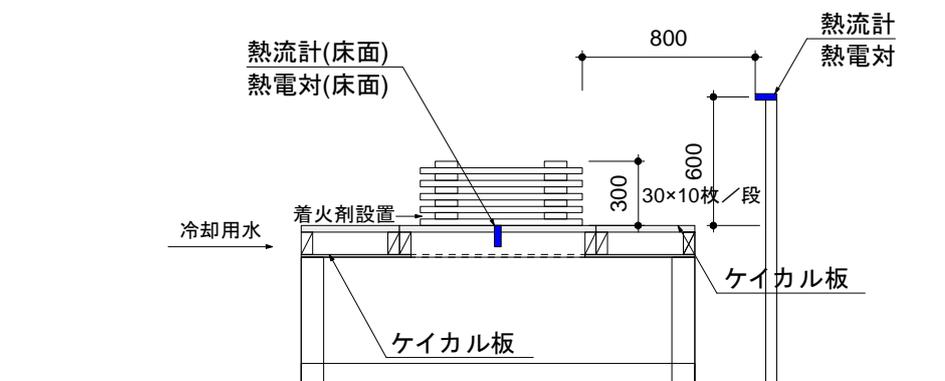
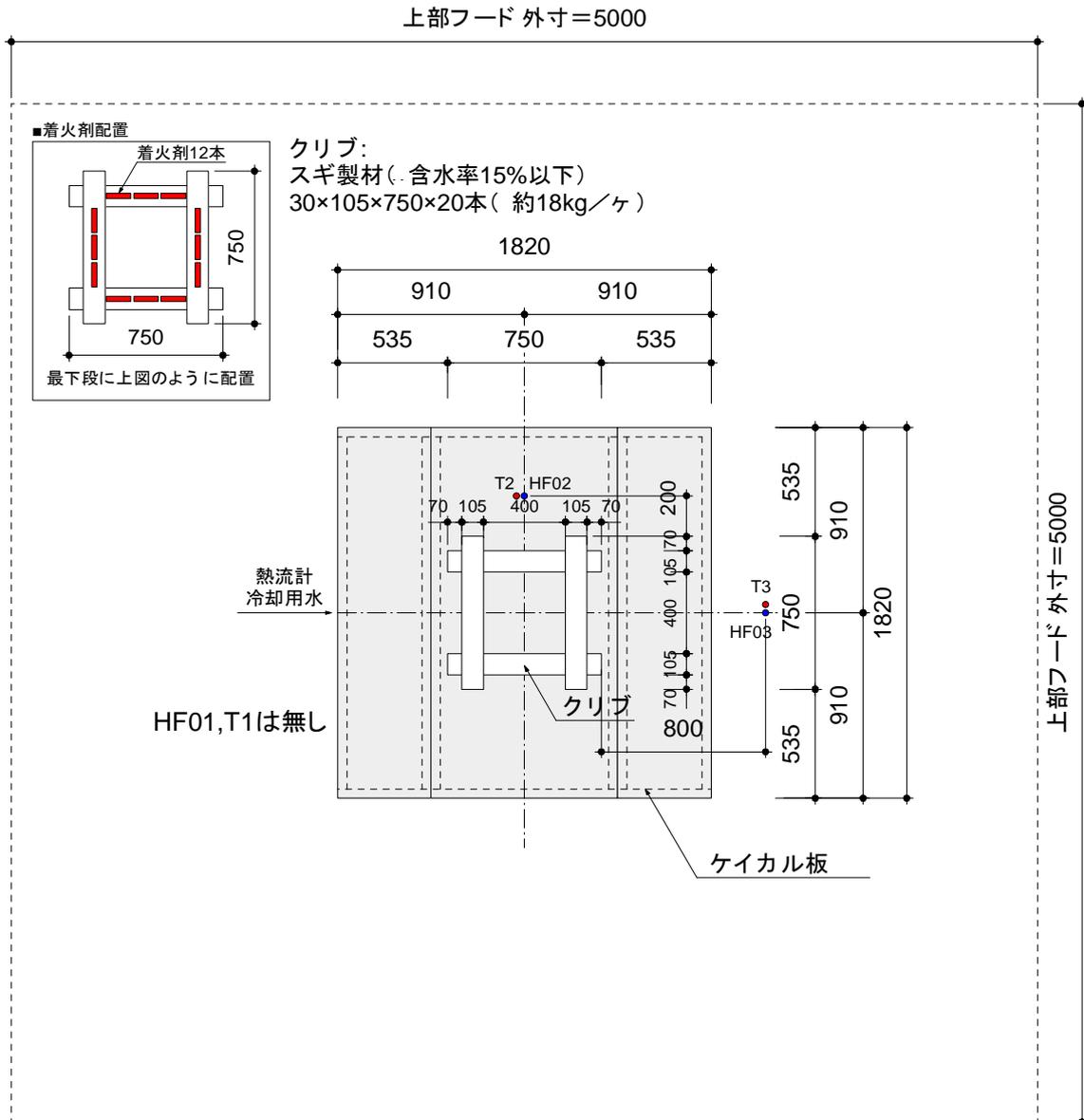


図 2.4-1 ブランク実験の試験装置及び試験体概要図 (単位: mm)

※床のブランク実験 (24床上-B2) では、上図の木製クリブを2段積みとして実施した。

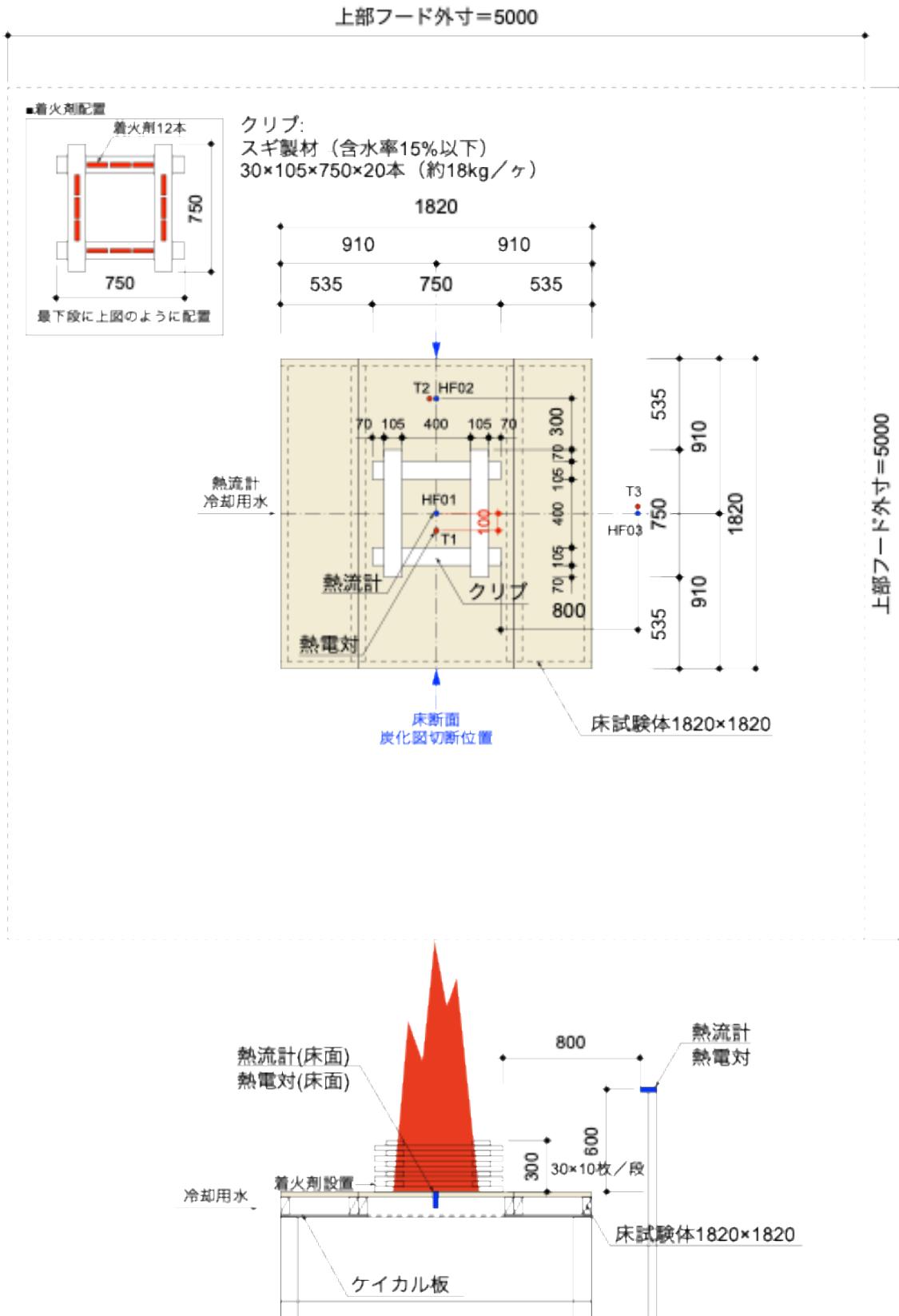


図 2.4-2 床実験-1~4 の試験装置及び試験体概要図 (単位: mm)

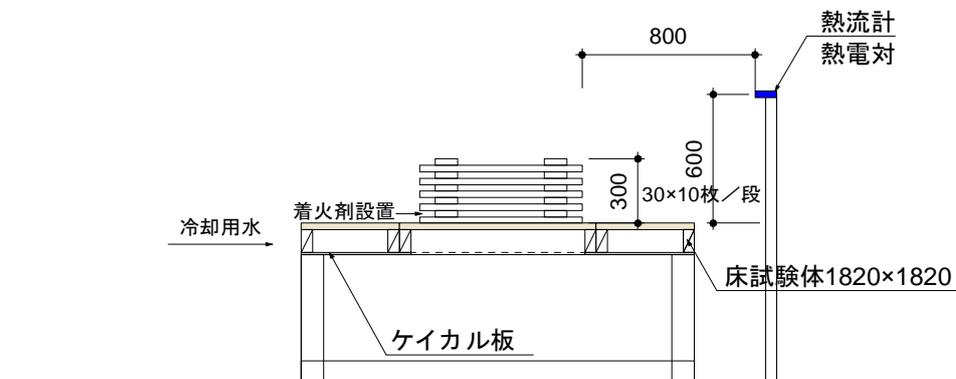
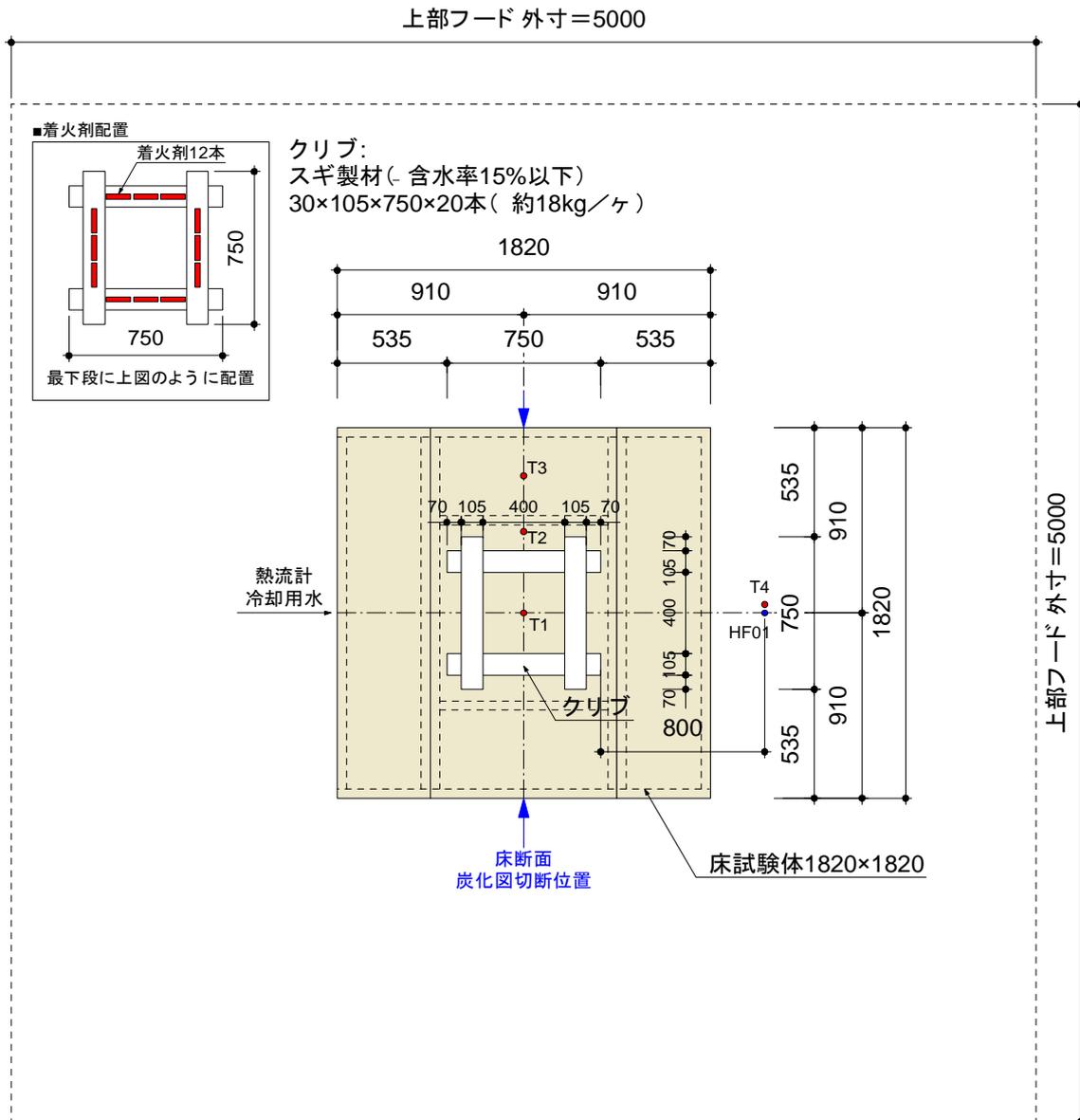


図 2.4-3 床抜実験-1 の試験装置及び試験体概要図 (単位: mm)

2.4.3 実験結果-床ブランク実験-1,2

床ブランク実験の発熱速度、温度、熱流速の計測結果と、実験の記録画像を以降に示す。

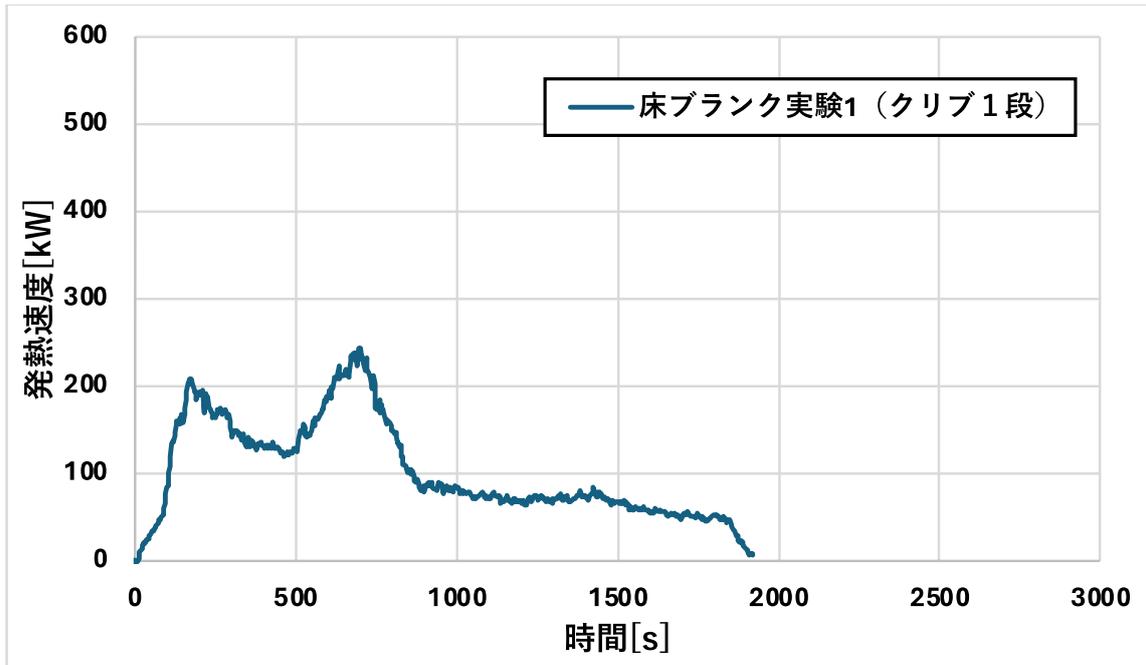


図 2.4-4 発熱速度の推移 (床ブランク実験 1・木製クリブ 1 段)

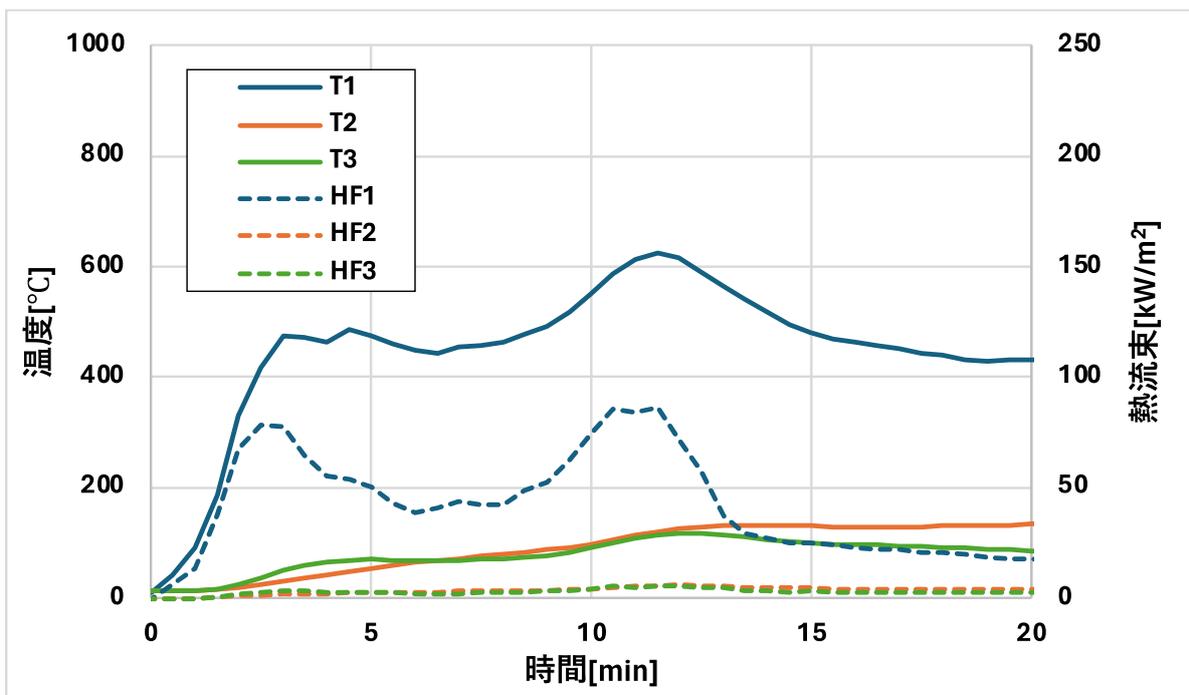


図 2.4-5 温度・熱流速の推移 (床ブランク実験 1・木製クリブ 1 段)



図 2.4-6 発熱速度の推移 (床ブランク実験 2・木製クリブ 2 段)

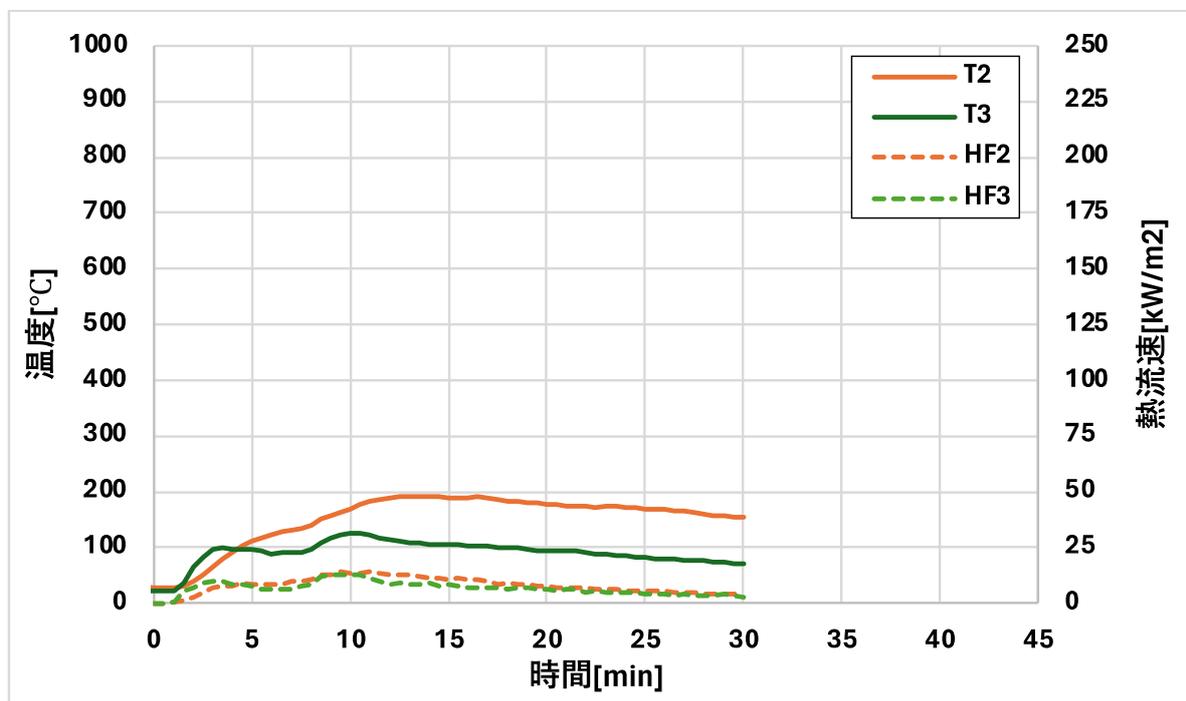


図 2.4-7 温度・熱流速の推移 (床ブランク実験 2・木製クリブ 2 段)



写真 2.4-4-1 実験開始時
(着火)



写真 2.4-4-2 着火 1 分後



写真 2.4-4-3 着火 2 分後



写真 2.4-4-4 着火 3 分後



写真 2.4-4-5 着火 4 分後



写真 2.4-4-6 着火 5 分後



写真 2.4-4-7 着火 6 分後



写真 2.4-4-8 着火 7 分後

写真 2.4-4 (床ブランク実験 1・木製クリブ 1 段) 記録画像 (その 1)



写真 2.4-4-9 着火 8 分後



写真 2.4-4-10 着火 9 分後



写真 2.4-4-11 着火 10 分後



写真 2.4-4-12 着火 11 分後



写真 2.4-4-13 着火 12 分後



写真 2.4-4-14 着火 13 分後



写真 2.4-4-15 着火 14 分後



写真 2.4-4-16 着火 15 分後

写真 2.4-4 (床ブランク実験 1・木製クリブ 1 段) 記録画像 (その 2)



写真 2.4-4-17 着火 16 分後



写真 2.4-4-18 着火 17 分後



写真 2.4-4-19 着火 18 分後



写真 2.4-4-20 着火 19 分後



写真 2.4-4-21 着火 20 分後
(バーナー消火)



写真 2.4-4-22 着火 21 分後



写真 2.4-4-23 着火 22 分後



写真 2.4-4-24 着火 23 分後

写真 2.4-4 (床ブランク実験 1・木製クリブ 1 段) 記録画像 (その 3)



写真 2.4-4-25 着火 24 分後



写真 2.4-4-26 着火 25 分後



写真 2.4-4-27 着火 26 分後



写真 2.4-4-28 着火 27 分後



写真 2.4-4-29 着火 28 分後



写真 2.4-4-30 着火 29 分後



写真 2.4-4-31 着火 30 分後
(実験終了)

写真 2.4-4 (床ブランク実験 1・木製クリブ 1 段) 記録画像 (その 4)



写真 2.4-5-1 実験開始
(着火 0 分)

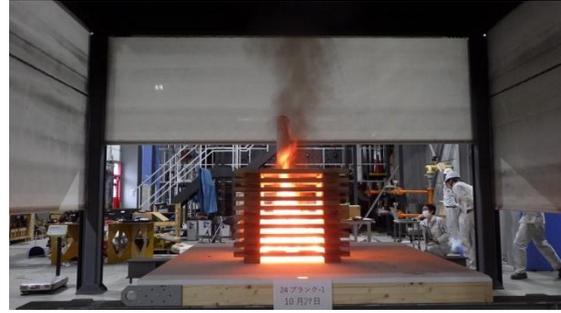


写真 2.4-5-2 着火 1 分後

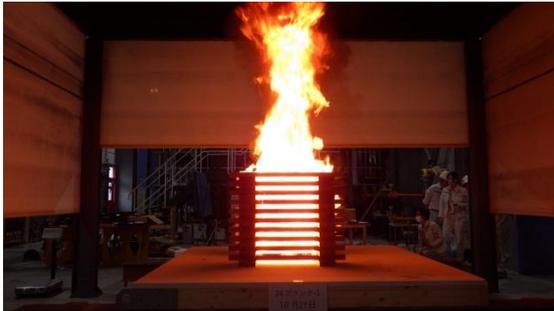


写真 2.4-5-3 着火 2 分後

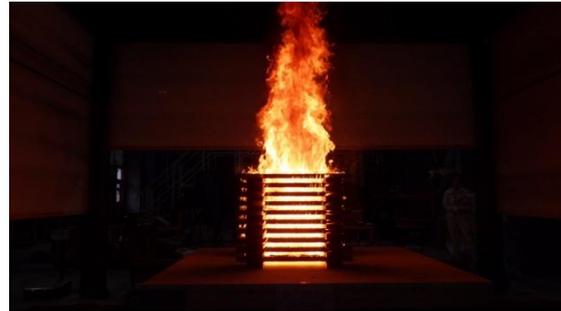


写真 2.4-5-4 着火 3 分後



写真 2.4-5-5 着火 4 分後



写真 2.4-5-6 着火 5 分後

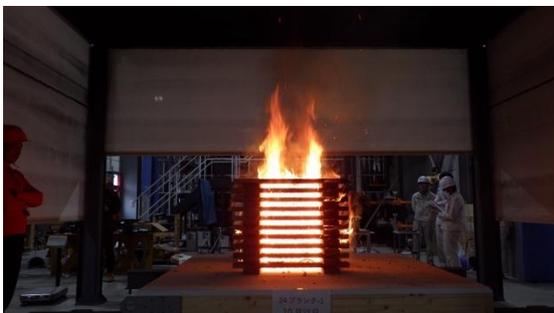


写真 2.4-5-7 着火 6 分後

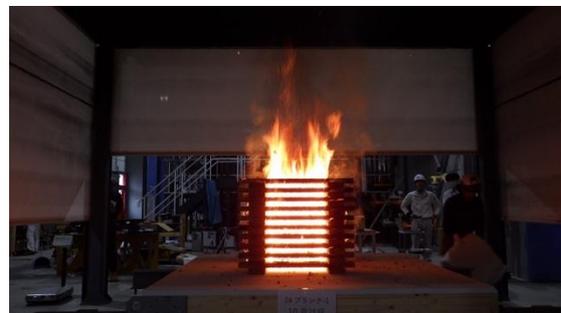


写真 2.4-5-8 着火 7 分後

写真 2.4-5 (床ブランク実験 2・木製クリブ 2 段) 記録画像 (その 1)



写真 2.4-5-9 着火 8 分後



写真 2.4-5-10 着火 9 分後



写真 2.4-5-11 着火 10 分後



写真 2.4-5-12 着火 11 分後



写真 2.4-5-13 着火 12 分後



写真 2.4-5-14 着火 13 分後

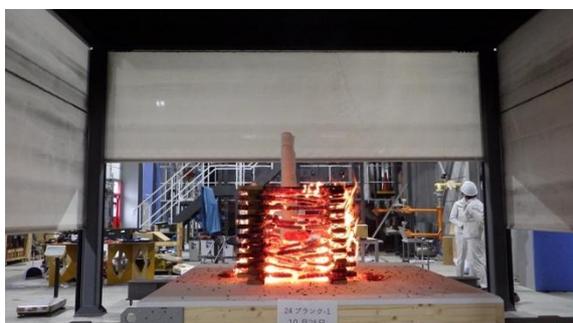


写真 2.4-5-15 着火 14 分後



写真 2.4-5-16 着火 15 分後

写真 2.4-5 (床ブランク実験 2・木製クリブ 2 段) 記録画像 (その 2)



写真 2.4-5-17 着火 16 分後

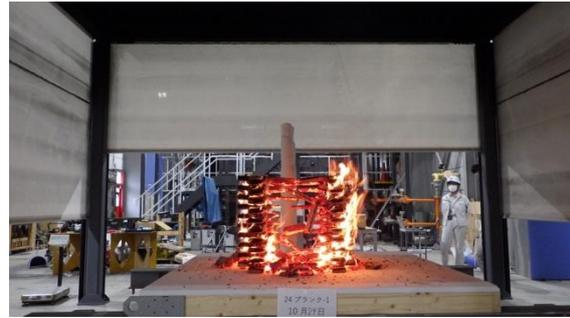


写真 2.4-5-18 着火 17 分後

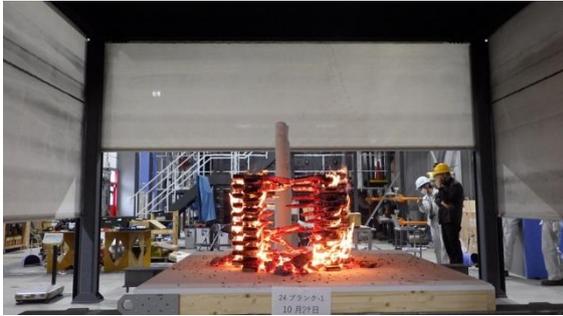


写真 2.4-5-19 着火 18 分後

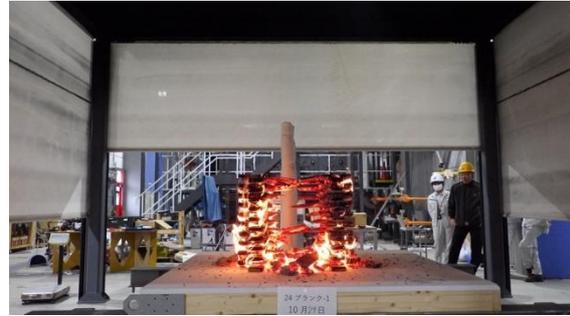


写真 2.4-5-20 着火 19 分後

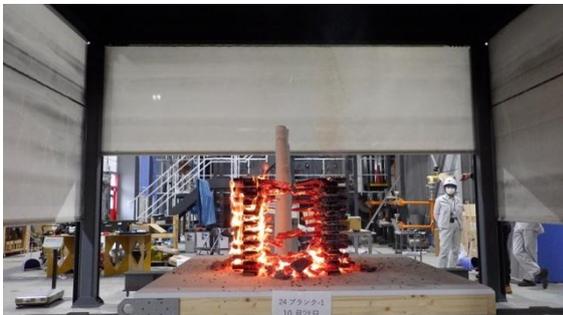


写真 2.4-5-21 着火 20 分後



写真 2.4-5-22 着火 21 分後



写真 2.4-5-23 着火 22 分後



写真 2.4-5-24 着火 23 分後

写真 2.4-5 (床ブランク実験 2・木製クリブ 2 段) 記録画像 (その 3)



写真 2.4-5-25 着火 24 分後



写真 2.4-5-26 着火 25 分後

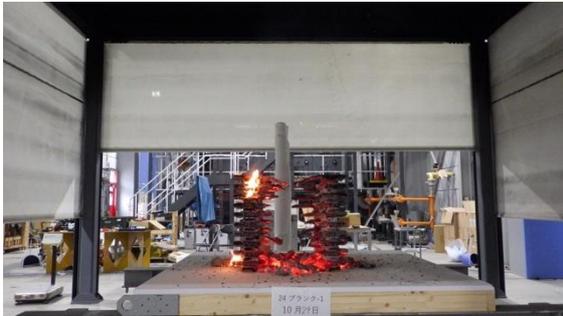


写真 2.4-5-27 着火 26 分後

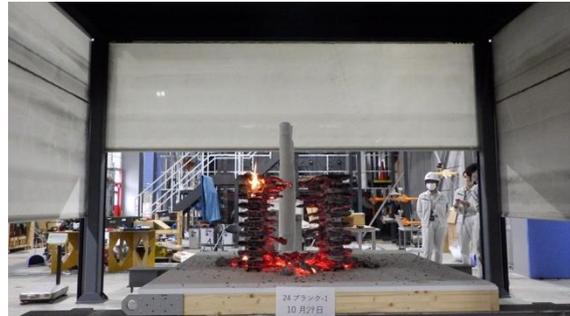


写真 2.4-5-28 着火 27 分後

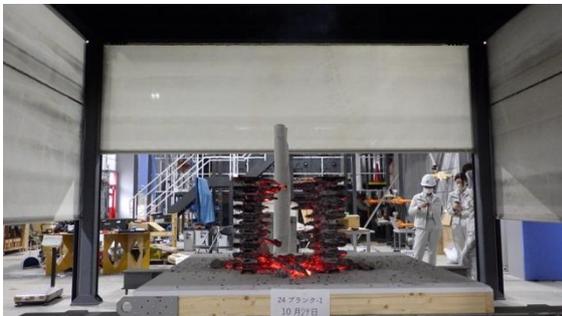


写真 2.4-5-29 着火 28 分後



写真 2.4-5-30 着火 29 分後

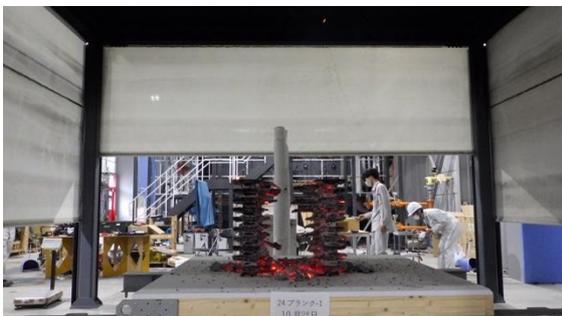


写真 2.4-5-31 着火 30 分後

写真 2.4-5 (床ブランク実験 2・木製クリブ 2 段) 記録画像 (その 4)

2.4.4 実験結果-床の燃え抜け抑制

発熱速度、温度・熱流速の計測結果および実験ごとの記録画像、炭化図を以降に示す。

床実験-1 は、実験開始 1 時間 32 分（加熱終了 40 分+放置 52 分）に床裏へ火炎貫通した（写真 2.4-6-28 参照）ため、注水により消火・終了した。一方、床実験-2~4 は、放置中に床材の赤熱が続き燃え抜けたが、その際、火炎貫通・噴出は見られず、床材の燃え抜け部分も自消した。

床実験-1：針葉樹合板 28mm の上に複合フローリング 18mm

床実験-2：針葉樹合板 28mm の上に無垢フローリング 18mm

床実験-3：パーティクルボード 20mm の上に複合フローリング 18mm

床実験-4：パーティクルボード 20mm の上に無垢フローリング 18mm

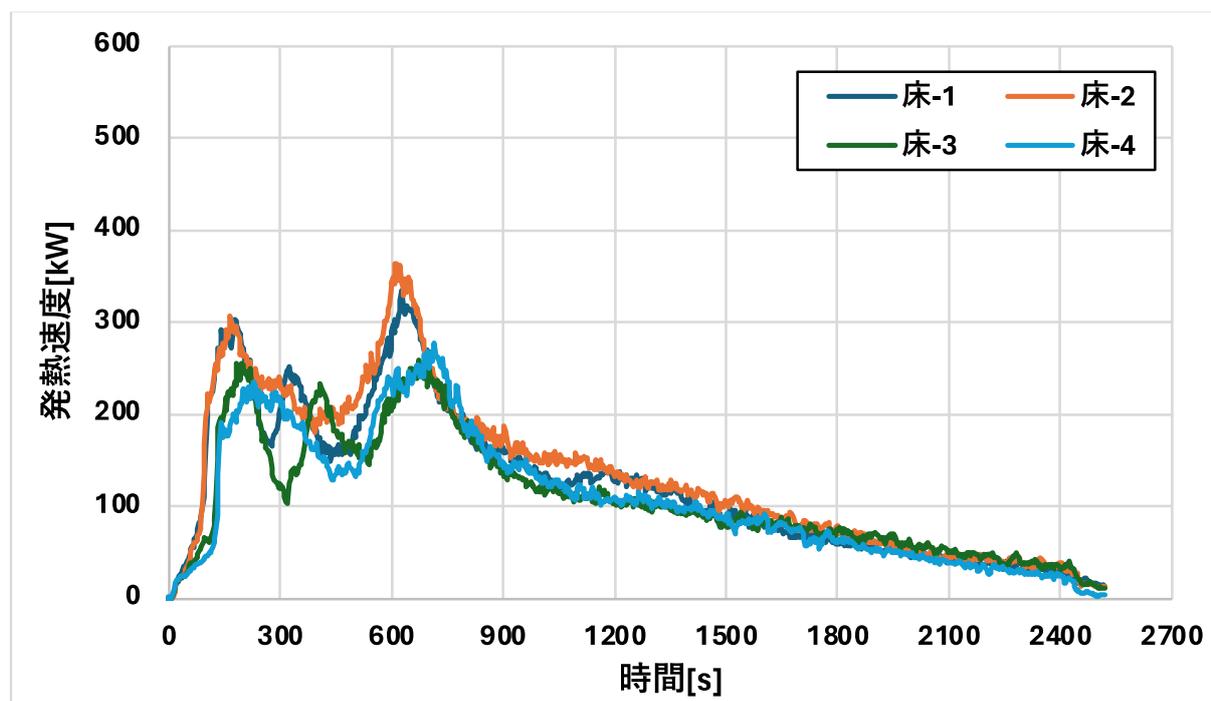


図 2.4-8 発熱速度の推移（床実験-1~4）

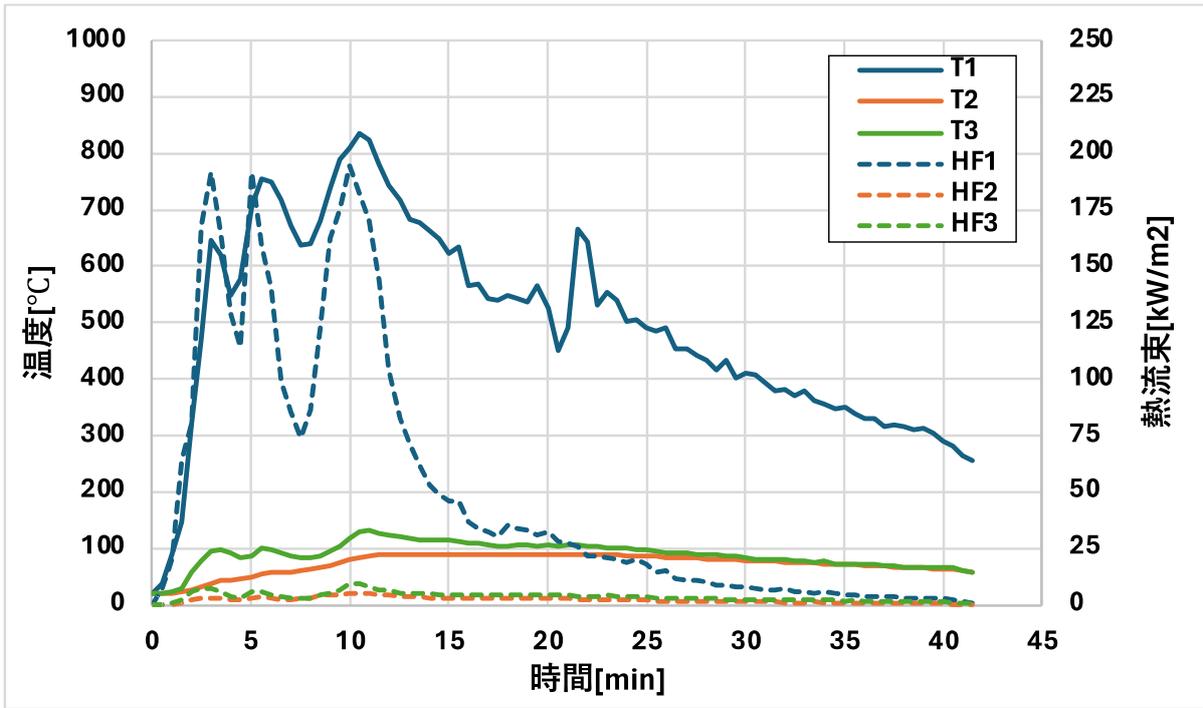


図 2.4-9 温度・熱流速の推移 (床実験-1)

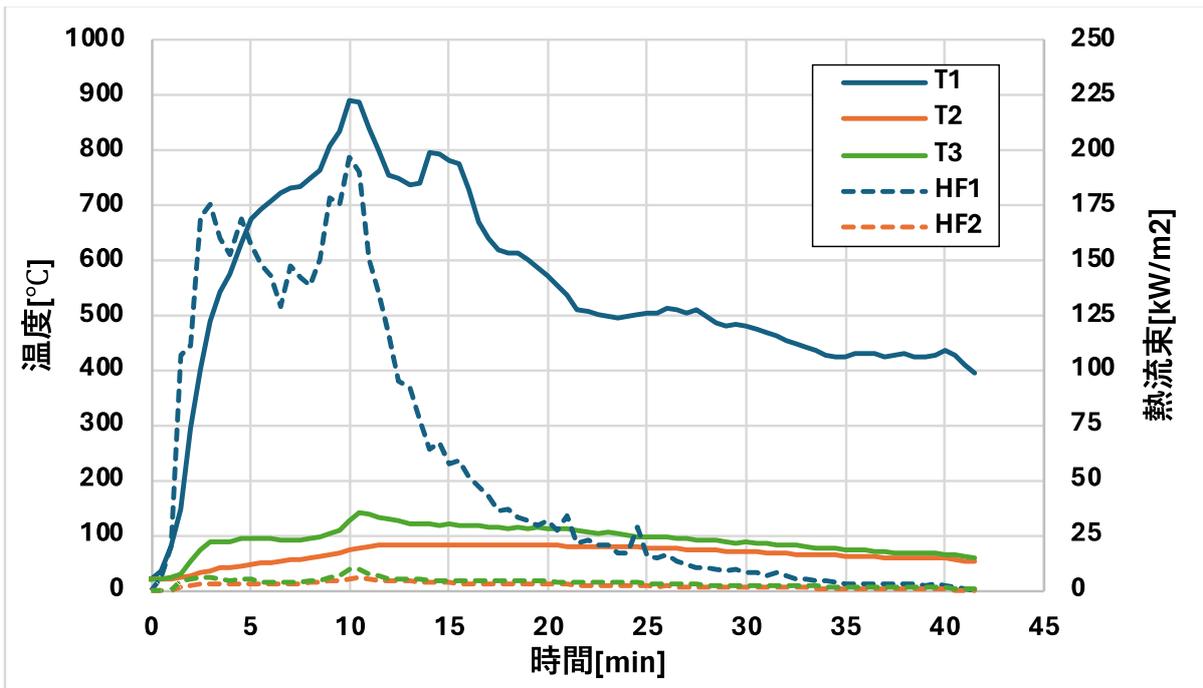


図 2.4-10 温度・熱流速の推移 (床実験-2)

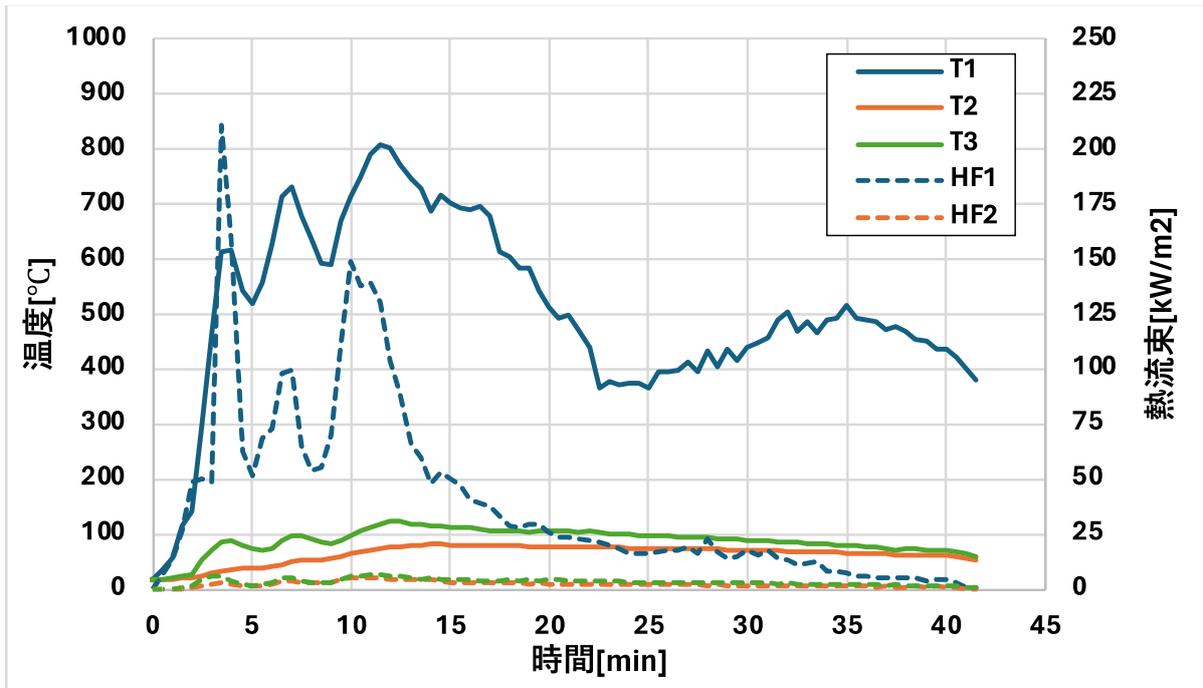


図 2.4-11 温度・熱流速の推移 (床実験-3)

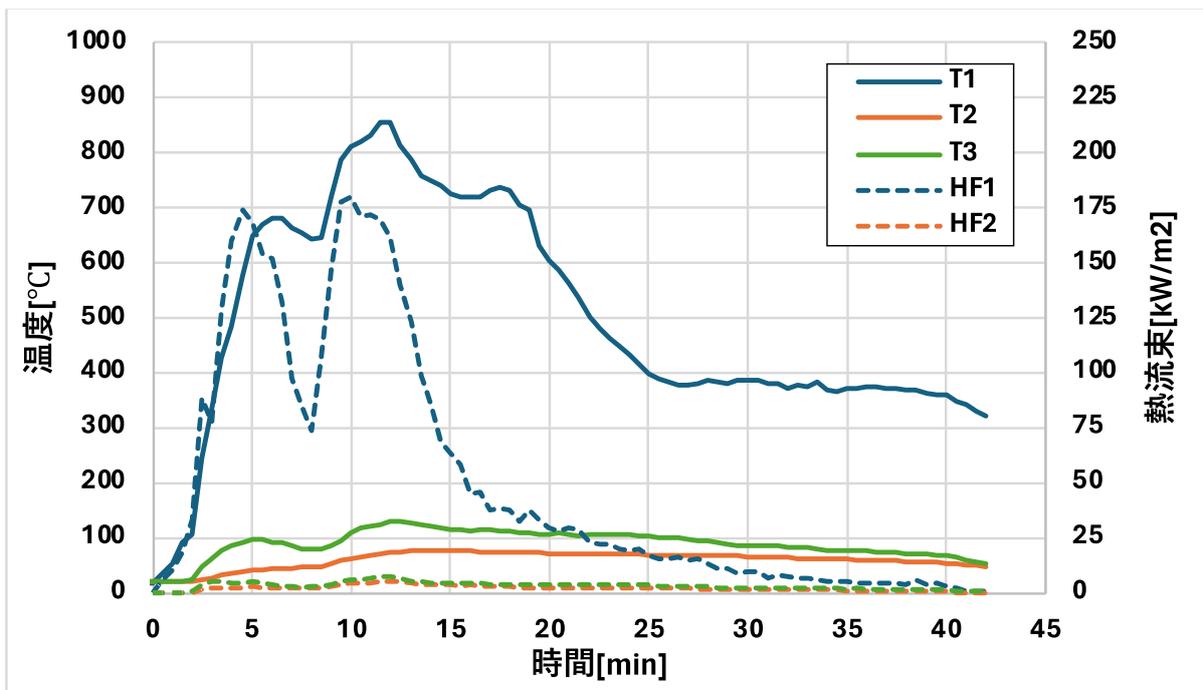


図 2.4-12 温度・熱流速の推移 (床実験-4)



写真 2.4-6-1 実験開始
(着火 0 分)



写真 2.4-6-2 着火 1 分後



写真 2.4-6-3 着火 2 分後



写真 2.4-6-4 着火 3 分後

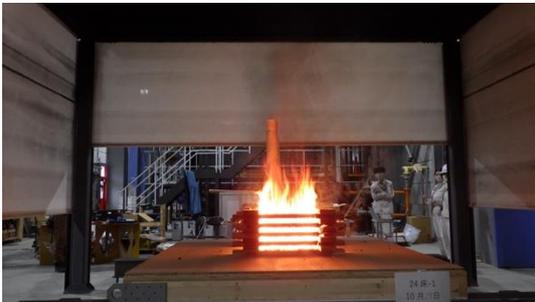


写真 2.4-6-5 着火 4 分後



写真 2.4-6-6 着火 5 分後

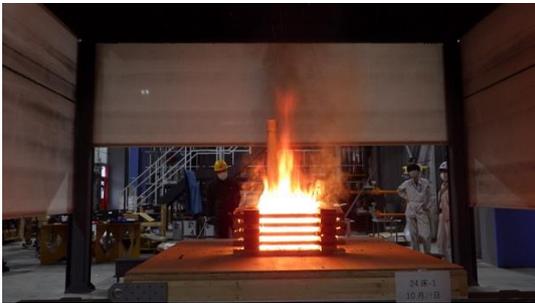


写真 2.4-6-7 着火 6 分後



写真 2.4-6-8 着火 7 分後

写真 2.4-6 床実験-1 記録画像 (その 1)



写真 2.4-6-9 着火 8 分後

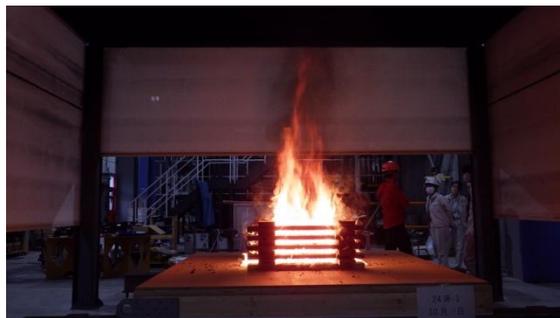


写真 2.4-6-10 着火 9 分後



写真 2.4-6-11 着火 10 分後



写真 2.4-6-12 着火 11 分後



写真 2.4-6-13 着火 12 分後

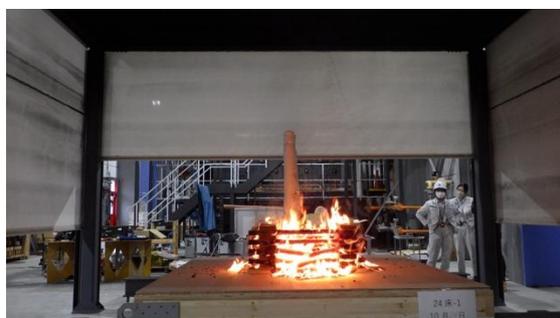


写真 2.4-6-14 着火 13 分後

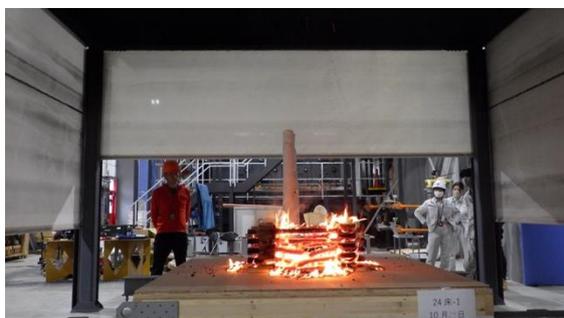


写真 2.4-6-15 着火 14 分後

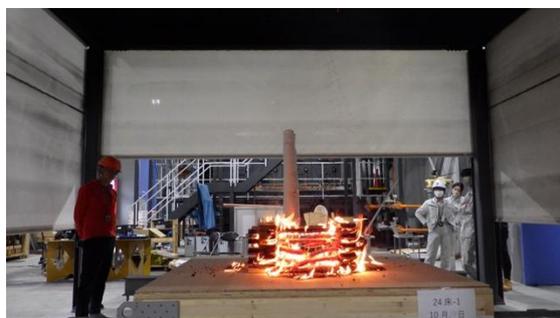


写真 2.4-6-16 着火 15 分後

写真 2.4-6 床実験-1 記録画像 (その 2)



写真 2.4-6-17 着火 16 分後



写真 2.4-6-18 着火 17 分後



写真 2.4-6-19 着火 18 分後



写真 2.4-6-20 着火 19 分後

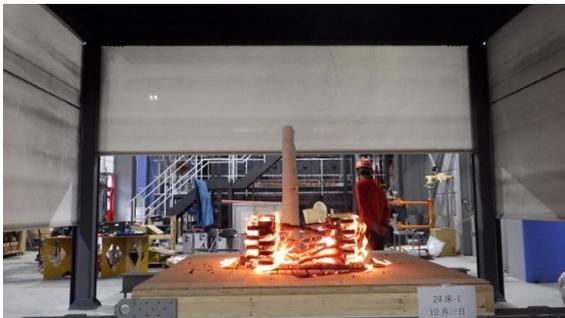


写真 2.4-6-21 着火 20 分後

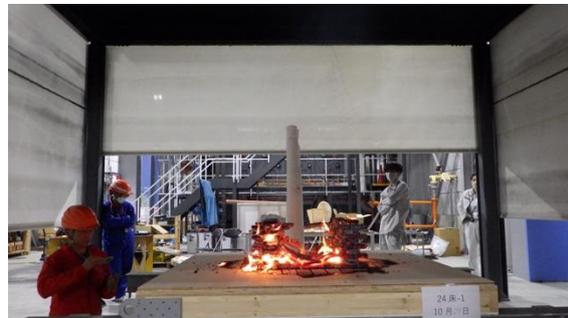


写真 2.4-6-22 着火 25 分後

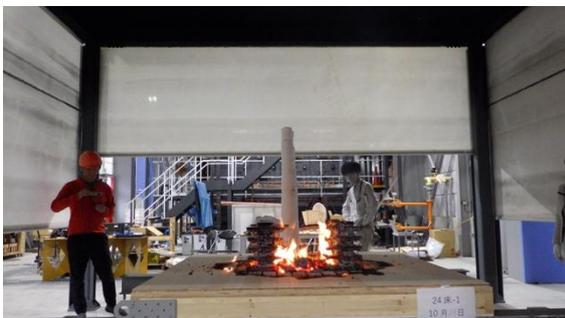


写真 2.4-6-23 着火 30 分後

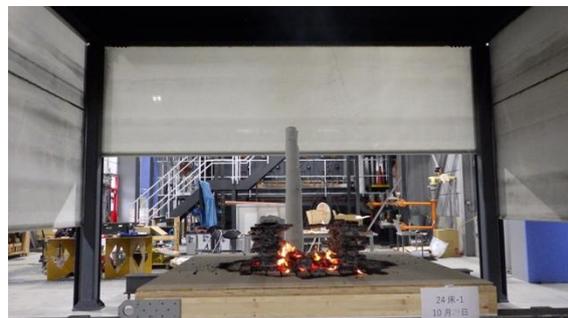


写真 2.4-6-24 着火 35 分後

写真 2.4-6 床実験-1 記録画像 (その 3)



写真 2.4-6-25 着火 40 分後
(計測終了)



写真 2.4-6-26 着火 42 分後
(クリブ撤去)



写真 2.4-6-27 床の燃焼範囲



写真 2.4-6-28 床裏面 燃え抜け状況
実験開始 1 時間 32 分
(加熱終了 40 分 + 放置 52 分)

写真 2.4-6 床実験-1 記録画像 (その 4)



写真 2.4-7-1 実験開始
(着火 0 分)

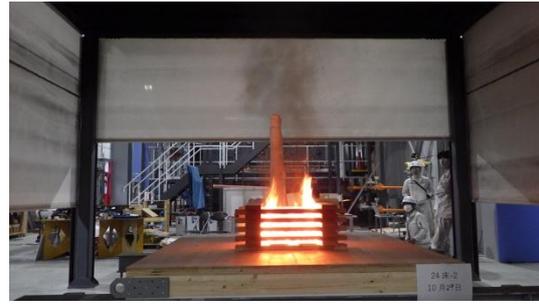


写真 2.4-7-2 着火 1 分後

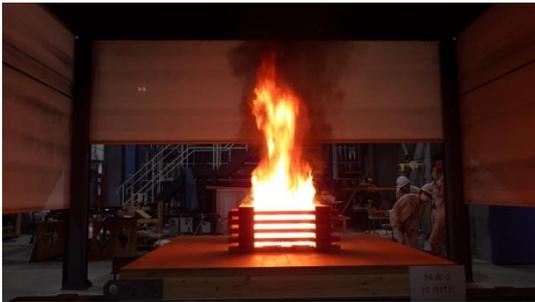


写真 2.4-7-3 着火 2 分後



写真 2.4-7-4 着火 3 分後



写真 2.4-7-5 着火 4 分後

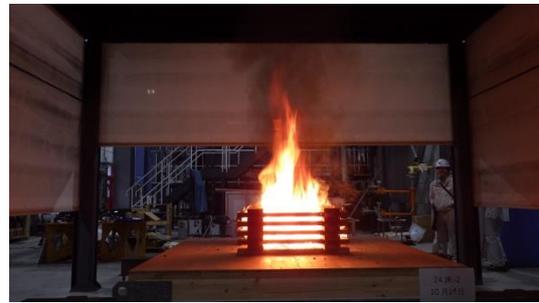


写真 2.4-7-6 着火 5 分後



写真 2.4-7-7 着火 6 分後

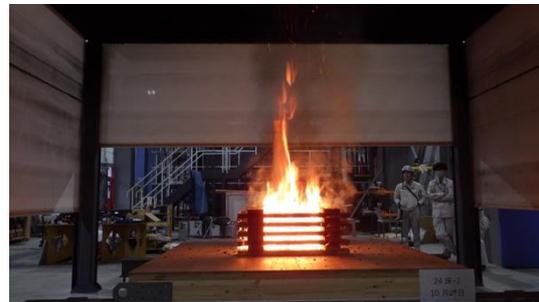


写真 2.4-7-8 着火 7 分後

写真 2.4-7 床実験-2 記録画像 (その 1)

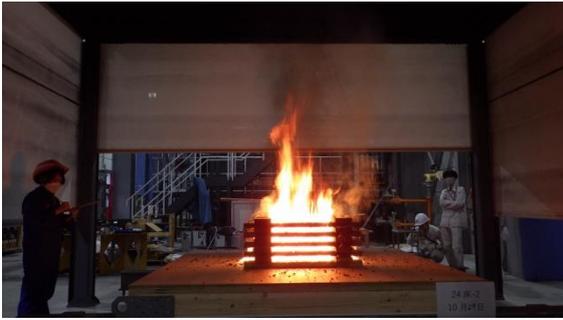


写真 2.4-7-9 着火 8 分後

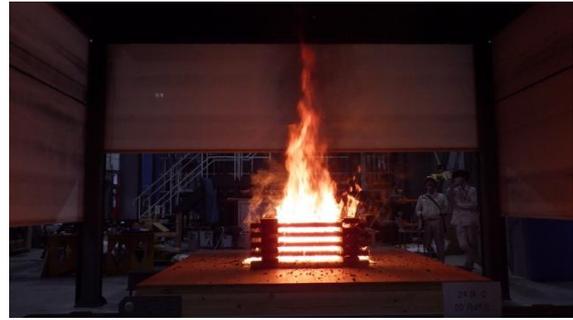


写真 2.4-7-10 着火 9 分後



写真 2.4-7-11 着火 10 分後



写真 2.4-7-12 着火 11 分後



写真 2.4-7-13 着火 12 分後



写真 2.4-7-14 着火 13 分後

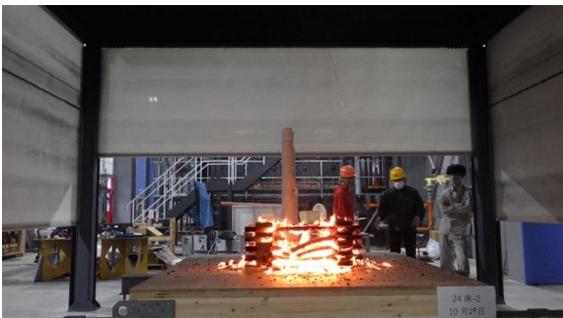


写真 2.4-7-15 着火 14 分後

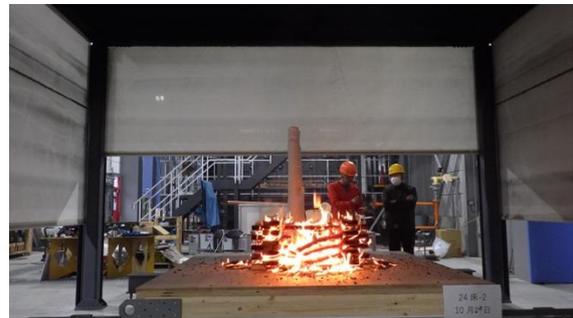


写真 2.4-7-16 着火 15 分後

写真 2.4-7 床実験-2 記録画像 (その 2)



写真 2.4-7-17 着火 16 分後



写真 2.4-7-18 着火 17 分後



写真 2.4-7-19 着火 18 分後

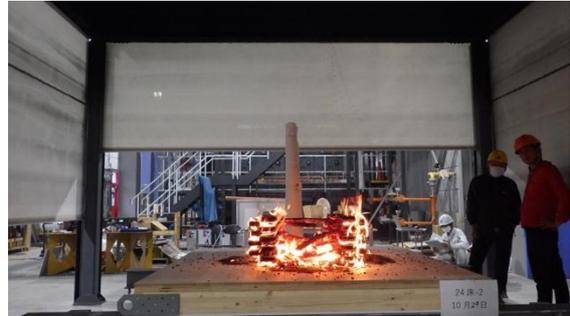


写真 2.4-7-20 着火 19 分後

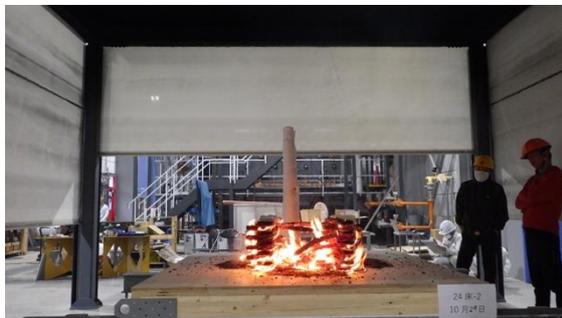


写真 2.4-7-21 着火 20 分後

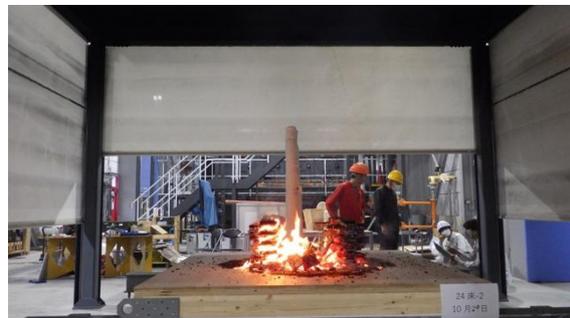


写真 2.4-7-22 着火 25 分後

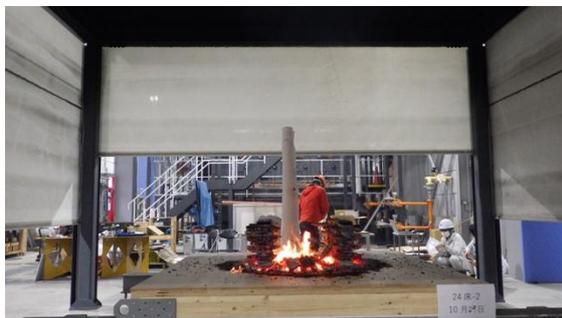


写真 2.4-7-23 着火 30 分後



写真 2.4-7-24 着火 35 分後

写真 2.4-7 床実験-2 記録画像 (その 3)

つづく



写真 2.4-7-25 着火 40 分後
(計測終了)



写真 2.4-7-26 着火 41 分後
(クリブ撤去)



写真 2.4-7-27 床の燃焼範囲

写真 2.4-7 床実験-2 記録画像 (その 4)



写真 2.4-8-1 実験開始
(着火 0 分)

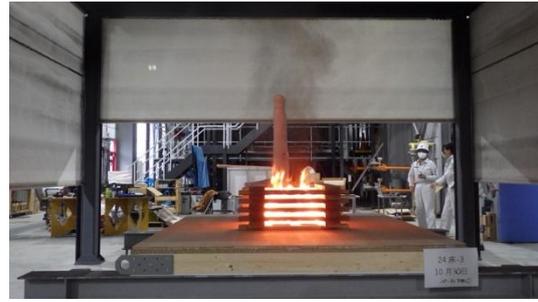


写真 2.4-8-2 着火 1 分後

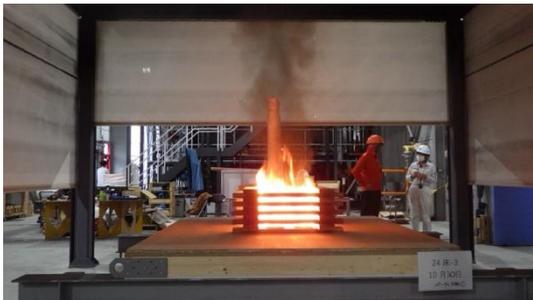


写真 2.4-8-3 着火 2 分後



写真 2.4-8-4 着火 3 分後



写真 2.4-8-5 着火 4 分後



写真 2.4-8-6 着火 5 分後



写真 2.4-8-7 着火 6 分後



写真 2.4-8-8 着火 7 分後

写真 2.4-8 床実験-3 記録画像 (その 1)



写真 2.4-8-9 着火 8 分後



写真 2.4-8-10 着火 9 分後



写真 2.4-8-11 着火 10 分後



写真 2.4-8-12 着火 11 分後



写真 2.4-8-13 着火 12 分後



写真 2.4-8-14 着火 13 分後



写真 2.4-8-15 着火 14 分後



写真 2.4-8-16 着火 15 分後

写真 2.4-8 床実験-3 記録画像 (その 2)



写真 2.4-8-17 着火 16 分後



写真 2.4-8-18 着火 17 分後



写真 2.4-8-19 着火 18 分後



写真 2.4-8-20 着火 19 分後



写真 2.4-8-21 着火 20 分後

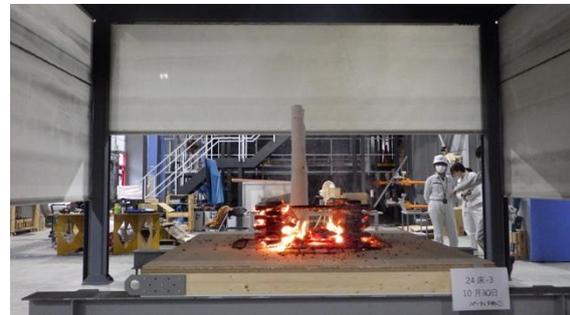


写真 2.4-8-22 着火 25 分後



写真 2.4-8-23 着火 30 分後



写真 2.4-8-24 着火 35 分後

写真 2.4-8 床実験-3 記録画像 (その 3)



写真 2.4-8-25 着火 40 分後
(計測終了)



写真 2.4-8-26 着火 42 分後
(クリブ撤去)



写真 2.4-8-27 床の燃焼範囲

写真 2.4-8 床実験-3 記録画像 (その 4)



写真 2.4-9-1 実験開始
(着火 0 分)



写真 2.4-9-2 着火 1 分後



写真 2.4-9-3 着火 2 分後



写真 2.4-9-4 着火 3 分後



写真 2.4-9-5 着火 4 分後



写真 2.4-9-6 着火 5 分後



写真 2.4-9-7 着火 6 分後



写真 2.4-9-8 着火 7 分後

写真 2.4-9 床実験-4 記録画像 (その 1)



写真 2.4-9-9 着火 8 分後



写真 2.4-9-10 着火 9 分後

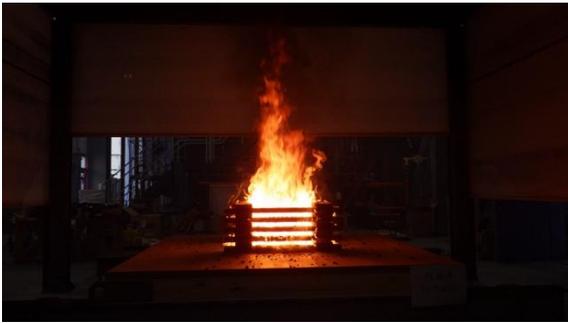


写真 2.4-9-11 着火 10 分後



写真 2.4-9-12 着火 11 分後



写真 2.4-9-13 着火 12 分後



写真 2.4-9-14 着火 13 分後



写真 2.4-9-15 着火 14 分後



写真 2.4-9-16 着火 15 分後

写真 2.4-9 床実験-4 記録画像 (その 2)



写真 2.4-9-17 床実験-4 着火 16 分後



写真 2.4-9-18 床実験-4 着火 17 分後



写真 2.4-9-19 着火 18 分後



写真 2.4-9-20 着火 19 分後



写真 2.4-9-21 着火 20 分後



写真 2.4-9-22 着火 25 分後



写真 2.4-9-23 着火 30 分後



写真 2.4-9-24 着火 35 分後

写真 2.4-9 床実験-4 記録画像 (その 3)



写真 2.4-9-25 着火 40 分後
(計測終了)



写真 2.4-9-26 着火 41 分後
(クリブ撤去)



写真 2.4-9-27 床の燃焼範囲

写真 2.4-9 床実験-4 記録画像 (その 4)

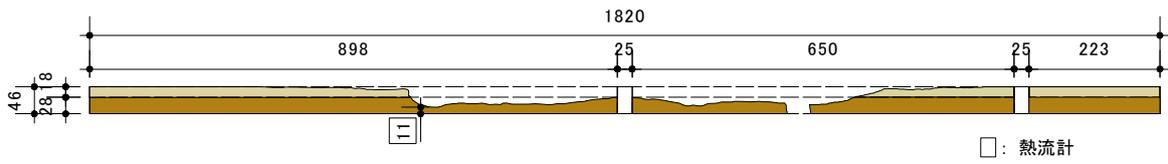


図 2.4-13 (床実験-1) 炭化図・断面

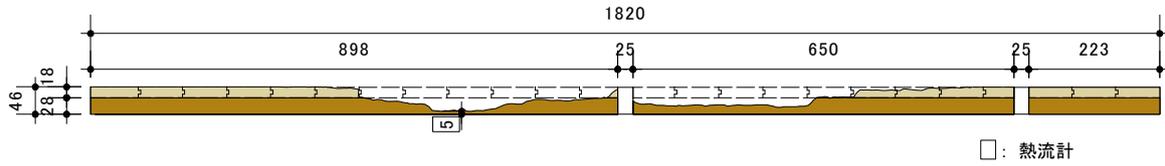


図 2.4-14 (床実験-2) 炭化図・断面

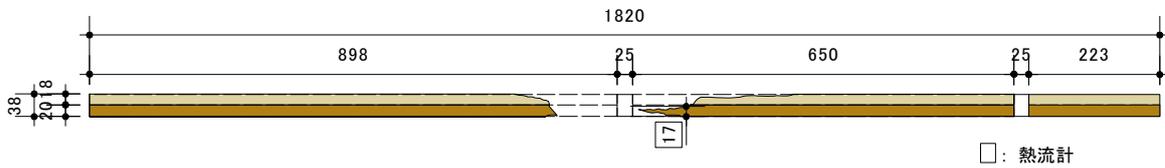


図 2.4-15 (床実験-3) 炭化図・断面

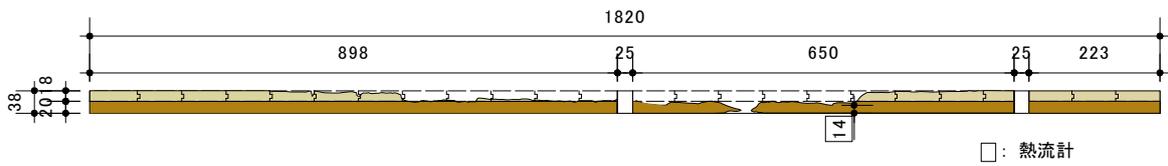


図 2.4-16 (床実験-4) 炭化図・断面

※炭化図の切断位置は、前掲の図 2.4-2,3 の試験体の概要図に示す。

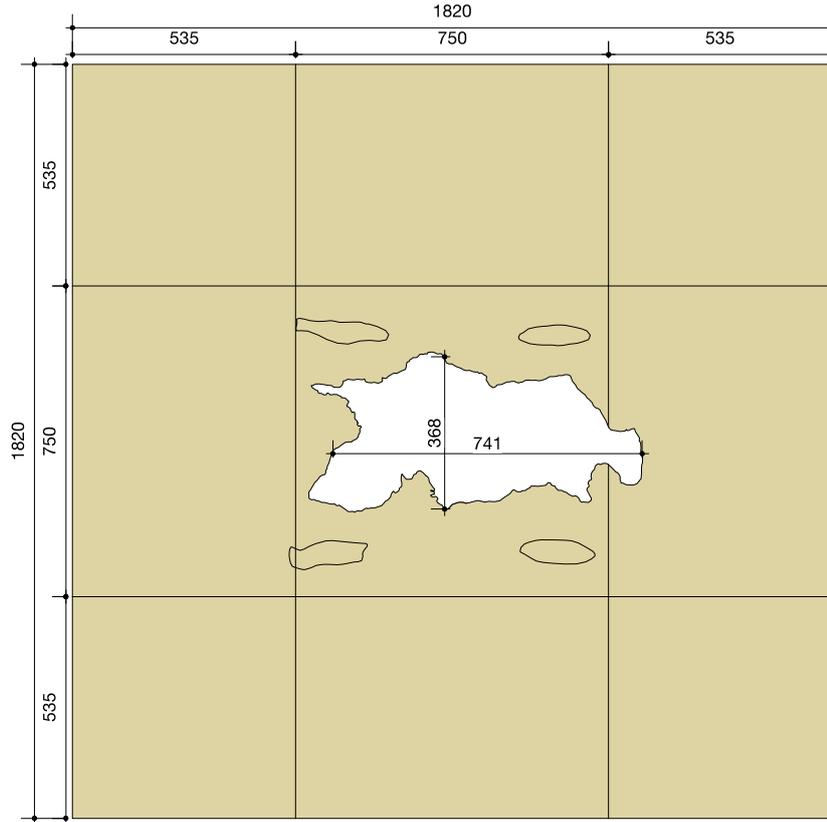


図 2.4-17 炭化図・見下げ (床実験-3)

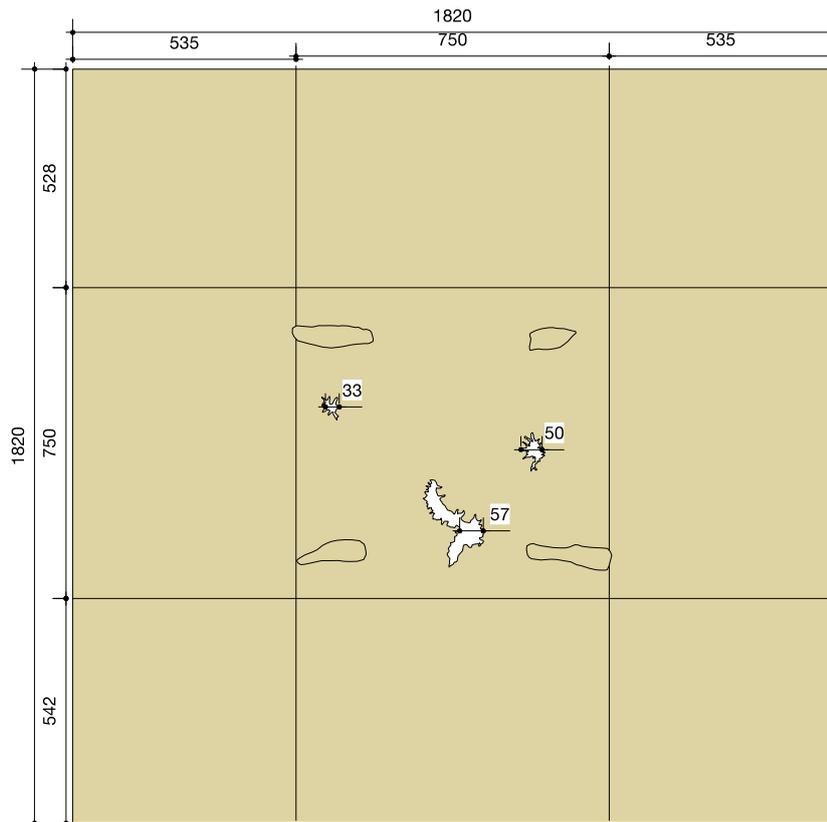


図 2.4-18 炭化図・見下げ (床実験-4)

2.4.5 実験結果-燃え抜け後の床裏の燃え拡がり抑制

発熱速度、温度・熱流速の計測結果および記録画像、炭化図を下記に示す。

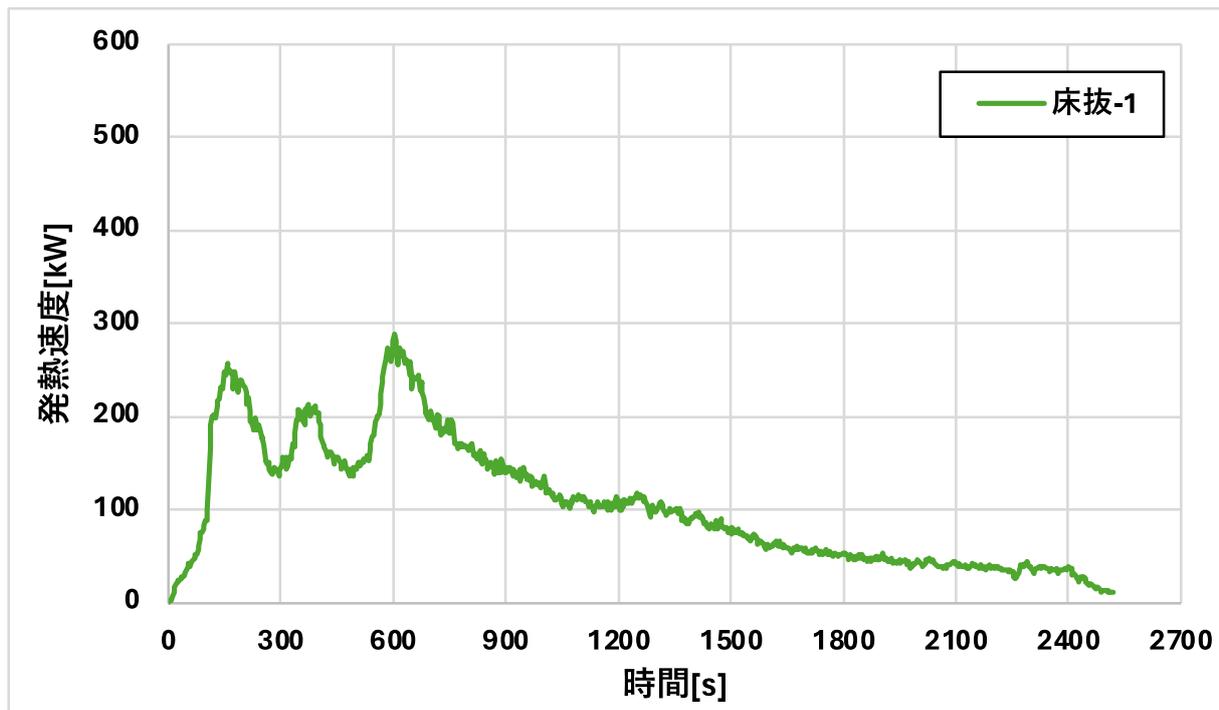


図 2.4-19 発熱速度の推移 (床抜実験-1)

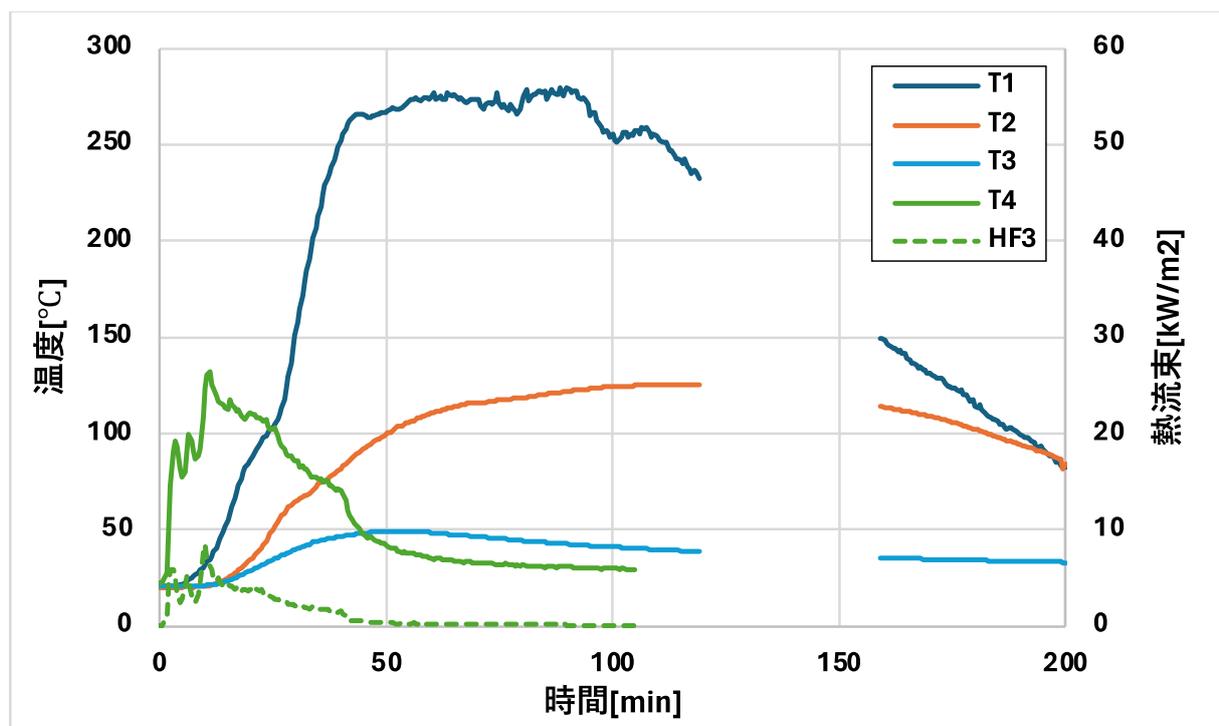


図 2.4-20 温度・熱流束の推移 (床抜実験-1)

※120分から160分はデータ無し



写真 2.4-10-1 実験開始
(着火 0 分)



写真 2.4-10-2 着火 1 分後



写真 2.4-10-3 着火 2 分後



写真 2.4-10-4 着火 3 分後



写真 2.4-10-5 着火 4 分後



写真 2.4-10-6 着火 5 分後



写真 2.4-10-7 着火 6 分後

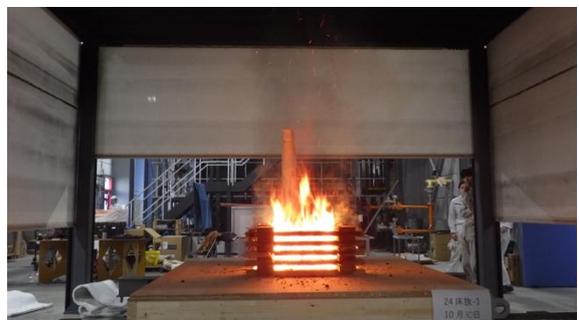


写真 2.4-10-8 着火 7 分後

写真 2.4-10 床抜実験-1 (クリブ 1 段) 記録画像 (その 1)

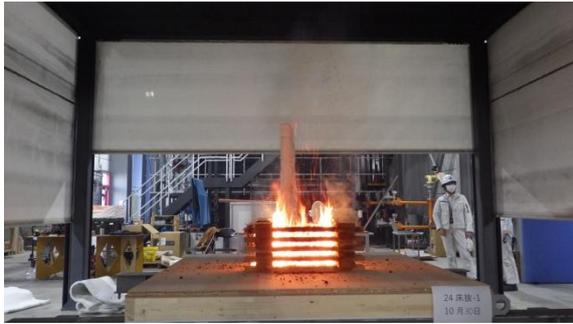


写真 2.4-10-9 着火 8 分後



写真 2.4-10-10 着火 9 分後



写真 2.4-10-11 着火 10 分後



写真 2.4-10-12 着火 11 分後



写真 2.4-10-13 着火 12 分後



写真 2.4-10-14 着火 13 分後

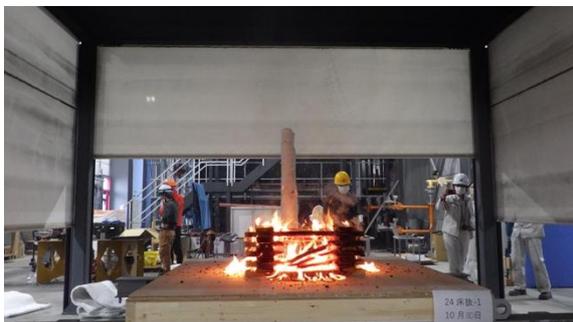


写真 2.4-10-15 着火 14 分後



写真 2.4-10-16 着火 15 分後

写真 2.4-10 床抜実験-1 (クリブ 1 段) 記録画像 (その 2)



写真 2.4-10-17 着火 16 分後



写真 2.4-10-18 着火 17 分後



写真 2.4-10-19 着火 18 分後



写真 2.4-10-20 着火 19 分後



写真 2.4-10-21 着火 20 分後

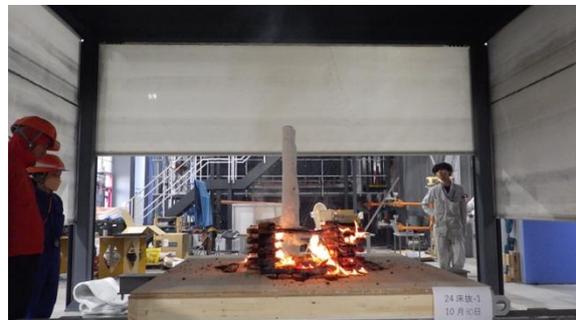


写真 2.4-10-22 着火 25 分後

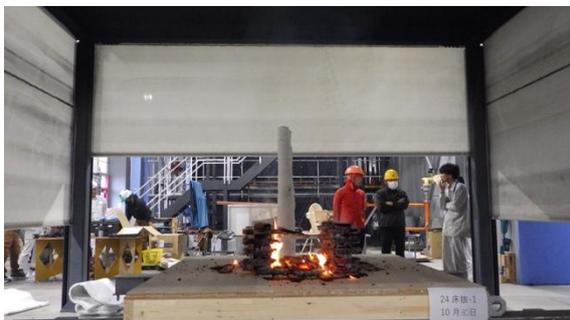


写真 2.4-10-23 着火 30 分後

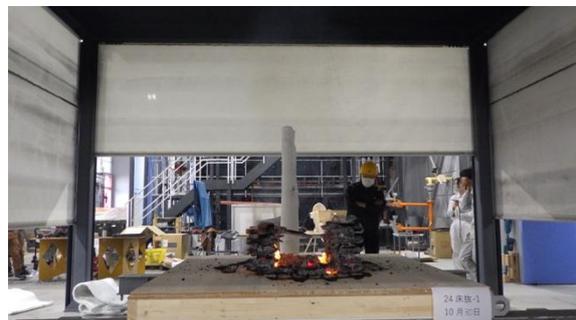


写真 2.4-10-24 着火 35 分後

写真 2.4-10 床抜実験-1 (クリブ 1 段) 記録画像 (その 3)



写真 2.4-10-25 着火 40 分後
(クリブ撤去開始)



写真 2.4-10-26 着火 41 分後
(クリブ撤去完了)



写真 2.4-10-27 着火 70 分後
(写真記録一時停止)



写真 2.4-10-28 着火 194 分後
(実験終了)



写真 2.4-10-29 実験終了後
床内の様子

写真 2.4-10 床抜実験-1 (クリブ 1 段) 記録画像 (その 4)

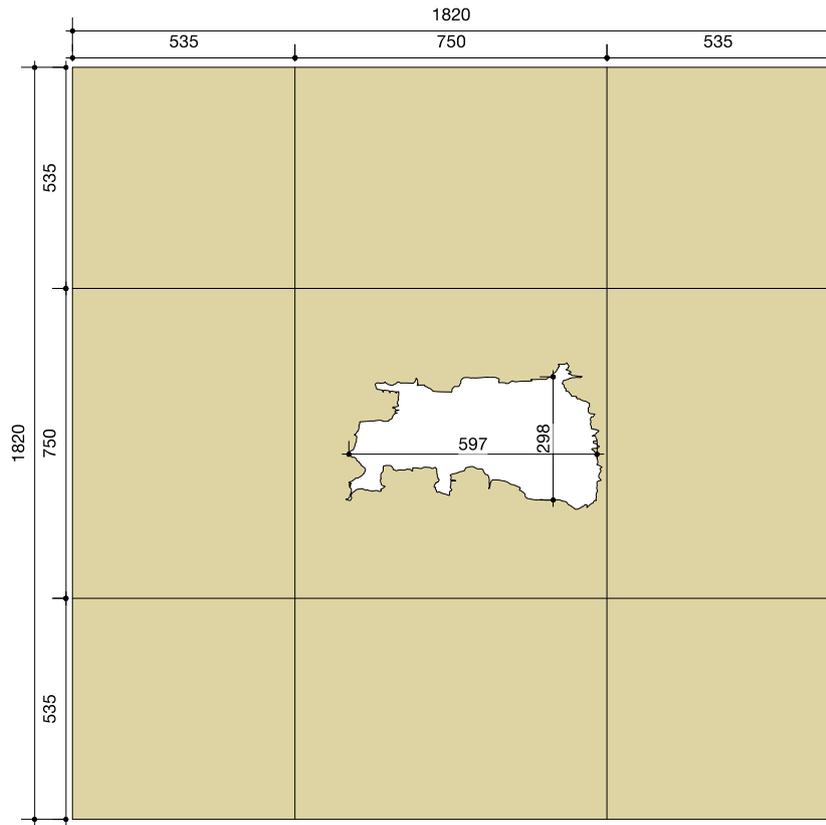


図 2.4-21 炭化図・見下げ（床抜実験-1）

2.5 実験結果～〔実験C〕床上面の燃え拡がり実験

2.5.1 実験概要

2023年度の検証では、一般的な体育館の床材として、針葉樹合板やフローリングなど4仕様の木質床について、床の燃え抜け及び燃え拡がり性状を把握するため、クリブを火源とし、床材及び加熱条件をパラメーターとして燃焼実験を実施した。今年度は、引き続き、体育館の床に用いられる柔道用畳などの燃え拡がり性状について検証する。以下に実験Cの概要を記載する。

表 2.5-1 実験Cの概要

実験C							
実験名	実験日	床材 [mm]	熱源	加熱条件	加熱時間	目的	計測項目
24床上一	12月9日	針葉樹合板28の上に 柔道用畳60	500角バーナー (床材上面)	200kW	20分	床上の燃え拡がり性状	床表面：熱流計2箇所+熱電対2箇所 火炎面：熱流計1箇所+熱電対1箇所 発熱速度 インターバル写真・ビデオ映像

2.5.2 試験体及び実験方法

試験体及び試験装置を図 2.5-1、写真 2.5-1,2 に示す。床試験体の外形は、W 1820×D1820mm とした。床材は、柔道用の公式畳

(<https://www.kusakura.co.jp/product/629/>) とし、試験体の中心に 500mm×500mm のプロパンガスを燃料とするバーナーを設置し 20 分間燃焼させた。

その際、水冷式熱流束計（フランジ無しタイプのシュミッド・ボエルター型、Hukseflux 社製、品番：CHF-SBG03-200、常用測定レンジ 200kW/m²、最高測定レンジ 300kW/m²）と K タイプの CA 熱電対を床への入射熱測定用に 2 箇所に設置して、熱流束及びその付近の温度（熱流計端部より 10mm の位置）を測定した。また、発熱速度を試験体上部に設けたフードを用いて、酸素消費法により測定するとともに、目視による観察、ビデオ及びカメラによる撮影を行った。

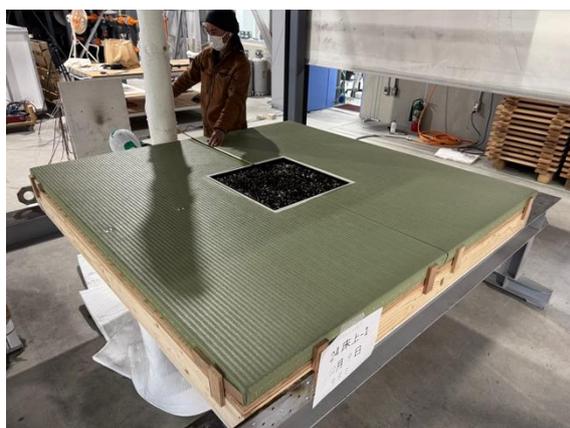


写真 2.5-1 実験 C の試験装置全景



写真 2.5-2 柔道用畳の断面

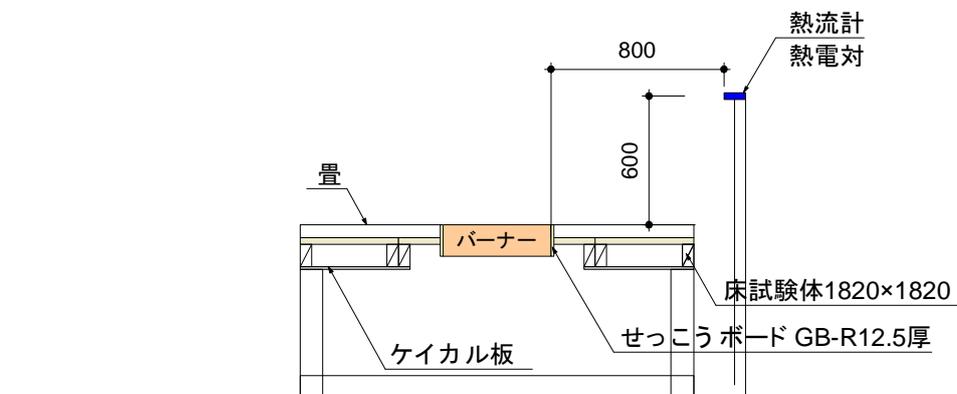
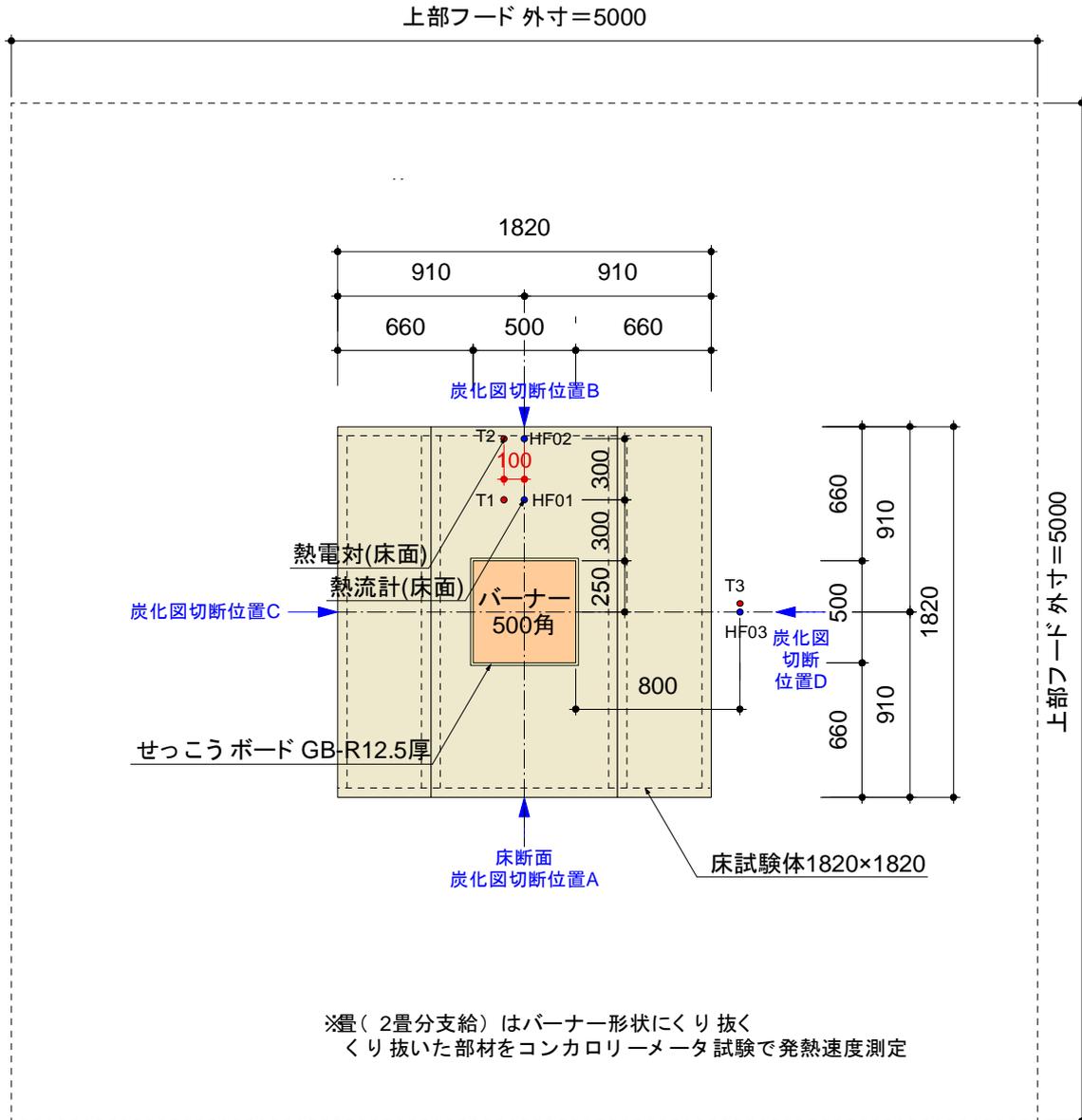


図 2.5-1 床上実験-1 の試験装置及び試験体概要図 (単位: mm)

2.5.3 実験結果-床上の燃え拡がり（柔道用畳）

発熱速度、温度・熱流速の計測結果および実験の記録画像、炭化図を下記に示す。本実験では、加熱開始 3 分 10 秒程度で畳表面に着火し、試験体中央のバーナー火源から放射状に畳内部を燃え拡がり、開始 40 分後に畳裏面に火炎がまわり自消が見込めないため、実験を終了した。

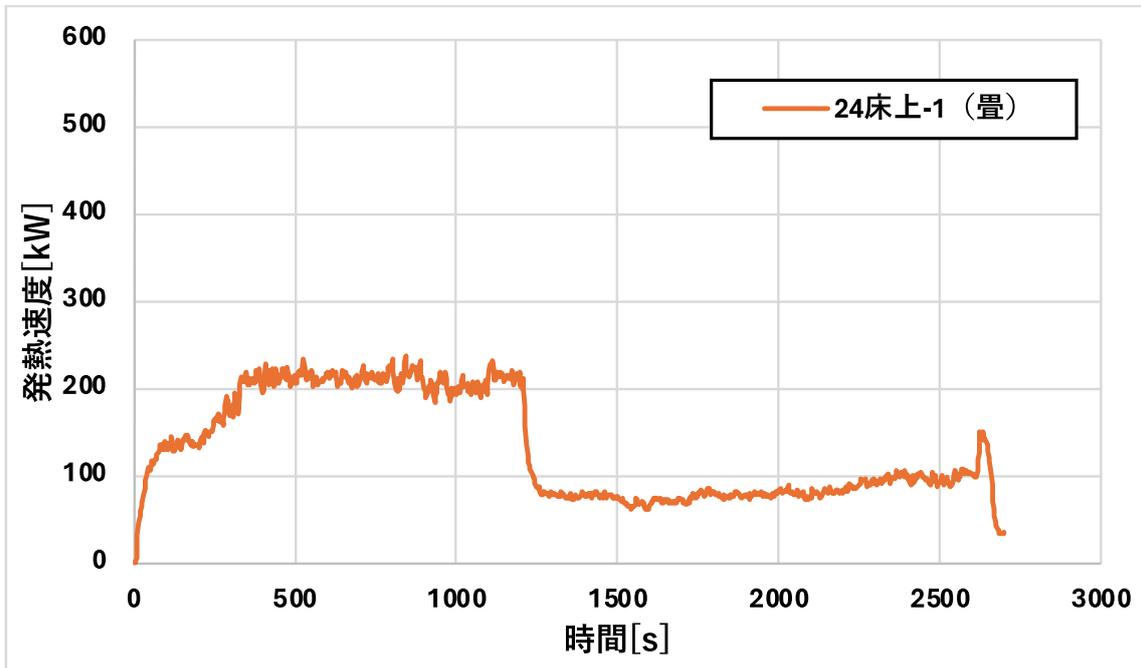


図 2.5-2 発熱速度の推移

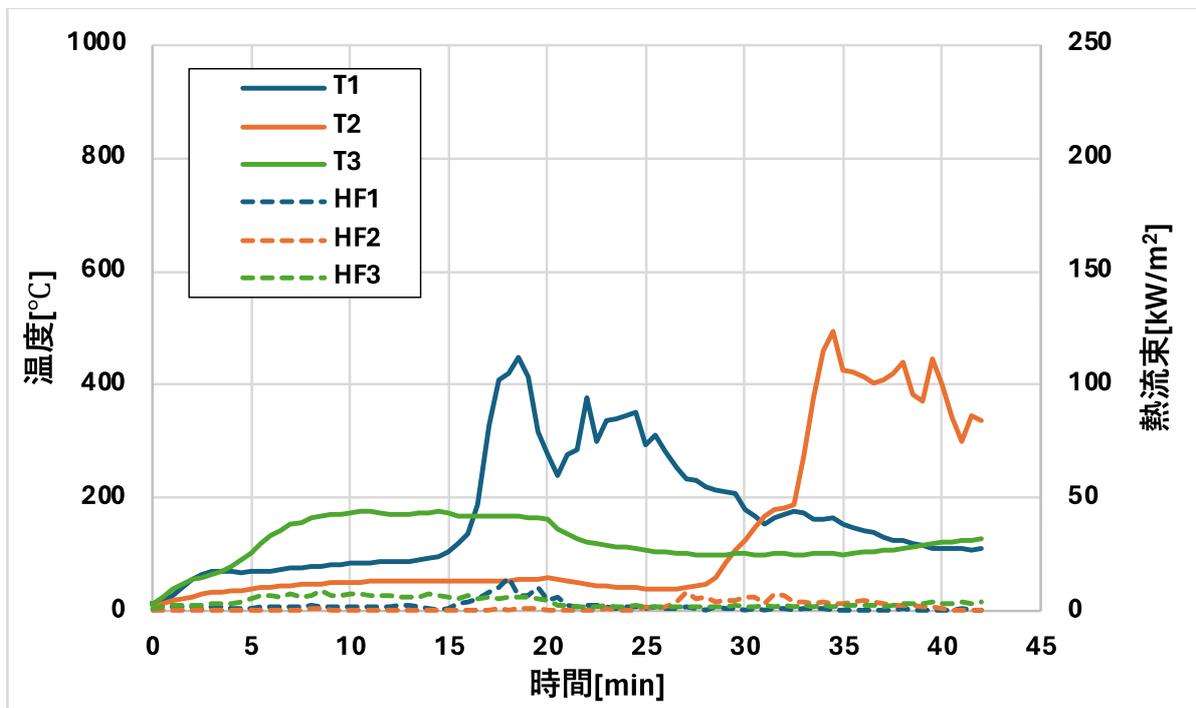


図 2.5-3 温度・熱流速の推移



写真 2.5-3-1 実験開始時
(着火 0 分)



写真 2.5-3-2 着火 1 分後



写真 2.5-3-3 着火 2 分後



写真 2.5-3-4 着火 3 分後



写真 2.5-3-5 着火 4 分後



写真 2.5-3-6 着火 5 分後



写真 2.5-3-7 着火 6 分後



写真 2.5-3-8 着火 7 分後

写真 2.5-3 床上実験・柔道用畳 記録画像 (その 1)



写真 2.5-3-9 着火 8 分後



写真 2.5-3-10 着火 9 分後



写真 2.5-3-11 着火 10 分後



写真 2.5-3-12 着火 11 分後



写真 2.5-3-13 着火 12 分後



写真 2.5-3-14 着火 13 分後



写真 2.5-3-15 着火 14 分後



写真 2.5-3-16 着火 15 分後

写真 2.5-3 床上実験・柔道用畳 記録画像 (その 2)



写真 2.5-3-17 着火 16 分後



写真 2.5-3-18 着火 17 分後



写真 2.5-3-19 着火 18 分後



写真 2.5-3-20 着火 19 分後



写真 2.5-3-21 着火 20 分後



写真 2.5-3-22 着火 21 分後



写真 2.5-3-23 着火 22 分後



写真 2.5-3-24 着火 23 分後

写真 2.5-3 床上実験・柔道用畳 記録画像 (その 3)



写真 2.5-3-25 着火 24 分後



写真 2.5-3-26 着火 25 分後



写真 2.5-3-27 着火 26 分後



写真 2.5-3-28 着火 27 分後



写真 2.5-3-29 着火 28 分後



写真 2.5-3-30 着火 29 分後



写真 2.5-3-31 着火 30 分後



写真 2.5-3-32 着火 31 分後

写真 2.5-3 床上実験・柔道用畳 記録画像 (その 4)



写真 2.5-3-33 着火 32 分後



写真 2.5-3-34 着火 33 分後



写真 2.5-3-35 着火 34 分後



写真 2.5-3-36 着火 35 分後



写真 2.5-3-37 着火 36 分後



写真 2.5-3-38 着火 37 分後



写真 2.5-3-39 着火 38 分後



写真 2.5-3-40 着火 39 分後



写真 2.5-3-41 着火 40 分後 (実験終了)

写真 2.5-3 床上実験・柔道用畳 記録画像 (その 5)

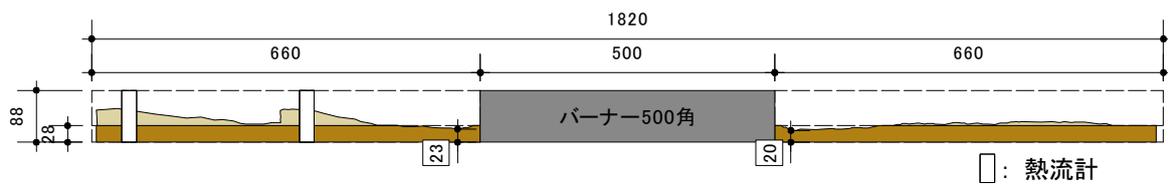


図 2.5-4 炭化図・断面（床上実験・サンプル A-B）

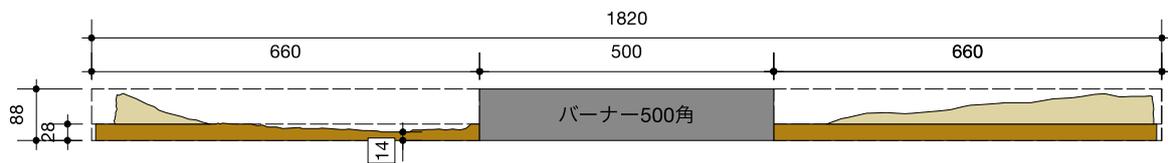


図 2.5-5 炭化図・断面（床上実験・サンプル C-D）

※炭化図の切断位置は、前掲の図 2.5-1 の試験体の概要図に示す。

2.6 実験結果～〔実験 D〕壁上方への燃え拡がり実験

2.6.1 実験概要

本実験では、体育館等の空間に想定される木質系の壁について、仕上げ材に用いる木材の樹種をパラメータとし、壁の下方から上方（側方）への燃え拡がりを検証（壁実験-1,2）した。また、壁内へ燃え抜け際の燃え拡がり抑制についても確認した（壁実験-3）。なお、これらの壁実験に先立ち、予備実験としてガスバーナーの発熱速度、壁への熱流束を把握するブランク試験を実施した。表 2.6-1 に実験 D の概要一覧を記載する。

表 2.6-1 実験 D の概要一覧

実験 D							
実験名	実験日	床材 [mm]	熱源	加熱条件	加熱時間	目的	計測項目
24壁-B	12月9日	ケイカル板12	500角バーナー (床上)	200kW	20分	発熱速度測定 (ブランク実験)	壁表面：熱流計4箇所+熱電対4箇所 発熱速度 インターバル写真・ビデオ映像
24壁-1	12月11日	構造用合板9の上に スギ12(動き幅102) +グラスウール16K105充てん	500角バーナー (床上)	200kW	20分	壁上方への燃え拡がり (スギ材)	壁表面：熱流計4箇所+熱電対4箇所 発熱速度 インターバル写真・ビデオ映像
24壁-2		構造用合板9の上に ヒノキ12(動き幅87) +グラスウール16K105充てん				壁上方への燃え拡がり (ヒノキ材)	
24壁-3		構造用合板9の上に スギ12(動き幅102) +ファイヤーストップ45×105設置				壁上方への燃え拡がり (スギ材)	

2.6.2 試験体及び実験方法

試験体及び試験装置を図 2.6-1,2、写真 2.6-1 に示す。壁試験体の外形は、W 1820×H3185mm とした。壁の構成は、構造用合板 9mm 厚の上にスギまたはヒノキの仕上げ材 12mm 厚（本実板横張り）とし、壁実験-1,2 はグラスウール 16K105 厚を充填した。また壁実験-3 は、壁内にファイヤーストップ 45×105mm を設けた。

実験の加熱は、局所火源火災で一般的に想定される代表火源である、代表寸法 1.5m×1.5m、3MW の火源と無次元発熱速度が同じとなるように、プロパンガスを燃料とするバーナー（500mm×500mm）で 200kW（実発熱速度は 150kW であった）を火源として 20 分間燃焼させ、壁の燃え拡がり性状を確認した。

その際、水冷式熱流束計（フランジ無しタイプのシュミッド・ボエルター型、Hukseflux 社製、品番：CHF-SBG03-200、常用測定レンジ 200kW/m²、最高測定レンジ 300kW/m²）と K タイプの CA 熱電対を壁への入射熱測定用に試験体中央の高さ方向に 4 箇所に設置し、熱流束及びその付近の温度（熱流計端部より 10mm の位置）を測定した。また、同位置の試験体裏面についても、K タイプの CA 熱電対を設置し裏面温度を測定した。発熱速度は、試験体上部に設けたフードを用いて、酸素消費法により測定するとともに、目視による観察、ビデオ及びカメラによる撮影を行った。

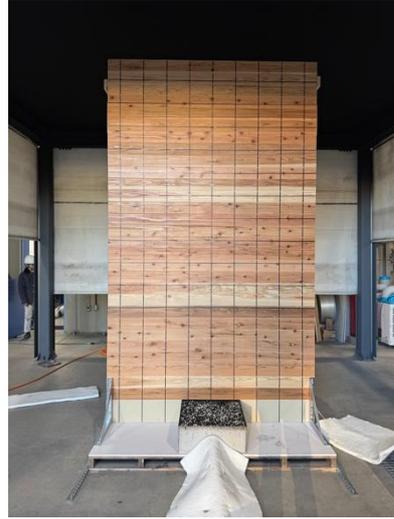


写真 2.6-1 実験 D の試験体及び試験装置全景
(左：ブランク実験・右：壁-1)

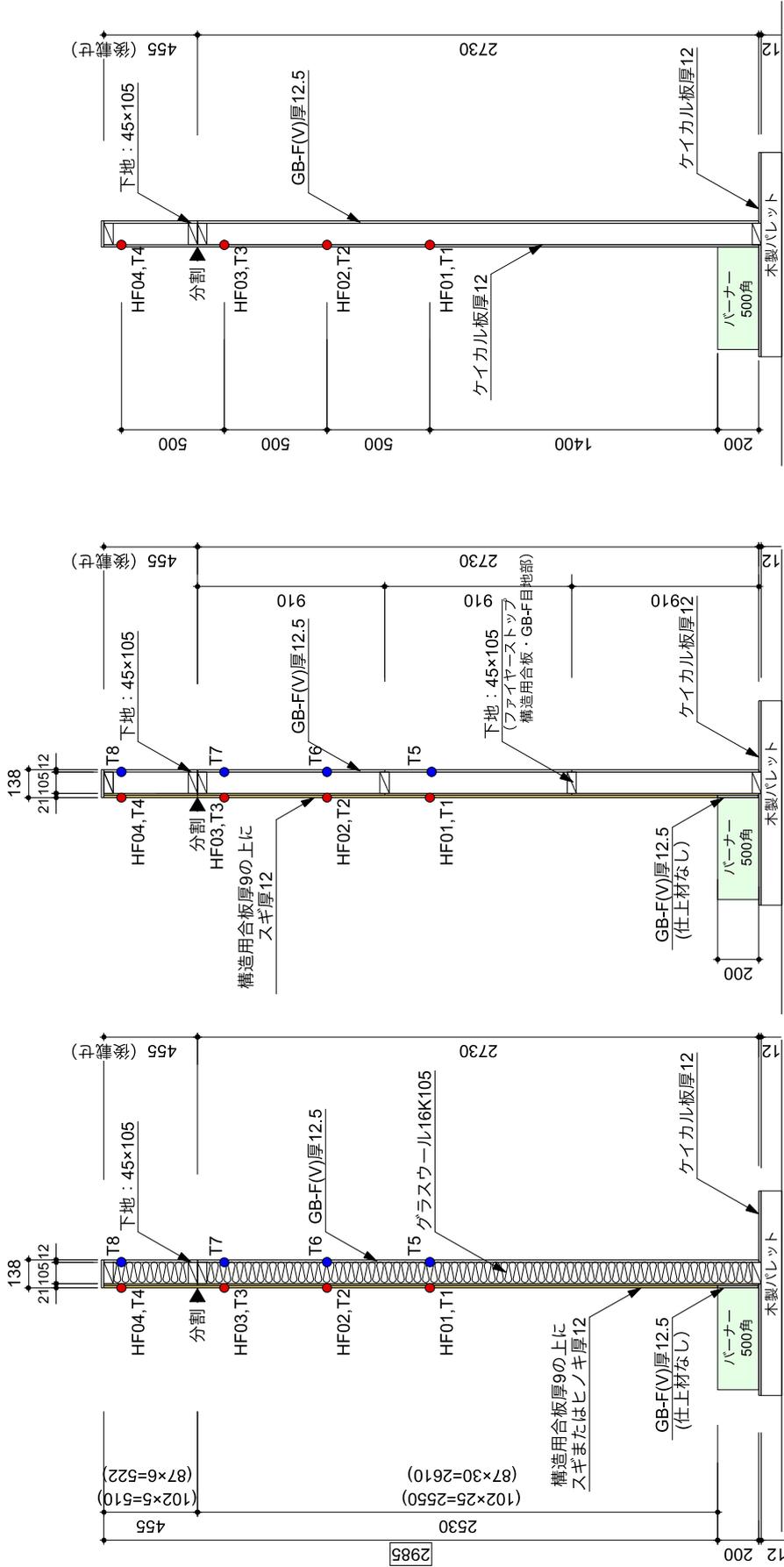


図 2.6-2 壁実験の試験体概要図・断面 (単位: mm)

24壁-B (ブランク)

24壁-3 (スギ仕上げ)

24壁-1 (スギ仕上げ)
24壁-2 (ヒノキ仕上げ)

ファイヤーストープ仕様

ガラスウール充填仕様

2.6.3 実験結果-壁ブランク実験

壁ブランク試験の発熱速度、温度・熱流速の計測結果および実験の記録画像を以降に示す。

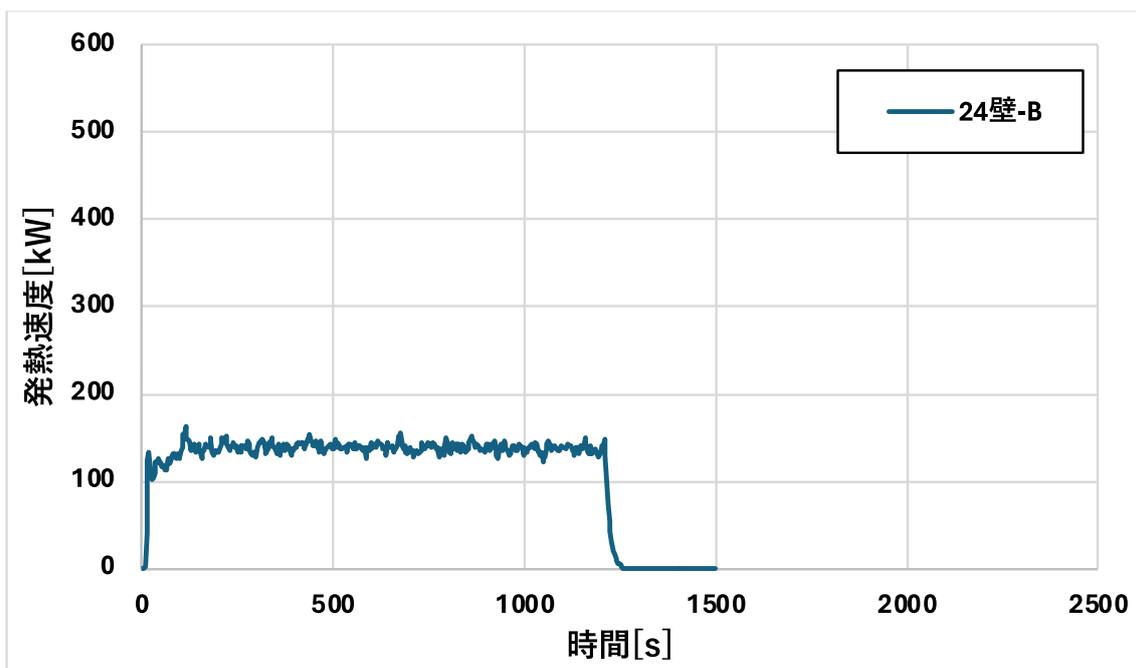


図 2.6-3 発熱速度の推移 (壁ブランク実験)

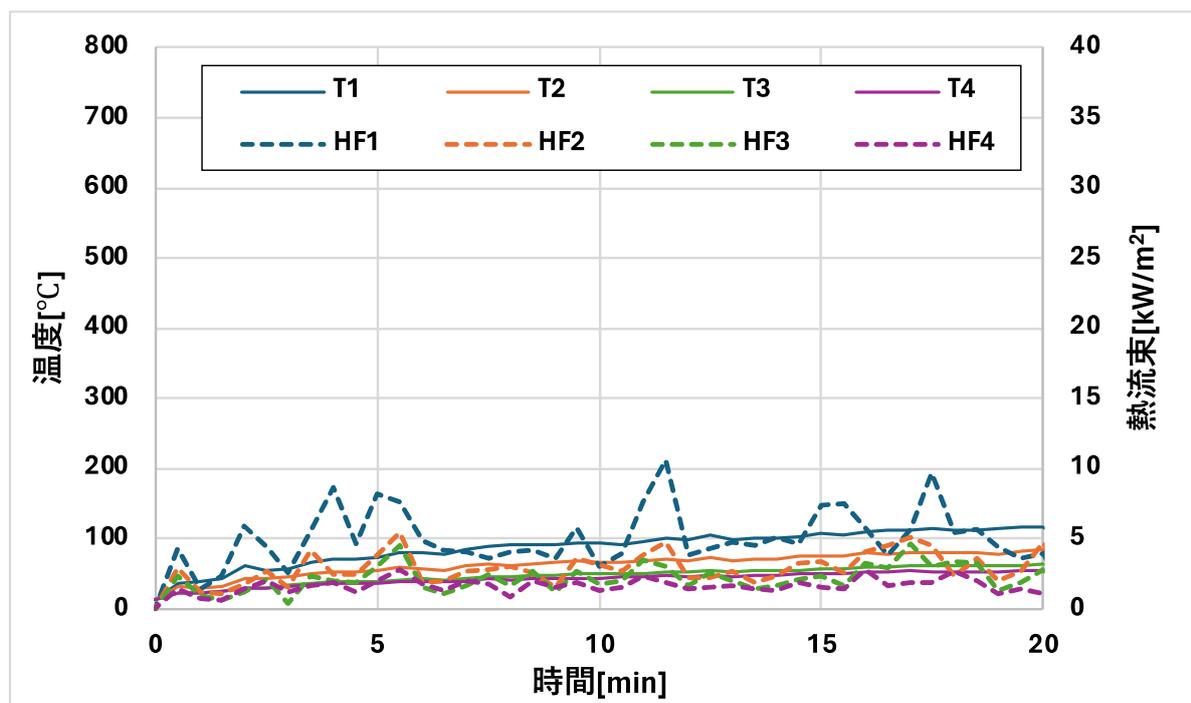


図 2.6-4 温度・熱流速の推移 (壁ブランク実験)



写真 2.6-2-1 実験開始時
(着火 0 分)



写真 2.6-2-2 着火 1 分後



写真 2.6-2-3 着火 2 分後



写真 2.6-2-4 着火 3 分後



写真 2.6-2-5 着火 4 分後



写真 2.6-2-6 着火 5 分後

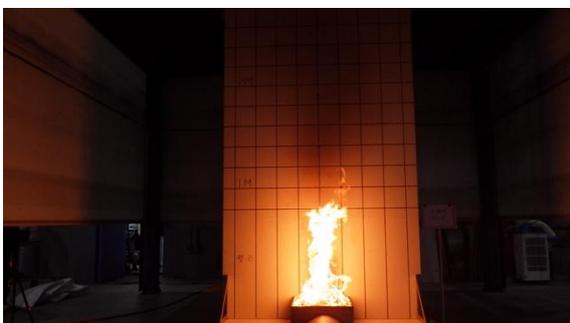


写真 2.6-2-7 着火 6 分後

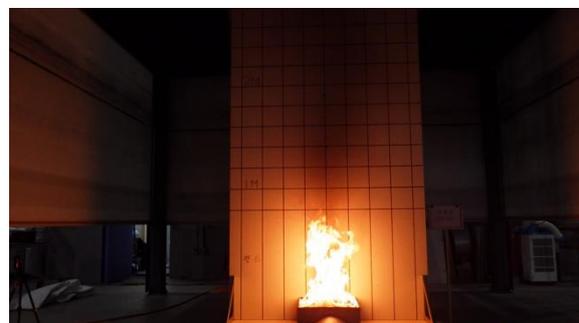


写真 2.6-2-8 着火 7 分後

写真 2.6-2 壁ブランク実験 記録画像 (その 1)



写真 2.6-2-9 着火 8 分後



写真 2.6-2-10 着火 9 分後



写真 2.6-2-11 着火 10 分後



写真 2.6-2-12 着火 11 分後



写真 2.6-2-13 着火 12 分後



写真 2.6-2-14 着火 13 分後



写真 2.6-2-15 着火 14 分後



写真 2.6-2-16 着火 15 分後

写真 2.6-2 壁ブランク実験 記録画像 (その 2)



写真 2.6-2-17 着火 16 分後



写真 2.6-2-18 着火 17 分後



写真 2.6-2-19 着火 18 分後



写真 2.6-2-20 着火 19 分後



写真 2.6-2-21 着火 20 分後
(実験終了)

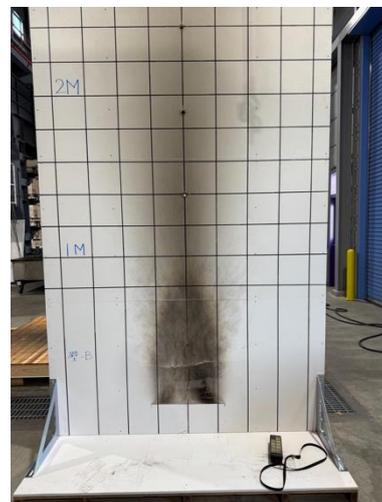


写真 2.6-2-22 着火 30 分後
(実験終了後)

写真 2.6-2 壁ブランク実験 記録画像 (その 3)

2.6.4 実験結果-壁上方への燃え拡がり

壁実験-1～3の発熱速度、温度・熱流速の計測結果、実験ごとの記録画像、炭化図を以降に示す。試験体表面は、プロパンガスバーナーの火炎が接する高さ1m程度まで上方へ燃え、燃え抜けて壁内部へ延焼した。ただし、壁表面は、より高い上方や横方向への燃え拡がりみられず、不燃系断熱材充てんまたは木製のファイヤーストップにより、内部の燃え拡がりも限定的であった。

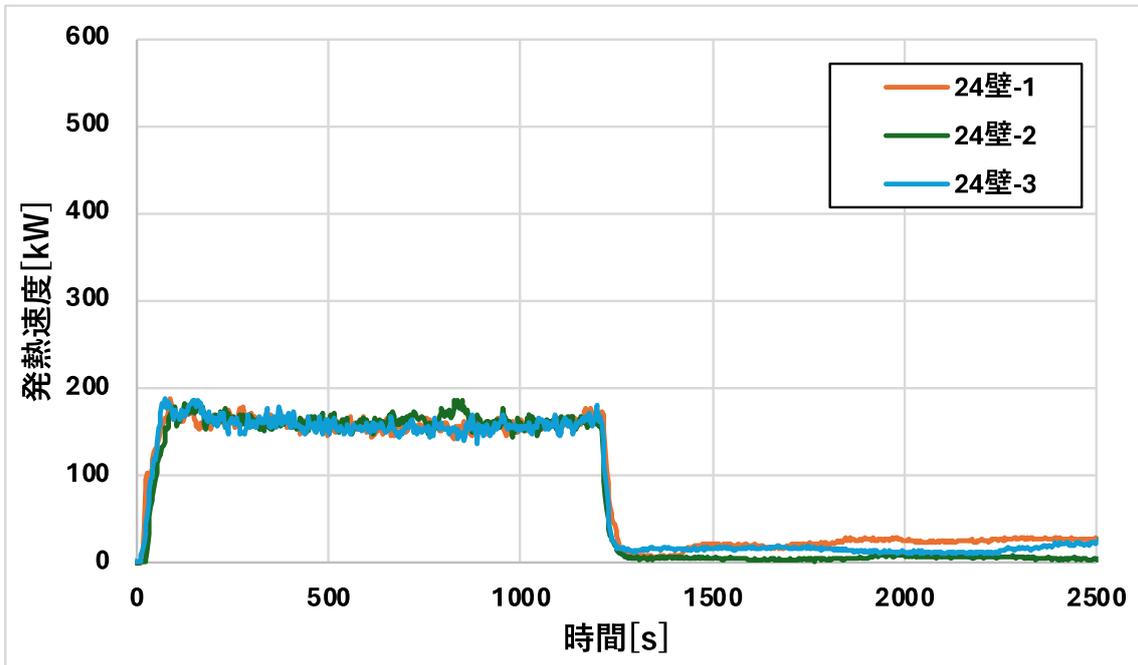


図 2.6-5 発熱速度の推移（壁実験-1,2,3）

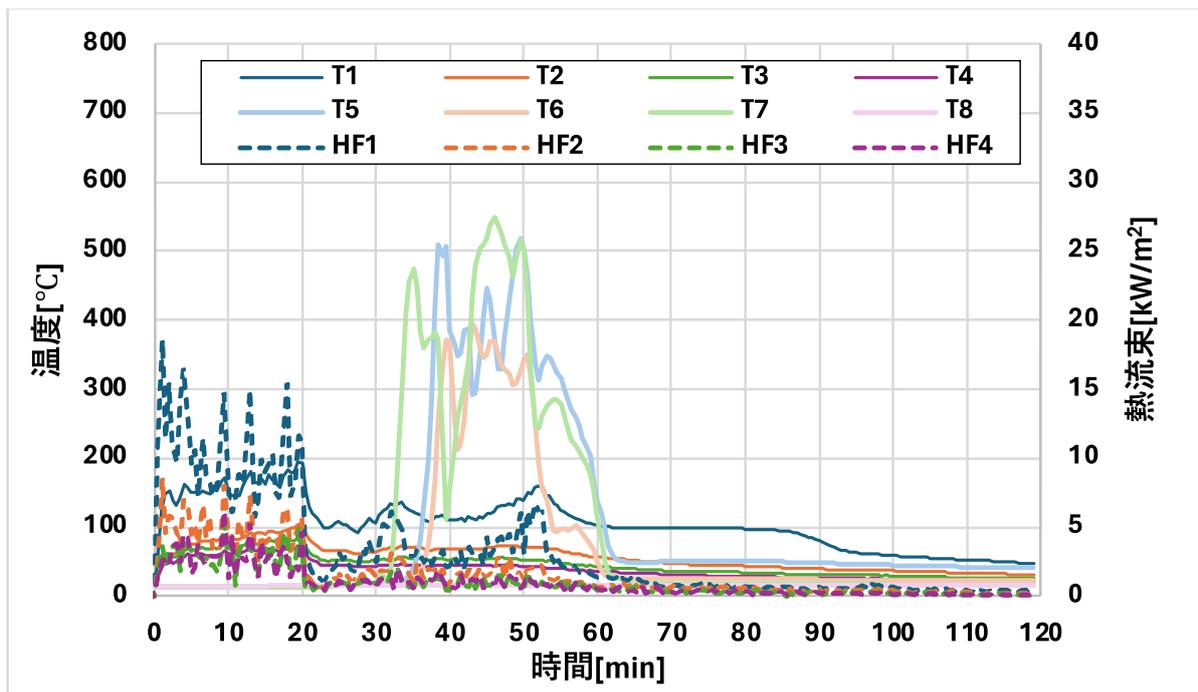


図 2.6-6 温度・熱流速の推移（壁実験-1）

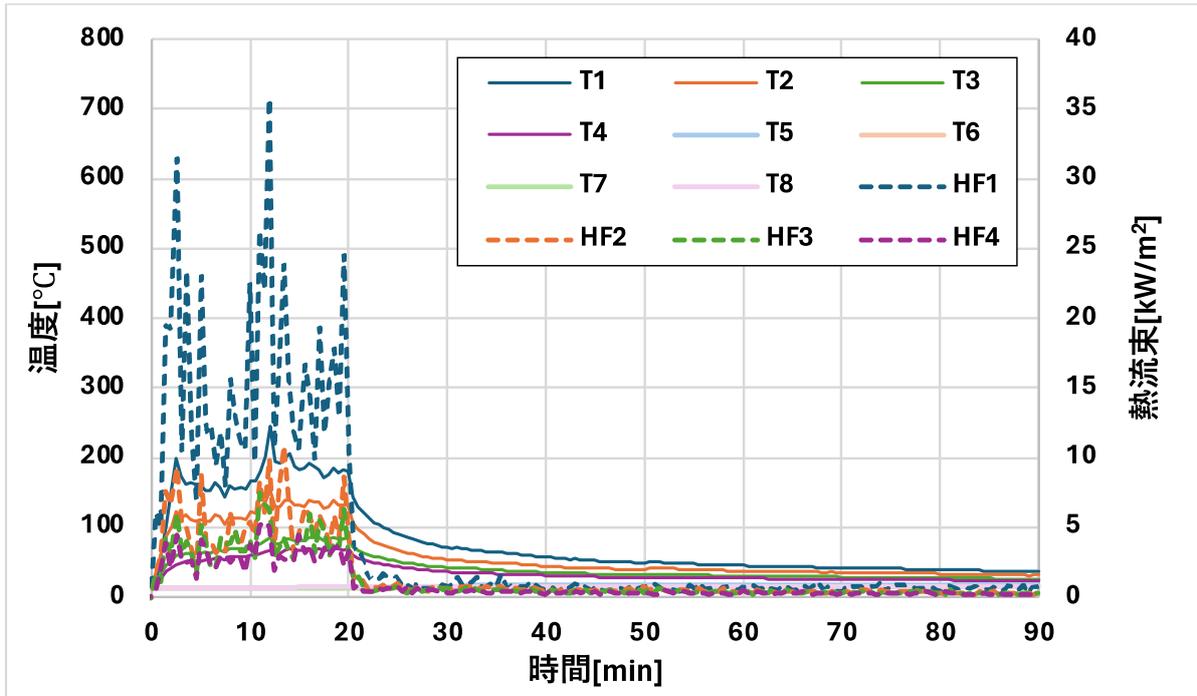


図 2.6-7 温度・熱流速の推移（壁実験-2）

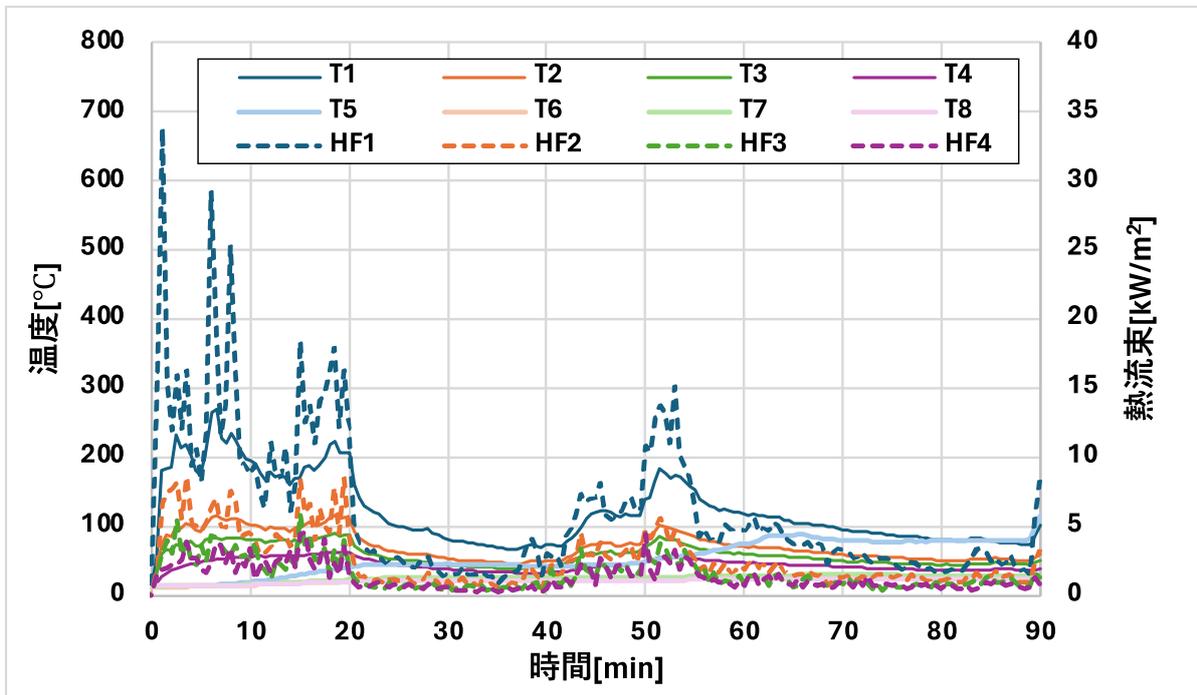


図 2.6-8 温度・熱流速の推移（壁実験-3）



写真 2.6-3-1 実験開始時
(着火 0 分)



写真 2.6-3-2 着火 1 分後



写真 2.6-3-3 着火 2 分後



写真 2.6-3-4 着火 3 分後

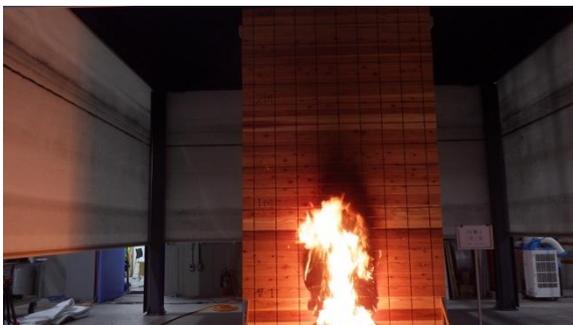


写真 2.6-3-5 着火 4 分後



写真 2.6-3-6 着火 5 分後



写真 2.6-3-7 着火 6 分後



写真 2.6-3-8 着火 7 分後

写真 2.6-3 壁実験-1 記録画像 (その 1)



写真 2.6-3-9 着火 8 分後



写真 2.6-3-10 着火 9 分後



写真 2.6-3-11 着火 10 分後



写真 2.6-3-12 着火 11 分後



写真 2.6-3-13 着火 12 分後



写真 2.6-3-14 着火 13 分後



写真 2.6-3-15 着火 14 分後



写真 2.6-3-16 着火 15 分後

写真 2.6-3 壁実験-1 記録画像 (その 2)



写真 2.6-3-17 着火 16 分後



写真 2.6-3-18 着火 17 分後



写真 2.6-3-19 着火 18 分後



写真 2.6-3-20 着火 19 分後



写真 2.6-3-21 着火 20 分後
(バーナー消火)



写真 2.6-3-22 着火 21 分後
(バーナー消火直後)



写真 2.6-3-23 着火 30 分後



写真 2.6-3-24 着火 45 分後

写真 2.6-3 壁実験-1 記録画像 (その 3)



写真 2.6-3-25 着火 60 分後



写真 2.6-3-26 着火 75 分後



写真 2.6-3-27 着火 90 分後



写真 2.6-3-28 着火 105 分後



写真 2.6-3-29 着火 118 分後

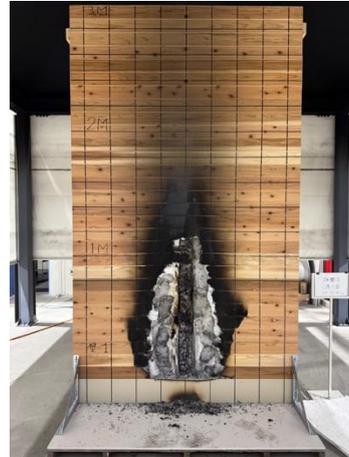


写真 2.6-3-30 着火 223 分後
(木材仕上げ燃え止まり・実験終了)



写真 2.6-3-31 着火 225 分後
(実験終了時柱のみ注水消火後)

写真 2.6-3 壁実験-1 記録画像 (その 4)



写真 2.6-4-1 実験開始時
(着火)



写真 2.6-4-2 着火 1 分後



写真 2.6-4-3 着火 2 分後



写真 2.6-4-4 着火 3 分後

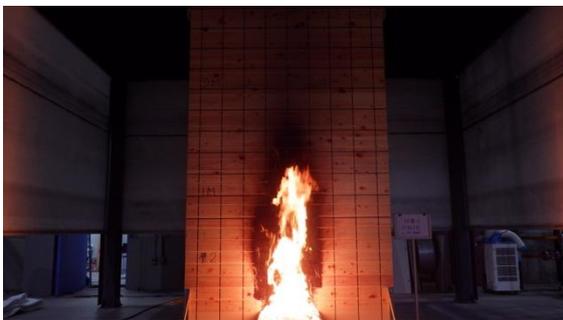


写真 2.6-4-5 着火 4 分後

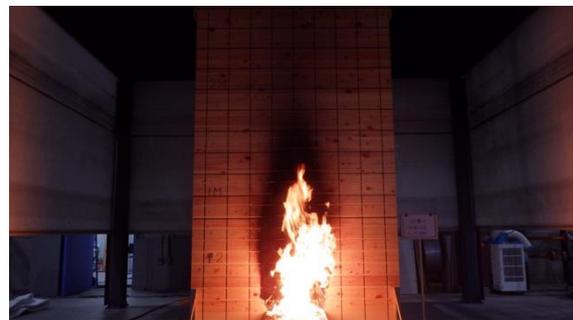


写真 2.6-4-6 着火 5 分後



写真 2.6-4-7 着火 6 分後



写真 2.6-4-8 着火 7 分後

写真 2.6-4 壁実験-2 記録画像 (その 1)



写真 2.6-4-9 着火 8 分後



写真 2.6-4-10 着火 9 分後



写真 2.6-4-11 着火 10 分後



写真 2.6-4-12 着火 11 分後

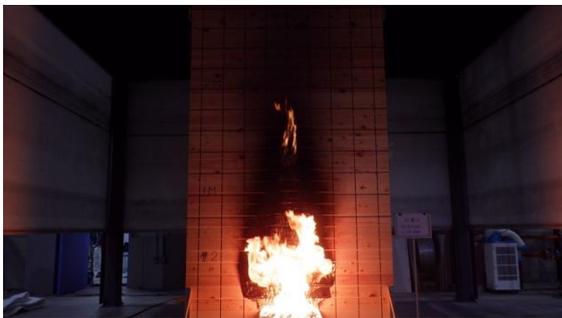


写真 2.6-4-13 着火 12 分後



写真 2.6-4-14 着火 13 分後

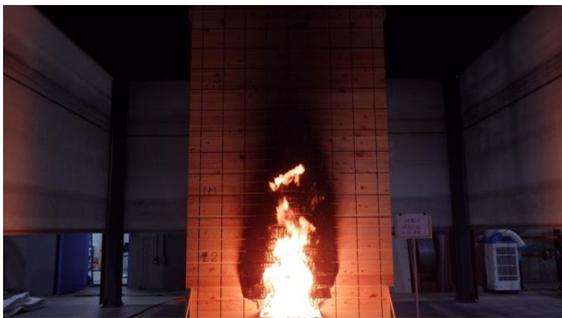


写真 2.6-4-15 着火 14 分後



写真 2.6-4-16 着火 15 分後

写真 2.6-4 壁実験-2 記録画像 (その 2)



写真 2.6-4-17 着火 16 分後



写真 2.6-4-18 着火 17 分後



写真 2.6-4-19 着火 18 分後



写真 2.6-4-20 着火 19 分後

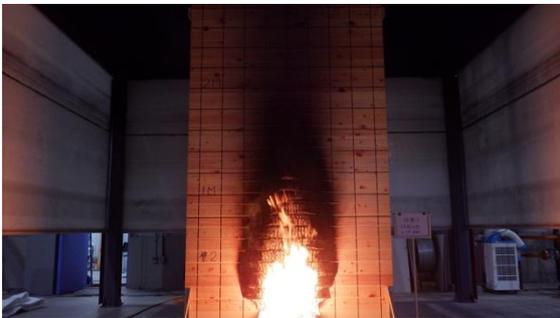


写真 2.6-4-21 着火 20 分後
(バーナー消火)



写真 2.6-4-22 着火 21 分後
(バーナー消火直後)



写真 2.6-4-23 着火 30 分後



写真 2.6-4-24 着火 45 分後

写真 2.6-4 壁実験-2 記録画像 (その 3)



写真 2.6-4-25 着火 60 分後



写真 2.6-4-26 着火 75 分後



写真 2.6-4-27 着火 90 分後
(計測終了)



写真 2.6-4-28 着火 100 分後
(移動後に放置開始)

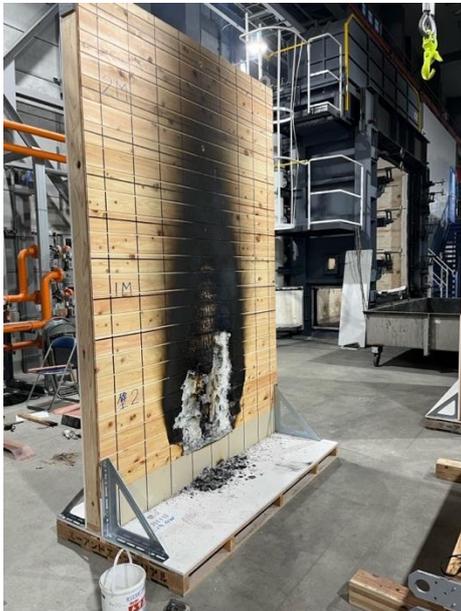


写真 2.6-4-29 着火 300 分後
(実験終了・消火)

写真 2.6-4 壁実験-2 記録画像 (その 4)



写真 2.6-5-1 実験開始時
(着火 0 分)



写真 2.6-5-2 着火 1 分後



写真 2.6-5-3 着火 2 分後

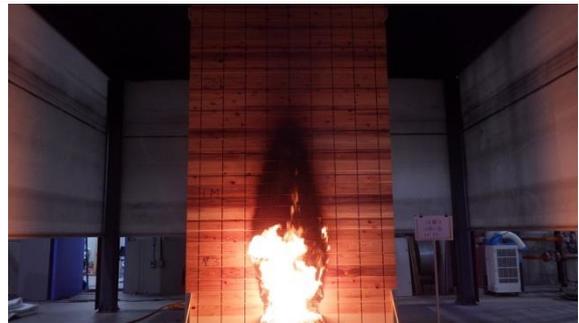


写真 2.6-5-4 着火 3 分後

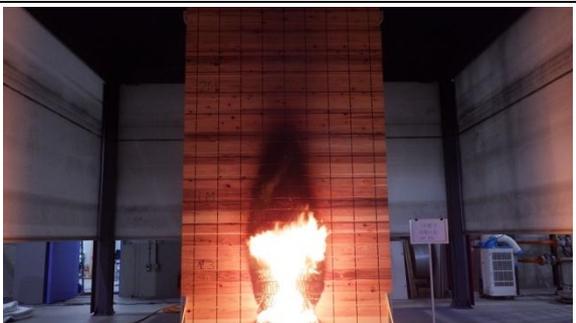


写真 2.6-5-5 着火 4 分後

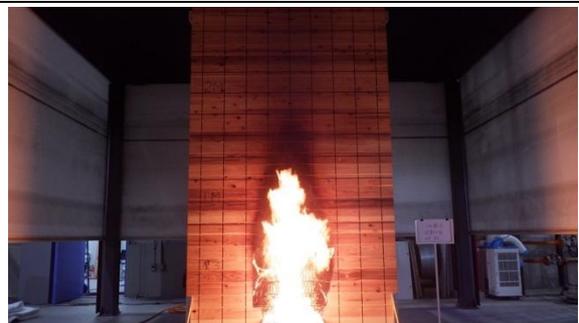


写真 2.6-5-6 着火 5 分後



写真 2.6-5-7 着火 6 分後



写真 2.6-5-8 着火 7 分後

写真 2.6-5 壁実験-3 記録画像 (その 1)

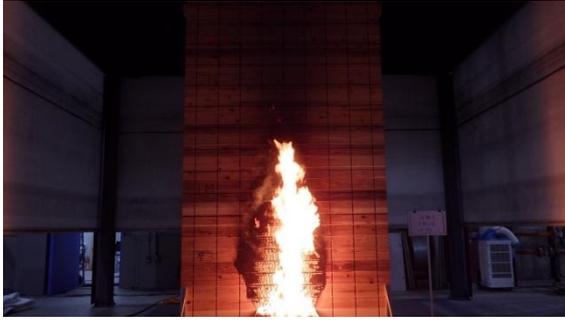


写真 2.6-5-9 着火 8 分後



写真 2.6-5-10 着火 9 分後

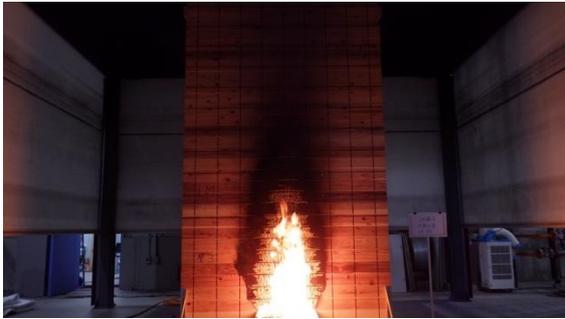


写真 2.6-5-11 着火 10 分後

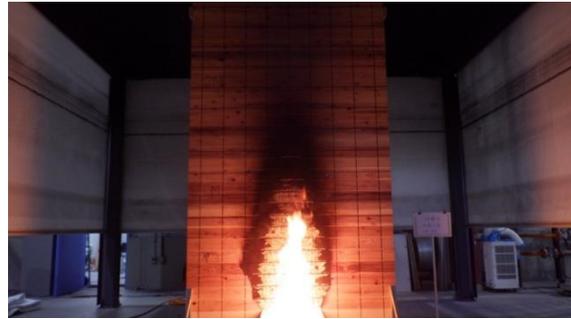


写真 2.6-5-12 着火 11 分後



写真 2.6-5-13 着火 12 分後

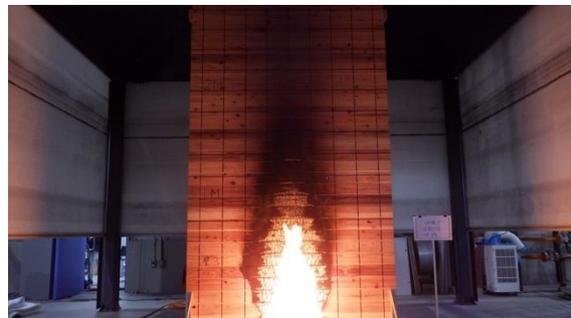


写真 2.6-5-14 着火 13 分後



写真 2.6-5-15 着火 14 分後



写真 2.6-5-16 着火 15 分後

写真 2.6-5 壁実験-3 記録画像 (その 2)



写真 2.6-5-17 着火 16 分後



写真 2.6-5-18 着火 17 分後



写真 2.6-5-19 着火 18 分後

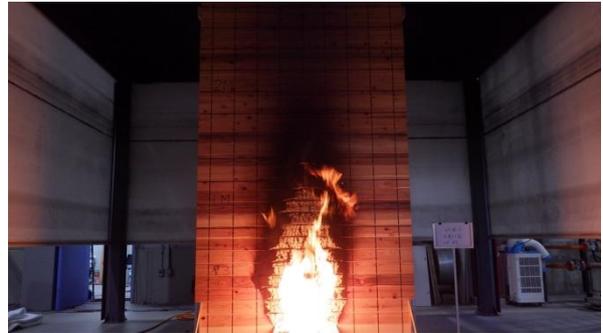


写真 2.6-5-20 着火 19 分



写真 2.6-5-21 着火 20 分後
(バーナー消火)

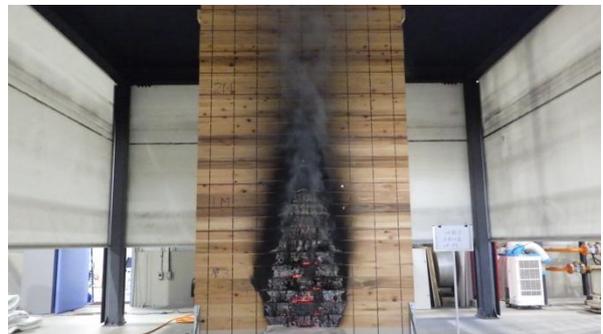


写真 2.6-5-22 着火 21 分
(バーナー直後)



写真 2.6-5-23 着火 30 分後



写真 2.6-5-24 着火 45 分

写真 2.6-5 壁実験-3 記録画像 (その 3)



写真 2.6-5-25 着火 60 分後

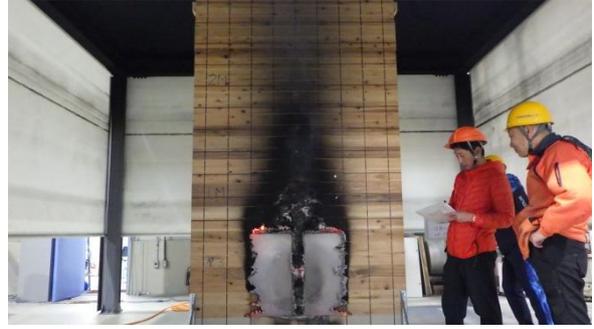


写真 2.6-5-26 着火 75 分後



写真 2.6-5-27 着火 90 分後
(計測終了・消火開始)



写真 2.6-5-28 着火 91 分
(消火終了後)

写真 2.6-5 壁実験-3 記録画像 (その 4)

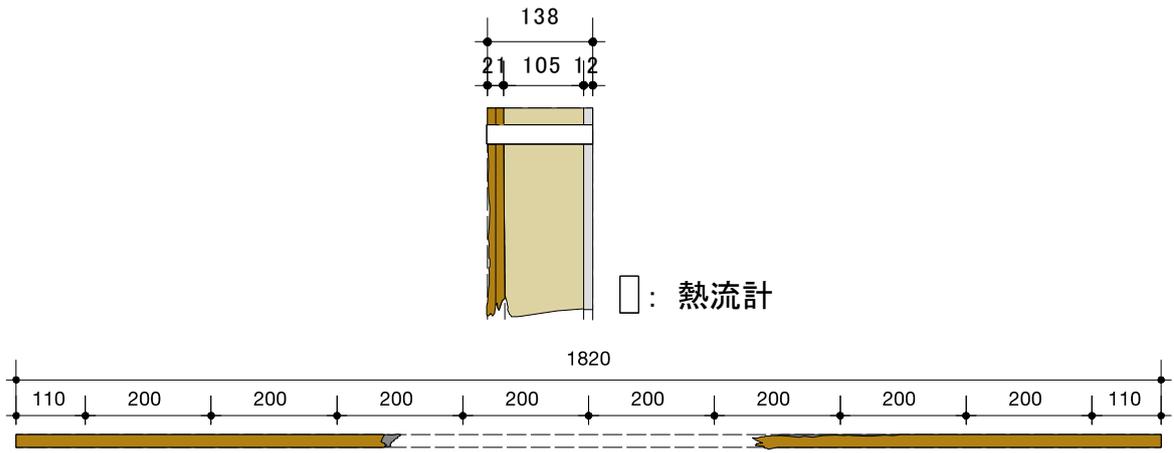


図 2.6-9 炭化図（壁実験-1）

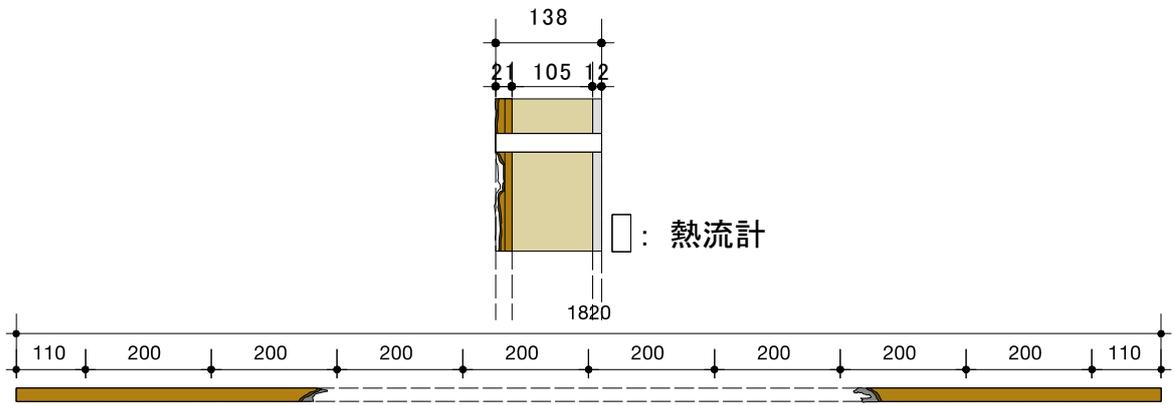


図 2.6-10 炭化図（壁実験-2）

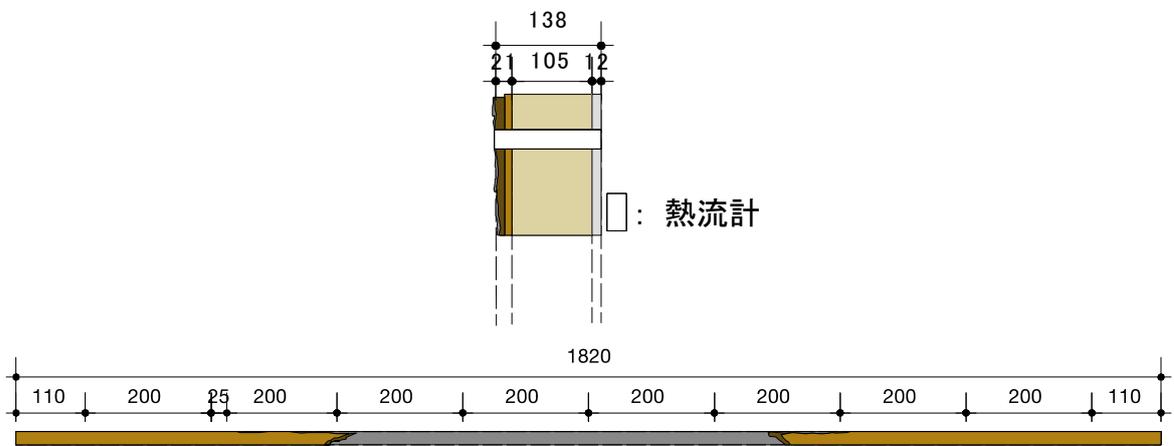


図 2.6-11 炭化図（壁実験-3）

※炭化図の切断位置は、前掲の図 2.6-1 の試験体の概要図に示す。

2.7 まとめ

以下に、実験ごとのまとめを記載する。

実験A：椅子の燃焼実験

スタッキング可能なパイプ椅子（2023年度実験のパイプ椅子の発熱速度比較実験において発熱速度が高かったもの）について、椅子単体での発熱速度の測定を行い最大 300kW であった。その椅子を横に3脚並べて、前後に 800mm 離れた位置に3脚並べた実験において、椅子の横方向、前後方向への燃え拡がり（燃え移り）を確認し、横方向には早期に燃え拡がるが、前後方向には、前方向、後ろ方向ともに、椅子の一部は焦げるものの燃え移らないことを確認した。なお、椅子の形状や可燃物種類、可燃物量等は 2023 年度年の同事業の報告書に詳しい。

実験B：床上の燃焼実験

木製クリブ（1段、高さ 300mm、厚さ 30×幅 105×長さ 750mm のスギ板を 20 枚使用したもの）を床上に設置して燃焼させた際に、木製の床上の燃え拡がりを確認する実験を実施した。体育館等で使用される木製フローリング床（下地：厚物構造用合板またはパーティクルボード）において、750mm 角のクリブの燃焼による燃焼範囲は $\Phi 1300\text{mm}$ 程度であり、燃え抜けも着火後 1.5 時間～2 時間程度経過した後に、クリブ直下のみに点として燃え抜けることがわかった。燃え抜けた後の床下地材裏面での燃え拡がり、床上 1 の実験のみ生じたが、すぐに消火したため、その後裏面を燃え拡がり続けるかは本実験からは確認できなかった。

実験C：床上の燃え拡がり実験

柔道の競技用の畳（厚さ 60mm、発泡プラスチック芯材）上の燃え拡がりを確認する実験を実施し、畳内部に燃焼が進んだのちに、バーナー火源（200kW プロパンガスバーナー、20 分間）から放射状の方向に畳内部を燃え拡がり、燃焼継続することが確認できた（実験開始 40 分で消火）。ただし、下地の構造用合板が燃え抜けることはなかった。

実験D：壁面上の燃え拡がり実験

天井高のある大空間の木製壁面（天井付近の煙溜まりの影響を受けない）の上方への火炎伝播性状を確認する実験を実施した。200kW プロパンガスバーナー（500mm 角）の火炎が接する高さ 1m 程度までの部分は壁面が燃えるがそれより上や横へ燃え拡がることはなかった。一方で、壁面が燃えた部分は壁板（総厚さ 21mm）が燃え抜けて壁内部へ延焼した。その際、不燃系断熱材充てんまたは木製のファイヤーストップを設けることで、内部での燃え拡がりを限定的にできることがわかった。

2.8 CCM 試験

2.8.1 試験概要

局所火源を想定した床および壁の燃焼試験で使用した表 2.8-1 に示す木材と公式競技で使われている柔道畳（図 2.8-1 参照）の燃焼性能を把握するため、50kW/m²、加熱時間 20 分の条件にてコーンカロリメータ試験（以下、CCM 試験）を実施した。

表 2.8-1 木質材料の CCM 試験試験体

種類	材種	厚さ	備考
木材	カバ	18mm	フローリング材 無塗装
	スギ	12mm	壁材 無塗装
	ヒノキ	12mm	壁材 無塗装

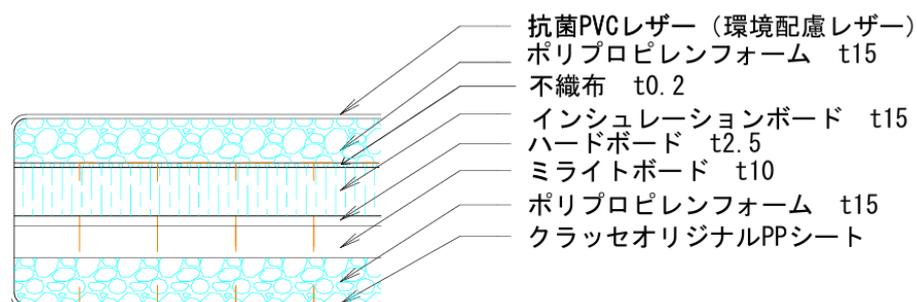


図 2.8-1 柔道畳の断面図

柔道畳は全日本柔道連盟公認畳（KL-JPN カバー式）で厚さは 60mm である。

2.8.2, 木材試験体の試験結果

木材試験体の着火時間、最大発熱速度と着火から試験終了までの平均発熱速度を表 2.8-2 に示す。着火の判断は発熱速度が 10kW/m² を上回ったタイミングとした。

表 2.8-2 木材試験体 CCM 試験 試験結果

試験体種類	樹種	試験体番号	着火時間 sec.	最大発熱速度		平均発熱速度 kW/m ²		
				kW/m ²				
				個別	平均			
木材	カバ	No.1	35	212	213	49	113	110
		No.2	27	216		40	106	
		No.3	32	212		49	112	
	スギ	No.1	10	169	167	20	77	78
		No.2	10	147		17	77	
		No.3	13	184		24	79	
	ヒノキ	No.1	23	208	202	30	81	81
		No.2	26	209		33	80	
		No.3	23	189		32	83	

木材試験体の発熱速度の推移を図 2.8-2～図 2.8.4 に示す。

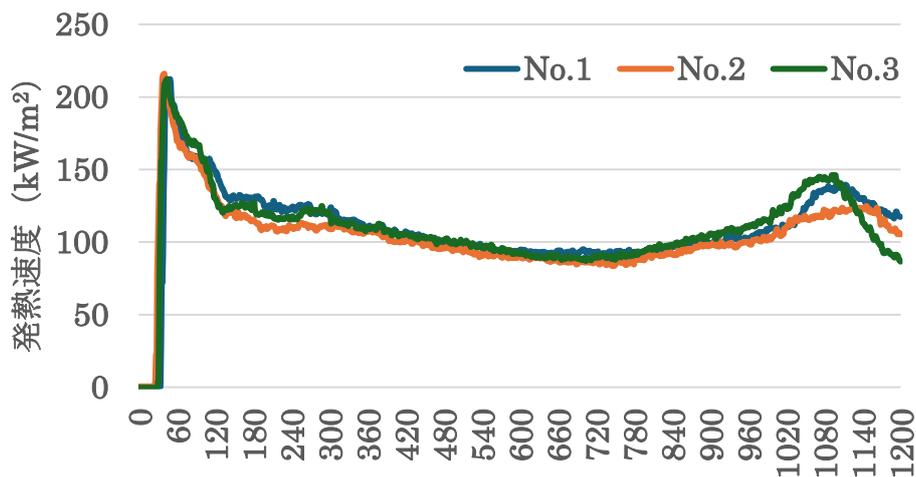


図 2.8-2 カバ (t=18mm)

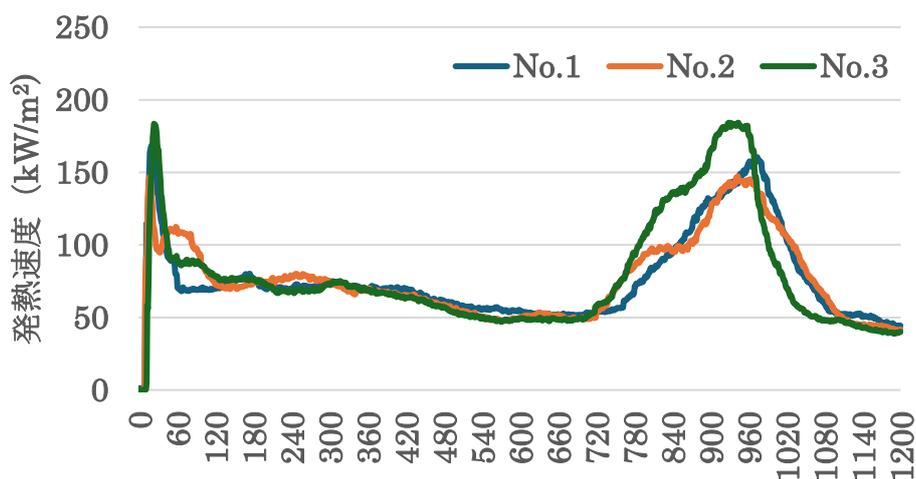


図 2.8-3 スギ (t=12mm)

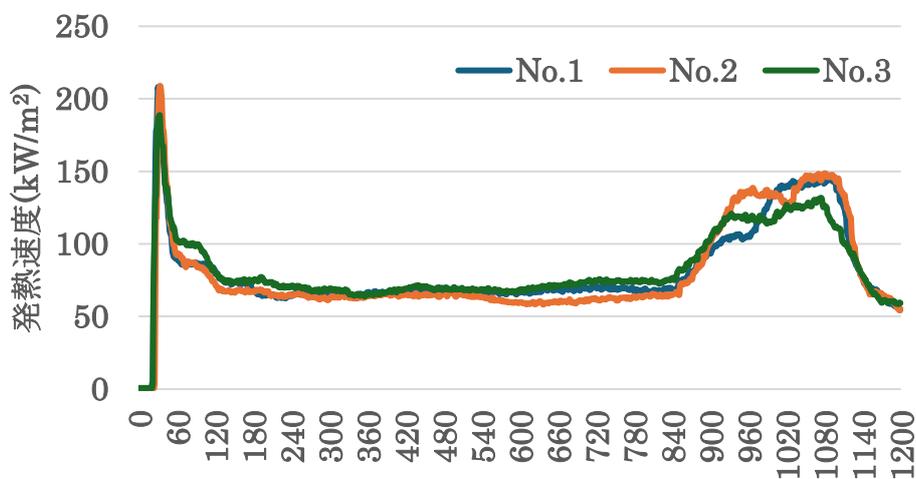


図 2.8-4 ヒノキ (t=12mm)

木材試験体の総発熱量の推移を図 2.8-5～図 2.8-7 に示す。

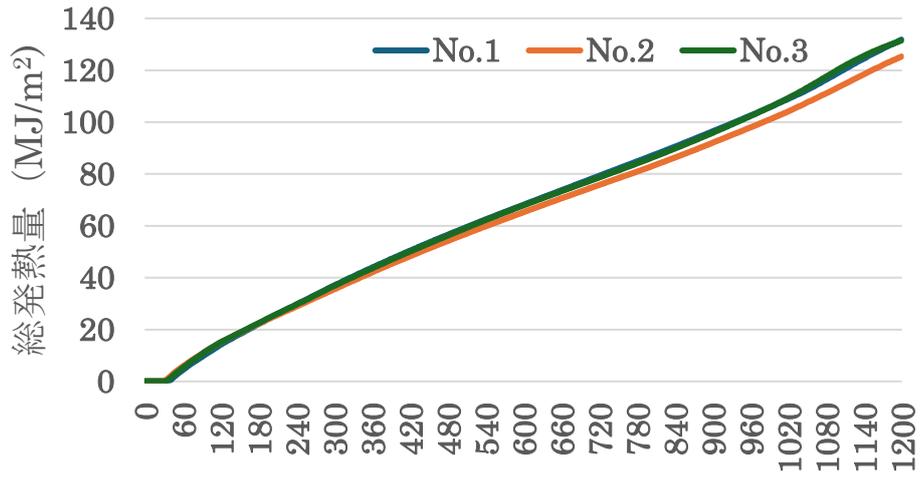


図 2.8-5 カバ (t=18mm)

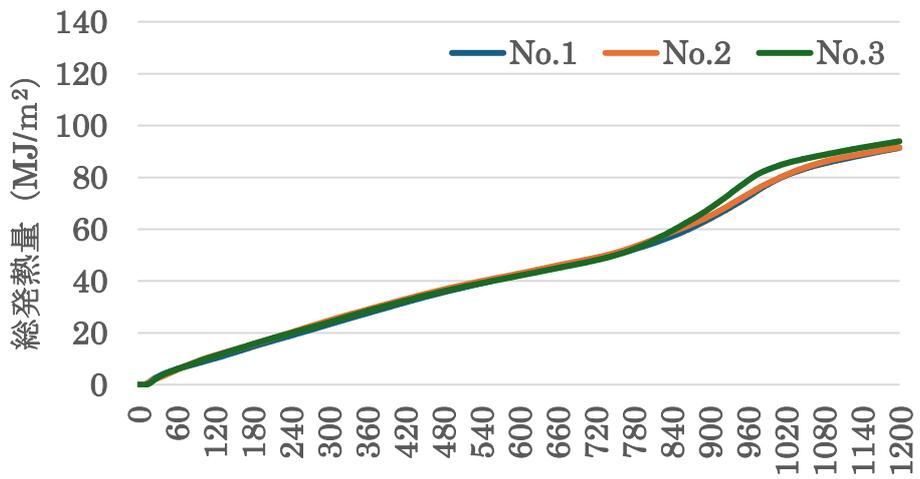


図 2.8-6 スギ (t=12mm)

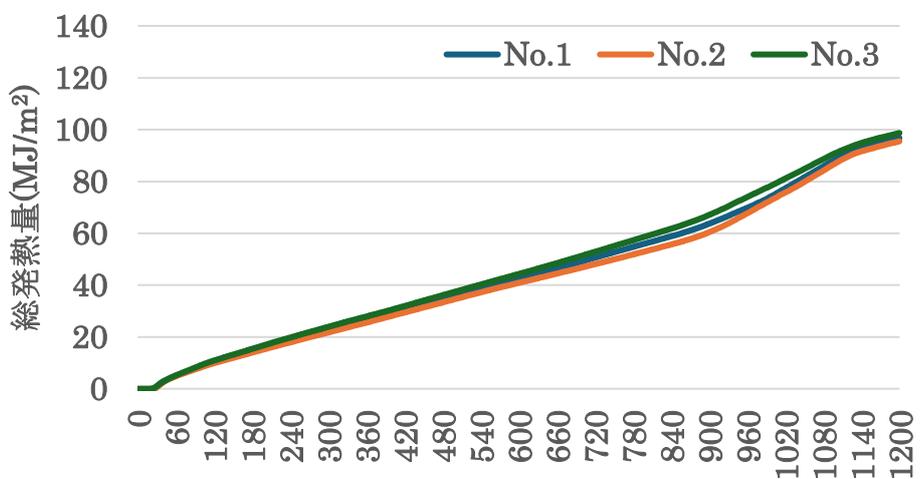


図 2.8-7 ヒノキ

試験体写真を写真 2.8-1～写真 2.8-3 に示す。

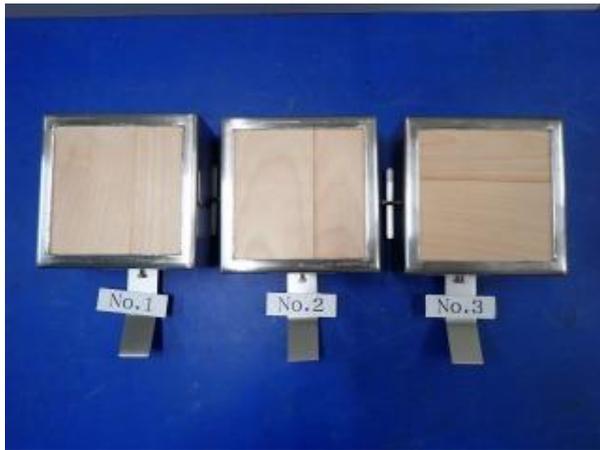


写真 2.8-1-1 試験前



写真 2.8-1-2 試験終了後

図 2.8-1 カバ (t=18mm) 試験体写真

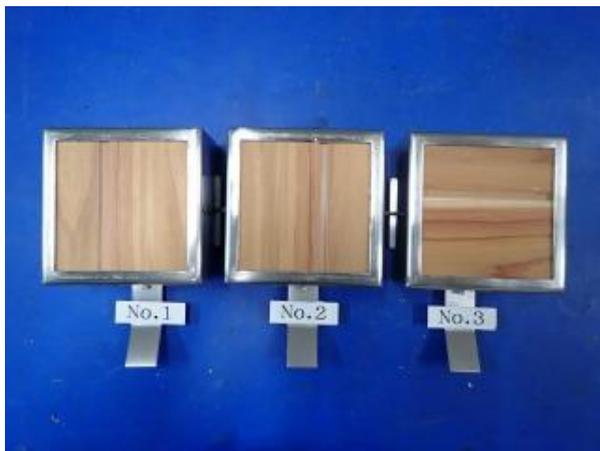


写真 2.8-2-1 試験前



写真 2.8-2-2 試験終了後

図 2.8-2 スギ (t=12mm) 試験体写真



写真 2.8-3-1 試験前



写真 2.8-3-2 試験終了後

図 2.8-3 スギ (t=12mm) 試験体写真

2.8.3 柔道畳の試験結果

柔道畳の試験結果を表 2.8-3 にまとめた。

表 2.8-3 柔道畳 CCM 試験 試験結果

試験体 種類	試験体 番号	着火時間 sec.	最大発熱速度		平均発熱速度	
			kW/m ²	sec.	kW/m ²	
柔道畳	No.1	13	376	373	23	96
	No.2	12	369		22	95
	No.3	12	374		23	97

発熱速度の推移を図 2.8-8、総発熱量を図 2.8-9 に示す。

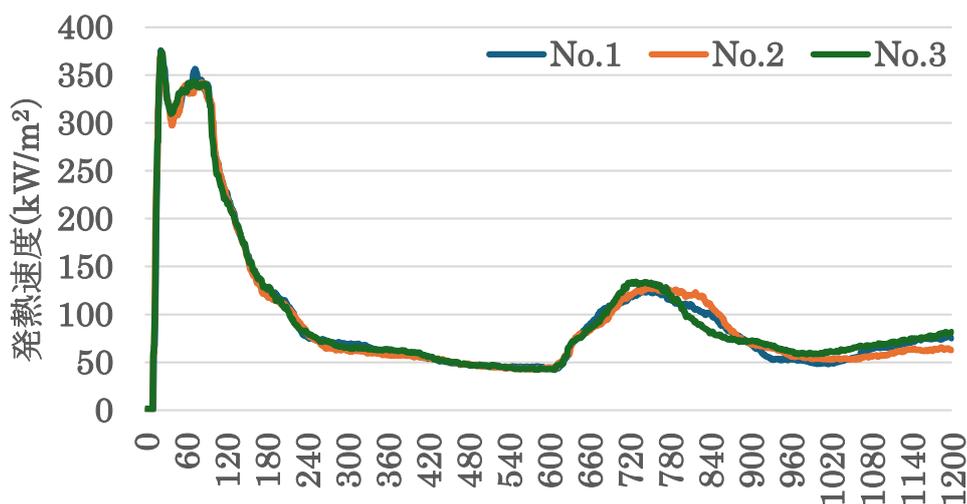


図 2.8-8 柔道畳の発熱速度

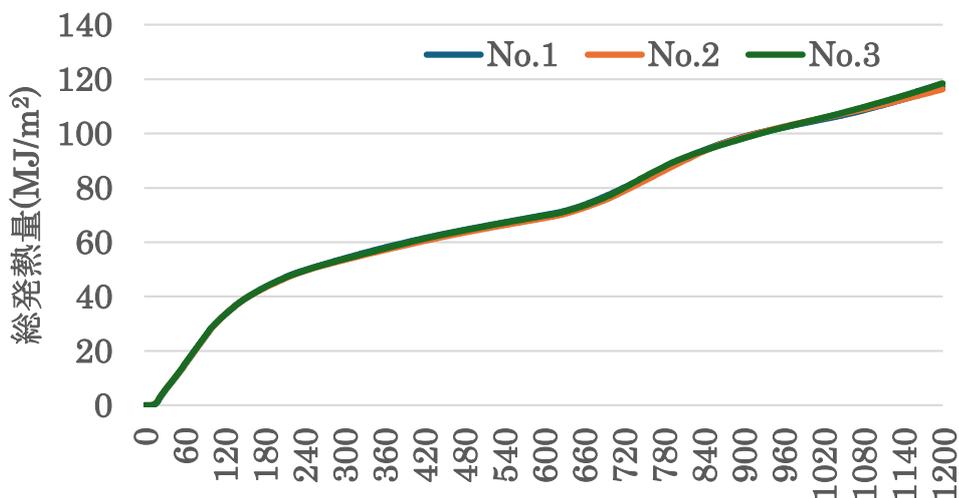


図 2.8-9 柔道畳の総発熱量

試験体写真を写真 2.8-4 に示す。

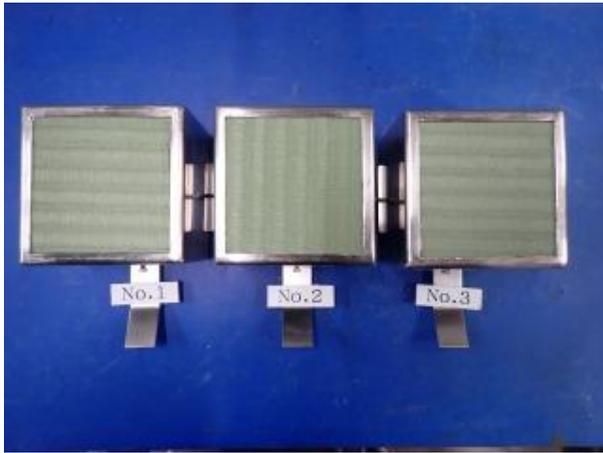


写真 2.8-4-1 試験前



写真 2.8-4-2 試験終了後

図 2.8-4 柔道畳 試験体写真

試験終了後の各試験体の燃え残りの状況を写真 2.8-5 に示す。



写真 2.8-5-1 3体の試験体の状況



写真 2.8-5-2 1体目の試験体



写真 2.8-5-3 2体目の試験体



写真 2.8-5-4 3体目の試験体

図 2.8-5 試験終了後の各試験体状況

第3章 実務設計への反映

3.1 はじめに

耐火建築物の主要構造部を木造化するためには、耐火性能検証（ルート B またはルート C）により「木造を耐火構造」とみなせること、すなわち「木造が着火しない」ことを検討する。この場合、検証対象部材が存する部分（以下、当該部分）において、特にルート C では以下の i) ～ iii) の火源に基づき、想定火災が局所火災となり、その火災の燃焼が検証対象部材へ与える影響により木造が着火しないことを検討する。

i) 3MW, 20分（ルート B においても想定する火源, 参考資料 3.1.1）

ii) 室用途に基づく火源（原則 160MJ/m²以下）

iii) 設置される可燃物に基づく火源

ここで、可燃物が木質系等の可燃性の床材に設置される場合には、

iv) 床材の燃え広がりを考慮した火源

を設定し、さらに、当該部分の壁を木質系とし、可燃物（火源）からの放射熱等により当該壁が着火する場合（例えば、可燃物と当該壁の離隔距離が確保されない場合）には、

v) 木質系壁への延焼を考慮した火源

を設定するが、これら iv) および v) の火源においても、i) ～ iii) の火源と同様、局所火災にとどまり、その火災の燃焼による影響により木造が着火しないことを検討する。

これまでの実案件においても、既往の火源性状・火炎性状の予測方法や実験（例えば、参考資料 3.1.2～3.1.4）に基づいた検討を実施している。ただし、局所火源を条件とした床や壁の燃焼実験の知見等が十分ではないことで、これらの燃焼を考慮する場合は安全側の検討を実施している傾向にある。

そこで、本章 3.2 では前述の火源 iv) および v) について、2023 年度・実験（参考資料 3.1.5）および 2024 年度・実験（本書・第 2 章）の結果も踏まえ、設計者らが実務的に活用できる条件設定や検討方法を整理する。

さらに本章 3.3 では、基本構想から基本設計の段階で見通しを立てるにあたり利用することをイメージして、煙層内の温度を、EXCELL を使って簡易に検討する手法を紹介する。

《参考資料》

3.2.1 : 2001 年版 耐火性能検証法の解説及び計算例とその解説, 日本建築センター等, pp.46～47, 2001

3.2.2 : 2001 年版 避難安全検証法の解説及び計算例とその解説, pp274, 日本建築センター等, 2001

- 3.2.3 : 鋼構造耐火設計指針, 日本建築学会, pp.52~54, 2017
- 3.2.4 : 五頭辰紀ほか, 内装防火設計に関する基本的研究—木造内装を例として その2
水平方向火炎伝播性と火炎伝播性に対する予熱の影響, 日本建築学会大会学術
講演梗概集, 1988
- 3.2.5 : 令和5年度 林野庁補助事業「建築用木材供給・利用強化」 CLT・LVL等
の建築物への利用環境整備事業のうち「CLT・LVL等を活用した建築物の
低コスト化・検証等」～耐火性能が要求される木造屋根の普及に向けての調査・
研究～, 2024

3.2 木質床および木質壁の燃焼

3.2.1 木質床

(1) 延焼範囲の推定

床自体の燃え拡がりの可能性は低く、床上の可燃物の燃焼に伴い、木製床の熱分解が進展すると考えられる。

なお、体育館の木製床の上に置かれる可燃物として柔道畳，体操マットなどが想定される。図 3.2-1 は柔道畳を敷いた一例であるが、火源設定にあたっては全体が燃焼するものと扱う。

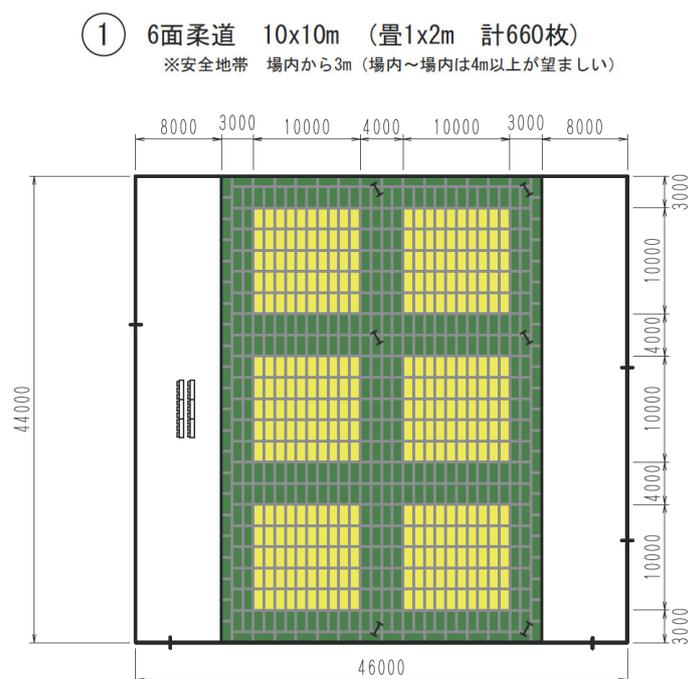


図 3.2-1 柔道畳の敷設例

(2) 発熱速度の推定

体育館では、球技のように床上に可燃物のない状態と武道や床競技のように畳やマットが敷かれる場合の二つの状態が想定される。

① 木製床

球技のように床上に可燃物がなければ、耐火設計では標準的な局所火源（発熱速度 3,000kW，直径 1.5m）を想定する。そのため、火源規模としては 3,000kW に木製床の燃焼分を考慮すればよい。木製床の単位面積あたりの発熱速度は樹種により差異があるが、概ね 100～130kW/m² 程度である。また、昨年度の報告書における木製床の燃焼実験における発熱速度の推移を図 3.2-2 に示す。バーナーの発熱速度（200kW）を除いた発熱速度の増加分は概ね 50kW 程度であることがわかる。

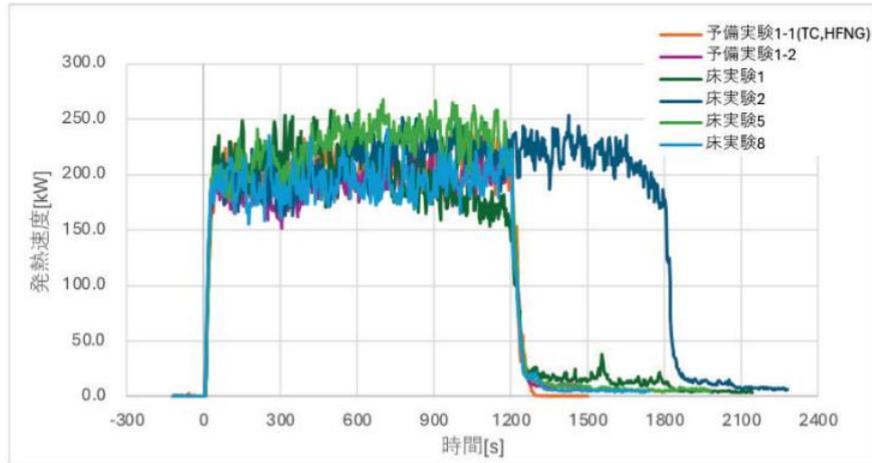


図 3.2-2 ガスバーナーを火源とした床実験の発熱速度の推移

また、カバ (t18mm) のコンカロリーメーター試験 (以降「CCM 試験」と称す。) の結果を図 3.2-3 に示す。加熱開始直後は 200kW/m^2 程度となるが、その後は 100kW/m^2 程度で推移しており、平均で 110kW/m^2 程度である。

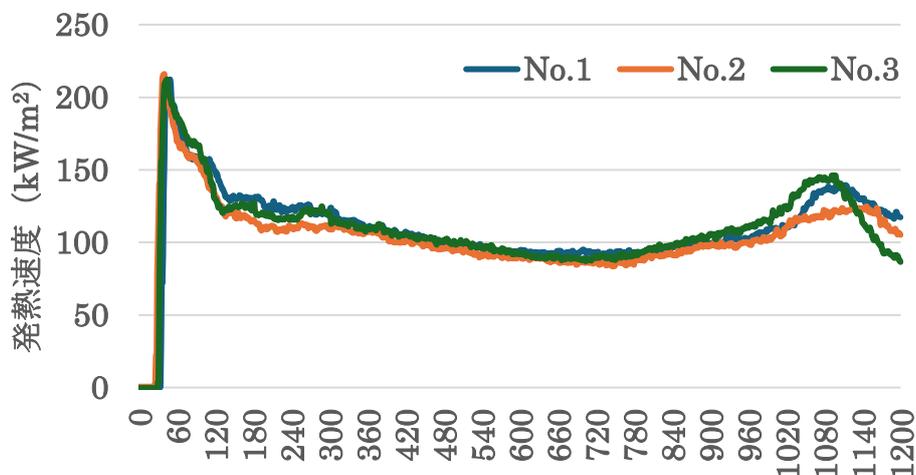


図 3.2-3 カバ (t18mm) の CCM 試験による発熱速度

以上のことから、フローリング床の燃焼を考える場合、 130kW/m^2 程度の発熱速度を見込んでおけばよいと考えられる。

木製床の燃焼実験において、着火は概ね着火限界熱流束とされる 10kW/m^2 の入射熱流以上の範囲内となっている。ただし木製床表面は火源に近い部分から順に着火するが、炭化すると発炎は継続せず消炎するため、図 3.2-2 のように時間とともに発熱速度が増加するという傾向はみられない。よってバーナーの発熱速度 (200kW) からの発熱速度の増加分 50kW は、図 3.2-4 に示す半径 R 内の木製床部分が延焼していると仮定するならば、仮想する延焼部分の半径 R は、次のように計算できる。

$$\text{延焼面積} = \pi R^2 - D^2$$

$$\text{延焼面積} = Q_f / q_f$$

ここで Q_f : 発熱速度の増加分 50kW

q_f : 木製床の単位面積当たりの発熱速度
130kW/m²

D : バーナー火源の幅 0.5m

とすると

$$\text{半径 } R = \{ (50/130) + (0.5)^2 / \pi = 0.45 \text{ (m)}$$

代表火源寸法 D が 1.5m となった場合は、相似則が成立すると仮定すると

$$R = 0.45 \times (1.5/0.5) = 1.35\text{m}$$

バーナー部分の床部分も燃焼すると想定するならば木製床の燃焼による発熱速度 Q は

$$Q = 130 \times \pi \times (1.35)^2 = 744 \text{ kW}$$

となる。

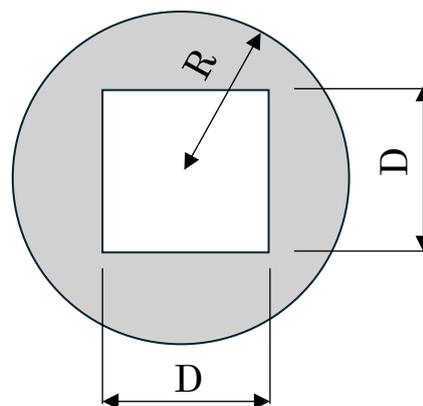


図 3.2-4 木製床の延焼範囲

3.2.2 床上可燃物

武道や床競技のように床上に可燃物が置かれる場合、材料の種類に応じて単位面積あたりの発熱速度を推定する。ここでは競技用畳を例に解説する。

(1) 解析による場合

一般的に畳はイグサが主原料であるが、柔道競技で使用される畳は、プラスチック素材で構成されたものが多い。畳の仕様（材質）及び物性値を表 3.2.1 に示す。なお「-」は知見が得られなかった部分となる。

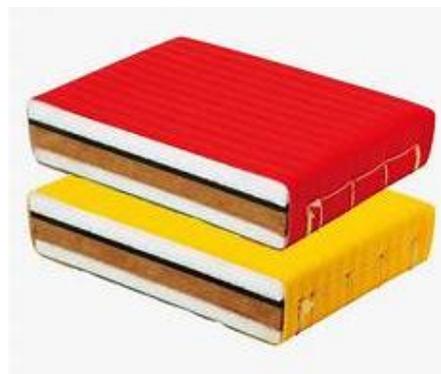


図 3.2-5 柔道畳の断面

表 3.2.1 畳の仕様

仕様	厚み [mm]	燃焼熱 [MJ/kg]	単位面積当たり の発熱速度 [kW/m ²]	密度 [kg/m ³]	発熱量密度 [MJ/m ²]	備考
畳表	1.25	13.8 *5	159 *5	506 *5	8.8	
ポリプロピレンフォーム	15	36.8 *1	418	22 *1	12.2	
ポリエチレンフォーム	5	36.8 *1	418	22 *1	4.1	
インシュレーションボード	15	14.7 *2	159	270 *3	59.6	軟質繊維板（難燃3級）
ハードボード	2	13.8 *5	159 *5	506 *5	14.0	
低発泡ポリスチレンボード	10	41.9 *1	348	22 *1	9.3	
ポリプロピレンフォーム	10	36.8 *1	418	22 *1	8.1	
ポリエチレンフォーム	2	36.8 *1	418	22 *1	1.7	
ノンスリップシート	1	19.6 *4	160	290 *4	5.7	ポリプロピレン織布
平均値	-	-	326	-	123.5	

*1) 日本建築学会編：建築物の火災荷重および設計火災性状指針，2022.3

*2) 日本建築学会編：鋼構造耐火設計指針 第2版，

*3) JISA5905

*4) 上記*1による繊維材料の平均値

*5) 上記*1によるセルロース系材料の平均値

畳が敷設されるのは壁面から離れた位置であるため、出火位置は最も燃焼性状が激しくなると想定される「中央出火」(図 3.2-7 参照)を想定する。

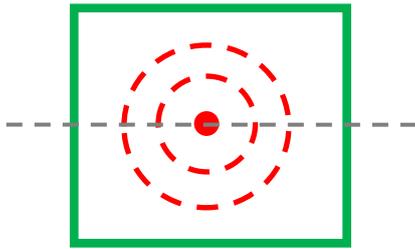


図 3.2-7 中央出火

① 燃焼拡大の前提

畳の燃焼拡大にあたって、下部にある木床も同時に熱分解が進むと考える。一般に木材の水平方向の燃え広がりは遅いと考えられるが、畳と同時と扱うことで火源発熱速度を大きく設定し、火炎高さ等を安全側に評価する。ここでは木床の発熱速度として 130kW/m^2 を加算する。

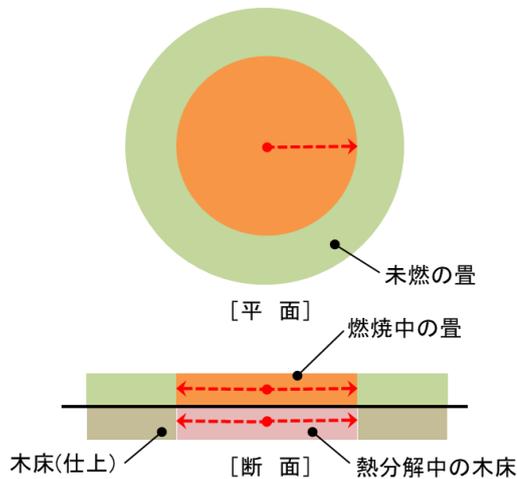


図 3.2-8 畳燃焼の概念図

② 延焼拡大モデルの概要 3.2.1)

平面的火源の燃焼拡大速度を見積もるために、次のような仮定を考える。(a)可燃物の分布する領域は均一に可燃物が分布していると想定する、(b)出火点は円形領域の中心とし、燃焼範囲は同心円上に一定速度で拡大するものとする、および(c)燃焼部分では単位面積当たりの発熱速度は一定である。火源は着火点を中心に次々に外側の部分を着火させながら拡大していくが、一方、早く着火した中心の部分はある時間たてば可燃物が燃え尽きて燃焼が止む。従って、可燃物の分布する面積が広い場合には、燃焼部分は環状(ドーナツ状)になると考えられる。なお、燃焼部分の下部にある床は熱分解が進むと考え、木質相当の発熱速度 130kW/m^2 を加算する。

燃焼拡大は、火災成長率 α を用いて以下のように表わすことができる。

$$Q = \alpha t^2$$

火災成長率 α は平面的に可燃物が分布していることを想定し、可燃物密度より以下のように算出する。

$$\alpha = \begin{cases} 0.0125 & (q_l \leq 170) \\ 2.6 \times 10^{-6} q_l^{5/3} & (q_l > 170) \end{cases}$$

可燃物密度 q_l は燃焼範囲内の物品がすべて燃焼した場合の最大発熱量を専有面積（燃焼範囲面積）で除すことで算出する。

一方、発熱速度 Q は積載可燃物の単位床面積当たりの発熱速度 q'' を用いて算出することができる。

$$Q = q'' A$$

この時、同心円上に一定速度で拡大するものとするれば、燃焼面積は燃焼拡大速度 v を用いて以下のようにあらわすことができる。

$$A = \pi(vt)^2$$

柔道畳の構成材料は熱可塑性樹脂で構成され、また材料が複合化している。そのため、ここでは軟質プラスチック材料の物性値の平均^{3.2.2)}から燃焼拡大速度 v を下式より算出する^{3.2.3)}。

$$\text{熱慣性 } k\rho c = 0.221 \text{ kW s}^{1/2} / \text{m}^2 \text{ K} \quad 3.2.2)$$

$$\text{火炎伝播パラメータ } f = 11.28 (\text{kW})^2 / \text{m}^3 \quad 3.2.2)$$

$$v = \frac{\phi}{k\rho c (T_{ig} - T_s)^2} = \frac{11.28}{0.221 \times (390 - 120)^2} = 0.0007 \text{ m/s}$$

表 3.2-2 ASTM E 1321 試験による水平方向の火炎伝播のデータ ^{3.2.3)}

材質	T_{ig} [°C]	$k\rho c$ $\left(\frac{\text{kW}}{\text{m}^2 \text{K}}\right)^2 \text{ s}$	ϕ $\left(\frac{\text{kW}}{\text{m}^3}\right)^2$	$T_{s, \min}$ [°C]
木製ファイバーボード	355	0.46	2.3	210
木製ハードボード	365	0.88	11.0	40
合板	390	0.54	13.0	120
PMMA	380	1.0	14.4	<90
軟質フォームプラスチック	390	0.32	11.7	120
剛質フォームプラスチック	435	0.03	4.1	215
アクリル製カーペット	300	0.42	9.9	165
壁紙張りのプラスターボード	412	0.57	0.8	240
アスファルトこけら板	378	0.70	5.4	140
ガラス強化プラスチック	390	0.32	10.0	80

なお積載可燃物の単位床面積当たりの発熱速度 q'' は、燃焼範囲内の物品がすべて燃焼した場合の最大発熱速度を専有面積（燃焼範囲面積）で除すことで算出する。

ある部分の燃え尽き時間 t_b は、単位床面積当たりの可燃物量（ kJ/m^2 ） q_l 、単位床面積当たりの発熱速度（ kW/m^2 ） q'' より以下となる。

$$t_b = q_l / q''$$

ここで円形火源の先端部分の着火点からの距離を（燃焼部分の半径） r 、燃焼部分の拡大速度を v 、着火からの時間を t 、燃え尽き半径 r_0 とし、前述の t_b を用いれば、燃焼部分の拡大は次の3つのケースに分けて考えられる。すなわち、

(a) ケース1：初期の拡大中で中心部に燃え尽きた部分がなく、かつ拡大の先端も燃料に達していないとき、すなわち、 $r < r_0$ 、かつ、 $t < t_b$

この時、燃焼部分の面積 A 及び発熱量速度 Q は、

$$A = \pi r^2 = \pi (vt)^2$$

$$Q = q'' A = (q'' + 130) \pi (vt)^2$$

すなわち、発熱速度は t の2乗に比例することになる。ここでは v を一定と仮定しているが、多くの火源で初期の発熱速度が t^2 に比例することが経験的に知られているので、この仮定は少なくとも近似的に妥当と考えられる。

(b) ケース2：中心部に燃え尽きた部分が生じているが、拡大の先端はまだ燃料端に達していない。すなわち $r < r_0$ 、かつ、 $t_b < t$

この時燃焼部分の面積 A は、

$$A = \pi r^2 = \pi [(vt)^2 - \{v(t - t_b)\}^2]$$

したがって発熱速度 Q は、

$$Q = q'' A = (q'' + 130) \pi [(vt)^2 - \{v(t - t_b)\}^2]$$

(c) ケース3：燃焼拡大の先端が既に燃料端に達し、中心部の燃え尽き部分が広がっている、すなわち、 $r = r_0$ 、かつ、 $t > r_0/v$ この時燃焼部分の面積 A は、

$$A = \pi r^2 = \pi [r_0^2 - \{v(t - t_b)\}^2]$$

従って発熱速度 Q は、

$$Q = (q'' + 130) A = (q'' + 130) \pi [r_0^2 - \{v(t - t_b)\}^2]$$

ケース1～3の燃焼面積 A 及び発熱速度 Q の時間経過をまとめると図3.2-9のようになる。

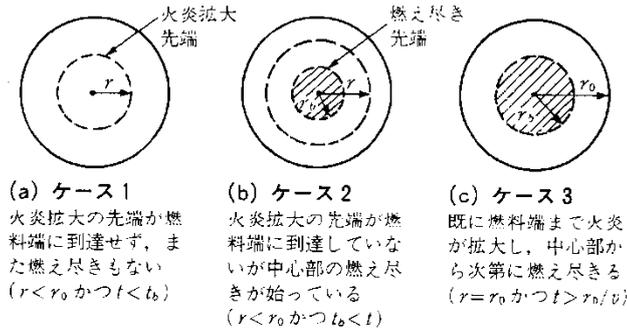


図 3.2-9 面的に分布する火源の燃焼面の拡大 3.2.1)

以上のケース1～3の燃焼面積 A および発熱速度 Q の時間経過をまとめると、図3.2-10(a)のようになる。なお、燃料密度が高いか、または、燃料面積が小さいため燃え尽きの始まる以前に拡大の先端が燃料端に到達するときは A および Q は同図(b)のような時間的变化を追うことになる。

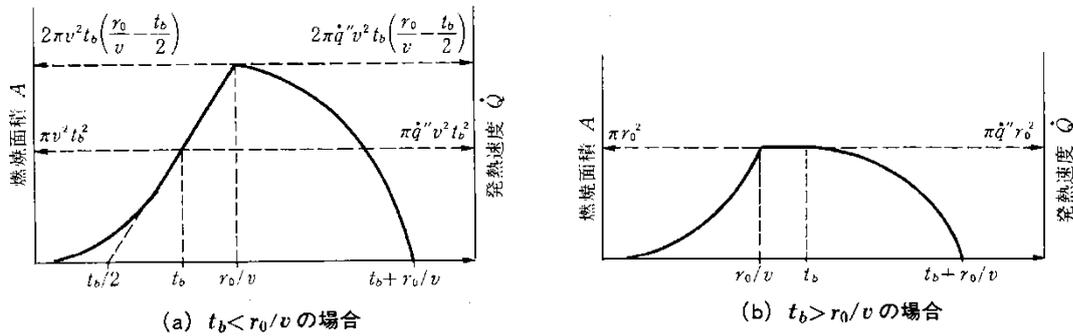


図 3.2-10 面的火源の燃焼面積と発熱速度 3.2.1)

③ 計算例

床面積 500m^2 の燃焼を等価の円形に置き換える。このとき円形火源半径 r_0 は、

$$r_0 = \left(\frac{500}{\pi}\right)^{1/2} = 12.62\text{m}$$

前述より、

積載可燃物の平均発熱量 $q_l = 124\text{MJ/m}^2$

火災成長率 $a = 0.0125\text{kW/s}^2$

単位床面積あたりの発熱速度 $q'' = 326\text{kW/m}^2$

燃焼拡大速度 $v = 0.0007\text{m/s}$

とすると、可燃物の燃え尽き時間 t_b は、

$$t_b = \frac{q_l}{q''} = \frac{124 \times 1,000}{326} = 380.4\text{sec}$$

また、燃焼の先端が端部に達する時間は、

$$\frac{r_0}{v} = \frac{12.62}{0.0007} = 18,029\text{sec} \approx 300\text{min}$$

となる。初期火災の拡大は、

$$Q = \alpha t^2$$

以上の条件により算出した火源の発熱速度と燃焼面積の時間変化を図3.2-11に示す。発熱速度の最大値は9,484kW、燃焼面積は20.8㎡となる。

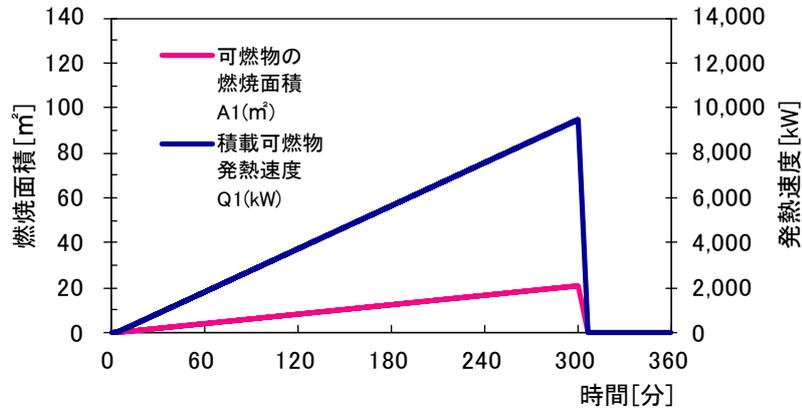


図3.2-11 火源の発熱速度と燃焼面積

図3.2-11は燃焼時間が長いため、20分まで間をグラフ化すると図3.2-12のとおりとなる。性状としては、燃焼拡大の途中で燃え尽き部分が生じる様相（左図(a)）となる。

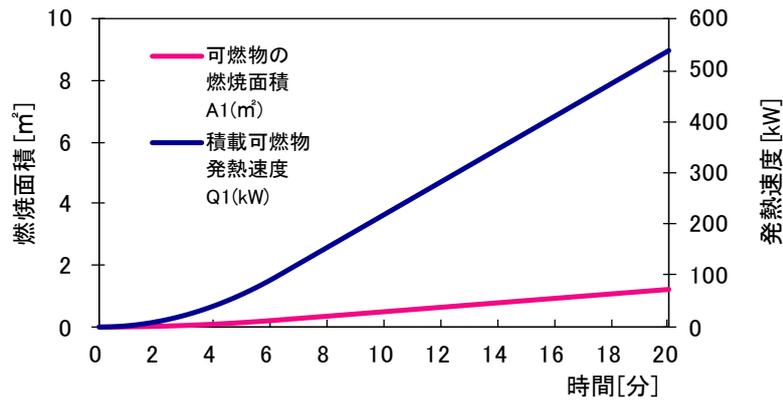


図3.2-12 火源の発熱速度と燃焼面積(0~20min)

このときの燃焼先端の半径を図3.2-13、火炎高さを図3.2-14に示す。

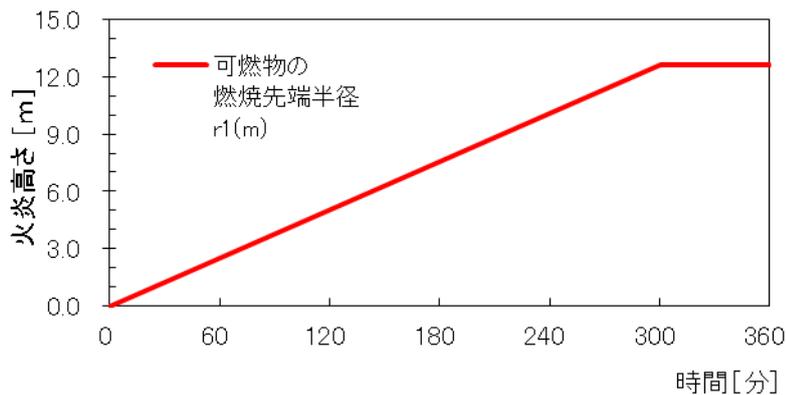


図3.2-13 燃焼先端部分の半径

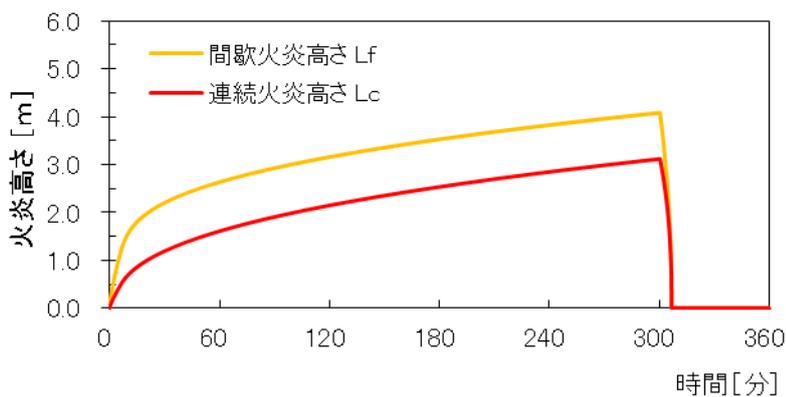


図3.2-14 火炎高さ

(2) 実験結果による場合

競技用畳はメーカーにより構成材料に幾分差がある。CCM試験の結果を図3.2-15、図3.2-16に示す。発熱速度は最大376kW/m²、平均96kW/m²である。

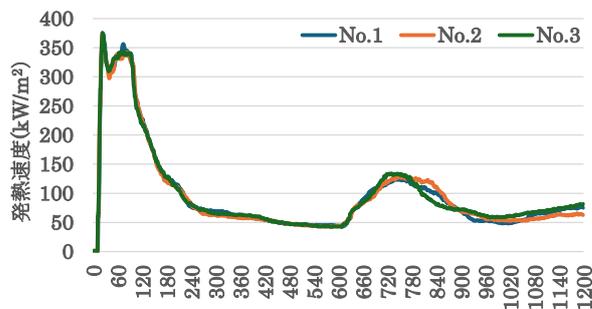


図3.2-15 柔道畳の発熱速度

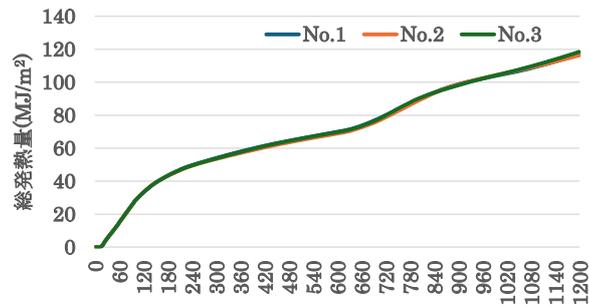


図3.2-16 柔道畳の総発熱量

一方、2.2.3項に示す実大試験体による実験での発熱速度を図3.2-17に示す。

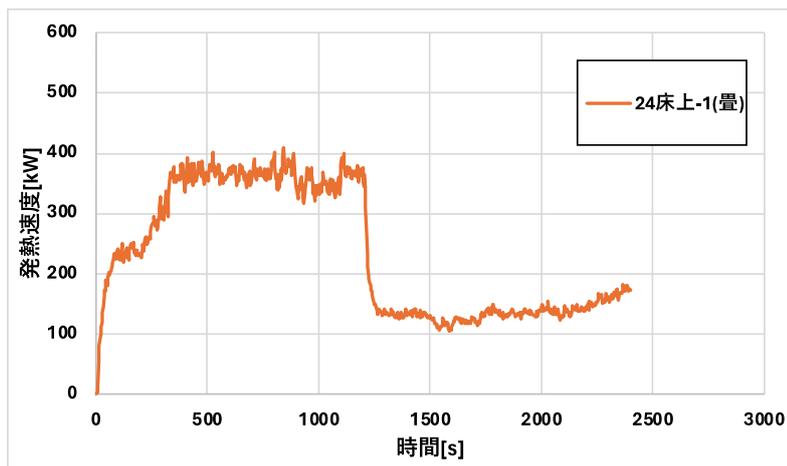


図3.2-17 実大試験体による発熱速度の推移

前述の解析用に材料の構成比から算出した発熱量密度は124MJ/m²、単位床面積あたりの発熱速度は326kW/m²であり、CCM試験や実大実験に近い値となった。実験結果を用いて安全側に検討するのであれば、単位床面積あたりの発熱速度は300～350kW/m²程度を見込んでおけばよいと考える。

参考文献

- 3.2.1) 田中哮義著：建築火災安全工学入門，日本建築センター，pp.54～56，1993.7
- 3.2.2) 日本建築学会編：建築物の火災荷重および設計火災性状指針，丸善，p.199，2022.3
- 3.2.3) James Quintiere 著：基礎 火災現象原論，共立出版，pp.78～79

3.2.3 木質壁

木質壁の燃焼は、壁自体が出火するのではなく、壁近傍の床上に置かれた可燃物の燃焼に伴う着火および燃え広がり（壁への延焼）を想定することになる。

木質壁への延焼を考慮した火源について、2023年度の報告書において示した想定方法（参考資料 3.2.4）の概要は、以下の通りである。

- ・火源位置は壁際とする。
- ・局所火源（発熱速度 3MW，代表寸法 1.5m）による壁上方への延焼は「燃焼高さ＝壁面高さ」とする。
- ・壁面の水平方向への火炎伝播はほとんど無いとして、「燃焼幅＝火源代表寸法 D_1 ：1.5[m]」とする。
- ・火源の発熱速度 Q_1 [kW]および無次元発熱速度 Q_1^* [-]は次式による。

$$Q_1[\text{kW}] = \text{火源発熱速度 } Q : 3,000[\text{kW}] + \text{燃焼する壁面の発熱速度 } Q_{w1}[\text{kW}]$$

ここで、 Q_{w1} ＝壁材の単位発熱速度[kW/m²]×壁の燃焼面積 A_{w1} [m²]

$$A_{w1} = D_1 \times \text{燃焼高さ}$$

$$Q_1^* = \frac{Q_{w1}}{1116D_1^{5/2}}$$

- ・ただし、壁面の燃焼幅を火源代表寸法の 3 倍（ $D_1 \times 3 = 1.5 \times 3 = 4.5\text{m}$ ）とした場合、火源の発熱速度 Q_2 [kW]、代表寸法 D_2 [m]および無次元発熱速度 Q_2^* [-]は次式による。

$$Q_2[\text{kW}] = \text{火源発熱速度 } Q : 3,000[\text{kW}] + \text{燃焼する壁面の発熱速度 } Q_{w2}[\text{kW}]$$

ここで、 Q_{w2} ＝壁材の単位発熱速度[kW/m²]×壁の燃焼面積 A_{w2} [m²]

$$A_{w2} = D_2 \times \text{燃焼高さ}$$

$$D_2 = \sqrt{(4.5 \times 1.5)}[\text{m}]$$

$$Q_2^* = \frac{Q_{w2}}{1116D_2^{5/2}}$$

- ・これらより、 $Q_2^* < Q_1^*$ であれば、壁面の燃焼を考慮した火源の発熱速度は Q_1 とする。

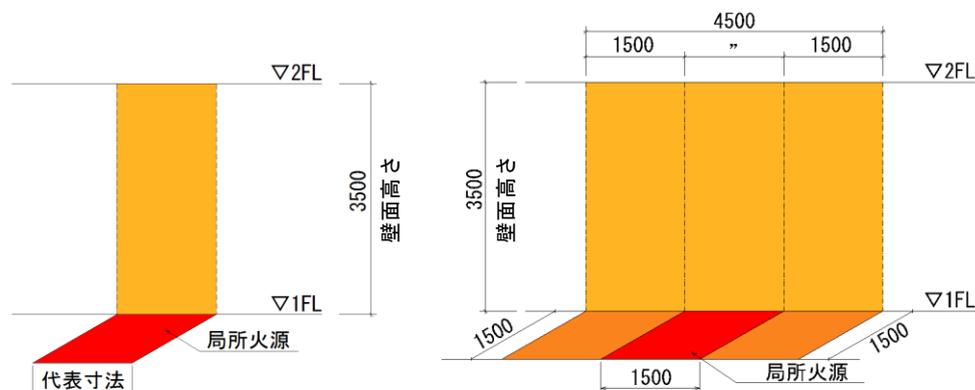


図 3.2-18 壁面の燃焼面積と無次元発熱速度の比較

そこで、本 3.2.1 では、上記の想定方法に 2024 年度（以降、本年度）に実施した木質壁の燃焼実験の結果（第 2 章 2.6）を考慮し、木質壁の燃焼範囲および燃焼を考慮した火源

の想定方法を整理する。

《参考資料》

3.2.4 : 令和5年度 林野庁補助事業「建築用木材供給・利用強化」 CLT・LVL等の建築物への利用環境整備事業のうち「CLT・LVL等を活用した建築物の低コスト化・検証等」～耐火性能が要求される木造屋根の普及に向けての調査・研究～, pp.63～64, 2024

(1) 延焼範囲の推定

本年度の実験における火源（バーナー火源，以降、実験火源）の出力すなわち発熱速度 Q は 150kW と推定される（ただし、代表寸法 $D : 0.50\text{m}$ ）ことから、無次元発熱速度 $Q^*[-]$ （参考資料 3.2.5）は

$$Q^* = \frac{Q}{1116D^{5/2}} = \frac{150}{1116 \times 0.5^{5/2}} = 0.761$$

と求められ、火炎高さの算定式（参考資料 3.2.6）のうち、壁際火源の算定式より

$$\begin{aligned} \cdot \text{連続火炎高さ} : L_c &= 2.2Q^{2/5}D = 2.2 \times 0.761^{2/5} \times 0.50 = 0.99[\text{m}] \\ \cdot \text{間欠火炎高さ} : L_f &= 4.6Q^{2/5}D = 4.6 \times 0.761^{2/5} \times 0.50 = 2.07[\text{m}] \end{aligned}$$

が得られる。

ここで、壁ブランク実験（第2章 2.6.3）の結果より、連続火炎高さは 1.00m以下、間欠火炎高さは 2.00m以下と見込める。

したがって、実験火源に基づき算定した火炎高さは、ブランク実験での火炎高さと概ね一致する。

《参考資料》

3.2.5 : 鋼構造耐火設計指針，日本建築学会，pp57，2017

3.2.6 : 鋼構造耐火設計指針，日本建築学会，pp52～54，2017

① 高さ方向の延焼範囲

本年度の壁実験の結果（第2章 2.6.4）より、連続火炎高さは 1.00m程度、間欠火炎高さは 2.00m程度と見込めることから、前述した壁際火源の算定式により得られた火炎高さと差異はなく、壁が燃焼していても火源からの火炎が支配的であり、

『実験火源による高さ方向の延焼範囲＝壁際火源の算定式により得られる間欠火炎高さ』

と見なせる。

したがって、Cルートで想定する局所火源（発熱速度 3MW，代表寸法 1.5m，以降、Cルート火源）の場合であっても、

『Cルート火源による高さ方向の延焼範囲＝壁際火源の算定式により得られる間欠火炎高さ』

とする。

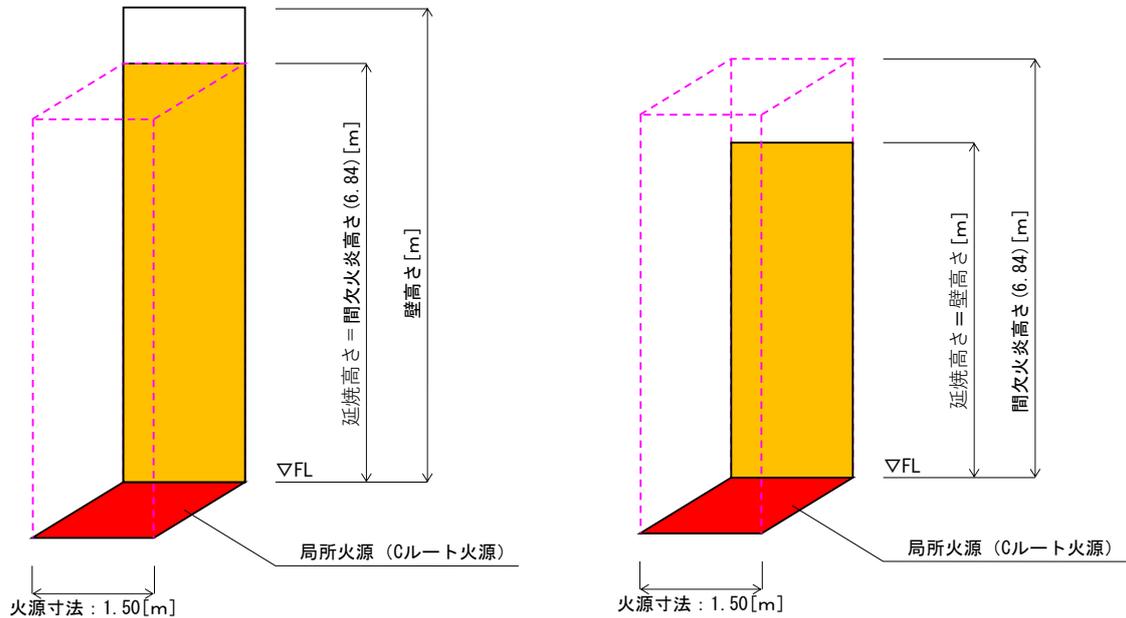
なお、Cルート火源における無次元発熱速度 $Q^*[-]$ および間欠火炎高さ $L_f[\text{m}]$ は、

・無次元発熱速度： $Q^* = \frac{Q}{1116D^{5/2}} = \frac{3000}{1116 \times 1.5^{5/2}} = 0.976$

・間欠火炎高さ： $L_f = 4.6Q^{*2/5}D = 4.6 \times 0.976^{2/5} \times 1.50 = 6.84[m]$

と求められるが、この間欠火炎高さより木質壁の高さが低い場合は、壁上端までが延焼範囲になることから、

『木質壁の高さ方向の延焼範囲（延焼高さ）＝木質壁の高さ』
とすればよい。



(a) 壁高さ > 間欠火炎高さ

(b) 壁高さ ≤ 間欠火炎高さ

図 3.2-19 木質壁の高さ方向の延焼範囲（延焼高さ）

② 水平方向の延焼範囲

本年度の壁実験の結果（第 2 章 2.6.4）からは、火源近傍すなわち連続火炎域において、壁面の水平方向へは火源寸法（0.5m）の 2 倍程度の範囲までの延焼が見られる。

ただし、C ルート火源の場合は「火炎の幅＝火源代表寸法 1.50m」（実験火源の代表寸法の 3 倍）であることから、火炎から壁面への放射の影響による延焼範囲が異なることも想定される。

そこで、連続火炎から壁面への入射熱が 10kW/m^2 以上となる範囲を壁面の水平方向の延焼範囲とし、算定手順は以下とする。

- 1) 連続火炎からの放射熱 $E_c[\text{kW/m}^2]$ は次式となる。

$$E_c = \varepsilon_c \cdot \sigma \cdot (T_c + 273)^4 = 79.93[\text{kW/m}^2]$$

ε_c : 連続火炎の放射率（=1.0）[-]

σ : ステファン・ボルツマン係数（= 5.67×10^{-11} ）[$\text{kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$]

T_c : 連続火炎の軸上温度（=820）[°C]

- 2) 連続火炎からの放射熱の受熱面、すなわち壁面から見た連続火炎の形態係数を次式

で求める。(参考資料 3.2.7)

微小平面 $dA_1 \rightarrow dA_1$ に垂直な長方形 A_2

$$F_{d1-2} = \frac{1}{2\pi} \left(\tan^{-1} Y - \frac{1}{\sqrt{1+X^2}} \tan^{-1} \frac{Y}{\sqrt{1+X^2}} \right), \quad X = \frac{a}{c}, \quad Y = \frac{b}{c}$$

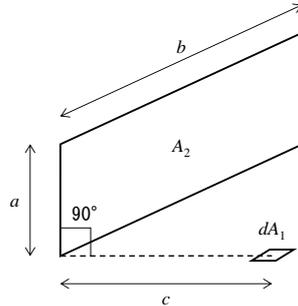


図 3.2-20 形態係数

3) 前述の放射熱 E_c および形態係数 F_{d1-2} より、連続火炎から壁面への入射熱 q_{inc-w} [kW/m²] を次式で求める。

$$q_{inc-w} = F_{d1-2} \cdot E_c$$

なお、C ルート火源においては、前述の無次元発熱速度 $Q^* : 0.976[-]$ および火源代表寸法 $D : 1.50$ [m] より、連続火炎高さ L_c [m] は、

$$L_c = 2.2Q^{*2/5}D = 2.2 \times 0.976^{2/5} \times 1.50 = 3.27$$
 [m]

と求められる。

また、前述の形態係数 F_{d1-2} の算定については、次図となる。

- a : 火炎代表寸法 (=1.50) [m]
- b : 連続火炎高さ (=3.27) [m]
- c : 連続火炎 (放射面) から壁面 (受熱面) までの距離 [m]

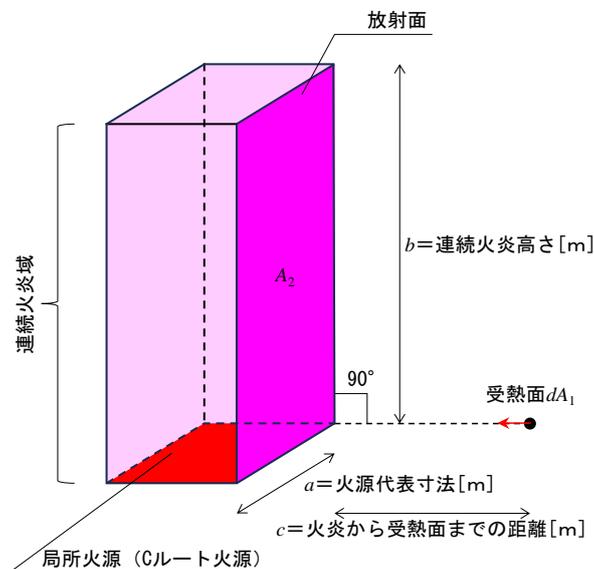


図 3.2-21 形態係数：連続火炎域 (放射面) に垂直な壁 (受熱面)

以上のことから、連続火炎から壁面までの距離と壁面への入射熱 q_{inc-w} の関係は次図と

なる。

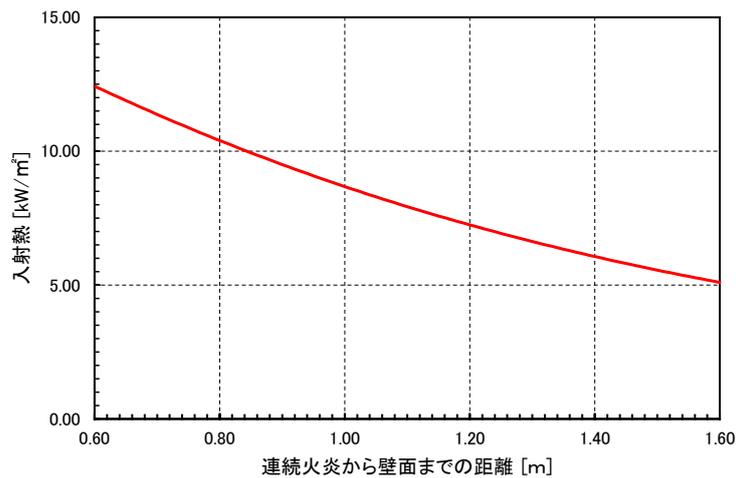


図 3.2-22 連続火炎から壁面への入射熱

これより、連続火炎から壁面までの距離が 0.84~0.85m あたりで入射熱 10kW/m²以上となる（壁面が着火する）ことから、C ルート火源からの火炎による壁面の水平方向の延焼範囲は 0.85m までとし、次図のように設定する。

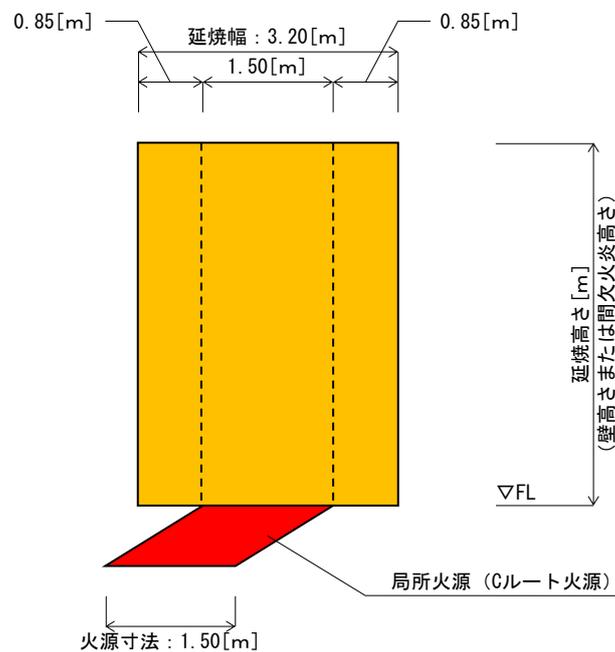


図 3.2-23 壁面の延焼範囲

なお、前述の算定方法で得られた壁面の水平方向の延焼範囲は火源寸法（1.50m）の約 2 倍であり、本年度の壁実験の結果（第 2 章 2.6.4）と概ね一致している。

《参考資料》

3.2.7 : 第 3 版 火災安全工学入門, 日本建築センター, 2020, pp115

(2) 発熱速度の推定

① 床面の延焼範囲

C ルート火源による木質壁の延焼範囲を考慮した発熱速度としては、前述の壁への延焼だけでなく、壁の燃焼からの放射熱の影響による床の延焼も考慮する。

ただし、壁の燃焼からの放射熱を連続火炎からの床面への入射熱に置き換え、この入射熱が 10kW/m^2 以上となる範囲を床面の延焼範囲とする。

なお、連続火炎による壁面の水平方向の延焼範囲と同様の手順により、床面への入射熱 $q_{\text{inc-f}}[\text{kW/m}^2]$ を算定するが、形態係数 $F_{\text{d1-2}}$ の算定においては次図となる。

- ・ a : 連続火炎高さ (=3.27) [m]
- ・ b : 火炎代表寸法 (=1.50) [m]
- ・ c : 連続火炎から壁面までの距離[m]

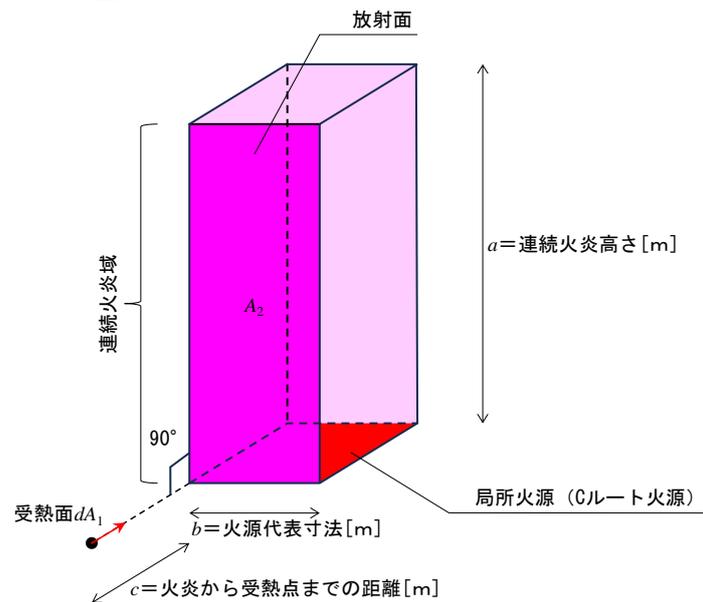


図 3.2-24 形態係数：連続火炎域（放射面）に垂直な床（受熱面）

以上のことから、連続火炎から床面までの距離と床面への入射熱 $q_{\text{inc-f}}$ との関係は次図となる。

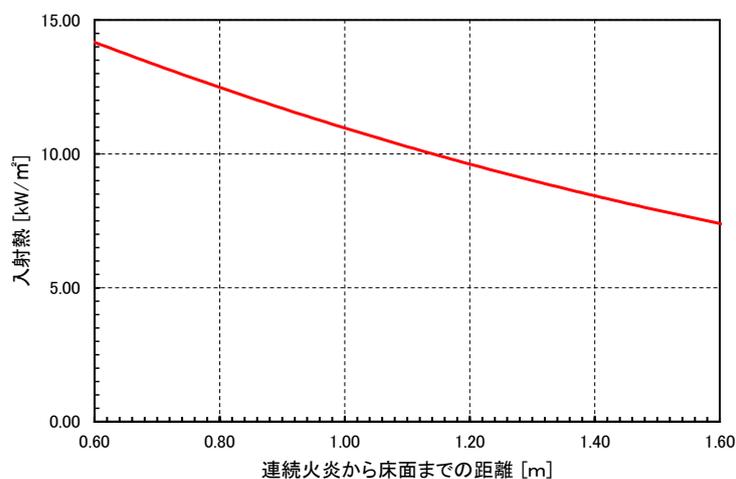


図 3.2-25 連続火炎から床面への入射熱

これより、連続火炎から床面までの距離が 1.14~1.15mあたりで入射熱 10kW/m^2 以上

となる（床面が着火する）ことから、Cルート火源からの火炎による床面の延焼範囲（延焼奥行）は連続火炎から壁面と反対方向へ1.15mまでとし、図3.2-23に示す壁面の延焼範囲もあわせ、図3.2-26のように設定する。

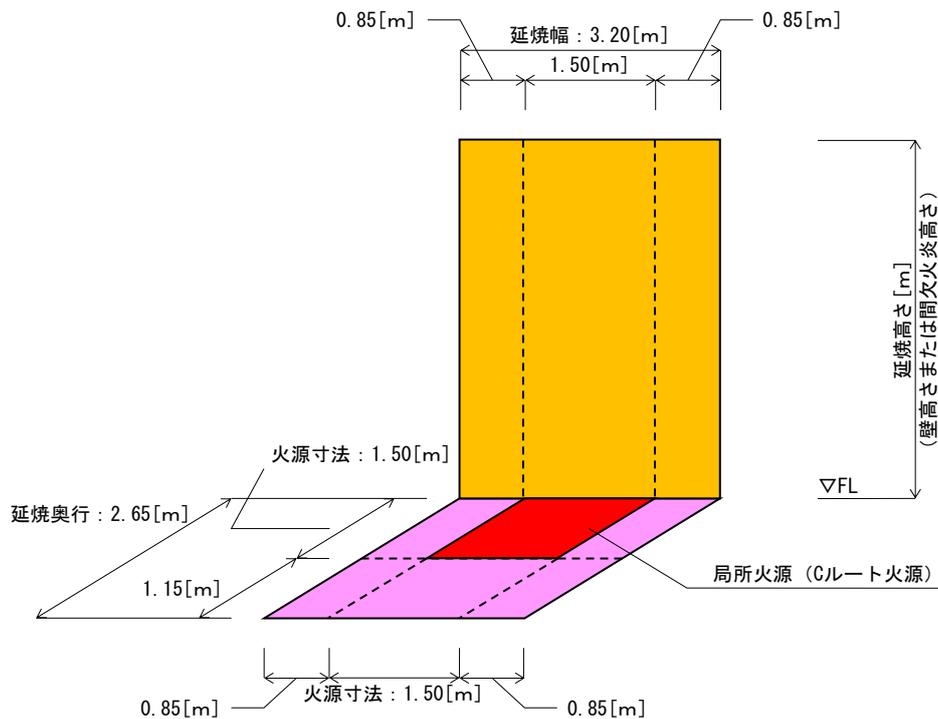


図 3.2-26 壁面および床面の延焼範囲

② 発熱速度

火炎からの入射熱による木質壁および木質床の延焼範囲を考慮した発熱速度 Q [kW]は次式とする。

$Q = 3,000\text{kW}$ (C ルート火源) + 木質壁の延焼範囲の発熱速度 + 木質床の延焼範囲の発熱速度

ここで、木質壁の延焼範囲の発熱速度[kW] = 壁材の単位発熱速度[kW/m²] × 壁の延焼範囲面積[m²]

壁の延焼範囲面積[m²] = 延焼幅[m] × 延焼高さ[m]

木質床の延焼範囲の発熱速度[kW] = 床材の単位発熱速度[kW/m²] × 床の延焼範囲面積[m²]

床の延焼範囲面積[m²] = 延焼幅[m] × 延焼奥行[m]

延焼幅 = 4.76[m], 延焼奥行 = 3.71[m]

～算定例～

木質壁および木質床の単位発熱速度を $130\text{kW}/\text{m}^2$ 程度と見込み、延焼高さを間欠火炎高さ L_f : 6.84m とした場合の発熱速度は、

$$Q = 3,000\text{kW} + 130\text{kW} \times 3.20\text{m} \times 6.84\text{m} + 130\text{kW} \times 3.20\text{m} \times 2.65\text{m} = 6,948\text{kW}$$

となる。

次に、火源代表寸法 D [m]を床面の延焼範囲（延焼幅： 3.20m ，延焼奥行： 2.65m ）の平方根とすれば、

$$D = \sqrt{3.20 \times 2.65} = 2.92[\text{m}]$$

であり、無次元発熱速度 Q^* [-]および壁際火源の火炎高さ算定式に基づく各火炎高さは以下となるが、前述の C ルート火源における火炎高さ（連続火炎高さ： 3.27m ，間欠火炎高さ： 6.84m ）に対し、木質壁の延焼を考慮した発熱速度による火炎高さは、いずれも約 1.4 倍となる。

$$\cdot \text{無次元発熱速度} : Q^* = \frac{Q}{1116D^{5/2}} = \frac{6948}{1116 \times 2.92^{5/2}} = 0.428$$

$$\cdot \text{連続火炎高さ} : L_c = 2.2Q^{*2/5}D = 2.2 \times 0.428^{2/5} \times 2.92 = 4.58[\text{m}]$$

$$\cdot \text{間欠火炎高さ} : L_f = 4.6Q^{*2/5}D = 4.6 \times 0.428^{2/5} \times 2.92 = 9.57[\text{m}]$$

なお、C ルート火源の代表寸法（ 1.50m ）と上記の発熱速度による無次元発熱速度および壁際火源の火炎高さ算定式に基づく各火炎高さは以下となる。

$$\cdot \text{無次元発熱速度} : Q^* = \frac{Q}{1116D^{5/2}} = \frac{6948}{1116 \times 1.50^{5/2}} = 2.260$$

$$\cdot \text{連続火炎高さ} : L_c = 2.2Q^{*2/5}D = 2.2 \times 2.226^{2/5} \times 1.50 = 4.58[\text{m}]$$

$$\cdot \text{間欠火炎高さ} : L_f = 4.6Q^{*2/5}D = 4.6 \times 2.226^{2/5} \times 1.50 = 9.57[\text{m}]$$

以上により、いずれの火源代表寸法であっても、各火炎高さは一致する。

3.3 煙層内温度の計算

3.3.1 本項の目的

耐火建築物とは、「想定される火災が終了した後、消火活動によらずとも崩壊せず、自立し続けられる建物である。耐火性能検証法を活用して耐火性能が求められる屋根梁等を木質材料とするには、下記のいずれかの条件を満たすことが条件となる。

- 1) 着火しない。
- 2) 着火はするが火災終了後に消火活動がなくても自消し、残存断面で長期荷重を支持できる。

本事業では、上記の内、1)を前提としている。火災時に屋根梁が着火するか否かは、収納可燃物や木質化された床および壁の燃焼により受ける熱量に加え、室内の上部に溜まった煙から受ける熱量も考慮して判定をする必要があるため、煙層内の温度を算出しなければいけない。

煙層内の温度は、火災時の建物内空間の上部は温度が高い煙層（高温層）、下部は相対的に温度が低い低温層が存在すると仮定（図 3.3-1 参照）し、それぞれの層を検査体積として火災に伴う物理的性状を調べる「二層ゾーンモデル」に簡素化し算定できる。実務的には建築研究振興協会から発行されている「BRI2002 二層ゾーン建物内煙流動モデルと予測計算プログラム」を活用して、時系列にそって解析が行われているが、火災工学の知識がなければこの計算プログラムを利用することは困難である。すると防耐火に関する検討は設計の計画段階から実施する必要があるため、火災工学の専門家が早い段階から設計業務に加われない状況では、耐火建築物の主要構造部材を、可燃物である木質材料とする案は見送られる要因になってしまう。

そこで以下のような条件を設計し、市販の表計算ソフト「EXCELL」を使って、概算にはなるが基本設計に必要な情報を整理できる計算シートを作成した。

- 1) 対象とする居室は、天井が高く、広い空間を有する1室とする。
- 2) 隣接する居室とは耐火構造の壁・床および防火設備で防火区画する。
- 3) 煙制御手段を講じ、煙層は定常状態にあると仮定する。
- 4) 収納可燃物量は、 $160\text{MJ}/\text{m}^2$ 以下とする。
- 5) 局所火源は、代表寸法 1.5m 、発熱速度は $3\text{MW}/\text{m}^2$ とする。



図 3.3-1 二層ゾーンモデル

3.3.2 煙層内の温度の算定

(1) 煙層内温度の計算手順

煙層内の温度の計算は、図 3.3-2 の手順で行う。

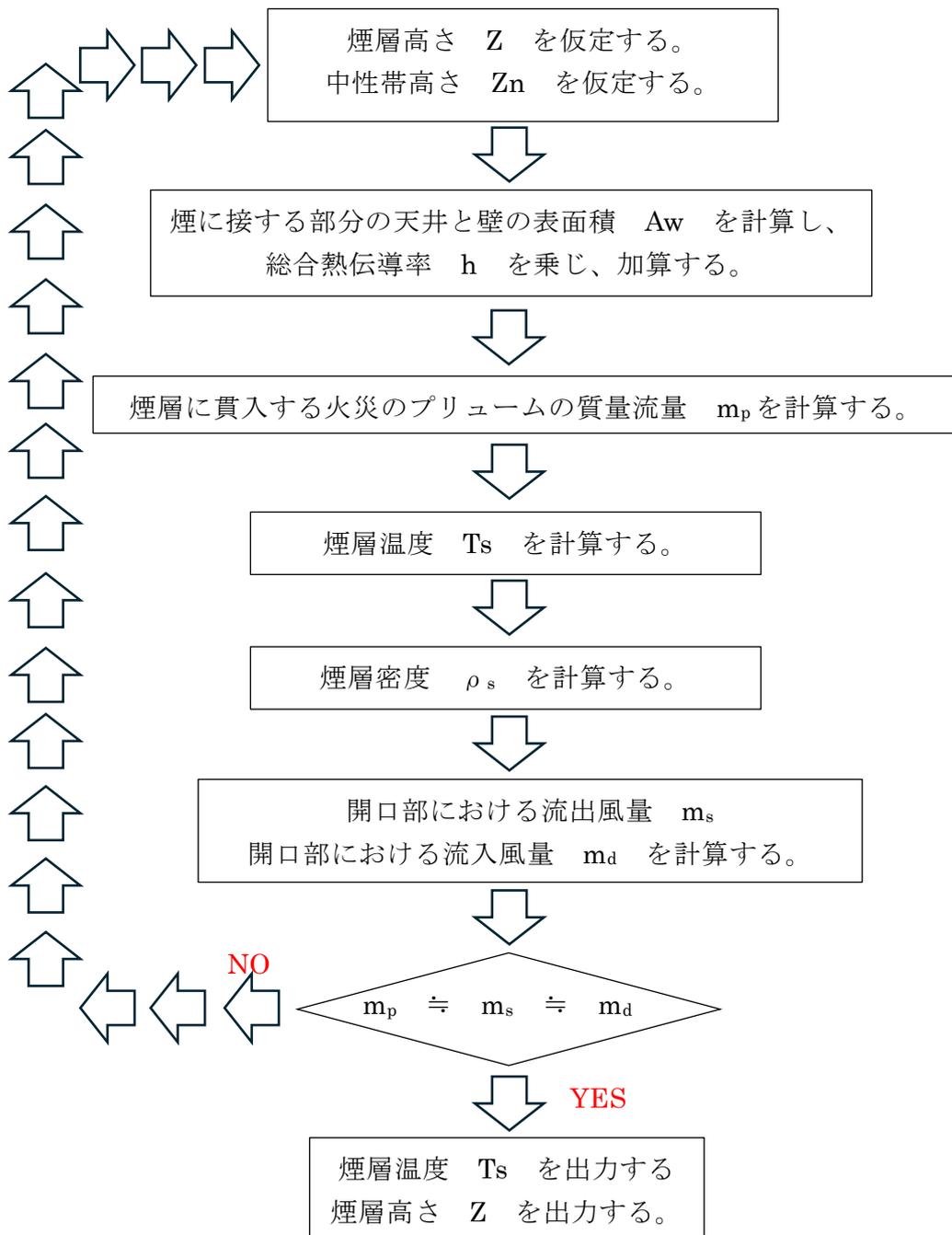


図 3.3-2 煙層温度の計算手順

(2) 煙に接する部分の天井と壁の表面積の算出

煙層に接触する天井、周壁の面積の面積は、建物の形状が仮に図 3.3-3、図 3.3-5、図 3.3-7 の場合、煙層下層の火源からの高さ（図 3.3-4、図 3.3-6、図 3.3-8 参照）に応じ、表 3.3-1～表 3.3-3 のように計算できる。

① 陸屋根

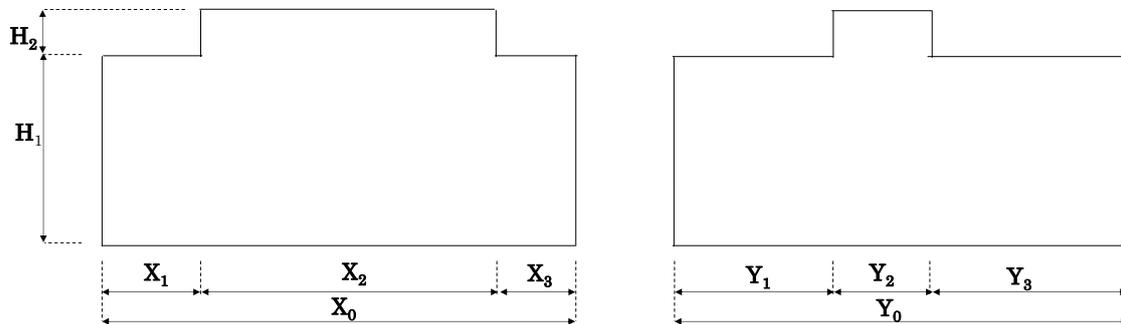


図 3.3-3 陸屋根建物の内形状

表 3.3-1 煙層に接触する天井、周壁の面積の計算表（陸屋根）

表 3.3-1-1 CASE1（図 3.3-4-1 参照）

天井面	$X_2 Y_2$
壁面	$2 (X_2 + Y_2) (H_1 + H_2 - Z)$

表 3.3-1-2 CASE2（図 3.3-4-2 参照）

天井面	越屋根部	$X_2 Y_2$
	大空間部	$X_0 Y_0 - X_2 Y_2$
壁面	越屋根部	$2 (X_2 + Y_2) H_2$
	大空間部	$2 (X_0 + Y_0) (H_1 - Z)$

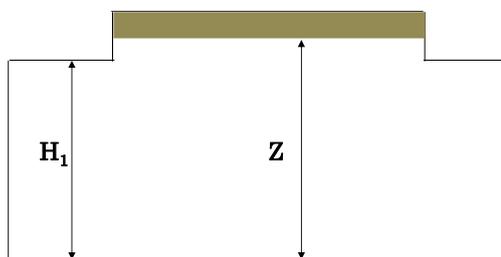


図 3.3-4-1 CASE1 ($H_1 < Z$)

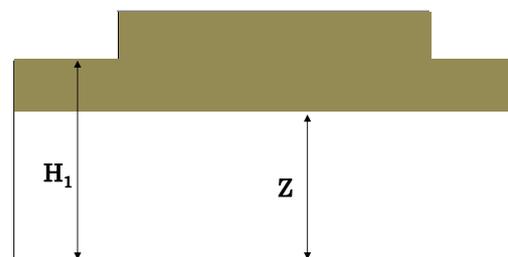


図 3.3-4-2 CASE2 ($H_1 \geq Z$)

図 3.3-4 煙層の位置の設定（陸屋根）

② 切妻屋根

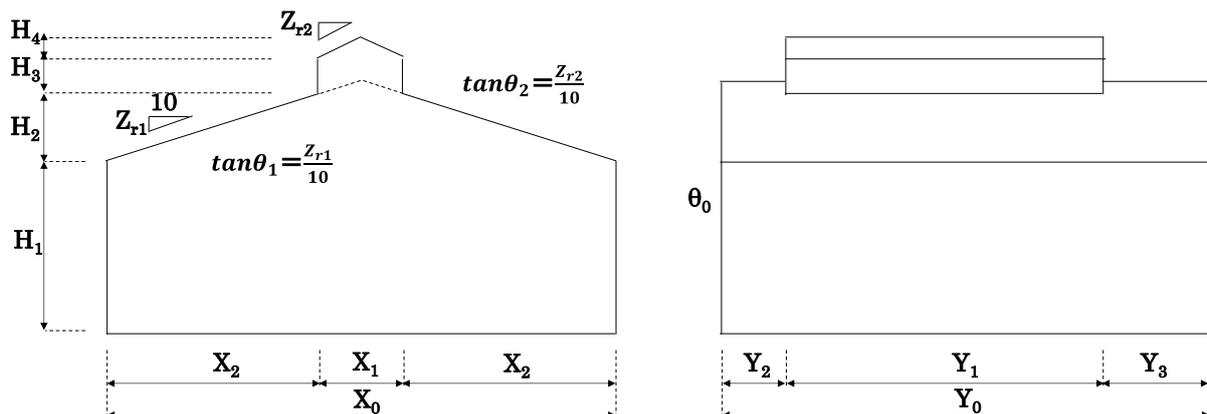


図 3.3-5 切妻屋根を持つ建物の形状

表 3.3-2 煙層に接触する天井、周壁の面積の計算表（勾配屋根）

表 3.3-2-1 CASE1（図 3.3-6-1 参照）

天井面	越屋根部	$\frac{X_1}{\cos\theta_2} Y_1$
	大空間部	$\frac{2(H_1 + H_2 - Z)}{\sin\theta_1} Y_1 + \frac{2(H_1 + \frac{X_0}{2} \tan\theta_1 - Z)}{\sin\theta_1} (Y_2 + Y_3)$
壁面	越屋根部	$X_1 H_4 + 2(X_1 + Y_1) H_3 - \frac{X_1^2}{2} \tan\theta_1$
	大空間部	$\left\{ \frac{2(H_1 + H_2 - Z)}{\tan\theta_1} + X_1 \right\}^2 \tan\theta_1 / 2$

表 3.3.2-2 CASE2（図 3.3.6-2 参照）

天井面	越屋根部	$\frac{X_1}{\cos\theta_2} Y_1$
	大空間部	$\frac{2H_2}{\sin\theta_1} Y_1 + \frac{X_0}{\cos\theta_1} (Y_2 + Y_3)$
壁面	越屋根部	$X_1 H_4 + 2(X_1 + Y_1) H_3 - \frac{X_1^2}{2} \tan\theta_1$
	大空間部	$\left(\frac{2H_2}{\tan\theta_1} + X_1 \right)^2 \tan\theta_1 / 2 + 2(X_0 + Y_0)(H_1 - Z)$

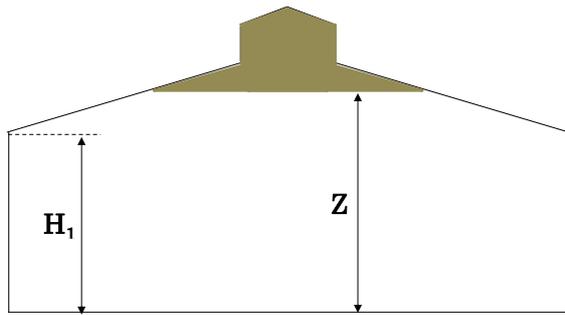


図 3.3.6-1 CASE1 ($H_1 < Z$)

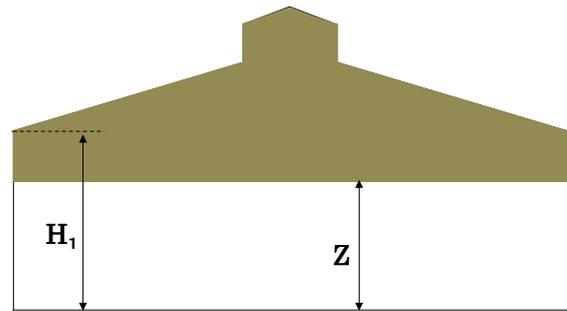


図 3.3.6-2 CASE2 ($H_1 \geq Z$)

図 3.3.6 煙層の位置の設定（勾配屋根）

③ 円型屋根

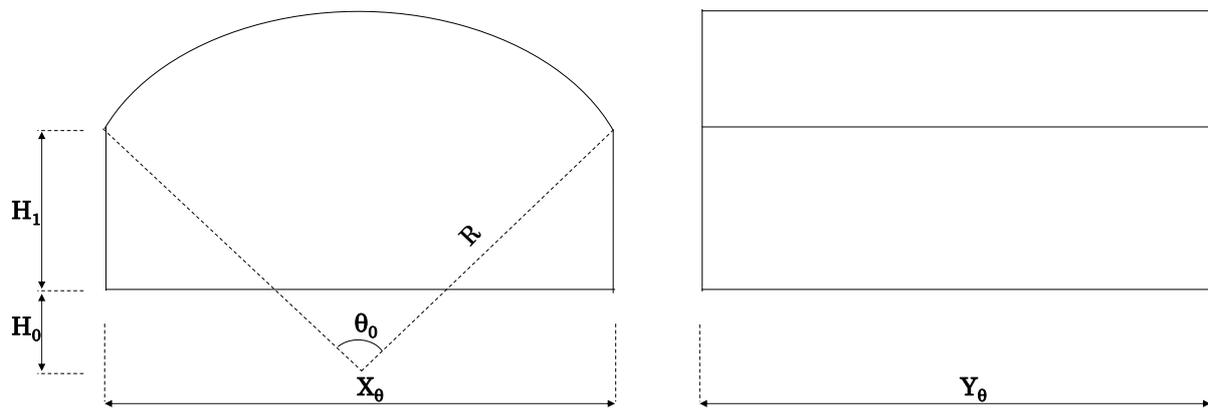


図 3.3.7 円形屋根を持つ建物の形状

表 3.3.3 煙層に接触する天井、周壁の面積の面積の計算表（円形屋根）

表 3.3.3-1 CASE1（図 3.3.8-1 参照）

天井面	$R \theta Y_0$	$\theta = 2 \cos^{-1} \left(\frac{Z + H_0}{R} \right)$
壁面	$R^2 \theta - 2R^2 \sin \left(\frac{\theta}{2} \right) \cos \left(\frac{\theta}{2} \right)$	

表 3.3.3-1 CASE2（図 3.3.8-2 参照）

天井面	$R \theta_0 Y_0$
壁面	$R^2 \theta_0 - 2R^2 \sin \left(\frac{\theta_0}{2} \right) \cos \left(\frac{\theta_0}{2} \right) + 2 (H_1 - Z) (X_0 + Y_0)$

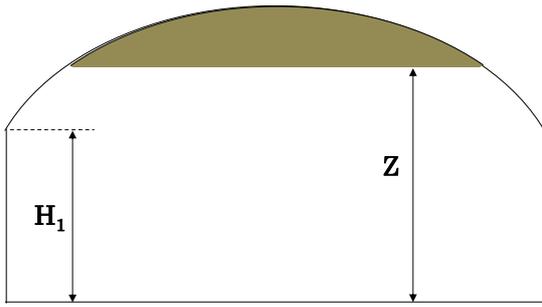


図 3.3.8-1 CASE1 ($H_1 < Z$)

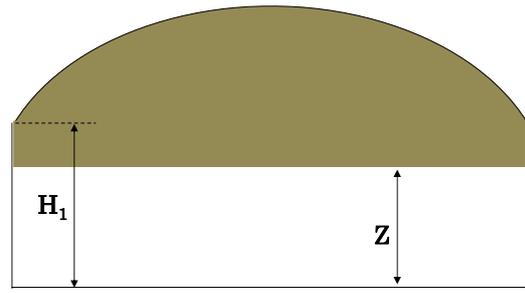


図 3.3.8-2 CASE2 ($H_1 \geq Z$)

図 3.3.8 煙層の位置の設定（勾配屋根）

(3) 煙層に貫入する火災のプルームの質量流量の計算

強さ Q (kW) の点火源（大きさを無視できる火源）から高さ z (m)の水平断面を単位時間あたりに通過する煙の質量は、参考資料 3.3.1 により、次式で与えられる。

$$m_p(z) = 0.21Q_z^{1/3} \rho_0 \sqrt{g}(z + \Delta z)^{5/3} = 0.076Q^{1/3} (z + \Delta z)^{5/3}$$

ここで

m_p : 火災プルーム量 (kg/s)

ρ_0 : 周囲空気の密度

g : 重力加速度 (=9.8 m/s²)

z : 点火源からの高さ(m)

Δz : 仮想点源深さ(m) $\Delta z = 0.50D - 0.33L_m$

L_m : 平均火炎高さ(m)

D : 代表寸法(m)

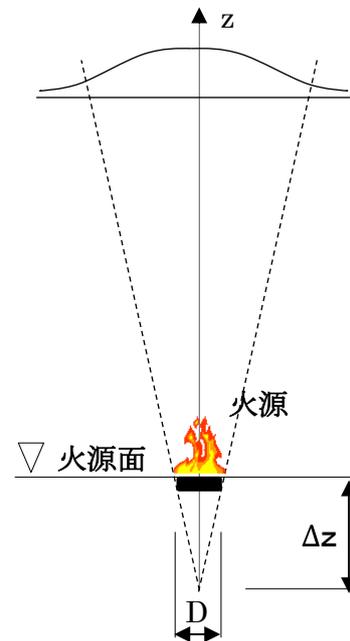


図 3.3-9 仮想点熱源

参考資料 3.3.1 : 火災性状予測計算ハンドブック、pp35～pp36, (一社) 日本建築学会、2018

(4) 開口流量

① 定常状態の条件

定常状態では、図 3.3-10 に示す \dot{m}_p (火災プルームを通じて煙層に流入する質量流速 (kg/s))、 \dot{m}_d (開口から火災室への空気流入速度 (kg/s))、および \dot{m}_s (開口から火災室からの煙の排出速度 (kg/s)) の関係が、下記式となることを条件とする。

$$\dot{m}_d = \dot{m}_s = \dot{m}_p$$

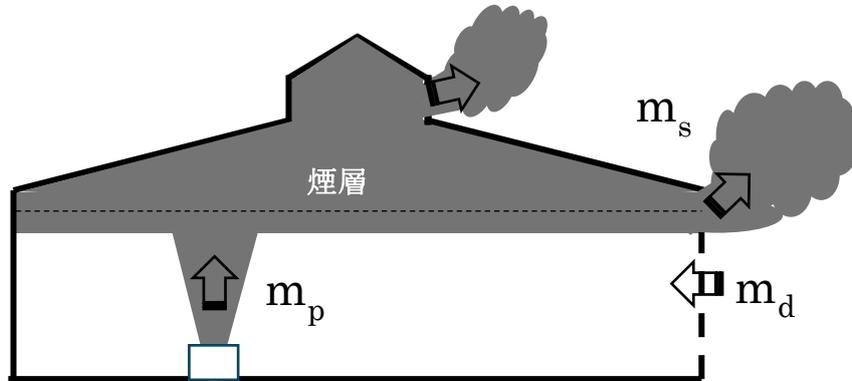
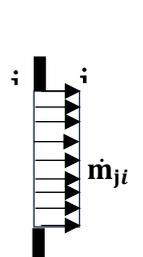
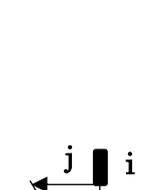
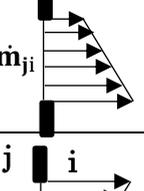


図 3.3-10 定常状態のイメージ

② 開口部を通過する気体流量

圧力差のある隣接する 2 つの空間の境界面にある開口部を通る気体の流量の計算式を、開口部の上下の高さと 2 つの空間の圧力が同じになる中性帯との関係から、参考資料 3.3.2 より表 3.3-4 にまとめる。

表 3.3-4 開口高さとの諸関係における開口流量 (単位 : kg/s)

判別条件		パターン	流量計算式
$\rho_j = \rho_i$	$p_j \leq p_i$		$\dot{m}_{ij} = \alpha B (H_u - H_l) \sqrt{2\rho_i \Delta p}$ $\dot{m}_{ji} = 0$
	$p_j > p_i$		$\dot{m}_{ij} = 0$ $\dot{m}_{ji} = \alpha B (H_u - H_l) \sqrt{2\rho_j \Delta p}$
$\rho_j > \rho_i$	$Z_n \leq H_l$		$\dot{m}_{ij} = \frac{2}{3} \alpha B \sqrt{2g\rho_i \Delta \rho} \times \{(H_u - Z_n)^{3/2} - (H_l - Z_n)^{3/2}\}$ $\dot{m}_{ji} = 0$
	$H_l < Z_n < H_u$		$\dot{m}_{ij} = \frac{2}{3} \alpha B \sqrt{2g\rho_i \Delta \rho} (H_u - Z_n)^{3/2}$ $\dot{m}_{ji} = \frac{2}{3} \alpha B \sqrt{2g\rho_j \Delta \rho} (Z_n - H_l)^{3/2}$
	$H_u \leq Z_n$		$\dot{m}_{ij} = 0$ $\dot{m}_{ji} = \frac{2}{3} \alpha B \sqrt{2g\rho_j \Delta \rho} \times \{(Z_n - H_l)^{3/2} - (Z_n - H_u)^{3/2}\}$
$\rho_j < \rho_i$	$Z_n \leq H_l$		$\dot{m}_{ij} = 0$ $\dot{m}_{ji} = \frac{2}{3} \alpha B \sqrt{2g\rho_j \Delta \rho} \times \{(H_u - Z_n)^{3/2} - (H_l - Z_n)^{3/2}\}$
	$H_l < Z_n < H_u$		$\dot{m}_{ij} = \frac{2}{3} \alpha B \sqrt{2g\rho_i \Delta \rho} (Z_n - H_l)^{3/2}$ $\dot{m}_{ji} = \frac{2}{3} \alpha B \sqrt{2g\rho_j \Delta \rho} (H_u - Z_n)^{3/2}$
	$H_u \leq Z_n$		$\dot{m}_{ij} = \frac{2}{3} \alpha B \sqrt{2g\rho_i \Delta \rho} \times \{(Z_n - H_l)^{3/2} - (Z_n - H_u)^{3/2}\}$ $\dot{m}_{ji} = 0$

Z_n : 中性帯高さ(m)、 α : 流量係数 (通常 0.7 程度)

H_u : 開口の上端高さ(m)、 H_l : 開口の下端高さ(m)、 B :開口幅 (m)

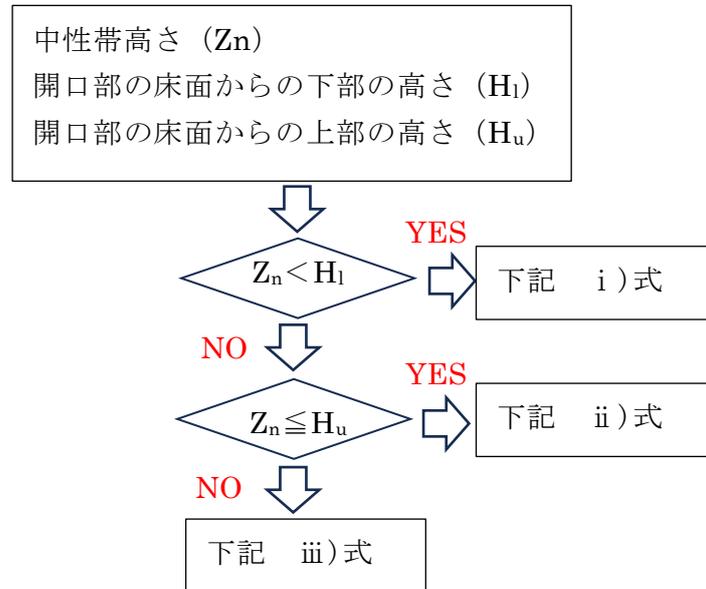
p : 圧力 (Pa)、 $\Delta p = |p_i - p_j|$ 、 ρ : 密度 (kg/m³)、 $\Delta \rho = |\rho_i - \rho_j|$

参考資料 3.3.2 : 田中哮義, 建築火災安全工学入門, pp171, (財)日本建築センター, 1993

参考資料 3.3.3 : 火災性状予測計算ハンドブック, pp66, (一社) 日本建築学会, 2018

③ 火災室からの煙排出量の計算

側壁上に多数の開口部が設けられている場合、煙層の高さ (Z)、中世帯の高さ (Z_n)、開口部の床面からの下部の高さ (H_l) および開口部の床面からの上部の高さ (H_u) の位置関係により、それぞれの開口での火災室からの煙排出量の計算は、表 3.3-4 により図 3.3-11 のフローで計算することができる (図 3.3-12 参照)。



i) 式 : $\dot{m}_S = \frac{2}{3} \alpha B \sqrt{2g\rho_s \Delta\rho} \times \{(H_u - Z_n)^{3/2} - (H_l - Z_n)^{3/2}\}$

ii) 式 : $\dot{m}_S = \frac{2}{3} \alpha B \sqrt{2g\rho_s \Delta\rho} \times (H_u - Z_n)^{3/2}$

iii) 式 : $\dot{m}_S = 0$

図 3.3-11 火災室から隣接する室外への煙流出量算出のフロー

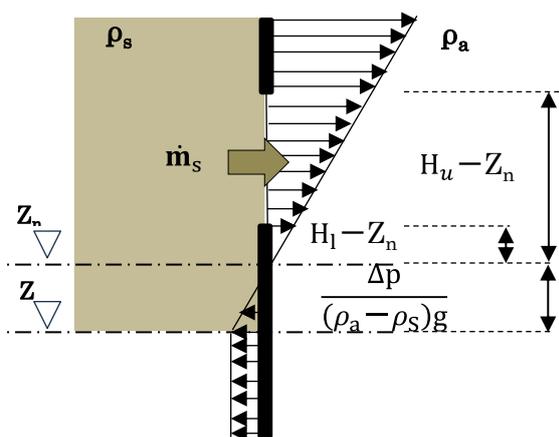


図 3.3-12-1 CASE 1 ($Z_n < H_l$)

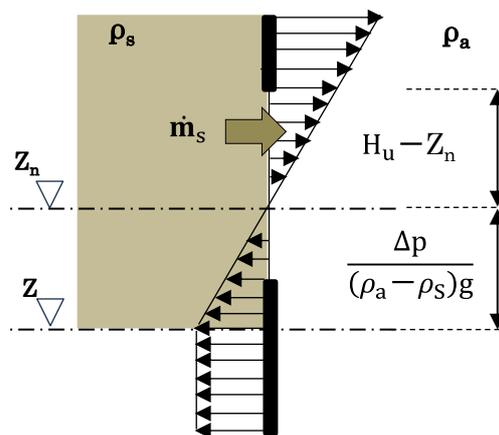


図 3.3-12-2 CASE2 ($H_l \leq Z_n \leq H_u$)

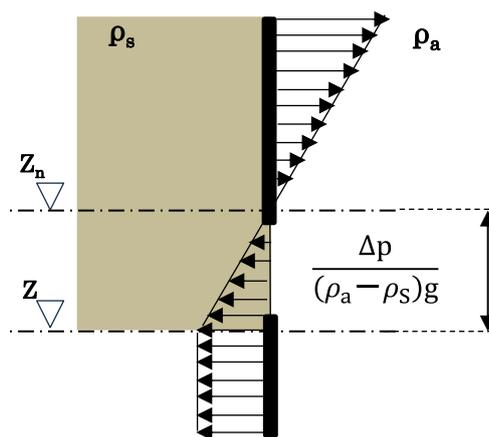
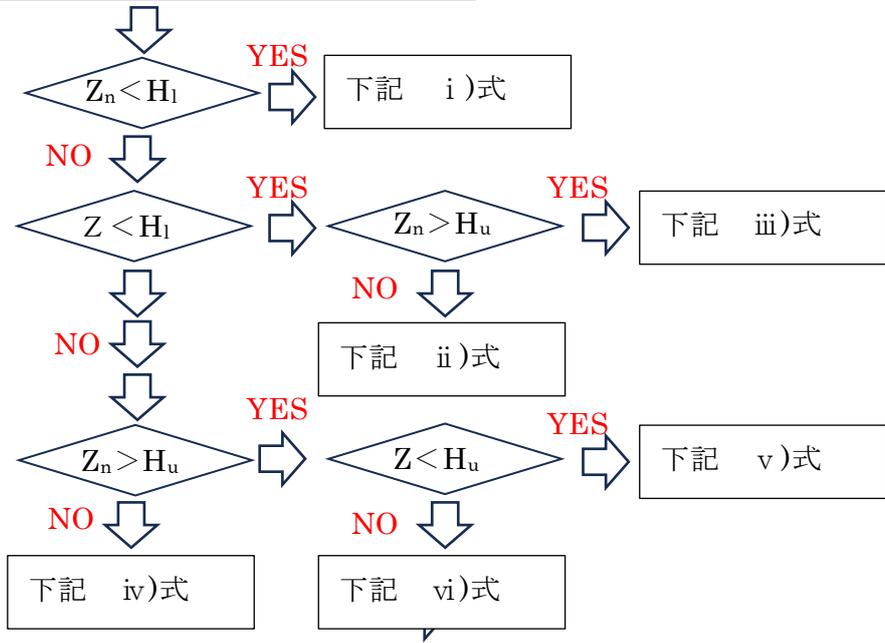


図 3.3-12-2 CASE2 ($H_u < Z_n$)

図 3.3-12 火災室と隣接する屋外間の圧力差

④ 側壁上に多数の開口部が設けられている場合、煙層の高さ (Z)、中世帯の高さ (Z_n)、開口部の床面からの下部の高さ (H_l) および開口部の床面からの上部の高さ (H_u) の位置関係により、それぞれの開口での火災室への気体の流入量の計算は、表 3.3-4 により図 3.3-13 のフローで計算することができる (図 3.3-14 参照)。

煙層の下端高さ (Z)
 中性帯高さ (Zn)
 開口部の床面からの下部の高さ (H_l)
 開口部の床面からの上部の高さ (H_u)



i)式 : $\dot{m}_d = 0$

ii)式 : $\dot{m}_d = \frac{2}{3} \alpha B \sqrt{2g\rho_a \Delta p} \times (Z_n - H_l)^{3/2}$

iii)式 : $\dot{m}_d = \frac{2}{3} \alpha B \sqrt{2g\rho_a \Delta p} \times \{(Z_n - H_l)^{3/2} - (Z_n - H_u)^{3/2}\}$

iv)式 : $\dot{m}_d = \frac{2}{3} \alpha B \sqrt{2g\rho_a \Delta p} \times (Z_n - Z)^{3/2} + \alpha B (Z - H_l) \sqrt{2\rho_a \Delta p}$

v)式 : $\dot{m}_d = \frac{2}{3} \alpha B \sqrt{2g\rho_a \Delta p} \times \{(Z_n - Z)^{3/2} - (Z_n - H_u)^{3/2}\} + \alpha B (Z - H_l) \sqrt{2\rho_a \Delta p}$

vi)式 : $\dot{m}_d = \alpha B (H_u - H_l) \sqrt{2\rho_a \Delta p}$

図 3.3-13 火災室から隣接する室外への煙流出量算出のフロー

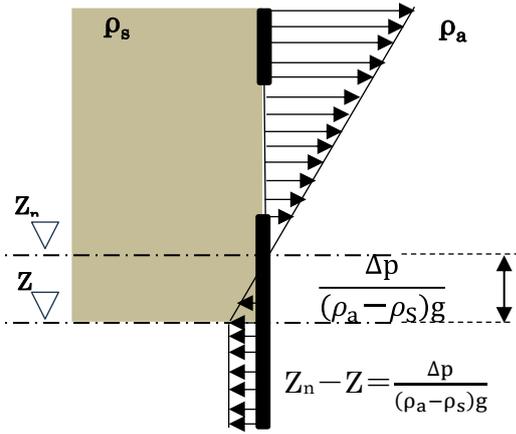


図 3.3-14-1 CASE 1 ($Z < Z_n < H_1$)

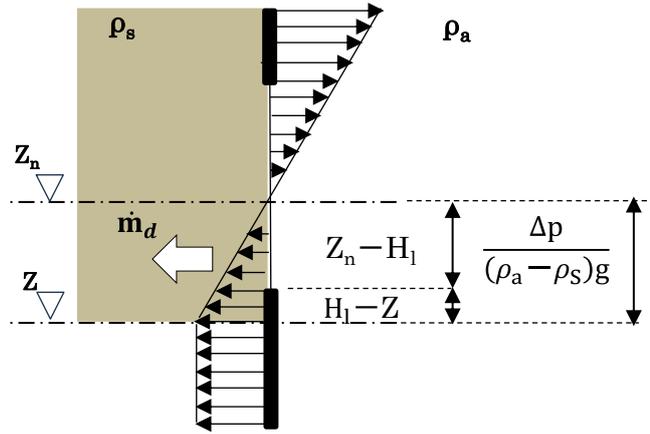


図 3.3-14-2 CASE2 ($Z < H_1 \leq Z_n < H_u$)

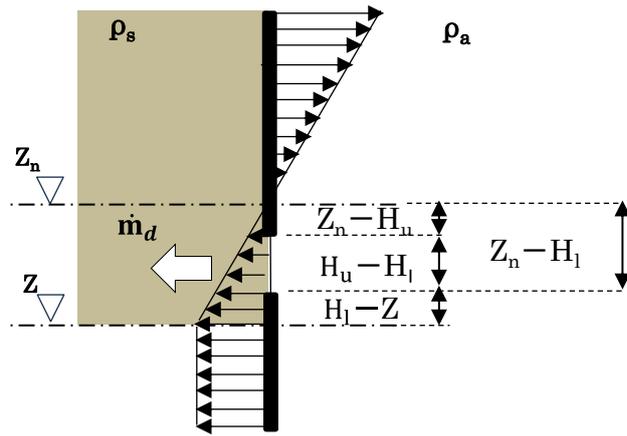


図 3.3-14-3 CASE3 ($Z < H_1 \leq H_u \leq Z_n$)

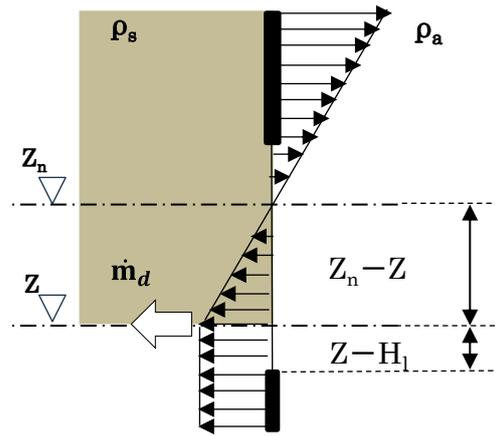


図 3.3-14-4 CASE4 ($H_1 \leq Z < Z_n < H_u$)

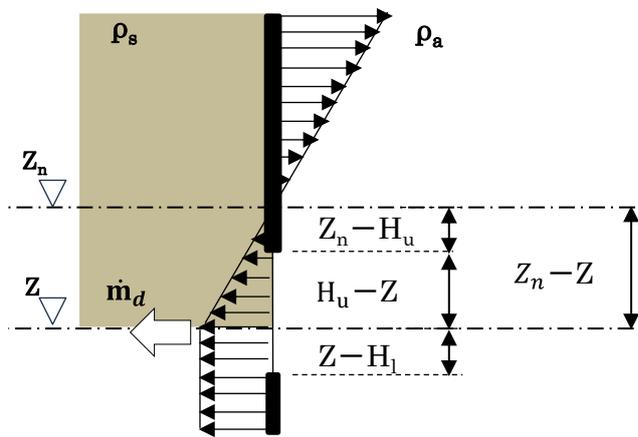


図 3.3-14-5 CASE5 ($H_1 \leq Z < H_u \leq Z_n$)

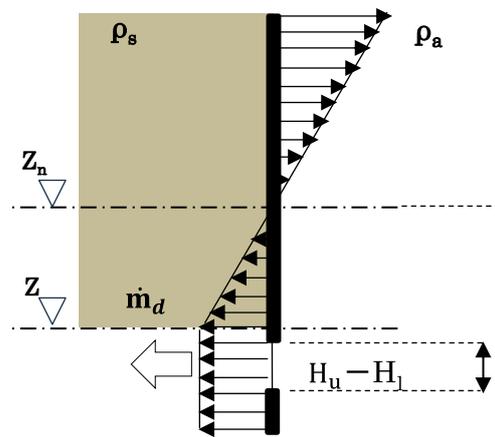


図 3.3-14-6 CASE6 ($H_1 < H_u \leq Z < Z_n$)

図 : 3.3-14 火災室と隣接する屋外間の圧力差

⑤ 空間上部に自然排煙口を設ける場合

定常状態で、火災室の上方に自然排煙口がある場合の煙層の状態を図 3.3-15 に示す。

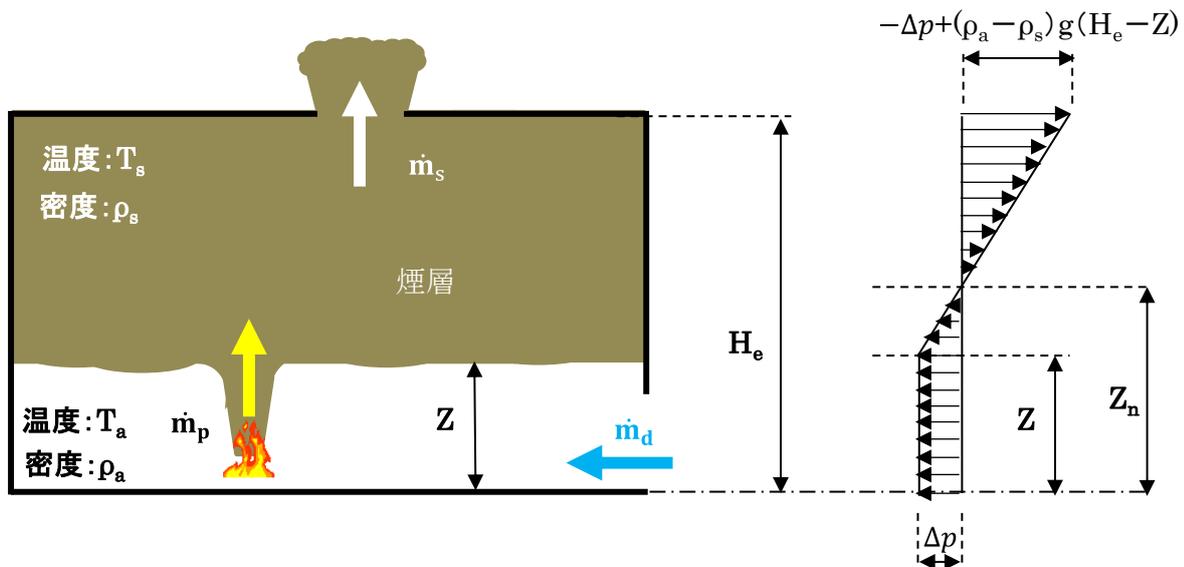


図 3.3-15 定常状態 火災室の上部に自然排煙口がある場合の屋外と室内の圧力差

ここで

\dot{m}_d : 開口から火災室への空気流入速度(kg/s)

\dot{m}_s : 自然排煙口から火災室からの煙の排出速度(kg/s)

\dot{m}_p : 火災プルームを通じて煙層に流入する質量流速(kg/s)

定常状態であるため、 $\dot{m}_d = \dot{m}_s = \dot{m}_p$ となる。

開口から火災室への空気流入速度は、参考資料 3.3.4 より、下記の式となる。

$$\dot{m}_d = \alpha A_d (2\rho_a \Delta p)^{1/2}$$

また自然排煙口から火災室からの煙の排出速度は、参考資料 3.3.4 より、下記の式となる。

$$\dot{m}_s = \alpha A_e \left[2\rho_s \left\{ -\Delta p + \Delta\rho g(H_e - Z) \right\} \right]^{1/2}$$

ここで A_d および A_e は、共に開口面積を示す。

参考資料 3.3.4 : 田中哮義, 建築火災安全工学入門, pp179~pp180, (財)日本建築センター, 1993

⑥ 機械排煙により煙を制御する場合

定常状態で、機械排煙で煙を制御する場合の煙層の状態を図 3.3-16 に示す。

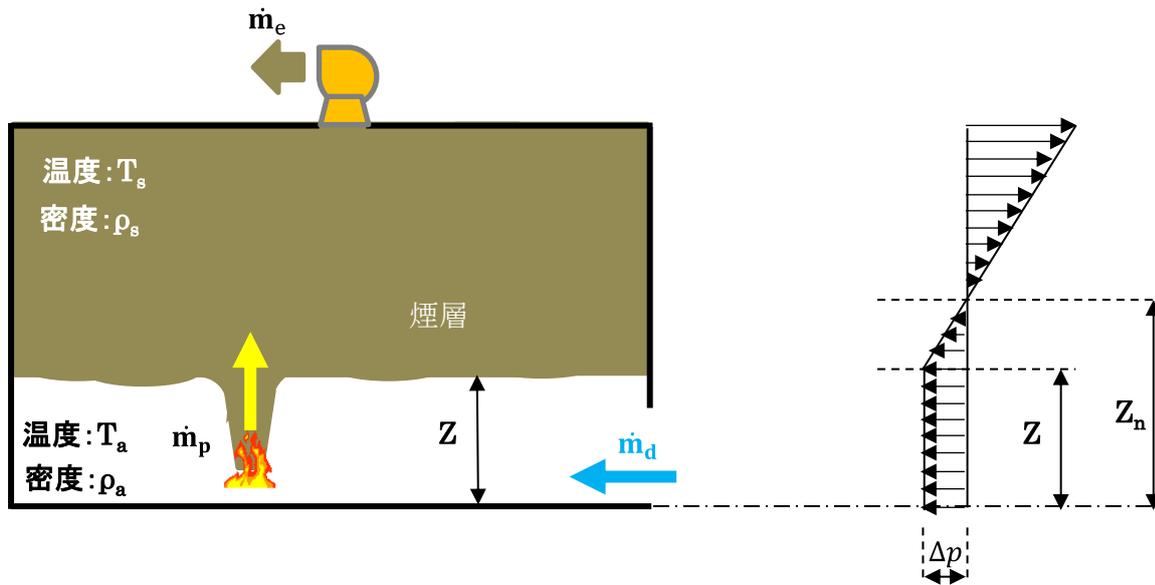


図 3.3-16 定常状態 機械排煙時の屋外と室内の圧力差

ここで

\dot{m}_d : 開口から火災室への空気流入速度(kg/s)

\dot{m}_e : 機械排煙設備による煙の排出速度(kg/s)

\dot{m}_p : 火災プルームを通じて煙層に流入する質量流速(kg/s)

定常状態であるため、 $\dot{m}_d = \dot{m}_e = \dot{m}_p$ となる。

開口から火災室への空気流入速度は、参考資料 3.3.5 より、下記の式となる。

$$\dot{m}_d = \alpha A_d (2\rho_a \Delta p)^{1/2}$$

また開口から火災室からの煙の排出速度は、参考資料 3.3.5 より、下記の式となる。

$$\dot{m}_e = \rho_s V_e$$

ここで

V_e : 風量 (m³/s)

参考資料 3.3.5 : 田中哮義, 建築火災安全工学入門, pp180~pp181, (財)日本建築センター, 1993

(5) 火災初期における煙層内のエネルギー保存

予測の対象を火災初期に限定するので周壁の温度上昇は無視する。また煙層温度も輻射が熱伝達の主体となるほど高くないため、煙層内のエネルギー保存の式は、参考資料 3.3.6 により、下記となる。それぞれの式を変換し、煙層内の温度 (T_s) および煙層内の気体密度 (ρ_s) を計算することができる。

(i) 側壁上の開口による排煙とする場合

$$\dot{Q} - c_p \dot{m}_s (T_s - T_a) - h A_w (T_s - T_a) = 0 \quad T_s = T_a + \frac{\dot{Q}}{c_p \dot{m}_s + h A_w}$$

$$\dot{m}_s = \dot{m}_p \text{ のとき } T_s = T_a + \frac{\dot{Q}}{c_p \dot{m}_p + h A_w} \quad \rho_s = \frac{353}{T_s}$$

(ii) 空間上部に自然排煙口を設ける場合

$$\dot{Q} - c_p \dot{m}_s (T_s - T_a) - h A_w (T_s - T_a) = 0 \quad T_s = T_a + \frac{\dot{Q}}{c_p \dot{m}_s + h A_w}$$

$$\dot{m}_s = \dot{m}_p \text{ のとき } T_s = T_a + \frac{\dot{Q}}{c_p \dot{m}_p + h A_w} \quad \rho_s = \frac{353}{T_s}$$

(iii) 機械排煙により煙を制御する場合

$$\dot{Q} - c_p \dot{m}_p (T_s - T_a) - h A_w (T_s - T_a) = 0 \quad T_s = T_a + \frac{\dot{Q}}{c_p \dot{m}_p + h A_w} \quad \rho_s = \frac{353}{T_s}$$

ここで

c_p : 火災室下層部空気の比熱 (kJ/kgK)

T_s : 煙層内の温度 (K)

T_a : 火災室下層部の温度 (K)

A_w : 煙層に接触する天井、周壁の面積

h : 総合熱伝達率 (kW/m²K) 0.01~0.02

表 3.3.4 空気の熱物性値

T : 温度 (K)	ρ : 密度 (kg/m ³)	c_p : 比熱 (kJ/kgK)
300	1.1763	1.007
400	0.8818	1.015
500	0.7053	1.031
600	0.5878	1.052
800	0.4408	1.099
1000	0.3527	1.142

*参考資料 3.3.7

参考資料 3.3.6 : 田中哮義, 建築火災安全工学入門, pp178~pp181, (財)日本建築センター, 1993

参考資料 3.3.7 : 田中哮義, 建築火災安全工学入門, pp263, (財)日本建築センター, 1993

3.4 計算事例

(1) 陸屋根の事例

① 建物概要

図 3.4-1、および図 3.4-2 のような大きな空間を有する建物を想定し、発熱速度 3,000kW、代表寸法 $D=1.5\text{m}$ の火源に対して、煙層内の温度、火源から煙層の下の高さおよび中性帯の位置を計算する。

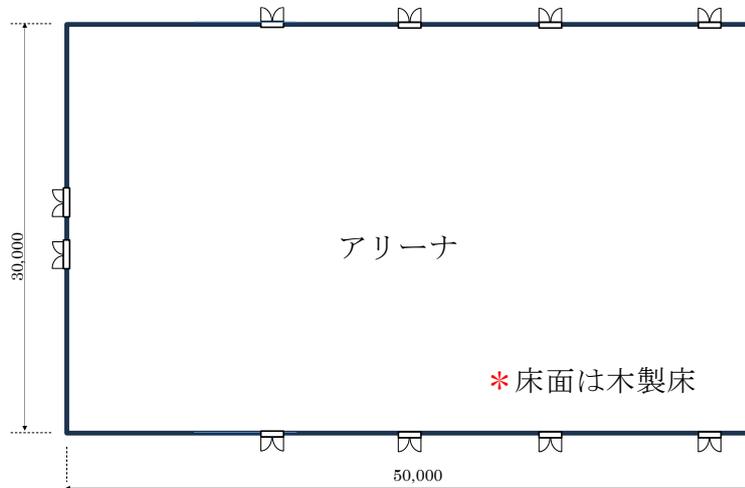


図 3.4-1 平面図

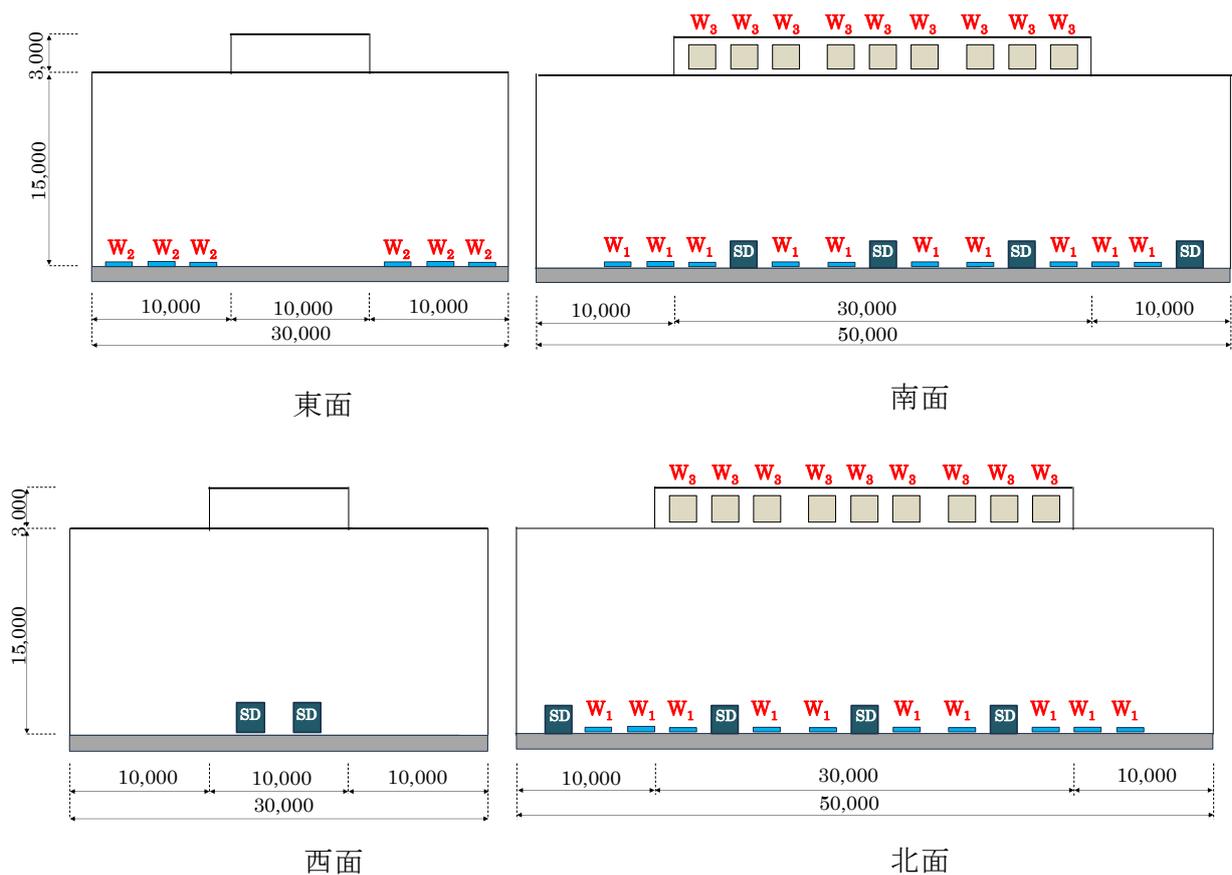


図 3.4-2 立面図

② 煙層に接触する天井、周壁の面積の計算

表 3.3-1 に入力する図 3.3-3 の各寸法を下記に示す。

$H_1=$	15.00 m	$X_0=$	50 m	$Y_0=$	30 m
$H_2=$	3 m	$X_1=$	10 m	$Y_1=$	10 m
		$X_2=$	10 m	$Y_2=$	10 m

③ 煙層に貫入する火災のプルームの質量流量

本章 3.3.1 より強さ $Q(kW)$ は、下記の加算値とする

局所火源による発熱速度 3,000 kW

木製床の燃焼による発熱速度 744 kW

煙層に貫入する火災のプルームの質量流量は下記式にて算出する。

$$\dot{m}_p(z) = 0.076 Q^{1/3} (z + \Delta z)^{5/3}$$

ここで

\dot{m}_p : 火災プルーム量 (kg/s)

z : 点火源からの高さ(m)

Δz : 仮想点源深さ(m) $\Delta z = 0.50D - 0.33L_m$ (Zukoski, E.E 等による)

L_m : 平均火炎高さ(m)

D : 代表寸法(m)

無次元発熱速度 $Q^*[-]$ (参考資料 3.2.5) は

$$Q^* = \frac{Q}{1116D^{5/2}} = \frac{3,744}{1116 \times 1.5^{5/2}} = 1.22$$

平均火炎高さ L_m は参考資料 3.4.1 より

$$L_m = 3.4Q^{*(2/5)}D = 5.518m$$

よって仮想点源深さ Δz は

$$\Delta z = 0.5D - 0.33L_m = -1.07m$$

④ 火災室からの煙排出量および火災室への空気の注入量の計算を図 3.3-11 および図 3.3-13 に従って実施するにあたり、開口部の大きさ、開口部の高さ、およびと数量を表 3.4-1 のように入力する。

表 3.4-1 開口部の入力情報

建具記号	開口幅 B m	開口高さ H m	上端 高さ H _u m	下端高さ H _l m	数量	α
W1	1.80	0.50	0.50	0.00	20	0.7
W2	1.80	0.50	0.50	0.00	6	0.7
W3	1.80	2.00	17.50	15.50	18	0.7

* 開口部の上端高さ、下端高さは床面からの高さを示す。

* α : 理論流束に対する実際の流速の補正係数である流量係数 (通常 0.7 程度)

⑤ 計算結果

煙層内の比熱は表 3.3-4 を参考に温度が概ね 350K 程度と仮定し 300K と 400K の平均値として入力し、 $\dot{m}_p \cong \dot{m}_s \cong \dot{m}_d$ となるまで Excell を使って計算する。その結果を下記に示す。

煙層高さ $Z = 11.530$ m

中性帯高さ $Z_n = 15.693$ m $Z_n - Z = 4.163$ m

火源の発熱速度 $Q = 3744$ kW

火源の代表寸法 $D = 1.5$ m 無次元発熱速度 $\dot{Q} = 1.21743$

平均火源高さ $L_m = 5.518$ m

仮想点源深さ $\Delta z = -1.07$ m

煙層に流入する質量流速 $\dot{m}_p = 59.032$ kg/m³

煙層内の比熱 $cp = 1.011$ kJ/kgK

煙層内の温度 $T_s = 338.3$ K = 65.31 °C

煙層内の気体密度 $\rho_s = 1.043$

開口部からの気体の流出量 $\dot{m}_s = 59.09$ kg/s

開口部からの気体の流入量 $\dot{m}_d = 59.12$ kg/s

表 3.4-2 煙層内の天井および周壁面積の計算表

仕上げ面	A_w m ²	h kW/m ² · K	ΣhA_w kW/K
越屋根部小屋裏天井	300	0.01	3
越屋根部小屋裏壁	240	0.01	2.4
大空間勾配天井	1200	0.01	12
大空間壁	555.2	0.01	5.552
		計	22.95

表 3.4-3 開口部からの煙の流出および気体の流入量の計算表

建具記号	開口幅 B m	開口高さ H m	上端高さ H _u m	下端高さ H _l m	数量	α	g m/s ²	ρ_s	ρ_a	Z m	Z _n m	Δp Pa	開口部流入出力		
													ms	md	
													kg/s		
W1	1.80	0.50	0.50	0.00	20	0.7	9.8	1.04	1.17	11.5	15.7	5.16	0	43.79917	
W2	1.80	0.50	0.50	0.00	6	0.7	9.8	1.04	1.17	11.5	15.7	5.16	0	13.139751	
W3	1.80	2.00	17.50	15.50	18	0.7	9.8	1.04	1.17	11.5	15.7	5.16	59.090705	2.184137	
													計	59.09	59.12

(2) 勾配屋根の事例

① 建物概要

図 3.4-3、および図 3.4-4 のような大きな空間を有する建物を想定し、発熱速度 3,000kW、代表寸法 $D=1.5\text{m}$ の火源に対して、煙層内の温度、火源から煙層の下の高さおよび中性帯の位置を計算する。

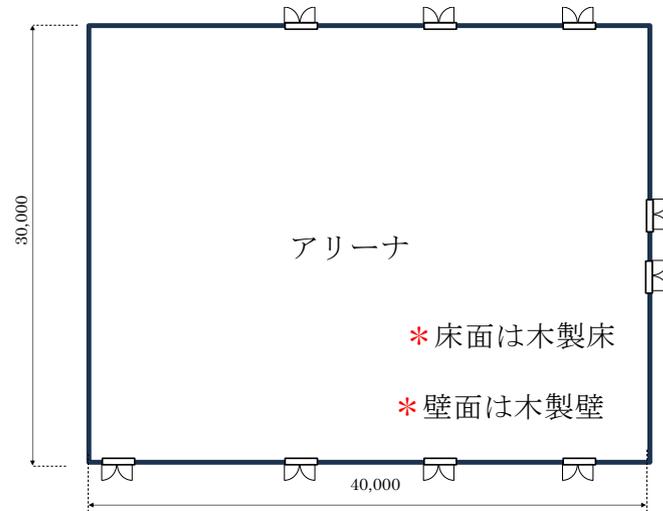


図 3.4-3 平面図

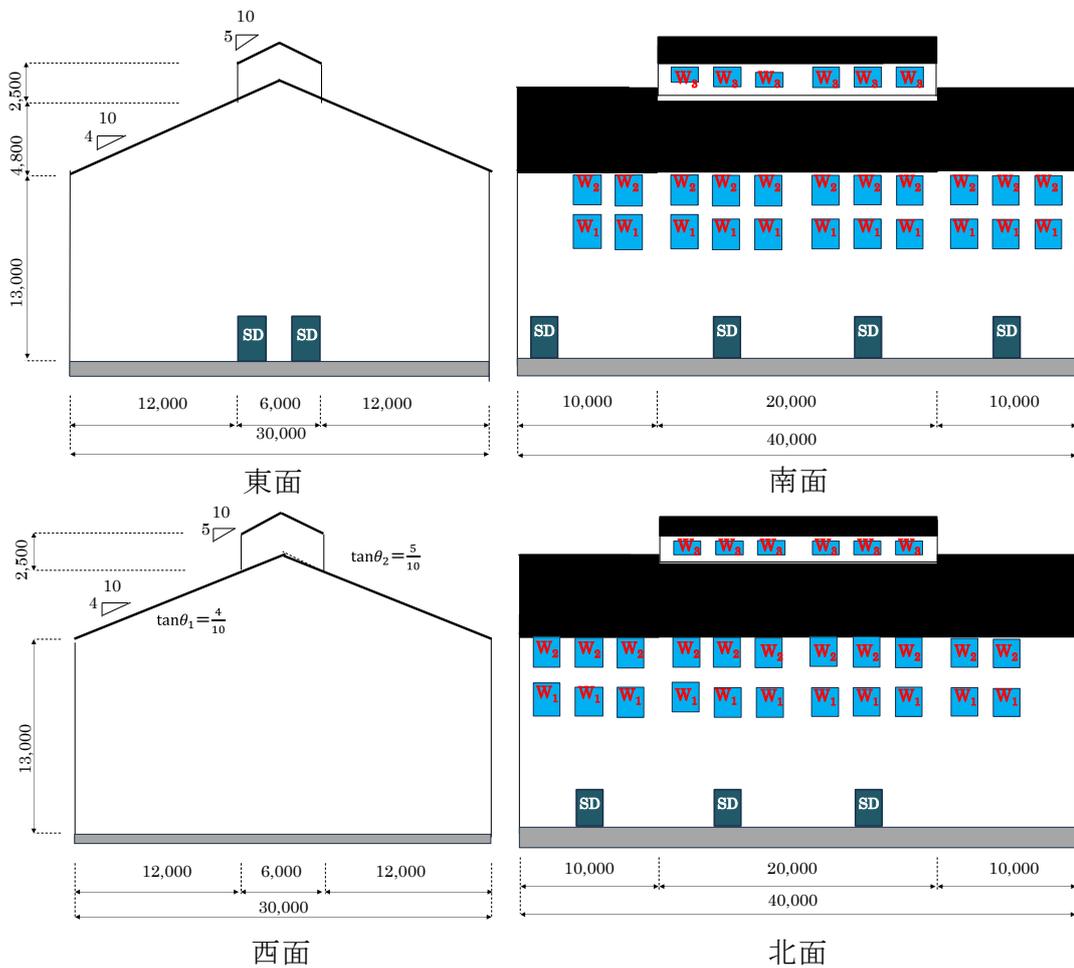


図 3.4-4 立面図

② 煙層に接触する天井、周壁の面積の計算

表 3.3-1 に入力する図 3.3-6 の各寸法を下記に示す。

一般 $Z_{r1} = 4$ 寸 角度 $\theta_1 = 0.381$ rad
 越屋根 $Z_{r2} = 5$ 寸 $\theta_2 = 0.464$ rad

H1= 13.00 m X0= 30 m Y0= 40 m
 H2= 4.8 m X1= 6 m Y1= 20 m
 H3= 2.5 m X2= 12 m Y2= 10 m
 H4= 1.5 m Y3= 10 m

③ 煙層に貫入する火災のプルームの質量流量

局所火源が窓際にあり、木製床および木製壁が、その火源によって燃焼した時に同時に発生する発熱速度は、本章「3.2.2 木質壁」の算定例を参考にすると下記となる。

$$Q = 6,948 \text{ (kW)}$$

煙層に貫入する火災のプルームの質量流量は下記式にて算出する。

$$\dot{m}_p(z) = 0.076 Q^{1/3} (z + \Delta z)^{5/3}$$

\dot{m}_p : 火災プルーム量 (kg/s)

z : 点火源からの高さ(m)

Δz : 仮想点源深さ(m)

D : 代表寸法(m)

無次元発熱速度 $Q^*[-]$ は

$$Q^* = \frac{Q}{1116D^{5/2}} = \frac{6948}{1116 \times 1.50^{5/2}} = 2.260$$

仮想点源深さ Δz は、参考資料 3.4.2 を参考に Heskestad, G. による下記式にて求める。

$$\Delta z = 1.02D - 0.083Q^{2/5} = -1.31 \text{ m}$$

④ 火災室からの煙排出量および火災室への空気の注入量の計算を図 3.3-11 および図 3.3-13 に従って実施するにあたり、開口部の大きさ、開口部の高さ、および数量を表 3.4-4 にまとめる。

表 3.4-4 開口部の入力情報

建具記号	開口幅 B m	開口高さ H m	上端高さ H_u m	下端高さ H_l m	数量	α
W1	1.80	1.80	9.80	8.00	22	0.7
W2	1.80	1.80	12.80	11.00	22	0.7
W3	1.80	1.00	19.30	18.30	12	0.7

* 開口部の上端高さ、下端高さは床面からの高さを示す。

* α : 理論流束に対する実際の流速の補正係数である流量係数 (通常 0.7 程度)

⑤ 計算結果

煙層内の比熱は表 3.3-4 を参考に温度が概ね 350K 程度と仮定して 300K と 400K の平均値として入力し、 $\dot{m}_p \equiv \dot{m}_s \equiv \dot{m}_d$ となるまで Excell を使って計算する。その結果を下記に示す。

煙層高さ	Z=	12.351 m	
中性帯高さ	Zn=	12.519 m	Zn-Z= 0.168 m
火源の発熱速度	Q=	6824 kW	
火源の代表寸法	D=	1.5 m	
仮想点源深さ	Δz =	-1.31 m	
煙層に流入する質量流速	\dot{m}_p =	78.966 kg/m ³	
煙層内の比熱	cp=	1.015 kJ/kgK	
煙層内の温度	T _s =	363.2 K =	90.24 °C
煙層内の気体密度	ρ_s =	0.972	
開口部からの気体の流出量	ms=	78.95 kg/s	
開口部からの気体の流入量	md=	79.04 kg/s	

表 3.4-5 煙層内の天井および周壁面積の計算表

仕上げ面	A _w m ²	h kW/m ² ・K	ΣhA_w kW/K
越屋根部小屋裏天井	134.16	0.01	1.342
越屋根部壁	131.8	0.01	1.318
大空間勾配天井	1163.2	0.01	11.63
大空間壁	270.86	0.01	2.709
		計	17

表 3.4-6 開口部からの煙の流出および気体の流入量の計算表

建具記号	開口幅 B m	開口高さ H m	上端高さ H _u m	下端高さ H _l m	数量	α							開口部流入出力	
							g	ρ_s	ρ_a	Z	Z _n	Δp	ms	md
							m/s ²	kg/m		m	m	Pa	kg/s	
W1	1.80	1.80	9.80	8.00	22	0.7	9.8	0.97	1.17	12.4	12.5	0.33	0	43.6
W2	1.80	1.80	12.80	11.00	22	0.7	9.8	0.97	1.17	12.4	12.5	0.33	5.3484077	35.437
W3	1.80	1.00	19.30	18.30	12	0.7	9.8	0.97	1.17	12.4	12.5	0.33	73.606205	0
													78.95	79.04

参考資料 3.4.1: 令和 5 年度 林野庁補助事業「建築用木材供給・利用強化」 CLT・LVL 等の建築物への利用環境整備事業のうち「CLT・LVL等を活用した建築物の

低コスト化・検証等」～耐火性能が要求される木造屋根の普及に向けての調査・研究
～, pp.70～71, 2024

参考資料 3.4.2 : 田中哮義, 第三版建築火災安全工学入門, pp234～235, (財)日本建築セン
ター, 2020

第 4 章 耐火性能検証法（C ルート検証法）の普及に向けて

4.1 想定する設計業務の流れ

設計業務の初期の段階で防耐火に関連する法規のチェックは不可欠であり、火災工学に精通した設計者が身近にいないければ、耐火建築物に該当する建築物の木造化は当初から論外という状況になってしまう。大臣認定を必要とする耐火性能検証法を活用する場合は、防耐火の専門委員会での審査が必要になるため、専門家による最終的な防耐火に関連する法規のチェックや、審議の席での同席は必要になるが、それ以外の設計業務については、検証の流れ、入力データや審査に必要な図面・書類がリスト化されていれば、火災工学になじみのない設計者でも図 4.1 のような流れで耐火性能検証法に容易に取り組むことができ、検証時の時間もコストも削減できる。

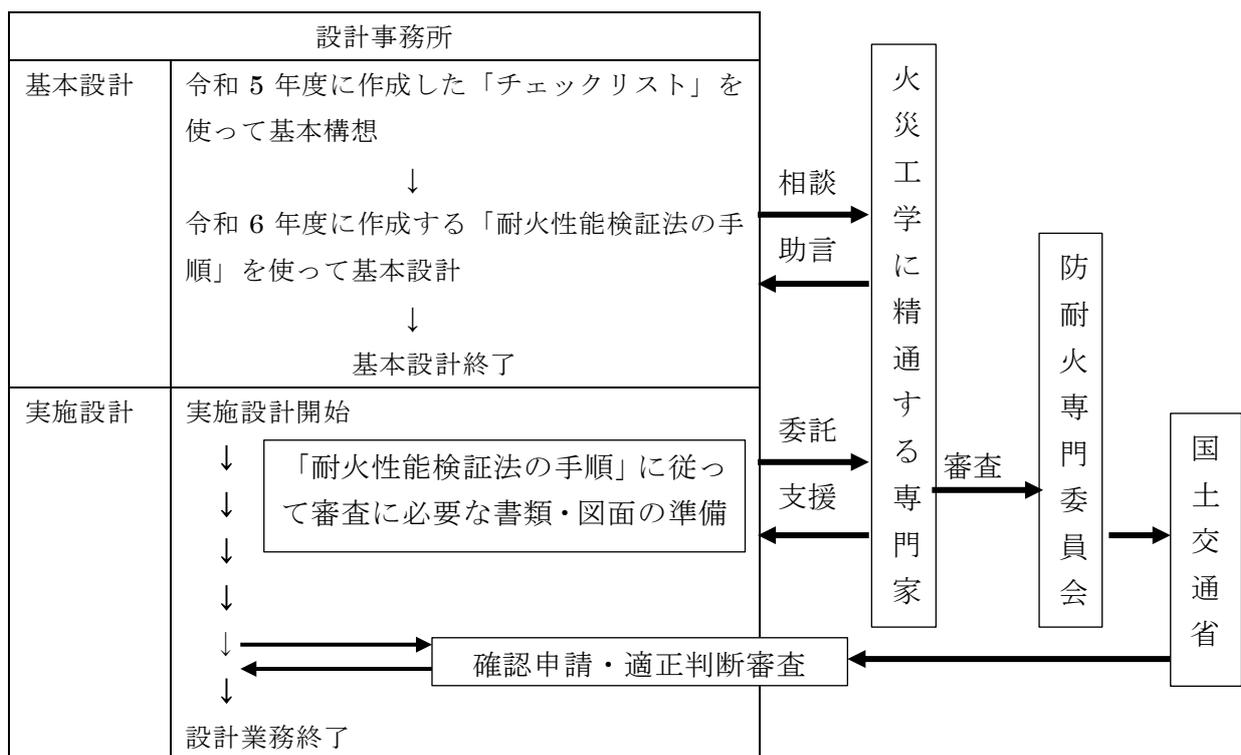


図 4.1 想定する耐火性能検証法を必要とする設計業務の流れ（案）

4.2 過去二年間の事業の内容

耐火建築物の定義は「想定される火災が終了した後、消火活動によらずとも崩壊せず、自立し続けられる」である。

2000年の基準法改正後、2004年頃から様々な企業やグループが盛期火災を想定して、この要求性能を満たす耐火構造部材の開発を進め、それぞれ大臣認定を取得し、ここ5年間で急速に中高層の木造建築物が誕生している。その中で最も多い事例は、燃えにくい建材で主要構造部材である木質材料を包み、さらにその周囲を木質材料で包む燃え止まり型となっている（写真 4.1 参照）。



写真 4.1 東京都内に建つ木造耐火構造を採用した建築物の事例

一方で天井が高く、室内の容積に対して収納可燃物が少ない体育施設のような建築物では、仮に火災が発生しても屋根を支える木質構造部材が火源から高い位置にあれば、上記のような手法を取り入れることなく無垢の木質材料であっても耐火建築物の要求性能を満たすことができる。しかし盛期火災を想定した木造化・木質化のための実験は相当数行われてきたが、耐火性能検証法で条件とされる局所火源を想定した自由空間における木質材料の燃焼実験は皆無の状況であったため、仮に本検証の活用により木造化が実現できたとしても、壁や床を木材で仕上げたいが、その燃え方がわからないことが理由で、耐火性能検証法の実務において、可燃物である木材の利用を避ける、あるいはコスト高につながる木質壁の難燃処理等が行われてきた。

そこで令和 5 年度、6 年度は、局所火源を条件とし次のような実験を実施し、その結果を、実施設計へと反映する方法を模索してきた。

(1) 収納可燃物の燃焼試験

① 鋼製椅子の燃焼試験

集会施設などで使用頻度の高い 4 種類の鋼製椅子を選び、各一脚、燃焼試験（図 4.2 参照）を行った。その後、その中から最も発熱速度の高い 1 脚を選択し、3 脚を横に並べて延焼状況を確認する実験を実施した。その椅子の構成材料を表 4.1 に示す。

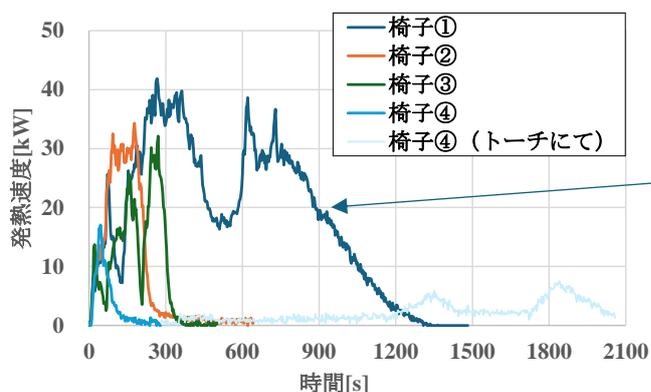


写真 4.2 椅子の燃焼試験の状況

図 4.2 4 種椅子の燃焼試験における発熱速度の推

表 4.1 3脚の燃焼実験に選択した椅子の構成

部位	材料	単位：mm	重量 (g)	
表層	ファブリック (防炎加工)		212	
座席	基板：合成プラスチック (400×420×5)		473	
	クッション材：ウレタンフォーム(t=5)		101	
背もたれ	正面 基板：合板 (440×270×7) クッション材；ウレタンフォーム(t=9)		468 29	
	背面 基板：MDF (440×270×3) クッション材；ウレタンフォーム(t=3)		249 8	

今年度は、同じ椅子を縦2列、横3脚に並べ、前後への延焼が発生するかの確認を行った(第2章「2.3 実験結果～【実験A】椅子の前後への燃え広がり性状確認実験」)。

② 柔道畳の燃焼試験

体育館も含めた武道場施設に使用される柔道畳の、ガスバーナーを火源とする延焼実験(2章「2.5 実験結果～【実験C】床上面の燃え広がり実験」)、およびCCM試験(第2章「2.8 CCM試験」)を実施し、その結果を設計に反映する手法を提案している(第3章「3.1.1 木質床」)。

(2) 木質床の燃焼試験

令和5年度はスギ厚物合板と、すでに体育館への使用事例のある複合フローリング材を2種の、ガスバーナー(発熱速度200kW、代表寸法0.5m、無次元加速度約1.0)を火源とする実験(加熱時間20分)を実施し、床の燃焼による発熱速度の増加分は25%程度、また側方への火炎伝播は火炎の中心から概ね半径70cmであり、試験終了後、床板は燃えどまっていることを確認した。一方で木製クリブ(スギ製材30×105×750、20本を井桁組で10枚重ねを1段、および2段)を火源とした実験では、側方への火炎伝播は同様に限定的であったが、床の裏面まで炭化することが確認された(写真4.3、図4.3参照)。木質材料は衝撃を和らげ、温かみを有するという特徴から積極的に床に使用したい材料であるが、二重床の場合には床下に燃え抜けると、側方への延焼が懸念される。



写真 4.3 燃焼試験終了後の床上の状況



図 4.3 燃焼試験終了後の床の断面図

そこで今年度は木製クリブ 1 段を火源とする燃焼実験を実施し、木製クリブが燃え尽きた後の木製床の損傷状況を確認することにした（2 章「2.5 実験結果～【実験 B】床の燃え抜け抑制・床裏の燃え広がり性状確認実験」）。

(3) 木質壁の燃焼試験

床の木質化同様、壁を可燃物である木材で仕上げる場合、耐火性能検証法を実施するにあたり局所火源に対し、延焼範囲や燃焼で生じた発熱速度を定量的に知る必要がある。そこで国内での生産量が多いスギとヒノキ板を選択（表 4.2 参照）し、内装壁（木製枠 9mm の合板下地）の燃焼試験を実施した（第 2 章「2.6 実験結果～【実験 D】壁上方への燃え広がり実験」）。

表 4.2 壁の燃焼実験概要

実験名	壁材	仕様
壁-1	スギ板 12mm＋下地合板 9mm	木製枠＋内断熱材としてグラスウール 16K (t=105mm)
壁-2	ヒノキ板 15mm＋下地合板 9mm	
壁-3	スギ板 12mm＋下地合板 9mm	木製枠（断熱材なし） 高さ方向に 45mm×105mm のスギ製材を 910mm ピッチで配置

(4) 耐火性能検証法実務への反映

令和 5 年度は、平成 12 年建設省告示第 1433 号による検証法（B ルート検証法）、および工学的手法による検証法（C ルート検証法）の手順を整理するとともに、初めて耐火性能検証法による木造化を目指す設計者を想定し、「初心者のための耐火性能検証法チェックリスト」を作成した。

今年度は、木質床の燃焼試験の結果を設計に反映する手法を（第 3 章「3.1.1 木質床」）に

、木質壁の燃焼試験の結果を設計に反映する手法を（第 3 章「3.2.2 木質壁」）で提案した。また第 3 章「3.3 煙層内温度の計算」では、定常状態を想定して簡易に煙層内の温度を計算する方法を紹介し、（第 3 章「3.4 計算事例」）において局所火源の影響により木質床が燃焼した場合と、局所火源が壁際で発生し、木質床とともに木質壁が燃焼した状況を想定した計算例を示した。

4.3 今後の普及に向けて

(1) 床の燃え抜けに関する考察

令和5年度のクリブを火源とした実験では、床の燃え抜けの現象が確認されたため、今年度は床の燃え抜けに着目し、表4.3に示す仕様で木製クリブ1段(スギ製材 30×105×750、20本を井桁組で10枚重ね、重量は概ね18kg/段)による燃焼試験を実施した。

表 4.3 木製床の燃焼試験の仕様

番号	仕上げ材	下地材	条件
No.1	複合フローリング(t=18)	針葉樹合板(t=28)	試験体の裏面開放
No.2	無垢フローリング(t=18)	針葉樹合板(t=28)	
No.3	複合フローリング(t=18)	パーティクルボード(t=20)	
No.4	無垢フローリング(t=18)	パーティクルボード(t=20)	
No.5	複合フローリング(t=18)	針葉樹合板(t=15)	試験体の裏面閉鎖

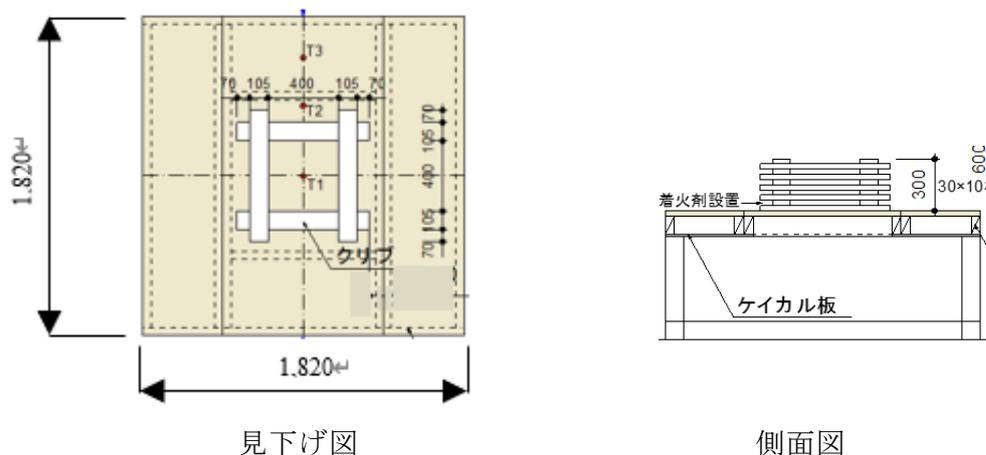


図 4.4 木製床の燃焼試験の仕様

その結果を、表 4.4 に示す。

表 4.4 木製クリブの燃焼試験の結果

番号	状況
No.1	約 90 分後、燃え抜け、床下地材裏面での発炎を確認 (すぐに消火)
No.2	約 120 分後、燃え抜けた後、赤熱は見られるが発炎はなく、やがて赤熱も消火するような現象を確認。
No.3	約 70 分後、燃え抜けた後、炭化部が徐々に広がっていく現象を確認 (
No.4	約 100 分後、燃え抜けた後、No.3 同様に炭化部が徐々に広がっていく現象を確認
No.5	194 分後、赤熱は見られなくなったが煙は納まらなかった。

また下から目視が可能な No.1~No.4 の燃え抜けの状況写真を写真 4.4 に示す。

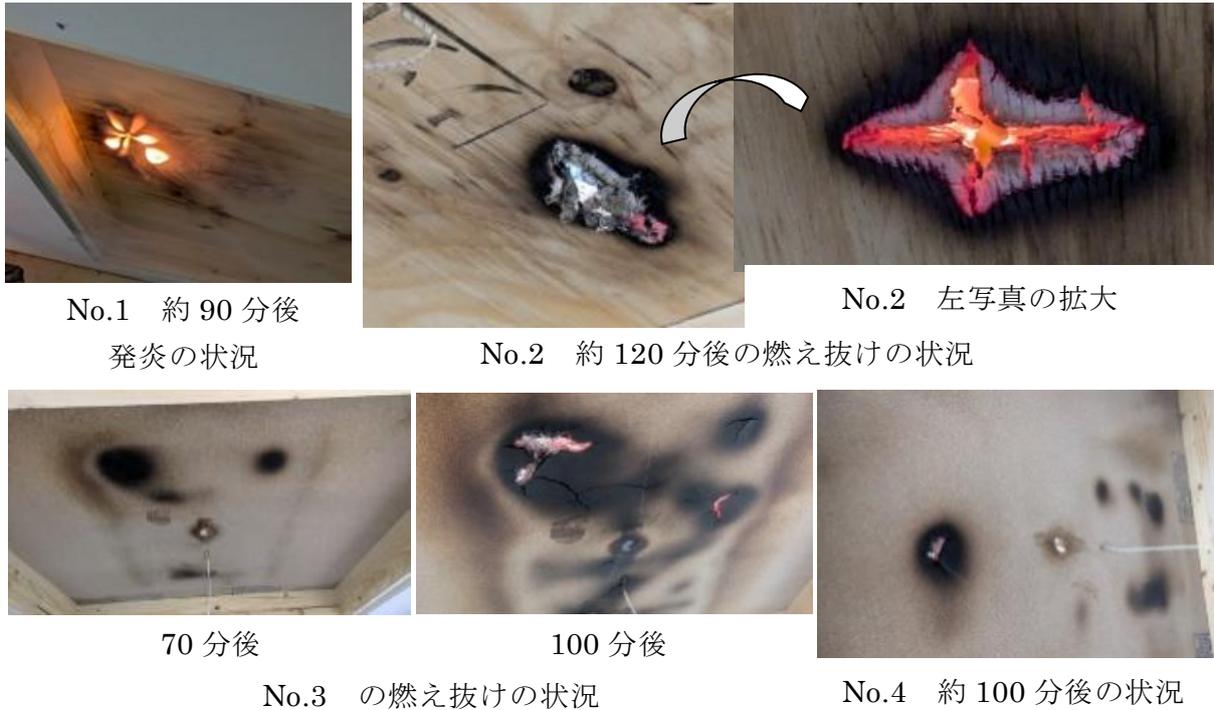


写真 4.4 下から目視した燃え抜けの状況

No.5 の試験体も含め、いずれも自消はしなかった。ただし燃え抜けても極めて側方への延焼速度は遅いことが確認された。よって収納可燃物が燃え尽きた後であれば、床が燃えぬけても、床下からの急激な延焼はないと考えられる。

収納可燃物が燃え尽きるまで床が抜けない状態を維持するためには、木製床の下方への炭化速度を推定する必要がある。そこで令和 5 年度の構造用合板 (t=28mm) の加熱条件を変えた CCM 試験 (加熱時間 20 分) の燃え残りの状況表 4.5～表 4.7 を参考に燃焼深さ (28mm－燃え残り深さ) と入射熱流束の関係から推察してみたい (図 4.5)。

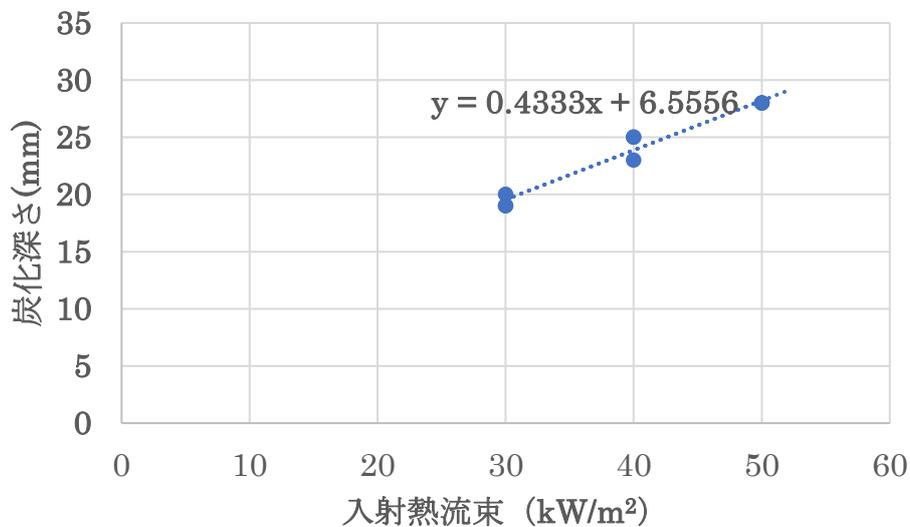


図 4.5 フローリング材が受ける入射熱流束と燃焼深さの関係

表 4.5 CCM 試験終了後試験体 (30kW)

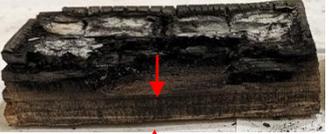
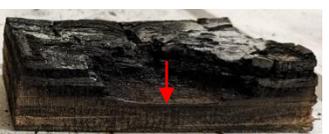
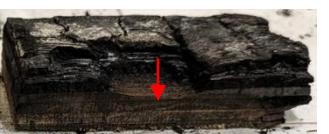
	No.1	No.2	No.3
裏面			
炭化部除去後の切 削面	 8mm	 9mm	 9mm
	 6mm 8mm	 9mm	 9mm

表 4.6 CCM 試験終了後試験体 (40kW) 写真

	No.1	No.2	No.3
裏面			
炭化部除去後の切 削面	 5mm	 3mm	 3mm
	 5mm	 3mm	 3mm

表 4.7 CCM 試験終了後試験体 (50kW)

	No.1	No.2	No.3
裏面			
試験体を 中央面で 切断後の 切削面	 	 	 

ここで燃焼深さと図 4.5 のグラフの切片 6.6mm の差を加熱時間 20 分で除した値（炭化速度）と入射熱流束の関係を図 4.6 に示す。

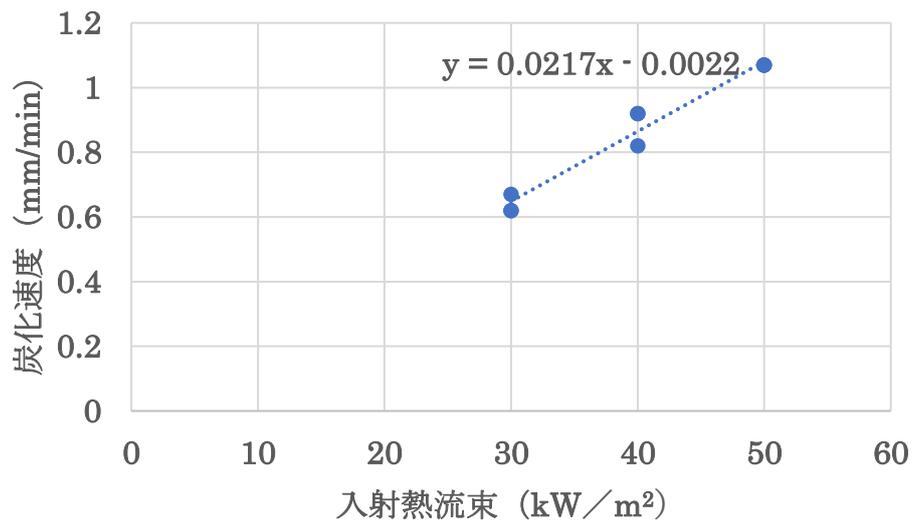


図 4.6 フローリング材が受ける入射熱流束と炭化速度の関係

図 4.6 のグラフの勾配は、参考資料 4.1 で紹介されている下記の式と一致する。

$$V_w = 2.2 \times 10^{-2} q''_{in}$$

ここで V_w : 炭化速度 (mm/min)

q''_{in} : 入射熱流束 (kW/m²)

よって木製床面への入射熱流束がわかれば、床下に可燃物が落下しない必要最小限の床厚さを推定できる。ただし第2章「2.5 実験結果～【実験B】床の燃え抜け抑制・床裏の燃え拡がり性状確認実験」の結果から、仕上げ材が異なれば炭化速度が違ってくる。またフローリング+下地合板の組み合わせ（ウレタン系接着剤で積層）でCCM試験を実施した際、上のフローリング材が炭化した後、下地合板への延焼が遅れるという現象も見られており、複数の材料の組み合わせで構成される木製床の炭化深さは上記の計算値よりも小さくなる可能性が高い。

収納可燃物の特定は難しい。耐火性能検証法で対象とされる発熱速度 3MW、代表寸法 1.5m と仮定すると、ある程度限定されるものと推察されるが、今後、安全対策としてファイアーストッパー等の効果を確認する必要がある。

参考資料 4.1 田中哮義：「第3版 建築火災安全工学入門」，pp175，2020

(2) 木質壁の延焼に関する考察

第2章「2.6 実験結果～【実験D】壁上方への燃え拡がり実験」から、上方については、間歇火炎域部分は、変色はするものの概ね延焼は連続火炎域であることが確認され、側方に関しても木製床と同様に延焼範囲は限定的であることが確認された。またいずれの実験でも試験終了後壁板の燃えぬけが確認されたが、その後、側方への延焼は見られないこと、一方で上方への延焼は、木質床同様に極めてゆっくり進むことが確認された。ただし裏面に断熱材を装着していない試験体では、ファイアーストッパー材として横向きに入れていた木製の角材（厚さ 45mm）より上に延焼が進むと急速に発炎することが確認された。よって上方へ木質壁材を連続火炎域より延ばす場合には、ある程度の高さで燃えどまる措置を施すことが求められる。

また床を木質とした場合、木質壁の延焼の影響を受ける。この局所火源+木質壁の燃焼+木質床の燃焼による発熱速度は、木質壁と木質床の延焼範囲がわかればそれぞれ計算できるが、このときの代表火源寸法および無次元発熱速度の設定をどのように置き換えるかについては知見が得られていない状況にある（第3章「3.2.2 木質壁」および（第3章「3.4 計算事例」では、木質壁の延焼範囲を高さ方向は間歇火炎高さ、幅方向は代表火源寸法の2倍として安全側での計算事例を紹介）。置換値により軸上温度の状況もかなり異なってくるため、実験により実証値を得ることが求められる。

(3) 木質構造材料の着火条件

耐火建築物の定義は、「想定される火災が終了した後、消火活動によらずとも崩壊せず、自立し続けられる建築物」である。よって耐火性能検証法を活用して耐火性能が求められる屋根梁等を木質材料とするには、下記のいずれかの条件を満たすことが条件となる。

- 1) 着火しない。
- 2) 着火はするが火災終了後に消火活動がなくても自消し、残存断面で長期荷重を支持できる。

本事業では、上記の内、1)を前提としており、過去の事例においてその着火の条件は木材の表面温度が260℃以上として検証が行われている。また必然的に間歇火炎域より上に木質材料が配置される必要があるが、第3章「3.3 煙層内温度の計算」でも述べたように上方のプルーム領域に木質材料がある場合、火源からの熱量に加え、室内の上部に溜まった煙から受ける熱量も考慮して判断する必要がある。このとき煙層内の温度を木質材料の雰囲気温度として木質材料の着火の検証を実施する判定法が考えられるが、やや高い室温よりも温度の高い煙層に火炎からの高温の流体が侵入した際、木質材料の表面温度が両者の和になる状況は考えにくい。木質材料の表面温度は火源の直上では、火源からのプルームの影響が支配的という判定法も考えられるが確証がない状況にある。

参考資料4.2では、火源からの熱流から受ける入射熱流束と、煙層から受ける入射熱量の和によって判定する手法が示唆されている。このとき木質材料が受ける着火限界熱流束を知る必要があるが、参考資料4.3では、CCM試験の結果から加熱時間が20分であるならば、14.9kW/m²程度が着火限界熱流束としている（表4.8、図4.7参照）。ただし上面加熱での実験となっていること、樹種がスギで限定されていることから、あくまでも目安となる。

表4.8 CCM試験の含水率、赤熱開始時間、着火開始時間と炭化深さ

輻射強度 (kW/m ²)	質量 (g)	含水率(%)		加熱 時間 (s)	赤熱 開始 (s)	着火 時間 (s)	炭化深さ (mm)			
		水分計	全乾法							平均
7	171.36	12.0	12.9	1800	—	—	0	0	0	0
	181.69	14.5	11.8	1800	—	—	0	0	0	0
	189.75	15.5	13.0	1800	—	—	0	0	0	0
9	177.09	12.0	13.4	1800	—	—	0	0	0	0
	185.49	11.0	13.7	1800	—	—	0	0	0	0
	192.62	15.0	13.1	1800	—	—	0	0	0	0
11	171.42	13.0	13.2	1800	—	—	0	0	0	0
	182.17	16.0	13.4	1800	—	—	0	0	0	0
	189.76	11.0	13.9	1800	—	—	0	0	0	0
13	177.31	12.5	12.9	1800	—	—	0	0	0	0
	186.49	12.5	13.4	1800	—	—	0	0	0	0
	192.70	15.5	13.1	1800	—	—	0	0	0	0
15	173.22	13.5	12.8	1200	788	997	10	8	10	9.3
	180.29	11.5	13.1	1200	970	1140	8	6	8	7.3
	183.34	11.5	13.4	1500	1084	1426	8	9	10	9.0
	187.72	12.0	13.2	1200	996	1060	10	10	10	10.0
	190.89	12.5	12.8	1200	895	1067	10	10	10	10.0
	194.00	13.0	13.1	1500	967	1229	10	12	10	10.7
17	174.30	13.5	12.9	1200	568	660	10	10	10	10.0
	180.80	13.0	14.7	1200	→	650	10	14	14	12.7
	184.12	12.0	11.0	1200	→	549	10	13	14	12.3
	189.09	14.5	13.0	1200	→	588	13	10	13	12.0
	191.63	12.5	12.7	1200	599	635	10	11	16	12.3
	194.62	12.0	13.4	1200	570	658	12	11	10	11.0
19	175.76	13.0	12.5	1200	→	325	16	15	19	16.7
	181.33	11.5	13.5	1200	437	445	13	15	13	13.7
	184.71	10.5	13.6	1200	→	351	13	14	13	13.3
	189.30	15.5	13.2	1200	409	425	14	13	14	13.7
	191.76	14.5	13.2	1200	→	440	14	14	14	14.0
	194.56	9.5	13.4	1200	→	354	14	14	14	14.0

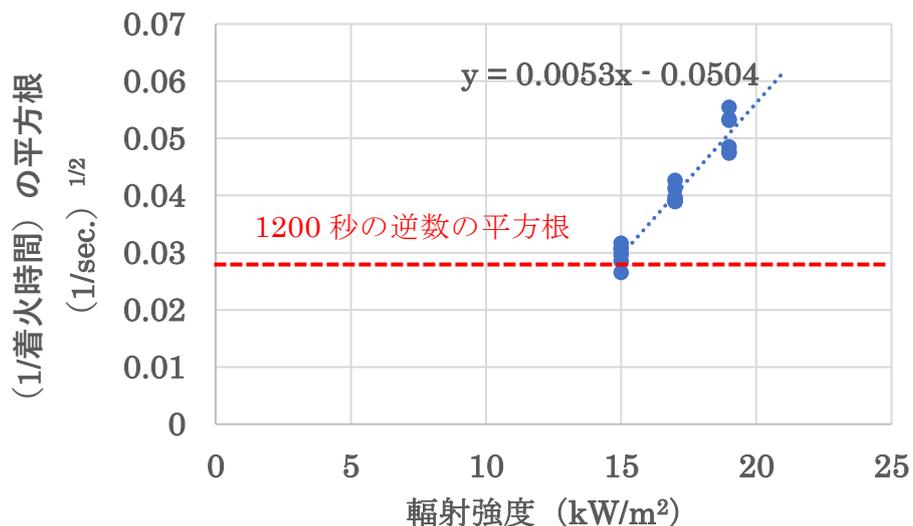


図 4.7 CCM 試験の輻射強度と着火時間の平方根の逆数の関係図

上記のように局所火源火災を条件とする木質材料の着火条件に関する実験は希少な状況にあり、また今年度の木質壁の実験（第 2 章 2.6 参照）で見られたように間歇火炎域の木材表面も変色はするが、燃焼しているとは言えない状況にあることから、今後、実験による実証データに基づいた着火条件の判定法の確立が望まれる。

参考資料 4.2 鋼構造耐火設計指針, pp73~75, 日本建築学会, 2017

参考資料 4.3 原田浩司 他：低輻射加熱を受けた木材の燃焼性能および強度性能, 日本建築学会構造系論文集 第 81 巻 第 727 号, 1491-1500, 2016 年 9 月