

建 築 研 究 報 告

REPORT OF THE BUILDING RESEARCH INSTITUTE

No. 149

February 2021

内装材の燃焼拡大を含めた
多層ゾーン建物内煙流動予測モデル

A multi-layer zone smoke transport model
including fire growth on combustible linings

西野 智研、鍵屋 浩司

Tomoaki NISHINO, Koji KAGIYA

国立研究開発法人 建 築 研 究 所

Published by

Building Research Institute

National Research and Development Agency, Japan

国立研究開発法人建築研究所、関係機関及び著者は、読者の皆様が本資料の内容を利用することで生じたいかなる損害に対しても、一切の責任を負うものではありません。

はしがき

建築基準法に性能規定が導入され20年が経過した。その間、性能設計が浸透して建築物に新たな空間や機能が実現されてきた。

また、公共建築物等における木材の利用の促進に関する法律が施行され、近年の木造耐火技術の整備を背景に、公共建築物をはじめとして木造建築物の更なる需要拡大が期待されているところである。

木材利用促進の流れの中で、現行の建築基準法の内装制限では、可燃物である木材の使用が厳しく制限されている。これは出火の防止や、出火しても建築物の中にいる人が居室や階、建築物から避難するまでの間に、火熱や煙によって避難に支障が生じないようにするためである。

その一方、視覚的にも暖かみを感じる木材を目に見えるかたちで室内の壁や天井などの仕上げ材料として利用したい、という強い需要がある。

そこで、建築研究所では、平成28年度から平成30年度にわたって指定課題「木質等の内装を有する建築物の避難安全設計技術の開発」を行い、火災安全性を損なわずに木質内装材をより柔軟に活用するための火災安全設計手法について研究開発を行ってきた。

その研究成果のひとつである本予測モデルが、今後の火災安全設計の実務において内装木質化の検討に大いに活用されることを期待する。

令和3年2月

国立研究開発法人建築研究所
理事長 緑川 光正

内装材の燃焼拡大を含めた多層ゾーン建物内煙流動予測モデル

西野智研*1, 鍵屋浩司*2

<概要>

中高層建築物を木造で設計する事例が増加する中、内装にも木材を活用することへの関心が高まっている。一般的に、壁や天井の内装に可燃性材料を用いることは、火災の成長を著しく早め、在館者の避難を困難なものにすると考えられてきた。しかし、近年に国内外で実施された実大火災実験は、内装の一部にしか木材を使用しない場合や大きな空間の内装に木材を使用する場合には、火災の成長がそうでない場合に比べて緩やかになることを示した。これに対し、我が国の性能的火災安全設計の実務では、木材を貼る部分の位置・面積や空間の大きさによらず、一律に厳しい設計火源の下で避難安全性を検証することが多い。こうした扱いは内装の木質化に対する過剰な制約となっている。

本予測モデルは、木質内装空間で火災が発生した時の避難安全性を合理的に評価するために開発されたもので、内装材の燃え拡がりによる火災成長と非火災室を含む複数室間の煙流動を一体的に解析可能な非定常の火災モデルである。本モデルが設計実務で利用されてきた従来のものと異なる点として、①内装材の熱物性と表面温度から計算される上方、側方、下方への燃え拡がり速度に基づいて、時々刻々と変化する内装材の燃焼領域を追跡すること、②多層ゾーンの概念に基づいて、建物内の各空間の温度等の変化を予測すること、すなわち、建物内のいずれの空間も、気体の状態が一様で水平な境界面により明確に分離された多数の層により満たされると仮定すること、等があげられる。本モデルでは、火源条件の他に、火災室の可燃性内装材を貼る範囲の形状、可燃性内装材の厚さや熱物性および単位面積あたりの発熱速度の時刻歴を指定することによって、火災室内全体の発熱速度や各空間の気体温度等の鉛直分布を時系列に予測することができる。また、避難安全検証に用いるための煙層高さや煙層温度を各空間の気体温度の鉛直分布から決定する。

本報告では、まず、開発した予測モデルの概念を述べる。次に、過去に実施された複数の実大火災実験の再現計算を行い、計算結果を実験結果と比較しモデルの予測性能を検証した内容を述べる。再現計算は、内装を部分的に木質化した区画の燃焼拡大実験を始め、多層ゾーンモデルの基本的な予測性能を調べるため、大規模吹き抜け空間の煙降下実験や複数室間の煙流動実験についても行っている。さらに、本モデルを設計実務に用いるための参考として、木質内装空間の仮想プランに適用した内容を述べる。付録として、本モデルに基づいて解析を行うために作成した計算プログラムの入出力マニュアルを添える。

*1 建築研究所 防火研究グループ 客員研究員 (京都大学防災研究所 准教授)

*2 建築研究所 防火研究グループ 上席研究員

A Multi-Layer Zone Smoke Transport Model Including Fire Growth on Combustible Linings

Tomoaki NISHINO^{*1}, Koji KAGIYA^{*2}

ABSTRACT

Timber is increasingly used as interior linings in large buildings as well as structural members. In general, using combustible materials as interior wall and ceiling linings has been considered to remarkably enhance fire growth and pose a threat to occupants' lives. However, full-scale fire experiments conducted in recent years have demonstrated that it is not necessarily true for a room partially lined with timber and a large room. In contrast, performance-based design in Japan has uniformly used a very severe design fire in verifying the evacuation safety of buildings regardless of the location of a timber lining and the size of a room. This is an excessive restriction of using timber as interior linings.

A new computational model for pre-flashover fires in timber-lined spaces was developed for use in evacuation safety verification. The developed model simultaneously simulates fire growth on combustible linings and smoke transport in multiple spaces. Key differences from conventional models used in practice such as BRI2002 are that (1) the new model predicts the burning area and heat release rate of combustible linings as a function of time using upward, lateral and downward flame spread equations and cone calorimeter data on time history of heat release rate of materials, and (2) the new model is based on a multi-layer zone concept; that is, the new model predicts the vertical profiles of physical quantities such as temperature in each space of a building as a function of time by dividing each space into multiple layers by horizontal boundary planes and assuming each layer as a control volume in which physical properties are uniform. The smoke layer height and temperature used in evacuation safety verification are determined from the vertical profile of gas temperature in each space.

This report describes the mathematical formulation and the performance of the model. To validate the performance, model predictions for gas temperatures and heat release rates were compared with data from five series of full-scale fire experiments previously reported in the literature, which includes experiments on smoke filling in an atrium and smoke transport in multiple rooms as well as experiments on fire growth in rooms partially lined with timber.

^{*1} Visiting Research Fellow, Department of Fire Engineering, Building Research Institute
(Associate Professor, Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University)

^{*2} Chief Research Engineer, Department of Fire Engineering, Building Research Institute

<目次>

第1章	はじめに	1
第2章	多層ゾーンモデル	4
2.1	ゾーンの基礎方程式	5
2.2	気体温度と化学種濃度の予測方程式	7
2.3	可燃物の燃焼に伴う室内の発熱速度	8
2.4	化学種（酸素）の生成速度	9
2.5	火災プルームの巻き込み量	9
2.6	開口噴流プルームの巻き込み量	10
2.7	開口を經由して移動する気体の質量流量	11
2.8	火災プルームの外で層の境界面を越えて移動する気体の質量流量	13
2.9	内装材に伝達される熱量	13
2.10	放射により層の境界面を越えて伝達される熱量	15
2.11	煙層高さや煙層温度	15
第3章	可燃性内装材の燃焼拡大モデル	17
3.1	熱分解領域先端の進行速度	18
3.2	壁面や天井面に沿って形成される火炎	19
3.3	可燃性内装材の着火時間	20
3.4	可燃性内装材の燃焼に伴う発熱速度	21
第4章	モデルの予測性能の検証	23
4.1	大規模吹き抜け空間の煙降下実験の再現計算	23
4.2	単室隅角部火災の自然排煙実験の再現計算	25
4.3	複数室間の煙流動実験の再現計算	27
4.4	内装を部分的に木質化した小規模区画の燃焼拡大実験の再現計算	30
4.5	内装を部分的に木質化した大規模区画の燃焼拡大実験の再現計算	34
第5章	木質内装空間の仮想プランへの適用	38
5.1	プランと計算条件	38
5.2	計算結果	40
第6章	おわりに	43
6.1	まとめと今後の課題	43
6.2	モデルの機能と使用上の注意点	43
	注釈	45
	謝辞	47
	参考文献	48
	記号	51
	付録：計算プログラムの入出力マニュアル	

第1章 はじめに

中高層木造建築物への関心の高まりとともに、内装にも木材を活用する設計事例が増えている。一般的に、壁や天井の内装に可燃性材料を用いることは、火災の成長を著しく早め、在館者の避難を困難なものにすると考えられてきた。しかし、内装が火災の成長に与える影響は、可燃性材料の貼り方や室の規模により大きく異なる。Peel et al.¹⁾は、内装を部分的に木質化した区画を用いて、ISO 9705 ルームコーナー試験に従った実大火災実験を行い、木質化した部分の総面積が同じでもその位置や形状により火災の成長が大きく異なることを報告している。また、フラッシュオーバー（以降では、室内の部分的な燃焼がある時点を境に室全体へ急激に拡大する現象という意味で用いる）が発生するまでの時間は、木質化した部分の火源からの高さや空間に占める比率、火源から上方への延焼経路となる部分の木質化の有無に影響されると結論づけている。市原ら²⁾は、壁や天井の全面を木材で仕上げた約 10m² と約 50m² の区画を用いて、隅角部に火源を設置した実大火災実験を行っている。これによると、50m² 区画の方が火災の成長が遅く、その要因として、煙層から天井面への加熱が小さく、天井の木材の燃焼拡大が緩やかであったことが考えられる。また、50m² 区画の天井を不燃材料で仕上げた場合には、フラッシュオーバーが発生しなかったことが報告されている。

建築火災時の避難安全検証法³⁾では、木質内装材の貼り方によらず一律に設計火源の火災成長率を大きくするため、内装の一部にしか木材を使用しない場合には、設計火災性状が厳しすぎる想定となり、設計上の過剰な制約となっている。また、室の規模が内装材の燃焼拡大に与える影響も考慮されていない。これに対し、高度な避難安全検証では、候補となる木質内装材の燃焼拡大性状を実大火災実験によって把握し、測定された発熱速度データから設計火源の火災成長率を決定している事例がある⁵⁾。しかし、こうした実大火災実験を誰しもが容易に実施できる訳ではない。内装木質化に関する設計の自由度を向上させるためには、計算の簡易さを重視する避難安全検証法の改善には限界があることから、高度な避難安全検証向けに、内装材の燃焼拡大性状を合理的に予測可能な手法を開発する必要がある。また、内装材の燃焼拡大に伴う煙の発生は、火災室だけでなく非火災室においても煙層の降下を早め、火災階や建物全体での避難に影響を与える。開発する手法を高度な避難安全検証で用いるためには、非火災室を含む複数室間の煙流動性状も同時に予測できる必要がある。

本研究では、内装材の燃焼拡大による火災成長と非火災室を含む複数室間の煙流動を一体的に解析可能な非定常の火災モデルを開発した。具体的には、火災室の隅角部に火源が存在するシナリオを想定し、①内装材の熱物性から上方、側方、下方への燃え拡がり速度を予測可能な火災伝播モデル⁶⁾と、②建物内の各空間の気体温度の鉛直分布を予測可能な多層ゾーンモデル⁸⁾を統合することによって、フラッシュオーバーが発生するまでの火災性状を定式化した。本モデルでは、火源条件の他に、火災室の可燃性内装材を貼る範囲の形状、可燃性内装材の厚さや熱物性および単位面積あたりの発熱速度の時刻歴を指定する

ことによって、火災室内全体の発熱速度や各空間の気体温度等の鉛直分布を時系列に予測することができる。すなわち、壁や天井に貼る可燃性内装材の面積、厚さ、位置および材種の違いを考慮することができる。ただし、表面が平らで加熱により溶融しない内装材に限られる。表面に溝があるものやルーバー状のものなど、内装材の表面に凹凸がある場合には、本モデルを適用することができない。なお、壁の一面のみを可燃性材料で仕上げる場合など、壁際に火源を想定することが現実的な場合もある。また、内装に可燃性材料を使用しない場合には、火災プルームの巻き込み量が大きくなる中央火源を想定する必要がある。そこで、隅角部火災シナリオだけでなく、内装材の燃焼拡大を伴わないが火災プルームの巻き込み量が最も大きくなる中央火災シナリオと、天井を不燃材料で仕上げることを前提に壁際火災シナリオも扱えるようにした。ここでの壁際火災シナリオでは、火災プルームの巻き込み量が隅角部火災シナリオよりも大きくなることのみを考慮し、壁に貼られた可燃性材料の燃焼拡大は隅角部火災シナリオと同様に扱っている。

代表的な先行研究として、Karlsson⁹⁾、Quintiere¹⁰⁾、Wade and Barnett¹¹⁾、Peel et al.¹²⁾、Lattimer et al.¹³⁾ は、二層ゾーンモデルを基盤として、内装材の燃焼拡大による火災成長を予測する計算モデルを開発している。しかし、内装材が燃え拡がり火災性状が急激に変化するような非定常性の強い場合には、煙層の内部にも鉛直方向の温度勾配が形成されるため、二層ゾーンの仮定が成り立たない可能性がある。また、煙層がある部分の内装材の温度も高さによらず常に一様とはならない。内装材の温度は火炎伝播速度を決定する重要な要因であり、二層ゾーンモデルが抱える温度予測の曖昧な点は、内装材の燃焼拡大性状の予測結果の信頼性に影響を与える可能性がある。本研究では、こうした課題を解決するため、鈴木ら⁸⁾²⁰⁾により提案された多層ゾーンモデルの概念を基盤としたが、我が国の設計実務において長く活用されてきた二層ゾーン建物内煙流動予測モデル¹⁴⁾¹⁵⁾を更新し、設計火災性状の予測を高度化するという狙いもある。ただし、本研究での多層ゾーンモデルは、①火炎からの放射は気体の層に全く吸収されることなく透過し、周壁表面に入射して吸収されるのに対し、気体の層と層の間や層と周壁表面の間での放射熱の授受を考える際には、気体の層を黒体として扱う、②開口噴流プルーム流量の計算にTanaka et al.¹⁶⁾の予測式を用いるなど、鈴木ら⁸⁾²⁰⁾の多層ゾーンモデルを簡略化したものとなっている。

本報では、まず、開発した予測モデルの概念を整理する。ただし、機械排煙設備やスプリンクラー設備の効果はモデルに含まれていない。なお、モデルでは、火災室の一部の内装材が可燃性材料であり、それ以外の内装材は燃焼しないことを想定している。そこで、モデルの概念を整理する第2章と第3章では、「内装材」と「可燃性内装材」を区別して用いることとし、「内装材」には「可燃性内装材」とその他の内装材も含まれるものとする。次に、過去に実施された複数の実大火災実験の再現計算を行い、計算結果を実験結果と比較することによって、モデルの予測性能を検証した内容を整理する。ここでは、多層ゾーンモデルの基本的な予測性能と内装材の燃焼拡大を含めた全体の予測性能を調べるため、

(I) Yamana and Tanaka¹⁷⁾の大規模吹き抜け空間の煙降下実験

(II) 出口ら¹⁸⁾の単室隅角部火災の自然排煙実験

(III) 吉田ら¹⁹⁾の複数室間の煙流動実験

(IV) Peel et al.¹⁾の内装を部分的に木質化した小規模区画の燃焼拡大実験

(V) 市原ら²⁾の内装を部分的に木質化した大規模区画の燃焼拡大実験

の再現計算を行い、(I)～(III)については気体温度の鉛直分布を、(IV)と(V)については区画内の発熱速度を、計算結果と実験結果の間で比較した。さらに、モデルを設計実務に用いるための参考として、木質内装空間の仮想プランに適用した内容を整理する。最後に、本報全体のまとめとモデルの使用上の注意点を整理する。

第2章 多層ゾーンモデル

図1に、本研究における多層ゾーンモデルの概念を示す。多層ゾーンモデルでは、水平な境界面によって各室を複数の層に分割し、各層を気体の状態が一様な検査体積とみなす。検査体積ごとに成り立つ質量、エネルギー、化学種（酸素 o ）に関する保存式と気体の状態方程式を連立して解くことによって、気体温度や化学種濃度の鉛直分布を時系列に予測する。周壁についても同様に分割し、周壁温度の鉛直分布を予測する。特に、二層ゾーンモデルとの大きな違いとして、火源上に生じた火災プルームは各層から気体を巻き込みながら最上層に流入し、それによって最上層の気体は一つ下の層に押し下げられ、さらにその層の気体も一つ下の層に押し下げられる。火災プルームは最上層を除く層の気体と混合しないことを仮定しているため、可燃物の燃焼に伴って発生する熱のうち対流によって運ばれる成分も、全て最上層に流入する。開口を經由して室内に流入する気体も、高温であれば、上昇気流となって各層から気体を巻き込みながら最上層に流入する。実際には、各層から気体を巻き込むことによって浮力を失い、最上層まで上昇しない場合もあると考えられるが、簡単のため、そうした場合は無視する。逆に、開口を經由して室内に流入する気体が低温であれば、下降気流が生じると考えられるが、これについても無視する。ここでは、開口を經由して室内に流入する気体の温度が最上層のそれよりも高い場合に、上昇気流が生じて各層から気体を巻き込みながら最上層に流入するものとする。気体の層、火災および周壁表面の間での放射熱の授受については、不正確ではあるが簡単に計算するための扱いとして、火災からの放射は気体の層に全く吸収されることなく透過し、周壁表面に入射して吸収されるのに対し、気体の層と層の間や層と周壁表面の間での放射熱の授受を考える際には、気体の層を黒体として扱うものとする。なお、多層ゾーンモデルでは、上部層の厚さが自動的に決定される二層ゾーンモデルとは異なり、各層の厚さを手入力で指定する必要がある。鈴木ら²⁰⁾は、各室を0.2m程度の厚さで等分割することによって、実

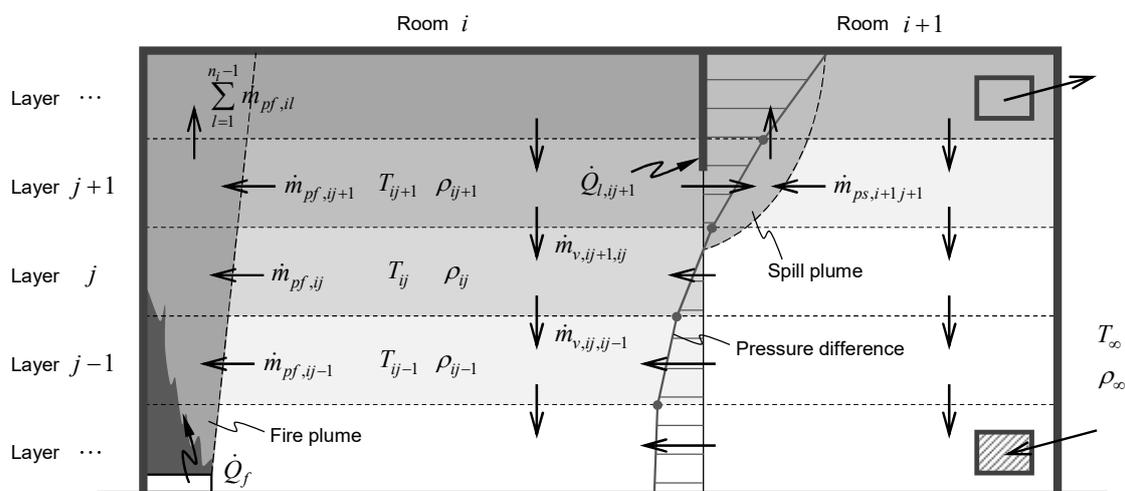


図1 多層ゾーンモデルの概念図

験結果を良好に再現できることを確認しているが、実用上は 0.1m の単位で高さを表現できる方がよいことや、本報で実施した実大火災実験との比較検証の内容を考慮し、層の厚さを一律に 0.1m として室を分割する。ただし、室の高さは余りがでないよう小数点第二位以下を切り捨てて指定する必要がある。

2.1 ゾーンの基礎方程式

i を室の番号、 j を室の最下層から上向きに層を数えた番号、 n_i を室 i の層数、 k を室の開口の番号とすると、室 i の層 j では、最上層、最上層と最下層を除く層、最下層のそれぞれの場合について、次の質量保存式が成り立つ。

・最上層 ($j=n_i$ の時) :

$$\frac{\partial(\rho_{ij}V_{ij})}{\partial t} = \sum_{l=1}^{n_i-1} \dot{m}_{pf,il} + \sum_k \sum_{l=1}^{n_i-1} \dot{m}_{ps,il,k} - \sum_k \dot{m}_{o1,ij,k} + \sum_k \sum_{l=1}^{n_i} \delta_{il,k} \dot{m}_{o2,il,k} - \dot{m}_{v,ij,ij-1} \quad (1)$$

・最上層と最下層を除く層 ($1 < j < n_i$ の時) :

$$\frac{\partial(\rho_{ij}V_{ij})}{\partial t} = -\dot{m}_{pf,ij} - \sum_k \dot{m}_{ps,ij,k} - \sum_k \dot{m}_{o1,ij,k} + \sum_k (1 - \delta_{ij,k}) \dot{m}_{o2,ij,k} + (\dot{m}_{v,ij+1,ij} - \dot{m}_{v,ij,ij-1}) \quad (2)$$

・最下層 ($j=1$ の時) :

$$\frac{\partial(\rho_{ij}V_{ij})}{\partial t} = -\dot{m}_{pf,ij} - \sum_k \dot{m}_{ps,ij,k} - \sum_k \dot{m}_{o1,ij,k} + \sum_k (1 - \delta_{ij,k}) \dot{m}_{o2,ij,k} + \dot{m}_{v,ij+1,ij} \quad (3)$$

ここに、 ρ_{ij} は室 i の層 j の気体の密度、 V_{ij} は室 i の層 j の気体の体積、 $\dot{m}_{pf,ij}$ は室 i の層 j から火災プルームに連行される気体の質量流量、 $\dot{m}_{ps,ij,k}$ は室 i の層 j から開口 k に由来する噴流プルームに連行される気体の質量流量、 $\dot{m}_{o1,ij,k}$ は開口 k を経由して室 i の層 j から流出する気体の質量流量、 $\dot{m}_{o2,ij,k}$ は開口 k を経由して室 i の層 j に流入する気体の質量流量、 $\delta_{ij,k}$ は開口 k を経由して室 i の層 j に流入する気体の温度が最上層のそれよりも高い場合を 1、そうでない場合を 0 とするダミー変数、 $\dot{m}_{v,ij+1,ij}$ (または $\dot{m}_{v,ij,ij-1}$) は火災プルームの外で室 i の層 $j+1$ から層 j に (または層 j から層 $j-1$ に) 境界面を越えて移動する気体の質量流量、 t は時間である。

また、室 i の層 j では、最上層、最上層と最下層を除く層、最下層のそれぞれの場合について、次のエネルギー保存式が成り立つ。

・最上層 ($j=n_i$ の時) :

$$\begin{aligned} \frac{\partial(c_p \rho_{ij} V_{ij} T_{ij})}{\partial t} = & \chi_c \dot{Q}_{f,i} - \dot{Q}_{l,ij} - \dot{Q}_{r,ij,ij-1} + \sum_{l=1}^{n_i-1} c_p \dot{m}_{pf,il} T_{il} + \sum_k \sum_{l=1}^{n_i-1} c_p \dot{m}_{ps,il,k} T_{il} \\ & - \sum_k c_p \dot{m}_{o1,ij,k} T_{ij} + \sum_k \sum_{l=1}^{n_i} \delta_{il,k} c_p \dot{m}_{o2,il,k} T'_{il,k} - \dot{Q}_{v,ij,ij-1} \end{aligned} \quad (4)$$

・最上層と最下層を除く層（ $1 < j < n_f$ の時）：

$$\begin{aligned} \frac{\partial(c_p \rho_{ij} V_{ij} T_{ij})}{\partial t} = & -\dot{Q}_{l,ij} + (\dot{Q}_{r,ij+1,ij} - \dot{Q}_{r,ij,ij-1}) - c_p \dot{m}_{pf,ij} T_{ij} - \sum_k c_p \dot{m}_{ps,ij,k} T_{ij} \\ & - \sum_k c_p \dot{m}_{o1,ij,k} T_{ij} + \sum_k (1 - \delta_{ij,k}) c_p \dot{m}_{o2,ij,k} T'_{ij,k} + (\dot{Q}_{v,ij+1,ij} - \dot{Q}_{v,ij,ij-1}) \end{aligned} \quad (5)$$

・最下層（ $j=1$ の時）：

$$\begin{aligned} \frac{\partial(c_p \rho_{ij} V_{ij} T_{ij})}{\partial t} = & -\dot{Q}_{l,ij} + \dot{Q}_{r,ij+1,ij} - c_p \dot{m}_{pf,ij} T_{ij} - \sum_k c_p \dot{m}_{ps,ij,k} T_{ij} - \sum_k c_p \dot{m}_{o1,ij,k} T_{ij} \\ & + \sum_k (1 - \delta_{ij,k}) c_p \dot{m}_{o2,ij,k} T'_{ij,k} + \dot{Q}_{v,ij+1,ij} \end{aligned} \quad (6)$$

ここに、 T_{ij} は室 i の層 j の気体の温度、 $T'_{ij,k}$ は開口 k を介して室 i の層 j に隣接する層の気体の温度、 $\dot{Q}_{f,i}$ は可燃物の燃焼に伴う室内の発熱速度、 $\dot{Q}_{l,ij}$ は室 i の層 j から内装材に伝達される熱量、 $\dot{Q}_{r,ij+1,ij}$ （または $\dot{Q}_{r,ij,ij-1}$ ）は放射により室 i の層 $j+1$ から層 j に（または層 j から層 $j-1$ に）境界面を越えて伝達される熱量、 $\dot{Q}_{v,ij+1,ij}$ （または $\dot{Q}_{v,ij,ij-1}$ ）は火災プルームの外で室 i の層 $j+1$ から層 j に（または層 j から層 $j-1$ に）境界面を越えて移動する気体の熱量、 χ_c は発熱速度のうち対流によって運ばれる成分の比率、 c_p は気体の定圧比熱である。

火災プルームの外で室 i の層 $j+1$ から層 j に境界面を越えて移動する気体の熱量 $\dot{Q}_{v,ij+1,ij}$ は、次式で与えられる。

$$\dot{Q}_{v,ij+1,ij} = \begin{cases} c_p \dot{m}_{v,ij+1,ij} T_{ij+1} & (\dot{m}_{v,ij+1,ij} \geq 0) \\ c_p \dot{m}_{v,ij+1,ij} T_{ij} & (\dot{m}_{v,ij+1,ij} < 0) \end{cases} \quad (7)$$

さらに、 X を化学種とすると、室 i の層 j では、最上層、最上層と最下層を除く層、最下層のそれぞれの場合について、次の化学種保存式が成り立つ。

・最上層（ $j=n_f$ の時）：

$$\begin{aligned} \frac{\partial(Y_{X,ij} \rho_{ij} V_{ij})}{\partial t} = & \dot{\Gamma}_{X,i} + \sum_{l=1}^{n_f-1} Y_{X,il} \dot{m}_{pf,il} + \sum_k \sum_{l=1}^{n_f-1} Y_{X,il} \dot{m}_{ps,il,k} - \sum_k Y_{X,ij} \dot{m}_{o1,ij,k} \\ & + \sum_k \sum_{l=1}^{n_f} \delta_{il,k} Y'_{X,il,k} \dot{m}_{o2,il,k} - \dot{M}_{X,v,ij,ij-1} \end{aligned} \quad (8)$$

・最上層と最下層を除く層（ $1 < j < n_f$ の時）：

$$\begin{aligned} \frac{\partial(Y_{X,ij}\rho_{ij}V_{ij})}{\partial t} = & -Y_{X,ij}\dot{m}_{pf,ij} - \sum_k Y_{X,ij}\dot{m}_{ps,ij,k} - \sum_k Y_{X,ij}\dot{m}_{o1,ij,k} \\ & + \sum_k (1-\delta_{ij,k})Y'_{X,ij,k}\dot{m}_{o2,ij,k} + (\dot{M}_{X,v,ij+1,ij} - \dot{M}_{X,v,ij,ij-1}) \end{aligned} \quad (9)$$

・最下層 ($j=1$ の時) :

$$\begin{aligned} \frac{\partial(Y_{X,ij}\rho_{ij}V_{ij})}{\partial t} = & -Y_{X,ij}\dot{m}_{pf,ij} - \sum_k Y_{X,ij}\dot{m}_{ps,ij,k} - \sum_k Y_{X,ij}\dot{m}_{o1,ij,k} \\ & + \sum_k (1-\delta_{ij,k})Y'_{X,ij,k}\dot{m}_{o2,ij,k} + \dot{M}_{X,v,ij+1,ij} \end{aligned} \quad (10)$$

ここに、 $Y_{X,ij}$ は室 i の層 j の化学種 X の質量分率、 $Y'_{X,ij,k}$ は開口 k を介して室 i の層 j に隣接する層の化学種 X の質量分率、 $\dot{\Gamma}_{X,i}$ は室 i の化学種 X の生成速度、 $\dot{M}_{X,v,ij+1,ij}$ (または $\dot{M}_{X,v,ij,ij-1}$) は火災プルームの外で室 i の層 $j+1$ から層 j に (または層 j から層 $j-1$ に) 境界面を越えて移動する化学種 X の質量流量である。

火災プルームの外で室 i の層 $j+1$ から層 j に境界面を越えて移動する化学種 X の質量流量 $\dot{M}_{X,v,ij+1,ij}$ は、次式で与えられる。

$$\dot{M}_{X,v,ij+1,ij} = \begin{cases} Y_{X,ij+1}\dot{m}_{v,ij+1,ij} & (\dot{m}_{v,ij+1,ij} \geq 0) \\ Y_{X,ij}\dot{m}_{v,ij+1,ij} & (\dot{m}_{v,ij+1,ij} < 0) \end{cases} \quad (11)$$

気体の状態方程式は、次式で与えられる。

$$\rho_{ij}T_{ij} = \rho_{\infty}T_{\infty} \quad (12)$$

ここに、 ρ_{∞} は外気の密度、 T_{∞} は外気の温度である。

2.2 気体温度と化学種濃度の予測方程式

式(1)~(6)を連立して解くと、気体温度 T_{ij} の時間微分について、次式が得られる^{注1)}。

・最上層 ($j=n_i$ の時) :

$$\frac{\partial T_{ij}}{\partial t} = \frac{\left[\chi_c \dot{Q}_{f,i} - \dot{Q}_{l,ij} - \dot{Q}_{r,ij,ij-1} + \sum_{l=1}^{n_i-1} c_p \dot{m}_{pf,il} (T_{il} - T_{ij}) + \sum_k \sum_{l=1}^{n_i-1} c_p \dot{m}_{ps,il,k} (T_{il} - T_{ij}) \right]}{c_p \rho_{ij} V_{ij}} \left[+ \sum_k \sum_{l=1}^{n_i} \delta_{il,k} c_p \dot{m}_{o2,il,k} (T'_{il,k} - T_{ij}) - \dot{Q}_{v,ij,ij-1} + c_p \dot{m}_{v,ij,ij-1} T_{ij} \right] \quad (13)$$

・最上層と最下層を除く層 ($1 < j < n_i$ の時) :

$$\frac{\partial T_{ij}}{\partial t} = \left[\begin{array}{l} -\dot{Q}_{l,ij} + (\dot{Q}_{r,ij+1,ij} - \dot{Q}_{r,ij,ij-1}) + \sum_k (1 - \delta_{ij,k}) c_p \dot{m}_{o2,ij,k} (T'_{ij,k} - T_{ij}) \\ + (\dot{Q}_{v,ij+1,ij} - \dot{Q}_{v,ij,ij-1}) - c_p (\dot{m}_{v,ij+1,ij} - \dot{m}_{v,ij,ij-1}) T_{ij} \end{array} \right] / c_p \rho_{ij} V_{ij} \quad (14)$$

・最下層 ($j=1$ の時) :

$$\frac{\partial T_{ij}}{\partial t} = \left[\begin{array}{l} -\dot{Q}_{l,ij} + \dot{Q}_{r,ij+1,ij} + \sum_k (1 - \delta_{ij,k}) c_p \dot{m}_{o2,ij,k} (T'_{ij,k} - T_{ij}) \\ + \dot{Q}_{v,ij+1,ij} - c_p \dot{m}_{v,ij+1,ij} T_{ij} \end{array} \right] / c_p \rho_{ij} V_{ij} \quad (15)$$

また、式(1)~(3)と式(8)~(10)を連立して解くと、化学種濃度 $Y_{X,ij}$ の時間微分について、次式が得られる。

・最上層 ($j=n_i$ の時) :

$$\frac{\partial Y_{X,ij}}{\partial t} = \left[\begin{array}{l} \dot{\Gamma}_{X,i} + \sum_{l=1}^{n_i-1} (Y_{X,il} - Y_{X,ij}) \dot{m}_{pf,il} + \sum_k \sum_{l=1}^{n_i-1} (Y_{X,il} - Y_{X,ij}) \dot{m}_{ps,il,k} \\ + \sum_k \sum_{l=1}^{n_i} \delta_{il,k} (Y'_{X,il,k} - Y_{X,ij}) \dot{m}_{o2,il,k} - \dot{M}_{X,v,ij,ij-1} + Y_{X,ij} \dot{m}_{v,ij,ij-1} \end{array} \right] / \rho_{ij} V_{ij} \quad (16)$$

・最上層と最下層を除く層 ($1 < j < n_i$ の時) :

$$\frac{\partial Y_{X,ij}}{\partial t} = \left[\begin{array}{l} \sum_k (1 - \delta_{ij,k}) (Y'_{X,ij,k} - Y_{X,ij}) \dot{m}_{o2,ij,k} + (\dot{M}_{X,v,ij+1,ij} - \dot{M}_{X,v,ij,ij-1}) \\ - Y_{X,ij} (\dot{m}_{v,ij+1,ij} - \dot{m}_{v,ij,ij-1}) \end{array} \right] / \rho_{ij} V_{ij} \quad (17)$$

・最下層 ($j=1$ の時) :

$$\frac{\partial Y_{X,ij}}{\partial t} = \left[\begin{array}{l} \sum_k (1 - \delta_{ij,k}) (Y'_{X,ij,k} - Y_{X,ij}) \dot{m}_{o2,ij,k} + \dot{M}_{X,v,ij+1,ij} \\ - Y_{X,ij} \dot{m}_{v,ij+1,ij} \end{array} \right] / \rho_{ij} V_{ij} \quad (18)$$

任意の時刻における気体温度 T_{ij} と化学種濃度 $Y_{X,ij}$ は、上記の微分方程式を数値的に解くことによって求める。ここでは、オイラー法を用いて数値的に解く。

2.3 可燃物の燃焼に伴う室内の発熱速度

各層を燃料と酸素の化学反応が生じる燃焼場とみなした時、酸素が豊富に存在する層では、層に供給される酸素が少なくても、層に存在する酸素が消費されることによって、供給される燃料は完全燃焼するとみなせる。しかし、酸素が乏しい層では、燃料と酸素の供給速度の小さい方によって、発熱速度が規定される。特に、室の上部に貼られた可燃性材料が燃え拡がり、上部にある層に燃料が過剰に供給される場合には、火災プルームによる酸素の供給速度が発熱速度を規定する可能性がある。一方で、煙層が室の低い位置まで降

下するような場合には、煙層と空気層の境界面付近で燃焼する様子が区画火災実験³⁹⁾において確認されており、火災プルームとは別に酸素が上部に流れている可能性がある。しかし、後者の定式化に利用可能な知見はほとんどなく、前者だけを考慮して発熱速度を規定すれば、発熱速度を過小評価する可能性がある。本モデルは、フラッシュオーバーが発生するまでの火災成長期を対象としており、その範囲においては、燃料の完全燃焼に必要な酸素が常に不足なく供給され、各層では燃料支配型の燃焼が起こるものと仮定する。ここでは、こうした仮定の下、可燃物の燃焼に伴う室内の発熱速度 $\dot{Q}_{f,i}$ を、火源の発熱速度 $\dot{Q}_{s,i}$ と可燃性内装材の発熱速度 $\dot{Q}_{m,i}$ の和として、次式で与える。

$$\dot{Q}_{f,i} = \dot{Q}_{s,i} + \dot{Q}_{m,i} \quad (19)$$

ただし、火源の発熱速度 $\dot{Q}_{s,i}$ は既知とする。

2.4 化学種（酸素）の生成速度

室 i の酸素 o の生成速度 $\dot{\Gamma}_{o,i}$ は、次式で与えられる。

$$\dot{\Gamma}_{o,i} = -\frac{\dot{Q}_{f,i}}{\Delta H_o} \quad (20)$$

ここに、 ΔH_o は酸素の燃焼熱である。

2.5 火災プルームの巻き込み量

Takahashi et al.²¹⁾は、隅角部および隅角部付近に正方形の火源が置かれた場合の火災プルーム流量を実験的に調べている。これによると、火源が隅角部に近づくほど壁の存在により空気の巻き込みが制限され、火災プルーム流量は自由空間でのそれに比べて減少する。さらに、Sugawa and Tobar²²⁾は、Zukoski et al.²³⁾により明らかにされているように、自由空間での火災プルーム流量が仮想点熱源の位置で補正した高さ $z+z_0$ の5/3乗に比例するのに対し、隅角部および隅角部付近において壁の影響を受ける領域での火災プルーム流量は $z+z_0$ の1乗に比例することを明らかにしている。また、巻き込み係数を火源径で無次元化した壁との離隔距離との関係で整理している。一方で、壁際に火源が置かれた場合の火災プルーム流量については、これまでにほとんど調べられていない。

本モデルでは、火災プルームに連行される気体の質量流量 $\dot{m}_{pf,ij}$ を、隅角部火源を想定する場合についてはSugawa and Tobar²²⁾の火災プルーム流量の予測式から、中央火源を想定する場合についてはZukoski et al.²³⁾のそれから計算する。壁際火源を想定する場合については、便宜的に、隅角部火源と中央火源についての $\dot{m}_{pf,ij}$ の中間値で与えるものとする。

・隅角部火源：

$$\dot{m}_{pf,ij} = 0.015 \left(\dot{Q}_{s,i} + \dot{Q}_{mw,i} \right)^{1/3} \left[\left(z_{ij,u} - z_b + z_0 \right)^{1/1} - \left(z_{ij,l} - z_b + z_0 \right)^{1/1} \right] \quad (21)$$

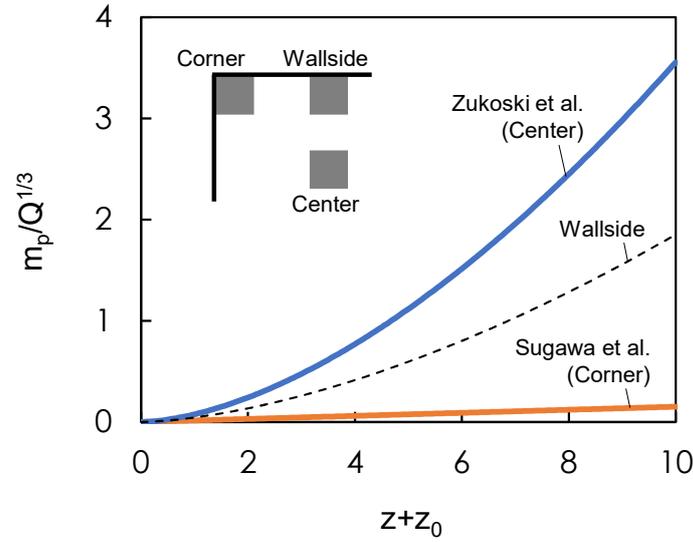


図2 火災プルーム流量の予測式²²⁾²³⁾の比較 (壁際の値は中央と隅角の値の中間値)

$$z_0 = 1.5D \quad (22)$$

・中央火源：

$$\dot{m}_{pf,ij} = 0.076\dot{Q}_{s,i}^{1/3} \left[(z_{ij,u} - z_b + z_0)^{5/3} - (z_{ij,l} - z_b + z_0)^{5/3} \right] \quad (23)$$

$$z_0 = 1.02D - 0.083\dot{Q}_{s,i}^{2/5} \quad (24)$$

ここに、 $\dot{Q}_{mv,i}$ は壁に貼られた可燃性内装材の発熱速度、 $z_{ij,u}$ と $z_{ij,l}$ はそれぞれ室 i の層 j の上面と下面の床面からの高さ、 z_b は火源面の高さ、 z_0 は仮想点熱源の位置²⁴⁾²⁵⁾、 D は火源の幅である。ただし、隅角部火源を想定する場合については、壁面に沿って拡大する火災を実際の火源と同じ幅の床面に置かれた単一火源として扱うことによって、壁の可燃性内装材に着火した後も Sugawa and Tobari²²⁾ の予測式が適用できると仮定している。この扱いは火災プルームの巻き込み量を計算するために行ったもので、今後改善が必要である。

2.6 開口噴流プルームの巻き込み量

開口噴流プルームに連行される気体の質量流量 $\dot{m}_{ps,ij,k}$ は、Tanaka et al.¹⁶⁾ の開口噴流プルーム流量の予測式から、次式で与えられる。

$$\dot{m}_{ps,ij,k} = 0.072\dot{Q}_{d,i,k}^{1/3} \left[(z_{ij,u} - z_{d,k} + z_0)^{5/3} - (z_{ij,l} - z_{d,k} + z_0)^{5/3} \right] \quad (25)$$

$$z_{d,k} = H_{d,k} - \frac{2}{3}(H_{d,k} - Z_{n,k}) \quad (26)$$

$$z_0 = 4.85 \left(\frac{\dot{m}_{d,i,k}}{\dot{Q}_{d,i,k}^{1/3}} \right)^{3/5} \quad (27)$$

ここに、 $\dot{Q}_{d,i,k}$ は開口噴流の熱量、 $\dot{m}_{d,i,k}$ は開口噴流の流量、 $z_{d,k}$ は開口噴流プルームの流量と開口噴流の流量が等しくなる巻き込み基準点の高さ、 z_0 は仮想点熱源の位置、 $Z_{n,k}$ は中性帯の高さ、 $H_{d,k}$ は開口上端の高さである。

開口噴流の熱量 $\dot{Q}_{d,i,k}$ と流量 $\dot{m}_{d,i,k}$ は、次のように計算する。

$$\dot{Q}_{d,i,k} = \sum_{l=1}^{n_i} \delta_{il,k} c_p \dot{m}_{o2,il,k} (T'_{il,k} - T_{in_i}) \quad (28)$$

$$\dot{m}_{d,i,k} = \sum_{l=1}^{n_i} \delta_{il,k} \dot{m}_{o2,il,k} \quad (29)$$

2.7 開口を經由して移動する気体の質量流量

開口を經由して移動する気体の質量流量を計算するにあたっては、室内の静圧を地表面高さにおける外気の静圧を基準とした相対圧力として扱う。 p_{ij} を室*i*の層*j*の中央高さにおける静圧、 $p'_{ij,k}$ を開口*k*を介して室*i*の層*j*に隣接する層の中央高さにおける静圧とすると、開口*k*を經由して室*i*の層*j*から流出する気体の質量流量 $\dot{m}_{o1,ij,k}$ は、次式で与えられる。

$$\dot{m}_{o1,ij,k} = \alpha B_k (z_{ij,u} - z_{ij,l}) \sqrt{2\rho_{ij} (p_{ij} - p'_{ij,k})} \quad (p_{ij} \geq p'_{ij,k}) \quad (30)$$

ここに、 $\alpha (=0.7)$ は流量係数、 B_k は開口の幅である。

また、 $\rho'_{ij,k}$ を開口*k*を介して室*i*の層*j*に隣接する層の気体の密度とすると、開口*k*を經由して室*i*の層*j*に流入する気体の質量流量 $\dot{m}_{o2,ij,k}$ は、次式で与えられる。

$$\dot{m}_{o2,ij,k} = \alpha B_k (z_{ij,u} - z_{ij,l}) \sqrt{2\rho'_{ij,k} (p'_{ij,k} - p_{ij})} \quad (p_{ij} < p'_{ij,k}) \quad (31)$$

室*i*の層*j*の中央高さにおける静圧 p_{ij} は、室*i*の床面高さにおける静圧を p_i として、次式で与えられる。

$$p_{ij} = p_i - \sum_{l=1}^{j-1} \rho_{il} g (z_{il,u} - z_{il,l}) - \rho_{ij} g \left(\frac{z_{ij,u} - z_{ij,l}}{2} \right) \quad (32)$$

ここに、 g は重力加速度である。

各室の床面高さにおける静圧(p_1, p_2, \dots, p_N)を計算するにあたっては、式(4)~(6)のエネル

ギー保存式を室ごとに足し合わせ、得られた式を静圧の関数 $f_i(p_1, p_2, \dots, p_N)$ とみなす。

$$\begin{aligned} f_i(p_1, p_2, \dots, p_N) &= \chi_c \dot{Q}_{f,i} - \sum_{j=1}^{n_i} \dot{Q}_{l,ij} - \sum_k \sum_{j=1}^{n_i} c_p \dot{m}_{o1,ij,k} T_{ij} + \sum_k \sum_{j=1}^{n_i} c_p \dot{m}_{o2,ij,k} T'_{ij,k} \\ &= 0 \quad (i=1, 2, \dots, N) \end{aligned} \quad (33)$$

ただし、 N は室の数である。

上記の関数を全ての室について連立させた非線形連立方程式を数値的に解くことによって、任意の時刻における静圧 (p_1, p_2, \dots, p_N) を求める。

$$\mathbf{f}(\mathbf{p}) \equiv \begin{bmatrix} f_1(p_1, p_2, \dots, p_N) \\ \dots \\ f_i(p_1, p_2, \dots, p_N) \\ \dots \\ f_N(p_1, p_2, \dots, p_N) \end{bmatrix} = \mathbf{0} \quad (34)$$

ここでは、ニュートン・ラフソン法を用いて数値的に解くこととし、反復計算の k 回目の近似解を $\mathbf{p}^{(k)}$ 、 $k+1$ 回目の近似解を $\mathbf{p}^{(k+1)}$ として、次のように計算する。

$$\mathbf{p}^{(k+1)} = \mathbf{p}^{(k)} - \mathbf{J}^{-1} \mathbf{f}(\mathbf{p}^{(k)}) \quad (35)$$

ここに、 \mathbf{J} は次式で定義されるヤコビ行列である。

$$\mathbf{J} \equiv \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial p_1} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial p_i} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial p_N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial f_j}{\partial p_1} & \dots & \frac{\partial f_j}{\partial p_i} & \dots & \frac{\partial f_j}{\partial p_N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial f_N}{\partial p_1} & \dots & \frac{\partial f_N}{\partial p_i} & \dots & \frac{\partial f_N}{\partial p_N} \end{bmatrix} \quad (36)$$

ただし、ヤコビ行列の逆行列を計算して $\mathbf{J}^{-1} \mathbf{f}(\mathbf{p}^{(k)})$ を求めるのではなく、次式を満たす静圧の修正量の近似解 $\Delta \mathbf{p}^{(k)}$ をガウス・ザイデル法を用いて求めることによって、 $k+1$ 回目の静圧の近似解 $\mathbf{p}^{(k+1)}$ を計算する。

$$\mathbf{J} \Delta \mathbf{p}^{(k)} = -\mathbf{f}(\mathbf{p}^{(k)}) \quad (37)$$

2.8 火災プルームの外で層の境界面を越えて移動する気体の質量流量

火災プルームの外で室*i*の層*j*から層*j-1*に境界面を越えて移動する気体の質量流量 $\dot{m}_{v,ij,j-1}$ は、上の層から下の層へ順々に計算していく。まず、最上層から一つ下の層に境界面を越えて移動する気体の質量流量は、式(1)を変形した次式で与えられる。

$$\dot{m}_{v,ij,j-1} = \sum_{l=1}^{n_i-1} \dot{m}_{pf,il} + \sum_k \sum_{l=1}^{n_i-1} \dot{m}_{ps,il,k} - \sum_k \dot{m}_{o1,ij,k} + \sum_k \sum_{l=1}^{n_i} \delta_{il,k} \dot{m}_{o2,il,k} - \frac{\partial(\rho_{ij}V_{ij})}{\partial t} \quad (j=n_i) \quad (38)$$

ただし、上式の右辺の最終項の計算には後退差分を用いる。

さらに、最上層の一つ下の層からさらに一つ下の層に移動する気体の質量流量は、式(2)を変形した次式で与えられる。

$$\dot{m}_{v,ij,j-1} = -\dot{m}_{pf,ij} - \sum_k \dot{m}_{ps,ij,k} - \sum_k \dot{m}_{o1,ij,k} + \sum_k (1 - \delta_{ij,k}) \dot{m}_{o2,ij,k} + \dot{m}_{v,ij+1,ij} - \frac{\partial(\rho_{ij}V_{ij})}{\partial t} \quad (j=n_i-1) \quad (39)$$

同様に、上式の右辺の最終項の計算には後退差分を用いる。

式(39)はさらに下の層、すなわち、 $2 \leq j \leq n_i - 1$ の範囲でも成立する。こうした計算を上層から下の層へ順々に行うことによって、層の境界面を越えて移動する気体の質量流量を全ての層について求めることができる。

2.9 内装材に伝達される熱量

内装材に伝達される熱量 $\dot{Q}_{l,ij}$ は、室*i*の層*j*の周りにある内装材を*m*とし、気体の層を黒体として扱くと、次式で与えられる。

$$\dot{Q}_{l,ij} = \sum_m \left[\varepsilon_m \sigma (T_{ij}^4 - T_{m,s}^4) + h_m (T_{ij} - T_{m,s}) \right] A_m \quad (40)$$

ここに、 $T_{m,s}$ は内装材の表面温度、 A_m は内装材の表面積、 ε_m は内装材の放射率、 h_m は内装材の対流熱伝達率、 σ はステファン・ボルツマン定数である。

内装材の表面温度 $T_{m,s}$ は、気体の層から材料表面への放射熱伝達と対流熱伝達、材料内部の熱伝導および火炎からの放射熱伝達を考慮して計算する。ここでは、厚さ方向の一次元熱伝導方程式

$$\rho_m c_m \frac{\partial T_m}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_m \frac{\partial T_m}{\partial x} \right) - \dot{m}_v'' L_v \quad (41)$$

を、境界条件

$$-k_m \frac{\partial T_m}{\partial x} \Big|_{x=0} = \varepsilon_m \sigma (T_{ij}^4 - T_{m,s}^4) + h_m (T_{ij} - T_{m,s}) + \varepsilon_m \dot{q}_{f,m}'' \quad (42)$$

$$-k_m \frac{\partial T_m}{\partial x} \Big|_{x=l_m} = 0 \quad (43)$$

の下で、有限差分法を用いて解く。ただし、 T_m は内装材の温度、 k_m は内装材の熱伝導率、 ρ_m は内装材の密度、 c_m は内装材の比熱、 x は内装材の表面からの距離、 l_m は内装材の厚さ、 \dot{m}_v'' は単位体積あたりの水分の蒸発速度、 L_v は水分の蒸発潜熱、 $\dot{q}_{f,m}''$ は火炎から内装材の表面に入射する放射熱流束である。水分の蒸発は、有限差分法を適用する際に配置する節点の温度が 100°C に達した時点で始まり、節点の水分の密度（初期密度を材料の密度×含水率とする）がゼロになるまで続くものとする。その間の節点の温度は 100°C で一定であるものとし、水分の蒸発速度 \dot{m}_v'' は式(41)の左辺を 0 とすることによって求められる。

火炎から内装材の表面に入射する放射熱流束 $\dot{q}_{f,m}''$ は、天井、床および各層を囲う壁の合計 n_f+2 個の検査面について求めた放射熱流束 $\overline{\dot{q}_{f,cs}''}$ で与える。火炎から検査面に入射する放射熱流束 $\overline{\dot{q}_{f,cs}''}$ は、空間的な広がりを持つ火炎を単一点源に近似し、そこから全ての方向に一様に放射されると仮定すると、次式で与えられる⁴⁰⁾。

$$\dot{q}_{f,m}'' \equiv \overline{\dot{q}_{f,cs}''} = \frac{(1-\chi_c)\dot{Q}_{f,i}\omega_{f,cs}}{4\pi A_{cs}} = \frac{(1-\chi_c)\dot{Q}_{f,i}F_{f,cs}}{A_{cs}} \quad (44)$$

ここに、 $(1-\chi_c)$ は発熱速度のうち放射によって消費される成分の比率、 $\omega_{f,cs}$ は点源から見た検査面の立体角、 A_{cs} は検査面の面積、 $F_{f,cs}$ は点源から見た検査面の形態係数である。

点源の位置は火源の位置に応じて設定する。中央火源を想定する場合については、床面の中央を基準に、連続火炎先端までの高さの半分の位置に設定する。隅角部火源を想定する場合については、床面の隅角部から両側の壁に沿ってそれぞれ火源幅の半分だけ進んだ位置を基準に、連続火炎先端までの壁や天井に沿った長さの半分の高さに設定する。壁際火源を想定する場合については、床面を構成するある辺の中点から垂直な方向に火源幅の半分だけ進んだ位置を基準に、連続火炎先端までの壁や天井に沿った長さの半分の高さに設定する。中央火源を想定する場合の連続火炎高さは、自由空間における円形または正方形火源上の火炎長さの予測式⁴¹⁾を用いて計算する。隅角部火源や壁際火源を想定する場合の連続火炎高さは、第3章2節で述べる火炎長さの予測式³⁰⁾³¹⁾を用いて計算する。

点源から距離 R 離れた平面上にある、辺長が X と Y の矩形面の形態係数 $F(X,Y,R)$ が

$$F(X,Y,R) = \frac{1}{4\pi} \left\{ \sin^{-1} \left(\sqrt{1 + \frac{R^2}{X^2 + Y^2}} \frac{Y}{\sqrt{Y^2 + R^2}} \right) + \sin^{-1} \left(\sqrt{1 + \frac{R^2}{X^2 + Y^2}} \frac{X}{\sqrt{X^2 + R^2}} \right) - \frac{\pi}{2} \right\} \quad (45)$$

で与えられ⁴⁰⁾、加法的であることに注意すれば、形態係数を任意の矩形について求めることができる^{注2)}。

内装材の対流熱伝達率 h_m は、伝熱工学の分野で得られている平板の自然対流熱伝達および強制対流熱伝達の実験式に基づいた考察から、次式で与えられる¹⁴⁾。

$$h_m = \begin{cases} 0.005 & (\bar{T} \leq 300) \\ 0.001(0.02\bar{T} - 1) & (300 < \bar{T} \leq 800) \\ 0.015 & (800 < \bar{T}) \end{cases} \quad (46)$$

ここに、 \bar{T} は気体温度 T_{ij} と内装材の表面温度 $T_{m,s}$ の平均である。

2.10 放射により層の境界面を越えて伝達される熱量

放射により層の境界面を越えて伝達される熱量 $\dot{Q}_{r,ij+1,ij}$ は、気体の層を黒体として扱くと、次式で与えられる。

$$\dot{Q}_{r,ij+1,ij} = \sigma(T_{ij+1}^4 - T_{ij}^4)A_{F,i} \quad (47)$$

ここに、 $A_{F,i}$ は室 i の床面積である。

2.11 煙層高さ と 煙層温度

避難安全検証に必要な室 i の煙層高さ $z_{s,i}$ は、室 i の気体温度の鉛直分布から決定する。気体温度の鉛直分布から煙層高さ（上部層と下部層の境界面高さ）を決定する方法には、初期温度からの温度上昇が天井近傍のそのN%となる高さを算出する方法（N%法）²⁶⁾、温度プロファイルを二層ゾーンに換算し境界面高さを算出する方法⁴²⁾、温度プロファイルに四次関数を当てはめ変曲点の高さを推定する方法⁴³⁾などがある。Cooper et al.²⁶⁾は、実大火災実験における目視観察との比較から、N値を10%とした場合に良好な結果が得られることを報告しているが、出口ら⁴³⁾によると、N%法（10%）を用いた場合の境界面高さは他の方法⁴²⁾⁴³⁾を用いた場合に比べて低くなる。本研究では、①N%法（10%）を用いれば、境界面高さが比較的に低く算出され、安全側の設計につながることを、②第4章1節で述べるように、N%法（10%）を用いれば、設計実務で用いられることの多いTanaka et al.³³⁾の簡易予測式との整合性が概ねとれることを考慮し、N%法（10%）を用いて煙層高さ $z_{s,i}$ を定義する。まず、室 i の最上層の気体温度 T_{in_i} とその初期温度（外気温 T_∞ と等しいものとする）から、参照温度 $T_{ref,i}$ を

$$T_{ref,i} = 0.1(T_{in_i} - T_\infty) + T_\infty \quad (48)$$

とする。次に、各層の気体温度を各層の中央高さにおける温度とみなして直線補間し、参照温度 $T_{ref,i}$ となる高さを求め、これを室 i の煙層高さ $z_{s,i}$ とする。

避難安全検証に必要な室 i の煙層温度 $T_{s,i}$ は、煙層高さより上の気体の平均温度として、

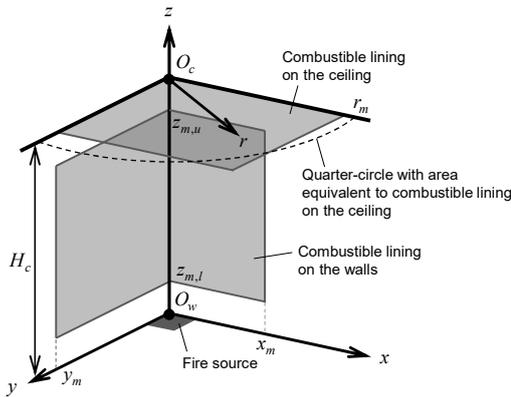
$$(H_{c,i} - z_{s,i})T_{s,i} = \int_{z_{s,i}}^{H_{c,i}} T_i(z) dz \quad (49)$$

とする. ここに, $H_{c,i}$ は室 i の天井高さ, $T_i(z)$ は室 i の高さ z における気体温度である.

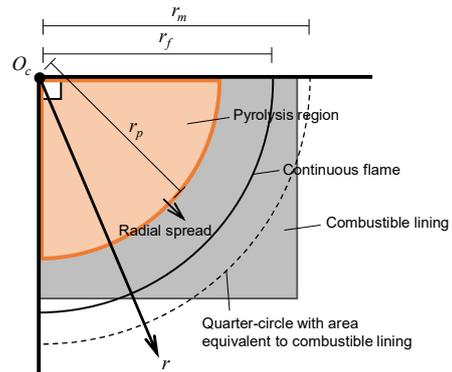
第3章 可燃性内装材の燃焼拡大モデル

図3に、本研究における可燃性内装材の燃焼拡大モデルの概念を示す。壁に貼られた可燃性内装材については、火源の背後または直上で着火が生じた後、壁面に沿って形成される火炎により、熱分解領域が上方と側方向に拡大する。その後、熱分解領域の先端が天井近傍に達すると、天井下に形成される火炎により、天井流の流れ方向と下方方向に拡大する。一方、天井に貼られた可燃性内装材については、火炎が天井下に形成された後、火源直上の角で着火が生じ、熱分解領域がそこから放射状に拡大する。ここでは、壁の一部に可燃性内装材が貼られた場合の燃焼拡大性状を記述するため、床面の隅角部を原点 O_w 、両側の壁に沿った水平方向を x 軸と y 軸、高さ方向を z 軸とする三次元座標系を導入し、 x 軸と y 軸については最大限界 x_m と y_m を、 z 軸については最大限界 $z_{m,u}$ と最小限界 $z_{m,l}$ を設定する。また、天井の一部に可燃性内装材が貼られた場合の燃焼拡大性状を記述するため、天井面の隅角部を原点 O_c 、半径方向を r 軸とする平面の極座標系を導入し、 r 軸について最大限界 r_m を設定する。なお、可燃性内装材を貼る天井の範囲は矩形が多いと思われるが、

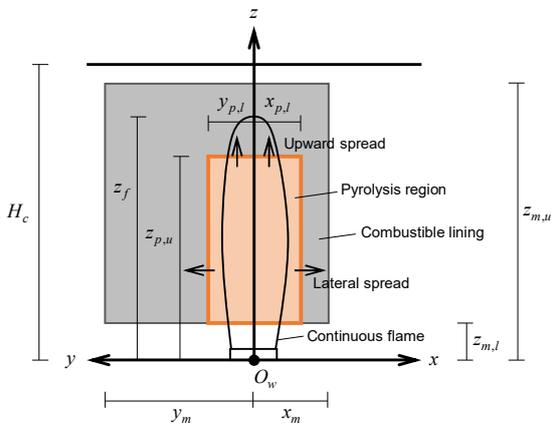
● Coordinate systems for rooms partially-lined with combustible materials



● Ceiling pyrolysis region



● Wall pyrolysis region (1)



● Wall pyrolysis region (2)

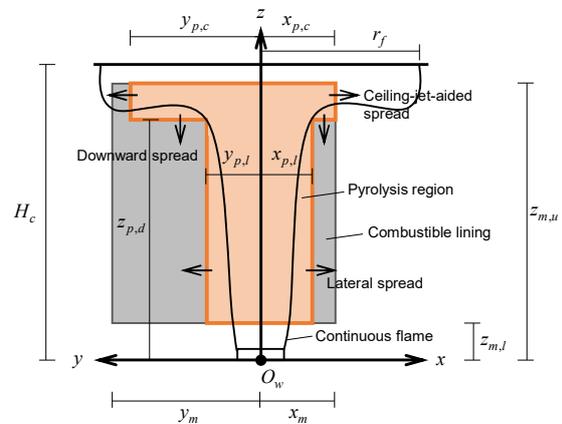


図3 可燃性内装材の燃焼拡大モデルの概念図

計算にあたっては面積が等価な四分円の半径を指定する。

3.1 熱分解領域先端の進行速度

壁に貼られた可燃性の内装材のように、鉛直に設置された可燃性平板が着火すると、火炎は浮力のため平板に沿って上方に伸びる。火炎は伸長方向に対し横方向や逆方向にも伝播するが、火炎からの強い加熱により伸長方向への伝播は著しく促進される。Quintiere et al.⁶⁾ は、熱分解領域上方の未燃部分が火炎や煙層によって予熱され、その部分（予熱領域と言う）の表面が着火温度に達すると、熱分解領域の先端が進行して火炎伝播が生じると仮定し、半無限固体の一次元熱伝導方程式を特定の境界条件の下で解くことによって、熱分解領域先端の進行速度を材料の熱物性から計算できる形で定式化している^{注3)}。

本モデルでは、①壁に貼られた可燃性内装材の上方火炎伝播速度、②壁に貼られた可燃性内装材の天井流の流れ方向への火炎伝播速度、③天井に貼られた可燃性内装材の半径方向への火炎伝播速度を Quintiere et al.⁶⁾ の予測式を用いて計算する。 $z_{p,u}$ を上方に進行する熱分解領域先端の高さ、 $x_{p,c}$ と $y_{p,c}$ を天井流の流れ方向に進行する熱分解領域先端の隅角部からの水平距離、 r_p を半径方向に進行する熱分解領域先端の隅角部からの水平距離とすると、それぞれの熱分解領域先端の進行速度は次式で与えられる。

$$\frac{\partial z_{p,u}}{\partial t} = \frac{4\dot{q}_{f,w}''^2 (z_f - z_{p,u})}{\pi k_m \rho_m c_m [T_{m,ig} - T_{m,s}(z_{p,u})]^2} \quad (t \geq t_{ig,w}) \quad (50)$$

$$\frac{\partial x_{p,c}}{\partial t} = \frac{4\dot{q}_{f,c}''^2 (r_f - x_{p,c})}{\pi k_m \rho_m c_m [T_{m,ig} - T_{m,s}(z_{m,u})]^2} \quad (z_{p,u} \geq 0.95H_c) \quad (51)$$

$$\frac{\partial y_{p,c}}{\partial t} = \frac{4\dot{q}_{f,c}''^2 (r_f - y_{p,c})}{\pi k_m \rho_m c_m [T_{m,ig} - T_{m,s}(z_{m,u})]^2} \quad (z_{p,u} \geq 0.95H_c) \quad (52)$$

$$\frac{\partial r_p}{\partial t} = \frac{4\dot{q}_{f,c}''^2 (r_f - r_p)}{\pi k_m \rho_m c_m [T_{m,ig} - T_{m,s}(H_{c,i})]^2} \quad (t \geq t_{ig,c}) \quad (53)$$

ここに、 z_f は壁面に沿った連続火炎の長さ、 r_f は天井面に沿った連続火炎の長さ、 $\dot{q}_{f,w}''$ は壁面に沿った連続火炎から予熱領域に入射する熱流束、 $\dot{q}_{f,c}''$ は天井面に沿った連続火炎から予熱領域に入射する熱流束、 $T_{m,ig}$ は可燃性内装材の着火温度、 $T_{m,s}(Z)$ は床面からの高さ Z における可燃性内装材の表面温度、 $z_{m,u}$ は壁に貼られた可燃性内装材の上端高さ、 $t_{ig,w}$ は壁に貼られた可燃性内装材の着火時間、 $t_{ig,c}$ は天井に貼られた可燃性内装材の着火時間である。ただし、上方に進行する熱分解領域先端の高さ $z_{p,u}$ が天井流の中心軸高さ（天井高さ H_c の95%とする）に達するまで、天井流の流れ方向への火炎伝播は生じないものとする。

火炎の伸長方向に対し横方向への火炎伝播については、式(50)～式(53)の右辺の分子を一種の熱物性（火炎伝播パラメータと呼ぶ）と捉え、LIFT 試験で測定される側方向の火炎伝

表 1 代表的な木質材料の火炎伝播パラメータ Φ_m の推定値

材料	厚さ	T_{ig}	$k\rho c^*$	Φ_m
	mm	°C	(kW/m ² K) ² s	(kW) ² /m ³
硬質繊維板 ²⁷⁾	6.35	298	1.87	4.51
硬質繊維板 ²⁷⁾	3.18	365	0.88	10.97
パーティクルボード ²⁷⁾	12.7	382	0.94	12.75
合板 ²⁷⁾	12.7	390	0.54	12.91
合板 ²⁷⁾	6.35	390	0.46	7.49
ラワン合板 ²⁸⁾²⁹⁾	5.50	357	0.61	9.41
シナ合板 ²⁸⁾²⁹⁾	12.0	404	0.30	4.99
単板積層材 (LVL) ²⁸⁾²⁹⁾	15.0	386	0.26	9.94

※本表の $k\rho c^*$ の値は半無限固体の熱着火理論に基づいて推定されたもので、常温時の熱伝導率、密度、比熱を代入して得られる値よりもかなり大きい。本表の値は水平火炎伝播や下方火炎伝播には適用できるが、火災成長において支配的な上方火炎伝播や天井流方向への火炎伝播にも適用できるかは不明であり、本表の値を用いると火炎伝播速度が過小評価される恐れがある。そこで、 $k\rho c^*$ の値には常温時の熱伝導率、密度、比熱を代入して得られる値を用いること。

播速度から、火炎伝播パラメータを推定する方法が提案されている⁷⁾。ここでは、この考え方に基づいて、①壁に貼られた可燃性内装材の側方火炎伝播速度、②壁に貼られた可燃性内装材の下方火炎伝播速度を計算する。 $x_{p,l}$ と $y_{p,l}$ を側方向に進行する熱分解領域先端の隅角部からの水平距離、 $z_{p,d}$ を下方に進行する熱分解領域先端の高さとする、それぞれの熱分解領域先端の進行速度は次式で与えられる。

$$\frac{\partial x_{p,l}}{\partial t} = \frac{\Phi_m}{k_m \rho_m c_m [T_{m,ig} - T_{m,s}(z_{m,l})]^2} \quad (t \geq t_{ig,w}) \quad (54)$$

$$\frac{\partial y_{p,l}}{\partial t} = \frac{\Phi_m}{k_m \rho_m c_m [T_{m,ig} - T_{m,s}(z_{m,l})]^2} \quad (t \geq t_{ig,w}) \quad (55)$$

$$\frac{\partial z_{p,d}}{\partial t} = -\frac{\Phi_m}{k_m \rho_m c_m [T_{m,ig} - T_{m,s}(z_{p,d})]^2} \quad (z_{p,u} \geq 0.95H_c) \quad (56)$$

ここに、 Φ_m は可燃性内装材の火炎伝播パラメータ、 $z_{m,l}$ は壁に貼られた可燃性内装材の下端高さである。ただし、上方に進行する熱分解領域先端の高さ $z_{p,u}$ が天井流の中心軸高さ(天井高さ H_c の 95%とする)に達するまで、下方への火炎伝播は生じないものとする。Quintiere and Harkleroad²⁷⁾ や小宮ら²⁸⁾ による LIFT 試験の結果によると、代表的な木質材料の火炎伝播パラメータ Φ_m の値は 4.5~12.9 程度である(表 1)。

任意の時刻における熱分解領域先端の位置は、オイラー法を用いて上記の微分方程式を数値的に解くことによって求める。

3.2 壁面や天井面に沿って形成される火炎

壁面や天井面に沿った連続火炎の長さ、 z_f と r_f は、バーナーを用いて隅角部火源上の

火炎長さを調べた火災実験の結果³⁰⁾³¹⁾から、次式で与えられる。

$$z_f = \min\left(3.0Q_1^{*2/3}D + z_b, H_c\right) \quad (57)$$

$$r_f = \min\left(3.9Q_2^{*1/2}D + z_b - H_c, \sqrt{4A_F/\pi}\right) \quad \left(3.0Q_1^{*2/3}D + z_b > H_c\right) \quad (58)$$

ここに、 Q_1^* と Q_2^* は無次元発熱速度であり、

$$Q_1^* = \frac{\dot{Q}_s + \dot{Q}_{mw}}{c_p \rho_\infty T_\infty \sqrt{g} D^{5/2}} \quad (59)$$

$$Q_2^* = \frac{\dot{Q}_s + \dot{Q}_{mw} + \dot{Q}_{mc}}{c_p \rho_\infty T_\infty \sqrt{g} D^{5/2}} \quad (60)$$

ここに、 \dot{Q}_{mw} は壁に貼られた可燃性内装材の発熱速度、 \dot{Q}_{mc} は天井に貼られた可燃性内装材の発熱速度である。ただし、無次元発熱速度の計算では、壁面や天井面に沿って拡大する火災を実際の火源と同じ幅の床面に置かれた単一火源として扱うことによって、壁や天井の可燃性内装材に着火した後も火炎長さの予測式³⁰⁾³¹⁾が適用できると仮定している。この扱いは火炎長さを計算するために行ったもので、今後改善が必要である。

連続火炎からの入射熱流束、 $\dot{q}_{f,w}''$ と $\dot{q}_{f,c}''$ は、バーナーを用いて壁面や天井面に沿った火炎からの表面入射熱流束を調べた火災実験の結果⁶⁾³²⁾から、次式で与えられる。

$$\dot{q}_{f,w}'' \approx 25, \quad \dot{q}_{f,c}'' \approx 20 \quad (61)$$

3.3 可燃性内装材の着火時間

壁に貼られた可燃性内装材の着火時間 $t_{ig,w}$ は、一定の放射加熱を受ける半無限固体の一次元熱伝導方程式の解から、次式で与えられる。

$$t_{ig,w} = \max\left(t_{f,w}, t_{Q,100}\right) + \frac{\pi}{4} k_m \rho_m c_m \left(\frac{T_{m,ig} - T_0}{\dot{q}_0''}\right)^2 \quad (62)$$

ここに、 T_0 は可燃性内装材の初期温度、 \dot{q}_0'' は火源からの入射熱流束、 $t_{f,w}$ は火源上の連続火炎の先端が壁に貼られた可燃性内装材の下端高さに達するまでの時間、 $t_{Q,100}$ は火源が可燃性内装材の着火に必要な熱流束を放射する程度（火源の発熱速度が100kW以上を仮定）に成長するまでの時間である。火源からの入射熱流束 \dot{q}_0'' は、

$$\dot{q}_0'' \approx \begin{cases} 50 & (z_{m,l} \leq z_b + D) \\ 25 & (z_{m,l} > z_b + D) \end{cases} \quad (63)$$

と仮定する。ここでは、火源面に近い高さでは火炎が厚いため、火炎からの入射熱流束が薄い火炎についての値⁶⁾よりも大きくなることを考慮している。

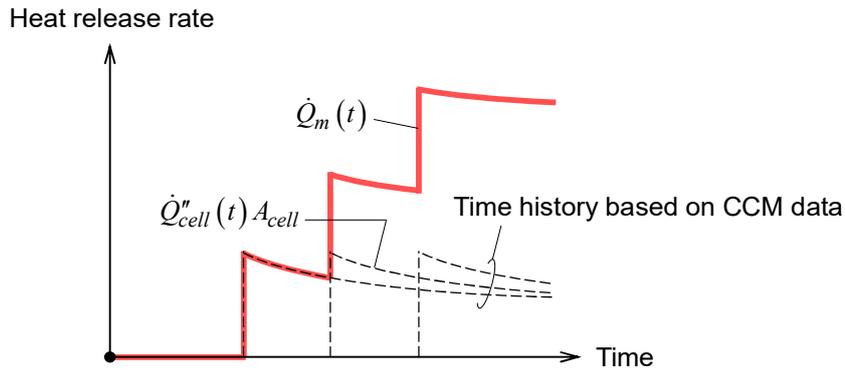


図4 セルの発熱速度の足し合わせによる可燃性内装材の発熱速度の計算

天井に貼られた可燃性内装材の着火時間 $t_{ig,c}$ は、連続火炎が天井に接触するまでの時間を $t_{f,c}$ として、次式で与えられる。

$$t_{ig,c} = t_{f,c} + \frac{\pi}{4} k_m \rho_m c_m \left(\frac{T_{m,ig} - T_0}{\dot{q}_{f,c}''} \right)^2 \quad (64)$$

3.4 可燃性内装材の燃焼に伴う発熱速度

可燃性内装材の発熱速度 \dot{Q}_m は、壁や天井に貼られた可燃性内装材の表面を正方格子で分割されたセルの集合とみなし、任意の時刻における各セルの単位面積あたりの発熱速度を $\dot{Q}_{cell}''(t)$ として、次式で与えられる。

$$\dot{Q}_m = \sum \dot{Q}_{cell}''(t) A_{cell} \quad (65)$$

ここに、 A_{cell} はセルの面積である。ここでは、セルの辺長を0.005mとして分割する。

セルの単位面積あたりの発熱速度 $\dot{Q}_{cell}''(t)$ の計算には、コーンカロリメータを用いて一定の加熱強度の下で測定される材料の発熱速度の時刻歴を使用する(図4)。ここでは、①壁面や天井面に沿って形成される連続火炎からの入射熱流束が20~25kW/m²程度⁶⁾³²⁾であること、②煙層をフラッシュオーバーの発生条件として知られる温度500°Cの黒体とみなした時に、煙層からの放射熱流束が約20kW/m²となることを考慮し、加熱強度40kW/m²の下で測定された発熱速度の時刻歴から、各セルの着火からの経過時間に対応する発熱速度を読み取る。ただし、可燃性内装材を加熱する火炎や煙層の性状は時々刻々と変化するため、可燃性内装材の発熱速度は一定の加熱強度の下での測定結果とは異なる性状を示すと考えられる。また、壁の上部や天井に貼られた可燃性内装材は、煙層の存在によって、コーンカロリメータのように十分に換気された条件下で燃焼する訳ではない。ここでの扱いは可燃性内装材の発熱速度を過大評価すると考えられるため、今後改善が必要である。なお、可燃性内装材の発熱速度の経時的な変化を考慮するため、条件によっては、それまで成長

していた火災が一旦減衰に転じることもあり，それに伴って火炎の長さも縮むことになる．そこで，連続火炎の長さが熱分解領域の先端よりも短くなる場合，すなわち式(50)～式(53)の右辺の分子がマイナスになる場合については，熱分解領域先端の位置を連続火炎先端の位置に修正し，その進行速度をゼロとすることによって，熱分解領域の縮小を記述する．

第4章 モデルの予測性能の検証

4.1 大規模吹き抜け空間の煙降下実験¹⁷⁾の再現計算

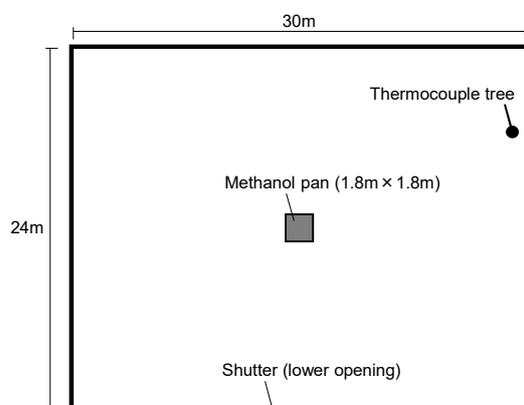
(1) 実験データ

Yamana and Tanaka¹⁷⁾は、大規模な吹き抜け空間における煙の降下性状を調べるための実大火災実験を行っている。実験では、幅 30m、奥行き 24m、天井高さ 26.3m の吹き抜け空間の床面中央部に 45cm 角の燃料容器を 15 個設置し、メタノールを燃焼させて火災を発生させている (図 5)。実験は、自然排煙や機械排煙などの様々な煙制御方法の効果を調べるため、計 9 条件の下で行われている。一つの条件下でのみ測定されたメタノールの重量減少速度はほぼ一定であり、平均重量減少速度から計算される発熱速度は 1300kW であった。吹き抜け空間を構成する壁や天井には、コンクリートが用いられている。壁の近くに天井から高さ 1m の間隔で熱電対が設置されており、気体温度の鉛直分布が測定されている。また、天井から高さ 2m の間隔でフォトセル (CdS セル) が設置されており、光学的煙濃度の鉛直分布が測定されている。煙層の高さは、目視の他、熱電対やフォトセルが反応し始めた時間を読み取ることによって決定されている。ここでは、①自然降下 (無排煙) と、②自然排煙、の 2 条件の下で得られた実験データを検証用データとして用いる。後者の条件下では、面積が 6.46m² と 3.23m² の開口がそれぞれ壁の上部と下部に設けられている。

(2) 計算条件

時間刻みを 0.05s として、着火から 8 分間の計算を行った。吹き抜け空間の形状は実験と同じように設定し、層の厚さを 0.1m として空間を分割した。壁や天井、床は厚さ 100mm のコンクリートとし、熱伝導率を 1.63×10^{-3} kW/mK、密度を 2250kg/m³、比熱を 0.895kJ/kgK、放射率を 0.9、含水率を 0 に設定した。火源の発熱速度は、着火後時間に比例して増加し、10 秒後に最大発熱速度 1300kW に達して、その後は一定になるように与えた。発熱速度のうちの対流成分の比率は 0.8 とした⁴⁴⁾。火源の幅は 1.8m とした。自然降下の条件について

(A) Floor plan



(B) Cross section

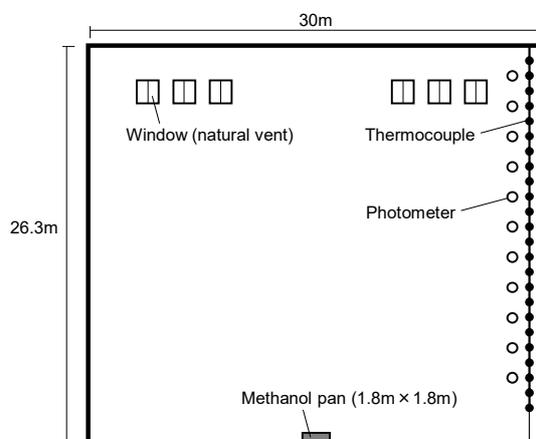


図 5 大規模吹き抜け空間の煙降下実験¹⁷⁾で用いられた実験装置

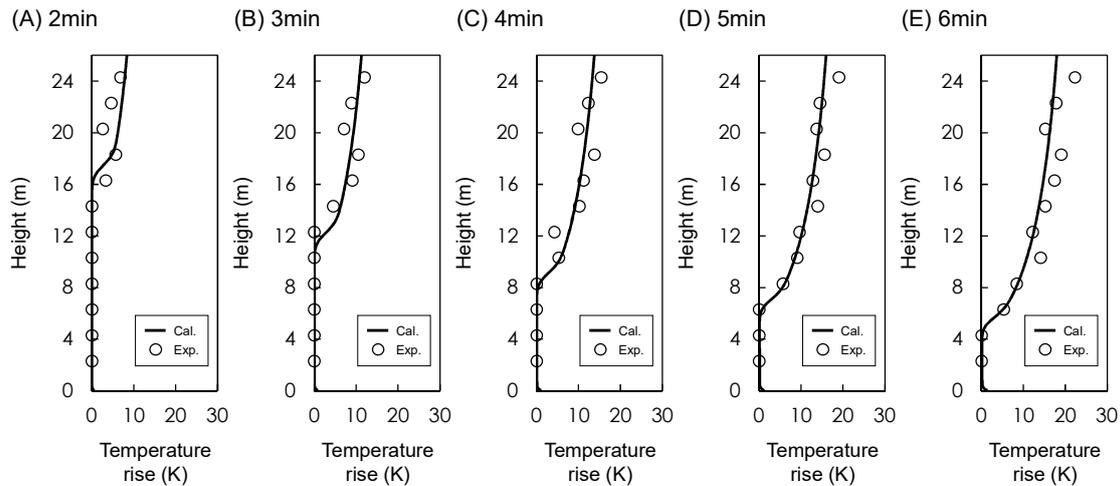


図6 気体温度の鉛直分布の予測結果と実験結果¹⁷⁾の比較(自然降下)

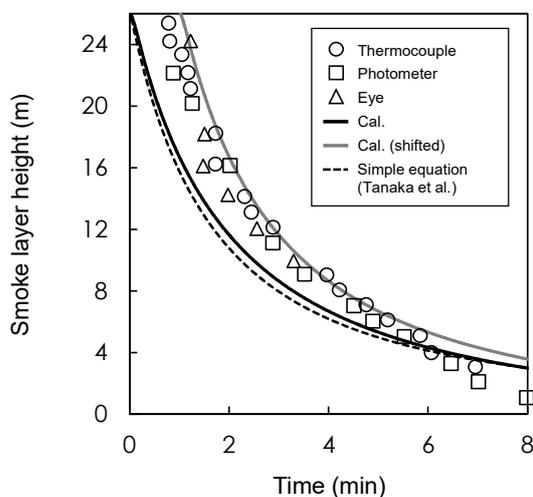
は、幅 6m、高さ 0.1m の開口が壁の下部(開口下端が床面の高さ)に設けられているものとした。自然排煙の条件については、幅 4.3m、高さ 1.5m の開口が壁の上部(開口下端が床面から 22.5m の高さ)に、幅 6m、高さ 0.54m の開口が壁の下部(開口下端が床面の高さ)に設けられているものとした。

(3) 計算結果と考察

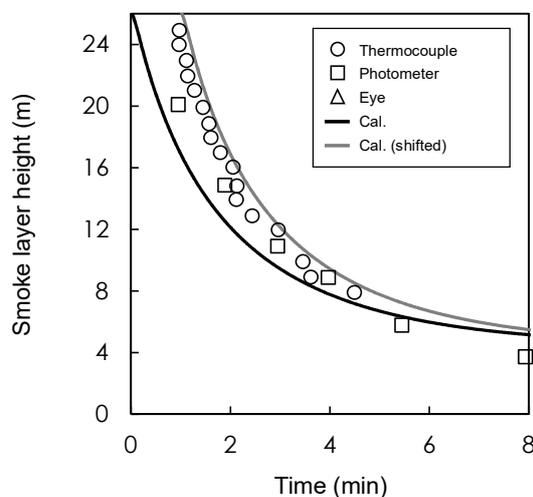
図 6 に、自然降下の条件についての気体温度の鉛直分布の予測結果と実験結果の比較を示す。ただし、実験では、着火後、煙が天井まで上昇し、横方向に拡がって側壁に達するまでに、約 1 分間を要したと報告されている¹⁷⁾。そこで、比較のために、予測結果については、時間原点を着火から 1 分後にずらして示してある。予測された気体温度は、天井に近い最上層で最も高く、天井から下に向かうにつれて徐々に低下するが、ある層を境に温度上昇がほとんど生じなくなり、床面までほぼ一定の温度となる結果が得られた。実験結果の温度分布は、予測結果に見られるような単調な傾向を示している訳ではないが、予測結果と実験結果の間の温度差は大きくなく、モデルは実験結果を概ね説明できているものと考えられる。特に、低温領域から高温領域に遷移し始める高さは、予測結果と実験結果の間で概ね一致している。

図 7 に、煙層高さの予測結果と実験結果の比較を示す。なお、予測結果については、時間原点を着火から 1 分後にずらした場合とずらさない場合の両方を示してある。また、自然降下の条件については、設計実務で用いられることの多い Tanaka et al.³³⁾ の簡易予測式を用いた場合の結果も示してある。煙層は、最初急速に降下するが、徐々に降下速度が遅くなる予測結果となった。これは、煙層が降下するほど、火災プルームの空気巻き込み量が減少するためである。自然排煙時の煙層は、自然降下時のそれに比べてやや遅い速度で降下し、ある高さで降下が停止するような予測結果となった。こうした煙降下の定性的な傾向は、予測結果と実験結果の間で概ね一致している。モデルでは、煙が天井まで上昇する

(A) Natural filling



(B) Natural vent

図7 煙層高さの予測結果と実験結果¹⁷⁾の比較

過程や天井に沿って水平に流動する過程が考慮されていないため、煙層高さは実験結果よりも低めに予測される。しかし、予測結果の時間原点を着火から1分後にずらして比較すると、予測結果は実験結果と概ね一致する結果となった。なお、自然降下時の煙層高さの予測結果は、簡易予測式³³⁾を用いて計算される煙層高さとはほぼ一致する。

4.2 単室隅角部火災の自然排煙実験¹⁸⁾の再現計算

(1) 実験データ

出口ら¹⁸⁾は、自然排煙における排煙口と給気口の効果を調べるための実大火災実験を行っている。実験では、幅15m、奥行き12m、天井高さ2.7mの区画の隅角部に500mm角のバーナーを設置し、プロパンガスを燃焼させて火災を発生させている(図8)。実験は、開口の面積や火源の発熱速度を変化させた計15条件の下で行われている。区画を構成する壁と天井には、それぞれ厚さ24mmと25mmのケイ酸カルシウム板が用いられている。高さ0.32mと0.16mの開口がそれぞれ壁の上部(開口下端が床面から2.29mの高さ)と下部(開口下端が床面から0.55mの高さ)に設けられており、開口の幅が可変である。区画の中央部には、天井から高さ0.1mの間隔(途中から高さ0.2mの間隔)で熱電対が設置されており、気体温度の鉛直分布が測定されている。ここでは、上部と下部の開口の面積がそれぞれ 1.8m^2 と 0.9m^2 、火源の発熱速度が450kWの条件の下で得られた実験データを検証用データとして用いる。

(2) 計算条件

時間刻みを0.05sとして、着火から5分間の計算を行った。区画の形状は実験と同じように設定し、層の厚さを0.1mとして空間を分割した。また、開口の形状や位置、火源の形状も実験と同じように設定した。壁、天井、および床は厚さ24mmのケイ酸カルシウム板と

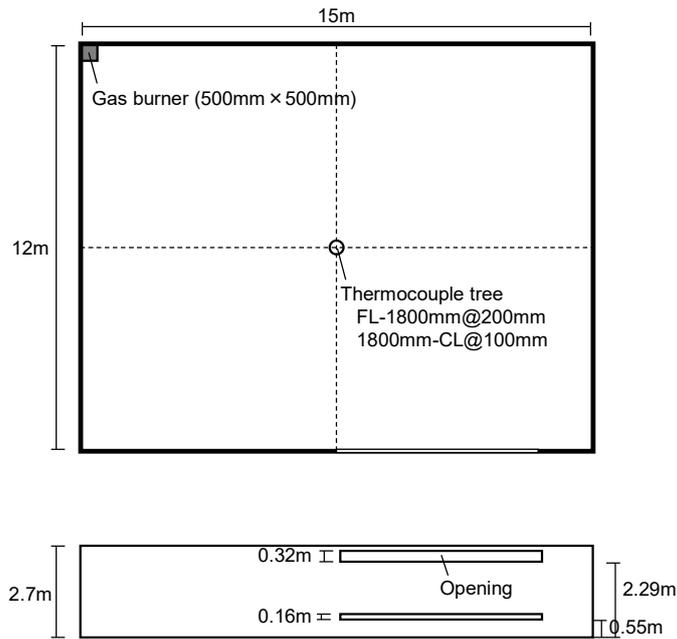


図 8 単室隅角部火災の自然排煙実験¹⁸⁾ で用いられた実験装置

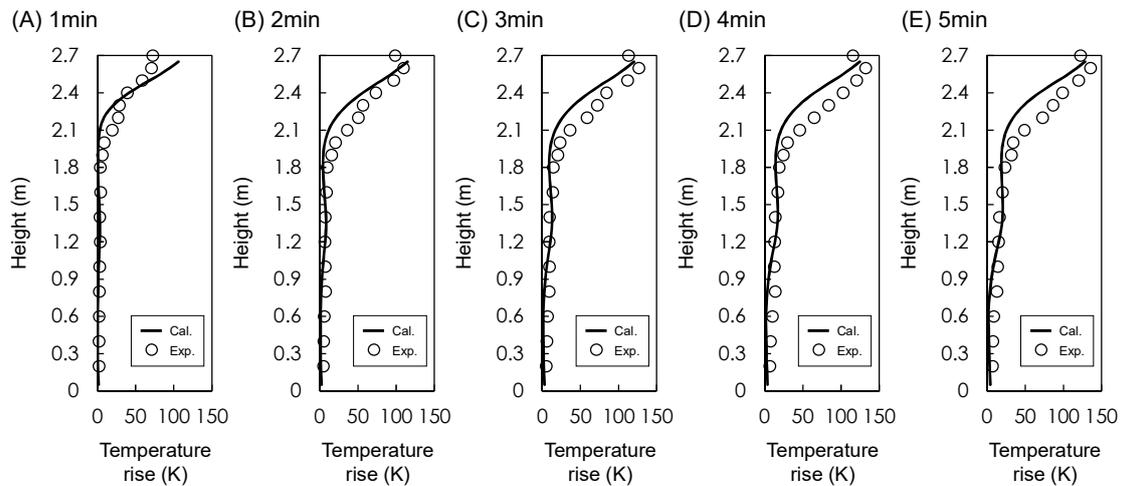


図 9 気体温度の鉛直分布の予測結果と実験結果¹⁸⁾ の比較

し、熱伝導率を $1.2 \times 10^{-4} \text{ kW/mK}$ 、密度を 975 kg/m^3 、比熱を 1.25 kJ/kgK 、放射率を 0.9、含水率を 0 に設定した。火源の発熱速度は、着火後時間に比例して増加し、10 秒後に最大発熱速度 450 kW に達して、その後は一定になるように与えた。発熱速度のうちの対流成分の比率は 0.7 とした⁴⁴⁾。

(3) 計算結果と考察

図 9 に、気体温度の鉛直分布の予測結果と実験結果の比較を示す。予測された気体温度は、天井に近い最上層で最も高く、天井から下に向かうにつれて急激に低下するが、床面

から高さ 2.1m あたりを境に温度勾配が小さくなる結果が得られた。予測された気体温度の鉛直分布は、床面から高さ 1.2~1.5m の層で若干盛り上がっているが、これは火炎を単一点源に近似しているために、点源周辺の層を囲う壁の表面が火炎からの放射によって特に温められており、それがさらに対流と放射によって気体の層を温めているためである。区画上部における温度勾配は、着火直後を除けば、予測結果と実験結果の間で概ね一致している。また、温度勾配が小さくなる高さも、着火直後を除けば、両者の間で概ね一致している。火源が壁から離れた位置にある場合には、火災プルーム流量を Zukoski et al.²³⁾ の予測式を用いて計算することが多いが、隅角部に火源を想定する場合には、Sugawa and Tobari²²⁾ の予測式を用いることによって、実験結果を概ね説明できることが分かる。

4.3 複数室間の煙流動実験¹⁹⁾の再現計算

(1) 実験データ

吉田ら¹⁹⁾は、複数室間の煙流動性状を調べるための実大火災実験を行っている。実験では、既存の建物の内部に火災室、廊下 1、廊下 2、および付室で構成される実験区画を作成しており、それぞれの面積は 28.0m²、16.2m²、16.8m²、13.8m²である(図 10)。火災室の中央に 500mm 角の燃料容器を設置し、メタノールを燃焼させて火災を発生させている。実験は、火災室に設置する燃料容器の数を 1 または 2 個とした計 2 条件の下で行われている。付室を除く 3 つの区画の天井高さはいずれも 2.7m、付室のそれは 3.3m である。建物の壁や床にはコンクリートが用いられており、付室を除く 3 つの区画においては、壁を厚さ 40mm のロックウールで、天井をケイ酸カルシウム板で被覆している。火災室と廊下 1 の間の壁および廊下 2 と付室の間の壁には、いずれも幅 0.8m、高さ 2m の開口が床面から設けられている。廊下 1 と廊下 2 の間には、天井から高さ 0.7m の垂れ壁が設置されている。廊下 2 の外壁には、幅 0.785m、高さ 2m の開口が床面から設けられている。各区画には、床から高さ 0.2m の間隔(天井近傍のみ、天井から 0.02m と 0.1m)で熱電対が設置されており、気

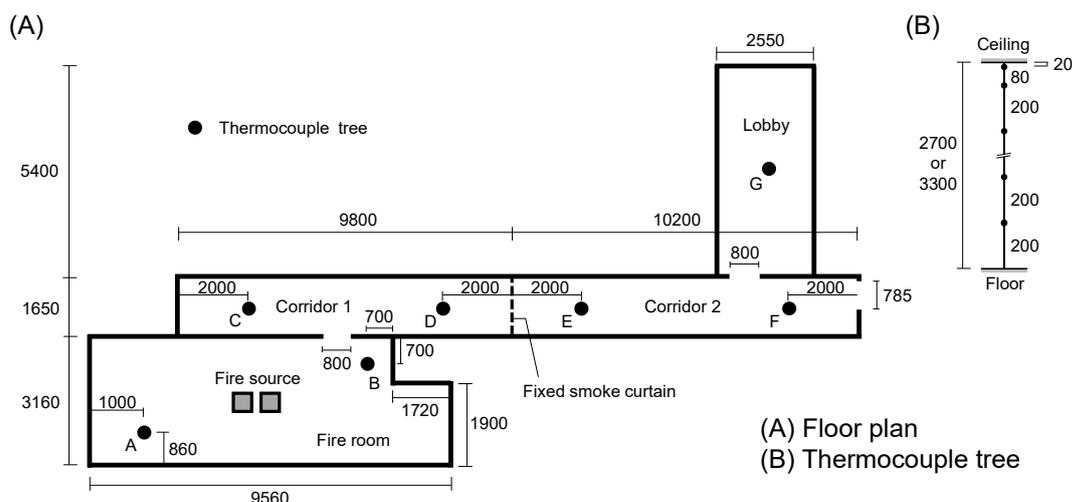
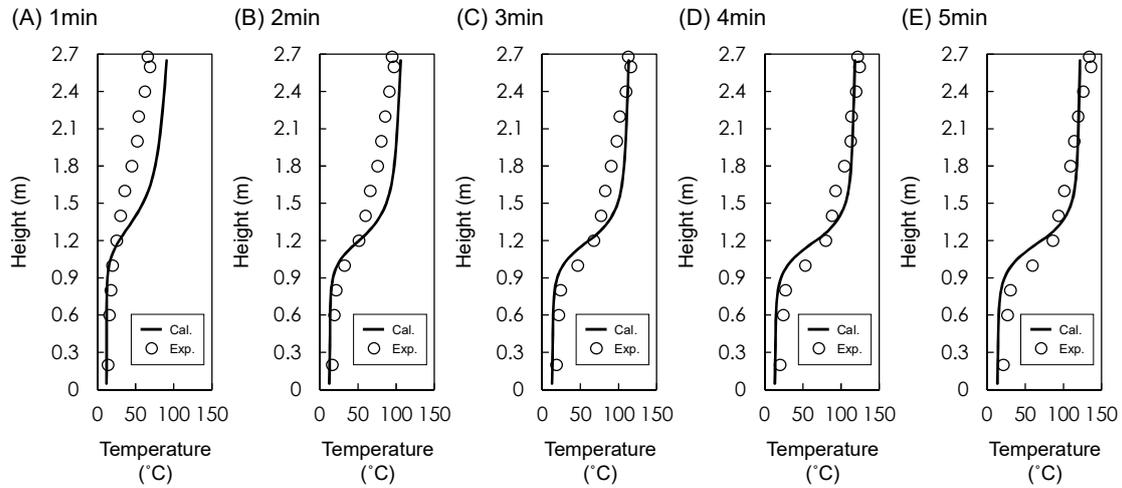


図 10 複数室間の煙流動実験¹⁹⁾で用いられた実験装置(単位: mm)

<火災室>



<廊下 1>

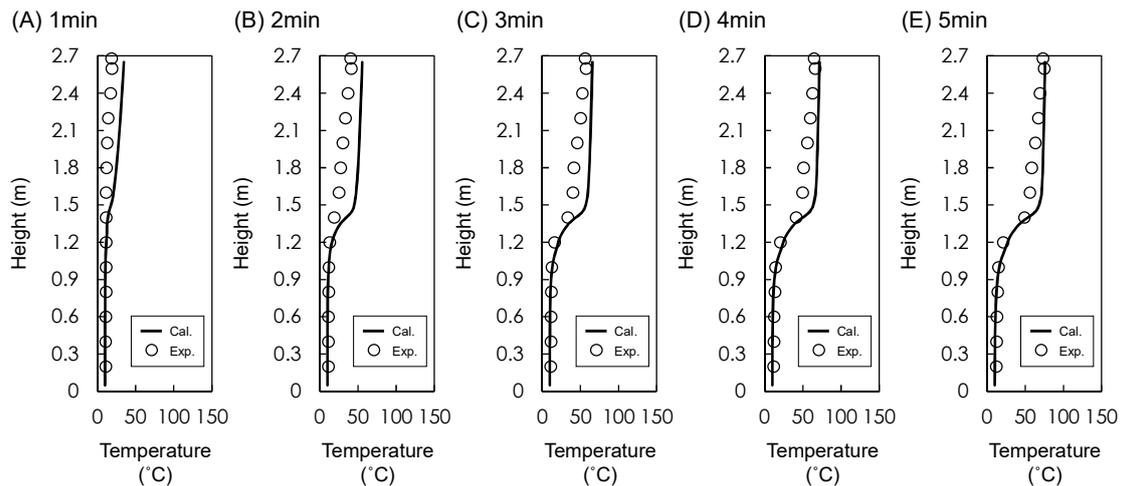


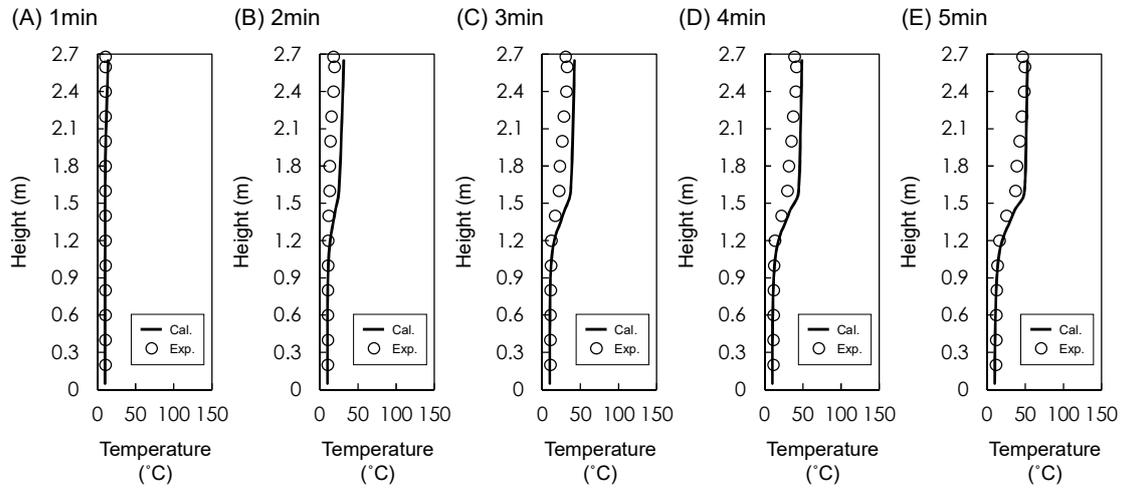
図 11 気体温度の鉛直分布の予測結果と実験結果¹⁹⁾の比較

体温度の鉛直分布が測定されている。ここでは、燃料容器の数を 1 個とした条件の下で得られた実験データを検証用データとして用いる。この条件の下で測定されたメタノールの重量減少速度はほぼ一定であり、平均重量減少速度から計算される発熱速度は 100kW であった。

(2) 計算条件

時間刻みを 0.05s として、着火から 5 分間の計算を行った。区画の面積と天井高さは実験と同じように設定し、層の厚さを 0.1m として空間を分割した。また、開口の形状や位置、火源の形状も実験と同じように設定した。付室を除く 3 つの区画の壁は、厚さ 40mm のロックウールとし、熱伝導率を $3.44 \times 10^{-5} \text{ kW/mK}$ 、密度を 100 kg/m^3 、比熱を 0.84 kJ/kgK 、放射率を 0.9、含水率を 0 とした。また、それらの天井は、厚さ 15mm のケイ酸カルシウム板と

<廊下2>



<付室>

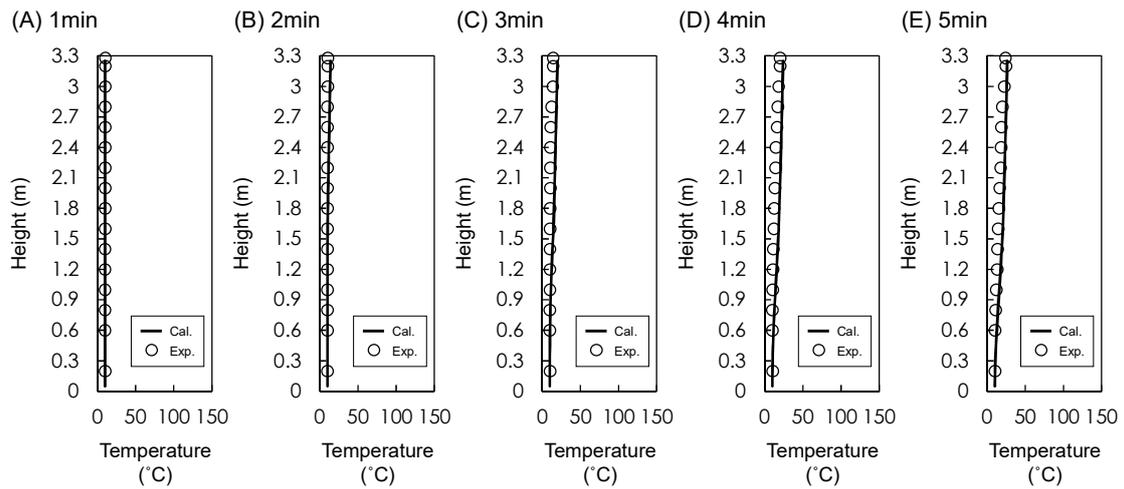


図 11 続き

し、熱伝導率を $1.2 \times 10^{-4} \text{ kW/mK}$ 、密度を 975 kg/m^3 、比熱を 1.25 kJ/kgK 、放射率を 0.9、含水率を 0 とした。付室の壁や天井は、厚さ 100mm のコンクリートとし、熱伝導率を $1.63 \times 10^{-3} \text{ kW/mK}$ 、密度を 2250 kg/m^3 、比熱を 0.895 kJ/kgK 、放射率を 0.9、含水率を 0 とした。床は、全て厚さ 100mm のコンクリートとした。火源の発熱速度は、着火と同時に最大発熱速度 100 kW に達し、その後は一定になるように与えた。発熱速度のうちの対流成分の比率は 0.8 とした⁴⁴⁾。

(3) 計算結果と考察

図 11 に、気体温度の鉛直分布の予測結果と実験結果の比較を示す。予測された気体温度の鉛直分布を見ると、上部と下部に温度勾配の小さな高温と低温の領域が形成され、その間では気体温度が滑らかに遷移していることが分かる。いずれの区画においても、予測さ

れた上部の気体温度は、着火後しばらくの間は実験結果よりも高いが、やがて実験結果に近づく結果となった。特に、時間が経った後の非火災室における気体温度の鉛直分布は、予測結果と実験結果の間で概ね一致している。着火後しばらくの間、上部の気体温度が実験結果よりも高めに予測されることは、煙が実験結果よりも早く非火災室に流入し降下する予測結果となっていることを表している。モデルでは、煙が天井に沿って水平に流動する過程などが考慮されていないため、非火災室における煙の降下は実験結果よりも早めに予測されることになる。

4.4 内装を部分的に木質化した小規模区画の燃焼拡大実験¹⁾の再現計算

(1) 実験データ

Peel et al.¹⁾は、内装を部分的に木質化した区画における燃焼拡大性状を調べるための実大火災実験を行っている。実験では、ルームコーナー試験で用いられる区画（幅 2.4m、奥行き 3.6m、天井高さ 2.2m）の壁や天井に厚さ 7mm の合板を貼り、隅角部に設置した 170mm 角のバーナーを用いてプロパンガスを燃焼させている（図 12）。実験は、木質内装材の貼り方を変化させた計 7 条件の下で行われている。区画は軽量コンクリートパネルで構成されており、内装のうち合板を貼らない部分には、厚さ 15mm のケイ酸カルシウム板が用いられている。幅 0.81m、高さ 1.96m の開口が壁に設けられている。プロパンガスの流量を調整することによって、バーナーの発熱速度が着火から 10 分間は 100kW、それ以降の 10 分間は 300kW になるように設定されている。実験はフラッシュオーバーが発生した時点で終了している。実験時に区画から流出するガスはフードで集められて外部に排出されており、排気ダクト内の酸素濃度と流量から、酸素消費法を用いて区画内の発熱速度が測定されている。ここでは、計 7 条件の下で得られた実験データを検証用データとして用いる。

(2) 計算条件

時間刻みを 0.05s として、着火から煙層温度が 500°C に達するまでの間の計算を行った。煙層温度が 500°C に達した時点で、フラッシュオーバーが発生することを想定している³⁴⁾。区画の形状は実験と同じように設定し、層の厚さを 0.1m として空間を分割した。また、開口の形状や位置、火源の形状も実験と同じように設定した。内装材として用いる合板の厚さは 7mm とし、Quintiere and Harkleroad²⁷⁾による LIFT 試験の結果から、熱伝導率を 1.2×10^{-4} kW/mK、密度を 523kg/m³、比熱を 1.22kJ/kgK、火炎伝播パラメータを 7.4 (kW)²/m³ に設定した。また、合板の放射率を 0.9、含水率を 0.1 に設定した。合板の単位面積あたりの発熱速度の時刻歴は、図 13 に示すように、Peel et al.³⁵⁾によるコーンカロリメータ試験の結果をピークやボトムに注意しながら読み取り、その間を直線補間することによって設定した。また、合板の着火温度を 350°C に設定した³⁵⁾。ケイ酸カルシウム板の厚さは 15mm とし、熱伝導率を 1.2×10^{-4} kW/mK、密度を 975kg/m³、比熱を 1.25kJ/kgK、放射率を 0.9、含水率を 0 に設定した。火源の発熱速度は、着火後 10 秒間で 100kW に増加し、その後は一定になるように与えた。また、着火から 10 分が経過した後は、10 秒間で 300kW に増加し、その後は一定になるように与えた。発熱速度のうちの対流成分の比率は 0.7 とした⁴⁴⁾。

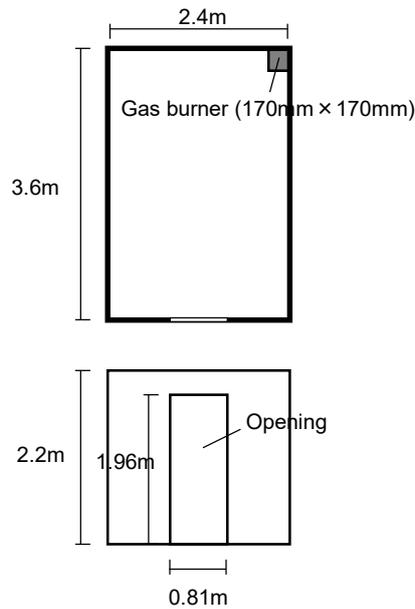


図 12 内装を部分的に木質化した小規模区画の燃焼拡大実験¹⁾ で用いられた実験装置

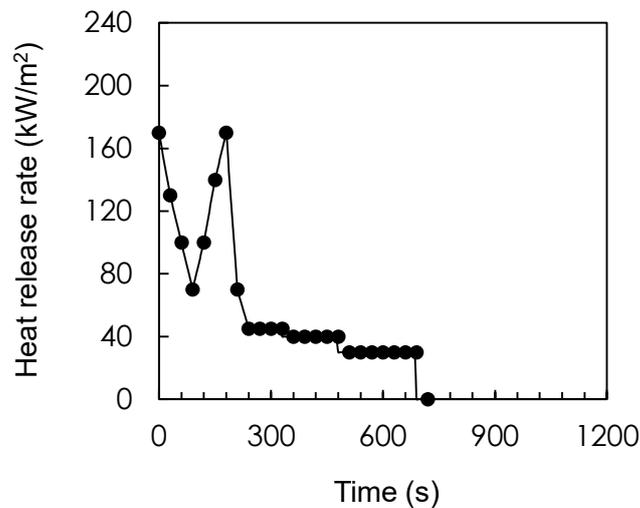


図 13 合板（厚さ 7mm）の単位面積あたりの発熱速度の時刻歴の設定³⁵⁾

(3) 計算結果と考察

図 14 に、区画内の発熱速度の予測結果と実験結果の比較を示す。ただし、酸素消費法を用いて測定された区画内の発熱速度は、着火後 1~2 分間はバーナーの発熱速度を下回っており、その間は過小評価されていることに注意する必要がある¹⁾。可燃物の燃焼に伴って発生したガスは、区画から流出しフードで集められて排気ダクトに運ばれる前に、区画内で煙層を形成するためである。なお、天井に木質内装材が貼られている条件は、A、B、G の

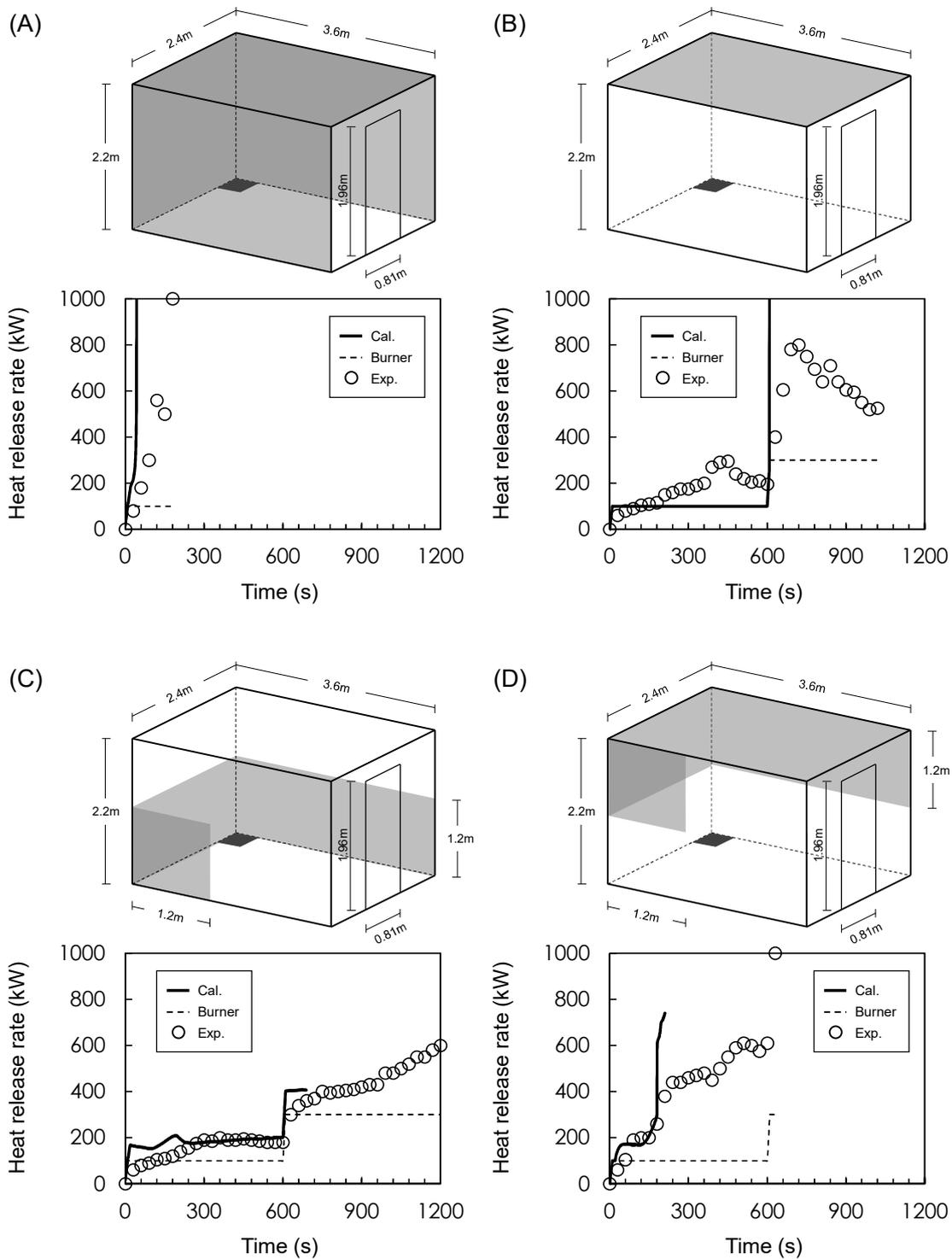


図 14 区画内の発熱速度の予測結果と実験結果¹⁾の比較（灰塗り：木質化した部分）

3 条件のみである。モデルは実験結果を精度良く再現できる訳ではないが、木質内装材の貼り方の違いにより火災拡大の性状が異なる様を定性的には説明できていると考えられる。

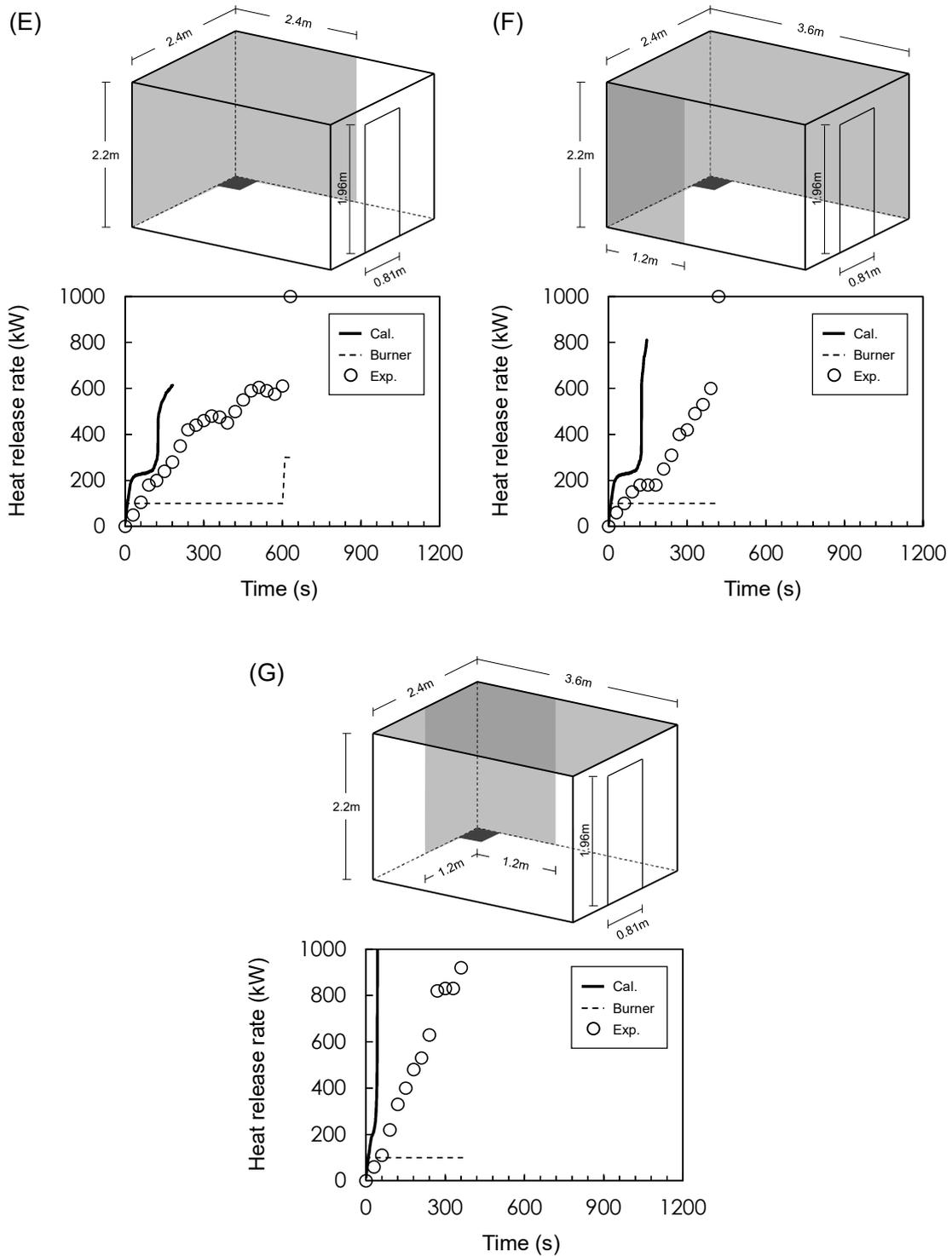


図 14 続き

例えば、予測結果を見ると、次のような傾向が表れており、それらは実験結果の傾向と一致する：①木質内装材を貼る面積が同じでも、壁の上部と下部に貼る場合では、上部に貼

る場合の方が火災の成長が早く、フラッシュオーバーの発生時間も短くなる、②壁の下端から上端までを木質化する場合、木質内装材を貼る面積が大きいほど火災の成長が早く、フラッシュオーバーの発生時間も短くなる、③火源から上方への延焼経路となる部分に木質内装材が貼られている場合と貼られていない場合では、貼られている場合の方が火災の成長が早く、フラッシュオーバーの発生時間も短くなる。発熱速度は全体的に過大評価される結果となり、それに伴って、フラッシュオーバーの発生時間もかなり短めに予測される結果となった。ただし、モデルを避難安全検証で用いる場合には、安全側の設計につながると考えられる。このように内装材の燃焼拡大が実験結果よりも激しく予測される要因として、①気体の層と周壁表面の間での放射熱の授受を考える際に、気体の層を黒体として扱っていること（内装材に入射する熱流束を過大評価していること）、②内装材の温度を計算する際に裏面の境界条件を断熱として一次元熱伝導方程式を解いていること、③内装材の発熱速度に十分に換気された条件下でのコーンカロリメータ試験の結果を用いていることが、壁の上部や天井に貼られた木質内装材の表面温度や区画上部における気体温度の過大評価につながり、その結果、火災伝播速度や煙層温度が過大評価されていることが考えられる。

4.5 内装を部分的に木質化した大規模区画の燃焼拡大実験²⁾の再現計算

(1) 実験データ

市原ら²⁾は、内装を部分的に木質化した区画における燃焼拡大性状を調べるための実大火災実験を行っている。実験では、幅 6.91m、奥行き 7.61m、天井高さ 2.8m の区画の壁や天井に厚さ 15mm のスギを貼り、隅角部に設置した 300mm 角のバーナーを用いてプロパンガスを燃焼させている（図 15）。実験は、①壁と天井の全面にスギを貼った条件と、②壁の全面にスギを貼った条件、の計 2 条件の下で行われている。区画は鉄骨フレームで構成され、壁、天井、床の下地として厚さ 12.5mm の強化石膏ボードが重ね張りされている。壁には、幅 0.9m、高さ 2.1m の開口が 2 箇所設けられている。バーナーの発熱速度は、プロパンガスの流量を調整することによって、300kW に設定されている。実験は開口から火炎が噴出した時点、または、着火から 20 分が経過した時点で終了している。実験時に区画から流出するガスはフードで集められて外部に排出されており、排気ダクト内の酸素濃度と流量から、酸素消費法を用いて区画内の発熱速度が測定されている。ここでは、計 2 条件の下で得られた実験データを検証用データとして用いる。

(2) 計算条件

時間刻みを 0.05s として、着火から煙層温度が 500°C に達するまでの間の計算を行った。煙層温度が 500°C に達した時点で、フラッシュオーバーが発生することを想定している³⁴⁾。区画の形状は実験と同じように設定し、層の厚さを 0.1m として空間を分割した。また、開口の形状や位置、火源の形状も実験と同じように設定した。内装材として用いるスギの厚さは 15mm とし、熱伝導率を $1.1 \times 10^{-4} \text{kW/mK}$ 、密度を 360kg/m^3 、比熱を 1.26kJ/kgK 、放射率を 0.9、含水率を 0.15 とした。コーンカロリメータ試験装置を用いてスギの着火温度を調

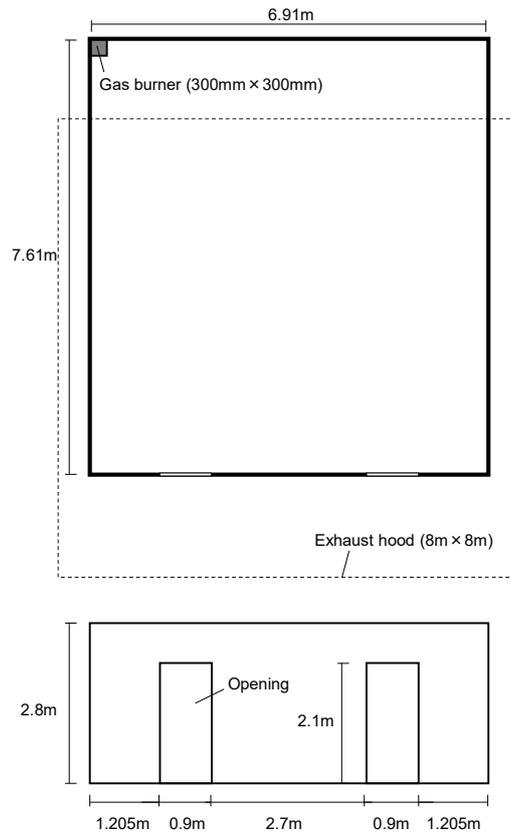


図 15 内装を部分的に木質化した大規模区画の燃焼拡大実験²⁾ で用いられた実験装置

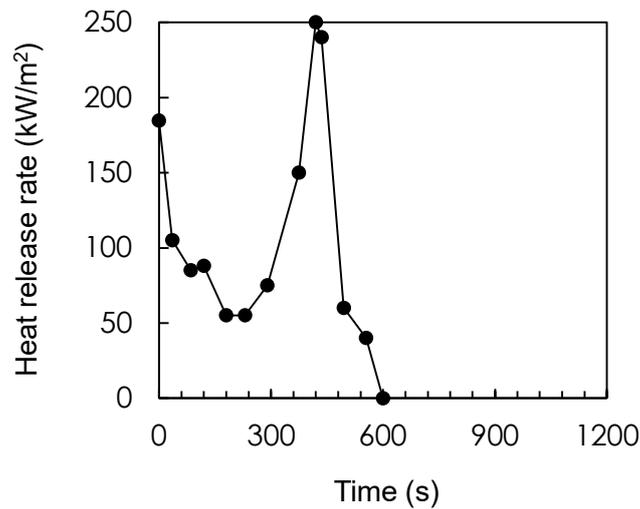


図 16 スギ (厚さ 15mm) の単位面積あたりの発熱速度の時刻歴の設定³⁷⁾

べた長岡らの実験結果³⁶⁾ から、スギの着火温度を 380°Cとした。壁の全面にスギを貼った条件の下ではフラッシュオーバーが発生せず、実験の終了時点における壁面下部の炭化・

焼失範囲の水平長さが 1.47~1.63m であったことに着目し、スギの火炎伝播パラメータを

$$\Phi_m = k_m \rho_m c_m (T_{m,ig} - T_0)^2 \left(\frac{\Delta x_{p,l}}{\Delta t} \right) = 0.05 (653 - 293)^2 \left(\frac{1.55}{1200} \right) \approx 8.4 \quad (66)$$

と設定した。スギの単位面積あたりの発熱速度の時刻歴は、図 16 に示すように、原田³⁷⁾ によるコーンカロリメータ試験の結果をピークやボトムに注意しながら読み取り、その間を直線補間することによって設定した。強化石膏ボードの厚さは 25mm とし、熱伝導率を 1.6×10^{-4} kW/mK、密度を 863kg/m³、比熱を 1.13kJ/kgK、放射率を 0.9、含水率を 0 に設定した。火源の発熱速度は、着火後、時間に比例して増加し、10 秒後に最大発熱速度 300kW に達して、その後は一定になるように与えた。発熱速度のうちの対流成分の比率は 0.7 とした⁴⁴⁾。

(3) 計算結果と考察

図 17 に、区画内の発熱速度の予測結果と実験結果の比較を示す。ただし、酸素消費法を用いて測定された区画内の発熱速度は、着火後 1~2 分間はバーナーの発熱速度を下回っており、その間は過小評価されていることに注意する必要がある。予測された発熱速度を見ると、天井に木質内装材を貼らなかつた区画では、天井に木質内装材を貼った区画に比べて、火災は緩やかに拡大していることが分かる。モデルは実験結果を精度良く再現できる訳ではないが、こうした火災拡大の定性的な傾向は予測結果と実験結果の間で一致する。しかし、発熱速度は全体的に過大評価される結果となった。特に、天井に木質内装材を貼らなかつた区画では、実験時にフラッシュオーバーが発生しなかつたものの、それが発生すると予測される結果となった。この要因として、①気体の層と周壁表面の間での放射熱の授受を考える際に、気体の層を黒体として扱っていること（内装材に入射する熱流束を過大評価していること）、②内装材の温度を計算する際に裏面の境界条件を断熱として一次

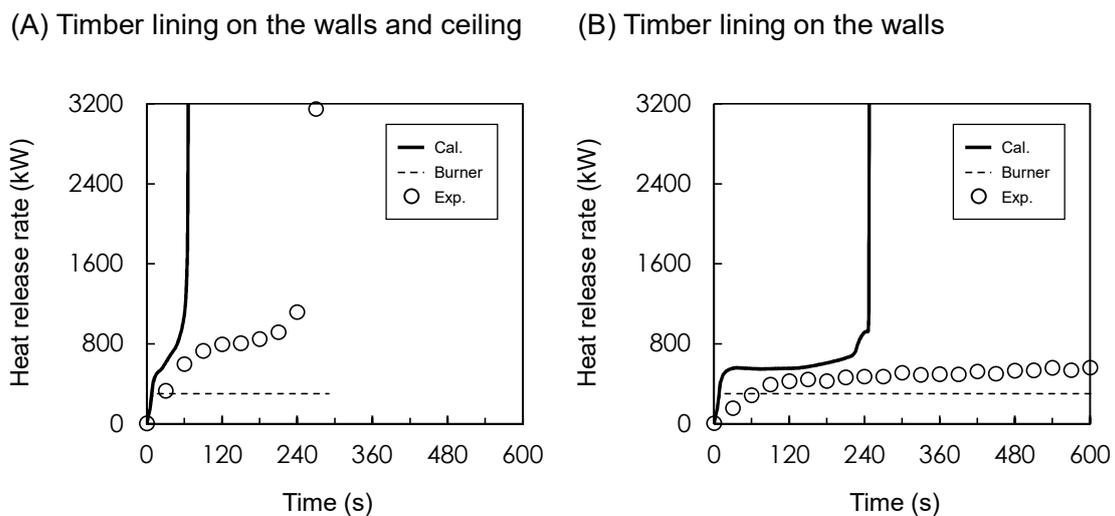


図 17 区画内の発熱速度の予測結果と実験結果²⁾の比較

元熱伝導方程式を解いていること、③内装材の発熱速度に十分に換気された条件下でのコーンカロリメータ試験の結果を用いていることが、壁の上部に貼られた木質内装材の表面温度の過大評価につながり、天井流の流れ方向や下方向への急激な燃え広がりを引き起こしていることが考えられる。

第5章 木質内装空間の仮想プランへの適用

木質内装空間の仮想プランを設定し、モデルを用いて火災性状を予測した結果を示す。具体的には、木質内装空間で火災が発生した時の各階や全館の避難安全性を検証する場合を想定し、火災室内の発熱速度と非火災室を含む各空間の煙層高さや煙層温度を時系列に予測する。ただし、避難時間との比較による避難安全性の判定は行わない。

5.1 プランと計算条件

図18に、設定した仮想プランの平面図を示す。建物は地上3階建て、鉄筋コンクリート造、延床面積1560m²の事務所ビル（主に貸し会議室）である。3層吹き抜けのエントランスホールを囲むようにして、1階にはカフェと管理室が配置されており、2階と3階には会議室と特別応接室が廊下を介して配置されている。各階の階高は4.5mであり、吹き抜け部分を除く天井高さは2.7mである。排煙設備は機械排煙、自然排煙とも設置されていない。1階のカフェとエントランスホールの間には防煙垂れ壁が設置されている。屋内階段とエレベーターシャフトが縦穴区画として設計されており、火災時に吹き抜け部分を囲うための扉やシャッターなどは設置されていない。ここでは、

- (I) 1階のカフェの内装（壁）の一部を木質化する
- (II) 1階のエントランスホールの内装（壁）の一部を木質化する

場合を想定し、1階のカフェとエントランスホールで出火した場合の2通りの計算を行う。なお、それ以外の内装（他の空間を含む）には準不燃材料を用いる。図19に、内装を木質化する部分のパスを示す。カフェについては、平面図で言う上側の壁一面、すなわち幅7.5m、高さ2.7mの範囲に木質内装材を貼る。エントランスホールについては、平面図で言

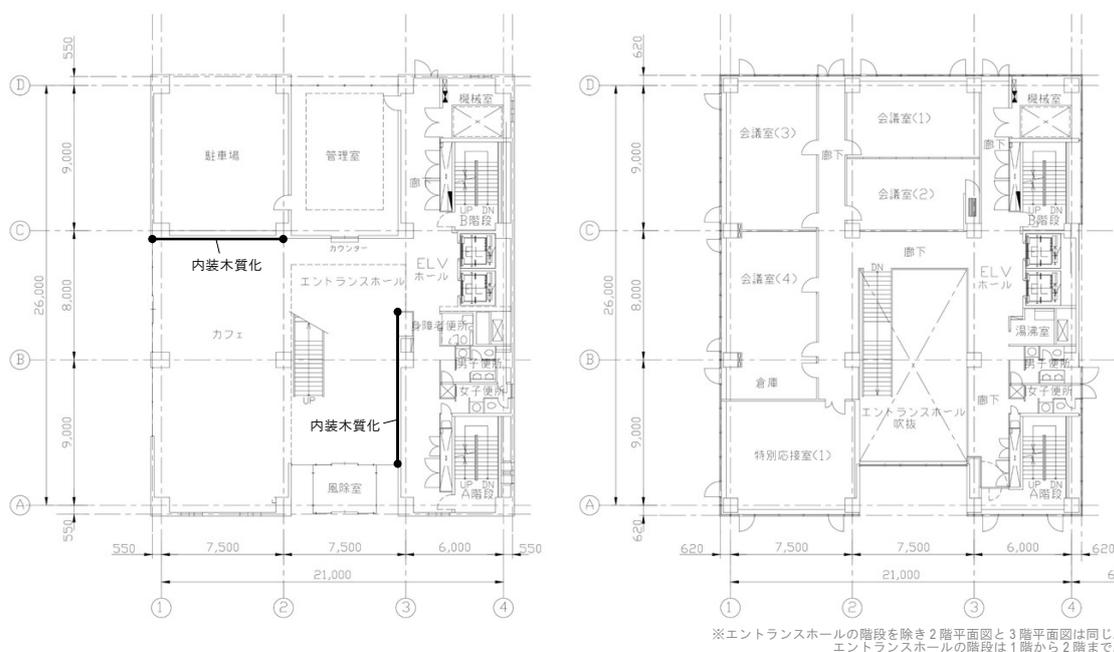
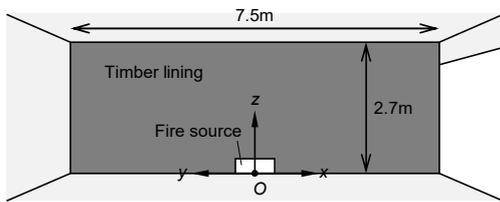
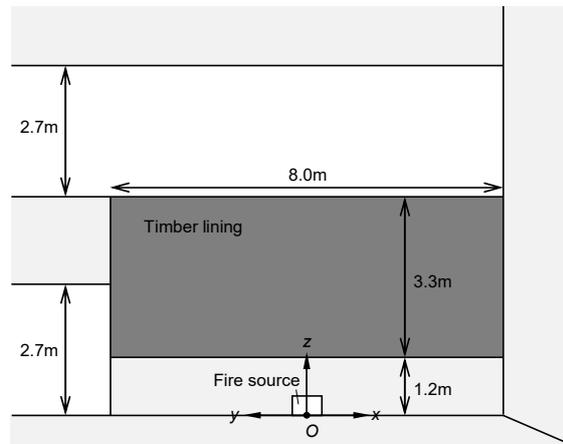


図18 仮想プランの平面図（左：1階平面図，右：2階・3階平面図）

(A) Cafe



(B) Entrance hall



(C) Parameters

Parameter	Cafe	Entrance hall
x_m	3.75 m	4.00 m
y_m	3.75 m	4.00 m
$z_{m,u}$	2.70 m	4.50 m
$z_{m,l}$	0.00 m	1.20 m

図 19 木質内装材の貼り方と火源の位置

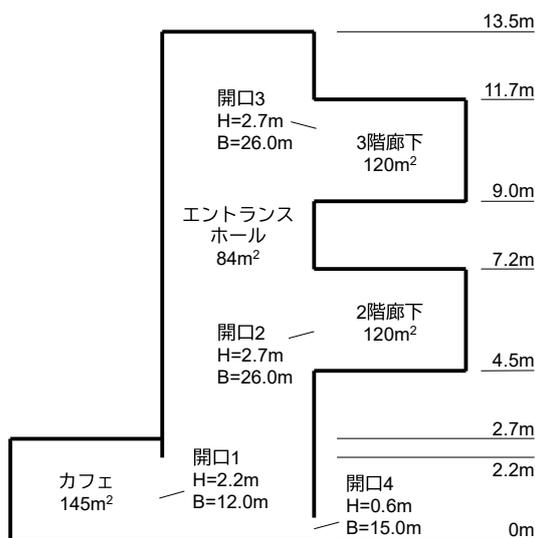


図 20 計算用の建物条件

表 2 火源の条件

項目	Cafe	Entrance hall
可燃物の種類	一人用ソファ	木質系椅子
火源の位置	壁際	壁際
火災成長率	0.12 kW/s ²	0.03 kW/s ²
最大発熱速度	1200 kW	250 kW
火源の幅	0.8 m	0.6 m
火源面の高さ	0.3 m	0.4 m

表 3 木質内装材(スギ)の条件

項目	設定
厚さ	15 mm
熱伝導率	1.1×10^{-4} kW/mK
密度	360 kg/m ³
比熱	1.26 kJ/kgK
放射率	0.9
含水率	0.15
着火温度	380 °C
火災伝播パラメータ	8.4 (kW) ² /m ³
発熱速度の時刻歴	CCM データ ³⁷⁾ を直線補間

う右側の壁に床上 1.2m から 4.5m の高さ (2 階床の高さ) まで、すなわち床から高さ 1.2m のクリアランスをとった幅 8m、高さ 3.3m の範囲に木質内装材を貼る。木質内装材には厚さ 15mm のスギを用いる。

計算にあたっては、図 20 に示すように、建物を①カフェ、②エントランスホール (吹き抜け)、③2 階廊下、④3 階廊下、の 4 つの空間が開口を介して接続される単純な関係に置き換えた。ただし、エントランスホールと外気との開口は、静圧計算のために人為的に設定したもので、煙流動性状に影響が出ないようにエントランスホールの下部に設けた。火源の条件は、実在可燃物の燃焼実験データ³⁸⁾を参考に設定した (表 2)。火源の発熱速度 \dot{Q}_s は、時間の 2 乗に比例して増加し、最大発熱速度に達した後は一定になるように与えた。

$$\dot{Q}_s = \min(\alpha_s t^2, \dot{Q}_{s,\max}) \quad (67)$$

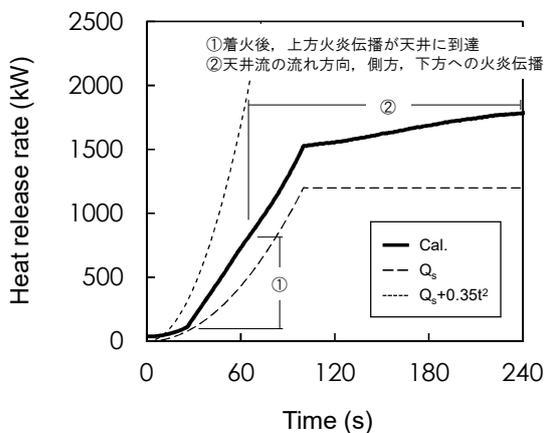
ここに、 α_s は火源の火災成長率、 $\dot{Q}_{s,\max}$ は火源の最大発熱速度である。カフェ出火で想定する火源は一人用ソファとし、壁際に火源を想定した。火災成長率を 0.12kW/s^2 、最大発熱速度を 1200kW 、火源の幅を 0.8m 、火源面の高さを 0.3m とした。エントランス出火で想定する火源は木質系椅子とし、壁際に火源を想定した。火災成長率を 0.03kW/s^2 、最大発熱速度を 250kW 、火源の幅を 0.6m 、火源面の高さを 0.4m とした。木質内装材として用いるスギ（厚さ 15mm ）の熱物性や単位面積あたりの発熱速度の時刻歴は、第4章5節と同じように設定した（表3）。発熱速度のうちの対流成分の比率は 0.7 とした⁴⁴⁾。

5.2 計算結果

(1) 火災室内の発熱速度

図21に、火災室内の発熱速度の計算結果を示す。カフェ出火については、出火から約25秒後に木質内装材に着火した。木質内装材の熱分解領域は上方に拡大し、出火から約65秒後に天井に到達した。その間、木質内装材からの発熱により、火災室内の発熱速度は火源の発熱速度よりも大きくなる。その後、木質内装材の熱分解領域は天井流の流れ方向、側方、および下方に拡大していき、木質内装材からの発熱速度は緩やかに増加する。火災室の面積が大きいので、高温気体から壁面上部への加熱が小さく、急激な燃え広がりは生じなかった。エントランスホール出火については、出火から約66秒後に木質内装材に着火した。木質内装材の熱分解領域は上方に拡大し、出火から約120秒後に床上 2.4m の高さに到達した。その後は、上方への拡大がほぼ停止し、木質内装材からの発熱速度はほぼ一定となった。すなわち、熱分解領域先端の高さが床上 $2.4\text{m} \sim 2.7\text{m}$ の高さでほぼ一定となり、木

(A) カフェ出火



(B) エントランスホール出火

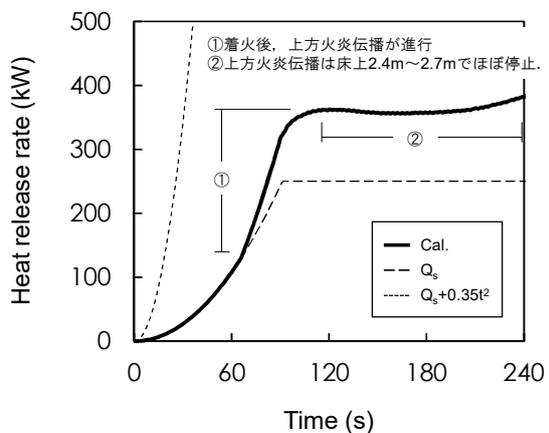
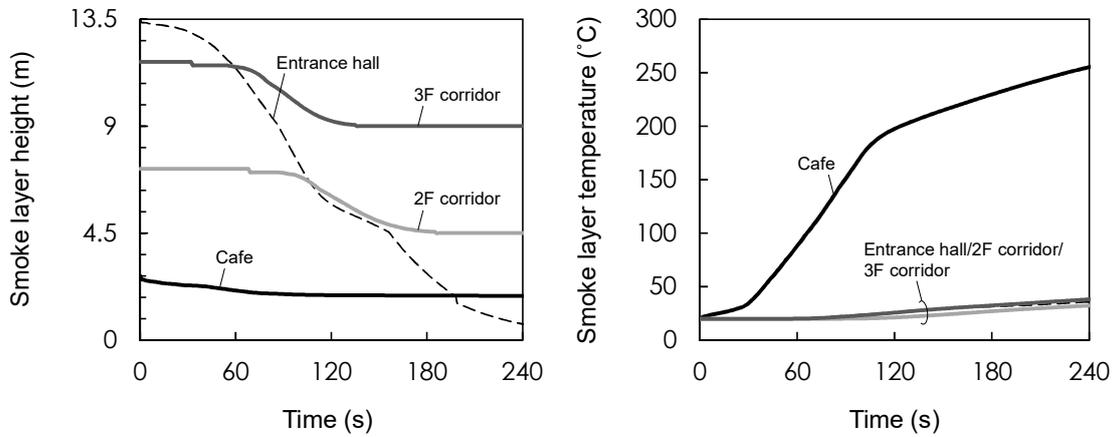


図21 火災室内の発熱速度の計算結果

(A) カフェ出火



(B) エントランスホール出火

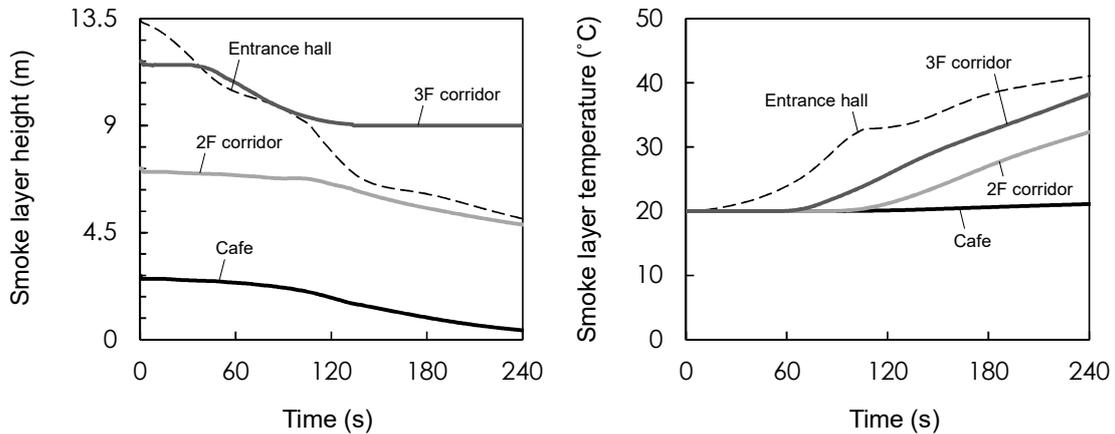


図 22 各空間の煙層高さと煙層温度の計算結果（煙層高さは地表面からの高さ）

質内装材の上端高さ（床上 4.5m の高さ）まで拡大することはなかった。ただし、側方への燃焼拡大は生じている。

いずれの場合も、モデルを用いて計算された火災室内の発熱速度は、平成 12 年建設省告示第 1441 号⁴⁾の内装の火災成長率（木材その他についての 0.35kW/s^2 ）を用いて計算される発熱速度よりもかなり小さい。出火後 4 分間の最大発熱速度は、カフェ出火の場合に約 1800kW 、エントランスホール出火の場合に約 400kW となった。特に、告示では、内装材の発熱速度が大きな火災成長率で延々と増加する扱いになっているのに対し、モデルでは、壁面上方への燃焼拡大が天井や天井に至る途中で停止する様や、その後の天井流の流れ方向、側方、および下方への燃焼拡大をも考慮して、発熱速度の変化を予測することができる。なお、図中の①の期間の始点と終点の時刻をそれぞれ t_1 と t_2 、発熱速度をそれぞれ \dot{Q}_1 と \dot{Q}_2 とし、その期間の内装の火災成長率 α_m を

$$\alpha_m = \frac{\dot{Q}_2 - \dot{Q}_1}{(t_2 - t_1)^2} - \alpha_s \quad (68)$$

として求めると、カフェ出火については 0.32kW/s²、エントランスホール出火については 0.05kW/s²となる。

(2) 各空間の煙層高さと煙層温度

図 22 に、各空間の煙層高さや煙層温度の計算結果を示す。ただし、煙層高さは地表面からの高さで示してある。カフェ出火については、出火直後から、わずかに温まった気体が火災室からエントランスホールに流出するが、高温の開口噴流によってエントランスホールでの急速な煙層の降下が始まるのは、出火から約 30 秒後である。その後、3 階廊下、2 階廊下の順に煙が拡がっていく。煙層が床面から 1.8m の高さに降下するまでの時間は、3 階廊下で 82 秒、2 階廊下で 114 秒であり、両空間とも煙層は最終的に床面まで降下する。火災室では、最終的に煙層高さが 1.8～1.9m の高さでほぼ一定となっている。出火後 4 分間で、火災室の煙層温度は 250°C 程度まで上昇するが、フラッシュオーバーが発生するような温度には達しない。エントランスホール出火については、出火直後から、エントランスホールで急速に煙層が降下し、3 階廊下、2 階廊下の順に煙が拡がっていく。煙層が床面から 1.8m の高さに降下するまでの時間は、3 階廊下で 61 秒、2 階廊下で 135 秒であり、両空間とも煙層は最終的に床面まで降下する。カフェにもわずかに温まった気体が流入するため、N%法によって煙層が低い位置まで降下すると判定されているが、カフェの煙層温度の初期温度からの上昇温度は極めて小さい。

第6章 おわりに

6.1 まとめと今後の課題

内装材の燃焼拡大による火災成長と非火災室を含む複数室間の煙流動を一体的に解析可能な非定常の火災モデルを開発した。具体的には、火災室の隅角部に火源が存在するシナリオを想定し、①内装材の熱物性から上方、側方、下方への燃え拡がり速度を予測可能な火炎伝播モデルと、②建物内の各空間の気体温度の鉛直分布を予測可能な多層ゾーンモデルを統合することによって、フラッシュオーバーが発生するまでの火災性状を定式化した。開発したモデルを用いて、複数の実大火災実験の再現計算を行い、計算結果を実験結果と比較することによって、モデルの予測性能を検証した。その結果、モデルの予測性能について、次のような結論が得られた。

- 火災室や非火災室における煙の降下は実態よりも早く予測される。しかし、出火後ある程度時間が経過した後の気体温度の鉛直分布については概ね良好な予測結果が得られる。特に、上部の温度勾配や低温領域から高温領域に遷移し始める高さは概ね良好に予測される。
- 火災室における内装材の燃焼拡大は実態よりも激しく予測される。発熱速度は過大に評価され、フラッシュオーバーの発生時間は短く予測される。しかし、可燃性内装材を貼る部分の高さや面積、上方への延焼経路となる部分の可燃性内装材の有無により燃焼拡大の性状が異なるという観測事実の定性的な傾向は予測結果に表れる。

開発したモデルは、可燃性内装材の貼り方に応じて火災性状を予測することができるため、これまでの避難安全検証で生じていた設計上の制約を緩和することができる。また、二層ゾーンモデルが抱えていた温度予測の曖昧な点を改善し、設計で想定する火災性状の信頼性を高めることができる。しかし、モデルには依然として改善の余地がある。室内での放射熱の授受については、気体の層を灰色体として扱うことによって、正確さを向上させる必要がある。火災室内の発熱速度については、各層に存在・供給される燃料と酸素の当量比から燃焼率を推定することによって、燃料支配型だけでなく換気支配型の燃焼も考慮する必要がある。その他に、煙の水平流動の考慮、内装材の温度を計算する際の一次元熱伝導方程式の境界条件の修正、物理的な熱分解モデルを用いた内装材の燃焼速度の予測などによって、モデルの予測精度が向上する可能性がある。

6.2 モデルの機能と使用上の注意点

開発したモデルの機能や使用上の注意点としては、次のようなことがあげられる。

- 火源条件の他に、火災室の可燃性内装材を貼る範囲の形状、可燃性内装材の厚さや熱物性（着火温度や火炎伝播パラメータを含む）および単位面積あたりの発熱速度の時刻歴を指定することによって、火災室内全体の発熱速度や各空間の気体温度等の鉛直分布を時系列に予測することができる。ただし、表面が平らで加熱により溶融しない内装材に限られる。また、木質材料を想定しており、紙や布のような内装材についての解析結果は確認されていない。

- 避難安全検証に用いるための煙層高さや煙層温度を各空間の気体温度の鉛直分布からN%法（10%）を用いて決定する。
- 代表的な可燃性内装材については、コーンカロリメータ試験装置やLIFT試験装置を用いて着火温度や火炎伝播パラメータを測定した結果が多数報告されているため、設計で検討する内装材の種類や厚さと一致する条件、または近い条件での測定結果を参考にして指定することができる。
- 可燃性内装材の単位面積あたりの発熱速度の時刻歴についても、代表的な可燃性内装材に限れば、コーンカロリメータ試験装置を用いた測定結果が多数報告されているため、設計で検討する内装材の種類や厚さと一致する条件、または近い条件での測定結果を選定し、グラフから読み取った発熱速度を直線補間して指定することができる。
- 計算の発散を防ぐために時間刻みを0.05sに設定しており、計算に要する時間は二層ゾーン建物内煙流動予測モデル¹⁴⁾¹⁵⁾に比べて長くなる。しかし、低性能CPU（Celeron N4100、周波数1.1GHz）を搭載したデスクトップPCを用いた場合でも、本報で実施した計算の所要時間は1分のオーダー（長いケースでも数分程度の時間）であり、数値流体力学シミュレーションに比べれば圧倒的に短い。
- 建物と外気との間に開口がない、または対象空間と他の空間との間に開口がないなど、完全に密閉された空間があると、火災により室内の静圧が異常に高まり、計算が継続できなくなる。静圧計算の実行上、常に若干の開口は設ける必要があり、人為的な開口を設ける場合には、煙流動性状に影響が出ないように、空間の下部に設けるといった配慮が必要になる。また、人為的な開口が小さすぎると、計算時間が膨大になる場合があるため、そのような場合には、人為的な開口の大きさを調整する必要がある。

開発したモデルは、表面が平らな内装材を対象にしており、表面に凹凸がある内装材は適用範囲外である。しかし、式(65)の $\dot{Q}_{cell}''(t)$ を内装材の見付面積に対する露出面積の比で割り増せば、内装材の表面に凹凸がある場合にも適用できる可能性はある。また、開発したモデルに機械排煙設備やスプリンクラー設備の効果を組み込むことができれば、防火対策を追加する代わりに木質化する内装の部分を拡大するなど、火災安全性を確保しながら内装木質化に関する多様なニーズをより柔軟に検討できるようになるとと思われる。

注釈

- 1) 例として、室*i*の最上層 ($j=n_i$) の気体温度 T_{ij} の予測方程式を導く。最上層についての質量保存式とエネルギー保存式、すなわち、式(1)と式(4)、を連立して解く。式(1)の右辺を R_1 、式(4)の右辺を R_4 とおく。式(4)は

$$\frac{\partial(c_p \rho_{ij} V_{ij} T_{ij})}{\partial t} = c_p \rho_{ij} V_{ij} \frac{\partial T_{ij}}{\partial t} + c_p T_{ij} \frac{\partial(\rho_{ij} V_{ij})}{\partial t} = R_4 \quad (\text{A1})$$

と表されるので、これに式(1)を代入すると、

$$\frac{\partial T_{ij}}{\partial t} = \frac{R_4 - c_p T_{ij} R_1}{c_p \rho_{ij} V_{ij}} \quad (\text{A2})$$

となり、気体温度 T_{ij} の予測方程式が得られる。他の層についても同様である。

- 2) 火災室を幅 a 、奥行き b 、高さ c の直方体とする。床面の隅角部を原点として、幅方向を x 、奥行き方向を y 、高さ方向を z とする三次元座標系を導入し、点源の位置を (x_f, y_f, z_f) とする。点源から見た各検査面の形態係数 $F_{f,cs}$ は、次式で与えられる。

・室*i*の層*j*を囲う壁：

$$\begin{aligned} F_{f,ij} &= F(x_f, z_f, y_f) + F(a - x_f, z_f, y_f) \\ &\quad + \operatorname{sgn}(z_{ij,u} - z_f) \left[F(x_f, |z_{ij,u} - z_f|, y_f) + F(a - x_f, |z_{ij,u} - z_f|, y_f) \right] \\ &\quad + F(x_f, z_f, b - y_f) + F(a - x_f, z_f, b - y_f) \\ &\quad + \operatorname{sgn}(z_{ij,u} - z_f) \left[F(x_f, |z_{ij,u} - z_f|, b - y_f) + F(a - x_f, |z_{ij,u} - z_f|, b - y_f) \right] \\ &\quad + F(y_f, z_f, x_f) + F(b - y_f, z_f, x_f) \\ &\quad + \operatorname{sgn}(z_{ij,u} - z_f) \left[F(y_f, |z_{ij,u} - z_f|, x_f) + F(b - y_f, |z_{ij,u} - z_f|, x_f) \right] \\ &\quad + F(y_f, z_f, a - x_f) + F(b - y_f, z_f, a - x_f) \\ &\quad + \operatorname{sgn}(z_{ij,u} - z_f) \left[F(y_f, |z_{ij,u} - z_f|, a - x_f) + F(b - y_f, |z_{ij,u} - z_f|, a - x_f) \right] \\ &\quad - \sum_{l=1}^{j-1} F_{f,il} \end{aligned} \quad (\text{A3})$$

$$\operatorname{sgn}(x) = \begin{cases} 1 & (x \geq 0) \\ -1 & (x < 0) \end{cases} \quad (\text{A4})$$

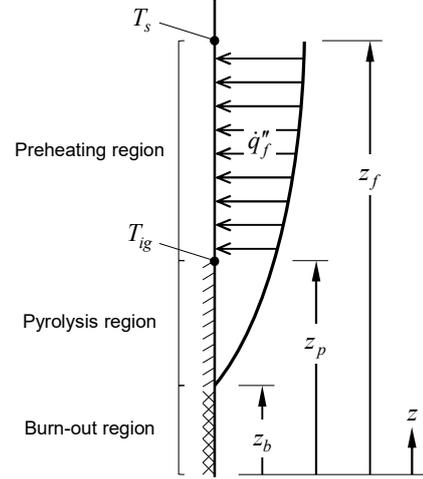
・床：

$$\begin{aligned} F_{f,cs} &= F(x_f, y_f, z_f) + F(x_f, b - y_f, z_f) \\ &\quad + F(a - x_f, y_f, z_f) + F(a - x_f, b - y_f, z_f) \end{aligned} \quad (\text{A5})$$

・天井：

$$F_{f,cs} = F(x_f, y_f, c - z_f) + F(x_f, b - y_f, c - z_f) + F(a - x_f, y_f, c - z_f) + F(a - x_f, b - y_f, c - z_f) \quad (\text{A6})$$

- 3) 右図は Quintiere et al.⁶⁾ による火炎の伸びる方向への火炎伝播モデルの概念図である。火炎は鉛直に設置された平板に沿って上方に伸びているが、左に 90 度回転させれば、右から左に流れる強制対流に火炎が吹き倒されていると考えることもできる。 $0 < z < z_b$ の範囲は既に燃え尽きており、 $z_b < z < z_p$ の範囲では熱分解が起こっている。一方、 $z_p < z$ の範囲では熱分解が始まっていない。 z_f は火炎の先端の位置を表し、 $z_p < z < z_f$ の範囲は火炎により予熱されている。火炎から予熱領域 $z_p < z < z_f$ に入射する熱流束 \dot{q}_f'' は一定であると仮定する。



上方火炎伝播モデル⁶⁾

予熱領域の表面温度 T_s が火炎からの入射熱流束 \dot{q}_f'' によって着火温度 T_{ig} に達すると、熱分解領域の先端の位置 z_p が火炎の先端の位置 z_f まで移動すると仮定する。このとき、火炎伝播速度 V_p は

$$V_p = \frac{\partial z_p}{\partial t} = \frac{z_f - z_p}{\Delta t} \quad (\text{A7})$$

ここに、 Δt は予熱領域の表面温度 T_s が一定の入射熱流束 \dot{q}_f'' によって着火温度 T_{ig} まで上昇するのにかかる時間である。 Δt は一定の熱流束を受ける半無限固体の一次元熱伝導方程式の解から、

$$\Delta t = \frac{\pi}{4} k \rho c \left(\frac{T_{ig} - T_s}{\dot{q}_f''} \right)^2 \quad (\text{A8})$$

したがって、火炎伝播速度 V_p は

$$V_p = \frac{\partial z_p}{\partial t} = \frac{4 \dot{q}_f''^2 (z_f - z_p)}{\pi k \rho c (T_{ig} - T_s)^2} \quad (\text{A9})$$

で与えられる。

謝辞

本報告で取りまとめた成果は、建築研究所が平成 28 年度～平成 30 年度に実施した指定課題「木質等の内装を有する建築物の避難安全設計技術の開発」(研究代表者：鍵屋浩司)の中で得られた研究成果を発展させたものです。モデルの予測性能の検証にあたり、建築研究所 防火研究グループ 主任研究員 出口嘉一氏から、単室隅角部火災の実大自然排煙実験データをご提供いただきました。また、木質内装空間の仮想プランへの適用にあたり、アイエヌジー株式会社 代表取締役 高橋済氏のご協力を得ました。本報告の最終原稿を作成するにあたり、国土技術政策総合研究所 建築研究部 防火基準研究室長 成瀬友宏氏、出口嘉一氏(前掲)、建築研究所 防火研究グループ 主任研究員 野秋政希氏に査読していただき、モデルの直すべき点や今後取り組むべき課題について重要な指摘をいただきました。また、読者から見て改善すべき点について示唆を与えていただきました。

参考文献

- 1) Peel, H., Wade, C., Spearpoint, M., Fleischmann, C.: Experiments to develop a performance based assessment method for rooms partially lined with timber, 11th International Conference on Performance-Based Codes and Fire Safety Design Methods, 23-25 May, Warsaw, Poland, 2016.
- 2) 市原卓磨, 長谷見雄二, 安井昇, 鈴木淳一, 鍵屋浩司, 吉田正志: 木質内装材料の燃焼発熱性状に関する研究 – 大規模空間における火災成長率の実験的把握, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 319-322, 2012.
- 3) 国土交通省住宅局建築指導課他編: 2001年版避難安全検証法の解説及び計算例とその解説, 海文堂, 2000.
- 4) 平成12年建設省告示第1441号, 階避難安全検証法に関する算出方法を定める件.
- 5) 出口嘉一, 長岡勉, 岡崎智仁, 白波瀬智幸: 避難安全検証法の内装制限の適用除外規定を活用した木質内装の実現, 日本建築学会技術報告集, Vol. 20, No. 45, pp. 599-604, 2014.
- 6) Quintiere, J. G., Harkleroad, M., Hasemi, Y.: Wall flames and implications for upward flame spread, Combustion Science and Technology, Vol. 48, No. 3/4, pp. 191-222, 1986.
- 7) Quintiere, J. G., Harkleroad, M., Walton, D.: Measurement of material flame spread properties, Combustion Science and Technology, Vol. 32, pp. 67-89, 1983.
- 8) 鈴木圭一, 田中哮義, 原田和典, 吉田治典: 火災空間における垂直温度分布の予測モデル – 多層ゾーン煙流動予測モデルの開発 その1 –, 日本建築学会環境系論文集, Vol. 69, pp. 1-7, 2004.
- 9) Karlsson, B.: Modeling fire growth on combustible lining materials in enclosures, Report TVBB 1009 Lund University, Department of Fire Safety Engineering, 1992.
- 10) Quintiere, J. G.: A simulation model for fire growth on materials subject to a room-corner test, Fire Safety Journal, Vol. 20, pp. 313-339, 1993.
- 11) Wade, C. A., Barnett, J. R.: A room-corner fire model including fire growth on linings and enclosure smoke-filling, Journal of Fire Protection Engineering, Vol. 8, pp. 27-36, 1997.
- 12) Peel, H., Wade, C., Spearpoint, M.: Comparison of partially lined timber room experiments with the modified B-RISK flame spread capability, 14th International Conference and Exhibition on Fire Science and Engineering - Interflam 2016, 4-6 July, Royal Holloway College, Windsor, UK, 2016.
- 13) Lattimer, B. Y., Hunt, S. P., Wright, M., Sorathia, U.: Modeling fire growth in a combustible corner, Fire Safety Journal, Vol. 38, pp. 771-796, 2003.
- 14) 田中哮義, 中村和人: <二層ゾーンの概念に基づく>建物内煙流動予測計算モデル, 建築研究報告 No. 123, 建設省建築研究所, 1989.
- 15) Tanaka, T., Yamada, S.: BRI2002: Two layer zone smoke transport model, Fire Science and

- Technology, Vol. 23, pp. 1-131, 2004.
- 16) Tanaka, T., Yamaguchi, J., Wakamatsu, T.: Investigations into flow rates of opening jet plumes from a fire space, *Fire Safety Science*, Vol. 6, pp. 1113-1124, 2000.
 - 17) Yamana, T., Tanaka, T.: Smoke control in large scale spaces (part 2: smoke control experiments in a large scale space), *Fire Science and Technology*, Vol. 5, pp. 41-54, 1985.
 - 18) 出口嘉一, 鍵屋浩司, 河合邦治, 山口純一: 実大規模の居室等における煙流動・排煙実験-(その2)自然排煙における給気口の効果-, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 105-108, 2018.
 - 19) 吉田悠起, 西野智研, 鍵屋浩司: センサーデータを用いた建築火災時の即時煙流動推定に関する研究-その2 実大複数室煙流動実験への適用-, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2020.
 - 20) 鈴木圭一, 田中哮義, 原田和典, 吉田治典: 区画火災の鉛直温度分布予測モデルの拡張と検証および火災ブルームへの連行を考慮した天井ジェット温度予測-多層ゾーン煙流動予測モデルの開発 その2-, 日本建築学会環境系論文集, Vol. 70, pp. 1-7, 2005.
 - 21) Takahashi, W., Tanaka, H., Sugawa, O., Ohtake, M.: Flame and plume behavior in and near a corner of walls, *Fire Safety Science*, Vol. 5, pp. 261-271, 1997.
 - 22) Sugawa, O., Tobari, M.: Behavior of flame/plume flow in and near corner fire -entrainment coefficient for corner fire-, U.S./Japan Government Cooperative Program on Natural Resources (UJNR). *Fire Research and Safety. 15th Joint Panel Meeting*. Vol. 2, pp. 489-493, 2000.
 - 23) Zukoski, E., Kubota, T., Cetegen, B.: Entrainment in fire plume, *Fire Safety Journal*, Vol. 3, pp. 107-121, 1980/81.
 - 24) Thomas, P. H., Hinkley, P. L., Theobald, C. R., Simms, D. L.: Investigations into the flow of hot gases in roof venting, *Fire Research Technical Paper*, No. 7, HMSO, London, 1963.
 - 25) Heskestad, G.: Virtual origins of fire plumes, *Fire Safety Journal*, Vol. 5, pp. 109-114, 1983.
 - 26) Cooper, L.Y., Harkleroad, M., Quintiere, J., Rinkinen, W.: An experimental study of upper hot layer stratification in full-scale multiroom fire scenario, *Journal of Heat Transfer*, Vol. 104, pp. 741-749, 1982.
 - 27) Quintiere, J. G., Harkleroad, M.: New concepts for measuring flame spread properties, National Bureau of Standards (U.S.) NBSIR 84-2943, 1984.
 - 28) 小宮祐人, 土橋常登, 原田和典, 仁井大策, 鍵屋浩司: CCM 装置を利用した内装材料の燃え拡がり試験方法に関する検討 (その2) 縮小 LIFT 試験結果, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 251-252, 2019.
 - 29) 土橋常登, 小宮祐人, 原田和典, 仁井大策, 鍵屋浩司: CCM 装置を利用した内装材料の燃え拡がり試験方法に関する検討 (その1) 熱慣性と発熱特性の測定結果, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 249-250, 2019.
 - 30) Hasemi, Y., Tokunaga, T.: Some experimental aspects of turbulent diffusion flames and buoyant

- plumes from fire sources against a wall and in a corner of walls, *Combustion Science and Technology*, Vol. 40, pp. 1-18, 1984.
- 31) Lattimer, B. Y., Sorathia, U.: Thermal characteristics of fires in a noncombustible corner, *Fire Safety Journal*, Vol. 38, pp. 709-745, 2003.
 - 32) Hasemi, Y., Yoshida, M., Yokobayashi, Y., Wakamatsu, T.: Flame heat transfer and concurrent flame spread in a ceiling fire, *Fire Safety Science*, Vol. 5, pp. 379-390, 1997.
 - 33) Tanaka, T., Yamana, T.: Smoke control in large scale spaces (part 1: analytic theories for simple smoke control problems), *Fire Science and Technology*, Vol. 5, pp. 31-40, 1985.
 - 34) McCaffrey, B. J., Quintiere, J. G., Harkleroad, M. E.: Estimating room temperatures and the likelihood of flashover using fire test data correlations, *Fire Technology*, Vol. 17, pp. 98-119, 1981.
 - 35) Peel, H.: Fire development in rooms partially lined with timber, A thesis submitted in partial fulfilment of the requirements for the Degree of Master of Engineering in Fire Engineering in the University of Canterbury, University of Canterbury, 2016.
 - 36) 長岡勉, 辻本誠, 古平章夫, 上原茂男, 菊池伸一: 木材の密度と着火時間の関係, 日本建築学会構造系論文集, Vol. 67, No. 559, pp. 233-236, 2002.
 - 37) 原田寿郎: 木材の燃焼性および耐火性能に関する研究, 森林総研研報, No. 378, pp. 1-85, 2000.
 - 38) Natori, A., Kakae, N., Kitahori, J., Tsuchihashi, T., Abe, T., Nagaoka, T., Ohmiya, Y., Harada, K.: Development of a simple estimation method of heat release rate based on classification of common combustibles into category groups, *Fire Science and Technology*, Vol. 25, pp. 31-54, 2006.
 - 39) 後藤大輔, 大宮喜文: 区画内の化学種濃度及び伝熱量の変化に着目した火災性状予測, 日本建築学会環境系論文集, Vol. 74, No. 638, pp. 403-411, 2009.
 - 40) Forney, G. P.: Computing radiative heat transfer occurring in a zone fire model, *Fire Science and Technology*, Vol. 14, pp. 31-47, 1994.
 - 41) Hasemi, Y., Tokunaga, T.: Flame geometry effects on the buoyant plumes from turbulent diffusion flames, *Fire Science and Technology*, Vol. 4, pp. 15-26, 1984.
 - 42) McGrattan, K., Selepak, M., Hnetkovsky, E.: The influence of walls, corners and enclosures on fire plumes, National Institute of Standards and Technology Technical Note 1984, 2018.
 - 43) 出口嘉一, 岸上昌史, 山崎慧, 大宮喜文: 垂直温度分布の多項式近似による高温層と低温層の温度境界面高さの簡易推定方法, 日本建築学会環境系論文集, Vol. 85, No. 772, pp. 413-423, 2020.
 - 44) 田中哮義: 建築火災安全工学入門 第3版, 日本建築センター, p. 248, 2020.

記号

アルファベット

A_{cell}	セルの面積 [m ²]
A_{cs}	検査面の面積 [m ²]
$A_{F,i}$	室 i の床面積 [m ²]
A_m	内装材の表面積 [m ²]
B_k	開口の幅 [m]
c_m	内装材の比熱 [kJ/kgK]
c_p	気体の定圧比熱 [kJ/kgK]
D	火源の幅 [m]
$F_{f,cs}$	点源から見た検査面の形態係数
g	重力加速度 [m/s ²]
$H_{c,i}$	室 i の天井高さ [m]
$H_{d,k}$	開口上端の高さ [m]
ΔH_o	酸素の燃焼熱 [kJ/kg]
h_m	内装材の対流熱伝達率 [kW/m ² K]
k_m	内装材の熱伝導率 [kW/mK]
l_m	内装材の厚さ [m]
L_v	水分の蒸発潜熱 [kJ/kg]
$\dot{M}_{X,v,ij+1,ij}$	火災プルームの外で室 i の層 $j+1$ から層 j に境界面を越えて移動する化学種 X の質量流量 [kg/s]
$\dot{m}_{d,i,k}$	開口噴流の流量 [kg/s]
$\dot{m}_{o1,ij,k}$	開口 k を経由して室 i の層 j から流出する気体の質量流量 [kg/s]
$\dot{m}_{o2,ij,k}$	開口 k を経由して室 i の層 j に流入する気体の質量流量 [kg/s]
$\dot{m}_{pf,ij}$	室 i の層 j から火災プルームに連行される気体の質量流量 [kg/s]
$\dot{m}_{ps,ij,k}$	室 i の層 j から開口 k に由来する噴流プルームに連行される気体の質量流量 [kg/s]
\dot{m}_v''	単位体積あたりの水分の蒸発速度 [kg/m ³ s]
$\dot{m}_{v,ij+1,ij}$	火災プルームの外で室 i の層 $j+1$ から層 j に境界面を越えて移動する気体の質量流量 [kg/s]
N	室の数
n_i	室 i の層数
p_i	室 i の床面高さにおける静圧 [Pa]
p_{ij}	室 i の層 j の中央高さにおける静圧 [Pa]
$p'_{ij,k}$	開口 k を介して室 i の層 j に隣接する層の中央高さにおける静圧 [Pa]
$\dot{Q}_{cell}''(t)$	任意の時刻におけるセルの単位面積あたりの発熱速度 [kW/m ²]

$\dot{Q}_{d,i,k}$	開口噴流の熱量 [kW]
$\dot{Q}_{f,i}$	可燃物の燃焼に伴う室内の発熱速度 [kW]
$\dot{Q}_{l,ij}$	室 i の層 j から内装材に伝達される熱量 [kW]
$\dot{Q}_{m,i}$	可燃性内装材の発熱速度 [kW]
\dot{Q}_{mw}	壁に貼られた可燃性内装材の発熱速度 [kW]
\dot{Q}_{mc}	天井に貼られた可燃性内装材の発熱速度 [kW]
$\dot{Q}_{r,ij+1,ij}$	放射により室 i の層 $j+1$ から層 j に境界面を越えて伝達される熱量 [kW]
$\dot{Q}_{s,i}$	火源の発熱速度 [kW]
$\dot{Q}_{v,ij+1,ij}$	火災プルームの外で室 i の層 $j+1$ から層 j に境界面を越えて移動する気体の熱量 [kW]
\dot{q}_0''	火源からの入射熱流束 [kW/m ²]
$\dot{q}_{f,c}''$	天井面に沿った連続火炎から予熱領域に入射する熱流束 [kW/m ²]
$\dot{q}_{f,cs}''$	検査面に入射する放射熱流束 [kW/m ²]
$\dot{q}_{f,m}''$	火炎から内装材の表面に入射する放射熱流束 [kW/m ²]
$\dot{q}_{f,w}''$	壁面に沿った連続火炎から予熱領域に入射する熱流束 [kW/m ²]
r_f	天井面に沿った連続火炎の長さ [m]
r_m	天井に貼られた可燃性内装材の半径 [m]
r_p	半径方向に進行する熱分解領域先端の隅角部からの水平距離 [m]
T_0	可燃性内装材の初期温度 [K]
T_{ij}	室 i の層 j の気体の温度 [K]
$T'_{ij,k}$	開口 k を介して室 i の層 j に隣接する層の気体の温度 [K]
$T_i(z)$	室 i の高さ z における気体温度 [K]
T_m	内装材の温度 [K]
$T_{m,ig}$	可燃性内装材の着火温度 [K]
$T_{m,s}$	内装材の表面温度 [K]
$T_{m,s}(Z)$	床面からの高さ Z における可燃性内装材の表面温度 [K]
$T_{ref,i}$	参照温度 [K]
$T_{s,i}$	室 i の煙層温度 [K]
T_∞	外気の温度 [K]
t	時間 [s]
$t_{f,c}$	連続火炎が天井に接触するまでの時間 [s]
$t_{f,w}$	火源上の連続火炎の先端が壁に貼られた可燃性材料の下端高さに達するまでの時間 [s]
$t_{ig,c}$	天井に貼られた可燃性材料の着火時間 [s]
$t_{ig,w}$	壁に貼られた可燃性材料の着火時間 [s]
$t_{Q,100}$	火源が可燃性内装材の着火に必要な熱流束を放射する程度（火源の発熱

	速度が 100kW 以上を仮定) に成長するまでの時間 [s]
V_{ij}	室 i の層 j の気体の体積 [m ³]
x	内装材の表面からの距離 [m]
x_m	壁に貼られた可燃性内装材の x 軸方向の長さ [m]
$x_{p,c}$	天井流の流れ方向に進行する熱分解領域先端の隅角部からの水平距離 [m]
$x_{p,l}$	側方向に進行する熱分解領域先端の隅角部からの水平距離 [m]
$Y_{X,ij}$	室 i の層 j の化学種 X の質量分率
$Y'_{X,ij,k}$	開口 k を介して室 i の層 j に隣接する層の化学種 X の質量分率
y_m	壁に貼られた可燃性内装材の y 軸方向の長さ [m]
$y_{p,c}$	天井流の流れ方向に進行する熱分解領域先端の隅角部からの水平距離 [m]
$y_{p,l}$	側方向に進行する熱分解領域先端の隅角部からの水平距離 [m]
$Z_{n,k}$	中性帯の高さ [m]
z_0	仮想点熱源の位置 [m]
z_b	火源面の高さ [m]
$z_{d,k}$	開口噴流プルームの流量と開口噴流の流量が等しくなる巻き込み基準点の高さ [m]
z_f	壁面に沿った連続火炎の長さ [m]
$z_{ij,l}$	室 i の層 j の下面の床面からの高さ [m]
$z_{ij,u}$	室 i の層 j の上面の床面からの高さ [m]
$z_{m,u}$	壁に貼られた可燃性内装材の上端高さ [m]
$z_{m,l}$	壁に貼られた可燃性内装材の下端高さ [m]
$z_{p,d}$	下方に進行する熱分解領域先端の高さ [m]
$z_{p,u}$	上方に進行する熱分解領域先端の高さ [m]
$z_{s,i}$	室 i の煙層高さ [m]

ギリシャ文字

α	流量係数
$\dot{\Gamma}_{X,i}$	室 i の化学種 X の生成速度 [kg/s]
$\delta_{ij,k}$	開口 k を経由して室 i の層 j に流入する気体の温度が最上層のそれよりも高い場合を 1, そうでない場合を 0 とするダミー変数
ε_m	内装材の放射率
ρ_{ij}	室 i の層 j の気体の密度 [kg/m ³]
$\rho'_{ij,k}$	開口 k を介して室 i の層 j に隣接する層の気体の密度 [kg/m ³]
ρ_m	内装材の密度 [kg/m ³]

ρ_{∞}	外気の密度 [kg/m ³]
σ	ステファン・ボルツマン定数 [kW/m ² K ⁴]
Φ_m	可燃性内装材の火炎伝播パラメータ [(kW) ² /m ³]
χ_c	発熱速度のうち対流によって運ばれる成分の比率
$\omega_{f,cs}$	点源から見た検査面の立体角 [sr]

下付き文字

i	室
j	層
k	開口
m	内装材
X	化学種

付録：計算プログラムの入出力マニュアル

計算は次のフォルダ構造を前提として行われる。計算プログラム `BRI_Advanced.exe` がフォルダ `in` に配置された入力ファイルを読み込み、計算結果をフォルダ `out` に出力する。入出力ファイルは全てカンマ区切りのテキストデータ (CSV) である。

任意のフォルダ

└─	<code>in</code>	【入力ファイル格納用フォルダ】	
	└	<code>R.csv</code>	【室の情報】
	└	<code>O.csv</code>	【開口の情報】
	└	<code>M.csv</code>	【不燃性内装材の情報】
	└	<code>F.csv</code>	【火災室の情報】
	└	<code>HRRs.csv</code>	【火源の発熱速度】
	└	<code>HRRm.csv</code>	【可燃性内装材の発熱速度】
└─	<code>out</code>	【出力ファイル格納用フォルダ】	
	└	<code>FireRoom_HRR.csv</code>	【火災室の発熱速度】
	└	<code>FireRoom_HRRm.csv</code>	【〃の可燃性内装材の発熱速度】
	└	<code>FireRoom_CLTw.csv</code>	【〃の可燃性内装材（最上層の壁）の温度】
	└	<code>FireRoom_CLTc.csv</code>	【〃の可燃性内装材（天井）の温度】
	└	<code>FireRoom_PYR.csv</code>	【〃の可燃性内装材の熱分解領域】
	└	<code>FireRoom_FLR.csv</code>	【〃の火炎から周壁表面に入射する熱流束】
	└	<code>RoomXX_GASTEMP.csv</code>	【室（番号 XX）の気体温度】
	└	<code>RoomXX_SMKLYHT.csv</code>	【〃の煙層高さと煙層温度】
	└	<code>RoomXX_OXYGCON.csv</code>	【〃の酸素濃度】
	└	<code>RoomXX_PRESMFO.csv</code>	【〃の静圧と開口経由の質量流量】
	└	<code>RoomXX_ENTFPLM.csv</code>	【〃の火災プルームの巻き込み量】
	└	<code>RoomXX_ENTSPLM.csv</code>	【〃の開口噴流プルームの巻き込み量】
	└	<code>RoomXX_MFACRLY.csv</code>	【〃の層の境界面を越えた質量流量】
	└	<code>RoomXX_HLOSSLM.csv</code>	【〃の内装材に伝達される熱量】
	└	<code>RoomXX_HTRADBL.csv</code>	【〃の層の境界面を越えた放射熱伝達量】
	└	<code>RoomXX_LIMTEMP.csv</code>	【〃の不燃性内装材（壁，最上層）の温度】
└─	<code>source</code>	【ソースコード格納用フォルダ】	
└─	<code>BRI_Advanced.exe</code>	【計算プログラム】	

1. 入力ファイルの書式

(1) R.csv【室の情報】

R.csv は、室の大きさと床面の高さ、壁・天井・床に貼る不燃性内装材を定義するファイルである。

≪R.csv の例≫

```
1,145,2.7,0,50,2,2,3
2,84,13.5,0,38,2,2,3
3,120,2.7,4.5,108,2,2,3
4,120,2.7,9,108,2,2,3
```

- ・ 1 列目 : 室の通し番号 (整数)
- ・ 2 列目 : 室の床面積 [m²]
- ・ 3 列目 : 室の天井高さ [m] (床面からの高さ)
- ・ 4 列目 : 室の床面高さ [m] (地表面からの高さ)
- ・ 5 列目 : 室の周長 [m]
- ・ 6 列目 : 室の壁に貼る不燃性内装材の番号 (整数. M.csv で定義される番号)
- ・ 7 列目 : 室の天井に貼る不燃性内装材の番号 (整数. M.csv で定義される番号)
- ・ 8 列目 : 室の床に貼る不燃性内装材の番号 (整数. M.csv で定義される番号)

(2) O.csv【開口の情報】

O.csv は、開口の形状と開口を介した室の接続関係を定義するファイルである。

≪O.csv の例≫

```
1,2.2,0,12,1,2
2,7.2,4.5,26,2,3
3,11.7,9,26,2,4
4,0.6,0,15,2,0
```

- ・ 1 列目 : 開口の通し番号 (整数)
- ・ 2 列目 : 開口上端の高さ [m] (地表面からの高さ)
- ・ 3 列目 : 開口下端の高さ [m] (地表面からの高さ)
- ・ 4 列目 : 開口の幅 [m]
- ・ 5 列目 : 開口を介して接続される二室のうち片方の室の番号 (整数. R.csv で定義される番号. 外気の場合は 0 を入力)
- ・ 6 列目 : 開口を介して接続される二室のうちもう片方の室の番号 (整数. R.csv で定義される番号. 外気の場合は 0 を入力)

(3) M.csv【不燃性内装材の情報】

M.csv は、不燃性内装材の種類と熱物性を定義するファイルである。

≪M.csv の例≫

Rock wool insulation (40mm)
1,0.0000344,100,0.84,0,0.9,0.04
Calcium silicate board (15mm)
2,0.00012,975,1.25,0,0.9,0.015
Normal concrete (100mm)
3,0.00163,2250,0.895,0,0.9,0.1

奇数行に不燃性内装材の種類を、偶数行にその熱物性を記述する。

偶数行の

- ・ 1 列目 : 不燃性内装材の通し番号 (整数)
- ・ 2 列目 : 不燃性内装材の熱伝導率 [kW/mK]
- ・ 3 列目 : 不燃性内装材の密度 [kg/m³]
- ・ 4 列目 : 不燃性内装材の比熱 [kJ/kgK]
- ・ 5 列目 : 不燃性内装材の含水率 [-]
- ・ 6 列目 : 不燃性内装材の放射率 [-]
- ・ 7 列目 : 不燃性内装材の厚さ [m]

(4) F.csv【火災室の情報】

F.csv は、火災室の番号とシミュレートする火災の時間、火源の形状や位置、火災室の内装に用いる可燃性材料の熱物性や貼り方を定義するファイルである。

≪F.csv の例≫

1,300,773,0.8,0.3,3,0.7,293
3.75,3.75,2.7,0,0,0.00011,360,1.26,0.05,8.4,653,10,0.1,0.9,0.015,13300,6000

1 行目に火災室の番号とシミュレートする火災の時間、火源の形状や位置などを、2 行目に火災室の内装に用いる可燃性材料の熱物性と貼り方を記述する。

1 行目の

- ・ 1 列目 : 火災室の番号 (整数. R.csv で定義される番号)
- ・ 2 列目 : シミュレートする火災の時間 [s]
- ・ 3 列目 : 計算を終了する火災室の煙層温度 [K] (二層ゾーンに変換した温度)
- ・ 4 列目 : 火源の幅 [m]
- ・ 5 列目 : 火源面の高さ [m] (床面からの高さ)
- ・ 6 列目 : 火源の位置 (整数. 中央は 1 を、隅角部は 2 を、壁際は 3 を入力)

- ・ 7 列目 : 発熱速度のうち対流によって運ばれる成分の比率
- ・ 8 列目 : 外気温 [K]

2 行目の

- ・ 1 列目 : 火災室の壁のうち可燃性材料を貼る部分の x 方向の最大限界 x_m [m]
- ・ 2 列目 : 火災室の壁のうち可燃性材料を貼る部分の y 方向の最大限界 y_m [m]
- ・ 3 列目 : 火災室の壁のうち可燃性材料を貼る部分の z 方向の最大限界 $z_{m,u}$ [m]
- ・ 4 列目 : 火災室の壁のうち可燃性材料を貼る部分の z 方向の最小限界 $z_{m,l}$ [m]
- ・ 5 列目 : 火災室の天井のうち可燃性材料を貼る部分の r 方向の最大限界 r_m [m]
 ※ 壁際火源を想定する場合には、天井に可燃性材料を貼る条件を扱えないため、必ず 0 を入力すること
- ・ 6 列目 : 火災室の内装に用いる可燃性材料の熱伝導率 [kW/mK]
- ・ 7 列目 : 火災室の内装に用いる可燃性材料の密度 [kg/m³]
- ・ 8 列目 : 火災室の内装に用いる可燃性材料の比熱 [kJ/kgK]
- ・ 9 列目 : 火災室の内装に用いる可燃性材料の熱慣性 $\sqrt{k\rho c}$ の 2 乗 [kJ²/sm⁴K²]
- ・ 10 列目 : 火災室の内装に用いる可燃性材料の火炎伝播パラメータ [kW²/m³]
- ・ 11 列目 : 火災室の内装に用いる可燃性材料の着火温度 [K]
- ・ 12 列目 : 火災室の内装に用いる可燃性材料の着火限界加熱強度 [kW/m²]
- ・ 13 列目 : 火災室の内装に用いる可燃性材料の含水率 [-]
- ・ 14 列目 : 火災室の内装に用いる可燃性材料の放射率 [-]
- ・ 15 列目 : 火災室の内装に用いる可燃性材料の厚さ [m]
- ・ 16 列目 : 火災室の内装に用いる可燃性材料の燃焼熱 [kJ/kg] (現在のバージョンでは計算に反映されないが、13300 を入力)
- ・ 17 列目 : 火災室の内装に用いる可燃性材料の熱分解潜熱 [kJ/kg] (現在のバージョンでは計算に反映されないが、6000 を入力)

(5) HRRs.csv【火源の発熱速度】

HRRs.csv は、火源の発熱速度の時刻歴を定義するファイルである。

≪HRRs.csv の例≫

0,5,0
5,5,3
10,5,12
15,5,27

- ・ 1 列目 : 出火からの経過時間 [s] (必ず 0 秒から始めること)
- ・ 2 列目 : データの時間間隔 [s] (必ず一定の時間間隔にすること)
- ・ 3 列目 : 火源の発熱速度 [kW]

(6) HRRm.csv【可燃性内装材の発熱速度】

HRRm.csv は、火災室の内装に用いる可燃性材料の単位面積あたりの発熱速度の時刻歴を定義するファイルである。

≪HRRm.csv の例≫

0,60,160
60,60,100
120,60,75
180,60,77

- ・ 1 列目 : 着火からの経過時間 [s] (必ず 0 秒から始めること)
- ・ 2 列目 : データの時間間隔 [s] (必ず一定の時間間隔にすること)
- ・ 3 列目 : 火災室の内装に用いる可燃性材料の単位面積あたり発熱速度 [kW/m²]

2. 出力ファイルの書式

(1) FireRoom_HRR.csv【火災室の発熱速度】

FireRoom_HRR.csv は、火災室の発熱速度に関する計算結果を記述したファイルである。

≪FireRoom_HRR.csv の例≫

```
0.000000,17.051000,17.051000,5.491000,5.780000,5.780000,0.000000, ……  
1.000000,26.915082,26.915082,15.447230,5.733926,5.733926,0.000000, ……  
……
```

- ・ 1 列目 : 出火からの経過時間 [s]
- ・ 2 列目 : 火災室内の発熱速度（火源と壁・天井の内装材の発熱速度の和）[kW]
- ・ 3 列目 : 火源と壁の内装材の発熱速度の和（天井の内装材を除く発熱速度）[kW]
- ・ 4 列目 : 火災室の最下層の発熱速度 [kW]
- ・ 5 列目 : 火災室の最下層から数えて第 2 層の発熱速度 [kW]
- ・ 6 列目 : 火災室の最下層から数えて第 3 層の発熱速度 [kW]
- ・ 7 列目 : 火災室の最下層から数えて第 4 層の発熱速度 [kW]
- ・ …… : 火災室の最下層から数えて第……層の発熱速度 [kW]

(2) FireRoom_HRRm.csv【火災室の可燃性内装材の発熱速度】

FireRoom_HRRm.csv は、火災室の内装に用いる可燃性材料の単位面積あたりの発熱速度の時刻歴（HRRm.csv）を、単位面積あたりの発熱速度と総発熱量の関係に変換したファイルである。

≪FireRoom_HRRm.csv の例≫

```
0.000000,0.500000,170.000000,  
0.500000,0.500000,166.000000,  
……
```

- ・ 1 列目 : 火災室の内装に用いる可燃性材料の単位面積あたり総発熱量 [MJ/m²]
- ・ 2 列目 : データの総発熱量間隔 [MJ/m²]
- ・ 3 列目 : 火災室の内装に用いる可燃性材料の単位面積あたり発熱速度 [kW/m²]

(3) FireRoom_CLTw.csv【火災室の可燃性内装材（最上層の壁）の温度】

FireRoom_CLTw.csv は、火災室の最上層の壁に貼られた可燃性内装材の温度に関する計算結果を記述したファイルである。

≪FireRoom_CLTw.csv の例≫

```
0.000000,20.000000,20.000000,20.000000,20.000000,20.000000, ……
```

```
1.000000,20.167162,20.007815,20.000250,20.000006,20.000000,20.000000, ……  
……
```

- ・ 1 列目 : 出火からの経過時間 [s]
- ・ 2 列目 : 火災室の最上層の壁に貼られた可燃性内装材の表面温度 [°C]
- ・ 3 列目 : 〃に貼られた可燃性内装材の表面から 1mm の深さにおける温度 [°C]
- ・ 4 列目 : 〃に貼られた可燃性内装材の表面から 2mm の深さにおける温度 [°C]
- ・ 5 列目 : 〃に貼られた可燃性内装材の表面から 3mm の深さにおける温度 [°C]
- ・ 6 列目 : 〃に貼られた可燃性内装材の表面から 4mm の深さにおける温度 [°C]
- ・ 7 列目 : 〃に貼られた可燃性内装材の表面から 5mm の深さにおける温度 [°C]
- ・ …… : 〃に貼られた可燃性内装材の表面から……の深さにおける温度 [°C]

(4) FireRoom_CLTc.csv【火災室の可燃性内装材（天井）の温度】

FireRoom_CLTc.csv は、火災室の天井に貼られた可燃性内装材の温度に関する計算結果を記述したファイルである。

≪FireRoom_CLTc.csv の例≫

```
0.000000,20.000000,20.000000,20.000000,20.000000,20.000000,20.000000, ……  
1.000000,20.167162,20.007815,20.000250,20.000006,20.000000,20.000000, ……  
……
```

- ・ 1 列目 : 出火からの経過時間 [s]
- ・ 2 列目 : 火災室の天井に貼られた可燃性内装材の表面温度 [°C]
- ・ 3 列目 : 〃に貼られた可燃性内装材の表面から 1mm の深さにおける温度 [°C]
- ・ 4 列目 : 〃に貼られた可燃性内装材の表面から 2mm の深さにおける温度 [°C]
- ・ 5 列目 : 〃に貼られた可燃性内装材の表面から 3mm の深さにおける温度 [°C]
- ・ 6 列目 : 〃に貼られた可燃性内装材の表面から 4mm の深さにおける温度 [°C]
- ・ 7 列目 : 〃に貼られた可燃性内装材の表面から 5mm の深さにおける温度 [°C]
- ・ …… : 〃に貼られた可燃性内装材の表面から……の深さにおける温度 [°C]

(5) FireRoom_PYR.csv【火災室の可燃性内装材の熱分解領域】

FireRoom_PYR.csv は、火災室の内装に用いられた可燃性材料の熱分解領域の形状に関する計算結果を記述したファイルである。

≪FireRoom_PYR.csv の例≫

```
0.000000,0.300000,0.170000,0.170000,0.170000,0.170000,0.000000,0.000000, ……  
1.000000,0.300000,0.170000,0.170000,0.170000,0.170000,0.000000,0.000000, ……  
……
```

- ・ 1 列目 : 出火からの経過時間 [s]
- ・ 2 列目 : 火災室の可燃性内装材の表面を上方向に進行する熱分解領域先端の床面からの高さ $z_{p,u}$ [m]
- ・ 3 列目 : $\prime\prime$ を側方向に進行する熱分解領域先端の隅角部からの距離 $x_{p,l}$ [m]
- ・ 4 列目 : $\prime\prime$ を側方向に進行する熱分解領域先端の隅角部からの距離 $y_{p,l}$ [m]
- ・ 5 列目 : $\prime\prime$ を天井流の流れ方向に進行する熱分解領域先端の隅角部からの距離 $x_{p,c}$ [m]
- ・ 6 列目 : $\prime\prime$ を天井流の流れ方向に進行する熱分解領域先端の隅角部からの距離 $y_{p,c}$ [m]
- ・ 7 列目 : $\prime\prime$ を下方向に進行する熱分解領域先端の床面からの高さ $z_{p,d}$ [m]
- ・ 8 列目 : $\prime\prime$ を半径方向に進行する熱分解領域先端の隅角部からの距離 r_p [m]
- ・ 9 列目 : 壁面に沿った連続火炎の長さ z_f [m]
- ・ 10 列目 : 天井面に沿った連続火炎の長さ r_f [m]

(6) FireRoom_FLR.csv【火災室の火炎から周壁表面に入射する熱流束】

FireRoom_FLR.csv は、火災室の火炎から周壁表面に入射する熱流束に関する計算結果を記述したファイルである。

≪FireRoom_FLR.csv の例≫

```
0.000000,0.000000,0.000000,0.000000,0.000000,0.000000,0.000000, .....
1.000000,0.000000,0.000000,0.000000,0.000000,0.000000,0.000000, .....
.....
```

火災室の層数を N とする。

- ・ 1 列目 : 出火からの経過時間 [s]
- ・ 2 列目 : 火炎から見た火災室の最下層を囲う壁の形態係数
- ・ 3 列目 : 火炎から見た火災室の最下層から数えて第 2 層を囲う壁の形態係数
- ・ 4 列目 : 火炎から見た火災室の最下層から数えて第 3 層を囲う壁の形態係数
- ・ 5 列目 : 火炎から見た火災室の最下層から数えて第 4 層を囲う壁の形態係数
- :
- ・ N+1 列目 : 火炎から見た火災室の最上層を囲う壁の形態係数
- ・ N+2 列目 : 火炎から見た火災室の天井の形態係数
- ・ N+3 列目 : 火炎から見た火災室の床の形態係数
- ・ N+4 列目 : 火炎から火災室の最下層を囲う壁に入射する放射熱流束 [kW/m²]
- ・ N+5 列目 : 火炎から火災室の最下層から数えて第 2 層を囲う壁に入射する放射熱流束 [kW/m²]
- ・ N+6 列目 : 火炎から火災室の最下層から数えて第 3 層を囲う壁に入射する放射熱

- 流束 [kW/m²]
- :
- 2N+3 列目 : 火炎から火災室の最上層を囲う壁に入射する放射熱流束 [kW/m²]
 - 2N+4 列目 : 火炎から火災室の天井に入射する放射熱流束 [kW/m²]
 - 2N+5 列目 : 火炎から火災室の床に入射する放射熱流束 [kW/m²]

(7) RoomXX_GASTEMP.csv【室（番号 XX）の気体温度】

RoomXX_GASTEMP.csv は、R.csv で定義される番号 XX の室の各層の気体温度に関する計算結果を記述したファイルである。

≪RoomXX_GASTEMP.csv の例≫

```
0.000000,10.000000,10.000000,10.000000,10.000000,10.000000,10.000000, .....
1.000000,10.000000,10.000000,10.000000,10.000000,10.000000,10.000000, .....
.....
```

- 1 列目 : 出火からの経過時間 [s]
- 2 列目 : 番号 XX の室の最下層の気体温度 [°C]
- 3 列目 : 番号 XX の室の最下層から数えて第 2 層の気体温度 [°C]
- 4 列目 : 番号 XX の室の最下層から数えて第 3 層の気体温度 [°C]
- 5 列目 : 番号 XX の室の最下層から数えて第 4 層の気体温度 [°C]
- 6 列目 : 番号 XX の室の最下層から数えて第 5 層の気体温度 [°C]
- 7 列目 : 番号 XX の室の最下層から数えて第 6 層の気体温度 [°C]
- : 番号 XX の室の最下層から数えて第.....層の気体温度 [°C]

(8) RoomXX_SMKLYHT.csv【室（番号 XX）の煙層高さと煙層温度】

RoomXX_SMKLYHT.csv は、R.csv で定義される番号 XX の室の煙層高さと煙層温度に関する計算結果を記述したファイルである。

≪RoomXX_SMKLYHT.csv の例≫

```
0.000000,2.700000,10.000000,
1.000000,2.543289,22.872908,
.....
```

- 1 列目 : 出火からの経過時間 [s]
- 2 列目 : 番号 XX の室の煙層高さ [m]
- 3 列目 : 番号 XX の室の煙層温度 [°C]

(9) RoomXX_OXYGCON.csv【室（番号 XX）の酸素濃度】

RoomXX_OXYGCON.csv は, R.csv で定義される番号 XX の室の各層の酸素濃度に関する計算結果を記述したファイルである.

≪RoomXX_OXYGCON.csv の例≫

```
0.000000,0.233000,0.233000,0.233000,0.233000,0.233000,0.233000, .....  
1.000000,0.233000,0.233000,0.233000,0.233000,0.233000,0.233000, .....  
.....
```

- ・ 1 列目 : 出火からの経過時間 [s]
- ・ 2 列目 : 番号 XX の室の最下層の酸素の質量分率 [-]
- ・ 3 列目 : 番号 XX の室の最下層から数えて第 2 層の酸素の質量分率 [-]
- ・ 4 列目 : 番号 XX の室の最下層から数えて第 3 層の酸素の質量分率 [-]
- ・ 5 列目 : 番号 XX の室の最下層から数えて第 4 層の酸素の質量分率 [-]
- ・ 6 列目 : 番号 XX の室の最下層から数えて第 5 層の酸素の質量分率 [-]
- ・ 7 列目 : 番号 XX の室の最下層から数えて第 6 層の酸素の質量分率 [-]
- ・ : 番号 XX の室の最下層から数えて第.....層の酸素の質量分率 [-]

(10) RoomXX_PRESMFO.csv 【室 (番号 XX) の静圧と開口経由の質量流量】

RoomXX_PRESMFO.csv は, R.csv で定義される番号 XX の室の静圧と開口経由の質量流量に関する計算結果を記述したファイルである.

≪RoomXX_PRESMFO.csv の例≫

```
0.000000,0.043253,0.015461,0.247295,0.000000,  
1.000000,0.039555,-0.014215,0.230279,0.000000,  
.....
```

- ・ 1 列目 : 出火からの経過時間 [s]
- ・ 2 列目 : 番号 XX の室の床面高さにおける静圧 [Pa]
- ・ 3 列目 : 番号 XX の室のエネルギー収支 [kW]
- ・ 4 列目 : 番号 XX の室の開口を經由して流出する気体の質量流量 [kg/s]
- ・ 5 列目 : 番号 XX の室の開口を經由して流入する気体の質量流量 [kg/s]

(11) RoomXX_ENTFPLM.csv 【室 (番号 XX) の火災プルームの巻き込み量】

RoomXX_ENTFPLM.csv は, R.csv で定義される番号 XX の室の各層からの火災プルームの巻き込み量に関する計算結果を記述したファイルである.

≪RoomXX_ENTFPLM.csv の例≫

```
0.000000,0.005808,0.015186,0.022031,0.027931,0.033264,0.038203, .....  
.....
```

```
1.000000,0.005808,0.015186,0.022031,0.027931,0.033264,0.038203, ……  
……
```

- ・ 1 列目 : 出火からの経過時間 [s]
- ・ 2 列目 : 番号 XX の室の最下層から火災プルームに連行される気体の質量流量 [kg/s]
- ・ 3 列目 : 番号 XX の室の最下層から数えて第 2 層から火災プルームに連行される気体の質量流量 [kg/s]
- ・ 4 列目 : 番号 XX の室の最下層から数えて第 3 層から火災プルームに連行される気体の質量流量 [kg/s]
- ・ 5 列目 : 番号 XX の室の最下層から数えて第 4 層から火災プルームに連行される気体の質量流量 [kg/s]
- ・ …… : 番号 XX の室の最下層から数えて第……層から火災プルームに連行される気体の質量流量 [kg/s]

(12) RoomXX_ENTSPLM.csv【室（番号 XX）の開口噴流プルームの巻き込み量】

RoomXX_ENTSPLM.csv は、R.csv で定義される番号 XX の室の各層からの開口噴流プルームの巻き込み量に関する計算結果を記述したファイルである。

≪RoomXX_ENTSPLM.csv の例≫

```
0.000000,0.000000,0.000000,0.000000,0.000000,0.000000,0.000000, ……  
1.000000,0.000000,0.000000,0.000000,0.000000,0.000000,0.000000, ……  
……
```

- ・ 1 列目 : 出火からの経過時間 [s]
- ・ 2 列目 : 番号 XX の室の最下層から開口噴流プルームに連行される気体の質量流量 [kg/s]
- ・ 3 列目 : 番号 XX の室の最下層から数えて第 2 層から開口噴流プルームに連行される気体の質量流量 [kg/s]
- ・ 4 列目 : 番号 XX の室の最下層から数えて第 3 層から開口噴流プルームに連行される気体の質量流量 [kg/s]
- ・ 5 列目 : 番号 XX の室の最下層から数えて第 4 層から開口噴流プルームに連行される気体の質量流量 [kg/s]
- ・ …… : 番号 XX の室の最下層から数えて第……層から開口噴流プルームに連行される気体の質量流量 [kg/s]

(13) RoomXX_MFACRLY.csv【室（番号 XX）の層の境界面を越えた質量流量】

RoomXX_MFACRLY.csv は、R.csv で定義される番号 XX の室の火災プルームの外で層の境界面を越えて移動する気体の質量流量に関する計算結果を記述したファイルである。

《RoomXX_MFACRLY.csv の例》

```
0.000000,-0.229123,0.000000,-0.201572,-0.229123,-0.167176,-0.201572, ……  
1.000000,0.018315,0.000000,0.045015,0.018315,0.078560,0.045015, ……  
……
```

- ・ 1 列目 : 出火からの経過時間 [s]
- ・ 2 列目 : 番号 XX の室の最下層に一つ上の層から境界面を越えて移動する気体の質量流量 [kg/s]
- ・ 3 列目 : 番号 XX の室の最下層から一つ下の層に境界面を越えて移動する気体の質量流量 [kg/s]
- ・ 4 列目 : 番号 XX の室の最下層から数えて第 2 層に一つ上の層から境界面を越えて移動する気体の質量流量 [kg/s]
- ・ 5 列目 : 番号 XX の室の最下層から数えて第 2 層から一つ下の層に境界面を越えて移動する気体の質量流量 [kg/s]
- ・ 6 列目 : 番号 XX の室の最下層から数えて第 3 層に一つ上の層から境界面を越えて移動する気体の質量流量 [kg/s]
- ・ 7 列目 : 番号 XX の室の最下層から数えて第 3 層から一つ下の層に境界面を越えて移動する気体の質量流量 [kg/s]
- ・ … (偶数列) : 番号 XX の室の最下層から数えて第……層に一つ上の層から境界面を越えて移動する気体の質量流量 [kg/s]
- ・ … (奇数列) : 番号 XX の室の最下層から数えて第……層から一つ下の層に境界面を越えて移動する気体の質量流量 [kg/s]

(14) RoomXX_HLOSSLM.csv 【室 (番号 XX) の内装材に伝達される熱量】

RoomXX_HLOSSLM.csv は、R.csv で定義される番号 XX の室の各層から内装材に伝達される熱量に関する計算結果を記述したファイルである。

《RoomXX_HLOSSLM.csv の例》

```
0.000000,0.000000,0.000000,0.000000,0.000000,0.000000,0.000000, ……  
1.000000,0.000000,0.000000,0.000000,0.000000,0.000000,0.000000, ……  
……
```

- ・ 1 列目 : 出火からの経過時間 [s]
- ・ 2 列目 : 番号 XX の室の最下層から内装材に伝達される熱量 [kW]
- ・ 3 列目 : 番号 XX の室の最下層から数えて第 2 層から内装材に伝達される熱量

- [kW]
- ・ 4 列目 : 番号 XX の室の最下層から数えて第 3 層から内装材に伝達される熱量 [kW]
- ・ …… : 番号 XX の室の最下層から数えて第……層から内装材に伝達される熱量 [kW]

(15) RoomXX_HTRADBL.csv【室（番号 XX）の層の境界面を越えた放射熱伝達量】

RoomXX_HTRADBL.csv は、R.csv で定義される番号 XX の室の層の境界面を越えて放射により伝達される熱量に関する計算結果を記述したファイルである。

≪RoomXX_HTRADBL.csv の例≫

```
0.000000,0.000000,0.000000,0.000000,0.000000,0.000000,0.000000, ……
1.000000,0.000000,0.000000,0.000000,0.000000,0.000000,0.000000, ……
……
```

- ・ 1 列目 : 出火からの経過時間 [s]
- ・ 2 列目 : 番号 XX の室の最下層に一つ上の層から境界面を越えて放射により伝達される熱量 [kW]
- ・ 3 列目 : 番号 XX の室の最下層から一つ下の層に境界面を越えて放射により伝達される熱量 [kW]
- ・ 4 列目 : 番号 XX の室の最下層から数えて第 2 層に一つ上の層から境界面を越えて放射により伝達される熱量 [kW]
- ・ 5 列目 : 番号 XX の室の最下層から数えて第 2 層から一つ下の層に境界面を越えて放射により伝達される熱量 [kW]
- ・ 6 列目 : 番号 XX の室の最下層から数えて第 3 層に一つ上の層から境界面を越えて放射により伝達される熱量 [kW]
- ・ 7 列目 : 番号 XX の室の最下層から数えて第 3 層から一つ下の層に境界面を越えて放射により伝達される熱量 [kW]
- ・ … (偶数列) : 番号 XX の室の最下層から数えて第……層に一つ上の層から境界面を越えて放射により伝達される熱量 [kW]
- ・ … (奇数列) : 番号 XX の室の最下層から数えて第……層から一つ下の層に境界面を越えて放射により伝達される熱量 [kW]

(16) RoomXX_LIMTEMP.csv【室（番号 XX）の不燃性内装材（最上層の壁）の温度】

RoomXX_LIMTEMP.csv は、R.csv で定義される番号 XX の室の最上層の壁に貼られた不燃性内装材の温度に関する計算結果を記述したファイルである。

《RoomXX_LIMTEMP.csv の例》

```
0.000000,10.000000,10.000000,10.000000,10.000000,10.000000,10.000000, ……  
1.000000,11.413372,10.151865,10.011135,10.000572,10.000021,10.000001, ……  
……
```

- ・ 1 列目 : 出火からの経過時間 [s]
- ・ 2 列目 : 番号 XX の室の最上層の壁に貼られた不燃性内装材の表面温度 [°C]
- ・ 3 列目 : 〃に貼られた不燃性内装材の表面から 1mm の深さにおける温度 [°C]
- ・ 4 列目 : 〃に貼られた不燃性内装材の表面から 2mm の深さにおける温度 [°C]
- ・ 5 列目 : 〃に貼られた不燃性内装材の表面から 3mm の深さにおける温度 [°C]
- ・ 6 列目 : 〃に貼られた不燃性内装材の表面から 4mm の深さにおける温度 [°C]
- ・ …… : 〃に貼られた不燃性内装材の表面から……の深さにおける温度 [°C]

© 建築研究報告 第 149 号

令和 3 年 2 月 印刷・発行
編集・発行 国立研究開発法人建築研究所

本資料の転載・複写の問い合わせは下記まで
国立研究開発法人建築研究所企画部企画調査課
〒305-0802 茨城県つくば市立原 1 番地
電話 (029) 864-2151(代)