

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

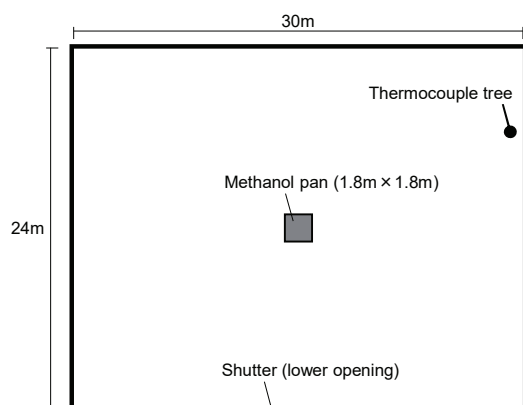
(1) 実験データ

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

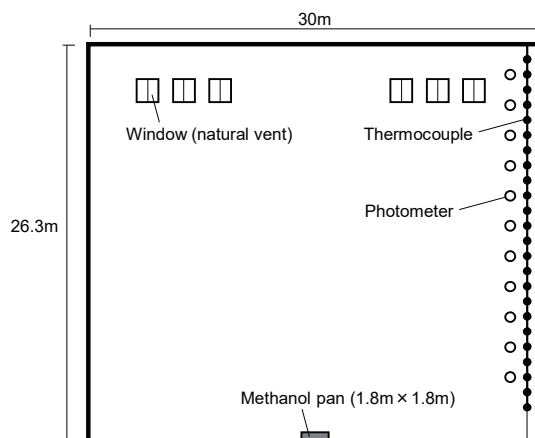


図 5 大規模吹き抜け空間の煙降下実験¹⁷⁾で用いられた実験装置

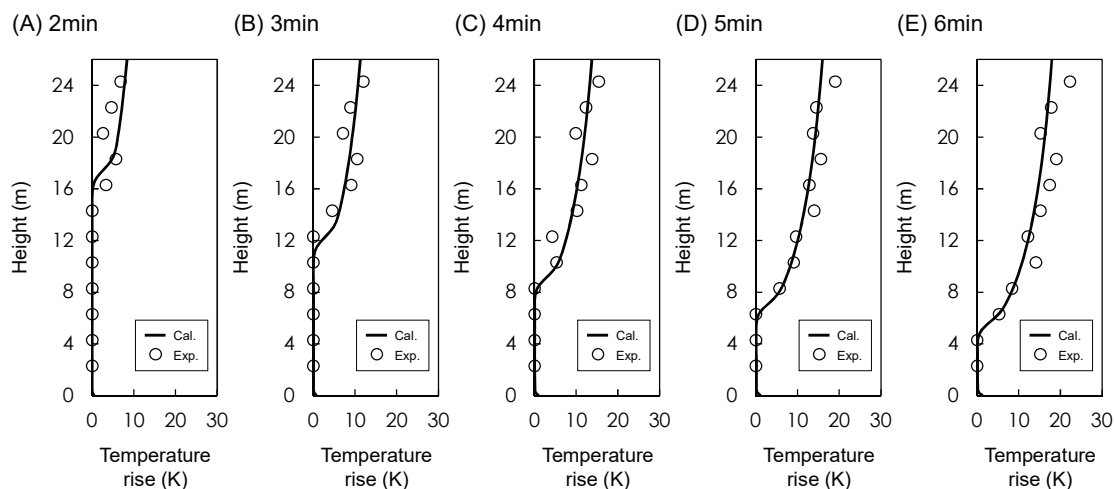


図6 気体温度の鉛直分布の予測結果と実験結果¹⁷⁾の比較(自然降下)

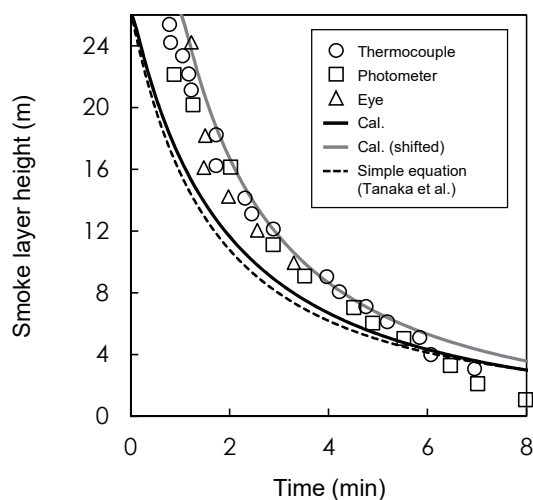
は、幅 6m、高さ 0.1m の開口が壁の下部(開口下端が床面の高さ)に設けられているものとした。自然排煙の条件については、幅 4.3m、高さ 1.5m の開口が壁の上部(開口下端が床面から 22.5m の高さ)に、幅 6m、高さ 0.54m の開口が壁の下部(開口下端が床面の高さ)に設けられているものとした。

(3) 計算結果と考察

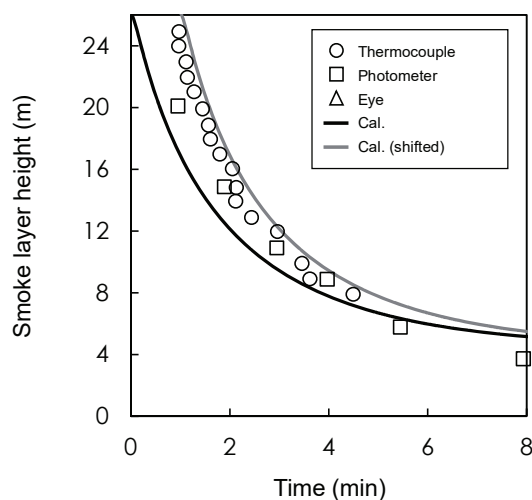
図 6 に、自然降下の条件についての気体温度の鉛直分布の予測結果と実験結果の比較を示す。ただし、実験では、着火後、煙が天井まで上昇し、横方向に拡がって側壁に達するまでに、約 1 分間を要したと報告されている¹⁷⁾。そこで、比較のために、予測結果については、時間原点を着火から 1 分後にずらして示してある。予測された気体温度は、天井に近い最上層で最も高く、天井から下に向かうにつれて徐々に低下するが、ある層を境に温度上昇がほとんど生じなくなり、床面までほぼ一定の温度となる結果が得られた。実験結果の温度分布は、予測結果に見られるような単調な傾向を示している訳ではないが、予測結果と実験結果の間の温度差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

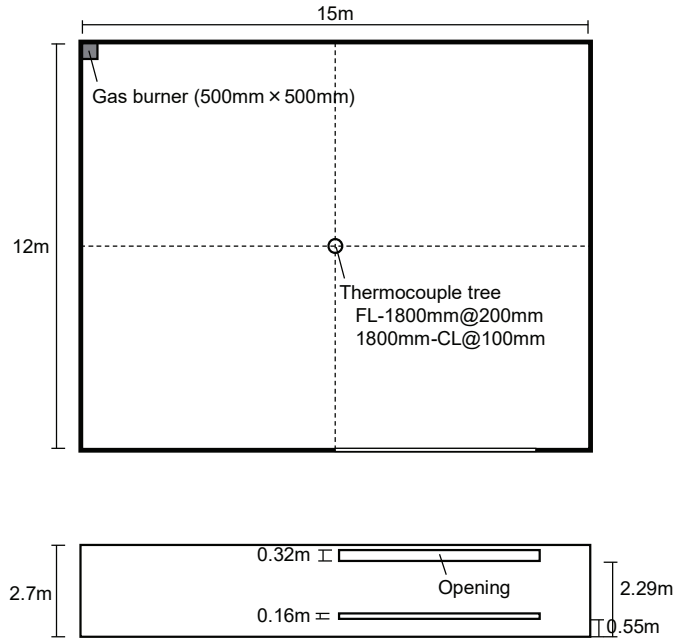


図 8 単室隅角部火災の自然排煙実験¹⁸⁾ で用いられた実験装置

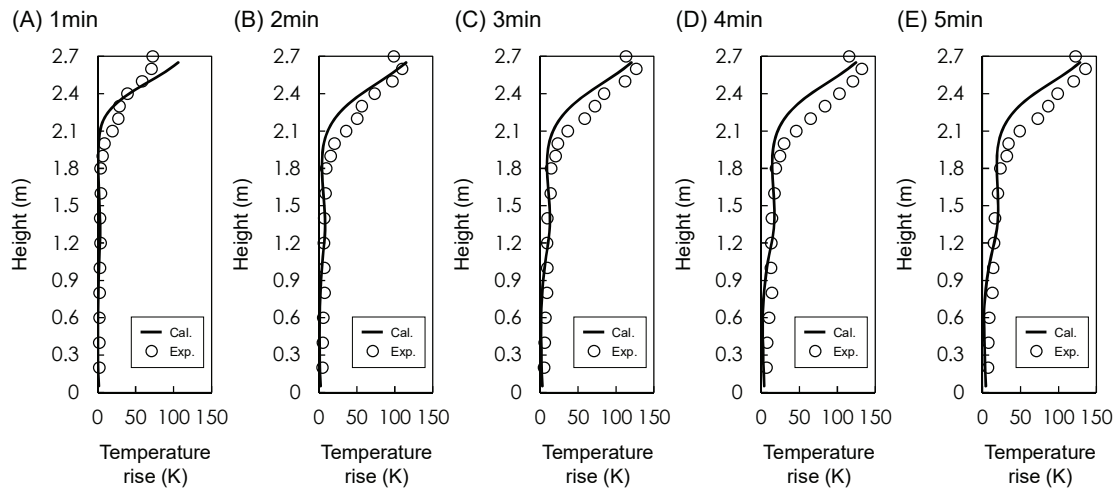


図 9 気体温度の鉛直分布の予測結果と実験結果¹⁸⁾ の比較

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

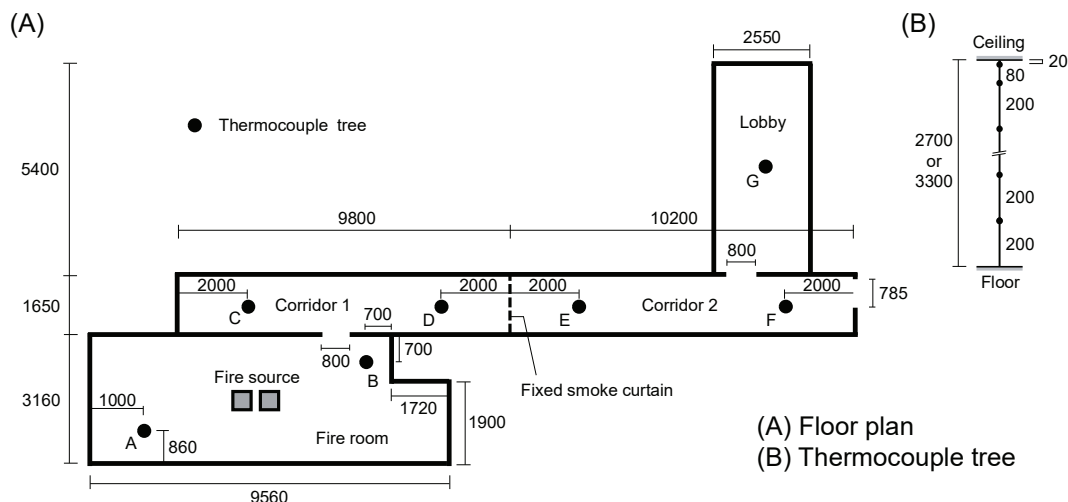
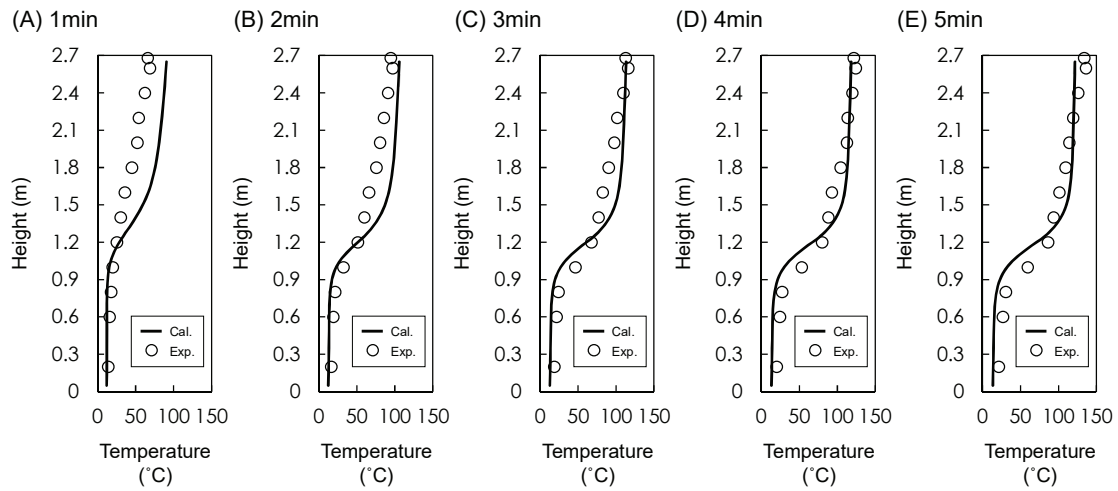


図 10 複数室間の煙流動実験¹⁹⁾で用いられた実験装置(単位: mm)

<火災室>



<廊下 1>

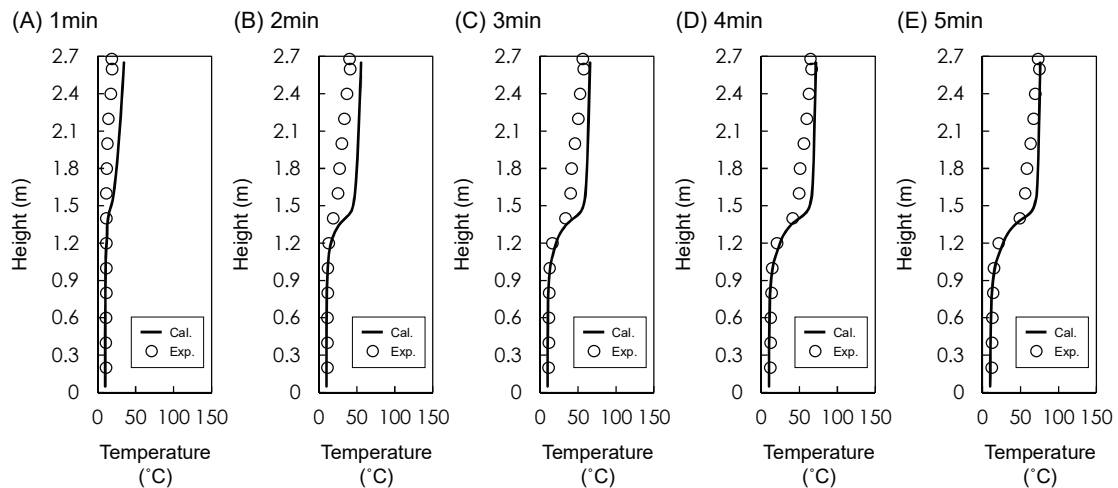


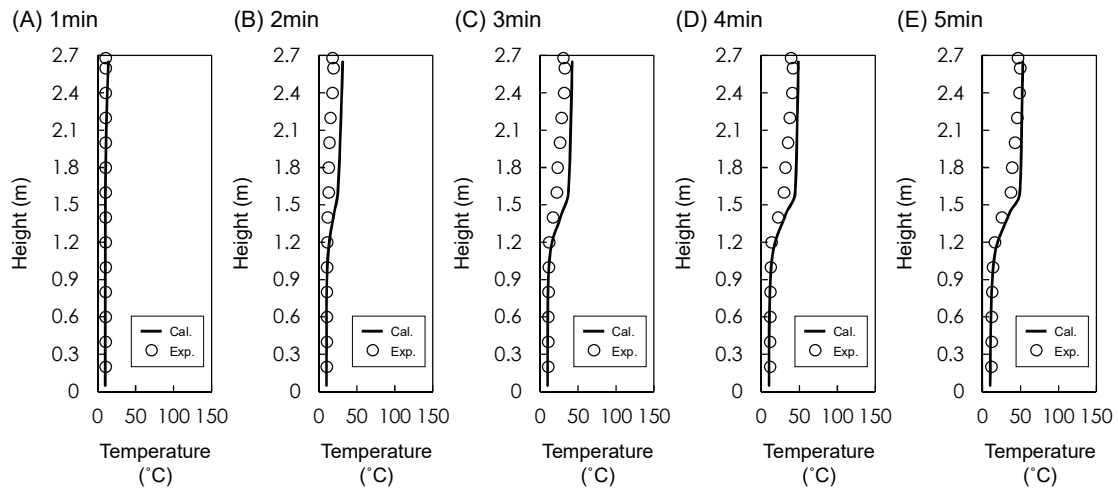
図 11 気体温度の鉛直分布の予測結果と実験結果¹⁹⁾の比較

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>

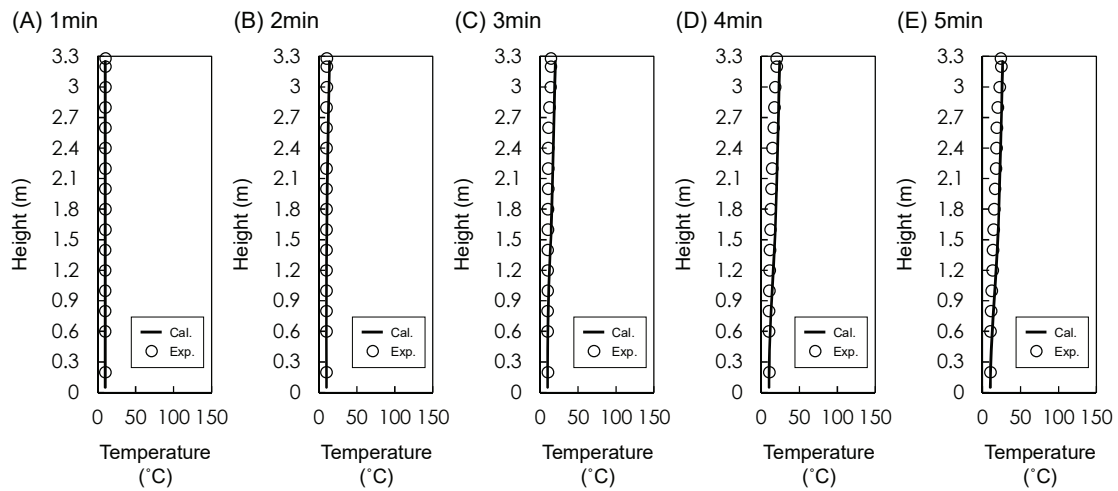


図 11 続き

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⁾。

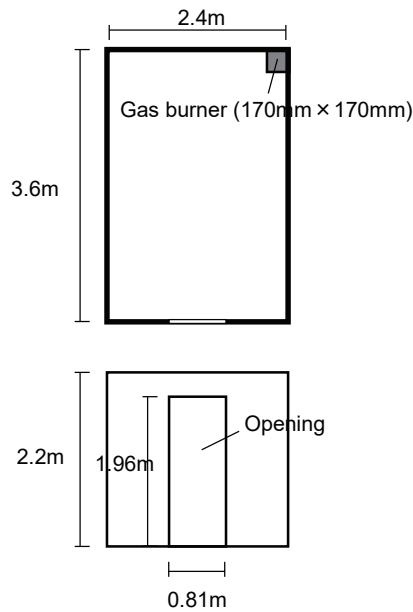


図 12 内装を部分的に木質化した小規模区画の燃焼拡大実験¹⁾ で用いられた実験装置

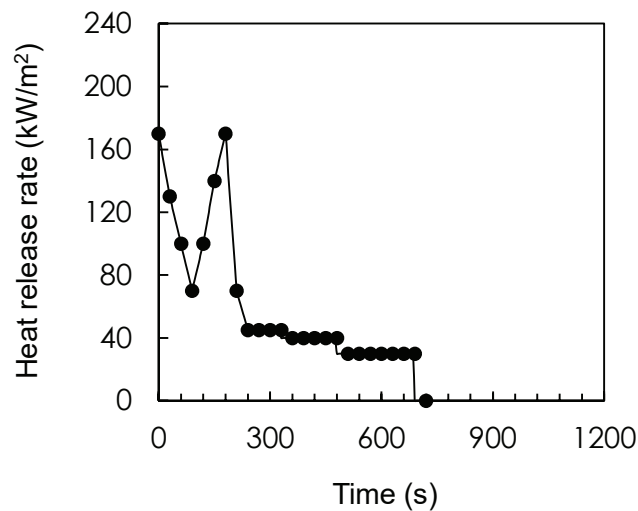


図 13 合板（厚さ 7mm）の単位面積あたりの発熱速度の時刻歴の設定³⁵⁾

(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

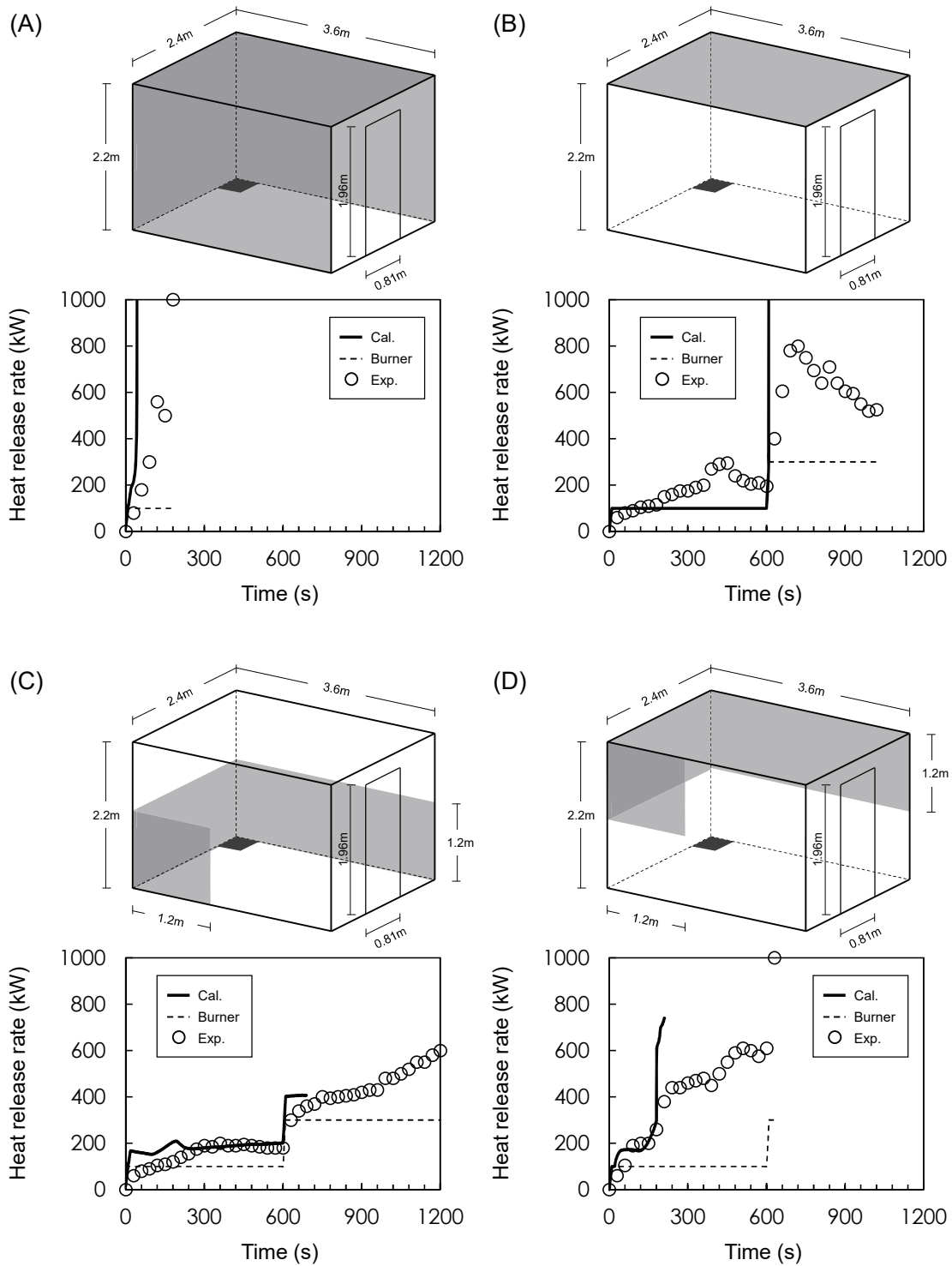


図 14 区画内の発熱速度の予測結果と実験結果¹⁾の比較 (灰塗り：木質化した部分)

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。

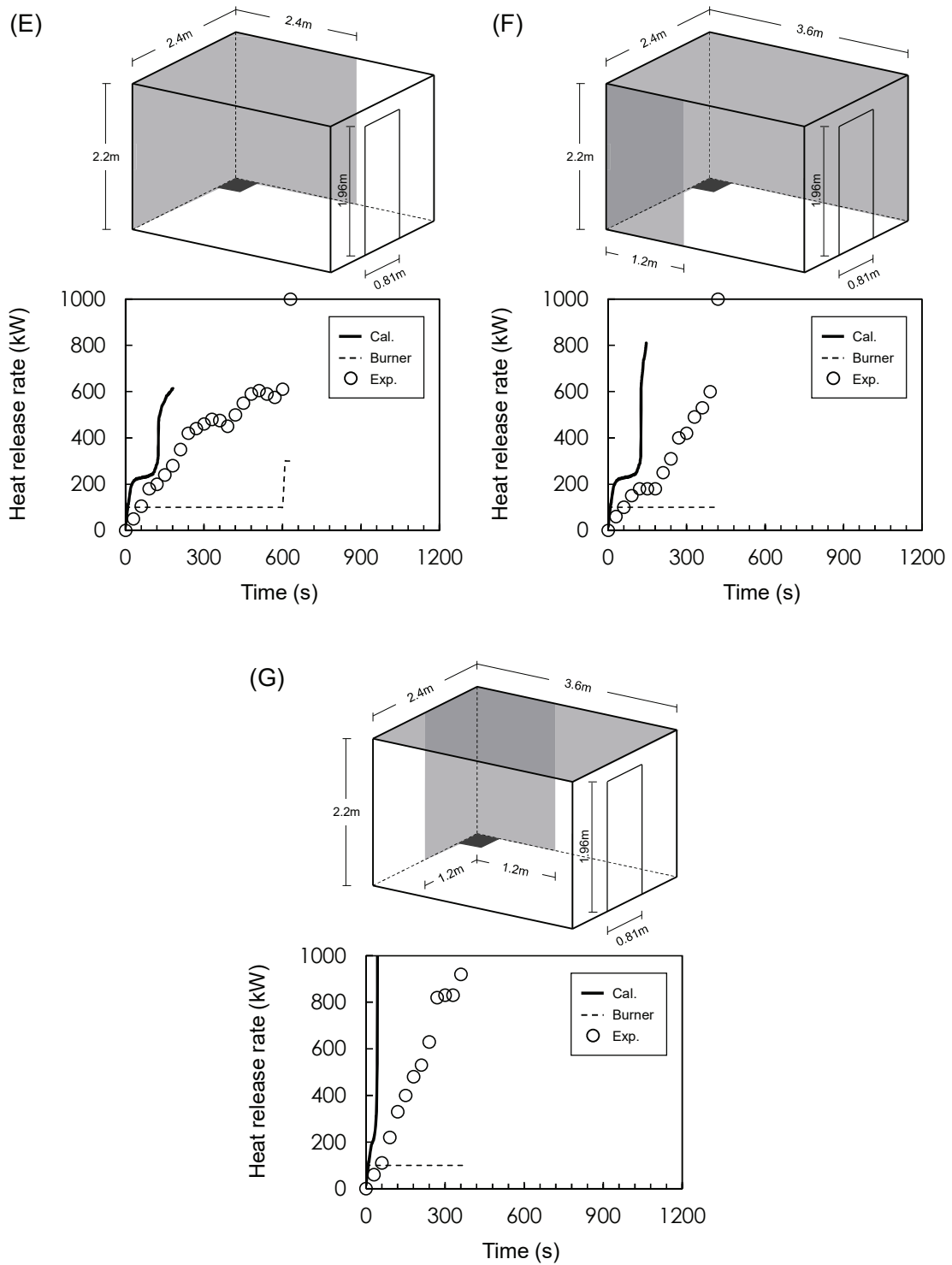


図 14 続き

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

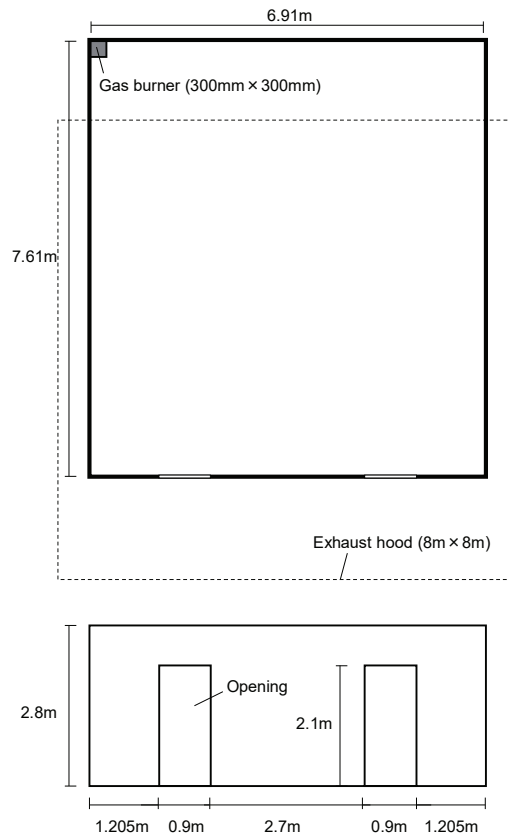


図 15 内装を部分的に木質化した大規模区画の燃焼拡大実験²⁾ で用いられた実験装置

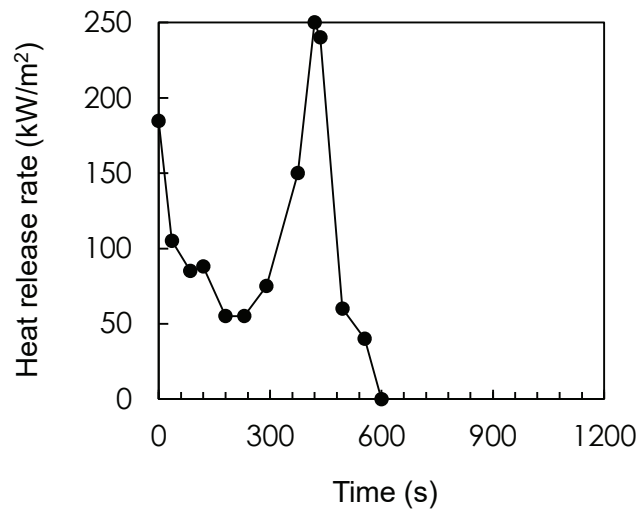


図 16 スギ (厚さ 15mm) の単位面積あたりの発熱速度の時刻歴の設定³⁷⁾

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

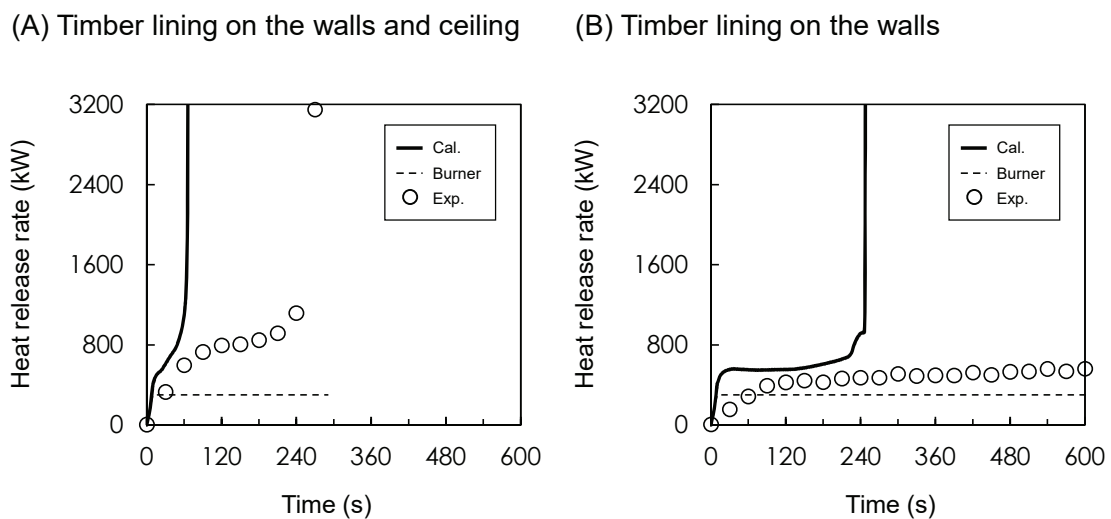


図 17 区画内の発熱速度の予測結果と実験結果²⁾の比較

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。