区画間の火災拡大を考慮した建物燃焼性状予測モデル

A BURNING MODEL FOR THE FIRE INVOLVED BUILDING
WITH REGARD TO THE ROOM-TO-ROOM FIRE SPREAD

樋本 圭佑*, 田中 哮義**

Keisuke HIMOTO and Takeyoshi TANAKA

A model for predicting burning behavior in multi-room buildings is developed with emphasis on room-to-room fire spread. In the model, building fire is considered as an ensemble of multiple room fires, and a one-zone method is applied to simulate the fire behavior of component rooms. The spread of fire is described as the ignition of combustible due to heat transfer from (1) hot gas of adjacent compartment involved in fire, and (2) external flame ejected from downstairs compartment. A model of burn-through of partitioning walls/doors, which may result the increase in the mass and heat transport, is also introduced. The fire behaviors in a building composed of eleven rooms are simulated. The results are compared with the full scale experimental data in a literature, showing reasonable agreement after some adjustments of the unknown burn-through temperatures T_{BT} and burn-through rate coefficient χ_{BT} of wall/door materials.

Keywords: Compartment Fire, Building Fire, Urban Fire, Burn-through, Fire Spread, Zone Model

区画火災, 建物火災, 都市火災, 燃え抜け, 火災拡大, ゾーンモデル

1 研究の目的と背景

現在のように建築部材や構法が多様化した市街地において、地震時や強風時に発生する都市火災の危険性を評価するには、物理的な延焼予測モデルの開発が不可欠である。都市火災は市街地を構成する個々の建物火災の集合であるから、延焼モデルの開発には、まず建物火災性状の数値的な予測手法の開発が前提となる。

一般の建物火災を対象とした火災性状予測モデルはこれまでも数多く開発され、建築物の防災性能評価等に利用されている。中でも室(区画)を一つもしくは二つの検査体積に分割するゾーンモデル^{1)~6)}は、様々な火災状況に適用され、その実用性が確かめられている。こうした実績のある計算手法を発展させることで、より効果的に信頼性の高い延焼モデルを構築することが可能になると考えられる。

ところで、一般に区画火災性状は、内部に積載される可燃物の燃焼・発熱状態によって時系列に変化する。これは、初期、成長期、盛期、終息期のように、いくつかの特徴的な様相を呈する過程に分類されることが多いが、従来の建物単体の火災を扱ったモデルでは、これらを部分的にモデル化することで防災性能評価ツールとしての実務上の目的を達成してきた。すなわち、避難安全を検証する上では、火災初期の煙流動性状を予測出来れば十分であったし、構造材の耐火性能を検証する上では、発熱が最も激しくなる盛期の火災性状に的を絞ったモデル化を行えばよかった。しかし、複数の区画火災が並列的に進行する都市火災では、

様々な燃焼状態の区画が混在しており、これらが相互に熱的な影響を及ぼしあうことが考えられる。したがって都市火災性状の予測を行うには、火災の進行過程に対応させたモデルではなく、火災の初期から終息期に至るまでの経時的な予測モデルが必要となる。

こうした観点から、筆者らは新しい区画火災モデルの構築を行ってきたが、既報では区画が単独で燃焼する状況を想定していた⁷⁾。そこで本研究では、隣接する区画間の火災拡大を考慮することで、これまでのモデルを複数室からなる建物の燃焼性状を予測可能なモデルへと進展させる。次いで、この計算結果を既往の実大火災実験結果⁸⁾と比較することで、モデルの有効性を検証する。

2 建物燃焼モデル

ここでは、住宅のように比較的小規模な建物内で発生する火災を想定し、一層ゾーンモデルに基づく定式化を行う。本モデルの概要を示したものが図1である。ある区画から出火した火災は当該区画の温度を上昇させると同時に、開口や壁などの区画境界を經由して隣接する区画を加熱する。このとき、開口を經由して隣接区画へと伝えられた熱は開口周辺に積載された可燃物に対して局所的に強い加熱を与える。これにより可燃物が温度を上昇させ、着火することで区画間の延焼が起こる。こうした区画間の延焼が連鎖的に繰り返されることで、区画火災は建物全体火災へと発展する。

* 京都大学大学院 博士後期課程・工修

** 京都大学防災研究所 教授・工博

Graduate School, Kyoto University, M. Eng.
Prof., DPRI, Kyoto University, Dr. Eng.

2.1 区画の燃焼性状

隣接する区画間の質量および熱の移動を加味すれば、建物内の任意の区画 i に充満する気体の質量収支および熱量収支は、

$$\frac{d}{dt}(\rho_i V_i) = \sum_j (\dot{m}_{ji} - \dot{m}_{ij}) + \dot{m}_{B,i} + \dot{m}_{S,i} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}(c_p \rho_i T_i V_i) = & \dot{Q}_{B,i} - \dot{Q}_{F,i} - \sum_j (\dot{Q}_{D,ij} + \dot{Q}_{M,ij}) \\ & + \sum_j (c_p \dot{m}_{ji} T_j - c_p \dot{m}_{ij} T_i) + c_p \dot{m}_{B,i} T_P + c_p \dot{m}_{S,i} T_S \end{aligned} \quad (2)$$

のように表すことができる。ここで、 ρ は気体密度、 V は区画容積、 $\dot{m}$ は開口流量、 $\dot{m}_B$ は可燃性ガスの供給速度(燃焼速度)、 $\dot{m}_S$ は可燃物表面に形成される炭化層の反応速度(表面燃焼速度)、 c_p は気体の定圧比熱、 T は区画内温度、 $\dot{Q}_B$ は可燃性ガスの燃焼に伴う発熱速度、 $\dot{Q}_F$ 、 $\dot{Q}_D$ 、 $\dot{Q}_M$ はそれぞれ可燃物、開口、壁や扉などといった区画境界部材への輻射および対流熱伝達による失熱速度、 T_P 、 T_S はそれぞれ可燃物の熱分解温度、炭化層の表面温度である。ただし Σ は区画を仕切る全ての境界について和を取ることを表している。また、下付き文字 j は区画 i に隣接する空間であり、 ij のように下付き文字が連続する場合は質量・熱の移動する方向を示している。

次に、酸素($=O$)および可燃性ガス($=F$)に関する化学種の保存式は、 Y を化学種濃度、 $\dot{\Gamma}$ を生成速度として次のように表される。

$$\frac{d}{dt}(\rho_i V_i Y_{X,i}) = \sum_j (\dot{m}_{ji} Y_{X,j} - \dot{m}_{ij} Y_{X,i}) + \dot{\Gamma}_{X,i} \quad (X=O, F) \quad (3)$$

式(1)~(3)を変形すれば、

$$\begin{aligned} \frac{dT_i}{dt} = & \frac{T_i}{c_p \rho_i T_{\infty} V_i} [\dot{Q}_{B,i} - \dot{Q}_{F,i} - \sum_j (\dot{Q}_{D,ij} + \dot{Q}_{M,ij}) \\ & + \sum_j c_p \dot{m}_{ji} (T_j - T_i) + c_p \dot{m}_{B,i} (T_P - T_i) + c_p \dot{m}_{S,i} (T_S - T_i)] \end{aligned} \quad (4)$$

$$\frac{dY_{X,i}}{dt} = \frac{T_i}{\rho_i T_{\infty} V_i} [\sum_j \dot{m}_{ji} (Y_{X,j} - Y_{X,i}) + \dot{\Gamma}_{X,i} - (\dot{m}_{B,i} + \dot{m}_{S,i}) Y_{X,i}] \quad (5)$$

のように、区画内温度 T_i と化学種濃度 $Y_{X,i}$ ($X=O, F$) の時間変化式が得られる。ここでは、これらを時間積分することにより時々刻々の火災性状計算を行う。

2.2 可燃物の燃焼・発熱

(1) 燃焼速度

熱分解を起こして可燃性ガスを放出する可燃物を、家具や衣類といった可搬性の収納可燃物($=L$)と、建物構造物などの固定可燃物($=M$)とに分類する。それぞれの燃焼速度を $\dot{m}_{B,L}$ 、 $\dot{m}_{B,M}$ で表せば、区画全体の燃焼速度 $\dot{m}_B$ はそれらの和をとって次のように表される。

$$\dot{m}_B = \dot{m}_{B,L} + \dot{m}_{B,M} \quad (6)$$

ここでは、収納可燃物、固定可燃物の双方について木質系材料を想定したモデル化を行うが、このうち収納可燃物の燃焼速度 $\dot{m}_{B,L}$ については筆者らがこれまでに提案したモデルに基づき算出する^{7)(注1)}。一方、固定可燃物の燃焼速度 $\dot{m}_{B,M}$ については、後述するように区画境界部材内部の熱伝達性状と関連付けてモデル化する。

収納可燃物の燃焼速度 $\dot{m}_{B,L}$ を見積もる際に必要となる正味の入射熱流束 $\dot{q}_{net}''$ は、収納可燃物が区画の平均温度 T_i で代表される気体から、均等な加熱を受けるものとして次のように計算する。

$$\dot{q}_{net}'' = \varepsilon_s \sigma (T_i^4 - T_s^4) + h_s (T_i - T_s) \quad (7)$$

ただし、 ε_s は可燃物表面の輻射率、 h_s は対流熱伝達率、 σ は Stefan-Boltzmann 定数である。ここで、 w_F を火災荷重、 A_{floor} を区画の床面積とすれば、既往の実態調査結果より可燃物表面積 A_F は、

$$A_F = 0.70 w_F^{1/3} A_{floor} \quad (8)$$

なる関係式⁹⁾で表されるから、区画内ガスから可燃物への正味の失熱速度 $\dot{Q}_F$ は式(7)、(8)を用いて次のように計算される。

$$\dot{Q}_F = \dot{q}_{net}'' A_F \quad (9)$$

(2) 発熱速度

区画へ放出された可燃性ガスは、気相中の酸素と反応して発熱する。この反応における化学的反応速度は十分速く、実質的な反応速度は物質の供給速度に依存すると考えると、発熱速度 $\dot{Q}_B$ は、

$$\dot{Q}_B = \min[\Delta H_O (\sum_j \dot{m}_{ji} Y_{O,j}) - \dot{Q}_S, \Delta H_F (\dot{m}_B + \sum_j \dot{m}_{ji} Y_{F,j})] \quad (10)$$

ただし、右辺第1項は全ての流入酸素が反応した場合の発熱速度であり、そのうち $\dot{Q}_S = \Delta H_S \dot{m}_S$ は炭化層の表面燃焼による酸素消費分を表す。また、右辺第2項は隣接区画からの流入分も含めた可燃性ガスの総発熱速度を表している。なお、 ΔH_O 、 ΔH_S 、 ΔH_F はそれぞれ酸素、炭化層、可燃性ガスの単位反応量あたりの発熱量である。

式(11)の結果を用いれば、酸素と可燃性ガスの生成速度 $\dot{\Gamma}_O$ 、 $\dot{\Gamma}_F$ がそれぞれ次のように求まる。

$$\dot{\Gamma}_O = -\frac{\dot{Q}_B + \dot{Q}_S}{\Delta H_O} \quad (11)$$

$$\dot{\Gamma}_F = \dot{m}_B - \frac{\dot{Q}_B}{\Delta H_F} \quad (12)$$

(3) 収納可燃物の着火(区画間の延焼)

収納可燃物の着火、すなわち区画間の延焼は、開口周辺にある収納可燃物 $A_{o,i}$ が、隣接する火災室の火災や区画内ガス、ならびに直下階開口から噴出する火災により局所的に強い輻射加熱 $\dot{q}_{o,i}''$ を受け、着火することで起こるものとする。隣接する火災区画の温度を T_j 、噴出火災

図1 建物燃焼モデルの概要

からの熱流束を $\dot{q}_{d,0}''$ とすれば, $\dot{q}_{d,0}''$ は,

$$\dot{q}_{d,0}'' = \sigma(T_j^4 - T_s^4) + \dot{q}_{ef,d}'' \quad (13)$$

と計算される。このときの受熱面積 $A_{B,0}$ は, 露出表面積 A_F のうち開口面積 A_D に比例する程度の大きさであると考え,

$$A_{B,0} = A_F \cdot \frac{A_D}{A_{total}} \quad (14)$$

とモデル化する。ここに, A_{total} は区画の総表面積である。

こうして, 開口周辺で局所的(面積 $A_{B,0}$)に始まった火災は徐々にその面積を拡大し, 区画全体火災へと発展する。ここでは, 可燃物表面積 A_F のうち加熱対象となる部分の面積を A_B と定め, これがある一点を中心として同心円状に拡大すると仮定して,

$$\frac{dA_B}{dt} = 2\pi r_B \cdot v_B \quad (15)$$

とする。ただし, π は円周率, r_B は A_B を円とみなした場合の半径, v_B は加熱範囲先端の同心円方向の移動速度である。なお, v_B は火災の燃え広がりに速度に関する結果¹⁰⁾を用いることとし, 区画内部の熱的状況に応じて次のように計算する。

$$v_B = [C_B(\dot{q}_c'' - \dot{q}_f'')]^2 \quad (16)$$

ここに, C_B は速度係数, $\dot{q}_c''$ は可燃物の着火限界熱流束である。

2.3 開口を経由した質量・熱の移動

開口流量は, 火災発熱により生じる区画間の圧力差 Δp に基づき決定する。この場合, ある空間 i と隣接する空間 j との間の開口流量 $\dot{m}_{ij}$, $\dot{m}_{ji}$ は開口部における圧力分布パターンに応じて表 1 のように計算できる³⁾。こうした換気による高温ガスの移流が, 建物内各室の温度上昇にもたら

表 1 圧力分布パターンと開口流量³⁾

判別条件	パターン	計算式
$\rho_i < \rho_j$	$Z_N \leq H_b$	$\dot{m}_{ij} = \alpha B_D (H_u - H_b) \sqrt{2\rho_i \Delta p \left(\frac{H_u + H_b}{2} \right)}$ $\dot{m}_{ji} = 0$
	$H_b < Z_N < H_u$	$\dot{m}_{ij} = \alpha B_D (H_u - Z_N) \sqrt{2\rho_i \Delta p \left(\frac{H_u + Z_N}{2} \right)}$ $\dot{m}_{ji} = \alpha B_D (Z_N - H_b) \sqrt{2\rho_j \Delta p \left(\frac{Z_N + H_b}{2} \right)}$
	$H_u \leq Z_N$	$\dot{m}_{ij} = 0$ $\dot{m}_{ji} = \alpha B_D (H_u - H_b) \sqrt{2\rho_j \Delta p \left(\frac{H_u + H_b}{2} \right)}$
$\rho_i = \rho_j$	$P_{i,0} \leq P_{j,0}$	$\dot{m}_{ij} = 0$ $\dot{m}_{ji} = \alpha B_D (H_u - H_b) \sqrt{2\rho_i \Delta p \left(\frac{H_u + H_b}{2} \right)}$
	$P_{i,0} > P_{j,0}$	$\dot{m}_{ij} = \alpha B_D (H_u - H_b) \sqrt{2\rho_i \Delta p \left(\frac{H_u + H_b}{2} \right)}$ $\dot{m}_{ji} = 0$
$\rho_i > \rho_j$	$Z_N \leq H_b$	$\dot{m}_{ij} = 0$ $\dot{m}_{ji} = \alpha B_D (H_u - H_b) \sqrt{2\rho_j \Delta p \left(\frac{H_u + H_b}{2} \right)}$
	$H_b < Z_N < H_u$	$\dot{m}_{ij} = \alpha B_D (Z_N - H_b) \sqrt{2\rho_j \Delta p \left(\frac{Z_N + H_b}{2} \right)}$ $\dot{m}_{ji} = \alpha B_D (H_u - Z_N) \sqrt{2\rho_i \Delta p \left(\frac{H_u + Z_N}{2} \right)}$
	$H_u \leq Z_N$	$\dot{m}_{ij} = \alpha B_D (H_u - H_b) \sqrt{2\rho_i \Delta p \left(\frac{H_u + H_b}{2} \right)}$ $\dot{m}_{ji} = 0$

α : 開口流量係数, B_D : 開口幅, H_u : 開口上端高さ, H_b : 開口下端高さ, Z_N : 中性帯高さ, $p_{i,0}$: 区画 i の基準圧力, $p_{j,0}$: 区画 j の基準圧力

す影響は熱収支式(2)に示すとおりである。ただし, 各区画の基準圧力 $p_{i,0}$, $p_{j,0}$ は, 全ての室の熱収支式(2)を連立条件式として解くことで決定する。

一方, 空間 i から隣接する空間 j への輻射による正味の失熱速度 $\dot{Q}_{D,ij}$ は, 噴出火災からの入射熱流束を $\dot{q}_{ef,d}''$ (空間 j が屋外である場合)として次のように計算される。

$$\dot{Q}_{D,ij} = [\sigma(T_i^4 - T_j^4) - \dot{q}_{ef,d}''] \cdot A_D \quad (17)$$

2.4 区画境界部材を経由した熱の移動

壁や扉といった境界部材と区画内ガスとの間では, 輻射と対流熱伝達により熱が伝達される。ここでは, 空間 i から, 空間 i と隣接する空間 j とを隔てる境界部材への正味の失熱速度 $\dot{Q}_{M,ij}$ を次のように計算する。

$$\dot{Q}_{M,ij} = [\varepsilon_M \sigma(T_i^4 - T_{M,i}^4) + h_M(T_i - T_{M,i}) - \dot{q}_{ef,M}''] \cdot A_M \quad (18)$$

ここに, ε_M , h_M はそれぞれ部材表面の輻射率, 対流熱伝達率, $T_{M,i}$ は区画 i 側の部材表面温度, $\dot{q}_{ef,M}''$ は噴出火災からの入射熱流束(空間 j が屋外である場合), A_M は部材の露出面積である。

式(18)で表される加熱を受けた部材は, 温度を上昇させ, (i) 含水蒸発, (ii) 熱分解に伴う可燃性ガスの生成(木質系材料のみ)を経て, (iii) 燃え抜けに至り, 輻射熱伝達や換気の経路となる新たな開口を形成する。ここでは, こうした状態変化を部材温度 T_M に応じてモデル化する(図 2)。まず, 基準となる温度 $T_{M,0}$ は, 境界部材を無限平板とみなした熱伝導方程式を解くことで求める。

$$\rho_M c_M \frac{\partial T_M}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_M \frac{\partial T_M}{\partial x} \right) - \dot{q}_v'' - \dot{q}_p'' \quad (19)$$

ここに, k_M , ρ_M , c_M はそれぞれ部材の熱伝導率, 密度, 比熱であり, $\dot{q}_v''$, $\dot{q}_p''$ はそれぞれ単位体積あたりの水分の蒸発, 熱分解に伴う熱の消費速度である。

(1) 含水蒸発

含水蒸発は蒸発温度 T_v ($=100[^\circ\text{C}]$) を中心に前後 $\Delta T_v/2$ の間で起こるものとする。この間に蒸発される単位体積あたりの含水量は, 含水率 w_v , 部材の絶対比重 $\rho_{M,0}$ を用いて $w_v \rho_{M,0}$ と表されるが, これが温度幅

図 2 部材温度と水分蒸発・熱分解・燃え抜けの関係

ΔT_v の間に均一に分布していると仮定すると¹¹⁾, 単位時間当たりの部材密度変化 $d\rho_M/dt$ は次式のように表される。

$$\frac{d\rho_M}{dt} = \frac{d\rho_M}{dT_M} \cdot \frac{dT_M}{dt} = \left(-\frac{w_v \rho_{M,0}}{\Delta T_v} \right) \cdot \frac{dT_M}{dt} \quad (20)$$

さらに, 水分の蒸発潜熱を L_v とすれば, 水分蒸発に伴う熱の消費速度 $\dot{q}_v''$ は次のように表される。

$$\dot{q}_v'' = -L_v \frac{d\rho_M}{dt} = L_v \left(\frac{w_v \rho_{M,0}}{\Delta T_v} \cdot \frac{dT_M}{dt} \right) \quad (21)$$

(2) 熱分解と固定可燃物の燃焼速度

木質系材料の場合, 境界部材は熱分解を起こして可燃性ガスを放出するものとする。水分の蒸発の場合と同様, 熱分解は熱分解温度 T_p を中心に前後 $\Delta T_p/2$ の間で起こるものとする。部材の絶乾比重に対する熱分解を起こす成分の比率 w_p を用いると, この間に熱分解を起こす単位体積あたりの成分量は $w_p \rho_{M,0}$ と表されるが, これが温度幅 ΔT_p の間に均一に分布していると仮定すると, 単位時間当たりの部材密度変化 $d\rho_M/dt$ は次式で表される。

$$\frac{d\rho_M}{dt} = \frac{d\rho_M}{dT_M} \cdot \frac{dT_M}{dt} = \left(-\frac{w_p \rho_{M,0}}{\Delta T_p} \right) \cdot \frac{dT_M}{dt} \quad (22)$$

さらに, 熱分解潜熱を L_p とすれば, 熱分解に伴う熱の消費速度 $\dot{q}_p''$ は次のように表される。

$$\dot{q}_p'' = -L_p \frac{d\rho_M}{dt} = L_p \left(\frac{w_p \rho_{M,0}}{\Delta T_p} \cdot \frac{dT_M}{dt} \right) \quad (23)$$

このとき, 放出された可燃性ガスは区画へ供給され, 火災発熱の燃料となるが, 先に式(6)で示した固定可燃物の燃焼速度 $\dot{m}_{B,M}$ は,

$$\dot{m}_{B,M} = -A_M \delta_M \frac{d\rho_M}{dt} = A_M \delta_M \left(\frac{w_p \rho_{M,0}}{\Delta T_p} \cdot \frac{dT_M}{dt} \right) \quad (24)$$

と計算できる。ここで, δ_M は部材厚さである。

(3) 燃え抜けによる新たな開口の形成

一般に燃え抜けには, 亀裂が生じて脱落する場合, 熔融・燃焼する場合, 収縮を起こす場合などがあり, その機構は様々ではない。しかし簡単のため, こうした状態変化が顕著に現れる温度が材料ごとに抽出可能であると仮定する。すなわち燃え抜けは, 部材温度が T_{BT} に達した時点で始まり, その後は部材への単位体積あたりの入射熱量 $\dot{q}_M''$ に比例して起こるものとする。このとき, 単位時間当たりの部材密度変化 $d\rho_M/dt$ を次のように表す。

(a) 開口経路の質量・熱移動 (b) 燃え抜け開口の面積拡大

図3 燃え抜けにより新たに形成される開口

$$\frac{d\rho_M}{dt} = \chi_{BT} \cdot \dot{q}_M'' \quad (25)$$

ここに, χ_{BT} は比例係数(燃え抜け速度係数)である。なお, 同様の考え方は, Harmathy¹²⁾, 原田ら¹³⁾によっても示されている^(注2)。

この間の密度変化は, 平板表面と直角に欠損部分を生じさせることとし, 平板の欠損前の面積に対する欠損部分の面積の比を欠損率 Ψ と定義する。ここでは, 燃え抜け前の部材密度が $(1-w_p)\rho_{M,0}$ であることを考慮し, Ψ を次のように表す(図2)。

$$\Psi = \frac{(1-w_p)\rho_{M,0} - \rho_M}{(1-w_p)\rho_{M,0}} \quad (26)$$

欠損率 Ψ を用いれば面材の欠損面積は $\Psi \cdot A_M$ と表されるが, 区画境界は複数の異なる面材から構成されることが一般には考えられる。そこで, 図3に示すように, 各構成面材の欠損面積 $\Psi \cdot A_M$ の最小値を, 区画境界上に新たに形成される開口の面積 A_D とみなし,

$$A_D = \min[\Psi_k \cdot A_M] \quad (k=1 \sim N) \quad (27)$$

とする。ただし, N は区画境界の構成面材の数である。なお燃え抜けによる欠損は, 面材の重心を中心として, 長手, 短手方向に等速度 dD/dt で開口面積 A_D を拡大していくものとする。 dD/dt は, A_D の拡大速度 dA_D/dt を周長で割ることにより,

$$\frac{dD}{dt} = \frac{dA_D/dt}{2(B_D + H_D)} \quad (28)$$

と計算する。ただし, B_D は開口幅, H_D は開口高さである。

2.5 噴出火炎による熱伝達

噴出火炎は, (i)幅が開口幅 B_D に等しく, (ii)高さ H_d が開口上端から火災中心軸の温度上昇が 300K の位置までの^(注3), (iii)開口面と平行な長方形平板, に近似する。図4は火災区画上方の開口部が, 噴出火炎によって加熱される様子を示したものである。開口部は, 開口部を噴出火炎面に対して投影した部分(被覆火炎面)から放出される輻射熱流束 $\dot{q}_{ef,D}''$ を受けるものと考え, これを次のように表す。

$$\dot{q}_{ef,D}'' = \varepsilon_M \sigma \left[(T_{ef,u}^4 + T_{ef,b}^4) / 2 \right] \quad (29)$$

ただし, $T_{ef,u}$, $T_{ef,b}$ はそれぞれ被覆火炎面の上端, ならびに下端位置の

(a) 断面

(b) 立面

図4 開口部へ入射する噴出火炎の熱流束

温度である。これらの基準温度 T_∞ からの温度上昇 ΔT_q は、

$$\Delta T_q = \Theta \cdot \frac{(\dot{Q}_q T_\infty / c_p \rho_q^2 g)^{1/3}}{r_0^{2/3}} \quad (30)$$

より算出する¹⁴⁾。ここに、 Θ は無次元温度、 $\dot{Q}_q$ は開口部からの熱の放出速度、 ρ_q は火炎の密度、 g は重力加速度、 r_0 は火炎噴出面の等価半径である。このうち $\dot{Q}_q$ は、換気による火災区画からの熱量の持ち出しと、未燃焼ガスの区画外部での発熱を考慮して、

$$\dot{Q}_{ef} = c_p \dot{m}_f (T_f - T_\infty) + \Delta H_f \dot{m}_f Y_f \quad (31)$$

と計算する。また、無次元温度 Θ は、文献[14]の結果から回帰的に導かれた次の関係式¹⁵⁾を用いて計算する。

$$\Theta = \begin{cases} 0.5 & (z/r_0 < 0.3) \\ 0.45(z/r_0)^{-0.1} & (0.3 \leq z/r_0 < 3.0) \\ 1.2(z/r_0)^{-1} & (3.0 \leq z/r_0) \end{cases} \quad (32)$$

以上、噴出火炎から上階の開口部に入射する熱流束をモデル化したのが、外壁面への入射熱流束についても同様に扱う。

3 建物燃焼モデルの検証

ここでは、建物燃焼モデルの計算結果と、中村により実施された 2 階建て住宅の実大火災実験結果⁸⁾との比較を行い、モデルの検証を行う。

3.1 実験の概要

実験建物は 1 階床面積 54.38m²、2 階床面積 62.02m² の 2 階建て鉄鋼系プレハブ住宅(エヌケーホーム社製)であり、図 5 はその平面図である。建物は 1 階に 6 室、2 階に 5 室の計 11 室からなっており、出火室は 1 階台所とされた。なお、実験当日の外気温は $T_\infty = 20.0^\circ\text{C}$ 、平均して 0.9~1.5m/s の風が北東から吹いていた。

図 5 実験で使された建物の平面図(単位:mm)

表 2 各室の火災荷重

階	室	火災荷重 [kg/m ²]	階	室	火災荷重 [kg/m ²]
1	和室 A	34.0	2	和室 B	32.1
	玄関ホール	6.0		ホール	6.0
	居間	33.1		洋室 A	27.9
	浴室・便所	0.0		洋室 B	29.6
	台所(出火室)	31.8		洋室 C	29.5
	食事室	27.6			

(1) 可燃物条件

各室には、用途に合わせた家具、ならびに木材(腐材)が収納された。単位面積あたりの積載木材重量(火災荷重)は表 2 に示す通りである。ただし表 2 では、プラスチック系製品の単位消費量あたりの発熱量が近似的に木材の 2 倍であるとして、同発熱量を有する木材の重量に換算されている。

(2) 開口部の開放状態

内壁面上の開口部については、扉のない 1 階の浴室・便所・玄関ホール、台所・食事室の開口、および 2 階の和室 B・ホール、ホール・洋室 B の開口以外全て閉鎖された。外壁面上の開口については、台所の二つある片開き窓の一方、および食事室の掃き出し窓が半分開放された。その他の外壁開口部は全て閉鎖された。なお、点火後 23 分には、居間の掃き出し窓の一枚が、半分だけ開放された。

(3) 着火条件

台所のほぼ中央には、クリブ木材(2×2×60cm×60 本)が井桁状に積み上げられた。その最下段の隙間には、メチルアルコールを含浸させたインシュレーションボードが 11 本挿入され、点火された。

3.2 計算条件

計算条件には実験条件に準ずる値を設定した。ただし、実験当日に吹いていた風は弱く、火災性状へ及ぼした影響は小さかったと考え、計算では無風として扱った。なお、本モデルで使用した物性値等は表 3 に示す通りである。

(1) 開口部材および壁部材

実験では、区画境界ごとに厚みや材種といった仕様が異なっていた。そこで、仕様のほぼ等しい区画境界を図 6 に示す開口部材 5 種類、図 7 に示す壁部材 4 種類に分類した。ただし、図 6 に示す開口部材①~⑤の設置場所は、図 5 の平面図に示した番号に対応している。これらを構成する各材料の物性値は、文[16]~[18]を参考に表 4 に示すように設定したが、燃え抜け温度 T_{br} ならびに燃え抜け速度係数 χ_{br} の値は合理的な根拠の基に値を設定することが難しい。ただしこれらは、区画間の延焼開始時間、および延焼直後の区画の温度上昇速度に対してそれぞれ支配的な要因になると考えられることから、本報では実験結果と計算結果が一致するように試行錯誤的に値を調整し、 T_{br} については表 4、 χ_{br} については表 3 に示す値をとるものとした(注 4)。

(2) 初期火源

初期火源には、計算による出火室(台所)の温度上昇速度が実験結果と一致するように、次の発熱速度 $\dot{Q}_{b,0}$ を与えた。

$$\dot{Q}_{b,0} = \begin{cases} 0.01t^2 & (t < 200[s]) \\ 400 & (200[s] \leq t < 500[s]) \\ 0 & (500[s] \leq t) \end{cases} \quad (33)$$

3.3 実験結果との比較

天井高さが 2.38m の各室のほぼ中央、床上 1.1m の高さで測定された温度との比較を行ったものが図 9(a)~(d)である(注 5)。ただし、実線は計算値、点線は実験値を示している。熱電対の断線により測定結果は各室が燃焼を開始して 10 数分ほどで途切れている。このため全体的な比較を行うことはできないが、実験値が得られている範囲では実験値と計算値が概ね一致する結果が得られた。

(1) 計算結果に関する考察(1 階の火災性状)

(a) 台所(出火室)

出火室である台所の温度は、出火から7分後には温度が600℃近くまで上昇し、この高温状態が出火後30分を経過するまで続いた。この間、区画内部の発熱が最も激しかったと考えれば、盛期火災状態は約20分間続いたことになる。その後、区画内温度は低下したが、出火から55分を経過するあたりまで区画内温度が400℃を超える状態が続いており、温度低下の度合いは緩やかであった。これは、建物内の他の火災区画からの伝熱や、炭化した可燃物の表面燃焼による加熱が継続したためと考えられる。

(a)部材① (b)部材② (c)部材③ (d)部材⑤ (e)部材⑥

図6 開口部材の構成(単位:mm)

(a)外壁 (b)内壁 (c)床および屋根

図7 壁部材の構成(単位:mm)

表3 建物燃焼モデルで使用する物性値

ΔH_D	単位消費量あたりの発熱量(酸素)	13100[kJ/kg]
ΔH_F	単位消費量あたりの発熱量(可燃性ガス)	12600[kJ/kg]
ΔH_S	単位消費量あたりの発熱量(炭素残渣)	32000[kJ/kg]
C_B	加熱範囲拡大の速度係数	$2.0[(s/m)^{1/2} \cdot m^2/kW]$
$\dot{q}_\infty$	可燃物の着火限界熱流束	15[kW/m ²]
T_V	水分の蒸発温度	373[K]
ΔT_V	水分の蒸発温度幅	20[K]
L_V	水分の蒸発潜熱	2440[kJ/kg]
T_P	木質系材料の熱分解温度	573[K]
ΔT_P	木質系材料の熱分解温度幅	100[K]
L_P	木質系材料の熱分解潜熱	1700[kJ/kg]
χ_{RT}	燃え抜け速度係数	$0.002[(kJ/kg)^{-1}]$

表4 開口部材および壁部材の熱物性 (< >内は熱分解の有無を示す)

	k_M [kW/(m ² ·K)]	ρ_M [kg/m ³]	c_M [kJ/(kg·K)]	T_{BR} [K](°C)
難燃合板<O>	0.15×10^{-3}	500	1.8	873(600)
ラワン合板<O>	0.15×10^{-3}	500	1.8	873(600)
野地板<O>	0.15×10^{-3}	500	1.8	873(600)
バークティクルボード<O>	0.15×10^{-3}	500	1.8	873(600)
石膏ボード<X>	0.17×10^{-3}	700	1.13	923(650)
石綿スレート<X>	1.2×10^{-3}	1500	1.2	923(650)
石綿スレートフレキシブル板<X>	0.15×10^{-3}	700	0.8	923(650)
ロックウール吸音板<X>	0.06×10^{-3}	300	0.84	873(600)
ロックウール<X>	0.04×10^{-3}	120	0.84	873(600)
グラスウール<X>	0.04×10^{-3}	40	0.84	673(400)
網入りガラス<X>	0.78×10^{-3}	2540	0.77	673(400)
ガラス<X>	0.78×10^{-3}	2540	0.77	423(150)

(b) 食事室

食事室は、隣接する台所での出火から間もなく温度上昇を始め、出火後10分を経過してからは、台所とほぼ同様な温度経過をたどった。これは、両室の間に間仕切りがなく、両室がほとんど一体となって燃焼したことが原因と考えられる。

(c) 居間

出火後14分程で食事室との間の扉が燃え抜け、延焼が起こった。この点は実験結果とほぼ一致する結果となった。その後、計算では4分間、実験では10分間ほど、区画内温度が400℃近くで停留した。温度の停留は、居間の東側開口が閉じた状態にあったため、酸素の供給が妨げられたことが原因と考えられるが、計算では早くに開口部ガラスが燃え抜けたために停留時間に差が生じたものと考えられる。

なお、出火後20分前後に起こった居間の温度の急激な上昇と時を同じくして、台所と食事室の温度が下降している。これは、火災の急激な成長によって居間へと空気が引き込まれ、多量の外気が台所や食事室に持ち込まれたことが原因と考えられる。

(d) 玄関ホール

実験では出火後28分、計算では出火後25分程で延焼が起こり、急激な温度上昇を迎えた。区画内温度と室の配置の関係から、この場合に延焼元となりうる火災区画は台所と居間の2室が考えられるが、計算結果によると、これら2つの経路のうち居間との間の扉が燃え抜けて延焼が起こったことが確認できた。玄関ホールの温度はその後、約10分間600℃を超える高温状態に保たれたが、積載可燃物量が小さかったため、その継続時間は台所や食事室などに比べて短くなった。

(e) 浴室・便所

浴室・便所は、隣接する玄関ホールの燃焼が始まるのとほぼ同時に温度上昇を始めたが、区画内温度は相対的に低く保たれた。これは、浴室・便所に可燃物がなく、玄関ホールから流入する高温ガスが唯一重要な温度上昇要因であったためと考えられる。

(f) 和室A

実験では出火後37分程で温度上昇が始まっているものの、計算では延焼が起こらなかった。これは、玄関ホールと和室Aを隔てる扉が燃え抜けなかったためだが、この原因には、延焼元である玄関ホールの温度が実験に比べて低く見積もられていたことが可能性として考えられる。

(2) 計算結果に関する考察(2 階の火災性状)

(a) 2 階ホール

2階ホールへは、実験、計算の双方とも出火後28分前後に延焼が起こっている。1階から2階への延焼は、玄関ホールと2階ホールをつなぐ階段を経由して起こったものと考えられる。

1階から2階への延焼が起こる前の出火後23分、そして延焼が起こった後の出火後40分における、建物内部の換気の様子をそれぞれ図9(a)、(b)に示す(図8には、対応する時刻に一点鎖線を引いてある)。まず、延焼が起こる前の様子を示した図9(a)を見ると、換気の起こっている各開口を通過する流量は双方向にほぼ釣り合った状態となっている。しかし、延焼が起こった後の図9(b)を見ると、建物内に屋外→1階→階段→2階→屋外という流れが形成されていることが分かる。これは、1階から流入した外気が火災室で温められ、浮力流となって2階へ上昇したのと考えられる。こうした建物内部の気流性状により、2階各室の急激な温度上昇がもたらされたと考えられる。なお、図9(b)の斜線部は燃え抜けて開口が形成された部分を示している。こうした開口も、上階へと運ばれる高温ガス

量を増大させたものと考えられる。ただし、洋室 A の床の燃え抜け開口は、直下階である食事室からの噴出火炎により形成されたものである。

(b) 和室 B

実験、計算の双方とも出火後 28 分前後に延焼が起こっているが、これ以降の計算により得られた温度上昇は、実験値に比べて緩慢であった。これは、和室 B の外壁面上に設置された網入ガラスがすぐには燃え抜け

(a) 1 階(台所, 食事室, 居間)

(b) 1 階(玄関ホール, 和室 A, 浴室・便所)

(c) 2 階(ホール, 和室 B, 洋室 A)

(d) 2 階(洋室 B, 洋室 C)

図 8 区画内温度の比較(実線:計算値, 点線:実験値)

ず、発熱の大小を左右する酸素が十分に供給されなかったためと考えられる。本来、部材の燃え抜け温度 T_{br} は個々の状態に応じてある程度ばらつくことが予想されるが、本報では材料ごとに一定として調整したために、実験に比べて燃え抜け時間を遅く見積もった可能性がある。

(c) 洋室 A

洋室 A への延焼は、2 階ホールへの延焼とほぼ同じく出火後 28 分あたりで起こっているが、この時点で洋室 A と 2 階ホールの間は扉により隔てられている。つまり洋室 A への延焼は、2 階ホールを経由して起こったものではなく、直下の食事室からの噴出火炎によるものと考えられる。

(d) 洋室 B

洋室 B と 2 階ホールとの間には扉が設けられていなかったことから、出火後 28 分前後に 2 階ホールが燃焼を開始するとほぼ時を同じくして温度上昇を開始した。ここまでは室の配置が類似した和室 B と同じような経過をたどった。しかし、その後の区画内温度は、和室 B の温度上昇が実験値に比べて緩慢であったのに比べ、洋室 B の温度上昇は実験値と概ね一致する結果が得られた。これは、和室 B の網入ガラスの燃え抜け時間を遅く算出したのに対し、洋室 B のガラスの燃え抜け時間は適切に予測できたためと考えられる。

(e) 洋室 C

実験では出火後 40 分ほどで燃焼が開始しているものの、計算では出火後 60 分を経過するまでに洋室 C への延焼は起こらなかった。これは先に述べたように、燃え抜け温度 T_{br} の値にばらつきがあったことや、延焼元となる 2 階ホールの温度が実際より低く見積もられたことが原因となったものと考えられる。

4 まとめ

本報では、区画間の延焼を考慮した複数室建物の燃焼性予測手法を提示した。計算単位となる検査体積は建物を構成する区画にとり、区画間の延焼は、(1)火災室の高温ガス、(2)噴出火炎、からの局所的な

(a) 出火後 23 分における建物内部の換気の様子(延焼前)

(b) 出火後 40 分における建物内部の換気の様子(延焼後)

図 9 1 階から 2 階への延焼が起こる前後の換気の様子
(流量単位: [kg/s]. 斜線部は燃え抜けて開口が形成された部分.)

加熱を受けた可燃物が着火することで起こるものとした。さらに、扉や壁といった境界部材は加熱されることで燃え抜け、延焼の経路となる新たな開口を形成するものとした。

作成した建物燃焼モデルの妥当性を検証するため、モデルによる計算結果と、2 階建て住宅の実大火災実験の結果との比較を行った。区画境界部材の燃え抜け温度 T_{BT} 、ならびに燃え抜け速度係数 χ_{BT} を調整したところ、実験値と計算値が一般的に一致する結果が得られた。

＜注＞

- (1) 区画の収納可燃物は、炭化層を形成する複数の可燃物要素から構成される。各可燃物要素は、(I)着火までの温度上昇期、(II)有炎燃焼期、(III)無炎燃焼期、の時系列の過程を経て燃焼を進行させる。(I)は、可燃物が隣接する火災区画からの加熱を受けて温度を上昇させ、表面温度 T_s が熱分解温度 T_p を上回った段階で着火する過程である。(II)は、可燃物が入射熱に応じて熱分解を起こし、気相へ可燃性ガスを放出する(燃焼速度 $\dot{m}_{BL}$)過程である。このとき、可燃物表面には炭化層が形成され、未反応層への熱の入射を緩和すると同時に、表面燃焼(表面燃焼速度 $\dot{m}_s$)による発熱を起こす。これは、全ての未反応成分が消費されるまで続く。(III)は、残った炭化層が表面燃焼を継続し、緩やかに発熱する過程である。これは、全ての炭化層が消費されるまで続く。
- (2) 壁や扉などの鉛直部材と床などの水平部材への荷重のかかり方は異なるので、燃え抜けの性状も異なることが予想される。また、床が燃え抜けることで可燃物が下階へ落下することも考えられる。しかし、本報の範囲ではこれらの点は考慮しない。
- (3) 発熱速度 $\dot{Q}$ の火源上の、火炎軸高さ z における温度上昇 ΔT_0 は、

$$\Delta T_0 = \begin{cases} 72 \left(z / \dot{Q}^{1/2} \right)^{-1} & (0.08 \leq z / \dot{Q}^{1/2} < 0.2: \text{間欠火災}) \\ 24.6 \left(z / \dot{Q}^{1/2} \right)^{-2/3} & (0.2 \leq z / \dot{Q}^{1/2}: \text{浮力ブリューム}) \end{cases} \quad (\text{A1})$$

のように整理される¹⁹⁾。この関係式より、輻射による伝熱が大きくなる火災領域は 300K 程度の温度上昇となることが分かる。そこで、噴出火炎についても同様の条件が成り立つものと考え、上階に延焼を及ぼす可能性のある最低温度を 300K に設定する。

- (4) 文[18]では、いくつかの断熱材料の使用温度範囲が示されており、ロックウールおよびグラスウールの使用温度範囲の上限値は、それぞれ 600℃、400℃となっている。これは、今回調整を行った燃え抜け温度 T_{BT} の値と一致する。なお本報では、区画境界部材を構成する材料ごとに燃え抜け温度 T_{BT} を調整したが、今後このモデルを利用していく上では、各種材料の加熱試験等を行ってこうした値を整備していくことが重要と考えられる。ただし、工学ツールとしての利用を考えれば、本モデルを何らかの形で簡略化して利便性を向上する必要があるかもしれない。その選択肢の一つとしては、耐火試験の結果を活用し、本論文のように区画境界部材の構成材料ごとではなく、区画境界部材全体としての燃え抜け性状をモデル化する方法が挙げられる。この点については、今後検討が必要であると認識している。
- (5) ただし、和室 A の温度は、床上 1.1m の高さでは測定されていなかったため、床上 1.8m の高さでの測定結果と比較を行っている。なお、便所・浴室および洋室 A については温度が測定されていなかったため、計算結果のみを示す。

＜主な記号＞

$A_{B,0}, A_B$	面積(開口周辺の可燃物, 受熱)[m ²]
A_D, A_F, A_M	面積(開口, 可燃物, 境界部材)[m ²]
B_D	開口幅[m]
C_B	加熱範囲拡大の速度係数[(s/m) ^{1/2} ・m ² /kW]
C_M, C_P	定圧比熱(境界部材, 気体)[kJ/(kg・K)]
$\Delta H_F, \Delta H_O, \Delta H_S$	単位消費量あたりの発熱量 (可燃性ガス, 酸素, 炭素残渣)[kJ/kg]
$H_{D,u}, H_{D,b}$	開口上端, 下端高さ[m]
h_m, h_s	対流熱伝達率(区画境界表面, 可燃物表面)[kW/(m ² ・K)]

L_p, L_v	潜熱(可燃物の熱分解, 水分の蒸発)[kJ/kg]
$\dot{m}$	開口流量[kg/s]
$\dot{m}_B, \dot{m}_S$	可燃物の燃焼速度, 炭化層の表面燃焼速度 [kg/s]
$\dot{Q}_B, \dot{Q}_S$	発熱速度(可燃性ガス, 炭素残渣)[kW]
$\dot{Q}_D, \dot{Q}_F, \dot{Q}_M$	失熱速度(開口, 可燃物, 区画境界)[kW]
$\dot{q}_{gr}''$	可燃物の着火限界熱流束[kW/m ²]
$\dot{q}_{D,0}''$	開口周辺の可燃物への入射熱流束[kW/m ²]
$\dot{q}_d''$	噴出火炎からの入射熱流束[kW/m ²]
$\dot{q}_p'', \dot{q}_v''$	単位体積あたりの熱の消費速度(熱分解, 水分蒸発)[kW/m ³]
t	時間[s]
T, T_{BT}, T_g, T_F	温度(区画内ガス, 燃え抜け, 噴出火炎, 可燃物)[K]
T_M, T_p, T_s, T_∞	温度(境界部材, 熱分解, 可燃物表面, 基準もしくは外気)[K]
w_p, w_v	部材の絶対乾比重に対する比率(熱分解成分, 水分)[-]
Y_F, Y_O	濃度(可燃性ガス, 酸素)[-]
$\dot{\Gamma}_F, \dot{\Gamma}_O$	生成速度(可燃性ガス, 酸素) [kg/s]
$\varepsilon_M, \varepsilon_s$	輻射率(区画境界表面, 可燃物表面)[-]
ρ, ρ_a	気体密度(区画内ガス, 外気もしくは基準)[kg/m ³]
$\rho_M, \rho_{M,0}$	固体密度(境界部材, 境界部材の絶対乾比重)[kg/m ³]
σ	Stefan-Boltzmann 定数(=5.67×10 ⁻¹¹)[kW/(m ² ・K ⁴)]
χ_{BT}	燃え抜け速度係数[(kJ/kg) ⁻¹]
Ψ	部材境界の燃え抜けによる欠損率[-]

＜添字＞

- ()'' : 単位面積あたり
()''' : 単位体積あたり
()' : 単位時間当たり

＜参考文献＞

- 1) 関根:「コンクリート造建物の室内火災温度の推定(その 1・熱収支式と温度上昇曲線)」, 日本建築学会論文報告集 No.85, pp.38-47, 1963.5
- 2) 建設省総合技術開発プロジェクト報告書「建築物の総合防火設計法(第 4 巻 耐火設計法)」, 1989
- 3) 田中・中村:「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, 1989.10
- 4) 松山・藤井・金子・大宮・田中・若松:「区画内火災性状の簡易予測手法」, 日本建築学会構造系論文集 No.469, pp.159-164, 1995.3
- 5) 大宮・田中・若松:「可燃物条件を考慮した区画火災性状予測モデルの構築」, 日本建築学会計画系論文集 No.487, pp.1-8, 1996.9
- 6) 日本建築学会編:「鋼構造耐火設計指針」, 丸善, 1999
- 7) 樋本・田中:「炭化層を形成する可燃物の経時的な燃焼モデルとその区画火災への適用」, 日本建築学会環境系論文集 No.568, pp.9-16, 2003.6
- 8) 中村:「鉄鋼系プレハブ住宅の火災実験」, 建築研究資料 No.40, 1983
- 9) 松山:「性能的火災安全設計に用いる火災性状モデルの構築と火災安全性評価への応用」, 東京理科大学学位論文, 2000
- 10) J.Quintiere: "A Simplified Theory for Generalizing Results from a Radiant Panel Rate for Flame Spread Apparatus", Fire and Materials, Vol. 5-2, pp.52-60, 1981
- 11) 梶山・原田・鉾井・高田:「木構造部材の燃え止まりに関する研究」, 日本火災学会研究発表会概要集, pp.512-515, 2002.5
- 12) T.Z.Harmathy: "On the Equivalent Fire Exposure", Fire and Materials, Vol.11, pp.95-104, 1987
- 13) 原田・辻本・細沢:「熱流時間面積が等しい等価火災時間」, 日本火災学会研究発表会概要集, pp.112-115, 1998.5
- 14) 横井:「建築物の火災気流による延焼とその防止に関する研究」, 東京大学学位論文
- 15) 大宮・若松・小屋・原田・田中:「延焼拡大防止に関する簡易予測法 (1)噴出気流による上階延焼」, 日本火災学会研究発表会概要集, pp.4-7, 1999.5
- 16) 日本建築学会編:「建築設計資料集成(1 環境)」, 丸善, 1978
- 17) 日本建築学会編:「建築材料の熱・空気・湿気物性値」, 丸善, 2001
- 18) 日本建築学会編:「防火材料パンフレット」, 丸善, 1993
- 19) 田中:「建築火災安全工学入門」, 日本建築センター, 1993

(2003年6月10日原稿受理, 2003年8月6日採用決定)