

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

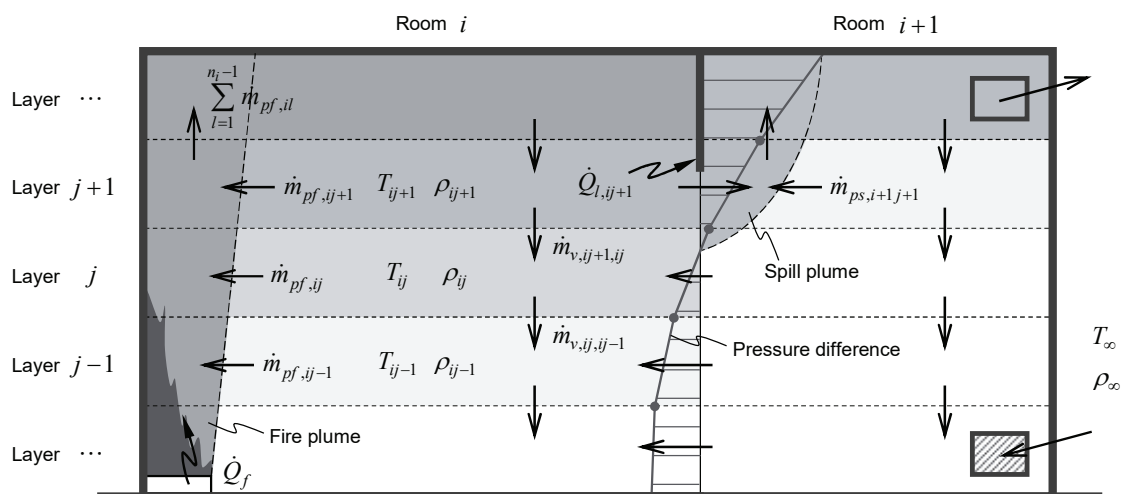


図1 多層ゾーンモデルの概念図

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) :

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

・最上層と最下層を除く層 ($1 < j < n_i$ の時) :

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

・最下層 ($j=1$ の時) :

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

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、 $\dot{m}_{ol,ij,k}$ 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 $\dot{m}_{v,ij,j-1}$) 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) :

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

・最上層と最下層を除く層 ($1 < j < n_j$ 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 ($j=n_j$ の時) :

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

・最上層と最下層を除く層 ($1 < j < n_j$ の時) :

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

・最下層 ($j=1$ の時) :

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

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 ($j=n_f$ 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 ($1 < j < n_f$ 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 Tobari²²⁾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 Tobari²²⁾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：

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

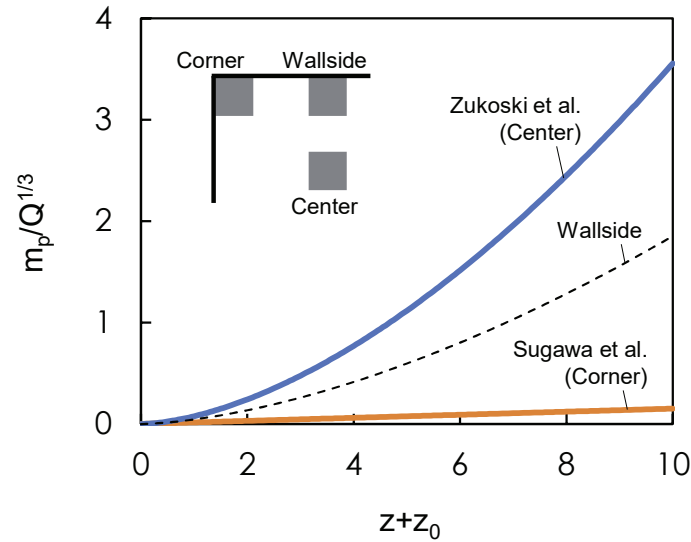


図2 火災プルーム流量の予測式²²⁾²³⁾の比較 (壁際の値は中央と隅角の値の中間値)

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

・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、 $\dot{Q}_{mw,i}$ 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 midpoint 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うと、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 煙層高さや煙層温度

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.