

建物内の火災安全・防災のためのシミュレータ Advance/EVE SAYFA

吉岡 逸夫* 浜野 明千宏* 秋村 友香* 富塚 孝之* 三橋 利玄**

Enhanced Virtual Environment Simulator for Aimed and Yielded Fatal Accident, Advance/EVE SAYFA

Itsuo Yoshioka*, Achihiro Hamano*, Yuka Akimura*,

Takayuki Tomizuka* and Toshiharu Mitsunashi**

Advance/EVE SAYFA は、文部科学省の国家プロジェクトとして開発したプログラムを、アドバンスソフト株式会社が改良整備した火災進展解析・有害物質拡散解析ソフトウェアである。本稿では、EVE SAYFA の機能とその適用事例を紹介する。

Key word: 火災、EVE SAYFA、二層ゾーンモデル、圧縮性換気系モデル、FDS、有害物質拡散

1. はじめに

EVE SAYFA の開発の発端は、2002 年から 2007 年にかけて実施された「革新的シミュレーションソフトウェア開発プロジェクト」[1]である。このプロジェクトは、

- ・人間の活動空間およびこれを支える空気流通空間における火災対策としての煙の移流拡散シミュレータ
- ・テロ対策としての人間の活動空間およびこれを支える空気流通空間における健康影響有害物質の移流拡散シミュレータ

の研究開発をテーマとするもので、その成果として開発されたシミュレータが EVE SAYFA である。プロジェクト終了後においても、Advance/EVE SAYFA としてアドバンスソフト株式会社が継続的な保守改良を行っている。

Advance/EVE SAYFA 2.0 では、特に急激な火災現象の解析にも適用可能とするために、建物内の火災延焼解析と管路系ガス過渡解析ソフトウェア

Advance/FrontNet/Γ による換気系モデルの連成計算を行うことができる。これにより、従来の火災、煙層高さ、二酸化炭素濃度などの解析に加え、フラッシュオーバーやバックドラフトとして知られる急激な火災時に起こりえる換気系内の逆流などによる流量大変動時の圧縮性効果を適切に取り扱うことができる点が最大の特長である。また、米国商務省国立標準技術研究所で開発された CFAST コード[2][3][4]等の火災解析シミュレータでは困難だった換気系を持つ施設での急激な火災解析が可能となった。

さらに、Advance/EVE SAYFA 2.0 では、火災解析用の二層ゾーンモデルの他、着目している部屋の火災詳細解析を目的として、3 次元火災・熱流動解析プログラムと連成することができる。本稿では、米国商務省国立標準技術研究所で開発された火災 CFD コードである FDS との連成解析について紹介する。具体的には、部分的な修正を加えた FDS(Version 5)[5]を Advance/EVE SAYFA に取り込み、急激な火災の連成解析を可能にした。

2. 火災進展解析機能

火災解析モデルとして、建築業界で煙層高さを算出するのに標準的に用いられている二層ゾーンモデル[6][7]と呼ばれるマクロモデルを採用して

*アドバンスソフト株式会社 第2事業部

2nd Computational Science and Engineering Group,

AdvanceSoft Corporation

**アドバンスソフト株式会社 専務取締役 技師長
Senior Managing Director and Chief Engineer,
AdvanceSoft Corporation

いる。二層ゾーンモデルの基礎方程式は、解析単位を部屋として時間発展で解かれ、火災解析に必要な物理モデルと関連付けて火災進展の解析を行うことができる。火源や熱ブルームは、通常 3 次元解析モデルにより模擬されると考えられるが、二層ゾーンモデルのみでも火災進展解析が行えるように簡易的な火災モデルが実装されている。

換気系モデルはガス管路系を対象として実績のある Advance/FrontNet/T[8]がサブルーチン化して組み込まれている。表 1 に Advance/EVE SAYFA の機能一覧表を示す。

表 1 Advance/EVE SAYFA の機能一覧

基礎方程式 (マクロモデル)	二層の質量保存式 二層の化学種保存式 二層のエネルギー保存式 状態方程式 (理想気体) 開口部に対する運動方程式
時間発展 スキーム	完全陰解法
伝熱モデル	対流伝熱モデル 放射伝熱モデル (ガス吸収とすすの影響を考慮)
煙流動モデル	二層ゾーンモデル
換気モデル	圧縮性を考慮した管路モデル (Advance/FrontNet/T)
機器 コンポーネント	開口部、隙間、ファン

2.1. 部屋のモデル (マクロモデル)

部屋のモデルは、図 1 に示すように、建物内のコンポーネント (部屋、階段、廊下、壁、床、天井、窓、ドア、給気ファン、排気ファン、感知器、スプリンクラー、防火扉の開閉、換気特性、換気制御など) を最小単位として、それらの影響をネットワークとして解析を行うマクロモデルと呼ばれる方法によっている。解析モデルは、任意個数の部屋 (ないしゾーン) とリンクから構成される。リンクはドアや窓などの開口部を表現し、2 つの部屋か部屋と外部を接続する。各部屋に対してそ

れぞれ床・天井・壁が設定される。

2.2. 煙の流動モデル

煙の流動モデルは、図 2 のように各部屋を上層 (煙層) と下層の二層に分割する二層ゾーンモデルを適用する。

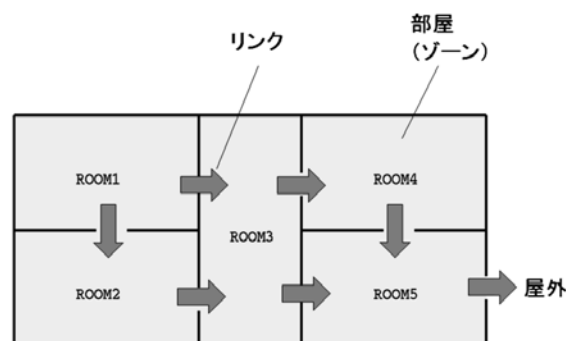


図 1 マクロモデルの形状モデル (平面図)

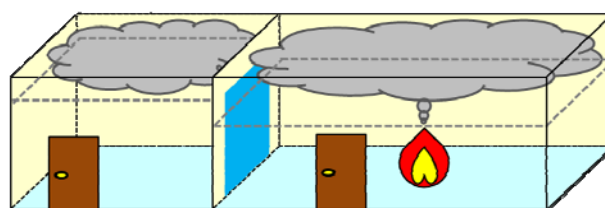


図 2 二層ゾーンの模式図

2.3. 伝熱モデル

2.3.1. 対流伝熱モデル

火災現象では、ガスと壁面間の伝熱が重要であるため、ガスと壁面の間の対流伝熱を扱う (図 3)。

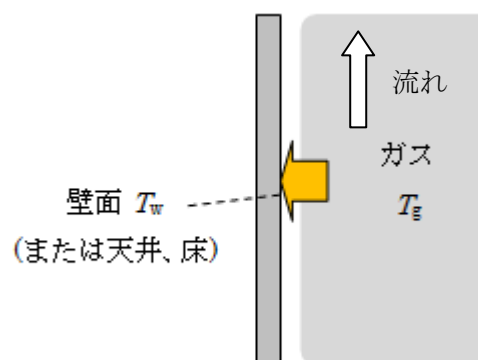


図 3 対流伝熱の模式図

対流伝熱量は、ガス温度 T_g と壁表面温度 T_w の差に、対流熱伝達係数 h と表面伝熱面積を乗じて算出する。具体的な計算式については、3.2.1 で説明する。

2.3.2. 放射伝熱モデル

火災現象での伝熱において、放射伝熱が支配的である場合も多く、放射伝熱の取り扱いが重要である。図 4 に示すように、放射伝熱は炎、ガス層、およびコンパートメントの表面（天井、壁、および床）の間で起こるとする。

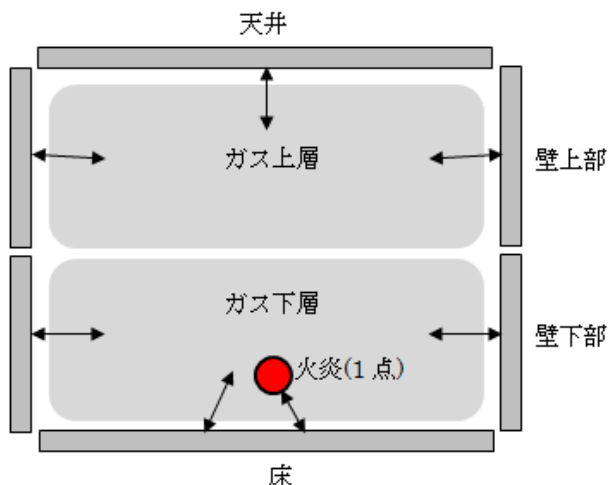


図 4 放射伝熱の模式図

この放射伝熱量は、コンパートメント表面とガス層の温度差と、両者間の放射率の関数である。計算の簡素化のために以下の仮定をおいている。

- ① 各々のガス層、壁セグメント内ごとに温度が均一で、準定常状態（壁とガス層の温度は微分方程式の時間ステップ間はゆっくり変化）。
- ② 炎は1点とし、すべての方向に、総エネルギー放出の一定割合を一様に放出する。
- ③ 放射熱流束は方向と波長に依存しない。
- ④ 部屋・コンパートメントは長方形とする。開口部を通じての放射伝熱分は部屋から喪失する。

2.4. 換気系モデル

空調、換気、排煙などの目的で使用するダクトのネットワークをここでは換気系と呼ぶ。アドバンスソフト株式会社では、ガス管路系過渡解析ソフトウェアとして Advance/FrontNet/Γ を開発している。本ソフトウェアにより圧縮性を考慮した換気系モデルが解析可能となった。

Advance/FrontNet/Γ については、本誌の「管路系

流体解析ソフトウェア Advance/FrontNet」を参照されたい。

2.5. 3次元解析連成機能（EVE SAYFA+FDS）のプログラム構成

図 5 に、EVE SAYFA と FDS による連成計算の概念図を示す。この例では火災室と隣接する部屋があり、その間に開口部（ドア）がある。二層ゾーンは EVE SAYFA、火災室は FDS で解析を行い、連成計算に必要な計算値の授受を行う。

Advance/EVE SAYFA と FDS を連成するプログラム構成を図 6 に示す。Advance/EVE SAYFA は、解析対象のうちの建物を構成する部屋での火災進展を解析する二層ゾーンモデルと、換気系ダクトを1次元管路として圧縮性流体解析を行う Advance/FrontNet/Γ で構成される。

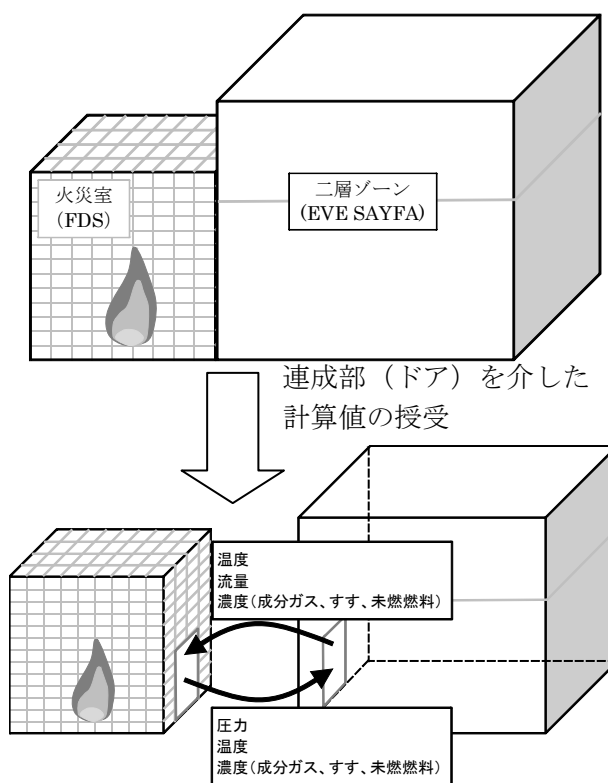


図 5 EVE SAYFA と FDS の連成計算の概念図

Advance/EVE SAYFA と FDS と連成した場合の処理の流れを図 7 に示す。初期設定段階と、時間ループ内の過渡計算段階で、サブルーチン化した FDS のメインプログラムを呼び込むことで、各時間の計算値を Advance/EVE SAYFA の計算に反映している。FDS からは、給排気口の接続面に接す

る格子の状態量を Advance/EVE SAYFA に渡し、Advance/EVE SAYFA からの状態量と質量流量を FDS にとっての給排気口の境界条件として受け取るようにしている。

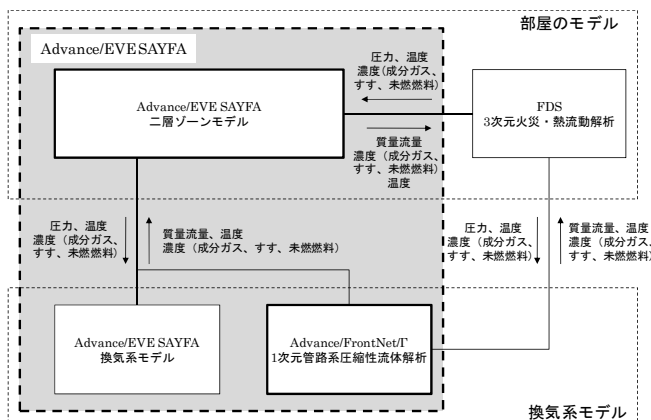


図 6 Advance/EVE SAYFA のプログラム構成 (火災解析機能)

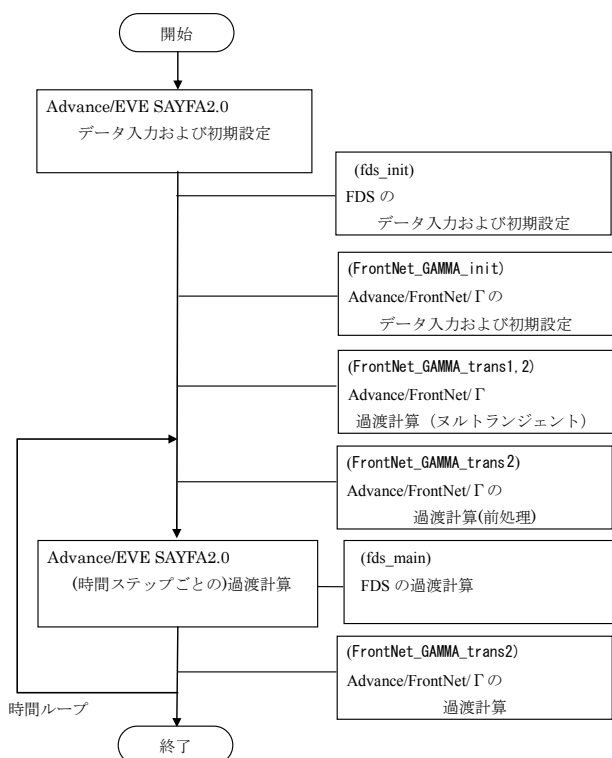


図 7 FDS と連成した場合の処理の流れ

3. 火災進展解析の理論概要

3.1. 基礎方程式 (火災解析)

二層ゾーンモデルの基礎方程式は、二層各層の質量保存式、エネルギー保存式、化学種保存式と、開口部（リンク）での運動方程式、気体の状態方程式である。解析により、各部屋の圧力、上層と下層の各々の温度、密度、体積、化学種濃度、リ

ンク間の流量（圧力差による）が求まる。また、上層と下層の境の高さである煙層高さも計算される。二層ゾーンモデルの基礎方程式を以下に示す。

3.1.1. 質量保存

ゾーン内の気体の質量変化は境界を通して流入する質量のみによる。

$$\frac{d}{dt}(\rho V) = \sum_j F_j \quad (1)$$

ここで、 ρ はゾーンの密度[kg/m³]、 V はゾーンの体積[m³]、 F はゾーンの境界を通して流入する気体の質量流速[kg/s]である。また、 j は流入のある境界を表す添字である。

3.1.2. 化学種保存

ゾーンの化学種の量の増加は、境界を通して流入する流れが持ち込む化学種、およびゾーン内部での化学反応（燃焼）による。

$$\frac{d}{dt}(\rho Y_l V) = \sum_j Y_{l,j} F_j + \Gamma_l \quad (2)$$

ここで、 Y_l は化学種 l の質量分率[-]、 Γ_l は化学種 l の生成速度[kg/s]である。

3.1.3. エネルギー保存

$$\frac{d}{dt} \left\{ \sum_l (u_l Y_l \rho) V \right\} + P \frac{dV}{dt} = \dot{Q}_{net} + \sum_j \sum_l \{ h_{l,j} Y_{l,j} F_j \} \quad (3)$$

ここで、 u_l は化学種 l の比内部エネルギー[J/kg]、 h_l は化学種 l の比エンタルピー[J/kg]、 P は圧力[Pa]、 $\dot{Q}_{net}$ は熱伝達によりゾーンに加わる正味の熱量[W]である。

左辺第 1 項は様々な化学種の混合気体である層の内部エネルギーの増加分、第 2 項は層が膨張することにより外部になす仕事を表す。

3.1.4. 気体の状態方程式

$$P_l = \left(\frac{\rho Y_l}{M_l} \right) RT \quad (4)$$

ここで、 P_l は化学種 l の分圧、 M_l は化学種 l の分子量 [kg/mol]、 R は普遍気体定数 [J/(mol・K)] である。二層ゾーンの場合は上部層、下部層の各々について上記モデル式を適用する。

3.1.5. 開口部に対する運動方程式

開口部を通過する速度の算出式は次式で与えられる。

$$v = C \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \quad (5)$$

ここで、 v は流速 [m/s]、 C は流量係数 [-]、 ρ は風上スラブの密度 [kg/m³]、 ΔP はスラブ間の圧力差 [Pa] である。

垂直開口（水平流）と水平開口（上下流）に対する質量流量の算出式については、付録(1)、(2)を参照のこと。

3.2. 伝熱計算

3.2.1. 対流伝熱計算

火災現象では、ガスと壁面間の伝熱が重要であるため、ガスと壁面の間の対流伝熱を扱う（図 3）。各部屋の中の上下二層の温度に対応して、熱が伝わる先の部分を

- ① 天井
- ② 床
- ③ 層境界面より上の壁セグメント
- ④ 層境界面より下の壁セグメント

の 4 つの部分に分けて扱う。

表面伝熱面積 A_s を通じての対流伝熱量 Q_c は次式で表される。

$$Q_c = hA_s(T_g - T_w) \quad (6)$$

対流熱伝達係数 h はガスの特性、温度、流速の関数である。Nusselt 数は $Nu = hL/k$ で定義され、自然対流では Nusselt 数は下記の Rayleigh 数の関数として表される。

$$Ra_L = \frac{g\beta(T_w - T_g)L^3}{\nu\alpha} \quad (7)$$

ここで

L : 代表長さ [m]

g : 重力加速度 [m/s²]

k : 熱伝導率 [W/(m²K)]

β : 体積膨張率 [1/K]

T_w : 表面温度 [K]

T_g : ガス温度 [K]

ν : 動粘性率 [m²/s]

α : 熱拡散係数 [m²/s]

である。すべての物性は次式の膜温度での値を用いる。

$$T_f = (T_w + T_g)/2 \quad (8)$$

壁、天井、床面に対して、Nusselt 数を以下の式で計算する。

(1) 壁

$$Nu_L = \left(0.825 + \frac{0.387Ra_L^{1/6}}{(1 + (0.492/Pr)^{9/16})^{8/27}} \right)^2 \approx 0.12Ra_L^{1/3} \quad (9)$$

(制限：なし)

(2) 天井、床面（上向きの高温面または下向きの低温面）

$$Nu_L = 0.13Ra_L^{1/3} \quad 2 \cdot 10^8 \leq Ra_L \leq 10^{11} \quad (10)$$

(3) 天井、床面（上向きの低温面または下向きの高温面）

$$Nu_L = 0.16Ra_L^{1/3} \quad 10^8 \leq Ra_L \leq 10^{10} \quad (11)$$

ここで、Prandtl 数 Pr は動粘性率と熱拡散係数の比率である。プログラム中では以下のように式を変形している。

$$\text{表面熱流束 } q = \frac{Nu}{L} k(T_g - T_w) \quad (12)$$

$$\frac{Nu}{L} = \frac{C \cdot Ra_L^{1/3}}{L} = \frac{C}{L} \left(\frac{g\beta(T_w - T_g)L^3}{\nu\alpha} \right)^{1/3} = C \left(\frac{g\beta(T_w - T_g)}{\nu\alpha} \right)^{1/3} \quad (13)$$

$C = 0.12$ (壁)、 0.13 (天井・床面 A)、 0.16 (天井・床面 B)

なお、空気の熱拡散係数 α と熱伝導率 k は、膜温度の関数で表される。

$$\alpha = 1.0 \times 10^{-9} T_f^{7/4} \quad (14)$$

$$k = \left(\frac{0.0209 + 2.33 \times 10^{-5} T_f}{1 - 0.000267 T_f} \right) \quad (15)$$

3.2.2. 放射伝熱計算

2.3.2 で述べたように、火災現象での伝熱において放射伝熱が支配的である場合も多く、放射伝熱の取り扱いは重要である（図 4）。この放射伝熱量 Q_{rad} は、温度差と、コンパートメント表面とガス層の間の放射率の関数である。

$$Q_{rad} = \varepsilon \sigma_{SB} (T_g^4 - T_w^4) F_{1-2} \quad (16)$$

ここで

ε : 放射率

ステファンボルツマン定数

$$\sigma_{SB} = 5.67 \times 10^{-8} [\text{W}/(\text{m}^2 \text{K}^4)]$$

F_{1-2} : 形態係数

である。

計算の簡素化のために以下を仮定した。

- ① 各々のガス層、壁セグメント内ごとに温度が均一で、準定常状態（壁とガス層の温度は微分方程式の時間ステップ間はゆっくり変化）。
- ② 炎は 1 点とし、すべての方向に、総エネルギー放出の一定割合を一様に放出する。
- ③ 放射熱流束は方向と波長に依存しない。放射率 ε 、吸収率 α 、反射率 ρ が次式で関係づけられる。

$$\varepsilon = \alpha = 1 - \rho \quad (17)$$

- ④ 部屋・コンパートメントは長方形の箱型と仮定する。開口部を通じての放射伝熱分は部屋から喪失される。

コンパートメントを 4 つの部品に分けて、壁温度を計算する。その 4 つとは、天井、床、層境界面より上の壁セグメント、および層境界面より下の壁セグメントである。そして、表面温度と放射率を用いてそれぞれの壁セグメントへの熱流束を計算する。

1 から 4 までの各壁セグメント k に関し、正味の熱流束 Δq_k は、次のようなエネルギー収支をみたす。

$$\sigma A_k \varepsilon_k T_k^4 + (1 - \varepsilon_k) q_k^{\text{in}} = q_k^{\text{in}} + A_k \Delta q_k \quad (18)$$

ここで、 A_k は第 k 壁セグメントの面積、 ε_k は第 k 壁セグメントの放射率、 T_k は第 k 壁セグメントの温度、 q_k^{in} は他のすべての壁セグメントと発熱体から第 k 壁セグメントに到着するエネルギーである。上式の左辺は壁からの熱放出で、第 1 項は灰色体表面放射、第 2 項は反射エネルギー、右辺は壁への入射される放射で、第 1 項は他の壁、火炎、ガス層からの放射、第 2 項は一定温度を保つために壁に加わるエネルギーである。

それぞれの壁セグメントにおける熱交換は、放射、反射、入力、正味の放射項を考慮している。正味の放射の流束 Δq_k は、修正した次の正味放射方程式を解くことで求まる。

$$\Delta \hat{q}_k - \sum_{j=1}^N (1 - \varepsilon_j) \Delta \hat{q}_j F_{k-j} \tau_{j-k} = \sigma T_k^4 - \sum_{j=1}^N \sigma T_j^4 F_{k-j} \tau_{j-k} - \frac{c_k}{A_k} \quad (19)$$

ここで、 $\Delta \hat{q}_k = \Delta q_k / \varepsilon_k$ 、 F_{k-j} は形態係数、 τ は透過率である。パラメータ c_k は熱源（炎自体とガス層）を表す。

(1) 形態係数

F_{1-2} で表される有限面積間の形態係数は、表面 1 から放射してエネルギーのうち表面 2 に達する割合で、次式で表される。

$$F_{1-2} = \frac{1}{A_1} \int_{A_1} \int_{A_2} \frac{\cos \theta_1 \cos \theta_2}{\pi L^2} dA_1 dA_2 \quad (20)$$

ここで、 L は 2 表面を結ぶ距離、 θ_1 と θ_2 は面 1、2 を結ぶ線と各面の法線とのなす角、 A_1 と A_2 は面積である（図 8）。2 面 1、2 が表面積に比べ十分離れている場合、 θ_1 、 θ_2 、 L は積分領域内で一定として次式で近似することができる。

$$F_{1-2} \approx \frac{\cos \theta_1 \cos \theta_2}{\pi L^2} A_2 \quad (21)$$

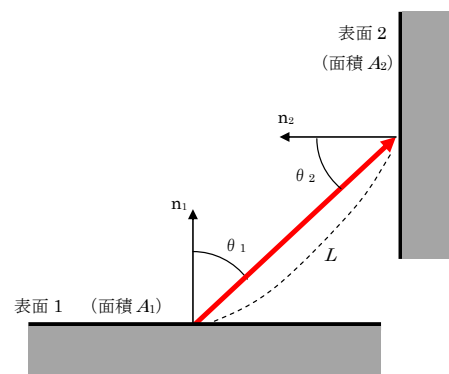


図 8 放射伝熱の模式図

(2) 透過率と吸収率

ガス体の透過率は、妨害されずに通過する放射エネルギーの割合であり、次式で与えられる。

$$\tau(L) = e^{-aL} \quad (22)$$

ここで、 a はガス体の吸収係数、 L は経路長さである。ガス体の吸収率 α はその中で吸収される放射エネルギーであり、灰色ガスでは $\alpha + \tau = 1$ である。すすに関しては、すべての波長を通じて連続的な吸収率を持ち、透過率と吸収率を「グレー」で近似する。ガス吸収係数 α_G は、 CO_2 と H_2O のそれぞれに対する値の組み合わせで、次式で与えられる。

$$\alpha_G = \alpha_{\text{H}_2\text{O}} + \alpha_{\text{CO}_2} - C \quad (23)$$

ここで、 C は全波長に適用するための補正項である。典型的な火災条件では、補正項は CO_2 の吸収率の約半分であり、ガス透過率は次式で近似される。

$$\tau_G = 1 - \alpha_G = 1 - \alpha_{\text{H}_2\text{O}} - 0.5\alpha_{\text{CO}_2} \quad (24)$$

ガスとすすの混合物の透過率はそれぞれの透過率の積であり、

$$\tau_T = \tau_S \tau_G \quad (25)$$

式(25)に(22)と(24)を代入して次式を得る。

$$\tau_T = e^{-aL} (1 - \alpha_{\text{H}_2\text{O}} - 0.5\alpha_{\text{CO}_2}) \quad (26)$$

また、有効な経路長(平均ビーム長さ L)は、次式で近似される。

$$L = \frac{c4V}{A} \quad (27)$$

ここで、 L は平均ビーム長さ[m]、 c は定数、 V は放射元のガス体積[m³]、 A はガスの表面積[m²]である。体積と表面積は層の寸法から計算される。

3.3. 火災モデル

二層ゾーンモデルのみでも火災・煙流動解析が行えるように簡易的なモデルを実装している。

3.3.1. 無制限(unconstrained)火源

無制限火源では燃料の熱分解率に基づいてエネルギーが放出される。燃焼のための十分な酸素が

常に供給されている場合に適用可能となる。発熱速度 Q_f は次式で表される。

$$Q_f = H_c \dot{m}_b - c_p (T_v - T_a) \dot{m}_b \quad (28)$$

ここで

T_v, T_a : 燃料の蒸発温度、周囲温度

H_c : 燃焼熱

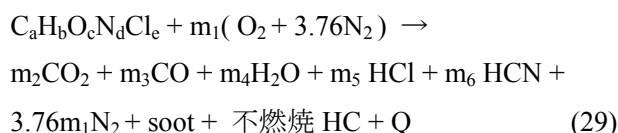
$\dot{m}_b$: 燃焼速度

c_p : 空気の定圧比熱

である。熱分解率を $\dot{m}_f$ で表すと、無制限火源では $\dot{m}_b = \dot{m}_f$ となる。

3.3.2. 制限(constrained)火源

制限火源では発熱速度が供給される酸素量により制限される。



4. 危険物質拡散解析機能

EVE SAYFA には、複数ゾーンの構造物における空気流動を解析するためゾーンモデルによる危険物質拡散解析機能が実装されている。これは、建物周りの風や煙突、空調などを考慮し、隙間風、大開口を通した流れ、一方向の換気などが取り扱えるものである。また建物内の汚染物質輸送の解析機能も実装されている。以下、基礎方程式を示す。

4.1. 圧力と流量

各空気流動コンポーネントにおける流れは、Bernoulli の方程式で記述されると仮定する。

$$\Delta P = \left(P_1 + \frac{\rho V_1^2}{2} \right) - \left(P_2 + \frac{\rho V_2^2}{2} \right) + \rho g(z_1 - z_2) \quad (30)$$

ここで

ΔP : 位置 1 と 2 の間の総圧力損失

P_1, P_2 : 入口と出口における静圧

V_1, V_2 : 入口と出口における流速

ρ : 空気密度

g : 重力加速度 (9.81 m/s²)

z_1, z_2 : 入口と出口における高度

である。

ゾーン i の空気質量 m_i は理想気体の状態方程式により与えられる。

$$m_i = \rho_i V_i = \frac{P_i V_i}{RT_i} \quad (31)$$

ここで、 V_i はゾーン体積[m³]、 P_i はゾーン圧力 [Pa]、 T_i はゾーン温度[K]、 R は空気に対する気体定数[J/(kg・K)]である。

4.2. 質量保存

$$\frac{\partial m_i}{\partial t} = \rho_i \frac{\partial V_i}{\partial t} + V_i \frac{\partial \rho_i}{\partial t} = \sum_j F_{ji} + F_i \quad (32)$$

ここで

m_i : ゾーン i における空気質量

F_{ji} : ゾーン j, i 間の空気の質量流量

である。

4.3. 空気流動に関する各コンポーネントモデル (AFU モデル)

4.3.1. 隙間のモデル

隙間のモデルとは、非常に狭い流路を扱うモデルである。閉じられた窓やドアも実際には隙間流量があり、開閉のスケジュール管理が可能な「開口部」と区別して設けている。例えば、建物モデルの中のある部屋で窓が開いていない場合、ドアが開いていてもその部屋は孤立して流量はゼロになる。ここで、ある程度微少な流量を発生させておきたい場合などに窓を隙間モデルで表したり、隣の部屋との間に隙間を設けたりする。このように、隙間の扱いは室内の換気や火災の解析において重要となる。

隙間や開口部の空気流動特性を表現するのに広く利用されるモデルとして、ベキ乗則がある。

$$F = C_s (\Delta P)^n \quad (33)$$

ここで

F : 質量流量 [kg/s]

C_s : 1Pa における質量流量係数 [kg/s]

ΔP : 隙間出入口の圧力差 [Pa]

n : 乗数 [-]

である。また、温度による補正、隙間長さの効果を考慮する。

$$F = C_r \frac{a}{l} C_s (\Delta P)^n \quad (34)$$

$$C_r = \left(\frac{\rho_{STD}}{\rho} \right)^{(n-1)} \left(\frac{v_{STD}}{v(T)} \right)^{(2n-1)} \quad (35)$$

ここで

a : 有効ファクター [-] (時系列で指定可能)

l : 隙間長さ [m]

ρ : 空気の密度 [kg/m³]

v : 空気の動粘性係数 [m²/s]

添字 STD : 標準状態

である。

4.3.2. 開口部（ドア、窓）のモデル

ドアや大開口部は、空気や汚染物質、熱エネルギーの伝達に大きな影響を及ぼす。

ベキ乗則や2次式モデルでは、流れは一度に一方のみが許される。ドアなどの大開口を通る流れは、開口の異なる部分で反対方向の流れが生じる可能性があり、より複雑になる傾向がある。2つの部屋の間の温度差とその結果による密度差は、煙突効果がドアの上部では正の圧力差を、低部では負の圧力差を引き起こし（あるいはその逆）、開口において2方向流を生じさせることもある。

ドアの開閉や窓ガラスの割れについては、シナリオとして計算条件で指定する方法と、計算途中でシナリオを変更する方法が考えられる。窓割れについては、指定した温度で割れるなどの簡易的なモデルも考えられる。

(1) 多重開口モデル

各部屋における空気密度が一定であるとして、各部屋の様々な高さ位置と圧力を関連付けるのに流体静力学の式が用いられる。

$$P_{0j} = P_j + \rho_j g(h_j - h_0) \quad \text{and} \quad (36)$$

$$P_{0i} = P_i + \rho_i g(h_i - h_0) \quad (37)$$

$$P_j(y) = P_{0j} - \rho_j g y \quad \text{and} \quad (38)$$

$$P_i(y) = P_{0i} - \rho_i g y$$

ここで

P_{0j}, P_{0i} : ゾーン j と i における、 $y=0$: 開口の参照高度の圧力

ρ_j, ρ_i : ゾーン j と i の空気密度

P_j, P_i : ゾーン j と i の参照圧力

h_j, h_i : ゾーン j と i の参照高さ

h_0 : 開口の中心の高さ

高さの関数として、空気流動の速度はオリフィスの式により与えられると仮定する。

$$V(y) = C_d \left(\frac{2(P_j(y) - P_i(y))}{\rho} \right)^{1/2} \quad (39)$$

ここで

C_d : 放出係数

ρ : 開口を通り過ぎる空気の密度

高さ H 、幅 W の開口は、高さ Δy と幅 W を持つ水平方向の薄い切れを表す、複数の開口部に分割できる。各細長い切れを通る質量流量は次式で表される。

$$F_y = C_d W \Delta y \sqrt{2\rho \Delta P} \quad (40)$$

これより、各細長い開口部のべき乗則モデルに対する係数は次式で与えられる。

$$C_0 = \sqrt{2} C_d W \Delta y \quad (41)$$

(2) 単一開口モデル (2 方向流)

隣接空間の間に温度差があるとき、これらの空間を隔てる壁に開口部があると、開口を通る流量を計算する場合に上下方向の圧力差分布が無視できない場合が多い。中性帯の位置が開口部の上・

下端の中間にできて、その上下で流れの方向が逆転することも普通に見られる現象である。

中性帯の位置 Y は、空気流動の速度がゼロとなる位置として定義される。上で示したゾーン j, i の圧力式において、 $P_j(y) = P_i(y)$ と置くと次式になる。

$$Y = \frac{P_{0j} - P_{0i}}{g(\rho_j - \rho_i)} \quad (42)$$

開口の上端、下端の高さをそれぞれ H_u, H_l とすると (開口高さ H 、幅 W)、

$$H_l < Y < H_u \quad (43)$$

の条件のときに、開口を通る二方向流となる。また $\rho_j = \rho_i$ のとき、中性帯は計算できない。この場合は二方向流にならないため、簡単なオリフィス開口として扱う。

$\Delta \rho \equiv \rho_j - \rho_i$ と置き、高さ座標を $z \equiv y - Y$ と

定義すると、開口に沿った圧力差分布は次式で与えられる。

$$\Delta P(z) = P_j(z) - P_i(z) = -gz\Delta \rho \quad (44)$$

中性帯の上部の開口を通る質量流量は

$$F_a = W \int_{z=0}^{z=H_u-Y} \rho_m V dz \quad (m=j \text{ or } i)$$

と表され、中性帯の下部の開口を通る質量流量は

$$F_b = W \int_{z=H_l-Y}^{z=0} \rho_m V dz \quad (m=j \text{ or } i) \quad (45)$$

と表される。上式を積分することにより、 Y の値と $\Delta \rho$ の符号に依存して幾つかの式が得られる。

$$G \equiv \frac{2}{3} W C_d (2g|\Delta \rho|)^{1/2} \quad (46)$$

と定義すると、以下の流れの式が導ける。

case	$\Delta \rho > 0$	$\Delta \rho < 0$
$Y \leq H_l$	$F = -G \sqrt{\rho_i} \{ (H_u - Y)^{3/2} - (H_l - Y)^{3/2} \}$	$F = G \sqrt{\rho_j} \{ (H_u - Y)^{3/2} - (H_l - Y)^{3/2} \}$

$Y \geq H_u$	$F = G\sqrt{\rho_j} \{(Y - H_l)^{3/2} - (Y - H_u)^{3/2}\}$	$F = -G\sqrt{\rho_i} \{(Y - H_l)^{3/2} - (Y - H_u)^{3/2}\}$
$H_l < Y < H_u$	$F_a = -G\sqrt{\rho_i} (H_u - Y)^{3/2}$ $F_b = G\sqrt{\rho_j} (Y - H_l)^{3/2}$	$F_a = G\sqrt{\rho_j} (H_u - Y)^{3/2}$ $F_b = -G\sqrt{\rho_i} (Y - H_l)^{3/2}$

4.3.3. ダクトのモデル

ダクトを通る圧力損失は、摩擦損失と、空気流動の流通面積を変化させる付属物により引き起こされる流れの外乱の結果としての動的損失に基づいて計算される。

$$\Delta P_{\text{loss}} = \Delta P_{\text{friction}} + \Delta P_{\text{fittings}} \quad (47)$$

$$\Delta P_{\text{friction}} = \lambda \frac{l}{d} P_{\text{dynamic}} \quad (48)$$

ここで

$\Delta P_{\text{friction}}$: ダクト内の摩擦損失 [Pa]

λ : 無次元摩擦係数 [-]

l : ダクトの長さ [m]

d : ダクトの直径 [m]

P_{dynamic} : 空気流動の動的圧力 [Pa]

4.3.4. ファンのモデル

火災時には通常空調は停止するため、煙流動には影響しないとする。しかし感知機が作動しても空調が止まらないケースも多い。また健康影響危険物質の移流拡散においては空気流動が重要となる。そのためファンのモデルの実装を行った。

ファンモデルは無次元特性曲線を用いて表され、質量流量の関数として温度上昇と運転効率を計算する。特性曲線は多項式で表され、係数を指定する必要がある。効率はファンの温度上昇を計算するのに用いられる。

無次元流量係数と無次元圧力水頭係数はそれぞれ次式で定義される。

$$C_f = \frac{w}{\rho N D^3} \quad (49)$$

$$C_h = \frac{1000 \Delta P}{\rho N^2 D^2} \quad (50)$$

ここで

ΔP : 圧力上昇 $P_o - P_i$ [kPa]

(P_o : 出口圧力[kPa], P_i : 入口圧力[kPa])

w : 質量流量 [kg/s]

ρ : 流体密度 [kg/m³]

N : 回転数 [rps]

D : 回転翼の直径 [m]

ファンを通過する質量流量、圧力は次式で表される。

$$F_1 = \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^3 \left(\frac{N_1}{N_2} \right) \times F_2 \quad (51)$$

($C_f(w_1, N_1, D_1) = C_f(w_2, N_2, D_2)$ より)

$$P_1 = \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^2 \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 \left(\frac{\rho_1}{\rho_2} \right) \times P_2 \quad (52)$$

($C_h(P_1, N_1, \rho_1, D_1) = C_h(P_2, N_2, \rho_2, D_2)$ より)

5. 解析事例

5.1. 圧縮性換気系モデルを考慮した EVE SAYFA (二層ゾーン) による火災進展解析

国際的な火災試験プロジェクトである OECD の PRISME 試験[9][10]を対象に、検証解析を実施した事例を紹介する。従来の EVE SAYFA や CFAST コード等の火災解析シミュレータでは困難だった換気系を持つ施設での急激火災解析事例である。本解析では、EVE SAYFA と Advance/FrontNet/T を連成している。

5.1.1. 解析条件

解析対象の体系を図 9 に示す。「Room」と「火源」と書かれている四角は部屋を表し、両者で熱のやり取りをしている。その他の細長い四角は換気系

ダクトを表している。

本解析では、「火源」とある部屋（以下、火源室と呼ぶ）の火災解析を EVE SAYFA の二層ゾーンモデルを用いて行い、換気系ダクトの 1 次元熱流動解析を、EVE SAYFA に組み込まれた Advance/FrontNet/T を用いて行った。

火源室は、幅 6m、奥行き 5m、高さ 3.95m の直方体である。火源室には、給気用と排気用のダクトが設置されており、火災試験時においても換気系は継続運転している。図 9 の左から部屋に給気し、右へ向かって排気している。端部の四角は境界部を表し、一定圧力・温度を境界条件として与えた。

火災源は火源室の床面中央に、プール火災を模擬した燃焼皿が設置されている。火源の条件は、時刻ゼロに火災が発生し、急激に発熱とガスが発生するものとする。発熱条件として、約 5 分で約 500kW のピークに達し、約 53 分から減少して鎮火するものと想定している。

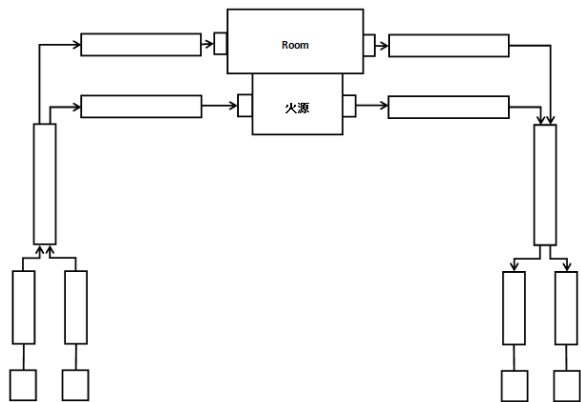


図 9 火災解析モデル（シングルルーム体系）

5.1.2. 解析結果

主な解析結果を図 10、図 11 に示す。

図 10 は火源室から換気系への排気流量と、換気系から火源室への給気流量の時間変化を試験結果[10]と重ねてプロットした図である。流量のマイナスは逆流となっていることを示している。図 11 は火源室のガス温度変化である。

火災が生じて直ちに火源から大量の熱と、二酸化炭素 CO_2 や一酸化炭素 CO などのガスが発生するため、火源室のガス圧力が急増し、給排気とも

排気する向きに流量が急速に増加する。そのため、給気側の換気系ダクトで逆流が生じる。また、火災による加熱でガス温度は上昇し、煙の発生により煙層高さ（煙領域の下限高さ）は低下する。換気系で逆流を伴う流量大変動の圧縮性効果が強い現象を良く捉えた結果となった。

本事例の詳細については、参考文献[11]を参照されたい。

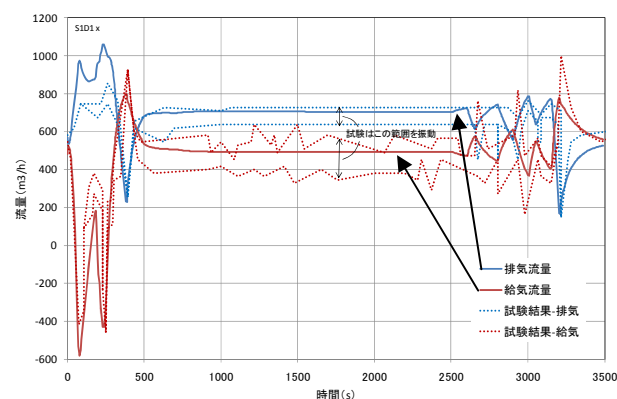


図 10 火源室への給排気流量変化（換気系モデルとの連成解析）

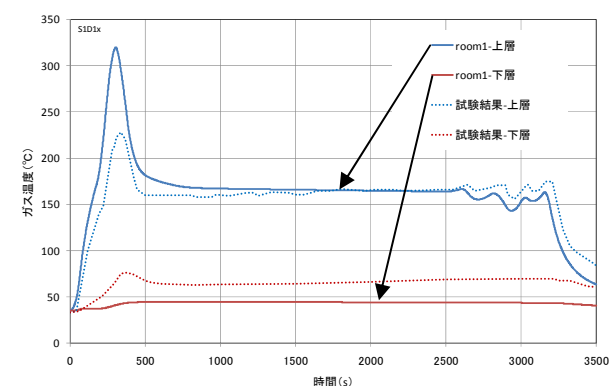


図 11 火源室のガス温度変化（換気系モデルとの連成解析）

5.2. 圧縮性換気系モデルを考慮した EVE SAYFA（二層ゾーン）および FDS による火災進展解析

5.1 と同様に PRISME 試験を対象にした解析事例である。この事例ではマルチルーム体系を対象に、EVE SAYFA（に組み込まれた換気系モデル）と FDS の連成解析を行い、急激火災解析に対する適用性を検討した。

5.2.1. 解析条件

解析対象の体系を図 12 に示す。

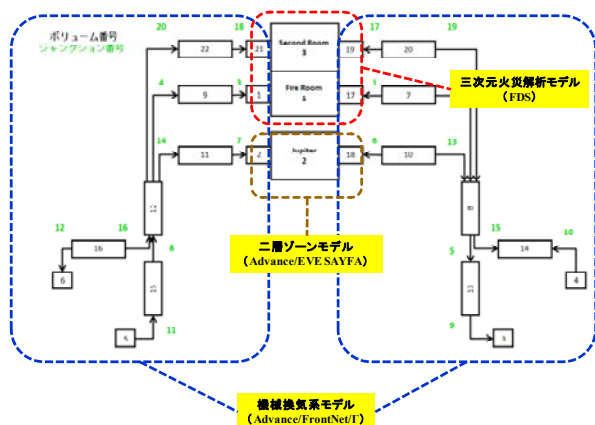


図 12 火災解析モデル（マルチルーム体系）

この連成解析手法では、火源室の3次元火災・熱流動詳細解析を、サブルーチン化したFDSを用いて行い、換気系ダクトの1次元熱流動解析を、EVE SAYFAに組み込まれたAdvance/FrontNet/Tを用いて行った。

図 13 に3次元解析のための3次元モデル図を示す。マルチルーム試験は、Fire-RoomとSecond-Roomの二つの部屋を用いて試験が行われており、二つの部屋の間のドアは開放された状態にある。各部屋に給気用と排気用のダクトが設置されており、火災試験時においても換気系は継続運転を行う。火源として、Fire-Roomの中央の床面にプール火災を模擬した燃焼皿が設置されている。各部屋は、幅6m、奥行き5m、高さ3.95mの直方体である。

火源の条件は、時刻ゼロに火源の部屋で火災が発生し、急激に発熱とガスが発生するものとする。発熱条件は、約3分で約670kWのピークに達し、約32分まで継続すると想定している。

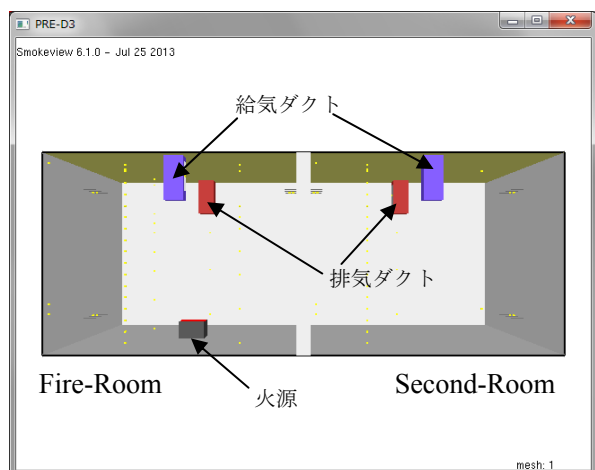


図 13 火源室の3次元モデル

5.2.2. 解析結果

EVE SAYFA と FDS の連成解析で得られた主な解析結果を、図 14、図 15 に示す。給排気流量変化は、Advance /FrontNet/T で得られた解析結果であり、その他はFDSにより得られた火源室に関する解析結果である。

火災が生じて直ちに火源から大量の熱と、二酸化炭素 CO_2 や一酸化炭素 CO などのガスが発生するため、火源室のガス圧力が急増し、給排気とも排気の向きに流量が急速に増加する。そのため、給気側の換気系ダクトで逆流が生じる。従来の、CFAST と FDS の組み合わせでは解析困難だった、急激な発熱を伴う火災時の換気系の逆流が模擬できている。ガス温度の解析結果は、過渡直後の急激な温度上昇と過渡後800秒以降の均衡した温度変化の傾向をよく模擬できている。

本事例の詳細については、参考文献[12]を参照されたい。

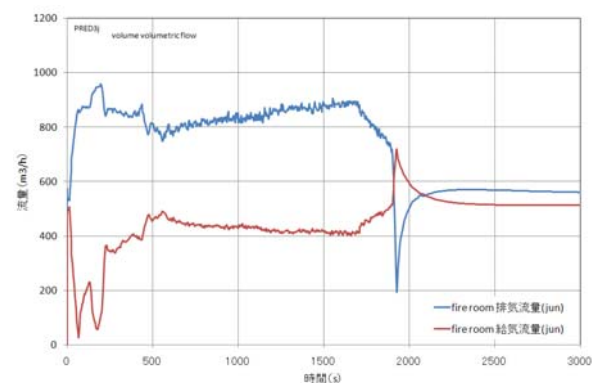


図 14 火源室への給排気流量変化 (FDS との連成解析)

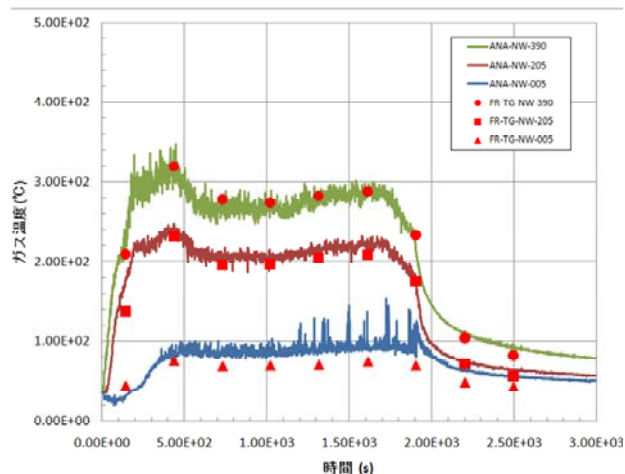


図 15 火源室のガス温度変化 (FDS との連成解析)

参考のため、時刻 600 秒における温度分布（火炎の分布）を図 16 に示す。

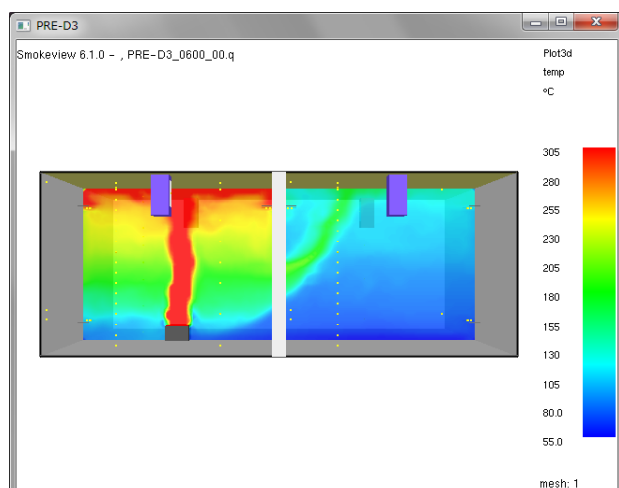


図 16 マルチルーム内温度分布（時刻 600 秒）
（FDS との連成解析）

一般に、大型建築物を対象とした火災進展解析を行う場合、全体を FDS で計算することは計算負荷が多大になると考えられる。そのようなケースでは、本事例のように火災室を FDS、それ以外を EVE SAYFA（二層ゾーンモデルや換気系モデル）でモデル化し、連成解析する方法が有効である。

6. おわりに

アドバンスソフト株式会社が改良整備した火災進展解析・有害物質拡散解析ソフトウェア Advance/ EVE SAYFA の概要を紹介した。また、従来の二層ゾーンモデルと火災 CFD コードの組み合わせでは困難だった、原子力施設などの密閉性の高い建物における換気下の急激火災の 3 次元詳細解析について紹介した。なお、本稿では有害物質拡散の解析事例について紙面の都合で紹介できなかったのもので、後日あらためて紹介する。

参考文献

- [1] 文部科学省次世代 IT 基盤構築のための研究開発、「革新的シミュレーションソフトウェアの研究開発」、
<http://www.ciss.iis.u-tokyo.ac.jp/rss21/>
- [2] Jones, W. W., Peacock, R. D., Forney, G. P. and Reneke, P. A., “CFAST –Consolidated Model of

Fire Growth and Smoke Transport (Version 6) Technical Reference Guide”, NIST Special Publication 1026, (2009)

- [3] R.D. Peacock, et al., “CFAST –Consolidated Model of Fire Growth and Smoke Transport (Version 6) User’s Guide”, NIST Special Publication 1041, (2005)
- [4] W. Jones, et al., “CFAST Technical Reference Guide”, NIST Special Publication 1030.
- [5] McGrattan, K. McDermott, R. et.al., “Fire Dynamics Simulator (Version 5) , User’s Guide”, NIST Special Publication 1019-5, (2019)
- [6] 田中嗜義, 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 (1989)
- [7] 社団法人建築研究振興協会, BRI2002 二層ゾーン建物内煙流動モデルと予測計算プログラム, (2003)
- [8] 秋村, “管路系流体過渡解析ソフトウェアの紹介”, アドバンスシミュレーション vol. 18
- [9] 独立行政法人原子力安全基盤機構: “マルチルーム体系における火災伝播解析手法の整備”, (2009.5)
- [10] 独立行政法人原子力安全基盤機構: “実機プラントに適用するための火災伝播解析コードの改良”, (2011.4)
- [11] 秋村, 三橋, 浜野, 吉岡, “換気系を考慮した急激火災解析－EVE SAYFA の換気系モデルの機能強化－” アドバンスシミュレーション vol. 6
- [12] 三橋, 浜野, 吉岡, 秋村, “換気系を考慮した急激火災解析－EVE SAYFA と FDS による火災連成解析－” アドバンスシミュレーション vol. 6

付録 部屋間の空気流動に関する式

(1) 垂直開口における流量計算式

窓やドアなどの垂直開口垂直ベント部を通る流量は、両端の部屋の圧力差により計算される。二層ゾーンにおける開口部の例を示す。

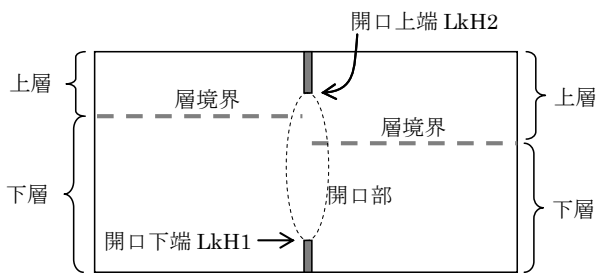


図 17 二層ゾーンにおける開口部の例

通常建物内の流れでは2方向流が生じるため、逆流の発生する高さ（中性帯）を考慮し、開口部を領域（スラブとよぶ）に分割して流量の評価を行う。最も一般的なケースを図 18 に示す。開口部のモデルは、前述の有害物質拡散解析モデルにも含まれているが、二層ゾーンでは両ゾーンの煙層高さも考慮する必要があり、別のモジュールとしている。

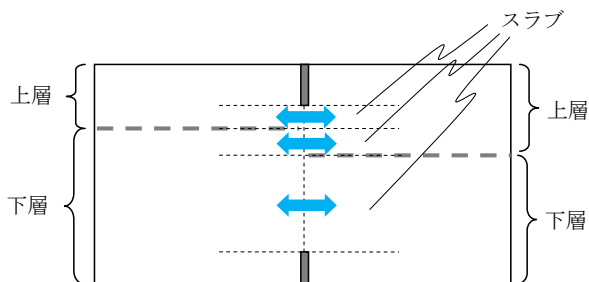


図 18 開口部のスラブ

質量流量の速度のための一般形は次式で与えられる。

$$v = C \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \quad (53)$$

ここで、 v は流速[m/s]、 C は流量係数[-]、 ρ は風上スラブの密度[kg/m³]、 ΔP はスラブ間の圧力差 [Pa]である。

スラブ（オイラー方程式を積分する領域）の境界高さは、中立面（neutral plane）、すなわち流れの反転が起こる高さ、開口下端や開口上端などの物理的な境界によって決める。ベント開口部は最大 6 つ（図 18、左右それぞれ最大 3 つずつ）のスラブに分割される。各スラブは層の高さ、中立面、つまり開口下端や開口上端などのベント境界で区切られる。

各スラブの質量流量は次式で求められる。

$$F = \frac{1}{3} C (8\rho) A_{slab} \sqrt{\frac{x^2 + xy + y^2}{x + y}} \quad (54)$$

ここで

$$\begin{aligned} x &= |P_t|^{1/2} \\ y &= |P_b|^{1/2} \end{aligned} \quad (55)$$

である。

P_t と P_b はそれぞれスラブの頂部と底部のベント間圧力差、 A_{slab} はスラブの断面積で、密度 ρ はゾースコンパートメントの値をとる。

(2) 水平開口における流量計算式

天井あるいは床における開口（ベント）を通る流れは、ドアや窓を通る流れよりも複雑になる。最も簡単には、圧力差のみにより駆動される一方向流となり、Bernoulli の式に基づいて計算できる。より一般には 'puffing' や、流れが不安定なときに生じる交換流(exchange flow)等の複雑な現象も扱う必要がある。

全体の流量式は次式で表される。

$$F = Cf(\gamma, \varepsilon) \left(\frac{\Delta P}{\bar{\rho}} \right)^{1/2} A_v \quad (56)$$

ここで

$$\gamma = c_p / c_v : \text{比熱比}$$

$$C = 0.68 + 0.17\varepsilon, \quad \varepsilon = \Delta P / P$$

A_v : 天井又は床開口面積

である。 f は γ と ε の関数を表す。不安定性に起因する交換流が次式で与えられ、これを上記流量に加算する。

$$F_{ex} = 0.1 \left(\frac{g \Delta \rho A_v^{5/2}}{\rho_{av}} \right) \left(1.0 - \frac{2 A_v^2 \Delta P}{S^2 g \Delta \rho D^5} \right) \quad (57)$$

ここで

$$\begin{aligned} D &= 2 \sqrt{A_v / \pi} \\ S &= 0.754 \text{ or } 0.942 \end{aligned} \quad (58)$$

(円形 or 正方形開口)

である。

※技術情報誌アドバンスシミュレーションは、アドバンスソフトウェア株式会社 ホームページのシミュレーション図書館から、PDF ファイルがダウンロードできます。(ダウンロードしていただくには、アドバンス/シミュレーションフォーラム会員登録が必要です。)