

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－

秋村 友香* 三橋 利玄** 浜野 明千宏* 吉岡 逸夫*

Analysis of Rapid Fire Accident with Ventilation System - Improvement of Ventilation System Model of EVE SAYFA -

Yuka Akimura*, Toshiharu Mitsuhashi**, Achihiro Hamano* and Itsuo Yoshioka*

有害危険物質を取り扱う施設では、外部への漏洩を防ぐために常に換気系を運転して、施設内を負圧に保たせるか、有害危険物質を回収処理設備に送る必要があり、そのために異常時でも換気系を含めた回収処理設備の制御が必要となる。そのような施設で火災が発生した場合には、施設の健全性評価や換気系の検討のために、火災延焼解析と換気系流動解析との連成による検討が必要となっている。

建物内の火災安全・防災のためのシミュレータである 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。本連成計算は、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ロ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徴であり、これにより米国商務省国立標準技術研究所で開発された 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が可能となった。

本稿では Advance/EVE SAYFA 2.0 による急激火災の解析事例を紹介する。得られた解析結果として、圧力、温度、煙層高さ、二酸化炭素濃度、酸素濃度の 1 時間に渡る挙動が得られ、火災のメカニズムに関する知見が得られ、実測値を良く再現した。

Key word: 急激火災、換気系、二層ゾーン、流量大変動、圧縮性、二酸化炭素、酸素、すす、フラッシュオーバー、バックドロフト、Advance/EVE SAYFA 2.0

1. はじめに

換気された部屋の中で火災が発生した場合、部屋の中の温度が上昇し一酸化炭素等の有毒ガスが充満するが、換気系を通じて有毒ガスや熱が排出され、酸素が供給され、部屋の中の状況は変化する。酸素濃度は燃焼に影響を及ぼし、すすの量は外部との伝熱量に影響を及ぼし、時々刻々と煙の高さが変化す

*アドバンスソフト株式会社 技術第 4 部

4th Technical Division, AdvanceSoft Corporation

**アドバンスソフト株式会社 第 2 事業部

Computational Science and Engineering Division II,
AdvanceSoft Corporation

る。このような複雑な状況を解析し、火災のメカニズムを理解して火災安全・防災に役立てるために、Advance/EVE SAYFA 2.0 の他、CFAST[1][2]、BRI2002[3]などの解析シミュレータが開発されている。ここで重要な量は、二酸化炭素濃度が 1000 ppm 以下であること（ビル管理法）や煙層高さが避難完了時点まで避難安全高さ 1.8m または開口高さより高いこと（建築基準法に基づく告知、避難安全検証法）である。これらの概念は通常の火災を想定しており、急激な火災という視点では、二酸化炭素濃度や避難というよりもいかに急激な火災を予防するかが焦点となる。

1.1. 急激な火災とは

急激な火災として知られている現象に「フラッシュオーバー」と「バックドラフト」の2つがある。フラッシュオーバーは「局所的な火災によって熱せられた天井や煙層からの放射熱によって、局所火源そのもの、あるいはその他の可燃物が外部加熱を受け、それによって急速な延焼拡大が引き起こされ全面火災に至る現象」[4]、バックドラフトは「火災が発生に伴い酸素量が不足している状態の時に、消防士による扉の開放などにより酸素が室内に供給され、同時に可燃性ガスを多量に含む高温気体が外部に流出することにより火災が急成長するか、火炎が扉等から周期的に噴出する現象」[5]と言われているが、定義は曖昧であるようである。表1にこれらの急激な火災時の現象について特徴をまとめた。

表1 急激な火災時の現象の特徴

	フラッシュ オーバー	バック ドラフト
火災範囲	全面火災	必ずしも全面火災 ではない
火災成長 時間	数分	数十秒
要因	局所的火災と天 井や煙層からの 放射熱	酸素の供給

1.2. 急激火災解析の従来の問題点

従来のAdvance/EVE SAYFAで換気系を含む火災実験を対象とした解析を行ったところ、給気口ノード部分で流れが逆流したときにAdvance/EVE SAYFAが計算を続けられないという問題が生じた。これと同様の症状は、CFASTでも報告されている。

計算が発散する過程を模式的に示すと図1のようになる。すなわち、①のように換気系によって部屋に給気と排気を行っている状況で火災が発生する場合を想定する。この場合、火炎の激しさによっては、急激な発熱・圧力上昇により部屋のガスは外に向かうようになり、それまで給気していた換気系

の流れが②のように反転する。従来のAdvance/EVE SAYFAによる解析では、この時点では収束性が悪化し、時間刻み幅が急減して計算が進まなくなり、最悪の場合、計算が破綻する。この原因は、②の左側の換気系における流れの向きの衝突にあり、従来のAdvance/EVE SAYFAの換気系モデルの基礎方程式や解析モデルの機能に不備があるものと考えられる。

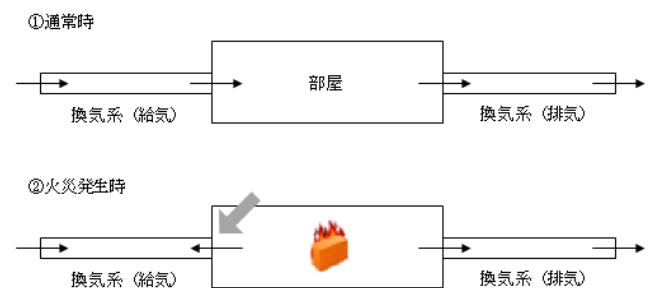


図1 換気系のある部屋における火災の模式図

そこで、検討したところ、これは圧縮性を考慮した保存方程式を解かなければ解決できない問題であり、従来のAdvance/EVE SAYFAの換気系モデルは、気体の圧縮性が考慮されていないため、このような問題が生じるものと結論付けた。この問題は、CFASTでも同じ事情と推察される。本稿では、この問題を解決するために火災解析に向けての換気系モデルを改良した経緯と成果を報告する。

2. Advance/EVE SAYFA 2.0

建物内の火災安全・防災のためのシミュレータとしてアドバンスソフト株式会社が開発しているAdvance/EVE SAYFA 2.0の概要について説明する。Advance/EVE SAYFA 2.0の解析モデルの詳細は付録で説明しているので、参照されたい。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[1][2][3]と呼ばれるマクロモデルを採用している。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。

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 をサブルーチン化して組み込まれている。両者の連成計算の方法は 2.6 節に述べる。表 2 に Advance/EVE SAYFA 2.0 の機能一覧表をまとめた。

表 2 Advance/EVE SAYFA 2.0 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 2 に示すように、建物内のコンポーネント、すなわち、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。

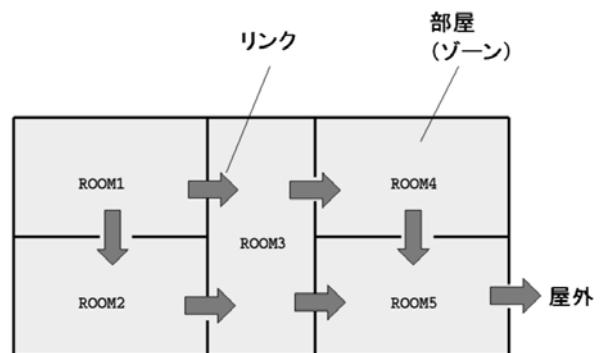


図 2 マクロモデルの形状モデル

2.2. 煙の流動モデル

煙の流動モデルは、図 3 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。これは、建物内の煙流動や火災予測において、国内では標準的に利用されているモデルである。

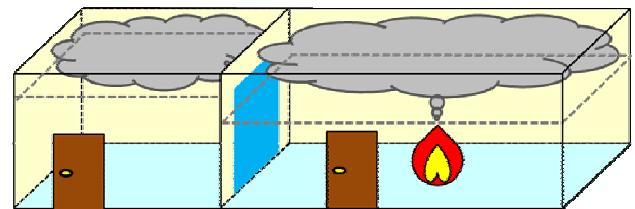


図 3 二層ゾーンの模式図

2.3. 二層ゾーンモデルの基礎方程式

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。これは、各層のエネルギー変化と圧力変化を考慮して各層の体積を計算し、下層体積を部屋の水平断面積で除して求めている。二層ゾーンモデルの基礎方程式を以下に示す。

①質量保存式

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

ρ : ゾーンの密度 [kg/m³]

V : ゾーンの体積 [m³]

F : ゾーンの境界を通して出入する気体の質量流速 [kg/s]

j : 流出入のある境界を表す添字

②化学種保存式

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

Y_l : 化学種 l の質量分率 [kg/m³]

Γ_l : 化学種 l の生成速度 [kg/s]

③エネルギー保存式

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

u_l : 化学種 l の比内部エネルギー [kJ/kg]

h_l : 化学種 l の比エンタルピー [kJ/kg]

P : 圧力 [Pa]

\dot{Q}_{net} : 熱伝達によりゾーンに加わる正味の熱量

④気体の状態方程式

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

P_l : 化学種 l の分圧

M_l : 化学種 l の分子量 [kg/mol]

R : 普通気体定数 [kg/mol]

⑤開口部に対する運動方程式

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

v : 流速 [m/s]

C : 流量係数

ρ : 風上スラブの密度 [kg/m³]

ΔP : スラブ間の圧力差 [Pa]

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方法は 5.1、5.2 節を参照のこと。

2.4. 伝熱モデル

2.4.1. 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 4）。

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。

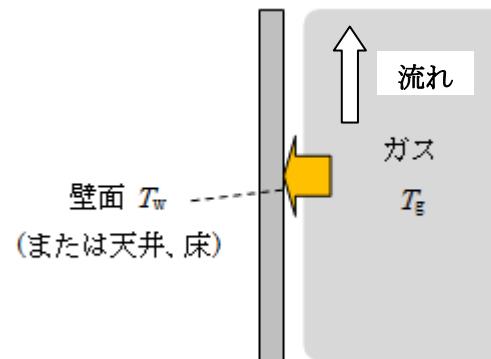


図 4 対流伝熱の模式図

表面伝熱面積 A_s を通じての対流伝熱量 Q_c は次式で表わされる。

$$Q_c = h A_s (T_g - T_s) \quad (6)$$

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。

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

L : 代表長さ

g : 重力加速度 (m/s²)

k : 热伝導率 (W/m²K)

β : 体積膨張率 (1/K)

T_s : 表面温度 (K)

T_g : ガス温度 (K)

ν : 動粘性率 (m²/s)

α : 热拡散係数 (m²/s)

すべての物性は次式の膜温度での値を用いる。

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

2.4.2. 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は重要である。図 5 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。

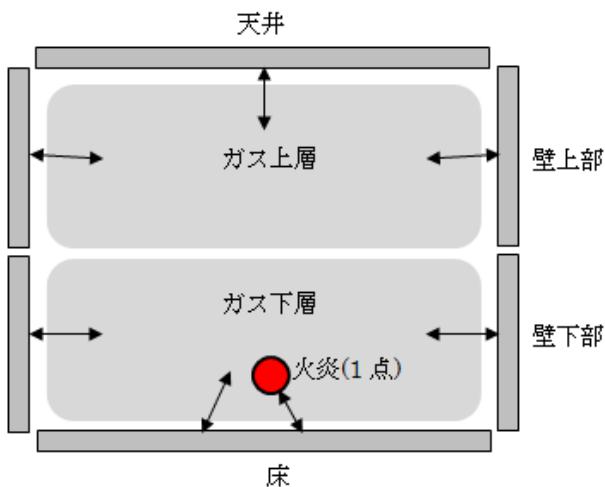


図 5 放射伝熱の模式図

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との間の放射率の関数である。

$$Q_{rad} = \varepsilon \sigma_{SB} (T_g^4 - T_s^4) F_{1-2} \quad (9)$$

ステファンボルツマン常数

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

F_{1-2} : 形態係数

計算の簡素化のために以下の仮定をおく。

- 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。

$$\varepsilon = \alpha = 1 - \rho \quad (10)$$

- 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される。

形態係数の取り扱いと放射率のモデルについては、付録の 5.3.1、5.3.2 に詳述する。

2.5. 換気系モデル

空調、換気、排煙などの目的で使用され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。本ソフトウェアでまさに換気系を解析できる。ここでは、その概要について説明する。

Advance/FrontNet/Γ は、配管の他にタンク、プロワ、弁等の流体機器で構成される管路系を解析対象とする。流体の配管に沿った流れ方向のみの 1 次元圧縮性流体の基礎方程式を解く。表 3 に Advance/FrontNet/Γ の概要を、表 4 に機能概要を示す。

表 3 Advance/FrontNet/Γ の概要

基礎方程式	質量保存式、運動量保存式、エネルギー保存式、状態方程式
対象流体	圧縮性流体
時間積分法	Euler 予測子修正子法
対流項	1 次精度風上差分
格子	スタッガード格子
流体物性	理想気体または実流体物性
物理モデル	壁面摩擦モデル 構造材熱伝導モデル 臨界流モデル 熱伝達モデル (Dittus-Boelter 強制対流相關式)

表 4 Advance/FrontNet/ Γ の機能概要

項目	入力詳細
理想気体ガスの場合	分子量、比熱比、粘性、熱伝導度
実流体物性の場合	水素、メタン、酸素など流体を指定
直管、テーパー管	(形状) 配管長、配管径 (材質) 粗度
境界条件 (圧力指定または流量指定、温度指定)	Dirichlet 条件 (固定値または時系列情報を入力) または Neumann 条件
接続、分岐、合流	抵抗係数、径
ベンドやオリフィスなどの局所抵抗	抵抗係数
バルブ	開度と C_V 値の関係、開度、遮断速度
1 次元円筒熱伝導、スラブ熱伝導	構造体の厚み、材料物性、熱伝達率

2.5.1. 換気系モデルの基礎方程式と計算方法

基礎方程式は 1 次元圧縮性流体の保存方程式であり次のとおりである。

- 質量保存式

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u)}{\partial x} = 0 \quad (11)$$

- 運動量保存式

$$\frac{\partial \rho u}{\partial t} + \frac{\partial (\rho uu)}{\partial x} + \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{2} \frac{K_{wall}}{L} \rho u^2 - \rho g \sin \theta - F = 0 \quad (12)$$

- エネルギー保存式

$$\frac{\partial E}{\partial t} + \frac{\partial (E + p)u}{\partial x} - \frac{\lambda A (T_w - T_f)}{V} = 0 \quad (13)$$

- 状態方程式

$$p = \rho RT = (\gamma - 1) \left(E - \frac{\rho u^2}{2} \right) \quad (14)$$

以下に理想気体について関連する式をまとめます。

- 単位体積当たりの全エネルギーと内部エネルギーの関係

$$E = \rho e + \frac{\rho u^2}{2} \quad (15)$$

- 音速の定義式

$$v_{sound}^2 = \left(\frac{\partial p}{\partial \rho} \right)_s = \gamma \frac{p}{\rho} \quad (16)$$

- 比エンタルピー関係式

$$i = e + \frac{p}{\rho} = \frac{v_{sound}^2}{\gamma - 1} + \frac{u^2}{2} \quad (17)$$

- 比熱比定義式

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v} \quad (18)$$

- マイヤーの関係式

$$C_p - C_v = R \quad (19)$$

- 内部エネルギーと温度

$$e = C_v T \quad (20)$$

- 比エンタルピーと温度

$$i = C_p T \quad (21)$$

基礎方程式の時間発展の離散化スキームは Euler 予測子修正子法を用い、ソース項は半陰的に扱う。生成項を半陰的に扱うのは、ある時刻に大きな摩擦損失や吸熱が急激にあっても計算が不安定になるのを回避するためである。一方、空間離散スキームについては、対流項について 1 次風上差分スキーム、圧力項については中心差分法を適用している。

2.5.2. 換気系モデルのメッシュスキーム

配管は、断面積、長さ、角度、高さを考慮し、図 6 のように長手方向に領域分割して、それぞれの格子に対して方程式を解くことにより質量、運動量、エネルギーなどの出入りを調べ、それぞれの格子の物理量を得る。なお、配管は円筒として扱っているが、断面が四角形のダクトに対しては、等価直径を与えることで模擬される。

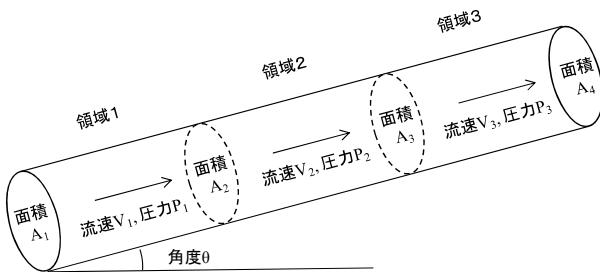


図 6 配管の格子分割イメージ図

Advance/FrontNet/T では、図 7 に示すように、コントロールボリューム（メッシュ）の中心位置に密度、エネルギー、圧力等、コントロールボリュームの界面上に流速を定義したスタガード格子スキームを用いている。スタガード格子を用いる利点の一つは、流速を解くのが界面上であるため、運動量保存式中の圧力項 (dp/dx) が隣り合ったコントロールボリュームからの情報で作られることである。コロケート格子を用いた場合、流速をコントロールボリューム中心で解くため、自分自身の圧力に関係なく、運動量保存式中の圧力項 (dp/dx) が両隣のコントロールボリュームからの情報で作られるため、非現実的な解を得ることがある。

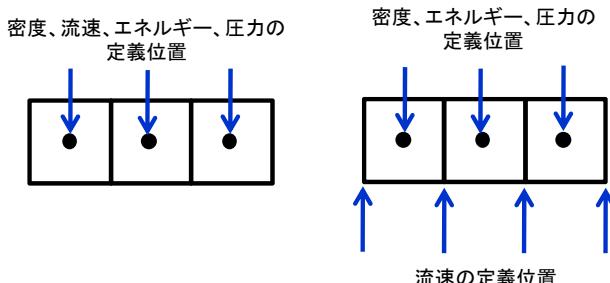


図 7 コロケート格子（左）とスタガード格子（右）

ボリューム・ジャンクション法は、複雑な管路系を取り扱うのに適した方法であり、これを用いることにより、管路系の合流・分岐や流体機器の配置の設計を自由に行うことができる。

「ボリューム」はコントロールボリュームを表し、「ジャンクション」はボリュームの界面を意味するが、図 8 に示すように、ジャンクションは分岐管に対し、2 本定義されることとなる。スタガード格

子スキームに従い、ボリューム上では質量保存式、エネルギー保存式、状態方程式により密度、エネルギー、圧力が解かれ、ジャンクション上では流速が解かれる。境界条件は端部のボリュームに圧力・温度を指定することにより与えられる（圧力境界条件）。流量を指定する流量境界条件では、端部のジャンクションに流量を指定する。また、流体機器は境界条件と同様にボリュームまたはジャンクション上に定義される。

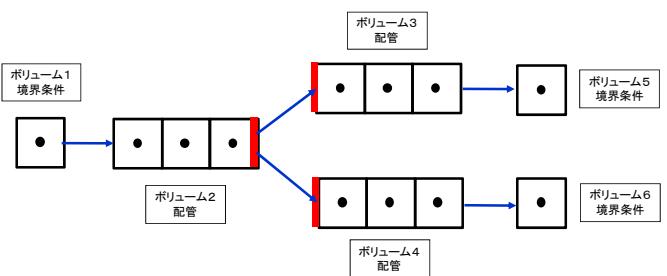


図 8 ボリューム・ジャンクションによる管路系設計の例（四角はボリューム、矢印はジャンクションを表す）

2.5.3. 換気系モデルの摩擦損失モデル

円管の摩擦損失 λ を乱流領域において、最も良く使用されている次の Colebrook の式がある。

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2.0 \ln \left(\frac{\varepsilon/D}{3.7} + \frac{2.51}{Re \sqrt{\lambda}} \right) \quad (22)$$

ここで $\varepsilon [m]$ は管の絶対粗度を表す。

この式は λ に関して非線形の式となっており、反復計算が必要なことから使用するには煩わしいため、Advance/FrontNet/T では λ に関して陽的表現として、かつ、層流から乱流の広範囲の領域に渡って整理されている Churchill の式[6]を採用している。

$$\begin{aligned} \frac{\lambda}{4} &= 8 \left\{ \left(\frac{8}{Re} \right)^{12} + (A + B)^{-3/2} \right\}^{1/12} \\ A &= (2.457 \log C)^{16}, \\ B &= (3.753 \times 10^4 / Re)^{16}, \\ C &= \frac{1}{(7/Re)^{0.9} + 0.27(\varepsilon/d)} \end{aligned} \quad (23)$$

本式を使用して管摩擦係数と Reynolds 数の関係を異なる粗度に対して描くと図 9 のような関係が得られる。これは Moody 線図をよく再現している。ここでは、層流領域、遷移領域、乱流領域にまたがる管摩擦係数が表されている。管路系流体解析では、流れ方向を 1 方向に仮定しているが、Moody 線図を適切に考慮することにより、乱流の影響も考慮されることとなる。

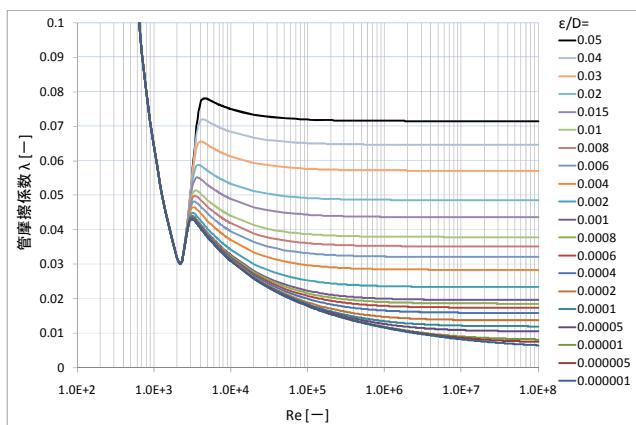


図 9 Churchill 式を用いた管摩擦係数とレイノルズ数の関係

2.5.4. 換気系の局所損失の取り扱い

オリフィス、ベンド、エルボなど管に局所的な抵抗は次のような抵抗係数 ζ として取り扱う。

$$H_{\text{in}} - H_{\text{out}} = \zeta \frac{V^2}{2g} \quad (24)$$

抵抗係数 ζ はハンドブック[7]などにまとめられている。

2.6. 部屋と換気系の連成解析

2.6.1. 連成時のプログラム構成

Advance/FrontNet/ Γ を Advance/EVE SAYFA 2.0 に組み込む方法として、図 10 に示す 3 方式が考えられる。ここでは、Advance/EVE SAYFA 2.0 の中の、本章で前述した二層ゾーンモデルを扱うサブルーチン（便宜的に Advance/EVE SAYFA/1D と呼ぶ）との関係を示した。①は、新たな全体制御プログラムを設け、Advance/FrontNet/ Γ と Advance/EVE SAYFA/1D を呼び出す方式である。②は

Advance/EVE SAYFA/1D を親プログラムとして Advance/FrontNet/ Γ をサブルーチン化するもので、③は逆に Advance/FrontNet/ Γ を親プログラムとして Advance/EVE SAYFA/1D をサブルーチン化するものである。今回は、このあとの 3 次元モデルとの連成も考慮し、解析モデルの「部屋」という単位を基本にして、②の方式を採用した。

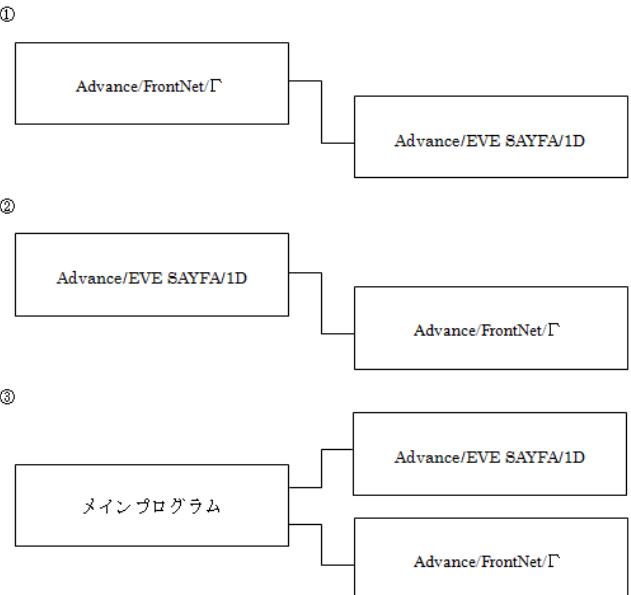


図 10 プログラム連成の方式

Advance/FrontNet/ Γ をサブルーチン化するにあたっては、次の点を検討し改修した。

- ・プログラムの構成
- ・データの共有
- ・時間刻み幅の設定
- ・データの受け渡し

2.6.2. ソフトウェア間のデータ同期の取り扱い

2 つのソフトウェアの時間の取り扱いについて、どのように同期をとったかを述べる。まず、図 11 のように Advance/FrontNet/ Γ を機能別に分けた。すなわち、データ入力およびプログラム内の初期設定と部分と、時間刻みによって計算を進める過渡計算の部分である。これらをそれぞれサブルーチンとして、図 12 に示すように、Advance/EVE SAYFA/1D の初期設定部分と時間ループのところ

で呼び出すようにした。これにより、従来の Advance/EVE SAYFA/1D のデータ入力および初期設定に続けて Advance/FrontNet/Γ のデータ入力および初期設定を行い、時間刻みによる計算の進行に合わせて Advance/EVE SAYFA/1D の過渡計算と Advance/FrontNet/Γ の過渡計算を、各ステップの中で交互に行うことができる。なお、Advance/FrontNet/Γ の計算ではナルトランジエント計算によって初期状態を設定する必要があるため、この部分を全体の過渡計算に入る前に行うように工夫した。ここでは、Advance/FrontNet/Γ の過渡計算部分を指定回数だけ先行実行する。

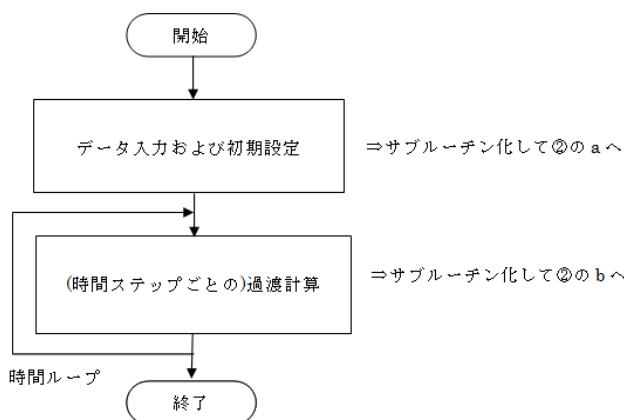


図 11 Advance/FrontNet/Γ の構成概要

データの共有に関しては、それぞれの形状データ定義は従来の方式を継承し、接続情報を新規で追加した。互いに接続する部分は、境界条件指定の新たなオプションとして入力データで定義し、その情報を保持する。時間刻み幅に関しては、一般に Advance/EVE SAYFA/1D で設定される時間刻み幅と Advance/FrontNet/Γ で設定される時間刻み幅が、それぞれのロジックで設定されるために必ずしも一致しない問題がある。どちらの時間刻み幅が大きいかは、形状モデルや解析条件にもよるために一概に言えないが、おおむね Advance/EVE SAYFA/1D の部屋（コンポーネント）モデルの寸法が大きいとすると、Advance/EVE SAYFA の方が、時間刻み幅が大きくなる場合が多いと考えられる。今回は、Advance/EVE SAYFA/1D で設定される時間刻み幅の中で、Advance/FrontNet/Γ の計算を行うので、

その場合の時間刻み幅の上限は Advance/EVE SAYFA/1D の時間刻み幅と設定し、Advance/FrontNet/Γ のロジックによっては細分されるようにした。例えば Advance/FrontNet/Γ の方が 1/10 の時間刻み幅である場合は、Advance/FrontNet/Γ の過渡計算サブルーチンを 10 回実行してから Advance/EVE SAYFA/1D に戻ることになる。

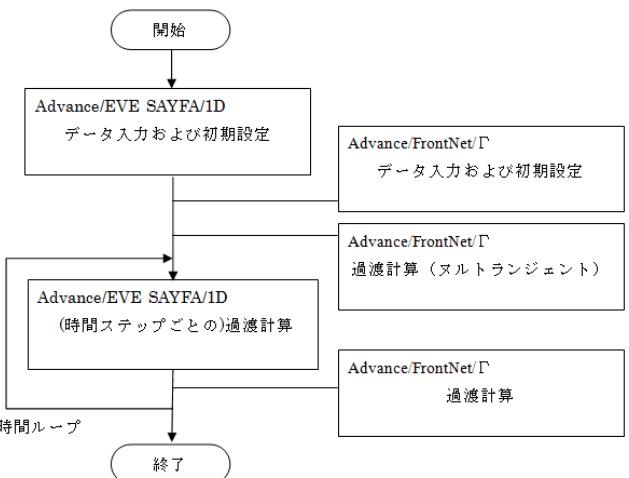


図 12 Advance/FrontNet/Γ と連成させた Advance/EVE SAYFA/1D の構成概要

2.6.3. データの受け渡し

Advance/EVE SAYFA と Advance/FrontNet/Γ の接続部における、時々刻々の境界条件としてのデータの受け渡しは次のようにした。換気系から部屋の方向に流れている場合、Advance/FrontNet/Γ で求めた流量、状態量（圧力、温度、密度、気体成分）を Advance/EVE SAYFA/1D に渡す。逆に部屋から換気系の方向に流れている場合、Advance/FrontNet/Γ にとっては流入条件となるため、Advance/EVE SAYFA/1D で求めた流量と状態量を Advance/EVE SAYFA/1D に渡す。

3. 解析事例

従来の Advance/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を取り上げ、

Advance/EVE SAYFA 2.0 を用いて解析を行い、換気系モデルとして、Advance/FrontNet/T を組み込むことで機能強化を図ったことの有効性を検討した。

3.1. 解析条件

解析対象の体系を図 13 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 Advance/EVE SAYFA 2.0 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、Advance/EVE SAYFA 2.0 に組み込まれた Advance/FrontNet/T を用いて行う。さらに、火源室に隣接する「Room」とある部屋の熱流動解析と全体制御を Advance/EVE SAYFA 2.0 を用いて解析を行った。なお、「Room」とある部屋では火災は起こらないが、二層ゾーンモデルを適用している。

本解析体系において通常運転状態では、図 13 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た。

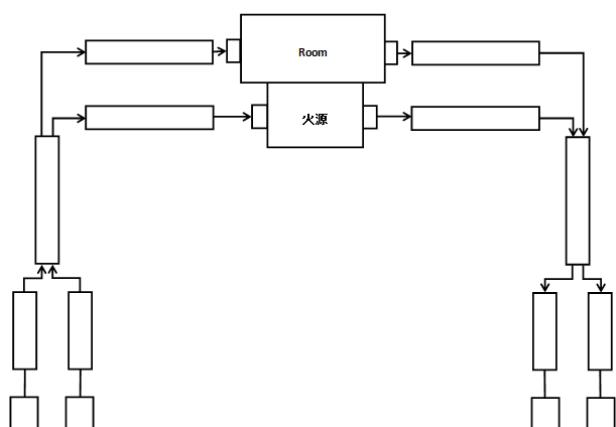


図 13 火災解析モデル

3.2. 解析結果

解析結果を図 14～図 19 に示す。

図 14 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表し、図 15 は火源室の圧力変化である。なお、流量のマイナスは逆流となっていることを示している。

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、給排気とも排気方向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)は低下している。ここまでの一連の解析では、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られている。急激な変動以後、約 10 分で定常火災となって、ガス圧力も給排気流量もほぼ一定に推移し、約 53 分で鎮火するため、その後の解析結果も終息する方向となる。

図 16 は火源室の煙層高さを表す。初期値が 4m であるのは、煙層高さの初期条件を部屋の天井高さにとっているためである。火源発熱量上昇と同時に煙層高さはゼロに近づく。これは部屋が煙で充満している様子を表す。排気しているにも関わらず煙層高さがゼロであるのは、煙の発生量が多く、排気が追い付いていない状況を示している。

図 17 は火源室の二層ゾーンモデルにおける上層と下層のガス温度を示している。時刻約 5 分に上層ガス温度はピーク値をとり、その後定常的な振る舞いを示している。下層ガス温度はほとんど一定値をとっている。これは、対流伝熱による上層ガスへの入熱が大きいことを示している。火源の減少により、最終的には上層ガス温度は下がる傾向にある。

図 18 は火源室の上層ガス内の酸素濃度を示し、図 19 は火源室の上層ガス内の二酸化炭素濃度を示している。急激な火災燃焼に伴う CO_2 濃度の増加と O_2 濃度の減少が捉えられている。また、約 5 分過ぎから、火源からの発熱量と発生質量の現象と換気効果により、ガス温度と CO_2 濃度の上昇がおさまって、前述と同様に火源、換気、対流・放射伝熱

がバランスすることで定常火災となっている状況が表現されている。さらに、約 53 分で鎮火することから、給排気によって、O₂濃度は通常の空気の濃度に回復し、CO₂濃度は減少している。

以上のように、解析結果は、火源、酸素の供給量と消費量、室内温度、煙層高さ、外部との放射伝熱などさまざまな物理的事象が関連した約 60 分に渡る現象をよく再現できた。なお、実測結果は完全公開ではないため、本稿には記載できないが、いずれの解析結果も実測結果を良く再現できていることを確認している。実測結果については、文献[8]を参照されたい。

火災発生により圧力が急増し、給気側の換気系で逆流が生じるが今回の Advance/EVE SAYFA 2.0 の改良により、このような事象でも解析ができるようになっており、特に換気系モデルの機能強化を図ったことの有効性が示されたといえる。

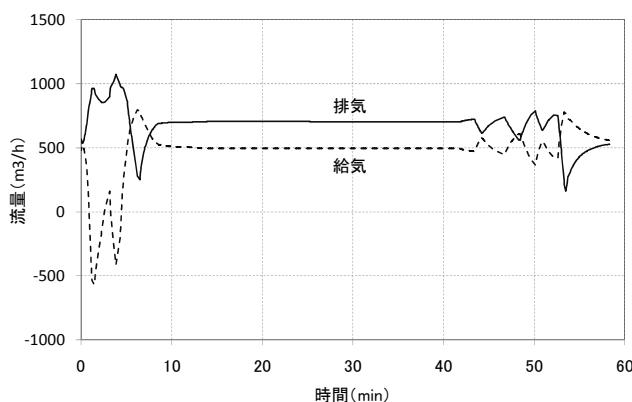


図 14 解析結果（火源室への給排気流量）

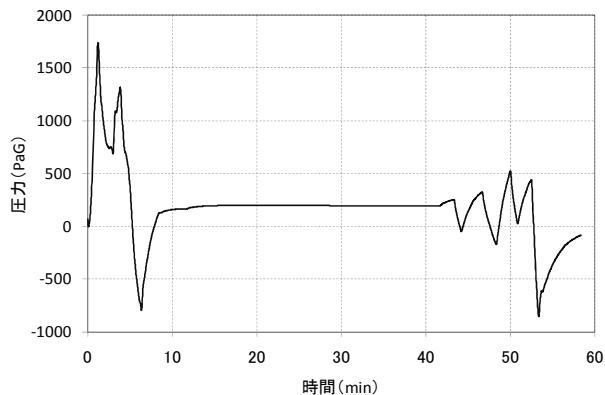


図 15 解析結果（火源室のガス圧力）

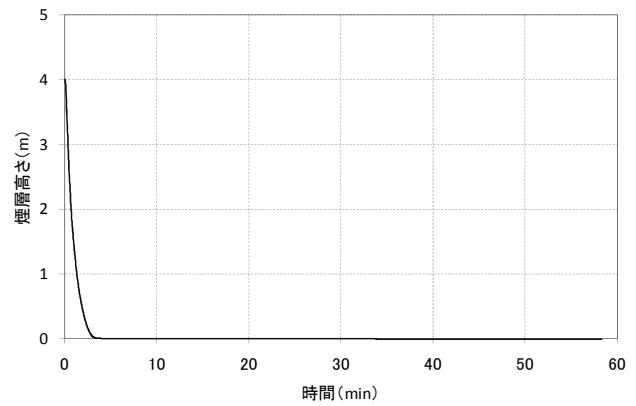


図 16 解析結果（火源室の煙層高さ）

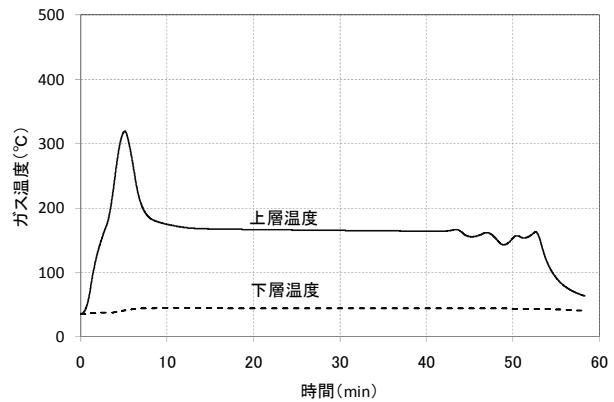


図 17 解析結果（火源室のガス温度）

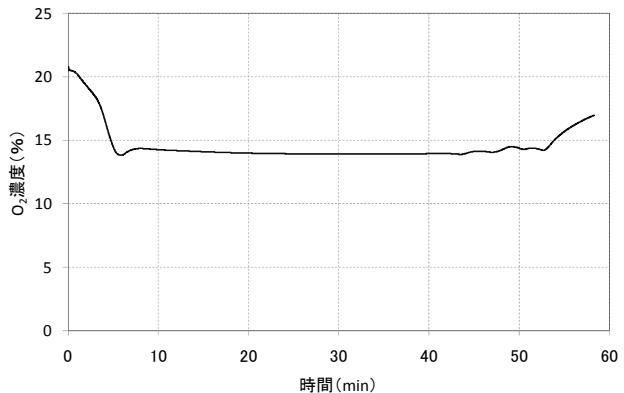
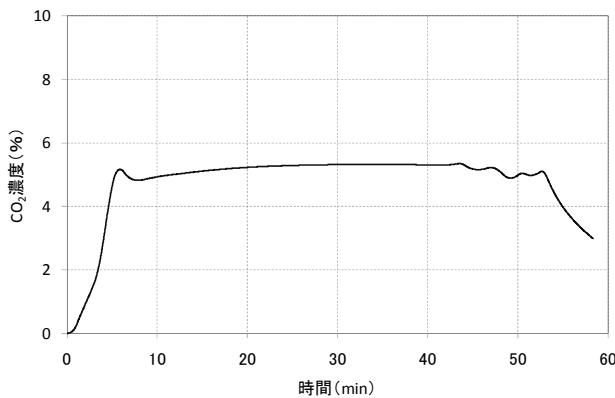


図 18 解析結果（火源室の上層 O₂濃度）

図 19 解析結果（火源室の上層 CO₂濃度）

4. おわりに

従来、建築分野で標準的に使用されていた非圧縮性近似の機械換気系モデルでは解決することができない急激な火災で生じる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解析モデルを従来の Advance/EVE SAYFA に導入し、Advance/EVE SAYFA 2.0 としてリリースしたため、本稿ではその成果の一部を紹介した。

具体的には、圧縮性流体が考慮できる 1 次元管路系解析プログラム Advance/FrontNet/T を Advance/EVE SAYFA 2.0 に組み込んで、急激な火災時の換気系の熱流動解析が可能となり、従来の Advance/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急激火災解析事例に対して妥当な結果が得られるようになった。

解析結果は、火源、酸素の供給量と消費量、室内温度、煙層高さ、外部との放射伝熱などさまざまな物理的事象が関連した約 60 分に渡る現象をよく再現でき、また、実測結果を良く再現していることを確認した。

今後は、大規模施設等における激しい火災などの解析を行う予定であり、換気系シミュレーションによる新たな知見を得られるものと期待できる。また、フラッシュオーバーやバックドラフトなどの急激火災の予防対策へも貢献していきたい。また、火災学会講演会[9]などで議論されている急激な火災などについても、検討していきたい。

5. 付録 1 : Advance/EVE SAYFA 2.0 のモデル詳細

本文で触れなかった Advance/EVE SAYFA 2.0 のモデルの詳細について以下に記載する。

5.1. 垂直開口部（水平流）の質量流量モデル

窓やドアなどの垂直開口部を通る流量は、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図 20 に示す。

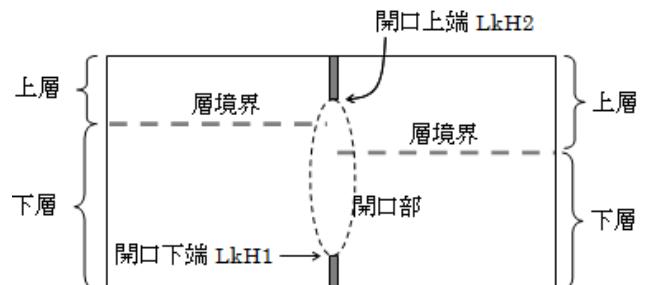


図 20 二層ゾーンにおける開口部の例

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（中性帶）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。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、最大で図 21 のようにスラブが生じる（左右それぞれ最大 3 つずつ）。スラブの境界高さは、中立面（流れの反転が起こる高さ）と、土台や下ばなどの物理的な境界によって決める。

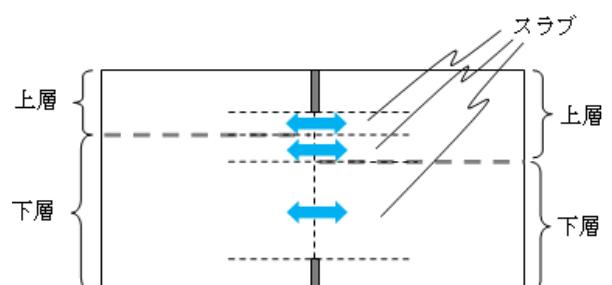


図 21 開口部のスラブ

垂直開口部に対する質量流量を次の式で定義する。

$$F = \frac{1}{3} C(8\rho) A_{slab} \sqrt{\frac{x^2 + xy + y^2}{x + y}} \quad (25)$$

A_{slab} : スラブの流路面積

$$x = |P_t|^{1/2}$$

$$y = |P_b|^{1/2}$$

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 は流れの向きに応じ上流コンパートメントの値をとる。

5.2. 水平開口部（上下流）の質量流量モデル

天井或いは床における開口を通る流れは、ドアや窓を通る流れよりも幾分複雑になる。水平開口部に対する質量流量は次の式で定義される。

$$F = Cf \left(\gamma, \varepsilon \right) \left(\frac{\Delta P}{\bar{\rho}} \right)^{1/2} A_v \quad (26)$$

$\gamma = c_p / c_v$: 比熱比

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

A_v : 開口面積

をそれぞれ表す。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。

$$F_{ex} = 0.1 \left(\frac{g \Delta \rho A_v^{5/2}}{\rho_{av}} \right) \left(1.0 - \frac{2 A_v^2 \Delta P}{S^2 g \Delta \rho D^5} \right) \quad (27)$$

$$D = 2\sqrt{A_v / \pi}$$

$$S = 0.754 \text{ or } 0.942 \quad (\text{円形 or 正方形開口})$$

5.3. 放射伝熱モデル

5.3.1. 形態係数

2面間の輻射交換の計算において、1面から射出される放射エネルギーのうち、2面へ至るもの割合を形態係数と呼び、 F_{1-2} で表す。形態係数に関する模式図を図 22 に示す。 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。有限面積間の形態係数（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）は、表面積に比べ 2 面が十分離れているとの仮定により次式で近似する。

$$F_{1-2} \approx \frac{\cos \theta_1 \cos \theta_2}{\pi L^2} A_2 \quad (28)$$

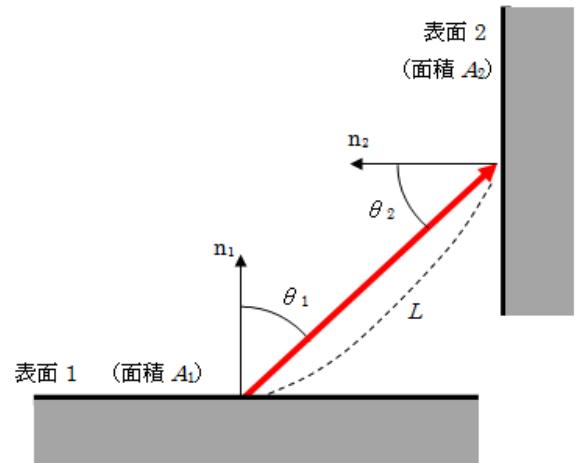


図 22 放射伝熱の模式図

5.3.2. 透過率と吸収度

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。

$$\tau(L) = e^{-aL} \quad (29)$$

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。ガス吸収係数 α_G は、CO₂ と H₂O 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。

$$\alpha_G = \alpha_{H_2O} + \alpha_{CO_2} - C \quad (30)$$

ここで、 C は全波長に適用するための補正項であり、典型的な火炎条件では CO₂ の吸収率の半分とする。

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、次式となる。

$$\tau_T = e^{-aL} (1 - \alpha_{H_2O} - 0.5\alpha_{CO_2}) \quad (31)$$

光学的な薄さの限度での吸収係数 a は Planck の平均吸収係数で置き換えることができ、光学的な厚さの限度での吸収係数は Rosseland の平均吸収係数で置き換えることができる。

$$\alpha = kf_v T \quad (32)$$

ここで、 k はすす粒子の光学的特性に依存する定数、 f_v はすすの体積割合、 T はすすの温度[K]である。 a は広い燃料範囲でほぼ一定であることが分かっている。 f_v はすすの質量と密度とガス層の体積から求まる。すすはガス層で熱的に平衡であると仮定

する。

H_2O と CO_2 に関する Edward の吸収率データは、ガス濃度の対数をパラメータとして、放射率の対数対（圧力・経路長）の対数として報告されている。各ガスに関して、これらのデータは、温度とガス濃度に基づくインデックスで、放射率の 2 次元配列としてテーブルに整理された。ガス成分もすす同様に、吸収度と放射率が等価であると仮定される。有効な経路長は、次式で近似される。

$$L = c \frac{4V}{A} \quad (33)$$

ここで、 L は平均ビーム長さ[m]、 c は定数(典型的な幾何形状に対しおよそ 0.9)、 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。

各ガスに対して、吸収率の対数は、温度の対数と濃度の対数で補間して参照テーブルから評価する。用意したテーブルの温度や濃度の領域外の場合、最も近い許容値を返す。また、パラメータが領域内外かのエラーフラグを返し、後者の場合は過大か過小かも示す。この全体の過程は H_2O と CO_2 の両方について実行される。

6. 付録 2 : Advance/EVE SAYFA の従来の換気系モデル

参考のために従来の Advance/EVE SAYFA の換気系モデルについて記す。

ファンダクトシステム（機械換気システム）は温度と圧力が特定されたノードのネットワークとして表される。

流量 は圧力差 と伝導率 (conductance) により

$$\dot{m} = G \sqrt{\Delta P} \quad (34)$$

として表される。伝導率は一般に

$$\frac{1}{G} = \sqrt{\frac{2\rho}{C_0}} A_0 \quad (35)$$

のように記述できる。ここで C_0 は流量係数、 A_0 は流入出面積やダクトの種類などに依存する係数を表す。

各ノードに対する保存式は

$$\sum_j \dot{m}_{ij} = 0 \quad (36)$$

で表される。

ダクトにおける伝導率は、ダクトのタイプ(円形、矩形、エルボーなど)に応じてより詳細に特徴付けられる。

$$G = \sqrt{\frac{FL}{2\rho D_e A_0^2}} \quad (37)$$

ダクトにおける温度 は次式を用いて計算される。

$$c_v \rho_d V_d \frac{dT_d}{dt} = c_p m_d (T_{in} - T_{out}) - h_d A_d (T_d - T_{amb}) \quad (38)$$

ここで、

V_d : ダクト体積

ρ_d : ダクトの気体密度

m_d : 質量流量

T_{in}, T_{out} : ダクトに流入・流出する気体温度

h_d, A_d : ダクトにおける対流熱伝達係数および表面積

T_{amb} : 周囲温度

をそれぞれ表す。

参考文献

- [1] 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).
- [2] Walter.W. Jones, et al., "CFAST –Consolidated Model of Fire Growth and Smoke Transport (Version 5) Technical Reference Guide", NIST Special Publication 1030, (2004).
- [3] 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.
- [4] 消防研究センターWeb ページ : http://www.fri.go.jp/cgi-bin/hp/index.cgi?ac1=JL_L1&ac2=13&ac3=425&Page=hpd_view
- [5] (社) 日本火災学会編：“はじめて学ぶ建物と火災”，共立出版, (2008).

- [6] Churchill, S. W.: “Friction-factor equation spans all fluid-flow regimes”, Chem. Eng., Nov.7, (1977).
- [7] 日本機械学会：“技術資料 管路ダクトの流体抵抗”，丸善株式会社, (2001).
- [8] 独立行政法人原子力安全基盤機構：“火災伝播解析コードの検証解析”, (2007),
<http://www.jnes.go.jp/content/000011160.pdf>
- [9] 日本火災学会講演討論会：“急拡大する火災など 不安定環境下での事故事例とその対策”, (2010) ,
<http://wwwsoc.nii.ac.jp/kasai/mt/arc/upfiles/学術講演討論会 2010 ポスター.pdf>