

建物内の火災安全・防災のためのシミュレータ Advance/EVE SAYFA 2.0

吉岡 逸夫* 浜野 明千宏** 三橋 利玄**

Simulator for Fire Protection and Disaster Prevention in Built Environment Advance/EVE SAYFA 2.0

Itsuo Yoshioka*, Achihiro Hamano**, Toshiharu Mitsuhashi**

建物内の火災安全・防災のためのシミュレータ”EVE SAYFA ;Enhanced Virtual Environment Simulator for Aimed and Yielded Fatal Accident”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」で開発されたプログラムである。この EVE SAYFA に対して、アドバンスソフト株式会社が特に火災解析機能の強化を図ったものが Advance/EVE SAYFA 2.0 である[1]。EVE SAYFA 2.0 は、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[2]。この計算機能は、従来の火災、煙層高さ、二酸化炭素濃度などの解析に加え、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る。また、EVE SAYFA 2.0 は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のために 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、EVE SAYFA 2.0 について、原子力関連施設における火災シミュレーションへの適応性に焦点をあてて解説する。

Key word: Advance/EVE SAYFA 2.0、NFPA805、急激火災、換気系、二層ゾーン、圧縮性、二酸化炭素、酸素、すす、フラッシュオーバー、バックドラフト、3 次元解析、連成解析、CFAST、FDS

1. はじめに

1975 年 3 月、米国ブラウンズフェリー発電所 1 号機において、ケーブル分配室と原子炉建屋の 2 カ所で火災が発生した。このとき多重の炉心冷却系の機器が同時に利用不能となったことで、機器の物理的分離及び隔離に関する設計基準を再検討する必要性などが認識された。なお、わが国ではこの火災事故を契機に、火災に対する設計上の問題点を見直し、1980 年 11 月、「発電用軽水型原子炉施設の火災防護に関する審査指針」[3]が定められた。

*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

現在、電力各社、消防研究センター、財団法人原子力安全基盤機構、原子力安全・保安院は、原子力発電所における火災防護対策の高度化に対して以下の項目に関する検討が行われている。

- (1) 火災ハザード解析に関する文献調査
- (2) 米国の例を踏まえた国内導入に関する技術的検討
- (3) 国内向け物性データの取得に係る火災実験などについて

上記(2)によると、米国では従来からの仕様の既定要件（決定論的評価）に代えて、事業者の任意で選択できる性能規定の例として米国火災防護協会(NFPA)の NFPA805[4]を挙げている。NFPA805 とは、軽水炉原子力発電所の火災防護のためのパフォーマンス基準であり、潜在的な火災シナリオとして、

ケーブル火災、電気盤火災、潤滑油火災、燃料油火災、変圧器火災、一般可燃物を挙げている。1970年代以前の運開プラントでは 32/53 プラント、1980年代以降の運開プラントでは 18/51 プラントが NFPA805 への移行を表明している。

NFPA805 の中では、CFAST、FASTLite、COMPBRN、FLAMME、MAGIC、FPETOOL と

いったゾーンモデルや FDS、FLOW-3D といった CFD モデルによる火災ハザード解析コードが参照されている[4][5][6][7]。

表 1 に、代表的ゾーンモデルの解析コードである CFAST 6.0[8][9][10]と Advance/EVE SAYFA 2.0 の主要機能の比較表を示す。

表 1 Advance/EVE SAYFA 2.0 と CFAST 6.0 の主要機能比較

項 目		Advance/EVE SAYFA 2.0	CFAST 6.0
建物内 ガス流動モデル	隙間モデル	○	○
	垂直・水平開口部モデル	○	○
	2 方向流	○	○
	煙突効果	○	○
換気系モデル	熱流体モデル	圧縮性を考慮した管路モデル (Advance/FrontNet/Γ を実装)	非圧縮性流体を 仮定したモデル
	合流・分岐	○	○
	ダンパ	○	×
	ファン	○ (高送風圧のブロワも可)	○
化学種		O ₂ 、N ₂ 、H ₂ O、CO、CO ₂ 、 C (煤)、Fuel	O ₂ 、N ₂ 、H ₂ O、CO、CO ₂ 、 C (煤)、Fuel、HCL、HCN
火災解析モデル		二層ゾーンモデル	二層ゾーンモデル
放射・対流熱伝達		○	○
可燃物(家具など)		×	○
燃焼モデル		混合分率燃焼モデル	混合分率燃焼モデル
防火設備モデル	防火戸・シャッター	○	×
	消火モデル (スプリンクラー)	○	○
	熱感知器	○	○
シナリオ設定機能		実装	実装
危険物質輸送計算モデル		実装	×

2. Advance/EVE SAYFA 2.0

火災解析モデルとして、NFPA805 でも多数参照されているゾーンモデルのひとつである二層ゾーンモデル[1][9][12][13]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。表 2 に Advance/EVE SAYFA 2.0 の機能一覧を示す。

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 1 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。

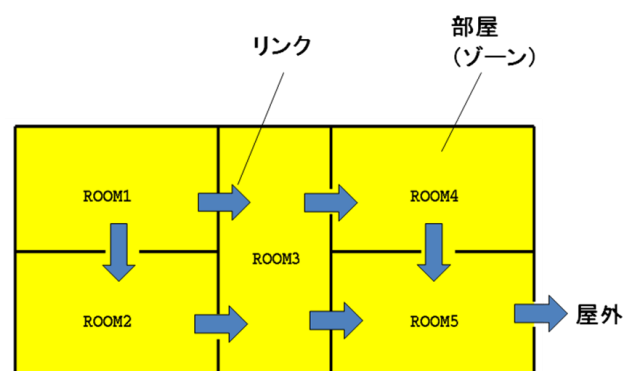


図 1 マクロモデルの形状モデル

2.2. 煙の流動モデル

煙の流動モデルは、図 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。

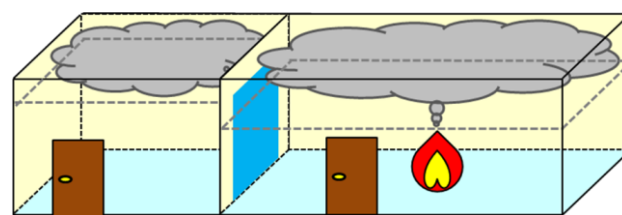


図 2 二層ゾーンの模式図

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流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

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

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 : 普遍気体定数 [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]

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 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。

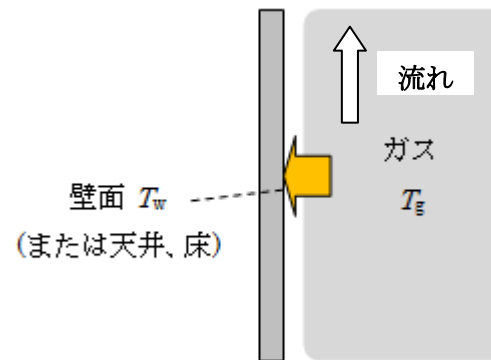


図 3 対流伝熱の模式図

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 : 熱伝導率 (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(m^2/s)

α : 熱拡散係数(m^2/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。

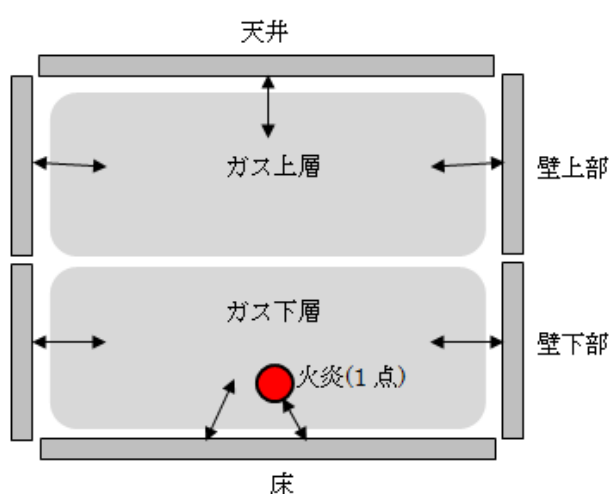


図 4 放射伝熱の模式図

この放射伝熱量 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。

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

ステファンボルツマン常数

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

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、アドバンスシミュレーション Vol.6 の「EVE SAYFA 特集」[1]を参照されたい。

2.5. 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 を開発しており、換気系の解析に適している。ここでは、その概要について説明する。なお、Advance/FrontNet/Γ の詳細については、アドバンスシミュレーション Vol.7 の「管路系流体解析シミュレーション特集」[2]を参照されたい。

Advance/FrontNet/Γ は、配管のほかにタンク、ブロワ、弁など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 強制対流相関式)

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 Cv 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通りである。

・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

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

・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

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

以下に理想気体について関連する式をまとめる。

・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、対流項について一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。

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

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、反復計算が必要になることから使用するには煩わしいため、Advance/FrontNet/Γ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[14]を採用している。

$$\frac{\lambda}{4} = 8 \left\{ \left(\frac{8}{\text{Re}} \right)^{12} + (A + B)^{-3/2} \right\}^{\frac{1}{12}}$$

$$A = (2.457 \log C)^{16}, \quad (23)$$

$$B = (3.753 \times 10^4 / \text{Re})^{16},$$

$$C = \frac{1}{(7/\text{Re})^{0.9} + 0.27(\varepsilon/d)}$$

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 5 のような関係が得られ、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。

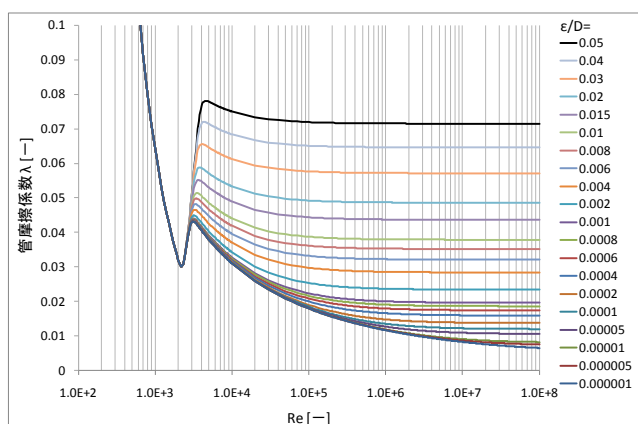


図 5 Churchill 式を用いた管摩擦係数とレイノルズ数の関係

2.5.3. 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[15]などにまとめられている。

3. 解析事例

従来の Advance/EVE SAYFA や CFAST など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/Γ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 6 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/EVESAYFA 2.0 の二層ゾーンモデルを用いて行い、換気系ダクトの一次元熱流動解析を、Advance/EVESAYFA 2.0 に組み込まれた Advance/FrontNet/Γ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/EVESAYFA 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 6 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。

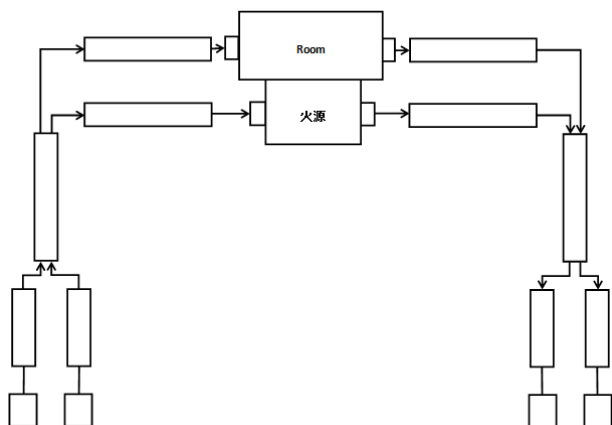


図 6 火災解析モデル

3.2. 解析結果

解析結果を図 7～図 12 に示す。

図 7 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 8 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 9 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、排気が追いついていない状況を示している。

図 10 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 11 は火源室の上層ガス内の酸素濃度を示し、図 12 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。さらに、約 53 分で鎮火することから、給排気によって、 O_2 濃度は通常の空気の濃度に回復し、 CO_2 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 分に渡る現象について、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、参考文献 [16] 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、Advance/EVE SAYFA 2.0 を用いることで解析が可能になり、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。

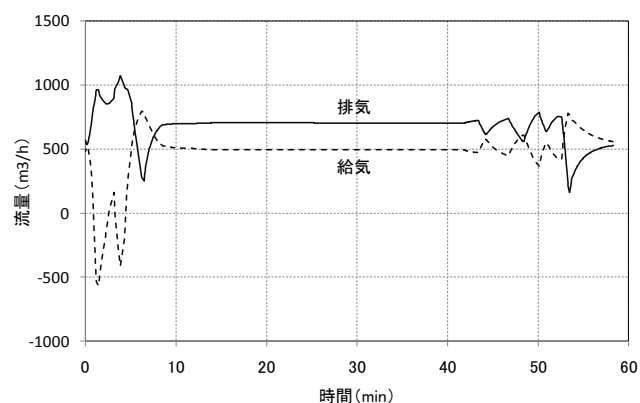


図 7 解析結果（火源室への給排気流量）

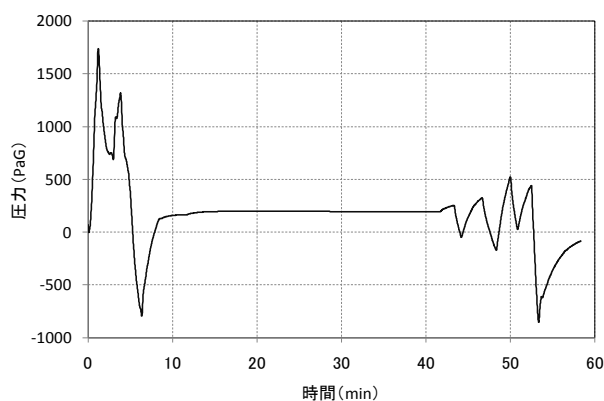


図 8 解析結果 (火源室のガス圧力)

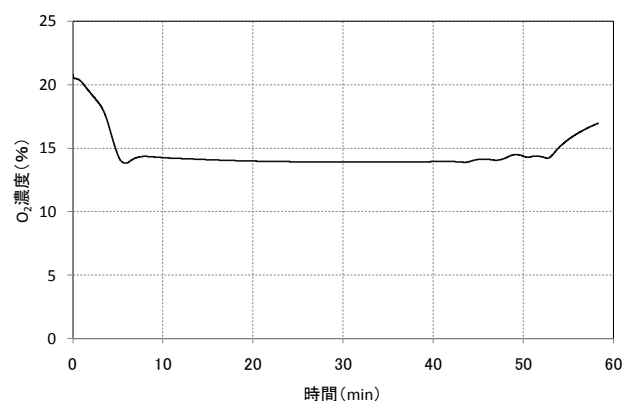
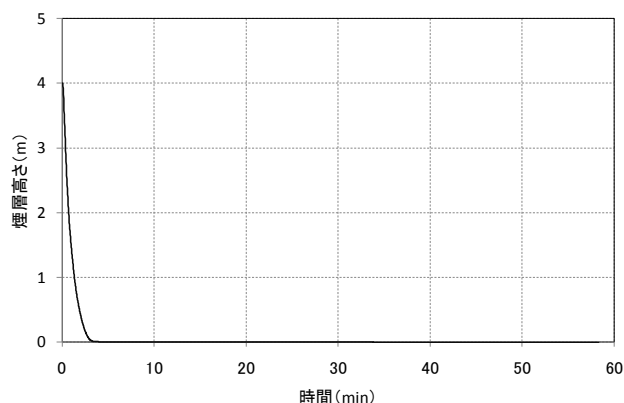
図 11 解析結果 (火源室の上層 O₂ 濃度)

図 9 解析結果 (火源室の煙層高さ)

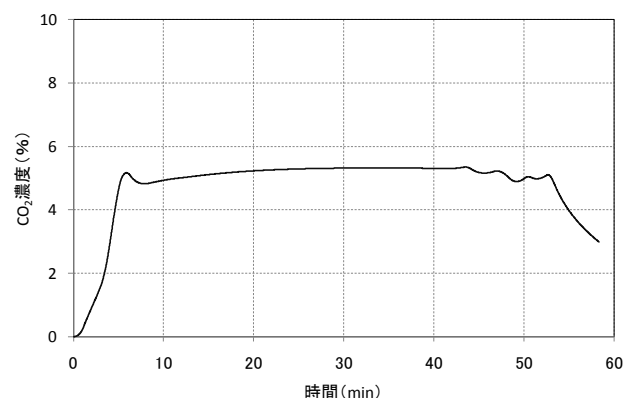
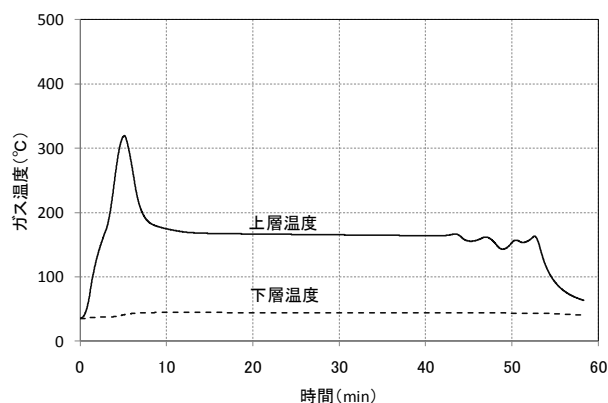
図 12 解析結果 (火源室の上層 CO₂ 濃度)

図 10 解析結果 (火源室のガス温度)

4. Advance/EVESAYFA の 3 次元解析連成機能

3 次元火災・熱流動解析コード Fire Dynamics Simulator (FDS) [17][18]と二層ゾーンモデルによる火災解析シミュレータ CFAST[9][10]とを組み合わせた連成解析が、一般の建築物の火災から船舶や原子力施設などでの特殊な火災まで、さまざまな分野で広く試みられている。そこで、部分的な修正を加えた FDS(Version 4)を Advance/EVESAYFA 2.0に取り込み、急激な火災の連成解析が可能となるように機能整備を行った。

Advance/EVE SAYFA 2.0 では、マクロモデルによるネットワーク解析のうち、ある領域を 3 次元詳細解析に置き換え、3 次元詳細解析ソルバーと連成計算することができる。図 13 に Advance/EVE SAYFA 2.0 の連成計算の概要、

表 5 に Advance/EVE SAYFA 2.0 の 3 次元詳細解析に対する機能一覧表をまとめる。

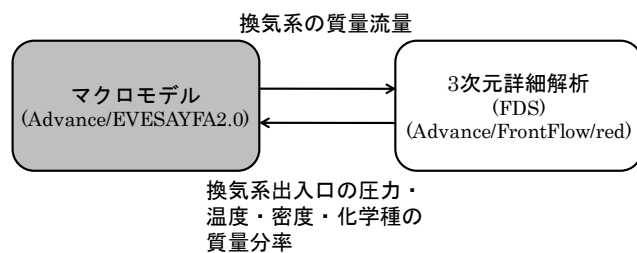


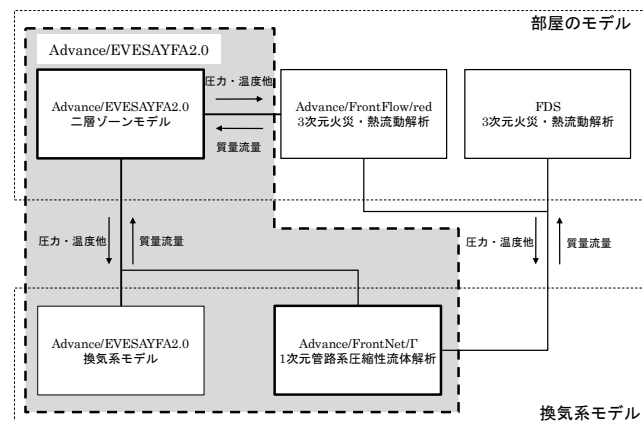
図 13 Advance/EVE SAYFA 2.0 の連成計算概要

表 5 Advance/EVE SAYFA 2.0 の
3次元連成解析機能

対応する 3次元ソルバー	FDS Advance/FrontFlow/red
圧力	EVE SAYFA が 3次元ソルバーから受け取る
温度	EVE SAYFA が 3次元ソルバーから受け取る
質量流量※	EVE SAYFA が 3次元ソルバーへ渡す
化学種の 質量分率	EVE SAYFA が 3次元ソルバーから受け取る

※従来の FDS では換気系の境界条件として体積流量を介して行われていたが、当社で改良を加えた。

Advance/EVE SAYFA 2.0 と FDS を連成するプログラム構成を図 2 に示す。計算手法は低マッハ数近似の圧縮性流体解析の基礎方程式をマルチブロック構造格子系の有限差分法で離散化して計算する。乱流モデルとして、ラージ・エディ・シミュレーション (LES : Large Eddy Simulation) を用い、そのサブグリッドスケールモデルには Smagorinsky モデル[19]を採用している。Mixture Fraction モデル(混合分率燃焼モデル)[20]により燃焼を計算し、放射伝熱と対流伝熱も考慮している。


図 14 Advance/EVE SAYFA 2.0 の
プログラム構成 (火災解析機能)

5. EVE SAYFA GUI の機能概要

EVE SAYFA による火災解析における、データ作成・条件設定、計算実行、結果の検討といった一連の操作を容易にするための GUI (グラフィック・ユーザー・インターフェイス) を開発した (以下、EVE SAYFA GUI と呼ぶ)。これは、地下鉄、地下街のような多層・広域につながった空間での火災発生時における消防防災対策の効果を消防職員が容易に把握可能とすることを目的としており、総務省消防庁 消防大学校消防研究センター殿からの受託によるものである。この目的を達成するため以下の点に配慮して開発を行った。

- ① シミュレーションの専門家でなくとも手早く解析対象となる建物の構造を設定できること
- ② 解析結果を視覚的に分かり易くすること
- ③ 火災発生中に窓やドアの開け閉めといった火災の被害抑制のための活動がリアルタイムでシミュレーション結果に反映されること

EVE SAYFA GUI では、アイコンを用いた形状モデル化機能や、インタラクティブ計算機能 (計算の進行にあわせて変化するグラフを見ながら、計算の一時停止や再開が自由に行える機能) などを実装した。図 15 にアイコンの配置例を示す。左側の部屋で火災が発生し、左側の部屋のみならず右側の部屋へも煙が充満し、人が倒れる様子を表している。複数階の場合は、階層ごとに画面が切り替わり、各階

のアイコンを設定する。

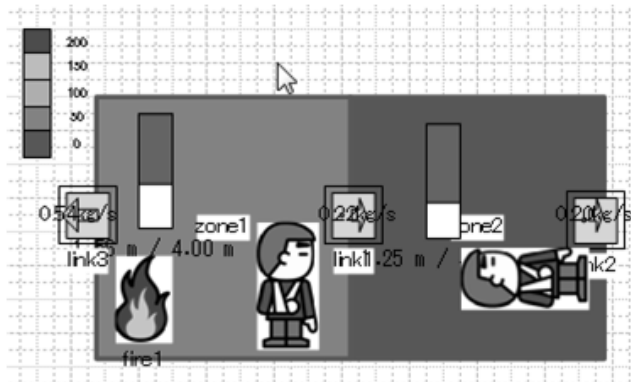


図 15 アイコン配置例

6. おわりに

本稿では、Advance/EVE SAYFA 2.0 について、特に原子力関連施設における火災シミュレーションに関して強化された機能を紹介した。

従来の EVE SAYFA と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/Γ を連成させた Advance/EVE SAYFA 2.0 は、CFAST などの二層ゾーンモデルによる火災解析コード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。このコードを用いることで、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を良く再現できることを確認した。

換気系を持つ施設での火災詳細解析を目的として、3 次元火災・熱流動解析コード FDS(Version 4) を Advance/EVE SAYFA 2.0 に取り込んで、3 次元モデル、マクロモデル (二層ゾーンモデル)、および換気系ダクトモデルの連成解析機能を開発した。この機能整備により、流量大変動時の圧縮性効果の強い火災現象に対しても安定に計算できることや連成解析機能の妥当性を確認した。着目部分の火源室では、二層ゾーンでは得られない発熱速度、すす濃度、二酸化炭素濃度、ガス温度の空間分布を得ることができた。

EVE SAYFA GUI は、アイコンを活用することで手早く建物の部屋の構造を設定でき、可視化アイコンを導入することで、どの部屋が危険な状態か視覚

的に分かりやすくした。さらに計算途中での開口率を変更するようなインタラクティブな操作が可能のため、窓や防火シャッターの開閉の影響がリアルタイムにシミュレーションに反映される。

今後は、大規模施設など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[21]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。さらに、Advance/FrontFlow/red との連成解析機能の強化、最新の FDS の取り込み、火災データベースの整備などに取り組んで、防火安全検討に役立てるような、より良いシステムとしていきたい。

7. 謝辞

EVE SAYFA GUI の開発にあたり、総務省消防庁消防大学校消防研究センター山田常圭様 (現東京大学工学系研究科 都市工学専攻 特任教授) はじめ研究グループの皆様には、構想から展開に至るまで多大なご支援・ご助言をいただいたことに深甚の謝意を表する。

参考文献

- [1] アドバンスソフト株式会社：“アドバンスシミュレーション (Advance/EVE SAYFA 特集)”，Vol.6, (2010)
- [2] アドバンスソフト株式会社：“アドバンスシミュレーション (管路系流体解析シミュレーション特集)”，Vol.7, (2011)
- [3] 原子力安全委員会：“発電用軽水型原子炉施設の火災防護に関する審査指針”，(1980)
- [4] National Fire Protection Association：“NFPA805, Performance-Based Standard for Fire Protection for Light Water Reactor Electric Generating Plants, 2010 Edition”，(2010)
- [5] 原子力安全・保安院：“原子力発電所における火災防護対策の高度化に関する検討状況 (概

- 要)”, (2010)
- [6] 経済産業省原子力安全・保安院：第1回原子力安全規制情報会議,テクニカルセッション 10, “原子力施設における火災防護の現状と今後の展望について”, (2010)
- [7] 独立行政法人原子力安全基盤機構：“欧米諸国の規制制度・規格基準の実情調査（火災防護に関する調査）に関する報告書”, (2006)
- [8] 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)
- [9] R.D. Peacock, et al.: “CFAST Version 6 User’s Guide”, NIST Special Publication 1041.
- [10] W. Jones, et al. : “CFAST Technical Reference Guide”, NIST Special Publication 1030.
- [11] Walter.W. Jones, et al. : “CFAST –Consolidated Model of Fire Growth and Smoke Transport (Version 5) Technical Reference Guide”, NIST Special Publication 1030, (2004)
- [12] 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)
- [13] 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)
- [14] Churchill, S. W. : “Friction-factor equation spans all fluid-flow regimes”, Chem. Eng., Nov.7, (1977)
- [15] 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)
- [16] 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>
- [17] Kevin McGrattan : “Fire Dynamics Simulator (Version 4) Technical Reference Guide,” National Institute of Standard and Technology (2005)
- [18] Fire Dynamics Simulator and Smokeview ,
<http://www.fire.nist.gov/fds/>
- [19] Smagorinsky, J. : “General circulation experiments with the primitive equations: Part 1. The basic experiment”, Monthly Weather Review, 91-3 (1963), 99-164.
- [20] Mell, W. E., McGrattan, K. B. and Baum, H. R. : “Numerical Simulation of Combustion in Fire Plumes”, 26th Symposium (International) on Combustion (1996), 1523-1530.
- [21] 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://www.soc.nii.ac.jp/kasai/mt/arc/upfiles/学術講演討論会2010ポスター.pdf>