

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

吉岡 逸夫* 富塚 孝之* 秋村 友香* 浜野 明千宏* 三橋 利玄**

Enhanced Virtual Environment Simulator for Aimed and Yielded Fatal Accident : EVE SAYFA and Fire Dynamics Simulator : FDS

Itsuo Yoshioka* , Takayuki Tomizuka* , Yuka Akimura* ,
Achihiro Hamano* , Toshiharu Mitsuhashi**

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・有害物質拡散解析ソフトウェアである。本稿では、EVE SAYFA の概要、入力データおよび使用方法について紹介する。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、原子力施設など換気下における密閉性の高い建物における急激火災の3次元詳細解析に適用した際の使用例について紹介する。ここでは、二層ゾーンモデルとして EVE SAYFA を使用し、換気系モデルとして Advance/FrontNet/ Γ を利用している。また、火災 CFD コードとして米国商務省国立標準技術研究所で開発された FDS[1]を使用した。解析結果は実測値を良く再現する結果であった。

Key word: 原子炉建屋、火災、EVE SAYFA、二層ゾーンモデル、FDS、圧縮性換気系モデル

1. はじめに

防火安全の分野において標準的に用いられている二層ゾーンモデルによる火災解析シミュレータ CFAST[2][3]と3次元火災・熱流動解析コード FDS (Fire Dynamics Simulator) [1][7][8]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等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。CFAST と FDS はともに米国商務省国立標準技術研究所 (NIST ; National Institute of Standards and Technology) で開発された火災 CFD コードであり、建物内の部屋の中で火源付近など詳細な解析が必要な領域を FDS で3次元火災・熱流動解析

を行い、その他の領域と換気系ダクトを CFAST で解析するものである。しかし、主に CFAST コードの換気系モデルの適用限界のために、急激な火災現象に対しては連成解析が困難で十分行えないのが現状である。

そこで、部分的な修正を加えた FDS(Version 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。

本稿では上記の火災連成解析を行う際の入力データ内容および使用方法を中心に解説する。

2. 機能および理論概要

2.1. Advance/EVE SAYFA

Advance/EVE SAYFA の概要について説明する。火災解析モデルとして、二層ゾーンモデル [5][6]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

*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

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/ Γ [11]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/ Γ)
機器 コンポーネント	開口部、隙間、ファン

2.1.1. 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。

2.1.2. 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。

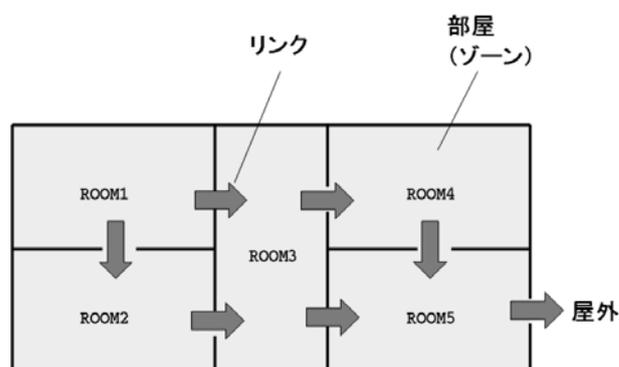


図 1 マクロモデルの形状モデル (平面図)

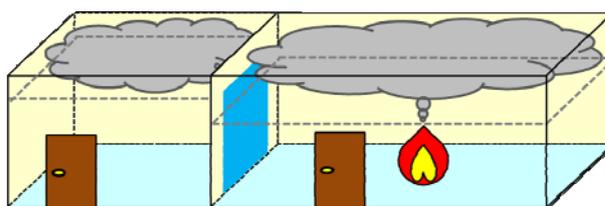


図 2 二層ゾーンの模式図

2.1.3. 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。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
- ② 化学種保存式
- ③ エネルギー保存式
- ④ 気体の状態方程式
- ⑤ 開口部に対する運動方程式

2.1.4. 伝熱モデル

(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、ガスと壁面の間での対流伝熱を扱う (図 3)。

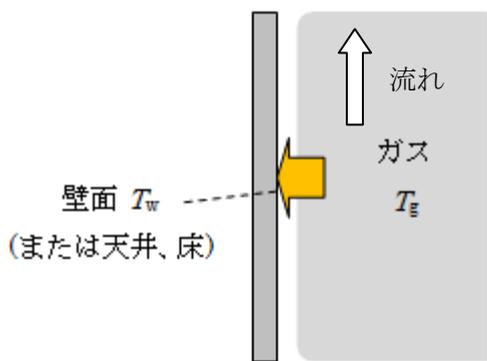


図 3 対流伝熱の模式図

対流伝熱量は、ガス温度 T_g と壁表面温度 T_s 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。

対流熱伝達係数 h はガスの特性、温度、流速の関数である。

(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。

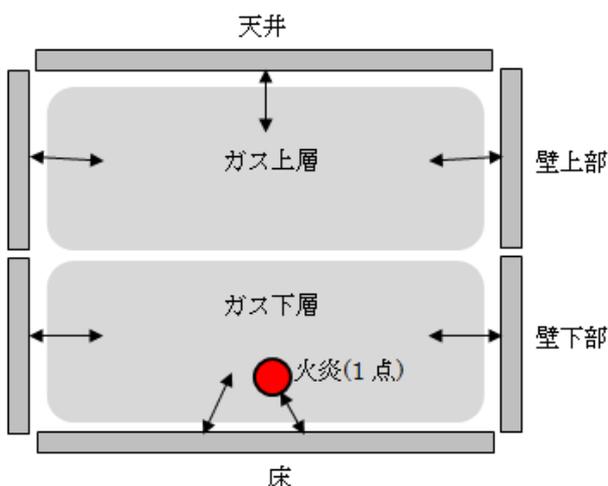


図 4 放射伝熱の模式図

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にはゆっくり変化）。
- 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律に放出する。
- 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。

2.1.5. 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。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、ブロワ、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 2 に Advance/FrontNet/Γ の概要を、表 3 に機能概要を示す。

Advance/FrontNet/Γ に関しては、本雑誌掲載の「管路系流体解析ソフトウェア Advance/FrontNet」や参考文献[11]を参照のこと。

表 2 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 3 Advance/FrontNet/T 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、熱伝導率
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
バ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、熱伝達係数

2.2. FDS

FDS の概要について説明する。FDS は火災の過渡現象を解析することを目的とした CFD コードであり、フリーウェアとして公開されている[1]。FDS 自体はソルバーであり、可視化のためのポストプロセッサとして Smokeview も一緒に公開されている。さらにバージョン 5 からは FDS と連成させることができる避難シミュレーションモジュールも付加され FDS+EVAC と呼ばれている。

FDS には主な計算モデルとして以下のものが組み込まれている。

- ・低マッハ数近似に基づく LES (Large Eddy Simulation) モデルを採用
- ・対流項スキームは 2 次中心差分、時間積分には予測子-修正子法による 2 次精度の半陰解法
- ・計算格子は構造格子でスタッガード格子を採用
- ・渦消散モデルと酸素消費法を組み合わせ、換気支配火災や消炎にも対応可能な独自の乱流拡散燃焼モデル

FDS は流れ場として、低マッハ数流れを想定し

ており、乱流モデルの LES ではサブグリッドスケール (SGS) モデルとしては Smagorinsky モデルを採用している[9]。オプションとして DNS (Direct Numerical Simulation) を使うこともできる。

計算格子は、直交座標系の他に円筒座標系も取り扱うことができる。さらにマルチブロック格子も取り扱うことができ (図 5 参照)、ブロックの接続面では格子点数が整数倍であれば、格子点数が異なっても計算ができる (図 6 参照)。

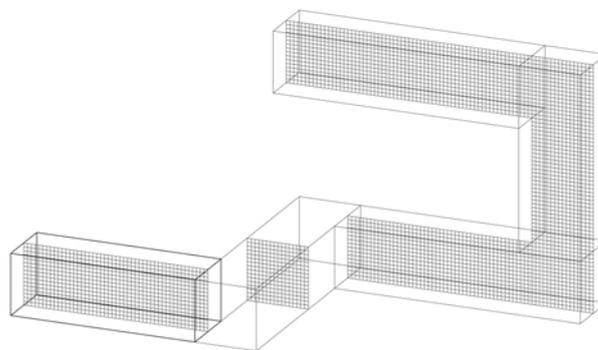


図 5 マルチブロック格子例

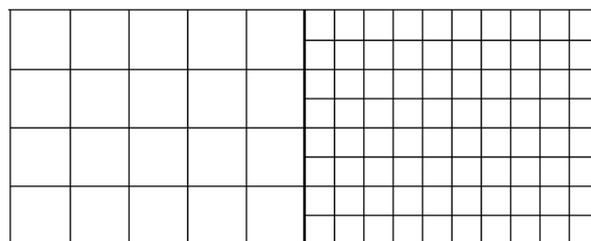


図 6 マルチブロックの接続

FDS ではポアソン方程式を高速に解くため、FFT (Fast Fourier Transform) を採用している。そのため一辺の格子分割数が $2^l 3^m 5^n$ (l, m, n は整数) である必要がある。

燃焼反応については多成分化学種を一段階反応で取り扱えるように混合分率 (Mixture Fraction) モデルを採用している。例えばメタンの燃焼では、



の反応は 3 成分にまとめると次式のようなになる。



まとめられた各成分は混合ガスとして輸送方程式で計算される。

火源となる境界条件には単純な温度固定や熱流束固定の他に、壁、天井、床および家具などの材質を設定することができ、火事のシナリオに沿った火災の延焼現象などをシミュレーションすることが可能である。

放射モデルでは放射輸送方程式 (RTE) を解いており、吸収については煙だけでなく液滴および粒子による吸収も考慮することができる。

3. プログラム構成と概略の計算の流れ

3.1. FDS

FDS のプログラム構成について記す。FDS は予測子-修正子法を採用しているので、入力データの読込と初期設定から過渡計算に入ると予測子の計算が開始される。ここでは流速の予測計算、各種質量分率、密度の計算、そして境界処理を行う。修正子の計算に入ってから燃焼、放射計算を行い、流速の修正を行う。図 7 に FDS の処理フローを示す。

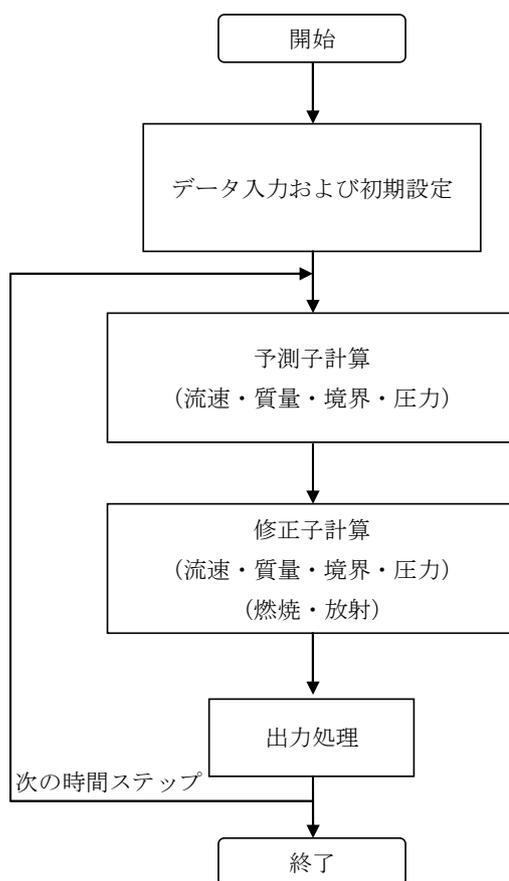


図 7 FDS の主なフロー

3.2.3 次元解析連成機能 (EVE SAYFA+FDS) のプログラム構成

図 8 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 9 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/T で構成される。FDS は、フリーウェアとして公開されている火災 CFD コードであり、可視化ソフトウェアとして Smokeview が用意されている。

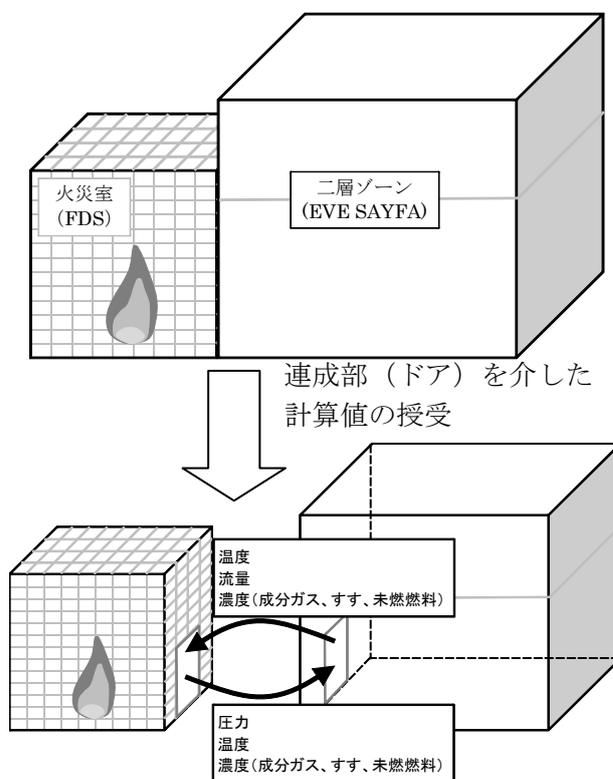


図 8 EVE SAYFA と FDS の連成計算の概念図

Advance/EVE SAYFA と FDS と連成した場合の処理の流れを図 10 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。

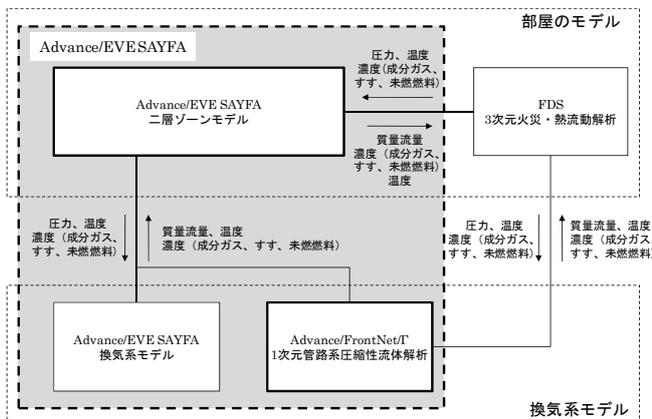


図 9 Advance/EVE SAYFA のプログラム構成 (火災解析機能)

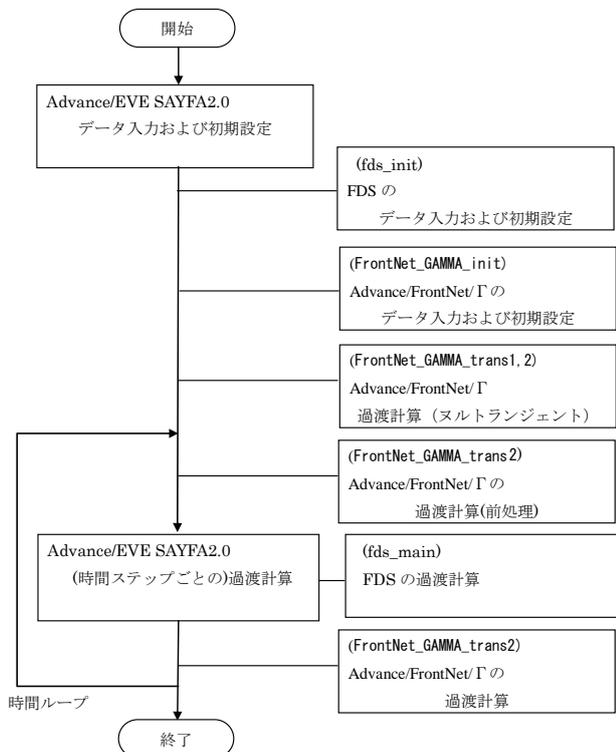


図 10 FDS と連成した場合の処理の流れ

3.3. EVE SAYFA と Advance/FrontNet/Γ

3.3.1. 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同期の取り方について述べる。Advance/ FrontNet/Γ の構成は、データ入力およびプログラム内の初期設定の部分と、時間刻みによって計算を進める過渡計算の部分に分けられる。これらを図 11 に示すように、それぞれサブルーチン化して、Advance/EVE SAYFA 中の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)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いて 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。

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。

3.3.2. 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通りである。換気系から部屋の方に流れている場合、Advance/Front Net/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/FrontNet/Γ に渡す。

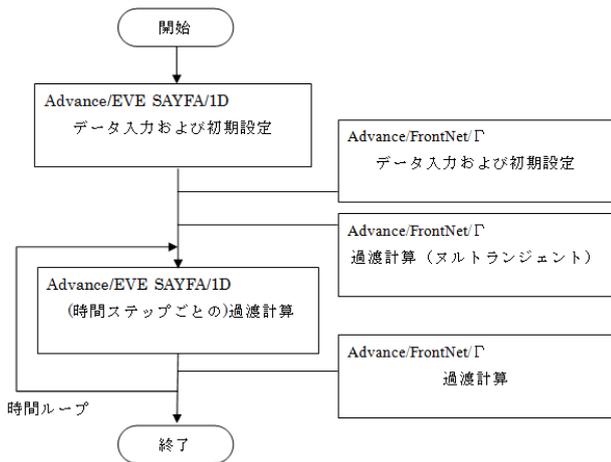


図 11 Advance/FrontNet/Gamma と連成させた Advance/EVE SAYFA/1D の構成概要

4. 入力説明

4.1. EVE SAYFA 単体の計算

4.1.1. 必要な入力ファイルの一覧

EVE SAYFA の単体計算に必要な入力ファイルの一覧を表 4 に示す。データは、テキストエディタにより入力ファイルを作成・編集する。
input.dat および火災シナリオファイルの詳細については付録を参照のこと。

表 4 Advance/EVE SAYFA の入力ファイル

ファイル名	内容
flgs.dat	全体(EVE SAYFA、FDS FrontNet/Gamma)の計算制御ファイル
input.dat	Advance/EVE SAYFA 計算制御ファイル
任意 (注)	火災シナリオ(スケジュール)の指定

(注) シナリオファイルの名称はinput.dat内で指定された***.fsch

表 5 FDS ネームリストグループ

Group Name	Namelist Group Description	主な入力項目
BNDF	(構造物) 境界面物理量の出力	
CLIP	温度と密度の上下限值の設定	温度および密度の最小値と最大値
CTRL	制御パラメーター	
DEVC	デバイスパラメーター	計測点位置、計測物理量等
DUMP	出力パラメーター	
HEAD	入力ファイル名	入力、出力ファイルの拡張子より前の名前

(1) 計算制御用パラメーター群 (ファイル名 : flgs.dat)

EVE SAYFA と FDS の連成条件に関する、以下の各項目を設定する。

- ・ FDS との連成フラグ
- ・ FDS の HRR (熱放出率) の適用の有無
- ・ FDS に接続する機械換気系の本数
- ・ FDS に接続する機械換気系の番号
- ・ FDS との連成 (切替) 時間

(2) 入力データ (ファイル名 : input.dat)

Advance/EVE SAYFA のモデル体系と計算条件を設定する。

- ・ ヘッダと、ヘッダごとに規定されたデータの組み合わせを羅列する。

(3) 火災シナリオ (ファイル名 : input.dat 内で定義)

Advance/EVE SAYFA の火災室に設定する火災シナリオを定義する。

4.2. FDS

FDS の入力ファイルは 1 個であり、基本的にテキストエディタにより入力ファイルを作成する。書式はネームリスト形式で入力する。以下に入力例を示す。

```
&DUMP NFRAMES=1800, DT_HRR=10.,
DT_DEVC=10., DT_PROF=30. /
```

ネームリストの種類と内容について表 5 に示す。詳細は FDS マニュアル[8]を参照されたい。

HOLE	構造物の部分削除	削除領域の座標値
HVAC	加熱、換気、空調	
INIT	初期条件	各化学種の質量分率、密度、温度
ISOF	等値面出力	
MATL	構造物表面の物性	構造物の材質
MESH	計算格子パラメーター	計算領域の座標値と分割数
MISC	その他	
MULT	繰り返し使用するパラメーター	
OBST	構造物	構造物の座標値と境界面名称
PART	ラグランジアン粒子	液滴径、密度、沈降速度等
PRES	圧力ソルバーパラメーター	
PROF	構造物の物理量出力	出力位置と出力物理量
PRO	デバイス特性	
RADI	放射パラメーター	
RAMP	時系列データ	各種物理量の時刻とデータ
REAC	反応パラメーター	各種燃料の化学組成、酸化熱、すすの発生量
SLCF	断面出力	断面位置と出力物理量
SPEC	化学種パラメーター	
SURF	境界面条件	温度、熱流束、流速境界条件など
TABL	テーブルデータ	
TIME	計算時間	計算終了時間
TRNX	格子変形パラメーター	
VENT	換気パラメーター	
ZONE	圧力ゾーンパラメーター	ゾーン番号と領域の座標値

4.3. EVE SAYFA と FDS の連成計算

連成計算に必要な入力ファイルの一覧を表 6 に示す。テキストエディタにより入力ファイルを作成・編集する。

表 6 連成計算用入力ファイル一覧

ファイル名	関連するプログラム	備考
flgs.dat、input.dat、シナリオファイル(注1)	Advance/EVE SAYFA	
fds.data、FDS入力データファイル(注2) FDS用DBファイル(注3)	FDS	[8] 参照

(注1) シナリオファイルの名称はinput.dat内で指定された***.fsch

(注2) FDS入力データファイルの名称はfds.dataで指定された***.data

(注3) FDS用DBファイルの名称は、FDS入力データファイルで指定された database4.data (変更可)

(1) 計算制御用パラメーター群 (ファイル名: **flgs.dat**)

本項目は、4.1.1(1)と同様である。

(2) 入力データ (ファイル名: **input.dat**)

連成計算用の入力指定項目として、リンク (&link) データで、FDSと連成するゾーンID(es***)を指定する。それ以外は4.1.1(2)と同様である。

(3) 入力データ (FDS で対応する入力指定について)

連成計算で、EVE SAYFA に対応する FDS 用入力データについては、

- ・ VENT (Vent Parameters)
- ・ SURF (Surface Properties)

で連成位置を認識させるための入力データを指定する必要がある。

- ・ SURF : ID (Character) で

ES**

と入力する。**は任意の数字だが、VENT の SURF_ID で指定する ID と一致させる。

・ SURF : EVE_ID (Character) で

es***

と入力する。この es*** を EVE SAYFA の入力データ (リンクデータ) における es*** と一致させる。この ID により連成位置を認識する。

・ VENT : SURF_ID (Character) で

ES**

と入力する。**は任意の数字だが、SURF_ID に対応させる。

その他の入力データについては、FDS のマニュアル[8]を参照されたい。

```
if exist *.restart (del *.restart)
"C:\EveSayfa\bin\Evesayfa.exe" > ProcessLog
```

図 13 EVE SAYFA の実行用
バッチファイルの例

EVE SAYFA の出力ファイルを以下に示す。いずれも左端に時間を記述した時系列テーブル形式で、EXCEL に取り込んで時系列グラフを作図することができる。第 1 行目の変数タイトルは、入力データ説明 (input.dat) の時系列結果出力指定変数の名称に対応している。

表 7 EVE SAYFA の出力ファイル

出力 ファイル名	意味
whole.out	全部屋の計算結果の出力 (常時出力。圧力、温度、煙層高さ、ガス成分濃度)
part.out	指定変数の計算結果の出力 (ユーザー指定時出力)

Advance/FrontNet/Γ の出力ファイルは、bin の直下の Output というフォルダに出力される。詳細は参考文献[11]を参照のこと。

また、FDS の出力ファイルに関しては、FDS のマニュアル[8]を参照されたい。

5. 実行方法

EVE SAYFA と換気系および FDS の連成解析ソルバーは、Windows 環境で実行する。フォルダ構成は以下の通りである。

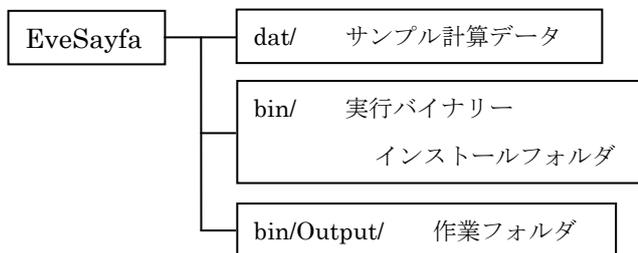


図 12 ファイル・フォルダ構成

作業フォルダ Output/ は、出力データ保存のための作業フォルダである。ここでは、EveSayfa 以下のフォルダ一式は、システムフォルダ C : の直下に存在するものとする。

bin/ の中に、実行バイナリー evesayfa.exe を置く。

計算に必要な入力データファイルをこの bin/ の下に置き、バッチファイル evesayfa.bat を起動することで計算が実行できる。

EVE SAYFA の実行・結果表示までの流れは次の通りである。

- ① 入力ファイルの設定
- ② 実行
- ③ 出力ファイルの確認

6. 使用例

6.1. EVE SAYFA (二層ゾーン) + 換気系

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。EVE SAYFA と Advance/FrontNet/Γ を連成している。

6.1.1. 解析条件

解析対象の体系を図 14 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/Γ を用いて行った。

通常運転状態では、図 14 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。

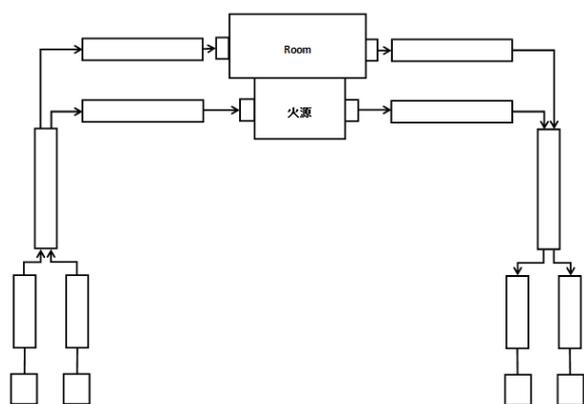


図 14 火災解析モデル

6.1.2. 解析結果

主な解析結果を図 15、図 16 に示す。

図 15 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[14][15]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 16 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 CO₂ 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[12]を参照されたい。

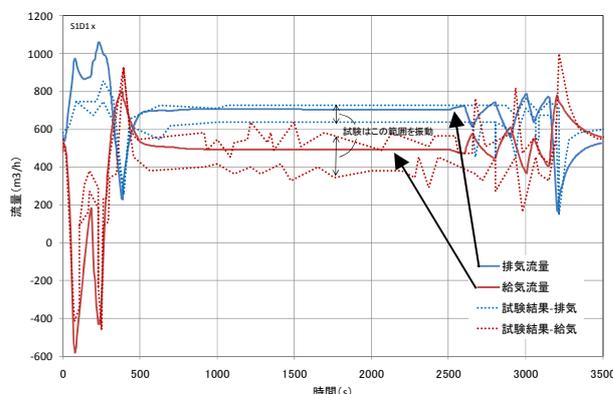


図 15 火源室への給排気流量変化 (換気系モデルとの連成解析)

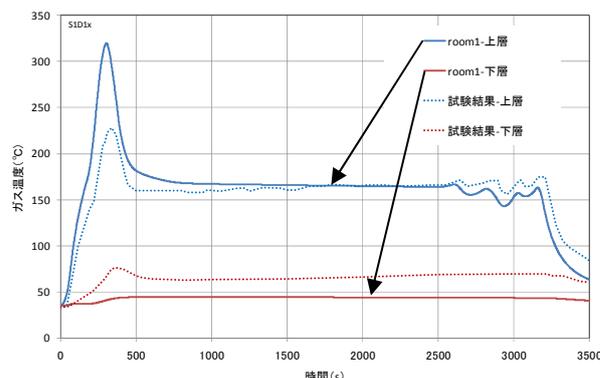


図 16 火源室のガス温度変化 (換気系モデルとの連成解析)

6.2. EVE SAYFA+換気系+FDS

6.1 で取り上げた解析事例に対して、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。

6.2.1. 解析条件

解析対象の体系は図 14 と同様である。

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/Γ を用いて行った。

図 17 に 3 次元解析のための火源室のモデル図を示す。左上が給気ダクト、右上が排気ダクト、床の真ん中に火源が置かれている。3 次元解析に関する計算条件は、前述の 6.1 と同様である。

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。発熱条件として、約 5 分で約 500kW のピークに達し、約 45 分から減少するものと想定した。

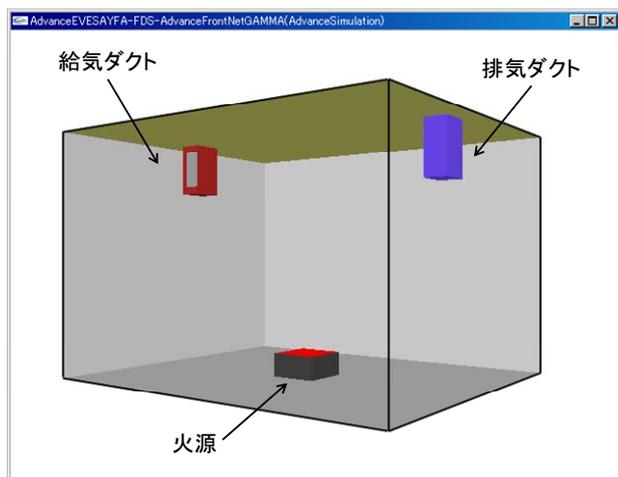


図 17 火源室の 3 次元モデル

6.2.2. 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、試験結果[14][15]とあわせて図 18、図 19 に示す。給排気流量変化は、Advance /FrontNet/I で得られた解析結果であるが、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 CO₂ 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。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。本事例の詳細については、参考文献[13]を参照されたい。

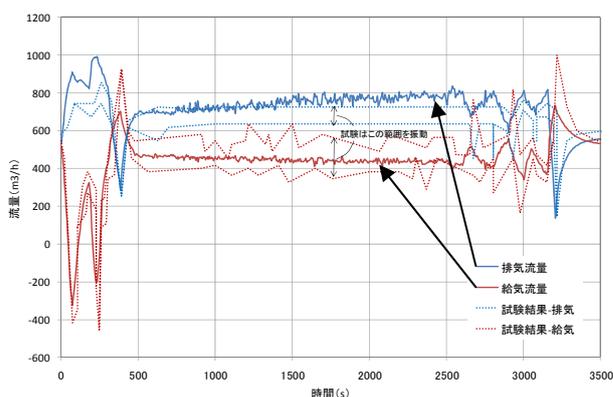


図 18 火源室への給排気流量変化 (FDS との連成解析)

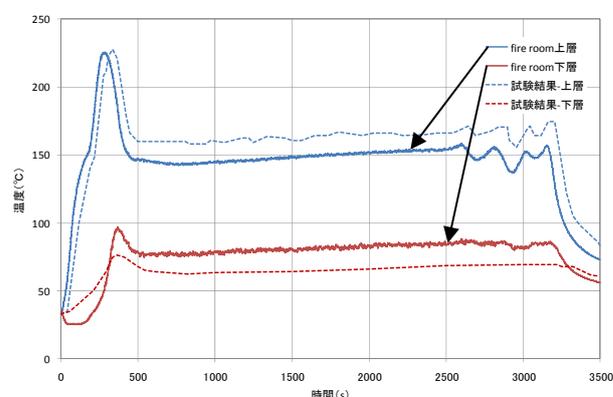


図 19 火源室のガス温度変化 (FDS との連成解析)

参考のため、時刻 5 分における火炎のピーク時の分布を図 20 に示す。また、時刻 1 分における火災室のすずの分布を図 21 に示す。これらは、Smokeview[1]を用いて描画したものである。

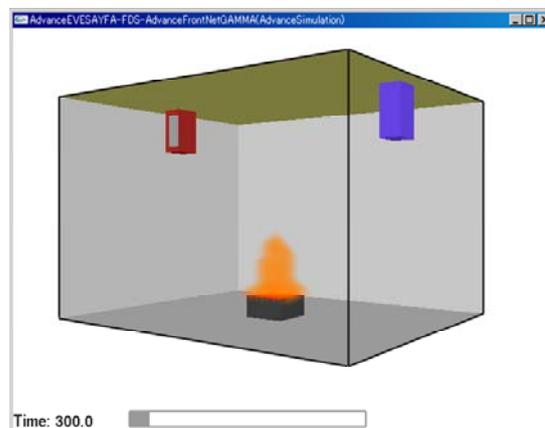


図 20 火炎分布 (時刻 5 分)

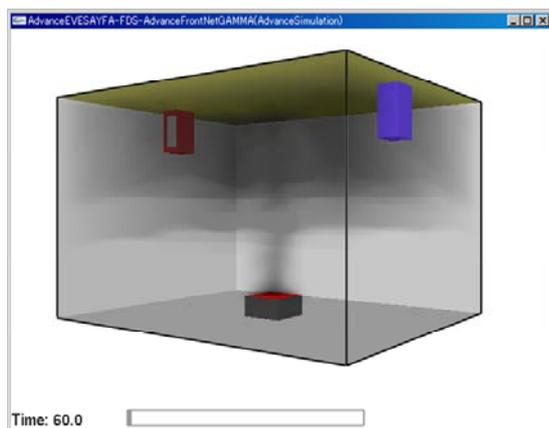


図 21 すす分布 (時刻 1 分)

この事例は小規模な施設だったが、大型建築物の場合は、全体を FDS で計算することは計算負荷の点で難しい場合が考えられる。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。

7. 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・有害物質拡散解析ソフトウェア Advance/EVE SAYFA について概説し、計算に必要な入力データおよび具体的な使用方法を紹介した。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、換気下の原子力施設などの密閉性の高い建物における急激火災の 3 次元詳細解析について紹介した。

8. 参考文献

- [1] Fire Dynamics Simulator (FDS) and Smokeview (SMV), <http://code.google.com/p/fds-smv/> (2014/9/16 アクセス)
- [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] 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)
- [6] 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)
- [7] Kevin McGrattan, “Fire Dynamics Simulator (Version 4) Technical Reference Guide”, National Institute of Standard and Technology, (2005)
- [8] McGrattan, K. McDermott, R. et.al., “Fire Dynamics Simulator (Version 5) , User’s Guide”, NIST Special Publication 1019-5, (2019)
- [9] Smagorinsky, J. “General circulation experiments with the primitive equations; Part 1. The basic experiment”, Monthly Weather Review, 91-3 (1963), 99-164
- [10] 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
- [11] 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
- [12] 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
- [13] 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
- [14] 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)
- [15] 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”, (2013.4)

付録 EVE SAYFA の計算に必要な入力データ

EVE SAYFA の単体計算に必要な入力ファイルの一覧を以下に示す。

(1) 入力データ (ファイル名 : input.dat)

Advance/EVE SAYFAのモデル体系と計算条件を設定する。

- ・ヘッダと、ヘッダごとに規定されたデータの組み合わせを羅列する。

大項目 (括弧 : キーワード)	データ項目	備考
(check)	(データ項なし。入力データの認識内容チェック出力指定)	この行を入れると、標準出力にデータ認識過程が書き出される
(monitaor)	(データ項なし。3次元解析連成時のデータ送受信のチェック出力指定)	この行を入れると、標準出力にデータ送受信過程が書き出される
(noHT)	(データ項なし。伝熱計算をスキップする指定)	この行を入れると、伝熱計算をスキップする (壁断熱条件)
計算タイトル (&title)	シミュレーション名称 (Simulation Name)	解析には影響せず
	建物名称 (Building Name)	
	計算日時 (calculation date)	
	計算条件の番号、名称	
計算条件 (&condition)	計算開始時刻 [s]	
	計算終了時刻 [s]	
	計算時間間隔 [s]	負符号をつけると次項も入力。
	計算時間間隔上限値 [s]	
	出力時間間隔 [s]	
	緩和係数	
	流量の収束判定値 (絶対)	
	流量の収束判定値 (相対)	
	圧力の収束判定値	
	圧力の初期値フラグ (=0)	
	solver選択 (=1)	
	最大反復回数	
	計算種別 (=1 : 危険物質輸送解析、=2 : 火災解析、=3 : 火災解析で、機械換気系として Advance/FrontNet/Γを適用)	火災解析では3が標準(2では適用範囲に限界がある)
特定計算結果出力 (&outspec)	計算結果出力指定変数の数	指定変数分指定
	変数名 (別表)	
	変数第1添字 (別表)	
	変数第2添字 (別表)	
	変数第3添字 (別表)	
ゾーン	ゾーン数 (ゾーンは、部屋に相当)	ゾーン数分指定

大項目 (括弧：キーワード)	データ項目	備考
(&zone)	ゾーンNo.	
	ゾーン名	
	初期圧力[kPaA]	
	初期温度[°C]	
	階	
	室床高さ(参照高さ)	
	ゾーンの高さHZn[m]	
	ゾーンの奥行きDZn[m]	
	ゾーンの幅WZn[m]	
	初期空気type (=0:温度のみ, =1:温度・湿度、=-n: ゾーンnの温度を境界条件にする)	
	壁type ID (ダミー)	
	天井type ID (ダミー)	
	床type ID (ダミー)	
	制御系コンポーネント名 (ダミー)	
空気流動コンポーネント (&afpath)	以下のデータブロック数	それぞれ、下記「リンク」「機械系ベントリンク」で参照。
隙間モデル (*crack)	隙間数	隙間数分指定。
	名称(文字列)	
	流量係数CS	
	べき乗数n	
	隙間の長さ	
	壁の厚さ	
	熱伝導率	
開口部モデル (*openings)	開口部数	開口部数分指定。
	名称(文字列)	
	開口タイプNo. (=1: 矩形垂直開口, =2: 水平固定軸垂直開口, =21: 矩形水平開口, =22: 水平固定軸水平開口)	
	閉じた状態での流量係数 Cs	
	流量のべき乗数	
	開口幅	
	開口高さ	
	追加隙間長さ	
	開口率	
	放出係数 Cd	
	開口幅比	
	開口高さ比	
	開口の始まる高さ比	
	ダクトモデル	

大項目 (括弧：キーワード)	データ項目	備考
(*duct)	名称(文字列)	
	ダクト幅(または径)	
	ダクト高さ	
	壁面の粗さ [mm]	
	ダクトの長さ	
	動的損失 (Dynamic Loss) 係数 Zeta	
	ダクトのタイプNo.	
	ダクトタイプに応じたパラメータ1	
	ダクトタイプに応じたパラメータ2	
ファンモデル (*fan)	ファン数	ファン数分指定
	名称(文字列)	
	特性曲線のデータ入力方法. (=1:多項式、=2:データ補間)	
	多項式の次数指定 (5まで)	
	流入(inlet)空気密度	
	ファンの回転速度 [rpm]	
	ファンがOFFの場合の流量係数 CS	
	ファンがOFFの場合のべき乗数	
	多項式における最小圧力点	
	多項式における最大圧力点	
	多項式における線形補外の傾き	
	特性曲線の流量軸(y)と線形補外の切片	
	多項式近似における定数項 C0、 1次以降の係数 C1～	
リンク (&link) (リンクとは、ゾーン等をつなぐ流路である)	リンクデータ数 NLink	
	固定点数 Nfx	以下の「fx**」の個数
	リンクID	以下、Nlink組指定
	空気流動コンポーネントの名称	
	接続ノード (IN)	ノード名： fx**：固定ノード (**：ID) ex**：外界 (**：ID) ゾーン番号：ゾーン 水平開口の場合は、TOPのノードを指定する。
	接続ノード (OUT)	同上 水平開口の場合は、BOTTOMのノードを指定する。
	リンク高さ (IN node)	
	リンク高さ (OUT node)	
	高さ因子 (height factor)	
倍数因子 (actual value)		

大項目 (括弧：キーワード)	データ項目	備考
	合流・分岐指定 (ダクトの場合)	
	合流・分岐の角度 (ダクトの場合)	
	危険物質に対するフィルター値	
機械系ベント (&mvlink)	機械系ベントリンク数	指定数分指定 Advance/FrontNet/Γで模擬する 場合は、境界接続を設定
	接続部屋(ゾーン)番号	
	機械系ベントノード番号	
	方向オプション (=1：垂直“V”、 =2：他)	
	接続高さ	
	接続面積	
	機械系ベントリンク機器指定数 Nbr	指定数分指定 Advance/FrontNet/Γで模擬する 場合は、パイプに対応 上記&afpathで定義した名称
	ダクト名またはファン名	
	第1ノード番号	
	第2ノード番号	
	第1ノード高さ[m]	
第2ノード高さ[m]		
固定圧力ノード (&fixed_pressure)	固定点数	固定点数分指定
	固定圧ノード番号	
	固定圧力値[PaG]	
ゾーン初期空気タイプ (&zone_air_type)	データ数 (=1)	
	温度[°C]	
	相対湿度	
	密度計算式の指定 (省略化) (注	
外気条件 (&outdoor)	圧力 [kPa]	
	温度 [°C]	
	相対湿度 (デフォルト0)	
	外気成分濃度(1)~(4)	省略するとデフォルト設定。
火源データ (&zone_fire)	火源の数 (=1)	
	火源のゾーン番号	
	火源のタイプ番号 (=1)	
	火源位置x座標[m]	ゾーンデータDZnに対応
	火源位置y座標[m]	ゾーンデータWZnに対応
	火源位置z座標[m]	ゾーンデータHZnに対応
	天井ジェットモデル (不使用)	
火炎データ (&fire)	データ数 (=1)	
	火炎 (燃料) タイプ番号 (=1)	
	燃料の分子量[g/mol]	
	燃焼熱[kJ/kg]	(入力直後[J/kg]に変換)
	気化熱[kJ/kg]	(入力直後[J/kg]に変換)
	揮発温度[°C]	
	放射率	
	着火温度[°C]	
	酸素下限値[%]	
火源時系列データ	火災シナリオ数 (=1)	

大項目 (括弧：キーワード)	データ項目	備考
(&fire_scenario)	火災シナリオファイル名	ファイル内容は別表
スプリンクラー (&sprinkler)	スプリンクラー数	スプリンクラー数分指定
	設置部屋(ゾーン)番号	
	スプレー密度Qspray[mm/s]	
	センサーの発動時間[s] (<0の時：-感知器設定温度[K])	
火災シナリオ (&scenario)	シナリオ数 (=1)	
	スケジュール (シナリオ) ファイル名	ファイル内容は別表

(注1) 火災解析時の気体成分内容

番号	成分	番号	成分
1	N2	6	C(soot:すす)
2	O2	7	Fuel
3	CO2	8	HCl
4	H2O	9	HCN
5	CO		

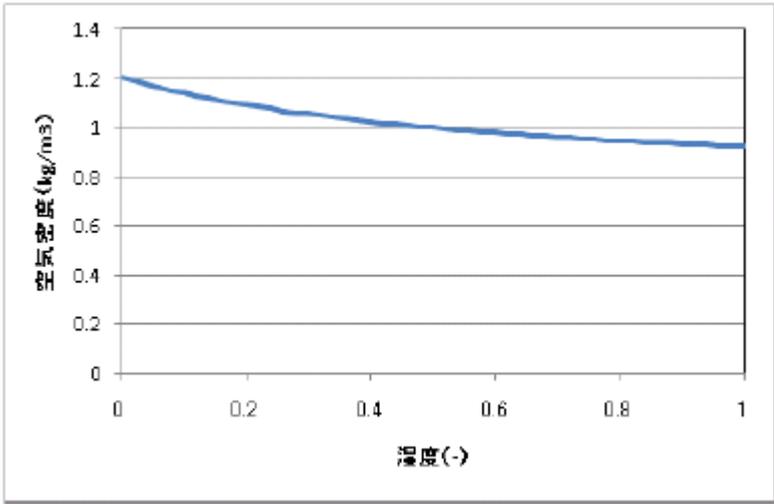
(注2) 時系列結果出力指定変数

入力データでの指定				意味	単位	変数名	
変数名称	第1添字	第2添字	第3添字			拡散	火災
PRS	部屋番号	-	-	圧力	Pa	PZn	PZnf
DPR	部屋番号	0	部屋番号	圧力差P1-P3	Pa	PZn	PZnf
HLY	部屋番号	-	-	煙層高さ	m		HLy
TMP	部屋番号	1:上層 2:下層 (火災解析)	-	温度	K	TZn	TZnf
RHO	部屋番号	同上	-	密度	kg/m ³	RhoZn	RhoZnf
YSP	部屋番号	同上	化学種番号	質量分率	-	YHzd (i1,i3)	Yspm÷ ΣYspm
YSM	部屋番号	同上	化学種番号	質量	g		Yspm
YSV	部屋番号	同上	化学種番号	濃度	ppm		*
YPR	部屋番号	同上	化学種番号	生成率	kg/s		(local)
FTM	部屋番号	同上	-	質量変化率の合計	kg/s	FTI	FTM
FTQ	部屋番号	同上	-	熱量変化率の合計	J/s		FTQ
FTS	部屋番号	同上	化学種番号	成分量変化率の合計	kg/s		FTS
FVM	部屋番号	同上	-	垂直開口部水平流による質量変化率	kg/s		FVM
FVQ	部屋番号	同上	-	垂直開口部水平流による熱量変化率	J/s		FVQ
FVS	部屋番号	同上	化学種番号	垂直開口部水平流による成分量変化率	kg/s		FVS

入力データでの指定				意味	単位	変数名	
変数 名称	第1添字	第2添字	第3添字			拡散	火災
FHM	部屋番号	同上	—	水平開口部垂直流による質量変化率	kg/s		FHM
FHQ	部屋番号	同上	—	水平開口部垂直流による熱量変化率	J/s		FHQ
FHS	部屋番号	同上	化学種番号	水平開口部垂直流による成分量変化率	kg/s		FHS
FFM	部屋番号	同上	—	火炎による質量変化率	kg/s		FFM
FFQ	部屋番号	同上	—	火炎による熱量変化率	J/s		FFQ
FFS	部屋番号	同上	化学種番号	火炎による成分量変化率	kg/s		FFS
FMVM	部屋番号	同上	—	機械系ベントによる質量変化率	kg/s		FMVM
FMVQ	部屋番号	同上	—	機械系ベントによる熱量変化率	J/s		FMVQ
FMVS	部屋番号	同上	化学種番号	機械系ベントによる成分量変化率	kg/s		FMVS
FCQ	部屋番号	同上	—	対流伝熱による熱量変化率	J/s		FCQ
FRQ	部屋番号	同上	—	放射伝熱による熱量変化率	J/s		FRQ
FJQ	部屋番号	同上	—	天井ジェット伝熱による熱量変化率	J/s		FJQ
FLW	リンク番号	—	—	リンク（部屋と部屋の間）流量	kg/s	FL	Σ FLf
FLF	同上	1,2:第1室の上層,下層	1,2:第2室の上層,下層	リンクの層間流量	kg/s		FLf
FLMV	機械系ベントノード番号	—	—	機械系リンク流量	kg/s		FLmv
PMV	同上	—	—	機械系ベントの圧力	Pa		
TMV	同上	—	—	機械系ベントの温度	K		
WCQ	部屋番号	壁要素番号	—	対流伝熱による壁要素の熱量変化率	J/s		FCQW
WRQ	部屋番号	壁要素番号	—	放射伝熱による壁要素の熱量変化率	J/s		FRQW

部屋番号、リンク番号はファイル出力時に部屋名、リンク名に変換して出力。

(注 3) 空気の密度計算式

ioptrho	内容	計算式 (カッコ内は101,300Pa、20°Cでの値)
0	圧力・温度依存式 (CFASTでも使用)	$\rho = \text{Pres} / 2.8914286 \times 10^2 / (\text{Temp} + T0C)$ (1.195kg/m ³)
1	湿度も考慮した式	$\rho = \text{Pres} / (461.518 * (\text{Temp} + T0C) * (\text{Hum} + 0.62198)) * (1.0 + \text{Hum})$ 
2	濃度を考慮した式	$\rho = (\text{Pres} / (\text{Rgas} * (\text{Temp} + T0C) * (1.0 + B))) * (1.0 + A)$ A = Hum + $\sum Y_k$ B = Hum * (Mmol _{Air} /Mmol _{H2O}) + $\sum Y_k * (Mmol_{Air} / Mmol_k)$
4	固定値	$\rho = 1.187$

(2) 火災シナリオ (ファイル名 : input.dat 内で定義)

Advance/EVE SAYFA の火災室に設定する火災シナリオを定義する。

位置	内容	
1行目	見出し	
2行目以降	第1項	時刻[s]
	第2項	熱放出割合HRR [kW] (入力直後に[W]に変換)
	第3項	熱分解速度MLR [kg/s]
	第4項	火源面積 [m ²]
	第5項	火源高さ [m]
	第6項	燃料のhydrogen/carbon割合 [kg/kg]
	第7項	燃料のOxygen/Carbon割合 [kg/kg]
	第8項	CO/CO ₂ 生成割合 [kg/kg]
	第9項	carbon/CO ₂ 生成割合 [kg/kg]
	第10項	不使用
	第11項	不使用
	第12項	不使用

※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。)