

EVE SAYFAの大規模解析と避難シミュレーションの適用

富塚 孝之* 吉岡 逸夫**

Large Scale Analysis by EVE SAYFA and Application to the Evacuation Simulation

Takayuki Tomizuka* and Itsuo Yoshioka**

二層ゾーンモデルによる火災・有害物質拡散解析ソフトウェアである Advance/EVE SAYFA と、米国商務省国立標準技術研究所で開発された火災進展・避難シミュレータである FDS+EVAC[1]を連成させ、大規模施設における火災・避難シミュレーションを試みた。FDS では火災源である居室に対して3次元CFD計算を行い、居室から通路、階段および他の部屋を通じて移流拡散する煙と熱気流をEVE SAYFAを用いて連成解析を行った。さらに、FDS および EVE SAYFA の計算結果を用いて避難シミュレーションを実施した。本稿では各ソフトウェアの計算モデルと同一シミュレーションにおける解析モデルについて説明する。

Key word: 火災、避難、大型施設、大型客船、EVE SAYFA、FDS、EVAC、二層ゾーンモデル

1. はじめに

近年、建物や船舶の高層化、大規模化が進んでおり、大規模・高層ビルや大型客船は構造上、火災が発生した際に避難ルートが複雑化してくることから、地上や甲板へのアクセスが制限されやすく、安全性に対する懸念が挙げられている。また、煙の挙動も通路、階段、ダクト管およびエレベータなどを通じて、水平方向および鉛直方向に複雑に移流拡散するため、どこの箇所にとどの程度の速さで煙が充満するかといった予測が困難である。このような建築物や船舶に対する防災設計、消火計画、さらには消防基準を検討するにあたり、実スケールでの実験や検証は危険性やコストなどの面で非常に困難である。

一方、科学技術計算分野ではより実用的な火災モデルや避難モデルの研究開発が進んだことと、大規模並列コンピュータなど計算機能力の飛躍的な向上により、大規模で複雑な解析モデルの

数値シミュレーションが可能となってきた。

自治体や消防機関をはじめ、防災に携わる機関では安全対策を検討する際にこれら数値シミュレーションを導入する機会が増えており、建築基準などの法整備においてもシミュレーションによる安全確認の義務化の検討が進められている。

計算機資源が豊富であり、計算速度も格段に向上した今日とはいえ、インテリアや機器設備などが非常に複雑に配置されている大型施設全体を、3次元CFDを用いて計算することは未だに実用的ではない。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][4][5]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、煙の発生源で急激な発熱や過渡的な熱流動が起きている火災の領域をFDSで3次元熱流動解析し、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

*アドバンスソフト株式会社 第3事業部

3rd Computational Science and Engineering Group, AdvanceSoft Corporation

**アドバンスソフト株式会社 第4事業部

4th Computational Science and Engineering Group, AdvanceSoft Corporation

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。

アドバンスソフト(株)は文部科学省の国家プロジェクトとして開発した建物内の火災安全・防災のためのシミュレータ Advance/EVE SAYFA (以降 EVE SAYFA と称す)に対し FDS との連成計算機能を付加し、さらに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との連成を可能にすることにより、急激な火災の解析が行えるようにした。EVE SAYFA は二層ゾーンモデルで CFAST と同等の機能を持ち、建物内での火災による煙および有害物質の移流・拡散現象が解析できるプログラムである。原子力施設を対象に FDS で火災源領域を 3 次元解析し、その他の領域は EVE SAYFA で連成解析を実施し、実測値と良く一致する結果を得た[6]。

FDS はバージョン 5 から FDS+EVAC (Fire Dynamics Simulator with Evacuation) として避難シミュレーションを統合したバージョンをリリースしている[7]。アドバンスソフト株式会社は FDS+EVAC と EVE SAYFA での連成解析もできるようにし、火災解析に加え EVAC による避難シミュレーションも可能となった。

2. 機能概要

2.1. EVE SAYFA

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[8][9]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/Γ[10]がサブルーチン化され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 EVE SAYFA の機能一覧

項目	内容
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 と連成)
機器 コンポーネント	開口部、隙間、ファン

2.2. FDS

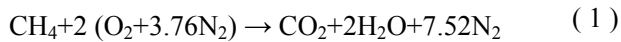
FDS の概要について説明する。FDS には主な計算モデルとして以下のものが組み込まれている。

- ① 低マッハ数近似に基づく LES (Large Eddy Simulation) モデルを採用
- ② 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
- ③ 計算格子は構造格子でスタッガード格子を採用
- ④ 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 Smagorinsky モデルを採用している。オプションとして DNS (Direct Numerical Simulation) を使うこともできる。

FDS では Poisson 方程式を高速に解くため、FFT (Fast Fourier Transforms) 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速固定の他に、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。

2.3. EVAC

FDS+EVAC における避難シミュレータである EVAC について説明する。EVAC の避難モデルでは各人を個々の避難者として取り扱い、FDS で設定された計算空間において、床および地表面上を 2 次元的に動くようになっている。その動きには散逸性粒子運動学法 (DPD: Dissipative Particle Dynamics) を用いており、次式で示される力学的法則に則っている。

$$m_i \frac{d^2 \mathbf{x}_i(t)}{dt^2} = \mathbf{f}_i(t) + \boldsymbol{\xi}_i(t) \quad (3)$$

ここで、右辺の第 1 項は周囲から受ける外力によるもので、第 2 項は微小でランダムな力である。

避難者は炎により避難する能力が減衰することがあり、炎により避難経路が遮断されるケースもある。逆に避難者が扉を開けて避難した場合や、防火装置を用いた場合には炎がその影響を受けることも考慮されている。煙については濃度に依存して避難者の避難速度が遅くなる。これは視界を遮られる効果を表している。また、避難出口が複数ある場合に避難者が選択するアルゴリズムについては、煙の濃度によって出口の優先順位がグループ化されるようになっている。

2.4. 連成方法

EVE SAYFA と FDS+EVAC を連成した場合の処理の流れを図 1 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 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 EVE SAYFA に渡し、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。

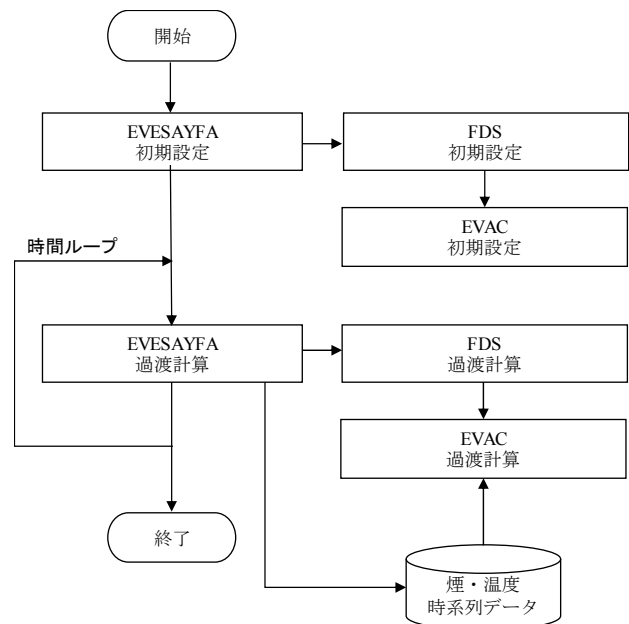


図 1 EVE SAYFA と FDS+EVAC の処理の流れ

3. EVE SAYFA と FDS+EVAC 連成解析事例

EVE SAYFA と FDS+EVAC の連成解析をビルディング火災に適用した事例について記す。

3.1. 解析モデル

4 階建てで区画数 (部屋数) が 40 あるビルディングを図 2 のようにモデル化した。火災は建物の左下にある一部屋で発生したものとする。左右両端の部屋は階段を模擬した流路で上下につながっており、各階の両側は避難用出口が設置されている。

初期条件として建物内の各階には 30 人の成人男性がいるものとした。

本解析では火災発生源の一部室内を FDS で解析し、その他 39 部屋を EVE SAYFA で解析した。その後、連成解析結果 (全 40 部屋の煙濃度および建物内温度の経時変化) を用いて避難シミュレーション (EVAC) を実施した。

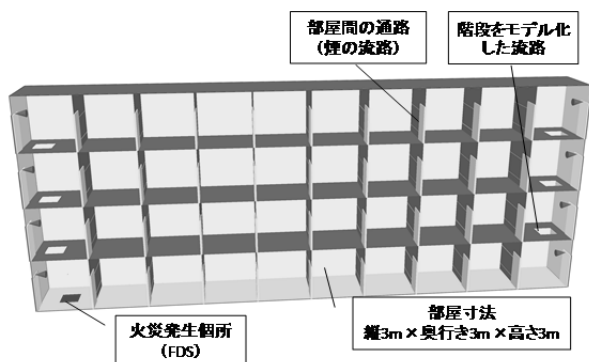


図 2 ビルディング火災解析モデル

3.2. 解析結果

連成解析結果として、図 3 に各階の中央付近部屋における温度の経時変化を示す。図 4 には避難シミュレーションの結果として、火災発生時と約 10 秒後における建物内の避難状態を示す。

温度の上昇速度は 1 階が最も早く、温度も高くなっており、上層階である 4 階が最も遅く比較的溫度も低い結果となっている。避難については全員成人男性 (Male) という条件で、EVAC の避難モデルによると、避難時の平均移動速度は 1.35 ± 0.20 [m/s] である。10 秒で約 13.5m 移動することから、各階の中央付近にいた人がほぼ端の部屋に到達することになる。この避難モデルでは、避難者同士の衝突やお互いの距離も移動速度に影響するが、同じ性質を持った避難者ということもあり、ほぼ同じ速度で移動するため、スムーズに避難できた結果であるといえる。

本解析結果において、火災源の位置や温度の上昇速度に対する、避難速度や避難する方向について、依存関係を確認するところまでは至らなかった。

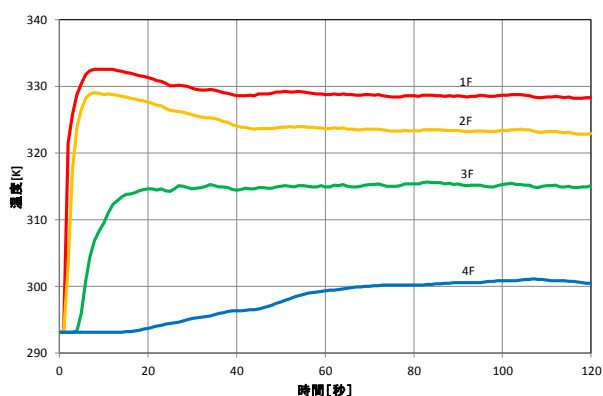


図 3 各階の温度経時変化

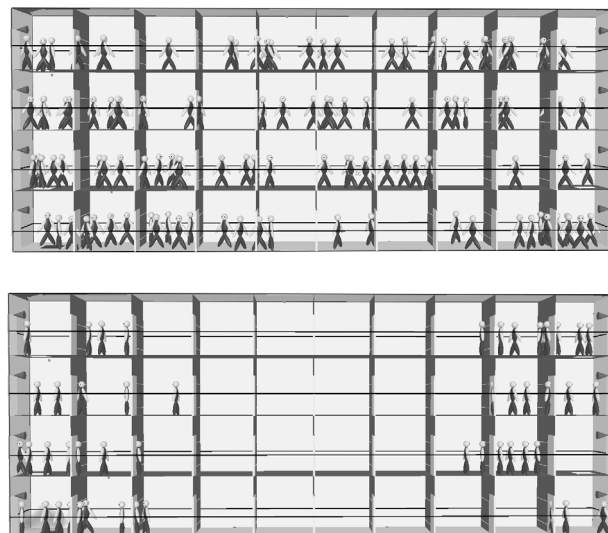


図 4 避難シミュレーション結果

(上段：火災発生時、下段：火災発生後)

4. まとめ

二層ゾーンモデルである EVE SAYFA と 3 次元火災・避難シミュレータである FDS+EVAC を連成し、実用的な計算負荷の範囲で大規模施設の火災・避難シミュレーションを実現できた。

今後はさまざまな施設形状の火災・避難シミュレーションを行い、煙と熱気流の定量的な挙動の検証を詰めていき、さらにさまざまな火災・避難シナリオの条件下で、避難シミュレーションを行い、モデルの特性を十分に把握する必要がある。

参考文献

- [1] <https://www.nist.gov/services-resources/software/fds-and-smokeview/>
- [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] Kevin McGrattan, “Fire Dynamics Simulator (Version 4) Technical Reference Guide”, National Institute of Standard and

Technology, (2005).

- [5] McGrattan, K. McDermott, R. et.al., :“Fire Dynamics Simulator (Version 5) , User’s Guide”, NIST Special Publication 1019-5, (2019).
- [6] 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
- [7] http://virtual.vtt.fi/virtual/proj6/fdsevac/documents/FDS+Evac_textbased_homepage.txt
- [8] 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).
- [9] 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)
- [10] 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

※ 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。)