

換気系を持つ施設での急激火災3次元詳細解析 —EVE SAYFAとFDSによる火災連成解析—

三橋 利玄** 浜野 明千宏* 吉岡 逸夫* 秋村 友香*

3-Dimensional Analysis of Rapid Fire Accident with Ventilation System - Fire Accident Simulation using EVE SAYFA combined FDS - Toshiharu Mitsuhashi**, Achihiro Hamano*, Itsuo Yoshioka* and Yuka Akimura*

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、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。連成可能な 3 次元火災・熱流動解析プログラムとして、汎用 3 次元熱流動解析プログラム Advance/FrontFlow/red と、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 がある。本稿では、Advance/EVE SAYFA 2.0 と FDS の連成解析機能と、連成解析機能の適用性を検討するために実施した解析事例を紹介する。取り上げた解析事例は、二層ゾーンモデルによる火災解析シミュレータ CFAST と FDS を組み合わせた連成解析で困難だった急激火災の 3 次元詳細解析であり、Advance/EVE SAYFA 2.0 と FDS の連成解析で得られた 3 次元詳細解析結果は実測値を良く再現し妥当な結果が得られた。

Key word: 急激火災、換気系、3 次元解析、連成解析、Advance/EVE SAYFA 2.0、FDS

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は、火災安全性を評価するために必要な煙層高さ、煙層降下速度や二酸化炭素濃度の算出に実績のあるモデルである[1][2]。二層ゾーンモデルは、建物内の煙流動をマクロな観点から上層と下層の二層とみなしこそ、気体の質量や熱的バランスを課したモデルであるが、複雑な形状で構成された建物や、ドア、窓などの開口部、換気ダクトなどの影響の大きい建物内での精度のよい火災安全性評価は困難である。このような状況で、注目したい箇所、要求される精度、計算負荷などに応じて、3 次元解析モデルによって着目箇所の詳細を調べ、システム全体はマクロ的なモデルを用い、両者を連成

解析するのは有効な手段の 1 つである。3 次元解析モデルを用いることで、ガス温度、構造物温度、火炎や煙、化学種濃度、すすなどの詳細な分布が得られ、精度の高い評価が可能となる。

そのため、3 次元火災・熱流動解析コード Fire Dynamics Simulator (FDS) [3][4] と二層ゾーンモデルによる火災解析シミュレータ CFAST[5][6] 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、FDS とも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。

*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 ,
AdvanceSoft Corporation

そこで、部分的な修正を加えた FDS(Version 4)を Advance/EVE SAYFA 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した。次に、これまで連成解析が困難だった急激な火災 3 次元詳細解析を行い、連成解析機能の妥当性を検討した。本稿では、連成解析機能と実施した急激な火災 3 次元詳細解析を紹介する。

2. Advance/EVE SAYFA の 3 次元解析連成機能

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）で開発されている Advance/EVE SAYFA 2.0 の概要については、本雑誌の先の報告「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 -」で述べられているため、ここでは、3 次元解析連成機能を中心に説明する。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 1 に Advance/EVE SAYFA 2.0 の連成計算の概要、表 1 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た。

Advance/EVE SAYFA 2.0 から FDS に対しては、換気系からの流量を受け渡す必要があるが、後述する理由から質量流量を受け渡すように改良を行った。FDS から Advance/EVE SAYFA 2.0 には、FDS の換気系の給排気口に接する格子平均のガスの圧力、温度、密度、化学種の質量分率を受け渡し、この圧力や温度を境界条件として、Advance/EVE SAYFA 2.0 内に組み込まれている Advance /FrontNet/G で換気系 1 次元の熱流動計算を行って質量流量を計算し、再度 FDS に受け渡すようにしている。FDS では、給排気の質量流量を境界条件として、3 次元領域の火災・熱流動解析を行い、火源から発生熱量や発生質量を基に、ガス圧力、ガス温度、構造物温度、化学種の質量分率、すすなど分布を逐次計算する。Advance/EVE SAYFA 2.0 と FDS のデータの受け渡し時間間隔は、入力データで制御できるようになっているが、標準値は 1.0 秒である。

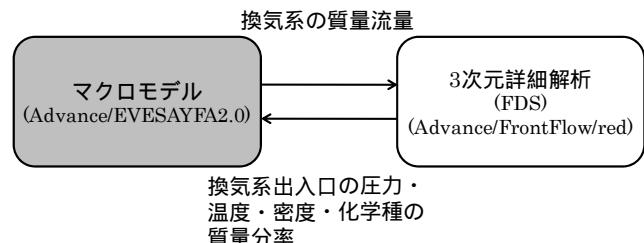


図 1 Advance/EVE SAYFA 2.0 の連成計算概要

表 1 Advance/EVE SAYFA 2.0 の 3 次元連成解析機能

対応する	FDS
3 次元ソルバー	Advance/FrontFlow/red
圧力	Advance/EVE SAYFA 2.0 が 3 次元ソルバーから受け取る
温度	Advance/EVE SAYFA 2.0 が 3 次元ソルバーから受け取る
質量流量	Advance/EVE SAYFA 2.0 が 3 次元ソルバーへ渡す
化学種の 質量分率	Advance/EVE SAYFA 2.0 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。

2.1.3 次元解析連成機能のプログラム構成

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。Advance/EVE SAYFA 2.0 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/G 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。本稿では、3 次元モデル図や 3 次元結果の分布図は、SmokeView を用いて出力したものを作成している。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ものであり、時間積分法には、2 次の Runge-Kutta 法

による予測子・修正子法を用いている。また、対流項の差分法は、数値粘性を抑えるために独特の工夫がなされているが、Courant 数をできるだけ 1.0 に近づけておく必要があるため、常に 0.8 と 1.0 に入るよう、時間刻み幅を制御している。

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[7]を採用している。Mixture Fraction モデル(混合分率燃焼モデル)[8]により燃焼を計算し、放射伝熱と対流伝熱を考慮している。低マッハ数近似に基づく質量保存式、化学種保存式、運動量保存式、エネルギー保存式、状態方程式を基礎方程式として、空間の寸法・障害物形状・可燃物種類・火源の発熱速度等を与えることで、温度、ガス濃度、速度といった物理量の分布を時系列で計算する。

Advance/EVE SAYFA 2.0 と FDS と連成した場合の処理の流れを図 3 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 2.0 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 2.0 に渡し、Advance/EVE SAYFA 2.0 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。

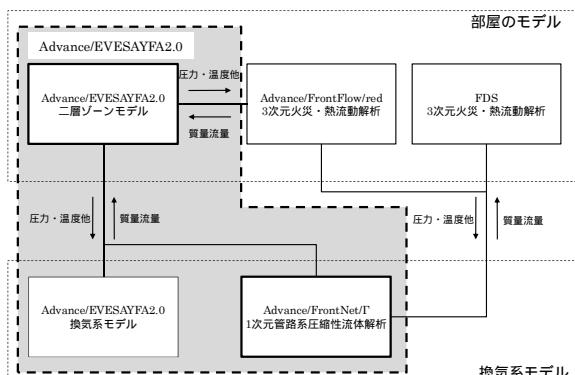


図 2 Advance/EVE SAYFA 2.0 の
プログラム構成（火災解析機能）



図 3 FDS と連成した場合の処理の流れ

2.2.3 次元計算の問題点と改良

FDS の質量保存は、給排気口に境界条件として与えた体積流量と火源からの発生質量から成り立つ。FDS の給排気口の境界条件には、体積流量の時間変化を与えるようになっているが、ガス密度を給排気口に接する格子からとられるため、質量保存が格子分割に影響することが懸念される。そこで、格子分割数を変更した FDS(Version 4)単独の解析を行った。計算対象は、後述する解析事例の火源室のみの単室体系とし、主要な計算条件を表 2 に示す。解析は、約 6 万格子の格子 1 と 96 万格子の格子 2 の 2 種類の格子を用いて行った。得られた解析結果を図 4~図 9 に示す。格子 2 を用いた解析結果は、ほぼ定常火炎となる 500 秒以後、ガス圧力も給排気口の質量流量もほぼ一定となり、妥当な結果を得ている。一方、粗い格子の格子 1 の解析結果は、500 秒以後、ガス圧力は低下する一方となり、質量保存が保たれていない様子が窺える。また、ガス圧力低下に伴い、ガス密度は低下し、それに合わせて質量流量も低下している。

なお、本雑誌の先の報告「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 -」で給排気の体積流量変化を示しているが、境界条件とした与えた Advance/FrontNet/T の体積流

量は、500 秒以後ほぼ一定で推移している。

以上から、格子分割の質量保存への影響は大きいことが分かり、Advance/EVE SAYFA 2.0 から FDS には、質量流量で受け渡すように 3 次元連成解析機能を実装した。離散化した基礎方程式の計算や Poisson 方程式の Divergence 計算では流速を用いているが、従来は境界条件として入力で与えた体積流量を給排気口の格子面積で割った流速を用いていた。3 次元連成解析機能では、給排気口の基礎方程式の計算や Divergence 計算において、受け渡された質量流量から給排気口の格子面積を用いて算出した質量流束を、給排気口に接する格子のガス密度で割るという形に置き換えた。こうすることによって、後述するように計算結果への格子分割の影響が小さくできるようになった。

表 2 FDS 単室体系解析の計算条件

項目	内 容
計算格子数	$40 \times 48 \times 32 = 61,440$ (格子 1) $100 \times 120 \times 80 = 960,000$ (格子 2)
Smagorinsky モデル定数	0.2(既定値)
乱流 Prandtl 数	0.5(既定値)
乱流 Schmidt 数	0.5(既定値)
火源の液体燃料	テトラプロピレン
燃焼熱放射割合	0.35(既定値)
給排気口の体積 流量変化	Advance/FrontNet/ Γ の 計算結果を入力

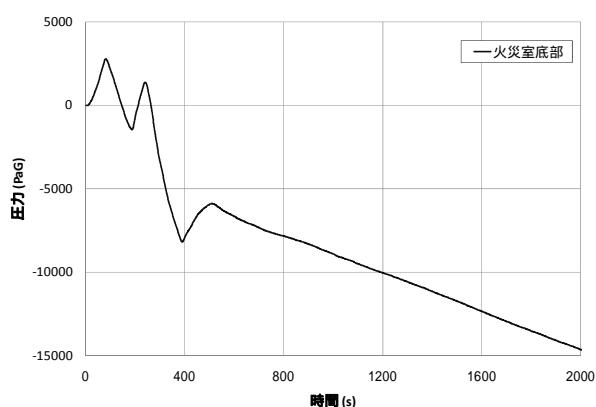


図 4 ガス圧力変化(FDS 単独解析、格子 1)

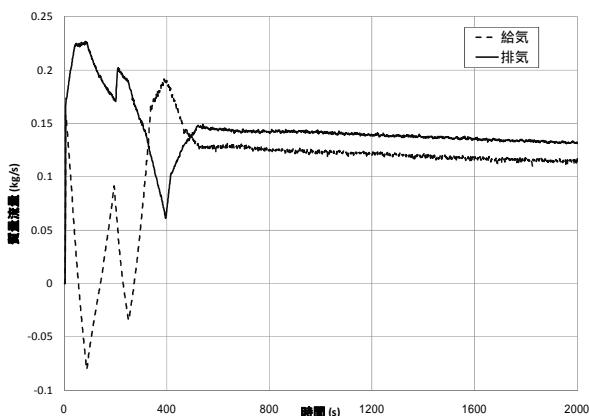


図 5 給排気流量変化(FDS 単独解析、格子 1)

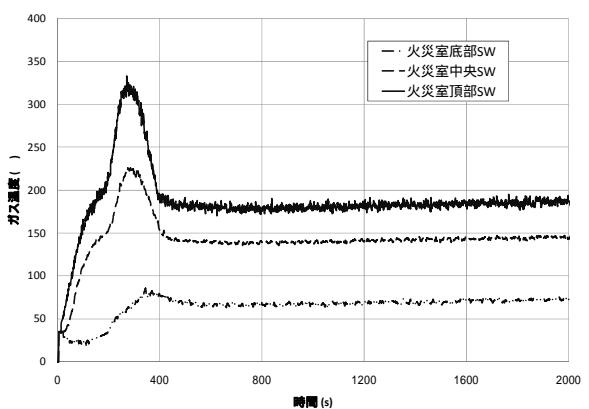


図 6 ガス温度変化(FDS 単独解析、格子 1)

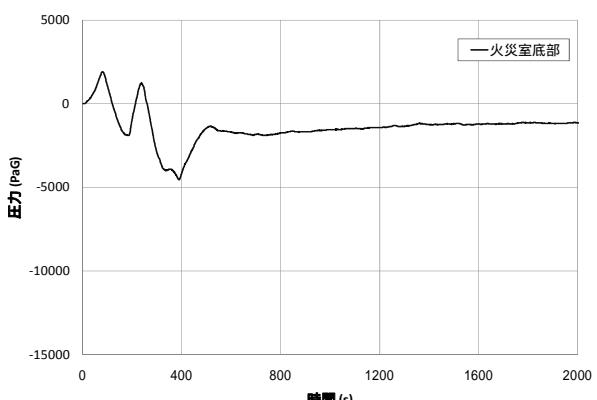


図 7 ガス圧力変化(FDS 単独解析、格子 2)

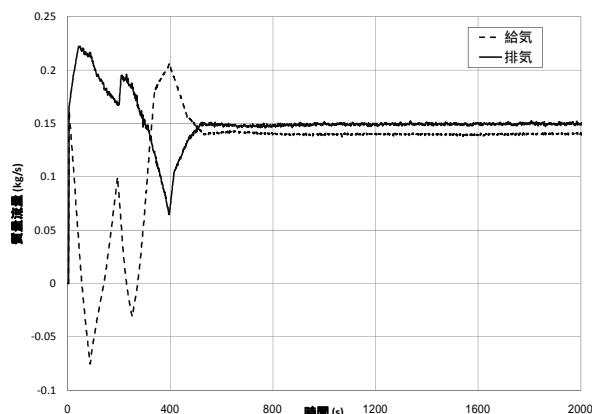


図 8 給排気流量変化(FDS 単独解析、格子 2)

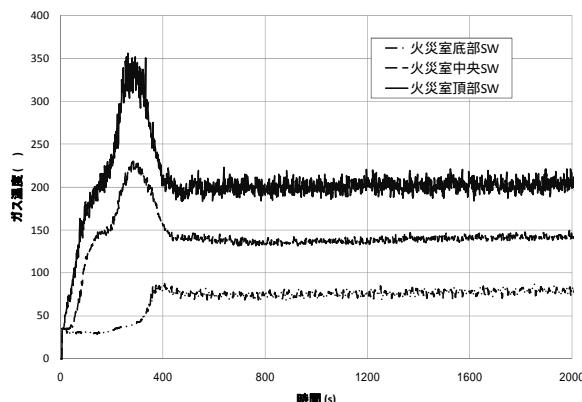


図 9 ガス温度変化(FDS 単独解析、格子 2)

3. 解析事例

本雑誌の先の報告「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 -」でも取り上げた解析事例に対して、Advance/EVE SAYFA 2.0 と FDS の連成解析を行い、急激火災解析に対する解析機能の適用性を検討した。

3.1. 解析条件

解析対象の体系を図 10 に示す。本雑誌の先の報告と同様、「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。

連成解析では、「火源」とある部屋(以下、火源室と呼ぶ)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、Advance/EVE SAYFA 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/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 10 の左から部屋に給気し、右へ向かって排気している。左右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。

図 11 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、前述の表 2 と同様であり、計算格子には、格子 1 を用いた。なお、乱流モデルとして、LES モデルを用いているが、格子 1 は通常の LES モデルの計算としては、かなり粗い格子である。本解析では、流速、圧力、温度の時間的に平均的な変化を求めることが主眼であるため、敢えて粗い格子を用いることとした。

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 45 分から減少するものと想定した。

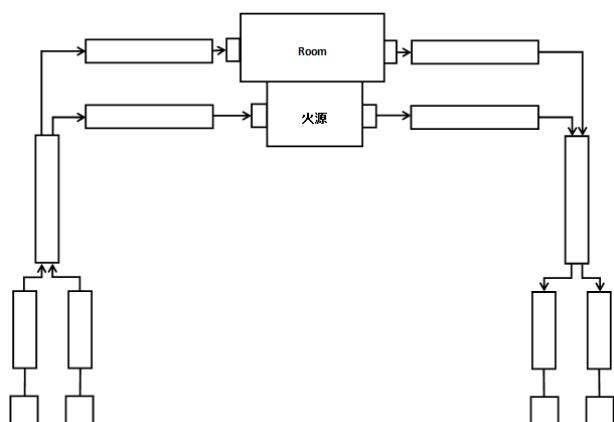


図 10 火災解析のための連成解析モデル

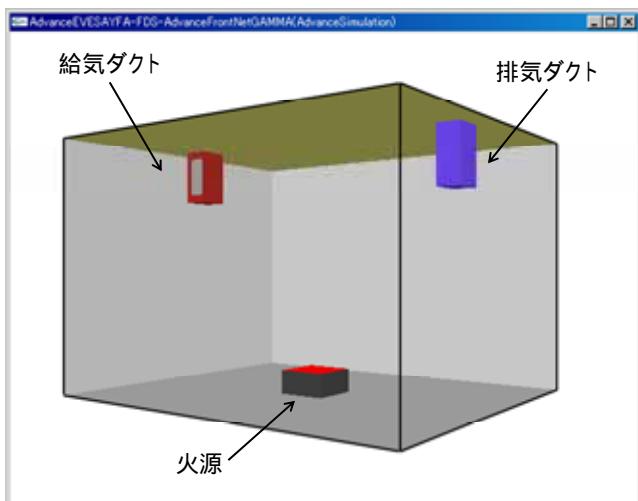


図 11 火源室の 3 次元モデル

3.2. 解析結果

Advance/EVE SAYFA 2.0 と FDS の連成解析で得られた解析結果を、図 12、図 14 および図 16 から図 19 に示す。給排気流量変化は、Advance/FrontNet/Γ で得られた解析結果であるが、その他は FDS で得られた解析結果である。

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ガス温度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。

さらに急激な火災燃焼に伴う CO₂ の増加と O₂ の減少が捉えられている。また、約 5 分すぎから、O₂ の減少に伴う火災の低下と換気により、温度と CO₂ 濃度の上昇があさまる状況が表現されている。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[9]を参照されたい。

本解析では、FDS の計算格子として粗い格子 1 を使用しているが、前章で述べた連成解析機能での改良の結果、ガス圧力や給排気流量の変化は妥当な挙動を示しており、改良の効果が示されている。また、FDS と連成しない解析で得られたガス圧力と給排気流量の変化を図 13 と図 15 に示したが、ほぼ同等の挙動を示したものとなっている。ガス圧力には実測結果がないものの、給排気流量が実測結果を良く現していることから、ガス圧力変化は実測と同等の変化を示しているものと推定される。

以上から、Advance/EVE SAYFA 2.0 と FDS の連成解析機能の妥当性が確認できるとともに、急激火災解析に対する解析機能の適用性が示された。

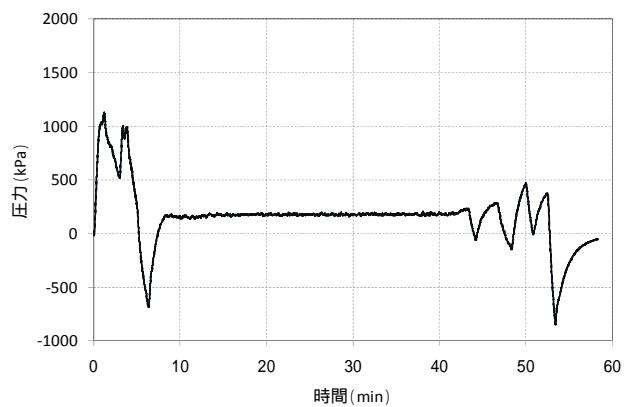


図 12 ガス圧力変化(FDS との連成解析)

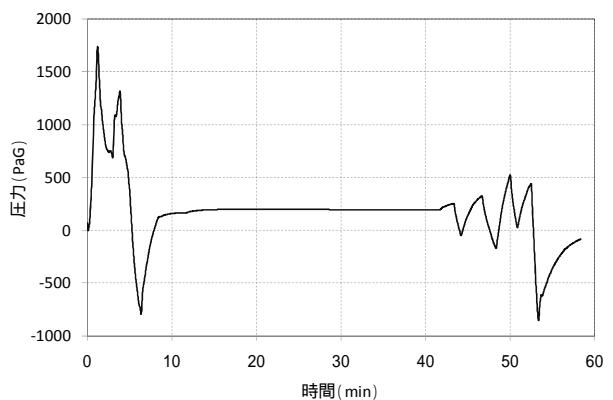


図 13 ガス圧力変化(FDS との連成しない解析)

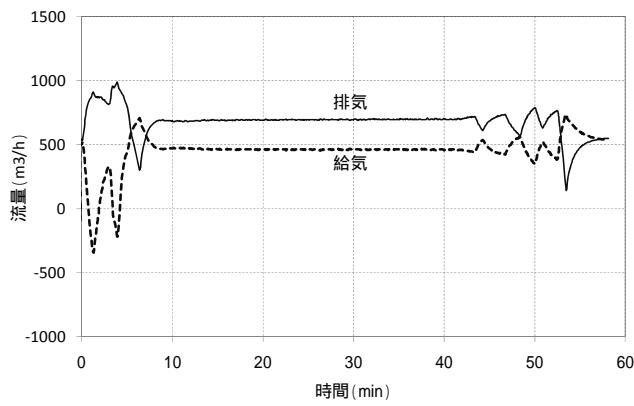


図 14 給排気流量変化(FDS との連成解析)

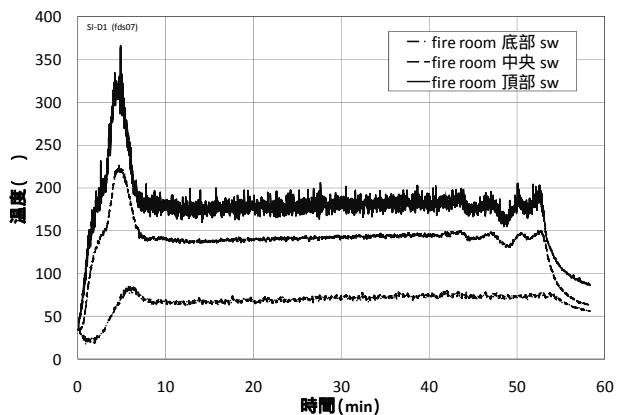


図 17 ガス温度変化(FDS との連成解析)

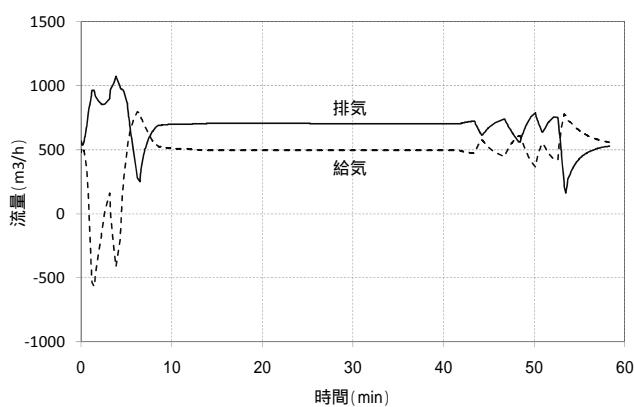


図 15 給排気流量変化(FDS との連成しない解析)

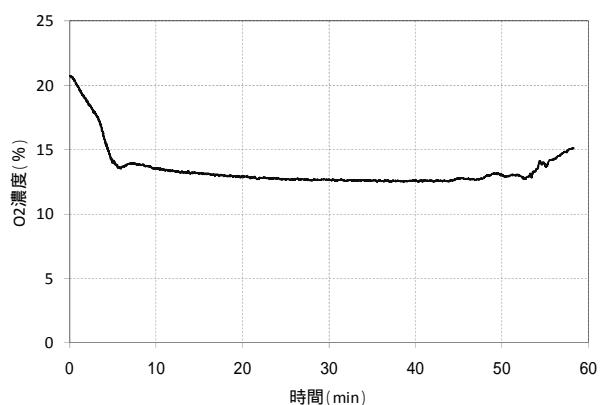


図 18 酸素濃度変化(FDS との連成解析)

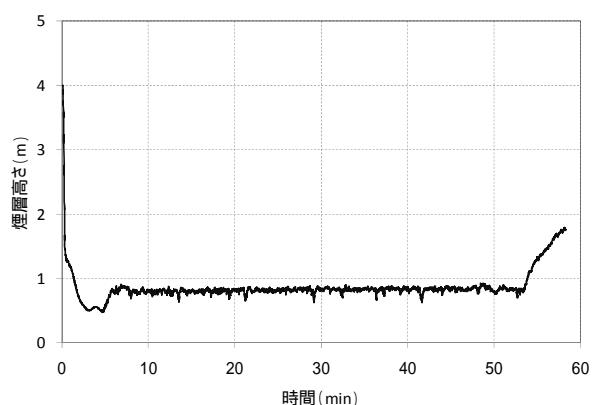


図 16 煙層高さ変化(FDS との連成解析)

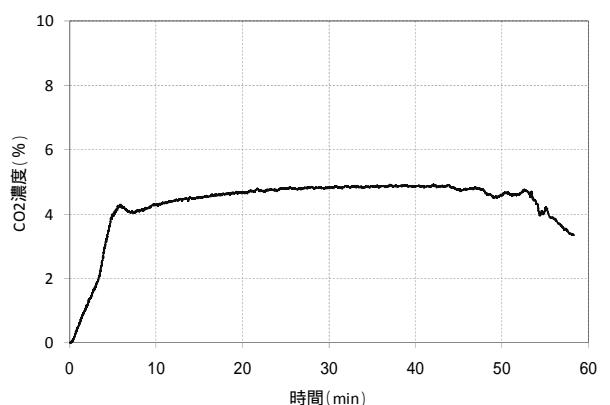


図 19 二酸化炭素濃度変化(FDS との連成解析)

次に、特徴的な時刻における火炎、すす、ガス温度、二酸化炭素濃度の 3 次元分布を図 20~図 39 に示す。

図 20~図 23 は火炎の分布を出力したものである。時刻 1 分で燃え始め(図 20) 時刻 5 分でピークをとり(図 21) 時刻 30 分では定常的に燃えているが(図 22) 時刻 55 分では鎮火している(図 23)。

図 24、図 25、図 26、図 27 は、それぞれ時刻 30 秒、1 分、2 分におけるすすの火源室の分布である。図 24 から火災発生からすぐにすすが火源から上昇し、天井をはうように分布している。図 25(時刻 1 分) 図 26(時刻 2 分) とすすの分布が下降して濃度が高くなっていく様子が分かる。それ以降の時刻ではすすが部屋に充満し、図 27(時刻 55 分) では排気が間に合わずすす濃度が高いことを示している。

図 28、図 29、図 30、図 31 は、それぞれ時刻 1 分、5 分、30 分、55 分における火源室のガスの温度分布を表す。出力断面は、給気ダクト、火源、排気ダクトの中心をとっている。それぞれ火源からガスが熱を得て上昇する様子や、給気ダクトから火源室に流入するガス温度が低いことが分かる。ピーク温度は火源近辺で約 600 となっている。

図 32、図 33、図 34、図 35 に、それぞれ時刻 1 分、5 分、30 分、55 分における火源室の二酸化炭素濃度を示す。時刻 1 分では、火源周辺の二酸化炭素のみが高濃度であったが(図 32) 時刻 5 分、30 分と時間が経過すると二酸化炭素が部屋に充満していることが分かる。給排気ダクトの流れの影響や浮力等により、二酸化炭素濃度は上層側で濃く、その様子を計算結果としてみることができる(図 33、図 34)。時刻 55 分では、火炎が鎮火したため、給排気により二酸化炭素濃度が減少している(図 35)。

図 36、図 37、図 38、図 39 に、それぞれ時刻 1 分、5 分、30 分、55 分における火源室の酸素濃度を示す。時刻 1 分では、部屋に通常濃度の酸素が充満し、火源周辺では酸素が消費されているのが分かる(図 36)。時刻 5 分、30 分と時間が経過する

と、給気ダクトから酸素が供給される様子や、下層側の酸素濃度が高いが、全体的には酸素が消費されていることが分かる(図 37、図 38)。時刻 55 分では、火炎がおさまったため、火炎ピーク時に比べ、酸素濃度が回復している(図 39)。

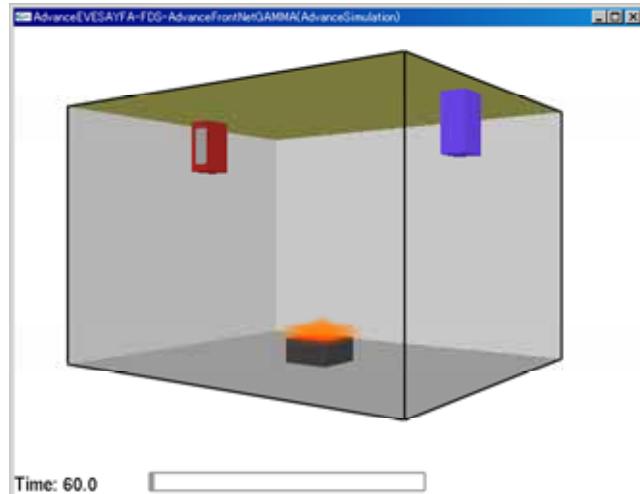


図 20 火炎分布（時刻 1 分）

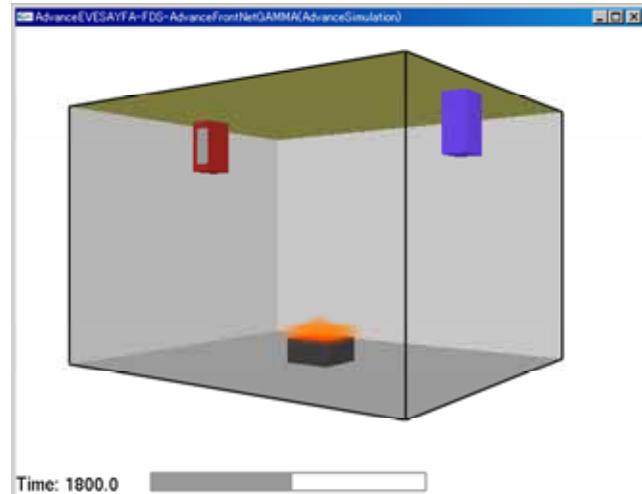


図 22 火炎分布（時刻 30 分）

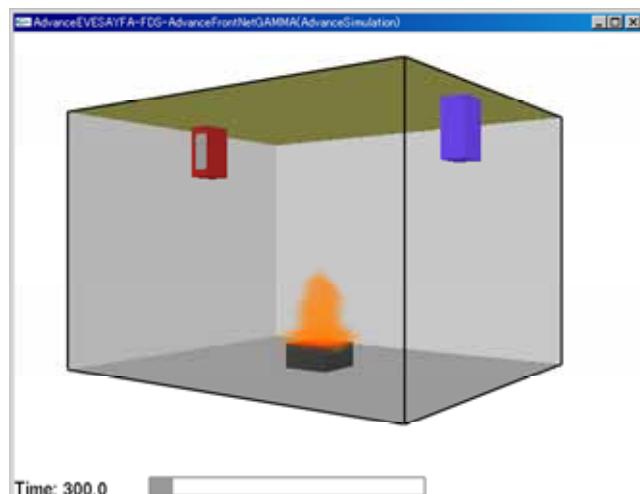


図 21 火炎分布（時刻 5 分）

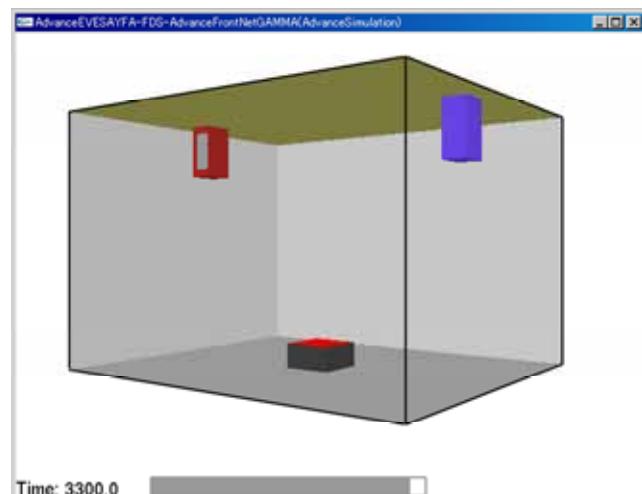


図 23 火炎分布（時刻 55 分）

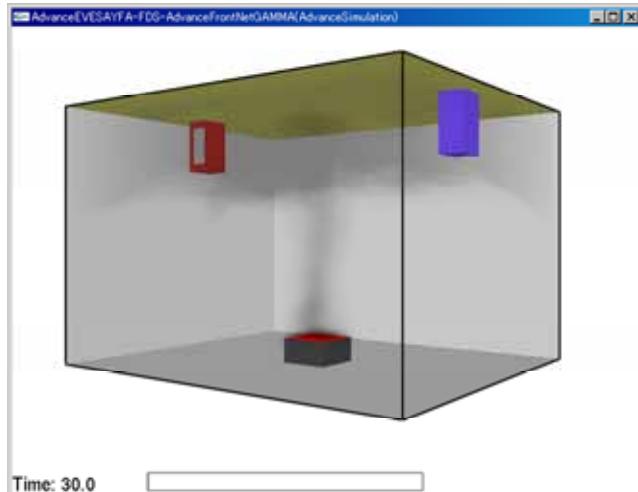


図 24 すす分布（時刻 30 秒）

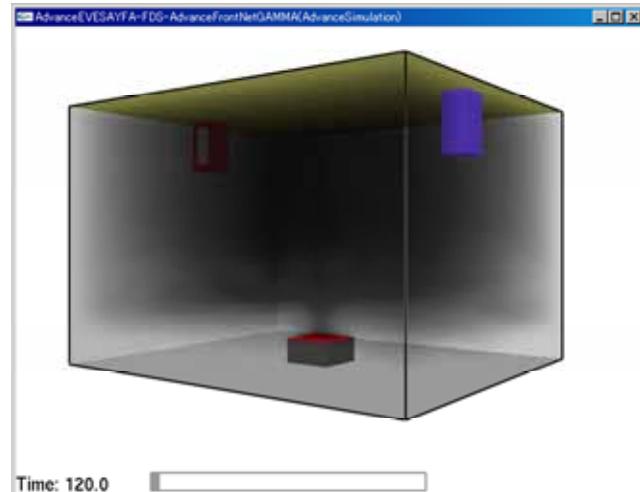


図 26 すす分布（時刻 2 分）

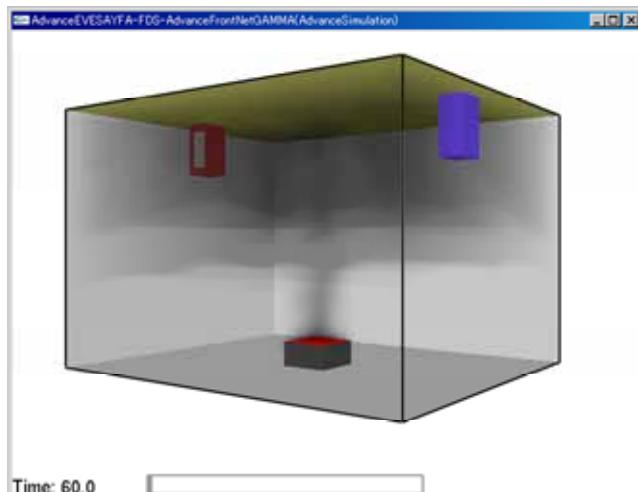


図 25 すす分布（時刻 1 分）



図 27 すす分布（時刻 55 分）

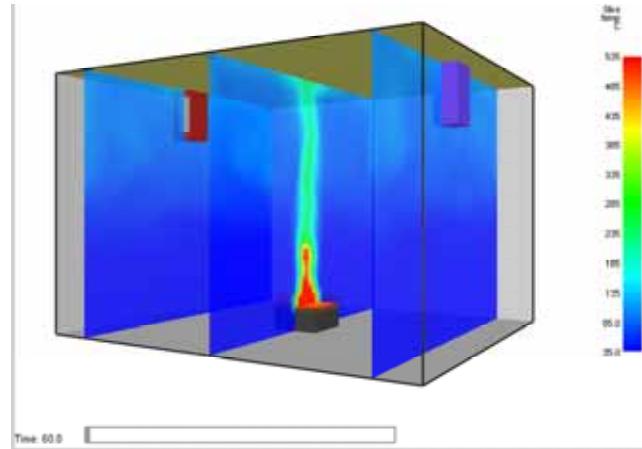


図 28 ガス温度分布（時刻 1 分）

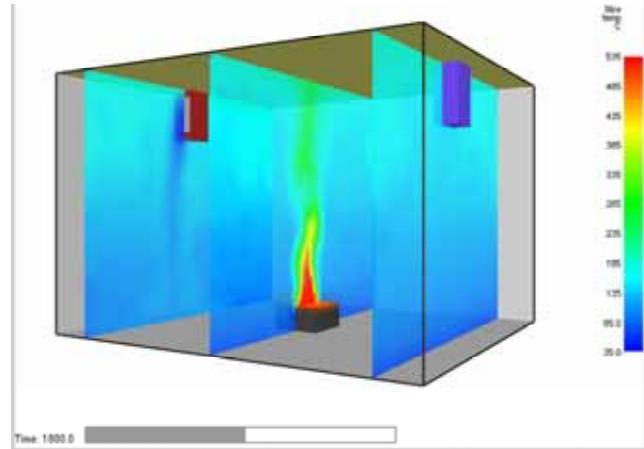


図 30 ガス温度分布（時刻 30 分）

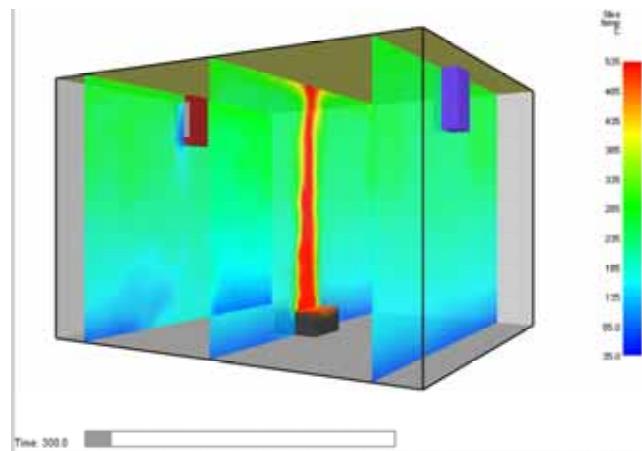


図 29 ガス温度分布（時刻 5 分）

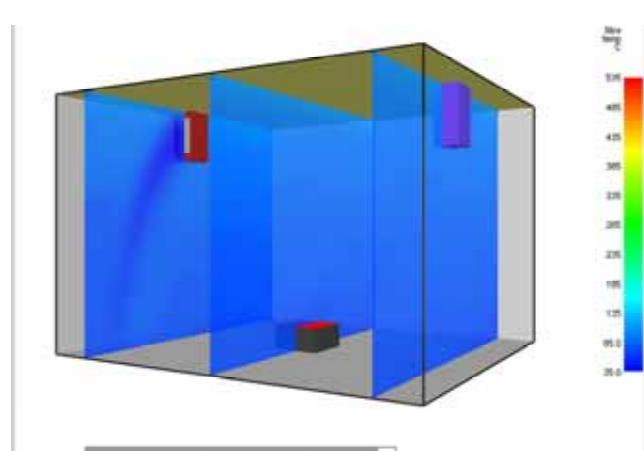


図 31 ガス温度分布（時刻 55 分）

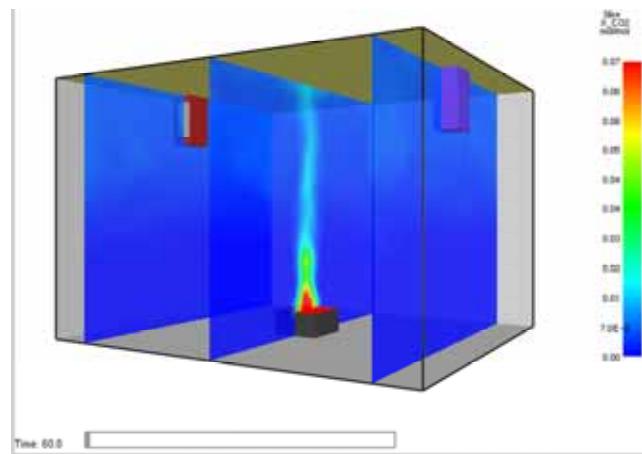


図 32 二酸化炭素濃度分布（時刻 1 分）

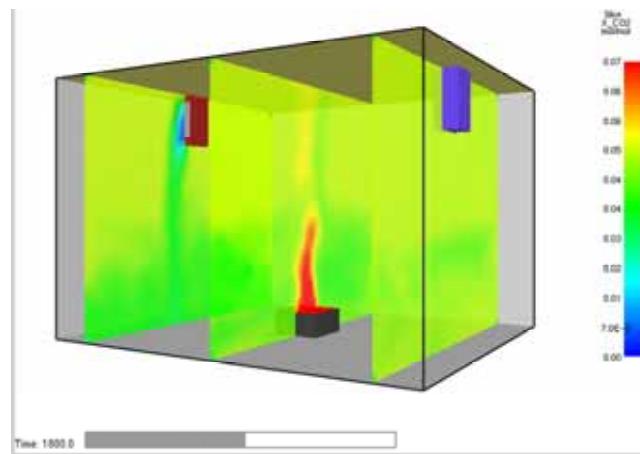


図 34 二酸化炭素濃度分布（時刻 30 分）

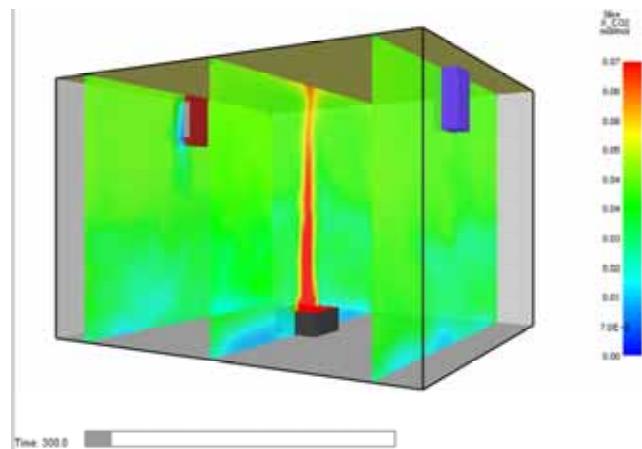


図 33 二酸化炭素濃度分布（時刻 5 分）

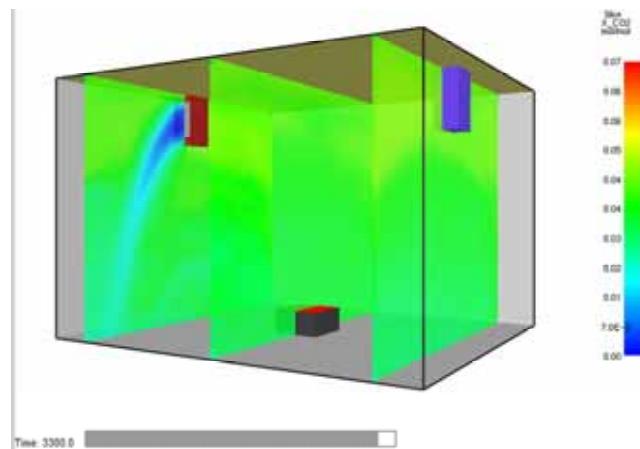


図 35 二酸化炭素濃度分布（時刻 55 分）

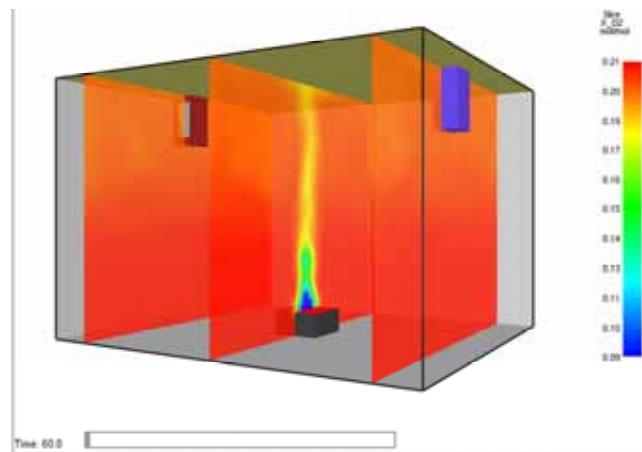


図 36 酸素濃度の分布（時刻 1 分）

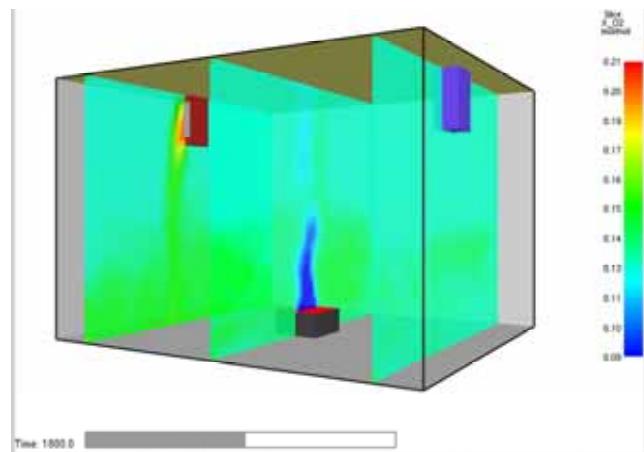


図 38 酸素濃度の分布（時刻 30 分）

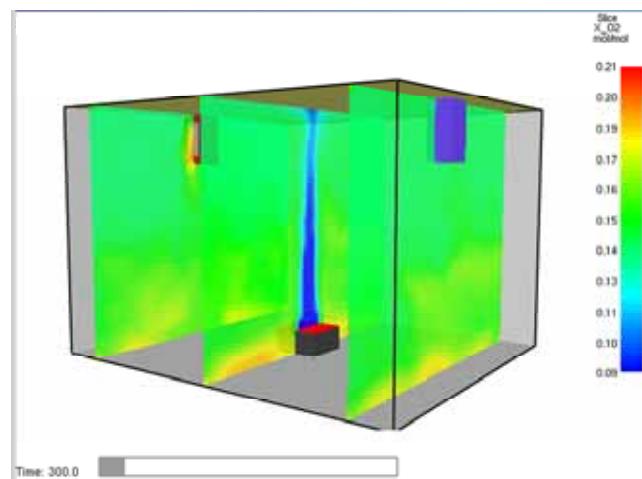


図 37 酸素濃度の分布（時刻 5 分）

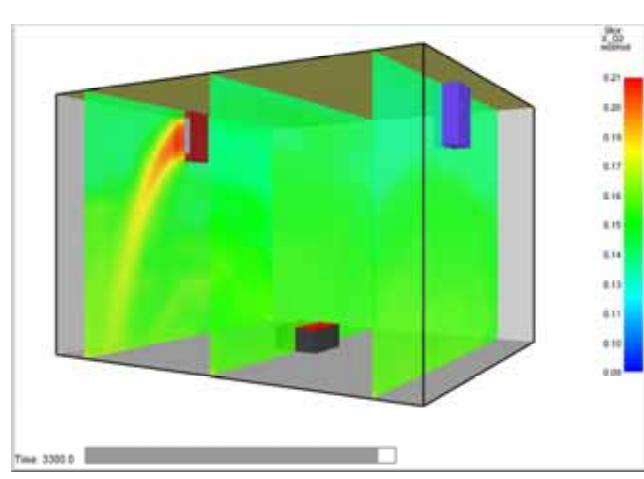


図 39 酸素濃度の分布（時刻 55 分）

3.3. 格子依存性に関する検討解析

Advance/EVE SAYFA 2.0 と FDS の連成解析において、解析結果の FDS の格子依存性について検討するために、前述の粗い格子 1 ($40 \times 48 \times 32 = 61,440$) に対して、 $64 \times 75 \times 50 = 240,000$ (格子 3) の細かい格子分割を用いて解析を行った。

格子 3 の解析結果を図 40 から図 45 に示す。

格子 3 を用いて得られた解析結果と格子 1 の解析結果と比較すると、ガス圧、給排気流量、ガス温度などは、格子を細かく分割したことにより変動がやや大きく、若干の差異が見られるものの、全体としてほぼ同等の結果が得られている。このことから、格子依存性が少ないことがいえ、連成解析機能での改良の妥当性が確認できる。

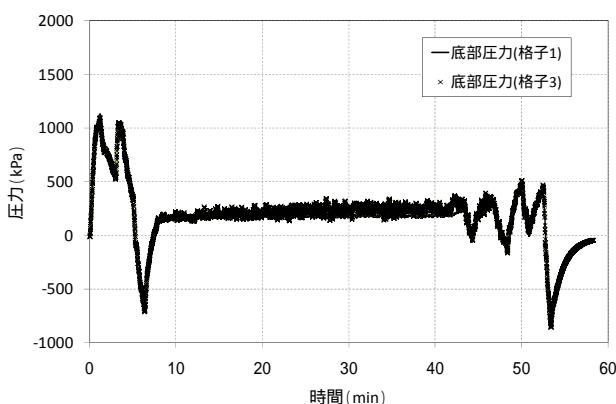


図 40 ガス圧力変化(FDS との連成解析、格子 3)

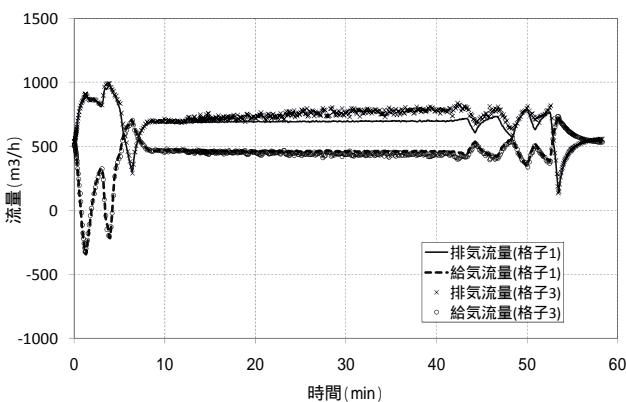


図 41 給排気流量変化(FDS との連成解析、格子 3)

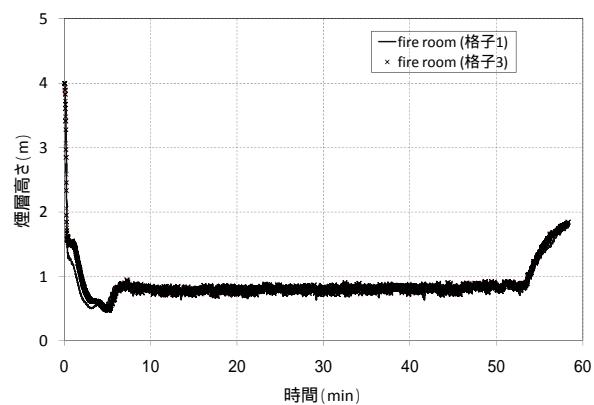


図 42 煙層高さ変化(FDS との連成解析、格子 3)

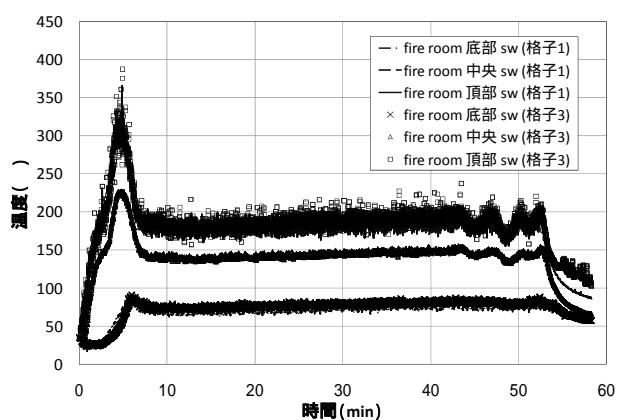


図 43 ガス温度変化(FDS との連成解析、格子 3)

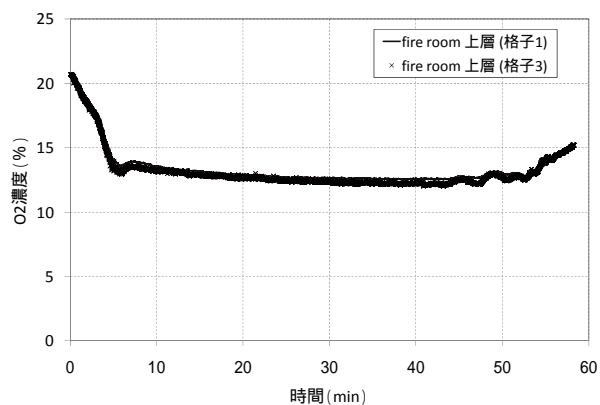


図 44 酸素濃度変化(FDS との連成解析、格子 3)

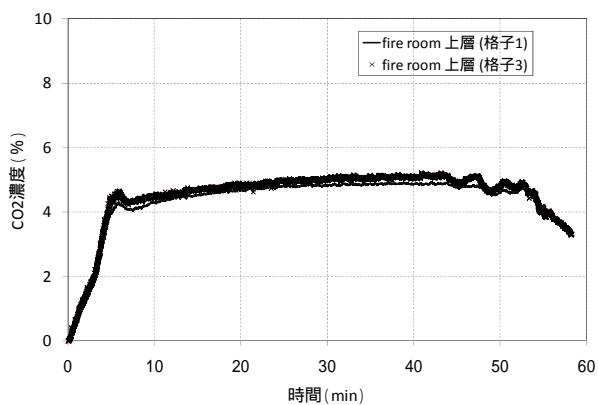


図 45 二酸化炭素濃度変化(FDS との連成解析、格子 3)

4. おわりに

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。急激な火災の連成解析が可能となるようにした。本解析機能では、詳細に着目する領域を FDS による 3 次元詳細解析を、換気系ダクトの 1 次元熱流動解析を、Advance/EVE SAYFA 2.0 に組み込んだ Advance/FrontNet/Γ を用いて行うようにした。さらに、マクロモデルで評価が十分な領域の熱流動解析と全体制御を Advance/EVE SAYFA 2.0 を用いて行うようにした。次に、これまで連成解析が困難だった、換気系を持つ施設での急激な火災 3 次元詳細解析と換気系から成るシステムの連成解析を行った。本解析事例のように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するとともに、実測結果を良く再現していることを確認した。

連成計算により、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。これらの量は換気系との連成計算により給排気ダクトによるガス流入出の影響が考慮され、妥当な計算結果が得られた。

さらに、FDS の格子依存性を解決するための改良を行い、規模の異なる計算格子を用いて連成解析

を行い、格子依存性が小さいことを確認した。

今後は、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。

参考文献

- [1] 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).
- [2] 阿部伸之：“CFD を用いた火災の数値シミュレーション”, 日本流体力学会数値流体力学部門 Web 会誌, 第 12 卷, 第 2 号 (2004).
- [3] Kevin McGrattan, “Fire Dynamics Simulator(Version 4) Technical Reference Guide,” National Institute of Standard and Technology (2005).
- [4] Fire Dynamics Simulator and Smokeview , <http://www.fire.nist.gov/fds/>
- [5] R.D. Peacock, et al., “CFAST Version 6 User’s Guide”, NIST Special Publication 1041.
- [6] W. Jones, et al., “CFAST Technical Reference Guide”, NIST Special Publication 1030.
- [7] Smagorinsky, J. “General circulation experiments with the primitive equations; Part 1. The basic experiment”, Monthly Weather Review, 91-3 (1963), 99-164.
- [8] 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.
- [9] 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>