

# オープンソース CFD による火災プルームの数値計算 — FDS と OpenFOAM の比較 — Numerical Simulations of a Fire Plume by Using Open Source CFD - Comparison of FDS and OpenFOAM -

- 北風慎吾, (株)アライド, 東京都江東区豊洲 3-2-20, E-mail:kitakaze@alde.co.jp  
阿部伸之, 消防研, 東京都調布市深大寺東町 4-35-3, E-mail:abe@fri.go.jp  
Shingo KITAKAZE, Allied Engineering Corporation, 3-2-20 Toyosu, Koto-ku, Tokyo, Japan  
Nobuyuki ABE, National Research Institute of Fire and Disaster, 4-53-3 Jindajji-higashimachi, Chofu-shi, Tokyo, Japan

Recently, numerical calculations using CFD have been utilized in fire investigation. For the future, it is important that CFD programs are open source CFD codes to be widely utilized for fire investigation, performance based design for fire defense equipment in a fire department. In this study, we carried out numerical calculations of a pool fire, fundamental to a fire, using open source CFD codes. They are Fire Dynamics Simulator (FDS) developed by National Institute of Standards and Technology and OpenFOAM developed by OpenCFD Ltd at ESI Group. And, we showed that grid resolution and a radiation model influence the profiles of temperature and rise velocity.

## 1. はじめに

現在、火災進展を予測する技術として、CFD を用いた数値計算が主に火災調査で活用されている<sup>(1)(2)</sup>。今後、消防機関において、火災調査や消防用設備の性能評価等に対し CFD を用いた数値計算が広く活用されるためには、計算プログラムがオープンソースであることが重要な必要条件の一つになる。

これまで火災科学分野では、オープンソース CFD コードとして米国商務省標準技術研究所 (以下、NIST) が開発している火災シミュレータ Fire Dynamics Simulator<sup>(3)</sup> (以下、FDS) が主に使用されている。FDS は火災進展の予測に特化した計算プログラムである。

一方、FDS と同様にオープンソースコードであり、OpenCFD 社による継続的な機能開発と並行してコミュニティベースでも活発な機能開発・改良が進んでいる汎用マルチフィジクスコード OpenFOAM<sup>(4)</sup>においても、火災進展の予測に特化したモジュール fireFOAM<sup>(5)</sup>が開発されている。過去にはプルームの Large Eddy Simulation<sup>(6)</sup>やヘリウム浮力流の解析<sup>(7)</sup>などに適用されてきた。

そこで本研究では、火災の基本的要素であるプール火災を取り上げ、それにより形成する火災プルームに対してオープンソース CFD コードである FDS と OpenFOAM を用いた数値計算を実施し、その結果を比較することにより、それらの特徴について調査したので報告する。

## 2. 数値計算法

### 2.1 基礎方程式

FDS 及び OpenFOAM の支配方程式は、質量保存式 (式(1))、化学種保存式 (式(2))、運動量保存式 (式(3))、エネルギー保存式 (式(4))、状態方程式から構成される。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \mathbf{u} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho Y_l) + \nabla \cdot \rho Y_l \mathbf{u} = \nabla \cdot (\rho D)_l \nabla Y_l + \dot{W}_l''' \quad (2)$$

$$\rho \left\{ \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} \right\} + \nabla p = \rho \mathbf{g} + \mathbf{f} + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho h) + \nabla \cdot \rho h \mathbf{u} - \frac{dp}{dt} = \dot{q}''' - \nabla \cdot \mathbf{q}_r + \nabla \cdot k \nabla T + \nabla \cdot \sum_l h_l (\rho D)_l \nabla Y_l \quad (4)$$

ここで、 $\rho$  は気体密度、 $\mathbf{u}$  は速度ベクトル、 $Y_l$  は化学種  $l$  の質量分率、 $\dot{W}_l'''$  は化学種  $l$  の生成率、 $p$  は圧力、 $\mathbf{f}$  は外力、 $\boldsymbol{\tau}$  は応力テンソル、 $h$  はエンタルピー、 $\dot{q}'''$  は単位体積あたりの発熱速度、 $\mathbf{q}_r$  は放射熱流束、 $T$  は温度である。火災の数値計算において取り扱う気体は圧縮性ではあるものの非常に低速の流れ場が支配的であり、密度波の伝播を捕捉する必要はない。熱の移動を伴う低速な流れ場では一般的にブジネスク近似による非圧縮性流れの解法が用いられるが、ここでは大きな温度変化による密度変化がある場を対象としていることから Rehm ら<sup>(8)</sup>により提案された低マッハ数近似の解法が FDS 及び OpenFOAM に適用されている。

### 2.2 FDS 及び OpenFOAM の概要

ここでは FDS 及び OpenFOAM の計算法の概要を示す。いずれもオープンソースコードであるため、誰でも無償でソースコードをインターネットでダウンロードすることができ、コンパイラさえ用意することができれば実行するアーキテクチャーの制約はない。

FDS は Fortran90 により計算プログラムが記述されているのに対し、OpenFOAM は C++ で記述されており、いずれもモジュールごとにソースが分割されているため、ユーザーによる改良に柔軟に対応できる仕組みとなっている。共に MPI による並列計算に標準対応しており、大規模並列計算が実行可能である。

今回計算で用いた双方のバージョンは FDS が ver5.5.3、OpenFOAM は ver2.1.x である。

#### 2.2.1 FDS の計算法

支配方程式には差分法に基づく離散化が適用されており、空間微分項には 2 次精度中心差分法が、時間進行法には陽的な 2 次精度の予測子-修正子法を用いており、時間刻み幅は CFL 条件を満足するような可変刻み幅か、予め裕度をもたせた固定の時間刻み幅のいずれかで計算が可能である。本研究では固定時間刻み幅によって計算を実施した。圧力の補正式には、CFD で用いられることの多い線形方程式ソルバによる反復解法ではなく、FFT による直接解法を採用しており、計算開始時付近の 1 時間ステップあたりの計算は反復解法に比べ高速である。計算格子は構造格子の他に円筒座標系による適合格子も使用可能である。

#### 2.2.2 OpenFOAM の計算法

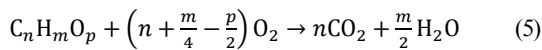
支配方程式には有限体積法に基づく離散化が適用されており、空間微分項は 2 次精度を保つように離散化されている。時間進行法は陰的な 1 次精度もしくは 2 次精度の解法から選択が可能であ

る。本研究では1次のオイラー陰解法を用いており、CFL条件が1以下となるような固定の時間刻み幅で実施した。速度と圧力の連成解法には SIMPLE 法と PISO 法のハイブリッド解法 (PIMPLE)<sup>9)</sup> が用いられており、非定常解法でありながら、PISO 法に比べて大きな時間増分を取ることができる。反面、各時間ステップで適切な反復計算を行う必要があるため、1時間ステップあたりの演算時間は長くなる。計算格子は構造・非構造格子両方に対応している。

### 2.3 燃焼モデル

燃焼現象は、素反応や火炎形成など物理、化学的に非常に複雑であり、燃焼現象そのものの詳細なモデリングは容易ではない。そこで火災を対象にした CFD コード内の燃焼のモデリング自体は比較的簡略化して扱われることが多く、FDS 及び OpenFOAM では共に Mixture Fraction モデル<sup>10)</sup>を採用している。

例えば、OpenFOAM では式(5)に示す燃焼の反応素過程をモデル化せずに燃料と酸化剤が混合したら即反応が終了するという仮定によって計算しているために、計算負荷の高い燃焼反応の素過程部分を省けるので実用的な計算時間で解くことが可能である。



### 2.4 乱流モデル

火災現象は非定常性が顕著であることから乱流モデルには Large Eddy Simulation (LES) の適用が望ましい。FDS では、現在リリースされている最新のバージョン 5.5.3 において工学的に広く用いられている標準 Smagorinsky モデル<sup>11)</sup>が採用されており、モデルパラメータとなる Smagorinsky 定数  $C_s$  は 0.2 で計算している。FDS 及び OpenFOAM での比較検証において極力、相違点をなくしておくために OpenFOAM でも標準 Smagorinsky モデル ( $C_s=0.2$ ) を用いて計算を実施した。なお、壁面付近の取り扱いには一般化対数則を用いている。

### 2.5 放射モデル

FDS では、放射輸送方程式を有限体積法による離散化を適用している。また、吸収係数の計算にデフォルトで Weighted sum of gray gases (WSGGM) モデルが適用され、オプションとして波長依存性を考慮できる広帯域放射 (Wide band radiation) モデル<sup>9)</sup>があり、有限の波長域を6つに離散化するモデル (6 band model) と9つに離散化するモデル (9 band model) が用意されている。なお各化学種で波長依存性をもった吸収係数は、FDS と同じく NIST で開発された RADCAL<sup>12)</sup>によって計算実行時に算出される。

他方、OpenFOAM では FDS と同様に放射輸送方程式を有限体積法で離散化する finite volume Discrete Ordinary Method (以下、fvDOM) と輸送方程式を簡略化した P1 モデルに対応しており、本研究では fvDOM を採用している。

### 2.6 運動量保存式の対流項の離散化

FDS では運動量保存式 (式(3)) の対流項に2次精度中心差分と1次精度風上差分を組み合わせて、クーラン数をパラメータにしたスキームを適用している。これはクーラン数が1に近い、つまり CFL 条件の限界値に近い格子ほど1次風上差分に近い離散化となり、一方クーラン数が小さい格子では2次中心差分に近い離散化となる。一般的には LES での SGS 応力による乱流粘性より1次風上差分による数値粘性の方が流れ場に与える影響が強くなるため<sup>13)</sup>、LES 適用時に対流項に風上差分を適用することはあまり望ましいことではないが、計算を安定に実行する意味では有効な手法の一つであるため、実用計算では用いられることも多い。

OpenFOAM でも式(3)の対流項には2次中心差分と1次風上差分の組み合わせを用いているが、こちらは陽的に2次中心差分に10%だけ1次風上差分の効果を入れるスキームで固定している。

なお FDS、OpenFOAM とともに粘性項の離散化には2次精度中心差分を適用している。

## 3. 解析対象及び計算条件

計算領域は、3次元デカルト座標系空間を対象とし、各方向に  $-2m \leq x \leq 2m$ 、 $-2m \leq y \leq 2m$ 、 $0m \leq z$  (鉛直方向)  $\leq 6m$  の範囲とした。図1に幾何形状を示す。底面 ( $z=0m$ ) は壁面と火源で構成されており、それ以外の領域境界は大气開放条件を適用する。空間座標の原点は、火源中央である。

初期条件は、常温 (20°C)、大気圧 ( $1.01325 \times 10^5$  Pa)、無風 (0m/s) とした。

境界条件は、底面を壁面として、断熱条件 (温度)、壁法則 (速度) を適用しており、底面以外は大气開放条件 (静圧=0Pa) とした。なお、OpenFOAM では計算の安定化のために火源面から法線方向 (鉛直方向) に微小な速度 (0.05 m/s) の流入を施した。

計算格子は、 $100(x) \times 100(y) \times 150(z) = 150$  万をベースに、各方向の分割数を1/2倍にした  $50(x) \times 50(y) \times 75(z) = 18.75$  万と分割数を2倍にした  $200(x) \times 200(y) \times 300(z) = 1200$  万の3パターンで実施した。これらをケース別に表1に整理した。FDS は差分法であることから計算格子は格子点でカウントしているのに対し、OpenFOAM は有限体積法のため、セル数でカウントしている。

解析時間は30秒までとし、データ処理を実施している。時間刻み幅は FDS 及び OpenFOAM とともに固定時間刻み幅を使用しているが、FDS の方は一律  $\Delta t = 0.001$  秒で実施しているのに対して、OpenFOAM の方は計算格子に応じて時間刻み幅を調整しており、ケース OF-1 では  $\Delta t = 0.005$  秒、ケース OF-2 では  $\Delta t = 0.003$  秒、ケース OF-3 では  $\Delta t = 0.002$  秒で計算を実施した。

その他に外力として浮力の効果を考慮しており、重力加速度は  $z$  方向下向きに FDS では  $9.81m/s^2$ 、OpenFOAM では  $9.8m/s^2$  を設定している。

最後に火源条件について、本研究において温度及び上昇速度分布に関して解の妥当性を検討するために、次元解析と実験により上昇気流内の任意の点における温度と上昇速度の予測式を導いた横井の式<sup>14)</sup>を用いたため、直径 0.454m の円形火源として横井の式を参照したのに対し、計算は格子の簡略化のために火源面積を等価として一辺が約 0.4023m の正方形の角形火源とし、計算領域の底面中心に設置している。燃料は、火災実験でよく用いられる  $n$ -ヘプタン ( $n-C_7H_{16}$ ) を使用した。計算で用いた燃料の燃焼に伴う諸条件を表2に示す。放射モデルを用いない場合の火源の発熱速度は、放射損失割合を予め考慮して  $650kW/m^2$  とした。

## 4. 計算結果および考察

### 4.1 火源形状による影響

火源形状の違いによる計算結果への影響について、FDS を用いて予備検討を実施した。例として火源中央・鉛直方向に 0.2m 間隔の位置 (図1) で取得した時系列温度データを25~30秒までの5秒間で時間平均した温度分布を図2に、検討したケースをまとめて表3に示した。本計算では放射モデルを使用している。格子解像度の粗い条件 (FDS-2) 及び細かい条件 (FDS-3) について、火源形状の違いによる差異は僅かであった。以降の検討については、火源形状の違いは今後の議論に影響しないと判断して、すべて角形火源を用いた結果を用いた。

### 4.2 放射モデルの有無による影響

放射モデルの使用の有無について、横井の式と比較するため温度及び上昇速度分布への影響を検討した。図3及び図4に4.1と同様に5秒間の時間平均を施した温度及び上昇速度の鉛直方向分布を示す。FDS については、格子分割数の異なる FDS-2 と FDS-3 の放射モデルの有無の結果を、OpenFOAM は OF-2 の放射モデル

の有無の結果を横井の式から予測した結果とあわせて比較している。

温度分布 (図 3) について、格子分割数が少ない FDS-2 には明瞭な差異が現れたが、同じ格子分割数の OF-2 や FDS でも FDS-3 には大きな差異は現れていない。ただし、明瞭な差が現れた FDS-2 についても、放射モデルを用いない場合 (FDS-2b) は、横井の式の分布に近い結果となっている。横井の式では、火源の発熱速度は空気に伝達される対流成分のみを考慮しており、放射成分の影響が考慮されていないことが一因であると考ええる。また、計算条件として周囲境界に側壁や天井がないことで、計算空間内の温度上昇が顕著でなかったということも一因であると考ええる。

上昇速度分布 (図 4) について、温度が比較的高かった FDS-2a、FDS-2b、FDS-3a の上昇速度が大きい傾向があった。これは空気が上昇する際に駆動力となる浮力が、温度が高い場合には強く働くため、上昇速度が大きくなっているものと考ええる。

本計算における FDS 及び OpenFOAM の放射モデルに関する設定条件を見てみると、FDS ではデフォルトで波長依存性が考慮され、各化学種で特定の波長域にて放射への寄与が調整されるように RADCAL からパラメータを求めており、吸収係数の入力値は妥当な値を用いている。一方、OpenFOAM では入力パラメータの簡略化によって波長依存性を考慮しておらず、また吸収係数に関しては水蒸気と二酸化炭素の化学種のみ考慮されている。どちらのコードも有限体積法による放射計算の離散化を行っているが、FDS はデフォルトの設定を使用しており経度方向に 100 分割、緯度方向に 15 分割しているため、十分に密な分割である。一方、OpenFOAM ではデフォルト値がないため、今回は経度方向と緯度方向に各 2 分割と非常に粗い分割で実施している。これらの設定条件の違いが、計算結果に及ぼす影響については今後検討していきたい。

#### 4.3 格子解像度による影響

種々の格子分割数の格子を用いた FDS 及び OpenFOAM の 5 秒間の時間平均を施した鉛直及び水平方向温度及び上昇速度分布を図 5~8 に示す。計算条件として、放射モデルを使用した場合の結果である。

鉛直方向中心軸の平均温度 (図 5) を比較すると、FDS では格子解像度を上げていくと参照している横井の式に近い結果に収束していく傾向がある。一方、OpenFOAM の場合は格子解像度による影響がはっきりと現れない。鉛直方向中心軸の上昇速度 (図 6) を比較すると、温度分布で横井の式と非常に一致する結果を示した FDS-3a のケースが横井の式の曲線に最も近い結果となっている。OpenFOAM について、格子解像度が上がると横井の式から離れた分布となるが、一方で格子解像度の上昇に伴い最高速度を示す高さ位置が低下し横井の式の分布形状によく似た形状に近づいていく傾向もある。

$z=2m, 3m, 4m, 5m$  において水平方向 ( $x$  方向) に  $0.1m$  間隔の位置 (図 1) で取得した時系列温度及び上昇速度データを 25~30 秒までの 5 秒間で時間平均した平均温度及び平均上昇速度の結果を図 7 及び 8 に示す。鉛直方向分布と同様に、FDS は格子解像度を上げることで分布が横井の式に近づく。一方、OpenFOAM では格子解像度を上げて分布が大きく変わらない。また、FDS に比べて温度、速度ともに過小評価されていることが観察され、本計算条件下においては格子解像度の変化に対して、ロバストな結果となっている。格子解像度以外にも計算結果への影響が想定される条件は幾つもあるため、どのパラメータが計算結果への影響感度が高いのか、また FDS に比べて OpenFOAM の計算結果が過小評価であった要因については今後検討していきたい。

#### 4.4 対流項の離散化スキームによる影響

プール火災においては、火災が周期的に振動する渦放出が観察

されることが知られている。渦放出を伴う非定常な流れ場を FDS 及び OpenFOAM が再現するか否かについて、運動量保存式 (式(3)) の対流項の離散化スキームの違いに着目して考察する。

対流項の離散化スキームが 1 次精度風上差分と 2 次精度中心差分のハイブリッドである FDS について、 $x=0.2m, z=0.2m$  の位置 (図 1) で取得した水平方向 ( $x$  方向) 速度の時系列データを FFT したパワースペクトルを図 9 に示す。格子解像度が粗い FDS-0a で低い周波数において出現した鋭いピークは、格子解像度を上げていくと徐々にピークの周波数は上がっていき、式(6)で表される Zukoski の式<sup>(15)</sup>から求めた渦放出周波数  $2.14\sim 2.51\text{Hz}$  に近づいていく (図 9(a))。

$$f = (0.50 \pm 0.04) \sqrt{\frac{g}{D}} \quad (6)$$

ここで、 $D$  は火源を円形とした場合の直径、 $g$  は重力加速度である。ただし、格子解像度を上げていくと徐々に鋭いピークは小さくなり、FDS-3a では鋭いピークが消えた。FDS では時間刻み幅を  $0.001$  秒で固定して計算を実施した、粗い格子分割のケースでは格子点間のクーラン条件が 1 よりかなり小さかったために 2 次精度中心差分に近いハイブリッドスキームだったものが、格子解像度を上げることでクーラン数が 1 に近づき、1 次精度風上差分が強くなるハイブリッドスキームでの解析となったために、数値粘性が強くなったことでピークが消えてしまったと考える。放射モデルを用いない場合や円形火源の場合でも周波数ピークは出現し、同様の傾向が現れた (図 9(b))。

一方、OpenFOAM のパワースペクトルを図 10 に示す。図 10(a) において格子解像度が低い OF-1a では FDS 同様の低い周波数帯域でピークが見られるが、OF-2a と OF-3a では鋭いパワースペクトルは出現せず、FDS の結果とは異なる様相となった。FDS との差異の主な要因として、時間刻み幅の違いが挙げられる。対流項の離散化スキームを 1 次風上差分スキームだけで計算 (OF-2upwind) した結果 (図 10(b)) では、離散化スキームを風上差分だけで計算すると拡散が大きく、渦放出を伴う現象のパワースペクトルのピークを解像することが中心差分スキームに比べて困難になる。

FDS の結果から格子解像度を上げることでピーク周波数の精度が改善することが期待できる結果となったが、FDS 及び OpenFOAM の時間の解像度に関する検討は行っておらず、各格子解像度に対して渦放出現象を再現するのに十分な時間解像度であるかは定かでない。ピーク周波数の正確な予測には十分な格子解像度とそれに見合った細かい時間解像度が必要であると考ええる。

#### 5. まとめ

プール火災によって発生するブルームに対して、オープンソース CFD コードである FDS 及び OpenFOAM を適用し、その計算結果を比較検討した。その結果、以下の特徴を確認した。

- (1) 放射モデルに関して、計算結果としては放射モデルの明瞭な差異は認められなかったが、FDS ではデフォルトの設定でかなり正確な放射のモデリングを行っているため、良好な計算精度が期待できる。その反面、放射モデルを考慮しない場合と比べて計算時間の増加が著しい。一方、OpenFOAM ではモデル設定が全て任意となるため、精度の良し悪しはユーザーの入力に依存し、正確な放射のモデリングのために吸収係数の化学種ごとのテーブル入力や細かい経度、緯度方向への分割などが必要であり、使いこなすのにある程度の経験が必要である。
- (2) 格子解像度に関して、FDS は格子解像度を上げることで時間平均値が横井の式に近づき、格子解像度と計算精度に相関がある。OpenFOAM は格子解像度による差異が不明瞭で、本計算条件に対しては格子解像度への影響感度が低い。
- (3) 対流項の離散化スキームに関して、FDS では時間発展を陽解

法で解いていることから安定して計算できるようにクーラン数から自動的に2次精度中心差分と1次精度風上差分の割合を調整しており、本計算条件においては時間刻み幅がある程度細かく2次精度中心差分が強くなるケースにおいては渦放出のような非定常現象も精度良く予測できると考える。

謝辞

OpenFOAM の計算実行にあたっては日本 SGI 株式会社の計算機環境を使わせて頂きました。また、OpenFOAM 勉強会@関東ではOpenFOAM 全般に関して、議論・ご助言の機会を頂きました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- (1) 阿部伸之, “CFD を用いた火災の数値シミュレーション”, 日本流体力学会数值流体力学部門 Web 会誌, 12(2), (2004), pp.69-84.
- (2) 阿部伸之, “計算機を用いた火災現象のシミュレーション (その1)”, 検定協会だより, 360, (2010), pp.9-17.
- (3) K. McGrattan, S. Hostikka, J. Floyd, H. Baum, R. Rehm, W. Mell and R. McDermott, “Fire Dynamics Simulator (Version 5) Technical Reference Guide”, NIST Special Publication 1018-5, (2010).
- (4) OpenFOAM® – The Open Source Computational Fluid Dynamics (CFD) Toolbox <http://www.open-foam.org>
- (5) firefoam-dev <http://code.google.com/p/firefoam-dev/>
- (6) Y. Wang, P. Chatterjee, J. L. Ris, “Large eddy simulation of fire plumes”, Proc. Comb. Inst., 33, (2011), pp.2473-2480.
- (7) G. Maragkos, P. Rauwoens, B. Merci, “Application of FDS and FireFOAM in Large Eddy Simulations of a Turbulent Buoyant Helium Plume”, Combustion Science and Technology, vol.184, issue7-8, (2012), pp.1108-1120.
- (8) R. Rehm, H. Baum, “The equations of motion for thermally driven, buoyant flows”, Journal of Research of the National Bureau of Standards, 83(3), (1978), pp.297-308.
- (9) J. H. Ferziger, M. Perić, “Computational Methods for Fluid Dynamics”, 3rd, rev. ed., Springer, (2002).
- (10) W. Mell, K. McGrattan, H. Baum, “Numerical Simulation of Combustion in Fire Plumes”, 26th Symposium (International) on Combustion (1996), pp.1525-1530.
- (11) J. Smagorinsky, “General circulation experiment with primitive equations”, Monthly Weather Review, Vol. 91, (1963), pp.99-164.
- (12) W. Grosshandler, “RadCal: A Narrow Band Model for Radiation Calculations in a Combustion Environment”, NIST Technical Note TN 1402, (1993).
- (13) 朴南燮, 小林敏雄, 谷口伸行, “チャンネル内立方体障害物周辺の流れの LES と QUICK の影響について”, 第10回数値流体力学シンポジウム講演論文集, (1996), pp.172-173.
- (14) S. Yokoi, “Study on the Prevention of Fire-Spread Caused by Hot Upward Current”, Report of the Building Research Institute, 34 (1960).
- (15) E. E. Zukoski, “Properties of fire plumes”, Combustion Fundamentals of Fire (ed. G. Cox), Academic Press, London, (1995), pp.101-219.

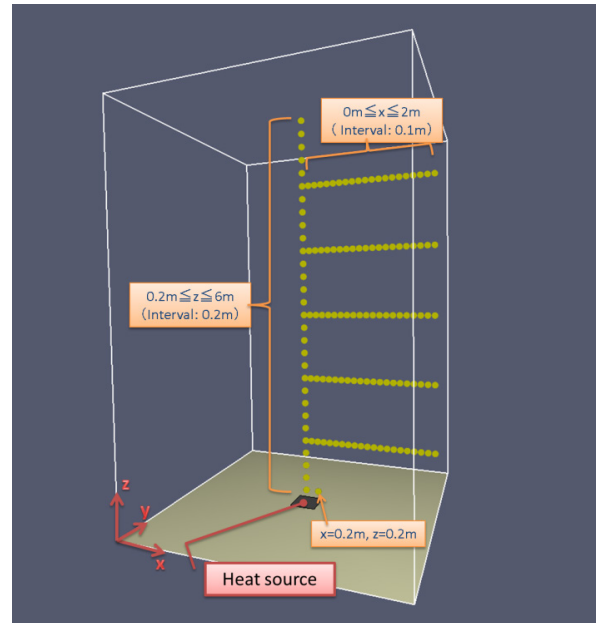


Fig. 1 Computational domain and locations of the heat source and the data acquisition.

Table 1 Calculation conditions for FDS and OpenFOAM

格子分割/放射モデル有無	FDS	OpenFOAM
20(x)×20(y)×30(z) /有	FDS-0a	—
20(x)×20(y)×30(z) /無	—	—
50(x)×50(y)×75(z) /有	FDS-1a	OF-1a
50(x)×50(y)×75(z) /無	—	—
100(x)×100(y)×150(z) /有	FDS-2a	OF-2a
100(x)×100(y)×150(z) /無	FDS-2b	OF-2b
200(x)×200(y)×300(z) /有	FDS-3a	OF-3a
200(x)×200(y)×300(z) /無	FDS-3b	—

Table 2 Combustion conditions.

火源の発熱速度 [kW/m <sup>2</sup> ]	1000
放射損失割合	0.35
雰囲気中酸素の質量分率	0.23
火源における燃料の質量分率	1.0
火炎発熱速度の上限 [kW/m <sup>2</sup> ]	200
臨界火炎温度 [°C]	1427
酸素単位質量当たりの燃焼熱 [kJ/kg]	13100
一酸化炭素生成率	0.006
すす生成率	0.015
すすの水素分率	0.1

Table 3 Conditions for preliminary calculations (FDS).

格子分割	角形火源	円形火源
100(x)×100(y)×150(z)	FDS-2a	FDS-2Rnd
200(x)×200(y)×300(z)	FDS-3a	FDS-3Rnd

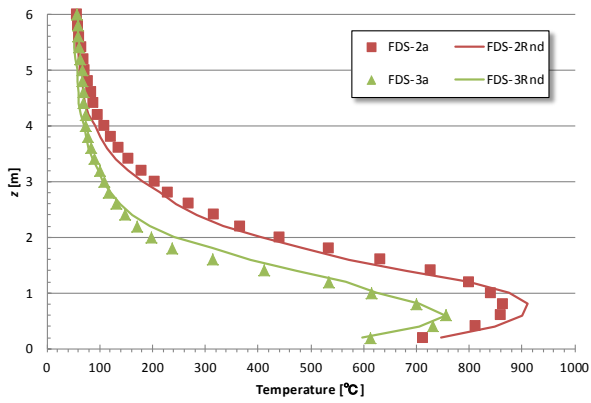


Fig. 2 Influence of the shapes of the heat source. Vertical profiles of the time-averaged temperature.

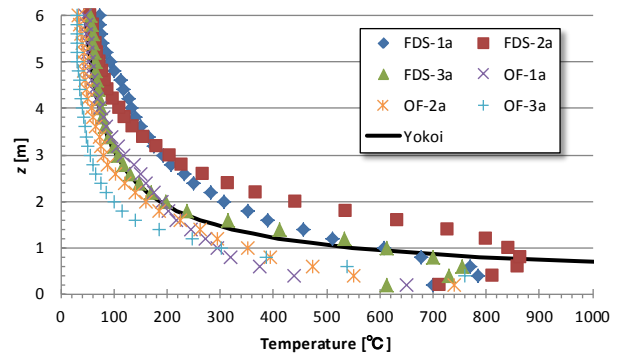


Fig. 5 Influence of the grid resolution. Vertical profiles of the time-averaged temperature.

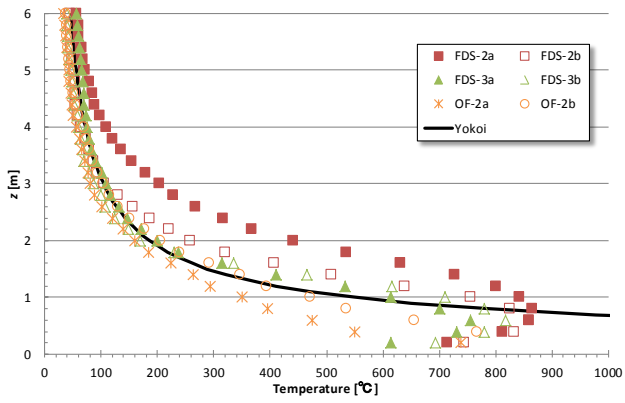


Fig. 3 Calculations with or without the radiation model. Vertical profiles of the time-averaged temperature.

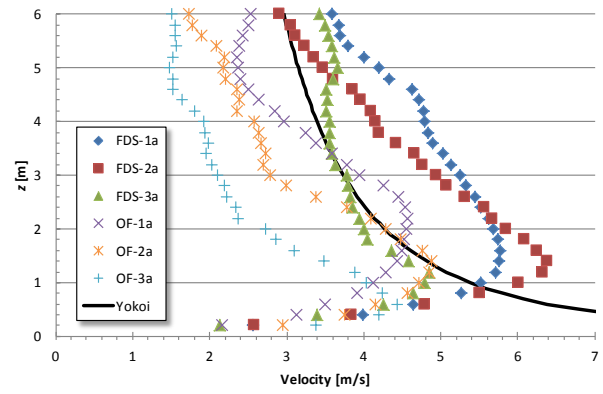


Fig. 6 Influence of the grid resolution. Vertical profiles of the time-averaged velocity in vertical direction ( $z$ -component).

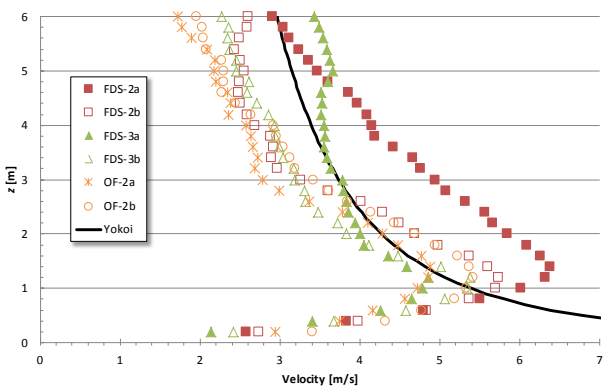


Fig. 4 Calculations with or without the radiation model. Vertical profiles of the time-averaged velocity in vertical direction ( $z$ -component).

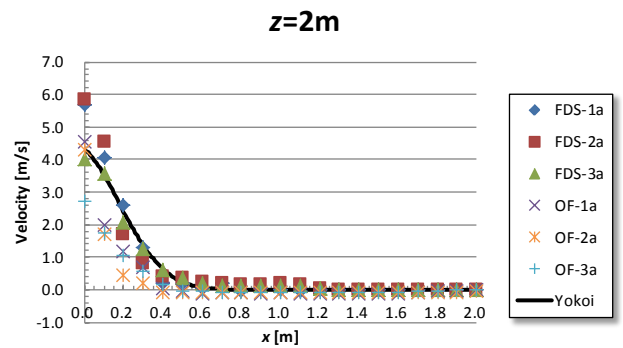
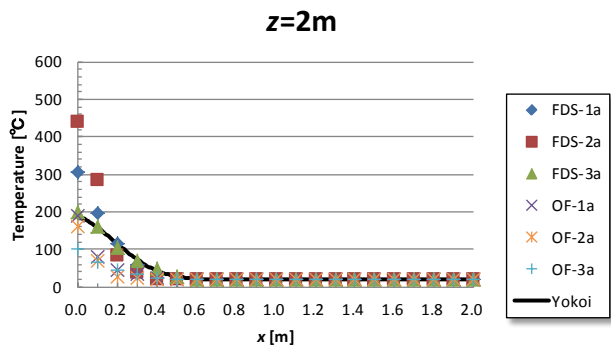
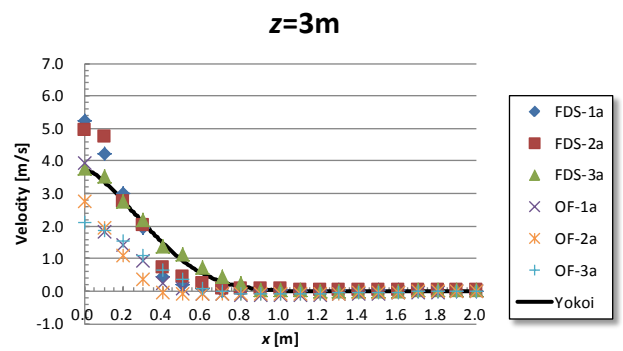
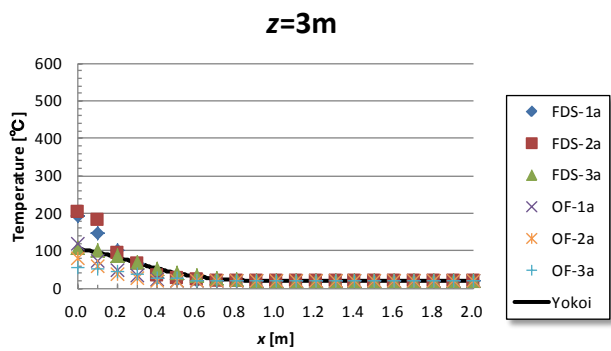
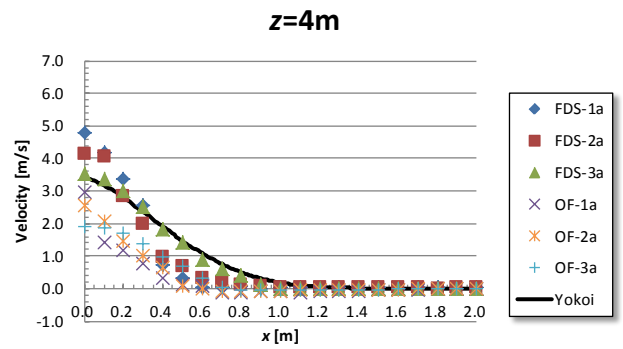
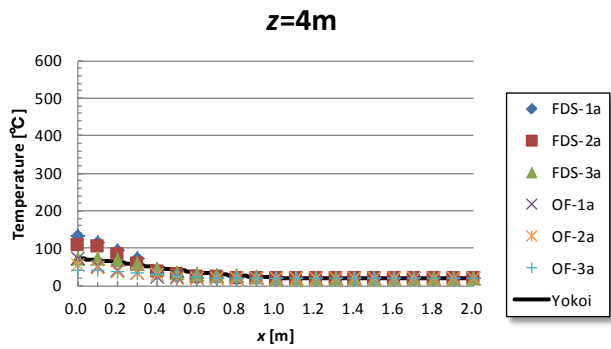
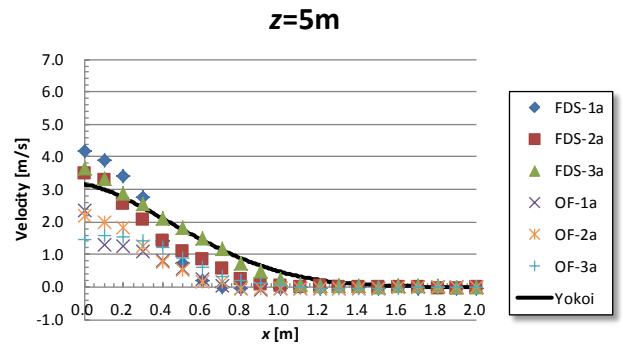
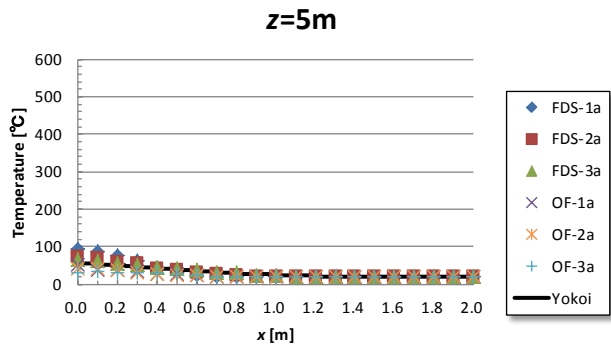
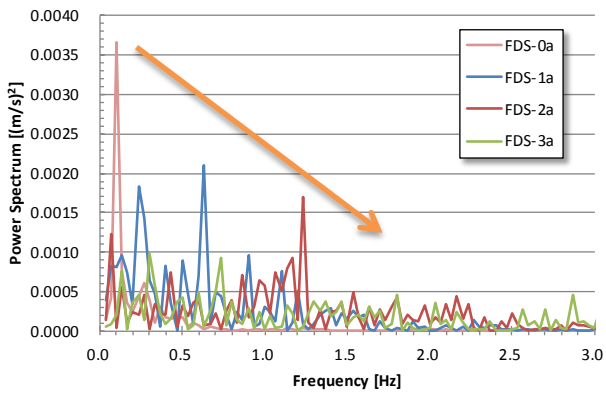
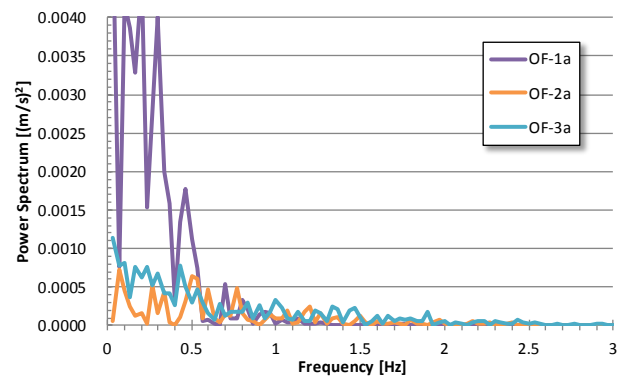


Fig. 7 Influence of the grid resolution. Horizontal profiles of the time-averaged temperature.

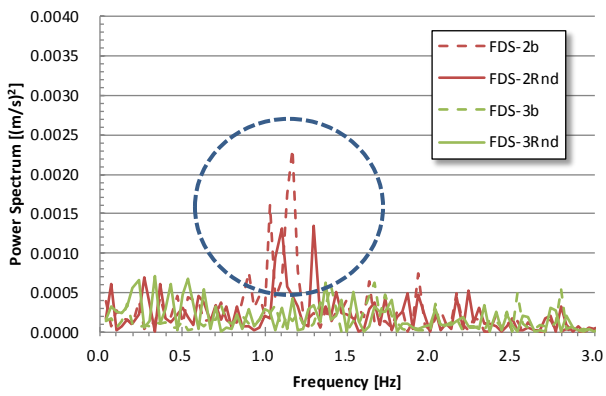
Fig. 8 Influence of the grid resolution. Horizontal profiles of the time-averaged velocity in vertical direction ( $z$ -component).



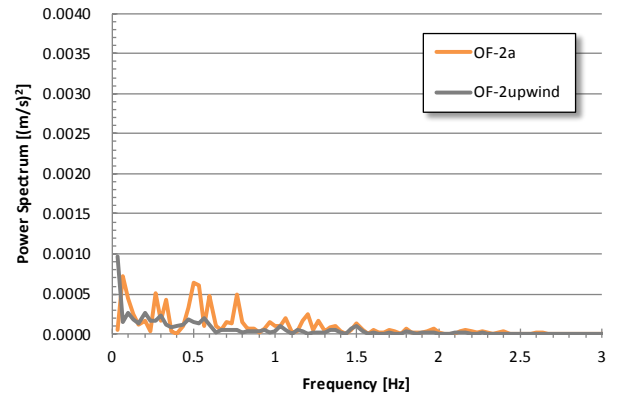
(a) Influence of the shapes of the grid resolution.



(a) Influence of the shapes of the grid resolution.



(b) Influence of the shapes of the heat source.



(b) Influence of the schemes for the convection term.

Fig 9 (FDS) Power Spectrum of the rise velocity in horizontal direction ( $x$ -component) at  $x=0.2m, z=0.2m$ .

Fig 10 (OpenFOAM) Power Spectrum of the rise velocity in horizontal direction ( $x$ -component) at  $x=0.2m, z=0.2m$ .