

Fire Dynamics Simulator の火災基礎現象への適用

工藤 祐嗣*・宮腰 直幸**・大黒 正敏***

Application of Fire Dynamics Simulator to a Basic Fire Phenomena

Yuji KUDO*, Naoyuki MIYAKOSHI** and Masatoshi DAIKOKU***

Abstract

With the development of computers, computational fluid dynamics (CFD) simulations are introduced to the field of fire safety science. In this study, the Fire Dynamics Simulator (FDS) was applied to basic fire phenomena, and confirmed its validity. By setting the appropriate combustion model, it was found that FDS is capable for the numerical calculation for the basic fire phenomena. To set the combustion reaction order which contained in the combustion model, some experimental results near limit conditions were compared with calculated results. In addition, the multi-threaded (OpenMP) FDS was used to reduce the calculation time. The calculation time was reduced to about 50% compared with using single-threaded FDS.

Keywords : Fire Safety, Flame spread, Pool fire, Fire modeling, Fire Dynamics Simulator

1. 緒 言

火災研究においては、何が、いつ、どこで、どれだけ燃えるかわからないという燃焼条件決定の困難さから、燃焼条件をパラメータとして設定できるボイラ、エンジンなどの燃焼機器と比較して数値流体力学 (Computational Fluid Dynamics : CFD) の導入は遅れてきた。コンピュータによるモデル化が早くから取り入れられてきたのは火災時の排煙に関する研究であり、建設省 (現 国土交通省) 建築研究所で開

発された BRI¹⁾ や米商務省国立標準技術研究所 (NIST) による CFAST などが挙げられる。これは排煙の場合、燃焼反応を考慮せず、流体力学と伝熱の問題として取り扱いが可能であり、区画を二層のゾーンに分け、ゾーン内での状態量が全て一様という大胆な近似 (ゾーンモデル) であっても、現象と良い一致が見られたためである。近年、コンピュータ技術の発達により、簡易ではあるが燃焼モデルを組み込んだ CFD による火災シミュレーションモデル (フィールドモデル) が提案されている。火災実験が多額の費用や多大な労力を必要とすることから、火災研究分野への CFD の導入は今後ますます進むものと考えられる。一方、火災の基礎研究分野では、実験室規模の実験が比較的容易であり、このような火災シミュレーション

平成 21 年 12 月 14 日受理

* 機械情報技術学科・准教授

** 感性デザイン学科・講師

*** 機械情報技術学科・教授

モデルを導入する動きは多くない。しかし、火災基礎研究で得られた知見を実規模へとスケールアップする段階では、そのスケール効果について調べておく必要がある。ここで重要なのは、流体力学や伝熱の問題と異なり、化学反応（燃焼）にはスケール効果が作用しないという点である。よって、火災シミュレーションモデルが備える燃焼モデルが小スケールでも実規模でも実験と一致するかどうか確認することは、火災シミュレーションモデルの有効性を確認する上で極めて重要であると考えられる。本研究では、いくつかの実験の容易な火災基礎実験と火災シミュレーションモデルの実行結果との比較を行い、その有効性を検討することとした。

2. Fire Dynamics Simulator (FDS)

火災を対象にした CFD コードは各国で開発されている。例えば欧州で開発された SOFIE や Sato, Yang らによる UNDSAFE などが挙げられる²⁾。多くは単室区画火災を対象としたものであり、本研究で取り扱う可燃性固体表面上の燃え拡がり火災やプール火災を取り扱う上ではモデルの汎用性が低く使用できない場合がある。一方、流体力学や伝熱問題の解決に通常用いられる汎用 CFD コードでは、燃焼反応の取り扱いが不十分な場合や、あるいは「何が、どれだけ燃えるか」よくわからない火災時の燃焼を検討する上では、化学反応モデルが厳密すぎて適用できない場合が多く、例えば水素ガス漏えい爆発のシミュレーションなど、限られた対象に対し用いられている。本研究では米商務省国立標準技術研究所 (NIST) が開発している火災 CFD 計算コードである Fire Dynamics Simulator (FDS) の Ver.5³⁾ を使用した。

FDS は無料で公開されているフリーウェアであり、Google Code に設置されたインターネット掲示板⁴⁾にて最新のコードや開発情報が入手できる。FDS 自体は計算を行うソルバー部分であり、後処理の可視化ソフトウェ

ア (ポストプロセッサ) として Smoke View が付属している。FDS 自体の汎用性は通常の汎用 CFD コードと同様に高く、乱流モデルとして LES (Large Eddy Simulation) あるいは直接ナビエ・ストークス方程式を数値計算する DNS (Direct Numerical Simulation) を選択することができる。本研究では、規模が小さくメッシュ数も多くない点、低ダムケラー数条件の計算条件が含まれ、燃焼モデルとして有限の反応速度を持つ総括一段燃焼モデルを用いることから、ユーザーズマニュアル⁵⁾で推奨されている DNS を選択した。

計算領域の形状や境界条件、メッシュ個数、計算領域内に設定されたオブジェクトの形状、素材などは全て拡張子 .fds を持つテキスト形式の設定ファイルを作成し設定する。この設定ファイルを作成するプリプロセッサ (前処理ソフト) は FDS-SMV には含まれていないが、市販のソフトウェア (例えば PyroSim など) により、通常の 3 次元 CAD 類似のインターフェースにより作成することができる。このようなプリプロセッサの利用は、複雑な実火災における建物形状の入力の際には非常に有用であると考えられるが、本研究が対象としている火災基礎現象では、その形状は単純なものが多く、テキスト入力による .fds ファイル作成でも不便を感じなかった。

また、ソルバーである FDS 本体は、2009 年 9 月にリリースされた OpenMP 対応の `fds_5.4.2_openmp_win32.exe` を使用した。OpenMP は 1997 年に発表されたマルチスレッド並列を行うためのディレクティブである。並列コンピューティング環境を利用することを目的として標準化され、主に共有メモリ型並列計算機で用いられている。現在は FORTRAN と C / C++ について OpenMP Architecture Review Board (ARB) によって標準化が行われている。OpenMP は OpenMPI のようにソースコード中にメッセージの交換を記入する必要がないため、ソースコードに大きく手を加える

ことなく並列計算を実現できる。FDS の配布パッケージには MPI 対応の実行ファイルが含まれているが、境界付近の処理に問題がある⁶⁾ ようである。OpenMP 版では、計算結果に違いは見られなかったが、並列計算による計算時間の短縮が見られた。しかし、3.2 節のプール火災に関する例では計算が不安定で実行できなかった。計算時間の詳細は 3.1 節にて述べる。

3. 火災基礎現象への FDS の適用例

3.1 微小重力下における熱的に薄い可燃性固体表面上の燃え拡がり火災

風洞中に設置された熱的に薄い可燃性固体表面上の燃え拡がりを想定し、図 1 に示す二次元計算領域により計算を行った。格子間隔 $dx=dz=0.5\text{mm}$ であり、格子数は $180 \times 100=18,000$ である。風洞の断面形状は、風晴らによる実験⁷⁾ と同一としたが、長さに関してはメッシュ個数を節約するために助走部分を省き、給気部分を porous に設定した。下流側に関しては、特に低流速の場合に風洞天井下の煙流動性状に影響があったため、実験と同一形状とした。試料はセルロースであり、厚さは 0.25mm と格子寸法より小さいため、試料のごく近傍のみ格子の z 方向寸法を 0.25mm とした。試料の裏面条件は露出とした。試料の熱分解および燃焼は、錦らの研究⁸⁾ を参考に以下のようにした。

セルロース固体は (1) 式で得られる反応速度で分解し、熱分解ガスを放出する。

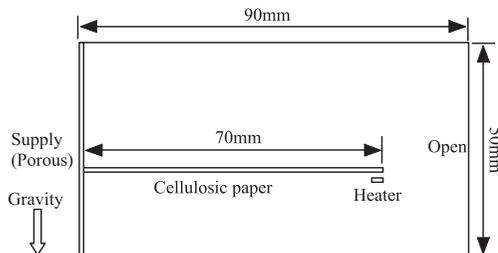


図 1 計算領域

$$\omega_s = A_s \exp\left(-E_s/RT_s\right) \quad (1)$$

ここで、セルロース密度 $\rho = 560 \text{ kg/m}^3$ 、蒸発熱 $L_V = 753 \text{ kJ/kg}$ 、分解反応の頻度因子 $A_s = 1.0 \times 10^{10}$ 、活性化エネルギー $E_s = 104 \text{ kJ/mol}$ とした⁹⁾。残った char は表面燃焼によって再度分解して CO となり、燃焼して最終的には CO_2 となる。また、固体セルロースの含水率は 5% とし、含まれる水分の蒸発も考慮した。熱分解によって発生したセルロース (気体) の燃焼は有限速度を持つ総括一段反応を仮定し、以下によるものとした。



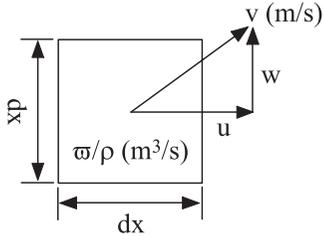
反応速度は (3) 式により与えた。

$$\varpi = B\rho Y_{PYRO}^{0.265} Y_{O_2}^{2.0} \exp\left(-E/RT\right) \quad (3)$$

反応の頻度因子 $B = 3.0 \times 10^{12} \text{ m}^3/\text{mol/s}$ 、活性化エネルギー $E = 62.8 \text{ kJ/mol}$ 、燃焼発熱量 $\Delta H = 1.674 \times 10^4 \text{ kJ/kg}$ とした⁹⁾。着火は $x=70\text{mm}$ の試料下方に 0.25mm 離して設置したヒータに 3 秒間、 800°C を与えて行った。計算は実時間 10 秒まで行った。FDS は計算領域に働く重力をベクトル成分ごとに時間経過で任意に設定することが可能である。本研究では日本無重量総合研究所 (MGLAB) 落下塔の実験シーケンス¹⁰⁾ を参考に、3 秒までは z 方向下向きに $1g$ 、3 秒で落下開始、落下後 1 秒で $1 \times 10^{-6}g$ の微小重力状態に達し、4.5 秒間の微小重力状態が続いた後に制動加速度 $5g$ が 0.1 秒間続くものとした。

数値計算で得られる値と実験で得られた火災形状との直接比較は困難なため、図 2 に示すように消炎パラメータとして用いられるダムケラー数 (Da) を計算格子に対し導入し、格子単位で火災が存在するか否かを判定し、実験で得られる火災形状との比較を行うこととした。数

値計算で求められた熱分解ガス濃度, 酸素濃度, 気相温度を用い, (3) 式より求まる反応速度より化学反応時間 τ_c が得られる。また, 気相の x 方向および z 方向速度から滞留時間 τ_r が得られる。両者の比である格子ごとの局所の



$$1/\tau_c = \omega/\rho/dx^3 \quad (\text{Chemical reaction time})$$

$$1/\tau_r = v/dx \quad (\text{Residence time})$$

$$Da = \tau_r/\tau_c$$

図2 局所 Da 数の定義

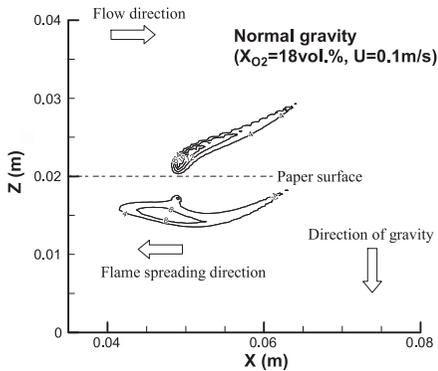


図3(a) 通常重力下の燃え拡がり火炎における局所 Da 数分布

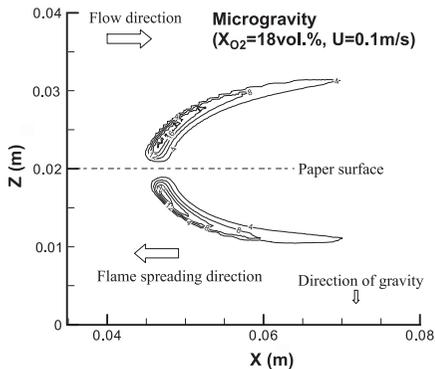


図3(b) 微小重力下の燃え拡がり火炎における局所 Da 数分布

Da 数分布を図3に示す。図3 (a) に示す通常重力下では浮力の影響によって上方に引き伸ばされていた火炎が, 図3 (b) では微小重力下では流れ方向のみに引き伸ばされている。また, 試料表面と試料上面を燃え拡がる火炎の間の距

Flow direction



Flame spreading direction

(a) Normal gravity



Direction of gravity



(b) Microgravity

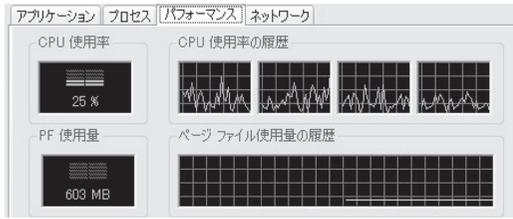
図4 通常重力および微小重力下での燃え拡がり火炎 (酸素濃度 18vol.%, 対向流速 0.1m/s)

離 (消炎距離) は, 微小重力下では通常重力下と比較し増大している。これらは図4に示す実験で得られた火炎写真と同様の傾向である。また, 通常重力下の火炎において試料下面を燃え拡がる火炎が先行していたのが, 微小重力下では両面の火炎先端位置が一致する。これは通常重力下では浮力の影響により試料下面を高温気体の流れ, 裏面の熱分解領域が先行するためである。この現象は側面からの観察では試料ホルダの陰となり確認できないが, 火炎上面から撮影したカメラの映像により, 熱分解領域の先行が確認できる。FDSによる数値計算でも同様の現象が確認された。

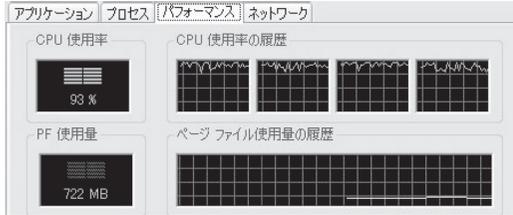
本数値解析における計算時間を表1に示す。使用した計算機は CPU Quad-Core AMD Opteron 2.3GHz, メモリ 2GB の Workstation

表1 計算に要した時間

	Single threaded	Multi threaded (with OpenMP)
CPU time	59413.687sec. (16.5hr.)	28909.860sec. (8.03hr.)



(a) FDS (single threaded)



(b) FDS with openMP (multi threaded)

図5 OpenMPによるCPU利用率の変化

(HP xw4550) である。OpenMP 対応の FDS により、計算時間が約半分に短縮された。図5には従来の FDS 実行時と OpenMP 版 FDS 実行時のタスクマネージャの比較を示す。OpenMP 版実行時には CPU 使用率が4つのコ

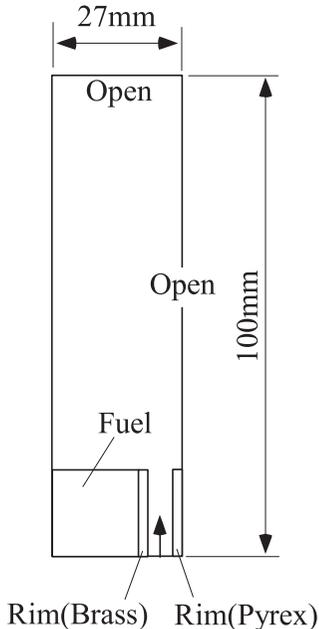


図6 計算領域

アともに 100% 近くに達し、マルチスレッド化により、CPU の4つのコアが有効に活用されていることを示す。

3.2 同軸流中のプール火災での浮き上がり火炎

同軸流中に置かれたプール火災は、ある条件下で容器リムに付着していた火炎が浮き上がり、浮き上がり火炎を形成する。この浮き上がり火炎の数値解析を FDS により試みた。Izumi らの実験¹¹⁾を参考に、図6に示す二次元で軸対称の円筒座標系の計算領域を設定した。格子間隔 $dr=dz=0.5\text{mm}$ であり、格子数は $54 \times 200=10,800$ である。燃料は n-ヘプタンとした。放射による熱フィードバック量と燃料蒸気の噴き出し速度の決定に重要な液体 n-ヘプタンの吸収係数は 40m^{-1} とした。n-ヘプタン蒸気の気相での燃焼反応は、有限速度を持つ総括一段反応を仮定し、以下によるものとした。



反応速度は (5) 式により与えた。

$$\omega = B\rho Y_{heptane}^m Y_{O_2}^n \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \quad (5)$$

反応の頻度因子 $B = 1.25 \times 10^{12} \text{ m}^3/\text{mol/s}$ 、活性化エネルギー $E = 62.8 \text{ kJ/mol}$ 、燃焼発熱量 $\Delta H = 4.456 \times 10^4 \text{ kJ/kg}$ とした。着火は燃料液面に設置したヒータに2秒間、 800°C を与えて行った。計算は実時間20秒まで行った。計算時間は CPU Quad-Core AMD Opteron 2.3GHz、メモリ 2GB の Workstation を使い、シングルスレッドの FDS で約 17.5 時間であった。

着火時の挙動を観察すると、ヒータ周囲の燃料液面に約1秒で着火した後、徐々に液面上を火炎が燃え広がっていくが、その燃え広がり速度は非常に遅く、直径 36mm の燃料容器で容器中央に着火した場合、火炎が容器外周に到達するまで約5秒かかった。これは FDS が液体

燃料の液内対流を考慮していないためと考えられ、液体燃料表面上の燃え拡がり性状予測にFDSを用いた場合、計算上の工夫をしないと大きな誤差を生じるものと考えられる。また、総括一段反応モデルに含まれる酸素濃度に対する次数 n を小さくすることで、Superflashに近い速い燃え拡がりとなったが、これは気相での燃焼反応に対する酸素濃度への依存性を変えることで、燃焼範囲が変化し燃料蒸気層を火炎が燃え拡がったものと考えられる。本研究では、燃焼が定常状態に達した後を取り扱っているため、この液体燃料内の熱伝達は対流込みの値としての吸収係数を与えることとした。

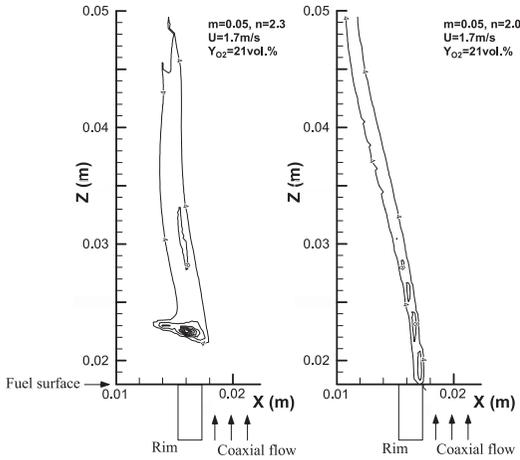


図7 同軸流プール火災における局所 Da 数分布

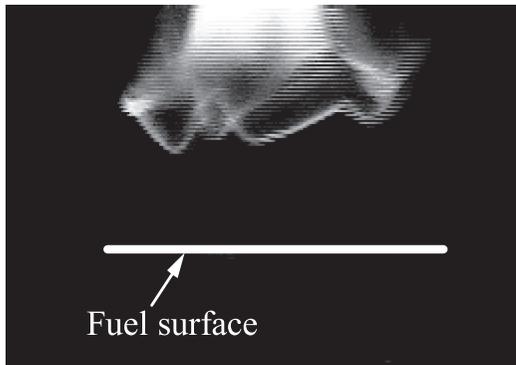


図8 浮き上がり火炎写真
(同軸流速 1.71m/s, 酸素濃度 21vol.%)

図7に同軸流速 1.7m/s, 酸素濃度 21vol.%での局所 Da 数分布を示す。また、図8には同条件の実験での火炎写真を示す。実験ではこの条件では浮き上がり火炎となった。図7は総括一段反応モデルにおいて経験的に与える次数の影響を見るため、酸素濃度に対する依存性を示す次数 n を変えた計算結果を示した。燃料濃度に対する次数 m の影響は着火性に表れ、適切に設定しないと着火しなかった。一方、酸素濃度に対する次数 n を変えることで、図7に示すように n の値が適切であれば浮き上がり火炎となったが、 n の値が過大な場合は火炎が容器リムに付着し浮き上がらなかった。このような限界条件に近い火炎での計算結果と実験結果の比較により、経験的に決定せざるを得なかった次数 m, n を適切に与えることができるものと考えられる。

4. 結 言

NISTで開発されたFDSを用い、いくつかの火災基礎現象を対象とする数値計算を行った。燃焼モデルを適切に設定することで、これまで火災モデルが対象としてきた実火災規模だけではなく、実験室レベルの火災基礎現象に対する数値計算にも十分対応できることがわかった。しかし、液体燃料の火災における液内流動の影響など、さらに考慮すべき点も明らかとなった。気相の取り扱いに関しては、総括一段反応を仮定した有限反応速度モデルとDNSの導入によって、消炎限界や吹き消え限界に近い低ダムケラー数条件であってもほぼ満足できる結果が得られた。OpenMPによるマルチスレッド対応は計算時間の短縮に効果が見られ、特にDNSや有限燃焼速度モデルの導入による計算時間の増加を補うことができた。

謝 辞

本研究は平成 19 年度～ 21 年度八戸工業大学プロジェクト研究の一環として行ったものである。ここに付記し謝意を表する。

参考文献

- 1) 田中, 中村, 建築研究所報告, No.123, (1989)
- 2) Friedman, R., Forum for Int. Coop. on Fire Research, (1991) .
- 3) <http://fire.nist.gov/>
- 4) <http://groups.google.com/group/fds-smv>
- 5) McGrattan et al., FDS User Guide, NIST Special Publication 1019-5, (2009) .
- 6) <http://www.eml.ele.cst.nihon-u.ac.jp/~momma/wiki/wiki.cgi/FDS.html>
- 7) 風晴, 鳥飼, 伊藤, 工藤, 第 46 回燃焼シンポジウム講演論文集, pp.544-545, (2008) .
- 8) 錦ら, 第 21 回数値流体力学シンポジウム, A2-4, (2007) .
- 9) Altenkirch et al., Combust. and Flame, 37:71-83, (1980) .
- 10) <http://www.mglab.co.jp/index.html>
- 11) Izumi, J. et al., Proc. of 5th Int. Symp. on Scale Modeling, pp.176-185, (2006) .