

流体解析ソフトウェア Advance/FrontFlow/redによる

自由プルームの解析と検証

大島 小百合* 杉中 隆史*

Analysis and verification of a fire flame by using Advance/FrontFlow/red

Sayuri Oshima* and Takafumi Suginaka*

火災時における煙流動の基本的流動である自由プルームの Large Eddy Simulation による解析結果を紹介する。

Key word: 流体解析、火災、煙流動、自由プルーム、LES

1. はじめに

建屋火災における死者の死因のほとんどは煙による窒息死や一酸化炭素等の有毒ガスによる中毒であるといわれている。避難経路の確保や消火活動の観点からも火災時の煙流動の予測は非常に重要である。

本稿では、火災発生時の煙流動を予測するに際し、その基本特性を有する自由プルームの Large Eddy Simulation (標準 Smagorinsky モデル) による解析結果を紹介する。

2. 自由プルームの数値解析

自由プルームの Large Eddy Simulation (標準 Smagorinsky モデル)による解析を行い、横井の点火源と円形面火源の実験式[1]と比較する。

2.1. 横井の実験式

横井[1]によれば、火源上の任意の点における上昇気流の速度と温度は次式で表される。

$$w = 0.833 \left[\frac{gQ}{C_p \rho T_0} \right]^{1/3} C^{-4/9} Z^{-1/3} \times (1 + 0.9174\zeta^{3/2} + 0.3990\zeta^3 + 0.1077\zeta^{9/2}) \times \exp(-1.4617\zeta^{3/2}) \quad (1)$$

$$\Delta T = 0.423 \left[\frac{T_0 Q^2}{C_p^2 \rho^2 g} \right]^{1/3} C^{-8/9} Z^{-5/3} \times (1 + 0.9383\zeta^{3/2} + 0.4002\zeta^3 + 0.09398\zeta^{9/2}) \times \exp(-1.4617\zeta^{3/2}) \quad (2)$$

C : 定数 $\zeta: r/(ZC^{2/3})$
(面火源: $C^{2/3} = 0.1$, 点火源: $C^{2/3} = 0.062$)

2.2. 解析条件

解析領域を図 1 に示す。燃焼モデルは使用しないで発熱量を与える。燃焼によるガス成分の変化を考慮しないで、流体は空気のみを仮定する。火源サイズは半径 $r = 18.75\text{cm}$ の円と同じ面積の 1 辺 $L = 33.23\text{cm}$ の正方形で近似する。火源発熱速度は $Q = 2064\text{cal/s} = 8637.8\text{W}$ とする。火源面で Q は一定、周囲との温度差を 800°C と仮定して鉛直方向速度

$$W = Q/(\rho \cdot C_p \cdot \Delta T \cdot L^2) = 0.0817\text{m/s} \quad (3)$$

を火源面に与えた。[2]

乱流モデルは Large Eddy Simulation (標準 Smagorinsky モデル) を使用し、圧縮性流体として扱う。LES のモデル定数 C_s は 0.2、乱流プラントル数は 0.5 とした。温度変化に伴う密度変化は理想気体の状態方程式で与える。表 1 に計算条件をまとめる。

*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

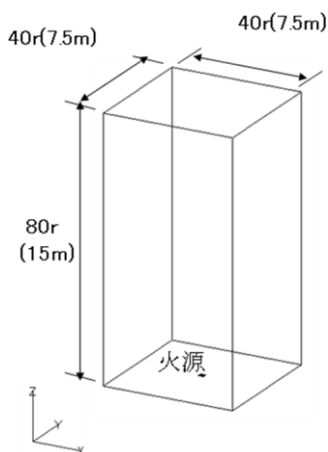


図 1 解析領域

表 1 計算条件

火源サイズ	1 辺 $L = 33.23\text{cm}$ の正方形
火源発熱速度	$Q = 2064\text{cal/s} = 8637.8\text{W}$
乱流モデル	Large Eddy Simulation (標準 Smagorinsky モデル) $C_s = 0.2$ 乱流プラントル数 $= 0.5$
基礎方程式	圧縮性流体
対流項離散化	2 次中心差分 90%+1 次風上差分 10% (運動方程式)
時間積分法	クランク・ニコルソン法 (運動方程式) Euler 陰解法 (エネルギー方程式)
境界条件	上空、側面：出口境界 順流：入力値(101325[Pa])で圧力固定 逆流：圧力=入力値 $\cdot 0.5 \times$ 密度 $\times$ 速度 ² 温度：20℃で固定 床面：壁境界 速度：Spalding 則による壁関数 温度：断熱条件 火源面：入口境界 速度：0.0817m/s 温度：820℃
初期温度	20℃
時間刻み	0.05 秒

2.3. 計算格子

計算格子は六面体で作成した。節点数 (=コン
トロールボリューム数) は $67 \times 67 \times 96 = 430944$

である。火源面は 6×6 分割とした。図 2~図 4
に格子図を示す。

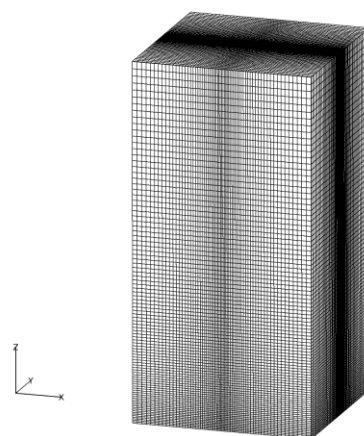


図 2 3次元格子図

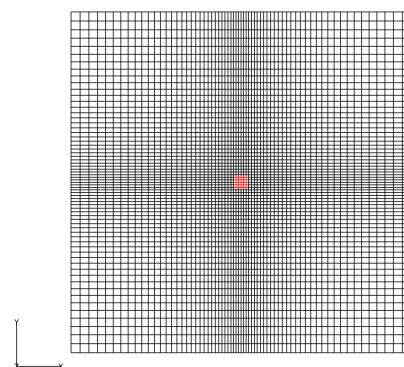


図 3 床面格子図 (66×66 分割)

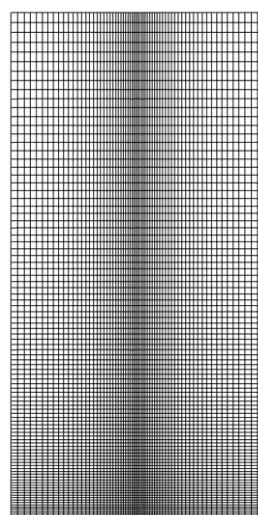


図 4 側面格子図 (高さ方向 95 分割)

2.4. 解析結果

現象時間 20 分間の計算を行った。平均値は 15
~20 分までの平均値である。

2.4.1. 温度分布

周囲温度を基準値 0 とした時の温度差分布を示す。図 5 は 20 分の瞬時値、図 6 は平均値である。

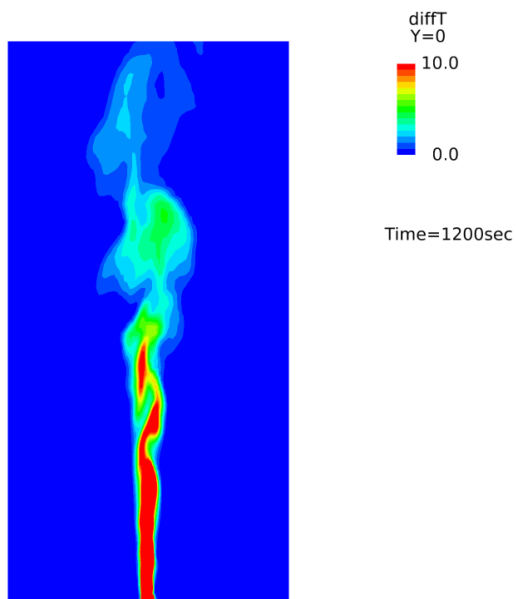


図 5 瞬時温度

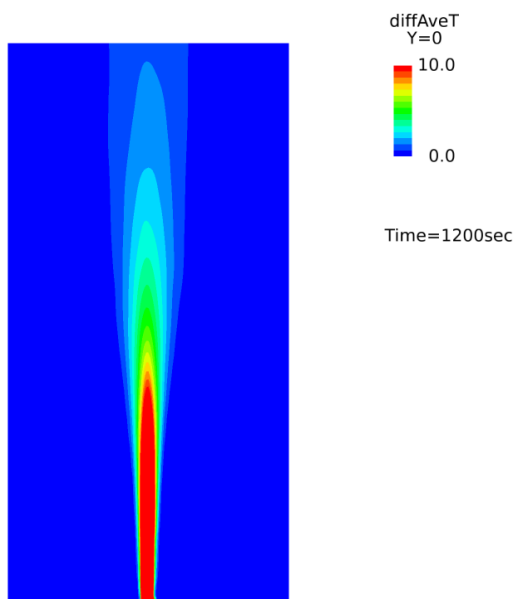


図 6 平均温度

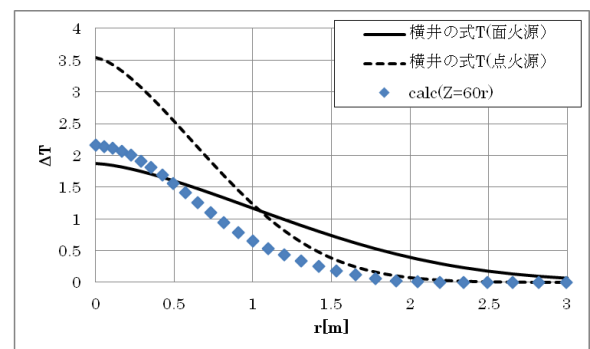
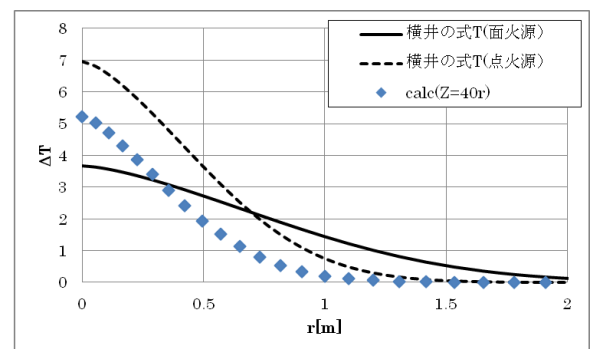
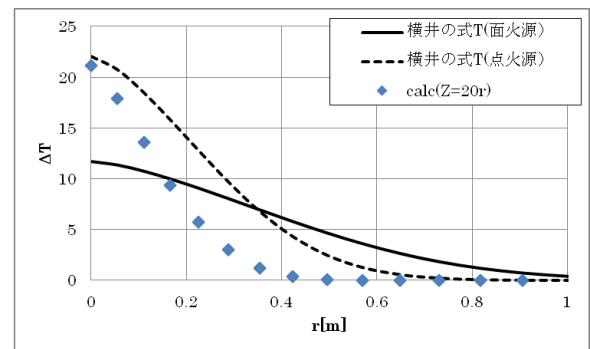
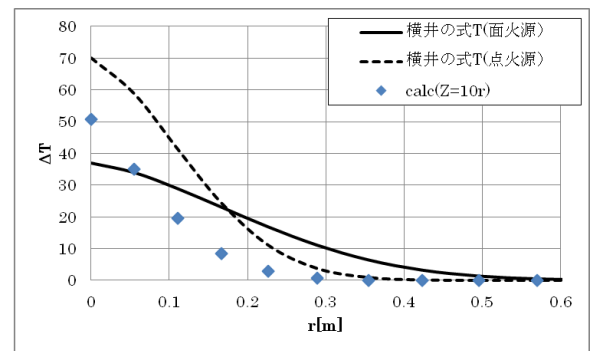


図 7 平均温度の水平分布

図 7 に火源面からの高さ (Z) が 10r、20r、40r、60r の位置での温度の水平分布結果を示す。横軸が火源面中心からの距離 (r)、縦軸が平均温度差 (ΔT) である。

横井の式 (点火源) の傾向を再現することができたが、高さが高くなるにつれ温度が低くなる結果となった。

2.4.2. 速度分布

高さ方向速度分布を示す。

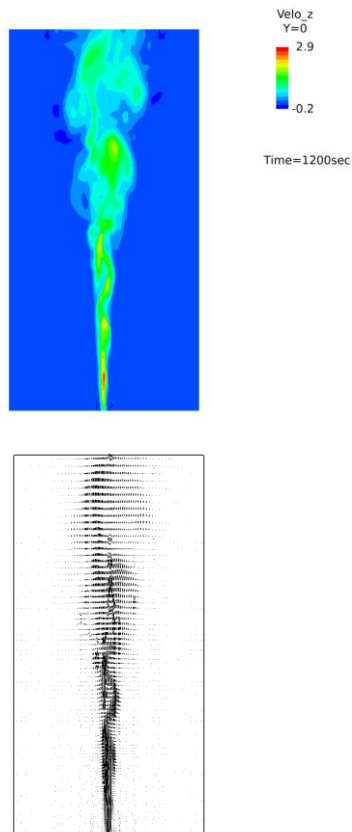


図 8 瞬時速度

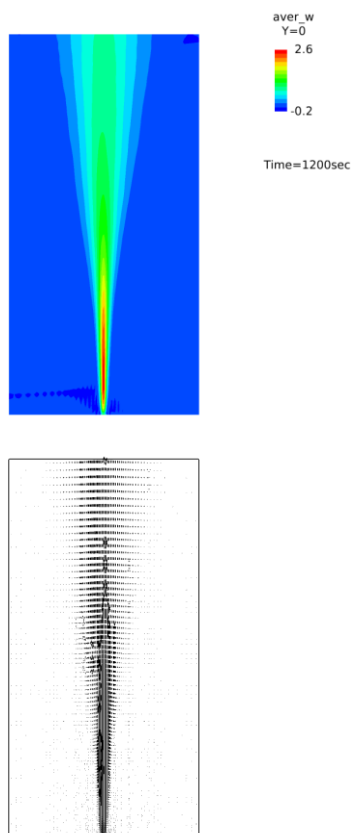


図 9 平均速度

図 10 に火源面からの高さ (Z) が $10r$ 、 $20r$ 、 $40r$ 、 $60r$ の位置での速度の水平分布結果を示す。横軸が火源面中心からの距離 (r)、縦軸が平均速度 (W) である。

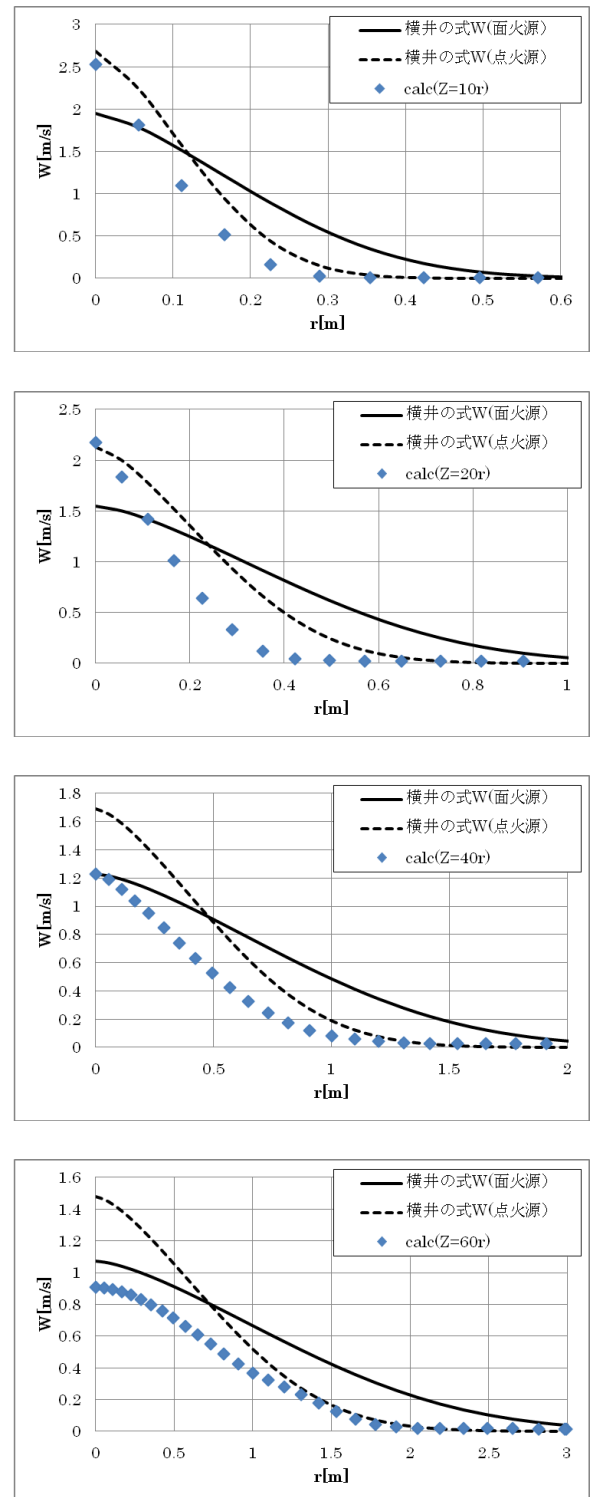


図 10 平均速度の水平分布

温度同様、横井の式（点火源）の傾向を再現することができたが、高さが高くなるにつれ速度が遅くなる結果となった。

2.5. 格子の検討

本節では格子による影響をみるために高さ方向の格子幅を変更した格子での結果を報告する。格子図を図 11 に示す。高さ方向の格子幅が異なるだけで床面格子は同一、高さ方向の格子数も同一である。具体的に図 4 の格子は床面からの格子幅が 0.06[m]、上面からの格子幅が 0.3[m]であるのに対し、図 11 の格子は床面からの格子幅が 0.08[m]、上面からの格子幅が 0.22[m]となっており、図 4 よりも等間隔に近い格子となっている。

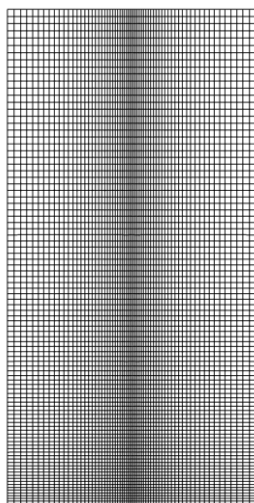


図 11 側面格子図

2.5.1. 温度分布

周囲温度を基準値 0 とした時の温度差分布を示す。火源面上では全体的に温度が高い結果となった。

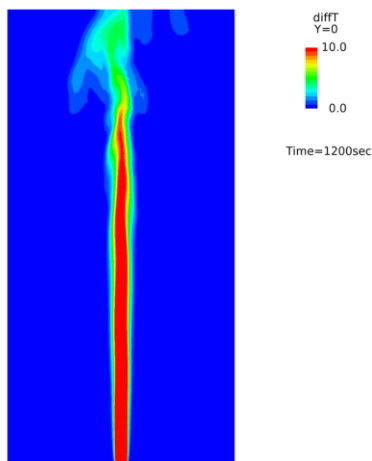


図 12 瞬時温度

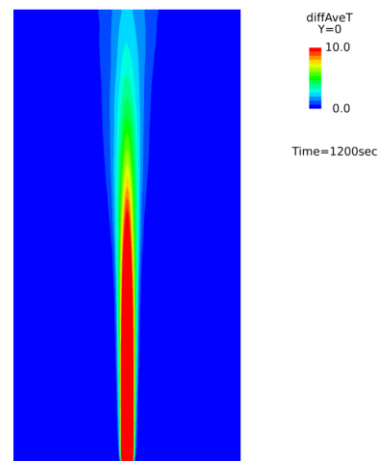
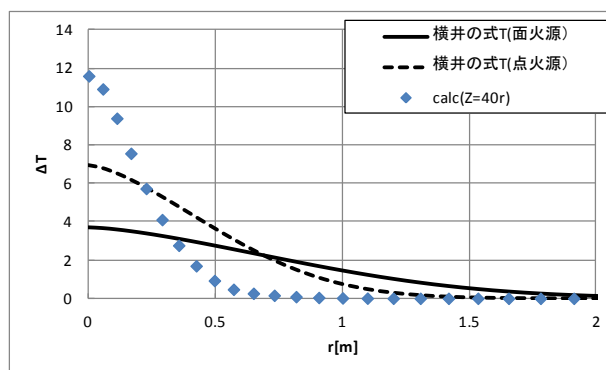
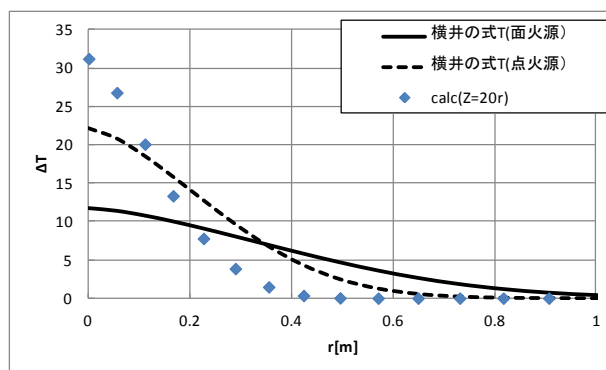
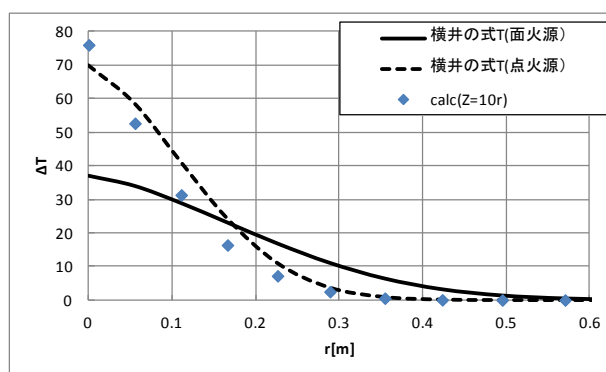


図 13 平均温度



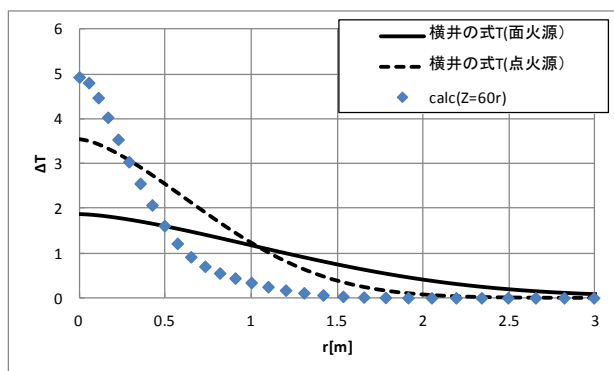


図 14 平均温度の水平分布

2.5.2. 速度分布

高さ方向速度分布を示す。温度の結果と同様に火源面上では速度が速い傾向がみられる。ただし $Z = 60r$ の位置では横井の式（点火源）と近い値となっている。

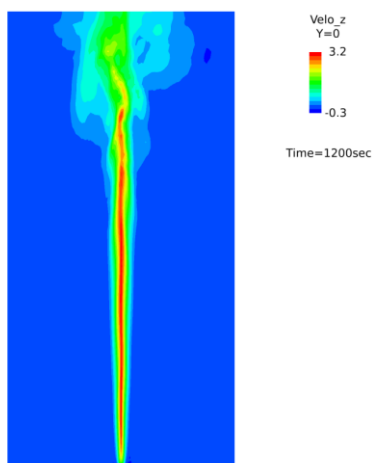


図 15 瞬時速度

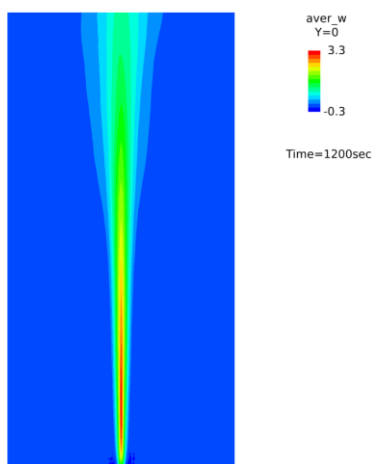


図 16 平均速度

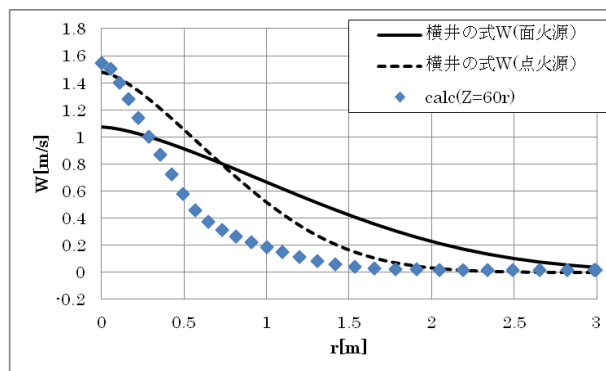
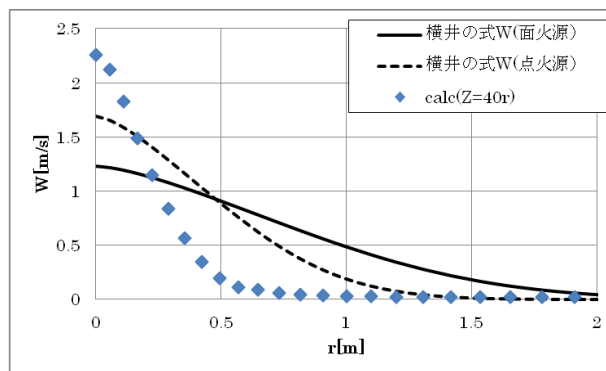
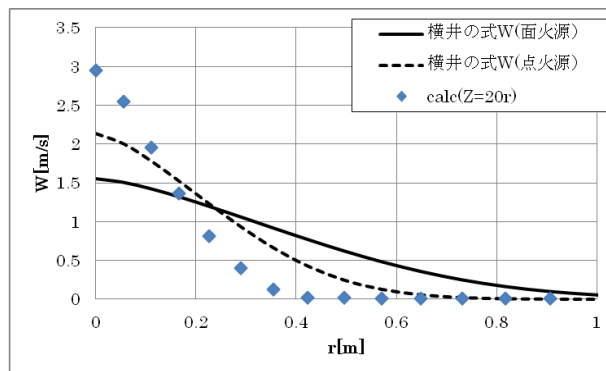
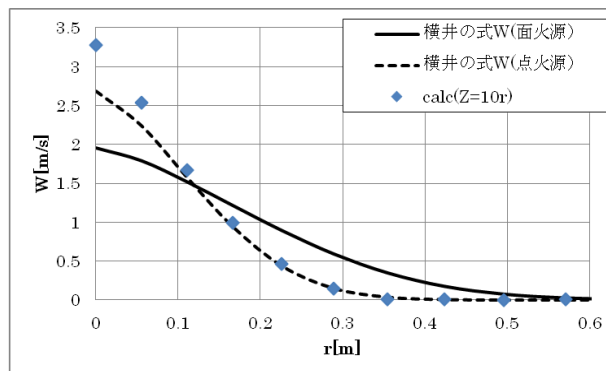


図 17 平均速度の水平分布

2.6. 時間刻みの検討

以下に時間刻みの取り方により計算結果が依存する例を示す。図 4 の格子よりもさらに床面に格子を寄せた格子図を図 18 に示す。床面からの格子幅は図 4 の半分の $0.03[\text{m}]$ である。この格子で時間刻みをこれまでと同様の 0.05 秒で計算し

た結果と半分の 0.025 秒で計算した結果を示す。計算中の最大クーラン数はそれぞれ時間刻み 0.05 秒のケースで 2.5 前後、時間刻み 0.025 秒のケースで 1.1 前後であった。時間刻み 0.05 秒のケースでは乱れがほとんど解析されない結果となった。このことは、クーラン数が 1 を超えると数値的な減衰効果が比較的顕著に現われるということの意味し、時間刻みは慎重に決定しなければならないことが分かる。

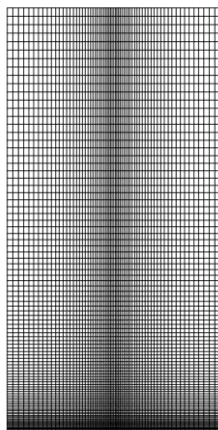


図 18 側面格子図

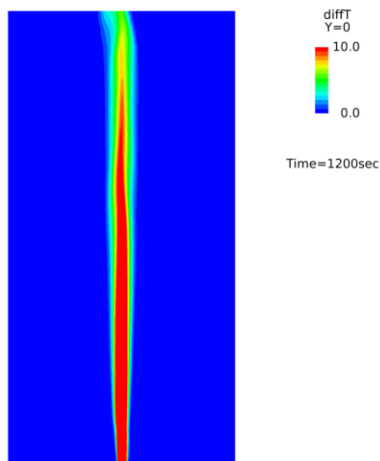


図 19 瞬時温度（時間刻み：0.05 秒）

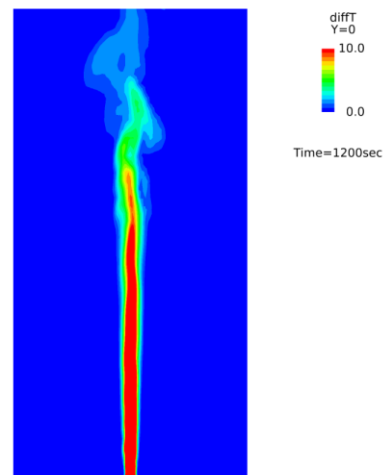


図 20 瞬時温度（時間刻み：0.025 秒）

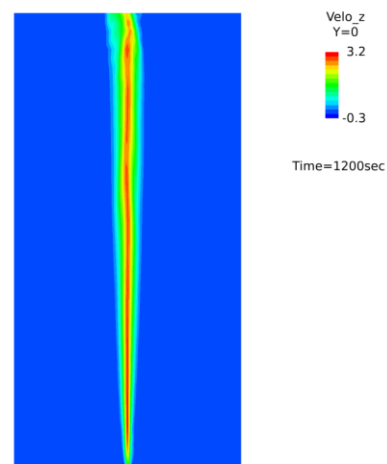


図 21 瞬時速度（時間刻み：0.05 秒）

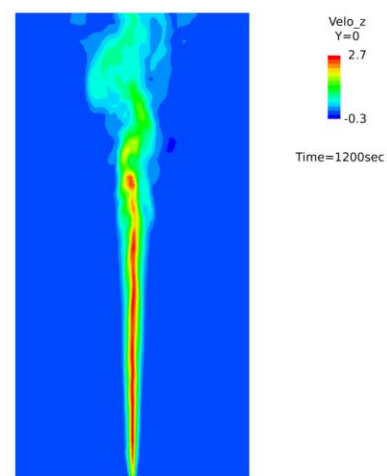


図 22 瞬時速度（時間刻み：0.025 秒）

3. まとめ

Large Eddy Simulation (標準 Smagorinsky モデル) による自由プルームの解析を行い、横井の実験式との比較を行った。本シミュレーションにより実験式を概ね再現することが可能であることが分かった。また、格子に解析結果が依存することについて調査した。その結果、プルームの吹き出し口近傍の格子解像度が重要であることが分かった。時間刻みについてはクーラン数が 1 前後に設定しないと乱れが不必要に減衰してしまう可能性についても言及した。

参考文献

- [1] Sizuo Yokoi : Study on the Prevention of Fire-Spread Caused by Hot Upward Current , Report of the Building Research Insitute , No.34 (1960)
- [2] 原哲夫, 横井睦己, 加藤信介 : “火災煙流動における自由プルームの標準 $k-\epsilon$ モデルに基づく数値予測”, 日本建築学会計画系論文集 第 530 号, 39-46(2000)

※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、【カラー版】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。)