

低マッハ数近似を用いた火災シミュレーション構築のための研究

中央大学大学院 学生員 川口 泰斗
 中央大学大学院 学生員 堀池 慎治
 中央大学 正会員 櫻山 和男

1. はじめに

都市火災に対する防災・減災対策を行う上で、火災シミュレーションを用いて火災の延焼性状を把握することは重要である。既往の研究では直交格子を用いた差分法による火災シミュレーション等¹⁾が行われてきたが、都市の複雑形状を正確に考慮することは困難といえる。そこで本研究では、任意形状への適合性に優れた有限要素法を用いて都市の複雑形状を正確に考慮可能な高精度な火災シミュレーション手法の構築を行う。

これまで著者らは、火災時の温度差の大きな流れ場の解析を行うために、低マッハ数近似を用いた基礎方程式に対して有限要素法に基づく解析手法を提案してきた。本報告では、その手法を三次元に拡張し、立方体 cavity 内自然対流解析を行って、本手法の妥当性を示す。また応用例として、簡単な都市を想定したモデルにおいて、流入風を考慮した解析を行い、流入風速や火災発生面の違いによる熱の流れを考察する。

2. 数値解析手法

(1) 基礎方程式

低マッハ数近似は圧縮性 Navier – Stokes 運動方程式をもとにして、流れのマッハ数が小さいことを仮定して得られる近似である。特徴としては、大きな温度変化に伴う密度の変化を考慮できる点である。低マッハ数近似に基づく、無次元化された Navier – Stokes 運動方程式、連続式、エネルギー方程式および状態方程式を以下に示す。

Navier – Stokes 運動方程式:

$$\rho \left(\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) + \frac{\partial p}{\partial x_i} - \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - G_a (\rho - 1) \delta_{i3} = 0 \quad \text{in } \Omega \quad (1)$$

連続式:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i} = 0 \quad \text{in } \Omega \quad (2)$$

エネルギー方程式:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u_i \frac{\partial T}{\partial x_i} - \frac{1}{\rho Pr} \frac{\partial^2 T}{\partial x_i^2} = 0 \quad (3)$$

状態方程式:

$$\rho = \frac{1}{(\beta \Delta T T + 1)} \quad (4)$$

ここで、 u_i は x_i 方向の流速、 p は圧力、 T は温度、 ρ は密度、 $\Delta T (= T_w - T_c)$ は高温壁と低温壁の温度差、 δ_{i3} はクロネッカーのデルタ、 $G_a (= gL^3/\nu^2)$ は Galilei 数、 Pr は Prandtl 数である。ただし、 g は重力加速度、 $\beta (= 1/T_0)$ は体膨張係数、 T_w は高温壁温度、 T_c は低温壁温度、 T_0 は基準温度である。

(2) 離散化手法

流れ場と温度場の連成解析手法としては弱連成解析を用いる。また流れ場の離散化には、速度場と圧力場を分離して解く分離型解法(流速修正法)を用いる。分離型解法では、基礎方程式に対して時間方向の離散化を行い、速度場と圧力場を分離し、それに対して安定化有限要素法(SUPG法)を適用する。また温度場の離散化に対しても安定化有限要素法(SUPG法)を適用する。空間方向の離散化には、四面体要素である P1/P1(流速・圧力 1 次)要素を用いる。一方、時間方向の離散化には、2 次精度である Crank-Nicolson 法を用いている。

3. 三次元 Cavity 内自然対流解析

(1) 解析条件

本手法の妥当性を検討するため、解析例として図 - 1 に示すような、三次元 Cavity 内自然対流解析を取り上げる。表 - 1 に計算条件を示し、初期条件は流速に関して全領域で 0、圧力は解析領域の中心 1 点に 0 を与え、温度に関しては高温壁面で $T = 0.5$ 、低温壁面で $T = -0.5$ とした。解析メッシュは最小メッシュ幅 1.113×10^{-2} の一辺を 30 分割した三角形メッシュを用いる。

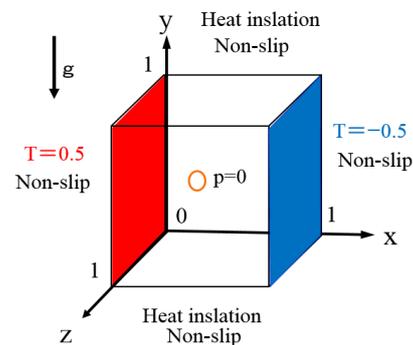


図 - 1 解析領域・境界条件

表 - 1 解析条件

Ra	Pr	Δt	$\beta \Delta T (\Delta T)$	ΔL_{min}
10^6	0.71	1.0×10^{-7}	0.104(30)	1.113×10^{-2}
10^6	0.71	1.0×10^{-7}	1.040(300)	1.113×10^{-2}

KeyWords : 火災シミュレーション, 安定化有限要素法, 低マッハ数近似

連絡先 : 〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27

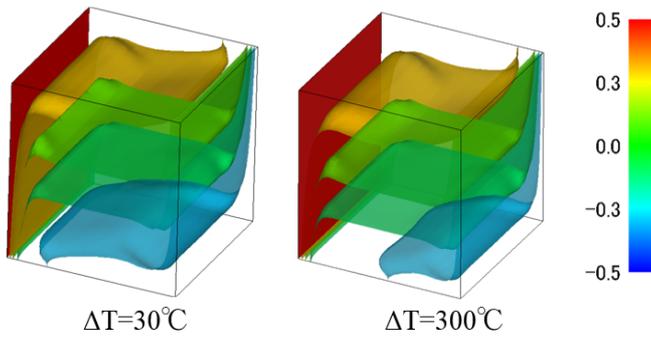


図-2 定常状態における温度分布図

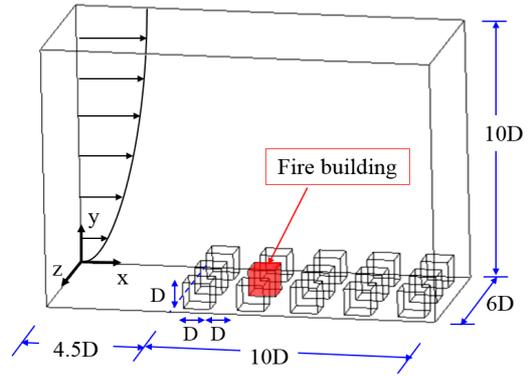


図-4 解析領域

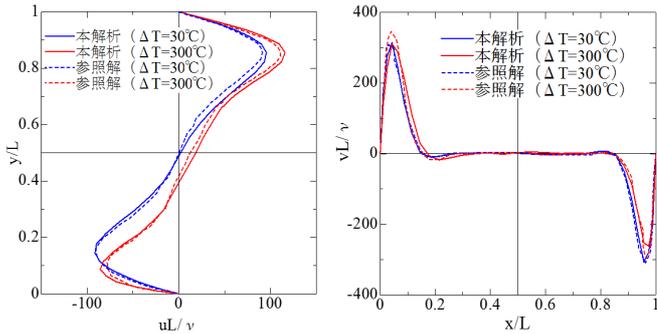


図-3 流速分布の参照解との比較

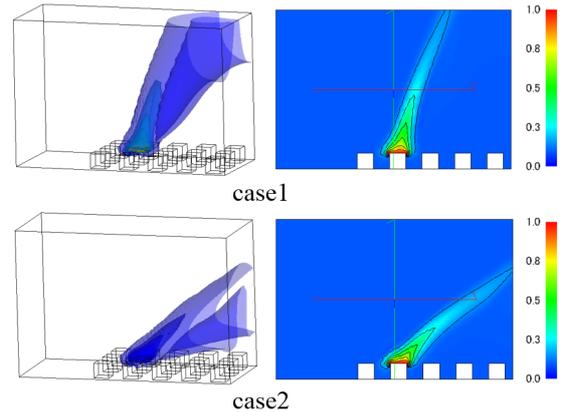


図-5 解析結果

(2) 解析結果

図-2に各条件の定常状態における温度分布を、図-3に本解析と参照解²⁾の定常状態における中心軸(x=0.5,z=0.5及びy=0.5,z=0.5)の流速u,vの分布を示す。

図-3を見ると、流速u,vともに最大値と最小値に若干の差異は見られるが、参照解とよい一致を示している。また温度差が大きくなると温度境界層が薄くなるのが分かる。

4. 流入風のある都市モデルでの解析

(1) 解析条件

応用例として、都市火災を想定して行われた解析例³⁾を参考に、流入風のある都市モデルでの解析を行う。図-4に解析領域、境界条件を示す。温度の境界条件は火災発生建物の上面にT=1.0を与え、その他の底面でT=0.0とした。流れ場の境界条件は流入風速を式(5)で与える。

$$u = \left(\frac{y}{D}\right)^{\frac{1}{4}} * U_D \quad \text{in} \quad (5)$$

ここで、Dは図-4に示す立方体建物の一辺の長さである。領域側面はslip条件、上面と風下壁面ではtraction-free条件とした。計算条件は表-2に示す。

表-2 解析条件

case	Ra	Pr	Δt	βΔT(ΔT)	UD
case1	10 ⁶	0.71	1.0 × 10 ⁻⁶	1.040(300)	100
case2	10 ⁶	0.71	1.0 × 10 ⁻⁶	1.040(300)	300

(2) 解析結果

図-5にcase1及びcase2についての無次元時間t=0.06における温度分布図(左:全体図,右:中心断面図)を示す。流入風速が弱いcase1では火災による上昇気流が流入風によってやや傾いて領域上面に抜けている。一方、流入風速が強いcase2では上昇気流が流入風によって風下側に大きく傾いており、風下側の隣家周辺にも高温領域が広がっている様子が分かる。

5. おわりに

本報告では低マッハ数近似を用いた基礎方程式の数値解析手法を三次元に拡張し、立方体cavity内自然対流解析を行うことで、本手法の妥当性を示した。また都市火災を想定したモデルにおいて流入風のある条件で解析を行い、流入風速が大きくなるほど上昇気流が風下側に傾き、隣家に延焼しやすくなることを確認した。

今後は、燃焼モデル、乱流モデルの導入を行うとともに、大規模化への対応として並列化を行う予定である。

参考文献

- 1) 黄弘, 加藤信介, 大岡龍三: 火の粉の飛来を組み込んだ都市火災伝搬のCFD解析: 日本流体力学会数値流体力学部門Web会誌, Vol.12, No.2, 1992.
- 2) 白石靖幸, 加藤信介, 石田義洋: 低マッハ数近似との比較によるBoussinesq近似の予測精度の検討: 日本建築学会環境系論文集 Vol.577, pp.13-18, 2004.
- 3) 白石靖幸, 加藤信介, 吉田伸治, 村上周三: 都市火災伝搬における火の粉飛散の数値解析: 日本建築学会計画系論文集 Vol.546, pp.187-192, 2011.