

都市における火災シミュレーション手法の構築

中央大学大学院 学生員 ○ 川口 泰斗
中央大学 正会員 檜山 和男

1. はじめに

わが国では近い将来、首都直下型地震の発生が予想されており、建物の密集する都市部で巨大地震が発生した場合には火災によって甚大な被害が出るのが懸念されている。そのため火災の延焼性状を正確に把握して都市火災への防災減災対策を講じる必要があり、都市部における高精度な火災シミュレーション手法の構築が求められている。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目的とする。

これまで著者らは、火災時のような温度差が非常に大きい条件でも適用可能な低マッハ数近似を用いた基礎方程式に対する有限要素法に基づく方法を提案し、その妥当性を示した。そこで本報告では、応用例として、都市火災を想定したモデルでの解析を行い、白石らの数値解析例³⁾と比較することで更なる妥当性の検証を行う。

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。低マッハ数近似を用いた 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:

$$\rho \left(\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) + \frac{\partial p}{\partial x_i} - \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right\} - (\rho - \rho_0) \delta_{i3} = 0 \quad (1)$$

連続式:

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

エネルギー方程式:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u_i \frac{\partial T}{\partial x_i} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{K}{C_p} \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) = 0 \quad (3)$$

状態方程式:

$$\rho T = \rho_0 T_0 \quad (4)$$

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、 P_r 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、 ν は動粘性係数、 α は温度伝導率である。

(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 法を用いる。

3. 流入風のある都市モデルでの解析

(1) 解析条件

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 - 1 に解析領域、境界条件を示す。温度の境界条件は火災建物の火災発生面に $T=1.0$ 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 - 1 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。流入風速と火災発生面を変更した条件で解析を行う。計算条件は表 - 1 に示す。なお、本解析は無次元化した方程式を用いて解析を行っている。

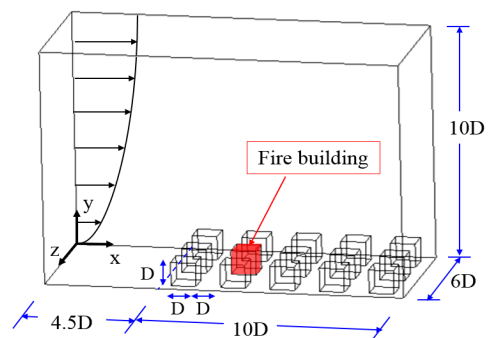


図 - 1 解析領域

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 TEL. 03-3817-1815

表 - 1 解析条件

case	火災発生面	Ra	Pr	$\beta\Delta T(\Delta T)$	U_D
caseA-1	建物上面	10^6	0.71	1.04(300)	100
caseA-2	建物上面	10^6	0.71	1.04(300)	200
caseA-3	建物上面	10^6	0.71	1.04(300)	300
caseA-4	建物上面	10^6	0.71	1.04(300)	400
caseB-1	風上面	10^6	0.71	1.04(300)	100
caseC-4	風下面	10^6	0.71	1.04(300)	400

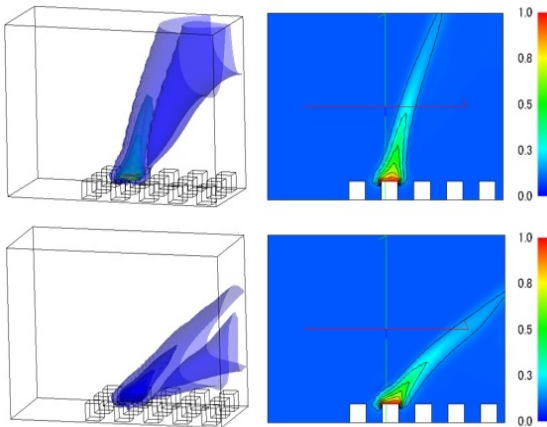


図 - 2 解析結果 (上:caseA-1, 下:caseA-3)

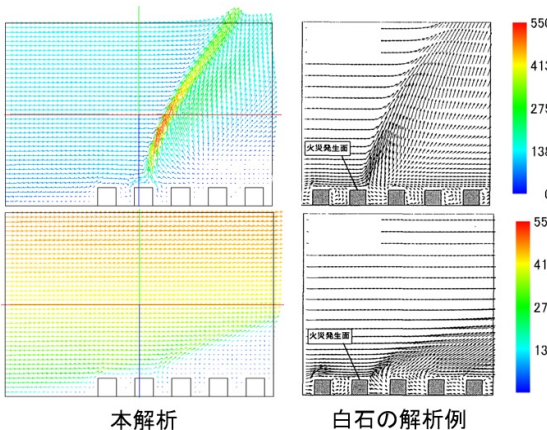


図 - 3 解析結果 (上:caseA-2, 下:caseA-4)

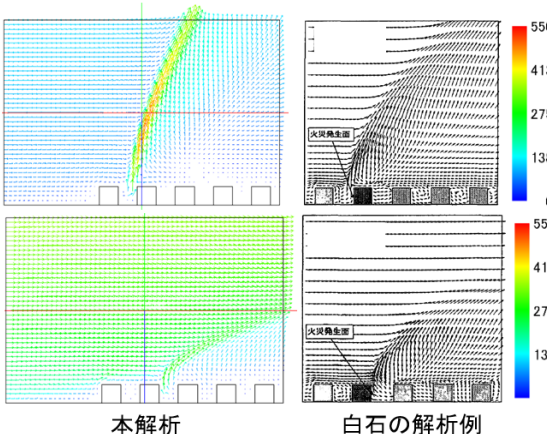


図 - 4 解析結果 (上:caseB-1, 下:caseC-4)

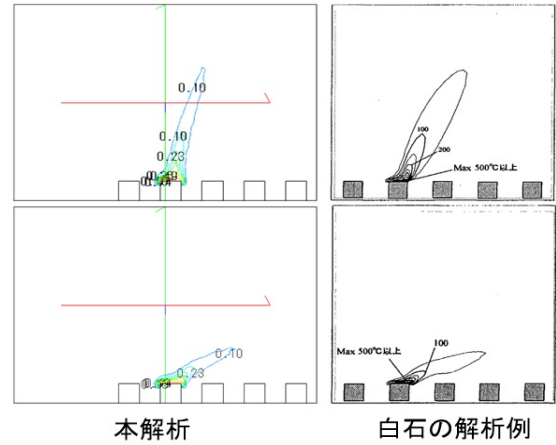


図 - 5 解析結果 (上:caseA-2, 下:caseA-4)

(2) 解析結果

図 - 2 に caseA-1 及び caseA-3 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 caseA-1 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 caseA-3 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.

図 - 3, 図 - 4 には定常状態での各条件の流速ベクトルと白石らの解析結果³⁾を示す. これより, 火災発生面を建物上面に設定した A-2 及び A-4 の条件において, 解析例とよく一致した流速ベクトルを示していると言える. また火災発生面を変更した C-4 と A-4 を比較すると, 火災発生面を風下側壁面に設定した C-4 のほうが上昇気流がより高い点まで達していることが分かる.

図 - 5 には A-2 及び A-4 の定常状態の温度分布図を示す. これから温度分布についても白石の解析結果と定性的によく一致した結果になっていると言える. ただし, 白石らの解析は有次元で行われているため, 定量的な比較はできていない.

4. 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示すとともに, 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, さらなる妥当性を示した. 今後は, 定量的な検討を行うための有次元での解析と大規模計算に向けた並列化手法の導入を行う予定である.

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) T.E.Tezduyar: Stabilized finite element formulations for incompressible flow computations, , *Advance in Applied Mechanics* , Vol.28, pp.1-44, 1992.
- 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.