

フィールドモデルによる高層ビル火災に伴う ビル周辺の熱気流性状の解析

CFD Analysis of Thermal Plume around a Highrise Building in Fire

加 藤 信 介*・村 上 周 三**・大 平 昇*

Shinsuke KATO, Shuzo MURAKAMI and Noboru OHIRA

1. 序

本研究は高層ビル火災に対して消火ヘリコプタが安全に消火活動を行うための条件を検討する研究の一環である^{注)}。このため、火災を起こしている高層建物周辺の火災プルームの性状を乱流モデルに基づく3次元流体数値解析(CFD)を用いて解析、検討する。なお、流れ場の解析にはヘリコプタにより生成される強い下降気流も考慮する。

2. フィールドモデルによる解析

高層建物から噴出する火災によるサーマルプルームは建物に沿って上昇するため自由空間内のプルームとは異なる性状を持つ。同様に火災プルーム近傍のヘリコプタによる誘引流もサーマルプルームに影響を与えることが予想される。乱流モデルに基づくCFD(流体数値シミュレーション)は、このような流れ場、温度場性状の予測手法として極めて有力とみなされる。

火災によるサーマルプルームのCFD解析は、空気の大密度変化を考慮する必要がある。本研究では、空気の密度変化に関し、2種類のモデルを検討する。簡易圧縮性モデルとブシネスク近似に基づく非圧縮モデルである^{1)~3)}。いずれも空間の圧力変動による密度変動は無視される⁴⁾。密度は、簡易圧縮性モデルでは絶対温度の逆数に比例すると仮定され空間で変化するが、ブシネスク近似では運動方程式浮力項を除き密度変化は無視され、場で一定と仮定される。流れ場の乱流性状は、 $k-\epsilon$ モデルにより考慮する。簡易圧縮性を仮定する場合、種々の $k-\epsilon$ モデルが考えられるが、ここではファブル平均に基づき導出されたモデル^{1)~3)}を用いる。この簡易圧縮性 $k-\epsilon$ モデルは高温の鉛

直加熱平板近傍流を十分な精度で再現することが確認されている。詳細は、文献1)~3)を参照されたい。

3. 火災高層ビルの想定

図1参照。①高層ビル：40 m(x)×50 m(y)×150 m(z)，②火災開口位置：地上100 m，ビル中央，③流入開口：5 m(y)×2 m(z)，流入部：開口下部5 m(y)×0.73 m(z)，流出部：開口上部5 m(y)×1.27 m(z) ④開口部からの流出熱量：21 MW，⑤開口上部からの熱気流流出量：7.8 kg/s，⑥流出温度：800 °C，⑦熱気流噴き出し角：上向き15度，⑧開口下部への空気流入量：7.8 kg/s，⑨市街地風の条件：風速0 m/s，温度30 °C，⑩ヘリコプタ：鉛直方向気流のみ再現，ブレード(回転翼)面は14 m×14 mとして、下向きに20 m/sの風速を発生。ヘリコプタ形状は再現しない。ヘリコプタブレード面は火災開口上端と同じ高さで、ブレード先端が建物から20 m離れた場所に位置する(図2参照)。

4. 流体計算条件

4.1 解析コード，計算格子

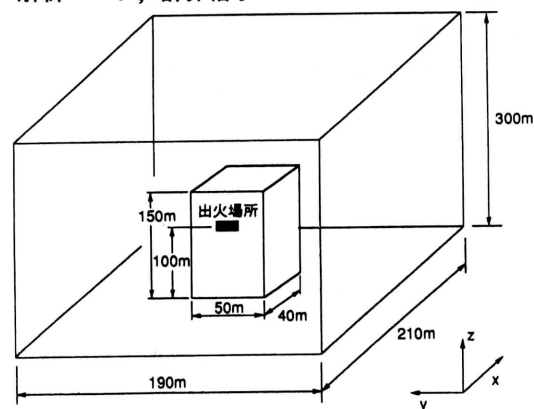


図1 建物形状及び計算領域

*東京大学生産技術研究所 第5部

**東京大学生産技術研究所 附属計測技術開発センター

基礎方程式は、①簡易圧縮性 $k-\varepsilon$ モデル (圧縮 $k-\varepsilon$) 及び②プシネスク近似非圧縮 $k-\varepsilon$ モデル (非圧縮 $k-\varepsilon$) (文献 1) ~ 3) 参照), SIMPLEX 解法, コロケーションメッシュ, 各輸送方程式の移流項はハイブリッドスキームを使用。

解析領域: 210 m (x) \times 190 m (y) \times 300 m (z)

解析格子点数: 39 (x) \times 42 (y) \times 44 (z)

4.2 境界条件等

①建物壁面, 地面: 速度は一般化対数則, 温度は断熱条件, ②火災噴出口: 速度, 乱流統計量, 温度に関し固定値を与える (乱流エネルギー, 乱流散逸に関しては, 噴流の乱流強度を 10%, 乱れの長さスケールを噴出口上下幅の $1/7$ として算出), ③火災開口下部空気流入口: 質量流量固定 (7.8 kg/s), 他はフリースリップ, ④上空, 側面における計算領域の仮想境界: 圧力一定自由流出, ⑤ヘリコプタ気流: ヘリコプタブレード面で鉛直方向平均速度のみ固定値を与える。ブレード面での乱れの生成は無視。

5. 圧縮 $k-\varepsilon$ と非圧縮 $k-\varepsilon$ の計算結果の比較

図 2, 3 に, 非圧縮 $k-\varepsilon$ による結果と圧縮 $k-\varepsilon$ による結果 (風速ベクトル分布) を比較して示す。非圧縮 $k-\varepsilon$

による計算結果では, 高層建物火災開口から出た火炎プルームは建物屋上部近傍で, 流速が約 50 m/s まで加速し, 地上から 300 m 上空でも約 12 m/s もの速度となっている。一方, 圧縮 $k-\varepsilon$ による結果ではプルームの中心の速度は最大でも約 8 m/s 程度であり, プシネスク近似による結果とは大きく異なる。ただし, 温度分布は両者の計算結果は大差ない (結果の図省略)。非圧縮モデルによる高風速の出現は, プシネスク近似により運動方程式浮力項が過剰に評価されるためと考えられる。非圧縮モデルで風速が過大評価される傾向は, 高温の鉛直加熱平板近傍流のシミュレーションでも同様に生じる^{1)~3)}。プシネスク近似による非圧縮流体を仮定したシミュレーションは, このような高温のサーマルプルーム流れに適用しても妥当な解が得られないと考えて良い。

6. 圧縮 $k-\varepsilon$ による解析結果

図 3 ~ 5 に, 火災中央断面における風速ベクトル図, 温度分布図, 及びヘリコプタ近傍の風速ベクトルと温度分布図を示す。図 3 に示されるように, 高層ビルから噴出した火炎プルームは, 建物壁面に添って真っ直ぐに上昇する。上昇に伴い周辺の空気を誘引している。ヘリコプタブレード面に吸引される空気の流れはポテンシャルフロー的に

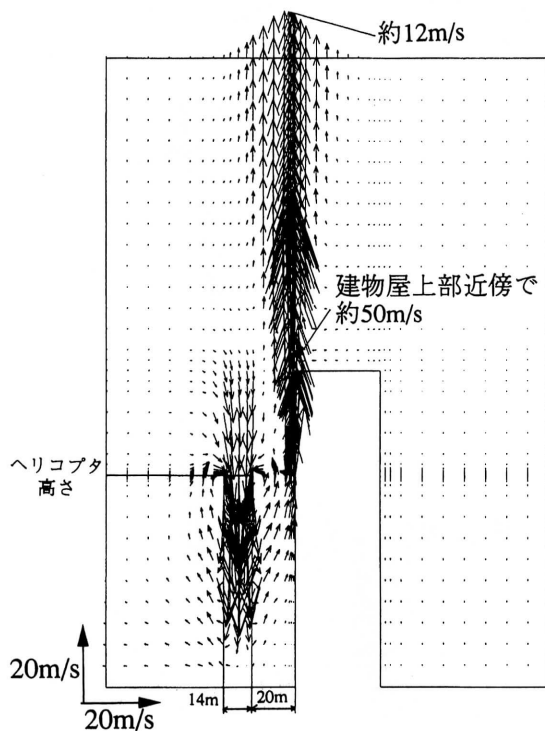


図 2 火災中央断面でのベクトル図 (非圧縮 $k-\varepsilon$)

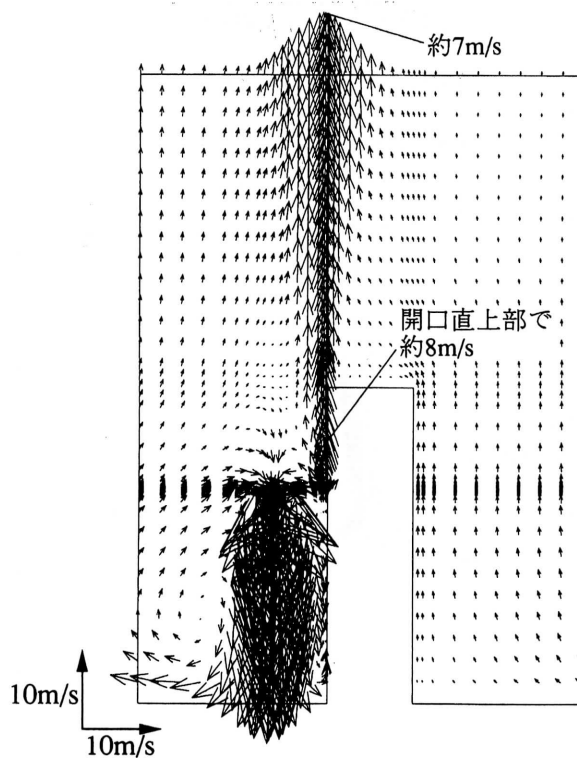


図 3 火災中央断面でのベクトル図 (圧縮 $k-\varepsilon$)

研 究 速 報

なっており、ブレード上部のみならず左右からも空気を吸引しており、現実の流れに近い結果と考えられる (図 3, 5)。火災によるサーマルプルームは建物屋上面で直径 40 m 前後にまで拡散しており、最大温度は約 40℃ にまで減衰している。火災開口高さにおいて、建物開口から水平距離 10 m 辺りまでは 40℃ 以上の温度が観察される (図 4)。図 5 に示されるように建物開口から 20 m 離れたヘリコプタブレード面には、火災によるサーマルプルームの影響はほとんどない。しかし、ブレード面での平均空気温度は、後述するようにヘリコプタブレード面が比較的広範囲の空気を吸引しているため、火災によるサーマルプルームと混合して多少温度が上昇した空気も吸引し、0.5~1℃ 程度周辺空気温度に比べ上昇している。

図 6 に高層建物外壁に平行な面でヘリコプタブレード面の中心を通る断面の風速ベクトル図を示す。ヘリコプタブレード面に吸引される空気は、かなり広い範囲に及んでいる。ブレード面の上部 30 m 四方 (ブレード直径の約 2 倍) のみならず、ブレード面側方下側の空気もこのブレード面に向かって吸引されている。ヘリコプタブレード面直下的高速噴流は周辺の空気を強く誘引しながら下降しており、ブレード面 100 m 下 (ブレード直径 14 m の約 7 倍) の地

上面まで到達している。ヘリコプタ上方には火災によるサーマルプルームが現れている。

7. ま と め

夏期 (30℃)、静穏な風環境の条件の下で、高さ 150 m の高層建物の中間階 (地上 100 m 高さ) で火災が生じた場合の、建物外部に噴出する火災によるサーマルプルームの性状を簡易圧縮性 $k-\epsilon$ モデルに基づく CFD により検討した。

ビル火災開口より噴出した火災プルームは建物壁面に沿って上空に向かって上昇する。火災プルームは、建物屋上面では直径約 40 m 前後にまで拡散し、中心の平均温度は約 40℃ 程度となる。火災噴出開口高さでは火災プルームの影響は建物壁面から 20 m 程度の距離まで見られる。

なお、今回の解析は、ビル周辺の風の影響を考慮していない。建物によって周辺の風が乱された場合の火災プルームの性状がヘリコプタに与える影響は、今回、解析した結果とはかなり異なることも予想される。

謝 辞

本研究は、東京消防庁内に設けられた「消防ヘリコプタによる消火活動に関わる検討委員会」内「高温熱流部会」での検討を参考としている。検討部会の構成は部会長、村上周三他、加藤信介、石田義洋 (鹿島)、長谷見雄二 (建

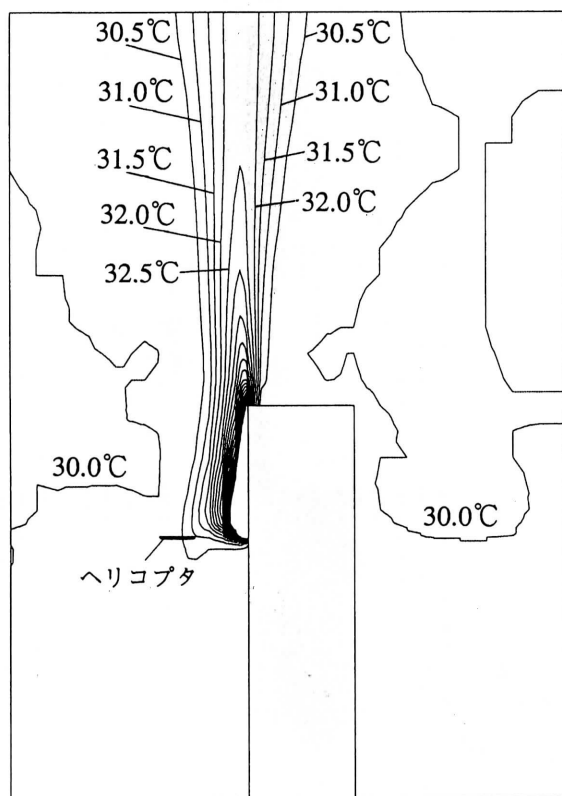


図 4 温度分布図 (圧縮 $k-\epsilon$)

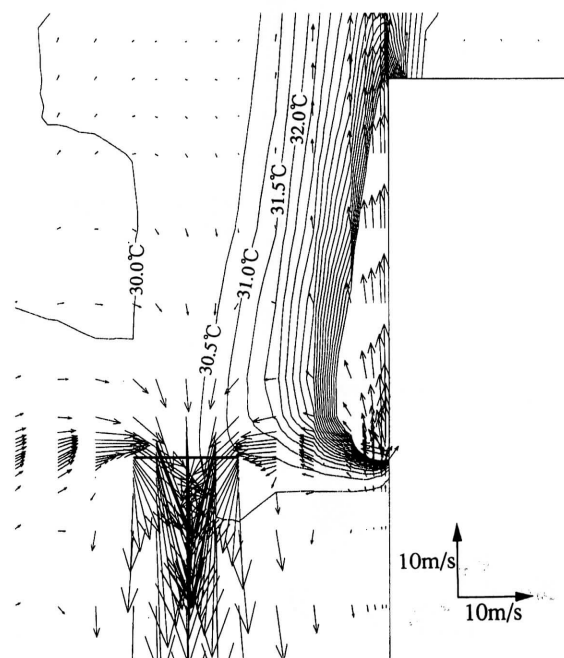


図 5 ヘリコプタ付近のベクトル、温度分布図 (圧縮 $k-\epsilon$)

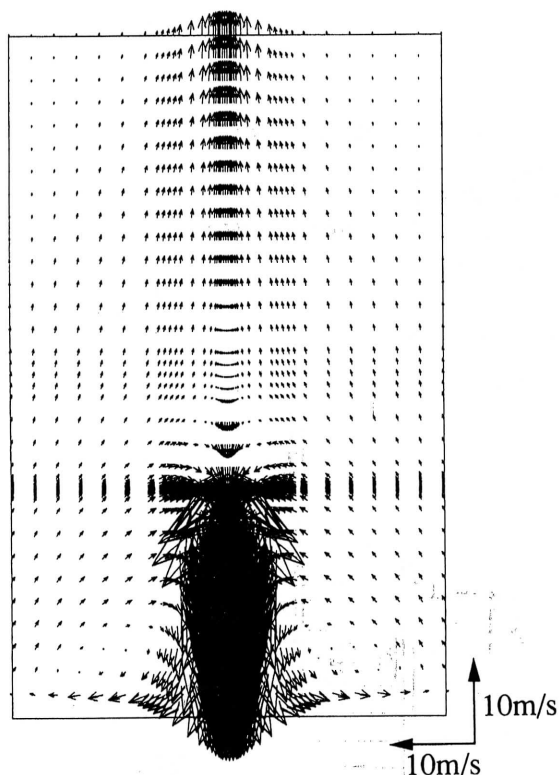
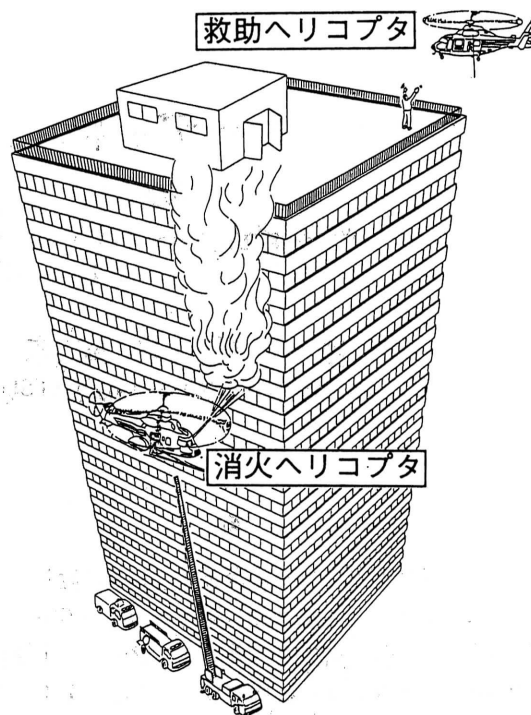


図6 ヘリコプタ中心断面でのベクトル図
(圧縮 k-ε, 火災面と平行断面)



付図 消火ヘリコプタのイメージ図

築研究所), 山田常圭 (消防研究所), 鎌倉弘幸 (東消警防部), 高橋太 (東消予防部) である. 研究に当たり, 検討部会の各委員, ならびに相馬信行氏 (東消警防部), 島田哲雄氏 (同) の御協力を得た. 記して謝意を表する.

(1995年5月15日受理)

注) 消火ヘリコプタの概念図を付図に示す.

参 考 文 献

- 1) 加藤, 村上, 義江, 山田: 密度変化を伴う高温, 高浮力流れの数値シミュレーションに関する研究 (その1) 鉛直加熱壁近傍の自然対流に関する実験とシミュレーション ($\Delta T = 43^\circ\text{C}$ の場合): 日本火災学会研究発表会概要集 1993.5.
- 2) 義江, 村上, 加藤, 山田: 密度変化を伴う高温, 高浮力流れの数値シミュレーションに関する研究 (その2) 鉛

直加熱壁近傍の自然対流に関する実験とシミュレーション ($\Delta T = 404^\circ\text{C}$ の場合): 日本火災学会研究発表会概要集 1993.5.

- 3) 林, 村上, 加藤, 義江: 密度変化を伴う高温, 高浮力流れの数値シミュレーションに関する研究 (その3) SIM-PLEC コロケーショングリッド法を用いた鉛直加熱壁近傍の自然対流に関する数値シミュレーション: 日本火災学会研究発表会概要集 1993.5.
- 4) 加藤, 村上, 義江: 鉛直加熱壁近傍の2次元層流解析 密度変化を伴う高浮力流れの数値シミュレーションに関する研究 (第1報) 日本建築学会計画系論文報告集 1993.7.
- 5) 義江, 村上, 加藤: 高温鉛直加熱壁近傍の自然対流に関する実験 密度変化を伴う高浮力流れの数値シミュレーションに関する研究 (第2報) 日本建築学会計画系論文報告集 1994.7.
- 6) 村上, 加藤, 義江: 高温鉛直加熱壁近傍の自然対流に関する乱流解析 密度変化を伴う高浮力流れの数値シミュレーションに関する研究 (第3報) 日本建築学会計画系論文報告集 1995.7 掲載予定.