

都市火災伝搬における火の粉飛散の数値解析

Numerical Analysis of Scatter of Fire Brand within Urban Fire Spread

白 石 靖 幸*・加 藤 信 介**・村 上 周 三*・吉 田 伸 治*・林 吉 彦*

Yasuyuki SHIRAIISHI, Shinsuke KATO, Shuzo MURAKAMI, Shinji YOSHIDA, Yoshihiko HAYASHI

1. 研 究 概 要

都市火災の伝搬要因の一つである火の粉飛散による飛び火現象の物理モデルを作成し、建物周辺気流の CFD 解析と火の粉飛散を連成させて都市火災伝搬を解析する。本来、火の粉の形状は多様であり、また延焼能力の大きい火の粉は寸法・重量ともに相当に大きいと考えられる。このような場合、正確な予測を行うためには飛散する火の粉に対して働く重力、抗力、揚力を考慮し、個々の火の粉の輸送をその運動方程式を解いて、解析することが望ましいと考えられる。本研究では、しかしながら、こうした検討の第 1 段階として、火の粉を重力沈降する通常の気中浮遊微粒子としてモデル化し^{文1)}、その移流・拡散性状を CFD を用いて解析を行う。

2. 解 析 概 要

2.1 解析対象

図 1 に解析対象を示す。解析対象は、 X_1 方向に 5 つ、 X_2 方向に 3 つの立方体形状の建物モデルを均等に配置した街区を想定している。解析領域では、左から右へ外部風が流れており、火災発生建物は X_1 方向に風上から 2 つ目、 X_2 方向の中心に位置している。

2.2 乱流モデル

Boussinesq 近似に基づく非圧縮性流体の基礎方程式を用いている。乱流モデルは、乱流熱フラックスの評価に温度変動に基づく浮力効果を組み込んだ改良型 k-ε モデル^{文2)}に更に建物風上側での乱流エネルギーの過大生産を抑制する改良 Launder-Kato モデル^{文3)}を適用している。

2.3 火の粉の物理モデル

本報では、火の粉の径が小さく、その飛散性状が通常の重力沈降する気中浮遊微粒子とみなせるものと仮定し、火

の粉の気中濃度に対する輸送方程式を数値的に解析して、その移流・拡散性状を解析する。火の粉の重力沈降は、気中濃度 C [個/ m^3] の輸送方程式において、重力沈降 ((1)式, 文 4) による移流効果を組み込んでいる ((2)式, 文 1)。尚、火の粉は、地表面および建物上面で沈降により各表面に堆積して気中より除去される。地表面および物体上面での濃度の乱流拡散フラックスは、法線方向勾配 0 を仮定している。

ストークスの重力沈降速度式：

$$W = 2.46 \left[\left(\frac{\rho_p}{\rho} \right) ag \right]^{0.5} \dots \dots \dots (1)$$

火の粉の気中濃度輸送方程式：

$$\frac{\partial C}{\partial t} + U_i \frac{\partial C}{\partial x_i} + W \frac{\partial C}{\partial x_3} = - \frac{\partial}{\partial x_1} \overline{u_i C} + C_0 \dots \dots \dots (2)$$

火の粉の乱流濃度フラックス：

$$\overline{u_i C} = - \frac{\nu_t}{\sigma_c} \frac{\partial C}{\partial x_i} \dots \dots \dots (3)$$

記号 C ：火の粉の気中濃度 [個/ m^3]、 U_i ： i 方向速度成分 [m/s]、 W ：重力沈降速度 [m/s]、 $\overline{u_i C}$ ：火の粉の濃度フラックス [個/ m^2s]、 C_0 ：火の粉の発生速度 [個/ m^3s]、 ν_t ：渦動粘性係数 [m^2/s]、 σ_c ：乱流シュミット

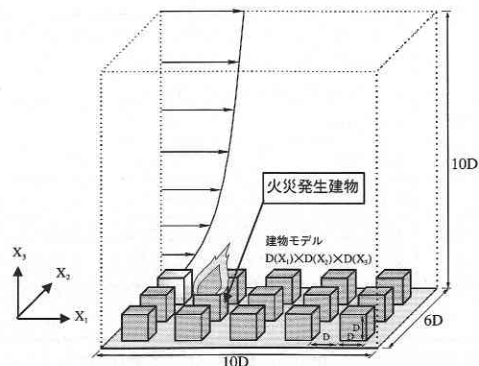


図 1 解析対象

*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

研 究 速 報

数 (= 1.0), ρ_p : 火の粉の密度 [kg/m³], ρ : 空気密度 [kg/m³], a : 火の粉の相当直径 [m], g : 重力加速度 [m/s²], オーバーバーはアンサンブル平均.

2.4 計算ケース

建物の高さ, 幅, 奥行きは全て $D = 10\text{ m}$. 建物火災面の発熱量は $1.6\text{ [MW/m}^2\text{]}$ (文5), 注1). また火の粉の発生は火災プルーム中の建物上面より 8 m の位置を仮定. 接近流の鉛直方向分布はベキ指数分布を仮定. 火の粉の飛散に最も影響を与える要因として, ①風速 (本計算では建物高さの接近流速) ②火の粉の相当直径 (重力沈降速度) ③火の粉発生位置 (火災発生位置) 等を変化させて検討を行う. 計算ケースを表1に示す. 火の粉の密度をスギの密度 $330\text{ [kg/m}^3\text{]}$ と仮定し, 相当直径 1 [mm] および 5 [mm] の重力沈降速度を(1)式より求めると表1に示すように 2.85 [m/s] , 6.37 [m/s] となる. 流入風速は, 高さ D での風速 U_D を境界条件として与えている.

2.5 計算条件

境界条件および計算条件を表2, 表3にそれぞれ示す.

3. 解析結果および考察

火の粉の濃度に関する以下の結果は, 建物スケール D と流入風速 U_D および火の粉の発生量 q [個/s] ($= C_0 V =$

700) を用い, 無次元化して示す. 但し, 本計算では火の粉の発生速度 C_0 は $100\text{ [個/m}^3\text{s]}$, 火の粉発生セルの体積 V は $7\text{ [m}^3\text{]}$ とした. この無次元化により, 火の粉の代表濃度は $q/U_D D^2$ [個/m³] となり, 算出される濃度はこの代表値を用いて無次元化される.

3.1 流入風速の影響 (図2~図7)

以下に示す鉛直断面図は, 全て $X_2 = 3D$ でのものである. CaseA-1 (図2) では接近流速が 2 [m/s] と比較的低速であるため, 建物上面の発熱により生じる熱上昇流が卓越し, その影響が解析領域上面 (高さ 100 m) まで達している. これと比較して CaseA-4 (図4) では接近流速が 5 [m/s] と強風であるため, 接近流速が卓越し, 熱上昇流は抑制されている. 温度分布に関して, CaseA-1 (図3) では高温域が上空まで形成され, 高温域の風下側への傾きは小さい. 一方, CaseA-4 (図5) では, 高温域が風下側へ大きく傾き, 風下に隣接する建物近傍まで及んでいる.

図6, 図7に CaseA-1~3 および CaseA-4~6 の鉛直面の火の粉の無次元濃度分布 ($CU_D D^2/q$) をそれぞれ示す. また, 火災発生建物より風下側の地表面および建物上面 (図6左図中に示す面①~面⑥) に沈降する火の粉の無次元沈着フラックス (WCD^2/q) も図中に示す. 強風時にお

表3 計算条件

格子分割は $51(X_1) \times 31(X_2) \times 29(X_3) = 45849$. 火の粉の発生位置は, 建物上面から 8 [m] の高さで, 最も温度の高いセルとし, 発生量は, (2) 式中で $C_0=100\text{ [個/m}^3\text{s]}$ を与えている.

表1 計算ケース

	火災発生面	流入風速 U_D [m/s]	重力沈降速度 W [m/s]
CaseA-1	建物上面	2	0
CaseA-2	建物上面	2	2.85
CaseA-3	建物上面	2	6.37
CaseA-4	建物上面	5	0
CaseA-5	建物上面	5	2.85
CaseA-6	建物上面	5	6.37
CaseB-1	風上側鉛直面	2	2.85
CaseC-1	風下側鉛直面	2	2.85

表2 境界条件

流入面	$U_1(x_3)=\alpha(x_3)^{1/4}$, $U_2(x_3)=0$, $\epsilon(x_3)=C_\mu k(x_3)^{3/2}/l(x_3)$, $U_3(x_3)=0$, $l(x_3)=4(C_\mu k(x_3))^{1/2} D^{1/4}/U_D \cdot x_3^{3/4}$, k は風洞実験値, $U_D=U_1(D)$
流出面	free slip
上空面	free slip
側面	$U_2=0$, その他全て free slip
地表面および建物表面	速度は一般化対数測. 温度は火災発生面で熱流束 $q_w=1.6\text{ [MW/m}^2\text{]}$ (文5) を与え, その他の壁面は断熱壁を仮定. 火の粉の濃度は壁面上で法線方向のフラックスを0としている.

(k : 乱流エネルギー [m^2/s^2], ϵ : k の散逸率 [m^2/s^3], l : 長さスケール [m], α : U_D の設定により決まる定数)

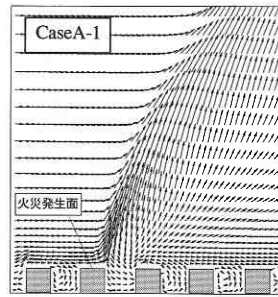


図2 鉛直面風速ベクトル

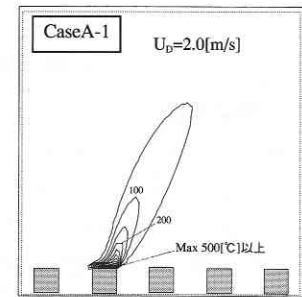


図3 鉛直面温度分布

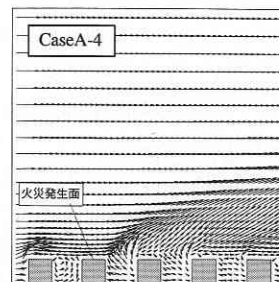


図4 鉛直面風速ベクトル

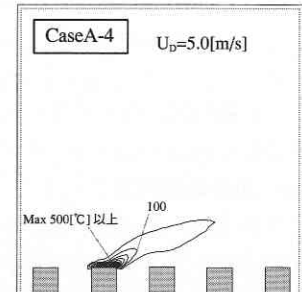


図5 鉛直面温度分布

いては (図7), 温度分布と同様に高濃度領域の風下側への傾きが大きく, 風下側の火の粉の沈着フラックスも大きくなる. 尚, 火の粉による延焼危険性を考察する場合には, 火の粉が発生してから建物に到達するまでに要する時間も考慮する必要がある. 本解析のように火の粉の相当直径が小さい場合, 火の粉の燃焼時間が短いため, 短時間で隣接する建物に到達する強風時においては, 延焼危険性が高いと考えられる.

3.2 火の粉の重力沈降速度の影響 (図6, 図7)

火の粉の相当直径が 1 [mm] の場合 (図6, 7の中図), 火の粉は風下側の建物上面に沈着するようになり, 風下側ほど沈着フラックスの値は低くなっている. 火災発生建物より風下側1つ目の建物上面 (面②) には建物上面の面積 D^2 で平均すると 0.05 (図6の中図) および 0.3 (図7の中図) の沈着フラックスが生じており, フラックスから概算すると単位時間あたりの火の粉発生量の 5 [%], 30 [%] がそれぞれ沈着している. 特に強風時の場合 (図7の中図), 熱上昇流の発達抑制されるため, 無次元重力沈降速度は 0.57 と弱風の場合の 1.43 に比べ小さくなるにもかかわらず, 重力沈降の効果が顕著に現れ, 火災発生建物から風下側2つ目の建物 (面④) まで 18 [%] という高い割合で火の粉が到達している.

火の粉の相当直径が 5 [mm] の場合 (図6, 7の右図), 重力沈降が支配的となり, 火の粉は殆ど上空には舞い上がらず, その大部分が火災発生建物近傍の地表面 (面①) お

よび風下側1つ目の建物上面 (面②) に堆積している. 沈着フラックスから概算すると, 低風速の場合 (図6の右図) 火の粉発生量の 20 [%] が, 強風の場合 (図7の右図) 50 [%] が, 風下側1つ目の建物上面 (面②) に堆積している. すなわち, 本計算で対象とした火の粉の相当直径の範囲内では, 相当直径が大きくなるに従い, 火災発生建物の風下側に隣接する建物上面へ火の粉沈着量は多くなる.

3.3 火災発生位置の影響 (図8~図14)

CaseB-1 (図8) の場合, 建物上面から発熱する CaseA-1 (図2) と同様に火災による熱上昇流が解析領域上面 (高さ 100 m) まで及んでいるが, 風下面から発熱する CaseC-1 (図11) の場合, 高さ 60 m 程度である. また, 水平面の温度分布 (高さ 25 m) に関しても, Case C-1 (図12) の場合, 高温域の最高温度が低く, また高温域が風下側に分岐して形成されている. このような差異が生じる原因は明らかでないが, 図14に示す建物間の水平方向の循環流の影響があるものと考えられる. すなわち, 風上側鉛直面に火災発生面がある CaseB-1 では, 火災発生面前方に生じる循環流が発熱面で収束流を形成し, 水平方向の熱拡散を抑制するように働き, 一方, 風下側鉛直面に火災発生面がある CaseC-1 の場合は循環流が発熱面で発散流を形成し, 水平方向の熱拡散を促進する. この効果により CaseC-1 では熱上昇流の上昇速度が低下し, 接近流の卓越した流れ場が形成されたものと考えられる.

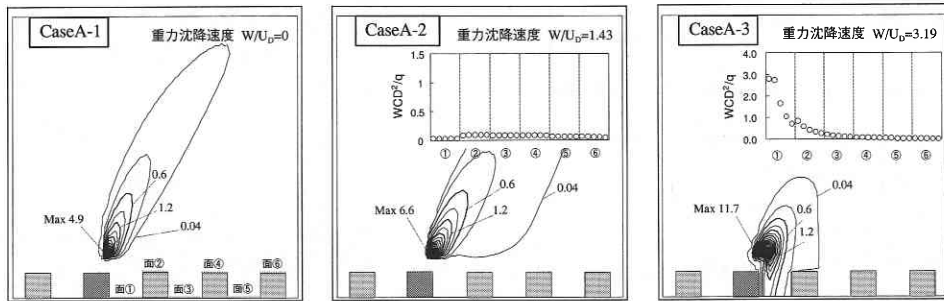


図6 鉛直面の火の粉の濃度分布 $[C_{U_D} D^2/q]$ および沈着フラックス $[WCD^2/q]$ (無次元表示, $U_D = 2.0$ [m/s])

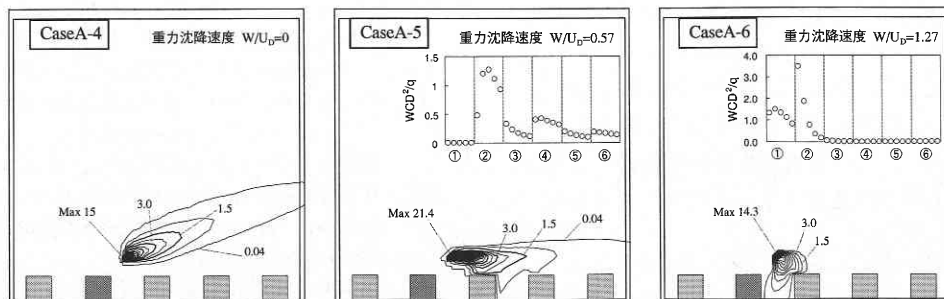


図7 鉛直面の火の粉の濃度分布 $[C_{U_D} D^2/q]$ および沈着フラックス $[WCD^2/q]$ (無次元表示, $U_D = 5.0$ [m/s])

研究速報

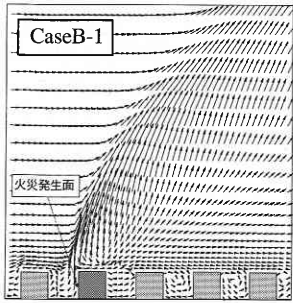


図8 鉛直風速ベクトル

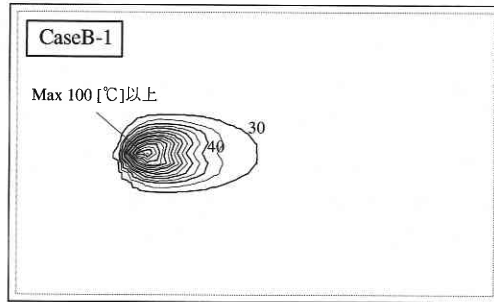


図9 水面温度分布(高さ25m)

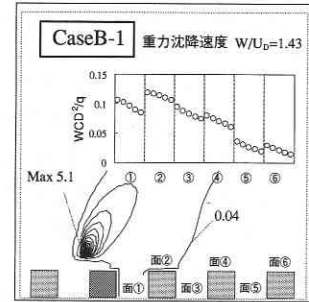


図10 鉛直面の火の粉の無次元濃度

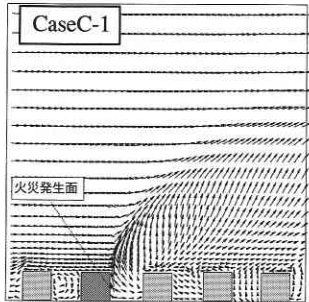


図11 鉛直風速ベクトル

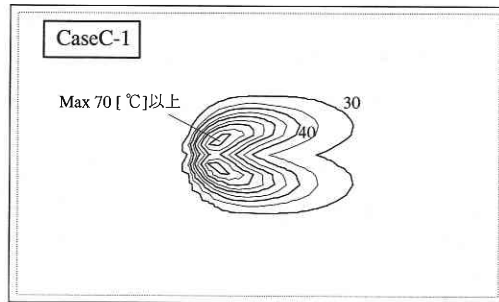


図12 水平面温度分布(高さ25m)

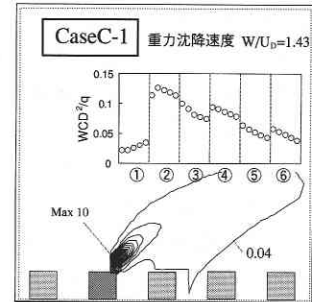


図13 鉛直面の火の粉の無次元濃度

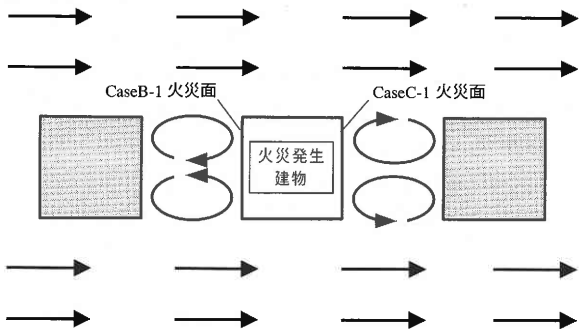


図14 火災発生建物近傍の水平面気流パターン

火の粉の飛散に関しては、流れ場の影響を受け、CaseB-1(図10)の方が上空への飛散量が多いため風下側の建物上面(面④~⑥)の沈着フラックスは小さく、CaseC-1(図13)では逆に大きい。CaseA-2(図6の中図)では、この差が著しくなり、CaseB-1(図10)よりも上空への飛散量は多くなる。従って、火災発生面が建物の風上側鉛直面(CaseB-1)および建物上面(CaseA-2)にある場合には、熱上昇流が発達し、火の粉飛散を助長するため、風下側に隣接する建物上面での沈着フラックスは小さくなる。

4. ま と め

都市火災の伝搬要因の一つである火の粉飛散の物理モデルを作成し、建物周辺気流のCFD解析と連成させて火の

粉飛散の数値解析を行い、以下の知見を得た。

- (1) 相当直径の小さい火の粉の飛散では、強風時ににおいて風下側に隣接する建物への延焼危険性が高い。
- (2) 火の粉の相当直径によって飛散性状(風下側建物上面への沈着フラックス等)が大きく異なる。
- (3) 火災発生面が建物上面及び風上側にある場合には、火災による熱上昇流が発達し、火の粉飛散を助長する。

(1998年10月19日受理)

注

- 1) 火災発熱は、全て建物の火災発生面で与え、火災プルーム中では発熱させていない。

参 考 文 献

- 1) 村上周三ら, 1989, 移流の卓越する室内気流における沈降を伴う浮遊微粒子の拡散, 第2報-数値シミュレーションと実大実験の比較, 空気調和・衛生工学会論文集, No. 40.
- 2) 野口康仁ら, 1994, 都市温熱環境の数値シミュレーション(その3), k-εモデルの乱流熱フラックスの評価への浮力効果の組み込み, 日本建築学会大会学術講演梗概集(環境).
- 3) B. E. Launder, M. Kato, Modeling Flow-Induced Oscillations in Turbulent Flow around A Square Cylinder, ASME Fluid Eng. Conference, 1993. 6, p. 20-24
- 4) 高橋幹二, 改著基礎エアロゾル工学(第一版), 1982, 養賢堂.
- 5) 横井鎮男(建築研究所), 1960, 建築研究報告, No. 34.