

# 火の粉の飛散を組み込んだ都市火災伝搬の CFD 解析

CFD Simulation of Urban Fire Spread Coupled with Firebrands Scattering

黄 弘, 加藤 信介, 大岡 龍三  
東京大学生産技術研究所

Hong Huang, Shinsuke Kato and Ryoza Ooka  
Institute of Industrial Sciences, University of Tokyo

E-mail:hhong@iis.u-tokyo.ac.jp

## 1 はじめに

多くの都市火災伝搬予測は火災伝搬過程を過去の被災記録からの統計解析に基づいた単純な延焼モデルによる予測するものであり、火災拡大に大きな影響を持つ火炎性状や火災域の風性状等の物理現象を実際に解析して予測するというものではない。都市火災において、建物間の延焼を引き起こす要因は、図 1 に示すように接炎、放射熱、熱気流、火の粉などが挙げられる。特に、強風下においては、大量の火の粉が原因となって、火炎発生場所から離れた所で飛び火による延焼被害が起こる事例も多い<sup>1,2)</sup>。しかしながら、火の粉は、火元建物の状態、着火形態、気象条件など、工学的にモデル化しにくい多くの不確定要因があるため、その性状や機構に関する研究が十分進められていないのが現状である。本稿では、都市火災伝搬予測に必要な CFD モデル、火炎燃焼モデル、火炎放射モデルと火の粉飛散モデルを述べた後、それに基づいた計算例を紹介する。

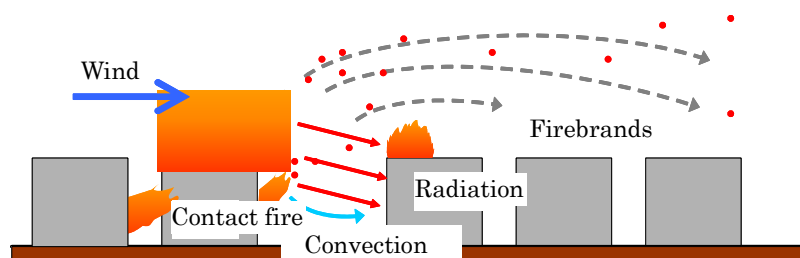


Fig.1 Urban fire spread process

## 2 市街地火災数値モデル

### 2.1 CFD モデル

火災気流をシミュレーションするには、ブジネスク近似による非圧縮性流体の基礎方程式を用いることがある<sup>3)</sup>が、加藤ら<sup>4)</sup>は密度変化を考慮した低マッハ数近似による圧縮性流体としての方程式系を用いて、室内火災気流をシミュレーションした。林ら<sup>5)</sup>は同じ方程式を用いて屋外火災気流と火の粉の飛散を解析した。筆者らはこれらの研究を踏まえ、火災時の気流を圧縮性流体として取扱い、圧縮性流体に対する平均操作として、ファブル平均<sup>6)</sup>を行い、乱流モデルは Tahry<sup>7)</sup>が提案した圧縮往復エンジン内の燃焼過程に適応した  $k-\epsilon$  モデルを用

Table 1 Governing equations

$\frac{\partial \bar{p}}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{\rho} \tilde{u}_j)}{\partial x_j} = 0$	(1)
$\frac{\partial(\bar{\rho} \tilde{u}_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{u}_j) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\bar{\tau}_{ij} - \bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{u}_j) + \bar{\rho} g_i$	(2)
$\frac{\partial(\bar{\rho} \tilde{h})}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\bar{\rho} \tilde{u}_j \tilde{h}) = \frac{\partial \bar{p}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\lambda}{c_p} \frac{\partial \tilde{h}}{\partial x_j} - \bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{h}'' \right) + \sum_{n=1}^N \bar{h}_n \bar{\rho} D_n \frac{\partial \tilde{Y}_n}{\partial x_j} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_j} + \bar{\tau}_{ij} \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} - \bar{S}_R$	(3)
$\frac{\partial(\bar{\rho} \tilde{Y}_n)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\bar{\rho} \tilde{u}_j \tilde{Y}_n) = \frac{\partial}{\partial x_j}(\bar{\rho} D_n \frac{\partial \tilde{Y}_n}{\partial x_j} - \bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{Y}_n'') + \bar{w}_n$	(4)
$\frac{\partial(\bar{\rho} \tilde{k})}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{\rho} \tilde{u}_j \tilde{k})}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \tilde{k}}{\partial x_j} \right) + \mu_t \left( \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} - \frac{2}{3} \left( \mu_t \frac{\partial \tilde{u}_k}{\partial x_k} + \bar{\rho} \tilde{k} \right) \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_i} - g_i \frac{\mu_t}{\sigma_h} \frac{1}{\bar{\rho}} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} - \bar{\rho} \tilde{\epsilon}$	(5)
$\frac{\partial(\bar{\rho} \tilde{\epsilon})}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{\rho} \tilde{u}_j \tilde{\epsilon})}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \tilde{\epsilon}}{\partial x_j} \right) + C_{\epsilon 1} \frac{\tilde{\epsilon}}{k} \left( \mu_t \left( \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} - \frac{2}{3} \left( \mu_t \frac{\partial \tilde{u}_k}{\partial x_k} + \bar{\rho} \tilde{k} \right) \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_i} \right) + C_{\epsilon 3} \max(-g_i \frac{\mu_t}{\sigma_h} \frac{1}{\bar{\rho}} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i}, 0) - C_{\epsilon 2} \bar{\rho} \frac{\tilde{\epsilon}^2}{k} + C_{\epsilon 4} \bar{\rho} \tilde{\epsilon} \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_i}$	(6)
$h = \sum_{n=1}^N Y_n h_n = \sum_{n=1}^N Y_n (h_{0,n} + \int_{T_0}^T c_{p,n} dT)$	(7)
$\bar{\rho} = \frac{\bar{p}}{R \sum_{n=1}^N \left( \frac{\tilde{T} \tilde{Y}_n}{M_n} \right)}$	(8)
$\bar{\tau}_{ij} = \mu \left( \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial \tilde{u}_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right)$	(9)
$\bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{u}_j'' = -\mu_t \left( \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_i} \right) + \frac{2}{3} \left( \mu_t \frac{\partial \tilde{u}_k}{\partial x_k} + \bar{\rho} \tilde{k} \right) \delta_{ij}$	(10)
$\bar{\rho} \tilde{u}_j \tilde{h}'' = -\frac{\mu_t}{\sigma_h} \frac{\partial \tilde{h}}{\partial x_j}$	(11)
$\bar{\rho} \tilde{u}_j \tilde{Y}_n'' = -\frac{\mu_t}{\sigma_n} \frac{\partial \tilde{Y}_n}{\partial x_j}$	(12)
$\sigma_k = 1.0, \quad \sigma_\epsilon = 1.22, \quad \sigma_h = 0.7, \quad \sigma_n = 0.7, \quad C_{\epsilon 1} = 1.44, \quad C_{\epsilon 2} = 1.92, \quad C_{\epsilon 3} = 1.0, \quad C_{\epsilon 4} = -0.33$ $n = \text{fuel, oxygen, product}$	

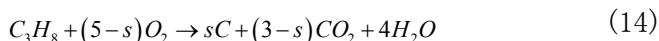
いている。表 1 に CFD 解析用の基礎方程式を示す。(1)–(6)式はそれぞれ連続式、運動量保存式、エネルギー保存式、ガス成分輸送式、乱れエネルギー輸送式と散逸率輸送式である。

## 2.2 火炎燃焼モデル

CFD 基礎方程式を閉じるため、成分の燃焼反応速度(式(4)の  $\bar{w}_n$  を表す乱流燃焼モデルが必要になる。本研究では Magunussen<sup>8)</sup>が提案した Eddy Dissipation Combustion Model を使用した。このモデルでは、可燃ガス、酸素の渦が崩壊していく過程での燃焼反応速度は、二者の内最も少ないものの量に支配されると考え、

$$\bar{w}_f = -\bar{\rho}(\epsilon/k) \min(A\tilde{Y}_f, A\tilde{Y}_{O_2}/i) \tag{13}$$

と表している。i は量論酸素燃料比で、A は経験定数である。建物の火災時は木材、プラスチックなど様々な物質が燃焼している。すべての燃焼を表現することは非常に困難であるが、一般には、特定の可燃性ガスに代表させてそれが発生するというモデルを用いる。可燃性ガスとしては一酸化炭素<sup>9)</sup>あるいはプロパン<sup>10)</sup>で代表させることが多い。建物火災について、プロパン発生モデルを採用することが多い<sup>11)</sup>ため、ここで、プロパンで代表する。放射に多大な影響を与えるすすの生成メカニズムは複雑であり、十分解明されておらず、本研究では、(14)、(15)式の化学式のように 1mol の燃焼性ガスは燃焼により、s mol ( $s = 0.02^{12}$ ) のすすを生成すると仮定し、計算を行う。



### 2.3 放射モデル

放射強度の伝達式である (16) 式によりガス放射およびすす放射の計算を行い、離散伝達法<sup>13)</sup>や six-flux 法<sup>14)</sup>などがあるが、ここでよく使われている離散伝達法を用いた。気体の吸収係数  $k_g$  およびすすの吸収係数  $k_s$  は (17)、(18) 式から求める<sup>10)</sup>。すすは非常に小さい粒子なので、散乱は省略する。

$$\frac{dI}{ds} = -(k_g + k_s)I + \frac{\sigma}{\pi}(k_g + k_s)T^4 \quad (16)$$

$$k_g = 0.28 \exp\left(-\frac{T}{1135}\right) \quad (17) \quad k_s = 1264 f_v \quad (18)$$

### 2.4 火の粉飛散モデル

火の粉の生成メカニズムおよび物理メカニズムに関しては現在ほとんど研究されていない。通常の粒子の飛散を解明するには、オイラー式を用いて火の粉を気体とみなし、輸送方程式を解くことで火の粉の飛散を考慮する方法とラグランジュ方程式を用いて火の粉一つ一つの運動方程式を解く方法がある。目的に応じて二つの式を使い分けていく必要があると考えられる。

#### 2.4.1 オイラーの式

オイラー式では粒子を気体とみなして計算を行っているため、火の粉発生が連続状態における濃度分布を知ることが可能である。小さい粒子に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空中浮遊微粒子とみなせるものと仮定して、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・拡散性状を評価する。火の粉の重力沈降は、火の粉の気中濃度  $C$  [個/m<sup>3</sup>] の輸送方程式において、重力沈降 ((19) 式, 文 15) による移流効果を組み込んでいる ((20) 式)。

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ものとする。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 (乱流拡散による固体表面沈着無視) と仮定して算出している。ストークスの重力沈降速度式：

$$W = 2.46 \left[ \left( \frac{\rho_p}{\rho} - 1 \right) r g \right]^{0.5} \quad (19)$$

火の粉の気中濃度輸送方程式：

$$\frac{\partial \bar{C}}{\partial t} + \bar{u}_i \frac{\partial \bar{C}}{\partial x_i} - W \frac{\partial \bar{C}}{\partial x_3} = - \frac{\partial}{\partial x_i} \bar{u}_i' C' + C_0 \quad (20)$$

火の粉の乱流濃度フラックス :

$$\overline{u'_i C'} = -\frac{v_i}{\sigma_c} \frac{\partial \overline{C}}{\partial x_i} \quad (21)$$

#### 2.4.2 ラグランジュ方程式

火炎熱気流中の火の粉の挙動は固気二相流と見なすことができ、ラグランジュ方程式を用いる。火の粉の粒子に関してはストークスの抗力と重力および圧力勾配による影響を考慮して火の粉の運動方程式は(22)式で与えられる。回転について本研究においては無視している。また、今回の火の粉飛散のモデル化においては、特に火の粉の飛行現象に着目し、火の粉自体の燃焼時間は火の粉の飛行時間に比べ十分に長いものと想定し、飛行中には火の粉の表面温度が流体運動に及ぼす影響並びに火の粉の形状変化についてはないものと仮定した。

$$m_p \frac{d\vec{u}_p}{dt} = \vec{F}_{dr} + \vec{F}_p + \vec{F}_g \quad (22)$$

$\vec{F}_g$  は重力項、 $\vec{F}_p$  は圧力勾配項、 $\vec{F}_{dr}$  は抗力項であり、それぞれ(23)、(24)、(25)式により与える。

$$\vec{F}_g = V_d (\rho_p - \rho_f) \vec{g} \quad (\vec{g} = (0, 0, -9.8) \text{ m/s}^2) \quad (23)$$

$$\vec{F}_p = -V_d \nabla p \quad (24)$$

$$\vec{F}_{dr} = \frac{1}{2} C_d \rho_f A_p |\vec{u} - \vec{u}_p| (\vec{u} - \vec{u}_p) \quad (25)$$

抗力係数  $C_d$  の値は(26)式に示す。

$$C_d = \begin{cases} 24(1 + 0.15 \text{Re}_p^{0.687}) / \text{Re}_p, & \text{Re}_p \leq 10^3 \\ 0.44, & \text{Re}_p > 10^3 \end{cases} \quad (26)$$

また、粒子のレイノルズ数は(27)式により算出する。

$$\text{Re}_p = \frac{\rho_f |\vec{u} - \vec{u}_p| d_p}{\mu} \quad (27)$$

火の粉を輸送する気流速度  $\vec{u}$  は平均の速度成分に変動速度成分を加えたものとして、以下の式に与える。

$$\vec{u} = \tilde{\vec{u}} + \vec{u}' \quad (28)$$

変動速度成分は以下の標準偏差  $\sigma$  のガウス分布確率密度関数からランダムに選択される。

$$\sigma = \sqrt{2k/3} \quad (29)$$

$$G(\vec{u}') = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{\vec{u}'^2}{2\sigma^2}\right) \quad (30)$$

### 3 実市街地スケール火災数値シミュレーション

2 節において示した市街地火災シミュレーションモデルを用いて、実スケールモデル街区

においてシミュレーションを行う。また、実際の火災においてよく観察されている粒径の大きい火の粉(1cm ぐらい)を対象しているため、火の粉飛散モデルはラグランジュ式を用いる。下にその概要を示す。

### 3.1 計算条件

図 2 に計算領域を示す。領域は火の粉の飛散の測定を行うため市街地下流方向に距離を長くとり、 $X \times Y \times Z = 510\text{m} \times 110\text{m} \times 200\text{m}$  とした。建物の大きさは  $10\text{m} \times 10\text{m} \times 10\text{m}$  の立方体とし、建物間隔も  $10\text{m}$  とした。境界条件は表 2 に示す。

計算ケースは燃焼面からの発熱量が  $1.6\text{MW}/\text{m}^2$ <sup>3)</sup> になるように燃焼面から可燃性ガス(プロパン)を発生させた。流入風速は 1998 年に起きた和歌山県白浜温泉の大火の調査<sup>1)</sup>を参考に高さ  $10\text{m}$  において  $5\text{m}/\text{s}$  と  $10\text{m}/\text{s}$  とし、 $1/4$  乗則に従う市街地風のプロファイルを与えている。燃焼面は屋上面、風下側の側面、全焼の三つの場合を想定した。表 3 に示す。

火の粉は複雑な形状(球状、棒状、板状など)をしており、また種類も様々であり、すべての形状に関して揚力および抗力の形状を評価することは非常に難しい。そこで、本研究では火の粉は球状であると仮定し、火の粉の飛散を計算する際の直径についてはストークス径で代表させた。ストークス径の決定は文 17)を参考し、以下のように行った。直径  $1\text{cm}$  程度の火の粉が最も多く発生する<sup>18)</sup>ことから火の粉は相当直径  $1\text{cm}$ 、ストークス径相当直径比が  $0.2 \sim 0.7$  の場合のケースの計算を行う。発生位置から、ストークス径相当直径比が  $0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6$  と  $0.7$  の火の粉を同じ発生割合で発生させた。火の粉の発生位置は燃焼面の  $1\text{m}$  上方より水平方向に  $1\text{m}$  間隔で格子状の点から発生するとする。初速は燃焼面に対して鉛直方向に  $5\text{m}/\text{s}$  と設定した。

### 3.2 計算結果

#### (a) 風速・風向および温度分布

中心断面における鉛直方向の風速・風向および温度(単位:K)分布を図 3 と図 4 に示す。図中に示した矢印は火災により生じるプルームであり、屋根面火災の場合の方が側壁火災の場合

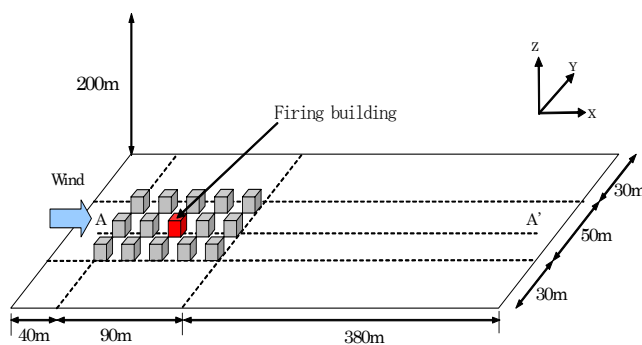


Fig. 2 Analysis domain

Table 2 Boundary conditions

Inlet	$U=U_D(z/10)^{1/4}$ , $T=293\text{ (K)}$ $\epsilon(z)=C_\mu^{3/4}k(z)^{3/2}/l(z)$ $l(z)=(4C_\mu k(z))^{1/2}D^{1/4}z^{3/4}/U_D^{3/4}$ $k$ : Experimental data <sup>16)</sup>
Outlet	Free flow
Wall	Generalized log law
Burning face	Vertical velocity of propane is $0.018\text{m}/\text{s}$

Table 3 Simulation cases

	Inflow velocity (Height 10m) (m/s)	Burning face
CASE1	5m/s	roof
CASE2		Leeward side wall
CASE3		All sides
CASE4	10m/s	roof
CASE5		Leeward side wall
CASE6		All sides

合よりブルームからの上昇流の影響は大きくなった。また、建物が全焼するケースにおいては、風速が 5m/s の場合のケースにおいても 10m/s のケースにおいても非常に大きな上昇流を示す結果になった。火炎ブルームからの上昇流に伴う巻き込み流に関して、風速が強い場合は弱くなった。燃焼部位別に分類すると、全焼の場合が最も強く、屋根面火災の場合の方が側壁火災よりも強くなった。側壁燃焼の場合には建物間での上昇気流は強く見られるが、上空に対する影響は少ない結果になった。また、風速が比較的速い場合は、上昇気流が抑制され、火炎の傾きが大きく、隣棟への延焼危険性が高くなる。

(b) 火の粉飛散結果

火の粉の飛散結果を図 5 に示す。どのケースにおいても非常に広範囲にわたって影響を与える結果となった。屋上面の火災の場合にはすぐ近くに落下するものと、100m 程度飛散するものと 400m 以上飛散するものに分類することができる。風速は 5m/s の時 (CASE1)、ストークス径が 0.2cm の火の粉は 400m 以上飛散し、0.3cm の火の粉は 100m 程度飛散する火の粉が多かった。ストークス径が 0.4cm 以上の火の粉に関してはほとんどが隣接する建物に落下する結果になった。風速は 10m/s の時 (CASE4)、ストークス径が 0.2cm の火の粉の一部は 400m 以上飛散したが、0.3cm 以上の火の粉のほとんどは隣接建物に落下した。CASE4 では、CASE1 に

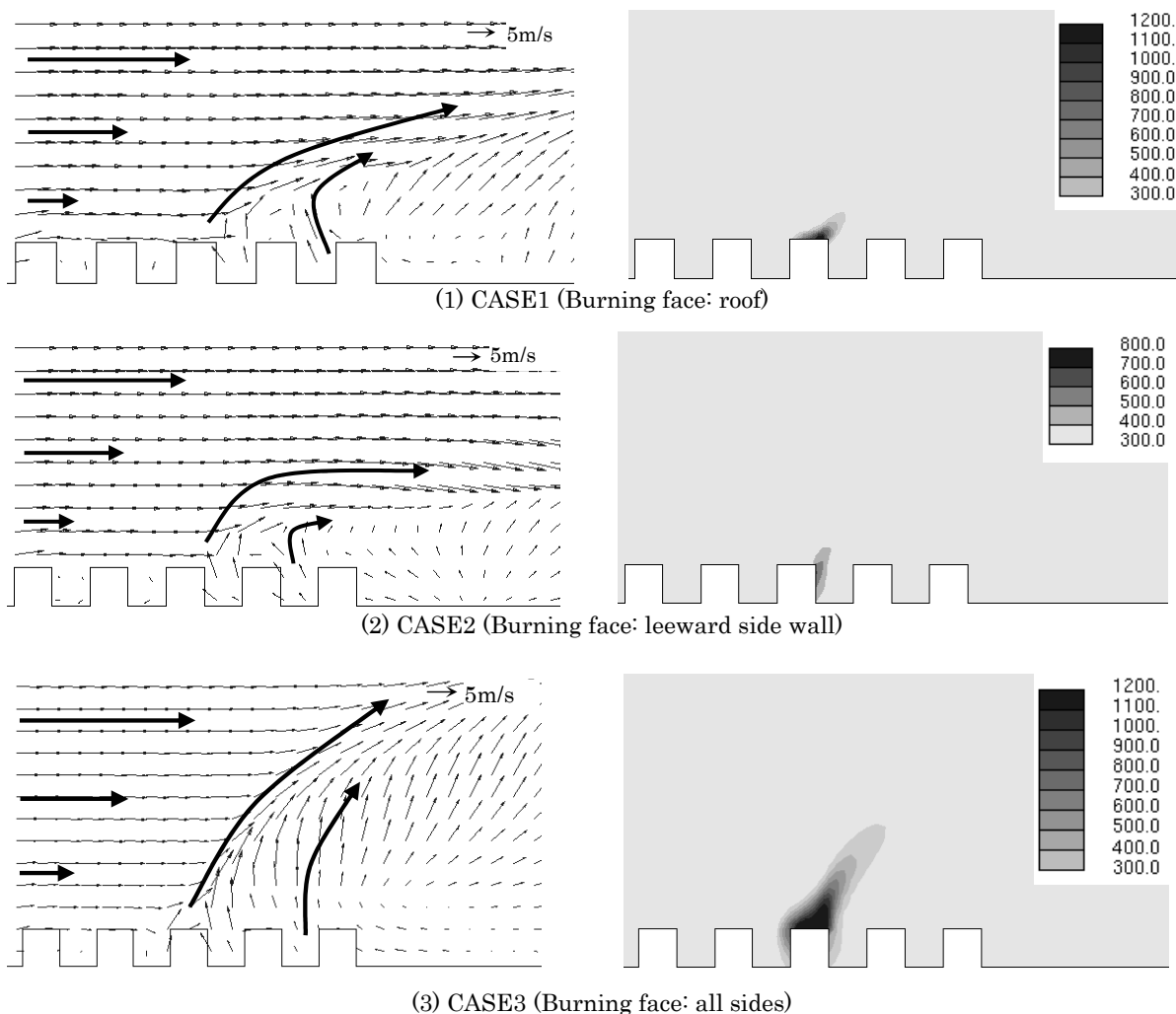


Fig. 3 Vertical wind and temperature distribution (Section A-A', Inflow velocity: 5m/s)

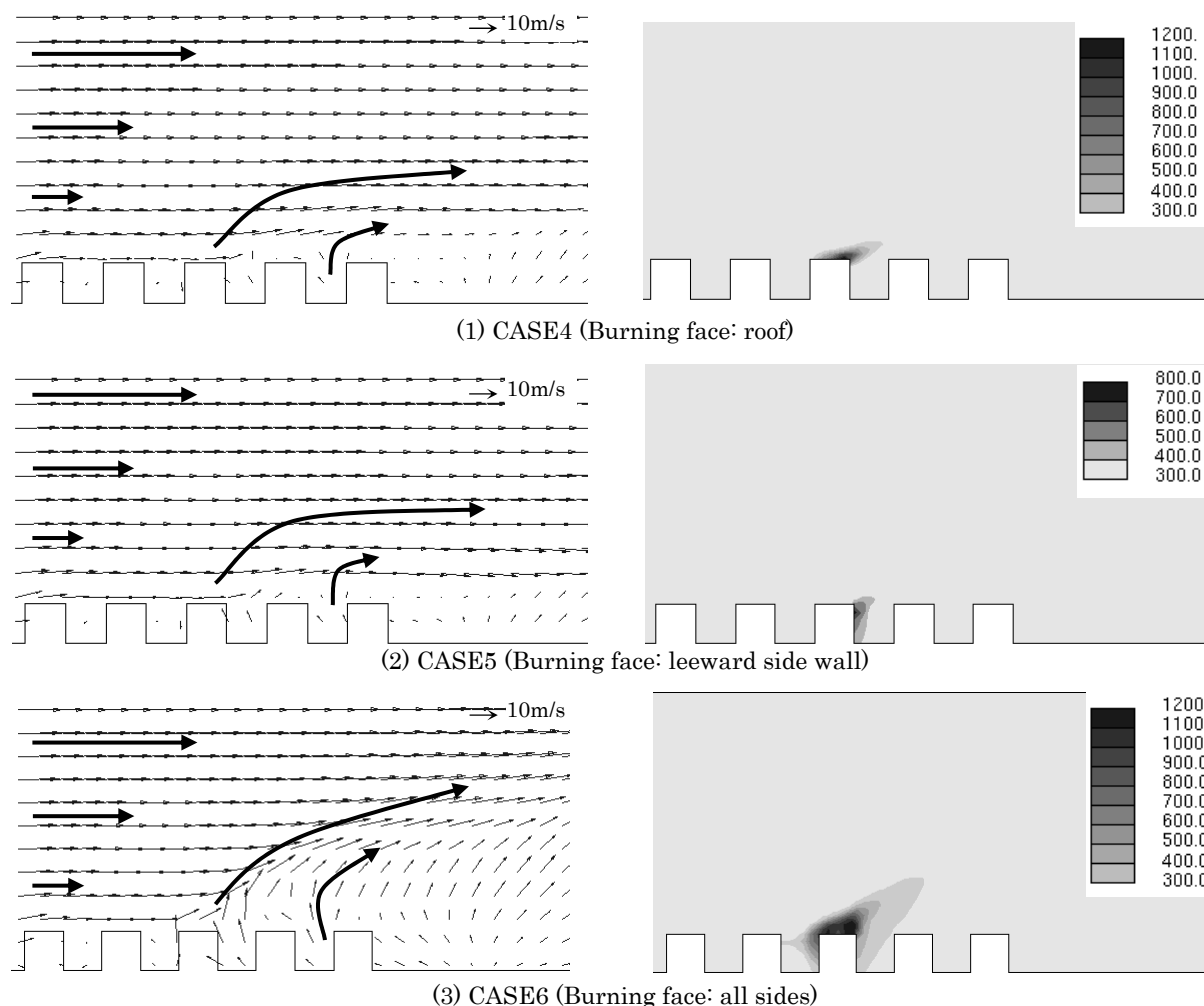


Fig. 4 Vertical wind and temperature distribution (Section A-A', Inflow velocity: 10m/s)

比べて風速が強くなったため、上昇流が抑制され、飛散距離は全ての種類の火の粉に関して短くなった。

側壁面の火災の場合には、300m以内の領域に幅広く火の粉が落下した。風速は 5m/s の時 (CASE1)、300m 以内の領域にまんべんなく火の粉が落下する結果になった。ストークス径が 0.2cm の火の粉は 200m程度、0.3cm の火の粉も 100m程度、0.4cm の火の粉は 50m 程度飛散した。ストークス径が 0.5cm 以上の火の粉に関してはほとんどが隣接する建物に落下する結果になった。風速は 10m/s の時 (CASE4)、150m 以内の領域にまんべんなく火の粉が落下する結果になった。ストークス径が 0.2cm の火の粉は 150m程度飛散し、0.3cm の火の粉も 80m 程度飛散した。ストークス径が 0.4cm 以上の火の粉に関してはほとんどが隣接する建物に落下する結果になった。CASE5 では、流入風の弱い CASE2 に比べると燃焼面付近の上昇気流が弱かったために、火の粉の飛散距離は全体的に短くなった。

全焼のケースの場合には、非常に強い上昇流が起きるので、全ての大きさの火の粉が 100 m以上飛散する結果になった。CASE6(風速 10m/s)はCASE3(風速 5m/s)に比べて、ストークス径の大きな火の粉は飛散距離が伸びる結果になった。これは、風速が強まったことにより上昇流が CASE3 に比べて多少弱まったが、火の粉が上昇流によって、上空に巻き上げられ、上

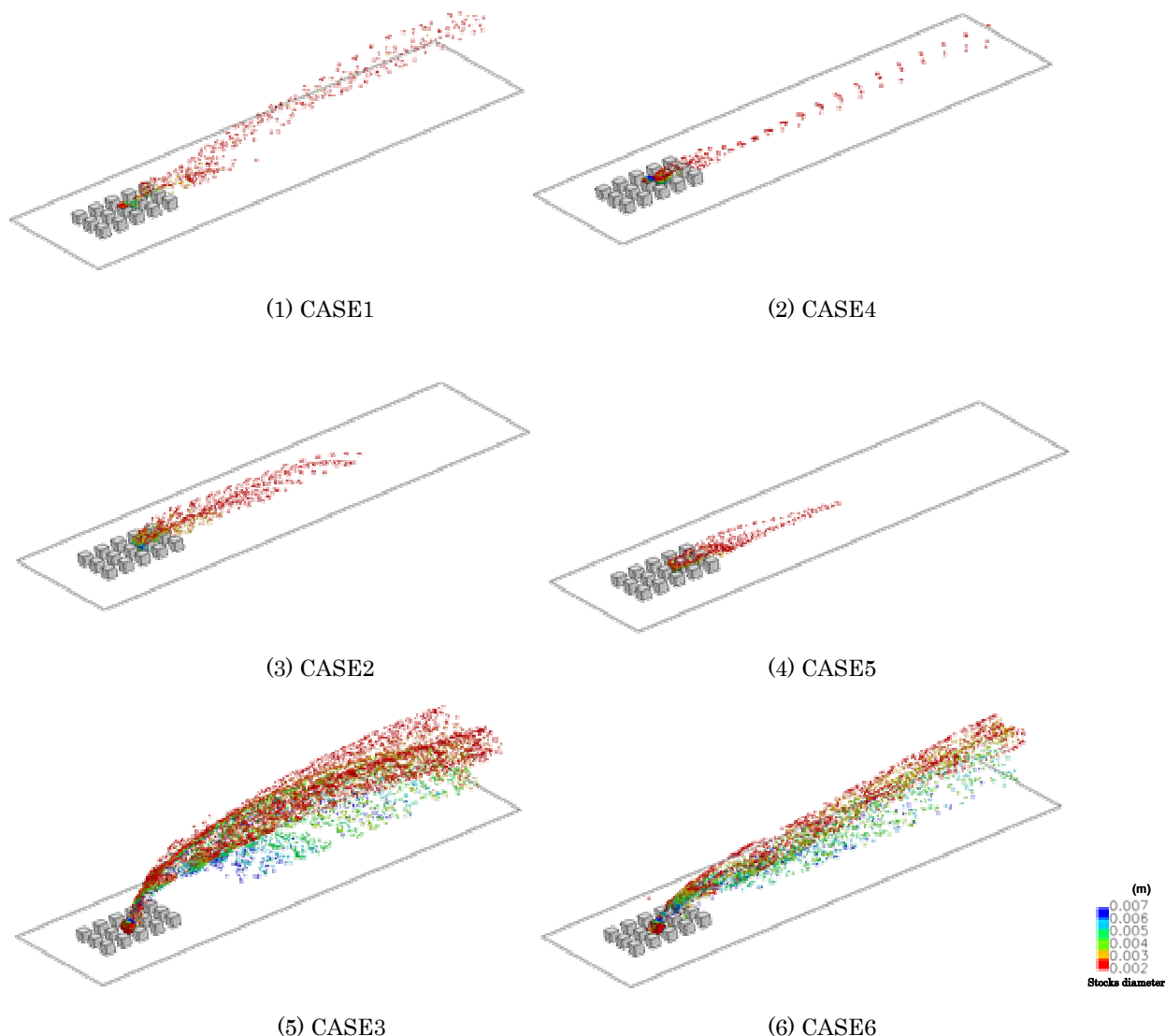


Fig. 5 Firebrands trajectories

空の市街地風に乗り、市街地風の風速が強まった分だけ飛散距離が増えたと考えられる。1998年に起きた和歌山県白浜温泉の大火では、直径1cmの火の粉が400m程度飛んだ記録があり<sup>1)</sup>、今回の計算は、燃焼の程度によっては、それと同等の結果を示すことができ、火の粉の飛散による広範囲の延焼の危険性があることを表現することができた。

## 6. まとめ

市街地火災予測モデルおよび火の粉性状実験のデータを用いてモデル街区における市街地火災シミュレーションを行い、火の粉の飛散性状の評価を行った。火の粉は400m以上の広範囲に渡って飛散することができ、1998年に起きた和歌山県白浜温泉の大火の記録と同等の結果を示すことができた。また、火の粉が火炎プルームによる上昇流によって巻き上げられ、市街地風に乗るかによって飛散距離が決めることを示唆した。また、火の粉の燃焼の取り扱いや放射モデルへの影響などは今後の課題である。



## 記号

$A_d$	火の粉の断面積(m <sup>2</sup> )
$C_d$	抗力係数
$C_p$	定圧比熱 (J/kg/K)
$C_\mu$	k-ε モデル定数
$C_{ei}$	k-ε モデル定数
$d_p$	火の粉の直径 (m)
$D_n$	分子拡散係数 (m <sup>2</sup> /s)
$\bar{f}$	変数 $f$ のアンサンブル平均値
$\tilde{f}$	変数 $f$ のファブル平均値
$\bar{F}_{dr}$	抗力 (N)
$\vec{F}_p$	圧力勾配による力 (N)
$\vec{F}_g$	重力 (N)
$f_v$	すすの体積分率
$h$	エンタルピー (J/kg)
$h_{0,n}$	標準生成エンタルピー (J/kg)
$h_n$	成分 $n$ の生成エンタルピー (J/kg)
$I$	放射強度 (J/m <sup>2</sup> /s) または、乱流強度
$k$	乱流エネルギー(m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> )
$k_g$	ガス吸収係数
$k_s$	すす吸収係数
$l$	乱流スケール (m)
$L$	モデルスケール (m)
$m_p$	火の粉の質量 (kg)
$M_n$	成分 $n$ の分子量
$P$	圧力 (Pa)
$Re_p$	火の粉のレイノルズ数
$s$	すすの転換率、または放射束がある方向に進行した距離 (m)
$S_R$	放射熱ソース (W/m <sup>3</sup> )
$t$	時間 (s)
$T$	温度 (K)
$u_p$	火の粉の瞬時速度 (m/s)
$u_i$	速度の 3 成分 (m/s) ( $u_1=U$ : X 方向速度, $u_2=V$ : Y 方向速度, $u_3=W$ : Z 方向速度)
$U_D$	代表風速 (m/s)
$V_d$	火の粉の体積 (m <sup>3</sup> )

$x_i$ : 空間座標の 3 成分

( $x_1=X$ , 主流方向、 $x_2=Y$ , 横方向、 $x_3=Z$ , 高さ方向、)

$Y_n$  成分  $n$  の質量分率

#### Greek symbols

$\sigma_h$  乱流 Prandtl 数

$\sigma_n$  乱流 Schmidt 数

$\sigma_k$   $k$ - $\epsilon$  モデル定数

$\sigma_\epsilon$   $k$ - $\epsilon$  モデル定数

$\lambda$  熱伝導係数 (W/m/K)

$\epsilon$  乱流散逸率 ( $m^2/s^3$ )

$w_n$  成分  $n$  の燃焼反応速度 ( $kg/m^3/s$ )

$\sigma$  Stefan-Boltzmann 定数  $5.67 \times 10^{-8}$  ( $W/m^2/K^4$ ) または、標準偏差

$\mu$  分子粘性係数 ( $kg/m/s$ )

$\mu_t$  乱流粘性係数 ( $kg/m/s$ )

$\rho_f$  空気密度 ( $kg/m^3$ )

$\rho_p$  火の粉の密度 ( $kg/m^3$ )

$\tau_{ij}$  応力テンソルの成分 ( $N/m^2$ )

#### 参考文献

- 1) 大宮喜文、岩見達也：建物火災に伴う火の粉の飛散と飛び火に関する実態調査、日本建築学会技術報告集、第 9 号、(1999)、133-136
- 2) 岩見達也、鍵屋浩司：稚内市街地火災調査報告、その 2、周辺の被害状況および火の粉の飛散状況、火災、52、(2002)、51-53
- 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、第 546 号、(2001)、187-192
- 4) 加藤信介、村上周三、義江龍一郎：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集、第 472 号、(1995)、45-54
- 5) 林吉彦、大宮喜文、岩見達也、笥雅行、後藤伸寿、佐賀武司：火の粉飛散範囲に関する数値シミュレーション、日本建築学会技術報告集、第 17 号、(2003)、203-208
- 6) Favre, A : Problems of Hydrodynamics and Continuum Mechanics, Soc. Indust. Appl. Mech., (1969), 231-266
- 7) EI Tahry, S. H. :  $k$ - $\epsilon$  Equation for Compressible Reciprocating Engine Flows, AIAA, J. Energy, 7, 4, (1983), 345-353
- 8) Magnussen, B. F. and Hjertager, H. : On Mathematical Modeling of Turbulent Combustion with Special Emphasis on Soot Formation and Combustion, in Proceedings of 16th Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh, (1976), 719-729

- 9) Morvan, D. and Dupuy, J. L. : Modeling of Fire Spread Through a Forest Fuel Bed Using a Multiphase Formation, *Combustion and Flame*, 127, (2001), 1981-1994
- 10) Novozhilov, V., Harvie, D. J. E, Kent, J. H., Apte, V. B. and Pearson, D. : A Computational Fluid Dynamics Study of Wood Fire Extinguishment by Water Sprinkler, *Fire Safety Journal*, 29, (1997), 259-282
- 11) McGrattan, K., Floyd, J., Forney, G., Baum, H. and Hostikka, S. : Development of Combustion and Radiation Models for Large Scale Fire Simulation, *The Third Technical Symposium on Computer Applications in Fire Protection Engineering*, (2001), 14-22
- 12) Yan, Z. H. and Holmstedt, G. : CFD and Experimental Studies of Room Fire Growth on Wall Lining Materials, *Fire Safety Journal*, 27, (1996), 201-238
- 13) Lockwood, F. C. and Shah, N. G. : A New Radiation Solution Method for Incorporation in General Combustion Prediction Procedures, *18th Symposium (International) on Combustion*, (1981), 1405-1414
- 14) Jia, F., Galea, E. R. and Patel, M. K., *The Numerical Simulation of Fire Spread Within a Compartment Using an Integrated Gas and Solid Phase Combustion Model*, *J. Applied Fire Sci.*, Vol.8(4), (1998), 327-352
- 15) 村上周三, 加藤信介, 永野紳一郎 : 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, (1989), 37-45
- 16) 村上周三, 持田灯, 林吉彦 :  $k-\epsilon$  モデルにおける建物風上の  $k$  の過大評価とモデルの改良, 第 10 回風工学シンポジウム論文報告集, (1988), 199-204
- 17) 大竹宏, 黄弘, 大岡龍三, 加藤信介, 林吉彦, 吉岡英樹 : 市街地火災における燃焼モデリングと火の粉の飛散性状の数値解析(その 3) 火の粉の流体力学的性状の測定, *日本建築学会大会学術講演梗概集 A-2*, (2004), 307-308
- 18) 吉岡英樹 : 有風下における火災家屋からの火の粉の発生性状に関する実スケール火災風洞実験, *東京大学修士論文*, (2002)