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**, 吉田伸治***, 村上周三**
Yasuyuki SHIRAISHI, Shinsuke KATO, Shinji YOSHIDA
and Shuzo MURAKAMI

The main driving forces for the propagation of urban fires are the thermal radiation from the fire and the leaping flames due to the drifting firebrands. In the present work, drifting firebrands in an urban fire are numerically simulated by means of CFD with a turbulence model. Firebrands are treated as airborne particles subject to sedimentation due to the gravity. Characteristics of brand drifting are investigated under various wind conditions, sedimentation speed and locations of a brand source. 1) When the approaching flow is relatively slow, the vertical thermal plume is raised by the fire and reaches up to around 100m height. In comparison, when the approaching flow is fast, the incoming flow acts to suppress the thermal plume. 2) The sedimentation fluxes over the downstream building roofs increase under high wind conditions, so the risk of the fire spreading increases on the leeward side of the fire. 3) Drifting patterns measured with the sedimentation fluxes over the downstream building roofs and so on, depend much on the effective diameter of brands. 4) When the upward plane of the building catches fire, the circulation flow in front of the burning surface suppresses thermal diffusion in the horizontal direction. In contrast, when the leeward plane of the building catches fire, the leeward circulation behind the building promotes horizontal thermal diffusion. The latter flow results in the reduction in the velocity of thermal plume. 5) When the roof or the leeward plane of the building catches fire, it developed into hot ascending flow patterns which promote the drifting of the firebrand.

Keywords : urban fire, drifting firebrands, CFD (Computational Fluid Dynamics)
都市火災、火の粉飛散、数値流体解析

1. 序

火の粉飛散(飛び火)現象¹⁾は、火災からの熱放射とともに都市火災拡大に影響を及ぼす重要な要素となる。多くの都市火災伝搬予測に関する研究が行われているが、それらは火災の伝搬過程や延焼速度を過去の被災記録からの統計解析に基づいた延焼モデルによりマクロ的に予測するものや^{2)~5)}、3次元的な火災気流の温度性状を簡略化した物理モデルと次元解析により予測するというものである^{6),7)}。従って、それらは火災の拡大に大きな影響を持つ火災域の風性状等の実際の物理現象を解析して予測するというものではない。筆者らは既往の研究において CFD を用いて都市のミクロな風の流れを実際に解析し、都市の気流分布、温度分布等から都市火災伝搬シミュレーションを行ってきた^{8),9)}。

本報では、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¹⁰⁾を作成し、建物周辺の風の流れを再現する CFD 解析と火の粉飛散を連成させて都市火災伝搬を解析しようとするものである。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、こうした検討の第1段階として、比較的小粒径(1mm から 5mm の径)

の火の粉に着目し、これらの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¹⁰⁾、その風による移流・拡散性状を CFD を用いて検討する。今回の CFD 解析と実際の都市火災における火の粉飛散による飛び火現象との対応は、今回検討対象とする比較的小粒径の火の粉が実際の飛び火現象の中で、どの程度発生し火災の延焼にどの程度影響を与えるか 等の火の粉の発生及び飛散現象のモデリング、並びに火の粉の発生位置、火源のモデリング等の様々なモデリングの実現象との対応による。また、火の粉が飛散した後に離れた場所に沈着し、火災が起きるという現象を数値シミュレーションにより再現しようとした場合、火の粉が飛散した後に沈着するまでに火の粉がどの程度の温度低下を伴うかを解明する必要もある。これらのモデリングや検討は実現象の詳細な観測 等から行われるものと考えられるが、本報はその検討を行うものではない。今後の重要な検討課題であると認識している。尚、本報で採用した火の粉の飛散モデルは、室内の浮力流れ場における浮遊微粒子の移流・拡散現象の解析において、解析対象、用いた乱流モデル等の差異はあるが、詳細にその予測精度を検証している¹⁰⁾。

2. 解析概要

街区スケールでの火災を想定し、流れ場、温度場の CFD 解析及び火の粉の拡散シミュレーションを連成させて解析を行う。

* 東京大学生産技術研究所 助手・工修
** 東京大学生産技術研究所 教授・工博
*** 東京大学生産技術研究所 博士研究員・工博

Research Assoc., Institute of Industrial Science, Univ. of Tokyo, M. Eng.
Prof., Institute of Industrial Science, Univ. of Tokyo, Dr. Eng.
Postdoctoral Research Fellow, Institute of Industrial Science, Univ. of Tokyo, Dr. Eng.

図1 解析対象

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。解析領域は $14.5D(X_1) \times 6D(X_2) \times 10D(X_3)$ であり、建物高さ D は本計算では 10m とした。建物の幅、奥行きも同様に 10m である。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 方向の中心に位置するものと想定している。

2-2. CFD シミュレーション 本解析では、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³⁾。乱流モデルとしては、乱流熱フラックスの評価に浮力効果を組み込んだ改良型 $k-\epsilon$ モデル¹¹⁾に、更に建物風上側での乱流エネルギー k の過大生産を抑制する改良 Launder-Kato モデル^{12), 13)}を適用し、街区スケールでの流れ場、温度場等を解析する。これらの乱流モデルの適用に関しては、風洞実験データとの比較により、その予測精度を確認している^{11), 13)}。

2-3. 火の粉の拡散シミュレーション 本計算では、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^3 の輸送方程式において、重力沈降^(1)式, 文14)による移流効果を組み込んで^(2)式, 文10, 注4)。

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：

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

火の粉の気中濃度輸送方程式：

$$\frac{\partial \bar{C}}{\partial t} + u_i \frac{\partial \bar{C}}{\partial x_i} - W \frac{\partial \bar{C}}{\partial x_3} = - \frac{\partial}{\partial x_i} \overline{u_i' C'} + C_0 \quad (2)$$

火の粉の乱流濃度フラックス：

$$\overline{u_i' C'} = - \frac{v_t}{\sigma_c} \frac{\partial \bar{C}}{\partial x_i} \quad (3)$$

- C : 火の粉の気中濃度[個/ m^3]
 u_i : i 方向の速度成分[m/s]
 W : 火の粉の重力沈降速度[m/s]
 $\overline{u_i' C'}$: 火の粉の乱流濃度フラックス[個/ $m^2 \cdot s$]
 C_0 : 単位体積あたりの火の粉の発生量[個/ $m^3 \cdot s$]

表1 計算ケース

	火災発生面	接近流速 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	$u_1(x_3)/U_D = (x_3/D)^{1/4}$, $u_2(x_3)=0$, $u_3(x_3)=0$, $\epsilon(x_3) = C_\mu k(x_3)^{3/2}/l(x_3)$, $l(x_3) = 4(C_\mu k(x_3))^{1/2} D^{1/4} \cdot x_3^{3/4}/U_D$, k は風洞実験値 ¹⁶⁾ , 温度は 300K, $U_D = u_1(D)$
流出面	全て free slip
上空面	全て free slip
側面	$u_2=0$, その他全て free slip
地表面および建物表面	速度は一般化対数則。温度は火災発生面で熱流束 $q_w = 1.6 \text{ MW/m}^2 \times 15)$ 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拡散フラックスを 0。地表面、建物上面において堆積する火の粉は、地表面及び建物上面の沈着フラックス WC 個/ $m^2 \cdot s$ により気中から除去されるものとして解析する。

(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], C_μ : モデル定数(=0.09))

表3 計算条件

格子分割は $60(X_1) \times 31(X_2) \times 29(X_3) = 53,940$ メッシュ。非定常計算により定常解を求めている。解法は SIMPLE 法。離散スキームは移流項に 1 次風上、その他を 2 次中心差分、時間は全てクランク-ニコルソン。

- ν_t : 渦動粘性係数 [m^2/s]
 σ_c : 乱流シュミット数(=1.0)
 ρ_p : 火の粉の密度 [kg/m^3]
 ρ : 空気の密度 [kg/m^3]
 r : 火の粉の相当直径[m]
 g : 重力加速度(=9.8 m/s^2)
(オーバーバーはアンサンブル平均値を示す。)

2-4. 計算ケース 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 U_D)、②火の粉の相当直径(重力沈降速度 W)、③火災発生位置(火の粉発生位置)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 kg/m^3 と仮定し、相当直径 1mm および 5mm の火の粉の重力沈降速度を(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。

2-5. 計算条件 火災による発熱は、建物の火災発生面で熱流束 1.6 $MW/m^2 \times 15)$ を与え、火災ブリューム中では発熱させていない。

火の粉の発生は建物火災発生面から生じる火災ブリューム上部を仮定する。今回の検討では、火災発生建物上面より高さ 8m、 X_2 方

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

図6 鉛直面の火の粉の濃度分布 $[CU_D^2/q]$ 及び沈着フラックス $[WCD^2/q]$ (無次元表示, $U_D=2\text{ m/s}$) 図7 鉛直面の火の粉の濃度分布 $[CU_D^2/q]$ 及び沈着フラックス $[WCD^2/q]$ (無次元表示, $U_D=5\text{ m/s}$)

向の中心位置で、最も温度の高いセルとしている。従って、CaseA-1～3とCaseA-4～6とCaseB-1とCaseC-1では、災発生位置が異なっており、当然各々流れ場及び温度場が異なるため、火の粉の発生位置も主流方向に若干異なることになる。解析は定常状態を対象としているため、最終的には火の粉の発生量は移流及び拡散により解析領域から排出される量と建物表面及び地表面から除去される量の和と等しくなり、質量保存則を満足する。また、火の粉沈着後の再飛散は考慮されない。

接近流の鉛直方向分布はベキ指数分布を仮定し、高さ D での接近流速 U_D を境界条件として与えている。境界条件およびその他の計算条件の詳細は表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、建物高さ D と接近流速 U_D および火の粉の発生量 q 個/s ($=C_0V=700$) を用い、無次元化して示す。但し、本計算では単位体積あたりの火の粉の発生量 C_0 は $100\text{ 個}/\text{m}^3\cdot\text{s}^{1/3}$ 、火の粉発生セルの体積 V は 7 m^3 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/ m^3 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. 接近流速の影響 図2、図3にCaseA-1の、図4、図5にCaseA-4の鉛直面風速ベクトルおよび温度分布をそれぞれ示す。以下に示す図の X_1 方向の表示範囲は全て $4.5D \leq X_1 \leq 14.5D$ (図1参照) である。また、鉛直断面図は全て $X_2=3D$ の地点のものである。CaseA-1(図2)では接近流速 U_D 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

図8 火災発生建物周辺の平面図

図9 建物上面の火の粉の沈着量 $[WC_{AVE}D^2/q \times 100]$

図10 鉛直面風速ベクトル

図11 水平面温度分布 (高さ 25 m)

図12 鉛直面の火の粉の濃度分布 $[CU_D D^2/q]$ (無次元表示, $U_D=2$ m/s)

図13 鉛直面風速ベクトル

図14 水平面温度分布 (高さ 25 m)

図15 鉛直面の火の粉の濃度分布 $[CU_D D^2/q]$ (無次元表示, $U_D=2$ m/s)

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おり、火災の傾きによる輻射熱や火の粉飛散による風下側に隣接する建物への延焼危険性が高くなる。

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 (註6)も図中に示す。強風時においては(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り、そのピーク値も風下側へ移行する。従って、強風時においては風下側に隣

接する建物への延焼危険性が高くなると考えられる。

図8に火災発生建物周辺の平面図を、図9に CaseA-2, A-3 及び CaseA-5, A-6 の建物上面の火の粉の沈着量 $WC_{AVE}D^2/q \times 100$ (註7) %を示す。ここで、 C_{AVE} は各建物上面第1セルにおける火の粉の濃度 C の平均値を示す。また、図9の横軸の項目名は図8に対応する。図8に示すように今回の計算条件下では、 X_2 方向に1列目及び3列目の建物上面への火の粉の飛散は殆どなく、沈着量としては X_2 方向に2列目の建物上面への沈着量に対して最大で 10^{-4} 程度のオーダーであった。また図9に示すように接近流速が速いほど風下側の建物上面への沈着量は多くなる結果となった(CaseA-2, A-3 と CaseA-5, A-6 の比較)。

3-2. 火の粉の重力沈降速度(相当直径)の影響 重力沈降速度 $W/U_D=0$ の場合(図6,7の左図)、火の粉は熱上昇流及び接近流によりパッシブに輸送され、建物及び地表面まで達しない。

図 16 建物上面の火の粉の沈着量 $[WC_{AVE}D^2/q \times 100]$

火の粉の相当直径が 1mm 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小さくなる。火災発生建物より風下側 1 つ目の建物上面(面②)には、単位時間あたりの火の粉発生量の 5%(CaseA-2)、30%(CaseA-5)がそれぞれ沈着している(図 9 参照)。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、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)まで約 20~30%(CaseA-5)という高い割合で火の粉が到達しており(図 9 参照)、これらの建物では延焼危険性が高いと考えられる。

火の粉の相当直径が 5mm 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。図 9 に示すように低風速の場合(CaseA-3)、火の粉発生量の約 20%が、強風の場合(CaseA-6)、約 50%が、風下側 1 つ目の建物上面(面②)に堆積している。ただし、両ケースのこの沈着量の差は、CaseA-3(図 6 の右図)と CaseA-6(図 7 の右図)を比較すると接近流速の差よりも、火の粉の発生位置の微妙な差(CaseA-6 の方が流れ場の違いにより発生位置が若干風下側に位置している)が最も影響しているものと考えられる。また、両ケースとも建物 2 以降は火の粉が殆ど堆積していない。

図 9 に示すように全体的な傾向としては、重力沈降速度が速いほど(火の粉の相当直径が大きいほど)、風下側の建物上面への火の粉の沈着量が多くなる(CaseA-2, A-5 と CaseA-3, A-6 の比較)。

3-3. 火災発生位置の影響 CaseB-1 および CaseC-1 の鉛直面風速ベクトル、水平面温度分布、鉛直面の火の粉の無次元濃度分布を図 10 から図 15 にそれぞれ示す。また図 16 に CaseA-2、CaseB-1、CaseC-1 の建物上面の火の粉の沈着量 $WC_{AVE}D^2/q \times 100\%$ を示す。

CaseB-1(図 10)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 13)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 14)の場合、CaseB-1(図 11)と比較すると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 17 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

図 17 火災発生建物近傍の水平面気流パターン

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、図 13 に示されるように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。

火の粉の飛散に関しては、流れ場の影響を受け、CaseB-1(図 12)では上空への飛散量が多いため風下側の建物上面への沈着フラックスは、CaseC-1(図 15)と比較して若干小さい。図 16 に示すように建物上面への沈着量も数%ではあるが、CaseB-1 の方が少ない。CaseA-2(図 6 の中図, 図 9)においては、建物上面への沈着量は、更に少ない。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、直上への火の粉飛散を助長することになり、風下側に隣接する建物上面での沈着フラックスが小さくなる。また、火災発生面の位置が、熱上昇流等の流れ場の性状に大きく影響を与え、最終的には火の粉飛散に影響を与える重要な要因になると考えられる。

4. 結論

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 解析と連成させて直径 1mm から 5mm 程度の火の粉飛散の数値解析を行い、以下の知見を得た。

- 1) 接近流速が比較的低速の場合、浮力が卓越し、熱上昇流が上空 100 m 以上まで形成されるが、強風の場合、接近流が卓越し、熱上昇流が抑制される。
- 2) 強風時においては、火の粉の高濃度領域が風下側へ形成され、風下側に隣接する建物上面への火の粉の沈着フラックス及び沈着量ともに多くなる。
- 3) 重力沈降速度が速いほど(火の粉の相当直径が大きいほど)、火災発生建物の風下側に隣接する建物上面への火の粉の沈着量が多くなり、結果的に更に風下側に位置する建物上面への沈着量は少なくなる。
- 4) 建物の風上側鉛直面に火災発生面がある場合、火災発生面前方に生じる循環流が収束流を形成し、水平方向の熱拡散を抑制する。一方、風下側鉛直面に火災発生面がある場合は循環流が発散流を形成し、水平方向の熱拡散を促進し、結果的に接近流速が同じ他

のケースと比較して熱上昇流が抑制される。

- 5) 火災発生面が建物の上面および風上側にある場合には、火災による熱上昇流が発達し、上空への火の粉飛散を助長することになり、結果的に風下側に隣接する建物上面での火の粉の沈着量は少なくなる。

本報で示した火の粉飛散のシミュレーション結果と実現象との対応に関しては、今後検討が必要であることは言を待たない。但し、今回の解析で検討対象とした直径 1mm から 5mm の火の粉の飛散モデルは、浮遊微粒子の移流・拡散現象の解析において、既に十分検討が行われている^{5) 10)}。今回検討対象とした径以外の火の粉がどの程度発生するか等発生と飛散現象のモデリング、火の粉の発生位置、火源のモデリング、火災現象の非定常性等に関して、今後更なる検討が必要と考えられる。

注

- [1] 飛び火現象は、①火源から発生した火の粉が飛散する現象と②火の粉が飛散した後に離れた場所に沈着し火災が起きるという現象の双方を意味する。
- [2] ここで、飛び火現象の物理モデルとは、火源から発生した火の粉の飛散をモデル化したものであり、火の粉が飛散した後に離れた場所に沈着し、火災が起きるという現象を取り扱うものではない。ただし、本モデルは火の粉の飛散から沈着までをモデル化しており、火の粉の沈着量に基づいて簡易的に火災発生の危険性を予測することは可能である。
- [3] 火災時のように温度差の大きい流れ場の解析において Boussinesq 近似に基づく基礎方程式を用いることは、本来不適切であると考えられる。しかし、実際に近似誤差生じるのは、火源近傍の温度勾配の大きい非常に限られた領域であるため、解析領域全体への Boussinesq 近似の与える影響は小さいと考えられる。この点の検討は今後の検討課題としたい。
- [4] 重力沈降を考慮する火の粉の物理モデルは、火の粉の終末沈降速度(火の粉の粒子に加わる外力が重力の場合のみ、その初速度のいかにかわらず重力と空気から受ける抵抗力が釣り合ったときの平均速度)を火の粉の濃度輸送方程式中で考慮するモデルであり、以下のような問題点が考えられる。①水平方向の抵抗力が考慮されていない(水平方向には流れに沿って輸送されるというバッシュスカラーを仮定)。②火の粉の初速度の影響が考慮されていない(火源近傍から発生した火の粉が既に終末速度に達しているものと仮定)。ただし、①および②の問題点は火の粉の相当直径が小さい場合すなわち終末沈降速度が流速と比較して十分小さい場合、例えば森林火災における火の粉飛散等の解析には、妥当な解法である。また、火の粉の一つ一つの挙動を解析するモデルと比較すると、火の粉を濃度として取り扱うため、汎用的な解法であるとも考えられる。
- [5] C_0 の値は一般に外部風速により影響を受けると考えられるが、本研究では火の粉飛散に関する定性的な検討に主眼を置いているため、ここでは全ての計算ケースにおいて一定とした。
- [6] 幅 D_m の矩形水平面に落下する火の粉の無次元沈着フラックス WCD^2/q は、単位時間あたりの火の粉発生量 q 個/s の内、フラックスを定義する矩形水平面 $D^2 m^2$ に沈降する火の粉の割合を示す。
- [7] 建物上面の火の粉の沈着量 $WC_{AVE}D^2/q \times 100 \%$ は、建物上面の火の粉の沈着量 $WC_{AVE}D^2$ 個/s を火の粉の発生量 q 個/s で基準化したものであり、単位時間あたりの火の粉発生量の内、各建物上面に沈着する火の粉の割合を示す。

参考文献

- [1] 糸井川栄一、塚越巧：飛び火を考慮した市街地火災の確率的延焼モデル、第 23 回日本都市計画学会学術研究論文集、pp.469-474、1988 年。
- [2] 糸井川栄一、塚越巧：市街地火災の延焼速度予測に関する研究、第 24 回日本都市計画学会学術研究論文集、pp.79-84、1988 年。
- [3] 矢野公一、松井武史、高井広行、坊池道昭、上村雄二：大規模震災火災の延焼シミュレーションに関する研究、土木学会土木計画学研究・講演集、No.19(2)、pp.39-42、1996 年。
- [4] 保野健治郎、難波義郎、西谷忠彦：地震時市街地火災の延焼速度式と予測に関する基礎的研究、日本建築学会計画系論文集、No.501、pp.9-15、1997 年。

11 月。

- [5] 難波義郎、保野健治郎：地震時市街地火災の延焼速度に関する基礎的研究、日本建築学会計画系論文集、No.520、pp.1-7、1999 年 6 月。
- [6] 佐賀武司：強風下における帯状熱源からの熱気流の風下温度分布、強風下の市街地大火における火災気流の温度分布に関する基礎的研究、日本建築学会構造系論文報告集、No.408、pp.99-110、1990 年 2 月。
- [7] 佐賀武司：強風下の市街地火災における火災気流に関する基礎的研究、面熱源の風下温度分布式に関する理論的考察、日本火災学会論文集、Vol.46、No.1・2、pp.1-11、1997 年。
- [8] 加藤信介、村上周三、石田義洋、大平昇：震災ビル火災時の周辺熱気流性状の CDF 解析、第 1 回都市直下地震災害総合シンポジウム、pp.271-274、1996 年。
- [9] 白石靖幸、村上周三、加藤信介、大岡龍三、金サンジン、森山正和：数値気候モデルを利用した神戸市大規模火災時の広域熱気流、拡散性状の解析、第 2 回都市直下地震災害総合シンポジウム、pp.411-414、1997 年。
- [10] 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、pp.37-45、1989 年。
- [11] 野口康仁、村上周三、持田灯、富永禎秀：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)、pp.65-66、1994 年。
- [12] B. E. Launder, M. Kato: Modeling Flow-Induced Oscillations in Turbulent Flow around A Square Cylinder, ASME Fluid Eng. Conference, pp.20-24, 1993.
- [13] 村上周三、持田灯、近藤宏二：改良 k-ε モデルによる 2 次元建物モデル周辺気流の数値計算、生産研究(東京大学生産技術研究所所報)、Vol.47、No.2、pp.29-33、1995 年。
- [14] 高橋幹二、改著基礎エアロゾル工学(第一版)、養賢堂、1982 年。
- [15] 横井鎮男(建築研究所)、建築研究報告、No.34、1960 年。
- [16] 村上周三、持田灯、林吉彦：k-ε 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、pp.199-204、1988 年。

(2000年11月8日原稿受理、2001年3月22日採用決定)