

# 有風下における市街地火災シミュレーション

## Simulation of Flames and Thermal Plume in Urban Fire Under Windy Condition

大竹 宏\*・黄 弘\*\*・大岡 龍三\*\*\*・加藤 信介\*\*・林 吉彦\*\*\*\*

Hiroshi OTAKE, Hong HUANG, Ryozo OOKA, Shinsuke KATO and Yoshihiko HAYASHI

### 1. はじめに

火災からの熱放射および熱対流は市街地火災事例を見ると、火災拡大の大きな要因となっている。そこで、本研究では実市街地モデルにも対応しうる市街地火災シミュレーションの開発を目的とし、CFDを用いた市街地火災の数値モデルの構築を行う。また、実験結果<sup>1)</sup>と比較を行うことによりその有用性の確認を行う。

### 2. 建物の火災延焼プロセス

#### 2.1 建物延焼により隣接建物に熱を与える要因

都市火災の拡大の要因は図2-1に示すように、火災からの放射や対流のほか、強風や火災からの上昇流による火の粉の飛散が考えられる。火の粉の発生や飛散のメカニズムに関してはほとんど研究がなされていないが、火の粉の飛散性状の解明のためには、まず、市街地の強風下における火災からの上昇流および放射の影響を正確に表現しなければ火の粉による延焼への影響を算出することはできない。そこで、今回の研究においては火災の上昇流および放射に関する数値モデル形成を行う。

#### 2.2 建物延焼プロセス

建物の延焼のプロセスは発火位置および建物の構造(RC造・防火造・準防火造など)によって異なるが、今回の計算では、防火造に関するケースを想定する。図2に火災成長のメカニズムを示す。防火造の場合、まず、室内で発火し、区画内での燃焼が進むにつれて屋根および外壁が崩壊

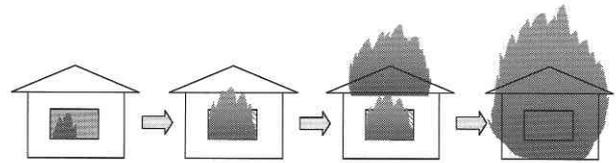


図2 建物延焼プロセス

し、屋根・外壁から火炎や熱気流が噴出する<sup>2)</sup>ケースが多い。つまり、屋上からの火炎および噴出火炎の影響の評価を行うことが、都市火災の熱気流および放射の影響を評価するためには必要になってくる。そこで、本研究では、屋上からの火炎、噴出火炎に焦点を絞って、数値シミュレーションモデルの構築を行う。

### 3. 都市火災数値モデル

#### 3.1 火災気流の計算

火災時の気流は激しい温度差に伴い、密度も大きく変化する。そのため、非圧縮の仮定(Boussinesq近似)を適用することはできず、圧縮性流体として取扱う必要がある。圧縮性流体に対する平均操作として、ファブル平均を用い、密度差の大きい乱流の基礎方程式(1)–(6)を得る。乱流モデルはTahry<sup>3)</sup>が提案したk-εモデルを用いている。表1にモデル係数値を示す。なお、(1)–(14)式の記号は慣用による<sup>4)</sup>。

$$\frac{\partial \bar{p}}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{\rho} \tilde{u}_j)}{\partial x_j} = 0 \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{\partial (\bar{\rho} \tilde{u}_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{u}_j) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\tau}_{ij} - \bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{u}_j) + \bar{\rho} g_i \dots\dots\dots (2)$$

$$\frac{\partial (\bar{\rho} \tilde{h})}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\rho} \tilde{u}_j \tilde{h}) = \frac{\partial \bar{p}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\lambda}{c} \frac{\partial \tilde{h}}{\partial x_j} - \bar{\rho} \tilde{u}_j \tilde{h} + \sum_{n=1}^N \tilde{h}_n \bar{\rho} D_n \frac{\partial \tilde{Y}_n}{\partial x_j} \right) - \tilde{u}_j \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_j} + \bar{\tau}_{ij} \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} + \bar{S}_R \dots\dots\dots (3)$$

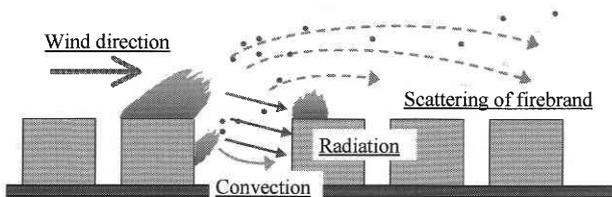


図1 市街地火災要因

\*東京大学大学院工学系研究科  
\*\*東京大学生産技術研究所 人間・社会部門  
\*\*\*東京大学生産技術研究所 都市基盤安全工学国際研究センター  
\*\*\*\*独立行政法人建築研究所

研 究 速 報

$$\frac{\partial(\bar{\rho}\tilde{Y}_n)}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{\rho}\tilde{u}_j\tilde{Y}_n)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j}(\bar{\rho}D_n\frac{\partial\tilde{Y}_n}{\partial x_j} - \bar{\rho}\tilde{u}_i\tilde{Y}_n) + \bar{w}_n \dots\dots\dots (4)$$

$$\frac{\partial(\bar{\rho}\tilde{k})}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{\rho}\tilde{u}_j\tilde{k})}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j}((\mu + \mu_t)\frac{\partial\tilde{k}}{\partial x_j}) + \mu_t(\frac{\partial\tilde{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial\tilde{u}_j}{\partial x_i})\frac{\partial\tilde{u}_i}{\partial x_j} - \frac{2}{3}(\mu_t\frac{\partial\tilde{u}_k}{\partial x_k} + \bar{\rho}\tilde{k})\frac{\partial\tilde{u}_i}{\partial x_i} - g_i\frac{\mu_t}{\sigma_{h,i}}\frac{1}{\bar{\rho}}\frac{\partial\bar{\rho}}{\partial x_i} - \bar{\rho}\varepsilon \dots\dots\dots (5)$$

$$\frac{\partial(\bar{\rho}\tilde{\varepsilon})}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{\rho}\tilde{u}_j\tilde{\varepsilon})}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j}((\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon})\frac{\partial\tilde{\varepsilon}}{\partial x_j}) + C_{\varepsilon 1}\frac{\tilde{\varepsilon}}{k}(\mu_t(\frac{\partial\tilde{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial\tilde{u}_j}{\partial x_i})\frac{\partial\tilde{u}_i}{\partial x_j} - \frac{2}{3}(\mu_t\frac{\partial\tilde{u}_k}{\partial x_k} + \bar{\rho}\tilde{k})\frac{\partial\tilde{u}_i}{\partial x_i}) - C_{\varepsilon 3}\max(g_i\frac{\mu_t}{\sigma_{h,i}}\frac{1}{\bar{\rho}}\frac{\partial\bar{\rho}}{\partial x_i}, 0) - C_{\varepsilon 2}\bar{\rho}\frac{\tilde{\varepsilon}^2}{k} + C_{\varepsilon 4}\bar{\rho}\tilde{\varepsilon}\frac{\partial\tilde{u}_i}{\partial x_i} \dots\dots\dots (6)$$

$$h = \sum_{n=1}^N Y_n h_n + \sum_{n=1}^N Y_n (h_{0,n} + \int_{T_0}^T c_{p,n} dT) \dots\dots\dots (7)$$

$$\bar{\rho} = \frac{\bar{p}}{R \sum_{n=1}^N (\frac{\tilde{T}Y_n}{M_n})} \dots\dots\dots (8)$$

$$\bar{\tau}_{ij} = \mu(\frac{\partial\tilde{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial\tilde{u}_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3}\frac{\partial\tilde{u}_k}{\partial x_k}\delta_{ij}) \dots\dots\dots (9)$$

$$\bar{\rho}\tilde{u}_i\tilde{u}_j = -\mu_t(\frac{\partial\tilde{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial\tilde{u}_j}{\partial x_i}) + \frac{2}{3}(\mu_t\frac{\partial\tilde{u}_k}{\partial x_k} + \bar{\rho}\tilde{k})\delta_{ij} \dots\dots\dots (10)$$

$$\bar{\rho}\tilde{u}_j\tilde{h} = -\frac{\mu_t}{\sigma_h}\frac{\partial\tilde{h}}{\partial x_j} \dots\dots\dots (11)$$

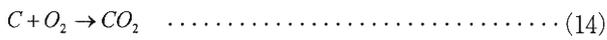
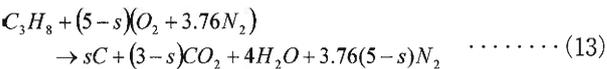
$$\bar{\rho}\tilde{u}_j\tilde{Y}_n = -\frac{\mu_t}{\sigma_n}\frac{\partial\tilde{Y}_n}{\partial x_j} \dots\dots\dots (12)$$

表 1 k-ε モデル係数

$\sigma_k$	$\sigma_\varepsilon$	$C_{\varepsilon 1}$	$C_{\varepsilon 2}$	$C_{\varepsilon 3}$	$C_{\varepsilon 4}$
1.0	1.22	1.44	1.92	1.44	-0.33

3.2 燃焼モデル

燃焼の際のすすの生成メカニズムは複雑であり、Magunussen<sup>5)</sup> などによりすす生成モデルが提唱されているが、今回の計算では Novozhilov<sup>6)</sup> による下式の化学式のようにプロパンの燃焼およびすすの生成が行われると仮定し計算を行う。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。だが、すべての燃焼を表現するのは非常に困難である。そこで、プロパン (C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>) のみ可燃性ガスとして発生するとして計算を行った。燃焼を考慮する際、プロパンは燃焼の際 s % (s = 0.02<sup>7)</sup>) のすすを生成すると仮定し、以下の化学式を考慮する。今回の計算では、すす粒子は気体であると仮定している。



式 (4) の物質 n の反応速度  $\bar{w}_n$  の変化を計算は Eddy break up モデルを導入する。都市火災は拡散火災と考えられるので、(12) および (13) の式によりプロパンおよびすすの時間平均反応率  $\bar{w}_{C_3H_8}$  および  $\bar{w}_c$  (kg/m<sup>3</sup>s) を算出する。A<sub>C<sub>3</sub>H<sub>8</sub></sub> および A<sub>c</sub> は経験定数 (= 4) である。

$$\bar{w}_{C_3H_8} = \frac{\bar{\rho}\tilde{\varepsilon}}{k} A_{C_3H_8} \min\left(\tilde{Y}_{C_3H_8}, \frac{\tilde{Y}_{O_2}}{i_{C_3H_8}} \left(\frac{\tilde{Y}_{C_3H_8} i_{C_3H_8}}{\tilde{Y}_{C_3H_8} i_{C_3H_8} + \tilde{Y}_c i_c}\right)\right) \dots\dots\dots (15)$$

$$\bar{w}_c = \frac{\bar{\rho}\tilde{\varepsilon}}{k} A_c \min\left(\tilde{Y}_c, \frac{\tilde{Y}_{O_2}}{i_c} \left(\frac{\tilde{Y}_c i_c}{\tilde{Y}_{C_3H_8} i_{C_3H_8} + \tilde{Y}_c i_c}\right)\right) \dots\dots\dots (16)$$

3.3 火炎からの放射

(17) 式によりガス放射および煤放射の計算を行う。気体およびすすの吸収係数 k<sub>g</sub> および k<sub>s</sub> は (18), (19) 式から求める<sup>8)</sup>。すすは非常に小さい粒子なので、散乱は省略する。ここで f<sub>v</sub> はすすの体積分率である

$$\frac{dl}{ds} = -(k_g + k_s)l + \frac{\sigma}{\pi}(k_g + k_s)T^4 \dots\dots\dots (17)$$

$$k_g = 0.32 + 0.28 \exp\left(-\frac{T}{1135}\right) \dots\dots\dots (18)$$

$$k_s = 1264 f_v \dots\dots\dots (19)$$

4. 屋上面燃焼の数値シミュレーション

4.1 比較手法

強風時における市街地火災を想定した火災シミュレーションの正当性の確認を行うため、3.1-3.3 において提案した計算モデルを用いた計算結果と林ら<sup>1)</sup> によっておこなわれた火災風洞実験結果の比較を行う。

4.2 実験および計算条件の無次元化

今回の計算では、純粋に計算モデルの適合性の確認を行うため、実測と同じスケールにおいて計算を行った。比較対象として、実市街区において地上 10 m の平均風速は 5 m/s, 10 m/s の 2 ケースを想定、発熱速度は現実の都市火災において木造家屋が一棟炎上すると、およそ 1.5 MW/m<sup>2</sup> であることから 1.5 MW/m<sup>2</sup> とこれより多少小さい値として 0.83 MW/m<sup>2</sup> を想定する。この数値を (20) 式を用いて無次元化した数値を用いて実験と計算結果の比較を行う。但し、モデルのスケールは実スケールの約 1/25 とした。また、(20) 式において L は長さ (m), U は風速

表2 計算ケース

	Wind velocity (m/s)	Heat release rate (kW)
Case1	1	15
Case2	2	15
Case3	1	26
Case4	2	26

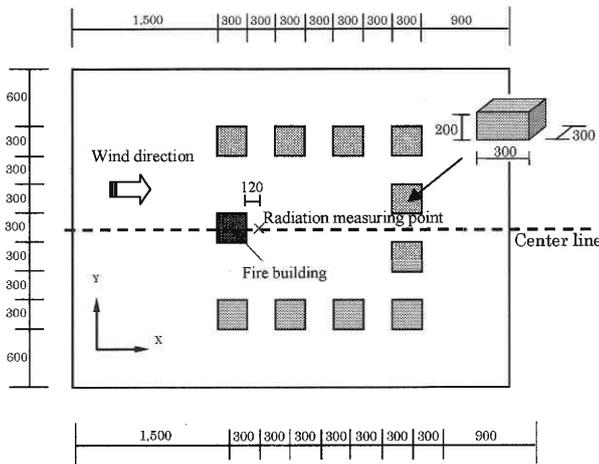


図3 計算領域

(m/s),  $Q$  は発熱量 (kW) を表す. 表2に比較対象となる4ケースを示す.

$$\frac{L_{real}}{L_{model}} = \left(\frac{U_{real}}{U_{model}}\right)^2 = \left(\frac{Q_{real}}{Q_{model}}\right)^{2/5} \dots\dots\dots (20)$$

4.3 計算条件

基本的には実験と同じ条件で計算が行えるように解析領域および境界条件の設定を行った. 解析領域は  $X = 4.5\text{ m}$ ,  $Y = 3.3\text{ m}$ ,  $Z = 3.0$  とし, 燃焼建物および周辺建物の大きさは  $0.3\text{ m} \times 0.3\text{ m} \times 0.2\text{ m}$  の直方体とした. 実測では今回の計算より多く, 縦6列の建物ブロックを配置していたが, 一番外側の建物ブロックは燃焼面にあまり影響を及ぼさないと考えられるので, 計算負荷低減のため省略し, 火災風洞実験よりも小さい領域を設定した. 図2に解析領域を示す.

火炎気流のCFD計算では, 移流項差分スキームは一次精度風上差分(圧力項に関しては中心差分), 計算アルゴリズムは simple 法を用い, 定常計算を行った. 境界条件は表3に示す. 流入条件における乱流強度に関しては風洞実験の数値を参考にした. 風速は市街地風を再現するため, べき級数分布を仮定し, 高さ  $D (= 0.4\text{ m})$  における風速  $U_D$  は表2における設定風速に等しいとする.

火炎からの放射量は中心軸上で, 火炎発生面から X 方

表3 境界条件

Inlet	$U = U_D(z/D)^{1/3}, V=0, W=0, T=293(K) \quad k=1.5I^2 U^2$ $f=0.2-0.1z \quad (0 \leq z < 1.8) \quad f=0.02 \quad (z \geq 1.8)$ $\epsilon(z) = C_\mu^{3/4} k(z)^{3/2} / l(z)$ $l(z) = (4 C_\mu k(z))^{1/2} D^{1/4} z^{3/4} U_D$
Outlet	Free flow
Upper	Free slip
Lateral	Free slip
Solid wall	Velocity boundary is defined by generalized log law Heat boundary is defined by adiabatic
Combustion side (inlet)	$U=0 \quad V=0 \quad W=0.0019(\text{Case1, Case2})$ $W=0.0031(\text{Case3, Case4, Case5, Case6})$ $f=0.05 \quad F=0.003$

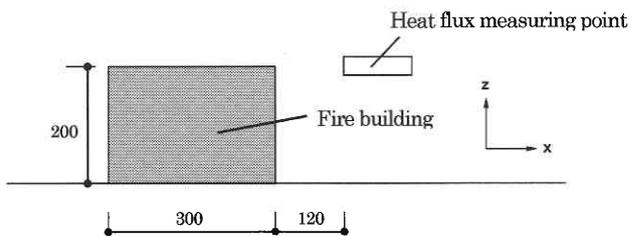


図4 放射測定点配置図

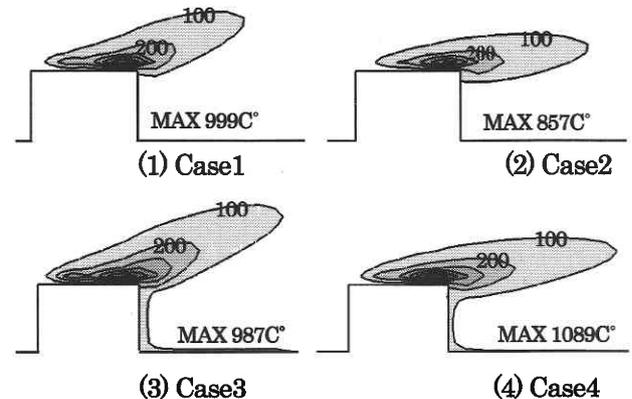


図5 鉛直方向温度分布

向に 120 mm 離れた高さ 200 mm の地点で計算を行った. 放射量計算面の配置に関しては図3に示す. 実測では, 対流熱および放射熱の合計を測定する全熱流計を使用しているので, 計算においても, 火炎からの放射による熱伝達と対流熱伝達の合計の数値を算出し, 計算結果と実測結果との比較を行った. 計算の際の放射受熱面の温度は 293(K) で一定と設定した.

4.4 熱気流計算結果の妥当性の検討

4.4.1 熱気流計算結果

Case1 ~ 4 それぞれのケースの中心軸 ( $Y = 1.65\text{ m}$ ) における燃焼面近傍の鉛直方向温度分布を図5に, 高さ 0.3 m における水平方向温度分布を図6に, 中心軸における鉛直方向風速分布を図7に示す.

研究速報

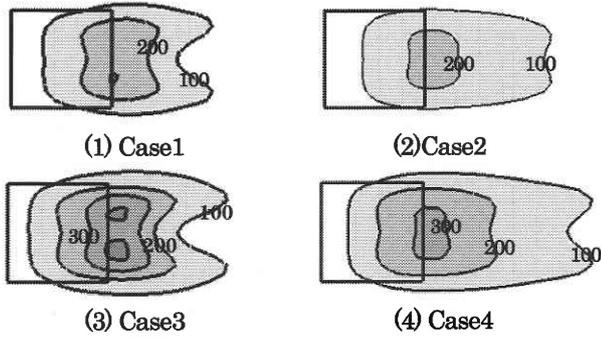


図6 水平方向温度分布(C°)  
[高さ0.3 m]

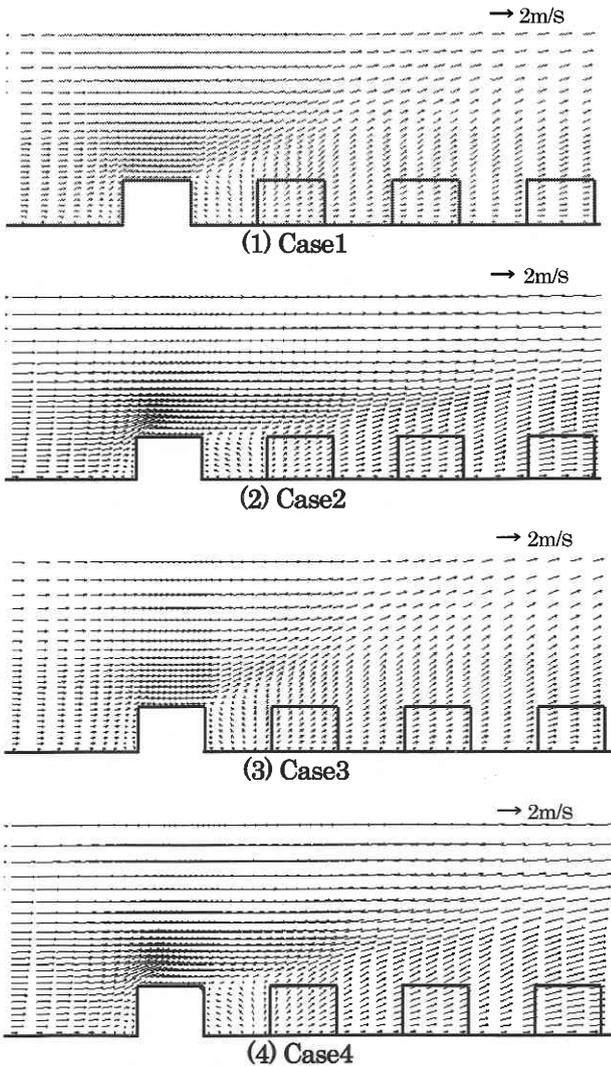


図7 鉛直方向風速ベクトル

4.4.2 熱気流の計算結果と実測の比較

解析領域の中心軸における温度の実測結果と計算結果の比較を行った。対象地点は中心軸 (Y = 1.65 m) 上で火災面の中心 (X = 1.65 m) と、中心から X 方向に 0.1 m, 0.2 m ずれた点、つまり X = 1.65 m, 1.75 m, 1.85 m の3箇

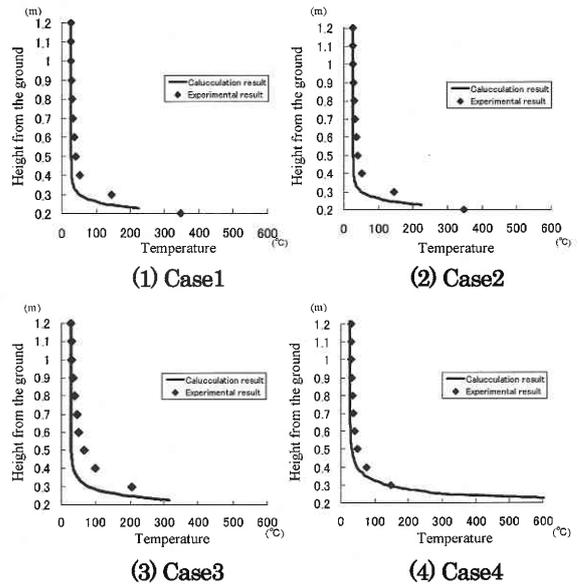


図8 実験結果と計算結果の比較(X=1.65 m)

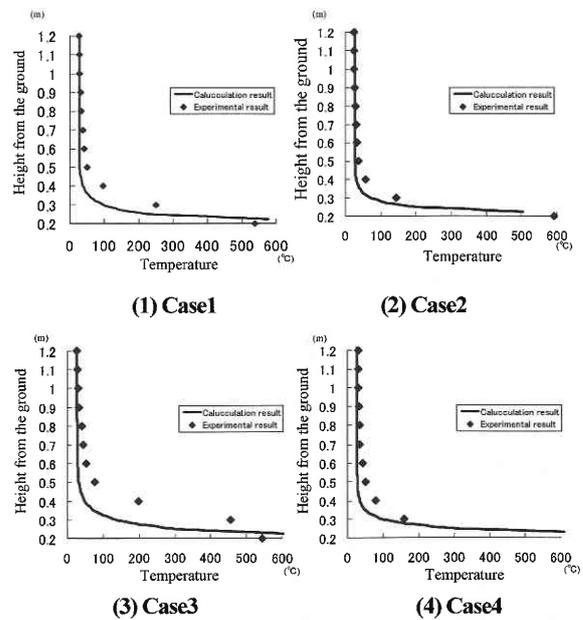


図9 実験結果と計算結果の比較(X=1.75 m)

所で、高さは  $z = 0.2 \sim 1.2$  m の地点で行った。結果を図8-10に示す。全体的に実測結果とほぼ等しい結果を算出することができたと考えられるが、 $x = 1.85$  m 地点 (図8-3) における Case1 と Case3 の場合においては実測結果と大きく異なった。この理由として、風速 1 m/s のケースでは  $X = 1.85$  m の地点は火炎の外の領域であり、計測の際使用した熱電対が放射および伝導により熱を吸収したため、計算結果に比べて大きな数値になっていると考えられる。これを考慮に入れると今回の計算は実市街地の火災においても十分適応することが可能であると考えられる。

表 4 計算ケース

	Wind velocity (m/s)	Heat release rate(kW)
Case5	1	18
Case6	2	18

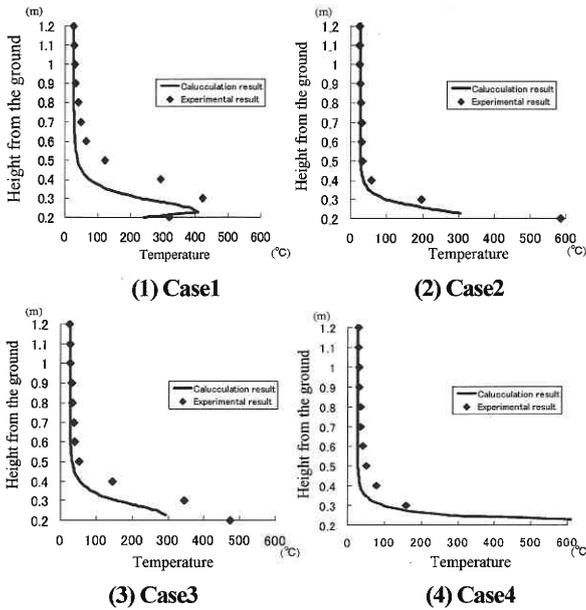


図 10 実験結果と計算結果の比較(X=1.85 m)

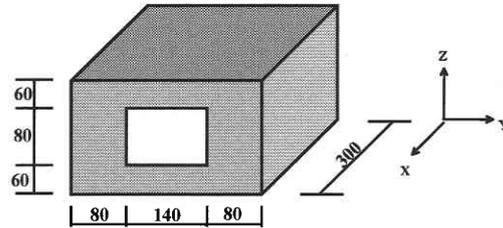


図 12 火災建物形状

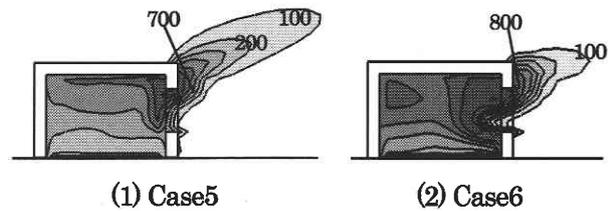


図 13 鉛直方向温度分布 (°C)

4.5 放射計算結果の妥当性

放射計算の結果を図 11 に示す。Case1～3 に関してはほぼ実測と一致した。Case4 においては多少異なる数値を示したが、今回の計算結果は実用的には実市街地火災に十分適用可能だと期待できる。しかし、実測では風速が強まるにつれ放射量が大きくなったが、計算では風速が強くなるほど放射量が小さくなる結果になった。また、実験では燃焼の燃料としてプロパンを用いて放射量の算出を行っているため、木材等の燃焼の際には、今回の数式のうちの生成率の補正を行うことが必要になってくる。今後、より多くの実験との比較を行うことで、数値モデルを修正していくことが必要である。

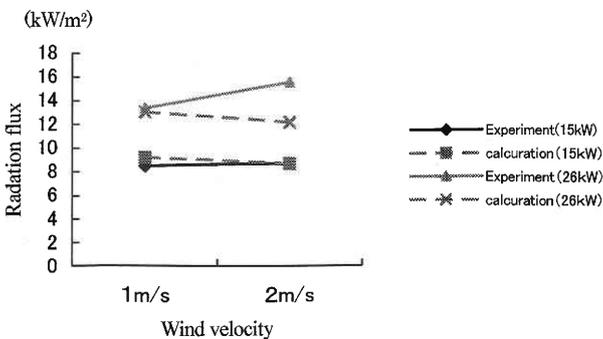


図 11 実験結果と計算結果の比較 (放射量)

5. 開口部からの噴出火炎の計算

5.1 噴出火炎形成条件

噴出火炎の形成時の区画内燃焼速度  $m_{pk}$  (kg/m<sup>2</sup>) は川越

により建物開口部の開口係数  $AH^{1/2}$  (A: 開口面積 (m<sup>2</sup>) H: 開口高さ (m)) に比例すると提案されており<sup>9)</sup>, (21) 式により算出できる。γ は燃料 1 kg 燃焼するのに必要な酸素量である。今回の計算では、区画内の床全面が燃焼しているという設定で計算を行う。燃焼時の発熱量は自由空間における発熱速度 1.5 MW/m<sup>2</sup> を (20) 式によりモデルスケールにおける発熱量に算出した数値を使用する。

$$m_{pk} = 0.52A\sqrt{H} / \gamma \dots\dots\dots (21)$$

5.2 計算条件

解析領域および境界条件は 4-2 と同じ条件とし、燃焼建物のみを変更することにより計算を行う。建物の開口部は風下側に設置し、大きさは (21) 式を用いて、区画内の発熱量が 5.1 の条件になるように設定する。建物の形状は図 10 に示す。計算ケースは風速 1 m/s, 2 m/s の 2 ケースにおいて行う。

5.3 計算結果

図 11 に中心軸上における鉛直方向温度分布を、図 12-1, 12-2 に鉛直方向風速分布を示す。温度分布に関しても、延焼により生じる上昇流も屋上面が燃焼するよりも小さい結果になった。噴出温度に関しては開口部付近の温度は 700~800°C 程度であり、横井<sup>10)</sup> によって行われた実験結果

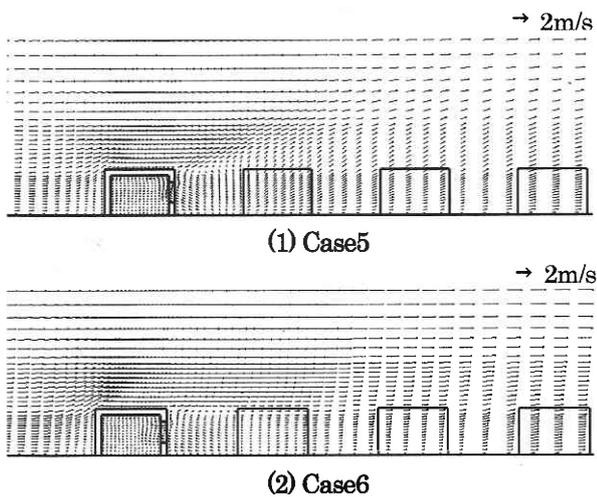


図14 鉛直方向関連ベクトル

の数値にほぼ一致する結果を得ることが出来た。

## 6. ま と め

屋上面の燃焼および開口部からの噴出火炎の気流、温度性状および放射量をCFDを用いてシミュレーションを行った。放射に関しては今後も考慮が必要だと考えられるが、気流性状および温度性状に関しては、実験結果とほぼ一致したと言える。今後は、本研究で提案した数値モデルを用いて、火の粉の飛散も含め、実市街地においても火災シミュレーションを行いたいと考えている。

## 7. 謝 辞

本研究の一部は科研費補助金基盤B(火災風洞実験とCFD

解析を用いた市街地火災時の火の粉による延焼メカニズム：代表 林吉彦)によるものである。また、国土技術政策総合研究所の岩見達也氏の助言を得た。ここに記して感謝の意を表す。

(2003年12月5日受理)

## 参 考 文 献

- 1) 林吉彦, 佐賀武: 有風下の火炎気流の温度分布に関する実験的検討, 日本建築学会環境系論文集, vol. 566, 25-32, 2003
- 2) Tatsuya Iwasm, Yoshifumi Ohmiya *et al.*: Simulation of city fire, Proceeding of the Second International Symposium on New Technologies for Urban Safety of Mega Cities in Asia, pp. 87-97, 2003
- 3) Tahry, S. H., AIAA, J. Energy, 7(4), pp. 345-353, 1983
- 4) 日本機械学会: 燃焼の数値計算, 2001.
- 5) B.F. Magunussen and B.H. Hjertager *et al.*: On mathematical modeling of turbulent combustion with special emphasis on soot formation and combustion, In proceedings 16<sup>th</sup> Symposium (International) on Combustion, pp. 719-729, 1976
- 6) V. Novozhilov, B. Moghtaderi, D.F. Fletcher, and J.H. Kent: Computational fluid dynamics modeling of wood combustion Fire Safety Journal 27, pp. 68-84, 1996
- 7) Yan, Z.H. & Holmstedt, G.: CFD experimental studies of room fire growth on wall lining materials, Fire safety journal, 27, pp. 201-238, 1996
- 8) D.R. Honnery and J.H. Kent: Soot mass growth modeling in laminar diffusion flames Twenty Fourth Symposium (International) on combustion pp. 1041-1047, 1992
- 9) 日本建築学会: 火災と建築, 2002
- 10) 横井鎮男: 耐火造火災時の窓からの噴出気流の温度分布, 日本火災学会論文集, vol. 7, No. 2, pp. 42-45, 1958