区画内火災性状の簡易予測法

A SIMPLE PREDICTIVE METHOD FOR ROOM FIRE BEHAVIOR

松山 賢*, 藤田隆史*, 金子英樹**, 大宮喜文***

田中 孝義****, 若松孝旺*****

*Ken MATSUYAMA, Takashi FUJITA, Hideki KANEKO, Yoshihumi OHMIYA
Takeyoshi TANAKA and Takao WAKAMATSU*

Simple predictive equations for the room fire behavior were proposed. These were obtained by applying simple predictive method for pre-flashover compartment fire temperature proposed by Quintiere et al. to ventilation controlled fire. These equations can easily predict the temperature inside the compartment, the rate of heat loss due to ventilation and the rate of heat loss to compartment boundary. These can be used when the room fire is ventilation controlled regime. The results of the prediction using the simple equations were compared with the results of a more detailed computer model. Through this comparison, it was confirmed that these simple predictive equations are practical useful to estimate ventilation controlled compartment fire behavior, even though there is a little error caused by neglecting heat loss by radiation through the openings.

Keywords : room fire behavior, simple predictive equation, ventilation controlled fire, radiation

区画内火災性状, 簡易予測計算式, 換気支配型火災, 輻射

1. はじめに

耐火設計等において、区画内火災性状は通常換気支配の火災を仮定し、コンピューターモデルを用いて予測されている。そのため、時間の浪費を余儀なくされる場合が多い。しかし、精度は幾分粗くてもコンピューターモデルに代わる簡易な予測計算式があれば、実務的には非常に便利であると考えられる。区画内火災性状を代表するものは、先ず第一に区画内温度であるが、周壁への伝熱量は区画の耐火性や延焼の問題に関係し、開口部からの流出熱量は避難など区画外への様々な火災危険に影響する。そこで本研究は、換気支配型燃焼を仮定した区画内火災性状（火災室温度・開口部からの流出熱量・区画内周壁への失熱）の簡易予測式を提案し、この簡易予測式をコンピューターモデルと比較し、実用性を検証することを目的として行った。

2. コンピューターモデルによる区画内火災性状予測

ここでは、後に提案する簡易予測計算式と比較するた

めのコンピューターモデルについて、概要の説明とその計算結果について述べる。

2.1 予測モデルの概念

本予測モデルは、盛期火災を対象として考えており、区画内の温度をはじめ、全ての物理量が一樣になっていると仮定している。一般に室火災は多くの過程が有機的に複合した現象である。そこで本モデルでは、火災室内の現象を次のような過程に分けた熱的モデルに沿って火災現象を考えている。

(1) 質量保存式

盛期火災の区画内では、質量保存を考えた場合、次のような式が成り立っている。

$$\frac{d}{dt}(\rho_F V) = M + m_a - m_g \quad (2.1)$$

(2) エネルギー保存式

火災室内におけるエネルギー保存式は、次式にて与えられる。

* 東京理科大学大学院理工学研究科

** ㈱NTTファシリティーズ・工修

*** 東京理科大学大学院理工学研究科・工修

**** 建設省建築研究所防煙研究室 室長・工博

***** 東京理科大学理工学部建築学科 教授工博

Graduate Student, Dept. of Architecture, Faculty of Sci. and Eng., Science Univ. of Tokyo

NTT Power and Building Facilities Inc., M. Eng.

Graduate Student, Dept. of Architecture, Faculty of Sci. and Eng., Science Univ. of Tokyo, M. Eng.

Head, Smoke Control Div., Building Research Institute, Ministry of Construction, Dr. Eng.

Prof. Dept. of Architecture, Faculty of Sci. and Eng., Science Univ. of Tokyo, Dr. Eng.

$$\frac{d}{dt}\{c_F\rho_F(T_F-T_\infty)V\}=Q_C-Q_W-Q_R-Q_V \quad (2.2)$$

$$=Q_C-Q_W-Q_R-c_Fm_g(T_F-T_\infty)$$

(3) 状態式

火災により誘起される微小な内外圧力差による空気密度に対する影響及び、燃焼によるガス成分組成の変化は無視し、本モデルでは、次のような状態方程式を用いる。

$$\rho_F T_F = \rho_\infty T_\infty \quad (2.3)$$

(4) 燃焼速度

川越・関根は、実験の結果から燃焼速度 M (kg/s)について次式のような半経験的な関係を示している¹⁾。

$$M \approx 0.1A\sqrt{H} \quad (2.4)$$

この燃焼速度は、換気支配の火災性状をもたらし、幾分の未燃ガスが生ずる。但し、本モデルでは数値計算の安定性を考慮して5分後に $0.1A\sqrt{H}$ (kg/s)となるように設定している。

(5) 発熱量

本モデルにおける可燃物の燃焼によって発生する熱量 Q_C は、燃料支配時・換気支配時の2つに分けて考えている。以下にその関係式を示す。

・燃料支配時($Q_C=Q_{C1}$)

単位重量あたりに燃焼する木材の発熱量を16,000 (kJ/kg)として、次式のように考えられる。

$$Q_{C1} = 16,000M \quad (2.5)$$

・換気支配時($Q_C=Q_{C2}$)

単位空気消費あたりの発熱量は、燃料の種類に殆どよらず約3,000 kJ/kg(空気)である²⁾³⁾。したがって、換気支配条件下では、流入空気が全て燃焼に使われると仮定すれば、

$$Q_{C2} = 3,000m_a \quad (2.6)$$

と考えることができる。これが火災室内で発生し得る最大発熱速度である。

図1 発熱速度の移り変わり

図1に、本モデルにおける発熱速度の移り変わりを示しているが、 Q_{C1} と Q_{C2} が交わる点以前、すなわち、(a)点以前は、燃料支配となり発熱速度は Q_{C1} となる。(a)点以降は、換気支配の火災性状もたらし発熱速度は Q_{C2} となる。

また、このとき幾分の未燃ガスが生じる。本モデルでは、換気支配型燃焼を仮定しているの、(a)点以降を関心の対象としている。

(6) 火災室温度

火災室温度は式(2.1)～(2.3)の3式より T_F を陽に計算した下式(2.7)を逐次計算して求めることができる。

$$\frac{dT_F}{dt} = \frac{T_F}{c_F\rho_\infty T_\infty V} (Q_C - Q_W - Q_R) - \frac{T_F}{\rho_\infty T_\infty V} (m_a + M)(T_F - T_\infty) \quad (2.7)$$

(7) 周壁への失熱量

内周壁等の境界構造面の温度は一樣であるとするならば、熱量 Q_W はそれらへの失輻射による熱伝達量と対流による熱伝達量の和である。すなわち、

$$Q_W = \varepsilon_w \sigma (T_F^4 - T_w^4) A_w + \alpha_w (T_F - T_w) A_w \quad (2.8)$$

なお Q_W は、上式(2.8)に示すように境界構造表面温度 T_w の関数となる。このため、火災の進行とともに変化する T_w を別の求める必要がある。本モデルでは、下記の①、②に示す1次元熱伝導方程式を差分法を使って数値的に求めている。

①基準方程式

$$\frac{dT}{dt} = \frac{k}{c\rho} \left(\frac{d^2 T}{dX^2} \right) \quad (2.9)$$

②境界条件

$$-k \left(\frac{dT}{dX} \right) \Big|_{x=0} = q''_{in}(t) \quad (2.10)$$

$$-k \left(\frac{dT}{dX} \right) \Big|_{x=l} = q''_{out}(t) \quad (2.11)$$

また、対流熱伝達率 α_w を求めるため、

$$T_a = (T_F - T_w) / 2 \quad (2.12)$$

で定義される T_a を用いて次式で定める⁴⁾。

$$\alpha_w = \begin{cases} 5 \times 10^{-3} & (T_a \leq 300K) \\ (0.02T_a - 1) \times 10^{-3} & (300K < T_a < 800K) \\ 15 \times 10^{-3} & (800K \leq T_a) \end{cases} \quad (2.13)$$

(8) 開口からの輻射失熱量

火災及び窓外部の物体の輻射率を1.0とすると開口からの輻射による失熱量 Q_R は次式のように表せる。

$$Q_R = \sigma (T_F^4 - T_\infty^4) A \quad (2.14)$$

(9) 換気量

本モデルにおいては、一般的な火災の事例にならない、中性帯の位置が開口上端と下端の間にできるという仮定の下に、中性帯の高さ及び換気量を算出する。

$$m_a = \frac{2}{3} \alpha B_w (2g\rho_F |\Delta\rho|)^{1/2} (H_h - X_n)^{3/2} \quad (2.17)$$

$$m_g = \frac{2}{3} \alpha B_w (2g\rho_\infty |\Delta\rho|)^{1/2} (X_n - H_l)^{3/2} \quad (2.18)$$

前述の理論に基づいて作成したコンピューターモデルの全体構成については、図2に示す通りである。

図2 計算プログラムの全体構成

2.2 計算条件

本予測モデルで区画内火災性状を把握するための計算条件を以下に示す。

(1) 区画条件

事務所ビルの基準階面積別棟数・基準階平均面積等を総合的に考えた結果、①18^W(m)-12^D(m)-2.6^H(m)、②21^W(m)-15^D(m)-2.6^H(m)、③42^W(m)-21^D(m)-2.6^H(m)の3条件について計算を行う。

(2) 壁の材質

壁の材質は、普通コンクリート・軽量コンクリート・ALC板の3種類について計算を行う。但し、本モデルで利用した壁材の熱伝導率 k (kW/m/K)、比熱 c (kJ/kg/K)、密度 ρ (kg/m³)の値については、表1に示す通りである。

表1 壁材の熱特性

	熱伝導率 k (kW/m/K)	比熱 c (kJ/kg/K)	密度 ρ (kg/m ³)
普通コンクリート	0.00163	0.895	2250
軽量コンクリート	0.000523	1.39	1350
ALC板	0.000151	1.09	600

(3) 温度因子(F_0)

温度因子 $F_0 = A\sqrt{H}/A_T$ の A は開口面積、 H は開口高さ、 A_T は室内全表面積(開口部分も含む)である。区画の開口条件を考えたとき、 F_0 の上限は2つの側面が全て開口であると仮定したときで十分であると考えられる。このときの値はおよそ0.15である。したがって、 $F_0=0\sim0.15$ の間(0.01, 0.025, 0.05, 0.075, 0.15)で計算を行う。

(1)～(3)の条件を組み合わせ表2に示すようなパターンで計算を行った。さらに、それぞれのパターンについての火災室温度変化、開口部からの流出熱量比、および区画内周壁への熱損失比を算出する。

表2 計算パターン一覧

設定条件	区画条件変化	壁の材質変化	温度因子変化
区画 (m) (W×D×H)	18-12-2.6	普通コンクリート 軽量コンクリート ALC板	18-12-2.6
	21-15-2.6		
	42-21-2.6		
壁の材質	普通コンクリート	普通コンクリート	普通コンクリート
温度因子	0.01, 0.025, 0.05, 0.075, 0.15		

但し、火災荷重については全て30(kg/m²)で計算を行う。

2.3 計算結果

(1) 区画条件を変化させた場合の比較

図3(a)～(c)に区画条件を変化させた場合の比較、すなわち区画の寸法のみを変化させそれ以外の条件は同一(壁の材質:普通コンクリート、火災荷重:30(kg/m²))にして計算を行った結果の比較を示す。

火災継続時間に若干の違いはあるが、火災室温度変化・開口部からの流出熱量比・周壁への失熱比は、全ての温度因子に対して合致している。このことから、換気支配の火災性状は区画の規模によらず温度因子のみで決まるといえることが分かる。

(2) 壁の材質を変化させた場合の比較

図4(a)～(c)に壁の材質のみを変化させ、それ以外の条件は同一(区画寸法:18-12-2.6(m)、火災荷重:30(kg/m²))にして計算を行った結果の比較を示す。

熱伝導率 k (kW/m/K)は、普通コンクリート(0.00163)>軽量コンクリート(0.000523)>ALC板(0.000151)となっており、 k が高い材質ほど熱を通しやすい性質であるので、火災室温度変化・開口部からの流出熱量比についてはALC板>軽量コンクリート>普通コンクリートとなり、周壁への失熱比については、この逆になったと考えられる。

なお、5種類の温度因子について、図3、図4と同様の計算を行なっているが、すべて同じ傾向を示すため、ここでは、 $F_0=0.01$ のみを示した。

(3) 温度因子を変化させた場合の比較

図5(a)～(c)に壁の材質のみを変化させ、それ以外の条件は同一(区画寸法:18-12-2.6(m)、壁の材質:普通コンクリート、火災荷重:30(kg/m²))にして計算を行った結果の比較を示す。

グラフを見ると、火災室温度変化および開口部からの流出熱量比は、温度因子が大きいくほど値が大きくなり、周壁への失熱比は小さいほど大きくなっている。これは、本モデルが換気支配燃焼を仮定しているため、開口が大きくなれば、区画内への流入空気量が多くなり、区画内での発熱量も大きくなるためであると考えられる。また、温度因子が大きいくほど火災継続時間が短くなっているが、これは、火災荷重と区画寸法を同一の条件で計算を行っているため、開口が大きいくほど燃焼速度が大きくなり、可燃物が早く燃え尽きてしまうからである。

図3 コンピューターモデルの計算結果(区画条件変化)

図4 コンピューターモデルの計算結果(壁の材質変化)

図5 コンピューターモデルの計算結果(温度因子変化)

3. 区画内火災性状の簡易予測法

3.1 簡易予測計算式

本研究では、Quintiereらにより提案された火災初期の火災室温度についての簡易予測法を基に、換気支配時の火災室内における温度変化、開口部からの流出熱量および区画内周壁への熱損失を簡易に予測するための計算式を提案する。

図6 初期火災時の室内の様子

火災室温度はQuintiereらによれば煙層の質量バランス、 m_g は開口因子 $A\sqrt{H}$ と温度の関数であることを考慮し、多くの実験結果による回帰により、火災室内での発熱速度が Q の時、次式にて与えられている⁵⁾。

$$\frac{\Delta T}{T_\infty} = \frac{T_F - T_\infty}{T_\infty} = 1.6 \left(\frac{Q}{\sqrt{g c_p \rho_\infty T_\infty A \sqrt{H}}} \right)^{2/3} \left(\frac{h_k A_T}{\sqrt{g c_p \rho_\infty A \sqrt{H}}} \right)^{-1/3} \quad (3.1)$$

$$\text{但し、} h_k = \left(\frac{k \rho c}{t} \right)^{1/2} \quad (3.2)$$

(1) 火災室温度 $\Delta T/T_\infty$

換気支配時の火災において火災室内への流入空気量 m_a は、概ね

$$m_a \approx 0.5 A \sqrt{H} \quad (3.3)$$

で与えられることが知られている²⁾。また、単位空気当たりの発熱量は燃料の種類によらず3,000(kW)で殆ど一定であるから、火災室内での発熱速度 Q は

$$Q \approx 1,500 A \sqrt{H} \quad (3.4)$$

となる。よって式(3.1)と式(3.4)から

$$\frac{\Delta T}{T_{\infty}} \propto \left(\frac{1,500 A \sqrt{H}}{\sqrt{g c_p \rho_{\infty} T_{\infty} A \sqrt{H}}} \right)^{2/3} \left(\frac{h_k A_T}{\sqrt{g c_p \rho_{\infty} A \sqrt{H}}} \right)^{-1/3} \quad (3.5)$$

$$\propto \left(\frac{A \sqrt{H}}{A_T} \right)^{1/3} \left(\frac{1}{h_k} \right)^{1/3}$$

と表すことができる。これに、式(3.2)を代入すると次のように与えられる。

$$\frac{\Delta T}{T_{\infty}} = C_1 \left(\frac{A \sqrt{H}}{A_T} \right)^{1/3} \left(\frac{t}{k \rho c} \right)^{1/6} \quad (C_1 \text{は定数}) \quad (3.6)$$

(2) 開口部からの流出熱量比 Q_v/Q

開口部からの流出熱量 Q_v は次式で与えられる。

$$Q_v = c_p m_g \Delta T \quad (3.7)$$

ここで $m_g \propto A \sqrt{H}$ 、また発熱速度 Q は式(3.4)から分かるように $Q \propto A \sqrt{H}$ であるから、 Q_v/Q は ΔT に比例していることが分かるので、次のように与えられる。

$$\frac{Q_v}{Q} = C_2 \left(\frac{A \sqrt{H}}{A_T} \right)^{1/3} \left(\frac{t}{k \rho c} \right)^{1/6} \quad (C_2 \text{は定数}) \quad (3.8)$$

(3) 区画内周壁への熱損失比 Q_w/Q

区画内周壁への熱損失 Q_w は

$$Q_w = h_k \Delta T A_T \quad (3.9)$$

と表現できるとすると、開口部からの流出熱量と同様に、式(3.4)を考慮して Q_w/Q は次のように与えられることになる。

$$\frac{Q_w}{Q} = C_3 \left(\frac{A \sqrt{H}}{A_T} \right)^{-2/3} \left(\frac{t}{k \rho c} \right)^{-1/3} \quad (C_3 \text{は定数}) \quad (3.10)$$

3.2 簡易予測計算式の回帰結果

コンピューターモデルの計算結果を簡易予測計算式に回帰させて係数を求めた結果、次のようになった。

$$\frac{\Delta T}{T_{\infty}} = 3.0 \left(\frac{A \sqrt{H}}{A_T} \right)^{1/3} \left(\frac{t}{k \rho c} \right)^{1/6} \quad (3.11)$$

$$\frac{Q_v}{Q} = 0.4 \left(\frac{A \sqrt{H}}{A_T} \right)^{1/3} \left(\frac{t}{k \rho c} \right)^{1/6} \quad (3.12)$$

$$\frac{Q_{v2}}{Q} = 0.45 \left(\frac{A \sqrt{H}}{A_T} \right)^{1/3} \left(\frac{t}{k \rho c} \right)^{1/6} \quad (3.13)$$

$$\frac{Q_w}{Q} = 0.45 \left(\frac{A \sqrt{H}}{A_T} \right)^{-2/3} \left(\frac{t}{k \rho c} \right)^{-1/3} \quad (3.14)$$

但し、 Q_v/Q 、 Q_{v2}/Q はそれぞれ、輻射による失熱を含まない開口部からの流出熱量比、輻射による失熱を含む開口部からの流出熱量比である。また、周壁への失熱比 Q_w/Q を考えた場合、時間 t が初期の方で1を越えてしまうということと、コンピューターモデルの計算値とあまり合致しないということから $Q_w + Q_{v2} = Q$ であることを利用し次のような簡易式を提案する。

$$\frac{Q_w}{Q} = 1 - 0.45 \left(\frac{A \sqrt{H}}{A_T} \right)^{1/3} \left(\frac{t}{k \rho c} \right)^{1/6} \quad (3.15)$$

なお、式(3.11)の係数3.0は、式(3.5)の定数 c_p 、 g 、 T_{∞} 、 ρ_{∞} に具体的な数値を代入しても得られる。

図7 モデル値と簡易式の比較(普通コンクリート)

図8 モデル値と簡易式の比較(軽量コンクリート)

3.3 簡易予測計算式とモデル値との比較・考察

図7は普通コンクリート、図8は軽量コンクリートについてのコンピューターモデルの計算値と簡易予測計算式((a)火災室温度は式(3.11)、(b)開口部からの流出熱量比は式(3.12)、(c)周壁への失熱比は式(3.15))を比較したグラフである。但し、ここで示したのは、温度因子 $F_0=0.025$ の場合である。

普通コンクリート、軽量コンクリートとも火災室温度 $\Delta T/T_\infty$ 、開口部からの流出熱量比 Q_w/Q についてすべての温度因子 $F_0=A\sqrt{H}/A_T$ に対してコンピューターモデルの計算値と簡易予測計算式はほぼ合致したといえる。しかし、軽量コンクリートの周壁への失熱比 Q_w/Q は温度因子が大きくなるにつれて合致なくなってしまう。これは、簡易予測計算式において開口部からの流出熱量 Q_v を $Q_v=c_p m_g \Delta T$ としており、輻射による失熱を式自体に含んでいないが、輻射による失熱を考慮したコンピューターモデルの計算値に簡易予測計算式を回帰させた Q_{v2}/Q と熱収支式 $Q_w+Q_{v2}=Q$ から Q_w/Q (すなわち式(3.15))を求めていることに起因する。つまり、軽量コンクリートは熱伝導率の小さい材質であること、また開口が大きくなることから、火災室温度は高くなり、輻射による失熱は大きくなるはずであるが、簡易予測計算式においてこれを小さく見積もってしまったために誤差が生じたと考えられる。

以上のようなことより、火災室温度変化と開口部からの流出熱量比については火災初期段階において安全側の予測ができることが分かった。しかし、周壁への失熱比については、輻射による失熱の見積もり方に課題を残すことになった。また、区画内火災性状を簡易に予測する上で温度因子と壁の材質が大きく影響することが明らかになった。

4. まとめ

コンピューターモデルでの火災性状予測の結論として、換気支配を仮定した火災の性状について、次のことが言える。

- ・火災性状は、区画の規模によらず温度因子のみによって定まる。

- ・火災性状には、壁の材質が大きく影響する。

簡易予測計算式は、Quintiere等によるpre-flashover火災に対する予測式を換気支配火災に拡大適用したものであるが、輻射による失熱の見積もり方に問題は残るものの、温度因子がある程度小さい場合、また、熱伝導率がある程度大きい場合には、コンピューターモデルによる予測結果とほぼ合致し、その実用性を確認することができたと言える。さらに、実用的なものにするためには以下の問題点を解決していく必要があると思われる。

- ・輻射による失熱を含んだ簡易予測計算式を導く。

- ・1室についての予測式でなく、2室・3室における簡易予測計算式を導く。

<記号説明>

A	: 区画開口の面積 (m ²)
A _T	: 区画内の周壁面積 (m ²)
A _w	: 境界構造面の面積 (m ²)
B _w	: 開口幅 (m)
c	: 壁材の比熱 (kJ/kg/K)
c _p	: 気体の定圧比熱 (kJ/kg/K)
F ₀	: 温度因子 ($A\sqrt{H}/A_T$)
g	: 重力加速度 (m/s ²)
H	: 区画開口高さ (m)
H _h	: 開口上端までの高さ (m)
H _l	: 開口下端までの高さ (m)
h _k	: 熱伝達率 (kW/m ² /K)
k	: 壁材の熱伝導率 (kW/m/K)
l	: 壁材の厚さ (m)
M	: 燃焼速度 (kg/s)
m _a	: 開口からの流入空気量 (kg/s)
m _g	: 開口からの高温ガス流出量 (kg/s)
m _p	: 火災プルームによる高温層への流入量 (kg/s)
Q	: 発熱速度 (kJ/s = kW)
Q _c	: 燃焼熱量 (kW)
Q _r	: 窓からの輻射失熱量 (kW)
Q _v	: 噴出火災の持ち去り熱量 (kW)
	開口部から流出する熱量 (kW)
Q _{v2}	: 輻射による失熱を含む開口部から流出する熱量 (kW)
Q _w	: 周壁への失熱量 (kW)
q _{in}	: 壁材の加熱面からの入射熱流束 (kW/m ²)
q _{out}	: 壁材の非加熱面からの失熱流束 (kW/m ²)
T	: 温度 (K)
T _F	: 火災室温度 (K)
T _w	: 境界構造表面温度 (K)
T _∞	: 雰囲気(外気)温度 (K)
ΔT	: 火災室内と外気の温度差 (=T _F -T _∞) (K)
t	: 時間 (s)
V	: 容積 (m ³)
X	: 壁体の奥行き方向距離 (m)
X _n	: 中性帯の高さ (m)
α	: 流量係数
α _w	: 対流熱伝達率 (kW/m ² /K)
ε _w	: 境界構造面の輻射率
ρ	: 壁材の密度 (kg/m ³)
ρ _F	: 火災室の空気密度 (kg/m ³)
ρ _∞	: 雰囲気(外気)の空気密度 (kg/m ³)
Δρ	: 火災室内と外気の空気密度差 (=ρ _∞ -ρ _F) (kg/m ³)
σ	: ステファン・ボルツマン定数 5.67051×10 ⁻⁸ (W/m ² /K ⁴)

【参考文献】

- 1) 川越邦雄, 関根孝: 壁体の熱伝導率の違いによるコンクリート造建物内の火災温度曲線の推定, 日本火災学会論文集, Vol. 13, No. 1 (1963)
- 2) 田中峰義: 建築火災安全工学入門, 日本建築センター (1993)
- 3) Huggett, C.: Estimation of Rate of Heat Release by Means of Oxygen Consumption Method, Fire and Materials, Vol. 4, No. 2 (1980)
- 4) 田中峰義, 中村和人: <二層ゾーンの概念に基づく>建物内煙流動予測計算モデル, 建築研究報告No.123, 建設省建築研究所 (1989)
- 5) McCaffery, B. J. Quintiere, J. G. and Harkleroad, M. F.: Estimating Room Temperatures and the Likelihood of Flashover Using Fire Test Data Correlations, Fire Technology, Vol. 17, No. 2, 98-119 (1981)
- 6) 国土開発技術センター編: 建築物の総合防火設計法 (第4巻 耐火設計法), 日本建築センター (1989)
- 7) Dougal Drysdale: An Introduction To Fire Dynamics (1985)
- 8) 大宮喜文: 噴出火災による上階延焼予測に関する研究, 建築学会大会学術講演梗概集, 日本建築学会 (1993)

(1994年10月7日原稿受理, 1994年12月22日採用決定)