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

BASIC STUDY ON FIRE SPREAD SPEED FORMULA AND PREDICTION OF SEISMIC FIRE IN URBAN AREA

保野 健治郎*, 難波 義郎**, 西谷 忠彦***
Kenjiro YASUNO, Yoshiro NAMBA and Tadahiko NISHITANI

Many fires generally occur simultaneously at the time of an earthquake. Therefore, the fire situation such as burn-out area and fire spread speed need to be expected more precisely as early as possible after a fire occurrence. First of all, we analyzed the fire spread speed formula of the urban area at the time of earthquake that considered complete collapse etc. in this research. Next, we attempted that predicts the fire spread condition in the early period on the basis of only the real fire data by using this fire spread speed formula. Multiple coefficients of correlation between real fire data and the prediction value were from 0.80 to 0.98. It is possible to predict the fire spread condition with quite a lot accuracy.

Keywords : fire spread, earthquake, burn-out area, prediction model

火災延焼、地震、焼損面積、予測モデル

1. はじめに

建物火災の延焼速度式については、浜田¹⁾、堀内²⁾、室崎、藤田、東京消防庁^{1,2)}、大阪市、建設省総プロモデル、浸透モデル(橘、神、青木)、保野^{1,0)}、糸井川^{1,3)}などの式がある。地震時火災は同時多発が一般的であるから、火災発生後できるだけ早期に焼損面積や延焼速度など火災の延焼状況をより正確に予想して対応策を実行する必要がある。そして、これらの式を用いて、地震時火災の一定時間後の焼失面積を予測し、所要消防力の決定や避難問題などが検討されている。

本研究では建物の全壊などを考慮した地震時における市街地火災の延焼速度式を求め、次にこの延焼速度式を使用して、ここでは、火災発生初期の実火災データのみをもとにして、火災の延焼状態を予測することを試みることにする。

2. 平常時および地震時火災の延焼速度式

火災の先端が出火箇所から広がっていく状況(消火活動を伴わない場合の延焼過程)を焼損面積で捉えた場合の木造系建物の延焼速度式は、一般的にS字状の曲線となり、式(1-a)~式(1-f)を式(1)に代入したもので表される。^{2)~1,0)}

$$A = \frac{G + n \cdot \varepsilon}{1 + \exp\{-a_1 \cdot (x - c_1)\}} - \frac{G + n \cdot \varepsilon}{1 + \exp(a_1 \cdot c_1)} \quad (1)$$

$$n = (1.39 - 2.82 \times 10^{-4} G) \times \exp\{(5.16 \times 10^{-2} + 3.29 \times 10^{-4} G - 2.18 \times 10^{-7} G^2) v\} \quad (1-a)$$

$$\varepsilon = G / (1 + \exp(a \cdot c)) \quad (1-b)$$

$$a = (0.175 + 0.0245 v^{1.62} \left(\frac{176}{G}\right)^{0.582 \exp(-0.146 v)}) \quad (1-c)$$

$$c = [\log_e(0.980 a^{1.40} G)] / a \quad (1-d)$$

$$a_1 = (0.175 + 0.0245 v^{1.62} \left(\frac{176}{G + n \cdot \varepsilon}\right)^{0.582 \exp(-0.146 v)}) \quad (1-e)$$

$$c_1 = [\log_e\{0.980 a_1^{1.40} (G + n \cdot \varepsilon)\}] / a_1 \quad (1-f)$$

ここに、A:焼損面積(m²)、x:出火からの経過時間(min)、G:1棟の建築面積(あるいは焼損危険のある建物群の建築面積、m²):ただし、A ≤ G)、v:風速(m/s)、n:nは1 ≤ n < 3として使用する。一般には、1.3 < n < 2程度となる。

* 近畿大学工学部建築学科 教授・工博

** 近畿大学工学部建築学科 助教授・工博

*** 近畿大学大学院工業技術研究科 大学院生

Prof., Kinki University, Dept. of Architecture, Faculty of Engineering, Dr. Eng.
Assoc. Prof., Kinki University, Dept. of Architecture, Faculty of Engineering, Dr. Eng.
Graduate Student, Kinki University, Dept. of Architecture, Faculty of Engineering

式(1-a)～式(1-f)の各係数 $n, \varepsilon, a, c, a_1, c_1$ は、K市（人口約23万人）の木造系建物火災について、消火活動を開始する前のデータより、非線形最小2乗法および定差図法によって求められたものである。ただし、かなり精度よく使用するには、式(1)の適用範囲は、 $0 \leq v \leq 10 \text{ m/sec}$, $50 \leq G \leq 1500 \text{ m}^2$, $x \leq 90 \text{ min}$, 平均建ぺい率50～60%である。

具体例として、佐賀関実家屋群（4棟）の火災実験のデータ¹⁴⁾のプロットと式(1)の延焼速度式（各棟のロジスティック曲線①～④と全体）および堀内の式(A_H)を図1に示す²⁾。この火災実験では、平均風速 $v \approx 1.8 \text{ m/sec}$, $G \approx 150 \text{ m}^2$ のとき、 $a_1 = 0.143 \sim 0.460$, $G = 804 \text{ m}^2$ のとき、 $a_1 \approx 0.150$ であった。堀内式²⁾（浜田式¹⁾を変換したもの）は時間に関して2次式になり、斜線部分のように大きくなる。このように、式(1)は最近の建物火災にほぼ適合することがわかっているが、精度をある程度まで低下させれば、約150,000 m^2 の大火にも適用することができ、酒田大火の場合も式(1)のようなS字状の曲線になっていることが示されている^{7), 11)}。酒田大火および後述の地震時の市街地火災において、消火活動が行われている。これは主として「防戦」としての活動と考えらるので、消火活動を伴わない延焼モデルの式(1)を近似的に適合できるものとして、本研究では取り扱った。しかし、消火活動の影響は厳密にはあるはずであるので、この点についての調査と解析は今後の課題である。

さて、予測式を神戸市の火災資料（昭和49～58年、4,757件）に適用した結果は、平均焼損面積（予測値133.6 m^2 /件、過去の値134.8 m^2 /件）および10年間の焼損面積の合計（予測値145,361 m^2 、過去の値137,344 m^2 ）とも、予測値と過去の値とがよく一致していることがわかっている^{2), 15)}。また、式(1)によって、大阪市（地区環境を考慮）の年間の焼損面積を予測した結果は過去の値とよく一致してその妥当性が確かめられている¹⁶⁾。さらに、耐火構造系の延焼モデル式¹¹⁾は神戸市の火災資料（昭和49～58年）より式(2)が得られている。

$$A = \frac{G + n \cdot \varepsilon}{1 + \exp \{-a \cdot (x - c)\}} - \frac{G + n \cdot \varepsilon}{1 + \exp (a \cdot c)} \quad (2)$$

$$\varepsilon = G / \{1 + \exp (a \cdot c)\} \quad (2-a)$$

$$a = 4.36 G^{-0.365} \quad (2-b)$$

$$c = 4.98 G^{0.137} \quad (2-c)$$

ここに、 x ：出火からの経過時間（min, $5 \leq x \leq 90$ ）, G ：1区画または1棟の建築面積（ m^2 ; $5 \leq G \leq 300$ ）, n ： $1 \leq n < 3$ （一般には $1.3 < n < 2$ 程度）である。

本研究では、式(1)に代えて地震時火災の延焼速度式¹⁷⁾として神戸市内の大規模火災（約10,000～120,000 m^2 ）に使用した式(3)が適合できるものとして、以下の研究を行った。

$$A = \frac{G + n \cdot \varepsilon}{1 + \exp \{-a_1 \cdot (x - c_1)\}} - \frac{G + n \cdot \varepsilon}{1 + \exp (a_1 \cdot c_1)} \quad (3)$$

$$\varepsilon = G / (1 + \exp (a_1 \cdot c_1)) \quad (3-a)$$

図1 佐賀関実家屋群の火災実験による各棟(①～④)および合計したものの延焼速度式ならびに堀内の式(A_H)との比較

$$a_1 = f(v/G) \quad (3-b)$$

$$c_1 = f(G/v) \quad (3-c)$$

$$\frac{\exp(a_1 \cdot c_1)}{G + n \cdot \varepsilon} = m_1 \cdot a_1^{m_2} \quad (3-d)$$

ここに、 m_1 および m_2 は係数、 n は $1 \leq n < 3$ として使用する。一般には、 $1.3 < n < 2$ 程度となる。式(1)と異なるのは、 ε , a_1 および c_1 が少し変更されて簡単な式で表現されていることであるが、式(3)で地震時火災に適用できることがわかっている¹⁷⁾。

3. 地震時市街地火災の延焼速度式

兵庫県南部地震における大火災の資料（焼損面積10,000 m^2 以上）については、現在も検討中であるが、現在までに得られた資料（神戸市消防局および東京消防庁）に基づいて検討した結果は、『地震時火災の延焼速度式に関する基礎的研究¹⁷⁾、日本火災学会論文集, pp. 15～23, Vol. 44, No. 1・2, 1996（以下、前論文と呼ぶ）』に発表した。再度資料を一部再検討した。前論文には c_1 に全壊率(D)を導入していなかったが、係数 a_1 のみならず、係数 c_1 にも全壊率(D)を導入して分析した。そして、 a_1, c_1 の各係数の平均値($\text{mean } a_1, \text{mean } c_1$)、最大値($\text{max } a_1, \text{max } c_1$)および最小値($\text{min } a_1, \text{min } c_1$)を求め、焼損面積も平均値(A_{mean})、最大値(A_{max})および最小値(A_{min})を求めた（前論文では、平均値 $[\text{mean } a_1, \text{mean } c_1, A_{\text{mean}}]$ のみ）。その結果を以下に示す。

火災の延焼動態図を分析した結果を表1に示す。なお、焼損面積は焼損街区面積(m^2)で表示している。ここに示す全壊率は日本都市計画学会および日本建築学会が調査した阪神・淡路大震災被害実態緊急調査被災度別建物分布状況図（震災復興都市づくり特別委員

表1 調査対象地区

調査地区	焼損面積(m ²)	平均風速(m/s)	全壊率
1	111,440	1.57	0.714
2	36,830	1.18	0.667
3	17,537	0.95	0.460
4	30,681	1.96	0.309
5	39,200	0.89	0.485
6	51,593	0.92	0.431
8	10,427	1.64	0.587
平均	—	1.30	—

会)をもとに焼失街区の被害程度が周辺街区から推定されたものであり、木造または防火木造建物が多数を占める2階以下の建物の全壊率(全壊または大破)を示している。全壊または大破と判定された基準は全面的倒壊、上部構造と基礎が遊離、柱等の破壊などで再使用が不可能と予想されるような状態であるとしている。

本研究に使用した地震時火災は、木造、防火木造および耐火造建築物の約30%以上が倒壊した場合の火災である。焼損面積と時間の関係はSカーブとなり、このような地震時火災の大火のような場合にも式(3)の曲線関係がほぼ適用されると考えられるので、式(3)を各調査地区に適用した結果を表2に示す。重相関係数は、ほぼ $R \approx 0.98$ 程度でありよく適合している。なお、係数 a_1 および c_1 の有効数字はデータの精度より、高々3桁程度である。

表2をみると、 a_1 は約0.007~0.06(平均風速は約1.3m/sec)となっている。佐賀関の実家屋火災実験では、焼損面積(m²、 $G=A$) $G=150\text{m}^2$ のとき、 $a_1 \approx 0.143 \sim 0.460$ (平均風速は約1.8m/sec)、また $G=804\text{m}^2$ のとき $a_1=0.150$ である。これらと表2の a_1 を比較して、約1/20~1/8と小さくなっており、家屋が約30~70%全壊したと、平均風速が小さかったことにも影響しているものと思われる。

表2に基づいて、 a_1 および c_1 を求めた結果を式(4)、式(5)および図2、図3に示す。 a_1 および c_1 の最大値および最小値は、ほぼ最大、最小と思われるデータを描いたものである。

$$\left. \begin{aligned} \text{mean } a_1 &= 2.28 \times 10^{-20} \left(\frac{(1-D) \cdot v}{G} \right)^{5.17} + 0.0114 \quad (R:0.973) \\ \text{max } a_1 &= 2.16 \times 10^{-20} \left(\frac{(1-D) \cdot v}{G} \right)^{5.03} + 0.0206 \quad (R:0.999) \\ \text{min } a_1 &= 1.57 \times 10^{-19} \left(\frac{(1-D) \cdot v}{G} \right)^{5.01} + 0.00673 \quad (R:0.999) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

$$\left. \begin{aligned} \text{mean } c_1 &= 5.04 \times 10^{-9} \left(\frac{G}{(1-D) \cdot v} \right)^{2.06} + 88.7 \quad (R:0.970) \\ \text{max } c_1 &= 4.86 \times 10^{-7} \left(\frac{G}{(1-D) \cdot v} \right)^{1.71} + 160 \quad (R:0.999) \\ \text{min } c_1 &= 4.63 \times 10^{-1} \left(\frac{G}{(1-D) \cdot v} \right)^{2.22} + 12.7 \quad (R:0.999) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

表2 各調査地区における $G+n \cdot \varepsilon$ 、 a_1 、 c_1 および R

調査地区	$G+n \cdot \varepsilon$	a_1	c_1	重相関係数 R
1	122,820	0.00714	707	0.944
2	39,445	0.00375	233	0.993
3	31,872	0.00850	46.7	0.999
4	32,458	0.0186	186	0.998
5	55,638	0.0128	110	0.999
6	53,257	0.0205	167	0.999
8	10,675	0.0626	86.9	0.999

図2 a_1 と $(1-D) \cdot v / G$ の関係 図3 c_1 と $G / ((1-D) \cdot v)$ の関係

ここに、 $n \approx 1.91$ 、 G : 焼損区域 (m²: $10,000\text{m}^2 < G < 120,000\text{m}^2$)、 v : 風速 (m/sec: $0 < v < 6\text{m/sec}$)、 D : 全壊率 ($0.3 < D < 0.7$) である。 $v=0$ の場合は $v=0.1\text{m/sec}$ 程度として計算する。

式(4)および式(5)を分析するに際して、前論文の火災資料を一部修正しているが、結果的には、 $\text{mean } a_1$ は(前論文と比較して)ほとんど変化なく、 c_1 については、全壊率(D)を考慮して表現している。

また、式(1-f)に示すように、

$$c_1 = [\log_e \{m_1 \cdot a_1^{m_2} \cdot (G+n \cdot \varepsilon)\}] / a_1 \quad (1-f)$$

は、

$$\exp(a_1 \cdot c_1) / (G+n \cdot \varepsilon) = m_1 \cdot a_1^{m_2} \quad (3-d)$$

と表示できる。本研究のようにデータ数が少ない場合には相関係数が小さくなることがあるので、相関係数を求めてみる必要がある。表2より図4のように表示でき、 $R=0.998$ とよい相関を示している。 a_1 、 c_1 および $(G+n \cdot \varepsilon)$ は式(6)のような関係にあることがわかる。

$$\exp(a_1 \cdot c_1) / (G+n \cdot \varepsilon) = 58.3 a_1^{2.85} \quad (R:0.998) \quad (6)$$

また、実測の焼損面積と予測値の焼損面積 (A_{mean}) との重相関係数 (R^*) は、1地区(0.966)、2地区(0.822)、3地区(0.999)、4地区(0.851)、5地区(0.977)、6地区(0.981)、および8地区(0.990)である。全体では図5(予測値において、 a_1 、 c_1 および A は平均値、 $n=1.91$)に示すように、単相関係数 $r=0.972$ であり、かなりよく一致している。図6に調査地区2の場合を計算した結果を示す。

なお、延焼速度式には地域の特性データ(建ぺい率の変化、不燃領域の効果、建築物の混成率(木造・防火造・耐火造)の変化等)なども考慮すべきと考えられるが、それぞれの因子をモデルに組み込むには、現在のところデータ数が少なく、不明の項目も多く統計処理を行う上で困難である。また、消防活動による消しの効果についての検討が必要と考えられ、現在データを収集中である。現在のところ、式(4)および式(5)において、調査地区の特性や消火条件などは係数 n 、 ε 、 a_1 、 c_1 のなかに結果的に反映していると考えられるが、詳細の検討については今後の課題である。

4. 延焼速度式の予測

実火災においては火災発生場所やその時刻を完全に予測することは現在のところ困難である。しかし、火災発生初期の実火災データをもとにして、火災の延焼状況を予測することを検討する。

図6の調査地区2では、実測値は、 A_{mean} と A_{min} との間に画かれていることがわかる。そこで、図6の($x=73\text{min}$, $A=3,830\text{m}^2$)のときの a_1 および c_1 を次のようにして求めることにする。 $A_{mean}(x=73\text{min}$, $A=5,275\text{m}^2$, $a_1=0.0114$, $c_1=177$)、 $A_{min}(x=73\text{min}$, $A=2,531\text{m}^2$, $a_1=0.00673$, $c_1=314$)であるから、($x=73\text{min}$, $A=3,830\text{m}^2$)の場合の a_1 および c_1 を上記の A_{mean} および A_{min} の値より比例配分すれば、 $a_1=0.00894$ および $c_1=249$ となる。表1に示すように調査地区2は $G=36,830\text{m}^2$ であるから、式(3-a)より $\varepsilon=3579.7$ となり、 $G+n \cdot \varepsilon=43,667$ となる。これら $a_1=0.00894$ 、 $c_1=249$ および $G+n \cdot \varepsilon=43,667$ を式(1)に代入したものを図7($R:0.977$)に破線で示し、実測の火災データとの相関図を図8($r:0.977$)に示す。

次に、図6の($x=133\text{min}$, $A=7,200\text{m}^2$)の場合は $a_1=0.00809$ および $c_1=274$ であるから、($x=73\text{min}$, $A=3,830\text{m}^2$)の場合の $a_1=0.00894$ およ

図4 $\exp(a_1 \cdot c_1) / (G+n \cdot \varepsilon)$ と a_1 の関係

図5 実測値と予測値の相関(全調査地区)

図6 焼損面積と時間の関係(調査地区2)

び $c_1=249$ との平均値として、 $a_1=0.00852$ および $c_1=262$ および $G+n \cdot \varepsilon=43,663$ を図9に破線で示し、実測の火災データとの相関は $R=0.989$ となっている。

以下同様に、($x=193\text{min}$, $A=11,150\text{m}^2$, $a_1=0.00827$, $c_1=269$, $G+n \cdot \varepsilon=44,433$, $R=0.988$)、($x=253\text{min}$, $A=16,400\text{m}^2$, $a_1=0.00818$, $c_1=272$, $G+n \cdot \varepsilon=43,705$, $R=0.992$)、($x=298\text{min}$, $A=20,851\text{m}^2$, $a_1=0.00819$, $c_1=271$, $G+n \cdot \varepsilon=43,704$, $R=0.992$)、($x=313\text{min}$, $A=22,426\text{m}^2$,

$a_1=0.00822$, $c_1=271$, $G+n \cdot \varepsilon=43,699$, $R=0.992$), ($x=353\text{min}$, $A=25,369\text{m}^2$, $a_1=0.00825$, $c_1=270$, $G+n \cdot \varepsilon=43,694$, $R=0.991$), ($x=433\text{min}$, $A=27,793\text{m}^2$, $a_1=0.00816$, $c_1=272$, $G+n \cdot \varepsilon=43,711$, $R=0.992$), ($x=538\text{min}$, $A=32,788\text{m}^2$, $a_1=0.00808$, $c_1=275$, $G+n \cdot \varepsilon=43,727$, $R=0.991$)となっている。 $x=193\text{min}$, $A=11,150\text{m}^2$ の場合を図10の破線に示すが、 $x=253\text{min}$ 以降は同様の傾向を示すので省略する。

このように調査地区2の場合には、図7 ($x=73\text{min}$)および図9 ($x=133\text{min}$)のような火災発生初期の実火災データ数1, 2個の火災データによって、その後の火災の延焼状態をかなりの精度で予測することが可能であることがわかる。したがって、火災発生初期の実火災データ数1個および2個の場合による結果を各調査地区ごとに表3に示す。1個および2個の場合を分析したのは、1個の火災データでも予測可能であるが、精度を考えると2個のデータの方が好ましいという意味からである。表3の重相関係数 R' は、式(4)および式(5)に表1の値を代入して各調査地区の重相関係数を求めたものである。表3に示すように調査地区2は、 $R=0.822$ が $R=0.989$ 、調査地区4では、 $R=0.851$ が $R=0.940$ と上昇している。しかし、その他の調査地区では、重相関係数は少し低下している。

表3より、火災発生初期の実火災データ数2個の場合を各調査地区(1, 3, 4, 5, 6地区)ごとに、図11～図15に示す。調査地区8はデータ数が少ないので火災発生初期の実火災データ数1個の

図7 実測および予測の焼損面積と時間の関係(調査地区2: $x=73\text{min}$ の場合, $R:0.977$)

図8 実測値と予測値の相関(調査地区2: $x=73\text{min}$ の場合)

場合を図16に示す。表3および図9, 図11～図16に示すように重相関係数は、 $R \approx 0.80 \sim 0.95$ であり、神戸市の地震時火災発生初期の実火災データ数1個または2個によって、その後の火災の延焼状態をかなりの精度で予測することが、各調査地区とも可能であることがわかる。

図9 実測および予測の焼損面積と時間の関係(調査地区2: $x=133\text{min}$ の場合, $R:0.989$)

図10 実測および予測の焼損面積と時間の関係(調査地区2: $x=193\text{min}$ の場合, $R:0.988$)

図11 実測および予測の焼損面積と時間の関係(調査地区1: $x=433\text{min}$ の場合, $R:0.832$)

表3 各調査地区の x , a_1 , c_1 , $G+n \cdot \varepsilon$ および重相関係数 R

調査地区	火災発生初期の実火災データ数1個の場合					火災発生初期の実火災データ数2個の場合					R^*
	$X(\text{min})$	a_1	c_1	$G+n \cdot \varepsilon$	R	$X(\text{min})$	a_1	c_1	$G+n \cdot \varepsilon$	R	
1	298	0.0174	572	11,450	0.774	433	0.0159	609	11,453	0.832	0.966
2	73	0.00894	249	43,667	0.977	133	0.00852	262	43,663	0.989	0.822
3	153	0.0114	115	24,711	0.949	193	0.0112	120	24,468	0.958	0.999
4	45	0.00891	175	40,839	0.957	135	0.00833	180	41,348	0.940	0.851
5	23	0.0119	155	49,331	0.927	103	0.0133	140	49,323	0.972	0.977
6	43	0.0111	195	61,723	0.964	73	0.00972	237	60,510	0.862	0.981
8	76	0.0736	85.0	10,465	0.996	107	0.0818	80.6	10,454	0.966	0.990

図12 実測および予測の焼損面積と時間の関係(調査地区3: $x=193$ minの場合, $R:0.958$) 図14 実測および予測の焼損面積と時間の関係(調査地区5: $x=103$ minの場合, $R:0.972$) 図13 実測および予測の焼損面積と時間の関係(調査地区4: $x=135$ minの場合, $R:0.940$) 図15 実測および予測の焼損面積と時間の関係(調査地区6: $x=73$ minの場合, $R:0.862$)

図16 実測および予測の焼損面積と時間の関係（調査地区8 : $x=76$ minの場合, $R:0.996$ ）

5. 結論

本研究をまとめて列挙すれば以下のようである。

- (1) 神戸の地震時の式については、再度資料を一部再検討し、 a_1 は式(4)、 c_1 は式(5)で表示できる。結果的には、前論文¹⁷⁾と a_1 はほとんど変化なく、 a_1 、 c_1 および $(G+n \cdot \varepsilon)$ の関係については式(6)、 $R=0.998$ となっている。実測の焼損面積と予測値の焼損面積との相関は、全体では図5に示すように、本研究では相関係数は0.972であり、かなりよく一致している。
- (2) 延焼速度式の予測については、神戸市における地震時火災の調査地区2について、火災発生初期の実火災データをもとにして予測した結果は、図7～図10のようになり、全ての実測値との重相関係数は $R=0.98$ となり、かなりの精度でその後の火災の延焼状態を予測することが可能である。
- (3) 他の調査地区にこの予測手法（火災発生初期データ数2個、調査地区8は火災発生初期データ数1個）を適用した結果を表3に示したが、実火災データとの重相関係数は $R=0.80 \sim 0.95$ であり、図9、図11～図16にその結果を示した。

謝 辞

最後に、この研究に協力していただいた建設省建築研究所、自治省消防庁消防研究所、神戸市消防局並びに東京消防庁に感謝の意を表する次第である。また、本研究は、平成8年度文部省科学研究費重点領域研究「都市直下地震」の補助を受けたものである。記して

感謝する。

参考文献

- 1) 浜田稔：火災（中田金市編），共立出版，1969
- 2) 堀内三郎ほか：新版建築防火，朝倉書店，1994
- 3) 保野健治郎ほか：ロジスティック曲線による建物火災の延焼速度式に関する基礎的研究，日本建築学会論文報告集，No. 311，pp. 137～144，1982
- 4) 保野健治郎ほか：建物火災の延焼に関する基礎的研究，日本火災学会論文報告集，Vol. 32，No. 1，P23～32，1982
- 5) 保野健治郎ほか：定差図法による建物火災の延焼速度式（ロジスティック曲線）に関する基礎的研究，日本建築学会論文報告集，No. 311，P155～160，1983
- 6) 保野健治郎ほか：建物火災の放水による延焼阻止効果に関する基礎的研究，日本火災学会論文報告集，Vol. 32，No. 2，P57～65，1982
- 7) 保野健治郎ほか：建物火災と消防水利に関する一考察，日本火災学会研究発表会梗概集，P101～102，1981
- 8) 保野健治郎ほか：建物火災の消火と水損面積に関する基礎的研究，日本建築学会構造系論文報告集，No. 422，P135～143，1991
- 9) 保野健治郎ほか：市街地の建物火災に対応した消防水利計画に関する基礎的研究，土木学会論文集，No. 425/IV-14，P145～153，1991
- 10) 保野健治郎：建物火災の延焼速度式と所要消火水量に関する研究，日本火災学会論文報告集，Vol. 20，No. 2，1971
- 11) 神戸市消防局編：阪神・淡路大震災における消防活動の記録（神戸市域），（財）神戸市防災安全公社／東京法令出版株式会社，1995
- 12) 東京消防庁：地震時における市街地大火の延焼性状の解明と対策，1985
- 13) 糸井川栄一：市街地における出火・延焼危険評価手法に関する基礎的研究，東京工業大学学位論文，1990
- 14) 自治省消防庁消防研究所：実家屋群による大規模火災対策の研究調査報告書，1980
- 15) 近畿大学工学部，神戸市消防局：神戸市最適消防力調査報告書，1985
- 16) 難波義郎：火災の延焼機構とその都市防火施設および土地利用への適用に関する研究，京都大学学位論文，P89～91，1983.12
- 17) 保野健治郎ほか：地震時火災の延焼速度式に関する基礎的研究，日本火災学会論文集，P15～23，Vol. 44，No. 1.2，1996

（1997年2月10日原稿受理，1997年6月24日採用決定）