地震時市街地火災の延焼速度に関する基礎的研究

BASIC STUDY ON FIRE SPREAD SPEED OF SEISMIC FIRE ON URBAN AREA

難波 義郎*, 保野 健治郎**
Yoshiro NAMBA and Kenjiro YASUNO

In this paper, we have dealt with the fire spread speed at the time of the earthquake. We analyzed the data from the Great Hanshin-Awaji Earthquake. It has been expressed with the factor such as the district of urban area to be burnt, the complete collapse rate, the wind velocity and also time. From the burn-out area and the fire front length, the mean value of fire spread speed have been obtained. Furthermore the predictions of fire spread speed that are the mean value, the maximum value, and so forth have been examined. And we showed that we are able to predict the fire spread speed at the time of earthquake by using our fire spread model.

Keywords: earthquake, fire, fire spread speed, prediction

地震, 火災, 延焼速度, 予測

1. はじめに

地震時市街地火災の延焼速度 (m/h) については, 関東大震災以後, 多くの実験と研究がなされており, それらの研究成果を都市防火計画に導入すべく, 種々の構想が検討されている^{1)~3)}。

本研究では, 延焼面積を焼損区域面積, 全壊率, 風速および時間などの因子をもって表現し, その焼損面積 $A(\text{m}^2)$ と火面周長 $S_{\text{mean}}(\text{m})$ から延焼速度の平均値(V_{mean})を求め, この V_{mean} より, 各時間ごとの延焼速度の最大値(V_{max} (予測)), および延焼速度の実測値の最大値 V_{max} (実測)などの諸関係について基礎的な研究をしたものである。

従来から延焼速度の測定方法には, 次の2つの計算方法が用いられている^{1), 2)}。その第1は, 風下側の延焼速度 $V(\text{m/h})$ は, 出火点から風下へ向かって焼け止まり点まで測った距離 $K(\text{m})$ をその時間 x_c (min)で除した平均速度として,

$$V = K(x_c) / (x_c / 60) \quad (1)$$

とするものである。ここで, 延焼距離 K を時間 x の関数として $K(x)$ のように表現している。また, 第2の方法はある時間ごとの平均速度を $t(\text{min})$ 刻みで求めることにし, 延焼速度 V を時間 x の関数で表現して,

$$V(x) = \frac{K(x+t/2) - K(x-t/2)}{t/60} \quad (2)$$

とするものである。本研究では, 式(2)によって表現される距離延焼速度を単に延焼速度と呼ぶ。

2. 延焼速度の予測について

筆者らは, 出火からの経過時間 x における焼損面積 A を表わす延焼モデルを式(3)のように表わしている¹⁾⁻¹⁸⁾。

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

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

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

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

* 近畿大学工学部建築学科 助教授・工博

** 近畿大学工学部建築学科 教授・工博

Assoc. Prof., Kinki University, Department of Architecture, Faculty of Engineering, Dr. Eng.
Prof., Kinki University, Department of Architecture, Faculty of Engineering, Dr. Eng.

ここに、 A ：焼損面積(m^2 、ある時点 x における空地などを含む延焼区域の面積)、 x ：出火からの経過時間(min)、 G ：地震時火災のような放置火災の場合は最終焼損面積、平常時のように消火活動をする場合は、延焼危険のある区域面積(m^2 、ただし、 $A \leq G$)、 v ：風速(m/s)、 n ： $1 \leq n < 3$ として使用する。一般に n は、 $1.3 < n < 2$ 程度となる。また、 a_1 、 c_1 ：各火災事例では定数であるが、風速や全壊率等の影響を受けるもので、兵庫県南部地震における大火災の資料より、 a_1 、 c_1 を v 、 G および D (全壊率)の関数として表している¹⁴⁾。

さて、式(3)を x で微分すると式(4)となる¹⁶⁾。

$$dA/dx = a_1 \cdot A (1 - A/(G+n \cdot \varepsilon)) \quad (4)$$

また、火面周長上の延焼速度の平均値(V_{mean} ： m/min)は、次式で表示できる。

$$V_{mean} = (dA/dx) / S_{mean} \quad (5)$$

ここに、 S_{mean} ：出火からの経過時間 x での平均的な火面周長である。 S_{mean} は焼損面積 A の関数であり、 x の関数として表される。

平均的な火面周長 S_{mean} を兵庫県南部地震の神戸市大火について求め、これらを式(5)に代入して、これら大火の経過時間に対応した火面周長上の延焼速度の平均値(V_{mean})および最大値(V_{max})を求めることについて検討する。

3. 兵庫県南部地震市街地大火の延焼速度と予測について

神戸市消防局と東京消防庁の調査資料より、調査中で不明な場所は除外して分析の対象とした地区の全焼損面積(敷地および街路を含む)、全火面周長を表1に示す^{13) - 16)}。表1には参考のために各地区の建物の全壊率および平均風速を示した。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。平均風速は神戸市消防局(三宮)の記録を使用して求めている^{13) - 16)}。

今回の神戸市の地震時火災は、焼損面積 $A(m^2)$ と時間 $x(min)$ との関係は S カーブとなり、式(3)の曲線関係がほぼ適用される。非線形最小2乗法による各調査地区の適用結果を表2に示す。

次に、兵庫県南部地震における表1における全調査地区について延焼動態図の延焼等時曲線よりプランニメーターで計測した火面周長 $S_{mean}(m)$ と焼損面積 $A(m^2)$ の関係を図1に示す¹⁵⁾。この等時曲線は各地区の火災で時間間隔は必ずしも一定ではないが、それぞれの火災で数組のデータが得られた。そして、その関係を非線形最小2乗法で求めたものが式(6)である。

$$S_{mean} = 1.11 \cdot A^{0.655} \quad (R=0.958) \quad (6)$$

ここに、焼損面積 A は、 $10,000 < A < 120,000 m^2$ 程度である。そして、全調査地区を対象とする火面周長上の延焼速度の平均値

表1 調査地区のデータ概要

調査地区	全焼損面積	全火面周長	風速	全壊率
T1	111,440	2,130	1.57	0.714
T2	36,830	1,115	1.18	0.667
T3	17,537	616	0.95	0.460
T4	30,681	1,071	1.96	0.309
T5	39,200	1,154	0.89	0.485
T6	51,593	1,400	0.92	0.431
T8	10,427	388	1.64	0.587

表2 各調査地区の式(3)の係数

調査地区	$G+n \cdot \varepsilon$	a_1	c_1	重相関係数： R
T1	122,820	0.00714	707	0.944
T2	39,445	0.00875	233	0.998
T3	31,872	0.00850	46.7	0.999
T4	32,458	0.0186	186	0.998
T5	55,638	0.0128	110	0.999
T6	53,257	0.0205	167	0.999
T8	10,675	0.0626	86.9	0.999

図1 火面周長と焼損面積の関係¹⁵⁾

(V_{mean} ： m/min)は、式(4)、式(5)および式(6)より式(7)のようになる。

$$V_{mean} = a_1 \cdot A (1 - A/(G+n \cdot \varepsilon)) / (1.11 \cdot A^{0.655}) \\ = 0.900 \cdot a_1 \cdot A^{0.345} (1 - A/(G+n \cdot \varepsilon)) \quad (7)$$

次に、各調査地区の延焼速度の平均値(V_{mean})を各々のデータから求めることにする。火面周長は次式のように表示して、非線形最小2乗法により求めた各調査地区の火面周長の係数値を表3に示す。

$$S_{mean} = m_1 \cdot A^{m_2} \quad (\text{ここに } m_1, m_2; \text{係数}) \quad (8)$$

調査地区4を例にして述べる。表1、表2および表3より調査地区4(T4)は、 $G+n \cdot \varepsilon = 32,458$ 、 $a_1 = 0.0186$ 、 $c_1 = 186$ 、 $m_1 = 1.58$ 、 $m_2 = 0.631$ であるから、式(4)および式(5)より $V_{mean}(m/min)$ は式(9)となる。

表3 各調査地区の火面周長の係数 m_1 , m_2

調査地区	m_1	m_2	重相関係数: R
T1	2.19	0.592	0.996
T2	1.42	0.634	0.985
T3	3.57	0.527	0.947
T4	1.58	0.631	0.993
T5	0.15	0.846	0.979
T6	1.93	0.607	0.996
T8	7.89	0.421	0.953

図3 延焼速度と時間の関係(T4)

表4 各調査地区の延焼速度の補正係数

調査地区	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T8
補正係数: M	5.33	3.54	3.83	4.19	3.94	5.00	2.54
重相関係数: R	0.854	0.737	0.730	0.789	0.943	0.896	0.820
補正係数: M_1	2.24	5.56	3.95	10.7	3.13	7.08	8.49
補正係数: M_2	1.42	0.769	0.983	0.607	1.09	0.871	0.626
重相関係数: R	0.874	0.753	0.730	0.869	0.945	0.901	0.891

$$V_{max} = \frac{dV}{dt} = A(1 - A / (G + n \cdot \varepsilon)) / (m_1 \cdot A^{m_2})$$

$$= 0.0186 \cdot A(1 - A / 32,458) / 1.58 \cdot A^{0.631}$$

$$A = \frac{32,458}{1 - e^{-0.0186(x - 186)}} - \frac{32,458}{1 - e^{-0.0186 \times 186}} \quad (9)$$

次に、図2に V_{max} (実測)とその時の V_{mean} の関係を示すが、 V_{max} (予測)を式(10)のように直線の場合と式(11)のように指数関数で表現する方法を検討した。

$$V_{max}(\text{予測}) = M \cdot V_{mean} \quad (\text{ここに、} M; \text{補正係数}) \quad (10)$$

$$V_{max}(\text{予測}) = M_1 \cdot V_{mean}^{M_2} \quad (\text{ここに } M_1, M_2; \text{補正係数}) \quad (11)$$

図2 延焼速度 V_{max} (実測)と V_{mean} の関係(T4)

調査地区 4(T4)の場合は $M=4.19$ (重相関係数; $R=0.789$)となり、各時間ごとの $V_{max}(\text{予測})=M \cdot V_{mean}$ を図3の②として描いている。また、 V_{mean} は①として描いている。

各調査地区について、以上のような計算をした結果を表4に示している。表4に示すように実測値と式(10)による予測値の重相関係数は、約 0.94 ~ 0.73 である。なお、相関係数によって比較的強い創刊を示すことがわかるが、どの程度のばらつきがあるかを散布図で確認するために、全調査地区の全データについて V_{max} (実測)と V_{max} (予測)の関係を図4に示している。

次に、式(11)の指数関数の場合の重相関係数は、約 0.95 ~ 0.73 である。このように両者の相関係数は、ほとんど差がない。指数関

数の場合には、 M_1 および M_2 の初期値の与え方によっては収束しない場合もあるので、式(10)を使用して V_{max} (予測)の予測をしてもよいと思われる。

次に、各調査地区における各種延焼速度の時間変動に対する最大値について比較する。すなわち、 V_{max} (実測)の最大値、 V_{mean} の最大値およびその時の予測値(V_{max} (予測))の最大値を表5に示すが、平均の欄をみると、 V_{max} (実測)=65.7m/h である。 V_{max} (予測)は、 $M \cdot V_{mean}$ =62.9m/h (V_{mean} =16.6m/h)であり、 V_{max} (実測)と V_{max} (予測)の平均値はかなりよく一致している。そして、表5の V_{max} (実測)の最大値と V_{max} (予測)の最大値の相関係数は、図5に示すように 0.902 である。

ところで、図3には各時間ごとの実測値の最大値(●記号)で示しているが、時間間隔は一定ではない。すなわち、データが一定間隔でないために資料収集が不十分で、もっと大きな値の実測値を収集していない可能性がある。したがって、実測値のほぼ最大値「 V_{max} (実測; 2σ)」を計算する。 σ は標準偏差である。図3に示す各調査地区の実測データ(●記号)より各時間ごとの実測値の最大値の平均値($\bar{V}_{max}$ (実測))、標準偏差 σ を計算し、実測値のほぼ最大値「 V_{max} (実測; 2σ)」= $[\bar{V}_{max}(\text{実測}) + 2\sigma]$ を求めたものを表5の V_{max} (実測; 2σ)として記入し、図3の③に示している。●記号の実測値の分布が正規分布である場合は、ほぼ95%の実測値が $\bar{V}_{max}(\text{実測}) \pm 2\sigma$ の間に入ることが知られている¹⁷⁾。例えば、調査地区4(T4)の場合は $\bar{V}_{max}(\text{実測}) + 2\sigma = 26.5 + 2 \times 22.6 = 71.6$ m/h となる。③は、 $V_{max}(\text{実測; } 2\sigma) / V_{mean} = 71.6 / 15.0 = 4.77$ であるから、③=4.77・ V_{mean} として描いている。このように調査地区4(T4)は $V_{max}(\text{実測}) \approx 57.0$ m/h であったが、 $V_{max}(\text{予測}) \approx 62.9$ m/h、 $V_{max}(\text{実測; } 2\sigma) \approx 71.6$ m/h の可能性があるとして図3に示している。他の調査地区も同様に計算し、表5に示している。

次に、全調査地区について V_{max} (予測)と V_{mean} との関係を非線型最小2乗法で計算した結果を式(12.1)~式(12.3)に示す。(12.2)は、すべてのデータからの回帰式であり、ほぼ中央を描くので、変数の前に下つき添字を用いて $_{min}V_{max}(\text{予測})$ と表示する。(12.1)および式(12.3)は、ほぼ最大値および最小値を描いて求めたもので、同様に

図4 V_{max} (実測)と V_{max} (予測)の関係 図6 延焼速度 V_{max} (実測)と V_{mean} の関係表5 V_{max} (実測), V_{mean} , V_{max} (予測), V_{max} (実測; 2 σ)の最大値

調査 地区	V_{max} (実測)	V_{mean} (予測)	V_{max} (予測)	V_{max} (実測; 2 σ)
		①	②	③
T1	66.0	10.5	56.0	76.2
T2	37.0	8.03	28.4	44.7
T3	42.0	8.00	30.0	46.9
T4	57.0	15.0	62.9	71.6
T5	70.0	18.0	70.6	99.2
T6	114	20.0	100	120
T8	74.0	36.5	92.7	96.2
平均	65.7	16.6	62.9	79.3

(単位: m/h)

図5 V_{max} (実測)の最大値と V_{max} (予測)の最大値の関係 V_{max} (予測)および V_{min} (予測)と表示する。

$$V_{max}(予測) = 11.2 \cdot V_{mean}^{0.735} \quad (12.1)$$

$$V_{max}(予測) = 7.06 \cdot V_{mean}^{0.785} \quad (12.2)$$

$$V_{min}(予測) = 3.48 \cdot V_{mean}^{0.885} \quad (12.3)$$

さらに、全調査地区について V_{max} (実測)と V_{mean} との関係を図6に示し、その関係を非線形最小2乗法で計算した結果を式(13.1)～式(13.3)に示す。図6にはこれらの曲線および式(12.1)～式(12.3)を描いている。なお、前式同様に式(13.2)は、すべてのデータからの回帰式であり、ほぼ中央を描くので、 V_{max} (予測)と表示する。式(13.1)および式(13.3)は、ほぼ最大値および最小値を描いて求めた

もので、 $MAX V_{max}$ (予測)および $MIN V_{max}$ (予測)と表示する。

$$MAX V_{max}(実測) = 17.9 \cdot V_{mean}^{0.645} \quad (13.1)$$

$$V_{max}(実測) = 7.21 \cdot V_{mean}^{0.783} \quad (13.2)$$

$$MIN V_{max}(実測) = 3.09 \cdot V_{mean}^{0.818} \quad (13.3)$$

表6には V_{max} (予測):式(12.1)と $MAX V_{max}$ (実測):式(13.1), V_{max} (実測):式(13.2)の最大値を表示している。また、 $MAX V_{max}$ (実測)および $MIN V_{max}$ (実測)によって兵庫県南部地震による神戸市内の延焼速度(実測値)の最大値および最小値の概略値が求まる。そして、式(12.2)および式(12.2)よりわかるように $V_{max}(予測) \approx V_{max}(実測)$ である。式(13.2)より計算した結果は表6に $V_{max}(実測)$ として示しているが、 $V_{max}(予測)$:②の最大値と $V_{max}(実測)$:式(13.2)の最大値を比較すると、平均値は62.9m/hと63.4m/hであり、ほぼ一致している。相関係数は図7に示すように0.837である。したがって、 $V_{max}(予測)$ は式(13.2)の $V_{max}(実測)$ でほぼ求まると思われる。 $V_{max}(実測; 2\sigma)$:③の最大値と $V_{max}(予測)$:②の最大値との相関係数は、図8に示すように0.957であるので、 $V_{max}(実測; 2\sigma)$ は、 $V_{max}(予測)$ でほぼ求められると思われる。以上のように、全体のデータによって比較的高い相関係数があることがわかったので、 $V_{max}(実測)$ と $V_{max}(予測)$ の関係、 $V_{max}(予測)$ と $V_{max}(実測)$ の関係並びに $V_{max}(実測; 2\sigma)$ と $V_{max}(予測)$ の関係について以下のような定式化を試みる。この場合、原点を通る直線、任意の直線および指数関数(べき乗関数)の3種類を仮定して、これらの数式による直線・曲線と実測値との隔たり・乖離が具体的にどの程度あるかを検討する。このように数式化・グラフ化しておくことは地震時のような情報の少ない状況の下で延焼速度を予測する場合に有効と考えられるからである。

$$V_{max}(実測) = 0.999 \cdot V_{max}(予測) \quad (R=0.890) \quad (14.1)$$

$$V_{max}(実測) = 0.968 \cdot V_{max}(予測) + 1.58 \quad (R=0.891) \quad (14.2)$$

$$V_{max}(実測) = 1.49 \cdot V_{max}(予測)^{0.901} \quad (R=0.894) \quad (14.3)$$

$$V_{max}(予測) = 0.997 \cdot V_{max}(実測) \quad (R=0.920) \quad (15.1)$$

表6 V_{max} (予測), $mean V_{max}$ (実測)および $MAX V_{max}$ (実測)の最大値

調査 地区	$max V_{max}$ (予測) 式(12.1)	$mean V_{max}$ (実測) 式(13.2)	$MAX V_{max}$ (実測) 式(13.1)
T1	63.1	45.4	81.6
T2	51.8	36.2	68.6
T3	51.6	36.7	68.4
T4	82.0	60.1	103
T5	93.7	69.3	115
T6	101	75.3	124
T8	156	121	182
平均	85.6	63.4	106

(単位: m/h)

図7 延焼速度 V_{max} (予測)の最大値と $mean V_{max}$ (実測)の最大値の関係 図8 V_{max} (実測; 2σ)の最大値と V_{max} (予測)の最大値の関係

$$V_{max}(\text{予測}) = 1.04 \cdot mean V_{max}(\text{実測}) - 3.11 \quad (R=0.923) \quad (15.2)$$

$$V_{max}(\text{予測}) = 0.917 \cdot mean V_{max}(\text{実測})^{1.02} \quad (R=0.920) \quad (15.3)$$

$$V_{max}(\text{実測; } 2\sigma) = 1.22 \cdot V_{max}(\text{予測}) \quad (R=0.915) \quad (16.1)$$

$$V_{max}(\text{実測; } 2\sigma) = 0.958 \cdot V_{max}(\text{予測}) + 19.0 \quad (R=0.957) \quad (16.2)$$

$$V_{max}(\text{実測; } 2\sigma) = 3.86 \cdot V_{max}(\text{予測})^{0.734} \quad (R=0.958) \quad (16.3)$$

次に、以上の式(14.1)～式(16.3)と表7についてより詳細に検討する。そして、どの式が適当であるかについては、種々の基準が考えられるが、次の基準を考慮することにする。

- (1) 重相関係数がより大きいこと
- (2) 平均値がほぼ一致すること
- (3) 各予測値と各実測値の差を次の3段階に分類し、より実測値

に近い値を示す式を選定する。

- 実測値との割合が20%以上～30%未満小のもの(▽記号)および大のもの(△記号)
- 実測値との割合が30%以上～50%未満小のもの(▼記号)および大のもの(▲記号)
- 実測値との割合が50%以上小のもの(↓記号)および大のもの(↑記号)

そして、表7に示す数値は、 V_{max} (実測): (f)～(h): 式(14.1)～式(14.3)と V_{max} (予測): (c)～(e): 式(15.1)～式(15.3)の場合には、 V_{max} (実測): (a)を基準(1.00)として、それぞれの数値の割合[(c)/(a)～(h)/(a)]を示している。

また、 V_{max} (実測; 2σ): (l)～(n): 式(16.1)～式(16.3)の場合には、 V_{max} (実測; 2σ): (k): ③を基準(1.00)として、それぞれの数値の割合[(l)/(k)～(n)/(k)]を示している。

V_{max} (予測) = $M \cdot V_{max}$: ②を代入して V_{max} (実測)を求める式(14.1)～式(14.3)の場合には、それぞれの重相関係数と割合の値を比較すると、式(14.1)は重相関係数 $R = 0.890$, (f)/(a)=0.957であり、式(14.2)は $R = 0.891$, (g)/(a)=0.951, 式(14.3)は $R = 0.894$, (h)/(a)=0.947となっており、ほぼ差がない。式(14.1)の場合に調査地区 T2 (0.767, ▽), T3 (0.714, ▽), T8 (1.25, ▽), 式(14.2)の場合に調査地区 T3 (0.731, ▽), T8 (1.23, △) および式(14.3)の場合に T3 (0.760, ▽) が、 V_{max} (実測)と20～30%の割合で離れているが、30%以上の乖離はない。したがって、式(14.2)と式(14.3)が、より適当であると考えられる。しかし、式(14.2)の場合は V_{max} (予測)が0に近くなると、 V_{max} (実測) ≈ 1.58 m/hと一定値を示すので、式(14.3)がより適当であろう。式(14.3)の場合を図9に示す。

次に、 V_{max} (実測; 2σ): ③と V_{max} (予測) = $M \cdot V_{max}$: ②の関係を表す式(16.1)～式(16.3)の場合について検討する。式(16.1)は $R = 0.915$, (l)/(k)=0.968であり、T2 (0.775, ▽), T3 (0.780, ▽)が20～30%の割合で離れている。さらに、それぞれの重相関係数と割合の値を比較すると、式(16.2)は $R = 0.957$, (m)/(k)=0.994となっており、式(16.3)は $R = 0.958$, (n)/(k)=1.02である。式(16.2)の場合には V_{max} (予測)が0に近くなると V_{max} (実測; 2σ) ≈ 19.0 m/hと一定値を示すので、式(16.3)がより適当であろう。式(16.3)の場合を図10に示す。

次に、 V_{max} (予測) = $M \cdot V_{max}$: ②と $mean V_{max}$ (実測): 式(13.2)の関係を表す式(15.1)～式(15.3)について検討する。式(15.1)は $R = 0.920$, (c)/(a)=0.943であり、T1 (0.672, ▼), T6 (0.645, ▼), T8 (1.60, ↑)となっている。式(15.2)の場合には、 $R = 0.923$, (d)/(a)=0.956

図9 延焼速度 V_{max} (実測)と V_{max} (予測)の関係

表7 V_{max} (実測), V_{max} (実測; 2 σ), V_{max} (予測) および V_{max} (実測) の最大値

調査地区	$V_{\max}$ (実測)	③: $V_{\max}$ (実測; 2 σ)	$V_{\max}$ (実測; 2 σ) 式(16.1)	$V_{\max}$ (実測; 2 σ) 式(16.2)	$V_{\max}$ (実測; 2 σ) 式(16.3)	$V_{\max}$ (予測) 式(15.1)	$V_{\max}$ (予測) 式(15.2)	$V_{\max}$ (予測) 式(15.3)	$V_{\max}$ (実測) 式(14.1)	$V_{\max}$ (実測) 式(14.2)	$V_{\max}$ (実測) 式(14.3)									
	(a)	(k)	(l) (l)/(k)	(m) (m)/(k)	(n) (n)/(k)	(c) (c)/(a)	(d) (d)/(a)	(e) (e)/(a)	(f) (f)/(a)	(g) (g)/(a)	(h) (h)/(a)									
T1	66.0	76.2	68.3	0.897	71.6	0.940	74.1	0.972	44.4	0.672▼	44.1	0.668▼	44.9	0.681▼	55.9	0.848	55.7	0.844	56.0	0.849
T2	37.0	44.7	34.6	0.775▽	46.2	1.03	45.0	1.01	35.4	0.956	34.5	0.933	35.7	0.964	28.4	0.767▽	29.9	0.808	30.4	0.821
T3	42.0	46.9	36.6	0.780▽	45.8	0.977	46.9	0.999	35.9	0.854	35.1	0.835	36.2	0.861	30.0	0.714▽	30.7	0.731▽	31.9	0.760▽
T4	57.0	71.6	76.7	1.07	78.5	1.10	80.7	1.13	58.7	1.03	59.4	1.04	59.8	1.05	62.8	1.10	62.4	1.09	62.2	1.09
T5	70.0	99.2	86.1	0.868	86.1	0.868	87.8	0.885	67.7	0.967	69.0	0.985	69.2	0.988	70.5	1.01	69.8	0.997	69.0	0.986
T6	114	120	122	1.02	115	0.958	113	0.945	73.6	0.645▼	75.2	0.660▼	75.3	0.660▼	99.9	0.876	98.1	0.861	94.4	0.828
T8	74.0	96.2	113	1.18	108	1.12	107	1.11	118.2	1.60↑	122.7	1.66↑	122.1	1.65↑	92.6	1.25△	91.1	1.23△	88.2	1.19
平均	65.7	79.3	76.8	0.968	78.8	0.994	80.7	1.02	61.9	0.943	62.8	0.956	63.2	0.961	62.9	0.957	62.5	0.951	62.2	0.947

(単位: m/h)

であり, T1 (0.668, ▼), T6 (0.660, ▼), T8 (1.66, ↑) となっている。式(15.3)は, $R = 0.920$, $(e)/(a) = 0.980$ であり, T1 (0.681, ▼), T6 (0.660, ▼), T8 (1.65, ↑) となっており, 式(15.3)がややよい。また, それぞれの重相関係数と割合の値を比較するとほとんど差がないが, 式(15.3)が最も高い。以上のことから, 式(15.1)～式(15.3)の中では, 式(15.3)がより適当であると考えられる。式(15.3)の場合を図11に示す。

また, V_{max} (実測): (a)を求める式(14.1)～式(14.3)および V_{max} (実測; 2 σ): ③を求める式(16.1)～式(16.3)において, 式(10)より求めた V_{max} (予測): ②を代入するかわりに, 式(15.1)～式(15.3)の V_{max} (実測)に式(13.2)を適用して求める V_{max} (実測)を代入して求めてもよい。

次に, 図12に調査地区4(T4)の場合の V_{max} (実測), V_{max} , 式(14.3): ①および式(16.3): ③を示す。図12のように, ①は実測値のほぼ中間に位置する。また, ③は図3の③と比較すると違いがよくわかるが, 実測値のほぼすべてを包含するように描かれている。

4. 結論

本研究で得られた結論をまとめると以下のようである。

(1) 各調査地区に対して, 焼損面積 A および火面周長 S_{max} の式より延焼速度 V_{max} を求めることができる。

V_{max} (予測) を求めるには, V_{max} に一次式で求めた補正係数 M を利用した式(10)と, 指数関数で求めた補正係数 M_1 , M_2 を利用した式(11)がある。表4に示す通り, 両者の相関係数に大きな差はない。したがって, 式(10)を使用して予測することができる。

(2) 全調査地区の V_{max} (予測), V_{max} (予測), V_{max} (予測) と V_{max} との関係を式(12.1)～式(12.3)に示した。同様に, V_{max} (実測), V_{max} (実測), V_{max} (実測) と V_{max} との関係を図6と式(13.1)～式(13.3)に示した。

その結果, V_{max} (予測): 式(12.2) $\approx$ V_{max} (実測): 式(13.2)である。また, 式(13.1)および式(13.3)で示す V_{max} (実測) および V_{max} (実測) によって, 兵庫県南部地震の神戸市内の延焼速度(実測値)による最大値および最小値が示される。

(3) 表5, 表6および表7に示すように全調査地区の平均を比較すると, V_{max} (実測) と V_{max} (予測) はほぼ一致した。したがって, V_{max} (予測) は V_{max} (実測): 式(15.3)でほぼ求まる。

また, 式(14.1)～式(16.3)においては, 重相関係数と, 各予測値の平均および各実測値との割合をとったもので判断した。

その結果, V_{max} (実測), V_{max} (予測) および V_{max} (実測; 2 σ) を

図10 V_{max} (実測; 2 σ) の最大値と V_{max} (予測) の最大値の関係 図11 V_{max} (予測) と V_{max} (実測) の関係

図12 延焼速度と時間の関係(T4)

求める場合は、それぞれ指数関数で表した式(14.3)、式(15.3)および式(16.3)が、より適当であると考えられる。これらの主な関係について、調査地区4の場合を図12に示した。

今後は、阪神大震災の解析だけではなく、同じく直下型地震といわれる福井地震、また平常時大火(昭和21年～昭和27年)等を解析し、比較検討を行う必要があると思われる。

なお、非線形最小2乗法の計算は主として、株式会社ヒューリンクス製のKALEIDAGRAPH-J(バージョン3.05, マッキントッシュ版)によった。

謝辞

この研究に際し、ご協力して頂いた建設省建築研究所、消防庁消防研究所、東京消防庁並びに神戸市消防局に感謝の意を表する次第である。

参考文献

- 1) 東京消防研究会：火災に於ける延焼速度, pp.3～4, 東京消防研究会, 1942
- 2) 内田祥文：建築と火災, p.120, 相模書房, 1953
- 3) 堀内三郎ほか：新版建築防火, pp.178～230, 朝倉書店, 1994
- 4) 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
- 5) 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, pp.23～32, 1982
- 6) 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, pp.155～160, 1982
- 7) 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, 日本火災学会論文集, Vol.32, No.2, pp.57～65, 1982
- 8) 保野健治郎ほか：建築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, pp.101～102, 1981
- 9) 保野健治郎ほか：建築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, pp.135～143, 1991
- 10) 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, 土木学会文集, No.425/IV-14, pp.145～153, 1991
- 11) 保野健治郎：建物火災の延焼速度式と所有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, pp.55～63, 1971
- 12) 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, pp.141～161, 1995
- 13) 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, 日本火災学会論文報告集, Vol.44, No.1・2, pp.15～23, 1996
- 14) 保野健治郎ほか：地震時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報告集, No.501, pp.9～16, 1997
- 15) 保野健治郎ほか：平常時および地震時火災の所要消防力と火面周長に関する基礎的研究, 日本火災学会論文報告集, Vol.47, No.1・2, pp.1～12, 1997
- 16) 保野健治郎ほか：地震時および強風下における市街地火災の延焼速度と予測に関する基礎的研究, 日本火災学会論文報告集, Vol.48, No.1, pp.1～10, 1998
- 17) 松原望ほか：統計学入門, 東京大学出版会, p.262～264, 1991

(1998年5月6日原稿受理, 1998年12月15日採用決定)