

地震火災の時間的発生分布について

自治省消防研究所 関沢 愛

関東大地震、福井地震、1968年十勝沖地震の火災事例で、出火原因及び出火時刻が判明している火災データに基づいて、地震発生後60分以内の出火原因別・時間経過別の火災発生累積頻度分布を求め、これについてワイブル分布による近似を行った。その結果、ワイブル分布による時間別地震火災発生確率の推定値と過去の火災データによる実績値とはきわめて高い相関を示し、かなり良い一致を示すことが分かった。また、季節・時間帯別の出火原因内訳比率を考慮した地震火災の時間的発生分布のワイブル近似を、「冬の夕方」及び「夏の夕方」について行い、これらを利用して地震発生時に地震後初期の火災情報に基づいて、リアルタイムにその後の火災発生状況を推定する方法を検討した。

地震火災の時間的発生分布について

関沢 愛

(平成2年11月30日受理)

関東大地震、福井地震、1968年十勝沖地震の火災事例で、出火原因及び出火時刻が判明している火災データに基づいて、地震発生後60分以内の出火原因別・時間経過別の火災発生累積頻度分布を求め、これについてワイブル分布による近似を行った。その結果、ワイブル分布による時間別地震火災発生確率の推定値と過去の火災データによる実績値とはきわめて高い相関を示し、かなり良い一致を示すことが分かった。また、季節・時間帯別の出火原因内訳比率を考慮した地震火災の時間的発生分布のワイブル近似を、「冬の夕方」及び「夏の夕方」について行い、これらを利用して地震発生時に地震後初期の火災情報に基づいて、リアルタイムにその後の火災発生状況を推定する方法を検討した。

1. はじめに

大地震時に想定される同時多発火災に対して、効果的に消防力を運用するためには、地震火災発生状況の的確な把握が不可欠である。大地震時に発生する出火件数の予測については既往の研究成果^{1) 2)}があり、幾つかの予測手法が紹介されている。これらの予測手法は、事前の被害想定等に対してはきわめて有用な情報を提供するものの、出火件数の推定の際には前提条件としてあらかじめ地震の規模等の想定を行う必要がある。

そこで、実際に大地震が発生したときに地震後初期の間に刻々と消防機関に入手される火災情報に基づいて、リアルタイムにその後の火災発生状況を推定することができれば、消防力の効果的な運用方針の決定に大いに役立つと考えられる。本研究は、過去の地震火災データに基づいて地震火災の時間的発生分布を求めることにより、地震発生後の火災発生状況を推定する方法を検討したものである。

2. 過去の地震火災データと時間別出火状況の特徴

2.1 時間別出火状況推定の対象時間範囲

Table 1は、文献1)における過去の地震火災データに基づいて、地震発生後60分以内の火災の発生状況を整理したものである。ここでは、地震発生直後の火災発生状況を概ね把握する一区切りとして1時間という時間経過を設定した。地震時に消防機関の体制が初動運用から2次の運用(広域的運用)に移行する時間的目安が、東京消防庁等の主要都市で概ね1時間であることから、初動運用体制を決定するための火災被害予測の時間的対象範囲として1時間を採用したものである。

なお、関東大地震、新潟地震及び十勝沖地震における火災発生件数の時間別累積分布を示した文献1)によるFig.1を見ると、関東大地震では1時間経過以降にも全出火件数の2割程度の火災が発生しているが、図中の表示のように主地震の30分経過以降に何度も大きな余震があり、これらの影響がその後の出火件数にある程度影響を与えていることも考えられる。実際のところ、Fig.2に示すように、関東大地震についても1時間という範囲だけに限って見れば、出火件数の時間的分布は地震直後に集中し、その後徐々に減ってゆき60分あたりではほぼ0に近くなるという指数分布的なパターンであることがわかる。

Table 1 Post-earthquake fire incidence by time lapse after a main shock.
Source: Fire data from the literature [1].

		Time lapse after a main shock (min.)									Total
		~5	6~10	11~15	16~20	21~25	26~30	31~40	41~50	51~60	
The great Kanto earthquake 1923 9/1 11:58	Chemicals	29	5	6	1	3	0	1	0	0	45
	Gas apparatuses	7	1	0	2	1	0	2	0	0	13
	Solid fuel apparatuses	61	7	21	8	11	0	16	5	4	133
	Kitchen fires	10	2	9	5	5	0	4	2	0	37
	Others	4	2	0	0	1	0	2	0	0	9
	Column total	111	17	36	16	21	0	25	7	4	237
	Frequency (%)	46.8	7.2	15.2	6.7	8.9	0.0	10.6	2.9	1.7	100.0
	Cumulative number	111	128	164	180	201	201	226	233	237	237
	Cumulative frequency (%)	46.8	54.0	69.2	75.9	84.8	84.8	95.4	98.3	100.0	100.0
The Fukui earthquake 1948 6/28 16:13	Chemicals	1	6	3	0	0	0	0	0	0	10
	Solid fuel apparatuses	1	2	2	4	0	0	0	0	0	9
	Kitchen fires	0	2	4	4	2	1	4	0	0	17
	Others	0	0	1	2	2	0	0	0	0	5
	Column total	2	10	10	10	4	1	4	0	0	41
	Frequency (%)	4.9	24.4	24.4	24.3	9.8	2.4	9.8	0.0	0.0	100.0
	Cumulative number	2	12	22	32	36	37	41	41	41	41
	Cumulative frequency (%)	4.9	29.3	53.7	78.0	87.8	90.2	100.0	100.0	100.0	100.0
The Tokachi-oki earthquake 1968 5/16 9:49	Chemicals	3	2	0	0	0	0	0	0	0	5
	Kitchen fires	3	3	0	0	0	0	0	0	0	6
	Kerosene heaters	9	3	1	0	0	0	0	0	0	13
	Others	2	3	0	0	0	0	0	0	0	5
	Column total	17	11	1	0	0	0	0	0	0	29
	Frequency (%)	58.6	38.0	3.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0
	Cumulative number	17	28	29	29	29	29	29	29	29	29
	Cumulative frequency (%)	58.6	96.6	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

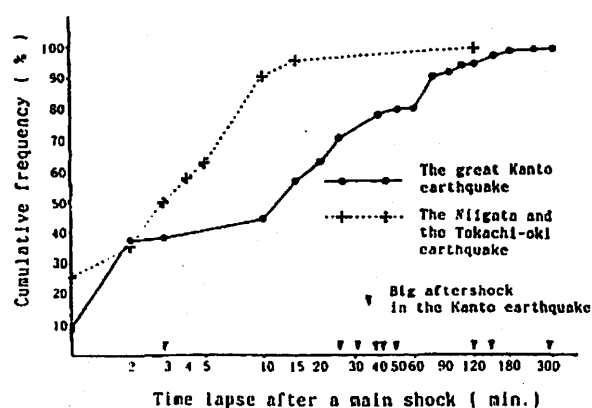


Fig. 1 Cumulative distribution of post-earthquake fire incidence by time lapse after a main shock from the literature [1].

2.2 時間別出火状況の特徴

Fig.2～Fig.4は、Table 1のそれぞれの地震ごとに火災の時間別発生頻度分布をヒストグラムにして示したものである。1968年十勝沖地震は、地震直後（10分以内）にほとんどの火災が発生しているのに対して、関東大地震は直後（5分以内）に約半数の火災が発生しているものの、残りの火災はそれ以降も徐々に頻度が減少しながら発生している。福井地震は、これらの2つの地震とはかなり異なり、直後よりしばらくして（5分から15分）の間に山がある頻度分布となっている。関東大地震と1968年十勝沖地震の間の違いの理由は、主として使用火気器具すなわち出火原因の時代変化によるものと考えられる。

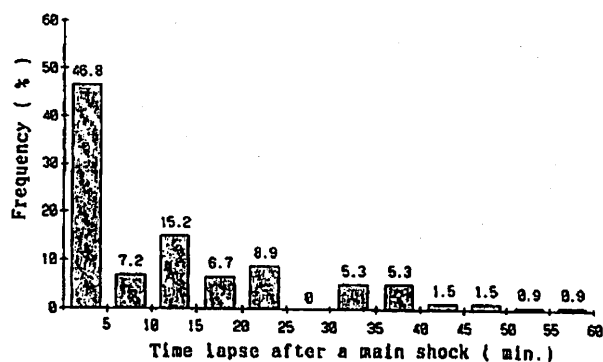


Fig. 2 Fire incidence distribution by time lapse within 60 min. after a main shock for the great Kanto earthquake of 1923.

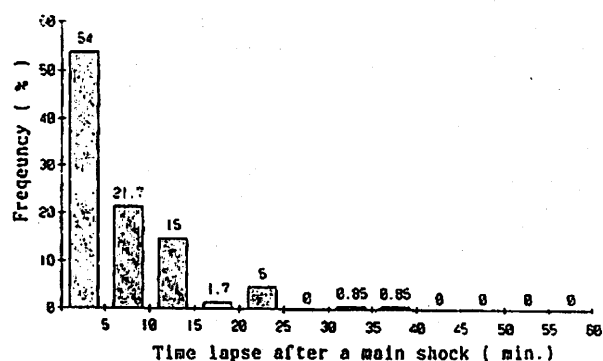


Fig. 5 Incidence distribution of post-earthquake fires caused by chemicals by time lapse within 60 min. after a main shock.

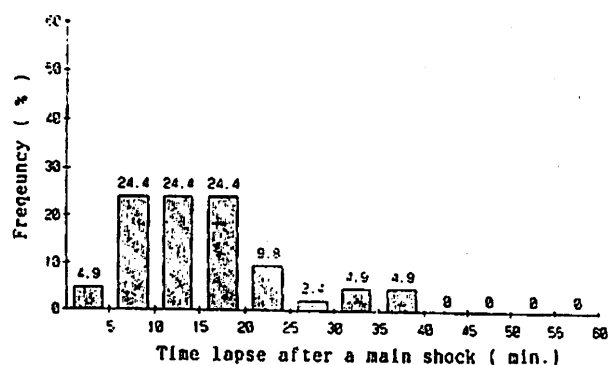


Fig. 3 Fire incidence distribution by time lapse within 60 min. after a main shock for the Fukui earthquake of 1948.

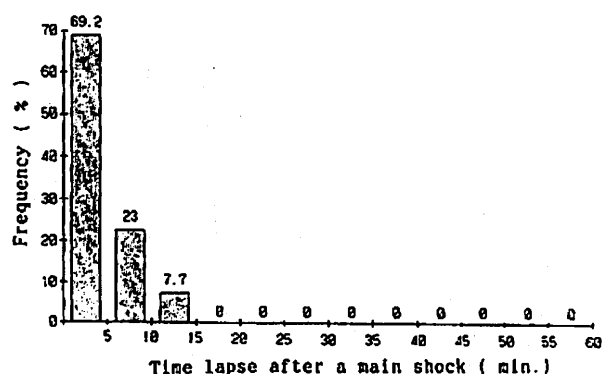


Fig. 6 Incidence distribution of post-earthquake fires caused by kerosene heaters by time lapse within 60 min. after a main shock.

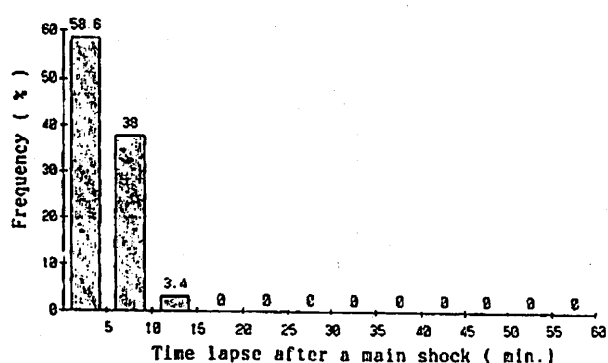


Fig. 4 Fire incidence distribution by time lapse within 60 min. after a main shock for the Tokachi-oki earthquake of 1968.

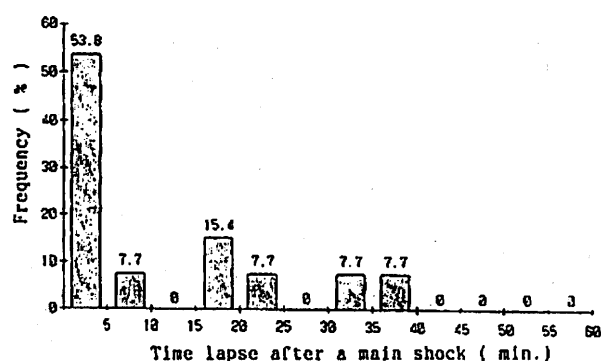


Fig. 7 Incidence distribution of post-earthquake fires caused by gas apparatuses by time lapse within 60 min. after a main shock.

Table 2は、Table 1に基づいて、出火原因別の時間別出火状況を求めたものである。Fig.5～Fig.9は、Table 2に基づいて、出火原因別の時間別火災発生頻度をヒストグラムにして示したものである。薬品、石

油ストーブは、直後に火災発生が集中しているのに対して、七輪・カマドは直後に多く発生しているものの、それ以降も少しずつ発生しており、頻度分布の裾野がなだらかに伸びる傾向がある。七輪・カマドは、関東

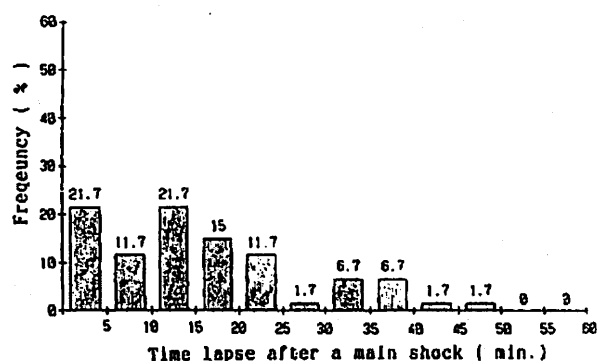


Fig. 8 Incidence distribution of post-earthquake fires which occurred in a kitchen by time lapse within 60 min. after a main shock.

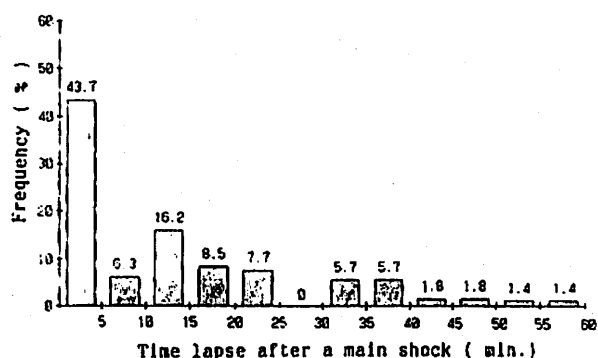


Fig. 9 Incidence distribution of post-earthquake fires caused by solid fuel apparatuses by time lapse within 60 min. after a main shock.

Table 2 Post-earthquake fire incidence by fire cause by time lapse after a main shock.

Source: Fire data from the literature [1].

Fire Cause		Time lapse after a main shock (min.)									Total
		~5	6~10	11~15	16~20	21~25	26~30	31~40	41~50	51~60	
Chemicals	Number of fires	33	13	9	1	3	0	1	0	0	60
	Frequency (%)	55.0	21.7	15.0	1.7	5.0	0.0	1.7	0.0	0.0	100.0
	Cumulative frequency (%)	55.0	76.7	91.7	93.4	98.4	98.4	100.0	100.0	100.0	100.0
Kerosene heaters	Number of fires	9	3	1	0	0	0	0	0	0	13
	Frequency (%)	69.2	23.0	7.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0
	Cumulative frequency (%)	69.2	92.3	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
Gas apparatuses	Number of fires	7	1	0	2	1	0	2	0	0	13
	Frequency (%)	53.8	7.7	0.0	15.4	7.7	0.0	15.4	0.0	0.0	100.0
	Cumulative frequency (%)	53.8	61.5	61.5	76.9	84.6	84.6	100.0	100.0	100.0	100.0
Kitchen fires	Number of fires	13	7	13	9	7	1	8	2	0	60
	Frequency (%)	21.7	11.7	21.7	15.0	11.7	1.7	13.3	3.3	0.0	100.0
	Cumulative frequency (%)	21.7	33.4	55.1	70.1	81.8	83.5	96.8	100.0	100.0	100.0
Solid fuel apparatuses	Number of fires	62	9	23	12	11	1	8	2	0	142
	Frequency (%)	43.7	6.3	16.2	8.5	7.7	0.0	11.3	3.5	2.8	100.0
	Cumulative frequency (%)	43.7	50.0	66.2	74.7	82.4	82.4	93.7	97.2	100.0	100.0
Chemicals, Gas apparatuses, and Kerosene heaters	Number of fires	49	17	10	3	4	0	3	0	0	86
	Frequency (%)	57.0	19.8	11.6	3.5	4.6	0.0	3.5	0.0	0.0	100.0
	Cumulative frequency (%)	57.0	76.8	88.4	91.9	96.5	96.5	100.0	100.0	100.0	100.0

大地震における火災の主たる出火原因であり、従って、関東大地震の時間別発生頻度はこれとほぼ同じ分布の形となっている。また、出火原因が炊事場として挙げられているものも、これらの60件のうち46件が関東大

地震と福井地震のものであることから、直後（5分以内）を除けば分布の形が七輪・カマドとよく似ており、実際の出火原因としてはこれらと同様の個体燃料タイプの火気器具によるものであることを伺わせている。

ガス器具は、直後の頻度集中が高いものの、やはり分布の裾野が伸びる傾向を有しており、特徴としては薬品・石油ストーブの類と、七輪・カマド類との中間にあると言える。

なお、今後の予測のための基礎データとしては、できる限り近年の地震火災事例を用いることが、調査水準の面からも、また、生活様式の類似性の面からも望ましいと考えられるが、1968年十勝沖地震の火災事例だけではデータ数が不足であるため、以下の分析ではあえて1923年関東大地震及び1948年福井地震のデータも利用していることを断っておく。ただし、対象とする出火原因としては、現在も地震時に発生し得ると考えられる薬品、ガスに絞っている。

Fig.10は、過去の地震火災における出火原因のうち現在でも発生し得ると考えられる薬品・ガス・石油ストーブの3種類を合計したものについて時間別火災発生頻度分布を示したものである。

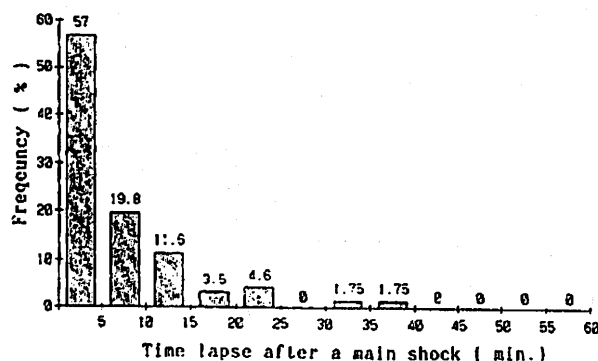


Fig. 10 Incidence distribution of post-earthquake fires caused by chemicals, kerosene heaters, and gas apparatuses by time lapse within 60 min. after a main shock.

3. 地震火災の時間的発生分布のあてはめ

3.1 ワイブル分布による近似

ワイブル分布は、材料の破壊、人体や機械類の故障など多くの部分で構成されている系が、その最も弱い箇所の故障によって全体の故障（寿命が尽きる）が生じるような事象についてよく表せるよう考察された分布であり、1種類の分布の式でどんな形の故障分布をも表現できるのが特徴である。

ワイブル分布は、確率密度関数 $f(x)$ が

$$f(x) = \begin{cases} \frac{m}{a} (x-r)^{m-1} e^{-\frac{(x-r)^m}{a}} & , x \geq r \\ 0 & , x < r \end{cases} \quad \dots (1)$$

a (尺度のパラメータ) > 0 , m (形のパラメータ) > 0

r (位置のパラメータ) < 0

であたえられている³⁾。また、分布関数 $F(x)$ は、式(1)から以下のように求められる。

$$F(x) = \int_0^x f(x) dx = \int_r^x \frac{m}{a} (x-r)^{m-1} e^{-\frac{(x-r)^m}{a}} dx$$

$$= \left[-e^{-\frac{(x-r)^m}{a}} \right]_r^x, \quad x \geq r$$

$$= 1 - e^{-\frac{(x-r)^m}{a}} \quad \dots (2)$$

ワイブル分布は、Fig.11 (及び式(1)参照)のように、形状パラメータ m が変わると分布の形が変わるので、既存の故障実績データに基づいて m の値を見つけておけば分布の形（すなわち故障の型）が分かる。ここで、故障率関数 $\lambda(t)$ は、式(1)及び式(2)から、(3)式のように示されることから、 $m > 1$ のときは故障率 $\lambda(t)$ は時間 t の増大とともに増加するが、反面、 $m < 1$ のときには故障率は時間がたつにつれて段々減少する。また、 $m = 1$ のときは常に一定の状態を保つ。このような現象の物理的な意味は概ね以下のように整理される³⁾。

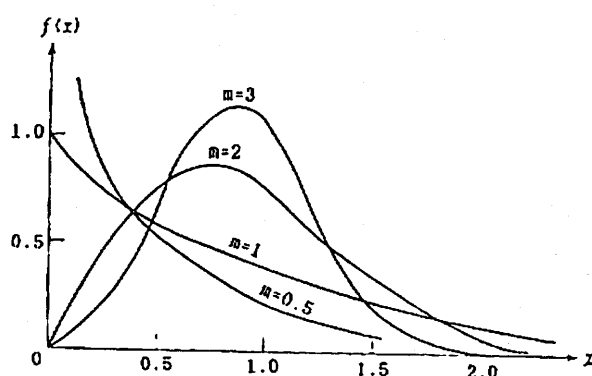


Fig. 11 Probability density curve of the Weibull distribution (where $\alpha = 1$).

- ① $m > 1$ …… 磨耗故障 (時間の経過とともに故障しやすくなる)
 ② $m < 1$ …… 初期故障 (時間がたてば生まれつきの初期的な故障は出尽す)
 ③ $m = 1$ …… 偶発故障 (①②のいずれにも属さない全く偶発的なもの)

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{1-F(t)}$$

$$= \frac{\frac{m}{a}(t-r)^{m-1}e^{-\frac{(t-r)^m}{a}}}{e^{-\frac{(t-r)^m}{a}}}, t \geq r; 0, t \leq r$$

$$= \frac{m}{a}(t-r)^{m-1}, t \geq r; 0, t \leq r \dots\dots\dots (3)$$

また、尺度パラメータ α を求めることにより時間別あるいは使用回数別にみた故障分布関数を特定することができる。あらかじめ、こうした故障分布関数を知れば、いつ部品を交換すべきかなどの故障に対する事前方針を立てることができるので、ワイブル分布 (指数分布は $m=1$ の場合に相当) は信頼性工学の分野でもよく使われる分布である。

本研究の対象である地震火災の発生についても、これを“安全に稼働している系 (火気器具等) について、地震という同時的インパクトが与えられた後に発生する一種の故障”と考えれば、ワイブル分布の適用を行うことは不自然ではなく、実際のところ他の分布関数に比較してもよりよい近似が得られる。地震火災の発生分布は、その性格上基本的には初期故障型であると思われる。

なお、本研究では、ワイブル分布の近似にあたっては Table 1、Table 2 における出火件数の累積頻度 (累積確率) データに基づきワイブル確率紙を用いて、ワイブル分布による分布関数 $F(x)$ の近似式を求めた。Fig.12 は、Table 2 の薬品・ガス・石油ストーブの合計についてのワイブル近似の例を示したものである。この図の中にワイブル分布の分布関数 $F(x)$ を示しているが、これは、本研究で対象としている地震火災

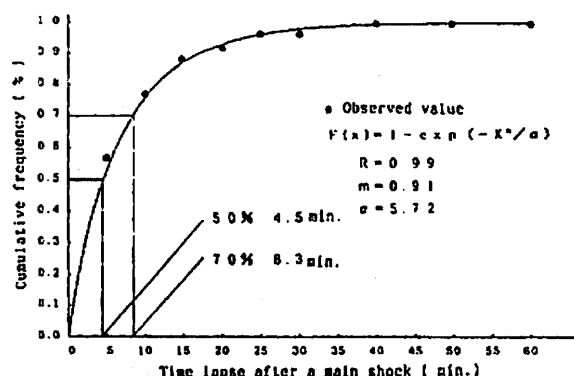


Fig. 12 Approximate distribution curve by the Weibull distribution as to the incidence of post-earthquake fires caused by chemicals, kerosene heaters, and gas apparatuses.

の発生が地震の発生を契機とするものであることから地震発生時点を起点 ($x=0$) とすることにより、式 (2) の分布関数 $F(x)$ の中の位置パラメータ r を 0 と置いた式の形となっている。また、Fig.12 の中に、ワイブル分布のパラメータである m と α の他に、 R (決定係数または寄与率と呼ばれる) が示されている。この R は、実績値と予測値との間の相関係数の 2 乗によって求められる指標であり、実績値の全変動に対する回帰によって説明される変動の比を示すもので、回帰式による予測の精度をはかる有効な目安とされているものである⁴⁾。Fig.12 の例の場合、 R は 0.99 であり、きわめて良い精度であることが分かる^{注*}。

予測の精度とは別に、ワイブル分布によるあてはめの当否を検証する方法の一つとして χ^2 検定がある。これは、離散型分布の出現頻度における実績値と理論値 (予測値) とに基づいて、 χ^2_0 値を求め、これと χ^2 分布による χ^2 (χ^2 の自由度: 危険率 α) とを比べて危険率 α での分布の適合性を検定する方法である。主として、実績値の分布と理論値の分布との間に有意な差があることを検証する場合に有効な方法であるが、今回のように理論分布の適合の当否を検証する場合に用いられることもある⁵⁾。ちなみに、Fig.12 の例について χ^2 検定を行った結果^{注**}、 $\chi^2_0 = 2.11 < \chi^2$

* 決定係数 R の場合、どの値以上であれば回帰式の精度として十分であるかという基準が定まっているわけではない。回帰式のあてはまりの良さの判断は、相関係数を用いるときと同様に相対的なものであり、対象とする事象によって求められる精度も当然異なるものであるが、今回の場合、 $R=0.99$ は十分に高い精度と考えられる。

** χ^2 検定では、出現頻度が 1 以上となるようにクラス分けして χ^2_0 を求めるのが望ましいので、Table 2 の最下欄の 26 分～60 分を 1 つのクラスとして扱い χ^2_0 を求めた。従って、クラス数は 6 となり自由度は 4 ($=6-2$) となる。

(4:0.1)=7.78となり、危険率10%で、ワイブル分布によるあてはめは棄却できない、すなわちワイブル分布によってあてはめても無理はないということが分かった。

ただし、以下でのワイブル分布の近似については、予測の精度の指標として決定係数 R のみ示すことにする。

3.2 季節・時間帯別の出火原因別内訳比率を考慮した時間的発生分布

Fig.12は、Table 2に示した過去の地震火災における3種類の出火原因（薬品・ガス・石油ストーブ）による出火件数の単純合計に基づく累積確率によって求めたものである。これはこれとして、一般的な意味（つまり過去の実績として）を全く持たないわけではないが、今後発生するであろう地震火災の個々のケースでは、その季節・時間帯によって出火原因の内訳比率構成が変化することが当然考えられる。そこで、もし季節・時間帯別に地震火災の出火原因内訳比率があらかじめ分かれば、その比率に基づいて季節・時間帯ごとに地震火災発生分布を推定することができ、より正確な予測が可能となる。ここでは、季節・時間帯別の地震時出火原因内訳比率データとして、東京消防庁による文献2)に示されている推定結果を利用する。これは、平常時火災データをベースにしつつ、地震時の出火機構のイベントツリーアナリシス及びシミュレーション結果を加味して推定を行ったもので、現段階での既存資料の内では最も新しい推定成果であると言える。ここでは、季節・時間帯として、暖房器具を使用している冬期とそうでない夏期を選び、かつ調理器具を最も多く使用している夕方を選んで、「冬の夕方」及び「夏の夕方」の2つのケースについて検討を行う。

Table 3の(A)欄に、文献2)による「冬の夕方」及び「夏の夕方」についての3種類の出火原因の推定内訳比率を示したが、これらは内訳比率合計が100%に満たないので、本研究ではTable 3に示す3種類の出火原因だけで内訳比率合計が100%になるように修正した(B)欄の値を、季節・時間帯別内訳比率として仮定した。そして、Table 2に示す3種類の出火原因の累積頻度に、上記の比率に応じた重みづけを行い、経過時間ごとに合計することにより、「冬の夕方」、「夏の夕方」のそれぞれに関して時間別累積確率データを作成した。

Table 3 Presumed proportion of post-earthquake fire causes by season and time of day when an earthquake occurs.

Season & Time of day Fire cause	Winter evening		Summer evening	
	Proportion* (A)	Proportion** (B)	Proportion* (A)	Proportion** (B)
1. Chemicals	25%	31%	29%	32%
2. Gas apparatuses	35%	44%	63%	68%
3. Kerosene heaters	20%	25%	--	--
Total	80%	100%	92%	100%

* : Estimate by Tokyo Fire Department in the Literature [2].

** : Presumed proportion by assuming that the fires from those causes in this table are total.

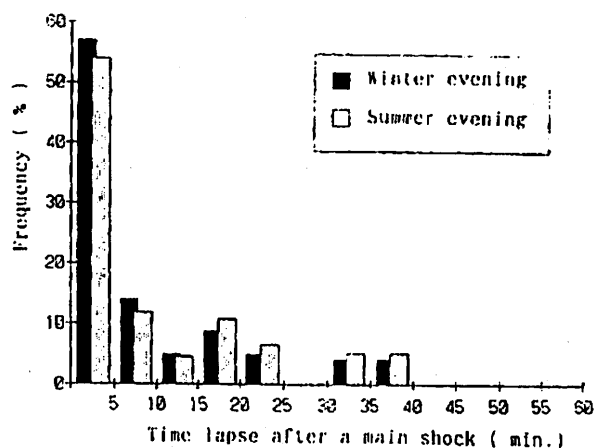


Fig. 13 Estimated incidence distribution of post-earthquake fires based on presumed proportion of fire causes for the two cases of "Winter evening" and "Summer evening".

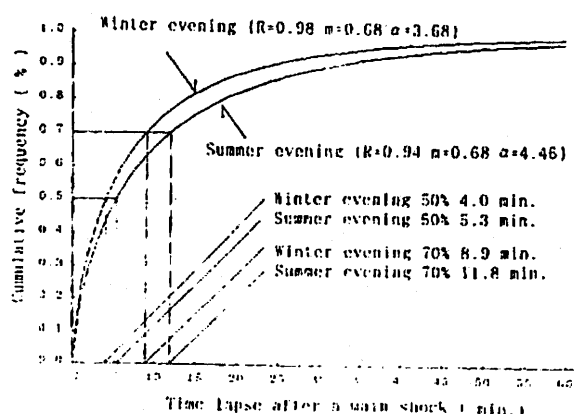


Fig. 14 Approximate distribution curve by the Weibull distribution as to the incidence of post-earthquake fires for the two cases of "Winter evening" and "Summer evening".

ものがFig.13である。Fig.14は、これらの累積確率データに基づいて求めた「冬の夕方」及び「夏の夕方」の地震火災の時間的発生分布のワイブル分布による近似である。ワイブル近似による予測の精度は、「冬の夕方」については $R=0.98$ 、「夏の夕方」については $R=0.94$ でありともに高い精度を示している。

3.3 時間的発生分布に基づく火災発生状況の予測

上で説明したように、季節・時間帯別（地域によっては地域固有）の出火原因比率が想定できるならば、時間的発生分布は比較的容易に求めることができ、地震火災の発生状況の予測に役立てることができる。例えば、Fig.14を参考にして述べれば、累積確率50%の時間は、「冬の夕方」で4.0分、「夏の夕方」で5.3分であり、出火時間が地震発生後5分程度までの火災情報を把握することができれば、60分以内に発生する全火災件数は概ねその2倍であることが分かる。同様に、累積確率70%の時間は、「冬の夕方」「夏の夕方」それぞれ8.9分と11.8分である。従って、以上の時間までには7割程度の火災はすでに発生していることになり、これらの火災情報を早期に入手することができれば火災被害の様相のおおよその状況把握が可能になるものと思われる。

4. まとめ

本研究の結果を以下にまとめる。

- (1) 過去の地震火災データに基づいて、地震発生後60分以内の出火時間経過別の火災発生状況を、出火原因別に頻度グラフにして表した結果、現在でも起こり得る出火原因、すなわち薬品、石油ストーブ、ガス器具については、いずれも地震直後に発生が集中し、その後徐々に減少していき、60分までにはほぼ頻度が0となる分布パターンであることが分かった。

ることが分かった。

- (2) 火災発生状況の時間別累積頻度分布についてワイブル分布による近似を行った結果、予測の精度を表す指標である決定係数は、いずれも0.94以上という高い数値が得られた。
- (3) 季節・時間帯別の出火原因内訳比率を考慮した地震火災の時間的発生分布のワイブル近似を求め、これを利用して、地震発生時に地震後初期の火災情報に基づいてリアルタイムにその後の火災状況を推定し得る可能性と、その方法を示した。

5. あとがき

3.3節で、地震火災の時間的発生分布に基づく火災の発生状況の予測方法について述べたが、ここでの具体的な数値は、過去の地震事例の火災累積頻度分布と大きくは異なるものの、限られた火災事例データ、及び出火原因別内訳比率の仮定に基づくものであり、現段階では一種の試行的な解析結果として受けとめて頂きたい。本研究は、ここに示したような地震火災の時間的発生分布の推定によって、地震発生時にリアルタイムに火災発生状況を予測する可能性とその方法を検討したものである。

参考文献

- 1) 国土開発技術研究センター：都市防火対策手法成果集成版（1983）
- 2) 東京消防庁：“地震時における地域別の総合出火危険予測と対策”、火災予防審議会答申（1987）
- 3) たとえば真壁肇：ワイブル確率紙の使い方、日本規格協会
- 4) 仮谷太一：予測の知識、p.139～142、森北出版
- 5) 塩見弘：信頼性工学入門、p.65～66、丸善出版