

第1回消防防災研究講演会資料

平成10年1月

自治省消防庁消防研究所

平成9年度
第1回消防防災研究講演会

新消火技術の科学と動向
兵庫県南部地震から何を学んだか？

日 時 平成10年1月21日（水）10：00～16：30
会 場 消防研究所 情報管理棟大会議室

開会の辞 消防研究所長 次郎丸 誠男

午前10：00～午後12：30

新消火技術の科学と動向

座長 斎藤 直

● ハロゲン系消火剤の燃焼化学	佐宗祐子	3
● 新消火剤の消火性能と課題	斎藤 直 佐宗祐子 尾川義雄	9
● 水による消火の実際と延焼阻止技術	高橋 哲 竹元昭夫	15

午後2：00～午後4：30

兵庫県南部地震から何を学んだか？

座長 座間信作

● 阪神・淡路大震災における火災被害と消防活動	関沢 愛	23
● 出火の状況および住民の火災への対応	鈴木恵子 松原美之 北後明彦 岩見達也	29
● 地震被害情報の効率的収集方法	座間信作 細川直史 畑山 健 関沢 愛	31

閉会の辞

研究企画官 佐藤 公雄

午前 10:00～午後 12:30

新消火技術の科学と動向

ハロゲン系消火剤の燃焼化学

消防研究所 消火第二研究室
佐宗 祐子

1. 緒 言

オゾン層保護のためハロン消火剤の生産が全廃されたのに伴い、代替の消火剤としてフルオロカーボン系の化合物が普及してきた。これらの新消火剤は従来のハロンより消火性能が劣るため高濃度で使用しなければならず、分解ガスの毒性危険などが指摘されている[1]。このためフルオロカーボンの消火性能向上を目的として、1990年代初頭から、フルオロカーボンの燃焼抑制効果について、詳細でしかも定量的な理解を目指した研究が盛んに行われてきたところである[2,3,4]。それらの中でも特に貢献度の高い研究の一つとして、最近米国のNISTによりC1及びC2フルオロカーボンの詳細酸化反応モデルが構築された[5]。しかしながら、この反応モデルを検証するための実験データは未だ十分ではなく、今後様々な燃焼条件における実験により、同モデルの検証が行われる必要がある。

フルオロカーボンの反応モデルを検証するための数少ない実験データの一つとして、Linterisら[6]は、ブンセン火炎法により測定したメタン-空気-C1フルオロカーボン混合気の層流燃焼速度を報告している。これについてNotoら[7]は同様の混合気の燃焼の数値計算を行い、フルオロカーボンを含まないメタン-空気混合気の層流燃焼速度との比で比較した場合、NISTの反応モデルによる計算結果はLinterisらの層流燃焼速度と良い一致を示すことを確認した。この結果は、構造の単純なC1フルオロカーボンの層流燃焼速度の予測に対してNISTの反応モデルが有用であることを示すものである。しかし、Linterisらのメタン-空気混合気の層流燃焼速度は、一般に認められている値とかなりの隔たりがあることから、フルオロカーボン混合気の層流燃焼速度についてさらに実験データを集積することは、反応モデル検証のために有用であると考えられる。

本研究では、Linterisらにより報告された層流燃焼速度を検証し、さらに幅広い当量比について層流燃焼速度の実験データを提供することを目的として、伸張と曲率による影響を排除できる対向流二重火炎法を用いてメタン-空気-HFC23(CHF_3)混合気の層流燃焼速度を測定した。次いで、NISTの反応モデルを用いて数値計算により層流燃焼速度を求め、実験結果との比較により反応モデルの検証を行い、修正した反応モデルを提案するとともに、このモデルを用いて CHF_3 の燃焼抑制効果について検討した[8]。その結果、 CHF_3 はメタン-空気火炎中で、反応帯初期の水素原子濃度を低下させることにより化学的に燃焼を抑制していることがわかった。第2節で詳細を述べる。

フルオロカーボンの燃焼化学に関する基礎的研究と並行して、消火性能の向上という差し迫った課題に対し、消防研究所では、不活性ガスとの混合による性能改善が検討されてきた[9,10,11]。その結果、ハロン1301(CF_3Br)を不活性ガスと混合することにより、消火性能に相乗効果が認められること、またフルオロカーボン系の新消火剤には同様の消火性能の向上が見られないこと等が実験的に確認された。そこで本研究では、消火剤間の相互作用のメカニズムを明らかにすることを目的として、 CF_3Br -不活性ガスまたは CHF_3 -不活性ガス混合消火剤を添加したメタン-空気量論混合気について、詳細化学反応モ

モデルを用いた層流燃焼速度の計算を行い、層流燃焼速度の低下に対する消火剤間の相乗効果の有無を調べたところ、消炎限界の実験結果と良く一致する結果が得られた。さらに、相乗効果をもたらしている要因であると考えられる、消火剤の化学的燃焼抑制効果の温度依存性について、数値計算により検討したところ、 CF_3Br 添加火炎中の連鎖停止反応の相対的寄与は火炎温度の低下とともに増大するのに対し、 CHF_3 添加火炎中では温度依存性がみられないことがわかった[12]。第3節に詳細を述べる。

ハロゲン系消火剤の消火性能改善のための添加物としては、不活性ガスの他に、代表的な消火剤である水が考えられる。しかしながら消炎限界の実験では、水蒸気がフルオロカーボンの消火性能をわずかながら低下させることができ確認されている[13]。本研究では、 CF_3Br -水蒸気 または CHF_3 -水蒸気混合消火剤を添加したメタン-空気量論混合気についても上述と同様に層流燃焼速度の計算を行い、層流燃焼速度の低下に対する水蒸気の影響を調べた。その結果、水蒸気は火炎温度を低下させる一方で、火炎中のOHラジカル濃度を増大させることにより、 CHF_3 の燃焼抑制効果を弱めることがわかった[12]。また、四塩化エタン($\text{C}_2\text{H}_2\text{Cl}_4$)-ノナン(C_9H_{20})混合液滴の燃焼速度に与える水蒸気の影響を実験と数値計算により検討したところ、 CHF_3 添加火炎の場合と同様、OHラジカル濃度の増大により液滴の燃焼が促進されることがわかった[14]。これらの結果から、ハロゲン系消火剤の性能を水蒸気の添加により向上させることは期待できないが、ハロゲン化合物の焼却処理に対しては水蒸気の添加は有効な手段であることが示唆された。第3節後半で詳細を述べる。

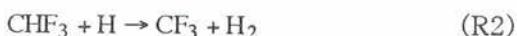
2. メタン- CHF_3 -空気混合気の層流燃焼速度と燃焼抑制機構

層流燃焼速度の測定には、対向流二重火炎法を用いた。また、数値計算には Sandia の CHEMKIN II および PREMIX コードを使用した。

当量比 1.0 および 0.9 のメタン- CHF_3 -空気混合気の層流燃焼速度の測定値は、 CHF_3 が 0 % の場合は再現性の高い文献値に一致し、 CHF_3 を加えた場合については Linteris らの値[6]と良い一致を示した。

Fig.1 は、当量比の効果を調べるために、メタンと CHF_3 の濃度比を 2 対 1 に保ちながら当量比を 0.7 から 1.4 まで変化させ、層流燃焼速度を実験ならびに計算により求めた結果である。横軸の当量比は CHF_3 の分解を考慮し定義した。実験結果については、直線外挿と非直線外挿の結果を共に示した。NIST の反応モデルを用いた計算結果（点線）は当量比の全範囲で実験値より著しく低く見積もられているが、このことは、反応モデル中のフッ素の関与する部分に改善すべき点があることを示唆している。

層流燃焼速度の計算結果に大きく影響する反応を抽出するため、感度分析を行った。フッ素の関与する反応のうち、以下の素反応が層流燃焼速度に大きく影響している。

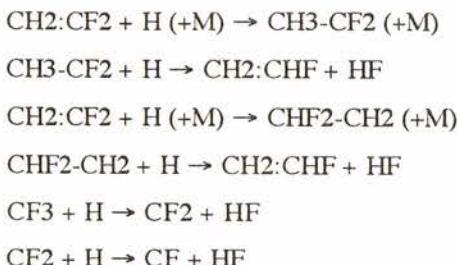


NIST の反応モデルを改善するため、これら 4 つの素反応の速度定数に関する文献調査を行ったところ、反応(R1)の速度定数は比較的確度が高いのに対し、他の 3 つの反応については 3 ないし 4 倍の不確実性が認められた。これらの速度定数を、最新の実験結果から得られた値等に改めることにより、Fig.1 の計算結果（実線）は実験値をよく再現出来るようになった。修正した反応モデルは、メタン-酸素- CHF_3

定圧平面火炎中の CH₃OH, CF₂ および CF の濃度分布の予測についても、NIST の反応機構と比較して改善が認められた。

次に、修正した反応モデルを用いて、CHF₃ の燃焼抑制効果について検討した。過去のハロゲン系消火剤に関する研究の多くは、燃焼抑制の機構が化学的（ラジカル捕捉）か物理的（希釈、冷却、物質あるいは熱の輸送）であるかを明らかにすることに焦点が置かれてきた。例えば、Sheinson らにより、ハロゲン系消火剤の化学的および物理的抑制効果に関するグループ加成則が提案された。また、Noto ら[7] は、数値計算において消火剤の反応を含めた場合と除いた場合を比較することにより、化学的効果と物理的効果の相対的寄与を調べた。これら従来の研究はすべて、消火剤を加えることにより消炎限界や燃焼速度の低下を調べる方法によるため、消火剤の添加による温度低下の効果が、定量したい他の効果と混在していた。火炎温度は燃焼強度を決定する最も重要な因子であるため、火炎温度の変化の影響を排除することは、その他の因子の影響を定量化するために不可欠であると考えられる。そこで本研究では、燃料のメタンと酸素の濃度を一定に保つことにより希釈の効果を排除し、空気中の窒素を徐々にアルゴンに置き換えることにより火炎温度を一定(2180K)に保ちながら、CHF₃ の濃度を徐々に増加させることにより、CHF₃ の燃焼抑制に対するラジカル捕捉と輸送の寄与を明らかにすることを試みた。Fig.2 に、層流燃焼速度の実験結果と計算結果を示す。実験結果、計算結果のいずれとも、CHF₃ の濃度増加にともない、層流燃焼速度は明らかに低下していることがわかる。CHF₃ の濃度が増加しても火炎温度と燃料、酸化剤濃度が変化していないことから、Fig.2 に見られる燃焼速度の低下は、ラジカル捕捉あるいは輸送の効果によるものであると結論される。当量比の影響を見るため、CHF₃ の代わりに同濃度のメタンを添加した場合についても計算を行い、Fig.2 に示した。メタンの添加にともない層流燃焼速度は最初増大し、その後当量比の著しい増大にともない低下するが、CHF₃ を添加した場合よりは常に大きい。

フルオロカーボン添加による層流燃焼速度の低下は、火炎帶の高温境界における水素原子濃度の低下と関係していることが、Noto らにより指摘されている[7]。そこで、Fig.3 に、Fig.2 の火炎における(a)火炎中の最大水素原子濃度、(b) 50% メタン消費位置における水素原子濃度、を未燃混合気中の CHF₃ または添加メタンの濃度に対してプロットした。火炎中の最大水素原子濃度は CHF₃ の濃度増加に対してほとんど変化がないが、50% メタン消費位置における水素原子濃度は、著しく低下している。50% メタン消費位置における温度は、CHF₃ の濃度が増加してもほとんど変化しない(1020K~1070K)ことから、この位置における水素原子濃度の低下は、速度論的要因によるものであると考えられる。感度分析および反応経路解析の結果、火炎の反応初期において、反応(R2)に加えて、以下の反応により水素原子が捕捉されることがわかった。



これらの解析結果は、CHF₃ が実際にラジカル捕捉により燃焼を抑制しており、しかもそれが火炎の反応初期で起こっていることを示している。

3. ハロゲン系化合物の燃焼反応に与える添加物の影響

3-1. CF₃Br, CHF₃ の燃焼抑制効果に与える不活性ガスの影響

前節で述べた CHF₃ の燃焼に関する修正した反応モデルと、CF₃Br に関する Noto らの反応モデル[7]を用いて、CF₃Br または CHF₃-不活性ガス混合消火剤を添加したメタン-空気量論混合気の層流燃焼速度を計算した。層流燃焼速度の低下に対する消火剤間の相互作用の有無の判定は、メタン-空気量論混合気の層流燃焼速度を 10cm/s まで低下させるのに必要な各消火剤の濃度 C_i（表 1 参照）と、混合消火剤中の各消火剤成分のモル分率 X_i から、(1)式[9]により相互作用がないと仮定した場合の混合消火剤濃度 C_{est.} を算出し、この濃度で層流燃焼速度が 10cm/s より低下するかどうかを調べることにより検討した。

表 1 混合消火剤に関する計算条件

Binary Suppressant	C ₁ (%)*	C ₂ (%)*	T _{ad} (K)
CO ₂ - N ₂	16.1	30.0	1807 - 1900
CF ₃ Br - N ₂	2.05	30.0	1807 - 2185
CF ₃ Br - CO ₂	2.05	16.1	1900 - 2185
CHF ₃ - N ₂	8.69	30.0	1807 - 2137
CF ₃ Br - H ₂ O	2.05	21.0	1877 - 2185
CHF ₃ - H ₂ O	8.69	21.0	1877 - 2137

$$*) 1/C_{est.} = X_1/C_1 + X_2/C_2 \quad — (1)$$

CF₃Br を不活性ガスと混合した場合、層流燃焼速度の低下に相乗効果が認められ、また CHF₃ には不活性ガスとの混合による相乗効果は認められなかった。これらの結果は、拡散火炎ならびに予混合火炎の消炎限界についての実験結果[9-11]とよく一致しており、ハロカーボンと不活性ガス間の消火性能に対する相乗効果が、平面一次元火炎の解析により説明できるものであることがわかった。

表 1 のように、不活性ガスの添加にともないハロカーボン混合気の断熱火炎温度は大きく低下することから、CF₃Br-ならびに CHF₃-不活性ガス混合消火剤の抑制効果に見られる相乗効果の有無は、ハロカーボンの化学的抑制効果の温度依存性に違いがあるためと考えられる。そこで次に、CF₃Br による層流燃焼速度低下の温度依存性を、CHF₃ の場合と比較した。未燃混合気中の酸素及び CF₃Br または CHF₃ 濃度を各々 15%、1%、5% に固定し当量比が 1 となるようメタン濃度を固定したまま、不活性ガスを窒素からアルゴンへ置き換えることにより火炎温度を 1940K から 2300K まで変化させて数値計算を行った。Fig.4 に、CF₃Br および CHF₃ 添加混合気の層流燃焼速度 S_u を、等しい火炎温度における消火剤無添加のメタン混合気の層流燃焼速度 S_{u0} で割って標準化した値を示す。CHF₃ の添加による層流燃焼速度の低下割合が、火炎温度の影響をほとんど受けないのとは対照的に、CF₃Br による層流燃焼速度低下は明らかに温度の影響を受けていることがわかる。両混合気の主要な連鎖停止反応の活性化エネルギーを比較すると、CHF₃ 混合気では連鎖分岐反応のそれとほぼ等しいのに対し、CF₃Br 混合気では臭素原子が関与する連鎖停止反応はいずれも活性化エネルギーがほとんどゼロに等しいか負の値をとる。しかしながら、臭素原子が関与する連鎖停止反応のいずれかを反応モデルから除いて計算を行っても、温度依存性は消失しない。火炎の詳細な解析の結果、Fig.5 に示すとおり、臭素原子濃度が温度低下とともに増大することが、CF₃Br による抑制効果の温度依存性に最も大きく寄与していることがわかった。

3-2. CF₃Br, CHF₃ の燃焼抑制効果に与える水蒸気の影響

CF₃Br または CHF₃ と水蒸気の混合消火剤について、抑制効果に対する消火剤と水蒸気の間の相互作用の程度を、前述の方法で数値計算により見積もった。CF₃Br に対しては、水蒸気は抑制効果をやや増大させたが、CHF₃ に対しては、水蒸気は逆に抑制効果を低下させることがわかった。これらの結果は、拡散火炎の消炎限界に関する過去の実験結果とよく一致している[13]。

水蒸気による CHF₃ の抑制効果低下の理由を探るため、CHF₃-水蒸気混合消火剤と CHF₃-N₂ 混合消火剤の各々を添加した火炎中の活性化学種の濃度分布を Fig.6 に比較した。水素原子、酸素原子濃度に大きな違いはないが、OH ラジカルの濃度は、水蒸気の添加により明らかに増大している。反応経路解析等の結果、水蒸気は H₂O + F → OH + HF の反応により、火炎中の OH ラジカル濃度を増大させ、CHF₃ の抑制効果を弱めていることがわかった。

3-3. 水蒸気による四塩化エタン液滴燃焼の促進

含ハロゲン化合物の燃焼反応に与える水蒸気の影響をさらに調べるために、高温雰囲気中における四塩化エタン(C₂H₂Cl₄)-ノナン(C₉H₂₀)混合液滴の燃焼速度に与える水蒸気の影響を、実験と数値計算により調べた。実験は、インクジェットプリンターと同様の方法により大きさの揃った単一液滴を定常的に生成させ、平面火炎の既燃ガス流中を落下させることにより着火させ、写真撮影により液滴直径の減少速度を測定した。計算は、燃料の蒸発過程を含む様、Sandia の PREMIX コードを境界条件を変えて使用した。C₂H₂Cl₄ については詳細反応モデルを用い、ノナンについてはノニルラジカルの C₃H₆、C₂H₄ および CH₃ への单段階の分解を仮定した。

液滴中の塩素／水素比が 1 に近い場合、少量の水蒸気の存在により液滴の燃焼速度は著しく増大し、着火温度と消炎温度は共に低下することが実験により認められた。計算結果は実験結果とよく一致し、また CHF₃ 添加火炎の場合と同様、塩素原子が水蒸気と反応して OH ラジカルを生成することにより、液滴の燃焼が促進されることを明らかにした。これらの結果から、ハロゲン系消火剤の性能を水蒸気の添加により向上させることは期待できないが、ハロゲン化合物の焼却処理に対しては水蒸気の添加は有効な手段であることが示唆された。

参考文献

- [1] 斎藤直、安全工学 35(6), 452-459 (1996), [2] Mizolek, A.W. and Tsang, W. (Ed.), *Halon Replacements*, ACS Symposium Series No. 611, 1995, [3] Proceedings of Halon Options Technical Working Conference, Albuquerque, NM, 1994, 1995 and 1996, [4] Saso, Y., Saito, N., Liao, C. and Ogawa, Y., *Fire Safety J.* 26: 303-326 (1996), [5] Burgess, D.R.F., Zachariah, W., Tsang, W., and Westmoreland, P.R., NIST Technical Note 1412 (1995), [6] Linteris, G.T. and Truett, L., *Combust Flame* 105: 15-27 (1996), [7] Noto, T., Babushok, V., Burgess, D.R.F., Hamins, A., Tsang, W. and Mizolek, A., *26th Symp.(Int.) on Comb.*, p. 1377 (1996), [8] Saso, Y., Zhu, D.L., Law, C.K., Wang, H. and Saito, N., *Combust Flame*, in press (1997), [9] Saito, N., Saso, Y., Ogawa, Y., Otsu, Y. and Kikui, H., *5th Int. Symp. on Fire Safety Science* p. 901 (1997), [10] 中谷、斎藤、佐宗、尾川、燃焼の科学と技術、印刷中 (1997), [11] Ogawa, Y., Saito, N. and Saso, Y., Proceedings of Halon Options Technical Working Conference, Albuquerque, NM, 1997, [12] (a) 佐宗、斎藤、尾川、平成 9 年度日本火災学会研究発表会概要集 pp.28-31 (1997), (b) 佐宗、斎藤、Wang, 第 35 回燃焼シンポジウム講演論文集 pp.196-198 (1997), [13] 菊井、斎藤、廖、中谷、尾川、佐宗、消防研究所報告 第 83 号、30-36 (1997), [14] Wang, H., Zhu, D.L., Saso, Y. and Law, C.K., *26th Symp.(Int.) on Comb.*, p.2413 (1996).

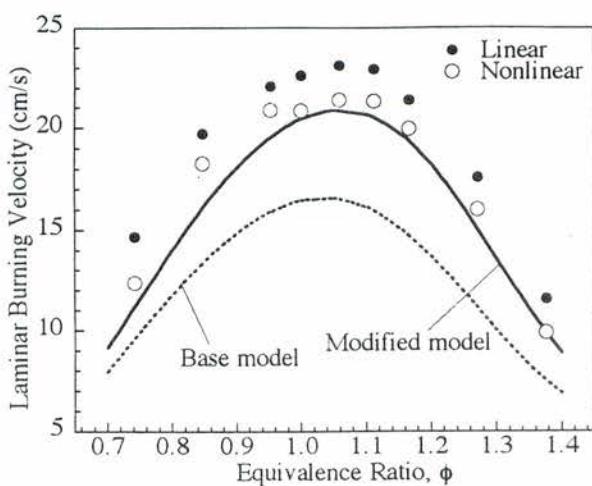


Fig.1 Laminar burning velocity - equivalence ratio diagram for methane-CHF₃-air mixtures.

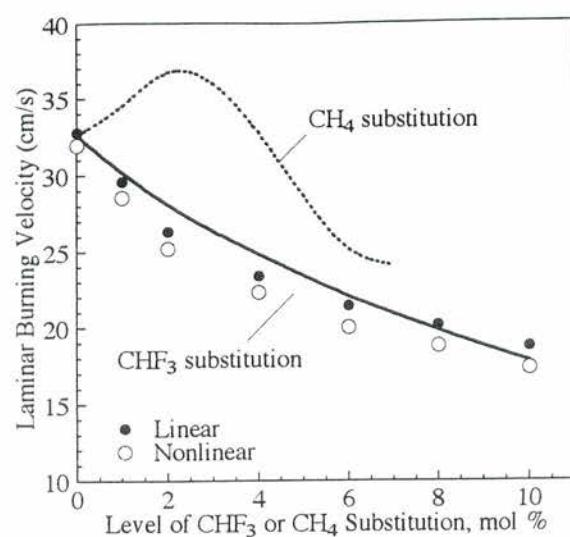


Fig.2 Laminar burning velocity versus molar percentage of inert substitution by CHF₃ or CH₄.

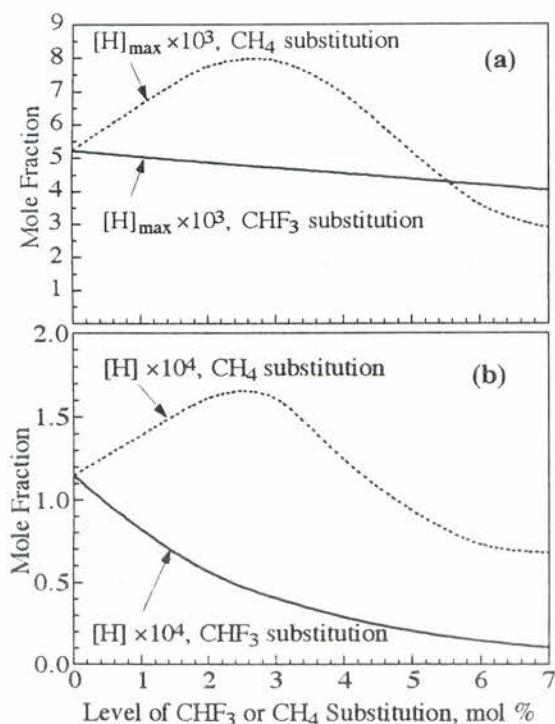


Fig.3 Mole fractions of H atom (a) at their peak values and (b) at the location of 50% CH₄, vs. mole % of inert substitution by CHF₃ or CH₄.

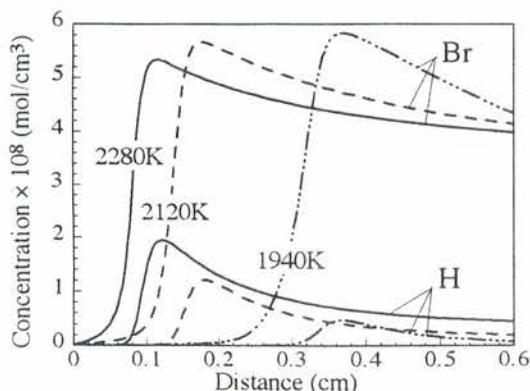


Fig.5 Br and H concentration profiles.

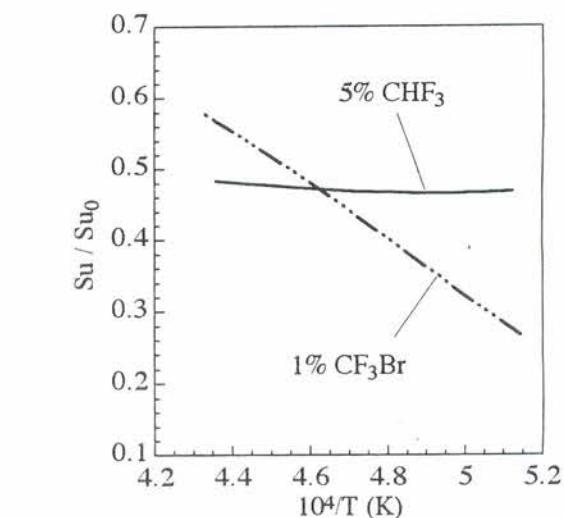


Fig.4 Variation of Su/Su₀ as a function of adiabatic flame temperature.

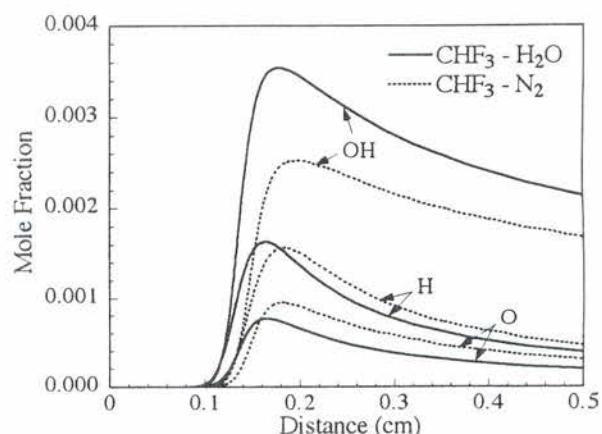


Fig.6 H, O and OH mole fraction profiles.

新消火剤の消防性能と課題

消防研究所 消火第二研究室
斎藤 直、佐宗祐子、尾川義雄

1 はじめに

オゾンホール問題は、ガス系消火剤にも激動の時期をもたらした。すなわち、フロンがオゾン層を破壊するという地球規模の環境問題は、高性能化学消火剤のハロン消火剤が大きなオゾン破壊係数を有するために、1994年1月1日以降生産の禁止に導いた。

日本では1988年5月に「特定物質の規制等によるオゾン層の保護に関する法律」が制定された。自治省消防庁はハロン抑制対策委員会を設け、優先度の低い施設におけるハロン消火剤利用の抑制、バンク方式によるハロン消火剤の回収と再利用の推進、及び代替の消火剤への対応によりハロン使用の抑制に努めてきた。

ハロン代替の新消火剤を利用するためには、全域放出型消火設備の設計濃度の技術基準が必要となる。設計濃度は消火剤の性能と毒性によって決定される。消防研究所は1993～94年度に上原陽一前横浜国立大学教授（現東京理科大学教授）を委員長とする「ハロン代替物質の毒性評価に関する研究委員会」により毒性評価方法を、また、1994年度には平野敏右東京大学教授を委員長とする「ハロン代替物質の消防性能評価に関する研究委員会」により消防性能評価方法を検討し、それぞれ結論を得た¹⁻³⁾。消防庁はこれらの委員会の結論を参考に新消火設備設置の技術基準を定め、1995年5月10日付予防課長通知によりその運用を始めた。

ここでは、新消火剤の消防性能と課題について、消防研究所消火第二研究室における調査・研究をもとに解説する。

2 ガス系新消火剤の採用基準

現在、日本において、オゾン層破壊のないガス系の新消火剤として、フロン系のHFC-23(CF_3H)及びHFC-227ea($\text{CF}_3\text{CFHCF}_3$)、不活性ガス系のIG-541(N_2 52%, Ar 40%, CO_2 8%の混合ガス)及び窒素(N_2)の四種類の新消火剤が利用可能となっている。FC-3-1-10(C_4F_{10})等の候補物質は、消火設備に使用する消火剤としての申請が次に述べる基準を満たしていると判断されるなら、新消火剤としての利用が可能になる。

全域放出型の消火設備に用いる消火剤の性能は、図1に示すカップバーナー装置により拡散火炎に対する消炎濃度を測定し評価される。ここで、消火剤の消炎濃度は、カップバーナー装置のカップ上に形成される拡散火炎を消すことのできる空気中の最低消火剤濃度として定義されている。カップバーナー装置の寸法は消炎濃度に重大な影響を及ぼすことが知られているが国際的な統一規格はなく、測定機関によるデータの均質性に問題がある。このため、消防研究所はバーナーを単純化することにより改良した装置を提案し、この装置または同等の装置による消炎濃度を、測定機関によらない消防性能の

均質なデータとして評価できるようにした¹⁾。装置の詳細は次節で紹介する。

新らたに開発された消火剤候補物質が消火剤として実用化されるためには、消火性能以外にも乗り越えなければならない重要な課題がある。それは候補物質の種々の毒性である。すなわち、新開発の候補物質は新規物質である可能性があるため、「化学物質の審査及び製造等の規制に関する法律」(化審法)に基づく試験結果を備え、消火剤に適すると判断される物質であることが前提となる^{2, 3)}。次いで、ガス系消火設備の性質上、消火のために放出された消火剤と消火後の分解ガス、あるいは誤放出による高濃度の消火剤に人が曝される可能性を無視することができない。そのため、薬剤そのもの(原体ガス)の毒性及び消火時に発生する分解ガスの毒性データが重要となる。原体ガスの毒性としては、ラットの50%致死濃度LC₅₀(1または4時間値)及び急性曝露における無毒性濃度が基本的な要素となる^{2, 3)}。これらの毒性データについては、信頼できる機関による公表データが存在する可能性がある。

消火剤の分解ガス毒性に関する研究例は極めて少ない。これまで、フッ素を含む消火剤による消火後のフッ化水素濃度は消火に要する時間に比例する³⁾、HFC及びFCによるフッ化水素の発生量はハロン1301の6~8倍である⁴⁾、及びHFC-227eaの分解ガスの急性毒性はフッ化水素の毒性と同等である⁵⁾ことが知られている程度である。今後も、消火剤の分解ガス毒性データの蓄積が消火剤を安全に利用するために必要である^{3, 42-44)}。

3 新消火剤の消火性能

製作が容易で、再現性よく消炎濃度を測定できるカップバーナー装置の開発⁶⁻¹¹⁾は、新消火剤を適正に利用するために必要である。このため、我が国において基準となる消炎濃度を測定するFRIカップバーナー装置を作製し¹⁾、各種燃料に対する新消火剤と候補物質の消炎濃度を報告した¹²⁻¹⁵⁾。表1にこれまでに測定した消炎濃度の一覧を示す。ハロン1301消火剤の消炎濃度と比較から、新消火剤の消火性能はハロン消火剤に比べて低いため、設計濃度は高濃度となることがわかる。

また、ハロン消火剤のリサイクル利用に役立てるため、回収・再生されたハロン1301消火剤の溶存窒素量とn-ヘプタンに対する消炎濃度を調べ、再生ハロンの性能は未使用のハロン1301と変わらないこと確認している¹⁶⁾。

4 新消火剤と爆発抑制

消火剤の消火性能は、可燃性混合気の燃焼を阻止する消火剤濃度によっても評価できる。いかなる混合比の燃料-空気混合気の燃焼をも阻止できる最小の消火剤濃度はその消火剤についてのピーク濃度と呼ばれており、爆発防止のために必要な基本的データである。ピーク濃度等の可燃性混合気に対する消火剤の燃焼阻止濃度の測定は、燃料-空気-消火剤三成分混合気の燃焼限界を測定することに等しい。

従来、燃焼限界測定装置としては米国鉱山局で開発された爆発ビュレットが有名であり、多く可燃性のガスや蒸気の燃焼限界が測定されている。しかし、爆発ビュレットは空気より密度の大きな混合気には不適当とされ、その場合には、球形爆発容器が利用さ

れる。

燃焼限界は予混合火炎バーナーを用いても測定できる。バーナー法は標準的な方法として採用されていないが、バーナーを適切に作製するなら、人為的によく制御された条件下の燃焼限界を再現性よく測定できる。

消防第二研究室では、管状火炎バーナーを燃焼限界測定用の装置として採用し、その基本的特性を調べている¹⁷⁻²⁴⁾。図2に管状火炎バーナー装置と、n-ヘプタン蒸気上限界近傍での管状火炎を示す。写真は、上限界に近づくにつれ花弁状の火炎の数が減少し、ついには細管状となって消える興味ある火炎の性状を写している。

管径30mmのバーナーを用い、最も広い燃焼範囲を与える条件で燃焼範囲を測定した。表2のように、管状火炎バーナーによる燃焼限界は従来の結果によく一致した。しかし、新消火剤のピーク濃度は表3のようにハロン1301に比べて大きく、爆発防止においても新消火剤はハロンに劣っている²⁵⁻²⁶⁾。また、HFCやFCの消火剤あるいは候補物質は可燃性ガスの燃焼限界を低下させる効果があるので、危険物施設における全域放出型消火設備にこれらの消火剤を利用する場合には、設計濃度の安全性を確かめる必要がある²⁷⁾。

従来の燃焼限界測定法によって測定されたハロンのピーク濃度は装置や着火方法に依存し、報告データが桁違いに変化している。これは、混合気に着火して燃焼限界を測定する従来の方法では、着火限界が測定されていることによる。一方、管状火炎バーナーでは、火炎の物理的条件を明らかにして燃焼限界ができる²⁸⁾。

5 混合消火剤の消火性能

新消火剤の性能は悪く、また、ハロン相当の高性能消火剤の開発には長期間を要するものと予想される。そこで、既存の消火剤を複合し性能を改善する方法について検討している。そのためには、混合により改善された消火性能を判断する尺度が必要となる。

混合気消火剤の各成分は互いに独立に作用し、ある特定の火炎温度以下で消炎するとし、不活性ガス混合気の消火性能を表す式を導き、この式が不活性ガスの混合気で良く成り立つことを確認した。そして、この式と混合消火剤の実際の消火性能との差は、消火剤各成分間の相互作用の有無と大きさを知る手がかりであり、消火性能の改善の程度を計る尺度として利用できるとした²⁹⁾。

この尺度を手がかりに検討した結果、消火剤の混合による消火性能は、(1)不活性ガス同士では改善されない²⁹⁾、(2)ハロンと不活性ガスの組み合わせでは相乗作用による消火性能の改善が認められ、ハロン消火剂量の大幅低減が可能となる³⁰⁾、(3)フロン系新消火剤と不活性ガス間には負の相乗作用があり、混合は不利となる³¹⁾等の結論を得た。また、管状火炎バーナーにより燃焼限界を測定し、同様の結論を得ている^{32, 33)}。

6 新消火剤の課題と高性能消火剤

ハロン消火剤の生産禁止は、ガス系消火剤を用いた消火設備に大きな影響を与えていく。そして、現在利用できる新消火剤の多くは、ハロン消火剤に比べ性能の低い消火剤である。ハロン以外の消火剤では、組み合わせて利用しても、成分消火剤以上の性能を

期待できない。また、HFC と FC 系の消火剤及び候補物質は分解ガスの毒性が強い等の問題もある。

とはいっても、粉末消火剤以外のガス系消火剤が持つ消火後の低汚損性、電気絶縁性等の特徴は、水系や粉末消火剤にはないものである。ハロン消火剤に代わる高性能の消火剤は必要であり、その開発が待望される。そのためには、解析可能な消火性能データの入手に努め³⁴⁻³⁶⁾、有力な解析道具としての化学反応を含めた燃焼計算を開始し、消火剤の化学を考慮した消火剤開発研究として推進される必要がある³⁷⁻³⁹⁾。

高性能消火剤の開発は消火分野の普遍的な課題であり、ハロン消火剤と異なる高性能消火剤の開発研究も引き続き行われている。しかしながら、この試みは少なくとも過去 20 数年にわたり実施されてきてたにもかかわらず、あらゆる面でハロン消火剤に匹敵する高性能消火剤の開発は今だに未達成である。この事実を考慮すると、ハロン消火剤をしおぐ高性能化学消火剤の開発には、今後多くの時間が必要とされるとみてよい。それまでの間、環境破壊をともなうことがなく、大きな蒸発潜熱の利用が期待できる伝統的な消火剤の水について、その消火性能を極限まで利用する新しい技術の開発が、消火分野で重要な研究課題の一つとなるように思える。

7 おわりに

オゾン層保護によってもたらされたハロン規制の動向と新開発のガス系消火剤について解説した。消防研究所は、我が国においてハロン消火剤と新消火剤を適正に利用するための正確な情報を公開することに努めている⁴⁰⁻⁴⁴⁾。ここでは、新消火剤の性能と内包する課題について述べ、今後の方向を展望した。この小文が将来の消火技術を考える一助となれば幸いである。

参考文献

- (1) 消防研究所、「ハロン代替物質の消火性能評価に関する研究委員会報告書」(1995)
- (2) 消防研究所、「ハロン代替物質の毒性評価に関する研究委員会報告書（中間報告）」(1994)
- (3) 消防研究所、「ハロン代替物質の毒性評価に関する研究委員会報告書（最終報告）」(1995)
- (4) 小田健一ら、第 69 回日本産業衛生学会講演集、p.s551 (1996)
- (5) 大前和幸ら、第 26 回安全工学シンポジウム講演予稿集、p. 183-184 (1996)
- (6) 斎藤 直ら、消防研究所報告、第 74 号、p.9-16 (1992)
- (7) Y. Saso et al., Fire Technology, 23(3), p.22-33 (1993)
- (8) 佐宗祐子ら、消防研究所報告、第 76 号、p.43-50 (1993)
- (9) N. Saito et al., Halon Options Technical Working Conference, p.299-309, Albuquerque, NM, USA (1995)
- (10) 斎藤 直ら、消防研究所報告、第 81 号、p.22-29 (1996)
- (11) 斎藤 直ら、第 33 回燃焼シンポジウム講演論文集、p.539-541 (1995)

- (12) 井上康史ら、消防研究所報告、第79号、p.1-7 (1995)
- (13) 酒井竜太ら、消防研究所報告、第80号、p.36-42 (1995)
- (14) 斎藤 直ら、第33回燃焼シンポジウム講演論文集、p.542-544 (1995)
- (15) 斎藤 直ら、消防研究所報告、第84号、p.12-19 (1997)
- (16) 大津敬久ら、日本火災学会研究発表会概要集、p.56-59 (1995)
- (17) 廖 赤虹ら、消防研究所報告、第76号、p.33-41 (1993)
- (18) 廖 赤虹ら、日本火災学会研究発表会概要集、p.52-55 (1994)
- (19) 廖 赤虹ら、日本火災学会研究発表会概要集、p.46-47 (1995)
- (20) 廖 赤虹ら、第33回燃焼シンポジウム講演論文集、p.320-322 (1995)
- (21) 尾川義雄ら、日本火災学会研究発表会概要集、p.60-63 (1996)
- (22) N. Saito et al., 26th International Symposium on Combustion, Abstracts of W-I-P Posters, p.45, Naples, Italy (1996)
- (23) 廖 赤虹ら、消防研究所報告、第82号、p.1-9 (1996)
- (24) 尾川義雄ら、第35回燃焼シンポジウム講演論文集、p.558-560 (1997)
- (25) N. Saito et al., ACS Symposium Series 611, "Halon Replacements : Technology and Science" (Miziolek & Tsang eds.), p.243-257, American Chemical Society (1995)
- (26) C. Liao et al., Fire Safety J., 27 (1), p.49-68 (1996)
- (27) 斎藤 直ら、日本火災学会研究発表会概要集、p.12-15 (1997)
- (28) N. Saito et al., 2nd International Seminar on Fire and Explosion Hazard of Substances and Venting of Defragrations, Moscow, Russia (1997) (in print)
- (29) N. Saito et al., Fire Safety J., 27 (4), p.185-200 (1996)
- (30) N. Saito et al., 5th International Symposium on Fire Safety Science, p.901-910, Melbourne, Australia (1997)
- (31) 中谷 衛ら、燃焼の科学と技術 (投稿中)
- (32) 尾川義雄ら、第34回燃焼シンポジウム講演論文集、p.690-692 (1996)
- (33) Y. Ogawa et al., Halon Options Technical Working Conference, p.106-115, Albuquerque, NM, USA (1997)
- (34) 佐宗祐子ら、消防研究所報告、第77号、p.11-19 (1994)
- (35) 佐宗祐子ら、消防研究所報告、第78号、p.42-50 (1994)
- (36) Y. Saso et al., Fire Safety J., 26 (4), p.303-326 (1996)
- (37) 佐宗祐子ら、日本火災学会研究発表会概要集、p.28-31 (1997)
- (38) Y. Saso et al., Combustion & Flame (to be appeared)
- (39) 佐宗祐子ら、第35回燃焼シンポジウム講演論文集、p.196-198 (1997)
- (40) 佐宗祐子、消研報、第43号、p.26-29 (1989)
- (41) 斎藤 直、化学工学、第54卷、p.36-37 (1990)
- (42) 佐宗祐子ら、消研報、第48号、p.11-18 (1994)
- (43) 斎藤 直、火災、219号、Vol. 45, No.6, p.7-12 (1995)
- (44) 斎藤 直、安全工学、Vol.35, No.6, p.452-459 (1996)

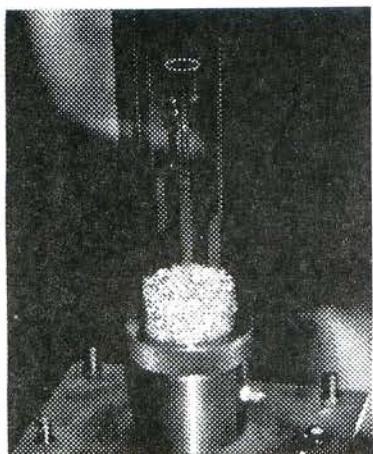


図1 FRIガラスカップバーナー

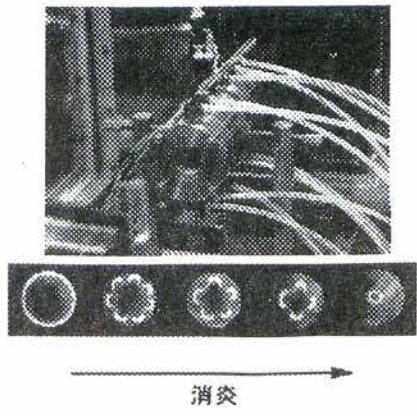


図2 管状火炎バーナーとヘプタン
蒸気上限界付近の火炎の変化

表1 各種消火剤のF R I カップバーナー消炎濃度 (%)

燃 料	消 火 剂								
	ハロン1301	HFC-23	HFC-227ea	FC3-1-10	IG-541	IG-55	N ₂	Ar	CO ₂
n-ヘプタン	3.4	12.9	6.6	5.3	35.4	37.8	33.6	43.3	22.0
ベンゼン	2.4	10.6	4.8	3.4			30.9	40.4	20.2
トルエン	2.3	9.7	4.6	3.6			25.7	36.2	16.9
メタノール	7.8	19.0	9.4	8.0			43.5	55.5	29.3
エタノール	4.3	16.0	8.2	6.9			36.8	48.6	24.3
軽油	3.4	12.5	6.4	5.0	31.0		29.8		20.7
絶縁油	2.3	12.8	6.6	5.4	28.3		27.0		18.7

表2 管状火炎バーナーと爆発ピュレットによる燃焼限界 (%) の比較

燃焼限界	メタン		エタン		プロパン		ブタン	
	管状火炎 バーナー	爆発ピュ レット	管状火炎 バーナー	爆発ピュ レット	管状火炎 バーナー	爆発ピュ レット	管状火炎 バーナー	爆発ピュ レット
上限界	15.4	15.0	13.4	12.4	9.8	9.5	8.3	8.4
下限界	4.8	5.0	2.8	3.0	2.1	2.1	1.7	1.8
燃焼限界	ヘプタン		メタノール		エタノール			
	管状火炎 バーナー	爆発ピュ レット	管状火炎 バーナー	爆発ピュ レット	管状火炎 バーナー	爆発ピュ レット		
上限界	---	6.7	---	---	---	---		
下限界	1.1	1.1	6.5	6.7	3.6	3.3		

表3 管状火炎バーナーによる各種消火剤のピーク濃度 (%)

燃 料	消 火 剂								
	ハロン1301	HFC-23	HFC-227ea	FC-3-1-10	IG-541	IG-55	N ₂	Ar	CO ₂
メタン	6.2	20.5	11.6	9.4	45.5	48.8	41.7	55.4	29.6
プロパン	7.6	20.5	12.1	10.0	51.9		49.4	61.7	36.9

水による消火の実際と延焼阻止技術

消防研究所 高橋 哲
竹元 昭夫

第1部 水による消火

1. はじめに

火災の効率的消火のためには、燃料の種類や規模に応じ、放水速度や水量、どんな方法で散水すれば効果的かといった消火必要条件に関する具体的対策を立てることが必要である。消火は複雑な現象なので、この点に関しては経験的に対処する方が実際的かも知れないが、経験にも限度があるので、可能なら論理的に対策を立てられれば都合が良い。また、ここには学術的意義もある。従来、原理原則的な理論はあっても、実火災の消火を定量的、技術的に説明する理論はほとんど無いように見える。

このような状況下で、まず木材火災の水による消火の機構を伝熱工学的に解明することを目標として実験と解析を行い、これを発展させ、実火災の消火必要条件に関する解明を試みた。消火の複雑さをもたらす因子、例えば注水速度、注水密度、移動速度のような注水方法はもとより、構造や燃焼温度の変化等因子の消火に及ぼす作用を一つずつ検討した。

2. 木材火災の消火

2. 1 注水速度の相対的に大きな場合の消火

固体可燃物火災の消火は、全燃料表面を水で濡らす（冷却する）事によって確実に達成できる。比較的大きな注水速度で燃料頂部から注水するとき、木材火災および燃焼木炭の消火でも、消火必要水量は炭量に比例し、注水速度に関係しない事がわかった〔1,2,3,4〕。杉およびシイを使った実験から、つぎの関係式（1）が得られた。なお、発炎燃焼中はほとんど炭の酸化燃焼は無い事が知られている。すなわち、

$$\begin{aligned} mc &= M_0 \phi \lambda \\ mw &= mc \mu_0 \\ te &= mwW^{-1} = M_0 \phi \lambda \mu_0 W^{-1} \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、 mc ：生成炭量、 mw ：消火必要水量、 te ：消火時間、 M_0 ：木材の初重、 M ：木材の注水開始時の重量、 ϕ ：木材クリップの注水開始時の重量減率 $(M_0 - M) / M_0$ 、 λ ：単位重量の燃料減少に対して生成する木炭量（木炭の収量を22.5%とすると、 $0.225 / 0.775 = 0.29$ ）、 W ：注水速度、 $\mu_0 = 3.4$ （単位重量の炭が通常の注水でほぼ飽和に近くなる吸水量）である。ただし、注水速度が非常に小さくなるとこの関係は成立しなくなる。

なお手動式注水のように操作要因が加わるときには、（1）式に係数（<1）を掛けると良く合う〔4〕。

2. 2 注水速度の相対的に小さな場合の消火

注水速度が小さくなると、火熱による水の蒸発速度と競合しあい、なかなか消火しない。蒸発速度を直接測定する方法も考えられる [5] が、まず蒸発と表裏の関係にある、再燃現象の検討を行った。

2. 2. 1 再燃現象について—平面可燃物火災消火の限界注水速度—

再燃現象は一般的には火災の鎮圧後、再出火しては困るという実際的、心情的側面から捉えられ、科学的意義への関心は薄い様子である。しかし例えば、木造建築物火災の消防活動を観察していると、筒先の注水部分は黒く消火するが、筒先を他へ移動させると、早い時には数秒後には消火部分は赤熱し再着火することが観察できる。この現象は注水速度と燃料内部の火力との熱的均衡関係を示すものであり、実大火災の全体の消火（局部消火ではない）は、部分の消火速度と再燃速度の競合関係によって実現されるものである事を示している。つまり濡れた消防物体の再燃現象（部分の現象）は、全体の消火現象と表裏一体の関係をなす事が推察できる。全体の消火に必要な注水速度および消火必要水量は、この伝熱工学的関係から導かれると考えられる。そこで消火の基礎となる現象として、再燃現象について検討した。

碓井は消火必要水量や消火の定義を目的として、杉角材片をいろいろの厚みまで炭化させ、これに対する注水量、及び風の有無と着火時間の関係を求めていた [6,7]。筆者は碓井のデータを再吟味し、濡らした試料への熱伝達は、高温域では熱放射が主体になると推測でき、再着火は水が全部気化したあとに起こると仮定し、単位表面積につき次式（2）が成立するとした [8]。

$$L \rho = G \sigma (T^4 - T_0^4) \tau$$

すなわち $T \gg T_0$ の時、

$$\tau = \frac{L}{G \sigma T^4} \rho \quad (2)$$

ここで、 L ：水の蒸発時の顯熱、 ρ ：散水密度、 τ ：再燃時間（発火遅れ時間）、 T ：環境温度、 T_0 ：試料表面温度であり、総括熱吸収率 $G = 0.7$ を与えると、計算値は碓井の実験データとよく合うこと、および風の影響(対流熱伝達)の小さいことを示した。更にこの式の妥当性を詳細に確認するため電気炉実験などを行った [9,10]。一例として炭化度が約20%の場合について実験と計算の結果を表1に示す。（2）式による計算値に $\rho = 0$ の着火時間 τ_0 （実験値）を加えると、一層良い一致を示すことがわかる。

すなわち、吸水させた固体可燃物の再燃時間（ τ ）は、いずれも、

$$\tau = k \rho + \tau_0. \quad (3)$$

の一般式で表わせる。ここで、 τ_0 は高温では小さな値なので無視し、 $G \sigma T^4 = I$ と置くと、再燃式（2）は、次式（4）と書き換えられる。

$$I = L \frac{\rho}{\tau} \quad (4)$$

すなわち、 I の熱流束を受けるとき、 ρ/τ の速度で水が表面から気化してゆく事になる。 ρ の水が無くなれば再着火する。換言すると ρ/τ の速度で注水を続ければ、消火状態が保てる事になる。平面的固体可燃物の限界注水速度は、入射熱量相当の水の注水速度に等しい。燃料局部の消火はこの原則によって行われると考えられる。なお同じ原理は、プラスチックの燃焼にも適用できる。

木材火災の場合、燃焼中の木材表面は必ず炭化しているから、この炭化表面が吸収した水が、単に燃料の保持していた熱量を冷却という形で奪うだけでなく、外部から流入する熱量に対し遮断という大きな役割を果たしていることがわかる。これは、平面が均等に加熱され、かつ均等に噴霧注水されたときの限界注水速度である。

2. 2. 2 消火のダイナミックス

この原理を実大火災に拡張適用するには、不均等注水された消火面に対する入射熱量と消火面に注がれる水とのダイナミックスを考えれば良いことになる [11, 12, 13]。

木材クリップは規則正しい構造をしているので、消火実験の再現性が高く、理論計算に有利である。注水時の木材クリップ内の熱平衡の計算のため、図1の中空な円筒モデルを適用することにした。すなわち、木材クリップの代わりに、多数の円筒形縦シャフトを有する木材ブロックを想定し、円筒の水平断面積、及び高さは元のクリップの縦シャフトのそれと等しいとする。さらに円筒の内部表面積の和は、元のクリップの全表面積に等しいとおく。

注水領域を図1のようにクリップの上又は下から規則正しく拡大してゆく時、消火面は燃焼シャフトとの境界の開口部を通して受熱する。一本の円筒シャフト内の火災の消火必要注水速度は、ここに注ぐ熱量相当の水量と置く。相当するシャフト数を掛けば、一個のクリップ火災全体の消火必要注水速度が得られる。

このモデルによると、角材の断面の横、縦および長さが a 、 b 、 c のものを、 n 列 N 段に積み上げた、 $a \times b \times c - n \times N$ 配列のクリップでは、限界注水速度 W_c は (5) 式となる。

$$W_c = \frac{J}{\sqrt{\pi}L} \cdot \frac{c-na}{n-1} \cdot \frac{[(ab+bc+ca)nN-a^2n^2(N-1)]}{bN} \quad (5)$$

但し、 J ：燃焼温度相当の黒体放射強度 (σT^4) である。

(5) 式から計算した限界注水速度を、実験値と並べ表2に示す。

表2中の重量減は燃焼経過時間と共に内部温度が上昇するので、火勢の強さを示す一種のファクターとして示してある。なお (5) 式中の係数 $\sqrt{\pi}$ はシャフト形状の仮定方法によって、 $\sqrt{\pi}$ は円筒の時に、2は方形のときに置き換えられる。この消火のダイナミックス理論は、室内火災や山火事の消火、延焼阻止もうまく説明できる [11, 13]。以上は注水速度に比べ、相対的に火災規模の大きい場合の消火の動力学である。スプリンクラーによる

必要放水速度 (mm/min) も (5) 式により算出できる。

表 1 吸水炭化木材の着火時間
 $\phi \approx 0.2$, $T=1173(K)$ の時

Weight loss ratio	ϕ	ρ (kg/m ³)	ignition time	
			Experimental τ_{emp} (sec)	Calculated τ_{calc} (sec)
0.183	0.0		2.8	-
0.239	0.0		3.4	-
0.165	0.13		6.8	3.2
0.202	0.201		9.2	4.9
0.285	0.215		9.6	5.2
0.236	0.434		13.2	10.6
0.261	0.465		12.8	11.4
0.238	0.474		15.0	11.6
0.218	0.539		15.3	13.2
0.298	0.823		25.0	20.0
0.235	1.350		38.0	33.1
0.244	1.804		41.5	44.0

表 2 実測と計算による限界注水速度の比較

Crib dimension	Observed critical rate(g/min)			Theoretical critical rate(g/min)		
	Weight loss when applied (%)			Heating Temperature(°C)		
	20	40	60	800	900	1000
3 ² × 33-6 × 12	130	-	-	92	132	184
3 ² × 21-4 × 8	35	40	72	41	58	80
4 ² × 36-5 × 10	155	225	400	114	162	226
3 ² × 33-6 × 8	120	225	-	94	134	186
2 ² × 33-6 × 24	240	-	-	140	200	276

第2部 延焼阻止

1. 研究の概要

阪神淡路大震災を契機とし大規模、多発性火災においては少量の水で延焼をくい止めることが要請されている。延焼阻止は、火線付近に延焼阻止剤を散布して延焼阻止帯を作り、ここで火災の拡大を遅延化ないし停止させ、消防力を有利に展開させようというものである。この課題に対して、水に少量の化学薬品を添加した延焼阻止剤を極力無駄に流失させること無く、迅速かつ多量に可燃物体に保持させ、水に比べ火熱に対する抵抗力を増強し、同時に難燃化効果によって火の拡大を阻止しようという構想である。

本研究では、大型木材クリップによる中規模基礎実験、及び最終的に実大規模の火災を、消防隊が実戦的に延焼阻止を図ることを試験した。延焼阻止用の薬剤として、水に浸透剤（ジオクチールスルフォコハク酸ナトリウム、0.15%）、再燃抑制剤（燐酸第一アンモニウム、1~2%）を加えたものを使用した。界面活性剤は木材、とくに炭化領域に水を迅速多量に吸収させる目的に使用し、燐安には防炎効果を持たせるものである。同一放水速度であっても、本阻止剤は水に比べ無駄に流出する割合を減らし、その分燃料表面に多く保持させられる。

2. 延焼阻止実験

実験は平成8年3月4日~3月8日にかけて、神戸に於いて大型木材クリップでの基礎実験、平成9年1月29日(水)に豊洲で大規模実験を行った。大規模実験では廃材を図2のように20m×15m×2mに積み上げたもの1基を用意し、消防ポンプ車から水と延焼阻止剤を各々10mの幅に散布して、延焼阻止効果の比較を行った。

A領域右端下に、灯油を染ませたウエスを少量詰めて点火する。燃焼は風下B方向に延焼する。火炎が3m幅のB領域を完全に包んだ時点で、水および延焼阻止剤の各々について、各1口の筒先をもって10mの幅に両側から注水消火する。水および延焼阻止剤の各々について別個に、B領域が完全消火したと判定員が判断した時点で注水を停止する。A領域の燃焼はそのまま放置して、B領域への燃焼の拡大浸透状況をビデオ、カメラで撮影する。燃焼がB領域を突破しそうになったときは、再度最小限の噴霧注水を行って、B領域内の燃焼域を消火する。以後この操作を、A領域のB領域直近の発炎燃焼が停止するまで繰り返す。判定員が延焼の恐れが無くなったと判定を下した時点で注水を停止して、おもな実験観測を終了する。なおこの後も一定時間、引き続きB領域の燃焼状態を観測しながら、残渣の燃焼を促進する。以上の阻止実験を、水と延焼阻止剤について試験し、必要水量の総計と延焼速度を比べる。

3. 結果の概要

実大実験時の活動状況を図3に示す。両実験を通じて、得られた主な成果の概要はつぎの通りである。

- ① 延焼阻止の目的には、主に火線から燃焼領域側にかけて散布することが必要である。

未燃部分への散布は、付着量が少ないので効果が小さい。但し、接炎、熱放射、火の粉を防ぐ意味での、最小限の予防散布は必要である。

- ② 延焼阻止領域への散布は、消火後もしばらく継続して、薬剤を充分に浸透させる事が有効である。
- ③ 風下側には燐安、界面活性剤入りの延焼阻止剤が有効である。
- ④ 風上側には、水単独でも有効であるが、界面活性剤を添加するとより良い。延焼阻止剤が使用できればさらに好ましい。
- ⑤ 消火部分の延焼阻止効果を燃焼速度によって比較したとき、延焼阻止剤は水に比べて、火炎が吹き込む最強度の条件下で：約5倍；輻射だけの時：約30倍の効果があった。

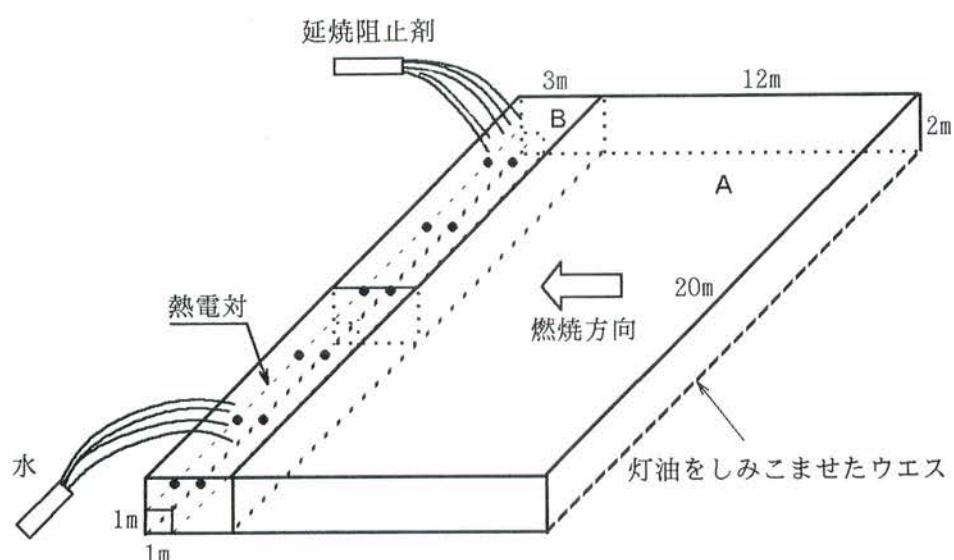


図2 延焼阻止の実験方法

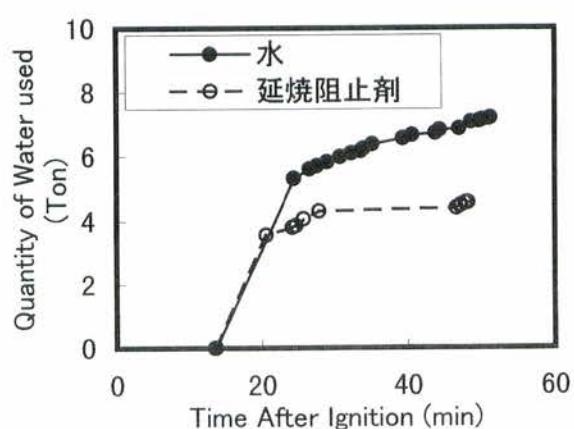


図3 消火と延焼阻止活動中の放水状況

午後 2:00～午後 4:30

兵庫県南部地震から何を学んだか？

阪神・淡路大震災における火災被害と消防活動

消防研究所 関沢 愛

阪神・淡路大震災における同時多発火災の発生状況とこれに対する消防活動の実態について、消防機関等の作成した報告書^{1)~4)}や火災資料、また既存の研究発表資料や調査報告等に基づき、とくに初動時の消防活動に的を絞って整理、分析した結果を報告するとともに、この震災の経験を通じて得られた教訓についてまとめる。

1. 同時多発火災の発生状況

1.1 地震火災の時間帯別・火災規模別内訳

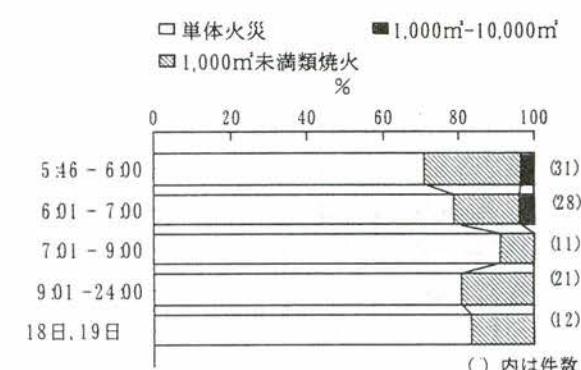
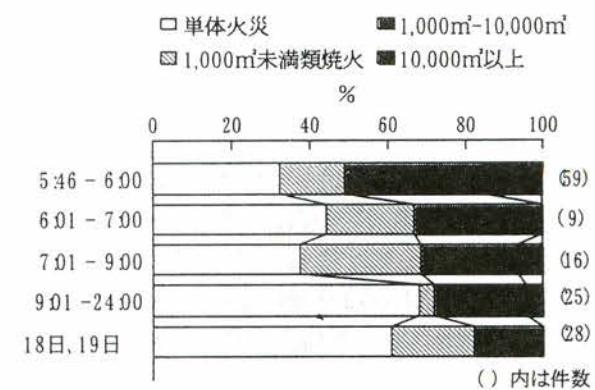
図1、図2は、地震発生から19日中までの間に発生した地震火災の時間帯別・火災規模別内訳を神戸市、神戸市以外の各々について示したものである。

図1より、神戸市では、直後（17日午前6時まで）に発生した火災のうち、火災規模が火元単体（火元棟内または火元箇所内）にとどまったものは全体の1/3（32%）であり、約半数（51%）は焼損面積1000m²以上の大規模火災に拡大している。午前6時以降に発生した火災の規模別内訳では、時間経過に伴い大規模火災の割合は徐々に減少するものの、18日～19日の時点でも1棟以上に類焼拡大した火災の割合は約4割（39%）となっている。

一方、図2より、神戸市以外の時間帯別・火災規模別内訳の特徴をみると、神戸市とは異なり地震直後の午前6時までに発生した火災でも71%が単体火災であり、焼損面積1000m²以上の火災はわずか3%に過ぎない。単体火災の割合は時間経過とともに徐々に増えるが18日～19日中発生の火災でも83%とそう大きな変化ではない。つまり、神戸市以外の地域では消防力による地震火災コントロールが比較的初期段階から機能していたことを伺わせる。

1.2 時間帯別炎上火災件数

消防活動対象という視点からは、ある時刻における消火の必要な炎上火災件数、あるいは各火災の火面周長の合計が問題となる⁵⁾。火面周長については、時間経過別の各火災の延焼拡大状況が判明しないと正確なデータが得られないもので、ここでは省略し、



現時点でも推定可能な炎上火災件数について記す。

図3、図4は、地震発生当日の17日中における時間帯別累積出火件数と累積鎮火件数を神戸市、および神戸市以外の各々について示したものである。ある時点における両者の差は、すなわちその時点における炎上中火災件数をあらわすものと考えられ、この時間帯別推移は時々刻々の消防活動対象数の変化を示すものといえる。

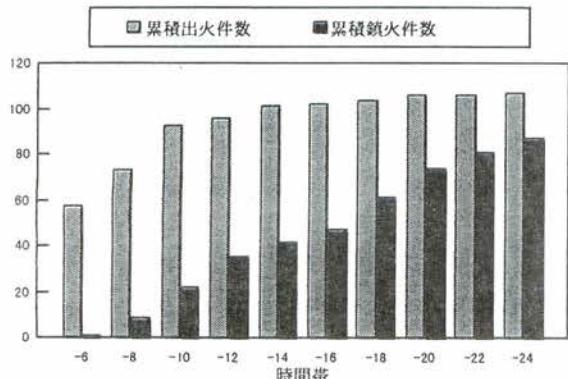


図3 累積出火件数と
累積鎮火件数（17日中神戸市）

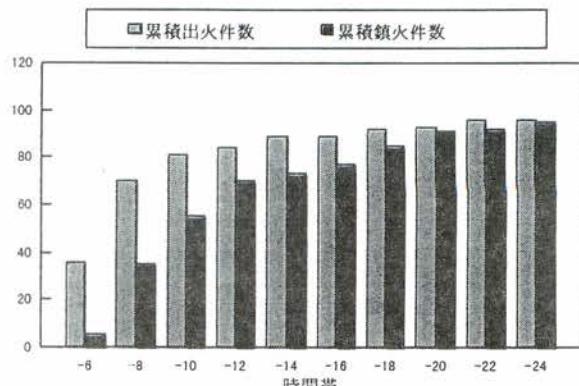


図4 累積出火件数と
累積鎮火件数（17日中神戸市以外）

図3、図4から、17日の最終的な累積出火件数には神戸市と神戸市以外で大きな差がみられないが、累積鎮火件数との差、すなわち炎上中火災件数には大きな差がみられる。とりわけ、この差は地震発生後初期の時間帯ほど大きい。つまり、神戸市では地震後の同時多発火災を初期の段階で鎮火できなかつたケースが多く、この時間帯に引き続き延焼する未鎮火火災に加え、その後発生した火災がさらなる消防活動対象として負担となっていた様子が伺える。

一方、神戸市以外では、地震後の同時多発火災の制圧が比較的早い時期から可能だった模様であり、したがってその後発生した火災についても効率的に対処できていたことを伺わせる。これは、地震後初期における同時多発火災に対する消防活動の成否が、その後の火災被害の結果に大きな影響を与えることを意味している。

2. 消防機関の初動時の体制と状況

2.1 神戸市消防局の初動時の体制と非番職員の参集状況¹⁾

神戸市消防局では、地震当時には80小隊（ポンプ車22、タンク車7、救助車11、特殊車13、救急車27）、警防要員292人が署所で待機していた。地震直後の初動時にはこの体制で立ち向かうことになるが、このうち40台（8台の乗換隊を含む）が地震時直後の同時多発火災の消火活動に運用できる消防ポンプ機能を有した車両であった。

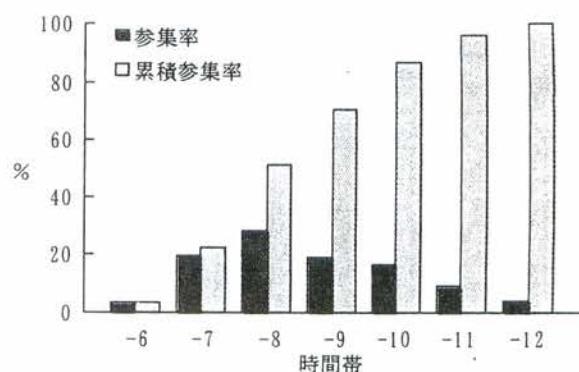


図5 非番職員の時間帯別参集率（神戸市消防局）

地震の発生と同時に神戸市消防局では、事前規定により甲号非常招集（全職員の招集）が発令された。地震発生時間が早朝であったため、ほとんどの職員が自宅で就寝中であったが、地震発生2時間後には約50%、5時間後には90%以上の職員が参集した。今回のような大震災では、自宅に被害のあった職員も少なくなく、公共交通手段が途絶したことを考慮すれば、このような数字は最大限のものであったと思われる。

参集手段については、特に指定はなかったが、自動車（55%）とバイク（26%）が多く、自転車、徒歩はそれぞれ8%と11%であった。一般に震災時の非常参集手段としては、事前計画で自動車を指定しないところが多いが、今回のような交通途絶状態では、遠方居住の職員については、バイクがない場合少なくとも途中まではむしろ必要手段であったといえるかも知れない。図5は、17日の12時までに参集した非番職員1205名についての時間別参集率と累積を示したものである⁶⁾。

2.2 火災覚知状況の時間的推移

図6は、神戸市以外をも含めた全地域での地震発生後の2時間の間に発生した火災のうち出火時刻および火災覚知時刻が得られているもの138件（事後聞知を除く）について、地震後経過時間別に出火件数および覚知火災件数の累積分布を示したものである。大地震時には119番通報が困難になるほか、火災を始め多種多様な災害が同時多発するため、消防などの防災機関においてさえ災害情報の早期収集が困難となるのが通例である。

図6から、今回の同時多発火災について見てみると、地震発生後10分の時点での消防機関による覚知の比率（その時点で出火している火災件数に対する覚知火災件数の比率）は約1/4（25.6%）に過ぎず、比率が50%を超すのは地震後30分の段階である。なお、これ以降、この比率の上昇は鈍化し、地震後60分（60.5%）から120分（69.9%）までの間に約9%しか増加していない。阪神・淡路大震災の場合、覚知の早い遅いが必ずしも単純に火災規模の大小とは結びつかない側面があるが、地震後1時間の時点では、なお4割の火災が消防機関に覚知されていないという状況が起こり得たことは、今後の災害情報収集体制の向上を考える上で重要な教訓とすべきである。

一方、地震発生当日の午前7時までに発生した火災118件について、火災覚知所要時間別内訳比率を神戸市、神戸市以外にわけて示したものが図7である。火災覚知時間（出火から消防機関が覚知するまでの時間）は、119番通報を前提とした平常時の場合2.0分～2.5分と推定されているが、図7から今回の大震災ではどちらの地域でも11分以上要した火災の割合が60%強であり、如何に火災の覚知（一般市民からみれば通報）が困難で、遅れが生じていたかが分かる。また、31分以上要している火災の割合は神戸市でかなり大きく、神戸市以外地域に比べ、神戸市では災害情報の収集が困難であったことを物語っている。

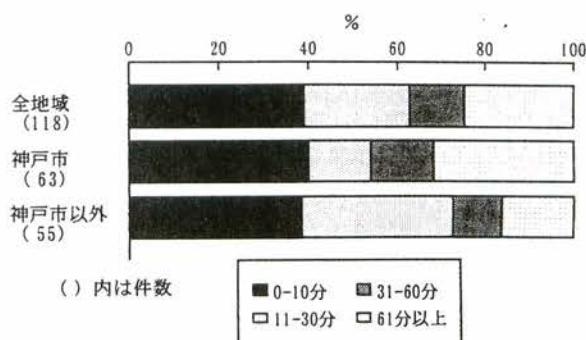


図7 17日7:00までの火災について
覚知に要した時間の割合

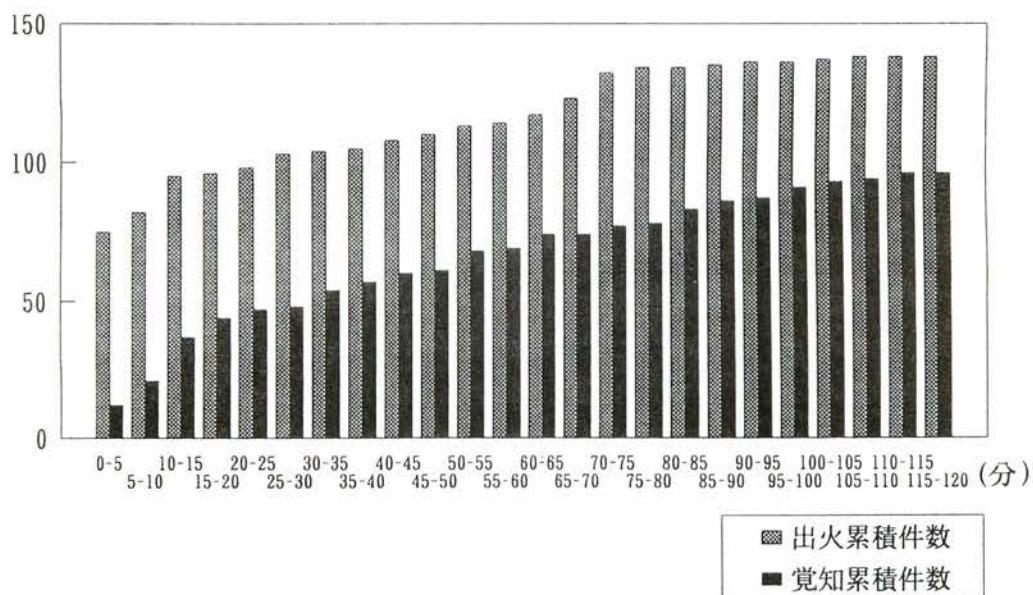


図6 出火件数、覚知件数の地震後経過時間別累積分布(全地域)

2.3 時間帯別の火災覚知方法の傾向

19日中までに発生した火災のうち覚知方法がわかった神戸市以外の火災96件（事後聞知を除く）についての時間帯別・覚知方法別内訳比率を示した図8をみると、地震直後からはじまる電話の輻輳等のため、119番通報に比べて、市民によるかけつけ通報や消防機関による自己覚知の割合が、地震発生直後に近いほど大きいことがわかる。

3. 初動時の消防活動について

－神戸市、西宮市、芦屋市の例

地震時の消防活動の成否と火災被害の様相を左右するのは、地震直後における同時多発火災発生状況と、これに対する初動時の消防活動能力および活動条件とのバランスである。

図9は、神戸市各区および阪神間の兵庫県下各市における地震直後の同時多発火災（ここでは17日の午前7時までに発生した火災とする）の10万世帯当たり出火件数と当該地区の建物全壊率との関係をみたものである。直後の同時多発火災出火率は建物全壊率ときわめて高い相関を示しており、出火原因として多かった電気火災やガス漏れに起因する火災などが家屋の損壊と因果関係が深い可能性があることを示唆している。ところで図9をみると、芦屋市、西宮市は、建物全壊率ならびに直後出火率ともにそれぞれ兵庫区、東灘区とほぼ同程度であり、出火率そのものは決して低くなかったことがわかる。しかし、これら2つの市における火災1件当たり焼損棟数は兵庫区、東灘区と比べてきわめて小さい。この理由は、一つには両者における木造率や建物密集度（平均隣棟間隔等）など延焼危険性に関わる市街地条件の差である⁶⁾。しかしながら、もう一方で忘れてはならないのが同時多発火災に対する消防力の要因である。

表1⁷⁾は、神戸市、西宮市、芦屋市において、17日の午前7時までに発生した建物火災状況とこれらに対する初動時の消防活動条件をまとめたものである。神戸市では7時までに、地震直後に出動可能であった40の消防ポンプ車隊数を上回る63件の同時多発火災が発生していた。これを、さらに区別にみれ

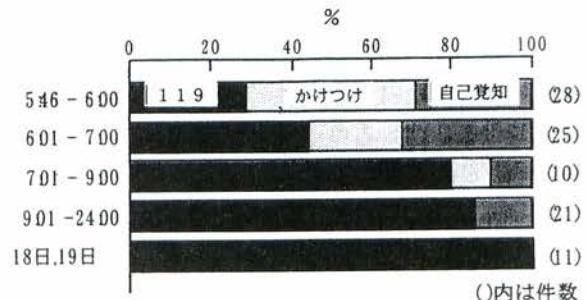


図8 時間帯別・覚知方法別内訳（神戸市以外）

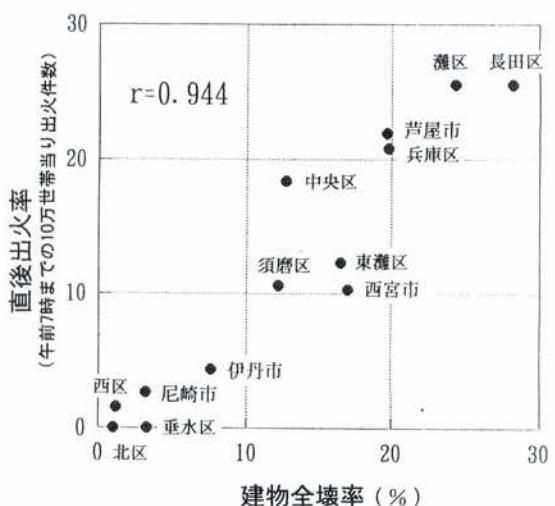


図9 建物全壊率と直後出火率

ば垂水、北、西の3区は少なくとも火災に関しては、大きな被害はほとんどなく、署別運用の時点では余裕があったと見てよい。従って、これらの3区を除いて考察すると、同時多発火災62件に対して出動可能なポンプ車隊数は、遙かに下回る28隊しかなかったことになる。つまり、単純な計算として、34件の火災にはすぐには対応できなかつたのである。表1から、焼損面積1000m²以上の大規模火災の発生件数は、同時多発火災件数から出動可能ポンプ車隊数を差し引いた数と概ね一致していることが示されている。これは、初動時においては、防火水槽など最低限の消防水利が確保されれば、マクロにみれば出動必要対象と出動可能能力とのバランスが基本的に被害様相を規定することを物語るものである。

さて、注目すべきは、西宮市と芦屋市の消防活動の内容である。西宮市は、人口で神戸市の約1/4の

表1 神戸市、西宮市、芦屋市における初動時の火災発生状況と消防活動条件

市・区	管轄域内世帯数	焼損棟数	火災1件当たり平均焼損棟数	17日7:00までに出火した建物火災*			地震直後に出動したポンプ車隊数(可能だった隊数)	消火栓使用可否状況	防火水槽の数(公+私)
				出火件数	1000m ² 以上 の件数,割合	1棟火災(内RC)			
西宮市	163,785	90	2.4	16	2 (13%)	7 (3)	21 **	使用不能	927
芦屋市	33,906	23	1.8	7	0 (0%)	5 (4)	8 **	使用不能	60
神戸市	581,700	7,326	53.5	63	37 (54%)	17 (15)	40	ほぼ使用不能	1,303
東灘	77,000	367	16.0	9	4 (44%)	3 (3)	5	最長で2時間	38
灘	55,000	559	29.4	13	7 (54%)	2 (2)	4	使用不能	100
中央	56,000	107	4.1	9	2 (22%)	6 (5)	5	生田署管内可能	147
兵庫	53,000	1,038	45.1	11	6 (55%)	3 (2)	5	使用不能	104
長田	53,000	4,814	218.8	13	11 (85%)	2 (2)	5	使用不能	93
須磨	66,000	432	27.0	7	4 (57%)	1 (1)	4	使用不能	129
垂水	87,000	6	1.0	0	0 (0%)	0	4	使用不能	77
北	71,000	2	2.0	0	0 (0%)	0	5	---	259
西	63,700	1	1.0	1	0 (0%)	1 (1)	3	使用不能	356

* ぼや火災で事後に消防機関に報告されたもの(事後聞知)を除く
** 消防団のポンプ車を含む
(1995年11月現在のデータ)

規模であるが、表1中の出火件数もたまたま約1/4となっている。しかしながら、出火件数16に対して、消防団のものを合わせて消防ポンプ車が21台出動しており、かつ神戸市に匹敵するくらいの防火水槽を有していたことが、消火栓が使用不能という条件下にありながらも火災被害を最小限(2件の焼損面積1000m²以上火災は両方とも2000m²未満)にとどめたことに、大いに効を奏している。

西宮市の開発指導基準では、開発に伴う所要消防水利について、3基に1基の割合で防火水槽としなければならないことになっており、このことが私設を含めてきわめて多くの防火水槽を有する理由となっている。また、1994年夏の深刻な水不足を契機として、「異常渇水に伴う特別消防体制」マニュアルを作成し、断水を想定した河川やプールの利用訓練を行ってきたことも今回の地震に役立った。

一方、芦屋市は人口約8万7千人であり、地震直後に1万人当たり0.8件(東京区部に換算すれば約650件)という高い割合で同時多発火災が発生したことになるのだが、消火栓が使用不能という中で、うち5件は1棟火災、焼損面積1000m²以上は0という画期的な成果をおさめている。これには、火元建物に耐火造が多かったという幸運な要素もあるが、出動消防ポンプ車台数とほぼ同数の同時多発火災を全て小規模にとどめた理由としては、消防団の協力と、市内を流れる2つの河川の利用という条件を挙げなければならないだろう。

4. 同時多発火災に対する初動時消防活動能力の規定条件

前節では、阪神・淡路大震災時の神戸市、西宮市、芦屋市における初動時の消防活動状況から、初動時においては、防火水槽など最低限の消防水利が確保されれば、マクロにみれば出動必要対象と出動可能能力とのバランスが基本的に被害様相を規定することをみてきた。ここでは、さらに、他の都市の消防活動状況等をも踏まえ、今回の阪神・淡路大震災におけるデータから初動時消防活動による対応能力を規定する条件を具体的に調べた結果を示す。

震災時に、もし地震発生直後の同時多発火災件数が初動時に対応できる消防力を大きく上回われば、消防隊がかけつられない火災、あるいは消防隊数が不足して初期鎮火できずに延焼拡大してしまった火災が発生することは当然起こり得ることである。一方、地震火災といえども、1993年釧路沖地震時の釧路市消防本部での活動事例⁸⁾にみられるように、もしその発生件数が初期対応可能な消防力を下回れば1件の類焼火災もなく鎮火できる場合がある。

このように、地震発生直後の同時多発火災に対する消防活動能力には、自ずとそれぞれの消防機関における現有の消防活動資源、すなわち消防ポンプ車数、当務中の消防人員、震災時有効消防水利などに規定される対応可能な限界条件というものが存在するはずである。

図10⁷⁾は、市・区別の阪神・淡路大震災時の初期同時多発火災（午前7時までに発生した火災とする）1件当たりに対する初動時に対応可能であった、あるいは対応した消防ポンプ車数の平均値（火災1件当たり平均ポンプ車数）を横軸とし、縦軸に当該市・区における火災1件当たり平均焼損棟数（平均延焼規模）を示し、相互の関係をしたものである。なお、西宮市、芦屋市は消防団の消防ポンプ車数も考慮に入れている。図10から、明らかに、火災1件当たり平均ポンプ車数の値が1.0を境に平均延焼規模が大きく変化していることがわかる。すなわち、火災1件当たり平均ポンプ車数の値が1.0より小さいとき、平均延焼規模（対数軸で表示）は急激に増大している一方、1.0より大きいときは平均延焼規模は西宮市の3.4を最大として一桁台の数値で推移し、1を漸近線として減少する傾向がみられる。

なお、これらのデータには、耐火造建物から出火した火災件数も含まれている。阪神・淡路大震災時の火災に関しては、図11、図12に示すように耐火造建物から出火した火災の大半は火元建物のみの1棟火災であることから、もし図10と同様のグラフを、木造建物からの出火した火災のみを対象として示すことができれば、平均延焼規模が大きく変化する境界となる火災1件当たり平均ポンプ車数は、1.0より多少大きい値になることが推察される。

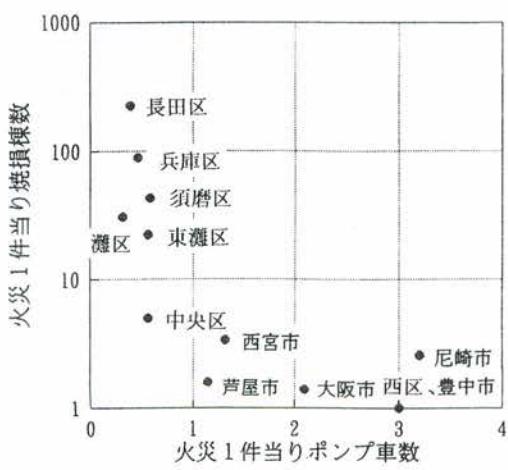


図10 火災(*)1件当たりの初動時平均出動
消防ポンプ車数と市・区別平均焼損棟数
(*17日午前7時までの火災)

【参考文献】

- 1) 神戸市消防局：阪神・淡路大震災（神戸市域）における消防活動の記録、1995年3月。
 - 2) 大阪市消防局：阪神・淡路大震災－大阪市消防活動記録、1996年1月。
 - 3) 東京消防庁：阪神・淡路大震災－応援活動等の記録、1995年10月。
 - 4) 全国消防協会：阪神・淡路大震災活動記録、1996年1月。
 - 5) 室崎益輝：阪神・淡路大震災における消火・救助の実態と問題点、第25回安全工学シンポジウム講演予稿集、1995年6月。
 - 6) 関沢愛：“火災の発生状況と焼け止まり状況について”，「消研輯報」第49号、p.35-44、1996年3月。
 - 7) 関沢愛：“3.5 消防活動の実態”，日本火災学会編「1995年兵庫県南部地震における火災に関する調査報告書」（執筆分担）p.111-119、1996年11月。
 - 8) 宮川覚：“釧路市における被害概要と消防活動について”，「火災」Vol.43 No.4（通巻205号）、1993年8月（日本火災学会発行）。

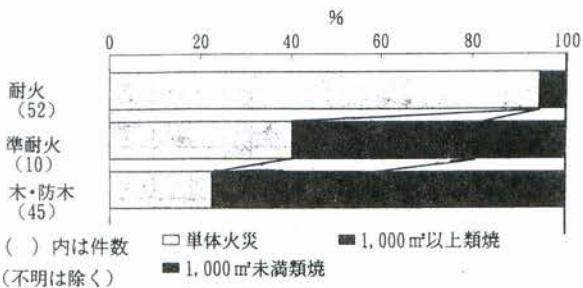


図11 火元構造別にみた火災規模別内訳（神戸市）

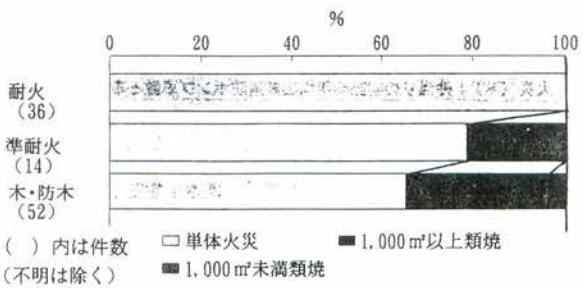


図12 火元構造別にみた火災規模別内訳（神戸市以外）

出火の状況および住民の火災への対応

鈴木恵子 松原美之（消防研究所）
北後明彦 岩見達也（建築研究所）

1. はじめに

平成7年1月17日に阪神地方を襲った兵庫県南部地震後に発生した火災について、消防本部が把握している情報を収集・整理した。今回の震災においては、地震直後のみでなく、地震後数日を経た後にも火災の発生があった点が特徴的であった。地震後に発生した火災について、その発生の状況、出火原因の分析、火災拡大の状況をはじめとした解析・検討が多方面で実施されている。しかし、地震直後の火災については混乱した状況の中で火災が拡大したなどの理由により出火原因の特定が困難なものが多い一方、地震後時間が経って発生した火災にあっては、出火原因自体は比較的明確であっても、そもそも地震が無ければ発生しなかった火災ではあるが、はたして地震による火災と言い得るのかどうかが曖昧な火災が含まれることとなり、「地震による火災」であるか否かの境界線が、未だ必ずしも明解となっているとは言えない。こうした状況にかんがみ、消防研究所では阪神間を中心とする周辺23消防本部から1月17日より26日までの10日間に発生した全火災に関する情報の提供を受け、その結果の集約と出火の機構に関する分析を行っている。

ここではその概要について報告するとともに、筆者らが参加した「阪神・淡路大震災時の火災と市民行動に関するアンケート調査」(日本火災学会,1995)の結果から、住民の火災対応行動を中心に紹介する。

2. 兵庫県南部地震後10日間の出火状況

兵庫県南部地震後10日間の出火状況¹⁾について、概要を報告する。

火災に関する情報の提供を受けた消防本部は図-1に示すとおりであり、総出火件数は、340件である。日別出火件数を図-2に、延焼規模別火災件数を図-3に示す。

3. 出火の機構について

火災に関する情報は、コード化によって蓄積が容易になり、統計という形で役立てられるが、それにより欠落してしまう情報も少なくない。特に、兵庫県南部地震後の火災については平常時の火災で想定されない出火のプロセスを明らかにすることが必要であり、その際、文章で書かれた火災の概要をもとに分析を進めることとなる。

340件の火災に関する情報と、各本部が出版した報告書などから概要が判るもの内、出火のプロセスが把握できる約50件について分析を行った。その結果について報告する。

4. 住民の火災対応について

「阪神・淡路大震災時の火災と市民行動に関するアンケート調査」²⁾は、日本火災学会兵

兵庫県南部地震災害調査委員会市民行動ワーキンググループが行ったもので、調査の概要は表-1に示す通りである。調査項目は、地震直後の様子、火災を知ったときの状況とその前後の行動、自宅への延焼状況、消火活動、広域避難、地震時の火気対応、回答者と住宅の属性などである。このうち、出火と関係の深い火気対応を中心に紹介する。

4. まとめにかえて

震災時に発生した火災は、その件数一つをとっても近年経験したことのない大きなものである。これらの火災原因を解明するためのより一層の努力とともに、現状の改善のための実行力ある対策が必要である。

震災後の多忙な時期から、各消防機関の方々には種々の御協力をいただいた。また、アンケート調査では被災された多くの方の理解と協力によって貴重なデータを集めることができた。最後に記して、謝意を表したい。

参考・引用文献

- 1) 鈴木恵子, 松原美之; 1995年兵庫県南部地震後10日間の出火状況, 消研輯報No.49, 1996.3
- 2) 日本火災学会; 1995年兵庫県南部地震における火災に関する調査報告, 1996.11

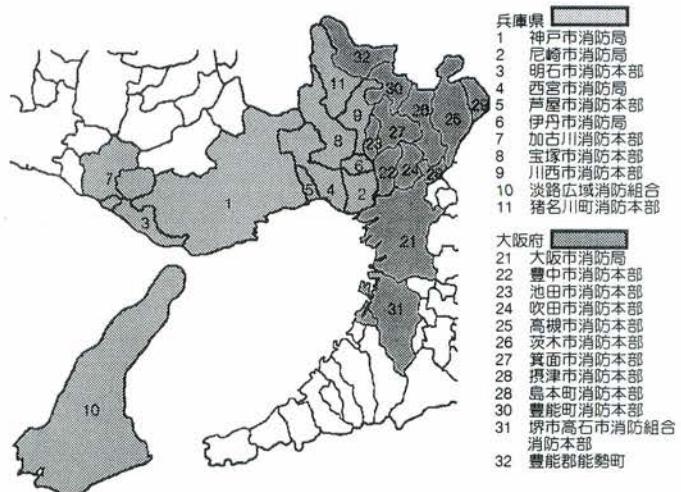


図-1 調査対象消防本部

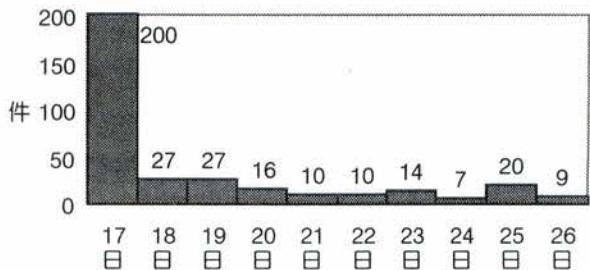


図-2 日別出火件数

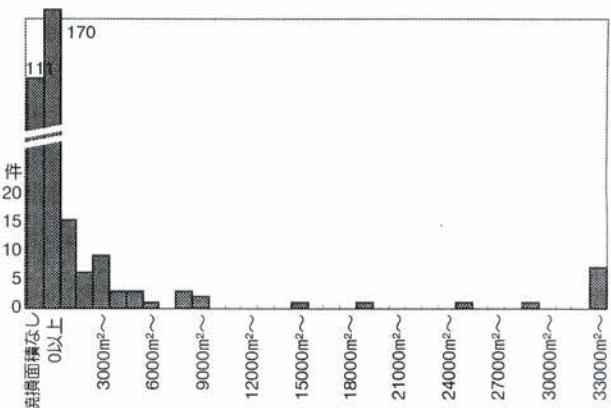


図-3 延焼規模別火災件数

表-1 アンケート調査の概要

呼称	対象	名簿	送付数	回収数(率)
市街地低層	市街地火災による焼失地域内とその周辺の低層住宅居住世帯	住宅地図より作成	8286世帯 46地区	2879世帯 (35%)
市街地高層	市街地火災による焼失地域内とその周辺の高層住宅居住世帯		3179世帯 40地区	691世帯 (22%)
単体高層	地震後10日間に火災が発生した高層住宅の居住者		1167世帯 30棟	424世帯 (37%)

地震被害情報の効率的収集方法

Effective Gathering of Earthquake Damage Information

○座間 信作 細川 直史 畠山 健 関沢 愛（消防研究所）

Shinsaku ZAMA, Masafumi HOSOKAWA, Ken HATAYAMA, Ai SEKIZAWA

National Research Institute of Fire and Disaster, 3-14-1, Nakahara, Mitaka, Tokyo, 181

For effective and adequate emergence responses just after an earthquake, it is necessary for a municipal corporation to grasp accurate damage information at an early stage. Results from hearing and questionnaire concerning the damage information collection to the damaged area due to the 1995 Hyogo-ken Nanbu earthquake, lead to the necessity of an earthquake damage prediction system to be useful just after an event, of a tool for easily gathering damage information in the form of digital values, and of a system that can predict a whole damage from limited real information. Thus, we have developed such a system and a tool. Furthermore, we propose how to gather damage information effectively using these tools.

Key words: earthquake damage prediction system, gathering damage information, Hyogo-ken Nanbu earthquake

1. はじめに

地震時の緊急・応急対策を効率よく実施するためには、先ず被害状況を迅速かつ正確に把握することが基本となる。兵庫県南部地震の教訓の一つとして、初動体制の早期確立が挙げられたのは、全体の被害規模の概要さえなかなか把握することができなかつたことによる。

ここでは、先ず兵庫県南部地震における行政側の地震被害情報収集状況に関する調査結果を示し、次にその結果を受けて、地震被害情報の効率的収集方法・体制に関する検討を行い、最後に具体的な収集システムの実現への取り組みを紹介する。

2. 兵庫県南部地震後の被害情報収集状況

Fig.1は地震発生時を原点としたときの、各自治体の死者数把握状況を時系列的にまとめたものである。この図から、伊丹市、北淡町、宝塚市ではほぼ当日に全体の死者数が判明している。一方、神戸市、大阪市、西宮市では容易に全体を把握できない状況であったことが伺え、また芦屋はこれらの中間的な状況となっている。このような相違をアンケート、ヒアリングから探ってみた。

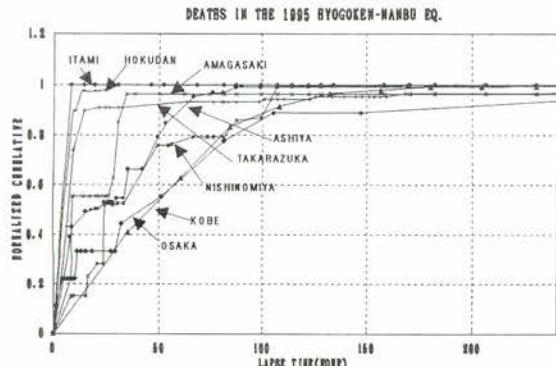


Fig.1 Normalized cumulative frequency for the number of deaths grasped at municipalities damaged by the 1995 Hyogo-ken Nanbu earthquake.

アンケートは兵庫県、大阪府の市町村防災担当者を、ヒアリングは主に上述の自治体を対象としておこなった。調査項目は

- (1) 防災活動の拠点となる庁舎の被災状況
- (2) 職員の参集状況
- (3) 電話、電気等使用の可否、電話輻輳状況
- (4) 地域防災無線、防災行政無線等の稼働状況
- (5) 災害情報収集体制、手段

等である。

それらの結果を要約すると、

兵庫県南部地震で甚大な被害を被った自治体では、圧倒的に要員が不足し、情報収集までに手が回らないといった状況であった。地域の被災度が大きいほど、庁舎の被災の可能性も大きく、また要員の確保も困難となりやすいし、電話等が利用できない状況となる。従って地震動強さが情報収集の困難性の大きな因子となっている(Fig. 2)。

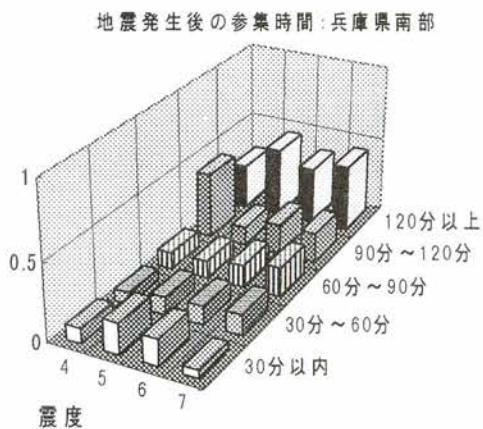


Fig.2 Time needed for emergency summons of staffs in municipalities after the 1995 Hyogo-ken Nanbu earthquake vs seismic intensity.

一方、被害の程度（地震動の強さ）が同じであっても、地域の防災ポテンシャルが高ければ、応急対応も早期に可能となる。これは北淡町の事例を見れば明らかであって、その対極にあるのが神戸ということになるだろう。

地域防災無線等の情報伝達手段が整備されている地域においては、収集活動の効率化は大いに図れると思われるが、通常時における情報形態は音声であることから、大量の情

報整理を行わなければならない状況下では多大な労力と時間を必要とする。例えば、釧路地震による釧路市の被害は死者2名、全壊家屋29棟程度であるが、防災担当者によれば、地震後約1週間はほとんど睡眠時間のない状態でとりまとめ等に携わっていたそうなのである。今回の地震ではそれ以上の状況であった地域が多かったらうと推察される。従って、情報の整理の容易性も考慮した何らかの収集方法が必要とされる。

被害収集過程の時間的相違の主な要因を被害の甚大さ及び地域の防災ポテンシャル、またはその裏返しとして都市化の度合いに求めることができるものとして、Fig. 1についてさらに議論を続ける。Fig. 1の分布がそのおおよその形状からワイブル分布で表現できるものとする。即ち、発震時を0とし、それからの経過時間をtとすると、tの関数としてワイブル分布 $F(t)$ は3つの係数 a , b , c を用いて次のように表せる。

$$F(t) = 1 - \exp(-a(t-c)^b)$$

これら3つの係数を変えて得られる分布と実際の累積分布との差の2乗和が最小となる係数を求め、curve fittingを行うと、神戸に10時間 ($c=10$) 程度のオフセットが認められ、最も遅い収集過程であることが示される (Fig. 3)。なお、経過時間としては50時間までとしている。一方、各地域に対する a , c の値を見ると殆ど $a=50$, $c=0$ に近い値となっており、それらを固定値としてもbest fittingの場合と大きな差はない。そこで、 b 値のみに着目

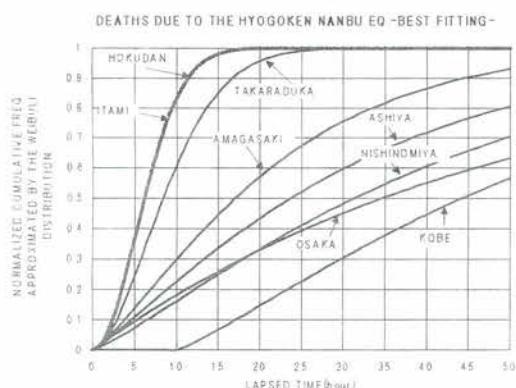


Fig.3 Weibull distribution fitting for the normalized cumulative frequency of the number of deaths grasped at municipalities damaged by the 1995 Hyogo-ken Nanbu earthquake.

して検討を進める。いま、被害の甚大さを表す指標として建物被害率を、都市化を表す指標として人口をとることとして、 b 値を人口と被害率に関する回帰式で表すと、

$$b = 3.747 - 0.591 \cdot \log(\text{人口}) - 1.294 \cdot \log(\text{被害率})$$

ここで、相関係数は0.854で比較的高い。但し、大阪の場合、死者数が少なくまたその死因も家具の転倒等によるもので外部から容易に様子が分からなかつたなど、他地域と異なった状況と考えられることから、大阪のデータを除いている。 b 値は分布形状の立ち上がり方の急峻さに対応するものであることから、人口が多く、被害の甚大な地域ほど情報収集に時間がかかるという、極めて常識的な関係があることが分かる。

回帰式から求まる b 値を用いたワイブル分布と実データ

を比較すると、芦屋が実際よりやや早い立ち上がり、神戸が相当遅い立ち上がりという推定となるが、その他はデータをよく説明できている。この式は被害率を計測震度に置き換えることで、地震直後の限られた実被害数から全体の概数を把握することに利用できることを付言しておく。

甚大な1次被害が起った後の2次災害の拡大を防ぐためには、情報収集が極めて重要であるという観点からの本節の重要な結論は、人口が少ないほど被害情報の収集が迅速に行えるということであって、このことが後述の情報収集体制の構築に結びつくことになる。

3 効率的被害情報収集体制のフレームワーク

自治体に対するヒアリング、アンケート調査から被害情報の収集活動に影響する因子としては、地震動強さ、人口、そして情報収集・整理・伝達手段ということになろう。この3つをキーワードとして効率的被害情報収集体制のフレームワークを時系列的に以下のように考えてみる。

(1) 地震直後には、災害対策本部設置判断、本部員参集後の被害イメージの共有、広域応援要請の判断等が早期に要求されることから、地震被害の大略を推定することが必要で、そのための被害想定システムの開発が望まれる。

(2) この段階ではあくまでも想定であり、その想定結果の精度は実際の被害数と比べてオーダーで合っているという程度と考えられる。従って、緊急・応急対策を実行に移す際には、実被害情報の把握が急務となるが、市町村内全域の実被害を早期に収集することは困難と考えられることから、次のステップとして、ある限られた地区に着目し、その地区的被害状況だけを先ず収集することを考える。ある地区内の被害情報が把握できた場合、その情報と上記被害想定システムの結果とを考慮することによって、市町村全域の被害推定を行う。

(3) その後は、少し時間をかけても正確な実被害情報の収集に務めることとなるが、その際の収集も後の整理効率をも考慮に入れた方法が望まれる。上述したように、種々の形態の被害情報を整理することは労力のかかる作業であるが、しかし、災害救助法の適用、広域応援隊要請と情報提供等に大変重要なものである。その後の復興対策立案等をも視野に入れるならば、GISを用いて被害箇所等の表示ができる形式にする必要がある。そのような手段の一つとして、市町村内の地図を搭載した携帯端末機の利用が考えられる。勿論これは前段階でのモニタリング地区での被害情報収集にも用いられ、直接収集データを被害想定システムに取り込み被害推定を行う。

(4) 一方、このようなシステムが導入されても都市化の進んだ人口の多い自治体では、被害の全容を早期に把握するには困難がある。そこで、例えば中学校区程度の広さを一区画としてそれぞれその中に被害情報を収集するという体制をとる。これは清水市が地域を19のブロックに分け、公民館等の施設を利用した防災拠点をその中に置き、情報の収集伝達等の活動を行う体制を構築しているというヒアリング結果に基づいたものである。このような分散型の体制をとることにより、その地区内の情報をいち早く把握することができる期待される。この防災拠点で集められた情報を災害対策本部に送信し、更に災害対策本部側で集約された被害情報が各防災拠点にフィードバックされれば、住民はいつでも最寄りの防災拠点で全体の被害状況を

知ることができることになる。

4. 効率的被害情報収集方法の具体化

4. 1 簡易型地震被害想定システム

上述のフレームワークの第1ステップである地震直後に震災イメージを描くことができる地震被害想定システムを構築した(Fig. 4)。その特徴は、

- ・住民の生命・財産に直接関係する建物被害、人的被害(死者)及び火災の3つの基本的な被害の推定ができる。
- ・全国場所を問わず、行政界を超えた広域の被害を推定できる。
- ・全国を網羅する既存の国土数値情報、国勢調査地域メッシュデータを用いたことから、データを新たに作成する労がない。
- ・必要な機器はWindowsが作動するパーソナルコンピュータで、推定に必要な時間は1都道府県あたり10秒程度と早い。

などで、既に700以上の自治体等で利用されている。



Fig.4 An example of output of the simple earthquake damage estimation system.

4. 2 詳細地震被害想定システム

前節の簡易型被害想定システムは1kmメッシュ単位での想定を行うものであることから、市町村レベルにおけるこのシステムの活用には限界があり、より詳細メッシュでの被害想定システムが望まれる。

本節では、まだ構築段階ではあるが、詳細情報を容易に取得する方法について述べる。

(1) 詳細地盤情報の取得

市町村レベルでの被害想定でも、従来のように多地点でのボーリングデータを収集・解析して増幅度を求めているところもあるが、比較的容易に得られる微地形分類図、土地条件図等をもとに地盤の増幅度を推定しているところもある。ここでは、情報の取得容易性を重視して、土地条件図の利用について検討する。

土地条件図の地盤分類と前節で用いた国土数値情報の分類とは一対一対応していない。そこで、k-netの強震計設置点のPS検層結果、及び消防庁震度情報ネットワークの計測震度計設置点付近のボーリングデータとの対応関係を調査している。これから表層地盤の平均S波速度と土地条件

図の分類項目との対応を明らかにして、増幅度特性を決定する。更には、市町村内に対してアンケート調査を行い、計測震度情報を基準とした詳細な相対的な増幅度を求め、両者の整合性をはかることによって詳細地盤情報とすることが考えられる。

(2) 詳細建物情報等

固定資産台帳がかなりのところでデジタル化されているので、これを利用する。その他、消防等関係機関が保存しているデータも利用できるものは利用することになる。このほか、リモートセンシングデータの解析から求める方法についても検討しており、データとしての活用が期待される。

以上によって詳細データが得られるので、簡易型被害想定システムと同じ計算方法によって被害想定を行うことができる。この場合、市町村という狭い領域を対象とすることから、地震直後対応のための利用においては、震源情報を入力することなく震度情報だけで面的な地震動の強さを推定しても大きな誤差をもたらさないであろう。

4. 3 被害情報早期収集・処理システムの開発

ここでは、地震被災地の防災活動要員が被害状況を収集する際に活用できる、後の処理効率をも考慮した情報収集ツールについて主に述べる。

被害情報の収集手段としては初期の段階では高所カメラやヘリコプター等の利用が挙げられるが、概して被害の大略を知る手段として位置づけられる。また市町村レベルでの利用にはその経費故に困難な面もある。

一方、実際の緊急・応急対策を実施するためには、どこでどのような被害が起こっているかを正確に知ることが必要となる。そのために、通常自治体職員が情報収集班を編成し巡回しながら情報収集を行う。その際、被害発生場所を地図上に落とせるように座標データが被害内容等と共にデジタル化されて収集できることが望まれる。そうすれば大量のデータでもGISを用いることによって殆ど瞬時に被害状況の視覚化ができる、的確・迅速な応急対応や復興対策に有効利用できることになる。

このような観点から、市町村職員・消防職員・自治会役員等が災害現場で実被害情報(場所、時間、被害項目、程度等)を簡単に入力できるシステムの開発を行った(Fig. 5)。主な機能は、

- ①携帯型である。
- ②家屋一軒一軒が認識できる1/5,000程度の市町村内全域の詳細地図が分割表示できる。
- ③GPSからの位置情報を取得できる。
- ④被害地点座標(緯度、経度)が自動入力される。
- ⑤被害項目・程度が簡単に入力でき、入力した被害種類を地図上に表示できる。
- ⑥通信機能を持ち、ホストコンピュータにデータを送信できる。
- ⑦ホストコンピュータで統合したデータを受信し、地域全体にわたる被害を簡易表示できる。

災害対策本部等では端末装置からのデータを受信し、データの統合を行い、地域全体の被害状況をGISを用いて表示する。現場においても統合されたデータを簡易的に表示し、情報収集担当地区が全体の中でどのような位置づけになっているかを知ることができるようしている。

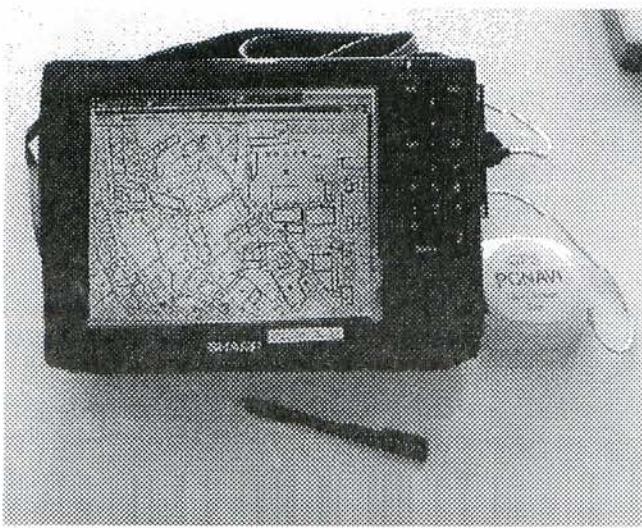


Fig.5 Handy-type collection and communication terminal of earthquake disaster information.

4. 4 地震直後の限られた実被害情報を用いた被害推定
地震直後には実被害情報は限定されたものとなるであろう。そこで、ある限られた地区に着目し、その地区的被害状況だけを先ず収集することを考える。地区内の被害情報が把握できた場合、その情報と被害想定システムの結果とを考慮することによって、市町村全域の被害推定を行うことが可能となる。即ち、想定結果は市町村全域の被害程度に対する重みを与えるものであるから、その重み言い換えれば被害確率分布とある地区内被害実数とを勘案することによって、より精度の高い推定結果が得られる。更に時間の経過と共に更新される被害データを取り込むことによつ

てダイナミックに推定していく。この方法の利点は、例えば建物強度の地域性などの影響が事前の評価を必要とすることなく推定結果に反映できることにある。現段階ではまだ構想段階ではあるが、実現は容易であると考えている。

5. 効率的被害情報収集体制に関する提言

地震後速やかに地域内の被害状況を把握することが、2次災害の防止軽減に欠くことのできないものであるという観点から、被害情報収集の効率的方法の一試案を述べてきた。最後に簡単に纏めると、地震直後は被害想定システムによって先ず被害の概略を知ることによって、災害対策本部の立ち上げ、要員招集等初動体制の早期確立を目指し、次に事後処理の効率化を考慮した収集ツールによって、あるモニタリング区域の被害情報を収集する。この限られた実情報を用いてより精度の高い被害想定を実施する。その後この収集ツールによって全地域の確実な情報を把握することになる。その際重要なことは、地域の防災拠点を情報収集のサブセンターとして位置づけることである。これによって住民への情報提供が容易にできることになる。当然ながら、防災拠点等での情報関連機器に関する耐震性の確保や電源の多重化、通信手段の確保等の対策を進めておく必要があることはいうまでもない。

このようなハード、ソフト両面が充実されると、それは被害情報の早期把握という一面だけにとどまらず、応急時の防災情報、生活情報提供、外部への情報提供、復旧対策等に有効活用できる。また、平常時の住民と行政間のコミュニケーションの円滑化も図れる。このような今後の発展性も含めて、情報収集・伝達の効率化に関する概念図を Fig.6 に示す。

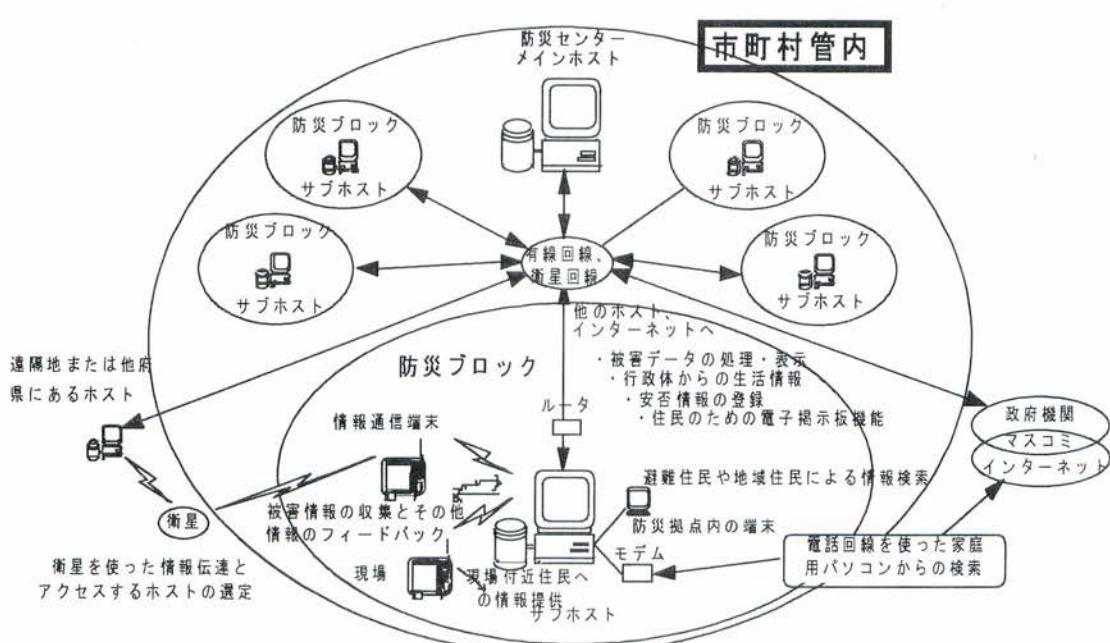


Fig.6 Framework for a system to effectively collect and transmit earthquake disaster information.