

ヘリコプター空中散水による市街地火災時の延焼遅延効果に関する研究

Study on Effect of Decreasing Spread Speed of Fires in Urban Areas by Aerial Fire Fighting of Helicopters

糸井川 栄一¹, 富塚 伸一郎²

Eiichi ITOIGAWA¹ and Shin-ichiro TOMIZUKA²

¹筑波大学大学院システム情報系

Faculty of Engineering, Information and Systems, University of Tsukuba

²東京消防庁

Disaster prevention section, Tokyo Fire Department

When a large earthquake happens in major city, a great number of post-earthquake fires would occur and expand in densely wooden buildings built up area. Furthermore, it is estimated that the number of fires would exceed the number of the pumper trucks in the suffered area. And the pumper trucks would face to difficulty of forward movement to firing area because of many street blockades by building collapse. Therefore, aerial firefighting by helicopters is needed. This study aims to clarify the relation between the firing properties in a burning area and the dropping water by helicopters. According to the numerical experiments based on the fire engineering methods, it becomes clear that there is a close relationship between marginal distance of the spread between two buildings and frequency of dropping water by helicopters. In addition, we clarified the requirements of urban area where is more effective to drop water by helicopters.

Keywords: Post-earthquake fire, marginal distance of fire spread, fire spread cluster, Aerial Fire Fighting, helicopter, effect of dropping water, densely wooden built-up area

1. 研究の背景と目的

(1) 研究の背景

阪神・淡路大震災では、発災日当日に206件の火災が発生し、そのうち8割を超える174件が発災後5時間以内に集中して出火した¹⁾。一方で、建物倒壊による交通障害や、上水道破壊に伴う水利枯渇により消防活動が阻害されたため、放任火災が多数発生し甚大な被害をもたらした。首都直下地震においても同時多発的な出火により発生する拡大火災に対し、都民による消火活動や地上消防部隊の運用のみでは消防力が不足する恐れがあることから、早期に他県から消防力を集結させる必要がある。しかし、緊急消防援助隊アクションプラン²⁾により東京に集結する陸上部隊は、その多くが発災後5時間以内に集結することが困難である。一方で、航空部隊消火チームの全9機は、発災後5時間以内に都内に集結することが可能である。このことより、地上消防力が充実するまでの間、ヘリコプターによる空中散水活動を効果的に行うことが震災時の火災被害の軽減につながると考えられる。

(2) 研究の目的

震災時の市街地火災に対する航空部隊の投入基準について総務省消防庁は、①不燃化率が30%以下の市街地、

②狭小建築物が密集する市街地、③延焼遮断が期待できない市街地としており³⁾、延焼危険性が部隊投入の判断基準となっている。一方、これまでに空中散水効果に関する十分な定量的研究は行われているとは言い難く、延焼危険が高い市街地で高い散水効果が得られるかどうかは明らかになっていない。そのため、現状の投入基準の場合、必ずしも延焼阻止・遅延効果が得られない市街地において散水活動を行う可能性がある。

以上の観点から、本研究では、より高い空中散水効果が得られる市街地要件を明らかにし、震災時の航空部隊消火チームの効率的な運用のための基礎的知見を得ることを目的とする(図1参照)。

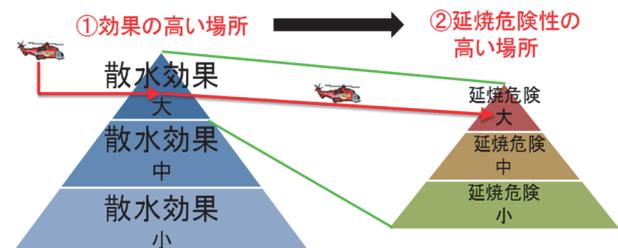


図1 効率的な航空部隊運用基準のイメージ

2. 既往の取り組みと研究フロー

阪神・淡路大震災においては、市街地火災に対し空中散水活動の実施が検討された。しかし、火災上空の飛行に対する機体の安全性、散水による地上の要救助者の安全性、市街地における散水効果等が不明確であったことから実施はされなかった³⁾。これらの問題点を明らかにするため、日本火災学会⁴⁾、自治省消防庁消防研究所⁵⁾により、燃焼させた模擬家屋に対し、実機から散水を行う実験が行われた。これらによれば、散水効果については一度の散水によって、一時的に火災の放射強度は低下し火勢抑止現象が生じるが、安定した鎮圧状態を導く事は困難であることから連続的な散水が必要であるとしている。しかし、実験から得られた知見は家屋配置が特定条件下のものであり、家屋配置を変化させた時に、どのように効果が変化するかについては検討がなされていない。

また、これらの実験結果を踏まえ、総務省消防庁は一つの火災に複数機投入し、燃焼区域の境界付近へ連続的に散水を行う方針を打ち出している³⁾。一方で、投入機体数と火災から無限水利までの距離で導き出される散水間隔を変化させた時に、どのように効果が変化するかについても検討がなされていない。

以上の点を踏まえ、本研究においては火災の拡大過程を物理的に表現する火災工学手法を用いた延焼モデルを基本とし、これに過去の実験結果から得られる散水効果を反映させたモデルの構築を行う。次に、このモデルを適用して、建物配置と散水間隔を変化させた時に建物間においてどのように散水効果が変化するかについて計算実験を行い、得られた結果を実際の市街地の状況と照合することにより、より高い散水効果が得られる市街地要件について考察を行う（図2参照）。

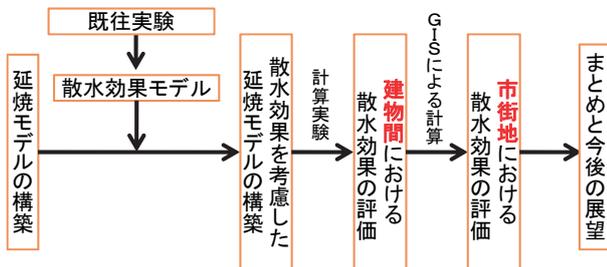


図2 研究のフロー

3. 延焼モデル

(1) 火災進行シナリオ

本研究では、家屋を一辺10mの正方形、1フロアの高さ3m、2階建の木造家屋、可燃物量を表1の通りモデル化したうえで、国土交通省総合技術開発プロジェクト「防災まちづくりにおける評価技術・対策技術の開発（以下、総プロ）⁶⁾」で開発された手法を参考に火災進行シナリオを次のように設定する。

- ①外部からの加熱に対しては、露出した木部に着火し、火災が家屋内部で成長する。（mode1）
- ②屋根や外壁は内部の燃焼とともにすぐに燃え抜け、全体が火災となり最盛期状態となる。（mode2）
- ③最盛期終了後、火災が減衰し燃え落ちる。（mode3）
- ④各modeにおける発熱速度曲線は次式により求める。

$$\text{mode1} : Q(t) = \alpha_{in} t^2 \quad (0 \leq t \leq t_f) \quad [1]$$

（最大発熱速度の上限値に達するまで）

$$\text{mode2} : Q(t) = Q_{b,p} \quad (t_f \leq t \leq t_p) \quad [2]$$

（総発熱量の一定割合 r_1 を放出するまで）

$$\text{mode3} : Q(t) = -\frac{Q_{b,p}}{(t_q - t_p)}(t - t_q) \quad (t_p \leq t \leq t_q) \quad [3]$$

（総発熱量の一定割合に相当する発熱量が放出されずに残る）

- ⑤未燃焼家屋へ輻射熱を曝し始めるのは、mode2以降。

このシナリオにより、市街地火災を個々の家屋の火災進行と周囲の家屋への熱移動に分けて、個別家屋の火災が連鎖するものとする（図3参照）。さらに、加害側の延焼建物の炎からの輻射熱を求め、炎に曝される被害側の建物の受け取る熱量と壁面温度により着火の判定を行う。家屋モデルを踏まえた発熱速度曲線は図4ようになる。

（各記号の定義は表2参照）

(2) 炎のモデル化と火炎面の平均放射強度

mode2, mode3における炎の形状は、図5に示す通り、火炎軸を中心とした四角錐とする。火炎軸の傾き、長さ、軸上温度分布は、発熱速度を変数とする次式により求める（各記号の定義は表3参照）。

表1 家屋モデルにおける記号設定

A_l : 建築面積[m ²]	10 m×10 m=100 m ²
N : 階数[-]	2
A_{floor} : 延べ床面積[m ²]	100 m ² ×2 階=200 m ²
H_c : 天井高さ[m]	2 階×3 m=6 m
w_l : 積載火災荷重[kg/m ²]	27.5 kg/m ²
W_l : 積載可燃物重量[kg]	$w_l \times A_{floor}=5500$ kg
W_b : 固定可燃物重量[kg]	$65A_{floor}+65A_l=19500$ kg
W : 可燃物重量[kg]	$W_b+W_l=25000$ kg
A_{fl} : 積載可燃物の表面積[m ²]	$0.54w_l^{2/3}W_l \approx 326$ m ²
$A_{f,c0}$: 壁・床天井・間仕切り壁の見つけの表面積[m ²]	$4\sqrt{A_l} \times N \times H_c + 2 \times N \times A_l + 0.5 \times A_l \times N \times H_c = 1480$ m ²
$A_{f,c}$: 壁・床の表面積[m ²]	$\Phi \times A_{f,c0}/2 + 0.5 \times 4 \times \sqrt{A_l} \times N \times H_c$ (火災最盛期) = 980 m ²
$A_{f,s}$: 構造体の表面積[m ²]	$0.09(W_b/A_l)^{-1/3}W_b$ (火災最盛期) ≈ 302.632 m ²
$A_{f,b}$: 可燃物表面積[m ²]	$A_{fl}+A_{f,c}+A_{f,s} \approx 1608.632$ m ²

表 2 火災進行曲線における記号設定

α_{in} : 建物内部火災成長率[kW/s ²]	$\alpha_{in} = \alpha_f + \alpha_m = 0.4162 \text{ kW/s}^2$
α_f : 積載可燃物火災成長率[kW/s ²]	$\alpha_f = 2.6 \times 10^{-6} (w_l + q_w)^{5/3} = 0.0662 \text{ kW/s}^2$
α_m : 内装の火災成長率[kW/s ²]	$\alpha_m = 0.35 \Phi^2 = 0.35 \text{ kW/s}^2$
q_w : 単位木材あたりの発熱量	16000 kJ/kg
Φ : 木材の酸素消費係数[-]	1
r_1 : 減衰期に入る時点における総発熱量の割合[-]	0.4
r_2 : 鎮火時における燃え残りに相当する総発熱量の割合[-]	0.4
$Q_{b,p}$: 発熱速度の上限値[kW]	$Q_{b,p} = q_s \times A_{f,b} \doteq 160863 \text{ kW}$
q_s : 可燃物表面積あたりの発熱速度[kW/m ²]	100 kW/m ²
t_f : 発熱速度が最盛期に入る時刻 sec	
t_p : 発熱速度が減衰期に入る時刻 sec	
t_q : 鎮火する時刻 sec	

$$\text{傾き } \phi \quad \sin \phi = \frac{56}{70} \left(\frac{T_\infty}{q_w Q_f^*} \right)^{0.14} \left(\frac{U^2}{gD} \right)^{-0.26} \quad [4]$$

$$\text{長さ } L_f \quad L_f = 3.3 Q_f^{2/3} D - 0.5 H_c \quad [5]$$

軸上温度分布 $T_f(z_f)$

$$T_f(z_f) = \begin{cases} 800 + 273 & (0 \leq z_f \leq 0.08 Q^{2/5}) \\ \frac{64 Q^{2/5}}{z_f} + 273 & (0.08 Q^{2/5} \leq z_f \leq L_f) \end{cases} \quad [6]$$

火炎は、地面と水平方向に等温な層で構成されるとした時、火炎面の温度は軸上温度分布により求められることから、上式により形状が定まった火炎面からの平均放射強度は次式により算出する。

$$E = \frac{2\epsilon\sigma}{L_f} \int_0^{L_f} (T_f(z_f))^4 \left(1 - \frac{z_f}{L_f}\right) dz_f \quad [7]$$

(3) 未燃焼家屋壁面への入射エネルギー

未燃焼家屋壁面への入射エネルギーは、
壁面への入射エネルギー I

$$= \Sigma \text{炎の平均放射強度 } E \times \text{形態係数 } f \quad [8]$$

よって求める。形態係数は、受熱点と火炎面の幾何学的関係より求められる。受熱点は未燃焼家屋の壁面上において最も入射エネルギーが高い場所となる地上から6mの壁面上に設定する。家屋配置を定めた時、山崎⁷⁾による n 本の直線で構成された面の形態係数 f の算出方法を使用

表 3 モデル炎における記号設定

Q_f^* : 無次元発熱速度[-]	$Q_f^* = \frac{Q}{\rho_\infty C_p T_\infty g^{1/2} D^{5/2}}$
ρ_∞ : 外気密度[kg/m ³]	$\rho_\infty = 353 / T_\infty \text{ kg/m}^3$
C_p : 空気の定圧比熱 [kJ/kg/K]	1.0 kJ/kg/K
T_∞ : 外気温度[K]	293 K
g : 重力加速度[m/s ²]	9.8 m/s ²
D : 火源寸法	$D = 2 \sqrt{\frac{A_f}{\pi}} \text{ m}$
U : 風速 m/s	
z_f : 火炎軸上点の軸下端からの距離 m	

し形態係数を求める。本研究では受熱点に面する全ての火炎面からの放射熱を考慮し、壁面への入射エネルギーはこれら全ての面からの合計値としている。例えば図6に示す通り、受熱点への合計入射エネルギーは火炎面1~4それぞれの入射エネルギーを合計したものである。ただし、火炎面3は火炎面2に遮蔽されている部分があるため、遮蔽されずに残った面における形態係数を算出している。

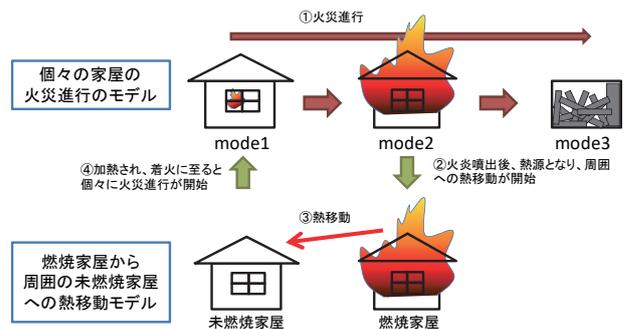


図3 市街地火災の進行シナリオ

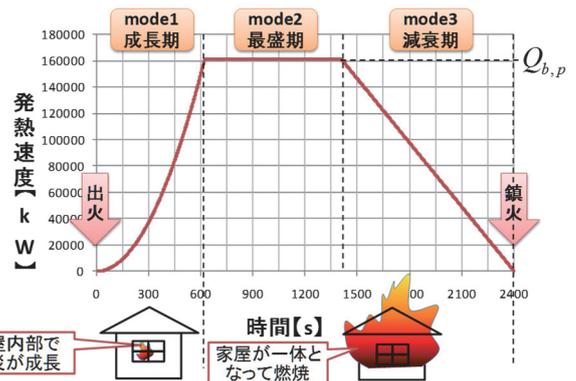


図4 木造家屋の火災進行曲線

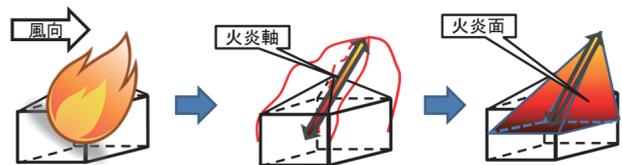


図5 炎のモデル化

(4) 未燃焼壁面温度と着火判定

入射エネルギーを受けた未燃焼家屋壁面の微小要素の温度応答は、木材の着火限界入射熱15 kW/m²、含水率0%の杉の熱慣性0.027 kW²s/m⁴K²を利用し、

$$T_s(t) = \frac{I}{h} \left(\frac{1.18\sqrt{at}}{1.18\sqrt{at} + 1} \right) + T_0 = 20I \left(\frac{1.18\sqrt{0.0926t}}{1.18\sqrt{0.0926t} + 1} \right) + 293$$

ここで、
 $T_s(t)$: 時刻 t における表面温度 [K]
 T_0 : 初期表面温度 [K] (=293[K])
 I : 入射熱流束 [kW/m²]
 h : 対流熱伝達率 [kW/m² K]
 a : 温度拡散率 [m²/s]. [9]

とし⁸⁾、初期温度293 Kの木材が着火温度593 Kに到達する時間 t_{ig} を求めることにより、着火判定を行う^[1] (図7参照)。延焼モデルの概要を図8に示す。

4. 建物間における散水効果

空中散水は広範囲にわたるため、効果は燃焼家屋に対する効果と、その周辺の未燃焼家屋に対する効果とに分けて計算を行う必要がある。そこで、過去の実験における火炎や壁面温度等のパラメーター変化を前章で構築した延焼モデルに反映させ、建物間における散水効果について検討を行う (図9参照)。

(1) 平均散水密度

空中散水の効果に大きく関係する平均散水密度は、文献5で得られる式に、過去の実験によって計測された値により補正をかけて、次式により求める。

$$D = \frac{0.9773M}{v \times t_w \times 2 \times H \times \tan \theta}$$

ここで、
 D : 平均散水密度[l/m²]
 M : 1回の散水による水量[l]
 v : ヘリコプターの速度[m/s]
 t_w : 散水継続時間[s]
 H : 飛行高度[m] [10]

この式に、緊急消防援助隊で東京に集結する機体が保有するタンク容量や、文献3にて安全とされている高度、速度等、表4の値を代入することにより求められる平均散水密度 $D=1.5$ l/m²を本研究における散水密度とし^[2]、目標対象物に対し常に同様に均一の状態で散布されることとする (図10参照)。

(2) 燃焼家屋に対する散水効果

燃焼家屋に対する散水効果として、散水による火炎の温度低減、火炎の縮小が考えられる。文献5で、模擬家屋内部に熱電対を設置し、散水を繰り返すことにより火災抑止効果の分析を行っている。これによれば、0.15 tonの

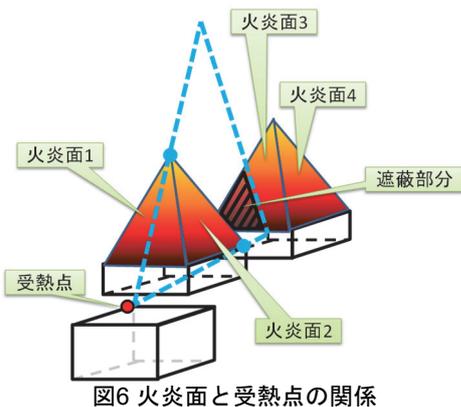


図6 火炎面と受熱点の関係

水が命中した燃焼家屋内の温度は $\Delta T=412$ deg下がり、降下温度が63%回復するのに =22.6 sかかるというデータを得ている^[3]。火災室内の温度は散水を行わなければ常に最盛期の火炎温度 (=1073 Kと定義) にむかって回復していくと考えられることから、 n 回目の散水後の温度回復過程を次式により近似する。ただし、最盛期となったmode2移行時の火災室内温度を $T_{M1}=1073$ Kとし、散水は

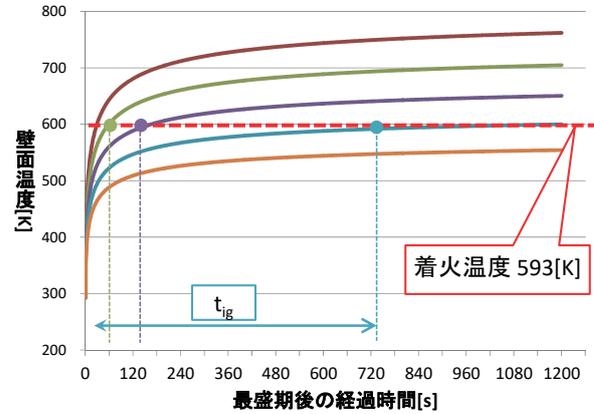


図7 最盛期後の経過時間、壁面温度変化と着火温度

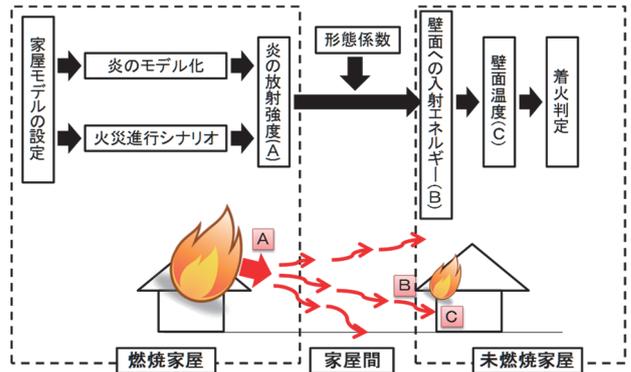


図8 延焼モデルの概要

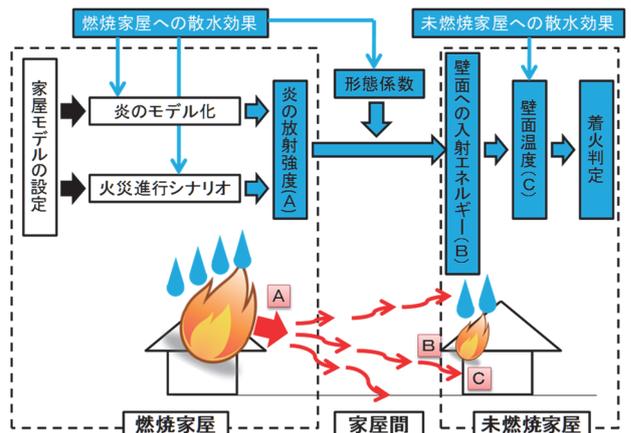


図9 延焼モデルと散水効果の概要

表 4 散水密度における記号設定^[2]

v : 散水時飛行速度[km/h]	20[kt] \approx 37 km/h
t_w : 散水継続時間[s]	5.6 sec
H : 散水時飛行高度[m]	150 ft \approx 45.7 m
M : 一度の散水量[l]	1300 l
θ : 水の落下時の拡散角	9度

mode2以降に行うものとする (図11参照) .

$$T_n(t) = \{1073 - (T_{Hn} - \Delta T)\} \left[1 - \left\{ 1 - \frac{\left(1 - \frac{1}{e}\right)\Delta T}{1073 - (T_{Hn} - \Delta T)} \right\}^{\frac{t}{\tau}} \right] + (T_{Hn} - \Delta T) \quad [11]$$

ここで, t : 最後の注水からの経過時間[s]. [11]

この時, n 回目の散水と $n+1$ 回目の散水 (散水間隔 Δt) 間における火災家屋室内平均温度, 平均発熱速度は総プロ⁶より火災室内温度と発熱速度の関係が比例関係にあることを利用し,

$$T_{An} = \left\{ \frac{\int_0^{\Delta t} T_n(t)^4 dt}{\Delta t} \right\}^{\frac{1}{4}} \quad [12]$$

$$Q_n = Q_{b,p} \frac{T_{An} - T_{\infty}}{1073 - T_{\infty}} \quad [13]$$

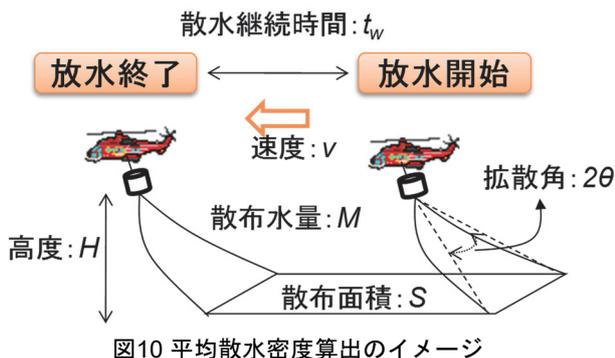
となり, 第3章(2)の式により散水により縮小した炎の形状を得る.

(3) 未燃焼家屋に対する散水効果

未燃焼家屋に対する効果として熱せられた壁面の温度降下が考えられる. 文献5では, 燃焼家屋と未燃焼家屋に対し散水を行い, 未燃焼家屋壁面部分の入射エネルギー (連続データ) と温度 (離散データ) を計測している. これらは第3章(4)の関係を満たしていると考えられるが, 得られたデータは壁面温度に対し入射エネルギーの値が小さい. そのため本研究では, 入射エネルギーに補正係数をかけ, 実験での入射エネルギー値から得られる計算上の壁面温度と実験での壁面温度データを比較し, 一度の散水による壁面温度降下幅の算出を行った. その結果, 表5の値の時に両値の挙動がほぼ一致した (図12参照). そのため, これらの補正係数, 温度降下幅の時には, 「未燃焼家屋壁面への散水効果」を「未燃焼家屋壁面の瞬間的な温度降下」として捉えることができると考えられる. そこで, 本研究における未燃焼家屋壁面への散水効果は, 100, 150, 200 degの3種類の値で計算を行い着火判定を行う.

(4) 家屋配置

以上の手法により散水を実施しなかった時と, 散水実施時の着火時間を, 建物配置を変化させながら比較を行っていく. 始めに燃焼家屋1棟と未燃焼家屋1棟のみにおける基礎計算を行い, 次に図13のように中心に燃焼家屋を4棟, そのまわりに未燃焼家屋を正方形格子状に隣棟間距離 X m離して配置する. これは, 複数の火源からの輻射熱に曝されるモデルであり, 実際に空中散水活動が行われるであろう拡大火災を想定して計算を行ったものである.



(5) 評価指標

本研究における建物間の散水効果は得られた着火時間より算出可能な次の2種類の指標を用いて評価を行う.

(a) 延焼速度

ある家屋 (一辺が10 m) が着火し火源となり, X m離れた隣棟が着火するまでの間に延焼が進む距離によって, 建物間の見かけ上の延焼速度[m/h]を次式により算出する.

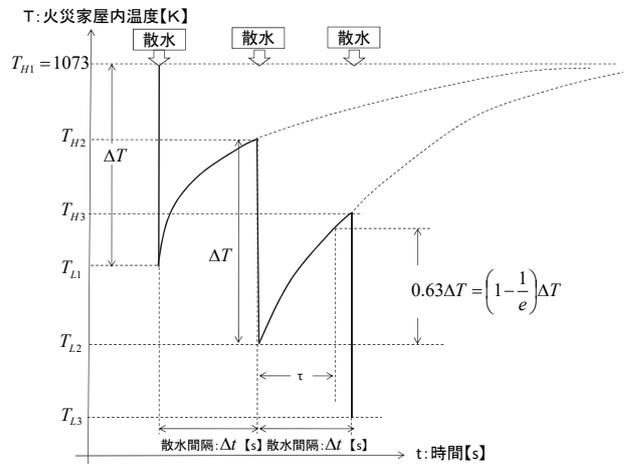


図11 火災室内温度の近似イメージ

表5 未燃焼家屋壁面温度の降下幅と補正係数

補正係数[-]	温度降下幅[deg]
1.8	100, 150, 200
1.9	150, 200
1.95	150, 200
2	150, 200

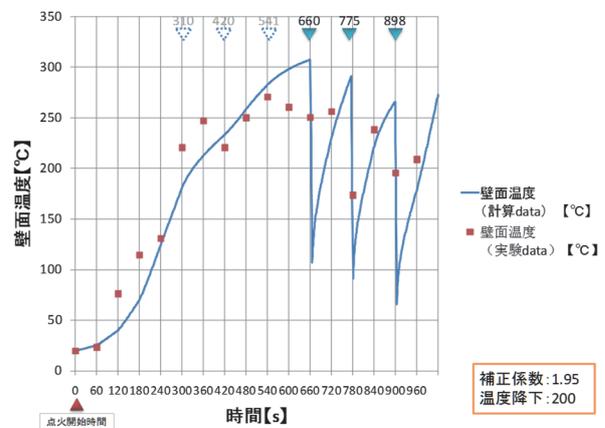


図12 未燃焼家屋壁面における計算上と実験データの比較

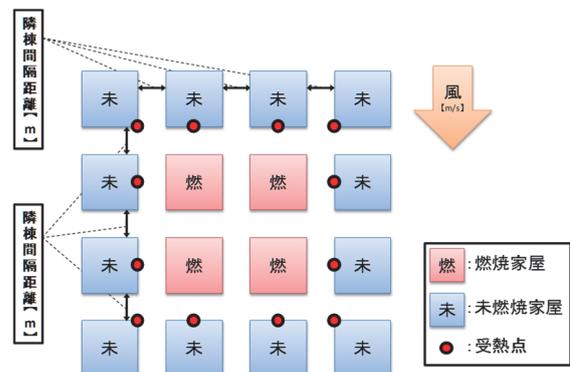


図13 家屋配置

$$V = \frac{10[m] + X[m]}{t_f + t_{ig}} \quad [14]$$

(b) 延焼限界距離

隣棟間隔距離を広げていくと、同じ放射強度を持つ火炎面でも形態係数の値が下がることにより入射エネルギーの値も下がり、未燃焼家屋壁面が着火しなくなる。この「 $X \geq d^*$ において、未燃焼家屋壁面は着火しない」となるような d^* を本研究における延焼限界距離と定義する。

これら2種類の指標をそれぞれ、隣棟間隔距離を変化させた時に、風向き、散水間隔ごとにどのように変化するかについて分析を行う。

(6) 建物間における散水効果のまとめ

風速が0 m/s, 3 m/s, 火源建物に対し正対する家屋における隣棟間隔距離と延焼速度の関係について図14に示す。なお、風速については、第3章(2)の火炎の傾きにおいて0 m/sと3 m/sが同様に傾かないという結果を得たため、以降は0・3 m/s, 6 m/sの2種類の比較を行う。それぞれの散水条件において、隣棟間隔距離が短い時には、延焼速度がほぼ同じ値をとっている。これは、mode1の時間が $t_f = 622$ sと散水によらず一定値であり、一方で入射エネルギーが高く着火時間が数秒であるためである。よって、隣棟間隔距離が非常に小さい隣棟間においては、空中散水効果はほとんど得られないと考えられる。また、隣棟間隔距離の値が大きくなると、同様に延焼速度に大きな違いは見られない。一方で、延焼限界距離に大きな特徴が見られ、散水間隔を短縮することにより縮小していることがわかる。

また、風速が6 m/s, 火源建物に対し風下側家屋における同関係については図15に示す通りであり、風速0 m/s, 3 m/sの時と比較して延焼限界距離が伸びているが、散水間隔を短縮することにより延焼限界距離が縮小していることが分かる。また、未燃焼家屋壁面の温度降下幅を変化させて計算を行ったところ大きな変化は見られなかった。

以上の結果より、空中散水を行うと、建物間においては延焼速度ではなく、延焼限界距離が短縮することが明らかになった。そこで、それぞれの散水条件における延焼限界距離を図示したものが図16である。

5. 市街地における散水効果

本章では、前章で得られた各散水条件による延焼限界距離を利用して、実市街地の建物配置を考慮した散水効果について検討を行う。

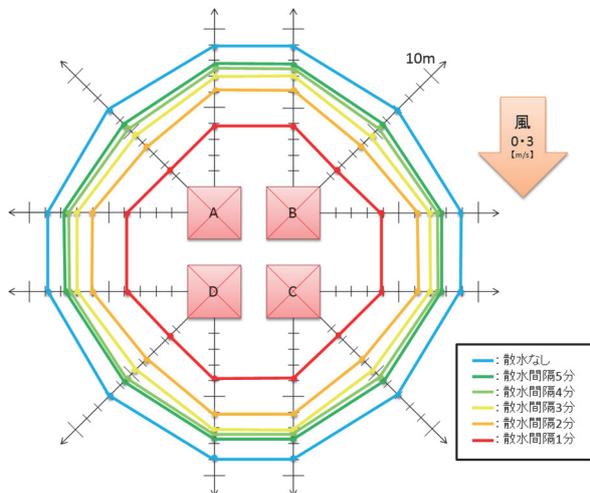


図16 各条件ごとの延焼限界距離

(1) 延焼クラスター

市街地の建物に対し延焼限界距離の半分の値でバッファを発生させ、その和集合をとったものを延焼クラスターと定義する(図17参照)⁶⁾。この時、延焼クラスター内で発生した建物火災は、その延焼クラスター内全ての建物に類焼することになり、一つ一つの延焼クラスターの広がり、市街地の中で延焼が拡大していく可能性のある建物の連担状況を示す。市街地における散水効果は、建物間の延焼限界距離が縮小されることにより、延

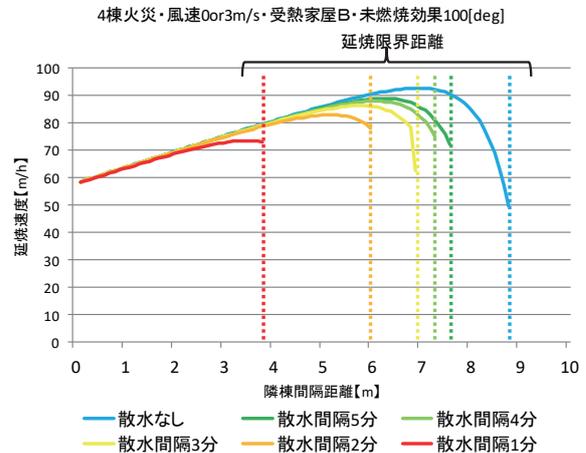


図14 建物間における散水効果(火源建物正対家屋)

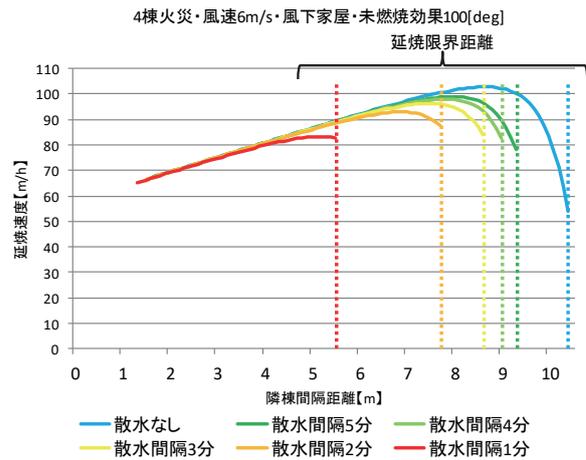


図15 建物間における散水効果(風下家屋)

焼クラスターが細分化され、焼失棟数の軽減や延焼経路変更に伴うマクロな延焼速度低下につながると考えられる。そこでGISにより実市街地の建物データにおいて、前章で得られた延焼限界距離を用いて延焼クラスターを作成する^[4]。ただし、防火造建物は木造建物の半分、準耐火建物は防火造建物の半分、耐火建物は0の値を延焼限界距離として使用する。

ここで、 n_i 個の延焼クラスターが形成される一つの地区*i*で、1件の出火があった場合の平均焼失棟数期待値について考える。地区*i*の一つの延焼クラスター*j* ($j=1\sim n_i$)内の建物棟数を C_{ij} とした場合、1件の出火があるパターンは C_{ij} 通りである。延焼クラスターの特性から、延焼クラスター内いずれの建物からの出火においても延焼クラスター内の建物は全部焼失し、他の延焼クラスターの建物への影響はないと考えるので、当該延焼クラスター内で出火があった場合には C_{ij} 棟が焼失する。1つの延焼クラスター内での出火は C_{ij} 通りであり、延焼クラスター内の建物が1回ずつ出火した場合の焼失棟数の合計は C_{ij}^2 棟になる。地区内の全ての建物から1回ずつ出火する場合の数は $\sum C_{ij}$ であり (\sum は地区*i*内の全てのクラスター ($j=1\sim n_i$) に対する積算を意味する)、 $\sum C_{ij}^2$ 通りの出火での焼失棟数の総和は $\sum C_{ij}^2$ になるので、地区*i*における散水間隔が Δt 分の時の平均焼失棟数期待値 $\chi_{i\Delta t}$ は次式となる ($\Delta t=\infty$ の時 は散水なしとする)。

$$\chi_{i\Delta t} = \frac{\sum_{j=1}^{n_i} C_{ij}^2}{\sum_{j=1}^{n_i} C_{ij}} \quad [15]$$

地区 *i* の散水間隔 t 分の時の散水効果 $R_{i\Delta t}$ を

$$R_{i\Delta t} = 1 - \frac{\chi_{i\Delta t}}{\chi_{i\infty}} \quad [16]$$

として求め、町丁目ごとに比較を行う。 $\chi_{i\infty}$ は、散水がない場合の平均焼失棟数期待値であり、 R_{it} は、建物配置を考慮したマクロな散水効果を表す指標であり、1に近づくほど散水効果が高い指標となっている^[6]。

(2) 評価対象地域と散水圏域

本研究における対象地域は、地上消防隊の不足により放任火災が起こりやすいと考えられる東京 23 区とする。無限水利は隅田川・荒川等の大規模河川や東京湾とし、運用可能機体数を 4 機、また文献 3 より給水時間=1 分、散水時間=1 分、飛行速度=120 km/h とすると図 18 の通りの圏域図となる^[5]。

(3) 散水効果と延焼危険性との比較

風速 0 m/s における燃焼家屋と正対した家屋の延焼限界距離 (風速 3 m/s と同値) を用いて算出した R_{it} を縦軸に、延焼危険性を示す木造・防火造建物密度を横軸に各町丁目、散水圏域ごとにプロットしたものを図 19 に示す。この目的は、木造・防火造建物密度は延焼危険性の高低と密接に関係する指標であるが、ヘリコプターによる散水効果が得られるのは延焼危険性の高いところへの散水であるのか、逆に緩慢な延焼拡大が想定される地域への散水であるのかを知るためである。高い効果が得られる市街地、特に $R_{it}>0.9$ となる市街地の大部分が、散水圏域 1 分の町丁目に属し、この地域では、木造・防火造建物密度が高くなると散水効果がより高まっていることが分かる。一方で散水圏域 2 分の地域においては、 $R_{it}>0.9$ となる市街地の数が大きく減少するとともに、木造・防火造建物密度が高い地域においては、高い散水効果が得られる地域はほとんど存在していないことが読み取れる。散水圏域 2 分で木造・防火造建物密度が高い地域

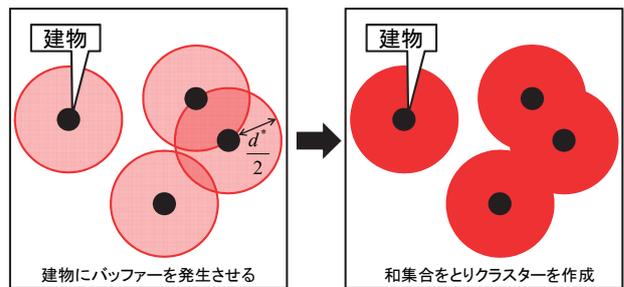


図 17 延焼クラスター



図 18 散水圏域図

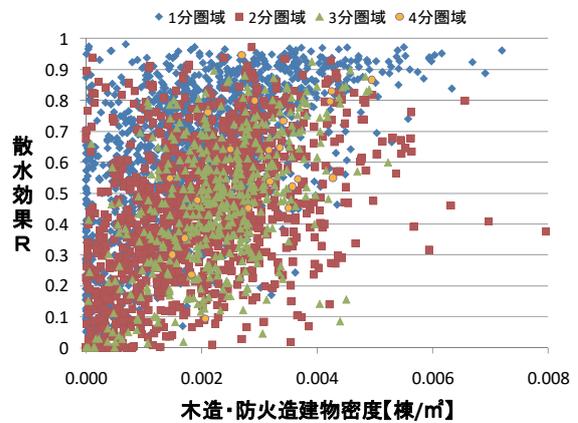


図 19 散水効果と延焼危険性の比較

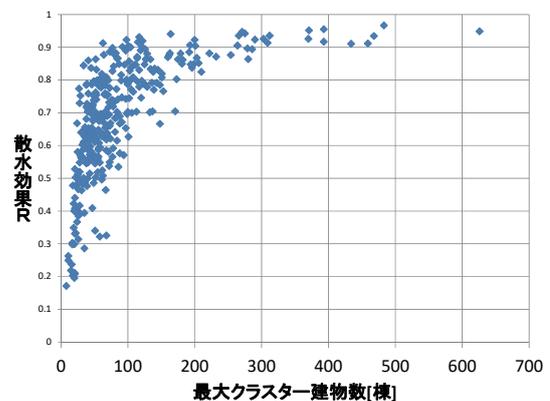


図 20 散水効果と最大延焼クラスター建物数の関係

ないため、十分な確認はできないものの、以上のことから、1分間隔で散水可能な場合のみ木造密集地域への散水を行い、これ以外の場合には木造密集地域を避けて散水を行うことがより効果的であることが示唆された。

一方で、同じ木造・防火造密度の町丁目において、同じ間隔で散水を行っても効果に差があることが読み取れる。そこで、木造・防火造建物密度の値が0.002から0.003の値をとる町丁目を抽出し、散水を行わなかった時の延焼限界距離によって作られる延焼クラスターの中で最大の規模のもの建物数を横軸に、1分圏域町丁目の散水効果を縦軸にプロットしたものを図20に示す。最大延焼クラスター建物数の値が100以下になると散水効果が大きく下がっており、他の木造・防火造建物密度の値でも同様の傾向が得られた。これは、最大延焼クラスター建物数の値が大きいほど散水によって延焼クラスターを切断できる機会が多く、かつ切断によって得られる効果が高いためであると考えられる。よって、木造・防火造建物が大きく連担している市街地において散水を行うことが効果的であることが示唆された。

また、散水効果の高い町丁目の地理的分布は図21に示す通りとなる。東京都の火災危険度⁹⁾(図22参照)と比較すると、荒川・隅田川周辺は火災危険度が高く、かつ高い散水効果が期待できる町丁目が密集していることが明らかになった。

6. まとめと今後の課題

本研究では、震災時の同時多発的な火災に対し、地上消防力が充実するまでの間、ヘリコプターによる空中散水活動が必要となることを背景とし、既往実験において検討されていない隣棟間隔距離や散水間隔と散水効果との関係を定量的に明らかにした。また、建物間における散水効果を用いて実市街地においてより高い散水効果を得られる市街地の抽出を行い、市街地指標との比較を行った。

(1) 本研究のまとめ

空中散水により建物間において延焼速度は低減せず、延焼限界距離が低減することが明らかになった。また、延焼限界距離を用いた実市街地における散水効果が相対的に高い場所を抽出するための手法の提案を行った。これにより、木造密集地域では散水間隔1分以内で散水活動を行う必要性があり、木造・防火造建物が大きく連担している市街地において散水を行うことが効果的であることが示唆された。さらに、地理的には荒川・隅田川周辺は空中散水活動の必要性が高く、かつ散水効果の高い場所が密集していることが示唆された。

(2) 今後の課題

より詳細な散水効果を把握するため、散水された水の挙動や、壁面等への実際の散水状況、散水による温度等のパラメーター変化を基礎実験を通じてデータ収集する必要がある。また、実際に震災時に空中散水を行うには航空燃料や臨時離着陸場等の事前準備が必要であることから、散水対象候補地を考慮した情報収集体制、人員・物資の供給体制と整えておく必要がある。

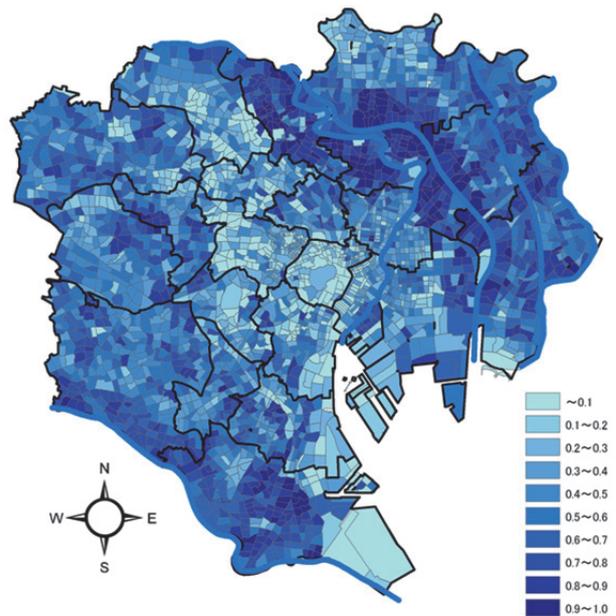


図21 風速0[m/s]における散水効果

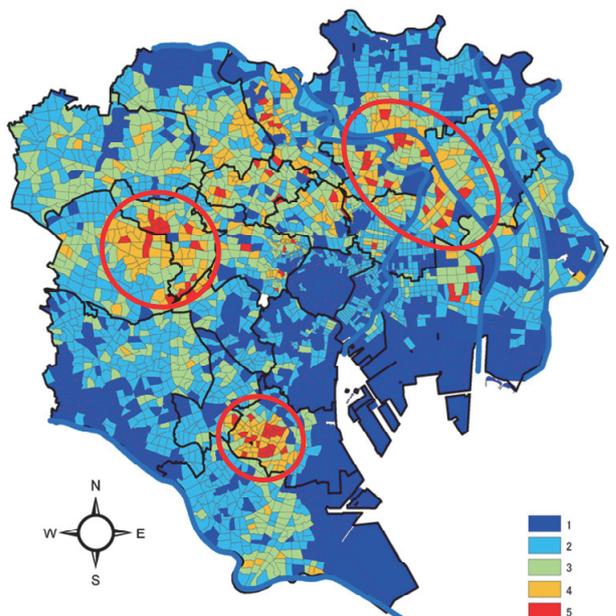


図22 東京都の火災危険度⁹⁾

補注

[1] 式[9]の右側の式は、中央の式において、対流熱伝達率 h の値を $0.05 \text{ [kW/m}^2\text{K]}$ (式[9]では h の逆数を取り20となっている)、温度拡散率 a の値を $0.0926 \text{ [m}^2\text{/s]}$ としたものである。この根拠を示す。左から2番目の式を $t \rightarrow \infty$ とすると次式を得る。

$$T_s(t) = \frac{I}{h} + T_0 \quad [9]$$

この式から、

$$h = \frac{I}{T_s(t) - T_0} \quad [9]'$$

を得るが、木材の着火限界入射熱 15 kW/m^2 、木材着火温度 $T_s(t) = 593 \text{ [K]}$ 、初期表面温度 $T_0 = 293 \text{ K}$ を代入して、対流熱伝達率 h の値 $0.05 \text{ kW/m}^2\text{K}$ を得る。また、温度拡散率 a については、次式で与えられる⁸⁾。

$$a = \frac{h^2}{k\rho c}$$

ここで、 $k\rho c$: 熱慣性 $[\text{kW}^2\text{/m}^4\text{K}^2]$ [9]''

含水率 0%の杉の熱慣性は $0.027\text{kW}^2\text{s}/\text{m}^4\text{K}^2$ である⁸⁾ので、この値と上述の対流熱伝達率 h の値から、 $a=0.0926$ を得る。

- [2] 表 4 のうち、消火タンク容量は、緊急消防援助隊アクションプラン²⁾で定められている、東京都に投入される消火ヘリコプターと投下器具の容量に基づきまとめたものである。いずれのヘリコプターの消火タンク容量も 1300 ℓ 前後であった。また、参考文献 4,5 で実施された合計 147 回の散水実験のうち、散布密度の値が記載されているもの 80 回から、消火タンク 1200 ℓ の散水継続時間が 5.6 秒となっているため、本研究でもこの値を採用した。投下高度 H はこの実験時の高度に準じている。水の落下時の拡散角 θ は、散水器具、水滴の大きさ、風速などに依存して変わるものであり、参考文献 4,5 では 5~11 度であることが示されているが、報告書の計測値と式[10]を適用した場合に最も予測精度の高くなる値 9 度を採用した。
- [3] 参考文献 4,5 で散水実験に使用した模擬家屋は $7.2\text{m} \times 7.2\text{m}$ でほぼ 50 m^2 であるが、対象の火災建物の周囲には地震によって倒壊した状況を再現するため、東西方向には隣棟間の中央位置まで、南北方向には隣棟に接して木材等の可燃物が置かれている。隣棟間隔は 2.5m であるので、短径を $7.2+2.5\text{m}$ 、長径を $2.5+7.2+2.5\text{m}$ の楕円と見なすと、その面積は約 93 m^2 となり、本研究で計算実験に使用している 100 m^2 の建物と概ね一致する。このためため、 0.15 ton の散水はほぼ平均散水密度 $D=1.5 \text{ ℓ}/\text{m}^2$ と算定でき、散水実験から得られた各種数値を計算実験の 100 m^2 の建物に利用することが可能である。
- [4] 本研究では、平均散水密度と火災建物の温度降下の関係について十分なデータが得られなかったため、一般市街地への適用に当たっては、全ての建物について、 $10\text{m} \times 10\text{m}$ の建物のものと同様の延焼限界距離であるとして計算を行っている。ただ、ケーススタディ対象地域である東京都下の裸木造率はきわめて低く、また裸木造建物を除けば、受害側建物に對面する（あるいは直近の）火災建物の開口部の大きさに概ね依存していることから、大開口部があるような建築物を除いて建築規模が大きくなっても、大幅に延焼限界距離が増加することはないと考える。
- [5] 参考文献 3 では、「給水場所から散水場所までの距離と空中消火ヘリ編成の目安表」が示されており、本研究はこれに従い散水間隔圏域図を作成した。給水時間 1 分、散水時間 1 分、飛行速度 $120 \text{ km}/\text{時}$ の場合のヘリコプター機数と散水間隔、距離の関係は下表のようになっている。

散水間隔 3 分		散水間隔 2 分		散水間隔 1 分	
距離	機数	距離	機数	距離	機数
1 km	1 機	1 km	2 機	1 km	3 機
4 km	2 機	4 km	3 機	4 km	6 機
7 km	3 機	7 km	5 機	7 km	9 機
10 km	4 機	10 km	6 機	10 km	12 機
13 km	5 機	13 km	8 機	13 km	15 機

- [6] 地震時市街地火災に対する消火活動は、ヘリコプターのみで消火活動を行うわけではなく、むしろ、公設消防組織による地上での消火活動と自主防災組織、住民等による消火活動が主体となる。ヘリコプターによる消火活動は、建物倒壊等による道路閉塞により上記の消防組織等がアクセスできず消火活動対応できないなどの限られた地区に対して、その効果を発揮することが期待される。この散水効果 R_{dt} は、延焼限界距離の減少という市街地全体への効果が把握しにくい個々の建物に関するミクロな指標に代えて、ヘリコプターからの散水による延焼限界距離の減少が、現実の市街地の火災被害に対してどの程度の効果をもたらすのかを計る一つの「名目上の指標」として提案するものであり、ヘリコプターの散水に

よって市街地全体に対して、この散水効果 R_{dt} を実現しようとすることを意味するものではない。

参考文献

- 1) 阪神・淡路大震災調査報告編集委員会：阪神・淡路大震災調査報告 火災、情報システム、日本建築学会ら、PP49, 1998.10
- 2) 総務省消防庁：東海地震、首都直下地震及び東南海・南海地震における緊急消防援助隊運用方針等の改訂について（通知）、2008.8.4
- 3) 総務省消防庁：消防防災ヘリコプターの効果的な活用に関する検討会報告書[本編]、2009.3
- 4) 日本火災学会：市街地火災空中消火実験報告書、1997.3
- 5) 自治省消防庁消防研究所：市街地火災時の空中消火による延焼阻止効果に関する研究報告書、1998.3~2000.3
- 6) 国土交通省国土技術政策総合研究所：総合技術開発プロジェクト「防災まちづくりにおける評価技術・対策技術の開発」、2003.6
- 7) 山崎均：日照環境のための基礎計算式、日本建築学会論文報告集第 288 号、PP139-147, 1980.2
- 8) 田中孝義：建築火災安全工学入門、日本建築センター、1993.7
- 9) 東京都：地震に関する地域危険度測定調査報告書（第 7 回）、東京都都市整備局、2013.9

(原稿受付 2016.9.10)

(登載決定 2017.1.21)