

令和 2 年 9 月 17 日現在

機関番号：82113

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2019

課題番号：18K13884

研究課題名（和文）散水設備から火炎を通過して可燃物表面に到達する散水量の工学的評価モデルの開発

研究課題名（英文）Development of the evaluation model of water delivered density onto combustible material surface through flame from water application

研究代表者

野秋 政希（Noaki, Masaki）

国立研究開発法人建築研究所・防火研究グループ・主任研究員

研究者番号：90535478

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,800,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では熱気流中における水滴の飛散および蒸発の挙動を、水滴の熱の釣り合いと力の釣り合いを考慮した推定モデルを構築すると共に、当該モデルの妥当性検証を目的とした実験を実施した。加熱強度をパラメータとした水の加熱実験の結果、水の単位時間単位面積当たりの蒸発量が水に加えられる正味の熱流束を水の単位重量当たりの潜熱で除すことで算出可能であることを確認した。また、火炎が有る場合と無い場合の散水密度分布確認実験の結果と本モデルの計算値の比較より、水滴径の小さい条件ほど火炎が有る場合の散水量と火炎が無い場合の散水量の比が小さくなるという傾向を本モデルで再現可能であることを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

スプリンクラー等の散水設備は有効な火災拡大抑制手法として広く認知されているが、散水設備による火災拡大抑制効果の工学的評価手法が確立されていないことを一因として、性能的火災安全設計において散水設備による火災抑制効果が反映された事例は少ない。散水による火災拡大抑制効果の評価手法が確立されれば、建物の火災安全性を保つために必要な防火対策の選択肢が増え、建築設計の自由度の向上が期待できる。本研究は、散水設備から散水設備による火災拡大抑制効果の工学的評価手法の一部としての活用が見込まれる点で社会的意義がある。

研究成果の概要（英文）：An estimation model of motion of water droplet discharged from a water application in fire plume was developed; is based on momentum and heat balance including evaporation. And a series of experiment aimed at verification of validity of the model was carried out. From the results of the heating experiment of water whose parameter of external heat flux, it is confirmed that water evaporation rate can be estimated as net heat flux onto water surface divided by latent heat of water evaporation. And from comparison of calculation by using the present model and the data of experiment measuring water delivered density distribution with or without flame, the present model can reproduce the tendency that smaller water droplet causes lower ratio of water amount with and without fire.

研究分野：火災安全工学

キーワード：散水密度 火炎・熱気流 散水設備 飛散 蒸発 水滴 燃焼抑制

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

スプリンクラー等の散水設備は有効な火災拡大抑制手法として広く認知されているが、性能的火災安全設計において散水設備による火災抑制効果が反映された事例は少ない。その一因として、散水設備による火災拡大抑制効果の工学的評価手法が確立されていないことが挙げられる。この評価手法が確立されれば、建物の火災安全性を保つために必要な防火対策の選択肢が増え、設計の自由度の向上が期待できる。

散水設備による火災抑制効果にはいくつかの種類があることが知られているが、本研究では、火災の拡大に大きな影響を及ぼす可燃物の発熱速度（燃焼によって単位時間あたりに発生する熱量）の低減に着目している。既に筆者らの先行研究により、燃焼物への直接散水による発熱速度低減効果は可燃物に供給される散水密度（単位面積当たりの散水量）に大きく影響されることが確認されており、散水密度に応じた発熱速度の低減量のモデル化がなされている¹⁾²⁾。一方、多くの散水設備では水平面に供給される散水密度分布のデータが得られているが、火災時においては、①火炎等からの熱による水滴群の蒸発や②火炎等の上昇気流による水滴群の飛散により（図1）、可燃物表面に到達する散水密度が低減する可能性が指摘されており、この低減効果の工学的評価手法は未だに確立されていない。

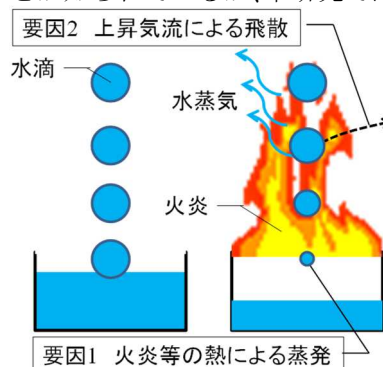


図1 火炎中を通過する水滴の概念

2. 研究の目的

本研究では熱気流中における水滴の飛散および蒸発の挙動をモデル化すると共に当該モデルの妥当性検証を目的とした実験を実施した。

3. 研究方法

(1) 火炎中の水滴群の蒸発・飛散モデル

本研究では、散水設備から任意の角度で放出された水滴の力学的釣り合いおよび熱的釣り合いから、水滴の蒸発および飛散性状をモデル化した。

(2) モデルの検証

a) 水滴の熱的釣り合いモデルの検証

細孔から水滴を自由落下させ、700mm 下方に設けた容器に溜まった水量を火源の燃焼の有無別に計測し、両者の差から、水滴が火炎を通過する間に蒸発する水量の計測を試みた。しかし、今回実施した実験条件（火源の発熱速度：4.4kW 程度、水滴の直径：1.94mm、2.96mm）では、水の滴下時の蒸発量と水を滴下させない条件で燃焼パンに予め溜めておいた水の蒸発量に大きな差異が無く、明確な火炎通過中の水滴の蒸発が確認できなかった。モデル検証には水滴径をさらに小さくする必要があるが本研究の範囲では適当な装置を構築できなかったことから、水面に供給される加熱の強さと蒸発速度の関係の把握を目的とし、水平に設置したステンレス製の容器（100mm 角）内に溜めた水を電熱ヒーターで放射加熱し、水の蒸発速度を計測した。当該実験では加熱を受ける水の表面積や伝熱機構は火炎中を通過する水滴の場合と異なるが、加熱の強さを広範囲に精度良く制御可能であるという利点がある。

b) 火炎中の水滴群の蒸発・飛散モデルの検証

(1) で概説したモデルの妥当性を確認するため、図2のように配置した取水マスのうち、散水ヘッド直下のマスに燃料（n-ヘプタン）を入れ、燃焼させることで火炎が存在する状況における散水密度分布を実測した。なお、実験で使用する燃料は、燃料の表面で水が蒸発しないよう、水よりも沸点が低く、比重の小さなものとする必要がある。また、燃焼性状の変化が水滴の蒸発性状に影響しないよう、水の滴下中に燃料の発熱速度が変化しないことが望ましいが、筆者らによる先行研究の結果¹⁾より n-ヘプタンがこれらに適合することを確認済みである。

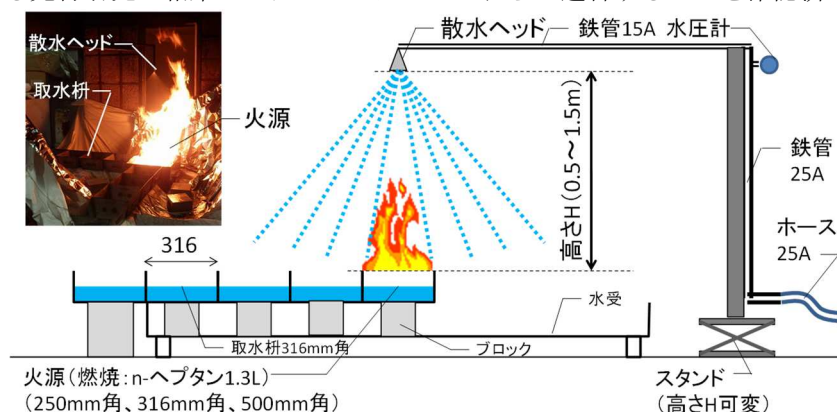


図2 実験概要図

使用した散水ヘッドは、噴霧角および水滴径が既知であるいけうち社の JJXP010(噴霧角 60°、散水量 1L/min@0.2MPa、平均公称粒子径 0.29mm)、JJXP060(噴霧角 60°、散水量 6L/min@0.2MPa、平均公称粒子径 0.45mm)、JJXP10(噴霧角 60°、散水量 10L/min@0.2MPa、平均公称粒子径 0.57mm)の3種類とした。実験パラメータはヘッドの種類のほか、火源と散水ヘッドの高さ(0.5、1.0、1.5m)、火源の大きさ(0.25m 角、0.316m 角、0.50m 角)とした。燃料の量は床面積当たりの総発熱量が住宅の積載可燃物密度:400MJ/m²と同程度となるよう n-ヘプタンの量をパンの大きさごとに調整した。散水は火源の燃焼開始直後に開始し、燃焼終了(鎮火)時に停止した。

4. 研究成果

(1) 火炎中の水滴群の蒸発・飛散モデル

a) 水滴の力学的釣り合い

水滴には重力と周辺気体の抵抗力 F がかかることを考慮し、以下の運動方程式を解く。なお、鉛直方向を z 軸、水滴の飛散孔からの水平方向を r 軸とする。

$$m_w \alpha_r = -F_r \quad (\text{水平方向}) \quad (1)$$

$$m_w \alpha_z = m_w g - F_z \quad (\text{鉛直方向}) \quad (2)$$

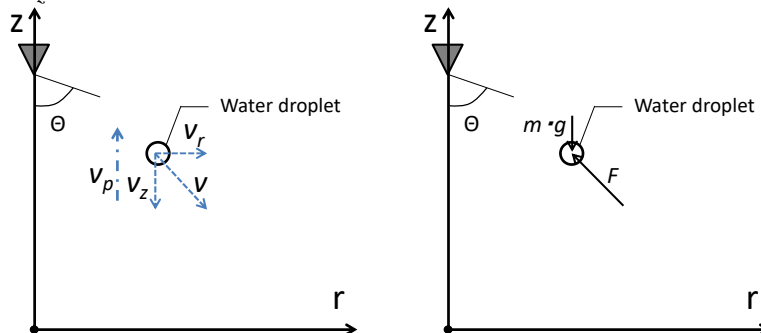


図3 水滴・気体の流速(左)と水滴の力学的釣り合い(右)

また、水滴を球体と仮定し、水滴に加わる周辺気体の抵抗力 F を次式で求めた。このとき、水滴の半径 R_w は後述の計算より水滴の蒸発量に応じて変化するものと考慮している。

$$F = \frac{1}{2} \pi R_w^2 C_D \rho_g v_{rel}^2 \quad (3)$$

このうち、抗力係数 C_D は既往研究により球に関する種々の式が提案されているが、本研究では Re の範囲毎に算定式を切り替える必要のない式として、 $0.1 < Re < 10^5$ の範囲で当てはまりの良い次式を構築し、これを用いた(図4参照)。

$$C_D = \frac{24}{Re^{4/5}} + 0.4 \quad (4)$$

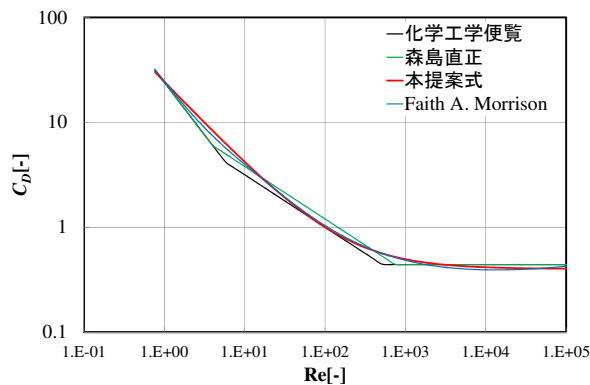


図4 球の抗力係数の比較³⁾⁴⁾

鉛直方向の熱気流の流速は McCaffrey により提案された次式を用いた。ただし、水平方向の流速は考慮していない。

$$v_{p,z} = v_{p0,z} \exp\left(-\frac{r^2}{(0.13z)^2}\right) \quad (5)$$

$$v_{p0,z} = \begin{cases} 6.84Q^{1/5} \left(z/Q^{2/5}\right)^{1/2} & \frac{z}{Q^{2/5}} < 0.08 \\ 1.93Q^{1/5} & 0.08 \leq \frac{z}{Q^{2/5}} < 0.2 \\ 1.13Q^{1/5} \left(z/Q^{2/5}\right)^{-1/3} & 0.2 \leq \frac{z}{Q^{2/5}} \end{cases} \quad (6)$$

b) 水滴の熱的釣り合い

水滴は周辺気体からの放射および対流による入熱により昇温・蒸発が生じているが、下式の通り水滴の温度 T_w が 100°C を境に熱収支式を分けることにより、水滴の温度上昇および蒸発に伴う粒子径を工学的に容易に取り扱った。

$$4\pi R_w^2 \left\{ h(T_f - T_w) + q_{rad} \right\} = \begin{cases} c_w m_w \frac{dT_w}{dt} & [T_w < 373\text{K}] \\ -L_w \frac{dm_w}{dt} & [T_w \geq 373\text{K}] \end{cases} \quad (7)$$

ここで、対流熱伝達率 h は強制対流における球の値とし次式で求めた。なお、レイノルズ数 Re の算定における流速は気流と水滴の相対速度とした。

$$h = Nu \frac{\lambda}{2R_w} = \left(2 + 0.6 Re^{1/2} \cdot Pr^{1/3} \right) \frac{\lambda}{2R_w} \quad (8)$$

一方、放射熱伝達 q_{rad} は水滴が連続火炎の領域に存する場合のみ生じるものとし、次式で計算した。 k は実効吸収係数、 l は平均光路長でありここでは火源径とした。

$$q_{rad} = \epsilon_f \sigma T_f^4 = (1 - \exp(-kl)) \sigma T_f^4 \quad (9)$$

(2) モデルの検証

a) 水滴の熱的釣り合いモデルの検証

水平に設置したステンレス製の容器 (100mm 角) 内に溜めた水を電熱ヒーターで放射加熱し、水の蒸発速度を計測した結果と加熱強度 (4~60kW/m²) の関係を図 5 に示す。なお、図中の×プロットは加熱強度から水面での放射および対流による失熱を減じた熱流束を水の単位重量当たりの潜熱で除した蒸発速度の推定値であり、いずれの加熱強度においても蒸発速度の推定値と実験値がほぼ一致しており、式 (7) 下式の妥当性を確認した。

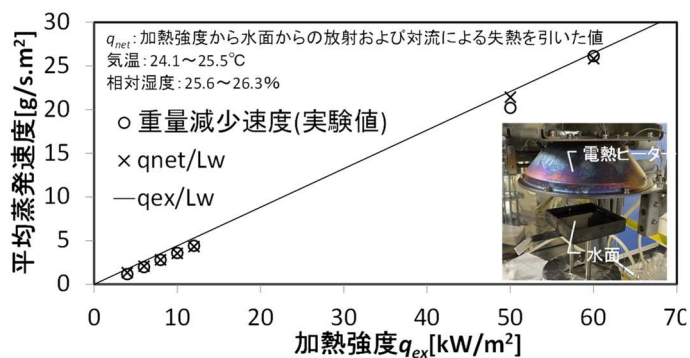


図 5 加熱強度と平均蒸発速度

b) 火炎中の水滴群の蒸発・飛散モデルの検証

図 2 の実験の散水密度の実測値を実験条件ごとに整理した結果を表 1 に示す。なお、平均発熱速度は燃料の完全燃焼時の総発熱量を燃焼継続時間で除した値である。燃料を入れた枡における火炎無し時の散水密度に対する散水有りの散水密度の割合 (到達率と呼ぶ) を実験値から求めた結果が図 6 の黒線である。図より、JJXP010 は他のヘッドに比べ到達率が低い。また、火源径が大きく、散水高さが高いほど到達率が低くなる傾向にある。一方、図 6 の緑線が (1) のモデルを用い、火源直下 (水滴の放出角度 0°) における火炎の有無ごとの散水密度の比である。同図より緑線は水滴径の小さな JJXP010 が他のヘッドに比べて到達率が低い傾向を概ね再現している。他方、散水密度分布の実験値と計算値の比較 (図 7) を鑑みると、実験値の場合、火源直下以外の散水密度が火炎有りの方が火炎無しに比べて低い値を示しているが、計算値では逆の傾向にある。このズレの原因は現時点で不明であるが、本モデルでは水滴の径を全て同一と見なしたのに対し、実際には極小径の水滴は気流で煽られ、燃焼生成ガスと共に排煙系統に捕集された影響を考慮できていないことや火炎への空気の巻き込み (水平方向の気流) の影響を考慮できていないことなどが考えられる。

<記号> m_w : 水滴の重量 [g]、 α : 水滴の加速度 [m/s²]、 F : 水滴に加わる周辺気体の抵抗力 [N]、 g : 重力加速度 (=9.8) [m/s²]、 v_p : 熱気流の鉛直方向の流速 [m/s]、 v_{p0} : 熱気流の中心軸上の流速 [m/s]、 r : 熱気流の中心軸からの水平距離 [m]、 z : 火源の燃焼面からの高さ [m]、 Q : 火源の発熱速度 [kW]、 R_w : 水滴の半径 [m]、 ρ_g : 水滴近傍の気体の密度 [kg/m³]、 h : 対流熱伝達率 [kW/m².K]、 T_f は水滴近傍の気体の温度 [K]、 T_w : 水滴表面の温度 [K]、 q_{rad} : 火炎から水滴への放射熱流束 [kW/m²]、 c_w : 水の比熱 [kJ/kg.K]、 L_w : 水の蒸発潜熱 [kJ/kg]、 λ : 気体の熱伝導率 [kW/m.K]、 ϵ_f : 火炎の放射率 [-]、 σ : ステファン・ボルツマン定数 (=5.67×10⁻¹¹) [kW/m².K⁴]、 k : 火炎の実効吸収係数 [1/m]、 l : 火炎の光路長 [m]、添え字 r 、 z はそれぞれ、散水ヘッドの中心から水平方向、地盤面から鉛直方向を表している。

<参考文献>

- 1) 野秋政希、山口純一、大宮喜文、可燃物表面への注水による発熱速度の低減効果—水膜が無い場合における注水時の発熱速度簡易推定モデルの構築とコーンカロリメータ試験結果との比較—、日本建築学会環境系論文集 Vol.79 No.696、p123-131、2014.

- 2) Masaki Noaki, Michael A. Delichatsios, Jun-ichi Yamaguchi, Yoshifumi Ohmiya, Heat release rate of wooden cribs with water application for fire suppression, Fire Safety Journal Vol. 95, p170-179, 2018.
- 3) 森島直正：大阪市立大学 学位論文、p.64, 1967.
- 4) Faith A. Morrison: Data Correlation for Drag Coefficient for Sphere, <https://pages.mtu.edu/~fmorriso/DataCorrelationForSphereDrag2016.pdf>, 2016.

表1 実験結果一覧

ヘッド(JJXP)	010	010	010	010	060	060	060	060	060	060	060	060	060	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
散水高さ[m]	1	1.5	1	1.5	0.5	0.5	1	1.5	1.5	1.5	1	1	1	1.5	1	1	1.5	1	1.5	1.5	0.5	0.5	0.5	
火源径[mm]	316	316	500	500	316	250	250	250	316	316	316	316	500	500	500	250	250	316	316	500	500	250	250	
ヘプタンの量[L]	1.3	1.3	3.3	3.3	1.3	0.8	0.8	0.8	1.3	1.3	1.3	1.3	3.3	3.3	3.3	0.8	0.8	1.3	1.3	3.3	3.3	3.3	0.8	
燃焼継続時間[s]	479	473	345	337	318	297	406	525	463	444	436	409	355	404	355	278	496	373	426	348	222	159	159	
平均発熱速度[kW]	83	84	292	299	125	82	60	46	86	89	91	97	284	249	284	88	49	106	93	289	453	153	153	
x[m]	散水密度(火炎有り)[g/s.m ²]																							
1.106	0	0	0	0	0	0	0	1	0.2	0.7	0	0.2	0	NA	0	0	2.4	0.1	1.9	1.7	0	0	0	0
0.79	0	0	0	0	0	0	1.2	12	6.1	11	0.8	1	0.3	NA	1.1	4.3	25	6.3	24	28	0	0	0	0
0.474	0.5	1.6	0	0.9	2.5	2.4	39	34	22	30	34	34	24	NA	43	62	46	67	42	35	0	3.8	0	3.8
0.158	9	6.4	7	4.2	136	138	62	35	15	32	37	58	50	NA	74	83	51	62	37	34	132	193	193	193
0	7.4	3	5.3	2.5	135	78	28	26	14	22	30	42	31	37	57	75	24	63	29	26	212	134	134	134
0.158	15	9.2	2.9	2.1	97	100	47	29	22	26	35	41	31	NA	54	68	44	59	39	27	110	171	171	171
0.474	0.5	2.8	0	0.3	1.3	1.3	25	21	31	20	26	27	18	NA	34	45	36	49	32	27	0.5	4.4	4.4	4.4
0.79	0.1	0.1	0	0	0	0	0.7	5.7	9.9	7.2	1	1.2	0.3	NA	0.8	2.5	16	2.6	17	14	0	0	0	0
1.106	0	0	0	0	0	0	0	0.4	0.4	0.2	0	0	0	NA	0	0	0.8	0	1.6	0.6	0	0	0	0
x[m]	散水密度(火炎無し)[g/s.m ²]																							
1.106	0.3	0	0	0	0	0	0	0	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	NA	0	0	1.3	0.3	0.3	0.7	0	0	0	0
0.79	0.3	0	0	0	0	0	0.7	9.3	3.1	6.7	0	0.7	0	NA	0.3	2.3	21	0.6	11	12	0	0	0	0
0.474	0.8	1.9	0	0.7	1.3	1.3	34	42	26	36	15	30	13	NA	32	57	52	30	39	47	0.3	4.7	4.7	4.7
0.158	15	22	8	11	138	142	76	51	37	47	64	80	76	NA	104	111	67	75	54	65	123	237	237	237
0	39	30	34	23	203	104	44	48	41	50	57	78	73	38	110	73	45	103	70	72	312	169	169	169
0.158	21	10	6.3	7.3	104	106	57	35	47	40	63	56	51	NA	82	86	51	92	58	49	81	177	177	177
0.474	0.8	0.8	0	0.3	1.3	1.3	23	20	35	24	24	22	10	NA	28	42	34	41	50	34	0	2	2	2
0.79	0.8	0.3	0	0	0	0	0	0.7	3.3	4.7	4.7	0.8	0.7	0	NA	0.3	1.3	8.7	1.7	11	6	0	0	0
1.106	0.3	0	0	0	0	0	0	0	0.3	0	0	0	0	NA	0	0	0.3	0	0.3	0	0	0	0	0

x: 燃料パンの端部から各マスまでの中心までの水平距離, NA: 柵を設置しなかったためデータなし

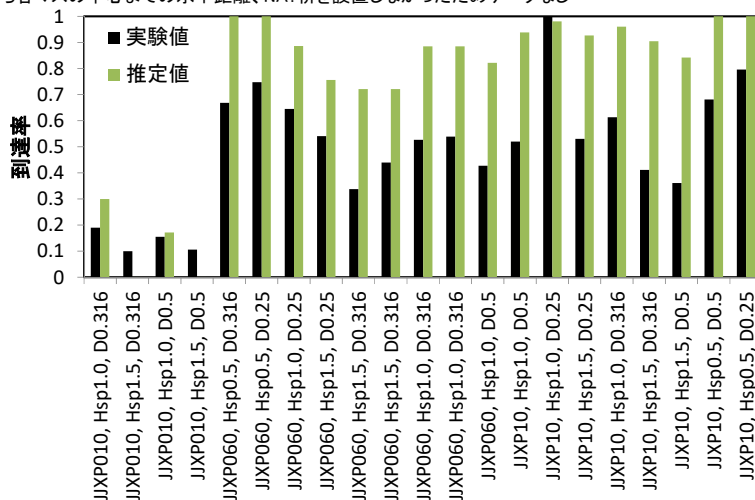


図6 到達率の実験値と計算値の比較

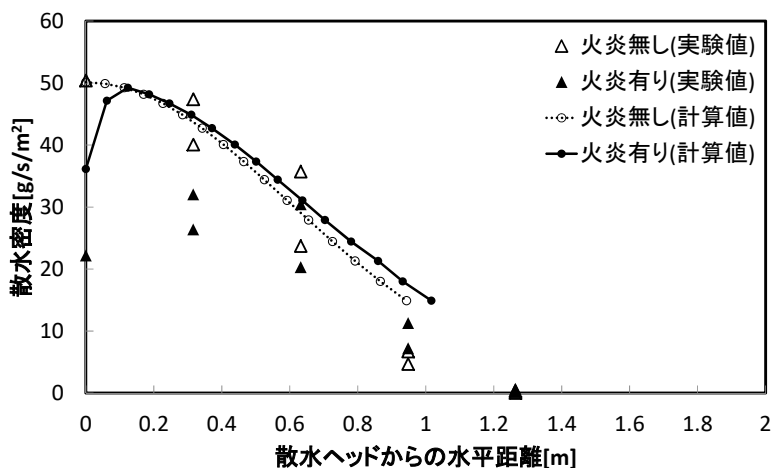


図7 散水密度分布の計算値と実験値の比較の例

(JJXP060 散水高さ 1.5m 火源径 0.316m)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----