

散水設備作動時における煙層の挙動

- PIV による煙層の流速測定と理論的考察 -

A Study on Smoke Behavior affected on Droplets of Sprinkler

- Velocities of the Droplets and Smoke Layer by PIV System -

指導教員 博士（工学） 松山 賢

松山研究室 K110612 土屋将人

修士論文審査要旨

主査 博士（工学） 松山 賢
副査 工学博士 関沢 愛
副査 博士（工学） 水野雅之

論文提出者 火災科学専攻 土屋将人
論文題目 散水設備作動時における煙層の挙動
-PIVによる煙層の流速測定と理論的考察-

スプリンクラー設備は消火設備として最も普及している設備の一つであり、その消火性能の高さは周知の通りである。一方現在の避難安全設計は、煙層と新鮮な空気の下部層の二層に成層化することを前提として、火災により発生した煙が避難上支障ある高さに降下するまでに要する時間と、避難時間とを比較して、安全性を評価する手法を用いている。しかしながら散水設備が作動すると、加圧噴射された水滴群によって、煙層を下部層へ連行する気流、下降気流が発生し、下部層は安全であるという避難安全設計の前提条件が成立しなくなる恐れがある。

そのような背景の中、既往の研究ではこの気流を下層貫入ブルームと定義し、特定のスプリンクラーヘッドを用いた実験を行い、煙層と下部層が二層化していることを前提として、ガス分析法を用いた下層貫入量の予測を提案している。本研究では散水ノズルの基礎データ測定(平均粒径・粒速・散水量)と併せ、複数の散水ノズルと複数の火源を組み合わせる実験を行い、Particle Image Velocimetry (PIV)により下降気流の物理現象を微視的に捉えることで、その発生メカニズムや挙動を解明することを目的とした。

下降気流の測定実験では、PIV システムにより散水中の煙層の流速測定を試みている。しかしながら、水滴と煙の2流体が存在する環境の計測が行われた例はないことから、本研究では解析方法に独自の工夫を行い、煙層解析の精度向上を図った。実験により、発生する下降気流の流速は散水ノズルによって大きく異なる測定結果が得られ、また煙層温度が高くなると大きな浮力が作用し、下降気流は小さく、あるいは発生しなくなる傾向が見られた。そこで、水滴と雰囲気との間で発生する抵抗と、雰囲気との温度差によって生まれる浮力の計算を行い、抵抗と浮力との比、及び下降気流と水滴粒速との比を基に、煙層の挙動を考察を行った。

床付近のCO₂濃度上昇値を基に煙層の安定性の判定を行った結果、不安定領域では相関が見られないが、安定領域および遷移領域では両者が直線的な相関をとることから、下降気流に関する関係式が得られた。これにより、下降気流および下層貫入量の簡易的な予測を可能とした。

今後は、適用範囲をより多くの散水ノズルに広げるためのデータベース構築や、避難安全設計に生かすための二層ゾーンモデル等への適用が望まれる。

A Study on Smoke Behavior affected on Droplets of Sprinkler - Velocities of the Droplets and Smoke Layer by PIV System - Masato Tsuchiya (K110612)

Keywords: Sprinkler, Smoke layer, Sauter mean diameter, Droplet velocity, PIV

A sprinkler system is one of the most popular fire suppression systems in buildings, and well-known as a system which has high suppression performance. In addition, the sprinkler system has some other performance to a fire, such as an effect of cooling a compartment and materials, and reduction of the radiation from a fire. These are good effects. But, in addition, the water droplets disturb the stable smoke layer, and cause downward air flow from the smoke layer to the lower layer. This effect must negatively affect during initial stage of fire because of evacuation safety. This point was focused, and experimental studies about disturbing the smoke layer was carried out. Downward air flow is the flow that penetrates the boundary from smoke layer to lower layer since stable smoke layer disturbed by water droplets. In the past study, downward air flow was estimated by CO₂ concentration.

The purpose is to figure out the smoke behavior affected on water droplets of sprinkler. This study investigate mechanism of the smoke layer behavior by the physical phenomenon around the droplets, not by the CO₂ concentration. And this study investigate downward air flow rate by using Particle Image Verocimetry system. However, because of no precedent that 2 fluids are measured at the same time by PIV system, measurement procedure was studied at first. The velocities of air flow in the smoke layer and water droplets during water discharge were tried to obtain simultaneously. It must be an original methodology. The movement of smoke layer is analyzed by the movement of the tracer, though the velocity differs from water droplets. Therefore, by deleting radiants with greater brightness than certain level from the picture, improvements in the accuracy was accomplished.

The experiments were carried out by using a part of Full-Scale Compartment at Fire Research and Test Laboratory. Vertical temperature distributions were measured by thermocouples of type-K. The air flow rate was measured by PIV system. 4 kinds of nozzle (normal sprinkler head and 3 Ikeuchi), 2 types of fuel (methanol and normal-heptane) and 2 sizes of fuel pan were used. By this experiment, two components were obtained. The first, downward air flow rate is changing by character of the nozzles. And the second, the temperature difference inhibit the downward air flow rate. As the downward air flow rate depends on the nozzles such as distribution of droplet, droplet size and velocity. So, in addition to the experiment, the fundamental data of nozzles were measured. Sauter mean diameter was calculated from droplet diameter.

Then, from these fundamental data, the theoretical drag (D [N/m³]) to the air by droplet is calculated by Newton's law because the shape of droplets is a sphere. And buoyancy force (B [N/m³]) is calculated from temperature difference. Balance of D and B (D/B [-]) expresses stability of the smoke layer. Then, it was shown that values of D/B is related to the balance of downward air flow rate (v_s [m/s]) and droplet velocity (v_d [m/s]). As a result, in the stable region and the transition region, relationship of D/B and v_s / v_d is linear proportion, and a relational expression was provided.

散水設備作動時における煙層の挙動

- PIV による煙層の流速測定と理論的考察 -

A Study on Smoke Behavior affected on Droplets of Sprinkler

- Velocities of the Droplets and Smoke Layer by PIV System -

土屋 将人 (K110612)

Masato Tsuchiya (K110612)

1. はじめに

スプリンクラー設備（以下 SP）は、消火設備として最も普及している設備の一つであり、その消火性能に優れていることは周知の通りである。一方、現在の避難安全設計は、煙層と新鮮な空気の下層の二層に成層化することを前提として、火災により発生した煙が避難上支障ある高さに降下するまでに要する時間と避難時間とを比較して安全性を評価する手法を用いている^[1]。しかしながら SP が作動すると、加圧噴射された水滴群によって、図 1 に示すような煙層を下層層へ連行する気流（以下、下降気流）が発生し、下層層は安全であるという避難安全設計の前提条件が成立しなくなる恐れがある。既往の研究ではこの気流を下層貫入ブルームと定義し、ガス分析法を用いた推測が行われている^{[2][3]}。本研究では、下降気流の物理現象を Particle Image Velocimetry (PIV) により微視的に捉えることで、その発生メカニズムや挙動の解明を目的とする。

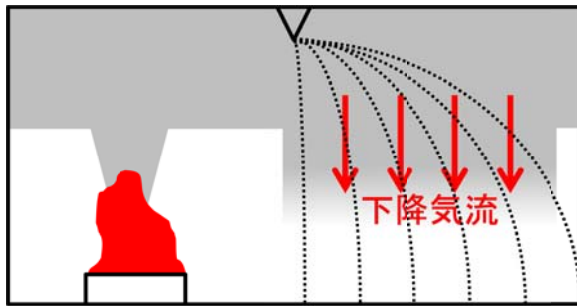


図 1 区画内での SP 作動状況

2. 散水ノズルの基礎データ測定

下降気流発生メカニズムを知るためには、まず煙層の挙動に影響を与える水滴の特徴を詳細に把握する必要がある。そこで下降気流測定実験で使用する各ノズルの水滴の粒径、粒速、散水分布の 3 つの項目の測定を行った。

2.1 測定概要

ノズルは表 1 に示すように、千住スプリンクラー製 SP ヘッド(K80)の他に、SP に近い粒径を持つ、いけうち製の広噴角形充円錐ノズル(BBXP シリーズ)より水量の異なる 3 つ(I20・I40・I80)を使用した。

粒径測定には、Microscope レンズを装着したカメラを使用する。取得した画像は粒子径解析ソフト VisiSizer Solo (Oxford Lasers 製)により解析され、粒径データが出力される。粒径はザウター平均を採用した。粒速の測定は PIV システムを用いて行った。散水分布は 0.1 m² (約 32cm 四方) の採水マスを散水位置直下から放射状に密着させて床面に並べ、測定を行った。図 2 に各項目の測定位置を示す。

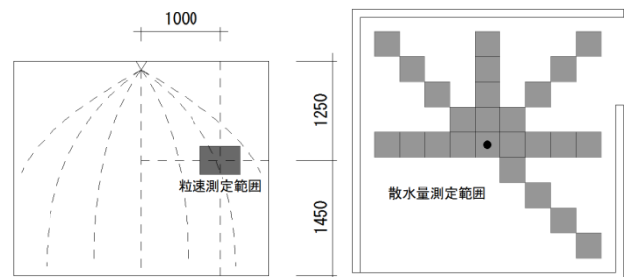
2.2 測定結果

表 1 に各ノズルの基礎データ測定結果を示す。平均粒径は、I20 がやや大きいものの、いずれのノズルも汎用 SP ノズルの K80 を中心に近い粒径となっ

ていることが分かる。粒速はいけうち製ノズルが K80 に比べて大幅に速い。散水量は放水量に依る結果となっているが、散水範囲の違いにより、同じ放水量の I80 の散水量は K80 と比べて多い。

表 1 ノズル基礎データ測定結果

ノズル	I20	I40	I80	K80
製造メーカー	いけうち			千住
仕様[MPa]	0.3	0.3	0.3	0.1
[L/min]	20	40	80	80
粒径[μm]	488	312	399	365
粒速[m/s]	3.63	3.12	4.24	1.85
散水量[mL/min・0.1 m ²]	159	252	436	293



(a) 粒径・粒速(断面図) (b) 散水分布(平面図)
図 2 ノズルの基礎データ測定位置 (単位:mm)

3. PIV による下降気流測定実験

3.1 実験方法および測定項目

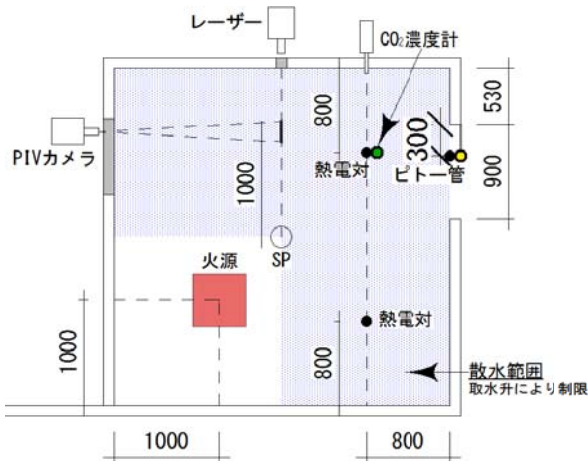
図 3 に実験概要を示す。本実験は火災実験用実大区画の一部 (幅 3200 × 奥 3200 × 高さ 2700mm) に行った。区画には開口部 (幅 900 × 高さ 1800mm) を 1 か所設けた。散水ノズルは区画天井部中央に 1 基設置し、取水升を使用して火源を散水範囲から外した。

区画内隅角部から 800mm の位置 2 か所にポールを立て、熱電対 (K 型 0.32mm) を高さ 200mm ピッチで 13 点、および開口部に 4 点設置し、垂直温度分布を測定した。また CO₂ 濃度計 (富士電機システムズ製・ZKJ-3) を 2 点、開口部にはピトー管を 4 点設置した。併せて、ロードセル (共和産業製・LUB-30KG) で火源の重量減少速度を測定した。

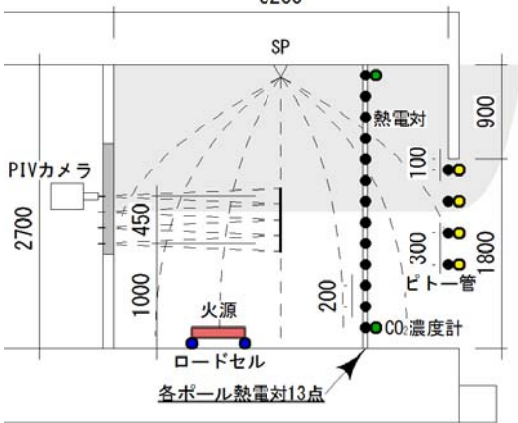
PIV システムによる下降気流の流速測定は、カメラとレーザー装置を区画の外に設置し、壁に設置したアクリルの窓を通して行った。測定範囲はノズルからの水平距離 1000mm の位置を中心とし、幅約 200mm × 高さ約 150mm の範囲とした。

3.2 実験条件

ノズルは表 1 に示した SP ヘッド(K80)と、いけうち製のノズルより水量の異なる 3 つ(I20・I40・I80)を使用した。火源には液体燃料を入れた方形パンを使用した。表 3 に示すように液体燃料の種類 (メタノールおよびヘプタン) と火源面積を変化させて実験を行った。



(a) 平面配置図
3200



(b) 立面配置図
図3 実験概要 (単位[mm])

3.3 実験結果

3.3.1 区画内温度

表3に各火源の定常状態の区画内条件測定結果を示す。いずれの火源においても180秒後までは区画内条件が定常状態を示しており、着火60秒後からPIV測定終了となる210秒後までの150秒間はほぼ一定の発熱速度を示した。煙層と下部層との境界高さはN%法(N=30%)により判定し、煙層の平均温度の算出を行った。

表3 火源と区画条件 (散水前) 測定結果

火源	燃料	火源面積 [m ²]	発熱速度 [kW]	境界高さ [mm]	煙層温度 [°C]	CO ₂ 濃度 [%]
メノール	0.1	67.0	1150	66.4	0.58	
	0.25	134.0	1100	110.1	1.13	
ヘプタン	0.1	111.5	1250	132.1	1.19	
	0.25	289.9	1150	204.4	2.67	

図4に散水時の区画内温度推移、図5に垂直温度分布の一例を示す。散水は煙層が安定する着火から180秒後に開始した。温度推移は散水直後から急激に煙層の温度が低下していく様子が見て取れる。垂直温度分布は、煙層の温度低下に加え、下部層の温度が上昇していることが分かる。

3.3.2 PIVによる下降気流測定

(1) 解析方法

本実験では雰囲気(煙層)と水滴の流速測定を同時に計測することを試みた。煙層の挙動は、シーディング装置 (PivPart+シーディングレク) により散布したトレーサーの動きにより解析される。両者の散乱

および流速が異なることから、誤解析低減のために、画像処理を行うことで精度向上を図った。具体的には図6に示すように、まずレーザーシート内に映り込んだ水滴部の除去(一定以上の輝度の光点を画像から消去)を行うことで雰囲気(煙層)のみの解析が可能となる。次に水滴のみを解析し、前者と重ね合わせることで両者の速度ベクトルが表示される。なおPIVシステムには表4に示す組合せを用いた。

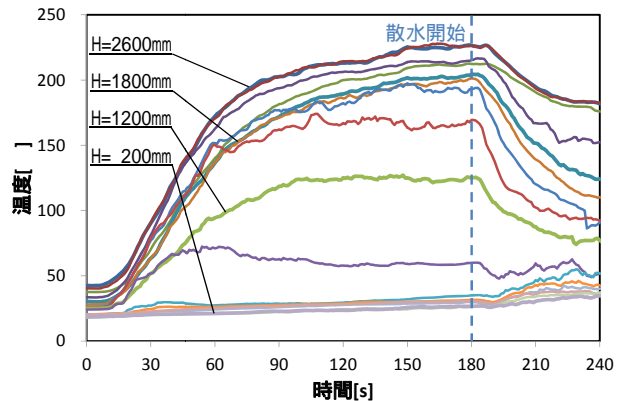


図4 温度推移 (火源 No. , ノズル: I80)

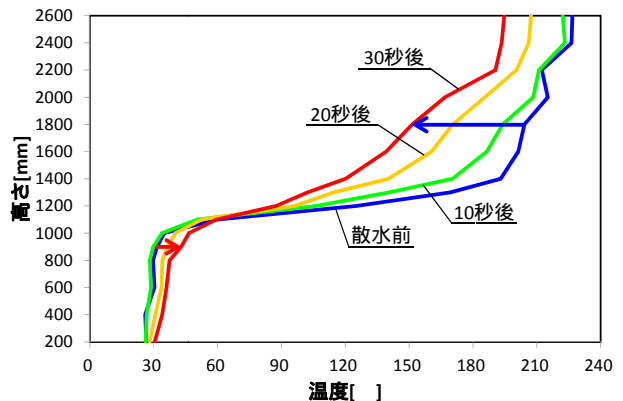
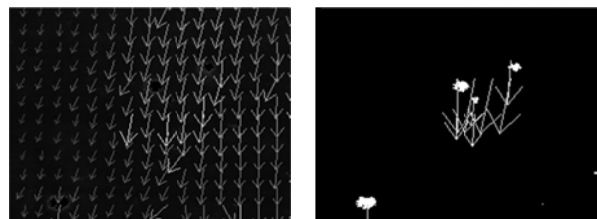
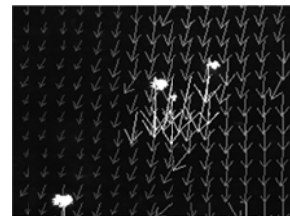


図5 垂直温度分布 (火源 No. , ノズル: I80)



(a) 雰囲気(煙層)のみ (b) 水滴のみ



(c) 雰囲気(煙層)+水滴

図6 画像解析手法を用いたPIVによる計測

表4 PIVシステムの構成

カメラ	pco1600 (1600 × 1200/14bit)
レーザー	Solo PIV 120XT (Nd:YAG/532nm/120mJ)
トレーサー	油滴 (DEHS/約 1 μm)
解析ソフト	Koncerto (西華産業製)

(2) 下降気流測定結果

図7に下降気流測定結果の時間推移の一例を示す。散水状態が安定している散水開始5秒後から、30秒後までの25秒間(測定回数100回)を平均値とした。

図8に平均下降気流の測定結果の一例をノズルごとに示す。火源によって異なる色で表示しており、右側の方が煙層温度が高い。グラフから、ノズルにより下降気流が大きく異なることが分かる。またいずれのノズルにおいても、煙層温度が高くなるにしたがって、下降気流が抑制されていることが見て取れる。特にI20は、ヘプタンを用いた火源では全く下降気流が発生しなかった。これは上下層の温度差が大きいため、強い浮力が原因だと考えられる。

図9に下降気流の高さ方向の変化例を示す。いずれのノズルにおいても、およそ一様に下降気流が発生していることが見て取れる。煙層境界はおよそ1100mmの高さにあるが、境界の上下による挙動の違いは見られない。

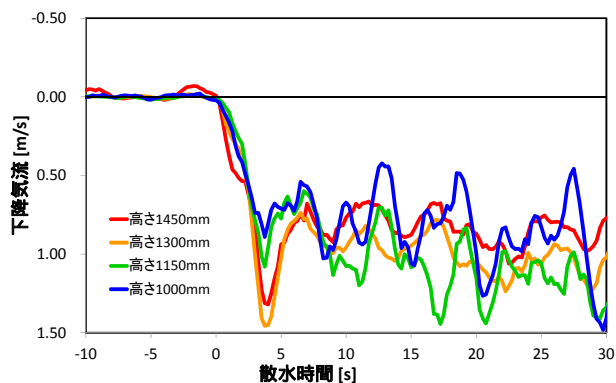


図7 下降気流の推移(火源No. , ノズル:I80)

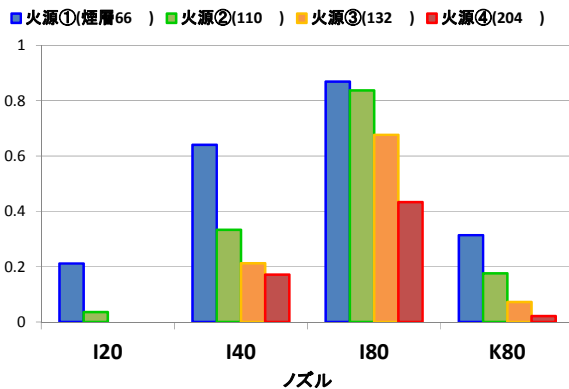


図8 散水ノズルごとの平均下降気流(高さ1450mm)

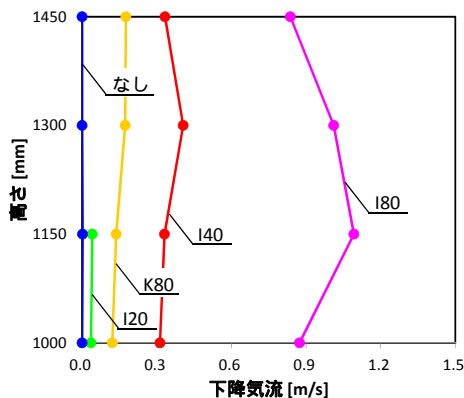


図9 下降気流の高さによる変化例(火源No.)

4. 下降気流の理論的考察

煙層温度が高くなることで、浮力は増加し、下降気流は小さく、あるいは発生しなくなる傾向がある。基本的な考え方は、既往の手法^{[4][5][6]}を踏襲し、図10に示すような水滴が雰囲気へ及ぼす抵抗 D と、雰囲気(上部層と下部層)の密度差(温度差)に生まれる浮力 B の比 D/B を基に考察することを試みる。

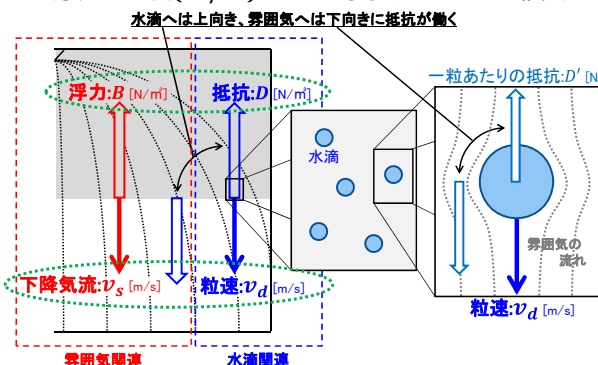


図10 抵抗 D と浮力 B の関係

水滴は球形であると仮定し、水滴一粒と雰囲気との抵抗 D' はニュートンの抵抗法則より、次式(1)にて表される。

$$D' = k_d v_d^2 \quad (1)$$

$$\text{ここに、} k_d = \frac{C_D \rho_s A_d}{2} \quad (2)$$

本研究で用いた散水ノズルの平均粒径・粒速においては、全て遷移領域となる為、抵抗係数 C_D 及びレイノルズ数 Re は下記の式(3)で表される。

$$C_D = 24(1 + 0.15 Re^{0.687}) / Re \quad (3)$$

$$\text{ここに、} Re = \frac{2rv_d \rho_s}{\mu} \quad (4)$$

単位体積あたりの雰囲気への抵抗 D は、 D' と単位体積あたりに存在する水滴の数 n との積となる。

$$D = D'n \quad (5)$$

$$\text{ここに、} n = \frac{W}{M_d v_d} \quad (6)$$

また浮力 B は、煙層と下部層の密度、または温度を用いて次式(7)により算出可能である。

$$B = (\rho_0 - \rho_s)g = \frac{T_s - T_0}{T_s} \rho_0 g \quad (7)$$

一方で煙層の挙動は、雰囲気と水滴の速度比にも依存すると考えられる。図11に $D/B[-]$ と $v_s/v_d[-]$ の関係を示す。なお、実測した水滴の粒径、煙層境界付近における粒速、散水量を用い、煙層温度は平均値とした。ここで、図12に D/B と散水30秒後の床付近の CO_2 濃度上昇値との関係を示す。床付近の CO_2 濃度の大幅な上昇は、煙層が床面に達していることを意味する。 CO_2 濃度上昇値は D/B の値が0.2付近を境界に急激に上昇し、さらに大きくなると煙層が不安定となり、床面に達していることが分かる。明快さは幾分欠けるが、本ケースでは、目視からの判断も考慮すると、 $0 < D/B < 0.15$ を安定領域、 $0.15 < D/B < 0.25$ を遷移領域、および $0.25 < D/B$ を不安定領域と定義される。

図11より、遷移領域および安定領域では両者が直線的な相関をとることが分かる。しかしながら、不安定領域では相関が見られない。安定領域および遷移領域においては、下降気流に関する次の関係式

が得られる。

$$v_s/v_d = D/B - 0.07 \quad (0.07 < D/B < 0.25) \quad (8)$$

なお、式(8)は原点を通らないが、安定した下降気流の発生にはある程度以上の浮力 B に対する抵抗 D が必要であることを示す。この理由として、抵抗 D に対する浮力 B の割合が極端に大きい場合、水滴の影響を受けた煙が浮力を保ち、再び煙層に戻る現象が起こるためであると考えられる。

以上より、式(1)および式(5)、式(6)を用いると、次式(9)のように整理される。

$$v_s = \frac{k_d v_d^2 W}{M_d B} - 0.07 v_d \quad (9)$$

さらに式(2)および式(7)を用いて整理すると、下降気流 v_s の予測式は次式(10)で表せる。

$$v_s = \frac{C_D A_d v_d^2 W}{2 M_d g (\rho_0 - \rho_s) / \rho_s} - 0.07 v_d \quad (10)$$

下降気流が床面に達することで不安定領域となる境界は区画の条件によって変わると考えられるが、本研究では異なるノズルと火源を組み合わせる実験を行い、共通となる式が得られた。したがって、安定領域において発生する下降気流はこの関係式によって予測可能だと考えられる。

また下降気流は単位面積、単位時間あたりの下層貫入容積と捉えることができるため、下層貫入量 m_E を以下の式で表すことができる。

$$m_E = v_s A \rho_s \quad (11)$$

さらに、無次元圧力 P_d を下式(12)で定義すると[5]、 P_d と D/B はノズルごとに相関があり、特定の区画条件における予測計算を容易に行うことができる。

$$P_d = P / \rho_d V_0^2 \quad (12)$$

$$\text{ここに、} V_0 = \left(\frac{g \dot{Q}}{\rho_0 c_p T_0 H} \right)^{1/3} \quad (13)$$

図 11 に P_d と D/B の関係を示す。ノズルごとに傾向が表れることが分かる。

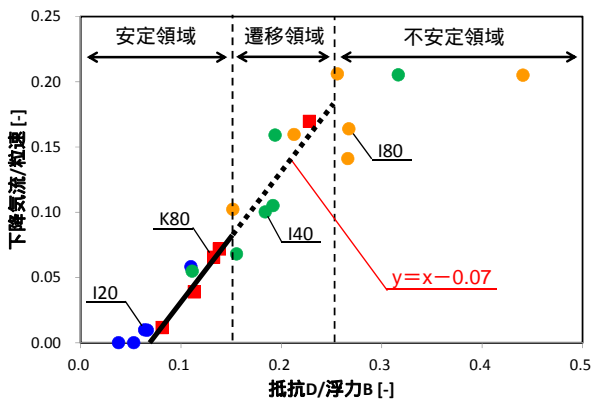


図 11 D/B と下降気流/粒速 (v_s/v_d) の関係

5. まとめ

本研究では、まず煙層の挙動を知る上で重要な要素である散水ノズル (SP を含め 4 種類) に関する散水基礎データ (散水量・平均粒径・粒速) の収集を行った。各ノズルの散水に伴う霧囲気の下降気流に関して、画像解析による手法を提案することで PIV による 2 流体 (霧囲気および水滴) 流速の同時

計測を可能にした。計測データから、煙層の浮力が大きくなると下降気流は抑制されることが分かった。さらに、測定した基礎データから算出される抵抗 D と煙層の浮力 B とのバランスが、下降気流 v_s と粒速 v_d のバランスと相関関係となる結果が得られた。この結果、下降気流および下層貫入量 m_E は、簡易的に予測することが可能となった。

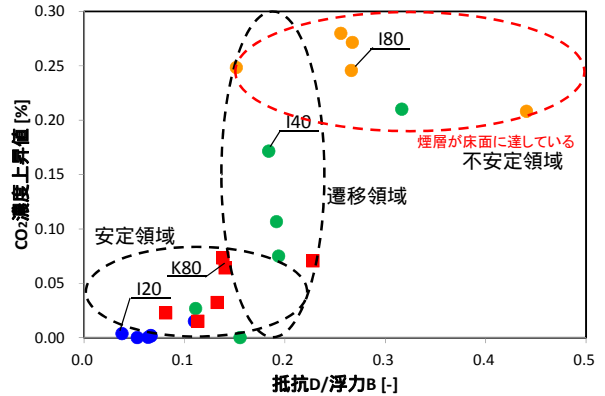


図 12 D/B と CO_2 濃度の関係

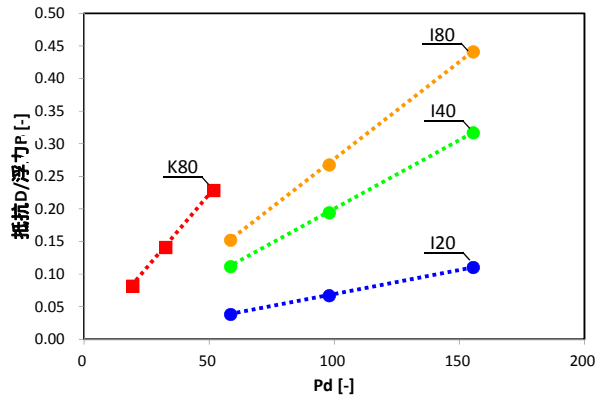


図 13 無次元圧力 (P_d) と D/B の関係

使用記号

A : 散水面積 [m^2] A_d : 水滴断面積 [m^2] B : 浮力 [N/m^3] C_D : 抵抗係数 [-] C_p : 比熱 [$\text{kJ}/\text{kg} \cdot \text{K}$] D : 空気への垂直抵抗 [N/m^3] D' : 一滴の垂直抵抗 [N] g : 重力加速度 [m/s^2] H : 垂れ壁高さ (開口上部高さ) [m] k_d : 抵抗計算係数 [kg/s] M_d : 一滴の質量 [kg] m_E : 下層貫入量 [kg/s] n : 水滴の数 [$1/\text{m}^3$] P : 放水圧 [MPa] P_d : 無次元圧力 [-] Q : 火源発熱速度 [kW] r : 水滴半径 [m] R_e : レイノルズ数 [-] T_0 : 下部層の温度 [K] T_s : 煙層の温度 [K] V_0 : 参照速度 [m/s] v_d : 垂直水滴速度 [m/s] v_s : 下降気流 [m/s] W : 散水量 [$\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$] μ : 気体粘度 [$\text{Pa} \cdot \text{s}$] ρ_0 : 下部層空気密度 [kg/m^3] ρ_s : 煙層空気密度 [kg/m^3] ρ_d : 水滴密度 (= 1000) [kg/m^3]

参考文献

- [1] 財団法人日本建築センター他：避難安全検証法の解説及び計算例とその解説，井上書院，2001
- [2] 桑名裕太，織戸貴之，高瀬文生，太田 充，山口純一，大宮喜文：ガス分析に基づく火災区画内の流量測定スプリンクラー設備作動時の区画内煙性状 その1，日本建築学会環境系論文集，No.623，pp.1-8，2008年1月
- [3] M. Ota, Y. Kuwana, Y. Ohmiya, K. Matsuyama and J. Yamaguchi : A Study on Smoke Behavior in a Compartment with Sprinkler System Activation -Simple Predictive Method on Mass Flow Rates Based on Experimental Study-, Fire Science and Technology, No.3, Vol.28, pp88-105, 2009
- [4] Bullen, M.L.: The Effect of a Sprinkler on the Stability of a Smoke Layer beneath a Ceiling. Fire Research Note 1016, Fire Research Station, England, 1974.
- [5] Zhang, C. F., Chow, W. K., Huo, R., Zhong, W. and Li, Y. Z.: Experimental Studies on Stability of Smoke Layer with a Sprinkler Water Spray, Experimental Heat Transfer, No.23:3, pp196-216, 2010
- [6] Li, K. and M. Spearpoint: Simplified Calculation Method for Determining Smoke Downrag Due to a Sprinkler Spray. Fire Technology, 47(3), pp. 781-800, 2011

第1章 序論

1.1 背景	3
1.2 既往の研究.....	4
1.3 研究の目的.....	7
1.4 本論文の構成	7

第2章 散水ノズルの基礎データ測定

2.1 測定目的	11
2.2 ノズル概要.....	11
2.3 粒径の測定.....	12
2.3.1 測定概要.....	12
2.3.2 測定結果.....	13
2.4 粒速の測定.....	14
2.4.1 測定概要.....	14
2.4.2 測定結果.....	14
2.5 散水分布の測定	15
2.5.1 測定概要.....	15
2.5.2 測定結果.....	16
2.6 測定結果のまとめ.....	17

第3章 PIVによる下降気流の測定を目的とした区画火災実験

3.1 実験目的	21
3.2 実験概要	21
3.2.1 実験装置.....	23
3.2.2 測定項目.....	31
3.2.3 実験手順.....	34
3.2.4 実験条件.....	34
3.3 実験結果	37
3.3.1 区画内条件.....	37
3.3.2 散水による温度の変化	48
3.3.3 散水によるCO ₂ 濃度の変化.....	59
3.3.4 散水による開口部温度・風速の変化.....	62

3.4	下降気流	64
3.4.1	PIV とは	64
3.4.2	下降気流の時間変化	73
3.4.3	平均下降気流	80
3.5	考察	83
3.5.1	火源と下降気流	83
3.5.2	温度変化と下降気流	85
3.5.3	CO ₂ 濃度変化と下降気流	88

第4章 下降気流の理論的考察

4.1	概要	91
4.2	既往の概念による検証	93
4.3	下降気流予測式の構築	101

第5章 総括

5.1	総括	109
-----	----------	-----

参考文献	111
------------	-----

付録

A.散水ノズル仕様	115
B.FDS 試算結果	117
謝辞	135

-第 1 章-

序論

1.1 背景

スプリンクラー設備（以下、SP）は、建築火災時の重要な火災安全対策の一つである。SPは建物の用途や規模に応じて消防法により設置が義務付けられており、設置の目的は火災を早期に消火または抑制するものとされている。そのため建築基準法の下での火災安全設計実務においては、拡大後の火災を対象としていることを理由に、SPの効果を考慮しないのが一般的である。またSPの消火性能の高さは周知であるが、その他の効果についてはあまり定量化されていない。SP設備が区画火災性状に与える影響は、可燃物の燃焼の抑制あるいは消火、区画内温度・区画部材の冷却効果、火災からの区画部材への輻射の低減がある^[1]。これらに加えて図1.1の示すような、煙層の煙を下部層へ連行する気流（以下、下降気流）を発生させることが考えられる。

また現在の避難安全設計は、火災により発生した煙が避難上支障ある高さに降下するまでに要する時間と避難時間とを比較して安全性を評価する手法を用いている^[2]。この評価法では、火災室もしくは避難経路となる空間等は、有害物質を含む煙層と新鮮な空気の下部層の二層に成層化することを前提としている。しかし、二層に成層化している状態でSPが作動すると、加圧噴射された水滴群によって下降気流が発生し、下部層は安全であるという避難安全設計の前提条件が成立しなくなる恐れがある。また、設計義務で広く利用されている煙性状予測モデルでは、Zukoskiらの火災ブルームモデルを用いることが多いが、このモデルは静穏な環境下で行われた実験を基に提案されたものである。しかし、SP設備が作動した状況は必ずしも静穏とは言えず、煙層の降下速度が早くなる恐れがある。

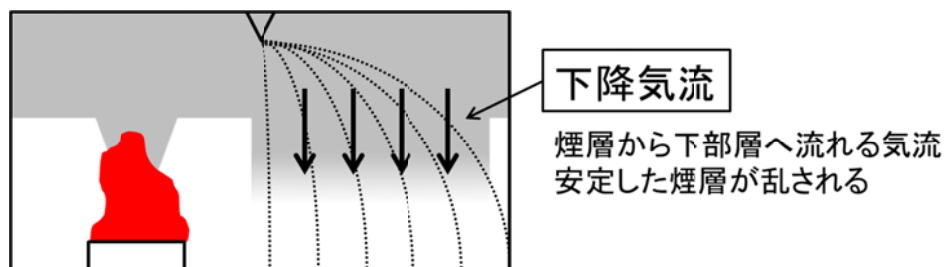


図 1.1 下降気流

1.2 既往の研究

(1) The Effect of a Sprinkler on the Stability of a Smoke Layer beneath a Ceiling^[3]

天井下の煙層安定性へのスプリンクラーの影響

スプリンクラーが煙層の安定性へ及ぼす影響に関する先駆的な研究は、Bullen によって 1974 年に行われている。水滴が煙層に及ぼす抵抗を $D[N]$ 、煙層の浮力を $B[N]$ として散水領域全体で積分し、 D/B (抵抗/浮力) が 1 を超えた際に煙層の安定性が失われるものとした計算結果をまとめた。図 1.2 に計算結果例を示す。 D/B はスプリンクラーの作動圧力(水量)、煙層温度と煙層厚さに依存しており、通常のスプリンクラーが作動する条件下では煙層の安定性が十分に保たれることを示した。

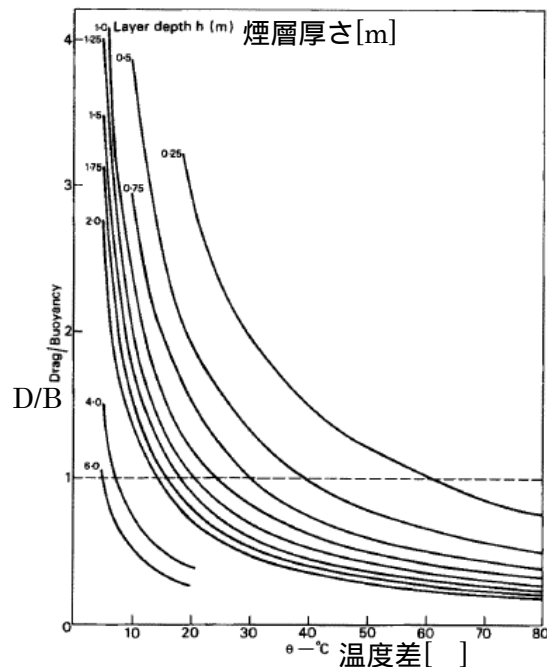


図 1.2 計算結果 (散水圧約 0.1MPa)

(2) A Mathematical Model on Interaction of Smoke Layer with Sprinkler Spray^[4]

煙層とスプリンクラー Sprey の相互作用計算モデル

Li らは Bullen と同様の計算方法を踏襲し、特に面積当たりの水滴による抵抗が最大となるスプリンクラー直下に注目し、スプリンクラー直下における水滴の抵抗 $D_0[N/m^2]$ と煙層の浮力 $B_0[N/m^2]$ の計算を行った。そして D_0/B_0 が 1 を超える場合には煙が下降するとし、 $D_0=B_0$ となる下降距離 $S[m]$ を算出した。図 1.3 に概念図を示す。図 1.4 に示す結果例が示すように、 S の計算により導いた煙の厚さは、実験データとかなりよく一致した。

また D_0 の計算モデルが複雑であることから、後に簡易的な計算式を提案している。^[5]

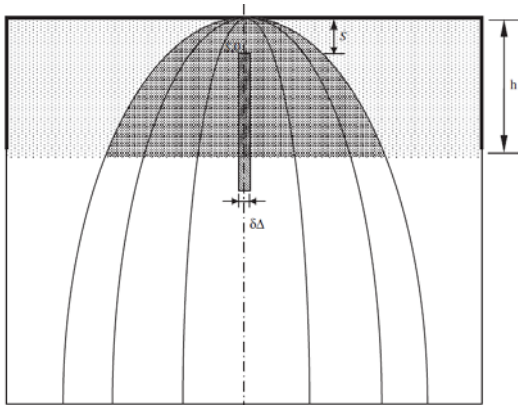


図 1.3 概念図

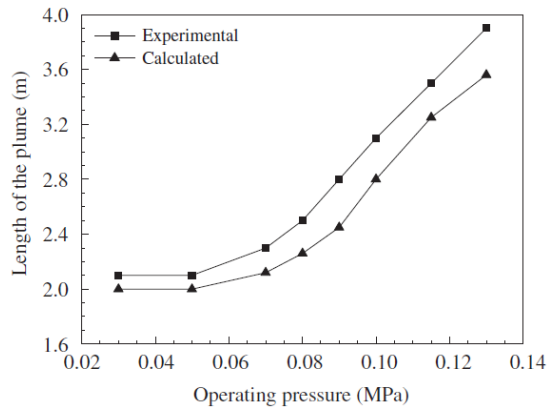


図 1.4 結果

(3) Experimental Studies on Stability of Smoke Layer with a Sprinkler Water Spray^[6]
 スプリンクラー散水時の煙層の安定性に関する実験的研究

Chow らは、Bullen の提案した計算モデルが煙層の安定を示す場合でもいくつかの実験で煙層の安定性が失われる結果が得られていることから、散水領域全体を対象とすると浮力を過剰に見積もってしまう可能性を示した。Bullen と同様の計算方法を踏襲し、図 1.5 に示す概念図が示すように、煙層境界付近における水滴の抵抗 D_1 [N/m²] と煙層の浮力 B_1 [N/m²] の計算を行った。 D_1/B_1 の計算結果と、実験において煙が下降した高さを図 1.6 に示す。煙の下降距離は D_1/B_1 と相関をとり、 D_1/B_1 が 0.9 から 1.2 を超えると煙層が床面に達して完全に不安定となった。また実験では異なる 3 つのノズルを使用しており、無次元圧力 Pd [-] を定義すると、図 1.7 が示すようにノズルごとに D_1/B_1 と相関を取ることを示した。

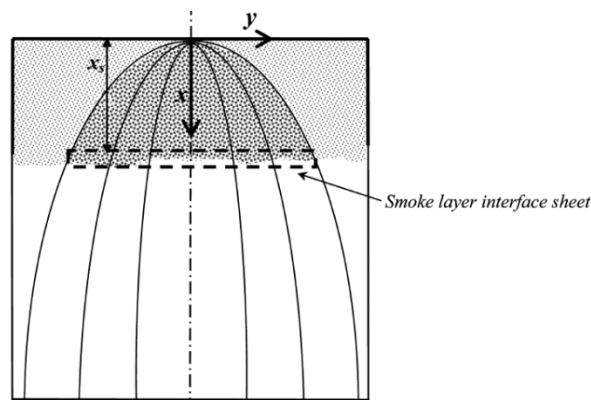


図 1.5 概念図

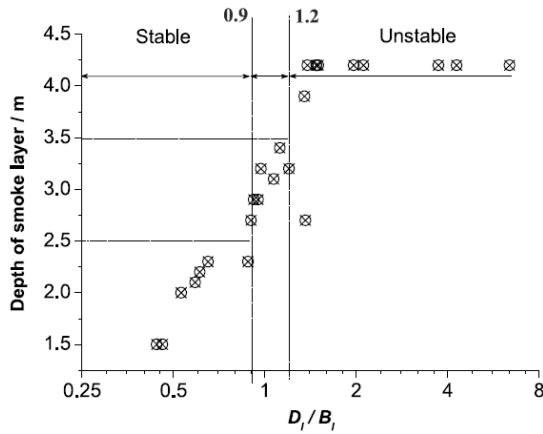


図 1.6 結果

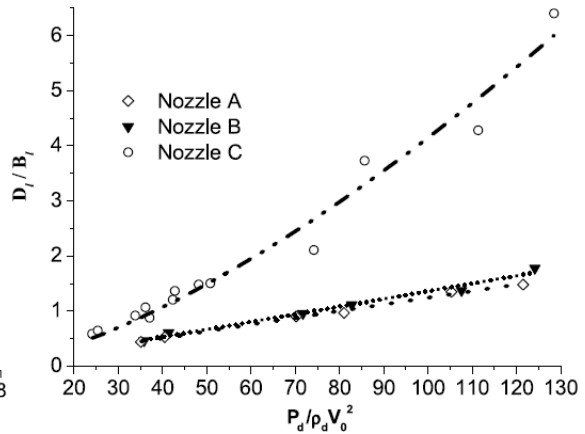


図 1.7 結果

(4) スプリンクラー設備作動時の区画内煙性状^{[7][8][9][10][11]}

桑名裕太らは、SP 設備作動時の煙流動性状予測モデル開発を目的とし、実大火災区画を用いた燃焼実験を行った。図 1.8 にスプリンクラー作動時の概念図を示す。上部層および下部層のガス分析を行うことにより、火災ブルーム流量、下層貫入流量、開口流出量および流入量を測定する手法を提案している。上部層の煙を下部層へと連行する気流を下層貫入ブルームと定義し、CO₂ 濃度の変化を基にしたガス分析手法により下層貫入流量 m_E の算出を行い、散水量が大きくなるほど、火源発熱速度が小さくなるほど増加する結果を得た。また火災ブルーム量が散水に伴う下層貫入の影響を受けて増加する結果を得た。これらの結果を受けて、巻き込み係数の増加による二層ゾーンモデルの改良を行い、SP 作動時の性状の予測モデルの構築を目指している。

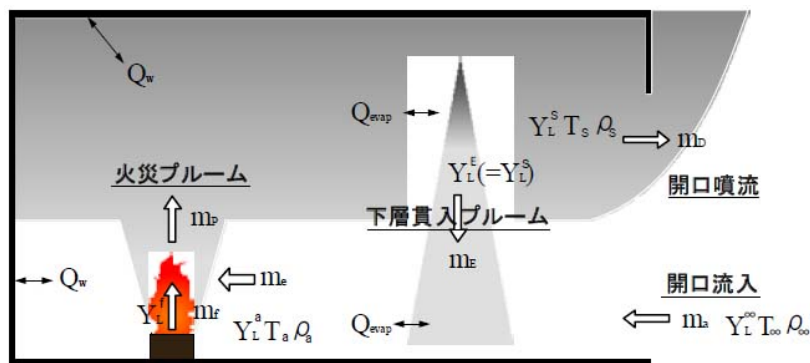


図 1.8 スプリンクラー作動時の概念図

1.3 研究の目的

既往の研究において煙層の下層貫入量の推測を行った例はあるが、煙層が2層のゾーンを形成していることを前提としており、下層貫入の際に発生する下降気流の測定は行われていない。そこで本研究では実際に煙層挙動の物理現象を捉えることで、メカニズムを考えることにした。Particle Image Verocimetry (以下 PIV) システムを用いることで、散水設備作動時に発生する下降気流を測定することを目的とした区画火災実験を行う。また、水滴が煙層に及ぼす運動エネルギーを算出する際に必要となる水滴の粒径、水滴の粒速、散水量が、いずれの既往の研究においても実験的には得られていないことから、本研究では実験に併せて測定を行う。火源の大きさ(煙層温度)の変化による煙層挙動の変化、および散水設備の変化による煙層挙動の変化を、複数の火源と現状の適法な SP を含めた複数の散水ノズルを組み合わせることで実験を行うことで把握する。得られたデータを集約し、散水設備作動時に発生する下降気流を予測するための計算手法を提案することを目的とする。

1.4 本論文の構成

第1章「序論」では、散水設備が避難安全上で悪影響を及ぼす可能性について記し、本研究の目的について示す。また過去に行われた関連する実験・研究について概要を述べる。

第2章「散水ノズルの基礎データ測定」では、下降気流発生メカニズムの考察を行う際の基礎データを得ることを目的とした測定を行う。現状の適法な SP を含めた4つの散水ノズルの水滴の粒径、粒速および散水量分布の測定概要とその結果を示す。

第3章「PIVによる下降気流の測定を目的とした区画火災実験」では、複数の火源とノズルを組み合わせを行った下降気流測定を目的とした区画火災実験の概要とその結果を示す。区画内の温度や CO₂ 濃度の変化と下降気流測定結果のまとめを行い、下降気流と煙の下層貫入との関連性を示す。

第4章「下降気流の理論的考察」では、実験で得られたデータを基に下降気流発生条件の理論的考察を行い、予測式を構築する。

第5章「総括」では、本研究で得られた知見を総括し、今後の課題および展望について述べる。

-第2章-

散水ノズルの基礎データ測定

2.1 測定目的

下降気流発生メカニズムの検証を行うには、煙層に影響を与える水滴の特徴を詳細に把握する必要がある。下降気流の測定実験で使用する各ノズルの基礎データを得ることを目的とし、水滴の粒径、粒速、散水分布の3つの項目の測定を行った。

2.2 ノズル概要

本研究では現状の適法な SP を含め、4つの散水ノズルを用いる。表 2.1 に各ノズルの概要を示す。ノズルは千住スプリンクラー製 SP ヘッド (ZQR) の他に、いけうち製の広噴角形充円錐ノズル (BBXP シリーズ) を用いた。水量を幅広く設定でき、均一かつ広範囲に散水する性能を持ち、また本研究は SP を代表とした散水設備を対象としていることから、SP に近い粒径となるものとして、いけうち製のノズルを選択した。なお各ノズルの呼称は頭文字を、いけうち製のものには “I”、千住 SP 製のものには流量係数を示す “K” とし、全体の散水量を示す数字を合せて設定した。図 2.1 の各ノズルの写真が示すように、散水位置が天井から約 20cm の高さで揃うように、配管の長さを調整した。

表 2.1 ノズル概要

呼称	I20	I40	I80	K80
製造	いけうち			千住 SP
散水量	0.3MPa 20L/min	0.3MPa 40L/min	0.3MPa 80L/min	0.1MPa 80L/min



a) I20

b) I40

c) I80

d) K80

図 2.1 ノズルの写真

2.3 粒径の測定

2.3.1 測定概要

測定位置に接写レンズ（Microscope レンズ）を装着したカメラを設置し、向かい合わせにストロボ光源を設置して撮影を行うと、ストロボ照射した瞬間に撮影面を通過していた水滴が影として画像に映り込む。粒径解析ソフト VisiSizer Solo (Oxford Lasers 製)を用いて画像解析を行うと、映り込んだ水滴のうちピントの合っているもののみが抽出され、粒径のデータが出力される。

図 2.2 に粒径の測定位置を示す。測定位置は第3章の実験における下降気流の測定位置と同じ位置に定めた。この位置は、散水位置からは下方距離・側方距離ともおよそ 1m となる位置である。カメラには高感度 14bit 電子冷却 CCD カメラ pco.1600 を、光源には Nd:YAG レーザー（Quantel 製：220mJ 15Hz 532nm）に高倍率撮影用ディフューザレンズを取り付けたものを使用した。

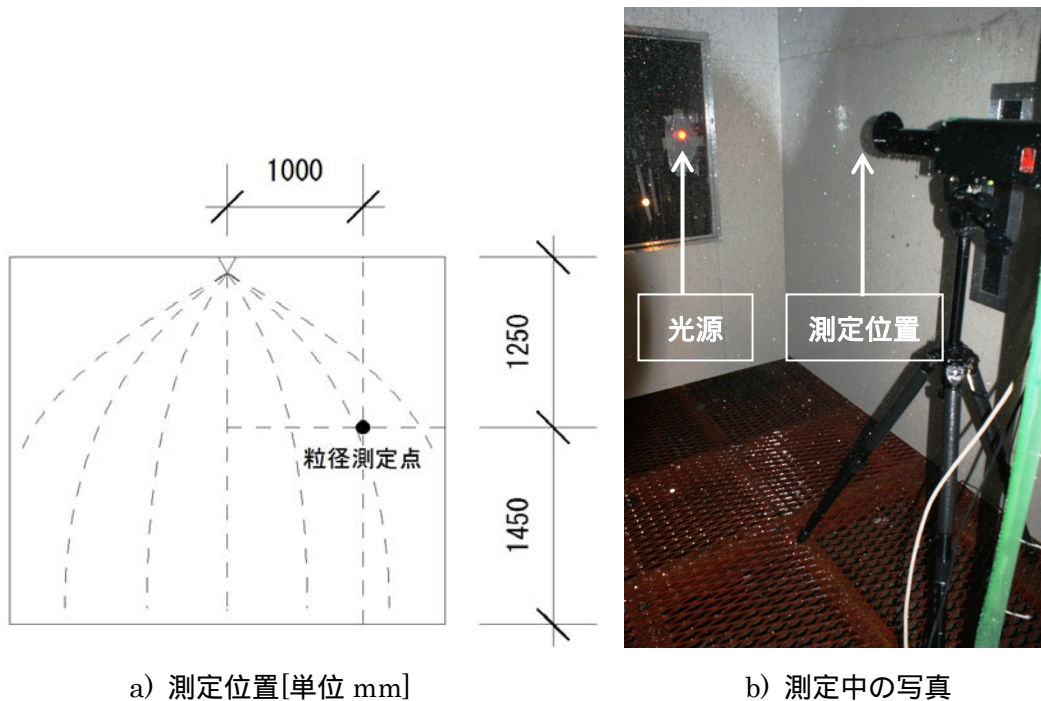


図 2.2 粒径の測定概要

2.3.2 測定結果

各ノズル約 6000 ~ 20000 粒の有効な水滴解析データを得た。図 2.3 に測定結果例を示す。

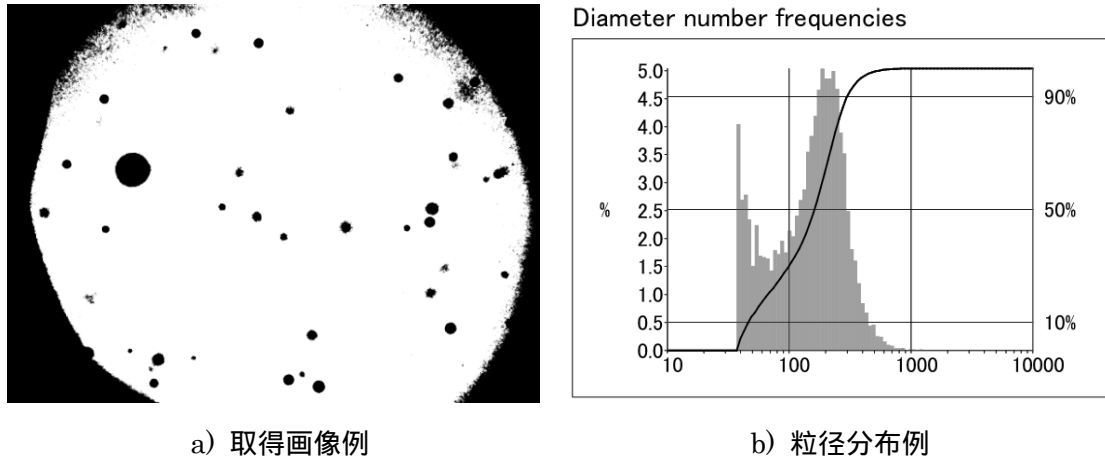


図 2.3 粒径の測定結果例 (I40)

平均粒径として、測定により得られた粒径データからザウター平均粒径の算出を行った。ザウター平均径は、表面積の合計と容積の合計が等しいとして求めるもので、液滴径の 2 乗で重み付けされた平均液滴径である。熱やの輸送や周囲媒質からの抗力など、表面積や断面積が感度パラメータになるような反応プロセスにおける液滴径の整理法としては最も多く用いられているものの一つである。 n_i を粒径、 x_i を粒の数とすると、ザウター平均粒径 \bar{x} は式(2.1)で表される。

$$\bar{x} = \frac{\sum n_i x_i^3}{\sum n_i x_i^2} \tag{2.1}$$

表 2.2 にザウター平均粒径の測定結果を示す。

表 2.2 ザウター平均粒径の測定結果

ノズル	I20	I40	I80	K80
ザウター平均粒径[μm]	488	312	399	365

2.4 粒速の測定

2.4.1 測定概要

粒速の測定はPIVシステムを用いて行った。図2.4に粒径の測定位置を示す。測定位置は第3章の実験における下降気流の測定位置と同じ範囲（横200mm×縦150mm）に定めた。カメラには高感度CCDカメラpc0.1600を、光源にはNd:YAGレーザーを使用した。いずれもPIVと同じ機器を使用するため、詳細は第3章にて記載する。

粒速のPIV測定においては水滴の速度のみ測定を行うため、気体の動きを可視化するレーザーは散布せずに、水滴をトレーサーとした解析を行った。

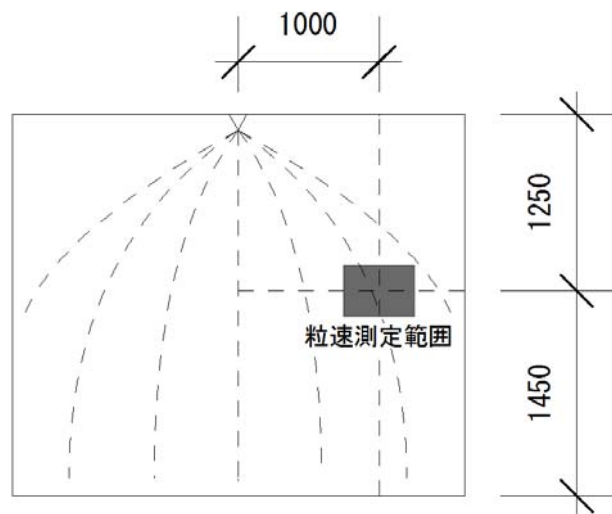


図 2.4 粒速の測定位置

2.4.2 測定結果

粒速の測定結果を表2.3に示す。本研究では下方向の運動のみを対象としているため、垂直に下方向の成分の値のみを示している。

表 2.3 粒速の測定結果

ノズル	I20	I40	I80	K80
粒速[m/s]	3.63	3.12	4.24	1.85

2.5 散水分布の測定

2.5.1 測定概要

図 2.5 に示すように、 0.1 m^2 (約 32cm 四方) の採水マス(約 32cm 四方)を散水位置直下から放射状に密着させて床面に並べ、測定を行った。それぞれの重量を記録した採水マスを並べて一定時間散水を行い、重量の増加量を重量計で測定することにより、各地点での単位時間、単位面積当たりの散水量の測定を行う。

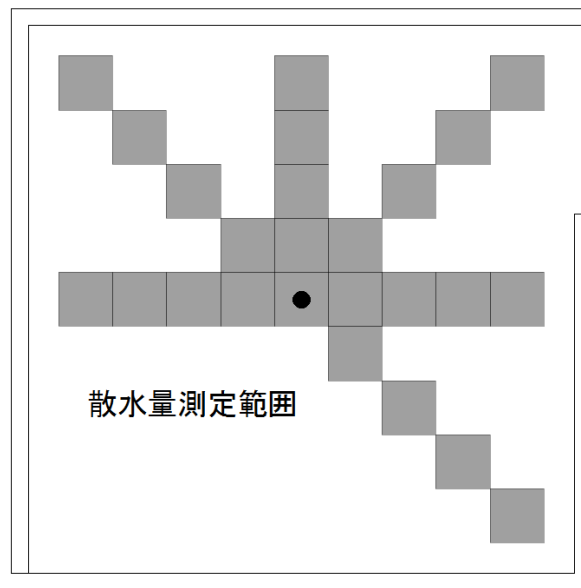


図 2.5 散水分布の測定範囲



a) 採水マスを並べた様子

b) 散水中の様子

図 2.6 散水分布の測定写真

2.5.2 測定結果

散水分布の結果例を図 2.7 に示す。

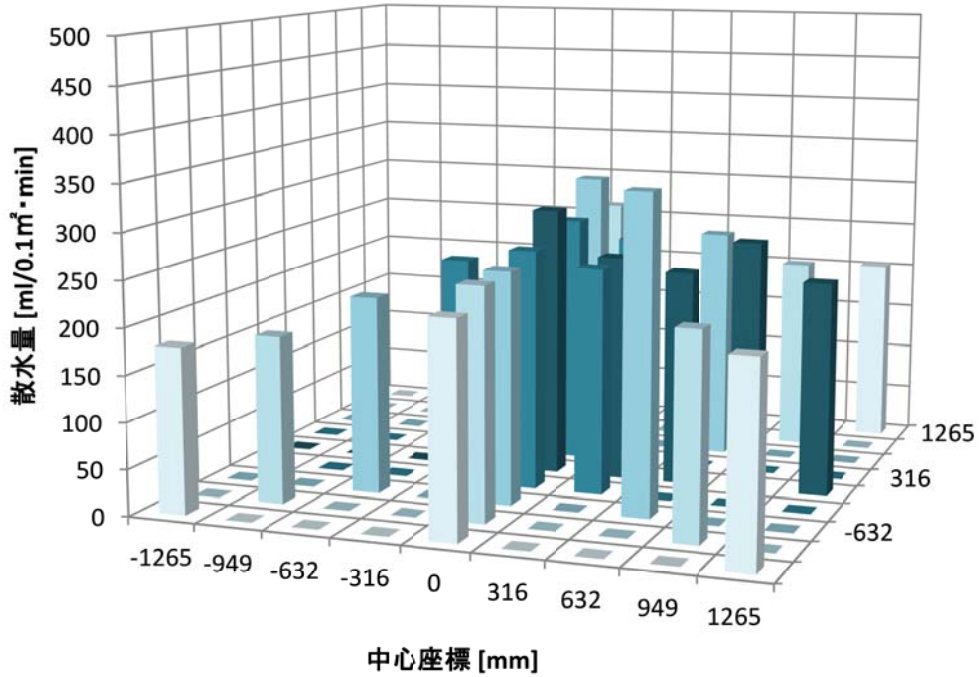


図 2.7 散水分布の測定結果例 (I40)

いずれのノズルもおおよそ均一に散水されており、極端な偏りは見られなかった。そのため、それぞれの平均値を各ノズルの散水量とした。表 2.4 に平均散水量測定結果を示す。

表 2.4 散水量の測定結果

ノズル	I20	I40	I80	K80
散水量[mL/min・0.1 m ²]	159	252	436	293

2.6 測定結果のまとめ

表 2.5 にノズル基礎データ測定結果をまとめて示す。ザウター平均粒径からは、I20 がやや大きいものの、いずれのノズルとも SP ノズルである K80 を中心に近い粒径となっていることが分かる。粒速を見ると、いけうち製のノズルが K80 に比べて大幅に速いことが分かる。散水量は放水量に応じる結果となっているが、いけうち製ノズルは SP ノズルよりも散水範囲が狭いため、同じ放水量の I80 の散水量は K80 と比べて多い結果となった。

表 2.5 ノズルの基礎データ測定結果

ノズル	I20	I40	I80	K80
ザウター平均粒径[μm]	488	312	399	365
粒速[m/s]	3.63	3.12	4.24	1.85
散水量[mL/min \cdot 0.1 m ²]	159	252	436	293

-第3章-

PIVによる下降気流の測定 を目的とした区画火災実験

3.1 実験目的

本研究では散水設備が煙の降下速度に及ぼす影響を測定する。煙層温度の違いによる下降気流発生状況の比較、散水ノズル性能の違いによる下降気流発生状況の比較を行うために実験の計画を行った。そして実験結果より、水滴の運動と煙層挙動との関係を明らかにすることを目的としている。

3.2 実験概要

本実験は、東京理科大学火災科学研究センター実験棟内にある火災実験用実大区画（幅 6500mm × 奥 6500mm × 高さ 2700mm）の一部をケイカル板で仕切り、幅 3200mm × 奥 3200mm × 高さ 2700mm の区画にて行った。図 3.1 に実験区画を示す。区画には開口部（幅 900mm × 高さ 1800mm）を 1 か所設けた。散水ノズルは区画天井部中央に 1 基設置し、取水升を使用して散水範囲の制限を行った。

なお同じ区画にて、火源と PIV 測定範囲の異なる 2 回の実験を行った。実験 1 では 1 点、実験 2 では高さの異なる 4 点を PIV 測定範囲とした。

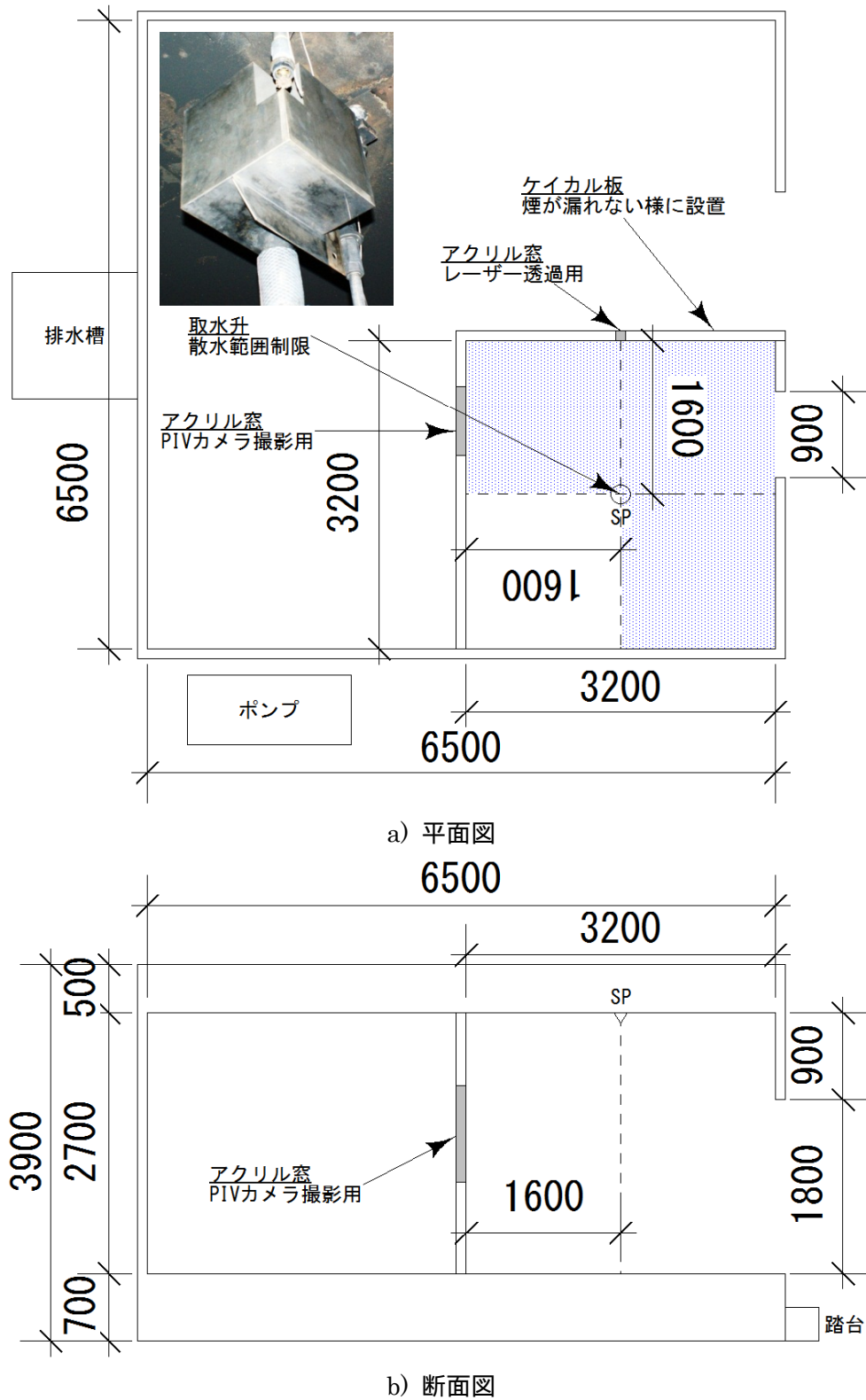


図 3.1 実験区画

3.2.1 実験装置

(1) PIVシステム

本実験では以下の装置を用いた。

- ・PIVカメラ：pco1600 (1600×1200/14bit)
- ・レーザー：Solo PIV 120XT (Nd:YAG/532nm/120mJ)
- ・タイミングコントローラ：TT1680
- ・トレーサー：油滴 (DEHS/約2 μ m)
- ・解析ソフト：Koncerto (西華産業製)

() PIVカメラ

PIVカメラとして、図3.2に示すpco.1600を使用した。PIVカメラはフレームストラドリング技術により2枚の画像を数 μ 秒以下の時間間隔で取り込む事が可能な高解像度デジタルカメラである。pco.1600はさまざまな流れに対応可能な高感度モデルである。レンズはNikon製105mmレンズを使用した。

実験では2台同時に使用しており、図3.3に示すように150mm間隔で2台を固定して測定した。

表3.1 PIVカメラ 性能

型番	有効画素数	ダイナミックレンジ	フレームレート	内蔵メモリー
pco.1600	1600×1200	14bit	30fps	1GB



a) カメラ本体



b) 電源

図3.2 PIVカメラ

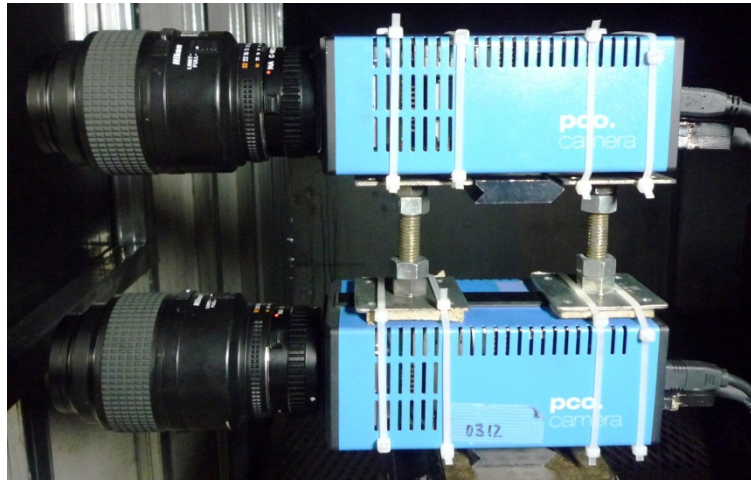


図 3.3 PIV カメラ 2 台同時使用

() レーザー

PIV 測定で光源に使用するレーザーとして、図 3.4 に示す Nd:YAG レーザー、Solo PIV 120XT を使用した。可視化用のライトシート生成光学系には BZ-60 を用いた。

表 3.2 Nd:YAG レーザー 性能

型番	発振波長	出力	繰り返し	ビーム径	パルス幅	光学系
Solo PIV 120XT	532nm	120mJ	15Hz	5mm	3 ~ 5ns	BZ-60



a) レーザー本体



b) 電源

図 3.4 Nd:YAG レーザー

() タイミング装置

タイミングコントローラとして、図 3.5 に示す TT1680 を使用した。PIV に関する全てのタイミング（カメラ、レーザー、同期計測用外部信号等）を一括制御する。解析ソフト Koncerto より制御が可能。



図 3.5 タイミングコントローラ

() トレーサー

トレーサーとして、DEHS (Di-ethylhexyl sebacate) と呼ばれる弱い揮発性を持つオイルを、シーディング装置により $2 \mu\text{m}$ 程度の液滴としたものを使用した。DEHS は吸気した場合に人体へ無害である。

シーディング発生装置には、図 3.6 に示す PivPart40 を使用した。この発生器はオイルをラスキンノズルで微粒化し、粒径 $2 \mu\text{m}$ 程度の粒子を大量に発生させることができる。また PIV 全般にいえることであるが、シーディング粒子をいかに均一に、気流に影響を与えずに拡散させるかは重要なポイントである。そこで、図 3.7 に示すシーディングレイクと呼ばれるシーディング散布用多孔ノズル、SR-2315 を併せて使用した。シーディングレイクは細孔をあけた細管を複数本組んだもので、流れに影響を与えずに均一なシーディングを可能とし、また必要最小限のシーディング量で済ませることができる。



図 3.6 シーディング装置



図 3.7 シーディングレイク

() 解析ソフト

PIV 計測制御ソフトおよび PIV 解析ソフトとして、西華産業製の PIV システムソフトウェア、Koncerto を使用した。高感度カメラをはじめとしたさまざまなタイプのカメラやレーザーを集中コントロールすることが可能。

図 3.8 に実験中の PIV システムの設置状況を示す。



図 3.8 PIV システム設置状況

(2) 熱電対

区画内の空気の温度を測るために、図 3.9 に示す K 型熱電対(φ=0.32mm)を使用した。

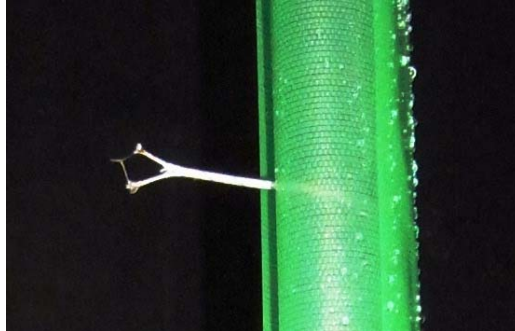


図 3.9 熱電対

(3) ロードセル

火源燃料の重量減少速度を測定するロードセルとして、図 3.10 に示す共和電業製の LUB-30KG を使用した。ロードセルの動ひずみ測定器としては、図 3.11 に示す共和電業製の DPM-700B を使用した。

表 3.3 ロードセル 性能

型番	定格容量	精度
LUB-30KG	300N	±0.03%R0 以内

表 3.4 動ひずみ測定器 性能

型番	精度	レンジ
DPM-700B	±0.5%	0~5V



図 3.10 ロードセル



図 3.11 動ひずみ測定器

(4) CO₂濃度計

CO₂濃度を測る測定器として、実験 では図 3.12 に示す扶桑理化製品製の CO₂濃度計 CD-602B を、実験 では図 3.13 に示す富士電機システムズ製の非分散型赤外線ガス分析計 ZKJ-3 を使用した。

表 3.5 CO₂濃度計 性能

型番	分解能	応答速度	サンプリング流量
CD-602B	10ppm	T90 < 15sec	0.5 L/min



図 3.12 CO₂濃度計

表 3.6 ガス分析計 性能

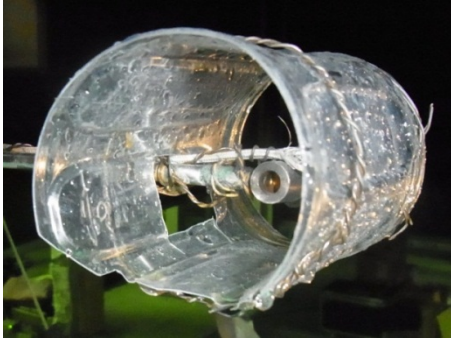
型番	測定範囲	直線性	繰り返し性	サンプリング流量	暖気時間
ZKJ-3	0 ~ 2 or 10%	± 1 %FS	± 1.0 %FS	1.0 L/min	4 時間



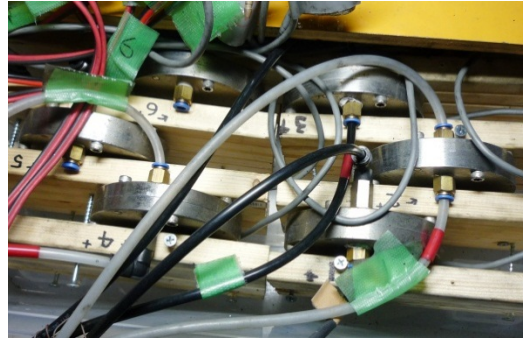
図 3.13 ガス分析計

(5) 風速計

開口部の煙層風速を測るために、図 3.14 に示すピトー管および、VALIDDYNE 製の微差圧計 VAL-5028 とアンプを使用した。



a) ピトー管



b) 微差圧計



c) アンプ

図 3.14 風速計

(6) データロガー

実験データの採取・記録用のデータロガーとして、図 3.16 に示す図横河電気製 MX100 を使用した。ロガー1 体で最大 60 点までの測定が可能である。ソフトウェアとして MX LOGGER、及び DAQLOGGER を使用した。

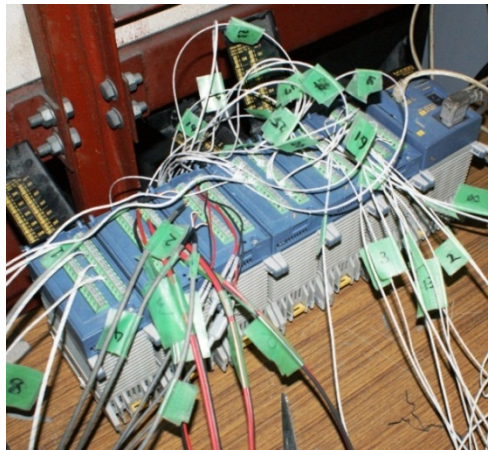


図 3.15 データロガー

(7) ビデオカメラ

映像記録機器として、図 3.16 に示すソニー製のビデオカメラを使用した。

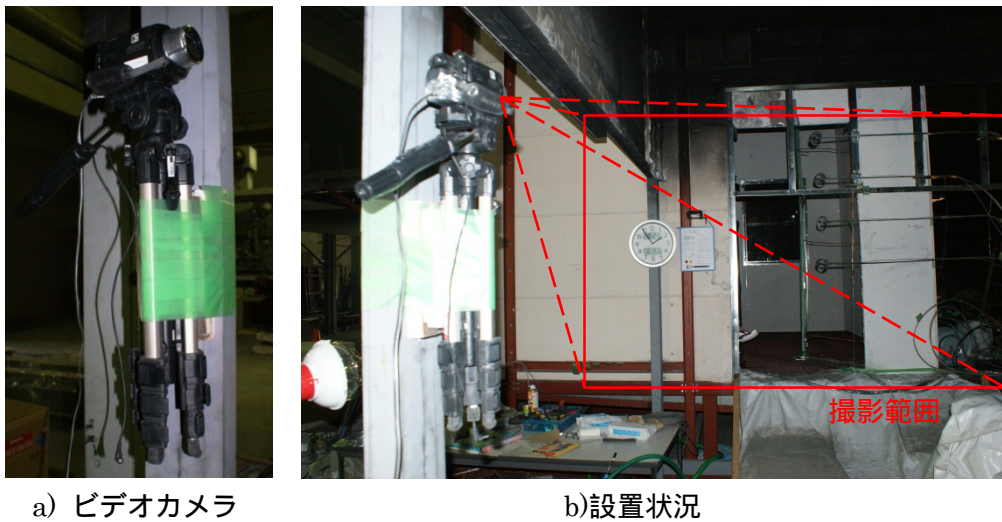


図 3.16 ビデオカメラ

3.2.2 測定項目

図 3.17 に各項目の測定位置を示す。

(1) 下降気流

PIV システムによる流速測定は、カメラとレーザー装置を区画の外に設置し、壁に設置したアクリルの窓を通して行った。図 3.18 に測定範囲を示す。SP からの水平距離 1000mm で、実験 Ⅰ では高さ 1450mm の 1 点、実験 Ⅱ では高さ 1450・1300・1150・1000mm の 4 点を中心として、幅約 200mm × 高さ約 150mm を測定範囲とした。

(2) 重量減少速度

ロードセル 3 台を使用した 3 点支持により、火源の重量変化を測定した。重量変化の測定結果を重量減少速度として整理し、火源の発熱速度の算出を行う。

(3) 垂直温度分布

区画内隅角部から 800mm の位置 2 か所にポールを立て、熱電対 (K 型 0.32mm) を高さ 200mm ピッチで 13 点設置し、垂直温度分布を測定した。なお水滴が当たらないように工夫をした。実験 Ⅱ では煙層境界付近にあたる高さ 900・1100・1300mm の 3 点を追加して測定した。

(4) CO₂ 濃度

開口に近いポールの高さ 200mm と高さ 2600mm の 2 点に吸気パイプを取り付け、CO₂ 濃度を測定した。

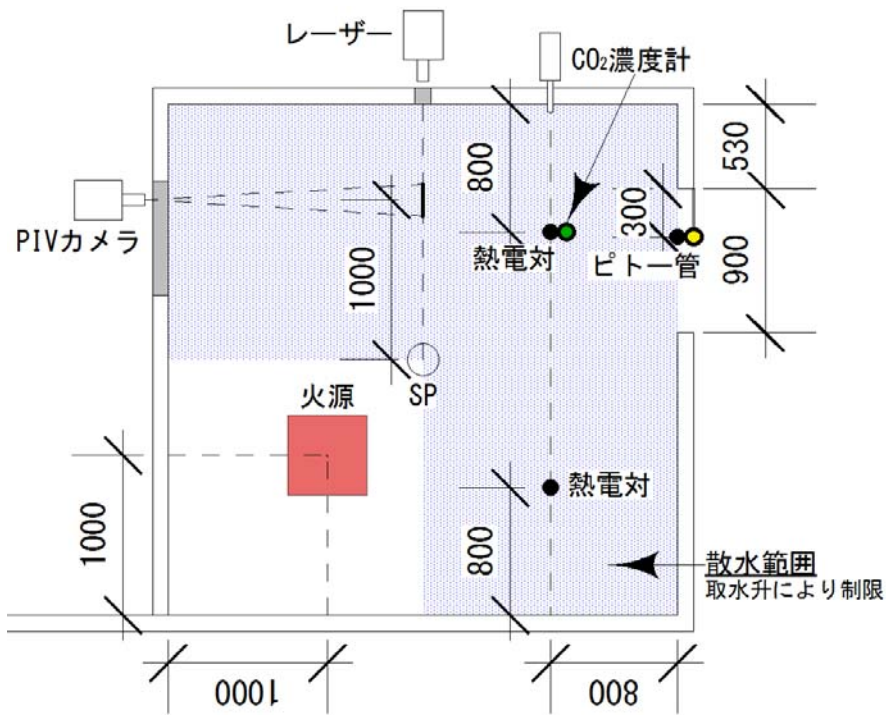
(5) 開口部温度・風速

熱電対およびピトー管を開口部上部に高さ 300mm 間隔で 4 点設置し、温度と風速を測定した。本実験の区画は散水した水が流れ出るように床面が網状になっており、空気の流れは設定した開口部に限られていない。そのため開口部の測定は上部 (煙層) のみを対象とした。

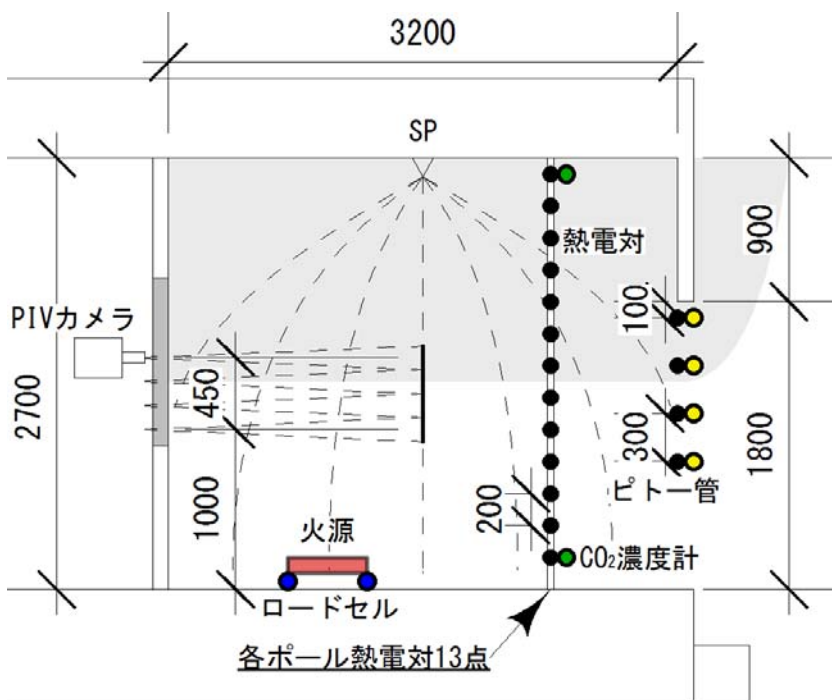
(6) 映像

ビデオカメラにより、区画外から開口部の定点撮影を行った。

図 3.19 に実験概要を示す。



a) 平面図



b) 立面図

図 3.17 測定位置

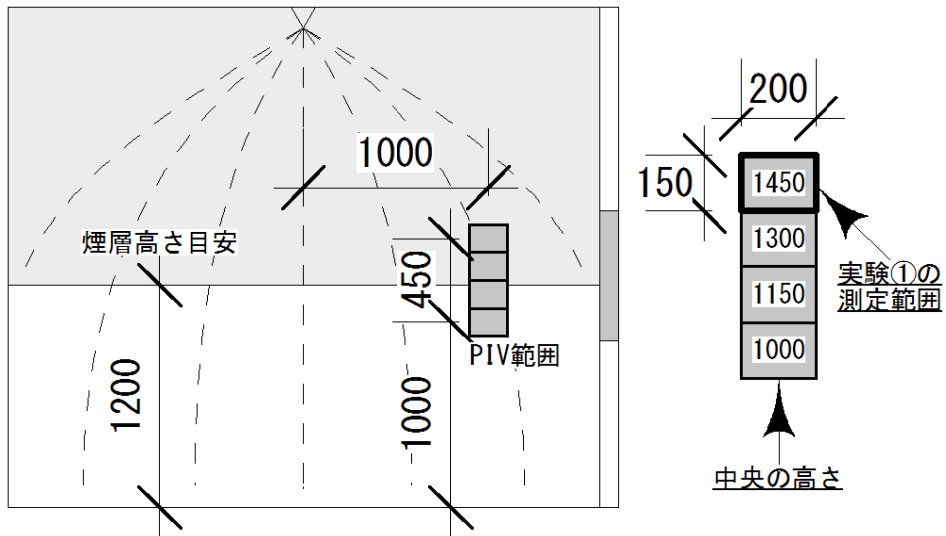


図 3.18 PIV 測定位置

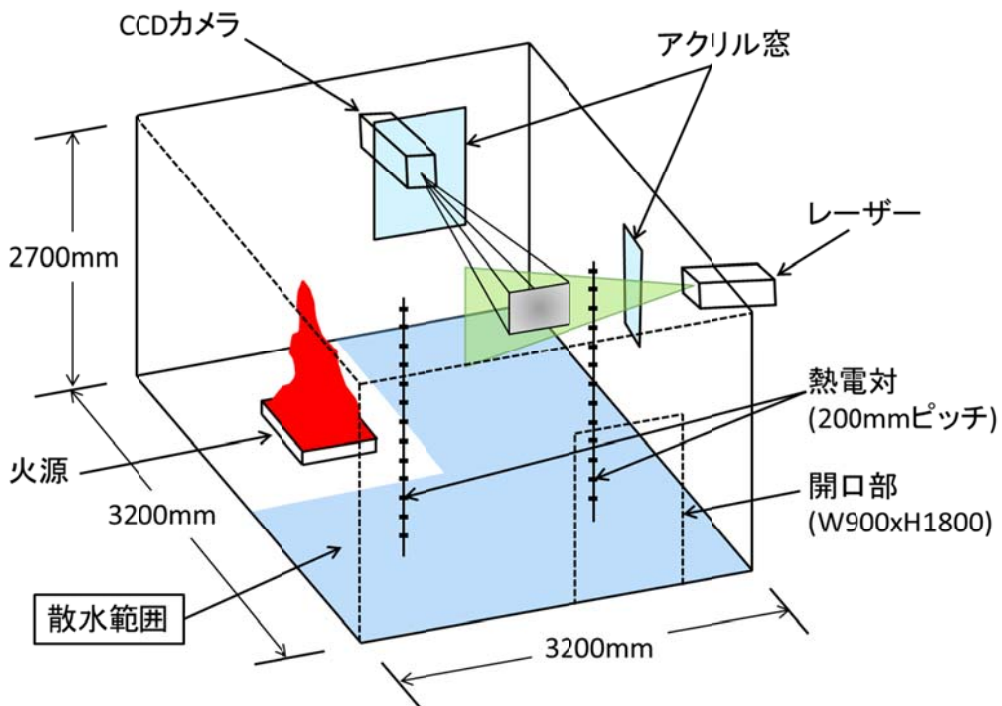


図 3.19 実験概要図

3.2.3 実験手順

区画内温度が定常状態となるまで散水は行わないものとし、十分に定常状態となる着火から180秒を散水開始時間と定めた。実験は以下の手順に従って行うものとした。なお散水開始後すぐに規定の散水圧が得られるように、バルブの調整はあらかじめ行っておくものとした。

手順

- 1 . 0:00 測定開始・ビデオ撮影開始・火皿に燃料注入
 - 2 . 1:00 点火
 - 3 . 3:50 PIV開始
 - 4 . 4:00 散水開始
 - 5 . 4:30 PIV終了
 - 6 . 鎮火 散水・測定終了・ビデオ撮影終了
- 10～15分間程度換気を行い、次の実験を行う。

3.2.4 実験条件

パラメータは発熱速度とノズル性能とした。火源には液体燃料を使用し、種類と面積を変化させて実験を行った。水量による変化を明らかにするため、ノズルは通常のスプリンクラーヘッドの他に、いけうち製の広角ノズルを使用した。

火源

表 3.7 に火源一覧を示す。火源には液体燃料を入れた方形パンを使用し、液体燃料の種類（メタノールおよびヘプタン）と火源面積を変化させて実験を行った。実験 1 と実験 2 で一部使用する火源を変更しており、実験 2 では発熱速度の大きいヘプタン 0.25 m²を用いた。測定中の煙層形成に十分な燃焼時間をとるために、燃料の種類と火源面積に応じて燃料の使用量を調節した。

表 3.7 火源

火源	実験 1	実験 2
メタノール 0.1 m ²		
メタノール 0.25 m ²		
メタノール 0.25 m ²		
ヘプタン 0.1 m ²		
ヘプタン 0.1 m ²		
ヘプタン 0.25 m ²		



a) 0.1 m²

b) 0.25 m²

図 3.20 火皿の写真

ノズル

表 3.8 にノズル一覧を示す。ノズルは千住スプリンクラー製 SP ヘッドの他に、SP に近い粒径で、均一かつ広範囲に散水する性能を持つ、いけうち製の広噴角形充円錐ノズル (BBXP シリーズ) より散水量の異なる 3 つを使用した。

表 3.8 ノズル

呼称	I20	I40	I80	K80
製造	いけうち			千住 SP
仕様	0.3MPa 20L/min	0.3MPa 40L/min	0.3MPa 80L/min	0.1MPa 80L/min



a) I20

b) I40

c) I80

d) K80

図 3.21 ノズルの写真

3.3 実験結果

3.3.1 区画内条件

次ページより火源ごとに区画内の温度条件を示す。PIV 測定位置に近い、開口部の近くに位置するポール B において測定した温度を結果として示すと共に、考察の対象とする。

いずれの火源においても散水を開始する 180 秒後までには区画内条件が定常状態を示しており、着火 60 秒後から PIV 測定終了となる 210 秒後までの 150 秒間はほぼ一定の発熱速度を示した。そこで各火源の発熱速度はこの 150 秒間の平均値と定めた。発熱速度 Q [kW] は式(3.1)で示すように、可燃物の燃焼速度 m_b [g/s] と燃焼熱 ΔH_c [kJ/g] の積により求めることができる。

$$Q = m_b \Delta H_c \quad (3.1)$$

各燃料の燃焼熱をメタノールは 26.8[kJ/g]、ヘプタンは 44.6[kJ/g] とした。^[8]

煙層と下部層の境界高さは、目視による計測と最も一致した N%法(N=30%)により算出を行った。また煙層平均温度に加え、煙層の境界付近の温度として境界から 300mm 上部の温度を整理した。

(1) メタノール 0.1 m² (実験)

表 3.9 および図 3.22 ~ 図 3.24 に火源メタノール 0.1 m² 燃焼時の区画内条件測定結果を示す。本実験で用いた火源では最も発熱速度が小さい火源である。煙層の平均温度も最も低くなった。

表 3.9 火源メタノール 0.1 m² の区画内条件

火源	発熱速度	境界高さ	平均温度	境界温度	CO ₂ 濃度
メタノール 0.1 m ²	67.0kW	1150mm	66.4	59.0	0.58%

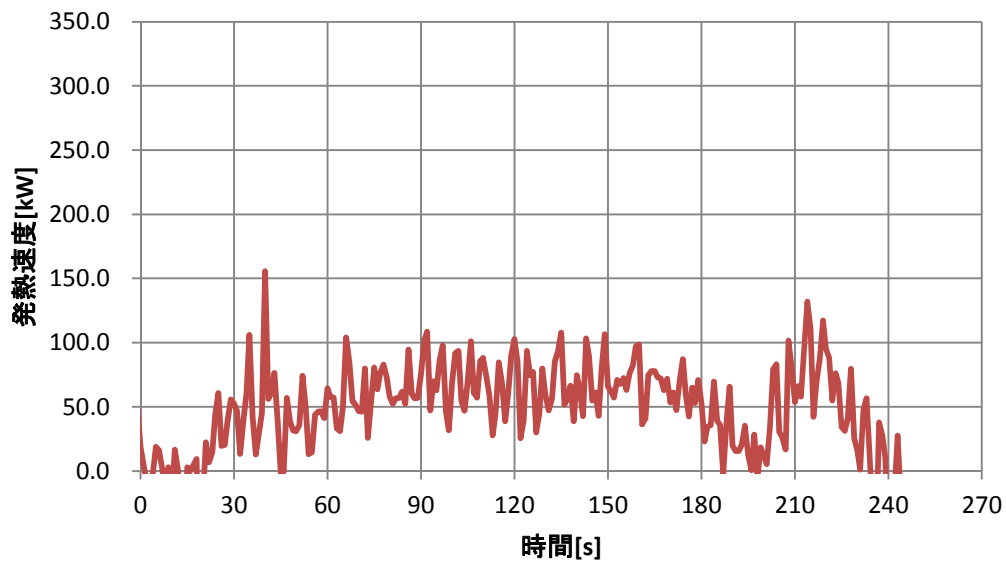


図 3.22 火源メタノール 0.1 m² の発熱速度

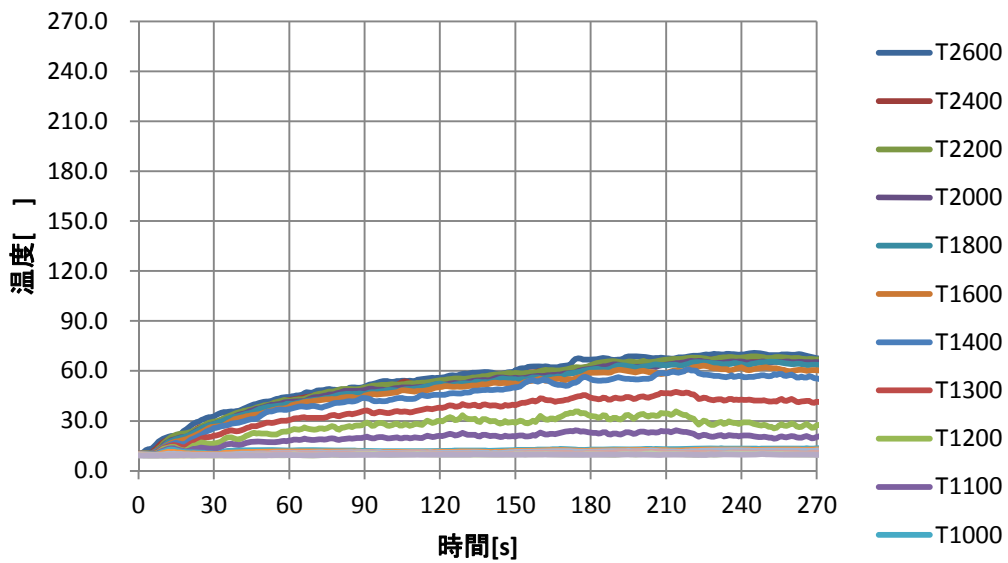


図 3.23 火源メタノール 0.1 m²の区画内温度推移

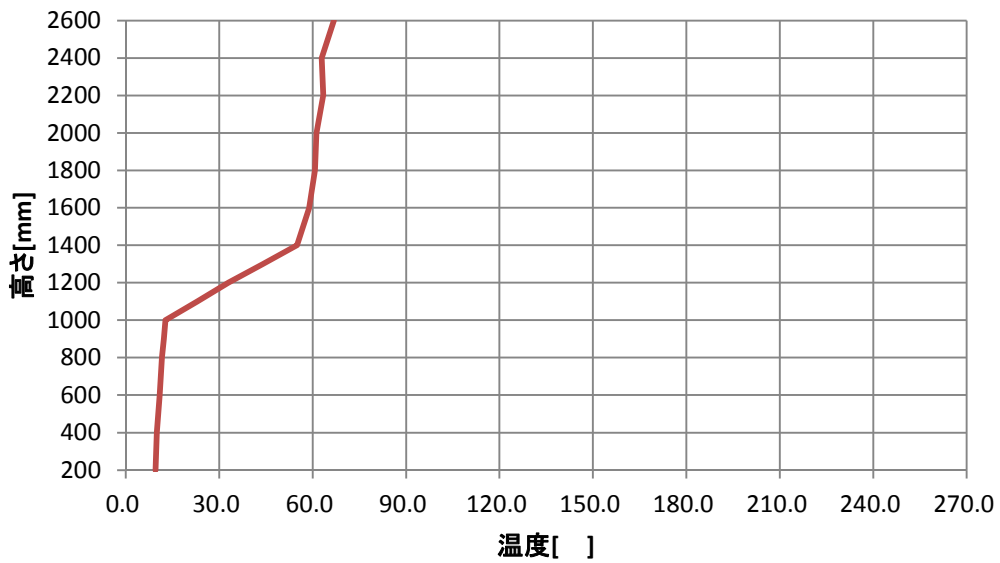


図 3.24 火源メタノール 0.1 m²の区画内垂直温度分布(180s)

(2) メタノール 0.25 m² (実験・実験)

表 3.10 および図 3.25～図 3.27 に火源メタノール 0.25 m²燃焼時の区画内条件測定結果を示す。実験 と実験 の両方で使用し、おおよそ同じ性状を示した。

表 3.10 火源メタノール 0.25 m²の区画内条件

火源	発熱速度	境界高さ	平均温度	境界温度	CO ₂ 濃度
メタノール 0.25 m ²	134.0kW	1100mm	103.6	96.8	0.91%
メタノール 0.25 m ²	134.0kW	1100mm	110.1	107.7	1.13%

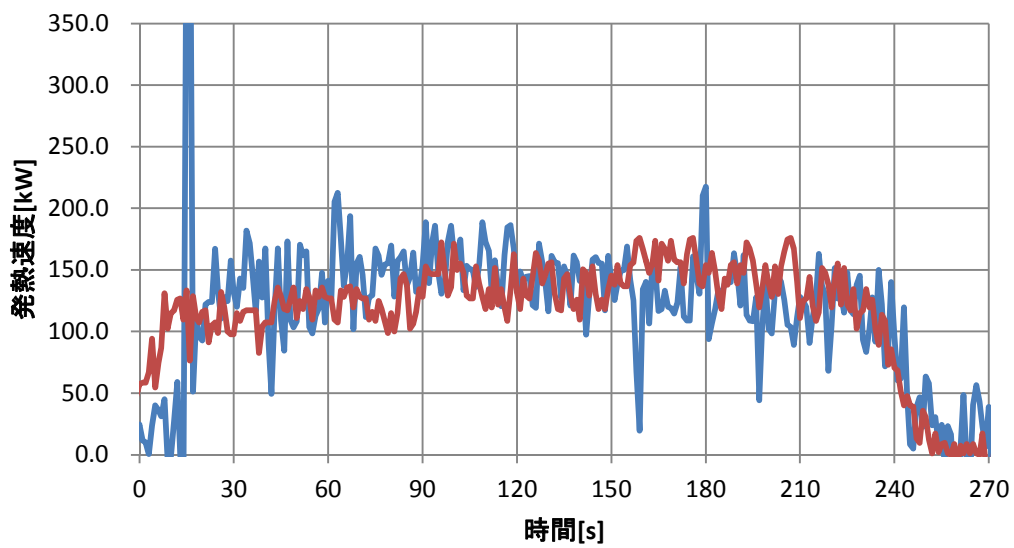


図 3.25 火源メタノール 0.25 m²の発熱速度 (青・赤)

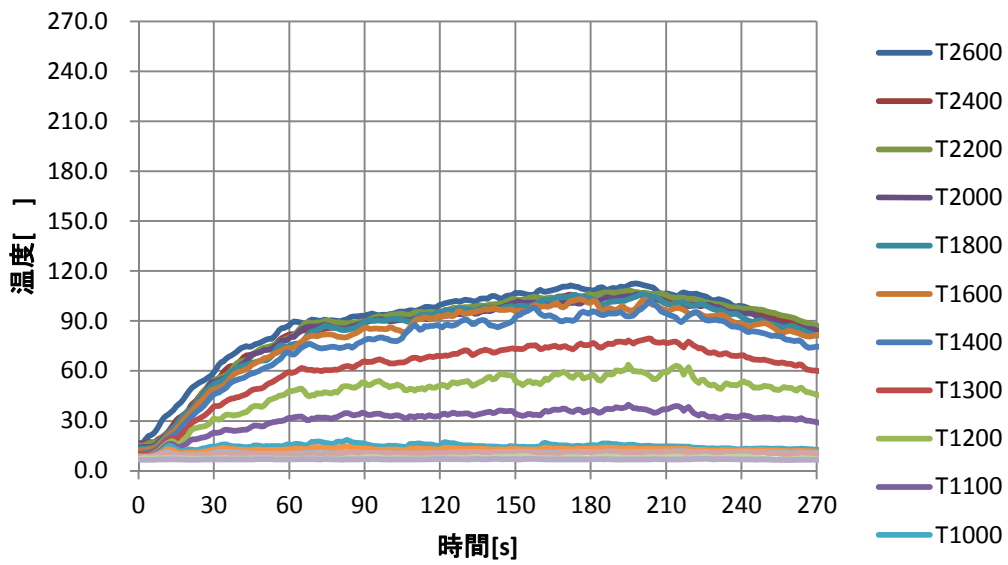


図 3.26 火源メタノール 0.25 m² の区画内温度推移

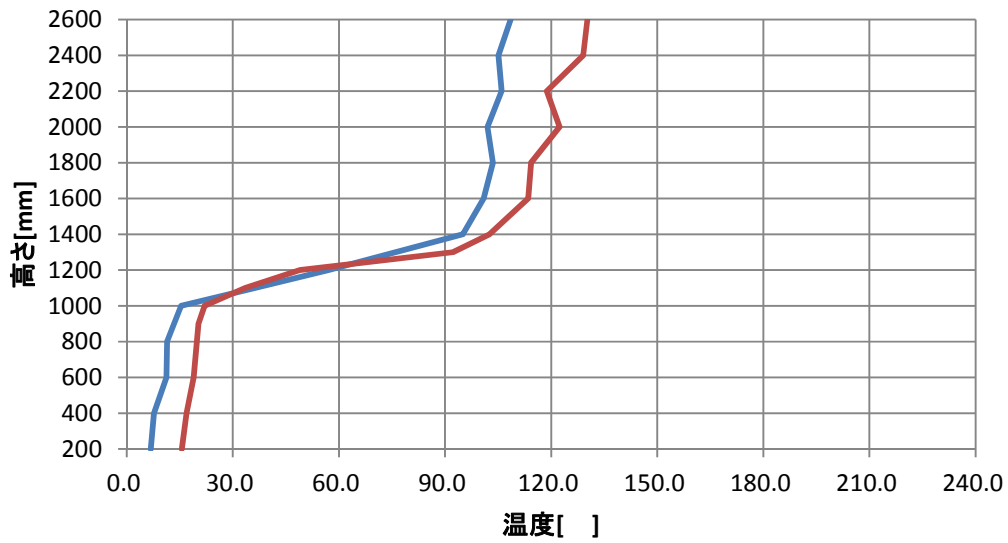


図 3.27 火源メタノール 0.25 m²の区画内垂直温度分布(180s) (青・ 赤)

(3) ヘプタン 0.1 m² (実験 1・実験 2)

表 3.11 および図 3.28～図 3.30 に火源メタノール 0.1 m² 燃焼時の区画内条件測定結果を示す。ヘプタンは黒煙が発生するため、目視により煙層の動きを確認することが可能である。実験 1 と実験 2 の両方で使用したが、実験 1 のみ敷き水を行ったため、発熱速度に差が表れた。そのため、煙層境界高さは同じであったが、実験 1 の方が煙層平均温度が高いという違いが生じている。なお実験 2 (ヘプタン 0.1 m²) では、煙層平均温度がメタノール 0.25 m² と同程度の値となった。

表 3.11 火源ヘプタン 0.1 m² の区画内条件

火源	発熱速度	境界高さ	平均温度	境界温度	CO ₂ 濃度
ヘプタン 0.1 m ²	111.5kW	1250mm	132.1	118.3	1.19%
ヘプタン 0.1 m ²	89.2kW	1250mm	105.1	96.2	1.31%

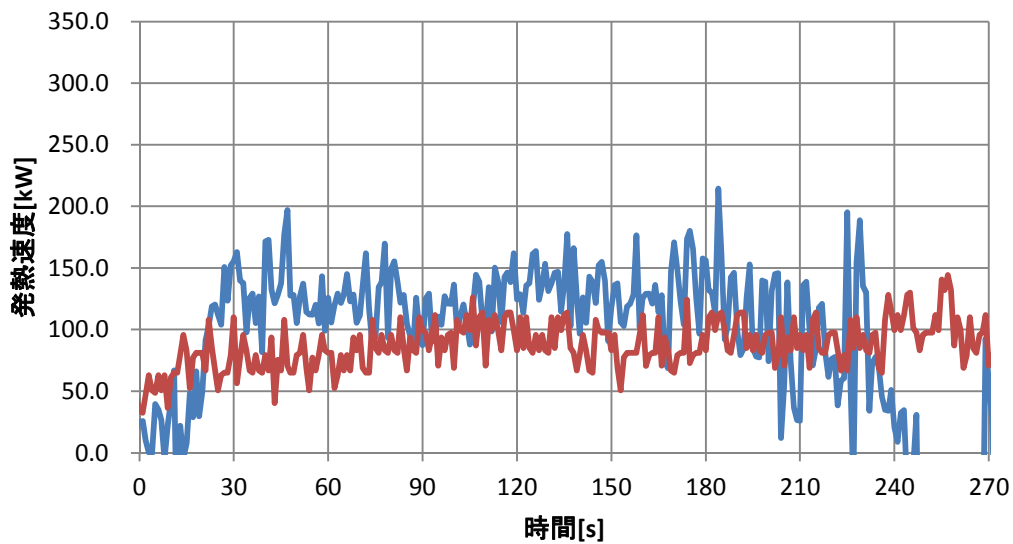


図 3.28 火源ヘプタン 0.1 m² の発熱速度 (青・赤)

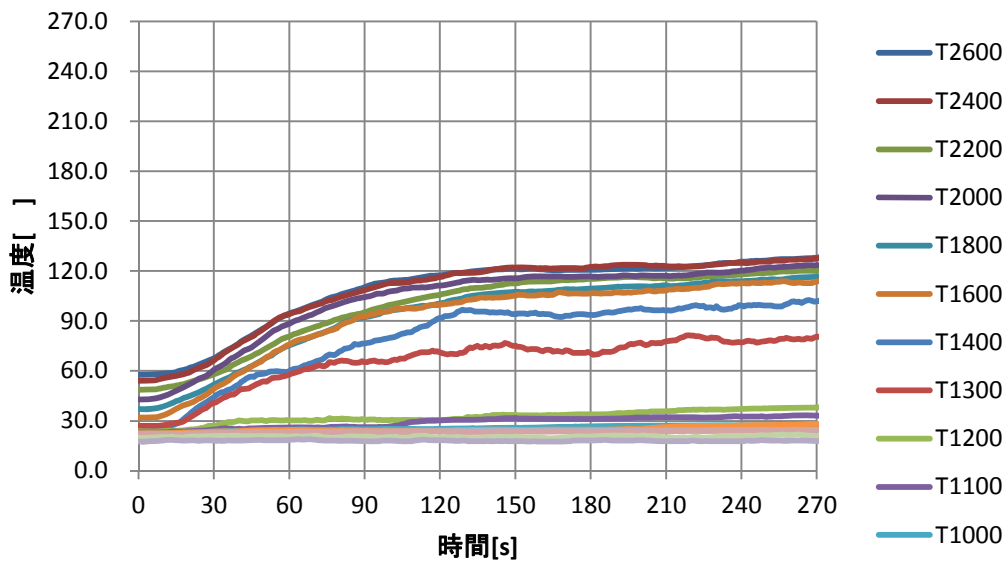


図 3.29 火源へプタン 0.1 m² の区画内温度推移

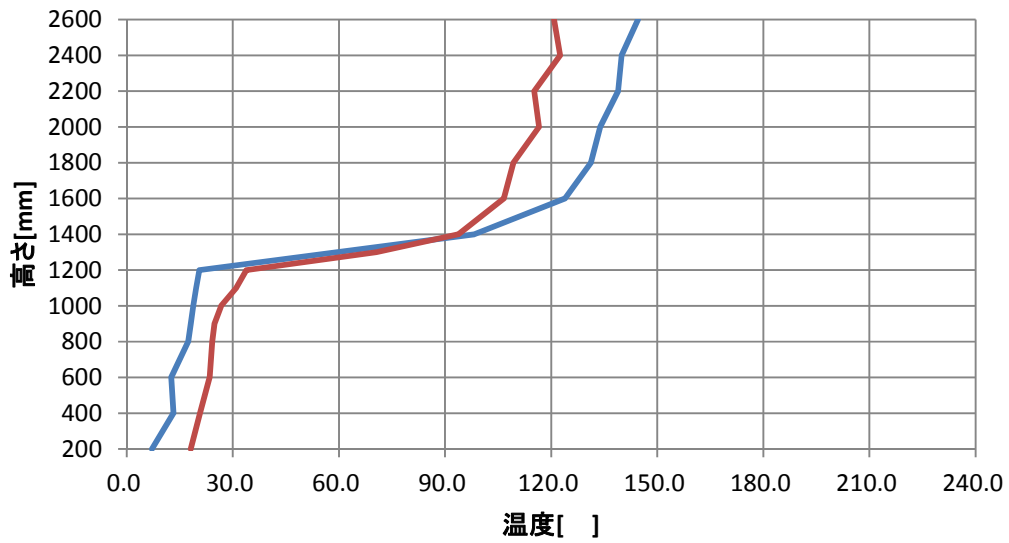


図 3.30 火源へプタン 0.1 m²の区画内垂直温度分布(180s) (青・ 赤)

(4) ヘプタン 0.25 m² (実験)

表 3.12 および図 3.21 ~ 図 3.33 に火源ヘプタン 0.25 m² 燃焼時の区画内条件測定結果を示す。本実験で用いた火源の中で最も発熱速度が大きく、煙層温度が高くなった火源である。黒煙が発生するため、煙層の動きの目視が可能である。

表 3.12 火源ヘプタン 0.25 m² の区画内条件

火源	発熱速度	境界高さ	平均温度	境界温度	CO ₂ 濃度
ヘプタン 0.25 m ²	289.9kW	1150mm	204.4	191.7	2.67%

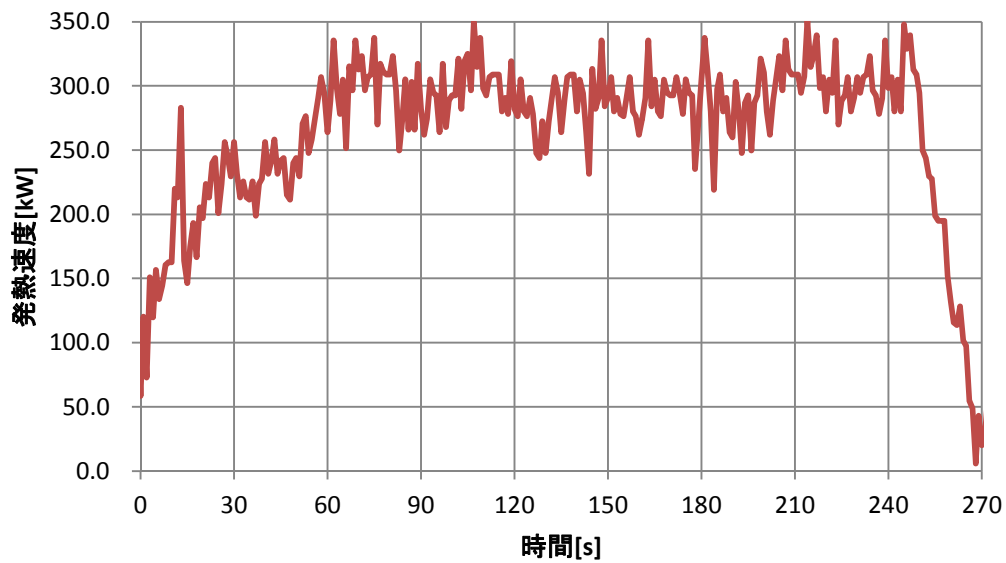


図 3.31 火源ヘプタン 0.25 m² の発熱速度

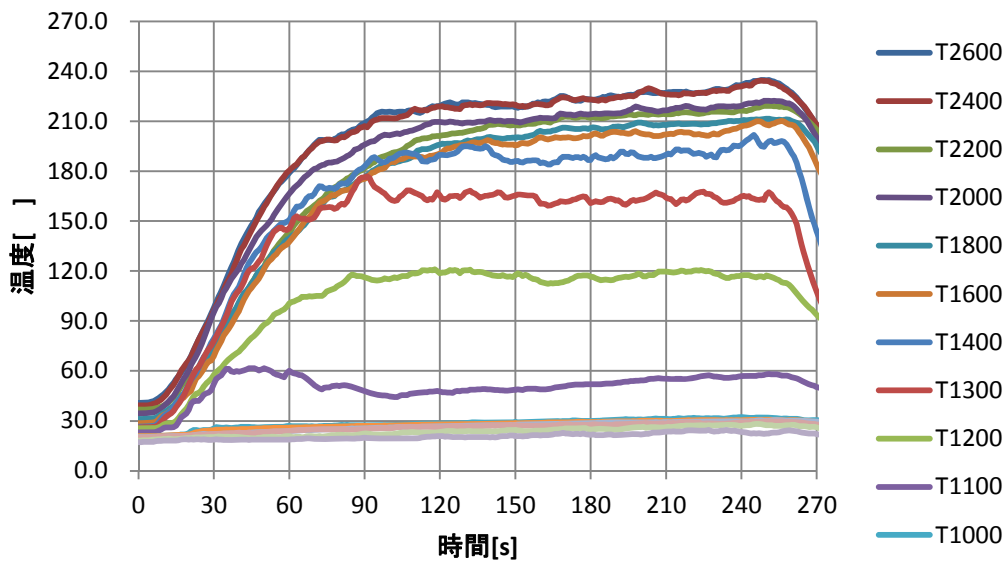


図 3.32 火源へブタン 0.25 m²の区画内温度推移

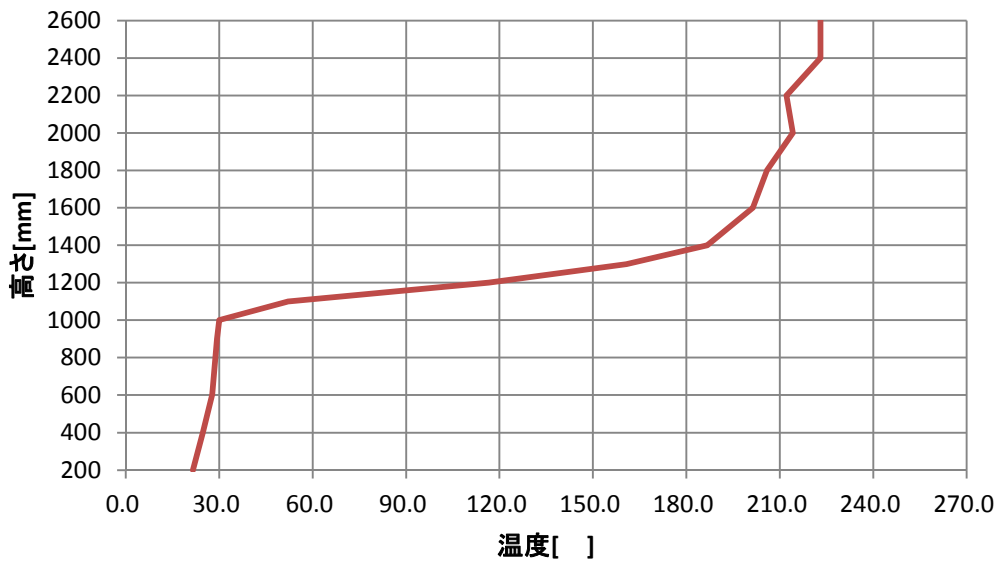


図 3.33 火源へブタン 0.25 m²の区画内垂直温度分布(180s)

(5) 区画内条件まとめ

表 3.13 に区画内条件の一覧を示す。

表 3.13 区画内条件まとめ

火源	発熱速度	境界高さ	平均温度	境界温度	CO ₂ 濃度
メタノール 0.1 m ²	67.0kW	1150mm	66.4	59.0	0.58%
メタノール 0.25 m ²	134.0kW	1100mm	103.6	96.8	0.91%
メタノール 0.25 m ²	134.0kW	1100mm	110.1	107.7	1.13%
ヘプタン 0.1 m ²	111.5kW	1250mm	132.1	118.3	1.19%
ヘプタン 0.1 m ²	89.2kW	1250mm	105.1	96.2	1.31%
ヘプタン 0.25 m ²	289.9kW	1150mm	204.4	191.7	2.67%

また本実験では散水を行う理由から流入口を限定させることができなかったが、実験では開口部を通過する煙の温度と風速の測定を行っている。風速データの相対的な妥当性検証のために、式(3.2)を用いて単位時間あたりに開口部から流出している熱量 Q_s [kW]を算出した。

$$Q_s = \sum \rho_s v_s a (T_s - T_0) C_p \quad (3.2)$$

ρ_s [kg/m³]は密度、 v_s [m/s]は流速、 T_s [K]は温度、 T_0 [K]は初期温度を表し、空気の定圧比熱 C_p [J/gK]は1.006とした。図3.34に開口部流出熱量と火源の発熱速度との関係を示す。開口部流出熱量が火源の発熱速度に応じて比例する結果を示していることを確認できる。

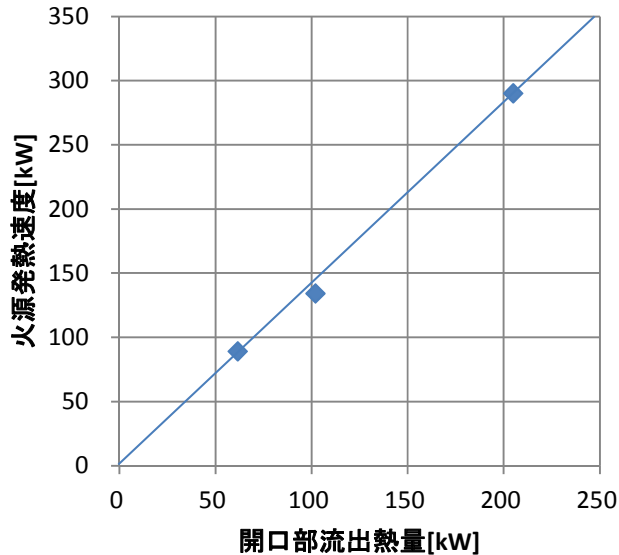
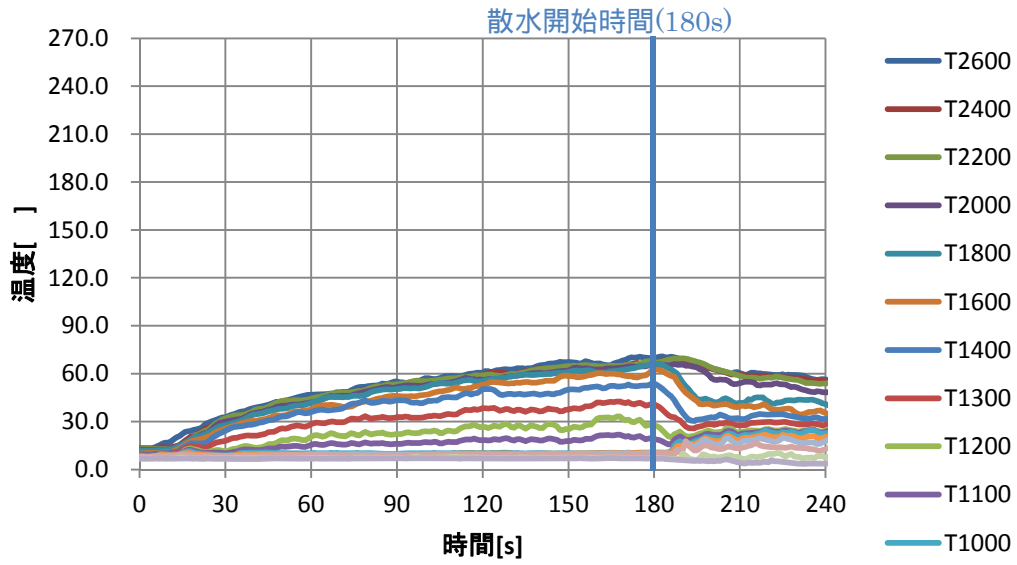


図 3.34 開口部流出熱量と火源発熱速度

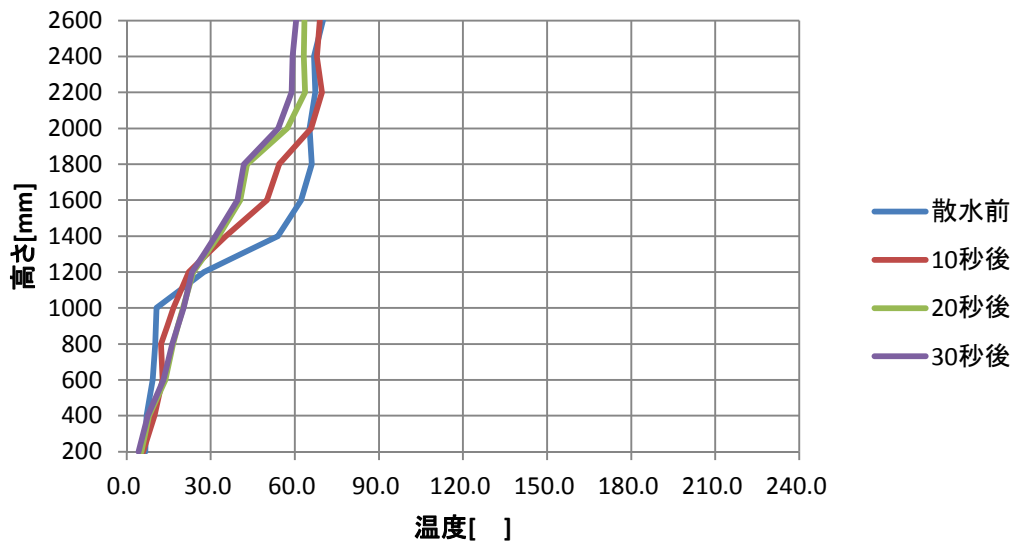
3.3.2 散水による温度の変化

図 3.35～図 3.42 に、各火源ごとに水量の大きく異なる二つのノズル I20 と I80 を例として、温度推移および垂直温度分布を示す。温度推移のグラフに示すように、散水は着火 180 秒後から行っている。垂直温度分布は散水直前から、PIV 測定を行った 30 秒後まで 10 秒ごとに示している。

温度推移を見ると、散水開始直後から煙層の温度が低下していく様子が見て取れる。さらに垂直温度分布を見ると、煙層の温度低下に加え、下層の温度が上昇していることが分かる。これらの変化はいずれの火源においても I20 よりも I80 のほうが大きいことをはっきりと見ることができる。また火源へブタン 0.25 m²と I20 (図 3.41) の垂直温度分布の変化をみると、煙層温度の緩やかな低下は見られるが、下部層の温度はほとんど変化していない様子が見て取れる。

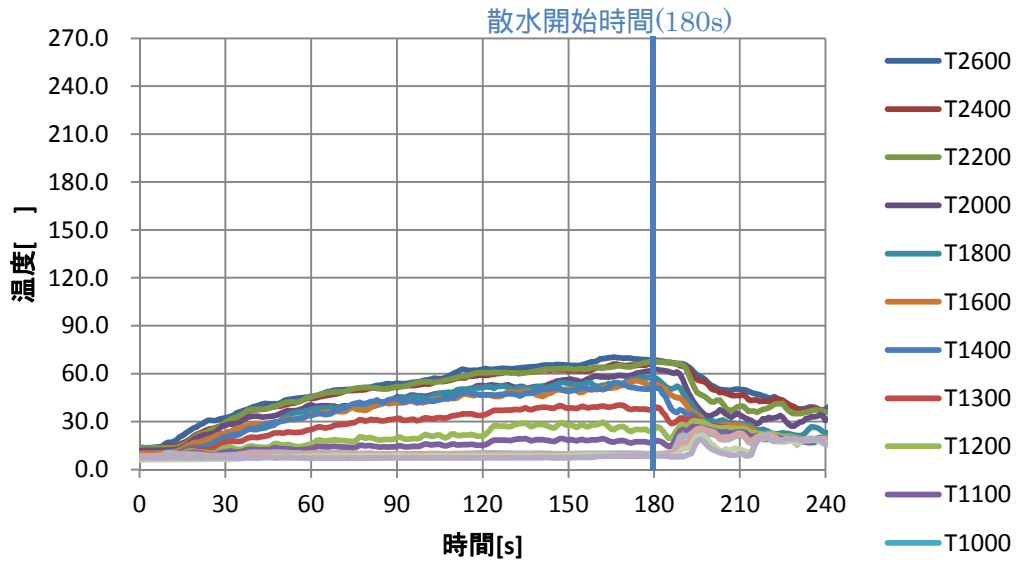


a) 温度推移

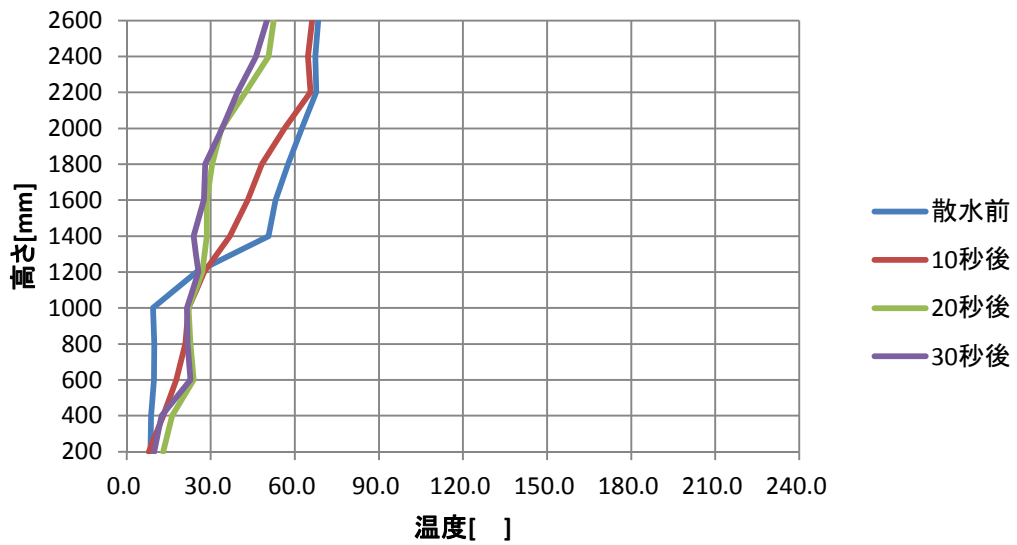


b) 垂直温度分布

図 3.35 温度変化 (火源メタノール 0.1 m²: ノズル I20)

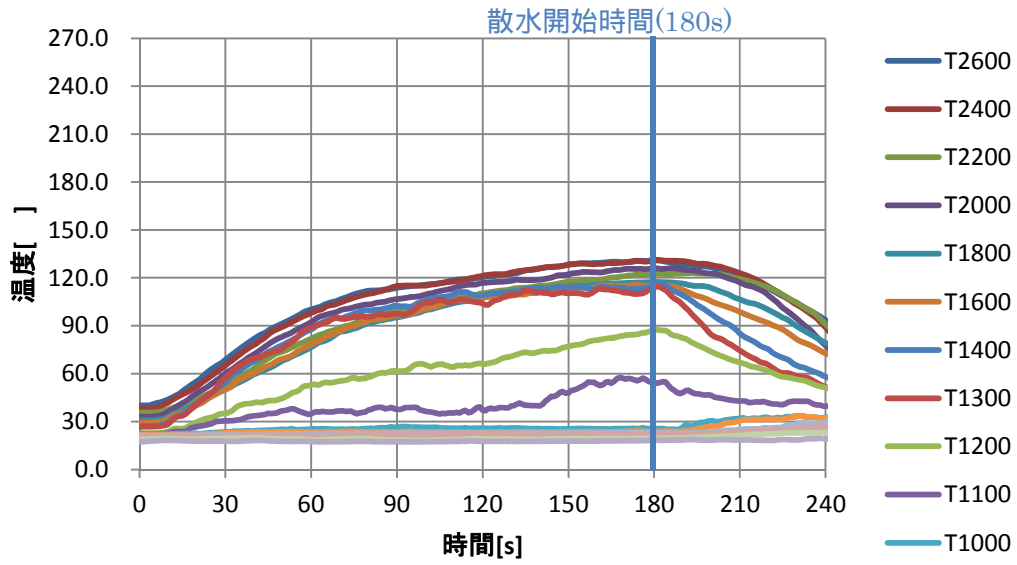


a) 温度推移

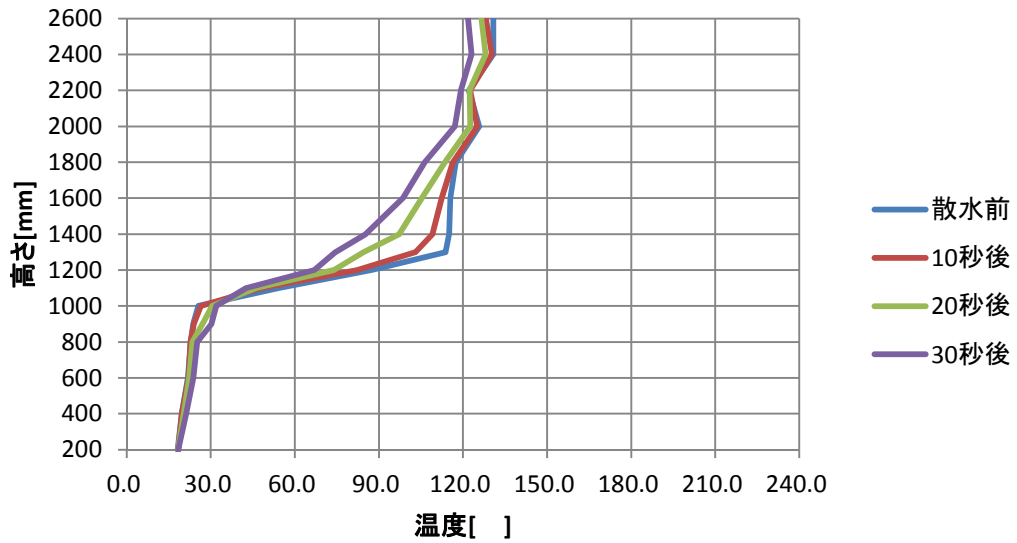


b) 垂直温度分布

図 3.36 温度変化 (火源メタノール 0.1 m²: ノズル I80)

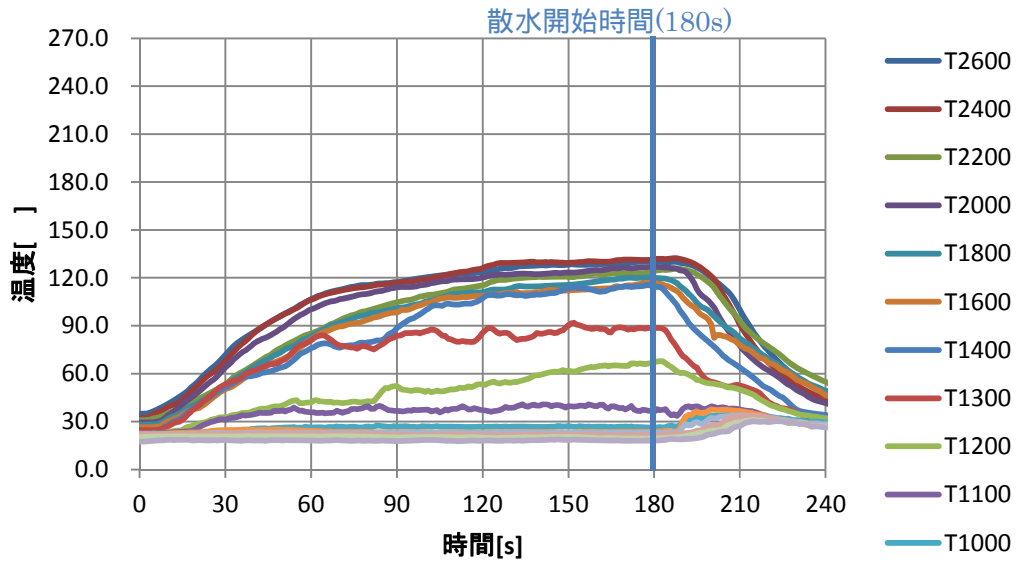


a) 温度推移

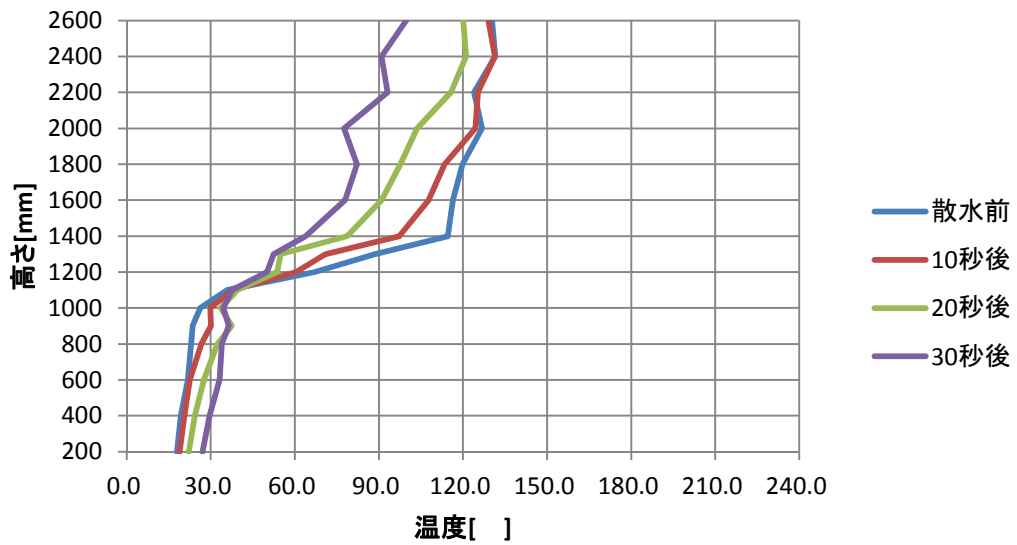


b) 垂直温度分布

図 3.37 温度変化 (火源メタノール 0.25 m² : ノズル I20)

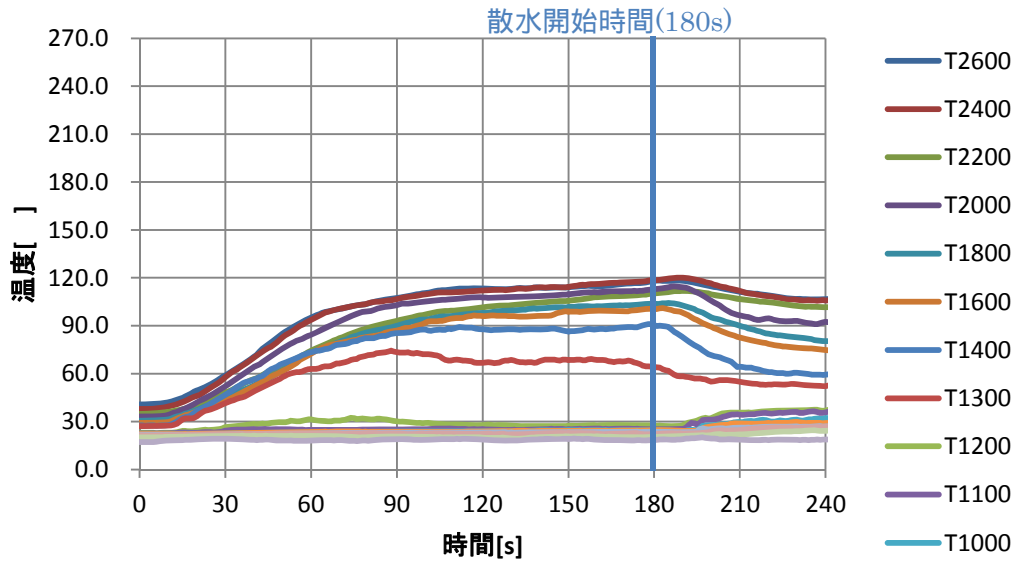


a) 温度推移

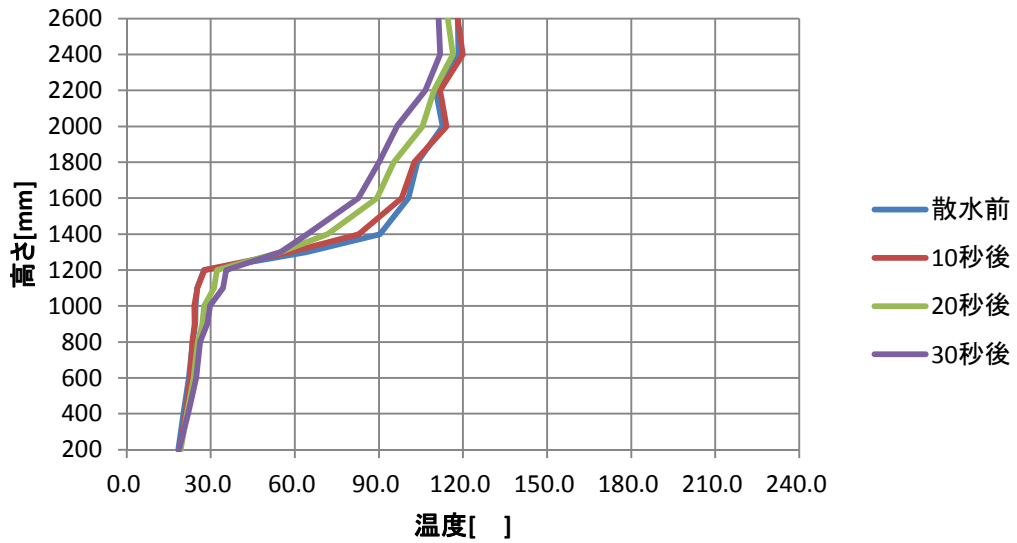


b) 垂直温度分布

図 3.38 温度変化 (火源メタノール 0.25 m² : ノズル I80)

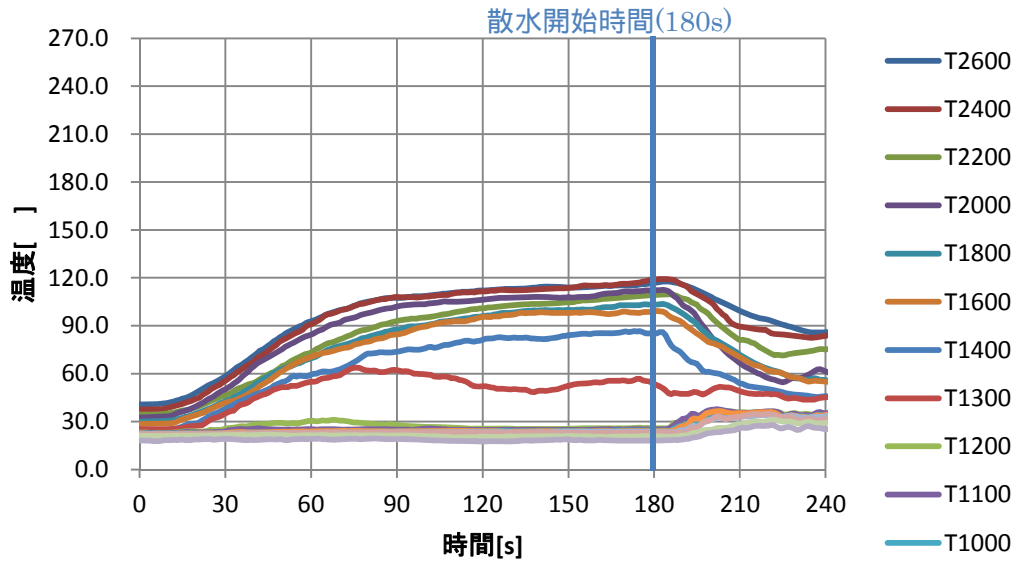


a) 温度推移

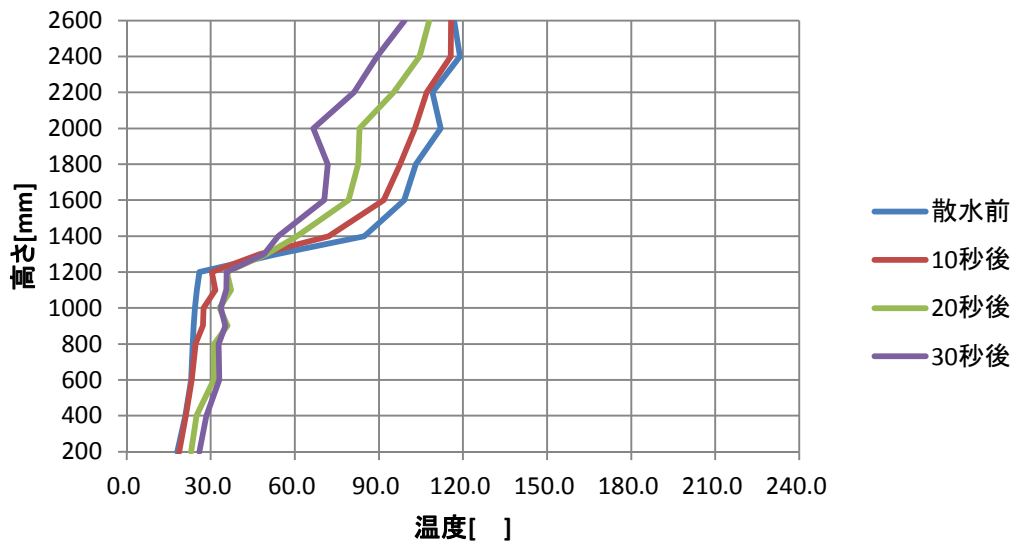


b) 垂直温度分布

図 3.39 温度変化 (火源へプタン 0.1 m² : ノズル I20)

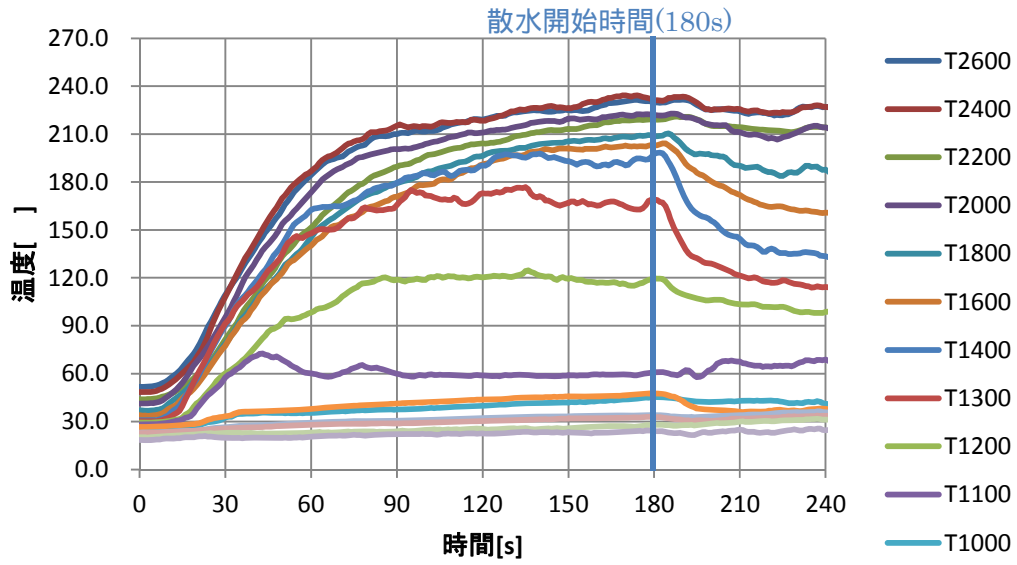


a) 温度推移

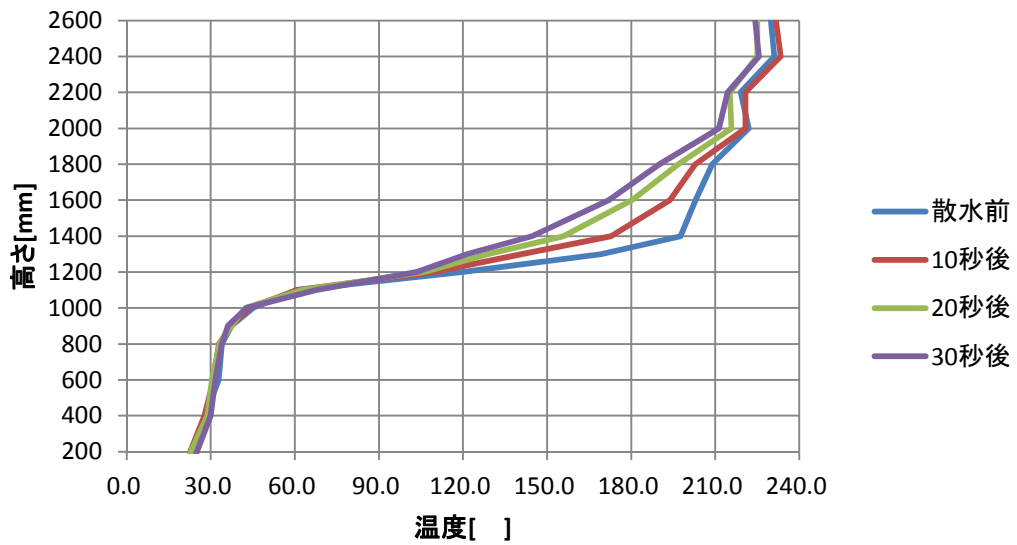


b) 垂直温度分布

図 3.40 温度変化 (火源へプタン 0.1 m² : ノズル I80)

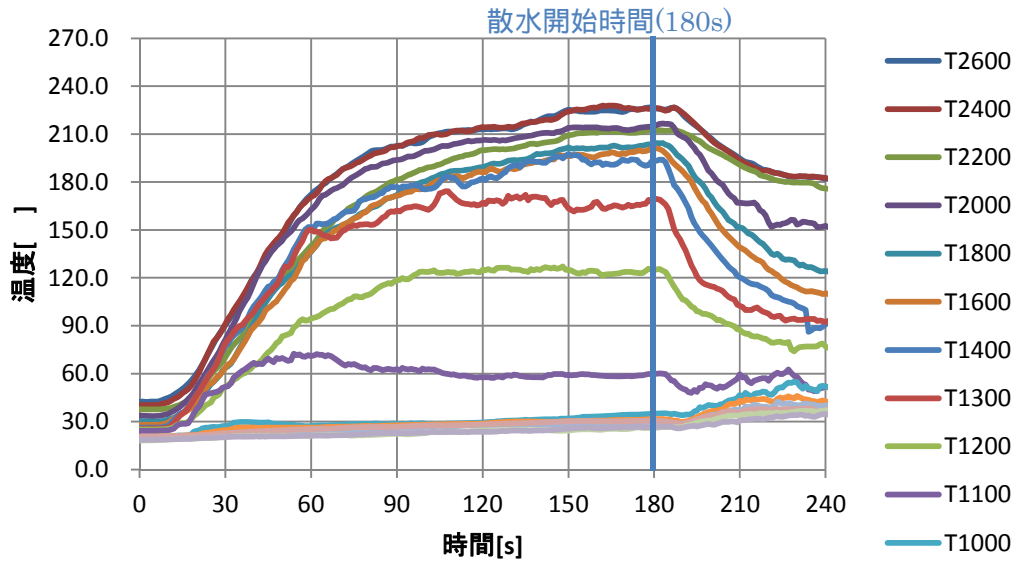


a) 温度推移

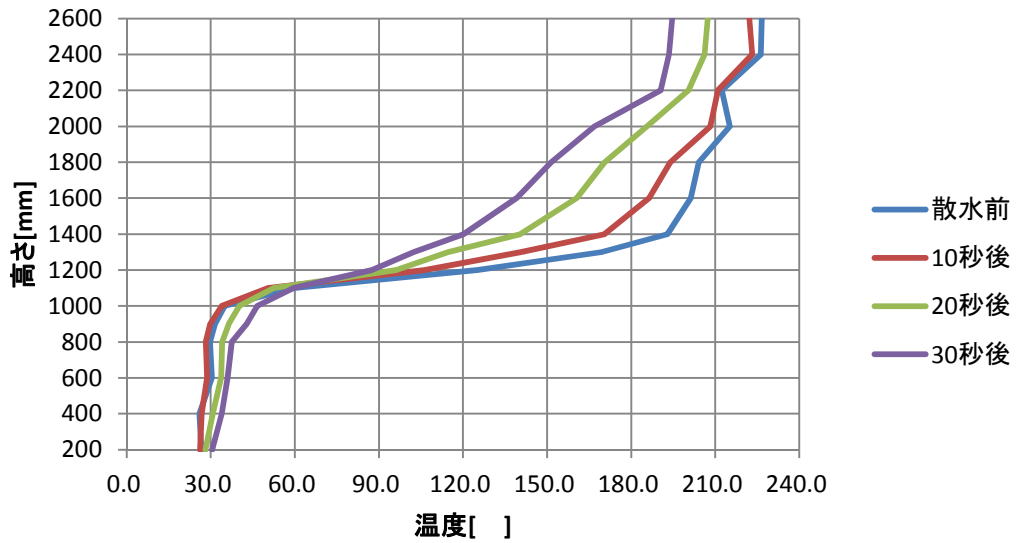


b) 垂直温度分布

図 3.41 温度変化 (火源へブタン 0.25 m²: ノズル I20)



a) 温度推移



b) 垂直温度分布

図 3.42 温度変化 (火源へブタン 0.25 m²: ノズル I80)

図 3.43 と図 3.44 に下部層の上昇温度を火源ごとに示す。全体的に I80 の上昇温度が特に大きく、続いて I40、K80、I20 と上昇温度が小さくなっている傾向が見て取れる。またいずれの火源においても高さ 1000mm から高さ 200mm まで全体で、おおよそ均一に温度の上昇が見られる。ただし I20 はメタノール 0.25 m² 等、最下部では上昇していないものが多い。またヘプタン 0.25 m² は他の火源と比較して、上昇温度が低いことが分かる。

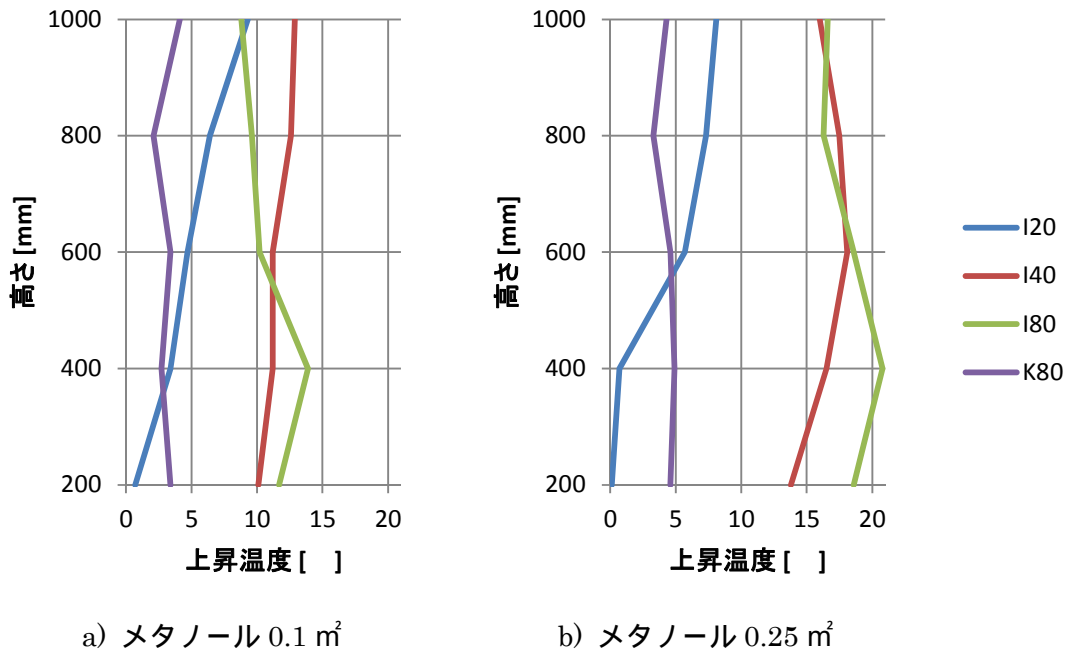
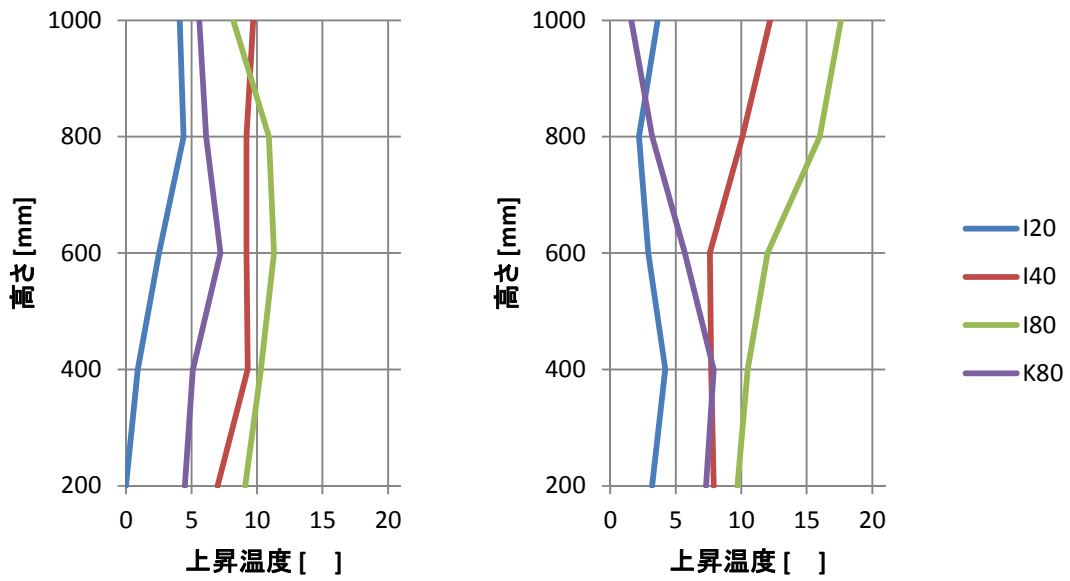
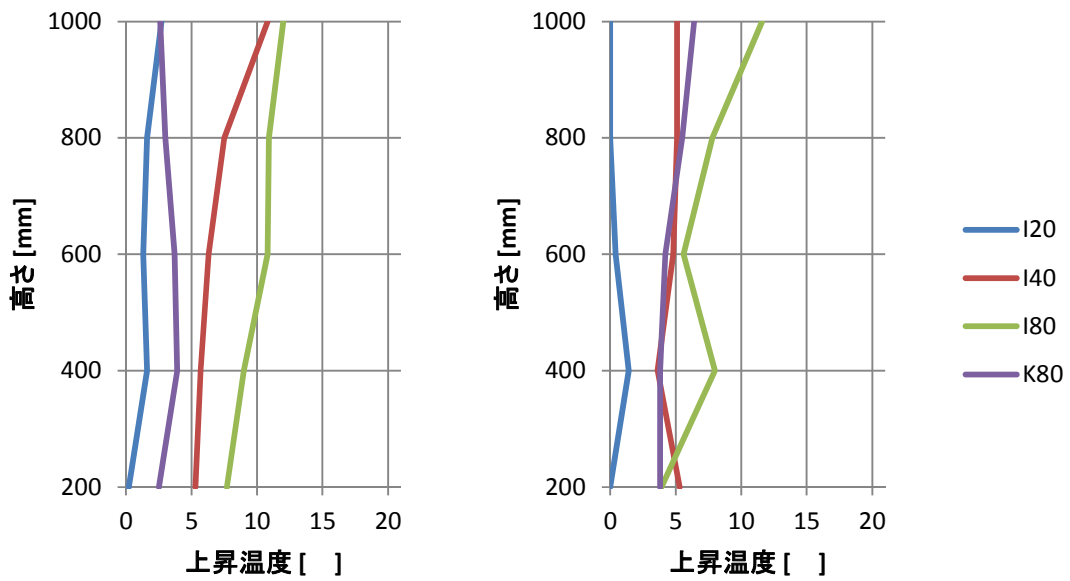


図 3.43 下部層の上昇温度 その1



a) メタノール 0.25 m²

b) ヘプタン 0.1 m²



c) ヘプタン 0.1 m²

d) ヘプタン 0.25 m²

図 3.44 下部層の上昇温度 その2

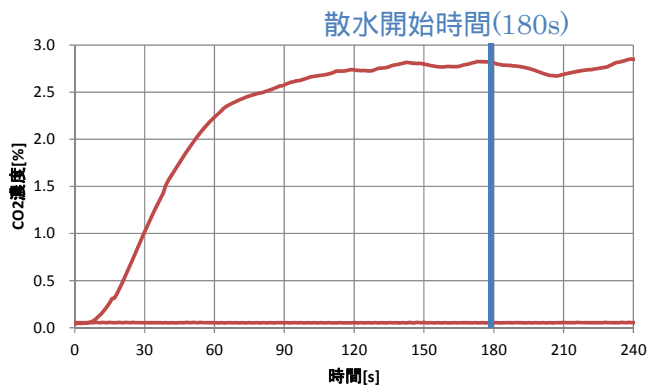
3.3.3 散水によるCO₂濃度の変化

図 3.45 と図 3.46 に火源ヘプタン 0.25 m²を例として、高さ 2600mm の位置（煙層）と高さ 200mm の位置（床付近）の CO₂濃度の推移を示す。併せて散水から 30 秒後（散水後）の区画の映像を示す。I80 を見ると煙層の濃度が下がり、同時に床付近の濃度が上がっている様子をはっきりと分かる。映像からは、煙層と下部層との明確な境界が失われていることを見て取れる。I40 と K80 を見ると煙層の濃度は少し下がっているものの、床付近の濃度変化はごくわずかである。I20 では煙層で若干の濃度低下があるものの、床付近での変化は見られない。映像からは、煙層が下部層に拡散せず、明確な煙層境界を保っている様子が見て取れる。

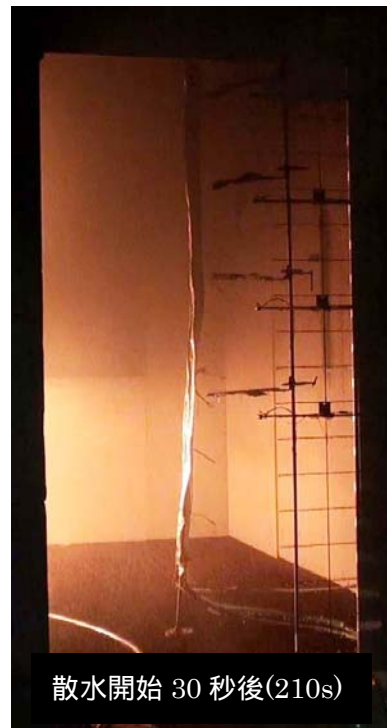
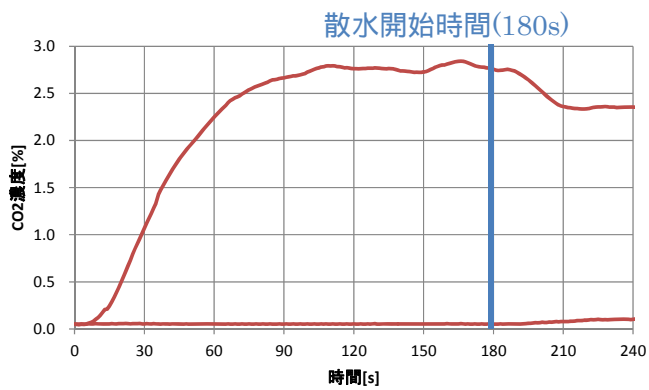
表 3.14 に各パターンの散水から 30 秒後の床付近の CO₂濃度の上昇値を示す。表の数値から、ノズルごとに極端に傾向が分かれていることが見て取れる。特に I20 ではいずれもほとんど変化しておらず、I80 では全ての火源において大きく上昇している。I40 ではあまり変化のないものから大きく上昇しているものまで様々あり、K80 では全体的に変化は少ない。

表 3.14 散水 30 秒後の床付近の CO₂濃度上昇値[%]

火源	I20	I40	I80	K80
メタノール 0.1 m ²	0.01	0.21	0.21	0.07
メタノール 0.25 m ²	0.00	0.07	0.27	0.06
メタノール 0.25 m ²	0.00	0.17	0.28	0.03
ヘプタン 0.1 m ²	0.00	0.00	-	0.02
ヘプタン 0.1 m ²	0.00	0.11	0.25	0.07
ヘプタン 0.25 m ²	0.00	0.03	0.25	0.02

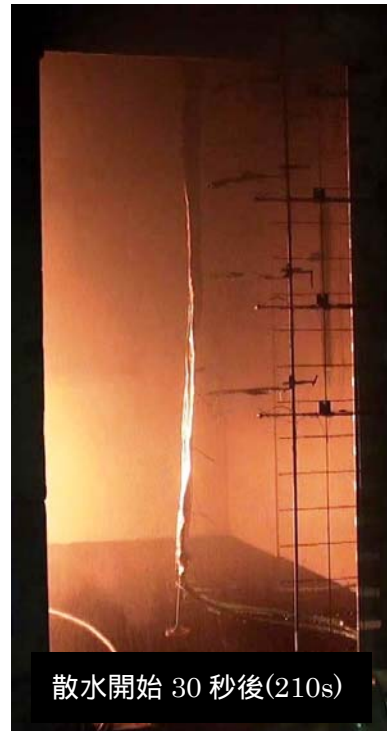
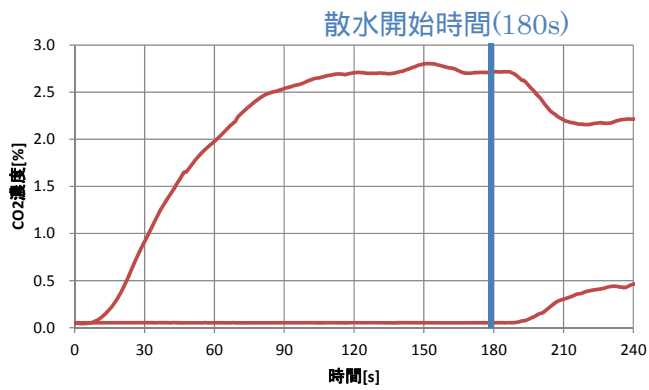


a) ノズル I20

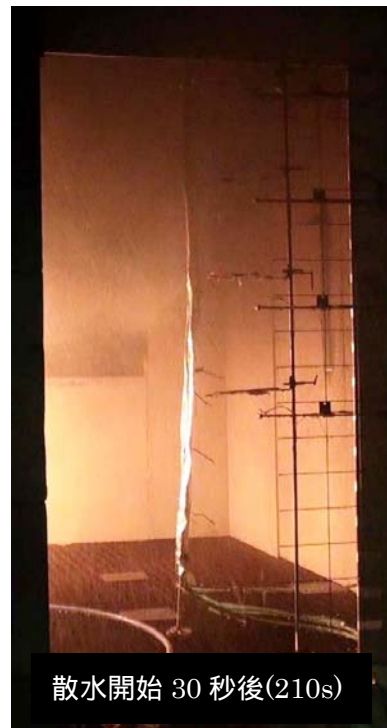
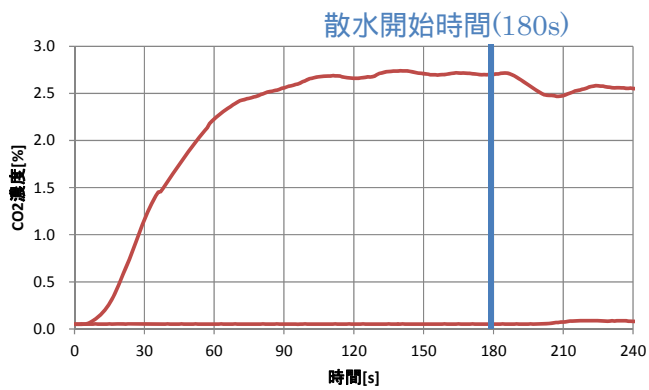


b) ノズル I40

図 3.45 火源へブタン 0.25 m²の散水時 CO₂ 濃度推移と映像 その 1



a) ノズル I80

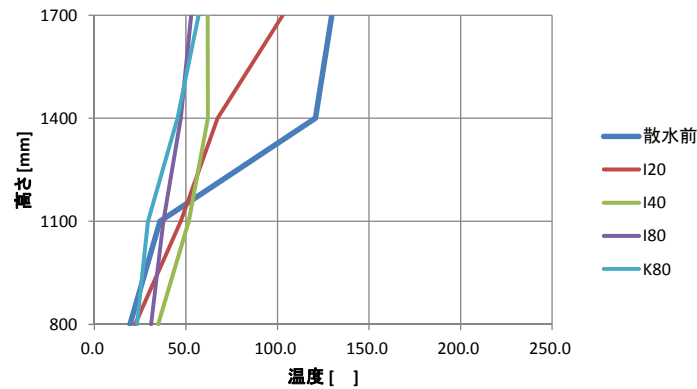


b) ノズル K80

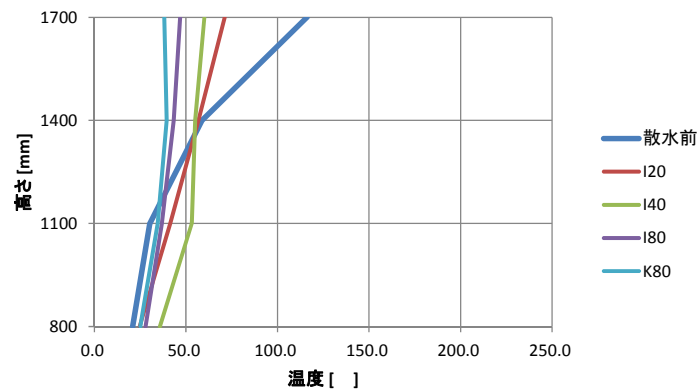
図 3.46 火源へブタン 0.25 m²の散水時 CO₂ 濃度推移と映像 その 2

3.3.4 散水による開口部温度・風速の変化

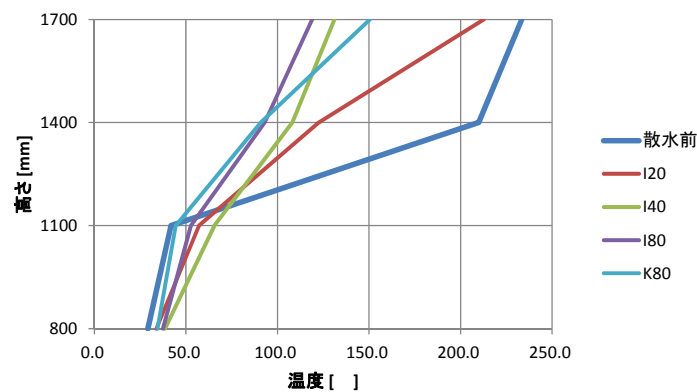
図 3.47 に散水開始から 30 秒後の開口部温度の測定結果を示す。開口上端近くではいずれも温度が下降しており、散水量が多いほど温度の下降が大きいことが分かる。また下方では温度の上昇も見られ、区画内温度と同様に煙層が拡散し、温度が均一化されている様子が見て取れる。



a) メタノール 0.25 m²



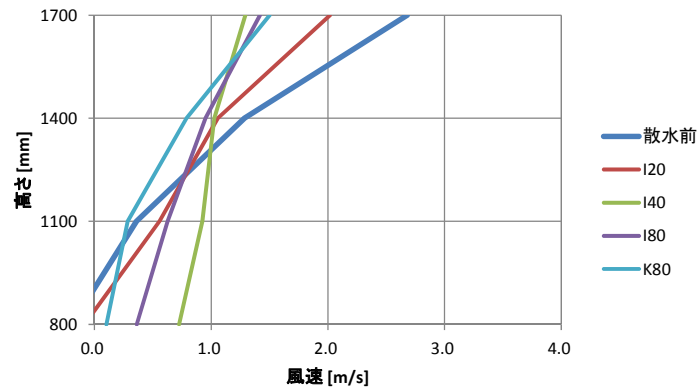
b) ヘプタン 0.1 m²



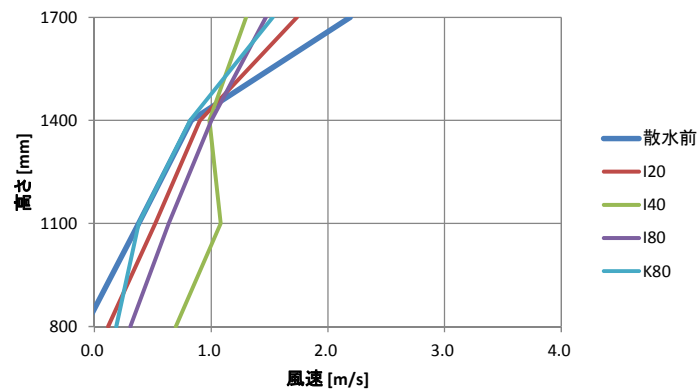
c) ヘプタン 0.25 m²

図 3.47 開口部温度測定結果

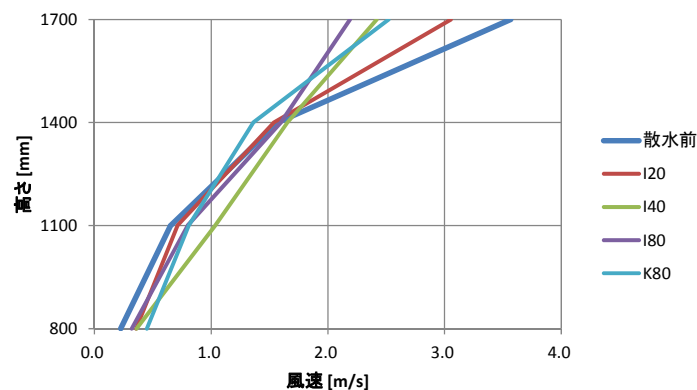
図 3.48 に散水開始から 30 秒後の開口部風速の測定結果を示す。風速は区画から流出する方向を示している。散水前と比較して、開口上端近くでは小さく、下方では大きくなっていることが見て取れる。このことから煙層厚さが増していることが考えられる。温度と異なり、影響の大きさが散水量だけによらないことも見て取れる。また火源へプタン 0.25 m²の下方の流速は比較的变化が小さく、散水の影響をあまり受けていないことが分かる。



a) メタノール 0.25 m²



b) ヘプタン 0.1 m²



c) ヘプタン 0.25 m²

図 3.48 開口部風速測定結果

3.4 下降気流

3.4.1 PIVとは

(1) 概要

PIV(Particle Image Verocimetry)とは、連続する2時刻の画像上の粒子像からその移動量を求め、速度を測る方法である。まず、流れに追従するトレーサーを流れの中に撒き、記録面にライトシートをストロボ照射することで可視化する。これを CCD カメラにより撮影し、得られた画像を解析することで、記録面のベクトルを得ることができる。

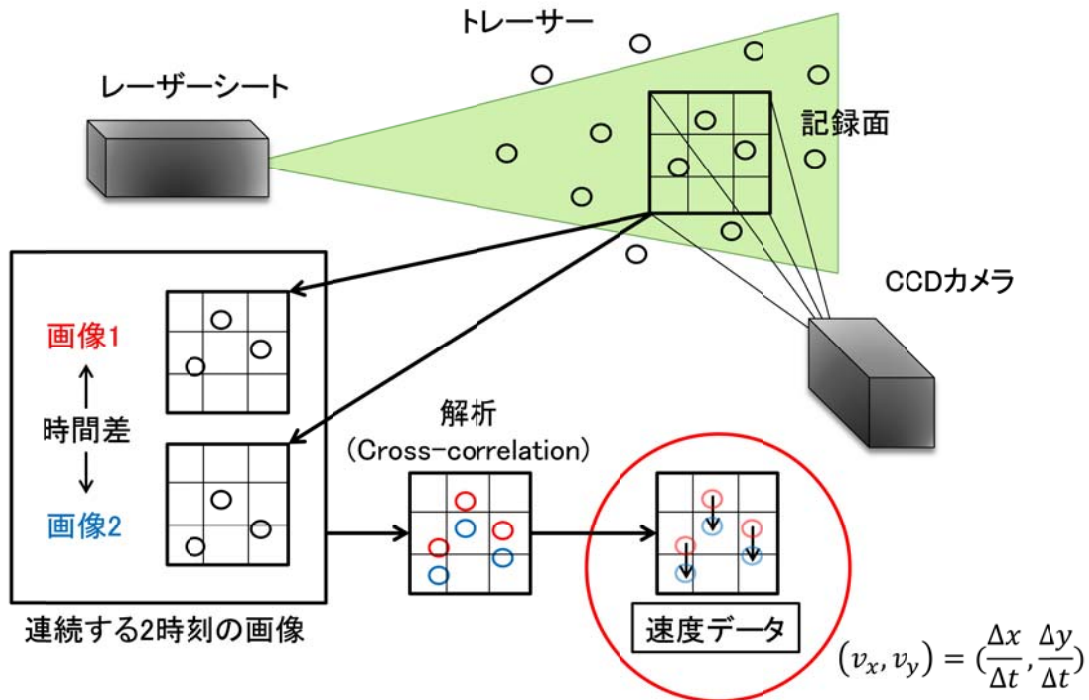


図 3.49 PIV 概要図

(2) PIVの特徴^[13]

流体計測法としては、熱線流速計とレーザードップラー流速計がすでに確立された流体計測手法としてあり、時間分解能が非常に高いという特徴を持つ。しかし複数の速度成分を同時計測するためには、複数を組み合わせることが必要となる。またこれらの手法は流れ場の1点の速度情報しか提供しないため、複雑な流れ場の詳細を必要とする流体計測の要求を必ずしも満たせない。

これらの計測手法と比較すると、PIVの流体測定手法の特徴は2次元測定あるいは3次元測定の高さにあるといえる。PIVの時間分解能は、撮影装置のフレームレート(30Hz~1kHz程度)あるいは照明のパルスレーザーの繰り返し周波数(10Hz~30Hz程度)の制限を受け、あまり高くはない。

(3) レーザー

Nd:YAG レーザーが、現在の PIV で標準的に使用されているレーザー光源であり、レーザー媒質は YAG (Yttrium Aluminum Garnet) の母体結晶に Nd を活性物質として加えている。励起は光によって行われ、光源にはアークランプやフラッシュランプが用いられる。なお、発振周波数は $1.06\ \mu\text{m}$ (赤外) であるが、非線形光学結晶を用いることで倍波 (532nm) にして用いられる。発振が短時間で起こること、小型で高出力パルスが得られることから、PIV では高解像度カメラと YAG レーザー光源との組み合わせが標準的に用いられるようになってきている。

Nd:YAG レーザーでは図 3.50 に示すようなレーザー照明システムが用いられている。CCD カメラとセットで用いて、連続する 2 時刻の瞬間画像を取得するのに用いられる。この照明装置では、二つの小型 Nd:YAG レーザー発振器の Q スイッチにより短い (数 ns 程度) 大出力のパルスレーザーを連続的に繰り返し発生させている。Q スイッチは、光共振器の間に特殊なシャッターを設けてレーザー発振を抑え、レーザー媒質の蓄積エネルギーが大きくなったところでシャッターを開いて瞬間的にレーザー発振を生じさせる方法が用いられる。二つの Nd:YAG レーザーからのレーザービームは、ミラーと偏光素子により幾何学的にはほぼ同軸かつ同じ偏向角で工学レンズ系に入射され、光シートが形成される。このとき、2 枚の光シートは同一平面になるよう調節される。ダブルパルスの発光時間間隔は、カメラの外部同期信号などと同期させて任意に設定できるが、それぞれのパルスの繰り返し周波数は、レーザーの励起に要する時間のため最大 30Hz 程度である。

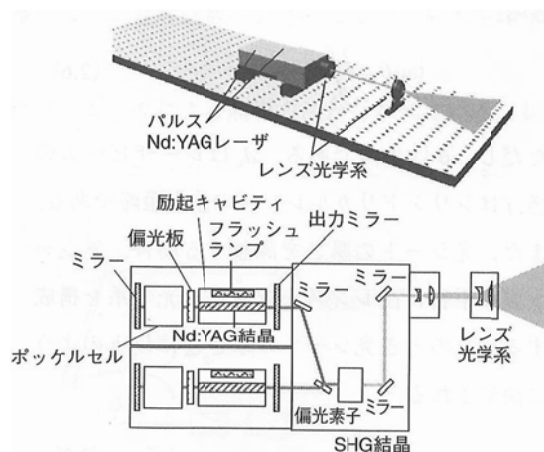


図 3.50 ダブルパルスレーザー

(4) トレーサー

PIV はトレーサー粒子像を直接の解析対象とするので、粒子の散乱特性を把握しておくことは重要である。PIV では 500 ~ 600nm 程度の波長の光源で、粒径 $1\mu\text{m}$ ~ 数十 μm のトレーサー粒子を照明することが多いので、散乱光の強度はほぼ粒子径の 2 乗に比例すると考えてよい。よって、等方性の均質球形粒子による平面波の散乱はミー理論によって解析される。図 3.51 はミー理論による散乱光強度を示したもので、空気中のオイルミスト(直径 $2\mu\text{m}$ 、屈折率 1.5) を Nd:YAG レーザー ($\lambda = 532\text{nm}$) で照明した場合の結果である。なお、散乱光強度は照明光が非偏光の場合で、レーザーは左方より当てられている。散乱光強度は対数表示されていて、散乱の方向により大きく強度が変化している。散乱光のうち光の回折に支配される前方散乱が最も大きく、側方への散乱光が最も弱い。現在の PIV における可視化は、ほぼ球形をした微小なトレーサー粒子をレーザー光シートで照明し、この粒子上での散乱光を側方から観察することが主流である。このように、小さい粒子の弱い側方散乱を用いるので散乱光強度は不足しがちであり、このため Nd:YAG レーザーなどの発光強度の高い照明光源が用いられる。

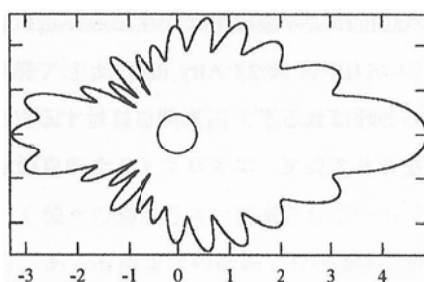


図 3.51 オイル粒子の散乱光強度

トレーサー粒子のシーディングは、計測対象の流体の物性に影響を与えない程度に行われ、瞬時速度場の計測不能領域を少なくするためにできるだけ均一に行う必要がある。同時に画像解析手法に適合するように粒子空間密度の制御を行う必要がある。

表 3.15 に代表的なトレーサー粒子の一覧を示す。気流へのトレーサー粒子には、気体との密度差が大きいため、流体への追従性を考慮して粒径の小さな粒子が使用される。中でも植物性オイルの液滴トレーサー粒子 (DEHS 等) は、平均粒径が約 $2\mu\text{m}$ で粒径のばらつきが少なく、また大量発生が容易であること、粒子の寿命が数時間と長いこと、装置などに付着した油滴は時間と共に蒸発して装置をよごしにくいこと、および毒性がないことなどから、PIV の気流用のトレーサー粒子として頻繁に使用されている。図 3.52 にオイル粒子発生装置の一例を示す。圧力容器中のオイルの中にラスキンノズル (Laskin nozzle) をおき、ノズルから外気圧との差圧が 0.5 ~ 1 気圧程度の圧縮空気をオイル中に吹き込み空気の泡を発生させる。気泡は浮力により上方に移動しオイル表面に運ばれ、表面で破裂して気泡中の微細な油滴が容器の気体中に飛散する。容器の上部には衝突板が設けられていて、ここで径の大きな油滴は衝突板への付着により捕獲される。

表 3.15 代表的なトレーサー粒子

粒子	材質	粒子径 [μm]	
		液体用	気体用
固体	イオン交換樹脂	30~700	1~30
	ポリスチレン	10~100	0.5~10
	アルミニウム	2~7	2~7
	ガラス球	10~100	—
	コーティング粒子	10~500	10~50
	マグネシウム	—	2~5
	煙	—	< 1
	酸化チタン	—	1
液滴	オイル	50~500	0.5~10
	水	—	0.5~10
中空	シリカ	—	0.5~5
	チタニア	—	0.5~2
	プラスチック	10~50	10~50
	ガラス	10~150	10~100
	ソープバブル	—	500~2000

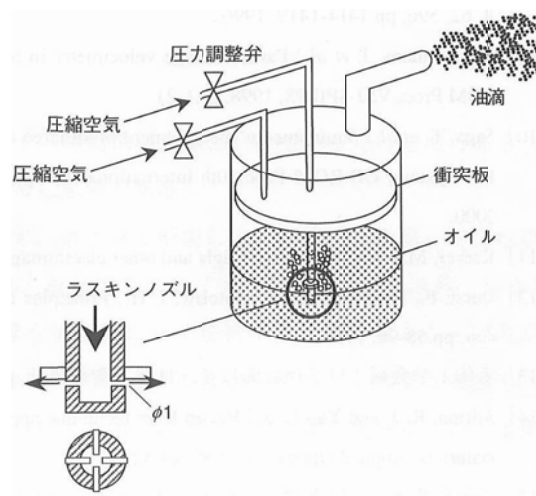


図 3.52 気流用オイル粒子の発生装置

(5) 画像取得

PIVにおける画像取得と画像解析の関わりは非常に重要である。PIVでは、レーザーとトレーサーにより可視化された流れ場をデジタル画像情報として記録し、コンピューターを用いて粒子の移動情報を抽出し、それを元に速度分布を決定する。

PIVの画像は、3次元空間に存在する物体によって散乱もしくは透過された光の上方を2次元平面上に投影したものである。一般に、画像から情報を抽出する場合には、輝度の2次元分布が用いられる。そして、1枚のデジタル画像は何個の画素から構成されているか、輝度値が何個の離散的な量子化レベルで表されているかによってデジタル画像の良否が決まる。図3.53に一般的なPIV画像を示す。この画像を細かく拡大していくと、一定の輝度をもった四角の画素が見えてくる。この画像がコンピューター上においては輝度という整数値をもっている。

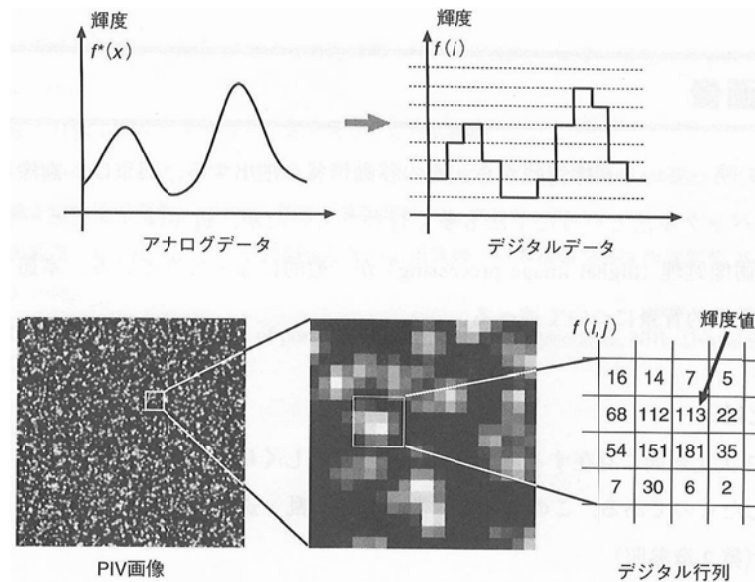


図 3.53 デジタルデータ

PIVにおいては、流体中に浮遊するトレーサー粒子が流体の動きを表していると考え、粒子からの散乱光情報を画像として捉え、粒子投影像の動きを解析する。つまり、3次元空間中の粒子投影像の画像上における移動、もしくは軌跡を解析することで粒速を算出する。このためには粒子の投影像の動き、あるいは動いた跡を画像中に記録する必要がある。現在のPIVではその方法として、カメラの記録とフラッシュを同期し、1枚の画像上に特定の1時刻の粒子像を記録する方法が主に用いられている。2時刻もしくは連続した数時刻の画像を解析することで粒子の移動距離を算出する。記録されている粒子の時刻がわかっているので、画像間の粒子の対応付がとれれば方向を確定できる。

(6) 解析手法

PIVにおいて流速を測定する基本方針は、流れの可視化に用いられるトレーサ粒子が微小時間 t に移動する距離 X を何らかの画像計測アルゴリズムで求め、その移動距離を t で除して流速を間接測定するというものである。画像計測で移動量ベクトル(X, Y)が得られると、速度ベクトル(u, v)を求めることができる。図 3.54 にその概念図を示す。右上方へ輝度値パターンが移動しているのがわかるが、その移動を破線で囲った位置への領域の移動と考える手法を画像相関法と呼び、PIV で最も標準的に利用されている手法である。

画像相関法は 2 時刻の輝度関数を用いて、画像上における粒子パターンの変異を解析する。一般的には画像を検査領域と呼ばれる小領域に分割し、その分割された領域内の輝度値パターンを用いて、領域内の平均移動量を算出する方法である。すなわち 2 画像間でパターンの類似している領域を探索することになるが、その類似度を相関関数などによって評価するため、一般に画像相関法と呼ばれる。この手法に用いられる画像は中間輝度レベルを多く持つ濃淡画像であり、比較的粒子数密度の高いものが利用される。画像上の輝度変化を用いて解析することになるため、個々の粒子像が分別できる必要はない。画像相関法は輝度値パターンを基準に測定するため、基本的に 2 次元速度分布算出に用いられる。この解析法では、多い場合でも 2 枚の画像しか必要がない、測定点が任意の位置に設定できるという長所と、照明および画像取り込みタイミングを制御することで計測精度が向上するという特徴があり、画像相関法は PIV 解析手法として広く普及している。

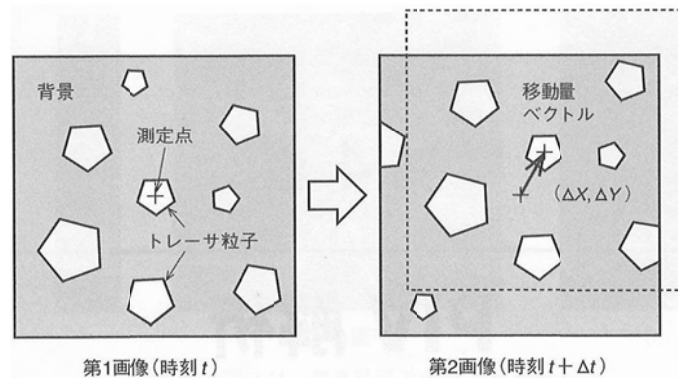


図 3.54 画像相関法概念図

(7) 誤ベクトル除去

どのような計測ツールでも誤差はつきものであり、PIVで得られる結果も例外ではない。また、PIVは画像処理を基盤とすることから、その特有の誤差の形態が含まれる。PIVにおいて実際とは異なる誤った粒子対応付けが行われてしまうと、その結果、非常に大きな誤差を含むベクトルが現れる。このベクトルを誤ベクトルという。誤ベクトルの発生している速度分布の例を図3.55に示す。誤ベクトルは明らかにその周囲とは異なる方向、大きさをもっており、一見してそれが正しくないデータと判断することができる。画像相関法では、二つの時刻の粒子画像で相関係数が最大となる部分を対応付けるという原理を利用している。したがって、誤ベクトルの発生は、相関係数のピーク値が低い、あるいはその唯一性が不十分であるということに起因する。二つの画像のあいだでの相関係数のピーク値を下げる原因には、輝度レンジの不足や画像ノイズ、あるいは検査領域の過不足といったものがある。ただし、流体のもつ速度分布は、連続体として近似できる限り、空間的に滑らかに分布するはずであるという観点から、周囲の速度ベクトルとの比較による誤ベクトルの除去が可能となる。

誤ベクトル除去手法として、統計に基づく誤ベクトルの除去手法がある。これは、取得された速度ベクトルが、そもそも実際にありうる妥当な領域に入っているか、あるいは周囲の速度ベクトルに対して大きな偏差がないか、などを統計的に診断する手法である。周囲の8点における速度ベクトルの平均値と標準偏差、あるいは中央値を求め、差がしきい値を超えた場合に誤ベクトルと判断し、近傍のベクトルから補間を行う。

また、速度ベクトルピーク分布の評価による方法がある。図3.56に分布例を示す。速度ベクトルのほとんどが楕円で示した部分に集中しており、他にはわずかにしか分布しない。逆に、楕円の外部にある速度ベクトルデータは、誤ベクトルや計測誤差である可能性が高い。

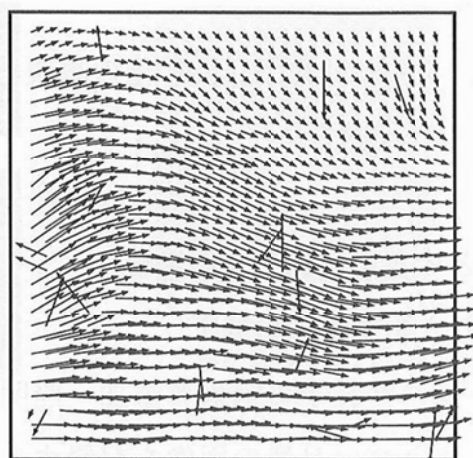


図 3.55 速度分布例

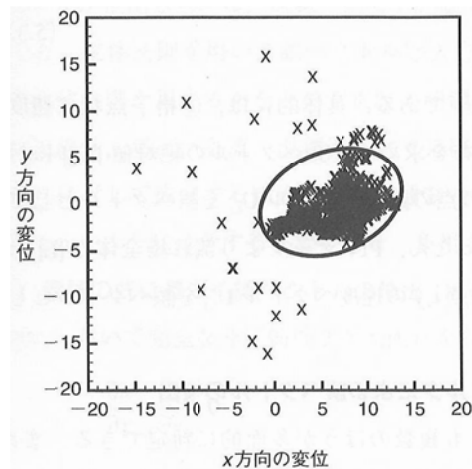


図 3.56 速度ベクトルピーク分布例

(8) 本研究における工夫

本研究において測定対象となる煙層の挙動は、シーディング装置により散布したトレーサーの動きにより PIV 解析される。しかしながら散水中の動きの計測を行っているため、カメラにより取得した画像には煙層と共に水滴が映り込む。両者の散乱および流速が異なることから、誤解析低減のために画像処理を行うことで精度向上を図った。図 3.57 にベクトル解析過程の一例を示す。具体的には、レーザーシート内に映り込んだ水滴部の除去（一定以上の輝度の光点を画像から消去）を行うことで煙層のみの解析を可能とした。逆に水滴のみの解析し、前者と重ね合わせれば両者の速度ベクトルを区別して得ることもできる。

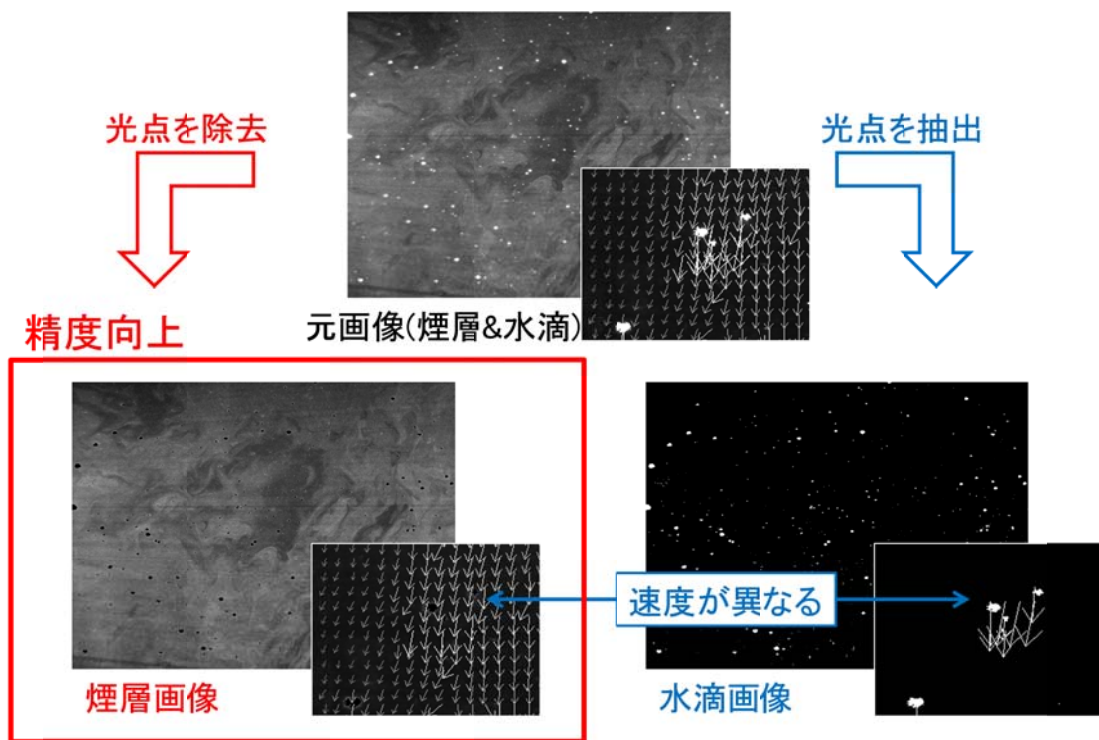
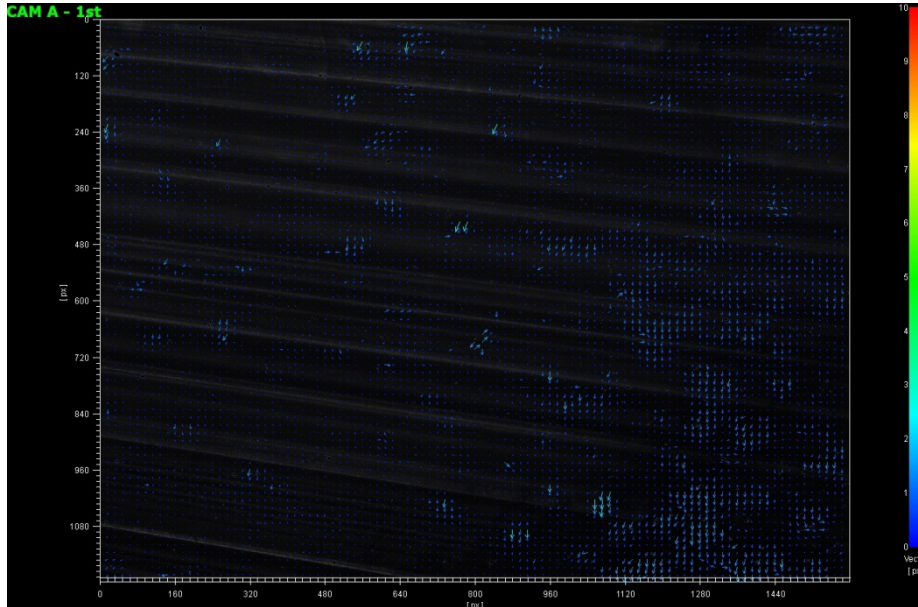
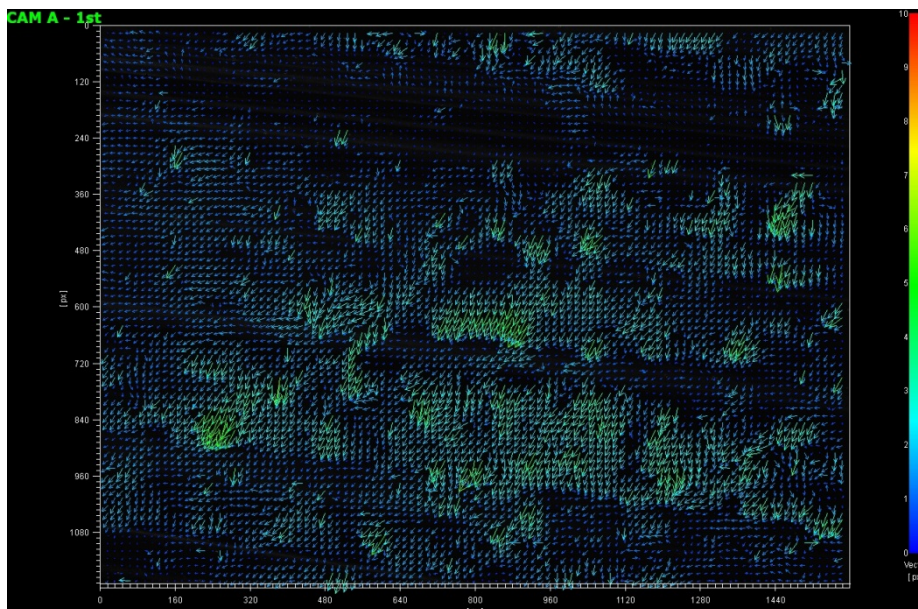


図 3.57 PIV 解析方法

図 3.58 に PIV 解析結果の画像例を示す。I40 と比較して I80 では全体的に色の变化（ベクトルを示す矢印）が大きく、煙層の動きが速いことが見て取れる。



a) ノズル I40



b) ノズル I80

図 3.58 PIV 解析画像例（火源ヘブタン 0.25 m^2 ）

3.4.2 下降気流の時間変化

図 3.59～図 3.66 に、メタノール 0.25 m³ とヘプタン 0.25 m³を例として、下降気流の時間変化を示す。またヘプタン 0.25 m³の例には散水開始直前から 30 秒後までの映像を併せて表示した。

いずれの例においても常に大きく波打っていることは見て取れるが、散水開始から 5 秒経ってからは、一定の値を中心に上下しており、平均的な値は安定していることが見て取れる。また、図 3.61 等の多くの例で複数の線が同じ程度の値を中心に推移していることから、測定高さの違いによる下降気流の変化は少ないことが見て取れる。散水開始直後に下降気流が特に大きく乱れている例が図 3.62 等いくつか見られるが、水開始直後はノズル付近の配管内に空気が入っている為に水が広く拡散せず、散水量の偏りが起こったためであると考えられる。

ヘプタン 0.25 m³の映像を見ると、I20 や K80 では煙層と下部層の境界がはっきりと残っているのに対し、I40 や I80 では境界があいまいになり、明確な層が失われている様子が見取れる。特に I80 では床面付近に煙が達している様子がはっきりと映し出されている。

なお、トレーサー不足や黒煙による減光等が原因で PIV 測定が適切に行えなかったものが複数あった。特に、本実験では火源にヘプタンを用いているため、黒煙が発生する。黒煙はトレーサーとしての役目も果たすが、実験 で用いたヘプタン 0.25 m³の火源では、濃い黒煙による減光で画像の光量が不足し、トレーサーを解析できない状態となってしまったものが多くあった。

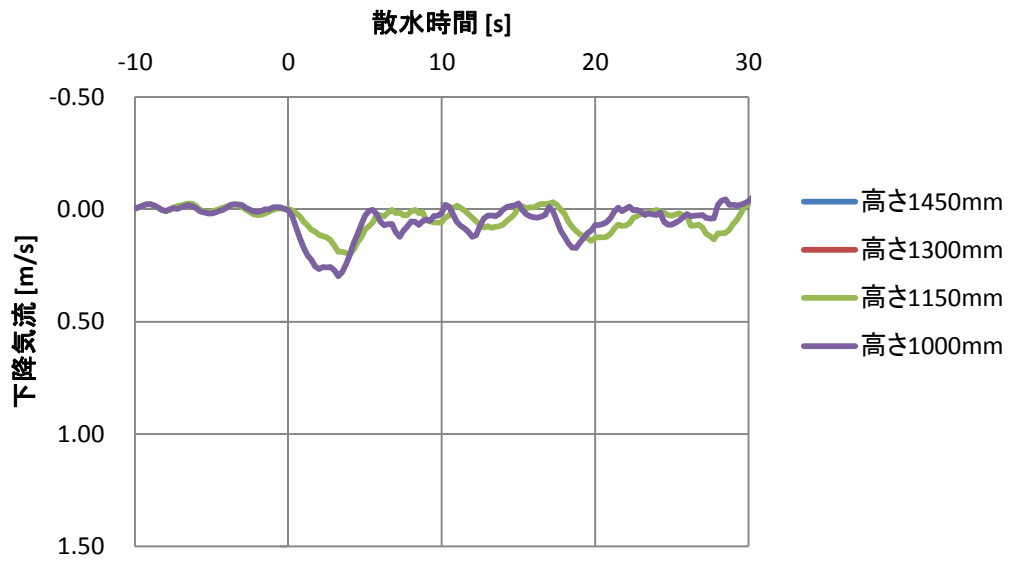


図 3.59 下降気流の時間変化 (メタノール 0.25 m² : I20)

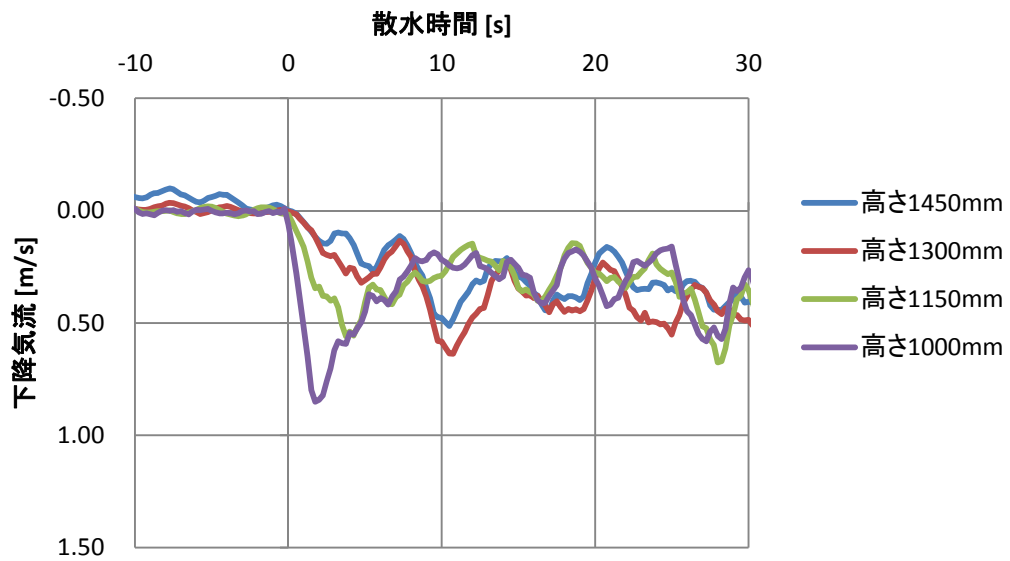


図 3.60 下降気流の時間変化 (メタノール 0.25 m² : I40)

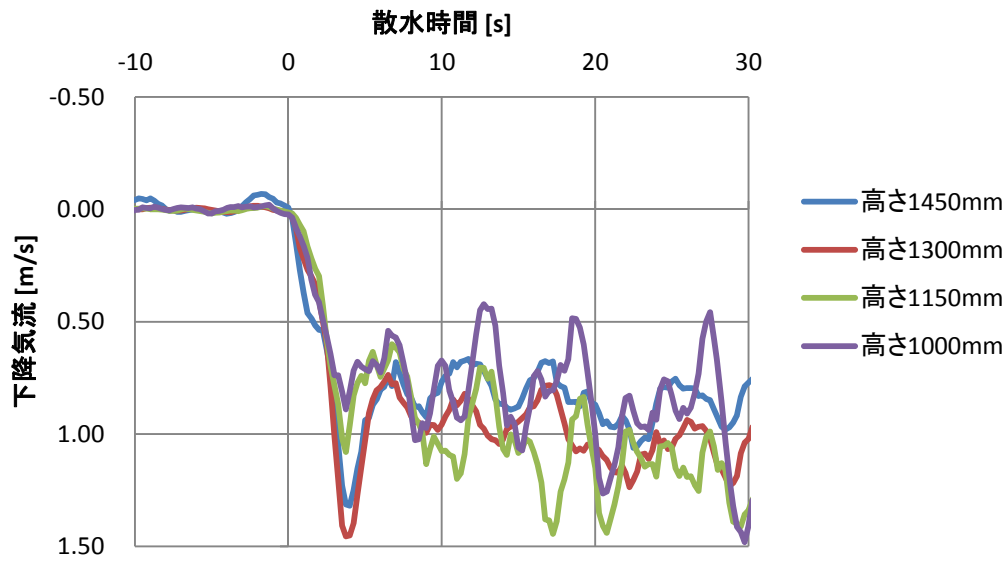


図 3.61 下降気流の時間変化 (メタノール 0.25 m² : I80)

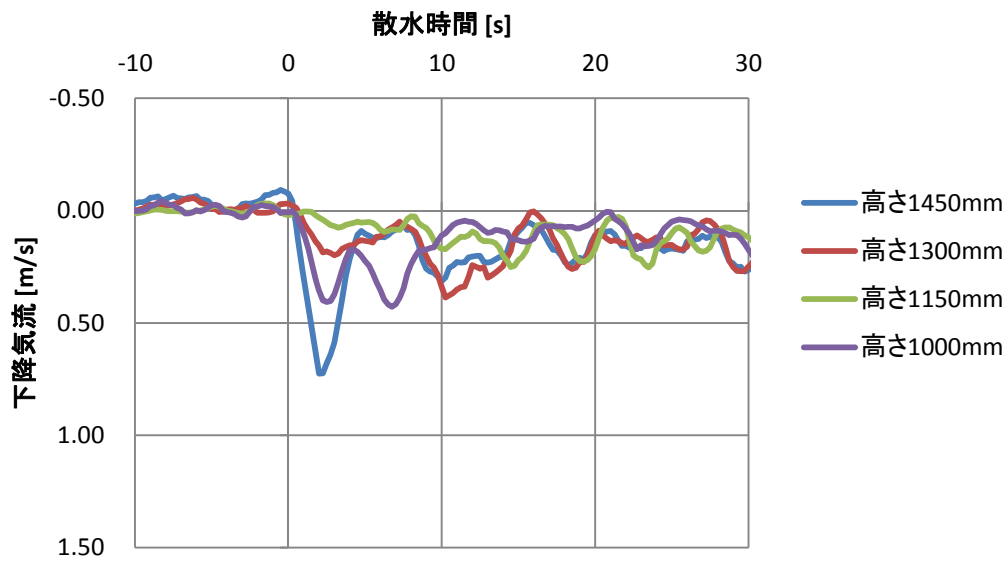
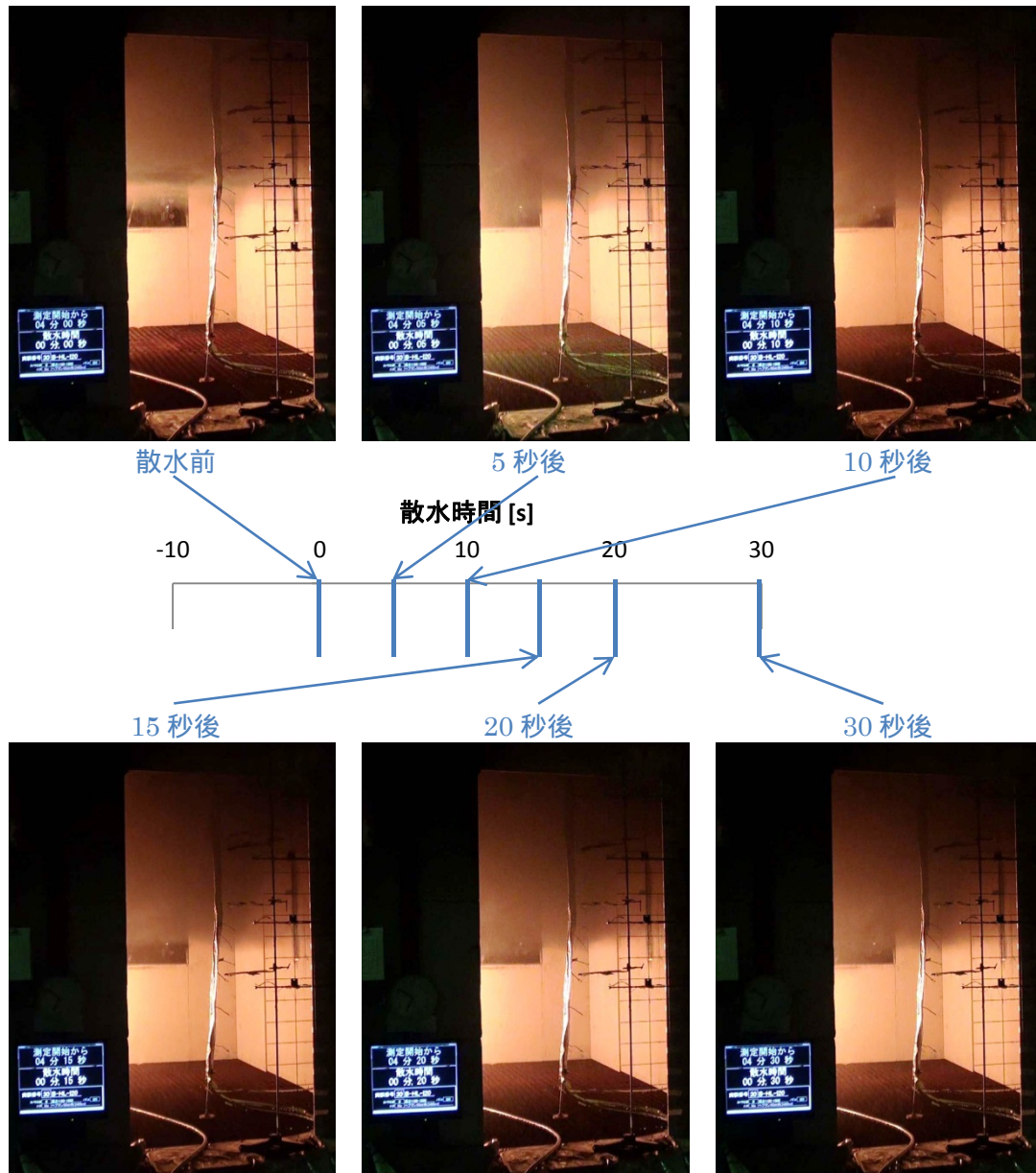


図 3.62 下降気流の時間変化 (メタノール 0.25 m² : K80)



下降気流測定失敗の為、カメラ映像のみ

図 3.63 カメラ映像 (ヘプタン 0.25 m² : I20)

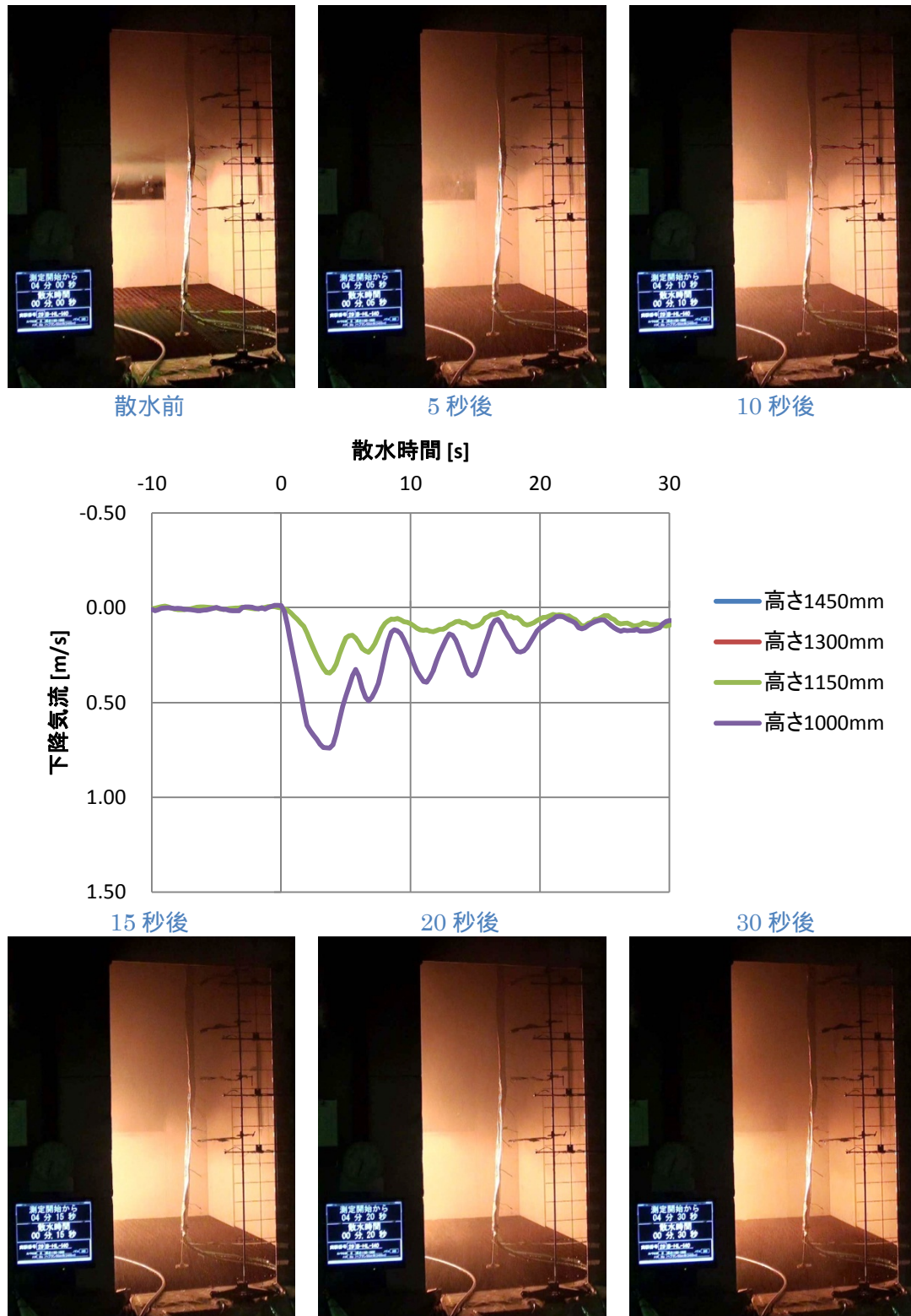


図 3.64 下降気流の時間変化とカメラ映像 (ヘプタン 0.25 m² : I40)

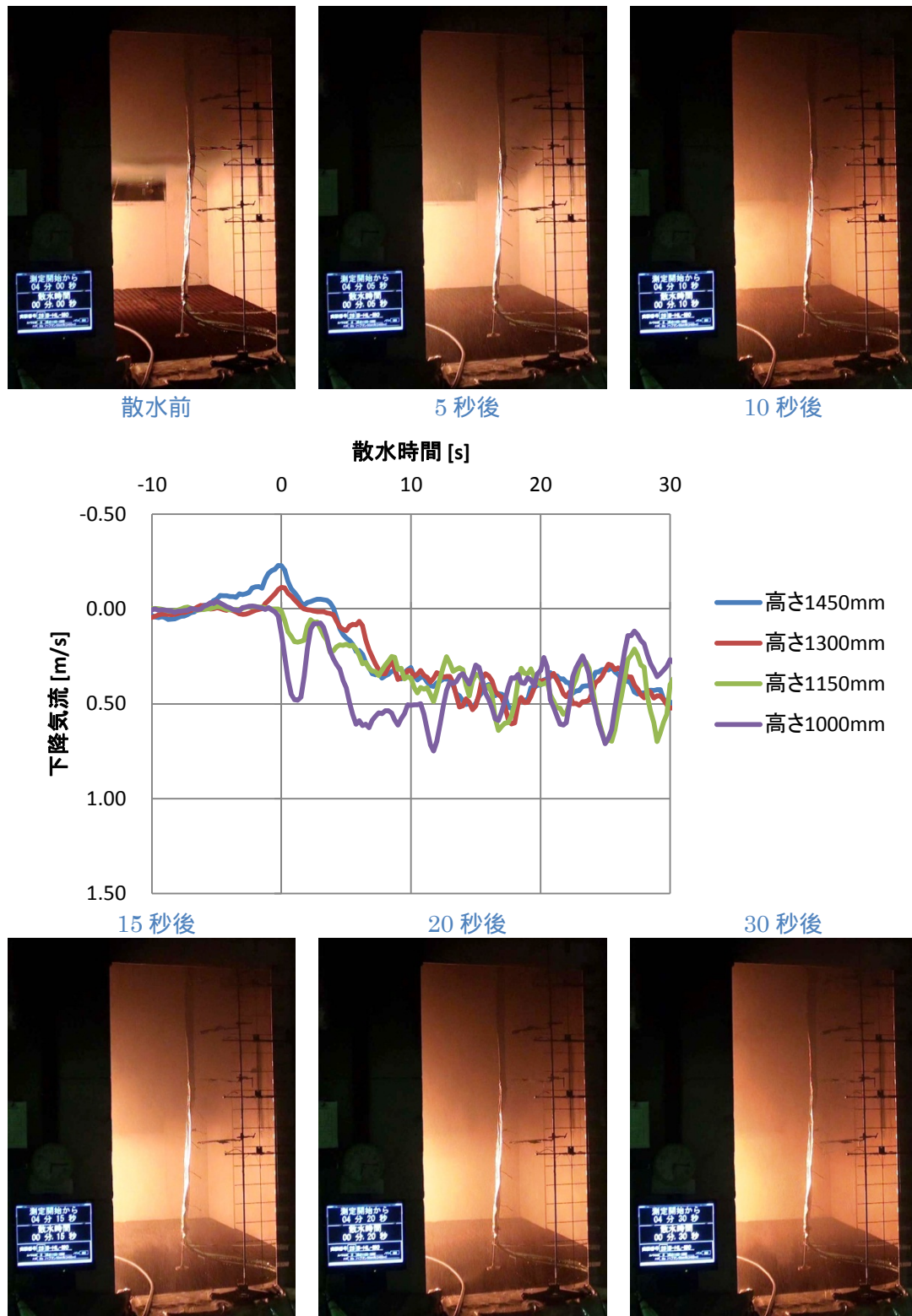


図 3.65 下降気流の時間変化とカメラ映像 (ヘブタン 0.25 m^2 : I80)

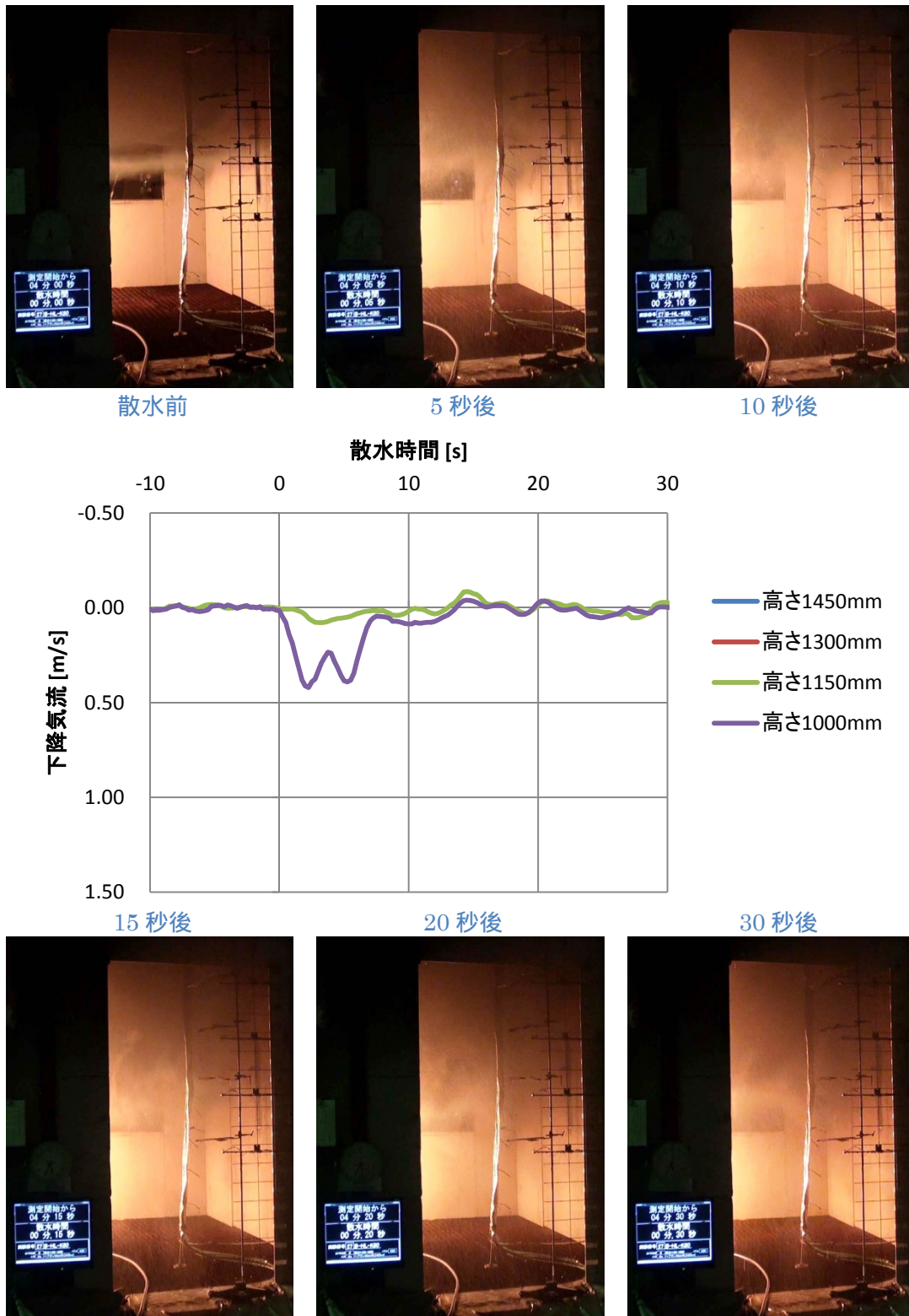


図 3.66 下降気流の時間変化とカメラ映像 (ヘプタン 0.25 m²: K80)

3.4.3 平均下降気流

散水状態が安定している散水開始5秒後から30秒後までの25秒間(測定回数100回)の平均値を、下降気流の平均流速とした。表3.16、表3.17に解析結果を示す。

傾向としてI20、K80、I40、I80の順に下降気流が大きくなっていることが見て取れる。特にI20は、火源なしの場合には0.5m/s程度の下降気流が発生しているが、最も小さい火源であるメタノール0.1m²の場合を除くと下降気流はほとんど発生していない。また全体的に、火源が大きいと下降気流が小さい傾向が見て取れる。特に火源ヘプタン0.25m²はデータ数が少なくなってしまうものの、下降気流が小さくなっていることをはっきりと示している。

高さ方向に複数か所の測定を行っているため、実験の下降気流測定結果を図3.67に火源ごとにグラフで示す。上下方向が測定位置の高さで、右に寄るほど大きな下降気流が発生していることを示す。いずれの火源においても、おおよそ一様に下降気流が発生していることが見て取れる。いずれも煙層境界の上から下の測定を行っているが、境界の上下による挙動の違いは発生しないことが分かる。全体的に高さによって大きな変化がないことから、実験の下降気流の代表値には、最も安定して測定結果を得られた高さ1000mmの下降気流の値を用いることとする。

表 3.16 実験 の下降気流測定結果[m/s]

火源	I20	I40	I80	K80	なし
なし	0.50	0.55	0.66	0.32	0.00
メタノール 0.1 m ²	0.21	0.64	0.87	0.31	-0.01
メタノール 0.25 m ²	-	0.50	0.70	-	-0.09
ヘプタン 0.1 m ²	-0.13	0.21	0.68	0.07	0.01

表 3.17 実験 の下降気流測定結果[m/s]

a) 火源なし

測定高さ	I20	I40	I80	K80	なし
1450mm	0.43	0.62	0.93	0.56	0.00
1300mm	0.50	0.70	1.09	0.53	-0.01
1150mm	0.49	0.66	1.28	0.51	0.00
1000mm	0.60	0.69	1.39	0.38	0.00

b) 火源メタノール 0.25 m²

測定高さ	I20	I40	I80	K80	なし
1450mm	-	0.33	0.84	0.18	-0.04
1300mm	-	0.41	1.01	0.17	-0.02
1150mm	0.04	0.33	1.09	0.14	0.00
1000mm	0.04	0.31	0.87	0.12	0.00

c) 火源ヘプタン 0.1 m²

測定高さ	I20	I40	I80	K80	なし
1450mm	0.00	0.27	0.70	0.14	0.00
1300mm	-0.01	0.27	-	0.13	0.00
1150mm	0.01	0.42	0.89	0.04	0.00
1000mm	0.03	0.33	0.60	0.13	0.00

d) 火源ヘプタン 0.25 m²

測定高さ	I20	I40	I80	K80	なし
1450mm	-	-	0.41	-	-0.10
1300mm	-	-	0.42	-	0.00
1150mm	-	0.08	0.42	0.00	0.00
1000mm	-	0.17	0.43	0.02	-0.01

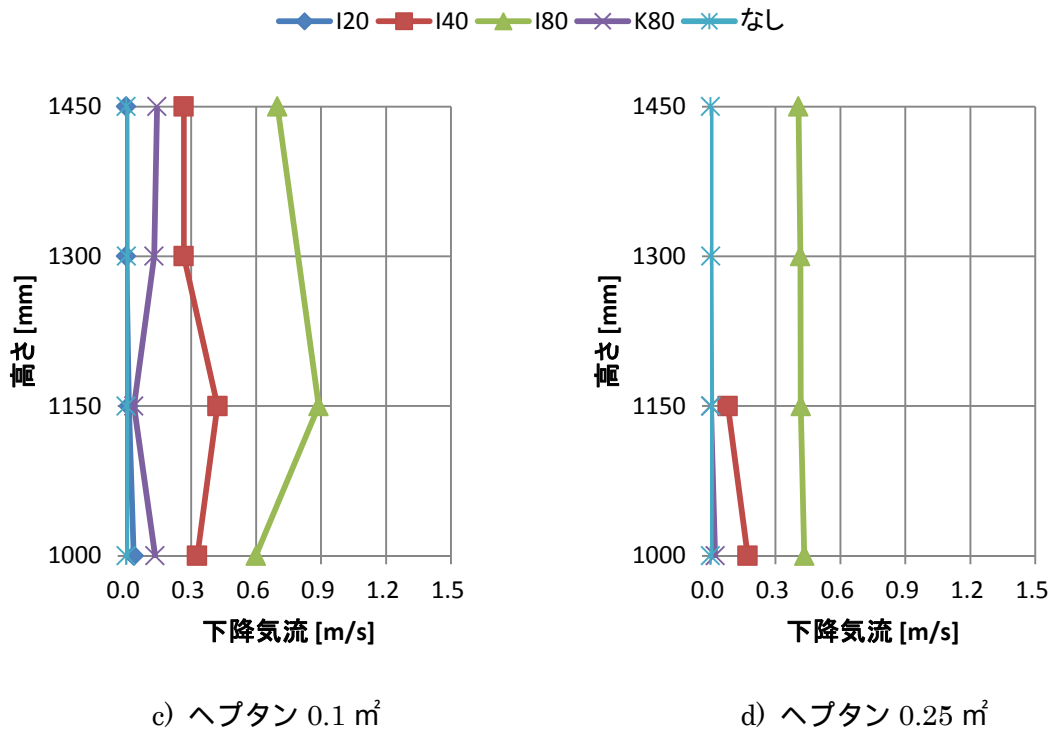
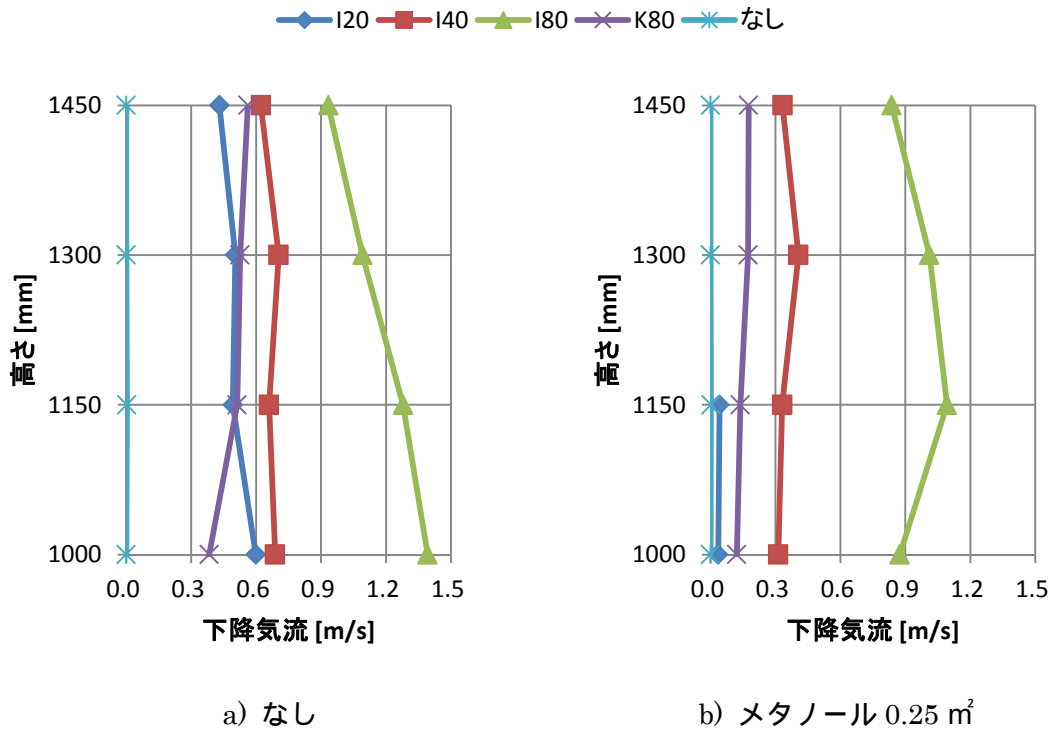


図 3.67 実験 の下降流速測定結果 (火源ごと)

3.5 考察

3.5.1 火源と下降気流

図 3.68 に実験 の下降流速測定結果を示す。なお下降気流の結果から、ノズルに応じて発生した下降気流の相対的な大きさが $I20 < K80 < I40 < I80$ となる傾向が見られたため、このグラフでは K80 を I20 と I40 の間に配置して表示している。いずれの火源においても、下降気流はノズルに応じて近い形で推移していることが分かる。ただし、火源の発熱速度が最も大きいヘプタンの場合の結果を見ると、I80 を除いた 3 種で下降気流が大幅に抑制されていることが見て取れる。これは上下層の温度差が大きいために、散水中でも強い浮力が働き続けていたためだと考えられる。同時に I80 は水の勢いが特に強く浮力を大きく上回ったため、いずれの火源においても速い下降気流が生じたと考えられる。

図 3.69 に実験 の下降流速測定結果をノズルごとに示す。火源がないパターンと比較してメタノール 0.25 m² とヘプタン 0.1 m² では煙層境界の上下に関係なく、一様に下降気流が弱まっており、特にヘプタン 0.25 m² では I80 を除き下降気流がほとんど発生していないことが分かる。I80 も煙層温度の高いヘプタン 0.25 m² では下降気流が抑制されていることがはっきりと見て取れる。温度が高いと下降気流が発生しにくくなっていることから、煙層の浮力が下降気流発生条件に関わっていることが分かる。

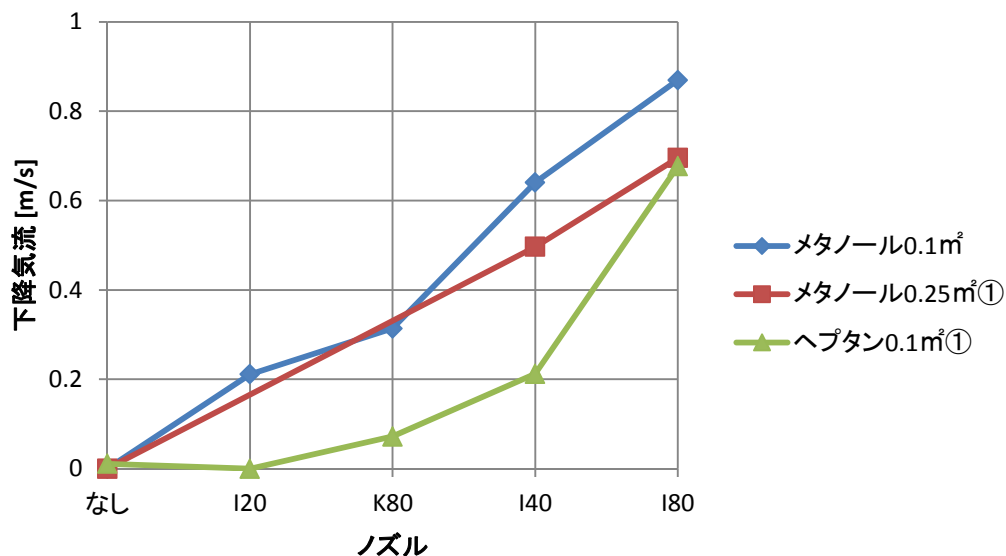
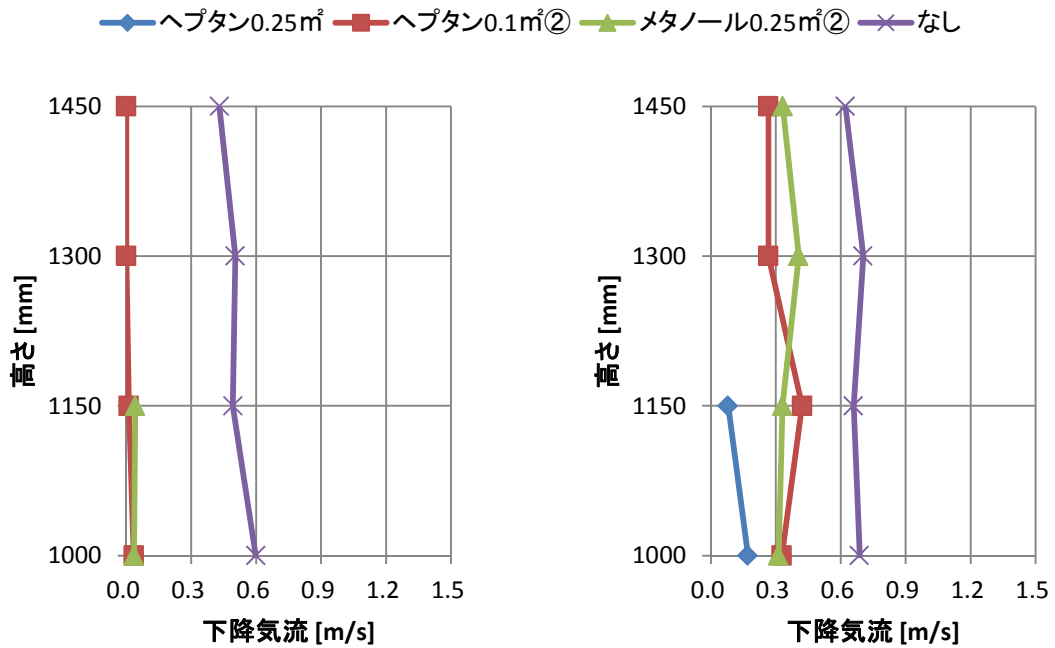
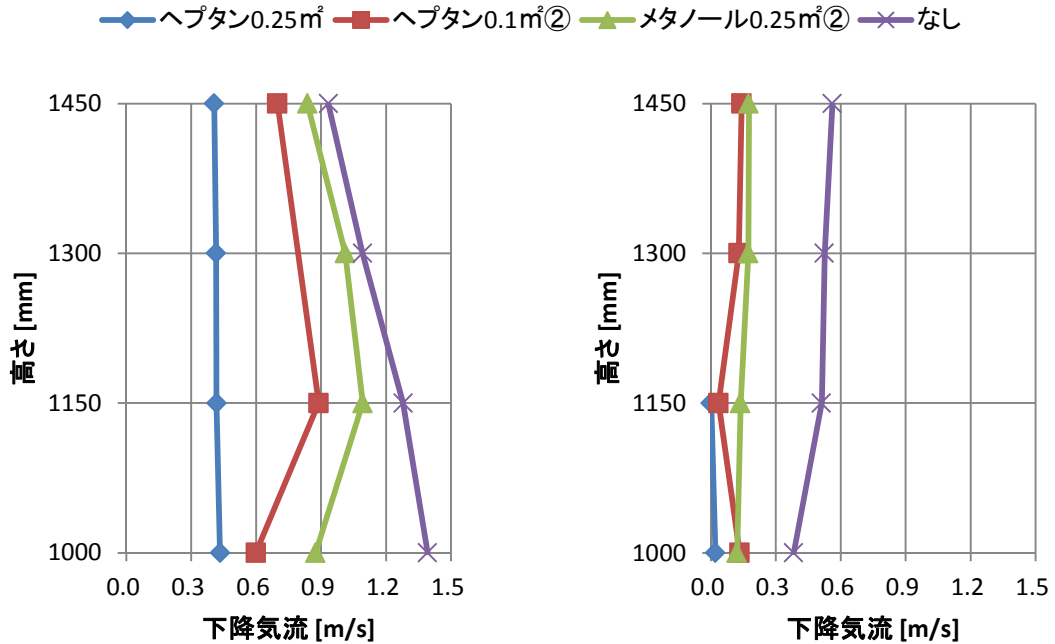


図 3.68 実験 の下降流速測定結果（下降気流の大きさ順）



a) I20

b) I40



c) I80

d) K80

図 3.69 実験 の下降流速測定結果 (ノズルごと)

3.5.2 温度変化と下降気流

図 3.70 に 30 秒間散水後の下部層の各高さの上昇温度と下降気流の関係を示す。いずれの高さの図においても、下降気流が大きい程下部層の上昇温度が高いという傾向は見てとれる。しかしながらはっきりした相関性はなく、下降気流が発生していないものであっても下部層の温度が上がっている場合がある。この温度上昇の原因として、煙層の流入だけでなく、煙層で温められた水滴による影響が考えられる。この結果からは、単純な上昇温度では煙層の下降高さを示すことはできないことが分かる。

また、垂直温度分布を基に計算による煙層境界の算出を行った。計算方法には N%法 (N=30%)と、火災シミュレーションソフト FDS にて用いられている、He らが考案した煙層境界高さ計算式^[14]を用いた。He 式は天井高さを H [m]、高さ z [m]の温度を $T(z)$ [K]、最下部の温度を T_l [K]とすると、煙層境界高さ z_{imt} [m]は以下の式で表される。

$$\int_0^H T(z) dz = I_1 \quad (3.3)$$

$$\int_0^H \frac{1}{T(z)} dz = I_2 \quad (3.4)$$

$$z_{imt} = \frac{T_l(I_1 I_2 - H^2)}{I_1 + I_2 T_l^2 - 2T_l H} \quad (3.5)$$

火源へブタン 0.25 m³の煙層境界高さ時間変化の計算結果を図 3.71 に示す。N%法では散水量と範囲が広い K80 で煙層境界が上昇する結果を示し、He 式では散水量が少ない I20 を除き、全ての散水条件において煙層境界の上昇を示す結果となった。これは一例であるが、いずれの火源の計算結果においても多くが煙層境界の上昇を示しており、適当と思われる結果は得られなかった。実験結果より煙層の下層貫入が発生していることは間違いないと考えられるが、垂直温度分布を基にした計算では示されなかった。散水下の状況では煙層の温度が下がり、また場合により煙層の下層貫入が起こって下部層の温度が上がり、煙層と下部層の明確な温度境界が失われてしまうことが多いため、垂直温度分布を基にした計算手法では対応できないことが分かった。

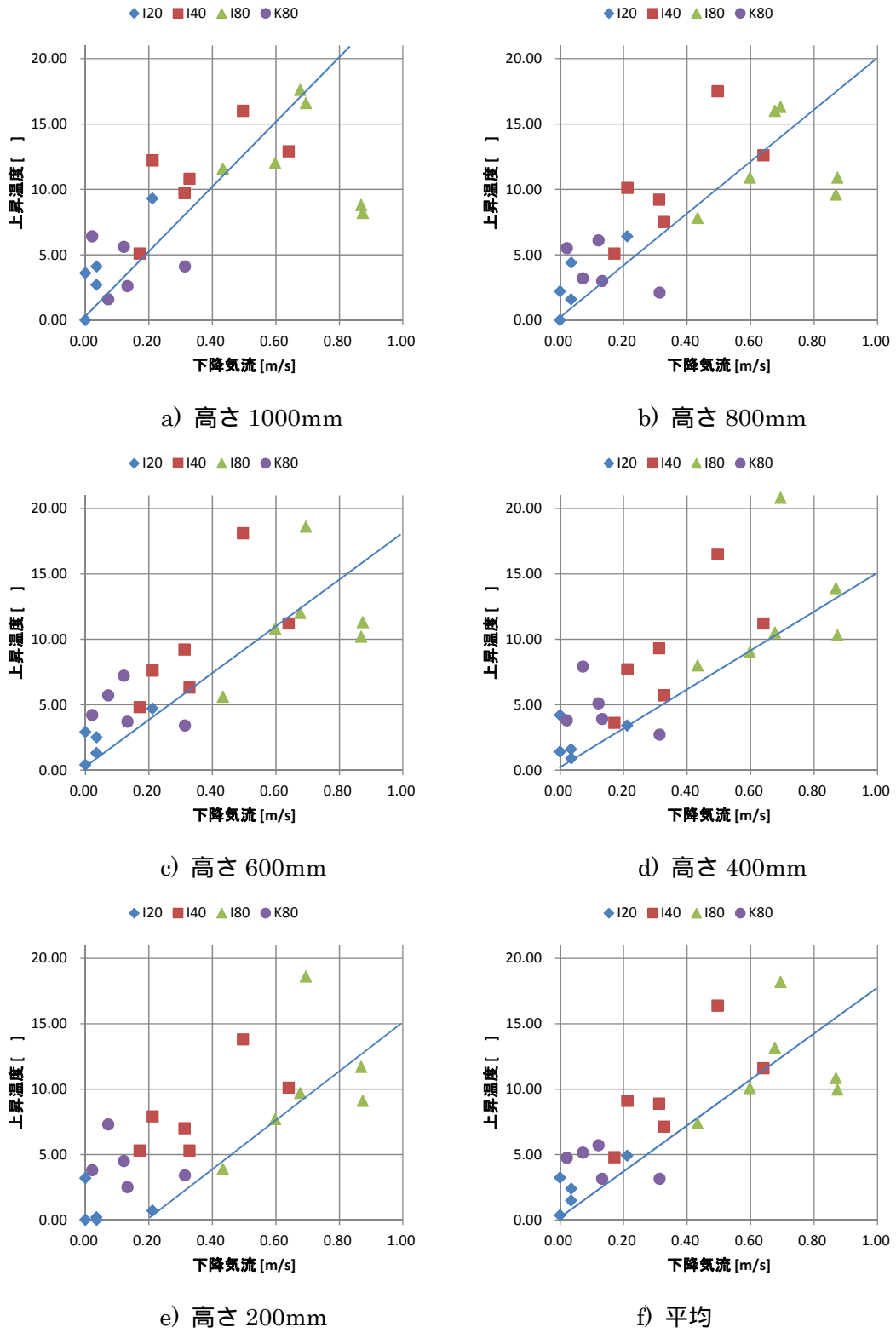
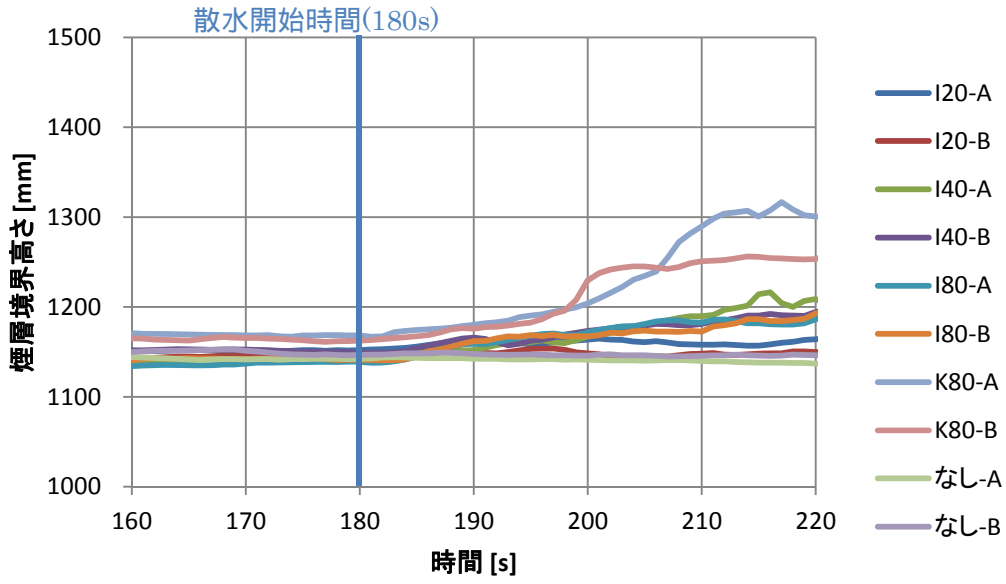
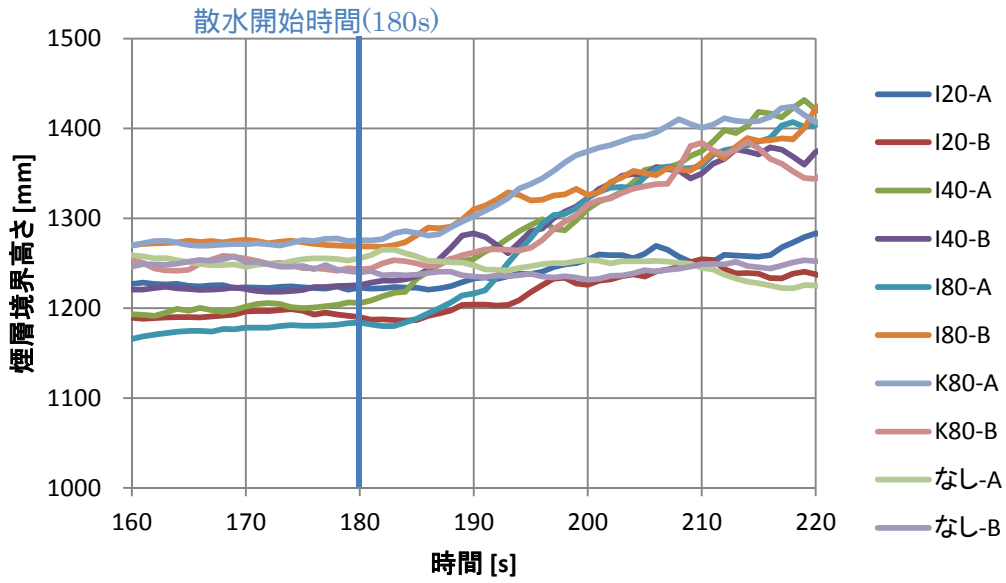


図 3.70 下降気流と下部層上昇温度



a) N%法(N=30%)



b) He 式

図 3.71 境界高さの算出結果例 (火源ヘブタン 0.25 m²)

3.5.3 CO₂濃度変化と下降気流

図 3.72 に床付近の CO₂ 濃度上昇値と下降気流の関係を示す。下降気流が 0.4m/s となるあたりを境に、CO₂ 濃度上昇値が 0.1%以下のほとんど変化していない領域と、0.2%以上大きく増加している領域に極端に分かれていることが見て取れる。これは煙層の空気が床面に達しているかどうかを表していると考えられ、下降気流がおよそ 0.4m/s を超えた時には煙層が床面に達していたと判断できる。

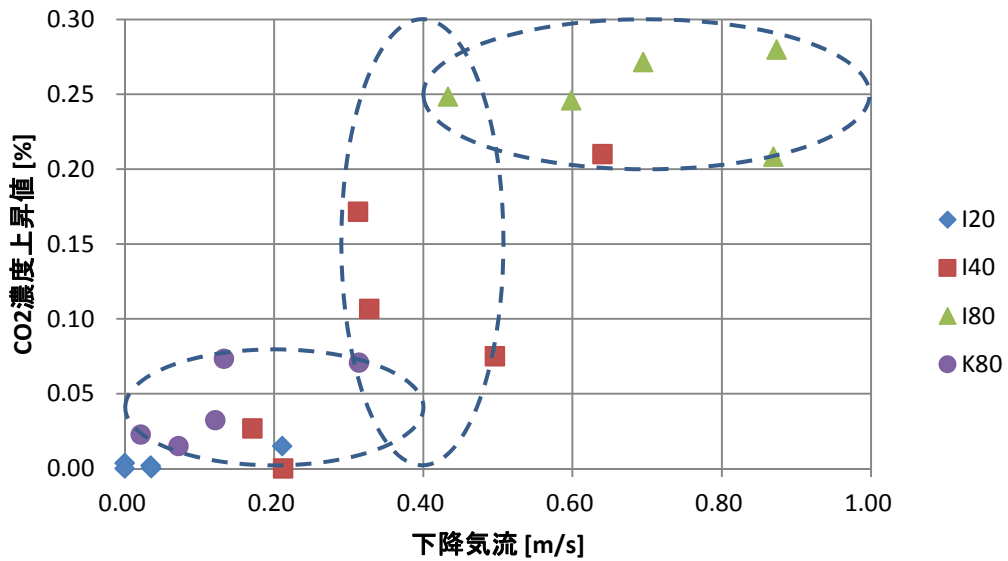


図 3.72 下降気流と下部層 CO₂ 濃度上昇

-第4章-

下降気流の理論的考察

4.1 概要

第3章で行った実験により、発生する下降気流の大きさがノズルの散水量だけでは依らないことが明らかとなったため、第2章で測定を行った基礎データを基に水滴が空気にあぼす抵抗の計算を行う。また煙層の温度が高くなると下降気流は小さく、あるいは発生しなくなることから、下降気流の発生条件を明らかにしようと試みた。基本的な考え方としては、水滴から受ける抵抗と、空気の密度差（温度差）によって生まれる浮力のバランスが発生条件であると考えた。図4.1に水滴と煙層の運動概念図を示す。

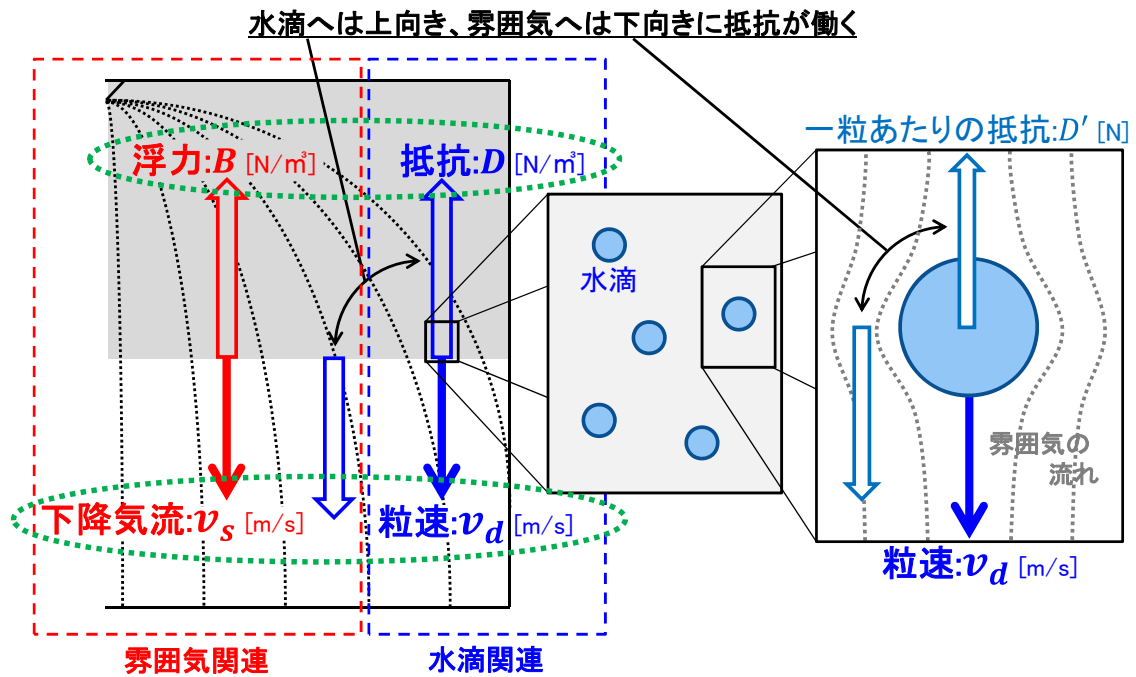


図 4.1 運動概念図

水滴の形状は球形であると仮定して、空気との抵抗はニュートンの抵抗法則を用いて、レイノルズ数、抵抗係数と併せて求めた。なおニュートンの抵抗法則ではレイノルズ数の大きさによって計算式が変化するが、本研究で用いた散水ノズルの平均粒径・粒速においては、全て遷移領域に当てはまった。

ニュートンの抵抗法則より水滴の半径を r [m]、垂直方向の水滴の速度を v_d [m/s]とすると、水滴一滴の垂直方向の空気との抵抗 D' [N]は、抵抗係数 C_D [-]、煙層の空気密度 ρ_s [kg/m³]、断面積 A_d [m²] (球の場合 $A_d = \pi r^2$)により以下の式で表される。

$$D' = k_d v_d^2 \quad (4.1)$$

$$k_d = \frac{C_D \rho_s A_d}{2} \quad (4.2)$$

遷移領域となる為、抵抗係数 C_D はレイノルズ数 R_e [-]により、気体粘度 μ [Pa·s]を用いて以下の式で表される。

$$C_D = 24(1 + 0.15R_e^{0.687})/R_e \quad (4.3)$$

$$R_e = \frac{2rv_d\rho_s}{\mu} \quad (4.4)$$

単位体積あたりの雰囲気への抵抗 D [N/m³]は水滴一滴の抵抗 D' と、散水量 W [kg/m²·s]、水滴一滴の質量 m_d [kg]、水滴の速度 v_d により求められる単位体積あたりに存在する水滴の数 n [-/m³]との積で算出できる。

$$D = D'n \quad (4.5)$$

$$n = \frac{W}{m_d v_d} \quad (4.6)$$

また浮力 B [N/m³]は、煙層の密度 ρ_s と下部層の密度 ρ_0 [kg/m³]の差と重力加速度 g [m/s²]との積から求めることができ、煙層の温度 T_s [K]と下部層の温度 T_0 [K]を用いて計算が可能である。

$$B = (\rho_0 - \rho_s)g = \frac{T_s - T_0}{T_s} \rho_0 g \quad (4.7)$$

4.2 既往の概念による検証

第1章にて示した3つの既往の研究では、それぞれ以下に示す異なる領域を対象として計算を行っている。

- (1) 散水領域全体^[3]
- (2) 散水ノズル直下^[4]
- (3) 煙層境界付近^[6]

図4.2に各々が対象とする領域を示す。まずはこれらの考え方を基に計算を行い、下降気流との関連性の検証を行う。図に示す通り、散水ノズルから煙層境界までを煙層厚さ h [m]とし、散水ノズルを原点として下方向の距離を x [m]、水平方向の距離を y [m]とする。

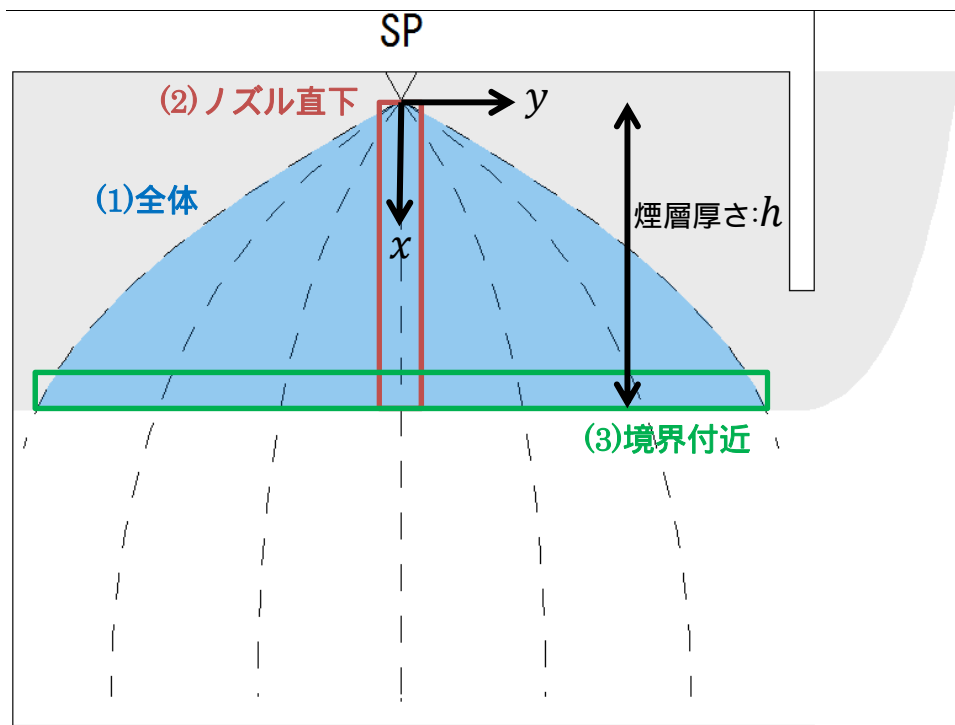


図 4.2 計算領域

(1)散水領域全体及び(2)散水ノズル直下を対象領域とする場合、煙層境界付近だけではなく、ノズルから煙層境界までの全ての高さが計算対象となる。そのためこれら2つの計算手法を用いる際には、高さごとの粒速と散水量を求める必要がある。この計算にはLiの手法^[4]を用いた。

式(4.1)より、水滴の浮力を0とすると、水滴周りの運動方程式は重力と抵抗により以下の式で表される。

$$m_d g - k_d v_d^2 = m_d \frac{dv_d}{dt} = m_d v_d \frac{dv_d}{dx} \quad (4.8)$$

式(4.8)を解くと、座標 x における垂直方向の水滴の速度 $v_d(x)$ は以下の式で表せる。

$$v_d(x)^2 = \frac{m_d g}{k_d} + C_1 \exp\left(-\frac{2k_d x}{m_d}\right) \quad (4.9)$$

ここで定数 C_1 は水滴の垂直速度の条件によって決まる。Sheppardによる実験結果^[15]によると、ノズルから0.2m下の位置($x_0 = 0.2$)における水滴の速度 v_0 は放水圧 P [MPa]と水の密度 ρ_d [kg/m³]より決まり、およそ $0.5\sqrt{2P/10^{-6}\rho_d}$ [m/s]となる。よって C_1 は以下の式で表される。

$$C_1 = \frac{v_0^2 - (m_d g)/k_d}{\exp(-2k_d x_0/m_d)} \quad (4.10)$$

$$v_0 = 0.5\sqrt{2P/10^{-6}\rho_d} \quad (4.11)$$

$$x_0 = 0.2 \quad (4.12)$$

また式(4.1)より、座標 x における水滴一滴の垂直方向の空気との抵抗 $D'(x)$ [N]は以下の式で表される

$$D'(x) = k_d v_d(x)^2 \quad (4.13)$$

次に、スプリンクラーの散水領域は、NFPA13HB^[16]によるとほぼ放物面となっており、その外形の軌道は以下の式で表せる。

$$y^2 = Ex \quad (4.14)$$

またスプリンクラーの散水半径は実験的に $x = 3[\text{m}]$ で $y = 3[\text{m}]$ となることが知られている^[3,15-17]。そのため係数 $E = 3$ と定めることができる。従って座標 x における散水面積 $S(x)[\text{m}^2]$ は以下の式で表される。

$$S(x) = 3\pi x \quad (4.15)$$

また本研究にて用いた、いけうち製ノズルの散水領域は、立体角 60° の円錐形となっており、その外形の軌道は以下の式で表せる。

$$y = x \tan 60^\circ = x\sqrt{3} \quad (4.16)$$

よって座標 x における散水面積 $S(x)$ は以下の式で表される。

$$S(x) = 3\pi x^2 \quad (4.17)$$

ノズルからの散水が、散水面積 $S(x)$ に対して均一な水量でされるものとする、放水量 $M[\text{kg/s}]$ により、座標 x において単位体積あたりに存在する水滴の数 $n(x)[\text{1/m}^3]$ は以下の式で表される。

$$n(x) = \frac{M}{m_d S(x) v_d} \quad (4.18)$$

なお座標 x における有効散水面積を $A(x)[\text{m}^2]$ とすると、本研究の区画が 3.2m 四方であることからおよそ以下の式で表される。

$$\begin{aligned} A(x) < 10.24 \text{ の時} : & \quad A(x) = S(x) \\ 10.24 < A(x) \text{ の時} : & \quad A(x) = 10.24 \end{aligned} \quad (4.19)$$

(1) 散水領域全体

散水領域全体を対象として、スプリンクラーが煙層の安定性へ及ぼす影響に関する先駆的な研究が、Bullen によって行われている。水滴が煙層に及ぼす抵抗を D_t [N]、煙層の浮力を B_t [N]として散水領域全体で積分し、 D_t/B_t (抵抗/浮力) [-]の値を用いて下降気流の検証を行う。ここでは粒径に実験値を用い、粒速および散水量は前述の計算式により算出を行う。煙層の温度は平均温度と定義する。

座標 x における、厚さ dx の領域への水滴の抵抗 $D_t(x)$ [N]は式(4.13)、式(4.18)により以下の式で表される。

$$D_t(x) = n(x)D'(x)A(x)dx = \frac{Mk_d v_d A(x)}{m_d S(x)} dx \quad (4.20)$$

散水領域全体の抵抗 D_t [N]及び散水領域全体の浮力 B_t [N]は、以下の式で表される。

$$D_t = \int_0^h \left[\frac{Mk_d v_d A(x)}{m_d S(x)} \right] dx \quad (4.21)$$

$$B_t = \int_0^h BA(x) dx \quad (4.22)$$

図 4.3 に D_t/B_t [-]の計算結果と下降気流 [m/s]との関係を示す。ある程度の傾向は表れているが、相関性は低いことが分かる。また Chow らの指摘した通り^[6]、 D_t/B_t が1を超えない場合でも煙層の下降が発生していることを確認できる。

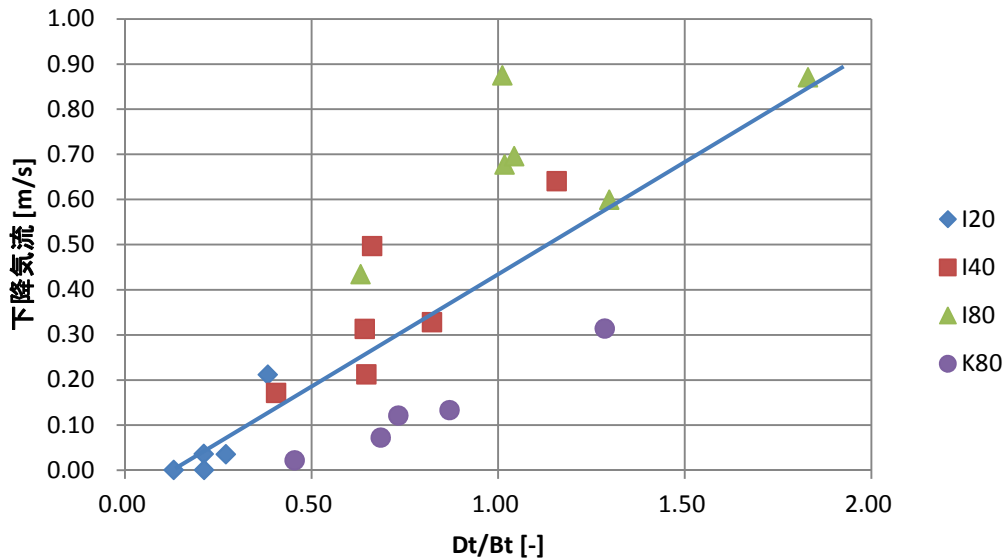


図 4.3 散水領域全体 D_t/B_t と下降気流

(2) ノズル直下

LiらはBullenの概念を踏襲し、特に水滴による抵抗が最大となるノズル直下に注目した。ノズル直下における面積あたりの水滴の抵抗 D_0 [N/m²]と煙層の浮力 B_0 [N/m²]の計算を行う。そして D_0/B_0 [-]が1を超える（抵抗の方が大きい）場合には煙が下降し、 $D_S = B_0$ となり抵抗と浮力が等しくなる高さまでの下降距離 S [m]を算出し、下降気流の検証を行う。(1)と同様に粒径に実験値を用い、粒速および散水量は前述の計算式により算出を行う。煙層の温度は平均温度と定義する。

座標 x における単位面積あたり厚さ dx の領域への水滴の抵抗 $D_0(x)$ [N/m²]は式(4.13)、式(4.18)により以下の式で表される。

$$D_0(x) = n(x)D'(x)dx = \frac{Mk_d v_d}{m_d S(x)} dx \quad (4.23)$$

よって抵抗が最大となる中央部における抵抗 D_0 [N/m²]および浮力 B_0 [N/m²]は以下の式で表される。

$$D_0 = \int_0^h \left[\frac{Mk_d v_d}{m_d S(x)} \right] dx \quad (4.24)$$

$$B_0 = Bh \quad (4.25)$$

ここで、 D_0/B_0 [-]が1を超える場合には煙が下降すると判断される。煙の下降と共に抵抗 D_0 の計算領域も下降し、煙が距離 S [m]下降した時の抵抗 D_S [N/m²]は以下の式で表される。

$$D_S = \int_S^{S+h} \left[\frac{Mk_d v_d}{m_d S(x)} \right] dx \quad (4.26)$$

$D_S = B_0$ となる時の S [m]が、煙層の理論下降距離を示す。

図 4.4 に理論下降距離 S [m] 算出結果と下降気流[m/s]の関係を示す。 S と下降気流はある程度の相関を示していることが見て取れる。ただし、理論下降距離 S は大きい場合でも 50cm 程度の下降しか示していないが、本研究における実験結果やビデオの目視では床面に達している（1m 以上下降している）ものも多く、少なく見積もられてしまうことが分かる。

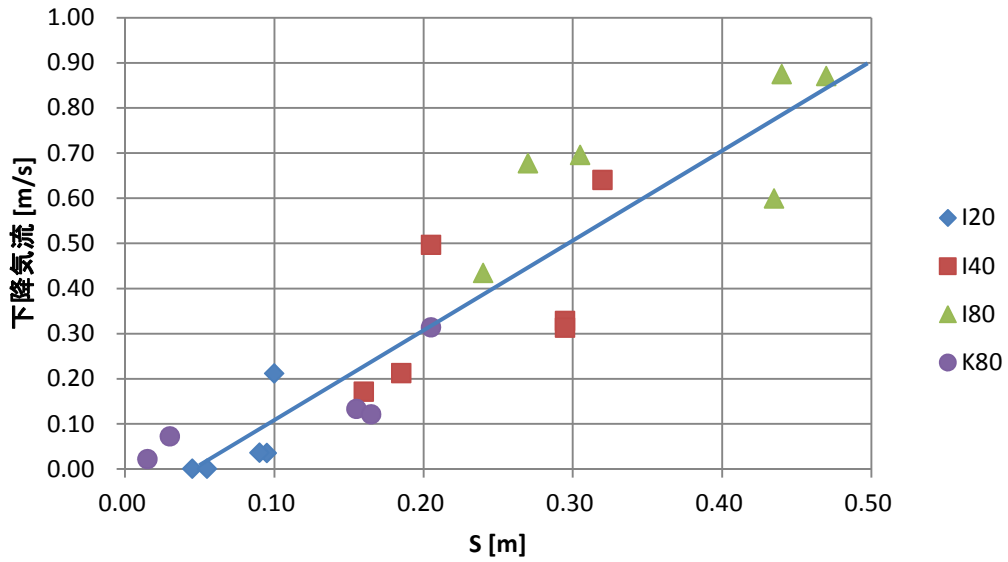


図 4.4 理論煙層下降距離 S と下降気流

(3) 煙層境界付近

Chow らは、散水領域全体を対象とした計算が煙層の安定を示す場合でも、いくつかの実験で煙層の安定性が失われる結果が得られていることから、煙層下降の起点となる境界付近に注目した。煙層境界付近の水平面における水滴の抵抗 D_l [N/m]と煙層の浮力 B_l [N/m]の計算を行い、 D_l/B_l [-]の値を用いて下降気流の検証を行う。本研究では煙層境界付近の粒径、粒速、および散水量の測定を行っているため、これらの実測値を用いて計算を行う。煙層境界付近の温度として Chow らは明確な定義を示していないことから、ここでは煙層境界から 300mm 上の位置の温度と定めた。

煙層境界付近の水平面における水滴の抵抗 D_l [N/m]および煙層の浮力 B_l [N/m]は、抵抗 D [N/m³]、浮力 B [N/m³]のそれぞれに水平面の面積を掛けたものとなり、以下の式で表される。

$$D_l = DA(x) \tag{4.27}$$

$$B_l = BA(x) \tag{4.28}$$

図 4.5 に D_l/B_l [-]の計算結果と下降気流[m/s]との関係を示す。煙層全体を対象とした(1)や(2)と比較して相関がよく見える。このことから下降気流の発生には、特に煙層境界付近における抵抗と浮力のバランスが大きく影響していると考えられる。

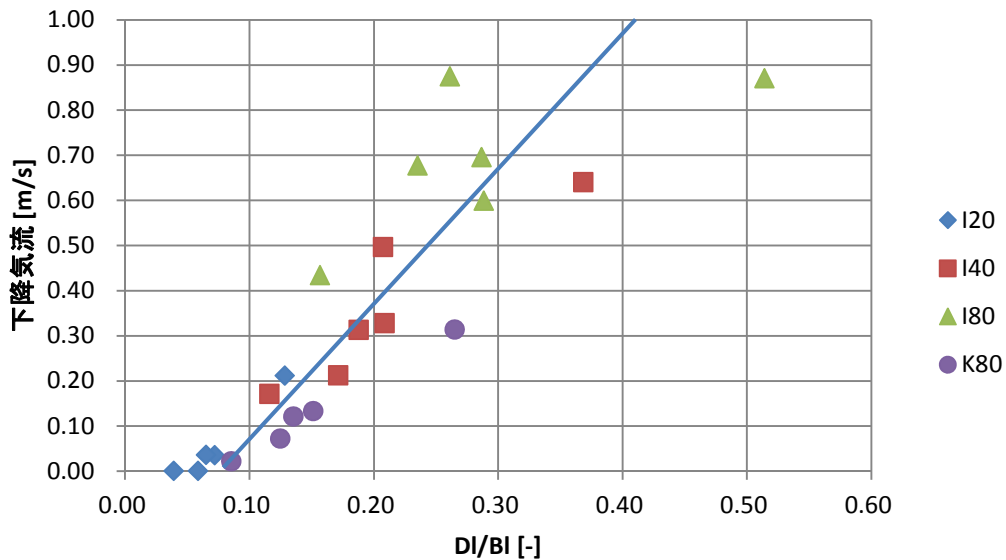


図 4.5 煙層境界付近 D_l/B_l と下降気流

また Chow は無次元圧力 P_d [-]を定義し、 P_d と D_l/B_l がノズルごとに相関を取ることを示している。無次元圧力 P_d [-]は放水圧 P [MPa]、水滴密度 ρ_d [kg/m³] ($\rho_d = 1000$)、火源発熱速度 \dot{Q} [kW]、下部層空気密度 ρ_0 [kg/m³]、空気比熱 C_p [kJ/kg·K] ($C_p = 1.006$)、下部層温度 T_0 [K]、垂れ壁高さ H [m] (本研究においては開口部上端からノズルまでの高さを指す)により、以下の式で定義される。

$$P_d = P/\rho_d V_0^2 \tag{4.29}$$

$$V_0 = \left(\frac{g\dot{Q}}{\rho_0 C_p T_0 H} \right)^{1/3} \tag{4.30}$$

無次元圧力 P_d と煙層境界付近 D_l/B_l の関係を示す。ノズルごとに分かれ、傾向が表されることが分かる。

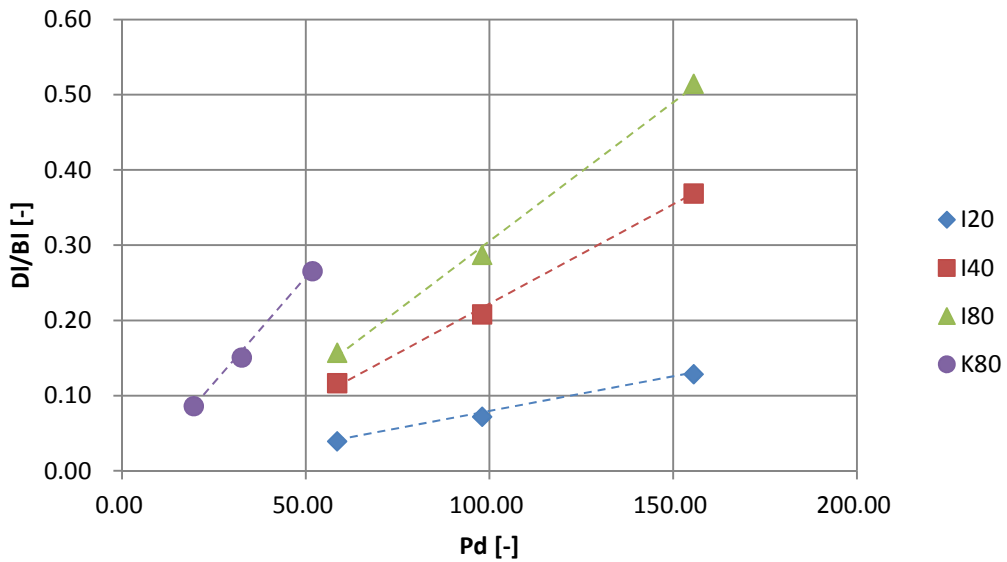


図 4.6 無次元圧力 P_d と煙層境界付近 D_l/B_l

4.3 下降気流予測式の構築

下降気流の発生には煙層境界付近における抵抗と浮力のバランスが重要であるという検証結果が得られたことから、第2章にて測定を行った水滴の粒径、煙層境界付近における粒速、散水量の実測値を基に、式(4.1)～(4.7)により抵抗 D [N/m^3]および浮力 B [N/m^3]の計算を行う。抵抗 D と浮力 B のバランスから、発生する下降気流 v_s [m/s]と粒速 v_d [m/s]とのバランスが決まると考えた。なお煙層の温度には平均温度を用いた。

図4.7に D/B [-]と v_s/v_d [-]の関係を示す。直線で示すように相関がはっきりと表れていることが見て取れる。ただし D/B の値が特に高い領域では v_s/v_d の値が相関せず、上昇していない事が分かる。これは、煙層が床面に達したために煙層の下方向の動きが抑制され、発生し得る v_s/v_d の上限に達しているのではないかと考えられる。

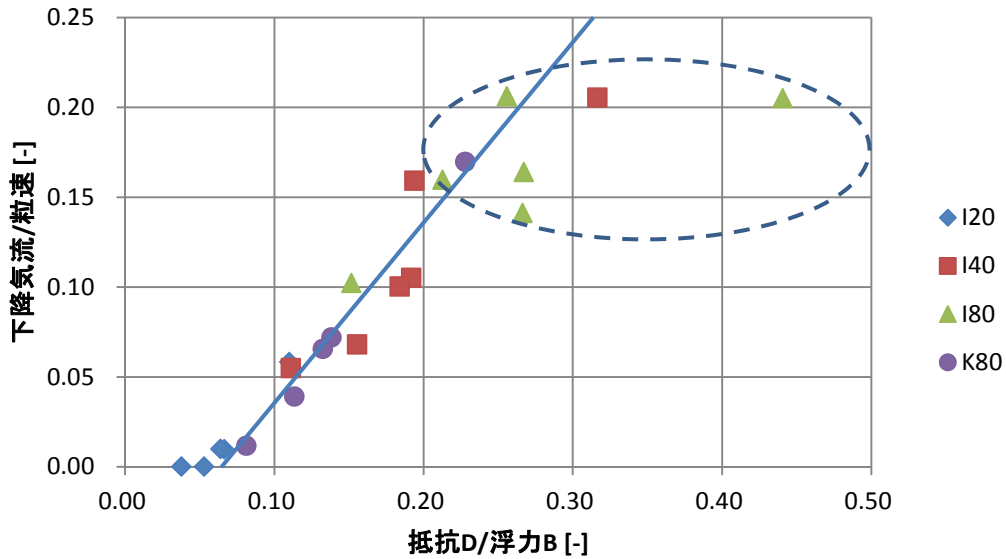


図 4.7 抵抗 D /浮力 B と下降気流 v_s /粒速 v_d

図 4.8 に D/B と、散水 30 秒後の床付近の CO_2 濃度上昇値との関係を示す。床付近の CO_2 濃度の大幅な上昇は、煙層の空気が床面に達していることを意味する。 CO_2 濃度上昇値は D/B の値が 0.2 付近を境界に急激に上昇し、さらに大きくなると煙層が不安定となり、床面に達していることが分かる。

また図の写真はそれぞれ矢印で示したパターンの実験映像である。いずれも火源へブタン 0.1 m^2 のもので、散水 30 秒後の映像を表している。I20 と K80 は安定領域、I40 は遷移領域、I80 は不安定領域に当てはまり、区画奥の床面が白く濁って見えることから、I80 では煙が床面に達している様子がはっきりと見て取れる。

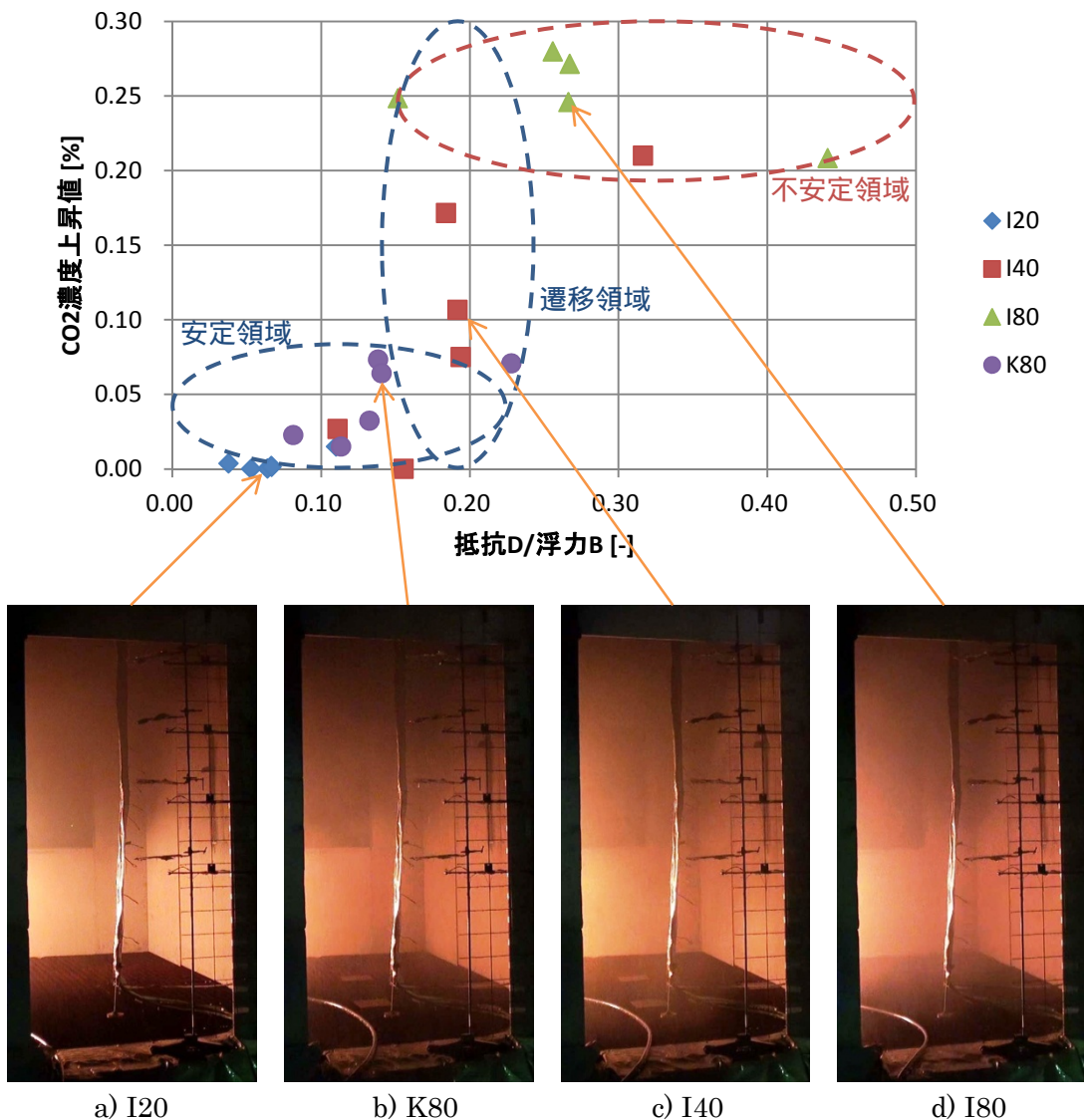
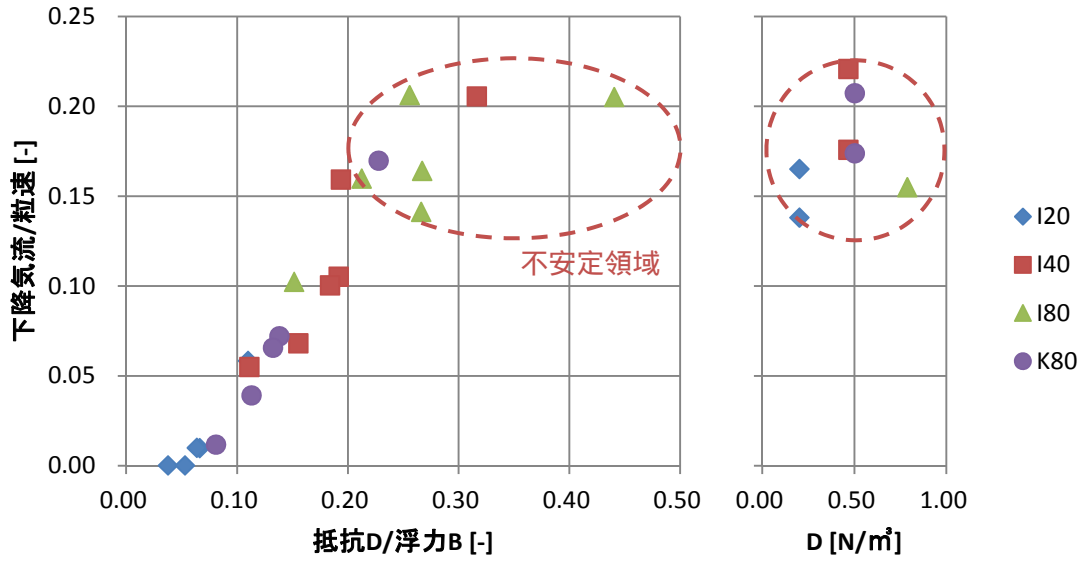


図 4.8 抵抗 D /浮力 B と CO_2 濃度上昇値および実験映像

図 4.9 に火源なしの場合の下降気流/粒速を並べて示す。火源がない場合は煙層（上部と下部の温度差）が発生しないため、浮力は存在しない。そのため横軸を抵抗 D の値で表示させた。すると火源なしの場合の下降気流 v_s /粒速 v_d の値は不安定領域の下降気流と同じ程度になっていることが見て取れる。浮力がない場合には D/B が無限大となるため不安定領域に当てはまり、下降気流の上限に達していることが分かる。



a) D/B と v_s/v_d

b) D と v_s/v_d (火源なし)

図 4.9 下降気流 v_s /粒速 v_d

図 4.10 に抵抗 D /浮力 B と下降気流 v_s /粒速 v_d の関係を示す。床付近の CO_2 濃度上昇値を基に本ケースでは、 $0 < D/B < 0.15$ を安定領域、 $0.15 < D/B < 0.25$ を遷移領域、および $0.25 < D/B$ を不安定領域と定義した。図中に示すように、安定領域および遷移領域では両者が直線的な相関をとることが分かる。ここから下降気流に関する以下の関係式が得られる。

$$\frac{v_s}{v_d} = \frac{D}{B} - 0.07 \quad (0.07 < \frac{D}{B} < 0.25) \quad (4.31)$$

なお関係式が原点を通らないことは、安定した下降気流の発生にはある程度以上の浮力 B に対する抵抗 D が必要であることを示す。この理由として、抵抗 D に対する浮力 B の割合が極端に大きい場合、水滴の影響を受けた煙が浮力を保ち、再び煙層に戻る現象が起こるためであると考えられる。

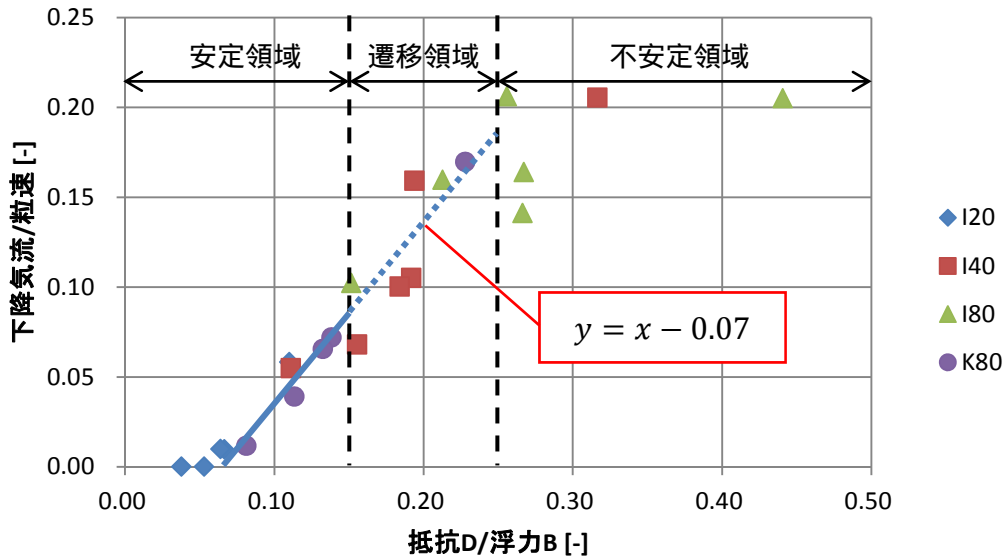


図 4.10 抵抗 D /浮力 B と下降気流 v_s /粒速 v_d

式(4.1)および式(4.5)、式(4.6)を用いると、以下の式に整理できる。

$$v_s = \frac{k_d v_d^2 W}{m_d B} - 0.07 v_d \quad (4.32)$$

さらに式(4.2)および式(4.7)を用いて整理すると、下降気流 v_s の予測式は以下の式で表せる。

$$v_s = \frac{C_D A_d v_d^2 W}{2 m_d g (\rho_0 - \rho_s) / \rho_s} - 0.07 v_d \quad (4.33)$$

下降気流が床面に達することで不安定領域となる境界は区画の条件によって変わると考えられるが、本研究では異なるノズルと火源を組み合わせる実験を行い、共通となる式が得られたことから、安定領域において発生する下降気流はこの予測式によって予測可能だと考えられる。

また下降気流は単位面積、単位時間あたりの下層貫入容積と捉えることができるため、下層貫入量 m_E [kg/s]の予測が可能となる。下層貫入量 m_E [kg/s]は下降気流 v_s [m/s]、散水面積 A [m²]、煙層の空気密度 ρ_s [kg/m³]により、以下の式で表すことができる。

$$m_E = v_s A \rho_s \quad (4.34)$$

-第 5 章-

総括

5.1 総括

本研究では、散水に伴う煙層の挙動を捉えることを目的とした区画火災実験を行い、PIVシステムを用いることで下降気流の測定を可能にし、散水ノズル基礎データの測定と併せ、下降気流発生条件の理論的考察を行った。

以下に本研究で得られた知見を述べる。

第2章において、散水ノズルの基本データの測定を行った。下降気流発生メカニズムの検証を行う際に必要となる、水滴の粒径、粒速、散水分布の3つの項目のデータを取得した。

第3章において、下降気流の測定を目的とした区画火災実験を行った。PIVシステムを用いることにより、散水設備作動時の煙層の挙動を捉えることを可能にした。第2章にて基礎データを取得した4つの散水ノズルと、6つの火源を組み合わせる実験を行った結果、ノズルごと、温度条件ごとに下降気流の大きさに傾向が表れることが確認された。下降気流の大きさは、散水ノズルの水量だけに依らないこと、煙層の温度が高くなると小さくなる、あるいは発生しなくなることが確認された。

第4章において、第2章および第3章で得たデータの理論的考察を行い、下降気流発生条件を示す式の構築を行った。まずは既往の手法を踏襲して検討をおこなった結果、煙層が下部層へ貫入する現象は、煙層境界付近における抵抗と浮力のバランスおよび、雰囲気と水滴の速度比に依存すると考えられた。そして、実測した水滴の粒径、煙層境界付近における粒速、散水量の値を基に抵抗の計算を行った。その結果、発生する下降気流の予測式を得ることができ、下降気流および下層貫入量を簡易的に予測することが可能となった。

今後の展望

本研究のさらなる展望を目指し、今後考慮すべき問題点を以下に記す。

本研究は区画・ノズルとも限られた条件で行っており、ノズルの各パラメータを実測により得たが、より多くのノズルに適用範囲を広げるためには、データベースの構築、あるいは計算で予測する手法が必要となる。

また本研究では散水開始直後を研究対象とし、散水直前の煙層温度を用いて計算を行ったが、水滴の吸熱による温度変化も考慮する必要性が考えられる。

さらに避難安全設計等に生かすためには、二層ゾーンモデル等への適用が有効と考えられる。

参考文献

本論文をまとめるにあたり、参考にした文献・書籍を以下に記す。

- [1] 田中 太, 大宮喜文, 高橋祥直, 高瀬文生, 中尾智昭: 散水設備作動時における実大区画の火災性状, 日本建築学会環境系論文集, No.614, pp1-7, 2007
- [2] 財団法人日本建築センター, 他: 避難安全検証法の解説及び計算例とその解説, 2001
- [3] M.L.Bullen: The Effect of a Sprinkler on the Stability of a Smoke Layer beneath a Ceiling, Fire Research Station, Fire Research Note No.1016, 1974
- [4] K.Y.Li, 他: A Mathematical Model on Interaction of Smoke Layer with Sprinkler Spray, Fire Safety Journal, No.44, pp96-105, 2009
- [5] K.Y.Li, 他: Simplified Calculation Method for Determining Smoke Downrag Due to a Sprinkler Spray, Fire Technology, No.47, pp781-800, 2011
- [6] W.K.Chow, 他: Experimental Studies on Stability of Smoke Layer with a Sprinkler Water Spray, Experimental Heat Transfer, No.23:3, pp196-216, 2010
- [7] 桑名裕太, 織戸貴之, 太田 充, 高瀬文生, 大宮喜文, 山口純一: スプリンクラー設備作動時の区画内煙性状 その1 実験概要, 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東)2006年9月, pp279-280, 2006
- [8] 織戸貴之, 太田 充, 高瀬文生, 桑名裕太, 大宮喜文, 山口純一: スプリンクラー設備作動時の区画内煙性状 その2 実規模区画を使用した燃焼実験結果, 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東)2006年9月, pp281-282, 2006
- [9] 太田 充, 桑名裕太, 高瀬文生, 大宮喜文, 織戸貴之, 山口純一: スプリンクラー設備作動時の区画内煙性状 その3 発熱速度・開口噴出量結果の妥当性とその考察, 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東)2006年9月, pp283-284, 2006
- [10] 高瀬文生, 太田 充, 織戸貴之, 桑名裕太, 大宮喜文, 山口純一: スプリンクラー設備作動時の区画内煙性状 その4 二層ゾーンモデルへの適用, 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東)2006年9月, pp285-286, 2006
- [11] 桑名裕太, 織戸貴之, 高瀬文生, 太田 充, 山口純一, 大宮喜文: ガス分析に基づく火災区画内の流量測定 スプリンクラー設備作動時の区画内煙性状 その1, 日本建築学会環境系論文集, No.623, pp1-8, 2008
- [12] James G. Quintiere, 他: 基礎 火災現象原論, 共立出版, 2009
- [13] (社)可視化情報学会: PIVハンドブック, 森北出版, 2002
- [14] Yaping He, 他: Determination of interface height from measured parameter profile in enclosure fire experiment, Fire Safety Journal, No.31, pp19-38, 1998
- [15] D.T.Sheppard: Spray Characteristics of Fire Sprinklers, Ph.D dissertation, Northwestern University, Evanston, 2002

- [16] NFPA13HB : Automatic Sprinkler System Handbook 2002 Edition , National Fire Protection Association , 2002
- [17] W.K.Chow , L.C.Shek : Physical Properties of a Sprinkler Water Spray , Fire and Material , No.17 , pp279-292 , 1993

-付録-

千住スプリンクラー製：ZQR 仕様

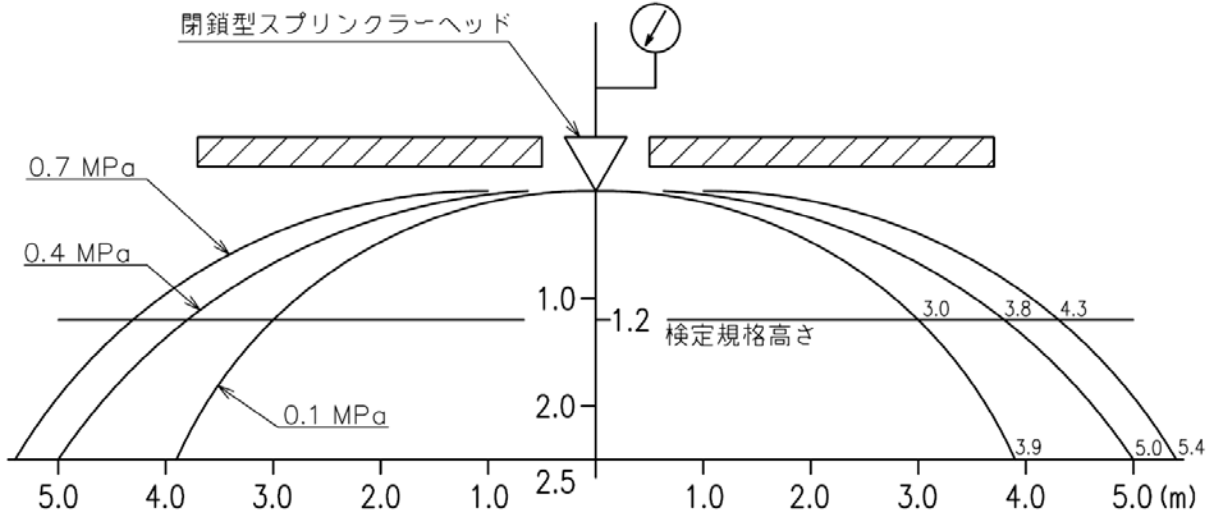


図 散水パターン

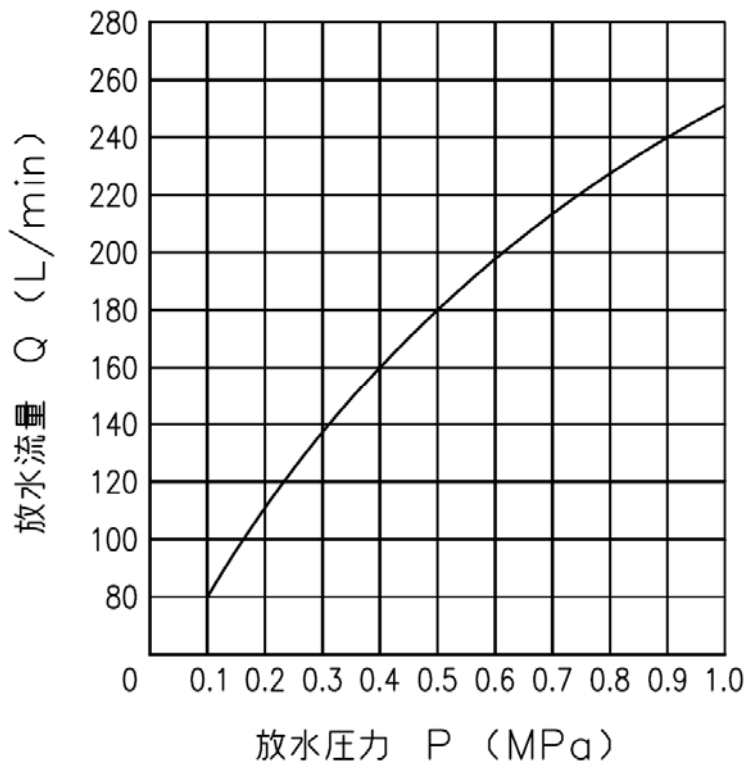
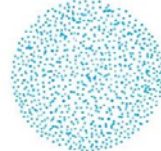
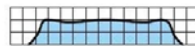


図 放水特性

いけうち製：BBXP シリーズ仕様



【スプレーパターン】



【流量分布】

【特 性】

- スプレーパターンが円形で均等な流量分布の広噴角円錐ノズル。
- 噴角が120°のため、他のどのノズルよりも広い噴霧面積をカバーできる。
- 小噴量から中噴量までシリーズ化。
- 異物通過径を大きくするため、旋回子にX形ワラーを採用。このため目詰まりしにくい。

【標準圧力】

0.2MPa(噴量の区分015~060)
0.35MPa(噴量の区分10以上)

【主用途】

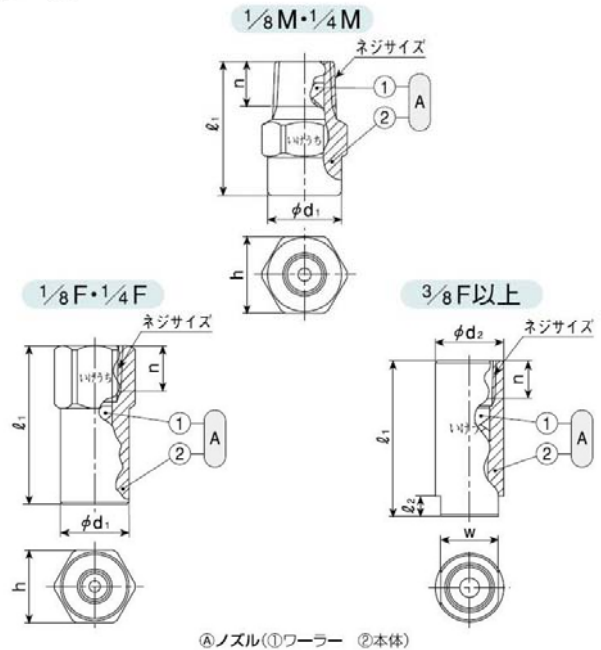
洗浄：ガス、焼却煙、機器装置、エリミネーター、スクリーン、タンク、部品、碎石、土砂など
冷却：ガス、機器装置、タンク、鋼板など
散布：汚水処理、バツ気、消泡、防火、消火、鎮塵、海水淡水化装置など

BBXPシリーズ

BBXPシリーズ	
構造	●ノズル本体とX形ワラーの2部より成り、ワラーを本体に圧入した一体形ノズル。
材質	●ネジサイズ1F以下はB(真ちゅう)またはS303 1½F以上はS316(SCS14) オプション材質 S316L(SCS16)、その他

シリーズ	ネジサイズ	外形寸法(mm)							質量(gr.)	
		ℓ ₁	ℓ ₂	h	w	φd ₁	φd ₂	n	B	SUS
BBXP	⅓M	21	—	12	—	11.5	—	7	11.5	11
	¼M	29	—	14	—	13.5	—	10.5	21	19.5
	⅓F	27	—	12	—	11.5	—	7	20	19
	¼F	36.5	—	17	—	16	—	10.5	70	66
	⅓F	45.5	6	—	17	—	20	11	80	75
	½F	56	8	—	22	—	25	14	150	140
	¾F	73	10	—	27	—	32	15	320	300
	1F	94	14	—	34	—	40	17	625	585
	1½F	131	20	—	50	—	58	19	—	1760
	2F	168	24	—	60	—	70	23	—	2980
	2½F	199	27	—	80	—	90	27	—	5890
	3F	220	30	—	90	—	105	30	—	9400
4F	278	40	—	115	—	130	36	—	16100	

(ご注意) 形番、材質により、外観・外形寸法が若干異なる場合があります。



①ノズル ②ワラー ③本体

噴量の区分	ネジサイズ									噴 角			噴 量 (ℓ/min)									平均粒径 (μm)	異物通過径 (mm)
	⅓F	¼F	⅓F	1F	1½F	2F	2½F	3F	4F	0.15 MPa	0.35 MPa	0.7 MPa	0.03 MPa	0.05 MPa	0.1 MPa	0.15 MPa	0.2 MPa	0.35 MPa	0.5 MPa	0.7 MPa	1 MPa		
10	○									123°	120°	111°	3.34	4.21	5.79	6.98	7.96	10.0	11.6	13.3	15.3	340	1.9
12	○									124°	120°	112°	4.00	5.06	6.95	8.37	9.55	12.0	13.9	15.9	18.4	340	1.9
14	○									124°	120°	112°	4.67	5.90	8.10	9.77	11.1	14.0	16.2	18.6	21.5	340	2.6
16	○									125°	120°	113°	5.33	6.74	9.25	11.2	12.7	16.0	18.5	21.2	24.6	340	2.6
18		○								123°	120°	111°	6.00	7.58	10.4	12.6	14.3	18.0	20.8	23.9	27.6	420	2.9
20		○								123°	120°	111°	6.67	8.43	11.6	14.0	15.9	20.0	23.1	26.5	30.7	420	2.9
23		○								124°	120°	112°	7.67	9.69	13.3	16.0	18.3	23.0	26.6	30.5	35.3	420	2.9
26		○								124°	120°	112°	8.67	11.0	15.1	18.1	20.7	26.0	30.1	34.5	39.9	480	3.5
30			○							123°	120°	111°	10.0	12.6	17.4	20.9	23.9	30.0	34.7	39.8	46.0	580	3.8
40			○							124°	120°	112°	13.3	16.9	23.2	27.9	31.8	40.0	46.3	53.1	61.4	580	4.1
50			○							125°	120°	113°	16.7	21.0	29.0	34.9	39.8	50.0	57.8	66.3	76.7	580	4.7
60				○						124°	120°	112°	20.0	25.3	34.7	41.9	47.7	60.0	69.4	79.6	92.1	630	5.3
80				○						125°	120°	113°	26.7	33.7	46.3	55.8	63.7	80.0	92.5	106	123	630	5.7

FDS 試算

実験 で用いた 3 つの火源を対象として、FDS による試算を行った。FDS で散水ノズルに設定できるパラメータには散水量、散水角度、初速、粒径等があり、細かく設定を行うことが可能である。

散水量と散水角度は各ノズルの仕様に則り、また床面における散水分布がおおよそ均等になるよう散水角度ごとの水量調整をおこなった。初速は散水圧より計算にて求め、いけうちノズル(I20・I40・I80)は 14.7m/s、SP(K80)は 8.5m/s と定めた。

FDS は図 F.1 のような粒径分布で散水される構造になっており、ここでユーザーが設定できるのは体積分布における、赤い線で示した中央値となっている。本研究で実測した分布例を図 F.2 に示すと、この値は抵抗の計算で用いたザウター平均粒径に近い値となることが分かる。そのため FDS の粒径設定値にはザウター平均粒径を用いた。

火源発熱速度は実験値を基に、面積当たりの発熱速度と火源面積を設定した。その上で、温度分布が実験値と近くなるよう、FDS の発熱速度を調節して設定を行った。

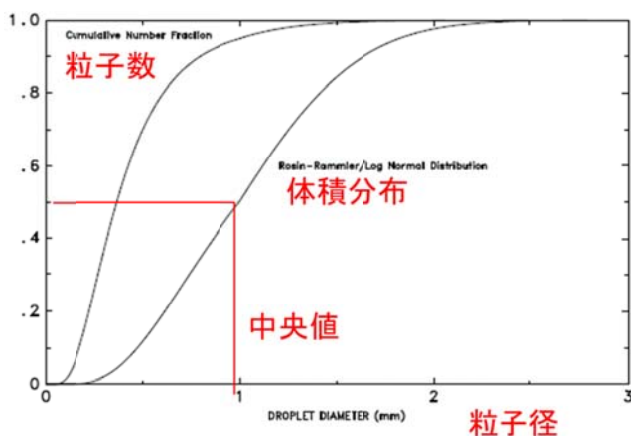


図 F.1 FDS 粒径分布

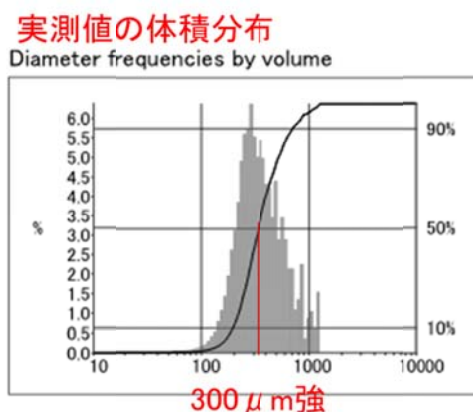
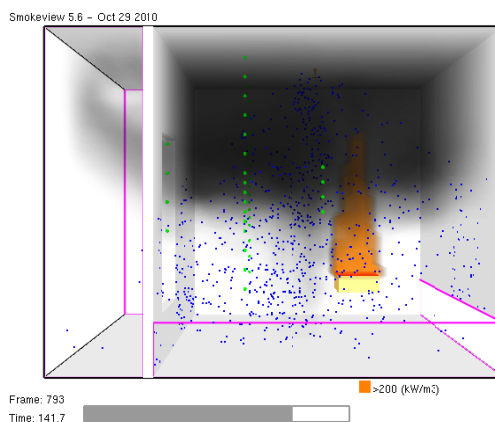
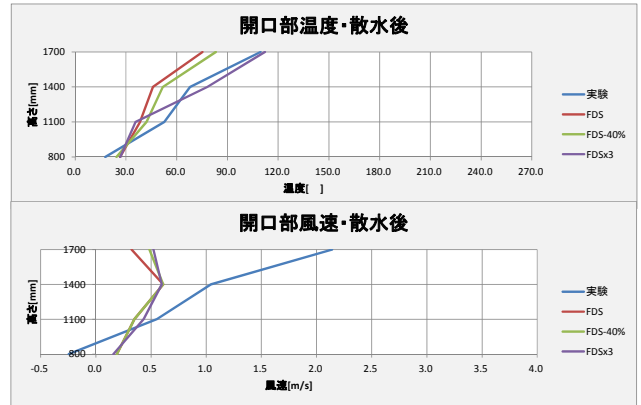
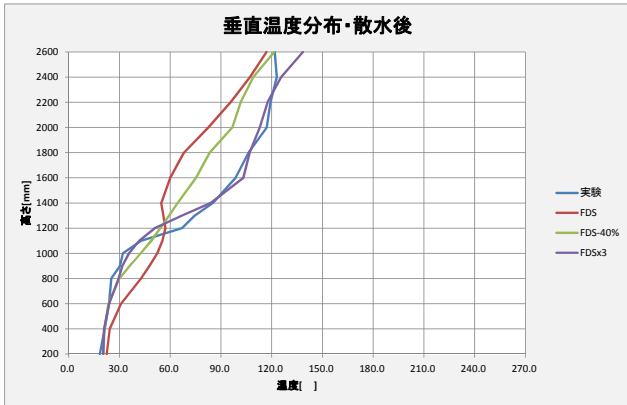
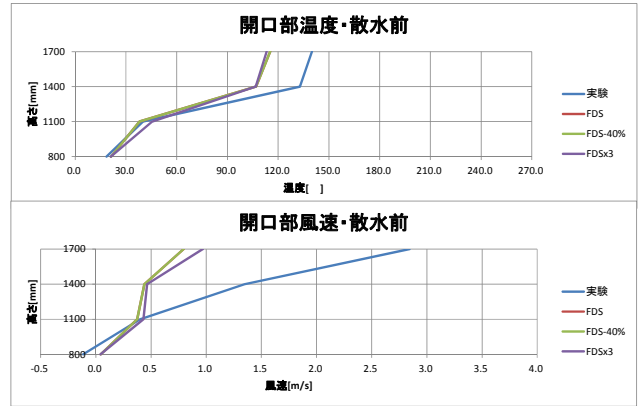
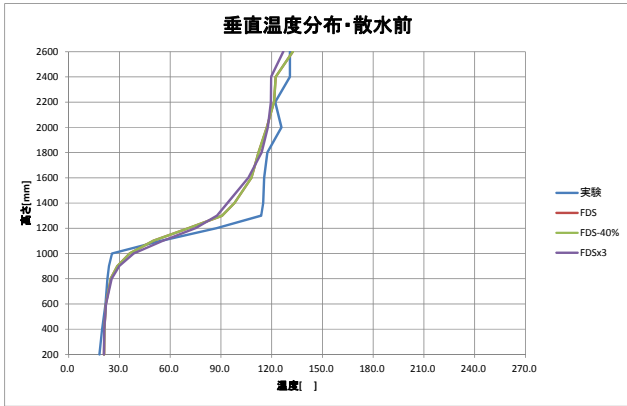
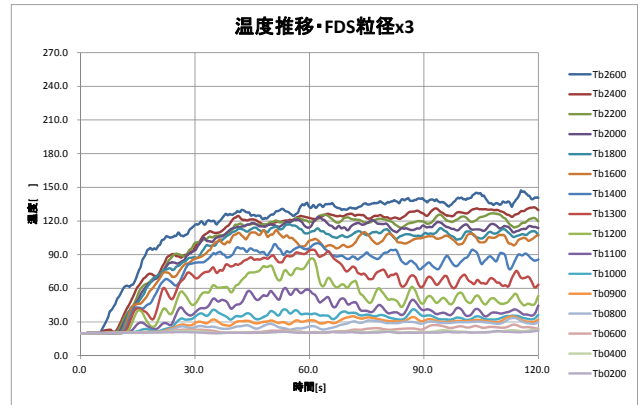
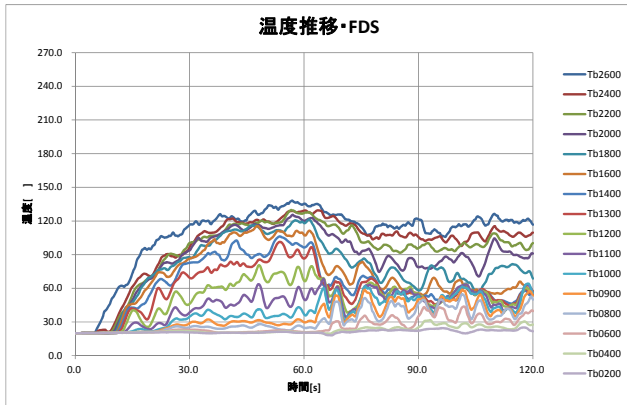
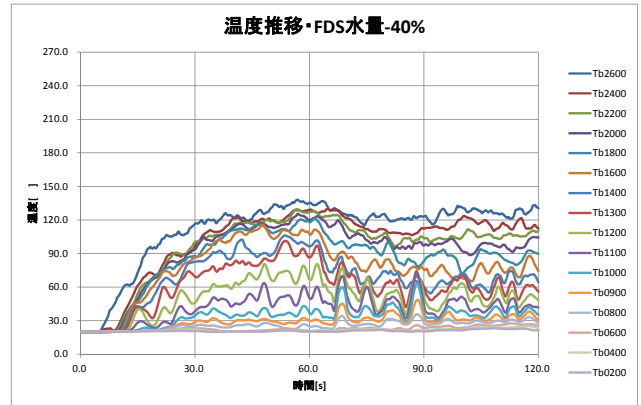
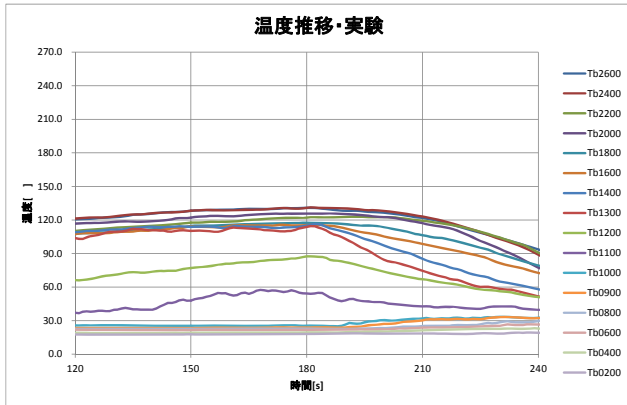


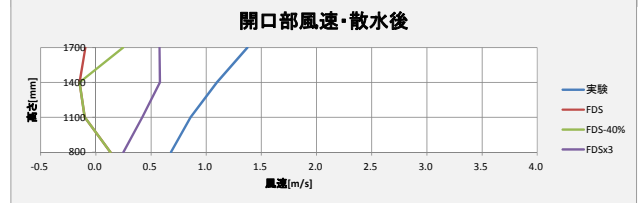
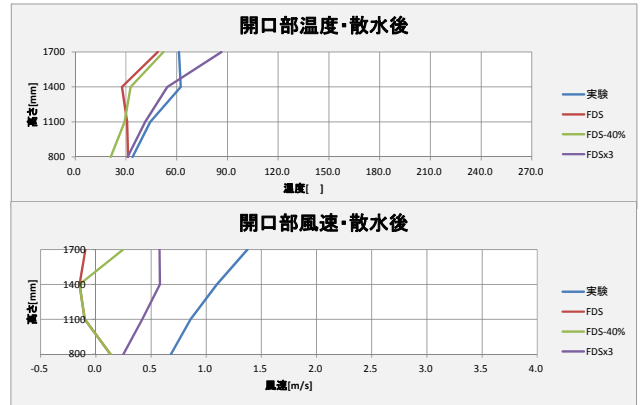
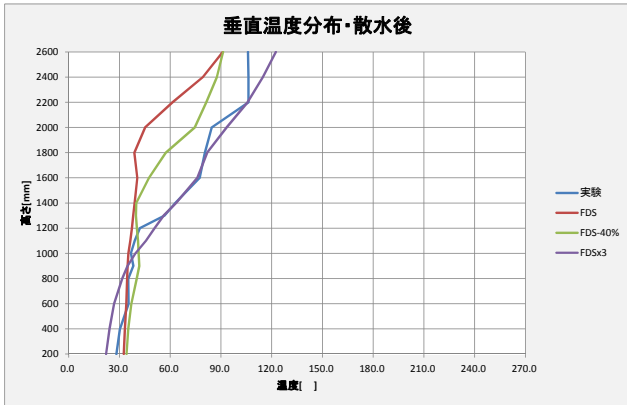
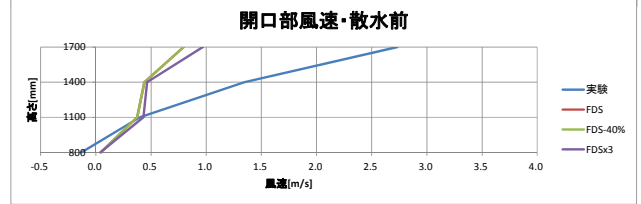
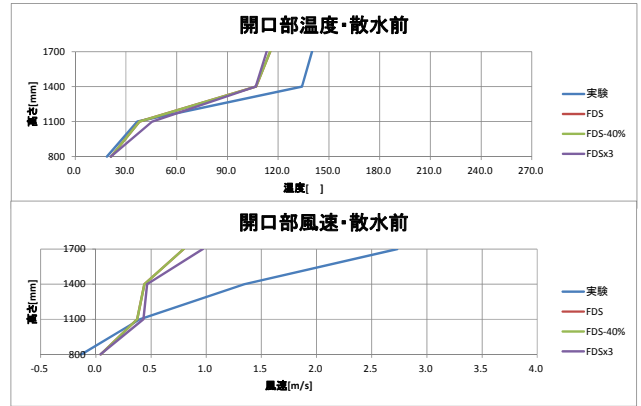
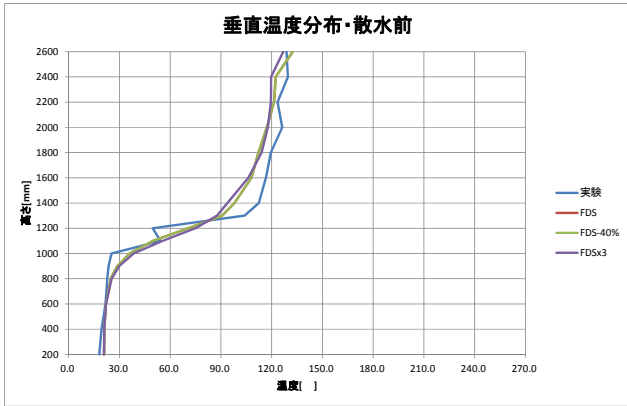
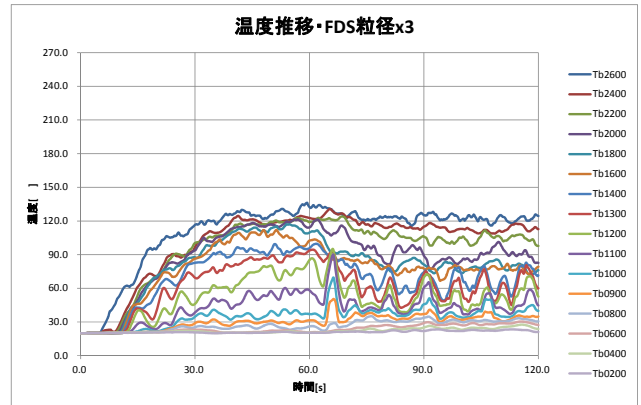
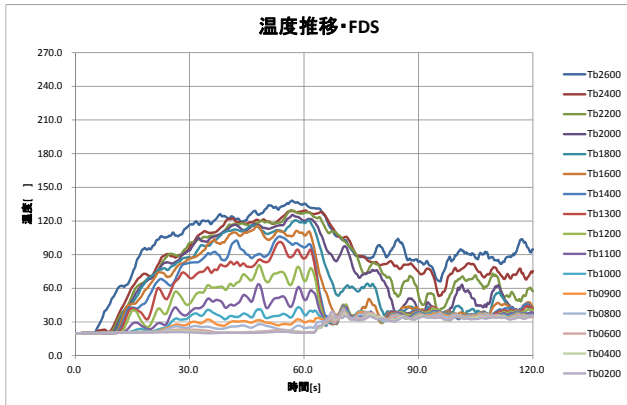
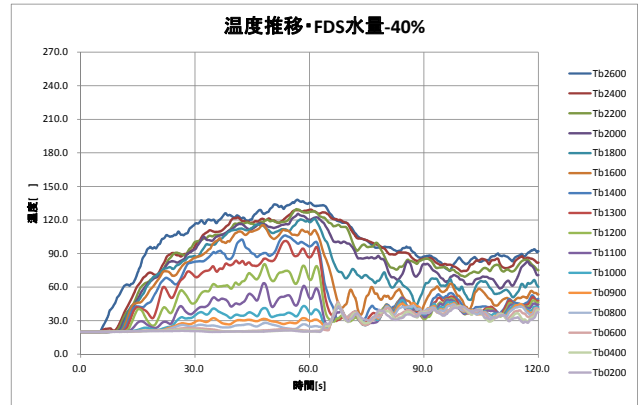
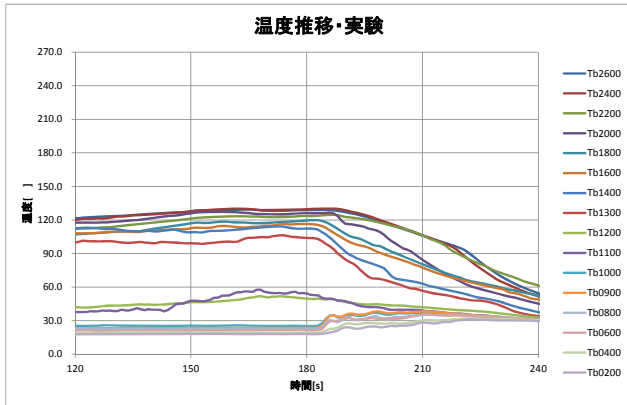
図 F.2 実測粒径分布

実験 で用いた 3 つの火源の実験データと併せて試算結果を掲載するが、上記の条件にて試算を行うと、FDS では水滴が実験値よりもはるかに大きな影響を与える結果となった。そのため併せて FDS の散水量を 40%減らしたもの、粒径を 3 倍の大きさに設定したものを掲載する。粒径を 3 倍に設定すると、温度分布は実験値と近い結果が得られたが、風速は全く再現することができなかった。FDS による散水の影響の再現は大きな課題として残る。なお FDS では着火 60 秒で散水開始としたため、温度推移は全て散水開始時間を中央に合わせて表示した。

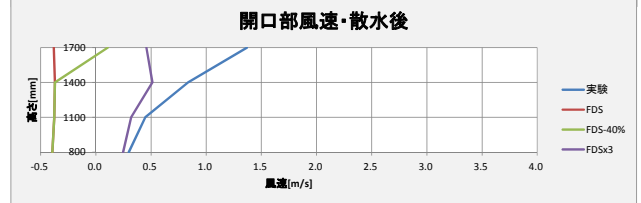
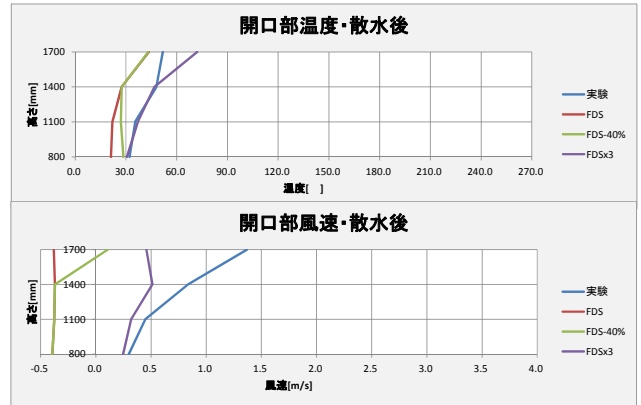
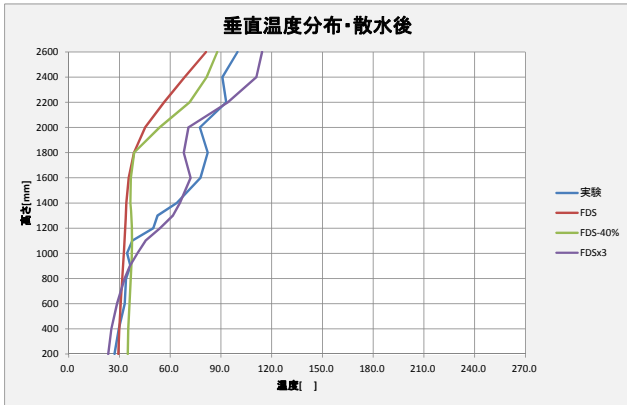
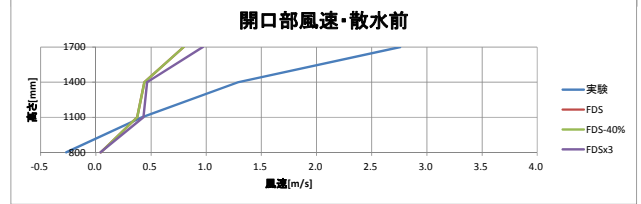
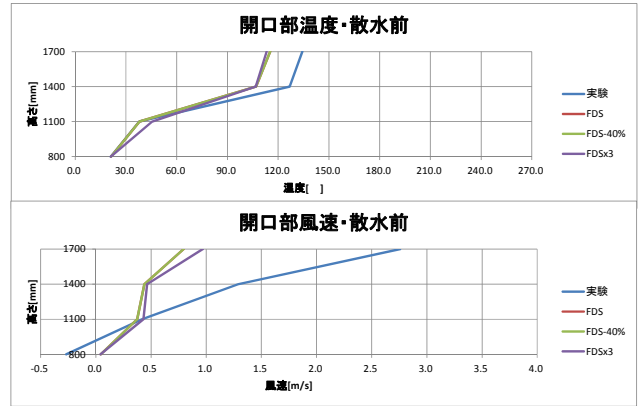
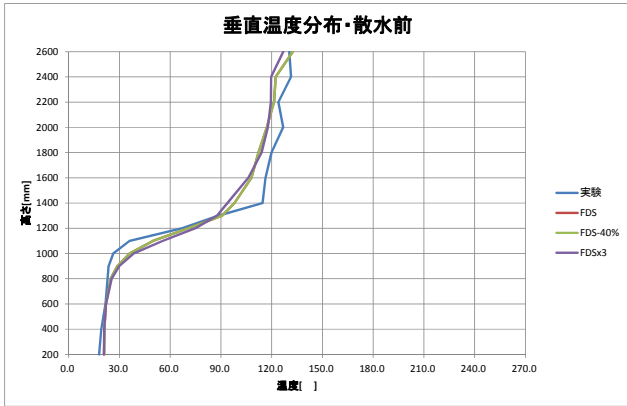
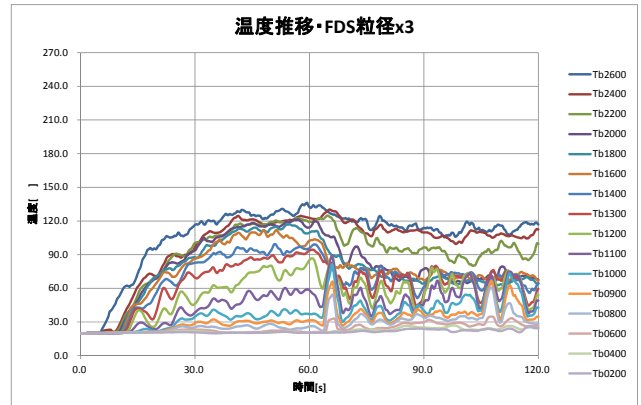
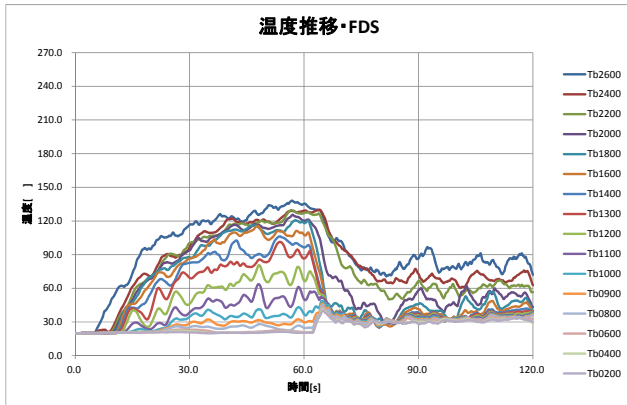
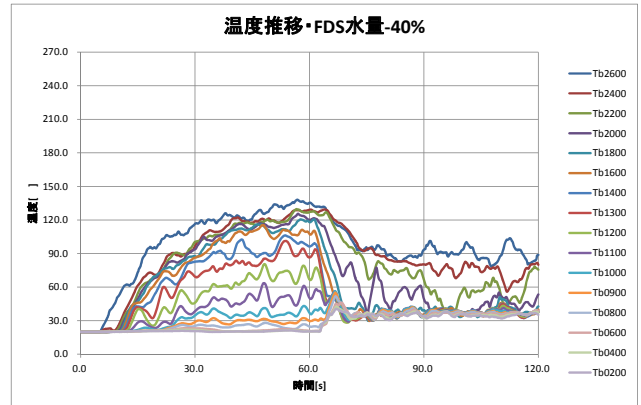
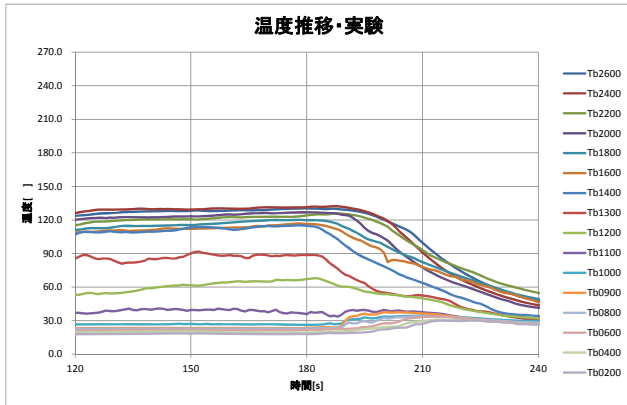




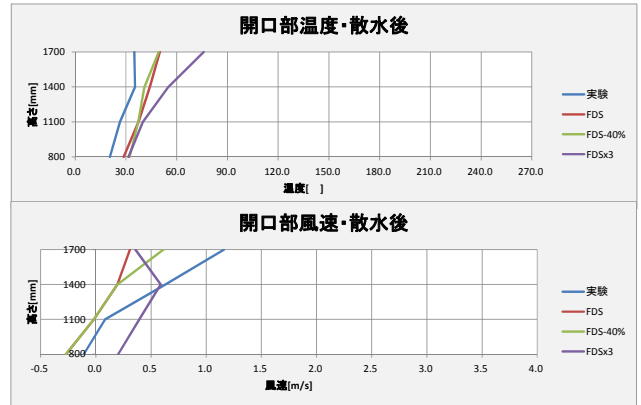
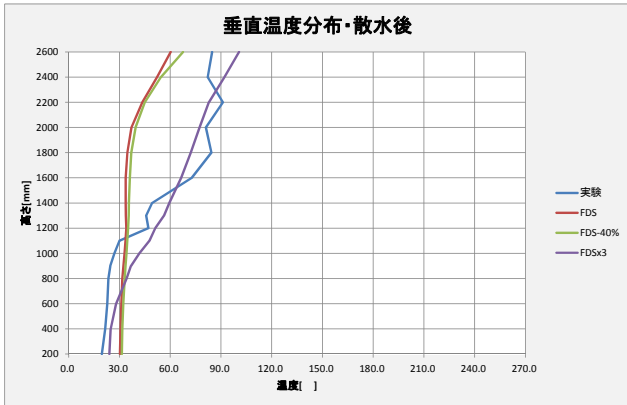
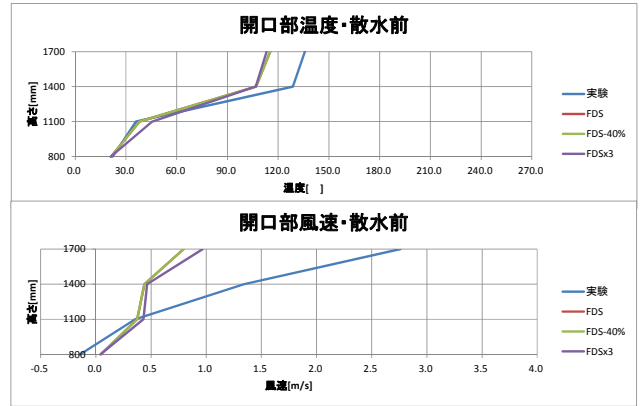
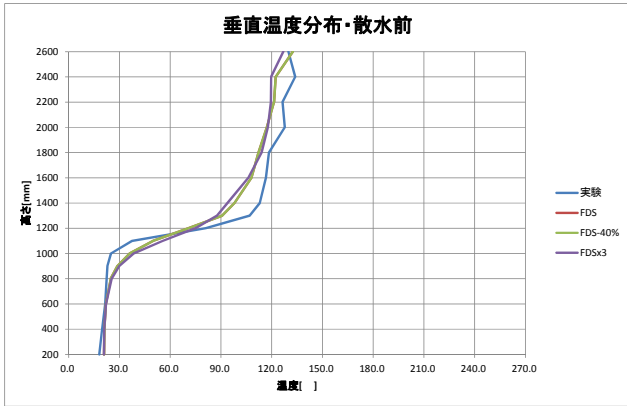
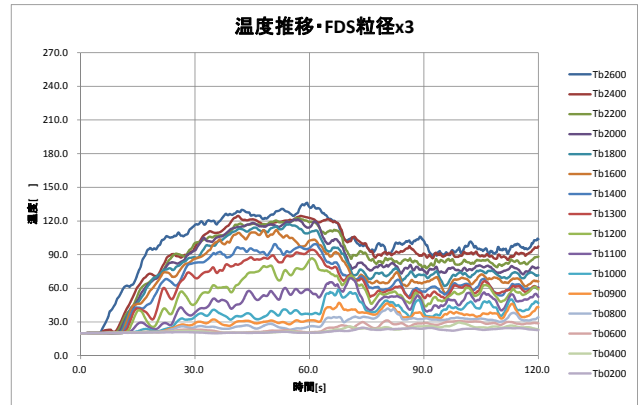
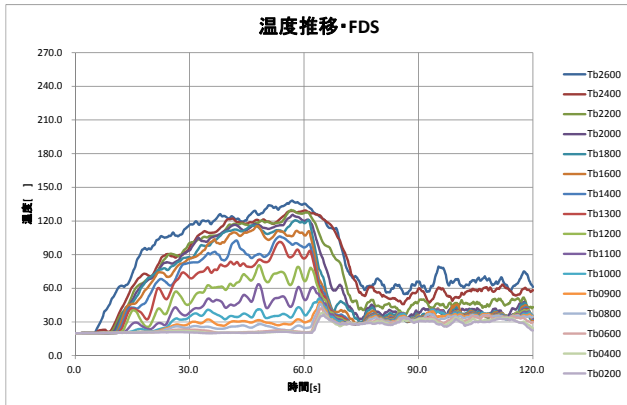
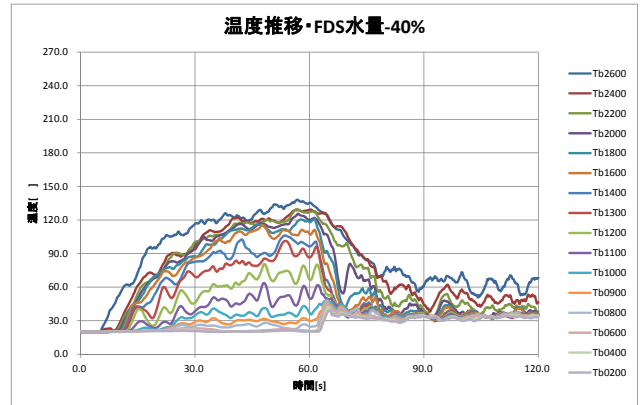
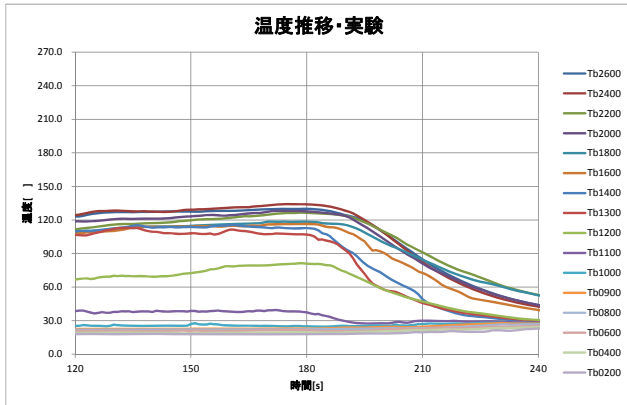
メタノール 0.25 m² ・ I20



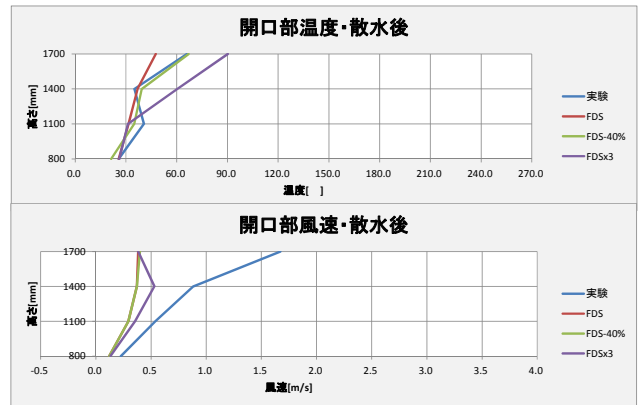
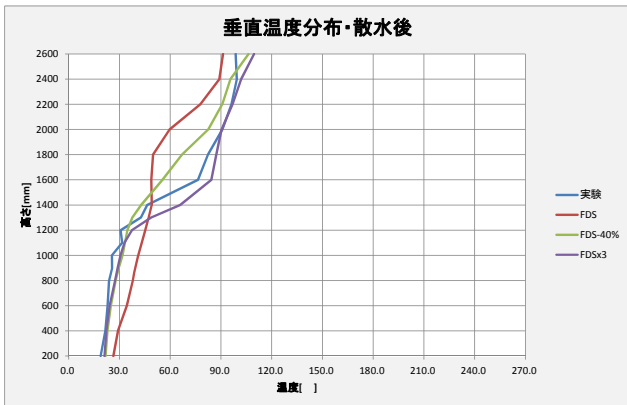
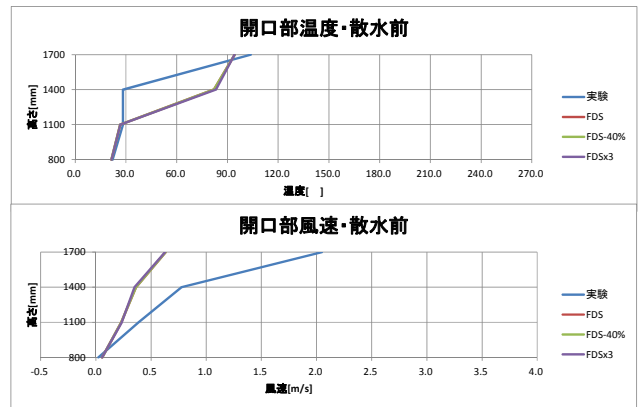
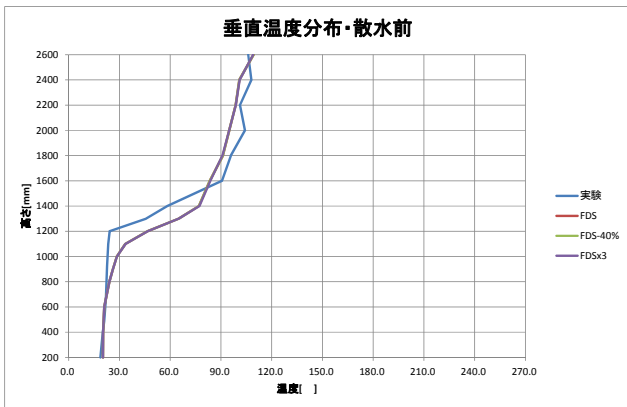
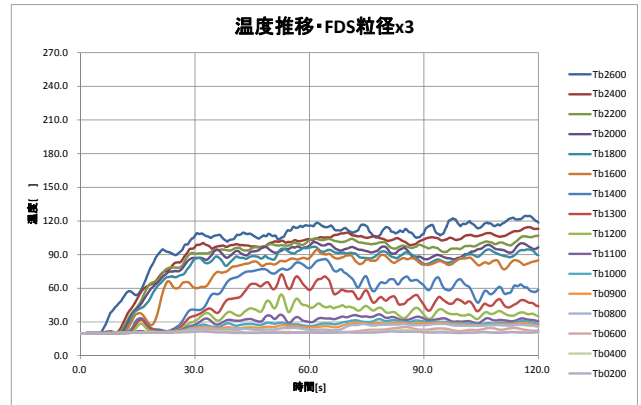
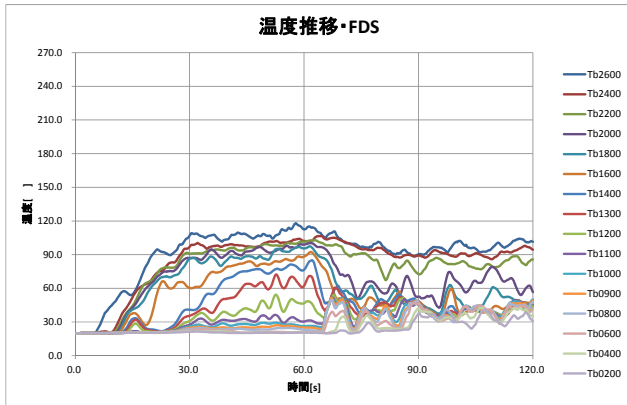
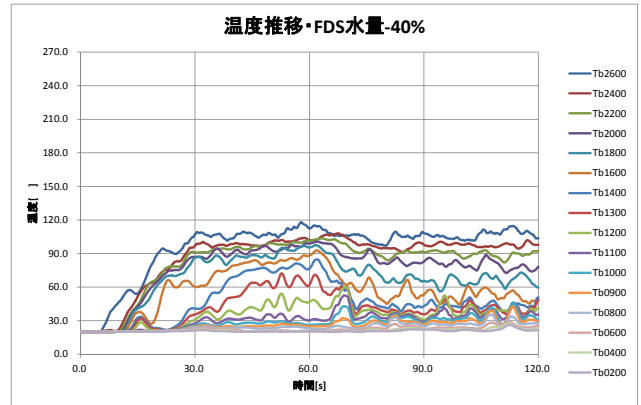
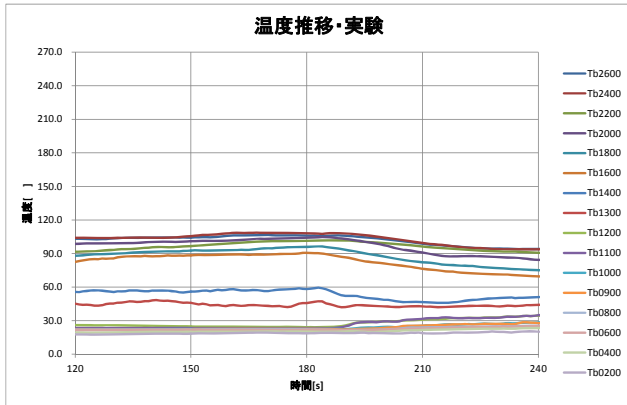
メタノール 0.25 m² ・ I40



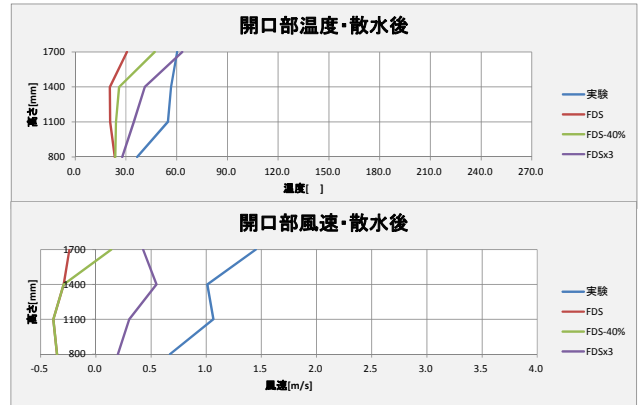
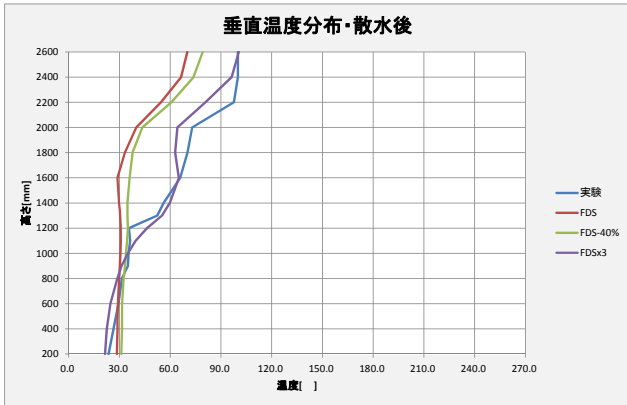
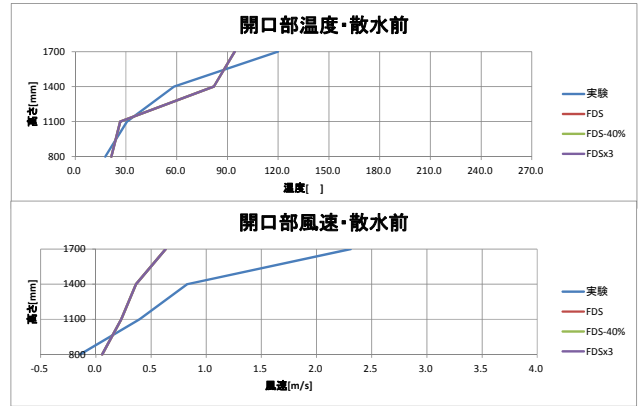
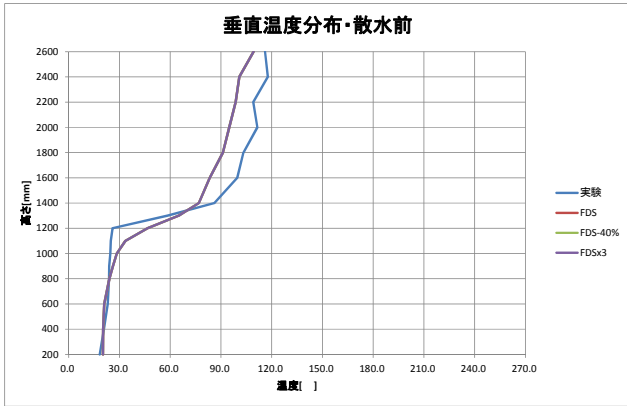
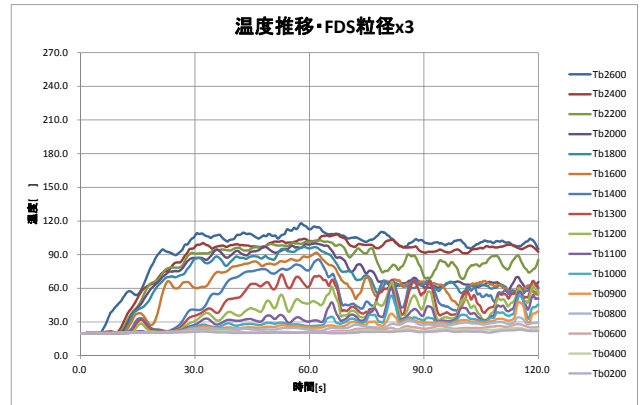
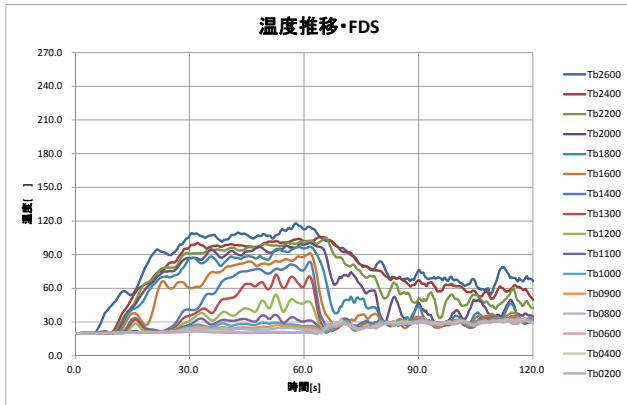
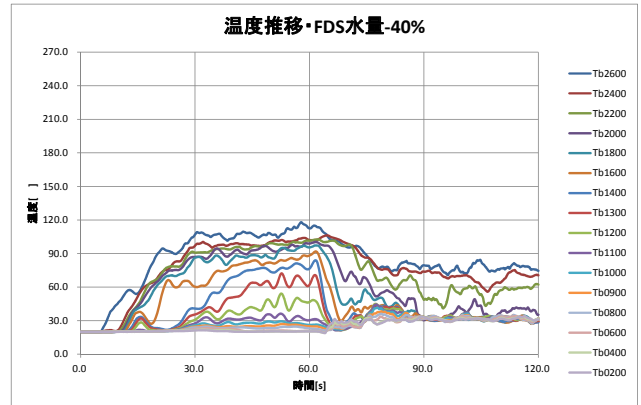
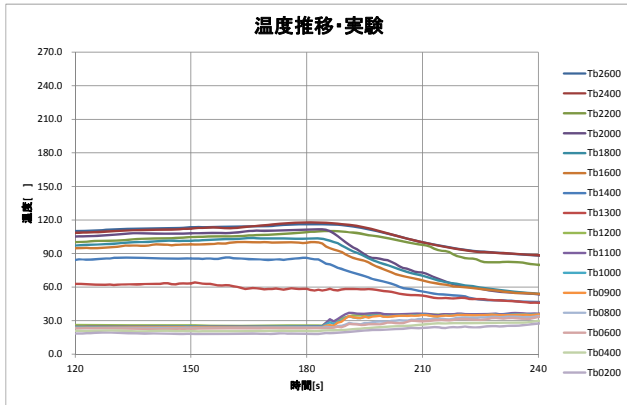
メタノール 0.25 m² ・ I80



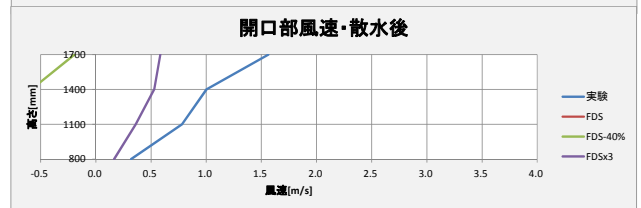
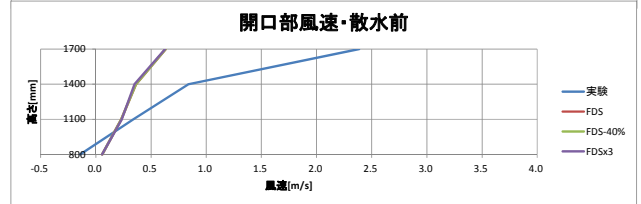
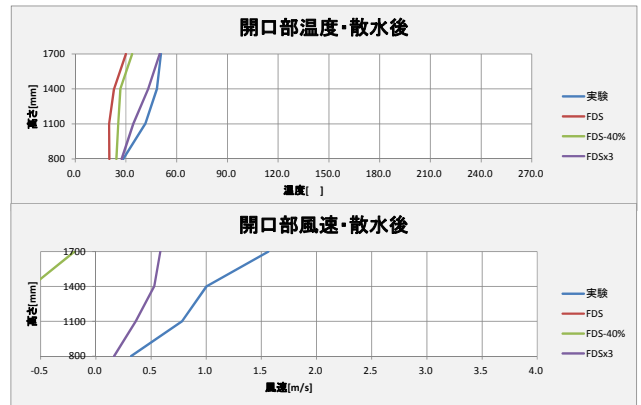
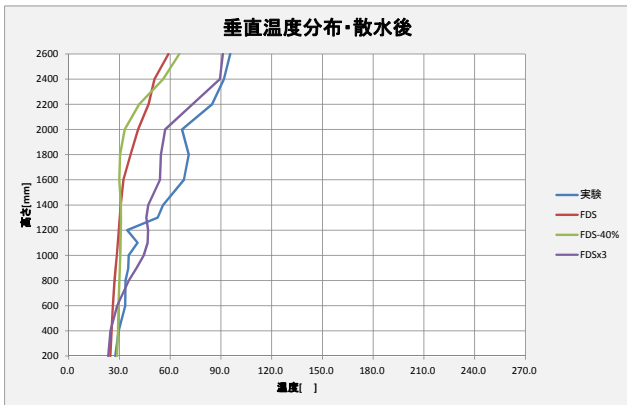
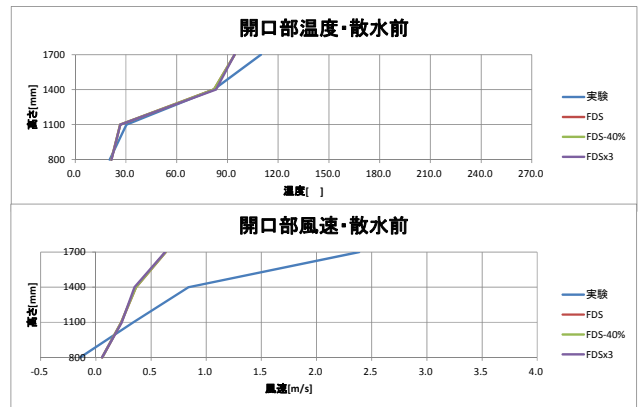
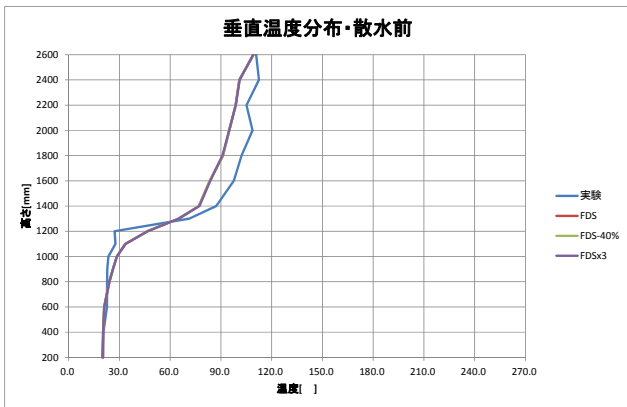
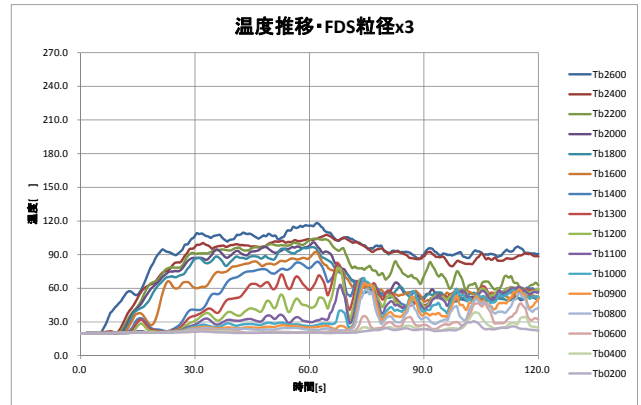
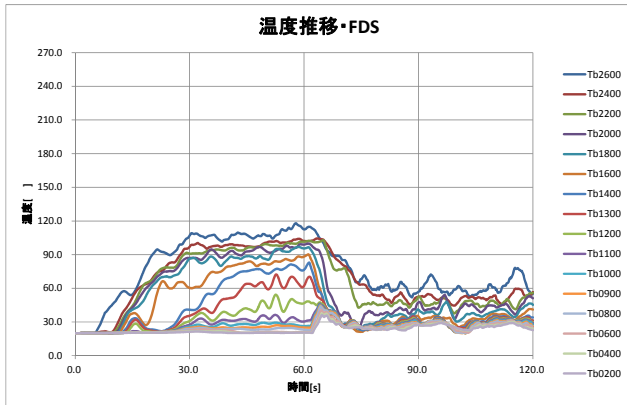
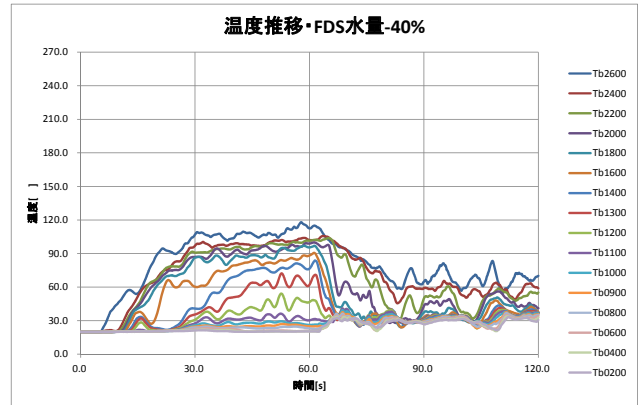
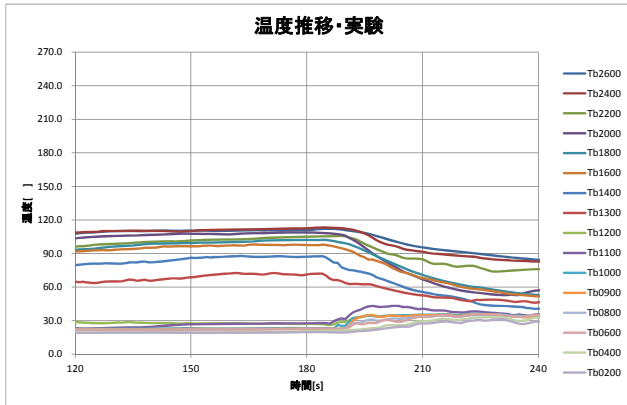
メタノール 0.25 m² ・ K80



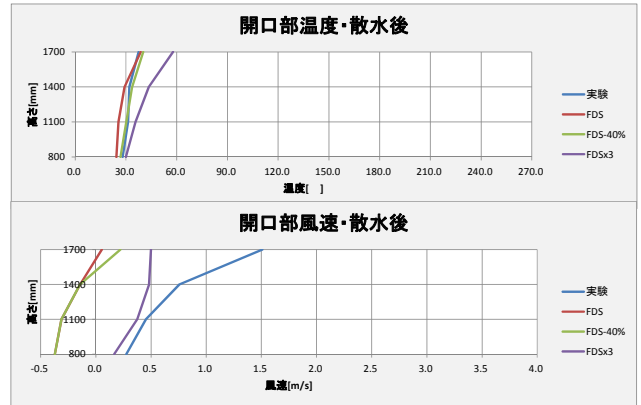
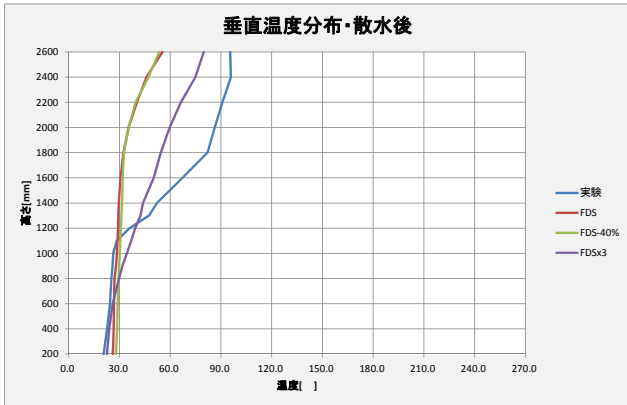
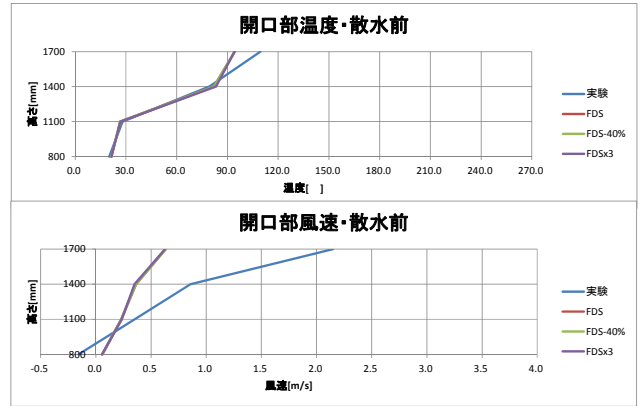
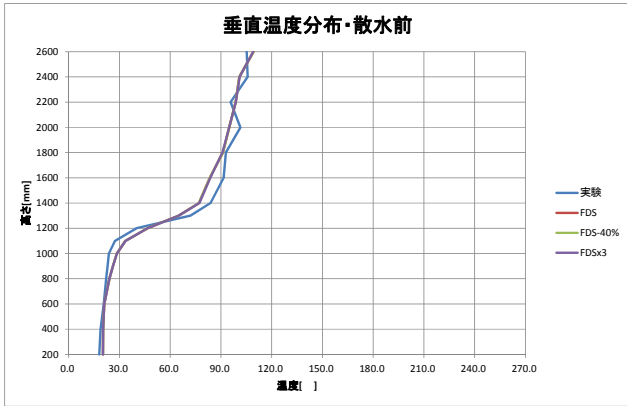
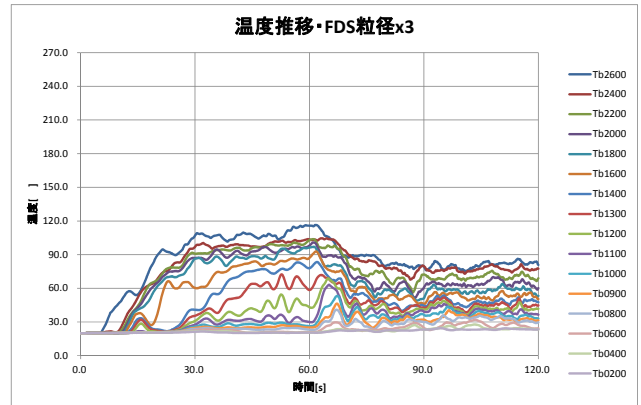
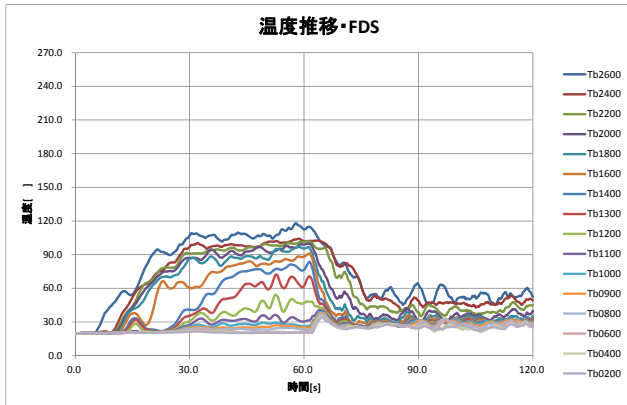
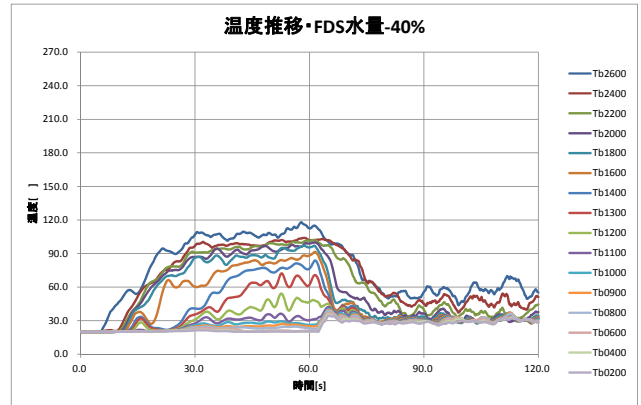
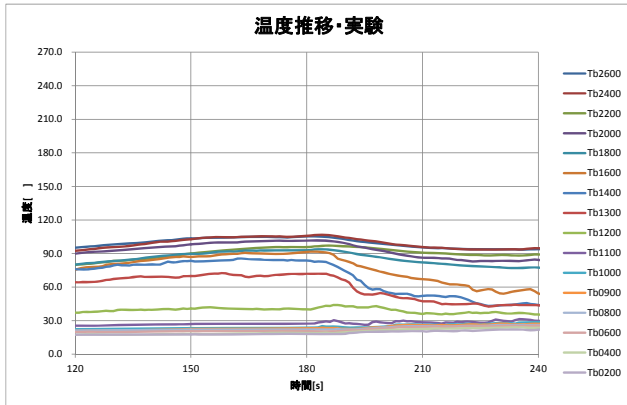
ヘプタン 0.1 m² ・ I20



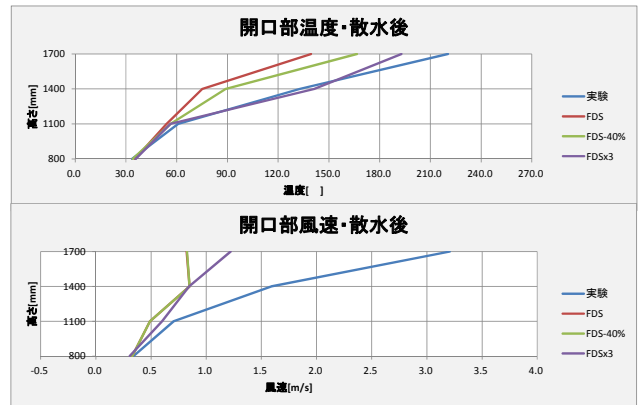
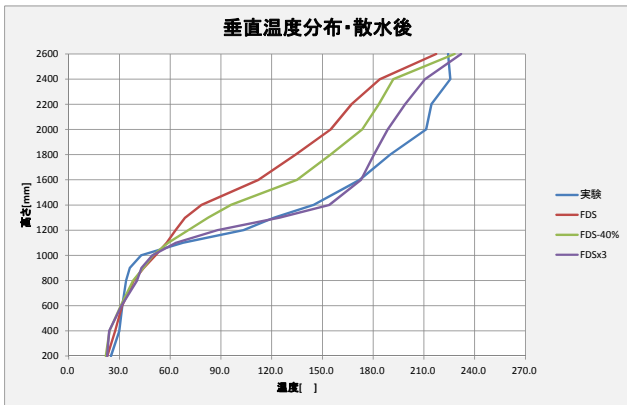
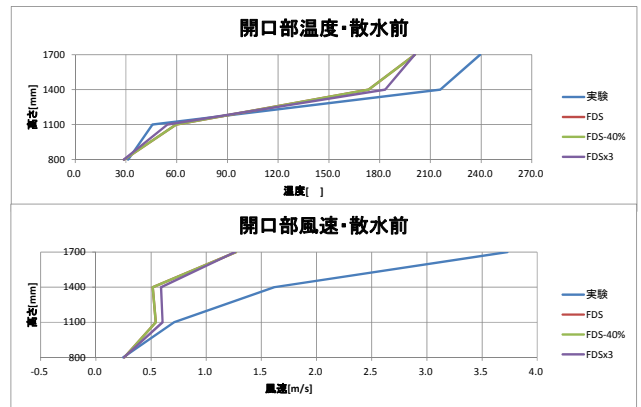
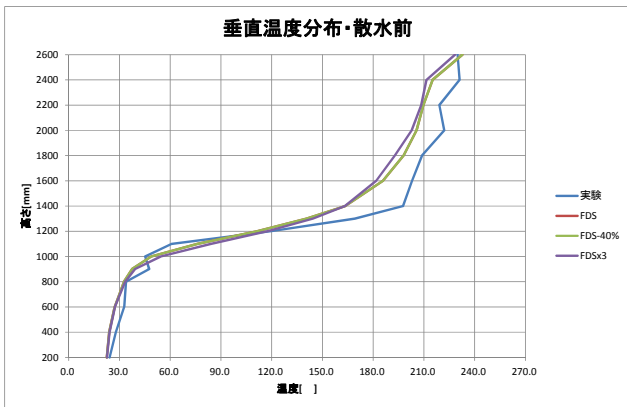
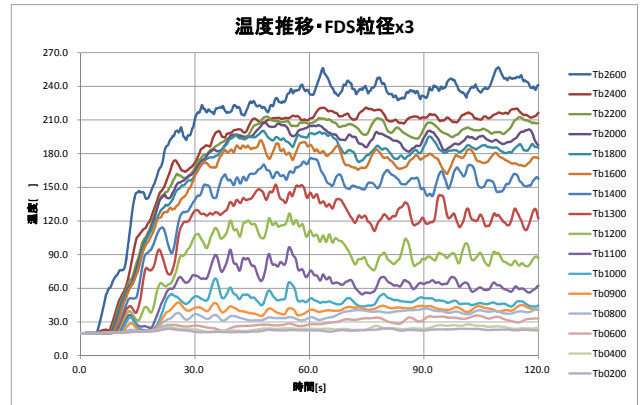
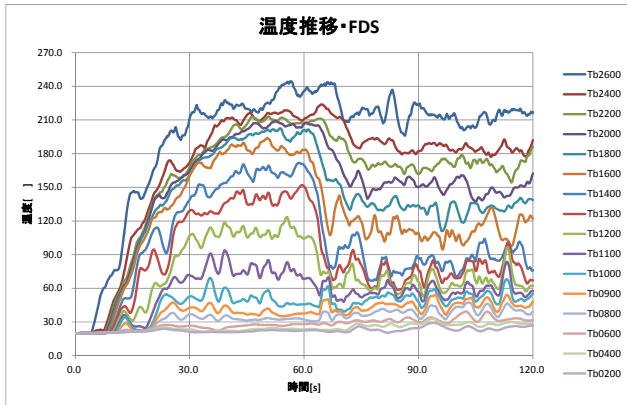
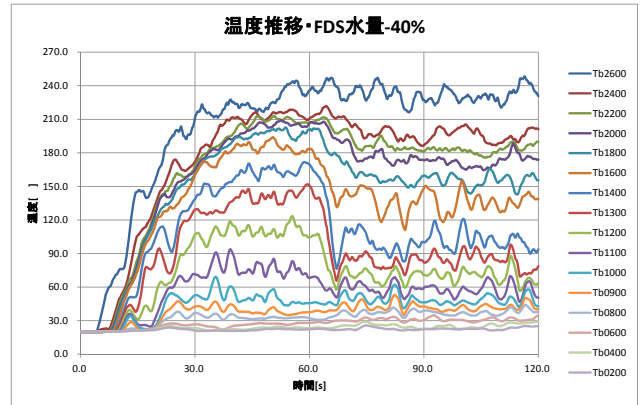
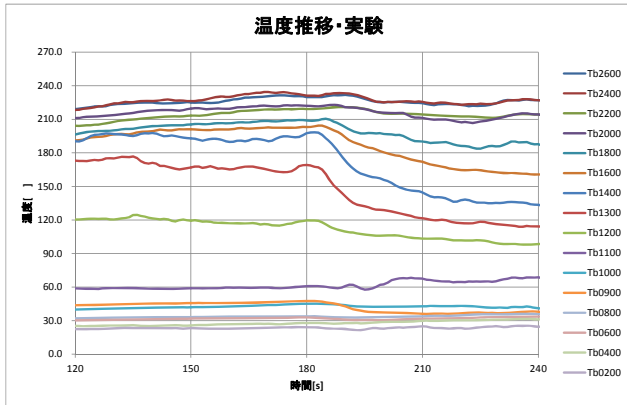
ヘプタン 0.1 m² ・ I40



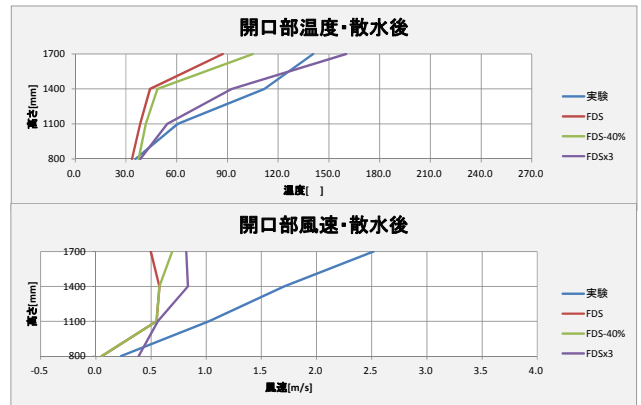
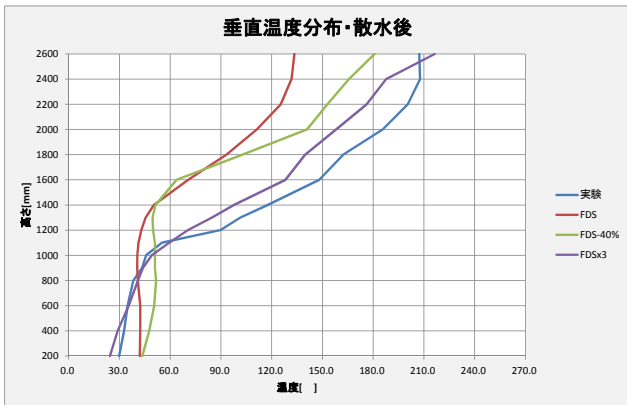
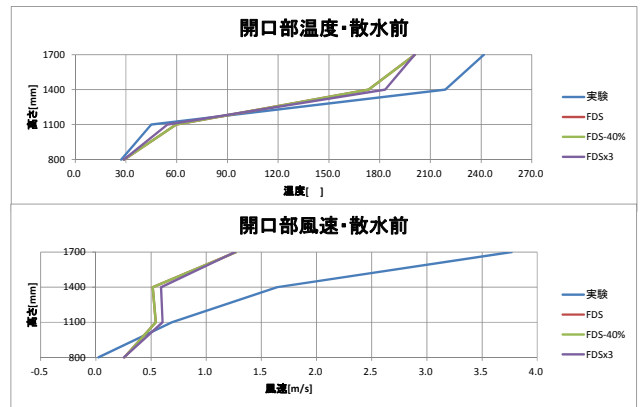
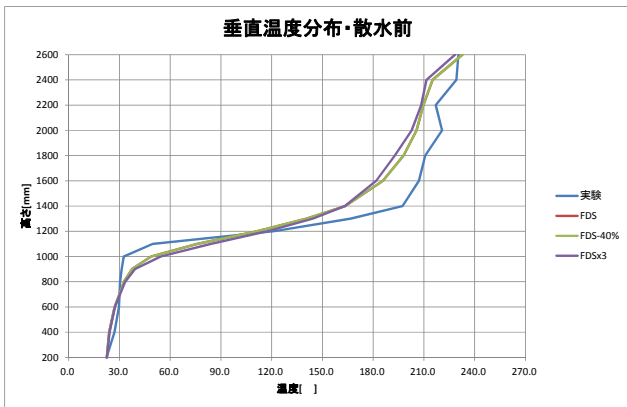
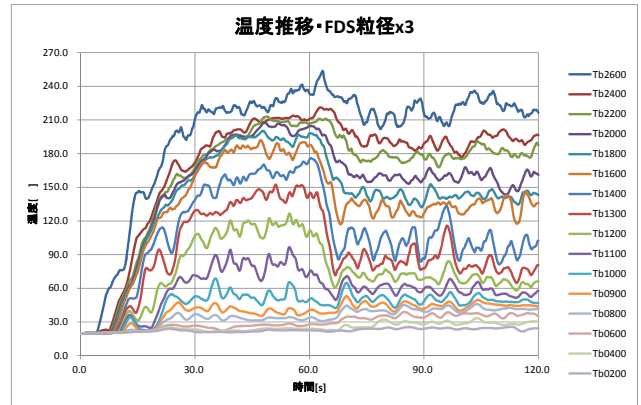
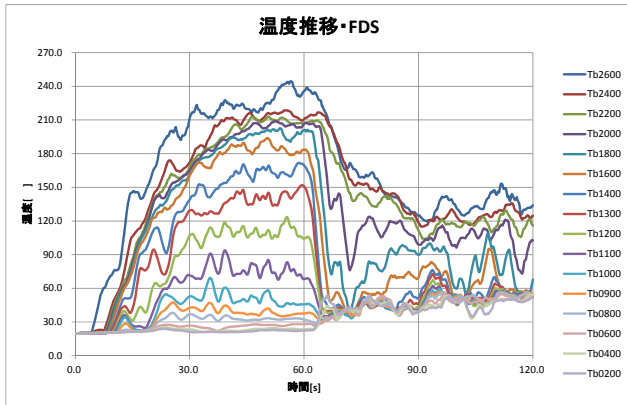
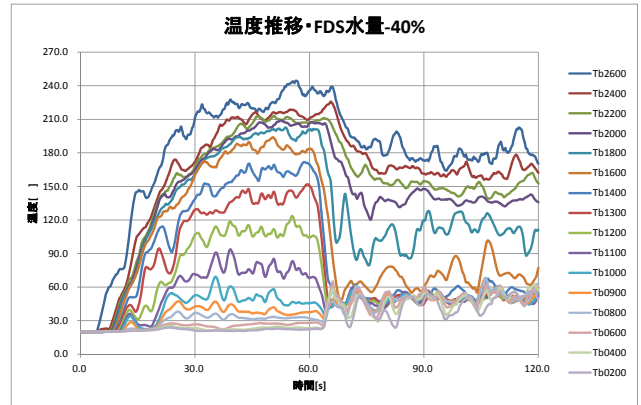
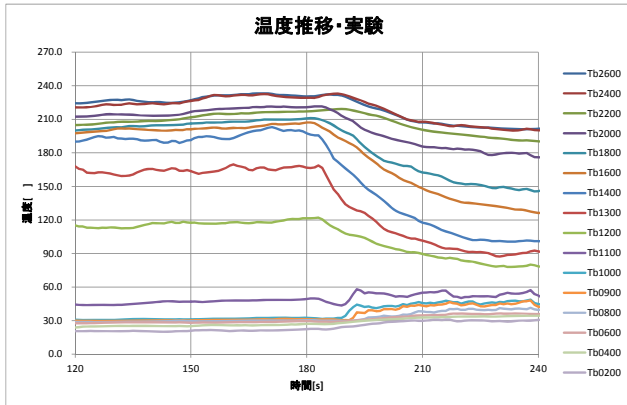
ヘプタン 0.1 m² ・ I80



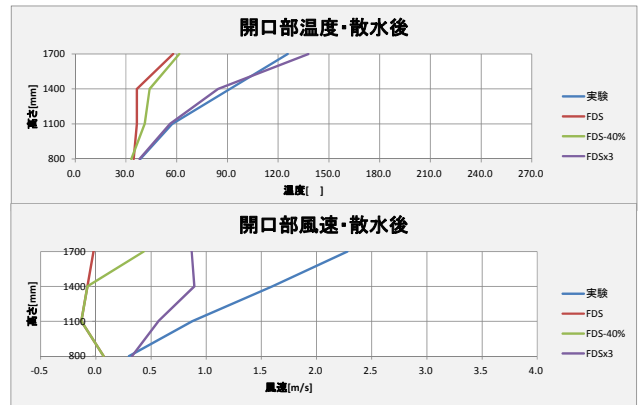
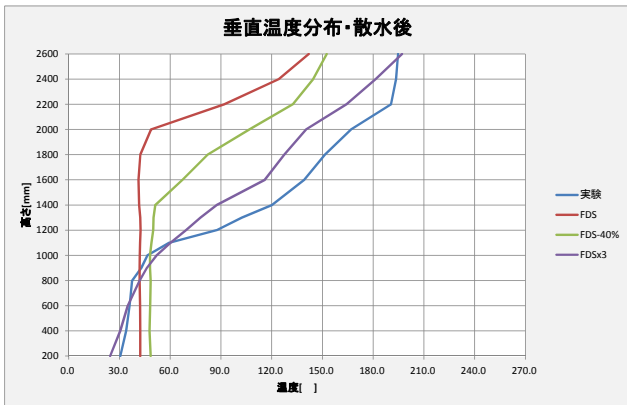
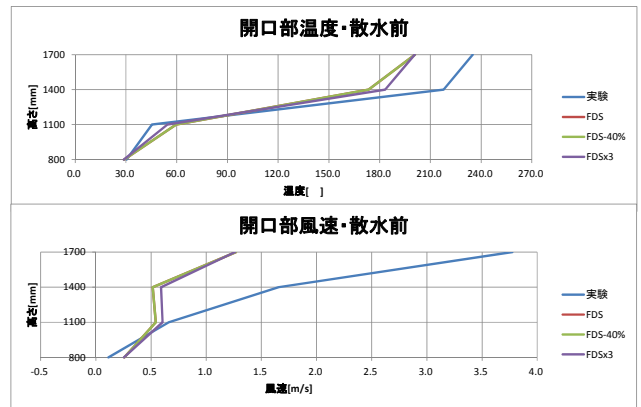
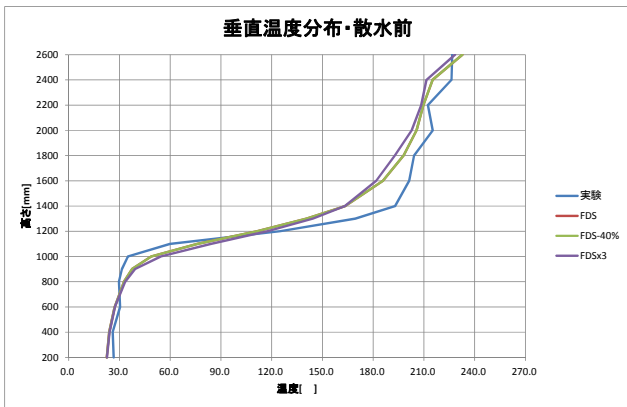
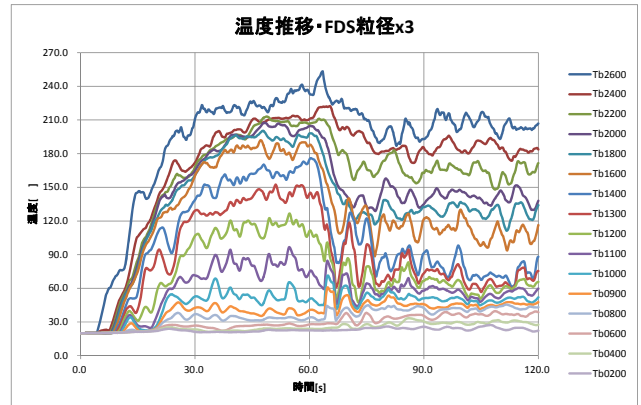
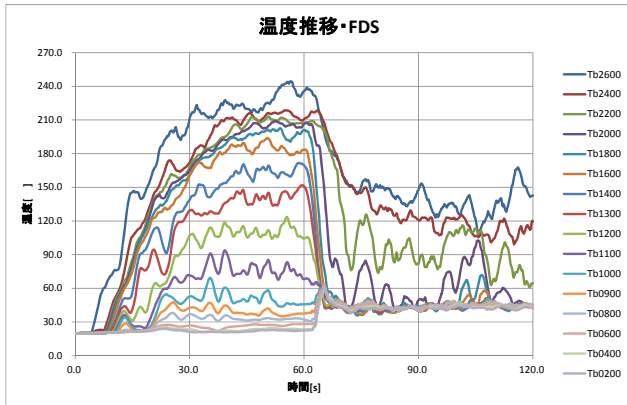
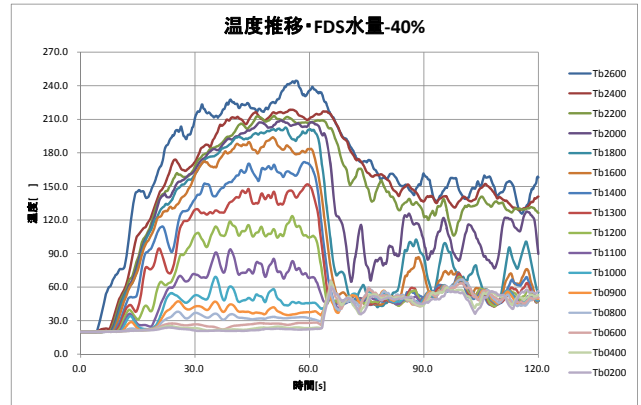
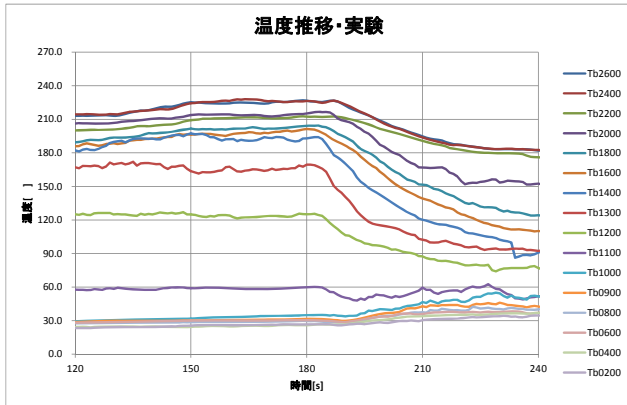
ヘプタン 0.1 m² ・ K80



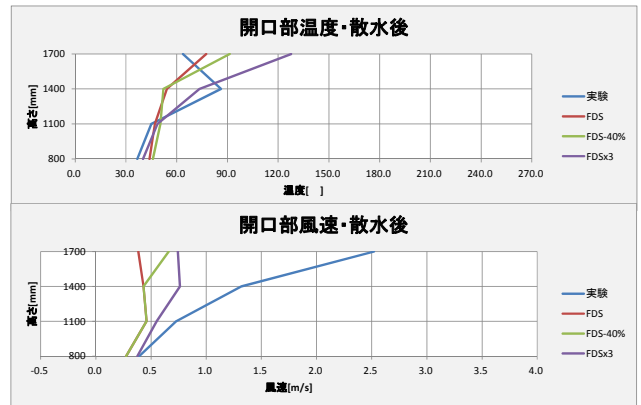
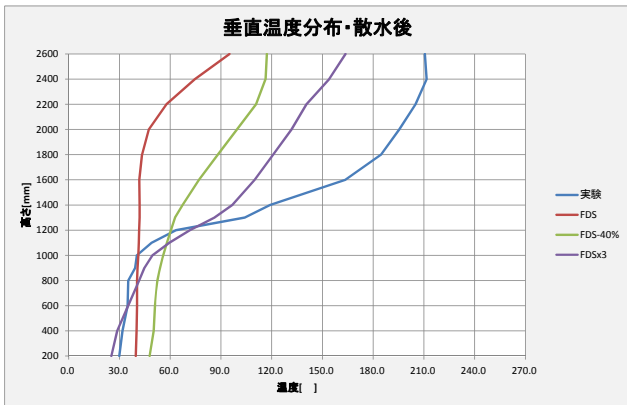
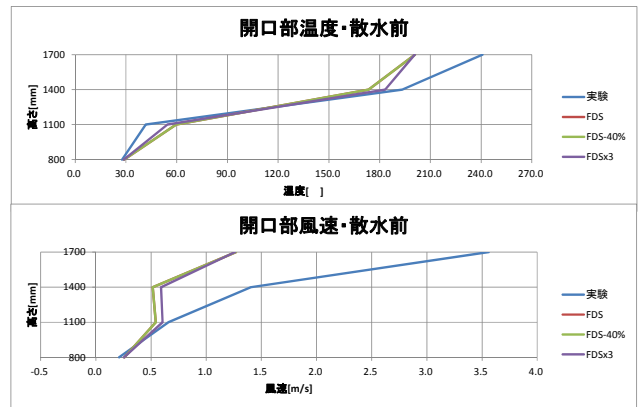
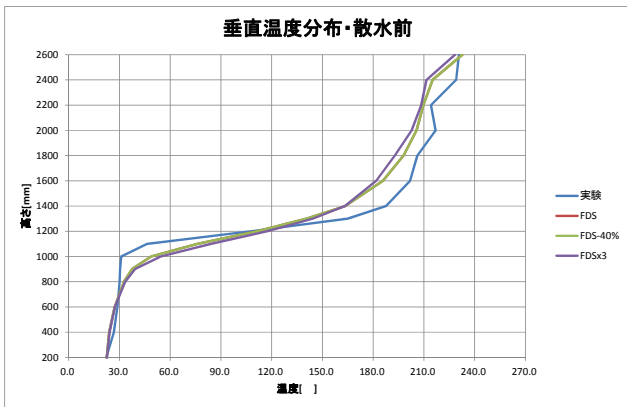
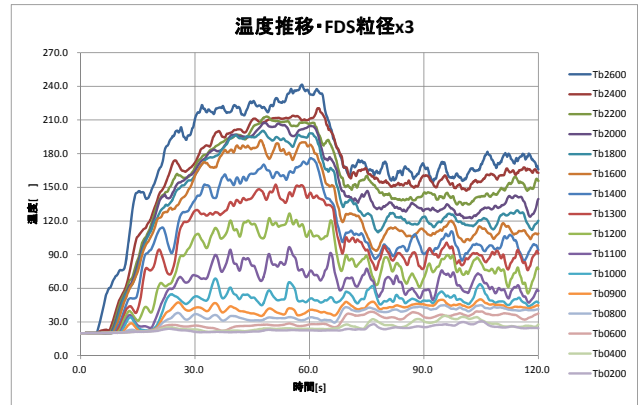
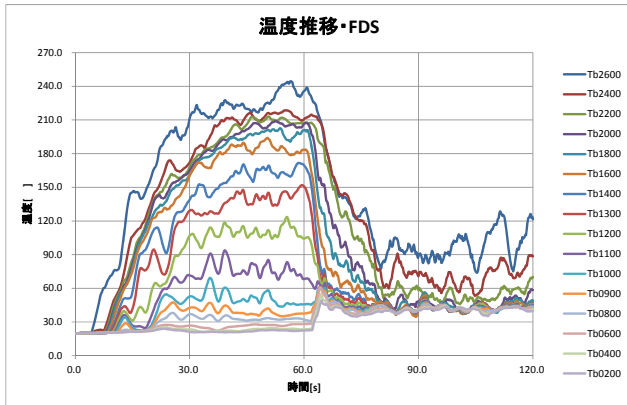
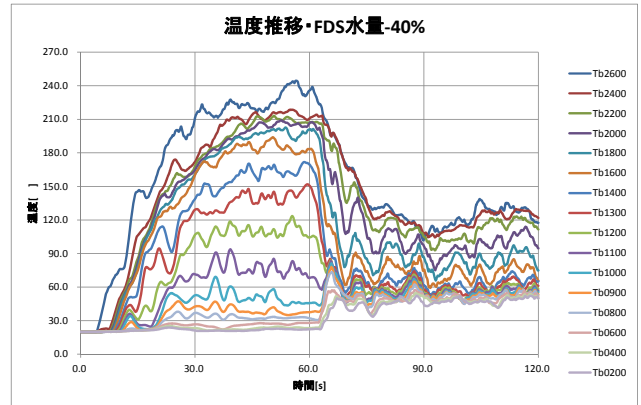
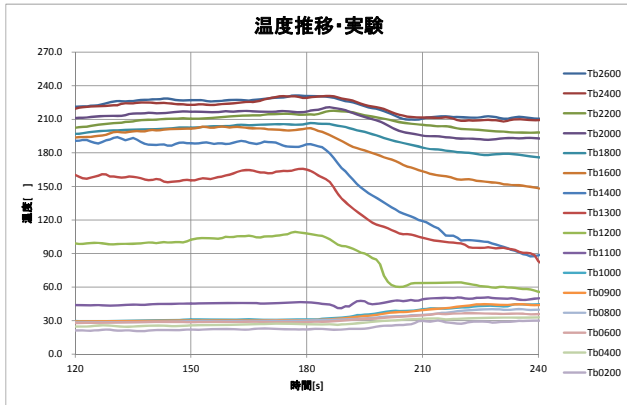
ヘプタン 0.25 m²・I20



ヘプタン 0.25 m²・I40

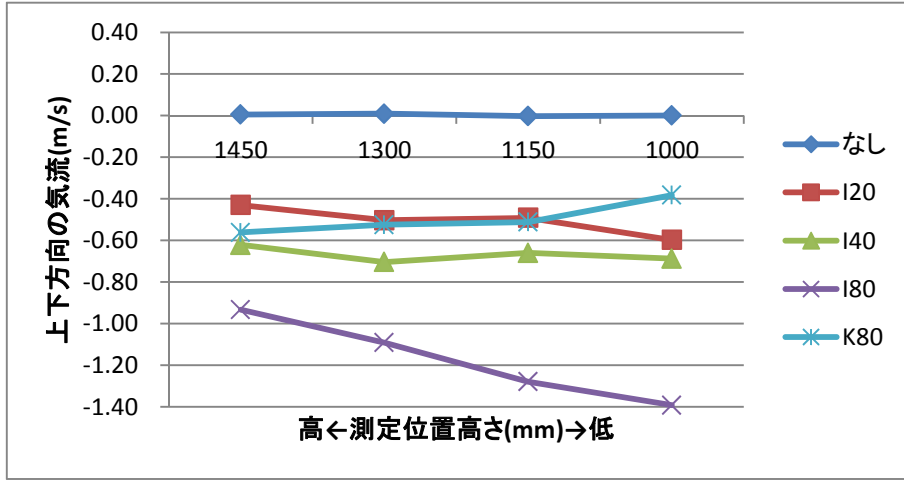


ヘプタン 0.25 m²・I80

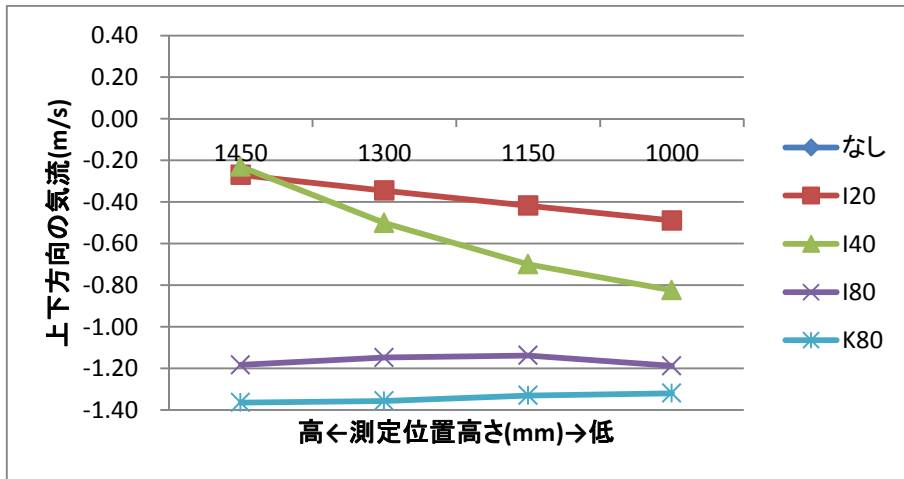


ヘタン 0.25 m²・K80

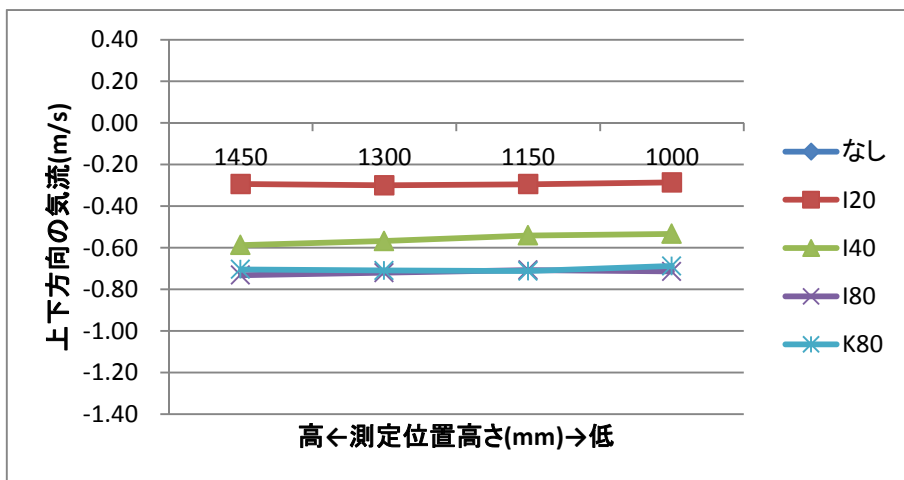
下降気流・火源なし



実験

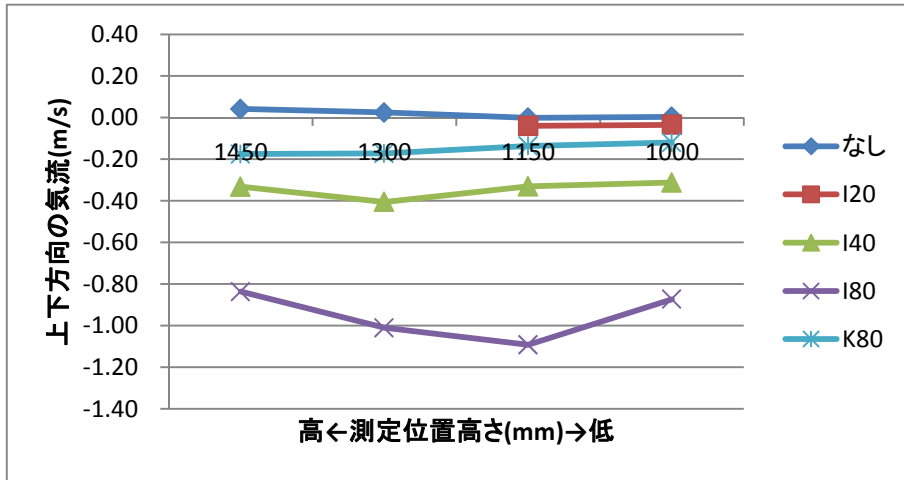


FDS

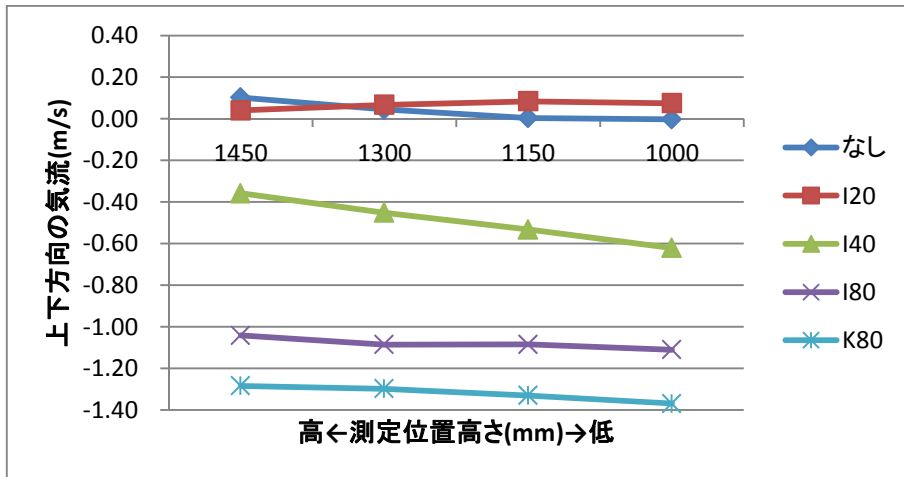


FDS(粒径 x3)

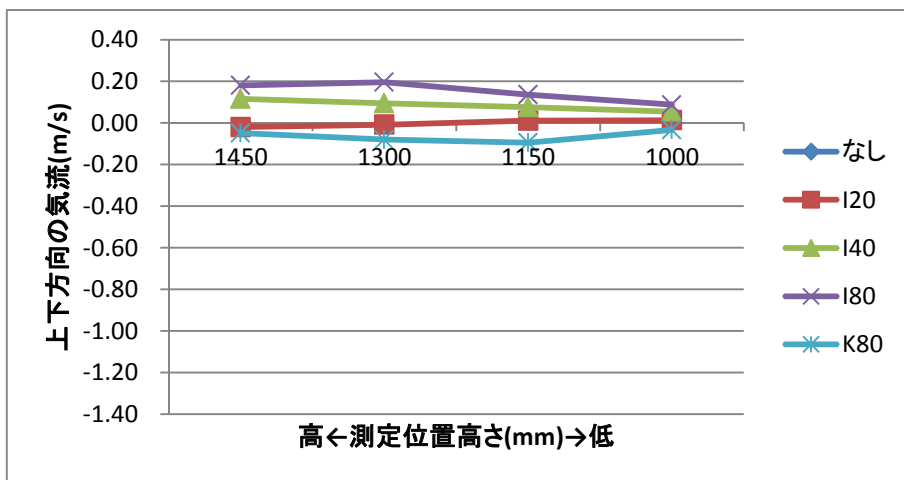
下降気流・メタノール 0.25 m²



実験

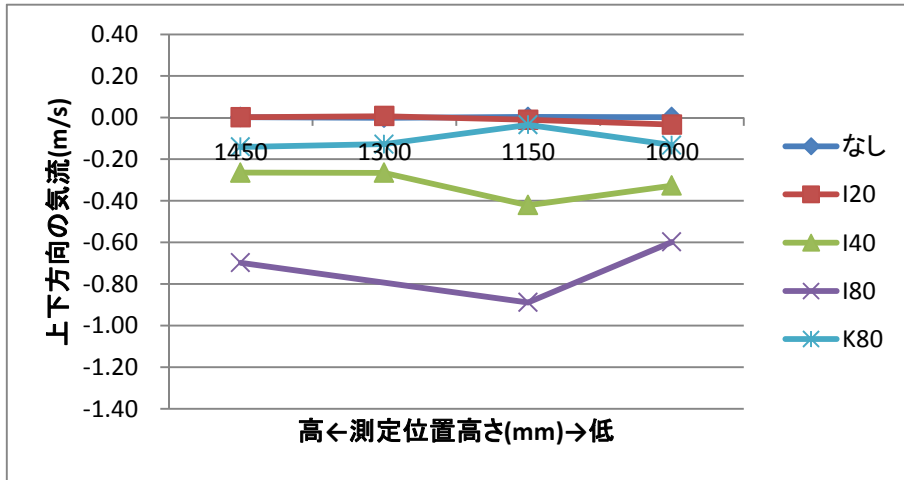


FDS

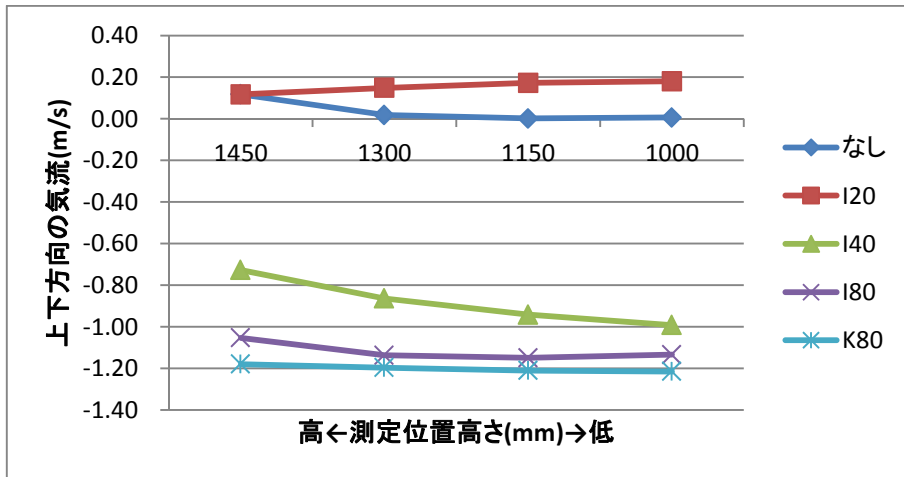


FDS(粒径 x3)

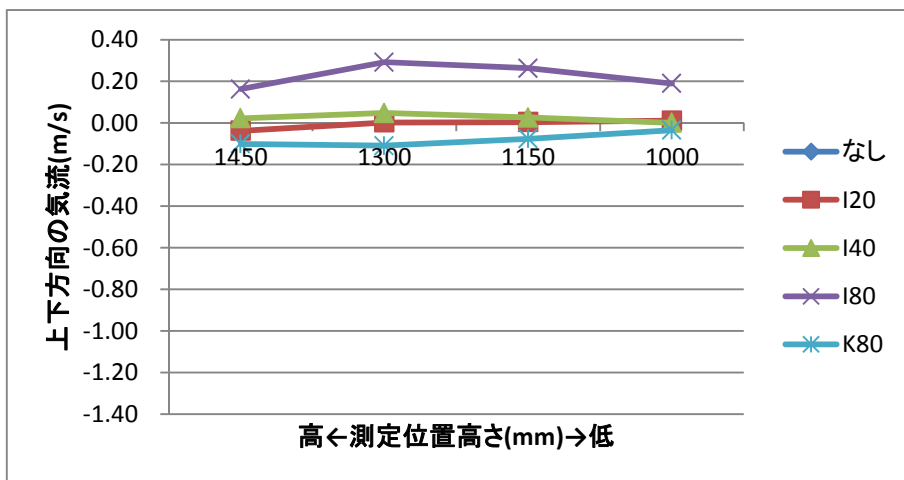
下降気流・ヘプタン 0.1 m²



実験

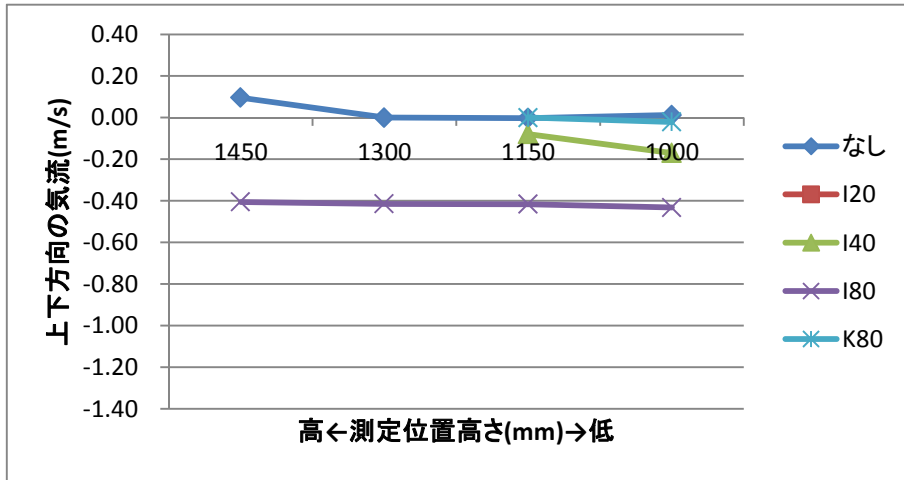


FDS

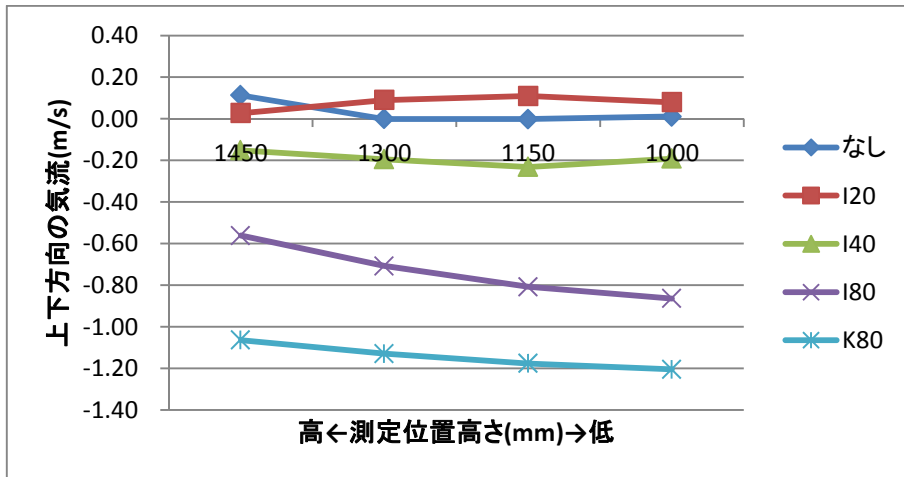


FDS(粒径 x3)

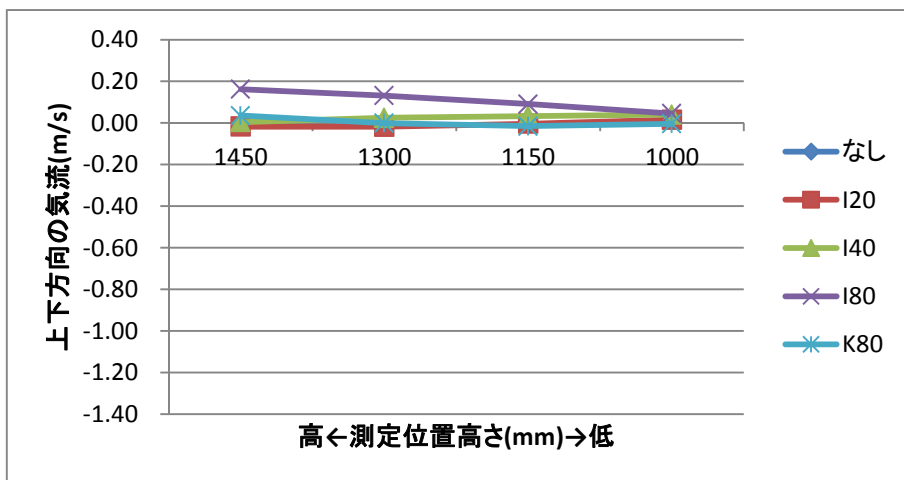
下降気流・ヘプタン 0.25 m²



実験



FDS



FDS(粒径 x3)

謝辞

東京理科大学 総合研究機構 火災科学研究センター 准教授 松山賢 博士には、本研究をまとめるにあたり、恵まれた研究環境、特に火災科学研究センターの大規模実験棟で実験を実施させていただくなど、大変貴重な経験の機会を与えて頂き、また、始終暖かいご指導を頂いたことを、心より深く感謝申し上げます。

また、実験を実施するにあたり、東京理科大学 総合研究機構 火災科学研究センター 技術者 沖永誠治氏には甚大なるご協力を頂いたこと、そして研究に取り組む姿勢や、実験のあり方など、数多くの助言を頂きましたことを深く御礼を申し上げます。

東京理科大学 国際火災科学研究科 火災科学専攻 松山研究室 修士2年 臼井清人氏には実験の実施、本研究を進めるにあたり多大なるご協力を頂くと共に、日常においても良きアドバイスを頂いたことを心から感謝申し上げます。

そして、本研究をまとめるにあたり多くの貴重な助言を頂いた、東京理科大学 国際火災科学研究科 火災科学専攻 松山研究室 修士1年 外村賢昭氏、佐々木史彰氏、西川浩平氏には、厚く御礼を申し上げます。

2年間の修士課程において、東京理科大学 国際火災科学研究科の方々には、楽しい研究環境を創れたこと、そして日常的な相談や、数々の旅行など、有意義な学生生活を送れたことに心より感謝致します。

最後になりますが、深い愛情を持って陰ながら支えてくれた家族ならびに、これまでの研究生活を支えて頂いた全ての方々に感謝の意を表し、謝辞と致します。

2012年2月
