

対流を利用した地下鉄駅舎内の 煙流動制御に関する研究

平成 20 年 3 月

徳 永 英

対流を利用した
地下鉄駅舎内の煙流動制御に関する研究

徳永 英

目次

第1章 序

1.1. 研究背景および目的	2
1.2. パッシブセイフティシステムの提案とその概要	3
1.3. ホームスクリーンドア, ソーラーチムニーおよびドライミスト設備の採用例	5
1.3.1. ホームスクリーンドア	5
1.3.2. ソーラーチムニー	6
1.3.3. ドライミスト設備	7
1.4. 日本の既存地下鉄駅舎の現状	7
1.4.1. 火災安全対策の現状	7
1.4.2. 関東地域における既存地下鉄駅舎の平・断面計画調査	11
1.5. 既往の研究	14
1.5.1. 横長区画内での火災時の煙流動性状	14
1.5.2. ソーラーチムニーの換気・排煙性能	14
1.5.3. ドライミスト噴霧による周囲空気の冷却効果	15
1.6. 本論文の構成	15
注 1-1) 地下鉄駅舎ホームの冷房負荷	17
注 1-2) 地下鉄駅舎ホーム階の火災安全基準	18

第2章 基礎的模型実験

— 火災時における駅舎内の煙流動性状に関する基礎的知見の把握 —

2.1. 本章の目的	20
2.2. 流れの相似則	20
2.3. 実験概要	25
2.3.1. 実験に使用した模型の概要	25
2.3.2. 計測・観測項目および計測位置	27
2.3.3. 実験手順	34
2.3.4. 実験条件	34
2.3.5. 事前に検討した項目	36
(1) 同一設計条件下での煙流動の再現性検証	36
(2) ピト一管による排気口風速分布計測	36
(3) 煙層から壁体への熱損失に関する検討	37
(4) 実験に用いる火源の発熱速度の時系列変化計測	38
2.4. 基礎的模型実験結果および考察	40
2.4.1. チムニー寸法（断面, 高さ）の変化による模型内煙流動性状への影響	40
2.4.2. 垂れ壁高さ, 垂れ壁下通路幅の変化による遮煙状況への影響	42
(1) 実験結果および考察 1（模型パターン I, 垂れ壁下通路幅変更時）	44
(2) 実験結果および考察 2（模型パターン I, 垂れ壁高さ変更時）	45
(3) 数値シミュレーションによる検討（模型パターン I, 垂れ壁高さおよび通路幅変更時）	46
(4) 実験結果および考察 3（模型パターン II, 垂れ壁高さおよび通路幅変更時）	49

2.4.3. 模型パターンを変更した場合（模型パターンI～IV）の比較	52
2.5. 数値シミュレーションによる着火直後の非定常煙流動性状予測	54
2.6. 本章のまとめ	66
注 2-1) 模型構成材料が相似則に従わぬことによる影響	67

第3章 火災初期における非定常煙流動性状の定式化

—天井下煙伝播性状および垂れ壁到達後の煙流動性状予測—

3.1. はじめに	70
3.2. 火災初期の天井下煙伝播モデル	70
3.2.1. 開放交換流れ（The "lock exchange" problem）	70
3.2.2. 松下らによる提案モデルの概要	73
3.2.3. 煙層先端部移動速度の定式化	74
3.2.4. 煙層に接する壁体への熱損失の考慮	75
3.2.5. 計算の初期条件	76
3.2.6. 計算手順	77
3.3. プルームから煙層への流入質量、熱量（計算の入力値）	78
3.4. 煙層先端部が垂れ壁到達後の煙流動モデル	80
3.5. 煙流動モデルを用いた遮煙条件の導出	83
3.6. 本章のまとめ	84

第4章 階段室－火災室間での遮煙に関する検討

—模型実験および煙流動モデルによる遮煙条件の導出—

4.1. 本章の目的	86
4.2. 実験概要	86
4.2.1. 模型概要および計測位置	86
4.2.2. 実験条件	88
4.2.3. 実験方法	88
4.3. 実験結果および考察	89
4.4. 模型天井高さが異なる場合の検討	100
4.5. 本章のまとめ	102

第5章 天井を傾斜させることによる効果に関する検討

—模型を傾斜させた際の煙流動性状に関する考察—

5.1. 本章の目的	104
5.2. 模型概要および実験条件	104
5.3. 天井の傾斜が煙流動に及ぼす影響	105
5.4. 傾斜天井を上る方向に進む煙に関する理論的な考察	112
5.5. 傾斜天井下を伝播する煙層先端部移動速度の定式化	117
5.6. 本章のまとめ	120

第6章 総括

6.1. 本論文のまとめ	.....	122
6.2. 今後の課題	.....	124

<u>参考文献</u>	126
-------------	-------	-----

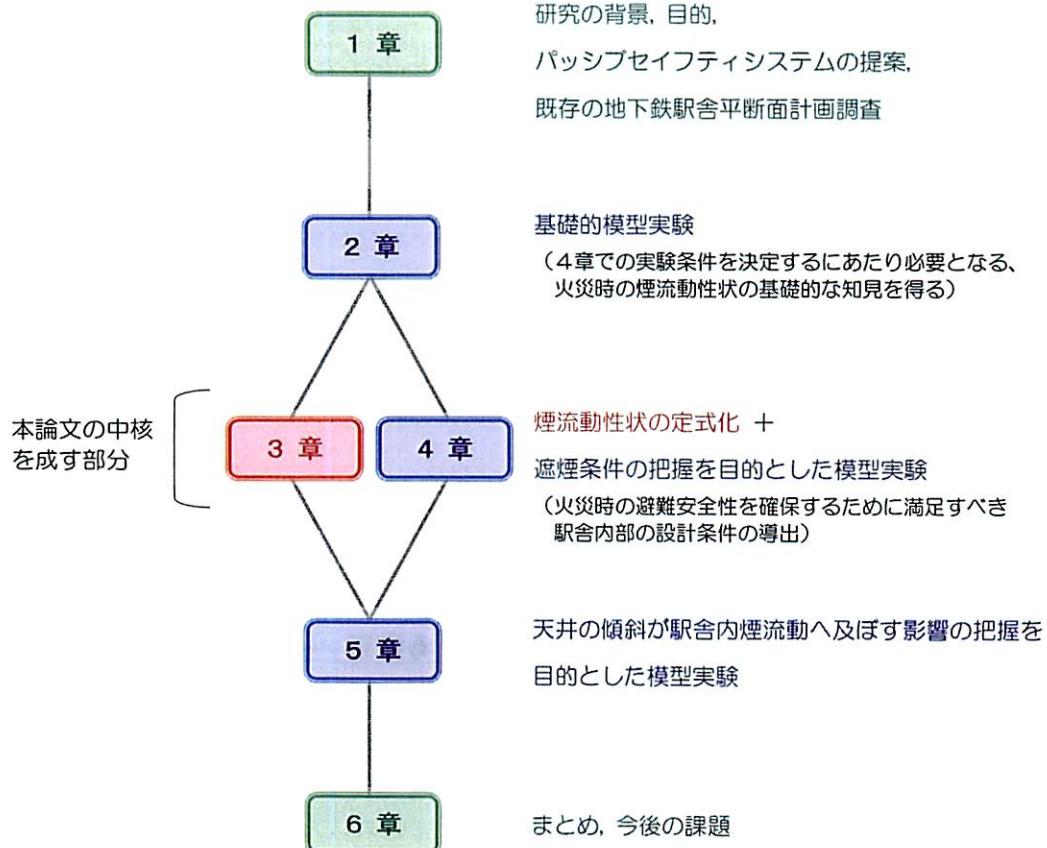
<u>使用記号</u>	128
-------------	-------	-----

<u>謝辞</u>	129
-----------	-------	-----

資料編

資料編 1.	ホームスクリーンドア、ソーラーチムニーおよびドライミスト設備の採用例	..... 132
資料編 2.	着火前換気量計測実験 結果	..... 138
資料編 3.	遮煙成否判定実験 結果（階段室内温度上昇）	..... 142
資料編 4.	煙流動モデルを用いた実大駅舎の設計例（ケーススタディ）	..... 153
資料編 5.	実験に用いた火源の発熱速度の計測データ	..... 155

論文の構成



第1章

序

1.1. 研究背景および目的

現代の我が国における大都市圏では、より高密度な都市形成に迫られた結果として、電気、ガス、電気通信、上・下水道などのライフラインに加え、鉄道、道路などの交通設備が地下に埋設されている。これらの施設は、主に公共用地である道路下に埋設されることが多く、また、現在までの地下施設建設は必ずしも適正かつ合理的に行われてきたわけではなく 建設の容易な浅い地下から順に行われてきたため、新たな施設の設置深度は年々深くせざるを得ず、結果として 現在の大都市圏における地下施設の空間的な配置は非常にアンバランスな状態となっている。そして、このような計画的でないとも受け取れる地下開発が今後も継続すれば、平面的に見れば広大な地下空間も、直ぐに施設で埋め尽くされるであろうことは容易に想像できる。

一方、比較的早期に整備された社会資本機能（地下鉄道、都市高速道路など）の老朽化から、近い将来、既存施設の機能更新や再整備の必要性が生じるため、それらに合わせて地下空間を有効利用することが期待されている。また、地上の既存施設のうち、地上にあることが必ずしも求められないものを地下へ移設できれば、地上にスペースが生まれ、都市の美観、環境の回復を始めとし、より質の高い都市を実現できることも大きな利点として考えられている。

こうした流れの中、「大深度地下の公共的使用に関する特別措置法」が 2001 年 4 月 1 日に施行され、今後、大都市圏での大深度地下において（道路等の公用地下に限定されず、より効率的に）、鉄道建設、高速道路建設等の公共事業を行うことが可能となった。ただし、2004 年 2 月に策定された「大深度地下の公共的使用における安全の確保に係る指針」でも示されるように、大深度地下利用のうち不特定多数の人が利用することとなる施設においては、災害発生時の人的被害の防止を目指すことが重要であり、確実な安全対策を施すことが必要とされる。特に、過去の地下施設での大きな被害は火災によるものが多く（2003 年 2 月に起きた韓国テグでの地下鉄駅舎火災は記憶に新しい）、安全確保を検討する上で火災対策は最重要項目の 1 つと考えられている。

安全対策を検討する上で基礎となる研究を行い、また、より確実な安全対策を提案することは重要である。本研究は、地下空間における様々な公共事業のうち、特に地下鉄駅舎を対象として提案する新しい火災安全対策についての基礎的な実験研究である。

現在、我が国の地下鉄駅舎には種々のアクティブな（災害時に作動する）防災対策が採られているが、既設の排煙設備が機能せず 2 名の負傷者がいた 2004 年 8 月の赤坂見附駅火災にも見られるように、これらの作動信頼性は完全に保証されているわけではない。排煙機器等のメンテナンスや作動確認を定期的に行うことにより火災時の作動信頼性はある程度向上すると考えられるが、コスト等の問題から十分な整備が行われるとは限らないのが現状である。また、今後もこの傾向は継続するであろうことを考えると、火災時という極稀に生起する事態に作動する（もしくは換気モードから排煙モードに切り替わる）システムではなく、日常時から作動している設備によって形成される駅舎内の空気の流れが 手を加えることなくそのまま火災時の煙制御にも利用でき、避難安全を図れるシステムが構築されれば、火災安全に対する信頼性を大幅に改善することができる。また、この防災対策で生じる空気の流れで一般的な空調設備（換気、冷房）が代用でき、かつ これに必要なエネルギーが従来の機械式空調設備よりも小さければ、地球環境問題においてもより好ましいものとなる。

本研究において提案するシステムは、近年研究が進められているソーラーチムニーによる煙突効果の促進^{1)~4)} およびドライミスト噴霧による周囲空気の冷却効果^{5)~11)} を地下鉄駅舎計画に組み込み、更に適切な制御を行うことで、一年のどの期間でも日常時の気流を一定方向に保ち、機械的制御なしに火災時の煙流動を避難に支障がないように制御するもの（パッシブセイフティシステム）である。パッシブセイフティシステムと機能的に類似するものとして、排煙筒による火災時の自然排煙と これに伴い給気口から流入する空気の流れを煙制御に利用するスマートタワー方式¹²⁾（図 1.1.1）が挙げられるが、排煙

筒内に生じる浮力が年間を通じて安定しないことからこれまで殆ど採用されてこなかったという経緯がある。しかしながら、このスモークタワーのようなローテクとも言えるシステムをうまくコントロールすることができれば、火災時の避難安全性の向上および日常時の空調負荷の低減に大きく貢献できると考える。

パッシブセイフティシステムを実建築物に採用するには、システムが有効に働くための駅舎内部での境界条件を確認する必要がある。具体的には、効率良く給・排気を行うことが可能なソーラーチムニーの寸法を見出し、また、火災時に避難経路、消防拠点となる階段室への煙の進入を防ぎ、旅客の避難安全を確保するために満たすべき垂れ壁等の条件を把握することが重要となる。これらに関する詳細な情報を得るために手段の1つとして、数値計算(CFD)による駅舎内の煙流動予測が挙げられるが、 $k-\varepsilon$ モデル等の乱流モデルを用いた場合には、本研究で扱う成層流に代表されるような鉛直方向の温度勾配で拡散が抑制される流れや垂れ壁近傍における複雑な非定常煙流動性状等を予測することは難しい。LESによってある程度精確な予測を行うことは可能であると考えるが、計算により階段室への煙の進入を防ぐために最低限必要な垂れ壁高さを予測するような場合には、実験結果とのチューニングが必要不可欠となる。そこで、本研究では実大駅舎の1/20スケール模型を制作し、相似則に基づく模型実験を中心に行うこととする(一部2.4.2.(3)節、2.5.節でLESによる検討を行っている)。

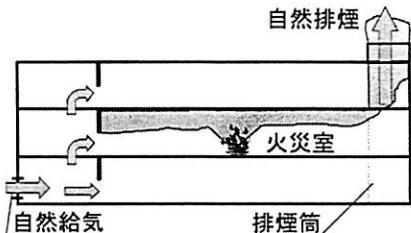


図 1.1.1 スモークタワー方式の概念図

1.2. パッシブセイフティシステムの提案とその概要

本研究で提案するパッシブセイフティシステムの概念図を図1.2.1に示す。なお、本システムは新規に建設される地下鉄駅舎を主な対象としている(本システムを既存の地下鉄駅舎に組み込むことで、既存駅舎の現在抱えている問題(1.4.1.節参照)が解消されるというわけではない)。

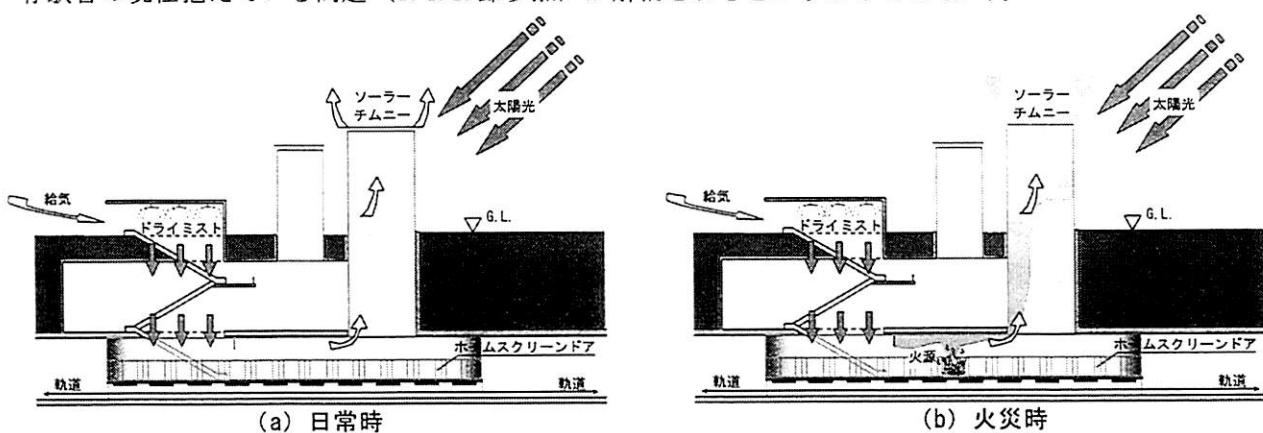


図 1.2.1 パッシブセイフティシステムの概念図(地下鉄駅舎断面図)

本システムでは、重要な境界条件として軌道とホームの境界(ホーム外周部)にホームスクリーンドアを設置する。これは駅舎内での火災発生時に軌道への煙の流入を防ぐことで被害の拡大を防止する、あるいは列車火災が発生した場合にホーム側への火災の拡大を防ぐといった火災区画としての役割に加え、列車風や軌道からの空気の流入、軌道への空気の流出による駅舎内の気流の乱れを防ぐことで、日常時および火災発生時の駅舎内の気流制御を容易にするためである。また、列車はブレーキ発熱、車両補機や車両冷房による発熱など膨大な排熱を行っているが、それによりホーム部へ持ち込まれる熱量は5分間隔で列車が停車する駅では828kWにも達する^{注1-1): 章末参照}。その排熱の駅舎内への進入を防ぐことで空調負荷を低減することもホームスクリーンドア設置の目的である。

駅舎には、ホームスクリーンドアに加えてソーラーチムニー、ドライミスト設備を設置することで日常時の換気制御および火災時の煙流動制御を行う。具体的には、地下の各階から地上に通ずるソーラーチムニーにより排気を行い、それに加えて、階段室上部（地上出入口付近）にドライミストを噴霧し周囲空気を冷却することで階段室内に下降気流を生成する。これにより、常に外気 → 階段室 → ホーム、コンコース → ソーラーチムニー → 外気の方向に空気が流れるように気流制御を行う。この状態で火災が発生した場合にも煙はこの流れに沿ってソーラーチムニーから外部への排出されるため、避難経路および消防拠点となる階段室の安全は確保されると考える（図1.2.1参照）。

ここで、ソーラーチムニーとは、太陽エネルギーを利用してすることでチムニー内の空気を加熱し、外気とチムニー内の空気との間に密度差を作ることで発生する対流を利用して通常の煙突より大きな換気効果を生むシステム^{1)~4)}である（図1.2.2）。太陽エネルギーを利用するシステムであるため、機械動力を使用せずに空気の流れを作り出せるという利点がある。ソーラーチムニーを火災時の排煙にも利用することにより、作動信頼性に不安が残る機械排煙設備を用いることなく火災時の安全性を確保することが可能となり、かつ日常時には省エネルギーの自然換気設備として機能する。ただし、夜間や雨天等ではソーラーチムニー内外で温度差が生まれず上昇気流が形成されない可能性があるが、このことに関する対応策は後述する。

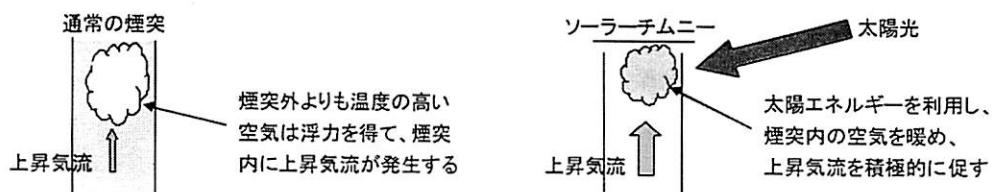


図1.2.2 一般的な煙突とソーラーチムニーの比較

また、ドライミスト設備は、水を平均粒径 $16\mu\text{m}$ 程度の微細な粒子にして噴霧するものである^{5)~11)}。水粒子は噴霧された後直ちに蒸発し、その際に周囲空気の温度を低下させるため（植物の蒸散効果を再現する）、夏季におけるヒートアイランド対策として効果が期待されている。仮にクスノキ林の蒸散量と同等のドライミストの蒸発量を確保するとすれば、気温 34°C 、相対湿度 50% の地域では 2°C 程度の温度低下を与えることができるとされている⁵⁾。

本システムではソーラーチムニーを階段室から適度に離れた位置に設置し、その一方で階段室上部（地上出入口付近）にドライミスト設備を設置し、夏季にはドライミストを噴霧する。これにより“チムニー内温度 $T_2 >$ 外気温 T_{∞} ”，“駅舎内温度 $T_0 >$ 階段室上部温度 T_1 ”となる状態を保ち、チムニー内に上昇気流を、階段室内に下降気流を形成することで、常に外気 → 階段室 → ホーム、コンコース → ソーラーチムニー → 外気の方向に空気が流れるように気流制御を行い、日常時の空調負荷削減および火災発生時の煙制御を同時に満足する（図1.2.3）。

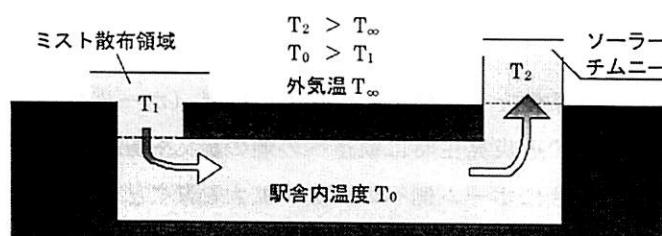


図1.2.3 駅舎内部の領域別温度分布概念図（断面図）：夏季

また、冬季にはドライミストの噴霧は行わないが、外気温は地下鉄駅舎内温度より低温になるとされる（すなわち、“チムニー内温度 T_2 、駅舎内温度 $T_0 >$ 外温 T_{∞} ”）。よって、夏季と同様チムニー内の上昇気流および階段室内での下降気流が生じ、外気 → 階段室 → ホーム、コンコース → ソーラー

チムニー → 外気 の方向に空気が流れるように気流制御を行うことが可能であると考える(図 1.2.4)。

ただし、中間期や雨天時にはチムニー内温度 T_2 , 駅舎内温度 T_0 , 外気温(および階段室上部温度) T_∞ が殆ど等しくなるような状態も考えられる。この場合には上述したような自然対流は起こらない、もししくは、想定している気流とは逆方向の流れが形成される可能性があるため、例えばチムニー内部にガス灯などの発熱設備もしくはファンを設置し 作動させることにより(あるいは 列車等からの廃熱を利用することにより)、先ほどのような対流(外気 → 階段室 → ホーム, コンコース → ソーラーチムニー → 外気)を生み出す必要がある(図 1.2.5)。また、本システムは駅舎内外の非常に微妙な圧力差バランスを保つことにより気流制御を行うシステムであるため、比較的駅舎内気流を形成しやすいと考える夏季、冬季においても気象条件によっては駅舎内外の圧力変動の影響が大きくなり、必要な気流が形成されない可能性があるため、その場合にも補助設備を作動させる必要がある。この場合にも、年間を通しての ドライミスト設備、ソーラーチムニー、補助設備の運用エネルギーの合計が従来の機械式空調設備よりも小さくなれば、地球環境問題においてもより好ましいものとなる。

ちなみに、日常時に チムニー内の風速や後述の垂れ壁前後の圧力差等を監視し制御することで、比較的容易にシステムを構築することが可能であると判断しているが、本論文ではこのことに関しては言及しない。

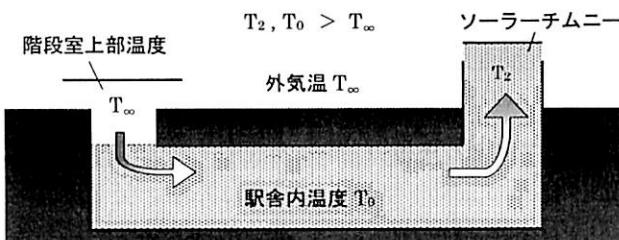


図 1.2.4 温度分布概念図：冬季

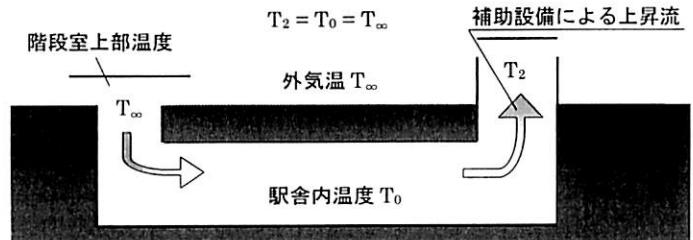


図 1.2.5 温度分布概念図: 中間期、雨天など

1.3. ホームスクリーンドア、ソーラーチムニーおよびドライミスト設備の採用例

本システムでは、プラットホーム外周部にホームスクリーンドアを設置することで軌道部分と駅舎内部とを空間的に分離する必要があるが、ホームスクリーンドアの地下鉄駅舎ホームへの導入は シンガポール、韓国、中国等のアジア諸国を始め、世界各国で 現在 積極的に進められている。また、ソーラーチムニーおよびドライミスト設備は、近年 建築物の省エネルギー化へのニーズが高まっていることから研究が進められてきており、それに並行して日本各地で実建築物への設置が行われ始めている。

以下では、それらの設備の実建築物への採用例について紹介する。

1.3.1. ホームスクリーンドア

世界各国の地下鉄駅舎へのホームスクリーンドア導入事例の一部を図 1.3.1 に示す。

日本でも一部の地下鉄駅舎でホームスクリーンドアは導入されているものの、ホームで火災が発生した際に軌道部分も(あるいは、列車火災が発生した際にホーム部分も) 蕁煙空間として利用できるように^{注1-2)}、いざれも 完全に軌道部分と駅舎内部を分離するタイプのものとはなっていない(図 1.3.1 (c), (d))。一方、日本以外の国々では完全にホーム部分と軌道部分を分離するタイプのものが設置されており(図 1.3.1 (a), (b))、パッシブセイフティシステムを採用した地下鉄駅舎へは こちらのタイプのホームスクリーンドアを導入する必要がある。

なお、図 1.3.1 (d)に示す 高さが 1300mm 程度のタイプのホームスクリーンドア(「ホームゲート」「可動式ホーム柵」とも呼ばれる)は、日常時の空調負荷削減等の効果はなく、主に 旅客の軌道への墜落、転落、飛び込み等の事故防止を目的として設置されており、日本では都営 三田線などで見られる。



(a) フランス・パリ



(b) 中国・深圳



(c) 日本・東京都 1



(d) 日本・東京都 2

図 1.3.1 世界各国の地下鉄駅舎におけるホームスクリーンドア採用例 資料編 1.からの抜粋：卷末参照

1.3.2. ソーラーチムニー

・日本大学理工学部船橋校舎 14号館（2004年）

日本大学理工学部船橋校舎 14号館は、ソーラーチムニーをはじめとして、クール・ヒートチューブ、簡易エアフロー、屋上緑化、太陽光発電、雨水利用等の様々な省エネルギーへの取り組みがなされている。同校舎の北棟南側ラウンジには、断面 3m×3m、高さ 26m のソーラーチムニーが 2 基設置されており（図 1.3.2）、チムニー 2 基で 17,000kWh/年 の電力（建物全体の年間電力のうち約 3%）を削減している。

・瀬戸日本館（愛知万博：2005年3～9月）

瀬戸日本館は日本の伝統工法に見られる自然通風や日除けと、先端技術である地中熱冷房システムやソーラーチムニーを組み合わせた自然融合型パビリオンとして設計された（図 1.3.3）。建物中央に直径約 4m のソーラーチムニーが設置されており、地下換気口より外気を取り入れて、室内を経由し、ソーラーチムニーから排出するという空気の流れによって、常に快適な温熱環境を提供する。



図 1.3.2 日本大学理工学部船橋校舎 14号館⁴⁾



図 1.3.3 瀬戸日本館

1.3.3. ドライミスト設備

・秋葉原クロスフィールド AKIBA_BRIDGE (2006 年)

AKIBA_BRIDGE のある秋葉原駅西側交通広場は、打ち水イベントを開催するなどヒートアイランド対策の活動を積極的に行っている場所である。東京都は、ヒートアイランド対策の一環としてドライミスト設備の普及を目指しており、AKIBA_BRIDGE へのドライミスト設備の設置は、一部 東京都の補助を受けて行われた。



図 1.3.4 AKIBA_BRIDGE (愛称：冷んやりフロフ) ^{37), 38)}

・東京 六本木ヒルズ 66 プラザ (2006 年)

六本木ヒルズ 66 プラザの一部区画（約 30m）に 3m 間隔で計 9 箇所ミストノズルが設置された（床面からの高さ 3m 位置）。2006 年夏に行われた来街者アンケートでは、全来街者のうち 91% が “快適” と回答している ⁴¹⁾。

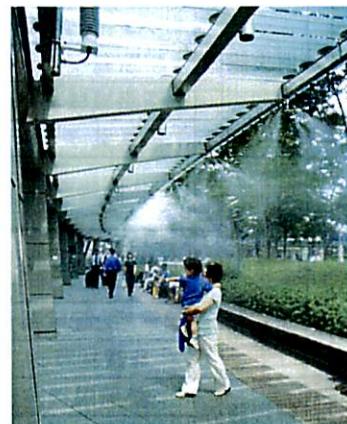


図 1.3.5 六本木ヒルズ 66 プラザ ^{37), 41)}

ドライミスト設備は この他、愛知万博、五稜郭タワー アトリウム（北海道）、名古屋大学経済学部校舎（愛知）、新丸の内ビルディング前 歩道（東京）にも採用されている 資料編 1. : 卷末参照。

1.4. 日本の既存地下鉄駅舎の現状

本研究ではパッシブセイフティシステムを採用した地下鉄駅舎における火災時の煙流動性状を把握することを目的として模型実験を行うが、これに先立ち 一般的な地下鉄駅舎の平・断面計画、問題点等を把握しておくことは重要である。そこで本節では、まず、日本の既存の地下鉄駅舎が採用している火災時の安全対策についてまとめ、抱えている問題を明らかにする。また、関東地域の全地下鉄駅のうち約 34% の 92 駅を対象（全 12 路線中 8 路線を対象）に平・断面計画調査（図面調査）を行い、模型実験計画、遂行に必要な情報をまとめる（調査項目によっては 全数調査を行った）。

1.4.1. 火災安全対策の現状

本節では、まず 韓国地下鉄と日本的一般的な地下鉄を比較し、現在の我が国の地下鉄が採用している防災対策が抱えている問題点を把握する。

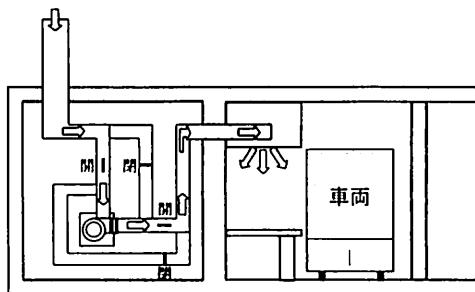
2003年に多大な被害を出した韓国テグの中央路駅は1997年末に開業した比較的新しい駅舎で、3層構造をしており、地下1階は商店街と通じ、地下2階がコンコースや駅務室等、地下3階がホームとなっており、ホーム深度18m、ホーム長さ149mで2面2線の相対型である。韓国の地下鉄は日本の技術を韓国側に提供することにより開業されたこともあり、両国の駅舎の形態、機能、防災対策は似通った傾向にあるため、テグで発生したような大規模地下鉄火災は日本でも十分起こり得ると言える。

韓国と日本の地下鉄がそれぞれ採用している火災安全対策を表1.4.1に示す。これによると、排煙設備、消火設備に関しては、日本の方が厳しい基準を設けていることが分かるが、このような防災設備も作動信頼性に十分な保証がなければ、必ずしも火災に対して安全であるとは言えない。

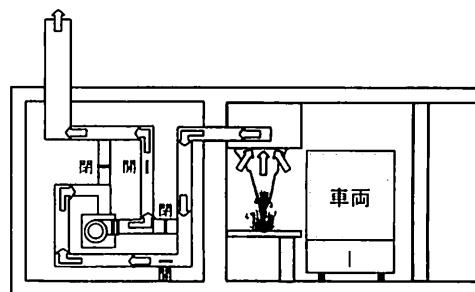
表1.4.1 韓国（テグ地下鉄公社）と日本の地下鉄の防災設備の比較

対象	主な設備	場所・機器など	大邱地下鉄	日本の一般的な地下鉄
駅	排煙設備	ホーム	換気設備を兼用（換気一排煙切替方式）	換気設備を兼用（換気一排煙切替方式）
		コンコース	換気用設備を一部兼用	専用排煙設備（専用ダクトを有する排煙機）
		駅務室	防煙区画 1000m ² 以内 防煙垂れ壁 60cm以上	防煙区画 500m ² 以内 防煙垂れ壁 50cm以上
		ホーム	排煙設備なし	専用排煙設備（専用ダクトを有する排煙機）
		コンコース	消火器、屋内消火栓	消火器、屋内消火栓、連結送水管
	消防設備	駅務室	消火器、屋内消火栓、スプリンクラー	消火器、屋内消火栓、連結送水管
		空調機械室	消火器、スプリンクラー	消火器、屋内消火栓
		電気室	消火器、スプリンクラー	消火器、スプリンクラー
		電気室	消火器、二酸化炭素	消火器、屋内消火栓、連結送水管
	避難経路	経路	階段4箇所	ホーム端から地上までの異なる2つ以上の経路、ホーム末端から50m以内に避難経路の出入り口
		防火シャッター	不明	煙感連動で1段（床上2m）、遠隔または現地で全横に避難用扉あり
トンネル	電源	起電系と配電系	変電所2次側分離で別系統	変電所2次側分離で別系統
		非常電源	主電源と同一系統	非常用自家発電機あり
トンネル	排煙設備	送・排風機	機械換気設備を兼用。中間排気方式	機械換気設備を兼用。
		連結送水管	不明	500m毎以下に送水管あり

日本の地下鉄駅舎のホーム部では、火災時には日常時の換気システムを排煙モードに切り替える方式を探っているが（図1.4.1）、これは、複数のダンパーが全て正常に開閉した際に始めて機能するものであり、仮に火災時には4つのダンパー制御が必要で1つのダンパーの開閉成功率为95%とした場合でも確率論的には81%程度でしか正常に排煙機が作動しないということを考えても、既存のシステムは大きな問題を抱えていることが分かる。実際、2004年の赤坂見附駅で発生した火災では、駅員が排煙機の作動を試みたにも関わらず作動しなかったという情報もあり、このことからも日本の地下鉄駅舎においても韓国テグでの火災と同様の大惨事が起こる可能性は十分にあると言える。



日常時（換気モード）



火災時（排煙モード）

図1.4.1 換気一排煙切り替え方式

なお、近年 我が国の地下鉄では、事故などにより防災対策の基準がより厳しくなっており、それを満たしていない駅は逐次変更していく必要がある。ここで、我が国の地下鉄における火災対策設備の現況¹⁵⁾（平成 15 年）によれば、「全地下鉄駅舎 684 駅の内、火災対策基準（地下鉄道の火災対策基準について：昭和 50 年 2 月 14 日 鉄土第 9 号、地下鉄道の火災対策の基準の取り扱いの改正について：昭和 57 年 4 月 15 日 鉄土第 70 号）を満たしていない駅は全体の 39%（268 駅）に上る」（表 1.4.2～1.4.4）。

表 1.4.2 火災対策設備の現況(1)¹⁵⁾

事業者名	地下鉄駅 総数	基準を満たして いない駅数	基準を満たして いない駅率
全国	684	268	39%
首都圏	283	137	48%
帝都高速度交通営団	144	55	55%
東京都交通局	93	36	39%
横浜市交通局	27	9	33%
京成電鉄	3	1	33%
京王電鉄	5	5	100%
小田急電鉄	1	1	100%
東急電鉄	10	6	60%

表 1.4.3 火災対策設備の現況(2) (全国)¹⁵⁾

原因	基準を満たして いない駅数
排煙設備	200
避難誘導装置	132
消火設備	56
通報設備	35
防火戸	25
建築物の不燃化	24
警報設備	1
その他	6

表 1.4.4 火災対策設備の現況(3) (首都圏のデータのみを抜粋)¹⁵⁾

路線名	開通初年	駅数	基準を満たしていない駅数	基準を満たしていない駅率	基準を満たしていない駅名
丸の内線	1954	28	25	89%	池袋、新大塚、本郷三丁目、御茶ノ水、淡路町、大手町、東京、銀座、霞ヶ関、国会議事堂前、赤坂見附、四ツ谷三丁目、新宿御苑前、新宿三丁目、新宿、西新宿、中野坂上、新中野、東高円寺、新高円寺、南阿佐ヶ谷、荻窪、中野、新橋、中野富士見町、方南町
銀座線	1927	19	16	84%	表参道、外苑前、赤坂見附、虎ノ門、新河岸、銀座、京橋、日本橋、三越前、神田、末広町、上野広小路、上野、稻荷町、田原町、浅草
日比谷線	1961	21	15	71%	恵比寿、広尾、六本木、神谷町、霞ヶ関、日比谷、銀座、八丁堀、人形町、小伝馬町、秋葉原、仲御徒町、上野、入谷、三ノ輪
東西線	1964	23	9	39%	落合、高田馬場、早稲田、神楽坂、飯田橋、九段下、竹橋、門前仲町、木場
千代田線	1969	20	10	50%	代々木公園、明治神宮前、表三号、乃木坂、霞ヶ関、新御茶ノ水、根津、千駄木、西日暮里、町屋
有楽町線	1974	24	3	13%	宮団成増、宮団赤塚、護国寺
半蔵門線	1978	14	1	7%	表参道
南北線	1991	19	0	0%	
浅草線	1960	20	13	65%	西馬込、馬込、中延、戸越、五反田、高輪台、新橋、東銀座、宝町、日本橋、東日本橋、本所吾妻橋、浅草
三田線	1968	27	12	44%	芝公園、御成門、内幸町、水道橋、春日、白山、千石、西巣鴨、板橋区役所前、板橋本庁、本蓮沼、志村坂上
新宿線	1978	21	11	52%	新宿三丁目、曙橋、神保町、小川町、岩本町、浜町、菊川、住吉、森下、西大島、大島
大江戸線	1991	38	0	0%	

平成 16 年には 韓国での大事故を受け、放火等による大規模火源の考慮、更なる安全性の向上を目的として、それまでの基準を取り込む形で解釈基準が全面的に改正されたが、既存の地下鉄駅舎はその要求に応え切れていないのが現状である。

次に、平成 11 年～15 年までの東京の地下鉄で発生した火災の件数を表 1.4.5 に、平成 11 年～18 年までの 東京メトロが運営する列車に影響を与えた地下鉄火災の件数を表 1.4.6 に、平成 11 年～18 年までの 東京都が運営する列車に影響を及ぼした、あるいは及ぼす可能性があった地下鉄火災の件数を表 1.4.7 に示す。表 1.4.2～1.4.4 のような防災設備の問題点がある中、小火などを含めると毎年数件火災は発生しており、地下鉄火災の危険性は見過ごすことのできない身近な問題となっている。幸いにも これまでのところ、その多くが小規模火災に留まっているが、将来大規模な火災が発生することは十分に考えられることから、確実な安全対策を施すことは喫緊の課題であると言える。

表 1.4.5 地下鉄火災の発生件数¹⁶⁾

出火年	小計	駅構内	軌道(トンネル・地下部分)	軌道(高架・橋梁)	軌道(その他)	死者数
平成11年	13	5	6	2	-	0
平成12年	11	6	2	3	-	0
平成13年	14	9	2	1	2	0
平成14年	12	10	1	-	1	0
平成15年	9	6	1	1	1	0
合計	59	36	12	7	4	0

表 1.4.6 東京メトロが運営する地下鉄での火災発生件数(列車の運行に影響を与えたもの)*

出火年	小計	駅構内	軌道(トンネル・地下部分)	軌道(高架・橋梁)	軌道(その他)	死傷者数
平成11年	3	0	2	0	1	0
平成12年	1	1	0	0	0	0
平成13年	0	0	0	0	0	0
平成14年	0	0	0	0	0	0
平成15年	1	0	1	0	0	0
平成16年	5	1	3	1	0	0***
平成17年	3	0	1	2	0	0
平成18年	5	2	2	0	1	0
合計	18	4	9	3	2	0

表 1.4.7 東京都が運営する地下鉄での火災発生件数**
(列車の運行に影響を及ぼす、あるいは及ぼす可能性があったもの)

出火年	小計	駅構内	軌道(トンネル・地下部分)	軌道(高架・橋梁)	軌道(その他)	死傷者数
平成11年	0	0	0	0	0	0
平成12年	0	0	0	0	0	0
平成13年	2	2	0	0	0	0
平成14年	0	0	0	0	0	0
平成15年	1	1	0	0	0	0
平成16年	1	1	0	0	0	0
平成17年	0	0	0	0	0	0
平成18年	2	2	0	0	0	0
合計	6	6	0	0	0	0

* : 東京メトロお客様センターにヒアリング調査を行い作成した。

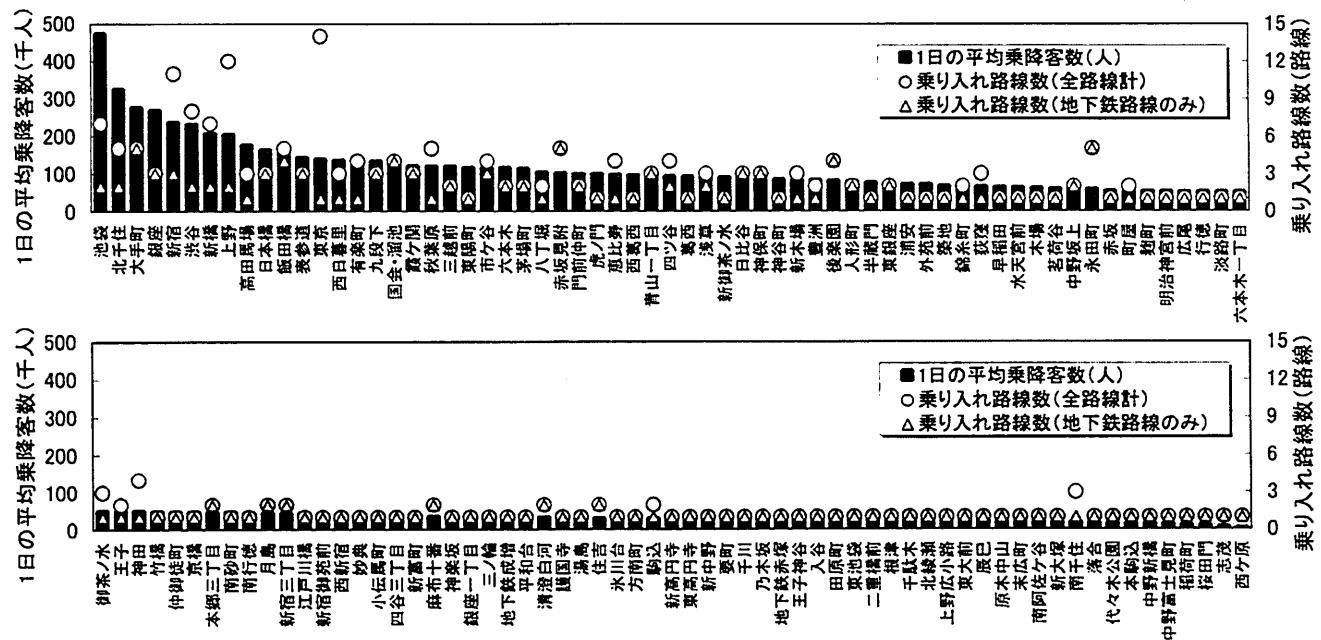
** : 東京都交通局お客様サービス課にヒアリング調査を行い作成した。

*** : 平成 16 年 8 月 8 日午後 0 時半頃、東京メトロ丸ノ内線のトンネル内で火災が発生した。煙が近くの 赤坂見附駅構内に流れ込んだため、男女二人が煙を吸うなどして軽傷を負ったという情報を得たが、その旨を問い合わせたところ、駅員が対応していない死傷者については記録が残されていないとの返答を頂いた。

表 1.4.5～表 1.4.7 のように地下鉄火災が発生している中、万が一 将来的に大規模な火災が発生した際の人的被害を最小限とするために、駅舎毎の利用客数を把握することは重要である。

東京の地下鉄における一日の平均乗降客数（図 1.4.2）を見ると、一駅に路線が複数乗り入れている駅では非常に多くなっていることが分かる。一日の平均乗降客数が 100,000 人を超える駅でも表 1.4.4 に

記載したように現在の火災対策基準を満たしていない駅は多数あることに加え、複数の路線が混在しているため 駅舎計画が複雑になることで避難経路も複雑化することや、火災時には煙が広範囲に伝播しやすくなることから、仮にそのような駅で火災が発生した際に 既存の機械排煙設備が正常に作動した場合であっても、旅客の安全が確実に確保されるか否かは疑問に思われるところであり、そういう意味でも我が国の地下鉄駅舎は潜在的な危険性が高いと言える。



(a) 東京メトロが運営する地下鉄駅舎（他線との直通連絡駅と白金台駅を除く）

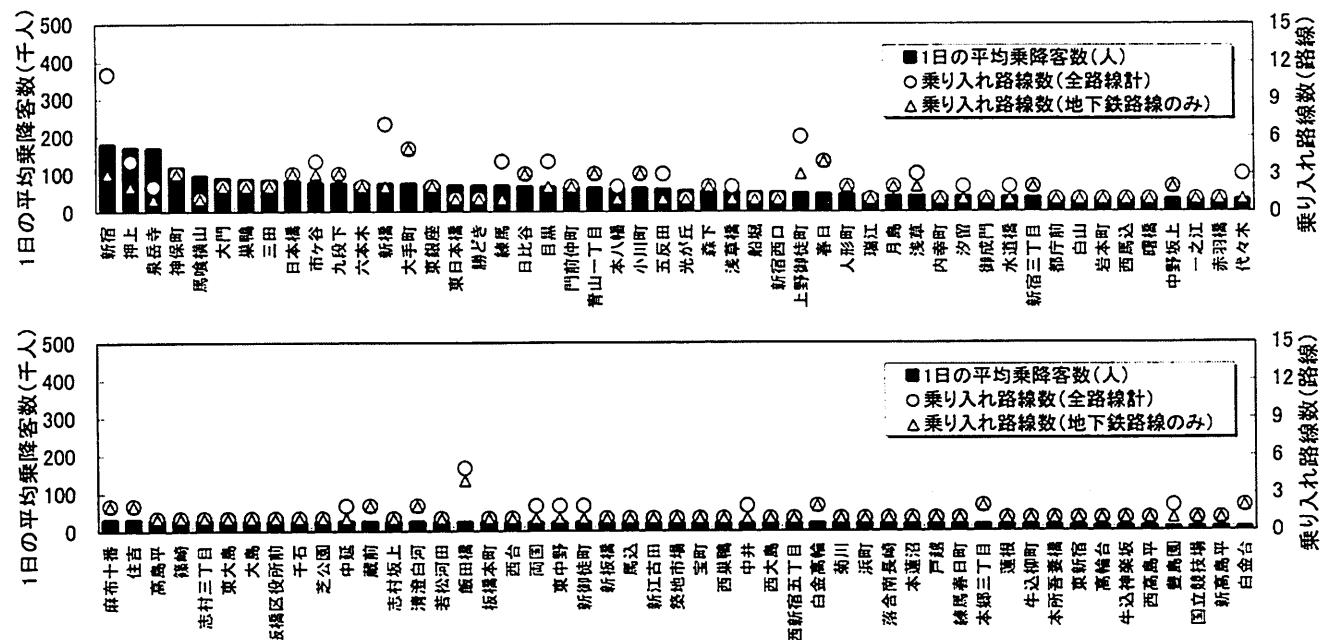


図1-4-3 各駅の一日の平均乗降客数（平成12年度）および乗用車路線数 17) 18)

1.4.2 関東地域における既存地下鉄駅舎の平・断面計画調査

本節では、地下鉄駅舎計画のうち、特にプラットホーム階の形態について順次記載すると共に近年の傾向を掴み、模型実験計画に反映させる。

地下鉄駅舎に限らず、多くの鉄道駅舎のホーム形式は、規模が大きく路線が複数停車する駅では若干異なるものの、概ね以下の2種類に大別できる。

- ホームの両サイドが線路に接している形式の「島式ホーム」(図 1.4.3)

特徴： ① ホーム階の掘削幅が小さいことから、道路下に駅舎を建設する必要がある場合には有利
 ② 上下線の列車監視員が兼用可能であるため、ランニングコストを削減できる
 ③ 階段、エレベーター、エスカレーターの設置総数が少ないため、建設コストおよびランニングコストを削減できる

- 向かい合う二つの片面ホームが線路をはさんで存在する形式の「相対式ホーム」(図 1.4.4)

特徴： ① ラッシュ時に上下線共に旅客が急増する場合にも円滑な処理が可能
 ② 線路を直線に保つことができるため、列車が減速せずに通過可能
 ③ ホームと同レベルに改札を設けることが可能であるため、場合によっては地下一層構造が可能（少数ではあるが島式ホームでもホームと同レベルに改札がある駅も存在する）
 ④ ホームの延長が比較的容易

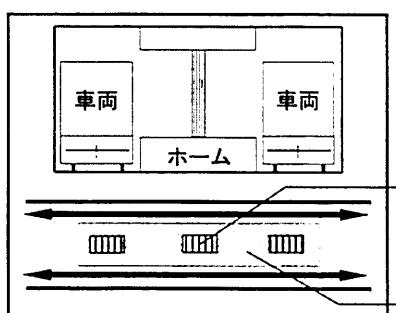


図 1.4.3 島式ホーム

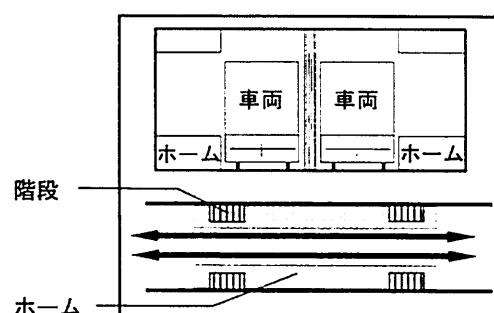


図 1.4.4 相対式ホーム

路線毎の全駅数に対する各ホーム形式の占める割合(図 1.4.5)を見ると、1970 年代以前に開通した路線とそれ以降に開通した路線とでは傾向が大きく異なっていることが分かる。ホームの形式は旅客数、地理的条件、他線との連絡等の条件を考慮して決定されるが、近年ではランニングコストを削減できる島式ホームが選択される傾向にある。

なお、本研究で図面調査の協力を頂いた地下鉄運営会社が管理している地下鉄駅舎では、天井高さは通路、広間等では 2500mm、ホームでは 3000mm が設計上の標準の高さとして定められているものの、既存駅舎ではホーム形式によらずホーム天井高さは概ね 2200~3000mm の範囲内であり、標準天井高さ以下となっている場合が多い(図 1.4.6)。

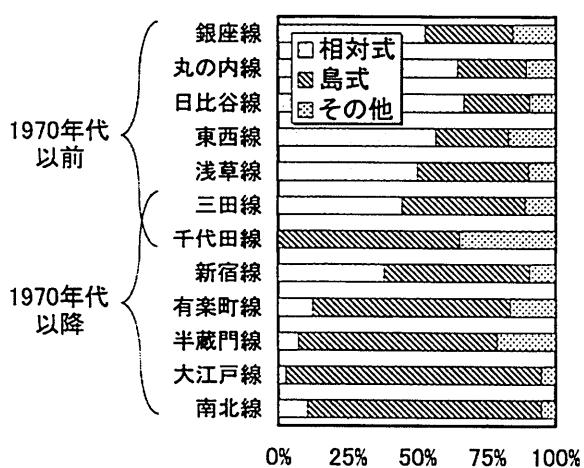


図 1.4.5 路線別での各ホーム形式の占める割合^{17), 18)}
 (全数調査を行った)

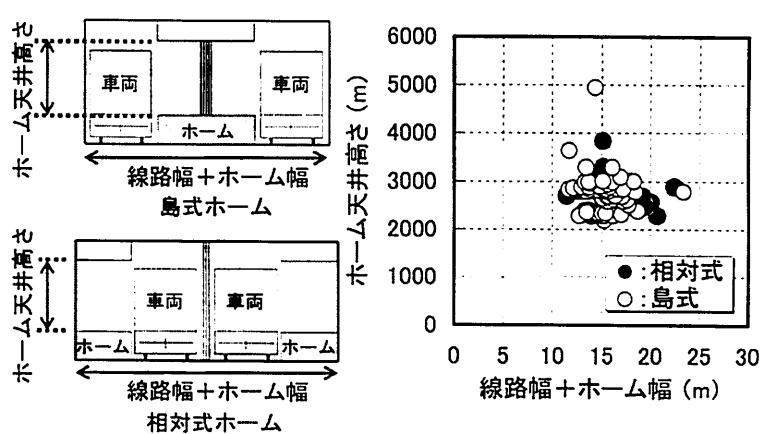


図 1.4.6 線路幅+ホーム幅とホーム天井高さの関係(路線毎、ホーム形式毎での平均)^{図4)}

図調) : 図の作成にあたり、関東地区において地下鉄を運営する会社に 駅名等が論文閲覧者に特定されないことを条件に、各駅舎の図面の調査を行うことを了解していただき、ご協力いただいた。

なお、1970 年代以降には、都市部の人口増加による混雑の緩和を図るためにホーム長さがそれまでの約 2 倍にまで伸び (図 1.4.7)、これに伴い駅舎の規模が大きくなっていることに加えて、地下鉄の建設深度が年々増していることから (図 1.4.8)、近年の地下鉄駅舎における日常時の空調負荷は増加する傾向にあると予想される。1990 年代以降では 新設駅舎のホーム長さは若干縮小する傾向にあるものの、今後も施設建設の大深度化が継続した場合には、日常時の省エネルギーの重要性は益々大きくなると予想されることから、火災時の安全性確保と日常時の省エネルギーを両立するパッシブセイフティシステムを提案する本研究の意義は大きいと言える。

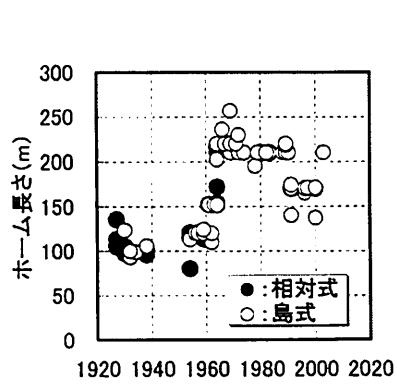


図 1.4.7 地下鉄駅舎のホーム長さの推移 (図調)

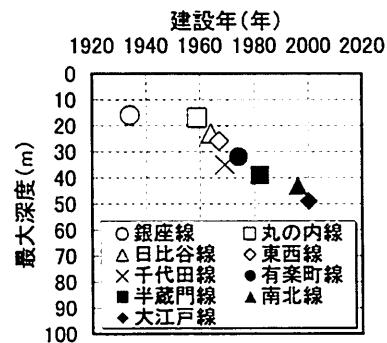


図 1.4.8 地下鉄路線毎の最大深度 ¹⁹⁾

次に各駅におけるホームへの階段設置箇所数とホーム長さの関係を見る。図 1.4.9 より、島式ホームでは ホーム長さによらず 階段は 2~4 箇所程度設置されることが多いが(非常階段は含まない)、相対式ホームでは 両側のホームにそれぞれ階段を設置する必要があるため、島式ホームに比べて階段合計数が多くなる傾向にある。

なお、階段設置箇所数と階段幅(手摺幅を含む)、階段とエレベーターが併設されている場合は、それらの合計幅)の間には有意な関係は見られない (図 1.4.10)。

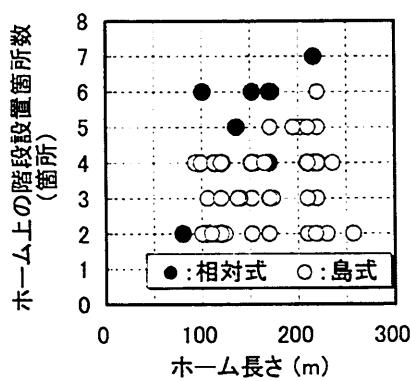


図 1.4.9 ホーム長 - 階段個数 (図調)

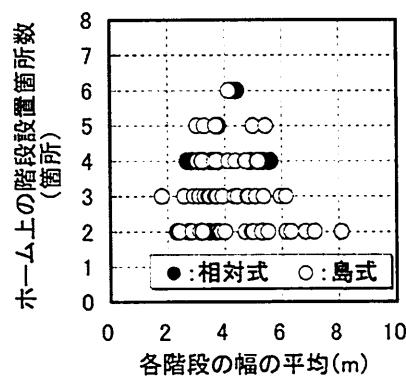


図 1.4.10 階段幅平均 - 階段個数 (図調)

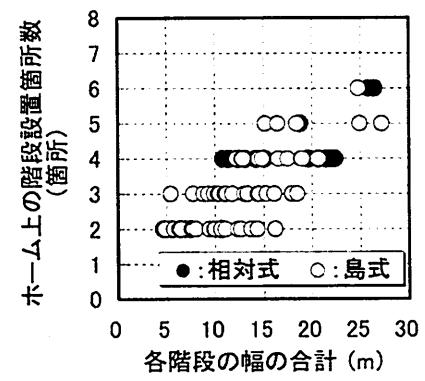


図 1.4.11 階段幅合計 - 階段個数 (図調)

本研究で行う実験では、近年の地下鉄事情に沿ったものとして島式ホームを選択し、また、近年のホーム長さ、ホーム幅を考慮に入れ、模型長さは実大換算で 200m とし、幅は実大換算で 15m とした。

また、階段室は 1 箇所(基礎的模型パターン)、2 箇所で可変とした(詳しくは、第 2 章で記載する)。なお、階段室数が 1 の基礎的模型パターンは、現実にはあり得ない計画であるが、これはパッシブセイフティシステムを採用した地下鉄駅舎内部での火災時の煙流動性状に関する基礎的な知見を得ることを目的として行った。

1.5. 既往の研究

地下空間内の避難安全対策や日常時の省エネルギーに関しては、法改正および社会的ニーズの高まりにより近年盛んに研究されている。以下に、本研究の着想時、本論文作成時に参考とした既往の研究のうち主立ったものを分野別に紹介する。

1.5.1. 横長区画内での火災時の煙流動性状

・*Dellichatsios*²⁰⁾ は、平行に設けられた 2 本の梁の中間 下方の床面で火災が発生した際の、天井面下を梁に平行方向に流れる煙に関して、理論的な考察を行っている。プルームが天井に到達した後 放射状に広がる天井ジェット(無限天井と同様の煙流動特性)が形成され、その天井ジェットが梁に到達すると、梁が薄い場合、その梁を越えて一部の煙は漏れ、残りの煙は梁に沿う一次元流れとなる。また、梁が十分に厚い場合には梁下から漏れる煙は非常に微量となるために ほぼ全ての煙が梁に平行方向に流れる。文献 20 では、梁厚の条件毎に、煙層温度、梁に平行方向の煙層先端部移動速度に関して それぞれ理論式が提案されている。

・*Hinkley*²¹⁾ は、*Benjamin* の "Gravity current" の理論に基づき、shopping mall (横長空間) 内における、火災時の煙層厚さ、煙層先端部の移動速度、煙層内の流速に関して それぞれ理論式を提案している。

・松下ら²²⁾ は二流体の密度流の考えを用いて、質量保存則と熱量保存則から煙層先端部の移動速度の定式化を行っている。なお、本論文第 3 章での火災初期の天井下煙伝播性状予測には松下らと類似する方法を用いている。

・本研究では、階段室一火災室（ホーム）間に設置した垂れ壁の遮煙効果を把握することを目的の 1 つとしているが、横長区画における火災時の垂れ壁近傍での煙特性、遮煙状況については笠原ら²³⁾ が報告している。文献 23 では煙が垂れ壁を越えようとした時の垂れ壁前後での密度差に基づく圧力差に注目して実験結果から考察を行っているが、火災発生直後からこの状態に至るまでの非定常の経緯については触れられていない。

・栗岡、岡ら^{24),25)} は、自由空間あるいは横長区画において横風がある場合の火炎、プルームの定常状態での傾斜角度が、上昇気流の質量流束と横風の質量流束の関係 もしくは プルームの浮力と周囲空気の慣性力の関係で説明できるとし、それぞれ実験式を提案している。

1.5.2. ソーラーチムニーの換気・排煙性能

ソーラーチムニーの設計を行う際の技術的裏づけを示すことを目的とした性能予測の検討が 趙晟佑ら³⁾ により行われている。具体的には、ソーラーチムニーの上部に設置された排気口面積と建物下方に設置された給気口面積の比、ソーラーチムニーの断面積およびアスペクト比の変化が建物内の空気の流れにどのような影響を及ぼすかを、チムニー内の高さ方向の温度変化を考慮した一次元簡易モデル および CFD により検討している。この結果、CFD を利用せずともベルヌーイ式と熱平衡式を利用することで、ソーラーチムニー内の任意の高さでの温度と垂直方向の流速の予測が可能であることが示された。

また、ソーラーチムニーを設置した建物における日常時の自然換気と火災時における居住空間の安全性確保の両立に関する研究が、丁文婷¹⁾、峯岸²⁾ らにより行われた。一般に自然換気の促進を図ると、建物の開放性が高まるため火災時の煙拡散を助長する傾向があるが、一方で、視点を変えると居住空間内の排熱や汚染空気を外部に排出する自然換気は 火災時に煙を外部に排出する自然排煙と機能的に類似していると言える。彼らは、高さ 30m のアトリウム上部に高さ 11.25m のソーラーチムニーが設置さ

れている 8 階建ての事務所建築を対象として、ソーラーチムニーを用いた自然換気システムをそのまま火災時の自然排煙にも活用する手法に関して、1/25 スケール模型実験により検討している。実験結果から、排・給気口面積比を 2 以上とすることで、日常時に共用空間に必要な換気量の確保と火災時におけるチムニー内への中性帶の保持(居住空間への煙流入防止)が両立でき、火災時にも 外気 → 居室 → アトリウム → ソーラーチムニー → 外気 となる気流が形成可能であることなどが明らかとされた。

早川ら⁴⁾は実建築物へソーラーチムニーを設置した際の日常時の省エネルギー効果について報告している。延べ床面積 9527.85 m²、地下 1 階・地上 5 階建ての 地上 S 造・地下 SRC 造 の日本大学理工学部船橋校舎 14 号館の南側に設置されている 2 基のソーラーチムニー（断面：3 m × 3 m、高さ：26 m）内の温度、チムニー頂部での処理風量、建物全体のガス・電力使用量等の実測データから、年間を通してのチムニー内外温度差および換気量の推移、ソーラーチムニー設置による年間消費エネルギー削減率等を示している。

1.5.3. ドライミスト噴霧による周囲空気の冷却効果

ドライミストの性能確認については辻本ら^{5)～11)}によって研究が進められている。ドライミスト設備は、屋上緑化などに見られる植物の蒸散効果によってもたらされる気温低下を 微粒子のミストを空気中に供給することで人為的に作り出す装置として考案された。ドライミストの性能確認実験は夏季（7～8 月）に屋外空間および半屋外空間で行われており、屋外空間はアスファルト敷の駐車場、半屋内空間は面積 3000 m²、高さ 4.5m で北面以外の壁 3 面が開放されたテントが使用された。実験のパラメータとして、ミスト散布量の他、外気温、湿度、風速、日射等が設定された。実験結果から、ミスト散布時に風速が 3.0 m/s を超えるような状況ではミストが吹き散らされてしまい、周囲空気温度の低下が見られなくなるものの、風速が 3.0m/s 以下の条件下であれば、外気温が 31℃を超えるあたりから気温低下が顕著に見られるようになる（最大で 3 ℃程度）ことが明らかとなった。ただし、相対湿度が 60%を超えると温度低下が殆ど見られなくなることも述べられている。

以上が本研究に関連する研究であるが、現在までの国内外の研究において、地下鉄駅舎における日常時の省エネルギーおよび火災時の安全性の確保を同時に提案する研究は存在しない。また、本研究で提案するパッシブセイフティシステムは、これまで別個に研究されてきた “ドライミスト噴霧による周囲空気の冷却効果” および “ソーラーチムニー利用による自然換気促進および火災時の排煙” を共に地下鉄駅舎計画に組込むものである。

1.6. 本論文の構成

本論文の構成を以下に示す。

第 1 章では、我が国の大都市における地下利用、特に地下鉄駅舎について現状と抱えている問題点を示し、今後 駅舎の新設が行われる際に大きな課題になると思われる、”日常時の省エネルギー” と ”火災安全対策の作動信頼性の問題”を同時に解決するシステムとしてパッシブセイフティシステムを提案した。

なお、本システムは 近年研究が進められているソーラーチムニーとドライミスト設備を地下鉄駅舎計画に組み込むものであるが、両設備に関する現在までの研究状況、実建築物への設置例についても記載した。また、提案するシステムの重要な境界条件であるホームスクリーンドアの世界各国の地下鉄駅舎への設置状況と、日本での状況（設置されない理由等）についても記載した。

第2章では、1/20スケールの地下鉄駅舎模型を用いて、本システムを採用した駅舎内部における火災時の煙流動性状に関する基礎的な知見を得ることを目的として実験を行った（火源は、実スケールで3MWを想定）。具体的には、まず、チムニー寸法が気流性状に与える影響を把握するために、用意した6種類のチムニーを用いてそれぞれ実験を行い、給・排気量、階段室への煙流入の程度等を指標に実験結果の比較を行った。

次に、火災時の本システムの有効性を判断する際の指標の1つである階段室一火災室間の遮煙性能について、まず本研究における遮煙に関する考え方を示し、これに基づき遮煙状況に対して大きな影響を持つと考える垂れ壁の高さおよび垂れ壁下の通路幅をそれぞれ現実的な範囲内で段階的に変化させて実験を行った（一部数値シミュレーションも併用した）。

また、堅シャフト（チムニー、階段室）の組合せが、火災時の煙流動性状に与える影響についても模型実験結果から考察した。

なお、本章で得た知見を基に第4章での実験条件を決定している。

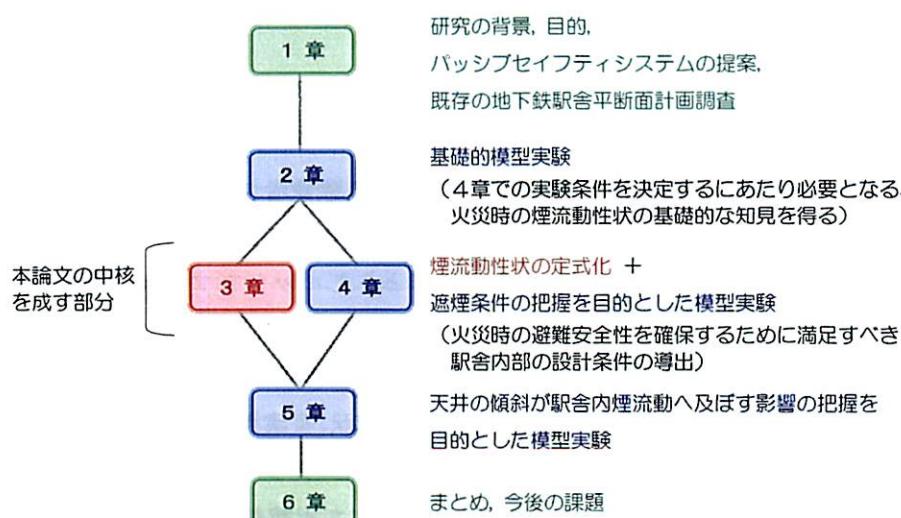
第3章では、火災発生後チムニーに煙が流入する以前の段階で遮煙を行うことが重要との見地（第2章）から、着火直後の天井下煙伝播性状、煙層先端部が垂れ壁に到達後の垂れ壁近傍の煙流動性状に関してそれぞれ定式化を行い、これら2つの煙流動モデルを用いることで計算から遮煙成否の境界となる条件を導出できるようにした。

第4章では、着火直後非定常状態での駅舎内煙流動、遮煙状況に注目し、着火前の模型内気流の大きさ、階段室一ホーム間垂れ壁高さ、垂れ壁下通路幅、火源条件（位置、径、発熱速度）をパラメータとして模型実験を行い、各種パラメータの組合せと遮煙状況から遮煙成否の境界となる条件を把握した。また、第3章で提案した煙流動モデルによる計算値と実験結果を比較し、必要に応じて提案モデルを改良した。

この他、模型の天井高さを変更した場合についても実験を行い、実験結果と計算結果を比較することで、提案モデルの適応可能範囲に関する考察を加えた。

第5章では、模型を段階的に傾斜させて実験を行うことで、地下鉄駅舎の天井を傾斜させた場合の火災時の煙流動性状への影響を把握した。

第6章では、総括として第2章から第5章までの結果をまとめると共に、今後の課題を記載した。



注 1-1) 地下鉄駅舎ホームの冷房負荷¹³⁾

ホーム負荷には、列車負荷(車両負荷、車両冷房器熱、列車風負荷)、人体負荷、照明負荷、壁部吸・放熱および外気負荷などがあるが、その中でも列車負荷はホーム階全負荷の70~80%を占めると考えられている。ここで、列車負荷は以下のようにして算出される。

① 列車からの発生熱量

ホーム階の軌道部分では、進入列車によりブレーキ熱が発生する(主に列車床下の抵抗器から発生する)。ブレーキの作動による発生熱量のうち、ホーム部へ直接影響する負荷の割合は、50%と考えるのが一般的である。

$$q_1 = \frac{1}{7200} \left(\frac{V^2 W}{2} + 9.8 H W \right) \left(1 - \frac{R_c}{100} \right) N \quad \dots \quad (1.a)$$

q_1 : 実際にホーム部負荷となるブレーキ作動による発熱量(W)

V : ブレーキ開始・終了時の速度差(m/s) W : 一列車総重量(kg)

H : ブレーキ開始・終了時のレールレベルの高度差(m) N : 列車本数(列車/h)

R_c : 回生ブレーキ採用の場合の回生率(一般的には30~40%) (%)

② 列車風負荷

列車風によりホーム部に持ち込まれる熱量は式(1.b)、式(1.c)により求められる。

$$q_s = 0.36 Q (t_r - t_p) N \quad \dots \quad (1.b) \quad q_L = 898 Q (x_r - x_p) N \quad \dots \quad (1.c)$$

q_s : 列車風による顯熱負荷(W) t_r, t_p : トンネル内、ホーム部の温度(°C)

q_L : 列車風による潜熱負荷(W) x_r, x_p : トンネル内、ホーム部の絶対湿度(kg/kg(DA))

Q : 列車風(一般地下鉄で1000~2000)(m³/列車)

③ 車両補機、車両冷房による発生熱量

列車には車内照明、コンプレッサーおよび車内冷房などの電源としてMG(電動発電機)またはSIV(サイリスタインバータ)が設置されている。それによる発生熱量は式(1.d)により算出できる。

$$q_2 = \left(\frac{M_g \eta_m n N}{\eta_e} \right) \frac{t}{3600} \times 1000 = q_g \times N \times \eta_m \times \frac{t}{3600} \times 1000 \quad \dots \quad (1.d)$$

q_2 : 補機器からの発熱量(W) q_g : 補機容量(kW/列車) η_m : 負荷率

η_e : 電動機効率 n : 編成車両数 N : 列車本数(列車/h)

t : 駅滞留時間(s) M_g : 発電機などの出力(kW/両)

また、冷房車によるホーム部への負荷は式(1.e)から求めることができる。

$$q_3 = (q_{AC} n N) \frac{t}{3600} \quad \dots \quad (1.e)$$

q_3 : 冷房車からの進入熱量(W) q_{AC} : 冷房装置容量(W/両) t : 駅滞留時間(s)

本節では、冷房負荷(式(1.a)~式(1.e)の和)算出に必要となる諸条件を以下のように仮定する。

$$H = 10 \quad N = 24 \quad Q = 1500 \quad R_c = 35 \quad V = 19.44 \quad W = 320000$$

$$n = 8 \quad t_p = 29 \quad t_r = 35 \quad t = 60 \quad q_g = 20 \quad q_{AC} = 85000$$

$$x_p = 0.0155 \quad x_r = 0.0240 \quad \eta_m = 0.5$$

これより、 $q_1 = 199,016(W)$, $q_s = 77,760(W)$, $q_L = 274,788(W)$, $q_2 = 4,000(W)$, $q_3 = 272,000(W)$

となり、列車によるホーム部への熱負荷合計は 828(kW) となる。

なお、パッシブセイフティシステムではホーム一軌道間にホームスクリーンドアを設置するため、これを大幅に低減することができる。

注 1-2) 地下鉄駅舎ホーム階の火災安全基準¹³⁾

運輸省（現 国土交通省）通達³⁹⁾によれば、ホーム部の排煙設備は 火点ブロック方式により決定するものとし、機械換気設備と兼用してもよい（図 1.4.1（8 頁））とされている。ここで、火点ブロック方式とは、ホーム階で火災（列車火災）が発生した場合に ホーム部、軌道において煙が拡散する空間のうち 煙濃度が最も濃いと推定される一定の空間 すなわち 火点ブロックの大きさを設定するものであり、ホーム階に設置する排煙設備は 火点ブロックの大きさ（容積）に対応した規定の換気回数（表 1.a）を確保できるものとする必要がある。ホーム階における火点ブロックの決定方法を図 1.a に示す。なお、図 1.a は火点ブロック線路直角方向断面図であるが、火点ブロックの線路方向の長さは 20m（避難時の見通し距離）であり、また、図中の斜線範囲内に柱、階段等の煙が拡散しない部分がある場合には当該容積を差し引くものとする。

表 1.a 火点ブロック容積-必要換気回数 N 対応表*

火点ブロック 容積 (m ³)	N (回/h)	火点ブロック 容積 (m^{3})	N (回/h)	火点ブロック 容積 (m^{3})	N (回/h)	火点ブロック 容積 (m^{3})	N (回/h)	火点ブロック 容積 (m^{3})	N (回/h)
255以下	50	297~303	42	363~372	34	461~476	26	614~638	18
256~260	49	304~311	41	373~383	33	477~492	25	639~665	17
261~266	48	312~318	40	384~394	32	493~509	24	666~693	16
267~271	47	319~326	39	395~406	31	510~528	23	694~723	15
272~277	46	327~335	38	407~418	30	529~547	22	724~756	14
278~283	45	336~343	37	419~432	29	548~568	21	757~790	13
284~290	44	344~353	36	433~445	28	569~590	20	791~827	12
291~296	43	354~362	35	446~460	27	591~613	19	828~868	11

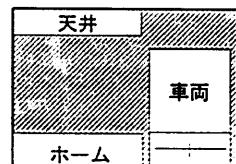
これにより、日本の地下鉄駅舎において世界各国で導入され始めている構造のホームスクリーンドア（上部に開口が無く、完全にホーム部分と軌道部分を分離するタイプ）を設置した場合には、火点ブロック容積が極端に小さくなるために 必要換気回数が非常に多くなることになる。結果として、日本では、現在設置されている構造（図 1.3.1(c), (d)（6 頁））以外のものは設置が難しい***。

* 火点ブロック方式が採用された昭和 54 年当時は、ホーム階の火災は、発煙量、発見の容易さ、消火活動のしやすさの観点から、列車火災の方が売店火災より厳しいと考えられ、ホーム階については列車火災が想定された。表 1.a は 昭和 54 年に定められた値である。

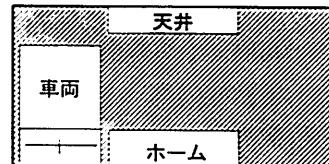
ただし、最近の車両の多くは難燃化が進んでおり、実大実験によりフラッシュオーバーに至らないことが確認されている⁴⁰⁾。

なお、平成 16 年には 韓国テグでの火災を受け、基準が改正された（放火による売店火災も想定）ため、必要換気回数は 表 1.a に示す値よりも大きくなるが、既存駅舎のうち 古いものは昭和 57 年の基準も満足していない。

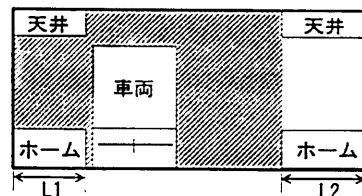
*** このことから、パッシブセイフティシステムは日本国内の地下鉄駅舎における安全対策を提案するものではない。



煙は斜線部分の全断面に拡散するものとする。
(a) 一線式ホーム



煙は熱による上昇気流により隣接ホームおよび反対軌道部にまで拡散するものとする。
(b) 二線式ホーム (島式ホーム)



反対側ホームは軌道部分より天井が低いため
煙は拡散しないものとし、入線する火災列車により設定される断面のうち 小なる断面とする。
(ホーム幅が L1≤L2 の場合、図中 斜線部分)
(c) 二線対向式ホーム

図 1.a 火点ブロック設定方法
(線路直角方向断面)

第2章

基礎的模型実験

— 火災時における駅舎内の煙流動性状に関する基礎的知見の把握 —

2.1. 本章の目的

本研究で提案するパッシブセイフティシステムは、ホームスクリーンドア、ソーラーチムニー、ドライミスト設備等の各種設備を併用し、常時一定方向（外気 → 階段室 → ホーム、コンコース → ソーラーチムニー → 外気）に気流制御を行うことで、日常時の換気に加え、火災時の避難経路の安全を確保するシステムである。ここで、本システムの火災時の信頼性に関する検討を行うにあたり、本システムを採用した地下鉄駅舎内部における火災時の煙流動性状を把握することが肝要となる。しかし、トンネルや地下鉄駅舎などの横長空間ではゾーンモデルにより現象を再現することは難しく、また、数値シミュレーションを行うには火災現象を正確に予測するための厳密な境界条件の設定が必要となる等の問題があり、本システムの有効性を数値シミュレーションのみによって確認することは難しい。

そこでまず、本章ではパッシブセイフティシステムを採用した地下鉄駅舎において、火災時の安全性を確保するために満たすべき駅舎内部での条件を把握するにあたって必要となる基礎的な知見、具体的には、本システムを採用した地下鉄駅舎においてチムニーや垂れ壁等の条件を変更することにより火災時の駅舎内煙流動性状にどのような影響があるか、また、それらの条件を調整することで、火災時に火災室→チムニー→外気の方向に煙の流れを制御し、避難経路、消防拠点となる階段室への煙の流入を防ぐことが可能であるのか否か、仮に階段室への煙の進入を防ぐことが可能な条件がある場合、火災発生後のどの状態（火災発生直後、準定常状態等）に注目してその条件を探るべきなのか等を把握することを目的として、本章第3節以降に記載する実験設備を用いて相似則に基づき模型実験を行う。

なお、本章第2節では模型実験で用いた相似則についてまとめている。

2.2. 流れの相似則

実スケールでの煙流動性状を把握するための手段として縮尺模型実験を行う場合、模型スケールと実スケールでの流れを相似とする必要があるが、それにあたっては、両者で全ての物理量を相似としなければならない。すなわち、模型と原型との間で、幾何学的形状が相似であることに加えて、両者の慣性力 f_i 、浮力 f_b 、圧力 f_p および粘性力 f_v の比を全て等しくする必要がある（式(2.2.1)、なお、模型スケール、実スケールの流れ場についてはそれぞれ添え字_m、_fを付す）。

$$\frac{f_{if}}{f_{im}} = \frac{f_{bf}}{f_{bm}} = \frac{f_{pf}}{f_{pm}} = \frac{f_{vf}}{f_{vm}} \quad \dots \quad (2.2.1)$$

非圧縮性流体の流れを考える場合、一般的に圧力は弾性力と対応させることができるので、慣性力、浮力、粘性力の3つが支配的と考えられ、式(2.2.1)より以下の式が得られる。

$$\frac{f_{if}}{f_{im}} = \frac{f_{vf}}{f_{vm}} \Leftrightarrow \frac{f_{if}}{f_{vf}} = \frac{f_{im}}{f_{vm}} \quad \dots \quad (2.2.2)$$

$$\frac{f_{if}}{f_{im}} = \frac{f_{bf}}{f_{bm}} \Leftrightarrow \frac{f_{if}}{f_{bf}} = \frac{f_{im}}{f_{bm}} \quad \dots \quad (2.2.3)$$

ここで、慣性力 f_i は代表密度 ρ 、代表長さ l 、代表流速 u を用いて式(2.2.4)のように表せ、また、粘性力は流体をニュートン流体と考えれば、代表粘性係数 μ を用いて式(2.2.5)のように表すことができる。

$$f_i = \rho l^2 u^2 \quad \dots \quad (2.2.4)$$

$$f_v = \mu l u \quad \dots \quad (2.2.5)$$

また、浮力 f_b は代表密度差 $\Delta\rho$ 、重力加速度 g を用いて式(2.2.6)のように表せる。

$$f_b = \Delta \rho l^3 g \quad \cdots (2.2.6)$$

式(2.2.4)～式(2.2.6)を用いて、式(2.2.2)および式(2.2.3)は それぞれ以下のように表すことができる。

$$\frac{\rho_f u_f l_f}{\mu_f} = \frac{\rho_m u_m l_m}{\mu_m} \equiv Re \quad \cdots (2.2.7)$$

$$\frac{\rho_f u_f^2}{\Delta \rho_f g_f l_f} = \frac{\rho_m u_m^2}{\Delta \rho_m g_m l_m} \equiv Fr^2 \quad \cdots (2.2.8)$$

式(2.2.7)はレイノルズ相似則、式(2.2.8)はフルード相似則と呼ばれる。

模型と原型における流れが 幾何学的かつ力学的に相似であるとき、式(2.2.7)および式(2.2.8)が同時に成立していなければならない。ところが、工学的に模型実験を行う際には、一般に同一流体、同一重力場で試験を行うことが多い。この場合、密度 ρ 、粘性係数 μ 、重力加速度 g が実スケールと模型スケールとで同一であるので、式(2.2.7)からは

$$(u_f/u_m) = (l_m/l_f) \quad \cdots (2.2.9)$$

が導き出され、その一方で、式(2.2.8)からは

$$(u_f/u_m) = (\sqrt{l_f/l_m}) \quad \cdots (2.2.10)$$

が導き出される。よって 式(2.2.7)と式(2.2.8)を同時に満足させることは 実規模模型を用いる以外不可能となる。

一般的には、模型と原型との間で力学的相似性が求められる場合には、明らかにすべき流れの特性によってレイノルズ相似則とフルード相似則を使い分けることになる。本研究で行う実験のように、火災現象を模型にスケールダウンして解析する手法は、過去の研究^{1)～3), 26), 27)}により ある程度確立されており、火源上に形成される高温域など 充分な大きさの浮力を持つ流体を対象とする場合、流れを支配するのは浮力と慣性力であることから、対象とする流体の内部フルード数 Fr を模型と原型で一致させることにより相似性を満足させる。以下では、唯一 選択可能な変数である発熱速度について、模型と原型で内部フルード数 Fr を一致させるように定めた場合、注目する現象である 火源上の熱プルームおよび天井面に沿う煙流動の各要素（温度、速度、煙層厚さ、時間軸）が模型と原型の間でどのような関係になるかをそれぞれ検討する。

・火源発熱速度

まず、火炎・プルーム領域について考える。内部フルード数 Fr を展開することで、無次元発熱速度 Q^* が次式のように導き出される²⁹⁾。

$$Fr = \frac{\rho u^2}{\Delta \rho g l} \propto \frac{Q}{\rho \cdot c_p \cdot T_\infty \cdot \sqrt{g z} \cdot A_{(z)}} \quad \leftarrow \boxed{Q \propto \rho c_p \Delta T A_{(z)} u} \\ \propto \frac{Q}{\rho_\infty \cdot c_p \cdot T_\infty \cdot \sqrt{g \cdot z^{5/2}}} \equiv Q_z^* \propto \left(\frac{\Delta T}{T_\infty} \right)^{3/2} \leftarrow \boxed{A_{(z)} \propto z^2, \rho \approx \rho_\infty} \quad \cdots (2.2.11)$$

T_∞ : 霧囲気温度

ρ_∞ : 霧囲気密度

u : 垂直方向流速

ΔT : プルーム内外温度差

$\Delta \rho$: プルーム内外密度差

Q : 火源発熱速度

Q_z^* : 点熱源からの高さ z を代表長さとした無次元発熱速度

c_p : 定圧比熱

$A_{(z)}$: 点熱源からの高さ z におけるプルーム水平断面積

g : 重力加速度

模型と原型で内部フルード数 Fr を一致させた場合には、式(2.2.11)より 火源発熱速度の相似則として 式(2.2.12)が得られる。

$$\frac{Q_m}{Q_f} = \left(\frac{l_m}{l_f} \right)^{5/2} \quad \dots \quad (2.2.12)$$

なお、火炎高さ z_{fire} は 火源発熱速度 Q と $z_{fire} \propto Q^{2/5}$ の関係があることが知られているが²⁹⁾、このことから、原型と模型とで火炎高さも相似になることが分かる。

・ 温度

式(2.2.11)より、模型と原型で内部フルード数 Fr を一致させた場合には、温度上昇の相似則として 式(2.2.13)が得られる。これにより、模型と原型とで、時間軸を合わせれば 非定常現象でも相似的に同じ位置における温度上昇は等しいことになる。このことは、自由燃焼の場合、火炎と周囲空気との接面の温度がスケールに関係なく約 800°Cで一定なことからも補強される。

$$\frac{\Delta T_m}{\Delta T_f} = 1 \quad \dots \quad (2.2.13)$$

・ 時間

代表流速 u は、代表時間 t および代表長さ l によって以下の式で表される。

$$u = \frac{l}{t} \quad \dots \quad (2.2.14)$$

よって、式(2.2.14)を内部フルード数 Fr に代入すると以下の式を得る。

$$Fr = \frac{\rho u^2}{\Delta \rho g l} = \frac{\rho l}{\Delta \rho g t^2} \quad \dots \quad (2.2.15)$$

式(2.2.13)および式(2.2.15)から、模型と原型で内部フルード数 Fr を一致させることにより、時間軸の相似則として次式を得る。

$$\frac{t_m}{t_f} = \left(\frac{l_m}{l_f} \right)^{1/2} \quad \dots \quad (2.2.16)$$

・ 流速

模型と原型で内部フルード数 Fr を一致させた場合には、式(2.2.11), 式(2.2.13)から次式が得られる。

$$\frac{u_m}{u_f} = \left(\frac{l_m}{l_f} \right)^{1/2} \quad \dots \quad (2.2.17)$$

以上により、式(2.2.12)から算出される 模型縮尺に対応した火源発熱速度を用いることで、模型と原型との間で火炎・ブルーム領域での性状が相似となる。これにより、模型の幾何学的形状が原型と相似で、かつ 煙層と壁面間での熱移動が無い場合 あるいは 熱移動も相似となる場合には、煙層部分に関しても模型と原型との間で相似性が保たれると考える。

実際の煙流動では壁体への熱損失があり、これにより煙層厚さや流速が変動することとなるため、これらを相似にする工夫として以下のように考えた。

・煙層一壁面間での熱移動²⁶⁾

煙層と接する壁面から失われる熱量は、煙層と壁面間の表面熱伝達および壁面内部の熱伝導によって決まる。表面熱伝達については、境界層厚さを調整することは不可能であるので、熱伝達の部分での工夫はできない。ただし、壁面温度が煙層温度と等しくなるとして壁面内部の熱伝導（熱吸収）について模型材料を選択することで工夫することは可能である。

図 2.2.1 のような、厚さ l_s で厚さ方向に均一な温度 T_s の煙層の流下方向の熱収支は、下方の空気層との熱のやり取りを無視することで、式 (2.2.18) で表される。

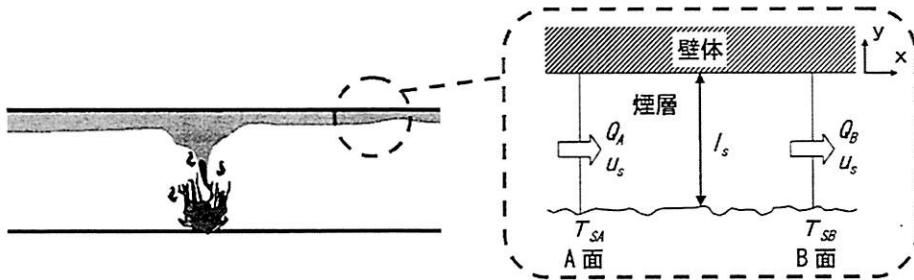


図 2.2.1 壁体に接する煙層概要

$$\lambda_s \frac{\partial^2 T_s}{\partial x^2} l_s - u_s l_s c_s \rho_s \frac{\partial T_s}{\partial x} = l_s c_s \rho_s \frac{\partial T_s}{\partial t} - \lambda_w \frac{\partial T_w}{\partial y} \Big|_{y=0} \quad \dots \quad (2.2.18)$$

λ_s	: 煙の熱伝導率	λ_w	: 壁体の熱伝導率	c_s	: 煙の比熱
ρ_s	: 煙の密度	T_s	: 煙の温度	T_w	: 壁体の温度
u_s	: 煙の流速	l_s	: 煙層の厚さ		

左辺第一項は、明らかにオーダーが小さく、また右辺第二項については、ある瞬間から表面が ΔT の温度上昇を受ける半無限体への表面からの熱吸収 \dot{q}

$$\dot{q} = \Delta T \sqrt{\frac{\lambda_w \rho_w c_w}{\pi t}} \quad \dots \quad (2.2.19)$$

が近似的に適用できると考えれば、式(2.2.18)は以下のように表せる。

$$u_s l_s c_s \rho_s \frac{\partial T_s}{\partial x} + l_s c_s \rho_s \frac{\partial T_s}{\partial t} = \Delta T \sqrt{\frac{\lambda_w \rho_w c_w}{\pi t}} \quad \dots \quad (2.2.20)$$

c_w : 壁体の比熱 ρ_w : 壁体の密度

ここで 模型スケールと実スケールにおける物理量 f_m , f_f の比 f_m/f_f を $n(f)$ と表し、本節で記載した相似則を整理すると以下のようになる。

$$n(Q) = n(L)^{5/2} \quad \dots \quad (2.2.21)$$

$$n(u) = n(L)^{1/2} \quad \dots \quad (2.2.22)$$

$$n(l) = n(L)^{1/2} \quad \dots \quad (2.2.23)$$

$$n(\Delta T) = 1 \quad \dots \quad (2.2.24)$$

これらの関係を用いて、式(2.2.20)の各項を物理量の比で書き直すと式(2.2.25)となる。

$$\frac{n(L)n(c_s\rho_s)n(T_s)}{n(t)} = n(\Delta T) \left\{ \frac{n(\lambda_w\rho_w c_w)}{n(t)} \right\}^{1/2} \quad \dots \quad (2.2.25)$$

ここで、 $n(\Delta T)=1$ が保たれていることから、 $n(\rho_s c_s)=1$ と判断され、

$$n(\lambda_w\rho_w c_w) = n(L)^{3/2} \quad \dots \quad (2.2.26)$$

が導かれる。これが模型－実スケール間での材料の相似則となる。

なお、参考のため、表2.2.1に主な建築材料、模型材料における $\lambda_w\rho_w c_w$ を示す。

表2.2.1 壁面材料物性値^{29) 30)}

壁面材料	密度 ρ_w (kg/m ³)	比熱 c_w (kJ/kg·K)	熱伝導率 λ_w (kW/m·K)	$\lambda_w\rho_w c_w$ (kW ² s/m ⁴ K ²)
普通コンクリート	2200	0.88	0.00151	2.923
軽量コンクリート(れんが屑)	1980	0.84	0.0008	1.331
気泡コンクリート	500	1.12	0.00012	0.067
アスファルト	2120	0.92	0.00074	1.443
モルタル	2110	0.80	0.0014	2.363
漆喰壁	1280	0.84	0.00062	0.667
アクリル樹脂	1190	1.40	0.00021	0.350
塩化ビニル樹脂(硬質)	1420	0.72	0.00015	0.153
シリコンゴム	970	1.60	0.002	3.104
ケイ酸カルシウム	622	0.92	0.00013	0.074
石膏ボード	863	1.13	0.00016	0.156
インシュレーションボード	258	1.30	0.00047	0.158
ロックウール板	300	1.63	0.00004	0.020
煉瓦	1660	0.84	0.00055	0.767
カーボン煉瓦	1580	1.40	0.017	37.604
杉(含水率0%)	300	1.30	0.000069	0.027
松(含水率35.6%)	480	1.26	0.00015	0.091
鉄	7870	0.44	0.08	277.024
アルミニウム	2688	0.91	0.237	579.721
鋼SUS304	7810	0.56	0.019	83.098

例えば、RC造(表面打放し仕上げ)建築物の1/20スケール模型では、式(2.2.26)から、

$$\lambda_w\rho_w c_w = 2.92(1/20)^{3/2} = 0.033$$

となる材料(杉： $\lambda_w\rho_w c_w = 0.027$ 等)を選ぶ必要がある。

本研究では本節に記載した相似則に基づき、1/20スケール模型を用いて実験を行う。なお、1/20スケールの模型を用いた場合には、対象とする流体(煙)の内部フルード数を模型スケールと実スケールで一致させた場合でも、レイノルズ数は模型スケールでは実スケールの1/89.4となるため、本模型実験における煙の流れの状態は乱流と層流の遷移領域近傍となると推測される。ただし、1/20スケール模型を用いて煙流動の可視化を行ったところ 煙の状態は乱流であったこと、火源近傍を除く位置では煙の内部フルード数が1以下となるため 実スケール、模型スケール共に煙層の空気の連行がほぼ無いと見なせること、また、その場合には界面の安定性が保たれると考えられること[※]、かつ辻本ら²⁶⁾により1/10スケール模型と1/25スケール模型との間で火炎形状および煙流動性状に関して相似性があることが確認されていることから、本研究では1/20スケール模型を用いた実験により得られた結果を分析することで、実設計にも反映させることが可能であると考える。ただし、文献26では、火炎が天井に接するような大規模火災に関しては 実験的に相似性が確認されていないため、本研究で行う模型実験は“火炎高さ<天井高さ”となる範囲内で行う。

※ Kelvin-Helmholze の理論によれば、流体を非粘性、非圧縮として取り扱った場合には、二成層密度流の内部境界面の安定条件は 式(2. 2. 27)で与えられる^{31), 32)}。

$$|u_1 - u_2| \leq \sqrt{eg(h_1 + h_2)} \quad \dots \quad (2. 2. 27)$$

u : 流速

ρ : 密度

h : 厚さ

$$\varepsilon = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2} \quad \dots \quad (2. 2. 28)$$

g : 重力加速度

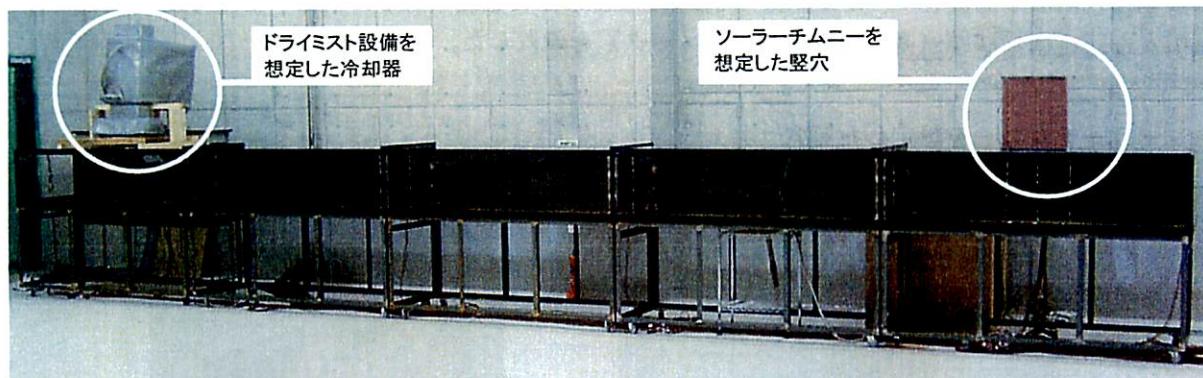
ただし、添え字 1, 2 は それぞれ 上、下部流体を表す

2. 3. 実験概要

本節では、実験に用いた模型の詳細、各種物理量の計測方法、実験方法および実験を行うに先立って検討した内容について記載する。

2. 3. 1. 実験に使用した模型の概要

本実験に用いた模型の概要を図 2. 3. 1 に示す。模型は内寸が 幅 W : 750mm × 長さ L : 2, 000mm × 高さ H : 500mm の横長区画を 5 つ直列につないだもので、W : 750mm × L : 10, 000mm × H : 500mm とした。これは W : 15m × L : 200m × H : 10m の実大地下鉄駅舎の 1/20 スケール模型である。実験は、写真に示した模型パターン I (階段室、ソーラーチムニーを共に 1 箇所ずつ設置したケースであり、これは、地下鉄駅舎にパッシュプセイフティシステムを採用した際の駅舎内部での基礎的な煙流動性状を把握するために行った) の他に、2 方向避難を想定し、かつ、実際の地下鉄駅舎でよく見られる階段配置である模型パターン II, III, IVについて行った (各模型パターンにおける詳細な寸法は図 2. 3. 4 参照)。



1/20 スケール地下鉄模型の写真 (模型パターン I (基礎的模型パターン))
(奥行き W : 750mm, 長さ L : 10, 000mm, 高さ H : 500mm)

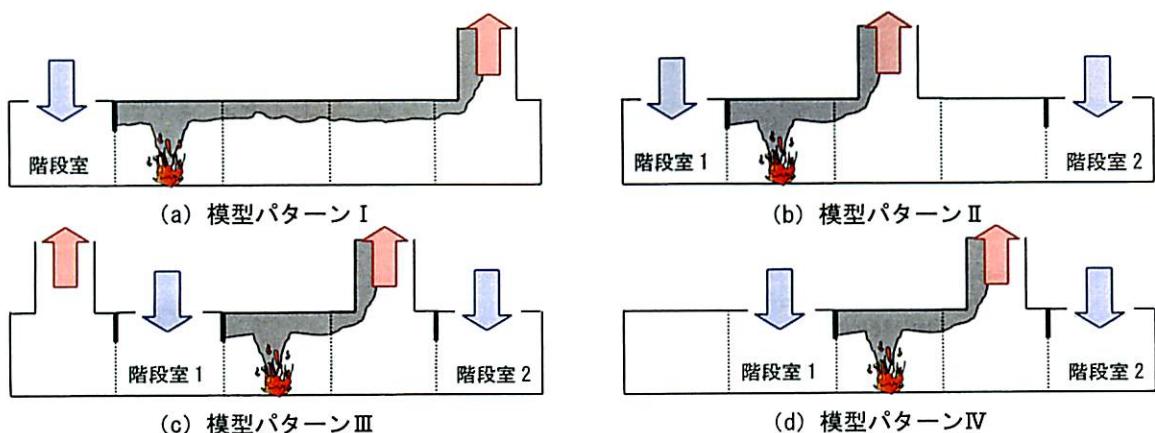


図 2. 3. 1 実験模型概要

・模型構成材料

本来 模型を構成する材料は、2.2.節に記載した相似則に基づき選定する必要がある（1/20 スケール模型では、例えば杉）が、本実験では煙流動の可視化の必要性から、模型側壁および天井、チムニー側面にはアクリル板（厚さ 10mm）を、床面は合板（厚さ 12mm）を用いることとした。ただし、安全のため火源直上の天井（2000mm×750mm）のみ石膏ボード（厚さ 9.5mm）とした。

なお、1/20 スケール模型構成材料をアクリル板とした場合、実スケールでの $\lambda_w \rho_w c_w$ は $31.30 (\text{kW}^2 \cdot \text{s/m}^4 \text{K}^2)$ となり、これは概ねカーボン煉瓦に相当する（表 2.2.1 参照）。これにより、本模型実験は熱対流現象としての相似則は満たすが、流体－固体（模型の天井、側壁、床）間の熱伝達は相似とはなっていない（注 2-1）：章末参照。

・火源

火源は 100mm 角のガスバーナーを区画床面の一箇所（模型パターン毎に移動：図 2.3.1, 2.3.4 参照）に設置し、燃料には LP ガス（成分：プロパン 97.7%, イソブタン 1.2%, エタン 0.9%, ノルマルブタン 0.2%）を使用した。

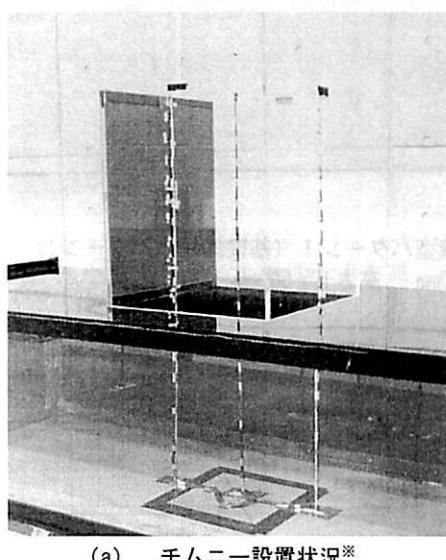
火源は 実スケールで 3MW を想定し、式(2.2.21)に基づき 発熱速度を 1.68kW とした。

火源位置は、模型パターン毎の移動を容易するために、5 つの横長区画それぞれの床面中央部に 100mm 角のガスバーナー用開口を設けた。なお、実験においてガスバーナーが設置されない開口部は、合板（厚さ 2mm）を用いて塞いだ。

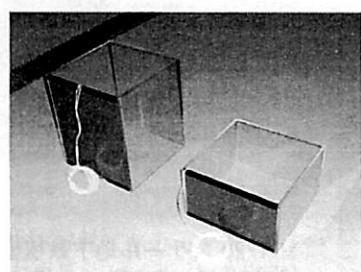
・階段室

階段室には階段を設置せず、天井面に 300mm×600mm の開口を設けるのみとし、また階段室とその隣の区画との間には垂れ壁（高さ等は実験パラメータ）を設置した。

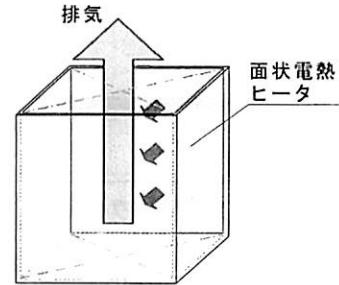
・ソーラーチムニーを想定した竪穴



(a) チムニー設置状況*



(b) チムニー部分



(c) チムニー構造概要

*写真は予備実験での設置状況。本章での実験では、全実験条件で面状電熱ヒータを写真中の奥側（コンクリート壁面側）の側壁に設置した（図 2.3.4 平面図参照）

図 2.3.2 ソーラーチムニーを想定した竪穴

チムニー壁面には内部の様子を観察するため、透明アクリル板（厚さ 10mm）を使用し、側壁の内側表面のうち 1 面にのみ面状電熱ヒータを設置することで日射熱の吸収による北側壁面、ガラス面の温度上

昇を再現した（面状電熱ヒータの設定温度は文献 3 を参考に 60°C に設定）（図 2.3.2）。なお、チムニー寸法（断面寸法、高さ）は実験のパラメータとしている（詳細は 2.3.4. 節参照）。

・ドライミスト設備を想定した冷却器

実際に、模型の階段室入口上部にドライミスト設備を設置することは困難であることから、水冷式の空気冷却器を開口上部に設置することで代替とした。なお、空気冷却器は、ボックス内に冷水を通した鉄管を配置し、ボックス内の空気を外気温より 3 °C^{5)~11)} 程度低下させ、冷気を自然対流で階段室内に流入させるものであり、ドライミストの蒸発による周囲空気の冷却効果と類似する効果をボックス内の鉄管により再現した。（図 2.3.3）。

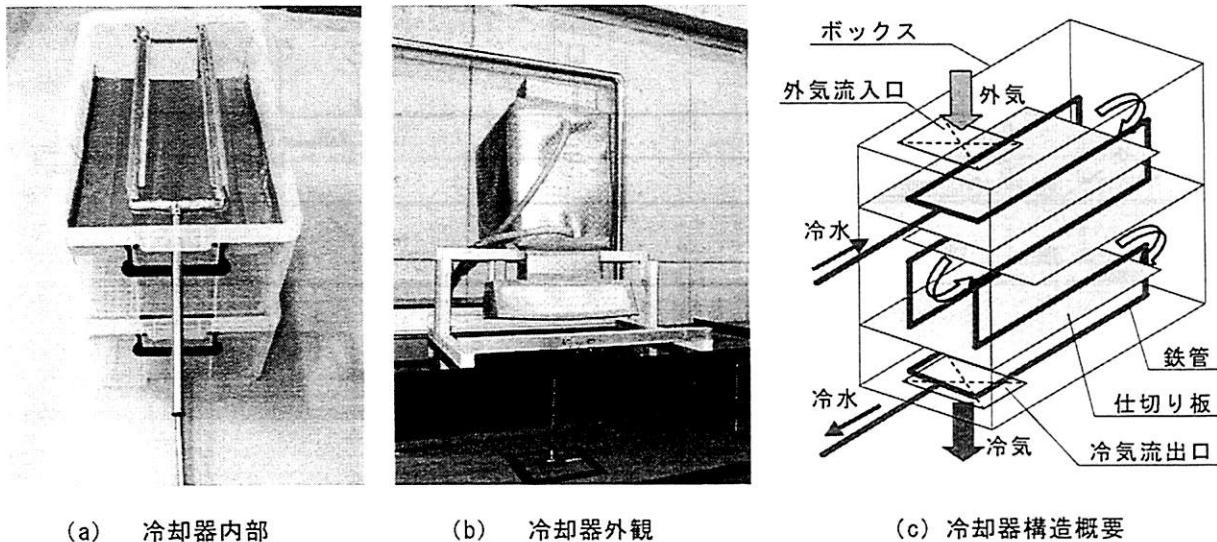


図 2.3.3 ドライミスト設備を想定した空気冷却器

2.3.2. 計測・観察項目および計測位置

計測は、模型内の煙流動性状、階段室への煙流入の有無（あるいは程度）およびチムニーの換気・排煙性能の確認を目的として、以下の項目について行った。

・模型内温度

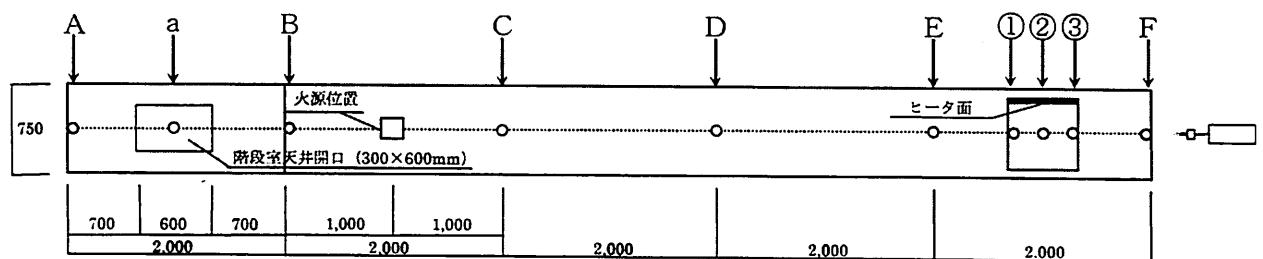
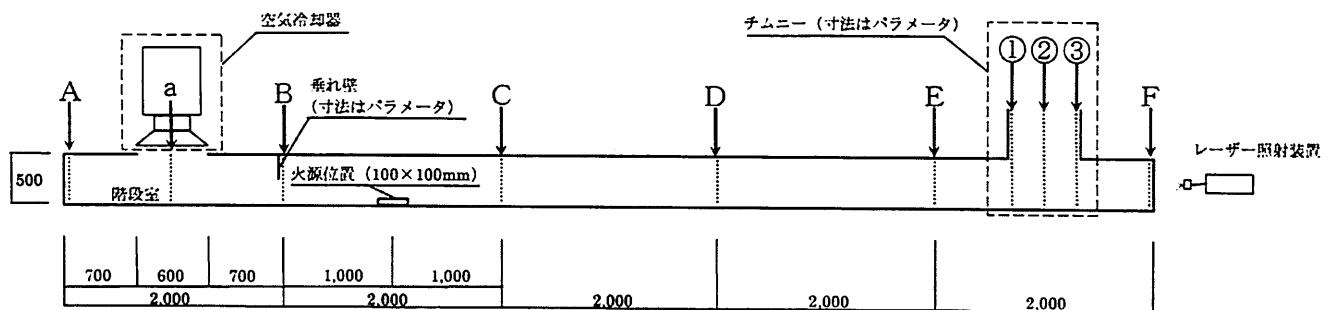
温度計測は、CC 熱電対 $\phi 0.2\text{mm}$ を、図 2.3.4 に示す横長区画内部 A～F および階段室中央 a～b の各位置でそれぞれ垂直方向に 8 点、チムニー中央および壁面近傍の①～④の各位置でそれぞれ垂直方向に 19 点を 図 2.3.4、図 2.3.5 に示すように設置し、模型内部の垂直温度分布を計測した。

・給気風速

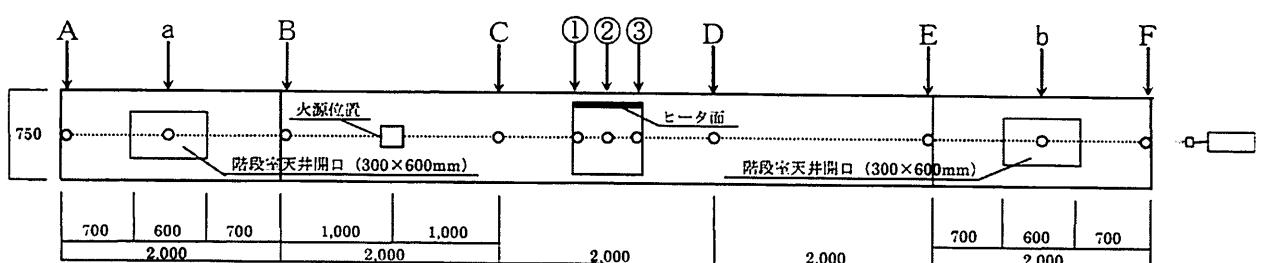
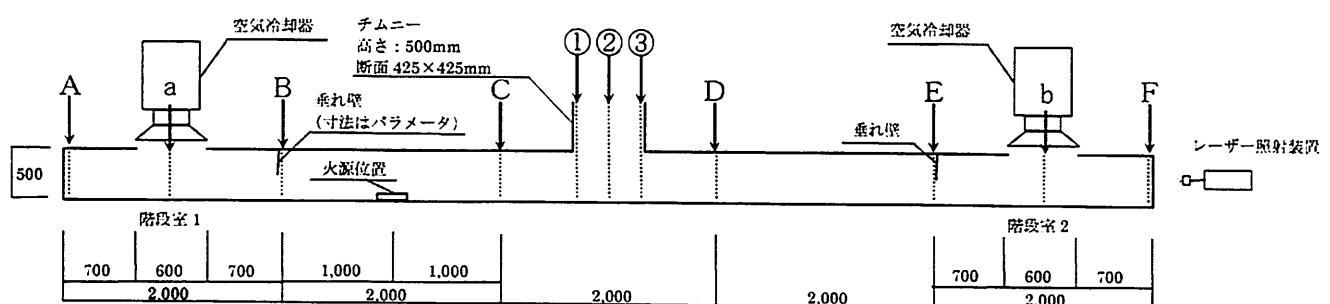
給気風速は給気口中心風速で代表させることとし、図 2.3.4、図 2.3.5 に示すように、階段室天井開口中心部の a, b 点にそれぞれ表 2.3.1(1)に示す熱線風速計を設置して計測した。

・排気風速

排気風速は、図 2.3.4、図 2.3.5 に示すように、チムニー頂部①点（端部）、②・④点（中心部）に風向が分かるように工夫された特殊なピトー管（以下、ピトー管、表 2.3.1(2) 参照）を設置して計測した。なお、各計測位置は周囲（熱電対など）の影響を受けないように模型幅方向中心軸から水平方向に 25mm ずらした位置としている。

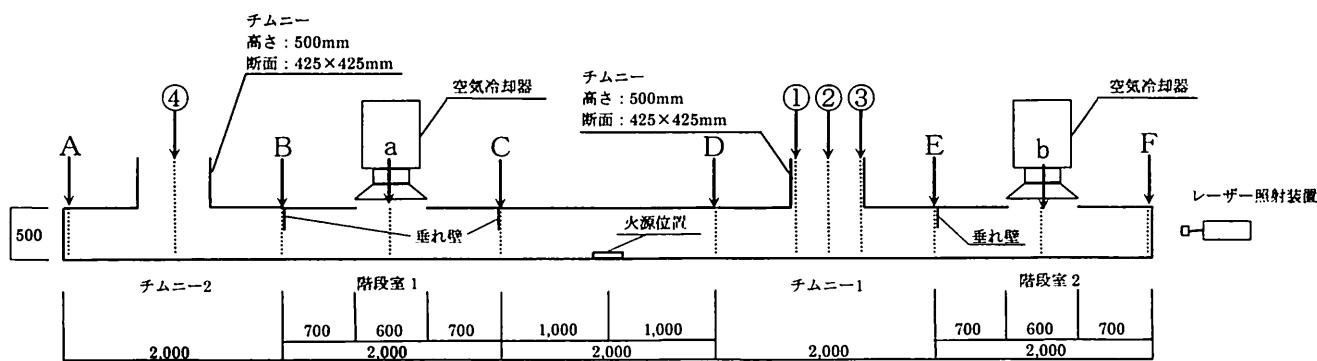


模型パターンI：断面図(上)、平面図(下) (単位: mm)

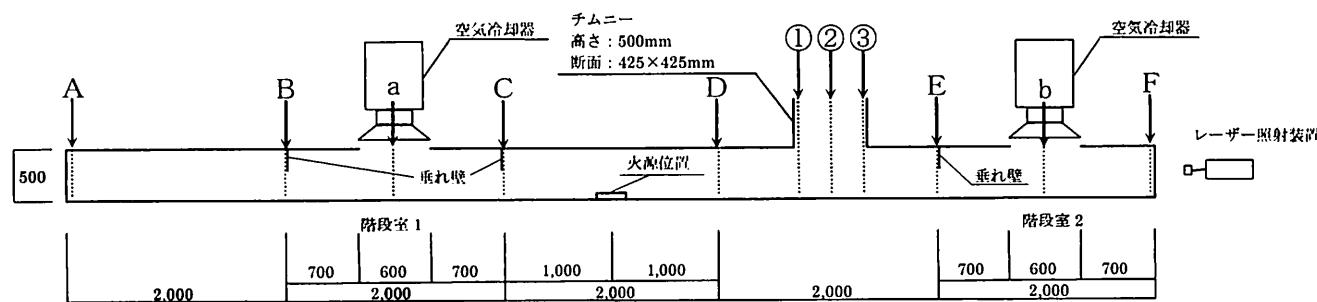


模型パターンII：断面図(上)、平面図(下) (単位: mm)

図 2.3.4 (1) 模型断面および計測機器設置位置 (模型パターンI (基礎的模型パターン), II)



模型パターンIII：断面図(上)、平面図(下)（単位：mm）



模型パターンIV：断面図(上)、平面図(下)（単位：mm）

図 2.3.4 (2) 模型断面および計測機器設置位置（模型パターンIII, IV）

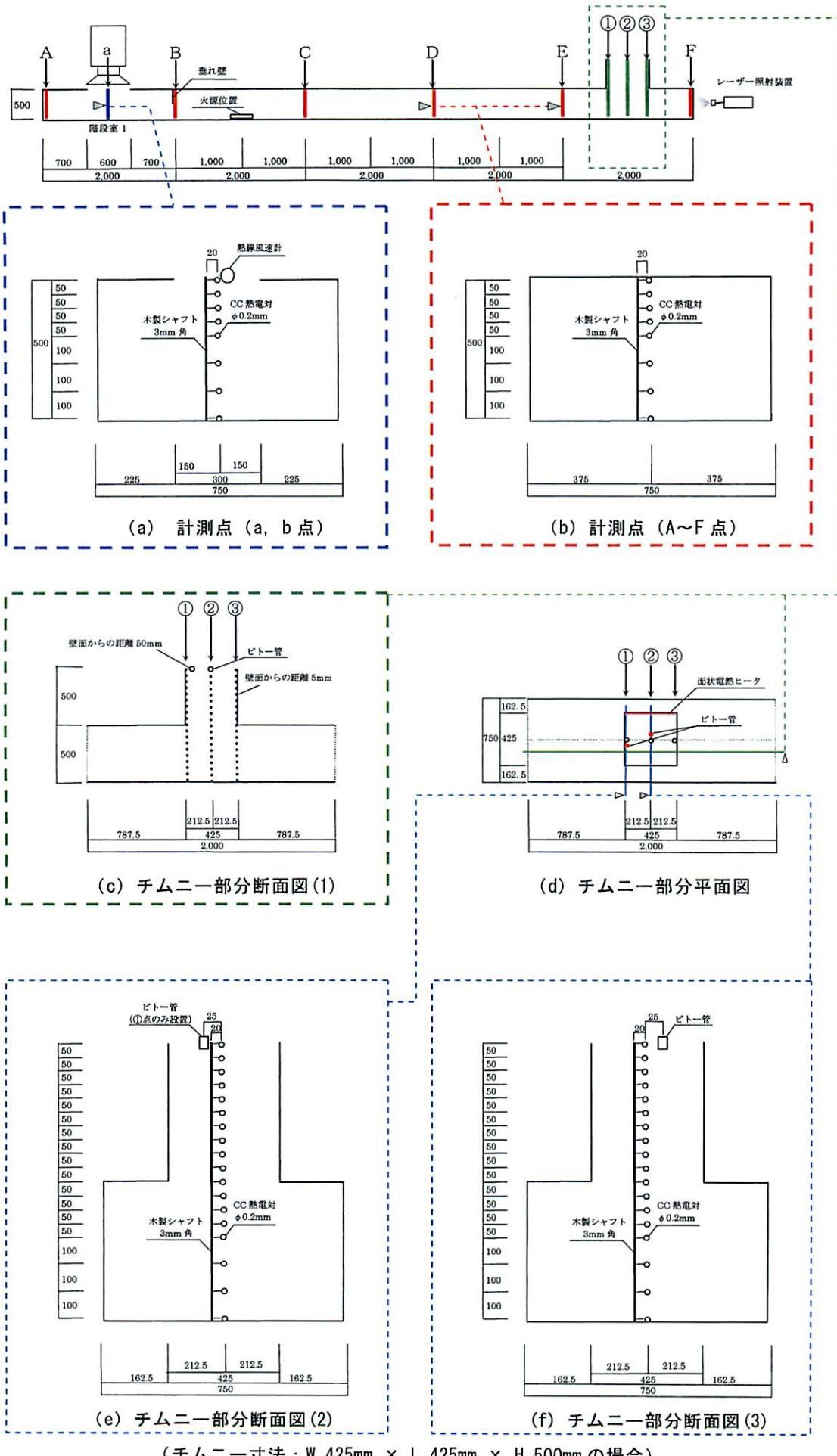
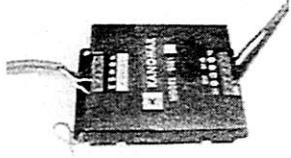
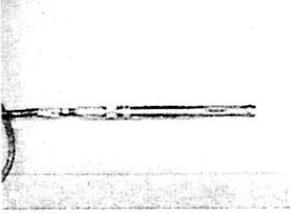


図 2-3-5 階段窓および手すり一部分詳細（単位：mm）

圖 1-1-1 沿枝葉於 3-5 年生部分詳細（單位：mm）

実験に使用した機器を表 2.3.1(1)～(3)に記載する。

表 2.3.1(1) 実験機器一覧

◎ データロガー	江藤電気製 THERMODAC6 MODEL3060A	・ 計測精度 CC 热電対: $0.02\% \text{rdg} \pm 0.2^\circ\text{C}$ (計測範囲: $0^\circ\text{C} \sim 400^\circ\text{C}$) 分解能 : 0.1°C 直流電圧 : $\pm 0.01\% \text{rdg} \pm 2 \text{ mV}$ (計測範囲: $0 \sim \pm 32 \text{ V}$) 分解能 : 1 mV
◎ 热線風速計 (給気風速計測)	・ 風速変換機 日本カノマックス製 MODEL6331	・ プローブ (指向性) 日本カノマックス製 MODEL0963-00  
◎ 热線風速計 (模型内風速計測) *	・ 風速変換機 日本カノマックス製 MODEL651-00	・ プローブ (無指向性) 日本カノマックス製 MODEL6543-01  

* 本論文第4章で記載する一部の実験でのみ使用した

表 2.3.1(2) 実験機器一覧

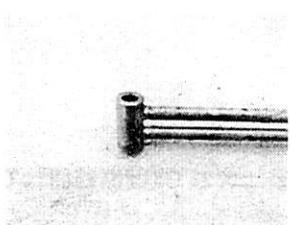
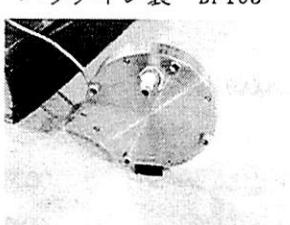
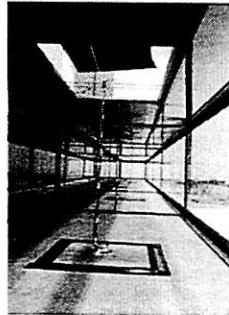
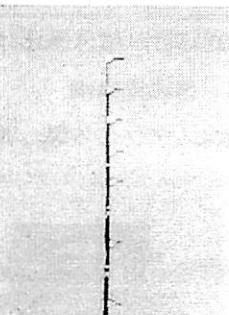
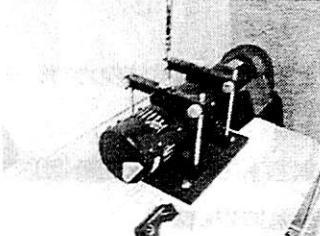
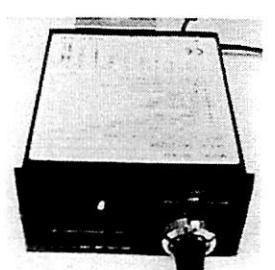
◎ ピトー管（排気風速計測）	
・ 特殊なピトー管（指向性）	・ 超微差圧トランスデューサ バリダイン製 DP103
	
計測レンジ : 0 ±50 Pa 計測精度 : ±0.25%FS (0.125Pa)	
◎ 热電対ツリー（温度計測）	
CC 热電対 ϕ 0.2mm (3 mm 角木製シャフトに固定)	 
◎ 可視化用レーザー	
オーテックス製 アルゴンイオンレーザー MODEL2010	
0~100mW の範囲で出力調節可能。 (ただし、本実験では出力は 80mW とした)	
◎ ガス流量調節器	
・ MassFlo コントローラ MKS 製 M100B08953CS1BV	・ 電源（表示・設定器） MKS 製 SP832
	
(プロパン用, FS 5000 sccm) 制御精度 : ±1.0%FS 分解能 : 0.1%FS 応答性 : 2 s 以内	

表 2.3.1(3) 実験機器一覧

◎ 発煙片(流れの可視化) ※※

昭和化工株式会社製

漏煙試験用発煙片

煙流動の可視化を行うにあたり 発煙片を用いたが、
この際 模型内気流への影響をできるだけ小さくす
るため、1/4 の大きさに分割し、使用した。
また、必要に応じて 1/4 発煙片を複数連結させて
発煙継続時間を調整した。

1/4 片

※※ 本論文第 4 章、第 5 章で記載する一部の実験でのみ使用した

・模型内部観測記録

模型内部の観測方法は、火源横の床面から少量の線香の煙を流入させ高温気流に乗せて流し、模型幅方向中央にアルゴンイオンレーザー (80mW) を照射する（専用のレンズを用い、レーザー光線を縦シート状に広げた）ことで、模型内の煙流動を目視により観測することとした。その際使用した記録シートを図 2.3.6 に示す。

なお、観測する際、特に注意した点としては、以下のような項目が挙げられる。

- ・階段室への煙進入の有無、程度
- ・模型内各所における煙層高さ
- ・模型（駅舎、チムニー）内の煙流動の様子（渦、停滞、逆流など）

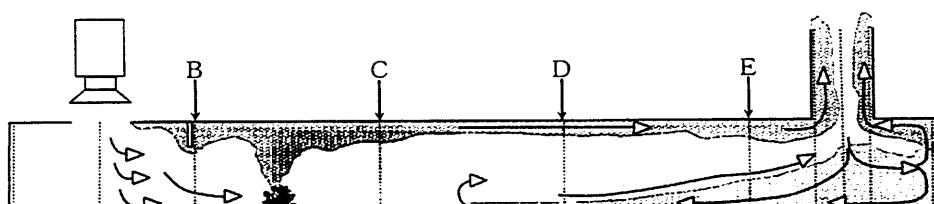
実験No.	○○	実験日時	○月○日 18:20~19:50
煙層高さ(mm) … 模型内熱電対設置位置と対応			
B: 20cm	C: 12~15cm	D: 10~15cm	E: 15~20cm
階段室への煙進入の有無、程度			
煙層進入:有 ただし、垂れ壁を越えてくる煙量はそれ程多くない。 給気風（模型内気流）による煙の拡散は垂れ壁付近に限定されている。			
火災室、チムニー部分での煙流動			
・着火から1分程度で、チムニーが排出しきれなかった煙が、チムニ一下方に滞留し始めた。 ・滞留した煙の一部は、火源へ向かう流れに乗って、火源からの距離が2mの位置付近まで床に沿って広がった。 ・チムニ一下部から火源方向へ 床面に沿って流れる煙層の厚さは、E点で20cm、D点で5~10cm程度であった。			
模型内煙流動目視図			
			

図 2.3.6 煙流動観察記録シート（記載例）

2.3.3. 実験手順

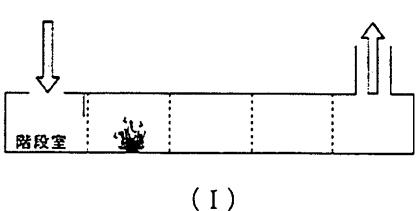
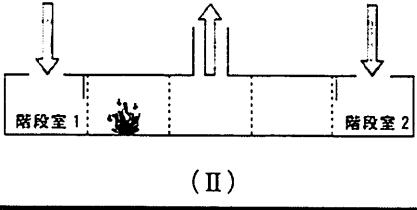
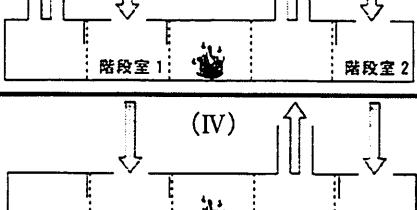
実験は以下の手順で行った。

冷却器および面状電熱ヒータの作動開始後 3600 秒 (60 分) 後に着火、その 1800 秒 (30 分) 後に実験終了とした。なお、温度、風速、差圧に関しては冷却器および面状電熱ヒータ作動開始と同時に計測を開始し、それぞれ 2 秒間隔で記録した。また、図 2.3.4 に示すように 模型右方向からアルゴンイオンレーザーを縦シート状に照射し、模型幅方向中央における煙流動の可視化を行った。

2.3.4. 実験条件

実験は、模型パターン、チムニー断面寸法、チムニー高さ、階段室一ホーム間垂れ壁高さ、垂れ壁下通路幅をパラメータとし、表 2.3.2 に示す組合せで実験を行った。

表2.3.2 実験条件

実験 No.	模型 パターン	チムニー 断面 (mm)	チムニー 高さ (mm)	階段室一 ホーム間 垂れ壁高さ (mm)	垂れ壁下 通路幅 (mm)
1		425×425	500	100	750
2				450	450
3				300	300
4				150	750
5				200	750
6		600×600	250	100	750
7			500	100	750
8			250		
9			500	100	750
10			250		
11		425×425	500	100	750
12				150	
13				200	
14				250	
15				450	
16				300	
17				100	450
18		425×425	500	100	450
19				150	750
20		425×425	500	100	450
21				150	750

以下では、実験パラメータとして設定した項目に関して それぞれ説明を加える。

・模型パターン

実験は模型パターン I (階段室、ソーラーチムニー共に 1 箇所ずつ設置したケースであり、これは、地下鉄駅舎にパッシブセイフティシステムを採用した際の 駅舎内部での基礎的な煙流動性状を把握するために行った) の他に、2 方向避難を想定し、かつ、実際の地下鉄駅舎でよく見られる階段配置である模型パターン II, III, IVについて行った。模型パターン IIIでは、階段室 1 の左側の区画で火災が発生した場合でも、階段室 1 を経由せずに排煙を行うことができるよう、チムニーを 2 箇所に設置してい

る。それに対し模型パターンIVでは、最も左側の区画で出火した場合に階段室1の安全を確保することができないため、模型パターンIVのような駅舎計画を採用する場合、可燃物を持ち込むことが可能な区画が制限されるものとする（最も左側の区画に可燃物は持ち込めない）。各模型パターンの寸法の詳細は図2.3.4を参照されたい。

・チムニー寸法

パッシブセイフティシステムにおいて、ソーラーチムニーの換気・排煙性能は、システム全体の性能を左右する要素である。本章では、より効率良く給・排気を行うことが可能なソーラーチムニーの寸法を見出すため、模型パターンI（基礎的模型パターン）において、チムニー断面寸法および高さをパラメータとして実験を行った。チムニー断面は、断面積が 階段室天井開口面積（固定値：300mm×600mm）の0.5倍、1.0倍、2.0倍となる正方形断面とし、内寸が 300mm×300mm、425mm×425mm、600mm×600mm の3パターン設定した。また、チムニー高さ h は 250mm、500mm の2パターン設定した（図2.3.7）。

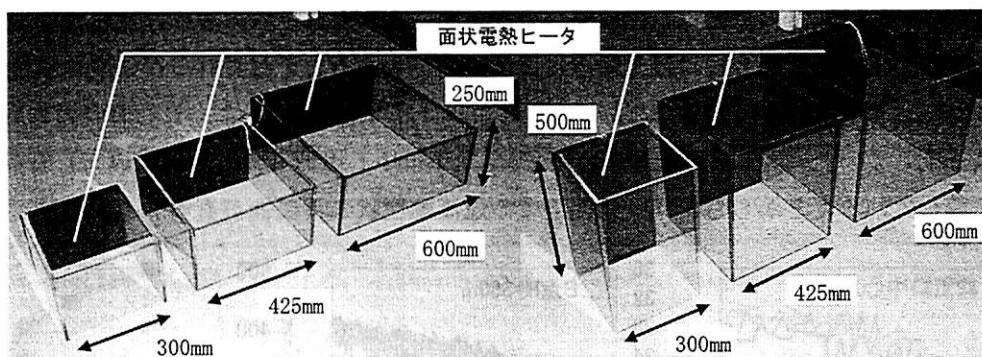


図2.3.7 各種チムニー寸法（左： h 250mm、右： h 500mm）

・階段室一火災室（ホーム）間の垂れ壁高さ および 垂れ壁下通路幅

本研究では、最終的には階段室一火災室間での遮煙成否の境界となる条件を把握することを目的としている。それに先立ち本章では、模型パターンI～IVにおいて、遮煙効果を高めると考える垂れ壁の高さおよび垂れ壁下通路幅を現実的な範囲内で変化させ、それぞれ実験を行うことにより、火災時に本システムが有効に働き得る設計条件が存在するか否かを確認する。また、垂れ壁等の条件の変化に伴う遮煙状況の変化も観測する。

模型では、階段室一火災室間の 図2.3.4において“垂れ壁”と表示する位置に、図2.3.8に示す“仕切り”を設置することとする（図2.3.8には例として模型パターンIの概要図（断面図）を併せて示してある）。なお、仕切りの材料はアクリル板（厚さ5mm）とした。本章では模型パターンI～IVにおいて、垂れ壁高さを最大4パターン（100mm, 150mm, 200mm, 250mm）、垂れ壁下通路幅を最大3パターン（750mm, 450mm, 300mm）変化させ、実験を行った。

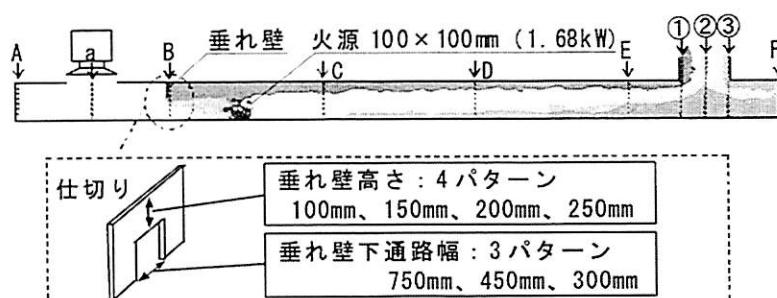


図2.3.8 階段室一火災室間仕切り寸法（実験パラメータ）

2.3.5. 事前に検討した項目

本実験を行うに先立ち、以下の項目について検討を行った。

(1) 同一設計条件下での煙流動の再現性検証

本研究における模型実験は、僅かな実験室温度、風速等の室内環境の差が実験結果に大きな影響を及ぼす可能性があることが懸念されたため、本節では同一設計条件下での模型内煙流動性状の再現性の有無を検証した。

図2.3.9に、実験日時のみが異なるが、その他の条件は同一として行った複数の実験結果を併せて示す(実験No.1の条件(表2.3.2参照)を3回行った)。

ただし、計測結果から図を作成するにあたり、給気口中心風速に関しては変動が激しいため60秒間毎の平均値(前後30秒間の平均値)をプロットし、各温度計測点の垂直温度分布に関しては準定常状態と考えられる着火後1740~1800秒(29~30分)の外気温からの温度上昇 ΔT の平均値とした。なお、温度上昇 ΔT の時系列変化は2秒間隔の計測結果をそのままプロットしている。(本章において以下、同様)

B点の床面からの高さ350mmの位置は、階段室-火災室間の垂れ壁直下(火源側)の温度を計測しているため、遮煙状況に変化がある場合には最も敏感に温度変化が現れると予想されるが、着火直後から準定常状態に至るまでNo.1①~③でほぼ一致している(図2.3.9 上段中参照)。また、その他の温度計測点での実験結果も概ね一致していた(図2.3.9 上段右、下段)。給気口中心風速(図2.3.9 上段左)も着火直後から同一の傾向を示していることからも、同一条件下での煙流動性状の再現性が有ることが確認できる。

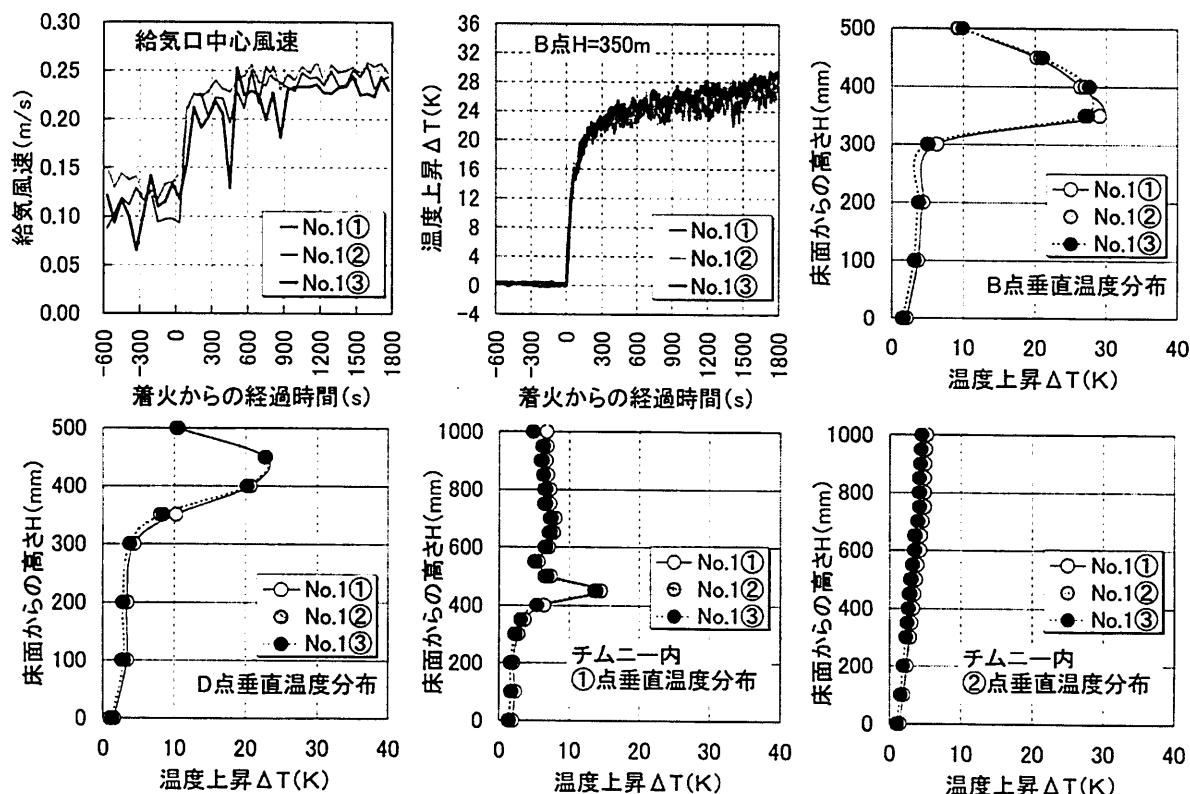


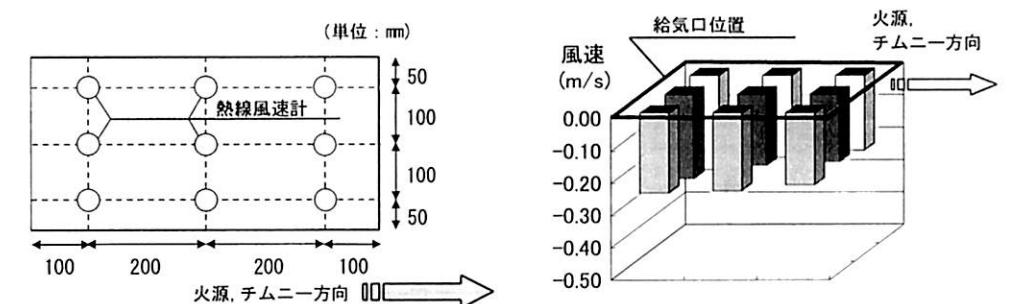
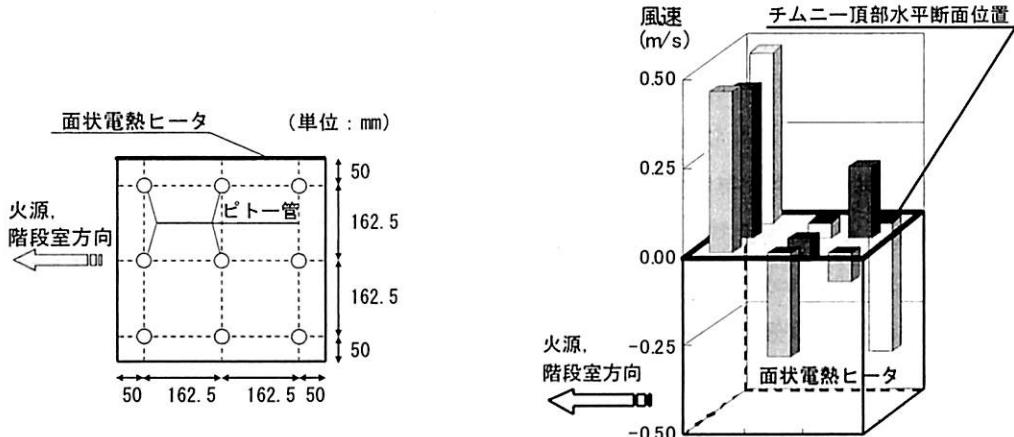
図2.3.9 同一条件下における再現性の確認(実験No.1×3回)

(2) ピトー管による排気口風速分布計測

模型実験により最適なソーラーチムニーの条件を把握するにあたり、チムニー寸法の変化に伴う換気・排煙量の変化を把握することが重要であると考える。本節では、事前検討として、ピトー管による風速計測によりチムニー頂部における水平断面内風速分布を把握し、それを基に排煙量を算出することが可能か否かを確認することとする。

実験No.1の条件における排気口風速分布(着火後25~30分での平均)を図2.3.10に示す。ここで、

一度の実験で図2.3.10に示す9点で風速を同時に計測した場合、単体ではそれほど大きくなない計測機器(ピトー管)も気流性状に大きな影響を及ぼす恐れがあるため、同一条件下での実験を3回行い、それぞれの実験でピトー管の位置のみを変更した(一度の実験で3箇所ずつ風速を計測した)。なお、図2.3.11には熱線風速計により計測した給気口風速分布を示すが、こちらも同様の理由により複数回の実験結果から作成した。



本章での実験では、チムニー側壁のうち模型長さ方向に平行な面のうちの1面にのみ面状電熱ヒータを設置したために、チムニーが模型内に気流を形成しようとする力(単位断面積あたりの力)がチムニー水平断面内で一様とならない(本論文第4章での実験では、この点を改善するために面状電熱ヒータをチムニー内側壁面の4面に設置している)。このこともあり、排気口風速分布は非常に複雑な分布となっているため、排煙量を把握するにはここで計測した9点でもなお不足すること、また、微差圧計に起因する計測誤差が約0.40m/sのため計測結果に対する誤差の占める割合が非常に大きくなる等の問題は残るもの、大体の傾向は掴めると考える。しかし、それだけの数の風速を一度に計測するには、模型の排気口では小さすぎ、また、全実験条件において複数回に分けて計測することは困難であることから、以下の考察では、図2.3.11に示すように気流性状が比較的複雑でない給気口の中心風速を換気・排煙量の大小を表す指標として用いて、各実験条件間の比較、考察を行う。ただし、給気口中心風速の計測に用いた熱線風速計も計測値0.00～0.25m/sに対して±0.10m/s程度の計測誤差が生じる可能性を有しているため、計測値そのものの信頼性はそれほど高くないことには注意されたい。

(3) 煙層から壁体への熱損失に関する検討

本研究における模型実験では、煙流動の可視化を行う必要があるために模型構成材料をアクリル板等としていることから、煙層-壁体間での熱移動は模型-実スケール間で相似になっていない。本章末に記載する注2-1)では数値計算によりこの影響を検討しているが、本節では模型実験により、実際の煙

層から壁体への熱損失を概算しておく。

図 2.3.13 は 実験 No. 1 における各計測点での垂直温度分布であるが、これによると 着火から 5 分後には煙の流れは概ね定常状態となっていることが読み取れることから、着火から 5 分、15 分、30 分経過時点における煙層内の温度の時間変化を無視し、隣り合う計測点位置における それぞれの煙層内部での通過熱量の差が壁体への熱損失であるとして、煙層一壁面間での熱伝達率等を概算する。なお、各計測点位置における煙層下端高さは、実験により計測した垂直温度分布のうち 最大温度と最小温度（床面に接している熱電対による計測値以外での最小値）の差の 40% まで温度が上昇した位置とした（文献によれば、10%まで温度が上昇した位置を煙層高さとしているが⁴²⁾、本研究では 可視化記録から判断した煙層厚さと垂直温度分布から判断した煙層厚さを合わせるために、“40%”とした（表 2.3.3））。また、煙層内部の流速 u_s は 周囲空気との密度差に伴う圧力差 $\Delta \rho gy$ との間に $1/2 \rho_s u_s^2 = \Delta \rho gy$ の関係があると仮定して算出した（ u_s は垂直方向の分布を持つ）（図 2.3.12）。

煙層から壁体への熱損失、熱伝達率等の概算値を表 2.3.3 に示す。本論文第 3 章で提案する煙流動モデルでは、煙層一壁面間での熱移動を計算する際に必要となる対流熱伝達率を $1.745 \times 10^{-2} \text{ kW}$ ($=15 \text{ kcal}/(\text{h} \cdot \text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$) とするが、この値は実験結果から概算した値とも大きくは異なる。

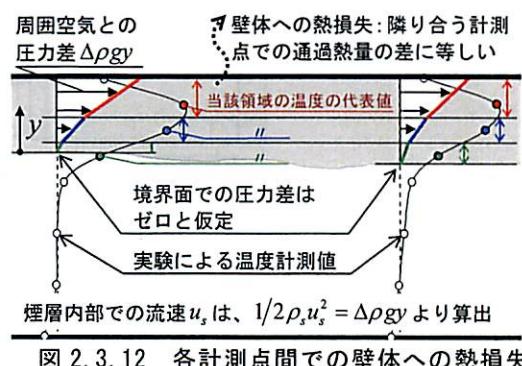


図 2.3.12 各計測点間での壁体への熱損失

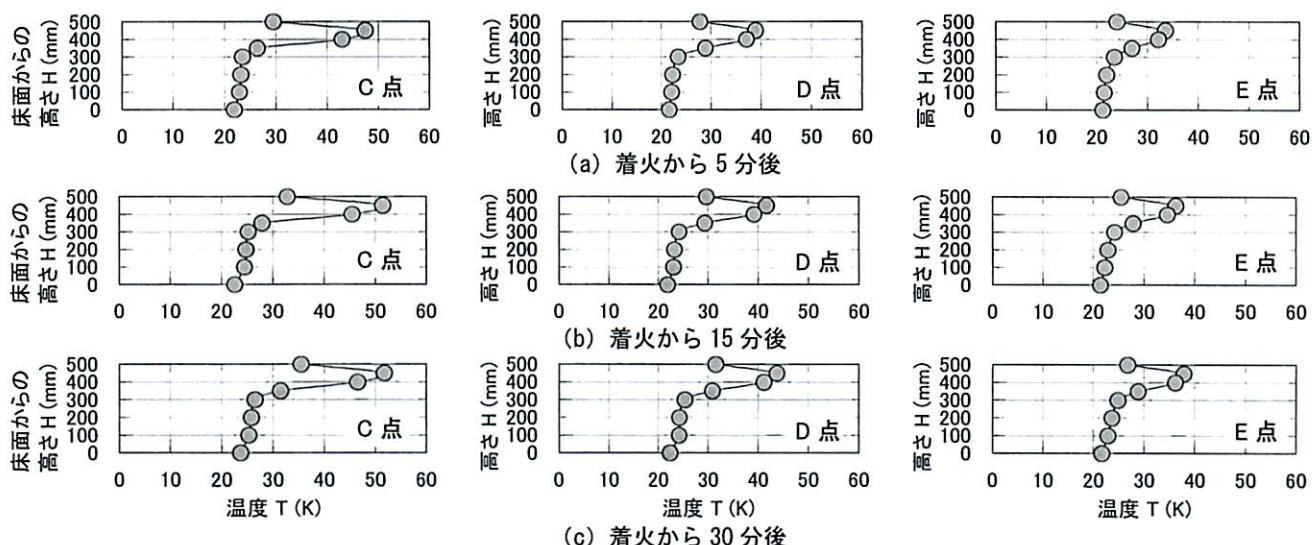


図 2.3.13 各計測点での垂直温度分布

表 2.3.3 壁体への熱損失（計算結果）

着火 からの 経過 時間 (min)	煙層厚さ (mm)						通過熱量 (kW)		壁体への熱損失 (kW)		熱伝達率 $\times 10^{-2}$ (kW/(m ² ·K)) [※]				
	可視化記録 から判断			垂直温度分布 から判断			C 点	D 点	E 点	C-D 間	D-E 間	壁面温度の設定			
	C 点	D 点	E 点	C 点	D 点	E 点						(a) 温度上昇なし (着火前の 周囲空気温度)	(b) H=500mm での温度 計測値		
5	120	100	150	131	151	159	9.47	9.33	8.5	0.14	0.83	3.62	3.18	5.24	4.98
15	5	5	5	129	144	150	9.69	9.18	8.43	0.51	0.75	1.11	2.51	1.79	4.22
30	150	150	200	135	144	150	10	9.44	8.73	0.59	0.71	1.29	2.11	2.39	3.86

※熱伝達率の計算に必要となる煙層温度は、実験による温度計測値のうち 最大値 (H=450mm 位置の値) を用いて算出した

(4) 実験に用いる火源の発熱速度の時系列変化計測

模型実験では表 2.3.4 に記載する 4 種類の火源を用いるが、いずれも着火直後には設定発熱速度にはならず非定常火源となるため、準定常時の模型内煙流動性状に加えて 着火直後等の非定常煙流動性状に

関しても検討を行うにあたっては、着火から準定常状態に至るまでの発熱速度の時系列変化を把握しておく必要がある。火源発熱速度の計測は、コーンカロリーメータ試験装置(ISO 5660)を用いて行った。

表 2.3.4 実験条件

火源No.	火源径D (mm)	設定ガス流量 (l/min)	設定発熱速度Q (kW) [*]	実大換算発熱速度 (MW)
1	100角	1.02	1.68	3
2***	100角	0.68	1.12	2
3***	50角	0.68	1.12	2
4***	50角	0.34	0.56	1

* 設定発熱速度は LP ガスの総発熱量を 23,673(kcal/m³)として算出した。

***火源 No. 2~4 は本論文第 4 章、第 5 章での実験で使用した。

・実験概要および実験結果

コーンカロリーメータ試験装置は、装置内に置かれた燃焼物から発生する燃焼生成ガスを分析し、酸素消費法により発熱速度を算出する装置である。コーンカロリーメータ試験装置の概要を図 2.3.14 に、仕様を表 2.3.5 に示す。

表 2.3.4 に示す 100mm 角もしくは 50mm 角の直方体型のガスバーナーをコーンカロリーメータ試験装置内に設置し、着火からの発熱速度の時系列変化を計測する。着火直後から 試験装置内のガスバーナーに LP ガスを安定して供給できるように、試験装置内のガスバーナーと同形、同構造のバーナー(コーンカロリーメータ試験装置外へ設置)へ LP ガスを事前に流し、流量が安定したことを確認後、試験装置内のガスバーナーへとガスが流れるように三方バルブを切り替えた(図 2.3.14)。また、試験装置内外のガスバーナーは LP ガスが全面から出るように $\phi 10\text{mm}$ のセラミックボールと約 $\phi 1\text{mm}$ の砂を図 2.3.15 に示すように敷き詰めた。なお、着火にライター、着火棒等の大きな熱源を用いた場合には その発生熱が実験結果に大きく影響するため、微小なスパークを発生させることが可能な自作の着火装置(ガスコンロの着火装置を転用)を用いた(図 2.3.16)。着火後、燃焼に影響を与えないように静かに着火装置を取り除いた。これらと同様の措置は模型実験においても行っている。

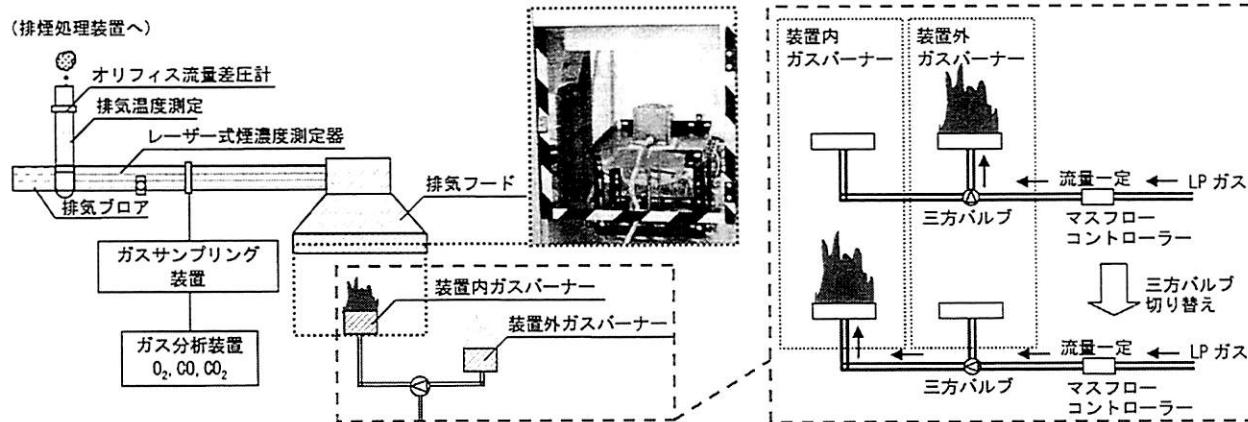


図 2.3.14 コーンカロリーメータ試験装置およびガス配管概要

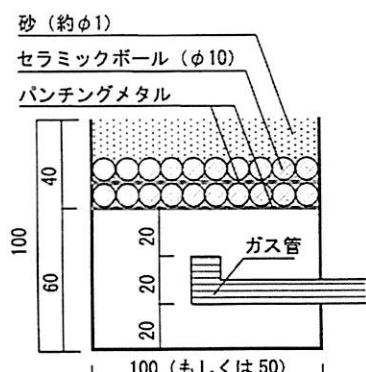


図 2.3.15 ガスバーナー断面図(単位:mm)

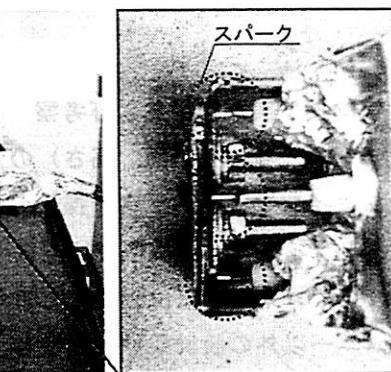
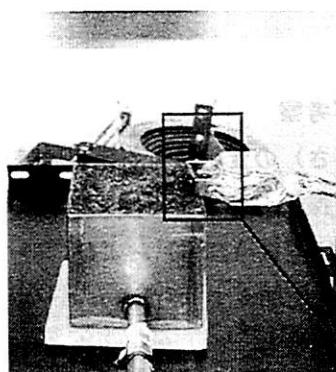
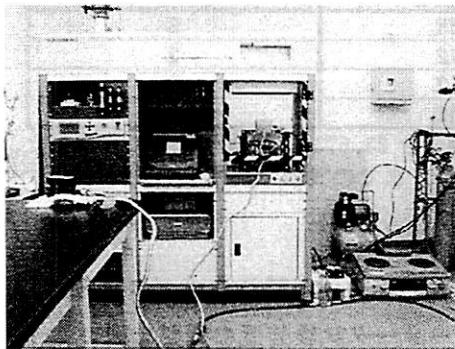


図 2.3.16 着火装置

表 2.3.5 コーンカロリーメータ試験装置仕様

◎ コーンカロリーメータ試験装置

株式会社 東洋精機製作所製 コーンカロリーメータIII



放射器	: 放射量 方向	最大 100 kW/m^2 水平および垂直方向
	熱暖衡器	水冷式
酸素分析計	: 測定範囲 再現性	0~25% 100ppm 以下
	補正	温度および圧力補正
CO, CO ₂ 分析計	: 測定範囲 測定範囲	0~1% (CO) 0~10% (CO ₂)
演算項目	: 発熱速度, 発熱量, 燃焼有効発熱量, 有効減光面積, CO/CO ₂ 吸収率, 質量減少率, 着火時間, 熱流束	

表 2.3.4 に示す火源の発熱速度の計測値（時系列変化）を図 2.3.17 に示す。なお、実験は火源条件毎に複数回行ったが、計測値がほぼ一致したため 図 2.3.17 ではそれらの平均値を示している。

コーンカロリーメータ試験装置内のガスバーナーに着火した直後には、三方バルブを切り替えることによる圧力変動により、ガス供給量が若干変動している可能性はあるが、概ね設定流量のガスが供給されていたと考える（マスフローコントローラーの指示値に変化はなかった）。しかし、実験結果を見るといずれの火源も着火から数十秒～数分間は非定常火源となっていることが分かる。

本実験で扱う規模のガスバーナーの場合、バーナーへのガス供給を停止後 数分経過後にはバーナー内に充満していたガスは無くなる あるいは ガス濃度が非常に低くなる。これにより、三方バルブを切り替えた後、試験装置内のバーナー内にガスが充満し 上面からガスが噴出するまでに時間遅れが生じ（実験では三方バルブ切り替えから数十秒後に着火している）、また 着火後も安定してバーナー上面からガスが噴出し始めるまでには相当の時間がかかり、これが 火源が非定常となる理由と考える。なお、この考えは、設定ガス流量の等しい火源 No. 2 と No. 3 を比較した際にバーナー断面積の小さい No. 3 の方が発熱速度の立ち上がりが早いこととも矛盾しない。

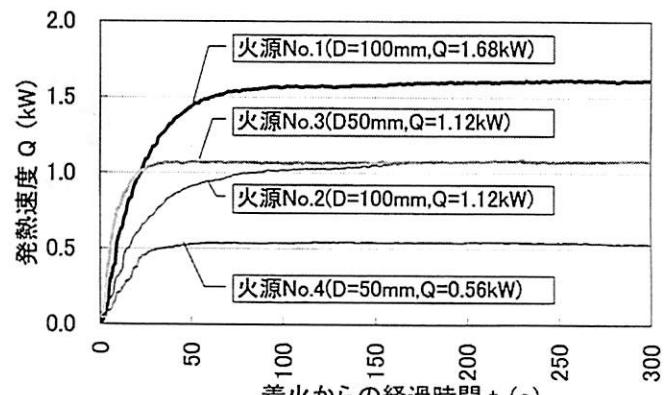


図 2.3.17 火源の発熱速度の時系列変化

2.4. 基礎的模型実験結果および考察

2.4.1. チムニー寸法（断面、高さ）の変化による模型内煙流動性状への影響

パッシブセイフティシステムを採用した駅舎では、日常時の駅舎内気流を形成する動力（以下、循環動力）は、ドライミスト（模型では空気冷却器）および ソーラーチムニー（面状電熱ヒータ付竪穴）によるものである。火災時には、これに加えて 煙がチムニー内に流入することによる影響も加わる。本節では、チムニー以外の設計条件は固定し、チムニー寸法（断面、高さ）のみを変化させた場合の実験結果より、チムニー寸法が模型内の煙流動性状に与える影響について考察する。

本節で行う実験で用いるチムニーは、断面寸法 3 種類 ($300\text{ mm} \times 300\text{ mm}$, $425\text{ mm} \times 425\text{ mm}$, $600\text{ mm} \times 600\text{ mm}$: 順に、給気口面積の 0.5 倍, 1.0 倍, 2.0 倍)、チムニー高さ 2 種類 (500 mm , 250 mm) の計 6 種類である。

チムニー断面寸法を大きくした場合、断面寸法が小さい場合と比較して、火災時に同じ量、温度の煙がチムニー内に流入した場合でも、断面全体に煙が行き渡らない等の理由から 平均的に見てチムニー内の温度上昇が小さくなることから、チムニー内外の密度差 $\Delta\rho$ による圧力 $\Delta\rho gh$ (h : チムニー高さ) が小さくなると考えられる。また、断面が大きすぎる場合、チムニー頂部の水平断面内的一部では外気の流入が生じやすくなる可能性があり、これによってもチムニー内の平均的な温度上昇は小さくなる（排煙量の低下に繋がる）と予想される（図 2.4.1 (b)）。一方で、チムニー断面が小さすぎる場合には 火源から発生した煙を排出しきれなくなり、駅舎内部の煙層厚さの増大が起こり得るため、適切な断面寸法を確保することが必要となる。

また、チムニーを高くした場合、チムニー内の温度上昇が一様であると仮定すると、 $\Delta\rho gh$ が増大するため、チムニーの排煙能力は上がると言える（図 2.4.1 (c)）。

本節では、チムニー寸法の変化による上記のような性能の変化が、模型内煙流動性状、階段室一火災室間での遮煙状況に与える影響について考察を行う。

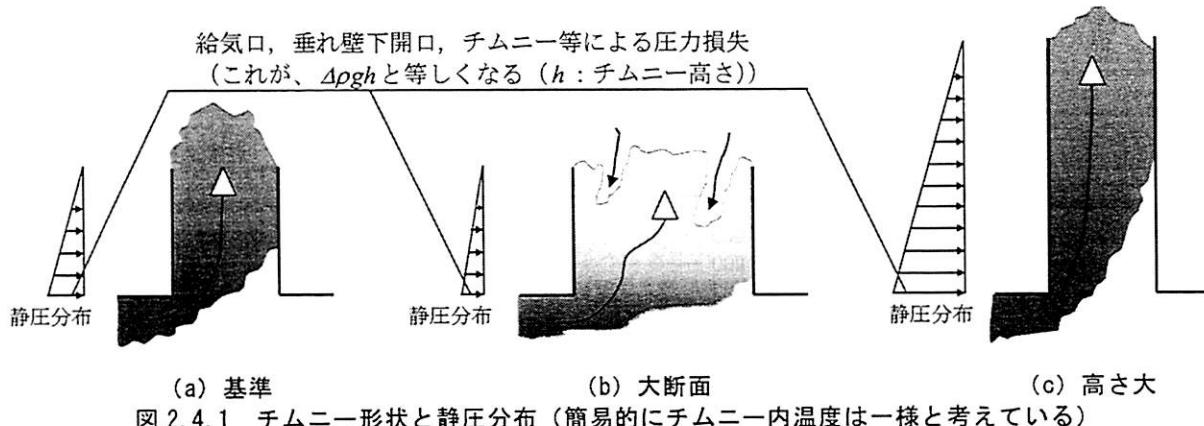


図 2.4.1 チムニー形状と静圧分布（簡易的にチムニー内温度は一様と考えている）

・ 模型実験結果および考察

本実験では、効率的に給・排気が行われるチムニー寸法を探るため、模型パターン I において チムニー寸法をパラメータ（断面寸法： 300 mm 角, 425 mm 角, 600 mm 角、高さ： 250 mm , 500 mm ）として、それぞれ実験を行った。

図 2.4.2 に給気口中心風速の時系列変化、階段室中央 a 点およびチムニー内①～③点の垂直温度上昇分布を示す。

給気口中心風速（図 2.4.2 上段左）を比較すると、各ケース間で着火前（日常時）には大差は見られない。着火後は、チムニー高さ h が 500 mm の 3 ケースに比べて 250 mm の場合は全体的に低下しているが、これは、 h が 500 mm の場合に比べて、 250 mm の場合にはチムニー内外での差圧が確保できなかったことによると考える。その結果、外気の逆流が生じやすくなり、また、階段室内 a 点の温度上昇（図 2.4.2 上段右）から判断できるように、階段室へ多量の煙が流入したと言える。なお、外気の逆流が生じたことは、実験の目視記録 および $h=250\text{ mm}$ のケースではチムニー内温度上昇が 床面からの高さ H が 500 mm 以下では大きいものの、それより上部では小さくなっていることから判断した（図 2.4.2 下段）。

また、チムニー高さに対する断面積が大きすぎる場合にも、同様に外気の逆流現象が伺え、チムニー断面が大きい場合に必ずしも排煙能力が上がるわけではないと言える。これは、チムニー高さが 500 mm の場合（3 ケース）の給気風速時系列変化（図 2.4.2 上段左）を見るとチムニー断面が 425 mm 角, 600 mm 角の場合で大差がないこと、 600 mm 角の場合ではチムニー上部での温度上昇が小さいことから判断できる（図 2.4.2 下段）。

ここで、チムニー内の温度上昇分布（図 2.4.2 下段）から、断面寸法が 600mm 角の場合では 425mm 角の場合と比較して、チムニー内外での密度差による圧力 ΔP_c が確保できていないと予想される。排気量は、給気口、垂れ壁下開口、チムニーを直列結合した有効開口面積 aA を用いて $aA\sqrt{\Delta P_c}$ に比例するため、本実験で想定した駅舎模型においては、チムニー断面が 425mm 角、600mm 角の場合では結果として給・排気量（給気口中心風速）に殆ど差が生じなかったと言える（若干ではあるが 425mm 角が大きい）。ただし、本節での実験ではチムニー内の面状電熱ヒータの設置方法に問題があるため、仮にチムニー内側壁面 4 面にヒータを設置した場合には本節での結果と異なる可能性がある。また、チムニーや階段室の設置箇所数や地上から階段室への入口の形状等が変化した場合にも最適なチムニー寸法が変化することが予想されるため、実際に設計を行う際には十分検討する必要がある。

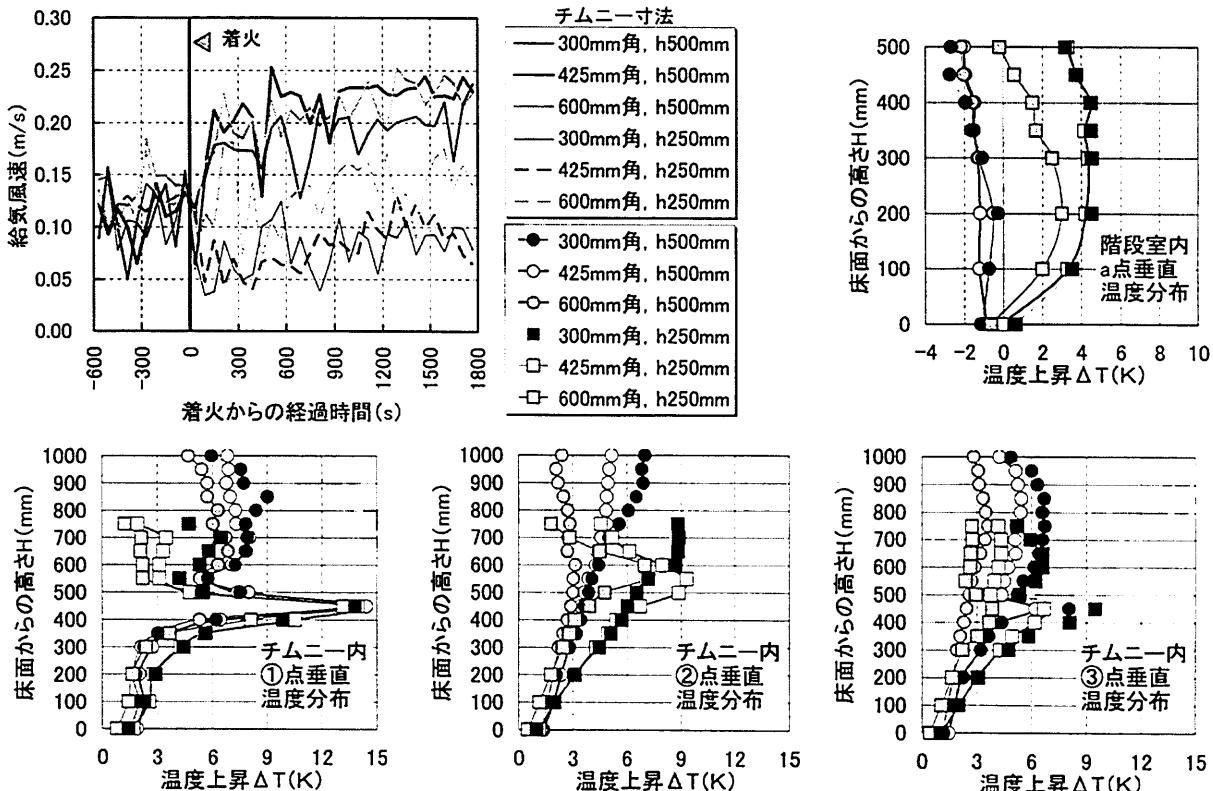


図 2.4.2 チムニー寸法（断面、高さ）変更時の比較

2.4.2. 垂れ壁高さ、垂れ壁下通路幅の変化による遮煙状況への影響

パッシブセイフティシステムは日常時から外気 → 階段室 → ホーム、コンコース → チムニー → 外気の方向に気流を形成し、火災時にはこの流れを利用して煙を外部に排出するものである。しかし、避難安全計画上、例えば階段室のように煙の進入を完全に防ぐ必要がある箇所では、こうした自然換気流のみでは遮煙に難があることが予想されるため、防煙垂れ壁などの煙流動を躯体で制御する仕組みが必要となる。本節では、垂れ壁等の寸法の変化が遮煙状況に与える影響について考察する。

以下では、まず、本研究における階段室一火災室間での遮煙についての考え方について述べる。

・ 遮煙条件に関する考察 1

垂れ壁高さを変えずに垂れ壁下の通路幅を小さくした場合、垂れ壁下の通路断面積が小さくなることから階段室から火災室へ向かう気流に対する抵抗となるため、ソーラーチムニーおよびドライミスト設備の条件が変わらない場合でも、日常時あるいは火災時において給・排気量が低下すると推測される。しかし、階段室出入口からの給気量の低下が小さいと仮定すれば、垂れ壁下通路断面積が小さくなる（通路幅を小さくする）ほど垂れ壁下通過時の風速は大きくなるため、火災時には、階段室一火災室間差圧

分布が図 2.4.3 (b) に示すように、右側（火災室側）に移動すると考えられる。その結果、垂れ壁位置における中性帯高さが高くなり、煙の階段室への進入を防ぐことが可能となると考える。

また、垂れ壁は、換気流のみでは制御の困難な天井流を受け止めることで、煙の進行を止める効果が期待される。本システムを採用した駅舎では、火源から見て階段室とは逆側の空間が大断面のチムニーを通して外部に開放されているため、垂れ壁等の寸法の変化により煙層高さはそれほど変化しないことから、図 2.4.3(a)に示す中性帯高さ以下まで垂れ壁下端を下ろせば遮煙が可能となる（図 2.4.3 (c)）。なお、垂れ壁高さを大きくした場合には垂れ壁下通路断面積を小さくすることにもなるので、通路幅を小さくした場合と同様の効果（差圧分布が火災室側に移動）も得られると考えられる。

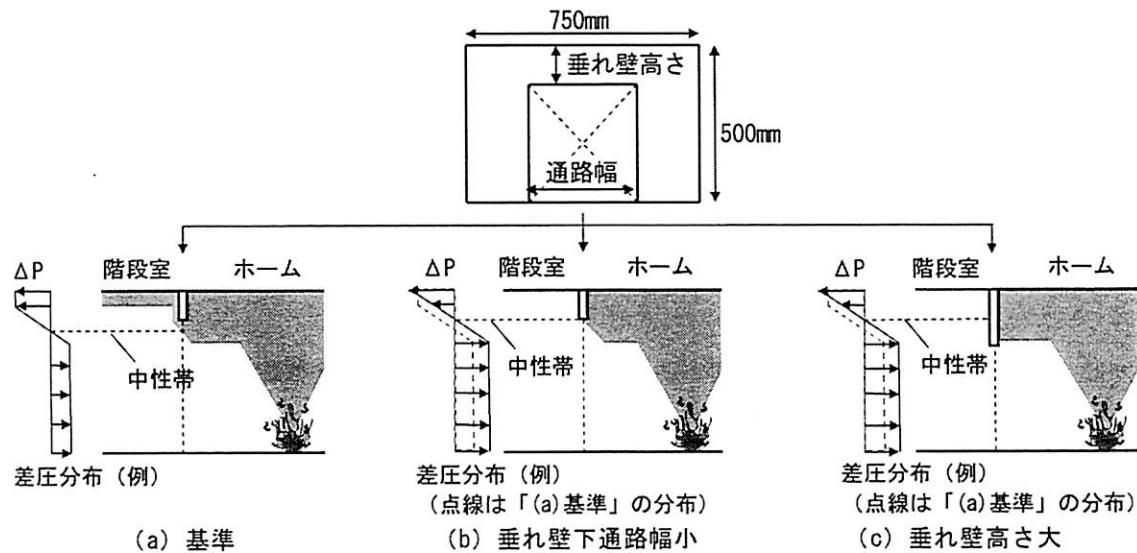


図 2.4.3 階段室一ホーム間差圧分布 および 階段室一ホーム間垂れ壁近傍の煙層概念図

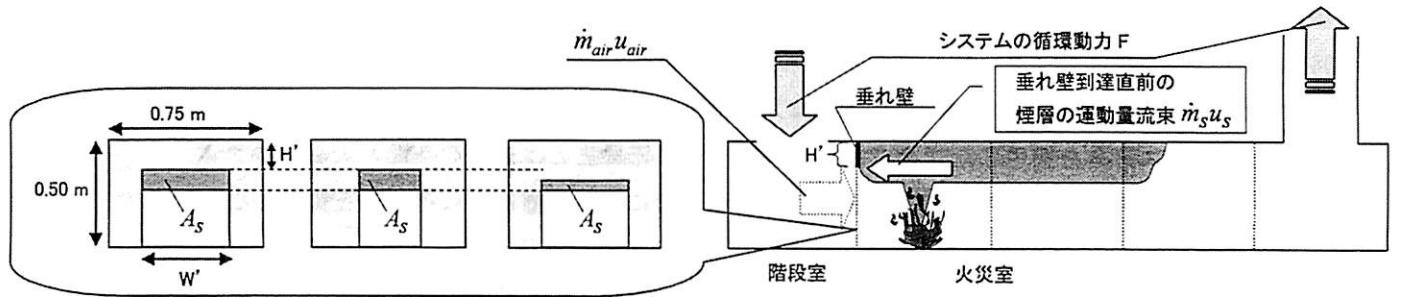
・ 遮煙条件に関する考察 2

「遮煙条件に関する考察 1」では、煙が階段室に進入しようとする時の力は浮力のみによるとして記載したが、階段室方向に進む煙層の厚さが 垂れ壁よりも大きい場合のように、煙層の慣性力を考慮しなければならない場合がある。ここでは、その様な場合の遮煙に関する考え方について記載する。

まず、ブルームの天井面衝突後もしくは煙層下端に流入後、階段室側に向かう煙層に注目する。ここで、階段室一火災室間に設置した垂れ壁に煙層が到達する直前の煙層の運動量流束を $\dot{m}_s u_s$ と表す（図 2.4.4）。仮に、煙層の階段室方向への進行が垂れ壁下で丁度止まるとすれば、垂れ壁下での煙層の流速はゼロとなることから、この時の煙層の運動量流束もゼロとなる。運動量流束の時間変化は外部から働く力によるので、この時 煙層が外部から受ける力は $\dot{m}_s u_s$ となり、同様に煙層が階段室に進入しようとする力も $\dot{m}_s u_s$ と表せる。

一方で、本システムでは ドライミスト装置およびソーラーチムニーの条件が決まれば、垂れ壁等の寸法を変化させた場合でも、システムが駅舎内に気流を形成しようとする力（循環動力 F）は一定である。ここで、煙層厚さが垂れ壁高さ以上となった際の遮煙の成否が $\dot{m}_s u_s (= \rho_s u_s^2 A_s)$ と循環動力 Fとのバランスで決定するとすれば、 A_s を小さくすることにより、いずれは遮煙が行われる条件に至ると考える。なお、本システムを採用した駅舎では、火源から見て階段室とは逆側の空間が大断面のソーラーチムニーを通して外部に開放されているため、垂れ壁等の寸法の変化により煙層高さはそれほど変化しない。

また、階段室一火災室間での遮煙の成否が、 $\dot{m}_s u_s$ と循環動力 F によって形成される模型内気流の垂れ壁下での力 $\dot{m}_{air} u_{air}$ のバランスで決定すると考えた場合、垂れ壁下通路断面積を小さくすることによって $\dot{m}_{air} u_{air}$ は大きくなると予想されるため、垂れ壁等の寸法を変化させることにより いずれは遮煙が可能となると考える。



- \dot{m}_s : 垂れ壁に到達する直前の煙層の単位時間、単位断面積あたりの質量流量 ($\text{kg}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$)
 \dot{m}_{air} : 垂れ壁下における模型内気流の単位時間、単位断面積あたりの質量流量 ($\text{kg}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$)
 u_s : 垂れ壁に到達する直前の煙層の流速 (m/s)
 u_{air} : 垂れ壁下における模型内気流の流速 (m/s)
 ρ_s : 煙層密度 (kg/m^3)
 H' : 垂れ壁高さ (m)
 W' : 垂れ壁下通路幅 (m)
 A_s : 煙層が垂れ壁を超えるとする時の 垂れ壁下の煙層断面積 (m^2)

図 2.4.4 「遮煙条件に関する考察2」概念図

以下では、模型パターンI（基礎的模型パターン）において、用意した6種類のチムニーのうち 階段室出入口面積(給気口面積)が1/20模型スケールで300mm×600mmの場合に最も排煙量の多い、断面425mm角、高さ500mmのチムニーを用いて(2.4.1.節参照)、垂れ壁等の寸法を変化させた場合の階段室－火災室間の遮煙状況の変化について考える。

(1) 実験結果および考察1（模型パターンI, 垂れ壁下通路幅変更時）

図2.4.5に垂れ壁高さ H' を100mmとして、垂れ壁下通路幅 W' が750mm(No.1), 450mm(No.2), 300mm(No.3)の場合の実験結果の比較を示す。これらの条件では、目視からはNo.3(垂れ壁下通路幅 W' 300mm)のみで遮煙が確認できた。

B点高さ350mm(垂れ壁下端より50mm下方)での温度上昇(図2.4.5上段中、下段左)を比較すると、No.1, No.2, No.3の順に大きくなっている。これは、目視より遮煙が確認できたNo.3では、この位置で煙層と模型内気流の衝突が起こったために温度上昇が抑えられたが、階段室に煙が進入したNo.1, No.2ではこの衝突が小さかったことが原因と考える。また、煙層下端よりも低い位置であると考えられるB点下方(床面からの高さ $H=0\sim200\text{mm}$)での温度上昇がNo.1, No.2, No.3の順で大きくなっているのは(図2.4.5上段右、下段左)、No.1, No.2では一度階段室へ流入した煙が、模型内気流により再び火源側へ移動してきたためと考える。

C点およびE点上部における温度上昇(図2.4.5下段中、下段右)を見ると、No.1と比較してNo.3で若干大きな値を示しているが、これは、遮煙が確認できたNo.3では垂れ壁位置で煙の進行が止められたため、No.1, No.2では階段室へ向かった熱量がNo.3ではチムニー側へ流れてきたためと考えられる(ただし、E点ではC点と比較して、失熱により各実験ケース間の温度上昇の差が小さくなっている)。

次に給気口中心風速(図2.4.5上段左)を見ると、遮煙が確認できたNo.3(W' 300mm)が最も小さい。しかし、垂れ壁下通路断面積がNo.1と比べNo.3では2/5である(No.1: 750mm×400mm(幅×高), No.3: 300mm×400mm)のに対し、結果として給気量低下が僅かであることから、この時の模型内気流の垂れ壁下通過時の流速は大きくなってしまい、階段室－火災室間の差圧が確保されていたと予想できる(階段室－火災室間の差圧は非常に小さく、実験で計測することができなかつたため、本節(3)において数値シミュレーションにより確認する)。

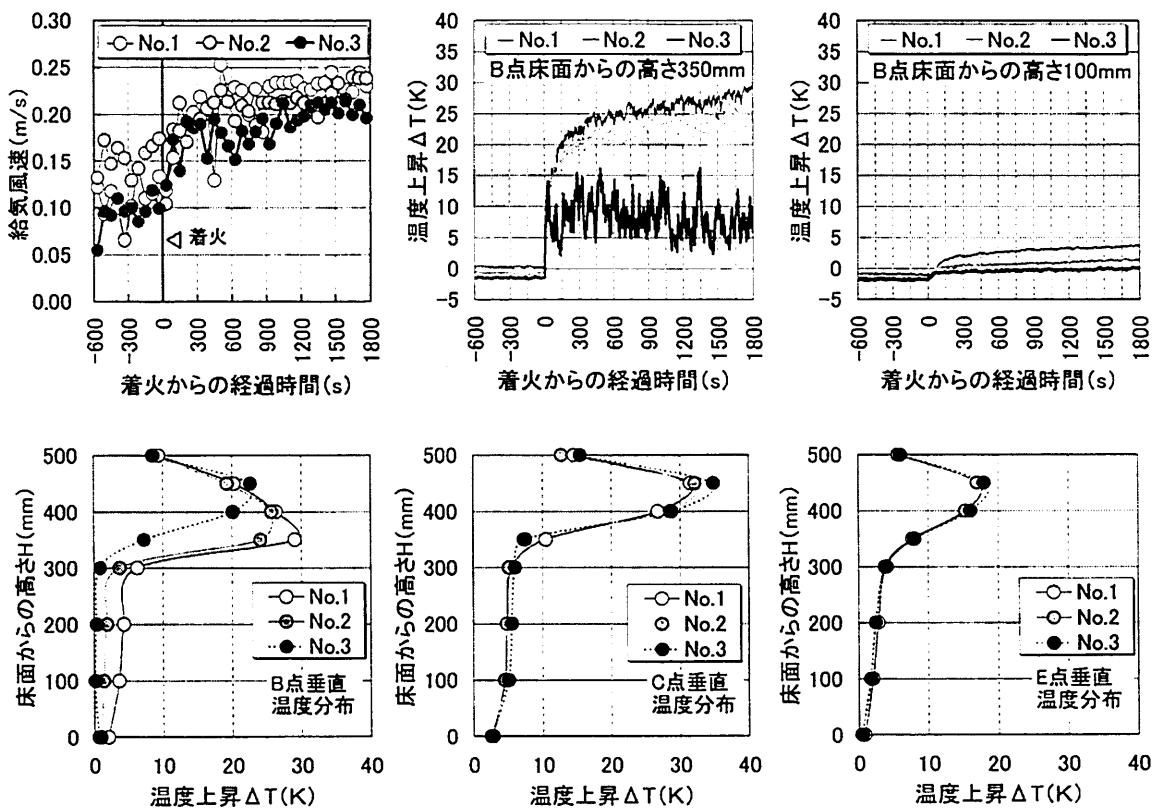


図 2.4.5 垂れ壁下通路幅変更時の比較

(2) 実験結果および考察 2 (模型パターン I, 垂れ壁高さ変更時)

図 2.4.6 に垂れ壁下通路幅 W' を 750mm として、垂れ壁高さ H' が 100mm (No. 1), 150mm (No. 4), 200mm (No. 5) の場合の実験結果の比較を示す。なお、これらの条件では、目視からは No. 5 (垂れ壁高さ H' 200mm) のみで遮煙が確認できた。

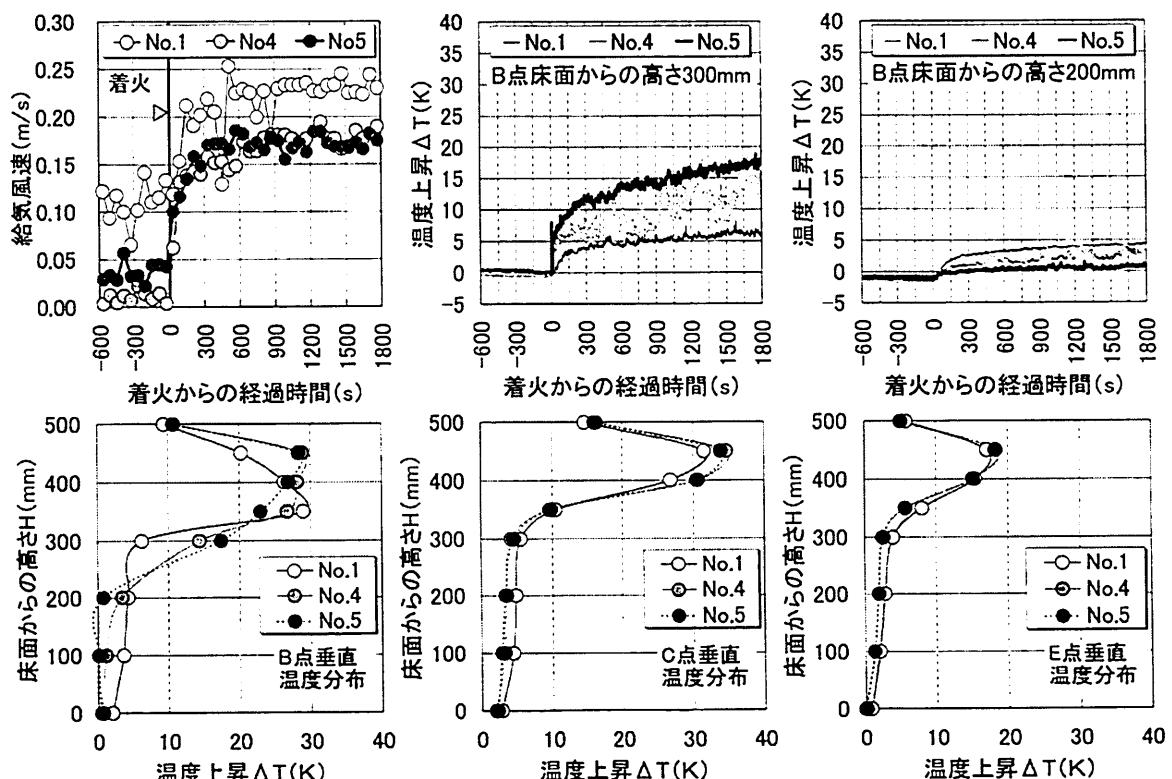


図 2.4.6 垂れ壁高さ変更時の比較

各実験ケースにおける B 点下方の温度上昇および C 点, E 点での温度上昇（図 2.4.6 下段）の大小関係は「本節（1）垂れ壁下通路幅変更時」に示した理由と同様の理由によると考える。なお、C 点および E 点での温度上昇は No. 4, No. 5 でほとんど変わらないが、給気口中心風速も両者でほとんど差がない（図 2.4.6 上段左）ことを合わせて考えると、遮煙の成否の境界が垂れ壁高さ 150mm 付近にあることが予想される。

（3）数値シミュレーションによる検討（模型パターン I, 垂れ壁高さおよび通路幅変更時）

本節では、（1），（2）節で検討した垂れ壁高さおよび垂れ壁下通路幅を変化させて行った実験（実験 No. 1～5）と同一の条件に対して数値計算（CFD）を行い、計算結果と実験結果の比較を行うことで、遮煙成否の境界となる条件を CFD により導出することが可能か否かを検討する。また、CFD により、模型実験では計測が困難であった階段室一火災室間の垂直差圧分布についても把握することが可能となるため、前節まで検討した遮煙状況に関して解析結果を基に考察を加える。

計算には米国商務省標準技術研究所（NIST）開発の Fire Dynamics Simulator Version4.07（以下 FDS）を使用した。離散化手法は有限体積法であり、時間進行スキームは陽的予測子一修正子法、空間差分スキームは二次精度中心差分（ただし、移流項は時間進行の予測子の段階では一次精度風上差分、修正子の段階では一次精度風下差分）とした。乱流を表現するにあたり、計算は LES により行った（SGS モデルとして標準 Smagorinsky モデルを用いた ($C_s = 0.2$)）。燃焼モデルは Mixture Fraction モデルを用いた。なお、計算では壁面間の放射熱交換も考慮している。

計算空間領域は、長さ 8050mm × 幅 850mm × 高さ 800mm と、長さ 2050mm × 幅 850mm × 高さ 1500mm の 2 つの直方体領域を連結させたもの（格子数：約 52 万）であり、この領域内部に実験模型と同寸法（模型パターン I）の区画を設置した。計算領域の概要を図 2.4.7 に示す。

境界条件として、計算開始時（着火 300 秒前）の計算領域内の空気温度および区画の壁体温度は実験実施時の実験室温とし、区画を構成する壁・天井材料および火源径、設定発熱速度は実験で用いたものと同一とした（計算開始から 300 秒後に火源に 1.68kW の発熱速度を与えた）。冷却器および面状電熱ヒータを再現するにあたり、給気口の上部 125mm の位置に、給気口と同寸法（300mm × 600mm）の温度を 0°C に固定した面状の熱源を設置し、また、チムニー内側壁の 1 つの面（模型実験と同方向の壁面）を 60°C に固定した。

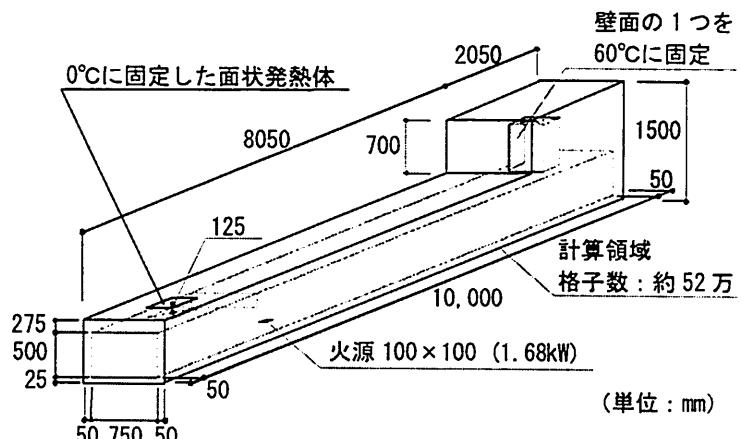


図 2.4.7 計算領域概要図

・ 垂れ壁高さ変更時の検討

図 2.4.8 に垂れ壁下通路幅 W' を 750mm として、垂れ壁高さ H' を 100mm（No. 1）, 150mm（No. 4）, 200mm（No. 5）とした 3 ケースについて、実験と CFD による駅舎内温度上昇分布（着火後 1740～1800 秒の平均値）、給気口中心風速（着火後 1200～1800 秒の平均値）、階段室一火災室間差圧（着火後 1740～1800 秒の平均値：FDS のみ）の比較を示す。ここで、階段室一火災室間差圧とは、垂れ壁中心から階段室および火源側（長さ方向）にそれぞれ 100mm 離れた位置かつ幅方向中央における静圧の差である。

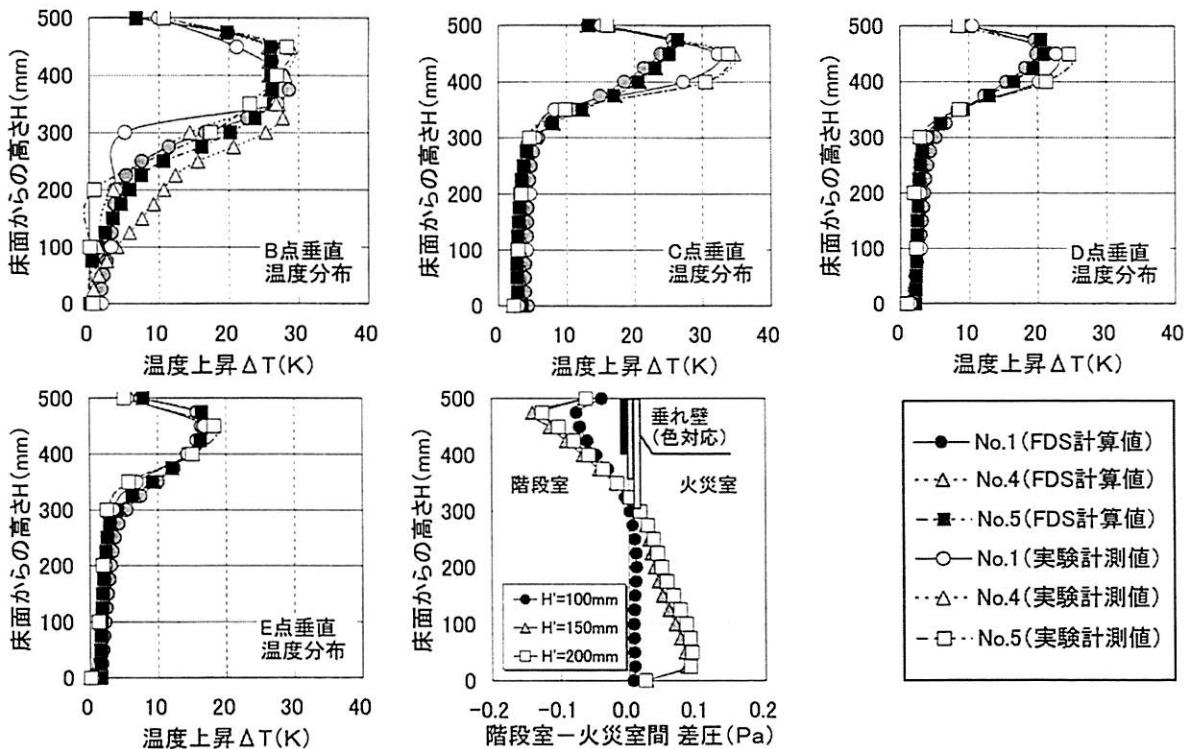


図 2.4.8 実験計測値と FDS 計算値の比較（垂れ壁高さ変更時）

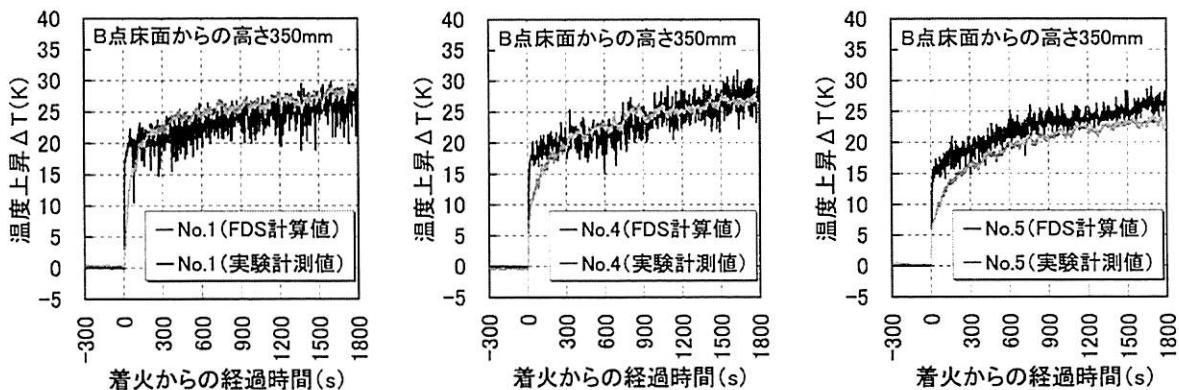


図 2.4.9 実験計測値と FDS 計算値の比較（温度上昇の時系列変化）
(B 点床面からの高さ 350mm, 垂れ壁高さ変更時)

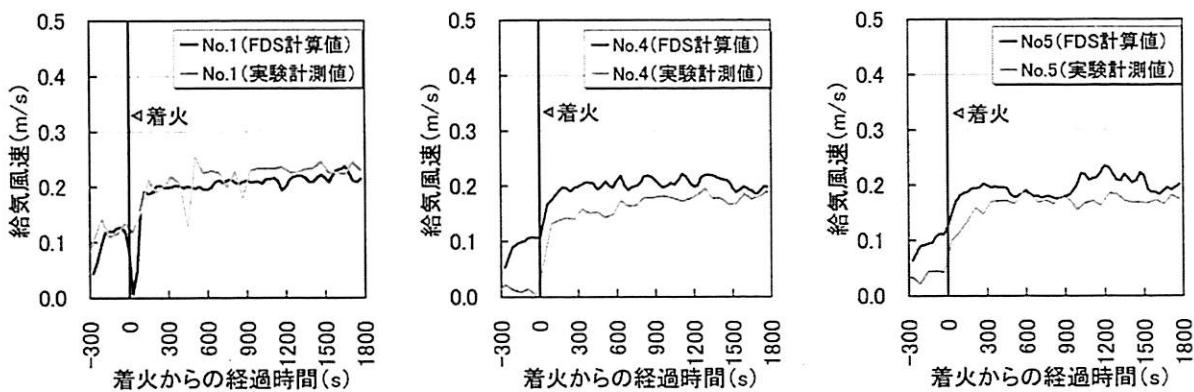


図 2.4.10 実験計測値と FDS 計算値の比較（給気口中心風速の時系列変化）(垂れ壁高さ変更時)

B 点垂直温度分布（図 2.4.8 上段左）を見ると、計算結果と実験結果では 床面からの高さが 300mm 以下で若干差異があるものの、天井近傍での煙層温度は比較的良好な精度で予測できていることが分かる。また、C 点、D 点、E 点においては、FDS による計算値は実験結果と比較して煙層温度が若干低くなっているものの、煙層高さはほぼ一致している（図 2.4.8 上段中、上段右、下段左）。

また、給気口中心風速およびB点H=350mm位置での温度上昇の時系列変化も両者で概ね一致した（図2.4.9、図2.4.10）。

階段室一火災室間差圧（図2.4.8下段中）を見ると、垂れ壁高さ150mm、200mmの場合では、差圧分布の傾きはほぼ等しいことが分かる。つまり、火災室内温度（あるいは煙層温度）と階段室内温度との差が両者でほぼ等しいことになる。また、垂れ壁高さ200mmの場合は垂れ壁のある高さに中性帶が存在するため遮煙が行われていることが読み取れることから、垂れ壁高さ150mmの場合には若干階段室へ煙が流入するものの、階段室温度を大きく上昇させるほどではないことが分かる。

・垂れ壁下通路幅変更時の検討

垂れ壁高さ H' を100mmとして、垂れ壁下通路幅 W' を750mm（No.1）、450mm（No.2）、300mm（No.3）とした場合の計算結果も比較的良く実験結果を再現している（図2.4.11～図2.4.13）。

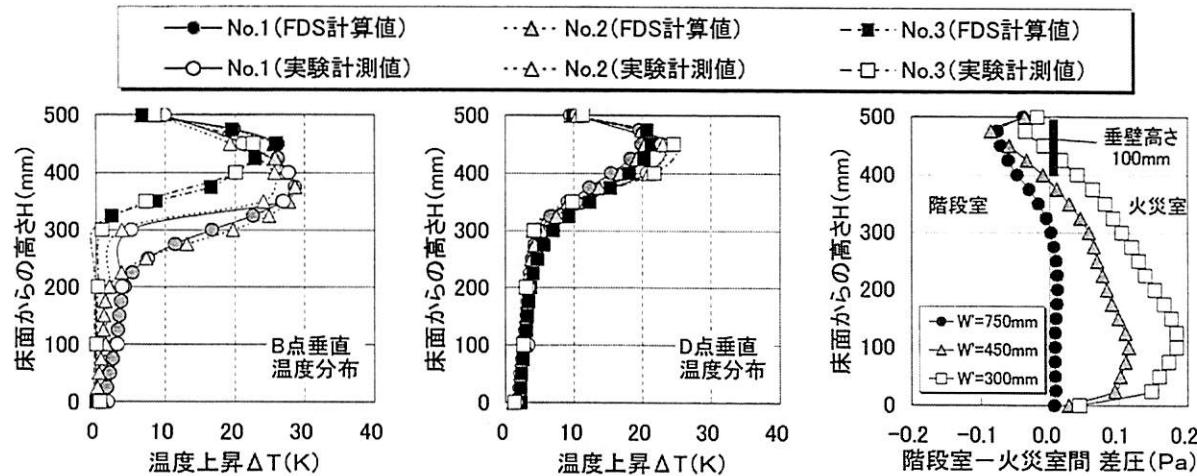


図2.4.11 実験計測値とFDS計算値の比較（垂れ壁下通路幅変更時）

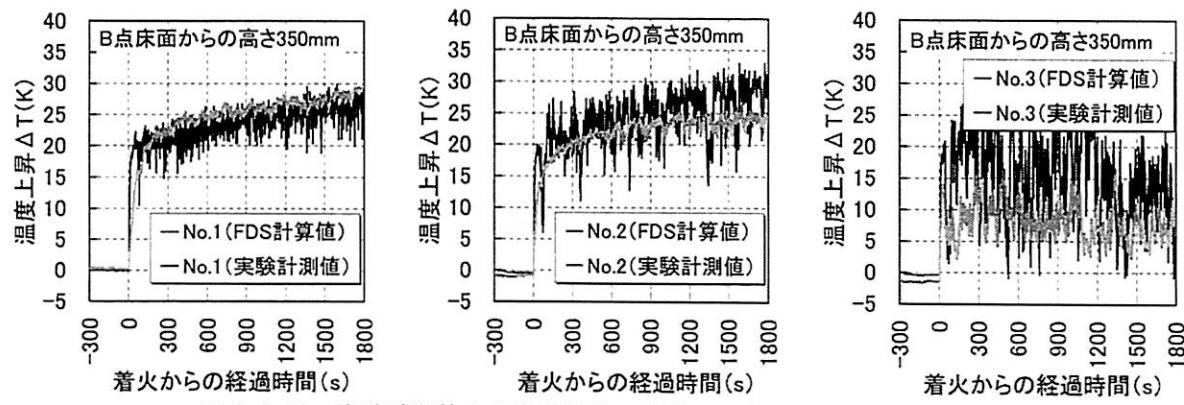


図2.4.12 実験計測値とFDS計算値の比較（温度上昇の時系列変化）
(B点床面からの高さ350mm、垂れ壁下通路幅変更時)

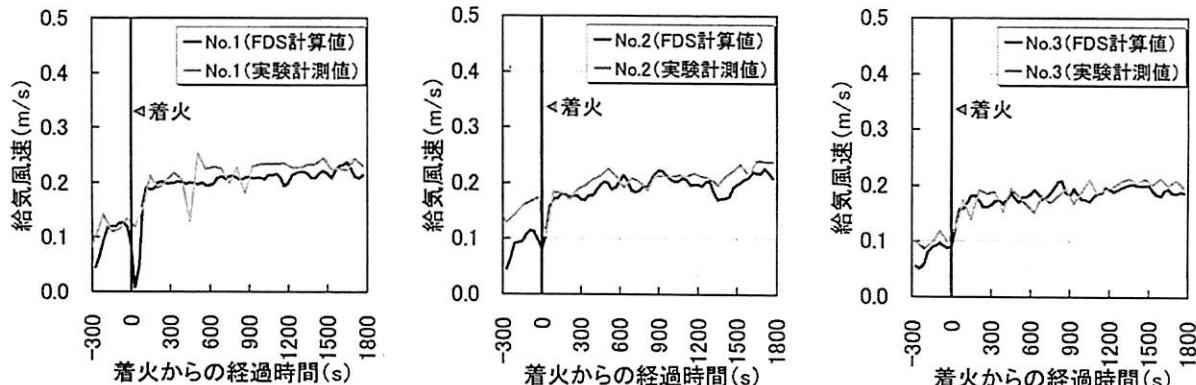


図2.4.13 実験計測値とFDS計算値の比較（給気口中心風速の時系列変化）（垂れ壁下通路幅変更時）

階段室一火災室間差圧（図 2.4.11 右）を見ると、通路幅が小さくなるほど火災室に対する階段室の静圧が大きくなっている（差圧分布が右方向に移動）、それに伴い中性帶高さも高くなっている。この結果、通路幅 300mm では垂れ壁のある高さに中性帶高さが到達し、遮煙が行われていることが分かる。

なお、本節での結果は 2.4.2. (1) および (2) 節で記載した考察とも一致する。

(4) 実験結果および考察 3（模型パターン II, 垂れ壁高さおよび通路幅変更時）

ここまでは、本システムを採用した駅舎内での基礎的煙流動性状の把握および本システム実現の可能性の有無を探ることを目的として、階段室 1 つ、チムニー 1 つの模型パターン I（基礎的模型パターン）について実験を行ってきた。しかし、実際に駅舎を設計する際には、少なくとも 2 方向避難が可能な計画とする必要があるため、本節では典型的な 2 方向避難型である模型パターン II（図 2.4.14）について、垂れ壁高さおよび垂れ壁下通路幅を現実的な範囲内で段階的に変化させ、模型実験を行うことにより、模型パターン I の場合と同様に遮煙が行われる条件が存在するか否かを確認する。

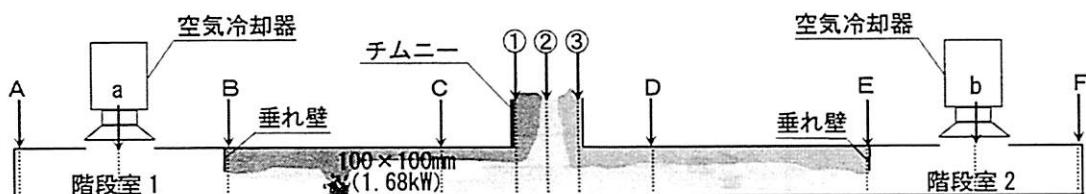


図 2.4.14 模型パターン II 概要図（寸法、測定点位置等の詳細は図 2.3.4 を参照されたい）

・ 垂れ壁下通路幅の変化による遮煙状況への影響

図 2.4.15 に模型パターン IIにおいて、垂れ壁高さ H' を 150mm として垂れ壁下通路幅を W' を 750mm (No. 12), 450mm (No. 15), 300mm (No. 16) と変化させた場合の実験結果を示す。なお、これらの条件では、目視からは No. 16 (垂れ壁下通路幅を W' 300mm) のみで階段室一火災室間での遮煙が確認できた (No. 15 では概ね遮煙は行われていたが、若干の階段室への煙流入が確認された)。

B 点の高さ 300mm における温度上昇の時系列変化（図 2.4.15 中段中）を見ると、No. 15 (W' 450mm) および No. 16 (W' 300mm) では、 $H=350\text{mm}$ 位置での温度上昇変化（図 2.4.15 中段左）と比較して 低温かつ乱れた温度上昇変化を起こしていることから、両ケースではこの高さで煙層と気流の衝突が起きていると推測される。一方で、No. 12 (W' 750mm) の場合には、着火直後に乱れはあるものの、その後は小さい温度上昇で安定している。なお、この温度上昇は火源からの放射の影響に加えて、一度階段室に流入した煙（図 2.4.15 上段右の階段室 1 内温度上昇分布より判断できる）が再び模型内気流により移動してきたことによると考える。

階段室に多量の煙が流入した No. 12 では、火源側の階段室 1 での給気口中心風速が若干小さくなっているものの、全ケースで左右の階段室からの給気量（給気口中心風速）に大差は見られない（図 2.4.15 上段左、上段中）。ここで、模型内に気流を形成しようとする力（循環動力 F）はチムニーと冷却器によるものであるが、模型パターン IIにおいてはそれらが設置されている区画が左右対称となっている。火災時の模型内気流性状に対しては 煙がチムニーに流入することによる循環動力 F の増加が大きな影響を持つと予想されるが、チムニーが模型中央に設置されているため、煙流入後のチムニー水平断面内温度分布が一様であると仮定すれば、左右の給気口からほぼ均等に給気しようと働くはずである。LP ガスの燃焼時の酸素消費およびブルームへの空気連行等による空気の流れは火源の位置によって大きく変化すると考えられるが、結果としてこの影響が相対的に小さかったために、火源の位置にはよらず、ほぼ対象に左右の給気口から空気を引き込んだと予想される。

次に、C 点および D 点の温度上昇分布（図 2.4.15 下段左、下段中）を見ると、D 点では C 点と比較し

て温度上昇がかなり小さくなっていることが分かる。これより、火源に近い階段室の手前で遮煙を行うことができれば、火源から見てチムニーを通り越した位置にある階段室の安全を確保することはそれほど難しくないと言える（図 2.4.15 下段右）。

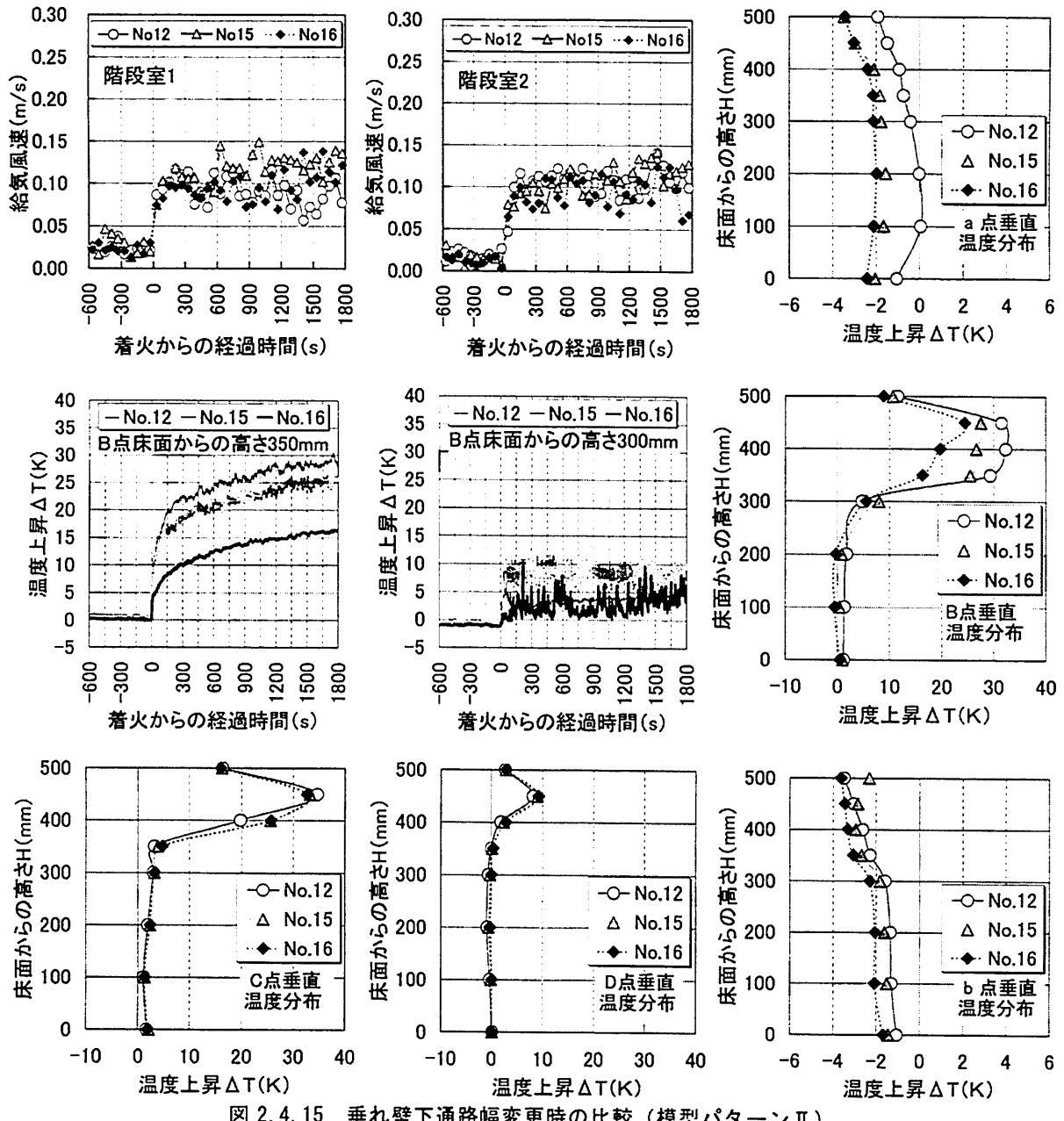


図 2.4.15 垂れ壁下通路幅変更時の比較（模型パターンⅡ）

・垂れ壁高さの変化による遮煙状況への影響

図 2.4.16 に模型パターンⅡにおいて、垂れ壁下通路幅を W' を 750mm として垂れ壁高さ H' を 100mm (No. 11), 150mm (No. 12), 200mm (No. 13), 250mm (No. 14) と変化させた場合の実験結果を示す。これらの条件では、目視からは No. 14 (垂れ壁高さ H' 250mm) のみで階段室一火災室間での遮煙が確認できた (No. 13 ではほぼ遮煙は行われていたが、稀に、若干の煙流入が見られた)。

階段室 1 での給気口中心風速（図 2.4.16 上段左）を見ると、No. 11 (H' 100mm) では着火後に風速が極端に低下していることが読み取れる（ただし、着火前の風速が他ケースと比較して明らかに大きすぎ、異常値とも考えられるため、値自体の信頼性は低い）。これは、着火後に階段室 1 に多量の煙が流入し（図 2.4.16 中段左）、階段室 1 からの給気が制限されたために、それを補う形で階段室 2 からの給気量が多くなったことによると考える（図 2.4.16 上段中）。先ほど（通路幅変更時（模型パターンⅡ））、「火源の

位置によらず、ほぼ左右対称に給気が行われる”と記載したが、今回のケースのように着火直後から多量の煙が階段室に流入する場合には、その浮力が片側からの給気に対してのみ大きな抵抗となるため、例外となることが分かる。

なお、階段室1内a点温度上昇分布の大小関係（図2.4.16中段左）、B点下方での温度上昇の大小関係（図2.4.16中段中）、B点での温度上昇時系列変化での変動（図2.4.16下段）、階段室2内b点温度上昇（図2.4.16中段右）に関しては、前節までで行った考察と同様のことと言える。

2.4.2節で行った実験および数値シミュレーション結果から、本システムを採用した駅舎では、適切に垂れ壁高さおよび通路幅を設定した場合には火災時の安全性が確保できることが示された。ただし、本節での実験では段階的に垂れ壁高さ（通路幅）を大きく（小さく）し、それらがある寸法となった場合に結果として遮煙が行われたことを確認したに留まっており、循環動力Fが変化した場合、例えば中間期、冬季などドライミスト装置を作動させない場合での火災時の安全性を確保するためには、垂れ壁高さもしくは垂れ壁下通路幅をどの程度にすれば良いかといった遮煙成否の境界となる条件を示すまでには至っていない。これに関する詳細な検討は本論文第3章および第4章で扱うこととする。

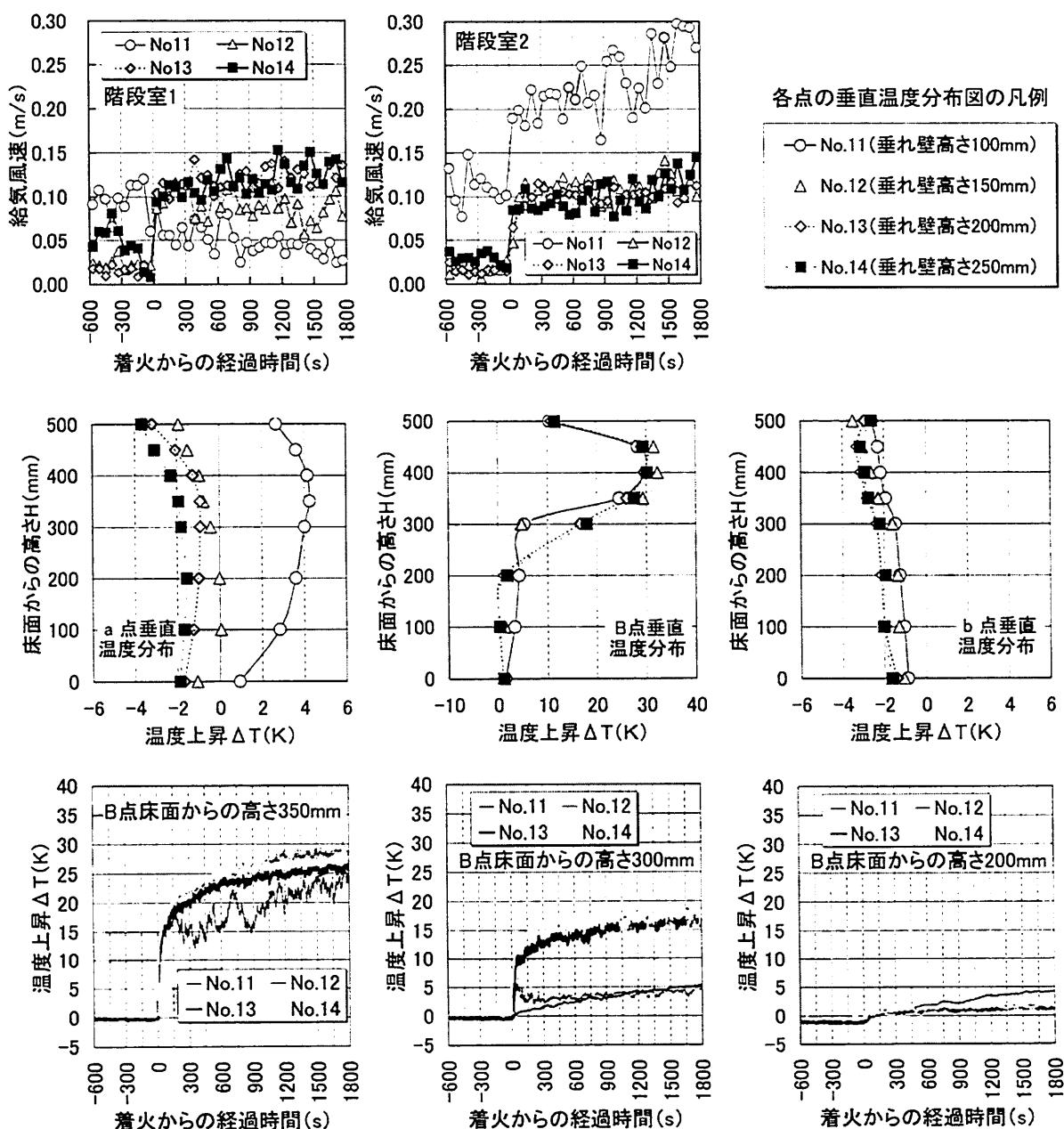


図2.4.16 垂れ壁高さ変更時の比較（模型パターンⅡ）

2.4.3. 模型パターンを変更した場合（模型パターンI～IV）の比較

前節までは本システムを採用した地下鉄駅舎内部での基礎的な煙流動性状に関する知見を得るために、主に階段室1つ、チムニー1つの模型パターンIを対象として検討してきた。一部2方向避難が可能な計画のうち、最も単純な計画である模型パターンIIも扱ったが、本節では、この他に模型パターンIII、模型パターンIV（表2.4.1参照。寸法の詳細は図2.3.4参照）を加えた実験結果より、階段室、チムニーの組合せの変化が駅舎内煙流動性状に及ぼす影響について考える。これにより、最適な堅シャフトの組合せを選出するための基礎的知見を得ることを本節の目的の1つとする。なお、本論文第3章以降では、主に模型パターンIを対象として実験および計算を行い、火災時に階段室一火災室間で遮煙を行うことが可能な駅舎内部での設計条件の組合せを把握するが、そこで示す結果、方法論を実設計に応用する際には本節での検討内容は有用なものになると考える。

本節では、模型パターンI～IVにおいて、それぞれ垂れ壁高さ H' を100mm、垂れ壁下通路幅 W' を450mmとした場合と H' を150mm、 W' を750mmとした場合の実験結果を用いて、模型パターン間の比較を行う。なお、いずれの実験も、チムニーは断面寸法：425mm角、高さ：500mmのものを用いた。また、各模型パターンにおいて火源位置は階段室1の隣接区画とし、発熱速度は前節までの実験と同様1.68kW（実スケールで3MW）とした。実験条件を表2.4.1に再掲する。

図2.4.17に垂れ壁高さ H' を100mm、垂れ壁下通路幅 W' を450mmとした場合の実験結果を示す。

表2.4.1 本節における実験の条件（表2.3.2（34頁）からの抜粋）

実験No.	模型パターン	チムニー断面（mm）	チムニー高さ（mm）	階段室一ホーム間垂れ壁高さ（mm）	垂れ壁下通路幅（mm）
2	 (i) 模型パターンI（基礎的模型パターン）	425×425	500	100	450
4				150	750
17	 (ii) 模型パターンII	425×425	500	100	450
12				150	750
18	 (iii) 模型パターンIII	425×425	500	100	450
19				150	750
20	 (iv) 模型パターンIV	425×425	500	100	450
21				150	750

* X点は、火災室一階段室2間垂れ壁位置の温度計測点

ここで、火災時 煙がチムニーに流入した後の本システムの循環動力Fがチムニーの排煙能力によって概ね決まると言えれば、模型パターンII～IVでは模型パターンIと比較して以下の点が異なる。

- チムニーの数に比べて階段室の数が2倍になることにより、火災時に排煙を行っている1つのチムニーの循環動力Fが複数の階段室に分割されるため、各々の階段室の手前での遮煙に対して不利に働くことが予想される。ただし、模型パターンIIIでは模型パターンIと比較して「階段室の数／チ

ムニーの数”は変わらないものの、火災時に高温の煙は 1 つのチムニーのみに流入し、これにより駅舎内の気流性状が支配される（排煙を行っているチムニー 1 と比較してチムニー 2 の影響が小さくなる）と考えれば、火災時の模型内の煙流動、気流性状は模型パターン IV と近くなると予想される。

- ii. 模型パターン I と比較して模型パターン II～IV では、火源からチムニーまでの距離が近いために煙層から周壁への熱損失が小さくなり チムニーに流入する煙温度が高くなるため、排煙能力が上がり、各々の階段室の手前での遮煙に対して有利に働くことが予想される。

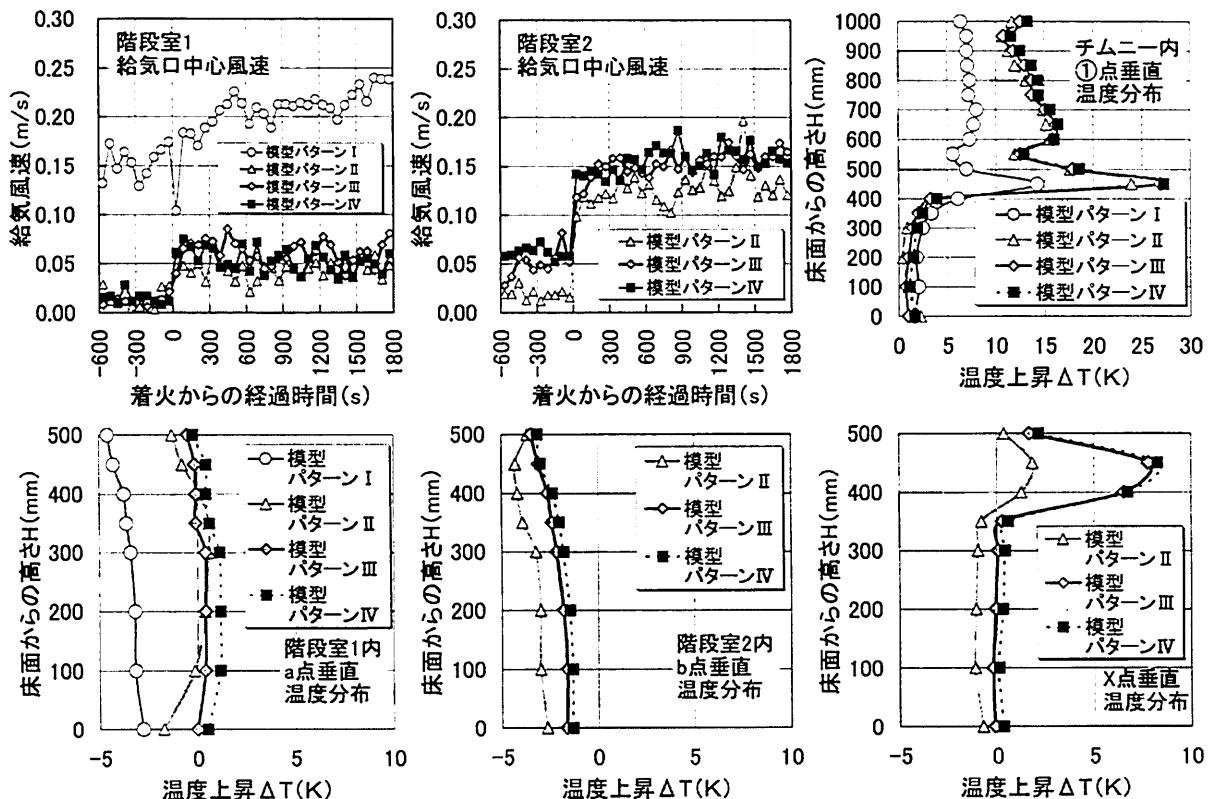


図 2.4.17 模型パターン変更時の比較（垂れ壁高さ 100mm, 垂れ壁下通路幅 450mm）

上記「ii」の理由から模型パターン II～IV でチムニー内に流入する煙の温度は模型パターン I と比べ高温となっており（図 2.4.17 上段右）、このためチムニーの排煙能力は上がると予想されるが、実験では火源側の階段室 1 の温度上昇分布（図 2.4.17 下段左）から分かるように、模型パターン II～IV では模型パターン I と比較して階段室 1 に多量の煙が流入している。また、模型パターン II～IV での着火後の給気口中心風速（図 2.4.17 上段左、上段中）は、階段室 1 での風速が階段室 2 での風速よりも小さくなっているが、これは階段室 1 に煙が流入し、その浮力が給気の妨げになったことによると考える。

このことから、階段室一火災室間での遮煙の観点から言えば、上記に記載した「ii」よりも「i」の方が影響は大きいと言える。

また、模型パターン II～IV における火災室一階段室 2 間の垂れ壁位置 X 点における温度上昇（図 2.4.17 下段右）は、いずれも それ程大きくなないことから、火災時に火源から見てチムニーを通り越した位置にある階段室の安全性を確保することは比較的容易であると言える（図 2.4.17 下段中）。

次に、垂れ壁高さ H' を 150mm、垂れ壁下通路幅 W' を 750mm とした場合の実験結果を図 2.4.18 に示す。全ての模型パターンにおいて、目視より階段室 1 への若干の煙流入が確認できたが、階段室 1 内の温度上昇（図 2.4.18 下段左）から判断できるように、いずれも階段室 1 内の温度を大きく上昇させる程の多

量の煙は流入していない。

図 2.4.18 上段左、上段中に示す給気口中心風速を見ると、模型パターンⅡでは左右の階段室からの給気量は同程度であるが、模型パターンⅢおよびⅣでは階段室 2 からの給気量が若干大きいことが分かる。これは、火災時の駅舎内の気流形成に大きな影響を有するチムニー（排煙を行っているチムニー）が模型パターンⅡでは 2 つの階段室の中央にあるのに対し、模型パターンⅢおよびⅣでは階段室 2 寄りにあることに起因すると考える。

なお、本節では煙がチムニーに流入した後の状態に注目してきたが、火災発生直後には煙はチムニーに達しておらず、従って本節頭に記載した「ii」の影響が無くなる。これにより、模型パターンⅡ～Ⅳでは、模型パターンⅠに比べて火災発生直後の遮煙が困難となり、階段室に多量の煙が流入した可能性があり、この火災室 → 階段室 の方向の煙の流れが形成された後で、初めて上記「ii」により循環動力 F が大きくなる。ここで、初期に火災室 → 階段室 の方向に煙の流れが形成されたことがチムニーへ煙流入後の模型内気流性状、煙流動性状に大きな影響を及ぼしたことは十分考えられる。ただし、チムニーへの煙流入前の段階で遮煙が行われていれば、その後も階段室の安全は確保されると考えられることから、まずは火災発生直後の遮煙成否の境界となる条件を見出すことが重要であると言える。

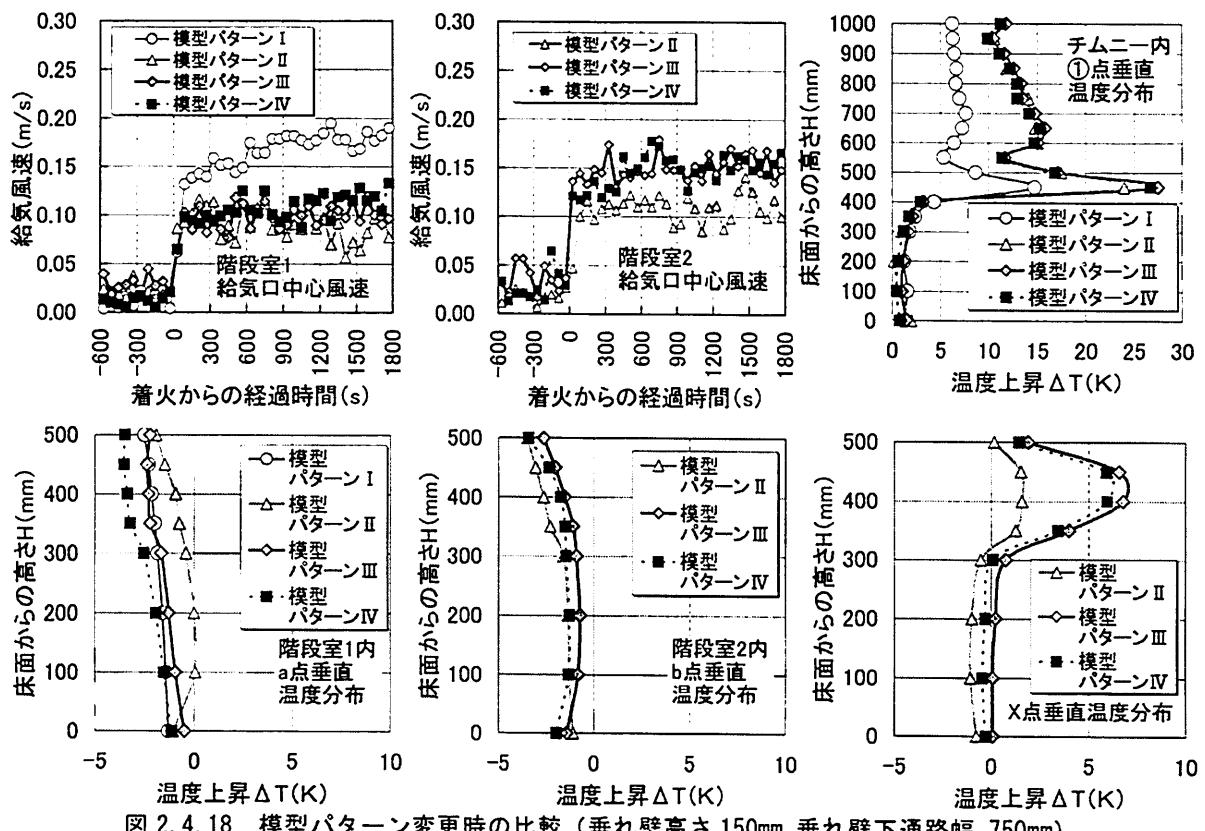


図 2.4.18 模型パターン変更時の比較 (垂れ壁高さ 150mm, 垂れ壁下通路幅 750mm)

2.5. 数値シミュレーションによる着火直後の非定常煙流動性状予測

前節で、火災時に階段室の安全性を確保するためには、火災発生直後 煙がチムニーに流入する以前の段階で遮煙を行うことが特に重要との知見を得た。次章以降では、火災発生直後における遮煙条件（遮煙を行うために満たすべき 垂れ壁、チムニーの条件）の導出を目的として 分析を行うが、その手段として CFD を用いることが可能か否かを本節で検討しておく。なお、計算には NIST 開発の FDS を用いるが、離散化手法、燃焼モデル等に関しては 2.4.2. (3) 節を参照されたい。

計算空間領域は、長さ 10.40m × 幅 2.20 m × 高さ 4.50 m (格子数：約 255 万) とし、この領域内部に前節までの実験に使用した模型と同寸法 (模型パターンⅠ)，同材料で構成された区画を設置した (火

源、垂れ壁近傍の領域の格子は 12.5mm 間隔とし、それ以外の模型区画内部および模型区画近傍の格子は 25mm 間隔とした。模型区画外部領域では 模型区画から離れるに従い徐々に格子を大きくし、最大で 100mm 間隔とした)。なお、本節での検討では、給気口上部に冷熱源(空気冷却器の代替)は設置せず、また、チムニーの断面は 425mm 角、高さは 1000mm とし チムニー内部の側壁の温度は上昇させなかった(着火前の模型内気流は形成しない)。計算領域の概要を図 2.5.1 に示す。

本節では、FDS による計算結果と 計算と同条件下での実験結果(実験条件に関しては後述する)を比較することで CFD による非定常煙流動性状の予測可能性に関する検討を行う。このため、計算の境界条件として、計算開始時の計算領域内の空気温度および区画を構成する壁体温度は実験実施時の実験室温度とし、区画構成材料および火源条件(径、発熱速度(図 2.5.2 に示す非定常火源))は 実験で使用したものと同一とした。また、計算は 火源位置を模型区画中央 b) とした場合は 60 秒間、火源位置を階段室側 a) とした場合は 300 秒間行った。

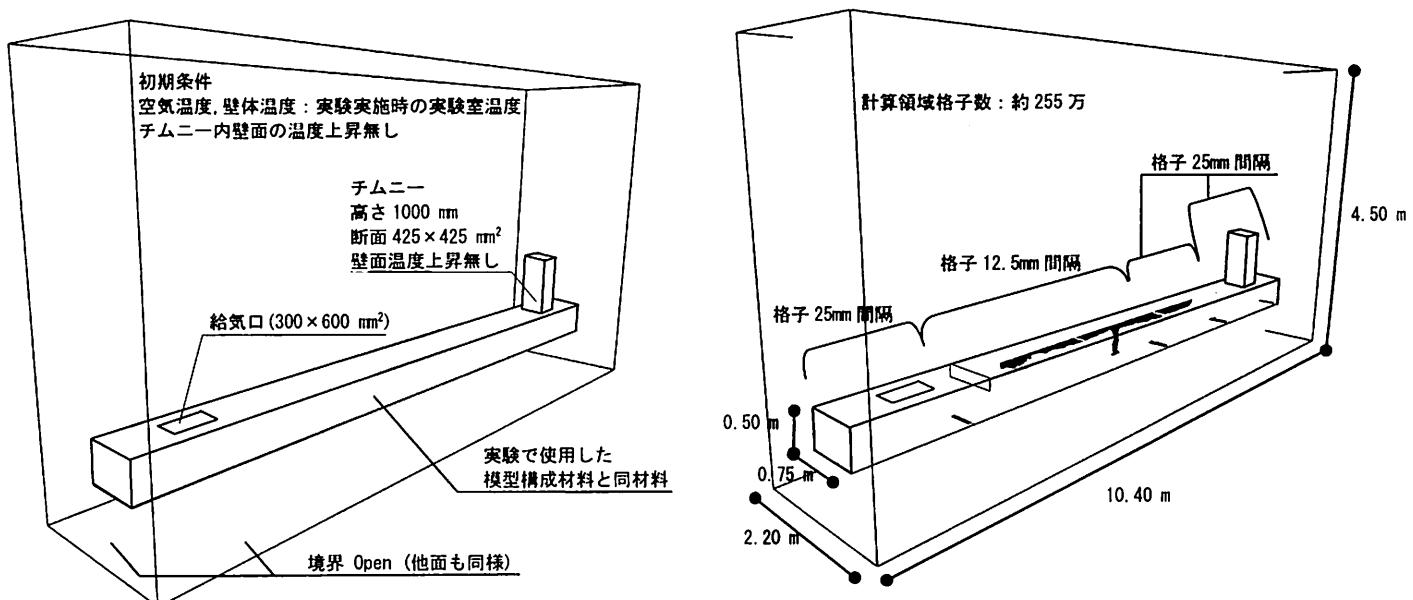


図 2.5.1 計算領域概要

本節で行った実験に使用した模型の概要および熱電対設置位置を図 2.5.3 に示す。

模型実験は、まず火源位置を模型中央 b) として行い、着火直後に天井下を伝播する煙層先端部位の時間変化を 煙流動の可視化記録 および 天井下に 250mm 間隔で設置した熱電対の温度上昇により判断した(垂れ壁高さ H' は 150mm、垂れ壁下通路幅 W' は 750mm とした)。次に 火源位置を a) として実験を行い、火源 - 垂れ壁間の煙層高さ、温度を計測した($H' = 400\text{mm}$, $W' = 750\text{mm}$)。なお、火源は 図 2.5.2 に示す 4 種類を設定し、それぞれ実験を行った(実験の詳細は第 4 章で記載する)。

模型実験結果と FDS による計算結果の比較を次頁以降に示す。

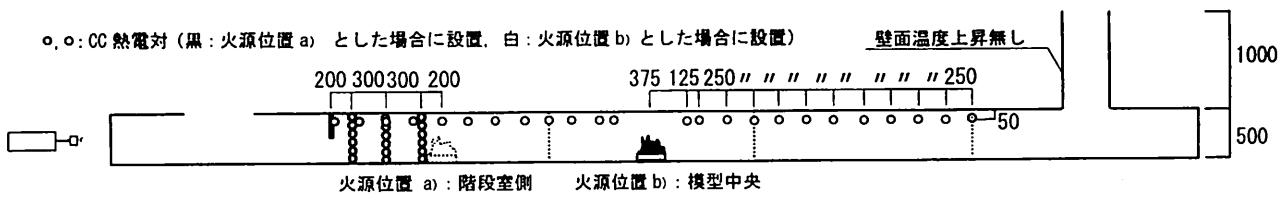


図 2.5.3 模型概要(単位: mm)(模型実験の詳細は第 4 章で記載する)

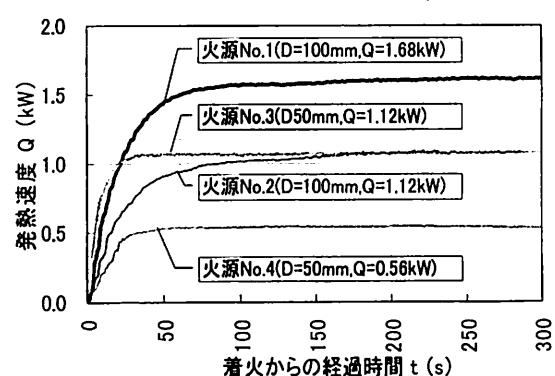


図 2.5.2 火源の発熱速度の時系列変化
(図 2.3.17 (40 頁) の再掲)

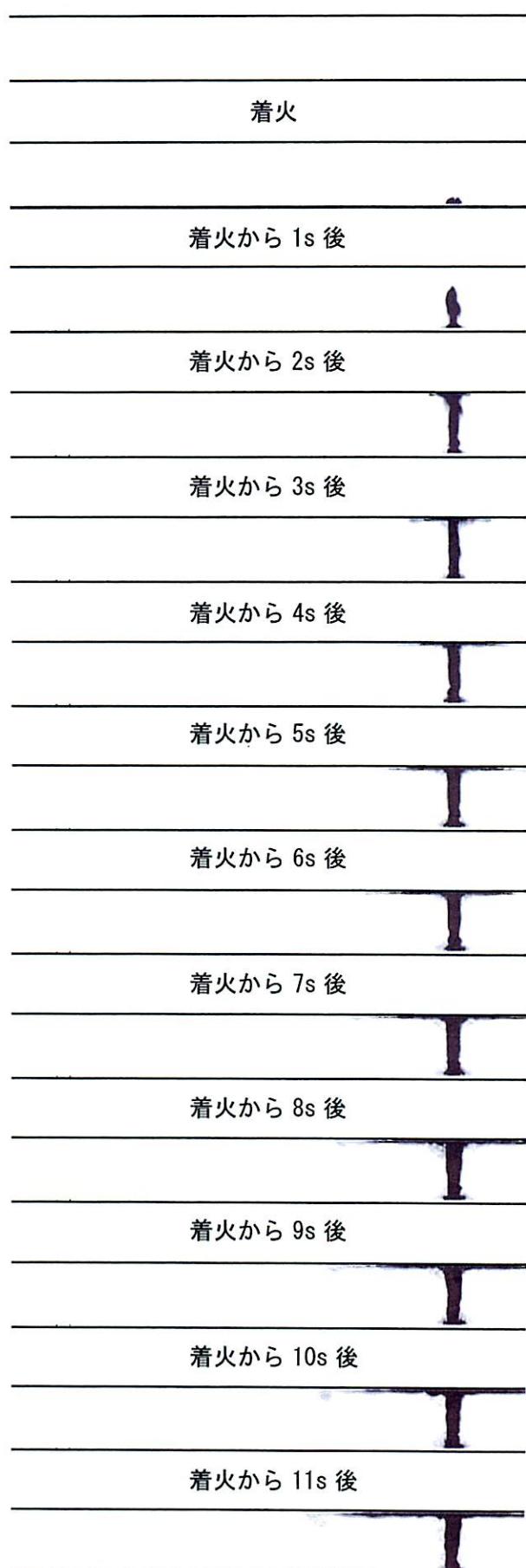
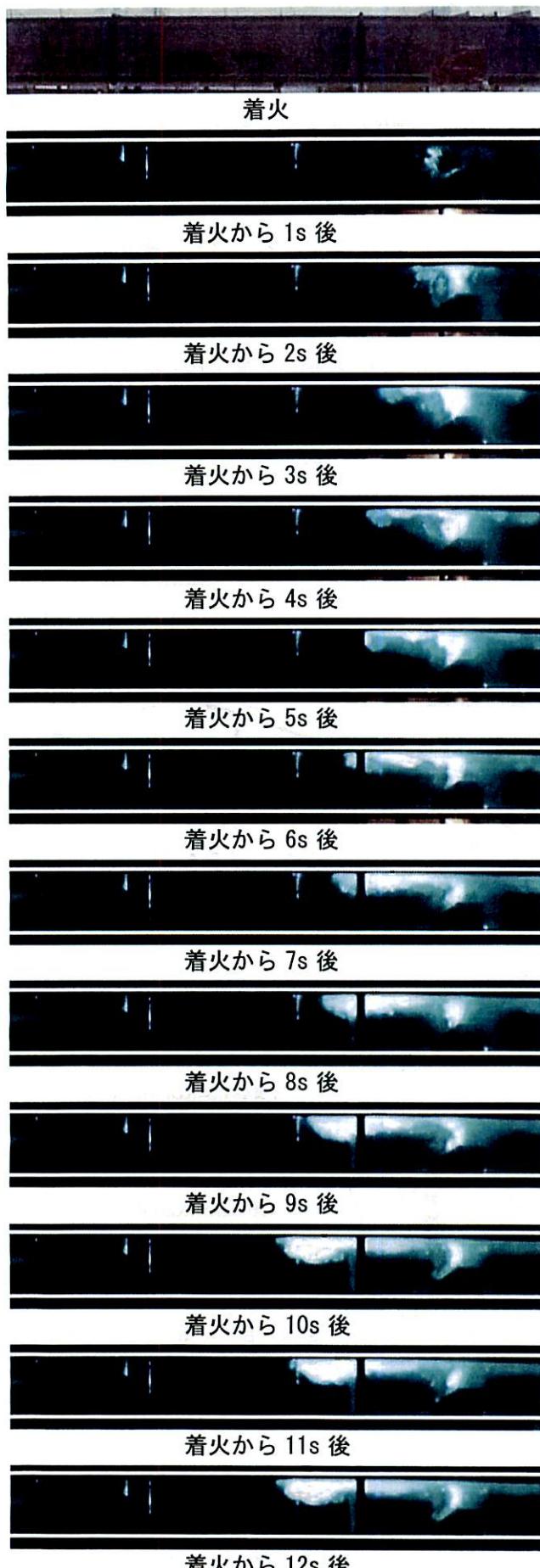


図 2.5.4 (1) 実験の可視化記録（左）と FDS による計算結果（右）の比較
(火源位置：模型中央, 火源 No.1 (F.S. 3MW), 垂れ壁高さ 150mm, 垂れ壁下通路幅 750mm)

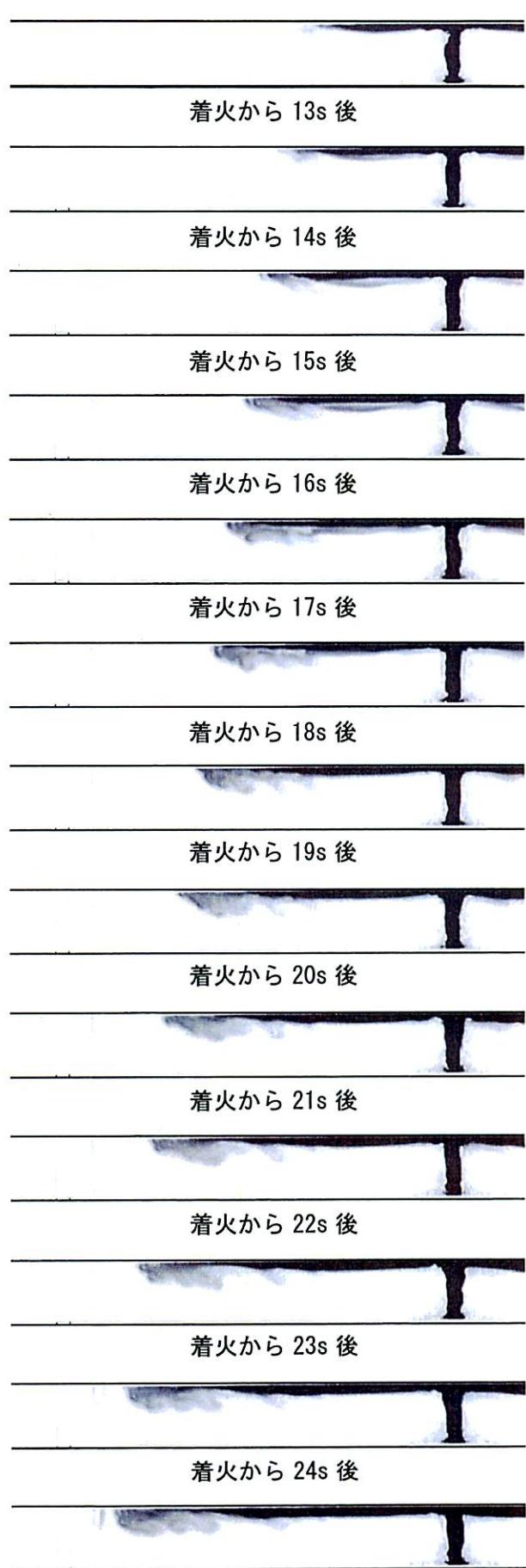
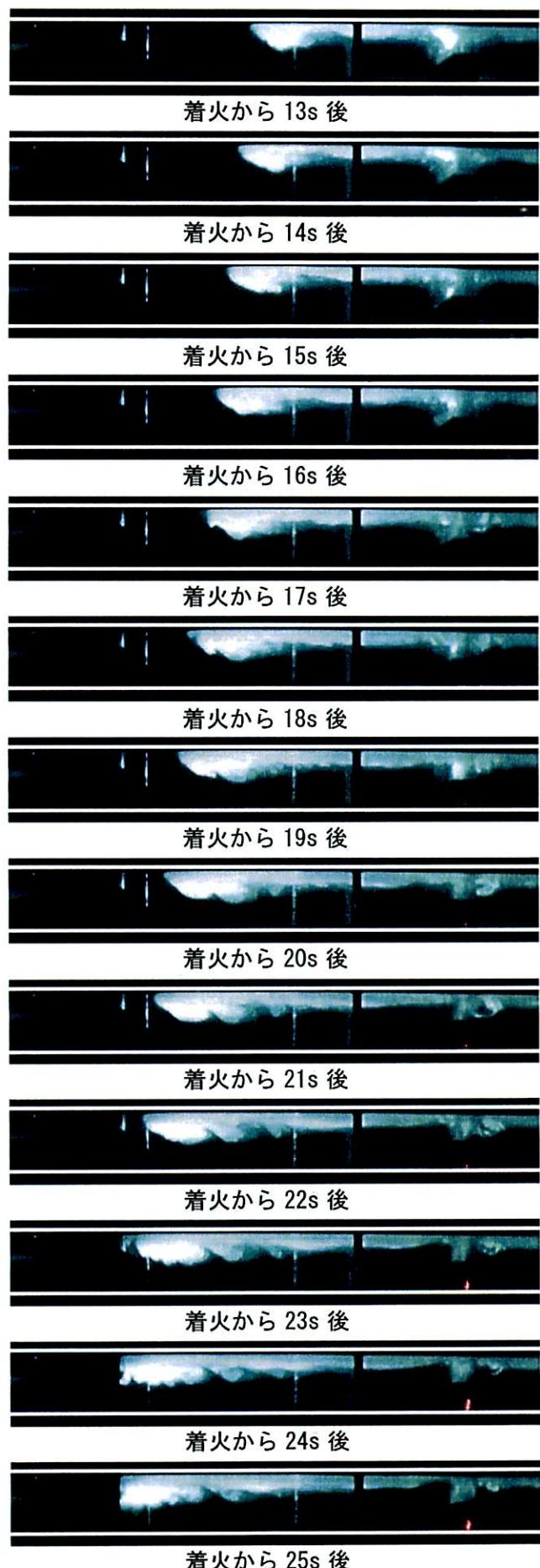


図 2.5.4 (2) 実験の可視化記録（左）と FDS による計算結果（右）の比較
(火源位置：模型中央, 火源 No. 1 (F. S. 3MW), 垂れ壁高さ 150mm, 垂れ壁下通路幅 750mm)

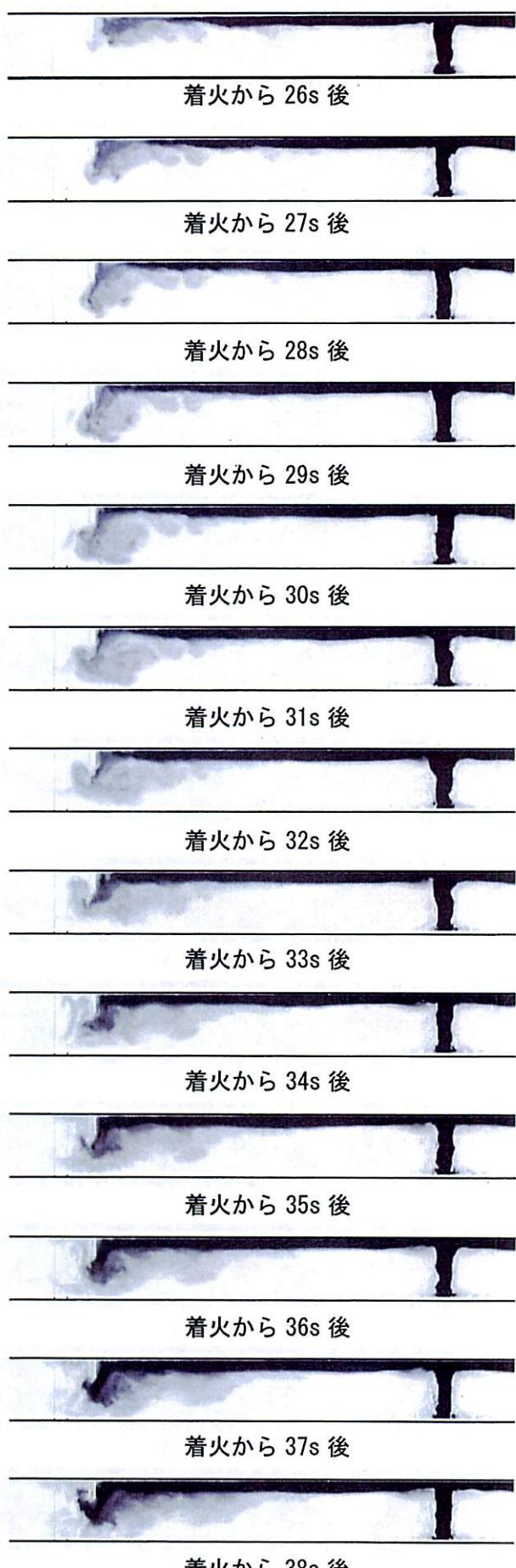
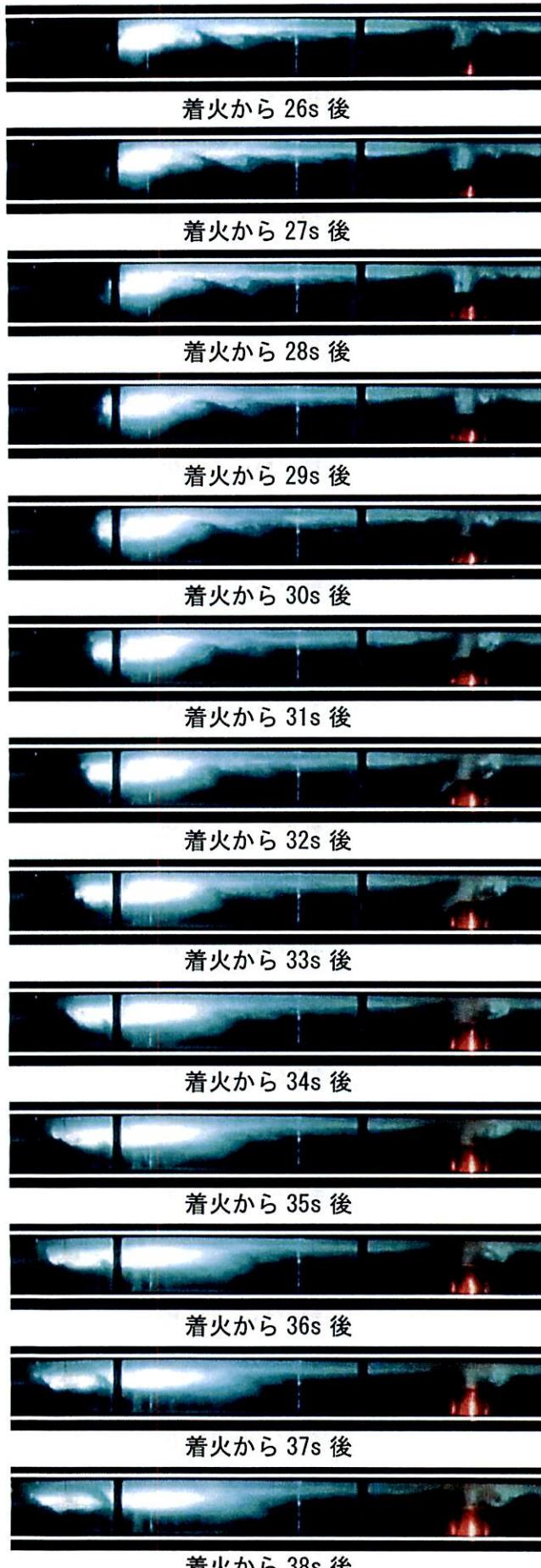


図 2.5.4 (3) 実験の可視化記録（左）と FDS による計算結果（右）の比較
(火源位置：模型中央, 火源 No. 1 (F. S. 3MW), 垂れ壁高さ 150mm, 垂れ壁下通路幅 750mm)

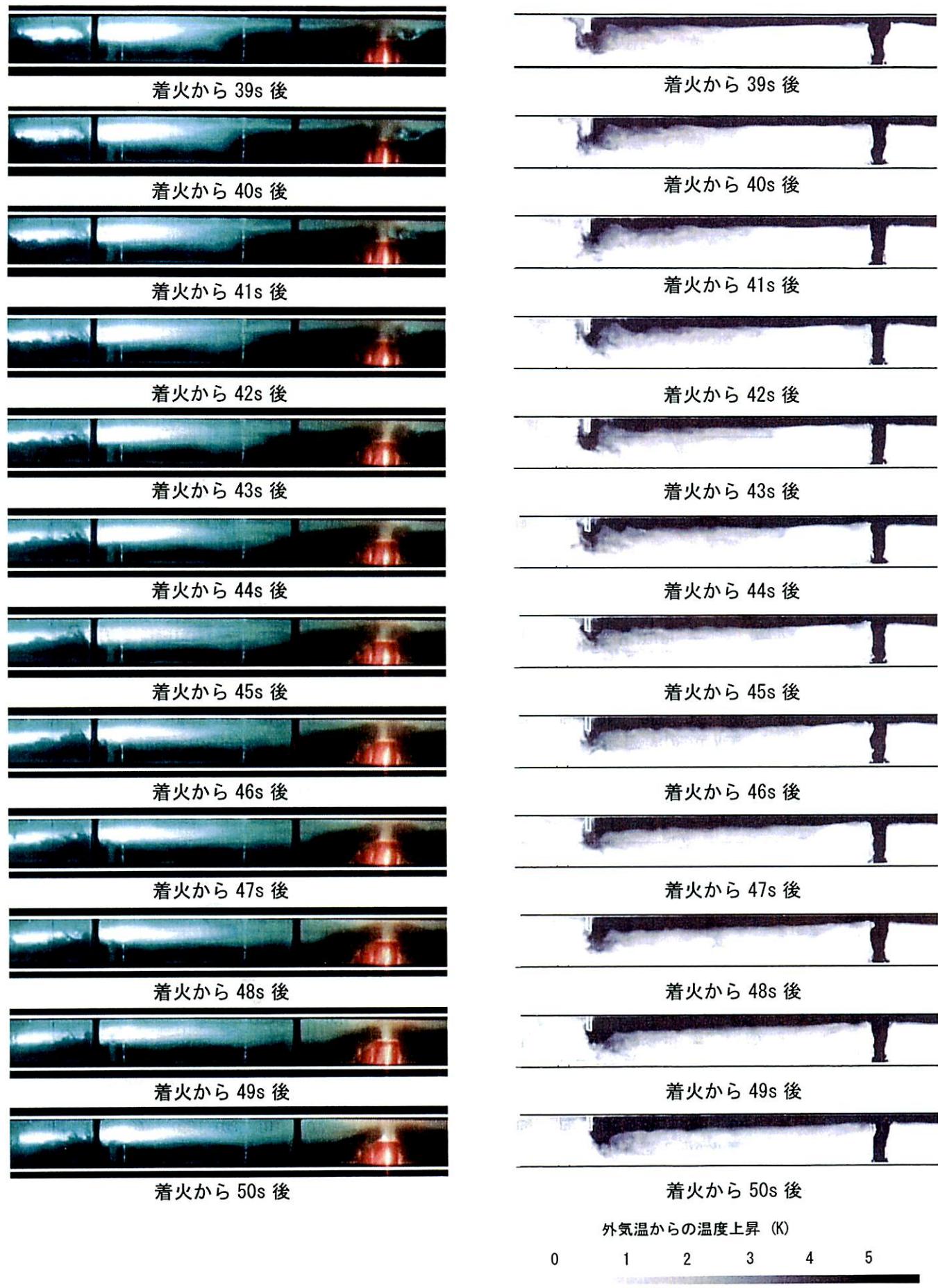
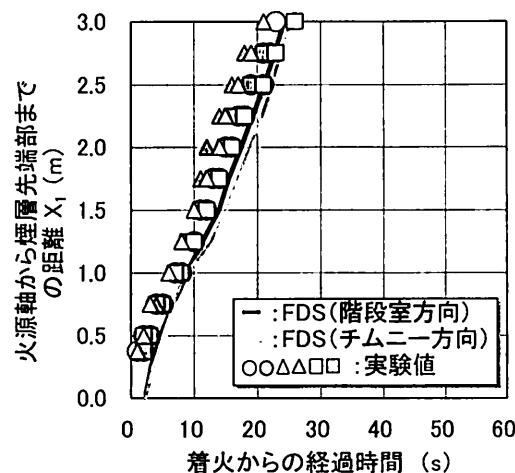


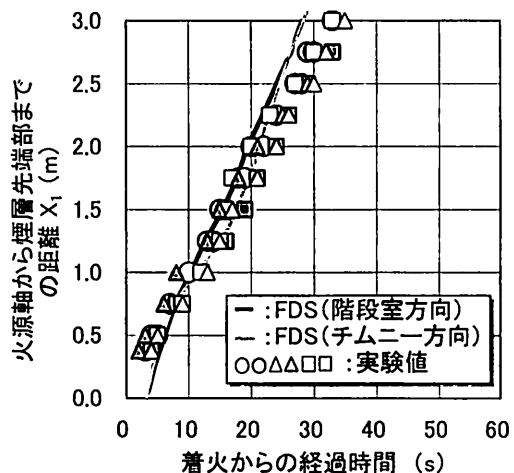
図 2.5.4 (4) 実験の可視化記録（左）と FDS による計算結果（右）の比較
(火源位置：模型中央, 火源 No. 1 (F. S. 3MW), 垂れ壁高さ 150mm, 垂れ壁下通路幅 750mm)

図 2.5.4 は火源位置を模型中央 b) として 火源条件を火源 No. 1 とした場合の実験の可視化記録と FDS による計算結果を比較したものであるが（図では、模型内部の 火源より左側の空間（垂れ壁側）を表示している）、これを見ると FDS による計算結果は、煙層先端部が垂れ壁到達後 数十秒経過した時点での垂れ壁近傍での煙層厚さが若干大きくなっているものの、それ以外の煙の挙動は 良く実験結果を再現できていると言える。特に、煙層先端部移動速度、先端部（head）の形状、ブルームが天井に到達直後 流れの状態が水力学で言う射流から常流へ変化する際に現れる跳水の位置および形状は ほぼ実験の可視化記録と一致している。また、煙層先端部が垂れ壁到達直後の垂れ壁近傍での煙層降下、垂れ壁を越えて階段室に煙が流入する様子、垂れ壁到達後に下側に押し出された煙の一部が火源方向に戻っていく様子も実験結果を良く再現できている。

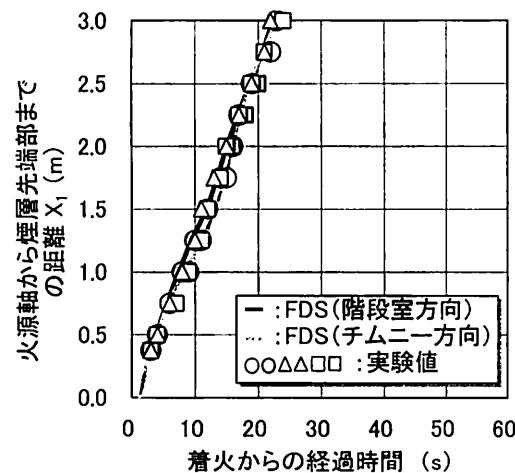
なお、模型実験および計算は、火源に火源 No. 2~4 を設定した場合についても行っているが（可視化実験は行っていない）、いずれの火源を設定した場合にも煙層先端部移動速度の計算結果は実験結果と良く一致した（図 2.5.5）。



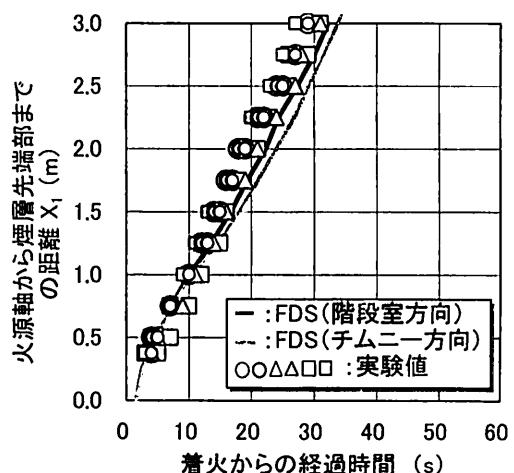
(a) 火源 No. 1 ($Q=1.68\text{kW}$: F. S. 3MW, D=100mm)



(b) 火源 No. 2 ($Q=1.12\text{kW}$: F. S. 2MW, D=100mm)



(c) 火源 No. 3 ($Q=1.12\text{kW}$: F. S. 2MW, D=50mm)



(d) 火源 No. 4 ($Q=0.56\text{kW}$: F. S. 1MW, D=50mm)

図 2.5.5 煙層先端部位置の時間変化の実験結果（プロット）と FDS による計算結果（実線）の比較

次に、火源位置を階段室側 a) とした場合の実験結果と計算結果の比較を行う。図 2.5.6 に可視化画像の比較（火源 No. 1 のみ）を、図 2.5.7～図 2.5.10 に 火源 No. 1～4 とした場合の 火源－垂れ壁間の煙層温度の比較を示す。

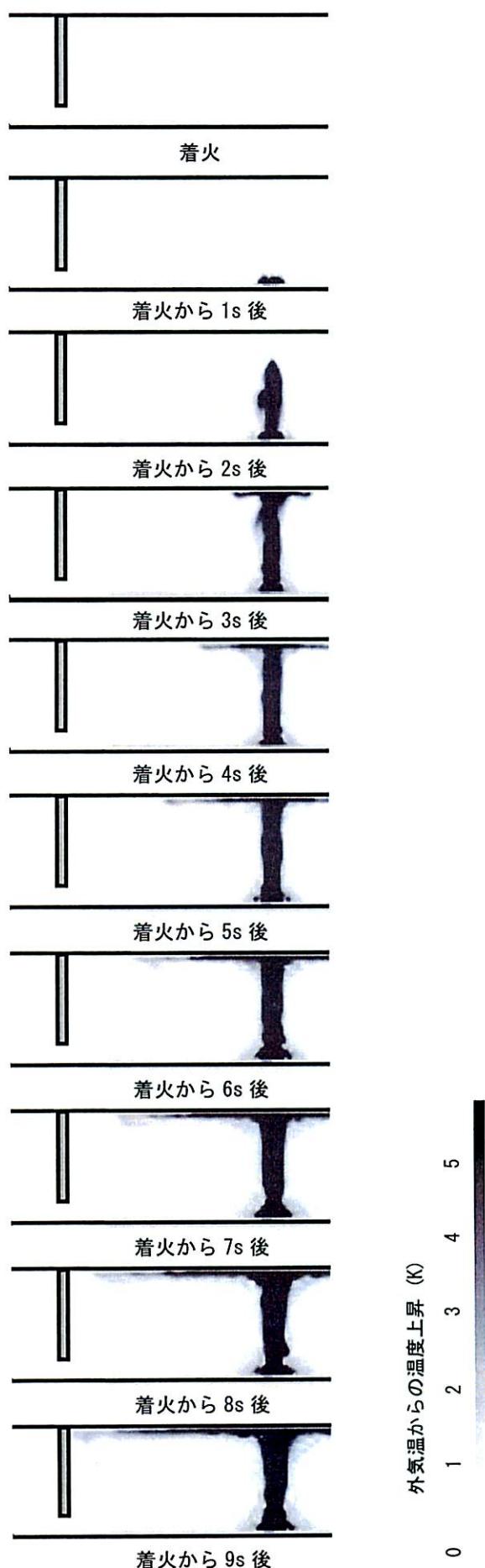
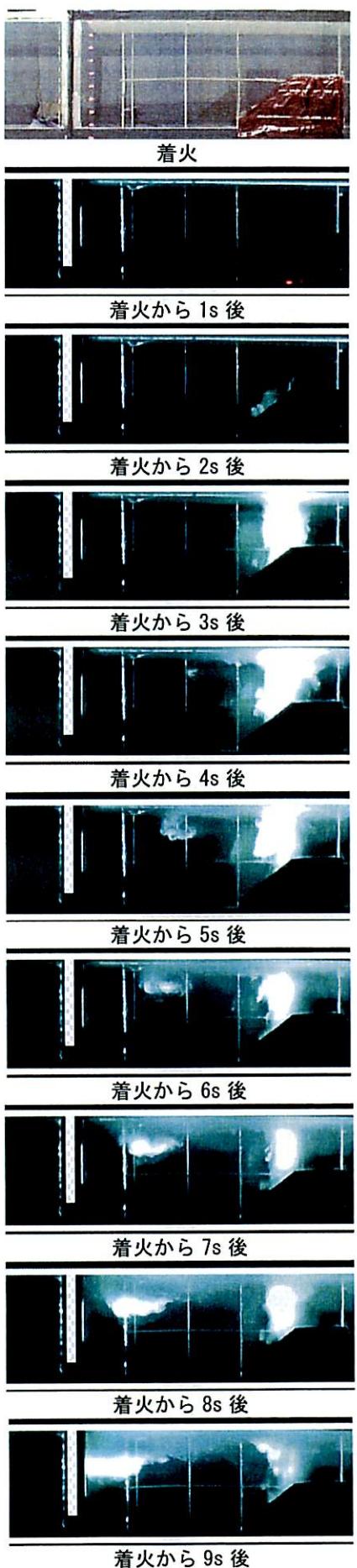


図 2.5.6 (1) 実験の可視化記録（左）と FDS による計算結果（右）の比較
(火源位置：階段室近傍、火源 No.1 (F.S. 3MW)，垂れ壁高さ 400mm, 垂れ壁下通路幅 750mm)

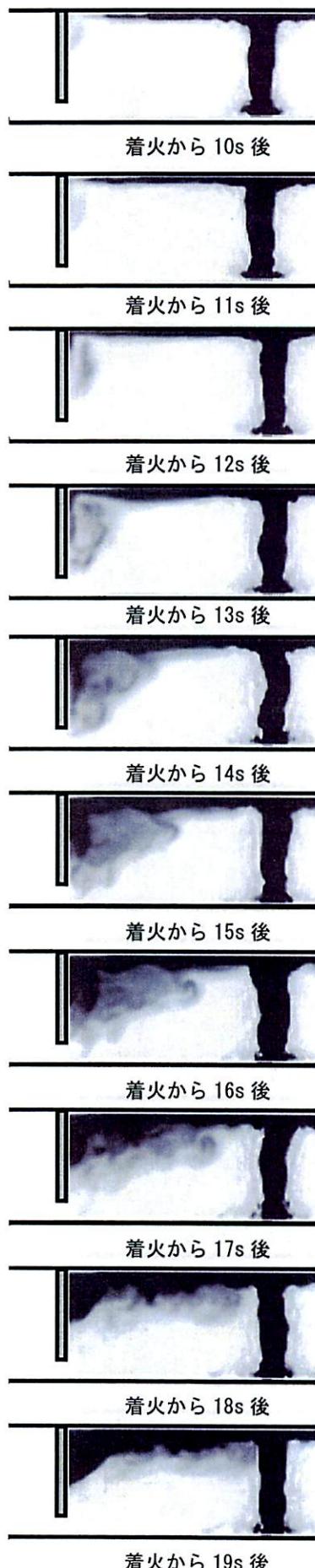
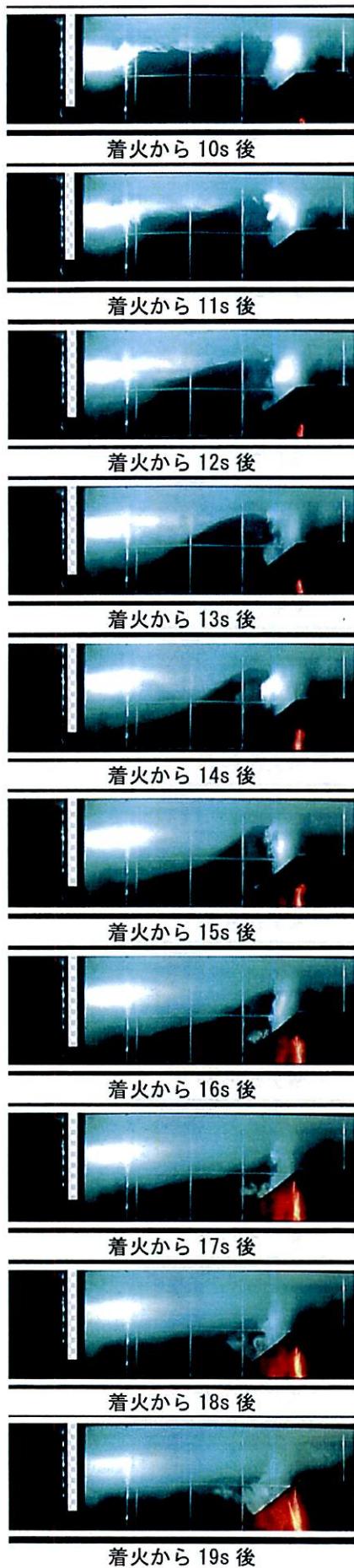


図 2.5.6 (2) 実験の可視化記録（左）と FDS による計算結果（右）の比較
(火源位置：階段室近傍, 火源 No. 1 (F. S. 3MW), 垂れ壁高さ 400mm, 垂れ壁下通路幅 750mm)

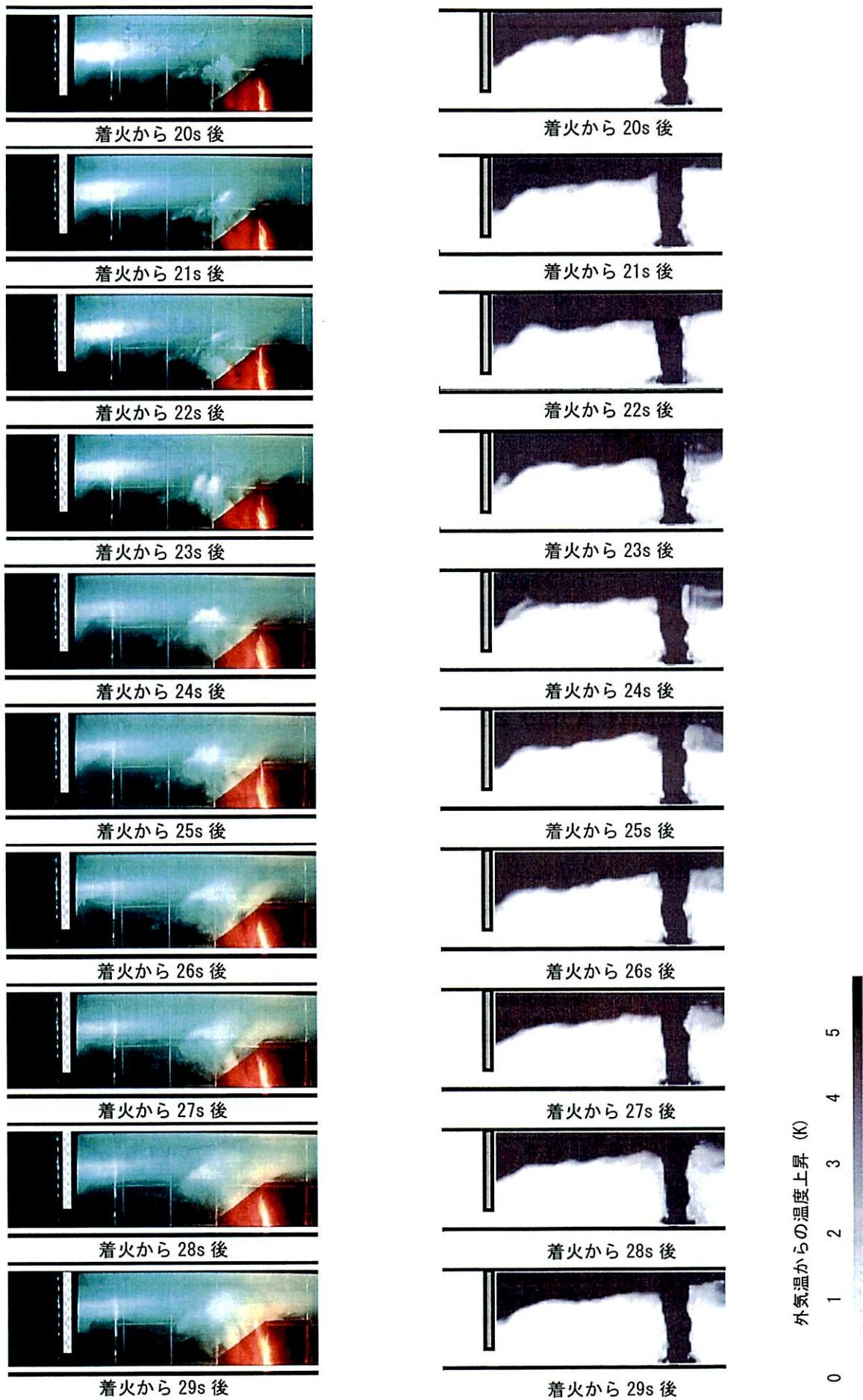


図 2.5.6 (3) 実験の可視化記録（左）と FDS による計算結果（右）の比較
(火源位置：階段室近傍、火源 No.1 (F. S. 3MW)、垂れ壁高さ 400mm、垂れ壁下通路幅 750mm)

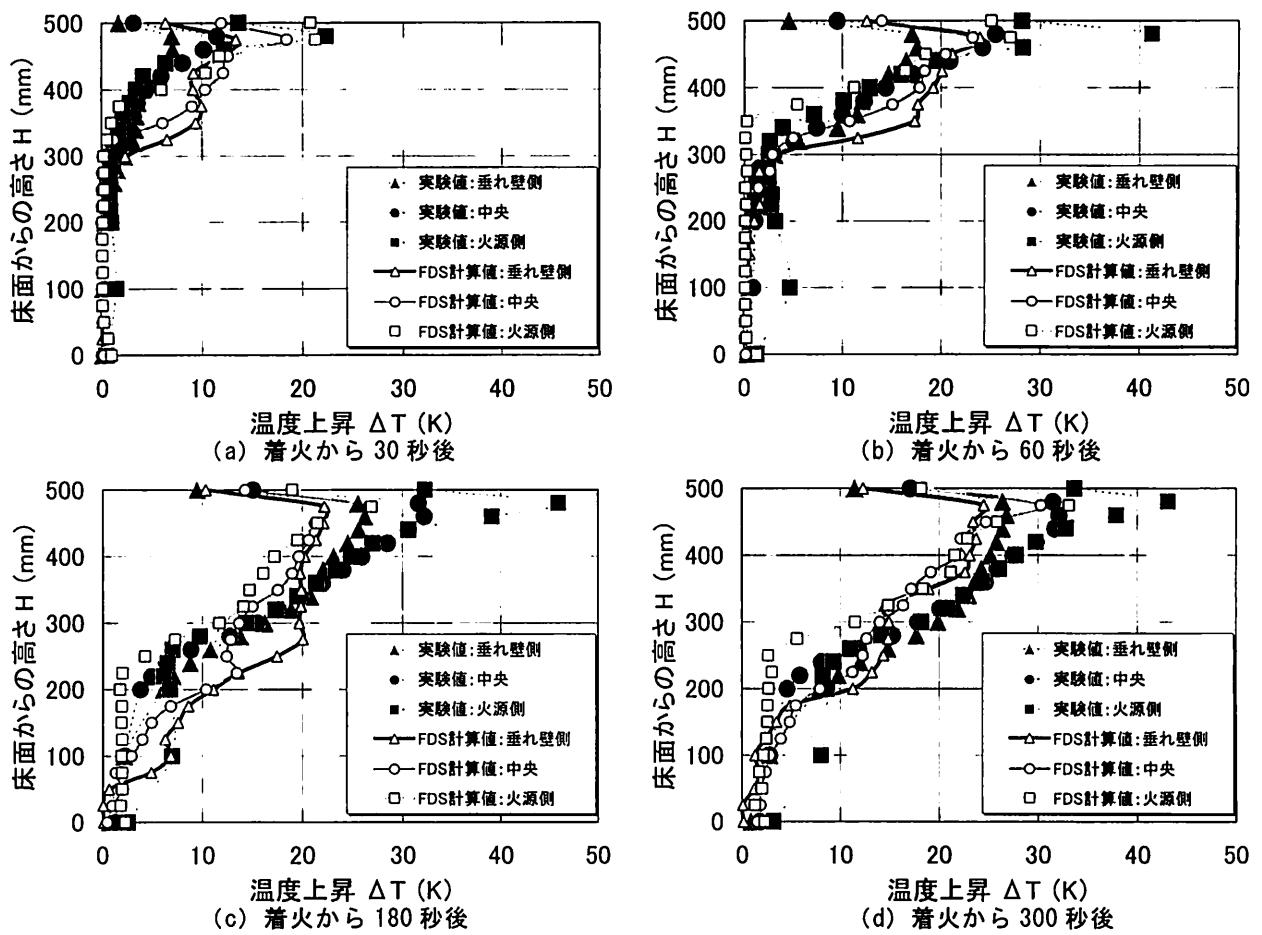


図 2.5.7 煙層温度の計算結果 (FDS) と実験結果の比較 (火源位置: 階段室近傍, 火源 No. 1 (F. S. 3MW))

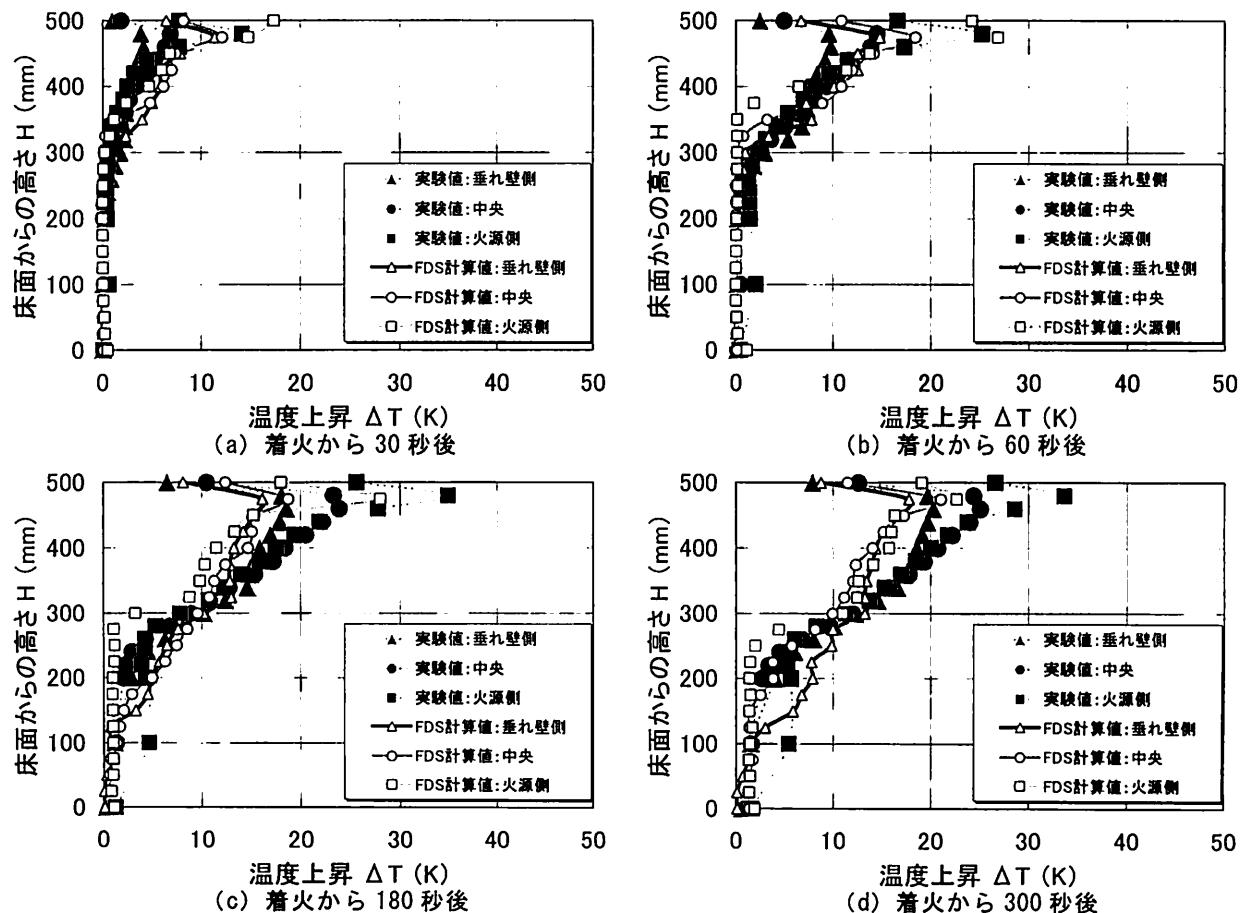


図 2.5.8 煙層温度の計算結果 (FDS) と実験結果の比較 (火源位置: 階段室近傍, 火源 No. 2 (F. S. 2MW))

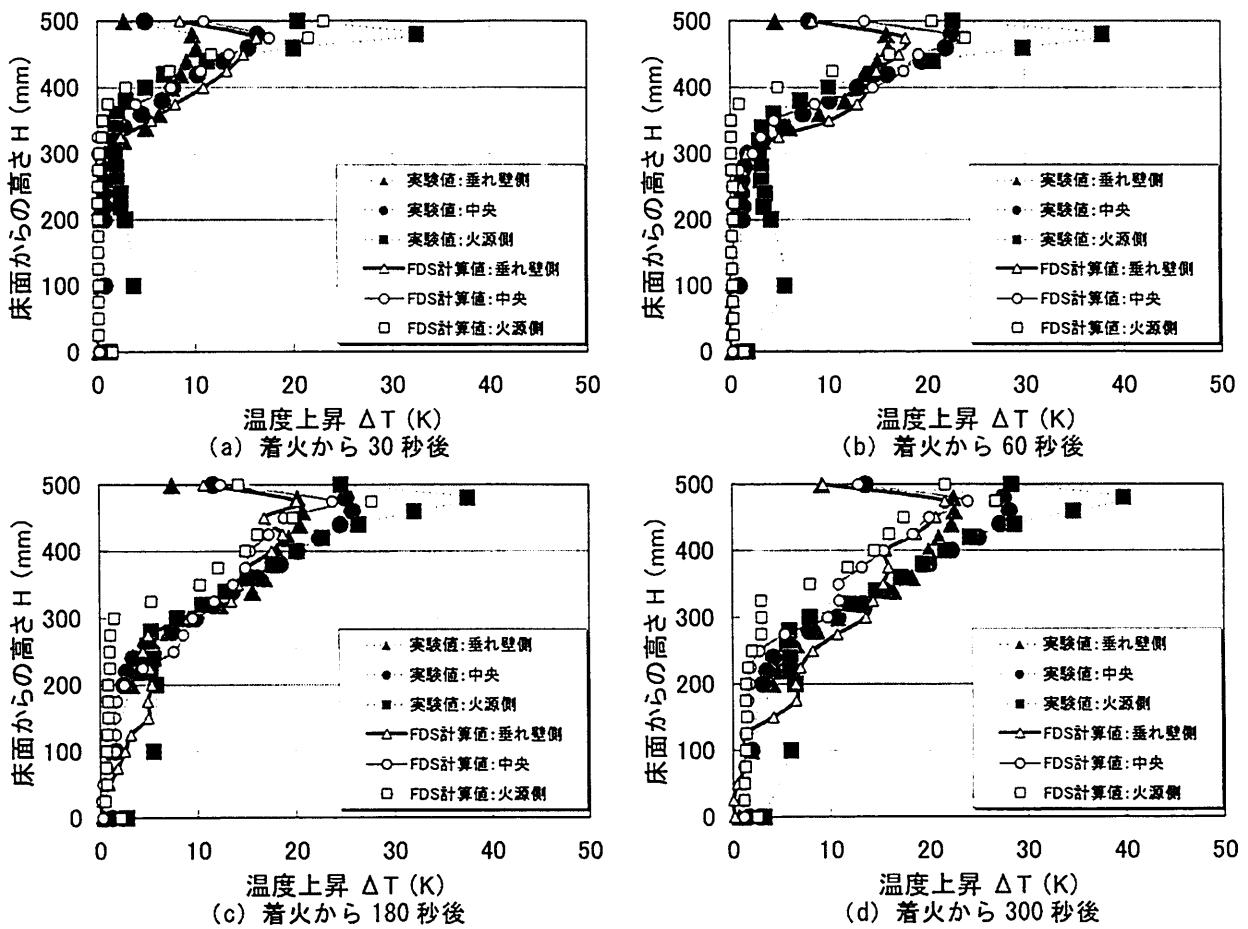


図 2.5.9 煙層温度の計算結果 (FDS) と実験結果の比較 (火源位置 : 階段室近傍, 火源 No. 3 (F. S. 2MW))

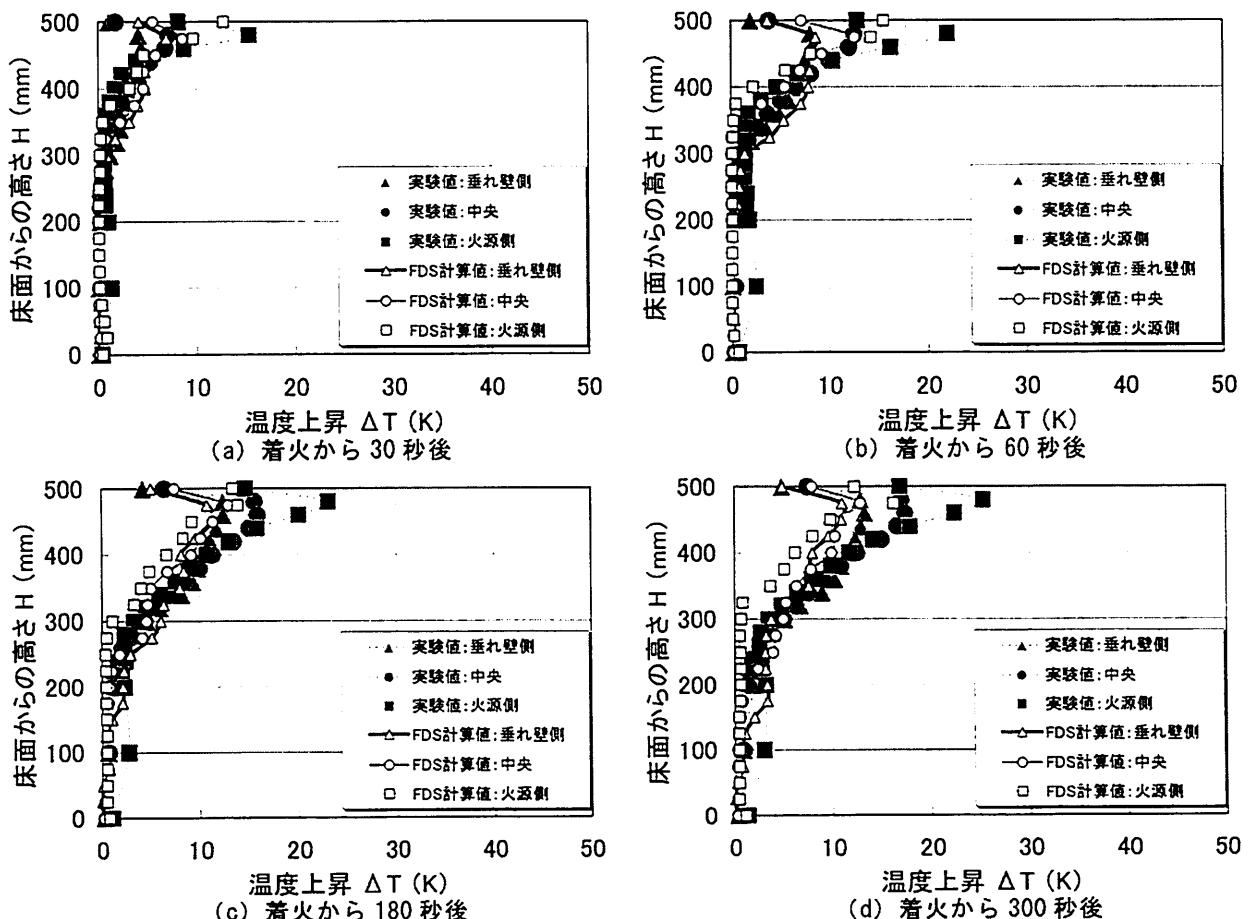


図 2.5.10 煙層温度の計算結果 (FDS) と実験結果の比較 (火源位置 : 階段室近傍, 火源 No. 4 (F. S. 1MW))

図 2.5.6 に示す可視化画像から、煙層先端部が垂れ壁到達直後の煙層降下の様子 および 下方に押し出された煙が火源方向に戻る現象は、FDS は良く再現できていることが分かる。ただし、図 2.5.7(a)の煙層温度の比較から分かるように、FDS による計算結果は 煙層先端部が垂れ壁到達直後に下方に押し出された煙の温度が模型実験結果よりもかなり高く、それにより、下方に押し出された煙は すぐに浮上し、結果として実験結果よりも煙層厚さが薄くなっている（図 2.5.6）。ただし、ある程度時間が経過した以降は、煙層温度の計算結果は実験結果と近くなっている（図 2.5.7(b)～(d)）。なお、火源に 火源 No.2 を設定した場合に関しては 火源 No.1 の場合と同様のことが言えるが（図 2.5.8）、火源 No.3, No.4 の場合には、煙層先端部が垂れ壁到達直後の垂れ壁近傍での煙層高さおよび煙層温度の計算結果も実験結果と比較的良く一致している（図 2.5.9, 図 2.5.10）。

以上より、全体的に見れば FDS による予測は実験結果を良く再現できていると言えるが、一部 計算結果と実験結果が合わないところ（煙層先端部が垂れ壁到達直後に下方に押し出された煙の温度、垂れ壁近傍の煙層厚さ等）もあり、このため 本研究の目的の 1 つでもある 非定常状態における遮煙条件（火災時に階段室手前で遮煙を行うにあたって必要な最小の垂れ壁高さの決定等）の導出の手段として FDS を用いることは現状では難しいと言える。なお、差分方法、各種パラメータ等のチューニングを行うことで、現状よりも さらに計算結果と実験結果を一致させることは可能であると思われるが、そこで設定した各種パラメータの汎用性にも結局のところ制限が生じる。このため、CFD は、実験では計測が困難である 煙層内部の流速分布、垂れ壁前後での圧力差分布等を把握するにあたっては有効なツールとなり得るもの、CFD による検討を行う際には 常に計算結果と実験結果を照し合せる必要があると言える。これにより、CFD による 詳細な煙流動性状の把握は今後の課題とし、次章以降では パッシブセイフティシステムを採用した地下鉄駅舎内部における火災時の煙流動性状に関する豊富なデータを得ることを目的の 1 つとして 数多くの模型実験を行い、また、実験により遮煙条件を把握することとする。

加えて、着火直後の天井下煙伝播性状、煙層先端部が垂れ壁到達後の垂れ壁近傍での煙流動性状に関して それぞれ定式化を行い、これらの煙流動モデルを用いることで、計算からも遮煙条件を導出できるようにする。

2.6. 本章のまとめ

本論文第 4 章では、パッシブセイフティシステムを採用した地下鉄駅舎において、火災時に避難経路の安全性を確保するために満たすべき駅舎内部での条件を把握することを目的とした模型実験を行うが、本章では その際の実験条件を決定するにあたり必要となる 煙流動性状に関する基礎的な知見を得ることを目的として、相似則に基づく模型実験を行い、各種パラメータの変化が煙流動性状に与える影響について考察した（一部 CFD による検討も行った）。この結果、以下の知見を得た。

- ・ 模型パターン I においては、用意した 6 つのチムニーのうち 細気口面積と等しい断面積である 425mm 角で 高さが 500mm のチムニーが最も火災時の排煙量が多いことを確認したが、ヒータ設置方向（実設計に対応させれば、これは駅舎が建設される方向（南北方向、東西方向等）にあたる）や給気口面積、位置、数等が変化した場合には最適なチムニー寸法も変化すると考えられるため、実際に設計を行う際には十分検討する必要がある。
- ・ 垂れ壁高さおよび垂れ壁下通路幅を現実的な範囲内で段階的に変化させて実験を行った結果、火災時に階段室への煙の進入を防ぎ、システムを有効に働かせることができる設計条件が存在することを確認した。

- CFDによる模型実験の再現を試みた結果、準定常状態での煙層高さ、垂れ壁近傍の煙層温度、給気口中心風速の計算結果と実験結果は比較的良好一致した。また、遮煙成否の境界となる垂れ壁高さ、垂れ壁下通路幅も実験結果と一致しており、CFDは本システムが火災時に上手く機能するか否かを検討する際に有効なツールと成り得ることを確認した。ただし、着火直後の非定常煙流動性状等、一部計算結果と実験結果が合わない部分もあることから、より詳細な検討を行うにあたっては 差分方法や各種パラメータのチューニングが必要となる。
- 基礎的煙流動性状を把握するために行つた模型パターン I と 2 方向避難が可能な計画である模型パターン II～IVの実験結果を、それぞれ階段室－火災室間での遮煙の観点から有利に働く点と不利に働く点を挙げた上で比較した。これにより、階段室が複数になることで、1つの階段室からの給気量の確保が難しくなり、遮煙に対して不利に働くことを確認した。
- 火災時には煙がチムニーに流入することにより、模型内に より大きい気流が形成されるために、階段室－火災室間での遮煙に対して有利に働く。しかし、火災発生直後 煙がチムニーに流入する前の段階で階段室に多量の煙が流入し、火災室→階段室→外気となる流れが形成された場合には、このことが原因として 煙がチムニーに流入後も遮煙を行うことが難しくなる可能性がある。非常に高いチムニーを設置した場合や火源位置がチムニーに近い場合などには、火災発生直後に階段室に煙が流入した場合でも、ある程度時間が経過した後には遮煙が行われる可能性はあるが、少なくとも本章で扱った実験条件では、初期に階段室に多量の煙が流入したにも関わらず 後に遮煙が行われたケースは確認できなかった。

このことから、パッシブセイフティシステムを採用した駅舎において、火災時に確実に階段室の安全性を確保するためには、火災発生後チムニーに煙が流入する前の段階で階段室への煙の進入を防ぐ必要があり、また、この時の遮煙条件を把握することが重要であると言える。

次章以降では、循環動力 F (あるいは模型内気流)、垂れ壁高さ、垂れ壁下通路幅の組合せによる遮煙成否の境界となる条件(遮煙条件)を把握することを目的として分析を行う。

具体的には、着火直後の垂れ壁近傍の非定常煙流動性状に注目した より詳細な実験を行い、実験から遮煙条件を把握する。加えて、横長空間における火災発生直後の煙流動性状に関してモデル化を行い、これを用いて 計算から遮煙条件を導出できるようにする。また、実験結果と煙流動モデルによる計算結果を比較し、必要に応じてモデルの調整を行う。

注 2-1) 模型構成材料が相似則に従わぬことによる影響

実大駅舎の天井、側壁、床がコンクリート打放し仕上げであるとすると、1/20 スケール模型を構成する区画材料は、式(2.2.26)の相似則に従えば、杉(含水率 0%)等とする必要がある。なお、1/20 スケール模型構成材料をアクリル板とした場合、実スケールでの材料の熱特性 $\lambda_w \rho_w c_w$ は $31.30 \text{ (kW}^2 \cdot \text{s/m}^4 \text{K}^2)$ となり、これは概ねカーボン煉瓦に相当する(表 2.2.1)。これより、2.3.1.節で記載した材料から構成される模型を用いて実験を行つた場合、模型内の任意の点における煙層温度は、模型構成材料に杉(含水率 0%)を用いた場合と比較して若干低くなると予想される。

なお、ここでは、具体的に模型構成材料の差によってどの程度の温度差が生じるのかを検討するために、2.4.2.(3)節で記載した計算条件で、実験 No.1 の条件に対して模型構成材料のみを変更してそれ計算を行つた。図 2.3.4(1) に示す B～E 点における着火後 4～5 分、14～15 分、29～30 分の平均温度

上昇垂直分布の計算結果を図 2. a に示す。

垂れ壁近傍 B 点の垂直温度分布を見ると、煙層高さは両者でほぼ一致しているものの、煙層温度には着火後 4~5 分では最大 4.8 K、着火後 14~15 分では最大 7.0 K、着火後 29~30 分では最大 4.5 K の差があることが分かる。また、火源から見てチムニー方向の C~E 点での計算結果を見ると、区画構成材料の違いによる煙層内での温度上昇の差が B 点での差ほどは大きくないが、区画構成材料として杉（含水率 0%）を設定した場合の煙層内での温度上昇値（白丸）は、区画構成材料に 2.3.1. 節で記載した材料（実験に使用した模型の構成材料）を設定した場合における温度上昇値（黒丸）の 1.1~1.2 倍程度となっていることが分かる。なお、C~E 点においても、区画構成材料が異なる場合での煙層高さは概ね等しいことが分かる。

- 区画構成材料として本論文第2章に記載した材料（実験に使用した模型の構成材料）を設定した際の計算結果
- 区画構成材料として杉（含水率0%）を設定した際の計算結果

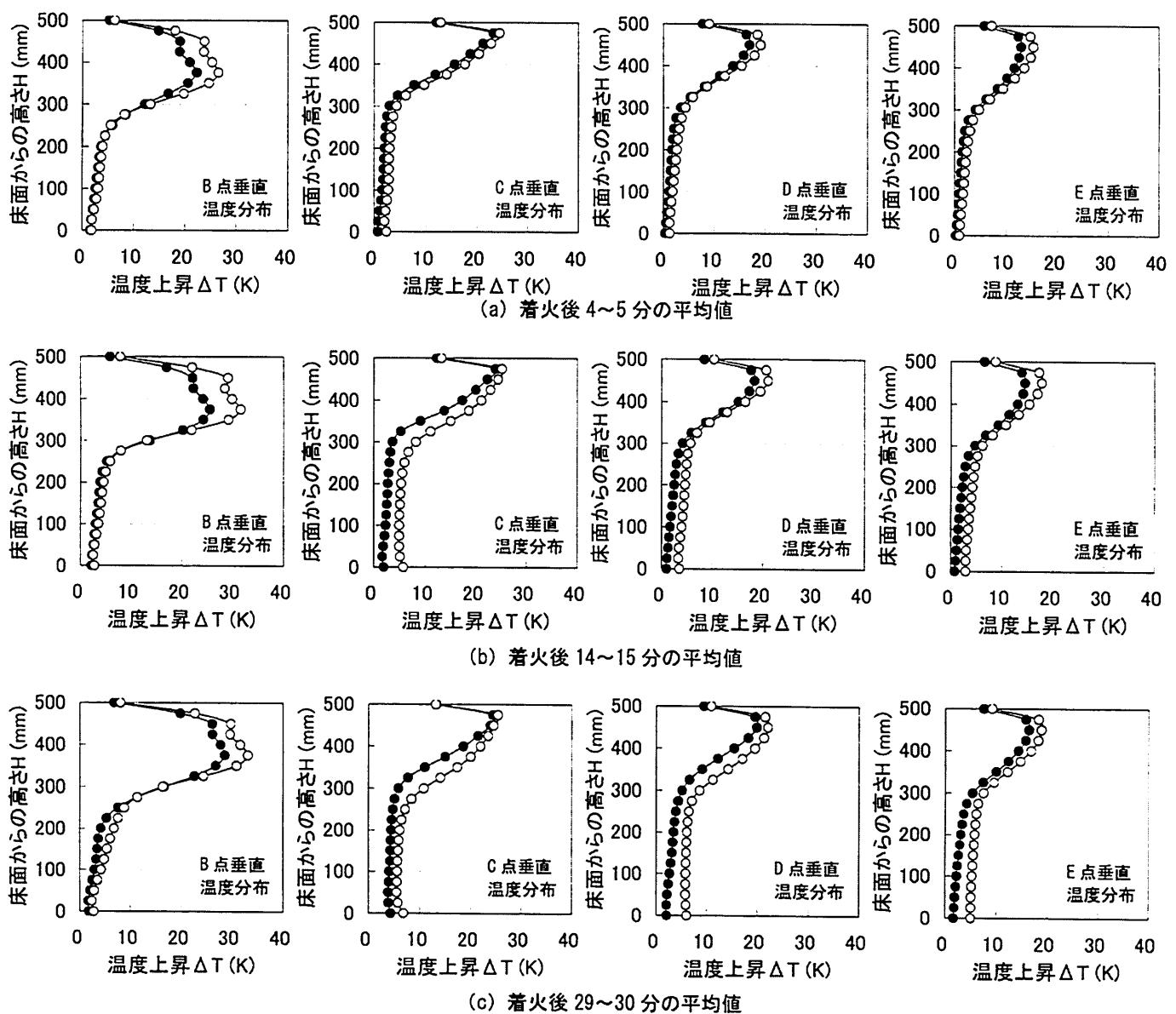


図 2. a 模型構成材料の違いによる煙層温度の差

第 3 章

火災初期における非定常煙流動性状の定式化

— 天井下煙伝播性状および垂れ壁到達後の煙流動性状予測 —

3.1. はじめに

本論文第4章では、地下鉄駅舎における火災時の非定常煙流動に注目したより詳細な模型実験を行い、実験から遮煙条件を把握するが、これに先立ち本章では火災初期の天井下煙伝播性状、煙層先端部が垂れ壁到達後の垂れ壁近傍煙流動性状に関してそれぞれ予測モデルを構築する。また、それらの煙流動モデルを用いて、最終的には計算から遮煙条件を導出できるようにすることを本章の目的とする。

3.2. 火災初期の天井下煙伝播モデル

Turnerは文献43で、密度の小さい流体の底部に密度の大きい流体が進入した際の現象(The "lock exchange" problem)に関して水理学的な手法を用いた理論的な考察をまとめている。本章では、火災発生時の天井下煙伝播速度の定式化を行うが、その際には文献43に記載されている理論式(3.2.1.節)を用いることとする。

松下ら²²⁾は水理学で言うところの"密度流"の考えに基づき、横長空間内での煙層先端部移動速度の予測式を提案し(3.2.2.節)、実験結果との比較を行っているが、これは横長区画の上端部から一定温度の煙が一定の速度で流入した場合を想定しており、本研究で扱うような非定常火源は対象としているため、これをそのまま用いることはできない。また、文献22では、煙層先端部移動速度は高さ方向に分布を持つとされているが、この点は進行する層は垂直断面方向に一定速度を持つとするTurnerらの考えとは異なるため本研究では採用しない。ただし、松下らの提案モデルにおける、煙層から壁面への熱損失による煙層温度変化、時間ステップ毎の計算方法等は、本章での予測においてもそのまま適用することができると考える。

以上により、本節では、松下らの提案モデルを横長空間内で火災が発生した際の予測にも対応できるよう一部改良し、また、煙層先端部移動速度の予測に関してはTurnerによってまとめられている理論式を用いることで、火災初期の天井下煙伝播性状を予測する。なお、3.2.1.節にはTurnerによってまとめられている異なる密度の流体の底部に進入する層の先端部移動速度に関する理論的な考察を、3.2.2.節には松下らが提案する煙伝播モデルの概要を記載する。

3.2.1. 開放交換流れ⁴³⁾ (The "lock exchange" problem)

Turnerは文献43で、Benjaminの研究を基に、密度の小さい流体の底部に密度の大きい流体が進入した際の現象に関する理論的な考察をまとめている。この現象の例としては、大気中の暖かい空気の下へ流れ込む冷たい空気の先端部の振る舞いや、河口部のゲートが開けられた際に水の下へ進入する海水の挙動などが挙げられる。すなわち、The "lock exchange" problemとは、図3.2.1(a)に示すように密度が異なる2種類の流体($\rho_1 > \rho_2$)が仕切られている状態で、仕切りを取り払った際の密度 ρ_1 の流体の挙動(図3.2.1(b))を表す。

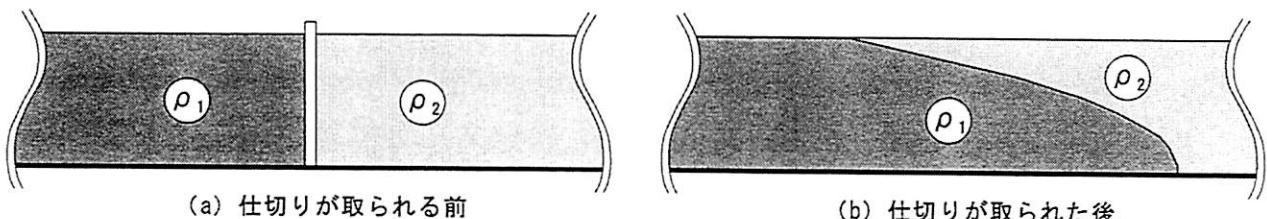


図3.2.1 The "lock exchange" problem

本節ではまず、水平な深さdの閉水路における摩擦のない二次元流れを考えることとする(ここでは、渦み点oを原点とする移動座標を用いる。図3.2.2参照)。

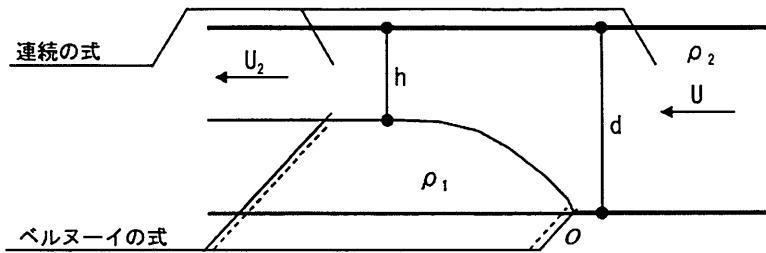


図 3.2.2 摩擦の無い水路の流れ（渓み点 o を原点とする移動座標）

連続の式（式(3.2.1)）と渓み点 o の微少距離前方（後方）および後流部の界面の直上（直下）におけるベルヌーイの式（式(3.2.2), 式(3.2.3)）により、底部を進行する重い層の上方の軽い層の厚さ h および相対的な流速 U_2 を含む 2 つの方程式（式(3.2.1), 式(3.2.4)）が得られる。また、摩擦を考えなければ、“flow force”（単位幅あたりの運動量流束と全圧の合計）は一定であるから、3 つ目の関係式として式(3.2.5)が得られる。

$$Ud = U_2 h \quad \dots \quad (3.2.1)$$

$$\frac{1}{2} \rho_2 U_2^2 + p_i + \rho_2 g(d-h) = p_o \quad \dots \quad (3.2.2)$$

$$p_i + \rho_i g(d-h) = p_o \quad \dots \quad (3.2.3)$$

ただし、 p_i ：後流部界面における圧力、 p_o ：渓み点における圧力

（式(3.2.2) および 式(3.2.3) より p_i , p_o を消去して 式(3.2.4) を得る）

$$\frac{1}{2} \rho_2 U_2^2 = (\rho_i - \rho_2) g(d-h) \quad \dots \quad (3.2.4)$$

$$\frac{1}{2} \rho_i (U^2 d + g'd^2) = \rho_i \left(U_2^2 h + \frac{1}{2} g'h^2 \right) \quad \dots \quad (3.2.5)$$

これらの式から、Benjamin は $h=d/2$ となる時に等式が成り立つ以下の式を導き出した。

$$U_2^2 = 2g'(d-h) = \frac{g'(d^2 - h^2)d}{(2d-h)h} \quad \dots \quad (3.2.6)$$

ただし、 $g' = (\rho_i - \rho_2)g/\rho_i$

これにより、唯一の安定したエネルギーが保存される流れは、底部に進入する流れが水路の半分を満たす場合となる。なお、その場合には、近づいてくる流れの内部 Fr 数は臨界値未満となる（式(3.2.7)）。

$$\begin{aligned} U/(g'd)^{\frac{1}{2}} &= 1/2 \Leftrightarrow U/(g'h)^{\frac{1}{2}} = 1/\sqrt{2} \\ \Leftrightarrow 2\rho_i U^2 &= (\rho_i - \rho_2)gh \end{aligned} \quad \dots \quad (3.2.7)$$

また、底部に進入する層の上方を流れる層の内部 Fr 数は臨界値より大きくなる（式(3.2.8)）。

$$U_2/(g'h)^{\frac{1}{2}} = \sqrt{2} \quad \dots \quad (3.2.8)$$

なお、現実ではよくあるように、前進する（進入する）流れが水路全体の深さの $1/2$ よりも浅い時、Benjamin は先端部付近でエネルギー損失があるとしている（なめらかな波列が形成されることによりエ

エネルギーが損失するわけではなく、波列が壊れることにより損失する)。このことは、先端部は層厚の2倍以上の厚みを持ち、先端部後方は乱流域となり、また先端後部では厚さが急激に変化し一樣の後流部へと繋がるというKeuleganによる実験観測とも一致する(図3.2.3参照)。

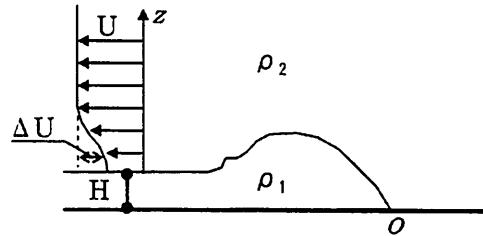


図3.2.3 厚みが非常に大きく密度の小さい流体の底部を進行する層の実際の流れ(灘み点oを原点とする移動座標)

底部に進入する層における力のバランスを考える際には、乱流となる後流(wake)による上層(深い層)の速度変化に伴う抵抗を考慮しなければならない。そうでなければ、進行方向に働く正味の力 $1/2(\rho_1 - \rho_2)gH^2$ はバランスがとれず、安定状態には至らない。ここで、上部流体との混合を無視し、後流(wake)内部での圧力は静水圧であるとすれば、厚さdの上部流体の下を前進する流れ(厚さH)の先端部の移動速度Uを計算することができる。すなわち、灘み点oにおける動圧 $1/2\rho_1U^2$ は後方の界面における静水圧の差 $(\rho_1 - \rho_2)gH$ に等しくなるために、先端部移動速度Uと層厚Hの関係として以下の式が与えられる。

$$\frac{1}{2}\rho_1U^2 = (\rho_1 - \rho_2)gH \Leftrightarrow U = 2^{\frac{1}{2}}(g'H)^{\frac{1}{2}} \quad \dots (3.2.9)$$

しかし、実際には混合領域の発達や灘み点が底面から浮き上がる現象、底面の摩擦の影響があり、問題がより複雑になる。なお、KeuleganとWoodは実験結果から、式(3.2.9)における比例定数 $2^{1/2}$ を1.1に減じた時に実験結果と計算結果がよく合うことを示している。ただし、Keuleganらが行った実験では水路の深さが有限であることには注意が必要である。

なお、層厚 $H=d-h$ であるから、先端部移動速度Uはほぼ H/d に線形に、 $H=d/2$ とした際の $2^{-\frac{1}{2}}(g'H)^{\frac{1}{2}}$ (式(3.2.7)と一致する)から $H/d \rightarrow 0$ とした際の $2^{\frac{1}{2}}(g'H)^{\frac{1}{2}}$ (式(3.2.9)と一致する)の間で変化する。

Benjaminは最終的に先端部移動速度と層厚との関係式として、次式を導いている³¹⁾。

$$U = \sqrt{\frac{(1-n)(2-n)}{(1+n)}} \cdot \sqrt{g'H} \quad \dots (3.2.10)$$

ただし、 $n = H/d$

2.5.節に示した実験の可視化画像から確認できるように、模型実験における煙層の厚さは100mm程度であることから、式(3.2.10)中のn($=H/d$)に $n=0.2$ を代入すると、先端部移動速度Uは $U=1.10(g'H)^{\frac{1}{2}} \Leftrightarrow 0.83\rho_1U^2 = (\rho_1 - \rho_2)gH$ となる。しかし、実際には上述したように灘み点の浮き上がりや底面の摩擦等の問題があり、また煙流動を扱う際には煙層の密度変化も生じるため、問題は更に複雑になることから、ここで導出した定数を用いて算出した先端部移動速度は実験結果と合わない可能性がある。このため、本研究では、模型実験により計測した煙層先端部移動速度と合うように、 $C_1\rho_1U^2 = (\rho_1 - \rho_2)gH$ 中の比例定数 C_1 を決定することとする。

3.2.2. 松下らによる提案モデル²²⁾ の概要

松下ら²²⁾は水理学で言うところの“密度流”的考え方に基づき、横長空間内での煙層先端部移動速度の予測式を提案し、実験結果との比較を行っている。

松下らが提案するモデルは、廊下に接する室で火災が発生し、当該火災室の状態が定常となった後で煙が廊下へ流出したようなケースを想定しており、これは図3.2.4のように、横長空間の上端部から一定温度の煙を一定流量で流入させた場合の煙流動性状を予測するものである。

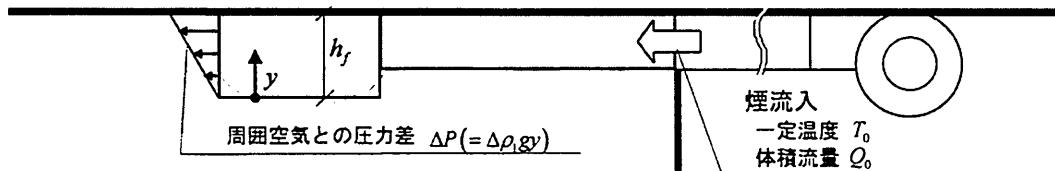


図3.2.4 松下らの提案モデルの概念図

松下らは煙流動性状の予測を行うにあたり、煙層先端部分とそれ以外の後流部分を分けて考え、また、以下に示す仮定a～c)に従い、時間ステップ毎の区画内への煙の体積流入量 Q_0 と先端部移動に伴う体積流量 $Q_f = \int_0^{h_f} u_{s1} dy \cdot B_s$ (式(3.2.14))が等しくなるように先端部厚さ h_f を決定している (式(3.2.15))。

仮定a) 煙層の密度は各時間ステップで一様とする。

仮定b) 煙層先端部における周囲空気との圧力差は密度差のみに依存し、煙層下端からの高さ y における圧力差は次式で表せるものとする。なお、煙層下端高さ($y=0$)における圧力差はゼロとする。

$$\Delta P = \Delta \rho_1 g y \quad \dots \quad (3.2.11)$$

仮定c) 煙層先端部に生じる周囲空気との圧力差 ΔP と煙層先端部移動速度 u_{s1} の関係は近似的に次式で表せるものとする。

$$\frac{1}{2} \rho_{s1} u_{s1}^2 = \Delta P \quad \dots \quad (3.2.12)$$

式(3.2.11)、式(3.2.12)から、煙層先端部における煙層下端からの任意の高さ y での流速は次式となる。

$$u_{s1} = \left(\frac{2\Delta \rho_1 g y}{\rho_{s1}} \right)^{1/2} \quad \dots \quad (3.2.13)$$

$$Q_f = \int_0^{h_f} u_{s1} dy \cdot B_s = \frac{2}{3} B_s \left(\frac{2\Delta \rho_1 g}{\rho_{s1}} \right)^{1/2} h_f^{3/2} \quad \dots \quad (3.2.14)$$

$$h_f = \left(\frac{3}{2} \right)^{2/3} \left(\frac{2\Delta \rho_1 g}{\rho_{s1}} \right)^{-1/3} \left(\frac{Q_0}{B_s} \right)^{2/3} \quad \dots \quad (3.2.15)$$

なお、式(3.2.13)より、煙層先端部移動速度 u_{s1} は高さ方向の分布を持つことになるが、簡易的に先端部移動に伴う体積流量 Q_f (式(3.2.14)) (Q_f は区画内への煙流入量 Q_0 と等しい)を区画の幅 B_s 、先端部厚さ h_f (式(3.2.15))で除した平均移動速度 \bar{u}_{s1} を用いて予測を行っている (式(3.2.16))。

$$\bar{u}_{s1} = \frac{Q_f}{B_s h_f} = \frac{2}{3^{2/3}} \left(\frac{\Delta \rho_1 g Q_0}{\rho_{s1} B_s} \right)^{1/3} \quad \dots \quad (3.2.16)$$

また、モデルでは煙層-壁面間での熱移動 q を $q = \alpha(T_{s1} - T_{w0})$ で考慮し、煙層内の質量収支式、熱収支式から得られる式(3.2.17)を用いて、各時間ステップにおける煙層温度の時間変化を計算している。

$$C_p \rho_{s1} V_{s1} \frac{dT_{s1}}{dt} = C_p \rho_0 Q_0 (T_0 - T_{s1}) - A_{s1} \alpha (T_{s1} - T_{w0}) \quad \cdots (3.2.17)$$

ただし、 C_p ：定圧比熱 ($\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$) , ρ_{s1} ：煙層密度 (kg/m^3) , V_{s1} ：煙層の体積 (m^3) ,
 ρ_0 ：区画内に流入する煙の密度 (kg/m^3) , Q_0 ：区画内に流入する煙の体積流量 (m^3/s) ,
 A_{s1} ：煙層が接している壁面の面積 (m^2) , α ：総合熱伝達率 ($\text{kW}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$) ,
 T_{s1} ：煙層温度 (K) , T_{w0} ：煙層が接している壁面の表面温度 (K)

以上の式を用いて、区画内部への煙の流入条件を境界条件とし、時間ステップ毎に煙層先端部移動速度、速度に微少時間を乗じた値を累積した流入部から煙層先端部までの距離、煙層温度を算出している。

ただし、松下らのモデルは、一定温度、流量の煙が区画内部に流入した場合を対象としているため、横長区画内部で火災が発生した場合のように火源が非定常の場合には、時間ステップ毎に後流部の厚さ変化が生じ、必ずしも煙層後流部へのブルームからの流入量と先端部での流量が等しくはならないと予想される（また、この場合、煙層内の体積保存ではなく質量保存で考える方が自然である）。

なお、文献 22 では後流部の厚さの計算方法に関する詳細は記載されておらず、時間ステップ毎での後流部の厚さ変動を考慮しているか否かは不明であるが、図 3.2.5 に示すいずれかの方法が採用されていると推測される。火源が定常であれば、先端部と後流部とでそれ程厚さが変わらないために、大きな問題にはならないと考えられるが、非定常火源の場合には先端部と後流部での厚さが大きく異なる可能性があるため、図 3.2.5 に示す後流部厚さの決定方法ではいずれも精度の良い予測は行えないと考える。

また、松下らのモデルでは計算の初期条件の設定が容易であるが（第 1 ステップ目の煙層厚さは吹き出し口の高さとすればよい）、横長区画内で火災が発生したようなケースでは、初期領域（計算の第 1 ステップ目に、ブルームから質量、熱量を流入させる領域 すなわち第 1 ステップ目での煙層の厚さ、幅、長さ）の設定が必要となる。

次節以降では以上の方針を改良し、かつ煙層先端部移動速度には文献 43 に記載されている理論式 $C_1 \rho_{s1} u_{s1}^2 = \Delta \rho_1 g h_{s1}$ を用いて、横長区画内で火災が発生した際の非定常煙流動性状の予測を行う。

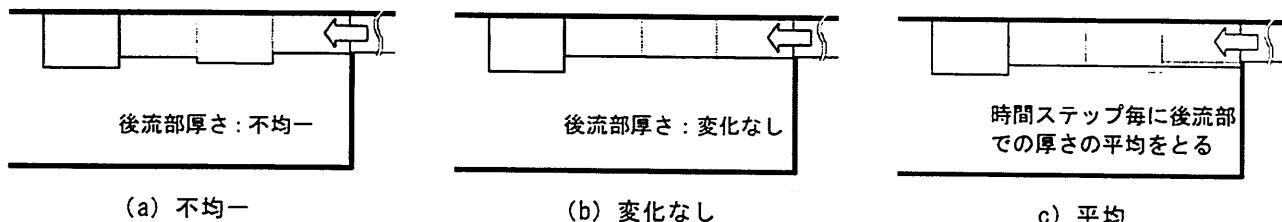


図 3.2.5 各時間ステップでの後流部厚さ決定方法

3.2.3. 煙層先端部移動速度の定式化

予測モデルの構築にあたり以下の仮定を用いる。

仮定 1) 煙層の密度は各時間ステップで一様とし、また、煙層先端部と後流部とで層厚が変わらないものとする。

仮定 2) 横長区画長辺方向に向かう煙層の先端部移動速度 u_{s1} は垂直方向に一様であるとし、また、煙層と下部空気層の界面における静水圧の差 $\Delta \rho_1 g h_{s1}$ と u_{s1} との関係は比例定数 C_1 を用いて式(3.2.18)で表せるものとする。

すなわち、本研究では、煙層先端部における内部 Fr 数 ($= u_{s1} / (g' h_{s1})^{1/2} = 1/C_1^2$) を一定と

することで、煙層厚さ、煙層温度から先端部移動速度を予測する方法を探る。

$$C_1 \rho_{s1} u_{s1}^2 = \Delta \rho_1 g h_{s1} \quad \dots \quad (3.2.18)$$

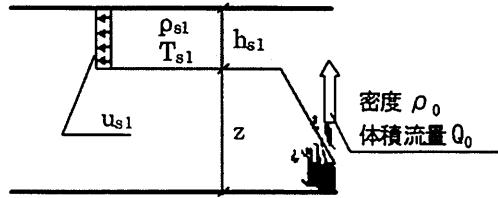


図 3.2.6 煙層先端部移動速度の予測に関する概念図

3.2.4. 煙層に接する壁体への熱損失の考慮

横長区画内における火災時の煙流動を扱う際には、煙層が接する壁体への熱損失を無視できない。本研究では、壁体への熱損失を考慮するにあたり、以下の仮定を用いる。

仮定 3) 煙層が接する壁体への熱損失 q を次式で表せるものとする。

$$q = \alpha (T_{s1} - T_{w0}) \quad \dots \quad (3.2.19)$$

ただし、 α : 煙層 - 壁面間の対流熱伝達率 ($=0.01745$) ($\text{kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$) ,
 T_{s1} : 煙層温度 (K) , T_{w0} : 煙層が接する壁面の表面温度 (K)

仮定 1), 3) から煙層内全体における質量収支および熱収支は次のように表すことができる。

[煙層内質量収支]

$$\frac{d(\rho_{s1} V_{s1})}{dt} = \rho_0 Q_0 \quad \dots \quad (3.2.20)$$

[煙層内熱収支]

$$\frac{d(C_p \rho_{s1} V_{s1} T_{s1})}{dt} + q A_{s1} = C_p \rho_0 Q_0 T_0 \quad \dots \quad (3.2.21)$$

式(3.2.19), 式(3.2.20)を用いて、式(3.2.21)を以下のように変形すると平均的な煙層の温度変化を与える式が得られる。なお、放射による熱交換は考慮しないものとする。

式(3.2.21)

$$\Leftrightarrow C_p \rho_{s1} V_{s1} \frac{dT_{s1}}{dt} + C_p T_{s1} \frac{d(\rho_{s1} V_{s1})}{dt} + q A_{s1} = C_p \rho_0 Q_0 T_0 \quad \dots \quad (3.2.22)$$

$$\Rightarrow C_p \rho_{s1} V_{s1} \frac{dT_{s1}}{dt} + C_p T_{s1} \rho_0 Q_0 + A_{s1} \alpha (T_{s1} - T_{w0}) = C_p \rho_0 Q_0 T_0 \quad \dots \quad (3.2.23)$$

$$\Leftrightarrow C_p \rho_{s1} V_{s1} \frac{dT_{s1}}{dt} = C_p \rho_0 Q_0 (T_0 - T_{s1}) - A_{s1} \alpha (T_{s1} - T_{w0}) \quad \dots \quad (3.2.24)$$

・ 煙層と接する壁体の温度上昇

壁体内部の温度は、図 3.2.7 のように壁体内部を仮想的に分割し、各領域内の温度を領域中心点の温度で代表できるものとして、実験室温度、煙層温度を計算の境界条件として時間ステップ毎に各領域温度（中心点温度）を非定常熱伝導計算により算出する（式(3.2.25)）。

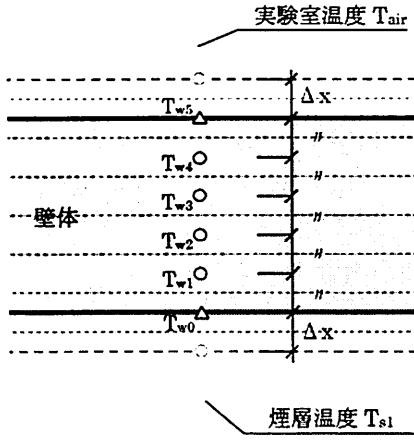


図 3.2.7 煙層に接する壁体の
温度上昇

内部格子点温度

$$c_p \rho \Delta x (T_{wi,t+1} - T_{wi,t}) = \left(\lambda_w \frac{T_{wi-1,t} - T_{wi,t}}{\Delta x} \Delta t \right) - \left(\lambda_w \frac{T_{wi,t} - T_{wi+1,t}}{\Delta x} \Delta t \right)$$

$$\Leftrightarrow T_{wi,t+1} = \left(\frac{\lambda_w \Delta t}{c_p \rho \Delta x^2} \right) (T_{wi-1,t} - 2T_{wi,t} + T_{wi+1,t}) + T_{wi,t} \quad \dots \quad (3.2.25)$$

ただし、 $1 \leq i \leq 4$

壁体表面温度

$$\lambda_w \frac{T_{s1,t} - T_{w1,t}}{2\Delta x} = \alpha (T_{s1,t} - T_{w0,t}) \Leftrightarrow T_{w0,t} = T_{s1,t} - \lambda_w \frac{T_{s1,t} - T_{w1,t}}{2\alpha \Delta x} \quad \dots \quad (3.2.26)$$

$$\lambda_w \frac{T_{air} - T_{w4,t}}{2\Delta x} = \alpha (T_{air} - T_{w5,t}) \Leftrightarrow T_{w5,t} = T_{air} - \lambda_w \frac{T_{air} - T_{w4,t}}{2\alpha \Delta x} \quad \dots \quad (3.2.27)$$

また、壁体表面の温度は、「煙層－壁面間の対流熱伝達」と「仮想的に、壁体表面から壁体内部および流体（煙層あるいは外部空気）側への距離が Δx までの範囲が全て壁体とした場合の当該壁体内部（厚さ： $2\Delta x$ ）での熱伝導」が等しいとして、式(3.2.26)、式(3.2.27)から算出する²⁹⁾。

計算の安定性を保つ範囲内で、壁体内部の分割数を大きくすることにより計算精度を上げることができるが、分割数を 5 とした場合と 10 とした場合とで計算結果に大きな差がなかったため、本研究では分割数を 5 ($\Delta x=0.02$) として計算を行った。

3.2.5. 計算の初期条件

本論文第 4 章では、本章で提案する煙伝播モデルによる計算結果と模型実験結果との比較を行うため、第 4 章で行う模型実験と同条件下で計算を行う必要がある。そこで、本研究では、天井下煙伝播モデルによる計算の初期条件として、図 3.2.8 を設定した。

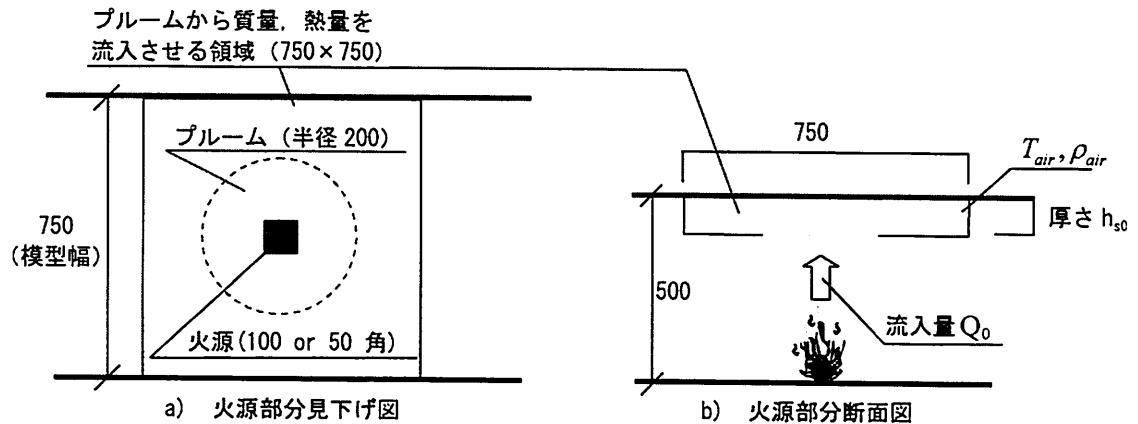


図 3.2.8 計算の初期条件(単位：mm)

・ 計算の第 1 ステップ目の煙層厚さ h_{s0} の設定方法

本章で提案する煙伝播モデルでは、計算開始時の煙層の厚さ h_{s0} に異なる値を用いた場合でも、計算開始から数秒後の煙層温度、厚さ、移動速度の計算値にはそれほど大きな差は生まれないものの、ある程度現実的な値を設定することが望ましい。本研究では、図 3.2.9 に示す領域を対象に定常計算を行い、算出された煙層厚さを初期条件として設定した。

ただし、ここでの計算では、煙層から壁面への熱損失は考慮しないものとする。これにより、火源中心

軸から煙層先端部までの距離（計算対象領域長さ）は任意の値とすることができます。

なお、具体的には h_{s0} は以下の手順で算出する（火源発熱速度 Q には 第4章での実験で設定した火源発熱速度を用いる）。

① 仮に、煙層厚さ $h_{s0} = 0.5H$ と設定する。

→ ② M_{plume} ($= M$) を計算する。

③ 煙層温度 T_{s0} を次式により算出する。

$$Q/2 + C_p M T_{air} - C_p M T_{s0} = 0 \quad (\text{対象領域内全体での熱量保存式})$$

④ 仮に、中性帶高さ $Z_n = z$ ($= H - h_{s0}$) と設定する

⑤ もし、十分な精度で $M_{smoke} = M_{air}$ ならば、⑥を行う。

そうでなければ、 Z_n を少し増加し、⑤を繰り返す。

⑥ もし、十分な精度で $M_{smoke} = M_{plume}$ ならば、計算終了。この時の h_{s0} を初期条件とする。

そうでなければ、 h_{s0} を少し減らして②に戻る。

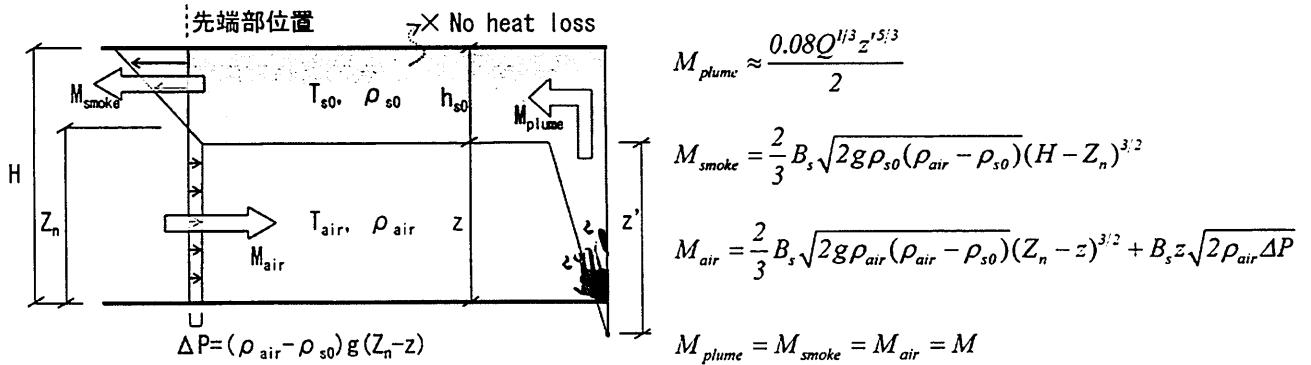


図 3.2.9 h_{s0} の算出

3.2.6. 計算手順

図 3.2.8 の状態を計算の初期条件とし、時間ステップ毎に 式(3.2.24)を用いて算出される煙層温度と式(3.2.18)から得られる先端部移動速度 u_{s1} に微小時間 Δt を乗じた移動距離を順次加算して得られる火源中心軸から煙層先端部までの距離を計算する。また、各時間ステップでの煙層厚さは煙層内部での質量バランスがとれるよう決定する。

具体的には、以下のようない算を行なう。

① 図 3.2.8 に示す領域に Δt 秒間ブルームから質量、熱量が流入した際の領域内の温度上昇 dT_{s1}/dt を式(3.2.24)から算出し、初期領域温度 T_{air} に加算する。

→ ② 上昇した煙層温度を用い、式(3.2.18)より煙層先端部移動速度 u_{s1} を算出する。また、煙層先端部位置を前方に $u_{s1}\Delta t$ 移動させる。

③ 「ブルームから煙層への流入質量」と「煙層内の質量増加分 + 煙層先端部の移動に伴う質量流量」の差を補うように煙層厚さを計算する(式(3.2.28), 図 3.2.10)。

$$h_{s1(t+1)} = \frac{\rho_{0(t)} Q_{0(t)} \cdot \Delta t - \left(\frac{d\rho_{s1(t)} V_{s1(t)}}{dt} \cdot \Delta t \right) - (u_{s1(t)} \cdot \Delta t) B_s h_{s1(t)} \rho_{s1(t)}}{\{X_{1(t)} + (u_{s1(t)} \cdot \Delta t)\} B_s \rho_{s1(t)}} + h_{s1(t)} \quad \dots \quad (3.2.28)$$

④ 次ステップにおけるブルームから煙層への流入質量、熱量を用いて 式(3.2.24)から煙層の温度上昇を算出し、当該時間ステップにおける煙層温度に加算する。(②～④を繰り返す)

ただし、式(3.2.18) 中の比例定数 C_1 は実験結果から決定する必要がある。

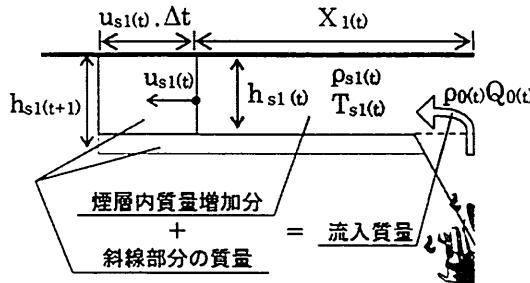


図 3.2.10 天井下煙伝播性状のモデル化

3.3. プルームから煙層への流入質量、熱量（計算の入力値）

前節で記載した煙伝播モデルを用いて計算を行うにあたり、入力値として各時間ステップにおけるプルームから煙層への流入質量、熱量が必要となるが、本論文第4章で行う実験結果と計算結果の比較を行うにあたり、これらの値は実験での値と等しくすることが望ましい。模型実験では火源として、第2章2.3.5.(4)節「実験に用いる火源の発熱速度の時系列変化計測」に記載した4種類を用いているが、いずれも着火直後には設定発熱速度にはならず非定常火源となるため、設定発熱速度を用いてプルームから煙層への流入質量、熱量を算出することはできない。そこで本研究では、2.3.5.(4)節で計測した発熱速度を用いることで各時間ステップにおけるプルームから煙層への流入質量、熱量を算出する。

図3.3.1に実験で計測した火源発熱速度の時系列変化を再掲する。

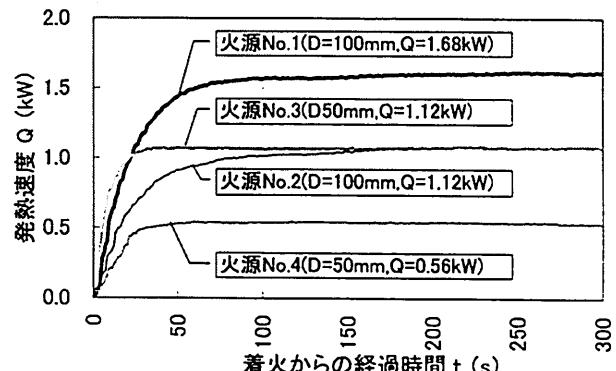


図 3.3.1 火源の発熱速度の時系列変化

・ プルームから煙層への流入質量、熱量算出

実験で計測した火源発熱速度を用いて プルームから煙層への流入質量、熱量を算出するにあたり、以下の仮定を用いる。

仮定4) 第4章での実験で用いる模型は幅が750mm(実大で15m)であり、火源径(100mm角、もしくは50mm角)と比較して十分大きいため幅方向からの空気連行の制限は無いとし、また天井の影響も無視して自由空間における燃焼性状(火炎・プルーム性状、仮想点熱源高さ)を適用できるものとする。

火炎・プルーム特性は Zukoski, Thomas らの実験式²⁹⁾を採用し、プルーム中心軸上の任意の仮想点熱源からの高さ z' における温度上昇、軸方向流速を算出する。

$$\frac{b_p}{z'} = 0.13 \quad \dots (3.3.1)$$

$$\frac{\Delta T_0(z')}{T_{air}} = 9.1 Q^* z'^{-1/3} \quad \dots (3.3.2)$$

$$\frac{w_0(z')}{\sqrt{gz'}} = 3.9 Q^* z'^{1/3} \quad \dots (3.3.3)$$

$$z_0 = 1.5 \sqrt{A_f} \quad \dots (3.3.4)$$

$$\text{ただし、 } Q_{z'}^* \equiv \frac{Q}{\rho_{air} C_p T_{air} \sqrt{g} z'^{3/2}}$$

ブルーム内での外気温からの温度上昇、軸方向流速の水平方向分布は正規分布に従うものとして、仮想点熱源からの高さ $z' (=z+z_0)$ 、火源中心軸上からの水平距離 r の点 (z', r) での温度上昇および流速を以下のように計算する²⁹⁾。

・ 温度上昇 : $\Delta T(z', r) (=T(z', r) - T_{air})$

$$\frac{\Delta T(z', r)}{\Delta T_0(z')} = \exp \left[-\beta^2 \left(\frac{r}{b_p} \right)^2 \right] \quad (\text{ただし、 } \beta^2=0.9) \quad \dots \quad (3.3.5)$$

・ 軸方向流速 : $w(z', r)$

$$\frac{w(z', r)}{w_0(z')} = \exp \left[-\left(\frac{r}{b_p} \right)^2 \right] \quad \dots \quad (3.3.6)$$

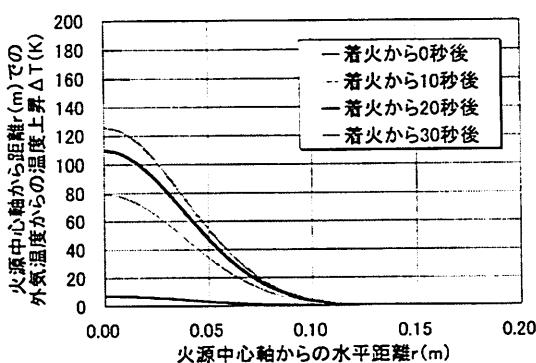
時間ステップ毎に算出された仮想点熱源から煙層下端までの高さ $z' (=z+z_0)$ における温度上昇 $\Delta T(z', r)$ および流速 $w(z', r)$ より、ブルームから煙層への流入質量 $2\rho_0 Q_0(z')$ を算出する。なお、ブルームからの全流入質量のうち 半分が階段室方向に配分されると考え、これを $\rho_0 Q_0(z')$ と表記するために ブルームから煙層への全流入質量は $2\rho_0 Q_0(z')$ と表記している（ブルームから煙層への流入熱量に関しても同様）。

$$2\rho_0 Q_0(z') = \int_0^r \left[\frac{353}{\Delta T(z', r_n) + T_{air}} \right] \cdot [w(z', r_n) \pi r_n^2 - w(z', r_{n-1}) \pi r_{n-1}^2] dr \quad (\text{ただし、 } r_n = r_{n-1} + \Delta r) \quad \dots \quad (3.3.7)$$

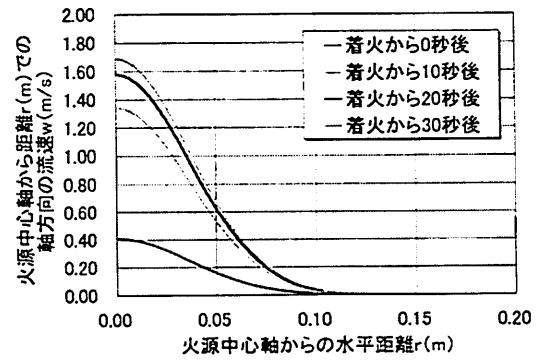
また、ブルームから煙層への流入熱量 $2C_p \rho_0 Q_0 T_0(z')$ は以下のように表せる。

$$2C_p \rho_0 Q_0 T_0(z') = \int_0^r C_p \left[\frac{353}{\Delta T(z', r_n) + T_{air}} \right] \cdot [w(z', r_n) \pi r_n^2 - w(z', r_{n-1}) \pi r_{n-1}^2] \cdot [\Delta T(z', r_n) + T_{air}] dr \quad \dots \quad (3.3.8)$$

なお、計算に用いる全ての火源で火源中心軸からの水平方向距離 $r=0.2m$ の位置で $\Delta T(z', r)$, $w(z', r)$ の計算値がほぼゼロとなつたため、積分範囲は $0 \leq r \leq 0.2$ とした（図 3.3.3）。図 3.3.2 では、例として火源 No. 1, 火源面から 400mm 上方（天井面下 100mm の位置）におけるブルーム内温度上昇、軸方向流速を示している。なお、3.2. 頃に記載した煙伝播モデルを用いて計算を行う際には、仮想点熱源から煙層下端までの高さ z' は時間ステップ毎に再計算するものとする。



(a) ブルーム内温度上昇



(b) ブルーム内軸方向流速

図 3.3.2 火源面からの高さ 400mm での温度上昇および軸方向流速の計算値

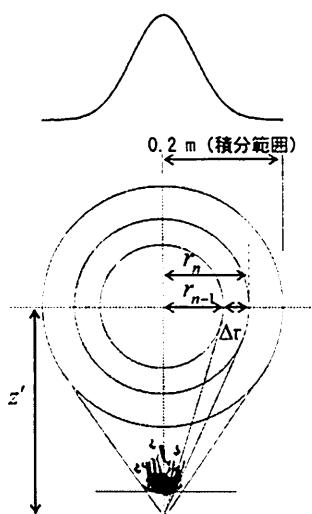


図 3.3.3 高さ z' における
プルーム水平断面

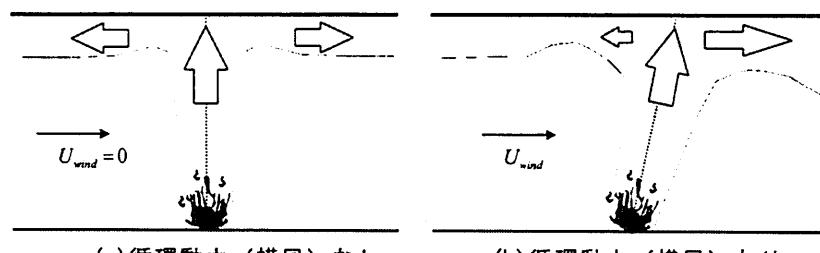


図 3.3.4 プルームからの流入質量、熱量の左右の煙層への配分

ここで、チムニー内面状電熱ヒータの温度を上昇させた場合、模型内には気流が生じており、火炎およびプルームは風下側へ傾斜すると考えられる(図 3.3.4(b))。このため、火炎の軸上温度や火炎長さなどは、この気流の影響を受けるものと考えられる。横長空間における有風下での火炎、プルームの傾斜に関しては、栗岡ら²⁴⁾により研究されており、本来はこのような考え方に基づき算出した火炎およびプルームの傾斜角度から左右への配分質量、熱量を算出する必要があるが、本研究で行う実験のように、発熱速度に対して区画内風速が小さい場合や火源が非定常の場合には、現段階では火炎、プルームの傾斜に関する研究は見あたらないことから、本研究においては区画内風速の有無によらず簡易的に全体の 1/2 が階段室側の煙層へ配分される(図 3.3.4(a))と考え、煙伝播モデルに用いる。

以上より、火災初期の横長空間における煙層先端部移動速度、煙層厚さ、煙層温度の予測が可能となる。予測結果は第 4 章で実験結果と併せて示す。

3.4. 煙層先端部が垂れ壁到達後の煙流動モデル

本研究では、計算から火災時における階段室-火災室間での遮煙成否の境界となる条件を導出可能とすることを目的の 1 つとしているため、3.2. 節でモデル化を行った煙層先端部が階段室-火災室間の垂れ壁に到達する以前での煙流動性状に加えて、それ以降の煙流動性状もモデル化する必要がある。

一般的に垂れ壁近傍での煙層について考える際には、二層ゾーンモデル等が用いられることが多いが、本研究で扱うような火災発生直後の非定常煙流動に対してもこれらを適用することは無理があると考える。そこで本章では、実現象に即したモデルを構築し、煙層先端部が垂れ壁到達以降の垂れ壁近傍煙流動性状の予測を行う。

図 3.4.1 は横長空間内幅方向中央の床面で火災が発生した際の煙流動の可視化記録であるが、これを見ると天井下を伝播する煙は前方の壁に到達直後に大きく膨らんでおり、壁面近傍で下方に押し出された煙はその後火源方向に移動していることが見て取れる。なお、これと同様の煙流動性状は、2.5. 節で掲載した実験の可視化記録(図 2.5.4, 図 2.5.6)からも確認することができる。

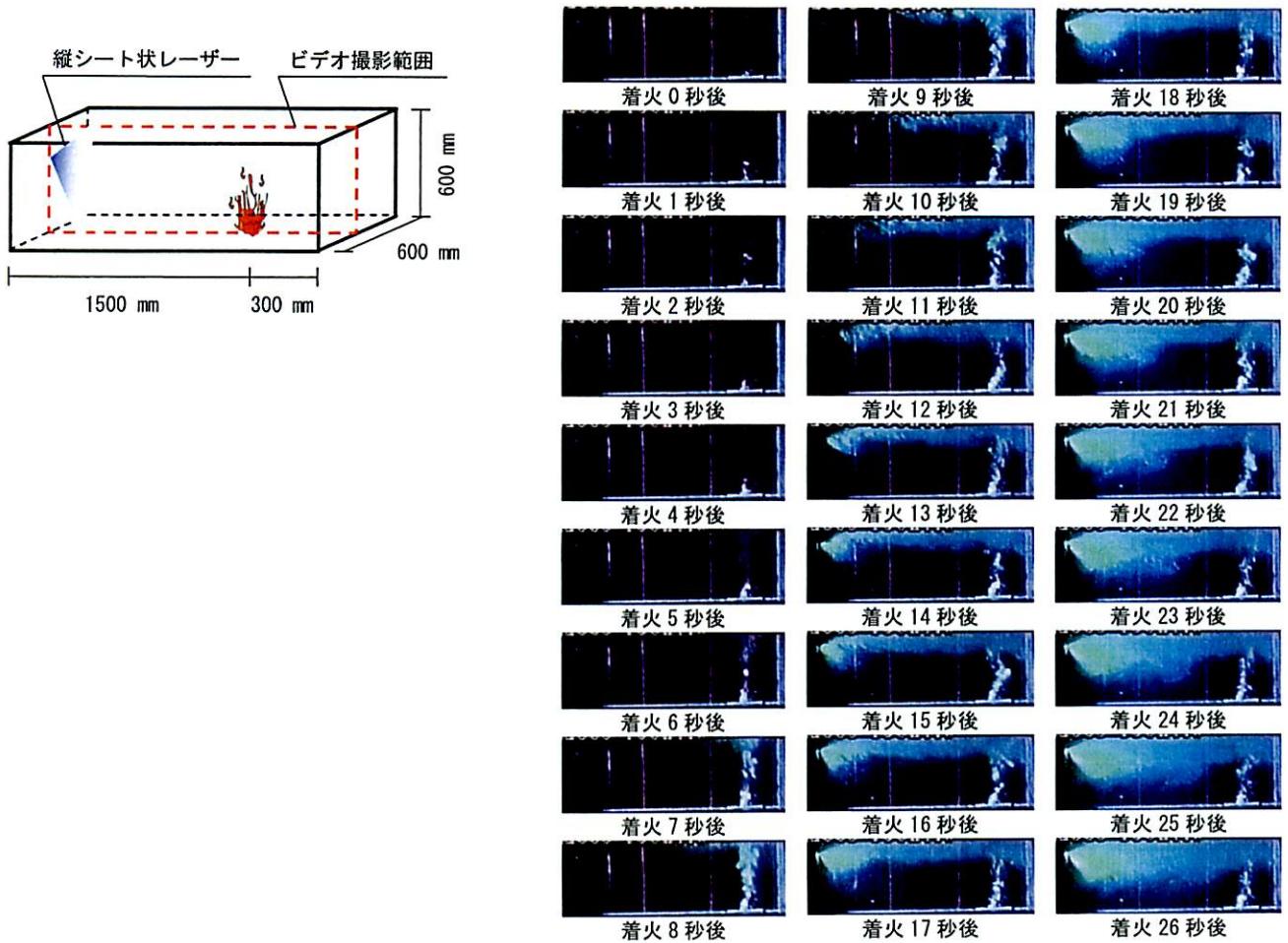


図 3.4.1 壁面到達後の煙流動性状（画像提供：東京理科大学 辻本誠教授）

・煙層先端部が垂れ壁到達後の煙流動性状の定式化

煙層先端部が垂れ壁到達後の煙流動性状をモデル化するにあたり、垂れ壁到達時の煙層部分を「上部煙層」、垂れ壁到達後の上部煙層の下方を流れる煙層を「下部煙層」と定義した。なお、モデルの構築にあたり、前節までの 1)~4) の仮定に さらに以下の仮定を加える。

仮定 5) 煙層先端部が垂れ壁到達以降、上部煙層の厚さは到達時の煙層厚さ h_{s1} (煙層体積 V_{s1}) を維持するものとする。

仮定 6) 下部煙層先端部が火源位置まで戻った後は、下部煙層は火源を挟んで逆側の空間に、下部煙層と周囲空気の密度差に伴う質量流量 M_{out} (kg/s) (式(3.4.1)) で流出するものとする (図 3.4.2)。

パッシブセイフティシステムでは、火源から見て階段室とは逆側の空間が大断面のソーラーチムニーを通して外部に開放されているため、火災時にはチムニー側の煙層は降下しないものと想定している。このため、チムニーの排煙能力不足によりチムニー側の煙層が降下してきた場合には 式(3.4.1)は使用できることには注意を要する (ただし、第 4 章での実験では そのようなケースは確認できなかった)。

$$M_{out} = \frac{2}{3} B_s \sqrt{2g\rho_{s2}(\rho_{air} - \rho_{s2})} \cdot h_{s2}^{3/2} \quad \cdots (3.4.1)$$

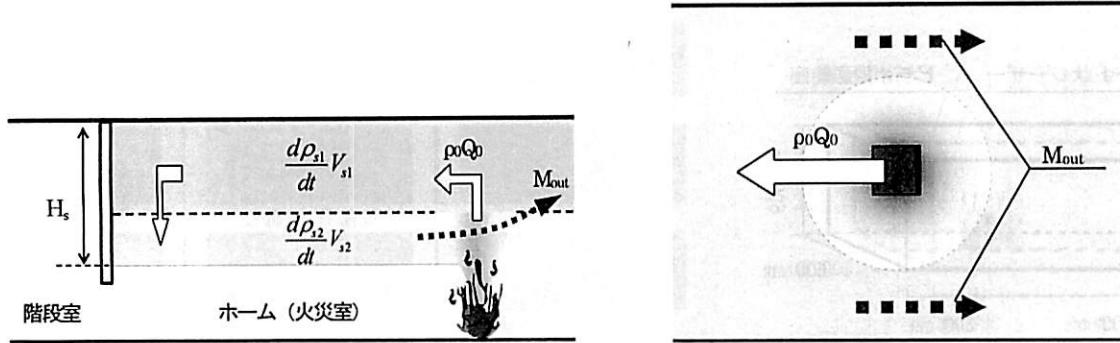


図 3.4.2 下部煙層が火源位置到達以降の煙流動概念図

仮定 7) 下部煙層先端部が火源位置まで戻った後は、プルームは周囲空気よりも温度の高い下部煙層を一部連行するため、上部煙層下端高さでのプルーム内温度は式(3.3.2)から算出される温度よりも高くなると考えられる。本研究では、渡辺らが提案する予測式²⁹⁾によりプルーム中心軸上の温度上昇を算出できるものとする(式(3.4.2), 図 3.4.3)。ただし、軸方向流速に関しては下部煙層の連行による変化は無いものとし(自由空間での流速と等しい)、また、プルーム内温度、軸方向流速の水平方向分布は正規分布に従うとする。

$$\Delta T'_o(z') = \left\{ 1 - \left(\frac{z'_a}{z'} \right)^{5/3} \right\} (T_{s2} - T_{air}) + \Delta T_o(z') \quad \dots (3.4.2)$$

(なお、 $\Delta T_o(z')$ は式(3.3.2) (78 頁) より算出する)

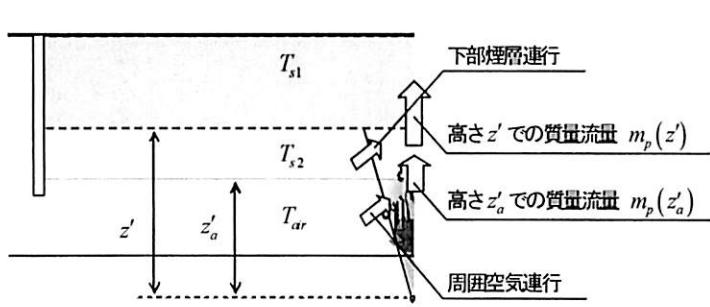


図 3.4.3 下部煙層が火源位置到達後のプルームの周囲流体連行に関する概念図

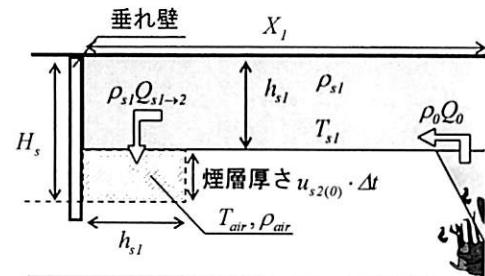


図 3.4.4 煙層先端部が垂れ壁到達以降の煙流動性状計算時の初期条件

以上の仮定に従い、煙層先端部が垂れ壁到達後の計算の初期条件として図 3.4.4 を設定し、上部煙層内での質量保存式(式(3.4.3))と熱量保存式(式(3.4.4))から得られる式(3.4.7)を用いて、時間ステップ毎に上部煙層温度上昇を計算する。

また、式(3.4.3)および上部煙層温度から算出される上部煙層から下部煙層への流入質量、熱量を用いて、3.2.節での天井下煙伝播モデルと同様の方法により下部煙層の温度変化、火源方向への平均移動速度(u_{s2} 算出時の比例定数を C_2 とする)、煙層厚さを算出する。なお、下部煙層先端部が火源位置到達以後も、時間ステップ毎に下部煙層内での質量バランスをとるように煙層厚さを決定する(式(3.4.8))。

[上部煙層内質量収支]

$$\frac{d(\rho_{sl} V_{sl})}{dt} + \rho_{sl} Q_{sl \rightarrow 2} = \rho_0 Q_0 \quad \dots (3.4.3)$$

[上部煙内層熱収支]

$$\frac{d(C_p \rho_{s1} V_{s1} T_{s1})}{dt} + C_p \rho_{s1} Q_{s1 \rightarrow 2} T_{s1} + A_{s1} \alpha (T_{s1} - T_{w0}) = C_p \rho_0 Q_0 T_0 \quad \dots \quad (3.4.4)$$

仮定 5) より $V_{s1} (= X_1 B_s h_{s1})$ は一定であるので、式(3.4.3)を用いて式(3.4.4)を以下のように変形できる。

式(3.4.4)

$$\Leftrightarrow C_p \rho_{s1} V_{s1} \frac{d(T_{s1})}{dt} + C_p V_{s1} T_{s1} \frac{d(\rho_{s1})}{dt} + C_p \rho_{s1} Q_{s1 \rightarrow 2} T_{s1} + A_{s1} \alpha (T_{s1} - T_{w0}) = C_p \rho_0 Q_0 T_0 \quad \dots \quad (3.4.5)$$

$$\Rightarrow C_p \rho_{s1} V_{s1} \frac{d(T_{s1})}{dt} + C_p T_{s1} (\rho_0 Q_0 - \rho_{s1} Q_{s1 \rightarrow 2}) + C_p \rho_{s1} Q_{s1 \rightarrow 2} T_{s1} + A_{s1} \alpha (T_{s1} - T_{w0}) = C_p \rho_0 Q_0 T_0 \quad \dots \quad (3.4.6)$$

$$\Leftrightarrow C_p \rho_{s1} V_{s1} \frac{d(T_{s1})}{dt} = C_p \rho_0 Q_0 (T_0 - T_{s1}) - A_{s1} \alpha (T_{s1} - T_{w0}) \quad \dots \quad (3.4.7)$$

[t+1ステップにおける下部煙層厚さ（下部煙層が火源位置到達以降）]

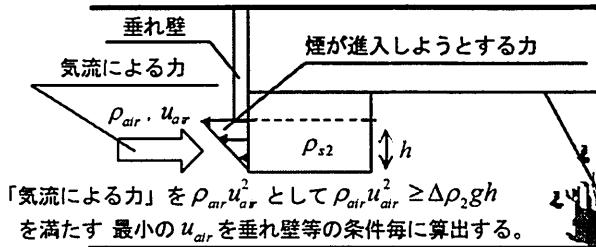
$$h_{s2(t+1)} = \frac{\rho_{s1(t)} Q_{s1 \rightarrow 2(t)} \cdot \Delta t - \left(\frac{d(\rho_{s2(t)} V_{s2(t)})}{dt} \cdot \Delta t \right) - M_{out(t)} \cdot \Delta t}{X_1 B_s \rho_{s2(t)}} + h_{s2(t)} \quad \dots \quad (3.4.8)$$

具体的には以下の手順で計算を行う。なお、計算結果は第4章において実験結果と併せて示す。

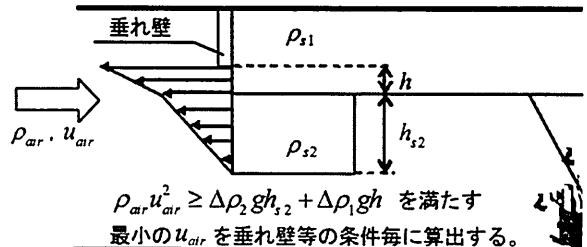
- ① 図3.4.4に示す上部煙層に Δt 秒間ブルームから質量、熱量が流入した際の上部煙層の温度上昇 $\frac{dT_{s1}}{dt}$ を式(3.4.7)から算出し、垂れ壁到達時の煙層温度 T_{s1} に加算する。
- ② 上部煙層の温度上昇に伴う質量増加を考慮し、上部煙層内で質量バランス（式(3.4.3)）をとるよう、上部煙層から下部煙層への流入質量、熱量を算出する。
- ③ 下部煙層内の熱量バランスをとるよう下部煙層の温度を上昇させ、下部煙層と空気層の界面における静水圧の差と火源方向へ向かう下部煙層の先端部移動速度 u_{s2} の関係式から u_{s2} を算出する。
下部煙層先端部が火源位置まで戻る以前ならば、下部煙層先端部位置を火源方向に $u_{s2} \Delta t$ 移動させる。
- ④ 「上部煙層から下部煙層への流入質量」と「下部煙層内の質量増加分 + 下部煙層先端部の移動に伴う質量流量」の差を補うように下部煙層厚さ h_{s2} を計算する。
なお、下部煙層先端部が火源位置まで戻った以降は、仮定6)に基づき式(3.4.8)から h_{s2} を計算する。
- ⑤ 次ステップにおけるブルームから上部煙層への流入質量、熱量を用いて上部煙層の温度上昇を算出し、当該時間ステップにおける上部煙層温度に加算する。（②～⑤を繰り返す）

3.5. 煙流動モデルを用いた遮煙条件の導出

前節までに提案した2つの煙流動モデルを用いることで、垂れ壁近傍における煙層温度および煙層厚さが算出できるため、これらから煙層が階段室に進入しようとする力 F_{smoke} が算出可能となる（図3.5.1）。本研究では、垂れ壁下を階段室→火災室の方向に流れる空気による力 F_{air} （= $\rho_{air} u_{air}^2$ ）が F_{smoke} よりも大きくなるような気流の大きさ u_{air} のうち最小の値（すなわち、 $\rho_{air} u_{air}^2 \geq \Delta \rho_2 g h$ を満たす最小の u_{air} ）を垂れ壁高さ、垂れ壁下通路幅の条件毎に決定する。



(a) 垂れ壁高さが上部煙層厚さよりも大きい場合



(b) 垂れ壁高さが上部煙層厚さよりも小さい場合

図 3.5.1 2つの煙流動モデルを用いた遮煙条件導出方法

ここで、煙流動モデルによる計算結果において、上部煙層温度よりも下部煙層温度が低く算出された場合、図 3.5.1(b)に示すように、上部煙層と下部煙層の境界で圧力差の勾配が変化することになる。このため、まず垂れ壁高さを煙層厚さ（上部煙層厚さ h_{s1} + 下部煙層厚さ h_{s2} ）として（この時の遮煙に必要な風速 u_{air} はゼロ）、順に垂れ壁高さを減らしていき その時の垂れ壁高さに対応する u_{air} を導出していった場合、垂れ壁高さの減少に伴い u_{air} は増加していくことになるが、その傾向は垂れ壁高さが上部煙層厚さと等しくなった時を境に変化することになる（垂れ壁が上部煙層厚さよりも小さい時には遮煙を行うことがより難しくなる）。なお、計算による遮煙条件の導出は、垂れ壁高さがゼロとなった場合も行うが、この場合（あるいは天井流厚さに対して、十分垂れ壁が小さい場合）には煙は垂れ壁位置到達時に下側に膨らまず、そのままの厚さを保ち 階段室に進入しようとすると思われるが、この時の F_{smoke} が $\rho_{s1} u_{s1}^2$ で表せるとすると、 $\rho_{s1} u_{s1}^2 = \Delta \rho_1 g h_{s1} / C_1$ であるので、 $F_{smoke} = \Delta \rho_1 g h_{s1} / C_1$ となる。一方で、垂れ壁が無い（十分小さい）場合においても、仮に壁面があるとして煙層を下側に膨らませ、その後に仮の壁面を取り払った際の F_{smoke} は $\Delta \rho_2 g h_{s2} + \Delta \rho_1 g h_{s1}$ と表すことができる。このため、下部煙層が火源方向に戻る際の下部煙層先端部移動速度を算出する際に必要となる比例定数 C_2 が C_1 とほぼ等しいと仮定すれば、仮に壁面があるとして煙層を下側に膨らませた際の F_{smoke} ($= \Delta \rho_2 g h_{s2} + \Delta \rho_1 g h_{s1}$) の方が $\Delta \rho_1 g h_{s1} / C_1$ よりも大きくなる（そして、この F_{smoke} を基に u_{air} を算出することで安全側の評価を行うことができる）。これより、本研究では、垂れ壁が天井流厚さと比較して十分小さい場合においても、仮に壁面があるとして下方に煙層を膨らませて u_{air} の計算を行うこととする（仮の壁面と煙層の間の熱移動は無いものとする）。

なお、本章以降では、着火直後 煙がチムニーに流入する以前に注目して分析を行うため、煙流動モデルを用いて u_{air} を導出する際には、煙層先端部がチムニーに到達する以前（計算により算出される 火源中心軸から煙層先端部までの距離が、火源－チムニー間距離以上となるまで）かつ、煙層が垂れ壁に到達後に下側に押し出された下部煙層が火源位置まで戻るまでを対象として計算を行った。

3.6. 本章のまとめ

本章では、パッシブセイフティシステムを採用した駅舎において火災時の安全性を確保するために満たすべき条件を計算から導出するにあたって必要な、横長空間において火災が発生した際の天井下煙伝播性状および煙層先端部が垂れ壁到達後の垂れ壁近傍煙流動性状に関する予測モデルを構築した。

次章では、4種類の非定常火源（図 3.3.1 (78 頁)）を用いて模型実験を行い、実験結果と 本章で提案した煙流動モデルによる計算結果を比較し、必要に応じてモデルの調整を行う。また、2つの煙流動モデルを用いることで 垂れ壁近傍での煙層高さ、煙層温度が算出できることから、これらを用いて“煙層が階段室に進入しようとする力 F_{smoke} ” および “遮煙に必要な模型内風速 u_{air} ” が算出可能となるため、模型実験に加えて計算からも垂れ壁位置における遮煙成否の境界となる条件を導出する。

第 4 章

階段室 - 火災室間での遮煙に関する検討

— 模型実験および煙流動モデルによる遮煙条件の導出 —

4.1. 本章の目的

本章では、着火前の模型内風速、階段室－火災室間 垂れ壁高さ、垂れ壁下通路幅の組合せからなる火災時の遮煙条件を把握することを目的として表 4.1.1 に示す種類の模型実験を行う。また、前章で提案した煙流動モデルによる予測結果と実験結果の比較、検討を行い、最終的には計算からも遮煙条件を導出できるようにする。

表 4.1.1 本章で行う実験の種類

実験の種類	概要	実験方法
煙層先端部移動速度把握実験	実験により 火災発生時の天井下の煙層先端部移動速度を把握し、前章での煙伝播モデルとの比較、検討を行う。なお、実験結果に基づき、煙伝播モデルにおける比例定数 C_1 を決定する。	天井下50mmの高さに、火源から250mm間隔で熱電対を設置し、各熱電対の温度上昇により煙層先端部の到達を判断する。 これにより、“火源軸からの各熱電対までの距離”と“着火からそれらの熱電対の温度が上昇するまでの時間”的関係を把握する。
遮煙成否判定実験	階段室への煙流入の有無を 実験パラメータの組合せ毎に調べ、実験から遮煙条件を把握する。	垂れ壁高さ、垂れ壁下通路幅、着火前模型内風速、火源条件（位置、径、発熱速度）をパラメータとして実験を行う。 階段室への煙流入の有無は、階段室内に設置した熱電対の温度上昇により判断する。
(着火前換気量計測実験)※	実験により遮煙条件を把握するにあたり、チムニー内 面状電熱ヒータの設定温度と垂れ壁等の条件の組合せ毎に単位時間あたりの換気量を把握する必要がある。 計算により算出した換気量と実験で計測した換気量を比較し、両者が合うように計算値を補正することで、ここで行う実験以外の条件についても換気量を算出できるようにする。	模型長さ方向中央の垂直断面を仮想的に20等面積に分割し、それぞれの中心位置で熱線風速計により風速を計測する。 実験は、チムニー内面状電熱ヒータ設定温度、垂れ壁高さ、垂れ壁下通路幅をパラメータとして行う。

※遮煙成否判定実験により得られた結果から遮煙条件を導出するにあたり、実験条件毎の煙がチムニーに流入する以前の垂れ壁下風速が必要となる。着火前換気量計測実験は、実験条件毎の垂れ壁下風速を把握することを目的とするものであり、遮煙成否判定実験の補足的な位置づけとなる。

4.2. 実験概要

4.2.1. 模型概要および計測位置

第2章での模型実験では、階段室上部の冷却器と面状電熱ヒータ付きのチムニーにより模型内の気流を形成していた。本章では着火前の模型内気流の大きさを実験パラメータの1つとして実験を行うが、この調整を容易とするため、チムニー高さを1000mm、断面寸法を425mm角とし、面状電熱ヒータをチムニー内側壁面4面の下半分にそれぞれ設置し、かつ側壁外側を断熱した（図4.2.1、図4.2.2参照）。また、階段室上部に冷却器は設置しなかった。

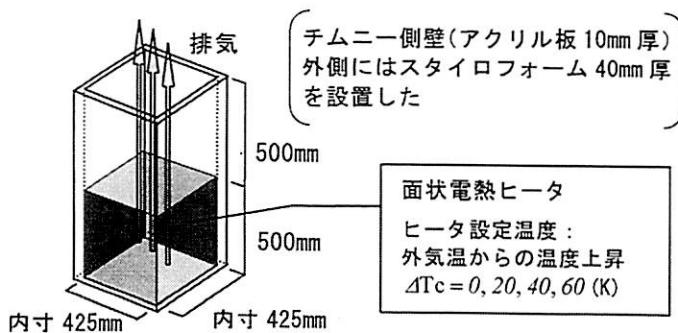


図 4.2.1 チムニー構造概要

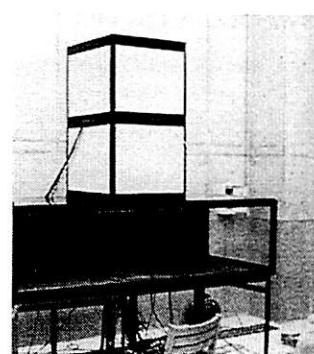


図 4.2.2 チムニー外観

計測項目は、煙層先端部移動速度、階段室への煙流入の有無、煙層温度、煙層厚さ および 換気量(排気量)等を把握することを目的として、それぞれ表 4.1.1 に示す実験の種類毎に図 4.2.3 に示す位置に熱電対および風速計を設置した。

各熱電対位置への煙層先端部到達および階段室への煙の流入は、各熱電対位置での温度上昇が着火前 1 分間の当該熱電対温度計測値の平均値より 0.2(K)以上上昇した時をもって判断した。

着火前の換気量は JIS B 8330 に基づき、模型中央断面を 20 等面積に分割し、それぞれの中心位置で風速を計測し、算出した(ただし、本実験では幅方向中央を境に左右対称であるため、図 4.2.3 に示す 12 点のみ計測した)。

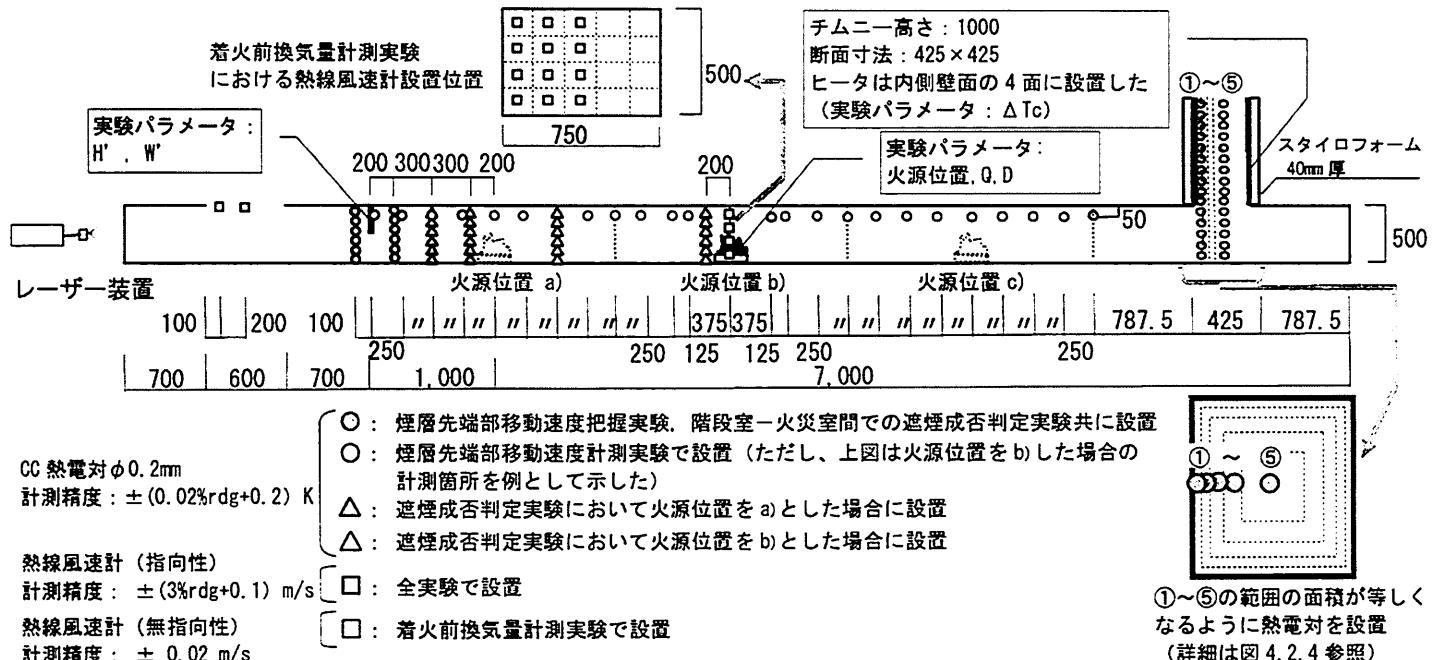


図 4.2.3 模型断面図および計測位置(単位 : mm)

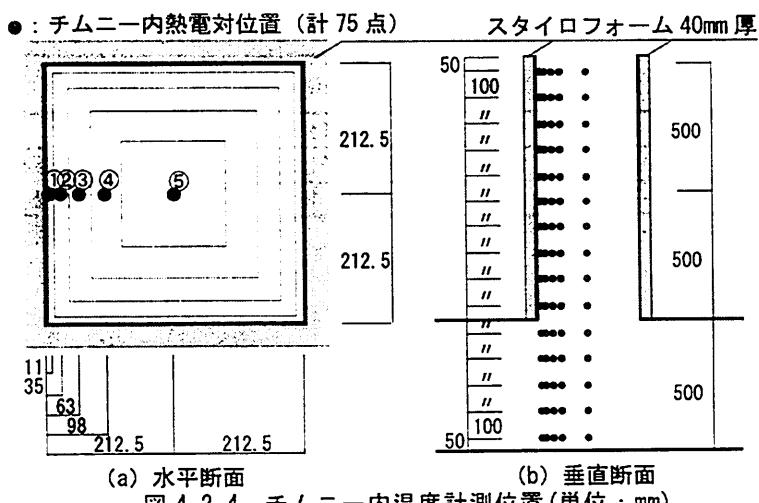


図 4.2.4 チムニー内温度計測位置(単位 : mm)

遮煙成否判定実験結果から遮煙条件を導出するにあたり、チムニー内の面状電熱ヒータ温度を上昇させた場合の循環動力 F (模型内に気流を形成しようとする力)を把握する必要がある。ここで、循環動力 F はチムニー内外の密度差による圧力であるから、実験条件毎の循環動力 F を算出するにあたり、チムニー内の任意の高さにおける水平断面内平均密度を算出できるように温度計測を行うことが望ましい。本実験では、図 4.2.4(a)に示すようにチムニー水平断面を仮想的に 5 分割し(点線で囲まれた各範囲の面積は等しい)、各領域内部に 1 箇所ずつ熱電対を設置し、熱電対を設置した高さ $\pm 50\text{mm}$ の範囲内でのチムニー水平断面内平均密度は、当該高さに設置した 5 点の熱電対による温度計測値から算出した それぞれの領域内の密度を平均したものとして、着火前の循環動力 F を算出する。

なお、図 4.2.4(a)に示す 点線で囲まれる各領域内部においては、以下の仮定に基づき 位置によらず 温度は等しいと考え、ある高さ、ある領域（点線に囲まれた領域）内部の任意の点の温度は、当該領域内部に設置した 1 点の熱電対（図 4.2.4）による温度計測値で代表できるものと考えた。

- 点線で囲まれた各範囲内における任意の点では、4 つの面状電熱ヒータからの受熱放射量が変わらないとする（図 4.2.5(左)）。
- 同一高さ、同一領域内での流速分布は一様とする。

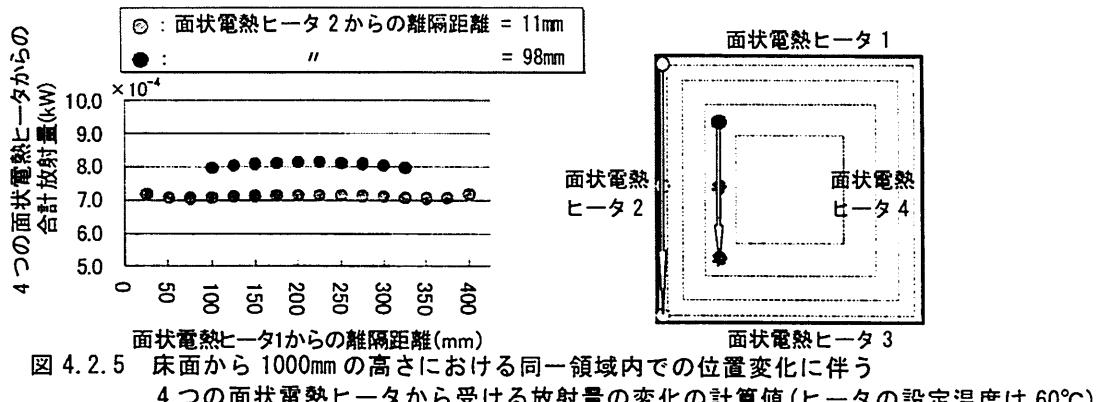


図 4.2.5 床面から 1000mm の高さにおける同一領域内での位置変化に伴う
4 つの面状電熱ヒータから受ける放射量の変化の計算値（ヒータの設定温度は 60°C）

また、実験に用いる火源の径、設定発熱速度は表 2.3.4(39 頁)に示す 4 通りとし、火源位置は図 4.2.3 に示す a), b), c) に変更可能とした。

4.2.2. 実験条件

火源条件（位置、径 D、発熱速度 Q）、垂れ壁高さ H'、垂れ壁下通路幅 W'、チムニー内面状電熱ヒータ設定温度 ΔT_c を実験パラメータとし、表 4.2.1 に示す条件でそれぞれ実験を行った。

表 4.2.1 実験条件

実験の種類	火源位置	火源No. [*]	H' (mm)	W' (mm)	ΔT_c (K)
煙層先端部移動速度把握実験	b), c)	1~4	150	750	0, 20, 40, 60
遮煙成否判定実験	a), b), c)	1~4	50~400(50刻み)	300~750(150刻み)	0, 20, 40, 60
着火前換気量計測実験	—	—	0, 150	300~750(150刻み)	0, 20, 40, 60

^{*} 表 2.3.4 参照 (39 頁)

4.2.3. 実験方法

煙層先端部移動速度把握実験および階段室－火災室間での遮煙成否判定実験では、面状電熱ヒータの作動開始から約 120 分後に着火、その 5 分後に実験終了とした。なお、温度、風速に関しては着火 5 分前から計測を開始し、それぞれ 1 秒間隔で記録した。また、必要に応じて煙流動の可視化を行う際には、図 4.2.3 での左端から幅方向中央にアルゴンイオンレーザーを縦シート状に照射し 煙流動の可視化を行い、ビデオカメラにより記録した（赤外線撮影）。ただし、可視化実験では着火と同時に発煙片を火源横の床面から投入したために 温・速度計測データは発煙片による影響を少なからず受けていると考え、可視化実験における計測データは本章での考察には使用しない。

着火前換気量計測実験では、面状電熱ヒータ作動開始から約 120 分後に風速計測を開始し、各計測位置で 5 秒間隔で 10 分間計測した。なお、模型内の気流への影響を小さくするために、模型内への熱線風速計の設置は最大で 2 台とし、順次計測位置のみを変更した。また、計測結果から単位時間あたりの換気量を算出するにあたり、各計測点における風速は、計測機器移動に伴う気流の乱れを考慮して当該位置での計測データの後半 5 分間の平均値を用いた。

4.3. 実験結果および考察

図 4.3.1 に $\Delta T_c=0(K)$, 火源位置 b) として、表 2.3.4 (39 頁) に記載した火源を用いた場合の煙層先端部位置の時間変化の実験結果と煙流動モデルによる計算結果を併せて示す。ここで、図中のプロットの色は 1 回の実験における階段室方向およびチムニー方向への煙層先端部位置変化 (灰: 階段室方向, 白: チムニー方向) であり、プロットの種類は同一実験条件下での実験結果である。なお、式(3.2.18) 中の比例定数 C_1 は実験結果から決定する必要があるため、火源条件毎に最小二乗法により C_1 を算出した。

ここで、火源に火源 No.2 を設定した場合、実験結果から決定した C_1 は理論から導びかれた範囲 ($0.5 \leq C_1 \leq 2.0$: 3.2.1. 節参照) を大きく逸脱しているが (図 4.3.1(b))、これは火源 No.2 は、バーナー径に対してガス流量が非常に小さくなるために (特に着火直後)、火炎、ブルームの形状が乱れ、それにより実験と計算とでブルームから煙層への流入質量、熱量が大きく異なることに起因すると考える。このため、本研究では、火源 No.2 を除く 3 つの火源を設定した際の実験結果から決定した各々の C_1 を平均した $C_{1ave.} = 1.36$ を用いて遮煙条件を導出することとする。なお、 $C_1 = C_{1ave.} = 1.36$ を式(3.2.18) に代入すると、 $1/2 \cdot \rho_s u_{s1}^2 = 1/2.72 \cdot \Delta \rho_s g h_{s1}$ となるが、この式から、本章での実験で使用した模型内部における実際の煙流動では、煙流動モデルでは考慮していない摩擦、灑み点の浮き上がり、煙層と空気層の混合、煙層内部の密度・速度勾配、煙層密度の時間変化等があるために、結果として界面での静水圧の差の 1/3 程度しか先端部での運動エネルギーに変換されなかつたと考えることもできる。なお、実験から決定した C_1 の値 ($C_1 = C_{1ave.} = 1.36$) は、流路が火源を中心 1/20 スケールで片側 3m の場合の実験結果から決定した値であるため、同スケール、同材料の模型を使用した場合でも流路の長さが異なる場合には C_1 の値も異なる可能性があることには注意が必要である。

$C_1 = C_{1ave.} = 1.36$ とした場合には、火源に火源 No.1 を設定した際の煙層厚さの計算値は 100mm 程度となっており、実験結果とも概ね一致している (可視化記録 (図 4.3.2, 図 4.3.9(1)(a)) 参照)。

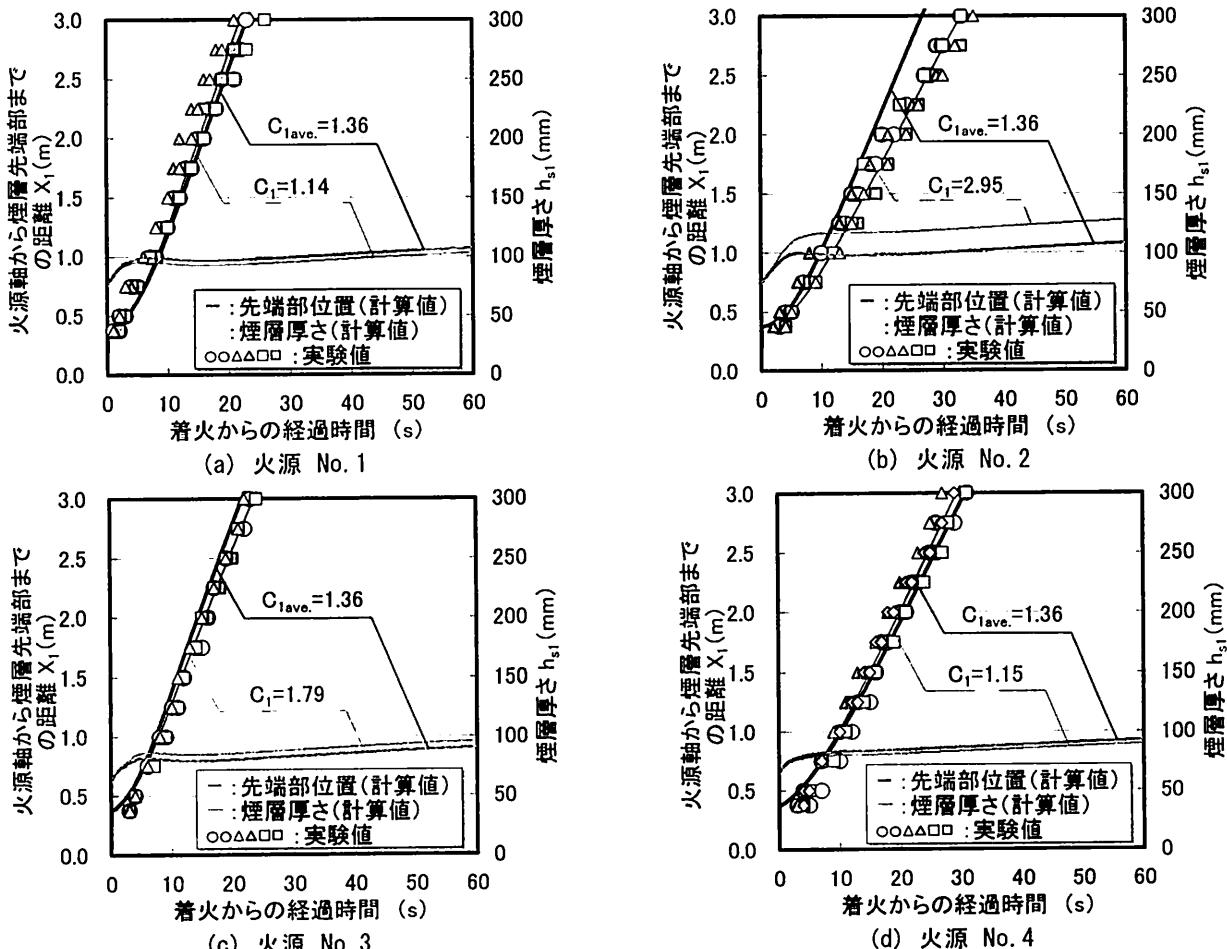


図 4.3.1 $\Delta T_c=0(K)$ での煙層先端部位置の時間変化 (左軸) および煙層厚さ (右軸)

次に、煙層先端部が垂れ壁に到達後の煙流動性状に関して計算結果と実験結果の比較を行う。

$\Delta T_c=0(K)$ 、火源 No. 1、火源位置 a) とした場合、実験の可視化記録(図 4.3.2)から煙層が垂れ壁到達後の煙層厚さは概ね 250~300mm ($\Delta T_c=0(K)$ として、垂れ壁高さを順次変更して実験を行った際の階段室への煙流入の有無から推測した最大煙層厚さも 250~300mm) であったが、3.4. 節で提案した 煙層先端部が垂れ壁到達後の煙流動モデルから算出した最大煙層厚さ(図 4.3.3 中の黒色極細線)は、概ね 200mm となった(ただし、 $C_2 = C_{lave.} = 1.36$ とした)。

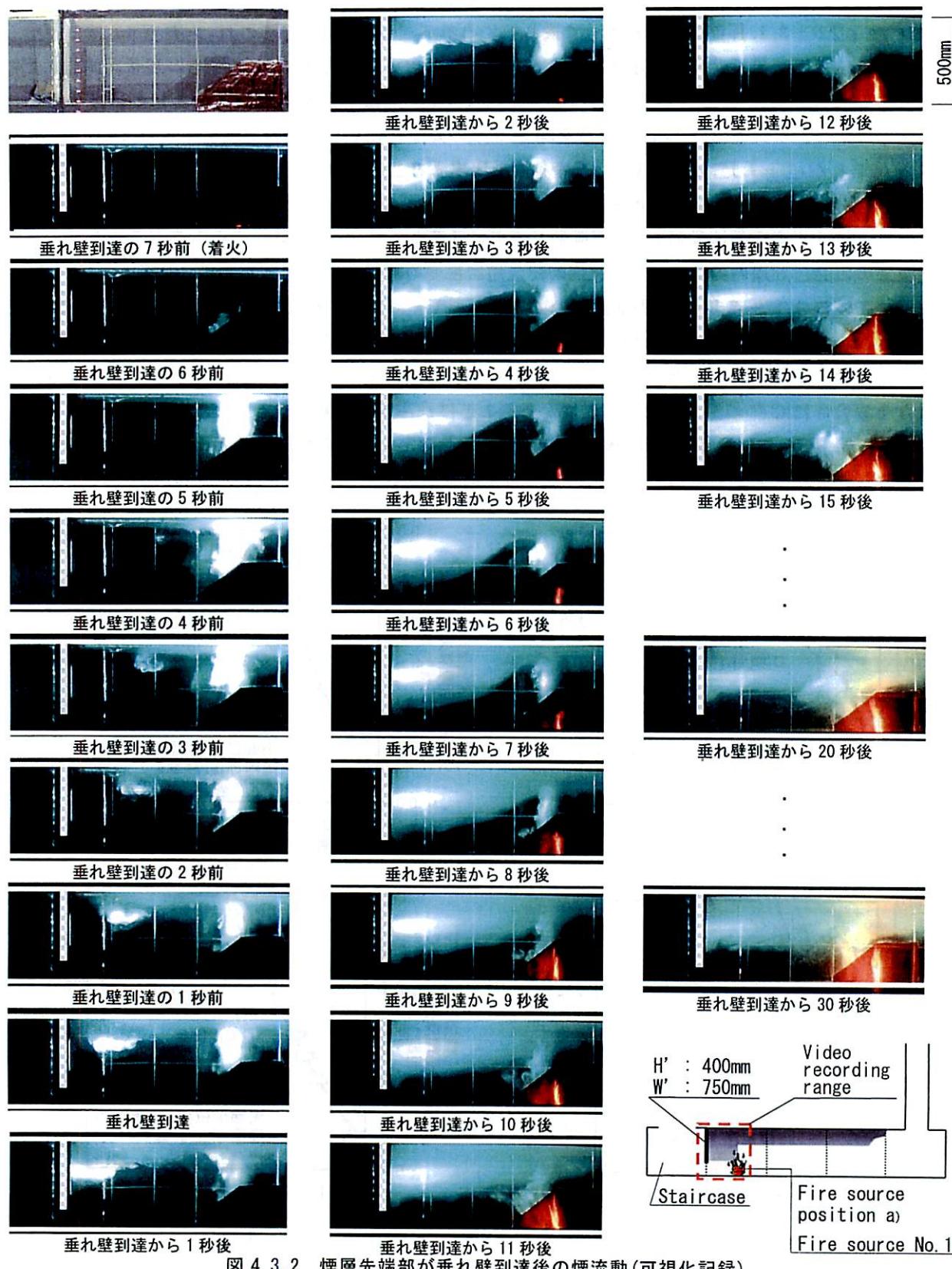


図 4.3.2

煙層先端部が垂れ壁到達後の煙流動(可視化記録)

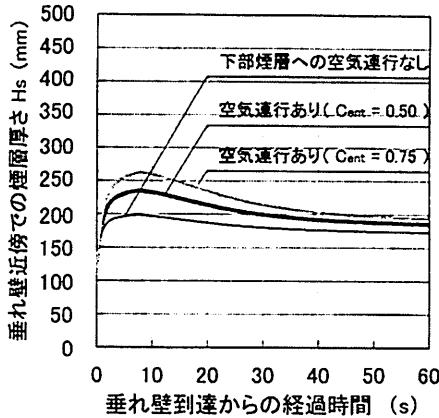


図 4.3.3 $\Delta T_c=0$ (K), 火源位置 a), 火源 No. 1 とした場合の垂れ壁到達後の煙層厚さ計算値

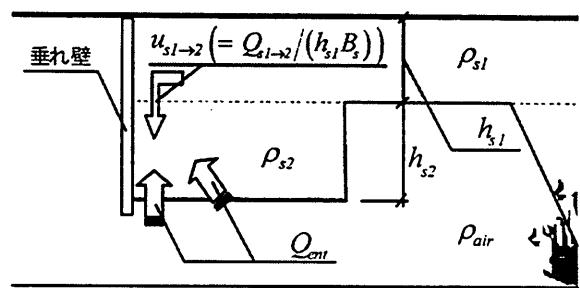


図 4.3.4 下部煙層—空気層間の混合を考慮

ここで、実験の可視化記録からは、煙層先端部が垂れ壁到達直後での煙層と空気層の混合が確認でき、このことが大きな煙層降下をもたらしたと考えられるため、煙流動モデルでもこの影響を考慮する必要がある。本研究では、この影響を 下部煙層へ密度 ρ_{air} の流体（空気）を時間ステップ毎に流入させることにより考慮することとする。ここで、下部煙層への空気の連行量を Q_{ent} とすれば、下部煙層内の質量収支および熱収支は以下のようになる。

[下部煙層内の質量収支 (下部煙層先端部が火源位置に到達する以前。到達後は左辺に M_{out} を加える)]

$$\frac{d(\rho_{s2}V_{s2})}{dt} = \rho_{s1}Q_{s1-to-2} + \rho_{air}Q_{ent} \quad \dots (4.3.1)$$

[下部煙層内の熱収支 (下部煙層先端部が火源位置に到達した後は 左辺に $C_p M_{out} T_{s2}$ を加える)]

$$\frac{d(C_p \rho_{s2} V_{s2} T_{s2})}{dt} + A_{s2} \alpha (T_{s2} - T_{w0}) = C_p \rho_{s1} Q_{s1-to-2} T_{s1} + C_p \rho_{air} Q_{ent} T_{air} \quad \dots (4.3.2)$$

ρ : 流体の密度, V : 煙層体積, C_p : 定圧比熱, $Q_{s1-to-2}$: 上部煙層から下部煙層への体積流入量

Q_{ent} : 下部空気層へ連行される空気の体積流量, T : 流体温度,

添え字 $s1, s2, air$: 順に 上部煙層, 下部煙層, 空気層 を表す

なお、下部煙層へ連行される空気の体積流量 Q_{ent} は 以下の式で表されるものとする。

$$Q_{ent} = u_{ent} h_{s2} B_s \quad \dots (4.3.3)$$

u_{ent} : 空気が連行される際の空気の流速, h_{s2} : 下部煙層厚さ, B_s : 模型の幅

ここで、各時間ステップにおいて、上部煙層は垂れ壁に到達後には同じ厚さ、同じ流速で 90° 下方に向きを変え 下部煙層に質量および熱量を注入すると考え、また、連行される空気の連行時の流速 u_{ent} と上部煙層から下部煙層へ流入する煙の流速 $u_{s1-to-2}$ の比は、流速 $u_{s1-to-2}$, 上部煙層温度 T_{s1} , 上部煙層厚さ h_{s1} から表される Ri 数 ($Ri_1 = \Delta \rho_1 g h_{s1} / (\rho_{s1} u_{s1-to-2}^2) = 1/Fr_1^2$) の逆数に比例するとして、次式で表されるものと考えた。なお、比例定数 C_{ent} は 0.50, 0.75 の 2通り設定し 計算を行った。

$$u_{ent} / u_{s1-to-2} = C_{ent} / Ri_1 \quad (C_{ent} : 比例定数) \quad \dots (4.3.4)$$

式(4.3.4)における比例定数 C_{ent} は、水理学の分野において 水平路、斜路に沿って進行する流体の周囲流体の連行量を計算する際に用いられている連行係数 E (Ri 数の関数)に対応するものであるが、本節

で設定した値 ($C_{ent} = 0.5$ or 0.75) は一般的に水理学の分野で用いられている E の値と比較して 1~2 衡程度大きい。しかし、ここで扱うような、煙が垂れ壁に衝突後に大きく下側に降下した場合の周囲空気の連行量は、水平路、斜路に沿って進行する天井流が連行する空気量 ($Fr < 1$ の場合には殆ど連行が無いものと見なされることが多い) と比較して、かなり大きくなると予想されるため、本研究で設定した値は それ程 非現実的な値ではないと考える。

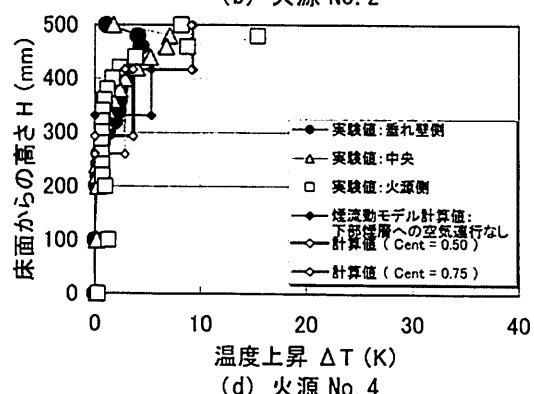
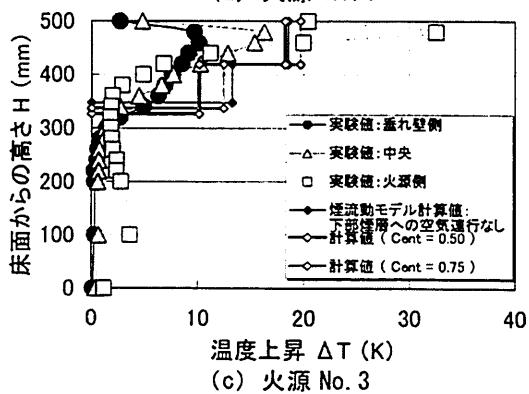
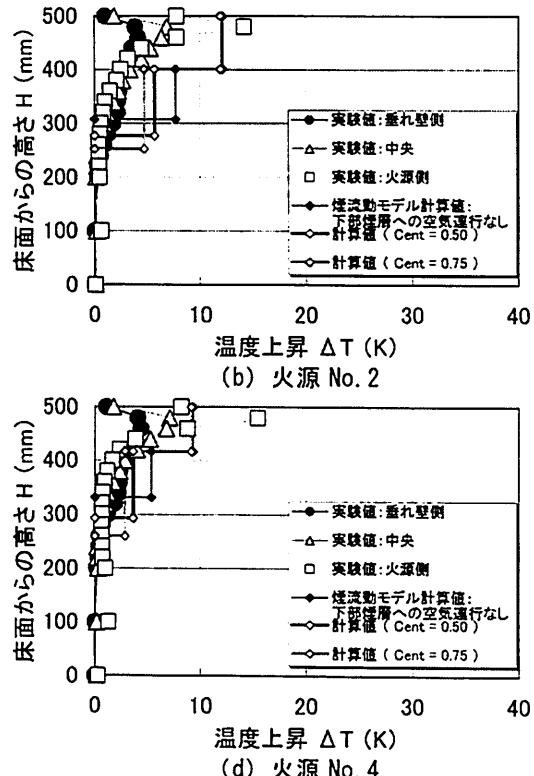
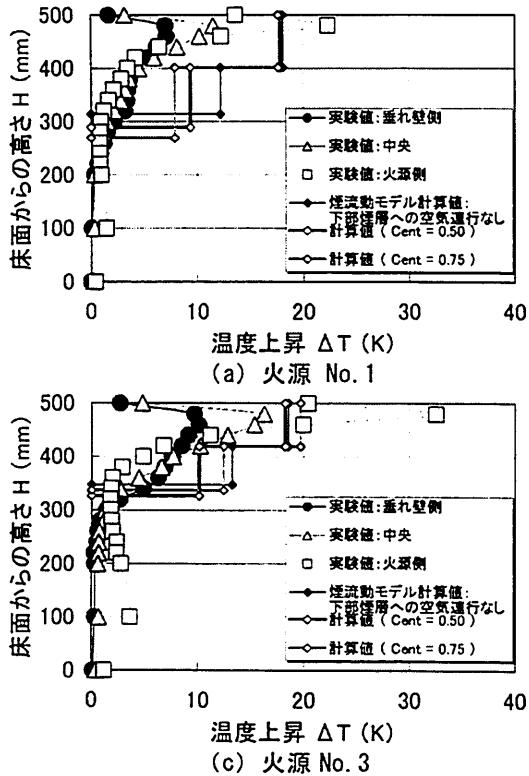


図 4.3.5 着火から 30 秒後の火源-垂れ壁間の煙層高さ、温度の比較
(火源位置 a), $H' = 400\text{mm}$, $W' = 750\text{mm}$, $\Delta T_c = 0\text{K}$

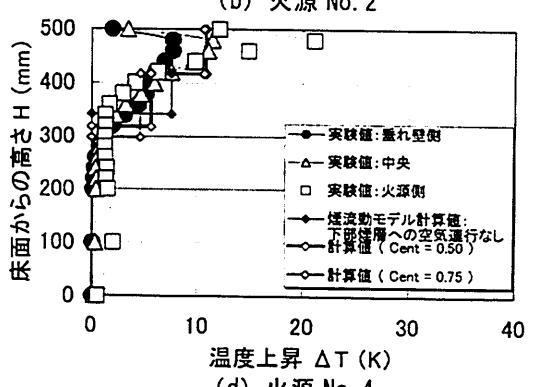
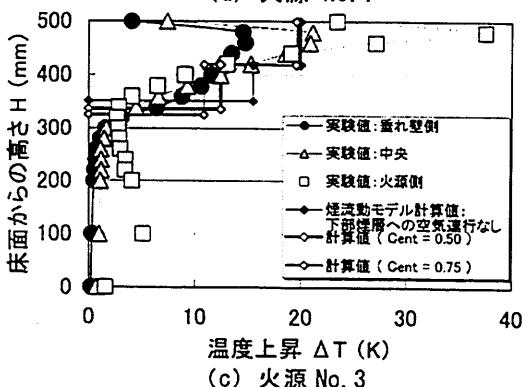
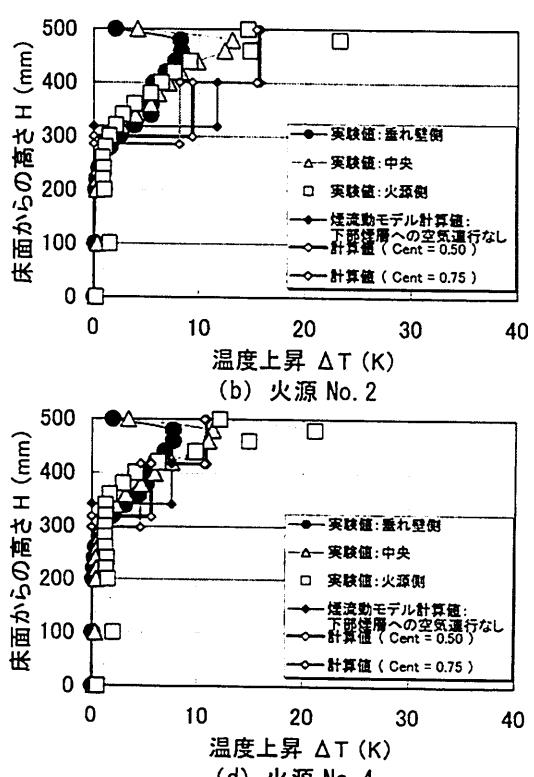
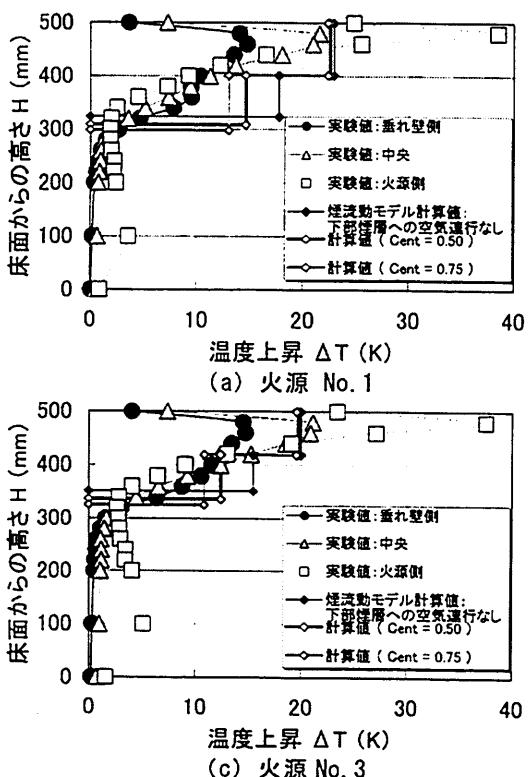


図 4.3.6 着火から 50 秒後の火源-垂れ壁間の煙層高さ、温度の比較
(火源位置 a), $H' = 400\text{mm}$, $W' = 750\text{mm}$, $\Delta T_c = 0\text{K}$

下部煙層への空気の運行を考慮した場合には、若干 下部煙層温度の計算値が実験結果よりも高くなっているものの、煙層厚さの計算値は実験結果に近づいた(図 4.3.3, 図 4.3.5(a), 図 4.3.6(a))。火源 No. 2~4 についても同様に、下部煙層への空気の運行を考慮することにより 計算結果は実験結果に より近くなることが分かる(図 4.3.5(b)~(d), 図 4.3.6(b)~(d))。

また、火源位置 b) (模型中央), 火源 No. 1, 階段室一火災室間垂れ壁高さ 400mm とした場合についても実験を行ったところ、煙層先端部が垂れ壁到達後の煙層厚さは 概ね 300~350mm となった(図 4.3.8)。煙流動モデルによる煙層厚さの計算結果は、下部煙層への空気の運行を考慮しない場合は、210mm 程度と 実験結果よりもかなり小さくなつたが、空気の運行を考慮することにより、実験結果と良く一致することが分かる(図 4.3.7)。

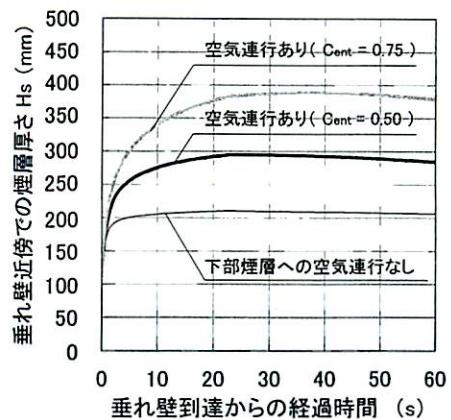


図 4.3.7 $\Delta T_c=0$ (K), 火源位置 b), 火源 No. 1 とした場合の 垂れ壁到達後の煙層厚さ計算値

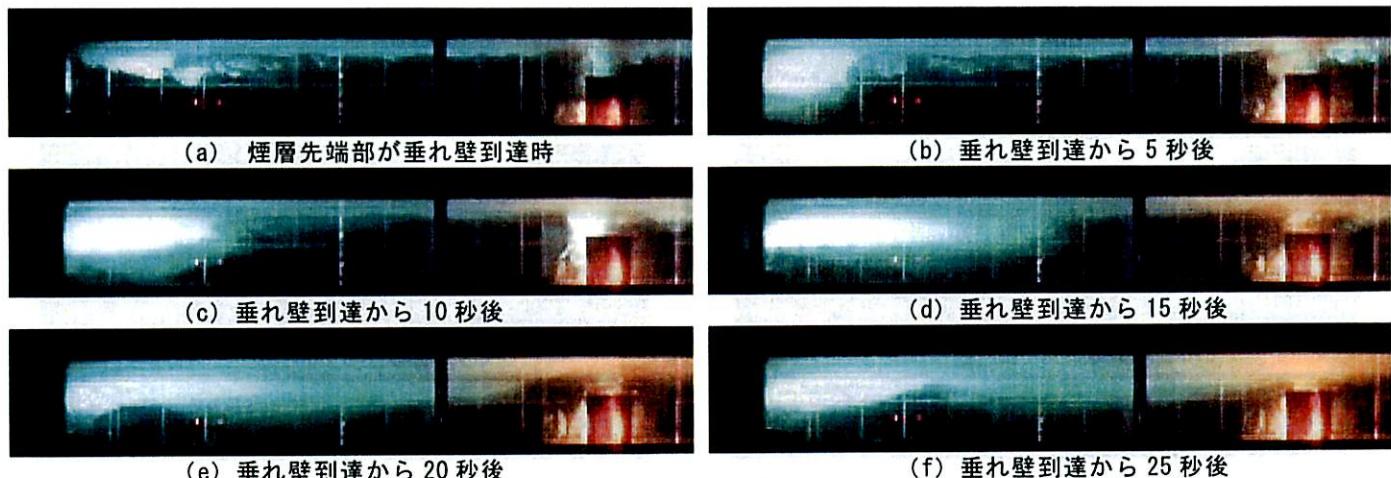
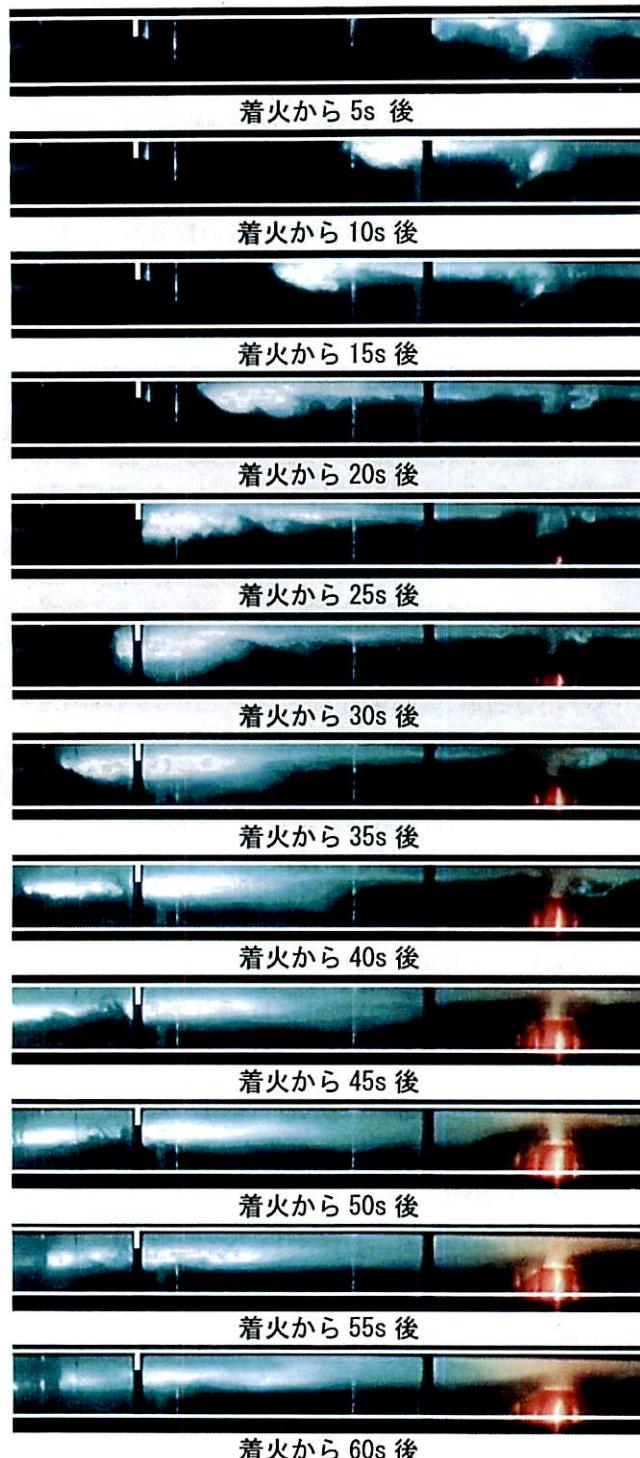
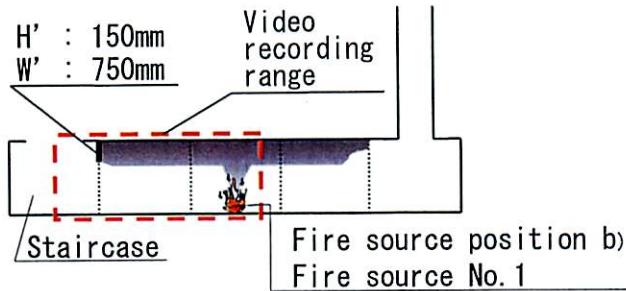


図 4.3.8 煙層先端部が垂れ壁到達後の煙流動(実験の可視化記録)
(火源位置: 模型中央 b), 火源 No. 1, 垂れ壁高さ 400mm, 垂れ壁下通路幅 750mm)

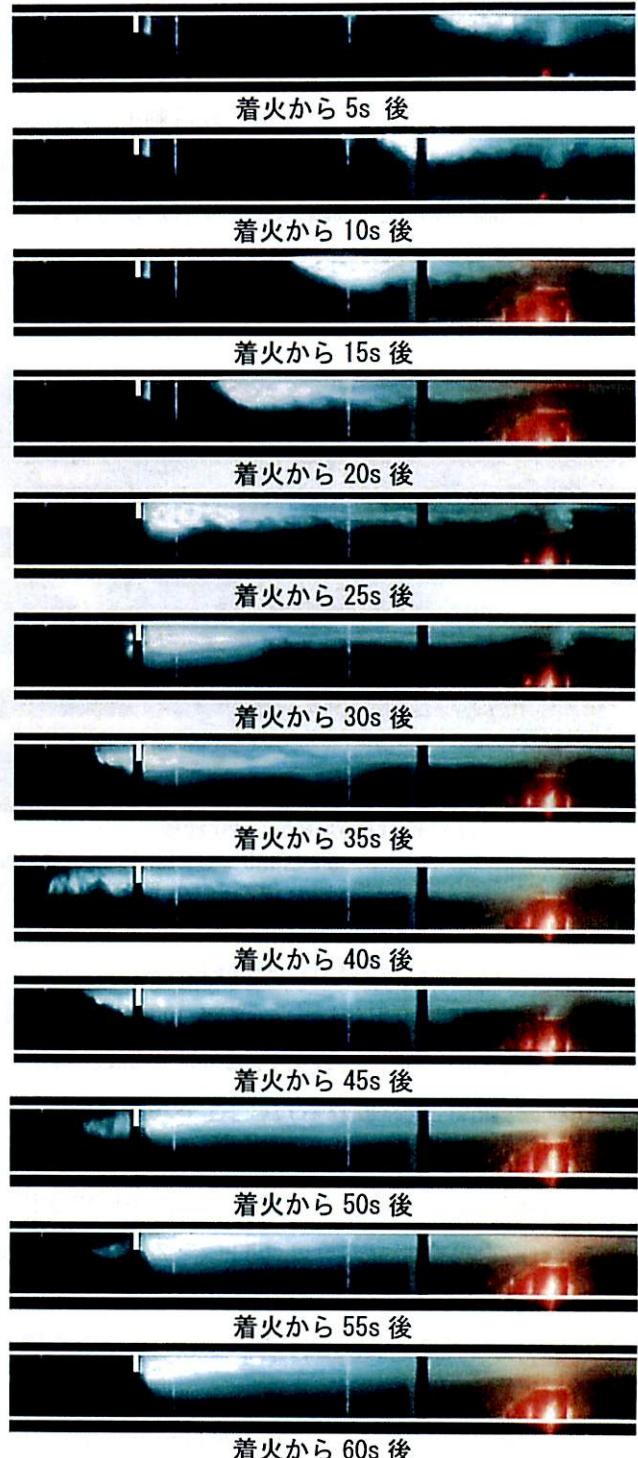
ここまででは、垂れ壁到達後の煙流動モデルによる計算結果と実験結果の比較、検討を行うにあたって、階段室一火災室間の垂れ壁の高さを 400mm とした場合を対象としてきたが、その場合には 垂れ壁高さが非常に大きいために、模型内に気流が形成されていないにも関わらず 階段室手前で遮煙が行われた(可視化画像から読み取れる)。ここで、垂れ壁高さが煙層厚さよりも小さい場合(駅舎計画上 小さい垂れ壁しか設置することができない場合)に遮煙を行うためには、チムニーによって形成される模型内気流が必要となる(着火前に模型内気流が形成されている場合の可視化画像を図 4.3.9 に示す)。

階段室一火災室間での遮煙に関して 2.4.2. 節で 2 通りの考え方を記載したが、以下では、遮煙状況が“模型内気流による力”と“煙が階段室に進入しようとする力”的バランスで決定すると考え、垂れ壁条件毎に遮煙が可能となる垂れ壁下風速 u_{air} を実験および煙流動モデルを用いた計算から導出する(図 4.3.10)。

ただし、煙層がチムニーに流入後は模型内気流が大きくなり 遮煙に対して有利に働くため、煙流動モデルから u_{air} を導出するにあたっては 煙がチムニーに流入するまで、かつ 下部煙層先端部が火源位置まで戻るまでを計算対象とした(実験では、着火後数分経過時点から階段室内に煙が流入し始めたケースは確認できなかった)。



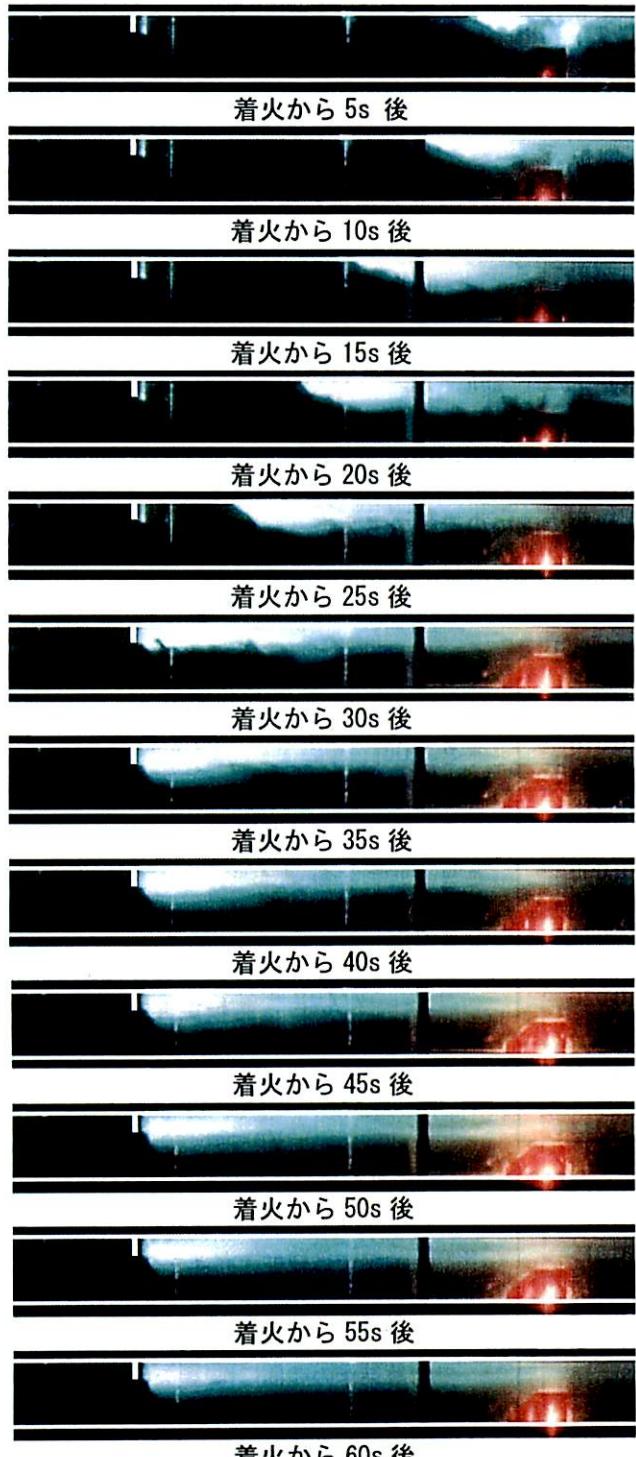
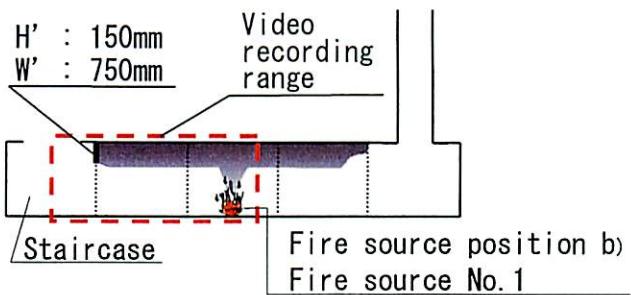
(a) $\Delta T_c = 0 \text{ (K)}$



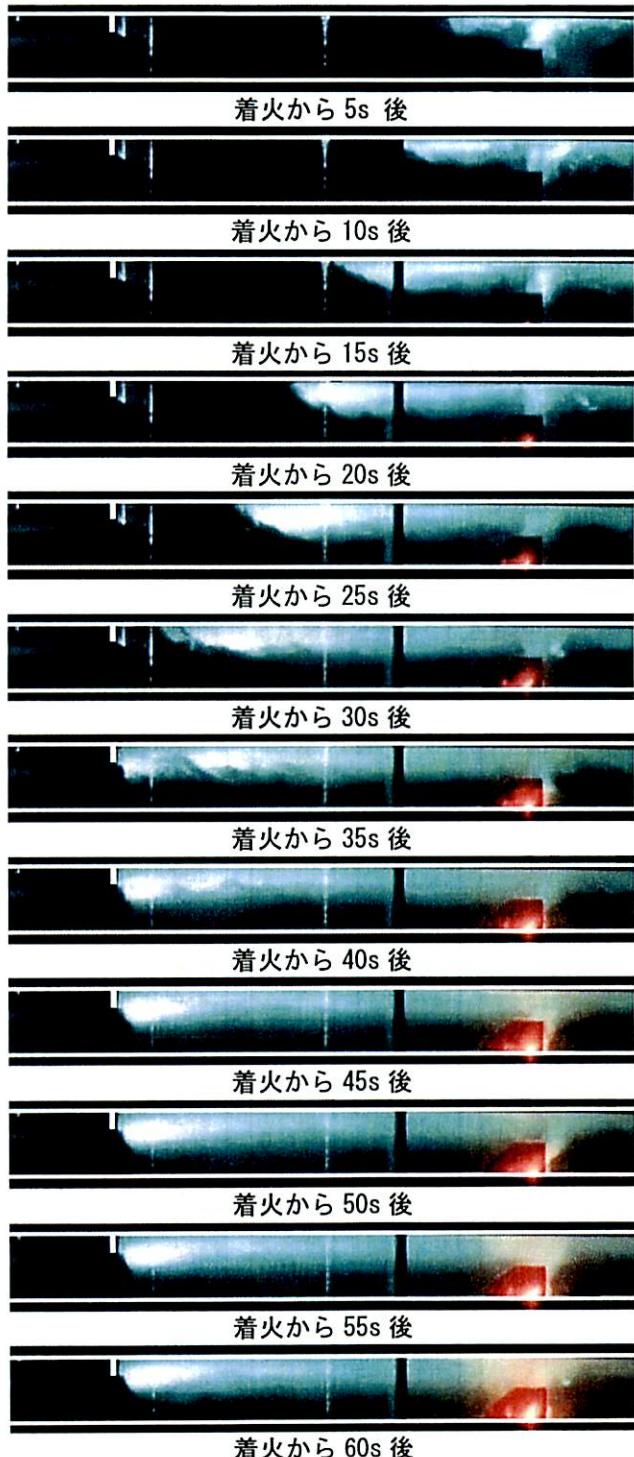
(b) $\Delta T_c = 20 \text{ (K)}$

図 4.3.9(1) 模型内気流による遮煙効果（可視化画像）

（火源 No. 1, 火源位置 b), $H' = 150\text{mm}$, $W' = 750\text{mm}$ ）



(a) $\Delta T_c = 40 \text{ (K)}$



(b) $\Delta T_c = 60 \text{ (K)}$

図 4.3.9(2) 模型内気流による遮煙効果（可視化画像）

(火源 No. 1, 火源位置 b), $H' = 150\text{mm}$, $W' = 750\text{mm}$)

階段室内への煙の流入の有無を判断する実験は、火源条件、 H' 、 W' 、 ΔT_c をパラメータとしてそれぞれ行ったが（実験条件、方法等に関する詳細は 4.2. 節を参照されたい）、実験結果から遮煙成否の境界となる条件を導出するにあたり、各実験条件下における 煙がチムニーに流入する以前での垂れ壁下風速を知る必要がある。

本研究では、式(4.3.5)から得られる単位時間あたりの換気量 V_{cal} と着火前換気量計測実験から得られた換気量 V_{exp} （表 4.3.1）との関係（図 4.3.11）から、計算による換気量を補正（計算値（式(4.3.5)）×0.53）することにより、表 4.3.1 に示す条件以外の設計条件下での垂れ壁下平均風速をそれぞれ算出した。

$$V_{cal} = aA \sqrt{\frac{2\Delta P_c}{\rho_{air}}} \quad \dots \quad (4.3.5)$$

$a=0.7(-)$: 流量係数（通常 流量係数は α で表すが、本研究では煙層－壁面間の対流熱伝達率に α を使用しているため、 a と表す）， $aA(m^2)$: 給気口、垂れ壁下開口、チムニーを直列結合した際の有効開口面積， $\Delta P_c(Pa)$: チムニー内外の密度差による圧力（チムニー内の熱電対による温度計測値を用いて算出）

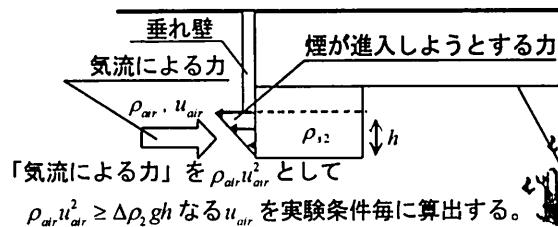


図 4.3.10 階段室－火災室間での遮煙の考え方

表 4.3.1 着火前換気量計測実験条件および結果

模型天井高さ (mm)	ΔT_c (K)	H' (mm)	W' (mm)	ΔP_c (N/m ²)	$V_{exp.}$ (m ³ /s)
500	20	0	750	0.116	0.016
			750	0.126	0.013
			600	0.102	0.018
			450	0.109	0.011
			300	0.114	0.009
	40	150	750	0.217	0.028
			750	0.222	0.021
			600	0.201	0.022
			450	0.201	0.020
			300	0.226	0.012
	60	150	750	0.348	0.035
			750	0.335	0.034
			600	0.316	0.032
			450	0.313	0.025
			300	0.347	0.017
300*	20	0	750	0.130	0.020
			450	0.136	0.015
			750	0.124	0.015
			150	0.129	0.015
	40	100	750	0.214	0.026
			450	0.222	0.020
			750	0.218	0.025
			150	0.233	0.023
	60	100	750	0.350	0.034
			450	0.354	0.027
			750	0.312	0.031
			150	0.344	0.029

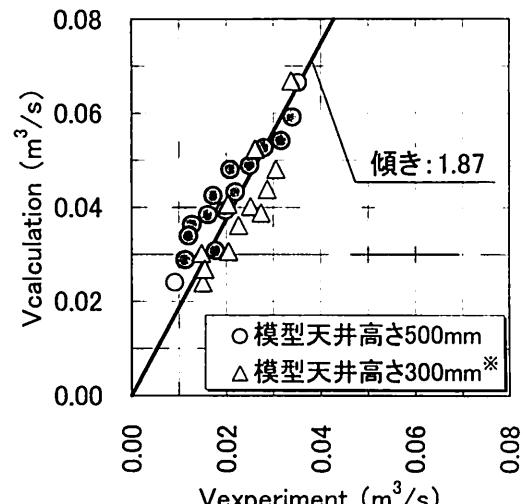


図 4.3.11 単位時間あたりの換気量

* 4.4. 節では模型天井高さを 300mm とした場合について検討するが、天井高さが 300mm の場合でも、着火前の換気量の実験結果と計算結果との間には 模型天井高さが 500mm の場合とほぼ同一の関係 ($V_{cal.} = 1.87 V_{exp.}$) があることが分かる（図 4.3.11）。このため、4.4. 節においても この関係を用いて本節で扱った以外の条件下における換気量を計算から算出する。

以下では、まず火源に火源 No. 1 ($D=100\text{mm}$, $Q=1.68\text{kW}$) を設定した場合の階段室-火災室間での遮煙に関して、実験結果および計算結果から考察を行う。

図 4.3.12 に火源位置を a), b), c)とした場合の遮煙成否判定実験結果と煙流動モデルから導出した遮煙成否の境界を併せて示す。なお、図 4.3.12 を作成するにあたり、各実験（遮煙成否判定実験）における階段室への煙の流入は階段室内に設置した熱電対による温度計測値が 0.2 (K) 以上継続して上昇した時をもって判断した（図 4.3.13）。

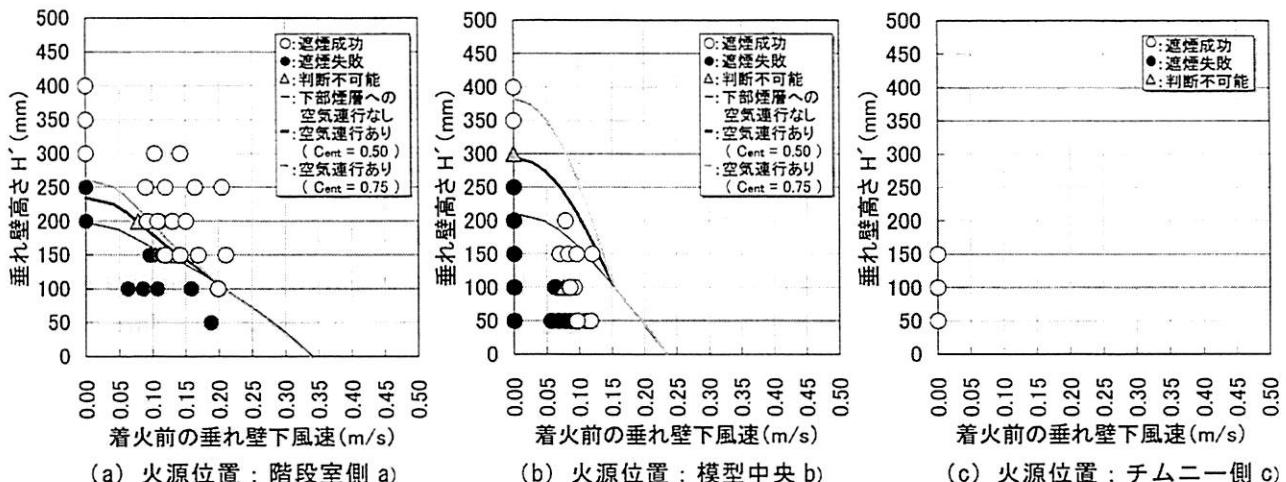


図 4.3.12 火源位置の違いによる遮煙の成否（火源 No. 1）

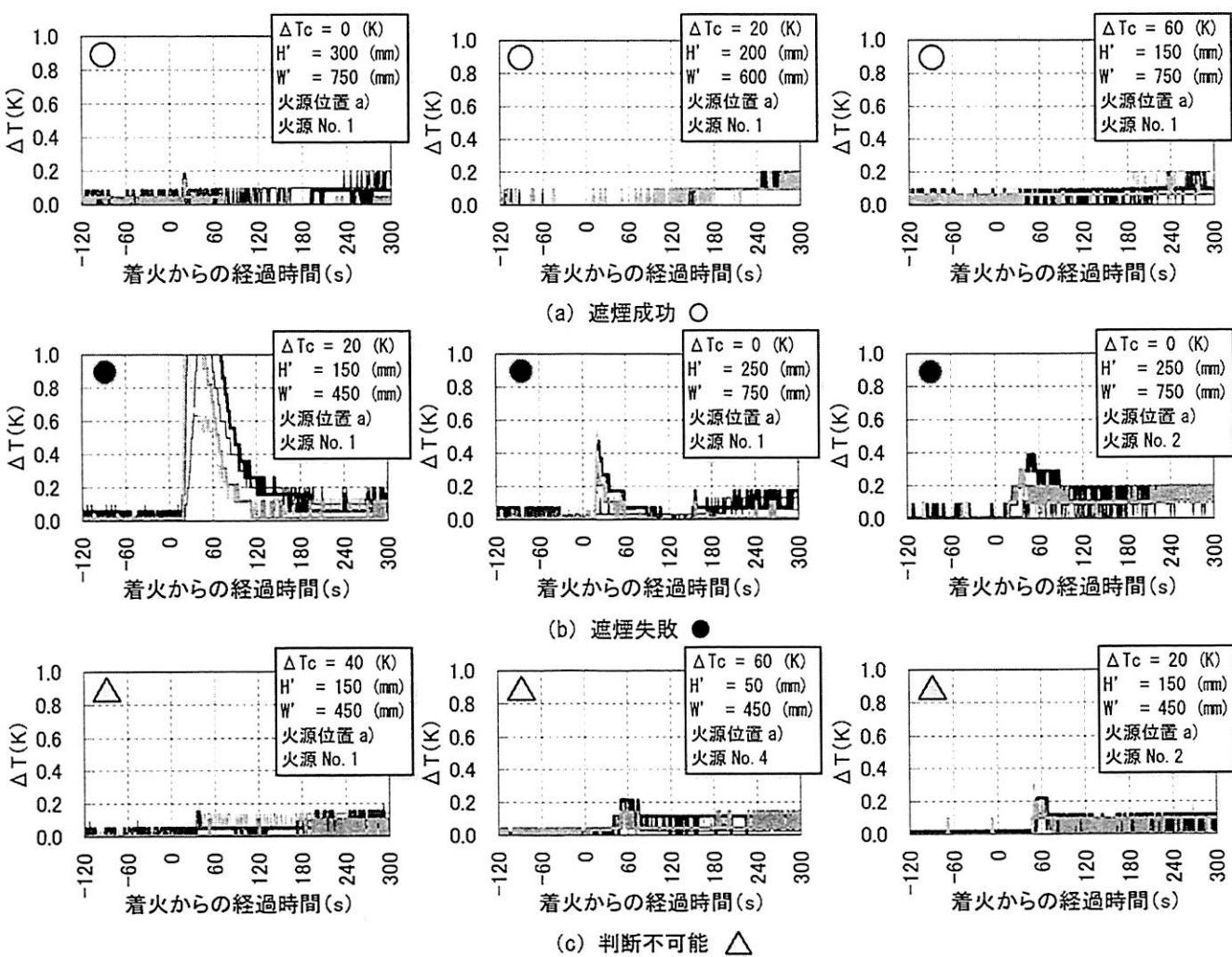


図 4.3.13 階段室内の温度上昇（実験計測値）に基づく煙流入の有無の判断 資料編 3. からの抜粋：巻末参照

図 4.3.12 より、火源位置が a), b), c) の順に遮煙を行うことが困難になっているが、これは火源がチムニーに近い場合には 着火後煙層先端部が垂れ壁に到達する前にチムニーに煙が流入し、模型内気流が大きくなることによると考える（図 4.3.14）（計算ではこの影響を考慮していない）。

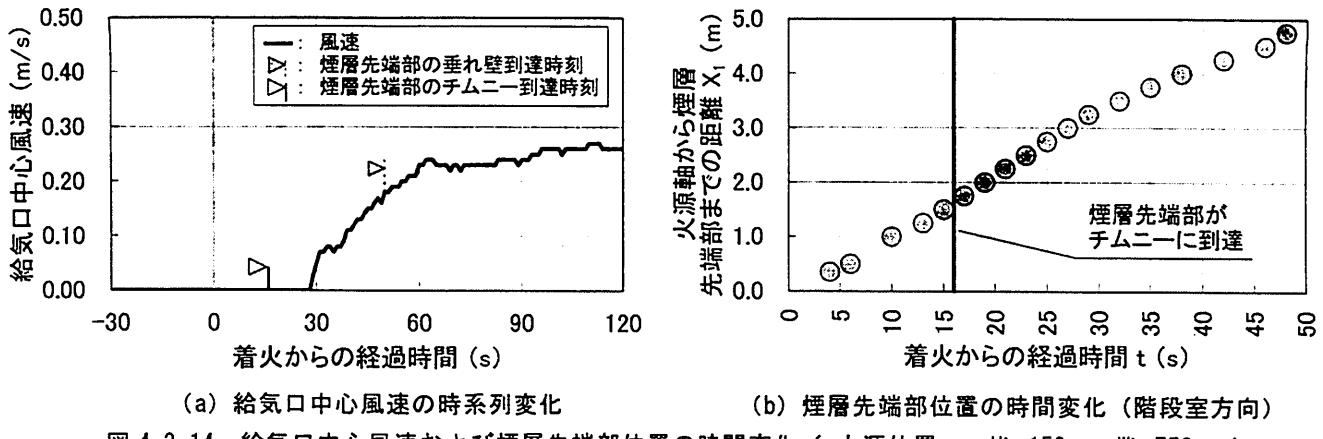


図 4.3.14 給気口中心風速および煙層先端部位置の時間変化（火源位置 c）、 $H' = 150\text{mm}$ 、 $W' = 750\text{mm}$ ）

火源位置が a) の場合を見ると、煙流動モデルから導出した遮煙成否の境界は、下部煙層への空気の連行を考慮することで実験結果と良く一致している。

火源位置 b), 着火前風速がある場合は、モデルから導出した境界は、実験結果と比較して安全側の評価となつたが、これは煙層先端部が垂れ壁に到達する前にチムニーに到達し（図 4.3.15）、より大きい模型内気流が形成された（図 4.3.16）ことによると考えられる（計算ではこの影響を考慮していない）。

また、火源位置が a) の場合では、火源条件が異なる場合（火源 No. 2（火源径とガス流量のバランスが悪い）は除く）においても、下部煙層への空気の連行を考慮することにより、計算結果は実験結果と良く一致している（図 4.3.18）。

ここで、計算結果は垂れ壁高さ 100mm 付近を境に傾向が異なっているが、これは上・下部煙層温度の違いによるものである。煙層先端部が垂れ壁に到達後の煙流動モデルでは、下部煙層への空気の連行を考慮しない場合は上部煙層と下部煙層の温度に大差はないが、空気の連行を考慮した場合には 上部煙層に比べて下部煙層の温度が かなり低くなるために、垂れ壁高さが上部煙層厚さよりも小さい場合と大きい場合とで計算結果（遮煙に必要な垂れ壁下風速）の傾向が異なることになる（図 4.3.17）（このことに関する詳しい説明は 3.5. 節末（84 頁）に記載している）。

また、火源位置を a) とした場合には、垂れ壁高さ 125~175mm 付近（火源条件によって異なる）にも変曲点が現れているが、これは 計算対象時間を煙層先端部がチムニーに流入するまでとしていることに起因する。計算では、時間経過と共に煙層の温度が高くなり、また それと同時に煙層厚さが小さくなるが、 F_{smoke} （煙層が階段室に進入しようとする力）を算出するにあたって、垂れ壁高さが 変曲点での値以上の場合には 煙層温度が高くなることよりも煙層厚さが小さくなることの影響の方が大きくなるために、チムニーに煙が到達する前に F_{smoke} が最大値をとる。一方で、垂れ壁高さが 変曲点での値以下の場合には、煙層温度が高くなる影響の方が大きく、徐々にではあるが F_{smoke} は時間経過と共に大きくなるために、煙層先端部がチムニーに流入した時点（計算により到達時間（煙層先端部が火源-チムニー間距離を進むまでに要する時間）を算出）で最も F_{smoke} が大きくなる。この違いが変曲点として現れたと考える。

なお、空気の連行を考慮した場合としない場合とで、垂れ壁高さが上部煙層厚さよりも小さい場合の遮煙条件の計算結果に殆ど差がないが、これは、空気連行の有無によって $\Delta\rho_2gh_s$ が殆ど変化しなかつたことに因る（図 4.3.17(右)）。

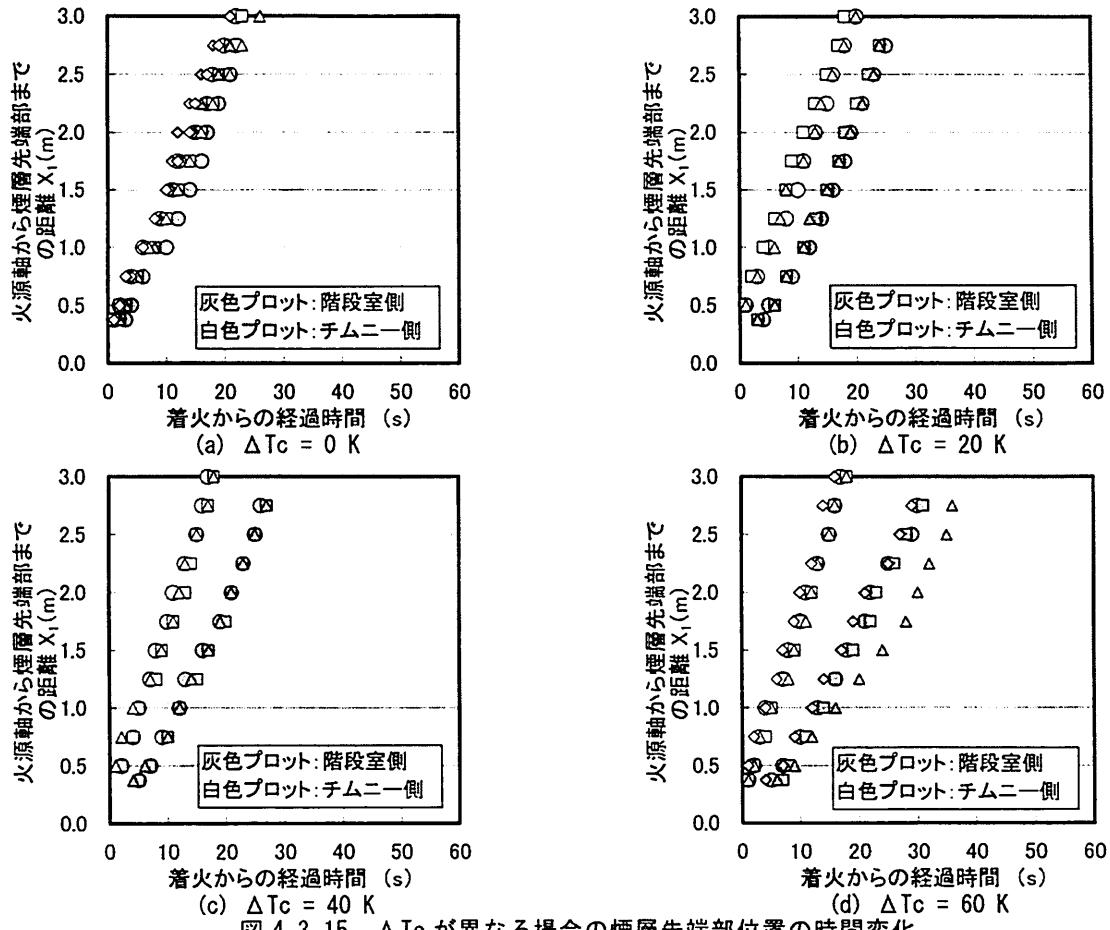


図 4.3.15 ΔT_c が異なる場合の煙層先端部位置の時間変化

(火源位置 b), 火源 No. 1, $H' = 150\text{mm}$, $W' = 750\text{mm}$)

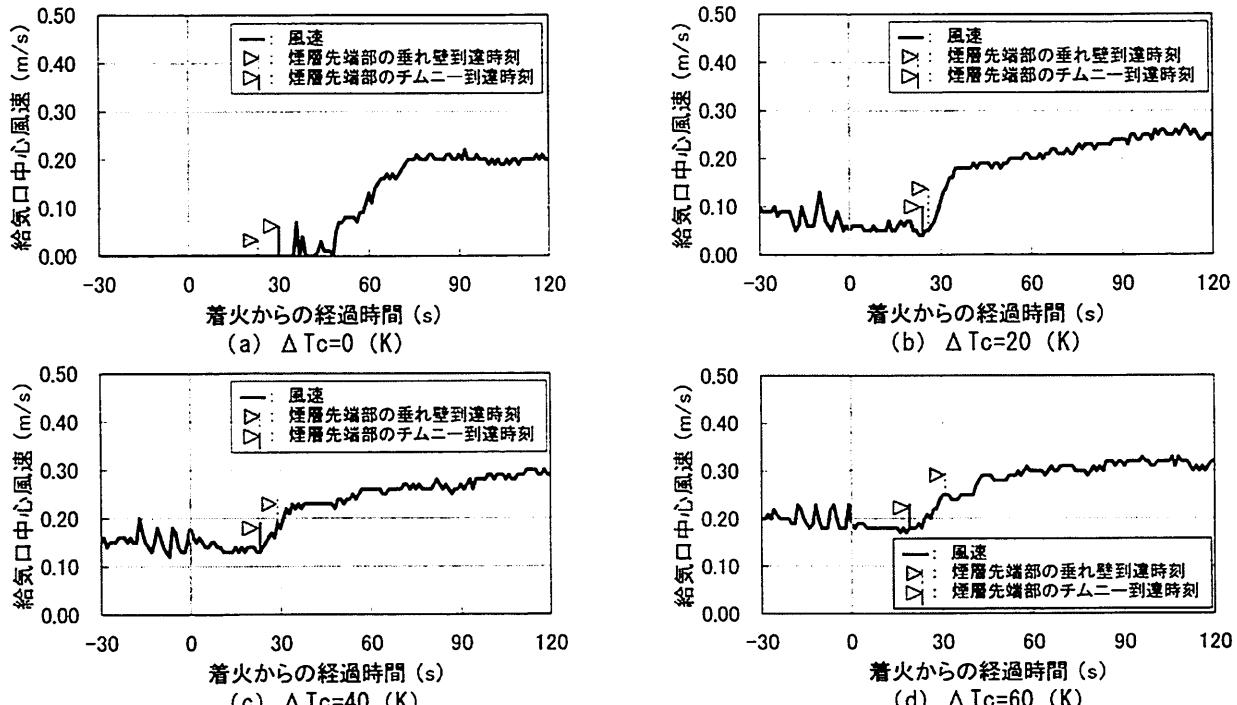


図 4.3.16 給気口中心風速の時系列変化 (火源位置 b), 火源 No. 1, $H' = 150\text{mm}$, $W' = 750\text{mm}$)



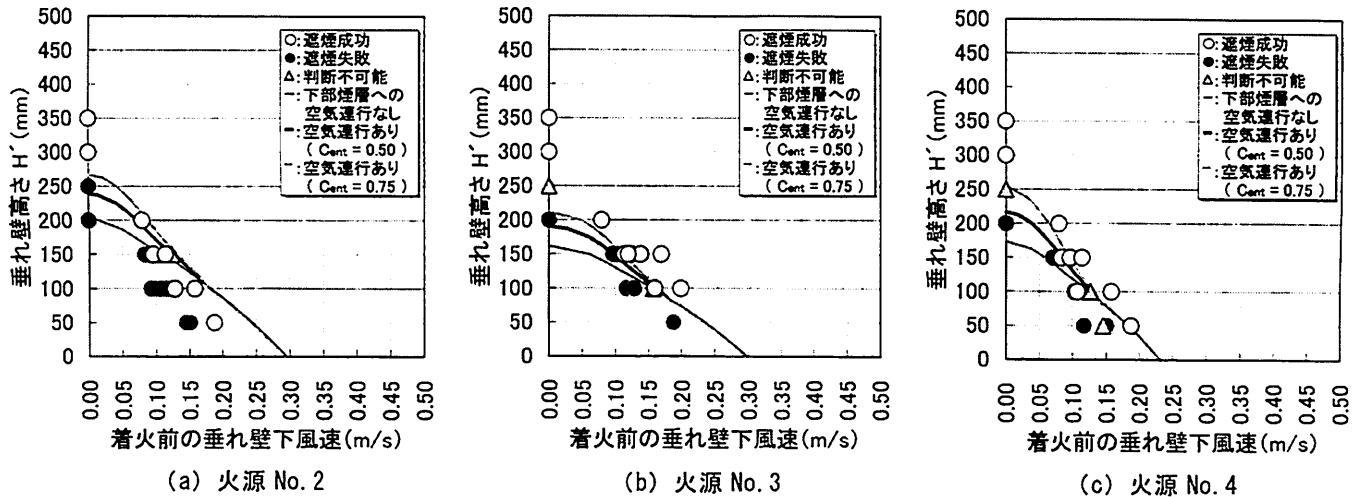


図 4.3.18 火源 No. 2~4 を用いた場合の遮煙の成否 (火源位置 a))

なお、本研究で提案する煙流動モデルでは、上・下部煙層をそれぞれ等温、等厚の一つの塊として扱っているため、垂れ壁-火源間距離が長くなるほど予測精度が低下すると言えるが、実際にパッシブセイフティシステムを採用した地下鉄駅舎を計画する際には、チムニーが設置される関係上 垂れ壁-火源間距離はそれほど長くならないことから、煙流動モデルを用いた予測が可能となると考える。

4.4. 模型天井高さが異なる場合の検討

前節では、模型天井高さが 500mm (F.S. 10m) の場合について実験および計算を行ったが、実際に駅舎の計画を行う際にはここまで大きな天井高さを確保することが困難な場合がある。本節では、模型天井高さを 300mm (F.S. 6m) とした場合についても同様に実験および計算を行い、本論文第 3 章で提案した煙流動モデルの適用可能範囲についての考察を加える。ただし、模型天井高さを 300mm として火源に No. 1 ($D=100\text{mm}$, $Q=1.68\text{kW}$) , No. 3 ($D=50\text{mm}$, $Q=1.12\text{kW}$) を用いた場合には火炎が天井に接するため、ブルームから煙層へ流入する質量、熱量を算出することができないこと、加えてその様な場合には相似則が成り立たなくなる可能性がある^{2.2節末参照}ことから、本節では火源 No. 2 ($D=100\text{mm}$, $Q=1.12\text{kW}$) , No. 4 ($D=50\text{mm}$, $Q=0.56\text{kW}$) の 2 種類のみを扱う。

図 4.4.1～図 4.4.3 に $\Delta T_c=0\text{K}$ とした場合の煙層先端部位置の時間変化 (灰:階段室方向、白:チムニー方向) および垂れ壁近傍の煙層温度 (火源位置 a)) の実験結果と煙流動モデルによる計算結果の比較を示す。ただし、煙流動モデル式中の C_1 , C_2 には、前節で実験結果より決定した 1.36 を用いた。

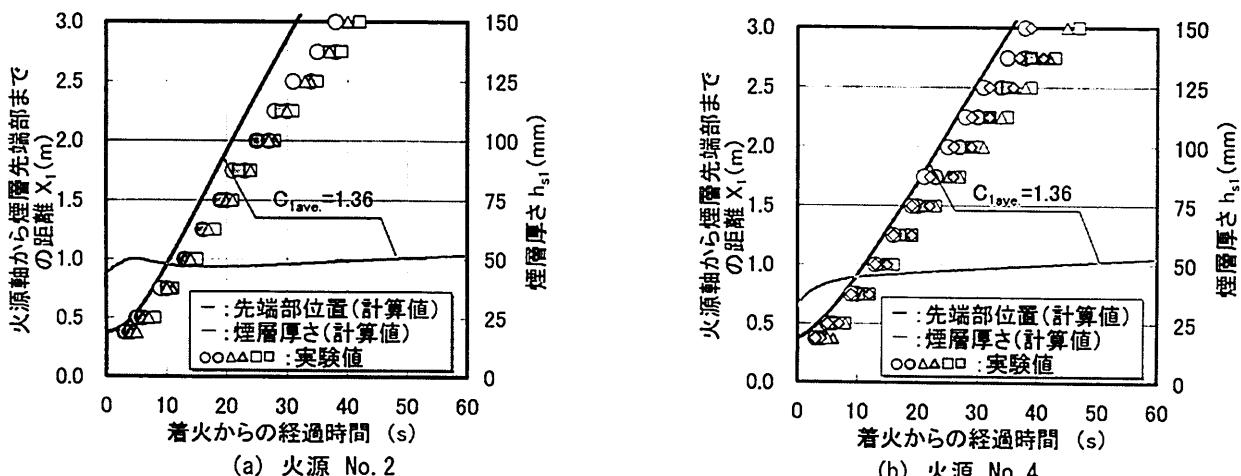


図 4.4.1 $\Delta T_c=0\text{K}$ での煙先端部位置の時間変化 (左軸) および煙層厚さ (右軸)

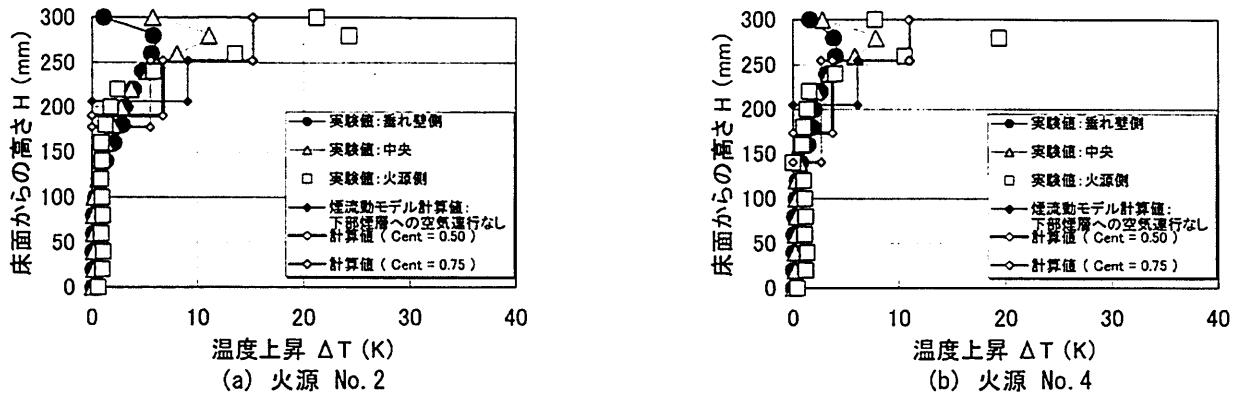


図 4.4.2 着火から 30 秒後の火源-垂れ壁間の煙層高さ、温度の比較
(火源位置 a), $H' = 200\text{mm}$, $W' = 750\text{mm}$, $\Delta T_c = 0\text{K}$)

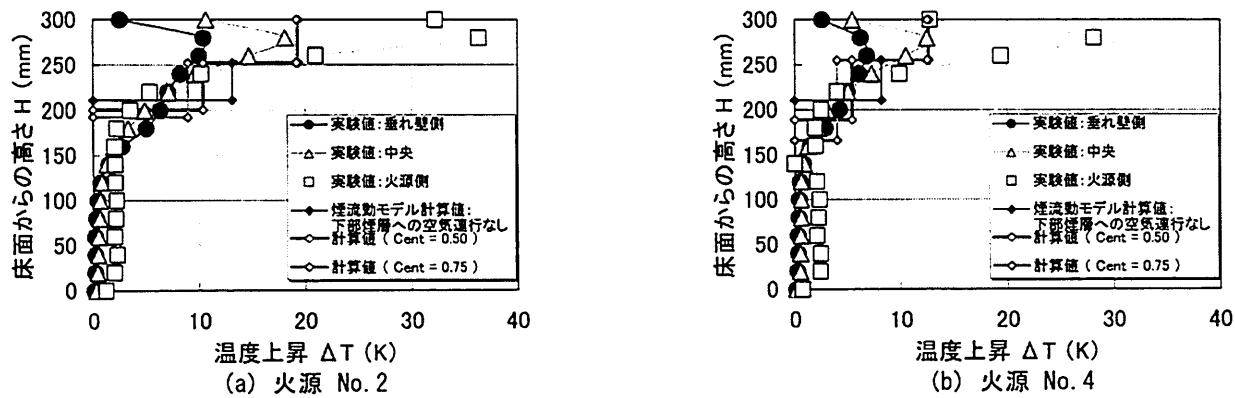


図 4.4.3 着火から 50 秒後の火源-垂れ壁間の煙層高さ、温度の比較
(火源位置 a), $H' = 200\text{mm}$, $W' = 750\text{mm}$, $\Delta T_c = 0\text{K}$)

また、図 4.4.4 に火源位置を a)とした場合の遮煙成否判定実験結果と煙流動モデルから導出した遮煙成否の境界を併せて示す。

図 4.4.1～図 4.4.4 より、天井高さが 300mm (F. S. 6m) の場合においても、火源 No. 4 とした場合には、煙流動モデル式中の C_1 , C_2 に関して特別な検討をしていないにも関わらず、下部煙層への空気の連行を考慮することで 実験結果と計算結果は良く一致している (火源 No. 2 (火源径とガス流量のバランスが悪い) に関しては、実験結果と計算結果の比較を行うことに それほど意味はないが、一応掲載した)。

ただし、より精確な予測を行うにあたっては 模型の断面寸法が異なる場合や模型スケールが異なる場合、模型構成材料が異なる場合についても検討を行った上で適切な C_1 , C_2 および C_{ent} を設定する必要があるが、これに関しては今後の課題とする (詳細は 6.2. 節で記載する)。

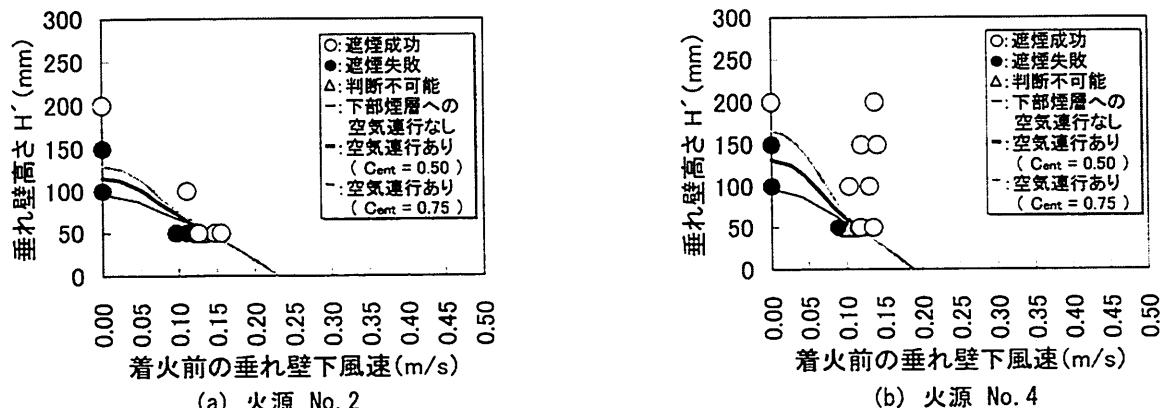


図 4.4.4 遮煙成否の境界となる条件

4.5. 本章のまとめ

本章では、着火前の模型内風速、階段室一火災室間 垂れ壁高さ、垂れ壁下通路幅をパラメータとして模型実験を行い、実験から 火災時の避難経路の安全性を確保するために満たすべき駅舎内部での設計条件（遮煙条件）を把握した。また、本論文第3章で提案した2つの煙流動モデルを用いて算出した煙層先端部移動速度と垂れ壁近傍での煙層厚さが実験結果と合致するようにモデル式中の比例定数 C_1 , C_{ent} の調整を行ったところ、遮煙条件の計算結果も実験結果と良く一致した。また、本章では、1/20スケール模型天井高さが500mmの場合以外にも300mmとした場合についても検討したが、煙流動モデルを用いた予測を行う際に、比例定数 C_1 , C_{ent} に天井高さを500mmとした場合の実験結果から決定した値を用いたにも関わらず、煙層先端部移動速度、煙層厚さ、煙層温度、遮煙条件の計算結果は実験結果と良く一致した。これにより、1/20スケールの駅舎においては、火災時に避難経路の安全性を確保するために満たすべきチムニー条件、垂れ壁条件を計算から導出することが可能となった。

なお、縮尺模型を用いた場合、壁、天井が断熱であれば、模型実験結果を相似則に従いそのまま実スケールでの値に変換し 実設計に用いることができるが、そうでない場合には煙層が接する壁面近傍の境界層厚さが模型-実スケール間で相似とはならない（すなわち、対流熱伝達率は相似とはならない）ため、模型実験により得られた煙層温度は実際の温度と異なることになる（この問題を解決することはできないが、辻本²⁶⁾は1つの工夫として模型構成材料の相似則（式(2.2.26)）を提案している）。具体的にどの程度の影響があるかを煙流動モデルを用いて確認したところ、図4.5.2に示すように 模型実験により得られた煙層温度は、実スケールでの煙層温度よりも かなり低くなつた。模型実験では実スケールでの場合と比較して 煙層の温度が低くなるために 煙層は厚くなるが（図4.5.2）、図4.5.1から分かるように、階段室手前に小さい垂れ壁しか設けることができない場合には、垂れ壁位置での遮煙の観点から言えば 煙層が厚くなることよりも煙層温度が低くなることの方が 影響が大きくなるために、模型実験結果（遮煙条件）を相似則に従って実スケールでの遮煙条件に変換した場合には 実際によりも危険側の評価となる。このために、模型実験結果を用いて、実際の駅舎の設計を行う際には注意が必要となる。なお、本節で検討したように、煙流動モデルを用いて 実スケール駅舎における遮煙条件を導出することは可能であるが（計算例を 資料編4.に記載する）、より精確な予測を行うためには、駅舎形状が変化した場合や異なる模型スケールにおいても煙流動モデル式中の C_1 , C_2 および C_{ent} に関する検討を行い、これらの結果を総合して適切な比例定数を設定する必要がある（詳細は 6.2.節参照）。

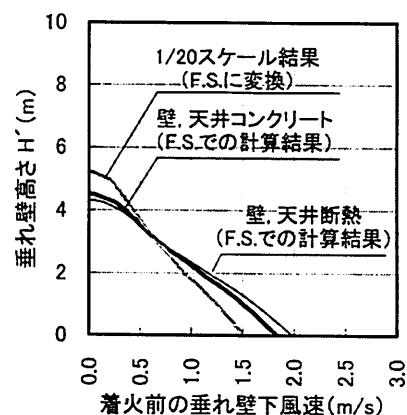


図 4.5.1 遮煙条件の比較※ 資料編4.からの抜粋

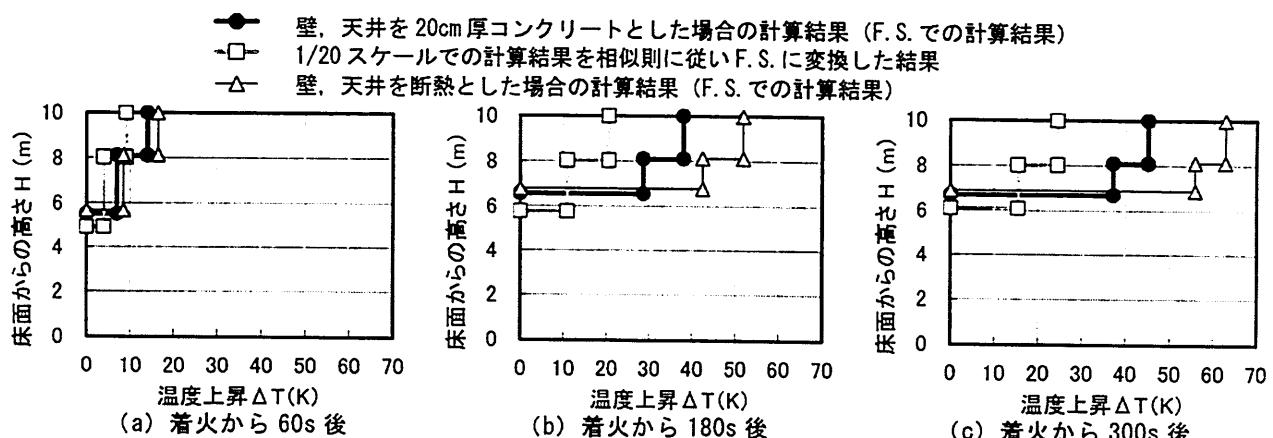


図 4.5.2 煙層温度および煙層高さの比較※ 資料編4.からの抜粋

※ F.S.での計算は、天井高さを10m、垂れ壁高さを8mとし、煙層-壁面間の対流熱伝達率 α には1/20スケールでの計算で用いた値と同じ $0.01745 \text{ kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ を用い、また、空気の連行係数 C_{ent} は0.75とした。火源位置はa)とし、火源No.1をF.S.に変換した径、発熱速度の火源を設定し、計算を行つた。

第 5 章

天井を傾斜させることによる効果に関する検討

— 模型を傾斜させた際の煙流動性状に関する考察 —

5.1. 本章の目的

本論文第3章および第4章では、パッシブセイフティシステムを採用した地下鉄駅舎において、火災時の避難安全性を確保するために満たすべき条件（垂れ壁高さ、垂れ壁下通路幅、日常時の垂れ壁下での風速の組合せ）の導出方法に関して記載した。第3章、第4章での検討では階段室×1箇所、チムニー×1箇所の模型パターンIを対象としたが、実際の駅舎計画を考えた際には少なくとも階段室を2箇所設置する必要がある。東京の既存の地下鉄駅舎では、

島型ホームで 2~4 箇所 階段が設置されることが多い
(図 5.1.1)、この場合には チムニーが駅舎内に気流
を形成しようとする力が各々の階段室に分割されるた
め、1 つの階段室からの給気量は小さくなると考えら
れる。その場合でも垂れ壁高さを大きくすることによ
り、火災時に階段室の安全性を確保することは可能と
なるが、駅舎計画上それが難しい場合には、天井を傾
斜させることにより煙をチムニー方向に流れやすくす
る等の対策が必要となる。

本章では、天井を傾斜させることによる煙流動性状への影響を把握することを目的として、模型を勾配 $1/100$, $3/100$, $5/100$ で傾斜させて それぞれ次節に示す条件で実験を行った。

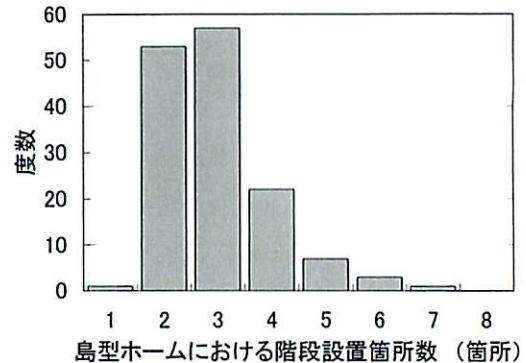


図 5.1.1 東京の既存の島型ホームに設置されている階段の数^{17), 18)}

- ※ 階段とエスカレーターが併設されている場合には一箇所として扱っている
- ※※ 他線への連絡階段を含む
- ※※※ 非常階段は含まない

5.2. 模型概要および実験条件

図 5.2.1 に本章での実験に用いた模型の写真を、図 5.2.2 に模型の断面図および温度、風速の計測位置を示す。なお、本章では 1 つの階段室からの給気量が比較的小さい場合を想定しているため、チムニー内に面状電熱ヒータは設置せず、着火前には模型内気流が形成されていない状態で実験を行った。実験条件を表 5.2.1 に示す。

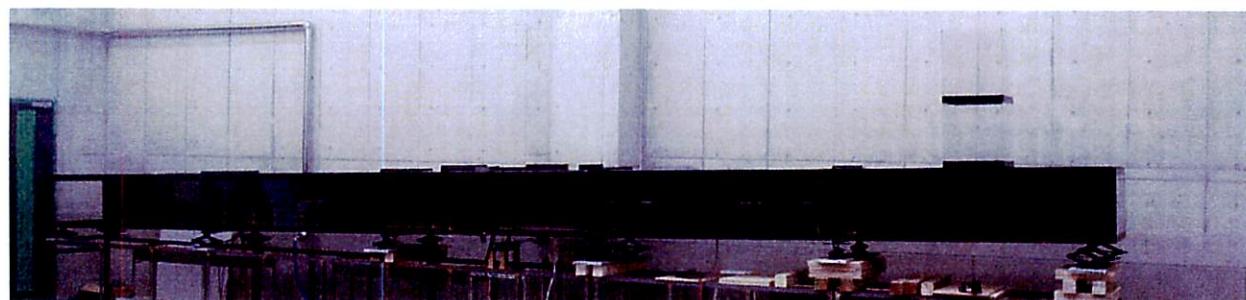


図 5.2.1 模型写真（勾配：3/100）



図 5.2.2 模型断面図および計測位置(単位:mm)

表 5.2.1 実験条件

実験の種類	火源位置	火源No.	H' (mm)	W' (mm)	ΔTc (K)	模型勾配(一)
煙層先端部移動速度把握実験	b)	1~4	150	750	0	1/100, 3/100, 5/100
煙流動可視化実験	a), b)	1	火源位置 a) の場合: 400 火源位置 b) の場合: 150	750	0	1/100, 3/100, 5/100

5.3. 天井の傾斜が煙流動に及ぼす影響

本論文第3章では、天井が水平な場合における火災発生直後の煙流動性状に関する2つの予測モデルを構築した。煙層先端部が垂れ壁に到達後の煙流動モデルにおいては、垂れ壁到達直後に煙層は垂れ壁近傍で大きく下方に押し出され、その後、下部煙層内の質量バランス、熱量バランスをとるよう煙層温度、煙層高さ、火源方向への移動速度が決定された（図5.3.1(a)）。

本節では、天井が傾斜している場合について考えるが、それに先立ちまず、図5.3.1(b)に示すように垂れ壁の手前に天井流厚さと同程度の高さの段差がある場合を考える。この場合には、火災発生後天井下を伝播する煙層は最初の段差に到達時に下方に押し出され、一部は段差を乗り越えて垂れ壁方向に進み、残りは火源方向に戻ると考えられる。ここで、簡略化のため、段差到達時に煙層と空気層の間に混合は無く段差到達前後の煙層温度は等しいとして、また煙層温度および厚さの時間変化が無いものと考えれば、段差の高さが段差手前での煙層厚さと同程度の場合には垂れ壁方向および火源方向に進む煙流量は概ね等しくなり、これらの合計が段差手前での流量に等しくなる。この仮定の下では、段差を超えて垂れ壁方向に向かう煙層の厚さは段差到達前の厚さの約0.63倍となるが、この煙層が垂れ壁に到達した後は、垂れ壁到達前後で煙層温度が等しければ、この厚さとほぼ同じ高さだけ下側に押し出されるため、結果として、垂れ壁近傍での煙層厚さHsは天井が水平な場合と比較して大きくなることになる（垂れ壁直前の段差下端からの煙層厚さH'sは水平天井の場合のHsよりも小さくなる）。ただし、垂れ壁に到達後に下側に押し出された煙が火源方向に移動し火源位置まで戻った後は、煙層内での質量および熱量保存式の各項は水平天井での場合とほぼ同じになることから、煙層厚さHsも同程度になると予想される（図5.3.1(b)下段）。

また、天井流厚さと比較して小さい段差が複数ある場合に関しても同様に考えれば、垂れ壁到達直後の煙層厚さHsは大きくなるものの、火源方向に戻る煙層が火源位置まで到達した後は、煙層厚さHsは水平天井の場合と同程度になると考えられる。なお、本節で考える傾斜天井は“非常に小さな段差が連続して設置されているもの”と置き換えて考えれば、この場合にも同様のことが言える。すなわち、着火後煙層先端部が垂れ壁に到達した直後での階段室への多少の煙流入を許容すれば、本論文第3章、第4章で記載した方法により算出した遮煙に必要な垂れ壁高さから“天井勾配”×“火源—垂れ壁間距離”を減じじことができると言える。

図5.3.2、図5.3.3に火源位置をa), b)として、それぞれ模型勾配を変化させた際の可視化記録を示す。

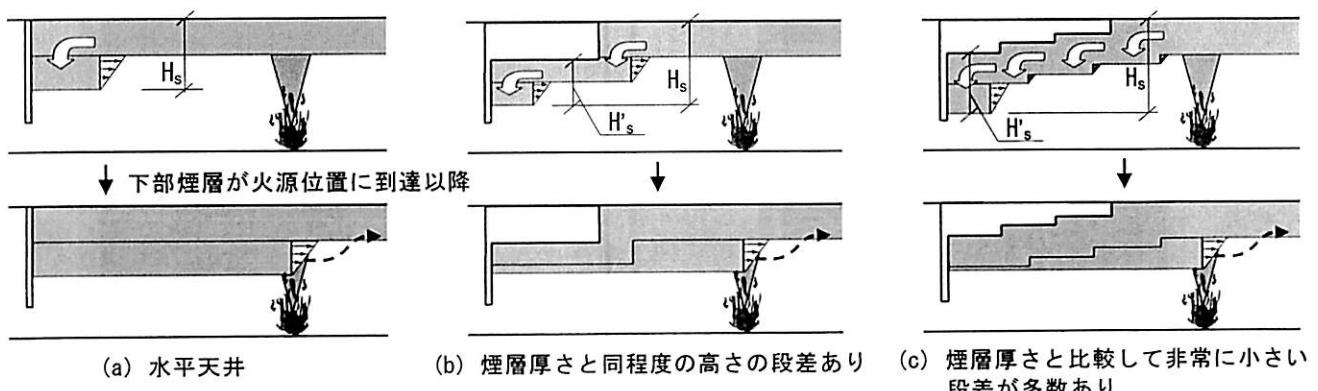
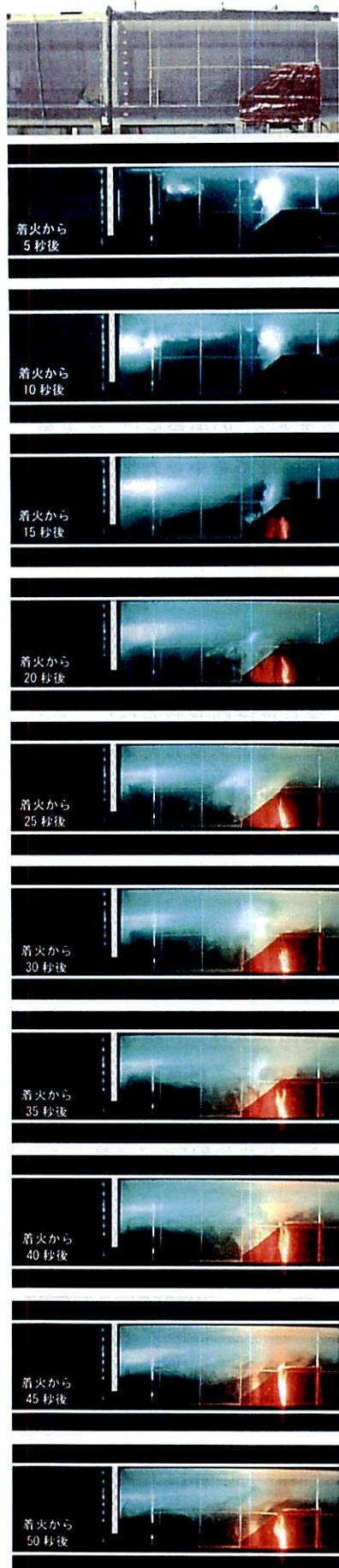
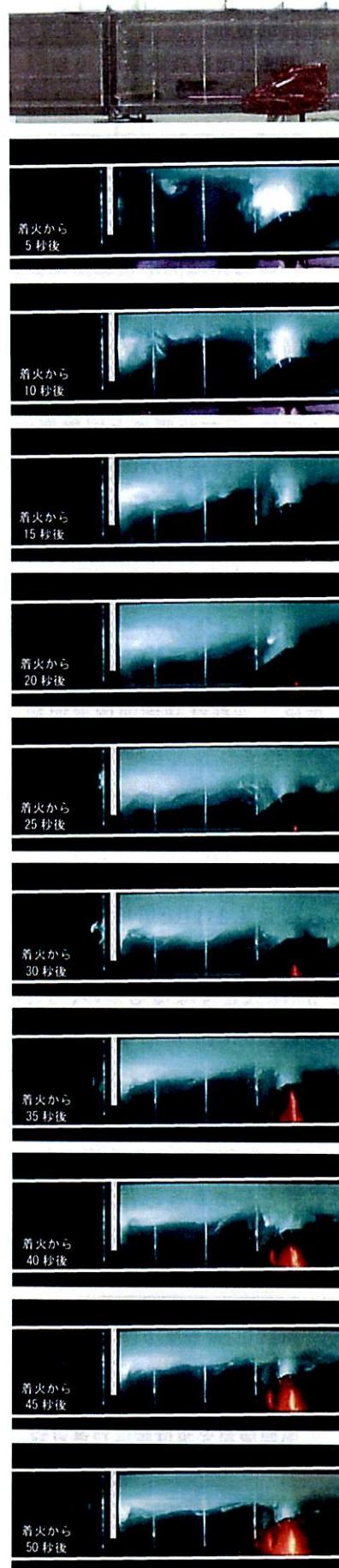


図5.3.1 垂れ壁、段差等の障害がある場合の煙流動

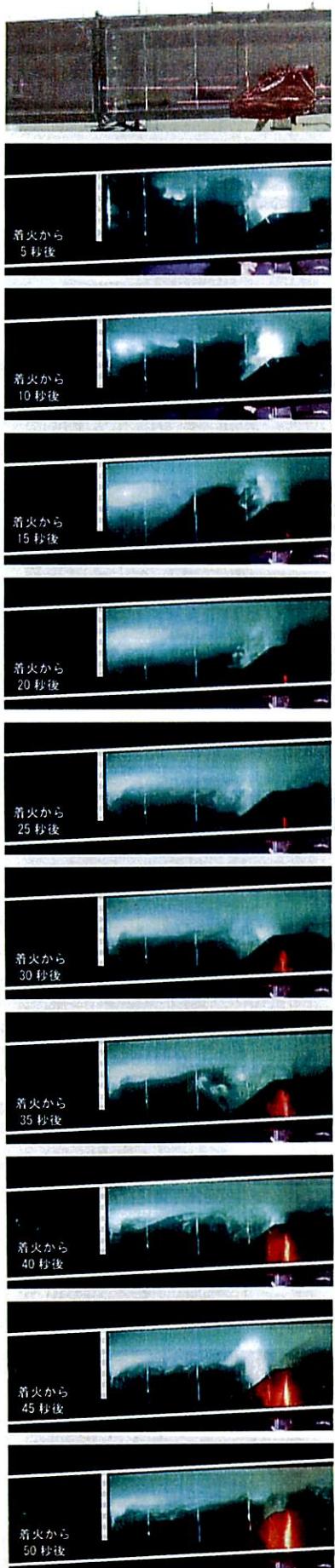


(a) 勾配 : 水平



(b) 勾配 : 1/100

図 5.3.2(1) 模型勾配の影響 (火源位置 a), 火源 No. 1, $H'=400$, $W'=750$)

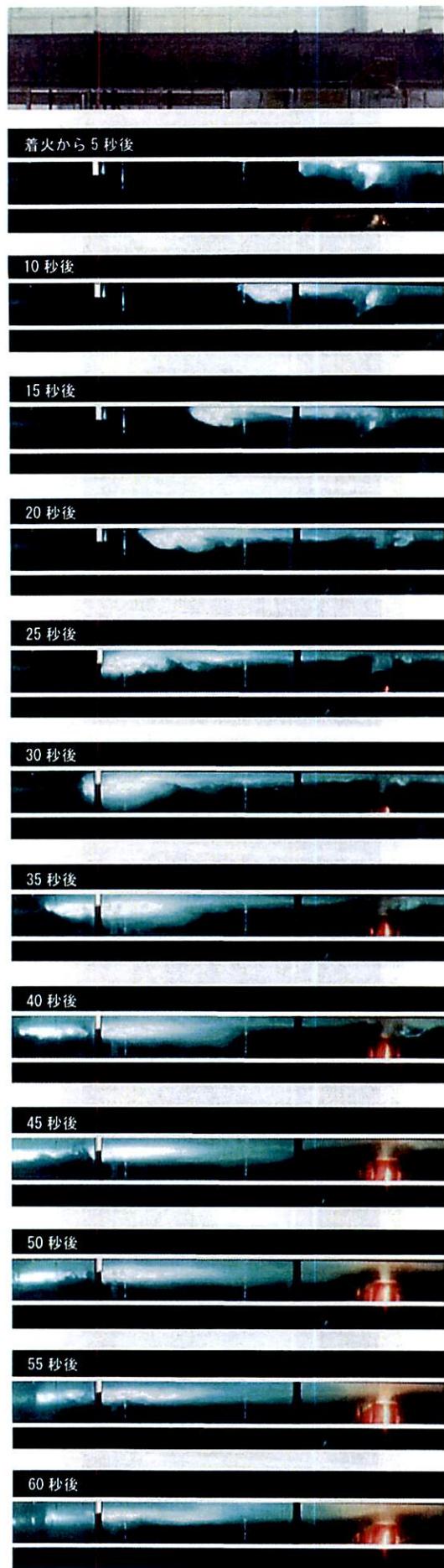


(c) 勾配 : 3/100

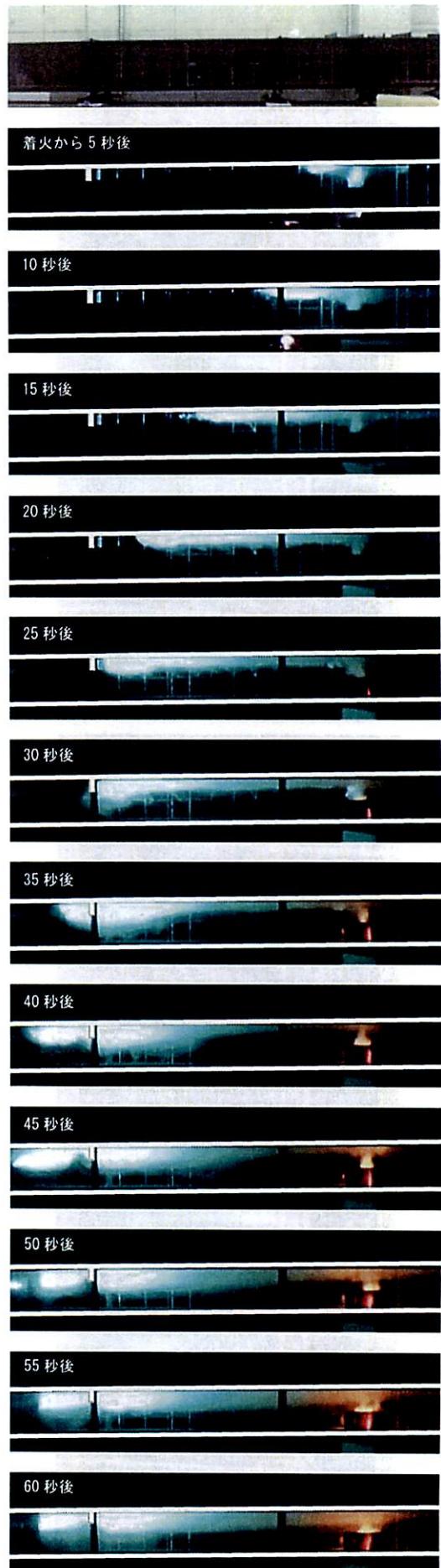


(d) 勾配 : 5/100

図 5.3.2(2) 模型勾配の影響 (火源位置 a), 火源 No.1, $H'=400$, $W'=750$)

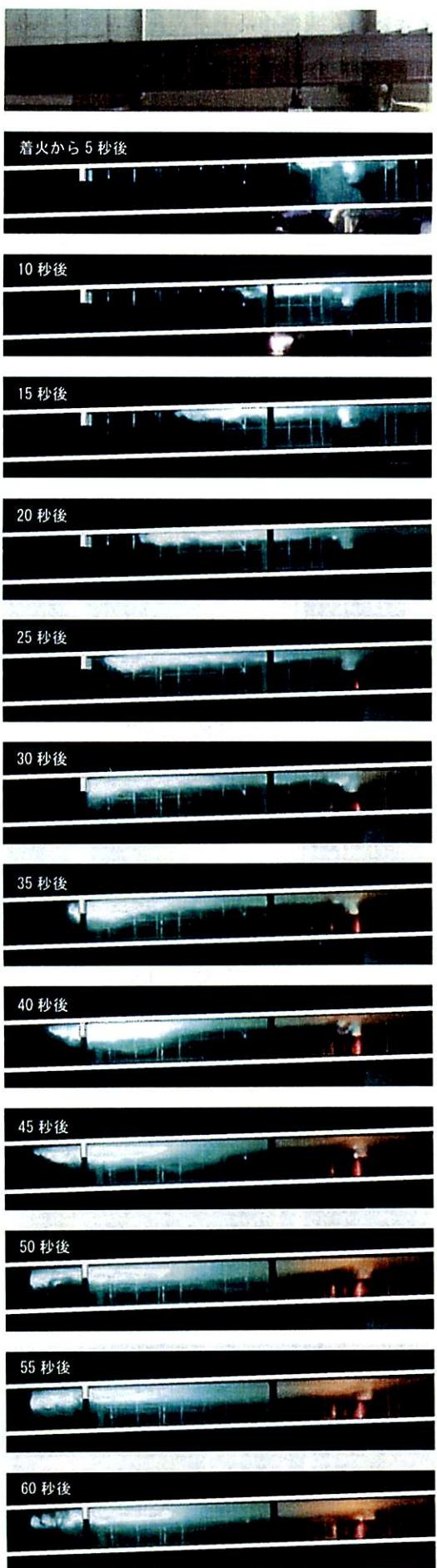


(a) 勾配 : 水平

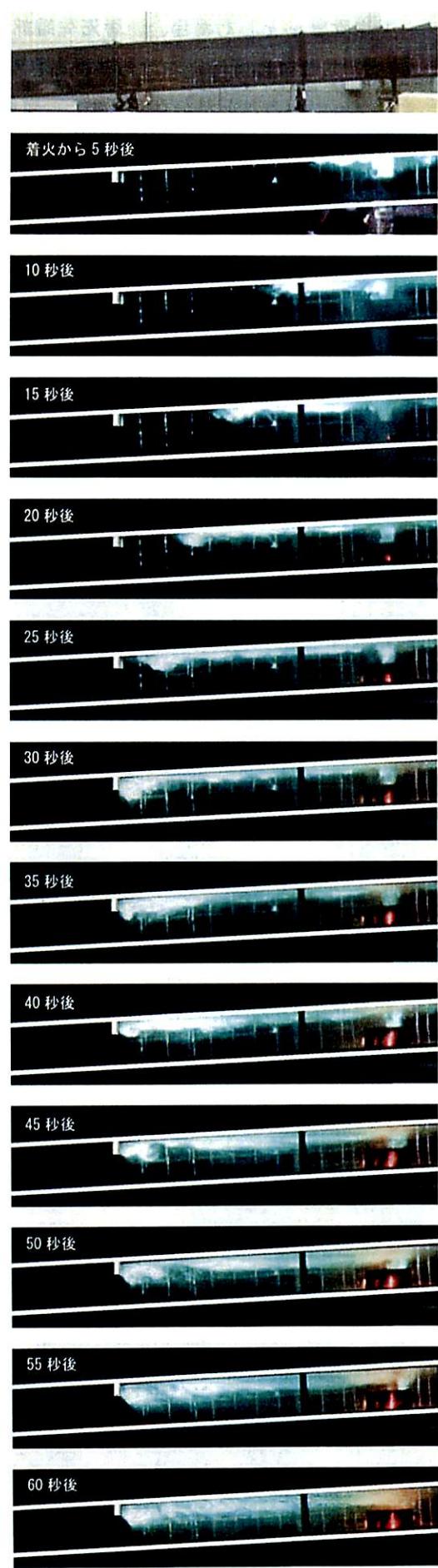


(b) 勾配 : 1/100

図 5.3.3(1) 模型勾配の影響 (火源位置 b), 火源 No. 1, $H=150$, $W=750$



(c) 勾配 : 3/100

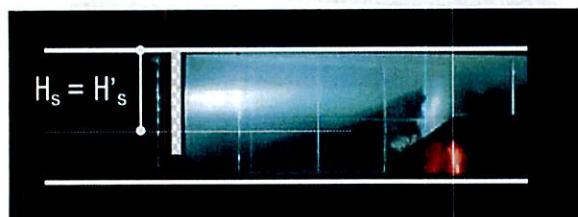


(d) 勾配 : 5/100

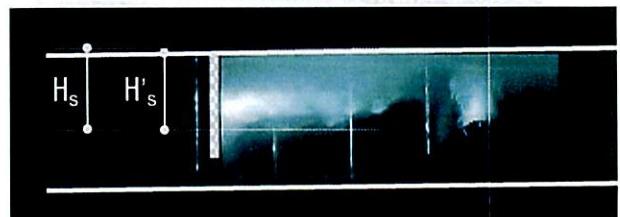
図 5.3.3(2) 模型勾配の影響 (火源位置 b), 火源 No. 1, H'=150, W'=750

火源位置を a)とした場合、煙層先端部が垂れ壁到達直後には、火源中心軸上の天井高さを基準高さとした際の 垂れ壁近傍における基準高さから煙層下端までの距離 H_s は模型勾配が大きくなるに従って大きくなっていることが分かる（また、可視化記録から、 $H's$ は模型勾配によらず殆ど変わっていないことが読み取れる）（図 5.3.4, 図 5.3.6）。これにより、駅舎計画上 垂れ壁高さを煙流動モデルにより算出される垂れ壁近傍での煙層厚さ以上にすることができない場合の対策として天井を傾斜させる場合、煙層先端部が垂れ壁到達直後の遮煙の観点から言えば、天井勾配が 5/100 以下の範囲では天井を傾斜させることによる効果はそれほど大きくないと言える。

一方で、垂れ壁に到達後に火源方向に向かう煙層が火源位置まで戻った以降は、 H_s は模型勾配によらず概ね等しいことが可視化記録から分かる（図 5.3.5）。加えて、火源一垂れ壁間の煙層温度は模型の勾配により殆ど変わらないことから（図 5.3.7, 図 5.3.8）、垂れ壁到達後に火源方向に向かう煙層が火源位置まで戻った以降は、垂れ壁高さが同一の場合には模型勾配が大きくなるに従い煙層が階段室に進入しようとする力は小さくなる（垂れ壁高さが煙層厚さよりも小さい場合）と言える。



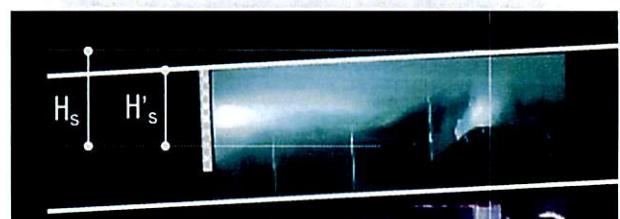
(a) 勾配：水平



(b) 勾配 : 1/100

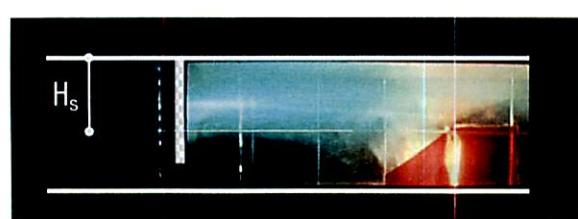


(c) 勾配 : 3/100

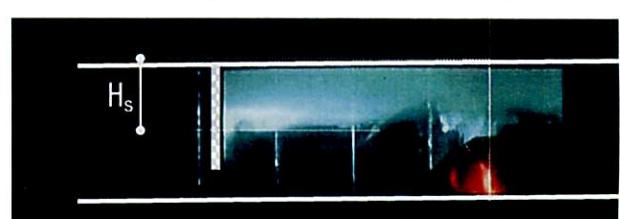


(b) 勾配 : 5/100

図 5.3.4 火源 No.1, 火源位置 a)とした際の 着火から 15 秒後（下部煙層が火源位置到達前）の煙層高さ（図 5.3.2 からの抜粋）



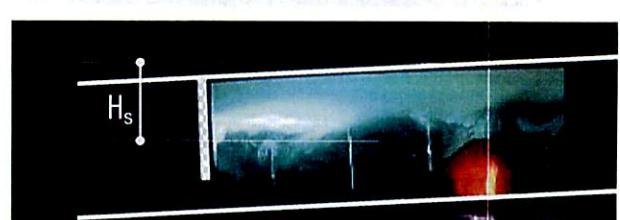
(a) 勾配：水平



(b) 勾配 : 1/100



(c) 勾配 : 3/100



(b) 勾配 : 5/100

図 5.3.5 火源 No.1, 火源位置 a)とした際の 着火から 40 秒後（煙がチムニーに流入することにより模型内気流が形成される直前）の煙層高さ（図 5.3.2 からの抜粋）

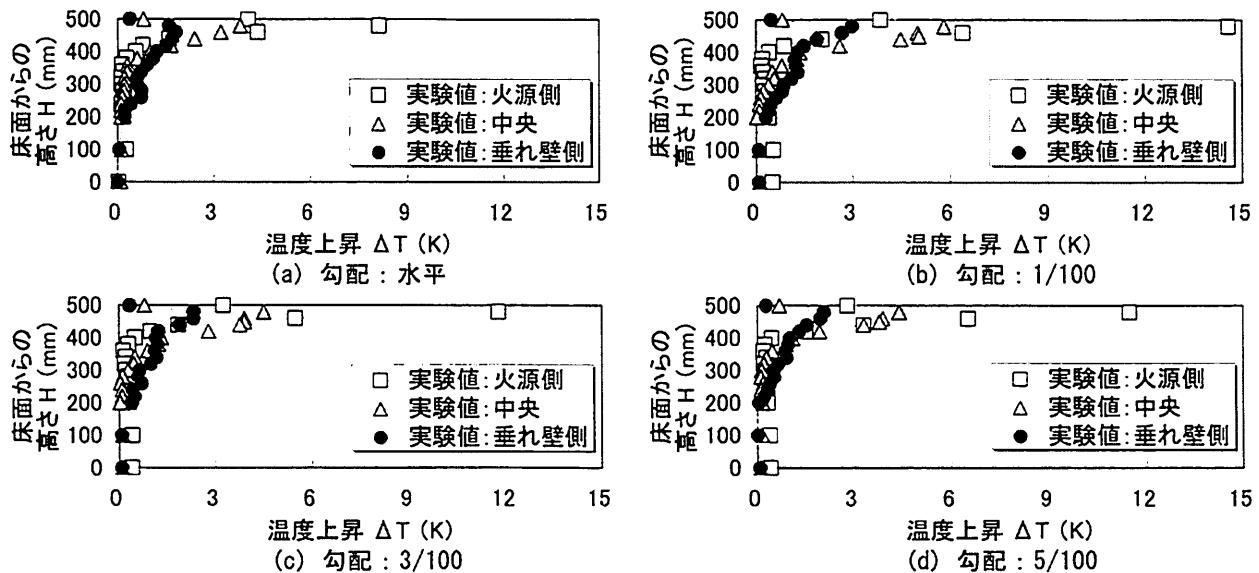


図 5.3.6 火源 No. 1, 火源位置 a)とした際の火源-垂れ壁間の煙層温度 (着火から 15 秒後) *

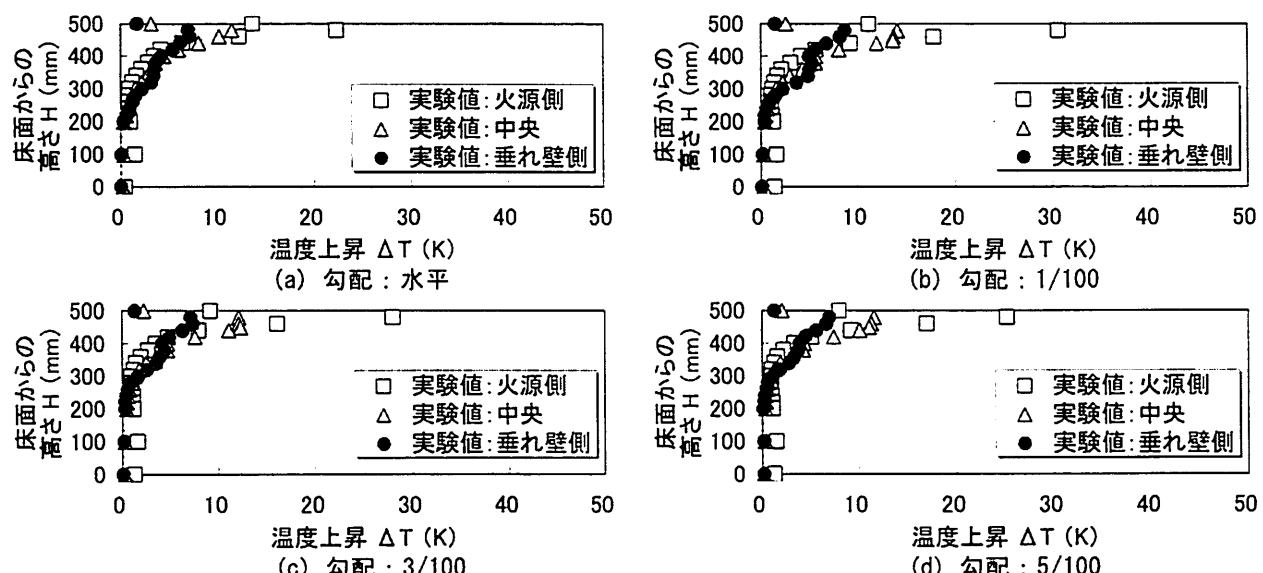


図 5.3.7 火源 No. 1, 火源位置 a)とした際の火源-垂れ壁間の煙層温度 (着火から 30 秒後) *

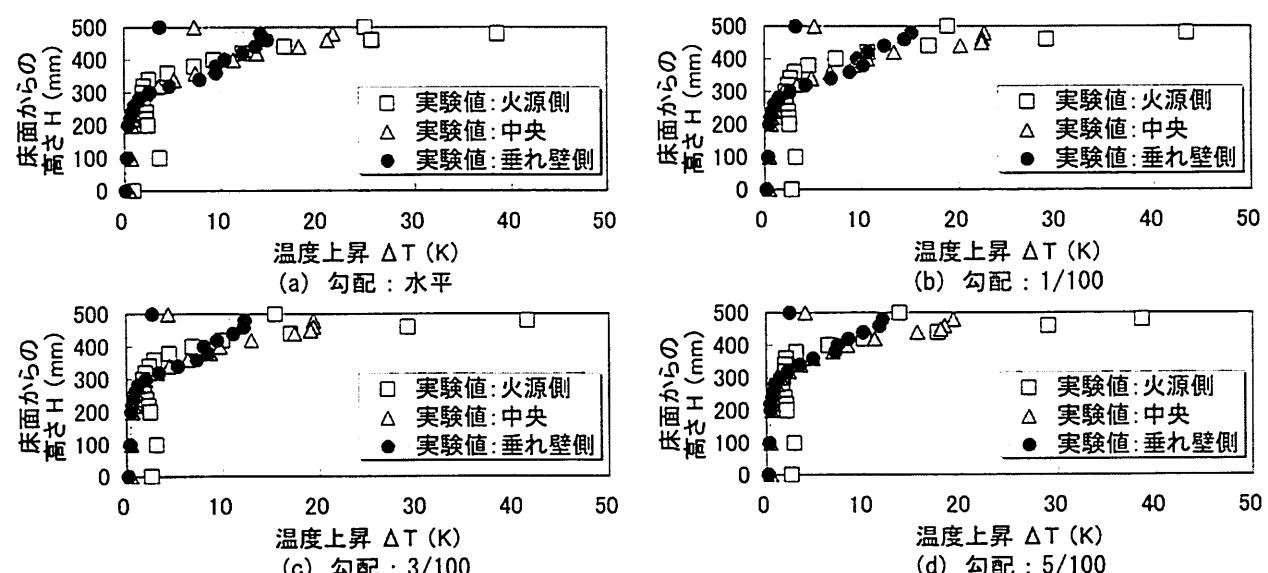


図 5.3.8 火源 No. 1, 火源位置 a)とした際の火源-垂れ壁間の煙層温度 (着火から 50 秒後) *

* 図 5.3.6～図 5.3.8 を作成する際に必要となる煙層温度の情報を得るために、可視化実験とは別に垂れ壁高さ $H' = 400\text{mm}$, 垂れ壁下通路幅 $W = 750\text{mm}$ として実験を行った (発煙片は用いていない)。

火源位置が b) の場合は、火源－垂れ壁間距離が大きいため 火源－垂れ壁間の無数の微少な段差（＝天井勾配）によって火源側に戻される煙の総量が結果として大きくなり、垂れ壁側に向かう煙量は 模型勾配が大きくなるに従い少なくなっていることが分かる（図 5.3.3）。その結果、模型勾配が大きい程 垂れ壁到達直後の煙層降下 H's は小さくなり、階段室への煙流入の程度も小さくなっている。

ここで、模型勾配 5/100 の場合には 垂れ壁高さよりも煙層が大きく降下しているにも関わらず遮煙が行われていることが可視化画像から分かるが、これは 模型勾配 5/100 の場合には煙層先端部が垂れ壁に到達する前にチムニーに煙が流入し（図 5.3.9）、模型内に気流が形成され、結果として 煙層が階段室に進入しようとする力よりも模型内気流による力が大きくなつたことに因ると考える。

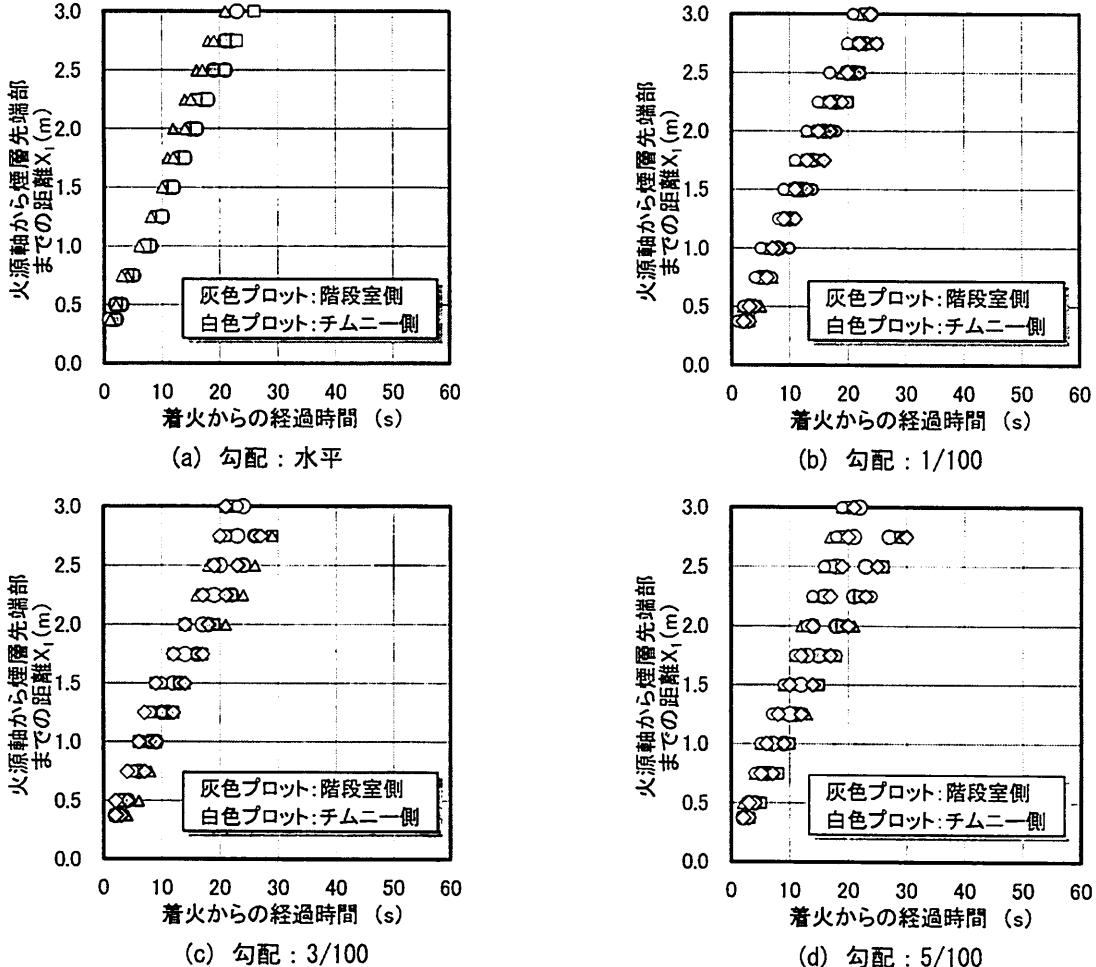


図 5.3.9 模型勾配が異なる場合の煙層先端部位置の時間変化（火源 No. 1）

5.4. 傾斜天井を上る方向に進む煙に関する理論的な考察

Turner らは、本章で扱っているような 斜路に沿って進む流れ（Inclined plume, 図 5.4.1 参照）に関して、流れの性質を表す 層断面平均リチャードソン数（overall Richardson number）を導入し、理論的な考察を行っている^{43) 44)}。ここで、一般的には、リチャードソン数は $Ri = -\{g(d\rho/dy)\}/\{\rho(du/dy)^2\}$ と定義され、流れの中の 任意の点における鉛直方向の拡散の強さを表す無次元数とされるが、Inclined plume の考察を行うにあたっては、本研究においても Turner らに従い 層断面平均リチャードソン数 Ri_0 （式(5.4.1)）を用いることとする。

$$Ri_0 = \nabla H \cos \theta / U^2 \quad \dots \quad (5.4.1)$$

ただし、 U ：斜路に沿う方向の断面内平均流速、 H ：式(5.4.2)、式(5.4.3)で表される厚さ
 ∇ ：密度差を表す代表値、 θ ：斜路の勾配

$$UH = \int_0^x u dy \quad \dots \dots (5.4.2)$$

$$U^2 H = \int_0^\infty u^2 dy \quad \dots \dots (5.4.3)$$

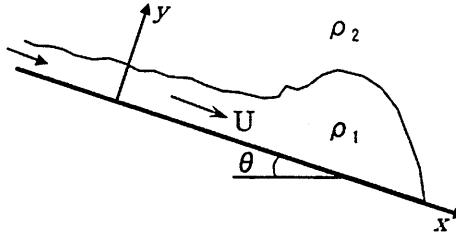


図 5.4.1 Inclined plume

ここで、進行する流体と周囲流体の密度差が十分小さいと考え、式(5.4.1)中の ∇ のように重力加速度 g が乗じられた場合を除いて、密度差を無視することができると仮定する。密度差が十分小さく、対象とする流れの Re 数が十分大きい場合には、周囲流体の連行を考慮する際に必要となる連行係数 E は Ri_θ 数のみの関数となる。この場合、連行係数 E を用いて連続の式は次式のように表すことができる。

$$d(UH)/dx = EU \quad \dots \dots (5.4.4)$$

また、流れの方向に総量としての密度差が保存されるとすれば、式(5.4.5)が成り立つ（煙流動を考える際には壁面への失熱を考慮する必要があるが、Inclined plume の考察を行うにあたっては、周囲空気の連行による密度差の変化が壁面への失熱による密度変化に対して影響が大きいと考え、失熱の影響は無視する）。

$$UH\nabla = \int_0^\infty g' u dy = const. \quad \dots \dots (5.4.5)$$

$$\text{ただし、 } g' = (\rho_1 - \rho_2)g/\rho_1$$

また、運動量保存式は式(5.4.6)となる。なお、式(5.4.6)の右辺第1項は底面の摩擦抵抗、第2項は層厚が変化することにより層にかかる圧力、第3項は重力が層を加速する力を表している。

$$\frac{d(U^2 H)}{dx} = -C_D U^2 - \frac{d(S_1 \nabla H^2 \cos \theta)}{dx} + S_2 \nabla H \sin \theta \quad \dots \dots (5.4.6)$$

C_D ：摩擦係数、

S_1, S_2 ：流れを断面方向に積分することによって定義される定数(profile constant)で式(5.4.7)、式(5.4.8)で表される

$$S_1 H^2 \nabla = \int_0^\infty g' y dy \quad \dots \dots (5.4.7)$$

$$S_2 H \nabla = \int_0^\infty g' dy \quad \dots \dots (5.4.8)$$

ここで、 S_1, S_2, θ に x 軸方向の変化がないものとすれば、式(5.4.1)、式(5.4.4)、式(5.4.6)を用いて、 $dH/dx, dRi_\theta/dx$ に関する別々の式を導くことができる。

$$\frac{dH}{dx} = \frac{(2 - S_1 Ri_0)E - S_2 Ri_0 \tan \theta + C_D}{1 - 2S_1 Ri_0} \quad \dots \quad (5.4.9)$$

$$\frac{dRi_0}{dx} = \frac{3Ri_0}{H} \cdot \frac{(1 + S_1 Ri_0)E - S_2 Ri_0 \tan \theta + C_D}{1 - 2S_1 Ri_0} \quad \dots \quad (5.4.10)$$

$dRi_0/dx = 0$, すなわち 式(5.4.10)における右辺の分子が 0 となる場合に流れの状態は安定となるが、この際の Ri_0 数（勾配と摩擦によって決まる）を導くにあたっては、 S_1, S_2 が既知で、かつ 実験により決定した 連行係数 E (Ri_0 数の関数) を用いる必要がある。

辻本⁴⁵⁾ は、実大廊下における実験結果から決定した S_1, S_2 (順に 0.58, 1.08) を用いて、式(5.4.9)および式(5.4.10)に関する考察を行っているが、これによると、安定時の Ri_0 数 (式(5.4.10)における右辺の分子がゼロとなる際の Ri_0 数) が 層厚が限界水深 (流れの状態が常流から射流へ変わる際に必ず生じる層厚) となる際の Ri_0 数 ($= 1/(2S_1) = 0.86$, 式(5.4.9), 式(5.4.10)における右辺の分母がゼロとなる際の Ri_0 数) と等しくなる斜路の勾配 θ は 1.2° である。この値は水理学でいうところの限界勾配であり、 θ がこの値よりも大きい時、流れは射流域で安定となる。ここで、"射流" とは 撥乱が上流へ伝播しない流れであり、それに対して自由表面上に与えられた撥乱が上流へ伝播する流れを "常流" という。なお、文献 45においては、連行係数 E は 斜路の勾配が非常に小さい時には 水平天井 (床) における連行係数とほぼ等しいと考え、Turner らの実験結果⁴⁴⁾ とも良く一致する 式(5.4.11)⁴⁶⁾ を用いている。また、摩擦係数 C_D は $C_D = 0.013/(UH)^{1/4}$ と表されるため、解は流体のプロフィルによって異なることになるが、分母の $1/4$ 乗のために C_D の値は任意の流れに対して それほど変わらないと考え、 $C_D = 0.015$ として解析している。

$$E = 0.075 \exp(-3.9Ri_0) \quad \dots \quad (5.4.11)$$

なお、 S_1, S_2 に関して、Turner らは実験⁴⁴⁾ により $0.4 \leq S_1 \leq 0.6, 0.6 \leq S_2 \leq 0.9$ を得ており、本節ではこの範囲内で S_1, S_2 を変化させて Ri_0 数が 限界水深での Ri_0 数 $= 1/(2S_1)$ と等しくなる時の勾配を算出したところ、勾配 θ の最大値は 2.2° となった ($C_D = 0.015$ として計算を行った)。すなわち、斜路の勾配が非常にわずかであっても、斜路に沿って進む流れは射流で安定となる。

これにより、本研究では 模型の勾配を $1/100, 3/100, 5/100$ (順に、 $0.57^\circ, 1.72^\circ, 2.86^\circ$) として実験を行っているが、模型の勾配を $3/100$ あるいは $5/100$ とした場合には、斜路を上る方向 (チムニー方向) に進む煙の状態は射流となっているはずである ($3/100$ が限界勾配以上か否かは微妙なところであるが、本節では $3/100$ は限界勾配以上であるとして 以下では考察を行う)。すなわち、ブルームが天井に到達した直後は煙の状態は射流となるが、その後は、水平天井あるいは勾配が $1/100$ の場合には直ぐに常流に遷移し (この際に、煙層厚さが急激に変化する内部跳水が発生する)、勾配が $3/100, 5/100$ の場合には 常流には遷移せずに射流のまま安定する。ここで、流れの状態が常に射流となる場合 (斜路の勾配が限界勾配以上の場合) には、ある場所での 煙層厚さ、温度、流速 が既知であれば、それを初期条件として、それより下流における流れを計算することができる。具体的には、まず、式(5.4.9)、式(5.4.10)を用いて、微少距離下流の 煙層厚さ H および Ri_0 数を算出し、次に そこで得た Ri_0 数を 式(5.4.1)と式(5.4.5)から得られる 式(5.4.12)に代入することで、流速 U を算出することができる。また、導出した H, U を式(5.4.1)に代入すれば ∇ を算出できる。

$$(Ri_0 \cdot U^3)/\cos \theta = UH\nabla = \text{const.} = \text{初期条件での } UH\nabla \quad \dots \quad (5.4.12)$$

計算を行うにあたり 初期条件の設定が必要となるが、本節で扱う模型勾配は最大で $5/100$ と非常に小

さいことから、第3章で提案した煙流動モデルによる計算を行う際の初期条件を決定した方法と同様の方法により 初期条件としての煙層厚さ、煙層温度を決定した(図5.4.2に示す領域を対象に定常計算を行い、その際の 煙層厚さ h_{s0} 、煙層温度 T_{s0} を初期条件に設定した。詳細は3.2.5.節参照)。また、流速に関しては、プルームから煙層下端への単位時間あたりの流入質量 \dot{m}_z ($= 0.08Q^{1/3}z^{5/3}$)を h_{s0} 、 ρ_{s0} および流れの幅 B_s ($= 0.75$)で除した値を初期条件として設定した。

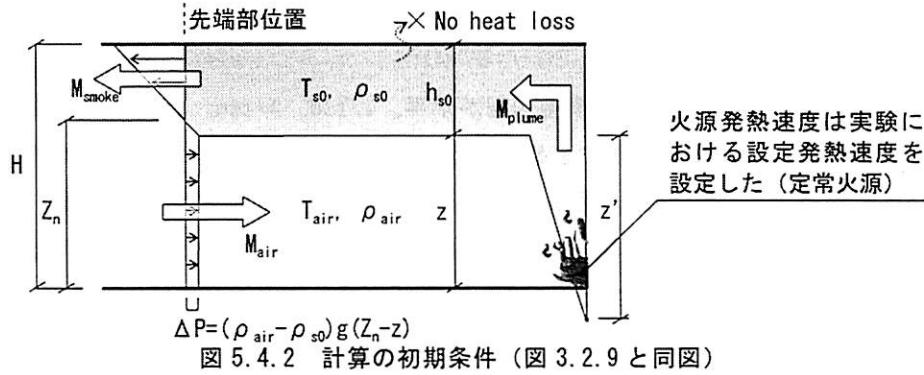


図5.4.2 計算の初期条件(図3.2.9と同図)

なお、模型の勾配が 水平 あるいは 1/100 の場合には内部跳水が発生するまで(射流域)の流れであれば上述の方法で計算を行うことができるが、流れの状態が常流となった以降は 流れは下流の影響を受けるために 同様の方法で計算することはできない。ただし、本章での実験に使用した模型は 下流にチムニーが設置されており、煙がチムニーに流入する際には 流入地点で煙層厚さは限界水深となり、その後は射流となることから(図5.4.3)、この位置での 煙層厚さ(限界水深 h_c)、流速、 Ri_0 数($= 1/(2S_i)$)を境界条件とし、これより上流へ向かい内部跳水位置までの流れの計算を行うことができる。

具体的には、限界水深 h_c となる位置での Ri_0 数の条件(式(5.4.13))と、限界水深 h_c とチムニーへ流入する煙の単位幅あたりの体積流量 Q_c の関係式(式(5.4.14)⁴⁷⁾)がチムニー位置での境界条件として与えられ、また、火源近傍に現れる内部跳水位置前後において煙層内部での質量保存が成り立つ(内部跳水により 煙層と空気層の混合は無いとし、内部跳水位置前後で 流速と煙層厚さのみが不連続に変化するものと仮定する)として その位置における質量流量とチムニーへの質量流入量が等しい(常流域における空気の連行を無視できる)と仮定すれば、チムニーフロー位置における煙層厚さ、流速、煙層温度が算出できる。これを初期条件として上流に向かって計算を行えばよい。

なお、模型実験では、チムニーの断面寸法は 425mm 角であり 模型の幅よりも小さいため、図5.4.4に示すようにチムニー位置まで到達した煙の一部はチムニーの脇を通り抜け、模型端の壁に衝突後にチムニーから排出されたことを 煙流動の可視化により確認したが、計算ではチムニー位置まで到達した煙は全てスムーズにチムニー内に流入するものとして 限界水深を決定した。

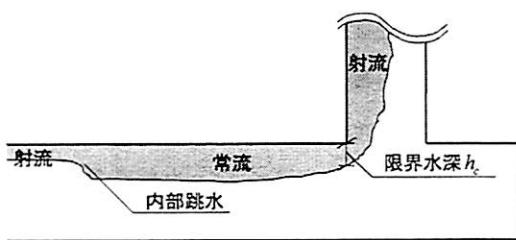


図5.4.3 水平天井および勾配が1/100の場合の定常時の流れの状態

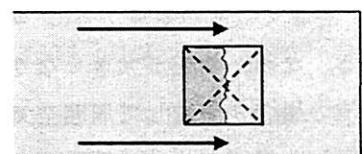


図5.4.4 チムニー部分見下げ図

ただし、常流の計算は、火災時に煙がチムニーに流入し ある程度時間が経過した後(定常状態)の煙の流れを対象としているため、ここで記載した方法で 着火直後の煙伝播等の非定常流れの計算を行うこ

とはできないことには注意が必要である（先に記載した射流の計算も定常状態を対象としているが、射流の場合は比較的早期に安定状態に至ると考え、また、下流の影響を受けないことから、近似的に煙層先端部移動性状等の非定常煙流動へも適用が可能であると考える）。

$$Ri_0 = I/(2S_1) \quad \dots \quad (5.4.13)$$

$$h_c^3 = Q_c^2/g' \quad \dots \quad (5.4.14)$$

$$\text{ただし, } g' = (\rho_{air} - \rho_{si})g/\rho_{si}$$

以上により、本章で模型実験を行った 模型勾配が水平、1/100、3/100、5/100 の場合の 定常状態におけるチムニー方向の流れの計算を行うことができる（ただし、勾配が 3/100、5/100 の場合には 近似的に非定常流れにも適用可）。図 5.4.5、図 5.4.6 に火源発熱速度が 1.68kW の定常火源（火源 No.1 の設定発熱速度、F.S. 3MW）の場合の、チムニー方向へ向かう煙層の断面平均流速 および 煙層厚さ の計算結果を示す。なお、本章で行った実験では、チムニー方向に進む煙層の垂直温度分布および流速分布を計測していないことから、実験により S_1, S_2 (profile constant) を決定することができなかつたため、ここでの計算では Turner らが実験結果から得た値の平均値である $S_1 = 0.5, S_2 = 0.75$ （この際の 限界勾配は 1.3° である）を用い、また $C_D = 0.015$ 、連行係数 E には式(5.4.11)を用いた。なお、勾配が水平、1/100 の場合の計算は、火源位置が模型中央（火源—チムニー間距離 = 5.7875 m）として行った。

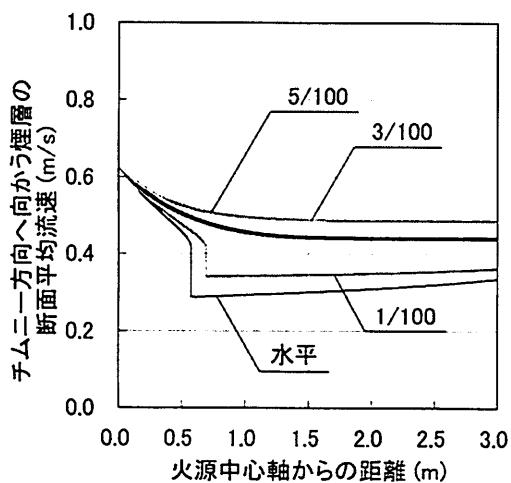


図 5.4.5 チムニー方向へ向かう煙層の断面平均流速の計算結果 ($Q=1.68\text{kW}$)

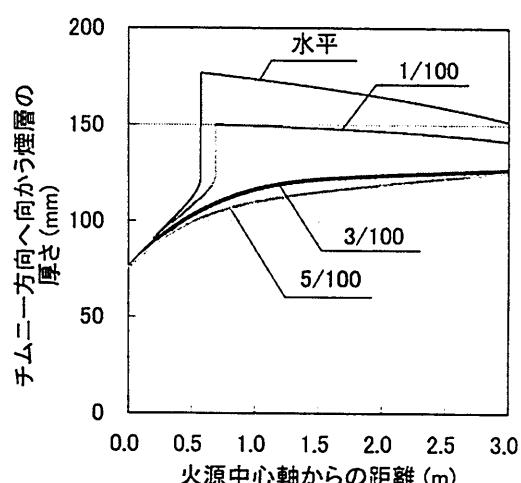


図 5.4.6 チムニー方向へ向かう煙層の厚さ ($Q=1.68\text{kW}$)

図 5.4.5 を見ると、天井勾配が 水平、1/100 の場合と 3/100、5/100 の場合とでは、断面平均流速に明確な差があることが分かる。また、模型勾配が水平、1/100 の場合には、流速および煙層厚さが不連続に変化している箇所があるが、これは この位置で内部跳水が発生したことを表す。図 5.4.6 から分かるように、水平天井の場合には 内部跳水により火源近傍での煙層厚さが非常に大きくなっていることから、避難安全性の観点からは 勾配が例え 1/100 であっても天井を傾斜させることの意味は大きいと思われる。なお、勾配が大きくなり、流れの状態が射流のまま安定した場合には内部跳水は発生しないが、常流の場合と比較して周囲空気の連行量が増加するため、斜路が非常に長くなった場合には火源から遠く離れた場所における煙層厚さが大きくなることには注意が必要となる。本節での計算で想定した駅舎（模型パターン I, 火源駅舎中央）では、チムニーの直ぐ手前の位置で 勾配が 3/100、5/100（射流）の場合と水平、1/100（常流）の場合の煙層厚さが逆転したが、実際にパッシブセイフティシステムを採用した駅舎を計画する際には、2 箇所以上の階段 および 1 つ以上のチムニーを設置する必要があるため、火源—チムニー間距離はそれ程大きくはならないことから、天井に勾配をつけることで より安全になる

と考えられる（また、天井勾配を大きくすれば、プルームから煙層へ流入する全熱量のうち、チムニー方向の煙層へ流入する熱量が増加し、階段室方向の煙層へ流入する熱量は減少するため、階段室の安全性確保の面では有利に働くと考えられる）。

なお、本章では、模型勾配を 水平, 1/100, 3/100, 5/100 として実験を行ったが、実験では火源が非定常であり、また 煙層厚さ、煙層内部の流速等を計測しておらず、チムニー方向の煙流動の可視化も行っていないことから、図 5.4.5, 図 5.4.6 に示した計算結果と実験結果を直接比較することができない（ただし、勾配を 3/100 および 5/100 とした場合の先端部移動速度の変化の程度（計算からは大きな差は見られなかった）を比較することは可能であると考える）。また、本節では斜路を上の方向（チムニー方向）へ進む煙層に関して、Turner らの方法に従い 理論的な考察を行ったが、同様の方法により、斜路を下る方向（階段室方向）へ進む煙層に関する考察を行うことはできない（斜路を下る方向へ進む煙は常流で安定となるため 定常状態の計算を行うには下流での境界条件が必要となるが、本節で行った実験では、垂れ壁まで到達した煙の一部は階段室へ流入し、一部は火源方向に戻り その後は火源逆側の空間（チムニー方向）へ進むことから、垂れ壁位置での境界条件を設定することができないことによる）。このため、次節では、3.2.節で提案した火災初期の水平天井下煙伝播モデルを 天井を傾斜させた場合の煙流動にも適用できるように一部改良を行い、煙層先端部位置の時間変化に関して 計算結果と模型実験結果の比較を行うこととする。

5.5. 傾斜天井下を伝播する煙層先端部移動速度の定式化

本節では、天井を傾斜させた際の天井下を伝播する煙層先端部の移動速度の予測を行い、実験結果との比較を行う。

なお、既往の文献において、斜路に沿って流れる煙層の先端部移動速度に関してまとめているものは少なく、特に浮力に逆らう方向に進む煙層の性状に関する文献は殆ど無い。なお、山田らが、文献 48 で斜路を上の方向に進む煙層に関して 先端部移動速度、先端部厚さ、煙層温度の定式化を行い、計算結果と実験結果の比較を行っているが（勾配が 45° 以下の場合は計算結果と実験結果は良く一致することを示している）、①煙層先端部と後流部とを分けて考え 先端部の進行方向長さは先端部幅に比例する、②煙層先端における周囲空気との密度差に基づく圧力差は図 5.5.1 のように表せる、③後流部の浮力は考慮しない とする大胆な仮定が用いられている。また、勾配が大きい場合にも煙層と空気層との混合は考慮されていない。

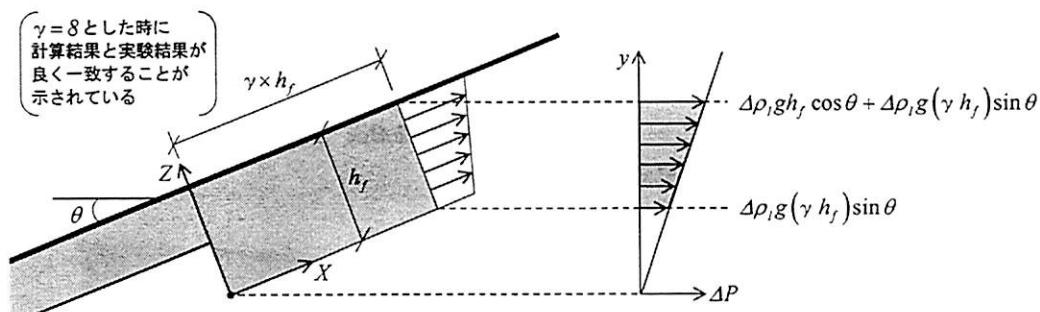


図 5.5.1 煙層先端部での圧力差分布（松下らが提案するモデル）

このため、本節では 文献 48 に記載されている方法は用いずに、3.2.節で提案した水平天井下の煙伝播モデルに幾つか仮定を加えることで、天井を傾斜させた際の先端部移動速度の予測を行うこととする。

具体的には、本章での実験では 模型勾配は最大でも 5/100 と非常に小さいことを考え、かなり大胆な仮定ではあるが、煙層の下端は常に水平に保たれるものとし、また、摩擦、空気の連行、天井に沿った

方向へ働く浮力の影響を無視できるものとすれば、図 5.5.2 を初期条件として、3.2.6. 節で示した方法と同様の方法により階段室方向およびチムニー方向へ進む煙層の先端部移動速度、煙層厚さ、温度を算出できる（図 5.5.3 (a) → (b) → (a) の順で計算（計算手順の詳細は 3.2.6 節（77 頁）を参照されたい）。なお、図 5.5.2 に示す計算の初期条件における煙層厚さは、火源中心軸上の煙層厚さを 3.2.5. 節（76 頁）に記載した方法によって決定した煙層厚さ h_{s0} に設定した。

なお、 $C_1 \rho_{s1} u_{s1}^2 = \Delta \rho_1 g h_{s1}$ から先端部移動速度を算出するにあたって、 h_{s1} には、本来 先端部から離れた位置における煙層厚さを用いるべきであるが、本節で提案するモデルでは 煙層厚さは火源からの距離に比例して変化するため、ここでの計算では h_{s1} には煙層先端での厚さを用いた。また、比例定数 C_1 には 本論文第 4 章での実験で決定した 1.36 を用いた。計算結果を図 5.5.4 に示す。

図 5.5.4(a) に示す 階段室方向に進む煙層に関する計算結果を見ると、先端部移動速度は勾配が水平の場合と 1/100 の場合では差は殆ど無いものの、3/100, 5/100 となるに従い移動速度が若干遅くなっていることが読み取れる。一方、チムニー方向に進む煙層先端部の移動速度は、勾配によらず殆ど差が見られない（図 5.5.4(b)）。なお、これらの、“天井を傾斜させることにより煙層先端部移動速度が受ける影響” の傾向は、図 5.3.9 (112 頁) に示す実験結果とも一致する。

ここで、チムニー方向に進む煙層に関する計算は、勾配が 3/100, 5/100 の場合には途中で破綻しているが、これは 火源直上の煙層厚さがゼロとなったためである。本節で提案するモデルは、火源直上の煙層厚さと先端での厚さが 火源中心軸からの水平距離 X_1 を用いて $X_1 \tan \theta$ 異なるため、チムニー方向に進む煙層に関する計算を行う場合、天井勾配が小さい場合でも X_1 が大きくなった際には、火源直上の煙層厚さがゼロとなり、計算が破綻する。また、階段室方向に進む煙層に関しては、計算の破綻には至っていない（火源直上の煙層厚さが天井高さ以上となった時 破綻する）ものの、 X_1 が大きくなった際には火源直上での煙層厚さが非常に厚くなり、実際の煙流動とは異なったものになる（実際は 火源直上の煙層厚さが厚くなりすぎる前にチムニー側の空間へ煙が流出すると思われる）。このため、本節で提案するモデルの適用範囲は、天井の勾配が非常に小さい場合で、かつ 火源から比較的近い範囲内に限られる。

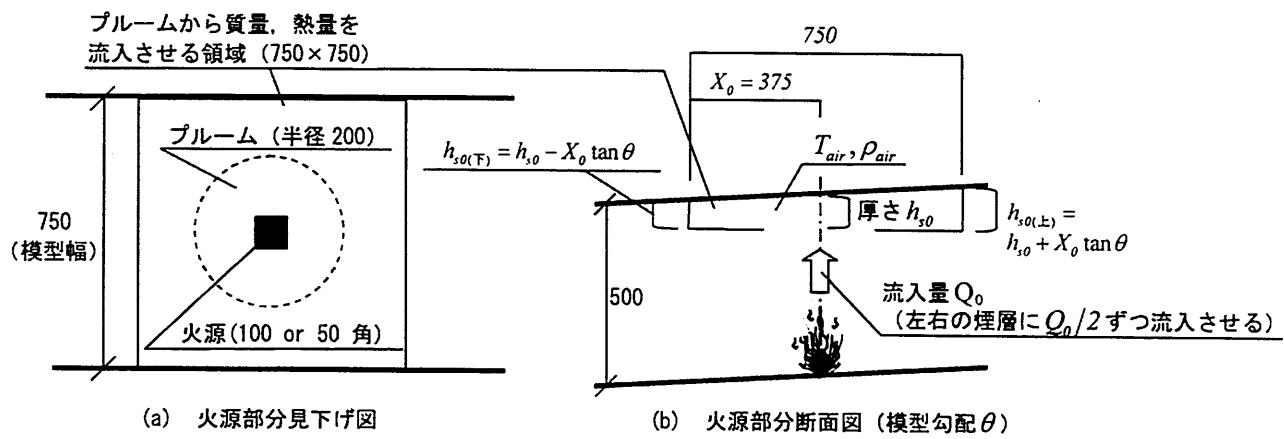


図 5.5.2 計算の初期条件(単位 : mm)

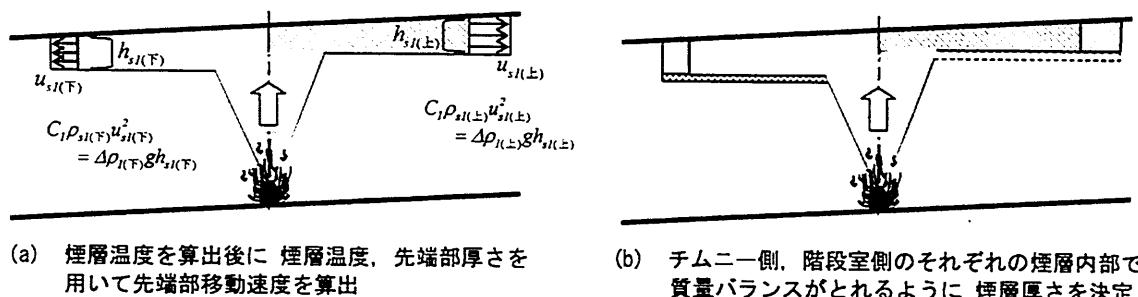
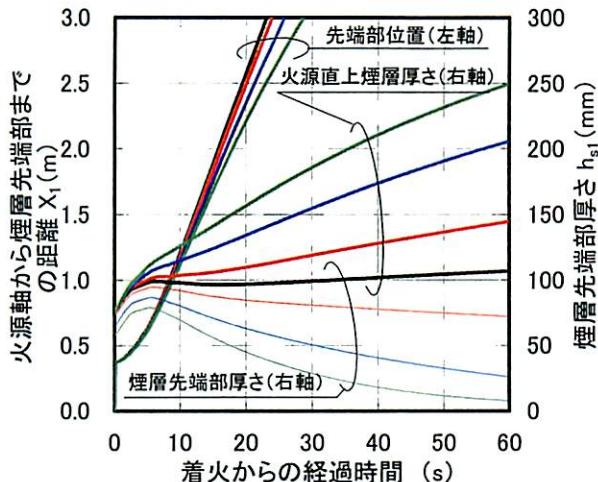
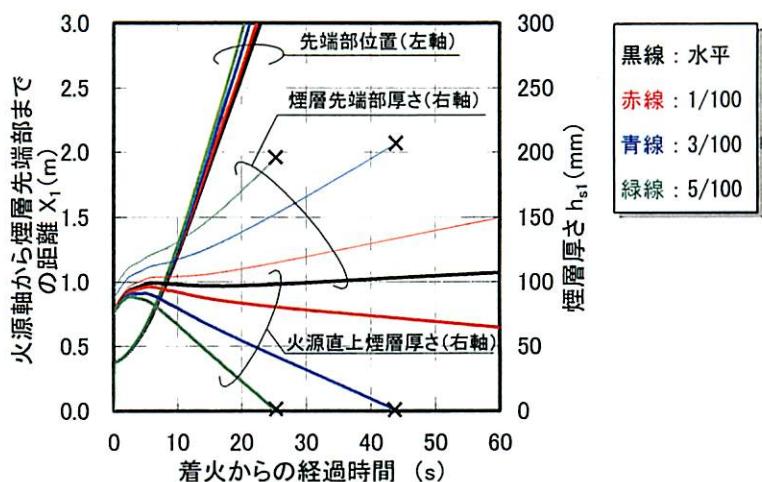


図 5.5.3 天井に沿った方向へ進む煙の伝播性状計算手順（詳細は 3.2.6. 節（77 頁）参照）



(a) 階段室方向に進む煙層



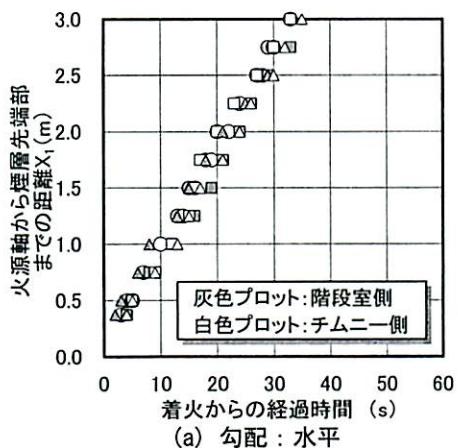
(b) チムニー方向に進む煙層

図 5.5.4 煙層先端部位置および煙層厚さの時間変化（計算結果）

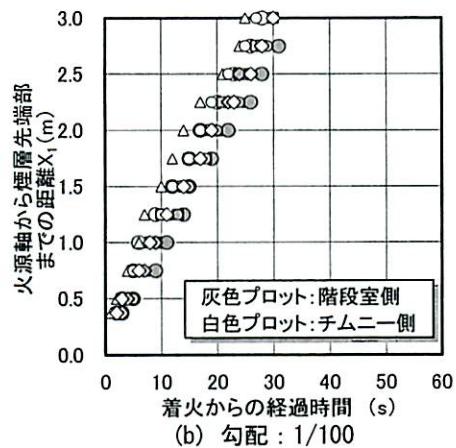
（火源位置：模型中央 b），火源 No. 1）

なお、本章では火源 No. 1 以外にも火源 No. 2, No. 3, No. 4 とした場合も実験を行ったが、火源 No. 1 の場合と同様の結果を得た（チムニー方向の移動速度は勾配による影響を殆ど受けないが、階段室方向の移動速度は勾配を 3/100, 5/100 とした際には若干遅くなる）（図 5.5.5～図 5.5.7）。

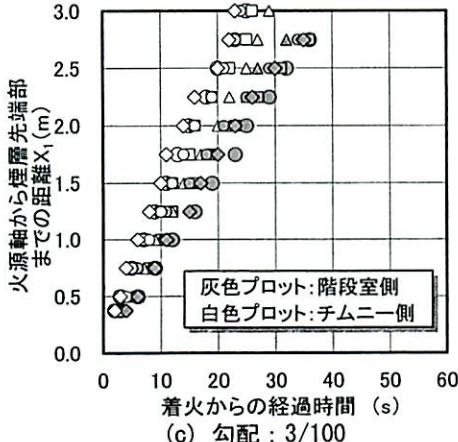
ただし、勾配を大きくすることによる階段室方向に進む煙層の先端部移動速度の低下は僅かであることから、火災発生後 階段室側へ向かう煙が垂れ壁位置に到達する前にチムニーに煙を流入させ、駅舎内により大きい気流を形成させるという目的で天井に勾配を設ける場合、勾配が 0～5/100 の範囲では効果はそれ程大きくなないと見える（ただし、火源が階段室とチムニーの中間付近にある場合には多少の効果はあると思われる）。



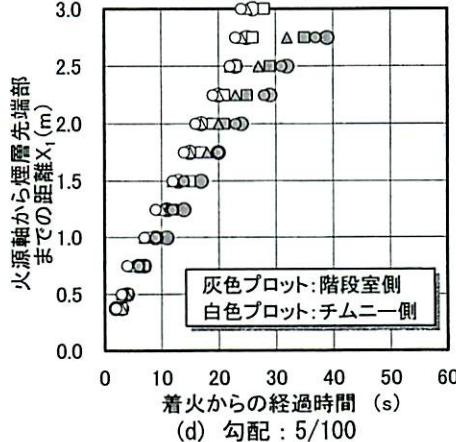
(a) 勾配：水平



(b) 勾配：1/100



(c) 勾配：3/100



(d) 勾配：5/100

図 5.5.5 模型勾配が異なる場合の煙層先端部位置の時間変化（火源 No. 2）

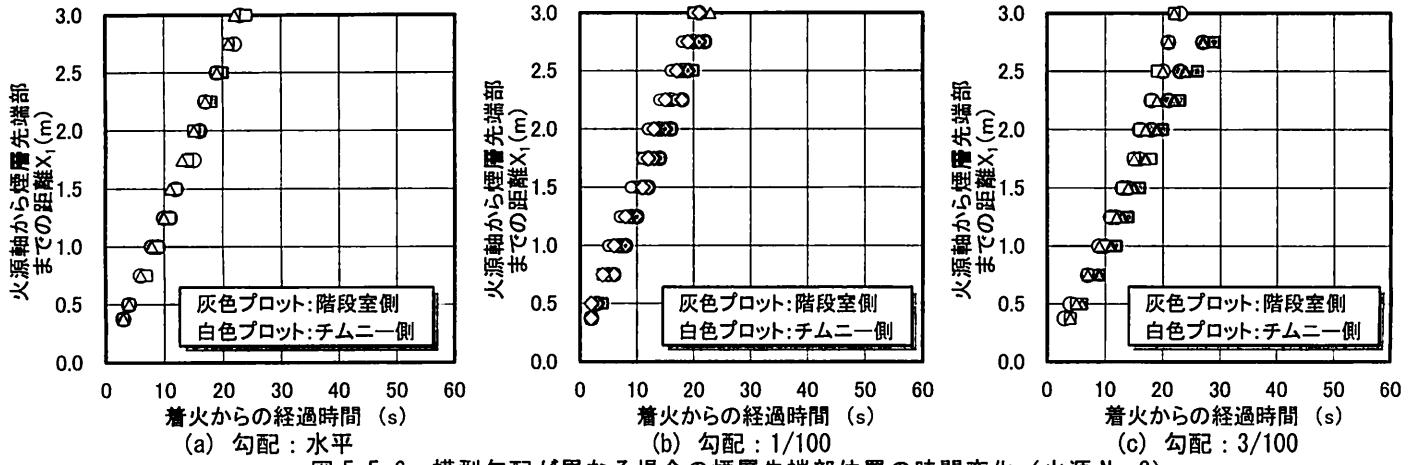


図 5.5.6 模型勾配が異なる場合の煙層先端部位置の時間変化（火源 No. 3）

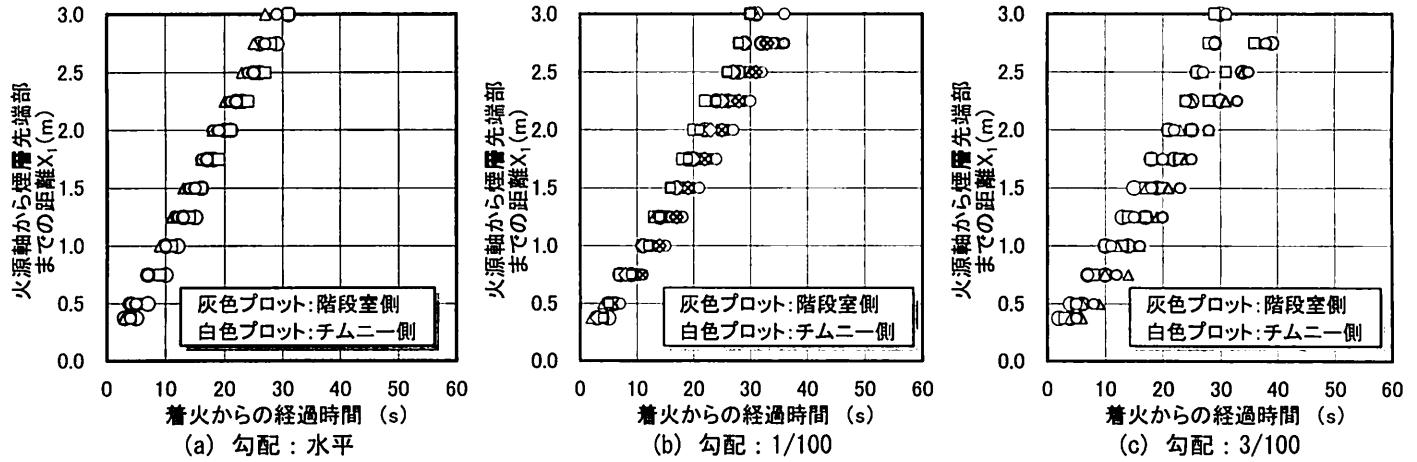


図 5.5.7 模型勾配が異なる場合の煙層先端部位置の時間変化（火源 No. 4）

5.6. 本章のまとめ

本章では、天井を傾斜させた際の煙流動に関して、模型実験結果および理論から考察を行った。これにより、以下の知見を得た。

- 天井を傾斜させた場合には、本論文第3章で記載した方法により導出した遮煙に必要な垂れ壁高さから“天井勾配”×“火源一垂れ壁間距離”を減じることができる。ただし、着火後 煙層先端部が垂れ壁に到達した直後では多少 階段室へ煙が流入する可能性があることには注意が必要である。
- 傾斜天井を上る方向に流れる煙に関して、定常状態での層厚、温度、流速を理論的に導出できることを示した。なお、天井の勾配を 2.2° 以上とすることで、勾配を上る方向に進む煙の状態は水力学で言う射流で安定となるが、この場合には、定常状態における理論予測結果を着火直後の非定常煙流動へも適用できると考える。また、水平天井の場合には火源近傍における内部跳水により煙層厚さが非常に大きくなることを理論予測により確認したが、これを解消する目的としてわずかな勾配を設けることは意味が大きいと思われる。
- 傾斜天井下を伝播する煙層に関して煙流動モデルによる予測を行ったところ、計算結果は、“チムニー方向に進む煙層の移動速度は勾配が $0\sim 5/100$ の範囲では勾配による影響を殆ど受けないが、階段室方向へ進む煙層移動速度は勾配を $3/100, 5/100$ とした場合には水平、 $1/100$ の場合と比較して若干遅くなる”という実験結果と同じ傾向を示した。ただし、勾配を大きくすることによる階段室方向に進む煙層の先端部移動速度の低下は僅かであることから、火災発生後 階段室側へ向かう煙が垂れ壁位置に到達する前にチムニーに煙を流入させ、駅舎内により大きい気流を形成させるという目的で天井に勾配を設ける場合、勾配が $0\sim 5/100$ の範囲では効果はそれ程大きくなないと見える。

第6章

総括

6.1. 本論文のまとめ

現在、我が国の地下鉄駅舎には 災害時に作動する種々の防災対策が採られているが、これらの作動信頼性は保証されているわけではない。また、近年の地下鉄駅舎建設は設置深度が年々大きくなっている、それに伴い日常時の空調負荷は増大する傾向にあると言える。

本論文では、火災時における安全対策の作動信頼性の問題と、日常時の空調負荷増大の問題を同時に解決するシステムとしてパッシブセイフティシステムを提案し、また、本システムを採用した地下鉄駅舎において、火災時の旅客の避難安全を確保するために満たすべき駅舎内部での条件（遮煙条件）を示した。具体的には、1/20 スケール地下鉄駅舎模型を製作し 相似則に基づき模型実験を行うことで、パッシブセイフティシステムを採用した地下鉄駅舎において、適切なチムニー寸法、階段室－ホーム間垂れ壁高さ、垂れ壁下通路幅を選ぶことで、火災時に チムニーにより煙を外部に排出し、避難経路、消防拠点となる階段室への煙の進入を防ぐことができることを確認した。また、模型実験により、火災時に確実に階段室の安全性を確保するためには、着火直後 煙がチムニーに流入する前の段階で 階段室－火災室間での遮煙を行うことが特に重要であり、この時の遮煙条件を導出する必要があることを示し、その上で 実験により遮煙条件を把握した。

加えて、着火直後における天井下の煙の水平伝播性状、煙層先端部が垂れ壁に到達後の煙流動性状に関して、水理学の分野で用いられている手法に基づき 火災の分野特有の現象でもある周壁への失熱による煙層の密度変化も考慮して、それぞれ予測モデルを構築した。これらの煙流動モデルを用いることで、非定常状態での垂れ壁近傍での煙層厚さ、煙層温度が算出でき、また、それらを用いて煙が垂れ壁を越えて階段室に進入しようとする力が導出できるため、それに打ち勝つために必要な垂れ壁下での風速（遮煙に必要な風速）を導出することが可能となる。なお、天井下の煙の水平伝播速度および煙層先端部が垂れ壁に到達した後の垂れ壁近傍における煙層高さの 2 变数に注目し、煙流動モデルによる計算結果と実験結果が合致するように、天井下水平伝播速度を算出する際に必要となる比例定数 C_1 および 垂れ壁到達後の煙層への空気の連行量を算出する際に必要となる比例定数 C_{ent} に関して整合性を求める値を選択した結果、モデルから導出される他の变数である天井流の厚さと温度 および 垂れ壁近傍における煙層温度の計算結果と実験結果も良く一致することを確認した。また、垂れ壁近傍での煙層厚さ、煙層温度を基に算出した 遮煙に必要な垂れ壁下での風速の計算結果も実験結果と比較的良く一致することを確認した。これにより、1/20 スケール模型実験結果から決定した 比例定数 C_1 および C_{ent} の値の設定には若干の課題が残るもの、これらに適切な値を設定することで、パッシブセイフティシステムを採用した実大駅舎における遮煙条件を、火源条件のみを入力値として導出することが可能となった。

本研究で提案しているパッシブセイフティシステムは、火災時の避難安全性を確保するだけでなく、ドライミストおよび太陽エネルギーを利用した自然対流による気流制御により、日常時の空調負荷を軽減する実用システムでもあると言える（ただし、階段室手前に大きい垂れ壁を設置することができない場合には、ドライミスト、太陽エネルギーのみでは 常時 火災時の遮煙に必要な風速を確保することが難しくなる可能性がある）。これによって、地下鉄駅舎内の空調機械室面積、空調機器の削減が図れ、かつ、空調システムのランニングコストの削減に資することが可能となる。こうした実用的に優れた機能を有する本システムは、今後、地下鉄の開発が急速に進みつつある中国をはじめとするアジア諸国など世界各国において、地下鉄駅舎の火災安全対策のひとつとして、広く応用されることが期待される。以上のように、本研究は、火災安全工学の応用による避難安全対策に関する実用技術の開発研究として大変意義ある研究であると言える。

また、本研究で提案した煙流動モデルの使用範囲は地下鉄駅舎空間に限定されるものではなく、例えばオフィスビルにおける廊下で火災が発生した場合もしくは火災室から廊下へ煙が流出した場合に、廊下から階段室への煙の流入を防ぐために必要な垂れ壁高さを算出する際にも用いることができるところから、有用性は大きいと言える。

以下に、各章で得た成果をまとめて記す。

第1章では、研究の背景および目的を述べた上で、今後 新規に建設される地下鉄駅舎を対象とした新しい火災安全対策であるパッシブセイフティシステムを提案した。

また、関東地域における既存地下鉄駅舎の平・断面計画調査を行い、これを基に 本論文第2章以降での実験で使用した地下鉄駅舎模型の寸法を決定した。

第2章では、パッシブセイフティシステムを採用した地下鉄駅舎において火災が発生した際の駅舎内部での基礎的煙流動性状の把握、火災時に煙を火災室→チムニー→外部へと排出し、避難経路、消防拠点となる階段室への煙の流入を防ぎ、システムが上手く機能する条件があるか否かの検討、あるとすれば火災発生時のどの段階（発生直後、準定常状態等）に注目して その条件を探る必要があるかを把握することを目的として、地下鉄駅舎の1/20スケール模型を制作し、相似則に基づき模型実験を行った（火源は、実スケールで3MWを想定）。

具体的には、まず、チムニー寸法が模型内気流性状に与える影響を把握するために、用意した6種類のチムニーを用いてそれぞれ実験を行い、給・排気量、階段室への煙流入の程度等を指標に実験結果の比較を行った。次に、火災時の本システムの有効性を判断する際の指標の1つである階段室一火災室間の遮煙性能について、まず本研究における遮煙に関する考え方を示し、これに基づき遮煙状況に対して大きな影響を持つと考える 垂れ壁の高さ および 垂れ壁下の通路幅 をそれぞれ現実的な範囲内で段階的に変化させて実験を行った。また、堅シャフト（チムニー、階段室）の組合せが、火災時の煙流動性状に与える影響についても実験結果から考察した。

この結果、適切なチムニー寸法、垂れ壁高さ、垂れ壁下通路幅を選ぶことで、火災時に階段室への煙の進入を防ぎ、システムを有効に働くことができることを確認した。

なお、パッシブセイフティシステムを採用した地下鉄駅舎において火災が発生した際には、煙がチムニーに流入することにより 外気→階段室→火災室→チムニー→外気の方向に形成される気流の流速が大きくなるために、階段室一火災室間での遮煙に対して有利に働くが、火災発生直後 煙がチムニーに流入する前の段階で階段室に多量の煙が流入し、火災室→階段室→外気となる流れが形成された場合には、このことが原因として 煙がチムニーに流入後も遮煙を行うことが難しくなる可能性がある。非常に高いチムニーを設置した場合や火源位置がチムニーに近い場合などには、火災発生直後に階段室に煙が流入した場合でも、ある程度時間が経過した後には遮煙が行われる可能性はあるが、少なくとも第2章で扱った実験条件の範囲内では、初期に階段室に多量の煙が流入したにも関わらず 後に遮煙が行われたケースは確認できなかった。このことから、パッシブセイフティシステムを採用した駅舎において、火災時に確実に階段室の安全性を確保するためには、火災発生後 チムニーに煙が流入する前の段階で階段室への煙の進入を防ぐ必要があり、また、この時の遮煙条件を把握することが特に重要であると言える。

第3章では、第2章で得た 火災発生後 チムニーに煙が流入する以前の段階で遮煙を行うことが重要な見地から、着火直後の天井下煙伝播性状、煙層先端部が垂れ壁に到達後の垂れ壁近傍の煙流動性状に関して定式化を行い、これら2つの煙流動モデルを用いることで 計算から遮煙条件を導出できるようにした。

第4章では、着火直後（煙がチムニーに流入し、より大きい模型内気流が形成される以前）の非定常状煙流動、遮煙状況に注目し、着火前の模型内気流の大きさ、階段室一ホーム間垂れ壁高さ、垂れ壁下通路幅、火源条件（位置、径、発熱速度）をパラメータとして模型実験を行い、各種パラメータの組合せと遮煙状況から遮煙条件を把握した。また、第3章で提案した2つの煙流動モデルから導出される遮煙条件と実験結果を比較、検討した結果、下部煙層への空気の連行を考慮することで 計算結果は実験結果と良く一致することを確認した。

この他、模型の天井高さを300mmとした場合についても実験を行い、実験結果と計算結果を比較した

結果、1/20 スケール模型天井高さを 500mm (F. S. 10m) とした場合の実験結果から決定した 煙流動モデル式中の比例定数 C_1 および C_{ent} を用いたにも関わらず、両者は比較的良好く一致した。

第 3 章および第 4 章では、階段室×1 箇所、チムニー×1 箇所の模型パターン I を対象として、計算および実験から遮煙条件を導出したが、実際の駅舎計画を考えた際にはプラットホームには 2~4 箇所の階段が設置される場合が多く、そのような場合には 各階段からの給気量が減少し、垂れ壁下での風速を確保することが難しくなることも考えられる。その場合にも 第 3 章で提案する煙流動モデルから導出される遮煙条件を満たすように垂れ壁高さを大きくすることで火災時の階段室への煙の流入を防ぐことが可能となるが、駅舎計画上それが難しい場合、対策の一つとして 火災時に煙がチムニー方向に流れやすくするように天井に勾配をつけるといった方法が考えられる。

第 5 章では、天井を傾斜させることによる効果を把握することを目的として、模型全体を傾斜させて実験を行った (模型勾配 : 1/100, 3/100, 5/100)。この結果、煙流動モデルを用いて導出される 遮煙に必要な垂れ壁高さから “天井勾配” × “火源 - 垂れ壁間距離” を減じることが可能であることを確認した。ただし、その場合には 火災発生後 煙層先端部が垂れ壁に到達した直後では、階段室への若干の煙流入が生じる恐れがあることには注意が必要となる。

また、傾斜天井を上の方向に流れる煙に関して、定常状態での層厚、温度、流速を理論的に導出できることを示した。なお、天井の勾配を 2.2° 以上とすることで、勾配を上の方向に進む煙の状態は水力学で言う射流で安定となるが、この場合には、定常状態における理論予測結果を近似的に着火直後の非定常煙流動へも適用できると考える。また、水平天井の場合には火源近傍における内部跳水により煙層が厚くなることを理論予測により確認したが、これを解消する目的として わずかな勾配を設けることは意味が大きいと思われる。

その他、傾斜天井下を伝播する煙層に関して煙流動モデルによる予測を行ったところ、計算結果は、”チムニー方向に進む煙の先端部移動速度は勾配が 0~5/100 の範囲では 勾配による影響を殆ど受けないが、階段室方向へ進む煙層の移動速度は 勾配を 3/100, 5/100 とした場合には 水平、1/100 の場合と比較して若干遅くなる” という実験結果と同じ傾向を示した。ただし、勾配を大きくすることによる 階段室方向に進む煙の先端部移動速度の低下は僅かであることから、火災発生後 階段室側へ向かう煙が垂れ壁位置に到達する前にチムニーに煙を流入させ、駅舎内により大きい気流を形成させるという目的で 天井に勾配を設ける場合、勾配が 0~5/100 の範囲では 効果はそれ程大きくないと言える (ただし、階段室とチムニーの中央付近で火災が発生した場合には、多少の効果はあると予想される)。

6.2. 今後の課題

2003 年 2 月に起こった韓国テグでの地下鉄駅舎火災を受けて、我が国の既存地下鉄駅舎が採用している排煙設備に関する基準の見直しが行われた結果、それまで想定していた小規模火源に加えて 車両や売店へのガソリン放火による出火を想定した大規模火源が視野に入れられるようになった。ここで、キオスクが炎上した際の発熱速度の時系列変化を見てみると (図 6.2.1)、火源の成長には大きいばらつきがあるものの 最大発熱速度は概ね 10~13MW であることが分かる。

本研究では、1~3MW の火源に対して検討を行い、煙流動モデルによる予測結果は実験結果と良く一致することを確認したものの、放火等によりキオスクが全焼したような場合については煙流動モデルが適用可能であるか否かの検討を行っていない。しかし、仮にパッシブセイフティシステムを採用した駅舎でそのような大規模な火災が発生した際にも、火源が十分成長する前に煙がチムニーに流入し、それにより 階段室→火災室 (ホーム) の方向に気流が形成されること、加えて 火源が大きくなるに従い その気流も大きくなることを考えれば、避難経路の安全性が確保される可能性は十分あると考えられる。ただし、火源が大きくなった際には 煙層温度も上昇し、それに伴い 煙が階段室に進入しようとする力も大きくなるため、遮煙状況に関して模型実験等により確認する必要があるが、そのような大規模火源の

場合には火炎が天井に接すると予想されることから 1/20 スケール模型を用いた実験では 現象が実スケールでの現象と相似にならない可能性があるため (2.2 節末 (24 頁) 参照)、よりスケールの大きい模型を用いた検討が必要となる。

また、本研究で提案した煙流動モデルを用いた計算では、煙がチムニーに流入することによる垂れ壁下風速増大を考慮していないため、火源位置がチムニーに近い場合には 実験結果と比較して計算結果が安全側の評価となった。より正確な予測を行うためには、煙がチムニーに流入後のチムニー内温度分布予測モデルを構築し、これを基に垂れ壁下風速の時間変化を算出し、考慮する必要がある。

なお、本研究においては 煙流動モデル式中の比例定数 C_1 および C_2 は 1/20 スケール模型 (天井高さを 500mm (F.S. 10m)) を用いた実験結果から決定した。ここで、 C_1 および C_2 は 天井流および下部煙層の平均的な内部 Fr 数を Fr_1 , Fr_2 として、それぞれ $C_1 = \Delta\rho_1 gh_{s1} / (\rho_{s1} u_{s1}^2) \equiv 1/Fr_1^2$, $C_2 = \Delta\rho_2 gh_{s2} / (\rho_{s2} u_{s2}^2) \equiv 1/Fr_2^2$ と表すことができる。煙層一壁面間の熱移動が無い場合あるいは放熱機構も相似であるならば 内部 Fr 数は模型スケールと実スケールで一致すると思われることから、それらの場合には 縮尺模型実験結果から決定した C_1 および C_2 は そのまま実スケールでの煙流動性状予測に用いることができるを考える。ただし、本研究で使用した縮尺模型では、模型スケールと実スケールの間で 煙層一壁面間の熱移動が相似とはなっていないために、模型スケールと実スケールとで煙の内部 Fr 数が異なる可能性があることから、模型スケールが異なる場合や模型構成材料が異なる場合についても検討し、本研究で得た結果と総合して適切な比例定数を設定する必要がある。

これらに関しては 今後の課題とさせていただきたい。

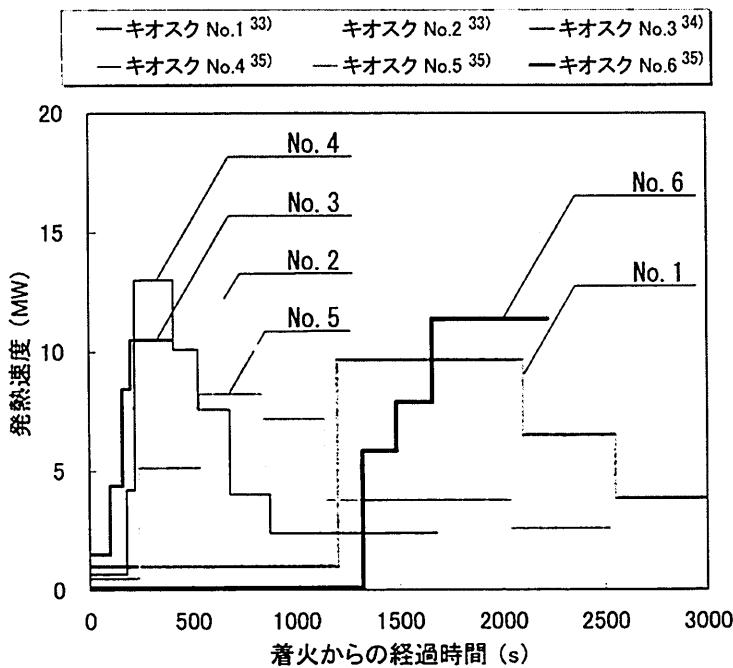


図 6.2.1 キオスクが炎上した際の発熱速度の時系列変化*

また、パッシブセイフティシステムはドライミストおよび太陽エネルギーを利用した対流制御により日常時の空調負荷削減、火災時の避難安全性の確保を実現するシステムであるが、本システムを採用した駅舎では、常時 駅舎内に火災時に遮煙を行うために必要な風速以上の風速が確保されている必要がある。このため、駅舎計画上 階段室手前に大きい垂れ壁を設置することが難しい場合、日中であっても ドライミストおよび太陽エネルギーのみでは必要な気流を安定して形成することができない可能性がある (このようなケースの例を資料編 4. に示す) が、その様な場合には、例えば 列車からの廃熱や駅舎内部、近隣施設で排出される廃熱を駅舎内部の気流形成に利用する等の措置を取ることで システムを実現できると考える。このため、チムニー内の廃熱利用等を含む具体的な駅舎設計方法に関して 今後 検討していく必要がある。

* 文献 33~35 では、既存の駅舎内に設置されているキオスクの形状や固定可燃物重量、積載可燃物重量の調査を行い、これを基に算出した キオスクにおける単位床面積あたりの等価可燃物量 (木材換算重量) に基づき 実大火キオスク供試体を制作し、燃焼実験を行っている。

文献にはキオスク供試体の燃焼重量の時系列変化が記載されているが、図 6.2.1 ではそれを基に発熱速度の時系列変化を導出した (可燃物の単位重量あたりの発熱速度は 15MJ/kg とした)。

参考文献

- 1) 丁文婷 他 2 人 : アトリウム型ソーラーチムニーにおける自然換気と避難路遮煙の両立可能性, 日本建築学会環境系論文集 No. 569, pp1-6, 2003 7
- 2) 峯岸 良和 他 2 人 : 煙制御機能を持つアトリウム型ソーラーチムニーのゾーンモデルによる自然換気性能予測－アトリウム型ソーラーチムニーにおける自然換気・避難路遮煙の両立手法－, 日本建築学会環境系論文集 No. 580, pp1-7, 2004
- 3) 趙晟佑 他 1 人 : 校舎建築の自然換気システムにおけるソーラーチムニーの性能予測に関する研究, 日本建築学会計画系論文集 No. 537, pp. 37-42, 2000
- 4) 早川 真 他 1 人 : ソーラーチムニーを主体とするサステナブル校舎の省エネルギー効果, 日本大学理工学部船橋校舎 14 号館, 建築設備 & 昇降機, No. 64, 2006
- 5) 辻本 誠 他 2 名 : ミストの蒸散効果を利用したヒートアイランド対策－そのコンセプトと初步的検討－, 空気調和・衛生工学会中部支部学術研究発表会論文集第 4 号, pp63-64, 2003
- 6) 林 啓紀 他 7 人 : ドライミスト散布によるヒートアイランド抑制システムの開発(その 1) ミスト散布条件・気象条件と気温効果の関係, 日本建築学会大会梗概集 D-1 分冊, pp. 805-806, 2004
- 7) 児玉 奈緒子 他 7 人 : ドライミスト散布によるヒートアイランド抑制システムの開発(その 2) 一卵性双生児による温熱快適性の検討, 日本建築学会大会梗概集 D-1 分冊, pp. 807-808, 2004
- 8) 林 啓紀 他 7 人 : ドライミスト散布によるヒートアイランド抑制システムの開発(その 3) 実測と数值流体解析による検討, 日本建築学会大会梗概集 D-1 分冊, pp. 629-630, 2005
- 9) 児玉 奈緒子 他 7 人 : ドライミスト散布によるヒートアイランド抑制システムの開発(その 4) 半屋外空間における温熱快適性の検討, 日本建築学会大会梗概集 D-1 分冊, pp. 631-632, 2005
- 10) 山田 英貴 他 3 名 : ドライミスト噴霧による冷却効果に関する研究 愛知万博グローバル・ループにおける実測結果, 日本建築学会大会学術講演概要集 D-1 分冊, pp. 677-678, 2006
- 11) 大手山 亮 他 2 名 : ドライミスト装置の開発と環境勘定, 日本建築学会大会学術講演概要集 D-2 分冊, pp. 559-560, 2007
- 12) 建設省住宅局建築指導課 : 新・排煙設備技術指針, 日本建築センター, 1987
- 13) 空気調和・衛生工学会 : 空気調和・衛生工学便覧 6 応用編(第 12 版), 空気調和・衛生工学会, 1995
- 14) 日本地下鉄協会 : 最新 世界の地下鉄, ぎょうせい, 2005
- 15) 国土交通省 HP 地下駅における火災対策設備の現況: <http://www.mlit.go.jp/index.html>
- 16) 東京消防庁 : 火災の実態, 東京消防庁, 2006
- 17) 東京メトロ HP : <http://www.tokyometro.jp/index.html>
- 18) 東京都交通局 HP : <http://www.kotsu.metro.tokyo.jp/>
- 19) 平成 15 年度大深度地下の公共的使用において配慮すべき安全性に関する調査報告書, 国土交通省都市・地域整備局大都市圏整備課大深度地下利用企画室, 2004, <http://www.mlit.go.jp/crd/daisindo/index.html>
- 20) M. A. Delichatsios : The Flow of Fire Gases Under a Beamed Ceiling, COMBUSTION AND FLAME 43, pp. 1-10, 1981
- 21) P. L. Hinkley : The Flow of Hot Gases Along an Enclosed Shopping Mall A Tentative Theory, Fire Research Note No. 807
- 22) 松下 敬幸 他 1 人 : 水平廊下における煙先端部の移動の定式化と実験, 煙先端部の水平伝播性状に関する研究その 1, 日本建築学会構造系論文集, 第 468 号, pp. 193-198, 1995
- 23) 笠原 獣 他 5 名 : 廊下状空間における垂壁下の遮煙性状, 日本建築学会計画系論文集第 522 号, pp. 1-5, 1999

- 24) 栗岡 均 他 4 人: 水平方向に細長い空間における火源近傍性状およびブルーム性状, 日本建築学会構造系論文集, 第 546 号, 151–156, 2001
- 25) 岡 泰資 他 3 人: 自由空間で横風を受けた火炎の傾斜モデルに関する考察, 日本建築学会構造系論文集, 第 520 号, 147–154, 1996
- 26) 辻本 誠 他 3 名: 一部に開口のある空間での煙流動に関する模型実験－大規模空間での初期火災時における煙流動に関する研究 第 1 報－, 日本建築学会構造系論文集第 488 号, pp. 153–160, 1996
- 27) J.G. Quintiere, Scaling Application in Fire Research, Proc. of the International Symposium on Scale Modeling, 1988
- 28) 日本火災学会: 火災と建築, 共立出版, 2005
- 29) 田中 啓義: 改訂版建築火災安全工学入門, 日本建築センター, 2002
- 30) 日本機械学会: 伝熱工学資料 改訂第 4 版, 日本機械学会, 1986
- 31) 有田 正光: 水圏の環境, 東京電機大学出版局, 1998
- 32) 岩佐 義朗: 水理学 II, 朝倉書店, 1993
- 33) 石橋 輝樹 他 4 名: 線路上空利用建物における耐火設計に関する研究 その 3 キヨスク店舗実大火災実験概要, 日本建築学会大会学術講演概要集, pp. 1199–1200, 1991
- 34) 武居 泰 他 4 名: 駅構内に設置される大型売店の火災性状, 日本建築学会大会学術講演概要集, pp. 357–358, 2004
- 35) 石橋 輝樹 他 2 名: キオスクを火源とする模擬線路階の火災実験, 日本建築学会構造系論文集第 470 号, pp. 143–150, 1995
- 36) 武居 泰 他 4 名: 駅構内に設置される大型売店の火災性状, 日本建築学会大会学術講演概要集, pp. 357–358, 2004
- 37) 東京理科大学 工学部第二部 建築学科 辻本研究室 HP:
<http://www.rs.kagu.tus.ac.jp/tujimoto/>
- 38) 秋葉原クロスフィールド HP: <http://www.akiba-cross.jp/top.php>
- 39) 運輸省, 地下鉄道の排煙対策の基準, 鉄土第 70 号 (昭和 57-4)
- 40) 武居 泰 他 3 名: 線路上空利用建物における耐火設計に関する研究 その 5 線路階火災模型実験, 日本建築学会大会学術講演概要集, pp. 1353–1354, 1992
- 41) 森ビル株式会社 HP: <http://www.mori.co.jp/companyInfo/press/res/2007062814410432681.pdf>
- 42) 松島 早苗 他 1 名: 地下鉄火災における駅構内の煙制御に関する研究 その 3 機械排煙時の排煙量と煙層高さ, 日本建築学会大会学術講演概要集, pp. 255–256, 2006
- 43) J.S. Turner: BUOYANCY EFFECTS IN FLUIDS, University of Cambridge, 1973
- 44) T.H. Ellison and J.S. Turner: Turbulent Entrainment in Stratified Flows, Department of the Mechanics of Fluids, University of Manchester, pp. 423–448, 1959
- 45) 辻本 誠: 火災時の建物内煙流動に関する研究 (学位論文), 1981
- 46) R.L. Alpert: Turbulent Ceiling-Jet Induced by Large-scale Fires, Technical Report, Factory Mutual Research, 1974
- 47) 岩佐 義朗: 水理学 I, 朝倉書店, 1993
- 48) 山田 慎二郎 他 1 人: 傾斜した天井面での煙先端部の伝播性状に関する研究, 日本火災学会論文集, Vol. 49 No. 2, pp. 57–63, 1999

使用記号

u_{sl}	: 天井流先端部の移動速度 (m/s)	α	: 煙層-壁面間の対流熱伝達率 (=0.01745) (kW / (m ² ·K))
u_{s2}	: 下部煙層先端部の移動速度 (m/s)	A_{sl}	: 上部煙層 (天井流) が周壁と接している面積 (m ²)
u_{air}	: 垂れ壁下における風速 (m/s)	A_{s2}	: 下部煙層が周壁と接している面積 (m ²)
u_{ent}	: 下部空気層へ空気が連行される際の空気の流入流速 (m/s)	A_f	: 火源面の面積 (m ²)
$\Delta\rho_1$	: 上部煙層と周囲空気の密度差 (kg/m ³)	b_p	: プルームの幅 (m)
$\Delta\rho_2$	: 下部煙層と周囲空気の密度差 (kg/m ³)	r	: 火源中心軸からの水平距離 (m)
ρ_{air}	: 周囲空気密度 (kg/m ³)	z_0	: 仮想点熱源高さ (m)
ρ_0	: 流入地点のプルーム密度 (kg/m ³)	z'	: 点熱源から煙層下端までの高さ (m)
ρ_{s1}	: 上部煙層密度 (kg/m ³)	$\Delta T_0(z')$	: 火源中心軸上の高さ z' の位置の温度上昇 (K)
ρ_{s2}	: 下部煙層密度 (kg/m ³)	$\Delta T(z', r)$	: 高さ z' , 火源中心軸からの水平距離 r の位置の温度上昇 (K)
T_{air}	: 周囲空気温度 (K)	$w_0(z')$	: 火源中心軸上の高さ z' の位置の軸方向の流速 (m/s)
T_0	: 流入地点のプルーム温度 (K)	$w(z', r)$	: 高さ z' , 火源軸からの水平距離 r の位置の軸方向の流速 (m/s)
T_{s1}	: 上部煙層温度 (K)	C_p	: 定圧比熱 (kJ/(kg·K))
T_{s2}	: 下部煙層温度 (K)	D	: 火源径 (mm)
T_{w0}	: 煙層と接する壁面の温度 (K)	H'	: 垂れ壁高さ (mm)
ΔT_c	: チムニー内面状電熱ヒータ設定温度 (外気温からの温度上昇) (K)	W'	: 垂れ壁下通路幅 (mm)
Q_0	: プルームから煙層への体積流入量 (m ³ /s)	g	: 重力加速度 (m/s ²)
$Q_{sl \rightarrow 2}$	: 上部煙層から下部煙層へ流入する煙の体積流量 (m ³ /s)	C_l	: 天井流先端部の移動速度を算出する際に必要になる比例定数 (-)
Q_{ent}	: 下部煙層へ連行される空気の体積流入量 (m ³ /s)	C_2	: 下部煙層先端部の移動速度を算出する際に必要になる比例定数 (-)
Q	: 火源発熱速度 (kW)	C_{ent}	: 下部煙層への空気の流入量を算出する際に必要になる比例定数 (-)
Q_z^*	: 無次元発熱速度 (-)	Ri	: リチャードソン数 (-)
V_{s1}	: 上部煙層 (天井流) 体積 (m ³)	Ri_0	: 層断面平均リチャードソン数 (-)
V_{s2}	: 下部煙層体積 (m ³)	Fr_1	: 上部煙層の内部フルード数 (-)
h_{s1}	: 上部煙層 (天井流) 厚さ (m)	Fr_2	: 下部煙層の内部フルード数 (-)
h_{s2}	: 下部煙層厚さ (m)	Re	: レイノルズ数 (-)
H_s	: 煙層厚さ ($= h_{s1} + h_{s2}$) (m)		
B_s	: 模型の幅 (流れの幅) (m)		
X_1	: 火源中心軸から天井流先端部までの水平距離 (m)		
X_2	: 垂れ壁から下部煙層先端部までの水平距離 (m)		

謝辞

本論文の内容について、終始 身に余る懇親丁寧なご指導をしてくださった 東京理科大学工学部第二部建築学科教授 辻本誠 博士 には心より感謝申し上げます。東京理科大学大学院博士課程に進学当初は、模型実験の経験が無く、また 煙流動に関する知識も皆無であった私が、この論文を書き上げることができたのも辻本先生のおかげです。

辻本先生には、名古屋大学大学院修士課程での 2 年間、東京理科大学大学院博士課程の 3 年間 ご指導をして頂きましたが、最近 ようやく私も勉強方法が分かってきたのか、名古屋大学進学時と比較して若干ではありますが 頭が良くなった気がします（名古屋大学時代は毎日のように馬鹿にされ、かなり落ち込んだ時期もありましたが、ここ最近は馬鹿にされる頻度も少なくなってきたような気がします）。先生に会えたこと、指導をして頂いたことは、私が今後の人生を歩んで行く上で必ずプラスになると思います。本当に有り難うございました。

恵まれた研究の環境と機会を与えて頂くと共に、研究に関する数多くの貴重な意見をくださった 東京理科大学理工学部建築学科 若松孝旺 博士 には深く感謝しております。また、長期間に渡って、思う存分 大規模模型実験を行える環境を与えて頂いたこと、大変嬉しく思います。学位論文の審査においては、沢山の厳しいご指摘を頂きましたが、そのおかげで 論文の内容はかなり良くなつたと思います。

若松先生には、私が 東京理科大学学部 4 年次に若松研究室に所属した時からお世話になっておりますが、今振り返れば、あの時 若松研究室への所属を希望して本当に良かったと思います。

学位論文の審査において、東京理科大学理工学部建築学科教授 武田 仁 博士、同理工学部建築学科教授 井上 隆 博士、同工学部第一部建築学科教授 倉渕 隆 博士 には、研究に関する貴重なご助言を頂いたことを大変感謝しております。審査が始まる前に比べて論文の内容は かなり良くなつたと思います。

審査期間中は、精神的にも肉体的にも本当に辛かったですが、あの時の経験は、今後 必ず役に立つと思います。東京理科大学で学位を取得したという自信と誇りを持って、残りの人生を歩んでいきたいと思います。本当に有り難うございました。

2 年間 共に研究生活を送った (株)損保ジャパン・リスクマネジメント(当時 東京理科大学大学院生) 天野 賢治 氏、君がいなかつたら この研究をここまで仕上げることは間違ひなくできなかつた。本当に感謝しているよ(天野君の先輩にあたる人たちを抜いて、この位置に名前があることからも すごく感謝していることが分かるでしょう？)。

この前、4 冊の実験ノートを読み返していたのだけど、我ながら これだけの実験を良くやつたと思うよ。そして、稀に文句は出たけれども、それでも最後まで良く俺についてきててくれたと思う。実験棟で音楽を聴きながら 2 人で黙々とやつた実験準備、試行錯誤の末 完成させた着火装置、始めて綺麗に可視化映像を記録できた時の感動、レンタルした高精度の熱線風速計の大破、PIV システムの件・・・などなど・・・一生忘れません。

実験以外にも色々と苦労したね。地下鉄駅舎の図面調査、図書館で水理学の本を読みあさったこと、苦労して煙流動モデルを構築したこと・・・これらも一生忘れません。本当に有り難う。

天野君が修了した後の 1 年間で 大きく変わった部分も多々あるので、是非一度 論文を読んでみて！

この研究が立ち上がつた年、すなわち まだ研究方針も何も決まっていない時にこの研究を選んでしまつた 東京消防庁(当時 東京理科大学大学院生) 大岩 大祐 氏、あの時は本当に苦労したね。完全に俺の実力不足を痛感した年だったよ。申し訳ない。とは言え、大岩君も無事に修了できだし、怨んでないよね？ 大岩君の苦労があったから、2 年目以降 この研究の具体的な方向性も決まり、順調に研究を進

めることができたのだよ。

あれから この研究がどのように進んでいったのか、一度 論文に目を通してみてください。あまりのレベルアップぶりに驚くと思うよ。

三機工業(株)技術開発本部 内山 聖士 氏 には、研究着想時から色々とお世話になりました。特に、地下鉄駅舎における日常時の換気に関する意見は 非常に参考になりました。有り難うございました。

私が博士課程に進学した当初、模型実験の経験、煙流動に関する知識が無かった私に、色々とアドバイスをしてくださった 東京理科大学総合研究機構火災科学研究センター講師 水野 雅之 博士 に厚く御礼申し上げます。水野さんからは、直接研究とは関連の無いことも含めて 多くのことを教えてもらったような、もらっていないような・・・・・・というのは冗談で、本当にお世話になりました。有り難うございました。

東京理科大学理工学部建築学科准教授 大宮 喜文 博士 には、この研究が始まった当初に数多くの貴重なご助言を頂いたことを心から感謝いたします。初年度は まだ研究方針が定まっていなかったこともあり、時には叱咤されたこともありましたが、そのおかげで、2年目以降の研究を順調に進めることができました。有り難うございました。

その他、東京理科大学総合研究機構火災科学研究センター講師 松山 賢 博士、同 COE PD 研究員 朴 相俊 博士、同 COE PD 研究員 抱 憲誓 博士、同 COE PD 研究員 鈴木 淳一 博士、総務省消防庁 消防大学校 消防研究センター 若月 薫 博士、(株)竹中工務店 技術研究所 長岡 勉 氏、同技術研究所 出口 嘉一 博士、東京理科大学大学院理工学研究科建築学専攻辻本研究室 D2 佐藤 歩 氏、東京理科大学工学部第一部建築学科辻本研究室 B4 松井 昭博 氏、同辻本研究室 B4 渡辺 明美 氏 に深く感謝いたします。皆様のご協力があったからこそ、この研究を続けることができました。本当に有り難うございました。

後 2 人ほど、加えなければならぬ人を忘れておりました。東京理科大学大学院理工学研究科建築学専攻大宮研究室 M2 城 明秀 氏、同大宮研究室 M2 柳沢 晶人 氏、君たちには この研究が始まった最初の年に少しだけお世話になったね。少しだけね。この研究の成果に対する天野君、大岩君の貢献度に比べれば、君たちの貢献度は 1/100 程度だけれど、それでも一応感謝しているかな。

それに名前を載せなければ載せないで色々文句も出そうなので、載せておくことにするよ・・・

最後になってしましましたが、この論文をまとめるにあたって、誰よりも、何よりも感謝しているのは、私の家族、親戚の方々です。名古屋大学大学院を修了後に一度社会に出たにも関わらず、また学生に戻ることを決めた時に、反対もせずに応援してくれて有り難う。学位論文の執筆途中で、正直 無理かもしれないと思ったこともありましたが、皆様が応援してくださったおかげで、何とか論文をまとめることができました。長いようで、短かった 3 年間ですが、この 3 年で非常に沢山のことを得ることができました。今後も これまで同様、一生懸命頑張っていきたいと思います。本当に有り難うございました。

なお、本研究の内容により、平成 19 年度 日本学術振興会特別研究員として採用され、文部科学省科学研究費補助金（特別研究員奨励費）を頂いたことを付記いたします。

2008 年 3 月

徳永英

資料編

資料編 1. ホームスクリーンドア、ソーラーチムニーおよび ドライミスト設備の採用例	132
資料編 2. 着火前換気量計測実験 結果	138
資料編 3. 遮煙成否判定実験 結果（階段室内温度上昇）	142
資料編 4. 煙流動モデルを用いた実大駅舎の設計例（ケーススタディ）	153
資料編 5. 実験に用いた火源の発熱速度の計測データ	155

資料編 1. ホームスクリーンドア、ソーラーチムニーおよびドライミスト設備の採用例

ホームスクリーンドアの地下鉄駅舎ホームへの導入は、現在 世界各国で積極的に進められている。また、ソーラーチムニーおよびドライミスト設備は、近年 建築物の省エネルギー化へのニーズが高まっていることから研究が進められてきており、それに並行して日本各地で実建築物への設置が行われ始めている。以下では、それらの設備の実建築物への採用例について紹介する。

(1) ホームスクリーンドア

世界各国の地下鉄駅舎へのホームスクリーンドアの導入事例を図 1-1 に示す。



(a) デンマーク・コペンハーゲン 1



(b) デンマーク・コペンハーゲン 2



(c) ロシア・サンクトペテルブルグ



(d) イギリス・ロンドン



(e) フランス・パリ 1



(f) フランス・パリ 2



(g) タイ・バンコク 1



(h) タイ・バンコク 2

図 1-1 (1) 世界各国の地下鉄駅舎におけるホームスクリーンドア採用例¹⁴⁾



(i) 韓国・大田



(j) 韩国・ソウル 1



(k) 韩国・ソウル 2



(l) 韩国・ソウル 3



(m) シンガポール・シンガポール



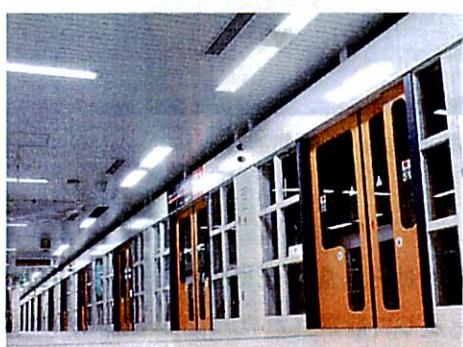
(n) 中国・深圳



(o) 中国・香港



(p) 中国・マカオ



(q) 日本・京都府 1



(r) 日本・京都府 2

図 1-1 (2) 世界各国の地下鉄駅舎におけるホームスクリーンドア採用例¹⁴⁾



(s) 日本・広島県



(t) 日本・東京都 1



(u) 日本・東京都 2



(v) 日本・埼玉県

図 1-1 (3) 世界各国の地下鉄駅舎におけるホームスクリーンドア採用例¹⁴⁾

(2) ソーラーチムニー

・日本大学理工学部船橋校舎 14号館（2004年）

日本大学理工学部船橋校舎 14号館は、ソーラーチムニーをはじめとして、クール・ヒートチューブ、簡易エアフロー、屋上緑化、太陽光発電、雨水利用等 様々な省エネルギーへの取り組みがなされている。同校舎の北棟南側ラウンジには、断面 3m×3m、高さ 26m のソーラーチムニーが 2 基設置されており（図 1-2）、チムニー 2 基で 17,000kWh/年 の電力（建物全体の年間電力のうち約 3%）を削減している。



図 1-2 日本大学理工学部船橋校舎 14号館⁴⁾

・瀬戸日本館（愛知万博：2005年3～9月）

瀬戸日本館は日本の伝統工法に見られる自然通風や日除けと、先端技術である地中熱冷房システムやソーラーチムニーを組み合わせた自然融合型パビリオンとして設計された（図 1-3）。建物中央に直径約 4m のソーラーチムニーが設置されており、地下換気口より外気を取り入れて、室内を経由し、ソーラーチムニーから排出するという空気の流れによって、常に快適な温熱環境を提供する（図 1-4）。

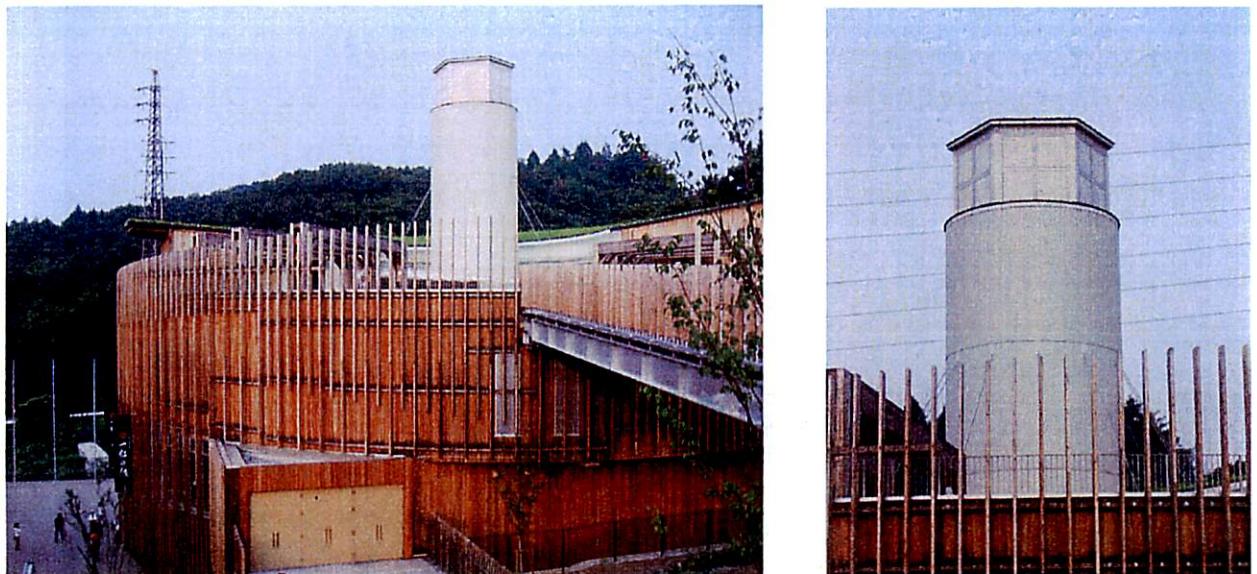


図 1-3 濑戸日本館写真(左: 外観全景、右: ソーラーチムニー)

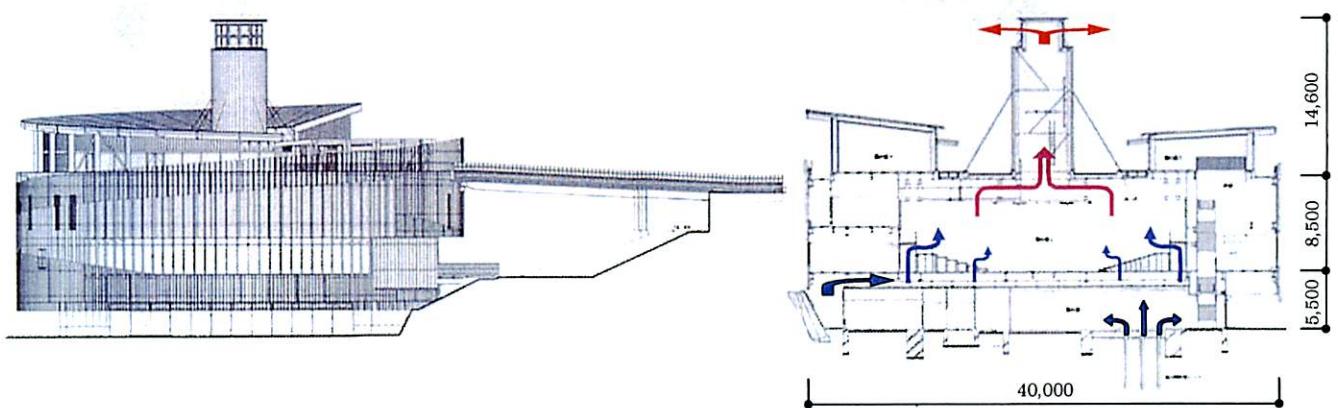


図 1-4 濑戸日本館図面(左: 北立面図、右: 断面図)

(3) ドライミスト設備

- ・グローバルループ、ワンダーサーカス電力館、オーストラリア館（愛知万博：2005年3～9月）

グローバルループは通路両脇に夏季の強い日射を遮るために屋根を設けた万博内の各ゾーンをつなぐ屋外通路であり、屋根のフレーム部分にドライミスト噴霧用の配管、ノズルを設置している（図 1-5(1)）。ドライミストの蒸発による冷却効果に視覚的な効果も加わり、図 1-5(2) に見られるように観客が日影に入れなくとも通路脇に寄る傾向が見られた。

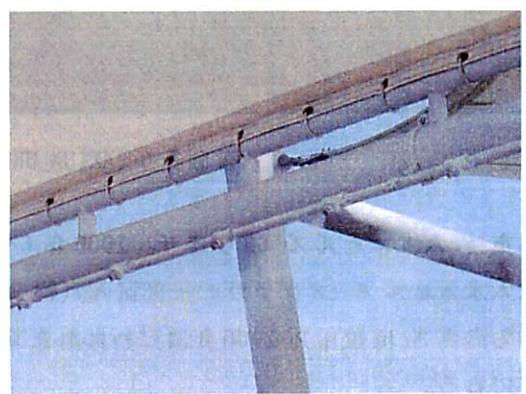


図 1-5 (1) グローバルループ



図 1-5 (2) グローバルループ

・東京 秋葉原クロスフィールド AKIBA_BRIDGE(愛称：冷んやりリフト)(2006年8~9月, 2007年7~8月)

AKIBA_BRIDGEのある秋葉原駅西側交通広場は、打ち水イベントを開催するなどヒートアイランド対策の活動を積極的に行っている場所である。東京都は、ヒートアイランド対策の一環としてドライミスト装置の普及を目指しており、AKIBA_BRIDGEへのドライミスト装置の設置(図1-6)は、一部 東京都の補助を受けて行われた。



図 1-6 AKIBA_BRIDGE(愛称：冷んやりリフト)^{37), 38)}

・東京 六本木ヒルズ 66 プラザ(2006年6~10月, 2007年7~10月)

六本木ヒルズ 66 プラザの一部区画(約30m)に3m間隔で計9箇所ミストノズルが設置された(床面からの高さ3m位置)。2006年夏に行われた来街者アンケートでは、全来街者のうち91%が“快適”と回答している⁴¹⁾。



図 1-7 六本木ヒルズ 66 プラザ^{37), 41)}

・北海道 五稜郭タワー アトリウム（2006 年）

愛知万博グローバルループ、秋葉原 冷んやリフト、六本木ヒルズ 66 プラザとは異なり、屋内空間（アトリウム面積 940.78m²、アトリウム天井高さ 約 12m）へドライミスト設備が導入された。ミスト噴霧高さは 床面から 3.5m であるが、これは あまりに上方でミストを噴霧した場合、ミストが自然換気風に乗り 天井開口から外部へ流出する可能性があるためである。なお、アトリウム内に噴霧ユニットは計 4 本、ミストノズルは計 24 個設置されている（ミストノズルは 6.0MPa で 50cc/（min・個） 噴霧する仕様で、愛知万博グローバルループ、六本木ヒルズ 66 プラザ、秋葉原 冷んやリフトで使用したものと同仕様）。

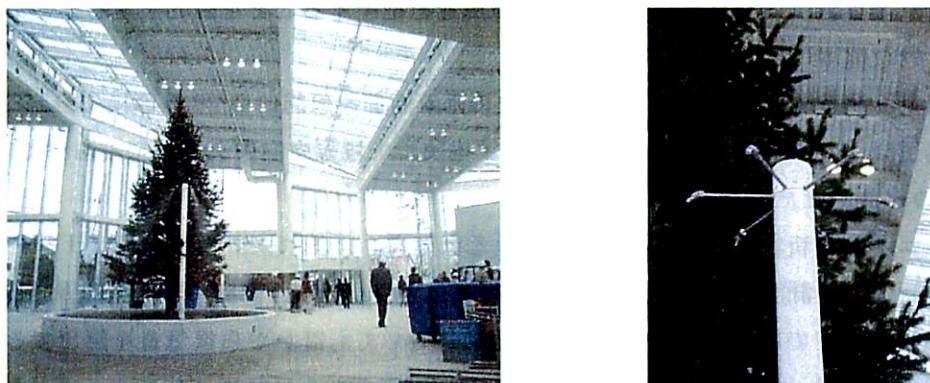


図 1-8 五稜郭タワー アトリウム³⁷⁾

・愛知 名古屋大学経済学部校舎（2006 年 3 月）

名古屋大学経済学部校舎の屋外通路屋根部分に設置されている。当初は全長約 52m の屋外通路の半分に配管およびミストノズルの設置が行われたが、2007 年 8 月には通路全体に渡り増設された。

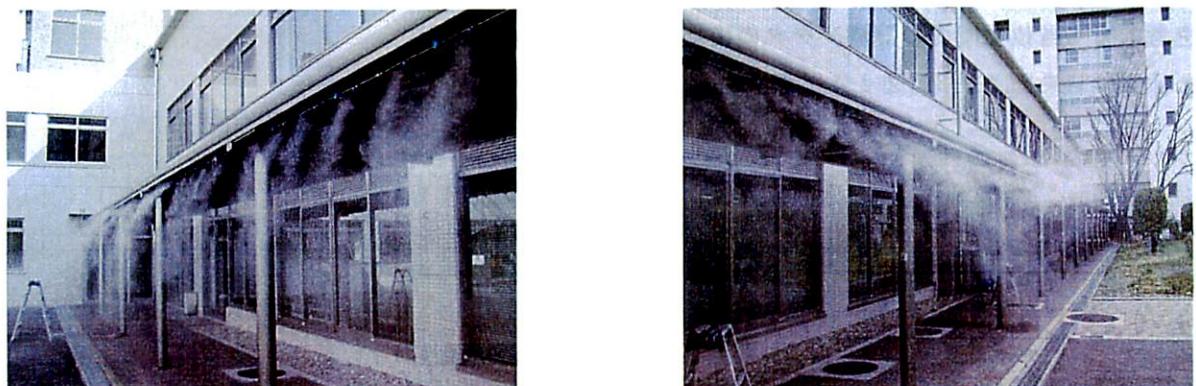


図 1-9 名古屋大学経済学部校舎³⁷⁾

- ・東京 新丸の内ビルディング前 歩道（2007年4月）
新丸の内ビルディング前の歩道には計5本の噴霧ユニット（ミストノズル計40個）が設置されている。



図1-10 新丸の内ビルディング前 歩道³⁷⁾

資料編2. 着火前換気量計測実験 結果

遮煙成否判定実験により得られた結果を基に遮煙条件を導出するにあたり、チムニー内面状電熱ヒータの設定温度と垂れ壁等の条件の組合せに対応した垂れ壁下風速（煙がチムニーに流入する以前）が必要となる。着火前換気量計測実験は、実験条件毎の垂れ壁下風速を把握することを目的とするものであり、遮煙成否判定実験の補足的な位置づけとなる。

着火前換気量計測実験では、模型長さ方向中央の垂直断面を仮想的に20等面積に分割し、それぞれの中心位置で熱線風速計により風速を計測した。ただし、本実験では幅方向中央を境に左右対称であるため、図2-1に示す12点のみ計測した。

実験は、チムニー内面状電熱ヒータ設定温度、垂れ壁高さ、垂れ壁下通路幅をパラメータとして全27ケースを行い、実験により計測した単位時間あたりの換気量 $V_{exp.}$ と計算による換気量 $V_{cal.}$ の関係を把握することで、実験を行っていないパラメータの組合せに対しても計算から換気量を算出できるようにした。また、計算による換気量 $V_{cal.}$ を垂れ壁下通路断面積（“床面から垂れ壁下端までの高さ”×“垂れ壁下通路幅”）で除すことにより、着火前の垂れ壁下風速を算出した（垂れ壁下の気流は一様分布であると仮定した）。

風速計測は、面状電熱ヒータ作動開始から約120分後に開始し、各計測位置で5秒間隔で10分間行った。なお、模型内の気流への影響を小さくするために、模型内への熱線風速計の設置は最大で2台とし（図2-2）、順次計測位置のみを変更した。また、計測結果から単位時間あたりの換気量を算出するにあたり、各計測点における風速は、計測機器移動に伴う気流の乱れを考慮して当該位置での計測データの後半5分間の平均値を用いた。実験結果を図2-3、図2-4に示す。

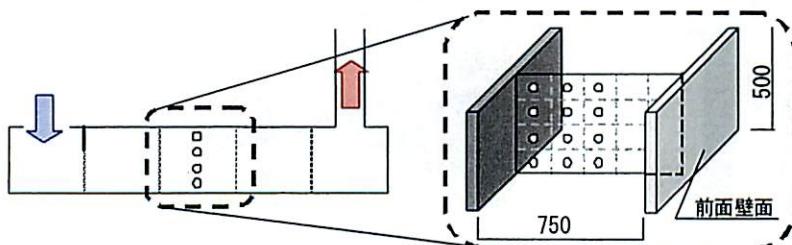


図2-1 風速計測位置

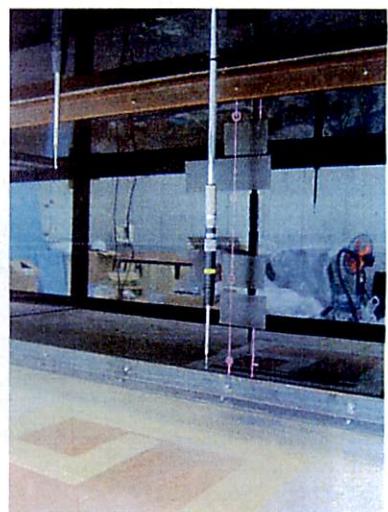


図2-2 热線風速計設置状況

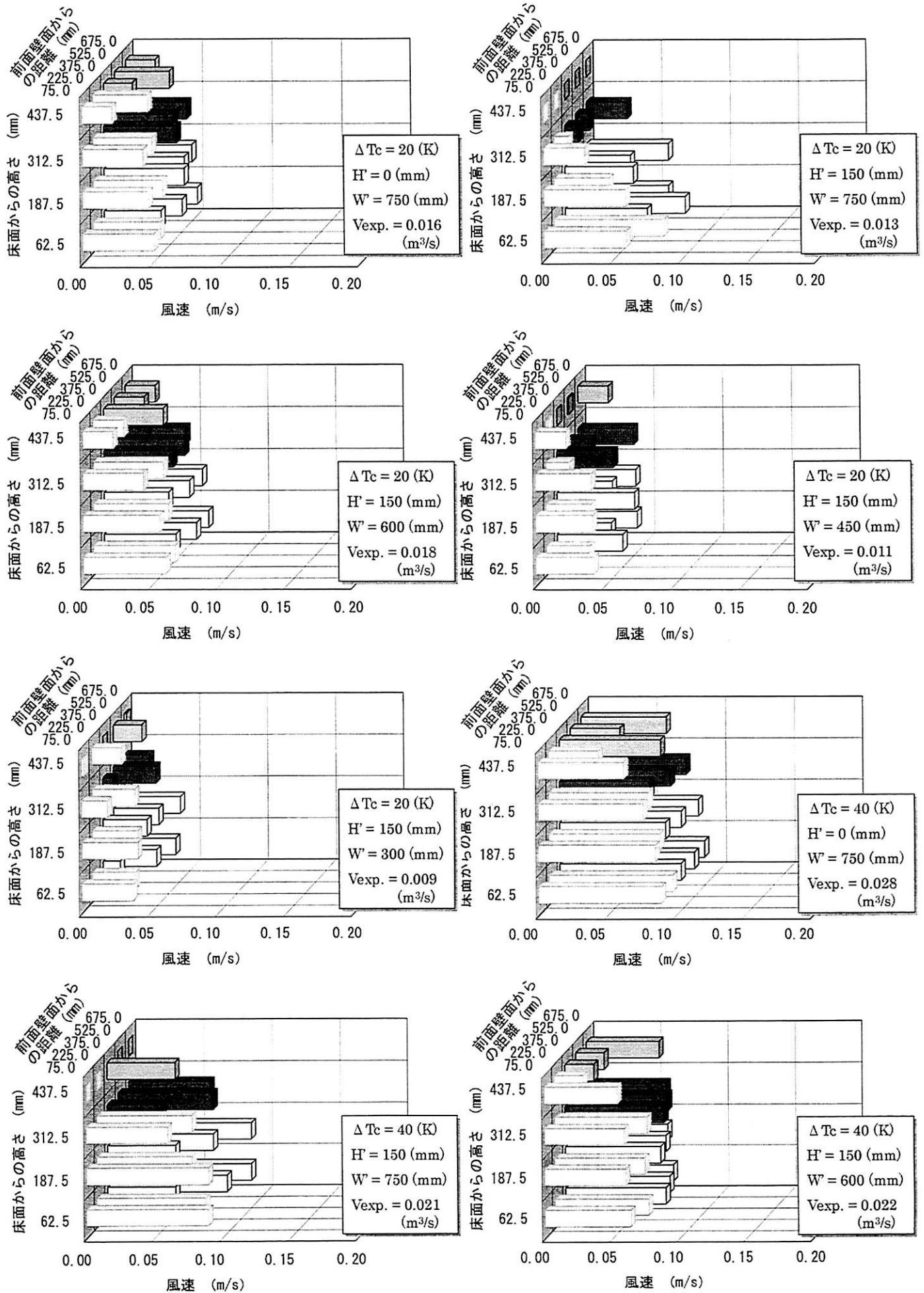


図 2-3 (1) 風速分布 (模型天井高さ 500mm)

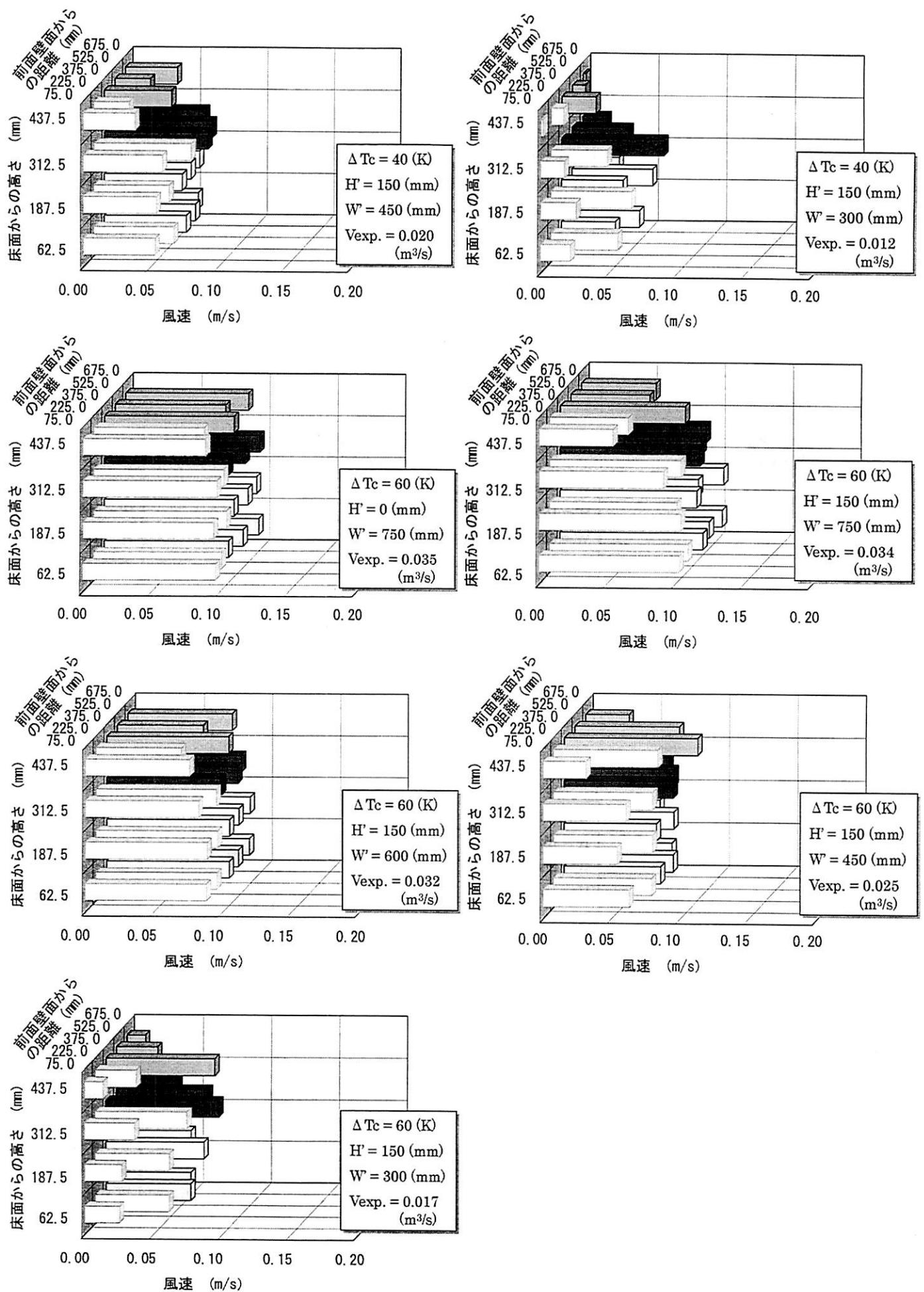


図 2-3 (2) 風速分布 (模型天井高さ 500mm)

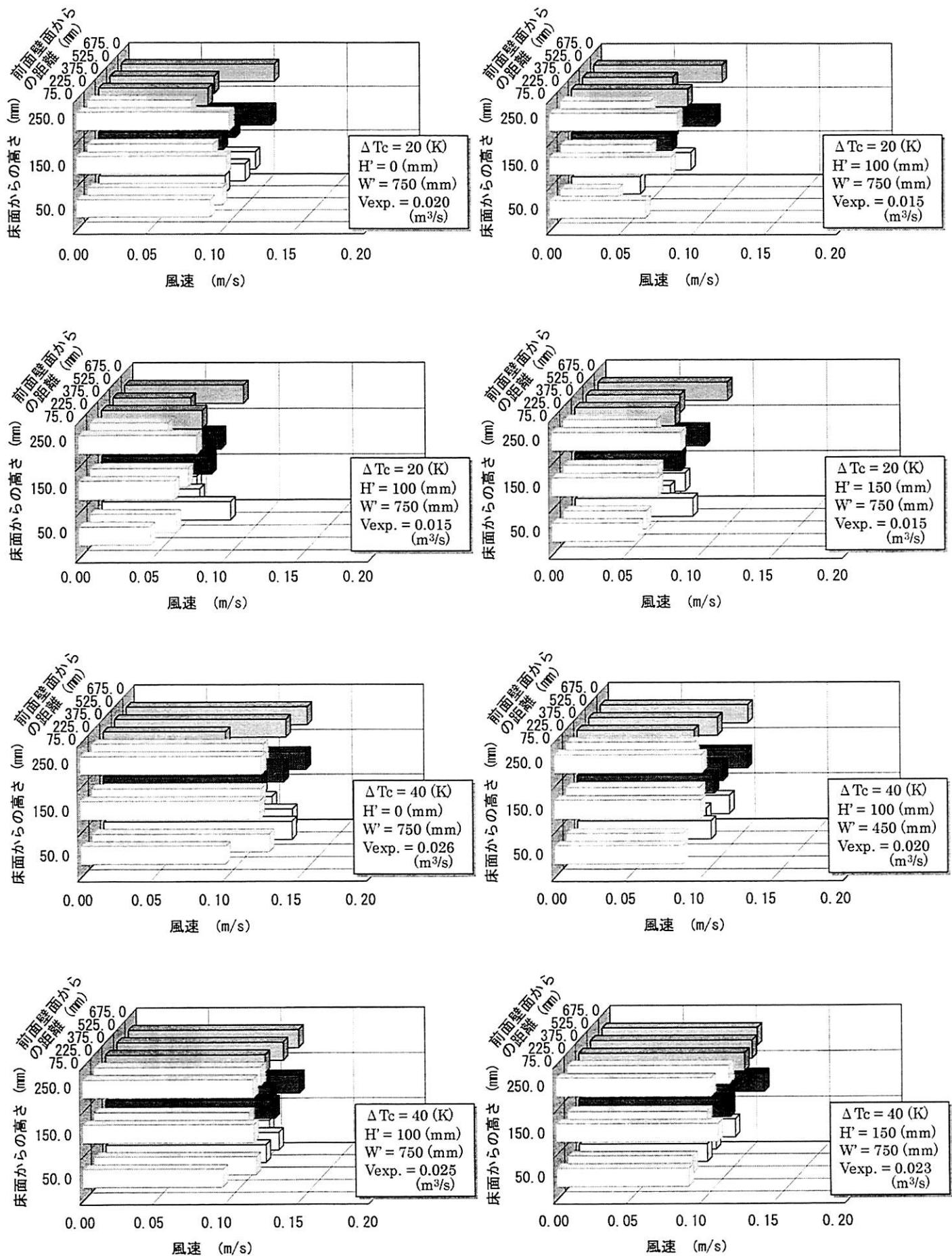


図 2-4 (1) 風速分布 (模型天井高さ 300mm)

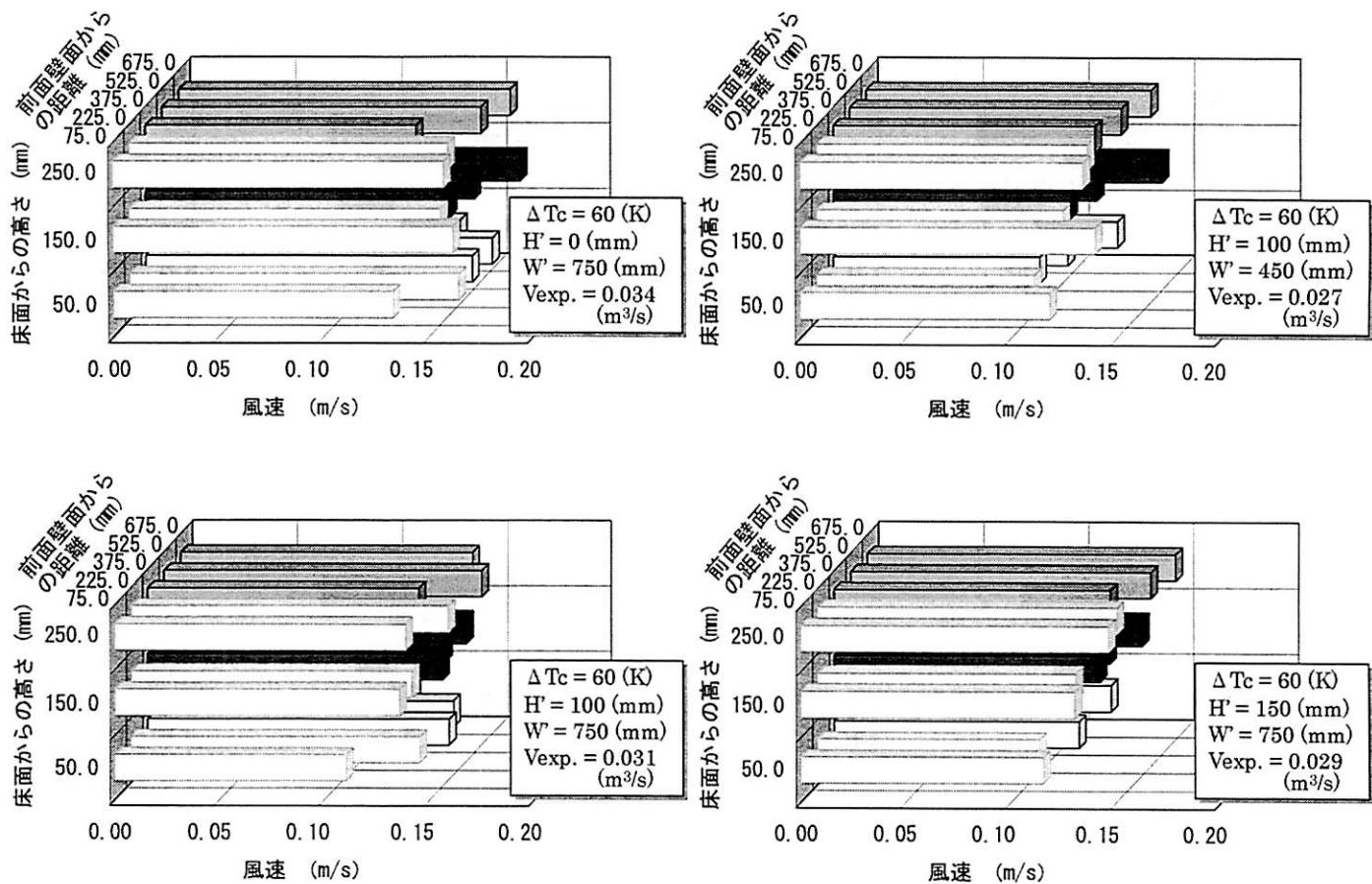


図 2-4 (2) 風速分布 (模型天井高さ 300mm)

資料編 3. 遮煙成否判定実験 結果 (階段室内温度上昇)

本論文第 4 章では、パッシブセイフティシステムを採用した地下鉄駅舎において火災時に避難経路、消防拠点となる階段室への煙の流入を防ぐために満たすべき駅舎内部での条件(図 3-2～図 3-4)を把握することを目的として、階段室手前の垂れ壁高さ、垂れ壁下の通路幅、着火前の模型内風速、火源条件を実験パラメータとして(表 3-1、表 3-2)、遮煙成否判定実験を行った。

なお、各実験において、階段室への煙の流入は階段室内に設置した熱電対(図 3-1)の温度が、着火前の温度計測値より 0.2(K)以上継続して上昇した時をもって判断した。図 3-5～図 3-12 に、本実験で扱った全実験条件での階段室内熱電対の温度上昇時系列変化を示す(条件によっては、同条件下で複数回実験を行った(結果は全て掲載している))。

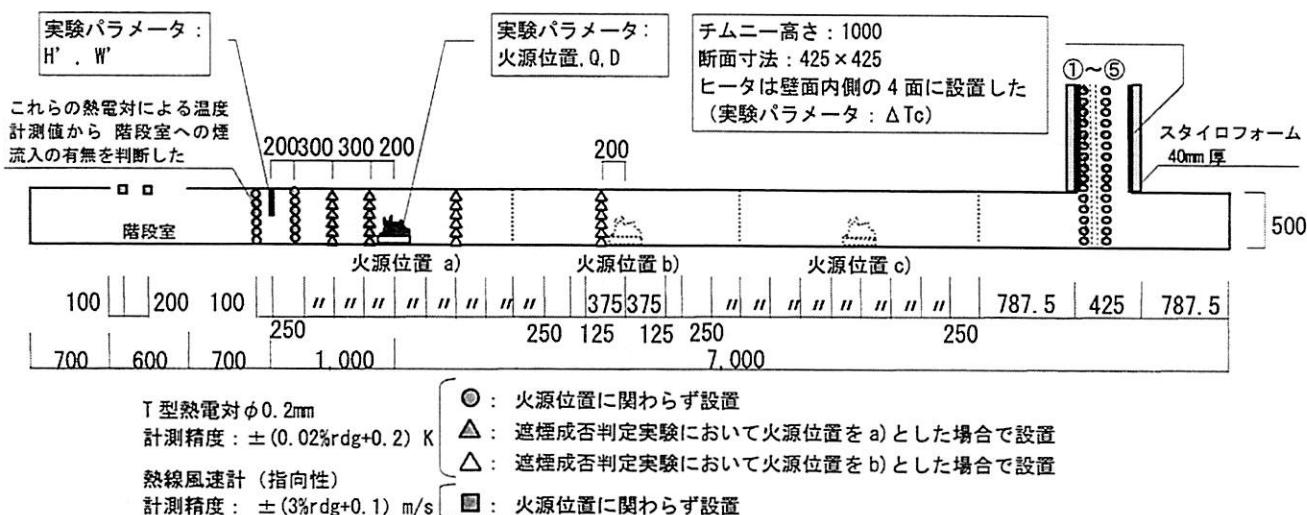


図 3-1 遮煙成否判定実験における 温度および風速の計測位置

表 3-1 遮煙成否判定実験における実験パラメータ

実験の種類	火源位置	火源No.	H' (mm)	W' (mm)	ΔT_c (K)
遮煙成否判定実験	a), b) [*] , c) [*]	1~4	50~400(50刻み)	300~750(150刻み)	0, 20, 40, 60

* 火源を火源 No. 1とした場合のみ 火源位置 b), c) として実験を行った (火源 No. 2~4 の場合は火源位置 a) のみ)。

表 3-2 遮煙成否判定実験に用いた火源の種類

火源No.	火源径 D(mm)	設定ガス流量 (ℓ/min)	設定発熱速度 Q(kW) [*]	実大換算発熱速度(MW)
1	100角	1.02	1.68	3
2	100角	0.68	1.12	2
3	50角	0.68	1.12	2
4	50角	0.34	0.56	1

* 設定発熱速度は LP ガスの総発熱量を 23,673 (kcal/m³) として算出した。

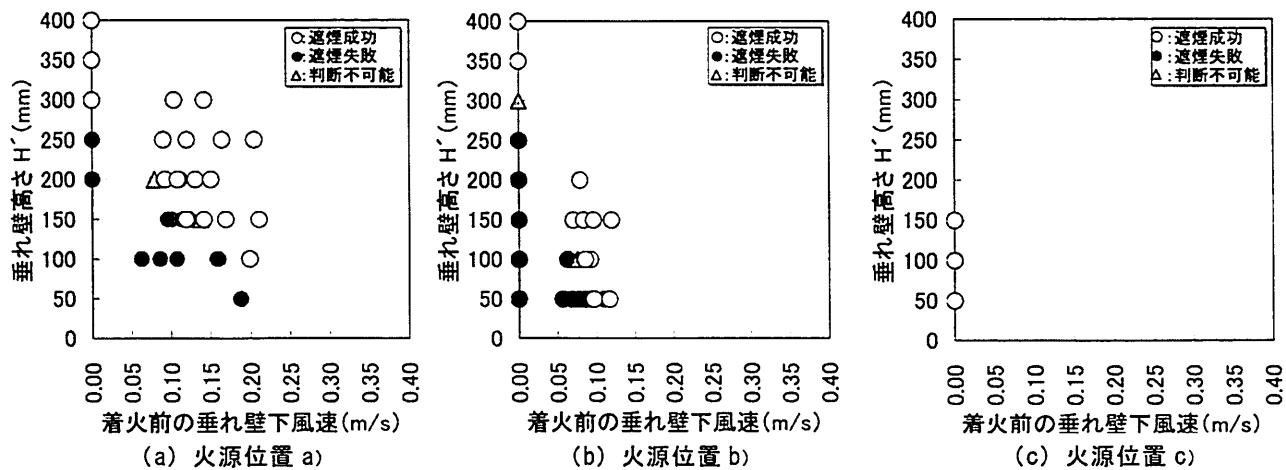


図 3-2 遮煙成否判定実験結果 (天井高さ 500mm, 火源 No. 1)

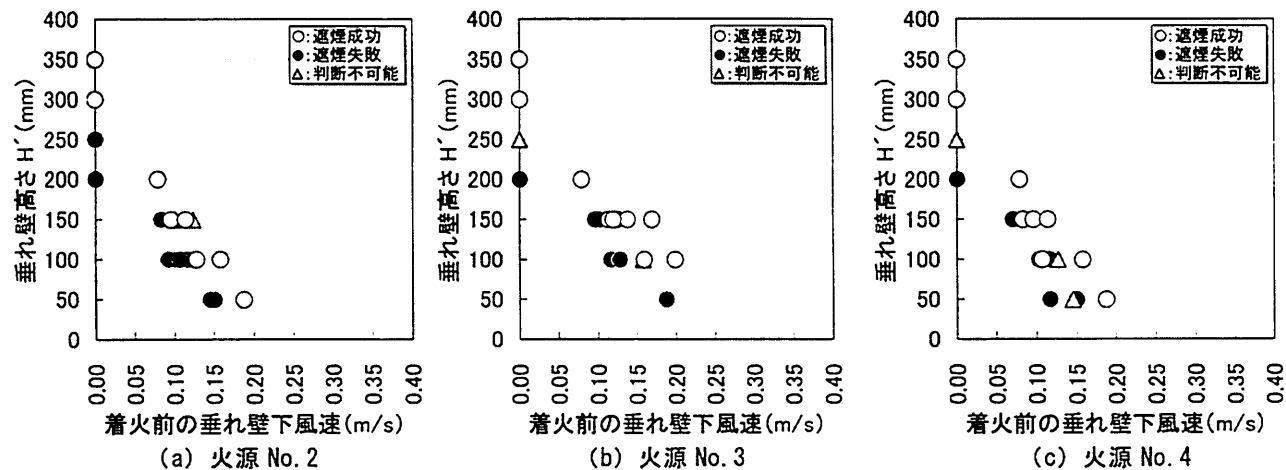


図 3-3 遮煙成否判定実験結果 (天井高さ 500mm, 火源位置 a), 火源 No. 2~4)

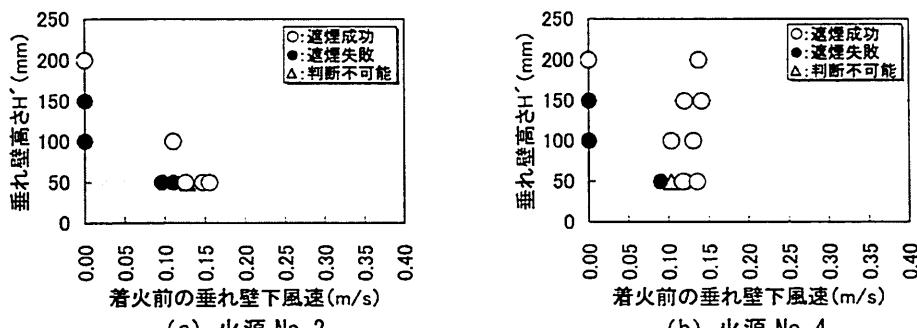


図 3-4 遮煙成否判定実験結果 (天井高さ 300mm, 火源位置 a))

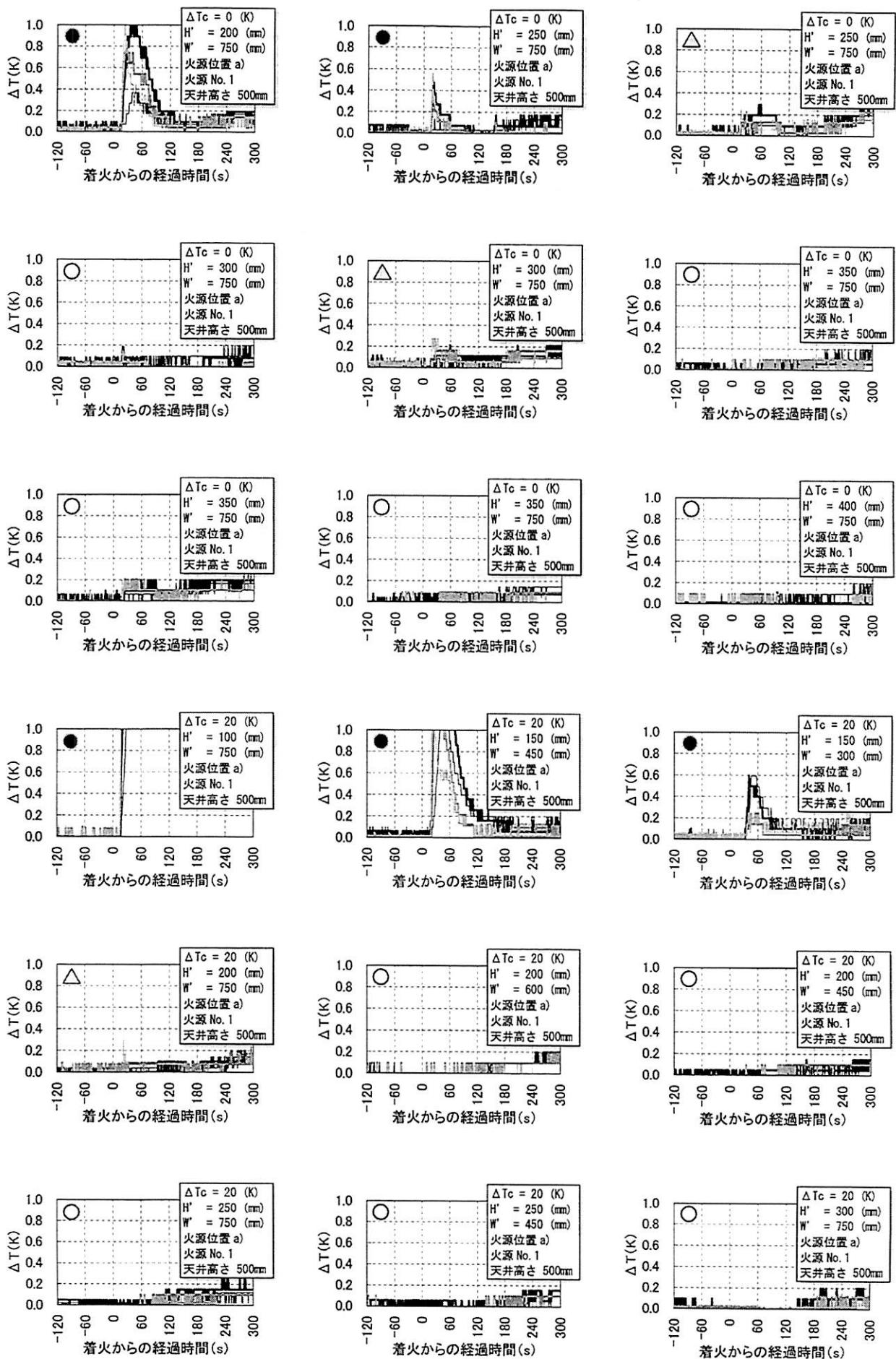


図 3-5 (1) 階段室内の温度上昇（実験計測値）に基づく煙流入の有無の判断
(模型天井高さ 500mm , 火源位置 a) : 階段室側 , 火源 No. 1)

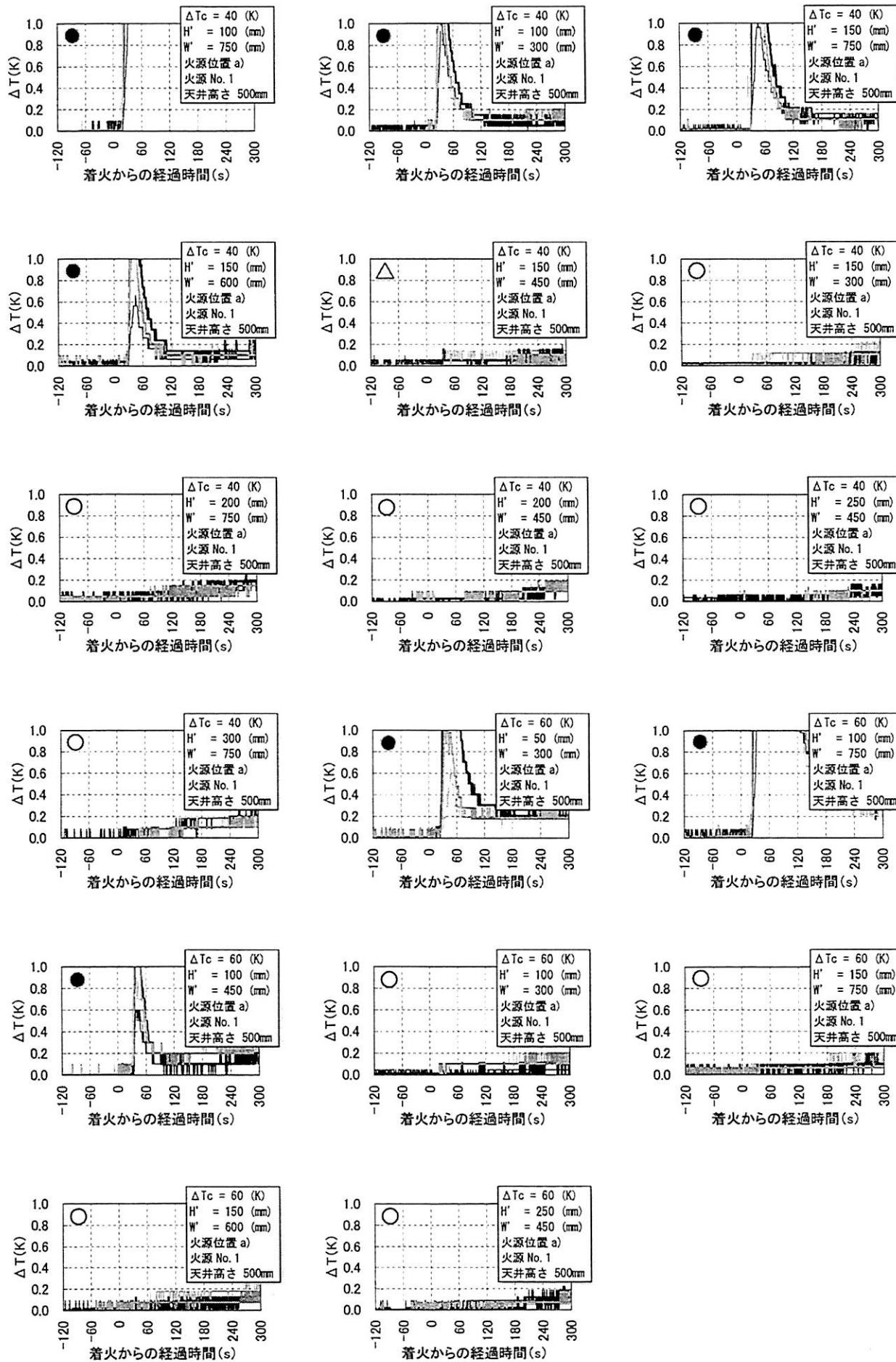


図 3-5 (2) 階段室内の温度上昇（実験計測値）に基づく煙流入の有無の判断
(模型天井高さ 500mm, 火源位置 a : 階段室側, 火源 No. 1)

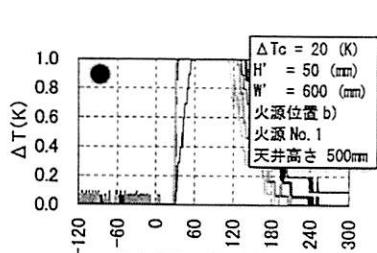
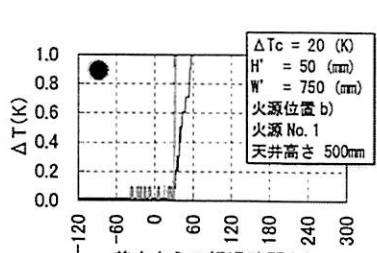
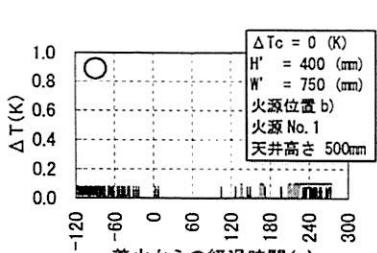
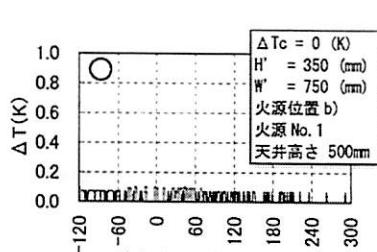
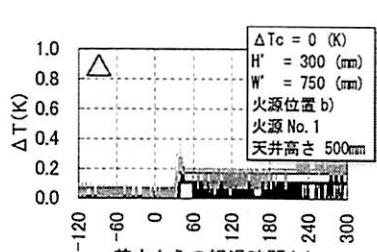
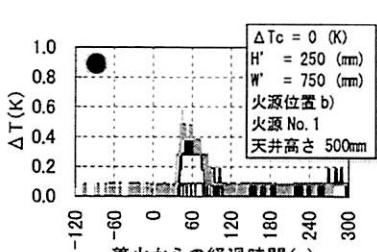
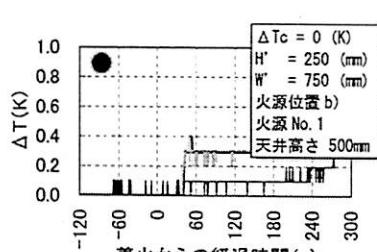
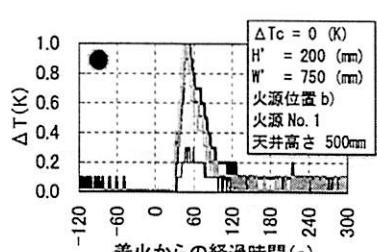
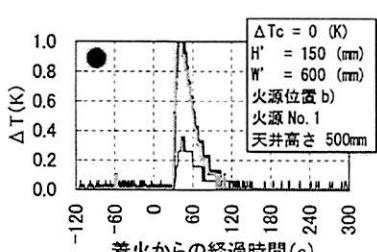
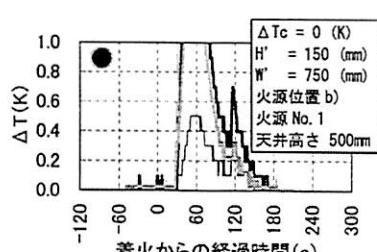
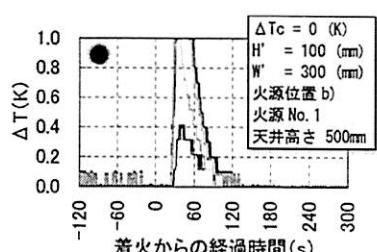
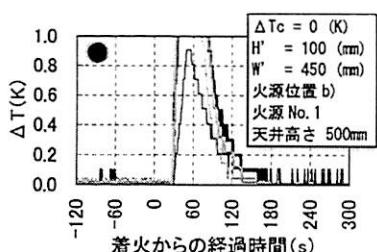
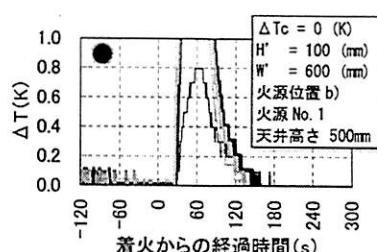
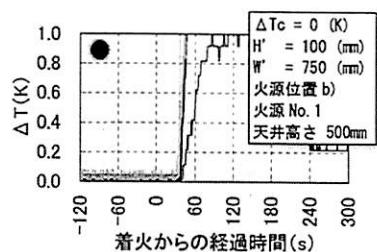
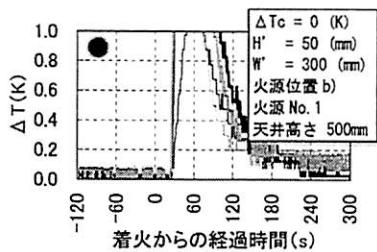
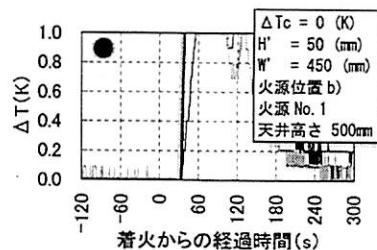
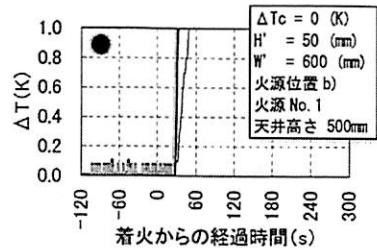
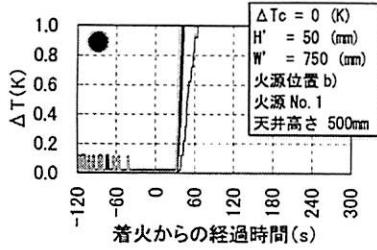


図 3-6 (1) 階段室内の温度上昇（実験計測値）に基づく煙流入の有無の判断
 （模型天井高さ 500mm, 火源位置 b): 模型中央, 火源 No. 1)

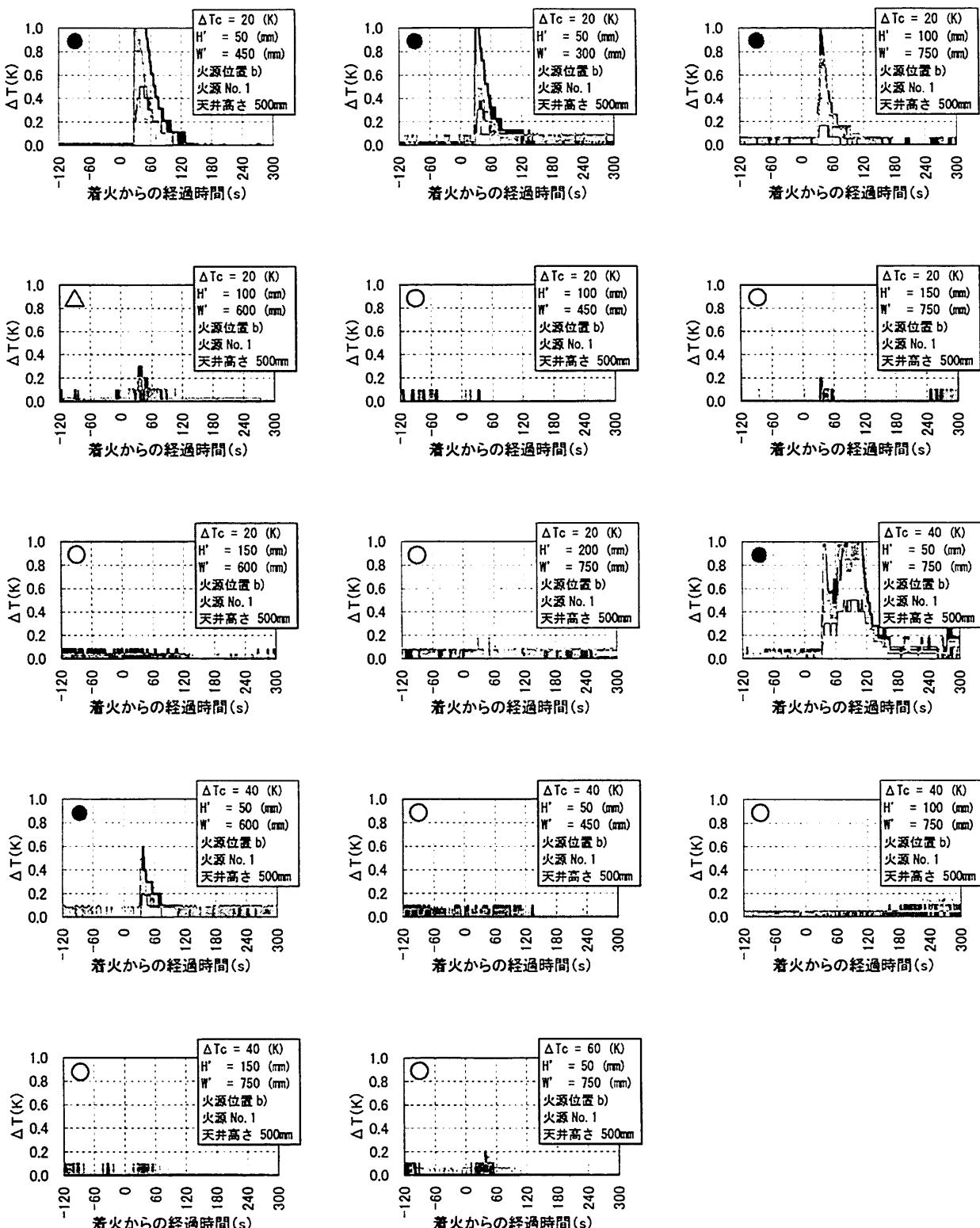


図 3-6 (2) 階段室内の温度上昇（実験計測値）に基づく煙流入の有無の判断
(模型天井高さ 500mm , 火源位置 b) : 模型中央 , 火源 No. 1)

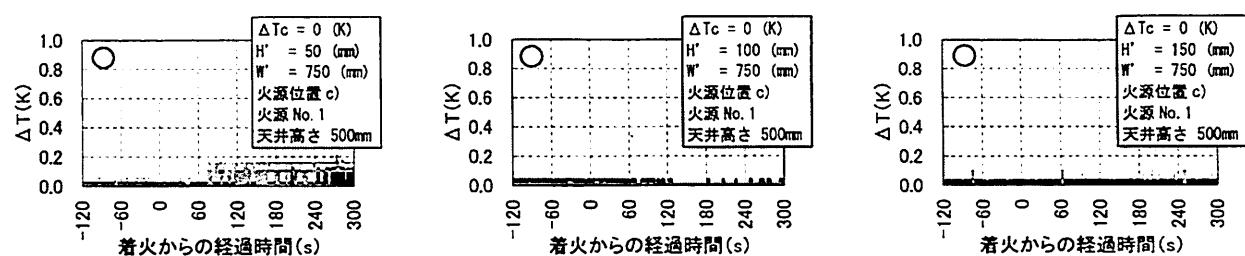


図 3-7 階段室内の温度上昇（実験計測値）に基づく煙流入の有無の判断
(模型天井高さ 500mm , 火源位置 c) : チムニー側 , 火源 No. 1)

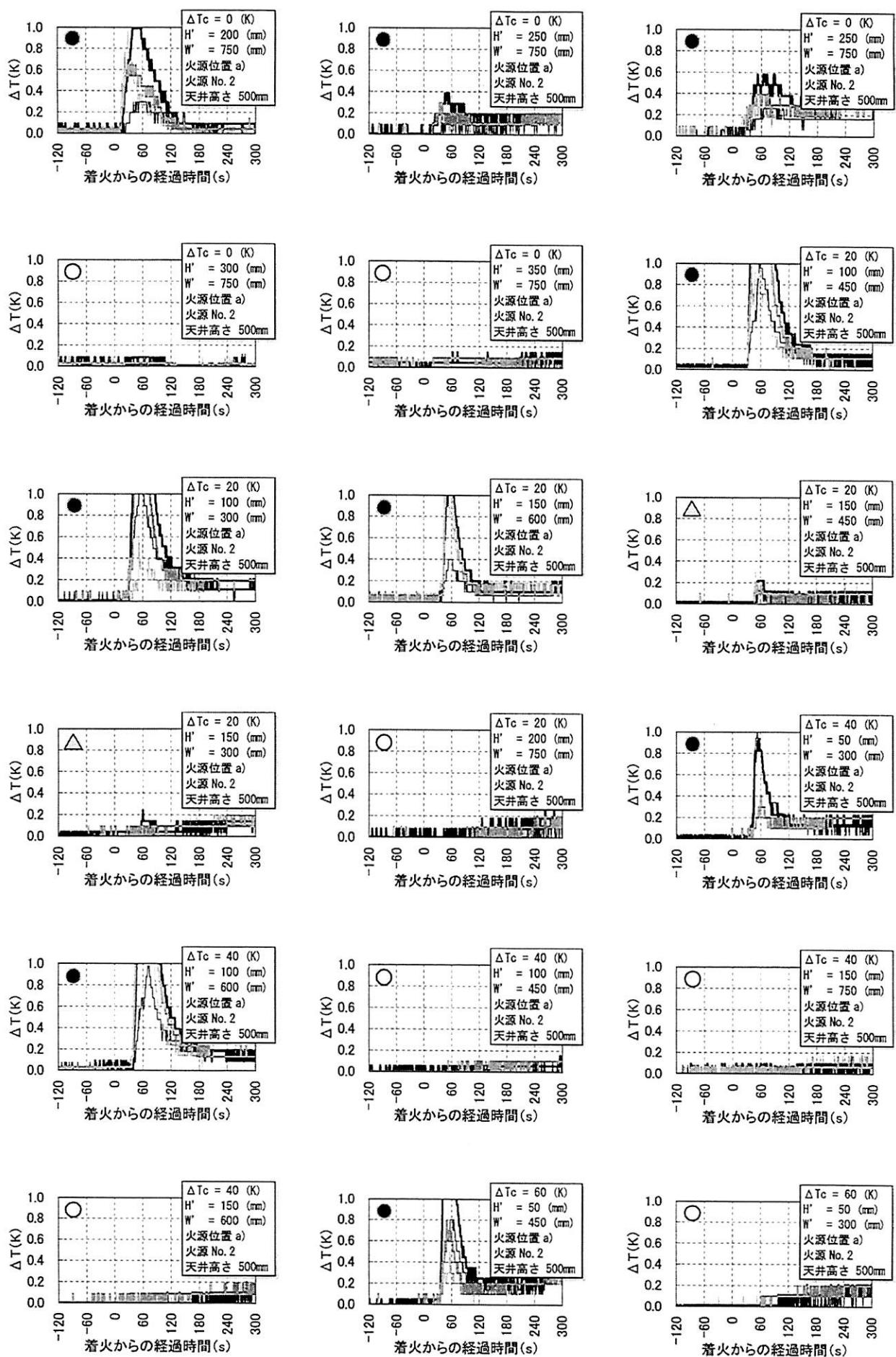


図 3-8 (1) 階段室内の温度上昇（実験計測値）に基づく煙流入の有無の判断
(模型天井高さ 500mm, 火源位置 a)：階段室側, 火源 No. 2)

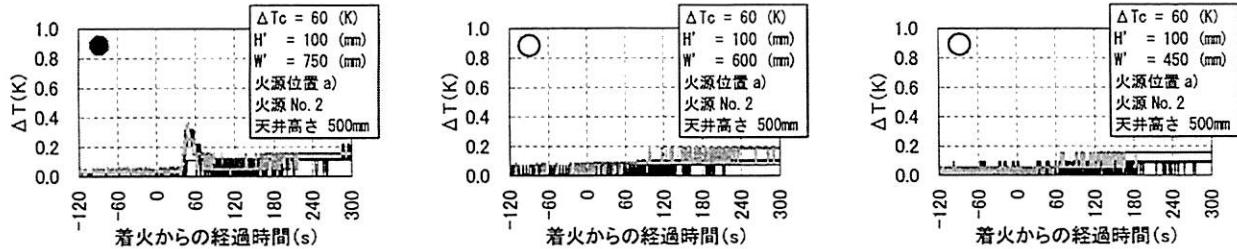


図 3-8 (2) 階段室内の温度上昇（実験計測値）に基づく煙流入の有無の判断

(模型天井高さ 500mm , 火源位置 a) : 階段室側 , 火源 No. 2)

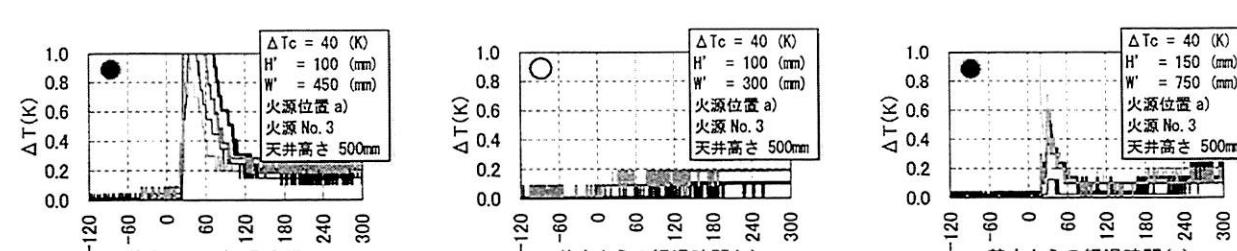
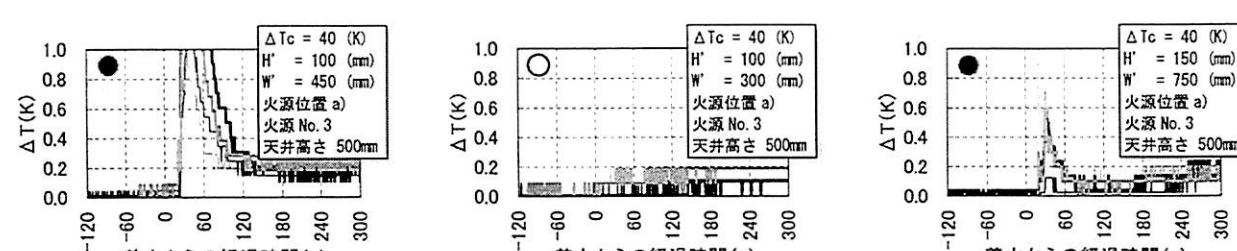
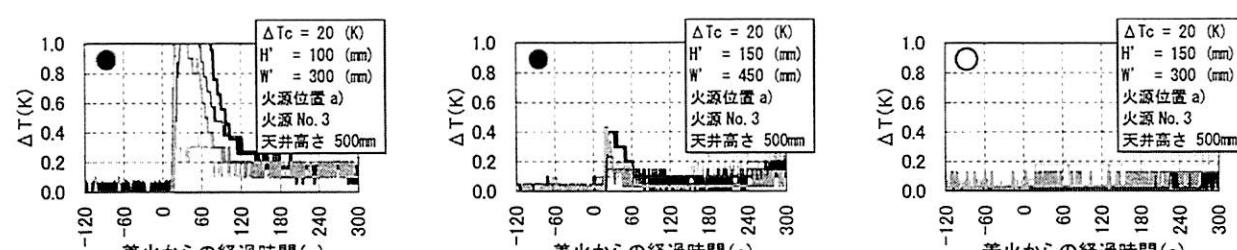
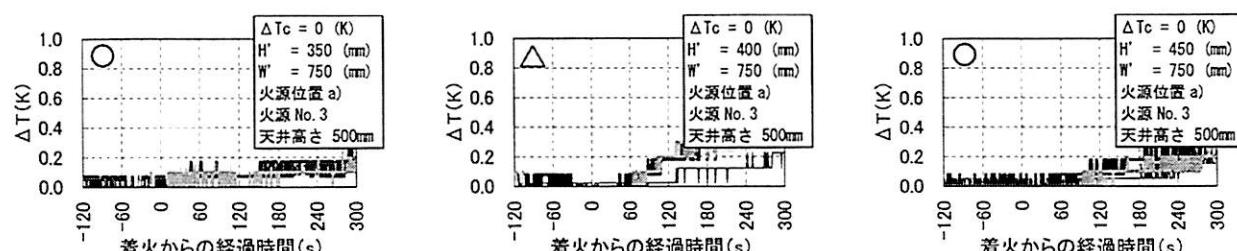
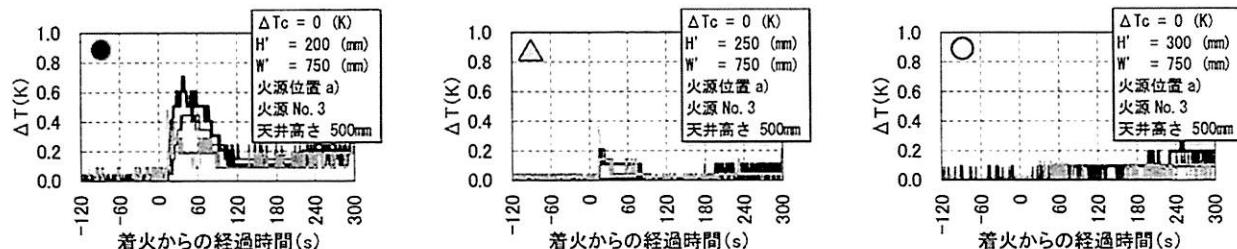


図 3-9 (1) 階段室内の温度上昇（実験計測値）に基づく煙流入の有無の判断

(模型天井高さ 500mm , 火源位置 a) : 階段室側 , 火源 No. 3)

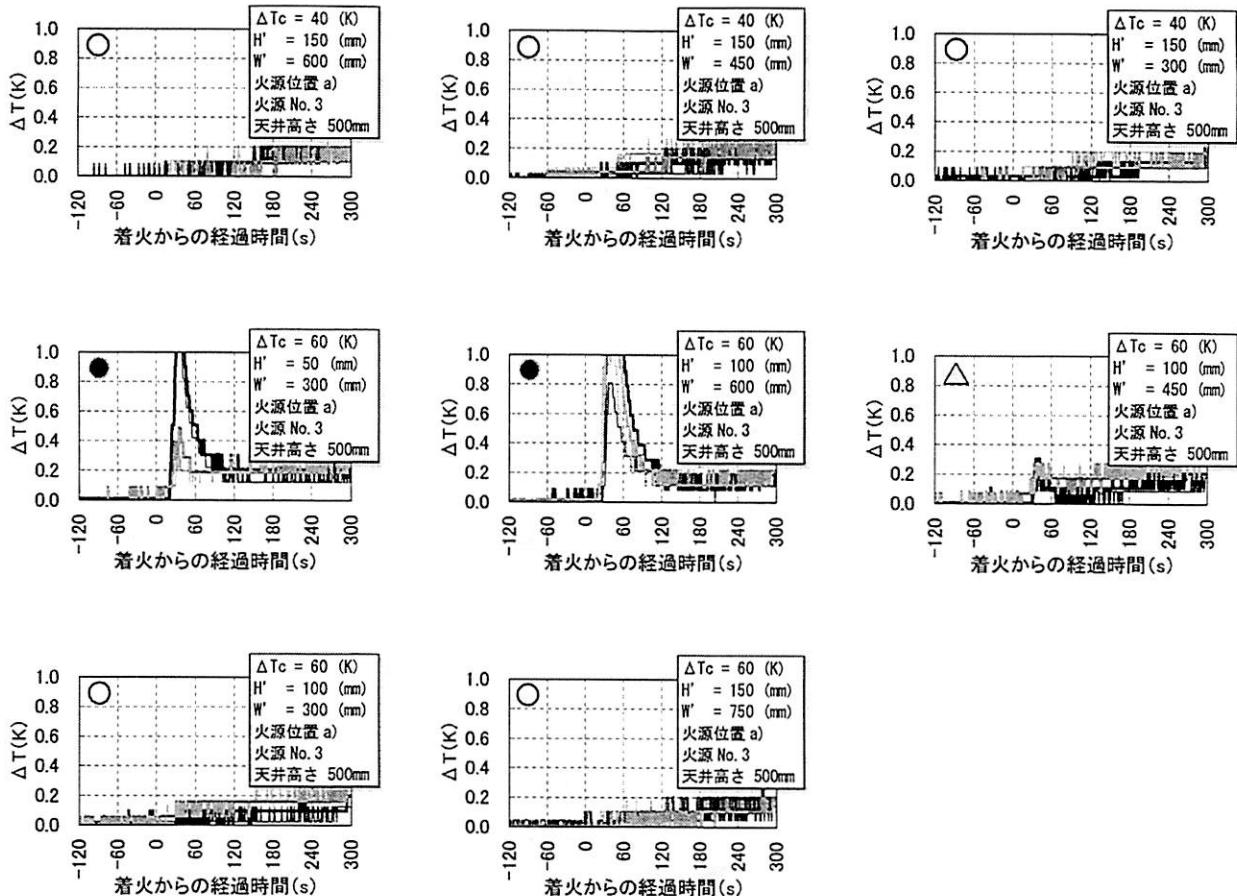


図 3-9 (2) 階段室内の温度上昇（実験計測値）に基づく煙流入の有無の判断
(模型天井高さ 500mm , 火源位置 a) : 階段室側 , 火源 No. 3)

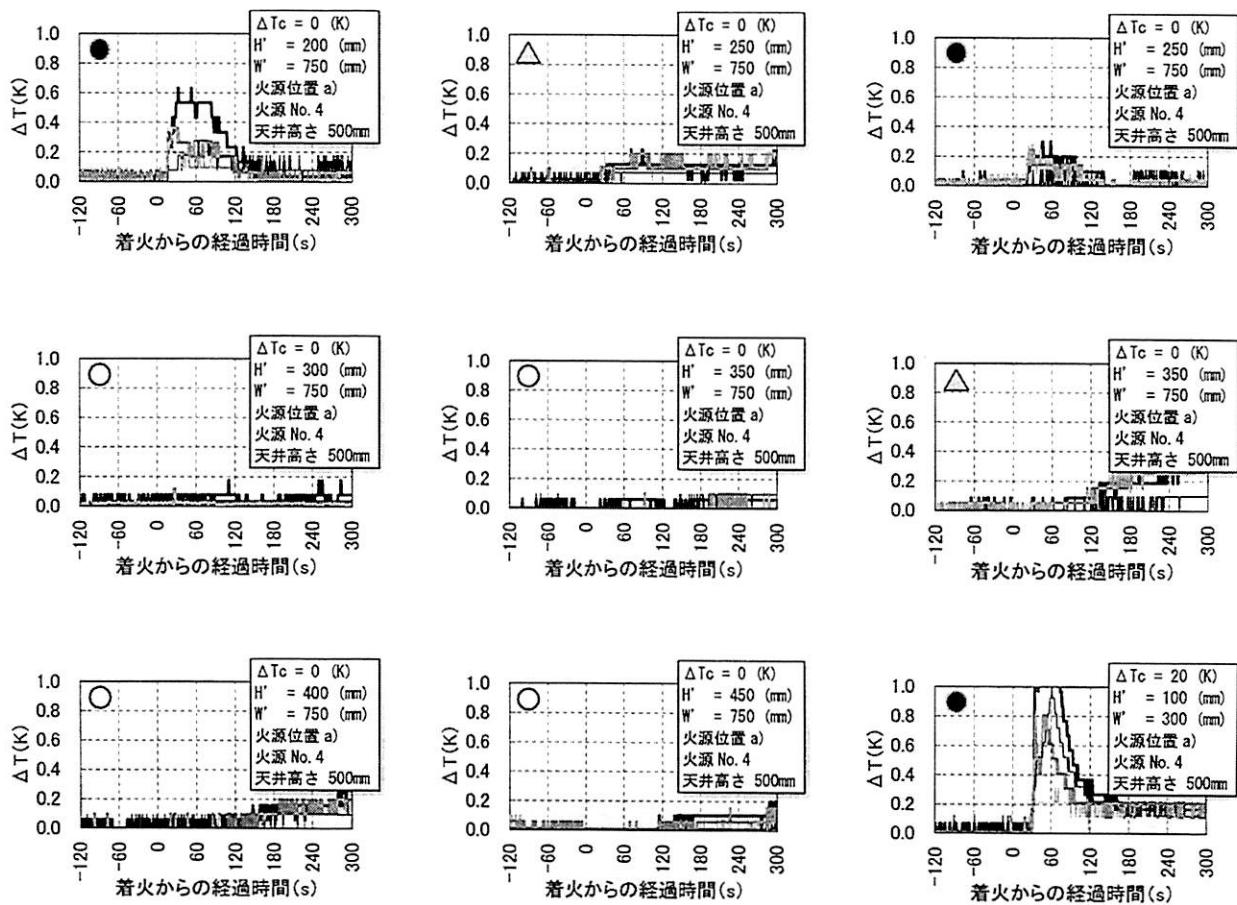


図 3-10 (1) 階段室内の温度上昇（実験計測値）に基づく煙流入の有無の判断
(模型天井高さ 500mm , 火源位置 a) : 階段室側 , 火源 No. 4)

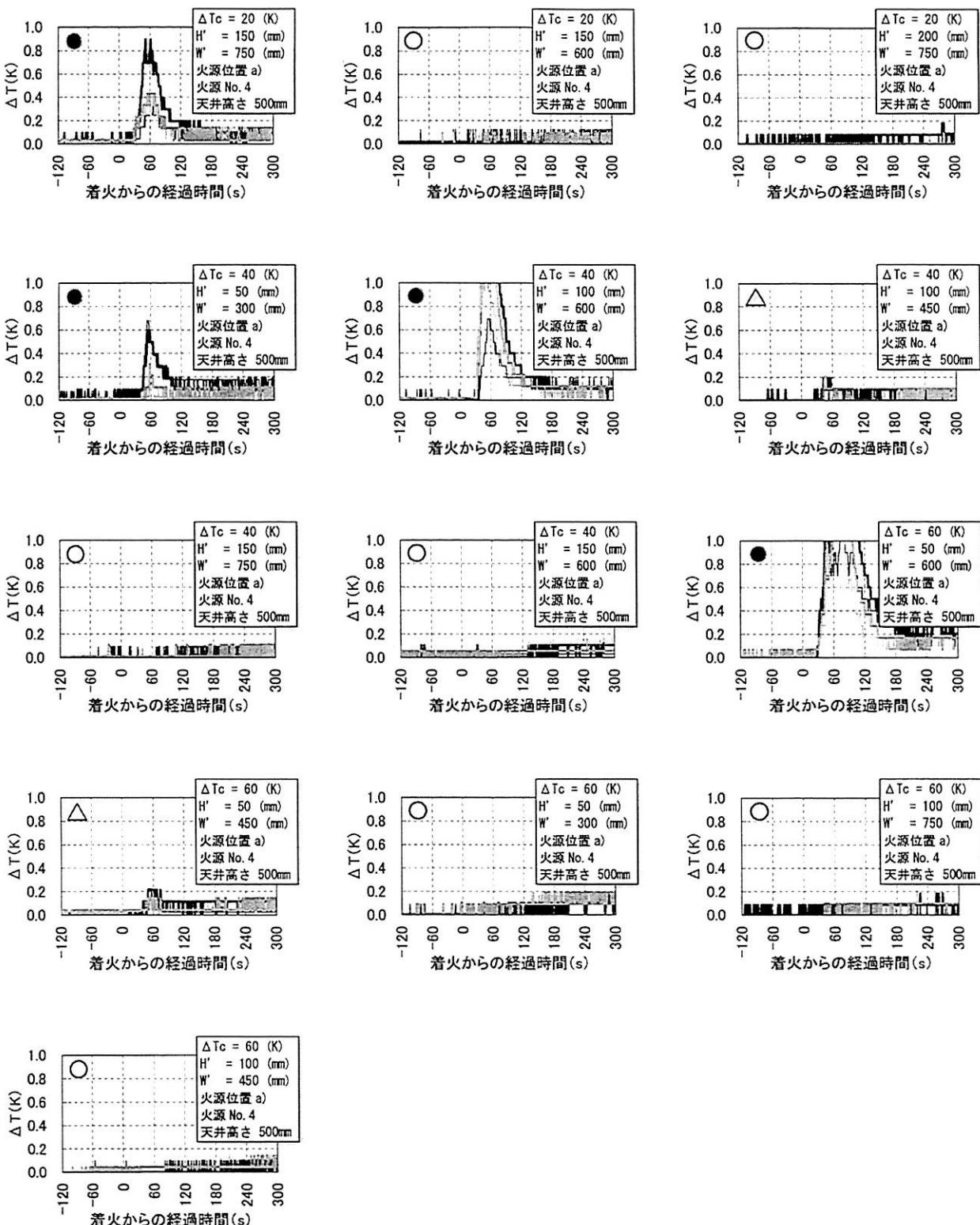


図 3-10 (2) 階段室内の温度上昇（実験計測値）に基づく煙流入の有無の判断
(模型天井高さ 500mm, 火源位置 a): 階段室側, 火源 No. 4)

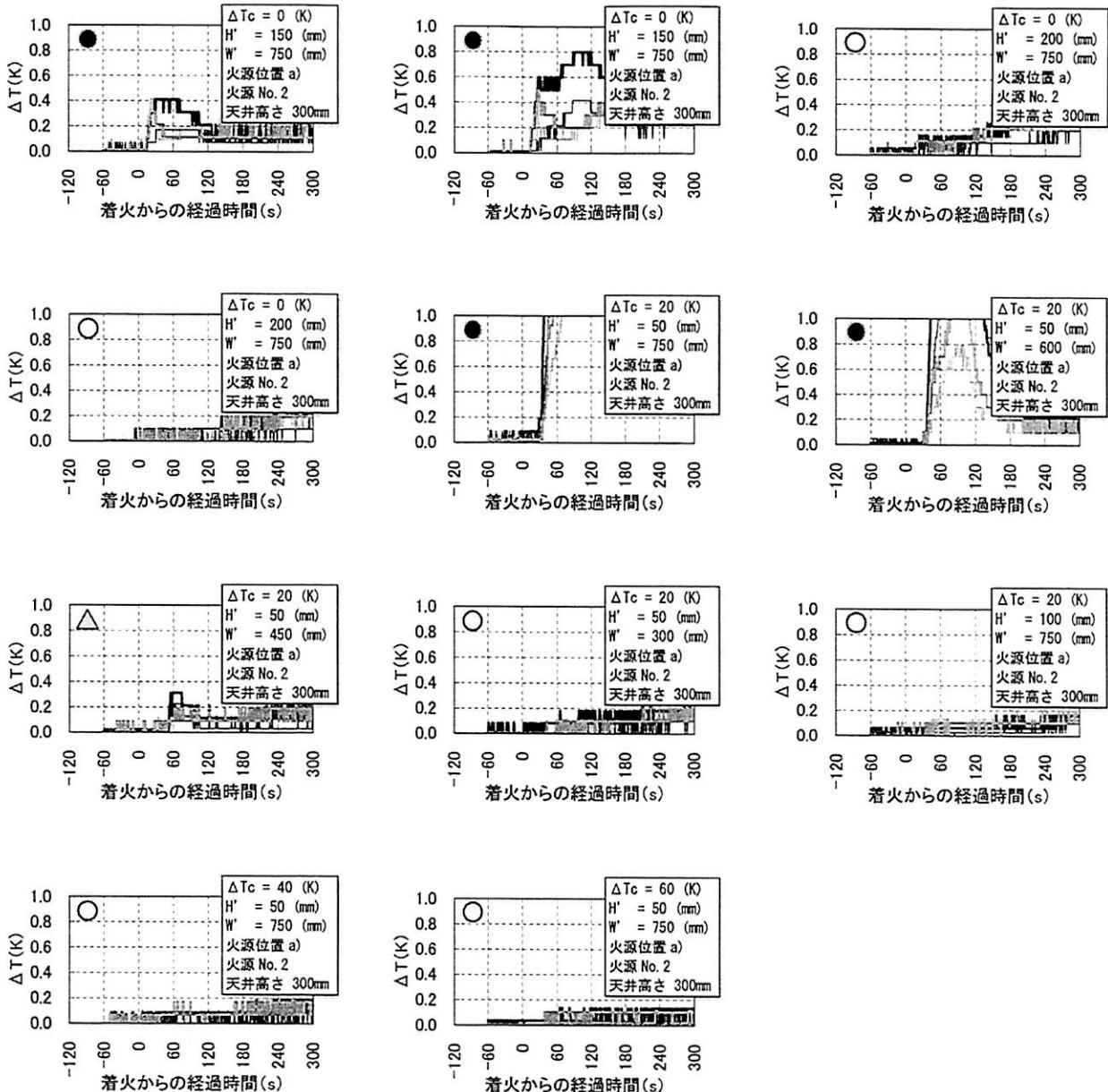


図 3-11 階段室内の温度上昇（実験計測値）に基づく煙流入の有無の判断
(模型天井高さ 300mm , 火源位置 a) : 階段室側 , 火源 No. 2)

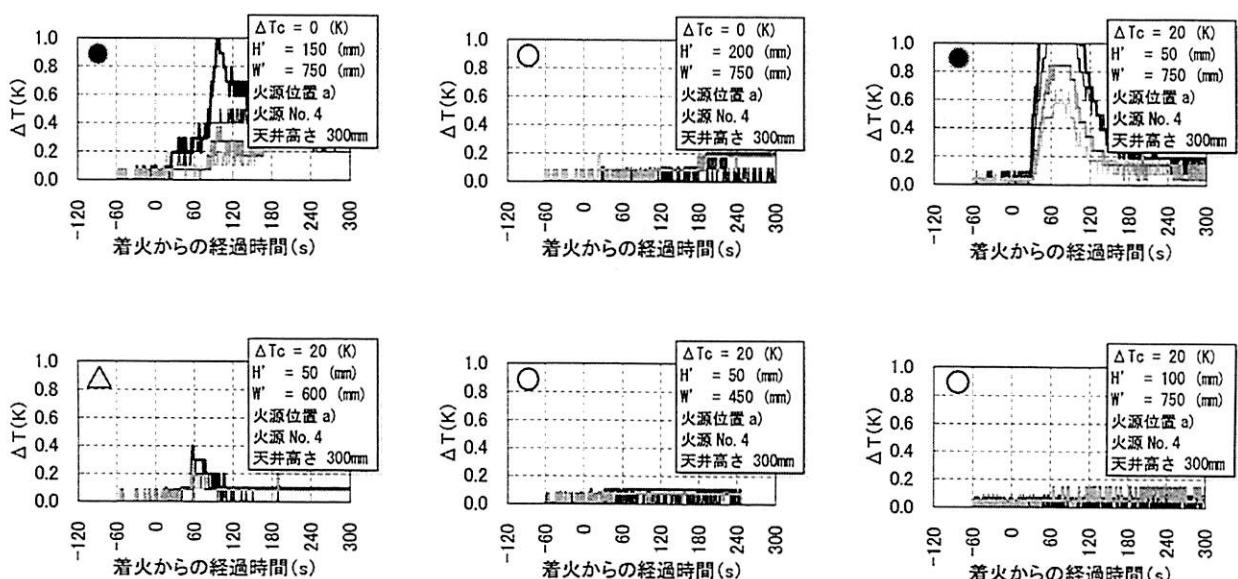


図 3-12 (1) 階段室内の温度上昇（実験計測値）に基づく煙流入の有無の判断
(模型天井高さ 300mm , 火源位置 a) : 階段室側 , 火源 No. 4)

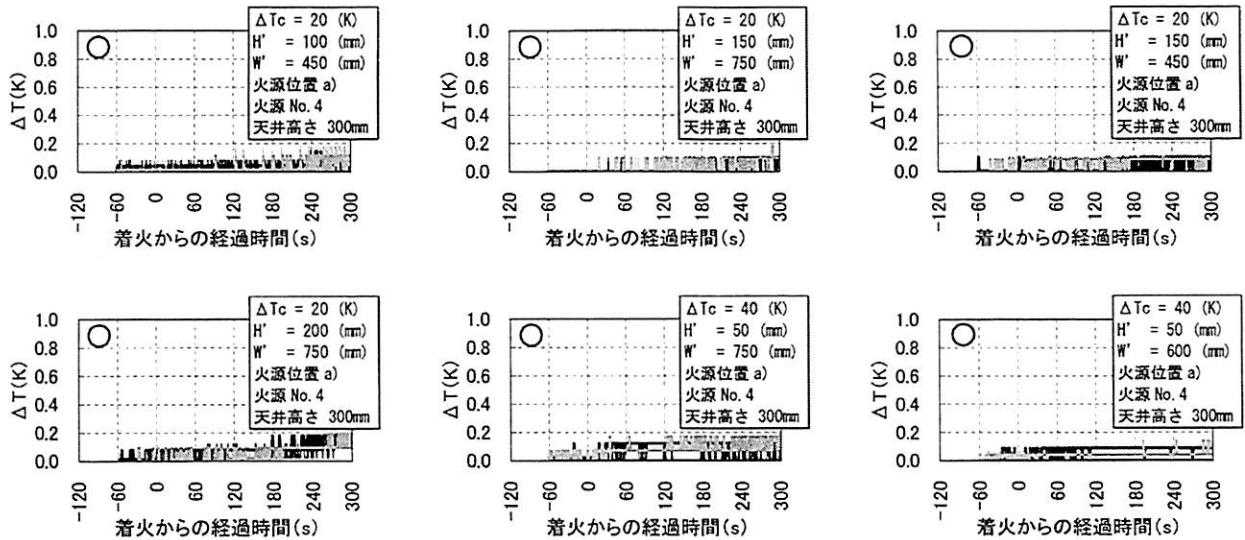


図 3-12 (2) 階段室の温度上昇（実験計測値）に基づく煙流入の有無の判断
(模型天井高さ 300mm, 火源位置 a) : 階段室側, 火源 No. 4)

資料編 4. 煙流動モデルを用いた実大駅舎の設計例（ケーススタディ）

本論文第 4 章では、1/20 スケール地下鉄駅舎模型を用いた実験により、火災時に階段室の安全性を確保するために満たすべき チムニーおよび垂れ壁の条件を把握したが、模型スケールと実スケールとでは、煙層一壁面間の熱伝達が相似とはならないため、模型実験結果を相似則に従って実スケールに変換し、設計を行う際には注意が必要となる。ここで、具体的に 模型実験結果を実スケールに変換した結果は 実スケール駅舎における煙流動性状と どの程度の差があるかを煙流動モデルを用いて確認したところ、図 4-1 ~ 図 4-4 のようになった（火源には、火源 No. 1 を F. S. に変換した非定常火源を設定し、火源位置は階段室近傍（火源位置 a）に対応）として計算を行った。

図 4-3 より、模型実験により得られた煙層温度は、実スケールでの温度よりも かなり低くなっていることが分かる（主に対流熱伝達率が相似にならないことに因る。また、本研究で使用した模型の構成材料は、辻本の提案する相似則（式(2.2.26)）に従っていないが、このことも原因の 1 つである）。また、模型実験では実スケールでの場合と比較して 煙層の温度が低くなるために 煙層は厚くなるが（図 4-1 ~ 図 4-3）、図 4-4 から分かるように、階段室手前に小さい垂れ壁しか設けることができない場合には、垂れ壁位置での遮煙の観点から言えば 煙層が厚くなることよりも煙層温度が低くなることの方が 影響が大きくなる（煙層が階段室に進入しようとする力 F_{smoke} (= $\Delta\rho gh$ ）を算出時に h の増加よりも $\Delta\rho$ の減少の影響が大きくなる）ために、模型実験結果（遮煙条件）を相似則に従って実スケールでの遮煙条件に変換した場合には 実際よりも危険側の評価となる。

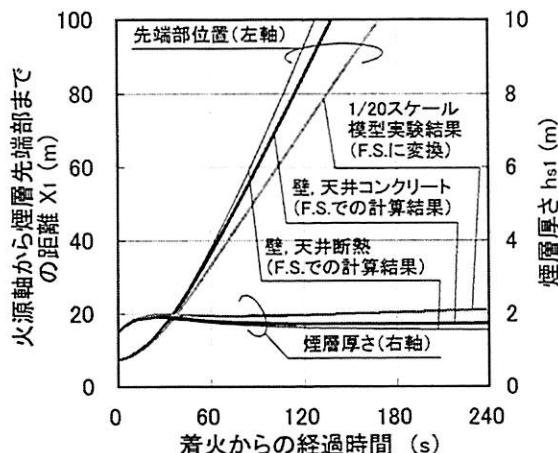


図 4-1 煙層先端部移動速度および天井流厚さの比較

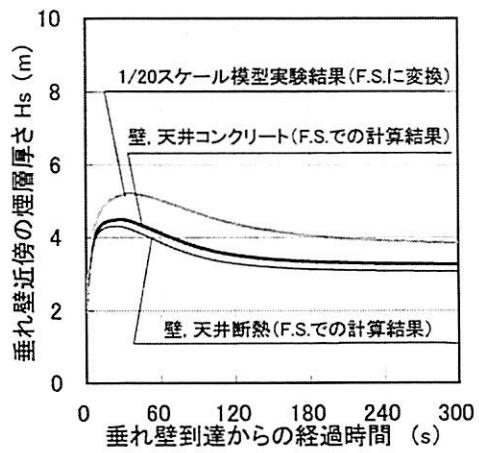


図 4-2 垂れ壁近傍における煙層厚さの比較

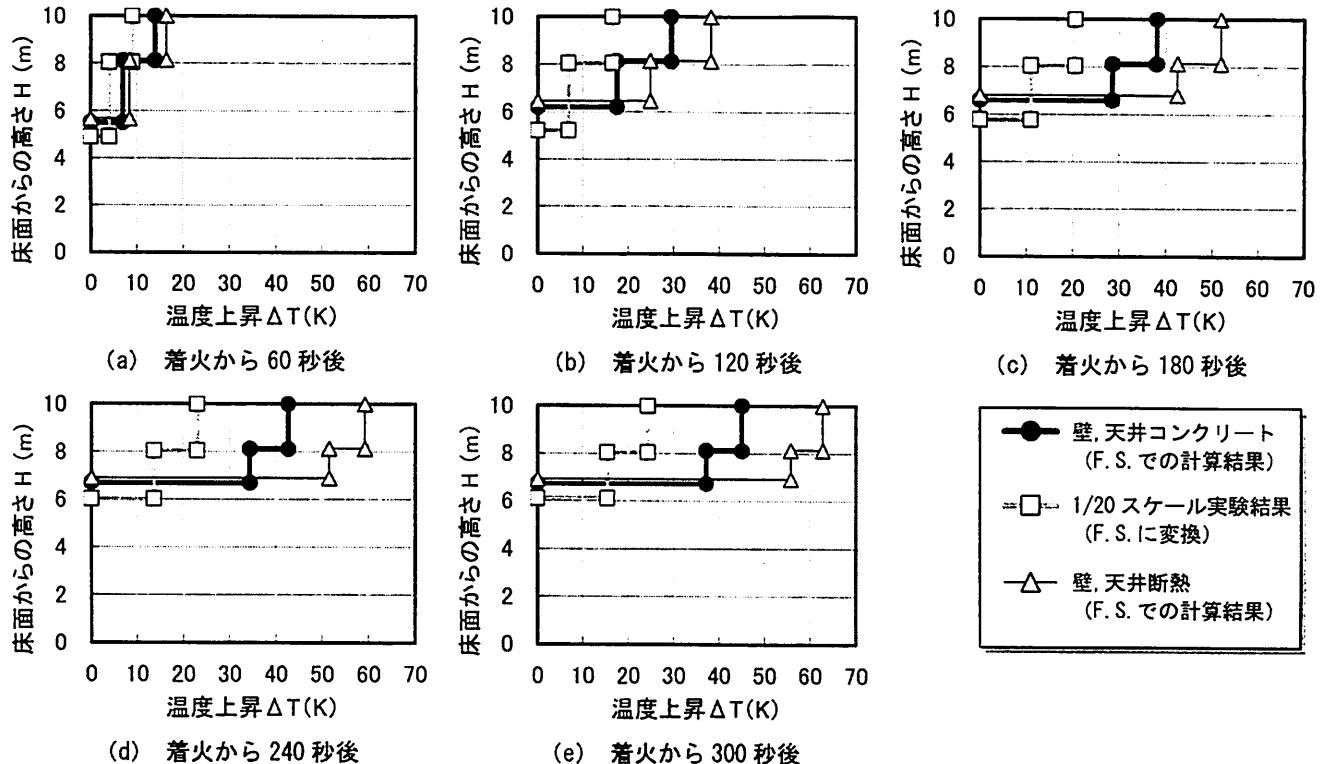


図 4-3 煙層温度の比較

このため、本節では、模型実験結果をそのまま相似則に従つて実スケールに変換し、設計を行うという方法ではなく、本論文第3章で提案する煙流動モデルを用いて実スケール駅舎における遮煙条件を導出することとする。本節では、例として、図4-5に示す駅舎において火災時に階段室の安全性を確保するために満たすべきチムニーの条件の導出方法を記載する(なお、本節での計算では、煙流動モデル式中の C_1 および C_2 は第4章での模型実験結果から決定した 1.36 を、 C_{ent} は 0.75 を設定したが、より精確な予測を行うためには、駅舎形状が異なる場合や模型スケールが異なる場合、模型構成材料が異なる場合に關しても検討し、これらを総合して適切な値を設定する必要がある)。

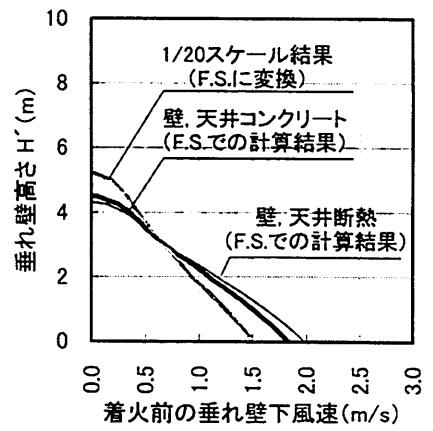


図 4-4 遮煙条件の比較

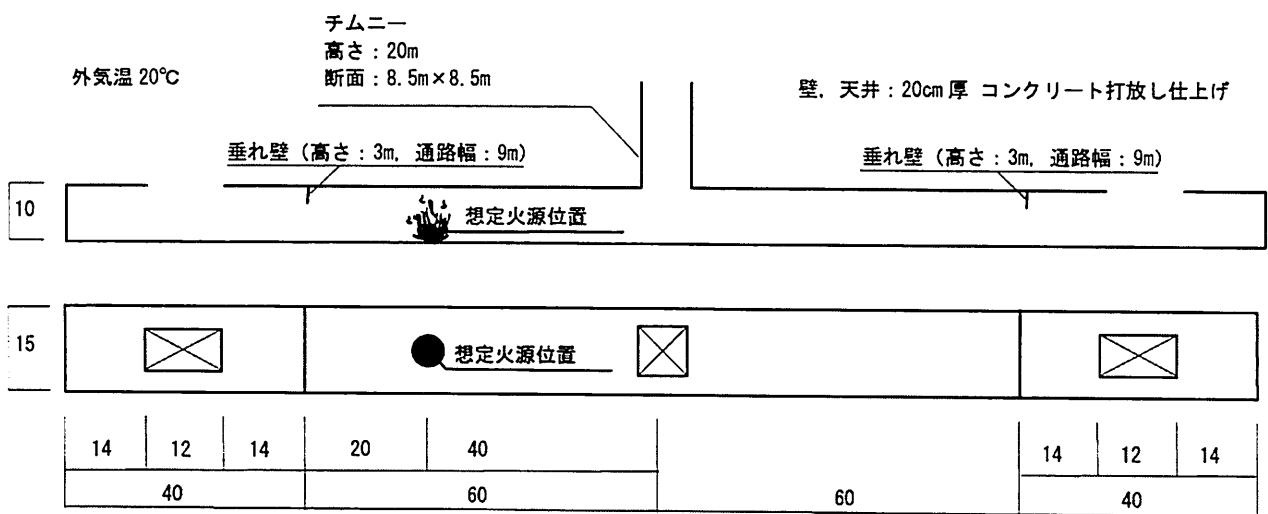


図 4-5 駅舎図面 (上: 断面図, 下: 平面図) 単位:m

図 4-5 に示す駅舎において、火源 No. 1 に相当する火災（最大発熱速度は F. S. で 3MW）が発生した場合、階段室手前の垂れ壁位置（垂れ壁高さ：3m、垂れ壁下通路幅：9m）で遮煙を行うためには、垂れ壁下で 0.68m 以上の風速を確保する必要がある（図 4-4 から読み取る）。この風速に 垂れ壁下通路断面積 ($7 \times 9 \text{ m}^2$) と階段室設置箇所数（2 箇所）を乗じた値が チムニーが処理すべき風量であるから、その風量を確保するために必要なチムニー内部の空気温度を算出すればよい（ここでの計算では チムニー内部の温度は一様であるとする）。

図 4-6 に示すように、階段室入口、垂れ壁下開口、チムニーによる圧力損失の合計（ここでは、摩擦による圧力損失、階段による圧力損失は無視する。また、各開口の流量係数は簡易的に 0.7 として 各開口での圧力損失を計算する）と チムニー内外の密度差による圧力 $\Delta\rho gh$ が等しくなるようにチムニー内温度上昇 ΔT を決定すると、 $\Delta T = 3.4 \text{ K}$ となり、この際のチムニー内部での熱量保存を考えれば、外部からチムニーに加えられる熱量は 347.5 kW となる。

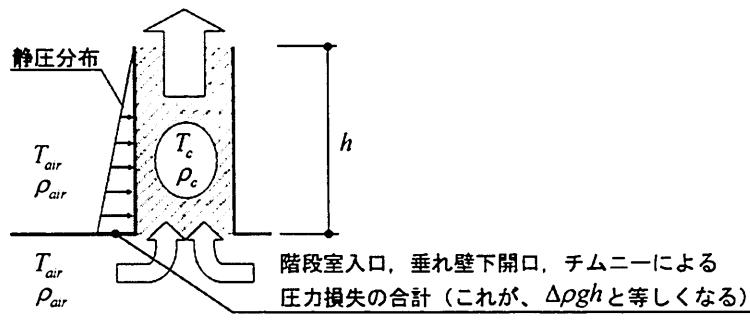


図 4-6 チムニー部分概念図

ここで、チムニーの東、西、南側側壁をガラス、北側壁面のみ受熱壁面と考え、北側壁面が受ける直達日射量を 0.5 kW/m^2 と仮定した場合、図 4-5 に示す駅舎では、必要な熱量 347.5 kW のうち 85 kW を日射により得ることができる。この不足分を、列車からの廃熱や駅舎内部、近隣施設からの廃熱等で補うことができれば、日常時の省エネルギーおよび火災時の避難安全性確保を両立することができる。

資料編 5. 実験に用いた火源の発熱速度の計測データ

模型実験では表 5-1 に記載する火源を用いたが、いずれも着火直後には設定発熱速度にはならず非定常火源となる（図 5-1）。

本研究では、コーンカロリーメータ試験装置（ISO 5660）を用いた酸素消費法により火源発熱速度の時系列変化を計測した。表 5-2～表 5-5 に 火源 No. 1～4 の発熱速度の計測データ（火源条件毎に複数回実験を行ったが、その平均値）を掲載する。

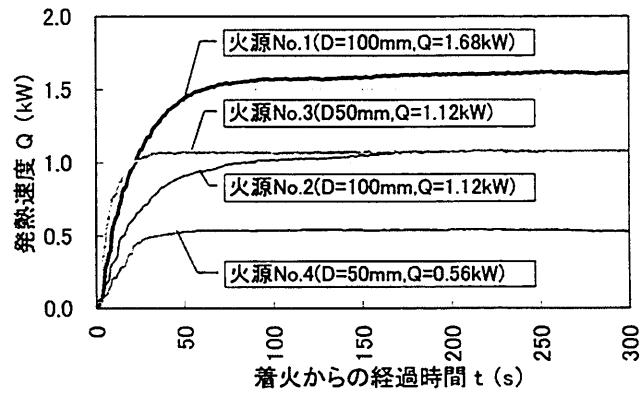


図 5-1 火源の発熱速度の時系列変化

表 5-1 実験条件

火源No.	火源径D (mm)	設定ガス流量 (l/min)	設定発熱速度Q (kW) [*]	実大換算発熱速度 (MW)
1	100角	1.02	1.68	3
2	100角	0.68	1.12	2
3	50角	0.68	1.12	2
4	50角	0.34	0.56	1

* 設定発熱速度は LP ガスの総発熱量を $23,673 (\text{kcal}/\text{m}^3)$ として算出した。

表 5-2 (1) 火源 No. 1 の発熱速度 (実験計測値)

着火からの 経過時間 (s)	発熱速度 (kW)
0	0.01650
1	0.03454
2	0.08492
3	0.08642
4	0.13669
5	0.27949
6	0.31408
7	0.37650
8	0.39960
9	0.53992
10	0.58717
11	0.62523
12	0.64372
13	0.70481
14	0.73693
15	0.80350
16	0.82938
17	0.83748
18	0.89876
19	0.92786
20	0.95733
21	0.97423
22	1.00155
23	1.02244
24	1.06136
25	1.08681
26	1.09297
27	1.12074
28	1.15051
29	1.17232
30	1.17467
31	1.18922
32	1.23115
33	1.24472
34	1.25807
35	1.26965
36	1.28128
37	1.30187
38	1.32045
39	1.32256
40	1.33815
41	1.35793
42	1.36425
43	1.37206
44	1.38171
45	1.39096
46	1.39986
47	1.41175
48	1.42041
49	1.43070
50	1.43816
51	1.44886
52	1.45841
53	1.45810
54	1.46088
55	1.47367
56	1.47993
57	1.48374
58	1.48604
59	1.48773

着火からの 経過時間 (s)	発熱速度 (kW)
60	1.49443
61	1.50049
62	1.50110
63	1.50873
64	1.51266
65	1.51402
66	1.51907
67	1.51721
68	1.52411
69	1.52929
70	1.53572
71	1.53464
72	1.53387
73	1.53860
74	1.54275
75	1.53985
76	1.53659
77	1.54067
78	1.54727
79	1.54625
80	1.54765
81	1.54929
82	1.54947
83	1.55027
84	1.55353
85	1.55445
86	1.55593
87	1.55674
88	1.56040
89	1.55912
90	1.56020
91	1.56202
92	1.56568
93	1.56721
94	1.56923
95	1.56794
96	1.56769
97	1.56985
98	1.56673
99	1.56438
100	1.56653
101	1.56752
102	1.57388
103	1.57203
104	1.57022
105	1.57102
106	1.57183
107	1.57442
108	1.57038
109	1.56931
110	1.56711
111	1.56785
112	1.57231
113	1.57027
114	1.57067
115	1.57156
116	1.56847
117	1.56905
118	1.57013
119	1.57004

着火からの 経過時間 (s)	発熱速度 (kW)
120	1.57358
121	1.57485
122	1.57415
123	1.57283
124	1.57244
125	1.57115
126	1.56981
127	1.56591
128	1.56704
129	1.56839
130	1.57060
131	1.57237
132	1.57161
133	1.57341
134	1.57313
135	1.57301
136	1.57327
137	1.57586
138	1.57599
139	1.57658
140	1.57592
141	1.57552
142	1.57750
143	1.57738
144	1.57548
145	1.57856
146	1.58163
147	1.57971
148	1.57661
149	1.57581
150	1.57858
151	1.58233
152	1.58366
153	1.58156
154	1.57910
155	1.57921
156	1.58113
157	1.58603
158	1.59096
159	1.58802
160	1.58692
161	1.58979
162	1.59174
163	1.59245
164	1.59182
165	1.58807
166	1.58941
167	1.59182
168	1.59438
169	1.59158
170	1.58997
171	1.59500
172	1.59647
173	1.59577
174	1.59695
175	1.59633
176	1.59513
177	1.59568
178	1.59662
179	1.59588

表 5-2 (2) 火源 No. 1 の発熱速度 (実験計測値)

着火からの 経過時間 (s)	発熱速度 (kW)	着火からの 経過時間 (s)	発熱速度 (kW)
180	1.59745	240	1.61021
181	1.59787	241	1.61335
182	1.59895	242	1.61302
183	1.59779	243	1.61200
184	1.59433	244	1.60742
185	1.59590	245	1.60815
186	1.60071	246	1.61244
187	1.59606	247	1.61415
188	1.59552	248	1.61429
189	1.60124	249	1.61188
190	1.60219	250	1.61502
191	1.60146	251	1.61769
192	1.60388	252	1.61258
193	1.59670	253	1.61518
194	1.59710	254	1.61517
195	1.60229	255	1.61433
196	1.60027	256	1.61799
197	1.59831	257	1.61572
198	1.60225	258	1.60891
199	1.60266	259	1.61068
200	1.60072	260	1.61564
201	1.60139	261	1.61466
202	1.59955	262	1.61572
203	1.60174	263	1.61335
204	1.60021	264	1.61004
205	1.59806	265	1.61033
206	1.60223	266	1.61263
207	1.60186	267	1.61208
208	1.60239	268	1.61289
209	1.60487	269	1.61466
210	1.60295	270	1.61470
211	1.60257	271	1.61473
212	1.60613	272	1.61104
213	1.59954	273	1.61317
214	1.59757	274	1.61379
215	1.60301	275	1.61133
216	1.60011	276	1.60967
217	1.59908	277	1.61099
218	1.60200	278	1.60987
219	1.60202	279	1.60973
220	1.60298	280	1.60959
221	1.60510	281	1.60408
222	1.60527	282	1.60400
223	1.60738	283	1.60778
224	1.60769	284	1.61006
225	1.60170	285	1.61333
226	1.60193	286	1.61372
227	1.60558	287	1.61137
228	1.60552	288	1.60931
229	1.60537	289	1.60901
230	1.60390	290	1.60963
231	1.60412	291	1.60952
232	1.61249	292	1.61137
233	1.60877	293	1.61220
234	1.60693	294	1.60875
235	1.60622	295	1.60955
236	1.60496	296	1.61493
237	1.60959	297	1.61513
238	1.60950	298	1.61288
239	1.60496	299	1.61396
		300	1.61567

表 5-3 (1) 火源 No. 2 の発熱速度 (実験計測値)

着火からの 経過時間 (s)	発熱速度 (kW)
0	0.00299
1	0.01388
2	0.01926
3	0.07040
4	0.09468
5	0.16203
6	0.18084
7	0.19371
8	0.28904
9	0.31102
10	0.32171
11	0.34302
12	0.36537
13	0.46071
14	0.49012
15	0.50015
16	0.50699
17	0.53950
18	0.57593
19	0.59004
20	0.60400
21	0.61400
22	0.63401
23	0.65952
24	0.66327
25	0.67471
26	0.69080
27	0.70841
28	0.71438
29	0.71663
30	0.73686
31	0.75807
32	0.77056
33	0.77806
34	0.78996
35	0.79961
36	0.81785
37	0.83087
38	0.83600
39	0.84209
40	0.85024
41	0.85938
42	0.86628
43	0.86985
44	0.87840
45	0.88474
46	0.89265
47	0.89384
48	0.89982
49	0.90782
50	0.91225
51	0.91349
52	0.91519
53	0.92077
54	0.92427
55	0.92757
56	0.93517
57	0.93554
58	0.94106
59	0.94333

着火からの 経過時間 (s)	発熱速度 (kW)
60	0.94316
61	0.94148
62	0.94549
63	0.95216
64	0.95091
65	0.95182
66	0.95496
67	0.95844
68	0.95905
69	0.96792
70	0.96990
71	0.97188
72	0.97851
73	0.98430
74	0.98578
75	0.98736
76	0.98819
77	0.99107
78	0.99477
79	0.99476
80	0.99375
81	0.99456
82	0.99896
83	1.00072
84	1.00049
85	0.99767
86	1.00313
87	1.00403
88	1.00472
89	1.00621
90	1.00771
91	1.01531
92	1.01686
93	1.01444
94	1.01375
95	1.01627
96	1.01297
97	1.01374
98	1.01764
99	1.01612
100	1.01614
101	1.01730
102	1.01549
103	1.01838
104	1.01958
105	1.02056
106	1.02270
107	1.02108
108	1.02452
109	1.02385
110	1.02458
111	1.02387
112	1.02544
113	1.02500
114	1.02215
115	1.02548
116	1.02633
117	1.02440
118	1.02723
119	1.02554

着火からの 経過時間 (s)	発熱速度 (kW)
120	1.02668
121	1.02796
122	1.02706
123	1.02491
124	1.02194
125	1.02308
126	1.02666
127	1.02745
128	1.02938
129	1.02984
130	1.02853
131	1.02961
132	1.03028
133	1.03223
134	1.03536
135	1.03622
136	1.03552
137	1.03418
138	1.03609
139	1.03689
140	1.03878
141	1.03501
142	1.03961
143	1.04393
144	1.04642
145	1.04532
146	1.03931
147	1.04083
148	1.04920
149	1.05037
150	1.04991
151	1.04878
152	1.04532
153	1.04479
154	1.05431
155	1.05393
156	1.05217
157	1.05343
158	1.05293
159	1.05504
160	1.05875
161	1.05740
162	1.05668
163	1.05891
164	1.05705
165	1.05966
166	1.06177
167	1.06266
168	1.06570
169	1.06495
170	1.06383
171	1.06260
172	1.06603
173	1.06796
174	1.06698
175	1.06591
176	1.06512
177	1.06464
178	1.06883
179	1.06889

表 5-3 (2) 火源 No. 2 の発熱速度 (実験計測値)

着火からの 経過時間 (s)	発熱速度 (kW)	着火からの 経過時間 (s)	発熱速度 (kW)
180	1.06768	240	1.07635
181	1.06735	241	1.07494
182	1.06597	242	1.07837
183	1.06616	243	1.07587
184	1.06621	244	1.07829
185	1.06541	245	1.07794
186	1.06689	246	1.07875
187	1.07313	247	1.07973
188	1.06953	248	1.07756
189	1.06934	249	1.08003
190	1.07426	250	1.08107
191	1.07466	251	1.07819
192	1.07256	252	1.07545
193	1.06890	253	1.07717
194	1.06783	254	1.07683
195	1.07561	255	1.07756
196	1.07637	256	1.07760
197	1.07489	257	1.07692
198	1.07625	258	1.07755
199	1.07445	259	1.07634
200	1.07739	260	1.07722
201	1.07837	261	1.07975
202	1.07602	262	1.07793
203	1.07471	263	1.07786
204	1.07572	264	1.07829
205	1.07471	265	1.07896
206	1.07600	266	1.08014
207	1.08066	267	1.07989
208	1.07716	268	1.07790
209	1.07726	269	1.07832
210	1.08440	270	1.08031
211	1.08372	271	1.07727
212	1.07637	272	1.07575
213	1.07721	273	1.07696
214	1.07814	274	1.07948
215	1.07569	275	1.07889
216	1.07582	276	1.07849
217	1.07512	277	1.07481
218	1.07714	278	1.07198
219	1.07815	279	1.07392
220	1.07641	280	1.07669
221	1.07515	281	1.07930
222	1.07689	282	1.08065
223	1.07846	283	1.07866
224	1.07867	284	1.07804
225	1.07863	285	1.07915
226	1.07839	286	1.07647
227	1.07769	287	1.07718
228	1.07604	288	1.07536
229	1.07732	289	1.07503
230	1.07318	290	1.07861
231	1.07116	291	1.08063
232	1.07505	292	1.08074
233	1.07827	293	1.07329
234	1.07738	294	1.07299
235	1.07569	295	1.07632
236	1.07756	296	1.07896
237	1.08003	297	1.07673
238	1.07879	298	1.07669
239	1.07765	299	1.07885
		300	1.07472

表 5-4 (1) 火源 No. 3 の発熱速度 (実験計測値)

着火からの 経過時間 (s)	発熱速度 (kW)	着火からの 経過時間 (s)	発熱速度 (kW)	着火からの 経過時間 (s)	発熱速度 (kW)
0	0.06107	60	1.06745	120	1.06557
1	0.07130	61	1.06971	121	1.06311
2	0.08151	62	1.06915	122	1.06452
3	0.21393	63	1.07012	123	1.06873
4	0.36915	64	1.07138	124	1.06812
5	0.45538	65	1.07149	125	1.06697
6	0.56592	66	1.07203	126	1.06720
7	0.63818	67	1.07001	127	1.06611
8	0.69757	68	1.06503	128	1.06638
9	0.75510	69	1.06380	129	1.06588
10	0.77088	70	1.06681	130	1.06298
11	0.78438	71	1.06688	131	1.06468
12	0.82507	72	1.06580	132	1.06784
13	0.86187	73	1.06672	133	1.06412
14	0.87163	74	1.06854	134	1.06374
15	0.89150	75	1.06854	135	1.06850
16	0.91429	76	1.06692	136	1.06939
17	0.94174	77	1.06757	137	1.06757
18	0.95567	78	1.06885	138	1.06619
19	0.96664	79	1.06851	139	1.06632
20	0.98212	80	1.06908	140	1.06717
21	0.99426	81	1.06744	141	1.06841
22	1.01065	82	1.06716	142	1.06824
23	1.01416	83	1.06931	143	1.06902
24	1.01836	84	1.06736	144	1.07052
25	1.02632	85	1.06737	145	1.07051
26	1.03543	86	1.06917	146	1.06688
27	1.03864	87	1.06679	147	1.06336
28	1.03875	88	1.06278	148	1.06480
29	1.04381	89	1.06294	149	1.06659
30	1.04942	90	1.06674	150	1.06496
31	1.05314	91	1.06782	151	1.06510
32	1.06152	92	1.06538	152	1.07124
33	1.06051	93	1.06709	153	1.07395
34	1.05810	94	1.06683	154	1.07243
35	1.06658	95	1.06392	155	1.06838
36	1.06961	96	1.06678	156	1.06666
37	1.06673	97	1.06727	157	1.06467
38	1.06579	98	1.06591	158	1.06452
39	1.06468	99	1.06411	159	1.06662
40	1.06488	100	1.06218	160	1.06633
41	1.06826	101	1.06155	161	1.06661
42	1.06993	102	1.06271	162	1.06609
43	1.06628	103	1.06506	163	1.06610
44	1.06103	104	1.06341	164	1.06759
45	1.06148	105	1.06287	165	1.07101
46	1.06345	106	1.06682	166	1.07429
47	1.06431	107	1.06821	167	1.07277
48	1.06612	108	1.06572	168	1.07310
49	1.07066	109	1.06573	169	1.07127
50	1.07177	110	1.06288	170	1.07085
51	1.07057	111	1.06541	171	1.07319
52	1.07042	112	1.06730	172	1.07103
53	1.07015	113	1.06734	173	1.07175
54	1.06933	114	1.06784	174	1.07121
55	1.06816	115	1.06624	175	1.06961
56	1.06785	116	1.06510	176	1.07188
57	1.06583	117	1.06543	177	1.07288
58	1.06694	118	1.06708	178	1.07173
59	1.06758	119	1.06549	179	1.07254

表 5-4 (2) 火源 No. 3 の発熱速度 (実験計測値)

着火からの 経過時間 (s)	発熱速度 (kW)	着火からの 経過時間 (s)	発熱速度 (kW)
180	1.07585	240	1.07963
181	1.07748	241	1.07842
182	1.07668	242	1.07747
183	1.07823	243	1.07843
184	1.07638	244	1.07340
185	1.07326	245	1.07162
186	1.07403	246	1.07438
187	1.07496	247	1.07261
188	1.07351	248	1.07112
189	1.07219	249	1.07204
190	1.07111	250	1.07188
191	1.06960	251	1.07365
192	1.06952	252	1.07498
193	1.07277	253	1.07665
194	1.07354	254	1.07693
195	1.07263	255	1.07707
196	1.07335	256	1.07524
197	1.07172	257	1.07312
198	1.07132	258	1.07759
199	1.07091	259	1.07738
200	1.07540	260	1.07451
201	1.07510	261	1.07517
202	1.07370	262	1.07841
203	1.07407	263	1.07830
204	1.07509	264	1.07394
205	1.07670	265	1.07483
206	1.07668	266	1.07587
207	1.07404	267	1.07401
208	1.07223	268	1.07463
209	1.07486	269	1.07657
210	1.07468	270	1.07920
211	1.07463	271	1.07736
212	1.07916	272	1.07746
213	1.08131	273	1.07658
214	1.08059	274	1.07554
215	1.08214	275	1.07580
216	1.08164	276	1.07774
217	1.07827	277	1.08009
218	1.07845	278	1.08055
219	1.07929	279	1.07859
220	1.07882	280	1.07940
221	1.08219	281	1.07797
222	1.08189	282	1.07938
223	1.07962	283	1.08143
224	1.07799	284	1.07943
225	1.07750	285	1.07923
226	1.07956	286	1.07888
227	1.08031	287	1.08096
228	1.08288	288	1.08293
229	1.08313	289	1.08154
230	1.08437	290	1.07969
231	1.08291	291	1.08012
232	1.07610	292	1.08009
233	1.07464	293	1.08047
234	1.07727	294	1.08204
235	1.07563	295	1.08394
236	1.07428	296	1.07962
237	1.07369	297	1.07995
238	1.07150	298	1.07683
239	1.07599	299	1.07401
		300	1.07523

表 5-5 (1) 火源 No. 4 の発熱速度 (実験計測値)

着火からの 経過時間 (s)	発熱速度 (kW)
0	0.03652
1	0.04434
2	0.04420
3	0.04930
4	0.08094
5	0.09148
6	0.10174
7	0.13810
8	0.15111
9	0.20336
10	0.21072
11	0.21063
12	0.23934
13	0.25424
14	0.28066
15	0.28903
16	0.29409
17	0.31758
18	0.36458
19	0.37665
20	0.37638
21	0.43263
22	0.43912
23	0.45443
24	0.45673
25	0.45925
26	0.47480
27	0.47816
28	0.48622
29	0.48586
30	0.49068
31	0.49499
32	0.49720
33	0.49962
34	0.49972
35	0.50230
36	0.50358
37	0.50699
38	0.50836
39	0.50669
40	0.51211
41	0.51523
42	0.51449
43	0.51419
44	0.51861
45	0.51863
46	0.52337
47	0.52338
48	0.52362
49	0.52887
50	0.52865
51	0.53067
52	0.53129
53	0.53094
54	0.53099
55	0.53358
56	0.53460
57	0.53521
58	0.53617
59	0.53683

着火からの 経過時間 (s)	発熱速度 (kW)
60	0.53746
61	0.53667
62	0.53610
63	0.53636
64	0.53676
65	0.53730
66	0.53604
67	0.53561
68	0.53709
69	0.53735
70	0.53781
71	0.53618
72	0.53612
73	0.53757
74	0.53846
75	0.53731
76	0.53608
77	0.53608
78	0.53529
79	0.53610
80	0.53553
81	0.53460
82	0.53514
83	0.53554
84	0.53604
85	0.53660
86	0.53601
87	0.53478
88	0.53467
89	0.53451
90	0.53413
91	0.53438
92	0.53715
93	0.53622
94	0.53630
95	0.53812
96	0.53851
97	0.53833
98	0.53643
99	0.53643
100	0.53766
101	0.53704
102	0.53735
103	0.53768
104	0.53720
105	0.53665
106	0.53794
107	0.53875
108	0.54106
109	0.54027
110	0.53933
111	0.53939
112	0.53987
113	0.53979
114	0.53870
115	0.54058
116	0.54234
117	0.54424
118	0.54317
119	0.54072

着火からの 経過時間 (s)	発熱速度 (kW)
120	0.54086
121	0.54178
122	0.54147
123	0.54266
124	0.54320
125	0.54191
126	0.54115
127	0.54248
128	0.54306
129	0.54123
130	0.54226
131	0.54312
132	0.54280
133	0.54306
134	0.54261
135	0.54277
136	0.54267
137	0.54329
138	0.54284
139	0.54169
140	0.53993
141	0.53994
142	0.54186
143	0.54158
144	0.54252
145	0.54334
146	0.54134
147	0.54126
148	0.54200
149	0.54297
150	0.54075
151	0.53897
152	0.53923
153	0.53949
154	0.53878
155	0.53838
156	0.53881
157	0.53984
158	0.54065
159	0.53939
160	0.53940
161	0.54269
162	0.54099
163	0.54015
164	0.53970
165	0.54078
166	0.54109
167	0.54019
168	0.54066
169	0.54078
170	0.54100
171	0.54057
172	0.53992
173	0.54106
174	0.54172
175	0.54166
176	0.54165
177	0.54079
178	0.54054
179	0.54073

表 5-5 (2) 火源 No. 4 の発熱速度 (実験計測値)

着火からの 経過時間 (s)	発熱速度 (kW)	着火からの 経過時間 (s)	発熱速度 (kW)
180	0.54065	240	0.54007
181	0.54108	241	0.54170
182	0.54122	242	0.54031
183	0.54047	243	0.53870
184	0.54085	244	0.53945
185	0.54183	245	0.53931
186	0.54092	246	0.53925
187	0.54108	247	0.54016
188	0.54207	248	0.53983
189	0.54173	249	0.54082
190	0.54021	250	0.54062
191	0.54034	251	0.53876
192	0.54199	252	0.54019
193	0.54002	253	0.54039
194	0.53999	254	0.54056
195	0.53988	255	0.54198
196	0.53906	256	0.54143
197	0.53828	257	0.54033
198	0.54162	258	0.54070
199	0.54257	259	0.54130
200	0.54423	260	0.54108
201	0.54259	261	0.53965
202	0.54254	262	0.53975
203	0.54347	263	0.54088
204	0.54493	264	0.54024
205	0.54430	265	0.54139
206	0.54208	266	0.54173
207	0.54159	267	0.53953
208	0.54302	268	0.53650
209	0.54369	269	0.53680
210	0.54385	270	0.53693
211	0.54334	271	0.53668
212	0.54220	272	0.53669
213	0.54381	273	0.53726
214	0.54383	274	0.53321
215	0.54373	275	0.53348
216	0.54444	276	0.53348
217	0.54348	277	0.53233
218	0.54331	278	0.53120
219	0.54414	279	0.53160
220	0.54346	280	0.53058
221	0.54141	281	0.53113
222	0.54155	282	0.53325
223	0.54304	283	0.53201
224	0.54366	284	0.53094
225	0.54312	285	0.53222
226	0.54335	286	0.53268
227	0.54253	287	0.53212
228	0.54283	288	0.53253
229	0.54162	289	0.53314
230	0.54085	290	0.53177
231	0.54058	291	0.53120
232	0.54093	292	0.53071
233	0.54144	293	0.53192
234	0.54015	294	0.53270
235	0.54012	295	0.53195
236	0.53998	296	0.53158
237	0.53962	297	0.53172
238	0.54104	298	0.53148
239	0.54027	299	0.52969
		300	0.52984