

建築物地下階の外部に連絡する傾斜空間を  
考慮した煙制御手法に関する研究

2022 年 3 月

朴 鉉又

Park HyunWoo



# 目次

## 第1章 序論

1.1 研究の背景.....	1-1
1.2 既往の研究.....	1-3
1.2.1 加圧煙制御システムに関する研究.....	1-3
1.2.2 傾斜空間における熱気流性状に関する研究.....	1-6
1.2.3 数値解析(FDS)による煙性状に関する研究.....	1-10
1.3 研究の目的.....	1-14
1.4 論文の構成.....	1-16

## 第2章 階段加圧煙制御に関する実験

2.1 はじめに.....	2-1
2.2 実験概要.....	2-3
2.2.1 実験施設の概要.....	2-3
2.2.2 測定項目および測定方法.....	2-5
2.2.3 実験条件.....	2-7
2.3 階段加圧時の給気量に関する理論モデル.....	2-14
2.4 実験結果および考察.....	2-16
2.5 地下階を火災室と想定した階段加圧に関する考察.....	2-37
2.6 まとめ.....	2-41

## 第3章 傾斜空間における熱気流性状に関する実験

3.1 はじめに.....	3-1
3.2 実験概要.....	3-2
3.2.1 模型概要.....	3-2
3.2.2 測定項目.....	3-3
3.2.3 実験条件および方法.....	3-4
3.3 実験結果および考察.....	3-5
3.3.1 発熱速度.....	3-5
3.3.2 鉛直温度.....	3-6
3.4 傾斜空間における鉛直温度分布性状.....	3-17
3.4.1 鉛直温度.....	3-18
3.4.2 無次元鉛直温度.....	3-22

3.5	傾斜空間における天井面下の熱気流温度.....	3-29
3.5.1	傾斜空間とトンネルの熱気流温度性状の比較検討.....	3-29
3.5.2	傾斜空間における天井面下の熱気流温度減衰.....	3-31
3.6	まとめ.....	3-36
<b>第4章 数値解析モデルを用いた熱気流性状に関するケーススタディ</b>		
4.1	はじめに.....	4-1
4.2	FDSを用いた再現性の検討.....	4-2
4.2.1	計算モデル.....	4-2
4.2.2	計算比較項目.....	4-3
4.2.3	計算条件.....	4-5
4.3	計算結果と実験結果の比較.....	4-7
4.4	地下空間における階段加圧煙制御を想定したケーススタディ.....	4-16
4.4.1	ケーススタディの条件.....	4-16
4.4.2	ケーススタディの結果および考察.....	4-22
4.5	まとめ.....	4-48
<b>第5章 総括</b>		
5.1	研究の総括.....	5-1
5.2	今後の課題および展望.....	5-5

# 第1章

## 序論



## 1.1 研究の背景

近年、都市部では人口などの集中により建築物が密集化し、そして、社会様式の変化とともに建築物に求められる機能も多様化し、そのような状況下で、効率的な土地利用などを考え、地下空間を有効に利用した建築物の深度化などが進んでいる<sup>[1-1]</sup>。同時に、建築物の地下空間は、地盤面下のため外気に面する開口が設けづらいなど、防災面や環境面での課題が多く、それらを解消するための技術的な対策などが検討されている。

建築物の地下空間を利用する上で、防災面の課題の中で、建物利用者の上下方向の移動に対する安全性の確保があげられる。例えば、日常的に折返し階段等の堅穴空間や直階段および車路のような傾斜空間が、地上階までの移動手段として利用される。一方、このような上下方向の移動に利用される可能性がある空間は、火災発生時、煙が侵入し伝播する経路になり、建物利用者の避難や消防隊の消防活動に支障を与える可能性があり、それらに対する火災安全対策は重要な課題の一つである<sup>[1-2]</sup>。

地下空間から地上階へ通ずる避難階段や特別避難階段に着目した場合、建物利用者の避難や消防隊の消防活動として使用が想定されるため、煙制御に対する配慮が不可欠な空間である。そのような煙制御対策として、階段室を形成する階段室の防火性能や防煙性能を考え、区画化することが考えられる。階段室の壁や扉には、そのような性能を考え、法規的に仕様定められている。一方で、火災時に避難や消防活動で階段を利用する場合、階段室の扉の開閉時に、扉を介した煙伝播等を引き起こす可能性がある。特に、地下空間の火災発生時には、煙伝播は外気に面する開口部がほとんど無いため、煙伝播経路は限定的になり、地上階へ通じる空間に対する煙伝播に対する安全性を十分に確保する必要がある。従来から階段の火災時の安全対策として階段室に付室を設け、その付室に機械的に外気を給気するファンを設置し付室内の圧力を高めることにより、扉を介した階段室への煙伝播を制御する方式が検討されている。この付室加圧方式を用いる場合、給気ファンは、基本的には火災による影響で停止する可能性は低く、長時間、煙制御が可能であるなどの利点がある。このような点を踏まえ、建築物に設けられる特別避難階段では、付室に外気を給気する煙制御システムを用いることで、階段室への煙伝播に対する安全性を確保する例もみられる。なお、平成28年6月の防火関係規定の改正により「建築基準法施行令第123条第3項第1号および129条第13項第3号」の構造に関する規定では「外気に向かって開くことのできる窓、または排煙設備を設ける」が「煙が付室を通じて階段室に流入することを有効に防止する」という表現に改められ、煙制御システムとしての信頼性を高めることが、更に進められている。この留意点として、地下空間では外気に向かって開くことができる開口部を設けることが困難であることから、何らかの対策を検討する必要がある。また、階段への煙伝播を制御する方式として、外気を給気する空間として、付室ではなく、直接的に階段室を給気する方式、すなわち階段加圧方式が考えられる。この階段加圧方式については、これまで、中層建築物等の階段で導入された事例は稀にみられるものの、系統的な研究が不足しており、煙制御システムとしての課題も多く残されている。なお、階段加圧方式は、海外においては既に加圧防排煙方式の煙制御システムの一つとして法的に定められている国もあるのに対して<sup>[1-3]~[1-5]</sup>、日本ではまだ知見の不足などから、防火関係規定での明文化等が

行われていない状況である。

前述した外気に向かって開くことができる開口部に関連し、地下空間の煙制御システムの検討として、日常的な地下空間における建物利用者の移手段として使用される直階段や車路のような傾斜空間に着目する。「建築基準法施行令第126条の2」では排煙設備の設置に関する規定が定められているが、直接外気に接する空間の場合、自然排煙方式による煙制御が考えられる。地下空間で発生した火災時には、防火区画や防煙区画が形成されないとした場合、出火室－傾斜空間－地上の連続する空間構成を考えると、地下空間内で発生した煙は熱気流となり傾斜空間へ侵入し、傾斜空間の上方へ煙拡散することが考えられる。また、地下街や駅舎高架下コンコースで火災が発生した場合の煙の排出は、主として機械排煙方式による煙制御システムが一般的に計画されているが、仮に避難者が使用していない傾斜空間は、自然排煙方式と同様に煙の浮力を利用した煙の排出を行う煙制御システムの一部として活用できる可能性がある。しかし、傾斜空間内の熱気流の性状は空間の幾何学的形状の影響を受けることなどが考えられるものの、これまで地下空間から地上階へ通じる直階段や車路のような傾斜空間を対象とした熱気流性状に関する定量的な知見は乏しい状況にある。

建築物の建築火災安全設計において、煙制御システムに関する検討は、建築基準法および消防法に定められている仕様規定の他、大臣認定制度に基づく性能規定による検討が実施されている<sup>[1-6]</sup>。その中で、性能設計では、学術的な知見に基づきながら火災現象を定式化し、構築されたツールを組み合わせたモデルによる検討が可能である<sup>[1-7]</sup>。仮に、煙性状に関する予測のために数値シミュレーションモデルなどが構築できれば、建築物の火災安全性の検証などでの活用が期待される。さらに、近年のコンピュータの性能の向上に伴い、ゾーン概念に基づく煙性状の予測モデル以外にも FDS(Fire Dynamics Simulator)<sup>[1-8]</sup>などの CFD(Computational Fluid Dynamics) モデルを用いた建築物の火災安全性の検討が、海外では行われている。CFD などの高度なシミュレーションモデルによる解析では、その対象空間を細かくメッシュ分割し、分割数を増加すれば、その分割された各要素において基礎方程式を適用することにより、空間内の詳細な化学種や温度等の分布などの煙性状が把握でき、建築物の詳細設計に寄与する情報を収集することが可能となる。建築物の多種多様な空間構成を踏まえた煙制御システムを検討する場合、高度なシミュレーションモデルの使用は、今後も発展的に検討されていく可能性が高い。特に地下空間における火災時の避難や消防活動を踏まえた煙制御システムの検討を行うためには、複雑な地下空間の構成を再現した煙流動性状について、実験を実施し検討できる課題も限定的にならざるを得ないと考えられることから、CFD などの高度なシミュレーションモデルを用いた検討手法は、今後、建築火災安全設計で用いることができる有力な方法の一つとして確立する必要がある。

## 1.2 既往の研究

### 1.2.1 加圧煙制御システムに関する研究

火災時の煙制御システムとして、第2章で階段加圧煙制御システムについて検討するため、本節では「加圧煙制御システム」に関する既往研究を整理する。これらを参考とし、第2章で階段加圧煙制御システムに関する検討を行う。

中村等<sup>[1-9]</sup>の研究では、加圧排煙システムにより避難扉位置の遮煙部の前後差圧制御に着目し、給排気系の制御を行わない条件で、ファン風量制御およびバイパス風量制御を条件とした実大実験による検討を行っている。この研究により、ファン風量制御およびバイパス風量制御を行うことで、遮煙部における前後で目標とした差圧に制御でき、扉開放時の漏煙防止効果および扉の開放力低減に関する知見を得ているが、実建物内の複雑な圧力変化を踏まえ制御システム計画の更なる検討が必要であると記述している。

笠原等<sup>[1-10]</sup>の研究では、特別避難階段の附室や非常用エレベータの乗降ロビーの加圧防煙システムに着目し、圧力変動の大きさと応答時間を適正に評価するための圧力制御装置の計画上の考え方について、実大模型実験およびそれらを適用した建物での実測に基づきながら検討している。この研究では、目標の整定時間の計画や送風用ダクト内の圧力に基づく制御による加圧送風量の制御は、加圧給気風量(Q)/加圧室における隙間開口面積の合計(S)を適切に設定することで可能になると述べている。

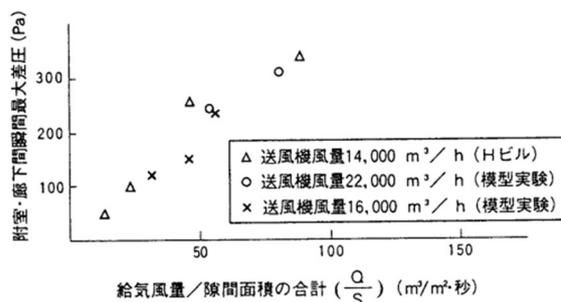


図 1-2-1 附室瞬間最大圧力と  $Q/S$  の関係

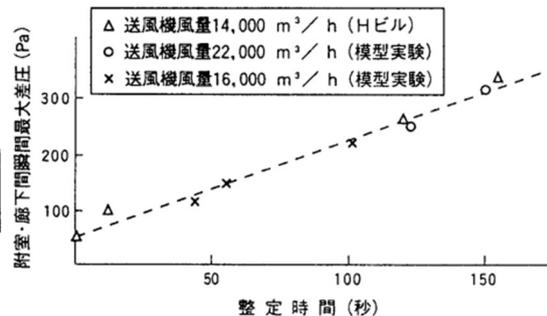


図 1-2-2 附室瞬間最大差圧と整定時間

掛川等<sup>[1-11]</sup>の研究では、集合住宅に適用した加圧防煙システムの性能確認を目的とし、地上25階、塔屋2階、地下2階の高層集合住宅ビルにおいて、集合住宅に合わせた火災シナリオ(通常モードおよび漏煙モード)の条件下での遮煙性能、圧力調整機構による扉開閉障害の防止効果および集合住宅の主要な部位の隙間有効開口面積について検討している。この研究では、各火災シナリオにおいて加圧防煙システムは遮煙性能を満足し、圧力調整機構は高齢者および児童の避難に対して、扉の開閉障害が防止できることなどが述べられている。なお、集合住宅中廊下廻りの躯体の単位床面積当たりの隙間有効開口面積は、事務所の廊下と比較すると約5割大きい値となり、住戸扉の圧力調整用開口の有効開口率は約0.4であると報告している。

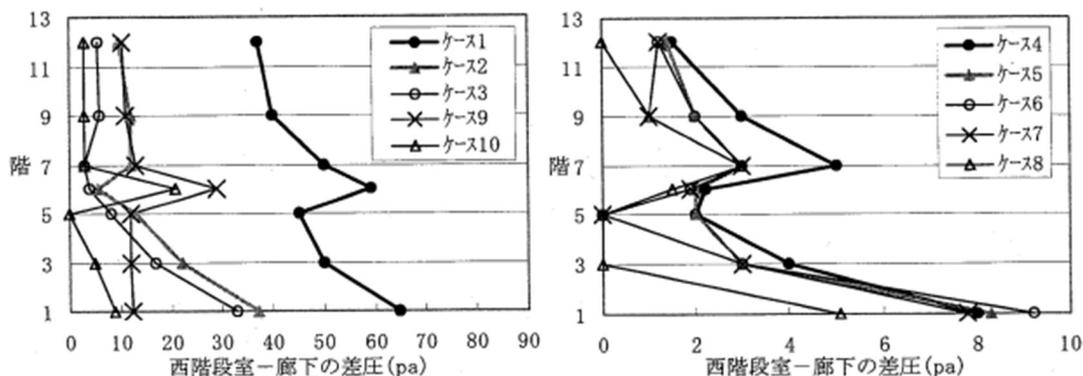
森山<sup>[1-12]</sup>の研究では、地上6階、地下1階の事務室ビルにおいて階段加圧防煙システムの性能検証を目的とした実測を行っている。この研究では、階段内の気密性、階段内の流量抵抗、扉の開閉による階段内の圧力変動および基準階の加圧防煙性能に関する結

果を報告している。本研究の結果、階段の内壁を含む壁面の流量係数は 0.000636、階段内の流量抵抗は上下間の隙間が多い階段であったため階段内の圧力降下の影響が少なく、フロア単位の流量係数は階段の平面投影面積に対して 0.339 であった。また、扉開閉の影響による階段内の圧力変動の検討では、リーク扉の圧力上昇防止効果が明らかとなり、扉開放数の増加により階段内の圧力は急激に低下し、扉の開放数が階段の防煙性能に大きく影響するため、開放する扉の数が設計上重要であることを示している。基準階では火災室の排煙システムなしでも階段加圧のみで火災階の安全区画を防煙できる可能性を述べている。

さらに森山等<sup>[1-13]</sup>の研究では、地上 14 階、地下 2 階の高い気密性を有した高層建物（事務室・住宅ビル）における 4 ヶ所の階段において階段の上下から同時に加圧給気し、排煙停止状況（盛期火災を想定）での階段内圧力性状および防煙性能について検討している。その結果、階段の上下から同時に階段を加圧した場合、階段の下からのみ加圧した場合に比べ、圧力損失は半分以下となり、排煙停止時の階段の防煙性能は、階段から建物内部を介し外気に至るルート合成抵抗によって決定され、建物全体の気密性が高い場合には、階段扉開放数の変化が階段の防煙性能に与える影響は少ないと述べている。

また森山等<sup>[1-14]</sup>の研究では、地上 10 階、地下 2 階の中規模事務所ビルでの階段加圧防煙システムの性能検証結果を報告している。その報告では、階段の気密性について階段と外気間の流量係数は約 0.0005 程度、階段内の流量係数は階段の平面投影面積に対して約 0.128 という結果を得ている。さらに、本階段加圧防煙システムは火災初期の火災階避難経路の防煙から火災盛期の全館避難、消防活動の支援性能を有すると述べている。

長岡等<sup>[1-15]</sup>の研究では、建物各所の漏気量や隙間量の計測、扉の開閉条件と階段室圧力分布の関係および階段加圧防排煙システム性能の確認のために、地上 14 階、地下 3 階の事務所ビルで実測を行っている。この結果では、階段室の隙間率（隙間量を外壁面積で割った値）は  $0.0001\text{m}^2/\text{m}^2$ 、EV 扉の隙間率は  $0.019\sim 0.021\text{m}^2/\text{m}^2$ 、事務室の外壁隙間率は  $0.0005\text{m}^2/\text{m}^2$  であったと述べている。階段室の圧力分布は、扉の開放数が多い程小さくなった。また、すべての条件を通して給気口に近い 1 階の差圧が大きく、上階に行くに従い小さくなる結果を得ている。階段加圧防煙システムの性能については、各想定シナリオにおいて、有効な性能を発揮すると述べている。



(a) 西階段室と廊下の扉間差圧（その 1） (b) 西階段室と廊下の差圧（その 2）

図 1-2-3 階段室と廊下の差圧

松下等<sup>[1-16]</sup>の研究では、地上1階から30階までの階段室に加圧を行い、扉の開閉に伴う階段室の圧力性状について検討している。また、階段内の差圧分布は基準柱(外部の流れや温度変化の影響を受けず、階段内での流れの性状を把握することが可能)との差圧としている。この研究では、階段室の通気特性である1階当たりの流量係数は0.17~0.19となることを示し、階段加圧時に上階から給気した場合、階段の扉が多数同時に開放されると、上流側の扉から送風空気が大部分流出し、下流の扉での加圧効果が期待できないという結果を得ている。

松山等<sup>[1-17]</sup>の研究では、加圧防排煙における常温時の性能確認手法について動圧方式にも対応できる手法の構築のための基礎的検討を目的とし、流れが不明な場合に静圧が測定できる静圧測定装置を提案している。また、2方向管やピトー管を用い計測した静圧と静圧測定装置を用い計測した静圧の比較を行うことでその性能を確認している。その結果、静圧測定装置が気流の流れに対する角度が0°であれば2方向管およびピトー管による静圧と同じ値を示すが、気流の流れに対する角度が大きくなるに従い差異が生じる知見を示している。

岸上等の研究<sup>[1-18]</sup>では、給気方式(静圧方式および動圧方式)の差異が遮煙部における遮煙性状に及ぼす影響について検討するため、2つの空間で構成された実大模型を用いた実験を行っている。この研究では、一般的に加圧煙制御システムでは開放される扉における遮煙には直交する2方向からの遮煙が必要としている。また、静圧方式において測定した遮煙部における必要な風量は、理論的に計算される風量と概ね一致し、動圧方式の場合は理論的に計算される風量に比べ、差異が生じる場合があると述べている。

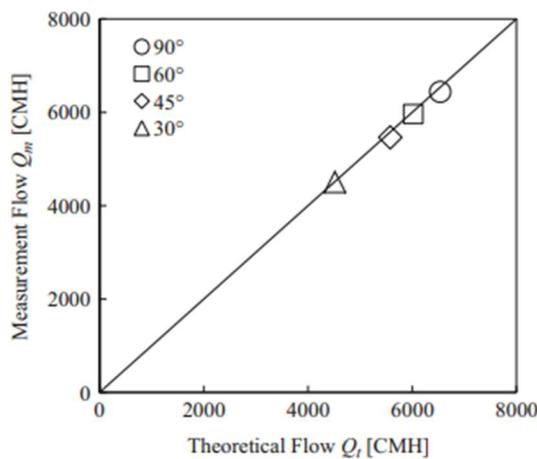


図 1-2-4 流量比 (静圧方式)

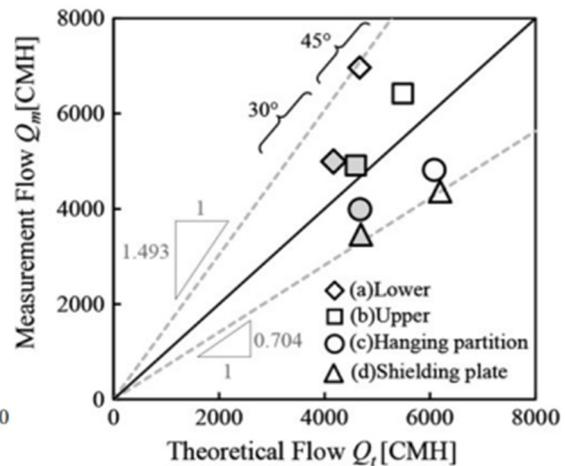


図 1-2-5 流量比 (動圧方式)

## 1.2.2 傾斜空間における熱気流性状に関する研究

地下空間における火災時の煙制御として、第 3 章で傾斜空間における自然排煙時の熱気流性状を明らかにするため、本節では「傾斜空間における熱気流性状」に関する既往研究を整理する。これらを参考とし、第 3 章で模型実験を通じた傾斜空間の熱気流性状の把握および熱気流の温度について定量的な検討を行う。

真船等<sup>[1-19]</sup>および佐藤等<sup>[1-20]</sup>の研究では、1/10 スケールの高架下の駅コンコース模型を用いた実験を行い、コンコース内で発生した火災の煙が階段を介し外部に排出される場合の煙流動性状に着目している。模型実験では、煙の流れを可視化し階段(傾斜空間)を介した煙の排出や煙の一部が下層部の空気と混合する現象を確認している。また、火源、コンコースの天井形状および階段開口部標識の有無や隙間の条件などが、煙層温度や煙層高さに及ぼす影響について検討している。結果として、コンコースに配置した火源やコンコースの空間の大きさ、コンコースと階段を出入する開口部の条件に対する煙層温度や煙層高さに及ぼす影響を定量的に把握している。

渡部等<sup>[1-21]</sup>の研究では、1/5 縮尺の地下駅構内模型を用い、自然換気の状態において、プラットフォーム階における車両を出火源とした火災実験を行った。実験では、階段内の温度分布等を測定し、天井形状(水平 2 段天井、30 度傾斜天井)の違いによる煙流動とコンコース階への煙の流出特性について調べ、天井形状の違いに関わらず階段部では熱気流は周囲空気を巻き込みながら上昇し、コンコース階へ流出する熱気流は概ね混合流となることを示している。

藤村等<sup>[1-22]</sup>の研究では、天井と床面で仕切られた 1/5 縮尺の傾斜模型を用い、斜路における煙流の挙動について調べている。結果として、斜路における煙流は主に 3 つの領域(主流域、巻き込み域、下部空気層)に区分されることを示している。また、傾斜角度や下部空気層の状態(自由流、対向流)の違いにより、空気の巻き込み現象が異なることを報告している。

山田等<sup>[1-23]</sup>の研究では、天井面が傾斜する場合の煙層の加速を考慮に入れ、煙先端部位置の時間変化を予測する簡易な手法の提案を行っている。この研究では、煙層を巨視的な密度流として取り扱い、水平天井面における煙先端部移動性状のモデルを拡張し、傾斜天井面における煙先端部の平均移動速度 $\bar{u}_f$ に関する簡易予測モデルとして次式を提案している。

$$\bar{u}_f = \frac{Q_f}{bh_f} = \frac{2}{3^{2/3}} \left( \frac{\Delta\rho g_0}{\rho_s b} \right)^{1/3} \left( \frac{(\cos\theta + \gamma \sin\theta)^{3/2} - (\gamma \sin\theta)^{3/2}}{\cos\theta} \right)^{2/3} \quad (1.2.1)$$

ここで、

$b$ : 廊下の幅 [m]、 $g$ : 重力加速度 [m/s<sup>2</sup>]、 $h_f$ : 煙層先端部の厚さ [m]、 $Q_f$ : 先端部の体積流量 [m<sup>3</sup>/s]、 $Q_0$ : 流入流量 [m<sup>3</sup>/s]、 $\bar{u}_f$ : 煙層先端部の平均移動速度 [m/s]、 $\gamma$ : 密度流先端部断面における層厚さに対する進行方向長さの比 [-]、 $\rho_s$ : 煙層の密度 [kg/m<sup>3</sup>]、 $\theta$ : 傾斜角度 [rad]

新田<sup>[1-24]</sup>の研究では、数値計算による傾斜路煙流の解析を行い、天井と床面からなる傾斜路での煙流動性状について、傾斜路での煙と空気の流れは動力作用が卓越することから、 $k-\varepsilon$ モデルを用いて数値実験を行っている。その結果、傾斜路の煙流に対する空

気流の条件が異なる場合の煙流動パターンや成層煙流である場合の巻き込み係数および傾斜路流出端より流出する煙量の増大の割合について述べている。

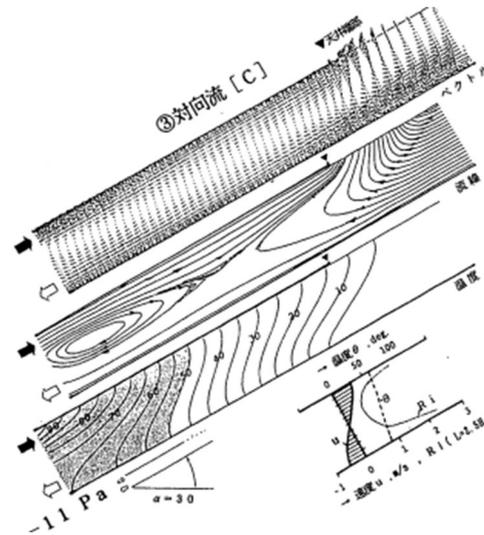


図 1-2-6 2次元傾斜路の煙/空気流動パターン(傾斜角 30°、対向流の場合)

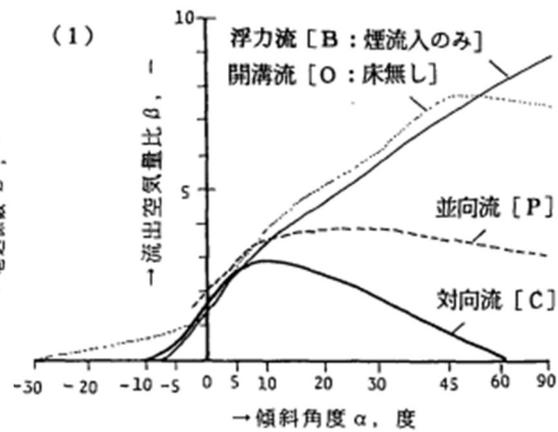
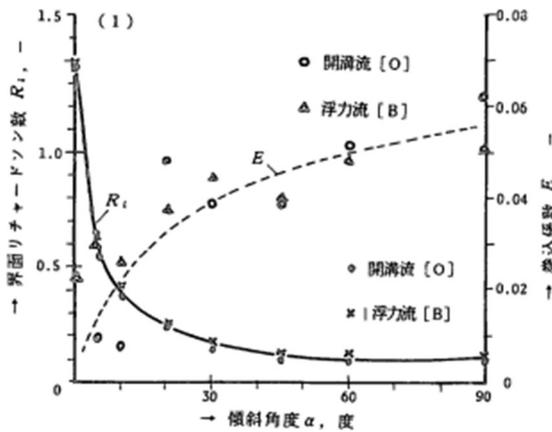


図 1-2-7 傾斜路成層流の巻き込み係数 図 1-2-8 傾斜路出口での流出煙量の割合

Oka 等<sup>[1-25]</sup>の研究では、傾斜したトンネルにおける天井流の温度性状に傾斜角度などが及ぼす影響について明らかにするため、1/23.3 スケールのトンネルモデル(断面アスペクト比 1.8(高さ:0.3m、幅:0.55m)、長さ:3.6m、傾斜角度:0°、8°、10°、20°)を用いた模型実験を実施した。そこで、天井面下を這う天井流の温度について、無次元温度  $\Delta T / (T_\infty Q^{*2/3})$  と無次元流動距離  $r/H$  の関係に基づく熱気流の無次元温度予測式を提案している。

$$\left(\frac{\Delta T}{T_\infty}\right) / Q^{*2/3} = \alpha_3 \left(\frac{r}{H}\right)^{-\beta_3} \tag{1.2.2}$$

ここで、

$$Q^* = \frac{Q}{\rho_\infty c_p T_\infty g^{1/2} H^{5/2}} \tag{1.2.3}$$

$$\alpha_3 = A(-5.397 \times 10^{-4} \theta^2 + 3.606 \times 10^{-4} \theta + 1.000) \tag{1.2.4}$$

$$A = 2.785(Q = 1.95kW)、3.203(Q = 5.7kW) \tag{1.2.5}$$

$$\beta_3 = 5.323 \times 10^{-3} \theta + 0.482 \quad (1.2.6)$$

なお、

$C_p$ : Air specific heat at constant pressure [kJ/(kg · K)],  $g$ : Acceleration due to gravity [m/s<sup>2</sup>],  $H$ : Tunnel height [m],  $Q$ : Heat release rate [kW],  $Q^*$ : Dimensionless heat release rate [-],  $r$ : Distance from the fire source along the tunnel axis [m],  $\Delta T$ : Temperature rise [K],  $T_\infty$ : Temperature in atmosphere [K],  $\rho_\infty$ : Density of air [kg/m<sup>3</sup>],  $\theta$ : Inclination angle of tunnel [° ]

Huo 等<sup>[1-26]</sup>の研究では、トンネルモデル(断面アスペクト比 0.8(高さ:1.0m、幅:0.8m)、長さ:3.0m、傾斜角度:0°、10°、20°、30°)を用いた実験および FDS による数値解析を実施し、熱気流性状について定量的な検討を行っている。結果として、天井面下 10mm 地点の熱気流温度を、無次元温度  $\Delta T / (T_\infty \dot{Q}_H^{*2/3})$  と無次元流動距離  $r_{up}/H$  の関係に基づき、モデル化している。

$$\frac{\left(\frac{\Delta T}{T_\infty}\right)}{\dot{Q}_H^{*2/3}} = (7.94 - 12.76 \times \sin\theta) \exp\left(-1.26 \frac{r_{up}}{H}\right) + 2.2 \quad (1.2.7)$$

ここで、

$H$ : Ceiling height above fire source [m],  $\dot{Q}_H^*$ : Dimensionless heat release rate [-],  $r_{up}$ : Radial distance from the plume-impinged point towards the tunnel upper opening [m],  $\Delta T$ : Temperature rise [K],  $T_\infty$ : Ambient temperature [K],  $\theta$ : Inclination angle of the tunnel [° ]

Wang 等<sup>[1-27]</sup>の研究では、トンネルの幅と傾斜が天井面を這う天井流の温度分布に与える影響について着目し、実大のトンネルモデル(断面アスペクト比 0.8~2.4(高さ:5.0m、幅:4.0m、6.0m、8.0m、10.0m、12.0m)、長さ:60.0m、傾斜:5%( $\approx 2.9^\circ$ )、7%( $\approx 4.0^\circ$ )、10%( $\approx 5.7^\circ$ )、12%( $\approx 6.8^\circ$ )、15%( $\approx 8.5^\circ$ ))を用いた数値解析を行った。その結果、天井面を這う天井流の最高温度減衰について、無次元温度  $\Delta T_r / \Delta T_{max}$  と熱気流の無次元流動距離  $rw/H^2$  の関係に基づく算定式を提案している。

$$\frac{\Delta T_r}{\Delta T_{max}} = 0.46e^{(-0.95+4.69\alpha)\left(\frac{rw}{H^2}\right)} + 0.54e^{(-0.038+0.17\alpha)\left(\frac{rw}{H^2}\right)} \quad (1.2.8)$$

ここで、

$H$ : Tunnel height [m],  $r$ : The distance from maximum temperature point [m],  $\Delta T_{max}$ : Maximum ceiling gas excess temperature [K],  $\Delta T_r$ : Excess temperature at  $r$  meters from maximum ceiling gas temperature [K],  $w$ : Tunnel width [m],  $\alpha$ : Tunnel slope

Hu 等<sup>[1-28]</sup>の研究では、傾斜したトンネルにおける排煙風速を考慮する場合の天井面の熱気流温度分布について着目し、トンネルモデル(断面アスペクト比 1.6(高さ:0.8m、幅:1.3m)、長さ:6.0m、傾斜:0%(=0°)、3%( $\approx 1.7^\circ$ )、5%( $\approx 2.9^\circ$ ))を用いた実験を行った。その結果、傾斜したトンネルにおける熱気流温度は、無次元温度  $\Delta T_x / \Delta T_{max}$  と火源上および天井面下で最高温度になる地点からの流動距離  $x$  の関係に基づき算定式を提案している。

$$\frac{\Delta T_x}{\Delta T_{max}} = \frac{T_x - T_a}{T_{max} - T_a} = e^{-(1+0.09)Kx} \quad (1.2.9)$$

ここで、

$T_a$ : Ambient air temperature [K],  $\Delta T_{max}$ : Maximum excess gas temperature [K],  $T_x$ : Temperature at  $x$  meters from the reference position [K],  $\beta$ : Percentage of the tunnel slope

Oka 等<sup>[1-29]</sup>の研究では、トンネルにおける熱気流の垂直温度性状に着目し、トンネルモデル(断面アスペクト比 1.7(高さ:0.45m、幅:0.75m)、長さ:10.0m、傾斜角度:0°、3°、5°、8°、10°)を用いた実験を実施した。トンネル内の垂直方向の無次元温度分布は熱気流の厚みを用いた無次元高さとの関係から定式化し、図 1-2-9 および図 1-2-10 に示す通り、大規模および実大規模や小規模への適用について述べている。

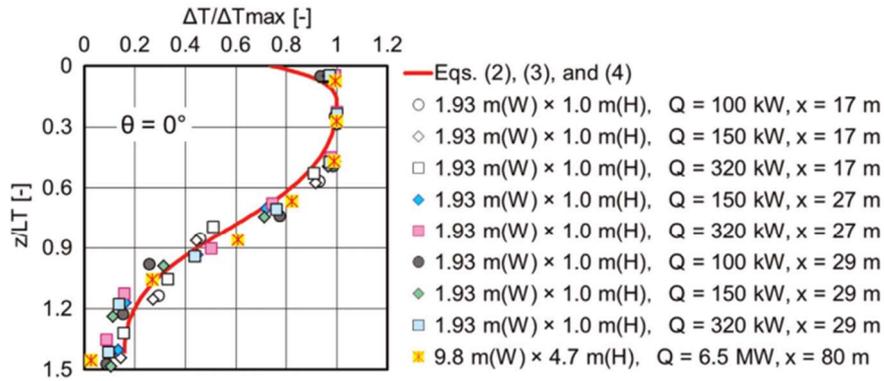


図 1-2-9 トンネルの大規模および実大規模実験への適用性検討

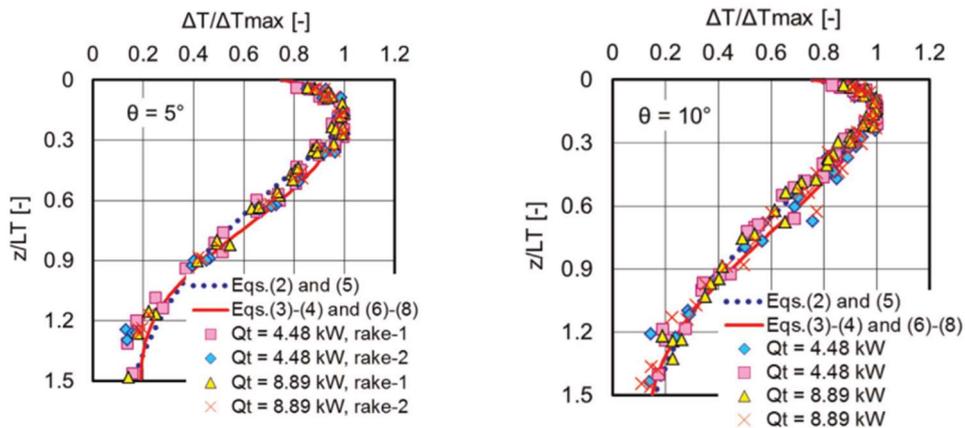


図 1-2-10 トンネルの小規模模型実験への適用性検討 ( $\theta = 5^\circ$ 、 $\theta = 10^\circ$ )

### 1.2.3 数値解析(FDS)による煙性状に関する研究

第4章において、第2章と第3章を考慮し、加圧給気時の火災室および傾斜空間における熱気流性状についてFDSを用い把握するため、本節では、「FDSを用いた煙制御時の煙性状予測」に関する既往研究について整理する。

蛇石等<sup>[1-30]</sup>の研究では、模型実験を実施して自然換気下の地下駅舎の斜路空間における煙流動性状およびその制御方法について検証し、FDSを用いて実験の再現性を確認し、実大シミュレーションにより有効な煙制御方法の検討を行っている。本研究により斜路空間における煙流動性状については斜路形状(直線斜路および折曲斜路)の違いで大きく異なるため、それぞれ適切な煙制御方法を選択すべきとしている。また、排煙に用いる排煙筒の設計指針を示し、設置位置や垂壁サイズに対する遮煙効果を満足する排煙筒サイズについて提案している。

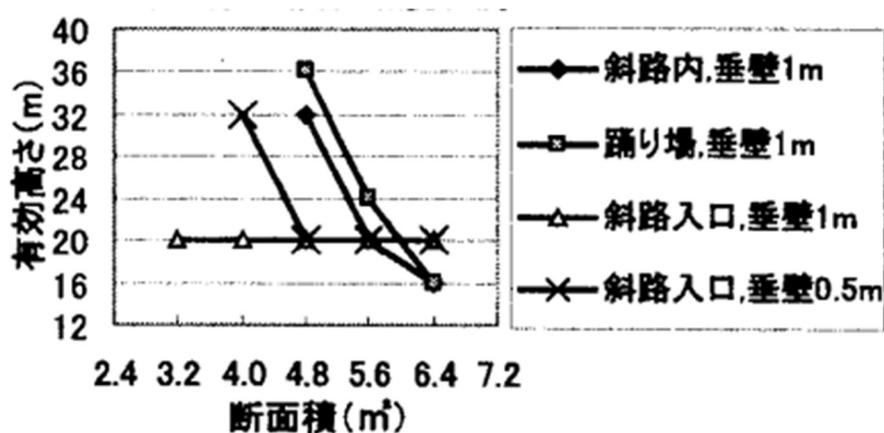


図 1-2-11 排煙筒設計指針

Park 等<sup>[1-31]</sup>の研究では、FDSを用いて地下鉄駅の階段の一部(プラットフォーム階から廊下階までを連絡する階段)をモデル化し、機械排煙設備の有無を条件とした煙制御性能について検討し、機械排煙設備を設置する条件が無い条件に比べ、火災により発生した煙を有効に排出できる知見を得ている。

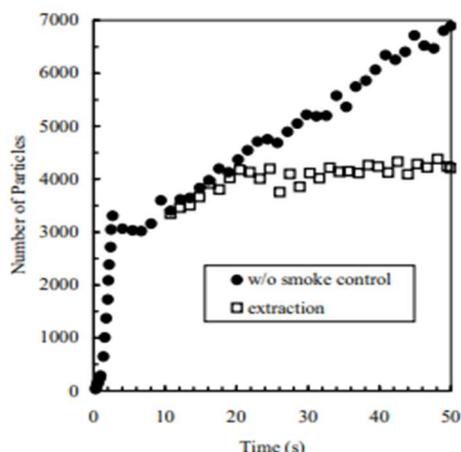


図 1-2-12 時間に従う煙粒子の変化

Ahmed 等<sup>[1-32]</sup>の研究では、FDS により実大スケールの地下鉄駅における車両火災を再現し、排煙口の単一設置および複数設置に着目し、さらに、複数設置する場合には排煙口の離隔距離や防煙垂れ壁との組み合わせによる煙性状について把握している。結果として、排煙口を複数設置し、設置離隔距離が離れる程、排煙性能は高くなり、さらに、防煙垂れ壁を設置することによって排煙効果は高くなると述べている。

Yang 等<sup>[1-33]</sup>の研究では、FDS により地下空間における高速鉄道駅のプラットフォームをモデル化し、それぞれの火源位置において機械排煙および消防活動時に使用する移動式排煙装置 (Mobile Smoke Ventilator) を用いた場合の煙流動性状について検討している。その結果、火源がプラットフォームの中央に位置するとした場合、主に機械排煙に依存する排煙方式で十分であり、火源が南側にある場合は機械排煙設備と移動式排煙装置 (Mobile Smoke Ventilator) の組み合わせにより排煙性能が高くなるとしている。また、移動式排煙装置は機械排煙設備と同等の能力を発揮すると報告している。

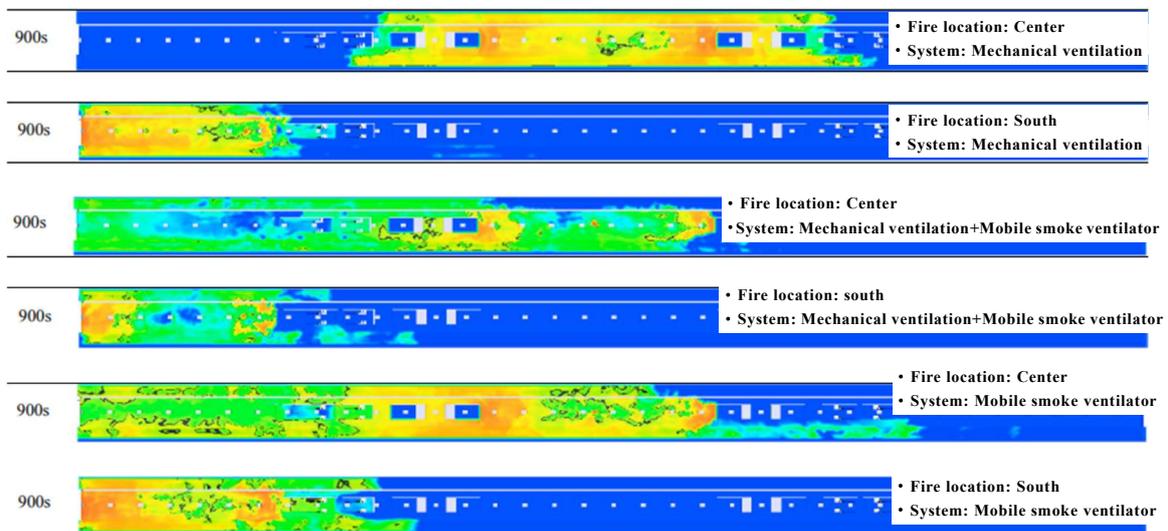


図 1-2-13 煙流動の可視化

Li 等<sup>[1-34]</sup>の研究では、傾斜したトンネルにおける傾斜 (3% ( $\approx 1.7^\circ$  )、5% ( $\approx 2.9^\circ$  )、7% ( $\approx 4.0^\circ$  )、9% ( $\approx 5.0^\circ$  )) が臨界速度に与える影響について模型実験および FDS を用いた数値解析により検討を行い、既存の臨界速度モデルの Grade factor  $k_g$  と比較し本研究の条件範囲で Grade factor  $k_g$  を以下のように提案している。

$$k_g = 1 + 0.065\alpha \quad (1.2.10)$$

ここで、

$k_g$ : Grade factor [-],  $\alpha$ : Tunnel slop [%]

Wan 等<sup>[1-35]</sup>の研究では、FDS により傾斜したトンネルで垂直シャフトを用いて煙を排煙する状況を再現し、傾斜角度、発熱速度および火源位置の条件が煙温度分布、Smoke back-layering length およびトンネルへ流入する空気速度に与える影響について検討している。その結果、トンネル内の煙の最高温度になる地点はすべての条件において火源軸から垂直シャフトへの流れに存在し、傾斜角度は大きくなる程、シャフト内の温度は低下すると報告している。さらに、Smoke back-layering length およびトン

ネルへの流入空気速度について無次元化した簡易予測式を提案している。

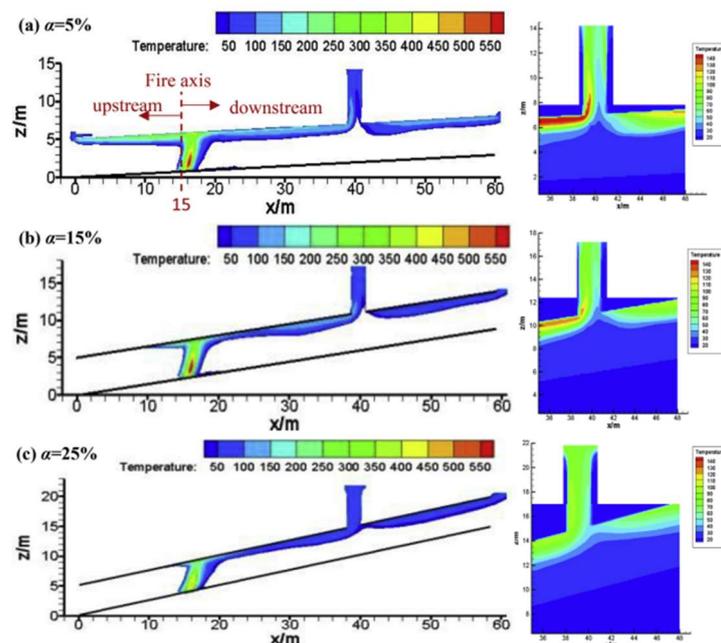


図 1-2-14 温度コンター ( $y=6\text{m}$ 、 $Q=5\text{MW}$ 、 $L_s=15\text{m}$ )

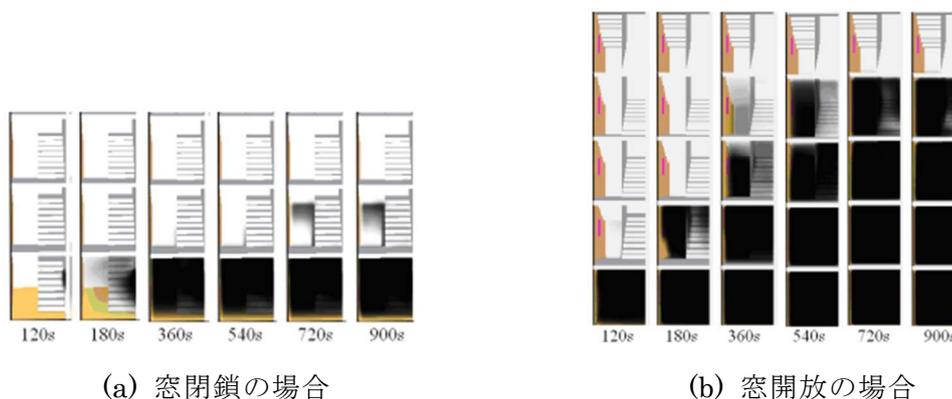
$$L_b^* = 0.06\alpha^{-1.57}, Q^* \geq 0.034 \quad (1.2.11)$$

$$V_{in}^* = Q^{*0.42} L_s^{*-0.57} (0.84 + 14.53\alpha^{2.41}) \quad (1.2.12)$$

ここで、

$L_b^*$ : Dimensionless back-layering length [-],  $L_s^*$ : Dimensionless fire source location [-],  $Q^*$ : Dimensionless heat release rate [-],  $V_{in}^*$ : Dimensionless inlet air velocity [-],  $\alpha$ : Tangent of the slope angle [%]

Wang 等<sup>[1-36]</sup>の研究では、階段加圧煙制御時に階段室内の窓の開閉による煙性状について、FDS を用いて検討している。その結果、階段室の窓が開放されている場合には、階段内の気密性が低くなり、階段加圧による煙制御効果が低くなると述べている。



(a) 窓閉鎖の場合

(b) 窓開放の場合

図 1-2-15 階段加圧時の階段室における煙流動の可視化

Li 等<sup>[1-37]</sup>の研究では、階段加圧煙制御システムについて、給気方式が煙制御性能に及ぼす影響について検討している。結果として、階段内の煙突効果を考慮し、火災階の近い位置の 2 つの給気口を用いた給気方式が最も防煙性能が優れていると述べている。

また、給気ファンが階段室の上部に設置された場合、各給気口における給気量について簡易予測手法を提案しており、質量およびエネルギー保存に基づき得られた式(1.2.13)と式(1.2.14)を組み合わせた Matlab program により算出できるとしている。さらに、火災階床レベルにおける階段室の平均圧力と給気量の相関関係を報告している。

$$\begin{cases} m_1' = m_o - m_1 = \rho A_o v_{x1}' \\ m_2' = m_o - (m_1 + m_2) = \rho A_o v_{x2}' \\ \dots \\ m_{i-1}' = m_o - \sum_{i=1}^{i-1} m_i = \rho A_o v_{xi-1}' = m_i \end{cases} \quad (1.2.13)$$

$$\begin{cases} 1/2\rho v_{x1}^2 + 1/2\xi\rho v_{x1}^2 + 1/2\rho v_{x1}'^2 = 1/2\rho v_{x2}^2 + 1/2\xi\rho v_{x2}^2 + 1/2\rho v_{x2}'^2 \\ 1/2\rho v_{x2}^2 + 1/2\xi\rho v_{x2}^2 + 1/2\rho v_{x2}'^2 = 1/2\rho v_{x3}^2 + 1/2\xi\rho v_{x3}^2 + 1/2\rho v_{x3}'^2 \\ \dots \\ 1/2\rho v_{xi-1}^2 + 1/2\xi\rho v_{xi-1}^2 + 1/2\rho v_{xi-1}'^2 = 1/2\rho v_{xi}^2 + 1/2\xi\rho v_{xi}^2 \end{cases} \quad (1.2.14)$$

ここで、

$A_o$ : The cross-section areas of air supply shaft [m<sup>2</sup>],  $m_o$ : The pressurization air supply mass flow rate [kg/s],  
 $m_i$ : For the  $i$ th outlet, x-component of the air mass flow rate [kg/s],  $m_i'$ : For the  $i$ th outlet, Y-component of the air mass flow rate in the shaft [kg/s],  $v_{xi}$ : For the  $i$ th outlet, x-component of velocity [m/s],  $v_{xi}'$ : For the  $i$ th outlet, Y-component of velocity in the shaft [m/s],  $\rho$ : Density of air [kg/m<sup>3</sup>],  $\xi$ : Local resistance coefficient  
 (0.17) [-]

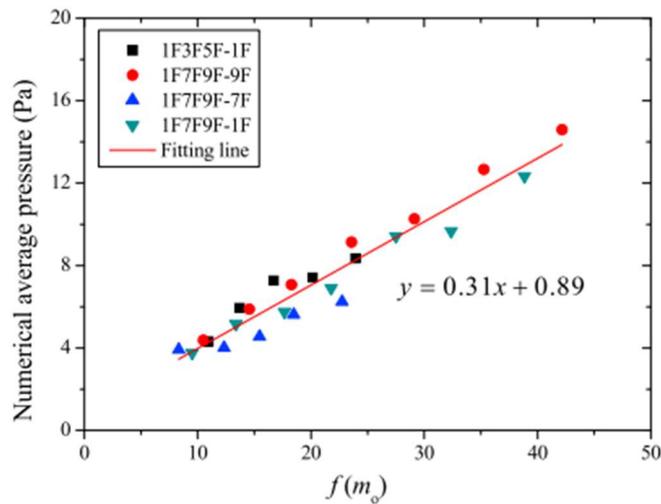


図 1-2-16 火災階床レベルにおける階段室平均圧力と給気量の関係

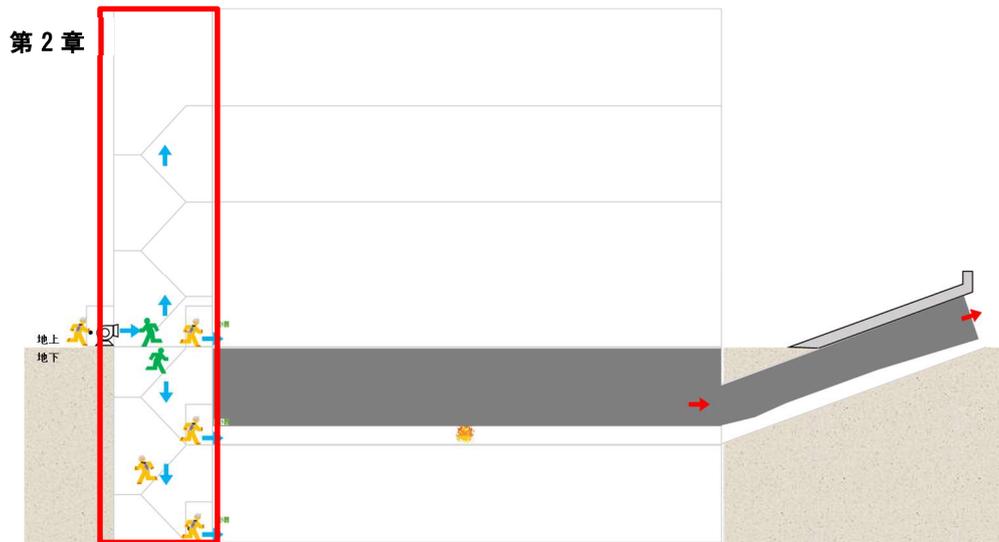
### 1.3 研究の目的

建築物の地下空間である地下階は地盤面下に設けられるため、外気に面する開口部が設けづらく、また、空間の気密性が高いなどの特徴がある。一方で、都心部では積極的な地下空間の利用が検討され、地下街や駐車場のようない利用を想定した地下階が考えられる。万が一、そのような地下階で火災が発生すれば、地下階で発生した煙の伝播経路は限定的になる可能性等が高く、人命安全を考える上で適切な煙制御システムを構築するための知見の収集が重要である。本研究では、図 1-3-1 に示す通り、建築物の地下階の火災時における建物利用者の避難および消防隊の消防活動上の安全性を確保するための煙制御システムを対象とし、実験および数値解析による検討を行う。

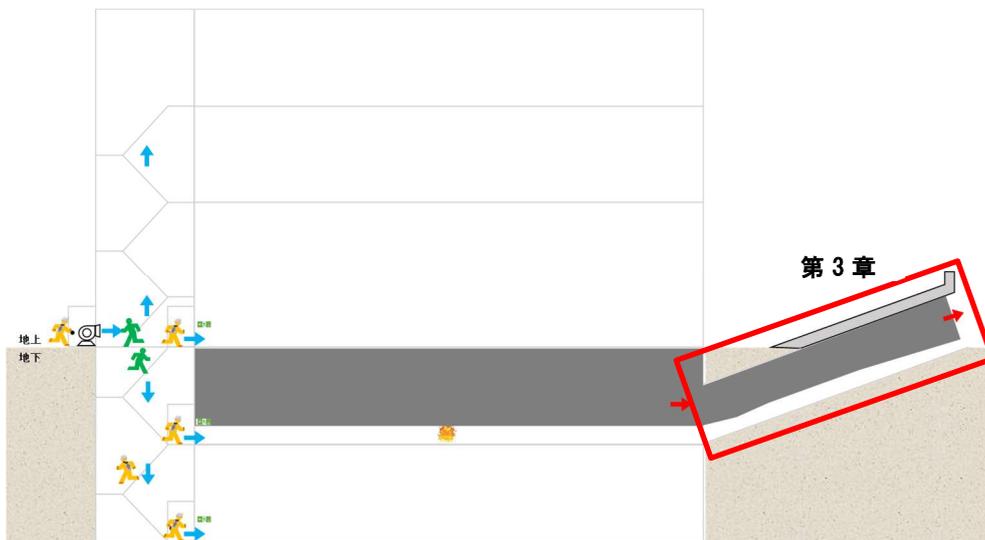
第 2 章では、地下階の火災時に建物利用者の避難や消防隊の消防活動に利用する階段室への煙侵入を防止するための対策として、階段加圧煙制御システムを対象とし検討を行う。煙制御システムとして自然排煙方式や機械排煙方式などに比べ、階段室を直接的に加圧給気する系統的な研究の知見が不足しているため、階段内の圧力制御特性に関する知見などを収集し、階段室を給気した場合の給気量と対象とする扉開口部の遮煙性能に関する相関性等を明らかにすることを目的とする。

第 3 章では、地下階で火災が発生した場合、火災階における避難時に有効な煙制御対策として、地上階に通じる傾斜空間を介した自然排煙時の熱気流性状に着目した検討を行う。これまで、傾斜空間の一端を火災室に通じた開口とし、他方の開口は外気へ通じることを想定した傾斜空間における熱気流性状に関する知見が十分に示されていないことから、模型実験を実施し、そのような傾斜空間内の熱気流性状を明らかにすることを目的とする。

第 4 章では、第 2 章、第 3 章から得られた知見に基づき、地下階から外部に通じる傾斜空間を介した煙伝播を考慮した煙制御システムを対象とし検討を行う。既往研究では、トンネル状の空間を想定した傾斜空間における煙性状について数値解析モデルを使用した検討は実施されているが、地下階から外部に通じる傾斜空間を介した煙伝播について、階段加圧給気を行うことを想定した条件について、数値解析モデルとして FDS を用いたケーススタディを行う。そして、階段室を加圧給気した場合の火災室および傾斜空間の熱気流性状を明らかにすることを目的とする。



(a) 階段加圧方式による煙制御



(b) 傾斜空間を用いた排煙



(c) 加圧給気による地下空間における熱気流性状

図 1-3-1 研究の対象

## 1.4 論文の構成

本論文の構成は、図 1-4-1 に示した通り、5 章構成である。以下に各章の概要を示す。

### 第 1 章 序論

第 1 章では、研究の背景、関連する既往研究、研究の目的および論文の構成について述べている。

### 第 2 章 階段加圧煙制御に関する実験

第 2 章では、階段加圧方式を用いた煙制御に関し、扉の開閉条件に対する階段室内の圧力変動、圧力調整ダンパーを用いた階段内の圧力制御手法、動圧制御装置による動圧制御に着目し、建築物の実規模階段を用いた実験を実施している。さらに火源を設置した実験結果に基づき遮煙性能について階段加圧時の給気量に関する理論モデルを用い妥当性について検討し、理論モデルを用い地下階へ通じる階段を加圧給気する場合の課題を述べている。

### 第 3 章 傾斜空間における熱気流性状に関する実験

第 3 章では、一方開口は火災室に接続し、他方の開口は外気に面する傾斜空間を想定したモデルを用いて実験を実施している。実験結果に基づき、傾斜空間の幾何学的形状が熱気流性状に及ぼす影響の把握や傾斜空間内において流れ方向に対して 1 次元で拡散する熱気流の温度性状に着目し、トンネルを対象とした傾斜空間と比較検討を行い、相違点を明らかにした上で仮想熱源距離 $r_0$ を用い線火源の概念に基づくモデルを提案している。

### 第 4 章 数値解析モデルを用いた熱気流性状に関するケーススタディ

第 4 章では、国内外で汎用的に使用されている数値解析モデルである FDS を用い本研究で得られた実験値の再現性を確認し、地下階における階段室を加圧給気時に傾斜空間が空気逃し口となる状況を想定し、加圧給気による火災室および傾斜空間における熱気流性状についてケーススタディを実施し、傾斜空間の空気逃し口としての性能、および加圧給気時の火災室および傾斜空間における熱気流性状について述べている。

### 第 5 章 総括

第 5 章では、本研究の総括ならびに今後の課題および展望について述べている。

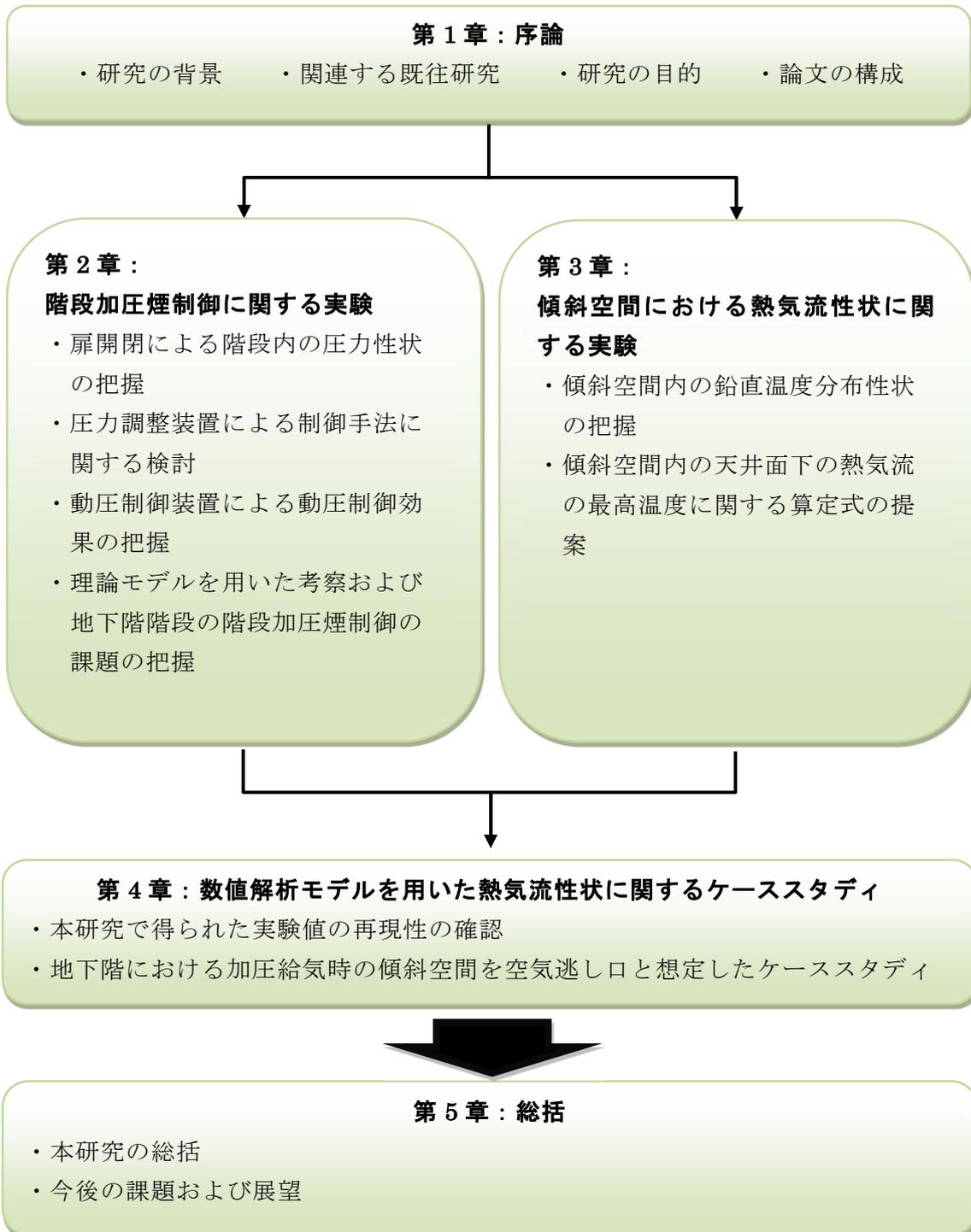


図 1-4-1 本論文の構成

## 参考文献

- [1-1] 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：大深度地下利用に関する技術開発ビジョン，2003.1
- [1-2] 長谷見 雄二：都心再開発と地下空間の防災的課題，学術の動向，pp. 58-62，2005.6
- [1-3] 韓国：国家火災安全基準（NFSC）501A，第5条
- [1-4] 米国：National Fire Protection Association 92A, B
- [1-5] 英国：BS EN12101-Part 6
- [1-6] 一般社団法人日本建築学会編集：建築物の煙制御計画指針，2014
- [1-7] 大宮 喜文，平山 貴至，山口 純一，申 易澈：庇面下の拡散を考慮した開口噴流プルーム流量算定式，日本建築学会環境系論文集，第81巻，第721号，pp. 263-271，2016.3
- [1-8] K. McGrattan, B. Klein, S. Hostikka and J. Floyd: Fire Dynamics Simulator (Version 5) User's Guide, NIST SP 1019-5, NIST, USA, 2007.10
- [1-9] 中村 和人，山名 俊男，矢代 嘉郎，広田 正之：加圧防煙システムの実大実験（加圧防煙システムの計画と課題 その3），日本建築学会大会学術講演梗概集（九州），pp. 1033-1034，1989.10
- [1-10] 笠原 勲，原 哲夫，高橋 一郎，林 広明：加圧防煙システムにおける圧力制御特性，日本建築学会計画系論文集，第514号，pp. 1-6，1998.12
- [1-11] 掛川 秀史，大田 道広，奥田 昌治，高橋 満博，広田 正之：高層集合住宅における加圧防煙システムの性能確認実験，日本建築学会技術報告集，第15号，pp. 137-142，2002.6
- [1-12] 森山 修治：階段加圧防煙システムの性能検証実例－中層建物における実例－，日本建築学会大会学術講演梗概集（九州），pp. 171-174，1998.9
- [1-13] 森山 修治，佐藤 孝輔：階段加圧防煙システムの性能検証実例（その2. 排煙を行わない場合の防煙性能－高層建物における実例），日本建築学会大会学術講演梗概集（東北），pp. 215-216，2000.9
- [1-14] 森山 修治，佐々木 教道，梶井 浩史：階段加圧防煙システムの性能検証実例（その3. 高層建物における実例2），日本建築学会大会学術講演梗概集（北陸），pp. 121-122，2002.8
- [1-15] 長岡 勉，上原 茂男，粕谷 敦：中層事務所ビルに適合した階段加圧防煙システムの事例，日本建築学会大会学術講演梗概集（東海），pp. 83-86，2003.9
- [1-16] 松下 敬幸，寺井 俊夫：階段室加圧時の気流性状の実測，日本建築学会大会学術講演梗概集（東海），pp. 737-738，1985.10
- [1-17] 松山 賢，岸上 昌史，山口 純一，沖永 誠治，松下 敬幸：加圧防排煙における動圧方式に対応した常温時の性能確認手法に関する実験的研究 その1 静圧測定装置の検証，日本火災学会研究発表会概要集，pp. 210-211，2015.5
- [1-18] M. Kishiue, J. Yamaguchi, S. Okinaga, K. Matsuyama and T. Matsushita: Experimental study on influence of air supply system difference on smoke shielding

performance in air pressure smoke control, The Proceedings of 10th Asia-Oceania Symposium on Fire Science and Technology, pp. 801-810, 2016.10

[1-19] 真船 奨, 佐藤 大輔, 大宮 喜文: 高架下の駅コンコースにおける火災時煙流動性状に関する模型実験 (その 2 実験概要・煙流動性状結果), 日本建築学会大会学術講演梗概集 (関東), pp. 299-300, 2015.9

[1-20] 佐藤 大輔, 真船 奨, 大宮 喜文: 高架下の駅コンコースにおける火災時煙流動性状に関する模型実験 (その 3 実験結果と考察), 日本建築学会大会学術講演梗概集 (関東), pp. 301-302, 2015.9

[1-21] 渡部 勇市, 松島 早苗: 深層地下駅構内における階段内の煙流動特性—水平天井と傾斜天井による煙流動の違い—, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (関東), pp. 253-254, 2006.9

[1-22] 藤村 欽哉, 明野 徳夫, 三宅 功: 傾斜路における煙流動に関する実験的研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (関東), pp.1281-1282, 1993.9

[1-23] 山田 慎二郎, 松下 敬幸: 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. 23-29, 1999.10

[1-24] 新田 勝通: 数値計算による傾斜路煙流の解析, 日本建築学会計画系論文集, 第 467 号, pp. 39-46, 1995.1

[1-25] Y. Oka, N. Kakae, O. Imazeki and K. Inagaki: Temperature property of ceiling jet in an inclined tunnel, The 9th Asia-Oceania Symposium on Fire Science and Technology, Procedia Engineering 62, pp. 234-241, 2013.8

[1-26] Y. Huo, Y. Gao and W.K. Chow: A study on ceiling jet characteristics in an inclined tunnel, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 50, pp. 32-46, 2015.8

[1-27] Z. Wang, L. Ding, H. Wan, J. Ji, Z. Gao and L. Yu: Numerical investigation on the effect of tunnel width and slope on ceiling gas temperature in inclined tunnels, International Journal of Thermal Sciences Vol. 152, pp. 1-10, 2020.6

[1-28] L.H. Hu, L.F. Chen, L. Wu, Y.F. Li, J.Y. Zhang and N. Meng: An experimental investigation and correlation on buoyant gas temperature below ceiling in a slopping tunnel fire, Applied Thermal Engineering, Vol. 51, Issues. 1-2, pp. 246-254, 2013.3

[1-29] Y. Oka and O. Imazeki: Temperature distribution within a ceiling jet propagating in an inclined flat-ceilinged tunnel with natural ventilation, Fire safety journal, Vol. 71, pp. 20-33, 2015.1

[1-30] 蛇石 貴宏, 森山 修治, 長谷見 雄二: 地下駅火災時における斜路空間の煙流動性状とその制御に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (東北), pp. 77-80, 2009.8

[1-31] W.C. Park: Simulation of Smoke Control in a Subway Station Fire, The 6th Asia-Oceania Symposium on Fire Science and Technology, 2004.3

[1-32] Mahmoud A. Ahmed, Mahmoud A. Fouad and Essam E. Khalil: Smoke Spread in Underground Metro Station, International Journal of Thermal and Environmental Engineering, Vol. 12, No. 2, pp. 95-103, 2016

- [1-33] H. Yang and S.C. Li: Numerical investigation on the effect of mobile smoke ventilator on fire-induced smoke extraction for underground platform in a high-speed railway station, The 8th International conference on Fire science and Fire Protection Engineering (on the Development of Performance-based Fire Code), Procedia Engineering 211, pp. 871-880, 2018
- [1-34] J. Li, Y. Tian, Y. Li, Y. Zhao and Y. Huang: Numerical and experimental study on the effects of the slope on the critical velocity in titled tunnels, The 10th International Symposium on Heating, Ventilation and Air Conditioning (ISHVAC), Procedia Engineering 205, pp. 1864-1870, 2017
- [1-35] H. Wan, Z. Gao, J. Han, J. Ji, M. Ye and Y. Zhang: A numerical study on smoke back-layering length and inlet air velocity of fires in an inclined tunnel under natural ventilation with a vertical shaft, International Journal of Thermal Sciences, Vol. 138, pp. 293-303, 2019
- [1-36] P. Wang, Q.Y. Ban, J. Liu and C.S. Zhao: Impacts of staircase windows on pressurized ventilation system, Procedia Engineering 52, pp. 363-370, 2013
- [1-37] M. Li, Z. Gao, J. Ji and K. Li: Modeling of positive pressure ventilation to prevent smoke spreading in sprinklered high-rise buildings, Fire safety journal, Vol. 95, pp. 87-100, 2018

## 第2章

# 階段加圧煙制御に関する実験



## 2.1 はじめに

建築物で火災が発生した場合、建物利用者は避難階まで階段などの避難経路を使用する。また、消防隊は、出火階まで非常用エレベータや階段などを利用し消防活動を行う。すなわち、建築物の上下方向の移動に使用する階段は、火災時に可能な限り煙や火炎からの影響を受けないように計画、設計し、維持管理することが求められる。建物利用者の避難や消防隊の消防活動では、階段室から付室あるいは廊下に通じる扉が、人の通過時に開閉される。その際、煙や火炎が階段室に侵入する可能性があり、特に建築物の地下空間である地下階で火災が発生した場合、階段室などの堅穴へ煙が流入する危険性がある。そこで、階段の扉を介した煙の侵入を防止するため、階段室に空気を供給し加圧する、いわゆる階段加圧煙制御システムが計画されることがある。建築物で実際に階段加圧煙制御システムを導入した例では、加圧空間は加圧により空間内の圧力が上昇し、他空間との間の圧力差である静圧による差圧分布により支配される状況を想定し設計されることが多い。一方、実際には、加圧給気設備から供給される空気により階段室内に生じる気流による動圧の影響がある。階段室内に給気を行う階から他階へ気流が生じ移動する場合、いわゆる高さ方向の流量係数を考慮することも必要になる。加圧給気による空間内の圧力から隣接空間との圧力差を静圧に基づき検討するには、気流の影響を緩和させる方法を検討する必要性が指摘されている<sup>[2-1]</sup>。また、給気量を算定する際、扉の開閉状況が計算条件として重要になる。既往研究によれば、階段室が居室と接している条件で、階段室の区画に対し階段加圧を行う際、階段扉のみの開閉状況が圧力変動に及ぼす影響について報告されているが、居室の階段室との間にある扉以外の開口部について開閉状況などの影響を考慮する必要がある<sup>[2-2]</sup>。また、建築物の地下階で火災が発生した際の有力な煙制御システムとして期待される階段加圧煙制御システムを用いる場合、地下階は地上階の空間に比べ、外気に通じる開口部は設けにくく、地上階の外壁の隙間量と比較して、周壁の隙間量は少ないため、空気逃し口の設置等の検討すべき課題が散在している状況である。

上述した状況において、階段加圧煙制御システムを用いる際、階段への給気量は安全側を考慮し、火災フェーズとして全館避難および消防活動まで想定して算定することが多い。全館避難中には非火災階における階避難も考慮され、居室と廊下間の扉よりも付室や階段室の扉の開閉頻度が高くなる可能性があり、それに従う扉の開閉条件により階段加圧煙制御システムの有効性を確認する必要がある。また、最終避難経路と共に加圧空間となる階段室は過大な圧力上昇による階段扉の開放に支障を生じない設計とする必要がある。その対応策として、圧力調整ダンパーや圧力逃がし口等の設置が有効ではあるが、圧力調整ダンパーについて、例えば扉の開放力を 100N 以下にするための設置方法は明示されておらず、地下空間等における空気逃し口の設置方法に関する考え方も明確になっていない状況である<sup>[2-3]</sup>。

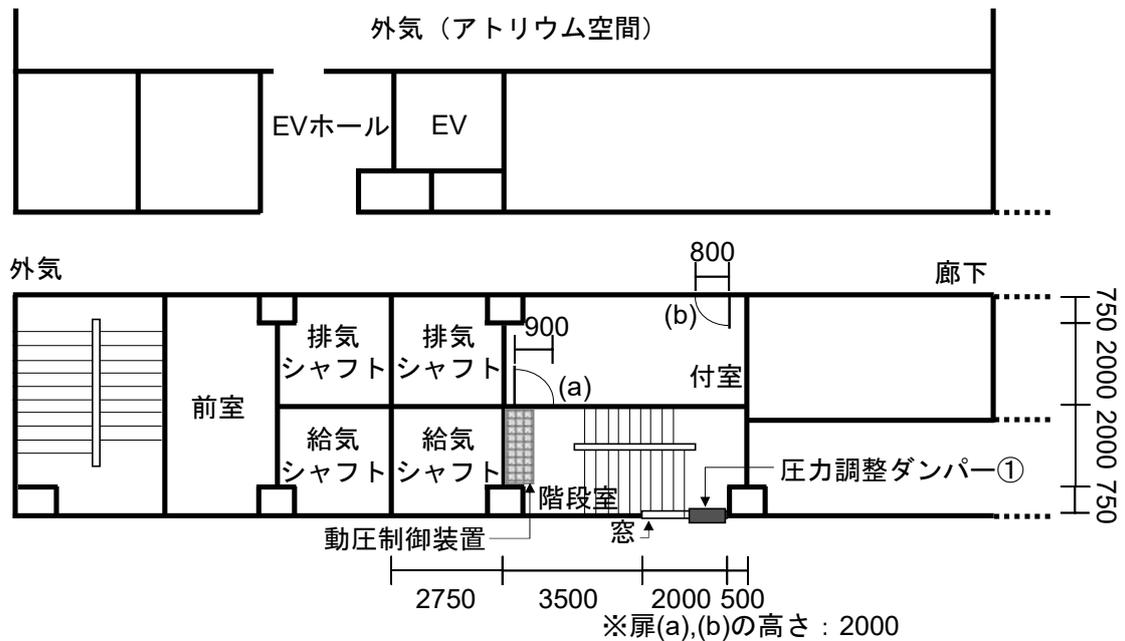
第 2 章では、自然排煙方式や機械方式に比べ知見が不足している階段加圧煙制御システムを対象とし、扉の開閉条件に対する階段室内の圧力変動、圧力調整ダンパーを用いた階段内の圧力制御手法、動圧制御装置による動圧制御に着目した実験を実施する。さらに火源を設置した実験結果に基づいた遮煙性能について階段加圧時の給気量に関

する理論モデルを用いた再現性の確認を行い、実験条件以外の条件への適用の可能性を検討し、地下階に通じる階段室に加圧給気する場合の階段加圧煙制御システムの課題を明らかにする。

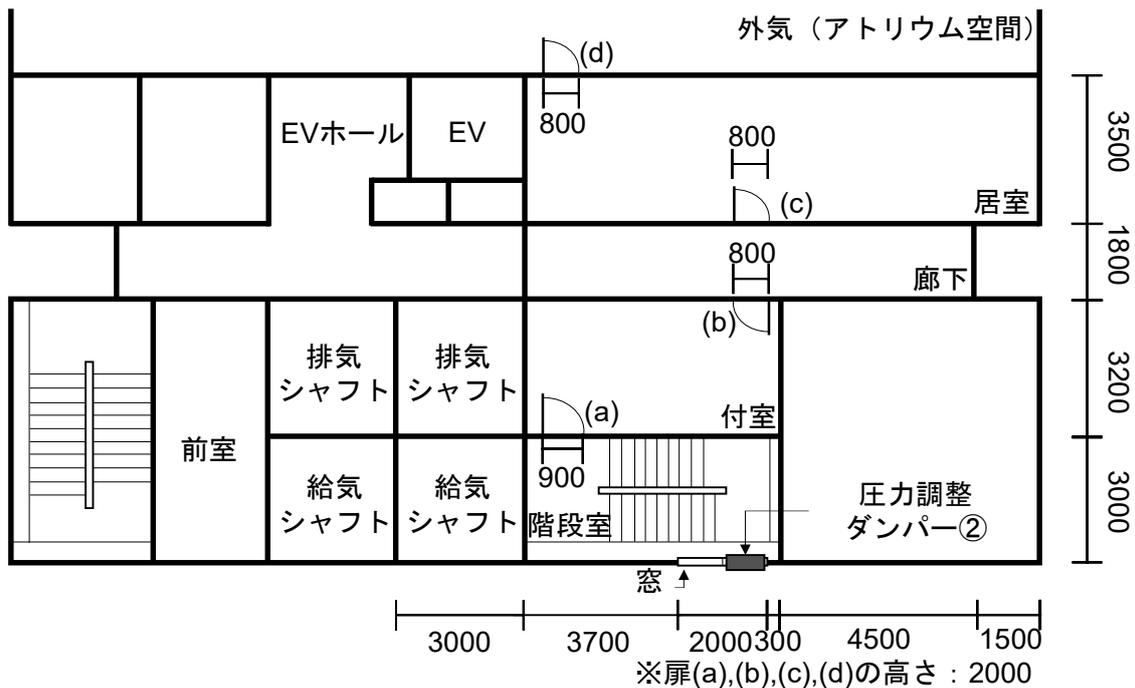
## 2.2 実験概要

### 2.2.1 実験施設の概要

実験施設は国立研究開発法人建築研究所の実大火災実験棟を使用した。実大火災実験棟の階数は7階建てである。図2-2-1(a)(i)に示したとおり1階では、付室は扉(b)を開放することにより、廊下を介し外気およびアトリウム空間に通じている。また、図2-2-1(a)(ii)に示したとおり、3階、5階、6階、7階では、居室の扉(d)がアトリウム空間に通じている。なお、アトリウム空間は、気積が十分な大きさであり、空間内に生じる気流の影響が無視できる程度の外気との隙間もあることから、外気同等であると仮定する。また、図2-2-1(b)に示したとおり、実大火災実験棟には、階段室を加圧するシステムを完備した階段があり、本実験は、その階段を使用し実施した。階段加圧用の送風機は1階の屋外に設置されており、給気シャフトを通じ給気シャフトと階段室間にある給気口より階段室に給気し、加圧するシステムとなっている。

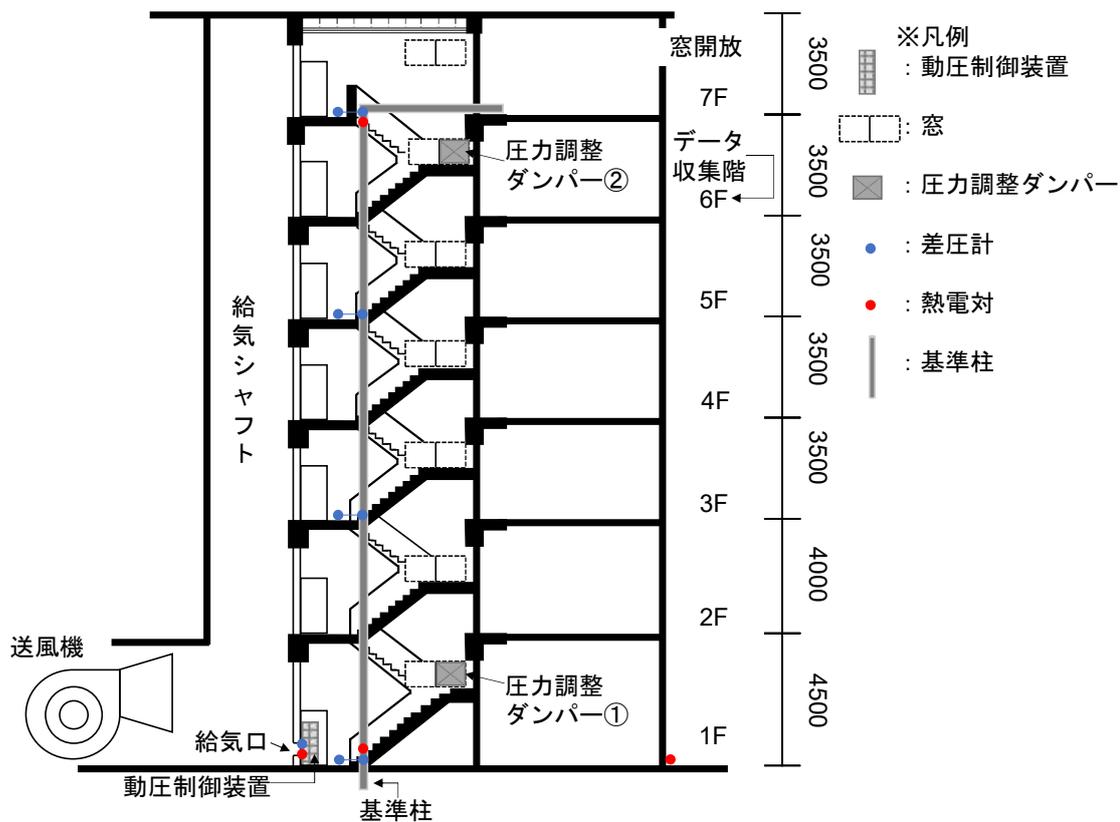


(i) 1階



(ii) 3階、5階、6階、7階

(a) 平面図



(b) 階段部の断面図

図 2-2-1 実験施設の概要 [単位：mm]

## 2.2.2 測定項目および測定方法

本実験では、給気口から階段室に流入する給気量、階段室の高さ方向の外気との差圧と温度、火源を設置した階の空間および扉の温度を測定した。

### (1) 給気量

給気量は、給気口に設置したニューエアロアイ(ウエットマスター社製)を用い測定した動圧および熱電対の温度から以下の式(2.2.1)により算出した。

$$Q = \alpha \times A \times V \times \rho \quad (2.2.1)$$

$$V = \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \quad (2.2.2)$$

ここで、

$Q$ : 給気量 [kg/s]、 $\alpha$ : 流量係数(0.8)、 $A$ : 給気口の有効開口面積 [m<sup>2</sup>]、 $V$ : 風速 [m/s]、 $\rho$ : 密度 [kg/m<sup>3</sup>]、 $\Delta P$ : 差圧 [Pa]

### (2) 階段室と外気の差圧

階段室の高さ方向の外気との差圧は、図 2-2-2 に示した外気を取り込んだ基準柱との圧力差とした。測定位置は 1 階、3 階、5 階、7 階の床面レベルの高さとした。ここで用いる基準柱は、松下等の研究<sup>[2-4]</sup>で提案された測定方法を参考とし、差圧測定で用いる基準圧に対し、外気風の影響が生じないように測定した。また、基準柱は階段室内に設置し、管の一端を外気に晒し基準柱内を外気と同等の圧力に設定した。さらに、基準柱は温度の影響を受けないよう保温材で養生した。なお、加圧給気する階段室と基準柱の差圧は、図 2-2-3 に示す差圧測定装置(差圧計、1 階、5 階、7 階: レンジ 20mmH<sub>2</sub>O、3 階: レンジ 15mmH<sub>2</sub>O)を用い計測し、階段室内の圧力を測定するため、測定部は図 2-2-4 に示した静圧測定装置<sup>[2-5]</sup>を使用し、他方は基準柱内に差し込んだ。



(a) 基準柱 (ホース)



(b) 保温材

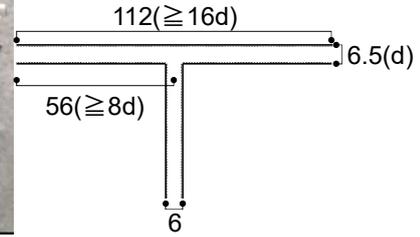
図 2-2-2 基準柱の構成



図 2-2-3 差圧計



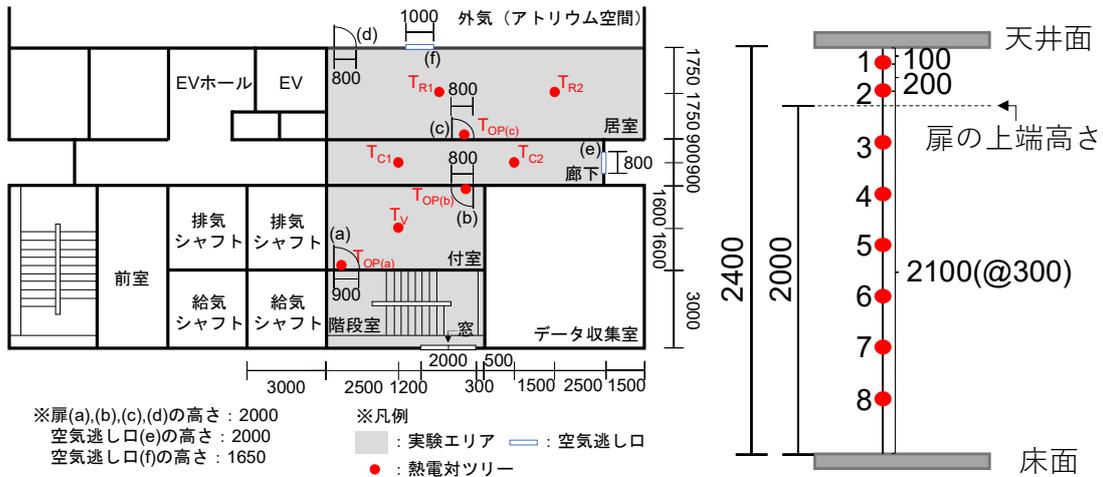
図 2-2-4 静圧測定装置 [単位 : mm]



### (3) 温度

基準柱内における温度変化を測定するため、図 2-2-1(b)に示したとおり、外気温度、1階の床面レベルの高さと7階の床面レベルの高さの基準柱内の温度を測定した。熱電対は K 型(φ0.2mm)を用いた。

実験の中で火源を配置する実験条件では、図 2-2-5(a)に示した火災階(6階)に熱電対ツリーを設置し、空間および扉の高さ方向の温度を測定した。熱電対ツリーは、図 2-2-5(b)に示したとおり、K 型(φ0.6mm)を用い天井面から 100mm および 300mm、それ以下の高さでは 300mm 間隔で 6 点とした。



(a) 熱電対ツリーの設置位置(6階)

(b) 熱電対ツリーの測定点高さ

図 2-2-5 熱電対ツリーの設置位置およびツリー構成の概要図 [単位 : mm]

### 2.2.3 実験条件

本実験では、まず、階段加圧制御システムを用いた場合の基本的な差圧の傾向を定量的に把握するため、(1)扉の開閉条件、(2)圧力調整ダンパーの設置条件、(3)動圧制御装置の設置条件を実験条件とし設定した。さらに、階段加圧煙制御システムに関する理論モデルとの比較を行うため、(4)火源の設置条件を設定した。なお、給気口は、1階の踊り場に面する壁面に配置した。

#### (1) 扉の開閉条件

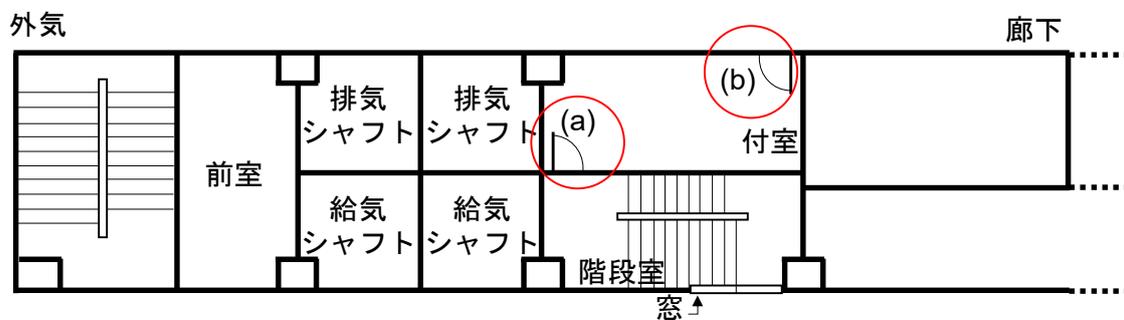
扉の開閉条件が階段室内の圧力分布に及ぼす影響に着目し、表 2-2-1 に示した実験条件を設定した。扉の開閉条件として 1 階、3 階、5 階、7 階の階段室扉(a)、付室扉(b)、廊下扉(c)および居室扉(d)を開閉し、計 5 条件を設定した。給気条件は単独給気条件(1階のみ)とした。図 2-2-6 に実験時の 1 階、3 階、5 階、7 階における扉の開閉について示す。なお、2 階、4 階、6 階の扉は常時閉鎖とした。

表 2-2-1 扉の開閉による階段室内の圧力性状に関する実験条件

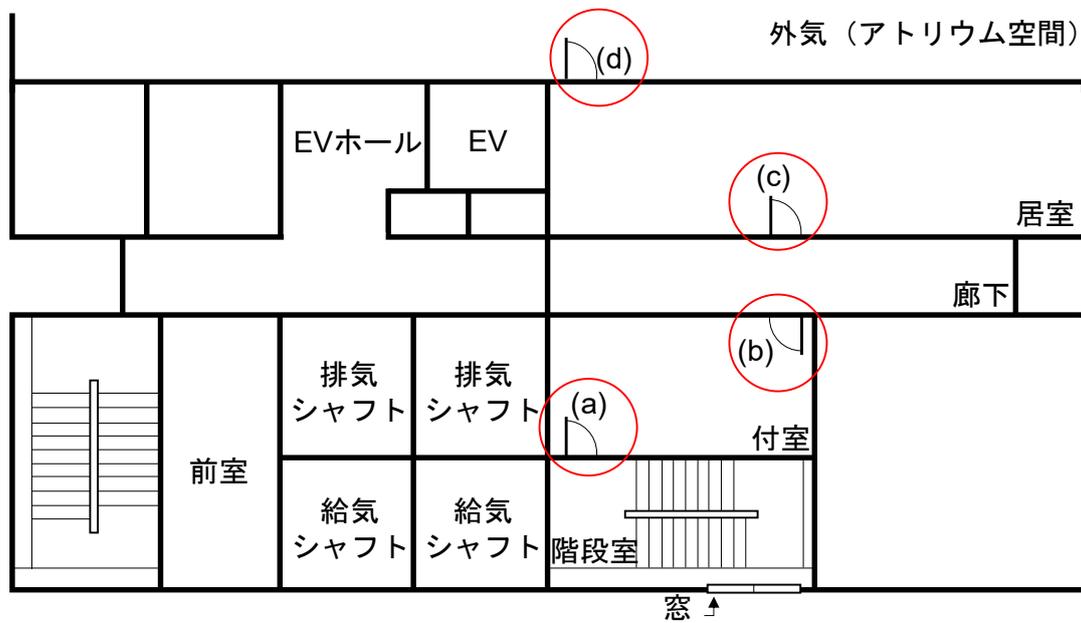
Case	1 階		3 階				5 階				7 階				動圧制御装置の有無
	階段室扉(a)	付室扉(b)	階段室扉(a)	付室扉(b)	廊下扉(c)	居室扉(d)	階段室扉(a)	付室扉(b)	廊下扉(c)	居室扉(d)	階段室扉(a)	付室扉(b)	廊下扉(c)	居室扉(d)	
1-1	○	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	無
1-2	×	×	○	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	
1-3	×	×	×	×	×	×	○	○	×	×	×	×	×	×	
1-4	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	○	○	×	×	
1-5	×	×	×	×	×	×	○	○	○	○	×	×	×	×	

※○：開放、×：閉鎖

※2 階、4 階、6 階の扉は全閉



(a) 1階



(b) 3階、5階、7階

図 2-2-6 条件階における開閉する扉の概要図

(2) 圧力調整ダンパーの設置条件

表 2-2-2 に階段室内の圧力制御に用いられる圧力調整ダンパーの設置に着目した実験条件を示す。圧力調整ダンパーは2か所(階段室内の1階と2階の間および6階と7階の間)に設置し(図 2-2-1(b)を参照)、1か所のみを使用する場合と2か所を使用する場合の条件を設定した。また、圧力調整ダンパー設置時の階段室内の圧力分布に扉の開閉条件が及ぼす影響を確認するため、扉開閉の対象階を3階、5階とした。なお、3階と5階の扉を開閉する Case2-3、Case2-6 の実験条件では、予め廊下扉(c)、居室扉(d)を開放し、階段室扉(a)と付室扉(b)を閉鎖した状態で階段加圧を行い、実験開始後、圧力調整ダンパーの作動および階段室内の状況を観察しながら、扉の開放のタイミングを決定し、階段室扉(a)と付室扉(b)を開放することで外気までの通気経路の扉が全開となるようにした。図 2-2-7 に実験時の3階および5階における扉の開閉条件について示す。なお、1階、2階、4階、6階、7階の扉は常時閉鎖とした。

表 2-2-2 圧力調整ダンパーによる階段内の圧力制御に関する実験条件

Case	3階				5階				扉開閉時間 [s]	圧力調整ダンパー位置	動圧制御装置の有無
	階段室扉(a)	付室扉(b)	廊下扉(c)	居室扉(d)	階段室扉(a)	付室扉(b)	廊下扉(c)	居室扉(d)			
2-1	×	×	×	×	×	×	×	×	-	ダンパー① [1階と2階の間]	無
2-2	○	○	○	○	×	×	×	×	78-93		
2-3	○	○	○	○	○	○	○	○	171-201		
2-4	×	×	×	×	×	×	×	×	-	ダンパー① [1階と2階の間] + ダンパー② [6階と7階の間]	
2-5	○	○	○	○	×	×	×	×	72-93		
2-6	○	○	○	○	○	○	○	○	141-171		

※○：開放、×：閉鎖

※1階、2階、4階、6階、7階の扉は全閉

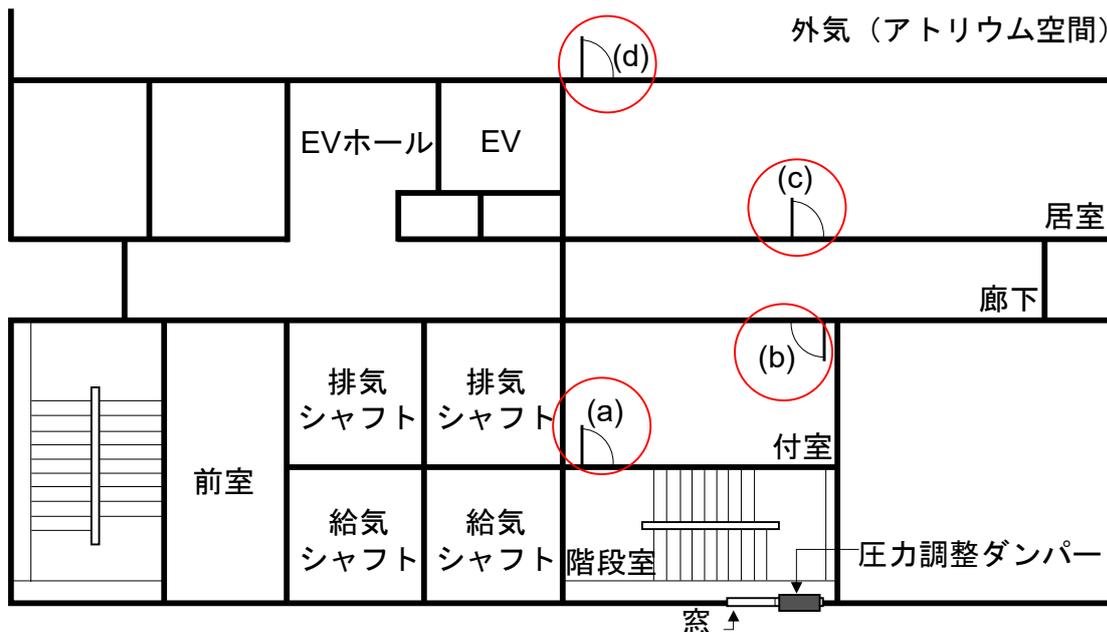
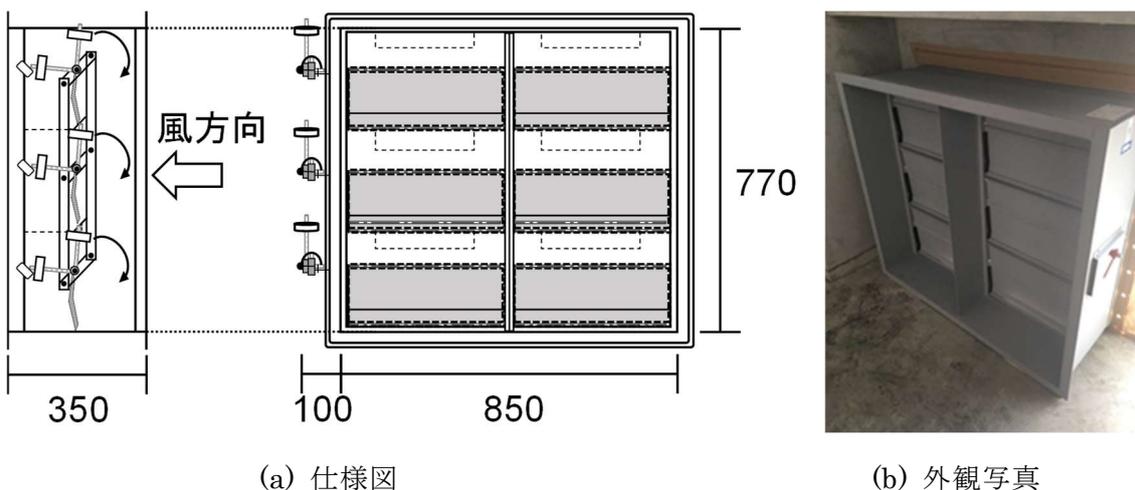


図 2-2-7 条件階における開閉する扉の概要図

本実験で使用した圧力調整装置は、図 2-2-8 に示す幅 850mm×高さ 770mm×奥行 350mm の圧力調整ダンパー(ニッケイ社製(OD-227649))を用いた。設置場所は階段室内の 1 階と 2 階の間および 6 階と 7 階の間において階段室内の外気に面する窓の片面に設置した。この圧力調整ダンパーは、階段加圧制御システムによる階段室内の過大な圧力上昇を抑制し、避難扉の開放障害を防止するように設計されており、本実験条件では、階段室と外気との間の差圧が、40Pa から圧力調整が徐々に行われるような設定となっている。



(a) 仕様図

(b) 外観写真

図 2-2-8 圧力調整ダンパー [単位 : mm]

(3) 動圧制御装置の設置条件

表 2-2-3 に階段室内の動圧の制御に用いられる動圧制御装置の有無に着目した実験条件を示す。動圧制御装置は 1 階の給気口に設置し、動圧制御装置の有無を条件とした。また、扉開閉による影響について確認するため、1 階および 5 階の扉の開閉を条件とし、計 4 条件を実施した。図 2-2-9 に実験時の 1 階および 5 階における扉の開閉条件について示す。なお、2 階、3 階、4 階、6 階、7 階の扉は常時閉鎖とした。

表 2-2-3 動圧制御装置による動圧制御に関する実験条件

Case	1 階		5 階				動圧制御装置の有無
	階段室扉(a)	付室扉(b)	階段室扉(a)	付室扉(b)	廊下扉(c)	居室扉(d)	
3-1	○	○	×	×	×	×	無
3-2	×	×	○	○	○	○	
3-3	○	○	×	×	×	×	有
3-4	×	×	○	○	○	○	

※○：開放、×：閉鎖

※2 階、3 階、4 階、6 階、7 階の階の扉は全閉

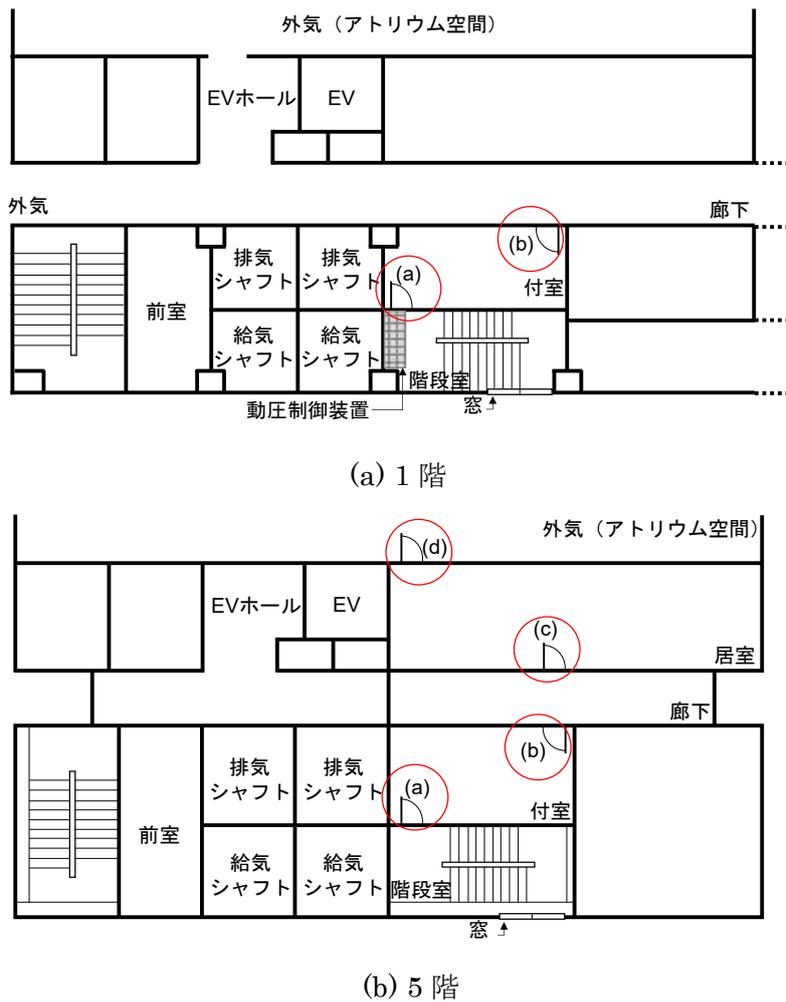


図 2-2-9 条件階における開閉する扉の概要図

階段加圧煙制御システムによる給気時の階段室内の空間では、一般に静圧が支配的である状況を想定するが、実際には給気による動圧を完全に解消することは難しい<sup>[2-6]</sup>。給気時の動圧は主に給気口付近で生じる空気の流れに起因する。本実験では、既往研究<sup>[2-1]</sup>を参考にし、図 2-2-10 に示すとおり、給気口に厚さ 1mm の多孔板(開孔率:53.6%、穴径:10mm、ピッチ:13mm)を組み合わせて製作した動圧制御装置(幅 1800mm×高さ 1600mm×奥行 600mm [実質開口面積 3m<sup>2</sup>])を使用した。

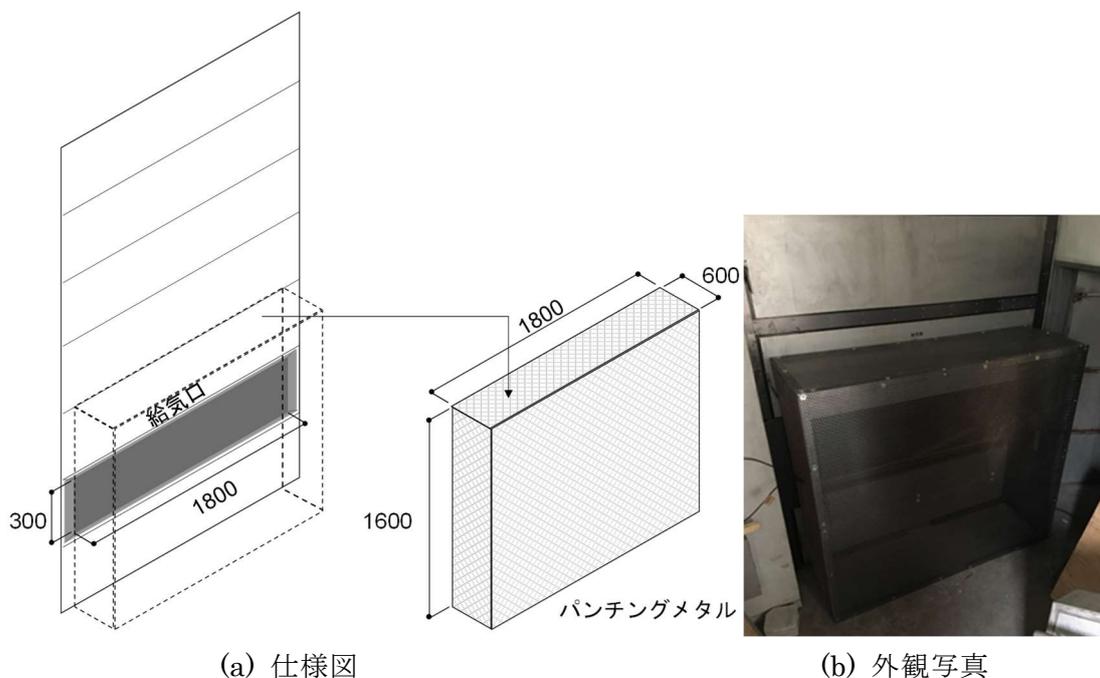


図 2-2-10 動圧制御装置の概要図 [単位 : mm]

(4) 火源の設置条件

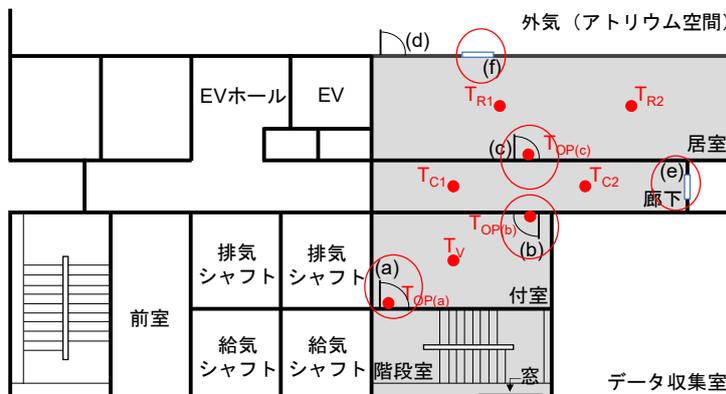
建築物内で火災が発生した状況を想定し、実験施設内の空間に火源を配置し、火源燃焼時の階段加圧煙制御システムによる遮煙性能に関する確認を行った。遮煙性能について火源を設置した条件の実験結果を用い、後述する階段加圧煙制御システムに関する理論モデルとの比較を行いながら、加圧給気量に関する定量的な考察を行う。火源の設置条件の設定では、火災室と空気逃がし口の位置を変化させ、開口部における煙の流出入の状況を確認した。実験条件は、6階を火災階と想定し、廊下および居室に火源を配置した。6階の各空間の温度を計測するため、熱電対ツリーを図2-2-5に示した位置に設置し、高さ方向の温度分布を測定した。燃料は、エタノール[18L]を用い、1000mm角の寸法の燃料パンに注ぎ着火した。階段室への給気量は、目視で煙の流動状況を観察しながら調整した。表2-2-4に実験条件を示す。図2-2-11に扉および空気逃し口の位置について示す。

表 2-2-4 遮煙性能の確認に関する実験条件

Case	点火位置	6階						給気量 $Q$ [kg/s]	給気量変更時間 [s]
		扉				空気逃し口			
		階段室扉(a)	付室扉(b)	廊下扉(c)	居室扉(d)	廊下(e)	居室(f)		
4-1	居室							6.29	-
4-2		○	○	○	×	×	○	3.77	220
4-3								1.75	432
4-4	廊下	○	○	×	×	○	×	3.75	-

※○：開放、×：閉鎖

※1階、2階、3階、4階、5階、7階の階の扉は全閉



※凡例

- : 実験エリア
- : 空気逃し口
- : 熱電対ツリー

図 2-2-11 条件階における開閉する扉の概要図

## 2.3 階段加圧時の給気量に関する理論モデル

### (1) モデル概要

岸上により理論的に構築された階段加圧時の遮煙を達成するために必要な最小の給気量を算定するモデル(理論モデルとする)<sup>[2-7],[2-8]</sup>に基づき、実験値の検証を行う。理論モデルは、階段加圧時の必要最小給気量の算出を目的とし提案されており、煙突効果と圧力損失の双方を解くことができ、かつ省力化されたモデルであり、火災室の温度を入力することにより、階段室への煙侵入を制御するために必要な最小給気量を算定することが可能である。なお、「流量仮定法による1層煙流動計算プログラム」による換気回路網を用いた数値計算結果と比較検証を行い、その精度は検証されているが、実際に実施された実験結果を用いた検証は十分でない。そこで、理論モデルの妥当性を確認するために、理論モデルによる計算結果と実験で得られた値を比較し再現性を確認し、さらに理論モデルを用い地下階へ通じる階段への加圧給気時の課題を明示する。

### (2) 階段加圧給気量算定の前提条件

理論モデルに基づき、以下の条件を前提とし、作成されたエクセルの計算シートを使用する。

- ① 温度は、空間又はゾーン毎に一様とする。各温度は既知であり、かつ変化しない。
- ② 各開口部の有効開口面積および階段内の圧力損失は既知とする。
- ③ 給気口および開口部等の流入部と流出部の距離は十分離れており、流れは静圧差のみに依存する。
- ④ 各居室には空気逃し口が設置された状態を想定するが、火災室のみで空気逃し口が開放されるとする。なお、空気逃し口の開口情報や設置高さは既知とする。

### (3) 理論モデルの入力設定

#### ① 火災室温度

理論モデルでは、計算の与条件として、火災室温度が必要である。火災室温度は、ここでは、(4)火源の設置条件における火災室の鉛直方向に計測した温度の平均温度および煙層温度の2つを設定した。ここで、煙層温度は、実験から得られた火災室の鉛直温度に基づき二層化を前提とする He の方法<sup>[2-9],[2-10]</sup>を用いて煙層下端高さ $Z_{int}$ を算出した後、天井から煙層下端高さ $Z_{int}$ までの平均温度とした。ここで、煙層下端高さ $Z_{int}$ および煙層温度 $T_u$ は式(2.3.1)および式(2.3.2)を用い算出する。

$$Z_{int} = \frac{T_l(I_1 I_2 - H^2)}{I_1 + I_2 T_l^2 - 2T_l H} \quad (2.3.1)$$

$$T_u = (I_1 - Z_{int} T_l) / (H - Z_{int}) \quad (2.3.2)$$

ここで、

$$I_1 = \int_0^H T_{(z)} dz = \sum \Delta h T_{(h)}$$

$$I_2 = \int_0^H \frac{1}{T_{(z)}} dz = \sum \Delta h \frac{1}{T_{(h)}}$$

$$\Delta h = \frac{(h_{n+1}-h_n)}{2} + \frac{(h_n-h_{n-1})}{2}$$

$h$  : 測定点高さ [mm]、 $H$  : 天井高さ [mm]、 $T_l$  : 鉛直方向の最低温度 [°C]、 $T_{(h)}$  :  $h$ の位置の温度 [°C]

② 合成有効開口面積および空気逃し口の寸法

理論モデルを用いる上で、実験で用いた空間構成を、外気、火災室、階段の空間構成に変換する必要がある。そこで実験で用いた空間構成を理論モデルに適用する際、通気条件に応じて幾つかの開口を合成した合成開口の考え方を用い、理論モデルの入力値として使用する。ここで、合成開口面積 $A_e$ は、開口の配置によって並列開口である場合と直列開口である場合に分け、以下の式(2.3.3)および式(2.3.4)により算出する。

<並列開口である場合>

$$A_e = A_1 + A_2 + \dots + A_n \tag{2.3.3}$$

<直列開口である場合>

$$A_e = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{A_1^2} + \frac{1}{A_2^2} + \dots + \frac{1}{A_n^2}}} \tag{2.3.4}$$

合成有効開口面積は、合成開口面積 $A_e$ と合成開口面積 $A_e$ における流量係数 $\alpha$ の掛け算で算出する。ここで、合成開口面積 $A_e$ における流量係数 $\alpha$ は、以下の式(2.3.5)の関係から求める。

$$\alpha = \frac{A_e}{A_{\text{実験における遮煙開口部}}} \tag{2.3.5}$$

なお、空気逃し口の寸法は実測値を用いる。

③ 階段室に関する条件

理論モデルの入力設定で必要な階段室の面積および階段室内の温度は、実測値を用いる。また、階段内の総隙間量 $\alpha A$ は 0.18 を用いる<sup>[2-7]</sup>。

④ 流量係数 $\alpha$

表 2-3-1 に理論モデルに入力する流量係数 $\alpha$ について整理し示す。なお、ここで階段内鉛直方向の流量係数 $\alpha$ は、既往研究<sup>[2-4]</sup>を参考にする。

表 2-3-1 理論モデルに入力する流量係数 $\alpha$

	外気－火災室	火災室－階段	階段内鉛直方向
	空気逃し口	開口部	
開放時	0.7	式(2.3.5)による 流量係数 $\alpha$ とする	0.2

## 2.4 実験結果および考察

### (1) 扉の開閉条件

図 2-4-1 に Case1-1~Case1-5 における差圧および給気量の時系列データ、階段室の鉛直方向の圧力分布および一例として Case1-5 における外気温度と基準柱内(1 階および 7 階)の温度の時系列データを示す。ここで、階段室の鉛直方向の圧力分布の結果は、各条件において加圧給気を開始後、計測データから階段室内の圧力が安定したことを確認した後、記録された 1 分間(0 秒~60 秒)のデータの平均値である。

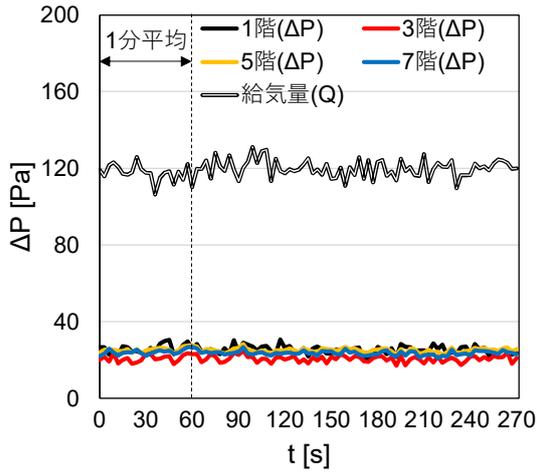
図 2-4-1(a)より、Case1-1(1 階の階段室扉(a)と付室扉(b)の開放条件)では、階段室扉(a)と付室扉(b)の開放により外気へ通じる通気経路の扉が全て開放されることになり、階段室と外気の差圧が概ね 25Pa 程度となり、差圧を計測した高さごとの圧力について、顕著の差はみられない。

図 2-4-1(b)~(d)より、Case1-2~Case1-4 では各階における階段室扉(a)と付室扉(b)を開放しているが、外気へ通じる通気経路が確保されていないため、階段室と外気の差圧は 140~170Pa 程度になり、加圧給気により階段室内の圧力が高い状態となっている。なお、全体的に 3 階で計測した差圧が他の階の計測値と比べ若干低い値を示す傾向がみられるが、これは 3 階の差圧計のみ他の階の差圧計のレンジと異なることによる差と推察される。

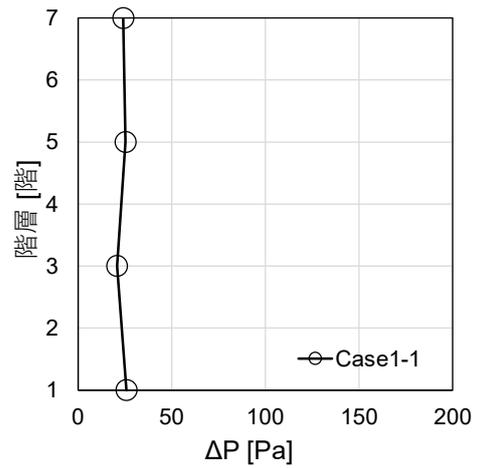
図 2-4-1(e)より、Case1-5(5 階の階段室扉(a)、付室扉(b)、廊下扉(c)、居室扉(d)の開放条件)では、図 2-4-1(a)の Case1-1 と同様に、階段室から外気へ通じる通気経路の扉が全て開放されることになり、階段室と外気の差圧が、1 階では 50Pa 程度の値を示しているが、3 階以上の階では 30Pa 程度となり、Case1-2~Case1-4 より低い圧力分布となっている。

上記の結果より、階段加圧時に、外気へ通じる通気経路の扉が全て開放されていない条件では階段室内の圧力が高い状態になり、開放されている場合、外気との差圧は低くなる傾向がみられる。

なお、図 2-4-1(f)に、Case1-5 における基準柱内(1 階、7 階)および外気(1 階)の温度を示すが、鉛直方向に顕著な温度差はみられず、外気と概ね同様の温度である。

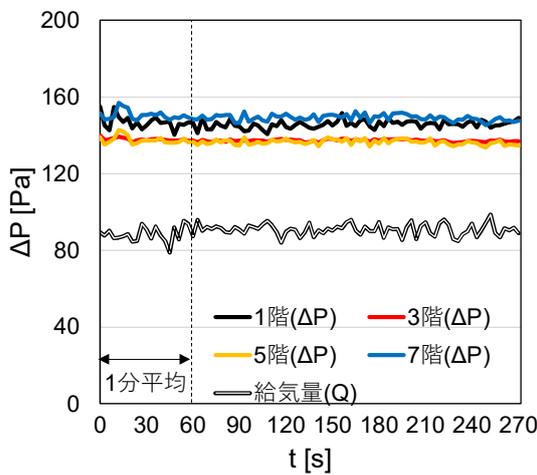


(i) 時系列データ

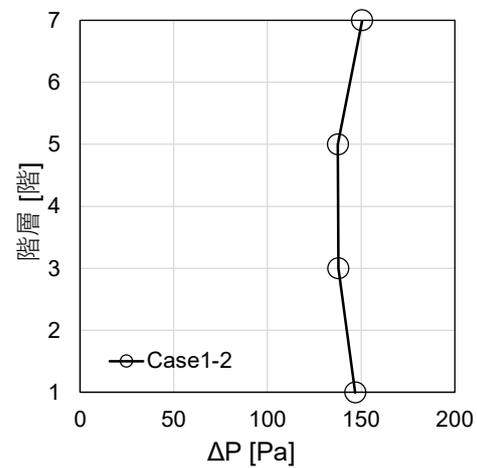


(ii) 階段室の鉛直方向の圧力分布

(a) Case1-1 (1 階の扉(a)および(b)の開放)

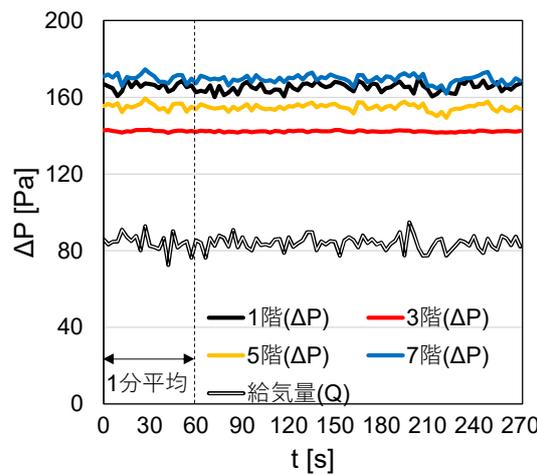


(i) 時系列データ

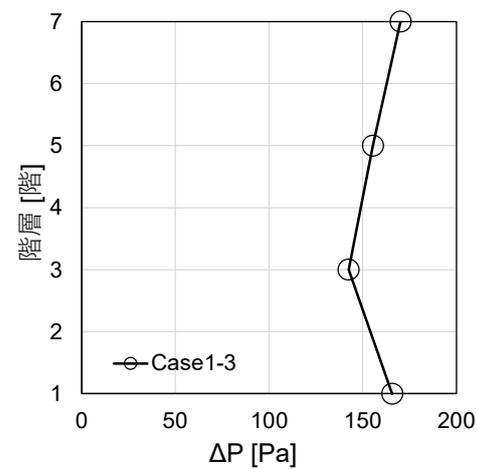


(ii) 階段室の鉛直方向の圧力分布

(b) Case1-2 (3 階の扉(a)および(b)の開放)

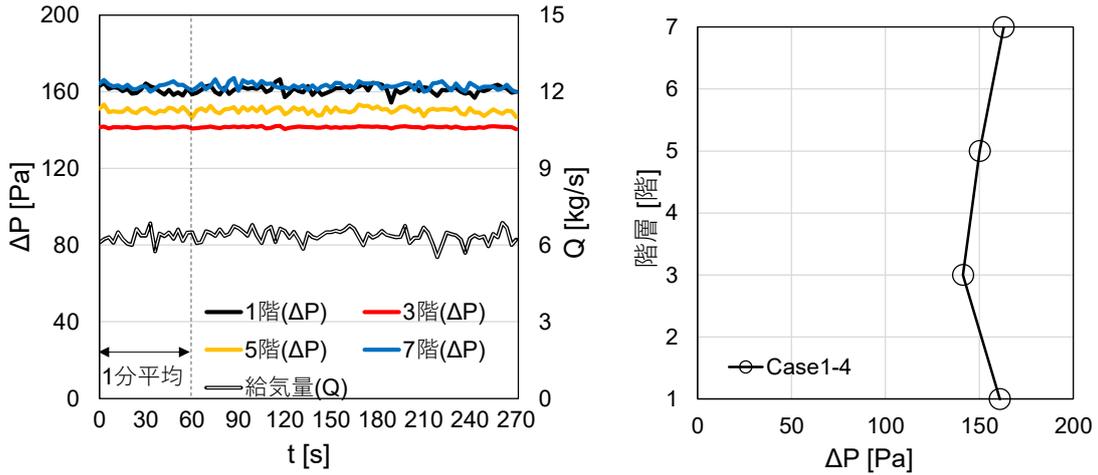


(i) 時系列データ

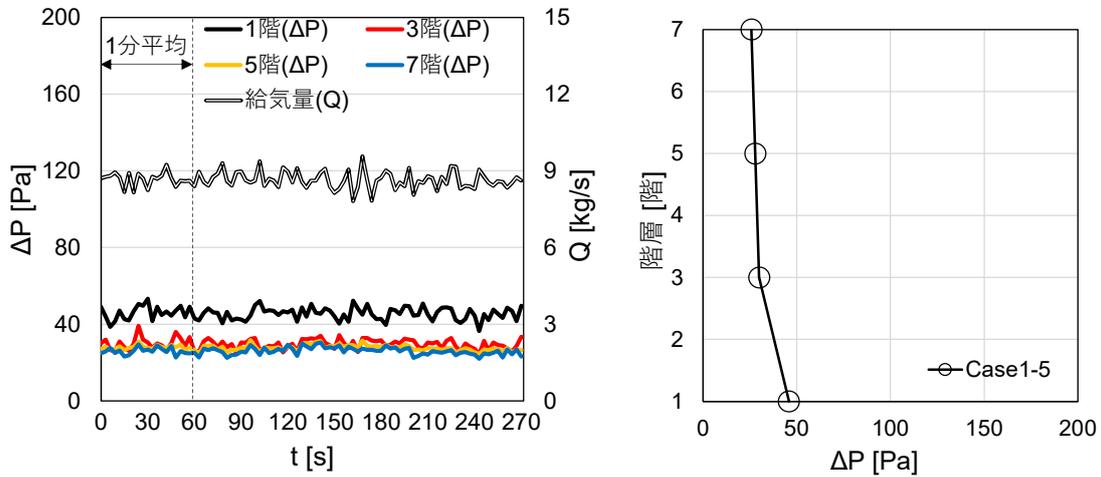


(ii) 階段室の鉛直方向の圧力分布

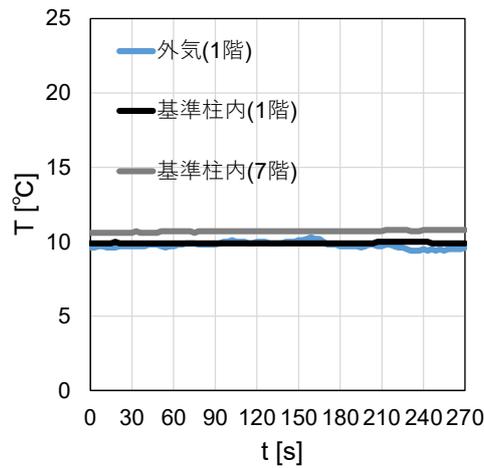
(c) Case1-3 (5 階の扉(a)および(b)の開放)



(i) 時系列データ (ii) 階段室の鉛直方向の圧力分布  
(d) Case1-4 (7 階の扉(a)および(b)の開放)

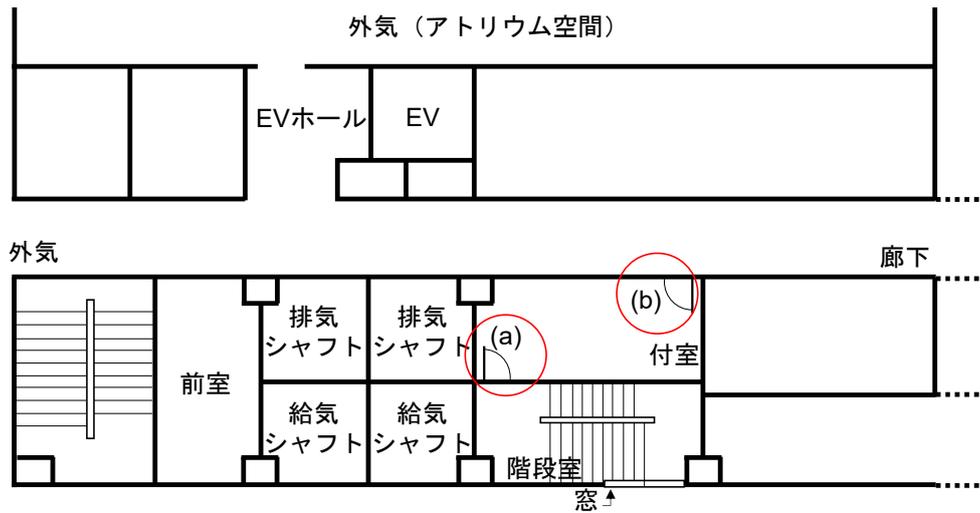


(i) 時系列データ (ii) 階段室の鉛直方向の圧力分布  
(e) Case1-5 (5 階の扉(a)、(b)、(c)および(d)の開放)

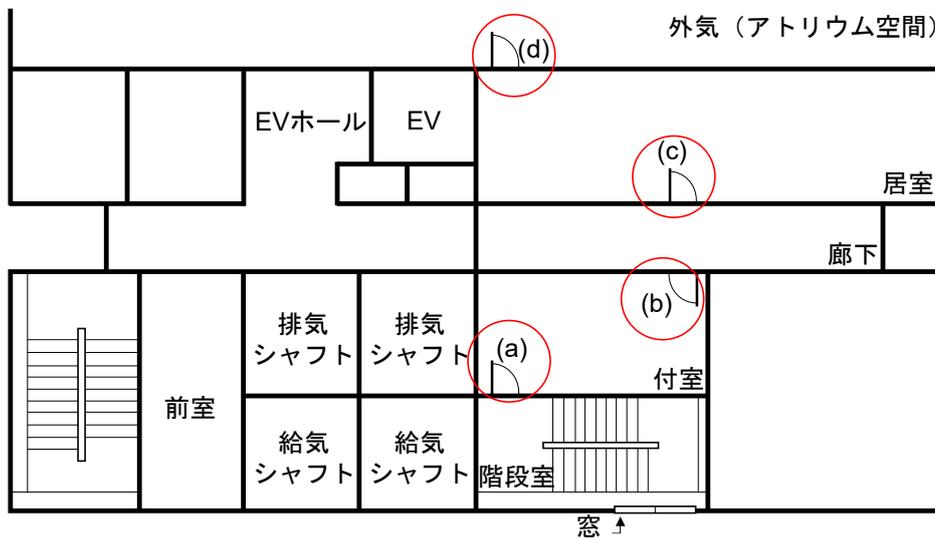


(f) Case1-5 における外気および基準柱内の温度

図 2-4-1 階段室における差圧傾向および基準柱内の温度変化



(a) 1階



(b) 3階、5階、7階

図 2-4-2 条件階における開放する扉の位置

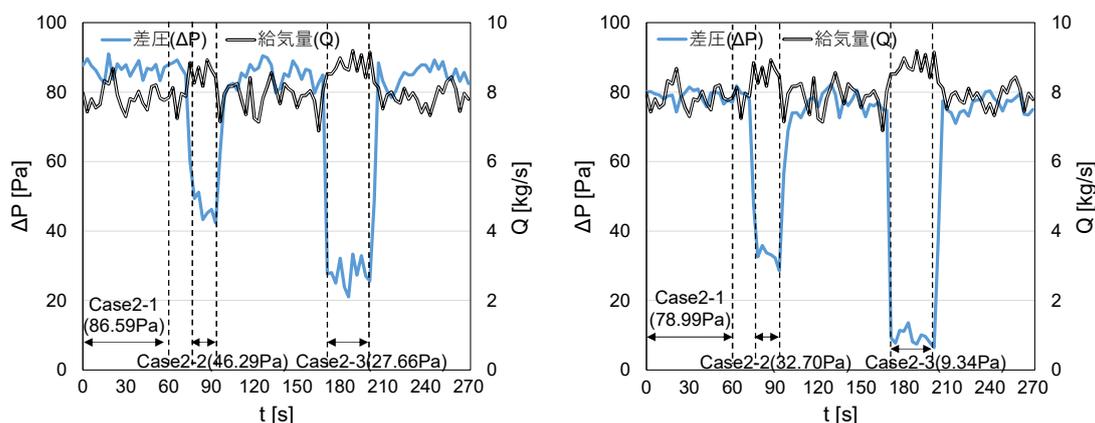
(2) 圧力調整ダンパーの設置条件

図 2-4-3 および図 2-4-4 に Case2-1~Case2-6 における圧力調整ダンパーの制御を条件とした階段室と外気の差圧および給気量の経時変化を示す。ここで、差圧は、Case2-1 および Case2-4 の場合、1 分間 (0 秒~60 秒) の平均値、Case2-2、Case2-3、Case2-5 および Case2-6 の場合、扉を開放し閉鎖するまでの時間の平均値とし、図中に矢印で示した時間範囲の平均値を用いる。

図 2-4-3 より、圧力調整ダンパー①を用いる条件では、Case2-1 の場合、差圧は 75~90Pa 程度となる傾向がみられる。また、Case2-2 (3 階の階段室扉(a)、付室扉(b)、廊下扉(c)、居室扉(d)の開放条件) および Case2-3 (3 階および 5 階の階段室扉(a)、付室扉(b)、廊下扉(c)、居室扉(d)の開放条件) では階段室から外気へ通じる通気経路の扉が全て開放されることになり、Case2-2 では 30~50Pa 程度、Case2-3 では 5~30Pa 程度に、差圧は減少する傾向がみられる。

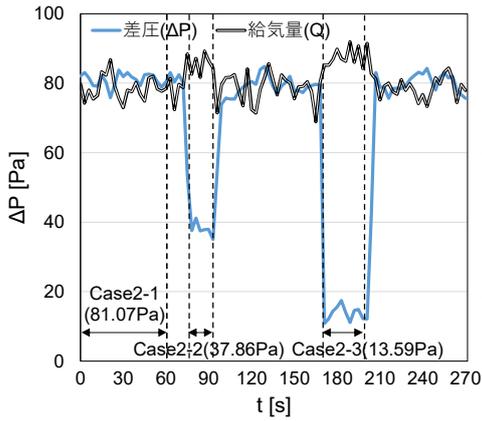
図 2-4-4 より、圧力調整ダンパー①と圧力調整ダンパー②を用いる条件では、Case2-4 の場合、差圧は 50~70Pa 程度となり、Case2-1 に比べ差圧は減少する傾向がみられる。また、Case2-5 (3 階の階段室扉(a)、付室扉(b)、廊下扉(c)、居室扉(d)の開放条件) および Case2-6 (3 階および 5 階の階段室扉(a)、付室扉(b)、廊下扉(c)、居室扉(d)の開放条件) では階段室から外気へ通じる通気経路の扉が全て開放されることになり、Case2-5 では 25~50Pa 程度、Case2-6 では 5~30Pa 程度に、差圧は減少する傾向がみられる。

以上の結果より、圧力調整ダンパーは、階段室と外気の差圧を制御する上で有効であることは確認できたが、その配置数は、階段室の扉が閉鎖されている場合、差圧に影響する可能性があるため、適切な数を配置することが必要であることがわかる。一方、扉の開放条件では、圧力調整ダンパーの設置数による差圧への顕著な影響はみられないことがわかる。

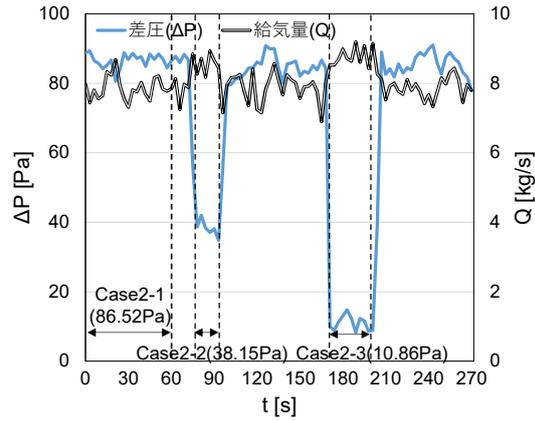


(a) 1 階

(b) 3 階



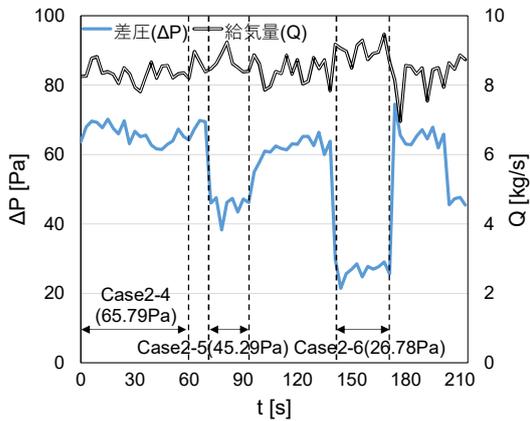
(c) 5階



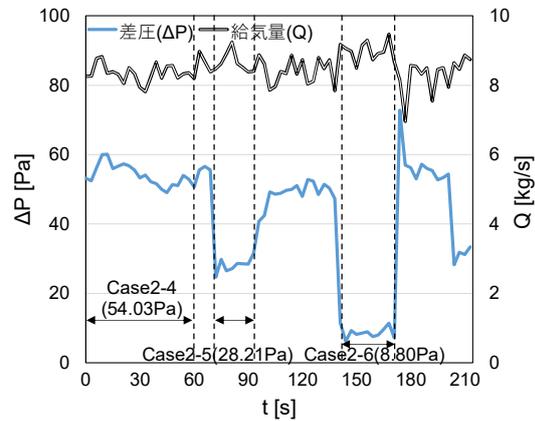
(d) 7階

図 2-4-3 圧力調整ダンパーによる階段室内の圧力制御

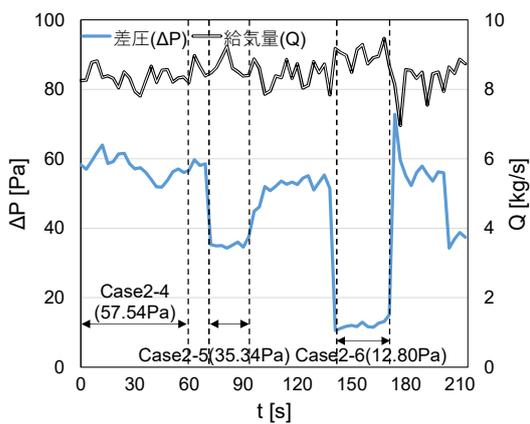
(Case2-1、Case2-2(3階の扉(a)~(d)開閉)、Case2-3(3階と5階の扉(a)~(d)開閉))



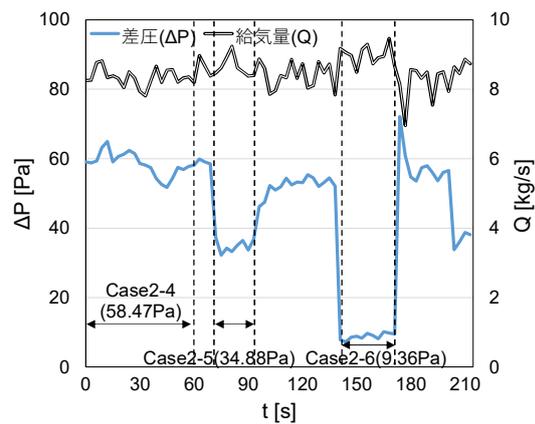
(a) 1階



(b) 3階



(c) 5階



(d) 7階

図 2-4-4 圧力調整ダンパーによる階段室内の圧力制御

(Case2-4、Case2-5(3階の扉(a)~(d)開閉)、Case2-6(3階と5階の扉(a)~(d)開閉))

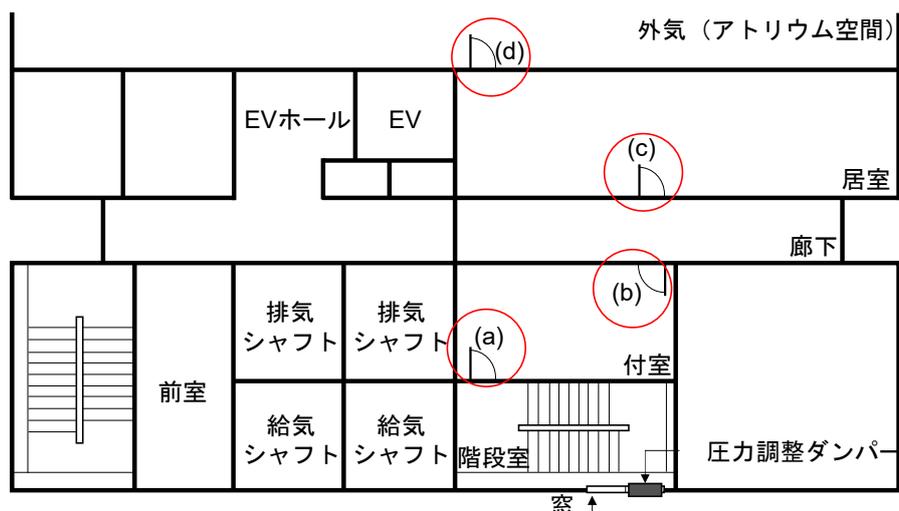


図 2-4-5 圧力調整ダンパーおよび条件階における開閉する扉の位置 (3 階および 5 階)

ここで、階段室扉(a)の開放力について考察する。図 2-4-6 に、1 階、3 階、5 階および 7 階における (i)鉛直方向の圧力分布および (ii)階段室扉(a)の開放力の分布を示す。階段室扉(a)の開放力は式(2.4.1)を用いて算出する<sup>[2-3]</sup>。ただし、階段室扉(a)の寸法は、実測により高さ 2000mm、幅 900mm とし、ドアクローザーのトルクは 40N・m<sup>[2-3]</sup>とした。また、図中には、圧力調整ダンパーの設置有無による影響を確認するため、圧力調整ダンパーを設置しない条件として Case1-3(階段室扉(a)と付室扉(b)の開放)の実験結果を併記している。

$$F \times B = M + A_d \times \Delta P \times \frac{B}{2} \quad (2.4.1)$$

ここで、

$A_d$ : 扉面積 [m<sup>2</sup>]

$B$ : 扉幅 [m]

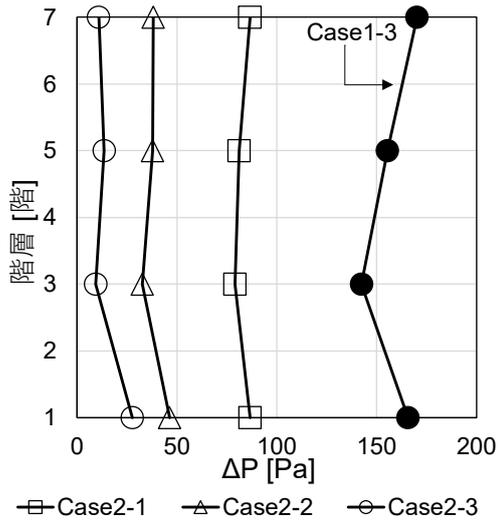
$F$ : 扉開放力 [N]

$M$ : ドアクローザーのトルク [N・m]

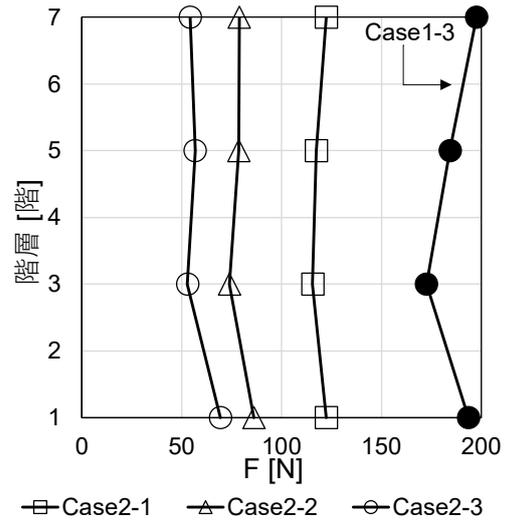
$\Delta P$ : 扉前後差圧 [Pa]

図 2-4-6(a)(i)および図 2-4-6(b)(i)より、圧力調整ダンパーを設置した条件では、階段室内の鉛直方向の圧力分布が、圧力調整ダンパーを設置しない Case1-3 の条件に比べ、明確に減少しており、圧力調整ダンパーによる差圧の制御が機能していることがわかる。

図 2-4-6(a)(ii)および図 2-4-6(b)(ii)より、圧力調整ダンパーを設置した条件では、階段室扉(a)の開放力は、圧力調整ダンパーを設置しない Case1-3 の条件に比べ、明確に減少している。なお、防火関係規定で推奨される避難者が使用する扉の開放力は 100N<sup>[2-3]</sup>とされている。よって、Case2-1 の条件では、125N 程度であり、避難上、支障を生じる可能性がある。本実験では、圧力調整ダンパーの有無や設置個数に関わらず、消防隊員が支障なく扉を開放することができると考えられるが<sup>[2-11]</sup>、避難者に対する扉開放力について圧力調整ダンパーの設置数は十分留意すべきであることが示唆される。

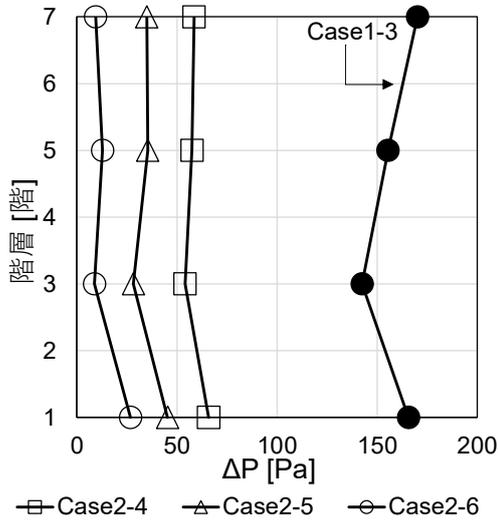


(i) 鉛直方向の圧力分布

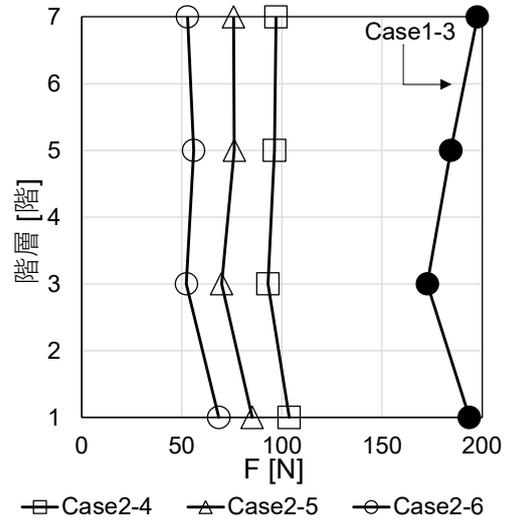


(ii) 階段室扉(a)の開放力の分布

(a) Case2-1、Case2-2、Case2-3



(i) 鉛直方向の圧力分布



(ii) 階段室扉(a)の開放力の分布

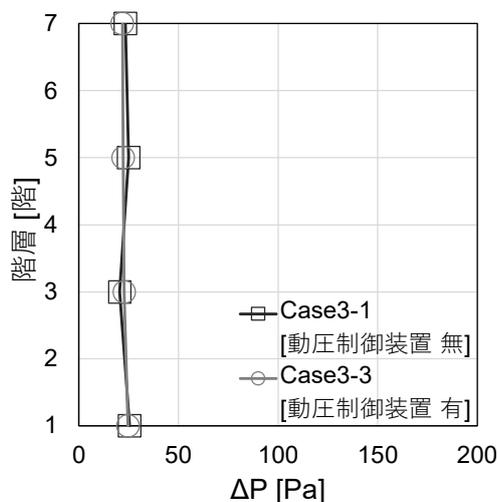
(b) Case2-4、Case2-5、Case2-6

図 2-4-6 階段室内の鉛直方向の圧力分布および階段室扉(a)の開放力

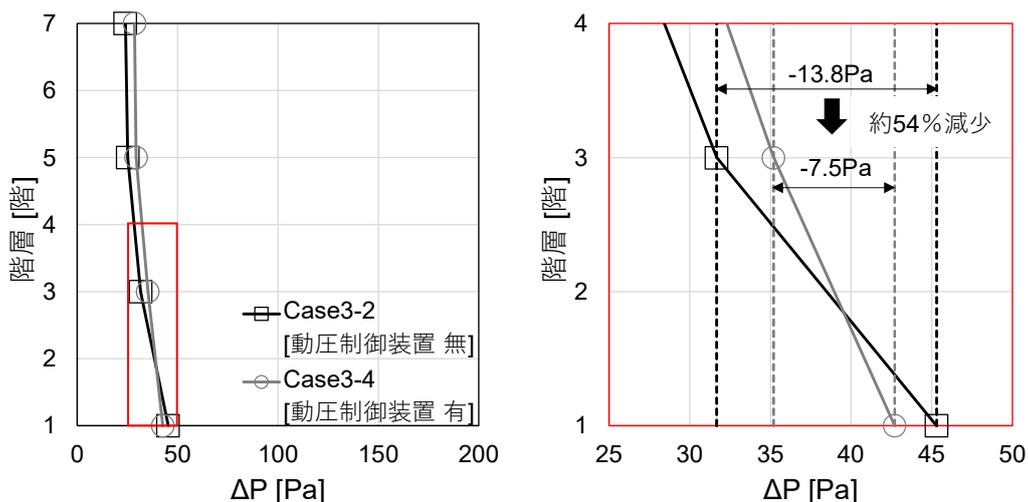
(3) 動圧制御装置の設置条件

図 2-4-7 に Case3-1~Case3-4 の動圧制御装置の設置の有無を条件とした実験結果を示す。図 2-4-7(a)の Case3-1 と Case3-3 の条件から、動圧制御装置を設置しない Case3-1 の条件に比べ動圧制御装置を設置した Case3-3 の条件において、若干ではあるが、階段室内の高さ方向の圧力分布のばらつきが減少傾向がみられる。

図 2-4-7(b)の Case3-2 と Case3-4 の条件から、動圧制御装置を設置しない Case3-2 の条件が動圧制御装置を設置した Case3-4 の条件に比べ、3 階以上において圧力が低くなる傾向がみられ、給気による動圧がすべて静圧に変換されていない可能性が示唆される。参考として、本実験では、給気口のある 1 階と 3 階の間の圧力差に着目すると、動圧制御装置により約 54%程度の圧力差を減ずる結果となった。



(a) Case3-1(1階の扉開放、動圧制御装置無)と Case3-3(1階の扉開放、動圧制御装置有)の比較検討



(b) Case3-2(5階の扉開放、動圧制御装置無)と Case3-4(5階の扉開放、動圧制御装置有)の比較検討

図 2-4-7 動圧制御装置による階段室内の鉛直方向の圧力分布

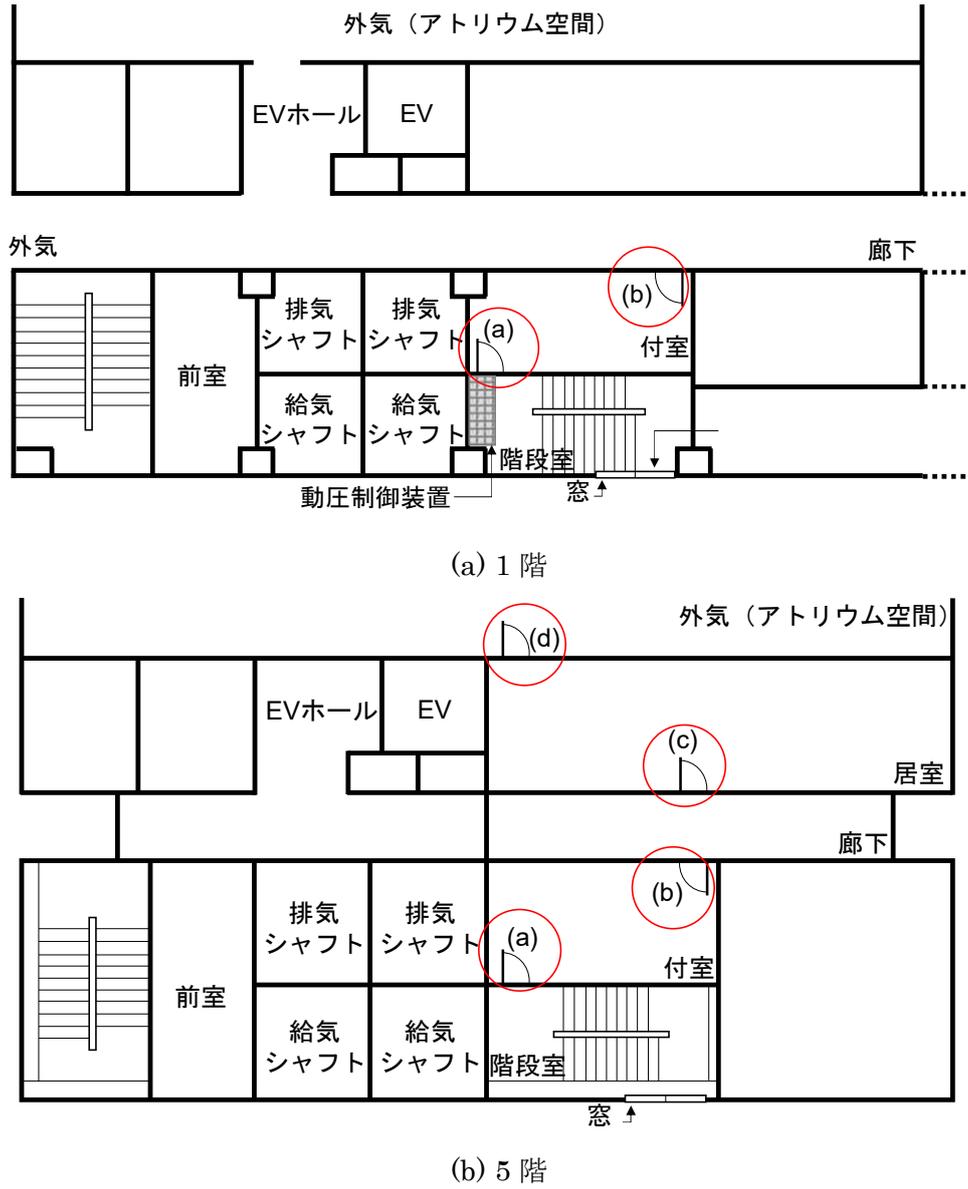


図 2-4-8 条件階における開放する扉の位置

#### (4) 火源の設置条件

図 2-4-9(a)、(b)は、火源を居室に設置し、給気量を 3 段階で減少させた Case4-1~Case4-3 の条件における給気量および火災室(居室)内の温度分布( $T_{R1}$ 、 $T_{R2}$ )の経時変化を示している。図 2-4-9(a)、(b)より、火災室上部の温度は給気量を減少させるに従い上昇する傾向がみられる。火災室下部の温度は、Case4-1 から Case4-2 に給気量を減少すると火災室上部に比べ顕著ではないが増加し、Case4-2 から Case4-3 に給気量を減少させても顕著に変化しない傾向がみられる。

図 2-4-9(c)は Case 毎に定常状態とみなした時間の温度に着目し、Case4-1 では 96s~156s、Case4-2 では 330s~390s、Case4-3 では 470s~530s における時間平均した鉛直温度分布を示している。図 2-4-9(c)より、火災室の鉛直温度分布は、温度測定点が床面から高いほど、温度は上昇する傾向がみられる。図 2-4-9(c)の火災室の鉛直温度分布の結果を用い、Case 毎に鉛直温度分布の平均値および火災室の鉛直温度分布の結果から式(2.3.1)および式(2.3.2)を用い計算した煙層温度は、Case4-1 の条件では 83°C および 117°C、Case4-2 の条件では 109°C および 134°C、Case4-3 の条件では 110°C および 136°C となった。Case 毎に給気量を変化させているが、Case4-1 では、温度が他の Case に比べ若干低くなる傾向はみられるが、Case4-2 と Case4-3 は概ね同様の温度を示す傾向がみられる。

図 2-4-10 は、火災室と廊下との間の廊下扉(c)の鉛直方向の温度分布の経時変化を示している。図 2-4-10 より、Case4-1 および Case4-2 の条件では温度分布の変化は、ほとんどみられないが、Case4-3 の条件では、開放された廊下扉(c)の上部の温度が上昇する傾向がみられる。これは Case4-3 の給気量の条件では、火災室から廊下に煙が流出していると考えられる。

図 2-4-11 は、廊下の鉛直方向の温度分布( $T_{C1}$ 、 $T_{C2}$ )の経時変化を示している。図 2-4-11 より、Case4-1 および Case4-2 の条件では温度分布の変化は、ほとんどみられないが、Case4-3 の条件では、廊下上部の温度が上昇する傾向がみられる。すなわち、Case4-3 の給気量の条件では、火災室から廊下に煙が流出したため、廊下上部の温度が上昇したと考えられる。

図 2-4-12 は、廊下と付室の間の付室扉(b)の鉛直方向の温度分布の経時変化を示している。図 2-4-12 より、Case4-1~Case4-3 のすべての条件で、温度変化がみられないことから、付室扉(b)では階段加圧により遮煙性能が満たされていることがわかる。

次に、理論モデルを用い実験結果の考察を行う。理論モデルを用いることにより、火源を配置した居室で発生した煙が、廊下扉(c)を介して廊下へ流出することを防止するために必要な階段加圧の必要最小給気量を求めることができる。図 2-4-13 に理論モデルの入力概要を示す。図 2-4-13 に示したとおり、火災階では階段室扉(a)、付室扉(b)、廊下扉(c)および空気逃し口(f)は開放し階段加圧を行っているが、ここで遮煙性能の検証は廊下扉(c)の開口部を対象とする。なお、式(2.3.4)を用いて階段室扉(a)、付室扉(b)および廊下扉(c)の合成開口面積を算出し理論モデルへ適用する。

図 2-4-11 に示したとおり、Case4-1 および Case4-2 では、給気量はそれぞれ 6.29kg/s および 3.77kg/s を設定したが、それら給気量により火災室から廊下扉(c)を介した廊下への煙流出を防止できることを確認したが、Case4-3 の給気量として 1.75kg/s を設定

した場合、廊下扉(c)を介した廊下への煙流出を確認した。この結果を踏まえ、理論モデルを用い、図 2-4-9(c)から算出した火災室の平均温度および煙層温度の 2 つの温度を用い、Case 毎にそれら温度に対する必要最小給気量を算出すると、表 2-4-1 の結果が得られる。表 2-4-1 に示したとおり、廊下扉(c)における遮煙性能について整理すると、Case4-1 および Case4-2 では、実験時の給気量が必要最小給気量を上回り、Case4-3 では下回り、理論モデルの計算結果は、本実験で得られた遮煙性能を判断する廊下への煙流出の有無の結果と整合することがわかる。

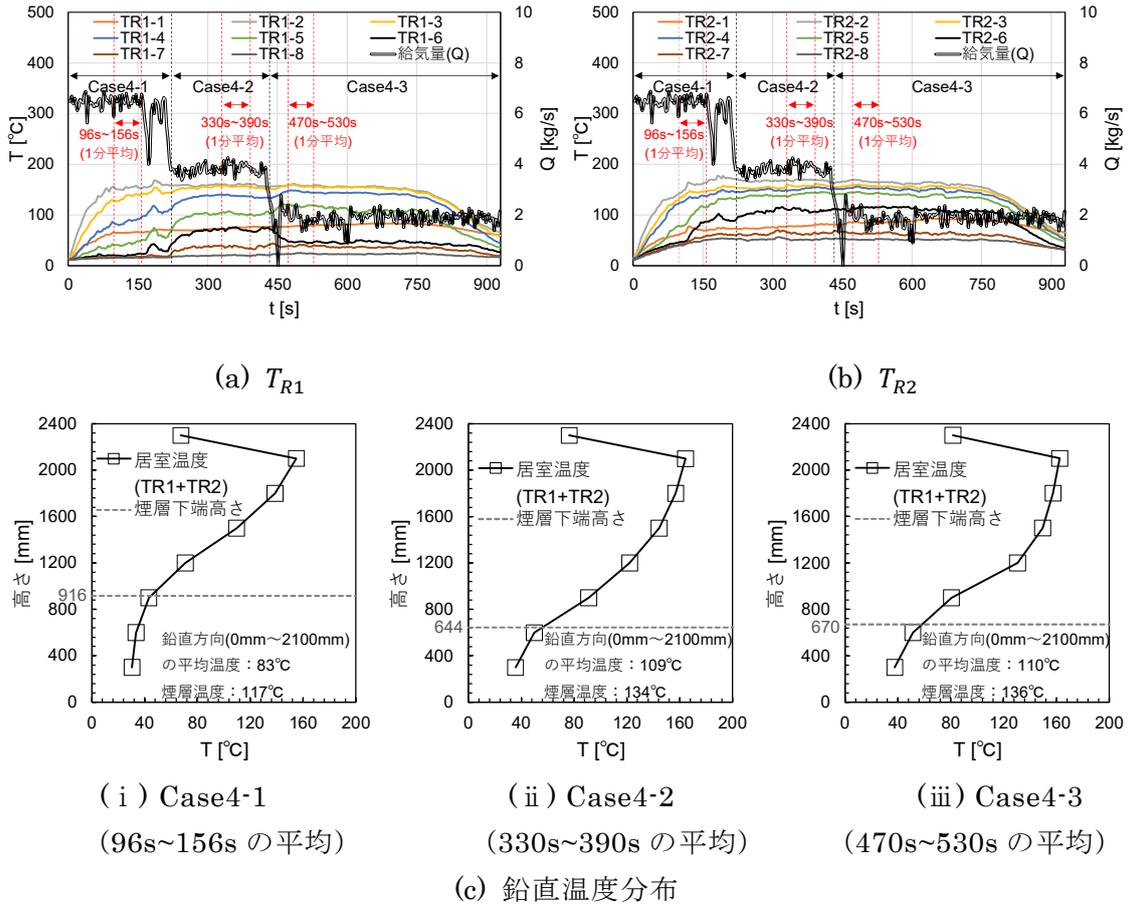


図 2-4-9 火災室(居室)の温度( $T_{R1}$ 、 $T_{R2}$ ) (Case4-1、Case4-2、Case4-3)

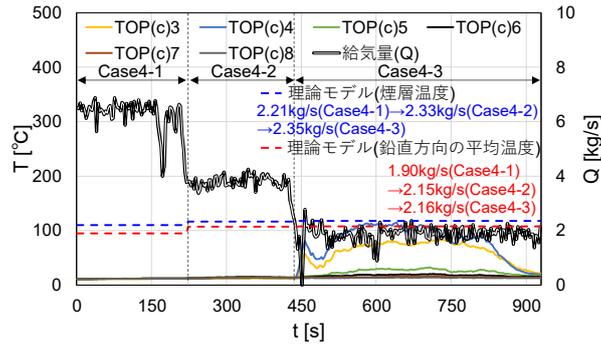
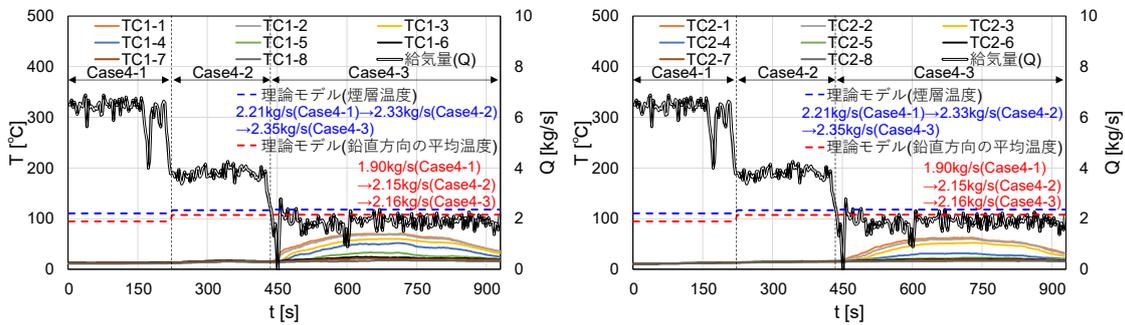


図 2-4-10 廊下扉(c)の温度( $T_{OP(c)}$ ) (Case4-1、Case4-2、Case4-3)



(a)  $T_{C1}$

(b)  $T_{C2}$

図 2-4-11 廊下の温度( $T_{C1}$ 、 $T_{C2}$ ) (Case4-1、Case4-2、Case4-3)

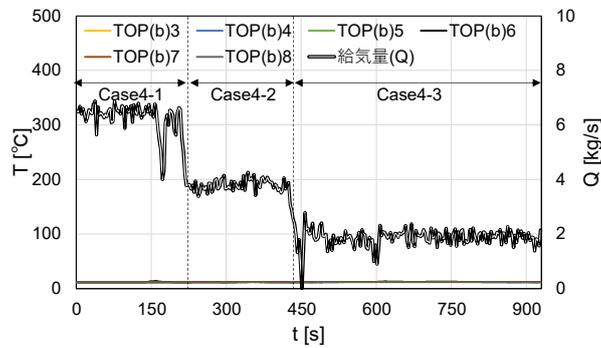
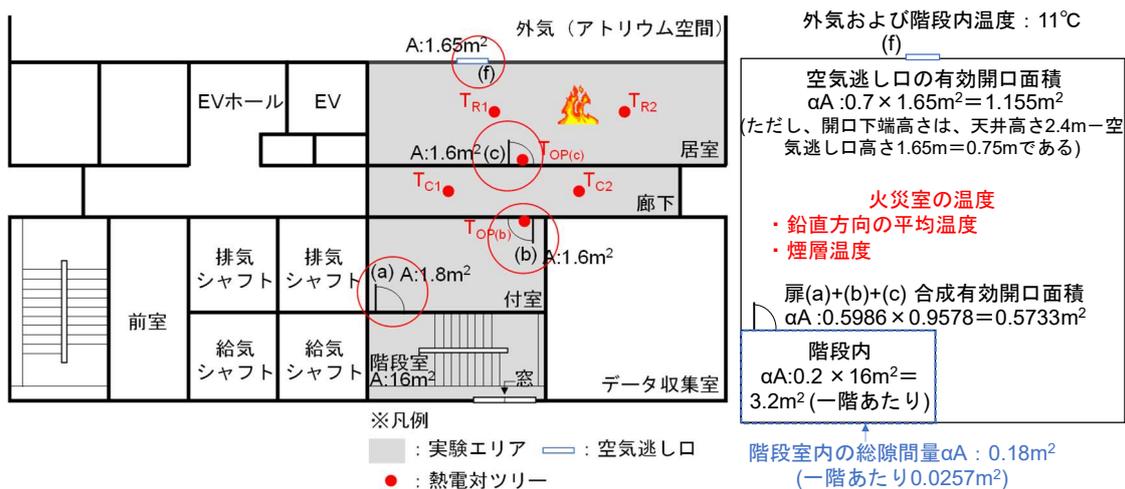


図 2-4-12 付室扉(b)の温度( $T_{OP(b)}$ ) (Case4-1、Case4-2、Case4-3)



(a) 実験条件

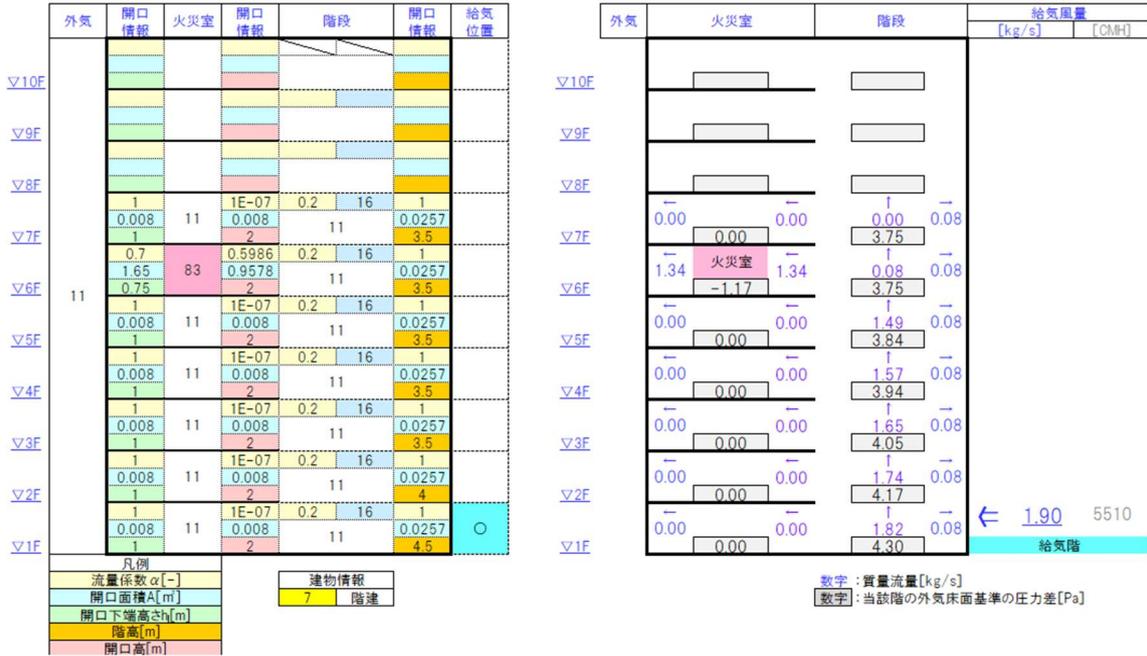
(b) 理論モデルの入力値

図 2-4-13 理論モデルの入力概要

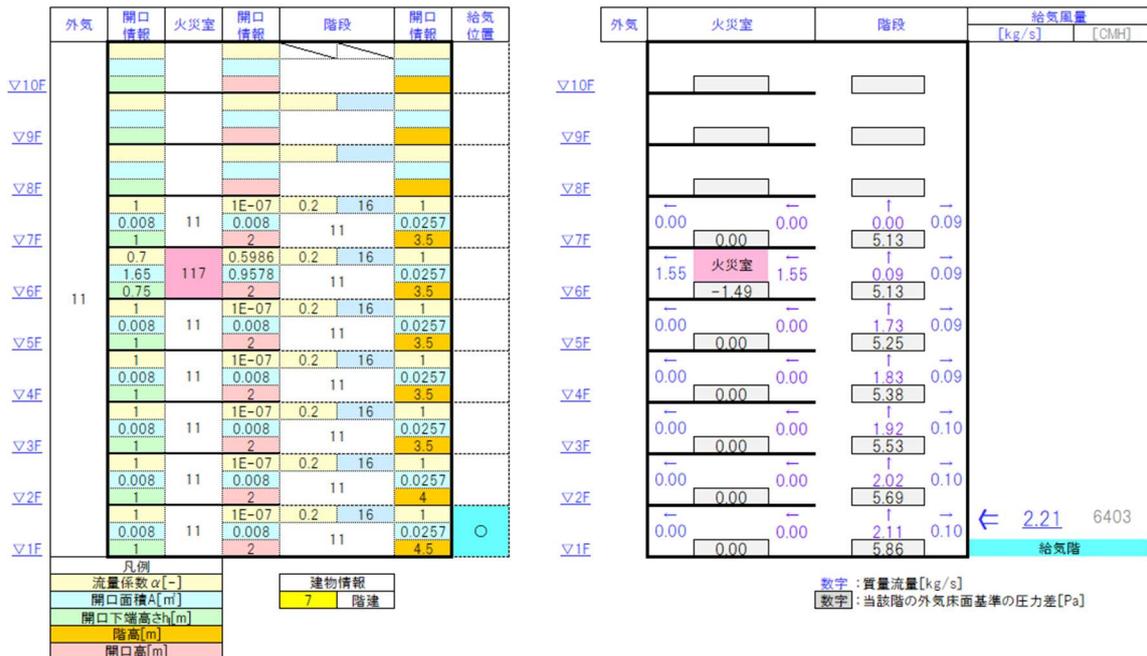
表 2-4-1 廊下扉(c)における遮煙性能

Case	火災室温度 T [°C]	理論モデルにより算出した必要最小給気量 Q [kg/s]	給気量 Q [kg/s]	遮煙性能
4-1	83 (平均温度)	1.90	6.29	○
	117 (煙層温度)	2.21		○
4-2	109 (平均温度)	2.15	3.77	○
	134 (煙層温度)	2.33		○
4-3	110 (平均温度)	2.16	1.75	×
	136 (煙層温度)	2.35		×

※○：遮煙奏功、×：遮煙不奏功

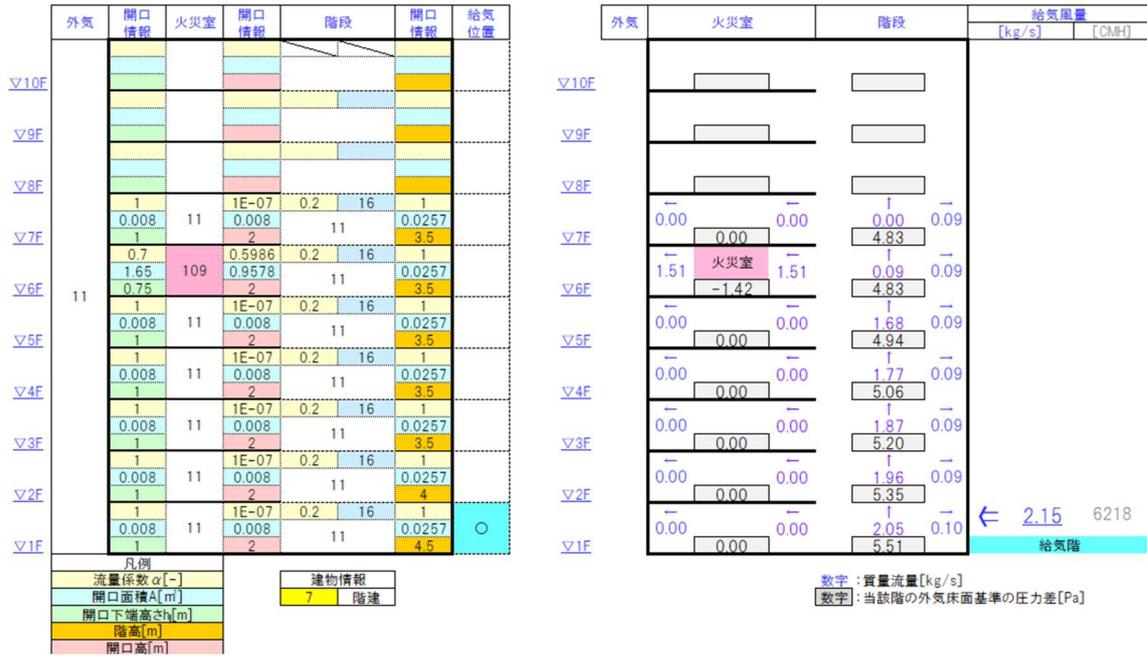


(a) 火災室温度(鉛直方向の平均温度)の場合

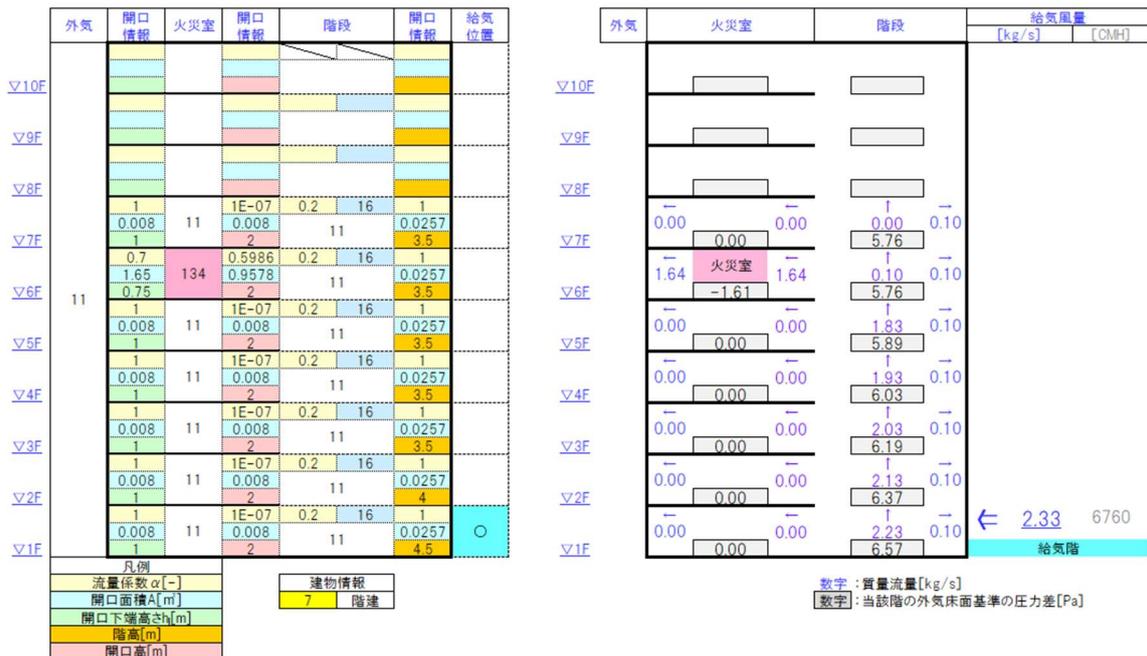


(b) 火災室温度(煙層温度)の場合

図 2-4-14 理論モデルの計算概要 (Case4-1)

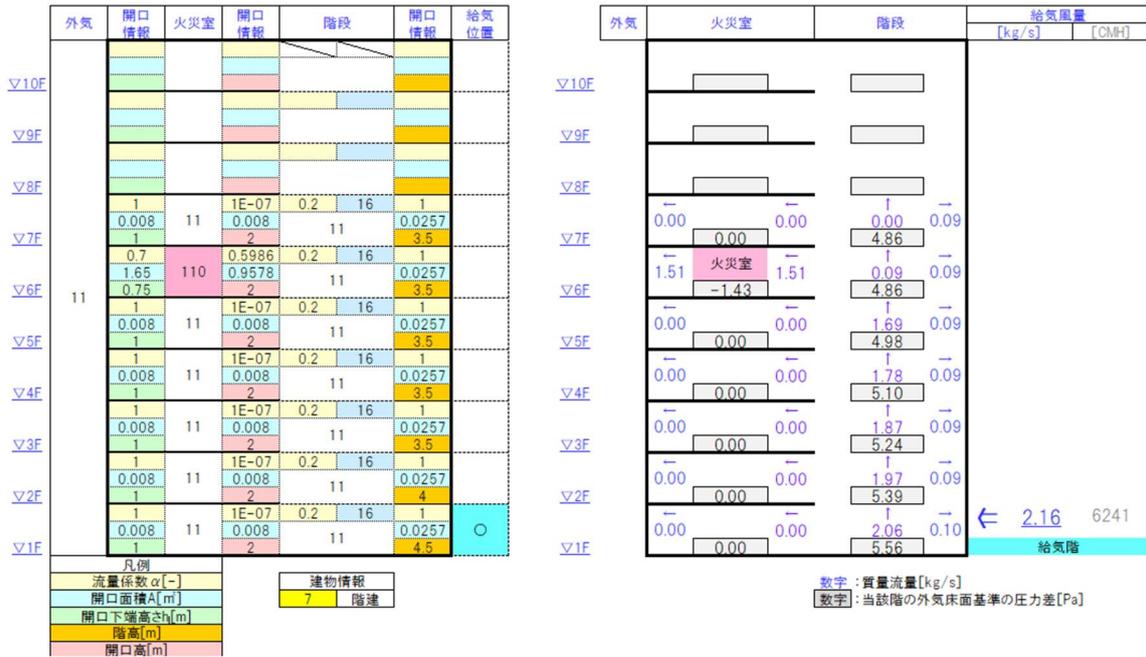


(a) 火災室温度(鉛直方向の平均温度)の場合

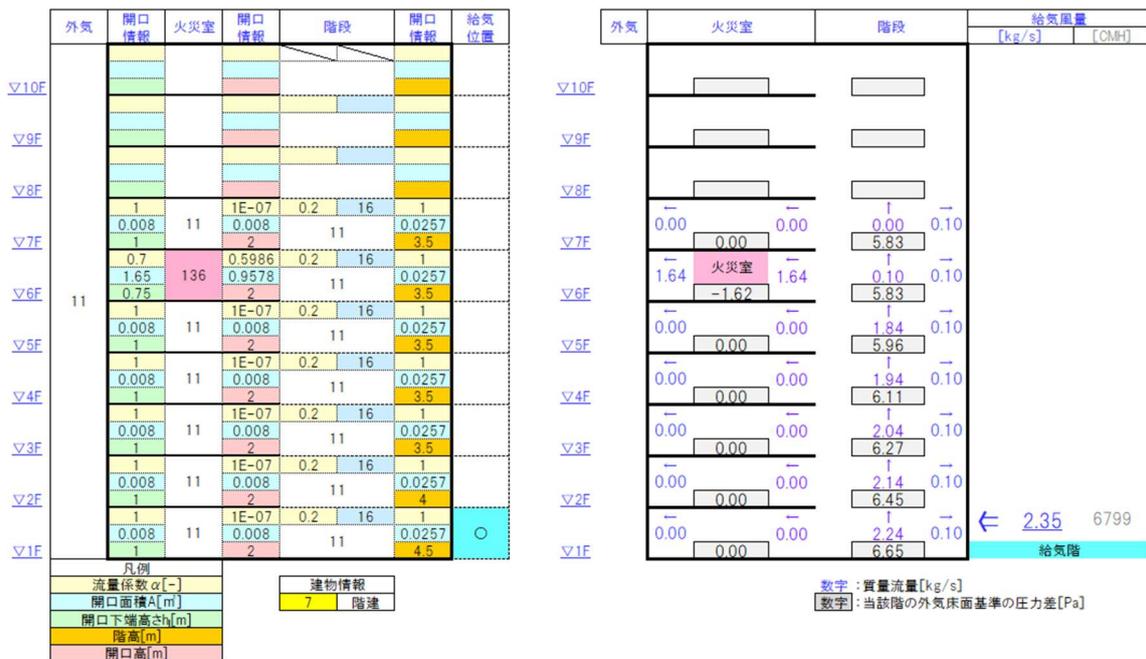


(b) 火災室温度(煙層温度)の場合

図 2-4-15 理論モデルの計算概要 (Case4-2)



(a) 火災室温度(鉛直方向の平均温度)の場合



(b) 火災室温度(煙層温度)の場合

図 2-4-16 理論モデルの計算概要 (Case4-3)

次に、火源を廊下に設置した条件について検証を行う。図 2-4-17 (a)、(b)は Case4-4 で設定した条件における給気量および火災室(廊下)内の温度分布( $T_{C1}$ 、 $T_{C2}$ )の経時変化を示している。図 2-4-17(a)、(b)より、Case4-4 で設定した条件の場合、時間経過とともに定常状態に近づき、給気を停止すると火災室(廊下)内の温度は顕著に上昇し始める傾向がみられる。

図 2-4-17(c)は Case4-4 の定常状態とみなした時間の温度に着目し、165s~225s における時間平均した鉛直温度分布を示している。図 2-4-17(c)より、火災室の鉛直温度分布は、温度測定点が床面から高いほど、温度は上昇する傾向がみられる。図 2-4-17(c)の火災室の鉛直温度分布の結果を用い、図 2-4-9 と同様に鉛直温度分布の平均値および火災室の鉛直温度分布の結果から計算した煙層温度は、160℃および 186℃となった。

図 2-4-18 は、火災室と付室の間の付室扉(b)の鉛直方向の温度分布の経時変化を示している。図 2-4-18 より、100s 付近から、付室扉(b)の上端付近の温度が上昇する傾向がみられる。これは Case4-4 の給気量の条件では、火災室の温度の上昇とともに、火災室から付室に煙が流出し始めていると考えられる。

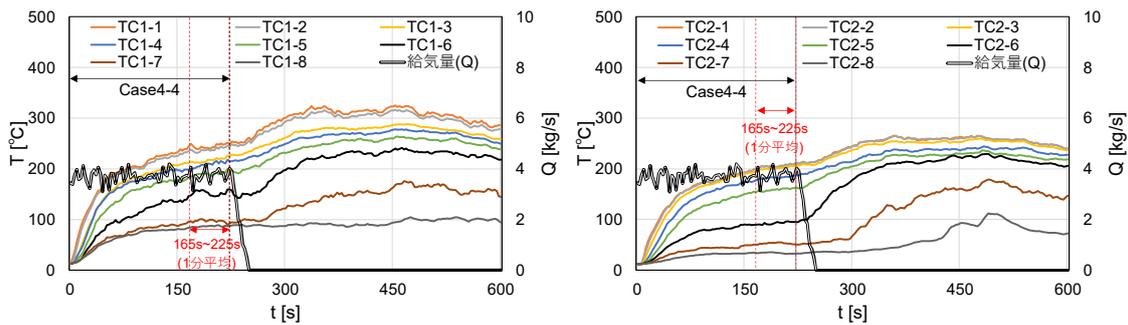
図 2-4-19 は、付室の温度( $T_V$ )の鉛直方向の温度分布の経時変化を示している。図 2-4-19 より、Case4-4 の条件では 160s 付近から、付室の温度が若干上昇し始めることがわかる。また、給気を停止すると付室上部の温度が顕著に上昇することがわかる。

図 2-4-20 は、付室と階段室の間の階段室扉(a)の鉛直方向の温度分布の経時変化を示している。図 2-4-20 より Case4-4 の条件では温度分布の変化はみられず、給気停止後、温度上昇することがわかる。

次に、Case4-1~Case4-3 と同様に、理論モデルを用い実験結果の考察を行う。理論モデルを用い、火源を配置した廊下で発生した煙が、付室扉(b)を介して付室へ流出することを防止するために必要な階段加圧の必要最小給気量を求める。図 2-4-21 に理論モデルの入力概要を示す。図 2-4-21 に示したとおり、火災階では階段室扉(a)、付室扉(b)および空気逃し口(e)は開放し階段加圧を行っているが、ここで遮煙性能の検証は付室扉(b)の開口部を対象とする。なお、式(2.3.4)を用いて階段室扉(a)および付室扉(b)の合成開口面積を算出し理論モデルへ適用する。

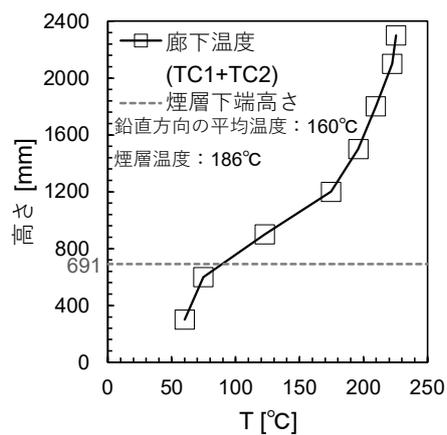
図 2-4-19 に示したとおり、実験結果から Case4-4 では、給気量は 3.75kg/s を設定したが、付室扉(b)を介した付室への煙流出を 160s 付近まで防止できることを確認したが、それ以降は若干の煙流出がみられた。この結果を踏まえ、理論モデルを用い、図 2-4-17(c)から算出した火災室の平均温度および煙層温度の 2 つの温度を用い、必要最小給気量を算出すると、表 2-4-2 の結果が得られる。表 2-4-2 に示したとおり、付室扉(b)における遮煙性能について整理すると、Case4-4 では、実験時の給気量が必要最小給気量と同程度となるため、安全側の遮煙性能となるように幾分給気量を増やし設定することで遮煙性能が満足できた可能性が示唆される。

以上の結果より Case4-1~Case4-4 の条件では、理論モデルの計算結果は実験から得られた階段加圧による遮煙状況を概ね再現しており、理論モデルを用いた計算結果は概ね妥当であると考えられる。



(a)  $T_{C1}$

(b)  $T_{C2}$



(c) 鉛直温度分布 (165s~225s の平均)

図 2-4-17 火災室(廊下)の温度( $T_{C1}$ 、 $T_{C2}$ ) (Case4-4)

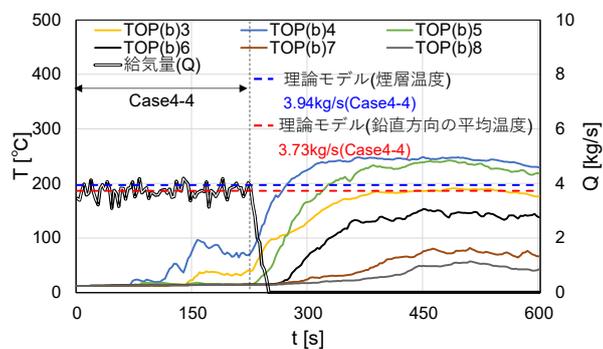
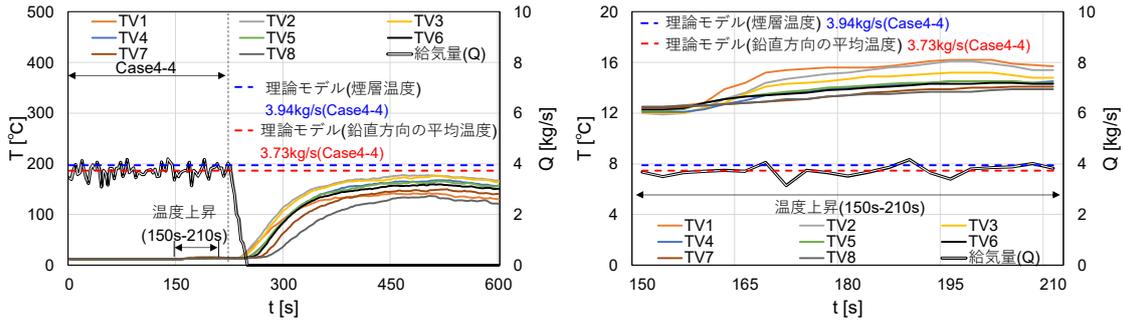


図 2-4-18 付室扉(b)の温度( $T_{OP(b)}$ ) (Case4-4)



(a) 全区間(0s~600s) (b) 温度上昇区間(150s~210s)

図 2-4-19 付室の温度( $T_V$ ) (Case4-4)

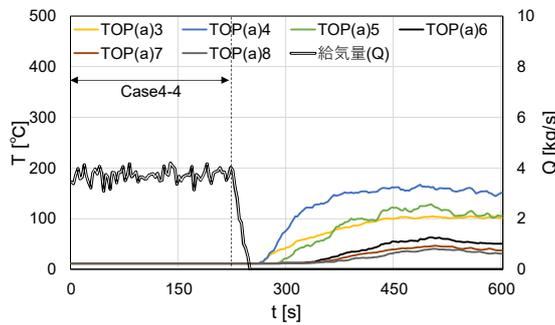
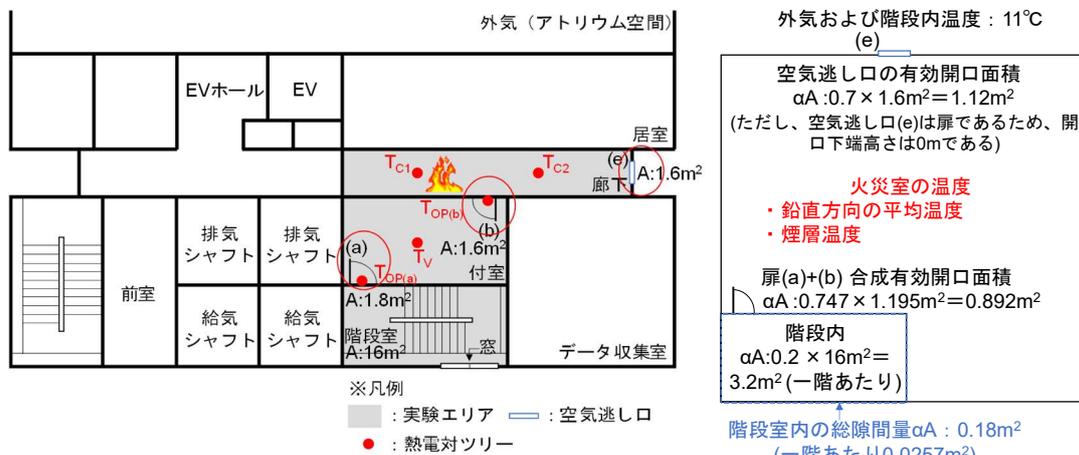


図 2-4-20 階段室扉(a)の温度( $T_{OP(a)}$ ) (Case4-4)



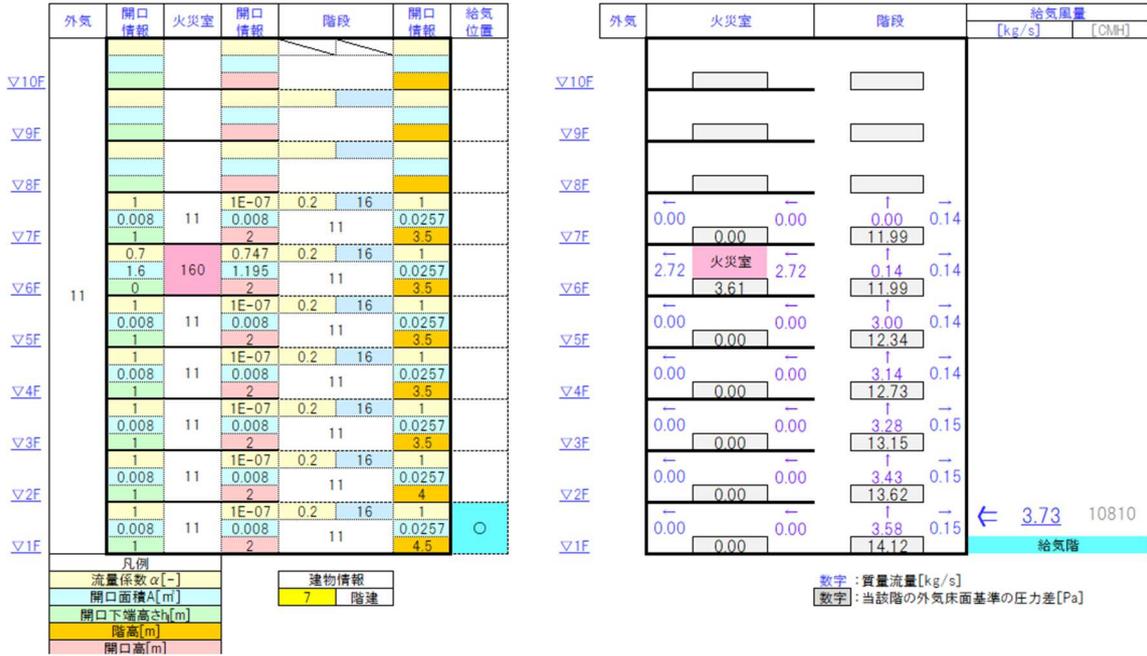
(a) 実験条件 (b) 理論モデルの入力値

図 2-4-21 理論モデルの入力概要

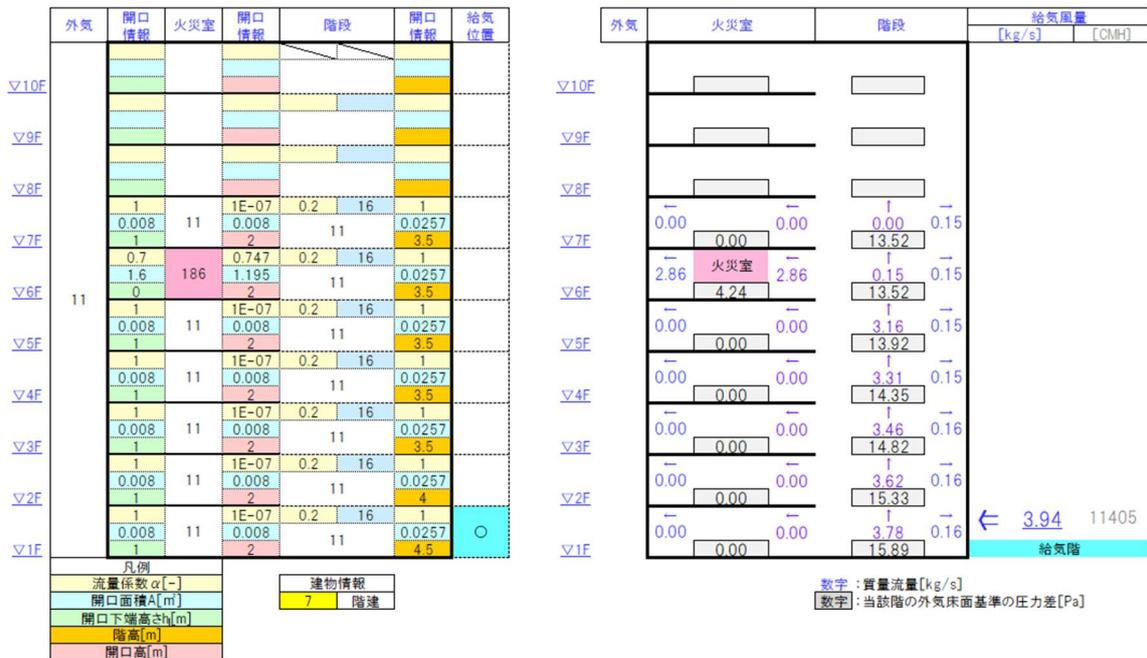
表 2-4-2 付室扉(b)における遮煙性能

Case	火災室温度 T [°C]	理論モデルにより算出した必要最小給気量 Q [kg/s]	給気量 Q [kg/s]	遮煙性能
4-4	160 (平均温度)	3.73	3.75	○
	186 (煙層温度)	3.94		×

※○：遮煙奏功、×：遮煙不奏功



(a) 火災室温度(鉛直方向の平均温度)の場合



(b) 火災室温度(煙層温度)の場合

図 2-4-22 理論モデルの計算概要 (Case4-4)

## 2.5 地下階を火災室と想定した階段加圧に関する考察

ここでは 2.3 で示した理論モデルを用い、地下階に通じる階段に加圧給気した場合の給気量および階段内の圧力分布等に関するケーススタディを行い、地下階に通じる階段に階段加圧を適用する場合の課題を明らかにする。

2.4 で示した実験結果を参考とし、表 2-5-1 の計算条件で、理論モデルを用い必要最小給気量と階段室と外気との差圧分布を計算する。

Case5-1 および Case5-2 は、図 2-5-1 に示したとおり、地上 5 階、地下 2 階の建物を想定し、火災室は地下 2 階、給気階は 1 階とし、地下階の階段室から外気等に通じる隙間量無しとしている。火災室から外気に通じる空気逃し口を条件とし、Case5-1 では設置する条件、Case5-2 では設置しない条件としている。なお、便宜的に、理論モデルの計算上、Case5-2 では Case5-1 で設定した空気逃し口が閉鎖していると想定した隙間を設定し、流量係数 $\alpha$ (0.007)<sup>[2-3]</sup>を用い有効開口面積 $\alpha A$ を入力値として与える。

表 2-5-1 計算条件

Case	想定建物		給気階 [階]	火災階 [階]	温度[°C]			有効開口面積 $\alpha A$ [m <sup>2</sup> ]		
	地上 [階]	地下 [階]			火災室	階段	外気	外気－ 火災室	火災室－ 階段室	階段室－ 外気
5-1	5	2	1	BF2	136 (火源の設置条件の Case4-3の火災室の 煙層温度)	11	11	1.155 (空気逃し口有)	0.5733	0.0257/ 階 (地上階) 0/階 (地下階)
5-2					0.011 (空気逃し口無)					

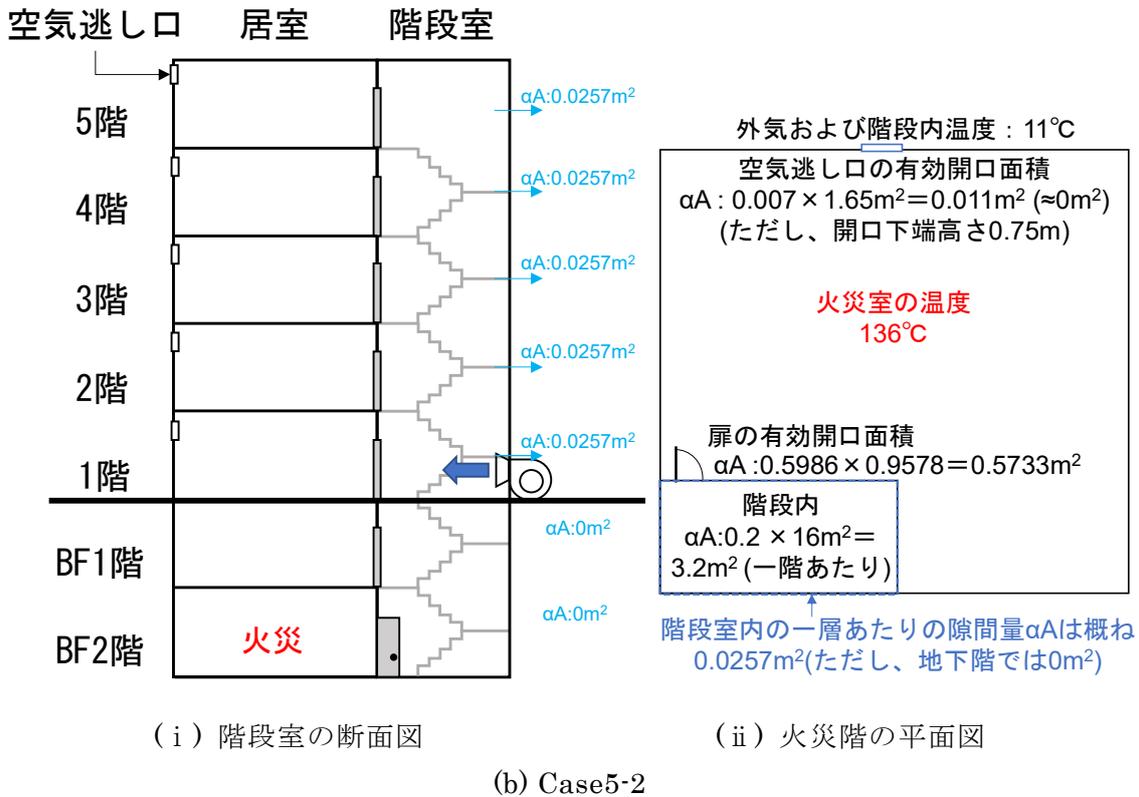
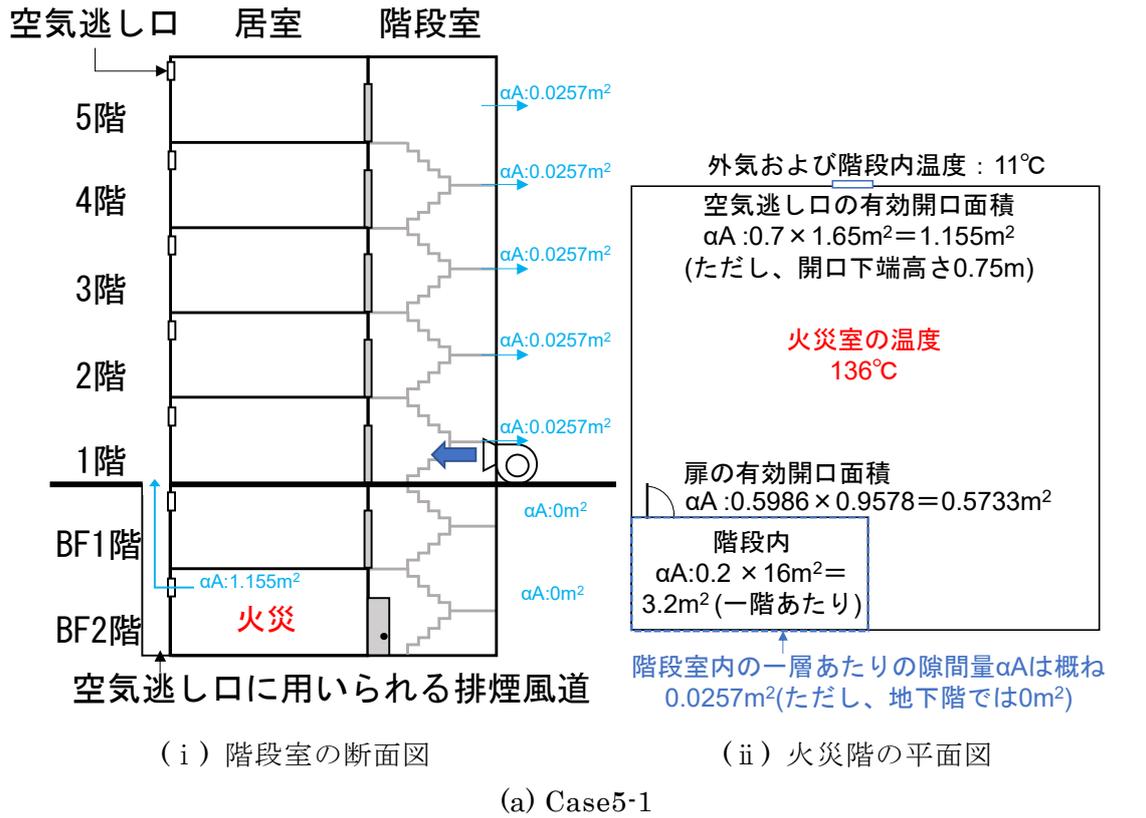


図 2-5-1 計算モデルの概要図

図 2-5-2 に Case5-1 および Case5-2 の計算結果を示す。この結果より、地下階に想定した火災室から外気に通じる空気逃し口が無い条件の Case5-2 では、空気逃し口が有る条件の Case5-1 に比べ、遮煙性能を確保するための必要最小給気量が増加するとともに、階段室と外気の差圧が、過大に圧力上昇することが分かる。これは、階段室扉の開放障害など、火災時に建物利用者の避難が困難になる可能性を示唆している。このケーススタディの結果から明らかなおとおり、地下階が火災室となる場合の外気に通じる通気経路の確保が肝要であり、地下階から外部に連絡している傾斜空間を通気経路として活用することが考えられる。

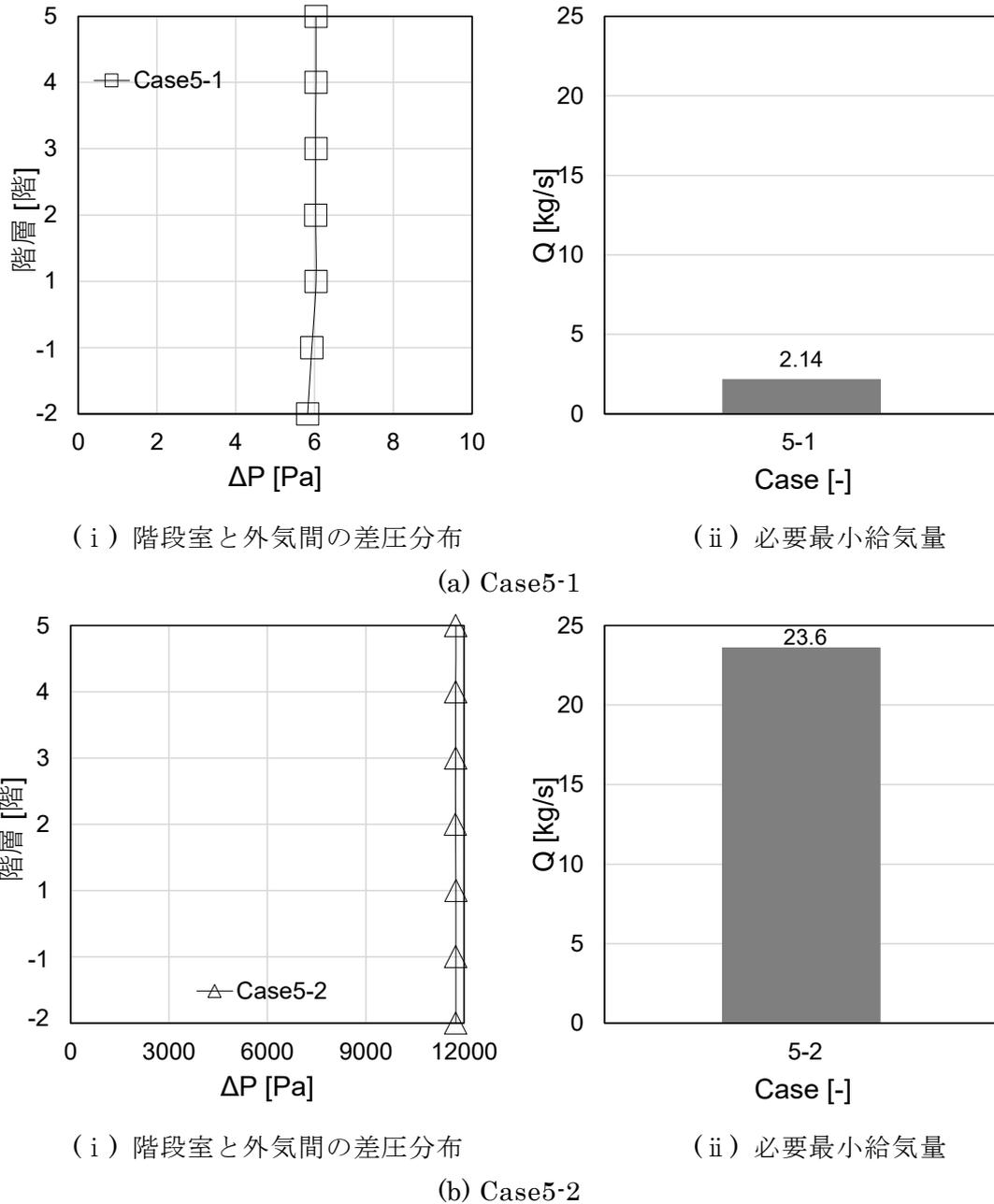
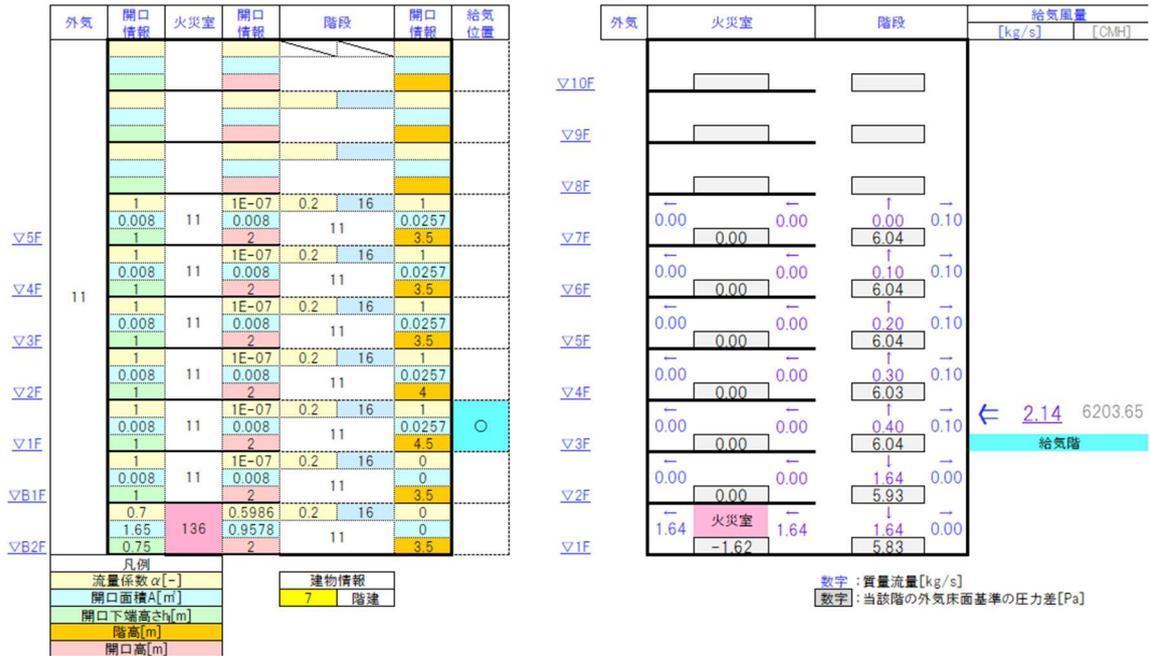
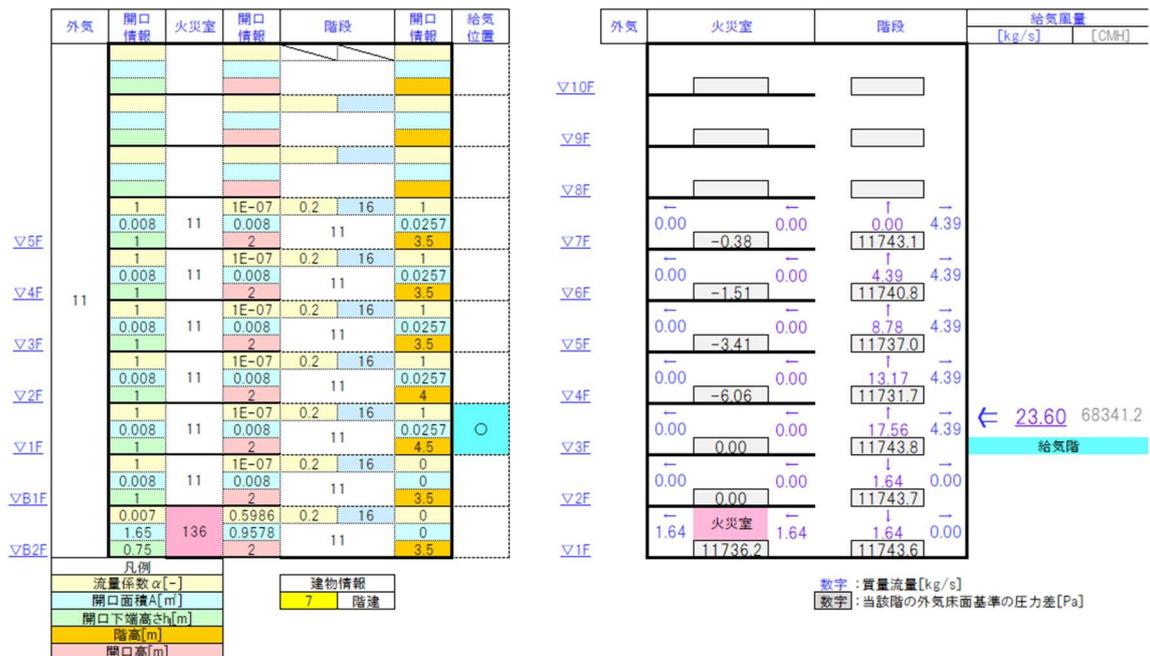


図 2-5-2 理論モデルの計算結果



(a) Case5-1



(b) Case5-2

図 2-5-3 理論モデルの計算概要 (Case5-1、Case5-2)

## 2.6 まとめ

第2章では、建築物の煙制御システムとして階段加圧方式を採用する際に留意すべき、扉の開閉条件に対する階段室内の圧力変動、圧力調整ダンパーを用いた階段内の圧力制御手法、動圧制御装置による動圧制御に着目した実験を実施し、さらに火源を設置した実験の結果に基づき、理論モデルを用い遮煙性能を満足する給気量に関する考察を行った。その結果、本実験条件の範囲で以下の知見が得られた。

### (1) 扉の開閉条件

- ・1階の外気へ通じる通気経路の扉が全て開放される条件では、階段室内と外気の圧力差が概ね 25Pa 程度となり、差圧を計測した高さごとの階段室と外気の差圧について顕著な差はみられなかった。
- ・外気へ通じる通気経路が確保されていない条件では、階段室と外気の差圧は 140~170Pa 程度となり、加圧給気により階段室内の圧力が高い状況となった。
- ・5階の階段室から外気へ通じる通気経路の扉が全て開放される条件では、階段室と外気の差圧は、1階では 50Pa 程度の値を示したが、3階以上の階では 30Pa 程度となった。

以上の結果より、階段加圧時に、外気へ通じる通気経路の扉が全て開放されていない条件では階段室内の圧力は高い状態になり、開放されている場合、外気との差圧は低くなる傾向となった。

### (2) 圧力調整ダンパーの設置条件

- ・圧力調整ダンパー①の一か所を用いる条件では、差圧は 75~90Pa 程度となる傾向がみられた。階段室から外気へ通じる通気経路として、3階の扉が全て開放される条件では 30~50Pa 程度、3階および5階の扉が全て開放される条件では 5~30Pa 程度に、差圧は減少する傾向がみられた。
- ・圧力調整ダンパー①と圧力調整ダンパー②を用いる条件では、差圧は 50~70Pa 程度となった。階段室から外気へ通じる通気経路として、3階の扉が全て開放される条件では 25~50Pa 程度、3階および5階の扉が全て開放される条件では 5~30Pa 程度に、差圧は減少する傾向がみられた。

以上の結果より、圧力調整ダンパーは、階段室と外気の差圧を制御する上で有効であるが、その配置数は、階段扉が閉鎖されている条件では、差圧に影響する可能性があるため、配置数に留意することが必要であった。なお、階段室から外気へ通じる通気経路を設けた扉の開放条件では、圧力調整ダンパーの設置数による差圧への顕著な影響はみられなかった。

### (3) 動圧制御装置の設置条件

- ・動圧制御装置を設置しない条件に比べ、動圧制御装置を設置した条件において、階段室内の高さ方向の圧力分布のばらつきの減少傾向がみられた。
- ・動圧制御装置を設置しない条件が、動圧制御装置を設置した条件に比べ、3階以上において圧力が低くなる傾向がみられ、給気による動圧がすべて静圧に変換されていない

い可能性があり、給気口の付近で動圧制御装置の設置の効果がみられた。

#### (4) 火源の設置条件

- ・ 給気量を  $6.29\text{kg/s}$  に設定した条件、および  $3.77\text{kg/s}$  に設定した条件では、火災室から廊下扉(c)を介した廊下への煙流出を防止できることを確認した。一方、給気量を  $1.75\text{kg/s}$  に設定した条件の場合、廊下扉(c)を介した廊下への煙流出を確認した。その結果を踏まえ、理論モデルを用い必要最小給気量を算出し、廊下扉(c)における遮煙性能について整理すると、給気量を  $6.29\text{kg/s}$  および  $3.77\text{kg/s}$  に設定した条件では、実験時の給気量が必要最小給気量を上回り、給気量を  $1.75\text{kg/s}$  に設定した条件では下回る結果となった。理論モデルの計算結果は、本実験で得られた遮煙性能を判断する廊下への煙流出の有無と整合する結果となった。
- ・ 給気量を  $3.75\text{kg/s}$  に設定した条件では、付室扉(b)を介した付室への煙流出を 160s 付近まで防止できることを確認したが、それ以降は若干の煙流出がみられた。付室扉(b)における遮煙性能について理論モデルを用い算出した必要最小給気量と比較すると、給気量を  $3.75\text{kg/s}$  に設定した条件では、実験時の給気量が必要最小給気量と同程度となった。この結果より、安全側の遮煙性能となるように実験で設定した給気量を幾分増やすことで、遮煙性能が満足できた可能性が示唆された。

さらに理論モデルを用い、地下階に通じる階段に加圧給気した場合の給気量および階段内の圧力分布等に関する計算を行い、地下階に想定した火災室から外気等に通じる空気逃し口が無い条件では、空気逃し口が有る条件に比べ、遮煙性能を確保するための必要最小給気量が増加するとともに、階段室と外気の差圧が、過大に圧力上昇することを示した。

## 参考文献

- [2-1] M. Kishiue, J. Yamaguchi, S. Okinaga, K. Matsuyama and T. Matsushita: Experimental study on influence of air supply system difference on smoke shielding performance in air pressure smoke control, The Proceedings of 10th Asia-Oceania Symposium on Fire Science and Technology, pp. 801-810, 2016.10
- [2-2] 森山 修治, 佐藤 孝輔: 階段加圧防煙システムの性能検証事例(その2. 排煙を行わない場合の防煙性能—高層建物における事例), 日本建築学会大会学術講演梗概集(東北), pp. 215-216, 2000.9
- [2-3] 財団法人日本建築センター: 加圧防排煙設計マニュアル, 2014.3
- [2-4] 松下 敬幸, 寺井 俊夫: 階段室加圧時の気流性状の実測, 日本建築学会大会学術講演梗概集(東海), pp. 737-738, 1985.10
- [2-5] 松山 賢, 岸上 昌史, 山口 純一, 沖永 誠治, 松下 敬幸: 加圧防排煙における動圧方式に対応した常温時の性能確認手法に関する実験的研究 その1 静圧測定装置の検証, 日本火災学会研究発表会概要集, pp. 210-211, 2015.5
- [2-6] 岸上 昌史, 山口 純一, 村岡 宏: 加圧防排煙における性能確認時の風速測定法に関する実験的研究, 大林組技術研究所報, No. 78, pp. 1-8, 2014
- [2-7] 一般財団法人日本建築防災協会, アイエヌジー株式会社: 法適合に向けた既存建築物の防火改修の手法の検討報告書(<第Ⅲ部>階段加圧告示の検討), 2018.3
- [2-8] 官 灵君, 岸上 昌史, 大宮 喜文, 三ツ邑 智裕, 朴 鉉又, 山田 茂: 簡易な階段加圧給気量算定方法を用いたケーススタディ その1 簡易な階段加圧給気量算定方法の構築, 日本建築学会北海道支部研究報告集, No. 90, pp. 329-332, 2017.6
- [2-9] Y. He, A. Fernando and M. Luo: Determination of interface height from measured parameter profile in enclosure fire experiment, Fire safety journal, Vol. 31, Issue. 1, pp. 19-38, 1998.7
- [2-10] Y. He: On Experimental Data Reduction for Zone Model Validation, Journal of Fire Sciences, Vol. 15, Issue. 2, pp. 144-161, 1997.3
- [2-11] 川村 成彦, 阿部 伸之, 山田 茂, 山田 常圭: 加圧防排煙時の消防活動拠点における扉の流量係数及び開放力に関する実験研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道), 2004.8

## 第3章

# 傾斜空間における熱気流性状 に関する実験



### 3.1 はじめに

社会ニーズや建設技術の向上等が相まって、都市部では多くの建築物等が建設され過密化が進み、さらに土地利用の高度化が検討されるようになり、大深度地下を含む地下空間の利用が進んでいる。そのような中で、都心部の建築物等の地下空間は地下街や駐車場として利用される事例がみられる<sup>[3-1]</sup>。地下空間を利用する上で、災害に対する安全の確保は重要な課題であり、火災、爆発、停電などに対する課題を明確にし、検討することは肝要である。例えば、火災に対しては、地下空間を構成する空間ごとに区画化し、可能な限り施設を不燃化し、可燃物を減少させるなどの検討を行う必要がある。そして、万が一、火災が発生した場合、初期消火などの対応を確実にを行うことが重要である。また、外部空間との鉛直距離や空間の閉鎖性などの特徴を踏まえ、地下空間の利用者の避難の困難性に対する留意すべき課題を明確にし、対策を検討しなければならない。併せて、消防活動についても、火災時に発生した煙が流れる方向が消防隊の進入方向と逆行する可能性があるため、消防活動が困難とならないような消防防災対策を検討する必要もある。

そのような地下空間では、スロープや直階段等(以降、傾斜空間とする)の縦動線で外部空間と連絡するように計画されることが多い。仮に、駐車場等で火災が発生した場合、傾斜空間を経由して煙などの熱気流は上方向に拡がることが考えられる。このような傾斜空間は、一方の開口は火災室と連絡し、他方の開口は外部空間と通じている。類似の火災現象として、これまで傾斜空間に関する研究は、主に鉄道や自動車などの交通網の一部となるトンネルを対象として検討されている<sup>[3-2]~[3-5]</sup>。トンネルは、傾斜空間の両端部が外部空間と接続しており、傾斜空間内で火災を想定することが多い。例えば、岡等<sup>[3-6]</sup>の既往研究により、トンネルにおける天井面下の熱気流の温度減衰についてトンネルの角度、発熱速度および流動距離等を考慮した関係式が提案されている。一方、建築物の地下空間の居室が火災室となった場合、火災室に接続する傾斜空間における熱気流は、火災室と通じる開口部から噴出し、外気に向かい一方向に流動する可能性が高く、トンネルにおける熱気流と異なる性状を示す可能性がある。

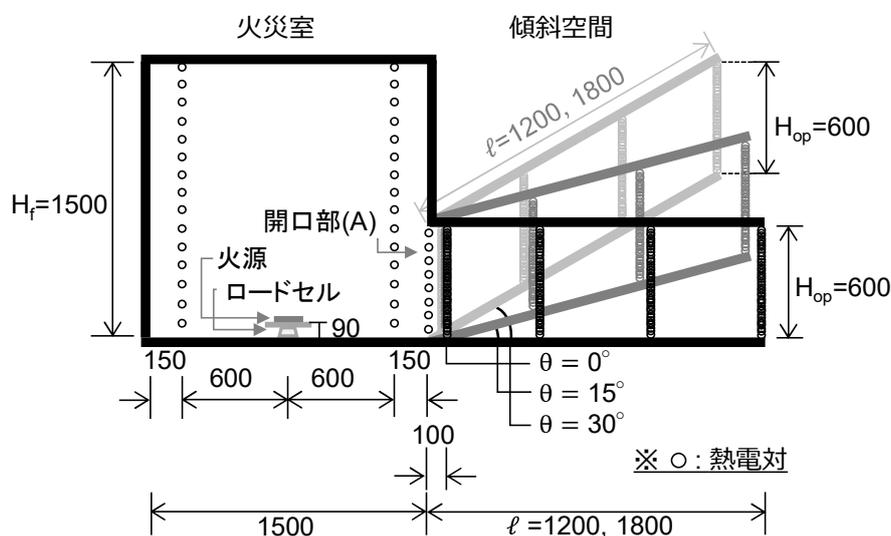
第3章では、上述した背景のもと、一方の開口は火災室と通じ、他方の開口は外気と通じた傾斜空間における熱気流性状に着目した模型実験を実施し、傾斜空間内の熱気流性状を定量的に明らかにする。

### 3.2 実験概要

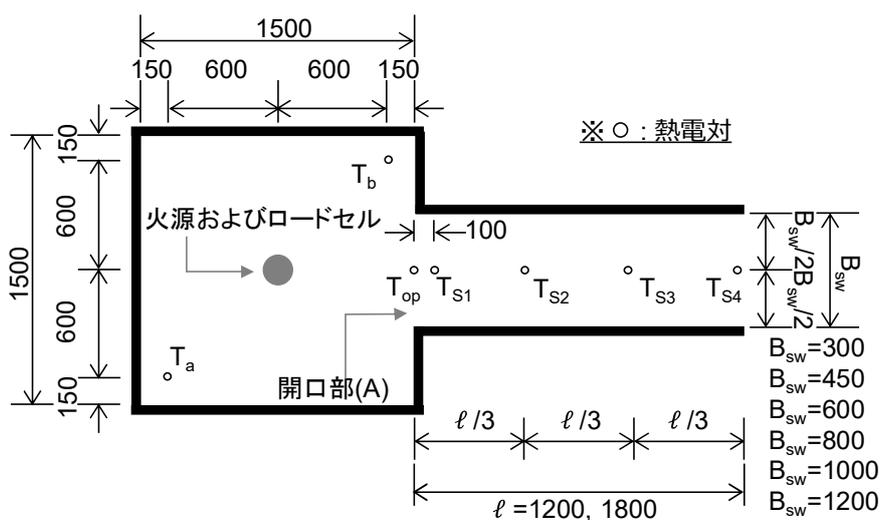
一方は火災室と通じ、他方の外気に通じる傾斜空間における熱気流性状に着目し、火災室および傾斜空間を想定したモデルを用い、傾斜角度を変化させた実験を実施した。

#### 3.2.1 模型概要

図 3-2-1 に、本実験で使用した模型の断面図と平面図を示す。火災室は、幅 1500mm × 高さ 1500mm × 奥行 1500mm の立方体とし、火災室の開口部 (A) の開口高さは 600mm とした<sup>注 3-1</sup>。傾斜空間は、傾斜角度によらず鉛直高さを 600mm とし、幅は 300mm、450mm、600mm、800mm、1000mm、1200mm とし、長さは 1200mm、1800mm、傾斜角度は  $0^\circ$ 、 $15^\circ$ 、 $30^\circ$  とした<sup>注 3-2</sup>。模型は、厚さ 25mm のケイ酸カルシウム板を用い製作した。また、火源は火災室の中央に配置し、火災室の床面から 90mm の高さに火源床面を設置した。



(a) 断面図



(b) 平面図

図 3-2-1 実験モデル概要 [単位 : mm]

### 3.2.2 測定項目

本実験の測定項目は、重量減少速度および鉛直温度とした。

#### (1) 重量減少速度

重量減少速度の計測は、ロードセル(共和電業社、LUB-5KB)を用いた。

#### (2) 鉛直温度

鉛直温度の計測は、火災室の2地点( $T_a$ 、 $T_b$ )、開口部(A)の1地点( $T_{op}$ )でK型熱電対( $\phi 0.32\text{mm}$ )を用い、傾斜空間の4地点( $T_{s1}\sim T_{s4}$ )でK型熱電対( $\phi 0.2\text{mm}$ )を用いた。また、図3-2-2(a)、(b)に示す通り、火災室 $T_a$ と $T_b$ は15点(天井面下25mmから100mm間隔)、開口部(A) $T_{op}$ は8点(天井面下40mmから70mm間隔)で熱電対ツリーを構成した。図3-2-2(c)に示す通り、傾斜空間 $T_{s1}\sim T_{s4}$ は46点(天井面から10mm間隔35点、350mmから20mm間隔に10点、550mmから25mm間隔に1点)で熱電対ツリーを構成し、図3-2-1(a)のように、傾斜によらず、水平床面に対し鉛直方向に測定した。

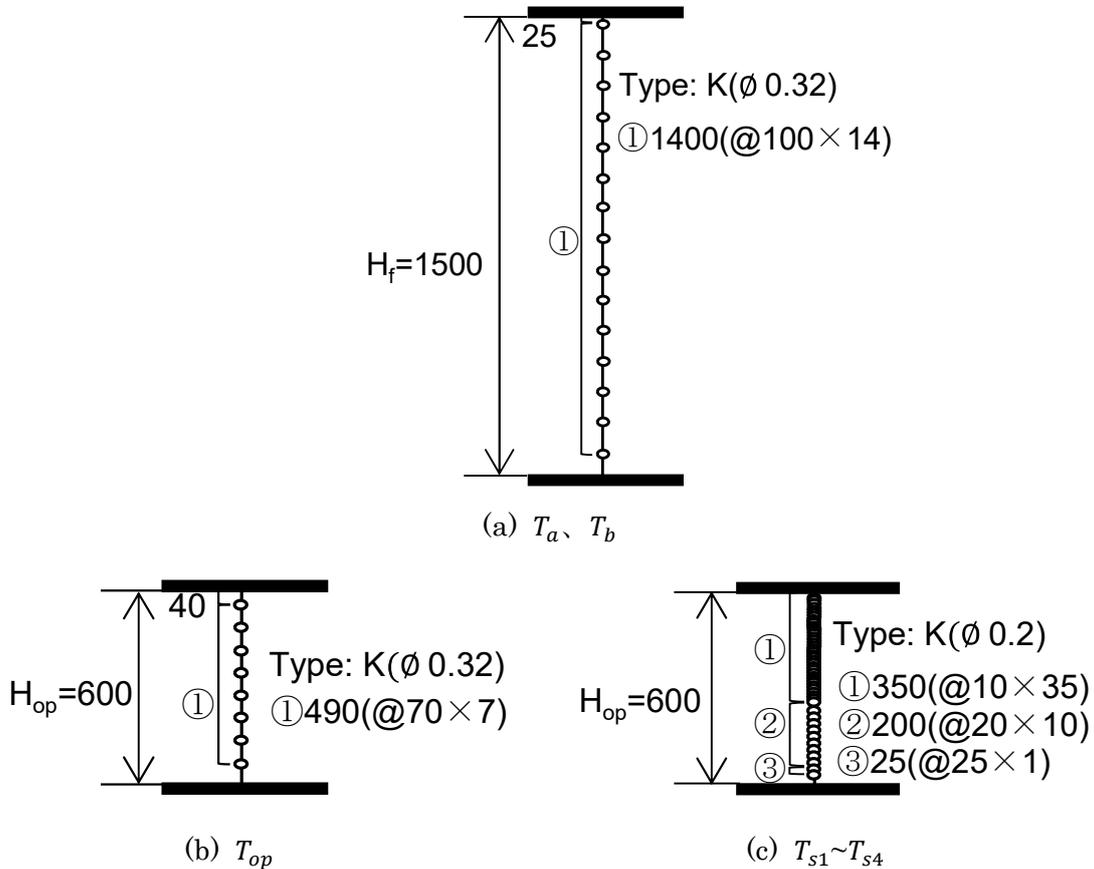


図3-2-2 熱電対ツリーの構成 [単位：mm]

### 3.2.3 実験条件および方法

実験条件を表 3-2-1 に示す。火源径 $D_f$ 、傾斜空間の幅 $B_{sw}$ 、傾斜空間の長さ $\ell$ 、傾斜空間の傾斜角度 $\theta$ をパラメーターとし、計 54 条件の実験を実施した。燃料はエタノールを使用し、エタノールの投入量は火源径 $D_f=150\text{mm}$  では 250g、火源径 $D_f=200\text{mm}$  では 500g とした。

表 3-2-1 実験条件

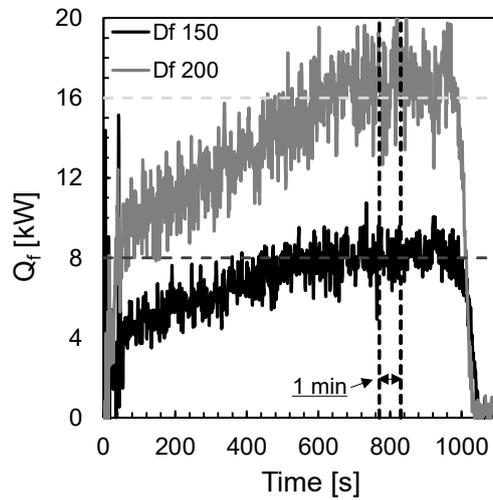
火源径 $D_f$ [mm]	150、200
傾斜空間幅 $B_{sw}$ [mm]※	300、450、600 800、1000、1200
傾斜空間長さ $\ell$ [mm]	1200、1800
傾斜角度 $\theta$ [°]	0、15、30

※ $B_{sw}=800\text{mm}$ 、 $1000\text{mm}$ 、 $1200\text{mm}$  の条件では、 $\ell=1800\text{mm}$  とし実験を実施

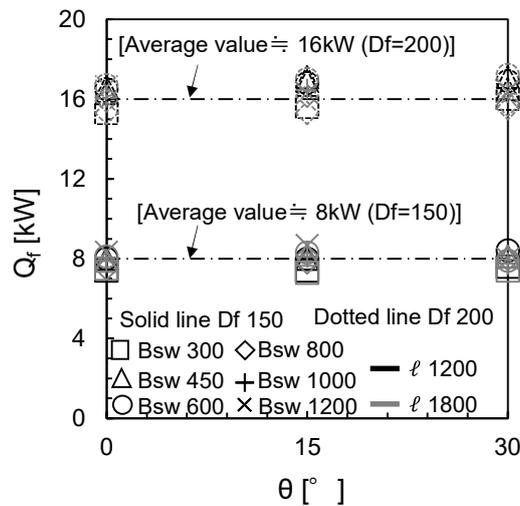
### 3.3 実験結果および考察

#### 3.3.1 発熱速度

図 3-3-1(a)に代表例として ( $B_{sw}=600\text{mm}$ 、 $\ell=1800\text{mm}$ 、 $\theta=0^\circ$ ) の実験条件の発熱速度  $Q_f$  の経時変化を示す。ただし、発熱速度  $Q_f$  は燃料として使用したエタノールが完全燃焼していると仮定し、重量減少速度に発熱量 ( $27\text{MJ/kg}$ ) を掛け算出した理論発熱速度である<sup>注 3-3</sup>。この結果より、発熱速度  $Q_f$  は、着火開始後 700 秒位経過してから概ね定常となる傾向がみられた。よって、本章では全条件において 770~830 秒を準定常状態とし、これ以降に示す全ての結果(発熱速度および温度)は 770~830 秒の 1 分間平均値とした。また、図 3-3-1(b)に全ての条件について準定常状態時の発熱速度  $Q_f$  の平均値を示す。本実験条件の準定常状態時の発熱速度は火源径  $D_f=150\text{mm}$  では  $Q_f \doteq 8\text{kW}$ 、火源径  $D_f=200\text{mm}$  では  $Q_f \doteq 16\text{kW}$  となった。



(a) 発熱速度  $Q_f$  の経時変化 ( $B_{sw}=600\text{mm}$ 、 $\ell=1800\text{mm}$ 、 $\theta=0^\circ$ )



(b) 発熱速度  $Q_f$  と傾斜角度  $\theta$

図 3-3-1 発熱速度  $Q_f$

### 3.3.2 鉛直温度

#### (1) 火災室

図 3-3-2 に、火災室における鉛直方向の上昇温度 $\Delta T$ を傾斜空間幅 $B_{sw}$ および火源径 $D_f$ の条件毎に整理した結果を示す。ここで、上昇温度 $\Delta T$ は火災室の $\Delta T_a$ と $\Delta T_b$ の平均温度である(以後同じ)。図 3-3-2 より、傾斜空間幅 $B_{sw}$ と火源径 $D_f$ が同じ条件において、火災室温度に対する傾斜空間長さ $l$ および傾斜角度 $\theta$ の影響は殆どみられなかった。また、傾斜空間幅 $B_{sw}$ が長くなるにつれ、火災室の温度は若干低くなる傾向がみられる。

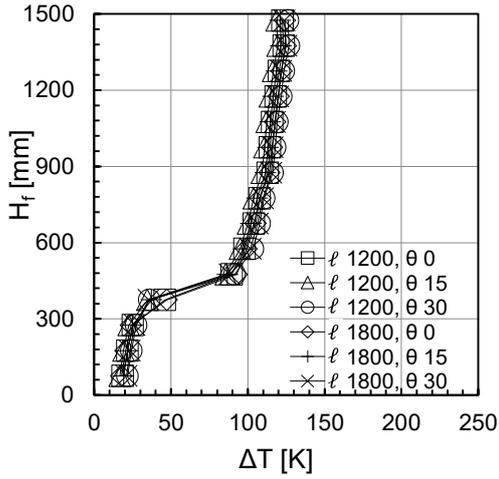
#### (2) 開口部 (A)

図 3-3-3 に、開口部 (A) における鉛直方向の上昇温度 $\Delta T$ を示す。図 3-3-3(a)~(f) は、それぞれ傾斜空間幅 $B_{sw}=300\text{mm}$ 、 $450\text{mm}$ 、 $600\text{mm}$ 、 $800\text{mm}$ 、 $1000\text{mm}$ 、 $1200\text{mm}$  の条件を示しており、火源径 $D_f$ 毎に整理した結果である。図 3-3-3 より、開口部 (A) では火源径 $D_f$ が同じ条件であれば、傾斜空間長さ $l$ の影響を殆ど受けず、傾斜空間幅 $B_{sw}$ および傾斜角度 $\theta$ が大きくなるに従い、開口部 (A) の上部の温度は低下する傾向がみられる。これは、傾斜空間幅 $B_{sw}$ が大きくなる程、換気量が増え、また、傾斜角度 $\theta$ が大きくなるにつれ傾斜空間において生じる浮力の影響で煙突効果が発生し、換気量が増加した可能性が考えられる<sup>[3-4]</sup>。

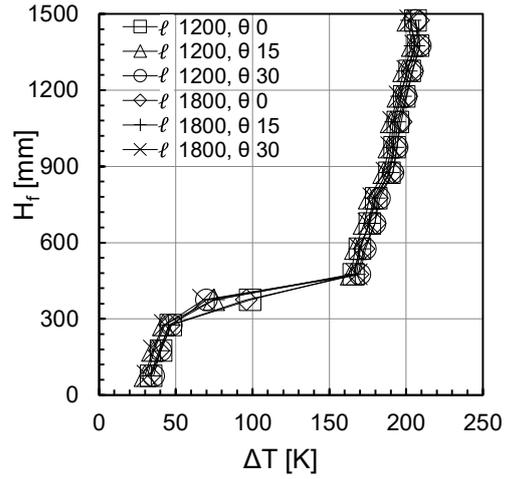
#### (3) 傾斜空間

図 3-3-4 に、火源径 $D_f=200\text{mm}$  の条件で、 $B_{sw}=300\text{mm}$ 、 $600\text{mm}$ 、 $800\text{mm}$ 、 $1200\text{mm}$ 、 $l=1800\text{mm}$  における傾斜空間の各温度測定地点での鉛直上昇温度 $\Delta T$ を示す。ここで、開口部 (A) を起点とした流動距離 $r=100\text{mm}$  における鉛直温度を $T_{s1}$ とし、同様に $T_{s2}$ は $r=600\text{mm}$ 、 $T_{s3}$ は $r=1200\text{mm}$ 、 $T_{s4}$ は $r=1800\text{mm}$  である。図 3-3-4 より、傾斜角度 $\theta$ に関わらず流動距離 $r$ が長くなるにつれ上部の温度は減少する傾向がみられる。また、傾斜角度 $\theta$ が大きくなるにつれ、傾斜空間上部の温度は全体的に低くなり、流動距離 $r=100\text{mm}$  の付近では傾斜空間の上部に概ね等しい温度分布を示す高温層を確認することができるが、流動距離 $r$ が長くなるにつれ、そのような高温層の形成が顕著でなくなる傾向がみられる。

図 3-3-5 に傾斜空間における天井面下の熱気流の最高上昇温度 $\Delta T_{max}$ について開口部 (A) を起点とした流動距離 $r$ に対し傾斜空間幅 $B_{sw}$ および傾斜空間長さ $l$ の条件毎に整理した結果を示す。図 3-3-5 より、それぞれの傾斜空間幅 $B_{sw}$ で傾斜空間長さ $l$ が等しければ、 $\Delta T_{max}$ は流動距離 $r$ が長くなるに従い、傾斜角度 $\theta$ が大きい条件ほど、温度減衰は顕著になる傾向がみられる。

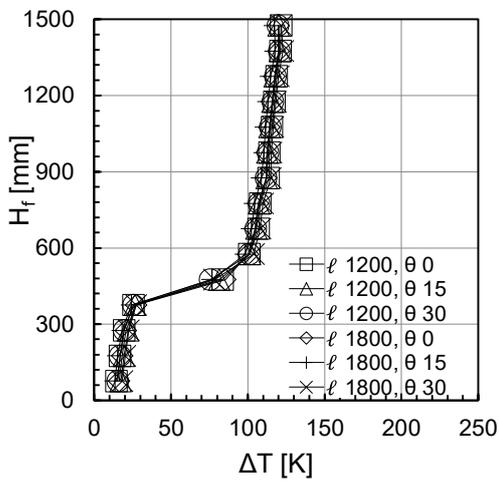


(i)  $D_f = 150\text{mm}$

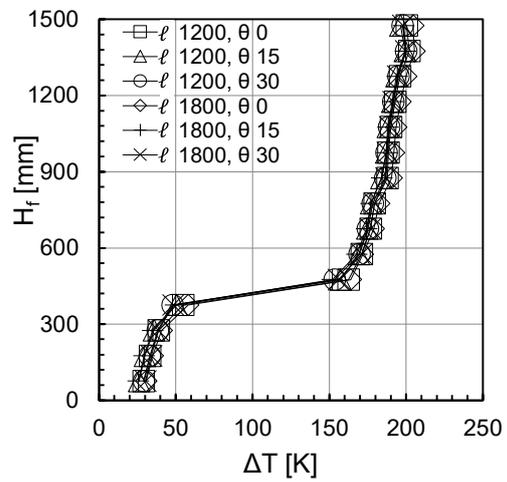


(ii)  $D_f = 200\text{mm}$

(a)  $B_{sw} = 300\text{mm}$

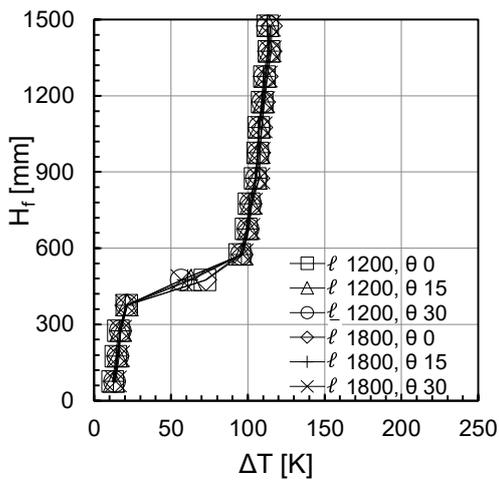


(i)  $D_f = 150\text{mm}$

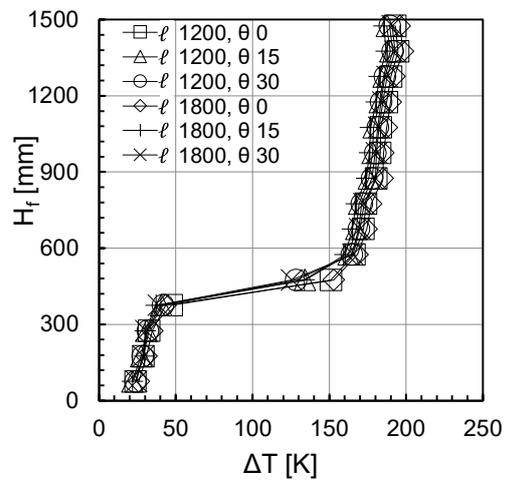


(ii)  $D_f = 200\text{mm}$

(b)  $B_{sw} = 450\text{mm}$



(i)  $D_f = 150\text{mm}$



(ii)  $D_f = 200\text{mm}$

(c)  $B_{sw} = 600\text{mm}$

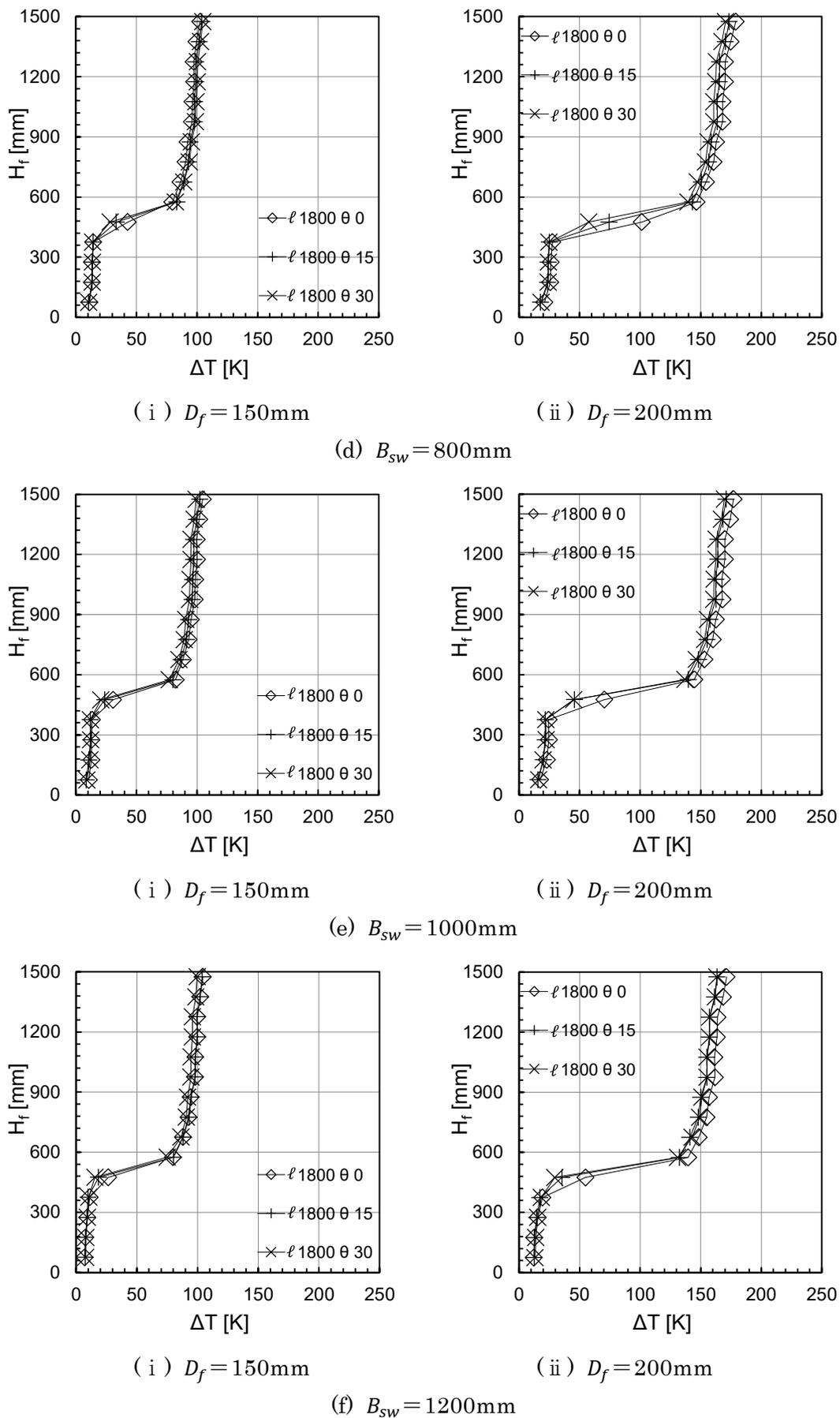
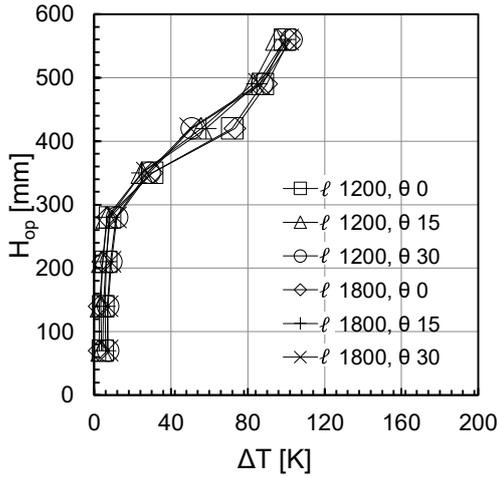
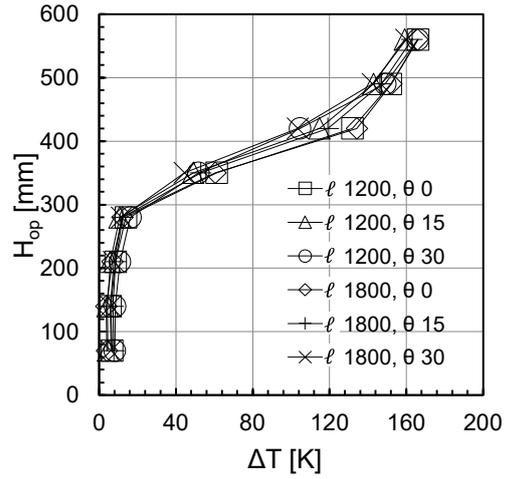


図 3-3-2 火災室の鉛直上昇温度分布

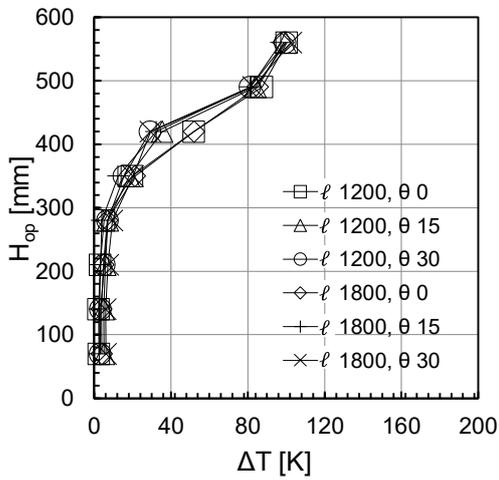


(i)  $D_f = 150\text{mm}$

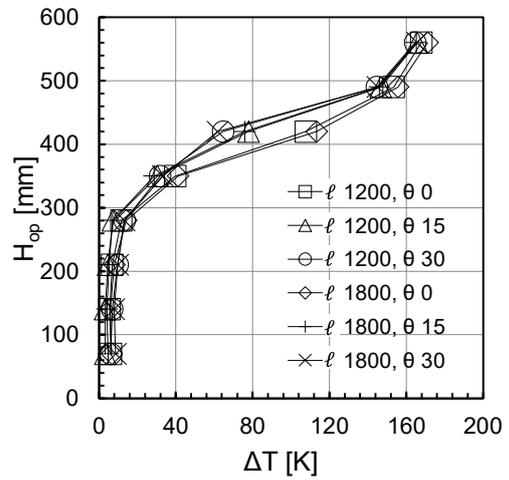


(ii)  $D_f = 200\text{mm}$

(a)  $B_{sw} = 300\text{mm}$

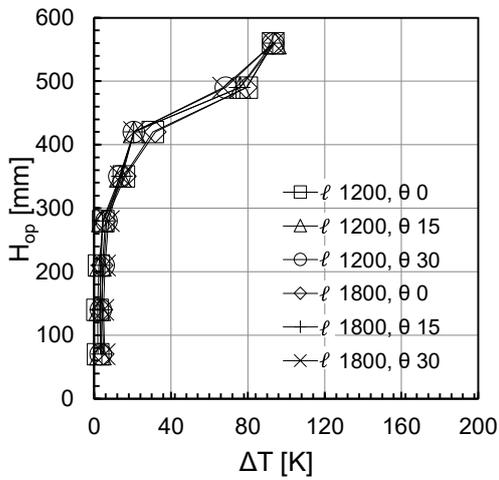


(i)  $D_f = 150\text{mm}$

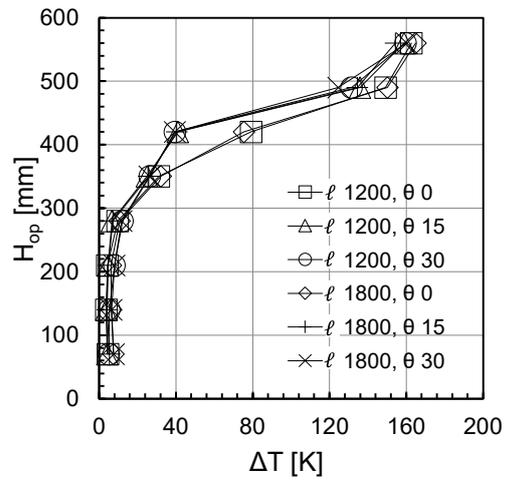


(ii)  $D_f = 200\text{mm}$

(b)  $B_{sw} = 450\text{mm}$



(i)  $D_f = 150\text{mm}$



(ii)  $D_f = 200\text{mm}$

(c)  $B_{sw} = 600\text{mm}$

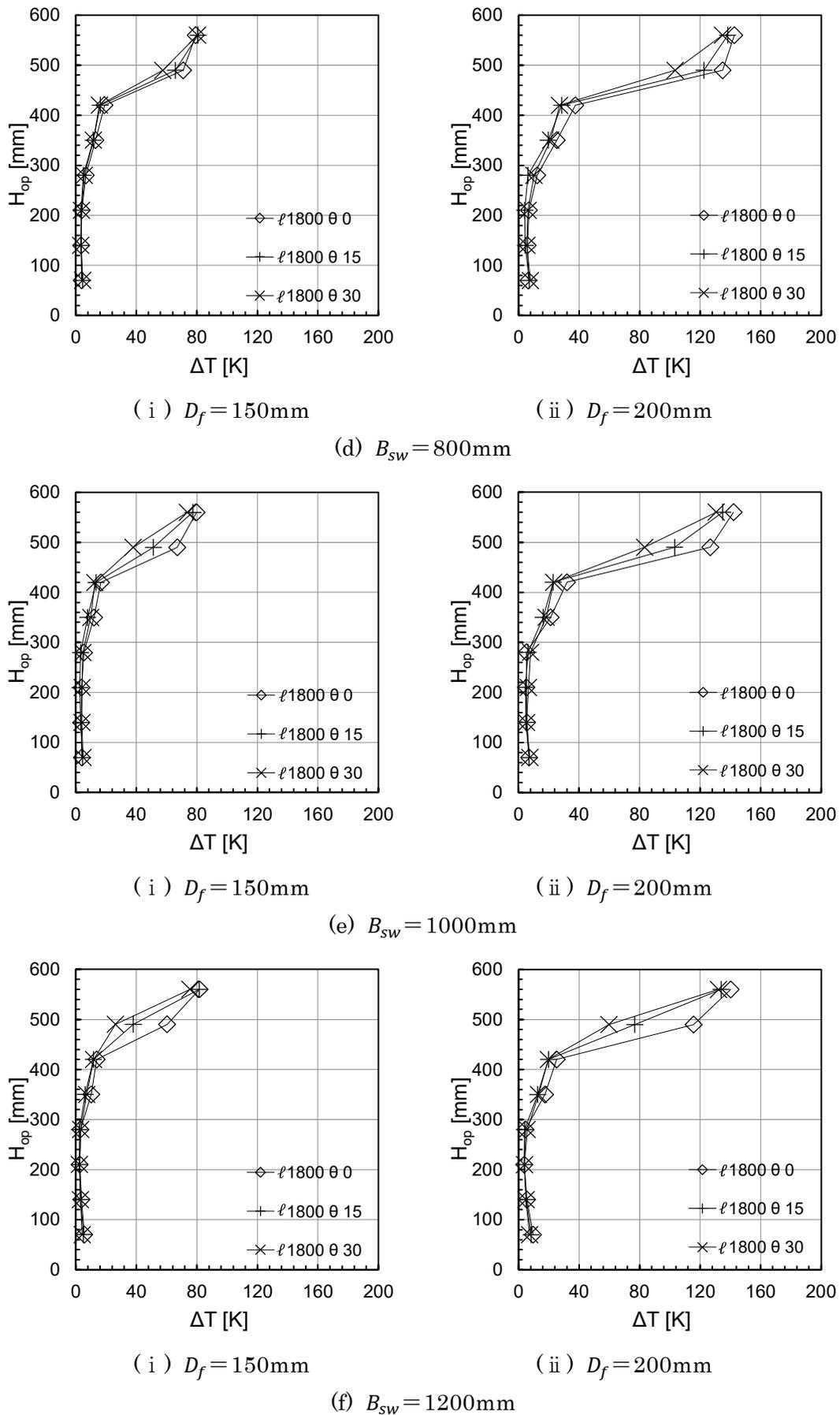
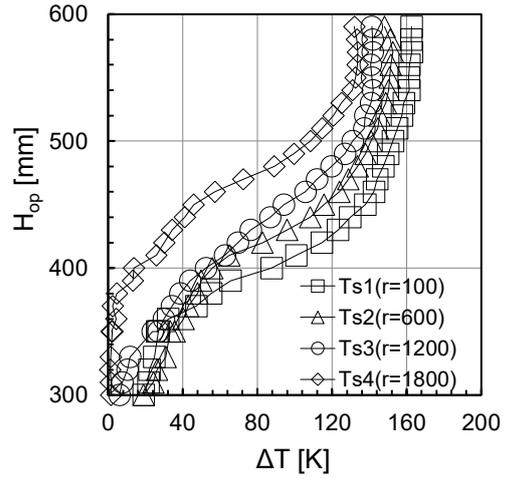
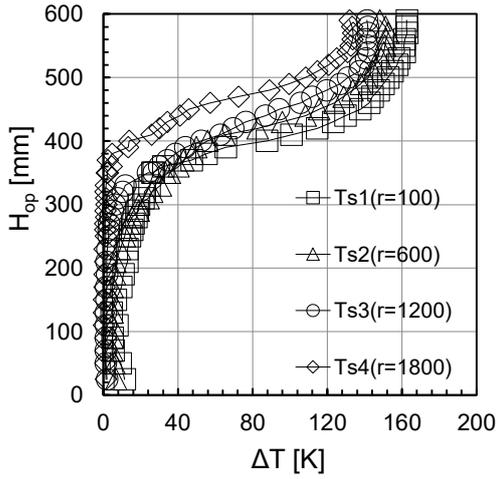
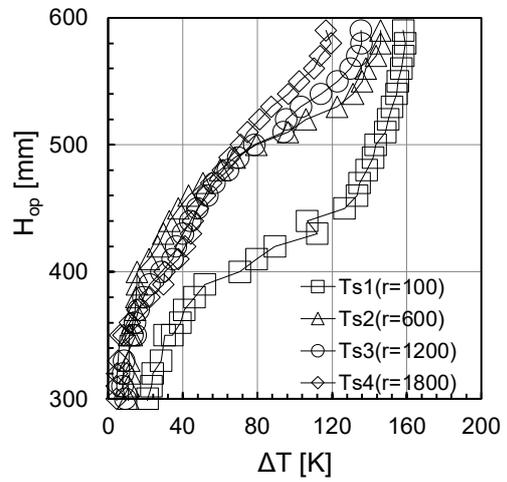
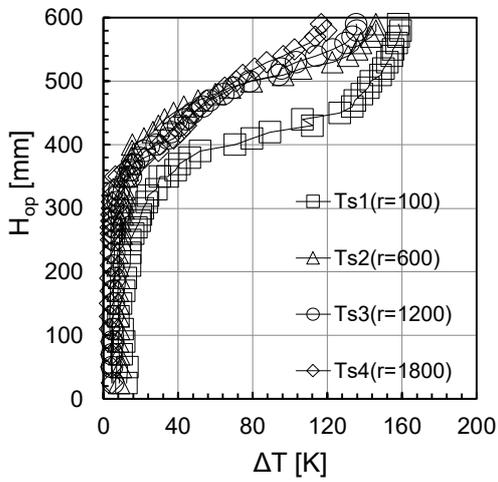


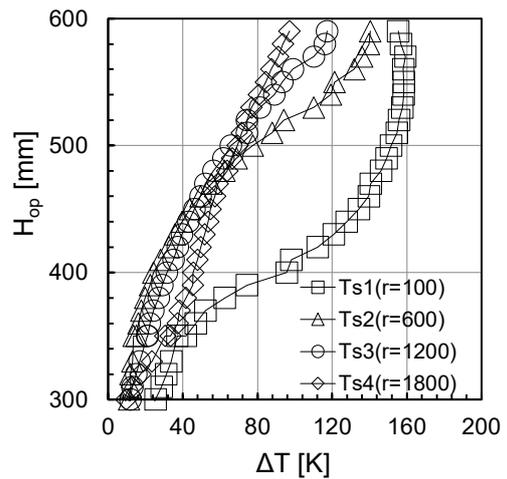
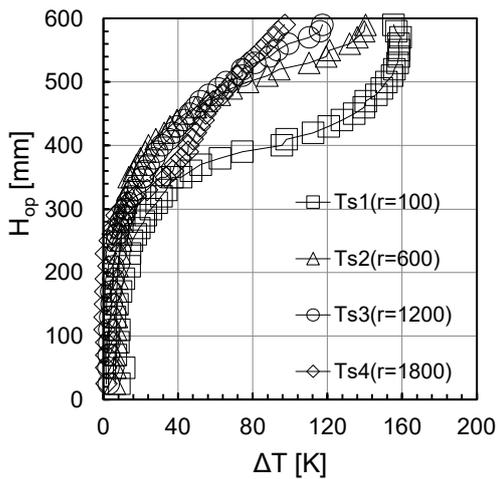
図 3-3-3 開口部(A)の鉛直上昇温度分布



(i)  $\theta = 0^\circ$

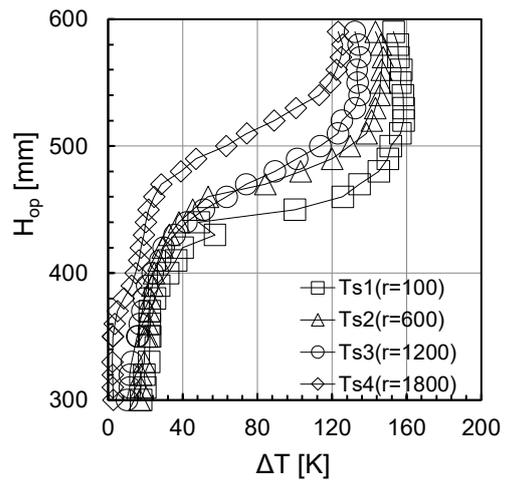
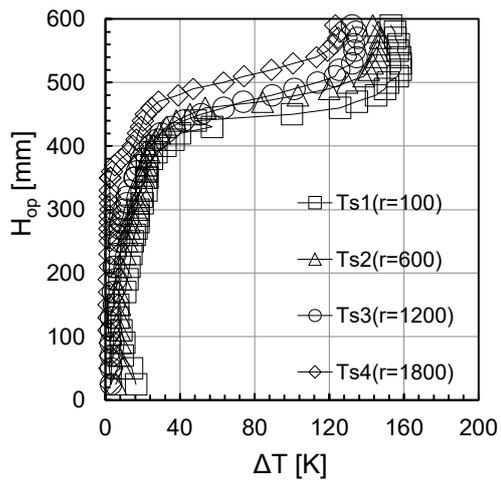


(ii)  $\theta = 15^\circ$

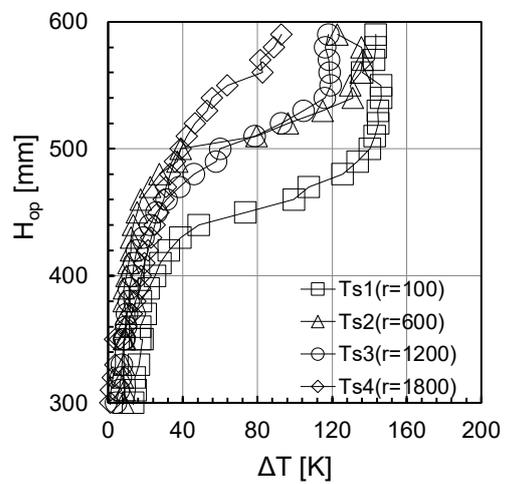
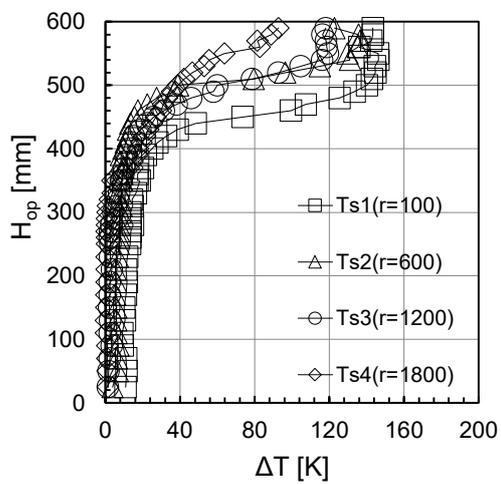


(iii)  $\theta = 30^\circ$

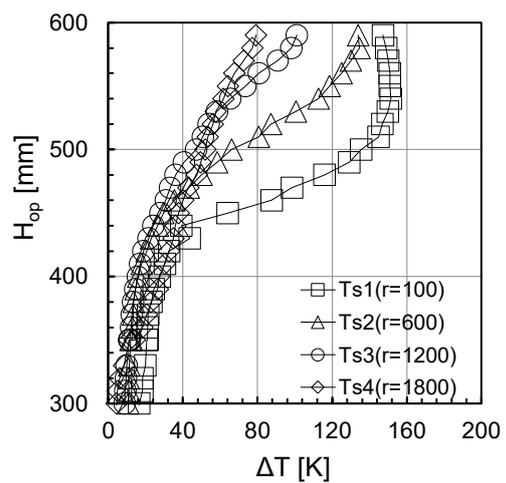
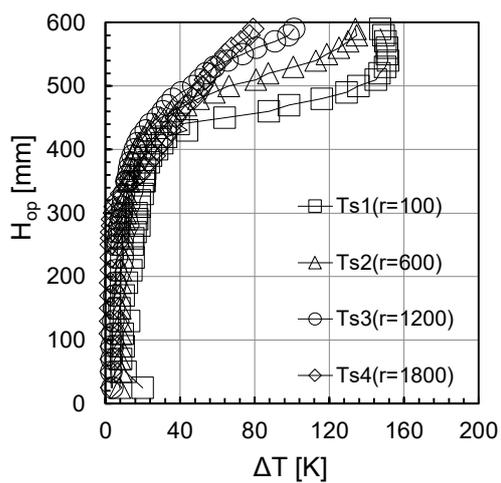
(a)  $B_{sw} = 300\text{mm}$



( i )  $\theta = 0^\circ$

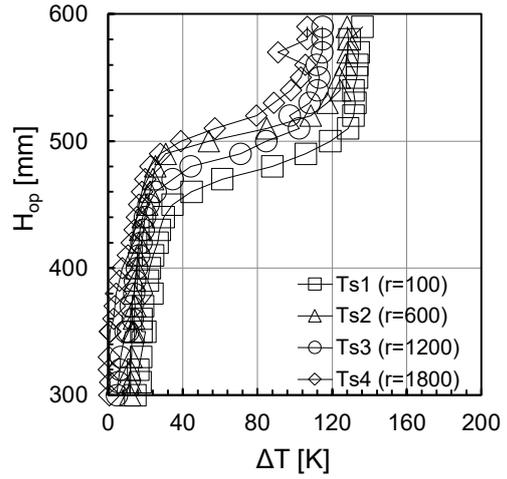
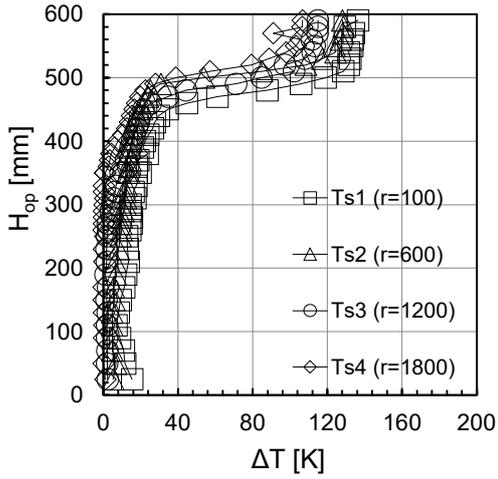


( ii )  $\theta = 15^\circ$

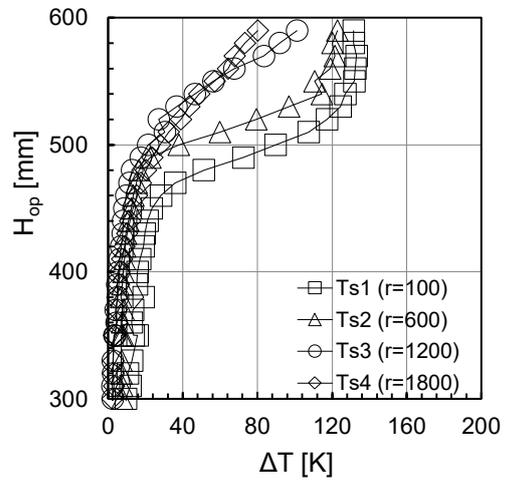
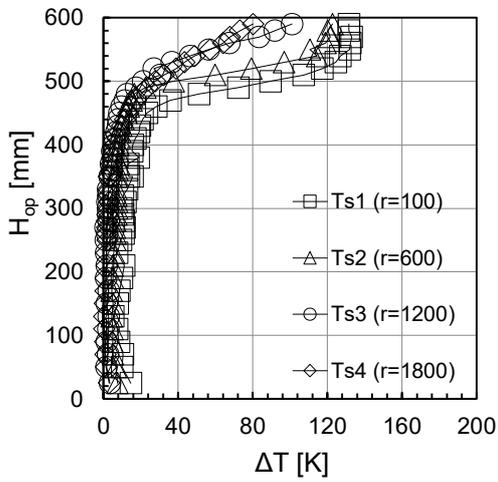


( iii )  $\theta = 30^\circ$

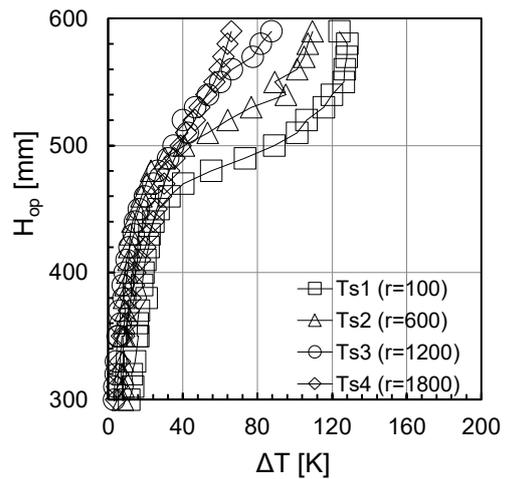
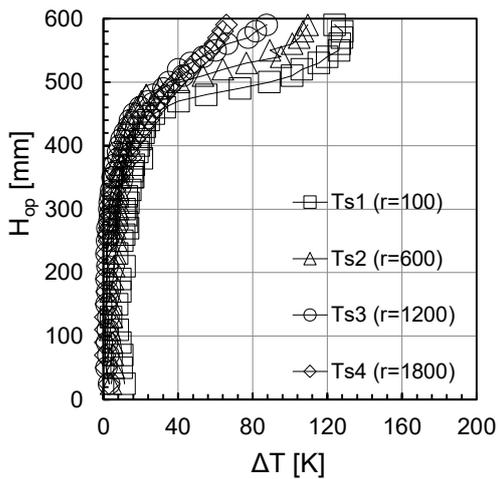
( b )  $B_{sw} = 600\text{mm}$



(i)  $\theta = 0^\circ$

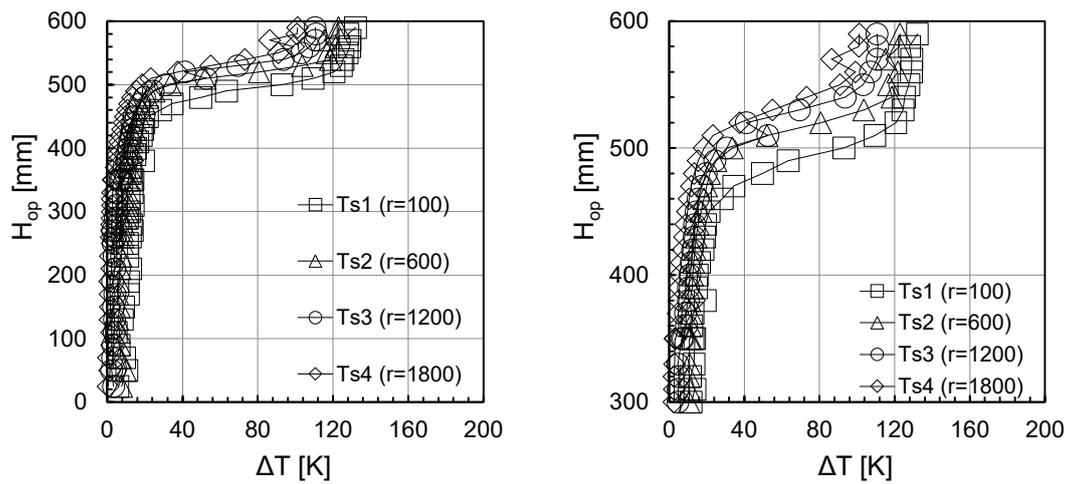


(ii)  $\theta = 15^\circ$

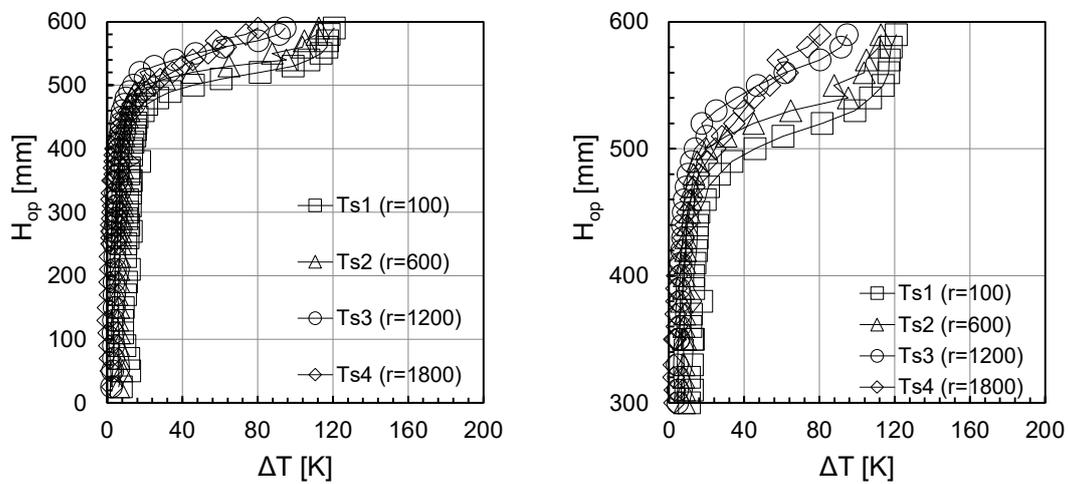


(iii)  $\theta = 30^\circ$

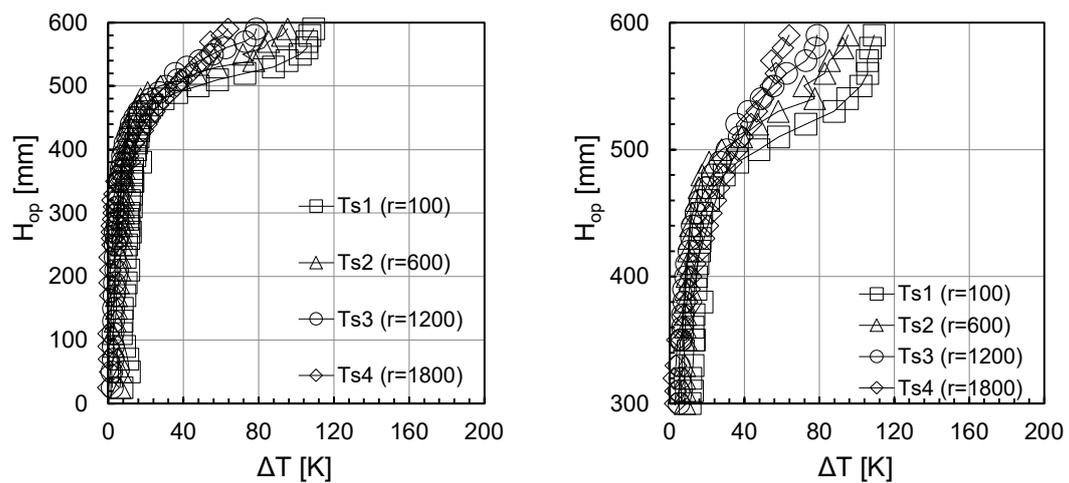
(c)  $B_{sw} = 800\text{mm}$



(i)  $\theta = 0^\circ$



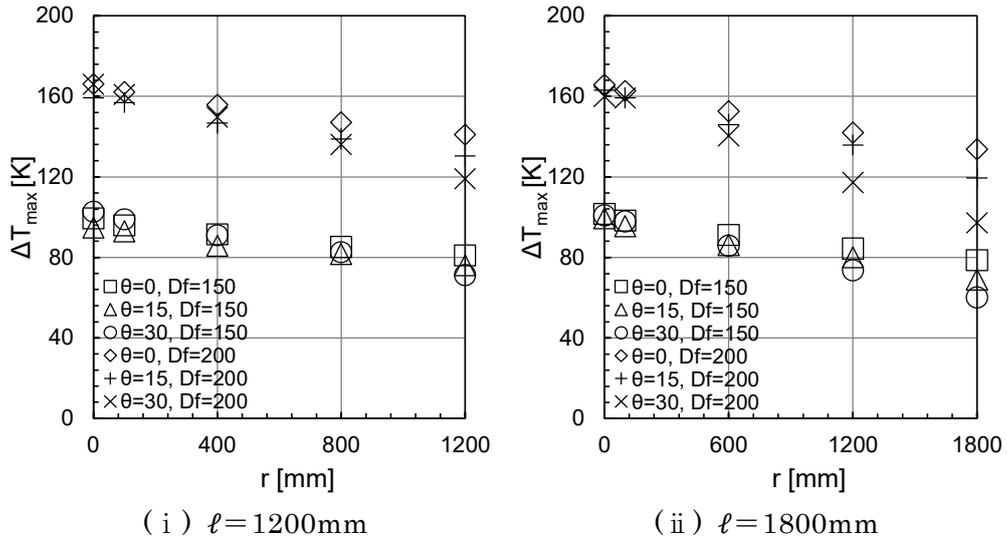
(ii)  $\theta = 15^\circ$



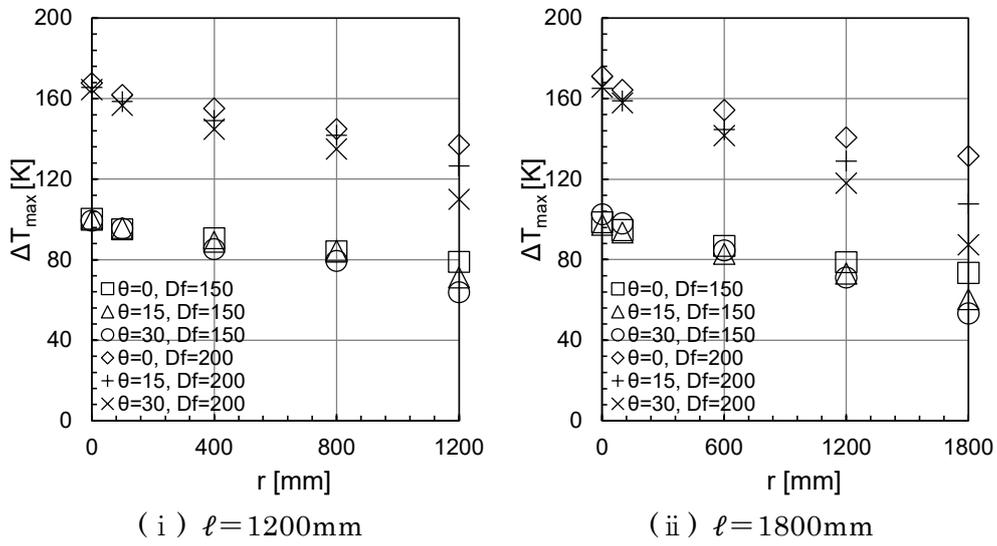
(iii)  $\theta = 30^\circ$

(d)  $B_{sw} = 1200\text{mm}$

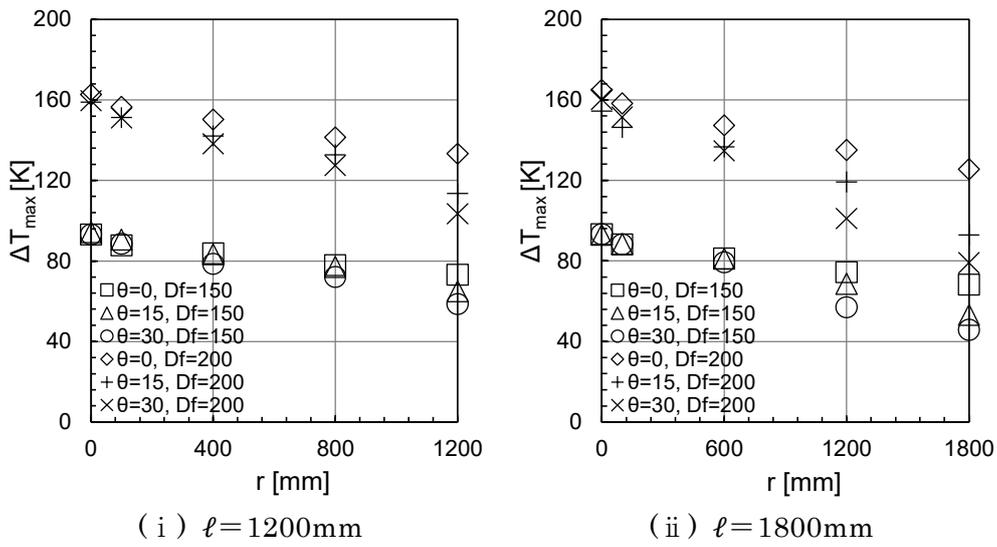
図 3-3-4 傾斜空間の鉛直上昇温度分布 ( $D_f=200\text{mm}$ 、 $\ell=1800\text{mm}$ )



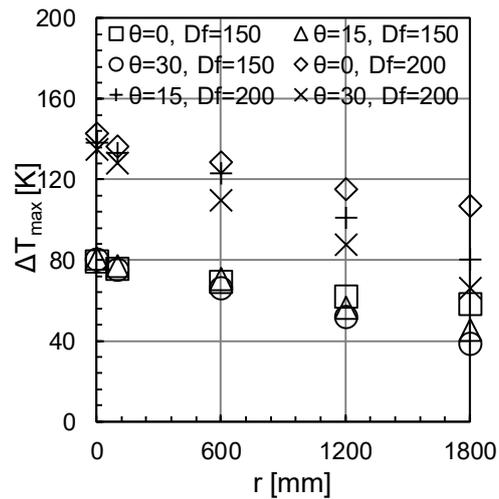
(a)  $B_{sw} = 300\text{mm}$



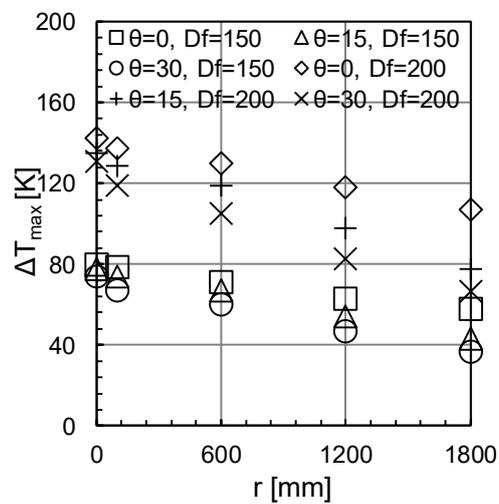
(b)  $B_{sw} = 450\text{mm}$



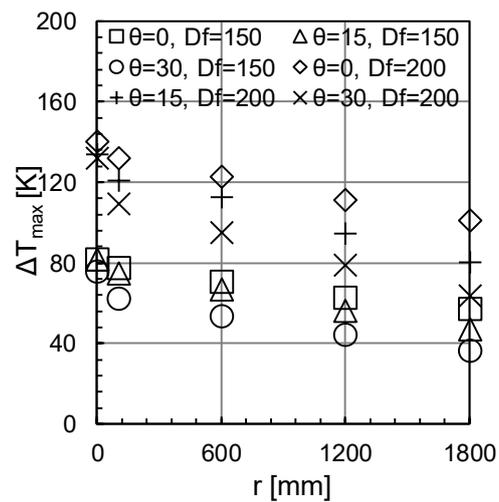
(c)  $B_{sw} = 600\text{mm}$



(d)  $B_{sw} = 800\text{mm}$



(e)  $B_{sw} = 1000\text{mm}$



(f)  $B_{sw} = 1200\text{mm}$

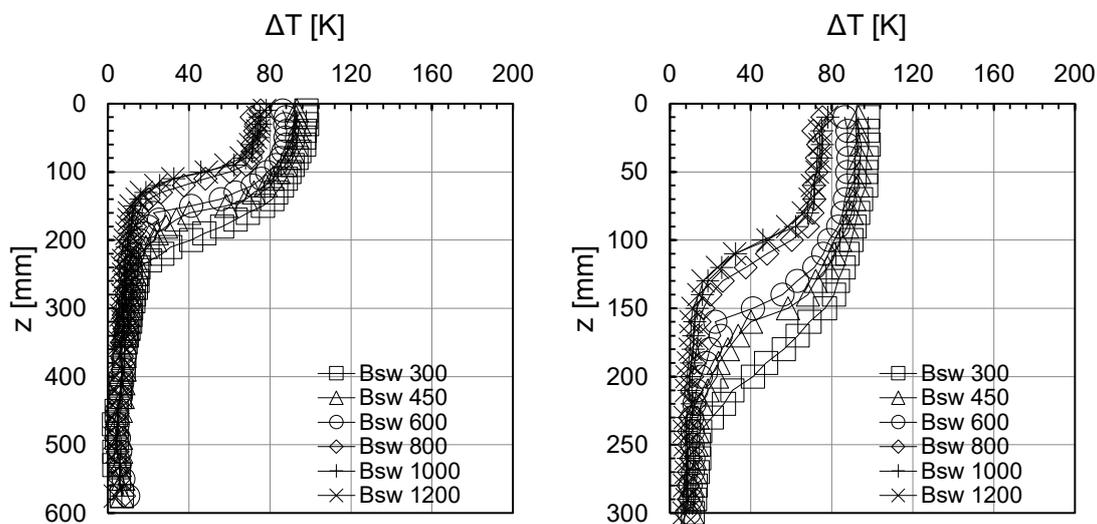
図 3-3-5  $\Delta T_{max}$  と  $r$  の関係

### 3.4 傾斜空間における鉛直温度分布性状

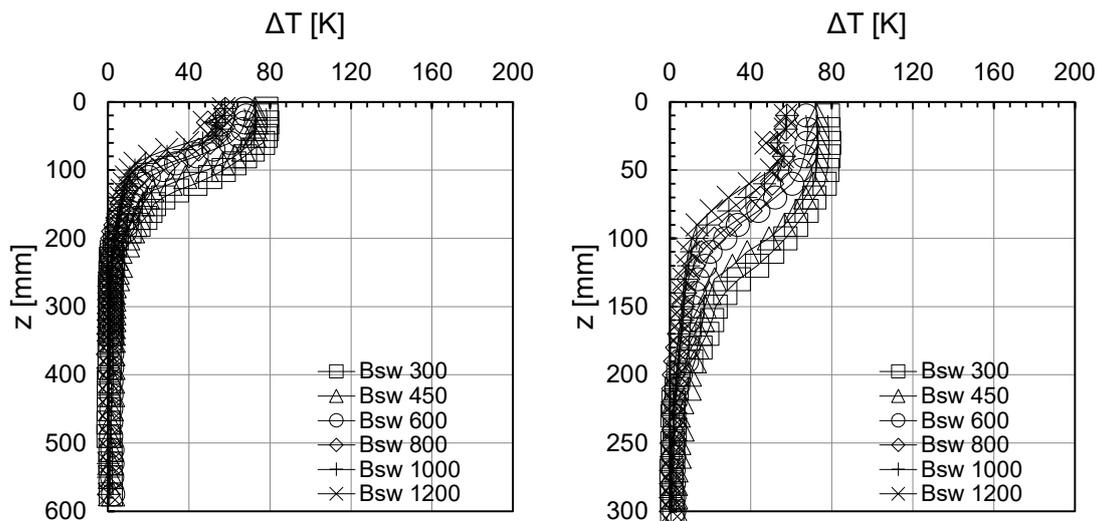
傾斜空間における鉛直温度分布性状に着目し、傾斜空間の断面アスペクト比 $n$ が鉛直温度分布性状に及ぼす影響を検討する。ここで、傾斜空間の断面アスペクト比 $n$ の範囲は  $0.5 \leq n \leq 2$  とし、傾斜空間長さ $\ell=1800\text{mm}$ の結果を用いる。

### 3.4.1 鉛直温度

図 3-4-1 および図 3-4-2 に、一例として ( $\theta=0^\circ$ 、 $30^\circ$ ) の火災室と傾斜空間の間に位置する開口部 (A) を起点とした流動距離  $r=100\text{mm}$ 、 $1800\text{mm}$  における鉛直温度分布を示す。図 3-4-1 および図 3-4-2 の縦軸は傾斜空間の天井面を起点とした長さ  $z$ 、横軸は雰囲気温度からの上昇温度  $\Delta T$  である。また、条件毎に縦軸の  $z$  の範囲として、左図は  $0\sim 600\text{mm}$  とし、右図は左図の鉛直温度分布から上部層の鉛直温度分布に着目し  $0\sim 300\text{mm}$  を採り整理している。これらの結果より、火源径  $D_f$  に関わらず、傾斜空間の上部の温度は傾斜空間幅  $B_{sw}$  が大きくなるに従い、低くなる傾向がみられる。また、傾斜角度  $\theta=0^\circ$  に比べ  $30^\circ$ 、そして開口部 (A) を起点とした流動距離  $r=100\text{mm}$  に比べ  $r=1800\text{mm}$  の方が、鉛直温度分布は傾斜空間の上部の高い位置から温度減衰が始まり、温度が低くなる傾向がみられる。

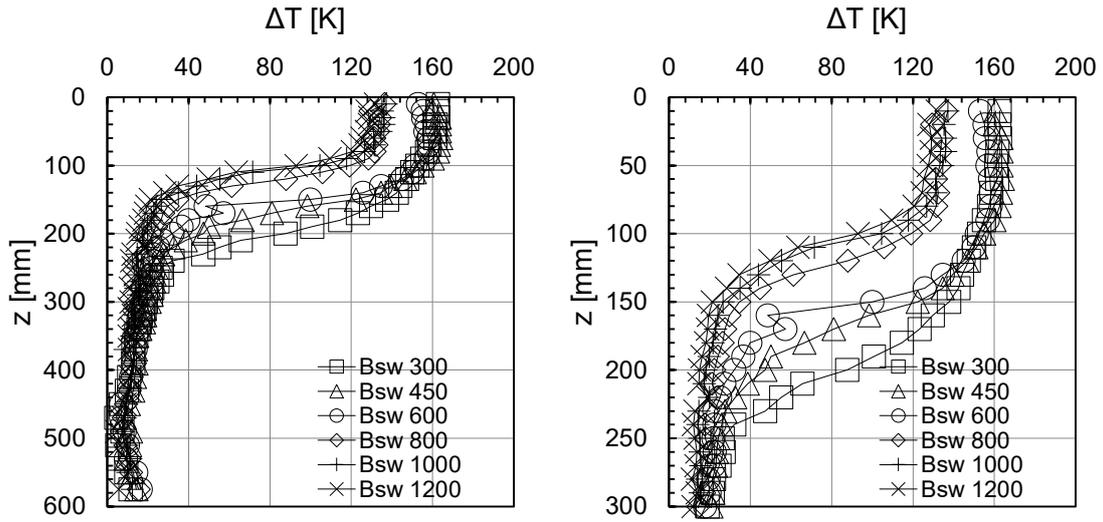


(i)  $r=100\text{mm}$

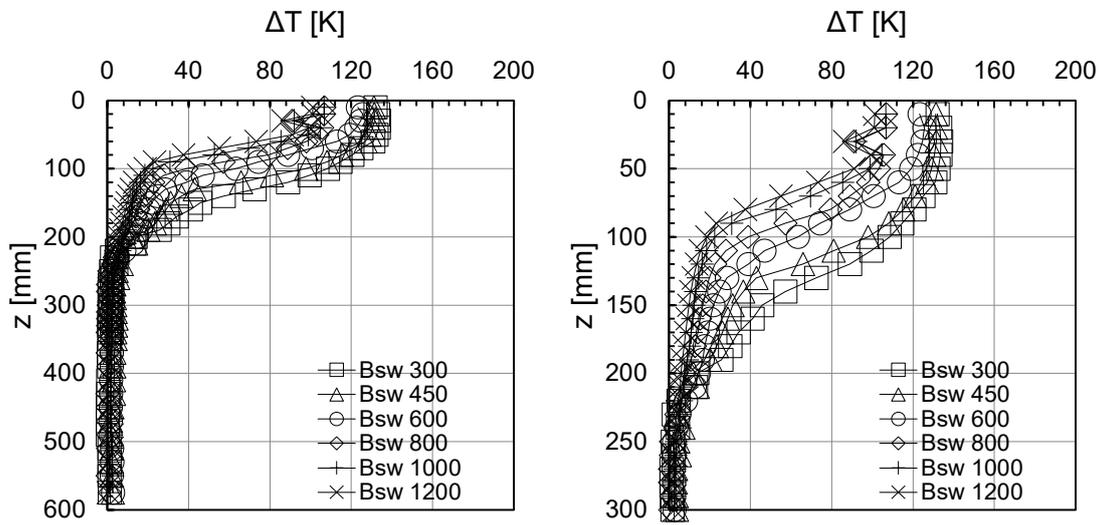


(ii)  $r=1800\text{mm}$

(a) 火源径  $D_f=150\text{mm}$



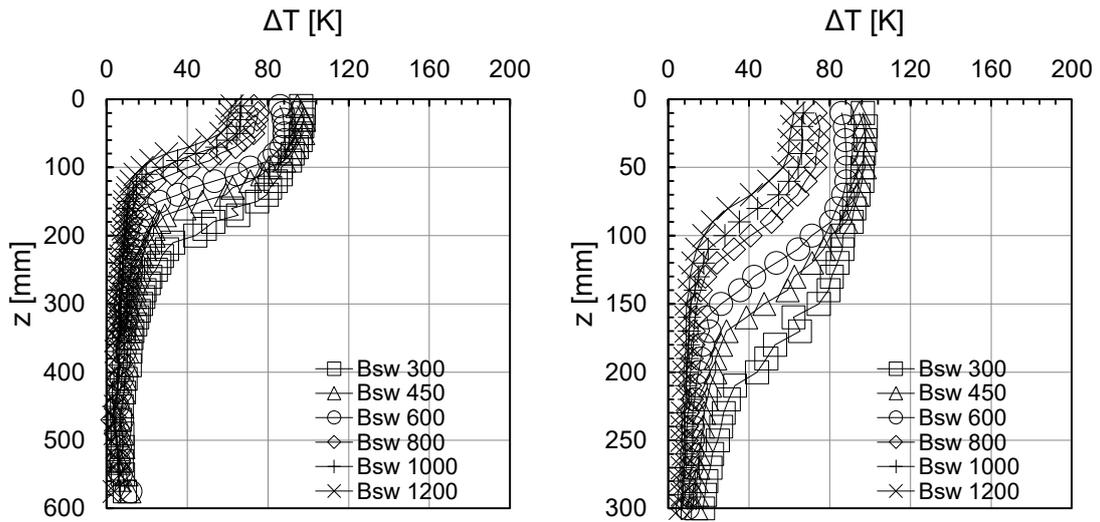
(i)  $r = 100$  mm



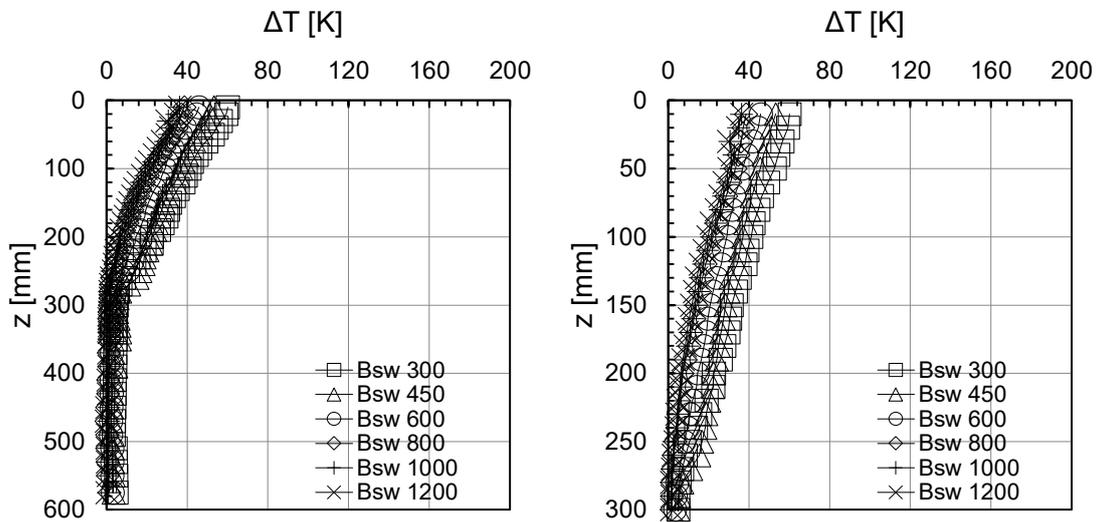
(ii)  $r = 1800$  mm

(b) 火源径  $D_f = 200$  mm

図 3-4-1 傾斜空間内の鉛直温度分布 ( $\theta = 0^\circ$ )

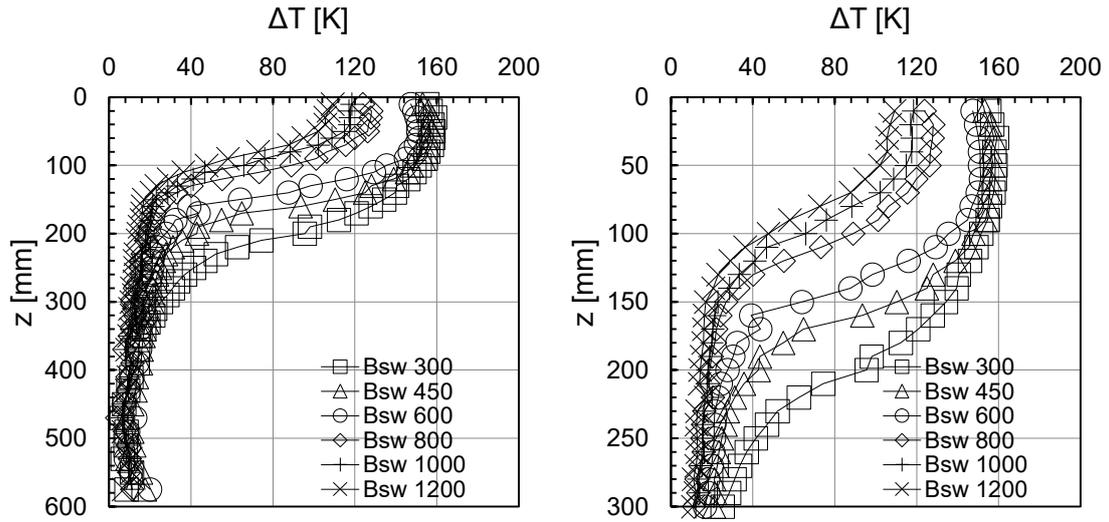


( i )  $r=100\text{mm}$

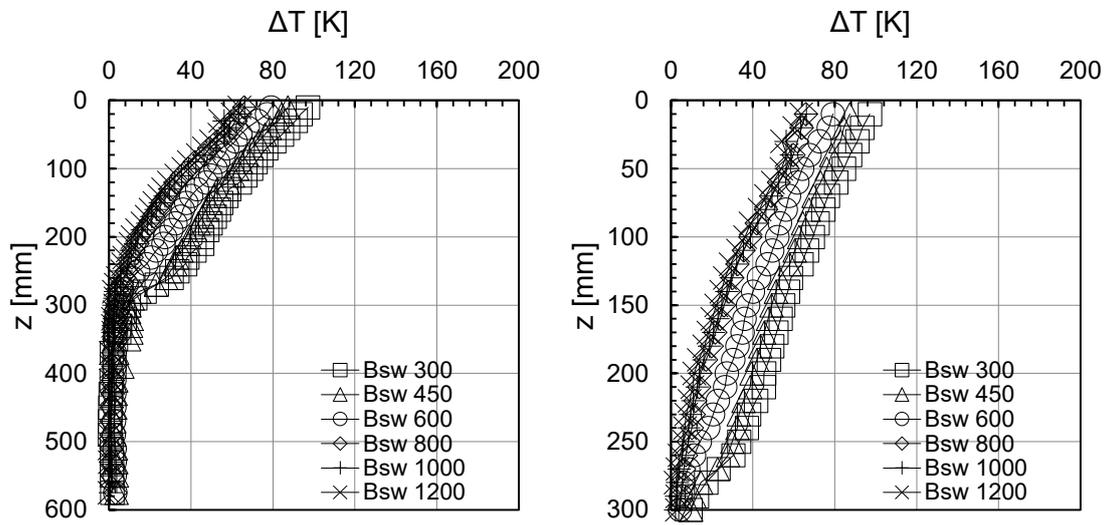


( ii )  $r=1800\text{mm}$

( a ) 火源径  $D_f=150\text{mm}$



(i)  $r = 100$  mm



(ii)  $r = 1800$  mm

(b) 火源径  $D_f = 200$  mm

図 3-4-2 傾斜空間内の鉛直温度分布 ( $\theta = 30^\circ$ )

### 3.4.2 無次元鉛直温度

傾斜空間における天井を起点とした鉛直方向の温度減衰傾向について検討するため、ここでは、既往研究<sup>[3-5]</sup>に従い、温度は式(3.4.1)に示すように無次元化する。

$$T^* = \frac{\Delta T}{\Delta T_{max}} \quad (3.4.1)$$

ここで、 $\Delta T = T - T_{\infty}$  [K]、 $\Delta T_{max}$ は $\Delta T = T - T_{\infty}$ の最大値である。なお、高さは、

$$z^* = \frac{z}{H_{op}} \quad (3.4.2)$$

で無次元化する。ここで、 $z$ は傾斜空間の天井面を起点とした長さ[mm]、 $H_{op}$ は傾斜空間で地面に対して鉛直天井高さ[mm]である。

図 3-4-3 に、一例として( $r=100\text{mm}$ 、 $1800\text{mm}$ )の傾斜空間における無次元温度 $T^*$ と無次元高さ $z^*$ の関係について傾斜角度 $\theta$ 毎に整理した結果を示す。図 3-4-3 より、各々の条件においては、傾斜空間幅 $B_{sw}$ に応じて厚み方向に差はみられるが、鉛直温度分布の温度減衰傾向は同様となることがみられる。また、各流動距離 $r$ における傾斜角度 $\theta$ による違いをみると、流動距離 $r=100\text{mm}$ では傾斜角度 $\theta$ に関わらず、天井面を起点とした鉛直方向の温度減衰は概ね同様の傾向を示すことがわかる。一方、 $r=1800\text{mm}$ では傾斜角度 $\theta$ が大きくなるに従い、天井付近から温度は減衰する傾向がみられる。

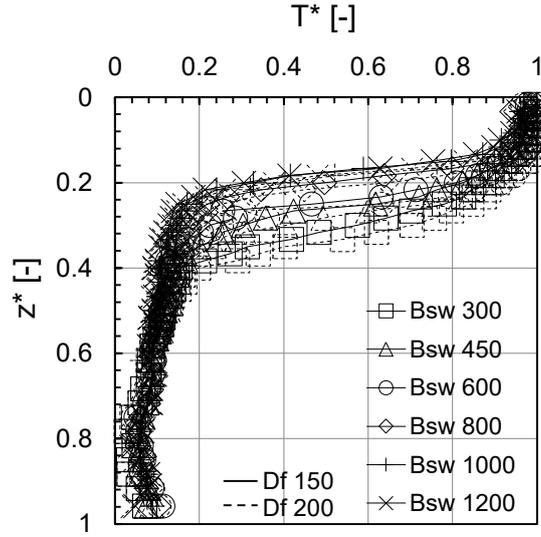
次に、図 3-4-3 における傾斜空間幅 $B_{sw}$ に応じた熱気流の厚みを考慮するため、傾斜空間で地面に対して鉛直天井高さ $H_{op}$ に関わらず、既往研究<sup>[3-5]</sup>で提案された鉛直温度分布より算出する $L_T$ を用い無次元化を行う。 $L_T$ は温度減衰性状を正規分布に近似し求め、本実験結果を一律に無次元化する<sup>[3-5]</sup>。 $L_T$ は各温度測定地点 $T_{s1} \sim T_{s4}$ において天井面から、

$$\frac{\Delta T}{\Delta T_{max}} = \frac{1}{e} \quad (3.4.3)$$

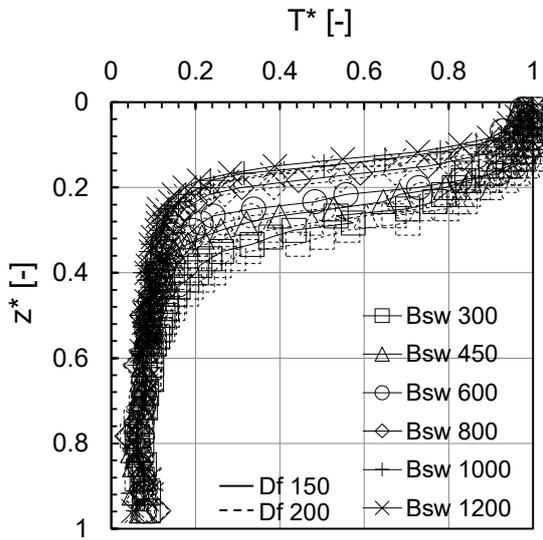
となる位置までの熱気流の厚みとする。なお、 $L_T$ を用いた無次元値は、式(3.4.4)のように定義する。

$$z'^* = \frac{z}{L_T} \quad (3.4.4)$$

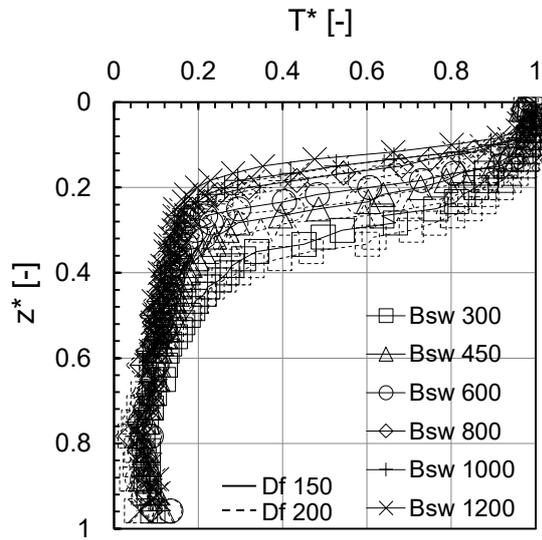
図 3-4-4 に、各流動距離 $r$ において無次元温度 $T^*$ と無次元高さ $z'^*$ の関係について傾斜角度 $\theta$ 毎に整理した結果を示す。図 3-4-4 から分かる通り、図 3-4-3 に比べ、全条件において横軸の無次元温度 $T^*$ が概ね 0.3 より小さい場合、データにばらつきがみられる。一方、無次元温度 $T^*$ が概ね 0.3 より大きい場合、傾斜空間幅 $B_{sw}$ によらず、無次元温度 $T^*$ は無次元高さ $z'^*$ に対し、同様の値を示す傾向がみられる。



(i)  $\theta = 0^\circ$

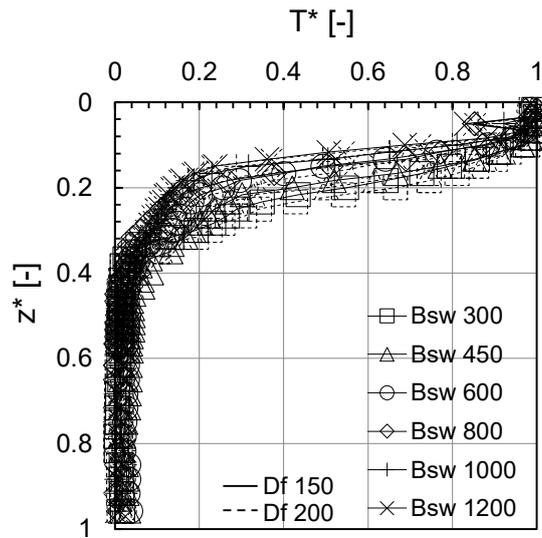


(ii)  $\theta = 15^\circ$

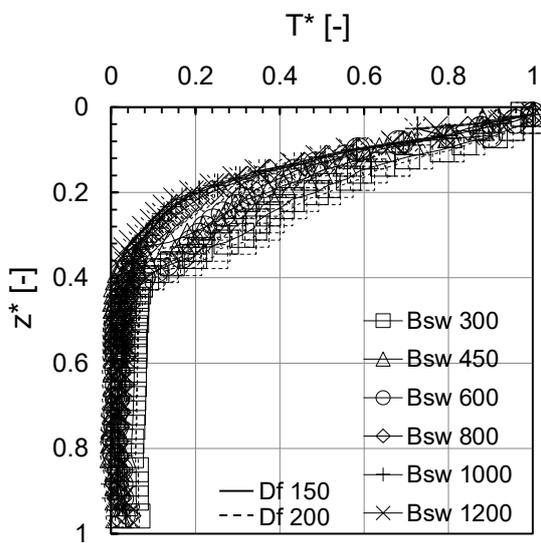


(iii)  $\theta = 30^\circ$

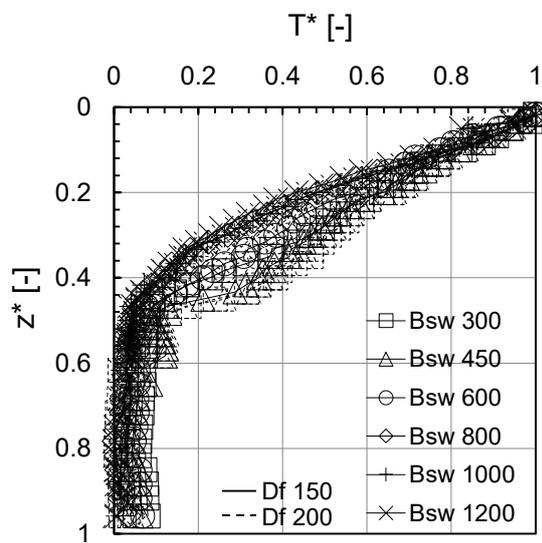
(a)  $r = 100\text{mm}$



(i)  $\theta = 0^\circ$



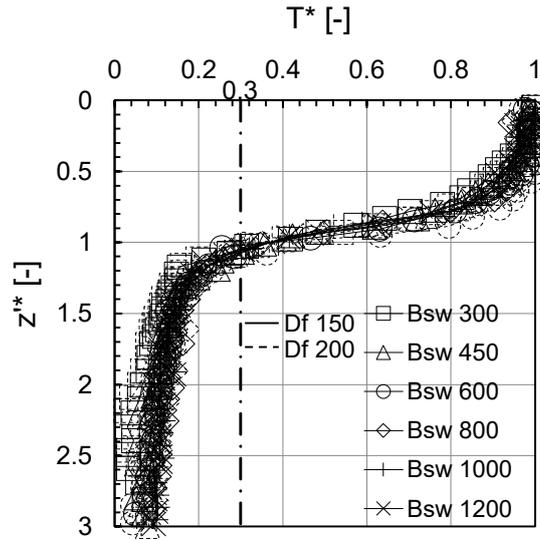
(ii)  $\theta = 15^\circ$



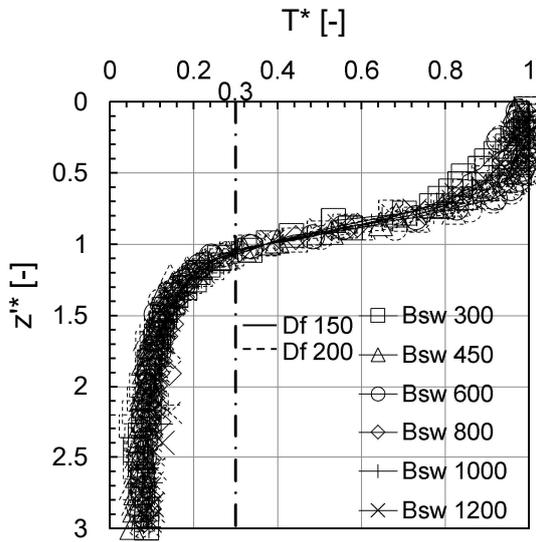
(iii)  $\theta = 30^\circ$

(b)  $r = 1800\text{mm}$

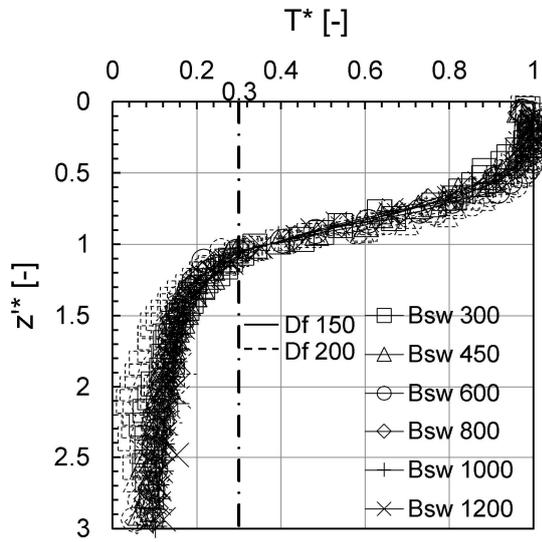
図 3-4-3  $T^*$ と $z^*$ の関係



(i)  $\theta = 0^\circ$

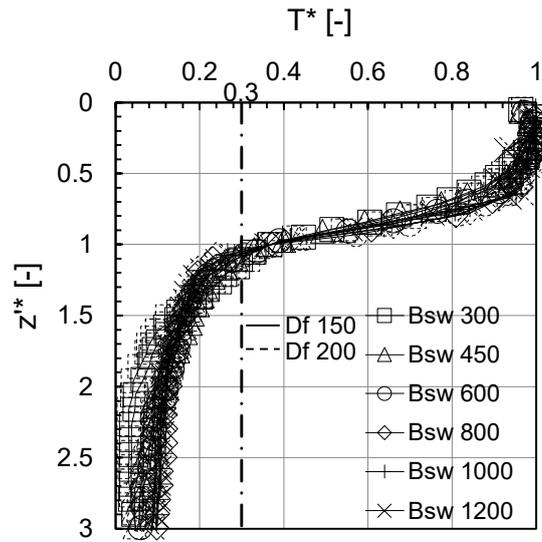


(ii)  $\theta = 15^\circ$

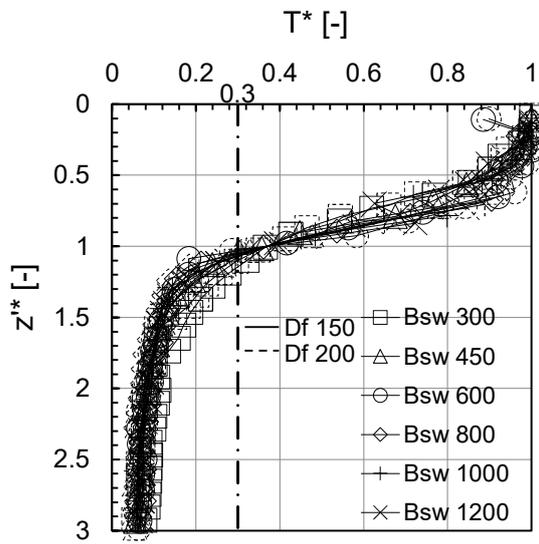


(iii)  $\theta = 30^\circ$

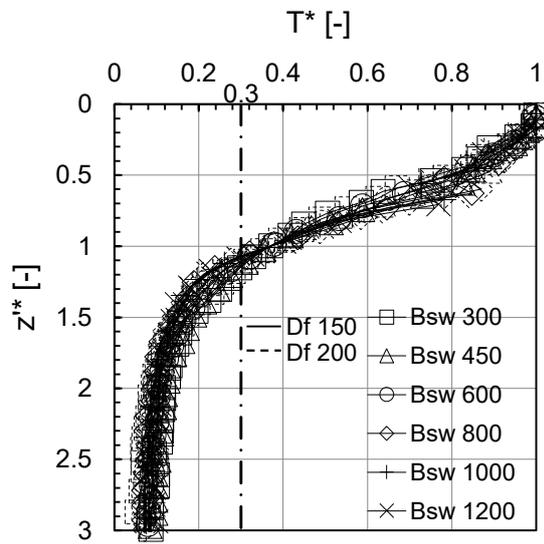
(a)  $r = 100\text{mm}$



(i)  $\theta = 0^\circ$

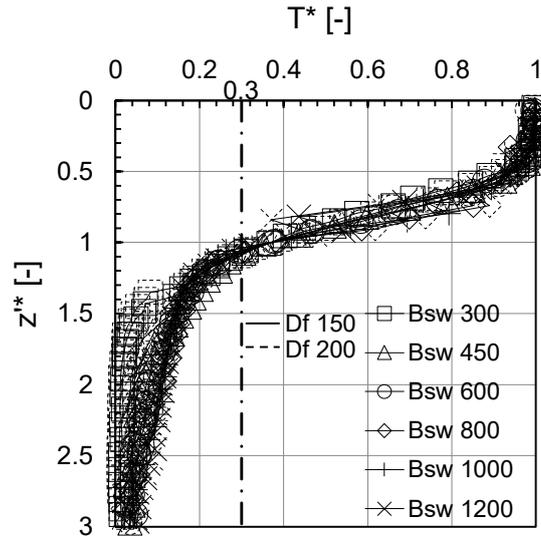


(ii)  $\theta = 15^\circ$

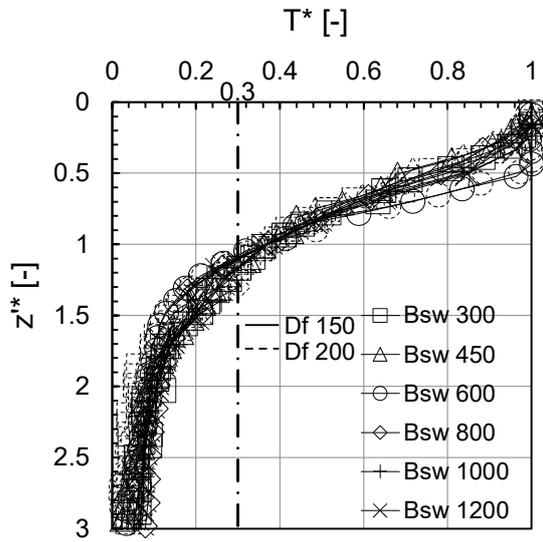


(iii)  $\theta = 30^\circ$

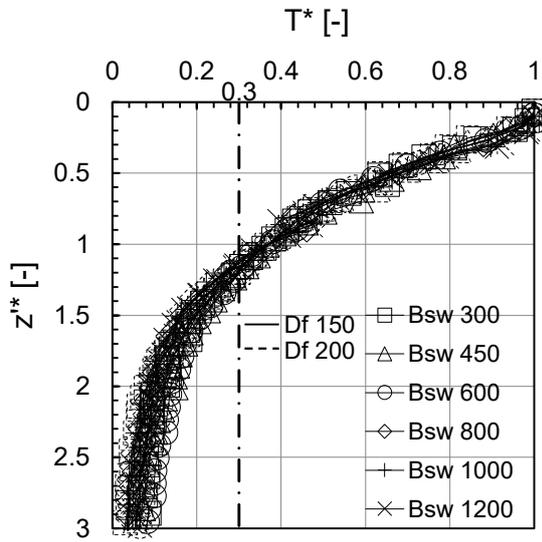
(b)  $r = 600\text{mm}$



(i)  $\theta = 0^\circ$

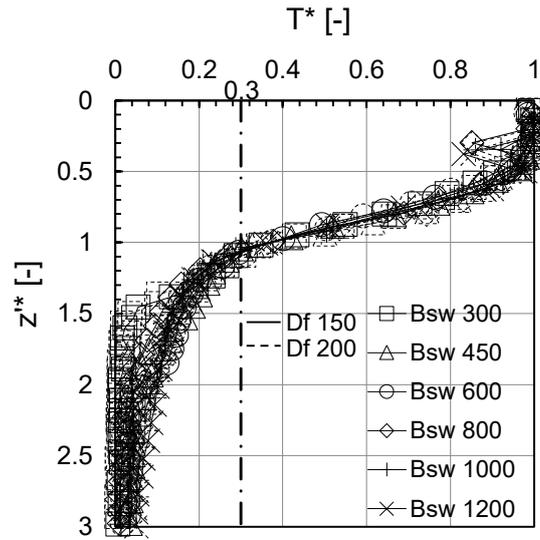


(ii)  $\theta = 15^\circ$

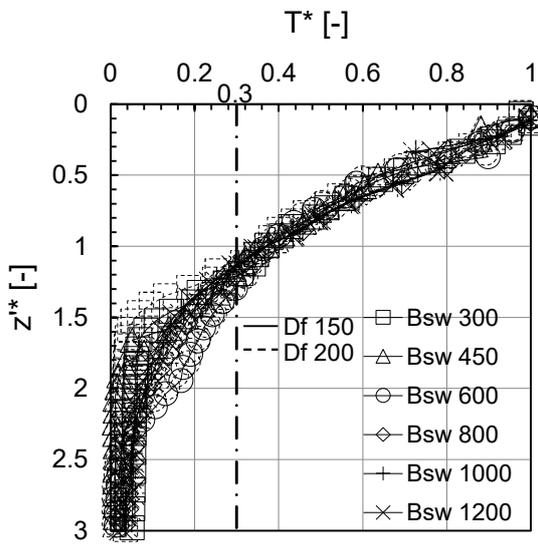


(iii)  $\theta = 30^\circ$

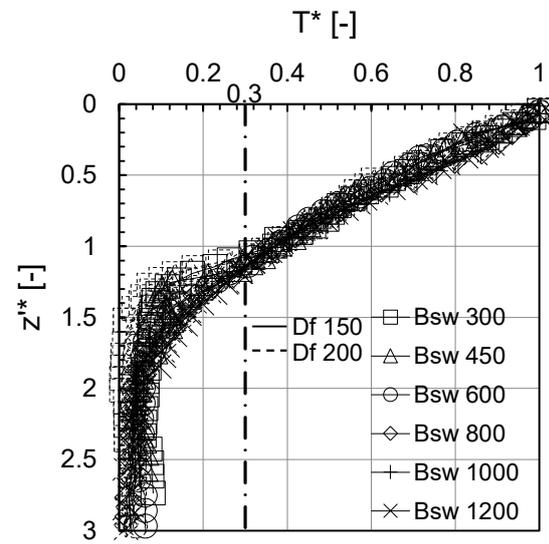
(c)  $r = 1200\text{mm}$



(i)  $\theta = 0^\circ$



(ii)  $\theta = 15^\circ$



(iii)  $\theta = 30^\circ$

(d)  $r = 1800\text{mm}$

図 3-4-4  $T^*$ と $z^*$ の関係

### 3.5 傾斜空間における天井面下の熱気流温度

#### 3.5.1 傾斜空間とトンネルの熱気流温度性状の比較検討

本章における傾斜空間は、例えば傾斜空間内に火源を設定すれば、トンネルと同様の性状となることが考えられる。既往研究<sup>[3-6]</sup>、<sup>註3-4</sup>によれば、トンネルにおける天井面下の熱気流の最高上昇温度 $\Delta T_{max}$ について、無次元温度 $\Theta$ を

$$\Theta = \left( \frac{\Delta T_{max}}{T_{\infty}} \right) / Q^{*2/3} \quad (3.5.1)$$

および、

$$Q^* = \frac{Q}{\rho_{\infty} c_p T_{\infty} g^{1/2} H^{5/2}} \quad (3.5.2)$$

で定義し、無次元温度 $\Theta$ と無次元流動距離 $r/H$ は、式(3.5.3)~式(3.5.6)の関係式が示されている。ここで、 $r$ は火源中心軸を起点とした流動距離、 $H$ は熱気流進行方向に対する垂直天井高さであり、本実験の場合 $H = H_{op} \cdot \cos\theta$ である。

$$\Theta = \alpha \left( \frac{r}{H} \right)^{-\beta} \quad (3.5.3)$$

ここで、

$$\alpha = A(-5.397 \times 10^{-4}\theta^2 + 3.606 \times 10^{-4}\theta + 1.000) \quad (3.5.4)$$

$$\beta = 5.323 \times 10^{-3}\theta + 0.482 \quad (3.5.5)$$

ただし、

$$A = 2.785(Q = 1.95kW)、3.203(Q = 5.7kW) \quad (3.5.6)$$

である。

図3-5-1は、本実験の傾斜角度 $\theta = 0^\circ$ の実験結果を無次元温度 $\Theta$ と無次元流動距離 $r/H$ に対してプロットした結果である<sup>註3-5</sup>。ここで、式(3.5.2)の $Q$ は既往研究<sup>[3-6]</sup>に従い火源発熱速度 $Q_f$ とした。また、本章のように火災室と傾斜空間が連続する空間の流動距離 $r$ の採り方には2つの方法が考えられる。まず、図3-5-1(a)では、火源中心軸を起点とした流動距離 $r_f$ を用いた結果を示している。図3-5-1(a)より、本実験の無次元温度 $\Theta$ は既往研究<sup>[3-6]</sup>(以後、トンネル)の提案式より高い値を示している。これはトンネルでは、火源直上の熱気流は天井に衝突した後、流動距離 $r_f$ に応じて温度が減衰する反面、本章の火災室における天井面下の熱気流(天井流)は火災室上部に蓄煙され均一化されるため、流動距離 $r_f$ に従う温度減衰は発生しないことが原因と考えられる。次に、図3-5-1(b)は、流動距離 $r$ に開口部(A)を起点とした流動距離 $r_d$ を用いた結果を示している。図3-5-1(b)から分かる通り、図3-5-1(a)に比べ本実験の結果は全体的に $r_d/H$ は小さくなり、そのため本実験の無次元温度 $\Theta$ の傾きは緩やかになることが考えられる。

ここで改めて本章において開口噴出気流を対象とする傾斜空間とトンネルとの違いを整理する。

##### (1) 開口噴出気流である点

火災室の天井高さは開口上端より高くなっており、火災室に蓄煙された熱気流が傾斜空間に開口部から噴出するため、開口部における開口噴出気流の無次元発熱速度 $Q_d^*$ に

基づくモデル化が必要である。詳細は 3.5.2 の(1)で述べる。

(2) 開口部上端を流動距離の起点とする点

単純なケースとして、傾斜角度 $\theta=0^\circ$ において、トンネルにおける熱気流は火源直上の天井に到達後は同心円状に広がり、側壁に到達後は外気に向い2方向に拡散する。しかし、本章(火災室に接続する傾斜空間)で対象とする熱気流は開口部から噴出した熱気流は、外気に向かい一方のみに流動する。よって、仮想熱源距離 $r_0$ を用いて補正する必要がある。詳細は 3.5.2 の(2)で述べる。

(3) 本実験の無次元温度 $\theta$ がトンネルの提案式より高い値を示す点

(2)に示した通り、トンネルにおける熱気流は側壁に到達後は外気に向い2方向に拡散するが、傾斜空間における熱気流は一方のみに流動する。よって、傾斜空間における熱気流が持つ熱量はトンネルより増加し、高温となることが考えられる。従って、本実験に基づき係数 $\alpha_d$ を定めることが必要である。詳細は 3.5.2 の(3)で述べる。

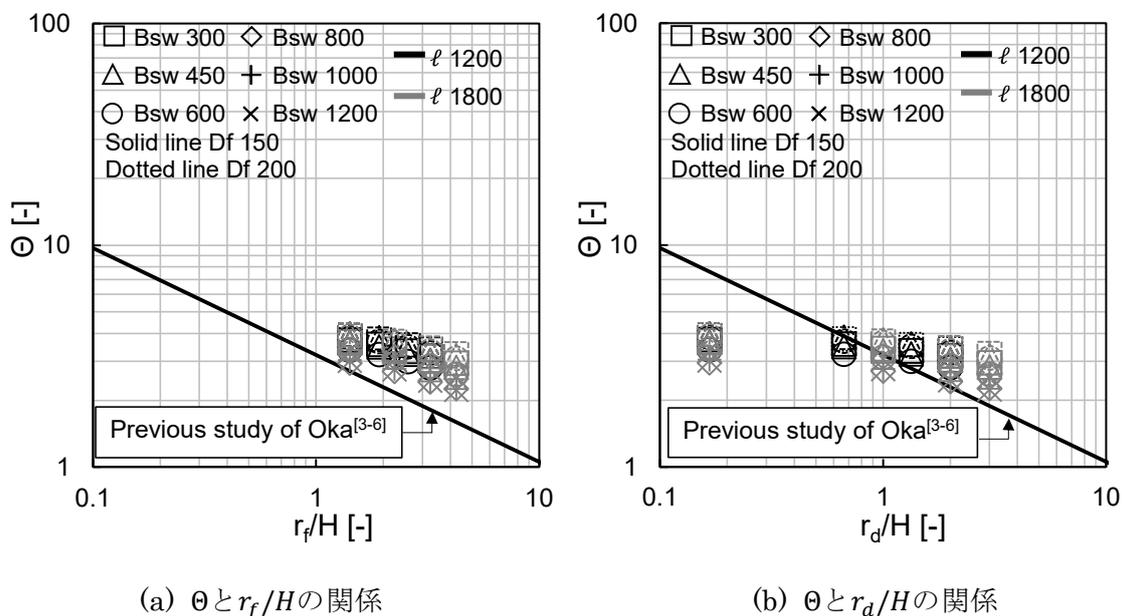


図 3-5-1  $\theta$ と $r/H$ の関係

### 3.5.2 傾斜空間における天井面下の熱気流温度減衰

#### (1) 開口噴出気流に基づく無次元発熱速度 $Q_d^*$

開口噴出気流を熱源とする場合の無次元発熱速度は、大宮等<sup>[3-7]</sup>の研究のように、式(3.5.7)に示す無次元発熱速度 $Q_d^*$ を用いるのが一般的である。そのため、本章でも式(3.5.7)を用いて無次元発熱速度を算出する。ただし、式(3.5.7)の $H$ は代表長さであり、本章では $H = H_{op} \cdot \cos\theta$ とする。また、式(3.5.7)の $Q_d$ は開口噴出気流の熱量であり式(3.5.8)を用い算出する。

$$Q_d^* = \frac{Q_d}{\rho_\infty c_p T_\infty g^{1/2} B_{sw} H^{3/2}} \quad (3.5.7)$$

ここで、

$$Q_d = C_p m_d \Delta T_f \quad (3.5.8)$$

なお、既往研究<sup>[3-6]</sup>と区別のため、式(3.5.7)の無次元発熱速度 $Q_d^*$ に基づく無次元温度を $\Theta_d$ と定義する。

$$\Theta_d = \left( \frac{\Delta T_{max}}{T_\infty} \right) / Q_d^{*2/3} \quad (3.5.9)$$

(2) 仮想熱源距離 $r_0$ 

本章では、対象とする開口噴出気流の性状について点熱源上または線熱源上の火災ブルーム性状の考え方に置き換えてモデル化を検討する。開口噴出気流は流動距離 $r_d=0$ において質量 $m_d$ 、熱量 $Q_d$ を持つ熱気流であることから、仮想熱源距離 $r_0$ を用いて補正する。

式(3.5.10)は仮想熱源距離 $r_0$ を考慮した場合の無次元温度 $\theta_d$ と無次元流動距離の関係を示している。

$$\theta_d = \alpha_d \left( \frac{r_d + r_0}{H} \right)^{-\beta} \quad (3.5.10)$$

仮想熱源距離 $r_0$ を算出するには、式(3.5.10)のべき乗数 $\beta$ を予め定めることが必要である。本章では、トンネルと本章の傾斜空間の熱気流の温度減衰性状(式(3.5.5)における $\beta$ )は同様であると想定する。

式(3.5.10)を有次元に直すと、

$$\Delta T_{max} = \alpha'_d (r_d + r_0)^{-\beta} \quad (3.5.11)$$

となる。さらに、上式の両辺を $-1/\beta$ 乗すると、式(3.5.12)のように変形される。

$$\Delta T_{max}^{-1/\beta} = \alpha_d'^{-1/\beta} (r_d + r_0) \quad (3.5.12)$$

火災室の開口部(A)を起点とした流動距離 $r_d$ を $x$ 軸に、式(3.5.12)の左辺を $y$ 軸として実験結果をプロットした場合の概念図を図3-5-2に示す。ここで、図3-5-2における原点から $x$ 軸切片までの距離が仮想熱源距離 $r_0$ であり、式(3.5.13)のように回帰直線の傾き $\alpha_d'^{-1/\beta}$ および $y$ 軸切片 $y_0$ から算出することができる。

$$r_0 = \frac{y_0}{\alpha_d'^{-1/\beta}} \quad (3.5.13)$$

また、 $y$ 軸の切片 $y_0$ は、開口部(A) ( $r_d=0$ )の最高上昇温度 $\Delta T_{max}(r_d=0)$ より式(3.5.14)を用いて算出する。

$$y_0 = \Delta T_{max}^{-1/\beta}(r_d=0) \quad (3.5.14)$$

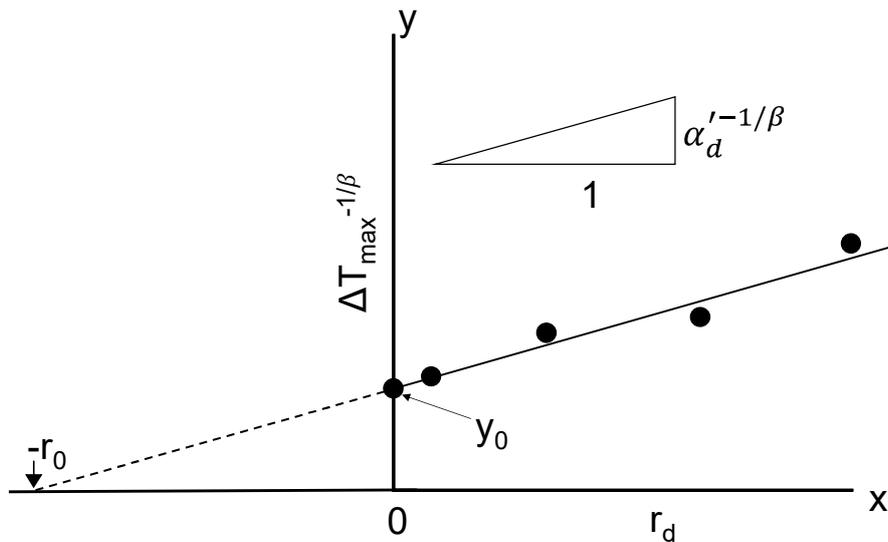


図 3-5-2 仮想熱源距離 $r_0$ の概念図

(3) 無次元温度 $\theta_d$ と無次元流動距離 $(r_d + r_0)/H$ の関係

図 3-5-3 に、傾斜角度 $\theta=0^\circ$  の無次元温度 $\theta_d$ を無次元流動距離 $(r_d + r_0)/H$ (ただし、 $H = H_{op} \cdot \cos\theta$ )に対してプロットした結果を示す。ここで、 $r_0$ は式(3.5.13)に基づく場合の結果である。図 3-5-3 を先の図 3-5-1(a)に比較すると、傾斜空間における開口噴出熱気流は式(3.5.9)に基づく $\theta_d$ および仮想熱源距離 $r_0$ を考慮することにより、トンネルと同様の温度減衰性状を示すことが分かる。また、図 3-5-4 に、図 3-5-3 の傾斜角度 $\theta=0^\circ$ と同様に傾斜角度 $\theta=15^\circ$ 、 $30^\circ$ における $\theta_d$ と $(r_d + r_0)/H$ の関係を示す。図 3-5-4 より、 $\theta=15^\circ$  および $\theta=30^\circ$ においてもトンネルと同様の温度減衰性状を示す結果が得られた。

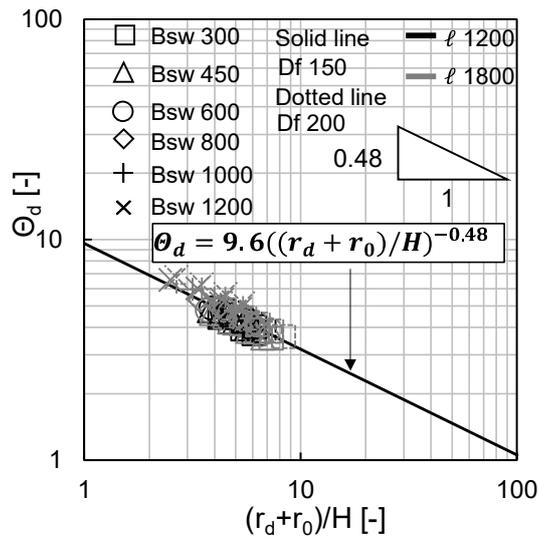
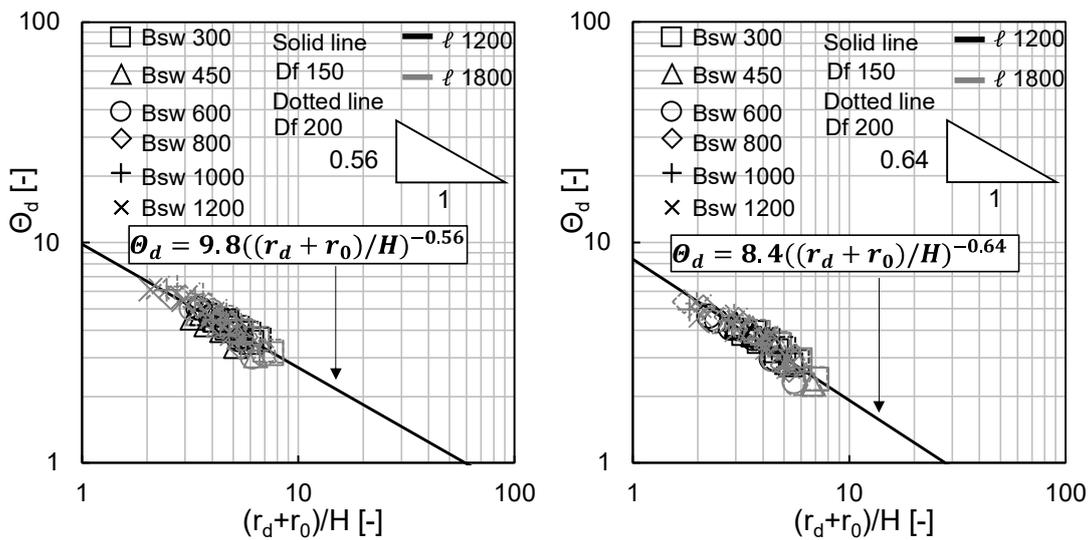


図 3-5-3  $\theta_d$ と $(r_d + r_0)/H$ の関係 ( $\theta=0^\circ$ )



(a)  $\theta=15^\circ$

(b)  $\theta=30^\circ$

図 3-5-4  $\theta_d$ と $(r_d + r_0)/H$ の関係 ( $\theta=15^\circ$ 、 $30^\circ$ )

さらに、図 3-5-5 は図 3-5-3 および図 3-5-4 で式 (3.5.10) の無次元温度  $\theta_d$  と無次元流動距離  $(r_d + r_0)/H$  の関係から得られた回帰式における係数  $\alpha_d$  を傾斜角度  $\theta$  に対して整理した結果である。この結果より、トンネルを対象とした提案式と比較すると、例えば傾斜角度  $\theta = 0^\circ$  の場合、本章の係数  $\alpha_d$  は 9.6 となり、トンネルの係数  $\alpha$  より大きい値を示す傾向がみられた。

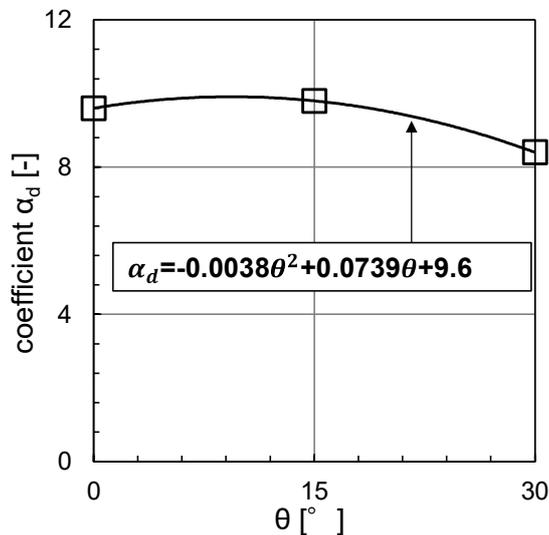


図 3-5-5 係数  $\alpha_d$

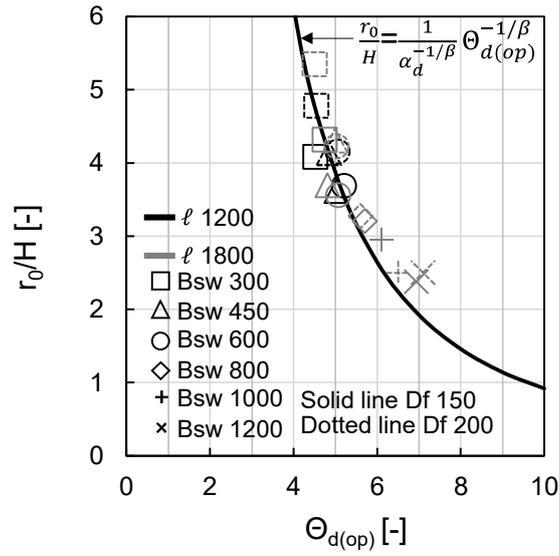
なお、仮想熱源距離  $r_0$  は、式 (3.5.10) において  $r_d = 0$  として、 $r_0/H$  について整理することで、式 (3.5.15) のように与えられる。

$$\frac{r_0}{H} = \left( \frac{\theta_{d(op)}}{\alpha_d} \right)^{-1/\beta} \quad (3.5.15)$$

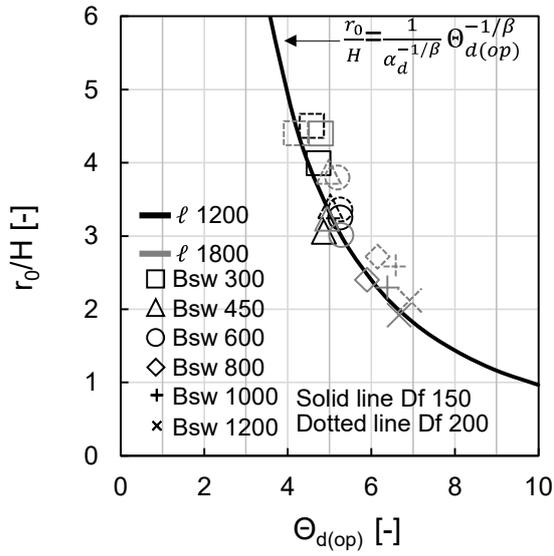
ここで、 $\theta_{d(op)}$  は式 (3.5.9) で定義される無次元温度であるが、式 (3.5.9) の  $\Delta T_{max}$  には開口部 (A) ( $r_d = 0$ ) における最高上昇温度  $\Delta T_{op(max)}$  を用いる。ここでは、式 (3.5.9) と混同することがないように、式 (3.5.16) に示す通り、 $\theta_{d(op)}$  を再定義した。

$$\theta_{d(op)} = \left( \frac{\Delta T_{op(max)}}{T_\infty} \right) / Q_d^{*2/3} \quad (3.5.16)$$

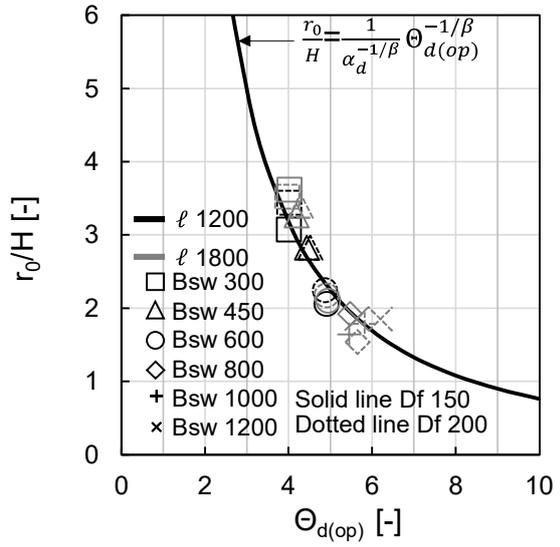
参考として、図 3-5-6 に仮想熱源距離  $r_0$  と  $\theta_{d(op)}$  の関係を傾斜角度  $\theta$  毎に整理した結果および式 (3.5.15) による計算値を示す。



(a)  $\theta = 0^\circ$



(b)  $\theta = 15^\circ$



(c)  $\theta = 30^\circ$

図 3-5-6  $r_0/H$  と  $\Theta_{d(op)}$  の関係

### 3.6 まとめ

第3章では、火災室および一方の開口は火災室と通じ、他方の開口は外気と通じた傾斜空間の模型を用いた実験を行い、本実験で設定した火源径 $D_f$ 、傾斜空間幅 $B_{sw}$ 、傾斜空間長さ $l$ 、傾斜角度 $\theta$ の条件が傾斜空間の熱気流流動性状に与える影響を把握し、以下の知見が得られた。

- ・火災室の温度は、傾斜空間幅 $B_{sw}$ と火源径 $D_f$ が等しい条件において、傾斜空間長さ $l$ および傾斜角度 $\theta$ の影響を殆ど受けない傾向がみられた。
- ・開口部(A)の上部の温度は、火源径 $D_f$ が同条件であれば、傾斜空間長さ $l$ の影響を殆ど受けず、傾斜空間幅 $B_{sw}$ および傾斜角度 $\theta$ が大きくなるに従い、低下した。
- ・傾斜空間における天井面下の熱気流の最高上昇温度 $\Delta T_{max}$ は、傾斜角度 $\theta$ 以外の条件が等しい場合、それぞれの傾斜空間幅 $B_{sw}$ で傾斜空間長さ $l$ が等しければ、 $\Delta T_{max}$ は流動距離 $r$ が長くなるに従い、傾斜角度 $\theta$ が大きい条件ほど、温度減衰は顕著になる傾向がみられた。

また、傾斜空間(断面アスペクト比  $0.5 \leq n \leq 2$ )における鉛直温度分布性状について検討を行い、以下の知見が得られた。

- ・無次元温度 $T^*$ ( $=\Delta T/\Delta T_{max}$ )および $L_T$ を用いた無次元高さ $z^*$ ( $z/L_T$ )を用い無次元鉛直温度分布を整理した場合、無次元温度 $T^*$ が概ね0.3より大きい範囲では、無次元温度 $T^*$ は傾斜空間幅 $B_{sw}$ によらず概ね同様の値となる傾向がみられた。

続いて、トンネルにおける熱気流と傾斜空間における熱気流の比較検討を行い、熱気流性状の違いを整理した上で、火災室と開口で通じる傾斜空間における天井面付近の熱気流温度について、仮想熱源距離 $r_0$ を用い線火源の概念に基づきモデル化を行い、以下の知見が得られた。

- ・火災室と開口で通じる傾斜空間の天井面下の熱気流温度は、仮想熱源距離 $r_0$ を用いることでトンネルの熱気流性状と同様に、式(3.5.10)を用い与えることができる。ただし、係数 $\alpha_d$ はトンネルの値より大きくなる傾向がみられ、傾斜角度 $\theta$ 毎に対して図3-5-5の通り与えられる。
- ・仮想熱源距離 $r_0$ は式(3.5.15)~式(3.5.16)により与えられる。

## 注釈

注 3-1 本研究の開口高さは、真船等<sup>[3-9]</sup>の研究によると実際の駅コンコースの高さを2400mmと3400mmとしており、その平均値(約3000mm)を1/5スケールとしたものである。

注 3-2 本研究の傾斜角度は、次を参考に決定した。旅客施設における階段は、公共交通機関の旅客施設に関する移動等円滑化整備ガイドライン<sup>[3-10]</sup>により、蹴上げ16cm程度以下および踏面30cm程度以上と定められていることから、傾斜角度は28°以下となる。また、建築基準法施行令<sup>[3-11]</sup>では、エスカレーターの傾斜角度は30°以下とされている。加えて、建築物である路外駐車場における車路がスロープとなっている場合、駐車場法施行令<sup>[3-12]</sup>により勾配は17%(約10°)以下とされている。

注 3-3 本実験における重量減少速度(30秒移動平均)は全ての条件において約700秒から火源径 $D_f=150\text{mm}$ は約0.3g/s、火源径 $D_f=200\text{mm}$ は約0.6g/sで安定した。

注 3-4 岡等の研究ではアスペクト比1.8(高さ=0.3m、幅=0.55m)、長さ3.6mのトンネル模型を用い、実験条件は $Q=1.95\text{kW}$ 、 $5.7\text{kW}$ 、 $\theta=0^\circ$ 、 $8^\circ$ 、 $10^\circ$ 、 $20^\circ$ である。

注 3-5 図3-5-1に実線で岡等の提案式をプロットする際、係数 $\alpha$ は $3.203(\theta=0^\circ)$ 、 $Q=5.7\text{kW}$ とした。

## 使用記号

$B_{sw}$	:	傾斜空間幅 [mm または m]
$c_p$	:	定圧比熱 [kJ/(kg · K)]
$D_f$	:	火源パン径 [mm]
$e$	:	ネイピア数 ( $\approx 2.718$ ) [-]
$g$	:	重力加速度 [m/s <sup>2</sup> ]
$H$	:	傾斜空間で熱気流進行方向に対する垂直天井高さ [mm または m]
$H_{op}$	:	傾斜空間で地面に対して鉛直天井高さ [mm または m]
$\ell$	:	傾斜空間長さ [mm]
$L_T$	:	熱気流の厚み [mm]
$n$	:	傾斜空間断面アスペクト比 [-]
$m_d$	:	開口噴出気流流量 [kg/s]
$Q$	:	式(3.5.2)における火源発熱速度 [kW]
$Q_d$	:	開口噴出気流熱量 [kW]
$Q_f$	:	火源理論発熱速度 [kW]
$Q^*$	:	式(3.5.2)で定義された無次元発熱速度 [-]
$Q_d^*$	:	式(3.5.7)で定義された無次元発熱速度 [-]
$r_f$	:	火源中心軸を起点とした流動距離 [mm または m]
$r_d$	:	開口部(A)を起点とした流動距離 [mm または m]
$r_0$	:	仮想熱源距離 [mm または m]
$\Delta T$	:	上昇温度 [K]
$\Delta T_{max}$	:	最高上昇温度 [K]
$\Delta T_f$	:	火災室(0~600mm)における熱気流層の上昇温度 [K]
$\Delta T_{op(max)}$	:	開口部(A)における最高上昇温度 [K]
$T_\infty$	:	雰囲気温度 [K]
$z$	:	傾斜空間の天井面を起点とした長さ [mm]
$\rho_\infty$	:	雰囲気密度 [kg/m <sup>3</sup> ]
$\alpha$	:	式(3.5.4)により与えられる係数 [-]
$\alpha_d$	:	式(3.5.10)における係数 [-]
$\alpha'_d$	:	式(3.5.11)における係数 [-]
$\beta$	:	式(3.5.5)により与えられる係数 [-]
$\theta$	:	式(3.5.1)で定義された無次元温度 [-]
$\theta_d$	:	式(3.5.9)で定義された無次元温度 [-]
$\theta_{d(op)}$	:	式(3.5.16)で定義された無次元温度 [-]
$\theta$	:	傾斜角度 [°]

## 参考文献

- [3-1] 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：大深度地下利用に関する技術開発ビジョン, 2003.1
- [3-2] Y. Huo, Y. Gao and W.K. Chow: A study on ceiling jet characteristics in an inclined tunnel, *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 50, pp. 32-46, 2015.8
- [3-3] C.Y. Tso and W.K. Chow: Scale model studies on Smoke movement in inclined tunnel with longitudinal ventilation and smoke barriers, *International Journal on Engineering Performance-Based Fire Codes*, Vol. 11, No. 2, pp. 21-26, 2012.1
- [3-4] W.K. Chow, Y. Gao, J.H. Zhao, J.F. Dang and Nadia C.L. Chow: A study on tilted tunnel fire under natural ventilation, *Fire safety journal*, Vol. 81, pp. 44-57, 2016.4
- [3-5] Y. Oka and O. Imazeki: Temperature distribution within a ceiling jet propagating in an inclined flat-ceilinged tunnel with natural ventilation, *Fire safety journal*, Vol. 71, pp. 20-33, 2015.1
- [3-6] Y. Oka, N. Kakae, O. Imazeki and K. Inagaki: Temperature property of ceiling jet in an inclined tunnel, *The 9th Asia-Oceania Symposium on Fire Science and Technology*, *Procedia Engineering* 62, pp. 234-241, 2013.8
- [3-7] 大宮 喜文, 平山 貴至, 山口 純一, 申 易澈: 底面下の拡散を考慮した開口噴流プルーム流量算定式, *日本建築学会環境系論文集*, 第 81 巻, 第 721 号, pp. 263-271, 2016.3
- [3-8] 岸上 昌史, 大宮 喜文, 丁 鐘珍, 山口 純一: 開口上端からの庇設置高さを考慮した開口噴流プルーム性状-庇下面に平行な側壁が設置された場合の庇先端物理量の予測-, *日本建築学会環境系論文集*, 第 83 巻, 第 751 号, pp.719-727, 2018.9
- [3-9] S. Mafune, O. Suzuki, D. Sato and Y. Ohmiya: Study on smoke behavior in the station underpass, *Interflam2016*, Vol.1, pp709-714, 2016.7
- [3-10] 国土交通省総合政策局安心生活政策課: 公共交通機関の旅客施設に関する移動等円滑化整備ガイドライン バリアフリー整備ガイドライン 旅客施設編, 2021.3
- [3-11] 建築基準法施行令: 第 129 条 12 エスカレーターの構造
- [3-12] 駐車場法施行令: 路外駐車場 第 1 節 構造及び設備の基準 第 8 条

## 第4章

# 数値解析モデルを用いた 熱気流性状に関するケーススタディ



## 4.1 はじめに

地下空間で発生した火災に対する煙制御手法として、機械排煙および排煙シャフト等を用いた自然排煙による手法が用いられる。本研究では地下空間と外部を連絡する傾斜空間に着目した煙制御システムを検討するための基礎的知見を収集するため、第2章では、階段加圧煙制御システムについて実大実験を行った。加圧給気による煙制御システムは、給気した室(以後、給気室)の隣接室の外気に向かって開くことができる開口部から給気した空気を外部へ排出することにより、給気室と隣接室間で差圧を形成し安全区画への煙拡散防止を達成するものであり、告示では空気逃し口の設置を義務としている<sup>[4-1]</sup>。しかし、建築物の地下空間である地下階において加圧給気により煙制御を行う場合、地下階は気密性が高く、無窓階であることが多いため、外気に向かって開くことができる開口部、いわゆる空気逃し口の設置が困難である。また、これらに対する系統的な研究の不足や防火関係規定での明文化が行われていない等の状況にあり、これらに関する知見の収集が必要である。第3章では、建築物の地下階における直階段や車路のような傾斜空間を利用した自然排煙方式による煙制御に着目し、模型実験を行い熱気流性状について検討した。傾斜空間は一方の開口は火災室に接続し、他の開口は外気に接する条件が考えられる。すなわち、地下空間に通じる階段室を階段加圧によって煙制御を行った場合、空気逃し口に関する対策として外部に連絡する傾斜空間を空気逃し口として用いることが考えられる。しかし、実際の地下階において階段室の加圧給気時に、給気による火災室および傾斜空間における熱気流性状や傾斜空間の空気逃し口としての性能等に関する知見が不足している。

そこで、第4章では基礎的な検討として、数値解析モデルとして FDS(Fire Dynamics Simulator)を用いた検討を行う。第4章で使用する FDS は、火災性状を予測するために米国国立標準技術研究所(NIST)によって開発されたソフトウェアである。計算領域およびその内部各次数、物体形状、材質、火源の条件等の情報を入力することにより温度や熱流束、燃焼生成物の濃度などのデータが得られるなど、Smoke view の機能が搭載されており、可視化し燃焼や煙性状など把握が可能になる。

第4章では、まず第3章の模型実験の結果を用い FDS の計算結果の再現性の検討を行った後、FDS を用い加圧給気時の傾斜空間を空気逃し口と想定したケーススタディを行い、傾斜空間の空気逃し口としての性能、および加圧給気時の火災室および傾斜空間における熱気流性状を把握する。

## 4.2 FDS を用いた再現性の検討

### 4.2.1 計算モデル

図 4-2-1 に FDS を用い、実験結果の再現性を検討するため、設定した計算モデルの概要を示す。計算モデルの条件は、火災室は、幅 1500mm×高さ 1500mm×奥行 1500mm の立方体とし、火災室と傾斜空間の間に位置する開口部 (A) の高さは 600mm とした。傾斜空間は、傾斜角度によらず鉛直高さを 600mm とし、幅は 600mm、長さは 1800mm、傾斜角度は  $0^\circ$ 、 $10^\circ$ 、 $20^\circ$  および  $30^\circ$  とした。また、火源は火災室の中央に配置し、火災室の床面から 90mm の高さに火源面を設置した。部材は厚さ 25mm のケイ酸カルシウム板とした。

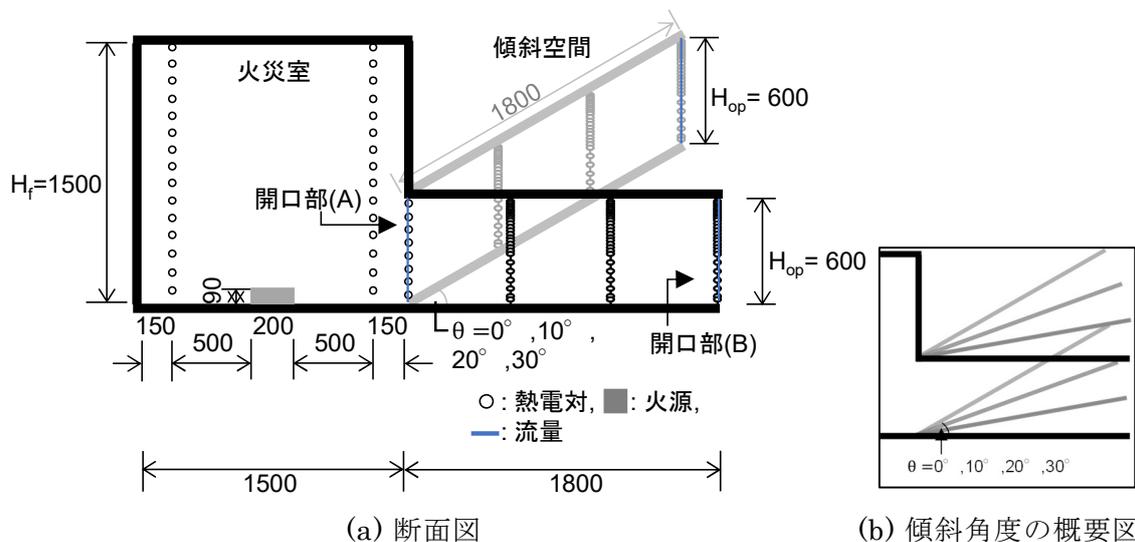


図 4-2-1 計算モデルの概要 [単位：mm]

### 4.2.2 計算比較項目

計算比較項目は鉛直温度、コンター(温度、速度)および流量である。詳細を以下に示す。

#### (1) 鉛直温度

鉛直温度の計算は、火災室の2地点( $T_a$ 、 $T_b$ )、開口部(A)の1地点( $T_{op}$ )でK型熱電対( $\phi 0.32\text{mm}$ )を用い、傾斜空間の3地点( $T_{s1}\sim T_{s3}$ )でK型熱電対( $\phi 0.2\text{mm}$ )を用いた。また、図4-2-2(a)、(b)に示す通り、火災室 $T_a$ と $T_b$ は15点(天井面下25mmから100mm間隔)、開口部(A) $T_{op}$ は8点(天井面下40mmから70mm間隔)で熱電対ツリーを構成した。図4-2-2(c)に示す通り、傾斜空間 $T_{s1}\sim T_{s3}$ は26点(天井面から10mm間隔10点、100mmから20mm間隔10点、300mmから50mm間隔5点、550mmから25mm間隔1点)で熱電対ツリーを構成し、図4-2-1(a)のように、傾斜によらず、水平床面に対し鉛直方向で計算した。

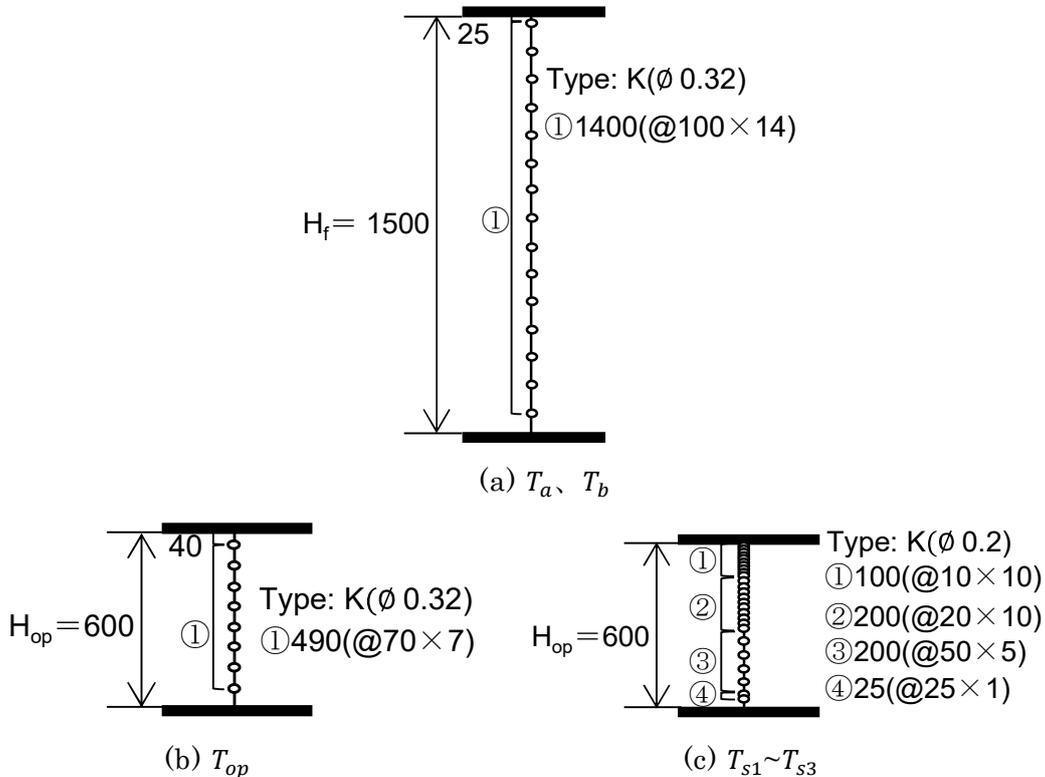


図4-2-2 熱電対ツリーの構成 [単位：mm]

(2) コンター(温度、速度)

図 4-2-3 示すように、FDS モデルの  $X=750\text{mm}$  の断面での温度および速度に関するコンターを比較項目とする。

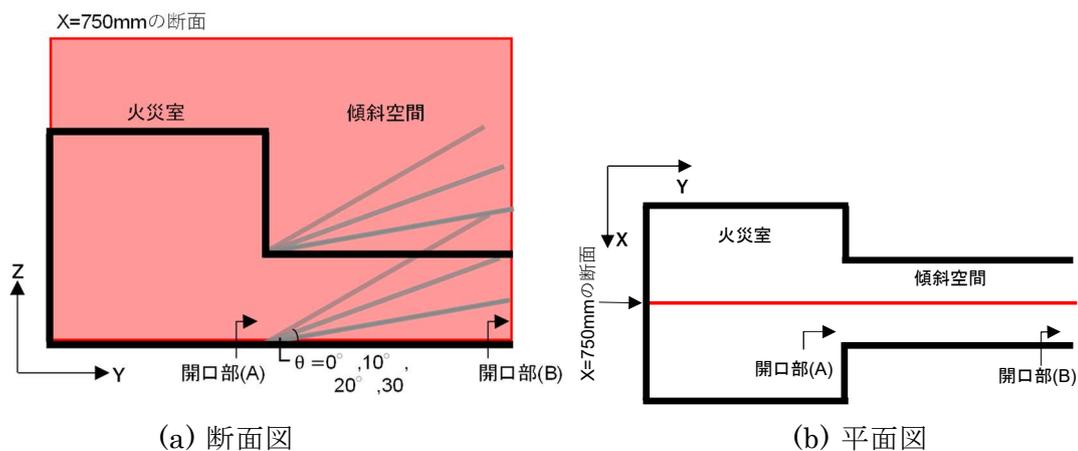


図 4-2-3 コンター図断面の設定位置 ( $X=750\text{mm}$ )

(3) 流量

図 4-2-4 に示す通り、流量は開口部 (A) および開口部 (B) の計算断面において  $Z$  方向に  $50\text{mm}$  ずつ 12 分割して計算した。流量は、火災室から外気への流れを  $m_{out}$  (+)、外気から火災室への流れを  $m_{in}$  (-) とした場合の正味の値  $m(m_{out} + m_{in})$  を用いる。

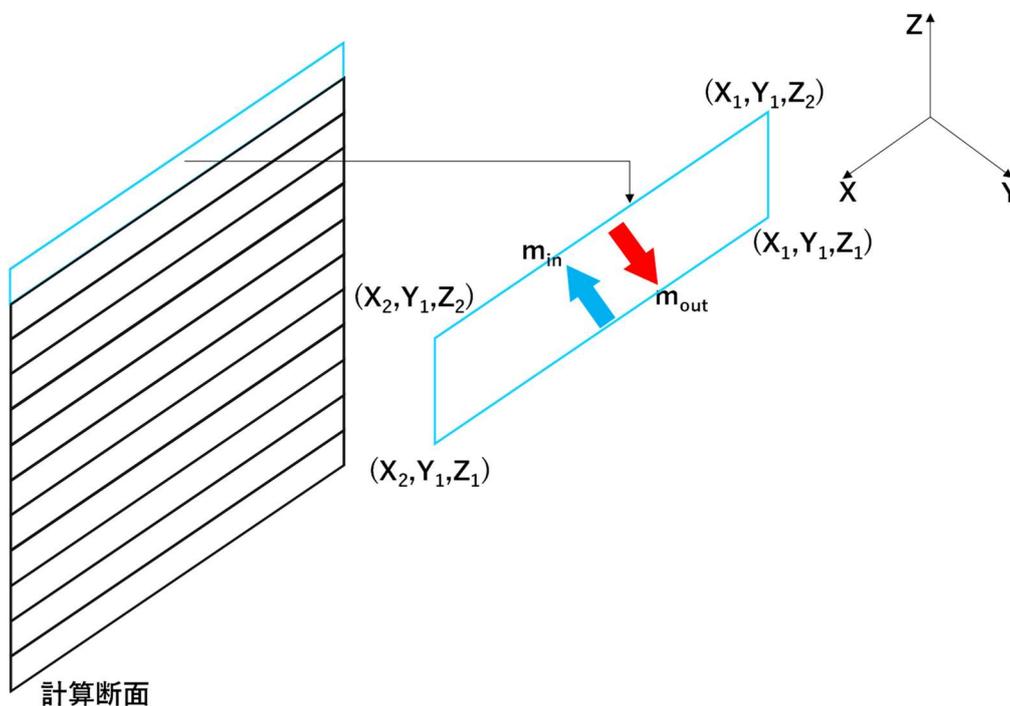


図 4-2-4 流量計算の概要図

### 4.2.3 計算条件

表 4-2-1 に再現性の検討に関する計算条件を示す。Case 番号は、再現性(再)、発熱速度 $Q_f$ 、傾斜角度 $\theta$ を組み合わせ設定した。例えば、発熱速度 $Q_f=16\text{kW}$ 、傾斜角度 $\theta=0^\circ$ であれば、Case 番号は「再-16-0」となる。第 3 章の模型実験に基づき、温度および開口部(A)における流量係数 $\alpha$ の計算結果と実験結果を比較し、再現性を確認する。なお、再現性の検討については第 3 章の実験条件と同様である Case 再-16-0 および Case 再-16-30 を用いる。

FDS モデルの部材であるケイ酸カルシウム板の物性値は「鋼構造耐火設計指針」およびケイ酸カルシウム保温材協会より発行された「ケイ酸カルシウム保温材 2009 年版」を参考にして設定した。

一般的に浮カブルームを含むシミュレーションに対してメッシュサイズ $\delta x$ は無次元化の表現 $D^*/\delta x$ より求められ<sup>[4-2]</sup>、特性火炎直径 $D^*$ は以下の式から求められる。

$$D^* = \left( \frac{Q_f}{\rho_\infty c_p T_\infty \sqrt{g}} \right)^{2/5} \quad (4.2.1)$$

ここで、

$c_p$ : 定圧比熱 [kJ/(kg·K)]、 $D^*$ : 特性火炎直径 [m]、 $g$ : 重力加速度[m/s<sup>2</sup>]、 $Q_f$ : 発熱速度 [kW]、 $T_\infty$ : 外気温度 [K]、 $\rho_\infty$ : 外気密度 [kg/m<sup>3</sup>]

FDS (Version 5) の User's Guide<sup>[4-2]</sup>によれば、適切な $D^*/\delta x$ の範囲は 4~16 を目安としており、本モデルでは、表 4-2-1 の発熱速度 $Q_f$ によると、メッシュサイズ $\delta x$ の範囲は約 12~50mm となり、火災室におけるメッシュサイズ $\delta x$ の範囲を 12.5~50mm と設定した。傾斜空間では、傾斜角度 $\theta$ によるメッシュ設定の具合を考慮し、メッシュサイズ $\delta x$ の範囲を 5~50mm とした。それぞれの条件における火災室および傾斜空間の総メッシュ数を表 4-2-1 に示す。初期温度は 20°C とし、境界条件は大気開放とした。

表 4-2-1 再現性の検討に関する条件

Case	発熱速度 $Q_f$ [kW]	傾斜空間幅 $B_{sw}$ [mm]	傾斜空間長さ $l$ [mm]	傾斜角度 $\theta$ [°]	熱物性値	メッシュサイズ[mm]およびメッシュ数		初期温度 [°C]	境界条件
						火災室	傾斜空間		
再-16-0	16	600	1800	0	ケイ酸カルシウム (厚さ:25mm) ・密度 240 [kg/m <sup>3</sup> ] ・比熱 0.782 (0°C)~ 1.003 (300°C) [kJ/(kg·K)] ・熱伝導率 0.098 (0°C)~ 0.177 (320°C) [W/(m·K)]	X:25 ~50 Y:25 Z: 12.5 計: 269, 824	X:50 Y: 5~50 Z: 12.5 計: 122,3 04	20	大気開放
再-16-10				10			X:50 Y:7.5 ~50 Z: 12.5 計: 244,7 76		
再-16-20				20					
再-16-30				30					

### 4.3 計算結果と実験結果の比較

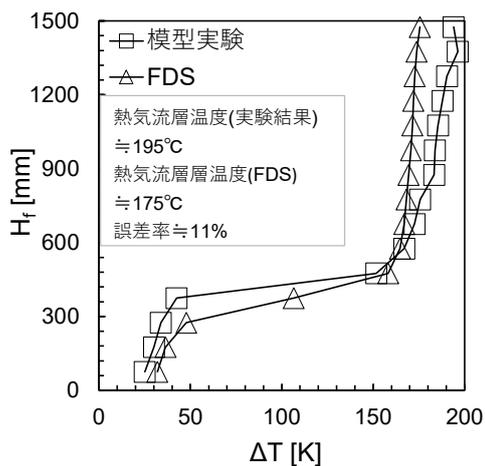
#### ① 鉛直温度

ここでは、第3章の実験結果に合わせ、FDSの計算結果において800秒を基準とした1分間(770秒~830秒)の平均値を用いる。温度および速度のコンター図は800秒における結果である。

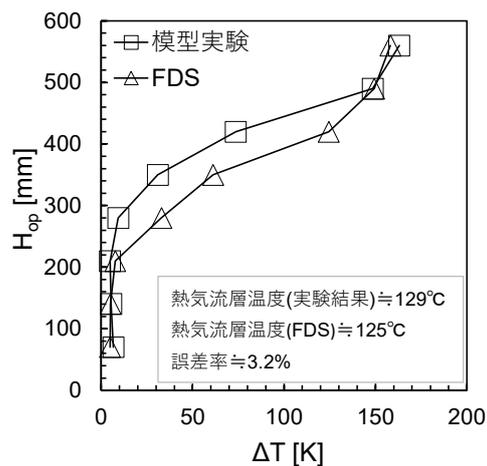
図4-3-2にCase再-16-0およびCase再-16-30の火災室および開口部(A)における実験結果と計算結果の鉛直温度 $\Delta T$ を示す。ただし、火災室の $\Delta T$ は $\Delta T_a$ と $\Delta T_b$ の平均値であり、外気温度を基準とした上昇温度である(以後同じ)。図4-3-2より、傾斜角度 $\theta$ に関わらず、火災室および開口部(A)における熱気流層温度に着目すれば、実験結果に比べ計算結果の方で熱気流の温度が低い値となる傾向がみられるが、その誤差は20%<sup>[4-3]</sup>以内におさまっている。

図4-3-3および図4-3-4にCase再-16-0およびCase再-16-30の傾斜空間における実験結果と計算結果の鉛直温度 $\Delta T$ を、開口部(A)を起点とした流動距離 $r$ に対して整理した結果を示す。ここで、縦軸は傾斜空間の天井面を起点とした長さ $z$ とし、横軸は外気温度を基準とした上昇温度 $\Delta T$ である。図4-3-3および図4-3-4より、各流動距離 $r$ における $z$ と $\Delta T$ の関係においては計算結果が実験結果より若干温度が高くなる傾向がみられる。さらに第3章のように、無次元温度 $T^*$ および熱気流の厚さ $L_T$ を用い無次元化した無次元高さ $z^*$ の関係とすれば、鉛直方向の温度減衰傾向は概ね一致する傾向がみられる。

以上の結果より、FDSによる計算結果は傾斜空間内の熱気流温度の減衰傾向について、実験結果を概ね再現していることがわかる。

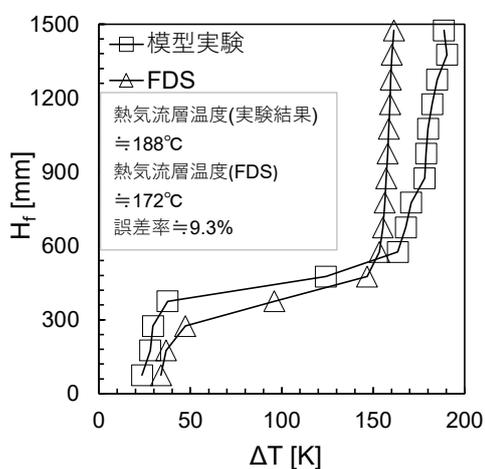


(i) 火災室

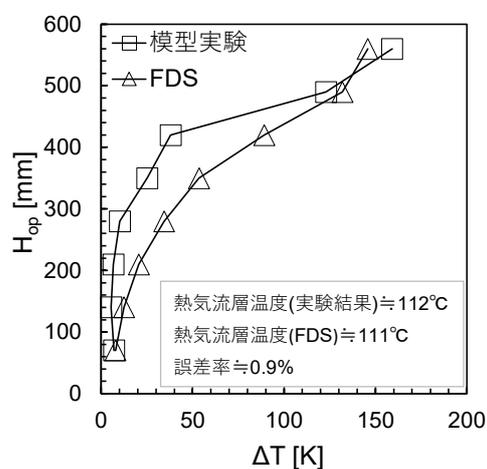


(ii) 開口部(A)

(a) Case 再-16-0



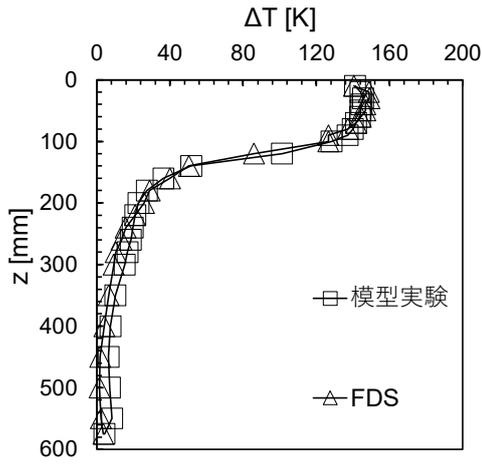
(i) 火災室



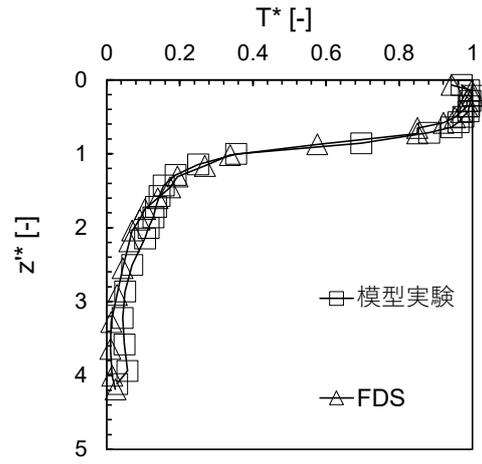
(ii) 開口部(A)

(b) Case 再-16-30

図 4-3-2 火災室および開口部(A)の温度

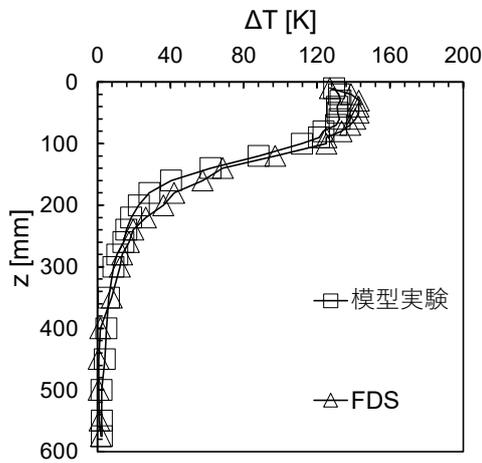


(i)  $z$ と $\Delta T$ の関係

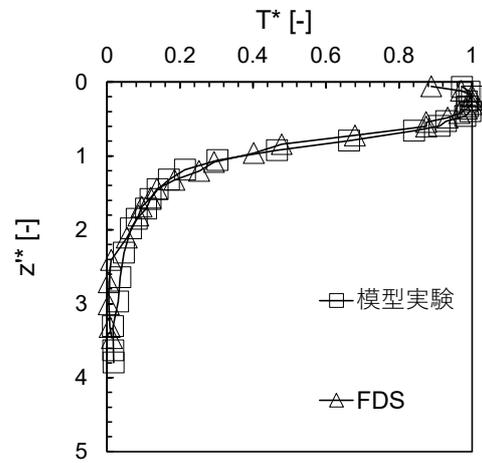


(ii)  $z^*$ と $T^*$ の関係

(a)  $r=600\text{mm}$

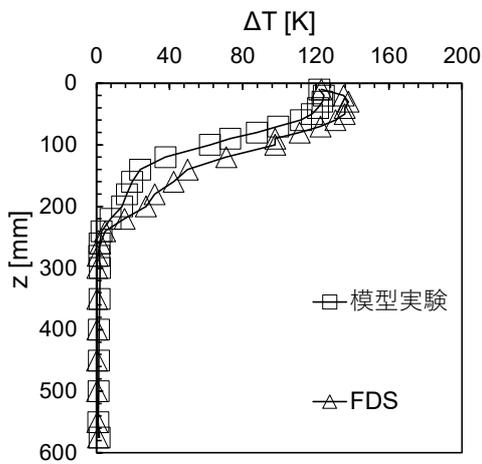


(i)  $z$ と $\Delta T$ の関係

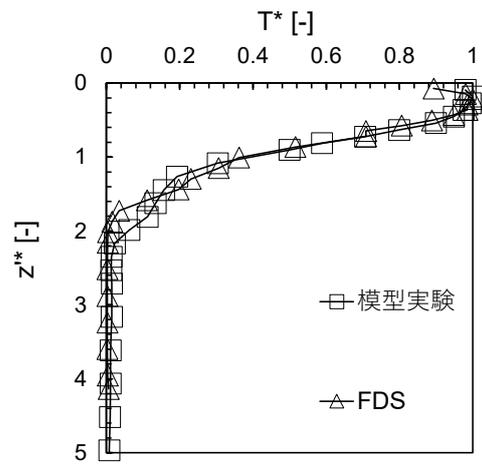


(ii)  $z^*$ と $T^*$ の関係

(b)  $r=1200\text{mm}$



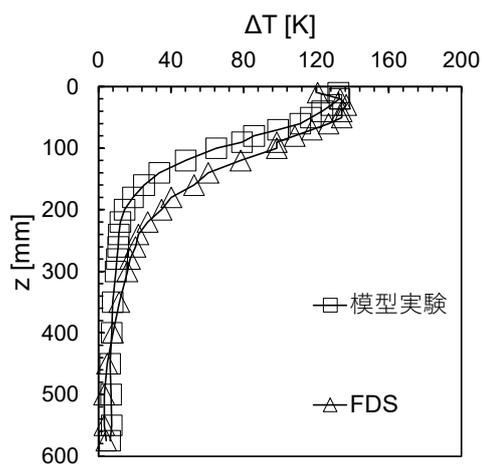
(i)  $z$ と $\Delta T$ の関係



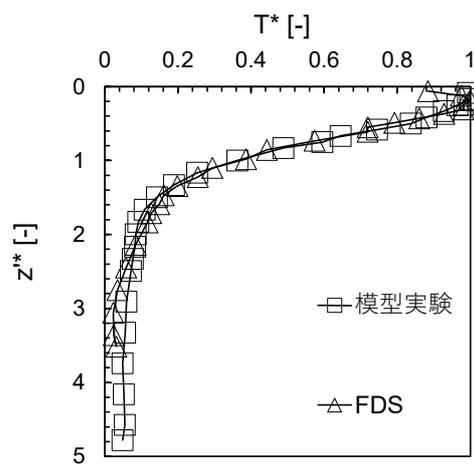
(ii)  $z^*$ と $T^*$ の関係

(c)  $r=1800\text{mm}$

図 4-3-3 傾斜空間の温度 (Case 再-16-0)

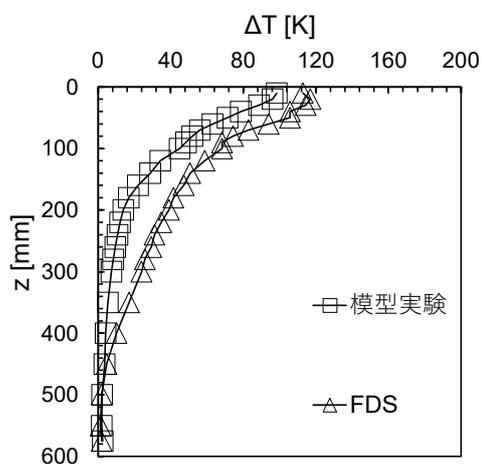


(i)  $z$ と $\Delta T$ の関係

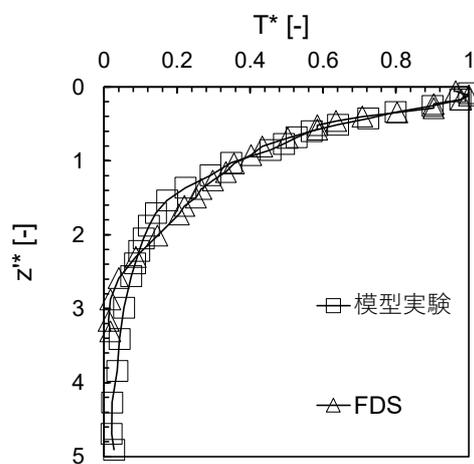


(ii)  $z^*$ と $T^*$ の関係

(a)  $r=600\text{mm}$

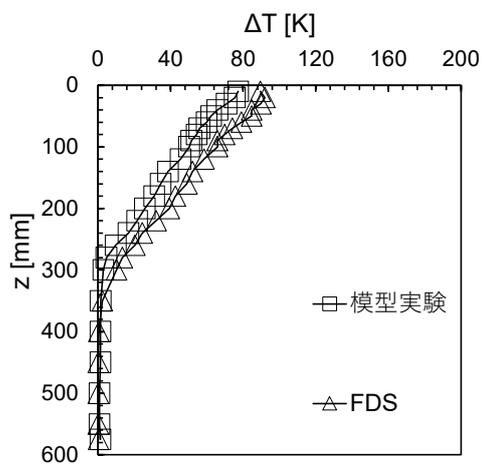


(i)  $z$ と $\Delta T$ の関係

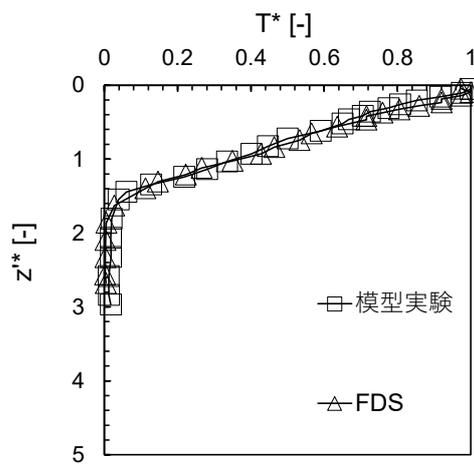


(ii)  $z^*$ と $T^*$ の関係

(b)  $r=1200\text{mm}$



(i)  $z$ と $\Delta T$ の関係



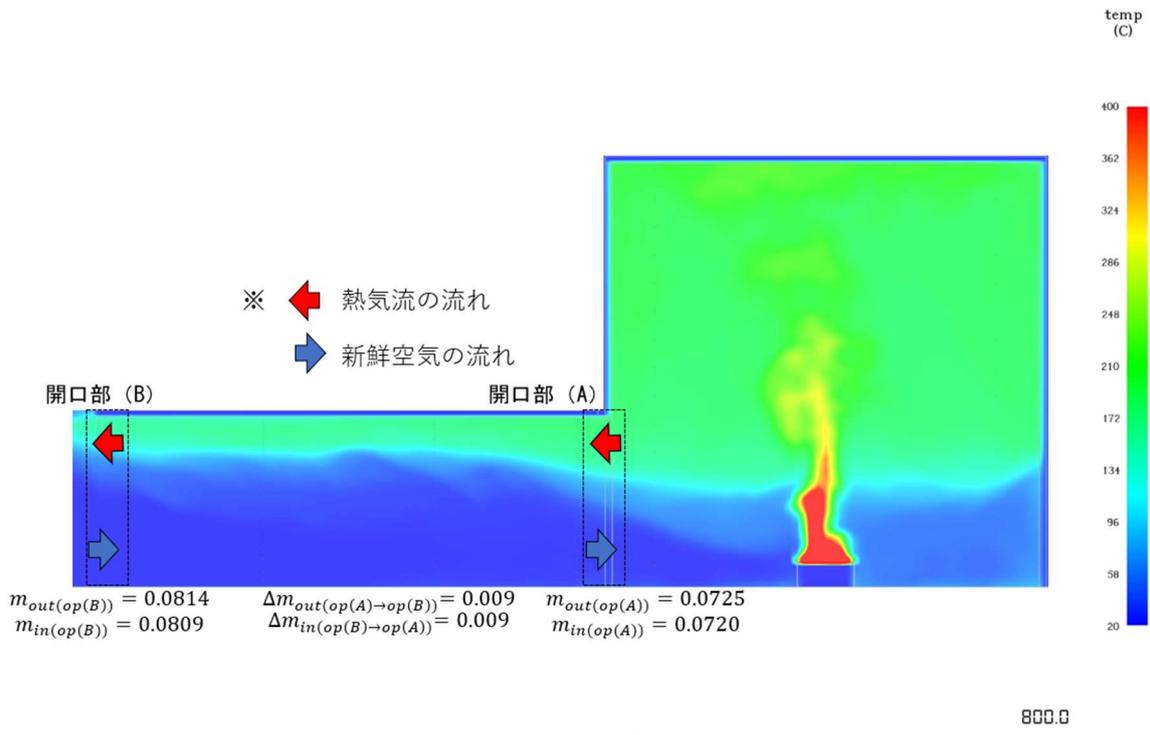
(ii)  $z^*$ と $T^*$ の関係

(c)  $r=1800\text{mm}$

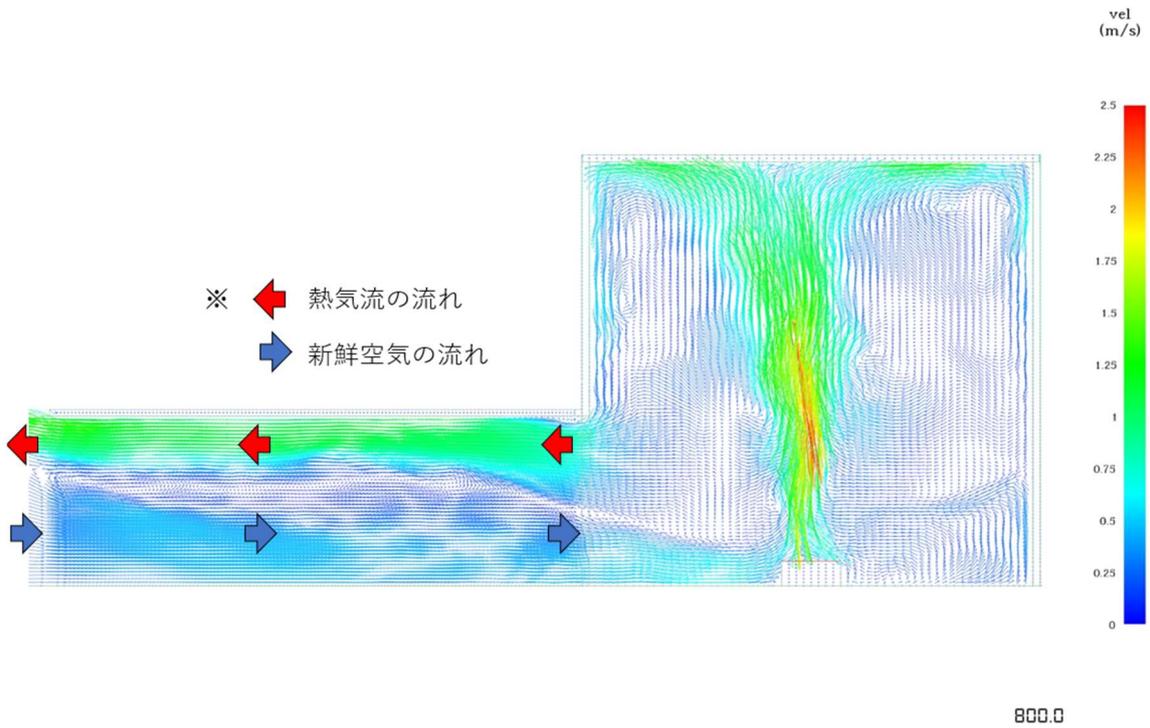
図 4-3-4 傾斜空間の温度 (Case 再-16-30)

図 4-3-5 に Case 再-16-0 および Case 再-16-30 の条件の  $X=750\text{mm}$  の断面における温度および速度に関するコンターを示す。

図 4-3-5(a)より、傾斜角度 $\theta=0^\circ$  の傾斜空間では、傾斜空間の上部の熱気流と下部の新鮮空気が二層化する傾向がみられる。また、傾斜角度 $\theta=0^\circ$  では開口部 (A) から開口部 (B) までの傾斜空間の上部の質量流量 $\Delta m_{out(Op(A)\rightarrow Op(B))}$ は約  $0.009\text{kg/s}$  増加し、開口部 (B) から開口部 (A) まで傾斜空間の下部の質量流量 $\Delta m_{in(Op(B)\rightarrow Op(A))}$ は約  $0.009\text{kg/s}$  減少した。図 4-3-5(b)より、 $\theta=30^\circ$  の場合は、傾斜空間で上部と下部の間で渦等が発生し、複雑な流れになる傾向がみられる。また、開口部 (A) から開口部 (B) までの傾斜空間の上部における質量流量 $\Delta m_{out(Op(A)\rightarrow Op(B))}$ は約  $0.04\text{kg/s}$  増加し、開口部 (B) から開口部 (A) までの傾斜空間の下部における質量流量 $\Delta m_{in(Op(B)\rightarrow Op(A))}$ は約  $0.04\text{kg/s}$  減少した。これらの結果より、それぞれの条件において質量保存則の成立が確認できる。また、傾斜角度 $\theta=0^\circ$  の傾斜空間では熱気流と新鮮空気の間における巻き込みは概ね 0 であり、上部の熱気流の温度減衰は主に周壁への熱損失等による影響を受けると考えられる。その反面、傾斜角度 $\theta=30^\circ$  の傾斜空間では、 $\theta=0^\circ$  に比べ、熱気流と新鮮空気の間で発生する渦(巻き込み)の影響を受けて上部の熱気流の温度が顕著に低下すると考えられる。

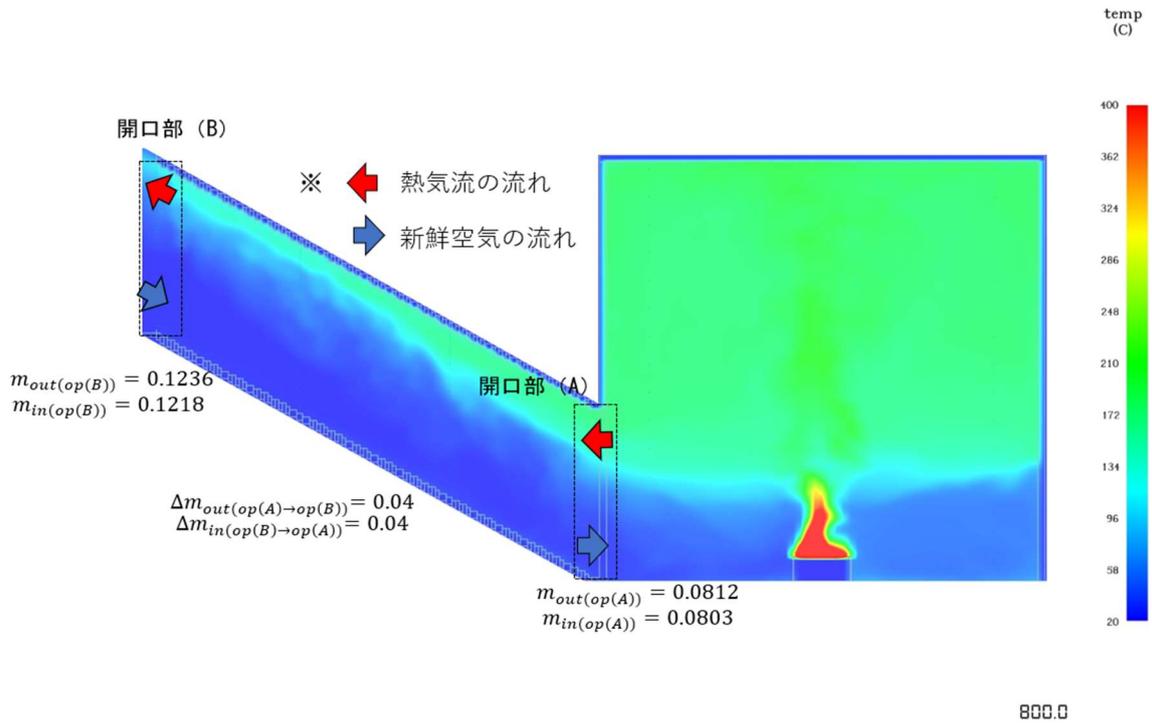


(i) 温度

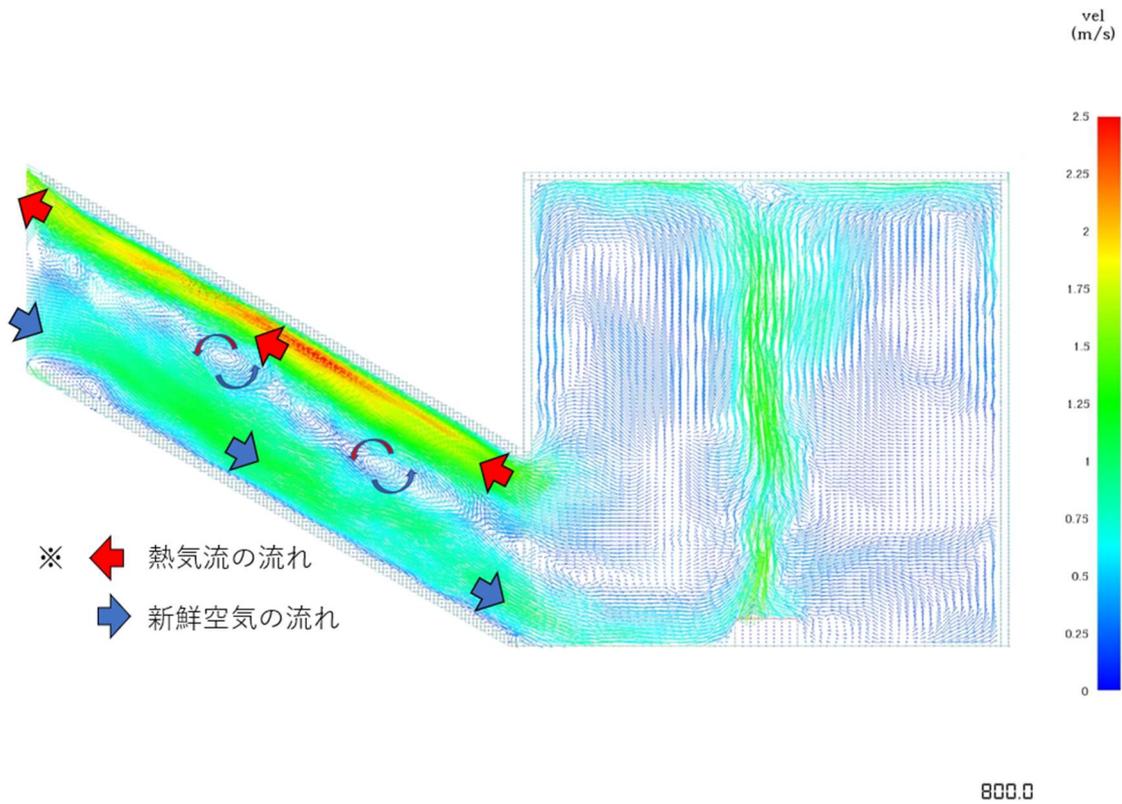


(ii) 速度

(a) Case 再-16-0



(i) 温度



(ii) 速度

(b) Case 再-16-30

図 4-3-5 温度および速度のコンター

② 開口部(A)における流量係数 $\alpha$ 

ここでは、FDS の計算結果において定常状態である 300 秒を基準とした 1 分間 (270 秒~330 秒) の平均値を用いる。

一般的に窓等の開口部を有する空間で火災が発生した場合、火災室から流出する熱気流は開口形状、熱気流層密度、中性帯高さおよび開口部の流量係数 $\alpha$ に依存することになる。ここで、流量係数 $\alpha$ は扉や窓のような平均的な開口では 0.6~0.7 となるが、本条件のような火災区画に設けられた排煙の開口が隣接空間を介して外気と通じている場合は、開口形状以外に空間の形状の影響も考慮すべきであり、それらを考慮した流量係数の検討が必要と考えられる。

よって、FDS の計算結果に基づき、火災室と傾斜空間の間に位置する開口部(A)における流量係数 $\alpha$ について検討する。ここで、流量係数 $\alpha$ は以下の式(4.3.4)を用いて算出する。

$$\alpha = \frac{m_{(Op(A))}}{\text{火災室}(0\sim 600\text{mm})\text{の温度分布に基づく熱気流流量}m_{(0\sim 600\text{mm})}(\alpha=1)} \quad (4.3.4)$$

ここで、 $m_{(Op(A))}$ は図 4-2-4 に示した通り、計算から得られる開口部(A)における熱気流の流量であり、 $m_{(0\sim 600\text{mm})}$ は FDS の火災室(0~600mm)の温度分布および圧力仮定法<sup>[4-5]</sup>を用いて算定した熱気流の流量である。ここで、圧力仮定法は鉛直温度分布を複数層に分割し、各層における室内外の差圧を求め、質量収支を条件とし、逐次計算により熱気流の流量を算出する方法であり、流量係数 $\alpha=1$ とした。

図 4-3-6 に火災室(0~600mm)の温度分布およびその分布に基づき圧力仮定法<sup>[4-5]</sup>を用いて算定した熱気流の流量 $m_{(0\sim 600\text{mm})}$ と開口部(A)における熱気流の流量 $m_{(Op(A))}$ の結果を示す。図 4-3-6 より、火災室の上部の温度は傾斜角度 $\theta$ が大きくなるに従い低下する傾向がみられる。また、その影響を受けて熱気流の流量 $m_{(0\sim 600\text{mm})}$ も変化する傾向がみられる。さらに、開口部(A)における熱気流の流量 $m_{(Op(A))}$ は傾斜角度 $\theta$ が大きくなる程増加する傾向がみられる。これは、傾斜空間では、傾斜角度 $\theta$ が大きくなるにつれ生じる浮力による煙突効果の影響などが原因と推察される。

図 4-3-7 に式(4.3.4)に基づき算出した傾斜角度 $\theta=0^\circ$ 、 $10^\circ$ 、 $20^\circ$ 、 $30^\circ$ の開口部(A)における流量係数 $\alpha$ を示し、参考値として模型実験<sup>[4-6]</sup>から得られた流量係数 $\alpha$ を併記する。図 4-3-7 より、傾斜角度 $\theta=0^\circ$ から $30^\circ$ の範囲で式(4.3.4)の計算結果から得られた開口部(A)における流量係数 $\alpha$ と実験から得られた流量係数 $\alpha$ は、概ね一致する傾向がみられ、流量係数 $\alpha$ に関して FDS の計算結果は実験結果を概ね再現していることがわかる。

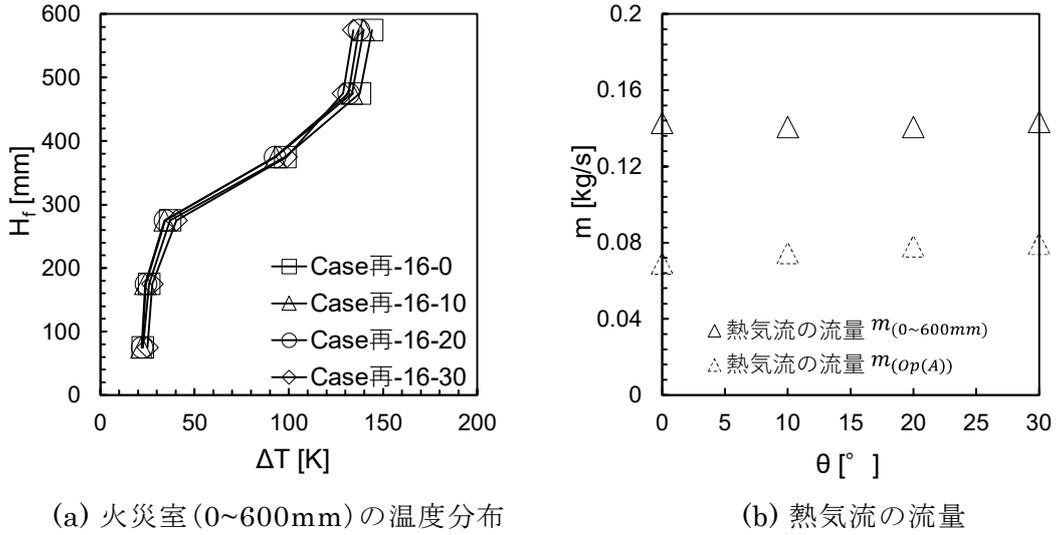


図 4-3-6 火災室の温度および熱気流の流量

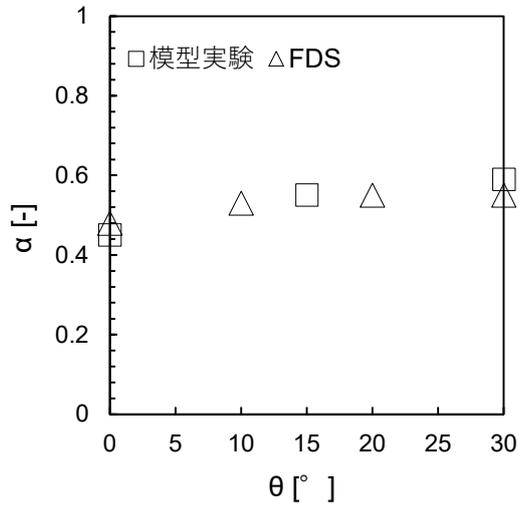


図 4-3-7 開口部 (A) における流量係数  $\alpha$

## 4.4 地下空間における階段加圧煙制御を想定したケーススタディ

地下空間に通じる階段室に階段加圧給気を行った場合、地下空間から外部に連絡する傾斜空間を空気逃し口および避難や消防活動時の移動経路として使用できるか検討を行うため、FDSを用いたケーススタディを実施する。

### 4.4.1 ケーススタディの条件

#### (1) 給気方式の違いによる影響

地下空間は水平方向に大規模に展開し、地下空間から地上階への階段の配置は地上の土地利用に制約され不規則な場合がある<sup>[4-7]</sup>。また、地下空間の火災で火源位置を予測することは困難である。このような空間で階段加圧煙制御を行う場合、一般に加圧空間では静圧上昇が望ましいが、仮に階段と火源位置が近い状況を考えれば加圧給気による動圧が火炎や熱気流に影響を与える可能性が考えられる。よって、本節では遮煙部に給気による動圧の影響がある給気方式(以降、[不完全静圧方式]とする)や給気による動圧の影響がない給気方式(以降、[静圧方式]とする)の条件を設定し<sup>[4-8]</sup>、それぞれの給気方式での火災室および傾斜空間における熱気流性状や避難および消防活動上の安全性について把握する。

表 4-4-1 に給気方式の違いによる影響に関するケーススタディの条件を示す。ただし、FDSモデルの部材の物性値やメッシュは表 4-2-1 に示した通りである。Case番号は、ケーススタディ(ケ)、発熱速度 $Q_f$ 、傾斜角度 $\theta$ 、給気量 $Q$ および給気方式(不完全静圧方式(d)、静圧方式(s))を組み合わせ設定した。例えば、発熱速度 $Q_f=16\text{kW}$ 、傾斜角度 $\theta=0^\circ$ 、給気量 $Q=0.071\text{m}^3/\text{s}$  および給気方式は不完全静圧方式であれば、Case番号は「ケ-16-0-0.071-d」となる。また、図 4-4-1 にケーススタディモデルの概要図を示す。図 4-4-1(a)のモデルの寸法は図 4-2-1 と同様である。図 4-4-1(b)に示した通り、加圧給気は火災室の下部で行い、本ケーススタディでそれぞれの給気方式を再現するため給気量 $Q$ は一定とし、給気口の形および給気量を調整した。給気方式が不完全静圧方式である場合、第 3 章の傾斜空間高さ $H_{op}$ のスケールに合わせ、給気口は実際使用する一般の扉(高さ 2000mm×幅 1000mm)<sup>[4-1]</sup>の 1/5 スケール(高さ 400mm×幅 200mm)とし、給気口から給気量を $Q$ とした。給気方式が静圧方式である場合は、給気口高さは不完全静圧方式と同様に 400mm とし、火災室の下部(高さ 0~400mm)の周壁をすべて給気口と設定し、給気口①の給気量は $Q/4$ 、給気口②の給気量は $Q/8$ とした。ここで、給気量 $Q$ は第 3 章の実験結果を参考にし、火災室の温度を 200℃と見なした時の遮煙性能を満足する風速に不完全静圧方式の給気口(実際使用する一般の扉の 1/5 スケール)の面積および流量係数 $\alpha(0.7)$ を掛け算出した値とし、火災室の温度が 100℃および 400℃の条件を追加した。それぞれの火災室の温度に対する給気量 $Q$ の算出は、以下に示す通りである。

・火災室の温度を 100℃に想定した条件(外気温度=20℃)

$$\Delta P_{100} = (\rho_\infty - \rho_f)gH = (1.2 - 0.95) \times 9.8 \times H = 2.45H$$

$$V_{100} = \sqrt{\frac{2\Delta P_{100}}{\rho_{\infty}}} = \sqrt{\frac{2 \times 2.45H}{1.2}} = 2\sqrt{H} = 1.26\text{m/s}$$

$$Q_{100} = \alpha \times A_d \times V_{100} = 0.7 \times (0.4 \times 0.2) \times 1.26 = 0.071$$

・火災室の温度を 200°C に想定した条件 (外気温度 = 20°C)

$$\Delta P_{200} = (\rho_{\infty} - \rho_f)gH = (1.2 - 0.75) \times 9.8 \times H = 4.41H$$

$$V_{200} = \sqrt{\frac{2\Delta P_{200}}{\rho_{\infty}}} = \sqrt{\frac{2 \times 4.41H}{1.2}} = 2.7\sqrt{H} = 1.7\text{m/s}$$

$$Q_{200} = \alpha \times A_d \times V_{200} = 0.7 \times (0.4 \times 0.2) \times 1.7 = 0.095$$

・火災室の温度を 400°C に想定した条件 (外気温度 = 20°C)

$$\Delta P_{400} = (\rho_{\infty} - \rho_f)gH = (1.2 - 0.52) \times 9.8 \times H = 6.66H$$

$$V_{400} = \sqrt{\frac{2\Delta P_{400}}{\rho_{\infty}}} = \sqrt{\frac{2 \times 6.66H}{1.2}} = 3.3\sqrt{H} = 2.1\text{m/s}$$

$$Q_{400} = \alpha \times A_d \times V_{400} = 0.7 \times (0.4 \times 0.2) \times 2.1 = 0.118$$

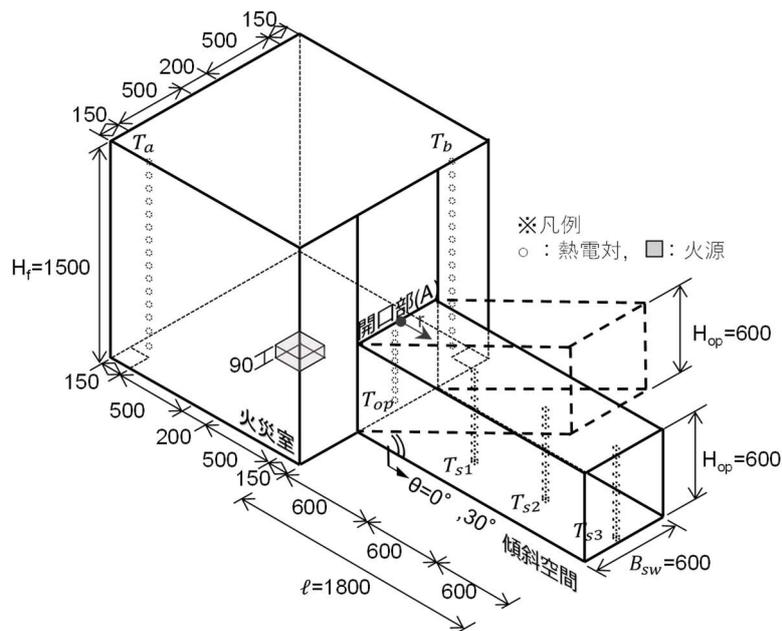
ただし、

$A_d$ : 不完全静圧方式の給気口面積 [m<sup>2</sup>]、 $g$ : 重力加速度 [m/s<sup>2</sup>]、 $H$ : 給気口の高さ [m]、 $Q$ : 給気量 [m<sup>3</sup>/s]、 $\Delta P$ : 差圧 [Pa]、 $V$ : 給気口における風速 [kg/s]、 $\rho_f$ : 火災室の密度 [kg/m<sup>3</sup>]、 $\rho_{\infty}$ : 外気密度 [kg/m<sup>3</sup>]、 $\alpha$ : 流量係数 (0.7)

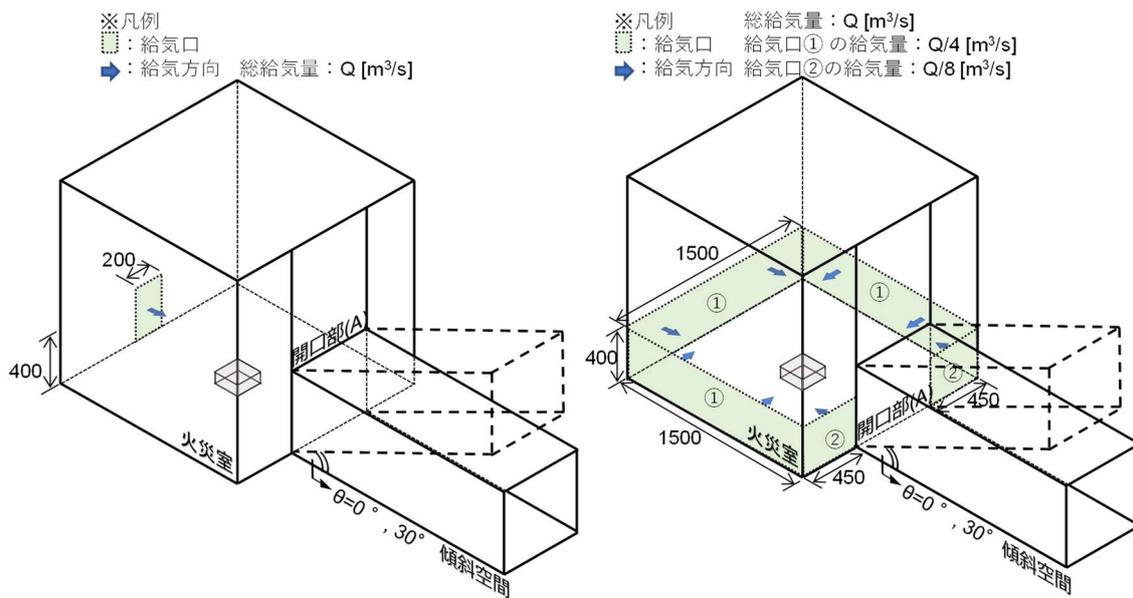
計算比較項目は鉛直温度、コンター(温度、速度)である。ここで、鉛直温度は、4.2.2 の(1)と同様である。温度および速度のコンターは、4.2.2 の(2)と同様である。

表 4-4-1 給気方式の違いによる影響に関するケーススタディ条件

Case	発熱速度 $Q_f$ [kW]	傾斜 空間 幅 $B_{sw}$ [mm]	傾斜 空間 長さ $\ell$ [mm]	傾斜 角度 $\theta$ [°]	給気 口の 高さ [mm]	給気口 の幅 [mm]	給気量 $Q$ [m <sup>3</sup> /s]	給気 方式
ケ-16-0-0.071-d	16	600	1800	0	400	200	0.071	不完全 静圧 方式
ケ-16-0-0.095-d							0.095	
ケ-16-0-0.118-d							0.118	
ケ-16-30-0.071-d							0.071	
ケ-16-30-0.095-d							0.095	
ケ-16-30-0.118-d							0.118	
ケ-16-0-0.071-s				0	400	①1500 ②450	0.071	静圧 方式
ケ-16-0-0.095-s							0.095	
ケ-16-0-0.118-s							0.118	
ケ-16-30-0.071-s							0.071	
ケ-16-30-0.095-s	30	400	①1500 ②450	0.095	静圧 方式			
ケ-16-30-0.118-s				0.118				



(a) モデルの概要図



(i) 不完全静圧方式

(ii) 静圧方式

(b) 給気方式

図 4-4-1 給気方式の違いに関するケーススタディモデルの概要図

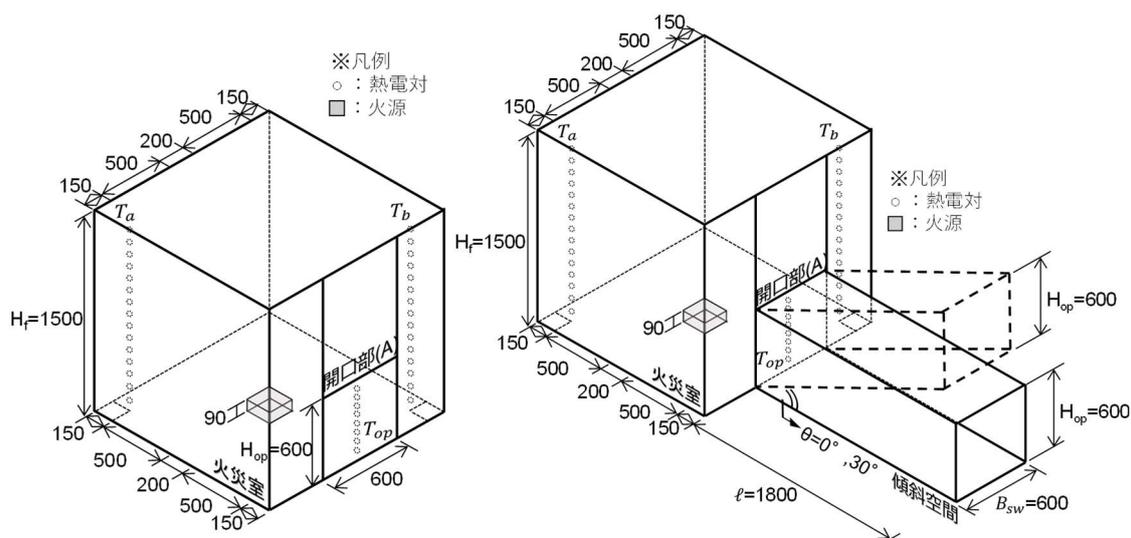
(2) 傾斜空間の空気逃し口としての性能

表 4-4-2 に加圧給気時の傾斜空間を空気逃し口として使用する場合の性能に着目したケーススタディの条件を示す。Case 番号は、ケーススタディ(ケ)、発熱速度 $Q_f$ 、傾斜角度 $\theta$ (傾斜空間なしの場合 $\times$ とする)、給気量 $Q$ および給気方式(静圧方式(s))を組み合わせて設定した。例えば、発熱速度 $Q_f = 16\text{kW}$ 、傾斜空間なし、給気量 $Q = 0.118\text{m}^3/\text{s}$  および給気方式は静圧方式であれば、Case 番号は「ケ-16- $\times$ -0.118-s」となる。ここで、給気量 $Q$ は $0.118\text{m}^3/\text{s}$ とし、給気方式は静圧方式を対象とする。

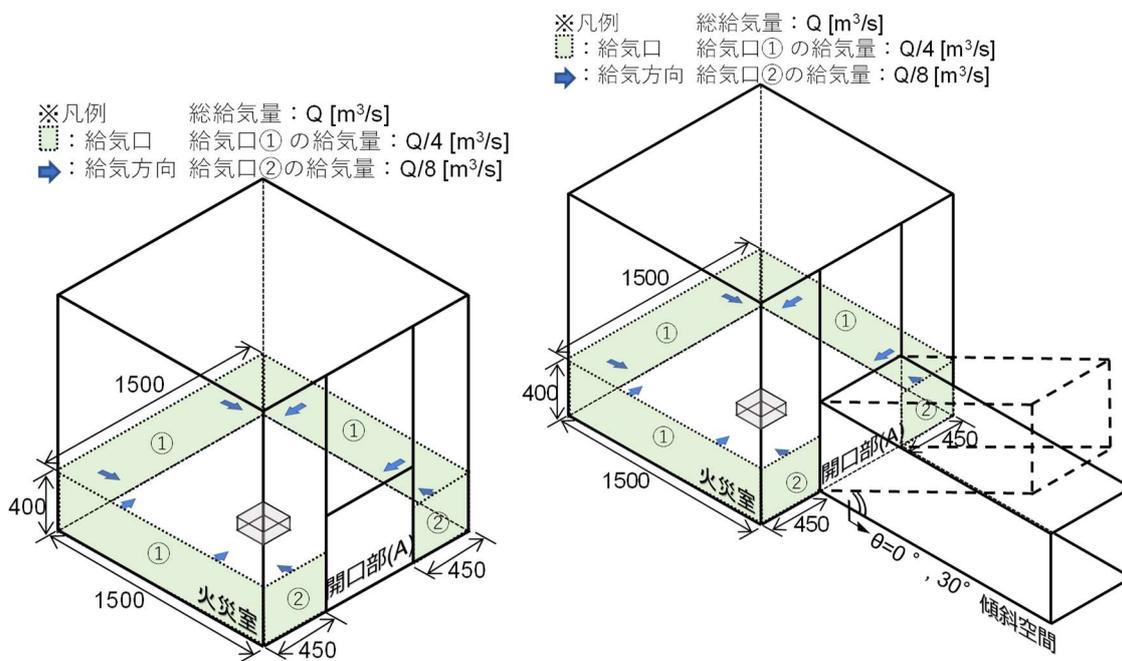
図 4-4-2 にケーススタディモデルの概要図を示す。計算比較項目は火災室および開口部(A)における鉛直温度およびコンター(温度、速度)である。鉛直温度は、4.2.2 の(1)と同様である。温度および速度のコンターは4.2.2 の(2)と同様である。FDS モデルの部材の物性値やメッシュは表 4-2-1 に示した通りである。ただし、ケ-16- $\times$ -0.118-sは傾斜空間なしの条件であるため、表 4-2-1 において傾斜角度 $\theta = 0^\circ$  の火災室のみのメッシュ設定とした。

表 4-4-2 傾斜空間の空気逃し口としての性能に関するケーススタディ条件

Case	発熱速度 $Q_f$ [kW]	傾斜空間 幅 $B_{sw}$ [mm]	傾斜空間 長さ $l$ [mm]	傾斜角度 $\theta$ [°]	給気口の 高さ [mm]	給気口の幅 [mm]	給気量 $Q$ [m <sup>3</sup> /s]	給気方式
ケ-16- $\times$ -0.118-s	16	600	-	-	400	①1500 ②450	0.118	静圧方式
ケ-16-0-0.118-s			1800	0				
ケ-16-30-0.118-s				30				



(i) Case ケ-16-x-0.118-s (ii) Case ケ-16-0-0.118-s、Case ケ-16-30-0.118-s  
(a) モデルの概要図



(i) Case ケ-16-x-0.118-s (ii) Case ケ-16-0-0.118-s、Case ケ-16-30-0.118-s  
(b) 給気方式 (静圧方式)

図 4-4-2 傾斜空間の空気逃し口としての性能確認に関するケーススタディモデルの概要図

(3) 火源の大きさの違いによる影響

表 4-4-3 に加圧給気時に火源の大きさの違いによる影響に着目したケーススタディの条件を示す。Case 番号は、ケーススタディ(ケ)、発熱速度 $Q_f$ 、傾斜角度 $\theta$ 、給気量 $Q$ および給気方式(静圧方式(s))を組み合わせ設定した。例えば、発熱速度 $Q_f = 32\text{kW}$ 、傾斜角度 $\theta = 30^\circ$ 、給気量 $Q = 0.118\text{m}^3/\text{s}$  および給気方式は静圧方式であれば、Case 番号は「ケ-32-30-0.118-s」となる。また、ケーススタディモデルは図 4-4-1 に示した通りであり、FDS モデルの部材の物性値やメッシュについては表 4-2-1 に示した通りである。計算比較項目は火災室、開口部(A)および傾斜空間における鉛直温度とし、詳細は 4.2.2 の(1)に示した通りである。

表 4-4-3 火源の大きさの違いによる影響に関するケーススタディ条件

Case	発熱速度 $Q_f$ [kW]	傾斜空間 幅 $B_{sw}$ [mm]	傾斜空間 長さ $l$ [mm]	傾斜 角度 $\theta$ [°]	給気 口の 高さ [mm]	給気口 の幅 [mm]	給気 量 $Q$ [m <sup>3</sup> /s]	給気 方式
ケ-32-30-0.071-s	32	600	1800	30	400	①1500	0.071	静圧 方式
ケ-32-30-0.095-s						②450	0.095	
ケ-32-30-0.118-s							0.118	

#### 4.4.2 ケーススタディの結果および考察

ここでは、すべての条件において定常状態である 300 秒を基準とした 1 分間(270 秒~330 秒)の平均値を用いる。また、温度および速度のコンター図は 300 秒における結果である。

##### (1) 給気方式の違いに関する検討

###### ① 鉛直温度

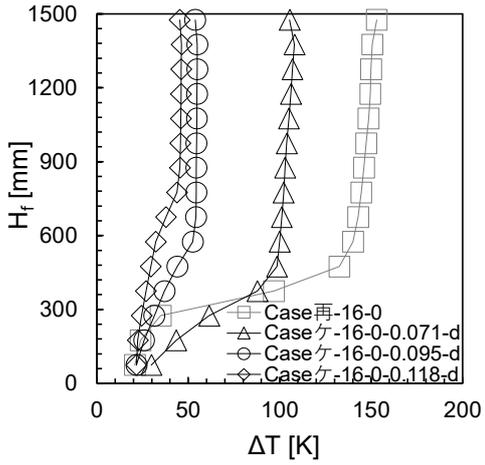
- ・火災室および開口部(A)

図 4-4-3 および図 4-4-4 に Case ケ-16-0-0.071-d~Case ケ-16-30-0.118-s の火災室および開口部(A)における上昇温度 $\Delta T$ について傾斜角度 $\theta$ および給気方式毎に整理した結果を示す。さらに、傾斜角度 $\theta=0^\circ$ 、 $30^\circ$ において給気口なし、すなわち給気量 $Q=0\text{m}^3/\text{s}$ である Case 再-16-0 および Case 再-16-30 における 1 分間(270 秒~330 秒)の平均値を併記し、加圧給気による影響について検討する。

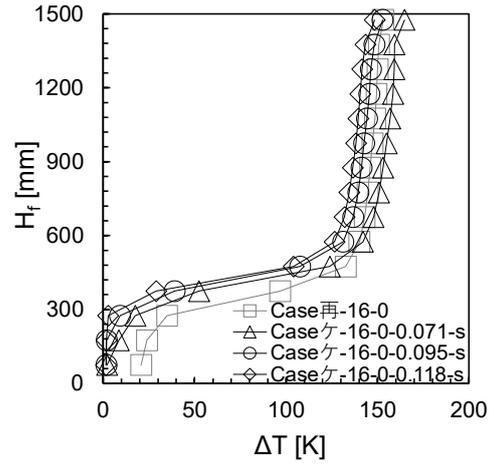
図 4-4-3(a)(i)および(b)(i)より、給気方式が不完全静圧方式である場合、火災室では傾斜角度 $\theta$ に関わらず、給気量 $Q$ が大きくなるに従い給気口なしの Case 再-16-0 および Case 再-16-30 より火災室の上部の温度は顕著に低下する傾向がみられる。これは、不完全静圧方式では給気口-火源-開口部(A)が直線上に位置しており、給気量 $Q$ が大きくなると、給気風速が速くなり給気した空気とともに火源からの熱気流が直接、開口部(A)に流れることが原因と考えられる。なお、傾斜角度 $\theta=0^\circ$ と $\theta=30^\circ$ を比較すると、傾斜角度 $\theta$ による大きな差はみられない。

図 4-4-3(a)(ii)および(b)(ii)より、給気方式が静圧方式である場合、火災室では傾斜角度 $\theta$ によらず、給気口なしの Case 再-16-0 および Case 再-16-30 と同様に上部と下部に二層化し、上部の温度は給気量 $Q$ が大きくなる程、低くなる傾向がみられる。また、給気を行う条件では下部において顕著な温度上昇はみられず、さらに給気口なしの Case 再-16-0 および Case 再-16-30 より低くなる傾向がみられる。これは、Case 再-16-0 および Case 再-16-30 の条件では、火源からの輻射や傾斜空間から一部の熱気流が新鮮空気に巻き込まれ火災室に流入するなどにより火災室の下部で温度上昇が起きると推察される。傾斜角度 $\theta$ による違いをみると、傾斜角度 $\theta=30^\circ$ が $\theta=0^\circ$ より、火災室の上部の温度は低くなる傾向がみられる。

図 4-4-4(a)(i)および(b)(i)より、開口部(A)では給気方式が不完全静圧方式である場合、傾斜角度 $\theta$ に関わらず、給気量 $Q$ が大きくなるにつれて上部の温度は低くなる傾向がみられる。これは、給気による動圧の影響を受け、火炎や熱気流が乱されることが原因と考えられる。その一方で、図 4-4-4(a)(ii)および(b)(ii)の給気方式が静圧方式である条件では、傾斜角度 $\theta$ に関わらず、上部と下部に二層化し、給気量 $Q$ が大きくなるに従い上部の温度は低くなり、下部では殆ど温度上昇はみられない。

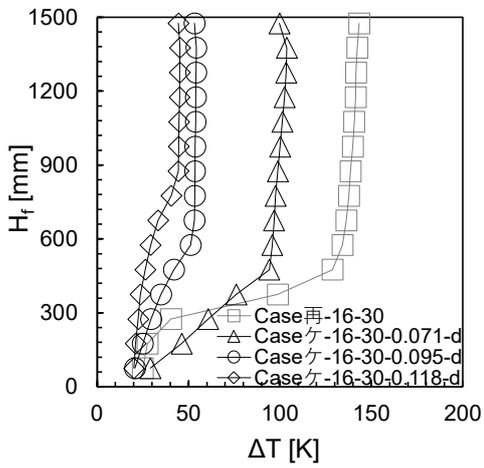


(i) 不完全静圧方式

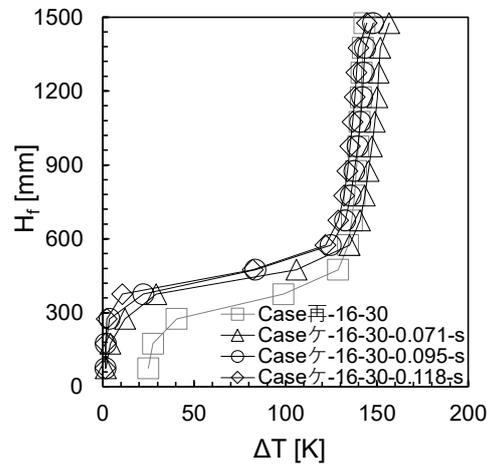


(ii) 静圧方式

(a)  $\theta = 0^\circ$



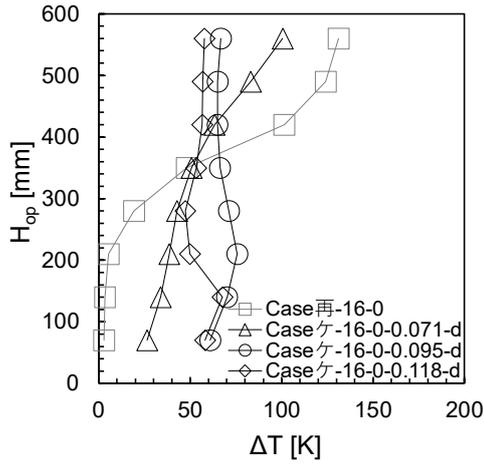
(i) 不完全静圧方式



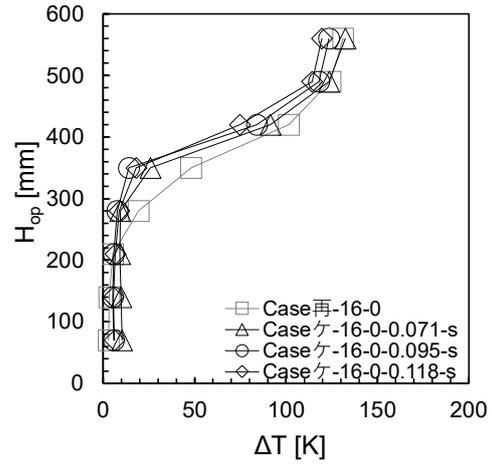
(ii) 静圧方式

(b)  $\theta = 30^\circ$

図 4-4-3 火災室における鉛直上昇温度の分布

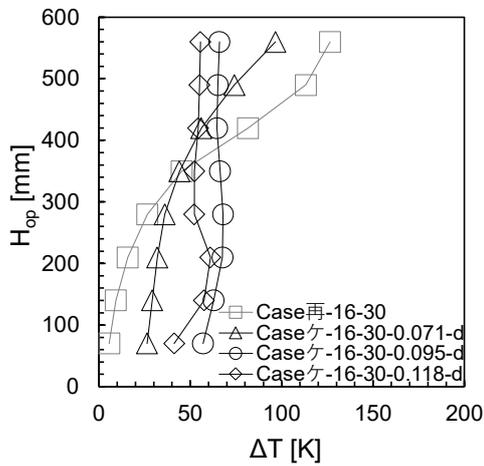


(i) 不完全静圧方式

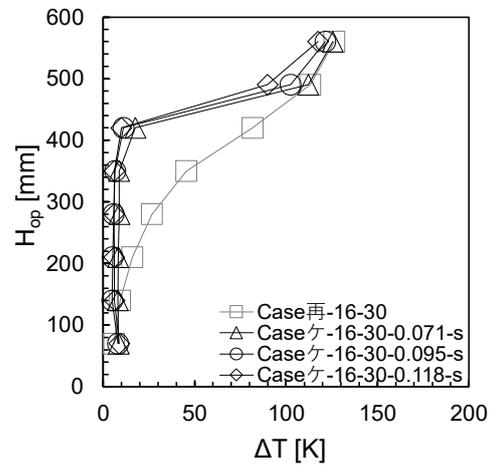


(ii) 静圧方式

(a)  $\theta = 0^\circ$



(i) 不完全静圧方式



(ii) 静圧方式

(b)  $\theta = 30^\circ$

図 4-4-4 開口部(A)における鉛直上昇温度の分布

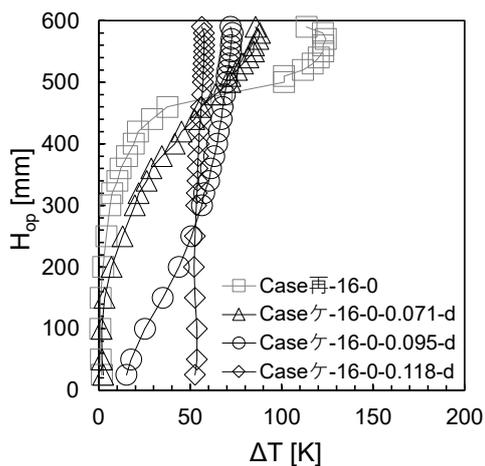
## ・ 傾斜空間

図 4-4-5 および図 4-4-6 に Case ケ-16-0-0.071-d~Case ケ-16-30-0.118-s の傾斜空間における上昇温度 $\Delta T$ について傾斜角度 $\theta$ 、流動距離 $r$ および給気方式毎に整理した結果を示す。ここで、流動距離 $r$ は図 4-4-1(a)に示したように、開口部(A)を起点とした流動距離である。さらに、傾斜角度 $\theta=0^\circ$ 、 $30^\circ$ において給気口なし、すなわち給気量 $Q=0\text{m}^3/\text{s}$ である Case 再-16-0 および Case 再-16-30 における 1 分間(270 秒~330 秒)の平均値を併記し、加圧給気による影響について検討する。

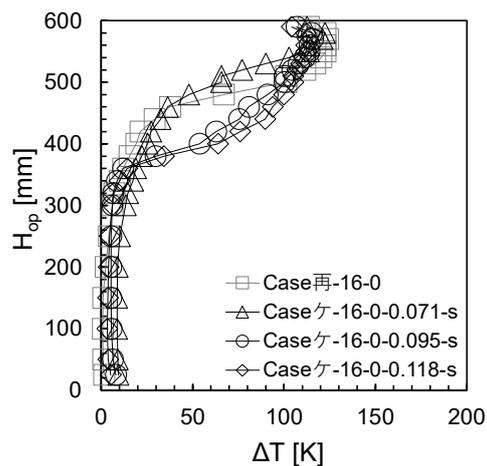
図 4-4-5(a)(i)、(b)(i)および(c)(i)より、傾斜角度 $\theta=0^\circ$ の傾斜空間において給気方式が不完全静圧方式である場合は給気口なしの Case 再-16-0 に比べ、給気量 $Q$ が大きくなるに従って上部の温度は低下するものの流動距離 $r=600\text{mm}$ では Case ケ-16-0-0.095-d および Case ケ-16-0-0.118-d において下部の温度が上昇し、流動距離 $r=1200\text{mm}$ では Case ケ-16-0-0.118-d で下部の温度が高くなる。流動距離 $r=1800\text{mm}$ では概ね高さ 0~100mm においてはいずれの条件でも下部での温度上昇はないが、鉛直方向の高さ 100mm 以降からは、給気量 $Q$ が大きくなる程、温度上昇する傾向がみられる。

図 4-4-5(a)(ii)、(b)(ii)および(c)(ii)より、傾斜角度 $\theta=0^\circ$ の傾斜空間において給気方式が静圧方式である条件では、流動距離 $r=600\text{mm}$ で Case 再-16-0 および Case ケ-16-0-0.071-s では熱気流の厚みが薄くなり、Case ケ-16-0-0.095-s および Case ケ-16-0-0.118-s では熱気流の厚みが厚くなる傾向がみられる。また、静圧方式は流動距離 $r$ が大きくなるにつれ上部の温度は減少し、いずれの条件でも下部で顕著な温度上昇はみられない。

図 4-4-6 より、傾斜角度 $\theta=30^\circ$ の傾斜空間の結果をみると、図 4-4-6(a)(i)、(b)(i)および(c)(i)の不完全静圧方式の条件では給気量 $Q$ および流動距離 $r$ が等しければ、 $\theta=0^\circ$ より傾斜空間の下部の温度は高くなる傾向がみられる。一方、図 4-4-6(a)(ii)、(b)(ii)および(c)(ii)の静圧方式では、給気量 $Q$ および流動距離 $r$ が等しければ、 $\theta=0^\circ$ より傾斜空間の上部の温度は低くなるが、下部では同じく温度上昇はみられない。

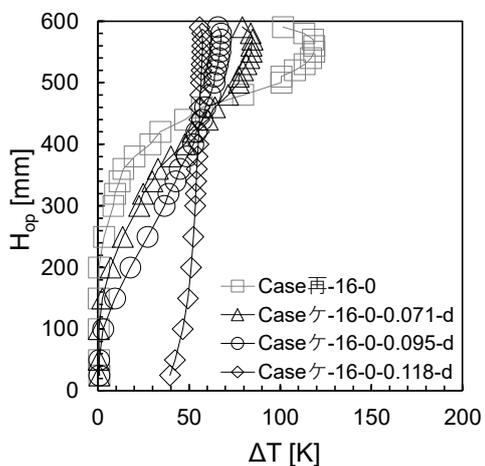


(i) 不完全静圧方式

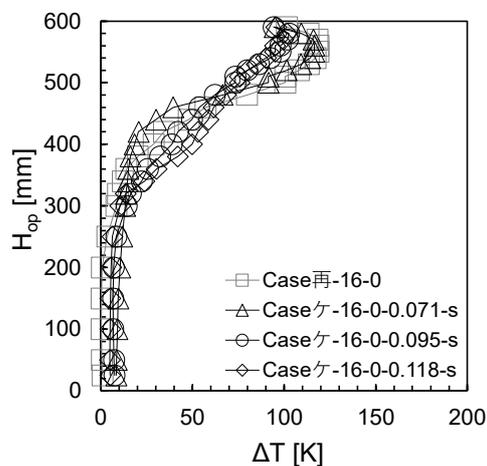


(ii) 静圧方式

(a)  $r=600\text{mm}$

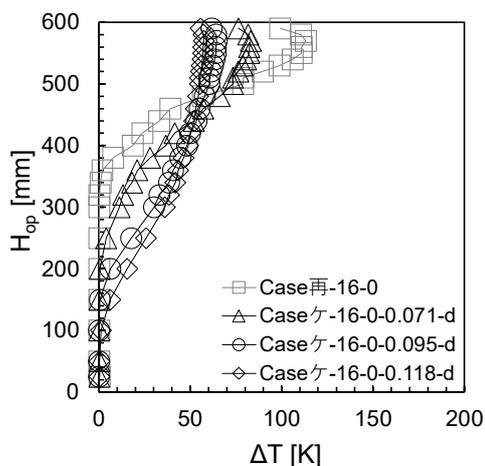


(i) 不完全静圧方式

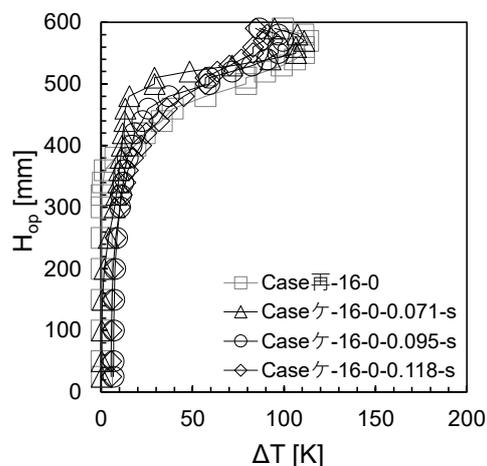


(ii) 静圧方式

(b)  $r=1200\text{mm}$



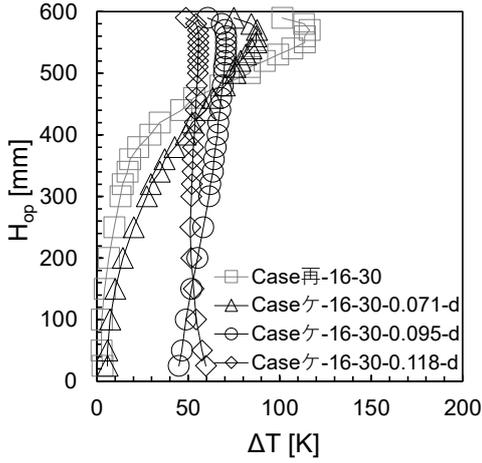
(i) 不完全静圧方式



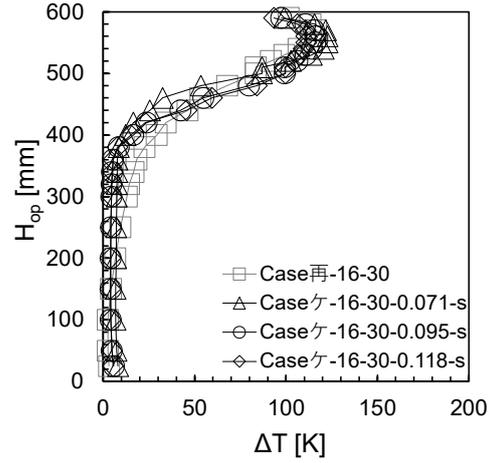
(ii) 静圧方式

(c)  $r=1800\text{mm}$

図 4-4-5 傾斜空間における鉛直上昇温度分布 ( $\theta=0^\circ$ )

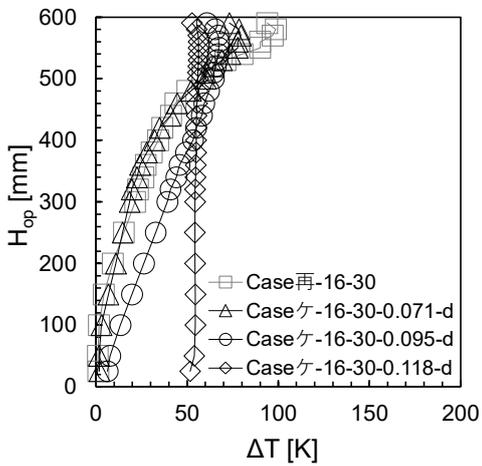


(i) 不完全静圧方式

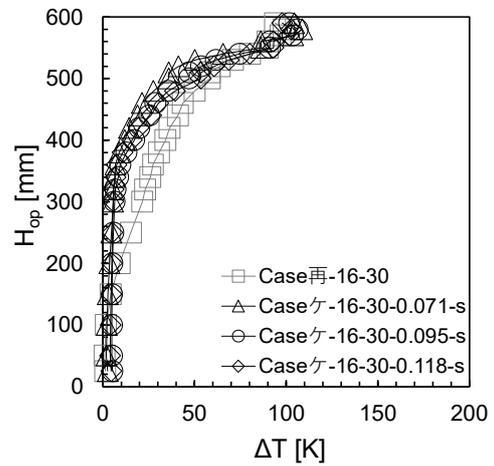


(ii) 静圧方式

(a)  $r=600\text{mm}$

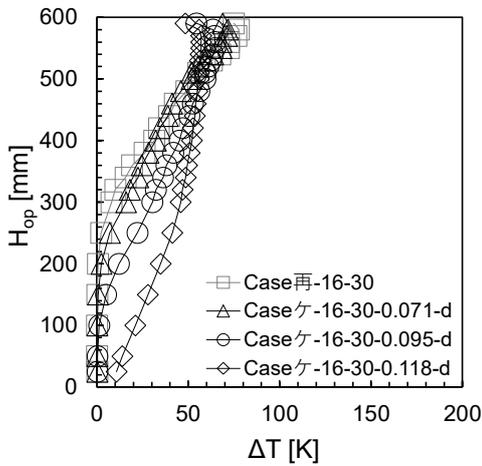


(i) 不完全静圧方式

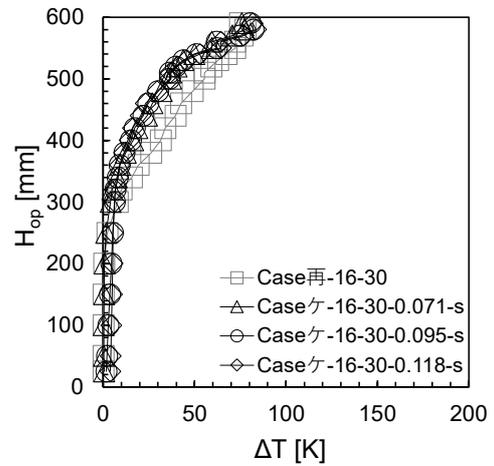


(ii) 静圧方式

(b)  $r=1200\text{mm}$



(i) 不完全静圧方式



(ii) 静圧方式

(c)  $r=1800\text{mm}$

図 4-4-6 傾斜空間における鉛直上昇温度分布 ( $\theta=30^\circ$ )

## ②コンター(温度および速度)

図 4-4-7 および図 4-4-8 の傾斜角度 $\theta=0^\circ$  の Case ケ-16-0-0.071-d~Case ケ-16-0-0.118-d および Case ケ-16-0-0.071-s~Case ケ-16-0-0.118-s の条件において  $X=750\text{mm}$  の断面における温度および速度のコンターを給気方式毎に整理した結果を示す。

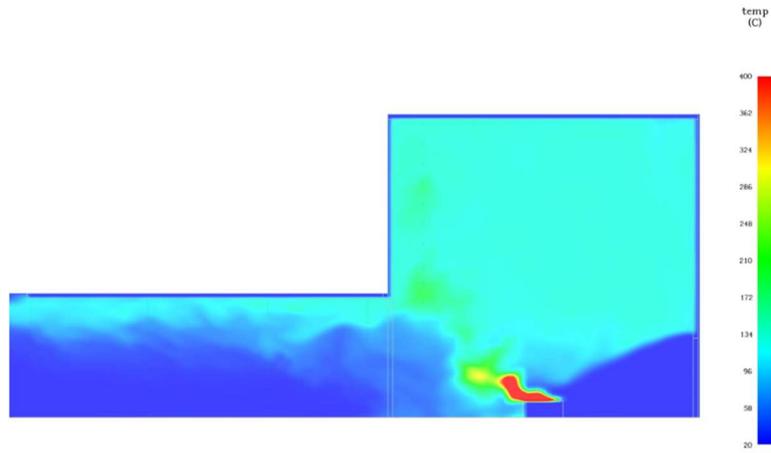
図 4-4-7(a)の給気方式が不完全静圧方式である場合、給気量 $Q$ に関わらず、火災室では給気による動圧の影響が著しく現れ、火炎が開口部(A)の方に倒れ込む傾向がみられる。また、給気量 $Q$ の増加に従い、火災室では上部の温度は減少するが、傾斜空間では下部において温度上昇する傾向がみられる。図 4-4-7(b)の給気方式が静圧方式である場合は、火炎の形状からも分かるように、給気により動圧の影響は殆ど無くなり、給気量 $Q$ に関わらず、火災室では上部と下部に二層化する傾向がみられる。さらに、傾斜空間では給気量 $Q$ の増加につれ、熱気流の厚みは厚くなる傾向がみられるが、下部における温度上昇はみられない。

図 4-4-8 の速度のコンターの結果をみると、すべての条件で開口部(A)を基準とすれば、気流の流れは火災室から傾斜空間に流れる傾向がみられる。ただし、図 4-4-8(a)の不完全静圧方式の場合は、図 4-4-8(b)の静圧方式に比べて給気量 $Q$ が大きくなるに従い、給気した空気は直接的に開口部(A)を介し傾斜空間に流れ込む傾向がみられる。なお、給気方式に関わらず、給気量 $Q$ が小さいと傾斜空間の下部では外気から傾斜空間に空気が流入し、給気する空気と混合する傾向がみられる。

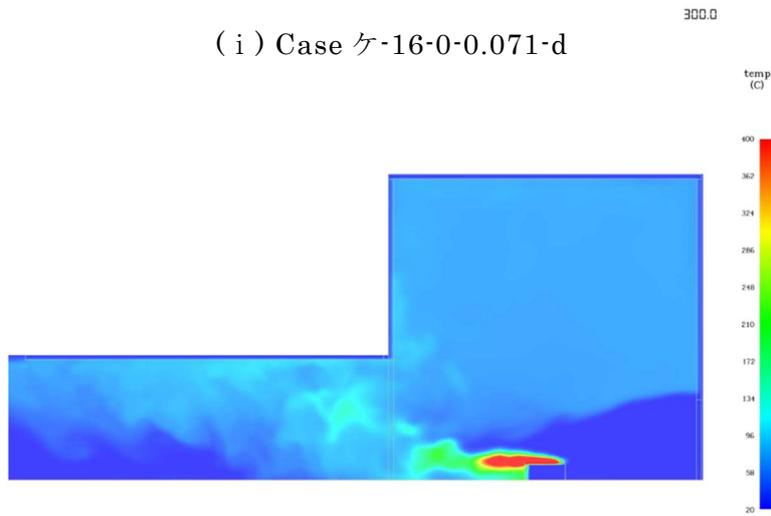
図 4-4-9 および図 4-4-10 に傾斜角度 $\theta=30^\circ$  の Case ケ-16-30-0.071-d~Case ケ-16-30-0.118-d および Case ケ-16-30-0.071-s~Case ケ-16-30-0.118-s の条件において  $X=750\text{mm}$  の断面における温度および速度に関するコンターを給気方式毎に整理した結果を示す。図 4-4-9(a)の給気方式が不完全静圧方式である場合、概ね傾斜角度 $\theta=0^\circ$  の図 4-4-7(a)と同様な傾向を示すが、給気量 $Q$ が同条件であれば、傾斜角度 $\theta=30^\circ$  の傾斜空間の下部において温度上昇する領域が広がる傾向がみられる。図 4-4-9(b)の給気方式が静圧方式である場合は、傾斜角度 $\theta=0^\circ$  に比べ、熱気流の厚みは薄くなる傾向がみられる。これは、傾斜角度 $\theta$ による浮力や煙突効果の影響が原因と考えられる。

図 4-4-10 の速度のコンターの結果をみると、給気方式に関わらず、傾斜角度 $\theta=0^\circ$  より $\theta=30^\circ$  の方で傾斜空間における熱気流の速度が速くなる傾向がみられる。

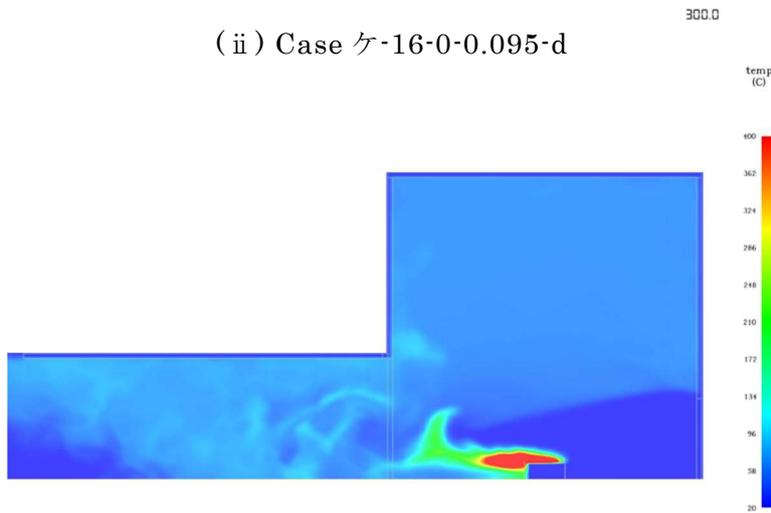
以上より、地下空間における加圧給気による煙制御時は、給気方式を静圧方式にすることで、火災室と傾斜空間の下部ではほぼ常温の新鮮空気の状態であることが確認できる。



( i ) Case ケ-16-0-0.071-d

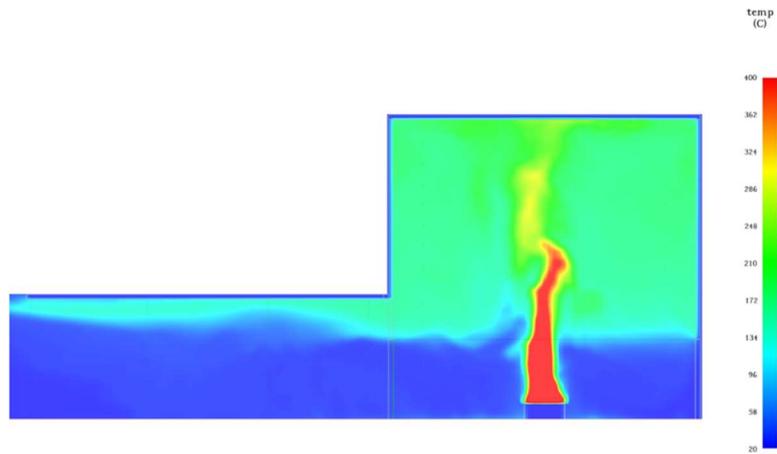


( ii ) Case ケ-16-0-0.095-d

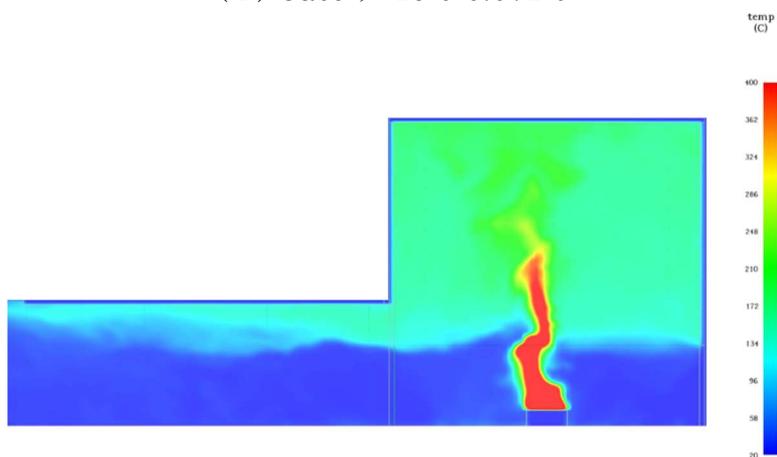


( iii ) Case ケ-16-0-0.118-d

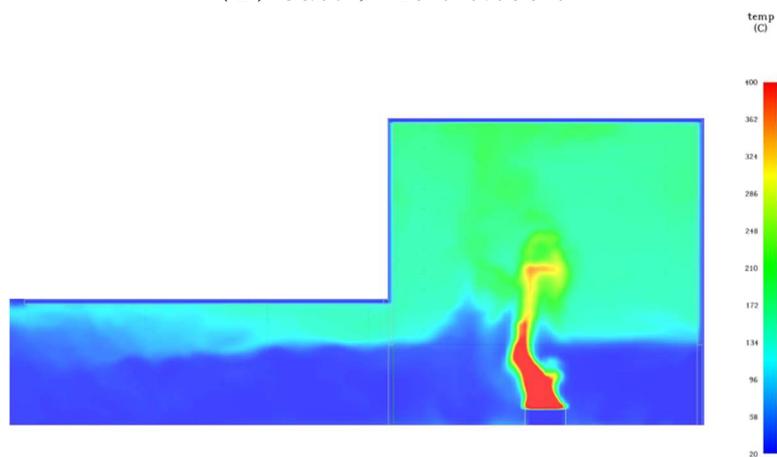
(a) 不完全静圧方式



( i ) Case ケ-16-0-0.071-s



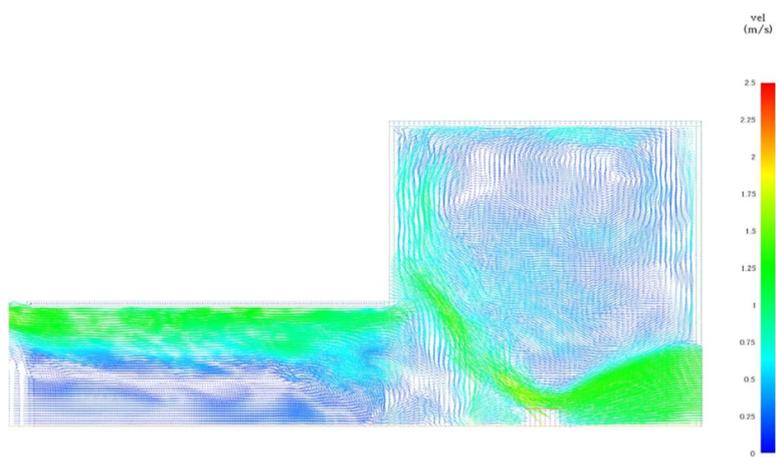
( ii ) Case ケ-16-0-0.095-s



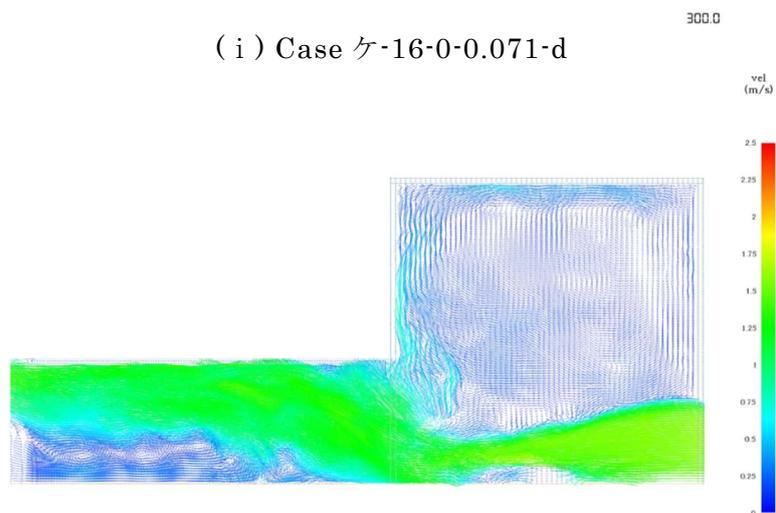
( iii ) Case ケ-16-0-0.118-s

( b ) 静圧方式

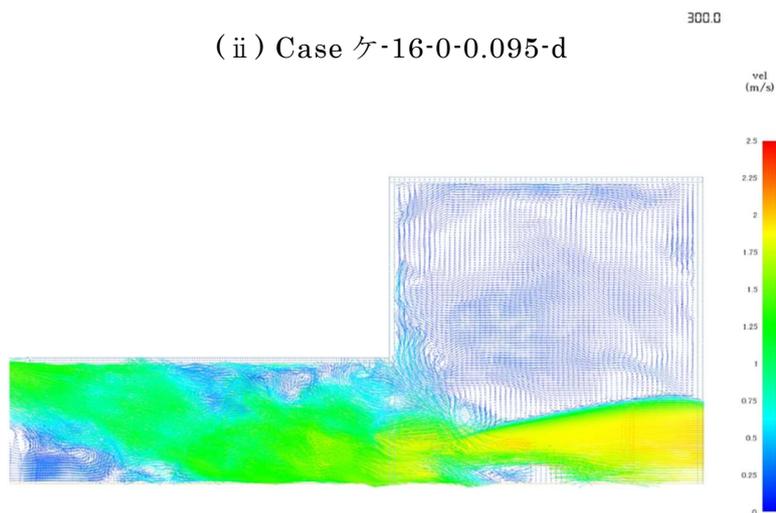
図 4-4-7 温度コンター



( i ) Case ケ-16-0-0.071-d

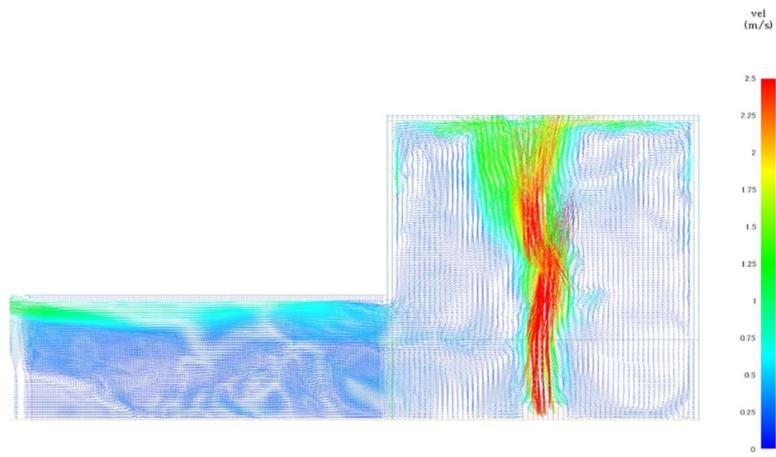


( ii ) Case ケ-16-0-0.095-d

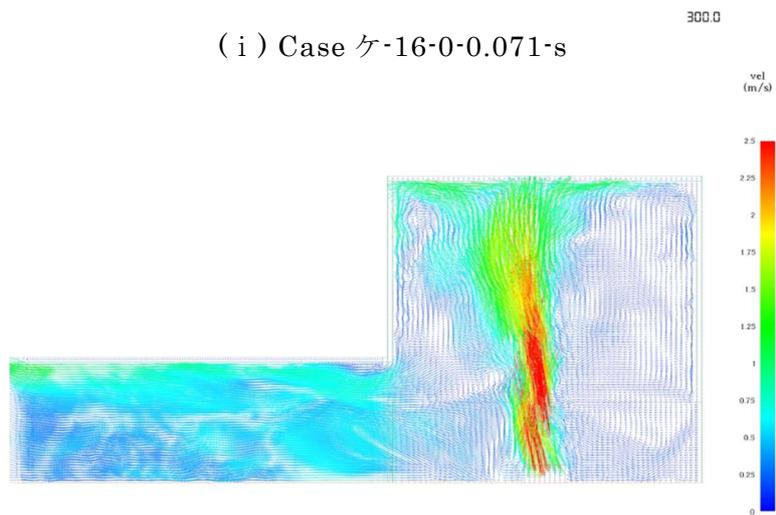


( iii ) Case ケ-16-0-0.118-d

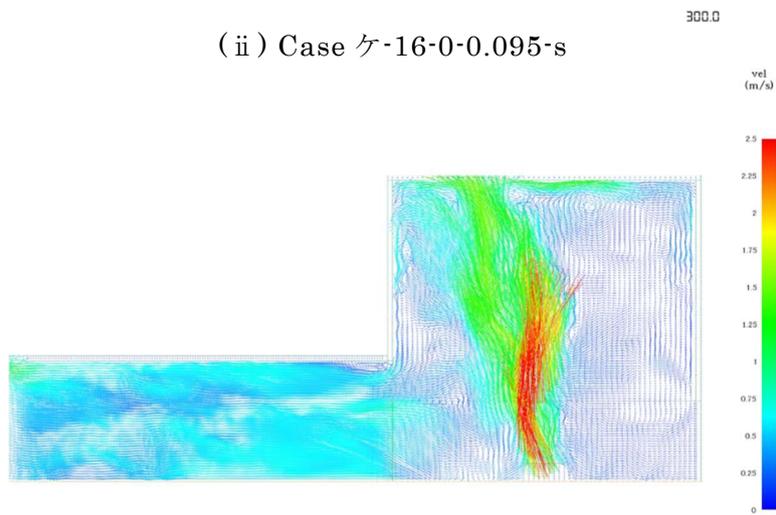
(a) 不完全静圧方式



( i ) Case ケ-16-0-0.071-s



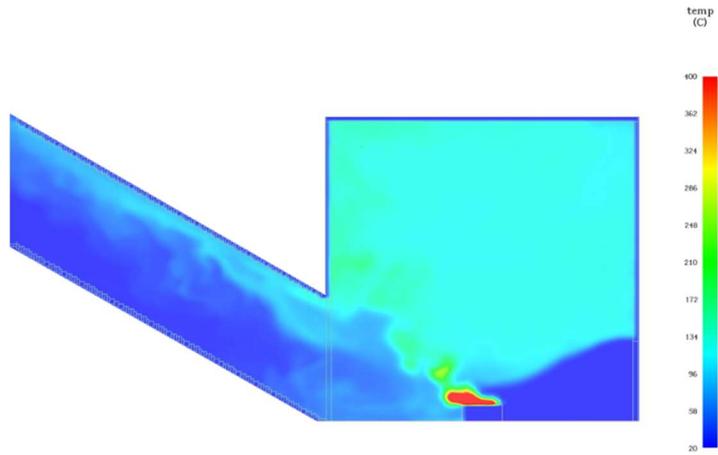
( ii ) Case ケ-16-0-0.095-s



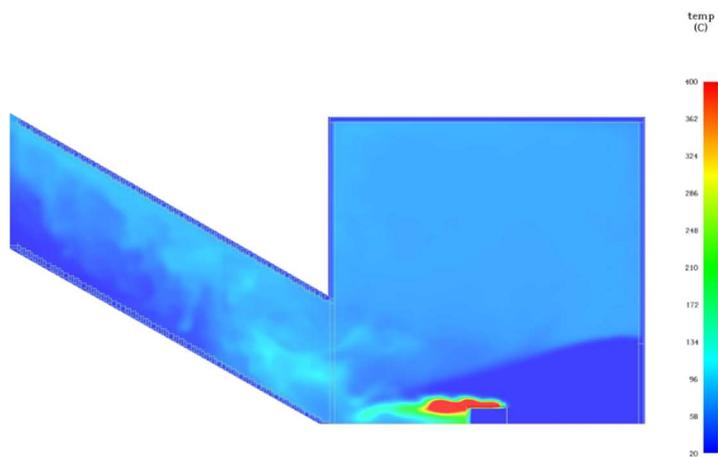
( iii ) Case ケ-16-0-0.118-s

( b ) 静圧方式

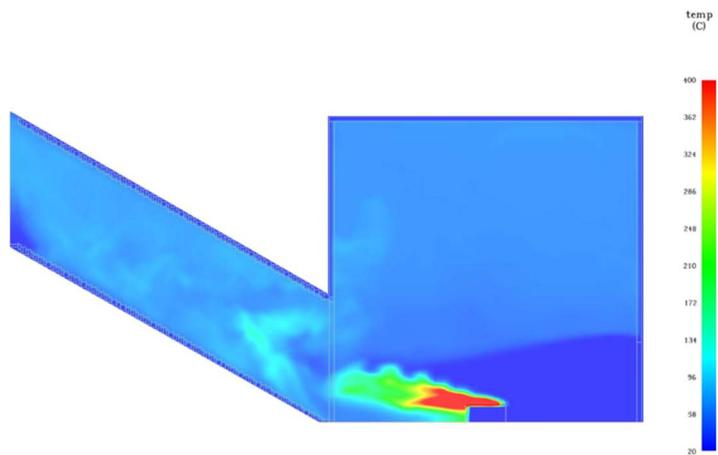
図 4-4-8 速度コンター



( i ) Case ケ-16-30-0.071-d

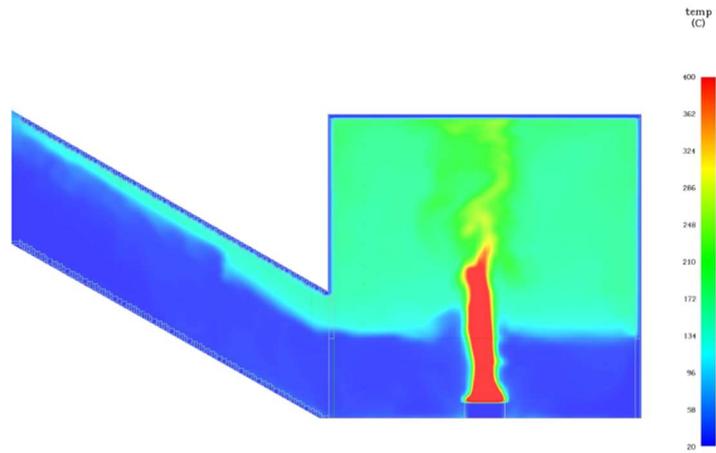


( ii ) Case ケ-16-30-0.095-d

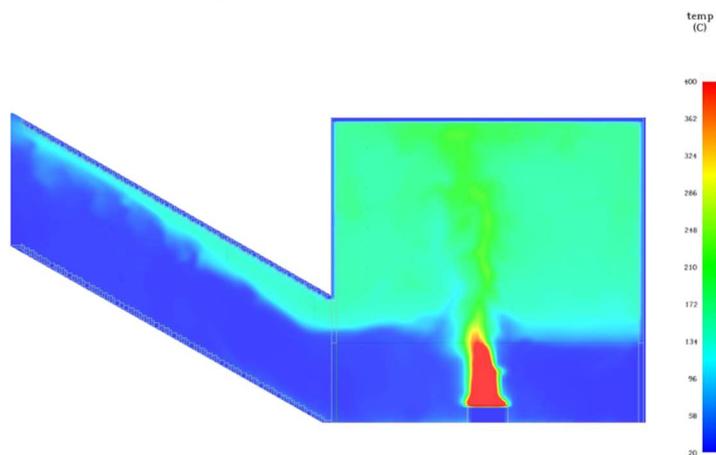


( iii ) Case ケ-16-30-0.118-d

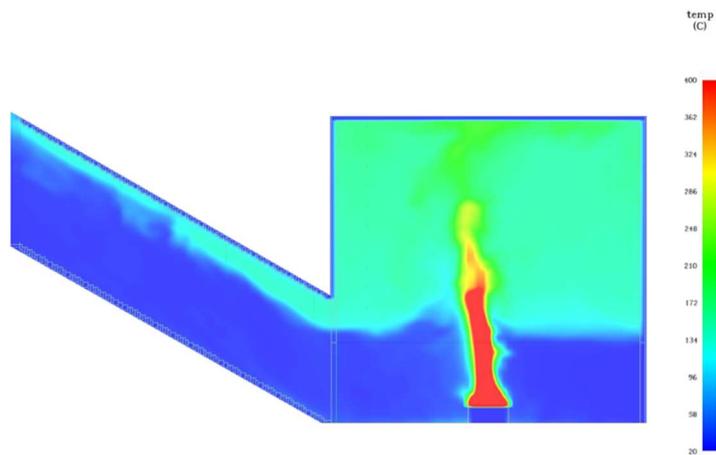
( a ) 不完全静圧方式



( i ) Case ケ-16-30-0.071-s



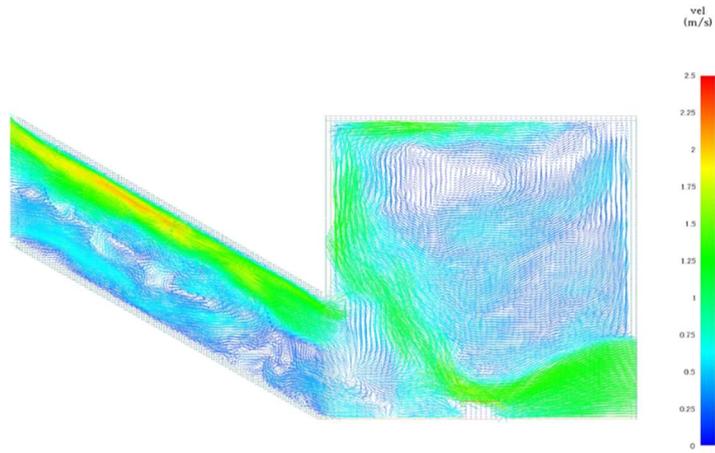
( ii ) Case ケ-16-30-0.095-s



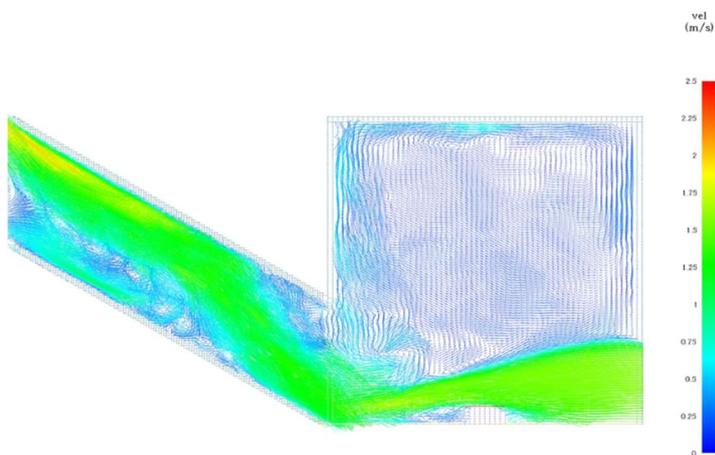
( iii ) Case ケ-16-30-0.118-s

( b ) 静圧方式

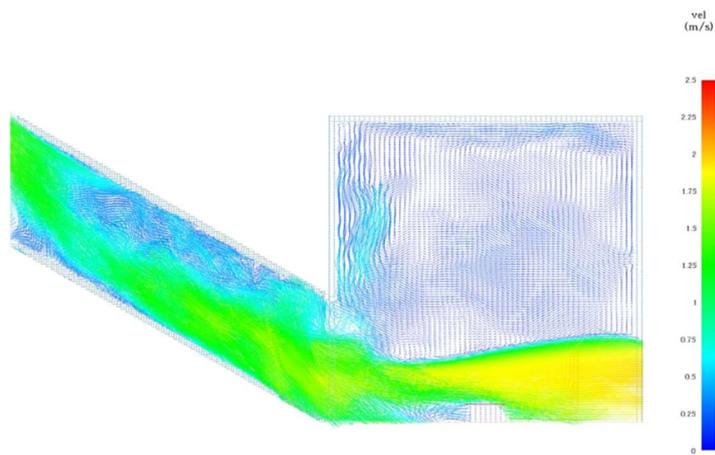
図 4-4-9 温度コンター



(i) Case ケ-16-30-0.071-d

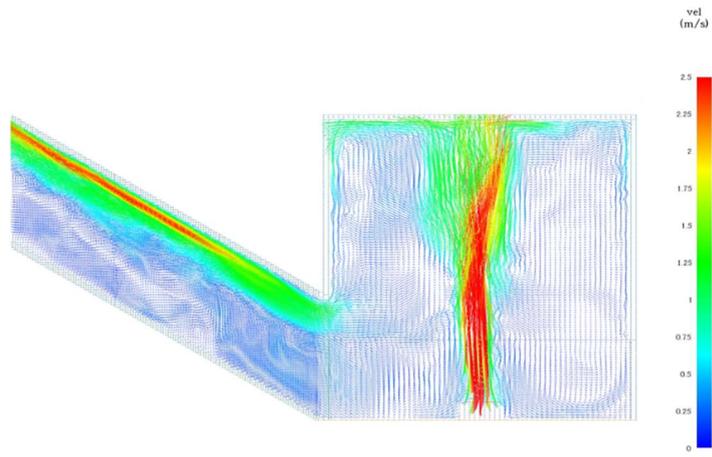


(ii) Case ケ-16-30-0.095-d

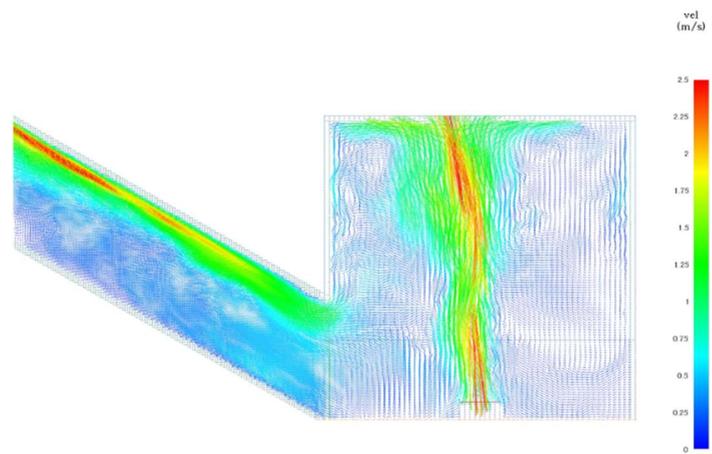


(iii) Case ケ-16-30-0.118-d

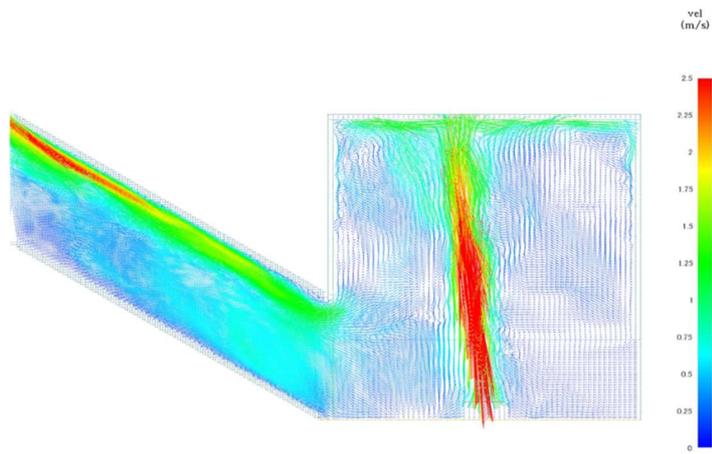
(a) 不完全静圧方式



( i ) Case ケ-16-30-0.071-s



( ii ) Case ケ-16-30-0.095-s



( iii ) Case ケ-16-30-0.118-s

(b) 静圧方式

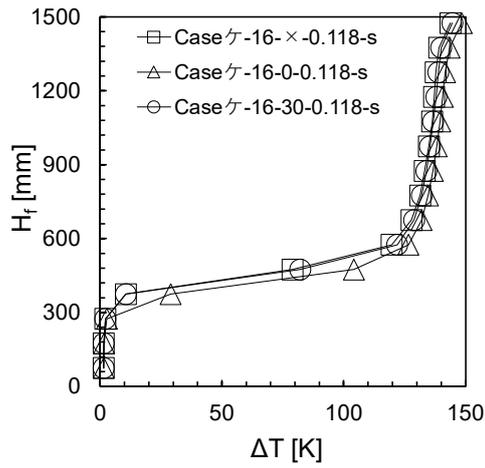
図 4-4-10 速度コンター

## (2) 傾斜空間の空気逃し口としての性能

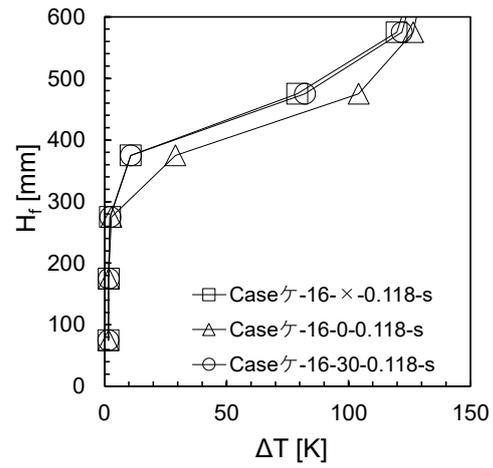
## ① 鉛直温度

図 4-4-11 に Case ケ-16-×-0.118-s~Case ケ-16-30-0.118-s の火災室および開口部 (A) における上昇温度 $\Delta T$ を示す。

図 4-4-11 より、火災室および開口部 (A) では、Case ケ-16-×-0.118-s と Case ケ-16-30-0.118-s の条件が Case ケ-16-0-0.118-s の条件に比べ、上部の温度は低くなり、熱気流の厚みが薄くなる傾向がみられる。さらに、Case ケ-16-×-0.118-s と Case ケ-16-30-0.118-s は、火災室および開口部 (A) において温度分布は概ね一致する傾向がみられる。これは、図 4-3-7 に示した通り、傾斜角度 $\theta=0^\circ$  の傾斜空間の場合は開口部 (A) における流量係数 $\alpha\approx 0.5$ であったことから、一般の開口で使用する流量係数 $\alpha(0.6\sim 0.7)$ より小さくなり、傾斜角度 $\theta=0^\circ$  の場合の傾斜空間は火災室から傾斜空間への流れに抵抗を与えるためと考えられる。しかし、傾斜角度 $\theta=30^\circ$  の傾斜空間の場合は、開口部 (A) での流量係数 $\alpha$ が概ね一般の開口で使用する流量係数 $\alpha(0.6\sim 0.7)$ に近くなることにより、Case ケ-16-×-0.118-s と Case ケ-16-30-0.118-s における火災室から外気への流れが概ね同様であることが推察される。

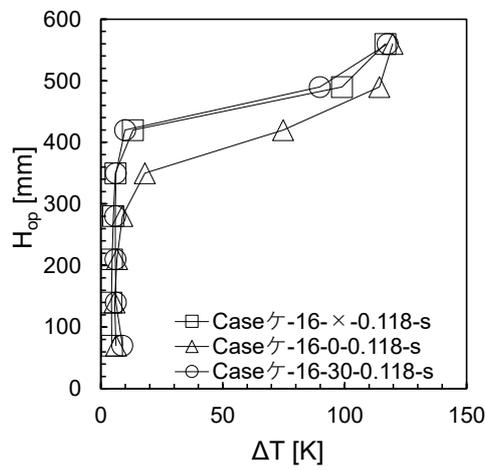


(i) 全高さ



(ii) 高さ 0~600mm

(a) 火災室



(b) 開口部 (A)

図 4-4-11 鉛直温度

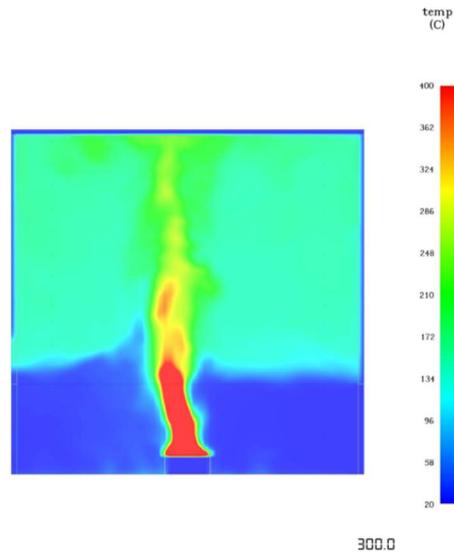
## ② コンター(温度および速度)

図 4-4-12 および図 4-4-13 に Case ケ-16- $\times$ -0.118-s~Case ケ-16-30-0.118-s の X=750mm の断面における温度および速度のコンターを示す。

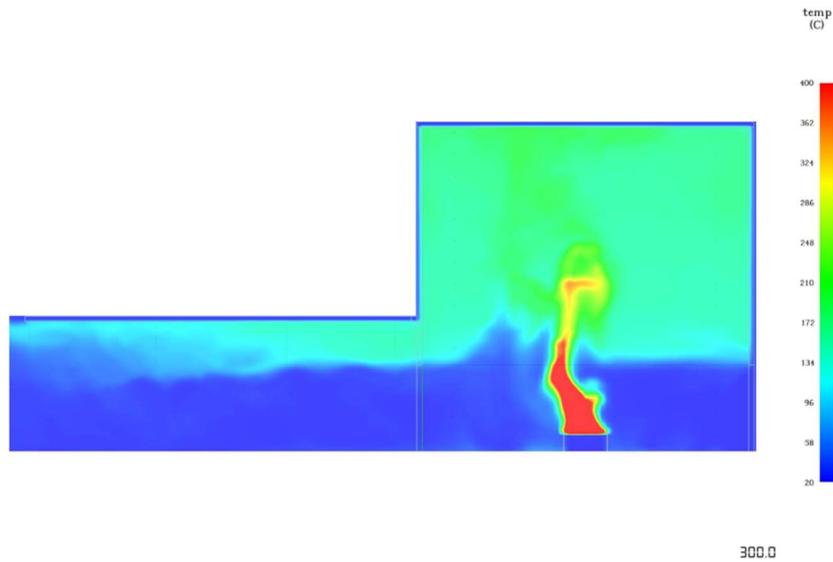
図 4-4-12 の温度コンターの結果より、いずれの条件でも火災室では上部と下部に二層化する傾向がみられる。開口部(A)では Case ケ-16- $\times$ -0.118-s と Case ケ-16-30-0.118-s の条件に比べ、Case ケ-16-0-0.118-s の条件の方が熱気流の厚みが厚くなる傾向がみられる。さらに、Case ケ-16-0-0.118-s および Case ケ-16-30-0.118-s の条件において傾斜空間内では、いずれの条件でも傾斜空間の上部には高温の熱気流が、傾斜空間の下部は概ね常温となる傾向がみられる。ただし、開口部(A)から遠くなる程、Case ケ-16-0-0.118-s は熱気流の厚みが厚くなり、Case ケ-16-30-0.118-s は熱気流の厚みが薄くなる傾向がみられる。

図 4-4-13 の速度のコンターの結果より、Case ケ-16- $\times$ -0.118-s に比べ、Case ケ-16-0-0.118-s は開口部(A)の上部における熱気流の速度は遅くなり、Case ケ-16-30-0.118-s では速くなる傾向がみられる。また、Case ケ-16-0-0.118-s と Case ケ-16-30-0.118-s の傾斜空間内では、上部と下部の間において巻き込み等の現象は顕著にみられず、外気に向かい一方向に流れる傾向がみられる。また、開口部(A)から遠くなる程、傾斜空間における熱気流の速度は Case ケ-16-0-0.118-s では遅くなり、Case ケ-16-30-0.118-s では速くなる傾向がみられる。

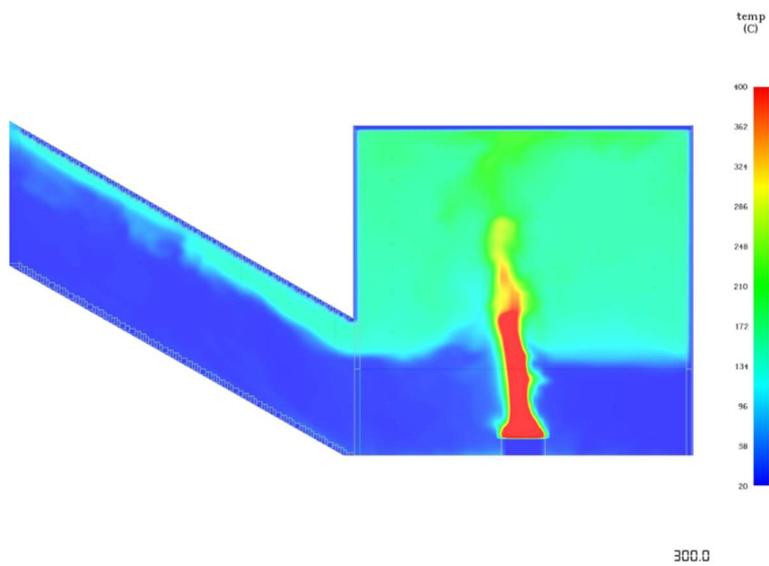
以上より、傾斜空間は空気逃し口として、傾斜空間の傾斜角度 $\theta=0^\circ$  より $\theta=30^\circ$  の条件が傾斜角度 $\theta$ により生じる浮力や煙突効果等の影響を受け、一般の開口(空気逃し口)と同等の性能を示す傾向が確認できた。



(a) Case ケ-16- $\times$ -0.118-s

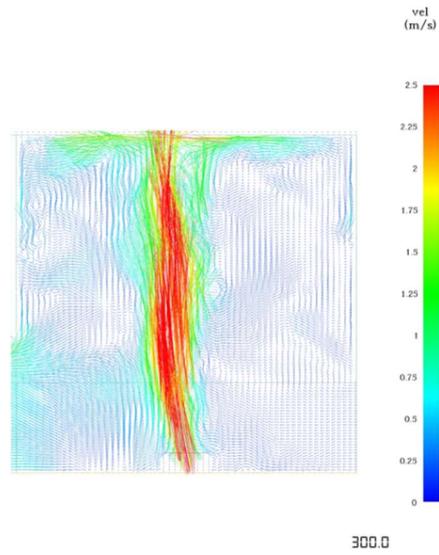


(b) Case ケ-16-0-0.118-s

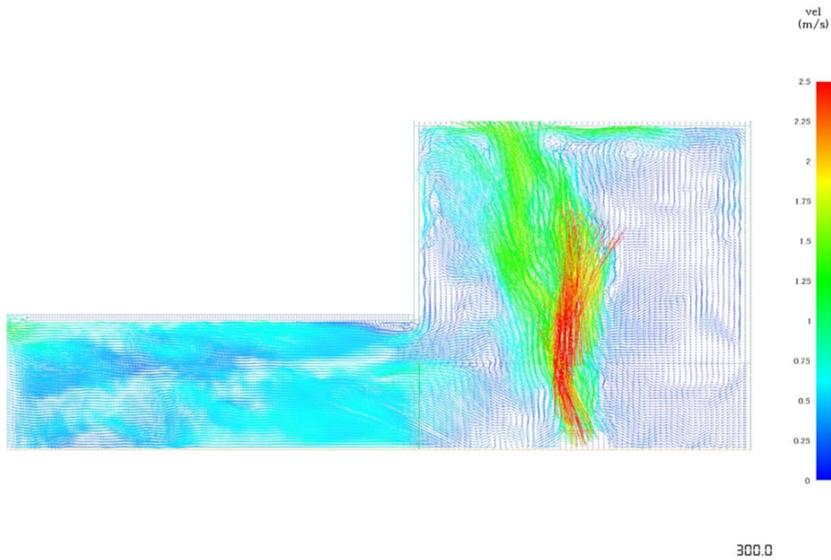


(c) Case ケ-16-30-0.118-s

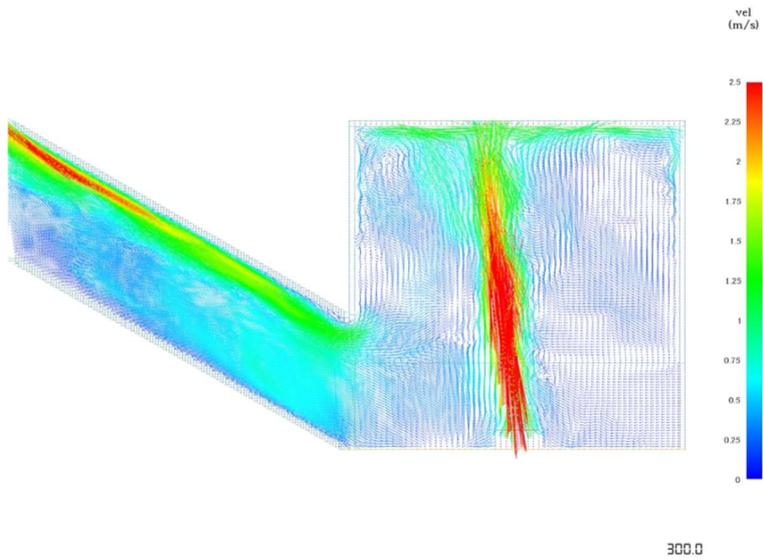
図 4-4-12 温度コンター



(a) Case ケ-16- $\times$ -0.118-s



(b) Case ケ-16-0-0.118-s



(c) Case ケ-16-30-0.118-s

図 4-4-13 速度コンター

### (3) 火源の大きさの違いによる影響

#### ・火災室および開口部(A)

図 4-4-14 および図 4-4-15 に Case ケ-32-30-0.071-s~Case ケ-32-30-0.118-s の給気量 $Q$ に対する火災室および開口部(A)における(i)温度 $\Delta T$ と(ii)無次元温度で整理した結果を示す。ここで、無次元温度は第 3 章で用いた、 $T^* = \Delta T / \Delta T_{max}$ と定義した。さらに、火源の大きさ(発熱速度 $Q_f$ )の違いによる影響を把握するため、(1)給気方式の違いに関する検討として Case ケ-16-30-0.071-s~Case ケ-16-30-0.118-s の結果を示す。

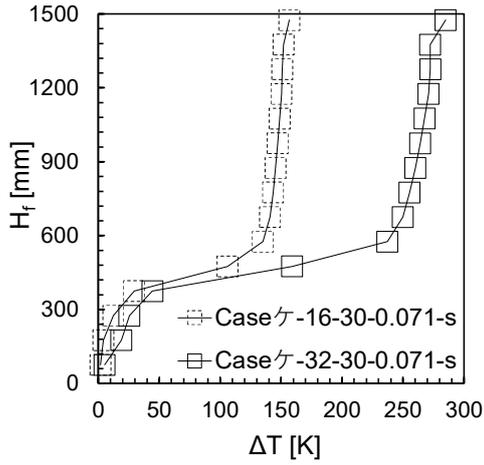
図 4-4-14 および図 4-4-15 の(i)温度 $\Delta T$ の結果をみると、火災室および開口部(A)における上部の温度は発熱速度 $Q_f = 16\text{kW}$ より $Q_f = 32\text{kW}$ の条件が高くなるが、(ii)無次元温度 $T^*$ の結果では各給気量 $Q$ の条件における鉛直方向の温度分布の傾向は発熱速度 $Q_f$ によらず、概ね一致する傾向がみられる。

#### ・傾斜空間

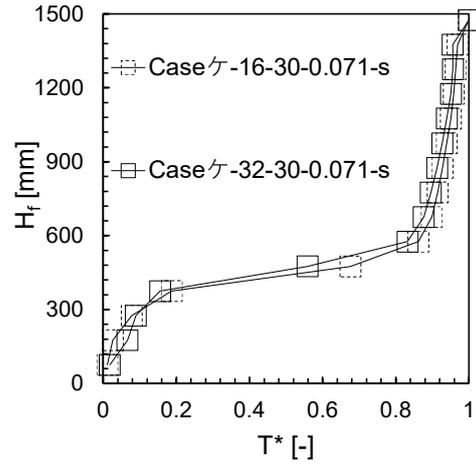
図 4-4-16~図 4-4-18 に Case ケ-32-30-0.071-s~Case ケ-32-30-0.118-s の傾斜空間における上昇温度 $\Delta T$ について給気量 $Q$ 毎に開口部(A)を起点とした流動距離 $r$ に対し、第 3 章を参考にし、(i) $z$ と $\Delta T$ の関係および(ii) $z^* (= z/L_T)$ と $T^* (= \Delta T / \Delta T_{max})$ の関係に整理した結果を示す。さらに、火源の大きさ(発熱速度 $Q_f$ )の違いによる影響を把握するため、(1)給気方式の違いに関する検討として Case ケ-16-30-0.071-s~Case ケ-16-30-0.118-s の結果を示す。

図 4-4-16~図 4-4-18 より、傾斜空間の $z$ と $\Delta T$ の関係でも図 4-4-14 および図 4-4-15 の火災室および開口部(A)と同様に発熱速度 $Q_f = 16\text{kW}$ に比べ $Q_f = 32\text{kW}$ の条件が上部の温度は高くなる傾向がみられるが、第 3 章と同様に、無次元温度 $T^*$ および熱気流の厚さ $L_T$ を用い無次元化した無次元高さ $z^*$ を用い整理すると、それぞれ給気量 $Q$ および流動距離 $r$ における鉛直方向の温度分布は発熱速度 $Q_f$ に関わらず、概ね一致する傾向がみられる。

以上より、発熱速度 $Q_f$ が変化した場合、各測定地点における鉛直温度は発熱速度 $Q_f$ が大きくなるにつれ上部の温度は高くなるが、鉛直方向の無次元温度分布は概ね同様となる傾向が確認できた。

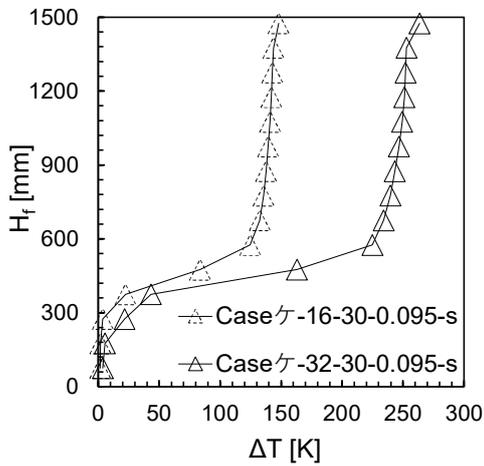


(i) 温度 $\Delta T$

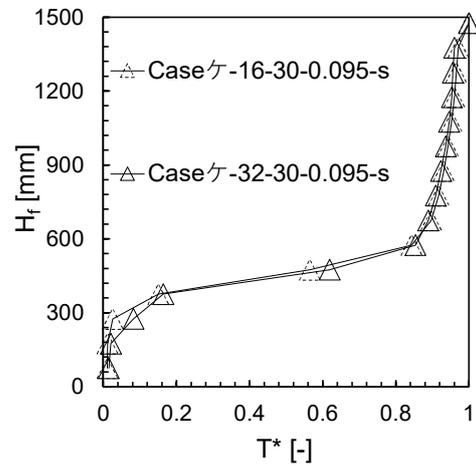


(ii) 無次元温度 $T^*$

(a)  $Q=0.071\text{m}^3/\text{s}$

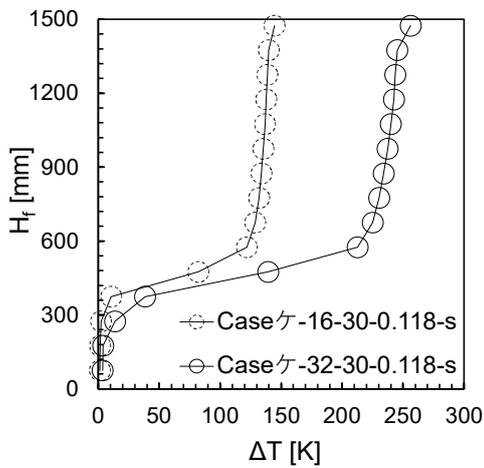


(i) 温度 $\Delta T$

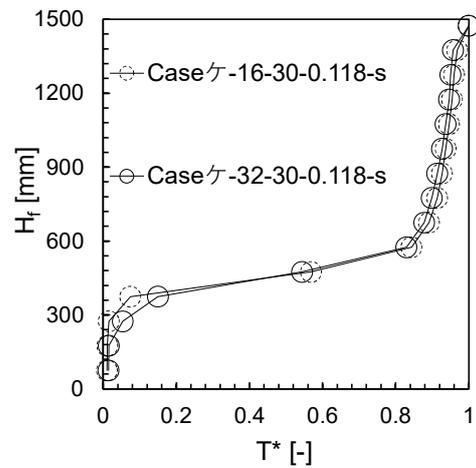


(ii) 無次元温度 $T^*$

(b)  $Q=0.095\text{m}^3/\text{s}$



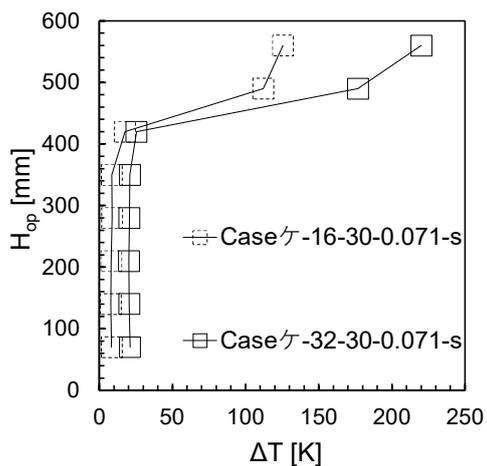
(i) 温度 $\Delta T$



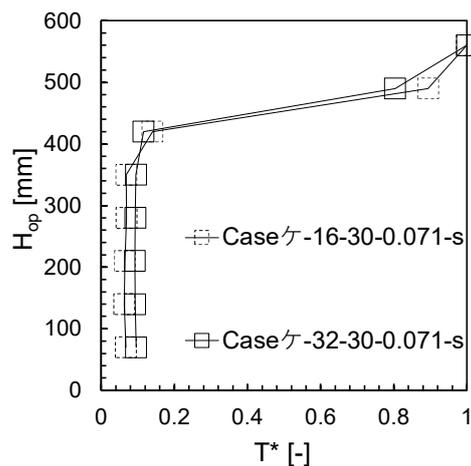
(ii) 無次元温度 $T^*$

(c)  $Q=0.118\text{m}^3/\text{s}$

図 4-4-14 火災室における鉛直温度

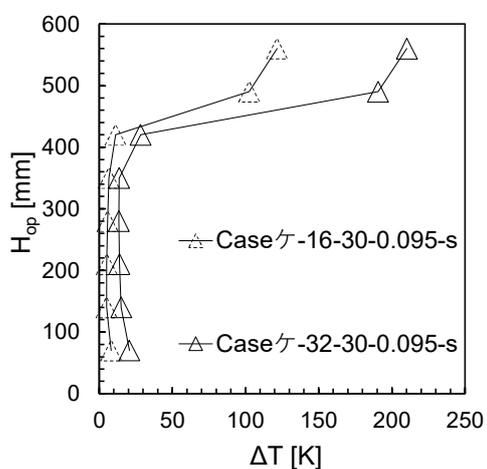


(i) 温度 $\Delta T$

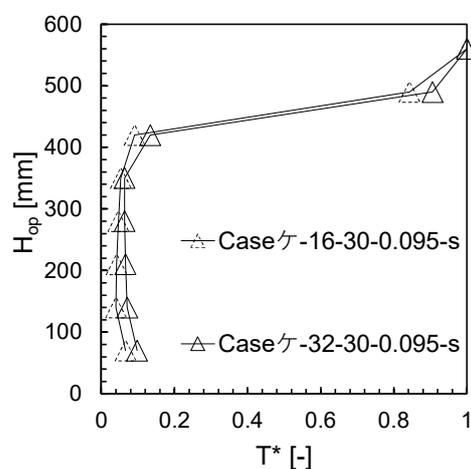


(ii) 無次元温度 $T^*$

(a)  $Q=0.071\text{m}^3/\text{s}$

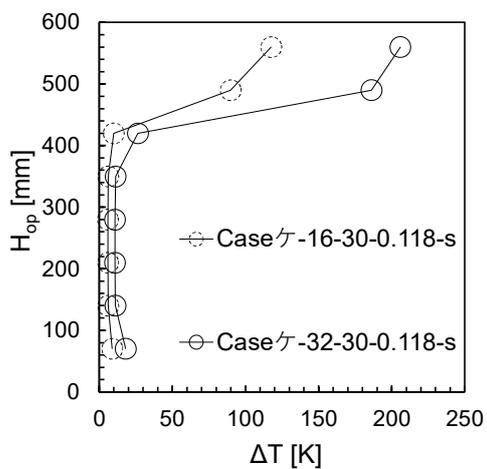


(i) 温度 $\Delta T$

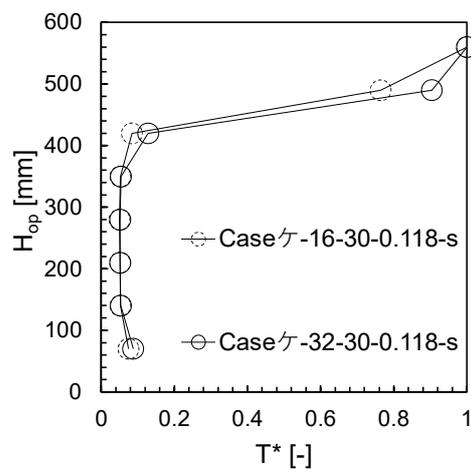


(ii) 無次元温度 $T^*$

(b)  $Q=0.095\text{m}^3/\text{s}$



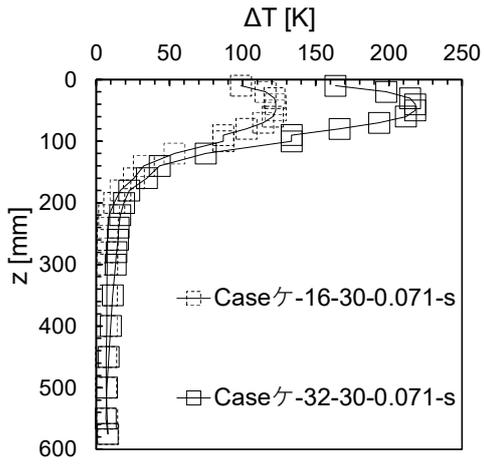
(i) 温度 $\Delta T$



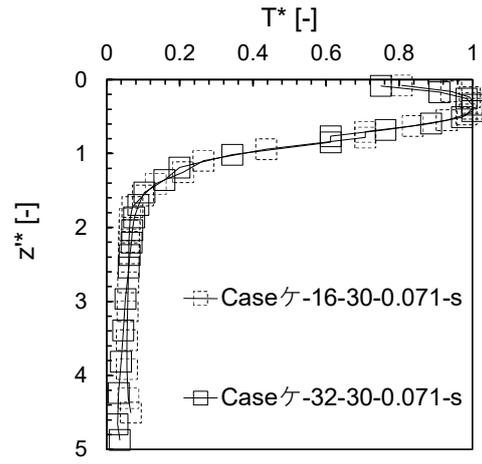
(ii) 無次元温度 $T^*$

(c)  $Q=0.118\text{m}^3/\text{s}$

図 4-4-15 開口部(A)における鉛直温度

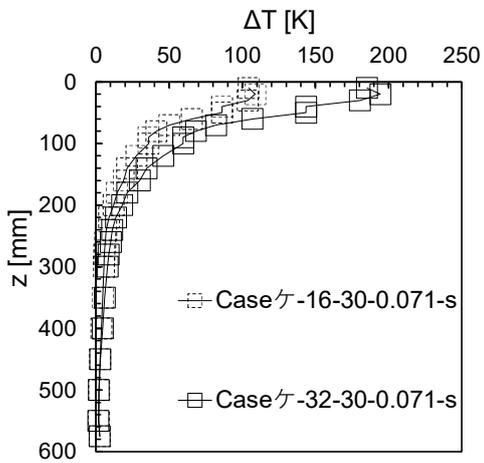


(i)  $z$ と $\Delta T$ の関係

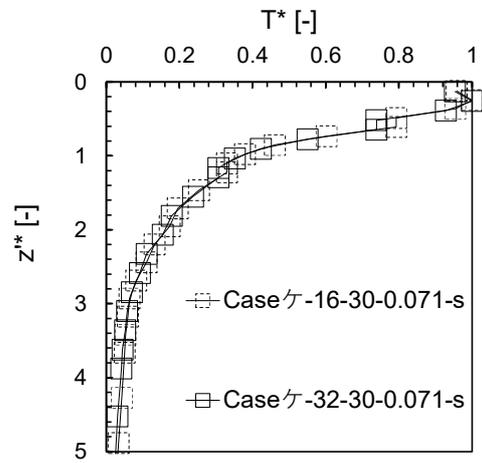


(ii)  $z^*$ と $T^*$ の関係

(a)  $r=600\text{mm}$

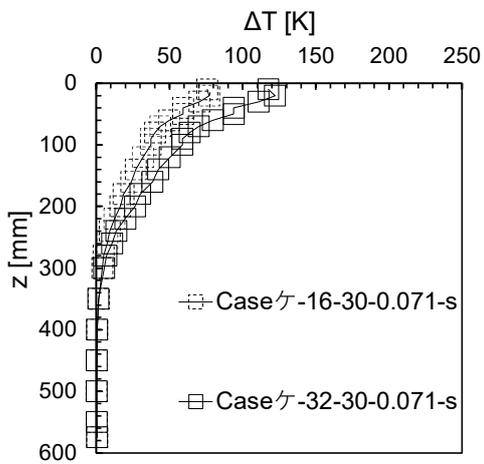


(i)  $z$ と $\Delta T$ の関係

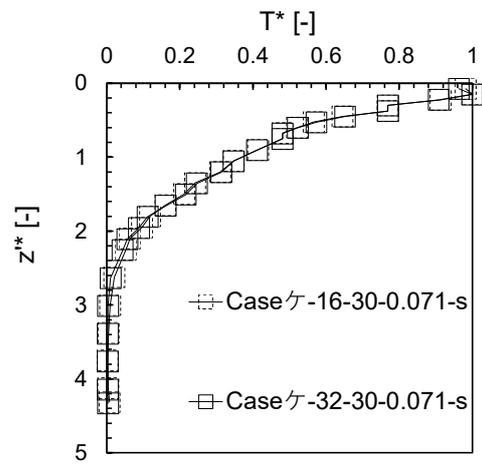


(ii)  $z^*$ と $T^*$ の関係

(b)  $r=1200\text{mm}$



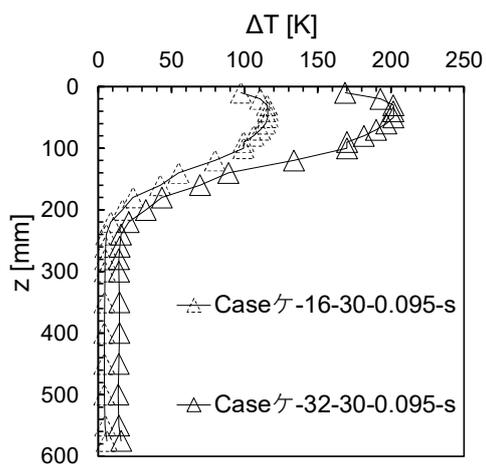
(i)  $z$ と $\Delta T$ の関係



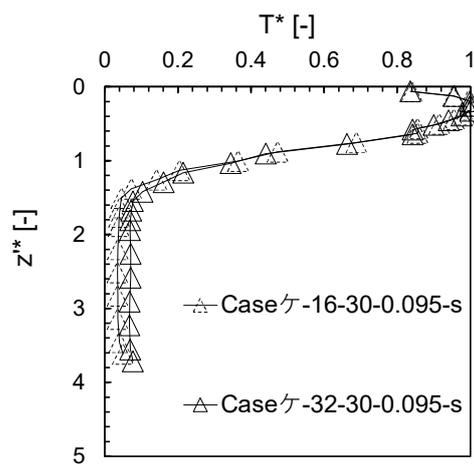
(ii)  $z^*$ と $T^*$ の関係

(c)  $r=1800\text{mm}$

図 4-4-16 傾斜空間における鉛直温度 ( $Q=0.071\text{m}^3/\text{s}$ )

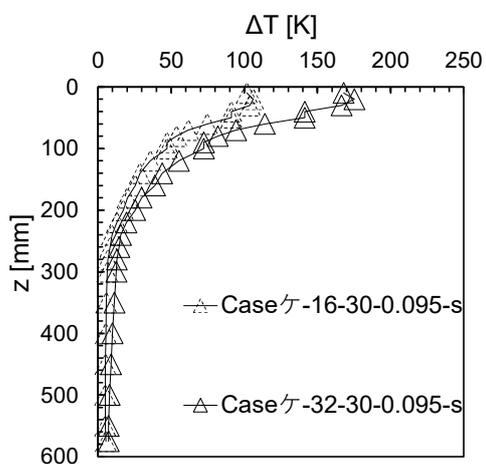


(i)  $z$ と $\Delta T$ の関係

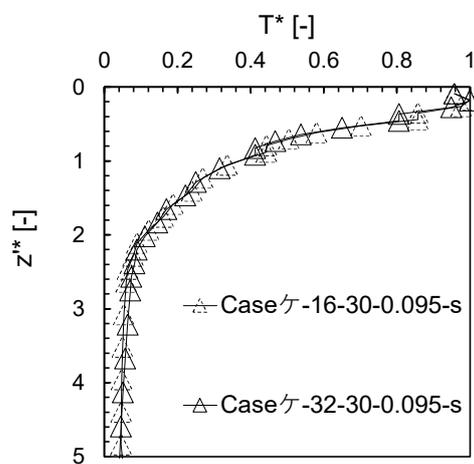


(ii)  $z^*$ と $T^*$ の関係

(a)  $r=600\text{mm}$

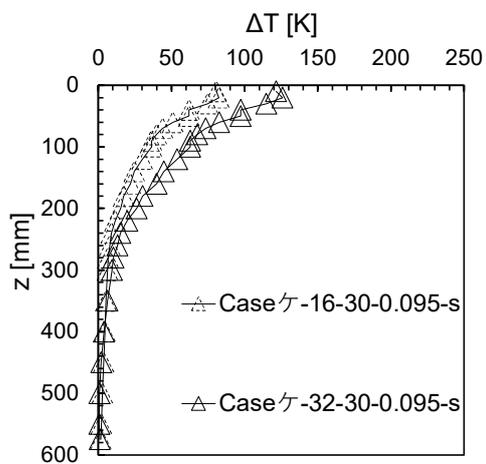


(i)  $z$ と $\Delta T$ の関係

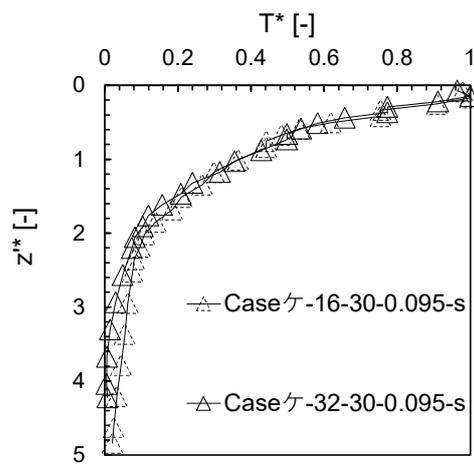


(ii)  $z^*$ と $T^*$ の関係

(b)  $r=1200\text{mm}$



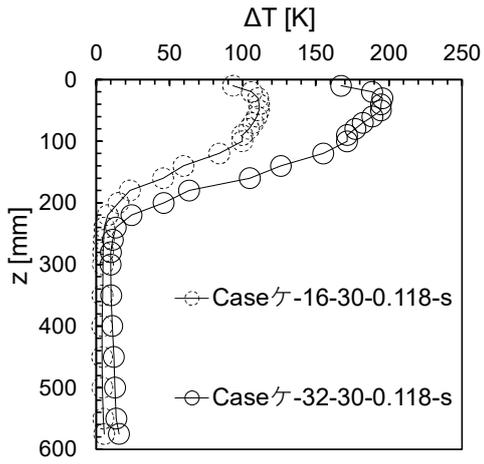
(i)  $z$ と $\Delta T$ の関係



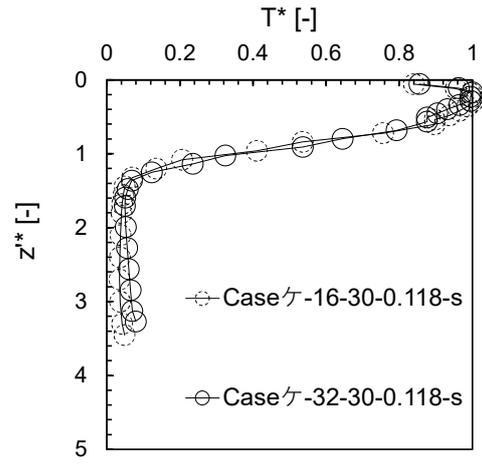
(ii)  $z^*$ と $T^*$ の関係

(c)  $r=1800\text{mm}$

図 4-4-17 傾斜空間における鉛直温度 ( $Q=0.095\text{m}^3/\text{s}$ )

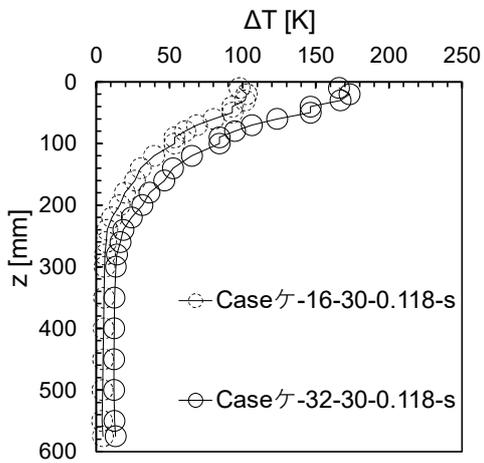


(i)  $z$ と $\Delta T$ の関係

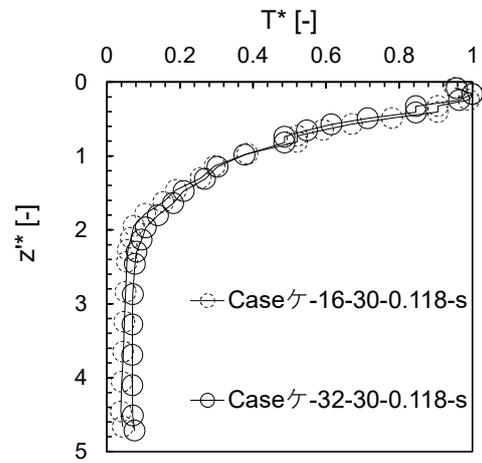


(ii)  $z^*$ と $T^*$ の関係

(a)  $r=600\text{mm}$

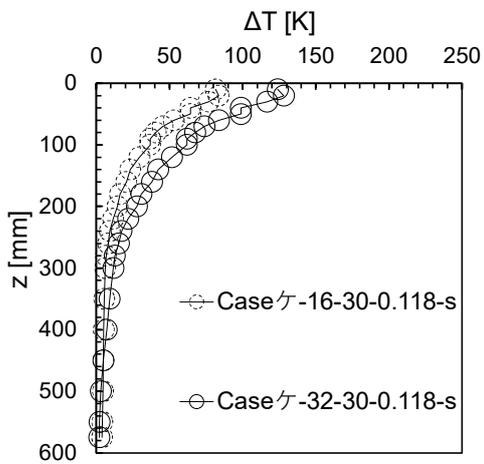


(i)  $z$ と $\Delta T$ の関係

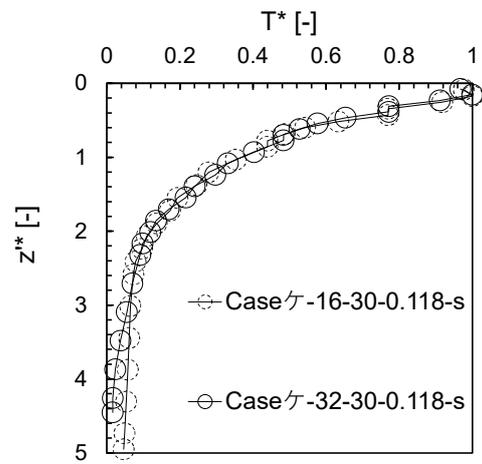


(ii)  $z^*$ と $T^*$ の関係

(b)  $r=1200\text{mm}$



(i)  $z$ と $\Delta T$ の関係



(ii)  $z^*$ と $T^*$ の関係

(c)  $r=1800\text{mm}$

図 4-4-18 傾斜空間における鉛直温度 ( $Q=0.118\text{m}^3/\text{s}$ )

## 4.5 まとめ

第4章では、基礎的な検討として、数値解析モデル(FDS)を用い第3章の実験で得られた温度や開口部(A)における流量係数 $\alpha$ に対する再現性の確認を行った後、地下空間における加圧給気時に傾斜空間を空気逃し口と想定したケーススタディを実施した。ケーススタディでは給気方式の違いによる影響や傾斜空間の空気逃し口としての性能、および火源の大きさの違いによる影響を条件とし、熱気流性状の把握を行った。その結果、FDSを用いた計算条件の範囲で以下の知見が得られた。

### 1. 再現性の検討

#### ① 鉛直温度

- ・火災室および開口部(A)における熱気流層の温度に着目すれば、傾斜角度 $\theta$ に関わらず、実験結果に比べ計算結果が熱気流の温度は低い値となる傾向がみられるが、その誤差は概ね20%以内におさまった。
- ・各流動距離 $r$ における $z$ と $\Delta T$ の関係においてはFDSを用いた計算結果が実験結果より若干温度が高くなる傾向がみられたが、無次元温度 $T^*$ および熱気流の厚さ $L_T$ を用い無次元化した無次元高さ $z^*$ の関係とすれば、鉛直方向の温度減衰傾向は概ね一致する傾向がみられた。

#### ② 開口部(A)における流量係数 $\alpha$

- ・傾斜角度 $\theta=0^\circ$  から  $30^\circ$  の範囲でFDSによる開口部(A)における流量係数 $\alpha$ と実験から得られた流量係数 $\alpha$ は概ね一致する傾向がみられた。

### 2. 加圧給気時に傾斜空間を空気逃し口と想定したケーススタディ

#### (1) 給気方式の違いによる影響

- ・火災室では、給気方式が不完全静圧方式である場合、傾斜角度 $\theta$ に関わらず、給気量 $Q$ が大きくなるに従い上部の温度は顕著に低下する傾向がみられた。一方、給気方式が静圧方式である場合、火災室では傾斜角度 $\theta$ によらず、上部と下部に二層化し上部の温度は給気量 $Q$ が大きくなるほど低くなり、下部において顕著な温度上昇はみられなかった。
- ・開口部(A)では、給気方式が不完全静圧方式の場合、傾斜角度 $\theta$ に関わらず、給気量 $Q$ が大きくなるにつれて上部の温度は低くなる傾向がみられた。給気方式が静圧方式である場合、開口部(A)では、傾斜角度 $\theta$ に関わらず、上部と下部に二層化し給気量 $Q$ が大きくなるに従い上部の温度は低くなり、下部では殆ど温度上昇はみられなかった。
- ・傾斜角度 $\theta=0^\circ$  の傾斜空間では、給気方式が不完全静圧方式である場合は給気量 $Q$ が大きくなるに従って上部の温度は低下し、流動距離 $r$ が小さい程、給気量 $Q$ が大きい程、下部での温度上昇は顕著であった。一方、静圧方式では流動距離 $r$ が大きくなるにつれ傾斜空間の上部の温度は減少し、いずれの条件でも下部で顕著な温度上昇はみられなかった。
- ・傾斜角度 $\theta=30^\circ$  の傾斜空間では、不完全静圧方式の条件では給気量 $Q$ および流動距離 $r$ が等しければ、 $\theta=0^\circ$  より下部の温度は高くなる傾向がみられた。一方、静圧方

式では、給気量 $Q$ および流動距離 $r$ が等しければ、 $\theta=0^\circ$ より傾斜空間の上部の温度は低くなるが、下部では同じく温度上昇はみられなかった。

### (2) 傾斜空間の空気逃し口としての性能

- 火災室および開口部(A)では、傾斜空間無の条件と傾斜空間有( $\theta=30^\circ$ )の条件が傾斜空間有( $\theta=0^\circ$ )の条件に比べ、上部の温度は低くなり、熱気流の厚みが薄くなる傾向がみられた。さらに、傾斜空間無の条件と傾斜空間有( $\theta=30^\circ$ )の条件は火災室および開口部(A)において温度分布は概ね一致する傾向がみられた。

### (3) 火源の大きさの違いによる影響

- 火災室および開口部(A)における上部の温度は、(i)温度 $\Delta T$ の結果をみると、発熱速度 $Q_f=16\text{kW}$ より $Q_f=32\text{kW}$ の条件で高くなるが、(ii)無次元温度 $T^*$ の結果では各給気量 $Q$ の条件における鉛直方向の温度分布傾向は発熱速度 $Q_f$ によらず、概ね一致する傾向がみられた。
- 傾斜空間における上部の温度は、火災室および開口部(A)と同様に発熱速度 $Q_f=16\text{kW}$ に比べ $Q_f=32\text{kW}$ の方が高くなるが、無次元温度 $T^*(=\Delta T/\Delta T_{max})$ および熱気流の厚さ $L_T$ を用い無次元化した無次元高さ $z^*(=z/L_T)$ の関係でみれば、それぞれ給気量 $Q$ および流動距離 $r$ における鉛直方向の温度分布は発熱速度 $Q_f$ に関わらず、概ね同様となる傾向がみられた。

## 参考文献

- [4-1] 財団法人日本建築センター: 加圧防排煙設計マニュアル, 2014.3
- [4-2] K. McGrattan, B. Klein, S. Hostikka and J. Floyd: Fire Dynamics Simulator (Version 5) User's Guide, NIST SP 1019-5, NIST, USA, 2007.10
- [4-3] K. McGrattan: Fire Dynamics Simulator (Version 4) Technical Reference Guide, NIST SP 1018, NIST, USA, 2006.3
- [4-4] Y. Oka and O. Imazeki: Temperature distribution within a ceiling jet propagating in an inclined flat-ceilinged tunnel with natural ventilation, Fire safety journal, Vol. 71, pp. 20-33, 2015.1
- [4-5] 岸上 昌史, 山口 純一, 沖永 誠治, 松山 賢, 松下 敬幸: 加圧煙制御の常温時における性能確認に関する研究 常温確認時に火災時の流れ場を再現する遮煙部扉開放性状理論式の改良と実験による検証, 日本建築学会環境系論文集, 第 80 巻, 第 707 号, pp. 1-11, 2015.1
- [4-6] 朴 鉉又, 姜 昇具, 岸上 昌史, 山口 純一, 大宮 喜文: 火災室と階段間の開口部の流量係数に関する実験的研究, 日本建築学会北海道支部研究報告集, No. 92, pp. 33-36, 2019.6
- [4-7] 長谷見 雄二: 都心再開発と地下空間の防災的課題, 学術の動向, pp. 58-62, 2005.6
- [4-8] 岸上 昌史, 山口 純一, 沖永 誠治, 松山 賢, 松下 敬幸: 加圧煙制御における給気方式の差異が遮煙性能に与える影響に関する研究—実大模型を用いた常温給気実験による測定面に直交する風速成分および動圧存在下での静圧と遮煙性能との関係—, 日本火災学会論文集, Vol. 67, No. 1, pp. 39-48, 2017.3

## 第5章

### 総括



## 5.1 研究の総括

本研究では、建築物の地下空間である地下階における火災時の建物利用者の避難および消防隊の消防活動の安全性を確保するための煙制御手法に着目し、実験や数値解析モデル(FDS)による検討を行った。第2章では、階段加圧煙制御システムを想定し、実建物を用いた実測により、扉開閉による階段内の圧力性状や圧力調整ダンパーによる制御手法および動圧制御装置の動圧制御効果について確認した。さらに、火源条件を設定し給気量と遮煙部における遮煙性能の相関性を理論的に確認し、地下階を火災室と想定した階段加圧に関する考察を行った。第3章では、傾斜空間における排煙に着目し、火災室および一方の開口は火災室と通じ、他方の開口は外気と通じた傾斜空間のモデルを用いた実験を行い、傾斜空間内の熱気流の鉛直温度分布に幾何学的形状(傾斜空間幅や傾斜角度)が及ぼす影響や天井面下の熱気流温度に関する算定式を提案した。第4章では、数値解析モデル(FDS)を用いた熱気流性状に関する検討を行い、第2章と第3章の結果を考慮し、まず、第3章の実験の再現性について検討した後、建築物地下階における煙制御方式として加圧給気時の傾斜空間が空気逃し口となる状況を想定したケーススタディを実施し、火災室および傾斜空間における熱気流性状について明らかにした。

以下に各章について記述する。

### 第1章 序論

第1章では、本研究の背景および関連する既往研究について述べ、本研究の目的や論文の構成について整理した。

### 第2章 階段加圧煙制御に関する実験

第2章では、実建物の階段を用いた煙制御に着目し、煙制御システムとして階段加圧方式を採用する際に留意すべき点である扉の開閉条件に対する階段室内の圧力変動、圧力調整ダンパーを用いた階段内の圧力制御手法、動圧制御装置による動圧制御に着目した実験を実施し、さらに火源を設置した実験の結果に基づき、理論モデルを用い遮煙性能を満足する給気量に関する考察を行った。そして、理論モデルを用い地下階へ通じる階段を加圧給気する場合の考察を行った。その結果、本実験条件の範囲で以下の知見が得られた。

#### (1) 扉の開閉条件

- ・1階の外気へ通じる通気経路の扉が全て開放される条件では、階段室内と外気の圧力差が概ね 25Pa 程度となり、差圧を計測した高さごとの階段室と外気の差圧について顕著な差はみられなかった。
- ・外気へ通じる通気経路が確保されていない条件では、階段室と外気の差圧は 140~170Pa 程度となり、加圧給気により階段室内の圧力が高い状況となった。
- ・5階の階段室から外気へ通じる通気経路の扉が全て開放される条件では、階段室と外気の差圧は、1階では 50Pa 程度の値を示したが、3階以上の階では 30Pa 程度となった。

#### (2) 圧力調整ダンパーの設置条件

- ・ 圧力調整ダンパー①の一か所を用いる条件では、差圧は 75~90Pa 程度となる傾向がみられた。階段室から外気へ通じる通気経路として、3 階の扉が全て開放される条件では 30~50Pa 程度、3 階および 5 階の扉が全て開放される条件では 5~30Pa 程度に、差圧は減少する傾向がみられた。
- ・ 圧力調整ダンパー①と圧力調整ダンパー②を用いる条件では、差圧は 50~70Pa 程度となった。階段室から外気へ通じる通気経路として、3 階の扉が全て開放される条件では 25~50Pa 程度、3 階および 5 階の扉が全て開放される条件では 5~30Pa 程度に、差圧は減少する傾向がみられた。

### (3) 動圧制御装置の設置条件

- ・ 動圧制御装置を設置しない条件に比べ、動圧制御装置を設置した条件において、階段室内の高さ方向の圧力分布のばらつきの減少傾向がみられた。
- ・ 動圧制御装置を設置しない条件が、動圧制御装置を設置した条件に比べ、3 階以上において圧力が低くなる傾向がみられ、給気による動圧がすべて静圧に変換されていない可能性があり、給気口の付近で動圧制御装置の設置の効果がみられた。

### (4) 火源の設置条件

- ・ 給気量を 6.29kg/s に設定した条件、および 3.77kg/s に設定した条件では、火災室から廊下扉(c)を介した廊下への煙流出を防止できることを確認した。一方、給気量を 1.75kg/s に設定した条件の場合、廊下扉(c)を介した廊下への煙流出を確認した。その結果を踏まえ、理論モデルを用い必要最小給気量を算出し、廊下扉(c)における遮煙性能について整理すると、給気量を 6.29kg/s および 3.77kg/s に設定した条件では、実験時の給気量が必要最小給気量を上回り、給気量を 1.75kg/s に設定した条件では下回る結果となった。理論モデルの計算結果は、本実験で得られた遮煙性能を判断する廊下への煙流出の有無と整合する結果となった。
- ・ 給気量を 3.75kg/s に設定した条件では、付室扉(b)を介した付室への煙流出を 160s 付近まで防止できることを確認したが、それ以降は若干の煙流出がみられた。付室扉(b)における遮煙性能について理論モデルを用い算出した必要最小給気量と比較すると、給気量を 3.75kg/s に設定した条件では、実験時の給気量が必要最小給気量と同程度となった。この結果より、安全側の遮煙性能となるように実験で設定した給気量を幾分増やすことで、遮煙性能が満足できた可能性が示唆された。

さらに理論モデルを用い、地下階に通じる階段に加圧給気した場合の給気量および階段内の圧力分布等に関する計算を行い、地下階に想定した火災室から外気等に通じる空気逃し口が無い条件では、空気逃し口が有る条件に比べ、遮煙性能を確保するための必要最小給気量が増加するとともに、階段室と外気の差圧が、過大に圧力上昇することを示した。

## 第 3 章 傾斜空間における熱気流性状に関する実験

第 3 章では、火災室および一方の開口は火災室と通じ、他方の開口は外気と通じた傾斜空間の模型を用いた実験を行い、本実験で設定した火源径 $D_f$ 、傾斜空間幅 $B_{sw}$ 、傾斜空間長さ $l$ 、傾斜角度 $\theta$ の条件が傾斜空間の熱気流流動性状に与える影響を把握し、以下の知見が得られた。

- ・火災室の温度は、傾斜空間幅 $B_{sw}$ と火源径 $D_f$ が等しい条件において、傾斜空間長さ $l$ および傾斜角度 $\theta$ の影響を殆ど受けない傾向がみられた。
- ・開口部 (A) の上部の温度は、火源径 $D_f$ が同条件であれば、傾斜空間長さ $l$ の影響を殆ど受けず、傾斜空間幅 $B_{sw}$ および傾斜角度 $\theta$ が大きくなるに従い、低下した。
- ・傾斜空間における天井面下の熱気流の最高上昇温度 $\Delta T_{max}$ は、傾斜角度 $\theta$ 以外の条件が等しい場合、それぞれの傾斜空間幅 $B_{sw}$ で傾斜空間長さ $l$ が等しければ、 $\Delta T_{max}$ は流動距離 $r$ が長くなるに従い、傾斜角度 $\theta$ が大きい条件ほど、温度減衰は顕著になる傾向がみられた。
- ・傾斜空間(断面アスペクト比  $0.5 \leq n \leq 2$ )における鉛直温度分布性状について検討を行い、無次元温度 $T^*(=\Delta T/\Delta T_{max})$ および熱気流の厚み $L_T$ を用いた無次元高さ $z^*(=z/L_T)$ を用い無次元鉛直温度分布を整理した場合、無次元温度 $T^*$ が概ね 0.3 より大きい範囲では、無次元温度 $T^*$ は傾斜空間幅 $B_{sw}$ によらず概ね同様の値となる傾向がみられた。
- ・トンネルにおける熱気流と傾斜空間における熱気流の比較検討を行い、熱気流性状の違いを整理した上で、火災室と開口で通じる傾斜空間における天井面付近の熱気流温度について、仮想熱源距離 $r_0$ を用い線火源の概念に基づきモデル化を行い、火災室と開口で通じる傾斜空間の天井面下の熱気流温度は、仮想熱源距離 $r_0$ を用いることでトンネルの熱気流性状と同様に、式(3.5.10)を用い与えることができた。

#### 第4章 数値解析モデルを用いた熱気流性状に関するケーススタディ

第4章では、数値解析モデルとして FDS を用い第3章の実験で得られた温度や開口部 (A) における流量係数 $\alpha$ に対する再現性の検討を行った後、地下空間における加圧給気時の傾斜空間を空気逃し口と想定したケーススタディを実施した。ケーススタディでは給気方式の違いによる影響や傾斜空間の空気逃し口としての性能、および火源の大きさの違いによる影響を条件とし、熱気流性状の把握を行った。その結果、FDS で設定した計算条件の範囲で以下の知見が得られた。

##### 1. 再現性の検討

###### ① 鉛直温度

- ・火災室および開口部 (A) における熱気流層の温度に着目すれば、傾斜角度 $\theta$ に関わらず、実験結果に比べ計算結果が熱気流の温度は低い値となる傾向がみられるが、その誤差は概ね 20%以内におさまった。
- ・各流動距離 $r$ における $z$ と $\Delta T$ の関係においては FDS を用いた計算結果が実験結果より若干温度が高くなる傾向がみられたが、無次元温度 $T^*$ および熱気流の厚さ $L_T$ を用い無次元化した無次元高さ $z^*$ の関係とすれば、鉛直方向の温度減衰傾向は概ね一致する傾向がみられた。

###### ② 開口部 (A) における流量係数 $\alpha$

- ・傾斜角度 $\theta=0^\circ$  から  $30^\circ$  の範囲で FDS による開口部 (A) における流量係数 $\alpha$ と実験から得られた流量係数 $\alpha$ は概ね一致する傾向がみられた。

##### 2. 加圧給気時に傾斜空間を空気逃し口と想定したケーススタディ

###### (1) 給気方式の違いによる影響

- ・火災室では、給気方式が不完全静圧方式である場合、傾斜角度 $\theta$ に関わらず、給気量 $Q$ が大きくなるに従い上部の温度は顕著に低下する傾向がみられた。一方、給気方式が静圧方式である場合、火災室では傾斜角度 $\theta$ によらず、上部と下部に二層化し上部の温度は給気量 $Q$ が大きくなるほど低くなり、下部において顕著な温度上昇はみられなかった。
- ・開口部(A)では、給気方式が不完全静圧方式の場合、傾斜角度 $\theta$ に関わらず、給気量 $Q$ が大きくなるにつれて上部の温度は低くなる傾向がみられた。給気方式が静圧方式である場合、開口部(A)では、傾斜角度 $\theta$ に関わらず、上部と下部に二層化し給気量 $Q$ が大きくなるに従い上部の温度は低くなり、下部では殆ど温度上昇はみられなかった。
- ・傾斜角度 $\theta=0^\circ$ の傾斜空間では、給気方式が不完全静圧方式である場合は給気量 $Q$ が大きくなるに従って上部の温度は低下し、流動距離 $r$ が小さい程、給気量 $Q$ が大きい程、下部での温度上昇は顕著であった。一方、静圧方式では流動距離 $r$ が大きくなるにつれ傾斜空間の上部の温度は減少し、いずれの条件でも下部で顕著な温度上昇はみられなかった。
- ・傾斜角度 $\theta=30^\circ$ の傾斜空間では、不完全静圧方式の条件では給気量 $Q$ および流動距離 $r$ が等しければ、 $\theta=0^\circ$ より下部の温度は高くなる傾向がみられた。一方、静圧方式では、給気量 $Q$ および流動距離 $r$ が等しければ、 $\theta=0^\circ$ より傾斜空間の上部の温度は低くなるが、下部では同じく温度上昇はみられなかった。

## (2) 傾斜空間の空気逃し口としての性能

- ・火災室および開口部(A)では、傾斜空間無の条件と傾斜空間有( $\theta=30^\circ$ )の条件が傾斜空間有( $\theta=0^\circ$ )の条件に比べ、上部の温度は低くなり、熱気流の厚みが薄くなる傾向がみられた。さらに、傾斜空間無の条件と傾斜空間有( $\theta=30^\circ$ )の条件は火災室および開口部(A)において温度分布は概ね一致する傾向がみられた。

## (3) 火源の大きさの違いによる影響

- ・火災室および開口部(A)における上部の温度は、(i)温度 $\Delta T$ の結果をみると、発熱速度 $Q_f=16\text{kW}$ より $Q_f=32\text{kW}$ の条件で高くなるが、(ii)無次元温度 $T^*$ の結果では各給気量 $Q$ の条件における鉛直方向の温度分布傾向は発熱速度 $Q_f$ によらず、概ね一致する傾向がみられた。
- ・傾斜空間における上部の温度は、火災室および開口部(A)と同様に発熱速度 $Q_f=16\text{kW}$ に比べ $Q_f=32\text{kW}$ の方が高くなるが、無次元温度 $T^*(=\Delta T/\Delta T_{max})$ および熱気流の厚さ $L_T$ を用い無次元化した無次元高さ $z^*(=z/L_T)$ の関係でみれば、それぞれ給気量 $Q$ および流動距離 $r$ における鉛直方向の温度分布は発熱速度 $Q_f$ に関わらず、概ね同様となる傾向がみられた。

## 5.2 今後の課題および展望

以下に本研究に関する今後の課題および展望について整理する。

### (1) 階段加圧煙制御システム

本研究では、コスト、時間および場所の制限のため、地上にある実大実験棟における階段加圧を対象とした実測を行ったが、実際の地下階における実測を行い、階段加圧煙制御システムの性能を検証することが必要と考えられる。

### (2) 傾斜空間における熱気流性状

本研究では、模型実験の結果から傾斜空間における天井面下の熱気流の温度に着目した算定式を提案しているが、実大規模の傾斜空間内での温度分布について実験を行い定量的データの収集が望まれる。

### (3) 数値解析モデル(FDS)を用いた熱気流性状

本研究では模型スケールの条件を用い検討を行ったが、実際の地下階を模した空間モデルを作成し、系統的な計算条件によるケーススタディの検討が望まれる。

本論文では、基礎的な検討として、建築物の地下階の外部に連絡する傾斜空間を考慮した煙制御手法について検討した。この成果は、地下階における煙制御計画の検討におけるバリエーションを広げるとともに、火災時の建物利用者の避難や消防隊の消防活動の安全性を確保する上で活用されることが期待される。