



Title	地下鉄構内の気流・温熱環境の予測手法に関する研究
Author(s)	福代, 和宏
Citation	大阪大学, 1998, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.11501/3143955
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

地下鉄構内の気流・温熱環境の予測手法に関する研究

平成10年1月

福代 和宏

目次

第1章 地下鉄における気流・温熱環境の予測・評価の意義	1
1. 1 地下鉄の位置づけ	1
1. 2 内部環境の保全	1
1. 3 地下鉄の温熱環境に関する既往の研究	3
1. 4 既往の研究の問題点と本論文の目的	5
第2章 温熱環境の巨視的予測	10
2. 1 マクロモデルの理論	10
2. 1. 1 換気回路網モデルについて	10
2. 1. 2 気流場の予測モデル	11
2. 1. 3 温熱場の予測モデル	13
2. 1. 4 損失係数の決め方	13
2. 2 実測値による予測精度の検証	14
2. 2. 1 B駅（縦流換気方式）における実測値との比較	14
2. 2. 2 E駅（駅給気・中間排気方式）における実測値との比較	18
2. 2. 3 H駅（縦流換気方式）における実測値との比較	21
2. 2. 4 実測値による予測値の精度検証のまとめ	23
2. 3 各種気流の相互比較	23
2. 3. 1 縦流換気方式の場合	23
2. 3. 2 駅給気・中間排気方式の場合	29
2. 4 まとめ	33
第3章 ミクロ・マクロ達成手法による気流・温熱環境予測	34
3. 1 はじめに	34
3. 2 解析モデル	35
3. 2. 1 one-way modelのアルゴリズム	35
3. 2. 2 two-way modelのアルゴリズム	36
3. 3 等温定常シミュレーション	38
3. 3. 1 気流予測の設定	38
3. 3. 2 two-way modelによる予測結果	41
3. 3. 3 one-way modelによる気流予測	44
3. 4 等温非定常シミュレーション	48
3. 4. 1 シミュレーションの設定	48
3. 4. 2 シミュレーションの結果	50
3. 4. 3 計算負荷の比較	51
3. 5 非等温非定常シミュレーション	51
3. 5. 1 温熱環境条件	52
3. 5. 2 one-way modelとtwo-way modelの比較	53
3. 5. 3 マクロサブモデルとミクロサブモデルの比較	55
3. 5. 4 その他の検討事項	57
3. 6 まとめ	57
Appendix A 駅構内気流シミュレーションと模型実験による気流の可視化	59
A. 1 はじめに	59
A. 2 シミュレーションおよび模型実験の手法	59
A. 2. 1 地下鉄駅および地下鉄系	59
A. 2. 2 列車の走行状態	59

A. 2. 3	シミュレーションについて	60
A. 2. 4	模型実験について	61
A. 3	結果	61
A. 3. 1	条件1：列車が走行していない場合	61
A. 3. 2	条件2：列車がC駅に向かってトンネル2を最高速度で走行する場合	62
A. 3. 3	条件2：列車がB駅に向かってトンネル2を最高速度で走行する場合	62
A. 4	まとめ	63
第4章	地下鉄構内における熱的快適性予測	64
4. 1	はじめに	64
4. 2	巨視的な熱的快適性予測手法の概要	64
4. 2. 1	予測手法	64
4. 2. 2	温冷感と熱的快適性	65
4. 2. 3	SET*	65
4. 2. 4	RWI・HDR	65
4. 2. 5	代謝量(M)	65
4. 2. 6	衣服の熱抵抗(I_{cl})	65
4. 2. 7	衣服表面の熱抵抗(I_{cl})	66
4. 3	巨視的予測の設定	66
4. 3. 1	対象とする地下空間	66
4. 3. 2	内部発熱量	67
4. 3. 3	列車運行ダイアグラム	67
4. 3. 4	環境設定	67
4. 3. 5	旅客の行動履歴および衣服	68
4. 3. 6	計算条件	69
4. 4	巨視的予測の結果	69
4. 4. 1	冬期の温熱環境予測結果	69
4. 4. 2	行動履歴1に対する温冷感予測結果	69
4. 4. 3	行動履歴2に対する予測結果	70
4. 4. 4	行動履歴3に対する予測結果	70
4. 4. 5	夏期の温熱環境予測結果	71
4. 4. 6	行動履歴1に対する予測結果	71
4. 4. 7	行動履歴2に対する予測結果	71
4. 4. 8	行動履歴3に対する予測結果	72
4. 5	巨視的予測結果の考察	72
4. 5. 1	地下鉄駅温熱環境の特徴	72
4. 5. 2	温冷感に対する温熱環境変動の影響	72
4. 5. 3	行動履歴別予測結果の比較	73
4. 5. 4	評価指標の比較	73
4. 5. 5	ヒートショックについて	73
4. 6	ミクロ・マクロ連成モデルによる微視的な熱的快適性予測の概要	73
4. 6. 1	巨視的予測からの改善点	73
4. 6. 2	気流・温熱環境予測	74
4. 6. 3	温冷感予測	74
4. 6. 4	旅客行動予測	74
4. 7	微視的予測の設定	75
4. 7. 1	地下鉄系と換気方式	75
4. 7. 2	地下鉄駅の構造	75
4. 7. 3	内部発熱量	75

4. 7. 4	列車の走行曲線	75
4. 7. 5	地盤熱伝導計算	76
4. 8	微視的温熱環境予測結果	76
4. 8. 1	換気回路網による気流予測計算	76
4. 8. 2	OSTESPによる温熱環境予測計算	77
4. 8. 3	冬期の駅構内温熱環境予測結果	77
4. 9	微視的温冷感予測	80
4. 9. 1	旅客の行動予測	80
4. 9. 2	旅客の温冷感予測	80
4. 10	微視的予測に対する考察	82
4. 11	まとめ	83
第5章	地下鉄駅の温熱環境設計	84
5. 1	はじめに	84
5. 2	シミュレーションの概要	84
5. 2. 1	シミュレーションの手順	84
5. 2. 2	シミュレーションの設定	84
5. 3	巨視的予測結果	87
5. 3. 1	気流の予測結果	87
5. 3. 2	気温・冷房負荷・地盤温度の予測結果	88
5. 4	微視的予測の設定	89
5. 4. 1	プラットホーム冷房の設定	89
5. 4. 2	定常状態の予測	91
5. 4. 3	列車走行時の設定	93
5. 5	列車走行時の予測結果	94
5. 5. 1	列車が到着するまでの予測結果	95
5. 5. 2	列車停止時の予測結果	98
5. 5. 3	列車発車後の予測結果	100
5. 5. 4	空間平均気温の時間変化	102
5. 5. 5	SET* による評価	103
5. 6	考察	105
5. 7	まとめ	105
第6章	結論	106
6. 1	各章のまとめ	106
6. 2	今後の研究課題と本研究の発展性	107
6. 2. 1	今後の研究課題	107
6. 2. 2	本研究の発展性	108
記号表		110

第1章 地下鉄における気流・温熱環境の予測・評価の意義

1.1 地下鉄の位置づけ

地下空間の利用とひと言にいても、その用途は非常に広い。図-1.1に示すように、地下住居・地下倉庫に始まり、生活基盤、いわゆるライフラインの埋設、地下鉄・地下街のような交通・商業施設などがある。最近では、図書館や報道施設を地下に建設している例がある。

本論文では研究対象を、こうした多様な地下空間のうちの有人空間に限定する。したがって、地下に設置された電気・ガス・上下水道・通信網といったライフラインや、有人空間の中でも鉱山・地下発電所のように一般人の立ち入りがほとんどない空間は対象としない。

有人空間として地下を利用した例として頻繁に取り上げられるのは、地下の恒温性（断熱性）を利用した地下住居である。大昔から現代にいたるまで、寒暖の差が激しい気候の下では、住居を地下に設けることが多く、北アフリカ・中国・オーストラリアなど各地で地下住居を見ることができる。また欧米では食料の貯蔵庫として住居に地下室が設けられていることが多い。

19世紀後半からは全く異なる動機による地下空間利用が始まった。都市への人口集中にともなって起こった、交通混雑、緑地・公園不足などの諸問題に対応するため、都市の立体化のひとつの方法としての地下空間の開発が始まったのである。地下鉄・地下街・地下駐車場などが例として挙げられる。つまり、これらの場合、地下は都市における空間資源として開発されているのである。とくに日本では、多湿な気候のため地下住居の伝統がなかったため、地下空間利用といえば地下鉄・地下街・地下駐車場などの開発を指すことが多い。

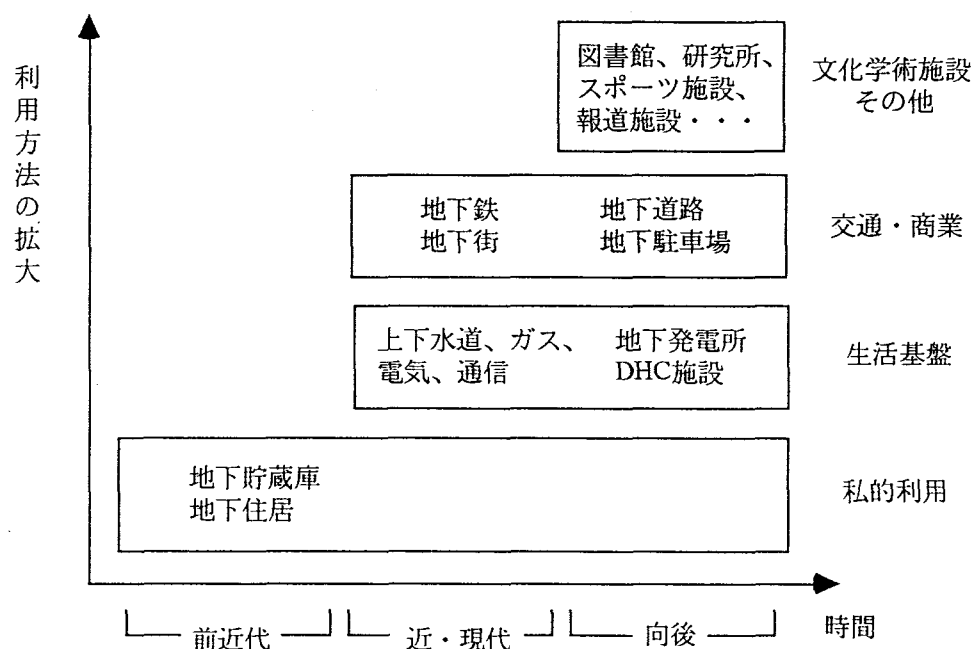


図-1.1 地下空間の利用方法

1.2 内部環境の保全

地下空間を有人空間として利用する場合には、内部環境の保全が重要な課題となる。内部環境の中

でも温熱環境は、人体の健康や快適性に対する影響が大きく、その維持には十分な注意を要する。

先に挙げたような地下住居の場合、出入口に扉が設けられており、内部環境が外部環境から隔絶している。周囲の地盤による吸放熱効果の影響はあるが、地上建築物と同様に内部の気流が安定しており、従来の空調技術の延長で温熱環境を調整することが可能であると考えられる。

これに対して、地下鉄・地下街などは、出入口が地上に開放されていたり、周辺建築物の内部環境との明確な仕切を持っていない半開放性空間であるため、地盤の影響だけでなく、各種気流駆動力の作用による地上との空気交換の影響を受けやすい空間となっている。特に地下鉄構内では、図-1.2に示すように列車の運行・内外温度差による浮力・地上風の吹き込み等によって地上との間で非定常の気流が発生し、温熱環境は常時変動している。そのため、冷暖房による調整は困難であり、多大なエネルギーが必要となる。

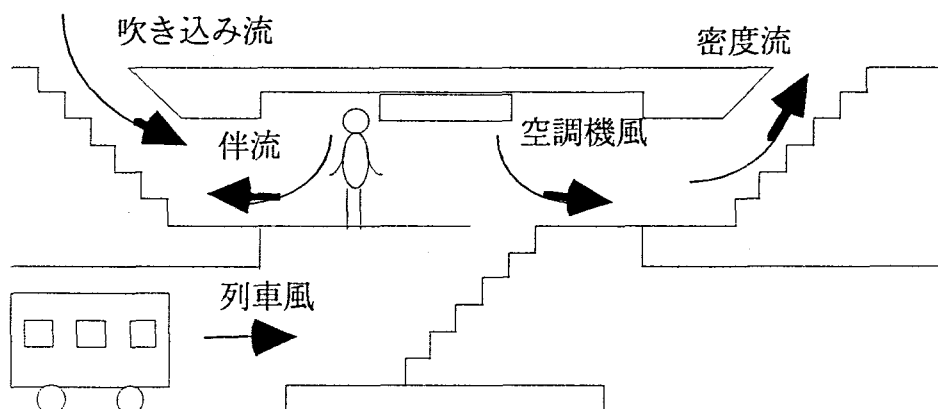


図-1.2 地下空間に作用する気流

さらに、これらの半開放性地下空間は利用形態上も特殊な空間である。利用者の多くが常時座業を続けているオフィス空間等と異なり、地下鉄・地下街では利用者は図-1.3に示すように主に歩行を中心として様々な行動をとっている。

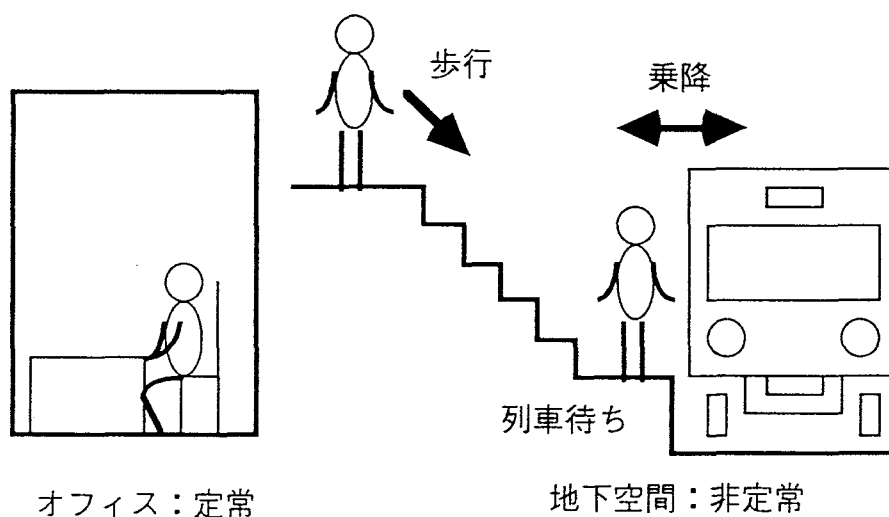


図-1.3 行動の非定常性

例えば地下鉄の場合、歩行・階段昇降・立ちながら待つ・乗車して座る、というように列車に乗りこむまでにいくつかの行動の変化があり、熱的快適性を維持するためには、こうした利用者の行動の非常性を視野に入れなくてはならない。このように、地下鉄では、温熱環境や利用者行動の非定常性という特性を考慮する必要性があり、従来の閉空間に対する温熱環境調整技術をそのまま適用することはできない。半開放性地下空間に対しては、独自の環境調整手法を確立する必要性がある。

1. 3 地下鉄の温熱環境に関する既往の研究

地下空間は周囲地盤の断熱性および熱容量の効果によって、「冬暖かく、夏涼しい」空間であるとして一般に認識されている。地下鉄も同様に認識されることが多い。しかし、そのような環境が成立するのは地下鉄開設初期においてであり、現在の地下鉄構内は、夏は暑く不快な空間となっている。

このような地下鉄構内の高温化については、戦前、すでに庄司が大阪市営地下鉄を対象とした調査研究¹⁾のなかで予測している。温熱環境の経年変化の調査結果から、庄司は、構内の気温の上昇の原因を乗客の増加および電力消費量の増加にともなう内部発熱であると述べている。

その後、東京・大阪の地下鉄構内の気温はこの予測のとおり年々上昇し（例えば、地下鉄銀座線においては昭和26年以降、 $0.35^{\circ}\text{C}/\text{年}$ の上昇）、高温化への対策が地下鉄経営の上で重要な課題となった。これを動機として、実測だけでなく地盤の吸放熱効果や列車風などの数学モデルを用いた温熱環境解析が始まった。

宮本²⁾、雑賀³⁾による初期の温熱環境の解析は、プラットホームの完全混合を想定（すなわちプラットホーム内の温度分布を無視）したマクロモデルによって行われ、地盤は無限固体として扱われ、換気量には実測値が用いられた。これらの解析によって熱収支の定量的な検討が行われ、列車からの放熱などの内部発熱と換気量が地下鉄構内の温熱環境を支配する因子であることが明らかにされた。宮本らの研究では常時換気を行うことによって、積極的に壁体を冷却し、壁体の吸熱能力を高める手法が提案されている。雑賀らも解析モデルを用いたシミュレーションによって夜間換気によって壁体の吸熱能力が高まることが期待できると述べている。しかし、列車の発熱量が非常に大きいため、壁体吸熱や換気だけで温熱環境の悪化を防ぐことは不可能であり、結局、1960年以降は地下鉄構内への冷房の導入が自然な流れとなった。

その後もマクロモデルを用いて、熱収支や冷房負荷予測に関する研究が行われ、地盤吸放熱モデルや列車風モデルを理論的に精値化する努力が続けられた。

コンピュータの利用が容易になったことで、地盤吸放熱効果は吉田らのレスポンスファクタ法⁴⁾や下田らの有限差分法⁵⁾などの手法によってより厳密に計算されるようになった。

列車風は見積りが困難であり、地下空間の冷房負荷計算が始まった当初は1列車あたり 1000m^3 という実測による概算値が用いられていた²⁾が、現在では松平らによる模型実験にもとづくモデル⁶⁾や、森井らによって理論的に導出された数学モデル⁷⁾を用いて予測することが可能になった。

地下鉄構内の高温化を契機として日本で発展したこれらの研究とは別個に、アメリカでも運輸省の指導による研究が行われ、シミュレーションプログラムSES(Subway Environmental Simulation program)とそのハンドブック⁸⁾という形で温熱環境予測手法が体系的にまとめられた。この研究の特色としては、地下鉄におけるhuman criteriaの確立を目指して、旅客の行動特性を考慮した温感指標RWI・HDRを示していることが挙げられる。SESは完成後も改良を加えられ、現在では世界で最も普及した地下鉄構内環境予測シミュレータとなっている。

日本でも、東京都営地下鉄12号線の建設を契機として、東京都地下鉄建設株式会社の主導によって地下鉄構内の温熱環境予測手法がまとめられた⁹⁾。この研究ではSESが発表されて以降の知見、例えば、森井らの列車風理論や従来の地盤モデルに地下水の影響を加味したモデルが取り入れられており、New SEASと呼ばれるシミュレータが開発されている。

ここまで述べてきたことを年表化したのが表-1.1である。

表-1.1 温熱環境研究年表

年	できごと・研究
1927	上野-浅草間開通（東京地下鉄道会社）
1933	梅田-心斎橋間開通（大阪市営地下鉄道）
1942	地下鉄温熱環境に関する初の系統的調査（庄司 ¹⁾ ）
1956～	<高温化が問題化>
1959	機械換気の年中無休運転開始（大阪市営地下鉄1号線） プラットホームに冷風装置設置（梅田・難波駅）
1964	宮本ら ²⁾ の研究（対象：大阪市営地下鉄1号線）
1965	高温化対策委員会設置（営団）
1971	初のトンネル冷房（営団銀座線・上野-稲荷町間）
1973	雑賀ら ³⁾ の研究（対象：営団銀座線）
1973～	松平らの列車風に関する研究 ¹⁰⁾
1976	SES（米国運輸省）の開発 ⁸⁾
1980～	吉田らの研究 ⁴⁾
1988～	下田らの研究 ¹¹⁾
1993	New SEASの開発 ⁹⁾ （都営12号線開発を契機として）

上述した地下鉄構内の温熱環境に関する研究には共通の枠組みが見られる。それは、マクロモデルによって温熱環境を解析するという枠組みである。ここでマクロモデルというのは換気回路網やゾーンモデルと呼ばれるものである。このモデルは、対象空間をいくつかのゾーンに分割し、各々のゾーンにおける完全混合とゾーン間の空気的一次元的な流れを仮定して、気温・流量の予測をおこなうというモデルである。地下鉄系では、トンネルやコンコース、プラットホームなど複数の空間が相互に連結しあっているため、例えば、駅構内の環境予測を行うためには、駅構内だけではなく、この空間に影響を及ぼす周囲空間のすべてについても解析を行う必要がある。また、地盤や気象条件などの影響も考慮すると、長期間にわたる予測を行う必要がある。対象空間を簡略に扱っているため、マクロモデルにはこのように広大な空間の長期に渡る温熱環境解析を比較的小さな計算負荷で予測できるといった利点がある。このため、過去の研究ではすべてマクロモデルによって解析が行われている。

1960年以降の地下鉄温熱環境に関する研究の中で用いられたいくつかのマクロモデルの分解能、すなわち時間刻み Δt [s]と空間刻み Δx [m]といった解析スケールを比較したのが図-1.4である。

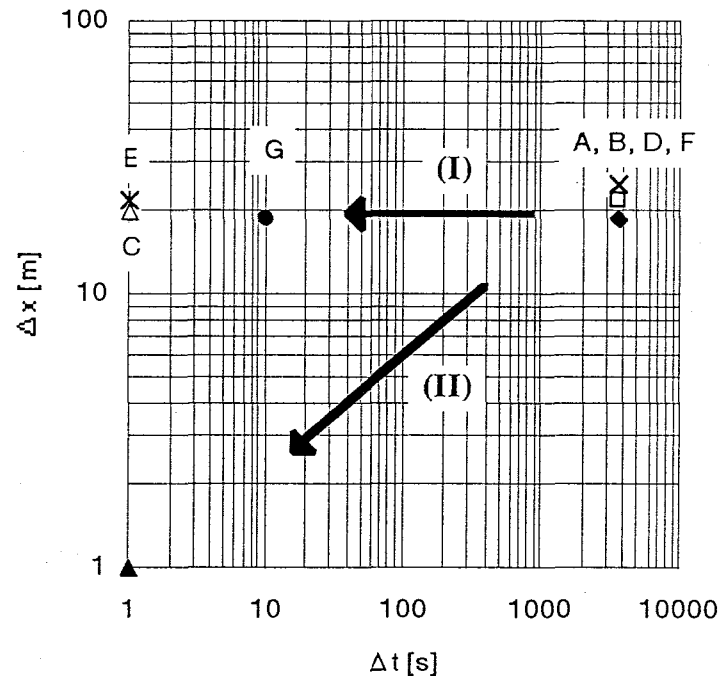


図-1.4 解析スケールの比較

ここでは地盤吸放熱モデルや列車風モデルといったサブモデルの解析スケールは取り上げず、対象とする空間の気温そのものを算出するための解析スケールを取り上げた。空間刻みは対象空間の体積の3乗根で表した。また、各記号はそれぞれ、つぎの研究に対応する。

A : 宮本ら²⁾ (1964), B : 雑賀ら³⁾ (1973), C : SES⁸⁾ (1976),
 D : 吉田⁴⁾ (1980), E : 柳下¹²⁾ (1988), F : 下田ら¹¹⁾ (1988),
 G : New SEAS⁹⁾ (1993)

A, B, D, Fの解析モデルは、地下鉄の包括的な熱収支の解析を目的とし、時間刻みは1時間としている。そして、計算に必要な換気量としては、あらかじめ実測または列車風モデルのシミュレーションから求めた平均の換気量を使用している。これに対し、C, E, Gの解析モデルは秒単位の時間刻みで気流と温熱環境を同時に解く手法（気流と温熱環境の連成）を採っている。

このほかにも地下鉄の温熱環境を対象とした研究がいくつかあるが、いずれの研究でも使用されている解析モデルはマクロモデルであり、1時間毎の解析、または気流と温熱環境の秒単位の連成計算のどちらかを行っている。

1. 4 既往の研究の問題点と本論文の目的

既往の研究の問題点として、マクロモデルしか解析手法を持たなかったため、扱える現象が限られてきたということが挙げられる。マクロモデルでは気流・温度の三次元的な分布を考えないため、駅全体の空調負荷の見積もりやプラットフォームの平均気温の算出のような巨視的な問題が扱えても、冷房吹き出しまわりの気流が列車風によって乱される様子の予測や旅客の周りの局所的な温熱環境の予測のようなより小さな空間スケールの問題を扱うことが出来ない。図-1.4に矢印(I)で示したよ

うに、既往の研究では、時間スケールのみ小さくしている例があるが、マクロモデルの枠内では、これに対応して空間スケールを小さくすることはできず、アンバランスさが存在する。

1. 2で述べたような温熱環境と旅客行動の非定常性を考慮した環境調整を行おうとすれば、従来のマクロモデルによる解析という枠組みを変え、図-1.4で矢印(II)および▲で示しているように、より小さな時間と空間のスケールの環境予測を行うことが必要になる。

より小さなスケールの温熱環境を予測する手法として、現在ではCFD(数値流体力学)という手法が存在する。CFDは数値解析手法の一つであり、解析対象空間を細かく分割し、流体力学の基礎方程式をもとに各空間要素の間の関係を表す離散化式を立てて、繰り返し計算によって各空間要素の気温や流速を算出する手法である。マクロモデルと比較して膨大な計算量と記憶容量が必要とされるが、3次元の詳細な気流・温熱分布が得られる。

オフィスや居室を対象とした予測ではCFDを適用する事例が増えてきているが、地下鉄構内に対してはこの手法はほとんど見られない。すでに前節で述べたように、地下鉄の温熱環境予測では、トンネルやコンコース、プラットホームなどを一括して解析を行う必要があり、こうした巨大な空間全体に対してCFDを適用することは困難であることが理由である。

そこで、本論文ではマクロモデルとCFD双方の欠点を補う実用的な手法として、駅構内に対してCFDを、トンネルなどの隣接空間に対してマクロモデルを適用し両者を連成させる手法、マイクロ・マクロ連成モデルという新しい手法を提案する。ここで、マイクロモデルというのはCFDを指している。

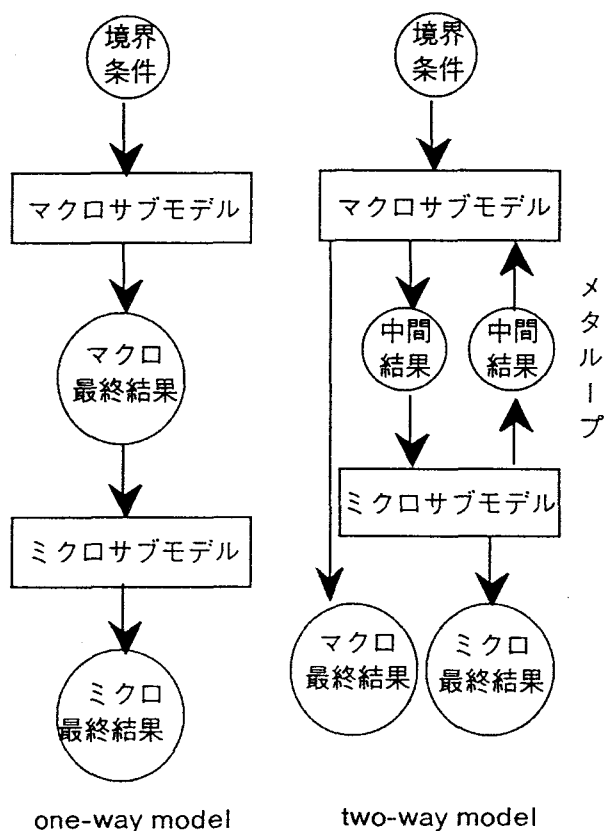


図-1.5 連成概念図

本論文の第2章では従来の研究と同様にマクロモデルによる巨視的解析手法を示すが、第3章では、このマクロモデルとCFDの連成によって、微視的な環境予測を行う手法を示す。ここでは、one-

way modelおよびtwo-way modelの2つの連成手法を検討する。

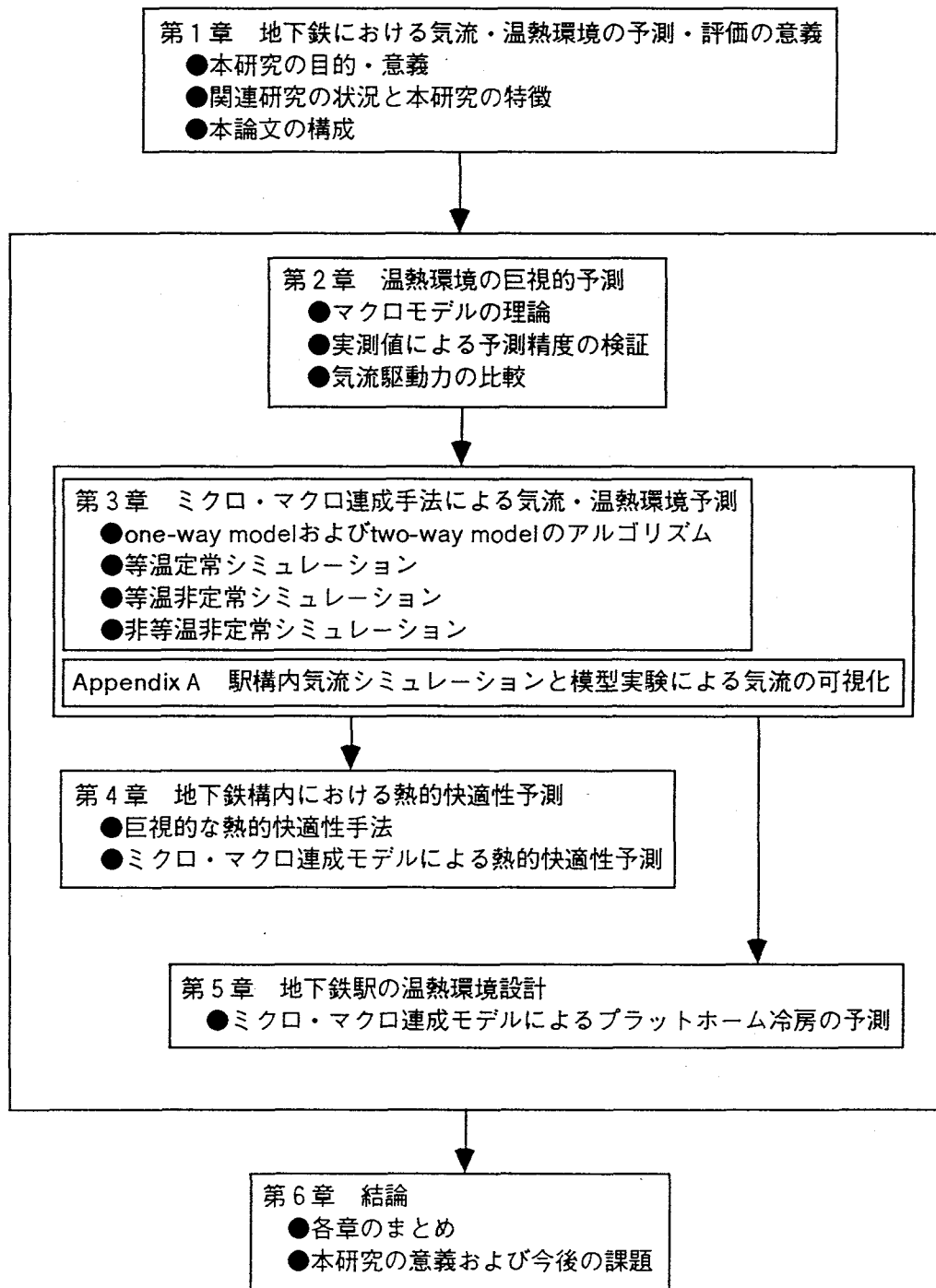
図-1.5に示すように、one-way modelとはマクロモデルで計算した結果を境界条件としてマイクロモデルで計算する手法であり、two-way modelとは一方の計算結果を他方の境界条件として交互に計算を行い、両者の解が収束するまで反復計算（メタループ）を行うものである。後者の方が理論的には正しい連成手法といえるが、本研究では両者の計算結果を比較し、実用的な計算手法を提案する。

これまでに、いくつか行われた地下鉄構内に対するCFDによるシミュレーション¹³⁾は、いわばone-way modelによるシミュレーションであったが、完全な連成手法であるtwo-way modelとの比較によってそうした予測の妥当性を検討したのは本研究が初めてである。また、完全な連成手法に関しては、これまでもいくつかのアイデアが示されてきた^{14), 15)}が、具体的な建築物に対して適用し、シミュレーション結果を示したのは本研究が初めてである。

第4章では、実用的な予測手法であることを示したマイクロ・マクロ連成モデルを用いて、温熱環境と利用者行動の二重の非定常性を考慮した温冷感予測手法を提案する。同章の前半部分においては、従来のマクロモデルを用いて温冷感予測を行う手法を示すが、後半部分において、one-way modelによって旅客周囲の温熱環境を予測し、この結果を用いてより詳細な温冷感を予測する手法を示す。また、ここでは特定の時刻における旅客の滞在位置を予測するモデルも適用する。この手法によって、従来SES⁹⁾を除き、ほとんど検討されてこなかった駅構内における旅客の温冷感に関する検討を行う。

第5章ではone-way modelによって、冷房時におけるプラットホーム内の非定常温熱計算を行う。従来のマクロモデルでは冷房の効果に関する予測を行うことができなかったが、ここでは吹き出した冷気の広がりや、列車風の冷気の分布に対する影響などの予測を行い、考察を加える。

本論文の構成を図-1.6に加える。



図一1.6 本論文の構成

参考文献

- 1) 庄司光：大阪市営地下鉄道の空気性状と其の調節に関する研究，国民衛生 18 (9, 10), (1942), pp. 441 - 589
- 2) 宮本政幸・赤松義夫：地下鉄の温湿度上昇解析，科学と工業 第38巻，(1964)，pp. 402 - 416
- 3) 雑賀忠昭、森田敏男、斎藤孝基、内田秀雄：地下鉄道の温熱環境の解析，空気調和・衛生工学会第47巻第6号(1972年)，pp 489 - 498
- 4) 吉田治典：地下鉄内の温度・熱負荷予測のためのシミュレーション，空気調和・衛生工学会学術論文集(1980 - 10)，pp. 317 - 320
- 5) 下田吉之，花井裕，水野稔：地下空間における地盤の吸熱効果に関する研究 第2報－地下鉄構内の気温形成に及ぼす機械換気と地盤吸放熱に影響に関する検討，空気調和・衛生工学会論文集，No.58 (1993 - 10)，pp. 1 - 12
- 6) 松平秀雄、阪倉康男、田中康雄、中田勉、濱田彰：トンネル内列車風の動特性 第1報－単線模型トンネルの基礎実験，空気調和・衛生工学会論文集No.1(1976 - 6)，pp 67 - 73，および，松平秀雄、阪倉康男、田中康雄、中田勉、濱田彰：トンネル内列車風の動特性，第2報－パラメーターの同定，空気調和・衛生工学会論文集No.1(1976 - 6)，pp 75 - 83
- 7) 森井宜治、澤洋一郎、榎本隆二：地下鉄の風，日本流体力学会「なかれ」第12巻第4号(1993 - 12)，pp. 423 - 437
- 8) W. D. Kennedy et al. : Subway Environmental Design Handbook: 2nd Edition, (U. S. Dept. of Transportation, 1976)
- 9) 日本気象協会：地下鉄12号線環状部温熱環境解析報告書(1993 - 3)
- 10) 松平秀雄，阪倉康男，田中康雄，中田勉：地下鉄駅の空調負荷計算に関する研究，空気調和・衛生工学会学術講演論文集 (1973 - 10)，pp. 295 - 298 など
- 11) 水野・下田・花井・内藤：地下鉄を例とした地下空間の熱環境シミュレーション(1)－換気量，ホーム気温の実測－，日本建築学会大会学術講演梗概集，(1988 - 10)，pp. 221 - 222 など
- 12) 柳下昌平・若宮宜範・山中晤郎：列車走行時の地下鉄トンネル内の風量，温度の非定常解析，日本機械学会論文集(B編) 55巻509号(1989 - 1)，pp. 101 - 106
- 13) 例えば，Parsons Brinckerhoff: ADVANCED FLUID FLOW MODELING (同社パンフレット)
- 14) 加藤信介・村上周三・崔棟皓：建物内外の空気流動に関するマクロ・ミクロ解析の統合(その1)－エネルギー保存則に基づくマクロ解析モデルの提案，日本建築学会大会学術講演梗概集，(1990-10)，pp. 507～508
- 15) 奥山博康：熱CADのための空間離散化モデル，日本建築学会環境工学委員会熱環境運営委員会第24回熱シンポジウム，(1994-11)，pp. 25～32

第2章 温熱環境の巨視的予測

地下鉄に作用する気流を駆動力別に分類すると図-2.1 (a)の5種類になる。このうち、人体の移動にともなう気流は見積りが困難であるため、以下では議論しない。従来の地下空間に対する気流解析では、気流の駆動源として機械換気と列車走行のみが考えられており、地下鉄の半開放性に着目し、地上風の吹き込みや浮力が気流・温熱環境に及ぼす影響を評価した研究例はあまり見られない。

本章では、半開放性の地下空間を対象とした巨視的な気流・温熱環境シミュレータを作成し、地下鉄駅における気流の実測値と計算値を比較して、その予測精度を検証する。そして地下鉄系を対象とした数値実験によって各種気流駆動力が地下空間の気流・温熱環境に与える影響の大きさを比較する。

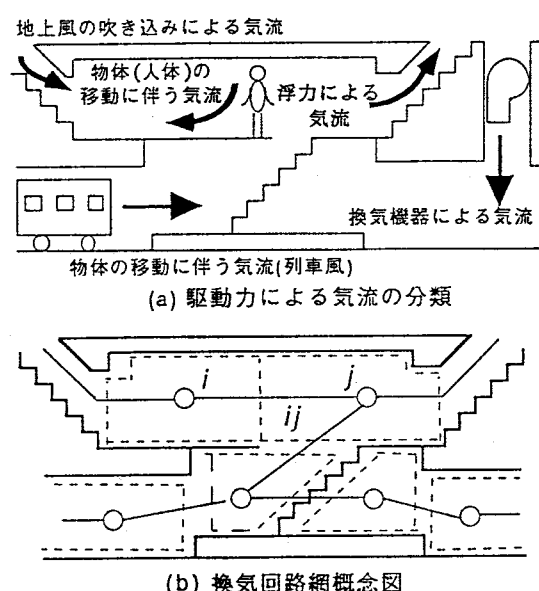


図-2.1 地下空間の概念図

2. 1 マクロモデルの理論

2. 1. 1 換気回路網モデルについて

本研究で用いる気流・温熱シミュレータは、換気回路網モデルによって気流場・温熱場の計算を行う。換気回路網モデルには網目法と接点法の2種類があるが、本研究のマクロモデルは接点法によるものである。この手法を選択した理由は第3章で述べる。以下、図-2.1 (b)を用いて換気回路網モデルの考え方について説明する。

対象とする空間を点線で示すゾーンに分割し、各ゾーンの完全混合を仮定する。そして、ゾーン間で交換される空気は、各ゾーンを結ぶ線に沿って一次元的に流れるものと仮定する。ここで各ゾーンの代表点を接点と呼び、接点を結ぶ線をブランチと呼べば、地下空間は接点とブランチからなる換気回路網に変換され、接点で各ゾーンの気温と圧力を計算し、ブランチでゾーン間の流量を計算することができる。

このように換気回路網モデルは、気流場・温熱場をマクロに取り扱うため、近年広く適用されている数値流体力学(CFD)のように、気流・温度分布を3次的に求めることはできない。しかし、地下鉄系のような大規模かつ複雑な形状をもつ空間全域に対してCFDを適用することは困難であり、ま

た系全体の空気・温熱環境を把握するためには、むしろマクロな気流・温度変動を予測することの方が有益であると考えられることから、本章では換気回路網モデルを用いる。

図-2.2にシミュレータで行う計算のフローチャートを示す。計算は気流場の計算と温熱場の計算の二つに分けられる。以下でそれぞれの計算方法を概説する。

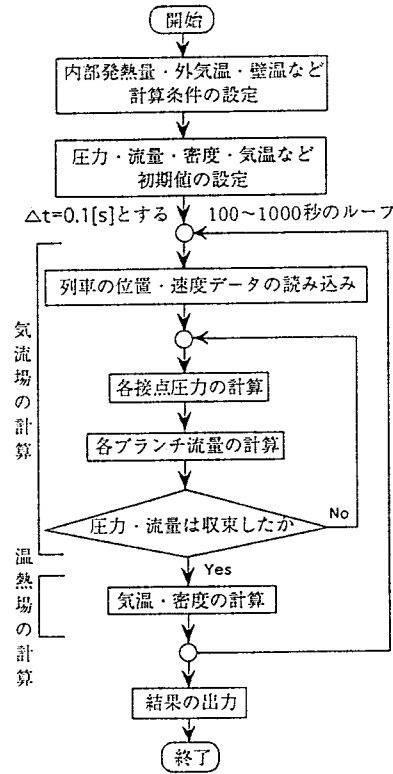


図-2.2 計算のフローチャート

2. 1. 2 気流場の予測モデル

ブランチ周囲の壁を管路の内壁と考えれば、ブランチに沿って流れる気流は管内流である。したがって、図-2.1(b)に示す接点*i*、*j*とこれらを結ぶブランチ*ij*に関して次のような気流の運動方程式が成立する。

$$\rho_{ij} L_{ij} \frac{dv_{ij}}{dt} = - \left(\frac{\lambda_{ij} L_{ij}}{D_{ij}} + \zeta_{ij} \right) \frac{1}{2} \rho_{ij} |v_{ij}| v_{ij} + \delta P_{ij} + (p_i - p_j) \quad (1)$$

ここで、気流駆動力 δP はダクト*ij*における浮力 δP_B 、換気機器のファン圧 δP_F 、地上風圧 δP_W 、列車風の圧力 δP_T の和、すなわち、

$$\delta P_{ij} = \delta P_{Bij} + \delta P_{Fij} + \delta P_{Wij} + \delta P_{Tij} \quad (2)$$

であらわされる。

浮力は地上空気の密度 ρ_0 を基準としたとき、次式で与えられる。

$$\delta P_{Bij} = (\rho_0 - \rho_{ij}) g (h_j - h_i) \quad (3)$$

ここで、 ρ_{ij} の与え方として、風上と風下の接点の空気密度の平均を与える方法と、風上の接点の空気密度を与える方法の2つが考えられるが、ここでは空気は拡散よりも移流によって移動するものと考え、風上の接点の空気密度を与えることにする。また、各接点の空気密度は後に述べる温熱場の計

算の中で求める。

換気機器による気流の駆動力は、 P - q 特性曲線を3次曲線近似した次式で与える。

$$\delta P_{Fij} = C_1 q_{ij}^3 + C_2 q_{ij}^2 + C_3 q_{ij} + C_4 \quad (4)$$

地上風の吹き込みによる駆動力は、風圧係数 C_w を用いて次式で与える。

$$\delta P_w = C_w \frac{1}{2} \rho w^2 \quad (5)$$

列車の走行に伴う駆動力は森井ら¹⁾のモデルを用い、次の2式を連立させて解く。

$$\delta P_T = -\rho \frac{\sigma}{1-\sigma} \{u-v\} \left[|h_{11} \psi| + \frac{h_{12} |u-v|}{1-\sigma} \right] \quad (6)$$

$$\frac{d\psi}{dt} = \frac{\sigma}{1-\sigma} \left\{ \frac{du}{dt} + \frac{|h_{11} \psi|}{L-l} \left[\frac{h_{12}(u-v)}{1-\sigma} + \frac{h_{11} \psi}{\gamma} \right] \right\} \quad (7)$$

ここで、

$$h_{11} = \frac{-\gamma - \sqrt{2\gamma^2 + \gamma}}{2} \quad h_{12} = \frac{\gamma + 1}{4} \quad (8)$$

として定義される。従来の列車風の数学モデル²⁾³⁾では、実測や実験から列車の抵抗係数を求める必要があったが、このモデルでは、そのような経験定数を与える必要が無いところに特徴がある。

式(1)にブランチの断面積 A_{ij} を掛け、流量 q による表現に直すと、

$$\frac{dq_{ij}}{dt} = -\left(\frac{\lambda_{ij}}{D_{ij}} + \frac{\xi_{ij}}{L_{ij}} \right) \frac{1}{2A_{ij}} |q_{ij}| q_{ij} + \frac{A_{ij} \delta P_{Fij}}{\rho_{ij} L_{ij}} + \frac{A_{ij}}{\rho_{ij} L_{ij}} (p_i - p_j) \quad (9)$$

となり、式(9)を完全陰解法で離散化すると、

$$q_{ij} = \left\{ -\left(\frac{\lambda_{ij}}{D_{ij}} + \frac{\xi_{ij}}{L_{ij}} \right) \frac{1}{2A_{ij}} |q_{ij}| q_{ij} + \frac{A_{ij} \delta P_{Fij}}{\rho_{ij} L_{ij}} + \frac{A_{ij}}{\rho_{ij} L_{ij}} (p_i - p_j) \right\} \Delta t + q_{ij}^{old} \quad (10)$$

となる。式(10)は2次方程式であり、解析的に解くことができる。

$$a_{ij} = -\left(\frac{\lambda_{ij}}{D_{ij}} + \frac{\xi_{ij}}{L_{ij}} \right) \frac{\Delta t}{2A_{ij}} < 0 \quad (11)$$

$$b_{ij} = \frac{A_{ij} \delta P_{Fij}}{\rho_{ij} L_{ij}} \Delta t + \frac{A_{ij}}{\rho_{ij} L_{ij}} (p_i - p_j) \Delta t + q_{ij}^{old} \quad (12)$$

と置くと、式(10)は、

$$q_{ij} = a_{ij} |q_{ij}| q_{ij} + b_{ij} \quad (13)$$

となる。 q_{ij} が正のときと負のときとで場合分けし、この式を解くと、

$$q_{ij} = \frac{1 - \sqrt{1 - 4a_{ij}b_{ij}}}{2a_{ij}} \quad (b_{ij} \geq 0)$$

$$q_{ij} = \frac{-1 + \sqrt{1 + 4a_{ij}b_{ij}}}{2a_{ij}} \quad (b_{ij} < 0) \quad (14)$$

となる。

ところで、接点 i が $j=1, \dots, m$ の複数の接点と接続しているとき、 i から j に気流が流出する場合を正とすると、 i に関する圧縮性気体の連続の式は、

$$\sum_{j=1}^m \rho_{ij} q_{ij} = 0 \quad (15)$$

となる。ここで、 q_i に式(14)を代入し、 δP 、 p_i が既知であるとする、式(15)は p_i に関する非線形方程式となる。式(15)の左辺を φ_i と書けば、Newton-Raphson法により、 p_i が次式の収束解として得られる。

$$p_i^{N+1} = p_i^N - \frac{\varphi_i(p_i^N)}{\varphi_i'(p_i^N)} \quad (16)$$

ここで、添え字のNはN次の近似解であることを示す。また、 φ_i' は φ_i を p_i について微分したものである。

本シミュレータでは、すべての接点に対して同様の計算を行い、各々の圧力を求める。そして、各接点の圧力を式(10)に代入して各ブランチの流量を得る。

2. 1. 3 温熱場の予測モデル

気温の計算はコンコース・プラットホーム・トンネル等の大規模空間に対してのみ行う。階段や通路はこれらの大規模空間に比べると表面積が小さく、発熱源も少ないので気温は風上側のゾーン気温に等しいものとする。

図-2.1 (b) に示す接点 i を含むゾーンの気温の変化は次式で表わされる。

$$\rho_i c V_i \frac{d\theta_i}{dt} = Q_i + S_i \alpha (\theta_{wi} - \theta_i) + \sum_j \rho_j c q_{ij} \theta_j - \sum_k \rho_i c q_{ik} \theta_i \quad (17)$$

式(17)で、右辺第1項は内部発熱、第2項は壁体放熱、第3、4項はそれぞれ換気によって流入・流出する熱量を表す。

長期間を対象とするシミュレーションを行う場合、壁体および地盤の熱収支計算を、気温の計算と同時にやって壁温を求める必要があるが、本研究では短時間を対象とするため、下田ら⁴が開発した地下鉄温熱環境予測プログラム(OSTESP)から求めた壁温を固定値として θ_w に代入する。OSTESPは時間刻み1時間で気温・地中温度を予測するプログラムであり、地表面熱収支を考慮した2次元熱伝導計算を行って地中温度を求めている。

温熱場は気流場に比べれば発散のおそれが小さいと考えられるため、本シミュレータでは式(17)を陽解法で離散化し、気流計算で求めた流量を与えて気温を求める。

また、次式により、気温と圧力からこのゾーンでの空気の密度を求める。

$$\rho_i = \frac{101325.0 + p_i}{287(273.2 + t_i)} \quad (18)$$

2. 1. 4 損失係数の決め方

本論文で用いている換気回路網では、気流を管内流として扱っているため、壁表面の摩擦や建築物の構造による圧力損失は、管摩擦係数 λ および損失係数 ζ によって表される。これらの値は以下の方法で決定する。

(1) λ の決め方

ベンチ、ごみ箱、照明機器、看板、階段の踏み段等は壁表面の粗さとして考えることができる。これらの物体の壁面からの高さ ε と、通路やプラットホームの水力直径Dを次のPrandtlの式⁵⁾

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2.0 \log_{10} \frac{D}{\varepsilon} + 1.08 \quad (19)$$

に代入して管摩擦係数 λ を求める。本論文では ε として場所に応じて0.2~0.5mを用いた。

(2) ζ の決め方

圧力損失を Δp とすると、損失係数 ξ は

$$\Delta p = \xi \frac{1}{2} \rho v^2 = \xi \frac{1}{2} \rho \left(\frac{q}{A} \right)^2 \quad (20)$$

で定義される。

ξ で表される圧力損失としては、①ブランチ接続部における断面積変化に伴う損失、②複数のブランチの接合部で生じる分岐・合流損失、③ブランチの屈折による損失等の構造に由来する損失が考えられる。

一般に①および③は流速に関係しない固定値であるため、それぞれ、断面積比または屈折角度から文献⁶⁾を参照して ξ を求める。

②の分岐・合流損失の ξ は流量比、断面積比、本管と支管の交角など多様な因子によって値が変わるので、各タイムステップ毎に、Gardelの式⁷⁾を用いて求める。

2. 2 実測値による予測精度の検証

本節では、実在の地下鉄駅を対象とした実測結果を用いて、シミュレータの予測精度の検証を行う。予測精度の検証をより厳密に行うためには、地下鉄駅各部の流量と気温の予測値の両方を実測値と比較するべきであるが、ここで取りあげた実測は列車風の測定を目的として行ったものであるため、気温は流量ほど詳しく測定されていない。このため、実測値と予測値の比較は気流に関してのみ行う。

地下鉄の代表的な機械換気方式として駅給気・中間排気方式と縦流換気方式の2つがある。本節では、縦流換気を行うB駅、駅給気・中間排気方式を採るE駅・H駅の3駅における実測値を用いて精度の検証を行う。

2. 2. 1 B駅（縦流換気方式）における実測値との比較

(1) 実測の概要

流量測定は1989年11月11日の16時20分から16時50分にかけて行った。B駅と隣接駅、送・排風機との位置関係を図-2.3に示す。また、同図では、トンネルおよびプラットホーム中心の地上からの深さを併記している。実測時の機械換気量を表-1に示す。送風機1,4,9,12の風量は定格風量であるが、排風機6,7の風量は、深夜に行った流量実測結果の収支から決定した。この表に示した以外の送・排風機は実測時には停止していた。

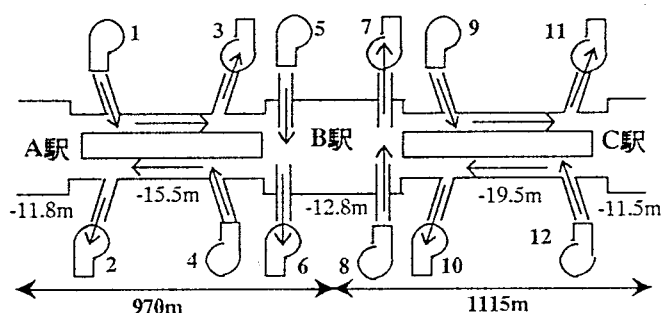


図-2.3 B駅および送・排風機の位置関係

B駅のプラットホーム部・コンコース部の平面図を図-2.4に示す。流量の測定点は図-4中に①～

表-2.1 機械換気量

送・排風機名	風量[m ³ /s]	備考
送風機1	20.8	定格風量
送風機4	20.8	定格風量
排風機6	14.3	夜間実測値
排風機7	14.3	夜間実測値
送風機9	20.8	定格風量
送風機12	20.8	定格風量

⑦で示す各位置である。各測定点に2～3人を配置し、熱線風速計を用いて風速を測定し、風向をスモークテスターで確認した。風速、風向は10秒毎の瞬時値を記録し、各測定点の断面積を乗じて流量を求めた。

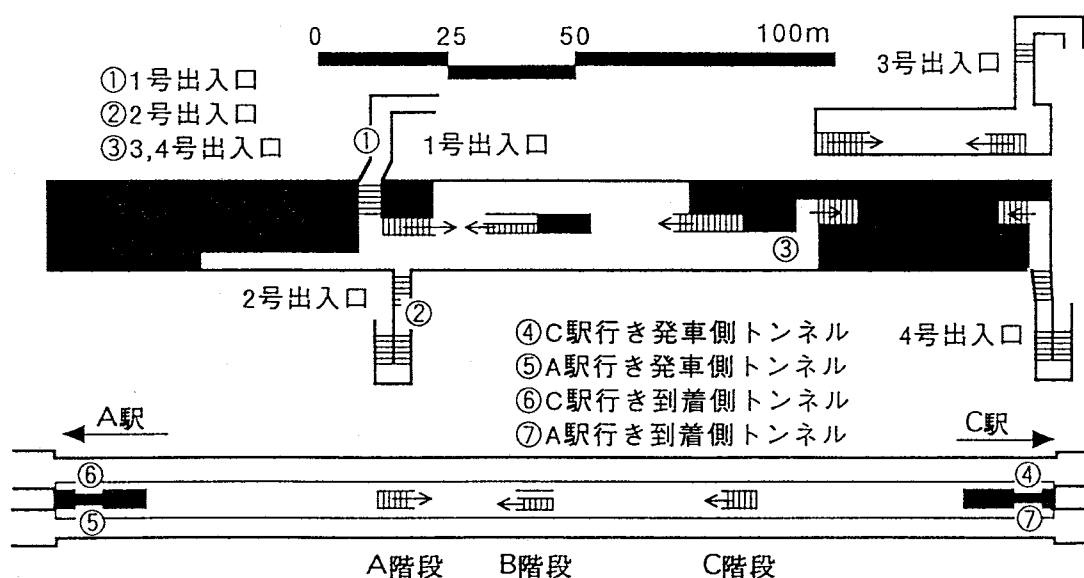


図-2.4 B駅プラットフォーム・コンコース平面図

(2) シミュレーションの概要

図-2.4に示したB駅の構造を換気回路網に置き換えると、図-2.5のようになる。また、表-2.2に、各ブランチに与えた寸法や損失係数などの諸元を示す。図-2.5中の数字は、シミュレータで計算する際に各ブランチおよび各接点に与えた番号であり、これらの番号は表-2.2の番号に対応する。機械換気量は表-2.1の値を与えた。ただし、風量の収支を合わせるため、AおよびC駅のプラットフォームから $20.8\text{ m}^3/\text{s}$ ずつ排気することにした。環境条件としては表-2.3に示す値を与えた。ここで、外気温は実測時の気象台気温であり、壁温はOSTESPによって求めた。また、列車の速度は実際の列車の走行曲線に基づいて、図-2.6に示す速度を与えた。速度は列車がA駅からC駅に向かう場合を正とした。

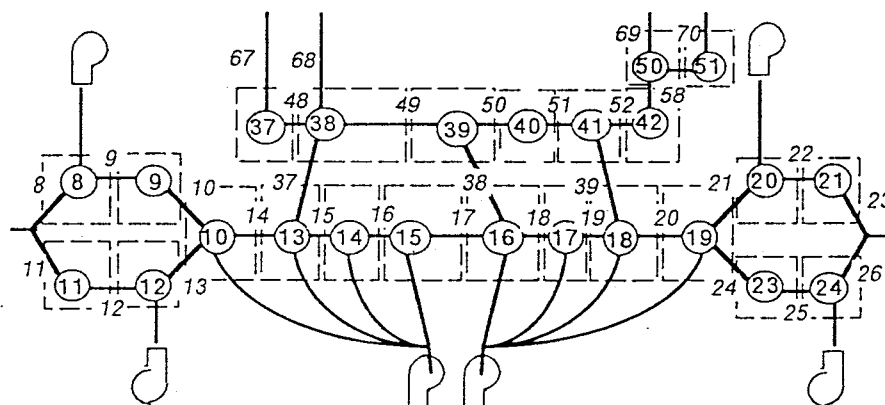


図-2.5 B駅の換気回路網による表現

表-2.2 B駅における各設定値

	プラン番号	長さ[m]	断面積[m ²]	周長[m]	λ	ζ	
A-B間トンネル	8,10,11,13	17.5~20.0	24.6	17.6	0.06	0.25~0.36	
	9, 12	770.0	24.6	17.6	0.06	0.00	
B駅ホーム	14~20	7.5~45	47.6~58.3	39.2~49.0	0.11	0.00~0.10	
B-C間トンネル	21,23,24,26	17.5~20.0	24.6	17.6	0.06	0.25~0.36	
	22, 25	910.0	24.6	17.6	0.06	0.00	
A~C階段	37~39	14.2	9.7	12.6	0.08	1.50	
B駅中階	48~52,61	10.0~30.0	22.5~45.0	21.0~36.0	0.11	0.00~0.15	
1~4号出入	67~70	27.9~41.4	9.0	12.0	0.08	3.04~3.95	
	接点(ゾーン)番号	長さ[m]	断面積[m ²]	周長[m]	体積[m ³]	表面積[m ²]	発熱量[W]
A-B間トンネル	8,9,11,12	394~395	24.6	17.6	9686~9717	6930~6952	1299~1304
	10	31.3	58.3	19.6	1822	613	103
B駅ホーム	13~19	8.8~31.2	58.3	49.0	510~1822	429~1531	2625~9375
B-C間トンネル	20,21,23,24	464~465	24.6	17.6	11408~11439	8162~8184	1530~1535
B駅中階	37~42,50,51	5.0~21.3	22.5~45.0	21.0~36.0	225~956	180~765	1500~6375

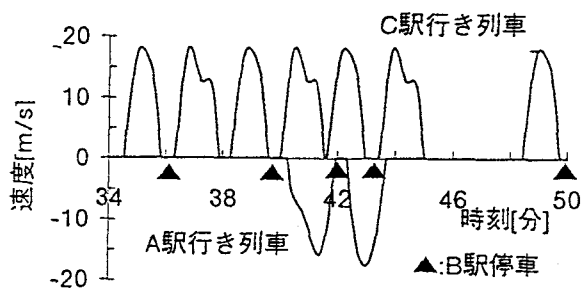


図-2.6 走行曲線

以上の条件下で、1989年11月11日の16時34分から50分の間の実測値と計算値を比較した。

(3) 実測値と計算値の比較

実測を行った図-2.4の①~⑦の7ヶ所の流量について実測値と計算値を比較した結果を図-2.7, 2.8に示す。実測結果を実線で、計算結果を破線で示している。時刻は16時34分を0sにとっている。また図中の三角印で示した点はB駅における列車の発着状況を表している。

図-2.7(a)~(c)に、各出入口の流量の変動を示す。ここで、流量は地上から駅構内に吹きこむ場合を正にとっている。いずれの出入口でも、時刻400s付近のピークで実測値と計算値の差が大きく、また全体的に実測値の方が風量が若干負側にずれているものの、ほぼ両者は一致している。

図-2.8(a)~(d)に、各トンネルの流量の変動を示す。ここで、流量はプラットホームからトンネルに吹き出す場合を正にとっている。縦流換気方式の場合、列車の走行方向に換気を行うため、列車が到着する側のトンネルでは、図-2.8に示すように常にトンネルから駅に向かう気流が生じている。列車が発車する側のトンネルでは列車通過時以外の風速は小さい。

(a), (b)に示すように列車が発車する側のトンネルでは実測値と計算値の間で良い一致が示されている。(c), (d)に示す列車が到着する側のトンネルでは変動の傾向は一致するものの、実測値に比べ、計算値が小さい。

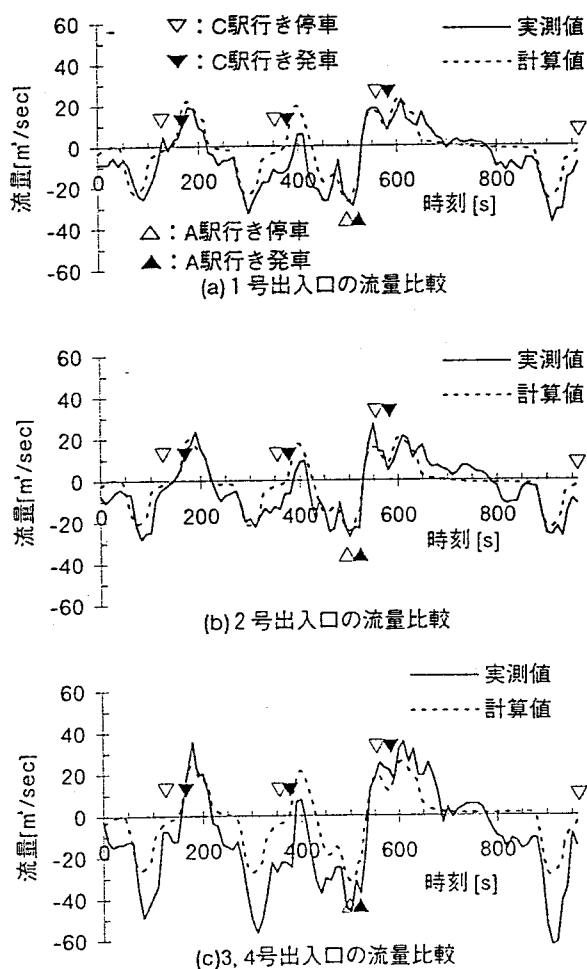


図-2.7 各出入口の流量

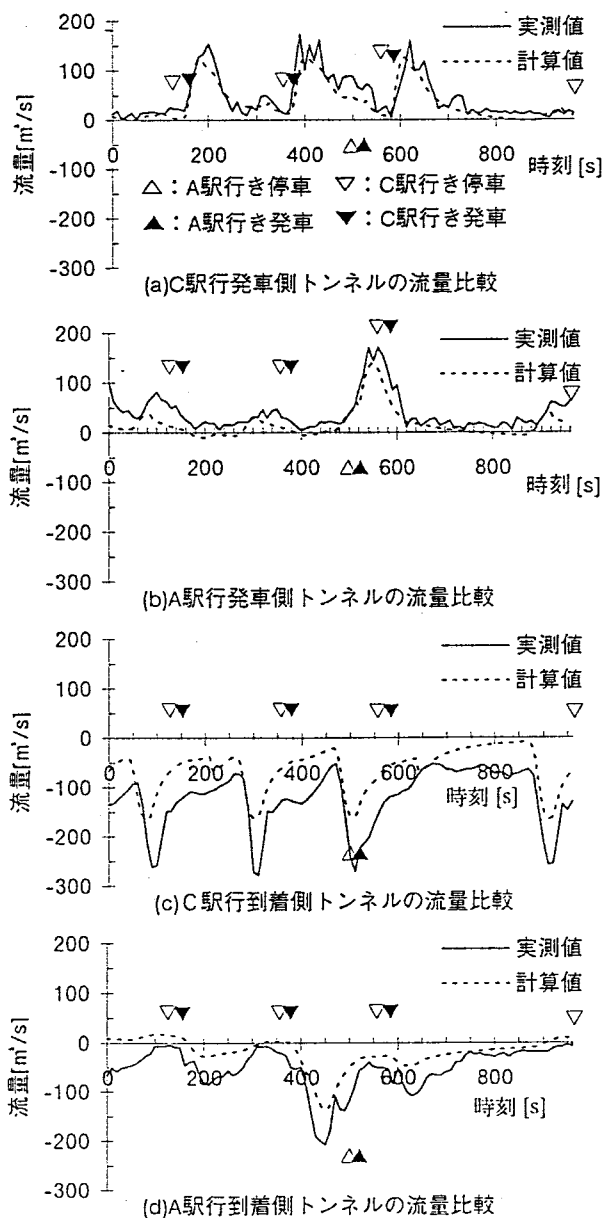


図-2.8 各トンネルの流量

以上の空気の密度差を考慮したシミュレーションとともに、空気の密度を一定としたシミュレーションも行ったが、両方の計算結果にはほとんど差がなかった。これは、実測時において構内の壁温と外気温とにあまり差がなかったことや、外気温が高く、安定した条件になっていることが原因であると考えられる。外気温が低く、不安定な条件については、後の数値実験で取り扱う。

以上、各開口別の風量変動の予測値を実測値と比較した。予測値と実測値の間に差が見られる箇所がいくつかあるが、実測値の複雑な変動を予測値は再現しており、予測精度は妥当なものであると考えられる。

(4) シミュレータによる風量収支の計算

図-2.9にシミュレータで求めたB駅各部の風量収支を示す。これは、16時34分を0sとしたときの200sの風量である。各接点における収支が合っていない所があるが、これは本研究で使用しているシミュレータでは空気の密度変化も考慮し、質量流量の収支を合わせているためである。このとき、C駅行き列車がB-C間トンネルを走行しており、全ブランチの中でトンネル内の風量が最大となっている。B駅のプラットフォームでは、列車の走行に引きずられて気流がA駅側からC駅側へ流れている。

下田ら⁴⁾が行った駅構内気温予測のシミュレーションでは、階段を通過する流量のうち、プラットフォーム部空気と混合しないものの割合を求めるために、ショートサーキット率という係数を推定する必要があったが、本シミュレーションのように適切に換気回路網を設定すれば、直接に風量の配分がわかり、そのような係数を用いる必要はなくなる。

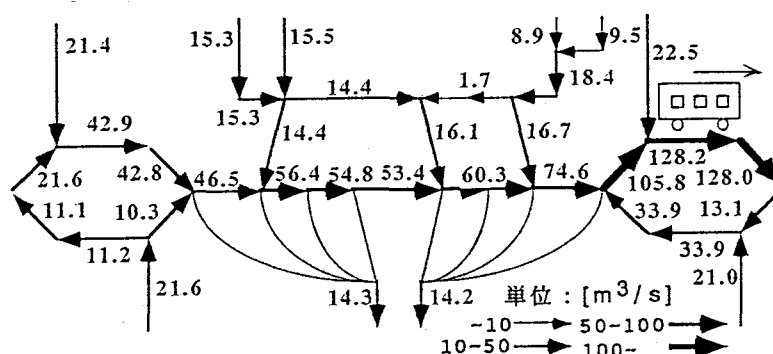


図-2.9 B駅各部の風量収支 (t=200s)

2. 2. 2 E駅 (駅給気・中間排気方式) における実測値との比較

(1) 実測の概要

E駅と隣接駅、送・排風機との位置関係は図-2.10のようにになっている。実測時には、E駅において2000m³/minの空気が供給され、E駅の左右の中間排気所からそれぞれ3400m³/min、4690m³/minの空気が排気されていた。

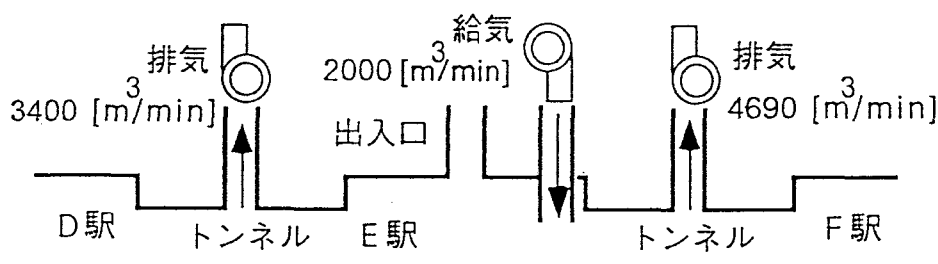


図-2.10 E駅および排風機の位置関係

E駅のプラットフォーム・コンコース部の平面図を図-2.11に示す。流量測定は1989年11月11日の21時20分から22時30分にかけて行った。流量の測定は図-2.11中に①～⑦で示す各位置においてB駅と同様の方法によって行った。

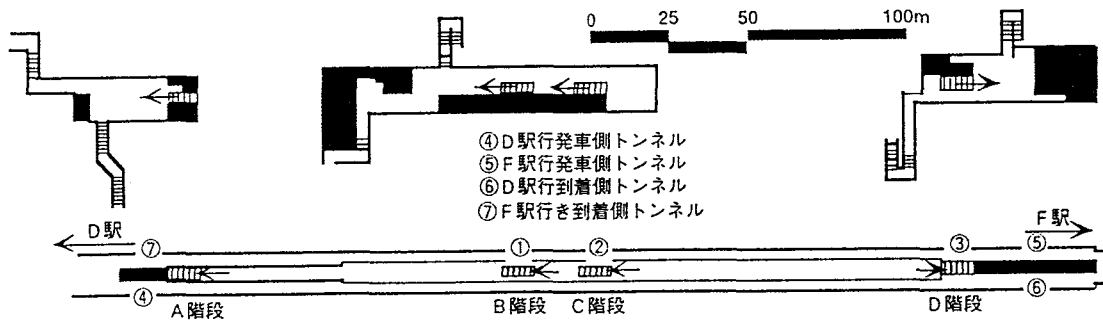


図-2.11 E駅プラットフォーム・コンコース平面図

（2） シミュレーションの概要

B駅に対して行ったシミュレーションと同様に、図-2.11に示したE駅の構造を換気回路網に置き換え、各ブランチに抵抗係数を与えた。機械換気量は図-2.10の値を与えた。B駅のシミュレーション結果から得られた知見にもとづき、密度差を考慮しなくても結果に大きな差が生じないと考え、ここでは等温条件で計算を行った。また、列車の速度は実際の列車の走行曲線に基づいて、図-2.12に示す速度を与えた。速度は列車がA駅からC駅に向かう場合を正とした。

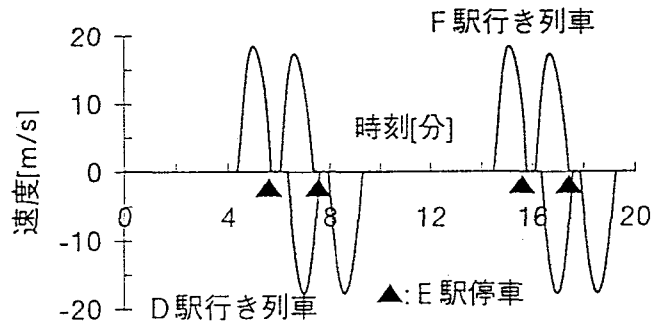
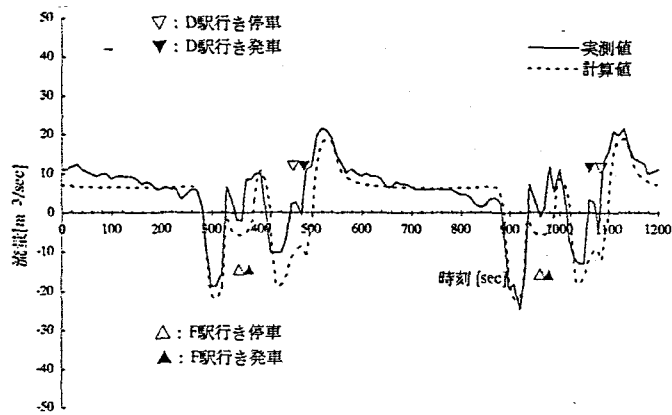


図-2.12 D～F駅間走行曲線

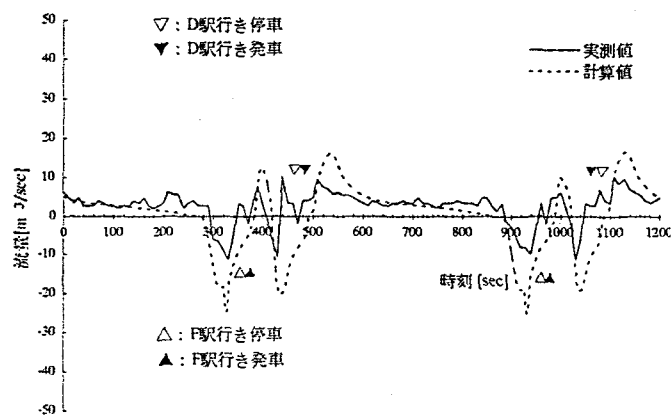
以上の条件下で、1989年11月11日の22時00分から22時20分間の実測値と計算値を比較した。

（3） 実測値と計算値の比較

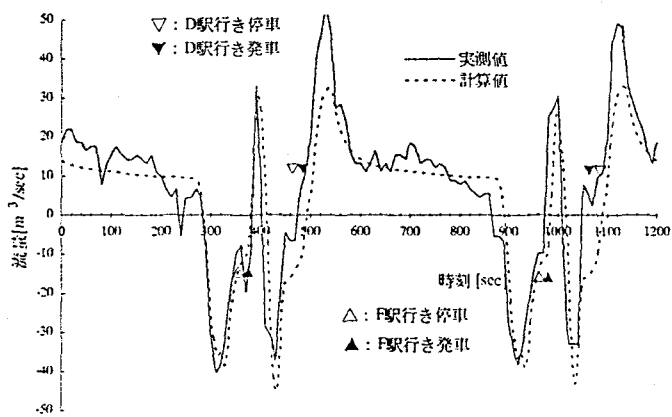
階段別の流量を図-2.13に、トンネル別の流量を図-2.14に示す。実測結果を実線で、計算結果を破線で示している。図中の時刻は16時34分を0sにとっており、三角印で示した点はE駅における列車の発着状況を表している。流量は、図-2.13ではコンコースからプラットフォームに吹きこむ場合を正に、図-2.14ではプラットフォームからトンネルに吹き出す場合を正にとっている。これらの比較からシミュレーションが実用的な精度を有することがわかる。



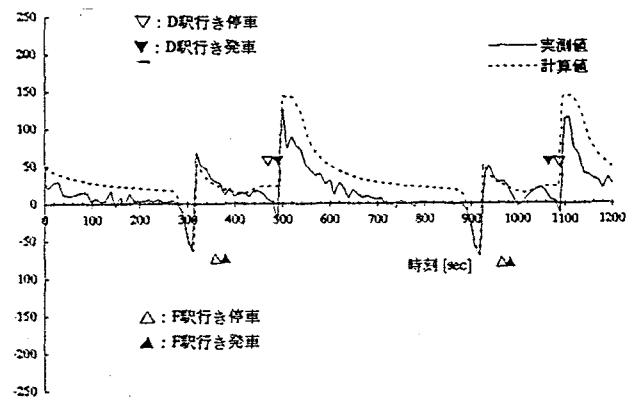
(a) B階段の流量比較



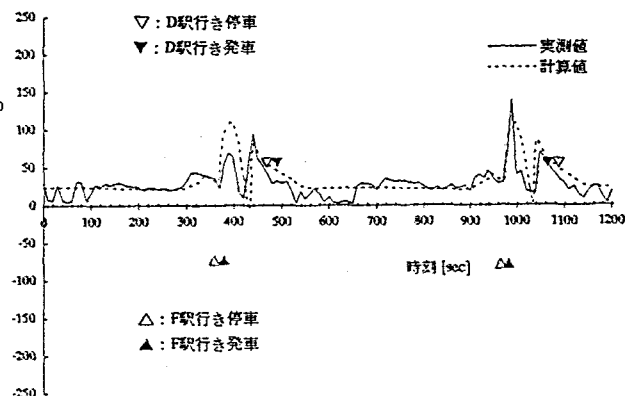
(b) C階段の流量比較



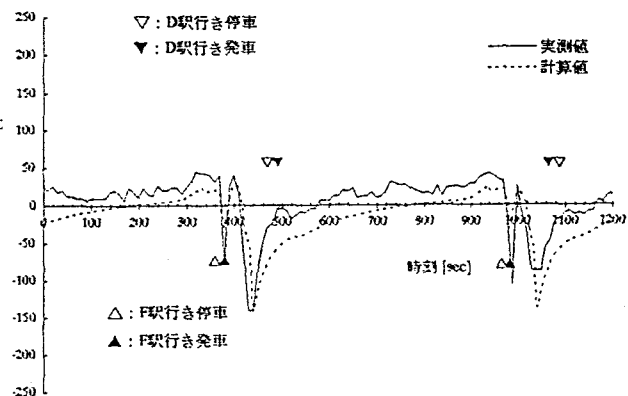
(c) D階段の流量比較



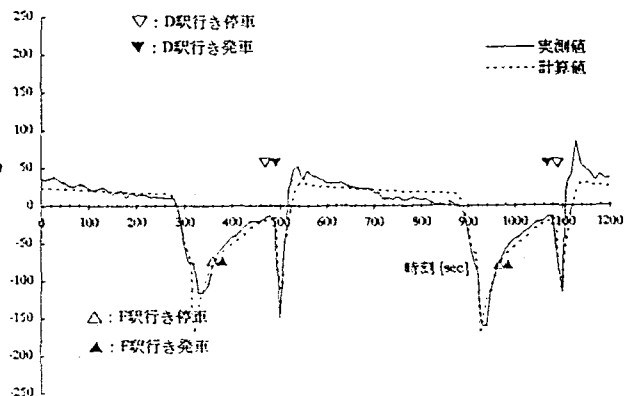
(a) D駅発車側トンネルの流量比較



(b) F駅発車側トンネルの流量比較



(c) D駅到着側トンネルの流量比較



(d) F駅到着側トンネルの流量比較

図-2.13 各階段の流量

図-2.14 各トンネルの流量

2. 2. 3 H駅（縦流換気方式）における実測値との比較

（1） 実測の概要

H駅における流量測定は1989年12月11日の21時45分から22時15分に行った。H駅と隣接駅、送・排風機との位置関係は図-2.15のようにになっている。実測時の機械換気量も図中に示す。この時期は、駅では給気せず、トンネルを通してH駅の左右にある中間排気所からそれぞれ $2560\text{ m}^3/\text{min}$ 、 $3800\text{ m}^3/\text{min}$ ずつ排気するという冬型の機械換気が行われていた。後述のシミュレーションでは実測値をもとに機械換気量を補正して用いた。

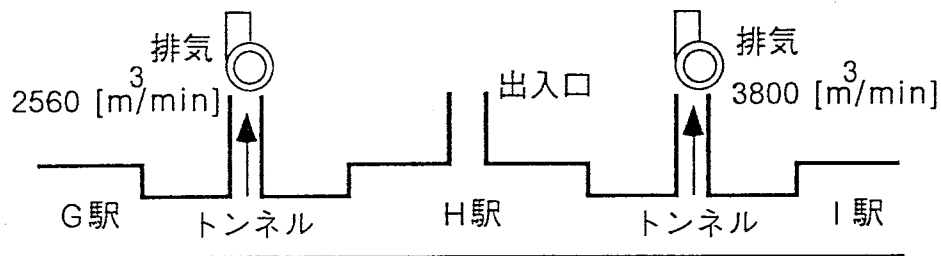


図-2.15 H駅および排風機の位置関係

H駅のプラットフォーム部・コンコース部の平面図を図-2.16に示す。流量の測定点は同図中に①～⑥で示す各位置である。6号出入口は閉鎖されていた。B駅と同様の方法で測定を行った。

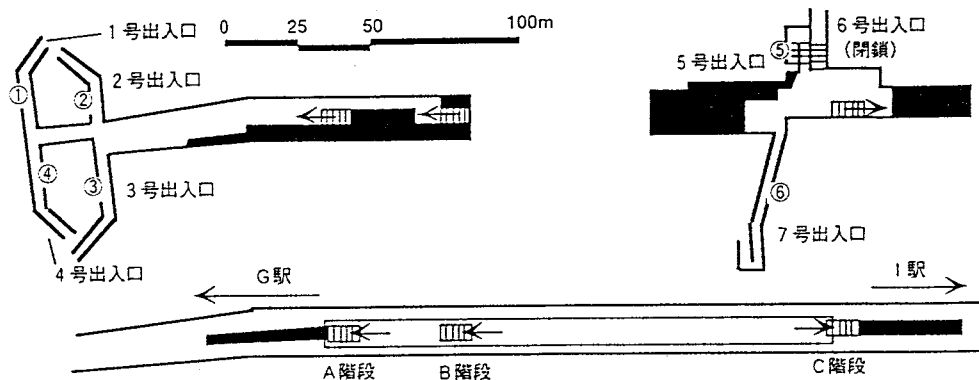


図-2.16 H駅プラットフォーム・コンコース平面図

（2） シミュレーションの概要

図-2.16に示したH駅の構造を換気回路網に置き換え、各ブランチに抵抗係数を与えた。また、機械換気量は図-2.15の値を与えた。E駅と同様にここでも等温条件でシミュレーションを行った。また、列車の速度は実際の列車の走行曲線に基づいて、図-2.17に示す速度を与えた。速度は列車がG駅からI駅に向かう場合を正とした。

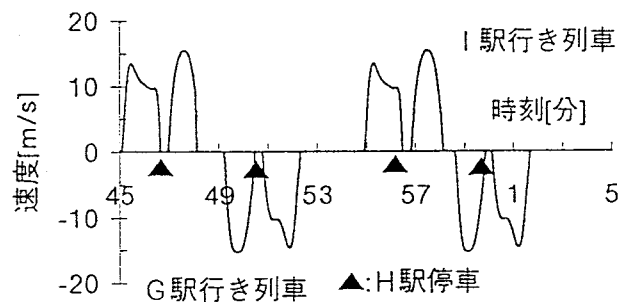


図-2.17 G～I駅間走行曲線

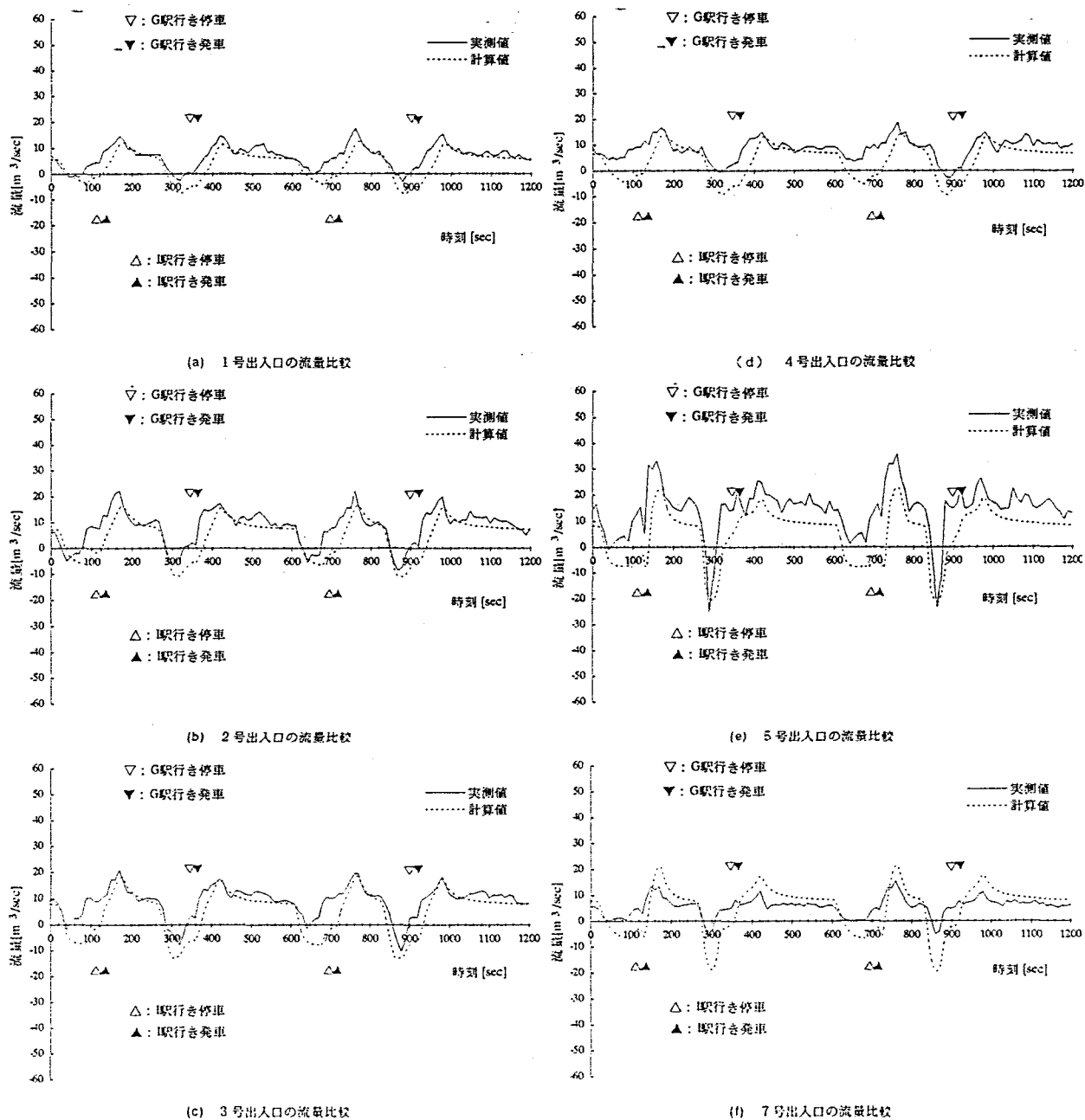


図-2.18 各出入口の流量

(3) 実測値と計算値の比較

1989年12月11日の21時45分から22時05分間の実測値と計算値を比較した。出入口別の流量を図-2.18(a)～(f)に示す。実測結果を実線で、計算結果を破線で示している。図中の時刻は16時34分を0sにとっており、三角印で示した点はH駅における列車の発着状況を表している。流量は、地上からコンコースに吹きこむ場合を正にとっている。これらの比較結果からもシミュレーションの精度が妥当であることがわかる。

2. 2. 4 実測値による予測値の精度検証のまとめ

実在の地下鉄駅3駅に対するシミュレーション結果と実測値との比較を行った。その結果、いずれの駅でも計算値は実測値とほぼ同じ傾向を示しており、本シミュレータの予測精度は妥当であると判断できる。

次節では、このシミュレータを地下鉄駅に適用し、半開放性地下空間の気流・温熱環境に作用する各種気流駆動力の影響を分散分析によって明らかにする。

2. 3 各種気流の相互比較

前章で、シミュレータの予測精度の妥当性を示したので、本章では、各種駆動力による気流が地下空間に与える影響の比較を数値実験によって行う。縦流換気方式の地下鉄系を対象とした数値実験では上記の地下鉄B駅を予測対象とし、駅給気・中間排気方式の地下鉄系を対象とした数値実験ではあらたに設定した標準的な地下鉄駅を対象とする。

2. 3. 1 縦流換気方式の場合

(1) 数値実験の概要

列車の基本運行パターンとして、本数値実験ではA～C駅間を上下線が交互に走行するものとした。なお、本数値実験では上下線がそれぞれ一本ずつ走行する500秒間を1周期と定義し、風量・気温が周期定常に達するまで数周期、計算を繰り返す。

環境条件は、表-2.3に示した値を用いる。

表-2.3 環境条件

種別	温度[°C]
外気温	18.90
B駅ホーム壁温	16.46
B駅中階壁温	16.50
A-B間トンネル壁温	15.68
B-C間トンネル壁温	15.61

表-2.4 計算条件

因子	水準1	水準2
A：機械換気	なし	あり
B：列車走行	なし	あり
C：温度差	小	大
D：地上風	なし	あり

以上の設定の下で、表-2.4に示す4因子2水準の計算条件をシミュレータに与え、計16回の全要因実験を行い、出入口・階段風量、コンコース・プラットホーム気温に及ぼす機械換気、列車走行、浮力、地上風の影響を分散分析法によって評価する。

ここで、表-2.4の各因子について説明を加える。

A 機械換気：水準2は表-2.1に示した機械換気を行う場合であり、水準1は送・排気をすべて停止する場合である。

B 列車走行：水準2は列車を走行させる場合である。このとき、列車の発熱量として500[kW]を列車が滞在するゾーンに与える。水準1は列車を走行させない場合である。このときは列車の発熱量を与えない。

C 温度差：これは地下鉄内外の気温差に起因する浮力が、地下空間に与える影響を調べるための因子である。水準1では表-2.3の環境条件をそのまま与えるため、駅構内壁温と外気温の差が小さい。水準2では外気温のみ-1.7℃に変え、駅構内壁温と外気温の差を大きくする。この温度は大阪地方HASP標準気象データから得た最も気温が低い一日の朝8時の気温である。

D 地上風：水準2では、図-2.19に示す地上風速をシミュレータに与える。この地上風速は、1994年6月27日に大阪大学構内で実測したものである。このとき、風は図-2.4で上から下へと吹くものとする。このとき、出入口2, 4の風圧係数を0.6, 出入口3では-0.6とする。出入口1では開口部に直交して風が流れるので-0.7とする。水準1では地上風速を与えない。

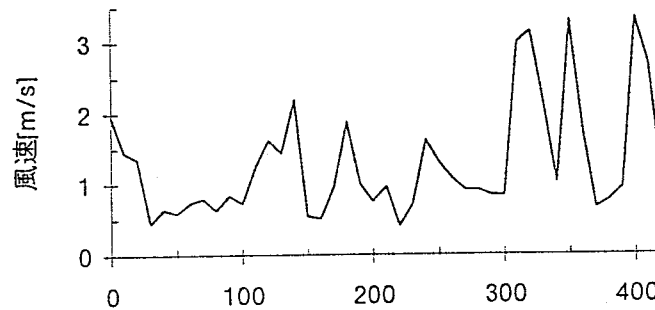


図-2.19 地上風速の変動

(2) 気流に対する各駆動力の影響

まず、出入口および階段の気流に対する各駆動力の影響の評価を行う。ここでは、出入口1とA階段を対象とした。そして、各因子の組み合わせ毎に、出入口または階段の風量の1周期分の時間平均値を求め、時間平均値を分散分析することによって、各因子が気流に与える影響の大きさを評価することにした。ただし、風量は、風向が変わると正負が逆転することがあり、そのまま平均すると、正の値と負の値とが相殺されるので、風量の絶対値を平均することにした。

1) 出入口1の風量

出入口1の風量を対象として分散分析を行った結果を表-2.5に示す。A～Dの因子は表-2.4に対応する。ここでは、3因子以上の交互作用を残差と見なした。また、この表で*, **, ***はそれぞれ危険率10%, 5%, 1%で有意であることを示す。

表-2.5 出入口1の風量の分散分析結果

因子	処理平均 [m ³ /s]		処理平均 の差	分散比	
	水準1	水準2			
A	8.05	7.97	-0.08	0.36	
B	4.95	11.07	6.13	1888.65	***
AB				0.20	
C	7.35	8.68	1.33	89.05	***
AC				0.20	
BC				69.80	***
D	7.58	8.44	0.86	37.45	***
AD				0.21	
BD				16.07	**
CD				6.89	**

ここで分散比は各要因の影響の相対的な大きさを示したものであるため、物理的な意味はあまり無い。本論文では、水準間の処理平均の差を各要因の影響の大きさとみなして議論を進める。

出入口1において影響が最も大きい主効果は、B:列車走行であり、処理平均の差は $7.43\text{m}^3/\text{s}$ である。残りは、D:地上風、C:温度差、A:機械換気の順で影響が小さくなる。他の出入口でも同様の結果が得られている。

地上風および温度差の影響は列車非走行時により明確に現れる。図-2.20(a), (b)は、機械換気を行う条件下で、出入口1における風量におよぼす地上風の影響を示したものである。ここで、正は駅への流入、負は駅からの流出である。

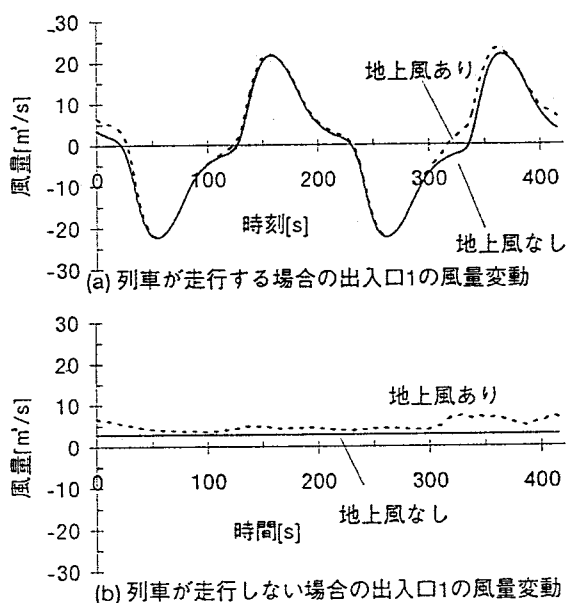


図-2.20 出入口1の風量変動

列車走行時(a)には、地上風の影響は時刻100sや400s付近の低風量時にのみ明確に現れる。

列車非走行時(b)には、地上風が風量に与える影響が明らかである。

2) A階段の風量

A階段の風量を対象として分散分析を行った結果を表-2.6(a)に示す。ここでも処理平均の差が最も大きい主効果は列車走行であり、その処理平均の差は $8.58\text{m}^3/\text{s}$ である。C:温度差も比較的大きい影響を示しているが、D:地上風の影響は出入口1の場合よりも小さくなっている。

列車走行と温度差の交互作用も比較的大きな分散比を持つので、この組み合わせについて処理平均を示したものを表-2.6(b)に示す。列車非走行時(B1)には、温度差の影響が明確である。他の階段についても同様の結果が得られている。

表-2.6 A階段の風量の分散分析結果

(a) 各因子の影響					
因子	処理平均 [m ³ /s]		処理平均 の差	分散比	
	水準1	水準2			
A	10.47	10.39	-0.07	0.37	
B	6.19	14.67	8.47	5116.87	***
AB				0.16	
C	8.43	12.43	4.00	1137.67	***
AC				0.46	
BC				552.88	***
D	10.32	10.54	0.23	3.61	
AD				0.40	
BD				4.64	*
CD				1.55	

(b) 列車風と温度差の交互作用

	B1	B2
C1	2.80	14.06
C2	9.58	15.27
C2-C1	6.78	1.21

単位[m³/s]

(3) 気温に対する各駆動力の影響

ここではコンコースおよびプラットホームの気温に対する各駆動力の影響の評価を行う。本数値実験では、コンコースおよびプラットホームを複数のゾーンに分割して計算しているため、コンコースおよびプラットホームの代表気温として各ゾーンの気温の空間平均値、すなわち各ゾーンの体積の重みつき平均を用いた。そして、気流の場合と同様に、各因子の組み合わせ毎に、コンコースまたはプラットホームの気温の空間平均値の時間平均を求め、これを分散分析することによって、各因子が気流に与える影響の大きさを評価することにした。

1) コンコースの気温

コンコースの気温の平均値に対する分散分析結果を表-2.7に示す。C: 温度差がコンコース気温に影響するのは当然である。つぎに影響の大きい主効果はB: 列車走行である。ここでは機械換気の影響も見られる。

表-2.7 コンコース気温の分散分析結果

(a) 各因子の影響					
因子	処理平均 [°C]		処理平均 の差	分散比	
	水準1	水準2			
A	10.13	10.16	0.03	0.52	
B	10.36	9.92	-0.44	112.37	***
AB				0.43	
C	11.28	9.01	-2.27	2963.71	***
AC				0.43	
BC				0.92	
D	10.21	10.07	-0.14	10.85	**
AD				0.43	
BD				15.62	**
CD				1.43	

(b) 列車風と地上風の交互作用

	B1	B2
D1	10.52	9.91
D2	10.21	9.94
D2-D1	-0.30	0.03

単位[°C]

主効果としての地上風の影響はほとんど見られないが、他の気流駆動力との組み合わせによって影響が明確になる場合がある。図-2.21(a), (b)は、機械換気あり・温度差大(A2, C2)の条件下で、コンコース気温におよぼす地上風と列車走行の影響を示したものである。

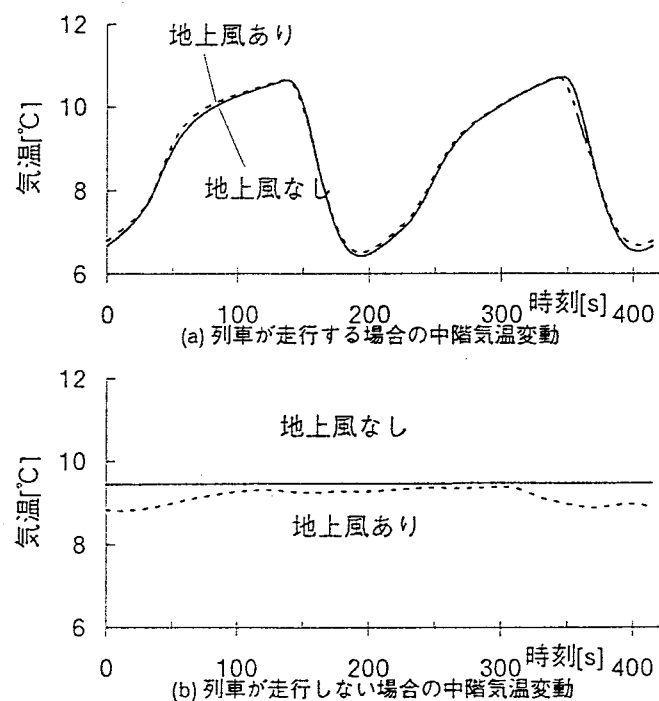


図-2.21 コンコースの気温の変動

列車走行時(a)は、地上風の有無によるコンコース気温の差はあまり見られないが、列車が走行しない場合(b)は、地上風の有無によるコンコース温度の差は明確に現れる。

2) プラットホームの気温

プラットホームの気温の平均値に対する分散分析結果を表-2.8に示す。温度差の次に影響の大きい主効果はB：列車走行であり、その次がD：地上風である。しかし、いずれの主効果もコンコース気温に対するほどにはプラットホーム気温に影響を与えていない。プラットホームは地上の影響を直接受けないためであると考えられる。

表-2.8 ホーム気温の分散分析結果

因子	処理平均 [°C]		処理平均 の差	分散比	
	水準1	水準2			
A	10.50	10.52	0.02	1.29	
B	10.60	10.43	-0.17	139.55	**
AB				0.93	
C	11.10	9.92	-1.18	6780.10	***
AC				0.93	
BC				921.97	***
D	10.53	10.50	-0.03	4.79	*
AD				0.93	
BD				1.72	
CD				2.76	

(4) 考察

1) 気流駆動力の比較

機械換気、列車走行、温度差による浮力、地上風の四者の中で出入口・階段風量に最も大きな影響を与える気流駆動力は列車走行であり、列車走行および温度差による浮力は列車走行の有無によって影響力が左右されることがわかった。また、機械換気の影響は本数値実験の範囲では最も小さかった。

コンコース・プラットホーム気温に関しても同様のことが言え、地上気温がコンコース・プラットホーム気温に影響を与えるのは当然として、2番目に気温に影響を与えるのは列車走行であり、地上風の影響力は列車走行の有無に依存していることがわかった。風量は駆動力の平方根に比例するので、列車走行のような大きな気流駆動力の有無によってこのような違いが生じる。

2) 浮力の効果

今回行った数値実験では、駅の構造を固定し、浮力の効果を外気温と駅構内壁温との差を変えることで調べたため、浮力が風量に与える影響は列車走行に比べて小さかった。しかし、浮力は温度差だけでなく高さの影響も受けるため、地下鉄駅が大深度にある場合や隣接駅との間に極端な高低差がある場合には、浮力の効果はより大きくなる。例えば、A～C駅のコンコース・プラットホーム・トンネルを10m深くし、出入口1の風量の分散分析を行うと、表-2.5に示した結果に比べて、主効果B：列車風の処理平均の差は抵抗の増加によって $7.43\text{m}^3/\text{s}$ から $6.06\text{m}^3/\text{s}$ に減少するのに対し、主効果C：温度差の処理平均の差は $4.10\text{m}^3/\text{s}$ から $6.17\text{m}^3/\text{s}$ に増加する。

また、駅自体がそれほど深い場所になくても、地下鉄駅が高層建築物に接続している場合には、煙突効果による気流が発生する可能性がある。

3) 機械換気の効果

機械換気が出入口および階段の風量に対して影響が小さかったのは、本数値実験において設定した縦流換気方式が、送風機がトンネルに流した空気をプラットホームで大部分排気する方式であったため、機械換気の運転時と停止時とで階段および出入口を通過する風量があまり変化しないことによる。これに対し、駅給気・中間排気方式の地下鉄では運転スケジュールによって出入口風量が変わるため、機械換気の影響が強く現れるものと考えられる。

また、機械換気が温熱環境に対して影響がなかった理由は、機械換気によって冷気を地下鉄系に給気しても、本実験で設定した機械換気方式では、トンネル内を通過させてプラットホームに給気するので、1km近いトンネル内で壁体により空気が暖められ、プラットホーム気温とあまり変わらない温度の空気を供給することになったためと考えられる。また、本実験では地盤温度がほとんど変化しない短時間を対象としていたが、数ヶ月あるいは数年の長期間を想定すると、機械換気の有無により、トンネル周辺の地盤温度に差が生じ、トンネルを通過してプラットホームに流入する空気の温度に影響する可能性がある。

4) 地上風および浮力の影響

地下空間の環境調整に関する研究分野では、庄司⁸⁾が地下鉄駅コンコースにおいて地上風による換気が起こっている例を示した他は、地上風や浮力の影響を検討した例はあまりない。しかし、数値実験の結果によれば、列車非走行時や列車風が弱い場合に地上風や浮力の影響が明確に現れることが分かった。地上との空気の交換が問題になる半開放性地下空間では、地上風や浮力の影響をも考慮する必要があることが示された。

2. 3. 2 駅給気・中間排気方式の場合

(1) 数値実験の設定

本実験では、標準的な地下鉄駅として図-2.22に示す構造のK駅を設定した。この構造は複数の実在の地下鉄駅を参考にして決定した。また、この駅は同じ構造を持つ2つの駅J、Lと複線トンネルで接続しており、中間排気を行なっている。これら3つの駅で構成される地下鉄系の全体像を図-2.23に示す。また、両端のトンネルは大気開放とした。

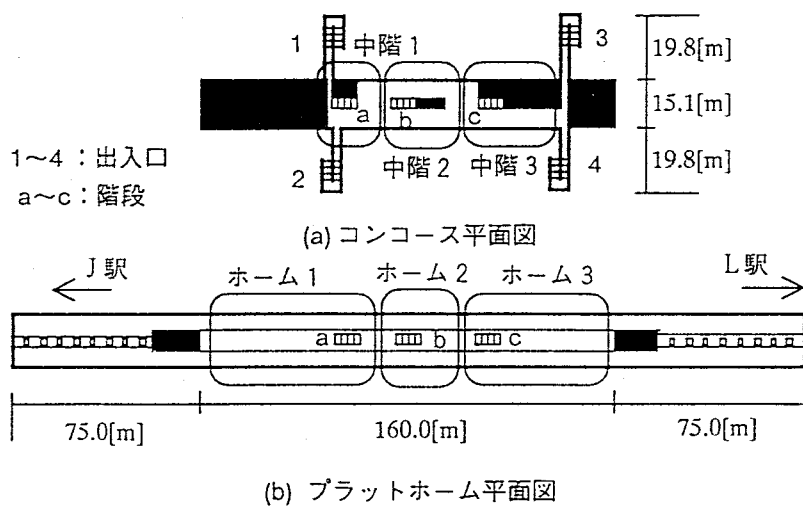


図-2.22 地下鉄K駅平面図

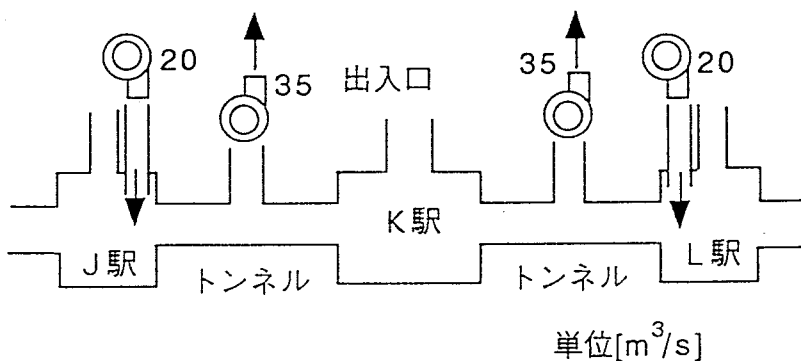


図-2.23 地下鉄系模式図

本数値実験では縦流換気方式の駅の場合と同様に列車の基本運行パターンとして、本数値実験ではJ~L駅間を上下線が交互に走行するものとした。環境条件は、表-2.9に示した値を用いる。

表-2.9 K駅環境条件

種別	温度[℃]
外気温	10.00
K駅ホーム壁温	18.00
K駅中階壁温	18.00
J-K間トンネル壁温	18.00
K-L間トンネル壁温	18.00

表-2.10 計算条件

因子	水準1	水準2
A: 機械換気	なし	あり
B: 列車走行	なし	あり
C: 内部発熱	なし	あり
D: 地上風	なし	あり

以上の設定の下で、表-2.10に示す4因子2水準の計算条件をシミュレータに与え、計16回の全要因実験を行い、出入口・階段風量、コンコース・プラットホーム気温に及ぼす機械換気、列車走行、浮力、地上風の影響を分散分析法によって評価する。

ここで、表-2.10の各因子について説明を加える。

A 機械換気の有無：機械換気の無いときは全ての換気機器を停止させた。稼働時は図2.23に示すように、対象駅の給気を停止し、両側の中間排気所から排気することによって対象駅出入口において常に外気が入るように設定した。この機械換気の方法は冬期においてよく行われる方法である。

B 列車走行の有無：水準2は列車を走行させる場合である。このとき、列車の発熱量として500[kW]を列車が滞在するゾーンに与える。水準1は列車を走行させない場合である。このときは列車の発熱量を与えない。

C 内部発熱の有無：内部発熱の有無は外気と駅構内の温度差を生み、この温度差が浮力（密度流）を発生させる。表-2.9示したように外気温を10℃に設定しているの、内部発熱が無いという場合、壁温を10℃、駅の単位天井面積当たりの照明発熱量を0W/m²、列車の発熱量を0Wに設定し、駅構内と外気の温度差を無くした。一方、内部発熱がある場合は、壁温を18℃、駅の単位天井面積当たりの照明発熱量を20W/m²、列車の発熱量を500kWに設定した。これらの値は実在の地下鉄駅の照明発熱量や列車の発熱量から決定した。

D 地上風の有無：地上風の吹き込みは風速、風向といった要素を考える必要があるが、ここでは出入口1、2から出入口3、4に抜ける風を想定した。地上風は出入口の正面から入るものとし、風圧係数0.6を与えることにした。また、風速は地上の通常風を想定し1.0m/sとした。本来、自然の風の吹き方には間欠性が有るが、ここではそれを考えず、常時1.0m/sの風が吹くものとした。

（2） 気流に対する各駆動力の影響

ここでは、全出入口と全階段を対象とした。縦流換気方式の場合と異なり、一部の出入口や階段で異なる結果が得られているからである。各因子の組み合わせ毎に、出入口または階段の風量の1周期分の時間平均値あるいは最大値・最少値を求め、これらの値を分散分析することによって、各因子が気流に与える影響の大きさを評価することにした。

1) 出入口の風量

出入口の風量を対象として分散分析を行った結果をまとめて表-2.11に示す。以下の表では有意性の判定結果のみ示す。また表中の*、**、***はそれぞれ危険率10%、5%、1%で有意であることを示す。また、A～Dの因子は表-2.10に対応する。平均値・最大値・最少値の三者の分散分析結果の間にはあまり違いがない。

どの出入口に対しても影響を与えるのはB：列車走行の有無、A：機械換気の有無の2つの因子であるが、出入口1ではBC、C、Dが5%以上の有意要因となっている。

表-2.11 出入口流量の分散分析結果

	対象	出入口1の風量			出入口2の風量			出入口3の風量			出入口4の風量		
		最大	最小	平均	最大	最小	平均	最大	最小	平均	最大	最小	平均
要因	A	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***
	B	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***
	AB												
	C	*	**	**									
	AC												
	BC	***	***	***									
	D	**	*	**	*		*			*			*
	AD												
	BD												
	CD												

2) 階段の風量

階段の風量を対象として分散分析を行った結果を表-2.12に示す。出入口の場合と同様に、どの階段に対しても影響を与えるのはB：列車走行の有無、A：機械換気の有無の2つの因子であるが、これらに加え、A階段ではC：内部発熱の有無と交互作用BCが、B階段ではC、ABが5%以上の有意要因となっている。

表-2.12 階段流量の分散分析結果

	対象	A階段の風量			B階段の風量			C階段の風量		
		最大	最小	平均	最大	最小	平均	最大	最小	平均
要因	A	***	***	***	***	***	***	***	***	***
	B	***	***	***	***	***	***	***	***	***
	AB				*	***	**			
	C	***	***	***	***	**	***			
	AC				*	*	*			
	BC	***	***	***						
	D									
	AD									
	BD									
	CD									

(3) 気温に対する各駆動力の影響

ここではコンコースおよびプラットホームの気温の時間平均値、最大値・最小値に対する各駆動力の影響の評価を行う。

ただし、内部発熱がないときは気温の変化が起り得ないので、内部発熱量を与えた8つの数値実験の結果を用いて、A,B,Dの要因について分散分析を行った。

1) コンコースの気温

表-2.13にコンコース気温に対する各要因の影響を示す。コンコースの気温に対する各因子の影響の大きさは場所によって異なる。気温の最大値に対する影響を見た場合、どの場所に対しても影響を与えるのはB：列車走行の有無である。コンコース2、コンコース3に対してはA：機械換気の有

無が5%以上の有意要因となっている。いずれの場所に対してもD：地上風の吹き込みの有無は有意要因となっていないが、これは風速が常識的な1.0m/sであったことが原因となっているとも考えられる。

表-2.13 コンコース気温の分散分析結果

	対象	中階1の気温			中階2の気温			中階3の気温		
		最大	最小	平均	最大	最小	平均	最大	最小	平均
要因	A				*	**	**	*	**	**
	B	***			***	**		**	**	
	D									

2) プラットホームの気温

表-2.14にプラットホームの気温に対する各要因の影響を示す。コンコースの場合と同様に気温に与える各要因の影響の大きさは場所によって異なる。気温の最大値に対する影響を見た場合、どの場所に対しても影響を与えるのはB：列車走行の有無である。プラットホーム3に対してはA：機械換気の有無が5%以上の有意要因となっている。

表-2.14 プラットホーム気温の分散分析結果

	対象	ホーム1の気温			ホーム2の気温			ホーム3の気温		
		最大	最小	平均	最大	最小	平均	最大	最小	平均
要因	A							**	***	***
	B	***		**	***	**	**	***	**	***
	D									

(4) 考察

1) 出入口および階段の通過流量について

風量に対しては列車風、機械換気が支配的な要因となっている。縦流換気方式の場合との大きな違いは機械換気の影響が明確に見られることである。すでに縦流換気方式の場合における考察で述べたように、縦流換気方式では、送風機がトンネルに流した空気をプラットホームで大部分排気する方式であったため、機械換気の運転時と停止時とで階段および出入口を通過する風量があまり変化しないのに対し、駅給気・中間排気方式の冬期に行われる換気方式では、トンネルで排気した量の空気が駅の出入口で誘引されるため、機械換気の有無によって出入口および階段を通過する流量が大きく変化する。

また、場所によっては浮力（密度流）や列車風と浮力の交互作用、地上風の吹き込みが有意な要因となることもある。

2) プラットホームおよびコンコースの気温について

気温に対しては列車風、機械換気、地上風の吹き込みのうち、列車風が最も支配的な要因であり、

機械換気がこれに次いでいる。本実験の範囲では、地上風の吹き込みは有意ではなかった。

2. 4 まとめ

本章でははじめに換気回路網に基づく気流・温熱シミュレータの理論について述べた。つぎに、このシミュレータ予測精度を実在の3つの駅における実測値によって検証した。最後に数値実験を行い、各種気流駆動力が地下鉄駅の気流・温熱環境に与える影響について検討した。

各種気流駆動力が地下鉄駅の気流・温熱環境に与える影響をまとめると次のようになる。縦流換気方式の場合と駅給気・中間排気方式の場合とで各要因（気流駆動力）の水準の定め方に違いがあるものの、両者の数値実験の結果は、①気流駆動力の中では列車風の影響が卓越していること、②列車風の存在しない場合は地上風の吹き込みや浮力の影響が明確に現れること、の2点にまとめられる。駅給気・中間排気方式の地下鉄の場合には上記の①に機械換気の影響が加わる。

参考文献

- 1) 森井宜治・澤洋一郎・榎本隆二: 地下鉄の風, なかれ, 12-4 (1993-12), pp. 423 ~ 437
- 2) W.D. Kennedy et al. : Subway Environmental Design Handbook (1976), U. S. Dep. of Transportation
- 3) 松平秀雄・阪倉康男・田中康雄・中田勉・濱田彰: トンネル内列車風の動特性 第1報・第2報, 空気調和・衛生工学会論文集, 1 (1976-6), pp. 67 ~ 83
- 4) 下田吉之・花井裕・水野稔: 地下空間における地盤の吸熱効果に関する研究 第2報—地下鉄構内の気温形成に及ぼす機械換気と地盤吸放熱の影響に関する検討, 空気調和・衛生工学会論文集, 53 (1993-10), pp. 1 ~ 12
- 5) 森川敬信・鮎川恭三・辻裕: 流れ学(1981), p. 50, 朝倉書店
- 6) D. S. Miller : Internal Flow Systems(1978), BHRA Fluid Engineering
- 7) A. Gardel : Les pertes de charge dans les écoulements au travers de branchemententé, Bulletin Technique de la Suisse Romande, No. 9-10(1957)
- 9) 庄司光: 大阪市営地下鉄道の空気性状とその性質に関する研究, 国民衛生, 18-9, 10 (1942), pp. 441 ~ 589
- 10) 福代和宏・水野稔・下田吉之: 地下鉄構内の環境予測に関する研究(2)—換気量計算プログラムの開発—, 空気調和衛生工学会学術講演会講演論文集(1994-10), pp. 341 ~ 344
- 11) 福代和宏・水野稔・下田吉之: 地下鉄構内の環境予測に関する研究(4)—地下鉄構内の各種気流の相互比較—, 第29回空気調和・冷凍連合講演会講演論文集(1995-4), pp. 97 ~ 100

第3章 ミクロ・マクロ連成手法による気流・温熱環境予測

3.1 はじめに

地下鉄系では、明確な境界を持たない複数の空間が相互に連結しあっている。このため、地下鉄駅構内における気流・空気質・温熱環境解析を行う際は、対象とする駅構内だけではなく、その空間に影響を及ぼす地上、トンネル、隣接駅などの周辺空間についても解析を行う必要がある。

SES¹やSEAS²等の先例が示すように、地下鉄系を対象とした従来の環境予測では、地下鉄系全体に対して、換気回路網あるいはゾーンモデルと呼ばれるマクロモデルが適用されていた。前章の環境予測モデルもマクロモデルである。マクロモデルは、対象空間を $10^1 \sim 10^2$ mスケールのゾーンに分割し、各ゾーンにおいて一次元流と完全混合を仮定するものである。このように対象空間を簡略に取り扱うことによって、大空間の環境を小さな計算負荷で予測することができるのがマクロモデルの特色である。

しかし、マクロモデルによる予測が十分な妥当性を持つのは、トンネルや出入口通路のように、管路とみなして適当な圧力損失係数 ζ を与えられる一次元性の強い空間に対して適用する場合に限られる。駅のコンコースやプラットホームのように三次元的な広がりを持ち、構造が複雑である空間に対してこの方法を適用する場合には適切な圧力損失係数をあらかじめ与えることができない。また、マクロモデルでは、気流・温度などの三次元分布を得られないため、小さなスケールの環境評価ができないという問題もある。

地下鉄系に対して、CFD(数値流体力学)のようなミクロモデルを適用すれば、コンコースやプラットホームに圧力損失係数を与える必要がなくなる。また、ヒューマンスケールの気流や気温・湿度の分布が得られるため、地下鉄利用者の熱的快適性や局所的な空気質まで考慮した、より高度な環境設計を行うことができる。

しかし、地下鉄系は複雑かつ大規模な空間であり、この空間全体に対してCFDを適用することは、今後計算機が高速・大容量化しても困難である。

そこで、マクロおよびミクロモデル双方の欠点を補う実用的な解析手法として提案されるのが、駅のコンコースやプラットホームのような三次元性の強い空間に対してミクロモデルを、トンネルや出入口通路のような一次元性の強い空間に対してマクロモデルを適用し、両者を連成させるという手法である。

この連成に関する既往の研究として、邦文のものでは加藤³⁾、奥山⁴⁾などがある。ミクロモデル、マクロモデルという呼称はこれらの研究にならったものである。前者は基礎方程式からマクロスケールの方程式を導出した文献であり、多重格子計算法の一種として見る事ができる。後者ではミクロモデルとマクロモデルを圧力に関するベクトル・マトリクス形式の全体方程式に統合するアイデアが述べられている。しかし、広く用いられている差分法によるミクロモデルをこの全体方程式に組み込んだ場合、差分法で用いられているアルゴリズムを完全に放棄する必要がある。また、全体方程式として巨大なマトリクスが形成されるので、これを解くには同文献に述べられているように、マトリクスの濃縮などの解法上の工夫が必要である。

いずれにせよ、これらの研究ではミクロモデルとマクロモデルを共通の枠組みに統一するアイデアが示されているものの、具体的な建築物に対する解析にまでは踏みこんでいない。

本報では、新しい計算モデルを提案することよりも、実際に地下鉄構内の気流を解析することを主眼として、既に確立しているマイクロモデルとマクロモデルを連成する手法を提示する。そして、この手法を標準的な地下鉄駅に適用して気流予測を行い、予測結果や利便性について検討を行う。

3. 2 解析モデル

本報では、マクロモデルとして前章で示した換気回路網モデルを用い、マイクロモデルとして大西らが開発したCFDコード、SCIENCE⁵⁾を用いる。SCIENCEはFDMの一つであるSIMPLEを採用している。

換気回路網モデルにはキルヒホッフの第二法則（閉回路内の圧力降下の代数和はゼロである）にもとづく網目法と第一法則（接点に入る流量は出る流量に等しい）にもとづく接点法の二つがある。SES¹⁾のモデルは網目法であるが、本論文の換気回路網モデルは接点法である。接点法は任意の接点で圧力を設定できるため、CFDコードとの連成が可能である。

マクロモデルとマイクロモデルを連成する手法としては、one-way modelとtwo-way modelを取り上げる。one-way modelはマクロモデルの計算結果をマイクロモデルに境界条件として一方的に与える手法である。two-way modelは一方のモデルの計算結果を他方のモデルに境界条件として与えて計算を行い、両者の接合部における流量が収束するまで計算を反復する手法である。それぞれのアルゴリズムを以下に示す。

3. 2. 1 one-way modelのアルゴリズム

ここでは、図-3.1 (a)に示すような、駅、トンネルa・b、出入口cで構成される単純化した地下鉄系を例としてアルゴリズムを説明する。マクロモデルは地下鉄系全体を計算対象とするため、同図(b)のように換気回路網が設定される。マイクロモデルは駅構内だけを対象とするため、同図(c)のように格子を設定する。ここで、マイクロモデルの計算領域がトンネルや出入口につながる部分を接続境界と呼ぶことにする。

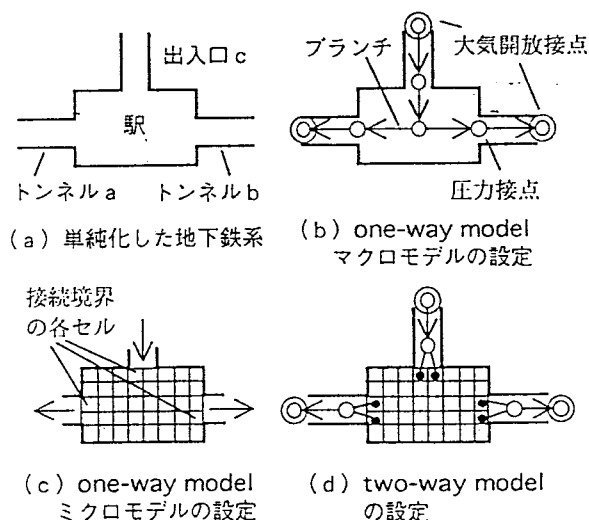


図-3.1 アルゴリズムの模式図

計算手順は次の通りである。まず、トンネル、出入口通路、コンコース・プラットホーム内の各部分の圧力損失係数 ζ を図(b)の全系に対するマクロモデルに与えて計算を行う。その結果のうち、トンネル、出入口通路の流速をマイクロモデルの接続境界に与え、コンコース・プラットホームを対象とする計算を行う。このとき、接続境界では一様流速を与える。

one-way modelでは、マクロモデルで予測される駅構内の流量配分とマイクロモデルで予測される流量配分が正しく対応している必要がある。

例えば、駅構内で発生する圧力損失が、マクロモデルで予測した値と著しく異なる場合、マイクロモデルの計算結果を用いてマクロモデルの計算をやり直さなくてはならない。これがone-way modelの限界である。

3. 2. 2 two-way modelのアルゴリズム

図-3.1(d)に示すように、two-way modelではマクロモデルの計算領域にマイクロモデルの計算領域が含まれない。マイクロモデルはコンコースとプラットホームを対象領域とする。マクロモデルは出入口通路やトンネルを対象領域とする。マイクロモデル側の接続境界の各セルは直接マクロモデルの圧力接点に接続される。

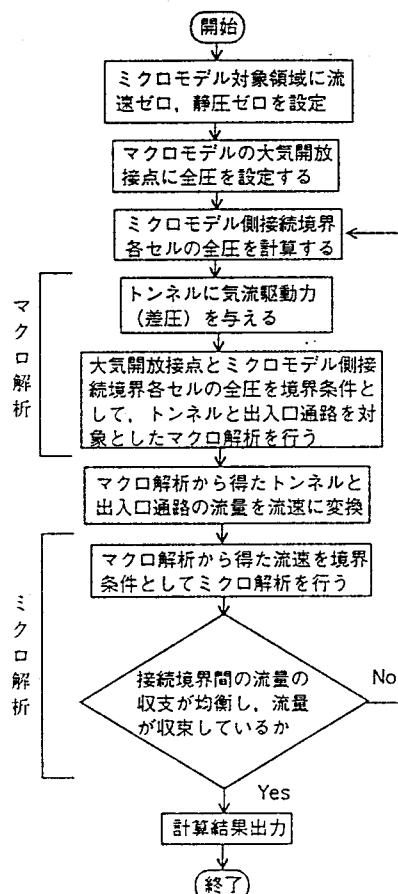


図-3.2 two-way modelのフローチャート

フローチャートを図-3.2に示す。計算が開始されると、初期値としてマイクロモデルの対象領域全体の流速と静圧にゼロが与えられる。また、マクロモデルの大気開放接点には境界条件として一定の

値の全圧が与えられる。また、トンネルの換気口に相当する場所に気流駆動力として差圧が設定される。このあと、次の1)～3) (これらをまとめてメタステップと呼ぶ) が繰り返される。

- 1) 大気開放点およびマイクロモデル側接続境界各セルの全圧およびトンネル内の差圧を境界条件として、トンネルと出入口通路に対するマクロ解析を行い、流量を求める。
- 2) マクロ解析から得たトンネル・出入口通路流量を流速に変換して、マイクロモデルに接続部分の境界条件として与える。このとき、マイクロモデルの接続境界では一様流速を与える。
- 3) マイクロモデルを用いて限られた回数、計算を反復する。接続境界間の流量収支、すなわちマイクロモデル対象領域に出入する流量の収支が合い、しかも前回のメタステップのマイクロ解析で得られた流量と一致する場合、計算を終了する。そうでない場合、マイクロ解析結果からマイクロモデル側接続境界各セルの全圧を計算し、ふたたび1)にもどる。

2) で接続境界における一様流速を仮定したが、地下鉄駅を対象とする場合、プラットフォームとコンコースのスケールが接続境界の開口面積および流速に対して十分に大きいため、ほかの流速分布を適用しても計算結果に差が無いことを数値実験により確認している。

3) で接続境界間の流量収支が、流入超過となる場合、マイクロモデル各メッシュの静圧は上昇する。これに伴い接続境界各セルの全圧が上昇すると、マクロ解析においてマイクロ解析対象空間への流入は抑制され、次のメタステップにおいてマイクロモデル内の流入超過は解消される。マイクロモデル内で流出超過となる場合は、これと逆のことが起こり、次のメタステップにおいて流出超過が解消される。

マクロ解析では、境界条件として前回のメタステップにおけるマイクロモデルの境界全圧を用いるので、最終的に流量収支が合い、流量が収束した場合には両モデルの境界全圧は一致する。

マイクロ解析対象空間内の流量の不均衡がある小さな範囲に収まった時、全体の計算はほぼ収束したと見なされ、メタループは終了する。本報では収束条件となるこの不均衡の範囲を流入流量の合計の1%以内とする。

この計算方法では、マクロモデルで扱いにくい部分の解析を、マイクロモデルが担当するので、one-way modelのようにコンコース・プラットフォーム各部分の圧力損失係数をあらかじめ用意する必要がない。

原理的にはtwo-way modelの方がより正確なので、以下で行う気流予測では、はじめにtwo-way modelを用いた計算結果について述べる。その結果を踏まえてone-way modelの妥当性について検討する。

3. 3 等温定常シミュレーション

3. 3. 1 気流予測の設定

(1) 地下鉄駅の構造

実際の地下鉄駅の構造は多様であるが、ここでは前章 2. 3. 2 と同様、標準駅として図-3.3 のような構造を持つ駅を計算対象とした。以後この駅をB駅と呼ぶ。

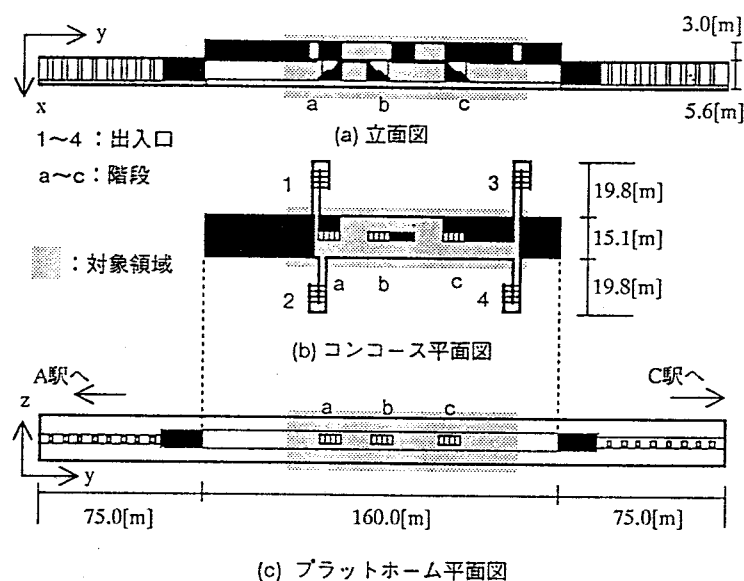


図-3.3 地下鉄B駅

B駅の出入口1~4はすべて図-3.4に示す形状をしているものとした。出入口の圧力損失係数は文献^{1), 6)}を参考にして、 $\zeta = 5.1$ を与えた。

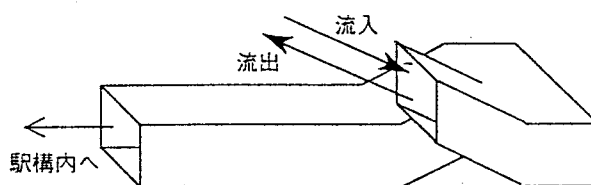
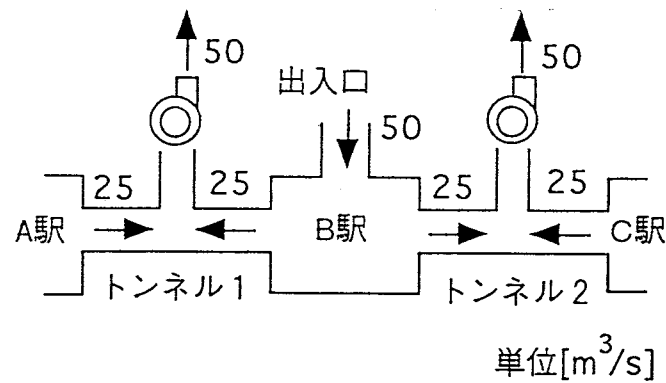


図-3.4 出入口1~4の形状

地下鉄系として、ここでは図-3.5に示すようなA, B, C駅と複線トンネルからなる系を想定した。A, C両駅の構造はB駅と同じものとする。この地下鉄系の換気システムは駅給気・中間排気方式とするが、冬期を想定して駅給気を停止した条件についてシミュレーションを行った。



図一3.5 地下鉄系模式図

(2) 気流の設定条件

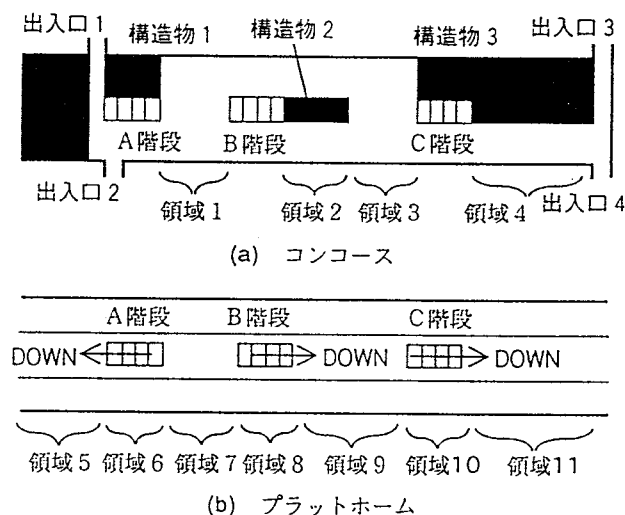
本報では、列車が運行しておらず機械換気のみ行われている場合を取り上げ、定常計算を行う。

前報5)で示したように機械換気のようなより大きな気流駆動力が作用する場合には、密度流や地上風圧の影響がほとんど無視できる。そこで、大気開放点で全圧ゼロを設定する。

また、ここでは一定量の空気が送られたときに、その空気が各出入口や階段でどのように配分されるか、ということに着目する。そのため、設定風量になるように全圧を制御する送風機モデルをプログラムに組み込んでいる。図一3.5に示すようにB駅から両側のトンネルに $25\text{m}^3/\text{s}$ ずつ空気が吸引されるように差圧を与えた。結果として駅には合計 $50\text{m}^3/\text{s}$ の外気が出入口よりが流入する。

(3) two-way modelの設定

ミクロモデルの対象領域はプラットフォームとコンコースである。図一3.6にその平面図を示す。

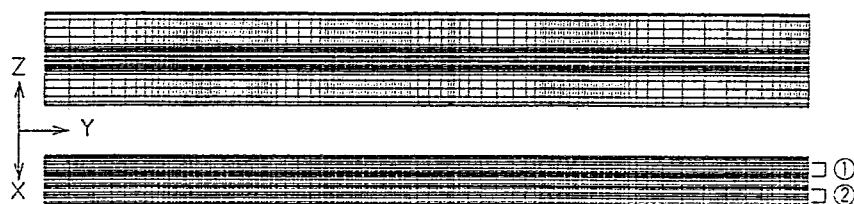


図一3.6 ミクロモデルの対象領域

これは図一3.3の網目部分に対応する。 $24 \times 139 \times 29 = 96744$ 個のメッシュに不等分割した対象領域を図一3.7に示す。また、ミクロモデルでは乱流モデルとして $k-\varepsilon$ モデルを使用し、壁面境界

条件としてno-slipを設定した。

マクロモデルは出入口とトンネルのみを扱う。出入口1～4の圧力損失係数は流入時の $\zeta=5.1$ を与える。トンネルでは管摩擦損失 $\lambda=0.06$ を与える。この値はトンネル内に存在するケーブル、レール、ランプなどをトンネル表面の粗さとみなし、前章で示したPrandtlの式を適用して求めた。



①コンコース、②プラットフォーム

図-3.7 メッシュ分割図

(4) 縮尺模型による比較実験

計算結果の妥当性を検討するため、B駅の1/75模型を用いてフローパターンの可視化を行う。

可視化実験では図-3.8に示す実験装置を用いて、コンコース部分のフローパターンを明らかにする。トレーサには流動パラフィンを使用し、コンコースの中間の高さで水平にレーザーライトシートを構成して、CCDカメラによってフローパターンを1/60秒毎に撮影する。画像はパソコンに取り込み、パターン・トラッキング・アルゴリズム⁷⁾を用いて2次元の平均流速場に変換する。

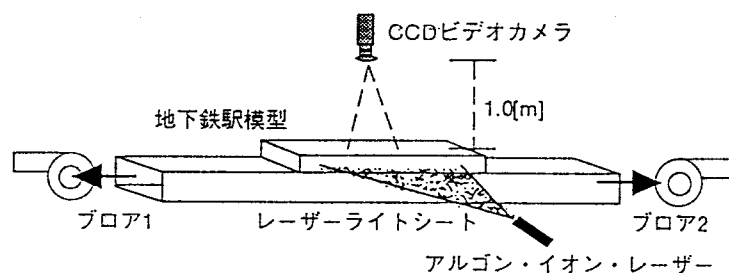


図-3.8 実験装置

この実験では、模型のトンネルから2台のブロアで空気を吸引し、その流量をローター・メーターで測定する。本実験では、各ブロアから $0.25\text{m}^3/\text{min}$ ずつ、合計 $0.5\text{m}^3/\text{min}$ を吸引した。

本実験のような縮率(1/75)で流体に空気を用いる場合、計算と模型実験の間でレイノルズ数を一致させることは困難である。しかし、模型内の気流が十分に発展した乱流であれば、相似性が成立すると考えられる。上記の流量の値は、この値以上に流量を増加させたときにフローパターンが変化

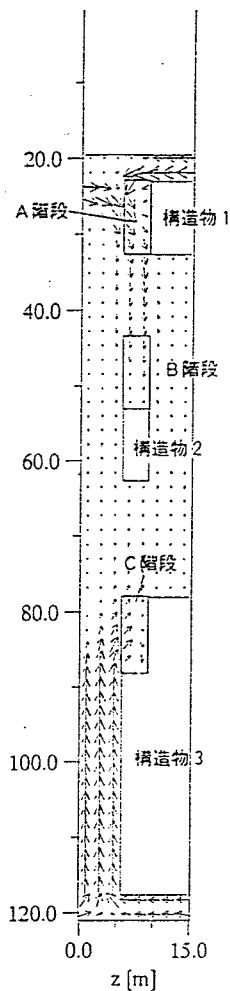
せず、すでに十分に発達した乱流になっていると判断される流量である⁸⁾。

ただし、この流量では模型内部の流速が大きくなる。例えば、領域4（以下、領域番号は図-3.6参照）は模型では幅0.076m、長さ0.4mになるが、ここを通過する流速は1.37m/sになるため、パターン・トラッキング・アルゴリズムを適用した流速測定において誤差が大きくなっている恐れがあり、以下では流速ベクトルのほか、煙による可視化画像による検討も行う。

3. 3. 2 two-way modelによる予測結果

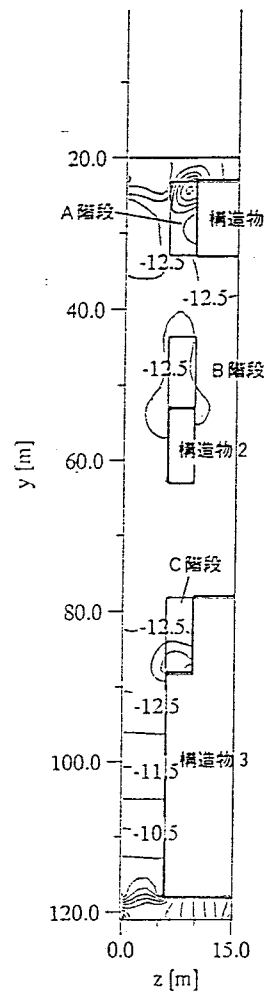
(1) コンコースの気流分布

図-3.9（a）にコンコースの気流分布を示す。出入口1、2から流入した空気の一部は、反時計回りに旋回しながらA階段に流入し、残りはB階段に流入する。このとき、 $y = 30 \sim 50$ mの範囲では気流は $z = 5 \sim 10$ mの範囲に集中し、構造物1の隅角部に滞留域が形成される。



→ = 2.49[m/s]
($x = 1.5$ [m])

(a) 気流分布



単位 [Pa]
($x = 1.5$ [m])

(b) 静圧分布

図-3.9 コンコースにおける気流・静圧分布

この領域を拡大したものが図-3.10 (a) である。同図 (b) は可視化実験から得た平均流速場である。(c) は煙を撮影したものに目視による流線を加えたものであり、白い部分が煙である。(a) ~ (c) のいずれにも中心部の強い気流や隅角部の滞留域が観察される。

出入口 3, 4 から流入した空気の一部は、時計回りに旋回しながら C 階段に流入し、残りは B 階段に流入する。構造物 3 の隅角部 ($y = 70 \sim 77 \text{ m}$, $z = 10 \sim 15 \text{ m}$ の範囲) に滞留域が形成されている。C 階段付近を拡大したものが図-3.11 (a) である。(b) に示す可視化実験から得た平均流速場や (c) に示す煙の画像にも C 階段上の渦や隅角部の滞留域が観察される。

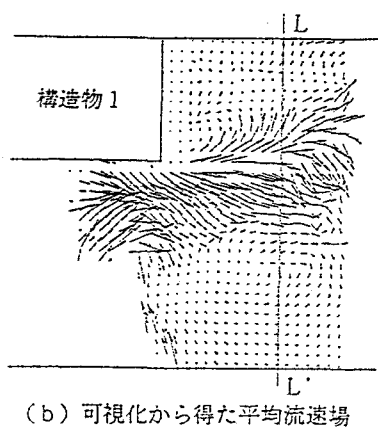
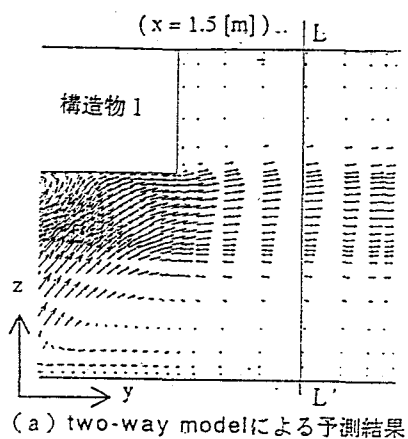


図-3.10 A 階段付近の気流分布

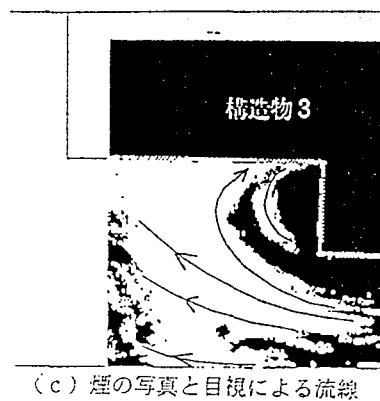
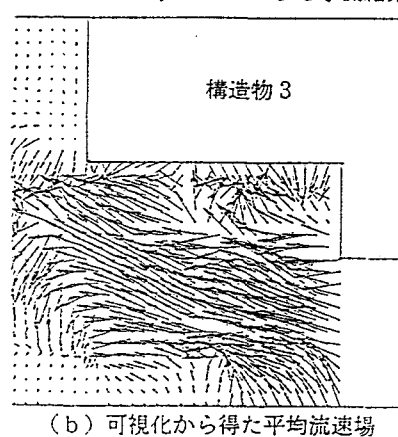
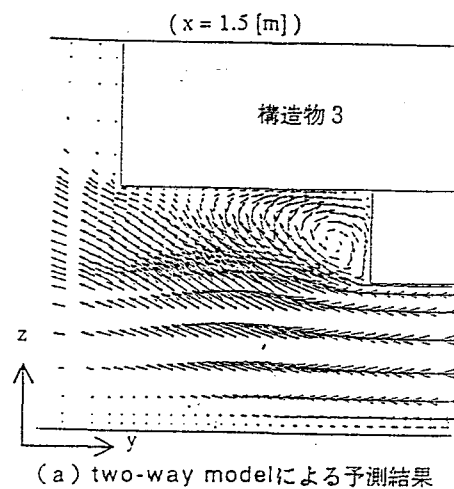
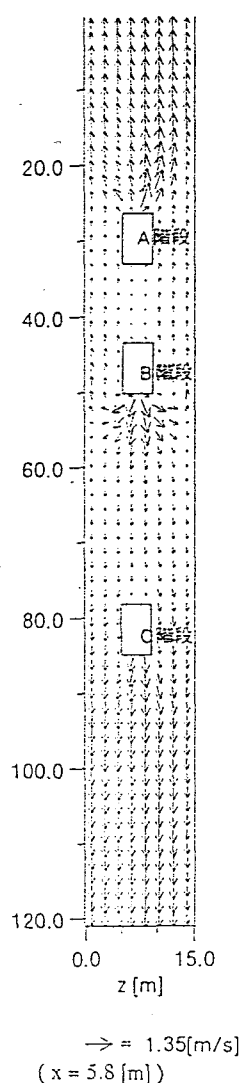


図-3.11 C 階段付近の気流分布

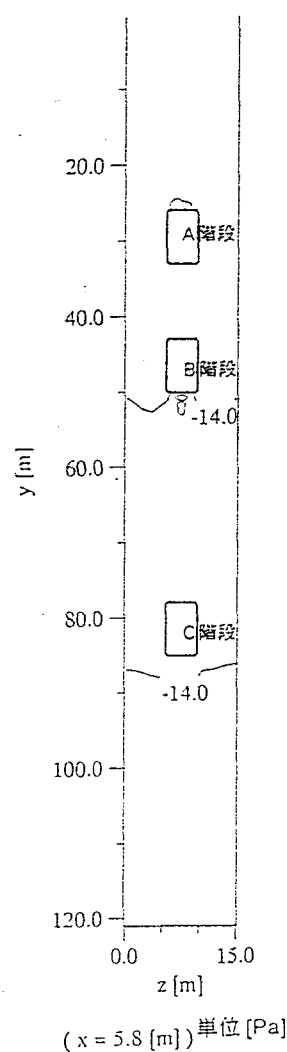
図-3.9 (b) にはコンコースの圧力分布を示す。大気圧を 0 Pa とした計算を行ったのでコンコース内部の圧力はマイナスの値を示している。等圧線は 0.5 Pa 毎に表示している。等圧線の間隔が狭いのは出入口 1, 2 付近, 出入口 3, 4 付近と領域 4 の通路部分 ($y = 88 \sim 118 \text{ m}$, $z = 0 \sim 5.7 \text{ m}$ の範囲) であり, $y = 33 \sim 78 \text{ m}$ の範囲では圧力変化が小さい。

(2) プラットホームの気流分布

図-3.12 (a) にプラットホームの気流分布を示す。各階段から直接空気が流出する $y = 20 \sim 27$, $50 \sim 60$, $85 \sim 90 \text{ m}$ の範囲では強い気流が見られる。 $y = 20 \sim 27$ の範囲では気流の強さが $z = 7.5 \text{ m}$ の軸に対して非対称であるが, これは A 階段のコンコース部分で反時計回りの渦が形成されているためである。 $y = 33 \sim 43 \text{ m}$ の範囲では, A, B 階段に囲まれているため流速が小さく, 滞留域が形成されている。



(a) 気流分布



(b) 静圧分布

図-3.12 プラットホームにおける気流・静圧分布

図-3.12 (b) にプラットホームの圧力分布を示す。ここでも等圧線は0.5Pa毎に表示している。-14.0Paを示す等圧線が階段周辺に見られるだけであり、プラットホーム内では圧力変化はほとんど生じない。

(3) two-way modelの結果に関する考察

図-3.10, 図-3.11に示したように、two-way modelの気流解析結果と可視化実験の結果の間には定性的な一致が見られた。

駅構内の圧力変化は、おもにコンコース内で起こっており、プラットホーム内の圧力変化はわずかである。また、コンコース内でも圧力変化は出入口通路周辺に集中している。

駅全体（出入口通路、コンコースおよびプラットホーム）の圧力損失は断面平均で14.4Paである。このうち出入口1～4および領域4の通路部分といった一次元性の強い領域で発生する圧力損失は平均11.5Paであり、駅全体の圧力損失の80%を占める。

このことは、地下鉄駅で発生する圧力損失がマクロモデルで取り扱いやすい一次元性の強い領域に集中して発生し、三次元的な広がりを持つ部分で発生する圧力損失はあまり問題にならないことを示している。したがって、one-way modelで予測しても結果に著しい差が生じないということが予想される。そこで、one-way modelを用いてB駅の気流分布予測を行い、two-way modelの結果との比較を行った。

3. 3. 3 one-way modelによる気流予測

(1) one-way modelの設定

one-way modelにおけるマクロモデルは地下鉄系全体を対象とするので、地下鉄系に図-3.13のような換気回路網を設定する。各ブランチの設定値を表-3.1に示す。全てのブランチに対して管摩擦損失として $\lambda = 0.06$ を与える。各ブランチの形状に対する圧力損失係数 ζ は、以下のような仮定にもとづき、文献^{1), 6)}から求める。

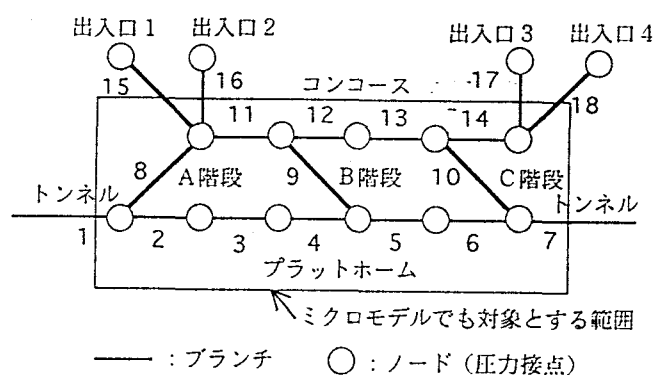


図-3.13 換気回路網で表現した地下鉄B駅

表-3.1 マクロモデルにおける圧力損失係数 ζ の設定

ブランチ番号	ζ [-]	図-3.6との対応
1, 3, 5, 7, 11, 13	—	それぞれ、領域5, 7, 9, 11, 1, 3に対応
2, 4, 6, 12	4.0	領域6, 8, 10, 2に対応
8, 10	2.6	階段A, Cに対応
9	1.6	階段B
14	1.0	領域4
15~18	5.1	出入口通路1~4に対応

出入口1~4の圧力損失係数としては、two-way modelと同じ値を用いる。ブランチ2, 4, 6, 12では階段や構造物2をブランチ内の障害物として考え、ブランチと障害物の断面積比に応じた ζ を与える。領域4に対応するブランチ14には、出入口3・4の気流が合流する際の圧力損失を与える。コンコースとプラットフォームを結ぶ階段は、方向性を考慮するために分岐・合流管として扱う。階段とコンコースがなす鋭角は 30° とする。その他の特に形状に変化のないブランチに対しては ζ を与えない。

ミクロモデルで扱う範囲はプラットフォームとコンコースのみであり、two-way modelの場合と同じ分割メッシュを使用した。

(2) 予測結果の比較

ここではone-way modelの結果をtwo-way modelの結果と比較する

1) コンコース・プラットフォームの流速分布

マクロモデルによる流量の予測結果を図-3.14に示す。ここから得られる出入口およびトンネル流量をミクロモデルに与えて計算した結果、コンコースとプラットフォームの気流および圧力分布は図-3.9, 図-3.12に示したtwo-way modelのものと同様のパターンが得られた。

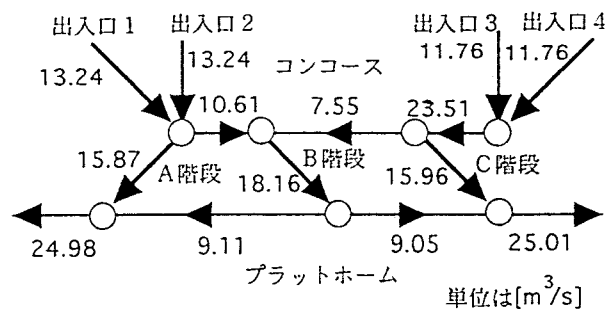


図-3.14 マクロモデルによる流量予測値

one-way modelとtwo-way modelのそれぞれから得られる，図-3.10（a）のL-L'線上（構造物1からの距離5.7m，床からの高さ1.5mの線上）における流速分布を図-3.15に示す。全体的には同じ形の曲線を描くが，後に述べるように，one-way modelではtwo-way modelよりも出入口1，2の流量がやや少ないため流速が小さくなり，最大0.27m/sの差が生じている。

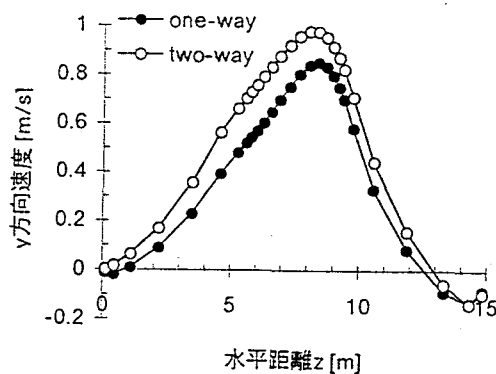


図-3.15 流速分布の比較

2) 出入口流量の比較

one-way modelとtwo-way modelから求めた出入口流量を表-3.2に示す。one-way modelでは出入口3，4の流量がより大きい。これは出入口3，4から流入し，O階段に到るまでに空気に加わる圧力損失が，one-way modelの解析においてマクロモデルで予測した値の方がtwo-way modelの値よりも小さいためである。出入口3の流量の差が特に大きく，two-way modelの結果と比較すると4.8ポイント，流量に換算すると $2.4\text{m}^3/\text{s}$ ，流速に変換すると 0.26m/s の差が生じている。

表-3.2 one-way およびtwo-way modelによる出入口流量

出入口番号	流量 $[\text{m}^3/\text{s}]$ (比率[%])	
	one-way model	two-way model
1	13.24 (26.5)	14.38 (28.8)
2	13.24 (26.5)	14.99 (30.0)
3	11.76 (23.5)	9.34 (18.7)
4	11.76 (23.5)	11.22 (22.5)
合計	50.00 (100.0)	49.93 (100.0)

3) 階段流量の比較

one-way modelの解析におけるマクロモデルおよびミクロモデル、そしてtwo-way modelから得られる階段流量を表-3.3に示す。

表-3.3 one-wayおよびtwo-way modelによる階段流量

階段名	流量[m ³ /s] (比率[%])			
	one-way model		two-way model	
	マクロモデル	ミクロモデル		
A	15.87 (31.8)	16.97 (33.9)	16.39 (32.8)	
B	18.16 (36.3)	20.47 (40.9)	20.63 (41.3)	
C	15.96 (31.9)	12.60 (25.2)	12.93 (25.9)	
合計	49.99 (100.0)	50.04 (100.0)	49.95 (100.0)	

one-way modelの解析におけるマクロモデルの結果とtwo-way modelの結果の差は、B階段において5ポイント、流量に換算すると2.5m³/sであり、やや大きい。しかし、one-way modelの解析におけるミクロモ

デルの結果をtwo-way modelの結果と比較すると、B階段において0.4ポイント、流量に換算すると0.2m³/sの差であり、差が小さくなっている。すなわち、one-way modelではマクロモデルから得た概算値をもとにミクロモデルで再計算することによって、two-way modelに近い結果を得ることができる。

4) 駅全体の通気抵抗の比較

本報では機械換気を想定して設定風量が流れるようにトンネルに差圧を与えるという条件でシミュレーションを行った。列車風を扱う場合は、流量を与えるのではなく、列車のピストン効果による差圧を与える条件

でシミュレーションを行う必要がある。この条件におけるone-way modelとtwo-way modelの計算結果の差を知るためには、one-way modelとtwo-way modelの予測結果から得られる駅全体（出入口通路、コンコースおよびプラットホーム）の通気抵抗を比較すればよい。

通気抵抗Rを用いると圧力損失 ΔP Paと流量 q m³/sの関係は次式で表される。

$$\Delta P = Rq^2 \quad \therefore \quad q = \sqrt{\frac{\Delta P}{R}} \quad (3.1)$$

two-way modelでは $R=5.76 \times 10^{-3}$ 、one-way modelでは $R=5.2 \times 10^{-3}$ である。 ΔP が一定ならば $q \propto 1/\sqrt{R}$ となるので、 $1/\sqrt{R}$ を求めると、two-way modelでは $1/\sqrt{R}=13.2$ 、one-way modelでは $1/\sqrt{R}=13.9$ となる。同じ差圧を与えた場合、one-way modelでは5%程度流量が増加する。トンネル、換気ダクト、周辺駅も含めたより複雑な地下鉄系の予測を行う場合には、コンコースとプラットホームの通気抵抗が相対的により小さくなるため、この流量の差はより小さくなる。

5) 計算負荷の比較

マイクロモデルの計算対象領域全体で連続式の誤差が 10^{-2}m^3 以下になるまでにone-way modelでは2000回のマイクロモデルの反復計算（SIMPLE法における流速・圧力収束のための反復計算）を必要とした。これに対しtwo-way modelでは、同程度の精度を得るまでに400回のメタステップの反復を必要とした。このとき、メタステップ毎に50回のマイクロモデルの反復計算を行ったので、合計20000回のマイクロモデルの反復計算を行ったことになる。HP735を使用した場合のCPU時間で比較すると、前者は $4.3 \times 10^4\text{s}$ 、後者は $4.7 \times 10^5\text{s}$ である。

3. 4 等温非定常シミュレーション

前節では等温・非定常流に限定してシミュレーションを行ったが、実際の地下鉄構内気流は、列車走行等に起因する非定常流であり、また温度差による浮力も存在することから、連成モデルをより現実的な応用計算に用いるためには、モデルを非等温・非定常状態に拡張する必要がある。

そこで本節と次節では非定常状態に関してone-way modelとtwo-way modelによるシミュレーションを行い、その計算結果や計算負荷、各連成手法の適用範囲を明らかにする。3. 4 節では等温条件についてシミュレーションを行い、非等温条件については3. 5 節で取り扱う。

3. 4. 1 シミュレーションの設定

(1) 地下鉄系と換気方式

対象とする地下鉄系と換気機器の配置を図-3.16に示す。ここでは地下鉄の代表的な換気方式のひとつである駅給気・中間排気方式を採用した。また、冬期における換気として駅給気を止め、中間排気のみを行っている。

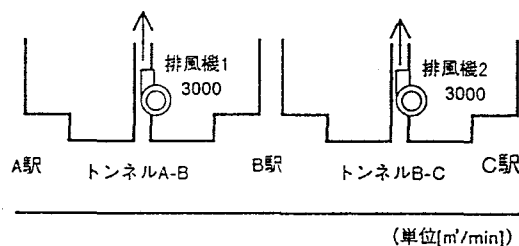


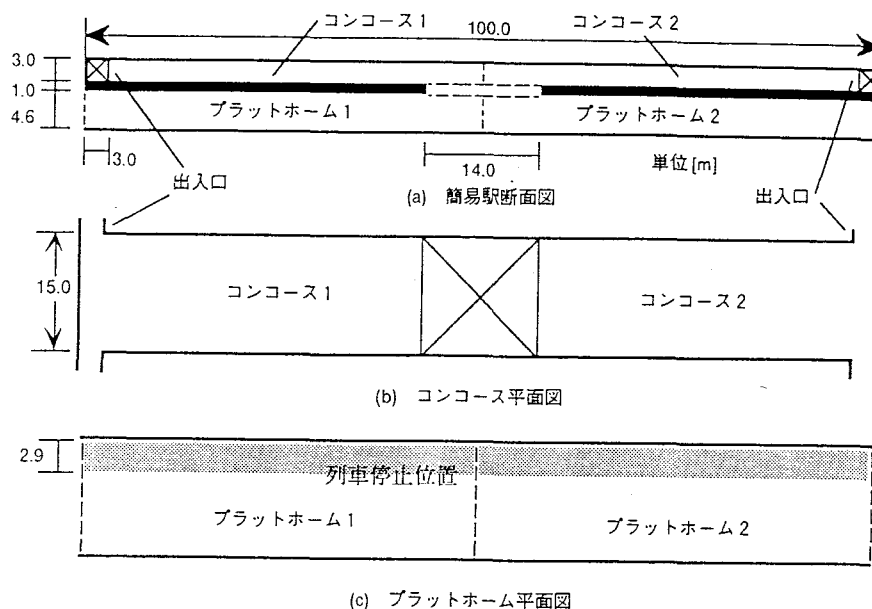
図-3.16 地下鉄系および換気機器の配置

(2) 簡易駅モデル

前節において示したように、実際の駅の構造をそのまま再現して計算対象とする場合、多くの計算格子が必要とされ、マイクロモデルの計算負荷が非常に大きくなる。本節および次節では、特定の地下鉄駅の気流・温熱環境予測を目的とするのではなく、非等温・非定常状態に関してone-way modelとtwo-way modelの計算結果の差を明らかにすることを目的として、スケールは維持するものの細かい構造を再現しない簡易駅モデルを対象としてシミュレーションを行うことにした。

簡易駅の構造を図-3.17に示す。ここでは、コンコースやプラットフォーム上の構造物をすべて省略し、階段も単一の開口部にまとめた。ただし、出入口やトンネルの数や断面積は標準駅モデルと同

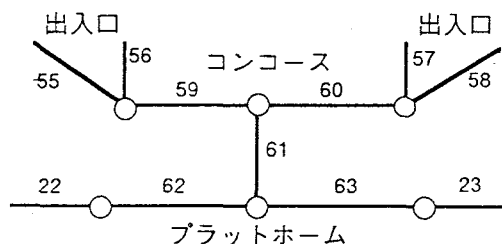
じとし、階段開口部の断面積も標準駅の階段開口部の断面積の合計に近い値にした。



図ー3.17 簡易駅の構造

one-way modelのマクロサブモデルでは簡易駅を図ー3.18に示す換気回路網に置き換えて計算を行う。換気回路網の各ブランチの設定値を表ー3.4に示す。

表ー3.4 簡易駅換気回路網の圧力損失係数



ブランチ番号	種別	ζ [-]
55～58	出入口	5.1
59, 60	コンコース	—
61	階段部開口	2.05
62, 63	プラットフォーム	—

図ー3.18 換気回路網に置き換えた簡易駅

(3) 列車の取り扱い

前節では機械換気による定風量の条件で定常計算を行ったが、本節では機械換気に加え、列車の走行による非定常の気流変動を発生させる。ミクロモデルでも列車走行を模擬しようとすれば移動境界問題としての取り扱いが必要になるが、本研究では列車が存在しないか、停車中の状態のいずれかであるとした。列車走行による気流はマクロモデル内でのみ計算する。また、プラットフォーム停車中もミクロモデルの中で列車を障害物として取り扱うことはしない。

図ー3.19にマクロサブモデルで用いる列車のサイズおよびランカーブを示す。これらは現実の地下鉄を参考に決定した。

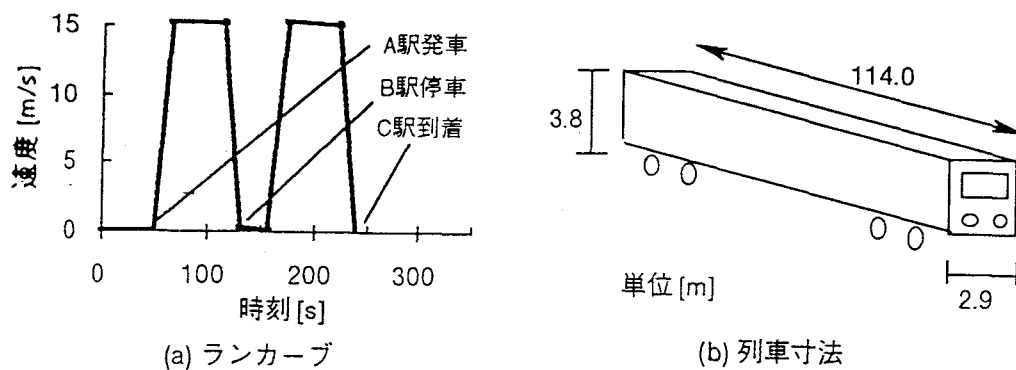


図-3.19 列車の設定

(4) 収束条件

マクロサブモデルにおいては各ブランチの流量収支の誤差が $0.01 \text{ m}^3/\text{s}$ 以下になることを収束条件とした。ミクロサブモデルにおいては対象領域全体の流量収支の誤差が $0.5 \text{ m}^3/\text{s}$ 以下になることを収束条件とした。

3. 4. 2 シミュレーションの結果

ここでは上記の計算条件を与えた時の、one-way modelによる等温非定常計算と、two-way modelによる等温非定常計算の結果を比較する。

まず巨視的な気流の予測結果として、それぞれの計算から得られた簡易駅出入口合計流量を図-3.20に示す。駅に空気が流入する場合を正とした。

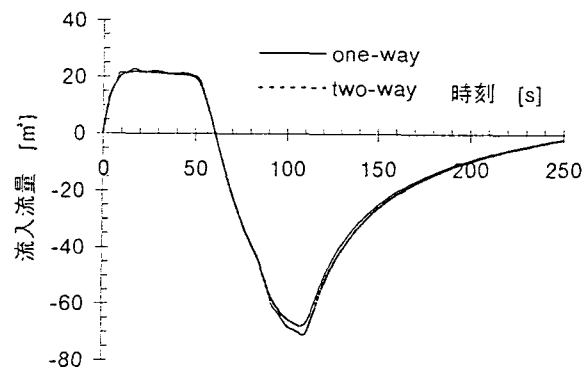


図-3.20 簡易駅出入口流量の変化（等温条件）

時刻50sまではトンネルの機械による排気によって駅に空気が流入している。時刻50s以降は列車の走行の影響で流量が変化し駅から地上への空気の流出が起こる。時刻100s前後で流出流量はピークに達する。出入口流量は、one-way modelではマクロサブモデルによって決定されるのに対し、

two-way modelではミクロ・マクロ両サブモデルの連成によって決定される。こうしたアルゴリズムの違いにかかわらず、図-3.20に見るように両者の計算結果の間にはほとんど差が見られない。各出入口ごとに比較した場合も、A-B、B-Cトンネルそれぞれについて比較した場合も同様である。これは前節に述べたように地下鉄駅構内で発生する圧力損失が、地下鉄系全体の圧力損失に比べて小さいため、巨視的な気流は、地下鉄駅をマクロモデルで取り扱うかミクロモデルで取り扱うかという違いにほとんど影響されずに決定されるということを示している。

微視的な気流予測の結果として、時刻110sにおけるone-way modelによる気流・静圧分布を図-3.21に示す。two-way modelでもほぼ同様の結果が得られたのでここでは略す。

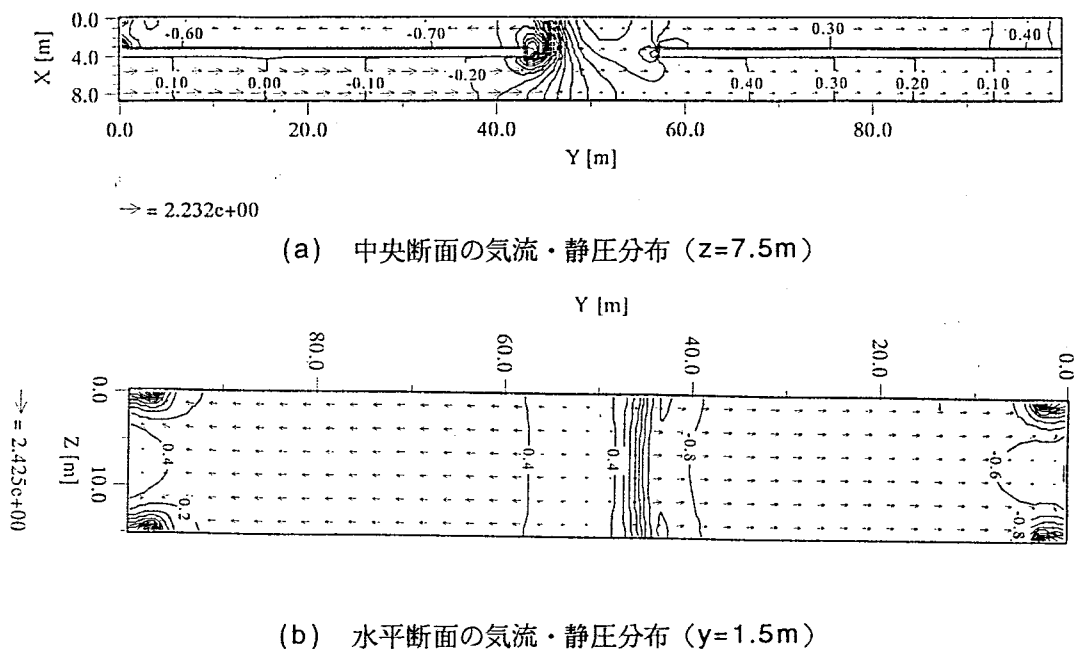


図-3.21 気流・静圧分布

3. 4. 3 計算負荷の比較

マクロサブモデルの計算負荷は非常に小さいため、ここではミクロサブモデルの反復計算回数によってone-way modelとtwo-way modelを比較する。250秒分の計算を行うためにone-way modelでは6800回の反復計算が必要だった。これに対してtwo-way modelでは19000回の反復計算が必要となった。すなわちtwo-way modelの計算負荷はone-way modelの計算負荷の2.8倍である。前節の計算とは総メッシュ数が違うため単純に比較できないが、等温・定常計算の場合に比べて両者の差が小さくなっている。two-way modelでは接続境界の流速が収束するまでにミクロサブモデルとマクロサブモデルの間でメタステップの反復を必要とするが、非定常計算においては、前の時刻における接続境界の流速・圧力の収束値が次の時刻のメタステップの反復計算において良い推測値となっているので、接続境界の新しい流速・圧力の収束解を得るために反復回数が少なくすむためであると考えられる。これはパタンカーが非定常計算について述べたこと⁹⁾と同じであると思われる。

3. 5 非等温非定常シミュレーション

前節に続き本節では非等温条件でシミュレーションを行う。温熱環境条件に関して以下に示す。こ

れ以外の設定は前節と同じである。

3. 5. 1 温熱環境条件

照明および列車の発熱量，壁温，壁面对流熱伝達率として表-3.5の値を与えた。壁温は，前節の等温非定常計算から得られる気流予測結果と大阪地方のHASP標準気象データをOSTESPに与えて算出した冬期1月29日の簡易駅の壁温を用いた。また，以下のシミュレーションでは計算を容易にするために壁面放射を無視している。

表-3.5 温熱環境条件

照明発熱	コンコース	20.0 [W/m ²]
	プラットホーム	20.0 [W/m ²]
	トンネル	3.3 [W/m]
列車発熱		500 [kW/列車]
外気温		7.8 [°C]
壁温	コンコース	6.8 [°C]
	プラットホーム	11.7 [°C]
	トンネル (近)	15.0 [°C]
	トンネル (遠)	17.3 [°C]
気温初期値	コンコース	8.1 [°C]
	プラットホーム	12.3 [°C]
	トンネル	16.8 [°C]

本シミュレーションではマクロモデルの温熱計算部分に変更を加えた。第2章で説明したマクロモデルでは温度場の予測には，圧力接点を中心とするコントロールボリュームを設定してその温度を計算したが，ここでは後に行うマイクロモデルとマクロモデルの比較のために，ブランチ毎に気温を計算することにした。

プラットホームに列車が滞在するときの列車発熱の取り扱いは次の通りである。マクロサブモデルでは列車が滞在するブランチごとに列車の長さに応じた発熱量を与えた。マイクロサブモデルでは列車滞在時に，車体に相当するセルに対して発熱量を与えた。

列車の走行曲線に対しても図-3.22に示すように列車の出発時刻を遅らせるという変更を行った。列車を走行させる前に気温を安定させるためには，気流を安定させるよりも多くの時間が必要であると予想されるからである。

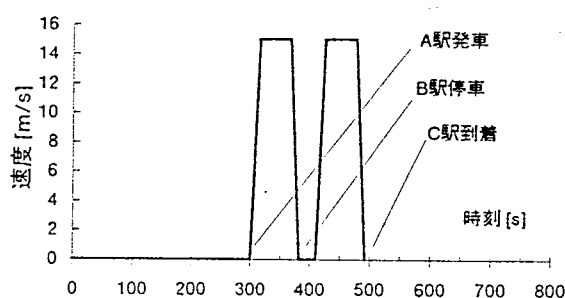


図-3.22 変更後の走行曲線

なお、浮力の計算に関してはミクロサブモデル、マクロサブモデルともにBoussinesque近似を用いた。

3. 5. 2 one-way modelとtwo-way modelの比較

図-3.23に出入口合計流量、A-B、B-Cトンネルの流量の比較結果を示す。出入口では駅に空気が流入する場合を正とした。A-BトンネルではA駅からB駅に向かう場合を正とし、B-CトンネルではB駅からC駅に向かう場合を正とした。時刻300sまではトンネルの機械換気による排気によって駅に空気が流入している。時刻300s以降は列車の走行の影響で出入口流量が変化し駅から地上への空気の流出が起こる。時刻380s前後で流出流量はピークに達する。

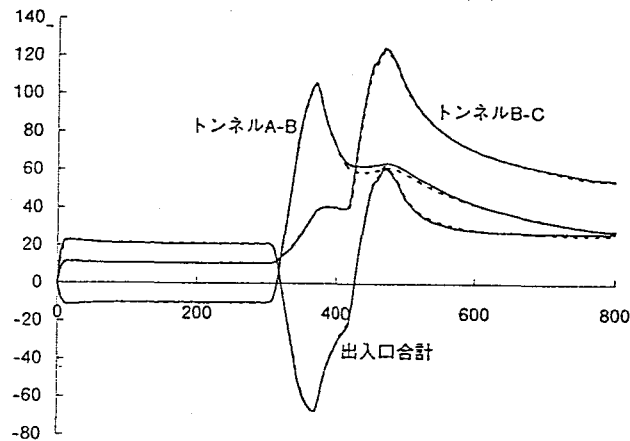


図-3.23 簡易駅各部流量の変化（非等温条件）

one-way modelの結果を実線で、two-way modelの結果を破線で示しているが、両者にはほとんど差が見られない。前節で述べたのと同様に、非等温条件においても、巨視的な気流は地下鉄駅をマクロモデルで取り扱うかミクロモデルで取り扱うかという違いにほとんど影響されずに決定されることを示していると思われる。

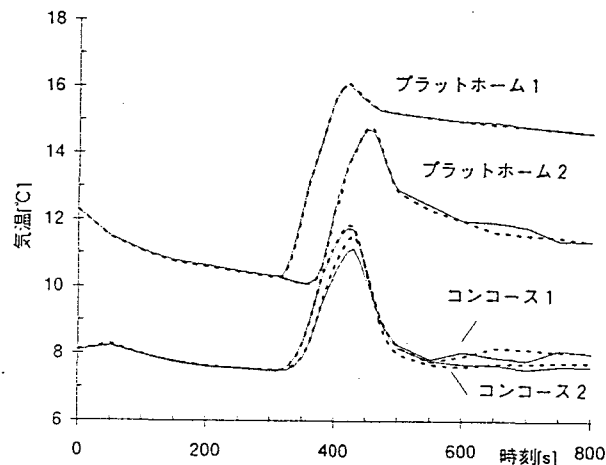
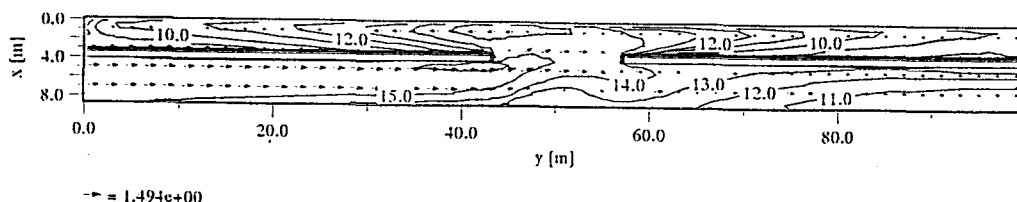


図-3.24 簡易駅各部気温の変化

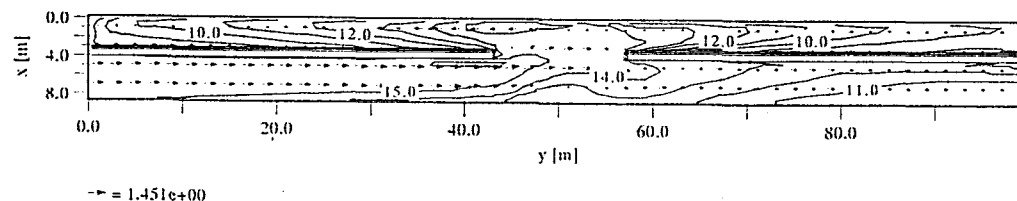
図-3.24にone-wayおよびtwo-wayモデルのミクロサブモデルから算出される、駅構内各部分に

における平均気温の変化を示す。ここで、各部分の名称は図-3.17に示した領域に対応する。また、平均気温はマイクロモデルの各メッシュの体積で重み付けした体積平均気温である。one-way model, two-way modelの結果をそれぞれ実線と破線で示しているが、両者にはほとんど差が見られない。

図-3.25(a)～(d)に時刻410sにおける駅垂直断面およびコンコース平面の気流・気温予測結果を示す。図-3.25(a), (b)はそれぞれone-way model, two-way modelで予測した駅垂直断面の気流・気温分布である。→が気流速を示している。等温線は1℃間隔で示している。



(a) one-way modelによる $z=7.5$ mの断面の気流・気温分布

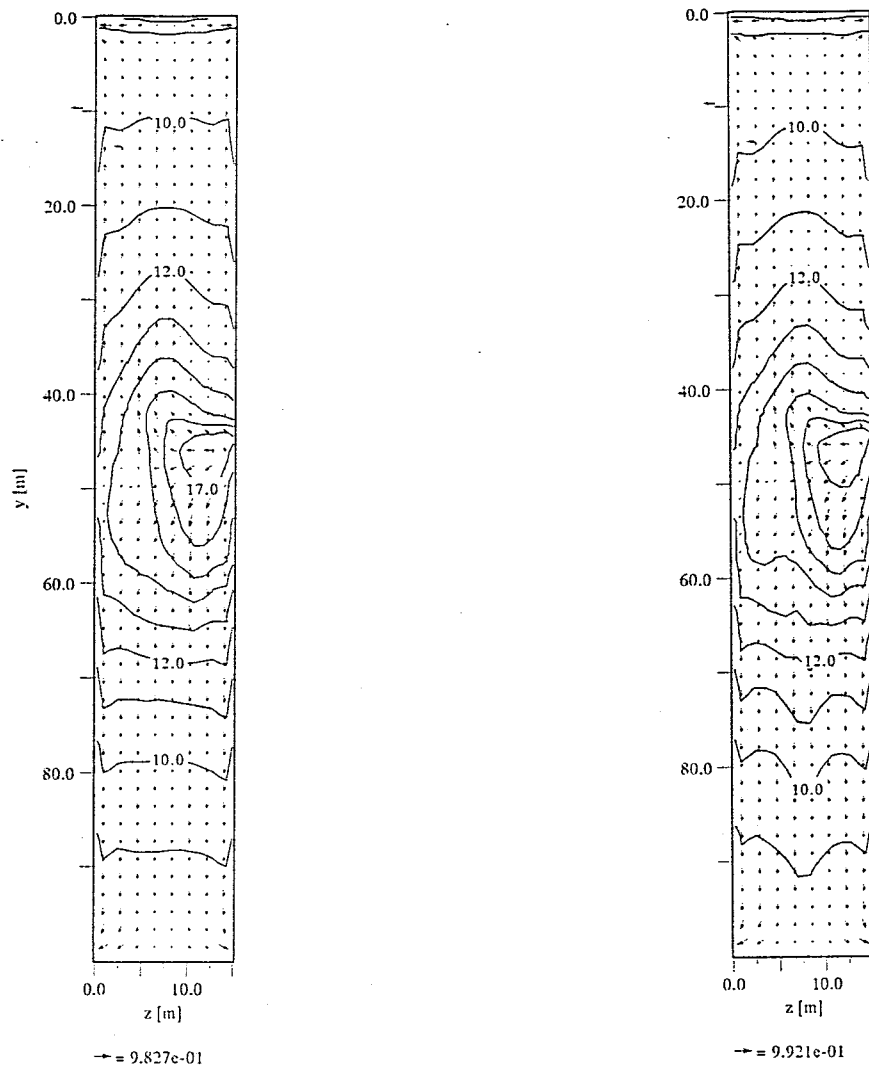


(b) two-way modelによる $z=7.5$ mの断面の気流・気温分布

図-3.25 簡易駅の気流・気温分布

図-3.25(c), (d)の両方に見られるように、コンコース平面の中央に17℃の領域があり、ここから熱が拡散している様子が見られる。これはホームに停車している列車から発生した熱が中央の開口部を通してコンコースに流れている様子を示している。one-way modelとtwo-way modelの気流・気温分布はほぼ同じものであり、両モデルの予測結果にはほとんど差がないと言える。

マイクロサブモデルの反復計算回数によって両者の計算負荷を比較すると、one-way modelの場合、800秒分の計算に24868回の反復計算が必要だったのに対し、two-way modelでは77505回の反復計算が必要だった。two-way modelの計算負荷はone-way modelの計算負荷の3.1倍であり、等温条件で非定常計算をおこなった場合とほぼ同程度の差が見られた。



(c) one-way modelによる気流・気温分布 (x=1.5mの水平断面) (d) two-way modelによる気流・気温分布 (x=1.5mの水平断面)

図-3.25 簡易駅の気流・気温分布 (つづき)

3. 5. 3 マクロサブモデルとミクロサブモデルの比較

one-way modelでは駅構内の温熱環境に関しては、マクロサブモデルとミクロサブモデルのそれぞれで予測を行っている。この両者の結果を比較することは、完全混合を想定した従来型の地下鉄温熱環境予測と、CFDを適用してより詳細に予測した場合を比較するという意味がある。

両者の比較結果として駅構内各部分の気温の変化を図-3.26に示す。ミクロサブモデルの気温は3. 5. 2でtwo-way modelとの比較を行った際の体積平均気温である。マクロサブモデルの気温は実線で、ミクロサブモデルの気温は●, +, ◇, ▲のマーカで示している。

プラットフォーム1における気温の変化はミクロおよびマクロサブモデルの間で比較的小さいが、プラットフォーム2の気温は時刻390s前後で、コンコース1, 2の気温は時刻410s前後で大きな差

が見られる。コンコース1, 2ではピーク時には、マイクロモデルによる予測結果の方が1℃以上高い。

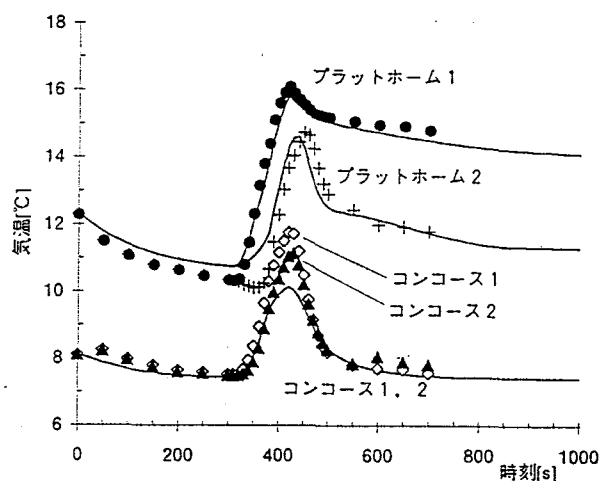


図-3.26 ミクロおよびマクロモデルによる簡易駅各部気温の変化

時刻410sにおけるコンコース、プラットフォームそれぞれの熱収支を表-3.6に示す。出入口・階段開口部・トンネルなどの開口部を通して出入りする移流熱量は0℃を基準として計算した。合計熱量を比較すると、コンコースではプラットフォームに比べてマイクロサブモデルの方がマクロサブモデルより大きい。これがマイクロサブモデルによるコンコース気温の予測値の方が大きい原因である。マイクロサブモデルの計算結果においてコンコースの合計熱量が大きい原因は、プラットフォームからコンコースに流入する移流熱量が相対的に大きいためである。プラットフォームにおける熱収支をマイクロモデルとマクロモデルとで比較すると、マイクロモデルの計算結果では、プラットフォームへの熱の流出が増加した分、B-Cトンネルへの熱の流出が減少しているのがわかる。

表-3.6 時刻410sにおける駅構内の熱収支

		単位[kW]	
場所		マイクロモデル	マクロモデル
コンコース	照明発熱	30.0	30.0
	壁体放熱	-150.3	-134.1
	移流熱量 (全出入口へ)	-281.2	-326.1
	(プラットフォームから)	593.4	493.0
	合計熱量 (温度上昇分)	191.9	62.8
プラットフォーム	照明発熱	30.0	30.0
	列車発熱	403.4	403.5
	壁体放熱	-109.7	-132.1
	移流熱量 (プラットフォームへ)	-593.4	-493.0
	(A-Bトンネルから)	1266.0	1267.4
	(B-Cトンネルへ)	-566.7	-657.7
	合計熱量 (温度上昇分)	429.5	418.2

このように移流熱の配分に違いが生じる原因は、マクロサブモデルではブランチ内の完全混合を前提にしているためである。図-3.25(a)に示したように、マイクロモデルで見た場合、プラットホーム

ム1の高い温度の空気は十分に拡散してコンコースとプラットフォーム2に流出するのではなく、比較的高温の空気がより多くコンコースに流出している。これには浮力が影響していると考えられるが、マクロモデルではブランチ内で一次的にしか浮力の影響を計算できないため、こうした現象を予測できない。

3. 5. 4 その他の検討事項

壁面対流熱伝達率として固定値を用いるのではなく、管内流の熱伝達で用いられるDittus-Boelterの式：

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} \quad (3.2)$$

から得られる熱伝達率を計算した場合のシミュレーションをone-way modelを用いて行ったが、結果にあまり差が生じなかった。固定値の設定が適切であったと言える。

また、列車発熱量を与える際、車体に相当するセルすべてに発熱量を与えるのではなく、モータ・ブレーキなどの発熱体の集中する列車の床下に相当するセルにのみ発熱量を与えるという条件でone-way modelを用いて計算したが、これも計算結果にほとんど影響をおよぼさなかった。

3. 6 まとめ

マクロモデル（換気回路網）およびマイクロモデル（CFD）を連成したtwo-way modelを用いた地下鉄駅構内の気流予測を行い、可視化実験との比較により予測結果の妥当性を検証した。マイクロモデルを連成することにより、コンコース・プラットフォームの3次元的な気流分布が得られた。従来、マクロモデルでの予測が困難だった階段の流量配分が、本手法を適用することで、より厳密に予測された。特に浮力の影響に関して、マイクロモデルとマクロモデルの差が大きくなった。

マクロモデルの結果を境界条件としてマイクロモデルに与えるone-way modelで予測を行った場合、標準的な地下鉄駅を対象とした等温・定常計算では1/10弱の計算負荷でtwo-way modelによる予測と同様の結果が得られた。同じくone-way modelを用いて簡易駅を対象とした等温・非定常計算および非等温・非定常計算を行った場合、30%程度の計算負荷で、two-way modelによる予測と同様の結果が得られた。

one-way modelとtwo-way modelの間で予測結果に差が生じないことは、出入口通路における圧力損失に比べ、コンコース・プラットフォームにおける圧力損失が小さいことが理由である。B駅に比べて抵抗が遥かに大きい場合を除けば、地下鉄駅に対してはone-way modelを使用の方が利便性の点で優ることが示された。列車風の影響を考慮した非定常問題として扱わなくてはならない地下鉄駅の環境予測では、one-way modelは計算負荷の点で有力な近似法になると考えられる。

参考文献

- 1) W.D. Kennedy et al. : Subway Environmental Design Handbook (1976), U. S. Dep. of Transportation
- 2) 日本気象協会：地下鉄12号線環状部温熱環境解析報告書 (1993)
- 3) 加藤信介・村上周三・崔棟皓：建物内外の空気流動に関するマクロ・マイクロ解析の統合（その1）－エネ

- ルギー保存則に基づくマクロ解析モデルの提案, 日本建築学会大会学術講演梗概集, (1990-10), pp. 507～508
- 4) 奥山博康: 熱CADのための空間離散化モデル, 日本建築学会環境工学委員会熱環境運営委員会第24回熱シンポジウム, (1994-11), pp. 25～32
- 5) 大西潤治・竹谷伸行・水野稔: 室内熱気流環境の数値予測手法に関する研究・第1報—解析コードSCIENCEの概要と計算手法, 空気調和・衛生工学会論文集, 58 (1995-6), pp. 23～34
- 6) D. S. Miller : Internal Flow Systems (1978), BHRA Fluid Engineering
- 7) Kaga, A.; Inoue, Y; and Yamaguchi, K, Pattern Tracking Algorithms Using Successive Abandonment, Journal of Flow Visualization and Image Processing, Vol. 1, pp. 283 - 296, 1993
- 8) 田所伸悟, 水野稔, 加賀昭和, 下田吉之, 福代和宏: 地下鉄構内の環境予測に関する研究(5)—可視化実験による検討—, 空気調和・衛生工学会近畿支部学術研究発表会論文集, (1996 - 3), pp. 101 - 104
- 9) S. V. Patankar : Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, Chap. 7, McGraw-Hill, 1980

Appendix A 駅構内気流シミュレーションと模型実験による気流の可視化

A. 1 はじめに

本稿ではCFDコード：SCIENCEを用いて、列車走行時および非走行時における駅構内気流を定常計算によって予測した結果を示す。また、シミュレーションの妥当性を確認するため、それぞれの予測結果に対応する模型実験の結果も示す。

A. 2 シミュレーションおよび模型実験の手法

A. 2. 1 地下鉄駅および地下鉄系

本稿で対象とする地下鉄駅はこれまでと同様に標準地下鉄駅B駅である。図-A.1に改めてその構造を示す。

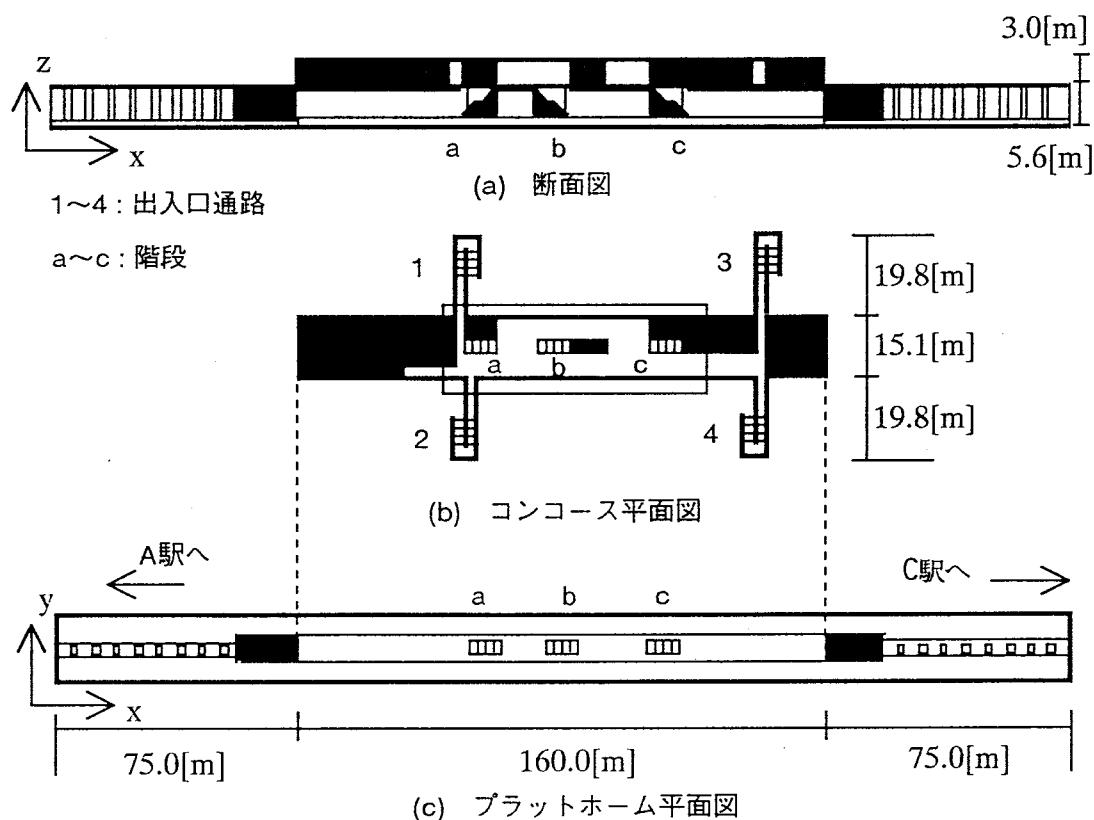


図-A.1 地下鉄駅の構造

またB駅を中心とした地下鉄系を図-A.2に示す。

A, C駅の構造はB駅と同様である。トンネル

1, 2は複線トンネルである。冬期を想定し、駅給気を行わず、トンネルでの中間排気のみ行う。各駅の出入口ではトンネルの中間排気に誘引されて、外気が駅構内に流入する。

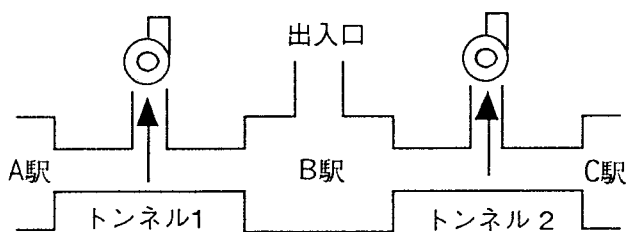


図-A.2 地下鉄系および中間排気

A. 2. 2 列車の走行状態

地下鉄構内の気流は本来、非定常流である。しかし、白鳥ら¹⁾はトンネル流量がある値に達した時の非定

常流のフローパターンが同じトンネル流量を与えた時の定常流のフローパターンとほぼ同じであることを模型実験によって示した。本稿ではこの結果をもとに、定常計算によって駅構内気流の予測を行うことにする。

本稿では列車の走行状態として次の3つの条件を設定する。

条件1：列車が走行していない場合

条件2：列車がC駅に向かってトンネル2を最高速度で走行する場合

条件3：列車がB駅に向かってトンネル2を最高速度で走行する場合

いずれの条件下でもトンネルの中間排気を行っている。それぞれの条件におけるトンネルおよび出入口の流量は換気回路網によるマクロ気流予測によって決定した。シミュレーションと模型実験で境界条件として用いる流量を表-A.1に示す。

表-A.1 各種境界条件

	1. 列車非走行時	2. C駅に向かう場合	3. B駅に向かう場合
シミュレーションの流量	a : 50 [m ³ /s] b : 25 [m ³ /s] c : 25 [m ³ /s]	a : 110 [m ³ /s] b : 30 [m ³ /s] c : 140 [m ³ /s]	a : 60 [m ³ /s] b : 15 [m ³ /s] c : 75 [m ³ /s]
模型実験の流量	a : 500 [l /min] b : 250 [l /min] c : 250 [l /min]	a : 350 [l /min] b : 100 [l /min] c : 450 [l /min]	a : 400 [l /min] b : 100 [l /min] c : 500 [l /min]

A. 2. 3 シミュレーションについて

シミュレーションにはCFDコード：SCIENCEを使用する。ここでは等温条件を設定し、物体表面に対しては壁関数を適用する。140×34×24=114240の不等分割メッシュを用いる。各方向の最小メッシュサイズは、それぞれ $Dx_{min} = 0.5m$, $Dy_{min}, Dz_{min} = 0.2m$ である。

各列車走行条件下における出入口の流量を表-A.2に示す。この流量の設定は換気回路網によるマクロ気流予測によって決定した。また、シミュレーションでは計算対象領域を小さくするために、出入口3, 4を一つにまとめて扱う。

表-A.2 各出入口の流量 [m³/s]

条件	出入口1	出入口2	出入口3および4
1	13.4	13.4	23.2
2	29.0	29.0	52.0
3	-16.2	-16.2	-27.6

A. 2. 4 模型実験について

模型実験装置の全体像を図-A.3に示す。駅模型は透明アクリル版によって作製した。

流量は模型のトンネルに接続したブロアを用いて制御する。トレーサーとしては流動パラフィンを使用し、これをニクロム線のワイヤー上で熱し30秒程度継続して発生させる。アルゴンイオンレーザー（Ion Laser Technology 5490 ACM-01-5A, 457~514.5nm, 200mW）を用いてコンコース上に水平にレーザーライトシートを形成する。このとき、レーザーライトシート面はコンコースの床から天井までの半分の高さで形成する。フローパターンはCCDビデオカメラ（NEC TI-324A）で撮影し、デジタル化した後、pattern tracking algorithm²⁾によって流速ベクトルに変換する。この作業によってコンコースにおける2次元の時間平均気流場が得られる。

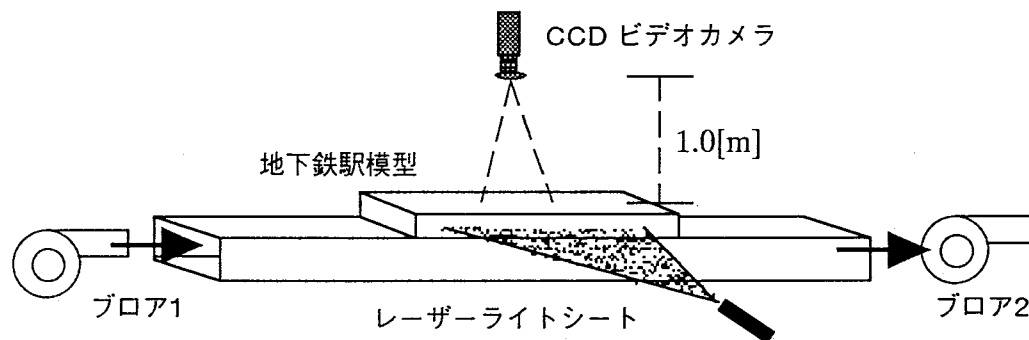


図-A.3 模型実験装置

実際の地下鉄駅で発生する気流のRe数を模型実験で維持するのは不可能なので、本模型実験では模型内の気流が完全に乱流になるように気流速度をできる限り大きくする。すなわち、模型内を流れる流量を大きくしながら煙による可視化を行い、フローパターンが変化しなくなったときに完全に乱流が発達したと見なし、このときの流量で可視化を行う。表-A.1における流量はこの手法で決定した。

A. 3 結果

A. 3. 1 条件1：列車が走行していない場合

図-A.4にシミュレーションによるコンコースの気流分布を示す。図-A.5には図-A.4の領域I, IIに対応する場所における模型実験の気流の可視化結果を示す。

図-A.6には図-A.4のline1-1におけるシミュレーションと模型実験の無次元気流速度を比較して示している。無次元化は出入口流速を基準として行った。シミュレーションと模型実験の結果の間には分布の相似が見られる。流速の最大値は両者ともほぼ同じである。

領域Iに注目すると、シミュレーションと模型実験の両方において、コンコースの中央では強い気流が見られ、その両側では気流が淀んでいる。

また、領域IIに注目すると、シミュレーションと模型実験の両方において、C階段に流れこむ気流が階段上で渦を形成している。ここには示していないが、模型実験ではA, B階段上でもシミュレーションと同様に渦が形成されていた。

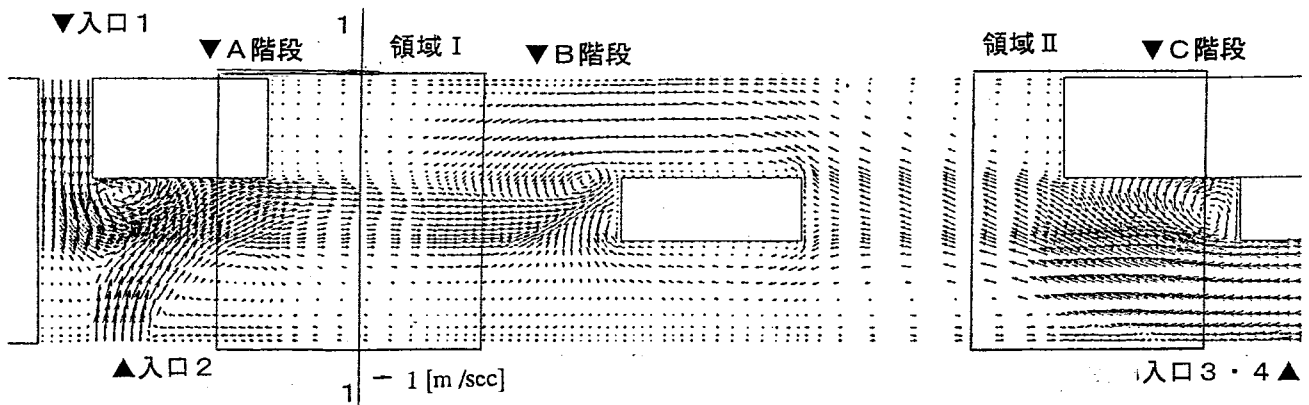


図-A.4 シミュレーションによるコンコースの気流分布

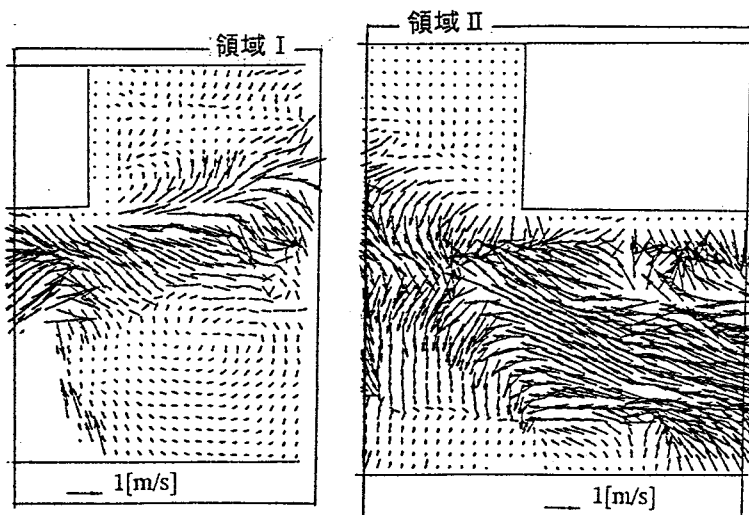


図-A.5 領域I, IIにおける気流の可視化結果

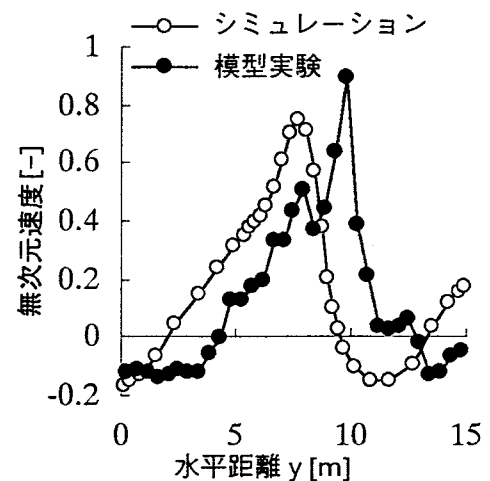


図-A.6 無次元気流速度の水平分布

A. 3. 2 条件2：列車がC駅に向かってトンネル2を最高速度で走行する場合

この条件も出入口からコンコースに空気が流入するという点が条件1と共通している。そのため、シミュレーションおよび模型実験では、気流速度が変化しただけで気流のパターンは条件1とほぼ同じものだった。

A. 3. 3 条件3：列車がB駅に向かってトンネル2を最高速度で走行する場合

この条件は、階段から空気が吹き出し、コンコースを経て出入口から流出するという点で条件1、2と異なる。図-A.7にシミュレーションによるコンコースの気流分布を示す。図-A.8には図-A.7の領域I, IIに対応する場所における模型実験の気流の可視化結果を示す。シミュレーションの結果と模型実験の結果はほぼ同じものである。条件1、2の場合と異なり、各階段上では渦が形成されなかった。B階段から吹き出した気流は一様に広がり、条件1の領域Iにおいて見られたように気流の強い領域と滞留域が明確に区別されることがない。また、シミュレーション結果によれば、各階段から吹き出した気流は最寄りの出入口に流れ込む。すなわち、A、B階段からの気流は出入口1、2に、C階段からの気流は出入口3、4に流れ込む。

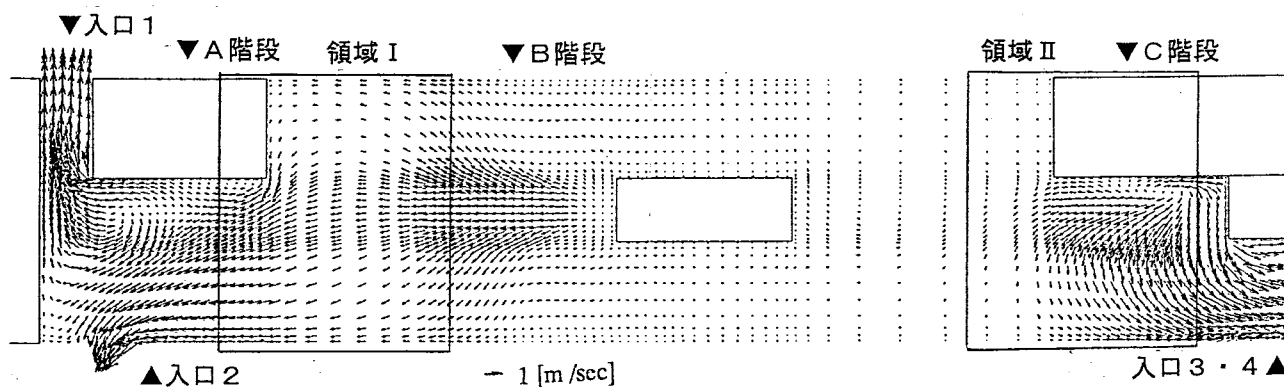


図-A.7 シミュレーションによるコンコースの気流分布

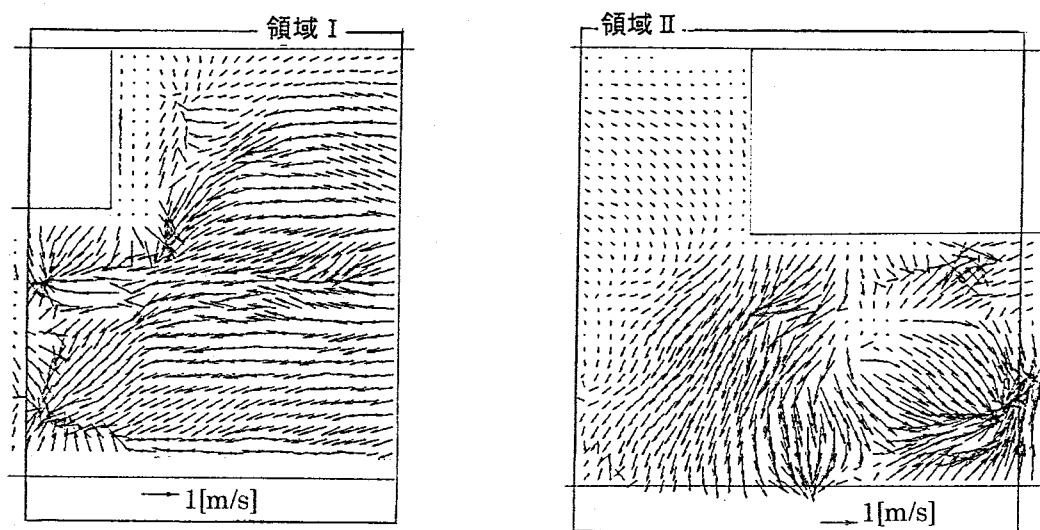


図-A.8 領域I, IIにおける気流の可視化結果

A. 4 まとめ

いずれの条件下でもシミュレーション結果と模型実験結果のあいだにはフローパターンの一致が見られたため、シミュレーションの妥当性が確認された。

地上から駅構内への空気の吹き込みが起きる条件1, 2においては、構造物の隅角部において空気の滞留域が形成されることが示された。条件1, 2とは逆に駅から地上への空気の吹き出しがおきる条件3においては、階段から吹きだす気流は一樣に広がり、構造物の隅角部における明確な滞留域は形成されないことが示された。

参考文献

- 1) 白鳥・松平・小西・桜井：地下鉄駅構内の空気流動に関する実験的研究（第1報，駅内部気流と列車風緩和），日本機学会論文集（B編），58巻546号，1992 - 2
- 2) Kaga, A.; Inoue, Y.; and Yamaguchi, K., Pattern Tracking Algorithms Using Successive Abandonment, Journal of Flow Visualization and Image Processing, Vol. 1, pp. 283 - 296, 1993

第4章 地下鉄構内における熱的快適性予測

4.1 はじめに

地下鉄は、各種気流駆動力、特に列車走行によって地上との空気の交換が起こりやすい空間である。このことは、夏期には冷房時において高温外気の流入による蒸暑感および冷房負荷の増大を招き、冬期には低温外気の流入による寒冷感を招く。地下鉄の温熱環境調整を行う場合には、このような温熱環境の非定常性を考慮する必要がある。

また、地下鉄は利用形態上も特殊な空間である。利用者の多くが常時座業を続けているオフィス空間等と異なり、地下鉄では旅客は主に歩行を中心として様々な行動をとっている。例えば地下鉄の場合、歩行・階段昇降・立ちながら待つ・乗車して座る、というように列車に乗りこむまでにいくつかの行動の変化があり、熱的快適性を維持するためには、こうした旅客の行動の非定常性も視野に入れなくてはならない。

このように、地下鉄では、温熱環境の非定常性および旅客行動の非定常性という二つの特性を考慮する必要性があり、従来の地上のオフィスを対象とするような温熱環境調整技術をそのまま適用することはできない。地下鉄に対しては、独自の環境調整手法を確立する必要がある。

温熱環境の調整を行う上で必要となるのが夏期冬期における気温・湿度設計条件の決定である。これらの設計基準を決定するためには、熱的快適性をなんらかの手法で予測することが必要となる。日本では習慣的に不快指数(DI)を指標として熱的快適性の予測を行い、設計条件を決定している。しかし、不快指数は温度と湿度のみを入力値とし、風速・旅客の代謝量といった重要な因子を含んでいないため、合理的な予測手法とはいえない。

より合理的な手法として文献¹⁾ではRWIおよびHDRという2つの指標を用いた熱的快適性予測手法を示している。しかし、この予測手法も、旅客の行動の変化を考慮しているものの、温熱環境を非定常ではなく、平均値で扱っており、まだ不十分である。

こうした先例を踏まえ、本章では地下鉄の温熱環境および旅客行動の特性により配慮した熱的快適性の予測手法を提案する。本章の前半(4.2~4.5)ではマクロモデル(換気回路網)を用いた巨視的な熱的快適性の予測手法を示し、同手法を用いて標準的な地下鉄駅を対象としたケーススタディを行う。本章の後半(4.6~4.10)では、駅構内のより詳細な熱的快適性を予測するために、ミクロマクロ連成モデル(one-way model)および旅客行動予測プログラムを用いた手法を示す。

4.2 巨視的な熱的快適性予測手法の概要

4.2.1 予測手順

本節より4.5節までは、第2章で示したマクロモデル(換気回路網)から得た気流・気温の予測結果、さらに任意に設定した旅客の行動履歴を、SET*やRWI・HDRなどの温感指標を用いて評価するという手順で熱的快適性予測を行う。

4.2.2 温冷感と熱的快適性

SET*やRWI・HDRは生理学的知識に基づく合理的な温感指標であり、適用範囲も広いとされている。

より厳密に熱的快適性を行うためには、温冷感に加えて、非温熱因子や心理作用を考慮する必要があるかもしれない。例えば、木村ら²⁾は地下食堂の快適性の総合評価において、内装デザインや空気の新鮮度等の非温熱因子が作用する可能性を指摘している。また、永良ら³⁾は、被験者テストの結果から、温冷感が温熱

環境を構成する諸因子よりも、温熱環境の変化の割合の方に影響をうける可能性を指摘している。しかし、本研究では心理まで考慮した高度な指標の開発が目的ではないため、SET*およびRWI・HDRによる温冷感評価によって、ある程度現実的な熱的快適性評価ができるものとして議論を進める。

4. 2. 3 SET*

SET*⁴⁾は生理学的知識に基づく合理的な温感指標であり、人体の熱収支の非定常性を考慮している。SET*は温度・湿度・気流速・平均放射温度といった環境因子と人体の代謝量および着衣状況を入力条件とする。ASHRAE⁵⁾では冬期の快適域をSET*=20.0~23.9℃、夏期の快適域をSET*=22.8~26.1℃としている。そして、SET*の予測値が快適域を上まわるほど旅客は蒸暑感を感じ、下まわるほど寒冷感を感じるものと判断される。駅構内を歩行する旅客を設定し、その旅客の周囲の温熱環境をSET*で評価することによって、地下鉄構内における熱的快適性評価ができるものと考えられる。

4. 2. 4 RWI・HDR

それぞれRelative Warmth Index, Heat Deficit Rateの略称である。ここでは文献¹⁾にもとづいて概説する。蒸暑環境に対してはRWI、寒冷環境に対してはHDRを適用する。両者は相互補完的指標である。人体熱平衡の取り扱いSET*ほど厳密ではないが、人間の活動の非定常性を考慮したという点で特色がある。両者の定義式を次に示す。

RWI :

$$RWI = \frac{M(I_{cw} + I_a) + 6.42(\theta - 35.0) + RI_a}{65.2(5.86 - P)} \quad (P > 2.27[kPa]) \quad (1)$$

$$RWI = \frac{M(I_{cw} + I_a) + 6.42(\theta - 35.0) + RI_a}{234} \quad (P \leq 2.27[kPa]) \quad (2)$$

HDR :

$$HDR = \frac{D}{H} = -M - \frac{6.42(\theta - 30.6)}{I_{cw} + I_a} + 28.4 - \frac{RI_a}{I_{cw} + I_a} \quad [w/m^2] \quad (3)$$

RWIは無次元数であるが、HDRはW/m²の単位を持ち、人体から熱が奪われる割合を表わす。上に挙げた変数のうち、M、I_{cw}、I_aの取り扱いについては後述する。

なお、SET*、RWIとASHRAEの温感スケールの対応を表-4.1に示す。

表-4.1 温感スケールの対応

ASHRAE Comfort Classification	RWI	SET* [°C]
warm	0.25	winter : 20.0 ~ 23.9 summer : 22.8 ~ 26.1
slightly warm	0.15	
comfortable	0.08	
slightly cool	0.00	

RWIは0.5を快適性の限界としている。HDRによる

評価では、各時点でのHDRの値よりもその積算値の方が重要である。しかし、本章で行うシミュレーションでは、短時間を対象とするため、HDRによって各時刻の熱損失を評価し、積算値は参考にとどめることにする。

4. 2. 5 代謝量 (M)

RWIでは活動が変化したとき、新しい活動に代謝量が対応するまでに6分の時間遅れが生じるとしている。したがって、代謝量が線形に変化すると仮定すれば、遷移時の代謝量は次式で表わされる。

$$M(t) = M_I - \frac{t(M_I - M_F)}{360} \quad (4)$$

4. 2. 6 衣服の熱抵抗 (I_{cw})

衣服のclo値は、衣服が汗で湿ることによって低下する。乾燥時1.0cloの衣服の活動によるclo値の低下を

表-4.2に示す。

他の衣服についても lcw と同じ割合で変化するものとする。遷移期間中の I_{cw} は代謝量と同様に線形補間で求める。

4. 2. 7 衣服表面の熱抵抗 (I_a)

I_a は皮膚や衣服の表面における空気の境界層の断熱効果である。これは気流速度のみによって変化し、次式から求められる。

$$I_a = 0.397v - 0.421 \quad (5)$$

ここで、 v は環境の気流速と活動にともなう気流速（伴流）の和である。ただし、この式は文献¹⁾に掲載されていた図から求めた近似式である。

表-4.2 活動別の代謝量、 lcw および伴流の値

活動の種類	代謝量[W/m ²]	$lcw[clo]$	伴流[m/s]
基礎代謝	47	0.60	0.0
椅座	63	0.60	0.1
座業	79	0.40	0.3
立ちながらの作業	88	0.50	0.2
ぶらつき	123	0.40	0.5
歩行(3.2[km/h])	123	0.40	1.0
歩行(4.8[km/h])	170	0.35	1.5
歩行(6.4[km/h])	224	0.30	2.0

4. 3 巨視的予測の設定

4. 3. 1 対象とする地下空間

ここでは図-4.1に示す地下鉄駅を熱的快適性予測の対象とする。この駅構造は実在のいくつかの駅構造を参考に設定した。シミュレーションでは長さ10mのゾーンによってコンコースを11分割し、プラットフォームを18分割し、ゾーン間にブランチを設定した。

機械換気方式には、大きく分けて駅給気・中間排気方式と縦流換気方式の2つがあるが、ここでは縦流換気方式の地下鉄系を設定した。

本実験で対象とする駅（以後B駅）は、同じ構造を持つA駅・C駅と単線シールドトンネルでつながっており、A・C各駅から外へ延びるトンネルは大気開放されているものとした。図-4.2に駅と換気機器の配置を示す。

各換気機の風量は30m³/sである。

夏期の換気運転は、全換気機を稼働させる。冬期は、図中番号1, 3, 6, 8, 9, 11, 14, 15の換気機のみ稼働する。

なお駅における換気はホームに対してのみ行ない、コンコースでは列車風を利用した自然換気を行なうものとする。また、いずれの駅も冷暖房を行わない。

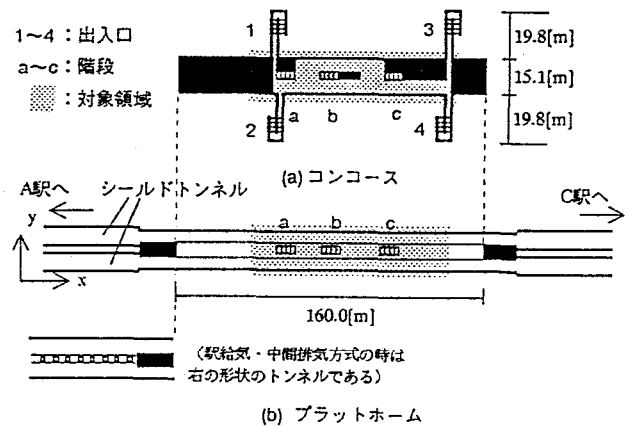


図-4.1 地下鉄B駅平面図

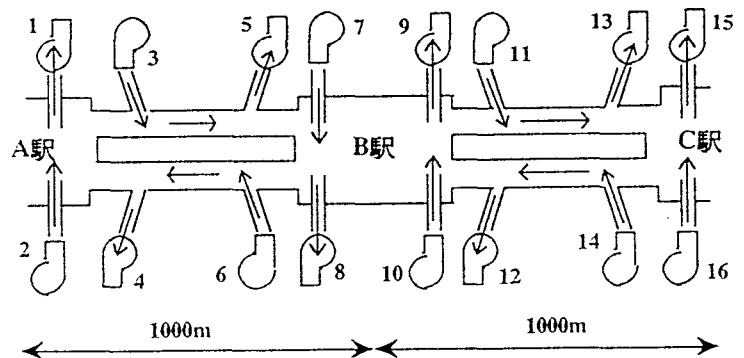


図-4.2 駅換気機器配置図

4. 3. 2 内部発熱量

本シミュレーションで対象とする地下鉄駅では空調を行わないため、駅構内の内部発熱としては、機器発熱は与えず、照明発熱、人体発熱、列車発熱のみを与えることにした。

表-4.3に各発熱の原単位を示す。照明発熱および列車発熱の原単位としては既存の地下鉄を参考にした。

表-4.3 各種発熱量

照明発熱[W/m ²]	20
列車発熱[kW/列車]	500

人体発熱は、文献⁶⁾を参考にして、次式で顕熱 Q_{HS} [W/人]と、潜熱 Q_{HL} [W/人]を求める。

$$Q_{HS}=83-7(\theta-24) \quad (6)$$

$$Q_{HL}=226-Q_{HS} \quad (7)$$

なお、人体発熱と列車発熱は、図-4.3に示す時間別の滞在人員や発着本数に滞在時間に乗じるものとする。

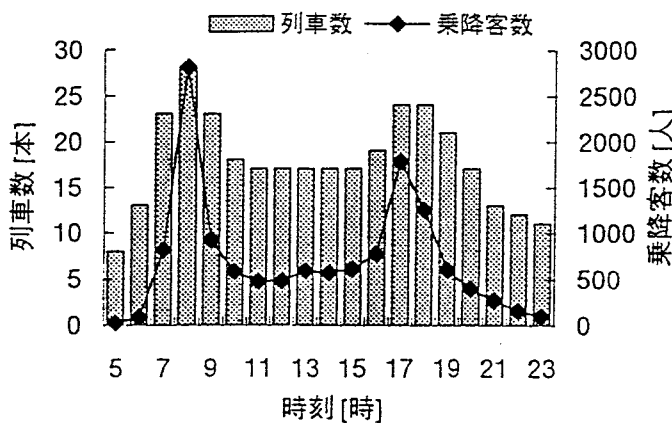


図-4.3 列車数と乗降客数

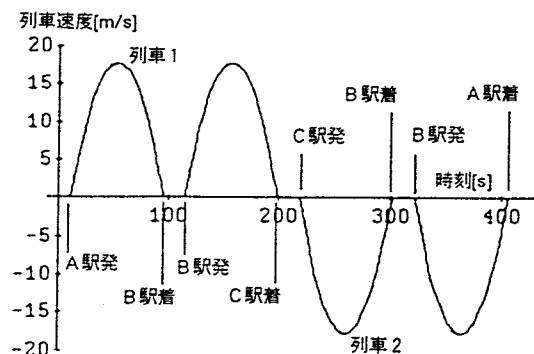


図-4.4 列車の走行曲線

4. 3. 3 列車運行ダイヤグラム

A駅からC駅に向かう列車1とC駅からA駅に向かう列車2を交互に走行させる。これらの列車の走行曲線を図-4.4に示す。

4. 3. 4 環境設定

(1) 地上気温および壁温

対象とする環境条件を求めるため、上記の地下鉄駅の構造、平均的な換気量、また、気象条件として大阪地方のHASP標準気象データを、下田らが開発した地下鉄環境シミュレーションプログラムOSTESP⁶⁾に与え、1時間ステップの地盤伝熱計算を行った。この熱伝導計算で用いた定数を表-4.4に示す。OSTESPによって得られた結果から最も寒い時期と暑い時期を選び、シミュレーションの環境条件とした。表-4.5にその環境条件を示す。以後、1月28日8時を冬期環境条件、8月8日13時を

表-4.4 熱伝導計算に用いた定数

熱伝導率	土	1.2
[W/(m・K)]	壁体	1.6
体積熱容量	土	1.9
[MJ/(m ³ ・K)]	壁体	2.3
熱伝達率	地表面	12.0
[W/(m ² ・K)]	トンネル・ホーム	11.6
	コンコース	9.3

表-4.5 環境設定

		1月28日8時	8月8日13時
外気温	[°C]	-1.7	36.5
外気湿度	[g/kg]	3.0	17.1
プラットフォーム壁温	[°C]	11.0	26.7
コンコース壁温	[°C]	11.1	29.6
トンネル壁温	[°C]	9.3	27.8

夏期環境条件と呼ぶ。

(2) 日射量

文献¹⁾にもとづき、RWI・HDRでは、地下空間内部において $R=0.0\text{W/m}^2$ とする。また、屋外では、夏期は 142.0W/m^2 、冬期は 31.5W/m^2 を与える。

SET*では、MRT（平均放射温度）の形で日射の影響を入力する必要があるので、RWIで用いる日射量をMRTに変換した。計算を簡単にするために、人体の表面温度を $35[^\circ\text{C}]$ 、人体表面の射出率を1とすると、 $R=31.5\text{W/m}^2$ に対して $\text{MRT}=39.6^\circ\text{C}$ 、 $R=142.0\text{W/m}^2$ に対して $\text{MRT}=54.5^\circ\text{C}$ が得られる。地下空間内部では壁温をMRTとして与える。

(3) 地上風

シミュレーションでは図-4.5に示す地上風の実測値を屋外歩行時の風速として用いることにした。この風速は1994年6月27日に大阪大学構内で実測したものである。ただし、本シミュレーションでは、第2章で得られた知見にもとづき、駅構内への地上風の吹き込みは考えない。

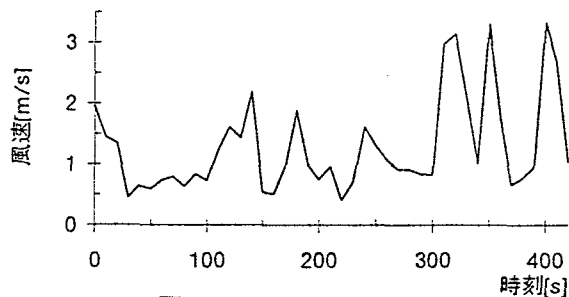


図-4.5 地上風速の変動

(4) 車内環境

列車内部は冷暖房が行われているものとし、冬期には、気温 21°C 、絶対湿度 3g/kg(DA) 、気流速は 0.2m/s を、夏期には、気温 27°C 、絶対湿度 17g/kg(DA) 、気流速は 0.2m/s を設定する。

4. 3. 5 旅客の行動履歴および衣服

(1) 衣服

男性の通勤客を想定し、夏はスーツの上着をとった状態として 0.5clo 、冬はコートを着用している状態として 1.4clo を設定した。

(2) 行動履歴

旅客の行動は乗車と下車の二つに大別できる。下車する旅客は一齐に行動するが、乗車する旅客は同時には行動しない。そこで、図-4.6に示すように、乗車行動に関して、駅に入る時刻をずらした2パターン、下車行動に関して1パターンを設定した。

また、乗客は図-4.7に示す経路を通るものとする。下車する場合は乗客の経路を逆行するものと定める。それぞれの行動における代謝量等の値は表-4.2の値を用いる。また、これらの行動履歴は列車の発着に同調させている。

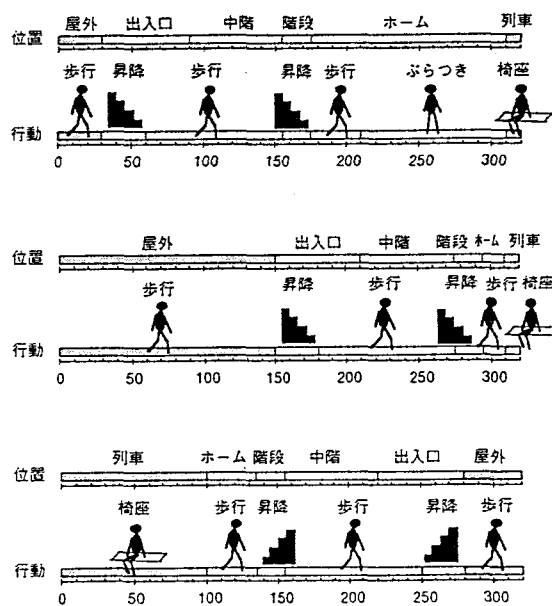


図-4.6 旅客の行動履歴

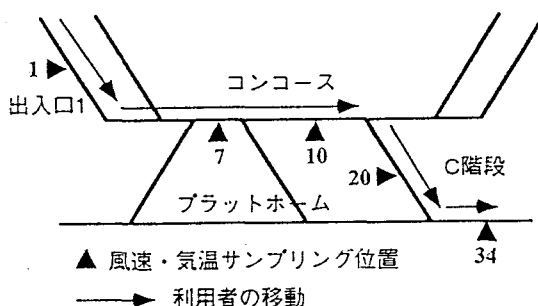


図-4.7 旅客の移動経路

4. 3. 6 計算条件

シミュレーションは冬期・夏期の2環境条件×3行動履歴の6通りの組み合わせで行う。

4. 4 巨視的予測の結果

4. 4. 1 冬期の温熱環境予測結果

図-4.8に、冬期の朝に乗車する場合のSET*・HDR予測値および気温・風速予測値を示す。気温・風速のグラフに添えられた数字は図-4.7に示す地点の番号に対応する。

風速の正負は番号ごとに以下のように定義する。

1（出入口）：屋外から構内に流れる場合を正とする。

7, 10（コンコース）、34（プラットフォーム）：図-4.7で右側に向かう場合を正とする。

20（階段）：コンコースからプラットフォームに流れる場合を正とする。

風速は列車の運行の影響を受けた変動を示しており、狭隘部分である出入口(1)、階段(20)やプラットフォーム(34)で強いピークが見られる。コンコース(7, 10)における変動はあまり大きくない。

冬期には外気と駅構内との気温差が大きいいため、風向の変化による気温の変動が急激なものとなっている。また、内部ほど、気温変動の幅が小さくなる傾向がある。出入口(1)では外気温の影響が強く、10℃を超える変動が見られるが、プラットフォーム(34)の変動は、2℃以内に収まっている。

4. 4. 2 行動履歴1に対する温冷感予測結果

(1) SET*

図-4.8において時刻30～310sが旅客が駅構内に滞在している期間である。この間、SET*はcomfort zoneの上限の線を中心として変動している。階段昇降時の時刻150～170sにはSET*の上昇が見られる。

(2) HDR

HDRは熱損失を表す指標であるため、SET*と比較する際は正負の記号を逆転して解釈する必要がある。HDRの予測結果は、全体としてはSET*に対応する傾向を示しているが、一部に傾向が異なる部分がある。それは階段昇降時(時刻155～175s)である。このとき、代謝量の上昇の影響によりSET*は増加しているが、HDRによれば、階段気温(20)および階段風速(20)の影響で熱損失が増加しており、逆の結果である。これは、SET*とHDRで代謝量の扱いが異なるためである。すなわち、SET*では瞬時の代謝量をそのまま計算に用いるが、HDRでは代謝量の変化が行動の変化に対して時間遅れを伴うことを考慮しているため、短時間では、代謝量の変化の影響が現れないためである。

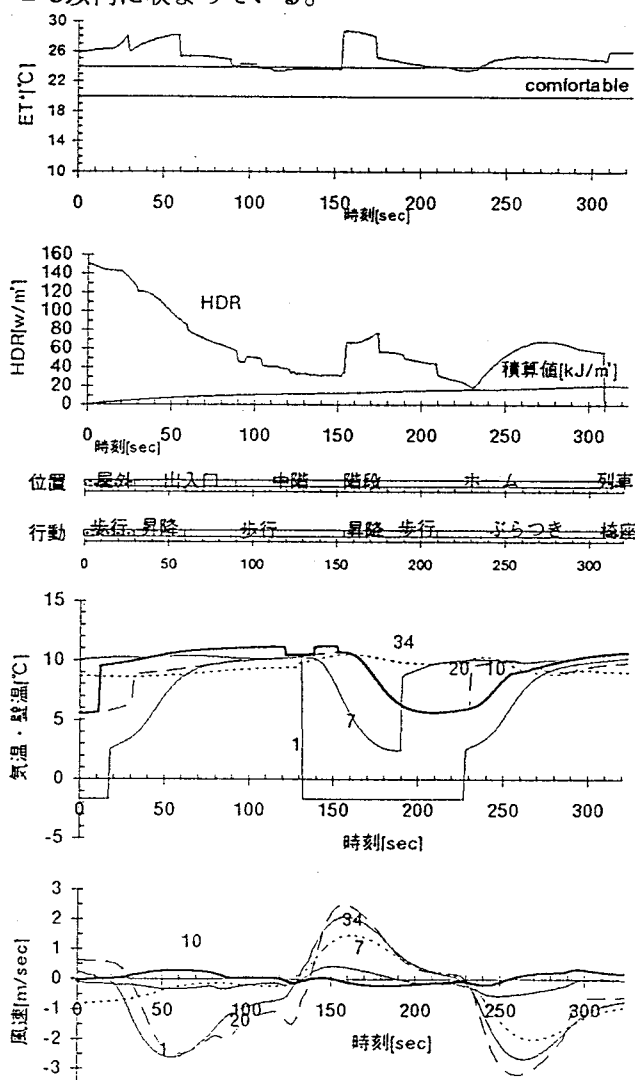


図-4.8 行動履歴1に対する温冷感および冬期の温熱環境

4. 4. 3 行動履歴2に対する予測結果

(1) SET*

図-4.9において時刻150～310sが旅客が駅構内に滞在する期間である。行動履歴1の結果と異なり、comfort zoneの下限の近くまで下がることがある。このように変動が激しくなる理由は、旅客が駅構内に入る時期と列車風による外気の流入の時期が重なることが原因である。

一般に冬期の地下空間は地上よりも温暖であると考えられているが、時刻180s以降に見られるように、出入口を通過中に冷気の侵入がある場合には、SET*が最低で21.2℃（時刻209s）まで低下する。

180s以降は、各場所の風速が低下し、冷気の進入も弱まるため、乗車するまでの期間、SET*は高い値を示している。

(2) HDR

HDRも全体としてはSET*と同様の傾向を見せている。しかし、SET*が時刻180s以降低下したとき、これに対応する変化は見せない。これも、代謝量の扱いの違いが原因である。

4. 4. 4 行動履歴3に対する予測結果

(1) SET*

図-4.10において時刻100～280sが駅構内に滞在する期間である。SET*は列車内ではcomfort zoneより高く、25.5℃で一定であるが、下車直後に温感が低下する。駅構内ではcomfort zoneの上限の線を中心として変動する。階段上昇時には、代謝量が大いこと、気流速が小さいこと等の理由で一時的に値が上昇する。

出入口歩行時の時刻220～230sでは、コンコースからより低温の出入口に移動したことにより、値がcomfort zoneの下限、20.0℃まで低下する。

(2) HDR

HDRの変化がSET*と大きく異なるのは出入口上昇時(250～280s)であるが、これも代謝量の扱いの違いが原因である。

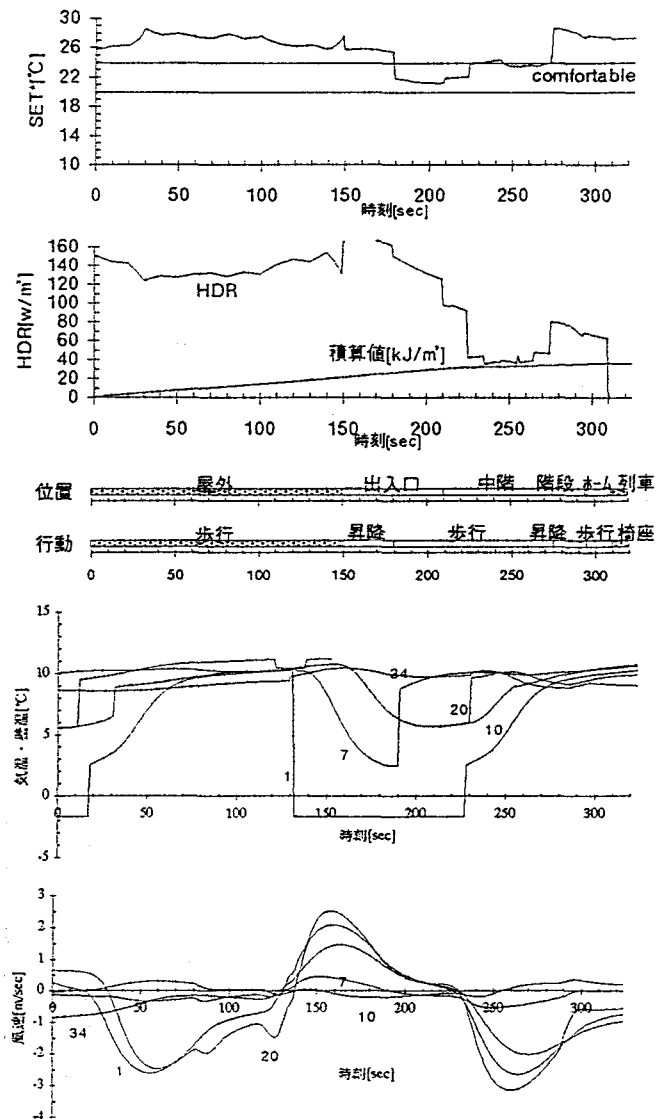


図-4.9 行動履歴2に対する温冷感

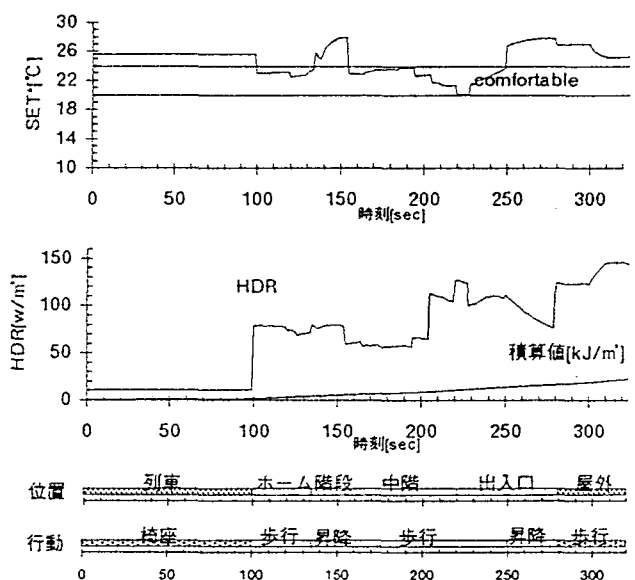


図-4.10 行動履歴3に対する温冷感

4. 4. 5 夏期の温熱環境予測結果

図-4.11 にSET*, RWI, 気温, 風速の予測値を示す。

第2章に示したように、列車風のような強制対流が存在する場合は浮力の影響は非常に小さいものとなる。そのため、地下空間内と外気温の関係が、冬期と夏期では逆であるにもかかわらず、風速の予測値はほぼ同じである。

屋外が非常に高温であるため、駅構内の気温は相対的に低い。しかし、それでも構内各部の気温は30℃を超えている。冬期と同様、気温はより内部になるほど、変動の幅が小さくなる傾向がある。

4. 4. 6 行動履歴1に対する予測結果

(1) SET*

SET*の値は常時comfort zoneを大きく上回っている。出入口やホームに入った直後に温感の急激な変化が見られる。出入口に入った直後(時刻30s)にはSET*の値が40.1℃から35.7℃まで低下する。また出入口で階段を降り終えた直後(時刻60s)には35.6℃から32.1℃まで、ホームに入った直後(時刻175s)には35.6℃から31.4℃まで低下する。プラットフォーム滞在時の時刻240sに、SET*が34.4まで上昇しているが、これはプラットフォーム(34)の気流が0m/s前後になっているためと考えられる。全体の傾向として、駅に入ってから乗車するまでの間階段状に温感が低下している。

(2) RWI

RWIの値の変動の傾向はSET*とほぼ同様であり、駅に入ってからwarmとslightly warmの間で変動している。出入口に入った直後には日射の影響がなくなるため、RWIの値は0.595から0.244に低下する。また、SET*と同様に時刻240s前後にはRWIが0.361まで上昇する。

4. 4. 7 行動履歴2に対する予測結果

行動履歴1と同様に、図-4.12においてSET*と

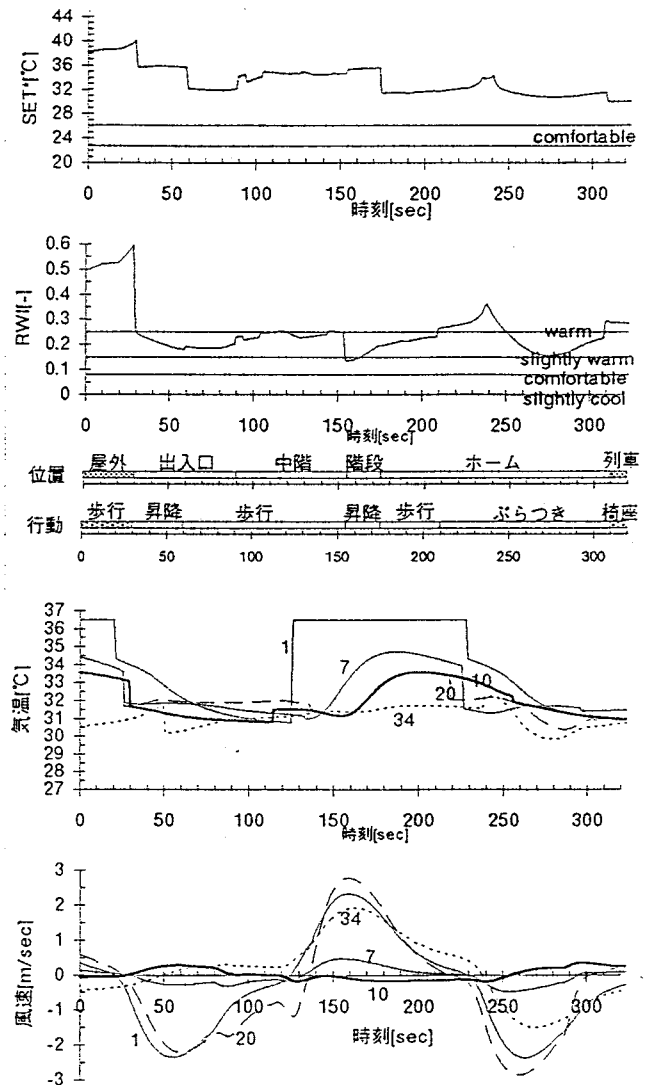


図-4.11 行動履歴1に対する温冷感および夏期の温熱環境

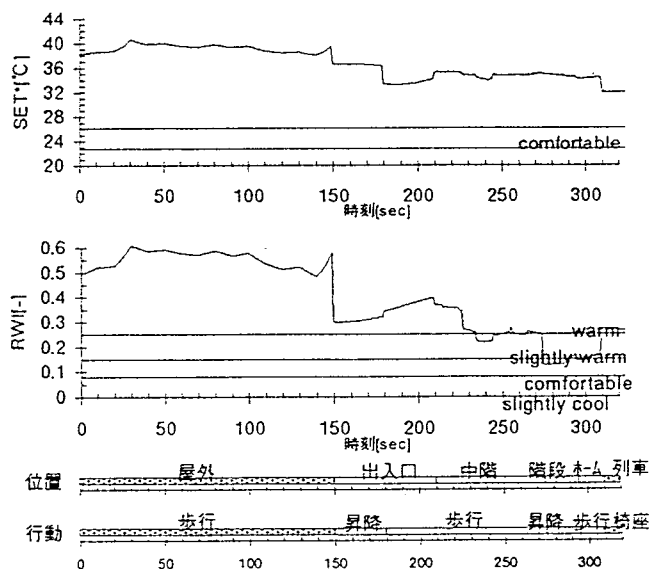


図-4.12 行動履歴2に対する温冷感

RWIの値はともに快適なレベルを大きく上回っている。SET*およびRWIは、全体としてほぼ同じ傾向を示しており、出入口や階段に移動した直後、温感の急激な低下が見られる。とくにSET*の値の低下の傾向は行動履歴1と似ており、出入口に入った直後、行動履歴1では4.4℃低下したのに対し、行動履歴2では3.0℃低下している。また、出入口で階段を降り終えた直後には、行動履歴1では3.6℃低下、行動履歴2では3.0℃低下している。

4. 4. 8 行動履歴3に対する予測結果

図-4.13において、SET*とRWIの値は屋外へ向かうにしたがって大きくなる傾向を示している。ホーム、コンコース、屋外に移動した直後には温感の急激な上昇が見られる。

コンコース歩行時の195[sec]においてSET*およびRWIの上昇が見られるが、これは図-4.7のコンコースの10で示す領域から7で示す領域に移動したことが原因である。このとき、気温(7)と気温(10)の差は2[℃]以上ある。このときの温感の上昇はSET*では小さく、RWIでは大きく現れている。

また、出入口歩行時の時刻220～230sで、RWIの値の急な上昇が見られるが、これはこのとき出入口の風速(1)が0[m/sec]になったことに伴う I_{cl} の増加が原因である。

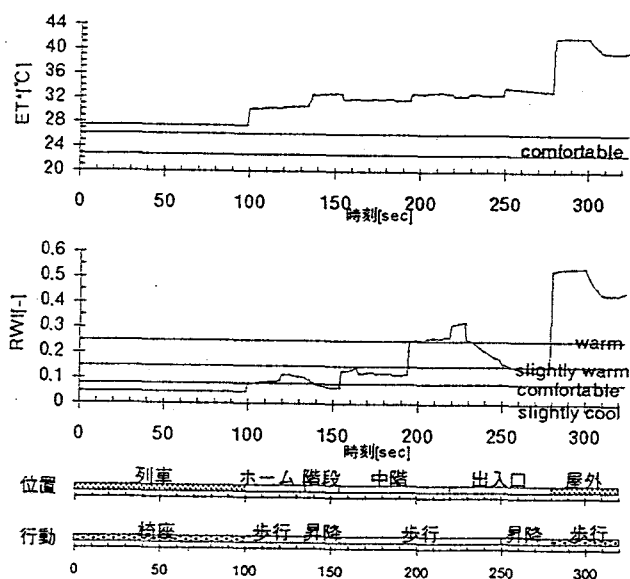


図-4.13 行動履歴3に対する温冷感

4. 5 巨視的予測結果の考察

4. 5. 1 地下鉄駅温熱環境の特徴

ホームの気温は比較的安定しているが、出入口やコンコース等の外部により近い部分では、列車運行にともなう冷氣もしくは高温外気の流入があり、気温が激しく変動している。コンコースにおいて冷暖房を行ったとしても、外気の流入により、温湿度の制御が困難となり、エネルギーの浪費につながる可能性がある。冷暖房の実行可能性は、旅客の行動パターンおよび周囲の温熱環境との相互関係を考慮して、本章で示したような熱的快適性予測手法を用いて判断されるべきであると思われる。

風速は、狭隘部分である出入口(1)、階段(20)やホーム(34)で強いピークが見られる。特に階段では、ピーク時に3[m/sec]程度の風速があり、温冷感とは独立に、風速自体で不快感が生じる可能性がある。この点については、設備設計ではなく、断面形状等、意匠・構造設計によって対応する必要がある。

4. 5. 2 温冷感に対する温熱環境変動の影響

シミュレーションでは、温熱環境の変動の影響が明確に現れた。特に風速の影響は明確で、4. 4. 6に示した例では、気温の変動があまり無い場合でも、風速が小さいと温冷感が上昇するという結果が得られている。

4. 5. 3 行動履歴別予測結果の比較

シミュレーション結果からは、同一環境が対象であっても、行動履歴の違いによって、温冷感の変動が異なることが示された。

こうした結果からは、温熱環境変動に対する旅客行動のタイミングの重要性が指摘できる。乗車客の行動は一斉に行われないが、下車客はほぼ一斉に行動するので、適切な動線計画によって熱的快適性を維持することが可能であると考えられる。たとえば、4. 4. 3に示した冬期の乗車時の熱的快適性予測では、旅客が出入口通行時に列車運行による強い風が吹き、寒さを感じる結果が得られている。そこで、旅客が出入口に到達する時間と列車風が流れる時間が一致しないように、通行距離を変更するという構造的対応を行えば、暖房などのエネルギー投入を行わずに熱的快適性を維持できる可能性がある。

4. 5. 4 評価指標の比較

SET*とRWI・HDRとでは、代謝量の取り扱いの違いから、旅客の行動が変化した直後の温冷感には違いが見られた。生理学的な観点から述べれば、代謝量の非定常扱いをするRWI・HDRの方がより正しいと言える。しかし、各計算条件に対する予測結果では、全体的には同じ傾向を示している。指標を利用する立場から述べれば、RWI・HDRは、寒冷環境と蒸暑環境とで使い分ける必要があり、またHDR自体は寒冷感を表現する指標ではないという点で利用しにくい。今後の研究では評価指標をSET*に限定した方が実用的であると思われる。

4. 5. 5 ヒートショックについて

SET*あるいはRWI・HDRの変動値を見ると、空間の移動に伴い、ヒートショックと呼ばれる温冷感の急激な変動が起こっているのがわかる。ヒートショックは旅客、特に老人の生理的機能に対して大きな負担であり、特別な対応が必要である。

ヒートショックを数量的に評価する手法のひとつとして、川島⁷⁾は現時刻と前時刻の人体周囲気温の差を正負に分けて経時的に積分することを提案し、正の積分値をTG+、負の積分値をTG-と呼んでいる。ここで人体周囲気温に代えてSET*を用い、夏期条件下の行動履歴1～3について駅構内滞在中のTG値を求めると表-4.6のようになる。夏期にはヒートショック：TG+のみが重要であると考え、下車行動である行動履歴3は下車直後や階段からコンコースに移動した直後の温冷感の急上昇によって、TG+値が最も大きくなっている。この指標の値を小さくするような温熱環境調整を目指す必要があると考えられる。

表-4.6 構想履歴別TG値

行動履歴	1	2	3
TG+[°C・s]	14.0	9.2	14.4
TG-[°C・s]	23.0	16.1	12.9

4. 6 ミクロ・マクロ連成モデルによる微視的な熱的快適性予測の概要

4. 6. 1 巨視的予測からの改善点

本章4. 2～4. 5で示したマクロモデルによる熱的快適性予測では、大空間であるホームやプラットフォームを気温・気流の均質な空間として扱っているため、ヒューマンスケールの気流・気温・湿度分布が考慮されないという点、また温冷感予測の対象である旅客の行動も任意に与えたものであるという点に問題がある。

本節以降では、これらの点を改善することを目的として、駅構内の環境予測にミクロ・マクロ連成モデル(one-way model)を適用し、一般的な旅客歩行ルートを選定に旅客行動予測プログラムを適用する熱的快適

性予測手法を示す。また、この予測手法の適用例として、標準的な地下鉄駅における冬期の熱的快適性を予測する。

4. 6. 2 気流・温熱環境予測

本節以降、気流・温熱環境および熱的快適性予測を図-4.14に示すようなフローで行う。一部は4. 3節の内容のくり返しになるが、以下、これらの予測手法について概説する。

マクロ気流予測は、換気回路網による地下鉄系全体の0.1秒ステップの気流予測である。ここで得られる流量と空気調和・衛生工学会による大阪地方のHASP標準気象データを与条件として、OSTESPによる地盤吸放熱を考慮した通年の温熱環境予測を行う。このとき、1年目の1月1日午前1時から始めて、地中温度の経年変化が0.1℃以内になるまで、1時間ステップで数年分の計算を行う。

最後に気象データ、OSTESPによる壁温・隣接空間の気温の予測値、換気回路網による気流予測値を与条件として、ミクロモデル(SCIENCE)による地下鉄駅構内の気流・温熱予測を行う。

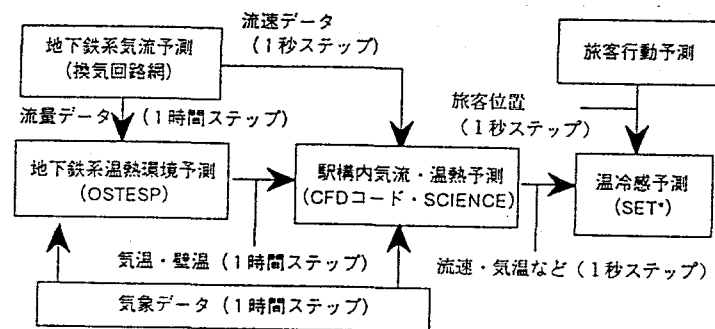


図-4.14 気流・温熱環境および温冷感予測の手順

4. 6. 3 温冷感予測

本節以降では、巨視的予測の知見にもとづき、温冷感の評価指標としてSET*を用いる。

温冷感予測は仮定の旅客一人に対して行う。その手順は以下の通りである

- ①旅客行動予測により、各時点における旅客の滞在位置を決定する
- ②SCIENCEによる予測結果から、旅客の滞在位置の気流・気温などの環境条件を取り出す。
- ③環境条件と旅客の代謝量・着衣状況からSET*を算出する。

4. 6. 4 旅客行動予測

上に示した熱的快適性予測では旅客行動予測によって旅客の滞在位置を決定する必要がある。

駅構内の旅客行動シミュレータとしてはSP-2⁸⁾が挙げられる。しかし、SP-2は入力データとして旅客の選択するおよその経路を入力して各時刻、各位置の人口密度を予測するシミュレータであり、本論文で必要とする旅客の経路予測の機能は無い。そこで、ここでは旅客は目的地に向かってなるべく短くなる経路をとろうとするという前提で旅客行動を予測した。

ダイナミック・プログラミングを用いれば完全な最短経路を求めることが可能であるが、ここではプラットフォームおよびコンコースの床面を細かいセルに分割し、内部構造物を物体セルとして設定した上で、以下

に示す簡単なアルゴリズムで経路を予測した。

- ①始点セルを滞在セルとする。
- ②滞在セルに隣接する8つのセルのうち、未踏かつ非物体のセルを次回移動セル候補とする。
- ③候補セルのうち、終点までの直線距離が最も小さいセルを次回移動セルとして選択する。
- ④③で選択したセルが終点ならば終了。違うならば次回移動セルを滞在セルにして②に戻る。

このほか、行き止まりを防ぐ工夫なども施している。なお本論文では後述のCFDで使用するメッシュをそのままセルとして用いた。

4. 7 微視的予測の設定

4. 7. 1 地下鉄系と換気方式

対象とする地下鉄系と換気機器の配置を図-

4.15に示す。ここでは巨視的予測の場合と異なり、駅給気・中間排気方式の地下鉄系を対象とした。

換気機器の運転は表-4.7に示す通りに行う。

換気回路網およびOSTESPではトンネルを50mずつ、駅構内を10mずつの空間に分割してマクロ環境予測を行う。

表-4.7 換気機器の給・排気量

季節	排風機1	送風機1	排風機2
冬期 (11/1~4/20)	3000	—	3000
夏期 (4/21~10/31)	6000	4000	6000

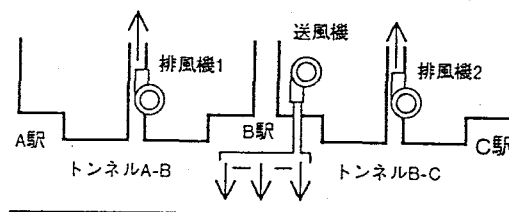


図-4.15 地下鉄系および換気機器の配置

4. 7. 2 地下鉄駅の構造

CFDおよび熱的快適性予測の対象とする地下鉄B駅の構造は図-4.1に示したものと同一である。マイクロ環境予測では同駅に対して図-4.16に示す不等分割メッシュを施し、非定常計算を行う。総メッシュ数は $29 \times 139 \times 32 = 128992$ 個である。

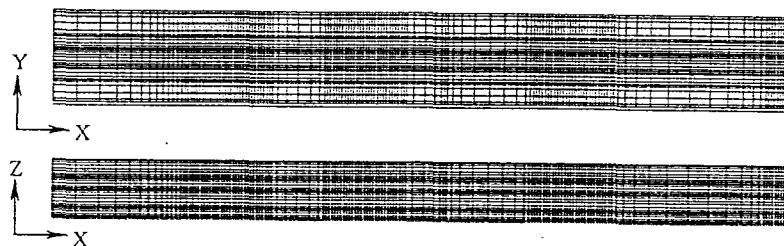


図-4.16 メッシュ分割図

4. 7. 3 内部発熱量

巨視的予測と同様に、ここで対象とする地下鉄駅でも空調を行わない。駅構内の内部発熱としては照明発熱、人体発熱、列車発熱を与えた。これらの設定は4. 3. 2と同じである。

4. 7. 4 列車の走行曲線

この地下鉄系はB駅を中心にして左右対称なので、A駅を出発し、B駅を経てC駅に到着する列車1本を走行させることによって、列車一本あたりの換気量を予測できる。図-4.17に列車の走行曲線を示す。

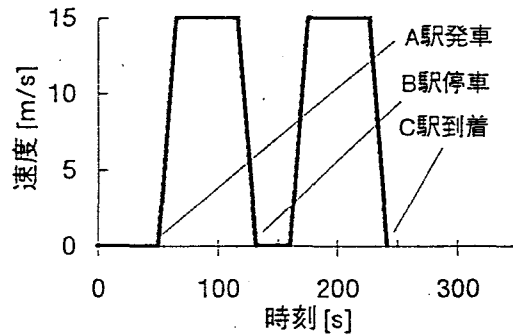


図-4.17 列車の走行曲線

4. 7. 5 地盤熱伝導計算

OSTESPでは駅構内・トンネル等各対象空間について日射の影響も考慮した二次元の地盤熱伝導計算を行う。この計算で用いる定数として表-4.4に示した値を用いる。

4. 8 微視的温熱環境予測結果

4. 8. 1 換気回路網による気流予測結果

冬期、夏期の機械換気運転下において、列車一本を走行させた場合のB駅の各開口部（出入口およびトンネル）の流量予測値をそれぞれ図-4.18(a), (b)に示す。このとき、図-4.17の走行曲線を換気回路網に与えたので時刻は走行曲線の時刻に対応する。出入口の合計流量およびトンネル流量は駅への流入時に正值をとる。列車走行に伴う流量の変化は冬期・夏期ともに次の通りである。はじめは機械換気によって出入口から駅構内へ空気が流入し、A-B, B-Cトンネルから流出する。A駅発車時からB駅停車時（50sから132s）までの間は列車のピストン効果によってA-Bトンネルから駅構内に流入し、出入口から流出する。B駅発車時（160s）以降は、ふたたび列車のピストン効果によって出入口から流入した空気がB-Cトンネルに流出する。C駅到着時（242s）以降は初期の機械換気のみ作用する状態に戻る。冬期(図-4.18(a))には駅給気を行わないため、夏期(図-4.18(b))に比べて出入口の流量が増加している。

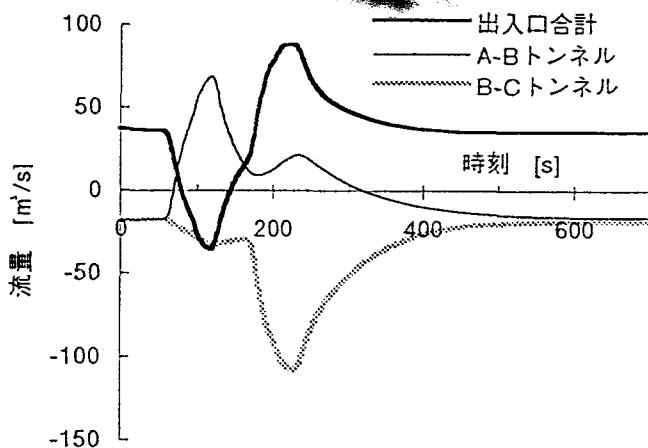


図-4.18(a) 冬期流量予測値

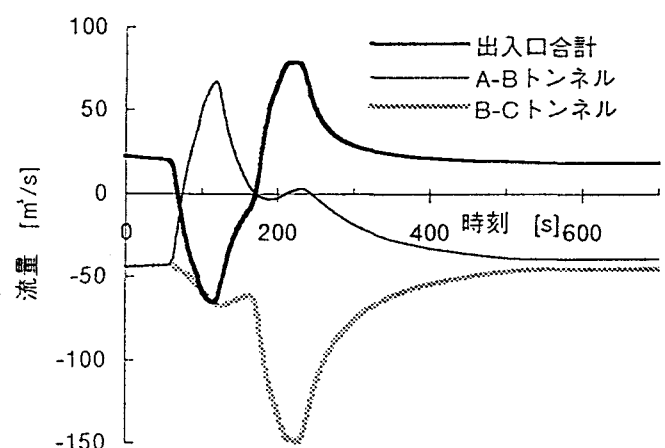


図-4.18(b) 夏期流量予測値

4. 8. 2 OSTESPによる温熱環境予測結果

換気回路網による予測から得られる列車一本あたりの換気量と機械換気量を気流条件とし、気象条件として大阪地方HASP標準気象データをOSTESPに与えて、地盤の温度の経年変化が 0.1°C 以内になるまで5年間分の計算を行った。この際、地下鉄構内の湿度は地下水の漏洩を想定せず、気象データによる地上の絶対湿度と旅客からの発汗を条件として計算した。

冬期の代表的な1日として計算開始後6年目の1月29日を選んだ。この日の正午における地下鉄系各場所の気温、湿度、壁温を表-4.8に示す。また、同時刻における地盤の温度分布を図-4.19に示す。

表-4.8 1/29（6年目）正午の温熱環境

	気温 [$^{\circ}\text{C}$]	絶対湿度 [g/kg(DA)]
外気	7.8	3.4
コンコース	8.1	3.42
プラットフォーム	12.28	3.49
トンネル	16.79	3.51

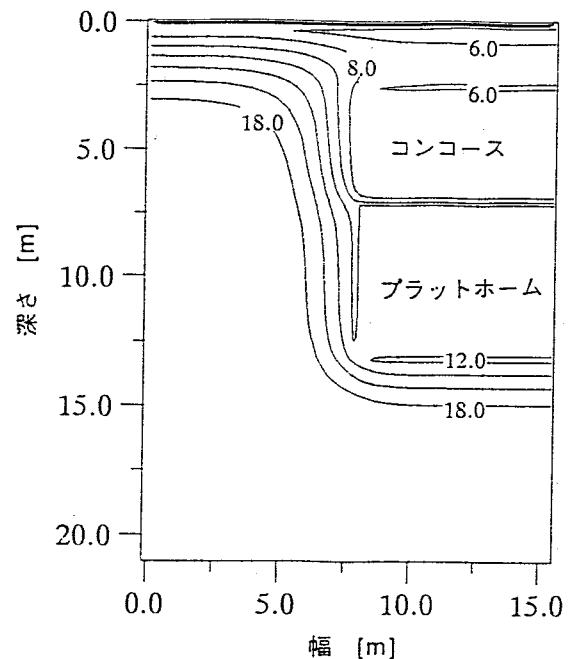


図-4.19 1/29 正午の地盤温度分布

4. 8. 3 冬期の駅構内温熱環境予測結果

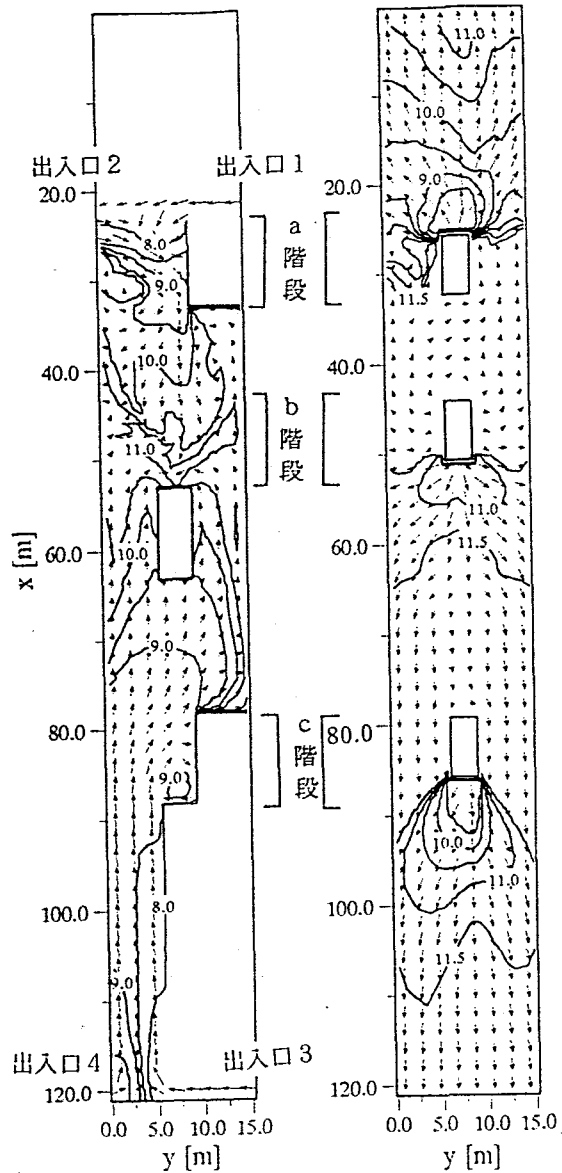
1月29日正午の駅構内を対象として、ミクロサブモデルによる非定常3次元温熱予測を行った。出入口やトンネルから進入する空気の種類として、それぞれ表-4.8の外気温、トンネル気温を用い、周囲壁体温度として図-4.19の温度分布を用いた。シミュレーションの対象期間は、A駅発の列車がB駅を経てC駅に到着するまでを対象として1秒刻みで400秒間の計算を行った。以後シミュレーション上の経過時間を t [s]で表す。気流の境界条件としては図-4.18(a)の値を各開口部に与えた。計算結果を全て出力するのは計算機容量の点から困難なので、10秒毎の気温・気流速データを出力させた。

(1) 機械換気のみ作用するときの温熱環境

図-4.20(a), (b)にA駅から列車が出発する直前(時刻50s)のB駅構内の気流・温度分布を示す。この状況では機械換気のみが作用するため、コンコースでは各出入口から外気が進入している。コンコースの $x=40\sim60\text{m}$ の範囲の空気は外気とあまり混合しないため気温がやや高く、 $10\sim11^{\circ}\text{C}$ である。ホームでは階段から吹き出した空気が両端のトンネルに流出している。プラットフォームでは $x=30\sim90\text{m}$ の広い範囲で気温の高い領域が存在する。しかし、a階段からは出入口1, 2からの空気が流入するため、プラットフォームの中でも特に気温の低い領域が形成されている。図-4.21に同じ時刻の気流・温度分布の断面図を示す。b, c階段ではコンコースからホームへの低温空気の進入が見られる。

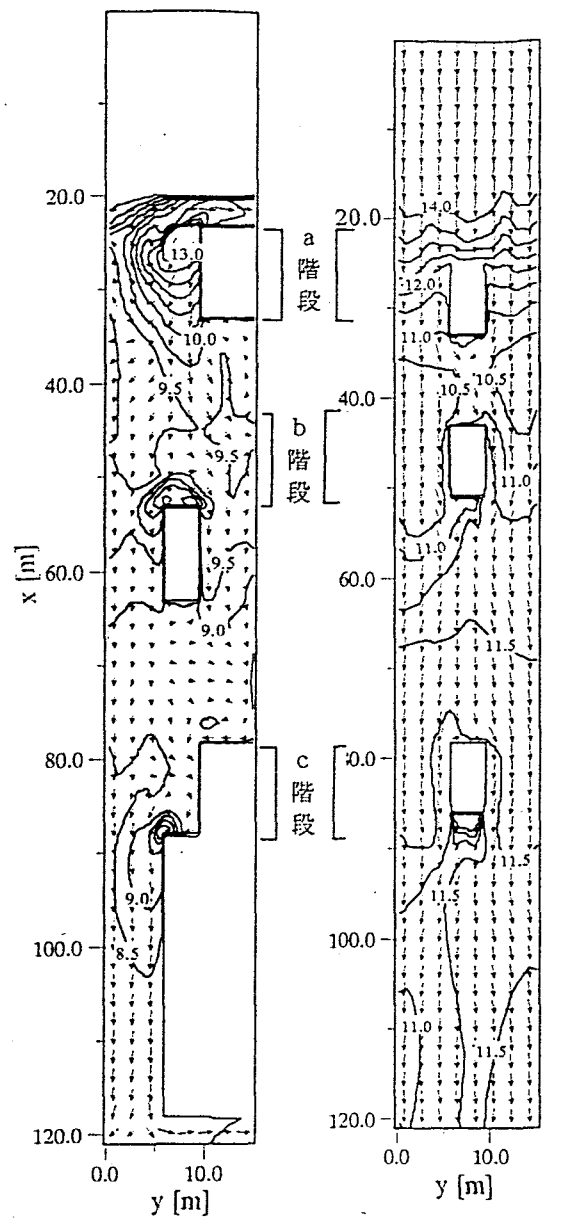
(2) 列車風が作用するときの温熱環境

図-4.22(a), (b)にA駅発の列車が最高速度で走行中(時刻50s)のB駅構内の気流・温度分布を示す。このとき、列車風的作用により、機械換気のみ作用する場合とは気流の流れが逆になる。すなわち、階段からコンコースへ、コンコースから出入口へ空気が流れる。図-4.23にこの時点での気流・温度分布の断面図を示す。トンネルから駅構内へ空気が流れるため、駅構内では気温の上昇が起こる。



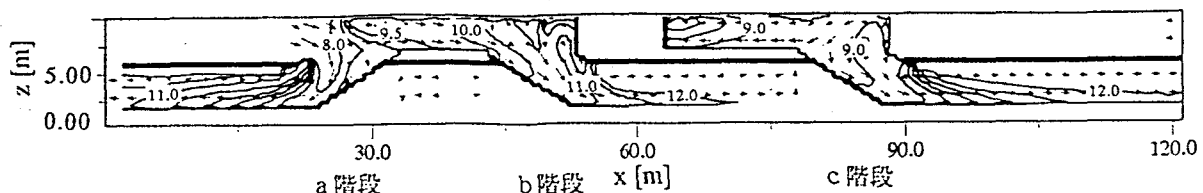
→ = 1.55 [m/s] → = 1.13 [m/s]
 (a) コンコース (b) プラットホーム

図-4.20 気流・気温分布図 (t=50s)

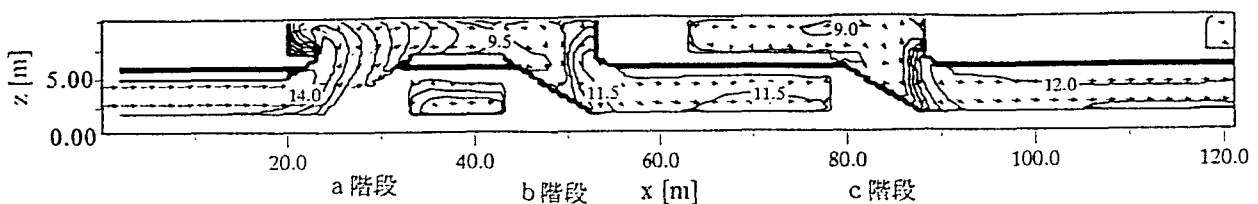


→ = 1.53 [m/s] → = 1.23 [m/s]
 (a) コンコース (b) プラットホーム

図-4.22 気流・気温分布 (t=110s)



→ = 1.46 [m/s] 図-4.21 中央断面の気流・温度分布 (t=50s)



→ = 2.23 [m/s] 図-4.23 中央断面の気流・温度分布 (t=110s)

(3) SET*の空間分布

気流・気温の予測結果をもとに、コンコースにおけるSET*の空間分布を求めた。図-4.24(a)は時刻50sのSET*空間分布であり、(b)は時刻110sのSET*空間分布である。ここで、着衣量は1.1clo、代謝量は123Wを与えた。MRT、湿度としてそれぞれ、表-4.5に示したコンコースの壁温と湿度を与えた。

このように温冷感の空間分布を示すことは、居住空間やオフィスの熱的快適性を評価するためによく行われる手法である。温熱環境が長時間にわたって安定しており、対象とする人間が定位置に留まる限りは、こうした手法で十分に熱的快適性を評価できるだろう。しかし、温熱環境が変化しつづける空間を旅客が移動する地下鉄構内においては、ある時点の空間全体の熱的快適性を予測するよりも、旅客を中心とする局所的な空間の熱的快適性の時系列的変化を予測する方が重要である。とくに後に述べるように、旅客が感じる気流速度はその場所の気流速度ではなく、旅客と気流の間の相対な速度であることを考えるならば、SET*の空間分布を求める方法は表現として不適切となる。次節では、気流・気温の予測値をもとに旅客を中心とした微視的な温冷感の予測を行う。

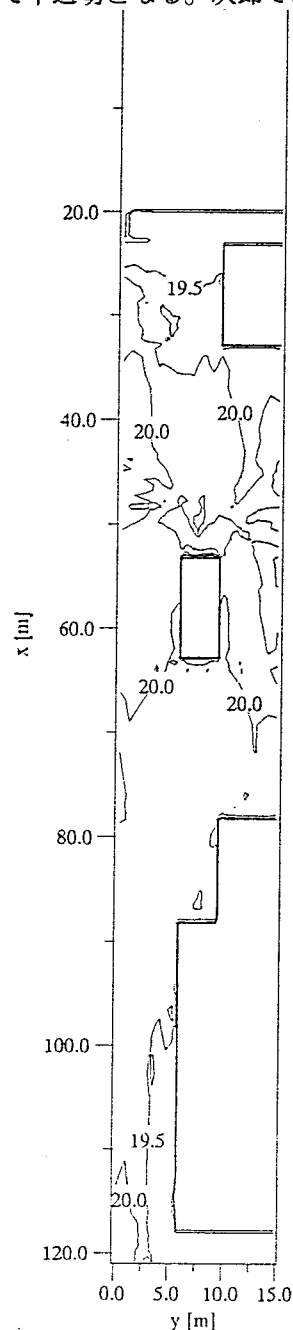


図-4.24(a) 時刻 110s SET*分布図

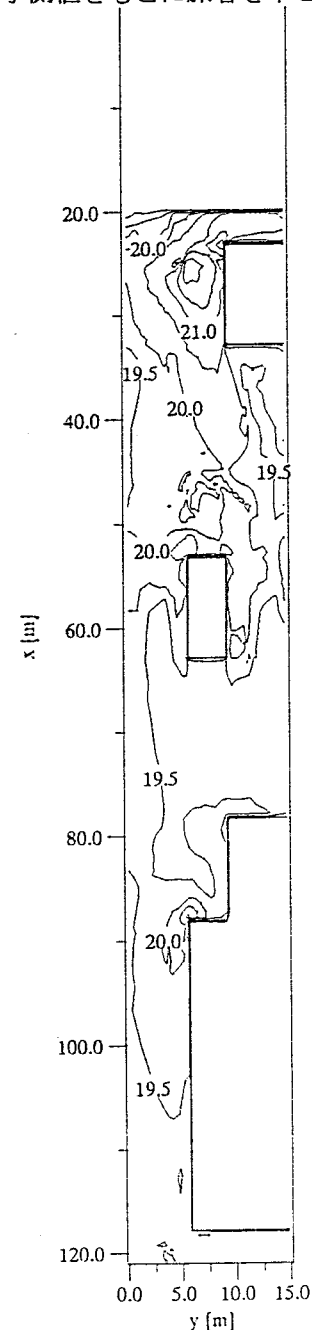


図-4.24(b) 時刻 160s SET*分布図

4. 9 微視的温冷感予測

4. 9. 1 旅客の行動予測

出入口1からプラットフォームに向かう乗車客の行動を予測した。図-4.25に結果を示す。太い線で描かれたのが乗客の経路である。A, B階段のまわりのフェンスに沿って歩き、改札を通過してC階段に進んでいる。本論文では旅客の歩行速度を0.7m/sに設定した。この場合、出入口1からプラットフォームまで計116秒かかる。降車客も同じ経路を逆にたどるものと仮定して、温冷感予測を行う。なお、乗降客の代謝量として、時速3km/hの場合の値、123Wを与える。階段昇降時には代謝量が上昇するが、階段昇降に対応する代謝量に達するまでの遷移時間に比べ、階段昇降にかかる時間が短いためここでは階段昇降に伴う代謝量の変化を無視した。

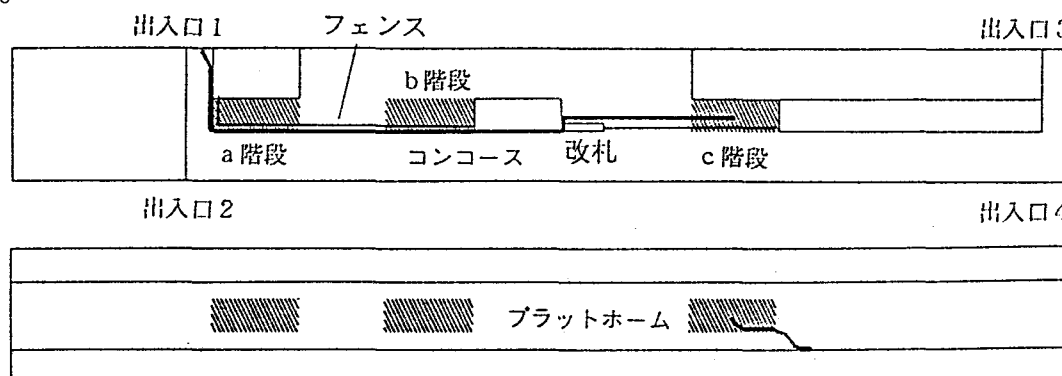


図-4.25 旅客の経路

4. 9. 2 旅客の温冷感予測

(1) 乗降客と気流の相対速度を考慮しない場合

(a) 乗車客の温冷感予測

乗車客がA駅発の列車がB駅に到着する10秒前(時刻120s)にプラットフォームに到達するという設定で、温冷感予測を行った。従って乗車客は時刻4sに出入口1からコンコースに入ってきている。

図-4.26に乗車客周りの温熱環境データとして、旅客の位置の床面から1mの高さにおける気温と気流速のデータを示す。ここでは空気と歩行する旅客との相対速度を考慮していないが、相対速度を考慮した場合については(2)で述べる。気温・気流速データは10秒毎に出力しているため、線形補間している。時刻110sにおける気温の上昇は、乗客がプラットフォームに入ったことによる変化である。

図-4.27に乗車客の温冷感をSET*によって示す。冬物ジャケットと冬ズボンを着用した場合(着衣量: 1.1clo)と、さらに着込んだ場合(着衣量: 1.4clo)とを示している。冬期におけるASHRAE Comfort ZoneはSET*=20から22.9の範囲である。1.4cloの場合、コンコースに入ってから時刻110sにプラットフォームに入るまでの間、常にSET*はComfort Zoneに含まれているが、1.1cloの場合はComfort Zoneよりも下側である。しかし、1.1cloの場合、それほど極端にComfort Zoneから外れているわけではなく、やや寒さを感じる程度であると考えられる。1.4cloの場合はプラットフォームに入ってから、むしろ暑さを感じると思われる。

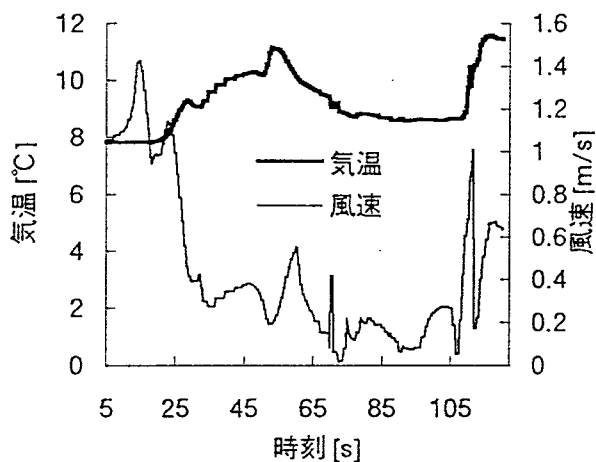


図-4.26 乗車客周りの環境

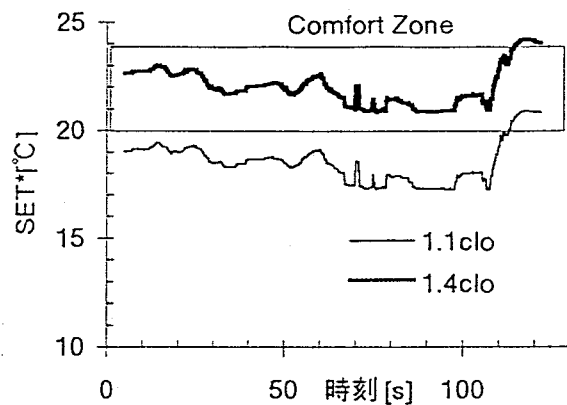


図-4.27 乗車客の温冷感

(b) 降車客の温冷感予測

降車客が列車がB駅に到着してから10秒後(時刻140s)にプラットフォームから歩き出すという設定で、温冷感予測を行った。

図-4.28に降車客周りの気温と風速のデータを示す。時刻150s付近で急激に気温が下がっているのは、降車客がプラットフォームからコンコースに移動したためである。時刻200～210sにおいて気温が上昇しているのは、コンコースの中でも気温の高い $y=40\sim60\text{m}$ の領域を通過しているためである。時刻230s付近の風速の上昇は、B駅を発車した列車が最高速度に達したためである。

図-4.29に降車客の温冷感をSET*によって示す。1.1cloの場合、時刻200sからコンコースの中でも気温の高い領域を通過しているため、SET*がComfort Zoneに含まれている。このとき、1.4cloの場合はかえって暑さを感じている。

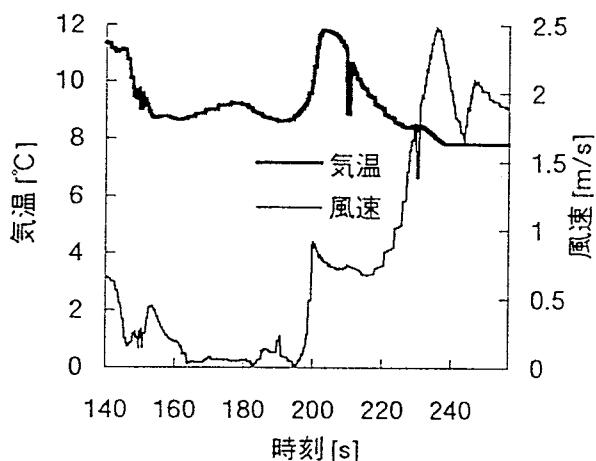


図-4.28 降車客周りの環境

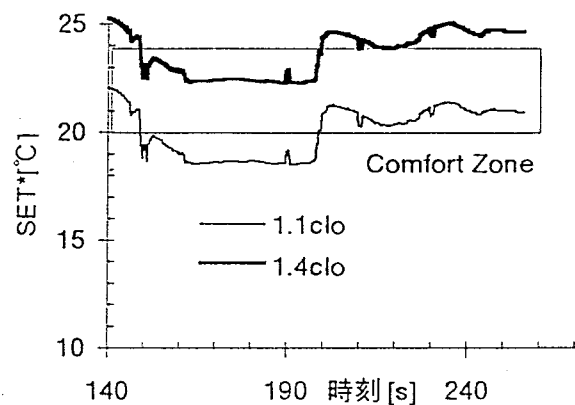


図-4.29 降車客の温冷感

(c) 地下鉄構内の評価

上に挙げた乗降客の温冷感予測結果から判断すれば、1.1cloの場合も1.4cloの場合も乗降客の温冷感がComfort Zoneから大きく乖離することはない、駅構内は冬期において暖房を行わなくても良好な温熱環境に

なっていると評価できる。しかし、ここで取り上げたのは正午の温熱環境であり、朝夕の、より外気温が低い場合においては乗降客の温冷感がComfort Zoneから大きく離れることが予想される。

(2) 乗降客と気流の相対速度を考慮する場合

上の温冷感評価では空気と歩行する旅客との相対速度を考慮しない気流速を用いて評価を行ったが、相対速度を考慮した場合の評価結果の変化を、着衣量：1.1cloの乗車客を例にとって以下に示す。図-4.30に相対速度を考慮した場合の気流速の変化を示す。この図で気流速とは上の評価で用いた風速のことであり、相対気流速とは相対速度を考慮した気流速のことである。気流の方向に順行して乗車客が歩く場合、相対気流速は低下し、逆行して乗車客が歩く場合には上昇する。

この相対気流速を用いて計算した結果を図-4.31に示す。相対速度を考慮しない場合と比較すると、最初の間は両者の間に差が見られないが、やがて両者の間に差が生じる。これは、5～20sの間に低温の空間を通過する際、そのままの気流速を用いると気流速が大きく、多くの熱を奪われるが、相対速度を考慮すると気流速が小さくなり、奪われる熱量が少なくて済むという違いから生じた結果であると考えられる。

原理的には相対速度を考慮した方が正しいやり方と言え、今後の評価では相対速度を考慮するやり方を採用すべきである。

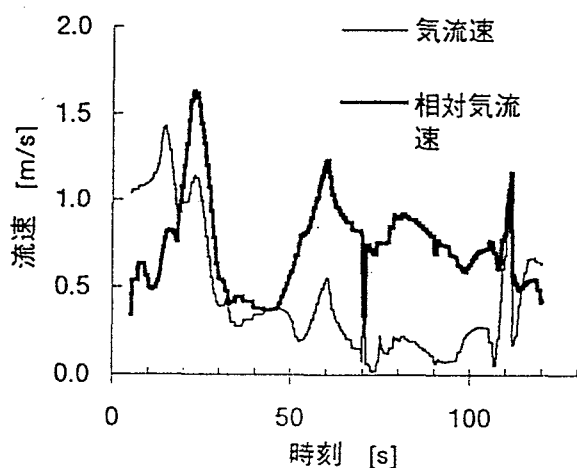


図-4.30 乗車客周りの気流速

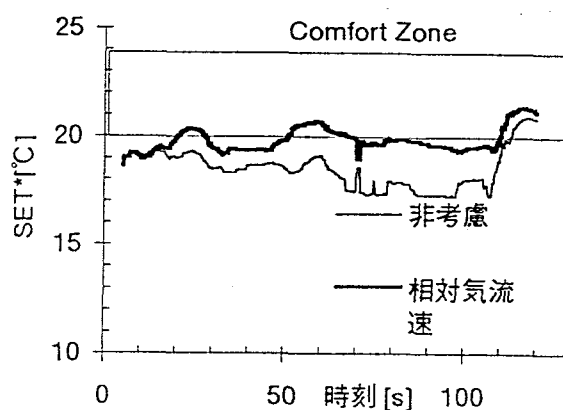


図-4.31 乗車客の温冷感

4. 1 0 微視的予測に対する考察

本章で示した予測手法を用いることにより、エネルギーと熱的快適性の両面から地下鉄駅を評価することができる。

これまで地下鉄構内の冷房設備は、完全混合を想定した温湿度条件を満足するように設計されていたが、これは気流の変動や旅客行動の影響を考慮しないという点で問題があった。また温湿度条件の達成のみを目的とする冷房の設計は過剰な設備設計につながる可能性がある。SET*を用い、気流や旅客の代謝量・着衣状況を考慮した合理的な評価を設計前に行うことによって、設備容量の軽減を図ることが考えられる。

駅の構造が気流と旅客の行動の双方に与える影響を予測することができるという点でも本手法は有効である。駅の構造によっては、冬期において降車客が階段や出入口等の狭隘部を通過する瞬間に、降車客が乗っ

ていた列車の走行によって生じた地上冷気の流入にぶつかり、コールドショックを受けるということもあり得る。こうした可能性を本予測手法によって地下鉄駅建設前に明らかにし、駅構造や旅客の動線計画に変更を加えるという利用方法も考えられる。

4. 1 1 まとめ

本章では地下鉄の温熱環境および旅客行動の特性を考慮した熱的快適性の予測手法を提案し、標準的な地下鉄を対象としてケーススタディをおこなった。

本章の前半(4. 2～4. 5)ではマクロモデル(換気回路網)を用いた巨視的な熱的快適性の予測手法を示した。温冷感の指標としてSET*とRWI・HDRを用い、行動履歴としてタイミンをずらした2つの乗車行動と1つの下車行動について検討を行ったところ、冬期についてはいずれの行動履歴に関しても比較的快適な温冷感予測結果が示された。しかし、夏期についてはいずれの行動履歴に関しても不快な温冷感予測結果が示された。とくに夏期の下車行動に関してはヒートショックが大きくなる可能性が示された。また、SET*とRWI・HDRの値にはよく似た傾向が見られたため、次の微視的な熱的快適性予測ではSET*のみを用いることにした。

本章の後半(4. 6～4. 10)では、駅構内のより詳細な熱的快適性を予測するために、ミクロ・マクロ連成手法(one-way model)および旅客行動予測プログラムを用いた微視的な予測手法を示した。乗車客下車客の行動経路を予測し、時間の経過および空間移動にともなう旅客周囲の温熱環境の変化をSET*によって評価したところ、巨視的な熱的快適性予測と同様に、冬期の地下鉄構内が良好な温熱環境であることが示された。また、旅客の歩行方向と気流速の間の相対速度を考慮した場合、単純に旅客周りの気流速度を与える場合との間に温冷感に変化が生じることが示された。

参考文献

- 1) W. D. Kennedy et al. : Subway Environmental Design Handbook, 2nd Ed., U. S. Dept. of Transportation, 1976
- 2) 木村健一, 増田達哉ほか: 地下空間の快適性の総合評価に関する実測(その1, その2), 空気調和衛生工学会学術講演会講演論文集(1993-10), pp. 209 - 216
- 3) K. Nagara, Y. Shimoda, M. Mizuno : Evaluation of thermal environment in outdoor pedestrian space, 2nd Thoma University International symposium, CUTEST'92(1992-9), pp. 157 - 158
- 4) A. P. Gagge, J. A. J. Stolwijk, Y. Nishi : An Effective Temperature Scale Based on a Simple Model of Human Physiological Regulatory Response, ASHRAE Transactions 77 (1971), pp. 247 - 262
- 5) ASHRAE : Fundamentals Handbook(SI)(1993), Chapter 8
- 6) 下田吉之, 花井裕, 水野稔: 地下空間における地盤の吸熱効果に関する研究, 第2報-地下鉄構内の気温形成に及ぼす機械換気と地盤吸放熱の影響に関する検討, 空気調和・衛生工学会論文集No.58(1993-10), pp. 1 - 12
- 7) 川島美勝: 人間の体温調節系と住宅熱環境に関する研究, 大阪大学博士論文(1993-10)
- 8) 中, 小林, 福島, 荒井, 島田, 池本: 駅構内旅客流動のシミュレーション-シミュレーションプログラムSP-2による実行法-, 鉄道技術研究報告, No.1153(施設編第505号) (1980-9)

第5章 地下鉄駅の温熱環境設計

5.1 はじめに

地下鉄駅構内の温熱環境設計、すなわち換気・空調設備の設計はマクロモデルによる動的熱負荷計算をもとに行われている。しかし、そのようにして設計された換気・空調設備が、より小さいスケール、すなわちヒューマン・スケールで見た場合にどの程度効果をあげるのかという点まではあまり検討がなされていない。

マクロモデルを用いて冷房負荷を見積もり、プラットホーム冷房の設計を行う作業を具体的に示した論文として金¹⁾によるものがあるが、同論文で述べられているように、プラットホームや軌道部に加わる熱負荷の配分には不明な点がある。この点を明らかにしようとするれば、実測またはCFDによる、より小さいスケールのシミュレーションを行う必要があるだろう。

本稿ではすでに開発したone-way modelの手法を用いてプラットホーム冷房のシミュレーションを行い、より小さいスケールにおける冷房の効果について検討する。

5.2 シミュレーションの概要

5.2.1 シミュレーションの手順

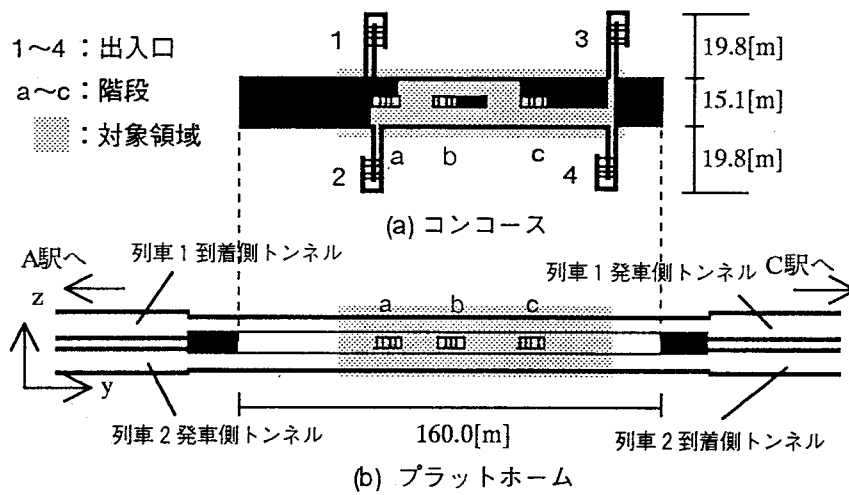
前章で示した旅客の温冷感予測と同様に、one-way modelを用いた手法によってシミュレーションを行う。改めて手順を示すと以下ようになる。

- ①駅・地下鉄系構造，列車運行スケジュール，換気運転スケジュール，冷房設計条件，気象条件を決定する
- ②マクロモデルによる1列車あたりの気流変動パターンの予測をおこない，1列車あたりの換気量を算出する
- ③OSTESPによって各領域の1時間平均気温・地盤温度データ，冷房負荷を算出する
- ④冷房負荷をもとにプラットホーム空調（吹き出し口面積・吹き出し風速・吹き出し温度）を設定する
- ⑤特定の時間帯（夏期の特徴的な時刻）において1列車走行時間分の気流・温熱環境変化をミクロモデルで計算する
- ⑥平均気温・気温分布などによる環境および冷房負荷評価

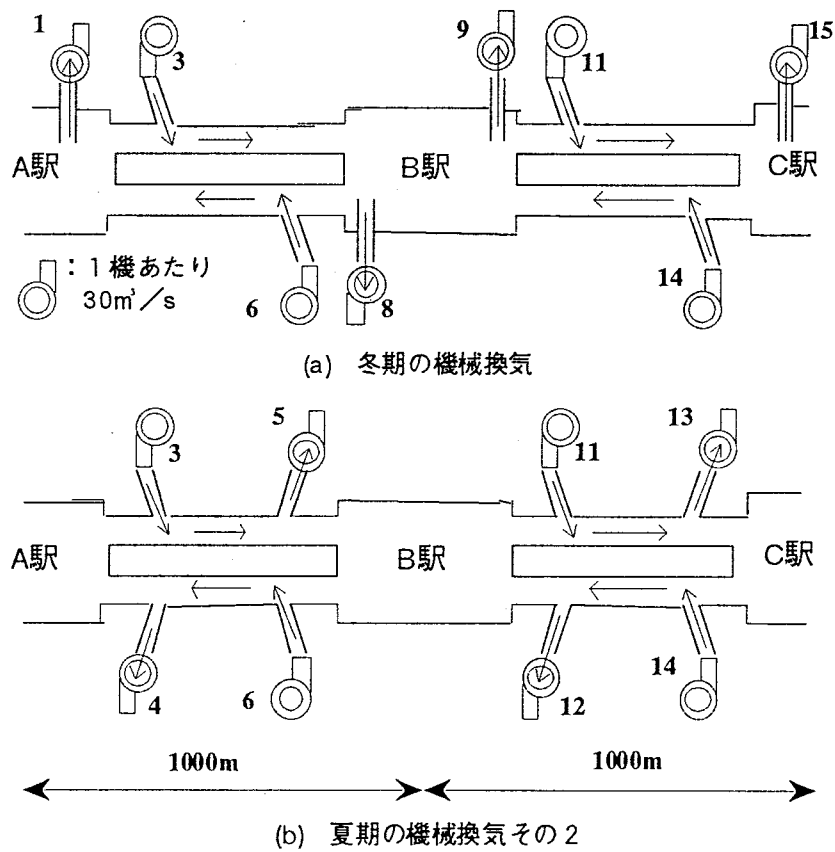
5.2.2 シミュレーションの設定

（1）対象とする地下鉄

縦流換気を行う地下鉄系を対象とする。地下鉄駅として，これまでのシミュレーションと同様に図-5.1に示す標準地下鉄駅を対象とする。また，地下鉄系および冬期・夏期の換気運転を図-5.2に示す。冬期にはトンネル内の壁体放熱で加熱した空気を駅に流入させる。夏期には駅の換気を止め，高温外気を駅に流入させない。換気運転のスケジュールを表-5.1に示す。



図ー5.1 地下鉄B駅平面図



図ー5.2 地下鉄系の換気方式

表ー5.1 換気運転スケジュール

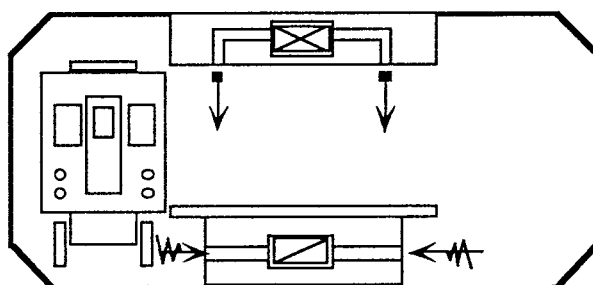
季節	換気運転内容
冬期 (11/1～4/20)	トンネル給気・駅排気
夏期 (4/21～10/31)	トンネル給排気

(2) 冷房運転の設定

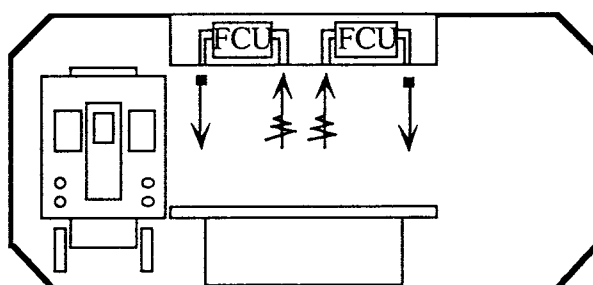
冬期の地下鉄構内は比較的温暖であるため暖房は通常行われない。旅客の熱的快適性の点で問題と

されるのは夏期の温熱環境であり、現在多くの地下鉄駅で冷房運転が行われている。代表的なプラットホーム冷房には、図-5.3 (a)に示すような天井吹出し・床下ホーム下排気や同図 (b)に示すような天井内ファンコイル方式などがある。本稿では、後者のファンコイルによるプラットホーム冷房を対象としてシミュレーションを行う。

また、冷房運転のスケジュールおよび設計温湿度を表-5.2に示す。冷房の列車内の冷房も同じスケジュールで行う。ただし、列車内の冷房では湿度も制御するが、プラットホームでは成り行きに任せることにする。



(a) 天井吹出し・ホーム下排気方式



(b) 天井内ファンコイル方式

図-5.3 プラットホームの換気・空調方式

表-5.2 冷房運転スケジュール

期間	気温	湿度
6/15~7/9	25.0	60% (RH)
7/10~9/10	28.0	60% (RH)
9/11~10/5	26.0	60% (RH)

(3) 環境条件

気象条件としては空気調和・衛生工学会による大阪地方のHASP標準気象データを使用する。

OSTESPによる地盤熱伝導計算のために用いる地盤各種条件を表-5.3に示す。

(4) その他の条件

各時刻の列車の本数、乗降客数を図-5.4に、列車の走行曲線を図-5.5に示す。また、各種発熱量の設定値を表-5.4に示す。

表-5.3 地盤各種条件

熱伝導率 [W/(m・K)]	土	1.2
	壁体	1.6
体積熱容量 [MJ/(m³・K)]	土	1.9
	壁体	2.3
熱伝導率 [W/(m²・K)]	地表面	12.0
	トンネル・ホーム	11.6
	コンコース	9.3

表-5.4 各種発熱量

照明発熱[W/m²]	20
列車発熱[kW/列車]	500

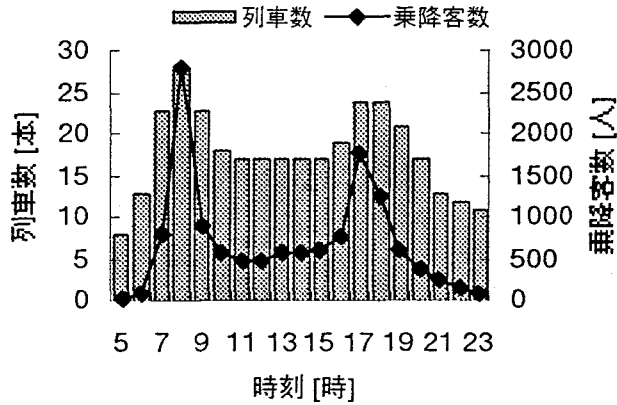


図-5.4 列車数と乗降客数

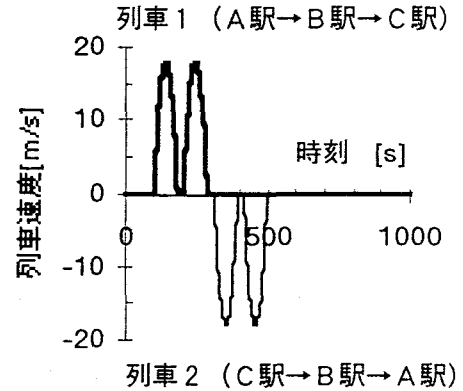


図-5.5 列車の走行曲線

5. 3 巨視的予測結果

5. 3. 1 気流の予測結果

換気回路網による列車風の予測結果を図-5.6, 5.7に示す。この結果から得た列車が上下各1本ずつ走行した場合の換気量を表-5.5に示す。OSTESPではこの換気量を入力条件として計算を行う。

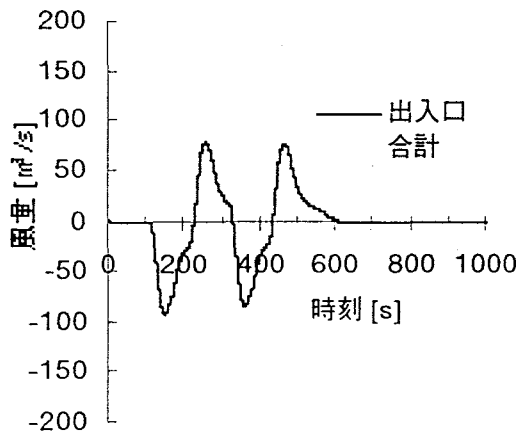


図-5.6 出入口合計流量の変動

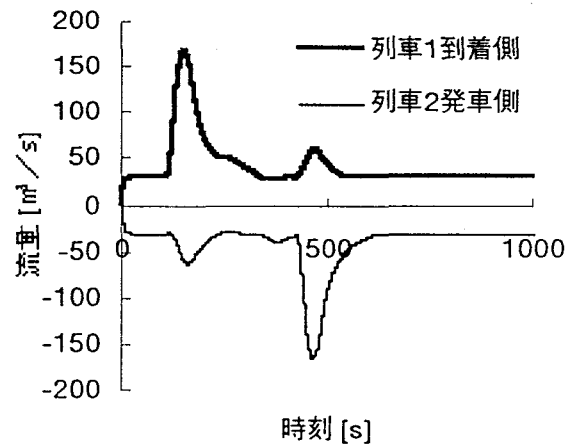


図-5.7 トンネル流量の変動

表-5.5 列車換気量 (単位[m³])

	プラットホーム・コンコース間	トンネル内
冬期	10300	11300
夏期	10000	11600

5. 3. 2 気温・冷房負荷・地盤温度の予測結果

大阪地方のHASP標準気象データでは8月8日13時に年間の最高外気温を示す。この一日の駅構内気温および外気温を図-5.8に示す。プラットホームでは冷房を行うため、7時から22時までは28℃を維持している。

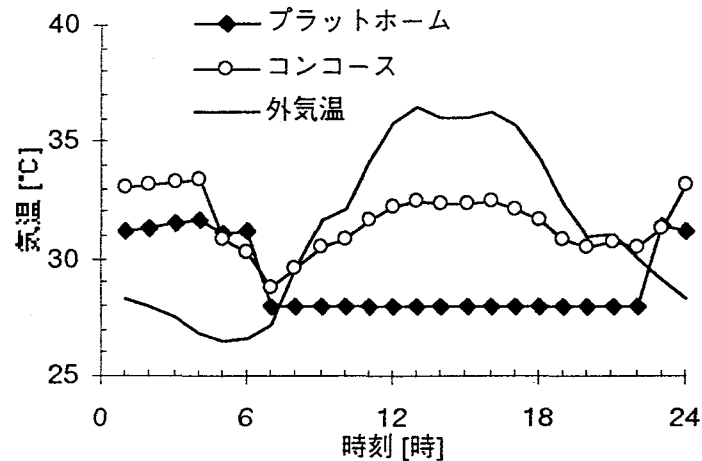


図-5.8 8月8日の気温変動

同日のプラットホーム内の熱収支を図-5.9に示す。負値は壁体吸熱あるいは冷房による除熱量である。7時から22時まで駅構内の発熱は全て冷房負荷となる。本稿ではプラットホームの湿度は制御しないので、顕熱負荷のみが冷房負荷である。

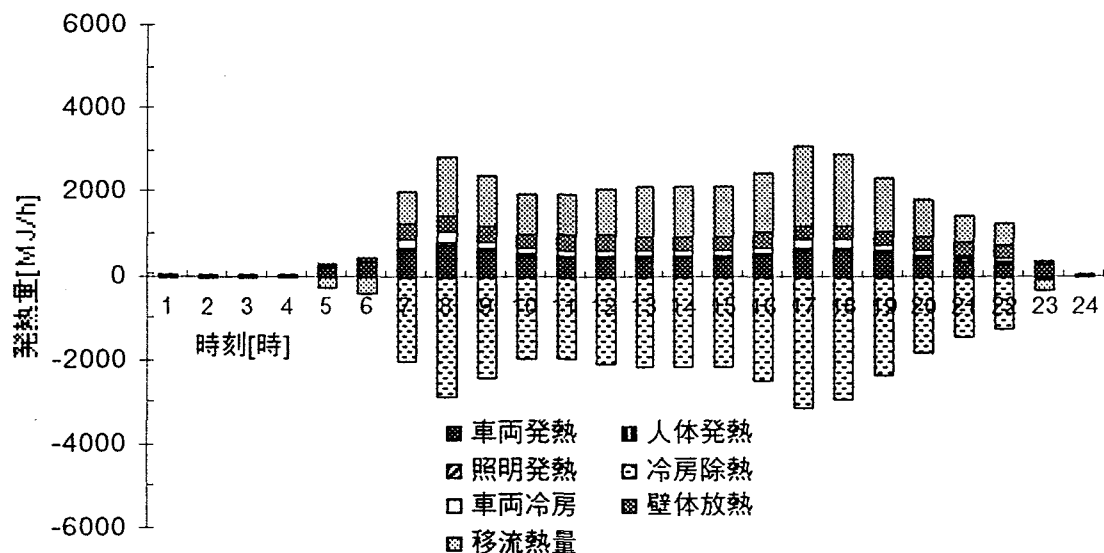


図-5.9 ファンコイル冷房時の熱収支

冷房負荷のピークは17時である。これは夕方のラッシュアワーにあたる。図-5.10に17時の冷房負荷の内訳を示す。冷房負荷は全体で3086.5MJ/hである。負荷の上位3者は以下の通りである。

移流熱量： 1875.1MJ/h (61%)
 車両発熱： 624.0MJ/h (20%)
 壁体放熱： 324.8MJ/h (11%)

移流熱量はコンコースおよびトンネルから流入する熱であり、列車本数の増加にともなう列車風換気量の増加が原因である。壁体放熱はコンコース・プラットフォーム間の天井スラブからの流入熱が多くを占めている。同日17時の地盤および壁体の温度分布を図-5.11に示す。

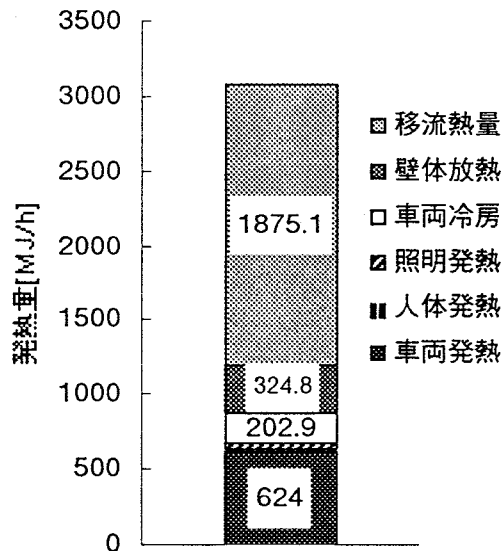


図-5.10 17時の冷房負荷

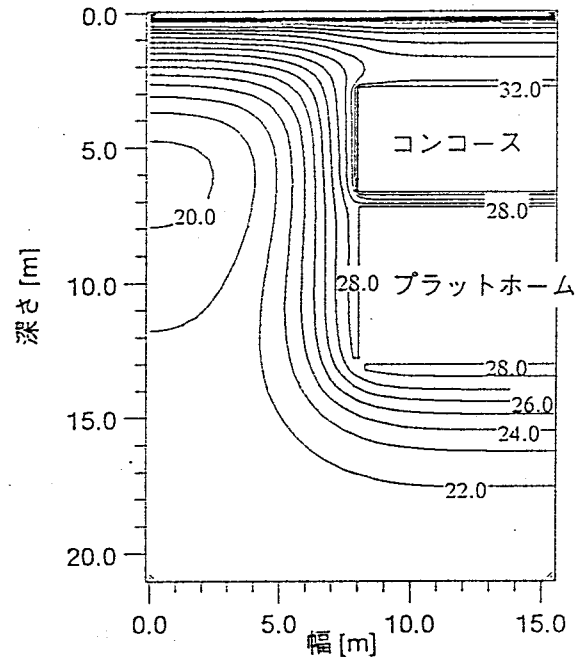


図-5.11 8月8日17時の温度分布

5. 4 微視的予測の設定

5. 4. 1 プラットホーム冷房の設定

(1) 吹出し風量の設定

吹出し風量は次式で算出される。

$$(\text{冷房負荷}) = 1208.6 \times (\text{吹出し風量}) \times (\text{吹出し温度差})$$

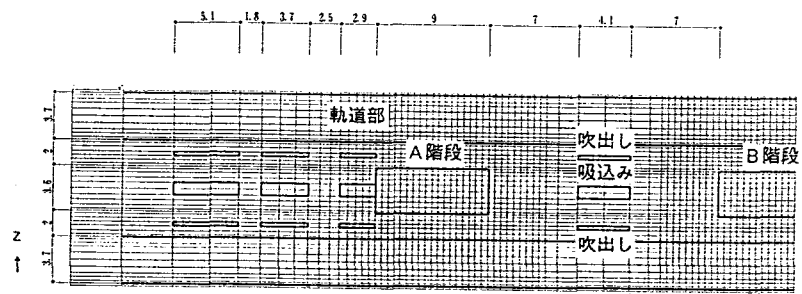
ここで1208.6は空気1 m³あたりの熱容量である。文献を参考に、吹出し温度差を10℃とすると、

$$(\text{吹出し風量}) = (3086.5 \times 10^6) / (3600 \times 1208.6 \times 10) = 70.94 \text{ [m}^3/\text{s]}$$

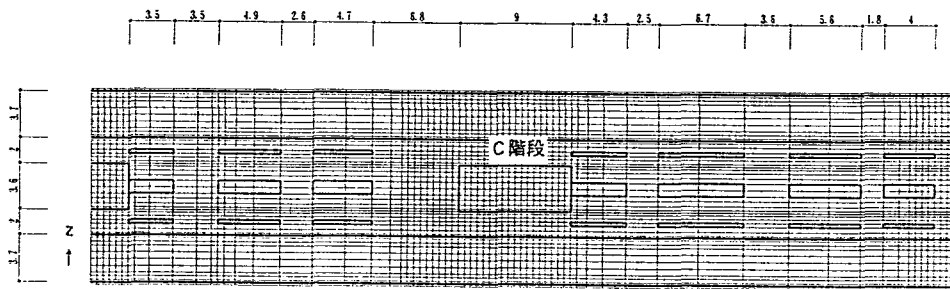
となる。

(2) 計算格子および吹出し位置・風速の設定

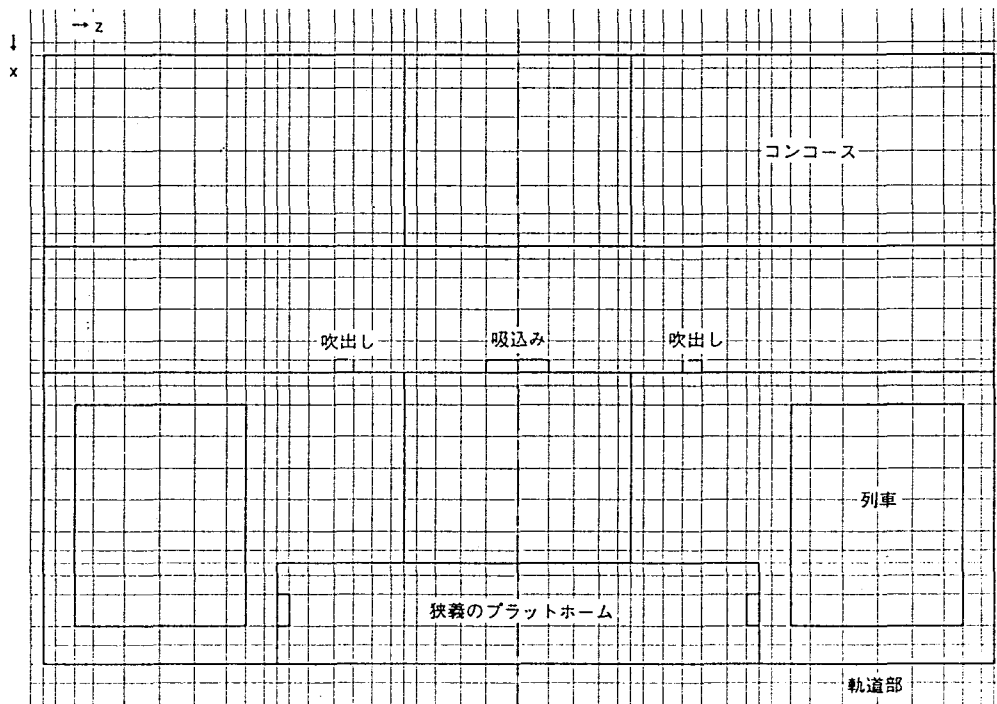
地下鉄B駅に対して図-5.12に示す計算格子(メッシュ)を設定した。長手方向(y方向)に139個、幅方向(z方向)に46個、深さ(高さ)方向(x方向)に29個のメッシュを設定した。また同図に示すように、幅0.3mの細長い吹出し口を、合計49.57m、11箇所×2列ずつ配置した。吹出し口の総面積は29.74m²であるので、吹出し風速は2.39m/sとなる。また天井中央に幅1.0mの吸込み口を、11箇所×1列ずつ配置した。吸込み風速は1.43m/sである。



(a) プラットホームの計算格子



(b) プラットホームの計算格子 (つづき)



(c) 垂直断面の計算格子

図-5.12 計算格子

5. 4. 2 初期条件の計算

列車走行にともなう非定常気流の計算を行う前処理として、列車が走行していない状態で図-5.10に示した負荷をプラットホーム階全域に与えて700秒分の計算を行い、その結果を非定常計算の初期条件とした。

本稿の設定では夏期には駅の換気運転がないため、このとき、駅構内ではファンコイルによる気流のみが発生する。

当初は $29 \times 46 \times 139 = 185426$ 個のメッシュを用いてコンコース部分も含めたシミュレーションを行ったが、コンコースで発生した気流場の計算が収束しなかったため、プラットホームに限定してシミュレーションを行うことにした。これによって総メッシュ数は $15 \times 46 \times 139 = 95910$ 個と半減した。

(1) 境界条件

周囲の壁体温度として、図-5.11に示した壁体の温度を与えた。プラットホーム階の構造物（プラットホームの床、階段など）に対しては設計室温 28°C を与える。

プラットホーム階の発熱として、図-5.10に示した各種発熱量の1時間平均値を次のように与える。照明発熱にはコンコースからスラブを通して流入する熱量を加え、合計 177.8W/m^3 を天井に隣接する2メッシュ分、合計の厚さ 0.5m に対して一様に与える。人体発熱は、プラットホームの床に隣接する1メッシュ分、厚さ 0.2m に対して 28.9W/m^3 を一様に与える。以後、車両発熱と車両冷房の発熱はまとめて列車発熱と呼ぶことにするが、列車発熱として上下線軌道部の列車停車位置に 746.2W/m^3 を与える。このほか、移流熱量に相当する発熱として、 118.2W/m^3 構造物を除くすべてのメッシュに一様に与える。ただし、今述べた列車発熱および移流熱に相当する発熱の与え方は、この初期条件の算出に限って適用する。後に行う非定常計算では列車の走行によって熱の移流が起こるので、移流熱に相当する熱は与えない。また、列車発熱も列車停車時に限り軌道部に与える。

(2) ファンコイルのモデル化

ファンコイルは次の用にモデル化した。

ファンコイルの性能を次のような温度効率で表す。

$$\psi = \frac{ta_{in} - ta_{out}}{ta_{in} - tw_{in}} \quad (1)$$

このとき、 ta_{in} 、 ta_{out} はそれぞれファンコイルの吸い込み温度と吹き出し温度であり、 tw_{in} は冷水温度である。吸い込み温度が設計温度の 28°C になっている時に 10°C 差で吹き出すとすれば、 $ta_{in}=28^{\circ}\text{C}$ 、 $ta_{out}=18^{\circ}\text{C}$ となる。このときの冷水温度を 7°C として設定すると、温度効率は

$$\psi = \frac{28-18}{28-7} = \frac{10}{21} = 0.476 \quad (2)$$

となる。この温度効率が常に一定であると仮定すると、式(1)、(2)より、吸い込み温度と吹き出し温度の関係は次式で表現される。

$$ta_{out} = 0.524ta_{in} + 3.332 \quad (3)$$

シミュレーションでは11組のファンコイルに対し上式を適用してファンコイルの吹き出し温度を設定した。

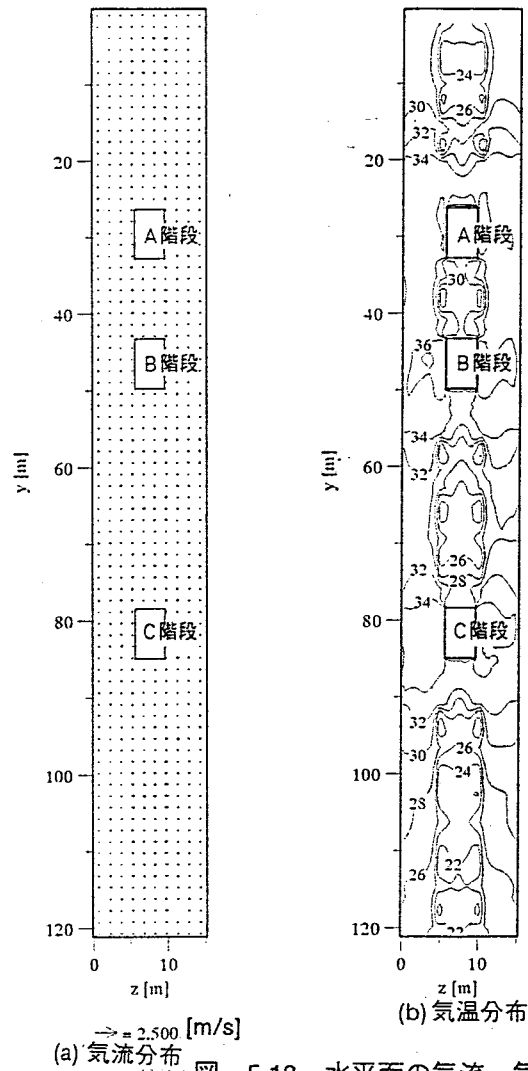


図-5.13 水平面の気流・気温分布

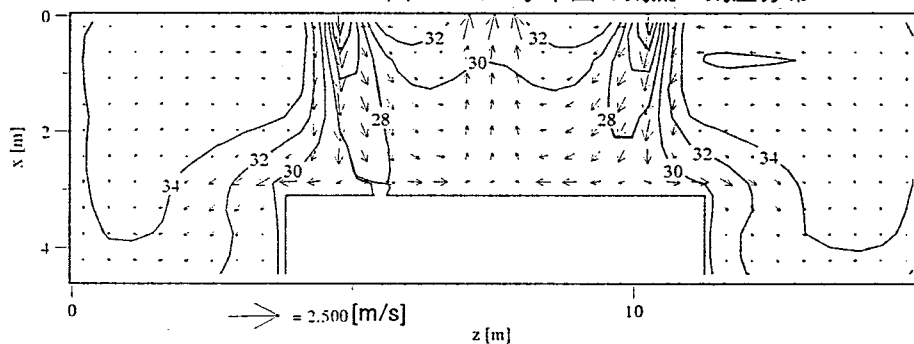


図-5.14 垂直断面の気流・気温分布

(3) 初期条件計算の結果

図-5.13(a),(b)はプラットホーム上1.25m, ほぼ人の胸にあたる高さの水平面の気流・気温分布である。水平面の気流速度は小さい。プラットホーム上は気温が低く, 軌道部では相対的に高くなっている。完全な定常状態ではないため, B, C階段の周りでは温度分布の対称性が見られない部分がある。

図-5.14は $y=39.0\text{m}$ の垂直断面の気流・気温分布である。吹出し口からの強い冷気がプラットホームに向かって下降している。この空気が中央の吸込み口に吸引されるため, プラットホーム場には低温の領域が形成されている。軌道部が高温になっているが, 現実には間欠的に列車風によって空気が入れ換えられるため, 軌道部気温はここに示した値よりは小さい値になると思われる。

5. 4. 3 列車走行時の設定

正確さを期するためには、上下線の列車の走行を繰り返して気流・気温が周期定常になるまで非定常計算を行う必要があるが、膨大な計算時間が必要となるので、ここでは5. 4. 2の初期条件計算結果を用いて非定常計算を行うことにした。また、シミュレーションの対象とする期間は、図－5.5の列車の走行曲線に示している、列車1がA駅を出発してB駅で一時停車し、C駅に到達するまでの時刻100sから280sまでとした。

プラットホームだけに限定して列車走行時の予測を行う場合、各階段開口部分の気流・気温の境界条件を与える必要がある。気流の境界条件については、列車走行時の各階段の流量配分や流入・流出時の気流の角度は、前章の旅客の温冷感予測で行ったシミュレーションの結果を参考にして決定する。気温については、換気回路網で計算したトンネルおよびコンコースの気温を与える。列車走行時の計算における各種設定の留意点を以下に述べる。

(1) 各階段の流量配分

本章のシミュレーションは、コンコース部分も含めたシミュレーションではないため、各階段開口部分の気流の境界条件を与える必要がある。前章で旅客の温冷感予測を行った際、非定常計算による気流・温熱環境の予測結果が得られているので、この結果をもとに各階段開口部分の流量配分を決定する。すなわち、列車速度の違いや複線トンネルと単線シールドトンネルの違いに起因して、トンネルから駅に流入する流量は前章のシミュレーションと本章のシミュレーションでは異なっているものの、各階段に流れこむ際の流量の配分はほとんど変わらないものと仮定する。

列車が最高速度でA駅からB駅に接近する場合、列車が最高速度でB駅から離れC駅に向かう場合のそれぞれについて、各階段の流量配分を求めた結果を表－5.6に示す。

表－5.6 階段の流量配分 (単位 [%])

列車1の走行状態	A階段	B階段	C階段
A駅からB駅に向かう	77.0	14.0	9.0
B駅からC駅に向かう	19.2	38.6	42.2

本章の非定常計算では換気回路網によって決定される全階段通過流量に、表－5.6の流量配分を掛けて各階段開口の流量とする。

(2) 列車の存在の取り扱い

換気回路網では列車の存在は列車風の駆動源および発熱源としてモデル化されているが、CFDで列車の存在を厳密に扱おうとすれば、車体を移動境界として扱わなくてはならない。しかし、移動境界問題はそれ自体で一つの研究分野をなす重要な問題であり²⁾、この問題に拘泥すれば本論文のテーマである駅構内の温熱環境予測を行うことが困難になる。そこで、本章では、次のようにして列車の存在を単純化して取り扱うことにした。

①列車が地下鉄系の気流の駆動源として機能するのは、高速度で走行している場合であり、それはトンネル内での走行に限られる。

②列車がプラットホーム内で発着する際、列車は低速度で走行しているため気流の駆動源とし

てはほとんど機能していない。

③以上の点から、CFDの対象空間となるプラットフォーム内では列車の移動は考えない。

列車の移動を考えないということは、駅に停車している時間だけ、列車をプラットフォーム内の静止した物体として扱うことである。すなわち、停車時間だけ存在して発熱し、その他の時間には存在しない物体として列車を扱うということである。

この扱いにともなう問題点は2つある。一つは列車1の先頭がトンネルからプラットフォーム内に入し、完全に停止するまでの遷移時間、あるいは列車1が発車し、その尾部が完全にプラットフォーム内から出ていくまでの遷移時間をどのように扱うかという問題である。もう一つは列車が突然プラットフォーム内に出現したり消滅したりすることによる気流場の計算の不安定性の問題である。

これらの問題に対処するために次の2つの手法を考え、それぞれについてシミュレーションを行うことにした。

手法1：図-5.5の走行曲線に示された時刻では、時刻164s~184sが列車1の到着時の遷移時間、184s~204sが完全停止時間、204s~224sが発車時の遷移時間である。列車の発着時の遷移時間は列車の存在位置に対して発熱量のみ与え、物体は存在させない。完全に停止したときのみ車体を物体として存在させ、発熱量を与える。

手法2：遷移時間および完全停止時間を通して車体を物体として存在させず、存在位置に対して発熱量のみ与える。

遷移時間の取り扱いは両手法とも同じであるが、手法2は気流場の連続性を重視し、車体の存在を無視している。

列車の存在位置は図-5.12(b)に示している。列車の発熱は車体の床下部分（厚さ1.0m、3メッシュ分）に 1642.4W/m^3 を与える。

5.5 列車走行時の予測結果

以下、時刻は図-5.5の走行曲線に示された時刻を基準にする。5.4.2の初期条件計算結果を時刻100sの値とし、同時刻以降の温熱環境の変化を示す。184秒以降は列車の取り扱いが上記の手法1と手法2とで異なる。手法1では発車時の遷移時間（204s以降）において車体を突然取り去ったので、気流場の計算が不安定となり、同時刻以降の計算を継続できなかった。列車発車以降は手法2の結果のみ示す。

5. 5. 1 列車が到着するまでの予測結果

(1) 中央断面の気温分布

時刻100sから180sまで20s毎のx-y断面の気温分布を図-5.15に示す。これらの図は $z=7.5\text{m}$ の位置すなわち、プラットホームの中央で切断したものであり、冷房の効果を強く受けている空間の温熱環境を示している。 $y=0\text{m}$ が列車1が到着側であり、 $y=120\text{m}$ 付近が列車1の発車側である。列車風は $y=0\text{m}$ の位置からプラットホームに流入する。等温線は 2°C 毎に引いている。

140s以降、トンネルから 32°C の空気が流入している様子が示されている。 $y=0\sim 30\text{m}$ の空間ではトンネルの空気が直接流入するため、 30°C 以上の領域が広がっている。同空間に注目すると、時刻160sと180sとでは160sの方が 32°C の等温線の領域が広いが、これは160sの方が180sよりもトンネルからの流量が大きいためである。時刻180sではトンネルからの空気の流入量が小さくなるため、冷房の効果が少し現れて 28°C の領域が広がっている。

B階段とC階段に囲まれた $y=50\sim 80\text{m}$ の空間では時間の経過とともに、 24°C 以下の低温の領域が広がっている。これは、初期条件の計算で与えていた列車発熱および移流熱量に相当する発熱が時刻100s以降加わっておらず、冷房の効果が強く現れているためである。

C階段からプラットホームの端にいたる $y=90\sim 120\text{m}$ の空間でも同様に 20°C 以下の低温の領域が広がっている様子が見られる。この空間では140s以降は気温分布にあまり変化が見られない。これは後述するようにC階段や列車発車側トンネルに流出する流量が相対的に小さく、同空間の空気が入れ替わらないためであると考えられる。

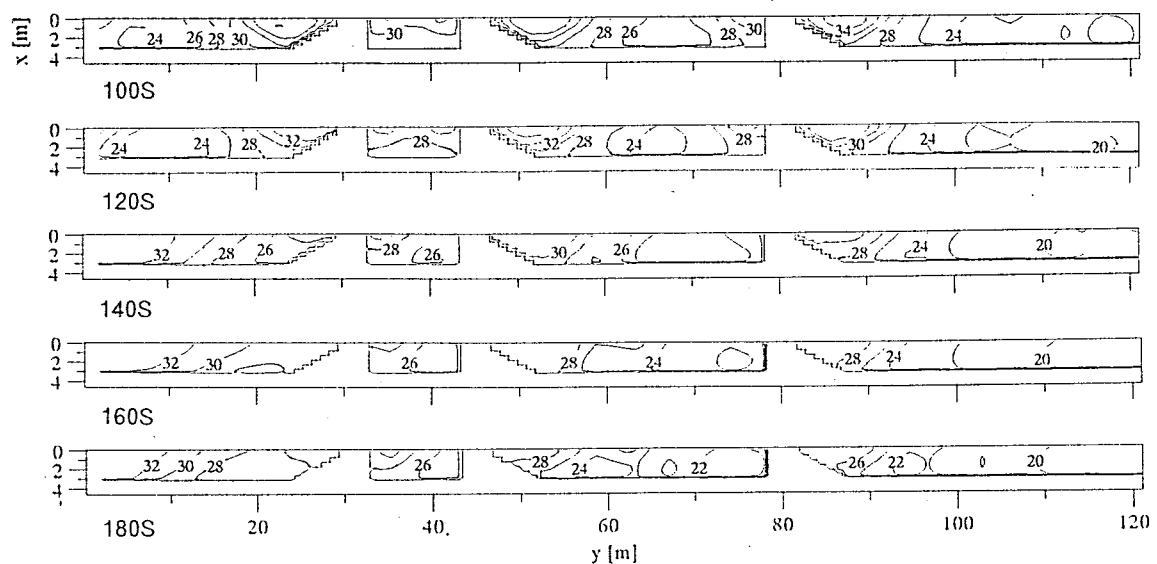


図-5.15 中央断面の気温分布

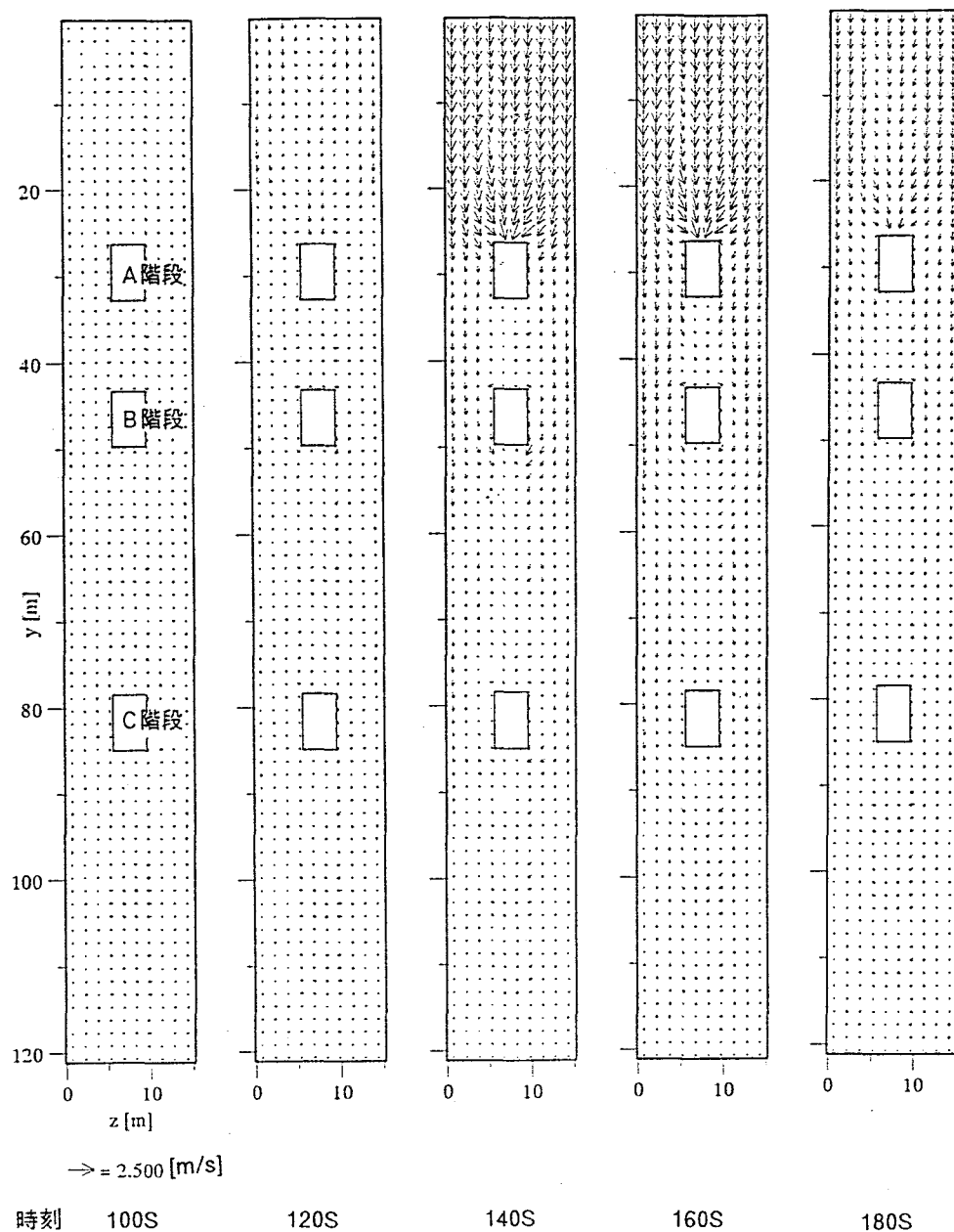


図-5.16 水平断面の気流分布

(2) 水平断面の気流分布

時刻100sから180sまで20s毎のプラットホーム上1.25mの高さの水平面の気流分布を図-5.16に示す。いずれの時刻でも、 $y=0\text{m}$ の面を通してトンネルからプラットホームに流入した空気が、各階段に流出してゆき、残りの弱い気流が反対側のトンネルから流出するという様子を示している。B階段から先の $y=50\sim 120\text{m}$ の空間では気流の速度が小さいため、先に示したように、冷房が強く影響し、比較的安定した低温の領域が広がっている。トンネルから流入する空気の流速が最大になるのは時刻140sであり、160sもほぼ同じ気流分布を示している。

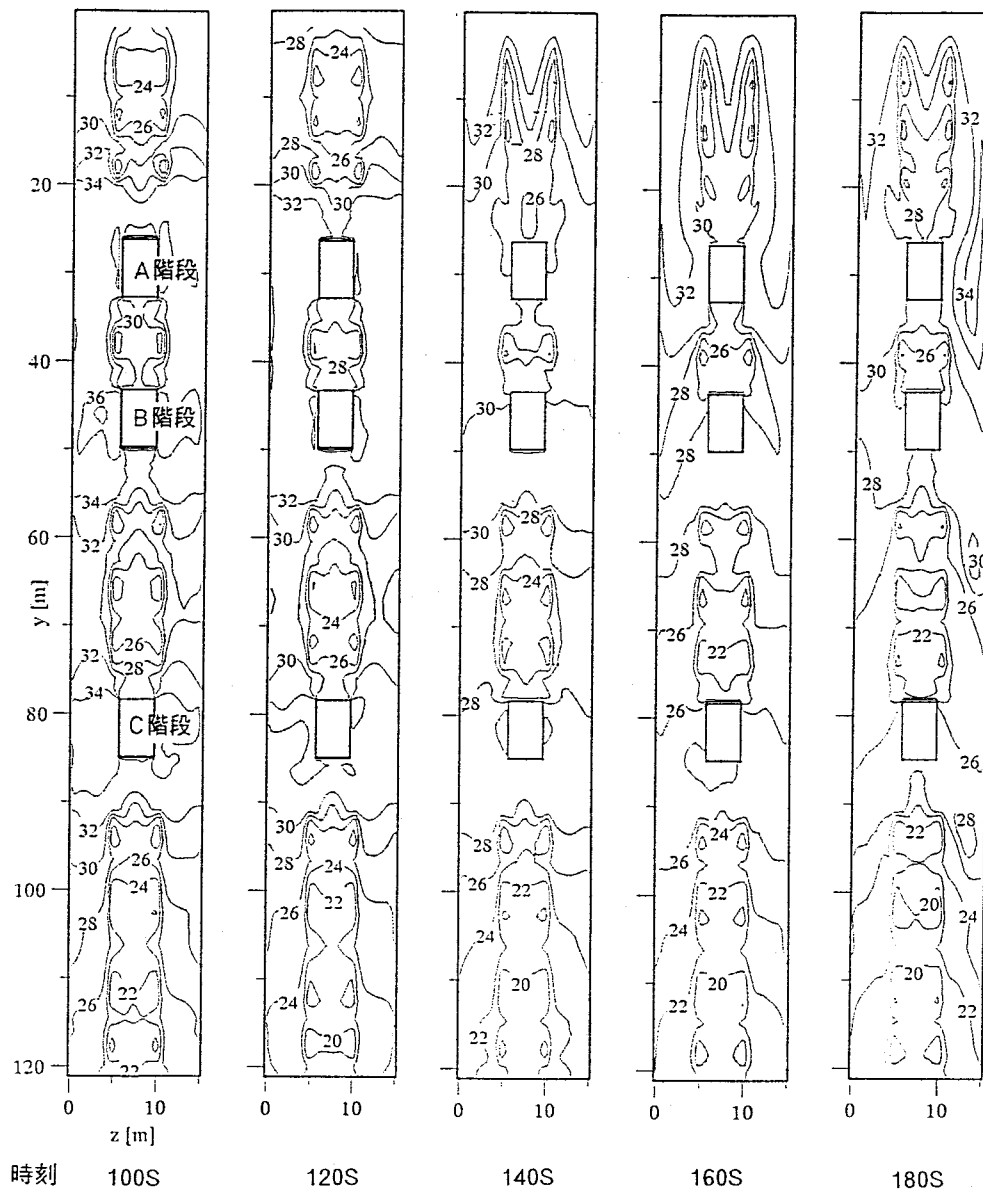


図-5.17 水平断面の気温分布

(3) 水平断面の気温分布

同じく時刻100sから180sまで20s毎のプラットフォーム上1.25mの高さの水平面の気温分布を図-5.17に示す。ファンコイル吹き出し口の直下には低温のスポットが形成されているのが見られる。 $y=0\sim30$ の空間に注目すると、時間の経過とともに冷房によって形成されていた低温領域のパターンが崩れていくのがわかる。

中央断面の気温分布について述べたのと同様に $y=110\sim120$ mの空間では 20°C の低温の領域が広がっており、時間が経過しても気温分布に変化があまり見られない。

時刻180sの気温分布では、それ以前に見られた $z=7.5$ mを中心軸とした分布の対称性が大きく崩れているが、これは、164sから列車1の存在位置における発熱を与えているためである。

5. 5. 2 列車停止時の予測結果

ここでは手法1（車体が存在する）・手法2（車体が存在しない）それぞれによって計算した時刻200sにおける気流・気温分布の違いを比較する。

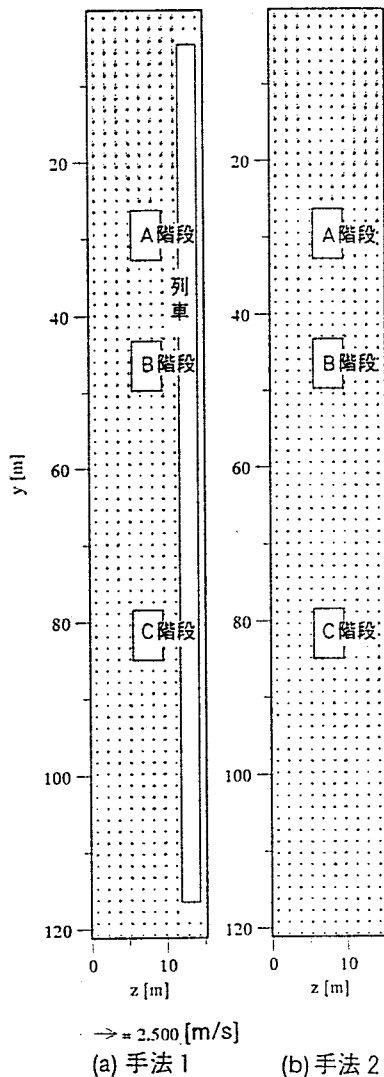


図-5.18 水平断面の気流分布

(1) 水平断面の気流分布

プラットホーム上1.25mの高さの水平面の気流分布を図-5.18に示す。手法1の場合、列車が存在する分気流の通過する面積が減少するため、トンネルから流入する気流の速度が少し大きくなっているが全体の気流分布に明確な違いが見られない。

(2) 水平断面の気温分布

プラットホーム上1.25mの高さの水平面の気温分布を図-5.19に示す。列車の存在する側である $z=7.5\sim15.0\text{m}$ については手法1と手法2とで全体の気温分布が異なっている。

しかし、 $Z=7.5\text{m}$ を中心として列車の存在しない側である $z=0.0\sim7.5\text{m}$ に関しては気温の分布に甚だしい違いが見られない。特に $y=50.0\sim120\text{m}$ の範囲については、28, 26, 24, 22, 20℃の等温線がほぼ同じ位置に見られる。これは、ファンコイルの吹き出しと吸い込みによってプラットホーム中央に空気の壁ができ、これによって列車の存在する側の軌道部からの影響が遮られ、反対側の軌道部におよばないためであると考えられる。

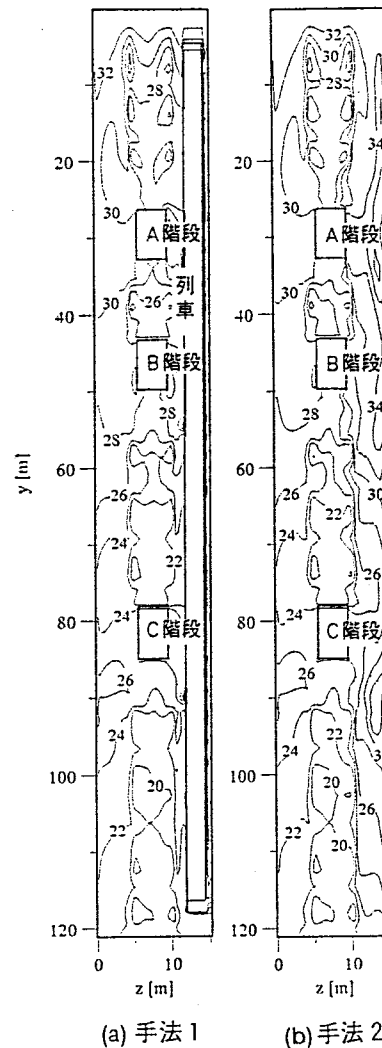


図-5.19 水平断面の気温分布

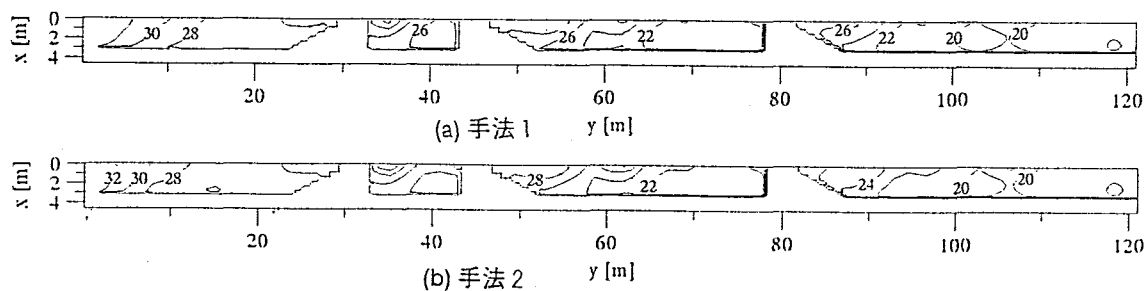


図-5.20 中央断面の気温分布

(3) 中央断面の気温分布

図-5.20は $z=7.5\text{m}$ の x - y 断面の気温分布である。この断面に関しては手法1と手法2の結果にほとんど違いが見られない。

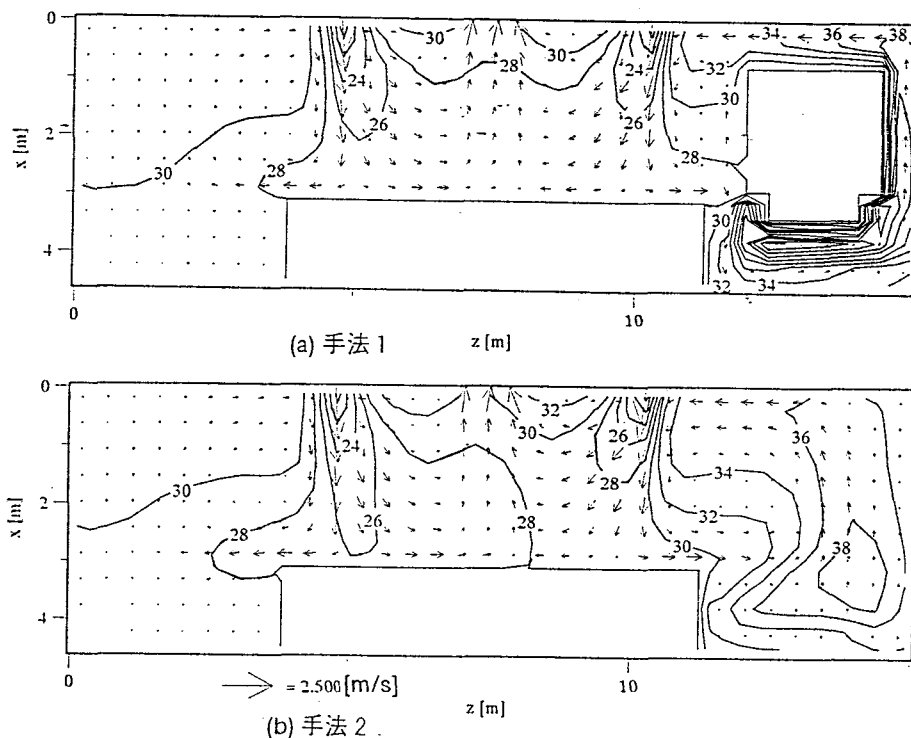


図-5.21 垂直断面の気温・気流分布

(4) 垂直断面の気温・気流分布

$y=39\text{m}$ で切断した x - z 平面の気流温度分布を図-5.21に示す。手法1では車体の床下で発生した熱が車体に押さえられて広がらず、一部が $z=15.0\text{m}$ の壁を伝わって天井からプラットフォームの中央に流れている。これに対して手法2では列車の床下の位置から発生した熱がそのまま上方に広がり、天井付近からプラットフォームの中央に流れている。30℃以上になる領域の広がり比べると手法2の方が広い。このように手法によって列車の周囲には気温分布に違いが見られるが、 $z=0.0\sim 7.5\text{m}$ の範囲では等温線の分布がほとんど変わらない。これは先に述べたようにプラットフォーム上の空調されている空間が列車の存在する軌道部からの影響を遮断しているためであると考えられる。

5. 5. 3 列車発車後の予測結果

時刻204秒に列車がC駅に向かって出発する。これ以後の気温・気流分布を以下に示す。

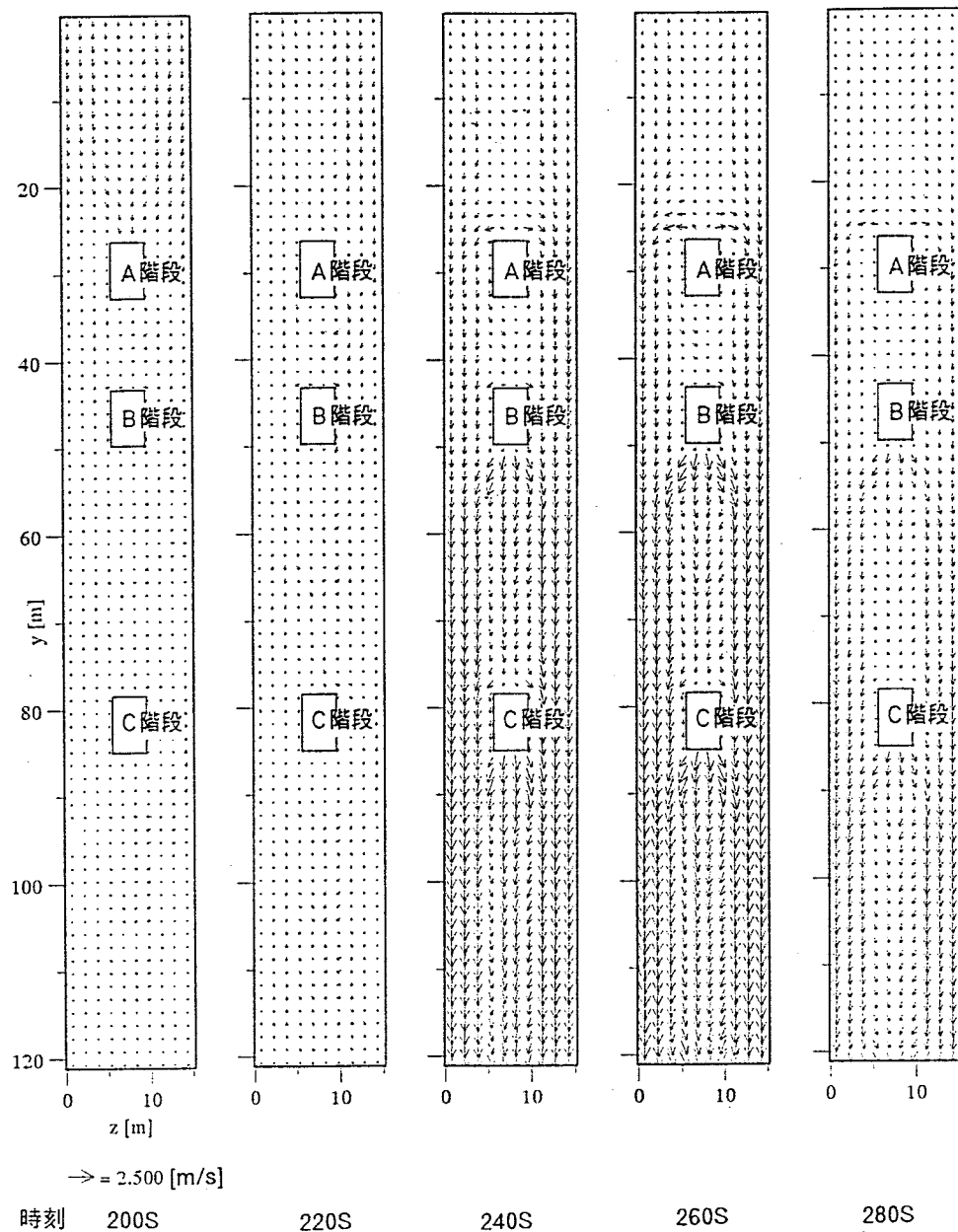


図-5.22 水平断面の気流分布

(1) 水平断面の気流分布

プラットフォーム上1.25mの高さの水平面の気流分布を図-5.22に示す。時刻220sまでは気流の状態は静穏であるが、時刻240～260sでは列車の走行により強い気流が形成されている。列車到着時には気流速度の小さかった $y=90\sim120\text{m}$ の空間では、気流速度が大きくなっている。

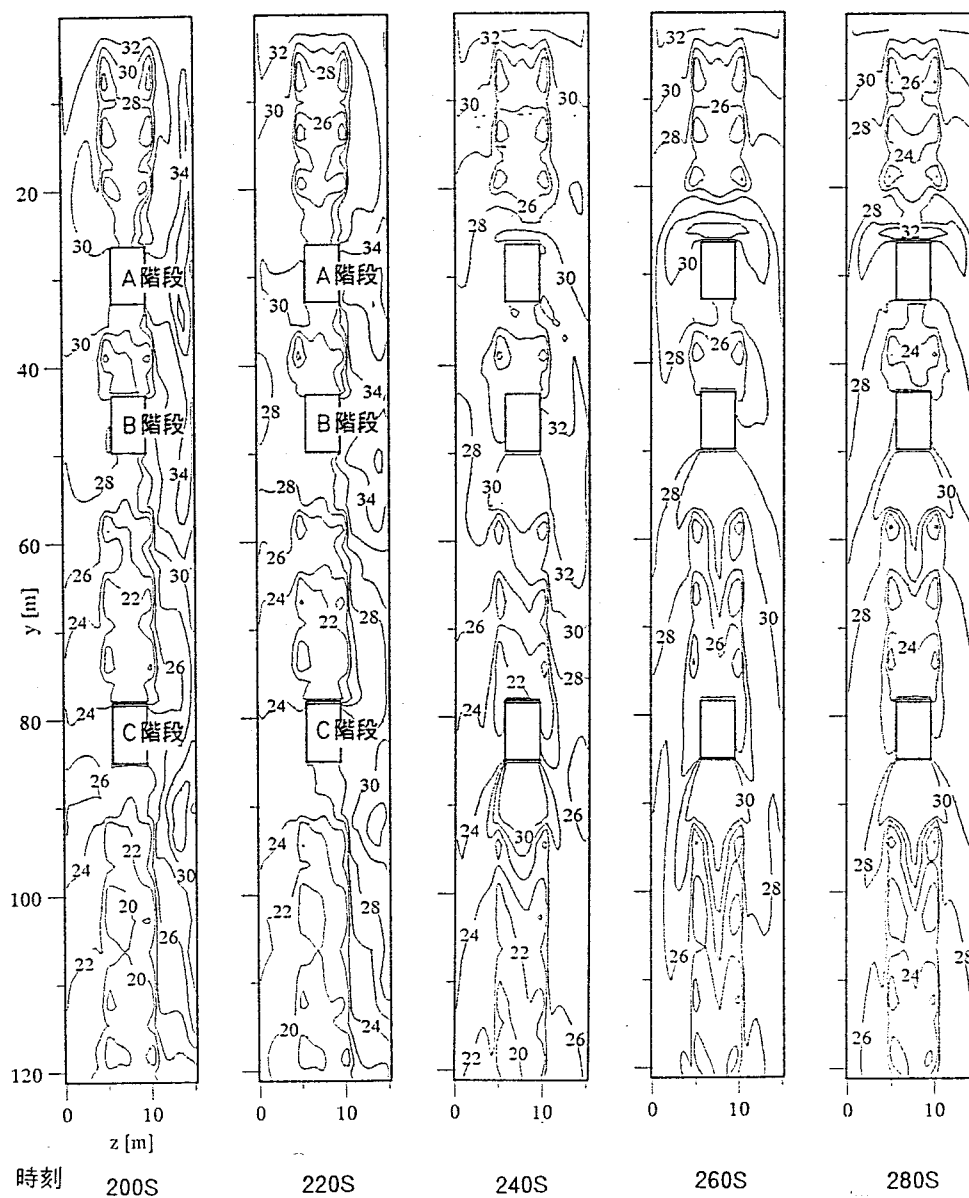


図-5.23 水平断面の気温分布

(2) 水平断面の気温分布

プラットフォーム上1.25mの高さの水平面の気温分布を図-5.23に示す。時刻220sと時刻200sの気温分布を比較すると、 $z=0.0\sim7.5\text{m}$ の範囲では気温分布がほとんど変化していない。時刻240sではB、C階段から 30°C の空気が流入している。 $y=90\sim120\text{m}$ の空間では列車走行の影響で水平方向に強い気流が発生しているので、冷房による低温の領域が押し流されている。同時刻の $y=0\sim20\text{m}$ の空間では水平方向の気流速度が小さいため、冷房によって形成される低温の領域が明確に現れている。時刻220sおよび240sの気温分布は $z=7.5\text{m}$ を中心軸として左右の非対称性が強く、この時点でも列車発熱の影響が残っていることがわかる。しかし、時刻260sでは列車発熱の影響が弱まり、左右の対称性が現れている。

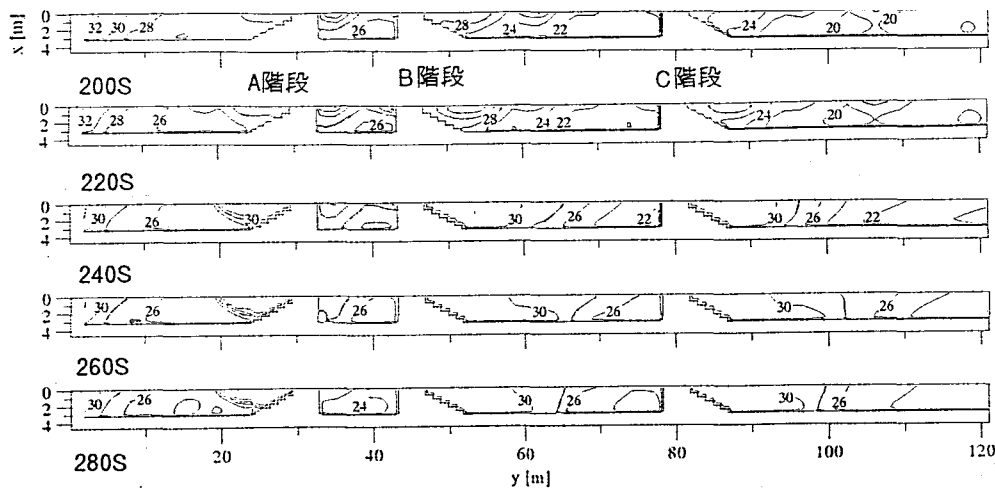


図-5.24 中央断面の気温分布

(3) 中央断面の気温分布

図-5.24は $z=7.5\text{m}$ の x - y 断面の気温分布である。等温線は 2°C 毎に引いている。時刻220sでは時刻200sとほぼ同じ気温の分布が見られるが、240sになると、列車の走行の影響で各階段からの空気の流入があり、各階段から 30°C の等温線が広がっている。これまで低温だった $y=90\sim 120\text{m}$ の空間でも階段からの空気の流入によって気温が上昇している。

5. 5. 4 空間平均気温の時間変化

温熱環境の変動を巨視的に見るために、各時刻の予測結果から空間平均気温を求めた。ここでは、空間平均気温として、プラットフォーム階全域の気温を体積平均したものと、プラットフォーム上である $z=3.7\sim 11.3\text{m}$ の範囲と軌道部である $z=0.0\sim 3.7\text{m}$ および $11.3\sim 15.0\text{m}$ を分けて体積平均したものの3つを示す。平均値を求める際、構造物内部の気温は除いた。

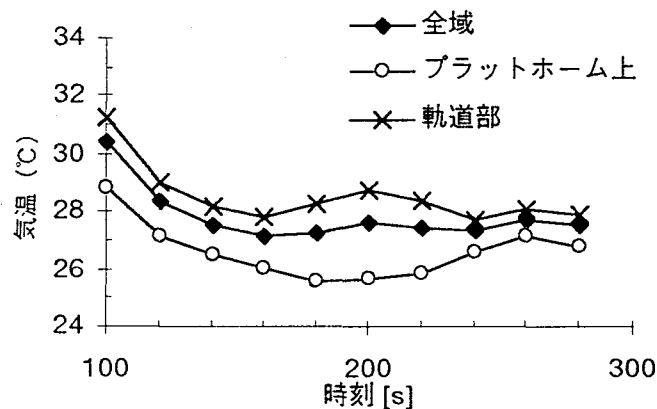


図-5.25 空間平均気温の変動

図-5.25は時刻100~280sの各平均気温の変動である。時刻100s以降、移流熱量に相当する発熱と、列車発熱が除かれるので、各平均気温は低下する。時刻180~200sでは軌道部に列車1が停車し、放熱するため、軌道部の気温が上昇する。しかし、プラットフォーム上では冷房の影響が強いため、あまり気温が上昇しない。時刻200s以降、列車走行の影響により、コンコースから空気が流入するため、プラットフォーム上の気温は上昇し、軌道部の気温は低下する。特に強い気流が発生する

240～260sでは冷房の影響よりもコンコースからの空気の流入の影響が強く現れ、軌道部とプラットフォーム上の気温の差が小さくなる。280sでは列車風が弱まり、再び冷房の効果が現れ、各気温の低下が起こる。

初期条件を除いた、時刻120～280sの各平均気温の最大値・最小値・時間平均値をまとめたものを表-5.7に示す。

表-5.7 空間平均気温の変動

	全域	プラットフォーム上	軌道部
最大値 [°C]	28.4	27.2	29.1
最小値 [°C]	27.2	25.6	27.8
時間平均 [°C]	27.6	26.4	28.3

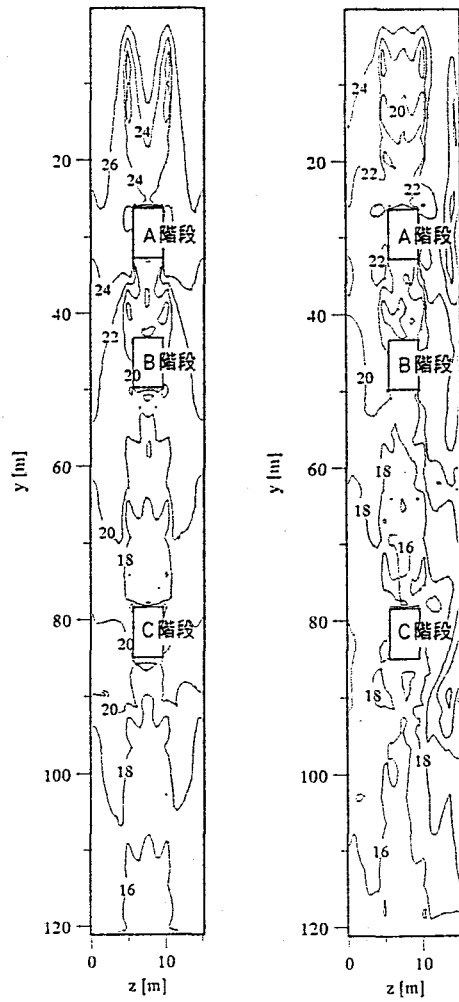
プラットフォーム階全域の時間平均は27.6°Cであり、冷房の設計条件である28°Cからはあまり離れていない。しかし、プラットフォーム上と軌道部の時間平均気温は、それぞれ26.4°Cと28.3°Cであり、1.9°Cの差が生じている。プラットフォーム上に関して言えば、過剰冷房になっていると考えられる。この様にプラットフォーム上と軌道部とで気温が明確に異なることを考慮すると、従来のマクロモデルで用いられているプラットフォーム階の完全混合の仮定は不適当であると言えるだろう。

5. 5. 5 SET*による評価

駅構内全体を対象とした旅客の温冷感予測を行う場合は、第4章で示したように旅客の移動を考慮する必要があるだろう。しかし、プラットフォームに限定した場合は、旅客は列車の到着まで定位置にとどまり続けていると考えられる。したがって、この場合に限り、4. 8. 3の(3)に示したようなSET*の空間分布を示す手法が、妥当な熱的快適性の評価手法となるだろう。ここでは、例として、時刻160sと200sのSET*の空間分布を図-5.26に示す。ここでは旅客の着衣量を夏服の上着を取った場合の0.5cloとした。また、旅客はプラットフォーム上で立ち止まっているものの、歩行後間もない状態であると考え、代謝量を歩行時の123Wとした。

図-5.26(a)は時刻160sにおけるプラットフォーム上1.25mの高さのSET*の空間分布である。ASHRAE³⁾では夏期の快適域をSET*で22.8～26.1°Cとしている。プラットフォーム上にあたる $z=3.7\sim11.3\text{m}$ の範囲ではSET*が26.1°Cを超えることは無いため、旅客は暑さを感じる事がほとんどないと思われる。むしろ、B階段から先の $y=50\sim120\text{m}$ の範囲ではSET*が20°C以下になる部分が広いため、過剰冷房となっていると思われる。

図-5.26(b)は時刻200s、すなわち手法2による列車停車時のSET*分布を示している。ここでは、列車の発熱が加わるものの、その影響は列車1の停車する $z=11.3\sim15.0\text{m}$ の空間にとどまる。トンネルからの空気の流量が少なくなり、冷房の効果が相対的に強くなるため、B階段から先の $y=50\sim120\text{m}$ の範囲に加え、 $y=0.0\sim40.0$ の空間にもSET*が20°C以下になる部分が現れている。



(a)時刻160S

(b)時刻200S

図-5.26 SET*の空間分布

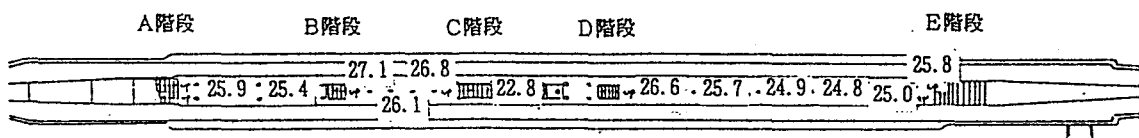


図-5.27 実在駅における気温実測値

5. 6 考察

プラットホーム上と軌道部分とを比較すると気温に明確な差があることが予測結果によって示された。図-5.21の時刻200sの垂直気温・流速分布に示されているように、プラットホーム上にはファンコイルの吹き出し気流によって流幕が形成され、その内側では比較的低温の領域が維持される。ファンコイルからの冷気は軌道部にまで拡散することが無く、狭義のプラットホーム内で循環している。このことにより、冷房はプラットホーム上に集中して作用し、結果としてプラットホーム上では過剰冷房になっている。

本シミュレーションではプラットホーム全体の吹き出し風量が $70.94 \text{ m}^3/\text{s}$ と大量であり、吹き出し風速も 2.34 m/s と比較的大きな速度であったため、このような効果が見られたとも考えられる。

しかし、シミュレーションと同様の過剰冷房が実際に起こっている例として、次のような実測例が挙げられる。図-5.27は実在の地下鉄駅のプラットホームを対象とした、9月14日の10時50分～11時20分の気温の実測結果である。このときのプラットホーム冷房の設定温度は 26°C であるが、C階段とD階段の間では 22.8°C 、D階段とE階段の間では 24.9°C 、 24.8°C 、 25.0°C というように設定温度を下回る部分が広く存在している。

このことは冷房負荷の見積もりに関して重要な示唆を与えると考えられる。冷気の吹き出しによる流幕がシミュレーションに示したように、軌道部とプラットホームの温熱環境を分離する役割を果たすならば、完全混合を仮定したマクロモデルによる冷房負荷の見積もりよりも低い値の負荷で十分な冷房を行いうる可能性があるからである。

5. 7 まとめ

マクロモデル（換気回路網およびOSTESP）を用いて見積もられた冷房負荷をもとにファンコイルによる冷房の諸条件を設定し、CFDを用いてプラットホーム階の気流・気温分布の予測を行った。

軌道部分と比較した場合、プラットホーム上では低温の領域が維持されている。また、プラットホームの空間平均気温は冷房の設定温度を下回っている。このような冷房の効果は冷気の吹き出しによって流幕が形成され、軌道部と狭義のプラットホームの間が分離されることに起因する。シミュレーションによって示されたように、軌道部とプラットホーム上の温熱環境が分離されるならば、冷房負荷は完全混合を仮定した見積もりよりも小さい値になる可能性がある。

参考文献

- 1) 金泰彦：地下鉄冷房設計と熱負荷シミュレーション，空気調和・衛生工学会近畿支部環境工学研究会，資料120号，1986-6
- 2) 数値流体力学編集委員会編：移動境界流れ解析，数値流体力学シリーズ4，東京大学出版会，1995-3
- 3) ASHRAE：Fundamentals Handbook(SI)(1993), Chapter 8

第6章 結論

6.1 各章のまとめ

第1章では、列車走行や機械換気の影響によって常時気温や風速が変動する地下鉄構内の温熱環境の非定常性を述べた。また、地下鉄構内では旅客が常に行動を変化させているため、旅客の熱的快適性を評価する際は温熱環境の非定常性に加え、旅客行動の非定常性を考慮する必要があることを述べた。

また、地下鉄の温熱環境に関する既往の研究を概観し、それらの研究にはマクロモデルによる解析という共通した枠組みがあることを指摘した。また、この枠組みの中では、温熱環境と旅客行動の非定常性を考慮する際に把握する必要がある小さいスケールの現象を取り扱うことができないことを指摘した。そして、ミクロ・マクロ連成モデルという新しい手法によってこの枠組みを超えた研究を行うことを述べた。

第2章では、マクロモデル（換気回路網）を開発し、3つの地下鉄駅を対象とした実測値との比較によって、このマクロモデルによる気流の予測精度が妥当なものであることを示した。また、このマクロモデルを用いた数値実験によって、地下鉄構内に作用する気流駆動力の比較を行い、列車走行と機械換気の影響が卓越しており、浮力や地上風の吹き込みの影響は、列車走行と機械換気が作用しない場合にのみ現れることを示した。

第3章では、マクロモデルとミクロモデル（CFD）を連成させる手法を示した。連成手法としてマクロモデルの結果をミクロモデルの境界条件として一方的に与えるone-way modelとマクロモデルとミクロモデルの間で結果を交換し合うtwo-way modelの二つを示した。可視化実験との比較によりこれらの手法によって得られる駅構内の気流の予測結果が妥当なものであることを示した。また、等温条件・定常状態、等温条件・非定常状態、非等温条件・非定常状態の3つのシミュレーションを行って、one-way modelとtwo-way modelを比較したが、地下鉄駅に対してこれらの手法を適用する場合には、それぞれの手法による結果の間に違いがあまり見られないことがわかった。また、同程度の精度の計算結果を得るために、two-way modelではone-way modelに比べ、定常計算では10倍、非定常計算では3倍程度の計算負荷が加わることがわかった。結論として、実用上はone-way modelを用いるのが好ましいことが示された。

第4章の前半では、大阪における標準的な地下鉄駅構内を歩行中の旅客の温冷感を、マクロモデルを用い、SET*とRWI・HDRを指標として予測した。2つの乗車行動と1つの下車行動について検討を行ったところ、冬期に関しては比較的快適な温冷感予測結果が得られた。しかし、夏期に関してはいずれの行動履歴に関しても不快な温冷感予測結果が得られた。とくに夏期の下車行動に関してはヒートショックが大きくなる可能性が示された。また、SET*とRWI・HDRの結果はよく似ており、SET*のみによる温冷感予測に統一しても支障が無いことが示された。

第4章の後半では、駅構内のより詳細な熱的快適性を予測するためにミクロ・マクロ連成手法（one-way model）および旅客行動予測プログラムを用いた微視的な予測を行った。乗車客・下車客の行動経路を予測し、時間の経過および空間移動にともなう旅客周囲の温熱環境の変化をSET*によって評価したところ、巨視的な熱的快適性予測と同様に、大阪における冬期の地下鉄構内が良好な温熱環境であることが示された。また、旅客の歩行方向と気流速の間の相対速度を考慮した場合、単

純に旅客周りの気流速度を与える場合との間に温冷感に変化が生じることが示された。

第5章では、ミクロ・マクロ連成手法による非定常状態におけるプラットホーム冷房の予測を行った。すなわち、マクロモデル（換気回路網およびOSTESP）を用いて見積もられた冷房負荷をもとにファンコイルによる冷房の諸条件を設定し、CFDを用いてプラットホーム内の気流・気温分布の予測を行った。

冷房を行っているプラットホーム上においても、列車の走行に伴う高温空気の流入による激しい気温の変動が見られた。しかし、軌道部分に比較すれば、プラットホームでは低温が維持されており、冷房の効果が大きいことが示された。この冷房の効果は冷気の吹き出しによってエアカーテンが形成され、軌道部とプラットホームの間が分離されることに起因する。エアカーテンによってシミュレーション通りに軌道部とプラットホームの温熱環境が分離されるならば、冷房負荷は完全混合を仮定した見積もりよりも小さい値になる可能性があることも指摘した。

6. 2 今後の研究課題と本研究の発展性

6. 2. 1 今後の研究課題

本研究の今後の課題としては次のようなものがある。

（1）予測精度の検証

第4章においては旅客の温冷感予測を、第5章においては冷房時の温熱環境予測を行ったが、このような予測をより現実的なものにするためには、実測値との比較が必要である。冷房時の温熱環境の非定常シミュレーションに対しては、プラットホーム上の複数の測定点における気流・気温の同時測定を行う必要がある。また、旅客の温冷感予測に対しては旅客周囲の気流・気温を移動しながら測定し、同時に旅客の温冷感の申告を経時的に記録する必要がある。

（2）連成手法の適用範囲に関する検討

本研究で対象とした地下鉄駅構内ではone-way modelとtwo-way modelの予測結果の間に著しい差が見られなかった。これは、駅構内で発生する圧力損失がトンネルや出入口で発生する圧力損失に比べて相対的に小さく、また、列車や換気機器のような強力な気流駆動力が作用しており、駅構内の微視的な気流場が地下鉄系全体の巨視的な気流場にほぼ支配されてしまうためである。このように連成手法の適用範囲を地下鉄駅構内に制限した場合には、one-way modelとtwo-way modelの間の差は小さく、そのためone-way modelを実用的な予測手法として採用することができる。

しかし、列車や換気機器のような気流駆動力が作用せず、温度差による密度流が支配的になる場合には両者の予測結果が異なる可能性がある。密度流は自励的な流れであり、気流場が温度場を変化させ、温度場が気流場を変化させるという繰り返しの中で、one-way modelとtwo-way modelの計算の初期の微妙な差が最終結果に深刻な差を与える可能性がある。

また、連成手法を地下鉄駅構内以外に適用する場合にも注意が必要である。例えば地下街を対象とする場合、ショッピングエリアなどの複雑な構造を持つ空間に対してあらかじめ適切な圧力損失係数を設定することは困難である。このような場合には、原理的にはtwo-way modelによる予測しか行えない。

このように今後は、連成手法の適用範囲を明らかにする検討が必要である。

(3) 基本形状と温熱環境に関する検討

本研究では実在の地下鉄駅を参考に標準的な地下鉄駅構造を設定し、これに対して気流・温熱環境予測を行った。しかし現実には、規模は同じであっても、出入口や階段の数や配置が異なる駅が多く存在している。また数は多くないが、大規模な地下鉄駅が複数存在している。こうした多様な地下鉄駅をいくつかの基本形状に分類して、温熱環境予測を行い、換気・空調設計に有用な情報を集める必要がある。たとえば、出入口や階段の配置の変更による流路の変化を検討すれば、コンコースやプラットフォームの温熱環境の安定を図る上で有益な情報が得られる。また、駅の規模と気流・温熱環境の安定性を検討し、換気・空調技術の上から見た駅の適正規模を定めることもできる。

6. 2. 2 本研究の発展性

1960年代以降、地下鉄構内の高温化対策として、プラットフォームやコンコースに対する冷房の導入が行われてきた。駅構内の冷房は、マクロモデルによって予測された冷房負荷をもとに設計されるが、この冷房が実際にどの程度の効果を持つかに関しては、冷房設置前の予測も設置後の追跡調査もあまり行われてこなかった。また、冷房設計の基盤である温湿度設計条件もオフィスや居室の設計基準よりも1～2℃高めに設定するという単純なやり方で行われてきており、温熱環境や旅客行動の非定常性という半開放性空間の特質は考慮されてこなかった。

本論文の第4章後半および第5章で示した手法はこのような放置されてきた部分を埋める役割を果たすことができると考えられる。

例えば、代表的なプラットフォーム冷房としては第5章に例示した「天井吹出し・ホーム下排気方式」や「天井内ファンコイル方式」を含めいくつかの方式があるが、地下鉄駅建設前の段階で、これらをシミュレーションによって定量的に比較して、効果のある冷房方式を選択することができる。冷房負荷のうち、移流熱量に次いで列車発熱が大きいことを考慮すれば、ホーム下排気による列車機器発熱の除去の効果が大きいものと考えられるが、本研究の予測手法を用いれば、その大きさを定量的に示すことができる。

既設駅ではダクトスペースが確保できないため、通常、天井内ファンコイル方式を選択する。しかし、地下鉄駅の内部発熱の大きさによっては、同方式による冷房が効果を上げないという予測結果が得られる可能性がある。このような場合には、発想を変えて、新設の地下鉄や新交通システム等で用いられているPSD（プラットフォーム・スクリーン・ドア）を導入し、軌道部とプラットフォームの完全分離を行うという手法や、トンネルにおける機械換気量を動的に制御することにより、トンネルからプラットフォームに流入する空気を低減するという手法を検討する必要がある。

第4章で示した旅客の温冷感予測は、既設の冷房システムの効果や温湿度設計基準の適切さの評価に適用できる。駅構内で発生する強い気流には、夏期において蒸暑感を緩和する作用がある可能性がある。これを考慮して冷房の設計基準温度を上げることができれば、消費エネルギーの低減にむすびつく。

また、旅客の温冷感を快適域に保つような冷房システムを、ミクロ・マクロ連成手法による予測によって試行錯誤的に探し、いくつか見つかった候補の中でコストあるいはエネルギー消費量が最も小さくなるものを選ぶという方法を採用すれば、従来よりも合理的な選択ができる。

いま設備設計における温熱環境予測の有用性について述べたが、地下鉄建設の基本設計においても、

温熱環境予測は重要な役割を担うことができる。先に今後の研究課題として挙げたが、地下鉄駅の構造が内部の温熱環境に与える影響に関して検討することは、基本設計に対して有用な情報を与えることになるだろう。

設備設計にはかなりの柔軟性があるため、従来は基本設計で決定した構造の枠内で換気・空調設備の設計が行われてきた。しかし、この手法では内部の温熱環境の保全のためにいたずらに多くのエネルギーが消費されるおそれがある。構造の変更によって、エネルギー消費を抑え、より快適な温熱環境を実現できる可能性がある場合は、基本設計段階で設計主体に対してそういった情報を判断材料として与えるべきである。例えば、コンコースとプラットホームを結ぶ階段をプラットホームの中央に寄せて配置すれば、プラットホーム内部の温熱環境は完全混合に近いものになり、階段をプラットホームの両端に配置すれば、プラットホーム中央では空気が滞留し気温の変動が小さくなる。本論文で標準駅として示した地下鉄駅と同規模の駅では階段や出入口通路で強い気流が感じられるが、都市中央部の複数の路線が乗り入れる大型の地下鉄駅ではそのようなことはない。これにはプラットホームやコンコースの容積、階段や出入口の数が影響していると思われる。このような形状・規模と温熱環境の関係を定量的に示し、換気・空調技術上の適正な構造を提案する必要があるだろう。

構造の変更は旅客の温冷感とも関係する。出入口、券売機、改札、階段の位置は旅客の行動経路を支配する要素であり、これらの配置によって旅客の温冷感の経歴を変化させることができる。とくに降車客の場合、まとまった人数が列車の運行にあわせて行動するため、出入口や改札などの配置による温冷感の制御は検討する価値があると思われる。列車が最高速度で走行している期間が最も列車風が強くなる期間であるが、この期間に降車客が出入口通路を通過しないように経路を短縮あるいは延長すれば、旅客は強い気流を受けずにすむと考えられる。

このほか、設備設計側の提案を別の視点で検討することも必要である。たとえば、先に触れた PSD は、プラットホームを軌道部から分離し、安定した環境を作る技術であるが、隔壁によって空間の広がり制限するという短所がある¹⁾。地下施設において「空間に広がり感をあたえる」²⁾ことが重要であるとする空間デザインの立場とのバランスを考慮する必要がある。

地下鉄駅は一般的な建築物と同じく、動線計画、構造力学、工法などのレベルの異なる技術的な検討、安全性、コスト、空間デザインの指針となるイメージなどを統合して設計されるものであるが、ここに温熱環境予測を加え、その結果を基本設計に反映させる努力をすることは、温熱環境の保全および省エネルギーの観点から重要なことである。

参考文献

- 1) W. D. Kennedy et al. : Subway Environmental Design Handbook: 2nd Edition, (U. S. Dept. of Transportation, 1976), Part 4 Application of Equipment and Structures for Environmental Control
- 2) John Carmody and Raymond Sterling : Underground Space Design, (Van Nostrand Reinhold, 1993), Chap. 6

記号表

記号

A	: 断面積	[m^2]
$C_{1 \sim 4}$	: ファン圧力特性曲線係数	[$\cdot$]
C_w	: 風圧係数	[$\cdot$]
D	: ブランチの水力直径	[m]
L	: ブランチまたはゾーンの全長	[m]
Q	: ゾーンの内部発熱量	[W]
R	: 通気抵抗	[$\text{N} \cdot \text{s}^2 / \text{m}^8$]
S	: ゾーンの表面積	[m^2]
V	: ブランチまたはゾーンの容積	[m^3]
a	: 列車断面積	[m^2]
c	: 空気の比熱	[$\text{J} / (\text{kg} \cdot \text{K})$]
g	: 重力定数	[m / s^2]
h	: 地上からの高さ	[m]
$h_{11} h_{12}$	: 輸送係数	[$\cdot$]
l	: 列車長	[m]
p	: 圧力 (ゲージ圧)	[Pa]
q	: 流量	[m^3 / s]
t	: 時間	[sec]
u	: 列車速度	[m/s]
v	: 気流速度	[m/s]
w	: 地上風速度	[m/s]
ΔT	: 時間刻み	[s]
α	: 対流熱伝達率	[$\text{W} / (\text{m}^2 \cdot \text{K})$]
ε	: 粗さ	[m]
γ	: 比熱比	[$\cdot$]
δP	: 気流駆動力	[Pa]
δP_B	: 浮力	[Pa]
δP_F	: 換気機器のファン全圧	[Pa]
δP_T	: 列車運行による圧力	[Pa]
δP_w	: 地上風圧	[Pa]
ζ	: 局所損失係数	[$\cdot$]
θ	: 気温	[$^{\circ}\text{C}$]
θ_w	: 壁温	[$^{\circ}\text{C}$]
λ	: 管摩擦係数	[$\cdot$]
ρ	: 空気密度	[kg / m^3]

σ : 閉塞率 $[-]$ ($=a/A$)
 ψ : ゆらぎ比速度 $[\text{m/s}]$

添字

i : 対象とするゾーンおよび接点の番号
 j : 上流側ゾーンおよび接点の番号
 k : 下流側ゾーンおよび接点の番号
 ij : 接点 ij を結ぶブランチ番号
 old : ΔT 秒前の値

謝辞

大阪大学工学部環境工学科 水野 稔教授，大阪大学先端科学技術共同研究センター 下田吉之助教授には，本研究の着手より論文の作成にいたるまで，長年に渡り一貫して懇切なるご指導を賜った。ここに記して深甚なる謝意を表する。

また本論文をまとめるにあたり，大阪大学工学部環境工学科 鳴海邦碩教授，山口克人教授には数々の貴重なご教示を賜り，本研究の位置づけや本研究で扱った現象について筆者の理解を深めさせていただいた。ここに厚く感謝の意を表する次第である。

シミュレーションに関しては大阪大学工学部環境工学科 大西潤治講師，温冷感指標に関しては大阪大学工学部環境工学科 中村安弘助教授，可視化画像の処理に関しては大阪大学工学部環境工学科 加賀昭和助教授，地下鉄駅模型作成に関しては大阪大学工学部環境工学科 西川誠行技官の協力をいただいた。また，列車風モデルに関しては沼津工業高等専門学校電子制御工学科 森井宜治教授，地下鉄駅構内の冷房設計に関しては日建設計大阪本社 金泰彦氏の助言をいただいた。厚く御礼申し上げる次第である。

筆者の所属する大阪大学工学部環境工学科第3講座の学生各位にも多大な援助を賜った。地下鉄駅模型を用いた実験に関しては，岡田俊彦，田所伸悟の両氏の協力を得た。このほかの学生諸氏にも，論文作成に際して協力を得ている。ここに記し，厚く感謝の意を表する次第である。