

地下鉄構内における熱的快適性予測
PREDICTION OF THERMAL COMFORT IN SUBWAY STATION

福代和宏^{*}・下田吉之^{**}・水野 稔^{***}
Kazuhiro FUKUYO, Yoshiyuki SHIMODA and Minoru MIZUNO

In this paper, the authors present a method to predict the thermal environment and patrons' thermal comfort within a ordinary type of subway station. In order to predict the thermal environment, an airflow network model and a CFD (computational fluid dynamics) code are applied to the station. The most common thermal index : SET* is applied to evaluate patrons' thermal comfort. As the result, it is predicted that the thermal environment within the subway station is in good condition during the daytime in winter without heating. Considering the relative velocity between a patron and airflow, more adequate results are predicted.

Key words : subway, thermal comfort, thermal environment, airflow

1. はじめに

一般に地下空間は地盤の断熱性により地上の温度変化の影響を受けにくく、安定した良好な温熱環境が形成されていると考えられている。

しかし、地下鉄構内の場合、地盤の断熱性によって内部発熱の放出が妨げられるため、夏期には高温になり、大量の換気が必要となる。また、地下鉄は出入口が地上や隣接空間に開放されている半開放性地下空間であるため、列車風などにより、制御されない地上との空気の交換が行われる。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ことになる。このような空間で旅客の熱的快適性を維持するためには、一般建築物とは異なる熱環境の評価・調整手法が必要である。

地下鉄構内における熱的快適性を論じる場合は、列車風などの影響による気流の非定常性や、旅客の行動特性を考慮する必要がある。著者らは論文¹⁾において、これらを考慮した熱的快適性評価手法を提示した。しかし、同論文で用いたモデルは換気回路網というマクロモデルであり、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問題点が残された。また、温冷感予測の対象とする人の行動も任意に与えたものであるという問題点も残された。

本論文は、これらの点を改善することを目的としており、駅構内の環境予測モデルとして換気回路網に加えてCFD(数値流体力学)コードを適用し、3次元的な気流・温度分布予測を可能にした。また、温感指標としては、もっとも適用範囲が広いと言われるSET*を適用し、旅客流動シミュレーションプログラムを使用することにより、一般的な旅客歩行ルートを選定し、このルートに沿った温冷感の予測を行う予測手法を

* 大阪大学大学院工学研究科環境工学専攻

** 正会員 工博 大阪大学助教授 先端科学技術共同研究センター

*** 工博 大阪大学教授 工学部環境工学科

開発した。

本論文では、この予測手法の適用例として、標準的な構造を持つ地下鉄駅を対象とした冬期の熱的快適性を予測した。

2. 気流・温熱環境および熱的快適性予測手法

本論文では気流・温熱環境および熱的快適性予測を図-1に示すようなフローで行う。以下、これらの予測手法について概説する。

2.1 気流・温熱環境予測

最近では居室やオフィスの気流・温熱予測にCFDを適用する事例が多くなっているが、地下鉄系のような大規模で環境の変動が激しい空間に対してCFDをそのまま適用することは困難である。これまで地下鉄の気流・温熱環境予測に用いられてきたSES²⁾をはじめとするシミュレーションモデルは、換気回路網と呼ばれるマクロモデルであり、地下鉄系を複数のゾーンに分割し、各ゾーンにおいて一次元流と完全混合を仮定して、巨視的な環境予測を行う手法であった。

しかし、マクロモデルが妥当性を持つのはトンネルや出入口通路のような管路とみなすことのできる一次元性の強い空間に適用する場合であり、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、構造が複雑な空間に対する予測を行うためには、CFDのようなマイクロモデルを適用することが必要である。

そこで本論文では、従来から行われているマクロな気流・温熱環境解析手法によって地下鉄系全体の環境予測を行い、その結果を与条件としてCFDによって地下鉄駅構内（プラットホームおよびコンコース部分）の気流・温熱環境予測を行うことにした。これはマクロモデル（換気回路網）の結果をマイクロモデル（CFD）に一方的に与える手法なので、著者らはこれをone-way modelと呼んでいる。この手法の妥当性は模型実験などによって検証している³⁾。

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。換気回路網およびOSTESPはそれぞれ実測との比較により予測の妥当性を確認済みである^{4)・5)}。これらによる予測を本論文ではマクロ環境予測と呼ぶ。

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、大西ら⁶⁾が開発したSIMPLE法⁷⁾に基づくCFDコード：SCIENCEによる地下鉄駅構内の気流・温熱予測を行う。マクロ環境予測に比べて詳細な予測ができるので、ここではSCIENCEによる予測をマイクロ環境予測と呼ぶ。SCIENCEは大規模工場における気流解析に適用されており、実測との比較により予測の妥当性を確認している⁸⁾。

2.2 温冷感予測

本論文では温冷感の評価指標としてSET*⁹⁾を選択した。これ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おり、適用範囲も広いとされていることが採用の理由である。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

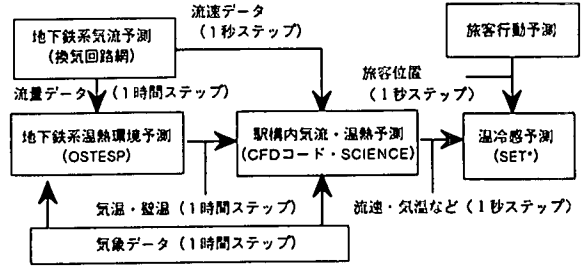


図-1 気流・温熱環境および温冷感予測の手順

する指標である。ASHRAE¹⁰⁾では冬期の快適域を $ET^* = 20.0 \sim 23.9^\circ\text{C}$ 、夏期の快適域を $ET^* = 22.8 \sim 26.1^\circ\text{C}$ としている。そして、 ET^* の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予測される。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。

温冷感予測はある一人の旅客に対して行う。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。

2.3 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-2¹¹⁾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が、ここでは省略する。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。

3. 予測対象と条件

3.1 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-2に示す。地下鉄の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、本論文では前者を対象とした。換気機器の運転は表-1に示す通りを行う。

表-1 換気機器の給・排気量 (単位 m^3/min)

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

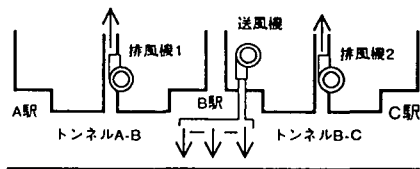


図-2 地下鉄系および換気機器の配置

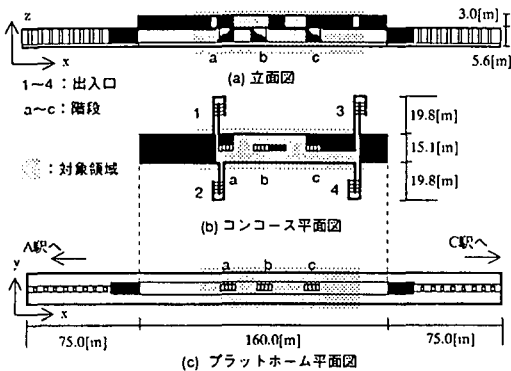


図-3 地下鉄B駅

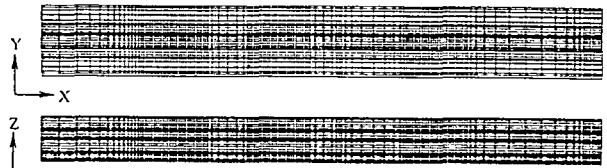


図-4 メッシュ分割図

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。

3.2 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駅の構造を図-3に示す。この駅構造は実在のいくつかの駅構造を参考に決定した標準的なものである。

SCIENCEによるミクロ環境予測では図-3の網目の領域に対して図-4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。

3.3 内部発熱量

本論文で対象とする地下鉄駅では空調を行わない。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。表-2に各発熱の原単位を示す。これらは既存の地下鉄を参考に決定した。

人体発熱は文献²⁾を参考に、次式により顕熱 Q_{HS} [W]と潜熱 Q_{HL} [W]を算出する。ここで θ は気温である。

$$Q_{HS} = 83 - 7(\theta - 24) \quad (1) \quad Q_{HL} = 226 - Q_{HS} \quad (2)$$

人体発熱と列車発熱は図-5に示す時間帯別の滞在人員と列車発着本数に滞在時間を乗じるものとする。

表-2 各種発熱量

照明発熱[W/㎡]	20
列車発熱[kW/列車]	500

表-3 熱伝導計算に用いた定数

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

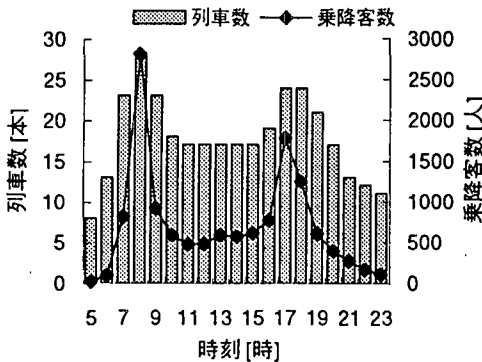


図-5 列車数と乗降客数

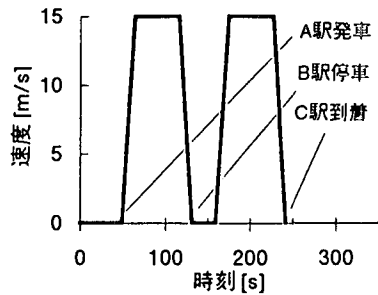


図-6 列車の走行曲線

3.4 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-6に列車の走行曲線を示す。

3.5 地盤熱伝導計算

OSTESPでは駅構内・トンネルなど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。この計算で用いた定数を表-3に示す。

4. 温熱環境予測結果

4.1 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-7(a), (b)に示す。このとき、図-6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-7(a)）には駅給気を行わないため、夏期（図-7(b)）に比べて出入口の流量が増加している。

4.2 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℃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に示す。また、同時刻における地盤の温度分布を図-8に示す。

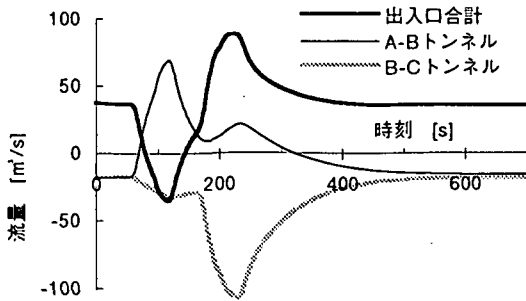


図-7(a) 冬期流量予測値

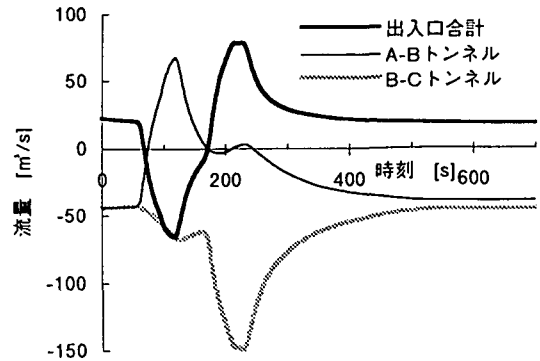


図-7(b) 夏期流量予測値

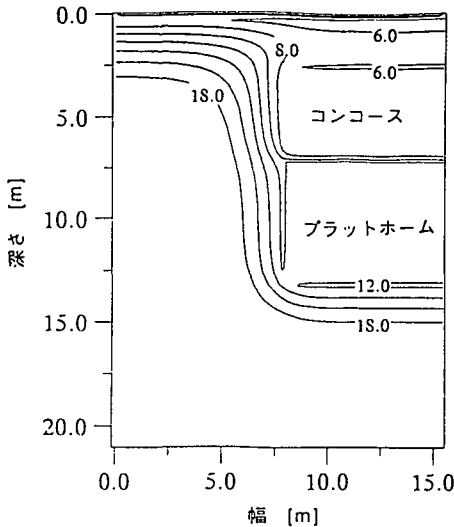


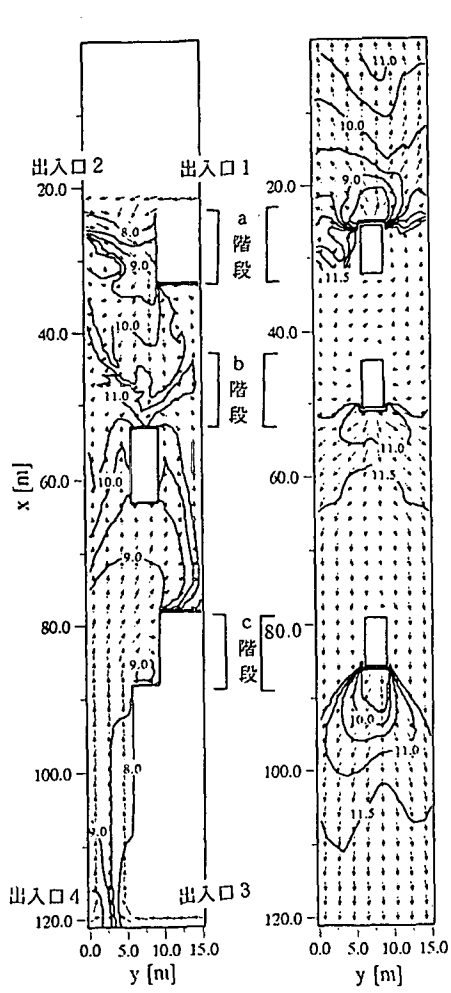
図-8 1/29日正午の地盤温度分布

表-4 1/29 (6年目) 正午の温熱環境

	気温	絶対湿度
	[°C]	[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

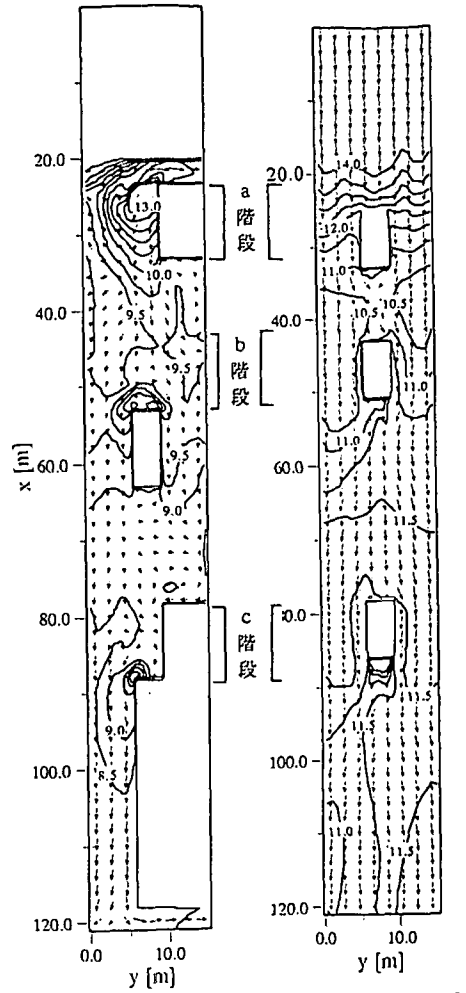
4.3 冬期の駅構内温熱環境予測結果

1月29日正午の駅構内を対象として、SCIENCE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温度として、それぞれ表-4の外気温、トンネル気温を用い、周囲壁体温度として図-8の温度分布を用いた。シミュレーションの対象期間は3.4で述べたように、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



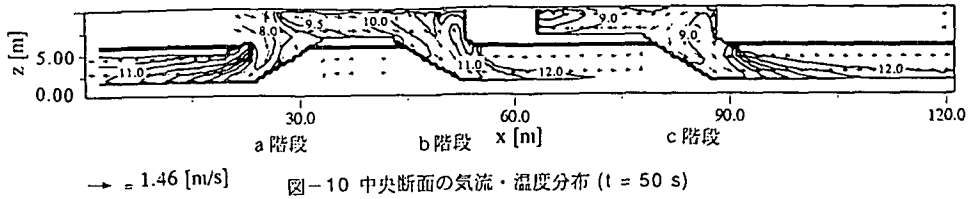
→ = 1.55 [m/s] → = 1.13 [m/s]
 (a) コンコース (b) プラットホーム

図-9 気流・気温分布 (t = 50 s)

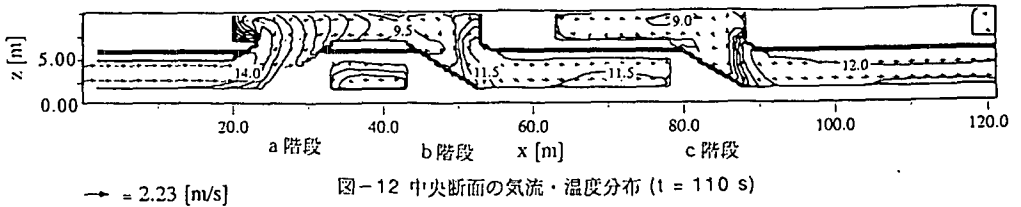


→ = 1.53 [m/s] → = 1.23 [m/s]
 (a) コンコース (b) プラットホーム

図-11 気流・気温分布 (t = 110 s)



→ = 1.46 [m/s] 図-10 中央断面の気流・温度分布 (t = 50 s)



→ = 2.23 [m/s] 図-12 中央断面の気流・温度分布 (t = 110 s)

間を t [s] で表す。気流の境界条件としては図-7 (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困難なので、10秒毎の気温・気流速データを出力させた。

(a) 機械換気のみ作用するときの温熱環境

図-9 (a), (b) にA駅から列車が出発する直前 ($t=50$ s) 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 $y=40\sim60$ 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。プラットホームでは $y=30\sim90$ 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、プラットホームの中でも特に気温の低い領域が形成されている。

図-10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。

(b) 列車風が作用するときの温熱環境

図-11 (a), (b) にA駅発の列車が最高速度で走行中 ($t=110$ s) 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-12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。

5. 温冷感予測

5.1 旅客の行動予測

出入口1からプラットホームに向かう乗車客の行動を予測した。図-13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 0.7 [m/s] に設定した。この場合、出入口1からプラットホームまで計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 3 km/hの場合の値、 123 W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。

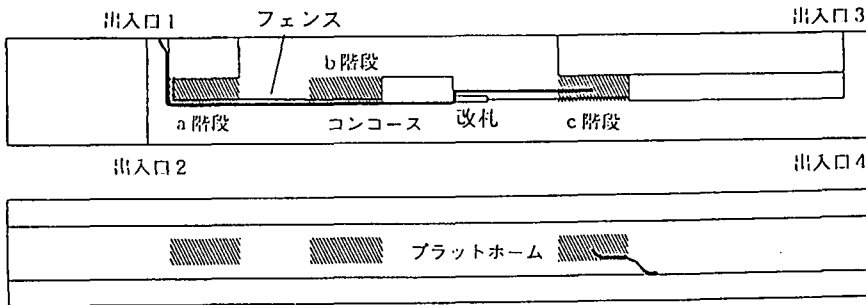


図-13 旅客の経路

5.2 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 ($t=120$ s) にプラットホ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 $t=4\text{s}$ に出入口1からコンコースに入ってきている。

図-14に乗車客周りの温熱環境データとして、旅客の立ち位置の床面から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考察で述べる。気温・気流速データは10秒毎に出力しているの、線形補間している。 $t=110\text{s}$ 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。

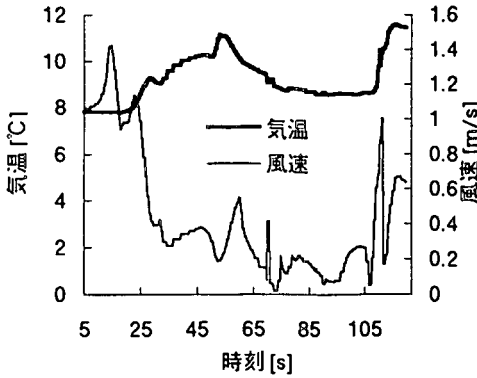


図-14 乗車客周りの環境

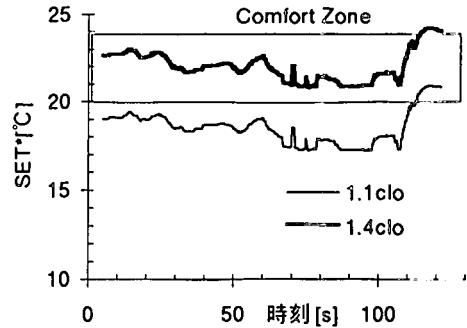


図-15 乗車客の温冷感

図-15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 $t=110\text{s}$ 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。

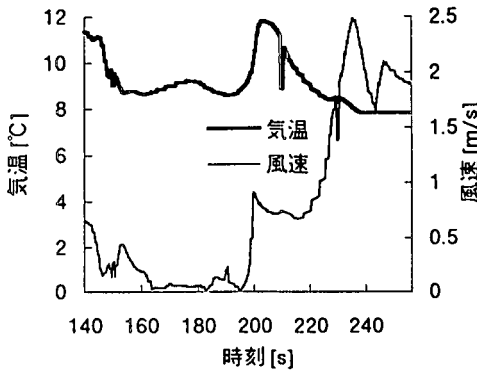


図-16 降車客周りの環境

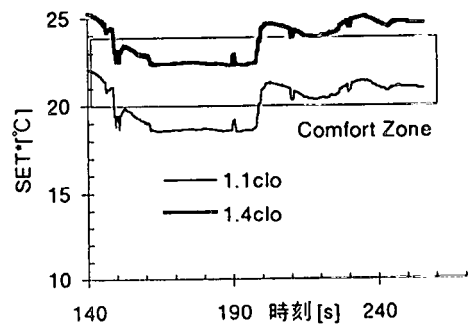


図-17 降車客の温冷感

(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($t=140\text{s}$)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-16に降車客周りの気温と風速のデータを示す。 $t=150\text{s}$ 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。 $t=200\sim 210\text{s}$ 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 $y=40\sim 60\text{m}$ の領域を通過しているためである。 $t=230\text{s}$ 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-17に降車客の温冷感をSET*によって示す。1.1cloの場合、 $t=200\text{s}$ 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。

(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度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-18に相対速度を考慮することによる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。

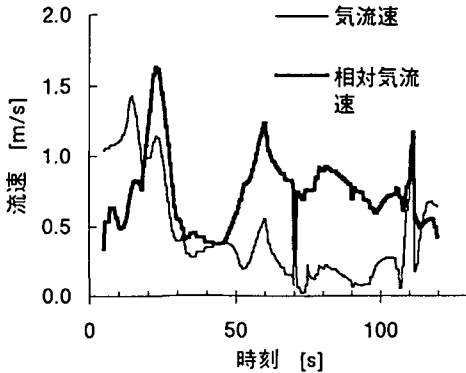


図-18 乗車客周りの気流速

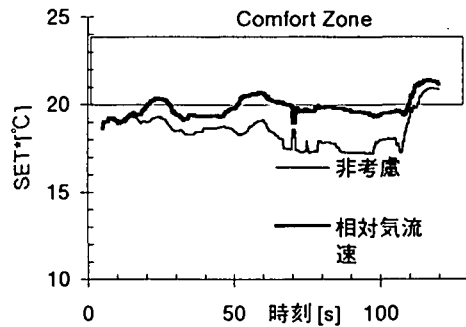


図-19 乗車客の温冷感

この相対気流速を用いて計算した結果を図-19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取るべきである。

6. 考察

6.1 温熱環境予測・温冷感予測による地下鉄駅の評価

本論文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。本論文では冷暖房を行う場合にまで踏み込んでいないが、OSTESPを使用すれば地下鉄駅の長期の熱収支が明らかになる。また、コンコースやプラットフォームに対してCFDコードを適用することにより冷暖房の空気がどの程度の範囲に影響を及ぼすのかも明らかになる。また、冷暖房の効果も旅客の一般的な歩行経路に沿って温冷感予測を行うことによってより現実的な評価をすることができる。

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口

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論文の手法は有効である。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。

6. 2 温冷感評価モデルについて

温冷感評価はオフィスや居室などに対してのみ多くの研究がなされており、ここで取り上げたような歩行者の温冷感についてはまだ十分な研究がなされていない。本論文ではSET*とASHRAE Comfort Zoneを用いて温冷感を評価したが、今後、駅構内における温熱環境の実測および旅客に対するアンケート調査を行い、旅客の実感する温冷感との対比によって本論文の手法の妥当性を確認する作業を必要とするだろう。

7. まとめ

換気回路網などのマクロモデルによる結果をCFD(数値流体力学)コードに境界条件として与え、地下鉄駅構内の3次元的な気流・温度分布を予測する方法を示した。また、旅客の一般的な歩行経路を予測し、この経路に沿って、気流・温熱環境をSET*によって評価することにより、旅客の温冷感を予測する手法を示した。本論文では、この予測手法の適用例として、標準的な構造を持つ地下鉄駅を対象とした冬期の熱的快適性を予測した。

参考文献

- 1) 福代・下田・水野：半開放性地下空間における熱的快適性予測に関する研究，地下空間シンポジウム論文・報告集，第1巻，pp. 35 - 44, 1995
- 2) W. D. Kennedy et al. : Subway Environmental Design Handbook, 2nd Ed., U. S. Dept. of Transportation, 1976
- 3) 福代和宏・下田吉之・水野稔：地下空間の気流・温熱環境の予測手法に関する研究(2) - ミクロ・マクロ連成モデルによる地下鉄駅の等温気流シミュレーション，空気調和・衛生工学会論文集，No. 66 (1997-7)，pp. 87 - 95
- 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，No. 53 (1993-10)，pp. 1 - 12
- 5) 福代和宏・下田吉之・水野稔：地下空間の気流・温熱環境の予測手法に関する研究(1) - 縦流換気方式の地下鉄駅に対するシミュレーション，空気調和・衛生工学会論文集，No. 61 (1996-4)，pp. 99~109
- 6) 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，No. 58 (1995-6)，pp. 23~34
- 7) S. V. Patankar : Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, McGraw-Hill, 1980
- 8) J. Onishi, K. Aoki et al. : Application of a CFD Code to Analysis of a Large Space Indoor Air Controlling System, Proc. 4th International Symposium on Ventilation for Contaminant Control, Stockholm, 1994-9, pp. 585 - 590
- 9) 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
- 10) ASHRAE : Fundamentals Handbook(SI)(1993), Chapter 8
- 11) 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)