

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
PREDICTION OF THERMAL COMFORT IN SEMI-OPENED UNDERGROUND SPACE

大阪大学 福代和宏 Kazuhiro Fukuyo^{*)}
大阪大学 下田吉之 Yoshiyuki Shimoda^{**)}
大阪大学 水野 稔 Minoru Mizuno^{***)}

SUMMARY

The interior environment of subways and underground shopping centers is strongly affected by the outside and the neighboring buildings through their openings. These spaces can be defined as the semi-opened underground spaces. In order to condition the thermal environment, it is necessary to consider the influence of exterior conditions and the patron's transient activities. By using an environmental simulator developed by the authors and the thermal comfort indices that reflect the variations of the thermal environment and the patron's activity, the procedure of thermal comfort prediction in the semi-opened underground spaces is prepared.

Keywords: Thermal Environment (温熱環境), Thermal Comfort (熱的快適性), Prediction (予測)

1. はじめに

地下空間を、地下居室や地下鉄のように有人空間として利用するときには、その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、空気環境と並んで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。

有人地下空間は、構造上2つに分類できる。1つは、地下居室・地下オフィス等、出入口に扉が設けられ、内部環境が外部環境から隔絶した地下空間であり、ここでは閉鎖性地下空間と定義する。

もう1つは、地下鉄・地下街等、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りをもっていない地下空間であり、ここでは半開放性地下空間と定義する。

閉鎖性地下空間は、吸放熱源である地盤の影響を受けるものの、地上建築物と同様に内部の温熱環境が安定しており、従来のビル空調技術の延長で温熱環境調整することが可能であると考えられる。

これに対して、半開放性地下空間は、地盤の影響だけでなく、各種気流駆動力の作用によって地上との空気の交換が起こりやすい空間になっている。地下鉄を例に取れば、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。

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、地下街・地下鉄では利用者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・地下街では、温熱環境や利用者行動の

*) Graduate Student, Environmental Engineering, Osaka University, 2 - 1, Yamadaoka, Suita, Osaka 565, Japan

***) Assoc. Prof., Cooperative Research Center for Advanced Science and Technology, Osaka University, 2 - 1, Yamadaoka, Suita, Osaka 565, Japan

****) Prof., Environmental Engineering, Osaka University, 2 - 1, Yamadaoka, Suita, Osaka 565, Japan

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がある。

この目的のためには、まず熱的快適性予測の手法を確立しなくてはならない。熱的快適性予測は、温熱環境の予測およびその予測結果を温感指標によって集約することの二つの部分に分けられる。

地下鉄の温熱環境予測の既存例として、世界的には米国運輸省の指導の下に行われた研究¹⁾があり、日本でも列車風や地盤吸放熱等に関する研究²⁾³⁾⁴⁾が行われている。

これに対し、半開放性地下空間の特性に応じた温感指標に関しては、文献¹⁾を除くと検討はあまり行われていない。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評価手法を示している。しかし、この評価手法では、利用者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、評価として不完全である。

一方、日本では習慣的にDI(不快指数)を指標として環境評価を行い、設計条件を決定している。しかし、DIは、風速・利用者の代謝量といった重要な因子を含んでいないため、合理的な評価手法とはいえない。中川⁵⁾、野村ら⁶⁾はより合理的な指標として上記のRWIを紹介しているが、いまのところ、日本においてこの指標の適用例はない。

本論文では、地下鉄を対象として、温熱環境および利用者行動の非定常性を考慮した熱的快適性予測の手法を具体的に示すとともに、この手法を用いて地下鉄駅を対象としたケーススタディを行う。

2. 予測手法の概説

(1) 予測手順

本論文では、温熱環境シミュレータから得た温熱環境の予測結果および任意に設定した利用者の行動履歴を、ET*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。

以下で用いる記号を表-1に示す。

(2) 環境予測手法

半開放性地下空間の温熱環境は地盤の吸放熱と地上および隣接空間との空気の交換の二つの要因に影響される。しかし、地下鉄利用者各人の滞在時間は

比較的短時間であるため、本論文で用いるシミュレータでは前者を一定とみなし、後者の変動を考慮して、温熱環境を秒単位で予測する。

最近では居室やオフィスの温熱解析にCFD(数値流体力学)を適用する事例が多いが、本論文で取りあげるような大規模で環境の変動が激しい空間に対してCFDを適用することには困難がともなう。

そこで本論文では、地下鉄に対して従来から行われているマクロな温熱環境解析を行うことにした。すなわち、対象とする空間を完全混合を仮定した複数のゾーンに分割し、ゾーン間を結ぶ換気回路網を設定して気流と温度・湿度を計算する手法を用いる。

表-1 記号表

(Table. 1 Nomenclature)

記号 D: 熱損失[J/m ²]	h: 熱伝達係数[W/(m ² ・K)]
H: 曝露時間[sec]	p: ゾーン圧力[Pa]
I _a : 衣服表面の空気境界層による熱抵抗[clo]	q: ブランチ流量[m ³ /sec]
I _{clw} : 湿りを考慮した衣服の熱抵抗[clo]	t: 時間[sec]
L: ブランチ全長[m]	v: ブランチ流速[m/sec]
M: 代謝量[W/m ²]	ΔP: 気流駆動力[Pa]
M _i : 始めの活動下の代謝量[W/m ²]	Δt: 計算時間ステップ[sec]
M _f : 終わりの活動下の代謝量[W/m ²]	λ: 管摩擦係数[-]
P: 水蒸気圧[kPa]	ρ: 空気密度[kg/m ³]
Q: ゾーン発熱量[W]	θ: ゾーン気温[°C]
R: 放射熱伝達量[W/m ²]	θ _w : ゾーン壁温[°C]
S: ゾーン表面積[m ²]	ζ: 局所損失係数[-]
c: 空気の比熱[J/(kg・K)]	添字
d: ブランチ水力直径[m]	i: 対象とするゾーン番号
	j: 下流側ゾーン番号
	k: 上流側ゾーン番号
	ij: ゾーンi, jを結ぶブランチ番号

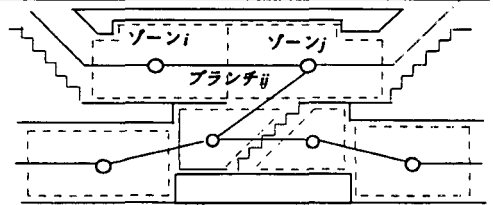


図-1 ゾーニングと換気回路網の設定

(Fig. 1 Zoning and Air Flow Network)

例えば地下鉄構内であれば、図-1に示すようなゾーニングと換気回路網の設定を行う。図-3に示すように地下鉄駅構内は細長く、1次元性の強い形状であるため換気回路網のような手法は合理的であると考えられる。ただし、浮力のような自然対流が支配的である場合は、細かな構造の影響に配慮し、3次元的に扱う必要がある。

さて、各ブランチで発生する気流を非定常1次元

流とみなすと、次式でブランチ流量が求められる。

$$\rho_i L_{ij} \frac{dv_{ij}}{dt} = - \left(\frac{\lambda_{ij} L_{ij}}{d_{ij}} + \zeta_{ij} \right) \frac{1}{2} \rho_{ij} v_{ij} |v_{ij}| + \delta P_{ij} + (P_i - P_j) \quad (1)$$

δP の駆動源として、換気機、列車運行、浮力、地上風の吹き込み等があるが、本シミュレータでは列車運行による気流駆動力を求めるために森井ら⁷⁾のモデルを用いた。なお、本論文では地上風の吹き込みを無視している。

温度場は各ゾーンを出入りする流量から式(2)で予測する。湿度も同様の計算を行う。

$$\rho_i c v_i \frac{d\theta_i}{dt} = Q_i + Sh(\theta_{in} - \theta_i) + \sum_j \rho_j c q_{ij} \theta_j + \sum_k \rho_k c q_{ik} \theta_k \quad (2)$$

地下鉄を対象とした場合の計算の全体的な流れを図-2に示す。同シミュレータによる気流の予測精度に関しては実測値との比較を行って検証している⁹⁾。

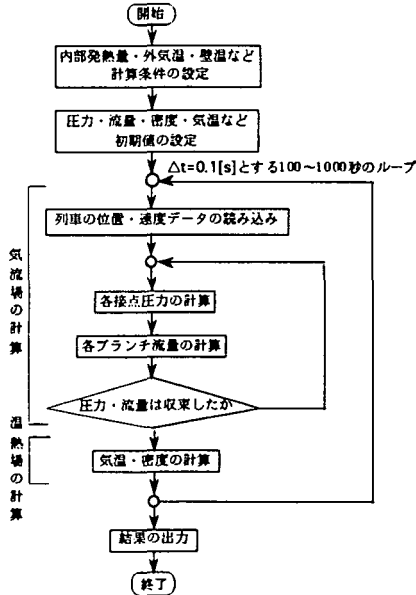


図-2 温熱環境予測のフローチャート
(Fig. 2 Thermal Environment Prediction Flow Chart)

(3) 熱的快適性評価手法

a) 温冷感と熱的快適性

本論文では温冷感の評価指標としてET*やRWI・HDRを選択した。これら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ことが採用の理由である。

より現実的な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のも事実である。例えば、木村ら⁹⁾は地下食堂の快適性の総合評価において、温冷感だけでなく、内装デザインや空気的新鲜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¹⁰⁾は、被験者テストの結果から、温冷感に影響を及ぼすのは、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である可能性を指摘している。

しかし、本研究では心理状態まで考慮した高度な指標作りが目的ではないため、ET*およびRWI・HDRによる温冷感評価によって、ある程度の熱的快適性評価ができるものとして議論を進める。

b) ET*

ET*はGagge、Nishiら¹¹⁾¹²⁾によって開発された指標であり、通常オフィスの環境評価ではPMVと並んで広く用いられている。

Two Node Modelにより、人体の体温調節機能を考慮しており、広範な熱環境の評価が可能であるとされているため、本論文で用いることにした。ただし、得られるET*の値は定常値であるので、RWI・HDRと比較しながら、非定常状態に適用することの妥当性についても後に考察を加える。

c) RWI・HDR

それぞれRelative Warmth Index、Heat Deficit Rateの略称である。蒸暑環境に対してはRWI、寒冷環境に対してはHDRを適用する相互補完的指標である。人体熱平衡の取り扱いがET*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。文献⁹⁾による両者の定義式を次に示す。

RWI :

$$RWI = \frac{M(I_{sw} + I_a) + 6.42(\theta - 35.0) + RI_a}{65.2(5.86 - P)} \quad (P > 2.27[kPa]) \quad (3)$$

$$RWI = \frac{M(I_{sw} + I_a) + 6.42(\theta - 35.0) + RI_a}{234} \quad (P \leq 2.27[kPa]) \quad (4)$$

HDR :

$$HDR = \frac{D}{H} = -M - \frac{6.42(\theta - 30.6)}{I_{sw} + I_a} + 28.4 - \frac{RI_a}{I_{sw} + I_a} \quad [w/m^2] \quad (5)$$

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。M、I_{sw}、I_aの取り扱いについては後述する。

表-2 温感スケールの対応(文献⁹⁾記載の表に加筆)
(Table. 2 Relation between Comfort Classification and Thermal Indices)

ASHRAE Comfort Classification	ET*	RWI
very hot	38.5	
hot	36.0	
warm	32.0	0.25
slightly warm	29.0	0.15
comfortable	25.0	0.08
slightly cool	21.5	0.00
cool	17.5	
cold	14.0	
very cold	11.0	

なお、ET*、RWIとASHRAEの温感スケールの対応を表-2に示す。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、本論文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。

代謝量(M) RWIでは活動が変化するとき、新しい活動に代謝量に対応するまでに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。

$$M(t) = M_f - \frac{t(M_f - M_i)}{360} \quad (6)$$

衣服の熱抵抗(I_{cl}) 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1.0[clo]の衣服の活動によるclo値の低下を表-3に示す。

表-3 活動別のR, I_{cl} および伴流の値
(文献¹⁾記載の表をSI単位系に修正)

(Table 3 Metabolic Rates, I_{cl} , and Air Velocities occurred by Human Activities)

活動の種類	代謝量[W/m ²]	I_{cl} [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

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

衣服表面の熱抵抗(I_s) I_s 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。

$$I_s = 0.397 v^{-0.421} \quad (7)$$

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。

3. シミュレーションの設定

(1) 対象とする地下空間

a) 地下鉄駅モデル

本研究では図-3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のゾーンによって中階を11分割、ホームを18分割し、ゾーン間にブランチを設定した。

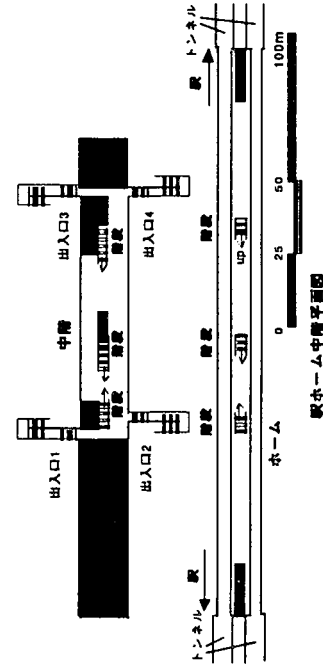


図-3 地下鉄駅構造

(Fig. 3 Structure of Subway Station)

b) 機械換気方式

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、本論文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に駅と換気機の配置を示す各換気機の風量は30[m³/sec]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。

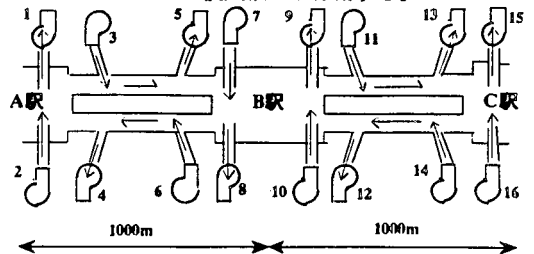


図-4 駅・換気機配置図

(Fig. 4 Layout of Stations and Ventilators)

なお駅における換気はホームに対してのみ行ない、中階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。

c) 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なわないため、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 各種発熱量
(Table. 4 Exhaust Heats)

照明発熱[W/m ²]	20
列車発熱[kW/列車]	500

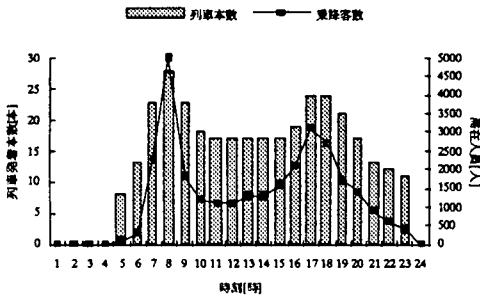


図-5 時間別の滞在人員と列車発着本数
(Fig. 5 Number of Trains and Passengers)

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

$$Q_{HS} = 83 \cdot 7 \cdot (\theta - 24), \quad Q_{HL} = 226 - Q_{HS} \quad (6)$$

なお、人体発熱と列車発熱は、図-5に示す時間別の滞在人員や発着本数に滞在時間を乗じるものとする。

d) 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-6に示す。速度はA駅からC駅に向かう場合に正とする。

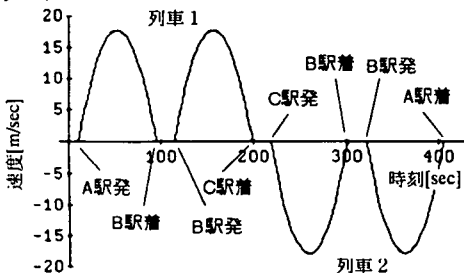


図-6 列車の走行曲線
(Fig. 6 Trains' Run Curves)

(2) 環境設定

a) 地上および建物の環境設定

外気温・湿度は大阪地方のHASP標準気象データから最も寒い時期と熱い時期を選んだ。また、それぞれの時期の地下鉄系の壁温は、地下鉄駅の構造、平均的な換気量、HASP標準気象データを、著者らが開発した地下鉄環境シミュレーションプログラム³⁾に与え、1時間ステップの地盤伝熱計算を行って求めた。表-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時を夏期環境条件と呼ぶ。

表-5 環境設定
(Table. 5 Environmental Conditions)

	外気温	外気湿度	ホーム壁温	中階壁温	トンネル壁温
1月28日8時	-1.7	3.0	11.0	11.1	9.3
8月8日13時	36.5	17.1	26.7	29.6	27.8

※単位は[°C]、外気湿度のみ[g/kg(DA)]

b) 日射量

文献⁶⁾にもとづき、RWI・HDRでは、地下空間内部において $R=0.0$ [W/m²]とする。また、屋外では、夏期は 142 [W/m²]、冬期は 31.5 [W/m²]を与える。

ET*では、RWIで用いる日射量をMRT(平均放射温度)に変換して与えた。計算を簡単にするために、人体の表面温度を 35 [°C]、人体表面の射出率を1とすると、 $R=31.5$ [W/m²]に対して $MRT=39.6$ [°C]、 $R=142$ [W/m²]に対して $MRT=54.5$ [°C]が得られる。地下空間内部では壁温をMRTとして与える。

c) 地上風

シミュレーションでは図-7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月および7月に数日間、数回にわたって大阪大学構内で実測したデータの中から一般的なものとして選んだものであり、1994年6月27日のデータである。ただし、本シミュレーションでは、駅構内への地上風の吹き込みは考えない。

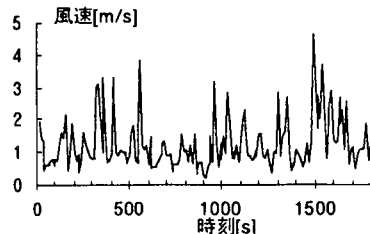


図-7 地上風の実測値
(Fig. 7 Measurement Value of Wind Velocity on Ground)

d) 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3[g/kg]、気流速は0.2[m/sec]を、夏期には、気温27[°C]、絶対湿度17[g/kg]、気流速は0.2[m/sec]を設定する。

(3)利用者の行動履歴および衣服

a)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0.5[clo]、冬はコートを着用している状態として1.4[clo]を設定した。

b)行動履歴

利用者の行動は乗車と下車の二つに大別できる。下車する利用者は一斉に行動するが、乗車する利用者は同時には行動しない。そこで、図-8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。

行動履歴1と2とで屋外歩行時間が異なるのは入口に到達する時刻をずらすのが目的である。時刻0秒以前も定常で歩行しているため、入口到達時の代謝量は同じである。

また、乗客は図-9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-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。

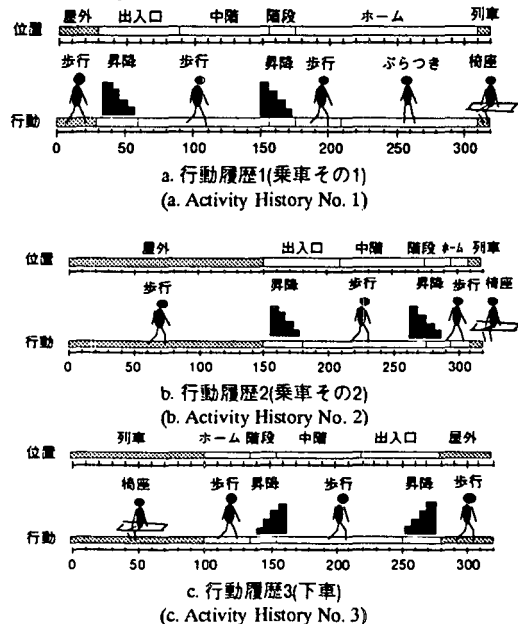


図-8 利用者の行動履歴 (Fig. 8 Patrons' Activity Histories)

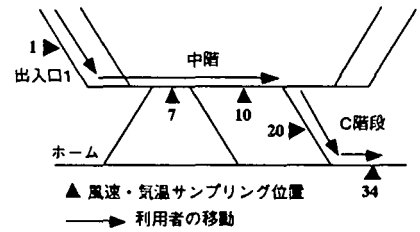


図-9 利用者の移動経路 (Fig. 9 Patrons' Path Way)

(4)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. シミュレーションの結果

(1) 冬期の予測結果

a) 冬期の温熱環境予測結果

図-10に、冬期の朝に乗車する場合のET*・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-9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(中階), 34(ホーム):図-9で右側に向かう場合を正とする。
- 20(階段):中階からホ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)やホーム(34)で強いピークが見られる。中階(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[°C]を超える変動が見られるが、ホーム(34)の変動は、2[°C]以内に収まっている。

b) 行動履歴1に対する温冷感予測結果 (図-10) ET* 利用者が駅構内に滞在している時刻30~310 [sec]の間、ET*はcoolからslightly coolの間で変動している。coolのレベルになるのは、出入口歩行時(60~90[sec])、ホーム歩行時(175~190[sec])、ホームbぶらつき時(250~300[sec])の3回であるが、1[m/sec]以上の風速があることが主な理由である。

ET*によって示した温冷感のピーク値の中には持続時間が10数秒程度と短いものがあるが、本シミュレー

タでは空間を10m程度に分割しており、一方10秒間に人が移動する距離も同程度であるから、巨視的モデルで10秒程度のピーク値を指摘することは不合理ではないと考えられる。

HDR HDRは熱損失を表す指標であるため、ET*とは正負の記号が逆転している。HDRの予測結果は、全体的にはET*に対応するが、一部に傾向が異なる部分がある。それは階段昇降時(155~175[sec])であり、このとき、代謝量の上昇の影響によりET*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、ET*では、行動に対応した代謝量をそのまま計算に用いるのに対し、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。

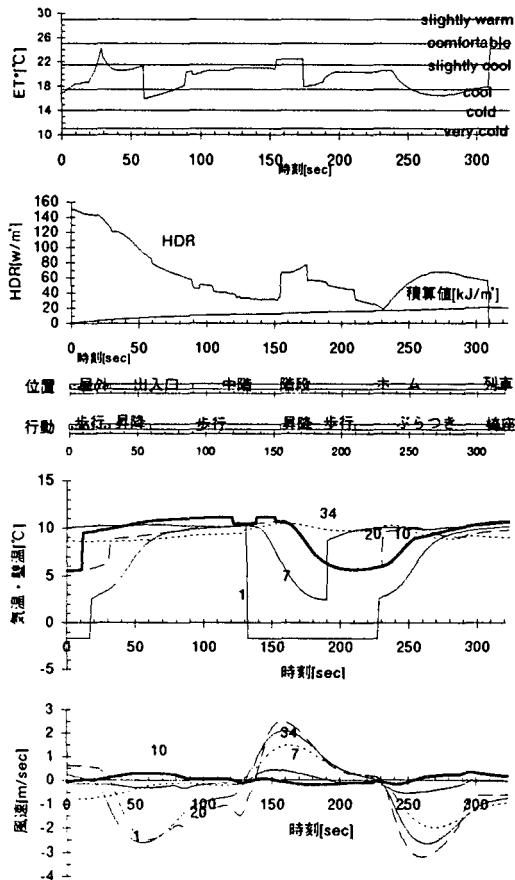


図-10 冬期温熱環境および行動履歴1に対する温冷感予測値 (Fig. 10 Winter Thermal Environment and Thermal Comfort for Activity History No. 1)

c) 行動履歴2に対する予測結果 (図-11)

ET* 150~310[sec]が利用者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、very coldからcomfortableまで大きく変動する。このように変動が激しくなる理由は、利用者が駅構内に入る時期と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180[sec]に見られるように、冷気の侵入と代謝量の低下が重なるような場合には、ET*がvery coldにまで低下する。

180[sec]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、ET*は上昇を続ける。

HDR HDRも全体としてはET*と同様の傾向を見せる。しかし、ET*が180[sec]でvery coldに低下したとき、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。

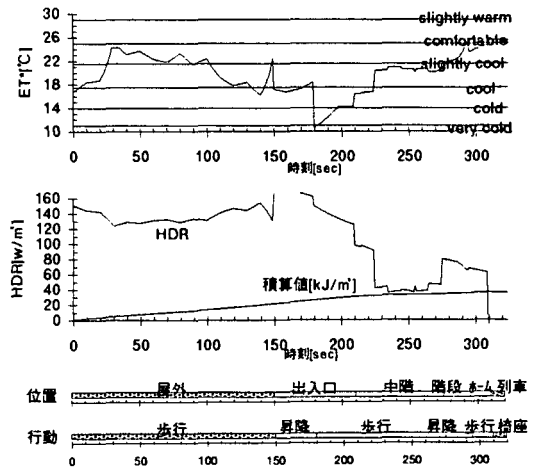


図-11 行動履歴2に対する温冷感予測値 (Fig. 11 Thermal Comfort for Activity History No. 2)

d) 行動履歴3に対する予測結果 (図-12)

ET* 100~280[sec]が駅構内に滞在する期間である。ET*は列車内ではcomfortableのレベルであるが、下車直後に温感の急激な低下が見られる。駅構内ではcomfortable~coldの間で変動する。階段昇降時には、代謝量が多いこと、気流速が小さいこと等の理由で一時的にcomfortableになる。

出入口歩行時の220~230[sec]では、中階からより低温の出入口に移動したことによりcoldになる。240~250[sec]では、出入口の気温(1)が上昇しているもの

の、列車運行に伴う強い気流によってcoldになる。

HDR HDRの変化がET*と大きく異なるのは出入口昇降時(250~280[sec])であるが、これも代謝量の扱いの違いが原因である。

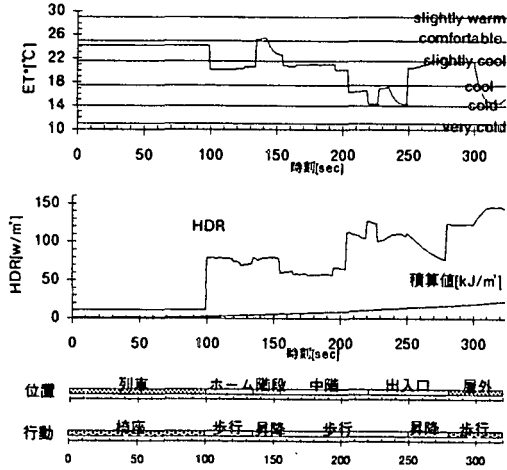


図-12 行動履歴3に対する温冷感予測結果
(Fig. 12 Thermal Comfort for Activity History No. 3)

(2) 夏期の予測結果

a) 夏期の温熱環境の予測結果

図-13にET*、RWI、気温、風速の予測値を示す。

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、風速の予測値がほぼ同じであるのは、列車風のような強制対流が存在する場合、浮力の影響が非常に小さいものとなるためである⁸⁾。

屋外が非常に高温であるので、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。

b) 行動履歴1に対する予測結果(図-13)

ET* ET*の値はwarmとcomfortableの間で変動している。全体の傾向として、風速の小さいときにwarmのレベルに近づいている。出入口や階段に入った直後に温感の急激な変化が見られる。

RWI RWIの値の変動の傾向はET*とほぼ同様である。しかし、蒸暑感は1温度レベル分高く評価されている。RWIの評価がET*による評価と特に異なっているのは、時刻240[sec]付近におけるRWI値の上昇である。これは、ホームの風速(34)がこの時刻に0[m/sec]前後になっており、風速の低下に伴う衣服表面の熱抵抗 I_{cl} の増加が現れたことが原因である。

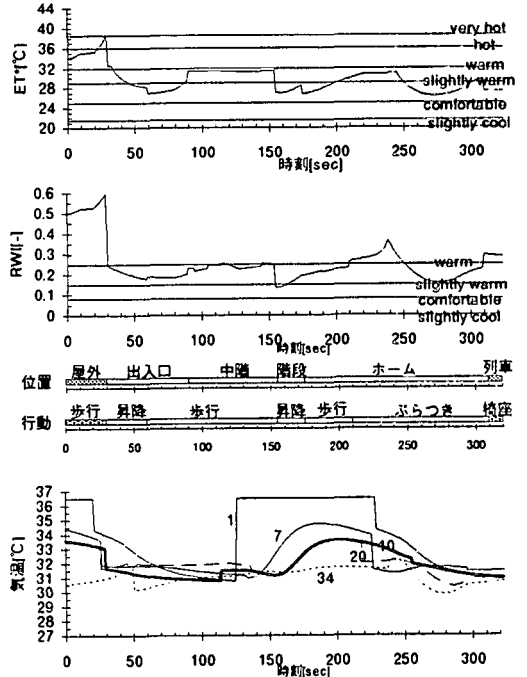


図-13 夏期温熱環境および行動履歴1に対する温冷感予測値
(Fig. 13 Summer Thermal Environment and Thermal Comfort for Activity History No. 1)

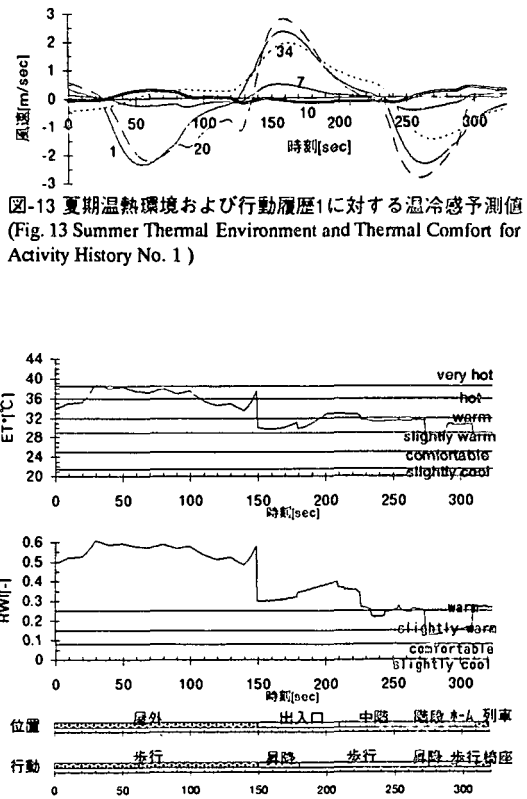


図-14 行動履歴2に対する温冷感予測結果
(Fig. 14 Thermal Comfort for Activity History No. 2)

c) 行動履歴2に対する予測結果 (図-14)

ET*とRWIの値は、ともに駅構内ではwarm寄りの結果を示している。行動履歴1よりも強い蒸暑感を示している。ET*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。

d) 行動履歴3に対する予測結果 (図-15)

ET*の結果がRWIの結果に比べて、ややwarm寄りの結果を示しているが、屋外へ向かって蒸暑感が大きくなる傾向は同じである。ホーム、中階、屋外に移動した直後には温感の急激な上昇が見られる。

中階歩行時の195[sec]においてET*およびRWIの急な上昇が見られるが、これは図-9中の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[°C]以上ある。

また、出入口歩行時の230[sec]付近で、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。

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。

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。

ただし、地下鉄構内の気温は交通量によって変動するので今後その影響についても検討したい。

(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, b)に示した例では、気温の変動があまり無い場合でも、風速が大きいと温度レベルが1つ低下するような結果が得られている。

(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利用者行動のタイミングの重要性が指摘できる。

乗車客は任意の時刻に駅に入るが、これは外部の厳しい環境から駅構内のより緩やかな環境への移動なので特に対応策を講じる必要はない。下車客はほぼ一斉に行動し、これは外部の厳しい環境への移動なので適切な動線計画による熱的快適性の保全が必要であると考えられる。

たとえば、図-12に示した冬期の下車時の熱的快適性予測では、下車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、下車客が出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等の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) 評価指標の比較

ET*とRWI・HDRとでは、代謝量の取り扱いの違いから、利用者の行動が変化した直後の温冷感に違いが見られた。生理学的な観点から述べれば、代謝量の非正常扱いをする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、両指標の結果は全体的には同じ傾向を示しており、

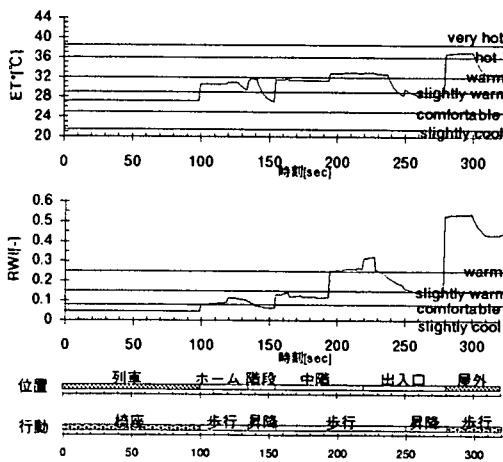


図-15 行動履歴3に対する温冷感予測結果

(Fig. 15 Thermal Comfort for Activity History No. 3)

5. 考察

(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、出入口や中階等の外部により近い部分では、列車運行にともなう冷気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。中階において冷暖房を行ったと

定常値を示すET*でも実用上はあまり問題がないことがわかった。

ここで、従来使用されてきたDIによって温冷感を予測した例を図-16に示す。これは、4,(2),a)の夏期の行動履歴1に対する結果であるが、図-13のET*, RWIと比較すると、気流の寄与が無い分、変動に乏しく、現実的でないと考えられる。

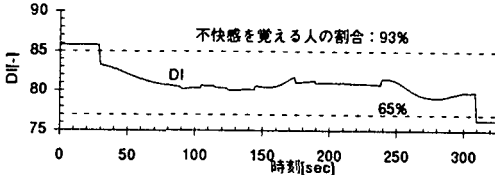


図-16 夏期の行動履歴1に対するDIの変動

(fig. 16 DI Variation for Activity History No.1 in Summer)

今のところ、半開放性地下空間に対して適用できる指標としてはET*とRWI・HDRがあるだけだが、今後被験者テストなども行いながら、より合理的な指標を開発する余地がある。

(5) ヒートショックの定量化

図-10~15のET*, RWI, HDRの変動値を見ると、ヒートショックと呼ばれる温冷感の急激な変動が起きているのがわかる。ヒートショックは利用者、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的に評価する手法の一つとして、川島¹³⁾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ET*を用い、夏期条件下の行動履歴1~3について駅構内滞在期間中(行動履歴3では出口から出た直後を含まない)のTG値を求めると、表-6に示す結果が得られる。

表-6 行動履歴別TG値
(fig. 6 TG values)

行動履歴	1	2	3
TG ⁺ [℃・sec]	14.0	9.2	14.4
TG ⁻ [℃・sec]	23.0	16.1	12.9

夏期にはヒートショック：TG⁺が重要でコールドショック：TG⁻があまり問題でないと考えると、下車行動である行動履歴3は、下車直後や階段から中階に移った直後等の温冷感の急上昇の寄与により、TG⁺が最も大きくなっている。

6. まとめ

本論文では、地下街および地下鉄という半開放性地下空間における、温熱環境と利用者行動の非定常性を反映した熱的快適性の予測手法を示した。そして、この予測手法を用いて、標準的な地下鉄駅モデルの評価を行い、気流の変動と行動履歴が熱的快適性に及ぼす影響を明らかにした。

参考文献

- 1) W. D. Kennedy et al. : Subway Environmental Design Handbook, 2nd Ed., (U. S. Dept. of Transportation, 1976)
- 2) 柳下昌平, 若宮宜範, 山中昭郎 : 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
- 3) 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種-地下鉄構内の気温形成に及ぼす機械換気と地盤吸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
- 4) 日本気象協会 : 地下鉄12号線環状部温熱環境解析報告書(1994)
- 5) 中川肇 : 地下鉄冷房の設計法, 空気調和・衛生工学55巻3号(1981 - 3), pp. 35 - 40
- 6) 野村為信 : 地下鉄プラットホームの空調, 冷凍69巻799号(1994 - 5), pp. 76 - 84
- 7) 森井宜治, 澤洋一郎, 榎本隆二 : 地下鉄の風, 「なかれ」12巻4号(1993 - 12), pp. 423 - 437
- 8) 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
- 9) 木村健一, 増田運哉ほか : 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
- 10) K. Nagara, Y. Shimoda, M. Mizuno : Evaluation of thermal environment in outdoor pedestrian space, 2nd Thowa University International symposium, CUTEST'92(1992 - 9), pp. 157 - 158
- 11) 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
- 12) A. P. Gagge, Y. Nishi, R. G. Nevins : The Role of Clothing in Meeting FEA Energy Conservation Guidelines, ASHRAE Transactions 82(1977), pp. 234 - 247
- 13) 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)