

地下空間の気流・温熱環境の予測手法に関する研究(1)^{*1}

——縦流換気方式の地下鉄駅に対するシミュレーション——

福 代 和 宏^{*2}
下 田 吉 之^{*3}
水 野 稔^{*4}

キーワード：シミュレーション・地下鉄・気流・温熱環境

地下鉄・地下街などの地上との空気の交換が問題になる半開放性地下空間を対象とした気流・温熱シミュレータを開発し、地下鉄駅における実測値を用いてその予測精度を検証した。また同シミュレータを用いて、気流駆動力が地下空間の気流・温熱環境に及ぼす影響について数値実験を行い、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込みや浮力の影響が明確に現れることなどを明らかにした。従来は、地下鉄構内環境に対する列車風の影響が重視されていたが、半開放性地下空間一般に対する環境調整を行うためには、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。

1. はじめに

地下空間の空気・温熱環境を考える時、年単位・月単位の変化を対象とする場合は、地盤の吸放熱効果や地下水の移動なども重要な要素となるが、日単位・時間単位の比較的短い期間に着目すれば、熱負荷、空気清浄度、利用者の熱的快適性などの各側面に大きな影響を与える因子は気流であると考えられる。

特に、地下街・地下鉄といった半開放性の地下空間では、換気・空調機器が起す気流以外にも、列車風や地上風の吹込みを原動力とする気流によって外部やトンネルの空気が流入し、内部の空気・温熱環境に影響を与えることを考慮する必要がある。

地下鉄を例に取り、半開放性地下空間に作用する気流を駆動力別に分類すると図-1(a)の5種類になる。このうち、人体の移動に伴う気流は見積りが困難であるため、以下では議論しないことにする。従来の地下空間に

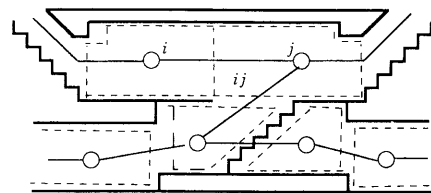
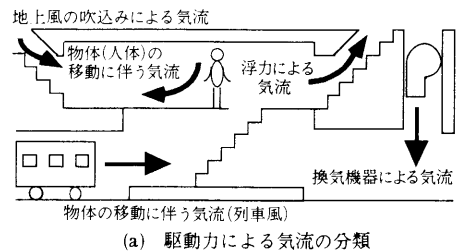


図-1 地下空間の概念図

対する気流解析では、機械換気と列車走行による気流に関心が寄せられており、地下街・地下鉄の半開放性に着目し、地上風の吹込みや浮力が気流・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。

そこで本報では、半開放性の地下空間を対象とした気流・温熱環境シミュレータを作成し、地下鉄駅における

^{*1} 本研究の一部は、既に口頭発表している^{10), 11)}。

^{*2} 大阪大学大学院工学研究科 学生会員

^{*3} 大阪大学先端科学技術共同研究センター 正会員

^{*4} 大阪大学工学部環境工学科 正会員

気流の実測値と計算値を比較して、その予測精度を検証した後、地下鉄系を対象とした数値実験によって各種駆動力による風が地下空間の空気・温熱環境に与える影響の大きさを比較する。

なお、本論文中で用いる記号および添え字は以下のとおりである。

記号		
A	: 断面積	[m ²]
C_{1-4}	: ファン圧力特性曲線係数	[-]
C_w	: 風圧係数	[-]
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	[N·s ² /m ⁶]
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	[J/(kg·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	[-]
l	: 列車長	[m]
p	: 圧力(ゲージ圧)	[Pa]
q	: 流量	[m ³ /s]
t	: 時間	[s]
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	[W/(m ² ·K)]
ϵ	: 粗さ	[m]
γ	: 比熱比	[-]
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	[-]
θ	: 気温	[°C]
θ_w	: 壁温	[°C]
λ	: 管摩擦係数	[-]
ρ	: 空気密度	[kg/m ³]
σ	: 閉そく率(= a/A)	[-]
ϕ	: ゆらぎ比速度	[m/s]

添え字

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

2. 気流・温熱シミュレーションの概要

2.1 換気回路網モデル

本研究で用いる気流・温熱シミュレータでは、換気回路網モデルによって気流場・温熱場の計算を行う。以下、**図-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・温度分布を三次元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ほうが有益であると考えられることから、本論文では換気回路網モデルを用いる。

図-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。

2.2 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-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。

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

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、

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

で表される。

浮力は地上空気の密度 ρ_0 を基準とした時、次式で与えられる。

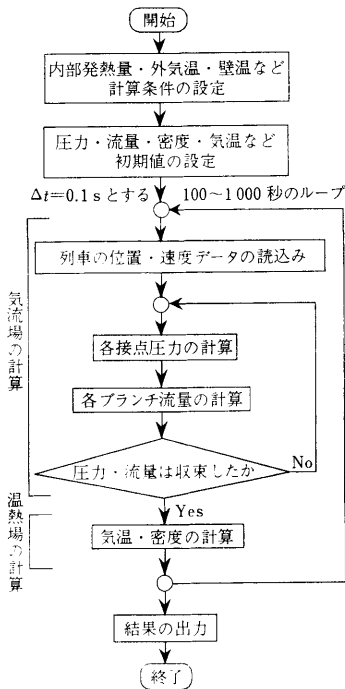


図-2 計算のフローチャート

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

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二つが考えられるが、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、 $P-q$ 特性曲線を三次曲線近似した次式で与える。

$$\delta P_{Fi} = C_1 q_i^3 + C_2 q_i^2 + C_3 q_i + C_4 \quad \dots\dots(4)$$

地上壁の吹込みによる駆動力は、風圧計数 C_w を用いて次式で与える。

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

列車の走行に伴う駆動力は森井ら¹⁾のモデルを用い、次の二式を連立させて解く。

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

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

ここで、

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

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な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、

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

となり、式(9)を完全陰解法で離散化すると、

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

となる。式(10)は二次方程式であり、解析的に解くことができる。

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

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

とおくと、式(10)は、

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

となる。 q_{ij} が正の時と負の時とで場合分けし、この式を解くと、

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

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

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時、 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、

$$\sum_j^m \rho_{ij} q_{ij} = 0 \quad \dots\dots(15)$$

となる。ここで、 q_{ij} に式(14)を代入し、 δP 、 p_j 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。

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

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。

2.3 温熱場の予測モデル

気温の計算は中階・ホーム・トンネルなど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-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。

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

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、著者ら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二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らる。

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。

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

2.4 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・階段の踏み段など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⁾

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

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

(2) ζ の決め方

圧力損失を Δp とすると、損失係数 ζ は、

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

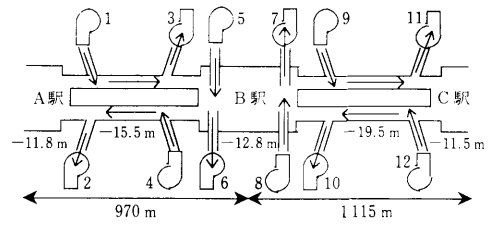


図-3 各駅および送・排風機の位置関係

表-1 機械換気量

送・排風機名	風量 [m³/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

で定義される。

ζ 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など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 ζ を求める。

②の分岐・合流損失の ζ 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、各タイムステップごとに、Gardelの式⁷⁾を用いて求める。

3. 実測値による予測精度の検証

3.1 対象駅の換気方式

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、ここで取り挙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するのみ行う。

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二つがあるが、最近では、単線シールド工法によって地下鉄が建設されることが多く、同工法に適した後者の方式がとられることが多い。そこで、ここでは縦流換気を行う実在の地下鉄駅B駅を対象とした。

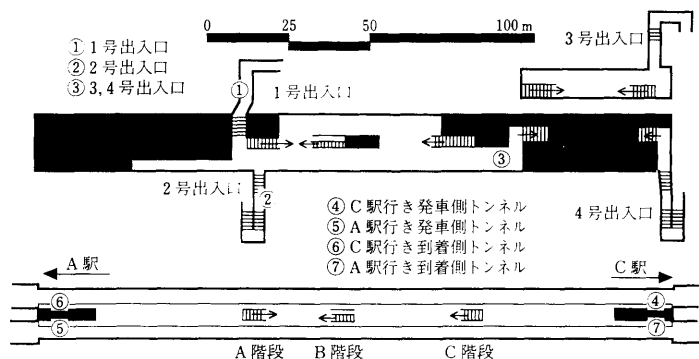


図-4 B 駅ホーム・中階平面図

表-2 B 駅における各設定値

	ブランチ番号	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	17.5~20.2	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(ブランチ)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	9 686~9 717	6 930~6 952	1 299~1 304
	10	31.3	58.3	19.6	1 822	613	103
B 駅ホーム	13~19	8.8~31.2	58.3	49.0	510~1 822	429~1 531	2 625~9 375
B-C 間トンネル	20, 21, 23, 24	464~465	24.6	17.6	11 408~11 439	8 162~8 184	1 530~1 535
B 駅中階	37~42, 50, 51	5.0~21.3	22.5~45.0	21.0~36.0	225~956	180~765	1 500~6 375

3.2 実測の概要

B 駅と隣接駅、送・排風機との位置関係は 図-3 のようになっている。また、同図では、トンネルおよび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。

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 駅のホーム部・中階部の平面図を 図-4 に示す。流量の測定点は 図-4 中に ①~⑦ 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で確認した。風速、風向は 10 秒ごとの瞬時値を記録し、各測定点の断面積を乗じて流量を求めた。

実測結果を 図-7, 図-8 に実線で示す。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

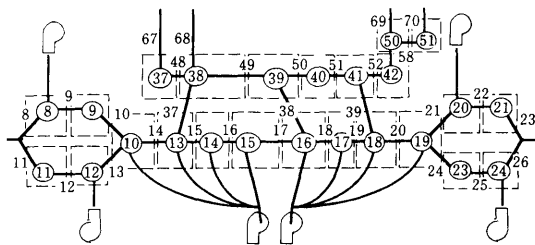


図-5 B 駅の換気回路網による表現

いる。流量は、図-7 では地上から駅構内に吹き込む場合を正に、図-8 では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-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。

表-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

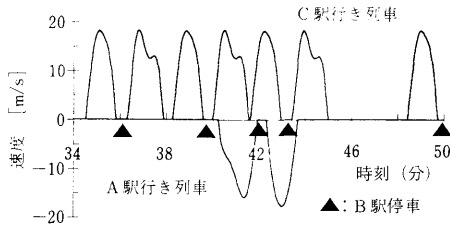


図-6 走行曲線

3.3 シミュレーションの概要

図-4に示したB駅の構造を換気回路網に置き換えると、図-5のようになる。また、表-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-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の番号に対応する。機械換気量は表-1の値を与えた。ただし、風量の収支を合わせるため、AまたはC駅のホームから20.8 m³/s ずつ排気することにした。環境条件としては表-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-6に示す速度を与えた。速度はA駅からC駅に向かう場合を正とした。

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

3.4 シミュレーションの結果

(1) 実測値と計算値の比較

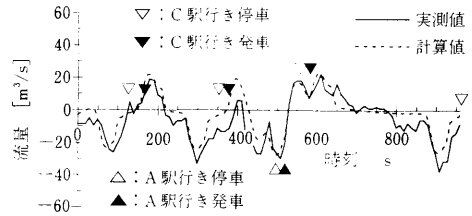
実測を行った図-4の①~⑦の7箇所の流量について実測値と計算値を比較した結果を以下に示す。

図-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込む場合を正にとっている。時刻は16時34分を0sにとっている。

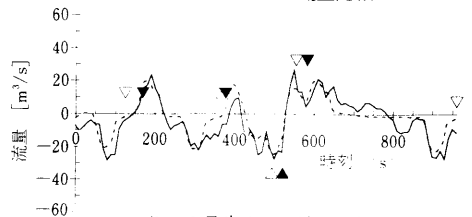
いずれの出入口でも、時刻400s付近のピークで実測値と計算値の差が大きく、また全体的に実測値のほうが風量が若干負側にずれているものの、ほぼ両者は一致している。

図-8(a)~(d)に、各トンネルの流量の変動を示す。ここで、流量はホームからトンネルに吹き出す場合を正にとっている。時刻は16時34分を0sにとっている。

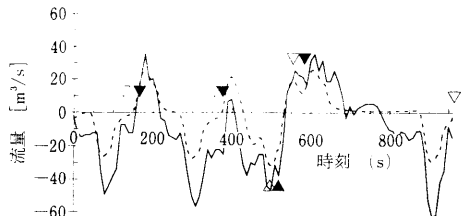
(a), (b)に示すように列車が発車する側のトンネル



(a) 1号出入口の流量比較



(b) 2号出入口の流量比較



(c) 3,4号出入口の流量比較

図-7 各出入口の流量

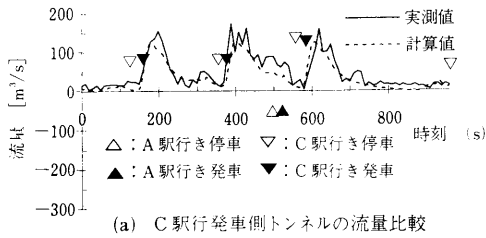
では実測値と計算値の間で良い一致が示されている。(c), (d)に示す列車が到着する側のトンネルでは変動の傾向は一致するものの、実測値に比べ、計算値が小さい。

以上の空気密度差を考慮したシミュレーションとともに、空気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。

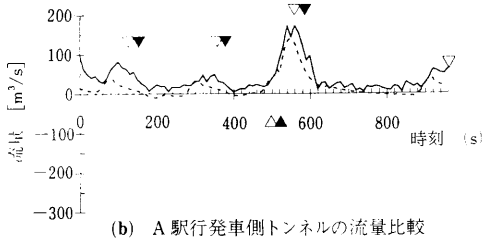
以上、各開口別の風量変動の予測値を実測値と比較した。予測値と実測値の間に差が見られる箇所がいくつかあるが、実測値の複雑な変動を予測値は再現しており、予測精度は妥当なものであると考えられる。

(2) シミュレータによる風量収支の計算

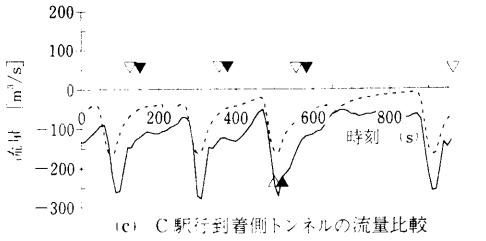
図-9にシミュレータで求めたB駅各部の風量収支を示す。これは、16時34分を0sとした時の200sの風量である。各接点における収支が合っていない所があるが、これは本研究で使用しているシミュレータでは空気の密度変化も考慮し、質量流量の収支を合わせているためである。この時、C駅行き列車がB-C間トンネルを走行しており、全ブランチの中でトンネル内の風量が最



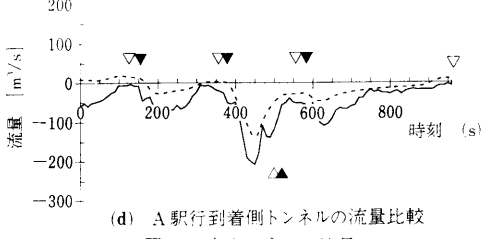
(a) C 駅行発車側トンネルの流量比較



(b) A 駅行発車側トンネルの流量比較



(c) C 駅行到着側トンネルの流量比較



(d) A 駅行到着側トンネルの流量比較

図-8 各トンネルの流量

大となっている。B 駅のホームでは、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。

著者らが既報⁴⁾において行ったシミュレーションでは、階段を通過する流量のうち、ホ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。

(3) 出入口の抵抗が気流に及ぼす影響

気流場が定常に達した時、あるブランチにおける気流駆動力と流量の関係は次式で表される。

$$\delta P = Rq^2 \quad \therefore q = \sqrt{\frac{\delta P}{R}} \quad \dots\dots(21)$$

ここで、R は通気抵抗であり、次式で定義される。

$$R = \frac{\rho}{2A^2} \left(\frac{\lambda L}{D} + \zeta \right) \quad \dots\dots(22)$$

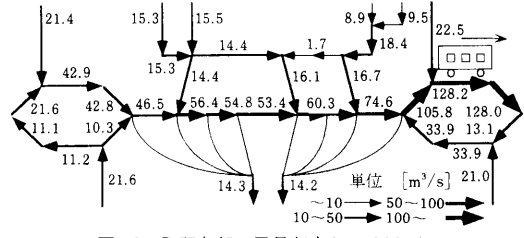


図-9 B 駅各部の風量収支 (t = 200 s)

表-4 通気抵抗の変化

	R (比率)	1/√R (比率)
ζ = 2.0	0.002 85 (0.76)	18.7 (1.15)
現状の B 駅	0.003 75 (1.00)	16.3 (1.00)
ζ = 8.0	0.005 67 (1.50)	13.3 (0.82)

B 駅構内各部の R を求めると、出入口・階段の R に対し、中階・ホームの R は非常に小さく、駅全体の R は出入口・階段の R でほぼ決定される。

出入口の ζ は形状に応じて決まり、B 駅 1~4 号出入口では ζ = 3.04~3.95 である。さまざまな駅を対象とした著者らの調査によれば、出入口の形状は多様であるが、多くは ζ = 2.0~8.0 の範囲に収まる⁸⁾。こうした出入口形状による ζ の変化が駅全体の R および流量に及ぼす影響を調べるために、現状の B 駅に対する R、1~4 号出入口すべての ζ を 2.0 または 8.0 に置き換えた時の R を算出した。また、式(21)より δP が一定ならば、q ∝ 1/√R となるので、1/√R も併せて求めた。結果を表-4 に示す。比率は現状の B 駅を 1.00 として求めた。

ζ によって R には明確な差が見られるが、1/√R の変化は +15~18% である。実際に B 駅出入口の ζ を変えて行ったシミュレーションでも出入口流量の変化は同程度となる⁸⁾。したがって、一般的な出入口の形状が駅内部と地上との間で交換される流量に与える影響は 20% 以内である。

4. 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。この数値実験では、前章で対象とした地下鉄系を用いる。

4.1 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 1 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-3 に示した値を用いる。

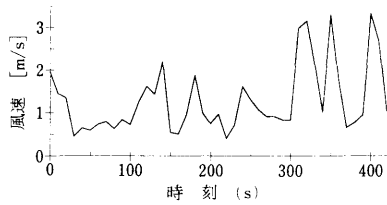


図-10 地上風速の変動

表-5 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-5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、中階・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-5の各因子について説明を加える。

A 機械換気: 水準2は表-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。この時、列車の発熱量として500kW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。この時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-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1日の朝8時の気温である。

D 地上風: 水準2では、図-10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。この時、風は図-4で上から下へと吹くものとする。この時、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。

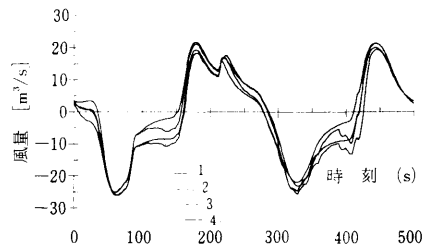
4.2 結果

(1) 気流に対する各駆動力の影響

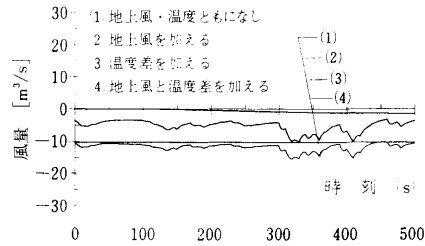
まず、出入口および階段の気流に対する各駆動力の影響の評価を行う。ここでは、出入口1とA階段を対象とした。そして、各因子の組合せごとに、出入口または

表-6 出入口1の風量の分散分析結果 [m³/s]

因子	処理平均		処理平均の差	分散比	有意性
	水準 1	水準 2			
A	11.22	9.30	-1.92	4.04	
B	6.55	13.98	7.43	60.41	***
AB				11.24	**
C	8.21	12.31	4.10	18.37	***
AC				0.20	
BC				9.64	**
D	7.72	12.81	5.09	28.34	***
AD				10.74	**
BD				0.44	
CD				0.03	



(a) 列車走行時の出入口1の風量変動



(b) 列車非走行時の出入口1の風量変動

図-11 出入口1の風量変動

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。

a 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-6に示す。A~Dの因子は表-5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。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ない。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して見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

表-7 A 階段の風量の分散分析結果

(a) 各因子の影響 [m³/s]

因子	処理平均		処理平均の差	分散比	有意性
	水準 1	水準 2			
A	8.44	7.59	-0.85	1.15	
B	3.73	12.31	8.58	117.63	***
AB				0.07	
C	5.69	10.35	4.66	34.63	***
AC				0.04	
BC				12.25	**
D	8.83	7.21	-1.62	4.21	*
AD				0.00	
BD				6.23	**
CD				5.92	*

(b) 列車風と温度差の交互作用 [m³/s]

	B 1	B 2
C 1	0.01	11.37
C 2	7.44	13.26
C 2 - C 1	7.43	1.89

車走行であり、処理平均の差は 7.43 m³/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。

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-11(a)、(b)は、機械換気を行う条件下で、出入口 1 における風量に及ぼす温度差と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。

列車走行時(a)には、地上風および温度差の影響は時刻 100 s や 400 s 付近の低風量時にもみ明確に現れる。

列車非走行時(b)には、地上風および温度差が風量に与える影響が明らかである。

b 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-7(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 m³/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、この組合せについて処理平均を示したものを表-7(b)に示す。列車非走行時(B 1)には、温度差の影響が明確である。

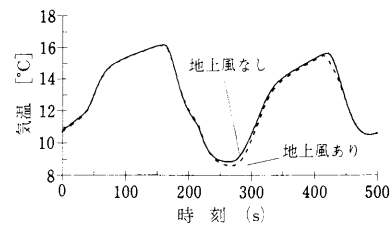
(2) 気温に対する各駆動力の影響

ここでは中階および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、中階およびホームを複数のゾーンに分割して計算しているため、各ゾーン

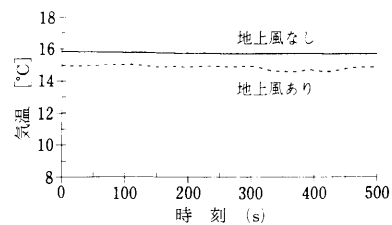
表-8 中階気温の分散分析結果

[°C]

因子	処理平均		処理平均の差	分散比	有意性
	水準 1	水準 2			
A	15.60	15.93	0.33	0.59	
B	16.48	15.05	-1.43	11.24	**
AB				0.44	
C	18.47	13.06	-5.41	159.43	***
AC				0.52	
BC				4.25	*
D	15.71	15.82	0.11	0.07	
AD				1.93	
BD				0.05	
CD				0.11	



(a) 列車走行時の中階気温変動



(b) 列車非走行時の中階気温変動

図-12 中階気温の変動

の気温の空間平均値、すなわち各ゾーンの体積の重み付き平均を中階およびホームの代表気温として用いた。そして、気流の場合と同様に、各因子の組合せごとに、中階または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。

a 中階の気温

中階の気温の平均値に対する分散分析結果を表-8に示す。C：温度差が中階気温に影響するのは当然である。次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。

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合せによって影響が明確になる場合がある。図-12(a)、(b)は、機械換気あり・温度差大(A 2, C 2)の条件下で、中階気温に及ぼす地上風と列車走行の影響を示したものである。

列車走行時(a)は、地上風の有無による中階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、

表-9 ホーム気温の分散分析結果 [°C]

因子	処理平均		処理平均の差	分散比	有意性
	水準 1	水準 2			
A	16.15	16.09	-0.05	0.01	***
B	15.70	16.54	0.83	2.38	
AB				0.17	
C	17.44	14.80	-2.64	23.92	
AC				0.24	
BC				1.19	
D	15.80	16.44	0.64	1.41	
AD				1.23	
BD				1.15	
CD				1.48	

地上風の有無による中階温度の差は明確に現れる。

b ホームの気温

ホームの気温の平均値に対する分散分析結果を表-9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、いずれの主効果も中階気温に対するほどにはホーム気温に影響を与えていない。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。

4.3 数値実験の結果に対する考察

(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、地上風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。

中階・ホーム気温に関しても同様のことが言え、地上気温が中階・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。

式(21)に示したように、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駅の中階・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-6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 m³/sから6.06 m³/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 m³/sから6.17 m³/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、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、数箇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⁹⁾が地下鉄駅中階において地上風による換気が起こっている例を示したほかは、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わかった。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。

5. まとめ

本報では気流・温熱シミュレータの予測精度を実測値によって検証した後、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。

この結果、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込みや浮力の影響が明確に現れることなどが示された。

謝 辞

本研究の実施にあたり、沼津高専森井宜治教授の助言を得た。また、大阪大学中村安弘助教授からは地上風の実測データを提供していただいた。記して謝意を表す。なお、本研究は空気調和・衛生工学会近畿支部環境工学研究会の助成研究である。

参 考 文 献

- 1) 森井宜治・澤洋一郎・榎本隆二：地下鉄の風、ながれ、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・飯倉康男・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, No. 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, No. 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 branchement en té, Bulletin Technique de la Suisse Romande, No. 9~10 (1957)
- 8) 岡田俊彦・水野 稔・下田吉之・福代和宏：地下鉄構内の環境予測に関する研究(3)模型実験による検討, 空気調和・衛生工学会近畿支部学術研究発表会論文集(1995-3), pp. 141~144
- 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

(平成 7. 7. 18 原稿受付)

Prediction of Air Flow and Thermal Environment in Underground Space (1)

—Simulation for Subway Station of Longitudinal Ventilation System—

by Kazuhiro FUKUYO*¹, Yoshiyuki SHIMODA*² and Minoru MIZUNO*³

Key Words: Simulation, Subway, Air Flow, Thermal Environment

Synopsis: To provide adequate ventilation and air conditioning in the semi-opened underground spaces such as subways and underground shopping centers, it is necessary to consider the influence of the various air flows on air and thermal environment. For this purpose, the authors developed an environmental

simulator for the general semi-opened underground spaces. Accuracy of the simulation result was examined by using the measurement results. By using this simulator, the examinations were carried out for 4 types of air flow: air flow caused by ventilators, trains, buoyancy or surface wind.

As the results of examination these are cleared:

- 1) Among air flows, train wind influences air and thermal environment most strongly.
- 2) In the absence of train, buoyancy and surface wind have influence.

*¹ Post Graduate Course, Osaka University, Student Member

*² Cooperative Research Center for Advanced Science and Technology, Osaka University, Member

*³ Department of Environmental Engineering, Osaka University, Member

(Received July 18, 1995)