

地下鉄駅構内の空気流動に関する実験的研究*

(第1報, 駅内部空気流と列車風緩和)

白鳥敏正^{*1}, 松平晏明^{*1}
小西奎二^{*1}, 桜井忠一^{*1}

Airflow Characteristics in Underground Railway Station (1st Report, Airflow Pattern and Reduction of Train Wind Effect)

Toshimasa SHIRATORI, Yasuaki MATSUDAIRA,
Keiji KONISHI and Chuichi SAKURAI

Scale model experiments were made to investigate the steady and unsteady airflow characteristics in an underground railway station. The experimental apparatus consists of a scale model of a two-layer underground railway station and train wind generators that simulate the steady and unsteady airflow caused by trains. The steady and unsteady airflows were measured with hotwire anemometers at several points of the station for several cases. The unsteady airflow patterns were almost identical to the estimated airflow patterns obtained from steady values. The method of reducing the train wind effect in a station by means of tunnel ventilation dynamic control was considered and its effectiveness was confirmed through experimentation.

Key Words: Internal Flow, Railway, Scale Model Experiment, Underground Station, Train wind Reduction

1. ま え が き

地下鉄駅構内の効果的換気・冷房を行う上で、駅構内の気流、それに伴う熱流動の状況を正確に把握する必要があるが、地下鉄駅構内の場合、通常の建物内と大きく異なり、駅構内への列車の出入りによって発生する列車風^{(1)~(3)}とそれに伴う熱エネルギーの出入りが存在し、これが内部の気流、および熱流動に大きな影響を与える。特に現在計画、着工されている地下鉄都営12号線の場合には閉そく率(=列車前面面積/トンネル断面積)が在来線より大きく、さらに列車内冷房の実施による熱放出のため、これらの影響は特に大きなものとなると考えられる⁽⁴⁾。ところが、これらを実際に12号線に即した環境で実測し、評価することは現時点では不可能である。

そこで本研究では列車風とそれによる熱エネルギーの出入りを模擬し得る地下鉄駅・トンネル端模型を製作し⁽⁵⁾、これを用いて駅構内の気流およびそれに伴う熱流動の状況を、基本的場合について実験的に調べ、地下鉄駅構内の熱流動解析のための基礎データと駅構

内の効果的換気・冷房方法の選定指針を提供することとした。本報では、そのうちの実験装置と駅内部の風速測定結果および列車風緩和の一方法などについて述べる。

2. 想定駅と予備的検討

地下鉄駅では、個々の駅、路線により、形態、列車走行状態が異なっているので、一般性のある結果を得るのが困難であり、かつ、これらの多くの条件について、模型実験を行うことも實際上困難であった。そこで、標準的とされる駅形態、代表的列車走行状態について、定性的側面を中心に調べることにした。

(1) 想定駅について 地下鉄12号線のトンネル、駅などの平均的寸法は以下のとおりである。

単線シールド円形トンネル：トンネル径=4.3 m

標準的な駅形態：二層島式駅、階段口2、3箇所

駅全長=150 m, 全幅=14.1 m, 全高=4.5 m

駅間平均トンネル長さ=約1150 m

(2) 列車風について 本実験では、以下で述べるように、列車風は実験条件として与えられるものである。そこで現在想定されている列車風⁽¹⁾および都営地下鉄10号線菊川駅での列車風実測値⁽⁶⁾などを参考に、実験条件としての列車風状態を決めることとし

* 平成2年8月29日 流体工学部門講演会において講演、原稿受付 平成3年7月30日。

^{*1} 正員、東京都立科学技術大学工学部 (〒191 日野市旭ヶ丘6-6)。

た。図1に実測データの一例を示す。また列車走行状態パターンから、当駅を中心とした場合の現象は以下のような時間的区分に分けられる。

- A. 列車が前駅から当駅端に進入してくるまでの間(約120 s)
- B. 当駅端に列車の先頭が到達してから停車するまでの間(約15 s)
- C. 乗客の乗降のための停車期間(約30 s)
- D. 列車が発車し、列車後尾が当駅端から出てゆくまでの間(約15 s)

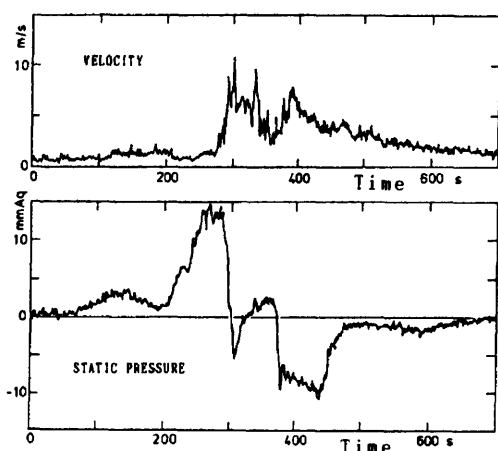


図1 列車走行時の駅端での風速、風圧実測値一例

E. 列車後尾が当駅端を出てから、次駅に到達するまでの間(約120 s)

AとEについては、列車走行は駅に対する空気流の出入りとして現れるので、プロアあるいは本実験で採用している列車風発生装置などにより列車風を模擬し、その影響を調べるのが妥当であるが、B～Dについては列車の後引き風、列車容積による駅構内空けきの変化、停車中の列車冷房装置からの排気流など検討を要する点がある。しかしながら、列車走行パターンから考えると、時間が長く風速も大きいAとEの期間の影響が、基本的に現象全体を支配していると考えてよい。そこで本実験では、B～Dの期間については模擬しないこととした。

3. 実験装置

(1) 駅模型 想定駅・トンネル形態などを参考にして、模型寸法は実構造物の1/43とし、形状は想定駅の縮小形に準じたものとし、プラットフォーム階(階段口2箇所)、コンコース階(出入口3箇所)で構成される。駅端には上下線トンネルとの接続部に駅端部空間がありこの天井部にトンネル換気口が設けられている。また内部の流れの様子が可視化できるように、透明アクリル製とする。駅模型の形状と主な寸法を図2に示す。また駅模型にはトンネル換気用駅端部給排

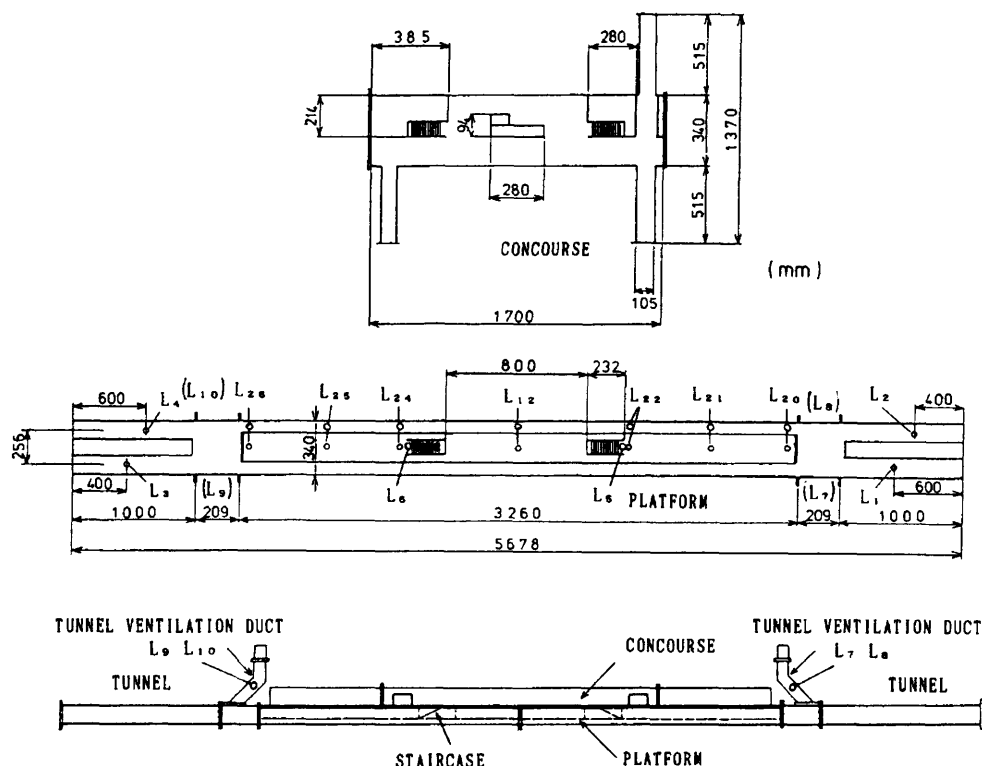


図2 地下鉄駅模型(二層島式)

気システム, ホームコンコース換気・冷房用給排気システムが設備できるようになっている。なお, 模型実験の相似性については, 慣性力の相似性より, 模型寸法を $1/43$, 代表風速を模型と原型で等しいとすると, 模型の代表時間は原型の $1/43$ とすればよい, レイノルズ数はこの場合実構造物にたいして $1/43$ となる。

(2) 列車風発生装置 本実験では, 駅内部の空気・熱流動の測定に主眼を置いていることから, 列車風発生メカニズムと分離して実験を行えるようにするために, トンネル端での列車風は, 既知量, すなわち実験条件(境界条件)として与えることにした。そこで列車風を発生させるための装置(列車風発生装置)を新たに考案し, 使用した。装置は駅への流入列車風を模擬する装置(押し出し側: 温風ヒータ, トンネル定常換気流用小形送風機付き)と駅からの流出列車風を模擬する装置(吸込み側: トンネル定常換気流用小形送風機付き)のおおの1台ずつである。図3に示されるように, 装置は基本的には, 内径800 mm, ストローク長800 mmのシリンダとピストンで構成されており, ピストンはステッピングモータで駆動される。小形コンピュータでステッピングモータを制御し, 列車走行状態に準じた動作を行わせることにより, 所定の模擬列車風を発生させる。また両装置とも, トンネル定常換気流を作り出すための小形送風機が取り付けられており, 定常流のみ, 変動流のみ, 定常流+変動流のいずれの形態での列車風をも模擬できるようにしている。

(3) 計測および実験方法 計測項目は風速, 静圧, 温度の3物理量であり, 基本的な測定箇所としては, 図2に示されるように, 上下各2本のトンネル端(L_1, L_2, L_3, L_4)と階段口2箇所(L_5, L_6)であり, ここに熱線風速計プローブ, 圧力孔, 熱電対が取り付けられている。その他, 測定目的により, 随時, 他の箇所にセ

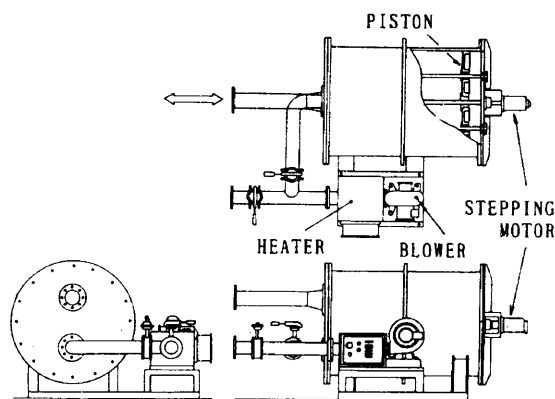


図3 列車風発生装置(押し出し側)

ンサを移動して測定を行った。

はじめに予備実験を行い, 所定の列車風を模擬できるように2台の列車風発生装置の同期駆動制御パターンの決定を行った。ここで, 実際の列車走行時間, 模型実験の相似性などを考慮して, 一列車走行を模擬する実験時間を, 風速・静圧測定では10 s間, 温度測定では20 s間とした。

実験は同時列車着発の場合(上り, 下りの列車が同時に駅に進入し, 同時に出発していく場合), 単独列車着発の場合(上りあるいは下りの列車のみが駅に進入し, 出発していく場合)について, トンネル換気の有無などの条件を変えて行った。

4. 実験結果

(1) トンネル, 階段口での定常風速 図4にトンネルより定常風を流入, 流出させた場合の階段口での風速を示す。トンネル L_1, L_4 から定常風が流入してくる場合[図4(a): 同時列車進入時に相当], トンネル L_2, L_3 から定常風が流出していく場合[図4(c): 同時列車出発時に相当], 2箇所(階段口)での風速 U_5, U_6 には当然ながらほとんど差がみられない。なお駅構内における列車風の影響を取り除くという立場からみた場合, 同時列車着発は, 風速, 風量のもっとも多い, 最悪の場合と考えられる。またトンネル L_1 のみから定常流を流入させた場合[図4(b): 単独列車進入時に相当], 流入トンネルに近い U_5 のほうが U_6 より大きくなるのではと予想されたが, 結果では逆に小さくなっている。これは後で示すように階段口での風速分布の違いによるものと考えられる。 L_3 から流出していく場合[図4(d): 単独列車出発時に相当], 両階段口の風速 U_5, U_6 はほとんど同一である。

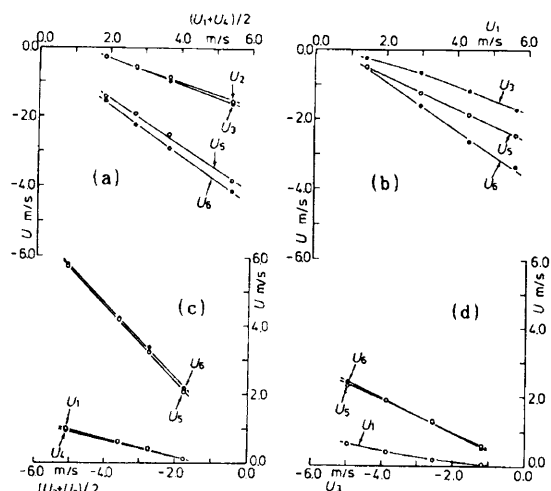


図4 トンネル定常風速と階段口定常風速の関係

(2) 駅内部の定常風流動パターン 図5に駅内部各点での熱線風速計での風速測定結果にスモークワイヤ法での流れの可視化観察結果を加味し、駅内部の定常風速分布としてまとめたものを示す。同時列車進入時に相当する場合：図5(A)，トンネルからの流入風は主として駅内部の流入側半分を通して階段口へと流れていく。一部は階段口横線路を通して、後方から回り込んで階段口へと流れていく。このとき、駅中心を越えていくことはほとんどない。同時列車出発時に相当する場合：図5(B)，階段口からホーム上へ流入した空気流はホーム上で広がりつつ、上下トンネルからほぼ均等に流出していく。これは駅端空間が存在するため、これがない場合は下りトンネルのみからの流出となる。単独列車進入時に相当する場合：図5(C)，流入側に近いほうの階段口までの流れの様子は同時列車着発の場合とほぼ同様であるが、階段口横を通り抜けた一部の空気流は遠いほうの階段口付近で回り込んで、ここから出ていき、進行側トンネルへ吹き抜けてゆく空気流はわずかである。単独列車出発時に相当する場合：図5(D)，近いほうの階段口から流出側トンネルまでの流れの様子は、同時列車着発の場合とほぼ同様である。遠いほうの階段口から流れ込んだ空気流は階段付近で向きを変え左右の線路空間をほぼ均等に分かれ流れていく。

(3) 模擬列車風流入流出時の風速、静圧 トンネル端(L_1 , L_3)、階段口(L_2)での風速、風圧の時間的变化について、図6に同時列車着発の場合(定常流なし)を例示する。各図は横軸に時間、縦軸に風速と静圧を取っている。太線で示された風速 U (駅への流入を

正、流出を負としている)は、トンネル端での列車風の最大値 U_0 を代表風速として、また細線で示された静圧 P は、最大動圧 $P_0 = \rho U_0^2 / 2$ により無次元化されている。これより、トンネル換気を停止している場合、トンネルからの流入、流出列車風の主な出入口となる階段口での風速は、進入時にはトンネル最大風速の55%，出発時には同75%程度となっている。また L_1 での最大風速時に、 L_3 に若干の流出風速増加が、 L_3 での負の最大風速時に、 L_1 に若干の流入風速増加が観察される。これは、列車風発生装置の駆動パターンによるものではなく、反対線路側トンネルからの列車風の一部回り込みによるものである。なお、図6には示していないが、駅端換気ダクトを閉鎖していないので、列車風の一部は駅端換気ダクトから流出、流入している。静圧に関しては、図示されている階段口での変化と同様に駅各部でも、列車進入時には上昇し、列車出発時には低下するが、その値は各部での流入風速(流入動圧)および流動損失に応じて、若干、異なったものとなる。

さて、定常流での結果を用いて同時列車着発時の駅内部(線路上、階段口など)での風速の時間的变化を推定してみた。図7に推定値(破線：トンネル流入、流出定常風速と各点での定常風速との関係から準定常的に変化するものとして求めた値)と非定常風実験値(実線：列車風発生装置により列車風を模擬した場合の各点風速の時間的变化測定値)との比較を示す。階段口での風速変化は準定常、非定常ほぼ同一であり、線路上では、一部違いがみられるが、全体としては、準定常値は非定常値に近いことから時間的に変化する列車

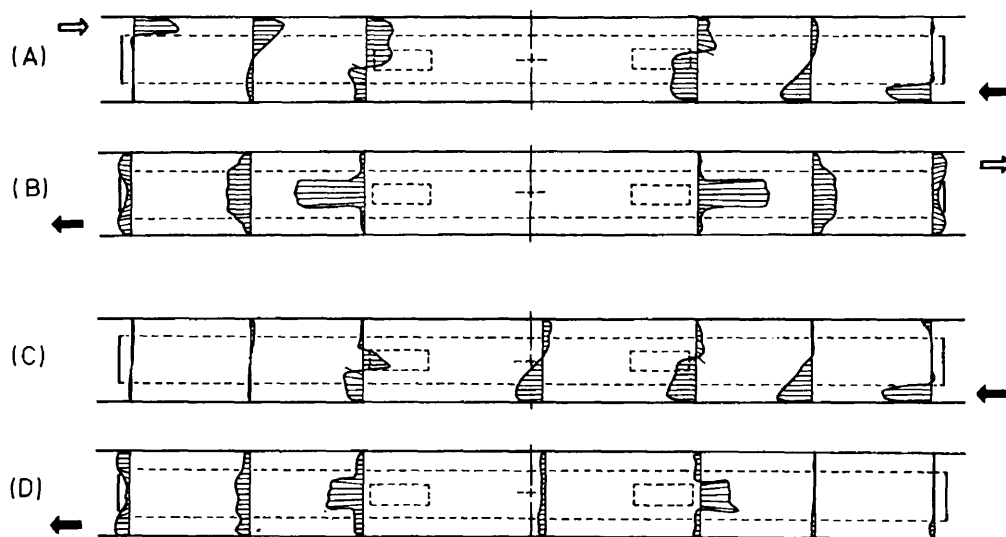


図5 駅内部(プラットフォーム階)の定常風流動パターン
A：同時列車進入時 B：同時列車出発時 C：単
独列車進入時 D：単独列車出発時

風の非定常性は大きくない。したがって本実験においては、駅内部の空気流動パターンを近似的には定常風パターンから推定してもよいと考えられる。

5. トンネル換気の動的制御による列車風緩和

流入列車風のホーム内への侵入および流出列車風としてのホーム内からの流出は、駅構内冷房に大きな影響を与えるので、冷房負荷軽減の観点から駅構内の列車風の緩和が望まれる。そこで現状の駅構建築物の大幅な変更を必要としない方法として、駅端換気の動的制

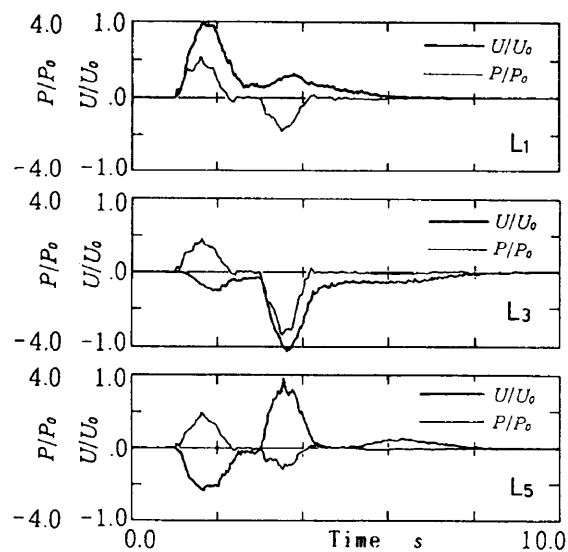


図6 トンネル端での模擬列車風波形と階段口風速、風圧変化 (同時列車着発時の場合)

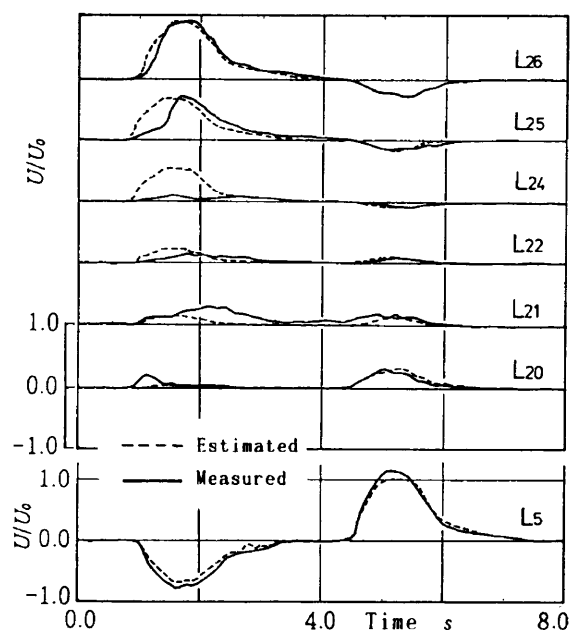


図7 駅内部の風速変化 (非定常実験値と準定常変化推定値との比較)

御を行い、駅構内に対する流入、流出風量を減少させる方法を試みた。

(1) 駅端換気風量の増加による方法 (i) 到着時に排気側風量 (L_7, L_{10}) を一時的に増加させ、ホーム

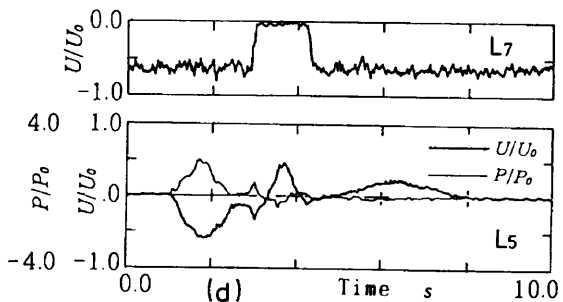
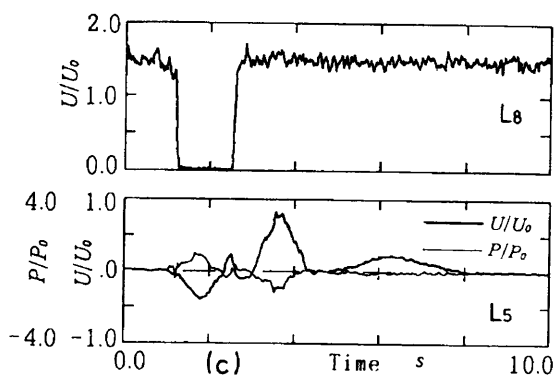
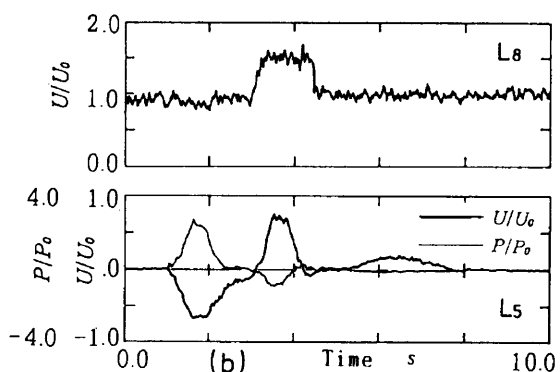
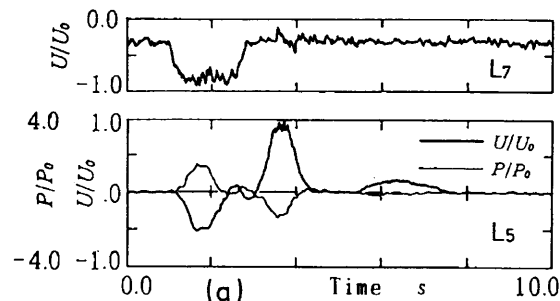


図8 駅端換気風量の動的制御時の階段口風速進入時 (a) : 排気を増加, (c) : 給気を減少
出発時 (b) : 給気を増加, (d) : 排気を減少

表 1 駅端換気制御時の階段口風量の減少量
(風量 % は列車風風量に対する割合を示す)

| | 換気制御量 Q_i | | 階段口 L_s 風量変化 Q_s | $\frac{Q_s}{Q_i}$ |
|-----|-------------|--------------|----------------------------|-------------------|
| | 給気側 L_i | 排気側 L_s | | |
| 進入時 | 18 % 29 | | -13 % -21 | 70 % 74 |
| | | -20 % -23 | -14 -18 | 67 78 |
| 出発時 | -20 -17 | | -13 -13 | 65 76 |
| | | 11 12 | -13 -11 | 117 90 |

内部への流入風量を減少させる、(ii)出発時に給気側風量 (L_s , L_i) を一時的に増加させ、ホーム内部からの流出風量を減少させようとするものである。

(2) 駅端換気風量の減少による方法 (iii)到着時に給気側風量を一時的に減少 (実験ではダンパで閉鎖し風量零とした) させ、隣側トンネルへの列車風の回り込みを促し、ホーム内部への流入風量を減少させる、(iv)出発時には排気側風量を減少させ、同じく隣側トンネルへの列車風の回り込みを促し、ホーム内部からの流出風量を減少させようとするものである。

図 8 に同時着発の場合について、これらを行った場合の換気風速と階段口での風速測定結果を示す。いずれの場合も、階段口での風速波形は、図 6 に示される換気制御を行わない場合と比べて小さくなっており、進入時には図 8 (a) あるいは図 8 (c)、出発時には図 8 (b) あるいは図 8 (d) の方法によって階段口での風速を低減できることがわかる。最後にトンネル換気制御時の風量算出結果を表 1 に示す。これより、換気風量増加法、換気風量減少法のいずれでも、適切なタイミングで、換気風量を制御すれば、階段口において制御風量の数十 % にあたる流入・流出風量を減少させることができ、両方法を組合せれば、効果的な列車風風

量の低減化が可能となると言える。

6. む す び

地下鉄駅構内の効果的換気・冷房を検討する上で不可欠な駅構内における空気流動について、模型実験で調べることとし、想定駅をモデルとしたトンネル端・駅模型と列車風を模擬する装置を開発した。これを用いて、まず定常風流動について調べた。その結果、同時列車着発と単独列車着発の場合について、駅内部の定常風流動パターンを明らかにすることができた。次に各列車条件におけるホーム内の風速、静圧について調べた。これらの結果をふまえて、冷房負荷の軽減に直接関連する積極的な列車風緩和方法を提案した。これについても実験を行い、トンネル換気制御を行うことにより有効な列車風緩和ができることを示した。

なお本研究の一部は東京都交通局高速電車建設本部からの委託研究⁽⁷⁾であり、関連資料の提供を受けた。また本学特定学術研究費の提供および実験に際しては本学学生であった木之下信也君、渡部裕希君の協力を得た。これら関係の諸氏に謝意を表す。

文 献

- (1) 日本鉄道技術協会, 地下鉄 12 号線の列車風に関する調査報告書, 1(1985), 2(1986).
- (2) Sockel, H., Draught Reduction in Subway Systems, *Proc. 5th Int. Symp. Aerodyn Ventil. Vehicle Tunnels*, (1985), 139-154.
- (3) 柳下・若宮・山中, 列車走行時の地下鉄駅トンネル内の風量, 温度の非定常解析, 機論, 55-509, B(1989).
- (4) 白鳥, 地下鉄駅・トンネル系温熱環境シミュレーションによる駅冷房負荷軽減の検討, 第 24 回空気調和・冷凍連合講演会講演論文集, (1990).
- (5) 白鳥・松平・小西, 地下鉄駅構内における空気流動の模型実験, 機論 No. 901-2(1990-6).
- (6) 松平・田代・白鳥・寺井・小西・稲田, 都営 12 号線の換気空調方式に関する調査研究(基本計画と実測調査について), 東京都立科学技術大学研究報告, 第 2 号(1988), 39-48.
- (7) 松平・白鳥・小西・田代, 地下鉄 12 号線の空調方式に関する調査(その 2)報告書, 東京都立科学技術大学, (1989).