列車走行による地下鉄駅構内の空気流動*

(駅模型の検討と列車走行風の緩和)

杉原義文^{*1}, 松平晏明^{*2}, 阿部康之^{*3}

Airflow in a Subway Station due to Train Transit (Examination of Station Model and Train Window Reduction)

Yoshibumi SUGIHARA^{*4}, Yasuaki MATSUDAIRA and Yasuyuki ABE

^{*4} Hitachi Plant Engineering & Construction Co., Ltd.,
1-13-2 Kita-Otsuka, Toshima-ku, Tokyo, 170-8466 Japan

The flow field and the train wind reduction effect in the subway station are experimentally examined for three kinds of station model with staircases and tunnels. As the results, prototype model consisting of station and shortened tunnels with orifices can clarify the overall flow characteristics. However, this model is not able to reproduce the time history of the wind velocity at the tunnels and the staircase parts in the real subway. One-station model having the same reduced scale ratio for the tunnels and the station is generally useful to evaluate the wind velocity and the air quantity. Two-stations model connecting two one-station models is most effective to evaluate the transient flow characteristics with high accuracy. In the next place, three train wind reduction methods are tested. The one blower control method which is the tunnel ventilation in accordance with the train wind can reduce the wind velocity at a staircase about 0.5 m/s. Furthermore, two blowers control method can reduce it about 1 m/s. In the case of natural draft method, the wind reduction value is 0.7-1.1 m/s and this reduction effect becomes 1.8 times for the usual staircase with small cross section.

Key Words: Blower, Velocity Distribution, Internal Flow, Flow Control, Subway Station, Train Wind, Model Experiment

1. 緒 言

地下鉄トンネル内を列車が走行するとそのピストン作用によりトンネル内に空気流動が引き起こされ、列車前方では駅構内への流入風、列車後方では駅構内からの流出風になる。これは駅部において乗降客に不快感を与え、またトンネルと駅とで熱流動を引き起こすことから駅構内の冷房効果を損なう。これまで、気流に関しては、数値解析^{(1)~(3)}と模型実験⁽⁴⁾により階段部等に発生する風速について議論され、熱環境に関しては、気流と列車排熱および土中放熱等とを結び付けた研究^{(5)~(7)}が行われてきた。また、著者らは都営大江戸線の光が丘駅における実測により、トンネルと階段に発生する気流の変化を明らかにしたうえで、駅構内に発生する列車走行風の緩和を目的として、トンネル換気用送風機の風量を列車走行に合わせて制御する手法を試み、その効果を実証⁽⁸⁾した。さらに、トンネルと駅部の空間のみとした簡易な駅タイプを用いて二次

元の数値計算を行い、数値計算の予測精度を確認したうえで、駅内部の流れの様相⁽⁹⁾を明らかにした。

さて、模型実験で地下鉄構内の流れの解析を行うことは有効な手段であるが、駅部に流入、流出する列車走行風は、駅部の階段、トンネルさらにはその先の駅からなる系の影響を受けたものであり、一路線のうちの区間をモデル化するかが最初の課題となる。次に、模型実験で幅15m、長さ140m程度の駅部の内部流れを調べるためには、測定機器の空間的な分解精度より模型の縮尺は1/50程度以上が望まれる。しかしながら、駅部の両側に接続する長さ1000mのトンネル、その先の隣駅を含めると実験室のスペースの制約を受ける場合がある。

そこで本研究では、(1)トンネル-駅-トンネルの構成であるがトンネルをオリフィスで模擬したプロトタイプ、(2)トンネル-駅-トンネルを同一に縮尺した1駅タイプ、(3)トンネル-駅-トンネル-駅-トンネルを同一に縮尺した2駅タイプの三とおりの流動特性を求めて、実験の目的にかなった模型の形状を明らかにする。次に、この中から列車走行風低減の検討に適した駅模型を選択して、いくつかの低減手法を試みその効果を検討する。

* 原稿受付 2000年6月16日。

^{*1} 正員、日立プラント建設(株)(☎170-8466 豊島区1-13-2)。

^{*2} 正員、東京都立科学技術大学(☎191-0065 日野市旭ヶ丘6-6)。

^{*3} 住友重機工業(株)(☎141-8686 品川区北品川5-9-11)。

E-mail: y-sugihara@hitachiplant.co.jp

2. 実験装置と方法

小形地下鉄を採用した標準的な駅と位置付けられている都営大江戸線光が丘駅をもとにして、プラットホームを有する幅 14.6 m、長さ 140 m の駅部、この駅部から地上に通じる階段と長さ 130 m の通路が 2 組、駅部の両側に接続する 1 000 m のトンネルを基本として、これが順次続くものとする。駅模型はこの基本の形状を 1/43 に縮尺しているが、駅部はプラットホームを省略した構造となっており、トンネル長さは各駅模型に応じて延長した。

図 1 に本研究で用いた駅模型と列車走行風を模擬する送風装置を示す。階段部の内径は 75 mm、これに続く通路 P_1 , P_2 は拡大して内径 100 mm としている。また、トンネルは内径 100 mm である。なお、図 1 中の○点は風速の測定点、●印で示した点 A～D は圧力測定点を示す。風速は熱線風速計(タングステン線を用いた I 形、線径 5 μ m)を用いて、円筒内水平方向 4 点の測定より断面平均風速として求め、圧力の測定は定格 ± 500 Pa のダイヤフラム式を用いた。

到着列車はトンネル T_1 を右方向に走行するものとし、このときの隣接トンネル T_2 を T_P と呼ぶことにする。出発列車はトンネル T_2 を左方向に走行するものとし、このときの隣接トンネル T_1 を同じく T_P と呼ぶことにする。走行列車がトンネルに発生させる列車走行風の時間履歴は、図 2 の太線で示す光が丘駅において行った実地測定を基にして、細線で示すようにピストン送風機を駆動して模擬した。ここで、模型寸法を 1/43、列車走行風を実地測定とほぼ一致させているため、模型の時間スケールは 1/43 として相似性を得ている。したがって、模型のレイノルズ数も実際の 1/43 となる。なお、図 2 の点 a より点 b の間は列車がトンネル内を走行した区間に相当する。

Fig. 1 Experimental apparatus

検討した三通りの模型形状の上面より見た概念図を図 3 (a)～(c) に示す。プロトタイプは静的なトンネルの壁面摩擦損失をオリフィスで置き換えてトンネルを短縮しており省スペースの装置であり、1 駅タイプはこれにトンネル内の空気流動により生ずる慣性力が加わり、2 駅タイプはさらに隣駅の影響が加わるという特徴をそれぞれもつ。

ところで図 3 (c) は、ピストン送風機を中心とした左右対称の模型となるので、駅 A への到着は駅 B において出発時にあたる。すなわち、到着時に流入風をトンネル T_1 に与えたときの隣接トンネル $T_P(T_2)$ と、出発時に流出風をトンネル T_2 に与えたときの隣接トンネル $T_P(T_1)$ の風速の時間履歴は一致しなければならない。このことより、図 3 (c) の 2 駅で求めた隣接トンネル T_P の風速を図 3 (a), (b) で求めた到着時の T_P および出発時の T_P の風速と比較することで、プロトタイプおよび 1 駅タイプによる駅構内の流動特性の評価法の正当性が議論できる。

3. 実験結果

3.1 駅模型と流動特性 既報の数値解析による実地測定の分析⁽⁹⁾で、到着時にトンネルからホームへ

Fig. 2 Train wind in the tunnel

Fig. 3 Station model

流入が始まると隔壁後方のホーム端で小さな回転流が形成され、時間の経過とともに下流側に伸長して実際の駅で図1の点Bに相当する点を中心とした回転流に成長するという特徴的な振る舞いを示している。そこで、この点における実地測定と模型の風速の時間履歴を比較して、相似性を調べてみる。

図4の上段に図1の点Bに相当する実地測定した風速と、下段に点Bで測定したプロトタイプと2駅タイプにおける風速を時間履歴で示す。実地測定の風速が列車走行風の加速時に一時的に強くなるのは、成長過程の回転流の先端が測定点を横切ったときである。その後も列車走行風は加速を続けるが、測定点は回転流のほぼ中心となり、それを維持するため風速は急激に低下したままとなる。図4下段のプロトタイプと2駅タイプでも時間軸を1/43としたことで、主流の横切る時刻および風速の時間履歴は同じといえる。これより、特徴的な回転流の成長過程を比較検討することで、プラットホーム内の風速の相似性が確認できた。

Fig. 4 Time history of air velocity (Comparison with actual station and scale model)

Fig. 5 Time history of air velocity (Comparison with station models)

なお、圧力に関しても同様の相似性を得ている。

以上のことから、プラットホーム内の実地測定と模型間の時間に関する相似性は保証されているといえる。また、レイノルズ数の差異による流動特性もプラットホーム内を主として支配する流れについては保証されていると考えている。ただし、境界層の影響を受ける壁面や、低速域についてはこの限りではない。これらの結果から、プラットホーム内の支配的な流れが依存する階段等の流動特性の評価が可能であると考えられる。

(1) プロトタイプ 図3(a)に示すプロトタイプは最も簡略化した構成であり、トンネルは静的なトンネル壁の摩擦損失をオリフィスの損失係数に置き換えることで模擬している。実際のトンネルの壁面抵抗係数⁽¹⁰⁾ ϵ は約 $\epsilon=0.025$ であることより、トンネル長さ L が 1000 m、直径 D が 4.3 m の損失係数 ζ は $\zeta=6.0$ とした。このオリフィスをトンネル T_3 と T_4 の端部につける。到着時の流入風を T_1 与えるときの $T_P(T_2)$ の長さ L_2 と、出発時に流出風を T_2 与えるときの $T_P(T_1)$ の長さは $L=L_1+L_2$ の関係を利用して、双方の風速の最大値が一致するよう事前の測定でオリフィスの損失を定めた。その結果、到着時の隣接トンネル T_P につけた損失係数は $\zeta=2.0$ 、同様に出発時には $\zeta=4.0$ とした。

図5上段に到着時および出発時における隣接トンネル T_P と通路 P_1, P_2 の風速の時間履歴を示す。列車走行風の加速時において、流動は通路より先に隣接トンネル T_P より開始する。また、到着時と出発時の T_P の風速を比較すると、最大値は約 2.3 m/s で一致させているが、その時間履歴には明確な差異がある。本来各駅の形状が同一で、駅間のトンネルを中心として対称であれば到着時と出発時の T_P の風速は一致してい

なければならない。このことは、オリフィスにてトンネルの静的な損失係数を合せても、トンネル内の空気の慣性力を模擬し得ないことに起因している。

(2) 1 駅タイプ 図 3 (b) に示す 1 駅タイプの構成は、トンネル内の壁面摩擦損失とトンネル内空気の慣性力の双方を満足させるため、模型のトンネル T_3 , T_4 の長さは 1000 m の実トンネルを縮尺した 23 m とし、隣接トンネル T_P の長さは、到着時と出発時の最大風速を合せ、到着時 $L_2=7.6$ m, 出発時 $L_1=15.4$ m とした。

図 5 中段にその風速の時間履歴を示す。これを図 5 上段と比較すると、列車走行風の加速時ではトンネル内空気流動により生ずる慣性力が働き T_P の風速の増加は通路より遅れ、減速時では通路より緩やかな減衰を示す。しかしながら、 T_P の風速の時間履歴は到着時と出発時で依然として差異がある。この原因として、到着時と出発時で隣接トンネル T_P の長さを $L=L_1+L_2$ の関係となるよう固定して与えていたが、加速→最大風速→減速の経路とともに L_1 と L_2 の割合が過渡的に変化するためと考えられる。

(3) 2 駅タイプ 走行トンネルの両側に駅を有する 2 駅タイプの風速の時間履歴を図 5 下段に示す。

到着時と出発時いずれも、列車走行風の加速時に、まず地上との距離が短い通路より流動が始まり、次に慣性力が大きい隣接トンネル T_P の流動が始まる。通

路部の風速は到着時と出発時で差異はなく、列車走行風の加速時に増加し、減速が始まる前に減少する。その後 T_P の風速は時間とともに緩やかに減衰する。また、到着時と出発時で T_P の風速の時間履歴は、最大風速時に若干の違いが見られるのみでほぼ一致しているといえる。この違いは両駅がわずかに対称性が得られなかったために生じたものと考えている。

図 6 にトンネル T_3 , T_4 の風速の時間履歴を示すが、これは列車走行トンネルのもつ流入あるいは流出風量よりトンネル T_P と通路の風量を除いたものと見ることができる。最大風速は 1.2 m/s と小さいが、慣性効果によって緩やかな減衰が長く続いている。

図 1 の点 A～D における静圧の時間履歴を図 7 に示す。列車到着時の点 A, B における静圧は、トンネルからの流入風の加速時に約 50 Pa に達するが、最大風速時以降はほぼ零となる。これに対し、トンネル口より離れた点 C, D となるにつれ、通路部から流出があるにもかかわらず加速時以降も零の静圧に戻らない。これは、前述の回転流を外れた点 C 以降では、ほぼ一様流となり静圧を回復するからである。なお、出発時では流出の開始以降、トンネル T_2 に向かうほぼ一様流を形成するため、プラットフォーム上の各点に特徴的な差異は見られない。

(4) 駅模型の比較 2 駅タイプは、駅部とトンネルを 1 単位としてこれを 2 個組合せたものであり、そ

Fig. 6 Time history of air velocity (T3 and T4)

Fig. 7 Time history of static pressure

れ以上の遠方の影響を省略している。しかしながら、遠方の影響は1駅タイプと2駅タイプの差異よりさらに小さいと見積もられ、2駅模型は実際の駅部、通路およびトンネルの流動特性を模擬していると考えてよいであろう。そこで、簡易形状であるプロトタイプと1駅タイプがどのような場合に採用できるのか、駅部の冷房効果に影響を与える風量と風害が問題となる通路部の最大風速より評価してみる。

風量は、ピストン送風機で発生させた10sの風量 Q_p に対するトンネル T_P, T_3, T_4 および通路の風量 Q の比 F_r を $F_r=Q/Q_p$ として表1に比較した。すなわち、 F_r は各トンネルと通路に流れる列車走行風の流動割合を意味している。2駅タイプにおける到着時の風量比 F_r は、その誤差範囲が大きいため断定的にはいえないが、2箇所の通路部で35%、トンネル T_P で26%、トンネル T_3, T_4 で37%の割合である。また、 T_P における F_r は到着時と出発時のプロトタイプと1駅タイプで差異が生ずるのに対して、2駅タイプではほぼよい一致を見ている。プロトタイプと1駅タイプを比較すると、 F_r には明確な差異は生じないといえる。次に、通路部の最大風速の比較を表2に示す。2駅タイプとプロトタイプと比較すると、到着時、出発時ともに差が大きいが、1駅タイプと比較するとこの差は小さくなる。

さて、プロトタイプおよび1駅タイプが2駅タイプに比べていちばん顕著な差が出たのは、図5で述べた T_P における加速時の風速の時間履歴であった。トンネル換気の制御あるいは自然通気口の採用で列車走行風を逃がす場合、風害が問題となるのは加速時であり、

この意味で流動特性を精度よく再現できる駅模型として2駅タイプが推奨できる。

以上をまとめると、駅部に流入あるいは流出する風量の概略値を求める場合には、プロトタイプの模型が利用できる。これに加えて風速の評価を行う場合には1駅タイプの模型が必要となる。さらに、風量と風速の双方の実験精度を向上させる場合、および以下で述べる列車走行風の緩和法において、加速時の特性が問題となる場合には2駅タイプの模型を採用する必要があるといえる。

3・2 駅部の列車走行風の緩和 トンネル換気用送風機の風量を列車走行に合せて制御する手法の実証試験⁽⁸⁾を行ってきたが、その効果を模型実験で確認する。また、従来より採用されているトンネルと地上を結ぶ自然通気口の緩和効果を明らかにして、この通気口に送風機を備えた新しい緩和法を検討する。

換気風量の制御は、図8(a)に示すように到着時排気風量を列車走行風に合せて一時的に増加させる、あるいは出発時給気風量を増加させる増加法で試みた。模型実験では、送風機につけたバルブの切換えによってトンネル断面風速で2m/sとする風量を1.8s排気するか、または給気させる。これを換気制御1Fと呼ぶ。

自然通気口は、地下30mの駅を想定して図8(b)に示すように直径65mm、長さ700mmの円筒を駅端の2箇所に取付けた。

また、図8(c)は自然通気口に送風機を取付けたもので換気制御2Fと呼び、換気制御1Fと同じ動作を行う。

図9上段に緩和を行わない2駅タイプの通路部 P_1, P_2 の風速の時間履歴を示す。到着時および出発時と

Table 1 Air volume ratio F_r [%]

		Ar:Arrival			De:Departure		Error
Type		T _P	T ₃	T ₄	P ₁	P ₂	
(a) Prototype	Ar	21	18	17	19	18	-7
	De	24	17	16	19	16	-8
(b) One-station	Ar	23	18	17	19	18	-5
	De	26	19	19	21	20	5
(c) Two-stations	Ar	26	19	18	18	17	-2
	De	27	16	16	17	17	-7

Table 2 Maximum air velocity $u_{\max}$ [m/s]

Type	Arrival		Departure	
	P ₁	P ₂	P ₁	P ₂
(a) Prototype	2.4	2.0	2.1	1.7
(b) One-station	2.8	2.7	3.3	3.3
(c) Two-stations	2.9	2.8	2.9	2.7

Fig. 8 Train wind reduction

もに最大風速は2.9 m/sであるが、このとき直径75 mmの段階では5.2 m/sの風速に換算される。

以下の図9(a)～(c)は各緩和法を用いたときの風速 u を細線で、低減値 Δu を太線で示す。

換気制御1Fにより換気風量を点aより点bにかけて制御したのが図9(a)で、通路の最大風速は到着時2.3 m/s、出発時2.5 m/sと低減される。

自然通気口を取付けた図9(b)において、最大風速は到着時2.2 m/s、出発時1.8 m/sとなり大きな低減効果を得ている。到着時に効果が低いのは、図7の点Aにおける静圧の履歴に示されるように流入風の加速時以降静圧が低下するためである。なお、流入風の減速時以降、T₁側の自然通気口において地上側からトンネル内に向かう逆流が生じている。出発時における低減値は、図7の静圧の時間履歴に応じたものといえる。

送風機を2台用いる換気制御2Fにおいては図9(c)に示すように、制御した風量が換気制御1Fに比べて2倍となるため低減値もほぼ2倍を得る。

低減風速 Δu の時間履歴より、どの方式も最大風速となる加速時において効率よく緩和していることがわかる。また、このように加速時の特性を論議する場合のモデルは2駅タイプが妥当であったともいえる。

換気制御1Fと2Fにおいて、制御した風量がどこに作用しているのかを明らかにするため、制御した積算風量 R_F とトンネルおよび通路における Δu の積算風量 R_L の比 $R_V = R_L / R_F$ よりその配分を求めて表3に整理している。その結果、約40%が通路 P_1 、 P_2 の風量を低減し、慣性力の大きい T_3 、 T_4 の流量にも大きく影響を与えている。

さて、換気制御1Fによって得られた通路部の低減値を断面積比から階段部の風速に換算して既報⁽⁸⁾の

実証結果と比較すると、模型実験では到着時 $\Delta u = 1.6$ m/s、出発時 $\Delta u = 1.4$ m/sの低減値に対して、実証結果では到着時 $\Delta u = 0.7 \sim 1.0$ m/s、出発時 $\Delta u = 1.0 \sim 1.7$ m/sとなる。また、積算風量の比 R_V で比較すると模型実験では $R_V = 38 \sim 40\%$ に対して実証結果では到着時50%、出発時70%程度であった。積算風量比に違いが生じたのは、既報の実証試験の駅では片側のトンネルが地下の車庫に通じており、隣駅に通じるよりも通風抵抗が大きく効果が出やすかったためである。

4. 結 言

トンネルと駅が連続する地下鉄において、模型で駅部の流動特性を求める場合に必要な実験装置の形状を求めることを目的として、(1)駅とその両側のトンネルをオリフィスで短縮した最も簡易なプロトタイプ、(2)駅と両側のトンネルまで含めて縮尺した1駅タイプ、(3)1駅タイプを二つ続けた2駅タイプの三通りの流動特性を求め比較した。さらに、駅構内に流入、流出する列車走行風の緩和を目的として、送風機によりトンネルの換気風量を制御する方法、および自然通気口を採用する方法で実験を行い、その作用を確認した。

その結果、以下の点が明らかとなった。

Table 3 Ratio of integrated air quantity R_V [%]

Type		Tp	T3 + T4	P1 + P2	Error
Ventilation control 1F	Arrival	18	36	40	6
	Departure	15	35	38	12
Ventilation control 2F	Arrival	15	32	47	6
	Departure	14	32	43	11

Fig. 9 Reduction value at the passages

(1) 駅部に流入あるいは流出する風速の概略値を求める場合には、プロトタイプの模型が利用できるが、駅構内の風速の評価を行う場合には1駅タイプの模型が必要となる。さらに、風量と風速の双方の実験精度を向上させる場合、あるいは列車走行風の加速時の特性が問題となる緩和効果の検討は2駅タイプの模型を採用する必要がある。

(2) 換気風量を制御して階段部の風速を低減する手法において、1台の送風機を用いると通路部の最大風速を到着時0.6 m/s, 出発時0.4 m/s程度低減できる。また、低減値の時間履歴 Δu を実証試験の結果と比較して模型における緩和効果を確認した。さらに、2台の送風機で約2倍の風量を制御するなら低減値も2倍となることを示した。低減効果は断面積比に反比例するため、通路より断面積が小さい階段部等において有効な緩和手法となり得るといえる。なお、従来より用いられている自然通気口は、設置に際して用地取得の問題があるものの効果の高い緩和法とあらためて

いえる。これらの手法は、緩和効果、建設費用あるいは建設用地取得の検討で選択すべきであろう。

文 献

- (1) Transit Development Corporation. Inc., *Subway Environmental Design Handbook*, (1976), 1, U. S. Dep. of Transportation.
- (2) 森井宜治・澤洋一郎・榎木隆二, *ながれ*, **12** (1993), 423-437.
- (3) 梶山博司・飯田雅宣・前田達夫, 鉄道総研報告, **7-7** (1993), 51-58.
- (4) 白鳥敏正・ほか3名, 機論, **58-546**, B (1992), 182-187.
- (5) 白鳥敏正, 第24回空気調和・冷凍連合講演会論文集, (1990), 105-108.
- (6) 福代和宏・下田吉之・水野稔, 空気調和・衛生工学会論文集, **61** (1996), 99-109.
- (7) Barrow, H. and Pope, C. W., *Proc. Inst. Mech. Eng.*, Part F **209** (1995), 105-112.
- (8) 杉原義文・白鳥敏正・松平晏明, 機論, **94-1619**, B (1995), 2143-2148.
- (9) 杉原義文・白鳥敏正・松平晏明, 機論, **97-0216**, B (1997), 3952-3958.
- (10) 福地合一, 鉄道技術研究報告, **1076** (1978), 1-206.