

地下鉄の風

福代和宏（山口大学）

1. はじめに

地下鉄空間は地盤に囲まれているため、閉鎖的な空間のような印象を与える。しかし、実際には出入口通路、トンネル端の開口、換気口などが開放された半開放の空間であり、地上の気象の影響を受けやすい特徴を持っている。また、列車の走行は地下鉄系特有の列車風を発生させ、地上と地下鉄との間の空気と熱の交換を促進している。

地下鉄に吹く風を駆動源ごとに分類して示すと次のようになる¹⁾。

- 列車風
- 換気機風
- 空調機風
- 密度流
- 人による伴流
- 吹き込み流

列車風は先に述べたように列車がトンネルの中でピストンの役割をして発生させる気流のことである。換気機風は、地下鉄構内の温度・空気質を適切に保つために換気装置によって地下鉄に供給・排出される空気の流れである。空調機風は地下鉄駅構内の冷暖房時に空調機器が発生させる気流である。

密度流は地下鉄系および地上の各場所における空気の密度と高さの差によって生じる気流のことである。例えば冬期には地下鉄構内が暖かく、地上が寒くなる。この場合、低所に低密度の空気が、高所に高密度の空気がそれぞれ存在するという不安定な状況になるため、微小な気流がきっかけとなって強力な密度流が発生することがある。この密度流は坑道など、高低差が

ある所でも観察されるものである。

人による伴流とは人の集団が同じ方向に移動する場合に発生する気流のことである。例えばラッシュ時に狭い出入口通路の中を同じ方向に群集が移動する場合に発生する。この気流に関する研究例はあまり見られない。

吹き込み流は地上から地下鉄構内へと流入する空気である。地下鉄構内の深い部分には流入しにくいですが、地下一階程度の部分では、ある出入口から別の出入口へと、地上からの空気が通過することがある。

地下鉄では以上のような多様な風が発生しているが、特に風量が多く、地下鉄空間の気象に影響を与えるのが列車風と換気機風である。以下では列車風と換気機風を対象を絞って地下鉄の風について論じたい。

2. 地下鉄の風の実際

2.1 地下鉄駅での実測結果

ある地下鉄駅のコンコース（地下一階）とプラットフォーム（地下二階）を結ぶ階段における気流の実測値²⁾を図1に示す（同図には、後述する予測手法によって予測した風量もあわせて示している）。

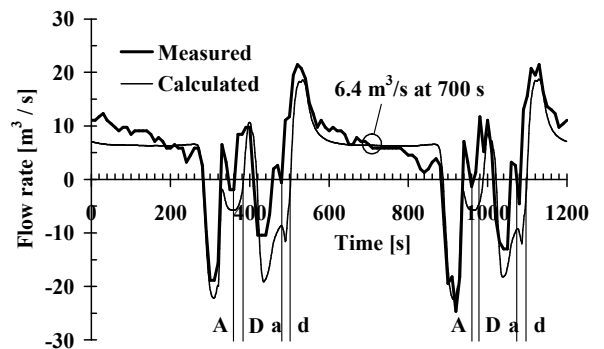


図1 駅構内の階段における風量

図1ではコンコースからプラットフォームへと空気が流れる場合、つまり地上から駅構内に空気が流入する場合に風量を正としている。また、同図の縦線 A, aはこの駅への列車の到着時刻を、縦線 D, dは列車がこの駅から出発する時刻を示している。

風量が負のピーク値を示すのは、列車の到着前である。これは図2に示すように、列車が地下鉄駅に近づくことによって、トンネルの空気が押し出され、地下鉄駅を経て地上に流出するためである。

また、風量が正のピーク値を示すのは、列車の出発後である。これは図3に示すように、列車が地下鉄駅から離れることによって、トンネル内の空気の圧力が低下し、地上から地下鉄駅を経てトンネルへと空気が流入するためである。

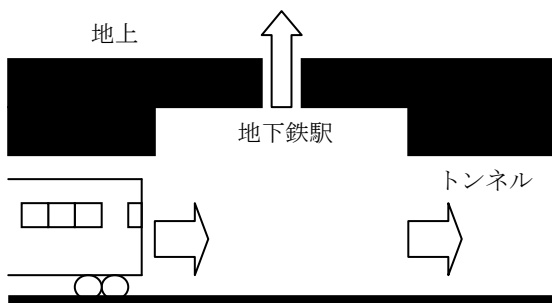


図2 列車到着時の気流の動き

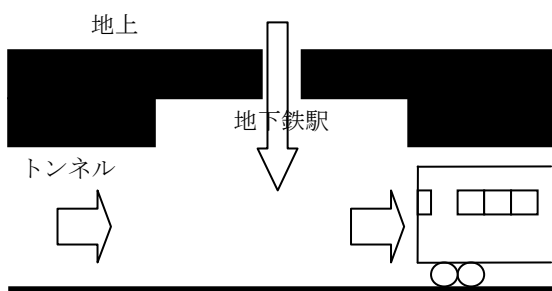


図3 列車出発時の気流の動き

列車の走行が無いときには、風量が正の値を示しているが、これは機械換気によって地上から地下鉄駅へと空気が流入しているからである。

階段の断面積を 10 m^2 とすれば、機械換気による風は約 0.6 m/s 、列車風はピーク値で約 2.0

m/s となる。駅の構造によっては、乗降客は 5 m/s 以上の列車風にさらされることがある。

2.2 地下鉄の風の予測手法

近年、建築物内部の気流予測に数値流体力学 (CFD) を適用することが増えている。しかし、地下鉄は冒頭に述べたような半開放空間であるため、気流予測を行うためには対象とする地下鉄駅だけではなく、地上、トンネル、隣接駅なども一括して取り扱わなくてはならない。コンピュータの性能が向上したとはいえ、広大な地下鉄空間に対して CFD を直接適用することは困難である。そこで、従来から地下鉄の風を予測するためには「換気回路網」と呼ばれるモデルが用いられている。

換気回路網は「ダクトモデル」とも呼ばれ、対象とする空間を空気が流れるダクトの集合体と見なし、ダクトの 1 次元的な空気の流れを予測するモデルである。また、ダクトは枝 (branch)、ダクト同士の接合部は節点 (node) と呼ばれる。

図4は地下鉄駅に換気回路網を適用した例である。ここで、出入口、コンコース、階段、プラットフォーム、トンネルは branch に変換されている。

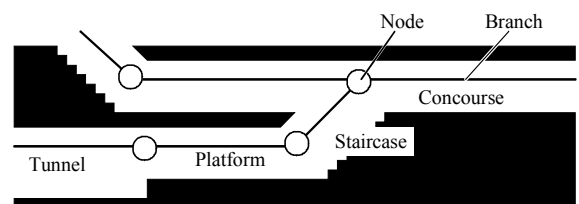


図4 地下鉄駅と換気回路網

各 branch が一定の断面積 A を持ち、風量 q で空気が流れるとすれば、各 branch での空気の運動方程式は次のように与えられる。

$$M \frac{dq}{dt} = -Rq|q| + A(\Delta P_1 + \Delta P_2) \quad (1)$$

ここで、 t は時間、 M は branch 全体の空気の

質量、 R は branch の形状抵抗および壁の摩擦抵抗、 ΔP_1 は branch 両端（つまり一方の node と他方の node）の圧力差、 ΔP_2 は換気機器や列車走行による圧力上昇である。列車走行による圧力上昇は、文献³⁾の二流体ピストンモデルを用いて計算できる。

各 node では流入する風量と流出する風量が等しいため次の連続の式が成立する。

$$\sum_{\text{inflow}} q = \sum_{\text{outflow}} q \quad (2)$$

すべての branch および node に対する式(1)、(2)を連立させて解けば、各 branch での流量が得られる。解法の詳細は文献¹⁾に記載している。

この換気回路網によって予測した地下鉄の風の風量を図1に細線で示している。換気回路網で定量的に妥当な予測結果が得られることがわかる。

3. 地下鉄の風が地下鉄空間に及ぼす影響

3.1 地下鉄の高温化と換気

一般に地下空間は、周囲の地盤の断熱性および吸放熱効果（熱を吸収・放出すること）によって、地上よりも温度の変動が小さく、快適な空間であることが知られている。地下鉄空間もかつては「夏涼しく、冬暖かい」空間として知られていた。

しかし、現在では状況が変わっている。地下鉄交通量の増加に伴って地下鉄空間内の発熱量が増加しているのだが、地盤の断熱性があるためこの発熱を外部に捨てることができず、結果として地下鉄空間の高温化が進んでいる。エネルギーを大量に消費する冷房に頼らずに、地下鉄空間で発生する熱を除去するためには、列車風および換気機風によって地上との間の空気の交換を促進する必要がある。

著者らは以前、冷房に頼らずに夏期の地下鉄駅構内の高温化を抑えるためには、どのような

機械換気の運転を行えばよいかについて検討を行った⁴⁾。検討対象としたのは駅給気・中間排気方式と呼ばれる機械換気方式（図5）を採用している地下鉄駅である。この方式では各地下鉄駅のプラットフォームには $6000\text{m}^3/\text{min}$ の給気が行われ、トンネルの中央から同量の排気が行われる。換気回路網を用いてこの駅について検討した結果を図6に示す。

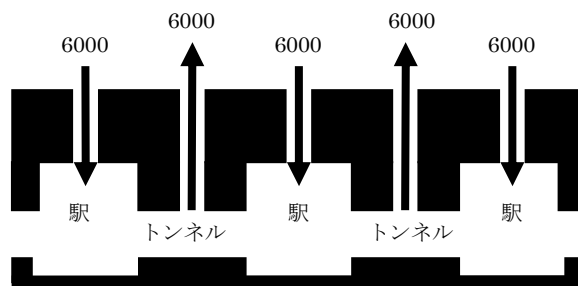


図5 駅給気・中間排気方式（単位 $[\text{m}^3/\text{min}]$ ）

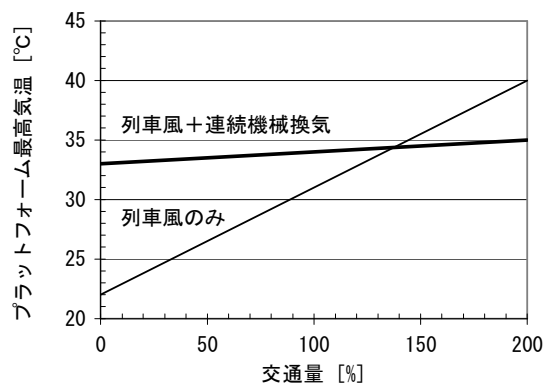


図6 換気方式および交通量とプラットフォーム最高気温の関係

交通量とは、通常の列車の運行本数を 100%とした場合に対する相対的な運行本数である。「列車風のみ」とは機械換気を停止して、列車風による換気にのみ頼った場合、「列車風+連続機械換気」とは列車風が吹く状況でさらに図5に示した機械換気を 24 時間連続で行う場合をあらわしている。

交通量の少ない場合（交通量 0~140%）は、列車風のみに関わる方がプラットフォームの気温が低く保たれる。連続機械換気を加えると、地上の高温の空気が駅構内に流入し、地盤の吸熱

効果が損なわれる。

交通量が増加すると（交通量 140%～）、列車や乗降客の発熱が増加し、列車風による換気だけでは、駅構内の除熱を行うことができなくなる。この場合には、機械換気を加えることによって、プラットフォームの高温化を抑制することができる。

このように、駅の熱環境調整には、交通量（列車本数）に応じた機械換気運転の切り替えが必要であることが示されている。

3.2 列車風と熱的快適性

前節で述べた地下鉄の高温化は夏期にはマイナス要因であるが、冬期にはプラス要因になるのだろうか？

この問いに対してはある面でイエスと答えることができる。例えば、著者らが大阪地方H A S P 標準気象データを用いて行ったシミュレーションによれば、冬期の最も寒い時刻（シミュレーションでは1月28日8時）において、外気温 -1.7°C に対するプラットフォーム気温は 11.0°C であった⁵⁾。

このように見ると高温化は冬期には地下鉄の熱環境を改善していると言える。しかしながら、地下鉄が冬期には温暖で良好な環境になっているとは言っても、列車風による体感温度の低下でその良さが損なわれることがある。

例えば図7は、冬期に、ある駅の階段で図1に示したような風量の変動があった場合に、その階段を通過する乗降客が感じる温度と温冷感を示している²⁾。

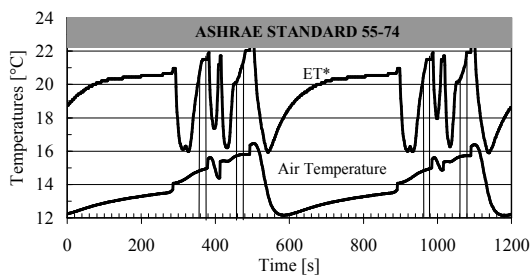


図7 駅構内の階段における熱的快適性

ET*と書かれているのが乗降客の温冷感であり、ET*が網掛けで示した $22.2\sim 25.6^{\circ}\text{C}$ の範囲のとき、快適であるとされている。列車風がなければET*は快適域に近い位置にあるが、列車風が発生すると、体から熱が奪われ、ET*は一気に低下する。

冬期の熱環境調整では列車風の緩和が重要な課題となる。

4. まとめ

本稿では、(1) 地下鉄の代表的な風は列車風と換気機風であること、(2) 地下鉄の風は換気回路網によって予測可能であること、(3) 地下鉄の風は地下鉄空間の熱環境に多大な影響を及ぼしていること、などについて概説した。

引用文献

- 1) 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). 空気調和・衛生工学会論文集, (61), 99-110 (1996).
- 2) K. Fukuyo, Y. Shimoda, M. Mizuno, Simulation of a Subway station for Evaluation of the Thermal Comfort. Proceedings of Indoor Air 2002 (Monterey, California), 736-741 (2002).
- 3) 森井宣治, ピストン効果の理論 (二流体ピストンモデル). 日本機械学会論文集, 66 (644), 145-152 (2000).
- 4) 下田吉之・福代和宏・水野稔, 地下空間における地盤の吸熱効果に関する研究 第三報. 空気調和・衛生工学会論文集, (63), 1-8 (1996).
- 5) 福代和宏・下田吉之・水野稔, 半開放性空間における熱的快適性に関する研究. 土木学会地下空間シンポジウム論文・報告集, 3, 35-44 (1995).