地下鉄における気流の三次元数値解析に関する研究

THREE DIMENSIONAL NUMERICAL SIMULATION OF AIRFLOW INSIDE A SUBWAY

齊藤正幸 *・田代広行 **・大塚　努 ***・宇波邦宣 ****
Masayuki SAITOH, Hiroyuki TASHIRO, Tsutomu OOTSUKA and Kuninobu UNAMI

It is important for railway companies to provide safe and comfortable airflow for passengers on platforms. One of the factors causing airflow on platforms is the change of air pressure induced by the passage of trains. Unlike those in open-air, subway stations form parts of a closed network of space comprising stations and a pipeline network of connecting tunnels, passages, concourses, and ducts for ventilation and air conditioning. The environment of a subway station is therefore easily affected by changes in air pressure. Providing a safe and comfortable environment for passengers and improving the efficiency of ventilation requires the prediction and control of airflow inside subway stations. Utilizing observed airflow data, we assessed the airflow inside a subway station by means of 3-D numerical simulation to analyze the spatial change of airflow induced by train traffic. We assessed the validity of 3-D numerical simulation by comparing its results with observed data. The simulation assessed the velocity change of airflow with a fair approximation of the real data. However, further development is needed before the technique can be put into practical application.

Keywords ：*subway, airflow, numerical simulation, CFD*

1.　はじめに

鉄道事業者にとって駅構内、とくにホームにおける気流に対する旅客の安全性と快適性を確保することは重要な課題である。ホームにおける気流の発生の要因のひとつに列車の移動による圧力変動が挙げられる。とくに、地下鉄駅構内ではトンネル、通路、コンコースならびに空調・換気ダクトなどが管路網を形成しており、地上駅のホームとは異なった閉鎖空間となっているため、その影響が顕在化しやすい環境にあるといえる。地下鉄駅構内での旅客の快適性を確保し、換気・空調を効果的に行うためにもこの気流の予測とその結果に基づいた制御を行うことが望ましい[1)]。

本研究では、地下鉄における列車の移動と気流の変化を空間的に捉えることができる、三次元数値解析による地下鉄駅構内の気流の評価を試みた。

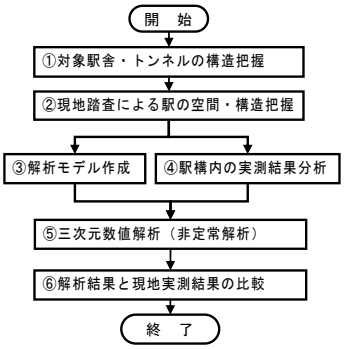
2.　駅構内の気流の検討とその課題

鉄道事業者では、地下鉄駅構内において、気流の風向気流速度を計測し、この計測結果に基づいて、対象地下鉄駅の一次元管路網モデルを構築し、駅構内の気流の発生状況の検討を行っているところもある[1)]。

一次元管路網モデルは地下鉄駅構内全体の気流を比較的容易に捉えることができる優れた方法であるが、列車の移動に伴う気流の局所的な変動までは評価が難しい。このような現象を評価する手段として、気流の動きを空間的に捉えることができる三次元数値解析による評価が合理的であると考えられる。

3.　研究の概要

本研究は地下鉄駅構内の気流に対する三次元数値解析の有効性を検証するため、1) 解析モデル作成、2) 三次元数値解析の実施および 3) 解析結果と現地実測結果の比較を実施した。具体的な作業のフローを**図－1** に示す。



図－1　研究のフロー

4.　研究の内容

(1) 対象地下鉄駅・トンネル・列車の構造

解析対象とした地下

*　日本シビックコンサルタント株式会社　事業統括本部
**　日本工営株式会社　中央研究所　総合技術開発部
***　東京地下鉄株式会社　鉄道本部　改良建設部
****　メトロ開発株式会社　技術部

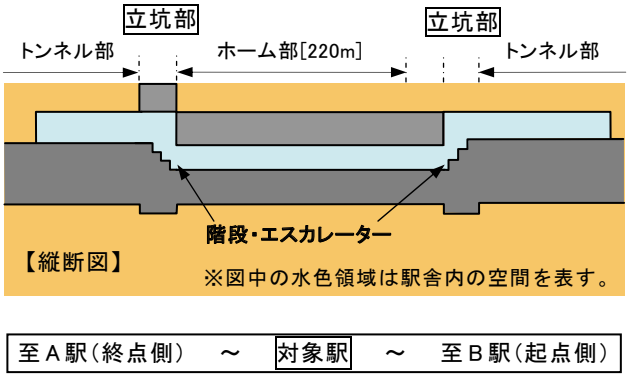
鉄駅、駅間トンネルおよび列車の構造を**図－2**に示す。解析対象駅はホームが地下3階にあり、改札は地下2階にある。ホーム両端部は立坑構造となっており、この両側の立坑部に地下3階のホームから地下2階の改札および地上出口に繋がる乗降用階段とエスカレーターがある。階段は中央部に、エスカレーターは階段の両側に配置された構造となっており、地下3階のホームから地下2階に通じる開口部はこの2箇所である。駅部および駅間トンネルはシールドトンネルである。

(2) 現地踏査状況

解析対象駅構内の現地踏査を行った。ホームは終点側から7割程度は直線形状であるが、それ以降はカーブした構造である。

駅構内の気流は、列車の到着・発車時に速度が上がる傾向が感じられた。列車の到着時には、ホーム上でも気流速度が高くなるが、歩行等に影響を及ぼす程ではなかった。

一方、ホームの両端にある階段・エスカレーター部では比較的高い気流速度が感じられた。地下2階の改札および通路でも列車の到着・発車時に気流速度が高くなる傾向があったが、ホームと上層階を繋ぐ階段・エスカレーター部ほどではなかった。



図－2　解析対象駅の駅舎・トンネル構造

(3) 解析モデル作成

1) 境界条件

図－2に示す地下鉄駅・トンネルを**図－3**に示すように三次元でモデル化した。

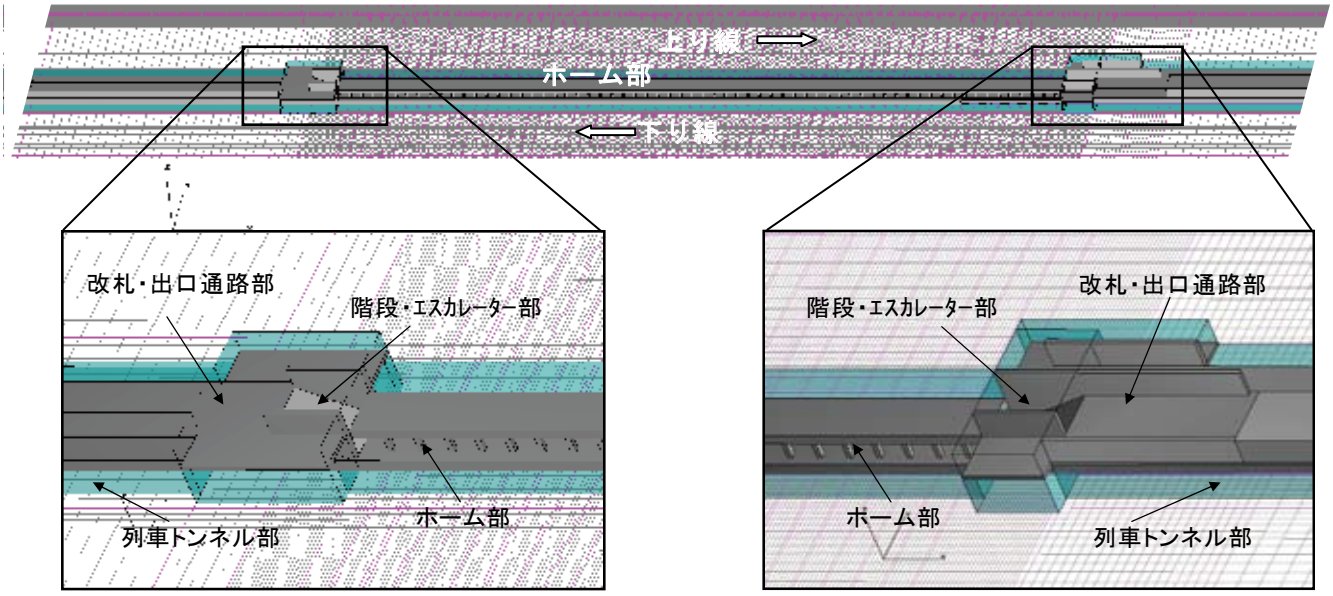
地下2階にある改札から地上部の出口に向かう通路については、断面形状と延長は実状をモデル化しているが、通路の方向は、解析要素数の増加を抑えるために平面的にはトンネルに対して直角、縦断的には同一平面内に単純化している。トンネルおよび他路線等へ連絡する通路の解析境界については、圧力損失境界として考慮した。

要素分割は、駅ホーム部では約0.35m～約0.55mとし、駅間トンネル部については駅部接続付近を密にし、駅部から遠ざかるにつれて粗くなるように要素分割した。

列車構造のモデル化は、断面積と縦横比が実際の列車とほぼ同様な矩形形状とし、列車の連結長さは運行時の長さと同様とした。

2) 列車のランカーブ

上り線および下り線の列車の移動は、**図－4**と**図－5**に示すランカーブを用いて設定した。

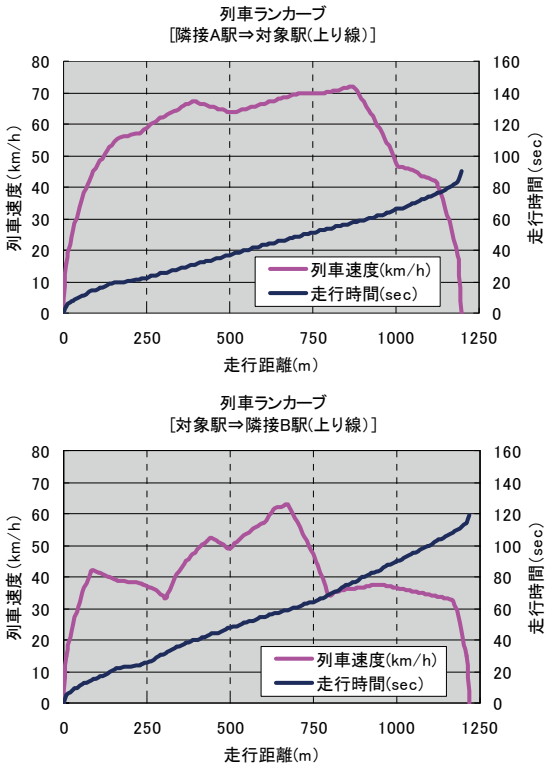


【終点（A駅）側立坑部】　　【起点（B駅）側立坑部】

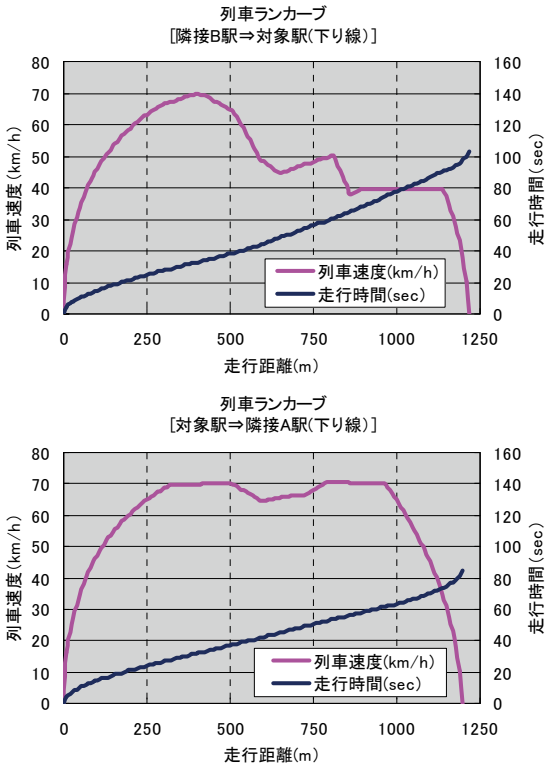
図－3　対象駅の解析モデル　※水色の分は駅舎・トンネル内の空間を表す。

5. 三次元数値解析

解析モデルの地下鉄駅部および駅間トンネルを**図－4**および**図－5**のランカーブに従い、列車モデルを移動させ解析した。列車モデルの走行条件は列車の運行パターンと駅構内の気流速度の状況を踏まえ決定した。



図－4　上り線のランカーブ
（隣接A駅⇒対象駅⇒隣接B駅）



図－5　下り線のランカーブ
（隣接B駅⇒対象駅⇒隣接A駅）

(1) 列車モデルの移動条件

列車の運行タイミングと気流の大きさの関係については、上り線では列車がA駅を発車し対象駅に向い、下り線では列車がB駅を発車し対象駅に向かっている時に10m/sを超える気流が発生することが多くなっている。

したがって、列車モデルを移動させるタイミングとしては、上り線で列車がA駅を発車し対象駅に向い、下り線でも同様に列車がB駅を出発し対象駅に向かっている状態を対象として解析を実施した。

(2) 数値解析手法

流体力学の非圧縮性流体における基礎方程式を平均化処理した式-1、式-2を有限体積法（コントロール･ボリューム法：CV法）により離散化し計算を実施した。乱流モデルは式-3、式-4に示す標準k-εモデルを用いた。

列車の移動は移動物体として扱い、要素の開口率と体積占有率を用い、保存則が満たされるように計算される[2)]。

＜連続の式＞

$$\frac{\partial \overline{u}_i}{\partial x_i} = 0 \qquad \cdots\text{式-1}$$

＜平均流の輸送方程式＞

$$\frac{\partial \overline{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \overline{u}_i \overline{u}_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial \overline{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left\{ \nu_t \left(\frac{\partial \overline{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u}_j}{\partial x_i} \right) \right\} \qquad \cdots\text{式-2}$$

＜乱流エネルギーの輸送方程式＞

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial \overline{u}_j k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\frac{\nu_t}{\sigma_k}\frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_S - \varepsilon \qquad \cdots\text{式-3}$$

＜乱流散逸率の輸送方程式＞

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial \overline{u}_j \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon}\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + \frac{\varepsilon}{k}\left(C_1 G_S - C_2 \varepsilon \right) \qquad \cdots\text{式-4}$$

$$G_S = \nu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$$

$$\sigma_k = 1.0, \sigma_\varepsilon = 1.3, C_1 = 1.44, C_2 = 1.92$$

ただし、

x_i：位置座標，　u_i：x_i方向の流体速度，t：時間，
p：流体の圧力，ρ：流体の密度，　ν_t：動粘性係数，
k：乱流エネルギー，　ε：乱流散逸率

(3) 解析結果

A 駅側および B 駅側、それぞれにおいて地下鉄構内で気流速度が最も大きかった地点について、気流速度の時系列変化および気流の速度ベクトル・速度分布の変化を述べる。

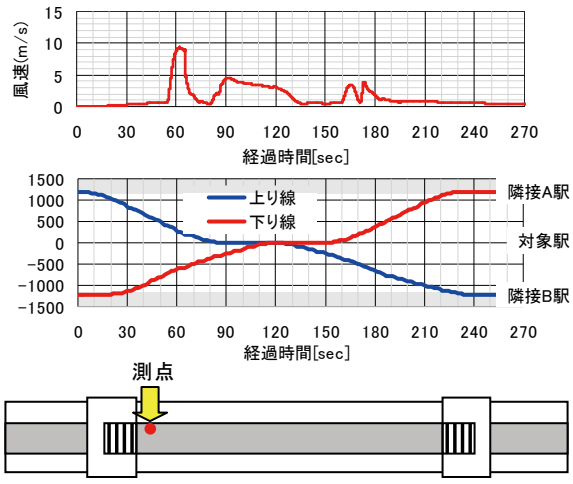
1) A 駅側

終点側での気流速度の時系列変化を**図－6**に示す。また、気流速度が最も大きくなる時点前後（58 秒後、62 秒後、66 秒後）の気流の速度ベクトル・速度分布の変化状況を**図－7**に示す。なお、**図－6**、**図－7**は次節に示す現地測定の風速計高さと同じ、床面から高さ 1.2m の結果である。

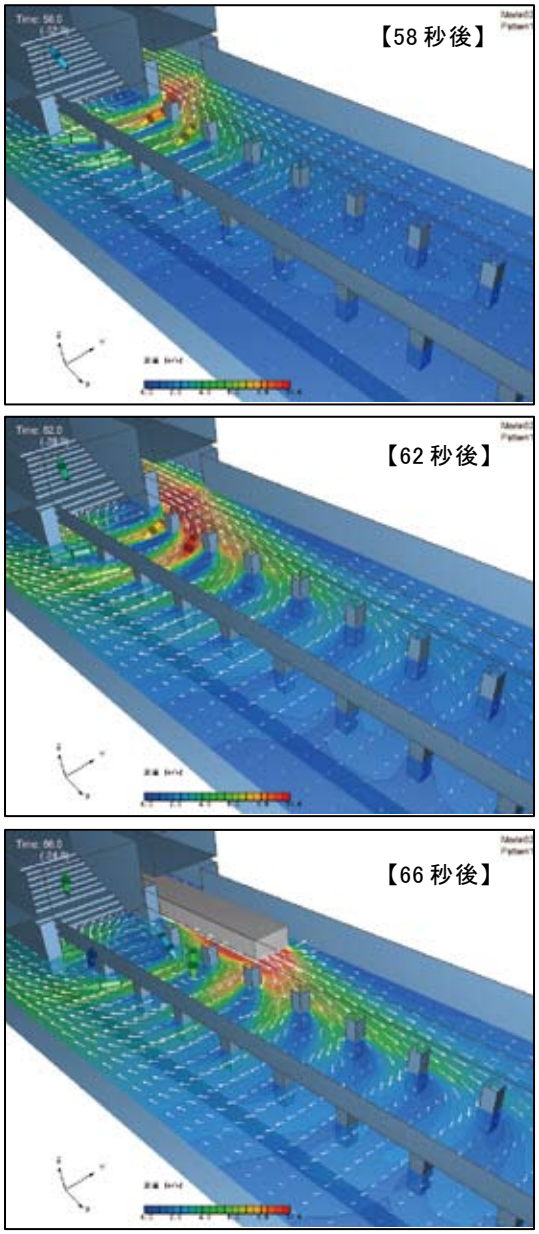
図－6の気流速度の時系列変化を見ると、上り線の列車が A 駅から対象駅に到着する前に気流速度の最大値（約 10m/s）が出現している。また、上り線のホームに列車が停車中で下り線の列車が B 駅から対象駅に到着する直前にも気流速度が 5m/s 程度となる。下り線の列車が A 駅に向けて発車した後には 4m/s 程度の気流が発生している。

次に**図－7**を見ると、上り線の列車が対象駅のホームに進入する前の 58 秒後では、上り線側ホーム上の気流速度が大きくなりはじめ、62 秒後には気流速度がさらに大きくなる。しかし、上り線の列車がホームに進入してきた 66 秒後では気流速度が小さくなる。**図－7**に示すように、終点側で気流速度が最も大きくなる箇所は階段・エスカレーター手前の上り線側ホーム上で、気流速度は列車がホームに進入する直前に最も大きくなっている。また、トンネルから押し出される気流はホーム上の柱間で大きく、柱の風下側では気流速度が小さくなる。

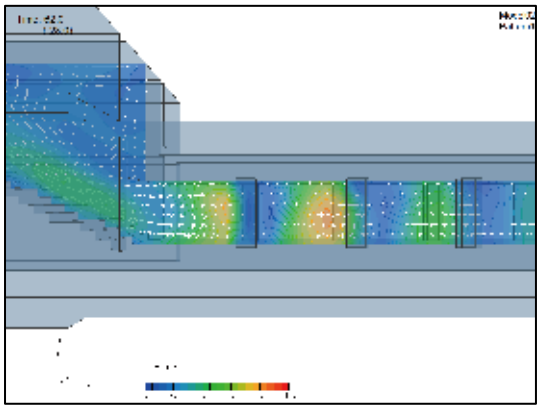
図－7の 62 秒後におけるホーム中心での縦断面の速度ベクトル・速度分布を**図－8**に示す。**図－7**で平面的に気流速度が大きい箇所は、ホームの鉛直方向にも気流速度が大きい領域が分布している。階段･エスカレーター上では、トンネルからホーム上に流れ込んできた気流の一部が上層階に向かって吹き上がっているが、ホーム上よりも気流速度は小さい。



図－6　地下鉄構内の気流速度変化（A 駅側）



図－7　構内の気流速度ベクトルと分布の変化（A駅側）



図－8　構内の気流速度ベクトルと分布の変化（A駅側、縦断面）

2) B 駅側

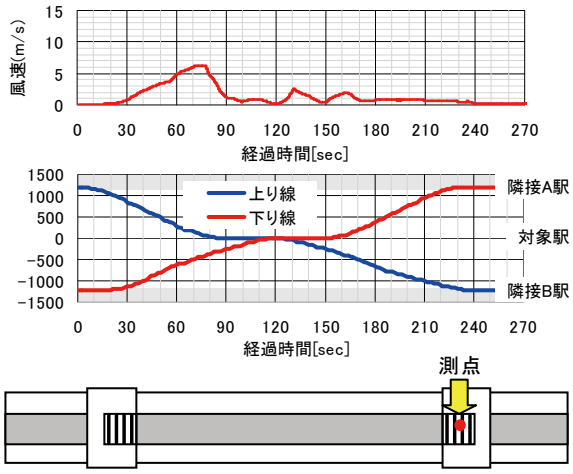
終点側と同様に、**図－9** に起点側における気流速度の時系列変化を示す。また、**図－9** で気流速度が大きくなる時点前後（72 秒後、76 秒後、80 秒後）における気流の速度ベクトル・速度分布の変化を**図－10** に示す。なお、**図－9**、**図－10** は次節に示す現地測定の風速計高さと同じ、床面から高さ 1.2m の結果である。

図－9 の気流速度の時系列変化を見ると、上り線の列車が対象駅に進入中に気流速度の最大値（約 6m/s）が出現している。下り線の列車が対象駅に到着する時点では気流変化はあまりなく、気流速度は小さい。また、上り線および下り線の列車が対象駅を発車した直後には、気流速度は 2m/s ～ 3m/s 程度である。

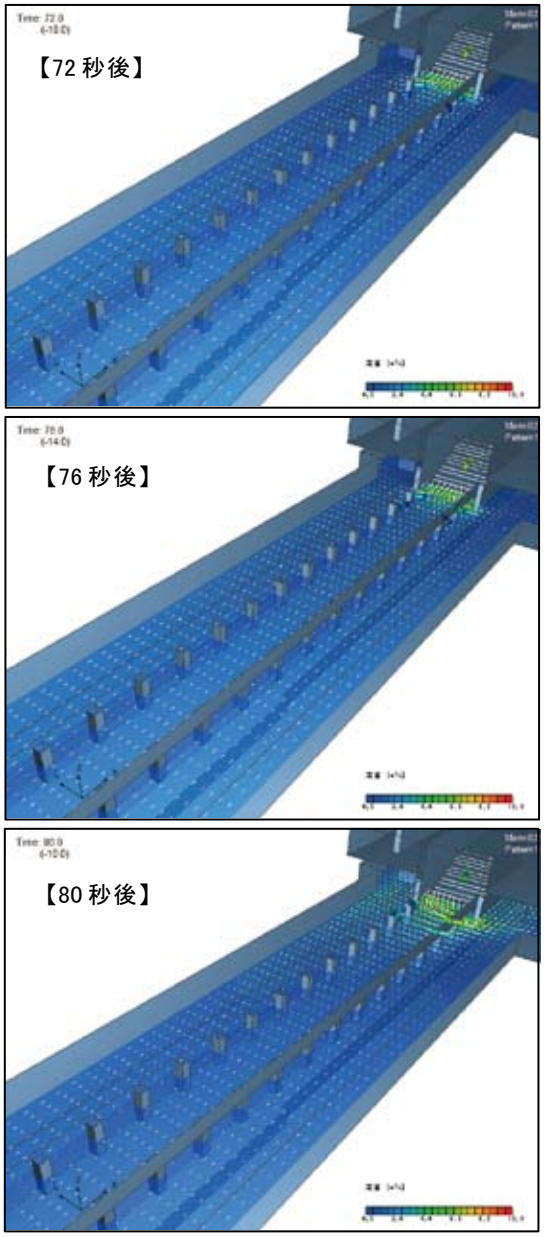
次に**図－10** を見ると、A 駅を発車した上り線の列車がホームに進入中である 72 秒後では階段・エスカレーターの昇り口付近で気流速度が大きくなりはじめ、階段・エスカレーターの中ほどでは気流速度が階段・エスカレーターの昇り口付近よりも大きくなっている。76 秒後も 72 秒後と同様な気流の状況が継続している。しかし、80 秒後になると 76 秒後までと比べ、階段・エスカレーター手前のホーム上での気流速度が大きくなりはじめ、一方、階段・エスカレーターの中ほどでは気流速度が小さくなっている。

図－11 には、**図－10** の 76 秒後におけるホーム中心での縦断面の気流の速度ベクトル・速度分布を示す。**図－11** を見ると、気流速度は階段・エスカレーター上で大きくなっており、気流方向はホームから上層階に吹き上がっている。

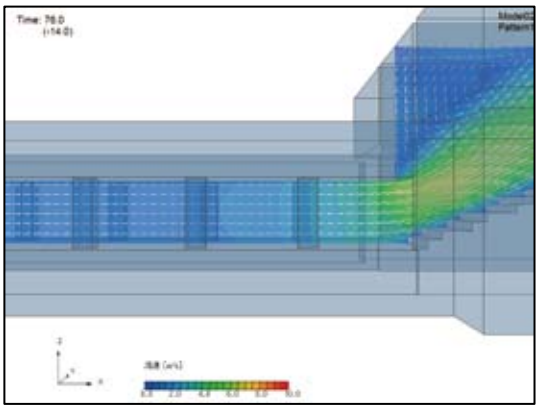
終点側では階段・エスカレーター上よりもホーム上の方が気流速度は大きかったが、起点側では、反対にホーム上よりも階段・エスカレーター上の方が気流速度は大きい。なお、後述するようにこの傾向は現地測定結果と一致している。



図－9　地下鉄構内の気流速度変化（B駅側）



図－10　構内の気流速度ベクトルと分布の変化（B駅側）



図－11　構内の気流速度ベクトルと分布の変化（B駅側、縦断面）

(4) 解析結果と現地測定結果の比較

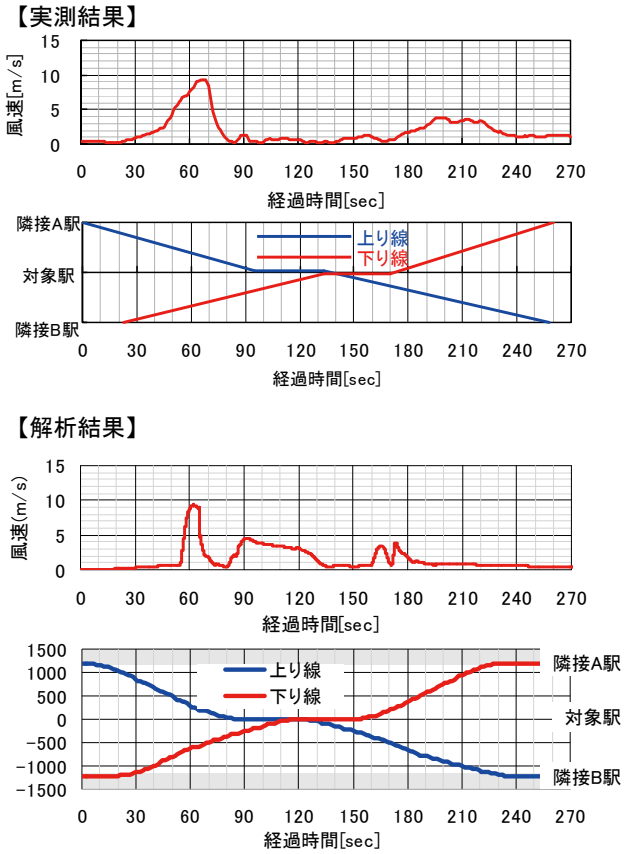
解析結果と列車の運行状況が類似している実測結果を用いて、三次元数値解析による構内の気流の再現性を検証した。終点側と起点側で解析結果と実測結果において列車の移動に伴う気流の最大気流速度が出現した地点は同様の地点であった。そこで、終点側と起点側において、気流速度が最大となった地点で、解析結果と実測結果の時系列変化を比較することとした。

1) A 駅側

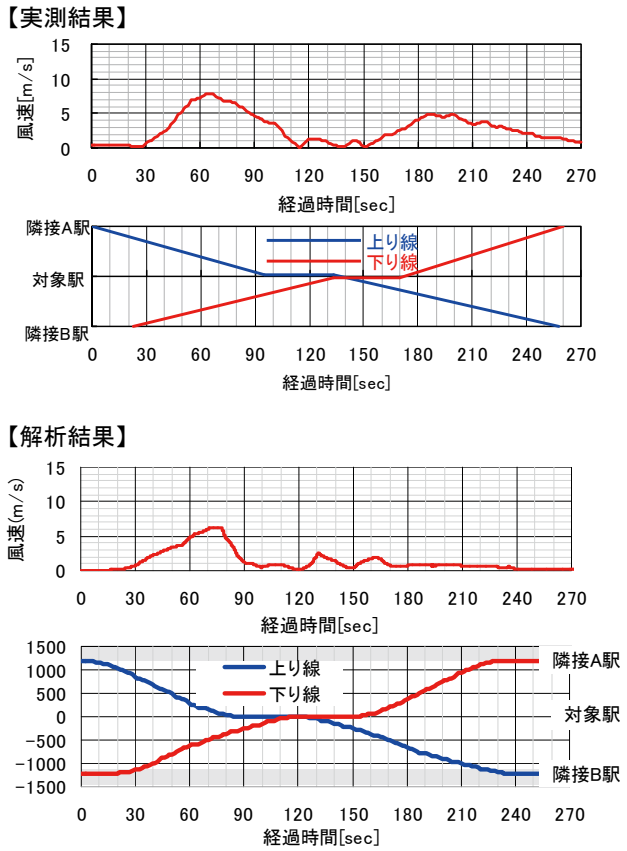
図－12 に示すとおり、解析値と実測値での気流速度のピークは上り線の列車が隣接駅を出発してから約 60 秒後に 9m/s を超える気流速度となっておりほぼ一致している。しかし、ピークの幅は解析値の方が小さくなっている。

終点側から対象駅に到着した列車がホームに停車しているときの気流速度は解析値の方が大きくなっている。隣接駅からきた下り線の列車がホームに停車し、その後、終点側に向かって発車した後に気流速度が若干大きくなる傾向は一致しているが、気流速度の持続期間は、解析値では短くなっている。

全体的な傾向として、解析値と実測値で気流速度が大きくなるタイミングは一致しているが、気流速度が大きい持続時間は解析値の方が小さくなっている。



図－12　地下鉄構内の気流速度変化（A 駅側）



図－13　地下鉄構内の気流速度変化（B駅側）

2) B 駅側

図－13 に示すとおり、解析値と実測値の気流速度に関する時系列変化の傾向はおおむね類似した傾向を示している。しかし、気流速度のピークは、実測値では上り線の列車が隣接駅を発車してから約 60 秒後に 8m/s となっている。これに対して、解析値では約 75 秒後にピークが現れており、気流速度は約 6m/s でピークの幅も解析値の方が小さくなっている。

隣接駅から対象駅に到着した下り線の列車がホームに停車し、その後、終点側に向かって発車した後に気流速度が多少大きくなる傾向は一致している。しかし、ピークの発生時間および持続時間は異なっている。

6.　解析結果のまとめ

本研究において、三次元数値解析によって地下鉄駅構内の気流を予測することで、ホームの柱や構内の壁、通路の平面的な凹凸などが気流に与える影響を表現し、駅構内の各位置における気流のベクトル（位置、方向、強さ）を三次元的に捉えるとともに、最も気流が強くなるタイミング（時間）も把握することができる可能性が確認できた。

このことから、三次元解析の精度を向上することで、列車の移動にともなう気圧の変化によって発生する気流がホーム上のどの位置のどの高さで何時強くなるかを把握す

ることができると考えられる。さらに、その解析結果から、駅構内の環境の向上や乗客の安全性を確保するための具体的な方策を講じるための情報を得ることができると考えられる。また、駅構内の気流を三次元的に捉えることによって、気流を制御するための方策を講じる場合の有用な情報が得られると考えられる。

一方、三次元数値解析によって再現できた地下鉄内の気流の現象や再現性に不十分な点があると考えられる現象について、以下にまとめる。

(1) 再現が確認できた現象

① 駅ホームから改札・出口通路に繋がる階段・エスカレーターの周辺で列車移動に伴う気流が強くなる。

② 両隣の駅から対象駅に列車が向かう時、対象駅から列車が離れる時に列車移動に伴う気流が強くなる。

(2) 再現が不十分な現象

① 気流が最も強くなる箇所のピーク値が実測結果よりも若干小さくなっている。

② 気流のピークの幅（気流速度が大きい継続時間）が実測結果よりも短い。

7. おわりに

本研究において、三次元数値解析により地下鉄の列車移動にともなう気圧の変化によって発生する気流をおおむね再現することが可能であることがわかったが、解析結果の最大気流速度が実測値より若干小さく評価されることや、ピーク値の出現時間が実測値と異なる箇所があることなどの課題も残っている。このため、駅構内の環境の向上や乗客の安全性を確保、気流の制御などに三次元数値解析を適用するには、現象の再現性を更に高める必要があると考えられる。

今後の予定として、本研究で対象とした地下鉄駅舎およびトンネル構造、境界条件のモデル化について、以下に示す点に着目して再検討を行い、三次元数値解析の再現性を高め、さらにタイプの異なる地下鉄駅舎・トンネルへの適用を行い、解析手法の汎用性を確認していきたいと考える。

① 現地踏査等による対象駅舎の解析モデルおよび境界条件の妥当性検証

② 解析手法の汎用性を確認するため、実測結果があるタイプの異なる地下鉄駅舎への適用

③ 一次元管路網モデルと三次元数値解析を組み合わせた解析の効率化検討（一次元管路網モデルを境界条件として）

また、移動体解析手法を用いていることから、解析に時間が掛かるという課題もあり、一次元管路網モデルと組み合わせることで解析時間の短縮による効率化を図っていきたいと考えている。

参考文献

1) 西村高明、森谷剛、宇波邦宣、森井宜治：列車走行に伴い地下鉄駅構内で発生する列車風の予測解析と緩和対策について、地下空間シンポジウム論文･報告集、第 14 巻、土木学会、pp.101-108、2009

2) 株式会社ソフトウェアクレイドル：STREAM Version8 ユーザーズガイド　リファレンス（ソルバー）編、2009 年 5 月