

$$\Delta P = \Delta P_1 \frac{\Delta \ell_1}{\ell_1} + \Delta P_2 \frac{\Delta \ell_2}{\ell_2} + \Delta P_3 \frac{\Delta \ell_3}{\ell_3} \quad (3)$$

$$\ell = \ell_1 + \ell_2 - \ell_3 \quad (4)$$

対向走行する各列車のピストン領域における密度”ゆらぎ”の移送速度が等しい ($\phi_{0,1} + W_1 = \phi_{0,2} + W_2$) ことを仮定すれば、式(2)は以下のように拡張される。

$$d_i \phi_{0,i} = d_i (V - W_i) + \frac{\sum (W_k - \phi_{0,k}) |\phi_{0,k}|}{2L} \quad (5)$$

トンネル内気流が一様であることから、圧力分布が拡張された式(1)を用いて、以下のように求められる。

$$P_{r1} - P_0 = -\rho_0 X_{r1} \left[d_i V + \frac{\lambda}{2D} |V| V \right] \quad (6)$$

$$P_{f1} - P_0 = P_{r1} - P_0 + \Delta P_1 - \rho_0 (\ell_1 - \ell_3) d_i V \quad (7)$$

$$P_{f2} - P_0 = P_{r2} - P_0 + \Delta P_2 - \rho_0 (\ell_2 - \ell_3) d_i V \quad (8)$$

$$P_{r2} - P_0 = \rho_0 (L - X_{r2}) \left[d_i V + \frac{\lambda}{2D} |V| V \right] \quad (9)$$

(2) 地下鉄系の解析方法

列車が走行するトンネルは、ホーム、階段、通路、出入口等で構成される駅部と結合している。ホームや改札口では必ずしも1次元性が強いとはいえない構造もあるが、このような構造に対しては断面積と内壁面積が一致する等価管路に換算して、図-2に示すような等価管路網を作成する。また、検討対象となる駅は通常両側に隣接駅がある。解析では検討対象駅を中央に配置し、隣接駅および駅間トンネル部を含めた3駅モデルを作成する(図-5参照)。

断面積や水力直径、延長等の列車諸元、列車の駅間走行を表すランカーブ(図-3参照)、列車ダイヤ等を設定し、気流解析を行う。解析で得られる風速は管路網内で一様な気流であり、断面に対して平均的な値である。

3. 緩和対策事例

営業駅の下を他路線が通過している2路線構造の駅に対し、連絡階段を新たに設置し、上下階を結ぶ

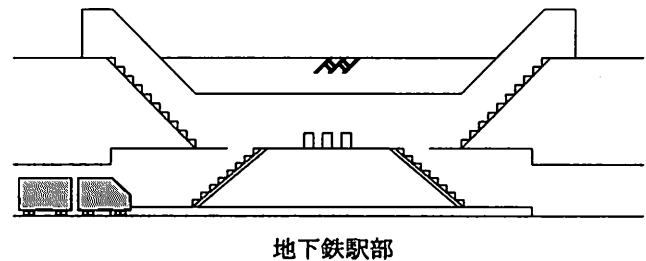


図-2 モデル化概念図

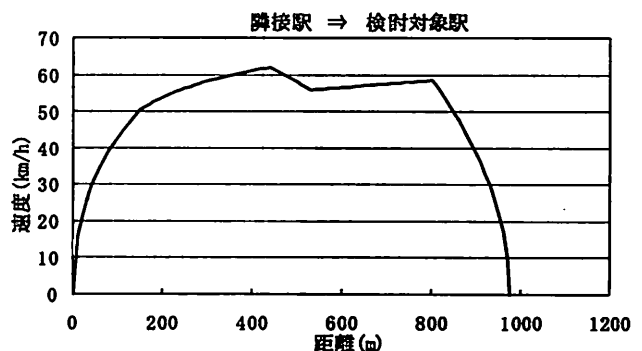
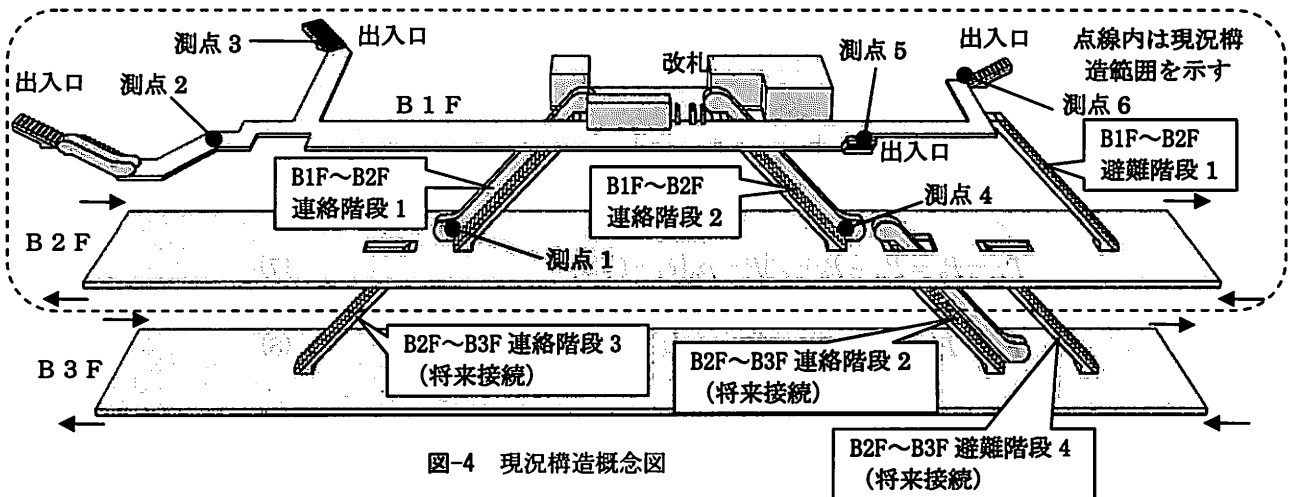


図-3 ランカーブ

計画に対する事例を示す。上下2路線を連結することで、2路線の列車が互いに干渉し、気流が大きく変化することが想定されたため、事前に気流予測解析を行い、緩和対策を実施したものである。

(1) 検討対象駅の構造

検討対象の駅構造を図-4に示す。駅改良前は、B2Fが営業路線であり、B3Fには別の路線が通過するだけで連絡階段では結ばれていない構造となっている。つまり、B3Fを列車が通過する時に発生している列車風はその上のB2Fホーム階やB1F改札階、出入口等にはまったく影響を及ぼしていない状態である。以降、出入口～B2Fの構造（図-4の点線で囲んだ部分）を現況構造と称する。将来的にB2FとB3Fは連絡階段で結ぶこととしており（以降、将来構造と称す）、この場合、2路線の列車走行に伴う列車風で複雑な気流変化が生じ、強風部位が発生することが想定された。そこでまず現況構造に対し、列車風計測および列車風解析を実施し、解析の妥当性を確認した。その後、将来構造になった場合の解析を実施し、列車風の評価を行った結果、列車風に対する緩和対策が必要と判断されたため、対策工を実施した。



(2) 現況構造での列車風検討

a) 列車風計測

まず現況構造駅の列車風計測を行った。列車風の計測箇所は図-4に示す測点1から測点6であり、この測点について列車風を測定した。測定では風速計を用いた30分間多点同時計測を行っており、計測時の列車の実運行ダイヤも同時に記録している。風速計は、プロペラ型や熱線計型、3杯型などがあるが、列車風の瞬間的なピーク値を精度よく測定し、列車の発着や通過で押し引きする風の動きを感度よく測定でき、旅客流動に支障を来さないコンパクトな3次元超音波風向風速計を採用している。

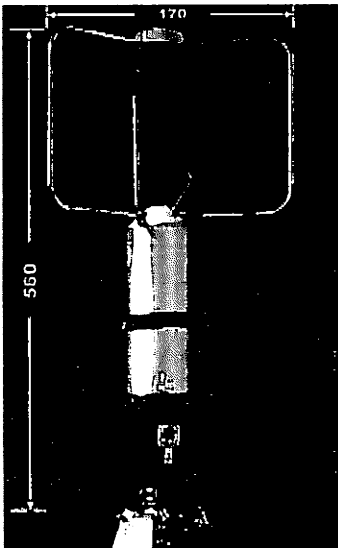


写真-1 超音波風向風速計

表-1 測定器仕様

項目	仕様
精度	±1%
分解能	0.01 m/s
サンプルレート	160 Hz
測定範囲	0-40 m/s
耐風速	60 m/s以上
デジタル出力内容	u,v,w,音速、温度 3次元風速
大きさ・重量	56cmH×17cmφ 1.7kg



写真-2 測定状況

測定で得られた最大風速を表-2 の実測値欄に示す。最大風速は、測定時間内で得られたデータの瞬間的なピーク値である。吹出しは大気解放に向う方向を示し、吸込みは軌道に向う方向を示している。

現況構造では、B1F～B2Fを結ぶ2つの連絡階段で強風が確認されている。吸込みよりも吹出しの方が大きくなる傾向にあり、10m/s程度であった。出入口については4箇所とも比較的小さな値となっている。

b) 列車風解析

列車風気流解析は、計測時の状態を再現するため、計測時の実ダイヤを使用し、計測時間と同じ30分間の解析を行っている。解析モデルを図-5に示す。

表-2 現況構造最大風速一覧

測点	部位	風 向	最大風速(m/sec)	
			実測値	解析値
測点1	B1F～B2F 連絡階段1	吹出し	9.7	9.3
		吸込み	-6.1	-6.6
測点2	出入口	吹出し	3.7	3.9
		吸込み	-4.9	-2.5
測点3	出入口	吹出し	4.4	3.9
		吸込み	-5.5	-3.2
測点4	B1F～B2F 連絡階段2	吹出し	10.9	8.6
		吸込み	-9.0	-6.6
測点5	出入口	吹出し	4.1	3.7
		吸込み	-5.5	-3.0
測点6	出入口	吹出し	3.8	4.9
		吸込み	-4.7	-3.9

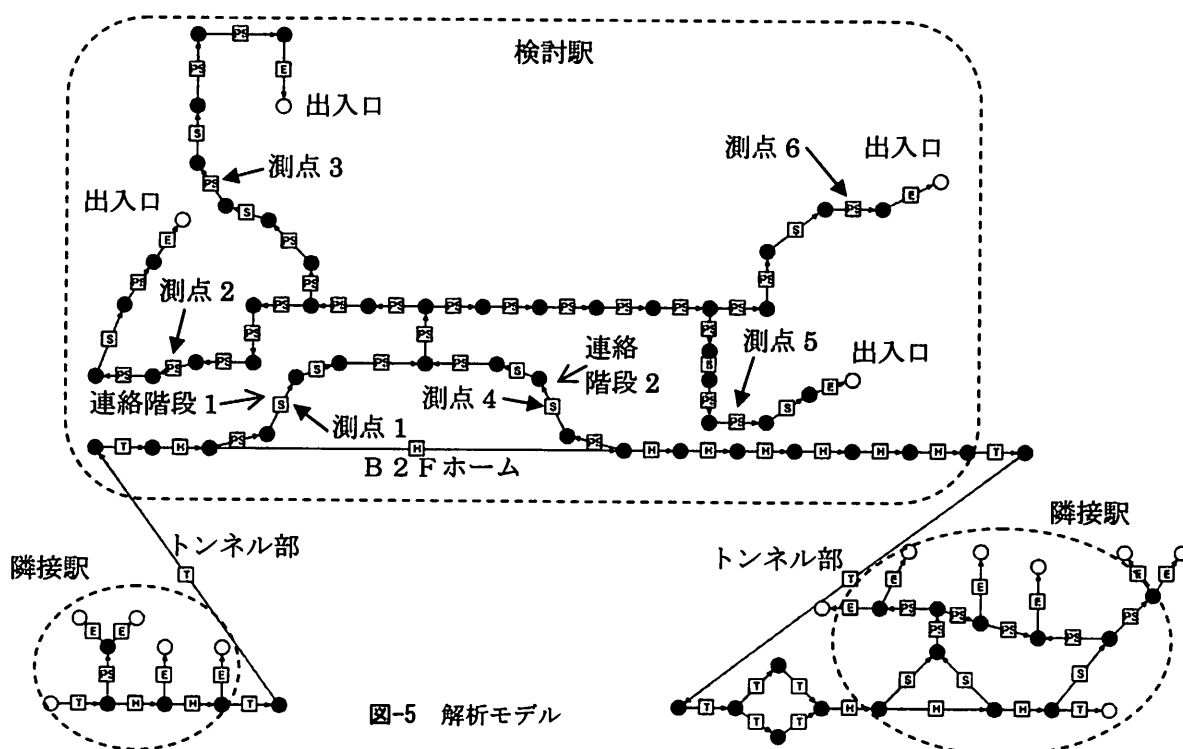


図-5 解析モデル

表-2 の解析値欄に解析で得られた各測点での最大風速を示す。解析上でも、連絡階段である測点1と測点4で強風が確認された。図-6に、2つの連絡階段（測点1、測点4）および1つの出入口（測点6）について実測と解析の波形比較例を示す。波線が実測波形で、実線が解析波形である。合わせて、列車風測定時の列車ダイヤも示している。

以下にこの結果から得られた特徴的な事項を示す。

・上下線列車の運行タイミング

ここで示した3つの波形とも、吹出し(+)のピークは、10:35付近と10:53付近で発生し

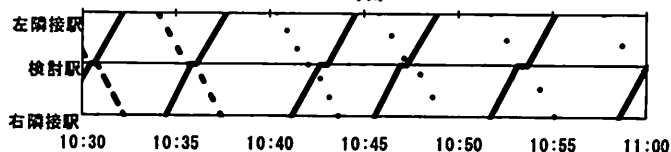
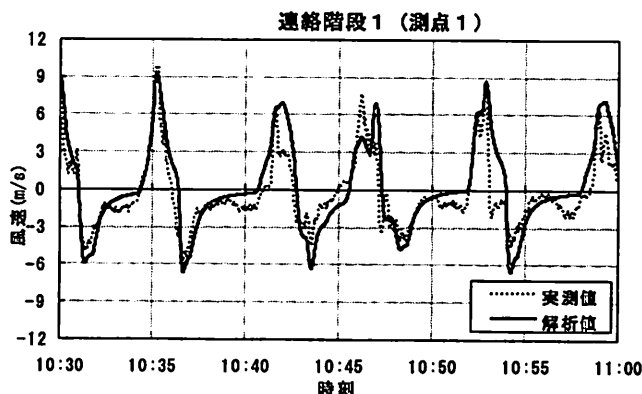


図-6(a) 風速波形比較

ている。列車ダイヤは、ちょうど上り線と下り線がほぼ同時に検討対象駅に進入している状況であることが分かる。つまり2つの列車がピストン状に検討対象駅に列車風を押し込んでいる最悪の状態となり、このタイミングで強い吹き出しの風が駅全体で発生していると考えられる。また、列車が検討対象駅を出るタイミングもほぼ同時であり、2つの列車の影響で強い吸込みの風が発生している。

・列車風ピーク時の列車位置

列車風のピークは列車が検討対象駅の手前、トンネル内に位置し高速で走行しているタイミングで発生しており、駅進入時には急激に落ちている。列車の速度や加速度と非常に関係があることが分かる。

・実測と解析との乖離

全体的には、解析波形は実測波形をよく再現できていると考えられるが、若干の乖離が見られる。これは、実際には、列車の運行速度やブレーキのタイミング等は各列車によって異なるのが現状である。そのため、解析と実測とでは乖離が発生している。また、列車風発生源から離れるほど、風速が小さいほど、乖離が見られる。これは解析誤差と考えられる。

実測と解析の乖離がどの程度であるかを評価するために、相関係数 r を求めた。基本式は以下の通りである。評価時間は本計測の30分間(10:30～11:00)とし、1秒刻みのデータ同士で相関係数 r を求めている。

$$r = \frac{\sum x y - \frac{\sum x \sum y}{N}}{\sqrt{\left\{ \sum x^2 - \frac{(\sum x)^2}{N} \right\} \left\{ \sum y^2 - \frac{(\sum y)^2}{N} \right\}}} \dots \dots \text{評価式(1)}$$

ここで、

r : 相関係数

x : 実測値

y : 解析値

N : サンプル数

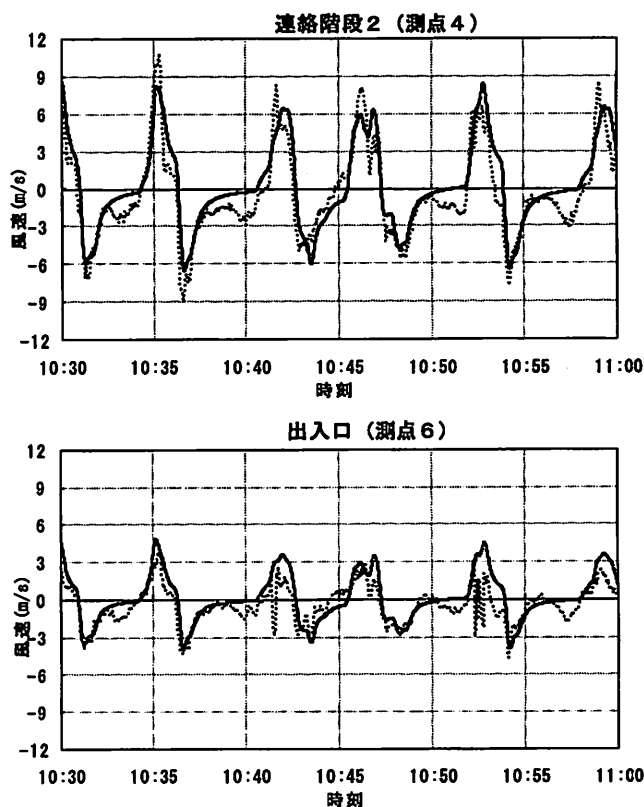


図-6(b) 風速波形比較

表-3 相関係数 r

測定部位	連絡階段1 (測点1)	連絡階段2 (測点4)	出入口 (測点6)
相関係数 r	0.882	0.922	0.803

得られた相関係数 r を表-3 に示す。2つの連絡階段とも、相関係数 r は0.8を大きく上回っており、全体的には解析は精度よく実測を再現できていることが確認できた。本解析ソフトは風が強いほど実測と解析との相関が増す特徴にあり、注目する部位ほど信頼度が高い。逆に出入口(測点5)のように風速が低くなるほど、また出入口等列車風発生源から遠くなるほど、相関係数 r は低くなっており、実測と解析の波形の乖離はこの値でも確認された。

(3) 将来構造での列車風検討

ここでは、将来構造駅に対する列車風の検討を示す。現況構造の検討で用いた解析モデルにB3Fを通る路線を追加し、2路線モデルで解析を実施した。

表-4 に将来構造の解析結果を対策前欄に示す。B2F～B3Fの連絡階段を連結することで、B1F～B2Fの連絡階段で発生している列車風は若干低下する傾向にあるが、B2F～B3Fの連絡階段で発生する列車風の風速は、風速10m/sを大きく超えるかなり強い風が吹くという結果となった。これは、B2Fを走行する列車による列車風の通り道が、改札階に繋がる連絡階段1と2の他に、B3Fへ繋がる連絡階段3と4が増えたため、列車風が分散し、連絡階段1と2の風速が減少したものと考えられる。

表-4 将来構造最大風速一覧

部位	風 向	最大風速 (m/sec)			
		現況構造	将来構造		実測値
			対策前	対策後	
B1F～B2F 連絡階段1	吹出し	9.3	7.0	7.1	7.7
	吸込み	-6.6	-5.1	-5.2	-4.5
B1F～B2F 連絡階段2	吹出し	8.6	6.6	6.5	5.9
	吸込み	-6.6	-5.1	-5.1	-5.0
B2F～B3F 連絡階段3	吹出し	-	16.0	7.5	7.5
	吸込み	-	-12.5	-5.8	-7.0
B2F～B3F 連絡階段4	吹出し	-	10.9	8.4	10.0
	吸込み	-	-13.4	-5.9	-7.4
出入口 (測点6)	吹出し	4.9	4.0	4.0	4.7
	吸込み	-3.9	-3.6	-3.7	-4.3

連絡階段3と4が大きく出ている主要因であるが、吹出しの場合、図-7に示すように、B2Fの列車が駅を出た時に白矢印の方向に列車風が発生する。さらにB3Fの列車が進入してくる時に黒矢印の方向に列車風が発生する。連絡階段3と4では、このタイミングで2路線の列車風が重なり合い、この干渉効果で大きな吹出しの風が生じていると考えられる。

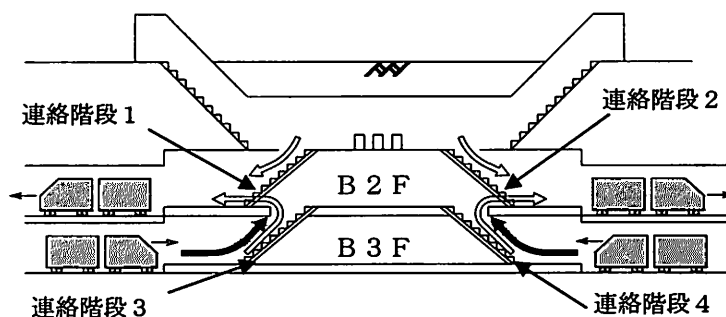


図-7 強風発生原因概念図

なお、吸込みの場合、B2Fの列車が進入し、B3Fの列車が出ていくタイミングで生じることとなる。

そこで、列車風緩和のための対策を行うこととした。B2F～B3Fの連絡階段の風速を低減させ、且つ、他の部位に悪影響を及ぼさないことを前提とした。一般的には軌道階から開口を設け、立坑などを築造し直接大気解放させてしまう方法がもっとも効果的であるが、用地確保が困難なことから、駅構内で対策せざるを得なかった。

図-8に対策位置と大きさを示す。開口の位置や大きさは、駅の施設物の関係、旅客流動への配慮、構築躯体の耐力などに考慮して決定し、合計5箇所とした。B2Fホーム部に床開口を3か所設け、B2F～B3Fの避難階段を連絡階段に変更し、B1F～B2Fの避難階段の扉はグレーチングとし、風が通る構造とした。

これらの緩和対策を解析モデルに組込んで、解析を行った結果を表-4の対策後欄に示す。B1F～B2Fの連絡階段、および出入口で発生する列車風の最大風速は、対策前と対策後でほとんど変化がないが、B2F～B3Fの連絡階段は最大風速が10m/s以下となり、緩和効果が確認された。

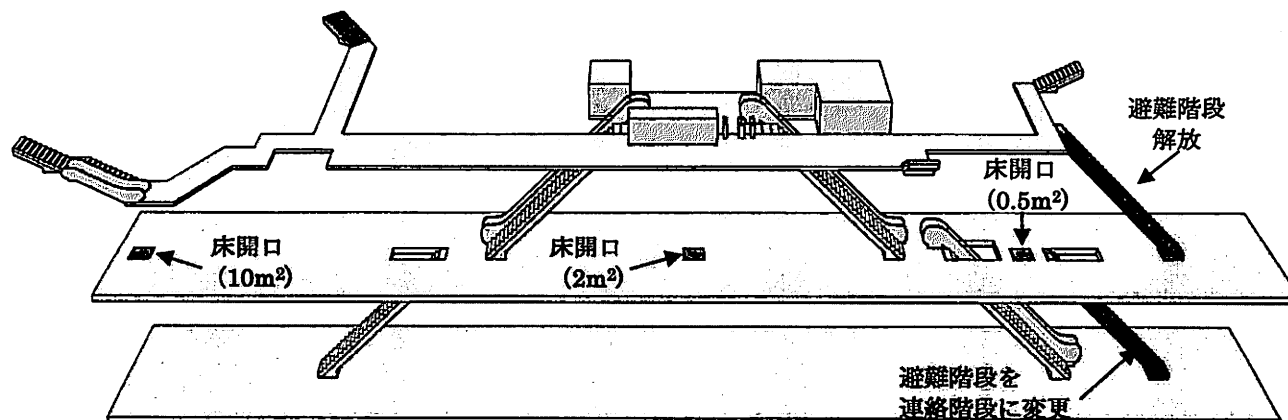


図-8 緩和対策実施位置

解析結果を踏まえ、緩和対策を実施した。B2F ホーム左端部床開口（10m²）と階段上床開口（0.5m²）を写真-3、写真-4に示す。

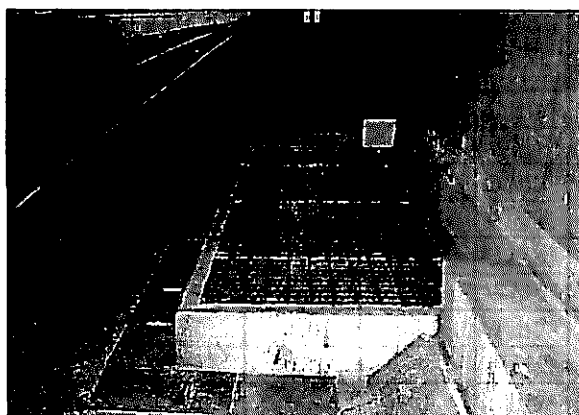


写真-3 ホーム端床開口

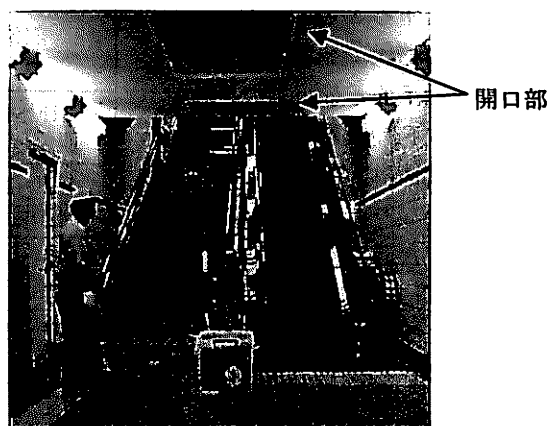


写真-4 階段上床開口

なお、緩和対策の効果を確認するため、再度駅構内で列車風の測定を実施した。その結果を表-3の実測値欄に示す。最大風速は、連絡階段4で解析値が8.4m/sに対し実測値は10.0m/sとなっており若干の乖離があるが、駅全体について評価すると風速は10m/s以下となっており、緩和対策の効果が検証できたと考えている。

4. おわりに

今回開発した列車風解析ソフトは地下鉄駅の列車風検討に特化しており、営業線の駅改良に対して検証を行った。全体的には実測を解析はよく再現できていたが、部分的には合わない部位もあった。この原因として、管路網のモデル化時の精度、計画ランカーブと実ランカーブとの差異、標準ダイヤと実ダイヤとの相違、摩擦係数等の各種係数値の設定などが挙げられる。また、緩和対策工も、用地確保の問題、駅構内施設物などの使用条件、構築物の耐力などの制約から有効な対策が取り難いのも実情である。

今後、更なる解析精度の向上、様々な緩和対策方法の立案などでこれらの課題を克服し、地下鉄駅構内の快適空間創造を目指して行きたいと考えている。

参考文献

- 1) 森井宜治：2007 年日本機械学会年次大会 トンネル内対向二列車の圧力分布(地下鉄系の場合)
- 2) 森井宜治・水島明彦・宇波邦宣：2008 年日本機械学会年次大会 地下鉄系の気流シミュレーション