

地下街の空気質の研究

— 地下鉄による気流への影響 —

Keywords

CFD解析 地下街
気流 移流拡散 空気質環境



DZ19201 山本 愛理

1. 研究の背景と目的

地下空間の空気・温熱環境を考える時、温熱感覚を測る要素として、気温、相対湿度、放射温度、気流速度的環境側の4要素と着衣量と代謝量の人間側の2要素がある。地下鉄の設計に伴い設計された地下街という地下空間は室内とは定義されていない。しかし、地盤に囲まれているという特徴があり、各所に空調が設置されているものが見られる。その地盤に囲まれているという特徴から温度、湿度はあまり変動がなく、利用者の着衣量と代謝量はあまり変動がないと予想される。このことより、利用者の熱的快適性などの各側面に大きな影響を与えるのは気流だと考えられる。

先ほども述べた通り、地下鉄の設計に伴って設計された地下街のような地下空間は室内とは定義されていない。出入口通路やトンネル端の開口が解放された半開放の空間である。また、列車の走行は地下鉄特有の列車による風を発生させ、地上と地下鉄との間の空気の交換を促進していると予測できる。

本研究では、列車が到着した時と発車した時の数秒間を熱流体解析ソフト(CFD)を使用してシミュレーション解析を行った。列車の到着、発車時の数秒間で、動く列車がどれほど地下街の気流へ影響するのかを把握することを目的として検討を行った。

研究対象

本研究は国土舘大学・オールドコーベカフェ・神戸商工会議所と共に換気シミュレーションを用いて研究を行う神戸の風プロジェクトの一環である。それに関連して神戸市にある地下街を本研究の対象地とする。研究対象の地下街では、列車による風と空調機による風が主な気流の原因だと本研究では解釈し、研究を進める。研究対象地下街の概要を表1、概略図を図1に示す。研究対象地下街はK駅とS駅の2つの駅間に設置されている。鉄道が走る地下2階部分の上の地下1階部分に鉄道線路に沿って作られ、細長い形状をしている。K駅周りの地下街(Kタウ

ン)とS駅周りの地下街(Sタウン)を結ぶ約300mの地下通路(中間通路)で構成されている。中間通路は現地調査時にはあまり人通りが多くなく、開業当初よりも中間通路の通行人数が減少している傾向にあると思われたが、2022年3月24日中間通路の広場が改装工事されたことより、今後は利用者が増加する傾向にあると予想される。

表1 研究対象地下街の概要

地下街名	開業年月	長手方向(m)	総面積(m ²)
対象地下街	S43.9	Sタウン	10,198
		中間通路	
		Kタウン	



図2 対象地下街の概略図



図3 研究対象地下街の様子

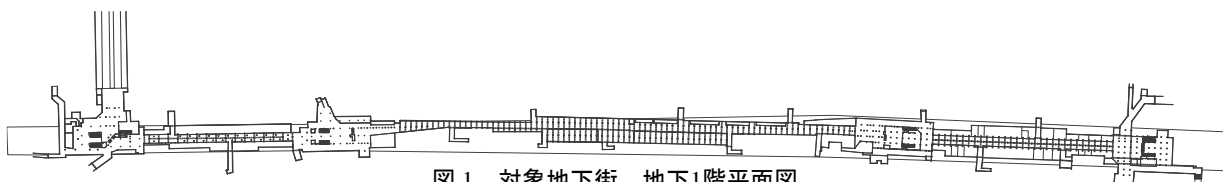


図1 対象地下街 地下1階平面図

2. 研究手法

2.1. 解析対象のモデリング

大まかな箇所はGoogle Mapよりトレースし、細部など、モデリングする上で不明だった箇所は現地で実測した。空調機の種類や箇所は現地調査より確認し、集めたデータをもとにCADソフトウェアを用いて建築図面の3次元化を行った。解析モデルの作成にGRAPHISOFT社のARCHICAD v24を使用した。3次元化した様子を図4に示す。作成したモデルを直接解析ソフトに取り込むことはできないため、データ受け渡し用にSTLフォーマットに変換した。

2.2 解析対象のCFD解析

本研究ではソフトウェアクレイドル社の熱流体解析ソフト「STREAM 2022.1」を使用した。

解析をする際に空調機による風の値などは固定する。変動する列車の速度の条件のみ変えて以下の2種類の解析を行った。

- 1) M駅(北側にある駅)、K駅(東側にある駅)方面から動いた列車がそれぞれS駅の地下1階と地下2階のホームで止まる(到着する)解析
- 2) 地下1階に止まっていた列車と地下2階に止まっていた列車がそれぞれS駅から動き出す(発車する)解析

本研究では気流の指標として、10,000個のマーカー粒子が移流拡散する発生点をx-y平面上で2つの列車の間、地下1階の床から1700mm上がったところに置く。発生点より拡散された粒子が列車の移動によりどれほど移動したのかを非定常解析を行い、その結果から気流の状態を把握する。非定常解析により列車が動き出してから40秒後(解析1)及び20秒後(解析2)の結果を求めた。しかし、後に記述する条件が複雑であることより、オーバーフローによる異常終了してしまうことが多かった。本研究では、解析時に起こったエラーにより、同じ解析を何度か行なっている。中でも後述する解析2は本論執筆時までエラーによる異常終了が直らなかつたため、エラーした中でも最も解析が進んだものを本論にて記す。

解析条件

列車は実際運転されているように、4車両を想定して動かす。解析1においてM駅方面からS駅に向かう列車を列車1、K駅方面からS駅に向かう列車を列車2、解析2においてM駅方面に向かう列車を列車3、K駅方面に向かう列車を列車4とする。それぞれの列車の速度を表2のように設定した。それぞれの現地調査によって研究対象における全ての吹き出し口と吸い込み口を確認し、吹き出し口はそれぞれから毎秒2mの風速となるように流量を設定した。エリアに応じて吹き出し口より流出した流量の合計が吸い込み口の合計の値と等しくなるように吸い込み口での流量を設定した。詳細を表3に記す。

解析領域及びメッシュ分割

規模が大きいことからメッシュの切り方も普通に単一ブロックのみで切るとソフトで計算できる範疇を越える。従って、メッシュ数を減らし計算コストを削減するため、マルチブロックを用いてメッシュを生成した。グリッド分割を設定し、粗分割した後はそれぞれのメッシュが実際にどのように切られているのか、一本一本確認しながら編集する。このような操作を行い、分割された要素数は解析不可能な1億以上から30,164,159にまで減らした。



図4 モデリングした研究対象地下街

表2 列車の速度

列車1		列車2	
t [s]	v [m/s]	t [s]	v [m/s]
0	0	0	0
0.05	0	0.05	0
0.06	-10	0.06	-10
2.86	-10	6.06	-10
18.86	0	30.06	0

列車3		列車4	
t [s]	v [m/s]	t [s]	v [m/s]
0	0	0	0
8	5	16	10
16	8	15	12
20	8	-	-

表3 空調パネルの流量値

場所	名前	パネル面積[m ²]	流量[m ³ /h]	数[個]	総流量[m ³ /h]	流量差
A線ホーム	ブリーズライン	0.1	700	72	50400	0
	300角	0.09	-3600	14	-50400	
	ブリーズライン	0.1	700	8	5600	
	アネモ	0.25	1800	28	50400	
S駅西口改札	300角	0.09	648	1	648	0
	ドアガラリ	0.16	-1062.15	2	-2124.3	
	300角	0.09	-708.1	1	-708.1	
	S西sui01	6.9	-48858.9	1	-48858.9	
	S西sui02	0.72	-4956.7	1	-4956.7	
	アネモ	0.25	1800	22	39600	
Sタウン	S横	0.015	-247.5	4	-990	0
	ドアガラリ03	1.98	-19305	2	-38610	
	アネモ	0.25	1800	23	41400	
S駅東口と中間通路1	トイレ入り口	3	-8280	2	-16560	0
	東sui01	1.08	-3036	1	-3036	
	東sui02	0.54	-1380	1	-1380	
	ペント	0.1	-276	35	-9660	
	ドアガラリ04	3.96	-10764	1	-10764	
	400角	0.16	1157	24	27768	
S駅ホーム	ブリーズライン	0.1	-534	52	-27768	0

3. 解析結果と考察

本研究においては、列車が到着した時と発車した時の数秒間を熱流体解析ソフト(CFD)を使用してシミュレーション解析を通し、地下街の気流についての検討を行った。得られた結果を以下に示す。

3.1. 解析1の結果

マーカー粒子の様子

列車が動き始めてから少しずつ気流に乗り、南側へと移動している傾向があることが見られた。列車2が減速し始める $t=6.0\text{sec}$ 時点で柱に衝突したが $t=8.75\text{sec}$ 時点で分岐しながらも気流に乗って南方向に移動し、 $t=10.0\text{sec}$ 時点で再び同じ気流に乗るように合流しているような光景が見られた。 $t=12.5\text{sec}$ にはS駅西口改札を通過し、解析が異常終了する $t=17.46\text{sec}$ には初期位置から約14m移動した(図5)。

気流

S駅の西口改札と東口改札を結ぶSタウンでは吸い込み口以外の部分で風速が 1m/s を超えるような箇所はホーム全体を通して見られなかった。列車が動く直前と直後での大きな差異は見受けられなかったが、東口側から流れる気流と西口側から流れる気流がぶつかる地点があった。これを地点Aとする。地点Aが直近の出口の東側であったのが、直近の出口の東側と西側の両方に見られるようになった。 $t=2.8\text{sec}$ では、直近の出口の西側の1箇所になった。 $t=3.0\text{sec}$ には再び直近の出口を挟んで西側と東側の2箇所になった。挟まれた気流は直近の出口に向かうように流れた。地点Aが1ヶ所の時よりも 0.5m/s 程度流速が大きくなるという結果が得られた。Sタウンの西側、東側とも入り口付近での流速が大きくなるのは $t=6.0\text{sec}$ の時点からで、最大 1m/s 程度になった。西側から入る流速は、北の出口付近の吸い込み口へと流れ、出口を通り過ぎた後は小さくなった。一方東側からSタウンに入ってきた気流は、入り口の 1m/s を最大にSタウンの中央へと進むにつれて小さくなり、歩行者にはほとんど感じにくい程度の流速が流れる結果になった。

中間通路での気流は解析1全体を通して、あまり大きな変化は見られず、流速の大きさは 0.1m/s 程度であった。一貫して流速の向きは中間通路から東口改札に最も近い出口からS駅東改札口の方に流れていることが確認され、吸い込み口周りでの気流が目立つ結果となった。

3.2. 解析2の結果

マーカー粒子の様子

列車が動く直前の $t=0.5\text{sec}$ 時点までは、粒子は初期の位置からあまり動いていないように見られたが、少しずつ気流に乗りながら移動した。列車3の加速度が変化すると共に大きくなった流速に乗って移動したことが観測された。柱にも衝突せず、分散せずに北へ移動し、 $t=20.0\text{sec}$ の時点では初期位置よりも約12m移動した。 $t=20.0\text{sec}$ の時点での粒子の位置を図7に示す。

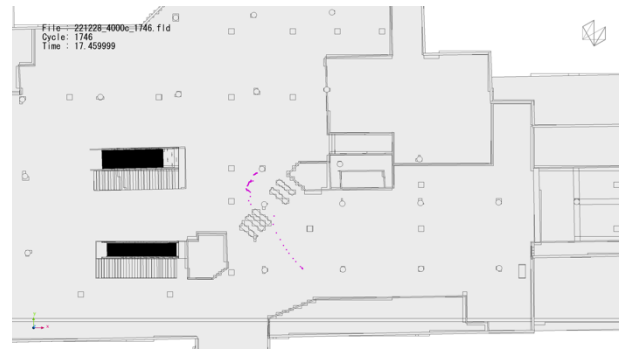


図5 解析1 マーカー粒子の位置 [t=17.46]

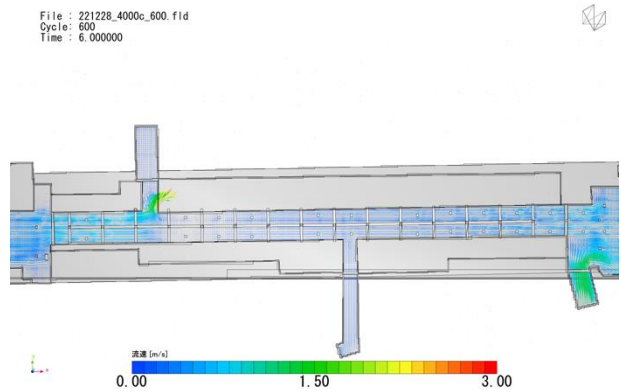


図6 解析1 6.0秒後の流速 (Sタウン)

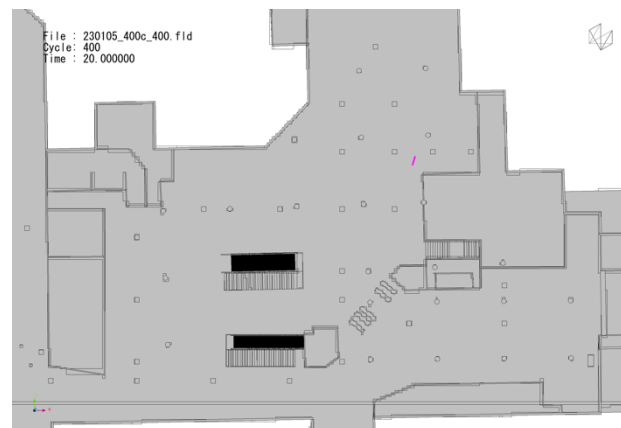


図7 解析2 マーカー粒子の位置 [t=20.0sec]

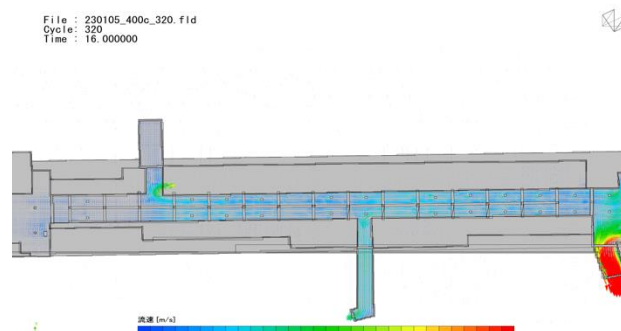


図8 解析2 16.0秒後の流速 (Sタウン)

気流

S駅の西口改札と東口改札を結ぶSタウンでは吸い込み口以外の部分で風速が1m/sを超えるような箇所全体を通して見られなかった。列車が動く直前と直後での大きな差異は見受けられなかった。東口側から流れる気流と西口側から流れる気流がぶつかる地点がSタウンから南側の出口の東側にあったが、 $t=16.0\text{sec}$ の時点では全体的に流速は東から西へと流れるようになり、無くなった(図8)。列車4が過ぎ去った $t=20.0\text{sec}$ の時点で再びSタウンの流速はあまり感じられなく程度になった。

S駅西口改札よりも東口改札の方が一貫して流速は大きく、列車4が過ぎ去る $t=16.0\text{sec}$ の時点では階段の流速が8.0m/s、出口の流速が4.0m/sとなった。S駅西改札口は $t=8.0\text{sec}$ 時点より改札内の流速が大きくなる傾向が見られ、一貫して地下1階のホームの方向へと流速が向いていた。

中間通路での気流は解析1と同様、解析2全体を通してあまり大きな変化は見られなかった。

3.3. 解析1に対する考察

気流に乗ったマーカー粒子が解析終了時に真っ直ぐ南向きに移動せず、南東方向にある改札の外にまで移動したという結果から、マーカー粒子は列車1による気流だけでなく列車2の影響も受けたと考えられる。移動した距離をx成分とy成分に分解して考えると、列車2よりも列車1の影響を大きく受けたということが示唆される。

Sタウンも中間通路もあまり大きな気流の変化が見られなかったのは、S駅の西改札口と東改札口の出口が大きな吸い込み口の役割を果たしたためだと解釈できる。

S駅西口改札周りには地下1階では列車1が、地下2階には列車2が近づき、停車した。そのため、西口改札周りに少なくとも3m/s以上の気流が流れると予想したが、解析結果では2m/s以上の流速は観測されなかった。列車1の影響で大きくなった流速が改札まで届くには距離が長かったことが要因の一つだと考えられる。また、列車2が停止する前に流速は小さくなったため、階下より気流が流れるのではなく地下1階より階段を通り地下2階へと気流が流れたことも要因の一つだと推測される。

3.4. 解析2に対する考察

マーカー粒子が広い範囲へ拡散しなかったことから解析開始から発生が終了する10秒間、発生点での流速の向きは変化しなかったと考えられる。また、粒子の密度が比較的变化しない状態で移動したことより、流速が場所によって大きく変化しなかったと推測できる。それは流速ベクトルからも確認できた。一方、粒子が単に北上したのではなく、微妙に東側へと移動した。これにより、粒子は列車4による影響を少し受けていると考えられた。しかし、階下より観測された最大1.5m/sの気流の向きが北東方向だったため、どちらの列車の方が影響を与えていたかまでは把握し難い部分である。

一貫してSタウンにはあまり大きな流速が見られなかった。流速ベクトルの結果より、S駅西口改札からは、その南にある出口に空気が流れ、東口改札からは、その南西にある出口に空気が流れたためだと考えられる。

S駅西改札口は $t=8.0\text{sec}$ 時点より改札内の流速が大きくなる傾向が見られた。これは $t=8.0\text{sec}$ 時点で階下より、上向きの流速が大きく見られたためと考えられる。

4. 結論と今後の課題

4.1 結論

本研究は、列車の到着、発車時の数秒間で、動く列車がどれほど地下街の気流へ影響するのかを把握することを目的として検討を行った。列車が到着する解析、列車が発車する解析共に地下1階と2階大きく流速の最大値が異なった。どちらの解析においても大きな流速は改札口近辺の出口へと流れたことで、地下街の気流は大きく変化しなかった。反対に、改札口周りに複数の出口があることは重要だと考えられる。地下街や中間通路にはあまり大きな気流は流れなかったが、改札口近辺の出口に流れきらなかった気流は吸い込み口にて地下街に流れることを防いでいたように見受けられた。

4.2 今後の課題

本研究は解析時間の関係より、本来の地下街の大きさより小さい領域での解析を行った。さらに、解析1が本論執筆時まで異常終了したまま終えてしまった。今後の課題として、以下の検討が必要と思われる。

解析1においてはメッシュの精度、連結ブロックの境界線での移動物体の干渉具合をより検討する必要がある。

両解析において、マーカー粒子は気流のつて移動したが、あまり大きな流速の気流に乗ったところは観測されなかった。予測に反して大きな流速が観測されたS駅東口階段に発生点を置いた場合を考慮する必要があると思われる。

5. 参考文献や註

参考文献

- 1) 西村研究室一科戸の風プロジェクト
<http://www.aero.ds.shibaura-it.ac.jp/shinatonokaze/index.html>,
2022年9月1日閲覧
- 2) 『知られざる地下街』歴史・魅力・防災、ちかあるきのスズメp.14, 90, 91, 著：廣井悠、地下街減災研究会
- 3) メトロこうべエリアマップ
<https://metrokobe.jp/area>, 2022年11月17日閲覧
- 4) 福代和宏：地下鉄の風, 山口大学, 2019.3
- 5) 福代和宏：地下空間の気流・温熱環境予測手法に関する研究(1), 空気調和・衛生工学会論文集No.61, 1996.4

謝辞

本研究は、(一財)大成学術財団による2021~2022年度 研究助成「新型コロナウイルス対策としての換気シミュレーションによる室内気流の可視化及び性能評価基準の提案(研究代表者:西村直也)」に基づいて行われた。ここに謝意を表す。