

博士（工学）学位論文

地下駅構内の列車風による  
冷房負荷推定に関する研究

2020 年 3 月

木村 健太郎

---

## 目次

学位論文題目：地下駅構内の列車風による冷房負荷推定に関する研究

### 第1章 序論

1.1 序	1-1
1.2 東日本旅客鉄道の消費エネルギー削減の取り組み	1-2
1.3 研究目的	1-4
1.4 既往の研究・文献調査	1-5
1.5 地下駅に関する各種規制	1-6
1.6 論文構成	1-7
1.7 論文フロー図	1-8
1.8 用語	1-9
1.9 既往研究と本研究の位置付け	1-10
第1章に関する参考文献	1-11

### 第2章 地下駅の冷房負荷算定に関する課題

2.1 序	2-1
2.2 設計条件と実負荷の乖離	
2.2.1 総武線地下駅の建設当初と現在の諸条件の違い	2-2
2.2.2 総武線東京駅の開業時と現状の設計条件	2-2
2.3 汎用シミュレータの課題	2-5
2.4 地下駅を対象とした場合のCFD解析の課題	2-6
2.5 まとめ	2-7
第2章に関する参考文献	2-8

---

### 第3章 地下駅温熱環境の実態把握

3.1 序	3-1
3.2 地下駅環境実測	3-2
3.3 隧道内空気温湿度	3-7
3.4 地下駅列車風	3-9
3.5 新日本橋駅の実態に即した負荷要素の推定	
3.5.1 列車風負荷	3-19
3.5.2 列車放熱負荷	3-21
3.5.3 隙間風負荷	3-22
3.5.4 人体発熱負荷	3-23
3.5.5 負荷内訳	3-23
3.6 まとめ	3-25
第3章に関する参考文献	3-26
第3章に関する既発表文献	3-27

### 第4章 ブロックの熱収支モデルに基づく負荷計算法

4.1 序	4-1
4.2 ブロックモデルの活用	4-2
4.3 ブロックモデルの概要	4-3
4.4 ブロック分割	4-8
4.5 入力パラメータ	4-9
4.6 列車風風量	
4.6.1 隧道内障害物のモデル化	4-10
4.6.2 隧道内の圧力損失モデルの一般性の確認	4-13
4.6.3 列車風の風量推定	4-14
4.7 ブロック間の交換空気量	
4.7.1 列車風による水平面空気交換量の検討	4-15
4.7.2 空調システムによる鉛直面交換空気量の検討	4-17
4.8 隧道内空気温湿度	
4.8.1 隧道内空気温度の予測式	4-19
4.8.2 時刻別の隧道内空気温度の推定	4-28
4.9 列車放熱	4-30
4.10 排気口の排熱割合	4-32
4.11 まとめ	4-34
第4章に関する参考文献	4-35
第4章に関する既発表文献	4-36

---

**第5章 本計算手法の精度検証**

5.1 序	5-1
5.2 島式1面2線駅	5-2
5.3 島式2面4線駅	5-3
5.4 まとめ	5-5
第5章に関する既発表文献	5-6

**第6章 総括**

6.1 全体の総括	6-1
6.2 今後の展望と課題	6-3

**謝辞****論文要旨（和文）****論文要旨（欧文）****研究業績一覧**

# 第 1 章

## 序論

## 第1章

### 序論

#### 1.1 序

国内のエネルギー消費は、2004年度をピークに減少傾向となっている（図1.1）<sup>1)</sup>。これは、製造業の省エネルギーの進展や産業構造の変化、鉄道や自動車など輸送効率の改善など、産業部門や運輸部門のエネルギー効率の改善によるものとなっている。一方、家庭部門や業務他部門を含む民生部門のエネルギー消費割合は年々増加し、国内の全消費エネルギー量の約30%を占めるに至っている。

更なる消費エネルギーの削減が求められる中、民生部門に含まれ本論文の研究対象となる地下駅は、日射の影響が少ないため負荷変動も少ない施設であるが、時間帯によって高い人員密度であり、それに伴う換気によるエネルギー消費が非常に大きい施設となっている。

ここで、地下駅は、消防法による換気基準はあるものの建築基準法上は適合外の扱いとなっており、建築物における衛生的環境の確保に関する法律（通称ビル管理法）で定められた空気環境基準の適用を必要としている特定建築物には含まれていない。しかし、鉄道各社は乗降客の快適性を向上させて利用客数の増加を図るため、ビル管理法に準拠した温湿度条件を各々設定している。なお、国内では暑熱環境の改善を図るため、一年間のピーク負荷は夏期の冷房負荷となっている地下駅が多い。

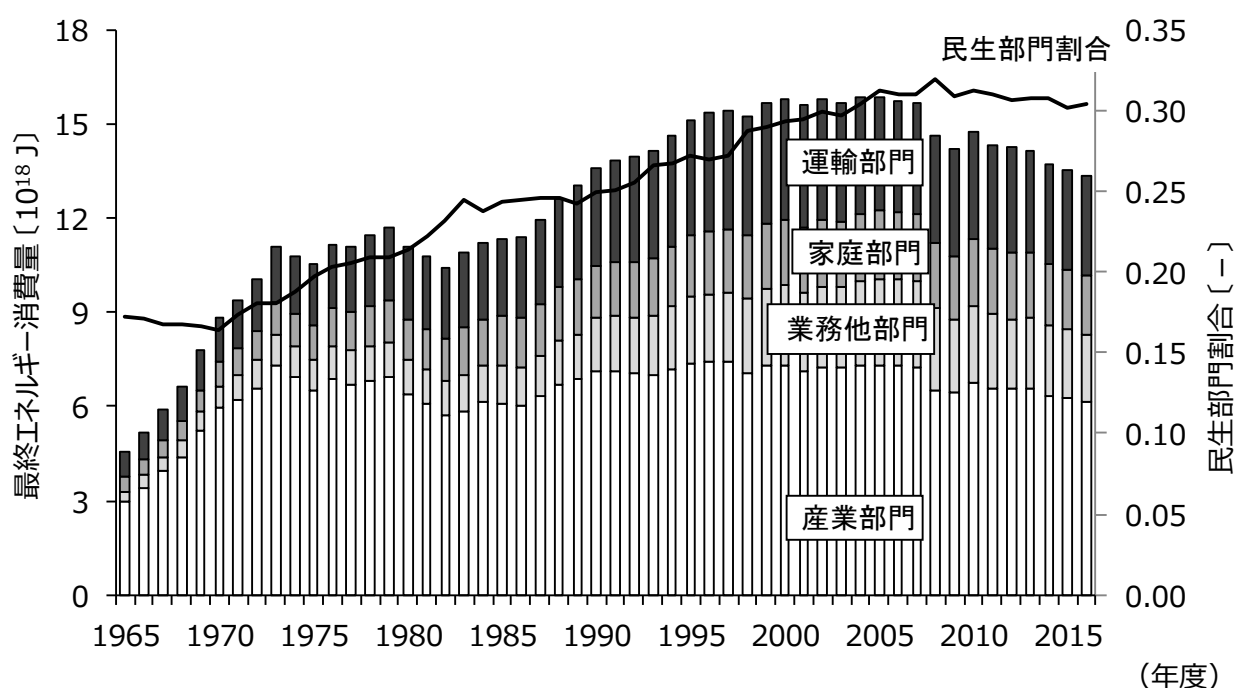


図1.1 最終エネルギー消費と民生部門割合の推移

## 1.2 東日本旅客鉄道の消費エネルギー削減の取組み

2019 年時において、営業規模や輸送人員が世界最大<sup>2)</sup>となっている東日本旅客鉄道では、鉄道事業の二酸化炭素排出量を 2030 年度までに 2013 年度に比べ 40%減らす目標を掲げている。図 1.2 に東日本旅客鉄道の消費エネルギーの構成<sup>3)</sup>を示す。全消費エネルギーの約 8 割が列車運転用となっており、エネルギー削減対策が積極的に続けられているが、目標達成のため約 2 割を占める駅や車両センター等においてもエネルギー消費量の削減が求められている。

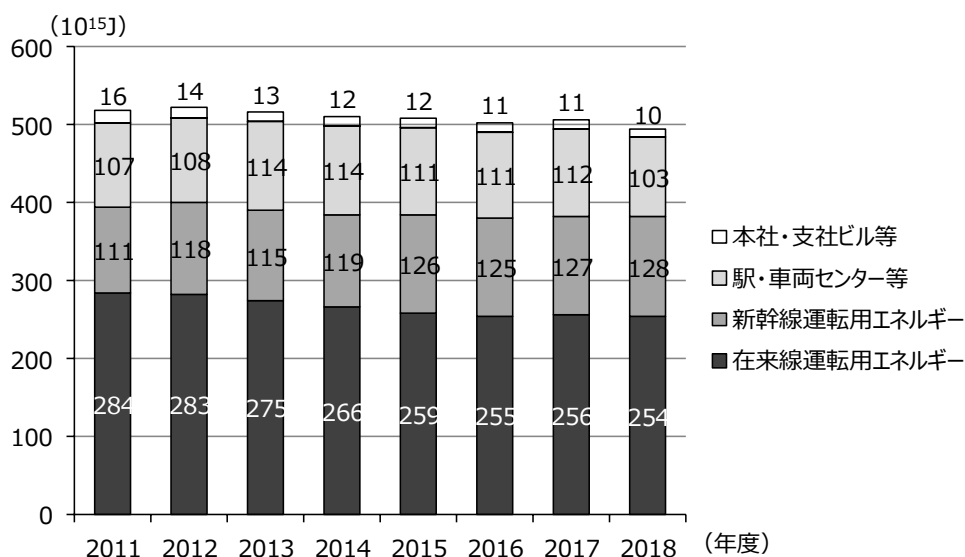


図 1.2 東日本旅客鉄道の消費エネルギーの構成

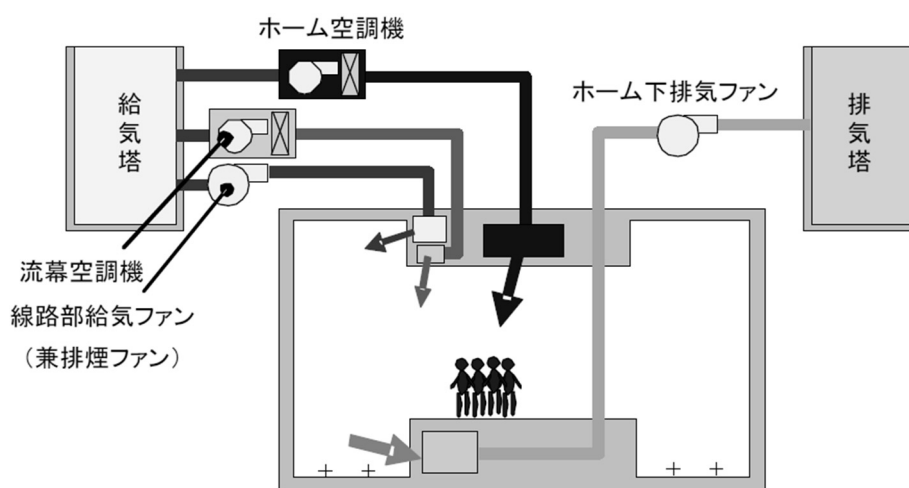


図 1.3 新橋駅・新日本橋駅・京葉線東京駅ホーム空調方式

これまで東日本旅客鉄道管轄の地下駅では、ホーム温熱環境や冷凍機生産熱量の調査・分析により空調システムの省エネルギー化を図ってきた。図 1.3 に設計当初の新橋駅・新日本橋駅・京葉線東京駅のホーム空調方式を示す。昭和 40 年代に設計されたこの空調方式は近年まで採用され、当時の列車が抵抗制御であった

ことから以下3つの対策により、ホームの負荷軽減を図っていた。

- ①ホーム天井からの冷氣供給
- ②軌道部では外気を供給し車両からの熱気をホーム下から排出
- ③ホーム端に沿って流幕状に外気を吹出

ここで、設計当初は設計条件に想定値や模型実験に頼らざるを得ない制約があったが、近年では解析用のサーバやシミュレーション技術が高度化しており、数値流体解析（以降CFD解析と称す）により空調システム毎の温熱環境の比較検証を容易に行うことができる。2009年から2011年に東日本旅客鉄道㈱で実施された地下駅の空調システム最適性の研究では、列車が抵抗制御から回生制御に代わった影響もあり、実測やCFD解析により軌道部の換気や流幕換気のアエカーテン効果が発揮できないことが確認され、2010年より流幕空調機と軌道部給気ファンを停止し、省エネルギー化を図っている。

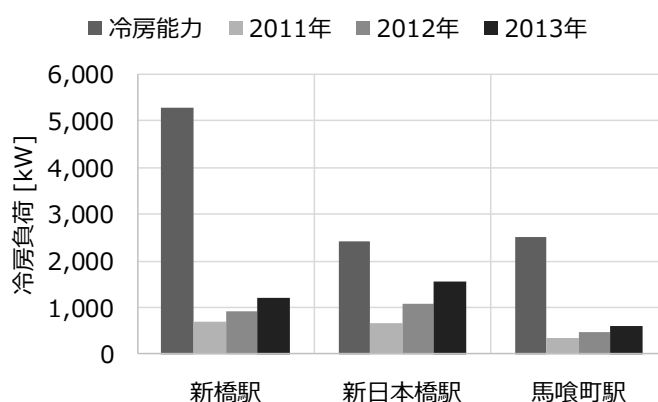


図 1.4 総武快速線地下3駅の空調用熱源設備の冷凍能力とピーク負荷

図 1.4 に総武快速線新橋駅、新日本橋駅、馬喰町駅の 2011 年から 3 年間の夏季ピーク負荷について、各駅に設置されている空調用熱源設備の冷房能力を比較して示す。2010 年に流幕と軌道部の換気を無くした効果もあり、空調用熱源設備が生産する熱量は夏期ピーク負荷時においても全設備容量の半分程度となっている。なお、2011 年は、東日本大震災後の原子力発電所の稼働停止を受け、各駅で大幅な節電対策が行われたため最も低い値となっている。2012 年以降は電力需給の改善に伴い、忍耐を伴った節電対策から快適性を考慮した運用にシフトしている。四万十市で当時の国内最高気温となる 41℃を記録するなど、全国的に猛暑となった 2013 年は、3 年間でピーク負荷が最も高くなっているが、それでも総武快速線の各駅は現状の設備容量に対し、ピーク時の生産熱量は非常に少なく、冷凍機は効率の悪い低負荷で運転している。この理由としては、前述した車両の軽量化や電力回生ブレーキの普及など、列車の高効率化による列車放熱量の減少に加え、地下水揚水規制に伴う地下水位上昇など、建設当初想定していた状況が現在の状況と異なることが一因と考えられ、現状に即した負荷解析手法の見直しが必要となっている。

### 1.3 研究目的

現状に即した負荷解析手法の見直しを図る上で、地下駅の空調負荷で一般建物との最大の違いは、列車運行に伴い発生する気流によりホームに持ち込まれる負荷(以降列車風負荷と記す)である。列車風負荷を推定するためには、トンネル(以降隧道と称す)からホームへ流入する空気温湿度と風量の予測が必要となる。ここで、既存駅の改修を目的とした設計であれば、隧道から流入する空気の実測値を活用する方法が適しているが、新設の駅舎を建設する際には、隧道内温湿度の予測は困難である。

列車風の風量に関しては、駅舎の構造や列車進入速度など、列車風に寄与する多くの要素が駅毎に異なり、これを予測するための方法としては CFD 解析の利用が考えられる。地下駅は隧道を含めると数 km に及ぶ巨大建造物であるが、近年のコンピュータ性能の向上に伴い実用的な解析が可能となっている。ただし、地下駅の CFD モデリングに関連する報告は少なく、実際の駅舎設計に CFD 解析が生かされていない場合が多い。

そこで本研究では、地下駅の冷房負荷の中でも特に予測が難しい列車風負荷に着目し、以下について明らかにすることを目的とする。

- ①列車を移動物体とした CFD 解析のモデル化方法
- ②列車風がホーム階の空調負荷に与える影響
- ③隧道から流入する空気温湿度の予測方法
- ④簡易で予測精度の高い新たなホームの冷房負荷推定法の構築

なお、機器更新を控えた地下駅では、既存設備の稼働実績やホームの温熱環境を把握し、設備容量の適正化を図ることは可能である。しかし、空調設備の設置されていない地下駅や国内外を含めた新規地下駅の冷房負荷を簡易に推定できれば、設備容量のコストミニマム設計や効率的な運用改善を事前に検証でき、地下駅の更なる省エネルギー化に役立てられると考える。

## 1.4 既往の研究・文献調査

地下空間の気流・温熱環境の予測について体系的に整理された福代の論文<sup>4)</sup>を参考に、既往のマクロモデル（換気回路やゾーンモデルと呼ばれるもの）の研究について概要を述べる。

地下空間が「冬暖かく、夏涼しい」のは地下鉄開設初期においてである。現在は地下鉄構内の高温化が進み、ラッシュ時の混雑も加わって夏は暑く不快な環境となっている。戦前、庄司は構内の気温の上昇の原因を乗客の増加および電力消費量の増加に伴う内部発熱であると述べている<sup>5)</sup>。その後、地下鉄構内の気温は年々上昇し、地盤の吸放熱効果や列車風などの数学モデルを用いた温熱環境解析が始まった。

宮本ら<sup>6)</sup>は、地下鉄がなぜ熱くなったかの原因と仮定を分析している。淀屋橋停留所における空気温度は、昭和 10 年には外気より 2.7℃低い、昭和 16 年には外気より 0.7℃高く、昭和 35 年には 3.7℃高くなったと記されている。暑さの原因は換気不足と壁体の蓄熱であり、地下鉄を冷やす一番実用的な方法は、非常に大量の換気をする事との記述がある。

雑賀ら<sup>7)</sup>は、営団地下鉄銀座線の駅ホーム部の気温が昭和 26 年以降、0.35℃/年の上昇であることを示している。また、地下鉄道の温度変化を予測するため、プラットホームの完全混合を想定したマクロモデルで解析し、地盤には地下 8m の地盤温度を 16℃と仮定し、換気量には実測値を用いている。この結果、温熱環境の支配因子として、列車からの内部発熱と換気量を特定した。

コンピュータの利用は、より厳密な計算を可能としている。吉田ら<sup>8)</sup>は、列車放熱、車両冷房、壁の吸熱、列車風、隧道換気による負荷をそれぞれ算出し、地盤吸放熱効果のレスポンスファクター法による解析を提案している。下田ら<sup>9)~12)</sup>は、周囲地盤の二次元温度分布を計算して地下鉄構内温湿度を予測する有限差分法による解析を提案している。

列車風については、風量の見積もりが困難で、冷房負荷計算が始まった当初は 1 列車あたり 1,000m<sup>3</sup> という実測による概算値<sup>6)</sup>が用いられていたが、模型実験や理論的な数学的モデルによって予測が可能となった。

松平ら<sup>13)</sup>は、長さが約 30m の隧道模型を構築し、模型電車で発進から停止に至る運動をさせて、列車速度と列車風速度、および空気吐出量の関係を実験的に求めた。

森井ら<sup>14)</sup>は、地下鉄の風が誘起される機構についてゆらぎ比速度理論を提案し、運動する列車近傍における微視的な気流密度、速度のゆらぎの振る舞いを理論的に導出した。

一方、アメリカでも運輸省の指導による研究が行われ、SES (Subway Environment Simulation)<sup>15)</sup>が温熱環境予測手法として体系的に纏められた。SES は、地下鉄における human criteria の確立を目指して、旅客の行動特性を考慮した温感指標 RWI・HDR を示している。完成後も改良が加えられ、2019 年時点において世界で最も普及した地下鉄構内環境予測シミュレータとなっている。

日本でも、東京都地下鉄 12 号線の建設を契機に、東京都地下鉄建設株式会社の主導によって、地下鉄構内の温熱環境予測手法が纏められた<sup>16)</sup>。これは、SES 以降の知見として、森井らの列車風理論や従来の地盤モデルに地下水の影響などが加味され、New SEAS と呼ばれている。

この他、吉田ら<sup>17)</sup>は、冷涼な札幌市の地下鉄について、夏期冷房装置の要・不要の検討と冬期廃熱利用を有効に行うためのシステム検討のためのシミュレーション方法を提案している。また、近藤ら<sup>18)</sup>は、CFD 解析によりシャフトを利用した自然換気とホームドアの有効性を提案している。

---

## 1.5 地下駅に関する各種規制

### (1) 消防法

消防法令では、法第17条に係る消防用設備等の設置規制が適用されるため、延床面積及び収容人員等に応じて排煙設備等の設置が義務付けられている。

東京都においては、平成15年2月の韓国大邱市の地下鉄火災を契機として、平成16年10月、火災予防条例等の一部改正が行われ、地下駅舎の防火安全対策の強化が図られている。

### (2) 建築基準法

建築基準法では、改札内のコンコースやホーム等を建築物として取り扱っていないため、法令の規制対象外となっている。

### (3) 鉄道に関する技術上の基準を定める省令（鉄道省令）

平成13年に制定された国土交通省令第百五十一号の鉄道省令は、鉄道の輸送の用に供する施設の技術上の基準を定めたものであり、具体的な内容は国交省の通達「鉄道に関する技術上の基準を定める省令等の解釈基準」に定められている。この解釈基準自体は強制力が無く、鉄道事業者は解釈基準を参考にして鉄道省令に規定する実施基準を策定し、地方運輸局長等へ届け出ることが義務付けられている。

鉄道省令の主なものは次の通りである。

#### 第29条（地下駅等の設備）

主として地下式構造の鉄道の駅であって地下にあるもの及びこれに接続する隧道並びに長大な隧道（以下「地下駅等」という。）には、必要な換気量に応じた換気設備を設けなければならない。ただし、十分な自然換気が得られるものにあつては、この限りでない。

2 地下駅等には、施設の状況に応じ、必要な消火設備、避難設備その他の火災対策設備を設けなければならない。

---

## 1.6 論文構成

本論文は以下の章により構成されている。

第 1 章では、序論として東日本旅客鉄道の消費エネルギー削減の取組みを概説し、本論文の研究目的を示す。また、既往の研究や文献調査、地下駅における温熱環境基準を説明する。

第 2 章では、東日本旅客鉄道の総武線における設計条件と実負荷の乖離を説明し、汎用シミュレータや CFD 解析の課題を説明する。

第 3 章では、地下駅温熱環境の実態把握のために行った地下ホームの温湿度測定、隧道内空気温湿度測定、地下駅の列車風測定結果を示す。また、新日本橋駅の実態に即した負荷要素を推定した。

第 4 章では、ブロックの熱収支モデルに基づく負荷計算法を提案し、ブロック分割や入力パラメータを説明する。また、入力パラメータの一部となる列車風風量を推定するための隧道内障害物のモデル化、ブロック間の交換空気量の CFD 検討、隧道内空気温湿度の予測式、列車放熱、排気口の排熱割合の算定方法を説明する。

第 5 章では、第 4 章で提案した負荷計算法の予測精度を検証するため、島式 1 面 2 線駅と島式 2 面 4 線駅にて監視データより得られた実測値と本負荷計算法による値との比較を行った。

第 6 章では、本研究の全体のまとめと、本研究の成果と今後の課題について示す。

以上をまとめ、次ページに本研究のフロー図を示す。

## 1.7 論文フロー図

博士学位論文題目：地下駅構内の列車風による冷房負荷推定に関する研究

### 課題の整理

#### 第1章 序論

- ・研究目的、既往の研究文献、地下駅的环境基準

#### 第2章 地下駅の冷房負荷算定に関する課題

- ・設計条件と実負荷の乖離
- ・汎用シミュレータの課題
- ・地下駅を対象とした場合のCFD解析の課題

### 実態の把握

#### 第3章 地下駅温熱環境の実態把握

- ・地下駅ホームの温湿度
- ・隧道内空気温湿度
- ・地下駅列車風
- ・新日本橋駅の実態に即した負荷要素の推定

### 負荷計算法の検討

#### 第4章 ブロックの熱収支モデルに基づく負荷計算法

- ・ブロックモデルの概要
- ・入力パラメータ
- ・列車風風量
- ・ブロック間の交換空気量
- ・隧道内空気温湿度
- ・列車放熱
- ・排気口の排熱効率

#### 第5章 本計算手法の精度検証

- ・島式1面2線駅
- ・島式2面4線駅

### まとめ

#### 第6章 総括

- ・全体のまとめ、今後の課題

---

## 1.8 用語

### (1) VVVF インバータ制御

電気の強さをインバータ制御で可変する制御。従来の抵抗器制御と比較し、排熱量の削減と省エネルギー化を実現。

### (2) 抵抗器制御

抵抗器制御は、始動抵抗を段階的に用意し速度制御に応用したもので、古くから電車に採用されているが、抵抗による電流の損失や放熱が大きい。

### (3) 回生ブレーキ

ブレーキをかけた時に出るエネルギーを電気に変え、その電気を他の電車に使えるようにした仕組み。

### (4) 流幕空調

流幕空調とは、空調ゾーンであるホーム部と換気ゾーンである軌道部をエアカーテンで遮断し、ホーム部の冷房効果を高めるための空調システムである。

### (5) 直接捕集率 (DCE:Direct Capture Efficiency)

近藤らにより提案された指標であり、一般に排気フードなどの捕集性状を評価するのに用いる。地下駅では、排気口の捕集率を高めることで、汚染質・熱を速やかに除去することが重要である。

---

## 1.9 既往研究と本研究の位置付け

地下駅の熱負荷計算に関する研究は、これまで数多く報告されている。既往研究と本研究の位置付けを以下に示す。

### (1) 地下駅構内の空気温湿度に関する研究

地下駅ホームや隧道内の空気温度については、下田らの有限差分法による温熱環境解析や吉田らによる地盤吸放熱効果のレスポンスファクター法による解析が提案されている。福代らにより換気回路網と CFD 解析を連成させた地下駅の気流・温熱環境予測手法が提案されている。また、近藤らは移動物体 CFD 解析により列車風の影響を組み込んだ上で、駅構内の温熱・空気環境を検討している。

これらの研究では、コンピュータの熱流体解析により温熱環境を予測する提案がなされている。本研究では、実務的な計算時間で精度良く予測することを目的とするため、隧道内空気温度の予測には複数個所の隧道内空気温湿度を長期間計測し、その実測データと隧道長から隧道温度を簡易に予測する方法を提案している。

### (2) 列車風の風量に関する研究

列車風の風量については、当初は 1 列車あたり  $1,000\text{m}^3$  という実測による概算値が用いられていたが、その後、松平らの模型実験に基づくモデルや森井らの数学的モデルが提案されている。本研究では、汎用性の高い移動物体 CFD 解析による隧道内障害物のモデル化を考案し、実測との比較により簡易でより正しく予測できる方法を提案している。

### (3) 地下駅ホームの負荷予測に関する研究

地下駅ホームの負荷予測については、SES を含む多くのモデルでは同一空間を一つのブロックとしており、ホーム部、隧道部、上階のコンコースなどの領域で分割している。本研究では、空調機毎の負荷予測が出来るように、列車走行方向では空調ゾーニングにてブロック分割できるようにしている。また、給排気高さによる負荷の違いを考慮できるようにするため、ホーム階を上下分割する方法を提案している。

---

第 1 章に関する参考文献

- 1) 経済産業省資源エネルギー庁：「平成 29 年度エネルギーに関する年次報告」（エネルギー白書 2018），第 2 部エネルギー動向第 1 節エネルギー需給の概要, 2018
- 2) 東日本旅客鉄道株式会社：2018 ファクトシート, 世界の鉄道会社との比較, 2018 年
- 3) JR 東日本グループ：「サステナビリティレポート 2018」, 2018 年
- 4) 福代和宏：地下鉄構内の気流・温熱環境の予測手法に関する研究, 1998. 1
- 5) 庄司光：大阪市営地下鉄道の空気性状と其の調節に関する研究, 国民衛生, 19(9, 10), 1942, PP. 441-589
- 6) 宮本政幸, 赤松義夫：地下鉄の温湿度上昇解析, 化学と工業, 第 38 巻, 1964, PP. 402-416
- 7) 雑賀忠昭, 森田敏男, 斎藤孝基, 内田秀雄：地下鉄道の温熱環境の解析, 空気調和・衛生工学会論文集, 第 47 巻第 6 号, 1972. 10, PP. 489-498
- 8) 吉田治典：地下鉄内の温度・熱負荷予測のためのシミュレーション, 空気調和・衛生工学会論文集, 1980. 1, PP. 317-320
- 9) 下田吉之, 阪倉康男, 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 2 報 地下鉄構内の気温形成に及ぼす機械換気と地盤吸放熱の影響に関する検討, 空気調和・衛生工学会論文集, No. 58, 1993, 10, pp. 1-12
- 10) 水野, 下田, 花井, 内藤：地下鉄を例とした地下空間の熱環境シミュレーション(1)換気量, ホーム部気温の実測, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1988, 10, pp. 221-222
- 11) 下田, 水野, 花井, 内藤：地下鉄を例とした地下空間の熱環境シミュレーション(2)シミュレーション結果と実測結果の比較, 日本建築学会大会学術講演梗概集 NO. 53, 1988. 10, pp. 223-224
- 12) 花井, 水野, 下田, 内藤：地下鉄を例とした地下空間の熱環境シミュレーション(3)パラメータ・スタディ, 日本建築学会大会梗概集 NO. 63, 1988. 10, pp. 225-226
- 13) 松平秀雄, 阪倉康男, 田中康雄, 中田勉, 濱田彰：トンネル内列車風の動特性 第 1 報, 第 2 報, 空気調和・衛生工学会論文集 No. 1, pp. 67-73, pp. 75-83, 1976. 6
- 14) 森井寛治, 澤洋一郎, 榎本隆二：地下鉄の風, 日本流体力学会, 第 12 巻第 4 号, 1993. 12, pp. 423-437
- 15) W.D.Kennedy et al.：Subway Environmental Design Handbook 2nd Edition, U.S.Dept. of Transportation, 1976
- 16) 日本気象協会：地下鉄 12 号線環状部温熱環境解析報告書, 1993. 3
- 17) 吉田治典, 奥村純英, 伊丹清, 久保田克己, 寺井俊夫, 岸寛：地下鉄道における冬期熱回収と夏期温度予測, 空気調和・衛生工学会論文集 NO. 61, 1996. 4, pp. 13-23
- 18) 近藤靖史, 遠藤俊：地下鉄構内におけるシャフトを利用した自然換気とホームドアの有効性に関する検討, 空気調和・衛生工学会論文集 NO. 187, 2012. 10, pp. 57-64

## 第2章

### 地下駅の冷房負荷算定に関する課題

---

## 第 2 章

### 地下駅の冷房負荷算定に関する課題

#### 2.1 序

昭和 47 年に使用開始された総武線地下駅は、過去の研究成果や運転実績を参考に、時間単位の負荷を推定してピーク負荷を算出し冷凍機的能力を決めている。建設当時は列車の運動エネルギーを熱に変換する抵抗器制御が主流であり、台車部からの放熱量が膨大なため軌道部はホーム部よりも高温になるため、軌道部よりは低温な外気を大量に取り込みながらホーム下から排気する方式としている。さらに、列車から発生する熱をホームに流入させない流幕式空調方式が採用されている。

しかし、現在の列車は回生ブレーキや VVVF インバータ制御が主流となっており、列車からの放熱量が大幅に減少している。このため、軌道部の換気や流幕式の空調方式の優位性が無くなり、改修工事の際には順次空調システムが変更されている。さらに、列車からの放熱量の減少に伴い隧道内の空気環境も改善し、ホームに流入する列車風による空調負荷も減少している。

2.2 節では、課題となっている設備容量と実負荷の乖離について、上記に述べた技術革新に伴う列車放熱量の変化など、建設当初と現在の諸条件の違いを示す。

2.3 節では、現在世界で最も普及している地下鉄構内環境予測シミュレーションプログラム「SES」について概要を紹介し、冷房負荷算定に関する課題を説明する。

2.4 節では、風洞実験や模型実験に代わる重要な技術として建築業界でも広く活用されている CFD 解析について概要を紹介し、冷房負荷算定に関する課題を説明する。

## 2.2 設計条件と実負荷の乖離

### 2.2.1 総武線地下駅の建設当初と現在の諸条件の違い

総武線の地下駅は、空気調和・衛生工学便覧<sup>1)</sup>の方法に準じた東日本旅客鉄道で社内制定された負荷計算手法により設計最大冷房負荷を計算しているが、当時の設計図書と現状に乖離が生じていることが明らかとなっている。特に乖離が著しいホーム部について、総武線建設当時と現在の諸条件の主な違いを以下に示す。

- ・車両制御方式が抵抗制御から VVVF 等の回生制御に代わり車両放熱量が減少
- ・車両冷房化に伴い、車両屋根上からの放熱量が増加
- ・車両の軽量化、電動車比率の減少に伴い、車両放熱量が減少
- ・他社線を含めた路線整備により混雑率（乗車率）が緩和し、人体放熱量が減少
- ・列車運用が折返しからスルー主体になり、停車時間短縮により車両放熱量が減少
- ・始発総武特急が京葉線に移転したため、長時間の乗車待ち客が減少
- ・省エネルギー化を指向し、照明器具や点滅運用が見直されており、照明発熱が減少
- ・隧道換気風量を低減し、外気負荷が削減

### 2.2.2 総武線東京駅の開業時と現状の設計条件

総武線東京駅の開業時と東日本旅客鉄道の「空気調和負荷計算の手引き」の主な設計条件比較を表 2.1 に示す。なお、本論文では、改札階やコンコースは含まず、ホーム階に限定して示す。

表 2.1 総武線東京駅の開業時と現行の主な設計条件比較

項目		開業時	現状（空調手引き）
設計温湿度	温度/相対湿度	29 ℃/65 %	28 ℃/60 %
外気温湿度（夏期 14 時）	温度/絶対湿度	32.3 ℃ / 19.1 g/kg(DA)	33.4 ℃ / 18.6 g/kg(DA)
列車運行（8 時）	列車本数	20 本/h	18 本/h
	制動速度	40 km/h	33.1 km/h
車両条件	編成両数	15 両/列車	15 両/列車
	列車自重	495.9 t/列車	413.3 t/列車
	列車定員	1,732 人/列車	2,209 人/列車
	制御方式	抵抗制御	VVVF 制御
	回生制御	非回生	回生車
車両搭載冷房機	冷房機台数	5 台/両	1 台/両
	冷房機動力	28.0 kW/両	17.8 kW/両
	給気風量	50 m <sup>3</sup> /(h・台)	260 m <sup>3</sup> /(h・台)
旅客条件（8 時）	乗車率	100 %	151 %
	滞在人員	4,150 人	727 人
	人体顕熱/潜熱	52.3 / 81.3 W/人	48 / 84 W/人
照明条件	発熱密度	26 W/m <sup>2</sup>	21.2 W/m <sup>2</sup>
列車風（8 時）	隧道機械換気	全数運転	全数停止
	列車風風量	3,000 m <sup>3</sup> /(h・列車)	3,000 m <sup>3</sup> /(h・列車)
	隧道温度/絶対湿度	外気温+2℃/外気と同等	外気温+2℃/外気と同等
熱負荷安全率	顕熱/潜熱	10% / 10%	5% / 0%

## (1) 冷房温湿度条件

当初 29℃であった冷房温度条件は、その後建設された京葉線東京駅からは 28℃となっており、東日本旅客鉄道の「空気調和負荷計算の手引き」でも 28℃が標準となっている。冷房湿度条件は、当初ホーム部が 65%であったが、現在は 60%が標準となっている。

当初の 29℃の冷房温度は、外気より少し涼しければ良いとの方針で決められており、その後ビル管理法で定められている温度範囲に準拠して 28℃に変更されている。

## (2) 外気温湿度条件

空調手引きと国土交通省の平成 21 年度版の建築設備設計基準による夏期外気条件を表 2.2 に比較して示す。地球温暖化や都市のヒートアイランド化に伴い、外気温度は経年上昇の傾向にある。また、都市の植栽面積の減少に伴い、絶対湿度は下がる傾向にある。このため、「空気調和負荷計算の手引き」では、当初より温度は 1℃前後高めに設定し、絶対湿度は 0.5g/kg (DA) 程度低めに設定している。

表 2.2 空調手引きと国交省の建築設備設計基準の夏期外気条件

時刻	乾球温度[℃]			絶対湿度[g/kg (DA)]		
	開業時	空調手引き	国交省 H21	開業時	空調手引き	国交省 H21
9 時	28.7	30.7	31.7	18.7	18.5	19.4
12 時		33.1	34.1		18.9	19.4
14 時	32.3	33.4	34.3	19.1	18.6	19.4
16 時		32.4	33.3		18.5	19.4
18 時	29.6	30.7		19.2	18.7	

## (3) 列車運行条件

当初の列車本数は昭和 60 年想定で設定されたが、現状の方が少ない運行となっている。当初設計では、朝ラッシュとタラッシュ時の列車運行条件が同じ設定であるため、外気条件が低い朝ラッシュ時については負荷計算を行っていない。

## (4) 車両条件

当初設計では全列車が快速 15 両編成としており、特急列車や快速 11 両編成列車については、安全側になるため考慮していない。当初設計の車両は抵抗制御車であり、現行の車両と比較し車体重量が大きく、床下機器からの放熱量が多い。また、開業時の車両冷房機は、1 車両に 5 台の分散型としていたが、現在の車両はグリーン車を除き、1 車両に 1 台の集中型である。

## (5) 旅客条件

当初設計では、列車の乗車率を最大 100%としているが、現状ではラッシュ時間帯に 100%を超えている。また、ホームの旅客滞在人員数は、当初設計ではかなり大きな値が設定されている。

## (6) 照明条件

ホームの照明発熱は、当初設計では蛍光灯を想定しており、現状と比較し大きな値が設定されている。

## (7) 発熱機器条件

ホーム階のエスカレータ発熱は、当初設計ではホーム部だけに計上されている。エスカレータの電動機は通常上階の床下にある、上階のコンコース階の冷房負荷に計上すべきである。

#### (8) 列車風条件

既往の文献による列車風<sup>1)</sup>を表2.3に示す。当初設計では1列車あたり3,000m<sup>3</sup>/hで設計されている。また、隧道で発生した列車風が駅構内でどのように分流するかについては、定常的なファン気流で模擬した模型実験結果から推定しており、駅へ吹き込まれる列車風のうち、ホーム部へはその30%が流入する設定となっている。

表2.3 駅部に影響する列車風の概数値

列車風風量[m <sup>3</sup> /列車]	記事
約1,500	営団銀座線実測値(6両編成複数トンネル部)
約1,000	営団銀座線実測値(対向列車進入の場合) JR(新日本橋)総武海側線計画
2,500	ソウル地下鉄計画 列車平均速度 42.5km/h
1,470	6両編成 5分間隔 列車風平均速度 3m/s
1,000～2,000	一般地下鉄
2,500～4,500	高速・大編成列車の地下鉄

#### (9) 隧道温度・絶対湿度条件

駅へ流入する隧道の温度は、隧道内の熱バランス式から算定している。また、隧道内の列車放熱量は、電力側で算定した列車の原単位電力量[kW/両/km]に隧道長と通過車両数をかけて求めた電力量から、到着駅への制動エネルギーを差し引いた値を隧道内発熱量としている。

隧道の相対湿度は、当初設計では外気と同じ値としている。

#### (10) 流幕条件

当初設計では、模型実験等で得られた知見から、流幕及び軌道部の給気風量を決定している。流幕は、空調ゾーンであるホーム部と換気ゾーンである軌道部をエアカーテンで遮断し、ホーム部の冷房効果を高めるためのものである。

#### (11) 床下排気の排熱条件

車両冷房機を除く車両機器の駅部での発熱量は、東京駅への制動開始点での列車の運動エネルギーに等しい値としている。この熱量のうち70%はホーム下排気により排熱され、残りの20%が軌道部、10%がホーム部へ流れる設定としている。車両冷房機熱については、ホーム側へ8.33%流れる設定にしているが、軌道部の温度計算には用いられていない。

### 2.3 汎用負荷シミュレータの課題

地下駅空調の汎用的な負荷シミュレータには、現在世界で最も普及している地下鉄構内環境予測シミュレーションプログラムとして、SES (Subway Environment Simulation) <sup>2)</sup>が挙げられる。SESの入出力データの一覧を表2.4、特徴を表2.5に示す。このシミュレータは任意の流れ網モデルが取り扱える汎用プログラムとして高い評価を受けている。しかし、SESは細かい条件入力により多様な条件での予測が可能である反面、条件設定の仕方が複数あるため、設計者の考える条件設定の与え方やシミュレータ熟練度の違いで計算結果が大きく異なる。さらに、膨大な入力条件が正しく設定されたとしても、地下水位の上昇や列車性能の変化など駅舎設計時の想定とは異なる条件が多く、列車風の温度などを正確に予測できないという問題点を有している。従って、この従来技術により得られた結果を用いても、空調設備の容量等を正確に設定することができない。

表2.4 SESの入出力データ

入力データ	出力データ
構築内面形状条件	風速 (瞬時値と平均値)
列車形状条件	換気量 (瞬時値と平均値)
列車運行条件	気温 (瞬時値と平均値)
ファン運用条件	湿度 (瞬時値と平均値)
ファン性能曲線	列車放熱量
列車性能曲線	冷房熱負荷量
定常発熱条件	列車運転曲線
壁体伝熱条件	地中伝熱量

表2.5 SESの特徴

解析方法	非定常解析 (1秒刻み)
計算範囲	任意に設定可 (路線全区間や連絡船まで拡張可)
圧力	流れ網の分岐点における分合流圧力損失を自動計算
温度・湿度	地下鉄各部の温湿度変動状況を自動計算
その他	列車の運転状況や放熱量、煙突効果も算出可能

## 2.4 地下駅を対象とした場合のCFD解析の課題

近年のコンピュータの発展と高機能なCFDツールの開発が進み、CFD解析は風洞実験や模型実験に代わる重要な技術として建築業界でも広く活用されている。また、現在様々な流れ場を対象としたベンチマークテストが実施され、他のツールとの比較検証等により計算精度が日々向上されており、ツール間の差異も小さくなる傾向にある。一方、常時CFD解析を行わない設計者にとってシミュレーション技術のスキル維持は難しく、設定値の誤入力やメッシュの分割方法の設定ミスなどが計算誤差の要因となっている。

表2.6にCFD解析における主な計算手順と誤差要因を示す<sup>3)</sup>。一つの誤った条件設定により計算結果が大きく異なるCFD解析は、第三者にとっても入力条件等の詳細チェックは困難であり、設計者個人のスキルに依存されるのが現状である。

さらに、半閉鎖空間である地下駅は、列車走行に伴う列車風が室内環境に多大な影響を及ぼす。ホームだけで数百m、隧道を含めると数kmに及ぶ大空間の地下建造物に対し、CFD解析をその都度適用することは膨大な計算時間を要するため実務的な解析は困難である。

表 2.6 CFD における計算手順と誤差要因

作業のグループ	CFD 計算の手順	誤差要因
1. 問題の設定	問題を設定する	物理現象が正しくモデル化されているか？
	計算対象の幾何学形状を設定する	
2. モデル化	物理現象をモデル化する	
	乱流モデルを選択する	
3. 境界条件	境界条件を設定する	方程式が数値的に正確に解かれているか？
4. 数値手法	メッシュを設定する	
	スキームを選択する	
	解法を選択する	
5. コード	問題を解く	
6. ユーザ	解をチェックする	
	計算後処理	
	分析と解釈	
	報告書作成	

---

## 2.5 まとめ

本章では、総武線地下駅の設備容量と実負荷の乖離について過去の報告書等を基に調査した結果を示した。設計条件と実負荷の乖離に加え、設計の誤差要因を以下に列記する。

### (1) 設計条件と実負荷の乖離

- ・車両制御方式が抵抗制御からVVVF等の回生制御に代わり車両放熱量が減少
- ・車両冷房化に伴い、車両屋根上からの放熱量が増加
- ・車両の軽量化、電動車比率の減少に伴い、車両放熱量が減少
- ・他斜線を含めた路線整備により混雑率（乗車率）が緩和し、人体放熱量が減少
- ・列車運用が折返しからスルー主体になり、停車時間短縮により車両放熱量が減少
- ・始発総武特急が京葉線に移転したため、長時間の乗車待ち客が減少
- ・省エネ化を指向して、照明器具や点滅運用が見直されており、照明発熱が減少
- ・隧道換気を低減し、外気負荷が削減

### (2) 汎用負荷シミュレータ

- ・設計者の考える条件設定の与え方
- ・設計者のシミュレータ熟練度の違い
- ・SES では、地下水位や列車性能の変化に伴う隧道温度を正確に予測できない

### (3) 地下駅を対象とした場合のCFD解析

- ・設計者のシミュレーション技術のスキル
- ・誤入力やメッシュの分割方法
- ・膨大な計算時間

### 第 2 章に関する参考文献

- 1) 空気調和・衛生工学便覧第 14 版:3 空気調和設備編・建物用途別空調システム第 16 章交通施設,1998,1
- 2) United States Department of Transportation: Subway Environmental Design Handbook, 1993.12
- 3) 村上和夫：はじめての環境・設備設計シミュレーション CFD ガイドブック,オーム社,2017,11



## 第 3 章

### 地下駅温熱環境の実態把握

---

## 第3章

### 地下駅温熱環境の実態把握

#### 3.1 序

本章では、地下駅の空調負荷に起因する条件を把握し、負荷内訳を解明するため地下空間全体の温熱環境の実測結果を示す。

3.2 節では、地下ホーム階の温湿度、車両発熱、壁面吸放熱の実態把握のため、総武線地下3 駅（東京駅・新日本橋駅・馬喰町駅）と地上1 駅（錦糸町駅）を対象とした地下駅環境実測を行った結果を示す。

3.3 節では、隧道内空気の実態を把握するため、3 か所の立坑にて温湿度の移動実測を行った結果を示す。

3.4 節では、隧道や駅部構造、立地などの異なる条件での列車風の傾向を把握するため、東日本旅客鉄道管轄の地下14 駅において列車風の実測を行った結果を示す。

3.5 節では、実態に即した地下駅の空調負荷を推定するため、新日本橋駅を対象に設計条件の再検討を行った結果を示す。

### 3.2 地下駅環境実測

#### (1) 測定概要

地下ホームの温湿度や車両発熱、壁面吸放熱の実態把握のため、図 3.1 に示す総武線地下3駅（東京駅・新日本橋駅・馬喰町駅）と地上駅1駅（錦糸町駅）を対象とした地下駅環境実測を行った。図 3.2 に実測で使用する測定機器を示す。地下駅ホームでは、ホームの両端（列車先頭と最後尾付近）と中央部において、線路の上・中・下段および隧道内の壁面温度をサーモカメラ（TESTO 社製 Testo875-2）で測定し、ホーム部の温熱環境を温湿度計（T&D 社製 RTR52 , RTR53 : FL+1.1m）により測定した。風速測定には、指向性を有する SIBATA 社製風速計（WIND BOY ISA-80）を用いた。

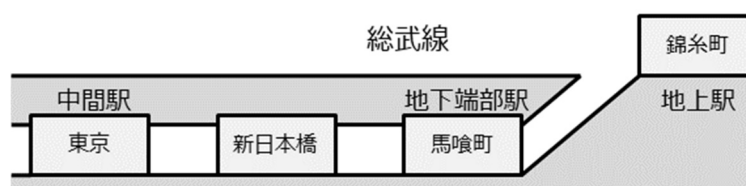


図 3.1 調査対象駅



図 3.2 測定機器

#### (2) 計測日の外気条件

図 3.3 に計測を行った 2012 年 7 月 19 日（木）東京の気象庁観測データと計測日の各駅計測時間を示す。当日の天候は快晴、2012 年では 3 番目に外気温の高い日（最高気温 34.7℃）となり、設計外気条件（33.4℃）よりも高い外気条件であった。移動測定のため各駅の外気条件は異なるが、全駅で 30℃以上での測定となった。

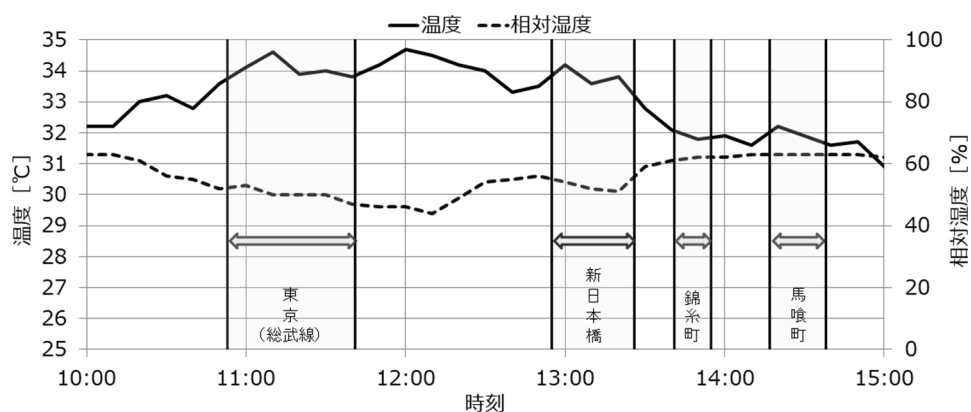
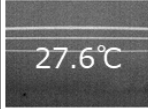

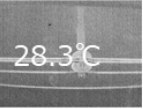






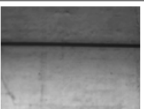



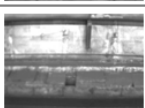

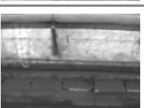




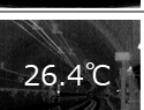



図 3.3 計測日の外気条件と計測駅

## (3) 壁表面温度分布

図 3.4 に新日本橋駅ホーム階の壁面温度分布を示す。壁面温度では、線路部の床部よりも天井部の方が 2～3℃高く、隧道内の壁面温度はホーム部より 1℃程度低い結果が得られた。ホーム上の温熱環境測定において、新日本橋駅は概ね設計値通りの温湿度環境であった。

	東京方ホーム端部		ホーム中央		千葉方ホーム端部	
	サーモグラフィ	可視画像	サーモグラフィ	可視画像	サーモグラフィ	可視画像
天井部	 27.6℃		 28.3℃		 27.0℃	
壁部	 26.5℃		 27.3℃		 26.5℃	
床部	 25.8℃		 25.7℃		 25.3℃	
隧道端部	 25.6℃				 26.4℃	

温度[°C]  
 33℃  
 32.5℃  
 30.0℃  
 27.5℃  
 25.0℃  
 23℃

図 3.4 新日本橋駅軌道部の壁面温度

図 3.5 に各駅の壁面温度とホーム空間の温湿度測定結果を示す。外気温度が 30℃以上に対し地下軌道端部の壁面温度は約 26℃と低く、ホーム部の相対湿度は 60～70%と外気湿度より高い値を示した。地下では端部駅となる馬喰町駅の軌道端部温度は、他の地下駅軌道端部温度よりも低温となっている。これは、夏期において、隧道内空気と相対的に比重が小さい外気が隧道へ流入しにくいと考えられる。

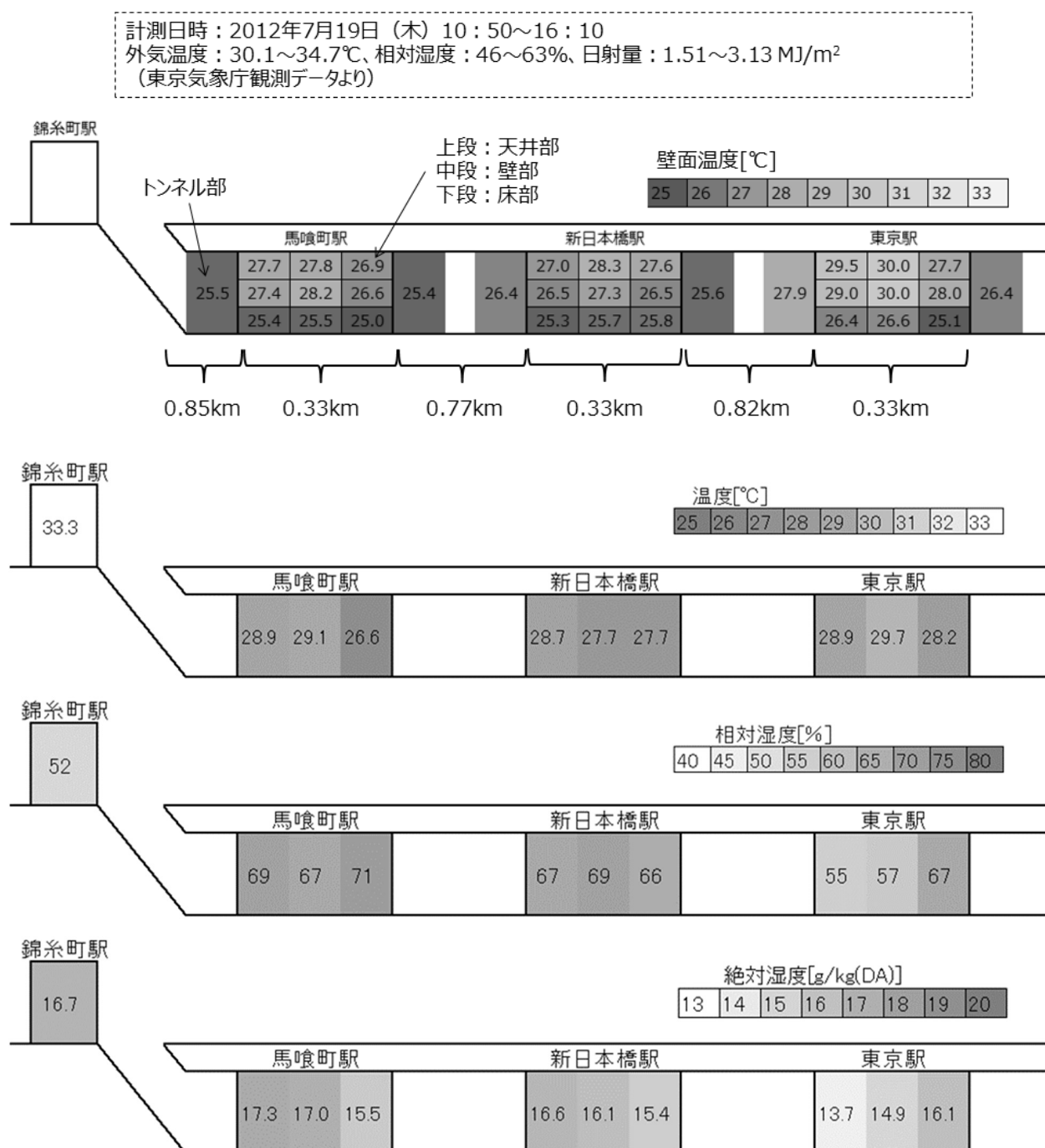


図 3.5 壁面温度とホーム空間の温湿度測定結果

## (4) 列車表面温度

総武線のように地上と地下が同一軌道となる場合、夏季日中では列車の外板が日射で高温となり、地下駅の冷房負荷になることが想定された。そこで、錦糸町駅（地上）から東京駅（地下）に至る区間において、同一列車の表面温度を測定した。

図 3.6 に同一列車の先頭車両と 2 両目の列車表面温度、図 3.7 に同表面温度の時間推移を示す。列車温度は、同一車両の図中の枠内平均温度とした。車両外板の表面温度は、馬喰町駅からほぼ一定温度である傾向が見られた。さらに馬喰町駅以降は先頭車両が 2 両目よりも低温となっていることから、日射による外板蓄熱は、錦糸町駅から馬喰町の隧道内で冷却され、地下端部駅の空調負荷に大きく寄与していないと考えられる。

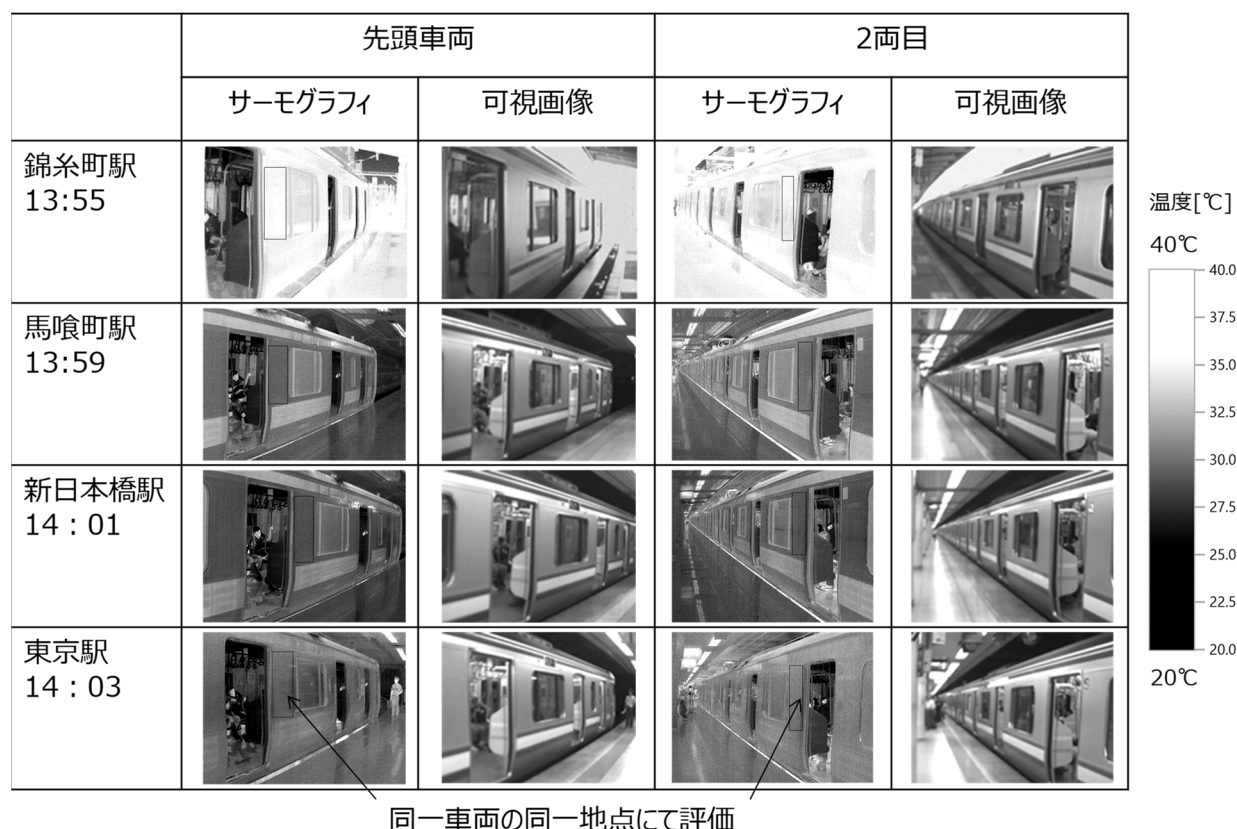


図 3.6 同一車両の列車表面温度

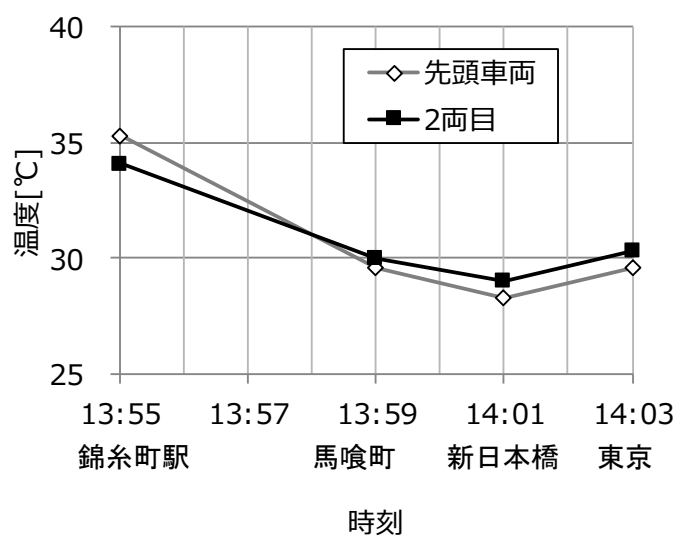


図 3.7 列車表面温度の時間推移

### 3.3 隧道内空気温湿度

隧道内空気の実態を把握するため、3か所の立坑にて温湿度の移動実測を行った。

#### (1) 測定概要

図 3.8 に調査対象の隧道部測定位置、図 3.9 に立坑外観と断面図を示す。実測は 2012 年 8 月 8 日に実施した。

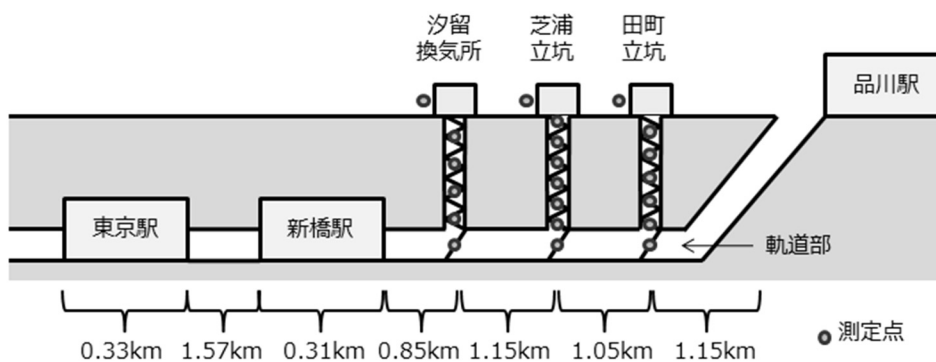


図 3.8 調査対象の隧道部測定位置 (立坑)

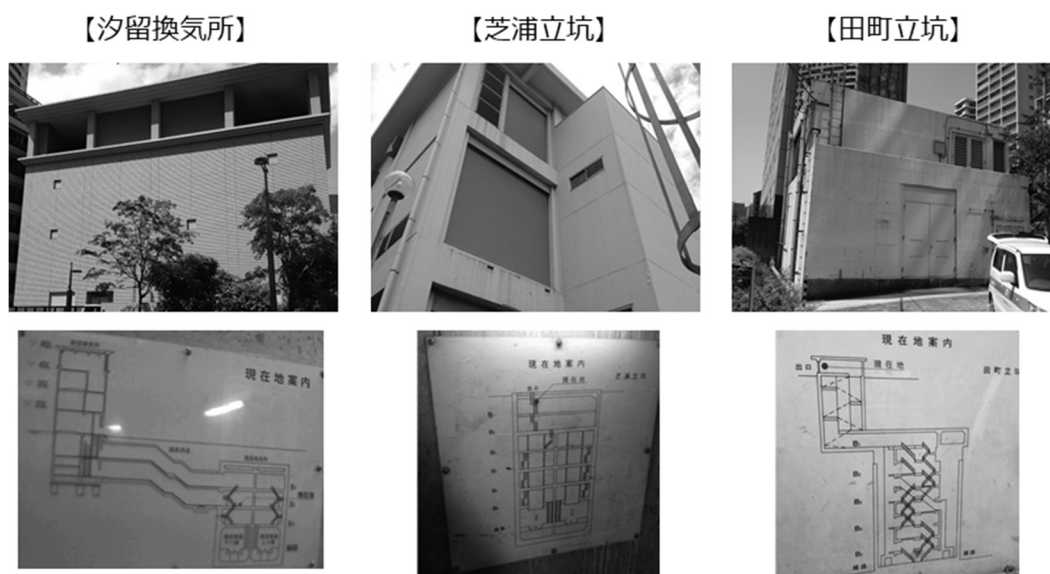


図 3.9 換気塔外観と立坑断面図

#### (2) 実測結果

温湿度の測定結果を図 3.10 に示す。立坑地下では地上の外気よりも低温多湿であり、軌道部では上階よりも 0.1～0.2℃程度温度が高くなる傾向が見られた。この温度上昇は、列車放熱の影響と考えられる。また、立坑は約 1km 間隔であるものの、隧道内温度は 25～26℃、相対湿度は 80% (18.4～19.5 g/kg (DA)) 程度となっており、4km ほどの隧道内温熱環境はほぼ同一であると想定される。

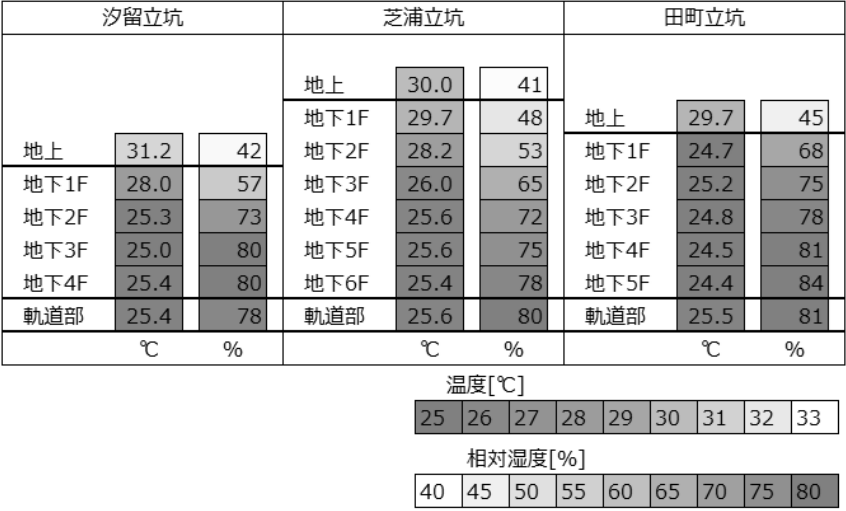


図 3.10 隧道部上下温湿度分布

### 3.4 地下駅列車風

地下駅は、駅ごとに構造や隧道、列車の進入速度などが異なる。表3.1に東日本旅客鉄道管轄の既存地下駅一覧、図3.11に地下駅平断面形状を示す。

本節では、隧道や駅部構造、立地などの異なる条件での列車風の傾向を把握するため、表3.1に示す地下駅の中で、京成電鉄相互乗り入れ2駅（成田空港駅、空港第二ビル駅）を除く14駅において列車風の実測を行った。

表3.1 東日本旅客鉄道管轄の既存地下駅一覧

駅名称	駅種別	階数	駅部構造	隧道	モデル分類	備考
総武線 東京駅	通過駅	地下5階	島式2面4線	複線	A	
総武線 新橋駅	通過駅	地下5階	島式1面2線	単線	B	
新幹線 上野駅	通過駅	地下4階	島式2面4線	複線	A	
埼京線 大宮	通過駅	地下1階	島式2面4線	複線	A	
京葉線 東京駅	終着駅	地下4階	島式2面4線	複線	C	
京葉線 八丁堀駅	通過駅	地下3階	島式1面2線	単線	B	
京葉線 越中島駅	通過駅	地下2階	島式1面2線	単線	B	
成田空港駅	終着駅	地下2階	JR1面2線 京成2面3線	複線	G	京成電鉄相互 乗り入れ
空港第二ビル駅	通過駅	地下2階	JR1面1線 京成1面2線	複線	H	京成電鉄相互 乗り入れ
仙石線 あおば通駅	終着駅	地下2階	島式1面2線	複線	D	
仙石線 仙台駅	通過駅	地下2階	島式1面2線	複線	E	
仙石線 榴岡駅	通過駅	地下2階	島式1面2線	複線	E	
仙石線 宮城野原駅	通過駅	地下2階	島式1面2線	複線	E	
仙石線 陸前原ノ町駅	通過駅	地下1階	相対式1面2線	複線	F	
総武線 馬喰町駅	通過駅	地下4階	島式1面2線	単線	B	
総武線 新日本橋駅	通過駅	地下4階	島式1面2線	単線	B	

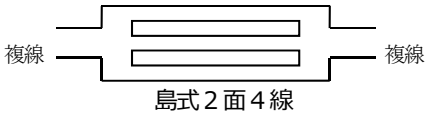
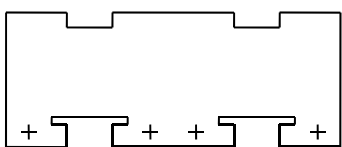
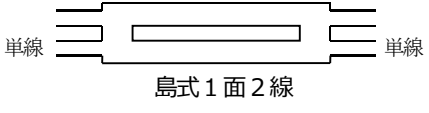
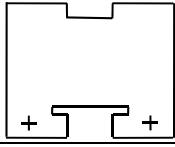
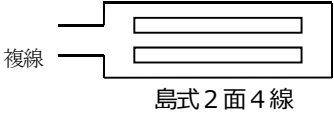
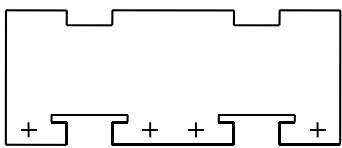
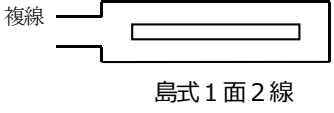
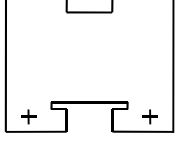
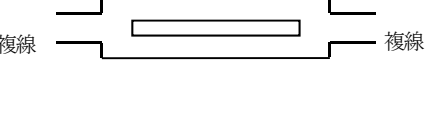
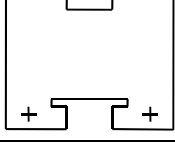
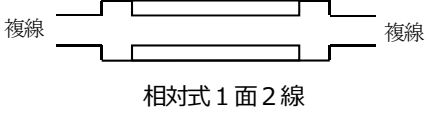
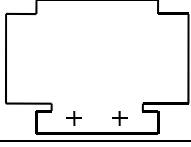
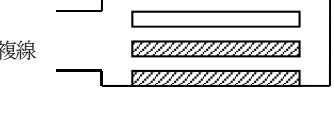
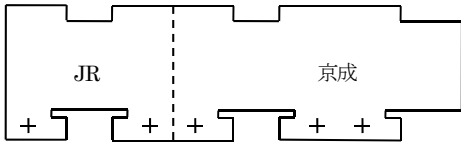
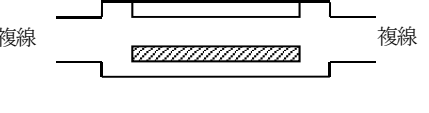
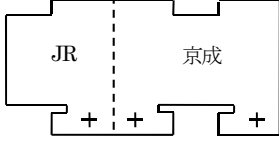
モデル	平面形状	断面形状	備考
A	 <p>島式2面4線</p>		
B	 <p>島式1面2線</p>		
C	 <p>島式2面4線</p>		終着駅
D	 <p>島式1面2線</p>		終着駅
E	 <p>島式1面2線</p>		
F	 <p>相対式1面2線</p>		
G	 <p>JR1面2線 京成2面3線</p>		斜線部は京成 電鉄を示す 終着駅
H	 <p>JR1面1線 京成1面2線</p>		斜線部は京成 電鉄を示す

図 3.11 地下駅平断面形状

列車風の移動測定装置を写真 3.1 に示す。風向・風速の測定には、三次元超音波風速計（カイジョー社製 DA-650）を使用し、20 回/秒データの 1 秒平均値を記録した。図 3.12 に三次元超音波風速計の仕様を示す。温度測定には熱電対にて 1 秒間隔、湿度測定には電子式湿度センサ（アズビル社製ネオセンサ）にて 1 秒間隔、CO<sub>2</sub> 濃度測定にはワイヤレスデータロガー（T&D 社製 TR-76Ui）にて 30 秒間隔で記録した。なお、移動測定装置は 2 台用意し、2 地点を同時測定することで計測時間の短縮を図った。総武線新橋駅と馬喰町駅は、微風速計（マルチ環境計測：TEST0400）にて計測した。総武線新日本橋駅は、ホーム端部に加え、階段や出入口などの全開口部を測定した。結果の詳細については後述する。



写真 3.1 列車風移動測定装置


三次元超音波風速計 DA-650 仕様		
測定方法	時分割送受切替え型超音波パルス方式	
演算方式	超音波伝搬時間逆数差演算方式	
計測範囲	0～±10m/s	
測定精度	±（指示値の2%+0.02m/s） （メジャーゼロ調整後の主風向にて）	
分解能	0.005m/s 以下	
測定繰り返し	10 回毎秒	
応答速度	0.5s	
仕様環境	温度範囲：0～40℃ 湿度範囲：85%以下	
プローブ	TR-90AH 型 スパン 5cm 主風向 Z 軸型	

図 3.12 三次元超音波風速計の仕様

各駅の実測状況を写真 3.2～3.15 に示す。本論文では、駅部構造の異なる代表的な 3 駅（新日本橋駅、宮城野原駅、大宮駅）について、実測概要と結果を示す。

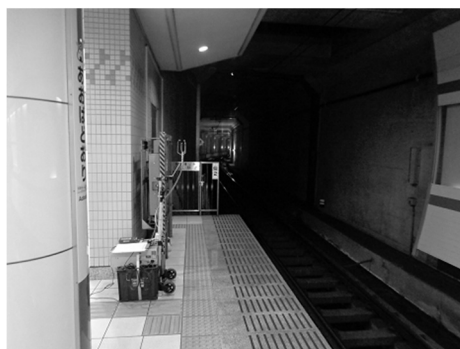


写真 3.2 仙石線あおば通駅実測状況（2015 年 6 月 2 日）



写真 3.3 仙石線仙台駅実測状況（2015 年 6 月 3 日）



写真 3.4 仙石線榴ヶ岡駅実測状況（2015 年 6 月 4 日）



写真 3.5 仙石線宮城野原駅実測状況（2013 年 8 月 21～23 日）



写真 3.6 仙石線陸前原ノ町駅実測状況（2015 年 6 月 5 日）



写真 3.6 新幹線上野町駅実測状況（2015 年 5 月 28 日）

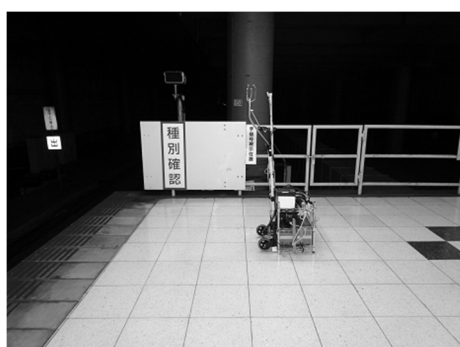


写真 3.7 埼京線大宮町駅実測状況（2013 年 8 月 26～28 日）

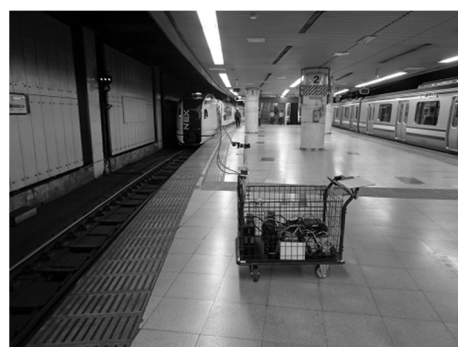


写真 3.8 総武線東京町駅実測状況（2015 年 5 月 26～27 日）



写真 3.9 総武線新橋駅実測状況 (2013 年 12 月 11 日)

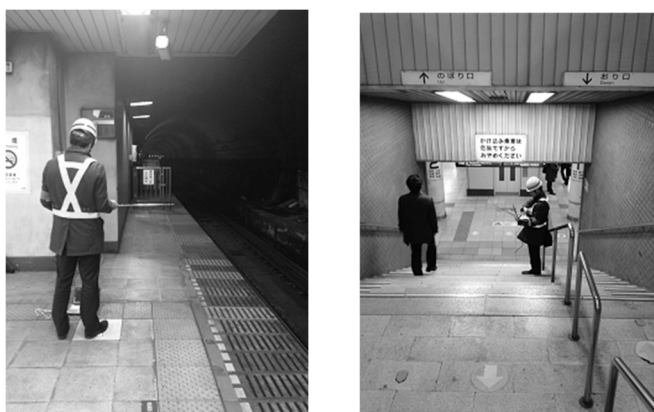


写真 3.10 総武線馬喰町駅実測状況 (2013 年 12 月 11 日)

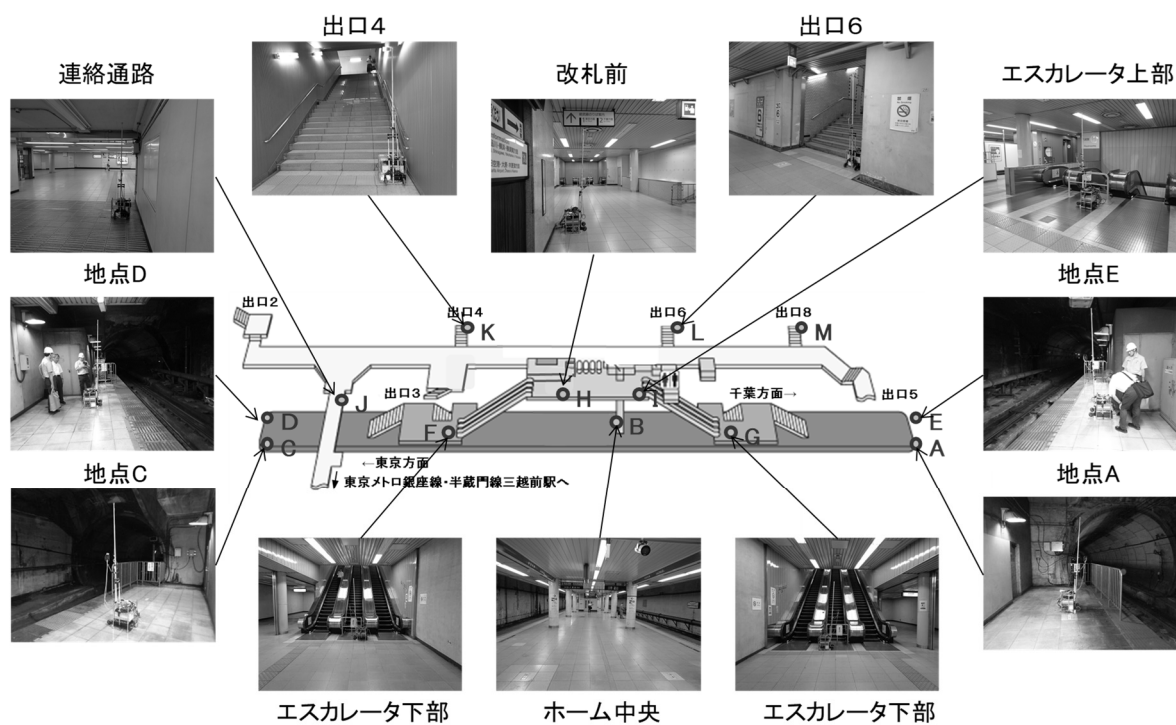


写真 3.11 総武線日本町橋駅実測状況 (2012 年 8 月 29～30 日)

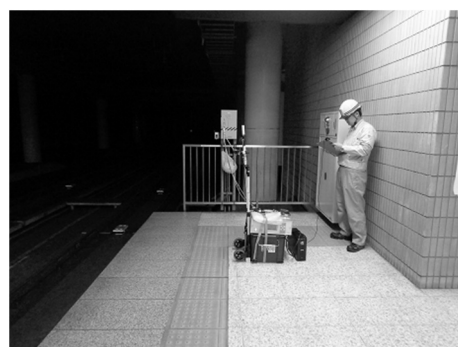


写真 3.12 京葉線東京駅実測状況 (2015 年 5 月 21~22 日)

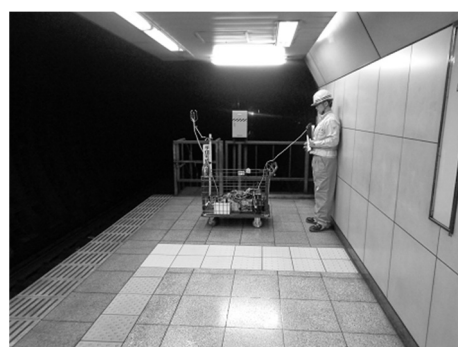


写真 3.13 京葉線八丁堀駅実測状況 (2015 年 5 月 21~22 日)



写真 3.14 京葉線越中島駅実測状況 (2015 年 5 月 20 日)

#### (1) 新日本橋駅

新日本橋駅は、単線円形隧道に接続する島式1面2線のホーム構造で、地下1Fの改札、中間2フロア、地下4Fのホームで構成される。ホーム長は約330m、主に15両編成の車両が停車し、特急列車(11両編成)が通過する。新日本橋駅の地下構造と列車風の測定位置を図3.13に示す。列車風の測定は2012年8月29日と30日の2日間実施し、上下線のそれぞれ列車ホーム進入側のホーム端で、隧道中心から約3m、FL+1.5mの風向・風速・温湿度を測定した。

図3.13中に示した地点Aと地点Bにおける風速の時間変化を図3.14に示す。軌道と平行な軸をX軸とし、列車進行方向が上り線では-X、下り線では+X方向として示している。駅端部の風速は、列車の駅進入前にはピストン流により徐々に増加しピーク値(約8m/s)に達する。その後列車が測定点を通過中には微風とな

り、一時的に風向が逆転する。列車が測定点を通過後には列車に誘引された気流が見られ、徐々に減衰する。列車風の風向は、列車の運行状態(停車・通過・車両数)に拘らず、概ね列車の進行方向とほぼ平行であった。

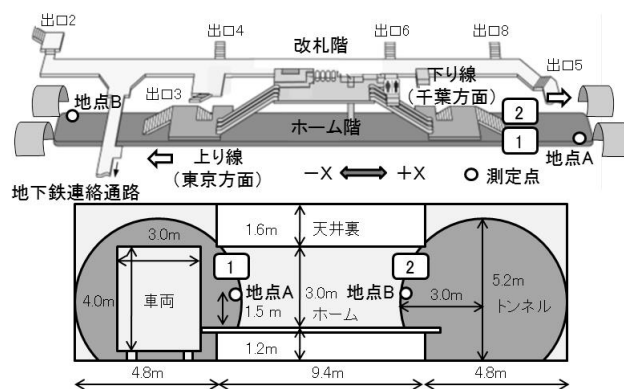


図 3.13 新日本橋駅地下構造と列車風の測定位置

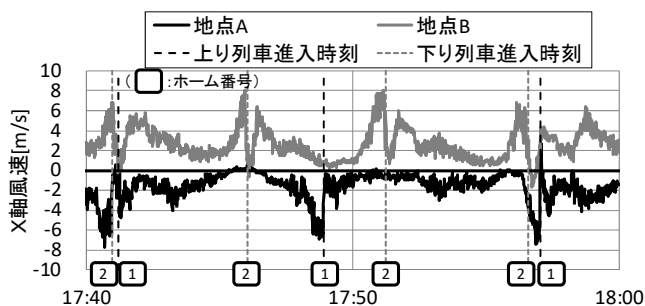


図 3.14 新日本橋駅の X 軸風速の時間変化 (地点 A と地点 B)

## (2) 宮城野原駅

宮城野原駅は、複線矩形隧道に接続する島式 1 面 2 線のホーム構造で、地下 1F の改札、地下 2F のホームで構成される。ホーム長は約 100m、全車両は 4 両編成で運行されている。宮城野原駅の地下構造と列車風の測定位置を図 3.15 に示す。列車風の測定は 2013 年 8 月 21 日～23 日の 3 日間実施した。新日本橋駅と同様に、上下線のそれぞれ列車ホーム進入側のホーム端で、隧道壁面から軌道部側に 0.2m、FL+1.5m の風向・風速・温湿度を記録した。

図 3.15 中に示した地点 C と地点 D における軌道と平行な X 軸方向の風速の時間変化を図 3.16 に示す。列車の進行方向と同じ風向で推移し、ピーク風速は新日本橋駅の半分程度(約 4m/s)であった。両駅の列車進入速度が同じ(停車前 1 分間の平均速度 45km/h)にも拘らずピーク風速が低い要因は、隧道が複線のため列車風が反対の軌道部へ分散すること、上下線の列車風が隧道内で相殺された影響などによると考えられる。

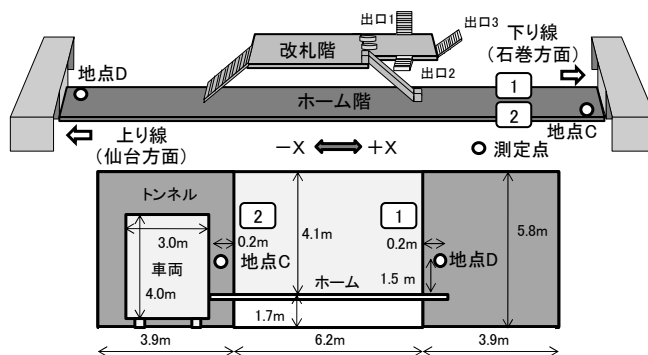


図 3.15 宮城野原駅地下構造と列車風の測定位置

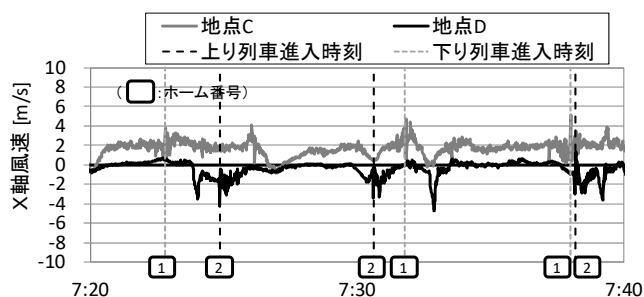


図 3.16 宮城野原駅の X 軸風速の時間変化（地点 A と地点 B）

### (3) 大宮駅

大宮駅では、地上 3F に島式 3 面 6 線の新幹線高架ホーム、地上 2F にコンコースおよび改札、1F に島式 5 面 10 線の在来線地上ホームがあり、地下 1F に島式 2 面 4 線の在来線ホームがある。地下 1F のホーム長は約 330m で、主に 10 両編成の車両が停車する。大宮駅の地下部分の構造と列車風の測定断面を図 3.17 に示す。実測は 2013 年 8 月 26 日～28 日の 3 日間、地下ホームで実施した。

図 3.17 中に示した地点 E～地点 H の軌道と平行な X 軸方向の風速の時間変化を図 3.18 に示す。大宮駅での列車風のピーク風速は、全測定点で宮城野原駅の半分程度（約 2m/s）であった。これは隧道断面積が大きいこと、隧道が複線のため上下線の列車風が隧道内で相殺されたこと、大宮駅で折り返し運転を行う列車があることなどによると考えられる。

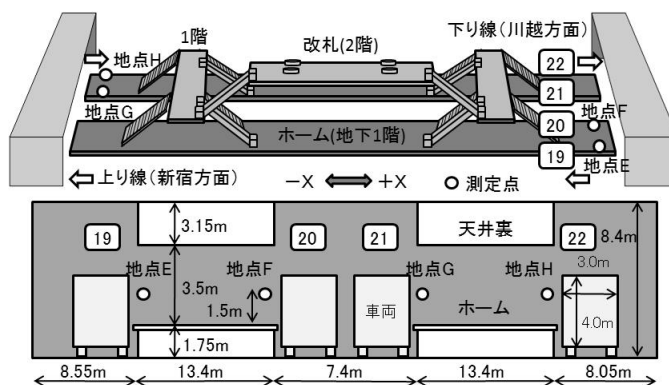


図 3.17 大宮駅地下構造と列車風の測定位置

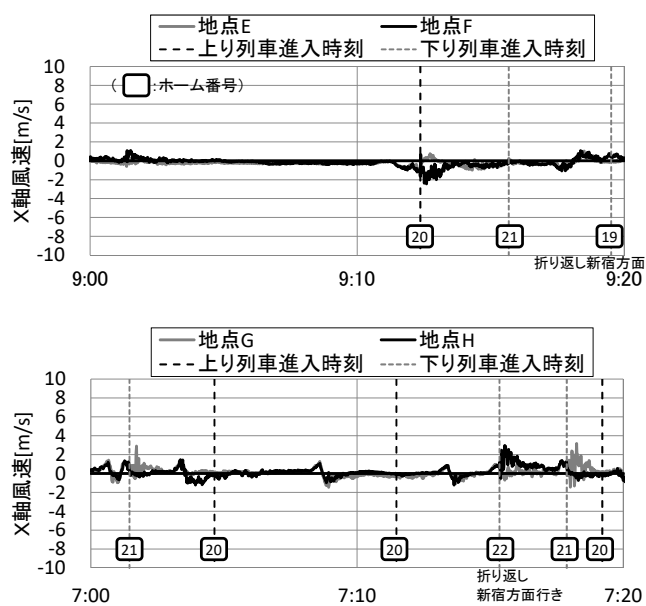


図 3.18 大宮駅の X 軸風速の時間変化 (地点 A と地点 B)

### 3.5 新日本橋駅の実態に即した負荷要素の推定

実態に即した負荷を推定するため、新日本橋駅を対象とした設計条件の再検討を行った。現行の地下駅の設計最大冷房負荷計算は、式(3.1)で示される。

$$q = q_W + q_T + q_L + q_P + q_E + q_{OA} + q_C \quad \text{式(3.1)}$$

$q$	: 全負荷 [W]
$q_W$	: 列車風負荷 [W]
$q_T$	: 列車放熱負荷 (冷房装置等発熱含む) [W]
$q_L$	: 隙間風負荷 [W]
$q_P$	: 人体発熱負荷 [W]
$q_E$	: 照明負荷 (その他機器含む) [W]
$q_{OA}$	: 外気取入負荷 [W]
$q_C$	: 壁部吸放熱負荷 [W]

本線の地下駅は、空気調和・衛生工学便覧<sup>1)</sup>に準じて東日本旅客鉄道で社内制定された負荷計算手法により設計最大冷房負荷を計算している。本論文では、上記負荷の中でも予測が難しい4つの構成要素( $q_W$ ,  $q_T$ ,  $q_L$ ,  $q_P$ )について考察する。

#### 3.5.1 列車風負荷

列車走行によってホームに持ち込まれる列車風負荷は、式(3.2)(3.3)で算出する。

$$q_{W.S} = 0.33Q_T(t_r - t_p) \cdot N \cdot k_W \quad \text{式(3.2)}$$

$$q_{W.L} = 837Q_T(x_r - x_p) \cdot N \cdot k_W \quad \text{式(3.3)}$$

$q_{W.S}$	: 列車風による顕熱負荷 [W]
$q_{W.L}$	: 列車風による潜熱負荷 [W]
$Q_T$	: 列車風の風量 [ $\text{m}^3/\text{列車}$ ]
$N$	: 列車本数 [列車/h]
$t_r$	: 隧道内温度 [ $^{\circ}\text{C}$ ]
$t_p$	: ホーム部温度 [ $^{\circ}\text{C}$ ]
$x_r$	: 隧道内絶対湿度 [ $\text{kg}/\text{kg}(\text{DA})$ ]
$x_p$	: ホーム部絶対湿度 [ $\text{kg}/\text{kg}(\text{DA})$ ]
$k_W$	: ホーム影響係数 (0~1) [-]

空気調和・衛生工学便覧<sup>1)</sup>では高速・大編成列車の列車風を2,500~4,500  $\text{m}^3/\text{列車}$ としており、これを参考に当駅の列車風は3,000  $\text{m}^3/\text{列車}$ とし、隧道内温度は35 $^{\circ}\text{C}$  (外気温度+2 $^{\circ}\text{C}$ )、隧道内湿度は外気絶対湿度に等しいとし、ホームへ直接影響する負荷の割合を示すホーム影響係数は0.5としていた。

##### (1) 列車風の風量の推定

当駅ホーム部に流入する列車風の実測結果から推定される値は、隧道内の換気ファンの影響も加わり18,000~23,000 [ $\text{m}^3/\text{列車}$ ]となり、設計時に想定した値の6倍以上であった。運行ダイヤが過密なほど列車風の総量は増加するが、相対的に1列車あたりの風量は減少する実測結果を踏まえると、式(3.4)のように表すことができる。

$$Q_T = (a \cdot N + b) \cdot A \quad \text{式(3.4)}$$

$A$  : 隧道開口面積 [m<sup>2</sup>]  
 $a$  : 係数 (ここでは490)  
 $b$  : 係数 (ここでは3190)

## (2) 隧道内温湿度の推定

図 3.19 に当駅ホーム端部で行った温湿度測定トレンドを示す。列車進入に伴う周期的変動は見られるものの、比較的安定した実測結果を踏まえ、当駅の隧道内温湿度には、計測期間の上下線平均値（=28.8℃、=16.7 [g/kg(DA)]）を終日一定とした。

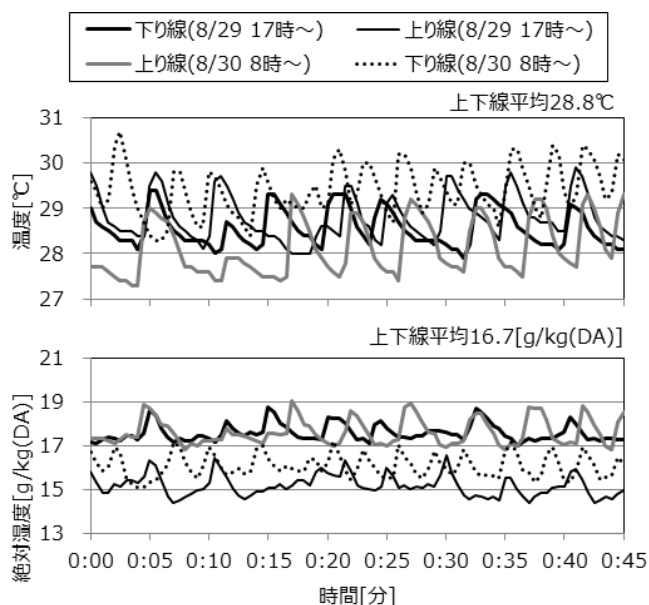


図 3.19 ホーム端部での温湿度トレンド

## (3) 現行式との比較

表 3.2 に示す設計条件により、現行式と推定式による列車風負荷の比較を行う。図 3.20 に現行式と推定式による列車風負荷の比較を時刻別に示す。現行式には、設計条件と運用条件に合わせた計算結果を比較して示す。推定式による列車風負荷は、列車風が大きい反面、隧道内空気のエンタルピーが設計条件よりも小さいため、現行式よりも大幅に小さい値となった。

表 3.2 負荷計算に使用した条件

項目		列車 本数	外気 温度	外気 絶対湿度
単位		本/h	℃	g/kg (DA)
設計条件	9時	37	30.7	18.5
	14時	20	33.4	18.6
	16時	22	32.4	18.5
	18時	24	30.7	18.7
実測値 (2012年8月17日)	9時	27	31.0	18.7
	14時	17	35.3	16.9
	16時	20	33.3	18.7
	18時	27	31.1	19.4

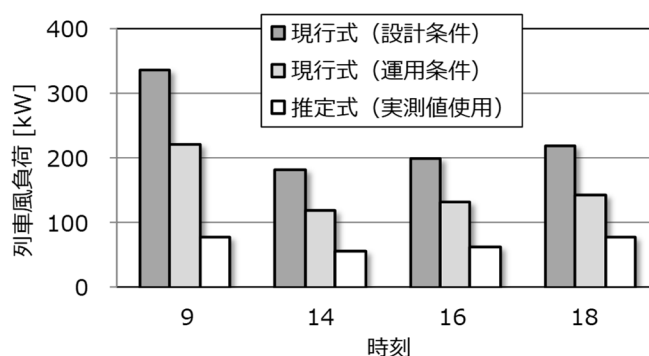


図 3.20 現行式と推定式による列車風負荷の比較

### 3.5.2 列車放熱負荷

列車放熱負荷は、進入列車によるブレーキ熱と車両内の補機類・冷房負荷により式(3.5)のように算出される。当駅では $q_{AC}$ のみを算入し、ホーム影響係数 $k_T$ は0.5としていた。

$$q_T = (q_B + q_{AC}) \cdot t / 3600 \cdot N \cdot k_T \quad \text{式(3.5)}$$

$q_B$  : ブレーキ負荷 [W]  
 $q_{AC}$  : 補機類・冷房負荷[W]  
 $t$  : 駅滞留時間 [s]  
 $k_T$  : ホーム影響係数 (0~1) [-]

#### (1) 列車放熱負荷の推定

列車進入側のホーム端部温度は、図 3.19 に示されるように、列車のホーム侵入直後から 1~2℃温度が上昇し、徐々に設計室温付近に低下する変動を繰り返す。この温度上昇の原因は、図 3.21 の列車のサーモグラフィに示されるように、夏期では主に車内冷房用の室外機と摩擦熱による車輪からの排熱と想定される。そこで列車放熱量を推定する方法として、上昇前の温度（列車のホーム進入時）を基準とし、新日本橋駅の上下線を含む 37 本の列車について、列車進入から退出するまでの温度偏差を積算した平均値と列車風の風量から列車放熱量を導出した。結果は下記である。

普通列車・特急列車 : 5.4[kW/本数]、回送列車 : 3.0[kW/本数]

ここで、列車放熱は、列車速度や乗車率の他、日射による外板蓄熱やホーム停車時間の影響で駅毎に値は異なる。対象とした新日本橋駅は、普通列車と特急列車の放熱量に特異な差が見られなかったため前述の列車放熱量を採用した。



図 3.21 列車のサーモグラフィ

## (2) 現行式との比較

図 3.22 に現行式と推定式による列車放熱負荷を比較して示す。推定式による列車放熱負荷は、簡便な計算方法でありながら、現行法との差異は小さい結果となった。

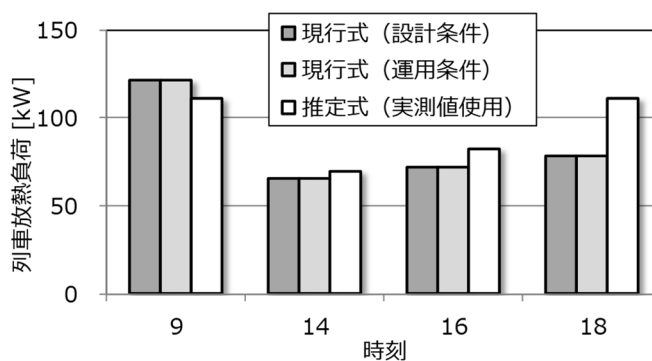


図 3.22 現行式と推定式による列車放熱負荷の比較

## 3.5.3 隙間風負荷

### (1) 隙間風負荷の推定

地下駅では、列車が駅を退出する際に、駅構内が負圧状態となることで地上の出入口から外気が流入するため、上下線の列車本数と相関が高い。当駅の隙間風を算出するため、B1 改札階に通じる開口部（出入口 3 ヶ所・連絡通路・エスカレータ開口 2 ヶ所）の風速測定を行った。実測の結果、地上階出入口からの流入風量は、1 列車あたり 3,300 m<sup>3</sup>/h と推定されるが、階段部（7.6mH）での変動を考慮すると、B1 改札階の隙間風負荷に直接影響する外気流入比は 50%程度が適当と考えた。

### (2) 現行式との比較

図 3.23 に推定式による隙間風負荷を示す。隙間風負荷は、特に列車本数の多い朝夕の時間帯が大きく、さらに外気温度が朝方よりも高い夕方にピーク負荷となった。

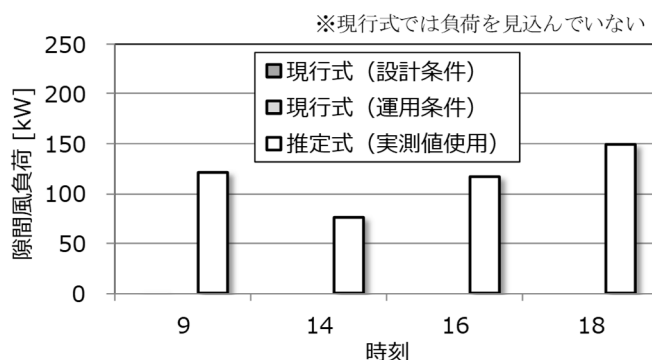


図 3.23 現行式と推定式による隙間風負荷の比較

### 3.5.4 人体発熱負荷

#### (1) 乗降客数の推定

推定式の人体発熱負荷に用いる乗降客数には、当駅の改札機入出者データを使用し、歩行速度 (0.7m/s) から各フロアの滞在時間を算出する。さらに乗降客のホーム階の平均待ち時間には、空気調和・衛生工学便覧<sup>1)</sup>に準じて停車列車の運転間隔の半分とする。

#### (2) 現行式との比較

図 3.24 に現行式と推定式による人体発熱負荷を比較して示す。推定式による人体発熱負荷は、現行式と比較し大幅に小さい値となった。

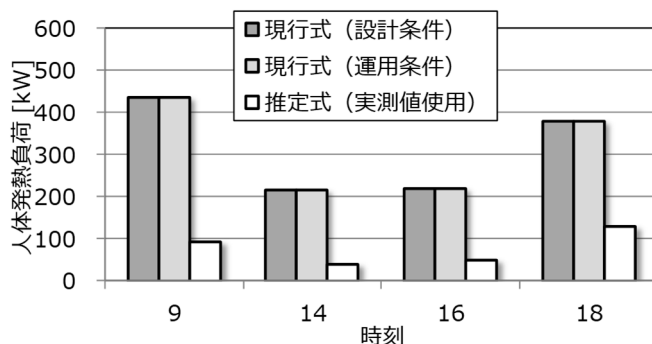


図 3.24 現行式と推定式による人体発熱負荷の比較

### 3.5.5 負荷内訳

図 3.25 に現行式 (設計条件・運用条件) と推定式による最大冷房負荷を示す。推定式による最大冷房負荷は、負荷の構成要素を実態に合わせたことで、実際の負荷に近づくことができた。

図 3.26 に実際の負荷と推定式による全負荷を時刻別に比較して示す。推定式による全負荷は、実際の負荷と比較して時刻毎の変動はあるが、概ね実際の負荷に近づくことができた。

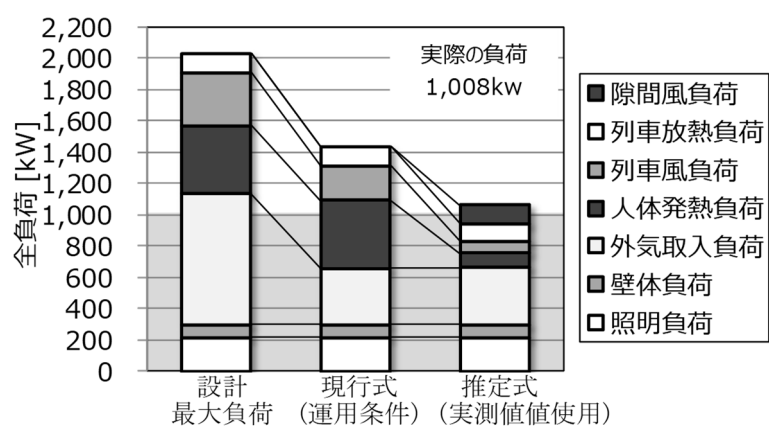
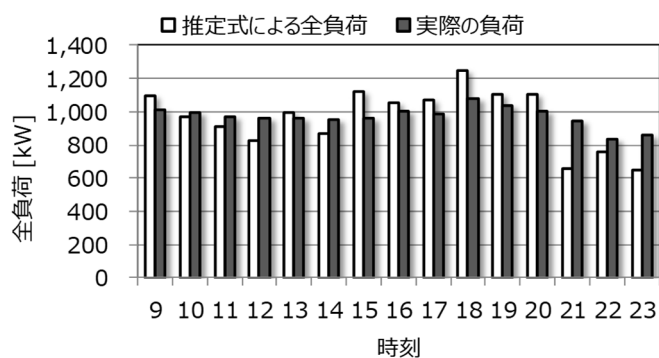


図 3.25 現行式と推定式による人体発熱負荷の比較

図 3.26 実際の負荷と想定式による全負荷の経時変化  
(2012 年 8 月 17 日)

### 3.6 まとめ

本章では、地下駅の空調負荷に起因する条件を把握して負荷内訳を解明するため、地下空間全体の温熱環境を実測し、以下の知見を得た。

(1) ホーム温湿度について

- ・夏期の地下軌道端部の壁面温度は外気温度よりも低く、ホーム部の相対湿度は外気湿度より高い値を示した。
- ・地下端部駅となる馬喰町駅の軌道端部温度は、他の地下駅軌道端部温度よりも低温となっており、夏期の高湿多湿で比重の軽い外気が隧道から駅軌道部へ流入する割合は小さいと考えられる。

(2) 隧道温湿度について

- ・夏期の地下隧道部は外気よりも低温多湿な状態であり、軌道部では列車放熱の影響による温度上昇が見られた。
- ・約1km間隔の隧道内空気温度は25～26℃、相対湿度は80%(18.4～19.5 g/kg(DA))程度となっており、4kmほどの隧道内温熱環境はほぼ同一であると想定される。

(3) 列車風の風量について

- ・14駅の列車風測定を行った結果、①列車風の風向は列車進行方向とほぼ平行に流入し、②隧道が複線の場合には反対の軌道への分散や隧道内での相殺された影響で列車風が減少する。

(4) 列車風負荷について

- ・列車風負荷は、当初設計と比較し列車風風量が大きい反面、隧道内空気のエンタルピが設計条件よりも小さく、大幅に小さい値となった。

(5) 列車放熱負荷について

- ・周期的に変動する列車風温度に対し、新日本橋駅の上下線を含む37本の列車について、列車進入から退出するまでの温度偏差を積算した平均値と列車風の風量から列車放熱量を導出した。結果は下記である。普通列車・特急列車：5.4[kW/本数]、回送列車：3.0[kW/本数]

(6) 冷房負荷内訳について

- ・推定式による最大冷房負荷は、負荷の構成要素を実態に合わせたことで、実際の負荷に近づくことができた。これにより、実際の負荷内訳の概算を示した。

第 3 章に関する参考文献

- 1) 空気調和・衛生工学会：第 11 版空気調和・衛生工学便覧,第 8 編空気調和応用, (1987) ,PP.758～766

---

### 第3章に関する既発表文献

- [1] 谷田直之,佐藤雅文,木村健太郎,柴田克彦,近藤靖史: 地下駅構内の温熱環境と空調負荷に関する研究,その1.地下駅構内とトンネル部の温熱環境および列車風の実測,日本建築学会大会学術講演梗概集,環境工学II,pp.215-216,2013.8
- [2] 木村健太郎,柴田克彦, 谷田直之,佐藤雅文,近藤靖史: 地下駅構内の温熱環境と空調負荷に関する研究,その2.移動物体 CFD 解析による列車風の検討,日本建築学会大会学術講演梗概集,環境工学II,pp.217-218,2013.8
- [3] 木村健太郎,柴田克彦, 谷田直之,佐藤雅文,佐藤誠,近藤靖史: 既存地下駅における設計最大冷房負荷推定に関する研究,空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集,pp.225-228,2013.9
- [4] K. Kimura, K. Shibata, N. Tanita, M. Sato, Y. Kondo: Estimation Method of Cooling Load in an Underground Station, Indoor Air, HP1331, 2014.7

## 第4章

### ブロックの熱収支モデルに基づく 負荷計算法

---

## 第 4 章

### ブロックの熱収支モデルに基づく負荷計算法

#### 4.1 序

本章では、地下駅における設計最大冷房負荷の推定方法の精度向上を目的に、ブロックごとの熱収支モデルを適用した負荷計算を提案する。

はじめに大規模建築の計算負荷を抑えながら、空調条件や換気条件を変えた場合の熱負荷を予測するため、ブロックモデルを採用し、ブロック内空気の熱収支や壁体の非定常熱伝導、壁体表面の熱収支、その他顕熱や潜熱負荷について、計算式を交えて説明する。

ブロック分割は、空調ゾーニングと軌道部の排気位置の変更による効果を確認できながら計算負荷を抑えるため、水平方向と鉛直方向の分割数を考慮した。多岐に渡る入力パラメータは、従来の負荷計算方法と提案方法の違いを比較して示す。列車風風量やブロック間空気量は、ホーム端部における列車風の風速測定を実施して隧道内の圧力損失係数を同定し、CFD 解析により各駅の列車風風量や列車風のホーム影響係数を明らかにする。隧道内空気温湿度は、隧道から流入する空気温湿度を予測する方法を検討するため、4 つの路線 8 地点の隧道換気口を対象に 2 年間の長期定点計測を実施した。その結果、隧道内の絶対湿度は最寄りの気象庁観測データの利用が適切であることを示し、隧道内の温度は、駅近傍の外気温度と隧道深さで簡易に予測できる推定式を導出した結果を示す。列車放熱負荷は、ホーム端部の温度偏差の実測値と CFD 解析による列車風風量の推定値から導出した。また、軌道部の排気口から直接排熱される割合を求め、排気高さによる列車放熱量の低減効果を加える提案を説明する。

---

## 4.2 ブロックモデルの活用

大規模建築の計算負荷を抑えるためには、建物形状や計算条件の簡略化など、適切な計算スキームの選択が必要となる。また、空調設備の省エネルギー検討を行うためには、空調条件や換気条件を変えた場合の室内環境や空調ゾーニング毎の熱負荷を予測できることが要求される。そこで本計算手法には、戸河里・荒井らによるブロックモデル<sup>1)</sup>の考え方を適用することとした。このブロックモデルは、計算の応答性が良く、大空間の上下温度分布や蓄熱を考慮できるため、本計算手法に最適と判断した。

また、本計算方法のインターフェースには、多くの技術者や設備管理者にとって使い慣れた汎用の表計算ソフトを利用した。また、設計者の技量による出力の違いを極力無くするため入力条件を極力制限し、短時間で精度良く予測する空調負荷計算手法の開発を目指した。

### 4.3 ブロックモデルの概要

#### 1) ブロック内空気の熱収支

ブロックモデルの概念を図4.1に示す。ブロックモデルは、地下空間を格子状のブロックに分割し、全ブロックで熱収支を満足するようにブロックの空気温度の線形連立方程式を解く。図4.1にブロック内空気の熱収支式を示す<sup>2)</sup>。左辺は室空気の蓄熱、右辺第1項は列車風による熱取得、第2項は空調による熱取得、第3項は隣接するブロックからの移流による熱取得、第4項は壁面からの対流熱取得となる。式(4.1)は後退差分で離散化している。

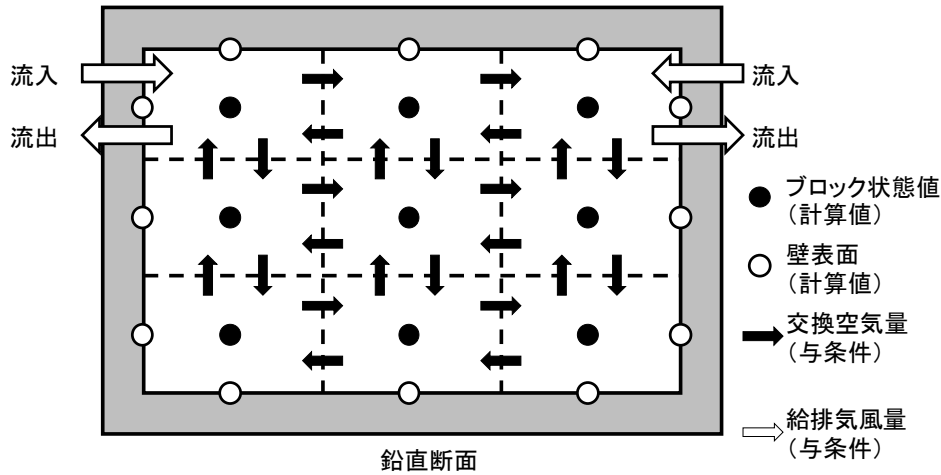


図4.1 ブロックモデルの概念図

$$c \cdot \rho \cdot Vol_i \cdot \frac{dT_{bi}}{dt} = c \cdot \rho \cdot Vw_i \cdot (Tw - T_{bi}) + c \cdot \rho \cdot Vd_i \cdot (Td - T_{bi}) + \sum_{j=1}^{Nblock} c \cdot \rho \cdot Vb_{j,i} \cdot (T_{bj} - T_{bi}) + \sum_{k=1}^{Nsurf_i} A_k \cdot hc_k \cdot (Ts_k - T_{bi}) + Qc_{T,i} + Qc_{P,i} + Qc_{L,i} \quad \text{式(4.1)}$$

- $c$  : 空気比熱 [J/(kg・K)] (=1,005)
- $\rho$  : 空気密度 [kg/m<sup>3</sup>] (=1.2)
- $Vol_i$  : ブロック i の気積 [m<sup>3</sup>]
- $T_{bi}$  : ブロック i の空気温度 [°C]
- $t$  : 時間 [s]
- $Vw_i$  : ブロック i に流入する列車風の風量 [m<sup>3</sup>/s]
- $Tw$  : 隧道内空気温度 [°C]
- $Vd_i$  : ブロック i に流入する空調風量 [m<sup>3</sup>/s]
- $Td$  : 空調の吹出し空気の温度 [°C]
- $Vb_{j,i}$  : ブロック j からブロック i への移動空気の風量 [m<sup>3</sup>/s]
- $Nblock$  : 全ブロック数
- $A_k$  : 壁面 k の表面積 [m<sup>2</sup>]
- $hc_k$  : 壁面 k の対流熱伝達率 [W/(m<sup>2</sup>・K)] (軌道部:14.4、ホーム部:12.0)
- $Ts_k$  : 壁面 k の表面温度 [°C]
- $Nsurf_i$  : ブロック i に面する壁面数
- $Qc_{T,i}$  : 列車放熱の対流熱取得 [W]
- $Qc_{P,i}$  : 人体からの対流熱取得 [W]
- $Qc_{L,i}$  : 照明からの対流熱取得 [W]

## 2) 壁体の非定常熱伝導

本計算手法では、列車放熱や照明負荷等の 1 日周期の熱容量を考慮するため、壁体の厚さ方向に 1 次元で考えることとし、図 4.2 に示す様に 5 分割して非定常熱伝導計算を行う。式(4.2)に壁体の非定常熱伝導の微分方程式を示す。式(4.2)を式(4.3)のように離散化した。

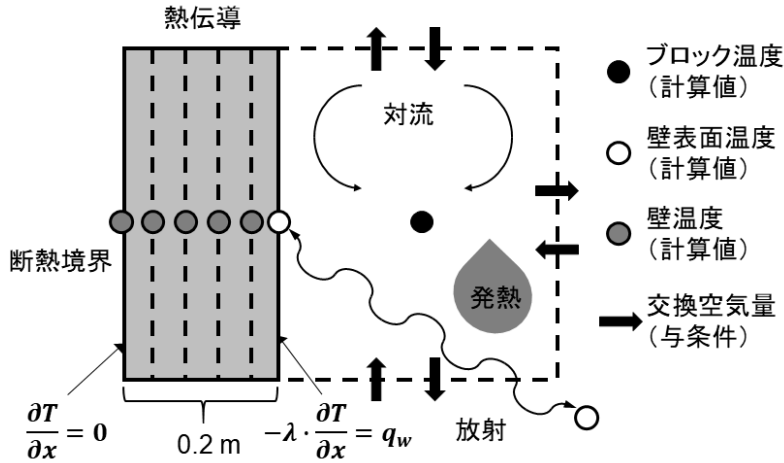


図 4.2 ブロックと壁面間の熱バランス

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad \text{式(4.2)}$$

$T$  : 壁体温度 [°C]  
 $a$  : 壁体の熱拡散率 [ $\text{m}^2/\text{s}$ ] ( $=8.0 \times 10^{-7}$ )

$$\frac{T_m - T_m^*}{\Delta t} = \frac{a}{\Delta x^2} \cdot (T_{m+1} - 2T_m + T_{m-1}) \quad \text{式(4.3)}$$

$x$  : 壁体厚さ [m]  
 下添え字  $m$  : 空間差分位置

## 3) 壁体表面の熱収支

壁体のブロック側表面の熱収支式を式(4.4)に示す。左辺は壁体内への熱伝導、右辺第1項は対流熱伝達、第2項は他の面からの放射熱伝達である。また、平均放射温度は、式(4.5)中式の様に形態係数加重平均で求められるが、以下3つの理由により面積加重平均温度で近似した。

- ① 列車風の影響で放射成分よりも対流成分が支配的
- ② 駅舎ごとにホーム長や階高等の構造が異なり、放射計算時の形態係数計算の煩雑さを軽減
- ③ 形態係数の積算値を用いた場合と面積加重平均を用いた場合の計算結果の差が僅少

$$q_{w,k} = hc_k \cdot (Ts_k - Tb_i) + hr_k \cdot (Tmrt - Ts_k) + qc_{T,k} + qc_{P,k} + qc_{L,k} \quad \text{式(4.4)}$$

$hr_k$  : 壁面  $k$  の放射熱伝達率 [ $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ] ( $=4.5$ )  
 $Tmrt$  : 平均放射温度 [°C]  
 $qr_{T,k}$  : 壁面  $k$  の列車放熱の放射熱取得 [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]  
 $qr_{P,k}$  : 壁面  $k$  の人体からの放射熱取得 [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]

$$qr_{L,k} : \text{壁面 } k \text{ の照明からの放射熱取得 } [\text{W/m}^2]$$

$$T_{mrt} = \sum_{j=1}^{N_{surf}} F_{j,k} \cdot T_{S_k} \approx \frac{\sum_{l=1}^{N_{surf}} A_l \cdot T_{S_l}}{\sum_{l=1}^{N_{surf}} A_l} \quad \text{式(4.5)}$$

$N_{surf}$  : ホーム内の全表面数  
 $A_l$  : 壁面 1 の表面積  $[\text{m}^2]$   
 $T_{S_l}$  : 壁面 1 の表面温度  $[\text{°C}]$   
 下添え字  $l$  : 壁面番号

なお、壁体の地盤側の境界については、詳細な壁表面温度を算出するためには十分な地盤厚さを解析対象とし、対象地点の不易層温度を初期温度とする年間の非定常計算を行うことが望ましいが、本計算手法では計算時間を削減するため壁体地盤側を断熱条件とした。ブロック側と地盤側の境界条件を式(4.6)、式(4.7)に示す(図 4.2 参照)。

$$-\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = qw \quad \text{式(4.6)}$$

$$\frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=5} = 0 \quad \text{式(4.7)}$$

#### 4) 顕熱負荷

式(4.1)～(4.7)を連立させることで、未知数のブロック内空気温度、壁体表面温度、壁体内部温度、空調吹出し温度を算出する。熱収支は非空調時間帯を含む 24 時間の非定常計算を行うが、給気風量が少ない場合など、対象のブロック温度が設定温度に達しない場合は未処理負荷として次の時間ステップに引き継がれる。負荷計算は、制御対象のブロック内空気温度が空調設定温度となる空調吹出し温度を求め、空調は全外気方式であることから外気温度との差から顕熱負荷を求める。

#### 5) 潜熱負荷

図 4.3 にあおば通駅と東京駅の平面絶対湿度分布を示す。同駅のホーム内では、平面絶対湿度に大きな差が無かった結果を踏まえ、潜熱についてはブロックモデルを適用せず、1 つの状態値として計算した。式(4.8)にブロック内空気の水蒸気収支を示す。



図 4.3 あおば通駅と東京駅のホーム絶対湿度分布

$$\rho \cdot Vol \cdot \frac{d x_R}{d t} = \rho \cdot V w_i \cdot (x_w - x_R) + \rho \cdot V d \cdot (x_d - x_R) + Q l_p + Q l_w \quad \text{式(4.8)}$$

$x_R$  : ブロック内空气の絶対湿度 [kg/kg (DA)]

$x_w$  : 隧道内絶対湿度 [kg/kg (DA)]  
 $V d$  : 空調の総吹出し風量 [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]  
 $x_d$  : 空調の吹出し空气の絶対湿度 [kg/kg (DA)]  
 $Q l_p$  : 人体からの水蒸気発生量 [kg/s]  
 $Q l_w$  : 壁面からの蒸発水蒸気量 [kg/s]

また、壁面からの  $Q l_w$  を式(4.9)、 $k_x$  はレイスの関係から式(4.10)にて算出する。

$$Q l_w = r_s \cdot k_x \cdot (x_s - x_R) \cdot A \quad \text{式(4.9)}$$

$r_s$  : 濡れ面積率 [-] (=0.2)  
 $k_x$  : 物質移動係数 [ $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{kg/kg (DA)})$ ]  
 $x_s$  : 壁体表面温度における飽和絶対湿度 [kg/kg (DA)]

$$k_x = \frac{h c}{C_{pm}} = \frac{h c}{c + c v \cdot x_R} \quad \text{式(4.10)}$$

$C_{pm}$  : 湿り空气の比熱 [ $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ]  
 $c v$  : 水蒸気の比熱 [ $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ] (=2.0×10<sup>7</sup>)

---

潜熱負荷は、外気の絶対湿度と吹出し空気の相対湿度を一定(90%)とした給気条件より算出するが、本計算手法は全外気方式を前提としており、絶対湿度は成り行きとなる。

なお、式(4.8)～(4.10)にて算出された絶対湿度がブロック最低温度の飽和絶対湿度よりも大きい場合、壁体表面で凝縮して排水されると仮定し、ブロック最低温度の飽和絶対湿度を全ブロック共通の絶対湿度とする。収束計算には、表計算ソフトの循環参照の機能を使用した<sup>3)</sup>。

#### 4.4 ブロック分割

図4.4に本計算手法の水平断面と鉛直断面のブロック分割を示す。一般の建物では、外部環境の影響を考慮しペリメータとインテリアに分割するが多いが、地下駅ホームは熱容量の大きなコンクリート等の構造体で囲われた空間であり、外部環境の影響が小さい。そこで、水平断面は列車の通過する軌道部と乗降客が滞在するホーム部に分割する。ホーム長手方向は、列車風等の影響でホーム中央部と端部で温度差が見られた実測結果を考慮して3分割とする。これにより、多様な地下駅の空調ゾーニングにも対応できる。また、鉛直断面の分割は、軌道天井部と床部で2～3℃の温度差がある壁面温度測定結や排気位置の変更による効果を比較できるようにするため、軌道部を上下3分割、ホーム部を居住域と非居住域に上下2分割とした。

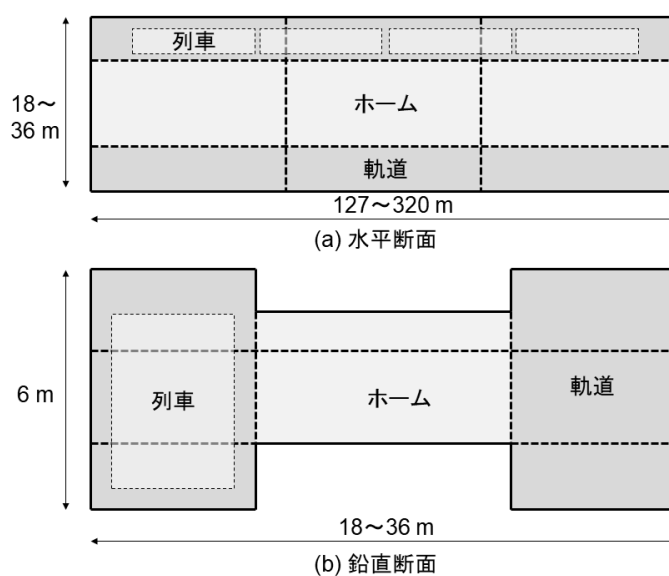


図4.4 ブロック分割

## 4.5 入力パラメータ

従来の負荷計算法と本計算手法の負荷計算法を表 4.1 に比較して示す。本計算手法は列車風負荷の算出に必要な流入風量と隧道からの流入温湿度を与条件とすることで、従来の負荷計算法で生じやすい不適切な入力設定を回避し、かつ計算精度の向上を図る。

以下に各項目の概要を示す。

### 1) 設計・運転条件

設計・運転条件には、ホーム温度設計条件[℃]、吹出し口相対湿度[%]、排気高さ[軌道上部/下部]、車輛の乗車定員[人/輛]、編成数[輛]、列車風風量[m<sup>3</sup>/h]、軌道部壁面の濡れ面積率[%]、内部発熱（人体発熱[kW/人]、列車放熱[kW/本数]、直接捕集率（DCE）[%]、照明発熱[kW/m<sup>2</sup>]）の与条件を設定する。列車風風量、列車放熱、DCE の推定値は後述する。

### 2) 時刻別設定

時刻別設定には、列車風風量や列車放熱量に影響する上下線の運行ダイヤ（普通・特急・回送・通過列車の本数）や列車の乗車率[%]、人体負荷の算定に必要な改札機データ[人]、外気負荷算定に必要な空調機・排気ファン・照明の運転スケジュール[on/off]、外気温湿度[℃、%]、隧道内空気温湿度[℃、%]の与条件を設定する。隧道内空気温湿度は後述する。改札機データは乗降者数の実数であり差分が滞在者数となるが、全ての乗降者数を計数していない乗換駅については、従来通り乗降者数の設計値を設定する。また、新築時には改札機データの代わりに従来の設計手法である推定乗降人員を設定する。

### 3) 形状設定

形状設定では、軌道部の高さ・奥行き、ホーム部の幅・長さ・軌道部からの床高さ・天井高さ[m]、ホーム長に対する空調ゾーン長の比率[%]を設定する。

### 4) 計算条件

計算条件は、計算時間間隔[s]、壁面の蓄熱を考慮するための計算期間[日]を設定する。

表 4.1 従来の負荷計算方法と提案方法の比較

変数	従来の計算方法	提案方法
列車風風量	模型実験や実測値 SES	各駅の実測と CFD
隧道温度	外気温度+2℃ SES	隧道実測値による計算値
隧道絶対湿度	周囲の相対湿度ピーク	外気相対湿度
列車放熱	列車速度や重量を基にした計算値 SES	ホーム端部の流入温度偏差と列車風風量による積算値
人体負荷	乗客計画数	改札機データ
計算方法	SES	ブロックモデル
ホーム影響係数	全てのゾーンで同一値 (=0.5)	個々のゾーンに設定

## 4.6 列車風風量

### 4.6.1 隧道内障害物のモデル化

隧道やホーム構造が異なる 3 駅(新日本橋駅、宮城野原駅、大宮駅)では、列車風の風向は列車の進行方向と同じであったが、風速の大きさには違いが見られた。列車風負荷の推定にはより詳細な列車風の特徴を把握する必要があるため、列車を移動物体とした CFD 解析を実施した。



写真 4.1 宮城野原駅の隧道

地下駅を結ぶ多くの隧道は、空気抵抗となる湾曲箇所や傾斜箇所が存在する。また隧道内には、レールやまくら木その他、湧水の排水管や排煙ダクト、掲示板等の障害物が多数存在する。宮城野原駅の隧道部を写真 4.1 に示す。CFD 解析を行う際には、隧道の起伏を再現することが望ましいが、車両を任意方向へ移動する設定には高度なモデル化の技術が必要となる。また、空気抵抗となる障害物の詳細な形状を再現することが望ましいが、駅間の隧道内障害物を正確に把握することは困難であり、1km 以上となる地下空間の解析領域における障害物の再現は現実的ではない。そこで本研究では、設備設計者による実務的な解析を目的に CFD 解析モデルの隧道形状を直線形状とし、障害物を含む空気抵抗の代わりに圧力損失を与える解析を実施した<sup>4)</sup>。

圧力損失は式(4.11)で表される。

$$\Delta P = \frac{1}{2} \rho \cdot C_f \cdot V^2 \quad \text{式(4.11)}$$

$P$  : 圧力 [Pa]

$\rho$  : 空気密度 [kg/m<sup>3</sup>]

$C_f$  : 抵抗係数 [-]

$V$  : 気流速度 [m/s]

単線の隧道が総武線で最長となる品川駅～新橋駅間を対象区間とした 2013 年 12 月 11 日の実測結果に基づいて、駅間の隧道部全領域に圧力損失を等方向に付与し  $C_f$  の同定を行った。

表 4.2 CFD 解析の概要

解析領域	1,630m×19.5m×5.9m
メッシュ分割	1,630(X)×67(Y)×20(Z)=2,184,200
車両(移動物体)形状	19.5(X)×3.0(Y)×4.0(Z) [m]
移流項精度	一次精度風上差分
開口条件 (階段部開口、隧道端部)	表面圧力条件(自然流入流出条件)
渦動粘性係数の初期値	$\nu_t=2.0 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ $k=1.0 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}^2$ $\varepsilon=4.5 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}^3$
乱流モデル	標準 k- $\varepsilon$ モデル
圧力補正式解法	SIMPLEC
壁面条件	速度：対数則、温度：断熱
計算時間間隔	0.05 [s]
解析ソフト	STREAM Ver. 11

CFD 解析の概要を表 4.2 に示す。移流項精度には、列車風がほぼ一方向流で数値拡散の影響が少ないことから、計算の安定性が高い一次精度風上差分を使用した。移動物体 CFD 解析のソフト上の制約と解析時間を考慮し、メッシュ分割は X 軸方向の基準長さ 1m、Y・Z 軸方向は 0.5m、計算時間間隔を 0.05 秒とした。

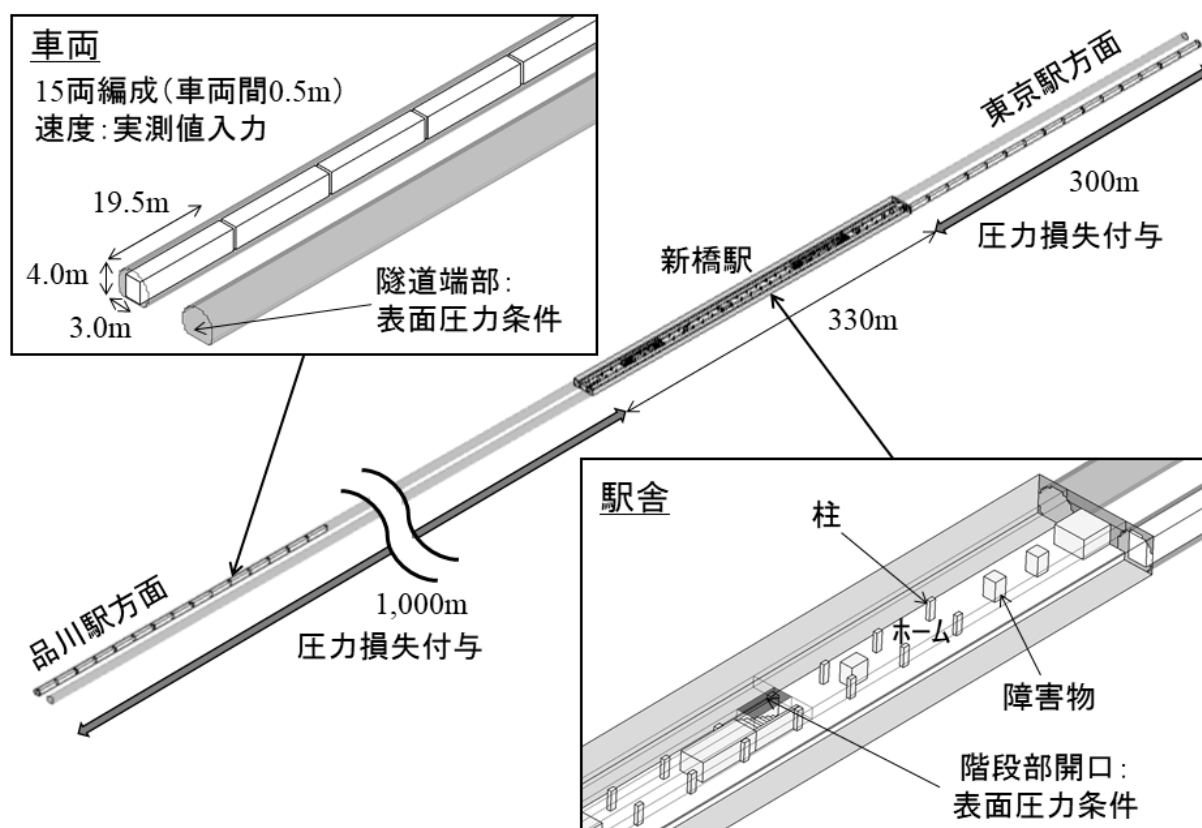


図 4.5 新橋駅の CFD 解析モデル

CFD 解析モデルを図 4.5 に示す。新橋駅は単線の隧道に接続する島式 1 面 2 線のホーム構造で、新橋駅を発着する列車(15 両編成)の車両を直方体でモデル化した。品川駅方面への 1000m と東京駅方面への 300m の隧道を直線形状でモデル化した。駅構内はホーム階のみを解析領域とし、上階との階段部開口および隧道端部を表面圧力条件とした。列車風が卓越した駅構内の流れ場では、温度差による浮力の影響は相対的に小さくなるため、等温条件で計算を行った。また、実測では列車風の影響が次の列車の発着時まで残っていることが観察されたため、検討対象とした列車の前に、上下線の列車を先行して駅構内に進入・停車・発車させ、次の列車を進入・停車・発車させた状況を検討対象とした。

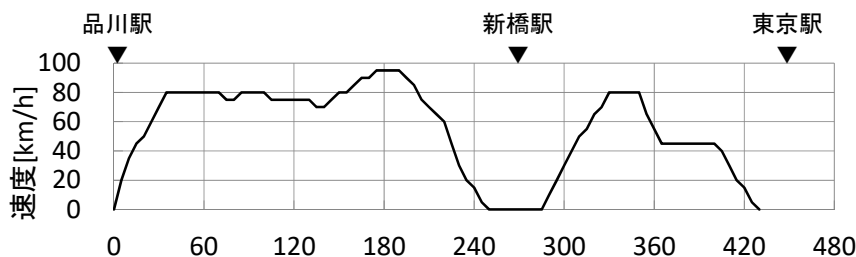


図 4.6 品川東京駅間の列車運行速度

列車速度は、実際に運行されていた車掌室のスピードメータを 5 秒毎に記録し、移動物体の条件とした。品川・東京駅間の列車運行速度を図 4.6 に示す。

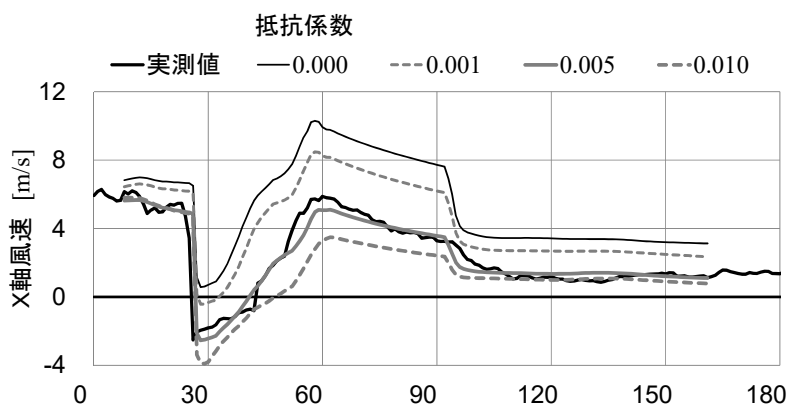


図 4.7 抵抗係数と列車風の関係（新橋駅ホーム端）

圧力損失の抵抗係数 $C_f$ をパラメータとした 4 ケースの計算値と実測値を図 4.7 に比較して示す。 $C_f$ の小さいケースでは解析結果は実測より風速が高く、 $C_f$ の大きいケースでは解析結果は実測よりも低くなり、圧力損失の適切な付与が重要であると考えられる。

次に、実測値を真値と仮定した場合の抵抗係数と標準偏差の関係を図 4.8 に示す。この結果、新橋駅の $C_f$ は 0.005 程度が適切と考えられる。

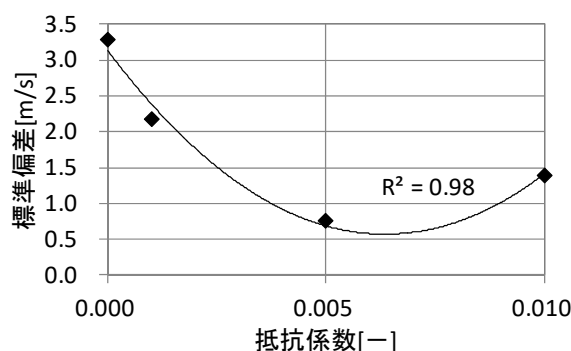


図 4.8 抵抗係数と標準偏差の関係

#### 4.6.2 隧道内の圧力損失モデルの一般性の確認

次に、新橋駅で同定した隧道部の抵抗係数 $C_f$ が他の駅舎においても適用できるかを確認するため、新日本橋駅、宮城野原駅、大宮駅の3駅を対象としてCFD解析を行った。階段を含む駅構造と列車の進入速度以外は新橋駅と同じ解析条件とし、隧道部の $C_f$ を0.005として圧力損失を与えた。

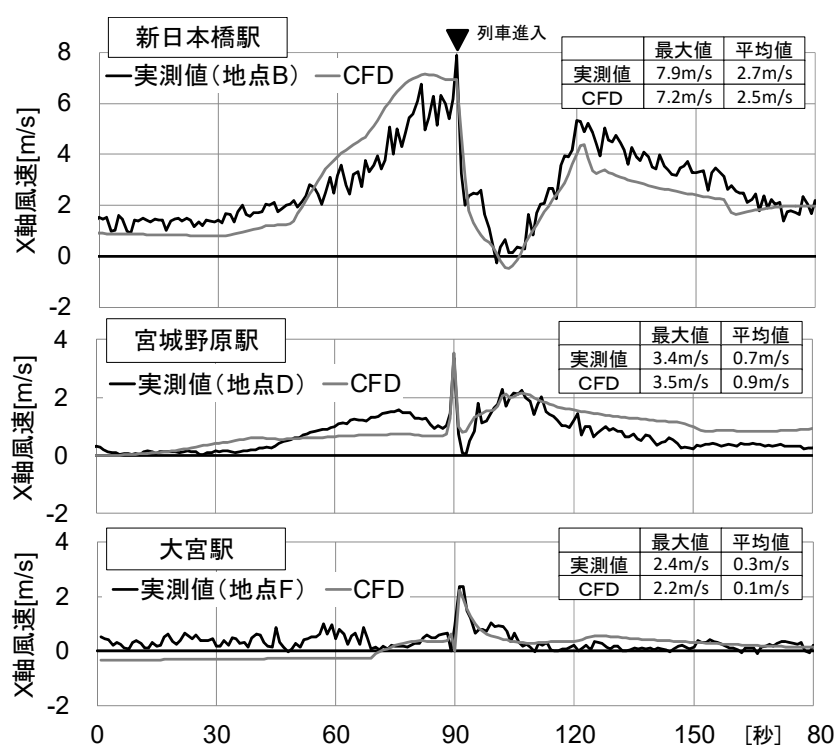


図 4.9 列車進入風速の実測結果とCFDの比較

ホーム端部での列車進入風速について、3駅の実測結果とCFD解析結果を図4.9に比較する。上り線のため、風速は全て正負逆に表示している。CFD解析により、列車のホーム進入前から退出後までの列車風最大値と平均値をほぼ再現できた。これらの結果から、 $C_f$ を0.005程度として圧力損失を与えることにより隧道内の障害物による影響を組み込むことが可能である。

### 4.6.3 列車風の風量推定

実測結果との対応が良い新日本橋駅の CFD 解析モデルを用い、列車運転本数と列車風の関係を検討した。駅に発着する列車の時間間隔として 4 ケース (3 分、4 分、5 分、6 分) を想定した。すなわち、1 時間当たりの列車運転本数は 20、15、12、10 [本/h] である。図 4.10 に、列車の運転本数と列車風の風速との関係について実測と CFD 解析の結果を比較する。CFD 解析による流入風は、隧道断面での平均風速を示す。この結果、列車風は列車の運転本数と相関があることが示され、かつ地点 B の実測値が CFD 解析の平均風速と最も近い値となり、列車風測定の代表点となり得る。

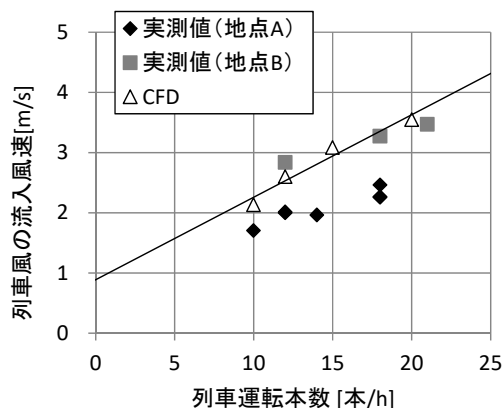


図 4.10 列車運転本数と列車風の風速との関係 (新日本橋駅)

その他駅について、列車の時間間隔として 3 ケース (3 分、4 分、6 分) を想定した解析を行った。各駅の列車運転本数と列車風の風量との関係を図 4.11 に示す。隧道形状や列車進入速度 (停車前 1 分間の平均速度 45km/h) に大差の無い新日本橋駅と馬喰町駅では、列車風の風量はほぼ同じであった。また、列車進入速度 (停車前 1 分間の平均速度 55km/h) の速い新橋駅では隧道形状は新日本橋駅と同等であるが、列車風の風量が多い。一方、宮城野原駅と大宮駅は、新日本橋駅よりも列車風の風量が半分程度となった。この 2 駅は複線であることから、隧道内での分散や上下線の列車風が相殺される影響が大きいと考えられる。

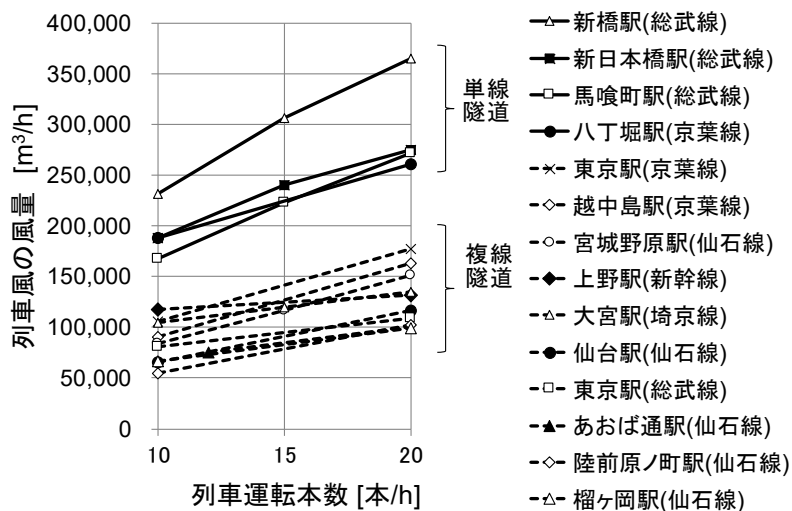


図 4.11 各駅の列車運転本数と列車風の風量との関係

## 4.7 ブロック間の交換空気量

### 4.7.1 列車風による水平面空気交換量の検討

列車走行によってホームに持ち込まれる列車風負荷 $q_w (= q_{w.S} + q_{w.L})$ は、式(4.12)と式(4.13)で算出する。

$$q_{w.S} = C_p \cdot \rho \cdot Q_T (t_r - t_p) \cdot k_w \quad \text{式(4.12)}$$

$$q_{w.L} = \gamma \cdot \rho \cdot Q_T (x_r - x_p) \cdot k_w \quad \text{式(4.13)}$$

- $q_{w.S}$  : 列車風による顕熱負荷 [W]
- $q_{w.L}$  : 列車風による潜熱負荷 [W]
- $C_p$  : 空気 の 定圧比熱 [J/kg/K]
- $\rho$  : 空気密度 [kg/m<sup>3</sup>]
- $Q_T$  : 列車風の風量 [m<sup>3</sup>/列車]
- $t_r$  : 隧道温度 [°C]、
- $t_p$  : ホーム部温度 [°C]
- $\gamma$  : 水の蒸発潜熱 [J/kg]
- $x_r$  : 隧道の絶対湿度 [kg/kg (DA)]
- $x_p$  : ホーム部の絶対湿度 [kg/kg (DA)]
- $k_w$  : ホーム影響係数

ホーム影響係数 $k_w$ は列車風がホームの冷房負荷へ影響する負荷の割合を示し、駅毎に異なる値となるが一般的には、0.5が使用されている<sup>5)</sup>。列車風の $k_w$ は、ホーム気積に占める列車風の割合であると考えられる。そこで、隧道内空気を拡散物質で模擬し、ホーム部における拡散物質の濃度により $k_w$ を推定する。

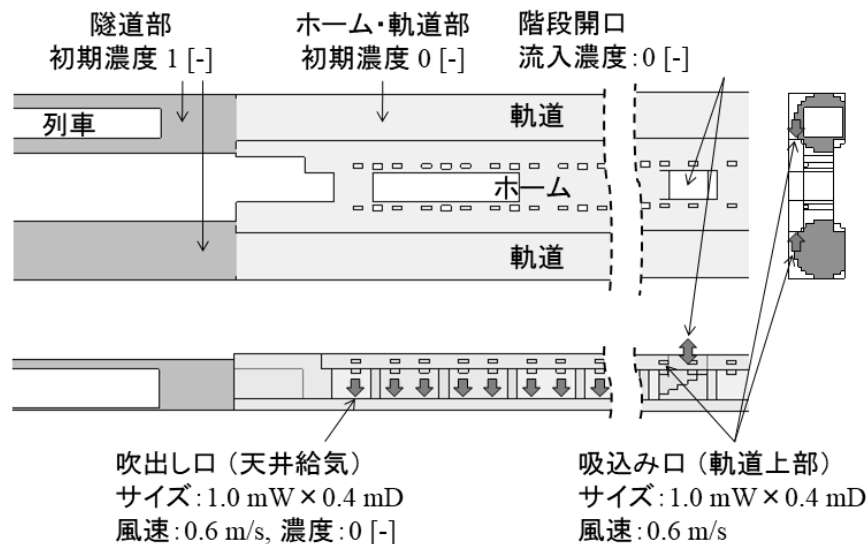


図4.12 新日本橋駅のCFD解析モデル

図4.12に新日本橋駅を対象としたCFD解析モデルを示す。付与する拡散物質は、乱流プラントル数を0.9とし、重力沈降は非考慮（沈降速度=0 m/s）とした。また、換気による気流性状の影響も考慮するため、等温の換気用給排気口（1.0mW×0.4mD、864 m<sup>3</sup>/h、各176個）を追加した。軌道部とホーム部の初期濃度、お

よび換気用の給気や上階から流入する拡散物質濃度を 0 [-]とし、隧道内及び隧道端部で解析領域外からの流入空気濃度を 1 [-]とした。

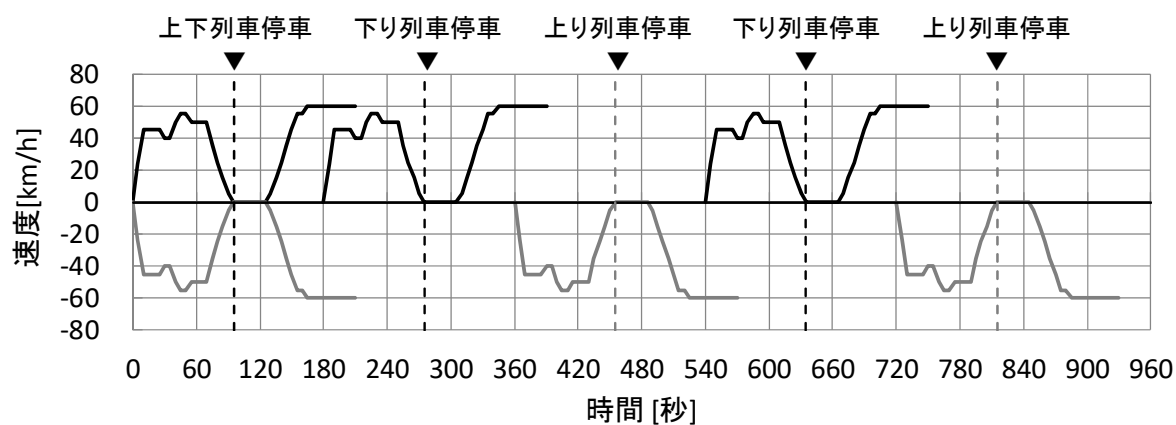


図 4.13 列車速度と運行間隔

列車速度と運行間隔を図 4.13 に示す。列車速度は実測時の運行速度を入力し、計算時間内（960 秒）に上下線を各 3 本運行する。始めに、解析領域内の気流性状がホーム中心で対称となるように、 $t=0$ s 時点より上下線の列車運行を開始し、 $t=95$  s 時点で 30 秒間停止したのち発車する。次に、 $k_w$ の周期定常解が得られるように、千葉方面の下り列車から上下線の列車を交互に 3 分間隔で駅へ進入・停車・発車するモデルとした。

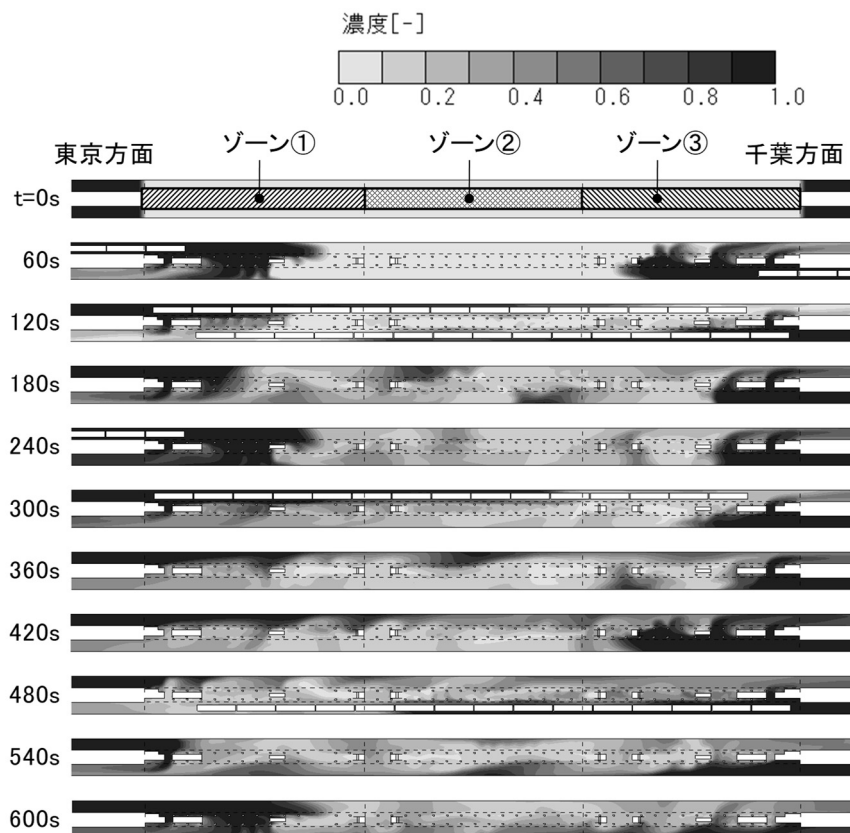


図 4.14 ホーム平均濃度分布（FL+1.5m）の時間推移

60s 間隔のホーム平面濃度分布を図 4.14 に示す。特徴的な傾向を以下に示す。t=60 s 時点では、列車走行に伴い隧道から列車風が流入し、ホーム濃度が上昇する。t=180 s 時点では、駅から列車が発車する際に、階段からの流入により濃度が低下する。t=360s 時点では、列車風の流入が少ないため、空調換気によりホーム全体の濃度が低下する。

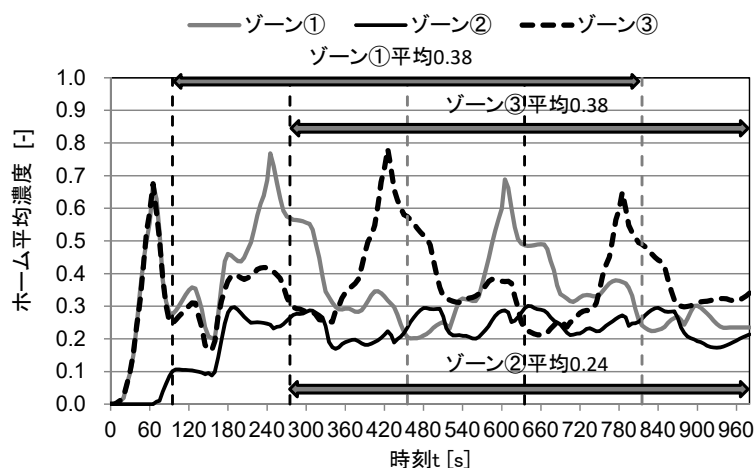


図 4.15 ホーム平均濃度 (FL+1.5m) の経時変化

図 4.14 に示すホーム部の 3 ゾーンについて、平均濃度 ( $\equiv k_w$ ) の経時変化を図 4.15 に示す。ゾーン別では、ホーム中央部のゾーン②は 0.2 から 0.3 の間で推移し、隧道と接するゾーン①と③では、0.2 から 0.8 の間で周期的に変動した。1 時間毎の負荷計算を想定した場合、2 周期分となる 12 分間の平均値では、ゾーン①と③共に 0.38 となり、ゾーン② (0.24) より 1.5 倍高い値となった。なお、上下線共にピーク値が 2 周期目よりも 3 周期目に低い要因は、上下線隧道の連通部や隣接駅 (東京駅) の複線部において、上下線の列車風が混合したためである。列車風の流入量を 1.0 とした時の水平断面のブロック間の交換空気量 (=ブロック間移動空気流量/列車風風量) を図 4.16 に示す。

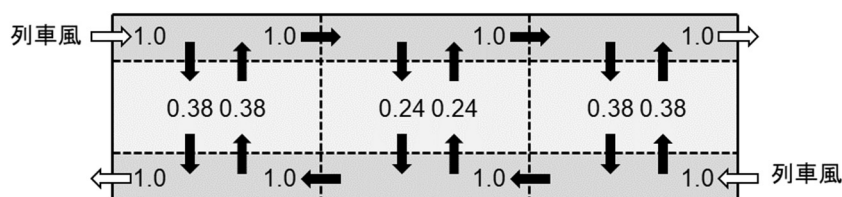


図 4.16 水平断面のブロック間交換風空気量

#### 4.7.2 空調システムによる鉛直面交換空気量の検討

給気風量を 1.0 とした時の鉛直断面のブロック間の交換空気量 (=ブロック間移動空気流量/給気風量) を図 4.17 に示す。鉛直断面では、浮力の影響を考慮するため、給気と排気の設置高さや風量比をパラメータとした 2 次元の非等温 CFD 解析を行い、給気風量により無次元化した値を適用した。ここで、鉛直断面のホーム上部には階段開口部が存在するが、上階は空調エリアと想定し、ホーム階の高低差が無く、流入する風量

の温湿度条件はすべてホーム設計条件と同等と仮定する。また、上下温度の逆転が生じた場合には、該当するブロック間の換気量を極めて多くし、一様な温度となるようにした。

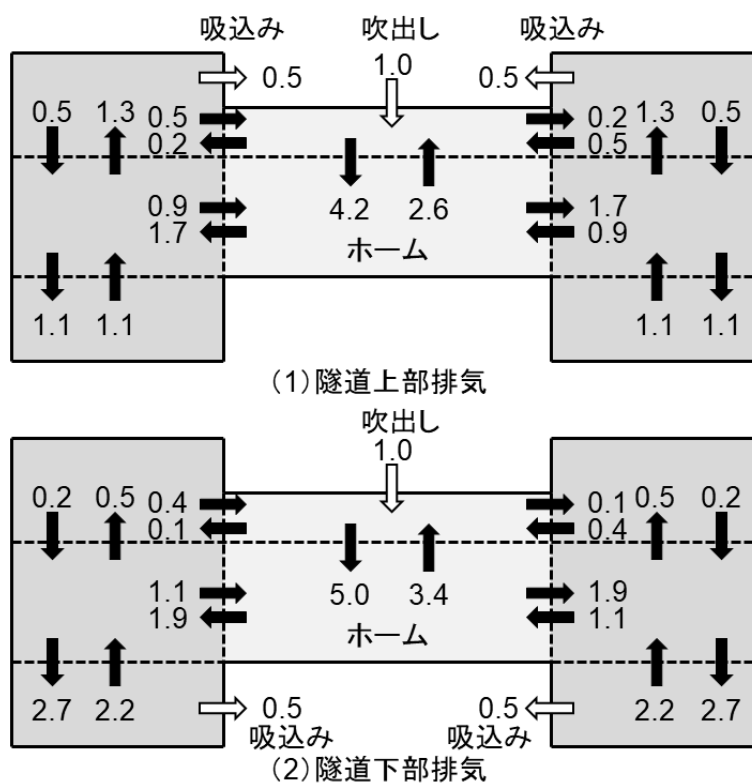


図 4.17 鉛直断面のブロック間交換空気量  
(上段：天井吹出し軌道上部吸込み、下段：天井吹出し軌道下部吸込み)

## 4.8 隧道内空気温湿度

隧道内温湿度の予測には、SES に代表される管路網計算と列車放熱、壁体伝熱を連成させた動的シミュレーションツールの使用も考えられる。しかし、環境条件の変化により、シミュレーションツールが開発された当時の状況と実際の状況とは大きく異なり、安全側の設計により過大な設備容量となることが多い。そこで本章では、隧道から流入する空気温湿度として実測値を活用する方法を検討するため、4 つの路線を対象に 2 年間の長期定点計測を実施し、駅近傍の外気条件と隧道長さなどの条件により隧道内空気温度を簡易に予測する推定式を導出し、実測値と比較する。

### 4.8.1 隧道内空気温度の予測式

#### 1) 実測概要

実測を行った 4 路線・8 箇所の隧道内測定点を表 4.3 に示す。隧道長さは地上となる隧道入口から測定点までの距離を示す。仙石線の 4 地点は隧道の換気塔内にある排気ファンのサクシヨン側を、埼京線の大宮駅は隧道に隣接する排気ファンのサクシヨン側を、総武線と京葉線の 3 地点は駅間にある立坑接続部での隧道内の空気温湿度を測定した。測定にはデータロガー付き温湿度センサ（T&D 製 RTR-53）を測定点 1 箇所につき 3 台使用し、30 分間隔でデータを記録した。なお、計測期間が長期間に及んだため、2 年間の測定後に ISO/IES 17025-2005 に基づく機関にて校正を実施したところ、全センサについて温度は標準器 $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ 以内、相対湿度は標準器 $\pm 2\%$ 以内の指示値であった。

表 4.3 隧道の測定点

測定点	路線名	駅間		隧道長さ[m]
あおば通駅換気塔	(1)仙石線	あおば通駅	仙台駅	3,100
仙台駅換気塔		仙台駅	榴ヶ岡駅	2,600
榴ヶ岡駅換気塔		榴ヶ岡駅	宮城野原駅	1,700
陸前原ノ町駅換気塔		宮城野原駅	陸前原ノ町駅	70
大宮駅換気塔	(2)埼京線	日進駅	大宮駅	600
汐留立坑	(3)総武線	新橋駅	品川駅	3,500
隅田川立坑	(4)京葉線	八丁堀駅	越中島駅	3,200
東越中島立坑		越中島駅	潮見駅	1,200

#### 2) 実測結果

図 4.18 に計測期間（2015 年 5 月～2017 年 4 月）における隧道内空気温度と外気温度を 4 つの路線別に比較して示す。隧道内空気はセンサ 3 点の平均値を、外気温度は対象駅最寄りの気象庁観測データ（1 時間平均値）<sup>6)</sup>を示している。各路線ともに隧道内の空気温度は外気よりも日変動が小さく、夏期ピークで外気より低く、冬期ピークでは外気よりも高温で推移した。2015 年と 2016 年の夏期ピーク値は 8 月にほぼ同じ値となり、1 年周期の波形を示した。

図 4.19 に計測期間における隧道内空気と外気の絶対湿度を 4 つの路線別に比較して示す。各路線とも 8 月に絶対湿度が最大となり、日変動の振幅はやや小さいものの、全期間を通して外気とほぼ同じ値で推移した。2015 年と 2016 年のピーク値はほぼ同じ値となり、温度と同様に 1 年周期の波形を示した。この結果、地下駅の列車風負荷に影響する隧道内の空気温湿度は外気温湿度と高い相関が見られた。一般的に、地下数 m から数十 m の地中温度は年間を通してほぼ一定温度であるが、隧道内は換気用に外気を取り入れていることや列車走行に伴う地上からの外気誘引等により、外気との相関が高いと考えられる。特に隧道内空气の絶対湿

度は、最寄りの気象庁観測データと大きな差異が見られなかった。一方、隧道内空気温度は外気温度よりも日変動、年変動ともに振幅が小さい。これは、設計用隧道内空気温度として外気ピーク値を利用する従来の設計手法では、列車風の顕熱負荷を過大に見積ることとなる。そこで本章では、外気温度から隧道内空気温度の推定を試みる。

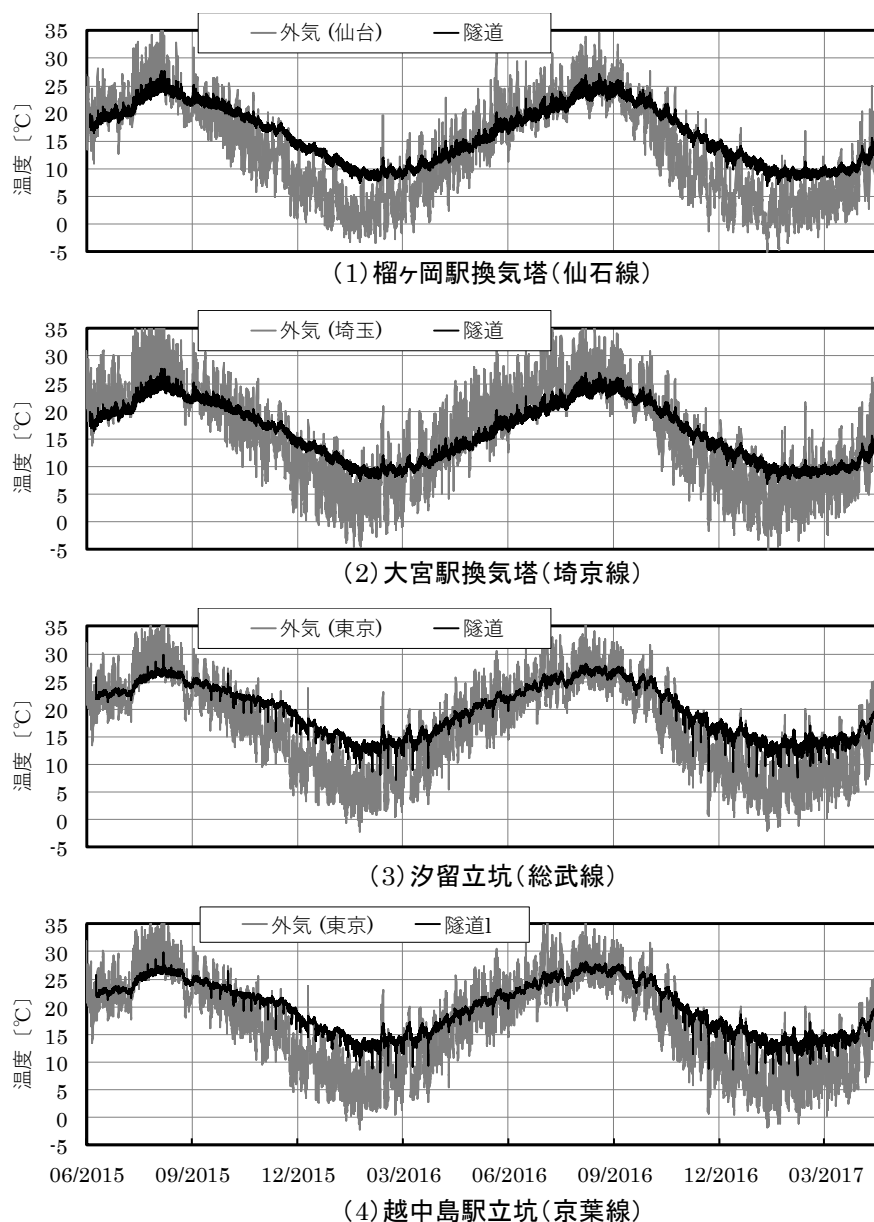


図 4.18 隧道内空気と外気の温度比較 (2015 年 5 月～2017 年 4 月)

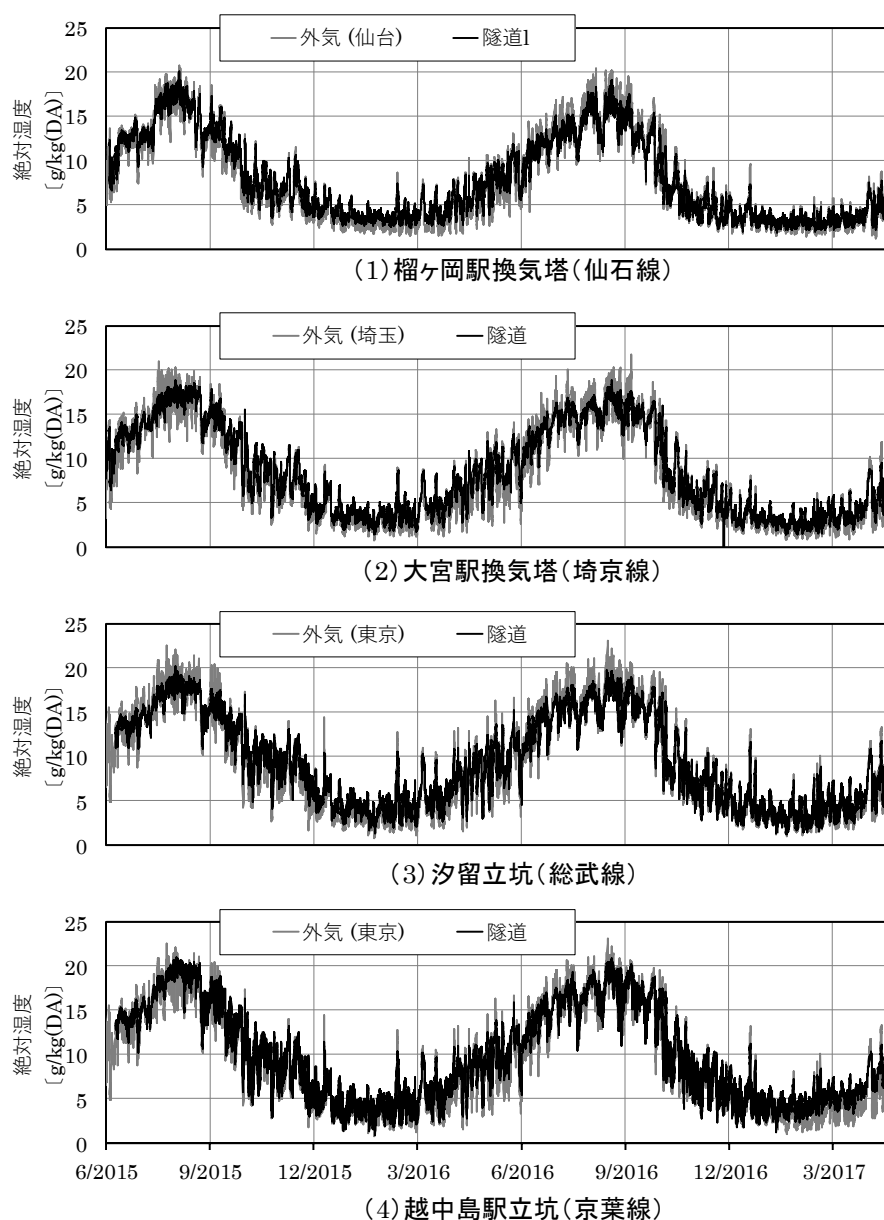


図 4.19 隧道内空気と外気の絶対湿度比較 (2015 年 5 月～2017 年 4 月)

### 3) 温度の日較差

外気と隧道内空気の温度日較差の平均値を表 4.4 に示す。外気は 1 時間平均値、隧道は 30 分毎の瞬時値から算出した。隧道内空気温度の日較差は 8 箇所の平均で  $2.4^{\circ}\text{C}$  となり、外気と比較して  $1/3$  以下の変動幅となった。なお、陸前原ノ町駅の日較差が若干大きいのは、測定点から約 70m で地上に出る配置であり (表 4.3)、他の測定点よりも外気流入の影響が大きいと考えられる。

図 4.20 に大宮駅換気塔の外気と隧道内空気の温度推移について 2015 年と 2016 年を比較して示す。両年共に隧道内空気温度は外気と比較して日較差が非常に小さい。そこで、1 日周期の波形をキャンセルした日平均外気温度を変数とし、隧道内空気温度を式 (4.14) で仮定し、各パラメータの同定を行うこととした。式 (4.14) で求める隧道内空気温度に対し、外気温度や各パラメータとの関係を図 4.21 に示す。 $a$  は外気と隧道内空気との年平均温度差、 $b$  は外気温と隧道内空気温度との年較差の比、 $t_d$  は外気温と隧道内空気温度との時

間遅れとする。

$$T_r(t) = (T_{oa} + a) + \{T_{ox}(t - t_d) - T_{oa}\} \cdot b \quad \text{式(4.14)}$$

- $T_r(t)$  : 隧道内空気温度 [°C]  
 $T_{oa}$  : 年平均外気温度 [°C]  
 $a$  : 温度加算 (外気と隧道内空気との年平均温度の差) [°C]  
 $t$  : 年初から数えた経過日数[日]  
 $t_d$  : 時間遅れ[日]  
 $T_{ox}(t)$  : 日平均外気温度 [°C]  
 $b$  : 係数 (外気と隧道内空気との年較差の比) [-]

表 4.4 外気と隧道内空気の温度日較差の平均値

測定点	外気温度[°C]	隧道[°C]
あおば通駅換気塔	6.9(仙台)	2.9
仙台駅換気塔		3.2
榴ヶ岡駅換気塔		1.7
陸前原ノ町駅換気塔		3.7
大宮駅換気塔	8.6(埼玉)	1.7
汐留立坑	7.2(東京)	1.5
隅田川立坑		2.3
東越中島立坑		1.9
平均	7.6	2.4

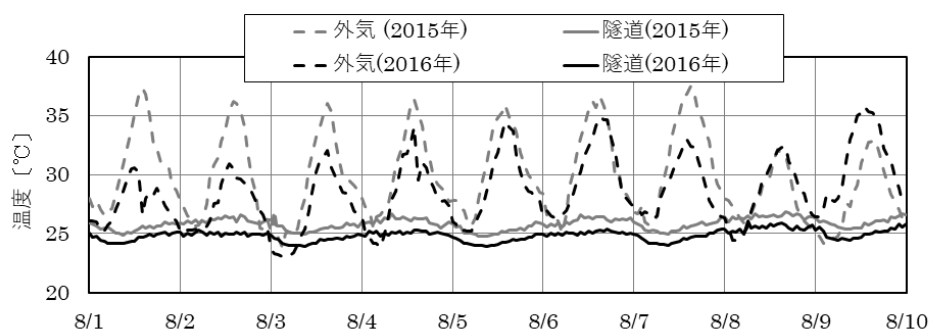


図 4.20 大宮駅換気塔の外気と隧道内空気の温度推移 (2015 年・2016 年)

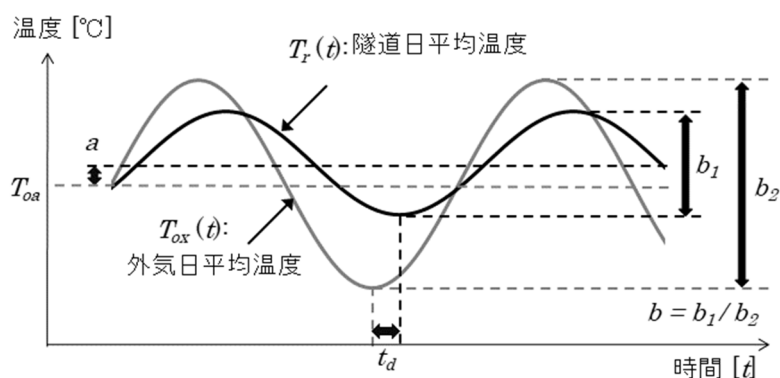


図 4.21 式(4.14)のパラメータ

4) 外気と隧道内空気との年平均温度の差 ( $a$  の同定)

表 4.5 に外気と隧道内空気との年平均温度とその温度差を示す。隧道内空気温度は測定点 8 箇所の全地点で外気温度より高く、平均で外気温度+3.2℃となった。これは、列車からの放熱負荷の影響が主要因と考えられる。特に仙石線終着駅のあおば通駅は、折返しで停車時間が長いいため車両からの列車放熱量が大きく、外気との温度差が大きくなったと推定される。また、上下線の隧道が外気に繋がる大宮駅換気塔は温度差が小さく、仙石線終着駅のあおば通駅に近い駅ほど温度差が大きくなることから、隧道長さが長いほど冷涼な外気の流入量が減少することが温度上昇の一因と推定される。

表 4.5 外気と隧道内空気の年平均温度と温度差

測定点	外気 (°C)	隧道 (°C)	温度差 (°C)
あおば通駅換気塔	13.6 (仙台)	18.5	+4.9
仙台駅換気塔		17.0	+3.5
榴ヶ岡駅換気塔		16.3	+2.7
陸前原ノ町駅換気塔		15.1	+1.5
大宮駅換気塔	15.9 (埼玉)	17.4	+1.5
汐留立坑	16.4 (東京)	19.8	+3.4
隅田川立坑		20.8	+4.4
東越中島立坑		20.3	+3.9
平均	15.3	18.2	+3.2

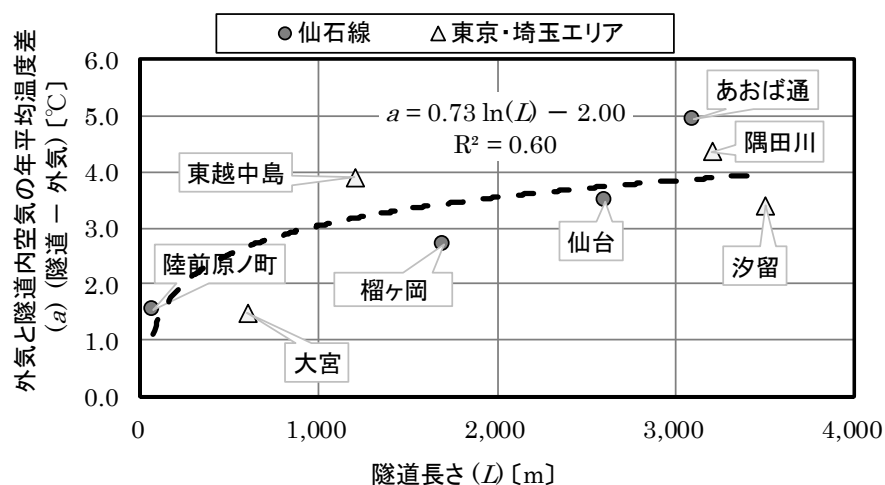


図 4.22 外気と隧道内空気の年平均温度の差と隧道長さとの関係

図 4.22 に外気と隧道内空気の年平均温度の差と隧道長さとの関係を示す。外気と隧道内空気の温度差は、測定点の隧道長さに対応して上昇する傾向が見られたが、列車の往来頻度（1 日の列車本数、編成数、乗客数）や隧道の種類（単線か複線、断面形状）が大きく異なる仙台と関東地区で特異な違いは見られなかった。そこで、 $a$  の算出には隧道長さをパラメータとし、対数近似から式(4.15)を導出した。なお、式(4.15)の適用範囲は  $L \leq 3,500$  m である。

$$a = 0.73 \ln(L) - 2.00 \quad \text{式(4.15)}$$

$L$  : 隧道長さ [m]

表 4.6 式(4.15)による計算値と実測値との温度差

測定点	実測値 (°C)	式(4.15)による計算値 $a$ (°C)	差 (°C)
あおば通駅換気塔	4.9	3.6	1.3
仙台駅換気塔	3.5	3.6	0.1
榴ヶ岡駅換気塔	2.7	3.2	0.5
陸前原ノ町駅換気塔	1.5	1.3	0.2
大宮駅換気塔	1.5	2.1	0.6
汐留立坑	3.4	3.5	0.1
隅田川立坑	4.4	3.6	0.8
東越中島立坑	3.9	2.8	1.1
平均	3.2	3.2	0.6

測定点8箇所の温度差と式(4.15)より算出した $a$ を表4.6に比較して示す。その結果、両者の差は平均0.6°C程度となり、この式により隧道長さを反映させた $a$ の推定が可能となる

#### 5) 温度の年較差 ( $b$ の同定)

図 4.23 に外気と隧道内空気の年較差の比 $b$ と隧道長さとの関係を示す。年較差は、夏期と冬期の突出した寒暖日の影響を抑えるため、外気温及び隧道内空気温度共に 7 日間の平均値を用いて算出した。 $b$ は測定点の隧道長さに対応して上昇する傾向が見られたため、対数近似から式(4.16)を導出した。なお、式(4.16)の適用範囲は $L \leq 3,500$  m である。

$$b = -0.031 \ln L + 0.92$$

式(4.16)

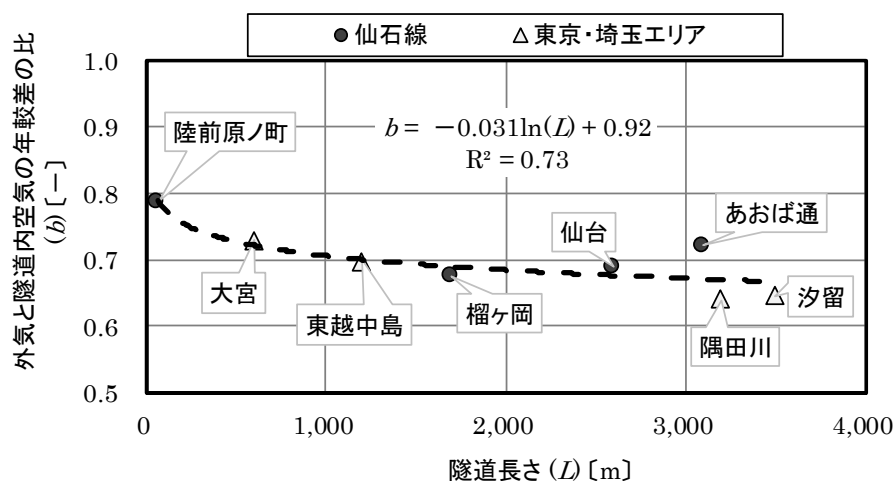


図 4.23 外気と隧道内空気の年較差の比と隧道長さとの関係

6) 時間遅れ ( $t_d$  の同定)

大宮駅換気塔の日平均温度変化について、図 4.24 に実測値と式(4.14)で推定した値を比較して示す。ただし、図 4.24 では式(4.14)中の時間遅れ $t_d$ をゼロとしている。推定式による温度推移は、隧道の実測値と比較して若干時間遅れが見られる。これは、隧道を構成するコンクリートなどの熱容量による影響が主要因と考えられる。そこで、2年間の推定値(2015年5月～2017年4月)を1日毎にずらした時の自己相関係数により時間遅れを同定した。時間遅れの同定には、2～4日間の短い同期の温度変動の影響を少なくするため、推定式及び実測値共に7日間の平均温度より算出した。

表 4.7 に測定点8箇所の時間遅れと自己相関係数を、図 4.25 に時間遅れと自己相関係数の関係を示す。測定点8箇所の時間遅れは、平均で15日となった。隧道の出口に近い陸前原ノ町駅は、特に冬期の外気流入の影響で時間遅れが短くなったと考えられる。

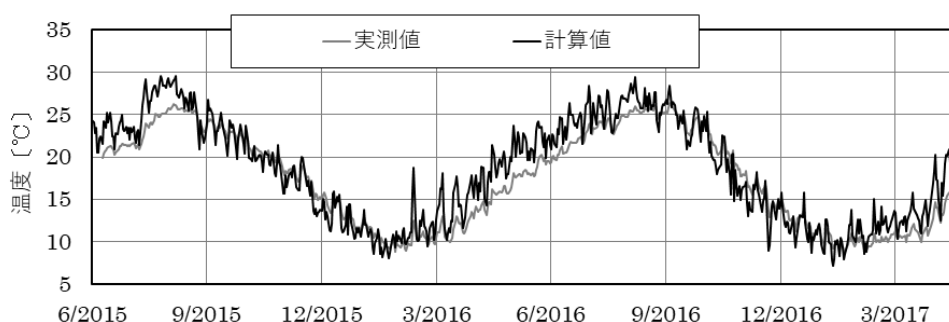


図 4.24 大宮駅換気塔の日平均温度の経時変化(実測値と計算値の比較)

表 4.7 測定点8箇所の時間遅れと自己相関係数

測定点	時間遅れ $t_d$ [日]	自己相関係数 [-]
あおば通駅換気塔	14	0.98
仙台駅換気塔	16	0.98
榴ヶ岡駅換気塔	18	0.98
陸前原ノ町駅換気塔	4	0.99
大宮駅換気塔	16	0.98
汐留立坑	8	0.98
隅田川立坑	14	0.98
東越中島立坑	16	0.98
平均	15	0.98

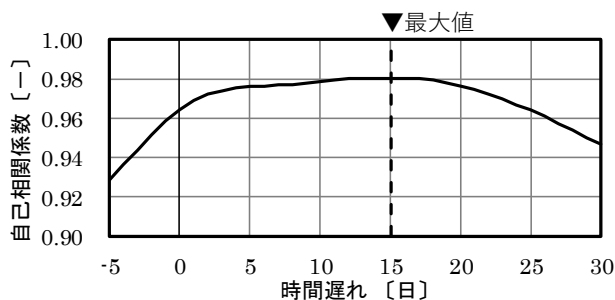


図 4.25 時間遅れと自己相関係数の関係

## 7) 隧道内空気温度の実測値と推定値との比較

推定式の予測精度を確認するため、表 4.8 に示すパラメータ値を用いて隧道内温度を計算した。 $a$ は式(4.15)、 $b$ は式(4.16)から算出し、 $t_d$ は測定点8箇所の実測から求めた平均値とした。

図 4.26 に仙石線換気塔、図 4.27 に東京・埼玉エリアの実測値と式(4.14)より推定した値を比較して示す。測定点8箇所に共通し、実測全期間で実測値と推定式のピーク値がほぼ一致した波形を示した。

表 4.8 測定点8箇所のパラメータ

測定点	$a$	$b$	$t_d$
あおば通駅換気塔	3.9	0.67	15
仙台駅換気塔	3.7	0.68	
榴ヶ岡駅換気塔	3.4	0.69	
陸前原ノ町駅換気塔	1.1	0.79	
大宮駅換気塔	2.7	0.72	
汐留立坑	4.0	0.67	
隅田川立坑	3.9	0.67	
東越中島立坑	3.2	0.70	

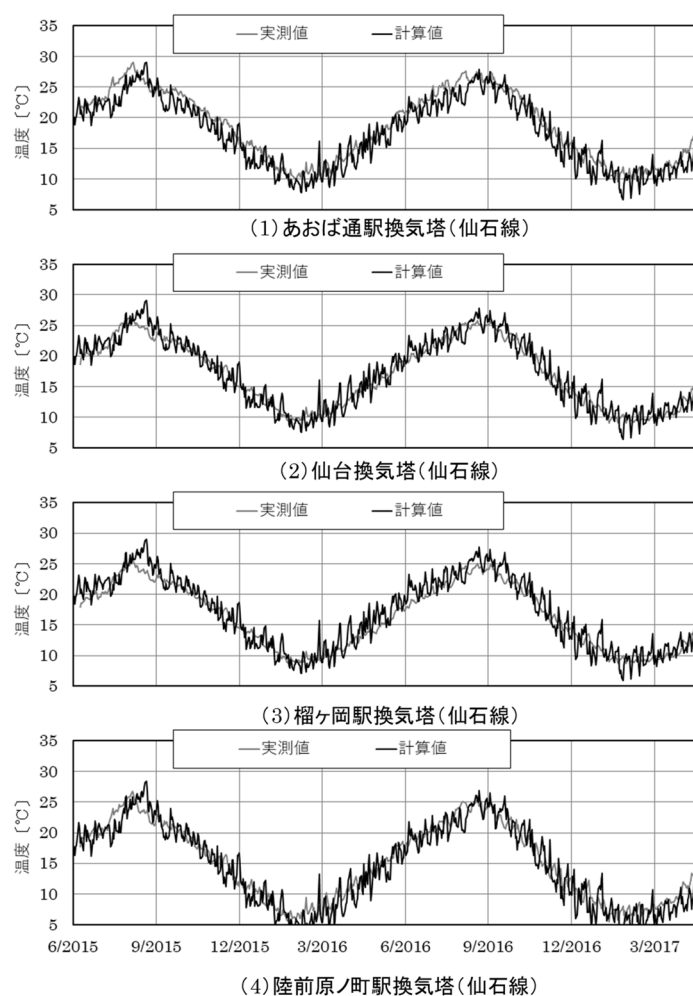


図 4.26 仙石線各換気塔における計算値と実測値の比較 (2015 年 5 月～2017 年 4 月)

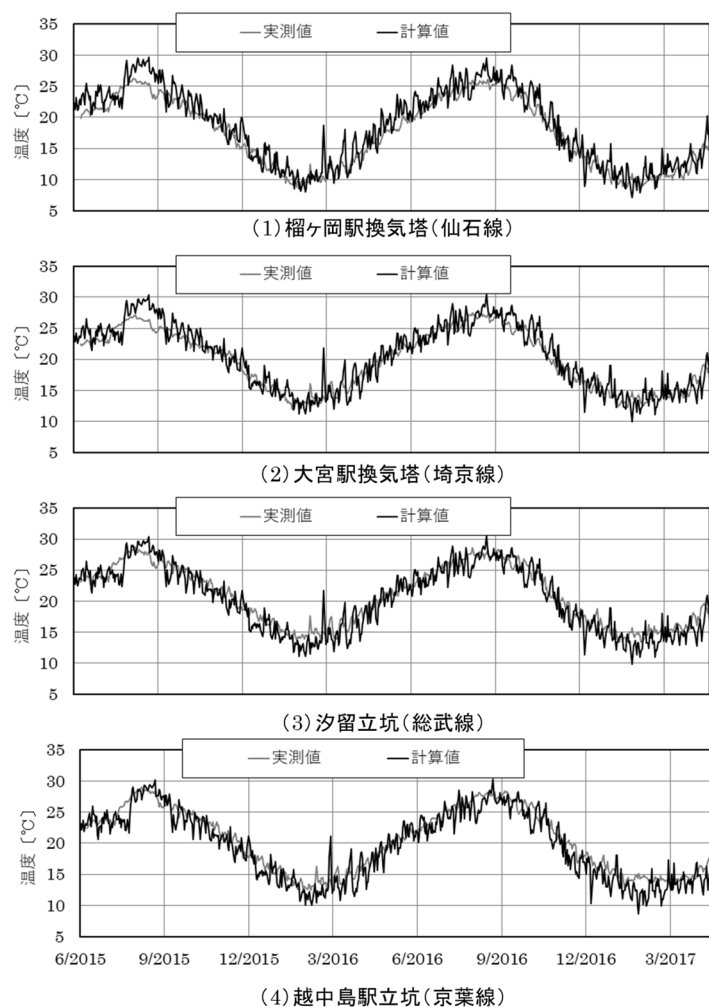


図 4.27 東京・埼玉エリア各換気塔における計算値と実測値の比較 (2015 年 5 月～2017 年 4 月)

表 4.9 各パラメータによる計算値と隧道の実測値との平均二乗誤差

測定点	平均二乗誤差 RMSE (Root mean squared error)				
	$T_{ox}(t)$	$T_{ox}(t) + a$	$T_{oa} + \{T_{ox}(t) - T_{oa}\} \cdot b$	$T_{ox}(t - t_d)$	$(T_{oa} + a) + \{T_{ox}(t - t_d) - T_{oa}\} \cdot b$
あおば通駅換気塔	6.23	3.73	5.39	6.13	2.08
仙台駅換気塔	5.28	3.76	4.09	5.13	1.72
榴ヶ岡駅換気塔	4.96	4.03	3.57	4.70	1.89
陸前原ノ町駅換気塔	3.36	2.93	2.38	3.61	2.14
大宮駅換気塔	3.92	3.64	2.52	3.87	2.14
汐留立坑	5.11	3.60	3.87	5.17	1.84
隅田川立坑	5.84	3.68	4.77	5.89	1.84
東越中島立坑	3.92	3.64	4.47	5.34	1.97
平均	5.02	3.63	3.88	4.98	1.95

次に式(4.14)のパラメータ毎の効果を分析するため、2年間の時系列データにて誤差評価した。各パラメータによる計算値と隧道の実測値との平均二乗誤差 (RMSE) を表 4.9 に示す。各パラメータの比較では、 $a$ 、 $b$ 、 $t_d$  の順で精度向上に寄与する結果となった。同日の外気温と隧道内空気温度の誤差は平均 5℃以上で

あるが、隧道長さや時間遅れを考慮した推定式では平均 $2^{\circ}\text{C}$ 以下へと減少し、測定点全箇所で大推定式が有効であることが示された。

#### 4.8.2 時刻別の隧道内空気温度の推定

隧道内空気温度は、表 4.5 や図 4.20 に示したように外気温度と比較して日較差は $1/3$ 程度と小さいが、列車本数や人体などの負荷変動が大きい地下駅では、最大熱負荷を算出するためには時刻別に熱負荷計算を行うことが推奨される。そこで、夏期ピークとなる8月の隧道内空気温度から時刻別の変動を試算し、日平均温度による推定式との差を確認する。

図 4.28 に、測定点8箇所の2015年8月の時刻別に平均した隧道内空気温度を示す。外気温度や列車本数の変動などにより隧道内空気温度の推移が確認できる。ただし、仙石線のあおば通駅と仙台駅は深夜に隧道内空気温度が日平均温度よりも高い。これは、深夜時間帯に隧道換気ファンが停止され、温湿度センサを設置している機械室内の温度が高くなったためである。あおば通駅と仙台駅を除く6箇所の隧道測定点の時刻別平均値と日平均温度との差を図 4.29 に示す。図より、温度日較差は $1^{\circ}\text{C}$ 程度、外気よりも1~2時間ほど遅い15~16時がピーク値となり、2015年と2016年の2年間でほぼ同じ温度推移を示した。

図 4.30 に実測値と式(4.14)より推定した値に図 4.28 で示す温度差で補正した隧道内空気温度を比較して示す（ここでは $t_d$ をゼロとしている）。推定値による隧道内空気温度は、時刻別の変動を考慮したことで、全ての時間帯において実測値の $+0.5^{\circ}\text{C}$ 以内で推移した。

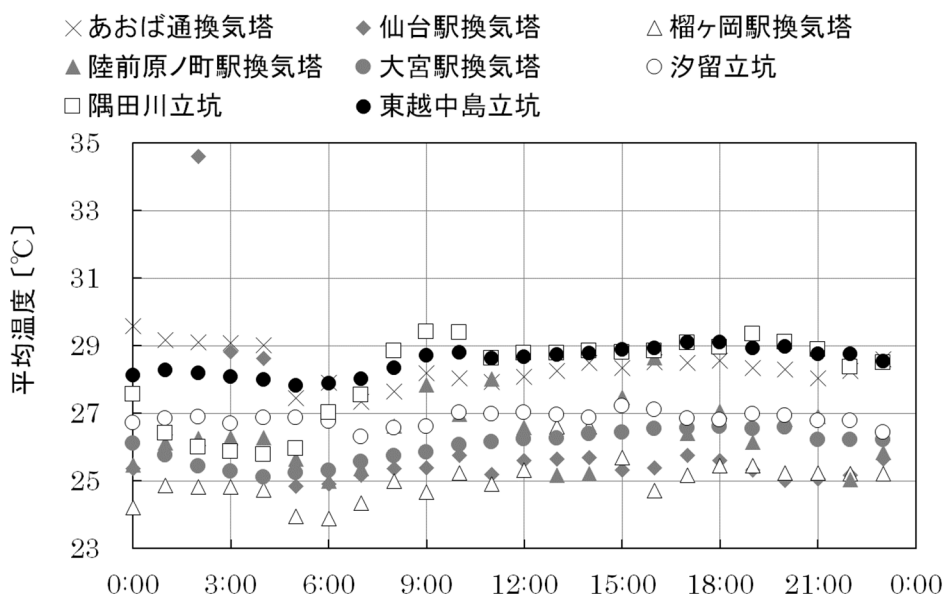


図 4.28 測定点8箇所の2015年8月の時刻別平均隧道内空気温度

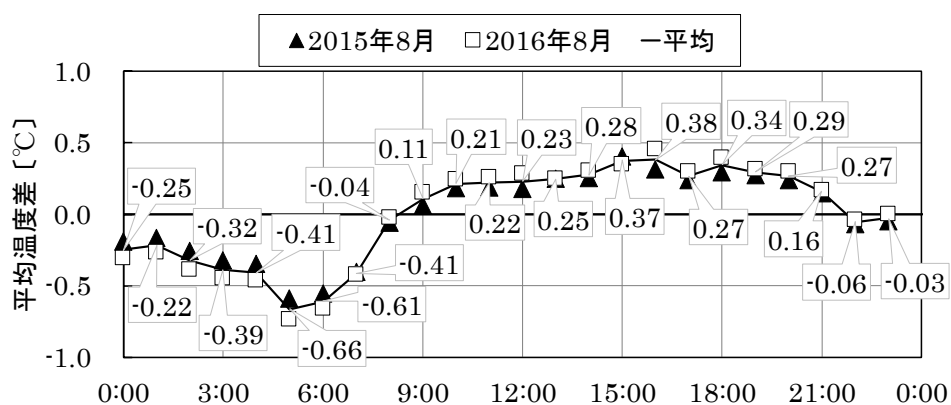


図 4.29 隧道測定点の時刻別平均値と日平均温度との差

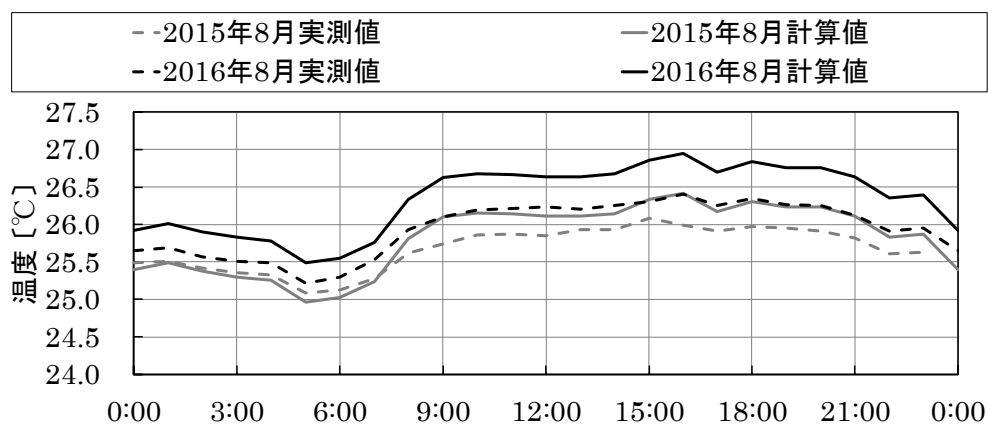


図 4.30 実測値と計算値の隧道温度 (2015 年 8 月・2016 年 8 月)

## 4.9 列車放熱

列車進入側のホーム端部温度は、図 4.31 の上下線温度に示されるように、列車のホーム侵入直後から 1～2℃温度が上昇し、徐々に設計室温付近に低下する変動を繰り返す。この温度上昇の原因は、図 4.32 のサーモグラフィに示されるように、夏期では主に車内冷房用の室外機と摩擦熱による車輪からの排熱と想定される。そこで列車放熱量を推定する方法として、上昇前の温度（列車のホーム進入時）を基準とし、新日本橋駅の上下線を含む 37 本の列車について、列車進入から退出するまでの温度偏差を積算した平均値と列車風の風量から列車放熱量を導出した。結果は下記である。

普通列車・特急列車：5.4[kW/本数]、回送列車：3.0[kW/本数]

列車放熱は、列車速度や乗車率の他、日射による外板蓄熱やホーム停車時間の影響で駅毎に値は異なる。対象とした新日本橋駅は、普通列車と特急列車の放熱量に特異な差が見られなかったため前述の列車放熱量を採用し、停車時間の長い終着駅（仙石線あおば通り駅、京葉線東京駅）では後述する実負荷との比較検証により列車放熱量を 2 倍とする。

本計算手法では、予め列車放熱を対流と放射成分に分割してブロックに付与する。図 4.33 に列車放熱のブロック分配率を示す。分配率は、まず列車放熱を軌道上部ブロック（①⑥）と下部ブロック（②③⑦⑧）に均等に振り分ける。次にホーム滞在時の列車走行時間と停止時間が同じであると仮定し、列車走行時の対流と放射の割合は 8：2、列車停止時は熱上昇流の影響を考慮し 5：5 とし分配率を算出した。

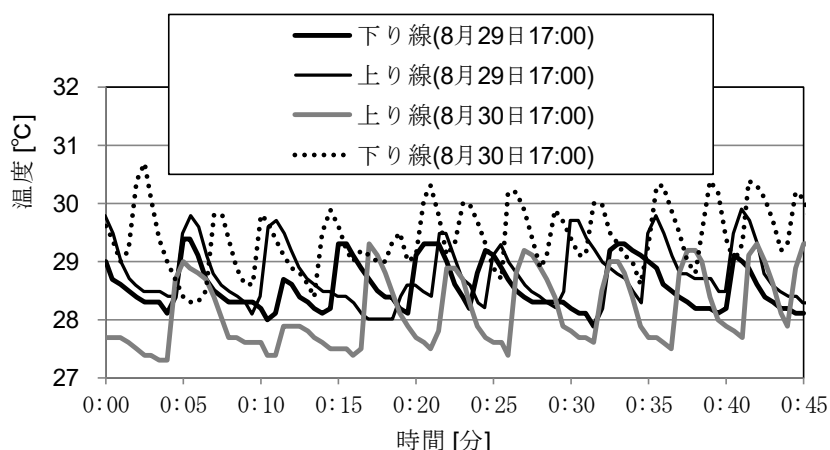


図 4.31 ホーム端部温度（新日本橋駅）



図 4.32 列車表面のサーモグラフィ

---

① 25.00 0.00	0.00 ④ 0.00	25.00 ⑥ 0.00	上段:対流 下段:放射 [%]
② 6.25 0.00	⑤ 0.00 0.00	6.25 ⑦ 0.00	
③ 10.00 8.75		10.00 ⑧ 8.75	

図 4.33 列車放熱のブロック分配率

#### 4.10 排気口の排熱割合

列車放熱量は、軌道部の排気口から直接排熱された場合、室内負荷を減じることが可能である。厨房の直接捕集率（DCE）<sup>7)</sup>の考え方を参考に、CFD 解析モデルを用いて排気高さ毎の排熱割合を推定する。

図 4.34 に軌道上部排気時の排熱割合を算出する CFD 解析モデルを示す。実測との再現性が高かった新日本橋駅の移動物体 CFD 解析モデルを用い、ホームに停車中の室外機を想定した列車上部、並びにブレーキ熱を想定した列車下部に列車放熱を模擬した拡散物質を発生させ、開口部となる隧道や階段部、排気口から全量排気されるまでの拡散物質の流出量の比により排熱割合を推定した。

軌道上部排気時の各開口部からの拡散物質除去量の経時変化を図 4.35、軌道下部排気時を図 4.36 に示す。列車放熱を模擬した拡散物質は、列車が停車中の 30s 後に排気口からの除去量がピークを迎え、発車後徐々に減少する。排気口で除去されない拡散物質の多くは、列車がホームから退出する際の誘引により、隧道から除去される。この結果、上部排気時の拡散物質の全除去量は 23.7% となった。軌道下部排気は、浮力の影響を安全側で見積るため拡散物質を列車上部のみに配置して算出したところ 12.0% となった。本計算手法では、発熱部位や発熱量などの可変性と設計上の安全率を考慮し、上部排気は排熱割合を 20[%]、下部排気では排熱割合を 10[%] とし、列車放熱量（対流・放射成分を含む）から減じることとした。

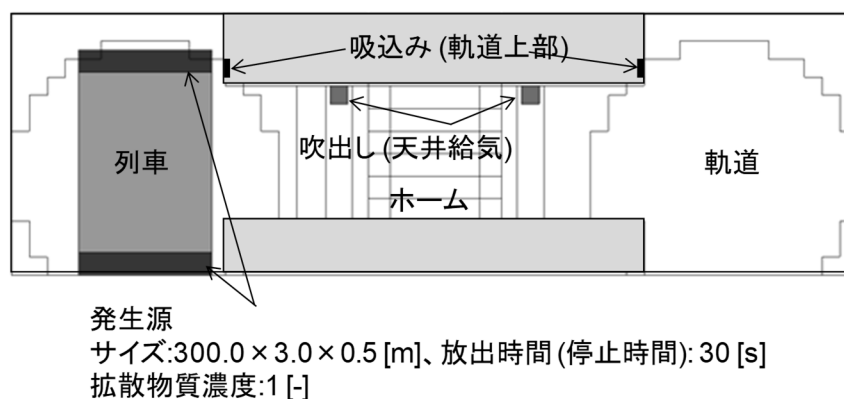


図 4.34 軌道上部排気時の DCE 算出用 CFD 解析モデル

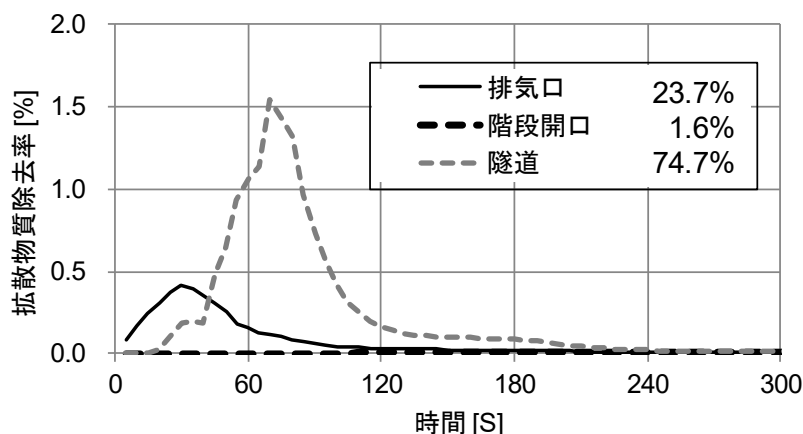


図 4.35 軌道上部排気時の各開口部からの拡散物質除去量の経時変化

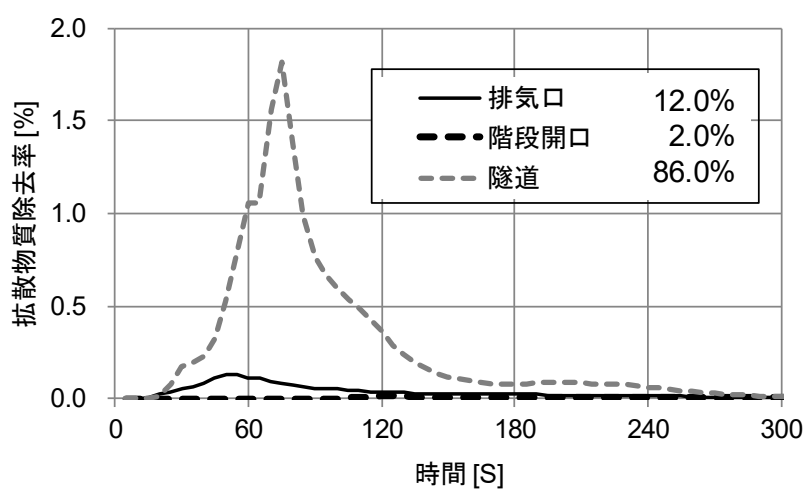


図 4.36 軌道下部排気時の各開口部からの拡散物質除去量の経時変化

---

#### 4.11 まとめ

本章では、ブロックモデルの概要と熱収支式を示した。列車風風量の予測には、隧道内障害物のモデル化手法を提案し、14 駅の列車運転本数と列車風風量との関係を示した。また、4 路線・8 箇所 の 2 年間に及ぶ長期計測結果を基に、外気温度から隧道内空気温度を簡易に予測できる推定式を示した。

- (1) ブロックモデルについて
  - ・大規模建築の計算負荷を抑えながら空調条件や換気条件を変えた場合の熱負荷を予測できるブロックモデルを提案
  - ・ブロック内空気の熱収支や壁体の非定常熱伝導、壁体表面の熱収支、その他顕熱や潜熱負荷について、計算式を提示
- (2) 列車風について
  - ・CFD 解析モデルの隧道形状を直線形状とし、障害物を含む空気抵抗の代わりに圧力損失を与えることで、簡易に実務的な解析が可能となる手法を提示
- (3) ブロック間の交換空気量について
  - ・隧道内空気を拡散物質で模擬した CFD 解析により、ホーム部ブロック間の交換空気量を導出
- (4) 隧道内の空気温湿度について
  - ・隧道内の絶対湿度は、最寄りの気象庁観測データと大きな相違はなく、列車風による負荷計算に適用可能であることを提示
  - ・隧道内空気の年間平均温度は、列車放熱等により最寄りの気象庁観測データよりも高く、隧道の長さに対する相関が高いことを提示
  - ・隧道内空気温度は、外気よりも 15 日ほど時間遅れが発生
  - ・時刻別変動を加味させることで温度の予測精度が向上する。
- (5) 列車放熱について
  - ・列車進入から退出するまでの温度偏差を積算した平均値と列車風の風量から列車放熱量を導出
- (6) 直接捕集率について
  - ・CFD 解析モデルを用いて排気高さ毎の DCE を導出

---

#### 第 4 章に関する参考文献

- 1) 戸河里ら, : Simplified Prediction Model of Vertical Air Temperature Distribution in a Large Space: Part 1 Study on a Thermal Environment Design System for Large Spaces, Journal of Architecture, Planning and Environmental Engineering (Transactions of AIJ), No. 427, pp. 9-19, 1991.9 (in Japanese)
- 2) 宇田川光弘 : パソコンによる空気調和計算法, オーム社, 1986.12
- 3) 富村敏夫 : エクセルとマウスでできる熱流体のシミュレーション, 丸善, 2005.3
- 4) 木村健太郎, 相澤直樹, 柴田克彦: データセンターの環境計測評価手法に関する研究 第 3 報 CFD による床下空間の構造的モデル化法, 空気調和・衛生工学会学術講演論文集, pp. 745~748, 2010.9
- 5) 中川肇: 地下駅ホーム・コンコース, 冷凍, 第 48 巻第 545 号, pp. 104~112, 1973.3
- 6) Japan Meteorological Agency website: Weather statistics information  
<http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>, (accessed 2017.10.29)
- 7) Kondo, Y. et al. : CFD Simulations of Direct Capture Efficiency for Local Ventilation Systems, Journal of Environmental Engineering (Transactions of AIJ), No. 584, pp. 41-46, 2004.10 (in Japanese)

---

第 4 章に関する既発表文献

- [1] 木村健太郎, 柴田克彦, 谷田直之, 佐藤雅文, 佐藤誠, 近藤靖史: 既存地下駅における設計最大冷房負荷推定に関する研究, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, pp.225-228, 2013.9
- [2] K. Kimura, K. Shibata, N. Tanita, M. Sato, Y. Kondo: Estimation Method of Cooling Load in an Underground Station, Indoor Air, HP1331, 2014.7
- [3] 木村健太郎, 柴田克彦, 谷田直之, 佐藤雅文, 近藤靖史: 地下駅構内の列車風による冷房負荷推定に関する研究, 日本建築学会環境系論文集 第 80 巻第 714 号, pp.657-663, 2015.8
- [4] 木村健太郎, 佐藤雅文, 山口慧祐: 地下駅構内の列車風による冷房負荷推定に関する研究, 地下駅構造の列車風への影響, 一般社団法人日本鉄道車両機械技術協会・R&M, pp.26-29, 2016.6
- [5] K. Kimura, K. Shibata, N. Tanita, M. Sato, Y. Kondo: Estimation Method of Cooling Load Caused by Train Wind in an Underground Station, Indoor Air, ID117, 2016.7
- [6] 山口慧祐, 佐藤雅文, 木村健太郎, 柴田克彦, 近藤靖史: 地下駅構内の温熱環境と空調負荷に関する研究, その 3 隧道内温湿度の実測, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学II, pp.239-240, 2016.8
- [7] 木村健太郎, 柴田克彦, 山口慧祐, 佐藤雅文, 近藤靖史: 地下駅構内の温熱環境と空調負荷に関する研究, その 4 地下駅構造の列車風への影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学II, pp.241-242, 2016.8
- [8] 木村健太郎, 柴田克彦, 佐藤雅文, 谷田直之, 八木秀隆, 近藤靖史: 地下駅構内の列車風による冷房負荷推定に関する研究その 2, 隧道内空気温度の簡易予測式の検討, 日本建築学会環境系論文集 第 83 巻第 749 号, pp.607-613, 2018.7
- [9] 木村健太郎, 谷田直之, 佐藤誠, 佐藤雅文, 柴田克彦, 近藤靖史: 地下駅構内の列車風による冷房負荷推定に関する研究その 3, ブロックの熱収支モデルに基づく負荷計算法, 日本建築学会環境系論文集 第 84 巻第 757 号, pp.313-321, 2019.3



## 第 5 章

### 本負荷計算法の精度検証

---

## 第 5 章

### 本負荷計算法の精度検証

#### 5.1 序

本章では、4 章で提案した計算手法の計算精度を確認する。東日本旅客鉄道管轄の地下駅の内、ホーム階系統の空調処理負荷が中央監視にて収集されている 7 駅にて検証する。

5.2 節では、本計算手法のブロック分割と一致する島式 1 面 2 線駅の仙石線 3 駅（あおば通駅、仙台駅、宮城野原駅）について、実負荷と本計算手法の計算値を比較する。

5.3 節では、島式 2 面 4 線駅の 4 駅（上野駅、大宮駅、東京駅 2 駅）について、実負荷と本計算手法の計算値を比較する。

## 5.2 島式1面2線駅

本計算手法のブロック分割と一致する島式1面2線駅の仙石線3駅（あおば通駅、仙台駅、宮城野原駅）について本計算手法の計算精度を確認する。ホーム階の空調処理負荷、外気条件は、全駅共通で2015年のピーク負荷となった1週間（8月1～7日）の時刻別平均値とした。外気温湿度と隧道絶対湿度は全駅共通で最寄りの気象データを入力する。また、各駅の隧道温度は、隧道入口から各駅中心までの距離を隧道長さとし、式(4.14)～(4.16)にて算出する。ホーム設計温度と吹出し口相対湿度は、期間中の運用条件（湿度成行き）とホーム環境の実態に合わせて設定した。なお、空調ゾーニング毎の熱量監視点が不足しているため、本論文ではホーム階全体の熱量と比較して示す。

図5.1に実負荷と本計算手法の計算値を比較して示す。3駅に共通し、空調立上り時間を除き、終日良い対応を示した。

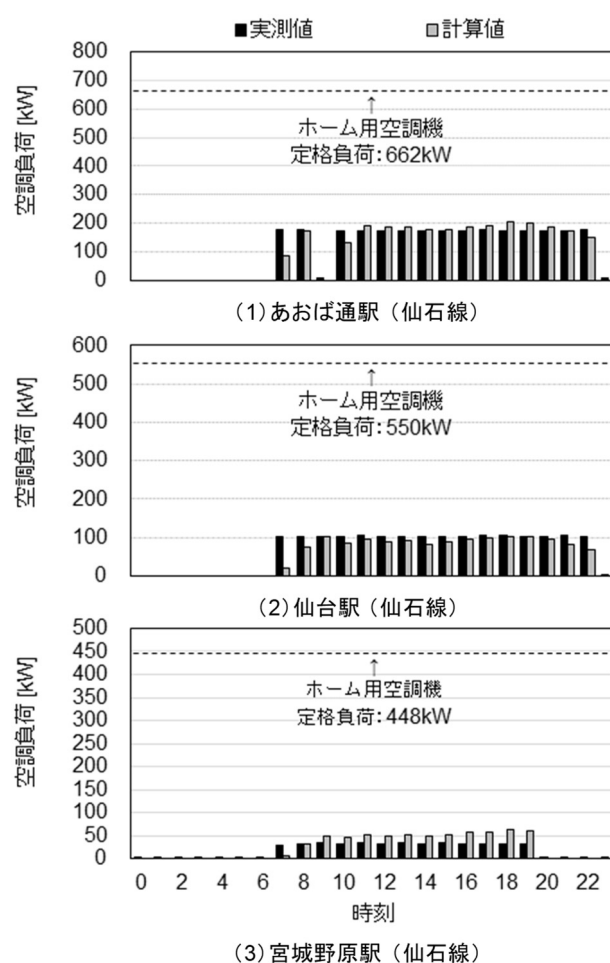


図5.1 実負荷と本計算手法の計算値との比較

### 5.3 島式2面4線駅

次に島式2面4線駅で大規模の4駅（上野駅、大宮駅、東京駅2駅）にて実負荷と比較した。ブロック分割は水平・鉛直断面共に1面2線と同じ分割とし、ホームと軌道部の幅を2倍にして延床面積を一致させた。図5.2に4駅の実負荷と本計算手法の計算値を比較して示す。各駅は終日良い対応を示した。一部の駅（上野駅・東京駅）で運転開始と停止時間帯に熱量差が見られるが、これは本計算手法の空調が1時間単位でON/OFF設定しており、実運転時間を分単位で再現していないためである。

表5.1に各駅の最大冷房負荷について、実測値と計算値を比較して示す。また、時刻毎のばらつきを評価するため、7時から22時の実測値平均と平均二乗平方根誤差（RMSE）も併せて示す。最大冷房負荷は、全駅で計算値の方が実測値より若干高い値となった。これは、本計算手法の計算条件で与えた温湿度条件に対し、実際のホーム部では時間帯や場所によって設計条件の温湿度環境になっていないことが一因と考えられ、設計条件と実運用の差異となって表れている。RMSEは、実測値平均値と比較し全駅平均で10%程度の誤差となった。相対的な誤差は小規模駅ほど大きいものの積算熱量の誤差は小さく、全駅いずれも実負荷に近い値で推移している。

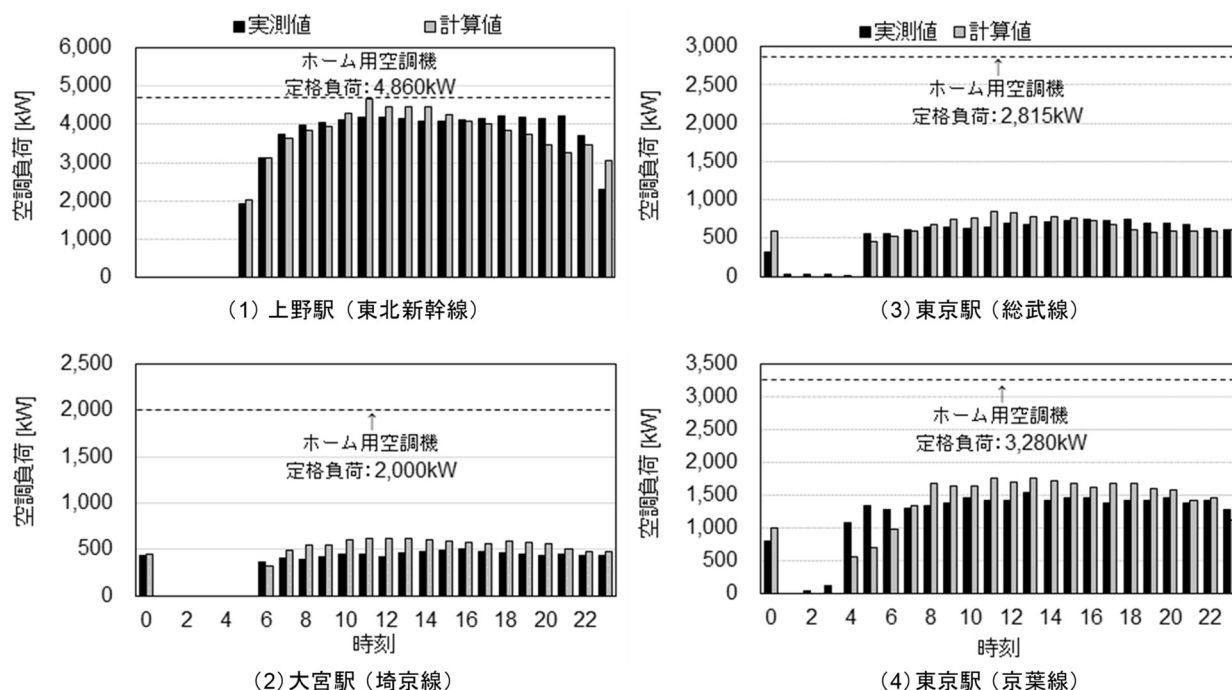


図5.2 実負荷と本計算手法の計算値との比較

表 5.1 各駅の最大冷房負荷の実測値と計算値の比較

駅	定格負荷 [kW]	最大空調負荷			実測平均 (7～22 時)	RMSE (7～22 時)
		実測値	計算値	差		
あおば通駅	662	178	204	+27	165	30
仙台駅	550	106	103	-3	103	26
宮城野原駅	448	36	62	+26	27	18
上野駅	4,860	4,209	4,659	+450	4,078	386
大宮駅	2,000	508	623	+115	448	126
東京駅（総武線）	2,815	751	856	+105	681	101
東京駅（京葉線）	3,280	1,548	1,768	+220	1,426	221
平均	2,087	1,048	1,182	+134	990	130

---

## 5.4 まとめ

本章では、本計算手法の計算精度を確認するため、ホーム階系統の空調処理負荷が中央監視にて収集されている 7 駅にて検証した。以下に結果と考察を列記する。

### (1) 島式 1 面 2 線駅

- ・ 3 駅に共通し、空調立上り時間を除き、終日良い対応を示した。

### (2) 島式 2 面 4 線駅

- ・ 4 駅に共通し、各駅は終日良い対応を示した

駅舎の最大負荷推定には十分な精度と考える。ただし、運用での検証用途には、風量制御や CO2 制御など、最適化モデルの追加が必要である。

第 5 章に関する既発表文献

- [1] 木村健太郎,谷田直之,佐藤誠,佐藤雅文,柴田克彦,近藤靖史:地下駅構内の列車風による冷房負荷推定に関する研究その3,ブロックの熱収支モデルに基づく負荷計算法,日本建築学会環境系論文集 第 84 巻第 757 号,pp.313-321,2019.3



## 第 6 章

### 総括

## 第 6 章

### 総括

#### 6.1 全体の総括

本研究の目的は、地下駅の負荷解析手法の見直しを行うことで、設備容量の適正化を図り効率的な運用から更なる省エネルギー化に役立てることである。地下駅の空調負荷で一般建物との最大の違いは、列車運行に伴い発生する気流によりホームに持ち込まれる列車風負荷である。列車風負荷を推定するためには、隧道内温湿度とホームへ流入する列車風の予測が必要となる。既存駅の改修を目的とした設計であれば、隧道から流入する空気の実測値を活用する方法が適しているが、新設の駅舎を建設する際には、隧道内温湿度の予測は困難である。

一方、列車風の風量に関しては、駅舎の構造や列車進入速度など、列車風に寄与する多くの要素が駅毎に異なり、これを予測するための方法としては CFD 解析の利用が考えられる。地下駅は隧道を含めると数 km に及ぶ巨大建造物であるが、近年のコンピュータ性能の向上に伴い実用的な解析が可能となっている。ただし、地下駅の CFD モデリングに関連する報告は少なく、実際の駅舎設計に CFD 解析が生かされていない場合が多い。

そこで本研究では、地下駅の冷房負荷の中でも特に予測が難しい列車風負荷に着目し、列車を移動物体とした CFD 解析のモデル化方法や列車風がホーム階の空調負荷に与える影響、隧道から流入する空気温湿度の予測方法を提案し、簡易で予測精度の高い新たなホームの冷房負荷推定法を提案した。

ここでは全体のまとめとして各章の主要な結論を総括し、今後の課題について述べる。

2 章では、総武線地下駅の設備容量と実負荷の乖離について過去の報告書等を基に調査した。設計条件と実負荷の乖離の要因は、車両制御方式が抵抗制御から VVVF 等の回生制御に代わり車両放熱量が減少したこと、車両冷房化に伴い、車両屋根上からの放熱量が増加したこと、車両の軽量化や電動車比率の減少に伴う車両放熱量の減少したこと、他斜線を含めた路線整備により混雑率（乗車率）が緩和し、人体放熱量が減少したこと、列車運用が折返しからスルー主体になり、停車時間短縮により車両放熱量が減少したこと、始発総武特急が京葉線に移転したため、長時間の乗車待ち客が減少したこと、省エネ化を指向して、照明器具や点滅運用が見直されており、照明発熱が減少したこと、隧道換気を停止し、外気負荷が削減したことが挙げられた。汎用負荷シミュレータでは、設計者の考える条件設定の与え方に違いが出やすいこと、設計者のシミュレータ熟練度の違いによること、SES では、地下水位や列車性能の変化に伴う隧道温度を正確に予測できないことなどが挙げられた。

3 章では、地下駅の空調負荷に起因する条件を把握して負荷内訳を解明するため、地下空間全体の温熱環境を実測した。その結果、夏期の地下軌道端部の壁面温度は外気温度よりも低く、ホーム部の相対湿度は外気湿度より高い値を示した。地下端部駅となる馬喰町駅の軌道端部温度は、他の地下駅軌道端部温度よりも低温となっており、夏期の高湿多湿で比重の軽い外気が隧道から駅軌道部へ流入する割合は小さいと考えられる。また、夏期の地下隧道部は外気よりも低温多湿な状態であり、軌道部では列車放熱の影響による温度上昇が見られた。約 1km 間隔の隧道内空気温度は 25～26℃、相対湿度は 80% (18.4～19.5 g/kg (DA)) 程度となっており、4km ほどの隧道内温熱環境はほぼ同一であると想定される。14 駅の列車風測定を行った結果、列車風の風向は列車進行方向とほぼ平行に流入し、隧道が複線の場合には反対の軌道への分散や隧道内での

相殺された影響で列車風が減少することが分かった。列車風負荷は、当初設計と比較し列車風風量が大い  
反面、隧道内空気のエンタルピが設計条件よりも小さく、大幅に小さい値となった。また、周期的に変動す  
る列車風温度に対し、新日本橋駅の上下線を含む 37 本の列車について、列車進入から退出するまでの温度偏  
差を積算した平均値と列車風の風量から列車放熱量を導出した。最後に、推定式による最大冷房負荷は、負  
荷の構成要素を実態に合わせたことで、実際の負荷に近づくことができた。これにより、実際の負荷内訳の  
概算を示した。

4 章では、地下駅における設計最大冷房負荷の推定方法の精度向上のため、ブロックごとの熱収支モデル  
を適用した負荷計算を提案した。大規模建築の計算負荷を抑えながら空調条件や換気条件を変えた場合の熱  
負荷を予測できるブロックモデルを用い、ブロック内空気の熱収支や壁体の非定常熱伝導、壁体表面の熱収  
支、その他顕熱や潜熱負荷について、計算式を提案した。列車風風量の予測には、隧道内障害物のモデル化  
手法を提案し、14 駅の列車運転本数と列車風風量との関係を示した。CFD 解析モデルの隧道形状を直線形状  
とし、障害物を含む空気抵抗の代わりに圧力損失を与えることで、簡易に実務的な解析が可能となることを  
示した。また、隧道内空気を拡散物質で模擬した CFD 解析により、ホーム部ブロック間の交換空気量を導出  
した。隧道内空気温度の予測には、4 路線・8 箇所の 2 年間に及ぶ長期計測結果を基に、外気温度から隧道内  
空気温度を簡易に予測できる推定式を示した。隧道内空気の年間平均温度は、列車放熱等により最寄りの気  
象庁観測データよりも高く、隧道の長さに対する相関が高い。また、隧道内空気温度は、外気よりも 15 日ほ  
ど時間遅れが発生し、時刻別変動を加味させることで温度の予測精度が向上することを明らかにした。なお、  
隧道内の絶対湿度は、最寄りの気象庁観測データと大きな相違はなく、列車風による負荷計算に適用可能で  
あることを明らかとした。

5 章では、本計算手法の計算精度を確認するため、ホーム階系統の空調処理負荷が中央監視にて収集され  
ている 7 駅にて検証した。島式 1 面 2 線駅では、3 駅に共通し、空調立上り時間を除き、終日良い対応を示  
した。また、島式 2 面 4 線駅では、4 駅に共通し、各駅は終日良い対応を示した。

## 6.2 今後の展望と課題

以上の様に、本論の主題である「地下駅構内の列車風による冷房負荷推定に関する研究」に関して概略をまとめている。研究により、明らかにした知見を踏まえ、地下駅空調の負荷解析に関する今後の課題と今後の展望を以下に示す。

### 1) 列車放熱負荷について

本論文では、ブロックモデルの入力条件として主に隧道からホームへ流入する列車風の温湿度や風量の予測方法を提案したが、地下駅空調負荷の予測精度を更に高めるためには、ホーム階では支配的な発生負荷となる列車放熱負荷の予測精度向上が必要である。今回、列車放熱負荷の予測には、実測値から推定した方法を取り入れており、具体的には新日本橋駅のホームへ流入する列車風風量と温度偏差の積算値により列車放熱負荷を算出している。ここで、相関の高い列車本数と列車放熱負荷の換算式を他の駅にも共通で使用しているが、列車の乗車率や列車本数などが異なる他の駅舎でも同様の実験と放熱負荷を試算し知見を増やすことで、列車放熱負荷に関する各パラメータの傾向が判明でき、各駅の列車放熱負荷や空調負荷の更なる予測精度を向上できると考える。

### 2) 解析領域について

本論文では空調負荷の対象域をホーム階に限定しているが、列車がホームから退出する際には上階のコンコースや改札階から階段部を通して風量がホーム部へ流入する。仮に上階がホーム階と同じ温度で空調されていれば隙間風負荷を無視できるが、上階が非空調や外部空間であった場合には、温湿度条件により空調負荷が大きく変動する。地下駅空調負荷の予測精度を更に高めるためには、計算負荷とトレードオフの関係ではあるが、上階エリアをブロックモデルの対象域に含むことが有効であると考えられる。

### 3) 省エネルギー運用について

本計算手法で算出される負荷は、各駅の最大負荷推定には十分な精度と考える。しかし、運用時の省エネルギーなどの検証用途には、風量制御やCO<sub>2</sub>制御など、最適化モデルの追加が必要と考えられる。

### 4) ホームドアの影響について

事故防止を主目的に設置されているホームドアは、現在国内の約半分の地下駅に設置されており、徐々に割合が増えている。ホームドアが設置されている駅では、隧道からホームへ流入する列車風風量やブロック間の流量係数が大きく変化することが想定される。そこで、ホームドア設置時の移動物体CFD解析を行い、列車風の風量やブロック間の流量係数を算出し、ブロックモデルに入力することで負荷計算が可能となる。また、ホームと軌道部が完全に遮蔽された駅であっても、ホームドアが開いたときに隧道からの列車風がホームに流入するため、より実態に即した負荷計算が可能となる。ホームドアの形状の多岐にわたるため、その形状ごとにCFD解析を行い、列車風の影響を求めておくことも今後の課題である。