

理論解析と模型実験によるトンネル内温熱環境予測 手法の検証

斎藤 寛之* 梶山 博司* 斉藤 実俊*

Verification of Prediction Method for Thermal Environment in Tunnel by Model Experiment and Analytical Solution

Hiroyuki SAITO Hiroshi KAJIYAMA Sanetoshi SAITO

The purpose of this paper is to verify our current prediction method based on simulation of thermal environment in tunnel by model experiments and an analytical solution. Comparison of the results by model experiments with theoretical results obtained from the analytical solution shows that the simulation results are very close to the theoretical results. In addition to the above, remeasurement of the airflow velocities and airflow temperatures in the model tunnel was performed using sensors with higher spatial resolution under the same conditions as the model experiments reported previously. As a result, it is found that the differences between the results by the simulation and those by the experiment using with higher performance sensors are found to be smaller than those reported previously.

キーワード：トンネル，換気，温熱環境，シミュレーション，検証，実験

1. はじめに

都市部の地下を通る鉄道トンネルや海底を通る鉄道トンネルには、温熱環境対策としてトンネル用の換気設備が設置される場合がある。この換気設備に必要とされる容量を正確に見積もるためには、トンネルにより接続される（全長 10km 程度またはそれ以上の）大規模な地下空間を対象として、年単位の長期的な温度変化を予測することが必要になる。地下鉄を対象としたトンネル内の温度予測手法としては米国の SES¹⁾ などがあるが、鉄道総研では新幹線などの高速鉄道にも対応できるように圧縮波の影響を考慮したトンネル内圧力変動シミュレーション^{2) 3) 4)} によりトンネル内風速を算出し、その風速を入力としてトンネル内の熱移動を計算することで温熱環境を予測する、トンネル内温熱環境シミュレーション⁵⁾ の開発を進めてきた。

シミュレーションを実際の温熱環境評価に使用するには、その計算精度を把握しておくことが重要になる。トンネル内温熱環境シミュレーション精度検証の取り組みの一環として、計算に使用される主要な基礎方程式から近似的に求めた解析解とシミュレーションによる計算結果の比較を行った⁶⁾。また、シミュレーション検証用縮尺トンネル模型を製作し、トンネル模型の温度境界条件（固体部分外表面・入口部の空気流）とトンネル内の空気流温度について各点での時間変化を同時に測定し、実験とシミュレーションの境界条件を一致させたいうで、

トンネル模型内を流れる空気流温度とトンネル模型の固体温度の時間変化についてシミュレーションと実験の比較を行い前報⁷⁾ で報告した。両者の差の原因を調べるために、トンネル模型の熱拡散率の推定⁸⁾ を行った。また、模型実験での風速と温度の測定に、これまでに比べて空間分解能が高いセンサーを使用し、一部の条件でトンネル断面内の空間分布測定を行った⁹⁾。本稿では、シミュレーション検証の一環として行った(1) 前報に記載しなかった理論解析とシミュレーションの比較、(2) 熱拡散率の推定、(3) 空間分解能が高いセンサーによる風速および温度測定について報告する。

2. トンネル内温熱環境シミュレーション

2.1 概要

外気温度変化、トンネル内風速、列車走行による発熱量などが与えられれば、トンネル内の空気、その周囲の地盤、地盤に含まれる土中水、トンネル内を流れる流水等の中の熱の移動を計算することでトンネル内温熱環境を予測することができる（図 1）。鉄道総研で使用している予測手法（トンネル内温熱環境シミュレーション）は、水分の豊富な海底トンネルを対象として一定風速で換気する場合のトンネル内温度予測手法¹⁰⁾ を基にしており、機械換気を行う鉄道トンネルの温熱環境を予測することを目的として開発されたものである。トンネル内およびトンネル周囲の水分の影響を考慮することは、鉄道トンネル内の温度予測を行う上で重要であるが、問題を単純化するために、以下では水分の関与する熱移動に

* 環境工学研究部 熱・空気流動研究室

特集：空気力学・騒音

については無視し、さらにトンネル内を列車が走行することによる発熱を無視し、トンネル内の空気、トンネル周囲地盤内、およびその間の熱移動の計算手法の検証について検討する。本計算では基礎方程式を導出する際に、トンネル断面内の空気流が瞬間的かつ完全に混合され、空気流温度が流れ方向に1次元的に変化するものと仮定した。また、トンネルのコンクリート壁体と外側の岩石の部分を一体の均質な地盤であるとみなしている。そして、トンネル内壁面からある一定距離（本シミュレーションでは10m）以上離れると温度が時間的にも空間的にも変化しない定温度層に達するものとして、トンネル内壁面から定温度層境界までの円筒領域の地盤温度を計算対象領域としている。この円筒領域において、地盤温度は二次元軸対称に変化するものと仮定する。空気流の温度と地盤温度の基礎方程式を連立させて解くことにより、トンネル内の熱移動を計算する。ここで、トンネル内を流れる空気とトンネル壁面との間の熱のやり取りは、Colburnの式¹¹⁾などから求めた熱伝達率により算出している。トンネル内を流れる1次元の空気流による熱の輸送を表す偏微分方程式と円筒形に広がるトンネル周囲地盤内の固体熱伝導を表す偏微分方程式を連立させて解くという問題の定式化の基本部分は、鉱山の坑道内の気温の冷却の問題を取り扱った文献12で使用されたものと同じと言える。各基礎方程式、境界条件、物性値および計算方法等に関しては文献5を参照されたい。

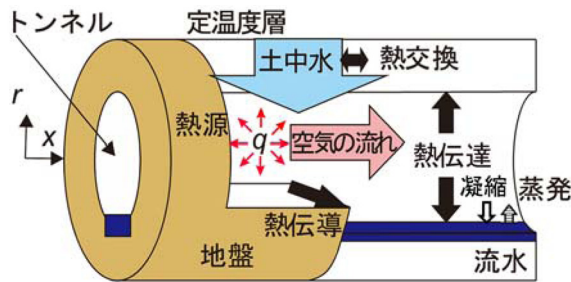


図1 トンネル内温熱環境シミュレーションで考慮しているトンネル内の熱移動

2.2 基礎方程式

前節で述べたようにトンネル内の空気流、トンネル周囲地盤内、およびその間の熱移動のみを考慮し、トンネル内での列車走行による熱の発生を無視するとトンネル内の気流および地盤温度を計算するための基礎方程式は式(1)～式(4)で示される。

$$c_a \rho_a S \left(\frac{\partial \theta_a}{\partial t} + U \frac{\partial \theta_a}{\partial x} \right) = h_a l (\theta_c(r_0, x, t) - \theta_a(x, t)) \quad (1)$$

$$c_c \rho_c \frac{\partial \theta_c}{\partial t} = \frac{\lambda_c}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \theta_c}{\partial r} \right), (r \geq r_0) \quad (2)$$

$$-\lambda_c \frac{\partial \theta_c}{\partial r} \Big|_{r=r_0} = h_a (\theta_a(x, t) - \theta_c(r_0, x, t)) \quad (3)$$

$$h_a = (\lambda_a / 2r_0) 0.023 \text{Re}^{0.8} \text{Pr}^{1/3} \quad (4)$$

式(1)がトンネル内空気流の温度、式(2)がトンネル周囲地盤温度の支配方程式である。式(3)が、空気流と地盤の境界面での熱の授受を表す境界条件の式である。ここでは、トンネルの断面形状は半径 r_0 の円形と仮定する。熱伝達率 h_a はColburnの式を用いて式(4)により算出する。ここで、 $S(=\pi r_0^2)$:トンネル(内空)断面積、 c_a :空気の定圧比熱、 $l(=2\pi r_0)$:トンネル断面(内面)周長、 t :時間、 U :トンネル内風速、 $\text{Re}:U$ を代表速度、 $2r_0$ を代表長とするレイノルズ数、 Pr :空気のプラントル数、 x :長手方向の距離、 $\theta_a(x, t)$:空気流の温度、 λ_a :空気の熱伝導率、 ρ_a :空気密度、 $\theta_c(r, x, t)$:地盤温度、 $\theta_c(r_0, x, t)$:壁面温度(空気と接する部分の地盤温度)、 c_c :地盤の比熱、 r :半径方向の距離、 λ_c :地盤の熱伝導率、 ρ_c :地盤密度とする。

3. 解析解との比較による検証

トンネル内温熱環境シミュレーションの中で実施される計算のうち、トンネル内の空気流、トンネル周囲地盤内、およびその間の熱移動の計算手法の検証のため、Peavyの既往研究¹³⁾により近似的に求められている解析解を用いて、トンネル入口から流入する気流温度変化の境界条件として時間変数の \cos 関数を与えた場合のトンネル内を流れる気流温度の周波数応答と、ステップ関数状の境界条件を与えたときの過渡応答について解析解とシミュレーションにより得られた結果を比較する。

トンネルに給気される外気の温度 $\theta_a(0, t)$ が時間変数の \cos 関数と一定値の和により与えられる境界条件(式(5))のもとでの解析解は式(6)で与えられる¹³⁾。

$$\theta_a(0, t) = \theta_i + \Delta \cos \omega t \quad (5)$$

$$\theta_a(x, t) = e^{-A'x} \left[\Delta \cos \left(\omega t - \frac{\omega x}{U} - AB' \right) + \theta_i \cos \left(\frac{\omega x}{U} + AB' \right) \right] \quad (6)$$

ここで、 θ_i :外気温度年平均値(定温度層温度との差)、 Δ :外気温度振幅、 ω :角周波数である。式(6)の A, A', B' の算出方法は、文献13のAppendixを参照されたい。

3.1 周波数応答

列車走行による発熱が無い場合について、風速 1.0m/s で換気される全長 20km, 半径 2.15m のトンネル内の空気流の温度 (日平均温度) を対象として、シミュレーション結果と解析解による結果の比較を行った。トンネル入口から流入する空気流の温度境界条件として、外気の季節変化を模擬した 1 年周期の強制的な温度変動を \cos 関数で与えた。ここではトンネル入口での空気流の年平均温度とトンネル周囲地盤の定温度層の温度が等しい ($\theta_f=0$) と仮定する。トンネル入口からの距離 x が 95m, 995m, 4995m, 19995m の 4 点で両手法による空気流の温度を比較した。地盤 (岩石) の熱伝導率については、想定される下限値 ($\lambda_c=0.5$ (W/m \cdot K)) の場合 (図 2(a)) および上限値 ($\lambda_c=5.0$ (W/m \cdot K)) の場合 (図 2(b)) の 2 種類の条件での比較を行った。シミュレーションでは、空気流の温度と地盤温度の初期値を 16.5 $^{\circ}$ C とした。

図 2(a) では開始から約 100 日まで、図 2(b) では、開始から約 50 日までの間は、初期状態からの過渡応答のため、定常応答のみで構成される近似解と数値計算結果に差が見られるが、それ以降の定常応答のみとみなせる期間ではよく一致している。

3.2 ステップ応答

前節で得られた解析解から、トンネル入口の空気流の温度の時間変動 (正弦波状変化) を入力、トンネル内の空気流の温度の時間変動 (正弦波状変化) を出力とすると、入出力の振幅比と位相差が周波数の関数 (周波数応答関数) として得られる。入力がステップ状変化の場合、そのステップ関数をフーリエ級数展開し多数の正弦波関数の項を合成したもので近似することができるため、各項に対する周波数応答を合成することによりステップ応答を近似的に求めることができる。

本節では、縮尺 1/160 アクリル製トンネル模型 (全長 5m, 内径 27mm) を使用したトンネル内温熱環境シミュ

レーション検証実験⁷⁾ の条件で、トンネル内空気流の断面平均風速を 6.3m/s に設定し、入口での気流温度を基準温度からステップ関数的に +10 $^{\circ}$ C 上昇させた場合のトンネル内の空気流の温度変化を対象として、シミュレーション結果と近似解による結果の比較を行った。

トンネル模型入口でステップ関数的に +10 $^{\circ}$ C 空気流温度を上昇させ、その 1000 秒前から 7000 秒後までのトンネル模型入口から 0.25m, 0.75m, 1.25m, 2.25m 位置におけるトンネル内空気流の温度について、解析解から近似的に求めた値と同条件のシミュレーションによる計算値の比較を図 3 に示す。同図から両者は概ね一致していると言える。

4. シミュレーション検証用模型実験の見直し

シミュレーションの精度検証のために、理論解や縮尺トンネル模型による実験結果とシミュレーション結果の比較を行った結果、前報⁷⁾ で報告したようにシミュレーションにより計算されたトンネル内空気流温度は模型実験の測定結果より小さい傾向がみられた。両者の差は、トンネル模型出口において最大で 1.3 $^{\circ}$ C となった。誤差の原因として (1) シミュレーションの入力値として使用したハンドブック記載の代表的なアクリルの熱拡散率に比べて実際に使用したトンネル模型の材料の数値が小さ

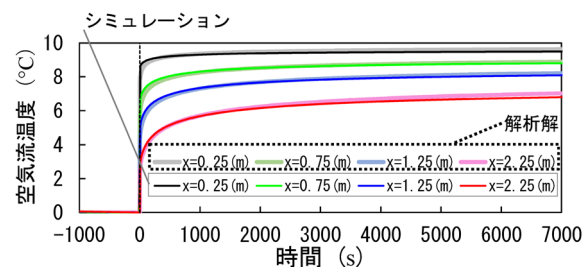


図 3 解析解とシミュレーションによるトンネル内空気流温度計算結果の比較 (ステップ応答)

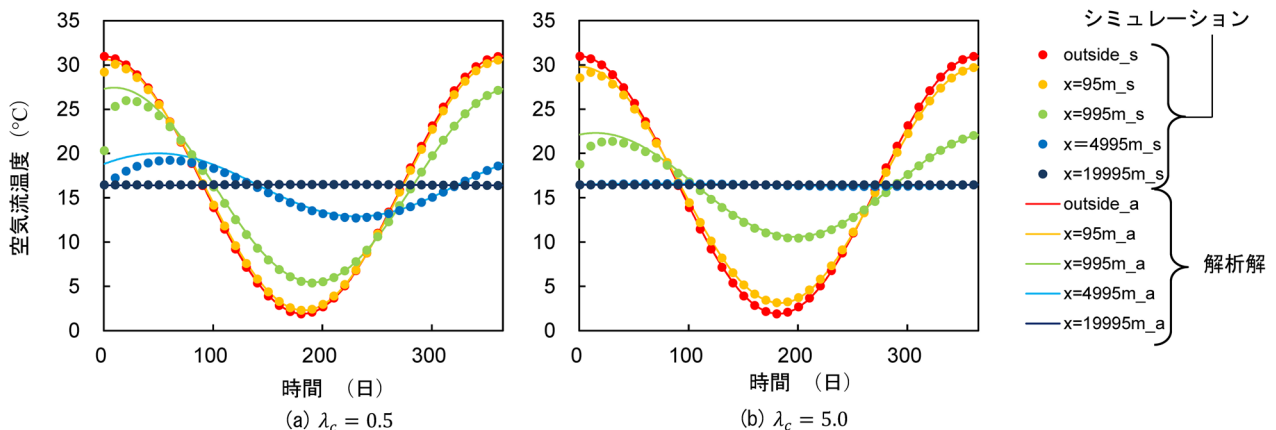


図 2 解析解とシミュレーションによるトンネル内の空気流の温度の計算結果の比較⁶⁾

特集：空気力学・騒音

い可能性、(2)シミュレーションの入力値として使用した模型実験において測定したトンネル内風速が真値に比べて過小である可能性、(3)シミュレーション結果との比較対象であるトンネル内気流温度の測定値が真値に比べて過大である可能性が考えられた。以下、4.1節でシミュレーション検証模型実験の概要を示し、4.2節でトンネル模型の熱拡散率の推定について、4.3節および4.4節でシミュレーション検証模型実験の一部条件での、以前より空間分解能が高い測定器により得られた風速および空気流の温度の断面分布をそれぞれ示す。

4.1 シミュレーション検証用模型実験の概要

トンネル内温熱環境模型実験装置は、図4に示す通りトンネルを模擬した肉厚アクリル円筒の内側に外気を模擬した空気を熱風発生機により送風する装置である。トンネル模型は、外径150mm、内径27mm、長さ5000mmのアクリル製の円筒によりトンネル壁面から約10m以内の地盤を縮尺1/160で再現している。熱風発生機は単相交流モーターにより駆動されるファンとヒーターにより構成される。この熱風発生機の吐出風速は、通常、給気口に取り付けられた簡易的なダンパーの開度により調節する。しかし、検証用模型実験では、ダンパーの代わりに穴をあけた金属板を取り付けることで、実験中に給気口面積が変わることを防止することにした。また、熱風の温度は、制御装置の設定値となるように熱風発生機内でPID制御により調節される。

シミュレーションとの比較検証のための模型実験は、熱風発生機の設定温度を30℃として一定風速で送風し、トンネル各部分の温度が定常状態に達したあと、設定温度をステップ状に45℃に上げてトンネルに給気される空気温度を変化させた。前報に記載されている測定データについては、トンネル模型を流れる空気流温度を直径1.6mmのパイプ型測温抵抗体〔時定数5.7s（空気流・7m/s・63%応答時間）〕、アクリル部分の内部温度とトンネル模型表面温度を厚さ0.3mm程度のフィルム型測温抵抗体〔時定数0.5s（水中・静止・63%応答時間）〕により測定し、トンネル模型内の風速を直径2.5mmの球形の風速受感部と2mm×5mm×厚さ1.3mmの温度補償のための受感部を持つ簡易型の熱式風速計〔応答性7s（メーカー公称値・空気流・1m/s・90%応答時間）〕により測定した。測定されたトンネル模型固体部の表面

温度とトンネル模型入口での空気の風速（流量に換算）と温度を比較検証のためのシミュレーションの境界条件として使用した。

4.2 トンネル模型の熱拡散率の推定

前報に記載した実験結果とシミュレーション結果の差異の原因として、ハンドブックに示された代表値をシミュレーションに入力するトンネル模型の熱拡散率として使用したため、真値より20%程度過大評価している可能性が考えられた。そこで、以下のようにトンネル模型の熱拡散率をトンネル模型の固体温度変化から推定した。

検証実験で使用したトンネル模型は円筒形であるが、トンネル長手方向および円周方向の温度変化が無視できると仮定し、式(2)の熱伝導方程式のパラメータを整理してアクリルの熱拡散率 $\alpha_c(=\lambda_c/(\rho_c c_c))$ の形にまとめた式(7)を単独で数値計算の基礎方程式とし、トンネル模型長手方向 $x=750\text{mm}$ における断面の半径 $r=17.5\text{mm}$ と半径 $r=75\text{mm}$ での温度 θ_c (フィルム型測温抵抗体で測定・時系列データ)を境界条件として $r=27\text{mm}$ 点での温度 θ_c の時間変化を数値計算により求めた。

$$\frac{\partial \theta_c}{\partial t} = \frac{\alpha_c}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \theta_c}{\partial r} \right) \tag{7}$$

数値計算と検証実験の条件を合わせるため、数値計算の要素分割幅 Δr は半径方向に0.3mm（センサーの厚みと同じ）とした。

図5にアクリルの熱拡散率を 1.10×10^{-7} （標準値の0.88倍）、 1.26×10^{-7} （ハンドブック等に表示される標準値）、 1.40×10^{-7} （標準値の1.11倍）とした場合の温度の数値計算結果（実線）と検証実験結果（点線）を示す。ハンドブック等に表示されている代表的な数値 1.26×10^{-7} の場合が最もよく一致していることから、トンネル内温熱環境模型実験装置のトンネル模型を構成するアクリルの熱拡散率は 1.26×10^{-7} が妥当と推定される。従って、トンネル模型長手方向の熱伝導を無視すれば、シミュレーション検証用模型トンネルを構成するアクリルの熱拡散率はハンドブック等に表示される代表的な数値と一致するため、検証実験とシミュレーションの結果のずれの原因はシミュレーションの入力として使用した熱拡散率ではないと考えられる。

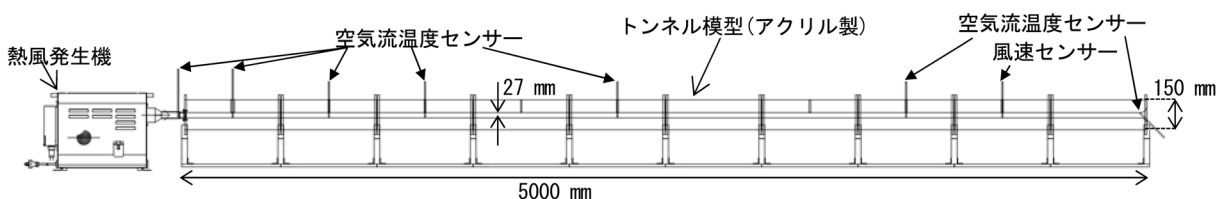


図4 トンネル内温熱環境模型実験装置

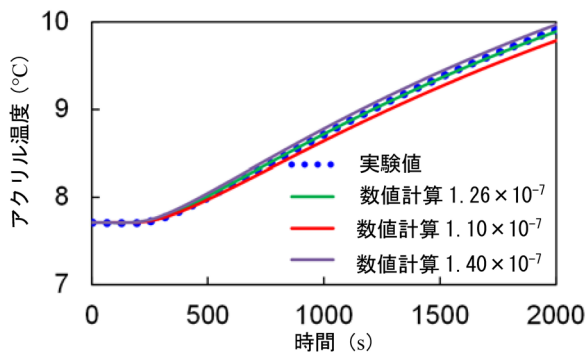


図5 アクリル温度の実験値と数値計算値の比較

4.3 熱線風速計によるトンネル模型内風速測定

前報では、実験で計測された空気流の温度がシミュレーションにより計算された数値より高かったことを報告したが、その原因として、シミュレーションで入力するトンネル模型内の流速を過小評価している可能性が考えられたため、前回使用したものは別の風速計（より空間分解能が高い熱線風速計）により風速分布を再測定した。

以前の模型実験で使用した熱式風速計は、堅牢であるが、受感部が大きく空間分解能が低い。また、風速は専用の温度センサーにより温度補償される。ただし、測定対象となる流路が狭小等の理由から補償用温度センサーを風速センサーに近づけられない場合、温度補償による誤差が混入する可能性がある。それに対し今回の測定ではDantec社製の定温度型熱線流速計90C10（1：20ブリッジ）とI型プローブ55P11（直径5 μ m タングステン線、長さ1.25mm）を使用した。較正には較正器90H10を使用した。今回使用した計測器の組み合わせの場合、風速の温度補償ができないため、空気流の温度変化の影響を抑制する対策として、各測定断面での測定前にその都度較正を実施した。

図6に模型実験装置の5断面で測定したトンネル模型内を流れる空気のトンネル半径方向の速度分布（断面平均風速 U_m による無次元値）を示す。同図には比較のため完全に発達した円管内の流れに関して、層流の場合の速度分布、1/7乗則による乱流の場合の速度分布、乱流モデルとして低レイノルズ数型 $k-\epsilon$ モデルの一つであるAKNモデル¹⁴⁾を使用した数値計算による速度分布を示した。

前報の模型実験において、流れが十分発達した位置において熱式風速計により測定したトンネル中心での時間平均風速（有次元値）は、7.3m/sであったが、より小型の受感部を持つ熱線風速計プローブで測定した結果は7.9m/sであり前回より約8%高い風速となった。このことから、前報に示した風速が過小評価であった可能性がある。

4.4 金属細線の電気抵抗によるトンネル模型内空気流温度測定

前報では、実験で計測された気流温度がシミュレーションにより計算された数値より高かった。原因として、シミュレーションの前提条件であるトンネル模型断面内の空気流が瞬間的かつ完全に混合されるという仮定が成立せず、トンネル模型内の空気流温度のトンネル半径方向の温度変化が無視できないため、模型実験でパイプ型測温抵抗体により測定された温度と（シミュレーションにより求めた空気流温度と直接対応する物理量である）トンネル模型内の空気流の混合平均温度の差が大きくなる可能性が考えられた。そのため、前報の実験条件を再現して、長手方向に加えて半径方向の温度の分布を測定した。

温度測定は風速と同じ55P11プローブを使用して、温度モジュール90C20により0.5mAの定電流をプローブのタングステン線に流した際の電気抵抗を測定すること

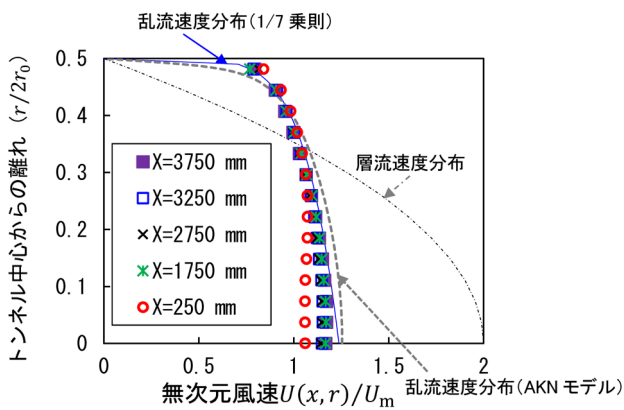


図6 トンネル模型内風速分布（無次元値）

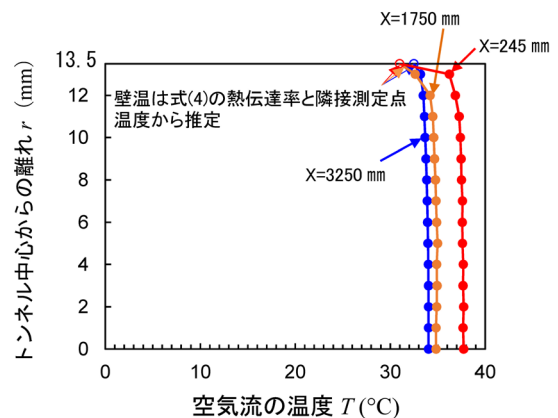


図7 トンネル模型内空気流温度分布（有次元値）

特集：空気力学・騒音

により温度を求めた。

図7に模型実験装置の3断面で測定したトンネル模型内を流れる空気流のトンネル半径方向の温度分布(有次元値)を示す。同図に示すトンネル壁面温度($r = 13.5\text{mm}$)については、フィルム型測温抵抗体により実測を試みたが、必要な精度が得られなかったため、式(4)(Colburnの式)による熱伝達率から算出される壁近傍の空気流の温度勾配と壁に最も近い($r = 13.0\text{mm}$)空気流温度測定値から推定した。空気流の温度分布が発達した領域では、空気流の温度は断面内でよく混合しており、検証実験とシミュレーションの結果のずれの原因はトンネル半径方向の温度分布ではないと考えられる。

4.5 再測定した風速を入力値としたシミュレーションと模型実験結果との比較

4.2節から4.4節の結果より、前報での実験とシミュレーションの差の原因は、シミュレーションで使用したトンネル中心風速と考えられる。そこで、今回測定されたトンネル中心風速を用いて再度シミュレーションを行い、最も差が大きかったトンネル出口部の空気流温度を実験結果と比較した(図8)。

同図に示す通り、実験とシミュレーションの差が 1°C 以内となった。これまでに示した結果に対して顕著な改善とは言えないが、シミュレーションで与えたトンネル断面の中心風速をこれまでより約8%大きい風速に見直したことにより、差が小さくなることが分かった。この結果から、前報で示した検証実験とシミュレーションの違いを生じさせた原因の一つとして、トンネル内の風速の計測誤差が考えられる。

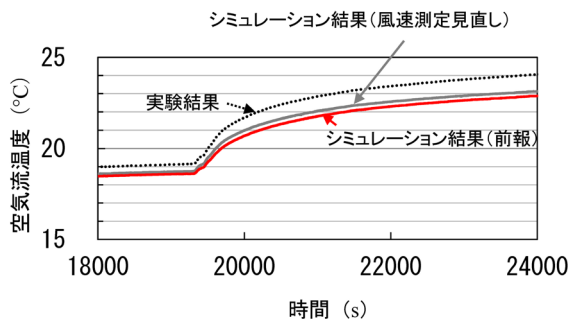


図8 トンネル模型出口部の空気流温度の比較

5. まとめ

トンネル内温熱環境シミュレーションの計算の基本部分である、トンネル内の空気流とトンネル周囲地盤それぞれの内部の熱移動と相互の熱の授受の計算を検証する

ため、理論解析解とシミュレーション結果を比較し、両者の結果が概ね一致することを示した。また、前報で示したシミュレーション検証実験とシミュレーション計算結果の差異の原因を調べた結果、トンネル模型内の風速の測定法を改良した結果をシミュレーションの入力として使用することで検証実験とシミュレーションによる結果の差が小さくなることが分かった。

文献

- 1) Kennedy, W. D. *et al.*, "Subway Environmental Design Handbook," Vol. II, U. S. Dept. of Transportation, 1976.
- 2) 山本彬也：新幹線トンネルの圧力変動・空気抵抗・トンネル換気，鉄道技研報告，No.871，1973
- 3) 飯田雅宣他：トンネル内圧力変動シミュレーション，鉄道総研報告，Vol. 4，No. 7，pp. 54-62，1990
- 4) 梶山博司他：大深度地下鉄道の空気流動シミュレーション，鉄道総研報告，Vol. 7，No. 7，pp. 51-58，1993
- 5) 梶山博司：地下鉄道の温熱環境シミュレーション，鉄道総研報告，Vol. 11，No. 10，pp. 41-46，1997
- 6) 斎藤寛之他：近似解によるトンネル内温熱環境シミュレーションの検証，機械学会年次大会2017，S0540205，2017
- 7) 斎藤寛之他：模型実験によるトンネル内温熱環境予測手法の検証，鉄道総研報告，Vol.30，No.7，pp.23-28，2016
- 8) 斎藤寛之他：シミュレーション検証実験用トンネル模型の熱拡散率の推定，機械学会年次大会2018，S0540404，2018
- 9) 斎藤寛之他：トンネル内温熱環境予測手法検証のための空間分解能を向上させた模型実験，機械学会年次大会2019，S05411，2019
- 10) 井口裕雄：縦流換気を行う長大トンネルの温湿度，日本機械学会論文集B編，Vol. 51，No. 463，pp. 928-935，1988
- 11) Colburn, A. P., "A Method of Correlating Forced Convection Heat Transfer Data and a Comparison with Fluid Friction," Transactions of the American Institute of Chemical Engineers Vol. 29, pp. 174-210, 1933.
- 12) 平松良雄他：気流による坑内冷却に関する研究(第1報)，日本鉱業会誌，Vol.71，No.803，1955
- 13) Peavy, B. A., "Heating and Cooling of Air Flowing Through an Underground Tunnel," Journal of Research of the National Bureau of Standards - C. Engineering and Instrumentation, Vol. 65C, No. 1, pp. 157-162, 1961.
- 14) Abe, K., *et al.*, "A new turbulence model for predicting fluid flow and heat transfer in separating and reattaching flows - I. Flow field calculations," International Journal of Heat and Mass Transfer., vol. 37, No.1, pp.139-151, 1994.