

模型実験によるトンネル内温熱環境予測手法の検証

齋藤 寛之* 梶山 博司* 齊藤 実俊*

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

Hiroyuki SAITO Hiroshi KAJIYAMA Sanetoshi SAITO

For the purpose of improvement of thermal environment in railway tunnels, it is necessary to utilize the mechanical ventilation systems and the cooling equipments for the underground train stations effectively. For the effective use of those equipments, improvement of prediction accuracy of thermal environment in tunnel is required. To verify the accuracy of the current prediction method, we have developed a model experiment system. This experiment system is so designed as to investigate heat transfer in a tunnel and heat conduction in the rock surrounding the tunnel by blowing hot air into a thick pipe made of acrylic plastic. Temperature detectors with high accuracy are put at various position of the experiment system to measure temperature. The differences between the temperatures by the model experiment and that by the calculation are about 1°C and the numerical calculation of the current method is found to have enough accuracy.

キーワード：トンネル，換気，温熱，シミュレーション，模型実験，検証

1. はじめに

地下鉄道のトンネルは山岳トンネルに比べて自然換気による熱の除去が難しい。この問題に対して、これまで様々な検討と対策が行われており、地下鉄のトンネルには機械換気装置を設置することが現在では標準的とされている¹⁾。エネルギー消費量のさらなる削減を目指す観点から、その機械換気装置や地下駅の冷房装置の必要容量を正確に見積もることの重要性が増している。そのような検討を行うための、地下鉄に特化した流れ・温熱環境シミュレーションプログラムとしては、米国運輸省主導で開発されたSES (Subway Environment Simulation)²⁾、都営地下鉄12号線を設計するために開発されたNewSEAS³⁾などがある。列車走行によるトンネル内風速の計算について、SESは非圧縮流れの計算を、NewSEASは2流体ピストンモデル⁴⁾に基づく計算を行っている。一方で、鉄道総研では新幹線などにも対応できるように特性曲線法により圧縮波の影響も考慮したトンネル内圧力変動シミュレーション^{5) 6)}によりトンネル内風速を計算し、そこで得られた風速を入力として、熱移動の計算を実施するためのトンネル内温熱環境シミュレーション⁷⁾の開発を進めてきた。

トンネル内温熱環境シミュレーションの計算精度を調べるための第一段階として、定常理論による理論解との比較を行った。その結果、トンネルに流入する空気温度が時間的に一定とする境界条件を設定した場合、シミュ

* 環境工学研究部 熱・空気流動研究室

レーションによる計算結果と理論値がほぼ一致することを確認した。しかし、実際の地下鉄道では、換気のために取り入れる外気(境界条件)は日変化・季節変化が重畳した周期的な温度変化を示し、そのような外気と熱をやり取りするために、トンネル内温度も時間的に変化する。そこで、本稿では、検証の第二段階として地下鉄トンネル内の熱移動の基本的な部分を再現する実験装置を製作し、トンネル内温度が時間変化する場合について実験結果による計算結果の検証を試みた。

2. シミュレーション手法の検証方法

シミュレーションによる検討を行う際には、そのシミュレーションの計算精度を把握することが重要になる。シミュレーションの計算精度を最終的に評価するためには、境界条件の詳細が明らかにされた現地試験(実物試験)結果とシミュレーション結果の比較が必要である。トンネル内温熱環境シミュレーションの場合、対象とする鉄道トンネルの実物の長さが数キロメートルから数十キロメートルと規模が大きく、かつ、地中深くに埋設されているため、実測において地中温度等の境界条件を正確に把握することは容易ではない。また、性質の異なる地層が複雑に重なるトンネル周囲の地盤の熱物性値を詳細に調べることも困難である。そこで、過去の現地試験結果との比較や新たな現地試験の実施を検討する前に、境界条件が単純で熱物性値が明確な単純形状模型を用いて精密な実験を行うことにより計算結果を検証する

特集：環境工学

こととした。シミュレーションのモデルにおいて「トンネルの壁面から 10m 以上離れるとトンネル周囲地盤の温度が時間・空間的に一定となる」という仮定を置いたが、これが正しいものとして、トンネル壁面から約 10m 以内の地盤を再現した円筒形のトンネル模型を中心に構成される実験装置を製作した。精密な実験を行うために、再現する現象をトンネル内の基本的な熱移動現象に絞り、単純な形状および構成の実験装置とした。この実験装置では、トンネル周囲の地盤に相当する部分を熱物性値が既知の均質な材料を使用して再現している。また、トンネル内およびトンネル

周囲地盤内の水による熱移動は再現していない。このようなトンネル模型を用いた模型実験により、トンネルに給気される空気温度を時間変化

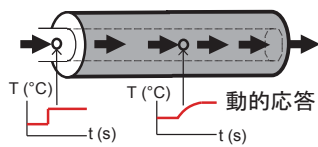


図1 模型実験の概念図

させた際のトンネル内の温度の時間変化（動的応答）を計測し（図1）、シミュレーションにより計算した温度の時間変化と比較することにより、トンネル内温熱環境シミュレーションの基本的な熱移動計算手法の検証を行った。このシミュレーションの計算精度を 1°C (± 0.5°C) 程度の誤差で調べることを目標として、測定精度の高い温度センサーを使用して実験を行った。

3. トンネル内温熱環境シミュレーション検証用模型実験

3.1 実験装置

トンネル内温熱環境模型実験装置は、トンネルを模擬した肉厚アクリル円筒（以下、トンネル模型）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（図2、図3）。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である。これは小断面単線地下鉄トンネルの駅間 1 区間（長さ 800m を想定）について、トンネル壁体とその周囲の岩または土を一体の均質な地盤とみなし、壁面内側から深さ約 10m 以内の部分縮尺 1/160 で再現したものである。熱風発生機は、取り入れた外気をヒーターにより設定温度まで加熱・温度制御し、一定風速で送風する装

置である。熱風発生機の吹き出し口をトンネル模型の開口部にホースにより接続してトンネル内部に加熱空気を送風し、同時に別の送風機によりトンネル模型周囲の空気を強制対流させた。トンネル模型表面温度は、外気温度の影響により時間変動するが、周囲の空気を強制対流させることによりトンネル模型長手方向の表面温度差を 2°C 程度以下に抑えることができる。この時間変動する境界条件を測定し、比較検証のシミュレーションの入力として使用することにより、実験とシミュレーションの条件を一致させることとした。

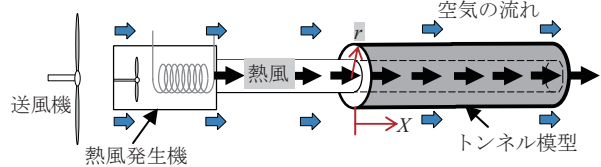


図3 実験装置の概念図

3.2 測定方法

トンネル内空気温度、トンネル模型表面温度、トンネル模型内部アクリル温度を測定精度と安定性が高い JIS A 級の 4 線式測温抵抗体を使用して測定した。このセンサーは、例えば、温度 30°C の測定温度の場合、許容差が ± 0.2°C であり、目標とする測定精度（誤差 ± 0.5°C 程度）を満たしている。トンネル内空気温度は、直径 1.6mm

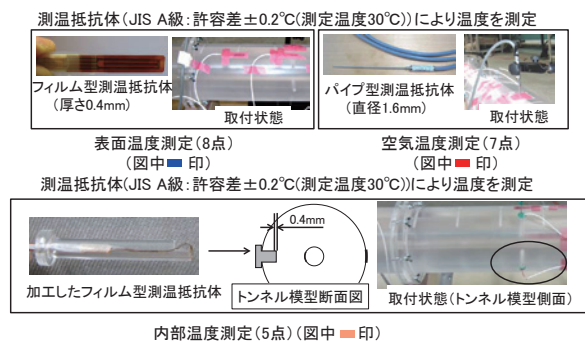
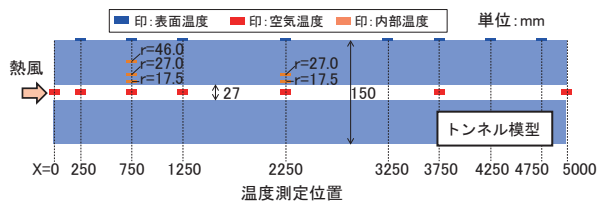


図4 温度測定方法

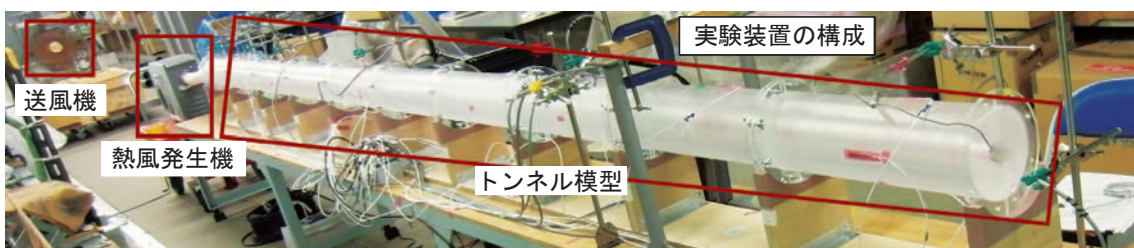


図2 実験装置の写真

のパイプ型測温抵抗体によりトンネル長手方向に7点で測定した。トンネル模型内部アクリル温度は、埋め込み型のフィルム型測温抵抗体によりトンネル長手方向の2断面 ($X=750, 2250\text{mm}$) において、それぞれトンネル半径方向に3点 ($r=17.5, 27, 46\text{mm}$) と2点 ($r=17.5, 27\text{mm}$)、計5点で測定した。トンネル模型表面温度はフィルム型測温抵抗体によりトンネル長手方向に8点で測定した。これら温度センサーの測定位置を図4に示す。トンネル模型上流側端部から距離 $X=4250\text{mm}$ の断面において、トンネルの中心に簡易型の熱式風速計を設置し、トンネル内風速を計測した(図5)。また、送風機を使用して強制対流させたトンネル模型周囲の風速は、トンネル模型の影響を受け局所的な風向が3次的に変化することから、3次元超音波風速計により計測した(図5)。

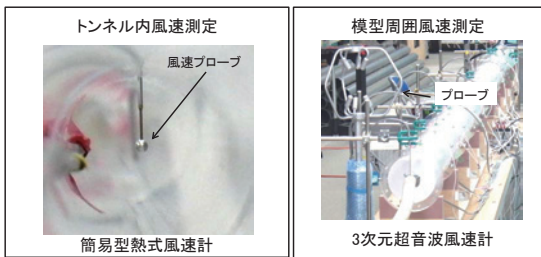


図5 風速測定方法

3.3 実験手順

はじめに、熱風発生機の設定温度を 30°C に設定し、送風機を稼働してトンネル模型周囲の空気を強制対流させながら5時間以上送風を継続した。その後、トンネル模型が、熱的に定常に達したと判断した時点で、設定温度を 45°C まで上げて1時間以上送風を続けた。実験開始後熱風の送風を5時間継続することにした理由は、予備的に実施したシミュレーション結果と予備実験の結果から、5時間程度熱風を送風し続ければトンネル模型内の温度が定常に近づくことが分かったためである。この間、トンネル内空気温度、トンネル模型表面温度、トンネル模型内部アクリル温度、トンネル内風速をサンプリングレート 5Hz で測定した。トンネル模型周囲風速は別途サンプリングレート 10Hz で測定した。

4. 模型実験結果

4.1 風速測定結果

トンネルの中心で測定された、トンネル模型内風速の測定結果を図6に示す。トンネル模型内風速は、ほぼ一定に制御されていると言える。測定された風速の時間平均値は 7.3m/s である。

トンネル模型周囲風速の測定結果(1分間平均水平風速)を図7に示す。測定された風速の時間平均値は 0.9m/s だった。

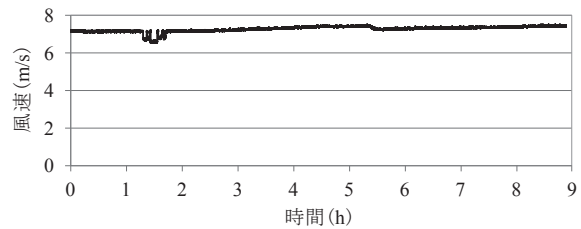


図6 トンネル内風速測定結果

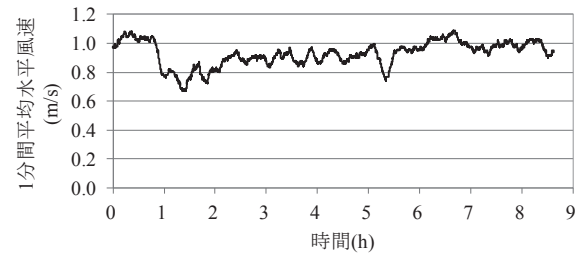


図7 トンネル模型周囲風速測定結果

4.2 温度測定結果

トンネル模型表面温度の測定結果を図8に示す。凡例の数字はトンネル模型端部(上流側)からの測定位置までの距離 X (単位 mm) である。図からトンネル模型表面温度は、外気温度の変動の影響を受け時間的に変化する傾向がみられる。本実験では、測定位置によるトンネル模型表面温度の違いを小さくするために模型周囲の空気を送風機により強制対流させている。そのため、実験開始3時間後から7時間後までの間については、トンネル模型表面温度は 12°C から 14°C の間の値を取り、場所による温度の違いが 2°C 程度に抑えられている。

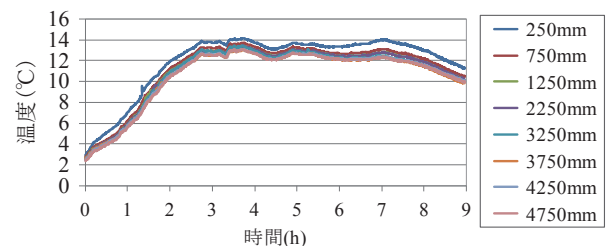


図8 トンネル模型表面温度測定結果

トンネル内空気温度の測定結果の一部を代表例として図9に示す。凡例の数字はトンネル模型端部(上流側)からの測定位置までの距離 X (単位 mm) である。測定開始後5.56時間後に熱風発生機の設定温度を 30°C から 45°C に上げたことに伴って、各測定点の空気温度が上昇しているが、上流側ほど急峻に変化し、短い時間で定常状態に近づく傾向がみられる。

$X=750\text{mm}$ の断面でのトンネル模型内部アクリル温度の測定結果を図10に示す。凡例の数字はトンネル中心からの距離 r (単位 mm) である。測定開始後5.56時間後に熱風発生機の設定温度を 30°C から 45°C に上げたことに伴って、各測定点のアクリル温度が上昇しているが、

特集：環境工学

中心から遠いほど定常状態に達するまでに要する時間が長い傾向がみられる。また、トンネル内空気温度に比べて温度の時間変化が緩やかである。

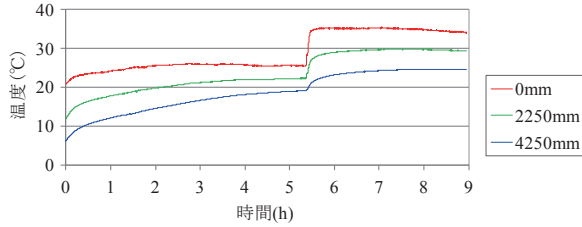


図9 トンネル内空気温度測定結果

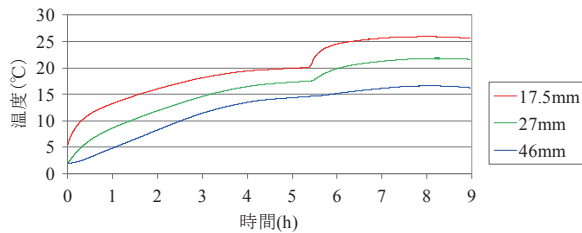


図10 トンネル模型内部アクリル温度測定結果

5. シミュレーション手法

5.1 シミュレーションの概要

トンネル内温熱環境シミュレーションでは、一定風速で機械換気される海底トンネルを対象とした温熱環境予測手法⁸⁾に基づき、トンネル内の空気の流れを1次元(図11)で、トンネル周囲地盤を2次元軸対称形状(図12)でモデル化しており、基本的にはトンネル内空気温度に関する基礎方程式(式(1))とトンネル周囲地盤に関する基礎方程式(式(2))を連立して解くことによりトンネル内の温度の時間変化を計算する。

$$c_a \rho_a A \left(\frac{\partial \theta_a}{\partial t} + U \frac{\partial \theta_a}{\partial x} \right) = h_a S (\theta_{c0} - \theta_a) + A \lambda_a \frac{\partial^2 \theta_a}{\partial x^2} \quad (1)$$

$$c_c \rho_c \frac{\partial \theta_c}{\partial t} = \frac{\lambda_c}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \theta_c}{\partial r} \right) + \lambda_c \frac{\partial^2 \theta_c}{\partial x^2} \quad (2)$$

ここで、 A ：トンネル断面積、 c_a ：空気の定圧比熱、 λ_a ：空気の熱伝導率、 h_a ：空気と壁面の熱伝達率、 S ：トンネル断面周長、 t ：時間、 U ：トンネル内風速、 x ：トンネル長手方向の距離、 θ_a ：空気温度、 θ_{c0} ：壁面温度、 ρ_a ：空気密度、 c_c ：地盤の比熱、 r ：トンネル中心からの半径方向の距離、 θ_c ：地盤温度、 λ_c ：地盤の熱伝導率、 ρ_c ：地盤密度である。

このシミュレーションは、トンネル内およびトンネル周囲地盤内の水による熱移動を取扱える機能を持つが、実験の状況に合わせるためにシミュレーションの機能を

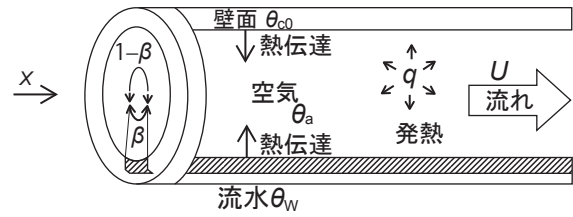


図11 トンネル内空気の熱移動

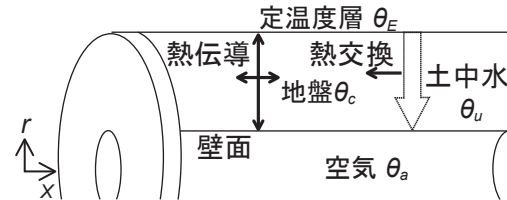


図12 トンネル周囲地盤の熱移動

制限し、水の影響は考慮しないものとする(式(1)と式(2)は水の影響を無視した場合を示す)。地盤温度は、トンネル内壁面から10m(縮尺1/160では62.5mm)離れると、地盤温度が変化しない定温度層に達すると仮定しているため、トンネル周囲地盤をモデル化した円筒領域の外表面の境界条件は、時間的、空間的に一定温度となる。ところが、今回開発した模型実験装置の表面温度は空間的には、2°C程度以内のばらつきであるが、時間的には変動するため、実験状況に合わせることにした。そのため、模型実験と比較するためのシミュレーションにおいて、トンネル周囲地盤の境界条件として実験で測定した時系列データを入力値として使用する。模型実験装置に合わせて、トンネル直径(円筒領域内径)を27mm、円筒領域外径を150mm、トンネル長さを5000mmに設定した。トンネル円筒内面の境界条件については、トンネル内側を流れる空気との熱の授受を、Petukhov-Popov⁹⁾の式から与えられる Nu による熱伝達率により与えた(式(3)~(7))。

$$h_u = (\lambda_a / d) Nu \quad (3)$$

$$Nu = \frac{\left(\frac{f}{8} R_{e_d} P_r \right)}{K_1 + K_2 \left(\frac{f}{8} \right)^{\frac{1}{2}} \left(P_r^{\frac{2}{3}} - 1 \right)} \quad (4)$$

ただし、

$$K_1 = 1 + 3.4 f \quad (5)$$

$$K_2 = 11.7 + \frac{1.8}{P_r^{\frac{1}{3}}} \quad (6)$$

$$f = (1.82 \log R_{e_d} - 1.64)^{-2} \quad (7)$$

ここで、 d ：トンネル模型の内径、 R_{e_d} ：トンネル模型内径とトンネル内(断面平均)風速にもとづくレイノルズ数、 P_r ：空気のプラントル数である。

5.2 トンネル内風速（境界条件）

シミュレーションではトンネル内の空気の流れを1次元とみなしているが、実際のトンネル模型内の風速は半径方向に分布を持っている。そのため、実験で測定したトンネル中心でのトンネル内風速の時間平均値（4.1節）と予備実験により測定したトンネル模型内の風速分布から断面平均風速を求めてシミュレーションのトンネル内風速（境界条件）として与える。

文献10)によると、乱流の場合、滑らかな表面を持つ半径 R の円管内の中心から r 離れた位置の風速 $U(r)$ は以下のべき乗則の式(8)で近似できる。

$$U(r) = U_{\max} \left(1 - \frac{r}{R}\right)^n \quad (8)$$

ここで U_{\max} は、トンネル中心の風速である。

乱流の管内流では n は通常7に取ることが多いが、実際には管の直径 $d (=2R)$ を代表長さに、管の断面平均風速 \bar{U} を代表風速にとったレイノルズ数 $Re (= \bar{U}d/\nu)$ に依存する。J.Nikuradse が実験により Re に対する代表的な n の値を求めている¹⁰⁾が、その実験値の内挿から、予備実験で風速分布を測定した $U_{\max}=4.6\text{m/s}$ の場合と 10.1m/s の場合の n を求めると6.26, 6.50である。図13に示すように予備実験の結果と式(8)の実験式は、おおむね一致している。

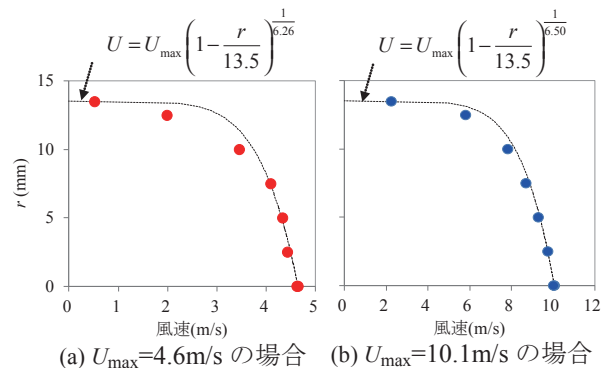


図13 トンネル模型内の風速分布

模型トンネル内の風速がべき乗則に従うとすると、断面平均風速 \bar{U} と模型トンネル断面中心風速 U_{\max} の関係は、式(8)を円管断面にわたって積分することで次式で得られる¹¹⁾。

$$\frac{\bar{U}}{U_{\max}} = \frac{2n^2}{(n+1)(2n+1)} \quad (9)$$

式(9)より、 $U_{\max}=4.6\text{ m/s}$ の場合 $n=6.26$ より、 $\bar{U}=0.80U_{\max}$ である、また $U_{\max}=10.1\text{ m/s}$ の場合 $n=6.50$ より、 $\bar{U}=0.80U_{\max}$ である。従って、今回の実験結果の $U_{\max}=7.3\text{ m/s}$ の場合も、 $\bar{U}=0.80U_{\max}$ であると考えられるので、トンネル内風速の境界条件は時間的に一定として $\bar{U}=5.84\text{m/s}$ を与えた。

5.3 トンネル模型表面温度（境界条件）

シミュレーションのトンネル模型表面温度（境界条件）は、実験により測定した8点のトンネル模型表面温度（図8）を使用し、測定点以外の箇所はデータの内挿により境界条件を与えた。

5.4 シミュレーションで使用した物性値

シミュレーションで使用した、トンネル模型内の空気とトンネル模型を構成するアクリルの物性値を表1(a), (b)に示す。

表1 シミュレーションで使用した物性値

(a) 空気の物性値		
定圧比熱 (J/ (kg · K))	密度 (kg/m ³)	熱伝導率 (W/ (m · K))
1006	1.275	0.0272
(b) アクリルの物性値		
比熱 (J/ (kg · K))	密度 (kg/m ³)	熱伝導率 (W/ (m · K))
1400	1190	0.21

5.5 シミュレーションの格子点間隔

数値計算のために式(1), (2)の離散化を行ったが、トンネル内空気とトンネル模型内部アクリル部分の X 方向の格子点間隔を 19mm の等間隔に設定し、270分割した。トンネル模型内部アクリル温度の r 方向の格子点間隔は原則的に内側の格子点ほど短く設定し、 0.2mm から 8.7mm の不等間隔で16分割した。計算の時間刻みは 0.2s に設定した。

6. トンネル内温熱環境シミュレーションの検証

トンネル内温熱環境シミュレーションを検証するために、シミュレーションによる計算結果と模型実験結果と比較する。図14から図16に、トンネル模型上流側端部からの距離 X が 750mm , 2250mm , 3750mm の断面でのトンネル模型内空気温度の比較を示す。図17, 図18に、トンネル模型上流端からの距離 X が 750mm の断面のトンネル中心からの距離 $r=17.5\text{mm}$, 27mm でのトンネル模型内部アクリル温度の比較を示す。熱風発生機の設定温度を 30°C から 45°C に上げた際の推移を示している。

図14から図18よりトンネル内空気温度とトンネル模型内部アクリル温度に関して、模型実験結果とシミュレーション結果の差は 1°C 以内であり、シミュレーションの数値解析方法が正しいことを検証できた。なお、この 1°C の誤差には、空気の物性値に対する温度変化の影響を無視したことの影響も含まれていると考えられる。

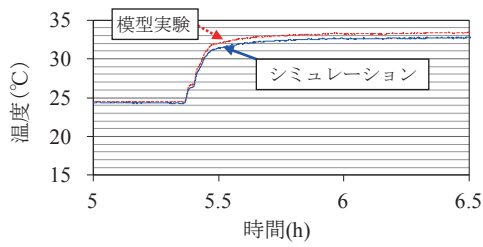


図14 モデル実験とシミュレーションの比較
(トンネル内空気温度, $X=750\text{mm}$)

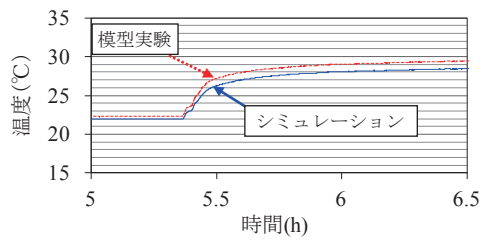


図15 モデル実験とシミュレーションの比較
(トンネル内空気温度, $X=2250\text{mm}$)

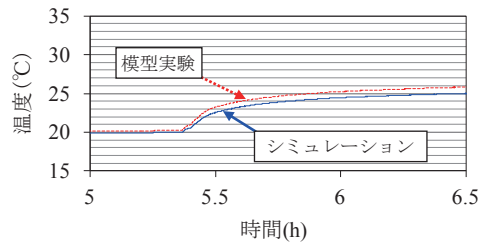


図16 モデル実験とシミュレーションの比較
(トンネル内空気温度, $X=3750\text{mm}$)

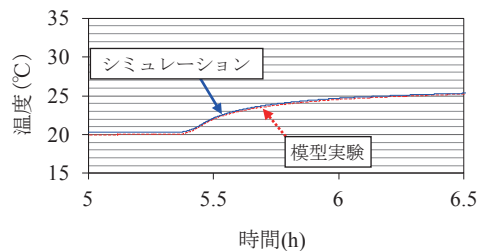


図17 モデル実験とシミュレーションの比較
(模型内部アクリル温度, $X=750\text{mm}$, $r=17.5\text{mm}$)

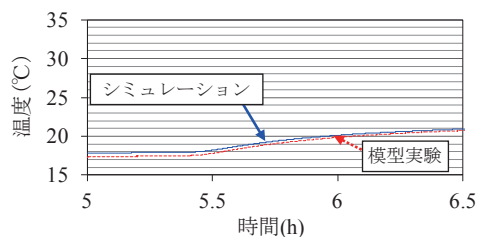


図18 モデル実験とシミュレーションの比較
(模型内部アクリル温度, $X=750\text{mm}$, $r=27\text{mm}$)

7. おわりに

トンネル内温熱環境シミュレーションの計算の基本的な部分である、トンネル内空気とトンネル周辺地盤中の熱移動および相互の熱のやり取りを検証するための模型実験装置を製作した。その実験結果と、模型実験を再現したシミュレーションの計算結果から以下のことが明らかになった。

トンネル内温熱環境シミュレーションによる計算結果と模型実験結果の差が約 1.0°C 以内であることから、シミュレーションによる数値解析の誤差は 1.0°C 程度である。

今後の課題として、今回の結果をふまえて、模型実験では検証できなかった地盤内の水の影響やトンネル本坑内および換気塔内風速の予測精度に起因する誤差などについて検討を進めていく必要がある。

文献

- 1) 我満勝輝：地下鉄の換気・冷房の現状と問題点，空気調和・衛生工学，Vol.55，No.3，pp.205-210，1981
- 2) Kennedy, W. D. et.al: Subway Environmental Design Handbook, Vol.II, U. S. Dept. of Transportation, 1976, B27-B39.
- 3) 石川禎昭，原山秀夫，東川直史：地下鉄の環境解析システム (NewSEAS) とその実用効果，鉄道車両と技術，Vol.2，No.7，pp.18-23，1996
- 4) 森井宣治，ピストン効果の理論 (二流体ピストンモデル)，日本機械学会論文集，Vol.66，No.644，pp.145-152，2000
- 5) 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
- 6) 飯田雅宣，前田達夫：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
- 7) 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
- 8) 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
- 9) B. S. Petukhov：“Heat Transfer and Friction in Turbulent Pipe Flows with Variable Properties”，Advances in Heat Transfer, vol.6, Academic Press, pp.503-564, 1970.
- 10) Hansen, A. G. : Fluid Mechanics, John Wiley & Sons, Inc, p.422, 1967.
- 11) 白倉昌明，大橋秀雄：流体力学 (2)，コロナ社，p.134，1969