

地下鉄トンネル内温度の予測と検証

環境工学研究部 熱・空気流動研究室

副主任研究員 齋藤 寛之

1. はじめに

地下鉄トンネルのように空気が入れ替わりにくい閉鎖空間内では、高密度ダイヤの列車走行により発生した熱をトンネル外に自然に放熱することは難しく、温度上昇が問題になる場合がある。過去には東京、大阪の地下鉄では経年的温度上昇が見られ¹⁾、対策が実施された。それ以降、地下鉄はラッシュ時の発熱量のピークに対応可能なトンネルの機械換気設備、駅部の冷房設備などの温熱に対する対策が建設の段階であらかじめ実施されている。今後も、建設費削減のためにトンネル断面積の小型化を試みることや、消費電力削減のために空調設備の運転方法について検討することは重要である。そのような検討にはトンネル内の温度を予測する手段が必要になる。これまで鉄道総研では、温熱環境シミュレーションプログラムを使用して、トンネル内温度の予測を行ってきた²⁾。今回、地下鉄トンネル内で実施した温度測定結果により、温熱環境シミュレーションの予測精度を検証した。

2. 地下鉄トンネルでの現地測定

(1) 測定の概要

温熱環境シミュレーションの検証のために、平成 21 年から平成 24 年まで 4 年にわたり地下鉄トンネルにおいて現地測定を実施している。測定場所は地表から約 30m から 40m の深さにある

- 凡 例(全 20 点)
- 空気温度 (×6)
 - △ 相対湿度 (×6)
 - 風速 (×2)
 - 地中温度 (×2)
 - ⊙ 壁体内温度 (×2)
 - ⊗ 壁面温度 (×2)
 - ★ データ記録装置
 - ⇨ 列車進行方向
 - ⇩ 機械換気風流の方向

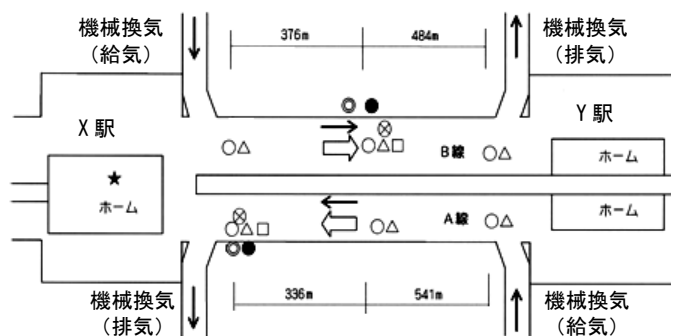


図 1 計測機器の設置位置

隣接する 2 駅 (X 駅と Y 駅とする) の間をつなぐ 2 本のトンネル (A 線と B 線とする) である。X 駅は Y 駅に比べて海拔高度が約 20m 低い位置にある。X 駅から Y 駅に向かう列車はトンネル B 線を通り、逆方向に向かう列車はトンネル A 線を通る。A 線、B 線両トンネルの機械換気による送風方向は、列車走行方向と同じ向きである。図 1 に示すように、空気温度と相対湿度、(線路方向) 風速、地中温度 (壁面から深さ 0.65m)、壁体内温度 (壁面から深さ 0.18m) および壁面温度を測定した。外気温は最寄りの気象官署の観測値を使用した。

(2) 測定データの日変化

図 2 に冬期の 1 日の測定データの一例を、図 3 に夏期の 1 日の測定データの一例を示す。図 2、3 に示すようにトンネル内の風速は、列車ダイヤの密度に応じて 1 日の間に変化し、機械換気が停止する深夜の風速は 0~0.3m/s と小さい。また、トンネル内の空気温度は夏期の日中を除いて外気温より高く、機械換気の送風方向 (列車進行方向) に空気温度が上昇する傾向が見られる。この傾向は冬期の B 線で顕著である。ただし、夏期に外気温が地中温度より高い場合は、逆に機械換気の送風方向に温度が下降する。

A線、B線とも壁面温度、壁体内温度、地中温度の変化は小さい。冬期の地中温度は24℃程度であり、夏期は30℃程度である。

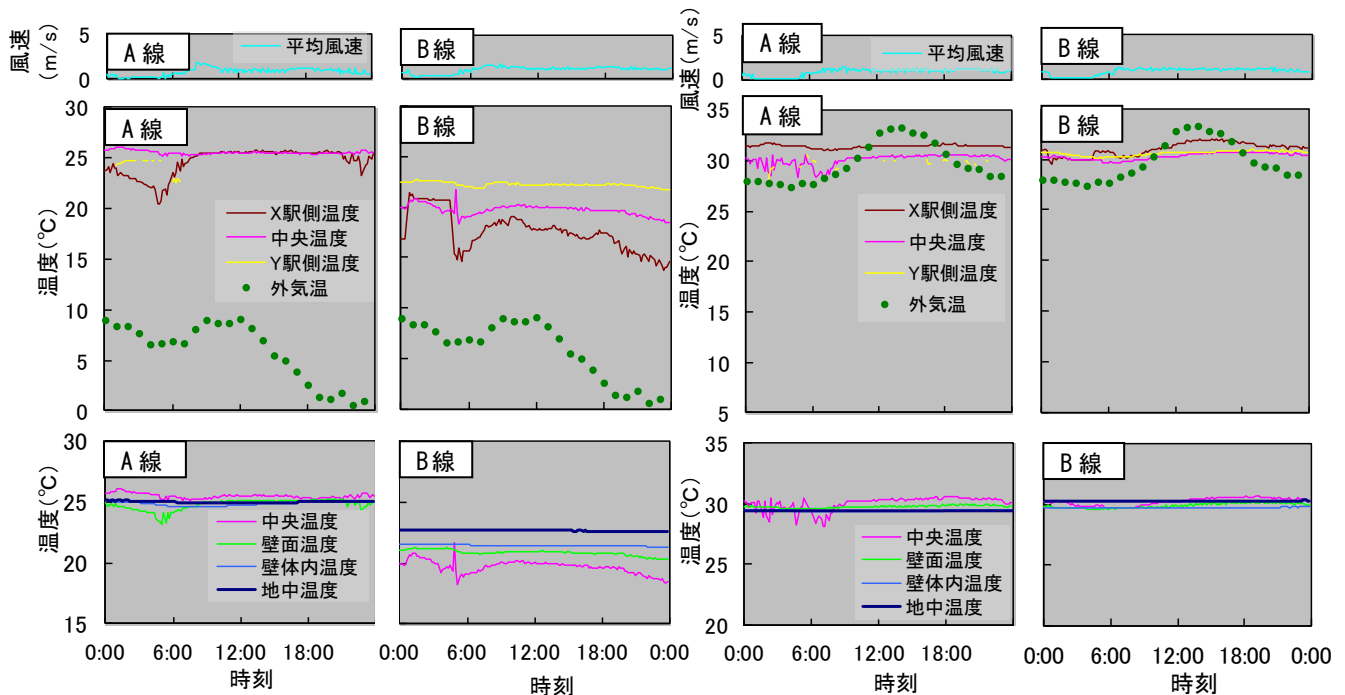


図2 冬期 (H22.2.1) の日変化

図3 夏期 (H22.8.1) の日変化

(3) 温度の季節変化と経年変化

以下B線で測定された温度の日平均値を示す。図4に平成21年以降の外気温の日平均値およびB線の駅間中央付近における地中温度、壁体内温度、空気温度の日平均値を示す。各年により多少変動するものの、季節的な変化は1年周期で繰り返されている。図4より、外気温、トンネル内の空気温度とも、この4年間では経年的上昇は見られない。

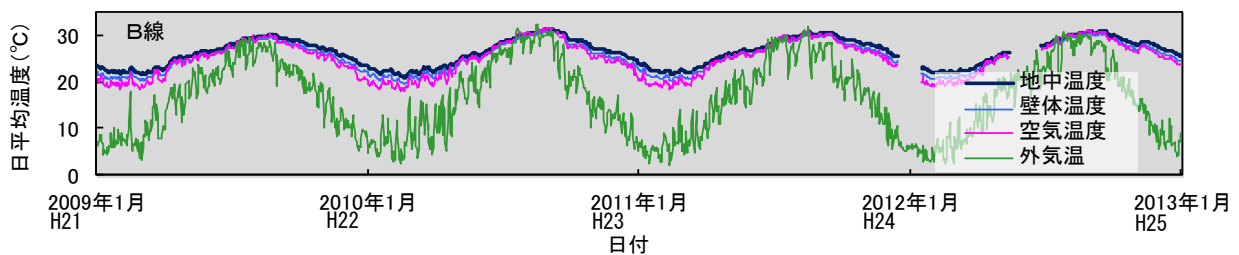


図4 日平均温度の4年間の変化 (2009年~2012年)

3. 計算方法

地下鉄に特化した流れ・温熱環境シミュレーション用の汎用プログラムとしてはSES (Subway Environment Simulation)³⁾ などがあるが、鉄道総研では新幹線などの高速列車についての検討にも共通して使用できるように流れのシミュレーションについては空気の圧縮性を考慮した予測手法を使用している。

(1) 流れの計算

列車がトンネル内を走行する場合の圧力変動は、流れを1次元非定常圧縮性流れとして扱い特性曲線法を用いて計算するトンネル内圧力変動シミュレーション^{4), 5)} により評価できる。この手法を基に、立坑や斜坑などの枝坑や駅部の要素を付加することにより、地下鉄道に適用できるようにした予測手法⁶⁾ を使用した。基礎方程式等は文献^{4) ~ 6)} に譲り、ここでは送風機による機械換気の取り扱いについて述べる。

送風機の特性は一般的に流量と送風機静圧の関係を表す性能曲線（図 7 参照）によって与えられ、送風機静圧 Δp はトンネル内の風速の断面平均 u の多項式で近似できる。2 次式で近似した場合、送風機設置点前後の X 点、Y 点で次の関係が成り立つ。

$$\left. \begin{aligned} p_Y - p_X &= C_{0e} + C_{1e}u + C_{2e}u^2 \quad (\text{排気}) \\ p_X - p_Y &= C_{0i} + C_{1i}u + C_{2i}u^2 \quad (\text{給気}) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$u = u_X = u_Y \quad (2)$$

ここで、 C_0, C_1, C_2 : 最小二乗近似により求めた定数、添字 e は排気用送風機、 i は給気用送風機を示す。送風機の設置点では、式(1)、(2)に従って格子点の前後で換気方向に送風機静圧 $\Delta p (= |p_X - p_Y|)$ だけ圧力が不連続に上昇するため、通常格子点の計算に使用する式に加えて式(1)、(2)を連立して解を求める。

(2) 温熱環境の計算

機械換気を行う長大トンネルの温熱環境予測手法として、海底トンネルを想定した一定風速で換気する場合の手法⁷⁾を基に、上記のトンネル内圧力変動シミュレーションにより求めた風速を用いて温熱環境を予測する手法²⁾を使用する。発熱量が増加して長手方向の温度勾配が大きくなる場合にも使用できるように、地盤温度に関する基礎方程式で半径方向の熱移動とともに長手方向の熱移動も考慮した。以下に、地盤温度に関する基礎方程式を示す。ここでは、トンネルのコンクリート壁体と外側の土の部分を一体的な均質な地盤であるとみなす。地盤温度（図 8 参照）は長手方向と半径方向に変化するものとして式(3)で表す。

$$C_c \rho_c \frac{\partial \theta_c}{\partial t} = \lambda_c \frac{\partial^2 \theta_c}{\partial x^2} + \frac{\lambda_c}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \theta_c}{\partial r} \right) + \kappa (\theta_u - \theta_c) \quad (3)$$

ここで、 C_c : 地盤の比熱、 r : トンネル中心からの半径方向の距離、 t : 時間、 x : 長手方向の距離、 θ_c : 地盤温度、 θ_u : 土中水温度、 κ : 地盤と土中水との熱交換率、 λ_c : 地盤の熱伝導率、 ρ_c : 地盤の密度である。また、壁面から 10m 離れると温度が変化しない定温度層 ($\theta_c = \theta_E$) になるものとする。

地盤が空気や流水と接する壁面温度は θ_{c0} とする。壁面での空気や流水との間の熱移動に関する関係式、地盤温度以外の空気温度 θ_a 、流水温度 θ_w 、土中水温度などに関する基礎方程式、境界条件、物性値および計算方法等に関しては文献²⁾を参照されたい。

4. 温熱環境シミュレーションの検証

シミュレーションの検証のために、現地測定を実施した地下鉄トンネルに関する計算結果を現地測定結果と比較する。計算のために X 駅、Y 駅を含む 9km の区間（全長 40.7km の中央付近）をモデル化したが、簡略化のためトンネルは B 線のみ、駅部はホーム階のみ、換気坑は一律に長さ 40m、駅端からの離れが 20m であるとした。計算格子の間隔は 10m とし、外気温の季節変動を正弦曲線で近似し境界条件として与えた。発熱量は消費電力量が最終的にすべて熱になるとして、トンネル全長で図 9 に示す量となるようにトンネル全長にわたり均等に与えた。

最初に、計算の境界条件として与える地盤の定温度層の温度について、過去に別の地下鉄トンネルでの

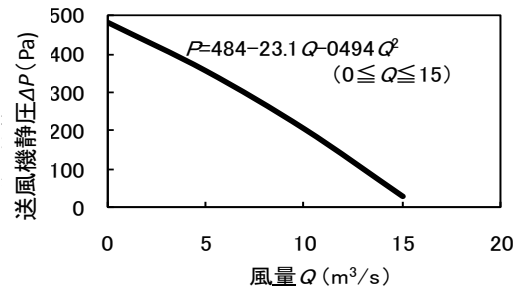


図 7 計算に用いた性能曲線

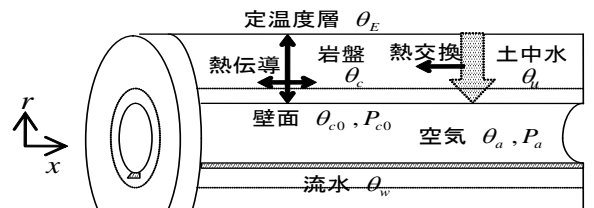


図 8 地盤温度に係る熱の移動

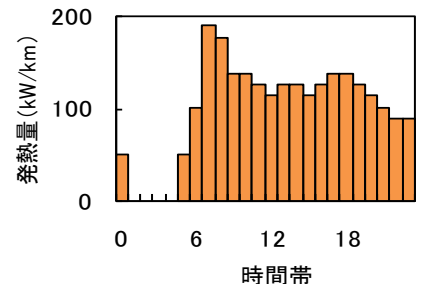


図 9 計算に用いた発熱量

測定結果から得られた外気温度の年平均値と地中温度の関係式を使用し、トンネルの両端が外気に開放された境界条件で計算したところ、図10に示すように地中温度が測定温度より6°C低い結果となった。次に、地盤の定温度層の温度を現地測定で得られた地中温度の年平均値（27.4°C）とし、トンネル両端を周期境界条件として計算をしたところ、図11に示すように実測値に近づいた。このことから、トンネル坑口から十分離れた区間については、トンネルの両端は周期境界条件とする方が良く、半径方向の境界条件として与える地盤の定温度層の温度の精度がトンネル内空気の計算精度に影響を与えることが分かる。また、図11から、計算ではトンネル内の空気温度の季節変動を過大評価している。今回の計算では送風機のパラメータや、トンネルおよび換気塔の形状を簡略化したため、モデルを見直し実態に即したものにすること等により精度を向上させる必要がある。

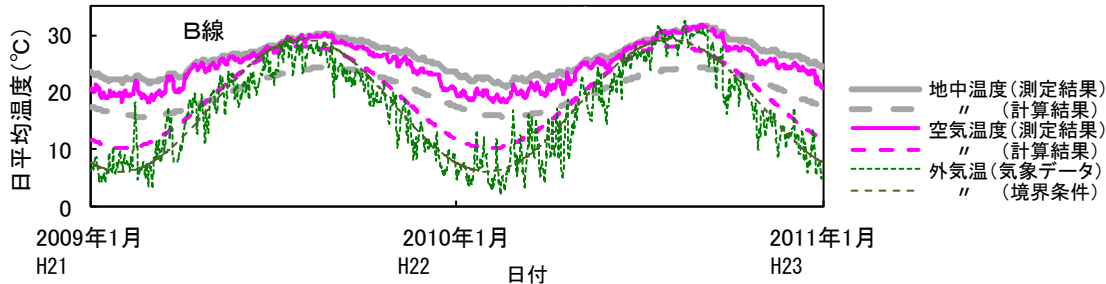


図10 境界条件見直し前の計算結果と測定結果の比較

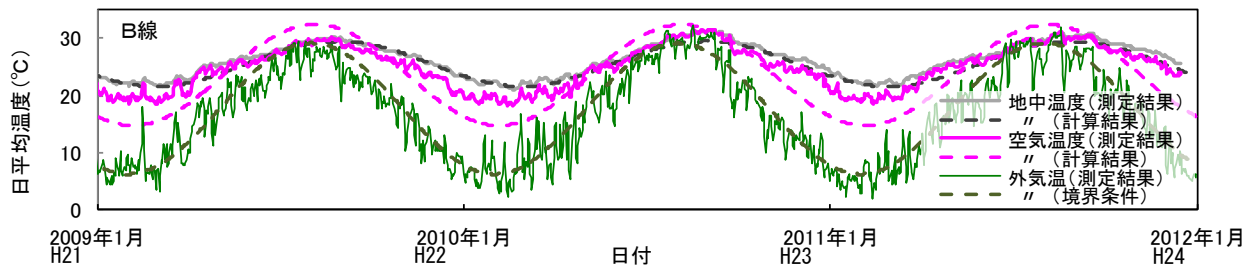


図11 境界条件見直し後の計算結果と測定結果の比較

5. おわりに

地下鉄トンネル内での4年間の温度測定結果を用いて、温熱環境シミュレーションの予測精度を検証した。その結果、トンネル坑口から十分離れた地下鉄トンネル内の温熱環境の計算では、トンネル両端の境界条件を周期境界条件とし、トンネルの半径方向の境界条件として与える地盤の定温度層の温度を正確に見積もることで、トンネル内の温熱環境の予測精度が向上することが分かった。また、季節変動を過大評価する傾向が見られるので、今後トンネルの機械換気装置に関する詳細なモデル化等により予測精度を向上させる必要がある。

最後に、現地測定実施にあたりご協力頂きました東京都交通局の関係各位に感謝いたします。

文献

- 1) 宮本政幸, 赤松義夫: 地下鉄の温湿度上昇解析, 科学と工業, Vol.38, No.8, pp.6~20, 1964
- 2) 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
- 3) Kennedy, W. D. et.al: Subway Environmental Design Handbook, Vol.II, U. S. Dept. of Transportation, 1976, B27-B39
- 4) 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
- 5) 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
- 6) 梶山博司, 飯田雅宣, 前田達夫: 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
- 7) 井口裕雄: 縦流換気を行う長大トンネルの温湿度シミュレーション手法の開発とその応用, 鉄道技研報告, No.1266, 1984