

- 鉄道一般
- 車両
- 施設
- 電気
- 運転・輸送
- 防災
- 環境
- 人間科学
- 浮上式鉄道

トンネル内の空気の流れと温熱環境を予測する

鉄道トンネルでは列車の走行に伴って空気の流れが生じます。新幹線のような高速鉄道における列車・トンネル系の空気力学的現象として、トンネル微気圧波、トンネル内圧力変動、トンネル内温度上昇などが挙げられます。これらのうち沿線環境に関わるトンネル微気圧波の予測については本誌1月号で紹介されていますので、ここではトンネル内の環境に関わるトンネル内圧力変動とトンネル内温度上昇の予測について、その概要を紹介します。



梶山 博司
Hiroshi Kajiyama
環境工学研究部
主管研究員
[専門分野]空気力学、熱工学



斎藤 寛之
Hiroyuki Saitou
環境工学研究部
熱・空気流動研究室
副主任研究員
[専門分野]空気力学、熱工学

トンネル内の圧力変動と温度に関する研究

列車とトンネルの空気力学の分野での最初の論文は当時100km/h運転を目標とするトルミーン¹⁾の研究(1927)で、トンネル断面内で流速や圧力が一定で長さ方向にのみ変化する1次元モデルで列車先頭がトンネルに突入してから後尾が突入するまでを扱っています。日本では蒸気機関車のばい煙と関連したトンネル内の気流が主な問題でしたが、新幹線の建設を契機として研究が進み、原²⁾がトンネル突入時の圧縮波の大きさとトンネル内の流速を理論的に求めました(1960)。その後、山本³⁾は圧力と流速をコンピューターで計算するプログラムを開発し(1973)、飯田ら⁴⁾は対向列車とすれ違う場合にまで拡張しました(1990)。

一方、昭和30年代後半から40年代

にかけて東京や大阪で地下鉄トンネル内の気温が上昇するという状況を契機としてトンネル内の温熱環境に関する研究が行われ、また、青函トンネルの建設を契機として長大トンネルの温熱環境に関する研究が始まり、井口⁵⁾は縦流換気を前提とする長大トンネル湿度シミュレーション手法を開発しました(1984)。

地下鉄では

地下鉄のホームで列車を待っていると列車の到着より先にトンネルから吹いてくる風を感じます。この時の流れを模式的に図1に示します。A駅を発車した列車はピストン効果で前面の空気を押し出すとともに側面で空気を引きずりながらB駅に向かいます。この場合、閉塞率(列車とトンネルの断面積比)と空気の粘性による摩擦力がト

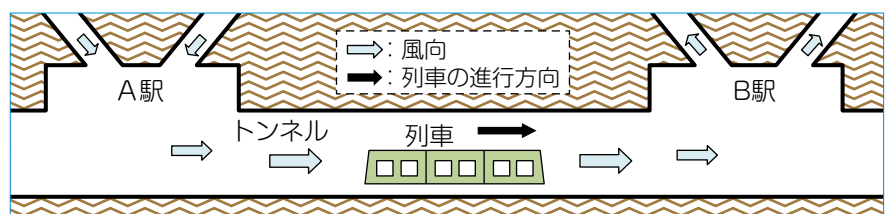


図1 地下鉄トンネル内の空気の流れ

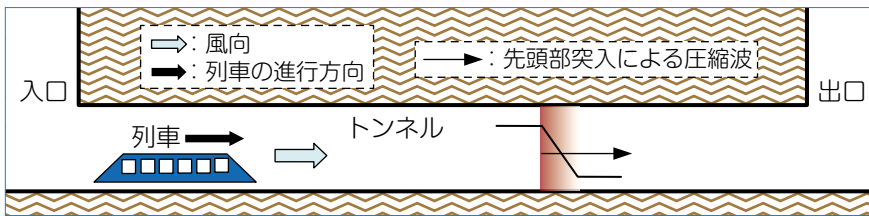


図2 トンネルに列車が突入した後の空気の流れ



図3 計算例のトンネルと列車

ンネル内に生じる流れの大きさに影響します。列車速度の他に編成長やトンネル長さなどによって風速が決まることとなります。

新幹線トンネルでは

「トンネル微気圧波を予測する」⁶⁾で紹介されているように、高速で走る列車の先頭部がトンネルに突入するとトンネル内の空気が圧縮されて圧力が上昇します。この圧力上昇は圧力波(☞参照)となってトンネル内を伝わります。また列車走行に伴って図1と同様に列車進行方向の流れが誘起されます。したがって、トンネル内の流れは図2に示すようにトンネル内を往復する圧力波と列車の進行とともに変化する空気の流れの2つの異なる性状を併せ持ち、前者では圧縮性の影響を無視できません。

空気流動シミュレーション

トンネル内の流れを1次元の非定常流れとして計算する手法の有効性は、新幹線トンネルでの実測結果により裏付けられています⁴⁾。この手法を単一トンネルに限らず斜坑・立坑などの枝坑や駅部のような拡幅部を持つ構造にも対応させ、列車速度が変化する場合も扱えるように発展させることで、今

後実現される予定の大深度地下鉄道の空気の流れも計算できるようになりました⁷⁾。現在は、さらに複雑な地下鉄トンネルの構成や換気方式にも対応できるプログラムの開発を進めています。

シミュレーションではトンネルなどの構造物の諸元および列車の諸元を与えて、トンネル内の流速や圧力を予測します。以下に、計算例として地下鉄程度の断面積のトンネルを、最高速度100km/hの列車が走行した場合の風速と圧力を複線と単線並列で比較した結果を示します。

図3に示すように、全長5kmの複線トンネルを想定します。駅は左端寄りにあり、トンネルは複線または単線並列の場合を考えます。下り列車①は、駅を出発後一定の加速度で加速した後、最高速度で走行し、出口手前で減速して停止します。上り列車②は、最高速度でトンネルに突入し、駅で停止する条件で計算します。

トンネル中央における風速と圧力の計算結果を図4に示します。図の左側が列車①(下り)のみが走行する場合、右側が列車①(下り)と列車②(上り)が中央付近ですれ違う場合で、上段は風速の時系列変化、下段は圧力の時系列変化を表しています。

これらの図から得られる特徴的な結果を以下に挙げてみます。

(風速について)

- ・列車の進行方向に流れが起きます。
- ・列車通過中は逆向きになります。
- ・単線では風速が大きくなります。
- ・単線並列区間では上下線で逆方向に流れるループ状の流れになります。
- ・列車減速後は次第に減衰します。

(圧力について)

- ・複線坑口突入よりも単線坑口突入の方が圧力は大きく上昇します。
- ・列車通過時に負圧に降下します。
- ・列車停止後は残存圧力波の影響で周期的に変動します。

温熱環境シミュレーション

トンネル内空気とその周囲の覆工コンクリートを含む地盤(湧水を考慮)を対象とした温度シミュレーション手法⁵⁾に上記の空気流動シミュレーションを組み合わせたトンネル内の温熱環境シミュレーション手法を開発しました^{8),9)}。地下鉄トンネルで測定した空気温度などを用いた検証作業を通じて予測精度の向上を進めています。

計算には空気流動シミュレーションの入力条件に加えて、熱移動に係わる

☞ 圧力波

空気中を波(圧力波)が伝わり、ある点を通過すると、その点の圧力や密度が変化します。そのとき圧力や密度が増加する波を圧縮波、逆に減少する波を膨張波といいます。列車先頭部がトンネルに突入すると圧縮波、後尾部が突入すると膨張波がトンネル内に形成されます。これらの波が坑口に到達すると圧力の位相が反転して圧縮波は膨張波となり、膨張波は圧縮波となり反対側坑口に向かいます(開口端反射)。

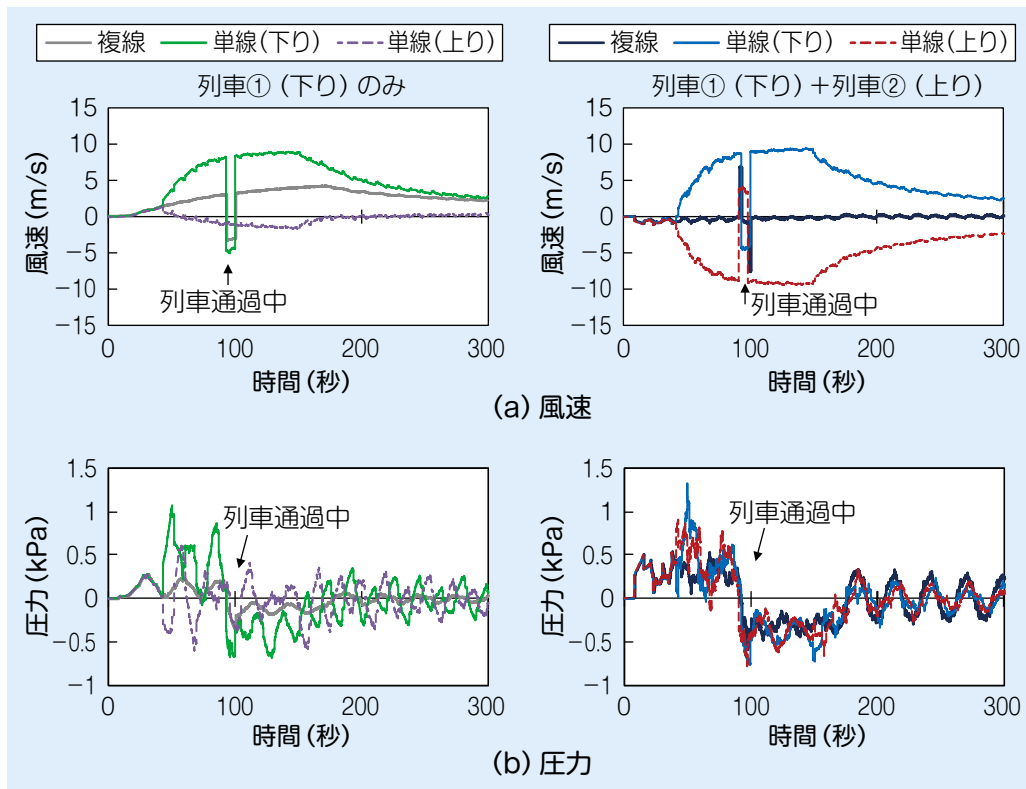


図4 トンネル内の風速と圧力の計算結果(トンネル中央)

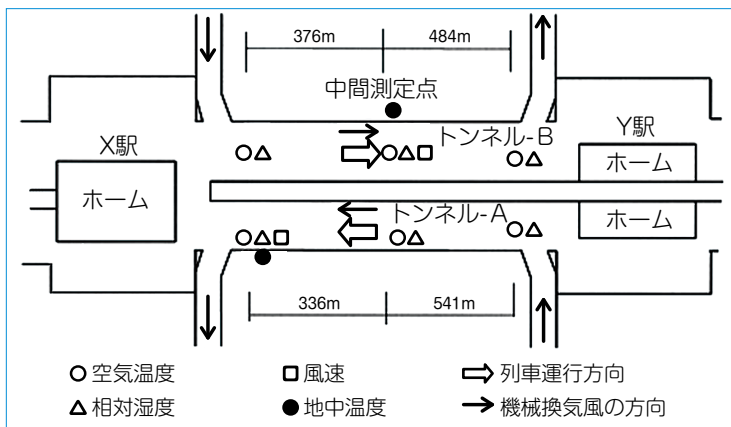


図5 地下鉄トンネル内の温度等測定計の配置¹⁰⁾

空気や水、地盤などの物性値、外気温・湿度や地盤周囲の境界条件、列車走行に伴う発熱量などを与える必要があります。

地下鉄の計算例

4年間にわたり地下鉄トンネル内の温度などを実測した結果と計算結果を比較しました¹⁰⁾。図5に示す単線シールドトンネル区間のうちトンネル-Bをシミュレーションの対象として、この区間を中心とする全長7kmをモデル化して計算を行いました。外気温は

過去の気象データから1年周期と1日周期をもつ正弦波で近似し、電力使用実績から1列車当たりの発熱量を算出して、時間帯毎の列車本数に応じた発熱量(図6)を与えました。

トンネル壁面から10m奥の地盤温度を地中温度の測定結果から求めた年平均温度一定として計算した結果、真夏の1日の温度変化を実測結果と比較すると、トンネル内空気温度の計算結果は実測値より3℃高めとなっています(図7)。また、日平均値の季節変化

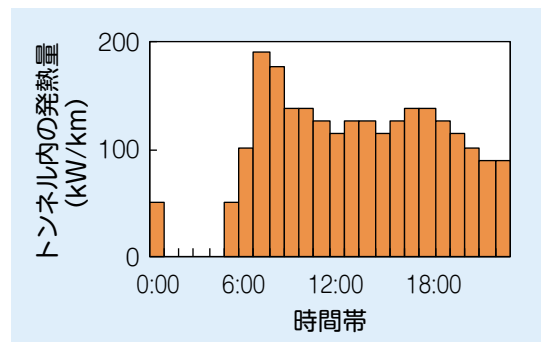


図6 発熱量の入力条件¹⁰⁾

に関して測定結果と計算結果を比較すると、トンネル内空気温度(日平均)の予測値は実測に比べ冬期は3℃低め、夏期は1℃高めとなっています。

現在、これらの誤差について、考えられる原因の寄与度を把握してシミュレーションプログラムの予測精度向上を図るための研究を進めています。

新幹線トンネルの計算例

集電性能評価と関連して、長さの異なる2箇所でのトンネルで空気温度の測定が行われました¹¹⁾。シミュレーションでは地盤周囲の温度は外気温の年間平均値と同じ一定値とし、発熱量は新

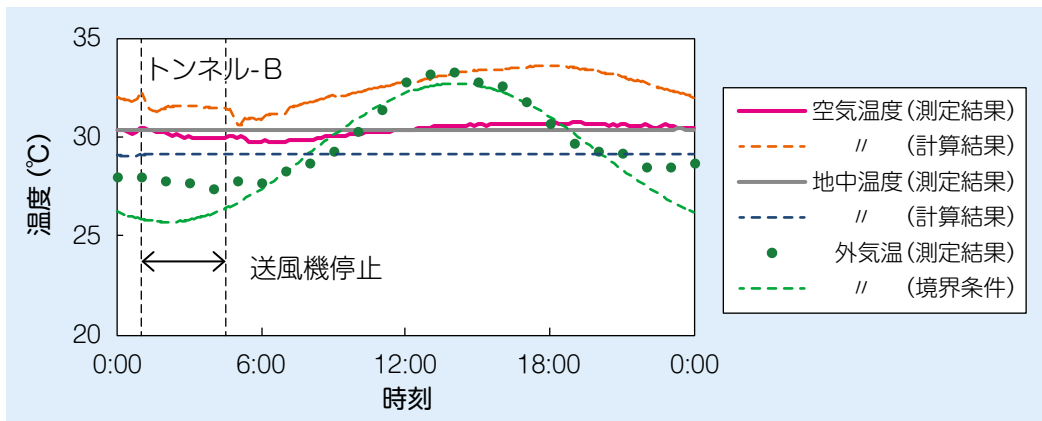


図7 トンネル内温度等の実測結果と計算結果の比較¹⁰⁾

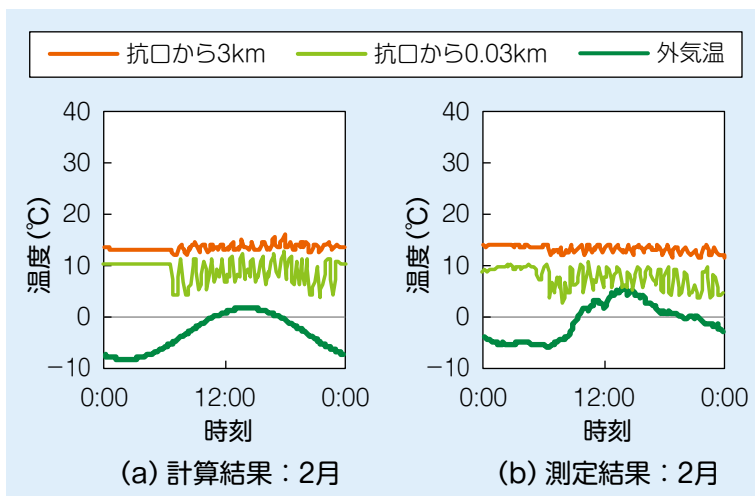


図8 トンネル内温度の計算結果と測定結果の比較 (10分間平均値)¹¹⁾

幹線列車の走行抵抗から算出しました。全長約10kmの長いトンネルの坑口付近と坑口から3km地点における測定結果と計算結果の比較を図8に示します。坑口付近では温度の変動が大きく、3km奥では変動が小さい傾向があり、両者の傾向はよく一致しています。また、長さが半分の5kmのトンネルについても計算を行い、トンネル内温度の年間変化幅と年間平均値がトンネル長さに依らず、坑口からの距離で決まるという結果が得られました。

今後の研究

トンネル内の空気の流れと温熱環境を予測する手法の概要を紹介しました。これまで、空気流動シミュレーション

は主に新幹線のような高速鉄道に適用してきましたが、都市部の地下鉄道でも列車速度とトンネル断面の大きさによっては圧力波の影響を考慮することが望ましい状況となることが考えられます。そのような状況に備えて、単線区間と複線区間が混在するような複雑な構造にも対応できるシミュレーションプログラムの開発を進めています。

また、温熱環境シミュレーションについては、地下鉄トンネルで実施した温度測定結果を活用して予測精度の向上を図ります。そのために、実トンネルを模擬した模型実験装置を製作して、シミュレーションの誤差要因の解明を進めていく予定です。[RRR]

文献

- 1) Tollmien, W.: Luftwiderstand und Druckverlauf bei der Fahrt von Zügen in einem Tunnel, Zeits.VDI 71, 6, 199, 1927
- 2) 原: 列車が高速で隧道に突入する場合の流体力学的諸問題, 鉄道技術研究報告, No.153, 1960
- 3) 山本: 新幹線トンネルの圧力変動・空気抵抗・トンネル換気, 鉄道技術研究報告, No.871, 1973
- 4) 飯田・ほか1名: 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
- 5) 井口: 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, 鉄道技術研究報告, No.1266, 1984
- 6) 福田・ほか2名: トンネル微気圧波を予測する, RRR, Vol.72, No.1, pp.16-19, 2015
- 7) 梶山・ほか2名: 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
- 8) 梶山: 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
- 9) 梶山: 地下鉄の温熱環境を評価する, RRR, Vol.64, No.5, pp.19-24, 2007
- 10) 斎藤・ほか1名: 地下鉄トンネル内の熱移動の予測, 日本機械学会年次大会, G061034, 2013
- 11) 常本・ほか2名: 新幹線のトンネル内における温度特性予測と集電性能評価, 第21回鉄道技術・政策連合シンポジウム, 2014