

# 機械換気を行う長大トンネル内の流れ・温熱環境の予測手法

環境工学研究部 熱・空気流動研究室

主任研究員 梶山 博司

## 1. はじめに

現在、鉄道トンネルとして世界一長い青函トンネルの新幹線走行や大都市圏を高速列車で結ぶ大深度地下鉄道構想が検討されている。このような長大トンネルでは列車の走行に伴いトンネル内の圧力変動や列車風などとともに列車発熱量が増大し、トンネル内の温熱環境対策が重要になるものと推測される。そのため長大トンネルに立坑を配置して換気することが考えられるが、新幹線のような高速列車が走行する場合、トンネル内に大きな圧力変動が生じて既往の送風機の動作範囲を超えることになる。そこで、立坑に換気経路とバイパスを備えてダンパ切替により送風機へのダメージを回避するシステムを想定し、それに対応した数値シミュレーション手法を開発したので、その概要を述べる。

## 2. 圧力変動下での機械換気方法

地下鉄トンネルの機械換気は立坑に送風機を配置して排気または給気する。したがって、トンネル内に生じた圧力変動は立坑内の送風機にも伝わることになる。高速鉄道トンネルでは列車速度が現行地下鉄の数倍になることが想定され、その場合は圧力変動の大きさも一桁大きくなると予測される。既往の送風機では、運転中にその様な圧力変動が作用した場合、破損に至るようなダメージを受けることが懸念される。そこで、図1に示すように立坑内に送風機を配置した換気経路（以下、換気坑と呼ぶ）とバイパスを持ち、ダンパを切り換えることにより、通常の「機械換気」のパターンと送風機の動作範囲を超える圧力ではバイパスに迂回する「自然換気」のパターンを併用する換気システムを考える。

このような換気システムを構築するためには、列車位置の検知や圧力波が到達する時間の予測などにより、圧力変動に先だってダンパの切替動作を指令する制御アルゴリズムが必要となるが、以下ではダンパが高速で動作するとして、立坑の圧力に応じて「機械換気」のパターンと「自然換気」のパターンが瞬時に切り換わる理想的な条件下での数値シミュレーション手法を示す。

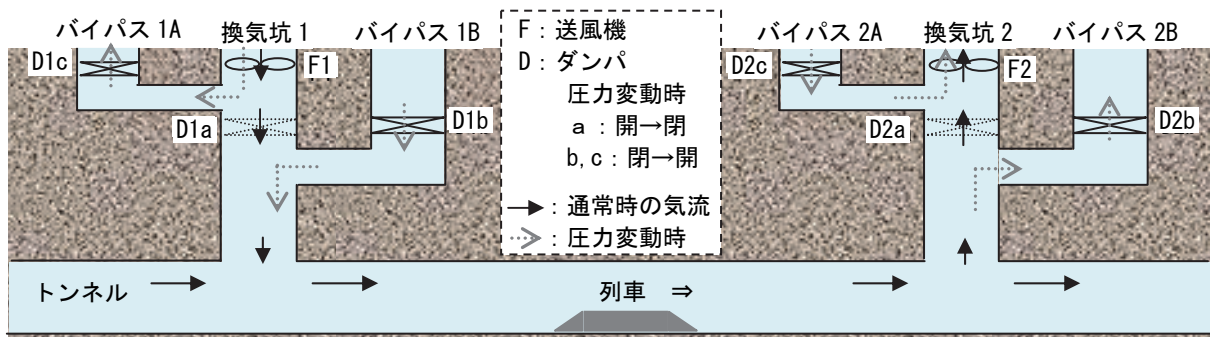


図1 圧力変動に対応した換気システムのイメージ図

## 3. 計算方法

新幹線のような高速列車がトンネルを走行する場合、坑口に列車が突入する際に圧力波が形成されてト

ンネル内をほぼ音速で伝播する。機械換気を行うトンネルでは、この圧力波が送風機に深刻な影響を与えることが懸念される。しかし、地下鉄トンネルの流れ・温熱環境シミュレーションに広く用いられている汎用プログラムSES (Subway Environment Simulation)<sup>1)</sup>などは非圧縮流れを扱うもので、圧力波の現象には対応できない。そこで、鉄道総研では空気の圧縮性を考慮した予測手法の開発を進めてきた。

(1) 流れの計算

高速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<sup>2), 3)</sup>により精度よく評価できる。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予測手法<sup>4)</sup>を開発した。基礎方程式等は文献 2)~4) に譲り、ここでは枝坑内の流れの計算方法について述べる。枝坑内の流れの座標系をトンネル側から枝坑坑口へ向かう方向を正とすると、トンネル内と同様に2本の特性曲線上の常微分方程式(1), (2)が成り立つ。

特性曲線C<sup>+</sup>:  $dx/dt = a$  に沿って

$$\frac{d}{dt}(p + \rho au) = (\gamma - 1)\rho\phi + \rho af \quad (1)$$

特性曲線C<sup>-</sup>:  $dx/dt = -a$  に沿って

$$\frac{d}{dt}(p - \rho au) = (\gamma - 1)\rho\phi - \rho af \quad (2)$$

ここで、 $a$ : 音速,  $f$ : 粘性による摩擦力,  $p$ : 圧力,  $t$ : 時間,  $u$ : 流速,  $x$ : 距離,  $\gamma$ : 空気の比熱比,  $\rho$ : 密度,  $\phi$ : エネルギー散逸とする。

また、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2参照)によって与えられ、送風機圧力 $\Delta p$ は流速 $u$ の多項式で近似できる。送風機圧力を風速の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。

$$\left. \begin{aligned} p_Y - p_X &= C_{e0} + C_{e1}u + C_{e2}u^2 \quad (\text{排気}) \\ p_X - p_Y &= C_{i0} + C_{i1}u + C_{i2}u^2 \quad (\text{給気}) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

$$u = u_X = u_Y \quad (4)$$

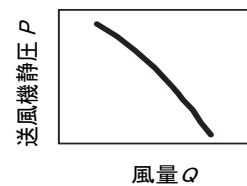


図2 性能曲線の例

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。

計算領域を一定の距離 $\Delta x$ で分割して時刻 $t=0$ で静止している状態から計算を始め、時間 $\Delta t (= \Delta x/a)$ 後の各格子点の流速と圧力を求める。通常の格子点では、図3(a)の $x-t$ ダイアグラムに示すように既知の2点A, Bを通る特性曲線C<sup>+</sup>, C<sup>-</sup>の交点Xについて、式(1), (2)の右边をA~X, B~Xの中間の値で一定であると近似して、式(1)より

$$(p_X + \rho au_X) - (p_A + \rho au_A) = \{(\gamma - 1)\rho\phi + \rho af\}(t_X - t_A) \quad (5)$$

式(2)より

$$(p_X - \rho au_X) - (p_B - \rho au_B) = \{(\gamma - 1)\rho\phi - \rho af\}(t_X - t_B) \quad (6)$$

と表すことができ、式(5), (6)を連立させて $u_X, p_X$ を求める。

一方、送風機の設置点では、格子点の前後で異なる値を持つものとし(図3(b)参照)、式(1), (2)で摩擦を無視して右边はゼロであると近似して、式(1)より

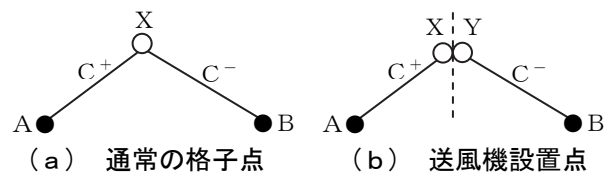


図3  $x-t$ ダイアグラム

$$p_X + \rho a u_X = p_A + \rho a u_A \quad (7)$$

式(2)より

$$p_Y - \rho a u_Y = p_B - \rho a u_B \quad (8)$$

と表すことができ、式(3)、(4)と式(7)、(8)を連立させて  $u_X (= u_Y)$ ,  $p_X$ ,  $p_Y$  を求める。ただし、送風機は一定の圧力範囲内(風量範囲内)で動作するため、圧力変動が大きい場合は解が得られないことになる。その場合は、通常の格子点とみなして(バイパスに迂回させて)計算し直し、式(5)、(6)を連立させて  $u_X (= u_Y)$ ,  $p_X (= p_Y)$  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、青函トンネルを想定した一定風速で換気する場合の手法<sup>5)</sup>を基に、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<sup>6)</sup>を開発した。ただし、この手法は既存の地下鉄道を対象としたもので、トンネル周囲の地盤が長手方向には大きな温度勾配を持たないものと仮定して地盤内の熱移動は半径方向のみ考慮していた。そこで、高速列車が走行する長大トンネルでは発熱量が増加して長手方向の温度勾配も大きくなることを想定して、地盤温度に関する基礎方程式を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。地盤温度以外の空気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6)を参照されたい。

地盤温度(図4参照)は長手方向と半径方向に変化するものとして式(9)で表し、壁面では空気や流水との間で熱移動があるものとする。

$$C_c \rho_c \frac{\partial \theta_c}{\partial t} = \lambda_c \frac{\partial^2 \theta_c}{\partial x^2} + \frac{\lambda_c}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial \theta_c}{\partial r} \right) + \kappa (\theta_u - \theta_c) \quad (9)$$

ここで、 $C_c$  : 地盤の比熱、 $r$  : 半径方向の距離、 $t$  : 時間、 $x$  : 長手方向の距離、 $\theta_c$  : 地盤温度、 $\theta_u$  : 土中水温度、 $\kappa$  : 地盤と土中水との熱交換率、 $\lambda_c$  : 地盤の熱伝導率、 $\rho_c$  : 地盤の密度である。また、壁面から一定距離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。

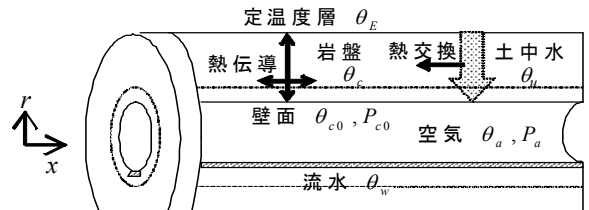


図4 地盤温度に係る熱の移動

## 4. 計算例

全長40kmのトンネル区間を、最高速度350km/hの高速列車が走行する場合(図5参照)について計算を行った。発熱量を地下鉄の2倍程度の24MWh/km/日として時間帯毎に与え、立坑を5km毎に配置して2種類の換気方式(縦流換気と中間換気、送風機は定格風量70m<sup>3</sup>/s・静圧2kPaを想定)で換気量とトンネル内温度を比較した。

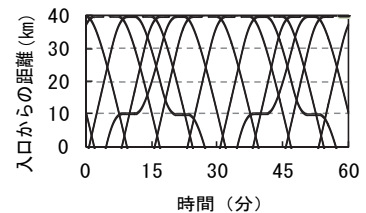


図5 ピーク時のランカーブ

### (1) 換気量

立坑1箇所当たりの送風機台数を変化させて列車本数がピークとなる時間帯の流れを計算し、通常の換気パターン(機械換気)とパイパスに迂回するパターン(自然換気)の割合の平均値を求めた結果を表1に示す。いずれの場合も機械換気の時間帯が大部分

表1 機械換気と自然換気の割合(列車:20本/時)

	縦流2台	中間2台	縦流3台	中間3台	縦流4台	中間4台
機械換気	56分55秒 95%	50分43秒 85%	57分28秒 96%	53分22秒 89%	57分54秒 97%	53分32秒 93%
自然換気	3分5秒 5%	9分17秒 15%	2分32秒 4%	6分38秒 11%	2分6秒 3%	4分28秒 7%

を占めるが、箇所別では列車すれ違い地点に近い排気用送風機で自然換気のパターンが生じやすい傾向が見られる。トンネル坑口および立坑を通じて給気される換気量（+で表示）と排気される換気量（-で表示）を求めて図6に示す。なお、「自然」と表示したケースは常時バイパスに迂回して自然換気する場合の結果である。列車走行時間帯に機械換気を行うことで換気量が大幅に増え、中間換気方式が縦流換気方式よりもやや有利であることがわかる。

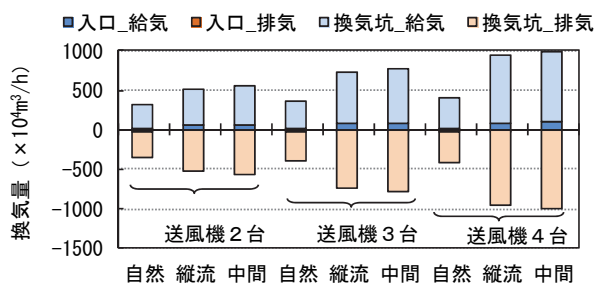


図6 列車本数がピークとなる時間帯の換気量

## (2) トンネル内温度

境界条件として与えた外気温とトンネル入口から22.5kmの地点における空気温度の日最高値の季節変化を図7に示す。列車走行時間帯も機械換気することによりトンネル内の温度上昇が抑えられ、本坑風速

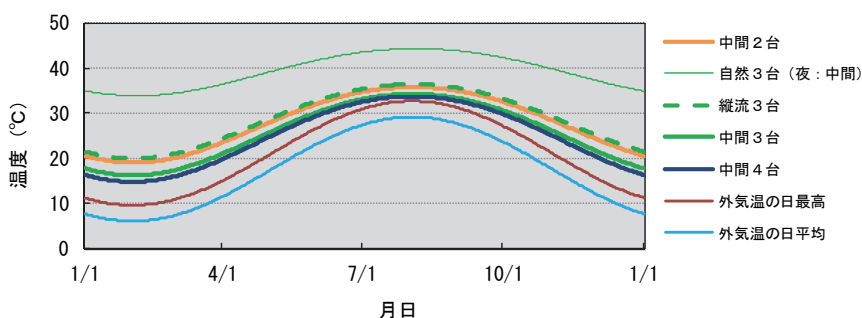


図7 外気温とトンネル内温度(22.5km地点)日最高値の季節変化

3m/s程度の機械換気を行うことで外気温の年最高値から数℃以内におさまることがわかる。また、温度上昇抑制の効果は中間換気方式で縦流換気方式よりも大きい傾向が見られる。

## 5. まとめ

高速列車で顕著となる圧力波を評価できる、トンネル内圧力変動の影響を回避する理想的な換気システムを想定した長大トンネル内の流れ・温熱環境を予測するシミュレーション手法を開発した。これを用いて最高速度350km/hの列車が走行する全長40kmの長大トンネルを5km間隔の立坑で機械換気する場合の計算を行い、以下のように予測された。

- (1) 列車の影響はすれ違い地点に近い排気用送風機に現れやすい傾向がある。
- (2) 列車走行時間帯の換気量は機械換気を行うことで大幅に増え、中間換気方式は縦流換気方式よりやや有利である。
- (3) 本坑風速3m/s程度の機械換気を行うことによりトンネル内の温度上昇は外気温の年最高値から数℃以内におさまる。

## 文献

- 1) Kennedy, W. D. et.al: Subway Environmental Design Handbook, Vol.II, U. S. Dept. of Transportation, 1976, B27-B39
- 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, 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
- 4) 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
- 5) 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
- 6) 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