鉄道トンネル内における1次元非定常圧縮性流れの 数値シミュレーション*

斉藤実俊^{*1}, 飯田雅宣^{*1}, 梶山博司^{*2}

Numerical Simulation of 1-D Unsteady Compressible Flow in Railway Tunnels

Sanetoshi SAITO^{*3}, Masanobu IIDA and Hiroshi KAJIYAMA

^{*3} Railway Technical Research Institute,
2-8-38 Hikari-cho, Kokubunji-shi, Tokyo, 185-8540 Japan

When a train runs through a tunnel at high speed, large pressure changes are generated in the tunnel. It is necessary, therefore, to predict these pressure changes accurately in planning speed-up of Shinkansen or Maglev trains. For this purpose, we have developed a one-dimensional flow simulation program to calculate the pressure changes and wind velocity in a high-speed railway tunnel. This program can make the prediction for tunnels with shafts and/or stations/terminal up to about 500 km/h of the train-speed. The results of the simulation are found to be in good agreement with those of model experiments performed for verification.

Key Words: Compressible Flow, Pressure Wave, Numerical Simulation, Railway, Tunnel

1. 結 言

高速列車がトンネル内を走行するとトンネル内に圧力変動が発生する。この圧力変動は列車がトンネルに突入、あるいは退出した時に生じる圧力波が、トンネル坑口や列車端で反射しトンネル内を往復することで起こるもので、車内におけるいわゆる「耳つん」現象の原因となるものである。これを防ぐために、高速列車には気密車両が使用されているが、圧力変動が車体構体に繰り返し荷重として作用することになるので、車体設計上、圧力変動の大きさを把握することが必要となる。

また、トンネル内に駅が存在する場合には、列車がトンネルに突入した際の圧力波による「耳つん」現象や、高速列車が通過した際の圧力変動、列車風など、駅施設の強度面や駅部の環境と安全面からも、圧力変動や列車風の予測が必要となる。

トンネル内の圧力変動の予測については、東海道新幹線の研究の一環として1960年代に山本によって1次元非定常圧縮性流れの数値シミュレーションが初めて行われ、現車試験の結果と良く一致することが確かめられている⁽¹⁾。この数値シミュレーショ

ンは後に複線トンネル内におけるすれ違い⁽²⁾や地下駅などの断面積変化部、枝坑などの分岐が取り扱える⁽³⁾ように機能拡張されている。また、山本以降、同様の計算はヨーロッパにおいても実施されている⁽⁴⁾⁽⁵⁾。

山本の数値シミュレーションでは計算を簡略化するために、列車速度が音速より小さくトンネル内の圧力変動が大気圧に比べて十分小さいと仮定し、列車端などの境界における接続を非圧縮流体として取り扱っている。しかし、近年では、新幹線の最高速度は350km/hを越え、さらに浮上式鉄道では500km/hで走行試験が行われるなど、トンネル内の圧力変動はこれまで以上に大きくなっており、上記の近似を用いる方法では誤差が大きくなる。そこで、本研究では、流れの圧縮性をより厳密に取り扱うことにより、350km/h以上の高速列車に対しても誤差の少ない1次元非定常圧縮性流れの数値シミュレーションの開発を行った。文献(4)においても、同様の手法が用いられているが、対象となるトンネルは断面積が一定の単純なトンネルであり、枝坑などの分岐やトンネルの断面積変化には対応していない。今回開発した数値シミュレーションは、より多くの実在のトンネルに適用できるよう、地下駅など断面積が不連続に変化する部分や、枝坑などの分岐部にも対応可能である。さらに、模型実験により、地下駅や枝坑のあるトンネル内を300~500km/hの高速で列車が走行した時の圧力と流速の測定を実施し、数値計算の検証を行った。

* 原稿受付 2009年4月6日。

^{*1} 正員, (財)鉄道総合技術研究所(〒185-8540 国分寺市光町2-8-38)。

^{*2} (財)鉄道総合技術研究所。
E-mail: saitou@rttri.or.jp

おもな記号

- a : 音速
 A : トンネル断面積
 C_{LP} : 坑口での圧力損失係数 (=0.5)
 C_{Lh} : 列車先頭部の圧力損失係数
 C_{Lr} : 列車後尾部の圧力損失係数
 C_{Lw} : 管の急拡大の圧力損失係数
 C_{Ln} : 管の急縮小の圧力損失係数
 C_{PQ} : P点からQ点への分岐・合流に伴う圧力損失係数
 d : トンネル水力直径 (4×断面積/周長)
 d' : 列車水力直径
 f : 摩擦項
 p : 圧力
 P : 全圧
 R : 列車・トンネル断面積比
 R_{gass} : 気体定数
 s : エントロピー
 t : 時間
 T : 空気の絶対温度
 u : 地上固定座標から見た流速 (トンネル軸方向)
 $\bar{u}$: 地上固定座標から見た平均流速 (トンネル軸方向)
 V : 列車速度
 x : 本坑内の距離
 y : 枝坑内の距離
 γ : 空気の比熱比 (=1.4)
 λ : トンネル壁面の摩擦係数
 λ' : 列車側面の摩擦係数
 ρ : 空気密度
 ϕ : エネルギー散逸に関する項
 ext : トンネル外の状態
 $'(ダツシュ)$: 列車の存在するトンネル区間

2. 計算方法

2・1 基礎方程式と境界条件 トンネル内を伝播する圧力波は通常その支配的な波長がトンネル直径に比べて十分長く平面波とみなすことができる。従って、圧力変動の問題については、1次元流れとして取り扱うことが可能である。

トンネル内の1次元非定常圧縮性流れの基礎方程式は以下のように示される⁽¹⁾。

$$\begin{aligned}
 \frac{D\rho}{Dt} + \rho \frac{\partial u}{\partial x} &= 0 \\
 \frac{Du}{Dt} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} &= f \\
 \frac{Dp}{Dt} - a^2 \frac{D\rho}{Dt} &= (\gamma-1)\rho(\phi - uf)
 \end{aligned} \quad (1)$$

$$\text{ここで } \frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + u \frac{\partial}{\partial x}$$

ϕ と f はトンネル壁面と列車側面の摩擦による外力項で、定常摩擦のみを考慮すると、以下のよう示される。

・列車が存在しない場合

$$f = -\frac{\lambda}{2d} u|u| \quad \phi = 0 \quad (2)$$

・列車が存在する場合

$$\begin{aligned}
 f &= -\frac{\lambda}{2d} \frac{1}{1-R} u|u| - \frac{\lambda'}{2d'} \frac{R}{1-R} (u-V)|u-V| \\
 \phi &= -\frac{\lambda'}{2d'} \frac{R}{1-R} (u-V)|u-V|
 \end{aligned} \quad (3)$$

トンネル坑口 (開口端) における境界条件は定常モデルを用いると、以下のよう示される。

・流出条件

$$p = p_{ext} \quad (4)$$

・流入条件

$$\frac{a^2}{\gamma-1} + \frac{u^2}{2} = \frac{a_{ext}^2}{\gamma-1} \quad (5)$$

$$(p_{ext} - p) \left/ \frac{1}{2} \rho_{ext} u^2 \right. = C_{LP}$$

トンネル終端にある地下駅のようにトンネル坑口の端部が閉塞している場合は、以下の境界条件を与える。

$$u = 0$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} = 0 \quad (6)$$

ここで、 S はエントロピー s 及び全圧 P と以下の関係がある。

$$\begin{aligned}
 ds &= s_2 - s_1 = \frac{\gamma R_{gass}}{\gamma-1} \ln \frac{T_2}{T_1} - R_{gass} \ln \frac{p_2}{p_1} \\
 &= \frac{R_{gass}}{\gamma-1} \left(\ln \frac{p_2}{\rho_2^\gamma} - \ln \frac{p_1}{\rho_1^\gamma} \right) \\
 &\equiv R_{gass} (S_2 - S_1) = R_{gass} dS
 \end{aligned} \quad (7)$$

$$P = p_{ext} e^{S_{ext}} e^{-S} \quad (8)$$

列車先頭部及び後尾部では、列車固定座標系で定常モデルを導入し、質量保存則、エネルギー保存則、圧力損失の関係式を用いて、以下の式で接続する。

・先頭部

$$\begin{aligned}
 \rho'(1-R)(u'-V) &= \rho(u-V) \\
 \frac{a'^2}{\gamma-1} + \frac{(u'-V)^2}{2} &= \frac{a^2}{\gamma-1} + \frac{(u-V)^2}{2} \\
 (P-P') \left/ \frac{1}{2} \rho'(u'-V)^2 \right. &= C_{Lh}
 \end{aligned} \quad (9)$$

・後尾部

$$\rho'(1-R)(u'-V) = \rho(u-V)$$

$$\frac{a'^2}{\gamma-1} + \frac{(u'-V)^2}{2} = \frac{a^2}{\gamma-1} + \frac{(u-V)^2}{2} \quad (10)$$

$$(P'-P) \frac{1}{2} \rho'(u'-V)^2 = C_{Lr}$$

地下駅とトンネル本坑との接続部などトンネル断面面積が不連続に変化する境界点の取り扱い、境界点を挟んだP側とQ側で、質量保存則、エネルギー保存則、圧力損失の関係式から以下のような境界条件を与える。なお、P側断面積の方がQ側断面積より小さいとし ($A_P < A_Q$)、 C_{Lw} 、 C_{Ln} はそれぞれ急拡大 ($u_p > 0$)、急縮小 ($u_p < 0$) の損失係数である。

$$\rho_P A_P u_P = \rho_Q A_Q u_Q$$

$$\frac{a_P^2}{\gamma-1} + \frac{u_P^2}{2} = \frac{a_Q^2}{\gamma-1} + \frac{u_Q^2}{2}$$

$$P_P - P_Q = \frac{1}{2} \rho_P u_P^2 C_{Lw} \quad (u_p > 0) \quad (11)$$

$$P_Q - P_P = \frac{1}{2} \rho_P u_P^2 C_{Ln} \quad (u_p < 0)$$

急拡大、急縮小の損失係数は文献(6)から以下のように与える。

$$C_{Lw} = (1 - A_P/A_Q)^2 \quad (u_p > 0, \text{急拡大})$$

$$C_{Ln} = C_{Lp} \left\{ 1 - (A_P/A_Q)^2 \right\} \quad (u_p < 0, \text{急縮小}) \quad (12)$$

本坑と枝坑の接続部は流れが分岐または合流する境界点となる。この境界点では図1に示したような分岐、合流それぞれの場合について、質量保存則、エネルギー保存則、圧力損失の関係式により、以下のような接続を行う。

・分岐の場合

$$\rho_P A_P u_P = \rho_Q A_Q u_Q + \rho_R A_R u_R$$

$$\frac{a_P^2}{\gamma-1} + \frac{u_P^2}{2} = \frac{a_Q^2}{\gamma-1} + \frac{u_Q^2}{2} = \frac{a_R^2}{\gamma-1} + \frac{u_R^2}{2}$$

$$P_P - P_Q = \frac{1}{2} \rho_P u_P^2 C_{PQ} \quad (13)$$

$$P_P - P_R = \frac{1}{2} \rho_P u_P^2 C_{PR}$$

・合流の場合

$$\rho_P A_P u_P + \rho_R A_R u_R = \rho_Q A_Q u_Q$$

$$\rho_P A_P u_P \left(\frac{a_P^2}{\gamma-1} + \frac{u_P^2}{2} \right) + \rho_R A_R u_R \left(\frac{a_R^2}{\gamma-1} + \frac{u_R^2}{2} \right)$$

$$= \rho_Q A_Q u_Q \left(\frac{a_Q^2}{\gamma-1} + \frac{u_Q^2}{2} \right) \quad (14)$$

$$P_P - P_Q = \frac{1}{2} \rho_Q u_Q^2 C_{PQ}$$

$$P_R - P_Q = \frac{1}{2} \rho_Q u_Q^2 C_{RQ}$$

ここで、添え字のP, Q, Rは図1に示す分岐・合流の境界点を挟む本坑・枝坑内の点である。分岐・合流に伴う圧力損失係数は各管に流れる流量の関数となり⁽⁶⁾、以下のように与えることとする。

・分岐の場合

$$C_{PQ} = c_0 + c_1 \left(\frac{u_R}{u_P} \right) + c_2 \left(\frac{u_R}{u_P} \right)^2 \quad (15)$$

・合流の場合

$$C_{PQ} = c_0 + c_1 \left(\frac{u_R}{u_Q} \right) + c_2 \left(\frac{u_R}{u_Q} \right)^2 \quad (16)$$

c_0 , c_1 , c_2 は図2に示す流れのパターンによって決まる定数である⁽³⁾⁽⁶⁾。

Fig.1 Two kinds of flow patterns at the junction

Fig.2 Flow patterns to determine the pressure loss coefficient at the junction

2・2 数値計算方法

2・2・1 トンネル内点 1次元非定常圧縮性流れの数値計算方法として特性曲線法⁽¹⁾⁻⁽³⁾⁽⁷⁾⁽¹⁰⁾を用いる。基礎方程式(1)を特性曲線上の常微分方程式に変形すると以下の3式が得られる。

・特性曲線 C_+ : $dx/dt = u+a$ に沿って、

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{2a}{\gamma-1} + u \right) - \frac{a}{\gamma} \frac{dS}{dt} = f + \frac{\gamma-1}{a} (\phi - uf) \quad (17)$$

・特性曲線 C_- : $dx/dt = u-a$ に沿って、

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{2a}{\gamma-1} - u \right) - \frac{a}{\gamma} \frac{dS}{dt} = -f + \frac{\gamma-1}{a} (\phi - uf) \quad (18)$$

・特性曲線 C_0 : $dx/dt = u$ に沿って、

$$\frac{dS}{dt} = \frac{\gamma}{a^2} (\phi - uf) \quad (19)$$

数値計算では基礎方程式(1)の代わりに式(17)~(19)の3つの常微分方程式を解く。列車端やトンネル端、断面積変化部や枝坑接続部など、境界点とそれに隣接する点以外の通常のトンネル内点における特性曲線を図3に示す。

式(17)~(19)をそれぞれの特性線に沿って積分すると、

$$\begin{aligned} \left(\frac{2a}{\gamma-1} + u \right)_P - \left(\frac{2a}{\gamma-1} + u \right)_A &= I^+ \\ \left(\frac{2a}{\gamma-1} - u \right)_P - \left(\frac{2a}{\gamma-1} - u \right)_B &= I^- \\ S_P - S_C &= I^0 \end{aligned} \quad (20)$$

ここで,

$$\begin{aligned} I^+ &= \int_{A(C_+)}^P \left\{ \frac{a}{\gamma} \frac{dS}{dt} + f + \frac{\gamma-1}{a} (\phi - uf) \right\} dt \\ I^- &= \int_{B(C_-)}^P \left\{ \frac{a}{\gamma} \frac{dS}{dt} - f + \frac{\gamma-1}{a} (\phi - uf) \right\} dt \\ I^0 &= \int_{C(C_0)}^P \left\{ \frac{\gamma}{a^2} (\phi - uf) \right\} dt \end{aligned} \quad (21)$$

である。式(20)より、時刻 $t + \Delta t$ の格子点 P における未知数 u, a, S を求める。式(21)の積分は各特性線の中点 X, Y, Z における値を用いて、以下に示す近似式によって解く。

$$\begin{aligned} I^+ &\cong \frac{a_X}{\gamma} (S_P - S_A) \\ &\quad + \left[f + \frac{\gamma-1}{a} (\phi - uf) \right]_X (t_P - t_A) \\ I^- &\cong \frac{a_Y}{\gamma} (S_P - S_B) \\ &\quad + \left[-f + \frac{\gamma-1}{a} (\phi - uf) \right]_Y (t_P - t_B) \\ I^0 &\cong \gamma \left[\frac{1}{a^2} (\phi - uf) \right]_Z (t_P - t_C) \end{aligned} \quad (22)$$

Fig.3 The characteristic lines at internal point

計算では、トンネルを一定の距離 Δx 毎に区切って格子点を決め、各格子点の時刻 t における u, a, S の値を既知とし、それらを用いて時刻 $t + \Delta t$ の値を求めることになる。その際、図3の格子点 P を通る特性曲線を1ステップ遡った点(図3のA, B, C)は通常は格子点と一致しないために、隣接する格子点の値を用いて内挿する必要がある。また、点A, B, Cの座標を決定するためには点X, Y, Zにおける u と a の値が必要となるが、それらは格子点Pと点A, B, Cの平均値として近似するために、未知である点Pにおける u と a の値が必要とな

る。そこで、以下のような繰り返し計算を行うこととする。

- ①全ての格子点におけるクーラン数が1以下になるように時刻 t における a と u から Δt を以下の式で決定する。

$$\Delta t = \frac{\Delta x}{\max(|a+u|_i, |-a+u|_i)} \quad \text{for all } i$$

- ②点 P ($x, t + \Delta t$) における (u, a, S) の値として時刻 t の値を代入し、点Aの座標を $x - \Delta x$ 、点Bの座標を $x + \Delta x$ 、点Cの座標を x と仮定する。

- ③点 P ($x, t + \Delta t$) と点A, B, Cにおける値から、それぞれの平均値として点X, Y, Zにおける値を求める。

- ④③で求めた点X, Y, Zにおける u と a から各特性曲線の傾きを求め、点A, B, Cの座標を決定する。

- ⑤④で求めた点A, B, Cにおける (u, a, S) を、時刻 t における格子点(座標 $x - \Delta x, x, x + \Delta x$)の値を線形補間することによって求める。

- ⑥⑤で求めた点A, B, Cにおける (u, a, S) から、式(20), (22)を用いて点P ($x, t + \Delta t$) における (u, a, S) を求める。

- ⑦③に戻る。

上記の手順を、一定回数実施することで時刻 $t + \Delta t$ の値を予測する。実際の計算では繰り返し回数を4回とした。これ以上繰り返し回数を増やしても結果はほとんど変わらない。

2・2・2 境界点 境界点においては、式(17)~(19)のうち必要な特性式と境界条件式を連立させる。列車の先頭部・後尾部がトンネルに突入・退出する時は不連続境界同士が干渉することになる。

列車先頭部のトンネル突入後の圧力波の状態を図4(a)に示す。状態0は列車先頭部突入時による圧縮波が到達していない状態であり、今回の解析では1列車しか考慮していないので、トンネル外部(初期値)と同じ状態(既知)である。状態1は圧縮波は通過したが、列車先頭部はまだ到達していない状態、状態2は列車先頭部通過後の状態である。状態0-1間では前進圧縮波の前後における状態量の変化が等エントロピー変化であるという関係を、状態1-2間では先頭部の列車端境界である式(9)を、状態2とトンネル外部の接続では、列車先頭部突入時の流れが流出条件であることから式(4)を、状態0と外部の接続はトンネル坑口の条件である式(4)または式(5)を適用し、連立させることで状態1, 2における未知数 u, a, S を求める。

列車後尾部がトンネルに突入した後の圧力波の状態を図4(b)に示す。状態0は列車後尾部突入による膨張波が到達していない状態である。状態1は膨張波が通過したが列車後尾部は到達していない状態、状態2は列車後尾

部通過後の状態である。後尾部が突入した時にはトンネル坑口の流れは流入となるため、外部から新鮮な空気が入ってくるので接触面が形成され、その境界面は流れによって流されていく。境界面の通過した後が状態3である。状態0-1間は先頭部の場合と同様、前進波（この場合は膨張波）の前後の関係式を、状態1-2間は列車後尾部の接続条件である式(10)を、状態2-3間は接触面前後の関係（流速と圧力が等しい）を、状態3とトンネル外部の接続は列車後尾部突入時の流れが流入であることから式(5)を適用する。状態0と外部の関係は、列車先頭部突入の場合と同じである。これらの関係式を連立させることで状態1, 2, 3における未知数を求める。

列車先頭部がトンネルから退出した時の圧力波の状態を図4(c)に示す。状態0は列車退出前の状態である。状態1は列車先頭部が通過したが、退出に伴う圧縮波はまだ通過していない状態、状態2は圧縮波通過後の状態である。また、列車先頭部退出直後のトンネル境界点での流れは流入であり、トンネル外部から新鮮な空気が流れ込むために、接触面が形成される。接触面の通過後の状態が状態3である。列車突入時と同様に、それぞれの境界において成立する条件式を連立させることで、各状態における未知数を求める。

列車後尾部がトンネルから退出した時の圧力波の状態を図4(d)に示す。状態0は列車後尾部がまだ退出していない状態であり、状態1が列車後尾部退出後で退出による膨張波が到達していない状態、状態2は膨張波が通過後の状態である。これらの境界において成立する条件式を連立させ、各状態の未知数を求める。

断面積変化部や分岐部を列車先頭部や後尾部が通過する時も不連続境界同士が干渉することになる。代表例として、列車端境界と分岐・合流部が重なる場合の特性線の例を図5に示す。図5に示される通り、列車端境界と分岐部境界によってP1, P2, RP, Q1, Q2, RQの6つの状態ができる。P1-P2-RP間及びQ1-Q2-RQ間では分岐・合流の境界条件で、P1-Q1間及びP2-Q2間では列車端境界条件で接続できる。

流速の方向及び本坑内の流速と列車速度との大小関係によって特性線の位置関係が異なるため、場合分けをする必要があるが、質量保存側から u_{P1} , u_{P2} , u_{RP} 間及び u_{Q1} , u_{Q2} , u_{RQ} 間の符号が制限されること、また、列車端における質量保存側から $(u_{P1}-V)$ と $(u_{Q1}-V)$ 及び $(u_{P2}-V)$ と $(u_{Q2}-V)$ が同符号であることから、特性線の配置パターンが限定される。

境界点において連立させた条件式は、非線形連立方程式となるが、これは反復法によるIMSLの数値計算ライブラリ (NEQNF) によって解いた。

(a) A train head enters a tunnel

(b) A train tail enters a tunnel

(c) A train head leaves a tunnel

(d) A train tail leaves a tunnel

Fig.4 The characteristic lines with train head/tail paths at the tunnel portal

Fig5 The characteristic lines with train head/tail at the side branch

3. 計算結果の検証

3-1 模型実験 数値計算の結果を検証するために、列車模型発射装置による模型実験を行った。発射装置の概略を図6に示す。発射装置は、上下にある車輪を高速で回転させ、その間に軸対称形状の列車模型を送り出し、回転輪による摩擦駆動で加速する方式である。発射された列車模型は発射装置と制動装置の間に張られたピアノ線によってガイドされ終端側の制動装置に達する。なお、列車模型が発射されてから制動装置へ達するまでの模型速度の減少量は1km/h未満であり、ほぼ等速でトンネル模型内を走行する。

(a) Components of the experimental apparatus

今回の実験ではトンネル本坑内の圧力、流速の他、地下駅を準1次元的な単純形状で模擬した断面積拡大区間及び枝坑内の圧力、流速の測定を行い、計算結果の検証用データを取得した。トンネル模型の構成と測定位置を図7に示す。圧力測定には Kulite 社製の圧力変換器 XCS-190-5G を、流速測定には Dantec 社製の熱線流速計 (I 型プローブ 55P11) を使用した。圧力変換器はトンネル模型の上部壁面に埋め込んだ。また、熱線流速計のうちトンネル内の V1 についてはトンネル壁面から 5mm 内側に、枝坑坑口の V2 については断面中心軸上で坑口断面から 5mm 離れた位置に設置した。熱線流速計の設置位置を図8に示す。

(b) Experimental apparatus and a train model

Fig.6 Experimental apparatus

Unit : m

P1~P4: pressure gauge V1, V2: hot-wire

(1) Case1 : Tunnel model with a station

(2) Case2 : Tunnel model with a branch

Fig.7 Tunnel models and locations of measurement

(a) Main tunnel : V1 (b) Portal of side branch : V2

Fig.8 Locations of hot-wire anemometer

実験に使用した模型の主要諸元を表1に示す。トンネル模型、地下駅(断面積拡大区間)模型、枝坑模型、列車模型の断面はいずれも円形であり、列車模型の先頭・後尾部形状は回転楕円体(長径/短径=3)で、縮尺は1/97である。

Table 1 Specifications of test models

Train	Cross-sectional area, A'	940 mm ²
	Diameter, d'	34.6 mm
	Length, L'	1300 mm
Main tunnel	Cross-sectional area, A	7850 mm ²
	Diameter, d	100 mm
	Length, L	14700 mm
Side branch	Cross-sectional area, A_b	3524 mm ²
	Diameter, d_b	67.0 mm
	Length, L_b	2000 mm
Station	Cross-sectional area, A_s	17000 mm ²
	Diameter, d_s	147 mm
	Length, L_s	1500 mm

3・2 計算結果と実験結果の比較

3・2・1 流体力学的パラメータの決定

計算では列車及びトンネルの摩擦係数や列車先頭部、後尾部の圧力損失係数といった流体力学的パラメータが必要となる。そこで、図7(1)に示した模型実験において、拡大部がない通常のトンネルで実験を行い、速度300km/hの時の圧力測定結果に計算結果が一致するように各パラメータを決定した。決定したパラメータを表2に示す。

Table 2 Parameters in calculation

Train	Friction coefficient, λ'	0.015
	Train head pressure loss coefficient, C_{Lh}	0.0
	Train tail pressure loss coefficient, C_{Lt}	0.0012
Tunnel, Branch, Station	Friction coefficient, λ	0.02

列車模型およびトンネル模型の摩擦係数は、それぞれの壁面に作用する相対流速を基準としたレイノルズ数（それぞれ $Re=3.0 \times 10^5$ 及び 7.0×10^4 程度）から得られる滑らかな管の摩擦係数⁹⁾とほぼ一致しており、妥当な値であると考えられる。

先頭部形状は流線型であるため、はく離などによる全圧損失はないとして $C_{Lh}=0$ とした。一方、後尾部では流路が拡大することになるため、一種の拡大円管と考えることができる。この場合の圧力損失係数は式(12)より約0.014となる⁹⁾。計算に使用した C_{Lt} は0.0012とさらに1桁小さいが、これは列車後尾部の流路の形状が単なる拡大円管ではなく2重管であるためにはく離渦領域が管中

央付近の狭い領域に集中していること、および、後尾部形状が流線型であり、はく離しにくいためと考えられる。

以降に示す計算は全て表2のパラメータを使用した。

3・2・2 圧力変動

a. 高速域における圧力変動

拡大部や枝坑のない通常のトンネルで、速度300km/hと500km/hの場合の圧力変動の計算結果を図9に示す。また、比較のために山本の手法による計算結果⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾も併せて示す。

図9のように、トンネル内の圧力は、列車先頭部突入時に発生した圧縮波の通過による上昇（図9①）、後尾部突入時に発生した膨張波の通過による低下（図9②）、さらに列車先頭部通過による低下（図9③）と後尾部通過による上昇（図9④）などによって、大きく変動する。その後も、上記圧縮波と膨張波のトンネル出口での反射波（図9①'②'）や、その反射波がトンネル入口でさらに反射した圧力波（図9①''②''）によって圧力は大きく変動する。

速度300km/hの場合、本手法による計算も山本の手法による計算も実験結果と良く一致している（一致するように表2のパラメータを決定した）。同じパラメータで500km/hでの計算を行うと、境界条件を非圧縮流体として取り扱う山本の手法では圧力変動を過小評価しているのに対し、本手法では実験結果と良く一致しており、速度500km/hでも精度良く圧力変動を予測できることがわかる。

(a) Velocity 300km/h

(b) Velocity 500km/h

Fig.9 Pressure changes in the main tunnel

b. トンネル拡大部と枝坑内における圧力変動

図7に示した、拡大部や枝坑があるトンネルについて、列車速度 500km/h の場合におけるトンネル内の圧力変動を計算した。計算結果を図10, 11に示す。トンネル本坑内 (P1, P3) のみならず拡大部(P2)や枝坑内 (P4) の圧力変動についても、計算結果は実験結果と良く一致しており、単純なトンネルだけでなく、地下駅などの拡大区間や枝坑がある場合にも適用可能であるといえる。

3・2・3 流速変動

(1) トンネル内の流速変動

拡大区間や枝坑のない、通常のトンネルのみの場合で、発射速度 500km/h の時のトンネル本坑内流速の計算結果と実験結果を図12に示す。実験値は熱線流速計

による測定値であるため、風速の絶対値が出力されるが、実際の風速は正負 (正: 列車進行方向) に変動する。図12では比較しやすいように、計算値も絶対値で示している。図中の $\longleftrightarrow$ は流速が負の区間を示しており、ちょうど列車模型が測定部を通過している時に一致する。

流速は境界層や列車周りの流れなどの3次元性のために、トンネル断面内の平均流速を求める1次元流れの計算結果とは一般には一致しないが、図12では、列車模型通過中 (図12 $\longleftrightarrow$ 区間) 及び通過直後を除いて概ね一致している。これは平面波である圧力波によって流れが誘起された場合、トンネル壁面近傍の境界層部分を除き、トンネル断面内で流速がほぼ一定となるためである。

Fig.10 Pressure changes in the tunnel with the station : 500km/h

Fig.11 Pressure changes in the tunnel with the side branch : 500km/h

Fig.12 Air velocity in the main tunnel : 500km/h

Fig. 13 Air velocity distribution between train and tunnel wall

列車固定座標からみた列車側面の質量流量は、圧力波の波面が列車側面を通過していない時（準定常状態）では一定であるため、列車に沿って $\rho(\bar{u}-V)$ が一定となるが、図9より、列車先頭部付近の方が列車後尾部付近より圧力が高く空気密度が大きいため、列車側面の平均流速は後尾側の方が大きくなる。この傾向は計算でも再現されているが、全体的に過小評価となっており（山本の手法では図9に示したように圧力変動が小さいため、さらに過小評価となっている）、その誤差は列車後尾側ほど大きくなっている。列車側面とトンネル壁面間の流速分布の概略を図13に示す。図13に示したように、列車後尾部ほど主流領域の流速が平均流速より大きくなるため、測定点での流速がより大きくなり、誤差が拡大したものと推定される。

列車模型通過後に流速の計算結果が実験結果と大きくずれたのは、列車端境界を不連続境界として取り扱ったためと推定される。計算では、流速は列車の存在による流路断面積の変化に応じて不連続に変化するのに対し、実際の流れでは列車模型の伴流によって通過後もしばらくは列車進行方向に流れが誘起されるため、測定結果の方が大きくなったものと推定される。

(2) 枝坑坑口における流速変動

枝坑坑口における流速変動の測定結果と計算結果（管坑口境界点）を図14に示す。流速測定はトンネル内と同様、熱線流速計で測定した結果であり、絶対値の出力である。比較のために計算結果については絶対値も併せて

示してある。また、坑口流速測定位置と計算結果の出力点位置を図15に示す。坑口流速の測定位置は管坑口から5mm外側の、管断面の中心軸上であり、主流速度を測定していると考えられる。

計算結果より、坑口における流れは正負（正：吹き出し方向）に変動している様子がわかる。計算結果（絶対値）を実験結果と比較すると、変動の傾向はほぼ一致しているものの、風速変動の立ち上がり方が実験結果に比べて急峻である。これは、計算はあくまで管内の流速を対象としており、管口からの吹き出し流れを測定した実験結果とは傾向が異なったものと推定される。しかし、計算においてもその変動の傾向、大きさなどは概ね再現できており、トンネル枝坑からの吹き出し流れの最大値を把握するには十分な精度と考えられる。

圧縮波到達時に坑口から流出するごく初期の流れはポテンシャル流に近い流速分布が坑口周辺に形成され、時間が経過すると管端で流れははく離し、噴流に移行する。フランジのない円形開口部から吹き出す速度ポテンシャルから、管の軸上流速を計算すると、管坑口から距離5mmに相当する位置では、管内平均流速の約65%となる⁸⁾。図14より、最初の圧縮波到達時に誘起された流速（時間約41ms）の立ち上がり量を比較すると、実験値8.3m/s、計算値14.3m/sであり、実験値は計算値（管内平均流速に等しい）の約60%となり、上記の解析結果にほぼ等しくなる。

Fig. 14 Air velocity at the portal of the side branch

Fig.15 Measurement and calculation points at the side branch portal

3・2・4 考察

今回実施した検証実験は円断面の列車模型が円断面のトンネル模型の断面中心を走行するものであるのに対し、実際の鉄道では、軸対称形状でないトンネル内を軸対称形状でない列車が偏って（複線トンネルの場合）走行している。このため、実際の列車では、列車周りの圧力変動によって、列車近接側のトンネル壁面と遠隔側のトンネル壁面に作用する圧力変動の大きさに違いがあり、その差は流路断面積の変化に伴う圧力変動（図 9③、④）の25～30%程度と推定される¹⁰⁾。従って、実際の鉄道トンネルに適用する場合、列車通過中に、列車近接側の壁面に作用する圧力については、本シミュレーションは過小評価となる可能性がある。

流速変動については、基本的に境界層の影響があるため、1次元モデルでは不十分であるが、列車側面及び列車通過直後を除くと平面波によって誘起される流れが支配的となる。その場合のトンネル断面内の流速分布を滑らかな円管内の発達した乱流流速分布としてべき乗則で近似すると、断面平均流速は断面内最大流速の85～90%程度であり、壁近傍を除いて、1次元モデルによる断面内の平均流速で概ね予測できると考えられる。列車通過時及び通過直後については、3.2.3で示したように、流速分布は複雑であり、1次元の本シミュレーションをそのまま適用すると誤差が大きくなる。

4. 結 論

列車の高速化に対応するため、支配方程式や列車端境界において圧縮性をより厳密に取り扱うことによって、トンネル内1次元流れシミュレーションの高精度化を行った。地下駅などトンネル断面積が変化する区間や枝坑

を有するトンネルに対して計算を行い、検証のために実施した模型実験と比較した。

計算結果について以下にまとめる。

- (1) 模型実験と比較することで500km/hの超高速域まで精度良くトンネル内の圧力変動を計算できることを確認した。
- (2) トンネル本坑だけでなく、地下駅などの断面積変化部内や、枝坑内の圧力についても精度良く計算できる。
- (3) トンネル内の流速変動については、列車通過中や列車通過直後における流れの3次元性が強い場合を除いては実験結果と概ね一致する。
- (4) 枝坑坑口における流速変動は流速の立ち上がり方（変化率）が実験値と異なるものの、その大きさについては概ね一致している。

文 献

- (1) Yamamoto, A., Pressure Variations, Aerodynamic Drag and Tunnel Ventilation in Shin-Kan-Sen type Tunnel, *Railway Technical Research Report*, No.871 (1973), pp1-74.
- (2) Iida, M., Maeda, T., Numerical Calculation of Pressure Transients in Railway Tunnels, *RTRI Report*, Vol.4, No.7(1990), pp54-62
- (3) Kajiyama, H., Iida, M., Maeda, T., Numerical Calculation of Air Flow in Underground Railway, *RTRI Report*, Vol.7, No.7(1993), 51-58
- (4) Woods W.A., Pope C.W., On the Range of Validity of Simplified One Dimensional Theories for Calculating Unsteady Flows in Railway Tunnels, *Third Int. Symp. on the Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels*, Paper D2 (1979), pp115-150
- (5) Vardy A.E., The Use of Airshafts for The Alleviation of Pressure Transients in Railway Tunnels, *2nd Int. Symp. on the Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels*, Paper C4, (1976), pp55-69
- (6) The Japan Society of Mechanical Engineers ed., *JSME DATA, Book: Hydraulic Losses in Pipes and Ducts*, (1979), pp.26, pp54-55, pp86-88, The Japan Society of Mechanical Engineers
- (7) Rudinger G., *Wave diagrams for nonsteady flow in ducts*, (1955), pp.8-19, D. Van. Nostrand
- (8) Howe M.S., The compression wave produced by a high-speed train entering a tunnel, *Proc. R. Soc.*, Vol.454(1997), pp1523-1534
- (9) Hoerner S.F., *Fluid-Dynamic Drag*, (1958), pp3-13, Hoerner Fluid Dynamics
- (10) Iida, M., Yoshida, Y., Maeda, T., Wada, Y. Ogawa, S., Numerical Simulation of Aerodynamic Problems in High Speed Railways(Part 3), *Proceedings of the 13th NAL Symposium on Aircraft Computational Aerodynamics*, No.30(1996), pp205-210