

高速鉄道に係わる空力問題の数値シミュレーション (その3)

飯田雅宣* 吉田康夫* 前田達夫* 和田安弘** 小川哲**

Numerical Simulation of Aerodynamic Problems in High Speed Railways (Part 3)

by

Masanobu IIDA, Yasuo YOSHIDA and Tatsuo MAEDA

Railway Technical Research Institute

Yasuhiro WADA and Satoru OGAWA

National Aerospace Laboratory

ABSTRACT

Pressure waves which are generated by a train entering or exiting a tunnel travel through the tunnel and reflect at the tunnel portals. Since the train in the tunnel meets the pressure waves repeatedly, the pressure field around it changes with time in a quite complicated manner. In this paper, one-dimensional flow simulation is performed to predict the pressure changes caused by the pressure waves which are usually considered to be plane waves. And three-dimensional flow simulation is also done to investigate the flow field around the head of the train in the tunnel.

1. はじめに

列車がトンネルを走行するとトンネル内に圧力変動が発生する。これは、列車のトンネル突入・退出により発生した圧力波が両坑口や列車の先頭・後尾で反射し、トンネル内を往復することから起こる現象である(図1)。高速列車では圧力変動が大きくなるため、乗客に不快感を与えないように車体を気密な構造とすることが多い。

車体構造や換気装置を設計するためには、列車が受ける圧力変動を予測する必要がある。1960年代後半、山本¹⁾は、列車のトンネル内圧力変動を予測するために、非定常1次元圧縮性流の数値シミュレーションをはじめて行った。壁面の摩擦係数や圧力損失係数などの流体力学的なパラメータを適切に選べば、数値シミュレーション結果は、走行試験結果と実用上問題のないレベルで一致することが確かめられている(図2)。このシミュレーションは、その後、複線トンネルにおける列車のすれ違いが取り扱えるように拡張されている²⁾。

山本の数値シミュレーションでは、計算を簡単化するため、トンネル内の圧力変動の大きさが大気圧に比べて十分小さいことを考慮し、音波近似を取り入れている。本報告の前半では、近年列車の速度が向上し、トンネル内の圧力変動が増大する傾向にあることを

踏まえ、音波近似を使わずに非定常1次元圧縮性流の数値シミュレーションを行う方法と結果について述べる。

鉄道トンネル内を伝播する圧力波は、通常その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。したがって、上記の1次元流れの解析により妥当な結果が得られる。ただし、坑口や列車端(先頭、後尾)は計算領域の不連続境界として取り扱われるので、3次元流れ場の詳細な情報は得られない。本報告の後半では、トンネル内の列車の先頭部まわりの流れ場を調べるために、3次元圧縮性非粘性流れの数値シミュレーションを行った結果について述べる。

2. トンネル内の非定常1次元圧縮性流れの数値シミュレーション

トンネル内の圧力変動を予測するために非定常1次元流れのシミュレーションを行った。1次元流れのシミュレーションは計算が短時間で済むため、設計における繰り返し計算に有用である。また、後述の3次元流の数値シミュレーションを実施する場合の上下流の境界条件を設定するために用いることができる。

2.1 基礎方程式と境界条件

トンネル壁面と列車側面の摩擦の効果を含んだ非定常1次元圧縮性流れの基礎方程式は、以下のように書かれる¹⁾³⁾。

* (財) 鉄道総合技術研究所

** 航空宇宙技術研究所

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

ここで、 x : 距離, t : 時間, ρ : 密度, u : 静止系から見た流速, p : 圧力, c : 音速, γ : 比熱比である。トンネル壁面と列車側面における摩擦に関する項 f , ϕ^* は、列車の存在する場所と存在しない場所のそれぞれに対して以下のように表される。

・列車の存在しない場所では

$$\begin{aligned} f &= -\frac{\lambda}{2d} u|u|, \\ \phi^* &= 0 \end{aligned} \quad (2)$$

・列車の存在する場所では

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

ここで、 R : 列車・トンネル断面積比 (閉塞率), V : 列車の走行速度, d : トンネルの水力直径 (4×断面積/周長), d' : 列車の水力直径, λ : トンネル壁面の水力学的摩擦係数, λ' : 列車側面の水力学的摩擦係数である。

トンネル坑口における境界条件は、トンネル坑口における流れの向きに応じて以下ようになる。

・流出の場合

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

・流入の場合

$$\begin{aligned} \frac{c^2}{\gamma-1} + \frac{1}{2} u^2 &= \frac{c_{\text{ext}}^2}{\gamma-1}, \\ \frac{p_{0,\text{ext}} - p_0}{1/2 \rho_{\text{ext}} u^2} &= C_{\text{Loss,portal}} \end{aligned} \quad (5)$$

ここで、 p_0 : 全圧, $C_{\text{Loss,portal}}$: 流入の場合のトンネル坑口における圧力損失係数であり、添字 ext はトンネル坑口の外部の状態を表す。

トンネル内の列車先頭部および後尾部は計算領域内の不連続境界として扱う。この境界においては、保存則と圧力損失の関係式を適用し、以下のような接続条件を用いる。

・先頭部では

$$\begin{aligned} \rho'(1-R)(u'-V) &= \rho(u-V) \\ \frac{c'^2}{\gamma-1} + \frac{1}{2} u'^2 &= \frac{c^2}{\gamma-1} + \frac{1}{2} u^2 \end{aligned} \quad (6)$$

$$\frac{p_0 - p'_0}{1/2 \rho' u'^2} = C_{\text{Loss,head}}$$

・後尾部では

$$\begin{aligned} \rho'(1-R)(u'-V) &= \rho(u-V) \\ \frac{c'^2}{\gamma-1} + \frac{1}{2} u'^2 &= \frac{c^2}{\gamma-1} + \frac{1}{2} u^2 \quad (7) \\ \frac{p'_0 - p_0}{1/2 \rho' u'^2} &= C_{\text{Loss,tail}} \end{aligned}$$

ここで、 $'$ (ダッシュ) のついた量は列車のある側を示している。また、 $C_{\text{Loss,head}}$: 先頭部の圧力損失係数, $C_{\text{Loss,tail}}$: 後尾部の圧力損失係数である。

2.2 数値計算法

非定常1次元圧縮性流の数値計算法として特性曲線法⁹⁾を用いる。現在あるいは近い将来の走行条件の下では、鉄道のトンネル内では強い衝撃波は形成されないと考えられるため、非保存形を基礎とした解析が有効である。基礎方程式(1)を特性曲線上の常微分方程式 (適合条件式) に書き直すと、

・ C_+ : $\frac{dx}{dt} = u+c$ に沿って

$$d\left(\frac{2}{\gamma-1}c+u\right) - \frac{c}{\gamma}dS + \left\{-f - \frac{\gamma-1}{c}(\phi^* - uf)\right\}dt = 0 \quad (8)$$

・ C_- : $\frac{dx}{dt} = u-c$ に沿って

$$d\left(\frac{2}{\gamma-1}c-u\right) - \frac{c}{\gamma}dS + \left\{f - \frac{\gamma-1}{c}(\phi^* - uf)\right\}dt = 0 \quad (9)$$

・ C_0 : $\frac{dx}{dt} = u$ に沿って

$$dS - \frac{\gamma}{c^2}(\phi^* - uf)dt = 0 \quad (10)$$

ここで、 S はエントロピーに相当し、次の関係がある。

$$S = \frac{1}{\gamma-1} \log\left(\frac{p}{\rho^\gamma}\right) \quad (11)$$

数値計算は、トンネルを等間隔に分割した固定格子上で行う。時間刻みは計算領域内の最大クーラン数が1以下となるように各タイムステップ毎に決定する。クーラン数が1より小さくなる特性線上で適合条件式の時間積分を行うためには、格子点以外の点における物理量が必要となるが、これは線形内挿によって計算する。また、式(8)~(10)を計算するためには、各タイムステップで反復計算が必要となるが、今回は反復数を2回としている。

境界の格子点においては、境界条件式と必要な適合条件式を連立させて計算を行う。たとえば、トンネルの左側の坑口境界で、流入の場合には、境界条件式(5)と特性曲線 C_+ 上の適合条件式(9)を連立させる。列車の

先頭・後尾部は移動する境界であるが、この場合も同様に必要な式を連立させて計算する。

列車の先頭・後尾部のトンネル突入・退出は、計算上、不連続境界同士の干渉として取り扱うことができる。図3に、先頭・後尾部の突入・退出時の波の発生モデルを示す。トンネル境界、列車境界、圧力波、接触面によって分割されたそれぞれの領域の間に成り立つ条件式を連立させることにより、各領域内の物理量を計算することができる。

2.3 計算結果

計算に用いた列車・トンネル系の諸元を表1に示す。これは0系新幹線車両が300km/hで走行するという条件に相当する。図4に計算結果を示す。図4(a)は列車と主要な圧力波の $x-t$ ダイアグラム、図4(b)はトンネル内の圧力分布の時間変化である。列車の先頭部突入により圧縮波が、後尾部突入により膨張波が発生する。これらの圧力波はトンネル内を伝播し、両坑口で反射を繰り返しながらトンネル内を往復する。また、列車の先頭部退出により圧縮波が、後尾部退出により膨張波が発生し、トンネル内を入口側へ伝播していく。図4(c)にはトンネル内のエントロピーの分布を示す。列車の側面摩擦と後尾部での圧力損失によりエントロピーが形成され、トンネル内の流れに乗って移動する。

図4(b)からトンネル内を走行中の列車は、圧力波との遭遇を繰り返すことがわかる。これにより、列車側面の圧力は図4(d)に示すように時間的に変化する。圧力変化の大きさは $-5 \sim +3$ kPa程度で、大気圧に比べれば小さいが、人間には不快感を与えるレベルであり、車体の気密構造化が必要である。

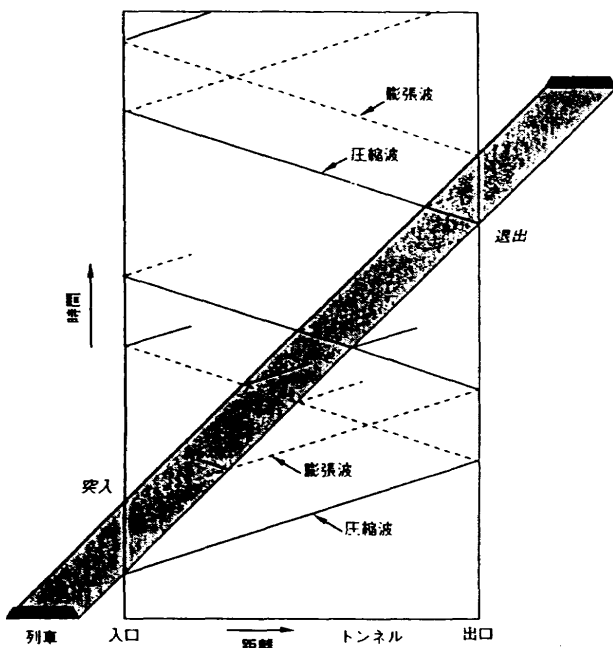
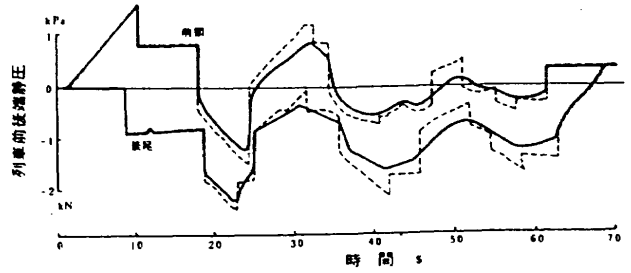


図1 列車のトンネル走行時の圧力波のダイアグラム



高塚山トンネル 3264m 断面積 60.4m² 摩擦係数 $\lambda=0.020$
 新幹線列車 400m 断面積 13.7m² 摩擦係数 $\lambda'=0.018$ 圧力抵抗係数 $C_{Dp}=0.15$
 測定日 1972.11.17 (961A列車) 速度 200→190 km/h 列車質量 869 t

図2 非定常1次元数値シミュレーション(山本)と実測の比較

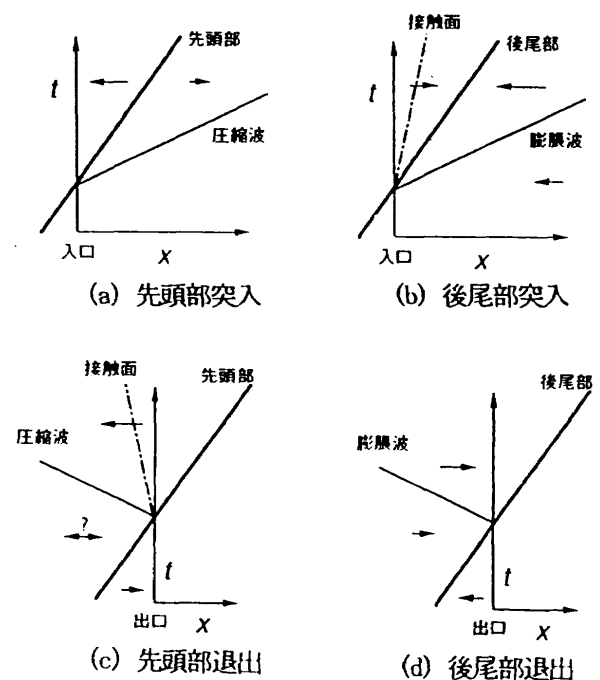


図3 列車のトンネル突入・退出による波の発生

表1 列車・トンネル系の諸元

トンネル	断面積	m ²	63.4	
	水力直径	m	8.1	
	長さ	m	3000	
	水力摩擦係数		0.02	
	坑口損失係数		0.0	
列車	断面積	m ²	12.6	
	水力直径	m	3.54	
	長さ	m	400	
	水力摩擦係数		0.017	
	先頭部圧力損失係数		0.0	
	後尾部圧力損失係数		0.2 R	
走行速度			km/h	300
列車・トンネル断面積比				0.20

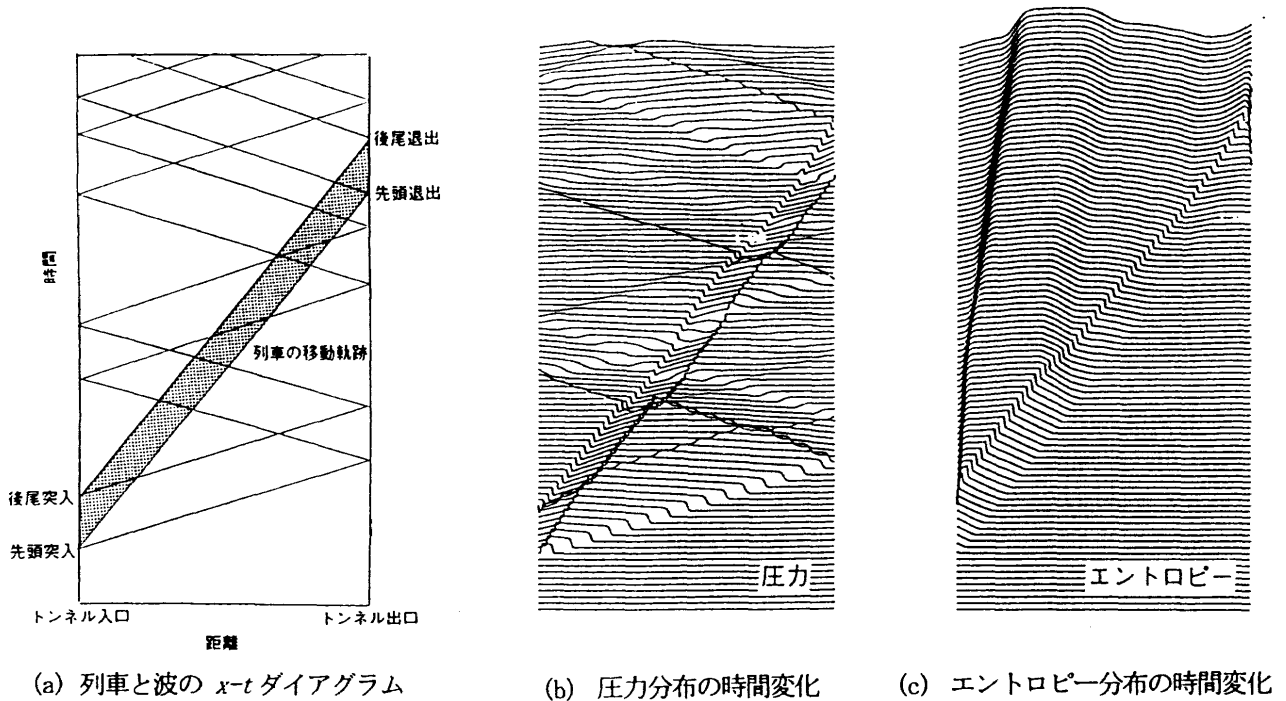


図4 非定常1次元数値シミュレーションの結果

3. トンネル内の列車先頭部まわりの3次元圧縮性非粘性流れのシミュレーション

列車の先頭部まわりの流れ場の詳細を知るためには、3次元の数値シミュレーションを行う必要がある。ここでは、複線トンネル内を走行する列車先頭部まわりの流れ場の計算を行う。

3.1 数値計算法

先頭部側では、大きな剥離が起こらないことを考慮し、基礎方程式は3次元圧縮性オイラー方程式とする。数値計算法は前回のすれちがいのシミュレーション⁹⁾に用いたものと同様である。セル中心型有限体積法により空間の離散化を行い、MUSCL型TVDスキームにより数値流束を計算する。時間積分は2段階の陽

的ルンゲ・クッタ法によって行う。また、複雑形状を扱う計算法として、複合格子法⁶⁾(Chimera法)を用いる。格子はトンネル内と列車まわりのそれぞれについて生成する。

計算対象の列車は先頭車両1両分とする。複線トンネル内の計算を行うため、左右対称条件は用いない。前章の図4(d)に見られるように、トンネル走行中は列車まわりの圧力は時間的に変化する。ここでは、列車がトンネルに突入した後、後尾突入による膨張波が列車先頭を追い越した後の準定常的な期間(図4(d)の場合で言えば、11~18秒の期間)を対象として、定常計算を行う。上下流の境界条件は、同一の走行条件のもとで行った1次元シミュレーションの結果を用いる。

3.2 計算結果

列車とトンネルの表面格子を図5に示す。図では見やすさのためにトンネル壁面を一部切り欠いて表示している。図6にトンネル壁面上の圧力分布の計算結果を示す。圧力分布の左右非対称性が現れている。

図7には、車両中心線上の圧力分布を示す。計算対象の車両には先頭部にスカートが設けられており、その部分の圧力上昇が大きい。車両の底面は完全な平面形状としているため、比較的先端側で下流境界の圧力に近い。一方、上面側では先頭部形状の影響がかなり後方まで及んでいる。

図8は表面圧力分布の左右非対称性を示したものである。図8の上図ではトンネル壁の側面上の圧力分布について、列車に近い側面と遠い側面で比較している。列車から遠い側面では上流から下流に向かって圧力が単調に低下しているのに対し、列車に近い側面では上流から下流に向かって圧力が上昇、降下、上昇という変化をしている。列車に近い側面のトンネル壁では、列車表面の圧力分布の影響が大きく現れていることがわかる。図8の下図は列車の先頭部側面の圧力分布を示したもので、トンネル壁に近い側面と遠い側面を比較している。トンネル壁に近い側面の圧力が高い傾向がある。したがって、列車の先端をトンネル中心へ向かわせる方向に空気力が働くことが推察される。

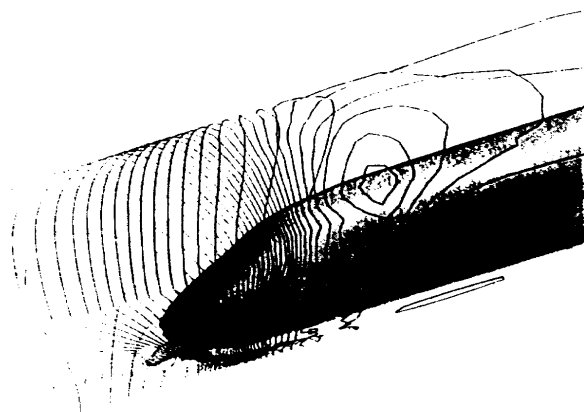


図6 トンネル壁面の圧力分布

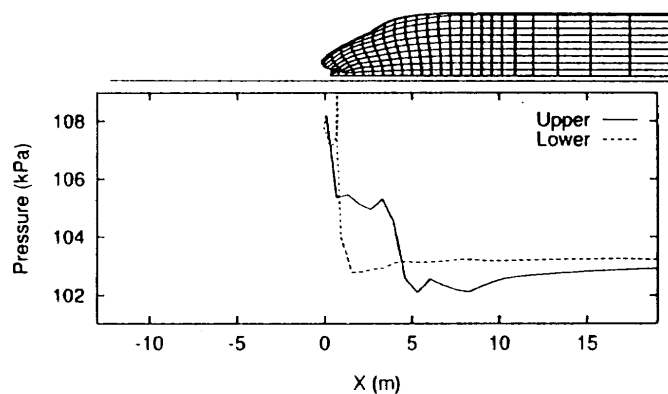


図7 車両中心線上の圧力分布

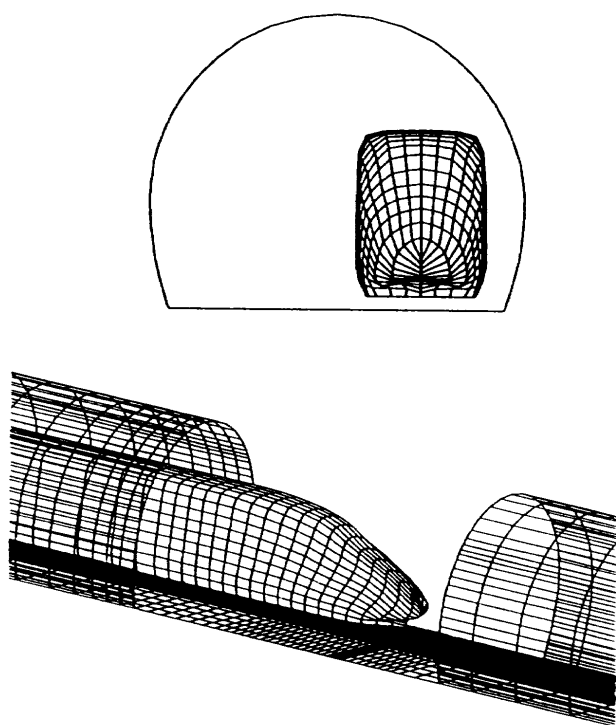


図5 表面計算格子 (トンネルを一部切り欠いて表示)

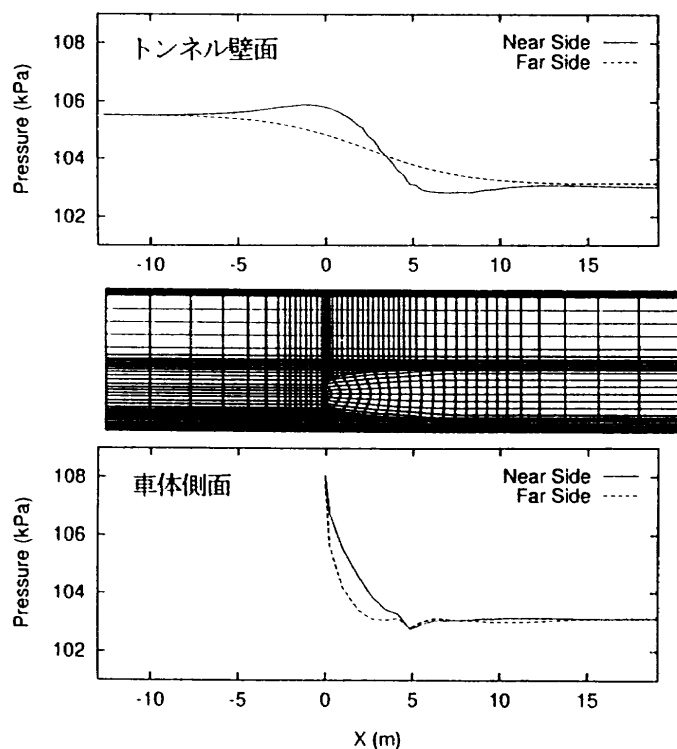


図8 トンネル壁側面および車体側面上の圧力分布

4. おわりに

本報告では、列車のトンネル内走行に関する流れの数値シミュレーションを行った。鉄道トンネルの長さは数100m～数10kmに及ぶ。また列車の編成長さも新幹線では最大400mと非常に長い。従って、全計算領域の3次元計算を行うのは効率的ではない。トンネル内の流れ場の状況や目的に応じて、1次元と3次元の計算を使い分ける、あるいは組み合わせることが必要となろう。

追記 平成7年3月11日に共同研究者の和田安弘氏が急逝されました。これまでのご指導・ご協力に深く感謝し、ご冥福をお祈り致します(飯田)。

文 献

- (1)山本, 鉄道技研報告, No. 871, (1973).
- (2)飯田, 前田, 鉄道総研報告, Vol. 4, No. 7 (1990).
- (3)Woods, W. A., Pope, C. W., Third Int. Symp. on the Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels, Paper D2, B. H. R. A. (1979).
- (4)Rudinger, G., "Wave diagrams for nonsteady flow in ducts", D. Van. Nostrand Co. Inc. (1955).
- (5)飯田, 吉田, 前田, 小川, 和田, 航技研特別資料 SP-27 (1994).
- (6)小川, 和田, 石黒, 高倉, 航技研特別資料 SP-16 (1992).