

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2)

飯田雅宣* 吉田康夫* 前田達夫* 小川哲** 和田安弘**

Numerical Simulation of Aerodynamic Problems in High Speed Railways (Part 2)

by

Masanobu IIDA, Yasuo YOSHIDA, Tatsuo MAEDA
Railway Technical Research Institute
Satoru OGAWA, Yasuhiro WADA
National Aerospace Laboratory

ABSTRACT

Numerical simulation of aerodynamic problems in high speed railways has been performed to investigate applicability of CFD to aerodynamic design of vehicles and ground structures. The first problem treated here is passing-by of two trains in open area. Unsteady 3D Euler simulation using relatively moving grids has been conducted and the result qualitatively agrees with real testing data. The second problem is compression wave generation during train nose entry into the tunnel. Axisymmetric Euler simulation gives quite realistic results on the compression waveform and can be extensively used to optimize area distribution of the train nose for reduction of strength of the pressure wave radiated from the tunnel exit.

1. はじめに

高速鉄道では、車両や地上設備の設計・改良にあたって空気力学的な検討を行う必要がある。その検討手法として、最近では数値シミュレーション (CFD) が有力になりつつある。今回、高速鉄道の空力問題の中から、明かり区間における列車すれちがいと、トンネル突入時の圧縮波形成に関する数値シミュレーションを行ったので報告する。

2. 列車すれちがいの数値シミュレーション

2.1 列車すれちがい時の空力現象

対向列車の先頭部・後尾部、パンタカバーなどの形状変化部が自列車側方を通過すると、自列車の車体表面上の圧力分布が変化し、非定常空気が働く。この結果、車両が過渡的に動揺する。このすれちがい時の動揺は、両列車の速度、形状、上下線の線路間隔、車体・台車間の支持機構などの影響を受ける。すれちがい時の乗り心地を限度以上に悪化させないために、これらの項目が及ぼす影響を検討しておく必要がある。

図1にすれちがい時の圧力変動を実測した例を示す。この図は、A車が260km/h、B車が210km/hですれちがう時の、B車の中間車側面で

測定した圧力の時間変化を示したものである。先頭部通過時に正負の圧力パルス、後尾部通過時に負正の圧力パルスが観測される。この結果は、列車の先頭部に湧き出し、後尾部に吸い込みを置いたポテンシャル流のモデルで定性的に説明できる¹⁾。

いま、新幹線などの長大編成列車を対象とし、中間部が平行な形状であるとすれば、列車同士のすれちがいは、先頭部対先頭部、先頭部対中間部、先頭部対後尾部、後尾部対中間部、後尾部対後尾部、と分けて考えることができる。通常後尾部まわりでは流れの剥離が大きく、先頭部まわりに比べれば圧力変化は小さいので、すれちがい時の動揺については先頭部通過に係わる場合の方が大きくなる。

さらに、すれちがいの問題については地上側の条件として、明かり区間 (トンネル外) とトンネル区間の場合がある。トンネル内走行中の車両まわりの圧力分布は、突入時に発生した圧力波のトンネル内の往復や、対向列車とのすれちがいによって、複雑に変化するが、すれちがいの瞬間の車両まわりの3次元的な圧力分布の変化によっておこる衝撃的な動揺 (主として横揺れ) の問題に限れば、トンネル区間の方が明かり区間よりも影響は小さい。これはトンネル内では対向列車の圧力分布がすれちがう側と反対側 (トンネル壁面側) にまわりこむためである。

*鉄道総合技術研究所

**航空宇宙技術研究所

2.2 数値シミュレーション

前項で述べた点を踏まえ、今回は明かり区間での列車先頭部同士のすれちがいの数値シミュレーションを行う。列車の先頭部としては、高速鉄道を前提とし、剥離の小さな流線形のを対象とする。流れの粘性は影響が小さいので省略する。圧縮性については、高速走行（例えば500km/h）時の定量的な評価を行うことを最終目的とするため、その影響を含める。以上により、支配方程式は非定常3次元圧縮性オイラー方程式となる。

数値計算プログラムは、前回²⁾トンネル突入の計算に用いたものの3次元版である。計算法は、セル中心定義の有限体積法であり、セル界面での数値流束はMUSCL型のTVDスキームにより求める。時間積分は陽的な2段階Runge-Kutta法によって行う。

列車のすれちがいのような、複数物体が相対的に運動する問題を取り扱うために、ここでは領域分割法を用いる。自列車、対向列車、地上のそれぞれに対して計算格子を割当て、列車側の格子は列車とともに移動させる。各計算格子間では、互いに領域境界を越えてダミーセルを設定し、そのセル内の物理量を内挿あるいは総和によって相手側の格子から計算する。各計算格子間の領域境界では、2方向の格子線が連続で、1方向の格子線のみが食い違うような構成とし、計算格子間の位置関係の決定は1次元的な探索によって行う。計算格子全体の鳥瞰図を図2に、先頭部付近を拡大したものの正面図と平面図を図3に示す。図3の平面図では格子線が食い違っていることがわかる。

2.3 計算条件

列車の計算モデルとしては、先頭部と計算格子の最後方まで続く半無限長の中間部からなるものを考える。自列車と対向列車は同一の形状とする。走行速度は、両列車とも同一で270km/h（マッハ0.22）とする。両列車が同一形状、同一速度の場合は、点対称条件を使用することにより計算格子を半分にて節約できるが、ここでは今後の拡張を考えて、自列車と対向列車で別々の格子を用いた。

はじめ両方の列車を一定の距離だけ離しておき、衝撃的に発進させることにより、計算を開始する。急発進によって圧力波が発生するが、列車がすれちがう時点ではその影響が十分小さ

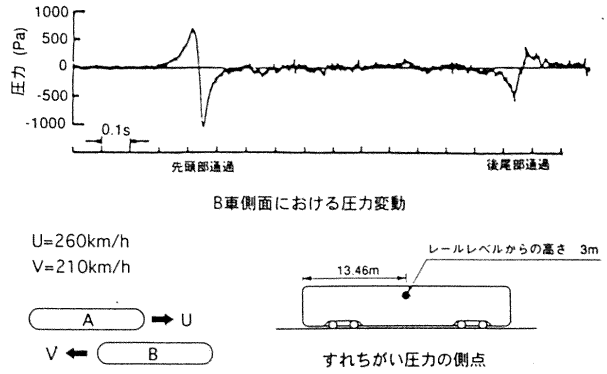


図1 すれちがいの時の圧力変動に関する実測例

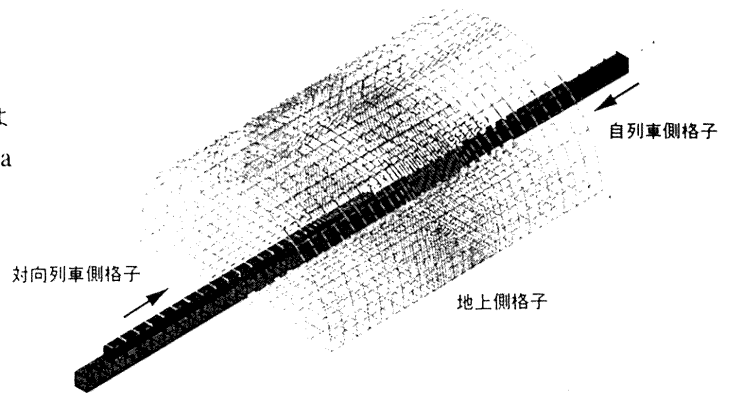


図2 列車すれちがいのシミュレーションのための計算格子（全体図）

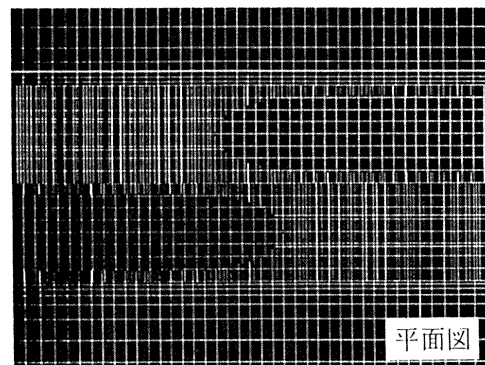
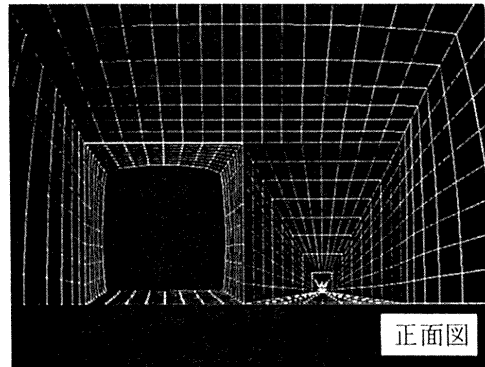


図3 列車すれちがいのシミュレーションのための計算格子（先頭部付近拡大図）

くなるように発進位置を決定する。ここでは両方の列車を車両高さの30倍だけ離して発進させる。図2、3の計算格子の全セル数は約11万である。

2.4 計算結果

先頭部と先頭部がすれちがった直後の圧力分布を図4に示す。対向列車（図で手前側の列車）の影響により、自列車側面に地面と同様の圧力分布が現われている。対向列車の先頭部先端付近の高圧部と先頭部から中間部へかけての低圧部の影響により、自列車側面では圧力の極大点、極小点が現われる（極小点は図では対向列車車体で隠れていて見えない）。

この圧力分布が時間とともに自列車側面上を移動し、その結果編成列車を構成する各車両に非定常空気力が働く。車両の動揺については、編成列車の運動方程式に、この非定常空気力を外力として加えることにより解析することができる。

自列車の平行部側面上の固定した位置における圧力の時間変化を図5に示す。対向列車とのすれちがい側の側面では正負のパルス状の圧力分布が見られ、図1の実測結果と同じ傾向である。なお、列車の形状や走行条件が異なっているため、ここでは定性的な比較にとどめた。また図5によると、自列車のすれちがいと反対側側面での圧力変化は小さい。したがって、自列車車両には主として横向きの力とヨーイングモーメントが働くことがわかる。

先頭部と先頭部のすれちがいは純粋に非定常な現象であるが、先頭部と中間部のすれちがいは境界層の発達などを無視すれば、一種の定常状態になっているとみなせる。自列車を無限長とし、対向列車に固定した座標系から見れば定常な問題に置き換えることができる。この原理を応用して風洞試験によりすれちがい時の影響を評価することができる³⁾。明かり区間のすれちがいの問題では、影響を受ける側の車両表面の圧力分布がわかれば十分なことが多く、このような定常モデルが有効である。

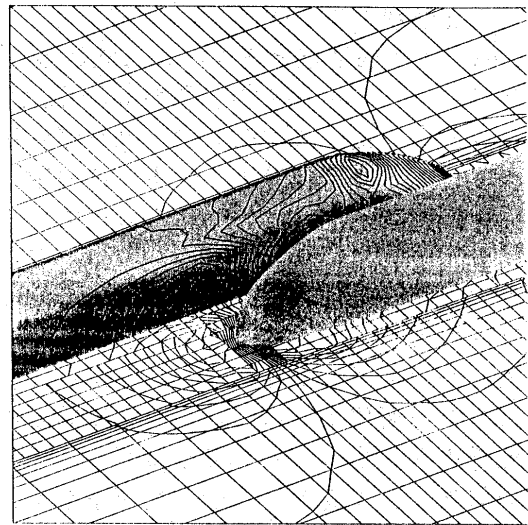


図4 先頭部すれちがい直後の圧力分布

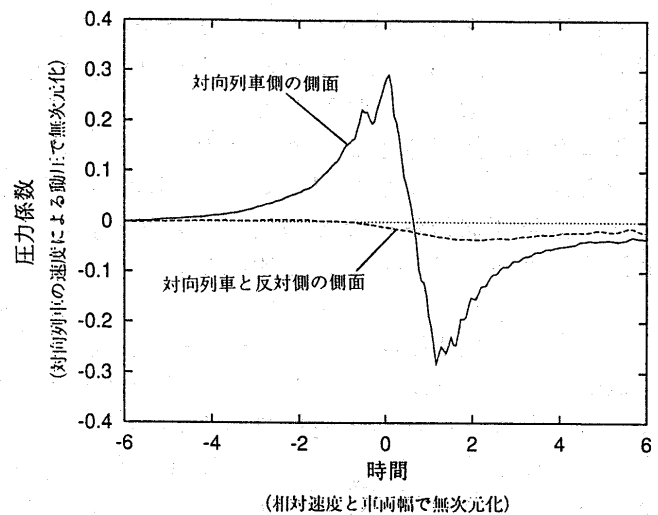


図5 すれちがい時の自列車中間部側面における圧力変動

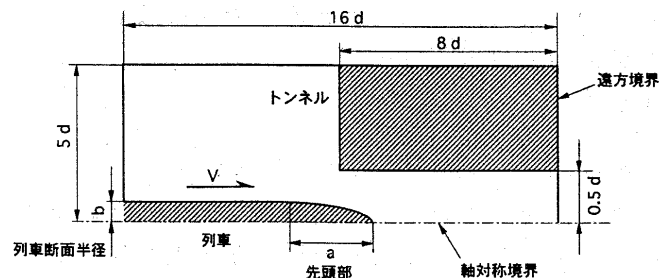


図6 トンネル突入シミュレーションの計算モデル

3.トンネル突入シミュレーションによる
先頭部形状の最適化

3.1 列車先頭部形状とトンネル微気圧波

列車のトンネル突入時に形成される圧縮波は、トンネル内を伝播して、突入側と反対側の坑口でトンネル微気圧波を発生させる。この微気圧波を低減するためには、トンネル入口で形成される圧縮波の圧力勾配を小さくすることが有効である⁴⁾。

トンネル入口で形成される圧縮波の波形は、列車先頭部の形状に依存する。したがって、先頭部形状を最適化することにより、圧縮波の圧力勾配を小さくすることができる^{5) 6)}。圧縮波の圧力勾配は、車両の最大断面積が小さく、また先頭部が長いほど小さくなるが、車両設計上、それらの値には限度がある。したがって、与えられた車両最大断面積（車両断面積とトンネル断面積の比）と先頭部長さに対して、圧縮波の圧力勾配ピーク値を最小とするような先頭部形状を見いだすことが重要となる。これは、一種の設計問題（最適化問題）である。

ここでは、前回報告した軸対称のトンネル突入シミュレーションプログラム^{2) 7)}を用いてトンネル微気圧波低減のための列車先頭部形状の最適化を行った結果について述べる。

3.2 トンネル突入の数値シミュレーション

数値シミュレーションにおける支配方程式および数値計算法は前回と同様である。トンネル突入時の圧縮波形成に関して3次元性の影響は小さいので、軸対称流のシミュレーションを行う。実際先頭部の3次元形状を設計する場合は、軸対称先頭部の形状を最適化し、それと同じ断面積分布となるような先頭部形状を決定するという方法が有効と考える。図6にはトンネル突入の計算モデルを、図7には計算格子の例を示す。

3.3 先頭部形状と圧縮波波形の関係

計算結果については前回報告したので省略する。ただし、後の議論の前提となる先頭部形状に関する計算結果については以下で説明しておく。図8に、先頭部形状が圧縮波波形に及ぼす影響を数値シミュレーションにより調べた結果を示す。図8上は、トンネル入口からトンネル直径の6.8倍だけ奥へ入った位置での圧力の時間変化、すなわち圧縮波の波形を示したものであ

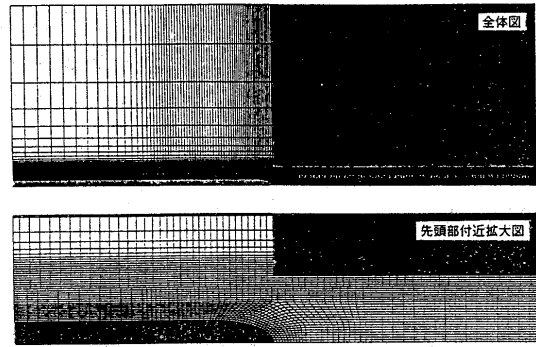


図7 トンネル突入シミュレーションの計算格子

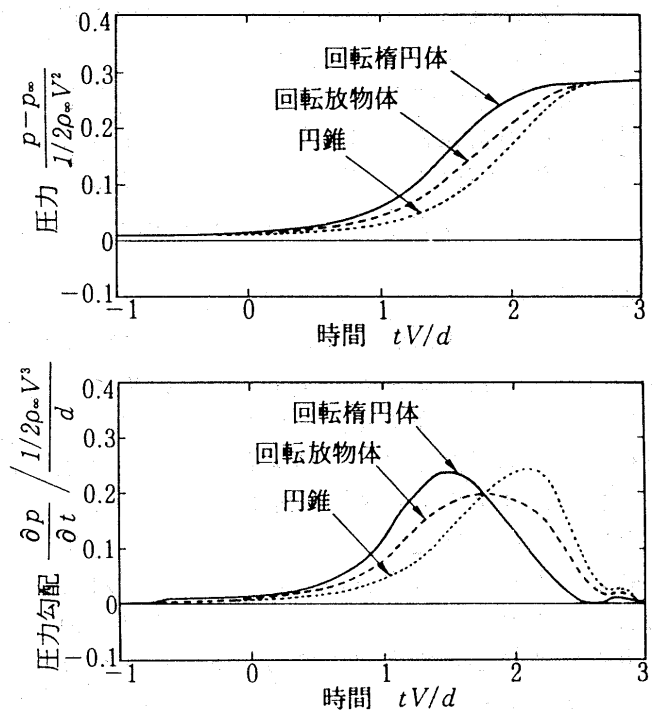


図8 先頭部形状が圧縮波波形に及ぼす影響
R=0.12 M=0.18 a/b=7

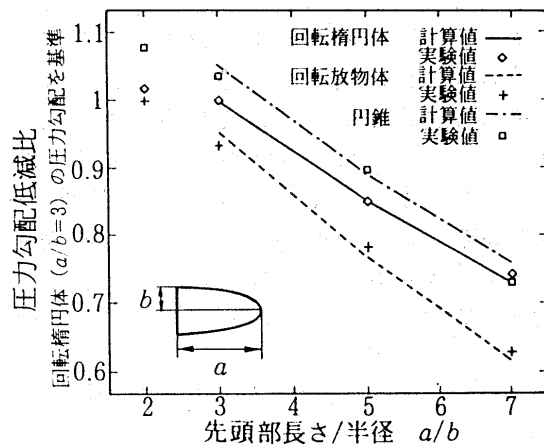


図9 先頭部形状・長さとの圧縮波圧力勾配の関係
模型実験と数値シミュレーションの比較
R=0.12 M=0.18

る。図8下は、その時間微分波形で（時間的な）圧力勾配である。計算条件は、列車・トンネル断面積比 $R=0.12$ 、突入マッハ数 $M=0.18$ 、先頭部の長さ a と車両断面半径 b の比 $a/b=7$ 。先頭部形状として、回転楕円体、回転放物体、直円錐の3つの基本的な形状とした場合のシミュレーションの結果を示している。図8よりこの3形状の中では回転放物体が最も圧力勾配のピーク値が小さいことがわかる。（なお、1次元流の考察からも理解されるように先頭部で大きな剥離がない限り、圧縮波の圧力上昇量は車両の最大断面積から決まり、先頭部の形状変化には依存しない。）図9は、先頭部形状と圧縮波の圧力勾配の関係を数値シミュレーションと模型実験で比較したものであるが、両者は一致する結果を与えており、数値シミュレーションが先頭部形状の効果を評価するために有効な手法であることを示している。

3.4 先頭部断面積分布の最適化

図8によれば、3つの基本形状の中で回転放物体による圧縮波の圧力勾配ピーク値が最小であった。これは回転放物体の断面積変化率が一定（断面積分布が直線的）であることと関連があると考えられる。この直線的な分布を初期値として断面積分布を修正することにより、圧力勾配ピーク値をさらに小さくできると期待できる。

圧縮波の圧力勾配ピーク値を小さくするためには、圧力上昇に要する時間を長くし、その間の圧力上昇を直線的にすればよい。したがって最適な断面積分布として、基本的には直線分布で、先端と終端（先頭部と平行部の境界）で断面積変化が大きくなっているという分布が考えられる。ここでは断面積分布を、

$$\frac{A(x)}{A_0} = (1-\alpha_1)(1-\alpha_2)\frac{x}{\ell} + \alpha_1(1-\alpha_2)\sqrt{\frac{x}{\ell}} + \alpha_2\left(\frac{x}{\ell}\right)^2$$

と表す。ここで、 x :先端からの距離、 ℓ :先頭部長さ、 $A(x)$:断面積分布、 A_0 :最大断面積である。 α_1 と α_2 はパラメータで、この値は後述の最適化手法により決定される。パラメータの数を増やせば、断面積分布のより細かな調整が可能となるが、最適化のための計算時間が増大するので、妥協が必要である。今回の計算では、上式の2パラメータの表現で実用上問題のない結果が得られている。

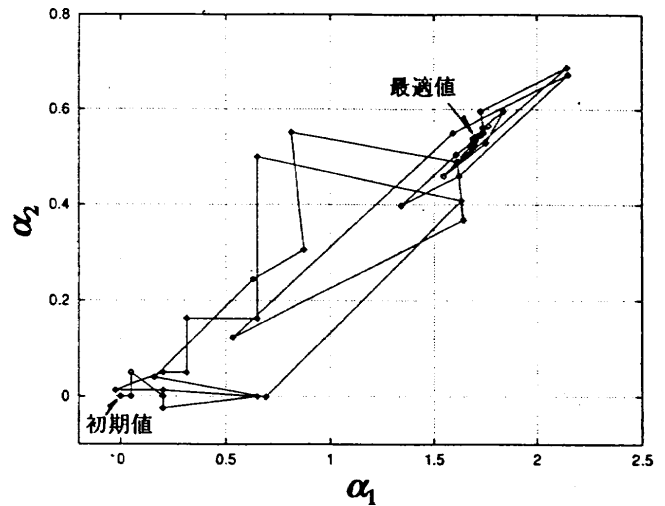
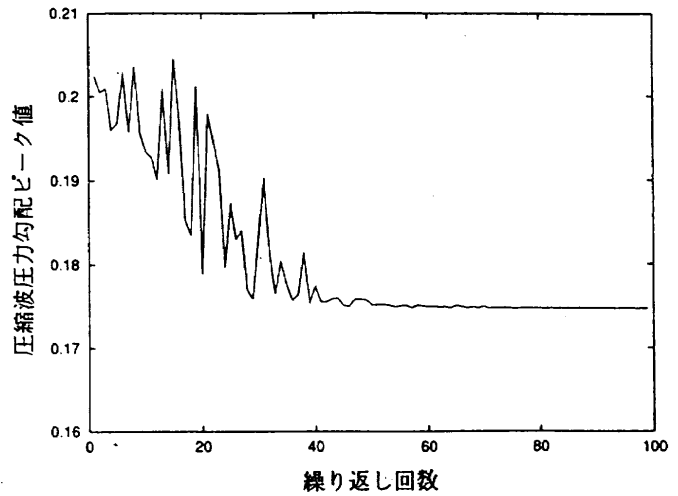


図10 先頭部断面積分布最適化の収束履歴

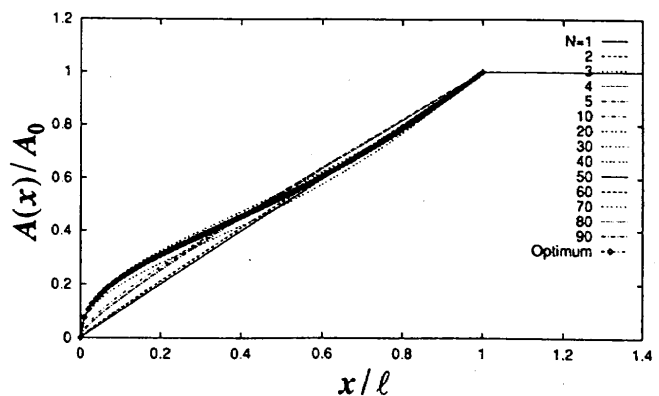


図11 先頭部の最適断面積分布

最適化の手法としては、非線形計画法の中で直接探索法に属するRosenbrock法⁸⁾を用いる。直接探索法では目的関数の導関数を計算する必要がないので、今回のように数値シミュレーションプログラムの出力が目的関数の値となるような問題への適用が容易である。

形状の最適化を自動的に行うためには、格子形成も自動化する必要がある。ここでは軸対称モデルに対して代数的に格子を形成するルーチンを作成して、シミュレーションプログラムに組み込んでいる。

図8の計算と同一の条件に対し、直線分布を初期分布として、断面積分布の最適化を行った結果を以下に示す。図10は収束の履歴である。図10上が目的関数の値（圧縮波の圧力勾配ピーク値）が繰り返し計算によって収束していく状況を示し、図10下が2つのパラメータの収束状況を示している。図11は断面積分布の収束状況、図12は圧縮波波形と圧力勾配波形の収束状況を示す。図11、12でマークでプロットした線が、最適断面積分布とそれによる圧縮波の波形を示す。はじめに意図した通り、直線的に圧力が上昇する圧縮波の波形が得られている。最適断面積分布の特長は、先端で断面積変化が大きく、鈍頭な形状となっていることである。鈍頭な形状では、先端の淀み点前方の高压領域の広がりが大きくなるので、先頭部が実際にトンネルに突入する前の早い段階からトンネル内の圧力を上昇させることができる。

ここで扱ったような非線形問題では、極小値が1つとは限らず、常に大域的な最小値が得られるという保証はない。しかし、上記で得られた最適断面積分布に関しては、目標通りの圧縮波の波形が得られており、満足すべき結果と言える。

なお、列車の先頭部形状の決定に当たっては、ここで述べた微気圧波の低減効果だけでなく、空気抵抗や空力騒音などの他の項目についても検討する必要がある。

4. おわりに

すれちがいのシミュレーションについては定性的に妥当な結果が得られたが、今後、単純形状について理論計算や模型実験との定量的な比較を行い、シミュレーションの検証を進める。

トンネル突入のシミュレーションについては設計ツールとしての有用性が示されたものと考

えている。今後はトンネル側の形状最適化などに発展させていく予定である。

最後に、すれちがいシミュレーションにおいて車両の表面格子データを提供していただいた鈴木昌弘氏に感謝の意を表す。

参考文献

- 1)川口光年, 鉄道技研報告 No.386, 1963
- 2)飯田雅宣ほか, 航技研特別資料 SP-22, 1994
- 3)井門敦志ほか, 鉄道総研報告 Vol.7, No.7, 1993
- 4)小沢智, 鉄道技研報告 No.1121, 1979
- 5)前田達夫ほか, 鉄道総研報告 Vol.4, No.1, 1990
- 6)Maeda, T. et al., The International Conference on Speedup Technology for Railway and MAGLEV Vehicles, Nov. 1993, Vol.2
- 7)飯田雅宣, 鉄道総研報告 Vol.8, No.6, 1994
- 8)杉江日出澄ほか, "FORTRAN77による数値計算法", 培風館, 1986

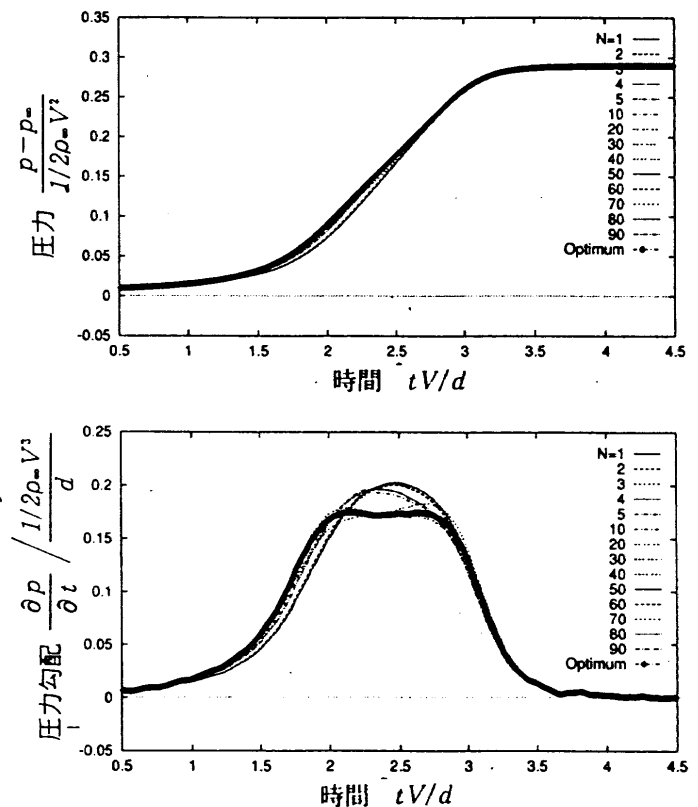


図12 最適断面積分布の先頭部による圧縮波と圧力勾配