

高速鉄道に係わる空力問題の数値シミュレーション

飯田雅宣* 吉田康夫* 前田達夫* 小川哲**

Numerical Simulation of Aerodynamic Problems in High Speed Railways

by

Masanobu IIDA, Yasuo YOSHIDA, Tatsuo MAEDA

Railway Technical Research Institute

Satoru OGAWA

National Aerospace Laboratory

ABSTRACT

Aerodynamic problems are of growing importance to railways aspiring for a remarkable speedup of trains. For research on these problems numerical simulation is expected to be a powerful tool in addition to conventional wind tunnel tests and running tests. This paper presents some results of numerical simulations on railway aerodynamics. The first simulation is performed to evaluate aerodynamic characteristics of trains. Three-dimensional compressible Navier-Stokes equations are solved using TVD scheme and Chimera method. Effect of nose shape and ground condition is investigated. The second simulation concerns an unsteady flow induced by a train entering a tunnel. Axisymmetric compressible Euler equations are solved by TVD scheme for the purpose of exact prediction of compression wave generated by the train. The result of the simulation is found to agree well with model experimental data.

1.はじめに

近年、高速化に伴い、鉄道においても空気力学的現象の緩和・低減が重要になっている。鉄道の空力問題には、空気抵抗、空力騒音、すれちがい時の圧力変動、列車/トンネル系の問題などがある(表1)。高速鉄道においては、これらの空力問題が安全性、エネルギー消費効率、環境への影響、快適性といった輸送機関としての基本的な特性に対して大きな影響を与えるため、その解決が非常に重要である。

一方、空気力学的な観点から表1の問題を眺めると、波動、乱流、移動境界問題などの多様な流体力学的現象が含まれていることがわかる。航空機、自動車、船舶の分野と比較すると、空気抵抗や空力騒音のように共通する問題もあるがトンネル走行やすれちがいなどの鉄道固有の問題もある。

これらの鉄道の空力問題を研究する手法として、現車走行試験、模型走行試験、風洞試験、流れの数値シミュレーション(CFD)がある。この中で、近年発展の著しいCFDは乱流モデルなどの問題点はあるものの、移動境界を扱うことができるなど数々の利点を持つ。空力騒音や後尾車両まわりの非定常3次元剥離流の数値シミュレーションは現状では困難な課題と考えられるが、明かり区間の定常走行やトンネル突入、すれちがいなどについてはCFDが有効であろう。本稿では、鉄道の空力問題へのCFDの適用例として、明かり区間の定常走行時の車両まわりの流れおよびトンネル突入時の流れの数値シミュレーションを行なった結果について述べる。

* 鉄道総合技術研究所

** 航空宇宙技術研究所

2.車両まわりの流れの数値シミュレーション

明かり区間走行時の車両の空力特性を調べるため、車両まわりの流れの数値シミュレーションを行なった。計算対象の車両形状は、新幹線を想定した単純形状および浮上式鉄道車両である。

2.1 基礎方程式と数値計算法

本節の計算に使用したプログラムの基本部分は文献²⁾のものである。基礎方程式は保存形の薄層近似圧縮性ナビエ・ストークス方程式、乱流モデルは代数型のBaldwin-Lomaxモデルである。計算スキームは流束修正型のTVDスキームで、メトリックの計算は有限体積法に行なっている。時間積分は局所時間ステップを用いた陽解法である。

本計算では各計算格子が重なり合うタイプの複合格子

表1 鉄道における空力的問題と関連項目

空気力学的問題	関連項目
空気抵抗	走行速度、走行エネルギー
横風、斜風に対する空力特性	強風時の走行安全性
すれちがい時に列車に働く空力	走行安全性、乗り心地
列車風	ホームの乗客、保線作業員の安全性
トンネル内圧力変動	車内の乗客の快適性、車体の強度、車内の換気
トンネル微気圧波	トンネル坑口付近の環境
地下鉄道内空気流動・換気・熱	地下鉄道駅・トンネル部の環境、防災
空力騒音	車内、沿線の環境

表2 計算ケースと格子点数

ケース	先頭部形状	地面条件	車両側格子の点数	地上側格子の点数
CASE 1	2次元形状	移動地面	79×40×30	91×44×44
CASE 2	3次元形状	移動地面	79×40×30	91×44×44
CASE 3	3次元形状	固定地面	79×40×30	91×44×44
CASE 4	3次元形状	地面なし	79×40×30	91×44×63

法 (Chimera法) を用いる。地上側にはH-H型の格子、車両側にはO-O型の格子を形成する。車両側の格子は地上側の格子の中に完全に包含されている。重なり領域における格子間の物理量の受渡しは線形内挿によって行なう。なお、計算格子は代数的方法により形成している。

2.2 単純な形状の車両に関する計算

まず、新幹線を想定した単純な形状まわりの流れの計算を行なう。ここでの計算の目的は先頭部形状と地面の効果調べることである。

計算条件

車両の先頭部形状として2種類の単純形状を対象とした。1つは左右対称面に平行な垂直断面形状の幅方向への変化が小さい「2次元形状」、もう一つはその形状の変化の大きい「3次元形状」である。上から見たときに(平面図)、四角い形状をしているのが2次元形状、先端に向かって絞られているのが3次元形状である。計算に当たっては、先頭部と後尾部が同一の前後対称の形状としている。車両の全長は全幅の9.6倍であり、これは約1.3両分に当たる。

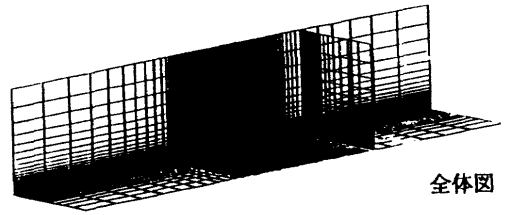
また、地面の効果を見るために「3次元形状」の先頭部に対して、実際の走行に相当する移動地面、風洞実験に相当する固定地面、地面なしの3つの地面条件で計算を行なう。表2に今回の4つの計算ケースを示す。

計算条件は、一様流のマッハ数が0.37 (450km/h)、レイノルズ数(車両全長基準)が 4.5×10^6 (1/24風洞実験に相当)である。

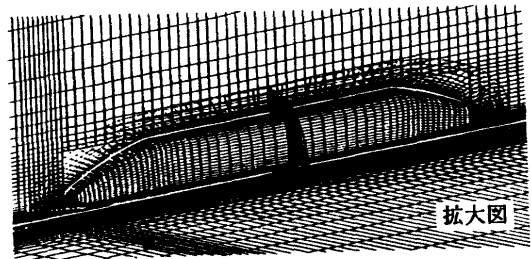
計算格子は、流れの左右対称性を仮定して片側だけとする。図1にCASE1の計算格子を示す。なお、表2には各ケースにおける格子点数も合わせて示してある。

計算結果

CASE1とCASE2の車体表面と地面上の圧力分布を図2に示す(車両前方から見た図)。また、図3、図4は車体中心線上の圧力分布について、各ケースの計算結果と風洞実験結果を示したものである。これらの図を見ると先頭部まわりの流れは以下のような状況になっている。先端部で流れがせき止められて圧力が高くなり、そこから車体上面へ向かって流れが加速されて圧力が低下し、勾配を登りきった所で圧力が低くなる。その後、車両中間部へ向かって圧力が回復していくが、車両長が短いために一様流の静圧まで戻っていない。2次元形状のように比較的稜線が明瞭な形状では、その角をまわる流れにより圧力が低下する。地面上にも車体側に対応した圧力



全体図



拡大図

図1 単純形状車両に関する計算のための格子

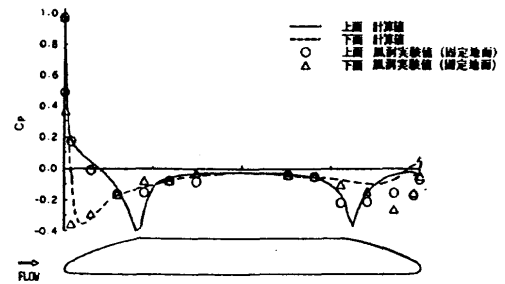


図3 車体中心線上の圧力分布 (2次元形状)

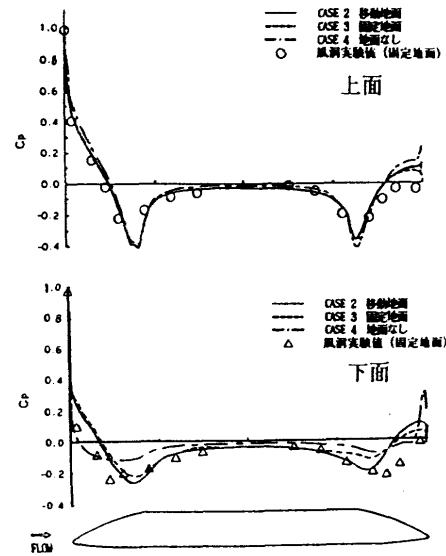
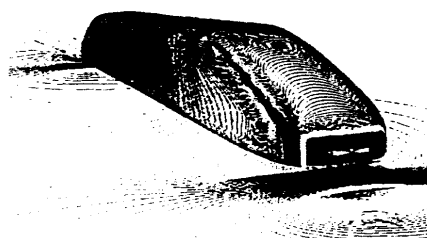
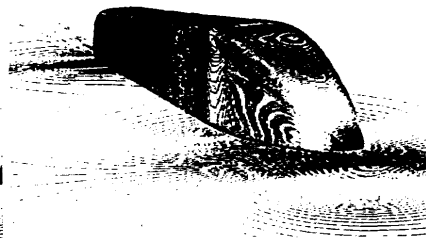


図4 車体中心線上の圧力分布 (3次元形状)



2次元形状



3次元形状

図2 車体表面と地面上の圧力分布

分布があらわれている。3次元形状では先端が鋭いため、圧力の高い領域は小さい。

図5は後尾側の車体表面付近の流線を示したもので、3次元的な剥離による縦渦の形成が見られる。車体の中心線上に強い下降流がある。2次元形状の方が左右の渦の中心間距離が大きく、縦渦の規模が大きいことがわかる。

次に車体底面の流れに注目する。車体底面のオイルフローパターンを地面条件の異なるCASE2,3,4について比較したものを図6に示す。先頭側、後尾側ともに、地面の有無によってオイルフローのパターンが異なることがわかる。地面がある場合、その移動の有無の影響については、オイルフローパターン上ではあまり差は見られない。図4に戻って底面側の圧力分布を見ると、ここでは地面条件の影響がはっきりあらわれている。地面がない場合の圧力分布は地面がある場合と大きく異なっている。また、地面がある場合は移動地面の方が固定地面に比べて底面での圧力低下が大きい。

図3、図4には計算結果と風洞実験結果の比較についても示した。全般的に、先頭側は合うが後尾側は合わない、また上面は合うが底面は合わないという傾向が見られる。すなわち、後尾部の剥離領域や地面と車両底面間の領域で計算値と実験値が一致しないという結果になっている。このことから代数的乱流モデルを採用したことが、実験と一致しない理由のひとつとして考えられる。その他、少ない格子点数、定常性や左右対称性の仮定、実験との細かな条件の差なども考えられる。

以上のように実験結果との差が見られるので定量的な精度を議論するところまではいかないが、参考のため抵抗と揚力の計算値を図7、図8に示しておく。抵抗は圧力抵抗分と摩擦抵抗分に分けて示した。2次元形状と3次元形状の抵抗の差は、主として圧力抵抗分の差であり、これは剥離領域の大きさの違いから来ている。なお、ここで注意しておかなければならないのは、この計算結果が約1.3両分の短い車両の結果であるという点である。新幹線列車は最大16両、短くても6両編成の長大列車であるので、先頭部・後尾部が原因となる圧力抵抗の寄与は全体から見ると非常に小さい(たった1.3両の本計算結果でも約半分は摩擦抵抗である)。したがって、図7の先頭部形状の違いによる抵抗の差を過大に評価する必要はない。

揚力については、地面効果がよくあらわれていて興味深い。地面の有無によっても差があるが、地面の移動の有無も揚力の値に対して大きな影響がある。地面が移動している場合に底面の圧力低下が大きいこと(図4)がダウンフォースを生んでいる原因になっている(3次元形状で移動地面のCASE2)。

なおここでは省略するが、列車先頭部通過時に側方に及ぼす圧力や風速の変動値(圧力変動、列車風)については2次元形状の先頭部の方が小さいという結果が本計算および風洞実験によって得られている⁹⁾。これは、2

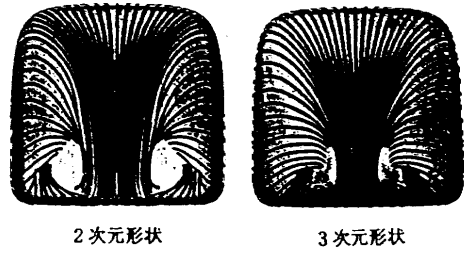


図5 後尾付近の流線図

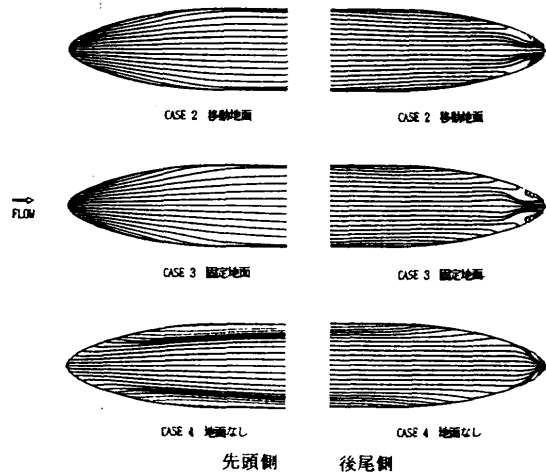


図6 底面のオイルフロー (3次元形状)

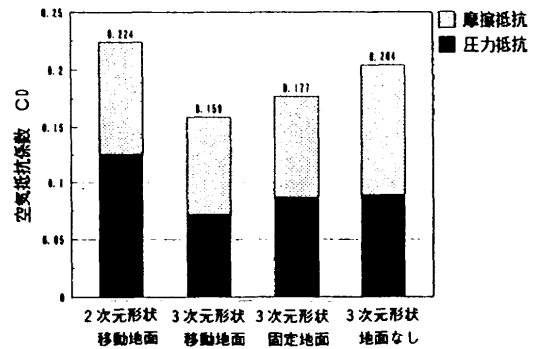


図7 抵抗係数の比較

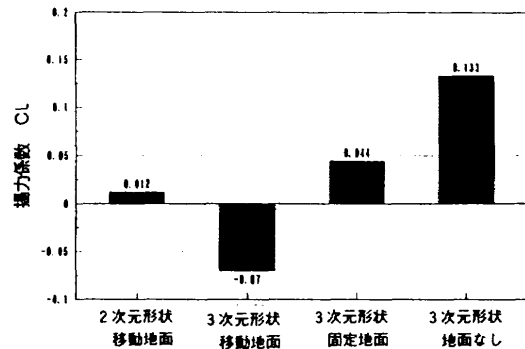


図8 揚力係数の比較

次元形状では流れを主として上方へ逃がすようになって
いるため、車両の側方へ及ぼす影響が小さいからである。
一方、3次元形状では流れを上方だけでなく側方へも逃
がすので、側方への影響は大きくなる。したがって、長
編成列車に対しては先頭部・後尾部の圧力抵抗を重視
しないという立場に立てば、2次元形状の先頭部の方が
空力的に優れているとすることができる（空力騒音につ
いては別の検討が必要である）。

2.3 浮上式鉄道車両に関する計算

次に、計算の対象として実際に走行している浮上式車
両MLU002をとりあげる。2.2の単純形状とは異なり、
この車両ではスカートがあり、また地上側のガイドウエ
イも平面ではなく側壁のある構造となっている。

計算条件

一様流のマッハ数は0.41 (500km/h)、レイノルズ数
(車両全長基準)は 4×10^6 (1/20風洞実験に相当)で
ある。ガイドウェイは一様流と同じ速度で後方へ移動し
ている。また、2.2と同様に左右対称で定常流であると
した。格子点数は車両側が $70 \times 55 \times 20$ 、地上側が $105 \times$
 43×90 である。車両とガイドウェイの表面格子(間引き
して表示)を図9に示す。

計算結果

図10には車体先頭側の表面圧力分布を示す。前述の平
面上の単純形状車両の場合と異なり、かなり複雑な流れ
となっている。先頭部のスカートやガイドウェイ側壁の
影響が見られる。図11は車体後尾側のオイルフローで
ある。ここでも縦渦の形成が見られるが、剥離のパター
ンはかなり複雑である。

図12には車体中心線上の圧力分布を現車走行試験の結
果と比較して示す。なお、あらかじめ断っておくが、走
行試験と計算でマッハ数とレイノルズ数は一致してい
ない。また、ガイドウェイと車両の形状も厳密には異
なる。図12によると上面の圧力分布はほぼ一致してい
る。下面は先頭側についてはよいが、後尾側は全く一
致しない。理由は前項同様、乱流モデルなどが考えら
れる。なお、計算結果で $X/L=0.6$ 付近の下面の圧力
が低い点がやや奇妙であり、まだ完全な定常解に達
していない可能性もあるので今後調べていきたい。

2.4 まとめ

明かり区間を定常走行する車両まわりの流れの数値シ
ミュレーションを行ない、全般的に妥当な結果を得た。
先頭部・中間部などの剥離の小さな領域では実験と一
致するが、後尾部の剥離の大きな領域、また車両と地
面・側壁の間の流れの領域の計算については、乱流モ
デルの問題などもあり結果の信頼性には疑問が残る。
今後はより忠実な形状表現、格子点数の増加、より普
遍的な乱流モデルの導入などによって信頼性を高めて
いくことが重要だと考えている。

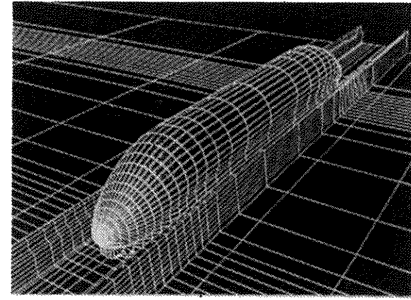


図9 浮上式車両に関する計算のための格子

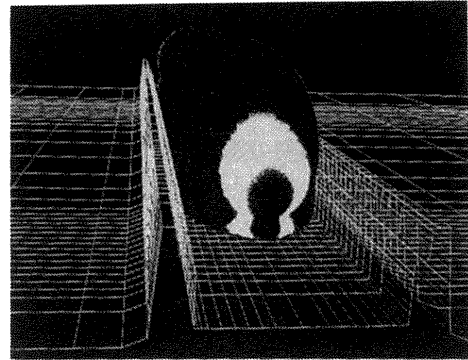


図10 車体表面の圧力分布(先頭側)

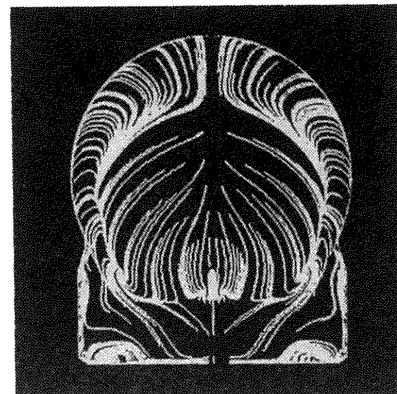


図11 後尾部表面のオイルフロー

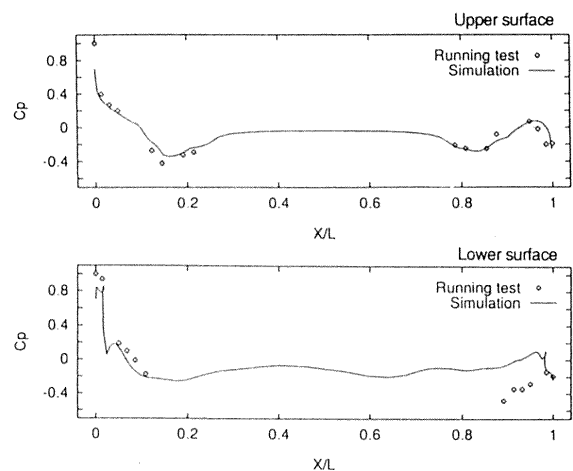


図12 車体中心線上の圧力分布(浮上式車両)

3.列車トンネル突入時の流れの数値シミュレーション

列車先頭部がトンネルに突入すると列車前方に圧縮波が形成され、この圧縮波がトンネル出口に到達すると外部にパルス上の圧力波（出口微気圧波）が放射される。このパルス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「入口対策」が一つの有効な対策となる²⁰⁾。

トンネル入口で形成される圧縮波の波形は、突入速度以外に、列車先頭部やトンネル入口の形状にも依存する。出口微気圧波の大きさを抑えた上で列車の速度を向上していくためには、列車先頭部やトンネル入口形状を工夫することが重要である。トンネル突入の数値シミュレーションプログラムはそのための有効なツールになる²⁰⁾。

3.1 基礎方程式と数値計算法

突入時に形成される圧縮波の前面に注目する限り粘性は省略できる。ここでは軸対称圧縮性オイラー方程式を基礎方程式とする。数値計算法はMUSCL型TVDスキームを用いた有限体積法²¹⁾である。列車とトンネルの相対運動は重ならないタイプの領域分割法²²⁾により取り扱う。遠方境界では無反射条件を用いる。

3.2 計算結果

図13に計算モデルを示す。半無限長のトンネルに半無限長の列車が突入する問題である。列車はトンネル入口からトンネル直径の6倍だけ離れた位置から急発進する。

図14は先頭部が回転楕円体（長径/短径=3）で、閉塞率（列車断面積/トンネル断面積）が0.12の場合の計算格子である。格子点数は車両側移動格子が約7000点、地上側静止格子が約3000点である。

図15に計算結果の一例を示す。この図は圧力分布の時間変化を示したもので、列車先頭部の突入に伴いトンネル内に1次元的な圧縮波が形成される様子がわかる。また、トンネル内外での列車先頭部まわりの圧力分布のバタンの違いも明らかである。図16はトンネル壁面に沿う格子線上の圧力分布の時間変化を表示したものである。初めに急発進に伴う圧力波が発生するが、この波は遠方境界を反射することなく透過し、後の計算には影響を与えない。

図17には模型実験結果との比較を示す。この模型実験は計算モデルと同じく、軸対称列車模型を軸対称トンネル模型に打ち込むものである。ただし計算とは異なり後尾部が存在する。計算と実験の条件は同一で、先頭部が上記の回転楕円体（長径短径比=3）、閉塞比が0.17、突入マッハ数が0.19である。図17ではトンネル壁面上の3点における圧力の時間変化を示している。ここで、距離xはトンネル入口から奥へ向かって測り、トンネル直径で無次元化している。時間tはトンネル直径を突入速度で割った代表時間で無次元化している。また、圧力は大気圧を基準として測り、突入速度で作った動圧により無次元化している。圧縮波前面の波形は計算と実験でよく一

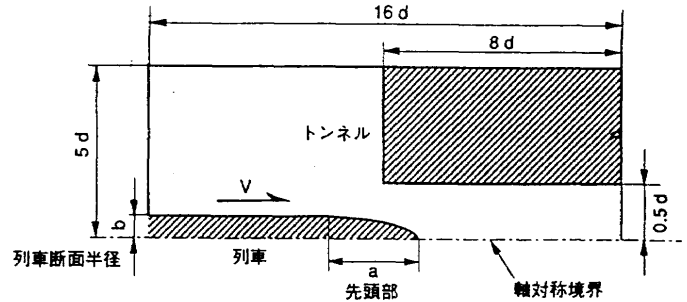


図13 トンネル突入問題の計算モデル

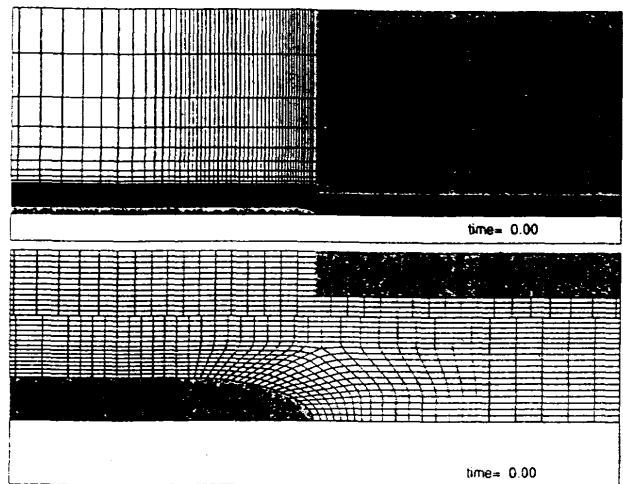


図14 トンネル突入問題の計算格子

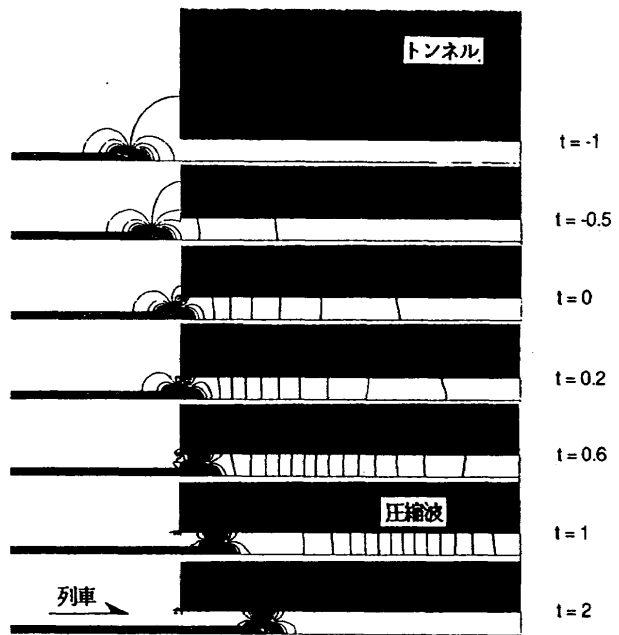


図15 トンネル突入時の圧力分布の変化

致している。先頭部通過時の圧力降下も上下にシフトすれば一致する。しかし、実験結果の圧縮波通過時から先頭部通過時にかけての緩やかな圧力上昇については計算では捉えられていない。これは粘性を省略した計算を行なったためである。また、実験では後尾部のトンネル突入に伴う膨張波の発生も観測されている ($t=6$ 以後の圧力降下)。

先頭部形状が圧縮波の波形に及ぼす影響を調べた結果の一例を図18に示す。閉塞比が0.12、突入マッハ数0.18、先頭部の長さが車両断面半径の7倍という同一の条件に対して、先頭部形状のみを回転楕円体、回転放物体、円錐の3通りに変えて比較している。図18の上側には圧縮波の波形を、下側には時間微分波形 (圧力勾配) を示す。3つの形状の中では回転放物体が最も圧力上昇が緩やかであることがわかる。これは、回転放物体の断面積変化が線形 (変化率が一定) であることに対応している。先頭部形状を工夫することにより、同じ先頭部長さでさらに圧力上昇の緩やかな形状とすることができる¹²⁾。

3.3 まとめ

列車先頭部がトンネルに突入するときの軸対称非粘性流の数値シミュレーションを行ない、トンネル内に形成される圧縮波の波形について模型実験とよく一致する結果が得られた。また、3つの基本的な先頭部形状に関する計算を行ない、その中で回転放物体が圧縮波の圧力上昇が緩やかであることを計算の面からも確認した。

4.おわりに

鉄道の空気力学的問題へのCFDの適用例として2つの項目について述べた。今後の研究の方向としては、より基礎的な問題 (移動地面など) の詳細な計算、またはトンネル突入・退出やトンネル内外でのすれちがいの含めた現車走行試験の忠実なシミュレーションの2つが考えられる。どちらの場合にも模型実験や現車試験によって結果の検証を行なうことが重要となるであろう。

参考文献

- 1) 前田達夫: 機械学会講習会資料 No.920-96, 1992.
- 2) 小川哲ほか, 航技研特別資料 SP-10, 1989.
- 3) 井門敦志ほか, 鉄道総研報告 Vol.7, No.7, 1993.
- 4) Wada, Y. et al, AIAA 88-3596-CP, 1988.
- 5) 小沢智, 鉄道技研報告 No.1121, 1979.
- 6) 前田達夫ほか, 鉄道総研報告 Vol.4, No.1, 1990.
- 7) 飯田雅宣ほか, 第42回応力連合講演会予稿集, 1993.
- 8) 小川隆申ほか, 航技研特別資料 SP-19, 1992.
- 9) Chakravarthy, S.R., AIAA 86-0243, 1986.
- 10) Sawada, K. et al, AIAA 87-0455, 1987.
- 11) Rai, M.M., J.Propulsion, Vol.3, No.5, 1987.
- 12) 松村豪ほか, 機械学会流体工学部門講演会論文集, No.930-49, 1993.

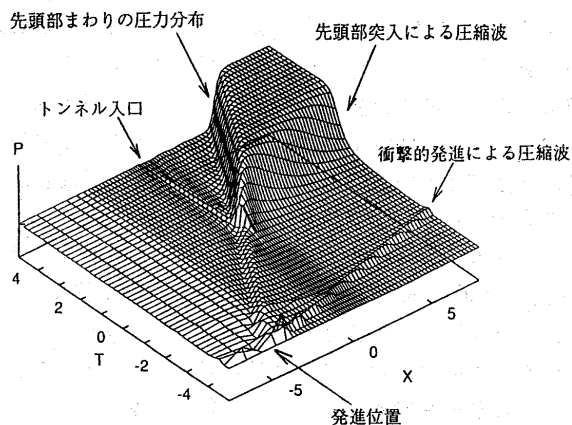


図16 トンネル突入時の圧縮波の形成

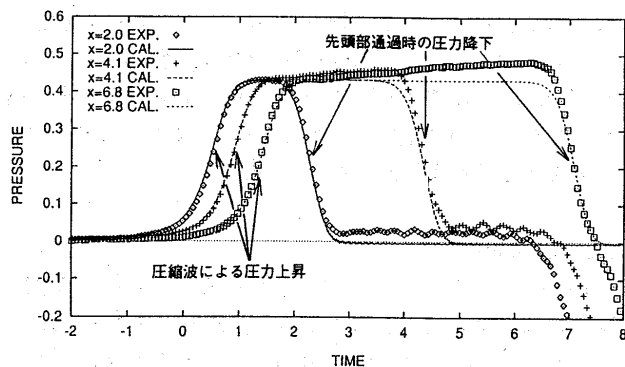


図17 模型実験との比較

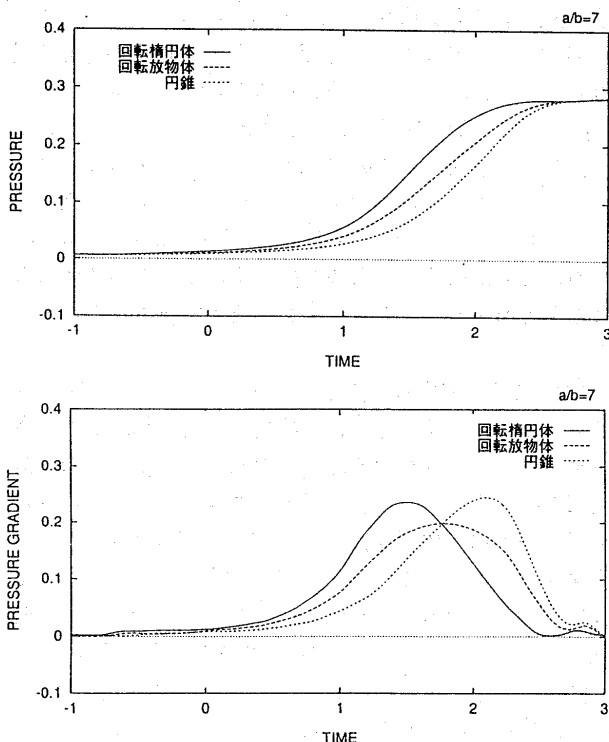


図18 先頭部形状が圧縮波に及ぼす影響