

小川 隆申^{*}、 藤井 孝藏^{**}、 田村 善昭^{**}Three Dimensional Simulation of Compressible Flow
Induced by a High-Speed Train Moving into a Tunnel

by

Takanobu OGAWA,
Shimizu Corporation
Kozo FUJII and Yoshiaki TAMURA
The Institute of Aerospace and Astronautical Science

ABSTRACT

A three-dimensional compressible flow induced by a practical high-speed train moving into a tunnel is numerically simulated. The flow field is decomposed with the zonal method and the Fortified Solution Algorithm (FSA) is used as an interface scheme. The result indicates that the algorithm is efficient to handle the moving boundary configurations which include a complicated geometry. The flow features, such as a compression wave and an expansion wave created by the train and an increment of drag force acted on the train are clarified.

1. はじめに

近年、世界的に列車の高速化が図られている。目標としている列車の最高速度は速いもので500km/hにもおよび、マッハ数にして0.4にもなるので、車体まわりの流れは圧縮性流体として取り扱わなければならない。このように高速で走行する列車においては、航空機のように空力設計が重要となる。ところが、地上を走行する列車の場合、航空機と異なり、場合によってはトンネルなどの閉鎖空間に突入する場合がある。このような流れは外部流から内部流へ移行する過渡的な流れ場であり、その際、車体抵抗の増加やトンネル出口微気圧波¹⁾が発生することが知られている。これらの現象は、列車のトンネル突入速度が速くなると顕著となるため、列車の高速化を図るうえでこれらの問題を解決することは重要であり、そのためにまずこの流れ場を調べる必要がある。この流れ場は、トンネルと列車というように相対的に移動する境界を含むため、解析的、実験的研究は難しいうえに、得られる情報は限られた条件内か、または、流れ場の中のごく一部の領域に限られる。それに対し、数値シミュレーションによれば、上述の難点を克服でき、さらに、列車やトンネルの形状が複雑になった場合にも対応できる。このような流れ場を数値的に解く場合には、境界の相対的移動を数値的に取り扱わなければならない。その方法の一つとして、各時間ステップにおいて格子を生成する格子再生成法がある。この方法を非構造格子について用いた計算²⁾はあるが、構造

格子に用いると場合によっては、例えば、列車とトンネルの位置関係によっては格子生成が非常に難しくなる可能性がある。しかも、列車の軌道が予め決まっていない場合には、格子生成が困難になることを予想できない。格子再生成法に対するもう一つの方法は領域分割法である。この方法は、計算領域をいくつかの領域に分割し、個々の領域をそれぞれの移動速度に応じて移動させる方法である。この方法によれば、初めに格子を生成するだけでよい。また、複雑な流れ場も、格子生成が簡単になるように領域分割すればよいので形状適合性が高く、複雑形状まわりの流れなど幾つかの計算例^{3,4)}がある。著者らは、領域分割法と、領域間の情報伝達手段として解強制置換法を組み合わせた手法を用い、簡単な形状の物体がトンネルに突入する時の流れ場を数値的にシミュレートし、トンネル内の圧縮波の形成、伝播から微気圧波の発生までの一連の現象を捉えた^{5,6,7)}。本研究では、この計算手法を用い、実際のな形状をもつ車両がトンネルに突入する際の流れ場をシミュレートする。それによって、この計算手法が移動境界を含んだ実用的な流れ場にとっても有効であることを示す。さらに、車両がトンネルに突入するときの流れ場の詳細について調べる。

2. 計算手法

計算は、領域分割法と解強制置換法を用いて行なう。この方法では、計算領域を複数の領域に分割し、分割された領域をそれぞれ独立に解く。そして、

* 清水建設株

** 宇宙科学研究所

領域間の情報の受け渡しを解強制置換法によって行なう。解強制置換法を支配方程式である三次元一般座標系オイラー方程式に適用すると、

$$\partial_t \hat{Q} + \partial_x \hat{E} + \partial_y \hat{F} + \partial_z \hat{G} = \chi (\hat{Q}_t - \hat{Q})$$

となる。右辺は強制項で、必要な領域で χ の値を大きくすることによって、解を強制解 \hat{Q}_t に束縛することができる。この計算では \hat{Q}_t として、他の領域における解を用いる。本計算は、三次元実形状物体を取り扱うための試計算でもあるため、粘性の影響を無視して、オイラー方程式を用いた。しかし、オイラー方程式の解でも車両のトンネル突入時のトンネル内の圧力上昇などの基本的現象は捉えることができ、また、粘性の影響がどのように働くかを明らかにするためにも、非粘性計算は十分有用であると考えられる。

計算領域はトンネル入口の領域とトンネルとからなる(図1)。今回の計算では特に車体のトンネル突入時の流れだけに着目しているため、トンネル出口側は考慮しない。長さは全てトンネル高さで無次元化してあり、トンネル長さは15.6で、車体はトンネル入口から1.86離れた場所に位置し、その長さは2.50で、 $t=0.0$ にマッハ数0.4で移動し始める。図2にトンネルに突入する車体形状を示す⁹⁾。トンネルと車体の断面積比は0.12で、トンネルと車体の位置関係を正面から見た図が図3である。このような流れ場を、トンネル入口、トンネル、車体まわり、さらに、車体は浮上して走行するため車体底面と地表面の間にも計算領域を設け、合計4つの領域に分割する(図4)。格子点数は、トンネル入口の格子が81x22x21、トンネルは301x22x21、車体まわりの格子はH-C型で格子点数は86x25x21(図5)、車体底部に設けた格子(図5、BOTTOM ZONE)は51x8x5である。車体まわりの格子と車体底部の格子がともにマッハ数0.4で移動する。

境界条件としては、トンネル入口手前の領域の外側境界では圧力を固定して、密度、速度を外挿する。地表面、トンネル内壁、トンネル入口の壁、車体表面で壁面境界条件を、対称面では対称条件を課す。また、トンネルの出口においては、この境界に入ってくる擾乱をそのまま計算領域外部に通過させる無反射境界条件を用いた⁹⁾。計算は、本来、静止流体中を十分遠く離れた場所から車体があるところから始めるべきであるが、その場合、車体がトンネルに近づくまでの間に多大な計算時間を必要とするうえ、トンネルから車体が離れている間は変化も微小であるので重要でない。そこで、本計算では、トンネルの存在しない計算領域をマッハ数0.4で走行する車体まわりの流れの定常解を求め、その解を $t=0.0$ における初期条件とした。

対流項はRoeのFlux Difference SplittingにMUSCLを

組み込んだ高解像度風上差分、時間積分は2段階陽積分法を用いた。計算時間はVP-200(富士通)上で、 $t=0.0$ から $t=17.25$ まで計算するのに約110時間かった。

3. 計算結果、および考察

$t=0.0$ における車体表面の圧力分布、および、地表面、対称面上の等圧力線図を図6に示す。この流れは定常なオイラー方程式の解であり、かつ、車体形状が前後対称であるので、流れもほぼ前後対称となっている。流れは前後端の淀み点付近で圧力が高く、前後端から胴体にかけて流れは加速し、圧力が下がり、胴体の端において圧力が極小値をもつような流れ場となっている。離散化に伴う数値粘性による散逸の分、後端における静圧は若干小さくなっているものの、車体表面上において剥離している領域は見られなかった。車体先端の底面の流れは、流路が急激に狭くなるため大きく圧力降下する。

図7は各時刻の対称面における等圧力線図、図8は同じく対称面の地表面上(実線)とトンネル上壁面上(破線)での圧力分布のプロットである。 $t=0.0$ においては、前に述べたように前後対称の流れのパターンとなっている。同じ時刻における圧力分布(図8(a))の中の2つの圧力の極大値は、車体の前後端の位置にほぼ相当し、その極大値に挟まれている圧力の低い部分は車体底面での圧力分布である。 $t=6.00$ では車体の先端部がトンネルに入る。それによって、車体先端の圧力が上昇し、車体前方に一次的な圧縮波ができ始めているのがわかる。この圧縮波はトンネル出口に向けて、ほぼ音速に近い速度で伝播する。この時の圧力分布(図8(b))を見ると、図中に示した $x=2.0$ 付近にある前述の圧縮波の他に、 $x=4.0$ 付近に圧力波が存在しているが、この波は車体の突入によって生じた波ではない。これは、トンネルがなく無限に広い領域を走行する車体まわりの流れの解を初期条件とし、 $t=0.0$ で突如としてトンネルが前方にあるものとして計算を始めたために生じた擾乱であり、この流れ場においては本来ないはずのものである。解決法として、初期条件として用いる定常解を求めるとき、車体と同じ速度で移動するが車体との距離が変化しないようなトンネル入口の壁を設定して定常解を求めた方法を検討している。 $t=9.00$ では車体はさらにトンネル内に進み、図8(c)の圧力分布を見ると車体前面の圧力はさらに上昇し、トンネル内に形成されつつある圧縮波の圧力増分も大きくなるとともにトンネル出口に向けて移動している。この時点での車体先端まわりの等圧力線図と速度ベクトル図が図9である。車体前方では圧縮波の存在によって進行方向に流れが誘起されている。

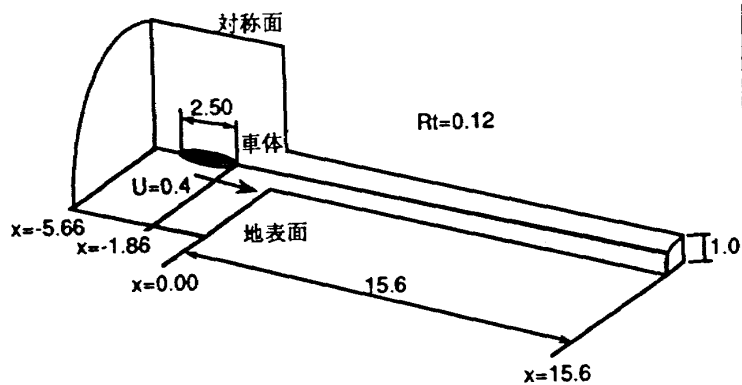


図1: 計算領域

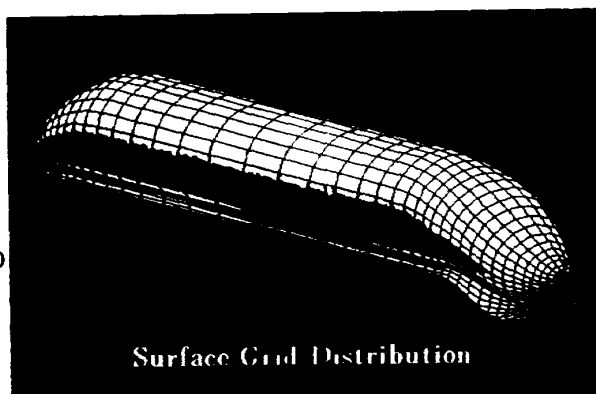


図2: 車体形状

GRID DISTRIBUTIONS

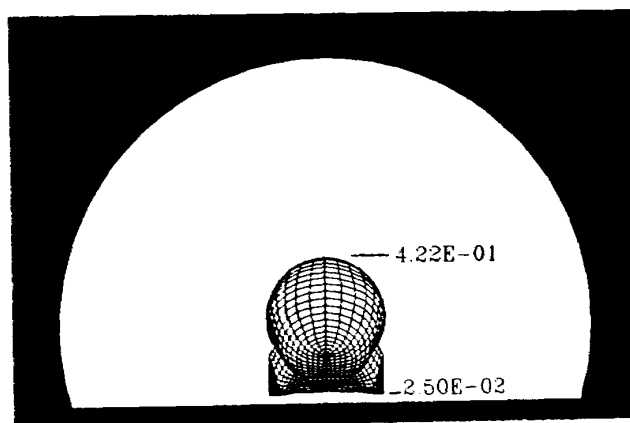


図3: トンネルと車体の位置関係

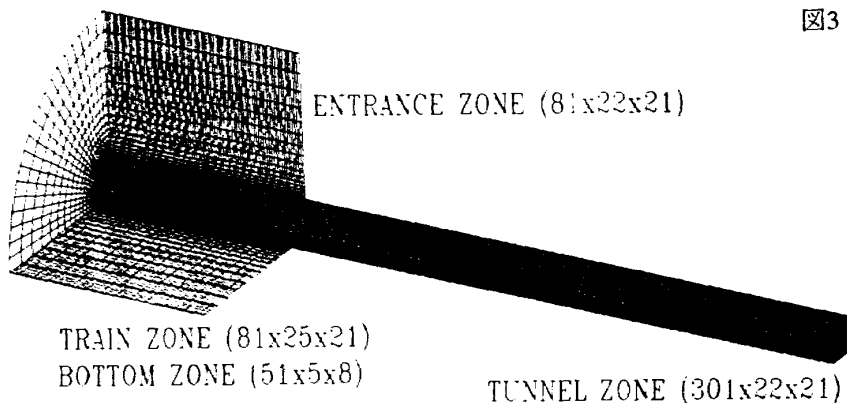


図4: 格子形状

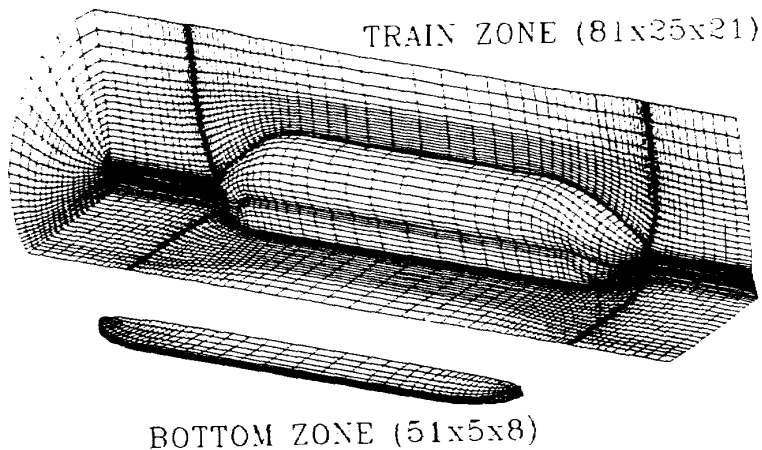


図5: 車体まわりの格子

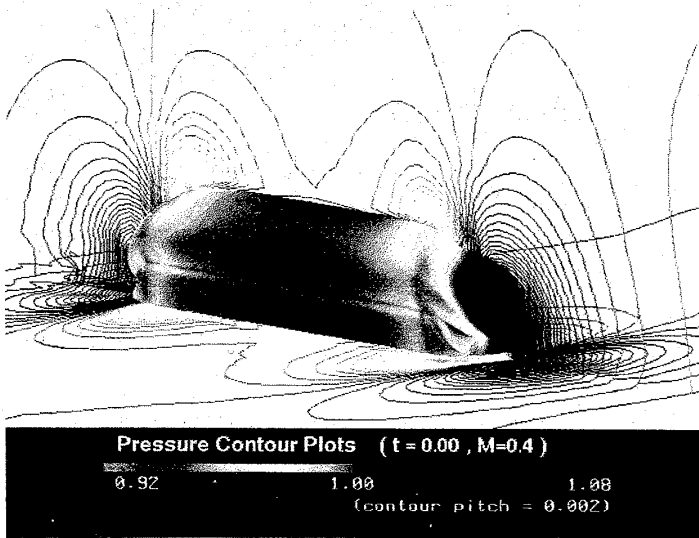


図6: t=0.0における圧力分布

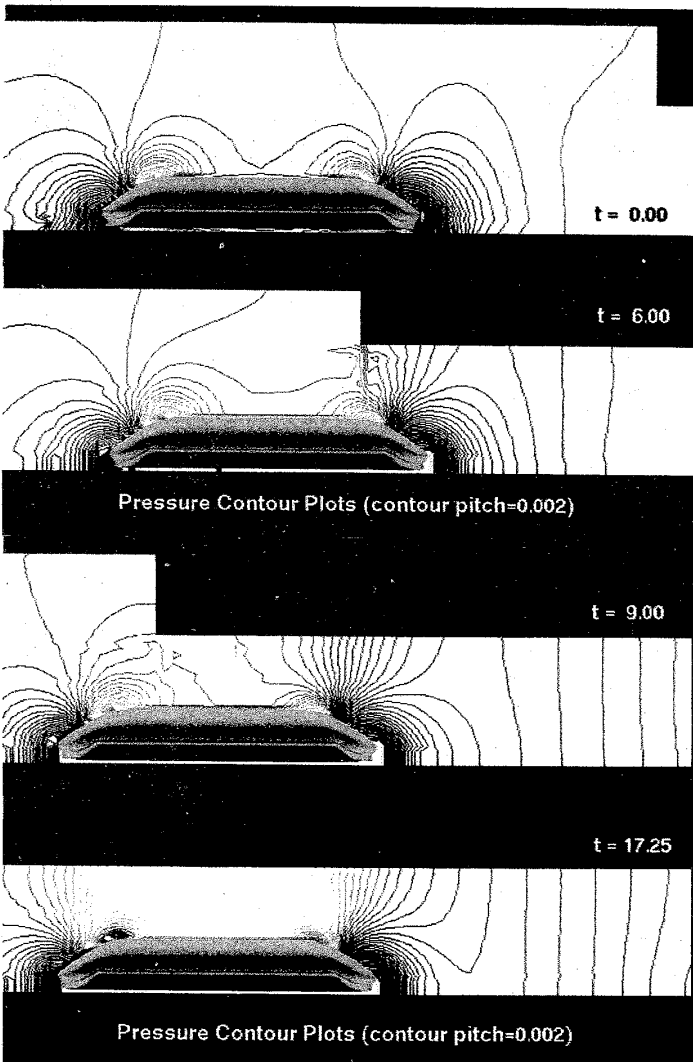


図7: 各時刻における等圧力線図

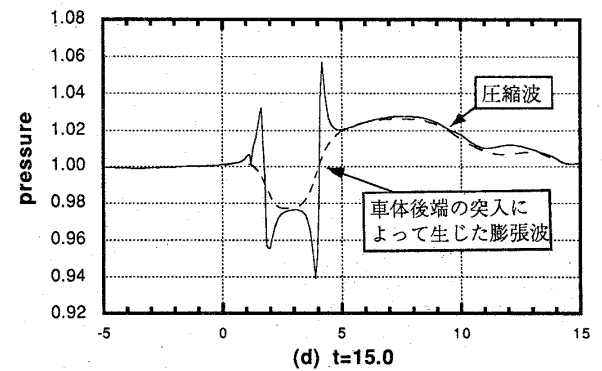
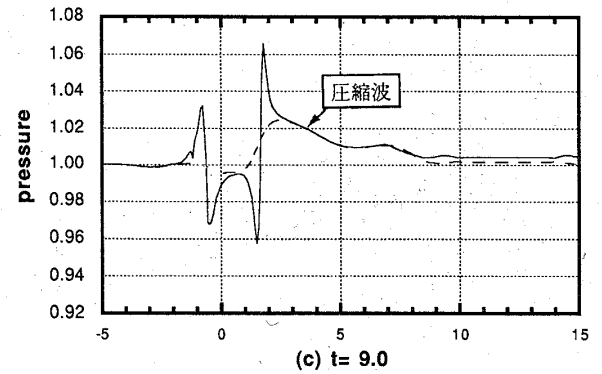
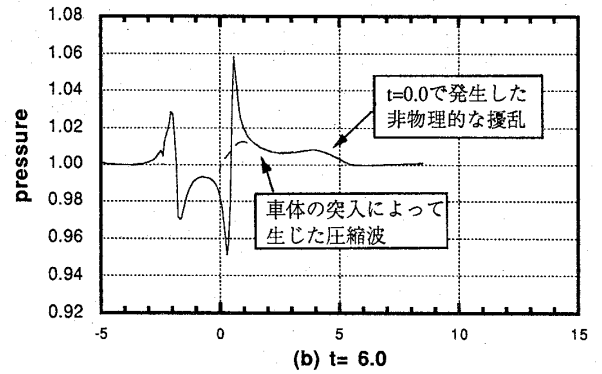
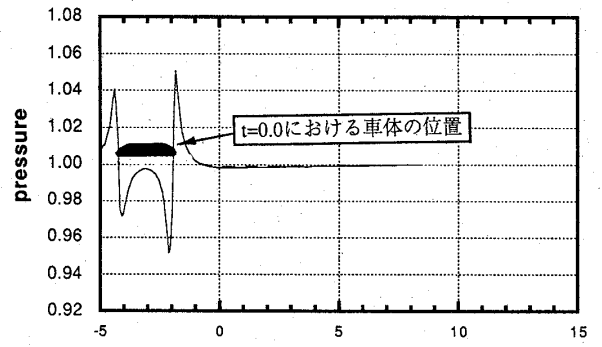


図8: 各時刻における圧力分布

(実線: 地面上、
破線: トンネル上壁面上の圧力分布)

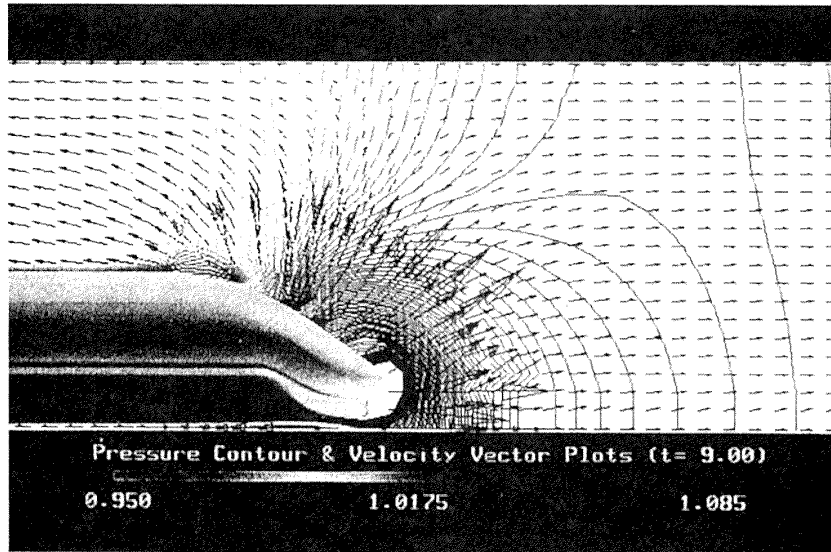


図9：t=9.0における等圧線図と速度ベクトル図

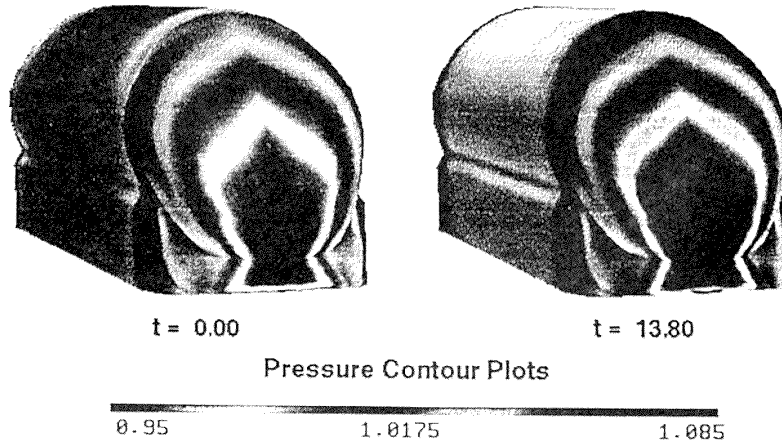


図10：トンネル突入前と突入後の車体表面上の圧力分布

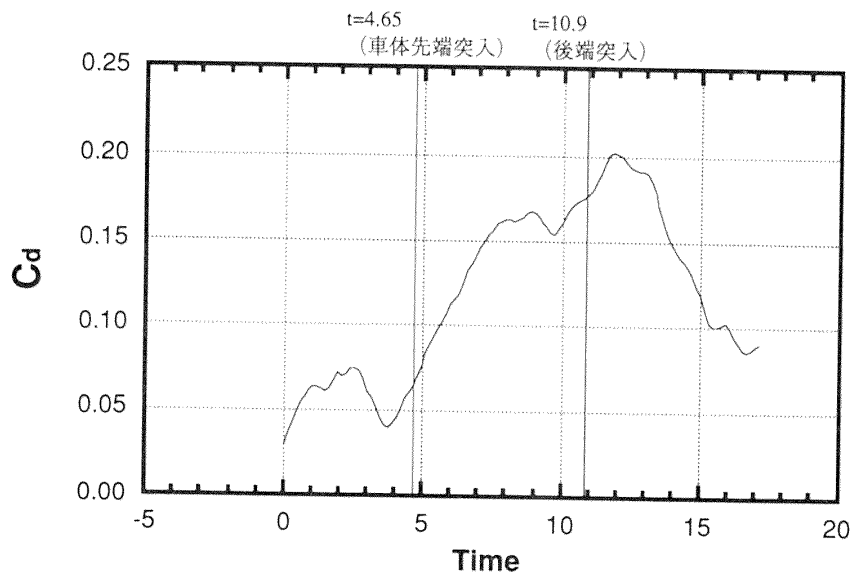


図11： C_d の時間履歴

一方、車体の側面では、車体前面とトンネル入口との圧力差によってトンネル内から入口に向かって流れが誘起され、そのため圧力が下がることになる。また、流れが三次元的であるのは、車体の前後端の近傍に限られ、その他の部分の流れは一次元的な流れとなっている。さらに時間が進むと車体後端がトンネルに突入し、トンネル入口付近で圧力が下がり、膨張波となってトンネル出口に伝播する。図7の $t=17.25$ の車体前方に見える等圧力線図が膨張波を示している。 $t=15.0$ の圧力分布(図8(d))を見ると、膨張波が圧縮波の後を追うような形で伝播しているのがわかる。膨張波の通過によって車体前面の圧力は下がり、それ以降圧力は上昇しない。この流れ場の場合、圧縮波の圧力上昇 ΔP は基準圧の約28%となった。

図10にトンネル突入前($t=0.0$)と突入後($t=13.8$)における車体表面上の圧力分布を比較する。 $t=13.8$ ではトンネル内の圧縮波が十分発達した状態となっている。突入後、車体の先端部では圧力が上昇し、圧力の高い領域が広がっているのに対し、車体側面では先に説明したように圧力が低くなっている。しかし、いずれの場合も胴体の端の部分で圧力の極小値をとっている。

C_d の時間履歴を図11に示す。 $t=4.65$ で車体の先端がトンネルの入口に到達する。 $t=0.0$ においては C_d は0に近い値を示す。車体がトンネルに向かって動き始めてすぐに、 $t=1.0\sim 3.0$ あたりで C_d が大きくなるが、これはトンネルが近づくことによるものではなく、前述の $t=0.0$ でトンネル入口で生じた擾乱が車体に到達したことによる影響であり、この流れ場においては本質的ではない。このことも先に述べた方法で解決できると考えられる。車体先端がトンネルに到達する $t=4.65$ 辺りから C_d は直線的に上昇する。そして、トンネル内の車体前方の圧力上昇が止まる、つまり、トンネル内の圧縮波が発達し終わる $t=9.0$ 付近まで上昇し続ける。その後、車体後端のトンネル突入($t=10.9$)による後端部の圧力降下によって、再び C_d は大きくなるが、その圧力降下が膨張波として前方に伝播すると、車体先端の圧力も減少して C_d は減少し始める。計算時間、トンネル長さの制限から、 C_d が減少している途中で計算が終了してしまったため、この先 C_d がある値に漸近するのかどうかなどを明らかにすることはできなかった。

4. まとめ

領域分割法と解強制置換法を用いることによって、実際的な形状をもつ高速車両がトンネルに突入する際の流れ場を解くことができた。計算結果から、トンネル内の圧縮波、膨張波の形成、車体の抵抗の

増加などの現象を捉えることができた。今後の課題としては次のようなことが挙げられる。初期条件を計算する際の、 $t=0.0$ での非物理的な擾乱の発生を防ぐような境界条件を設定する。また、今回の計算では取り入れなかったが、実際の路線では地表面上に磁気浮上用のガイドレールがあるので、その場合に流れ場がどのように変化するかを調べる。さらに、粘性計算を行い、圧縮波の強さなどにどのような影響が現われるかを調べる予定であるが、そのための計算には今回使用したVP-200(富士通)の20~30倍の演算能力を持った計算機が必要になるとみている。

参考文献

- 1) 小沢智：「トンネル出口微気圧波の研究」、鉄道技術研究報告、No.1121、(1979)
- 2) Aita, S. et al. : "CFD Aerodynamics of the French High-Speed Train," *Vehicle Aerodynamics*, (1992)
- 3) Kuroda, S. and Fujii, K. : "Supersonic Inlet Flow Computations Using Fortified Navier-Stokes Approach," *AIAA-91-1730*, (1991)
- 4) Fujii, K. : "Unified Zonal Method Based on the Fortified Navier-Stokes Concept," *AIAA-91-1558*, (1991)
- 5) 小川隆申、藤井孝藏、田村善昭：「ダクト内に突入する物体に誘起される流れ場の数値計算」、日本航空宇宙学会第22期年会講演会、(1991)
- 6) 小川隆申、藤井孝藏、田村善昭：「トンネル内を伝播する圧力波の数値計算の高精度化」、第23回流体力学講演会、(1991)
- 7) Ogawa, T., Fujii, K. and Tamura, Y., "Numerical Simulation of Compressible Flows Induced by an Object Moving Into a Duct", 4-th ISCFD Davis, (1991)
- 8) 「リニアモーターカーの技術開発最前線」：公共投資ジャーナル社、pp. 2-20,21、昭和63年2月
- 9) 小川隆申、藤井孝藏、田村善昭：「三次元ダクトに突入する物体に誘起される流れ場の数値計算」、第5回数値流体力学シンポジウム、(1991)