

チューブトレインの亜音速／遷音速空力特性の数値解析

若山一樹、鈴木宏二郎
東大院、東大新領域

Numerical Analysis on Subsonic and Transonic Aerodynamic Characteristics of Bullet Train in Tube

by
Kazuki Wakayama and Kojiro Suzuki

ABSTRACT

For the purpose of reducing drag and further speeding up of high-speed train, the axisymmetric Navier-Stokes analyses have been numerically conducted around a bullet train running in depressurized tube. The flows around a simple axisymmetric body, which runs in high subsonic and transonic regimes at velocity more than 500km/h and freestream pressure 0.001atm, was solved for various tunnel diameters. When the train speed increases or the diameter of the tunnel decreases, the pressure on the nose tip of the train rises and the separation in the rear part of the train becomes more significant. As a result, the “drag divergence” phenomena were observed on the plots of the relation between the drag coefficient and the freestream Mach number. The results show that when the tube is depressurized to 0.001atm, further speeding up becomes possible with smaller power requirement than the existing Shinkansen bullet train.

1. はじめに

現在、国内の長距離輸送手段においては、新幹線と航空機が激しい競争を繰り広げている。500km/h で走行するリニアモーターカーの開発や、鹿児島、札幌への新幹線の計画が進められているが、現在の新幹線の走行速度ではやはり航空機の到達時間には及ばない。一般に、長距離になるほど航空機の有利性には及ばない。ゆえに、高速列車のさらなる高速化の検討は、(i) 長距離輸送を航空機から高速列車に集約し環境への配慮を高める、(ii) より短時間での長距離移動が可能になり利便性が高められる、といった観点から重要であると考えられる。さらには大陸輸送を高速列車が担うことも可能になると考える。しかし、高速走行時は空気抵抗の増大が顕著となり必要パワーも増加することや、騒音・振動等の沿線住民への影響など多くの問題が生じる。

そこで、本研究では抵抗低減を狙い減圧したトンネル内を走行するチューブトレインの数値解析により、既存の高速列車よりもさらに高速に走行する際の空力特性を取得し、現在の新幹線との比較により、鉄道の高速度の可能性について検討する。本研究では実際の三次元形状に対して高速化実現のための知見を得ることが目的であるが、まずは軸対称形状に対する解析を行った。ここでは、抵抗低減を目指す上で、流れを層流とみなすことの可能な 1/1000 気圧に減圧したトンネル中を時速 500km を超える亜音速から遷音速で走行する軸対称形状に対して、トンネル直径を変えて解析を行い、流れ場および抵抗特性の変化について検討した。

2. 高速化に伴う空気力学的問題

新幹線やリニアモーターカー等における鉄道の高速度においては様々な制約要因が克服されなければならない。そのうち最も重要なものとして速度の増加に伴う空気力学的問題に起因する制約要因が挙げられる。鉄道における空気力学的問題として代表的なものを表1に示す。列車には、(i) 非常に細長い、(ii) 地面の直ぐ上を走行する、(iii) 対向列車が接近・通過する、といった特徴が挙げられる[1]。表1から空力的問題はトンネルの存在に因るものが多い。本研究での知見は、通常の高速度鉄道に関しても、トンネルによる空力的問題の克服にも有用である。

表1. 鉄道に関する空気力学的問題^[1]

地上側	列車通過時の列車風・圧力変動
	トンネル微気圧波、突入・退出波
	トンネル内の温度上昇と換気
	トンネル内の圧力・風速
車両側	空気抵抗
	列車側面の圧力変動
	車内換気方式と車内圧変動
	列車すれ違い時の圧力
	列車先頭部・後尾部の空力特性
	横風が車両に及ぼす空力
	トンネル突入・退出時の過渡現象
	パンタグラフの空力特性・空力音
	車両空力音

3. チューブトレインのコンセプト

チューブトレインの概念図を図1に示し、その走行コンセプトを以下に示す。

- (i) 速度の二乗に比例して空気抵抗が増大することから、チューブ内を減圧し抵抗低減を図る。
- (ii) 全走行区間をチューブ内とすることで、トンネル進入・退出時の空力的影響を避ける。
- (iii) 減圧により走行時のレイノルズ数を下げ、流れを層流とし、乱流による摩擦抵抗の増加を防ぐ。

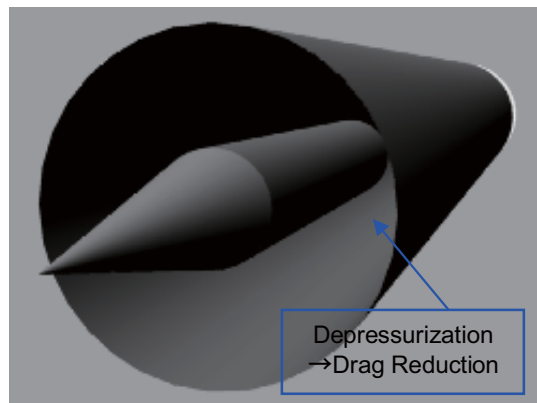


図1. チューブトレイン（軸対称形状）概念図

4. 数値解析手法

4. 1 計算モデル

図2に解析に用いる列車形状を示す。現在開発中のリニアモーターカーのデータ^[2]を参考にし、列車長を84m(3両相当)、高さを3m、先頭形状を円錐形とした軸対称形状として定義した。計算格子は中心軸を含む一断面について生成し、構造格子を用いた。列車前方に列車長の10倍、後方に列車長の100倍の計算領域を設けた。格子点ほどのトンネル直径のケースにおいても461x101の46561点である。

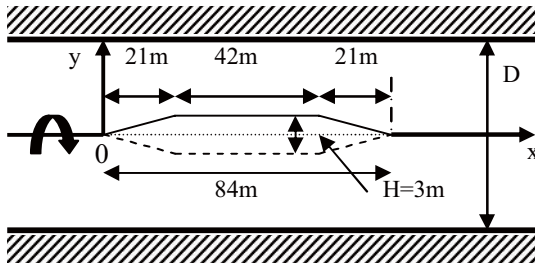


図2. 軸対称列車形状

4. 2 計算条件

チューブ内は減圧し 1/1000 気圧とした。一様流速度は 500km/h($M=0.4, T=20^{\circ}\text{C}$)を基点とし、表2より、マッハ数に換算して、 $M_{\infty}=0.4\sim 0.9$ の5ケース($D=5, 4H$ については、 $M=0.5$ も含む6ケース)について計算を行った。いずれの速度においてもレイノルズ数(基準長:列車直径 H)は 10^4 のオーダーであり、層流として差し支えない。また、列車側面とチューブ壁面の間隔を変えることによる抵抗特性の変化を検討するために、トンネル直径 D を列車直径 H の2,3,4,及び5倍に変えて計算を行った。列車とチューブ壁面は相対的に移動している。本計算では列車に固定した座標で計算を行うため、チューブ壁面についても一様流速度を境界条件として与えた。亜音速流では流出境において、計算領域から外部へ伝播する波は非物理的な反射波を生ずることなく境界を通過しなければならない。そこで、計算領域の下流外縁を十分に遠方にとるだけでなく、出口で一次元を仮定した無反射流出条件^[3]を適用した。

表2. 計算条件

一様流マッハ数	0.4	0.6	0.7	0.8	0.9
一様流圧力	1/1000[atm]				
一様流温度	20[$^{\circ}\text{C}$](=293.15[K])				
トンネル直径 D	2H, 3H, 4H, 5H				
レイノルズ数 $\text{Re}(x10^4)$	2.72	4.07	4.75	5.43	6.11

($M=0.5$ のとき $\text{Re}=3.39x10^4$)

4. 3 数値計算手法

流体の支配方程式には軸対称圧縮性 Navier-Stokes 方程式を用い、層流解析を行った。各軸方向の座標は列車直径で無次元化した。対流項の離散化は Symmetric-TVD スキーム^[4]を用いた。粘性項は二次精度中心差分で離散化し、時間積分は2段階 Runge-Kutta 陽解法を用いた。

5. 計算結果および考察

5. 1 $D=5H$ におけるマッハ数の影響

図3に各マッハ数における列車表面圧力係数分布、図4に各マッハ数における列車周辺の等圧力係数線図を示す。 $M_{\infty}=0.4$ では図3より列車先端で圧力が上昇し、先頭部で圧力が低下していき、列車の肩の部分で極小のピークとなっている。列車中間部では圧力が一定となり、列車後部の形状変

化部で圧力が回復していく。この結果は飯田、吉田らによって行われた三次元形状の $M_{\infty}=0.37$ の計算や $M_{\infty}=0.4$ の磁気浮上車両の計算によって得られた車体中心線上の圧力分布^[5]と定性的に一致しており、本計算の結果の妥当性が示されたと考える。

図5に列車後方の各マッハ数における等密度線図を示す。図3および図4より、速度の上昇に伴い、 $M_{\infty}=0.7$ までは圧力係数の分布に大きな変化はない。後部で剥離領域が徐々に大きくなるが、全体の抵抗に大きな影響はない。しかし $M_{\infty}=0.8$ より前方の流れの圧縮が顕著になり、列車先端の圧力上昇が大きくなる。後部では流れの剥離が顕著になり、図3および図4から負圧領域が拡大する。 $M_{\infty}=0.9$ では後部で大規模な剥離が生じ、図5より渦の放出が始まり流れが非定常になる。以上より速度の上昇に伴い前方の流れの圧縮と後部の剥離が顕著になり、圧力抵抗が増大する。

5. 2 $M_{\infty}=0.6$ におけるトンネル直径の影響

図6および図7に各トンネル直径における列車表面圧力係数分布、列車後方部の等マッハ数線図をそれぞれ示す。トンネルの直径が小さくなるにつれ、流路が狭くなり、図6に示す通り列車前方での圧力上昇が大きくなる。また、列車中間部ではより流れが加速され、圧力が低下する。図7より、列車後方部では剥離の規模が大きくなっていく。 $D=2H$ では $M_{\infty}=0.9, D=5H$ と同様に列車中間部でも流れが加速され、後方部で流れが非定常的になり、渦の放出が始まる。以上より、同じ走行速度に対して、トンネルの直径が小さくなるにつれて、列車前方の圧力上昇および列車後方の流れの剥離が大きくなる。このことにより、列車前後の圧力差が増大し、空気抵抗も増大する。これは、同じトンネル直径に対して、走行速度が上昇することによる流れおよび抵抗特性の変化と同様である。

5. 3 抵抗特性および必要パワー

図8に各トンネル直径に対するマッハ数による抵抗係数の変化を示す。図8より、 $D=5H$ の場合 $M_{\infty}=0.4$ から $M_{\infty}=0.7$ までは、5.1に示したように列車後方部で剥離の規模が大きくなるものの、列車全体の抵抗係数はあまり増加しない。しかし、マッハ数が0.7を超えると、急激に抵抗が増加する。この原因は列車後方部でより大規模な剥離が生じるためである。このような抵抗の急激な増大は、要因は異なるが、翼型の抵抗発散現象に似ている。

次に $D=4H, 3H, 2H$ の分布から、トンネル直径が小さくなるにつれて、同じマッハ数において、より抵抗が増大している。そして、抵抗の急激な増加が、より低いマッハ数において始まるのが分かる。これはトンネル直径が小さくなるのが、5.2と同様に、走行速度の増加に伴う抵抗特性の変化と同様の効果を生じさせていることによる。また、抵抗係数は走行速度の増大とともに急激に増大するものの、その割合は小さくなる。特に $D=2H$ では、 $M_{\infty}=0.8, 0.9$ において抵抗係数が減少している。しかし、抵抗そのものが減少しているわけではないので、注意を要する。

次に、得られた各条件における抵抗係数から列車の抵抗および必要パワーを算出した。図9に各トンネル直径における、マッハ数による必要パワーの変化を示す。マッハ数の上昇に伴い、必要パワーは増大する。また、同じマッハ数においてもトンネル直径が小さくなることにより、必要パワーは増大する。図9はマッハ数による抵抗の変化と同様であり、 $D=2H$ において、 $M_{\infty}=0.8$ から0.9にかけて抵抗係数は減少するが、抵抗そのものは増加していることが分かる。

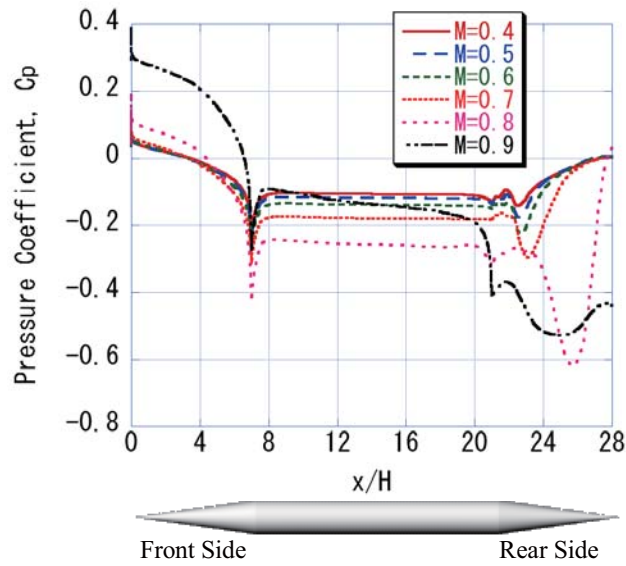
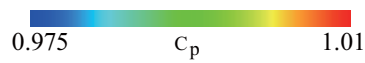


図3. 列車表面圧力係数分布 ($D=5H$)
 ～マッハ数による変化～



Flow

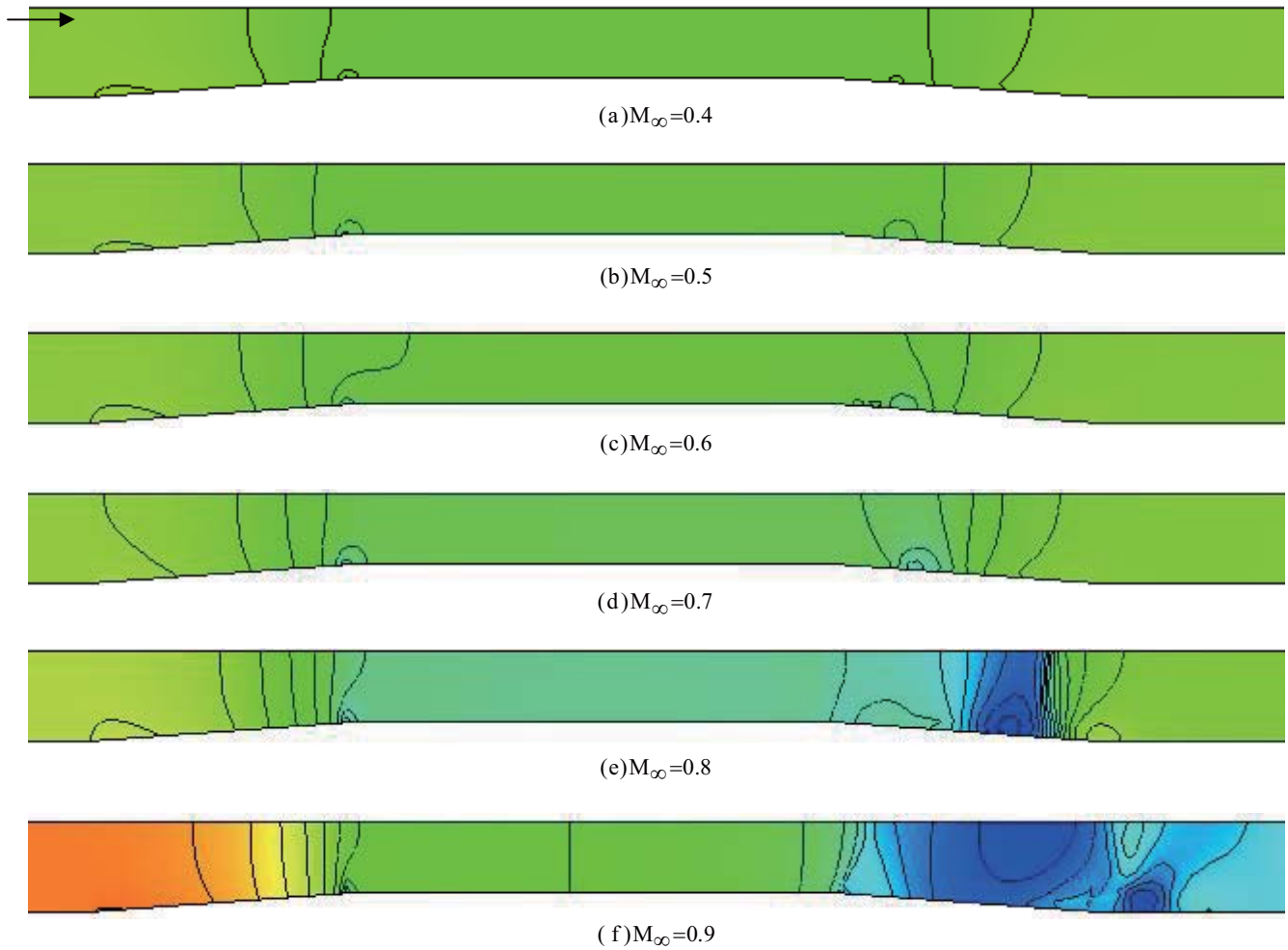


図4. 等圧力係数線図 ($D=5H$)
 ～マッハ数による変化～

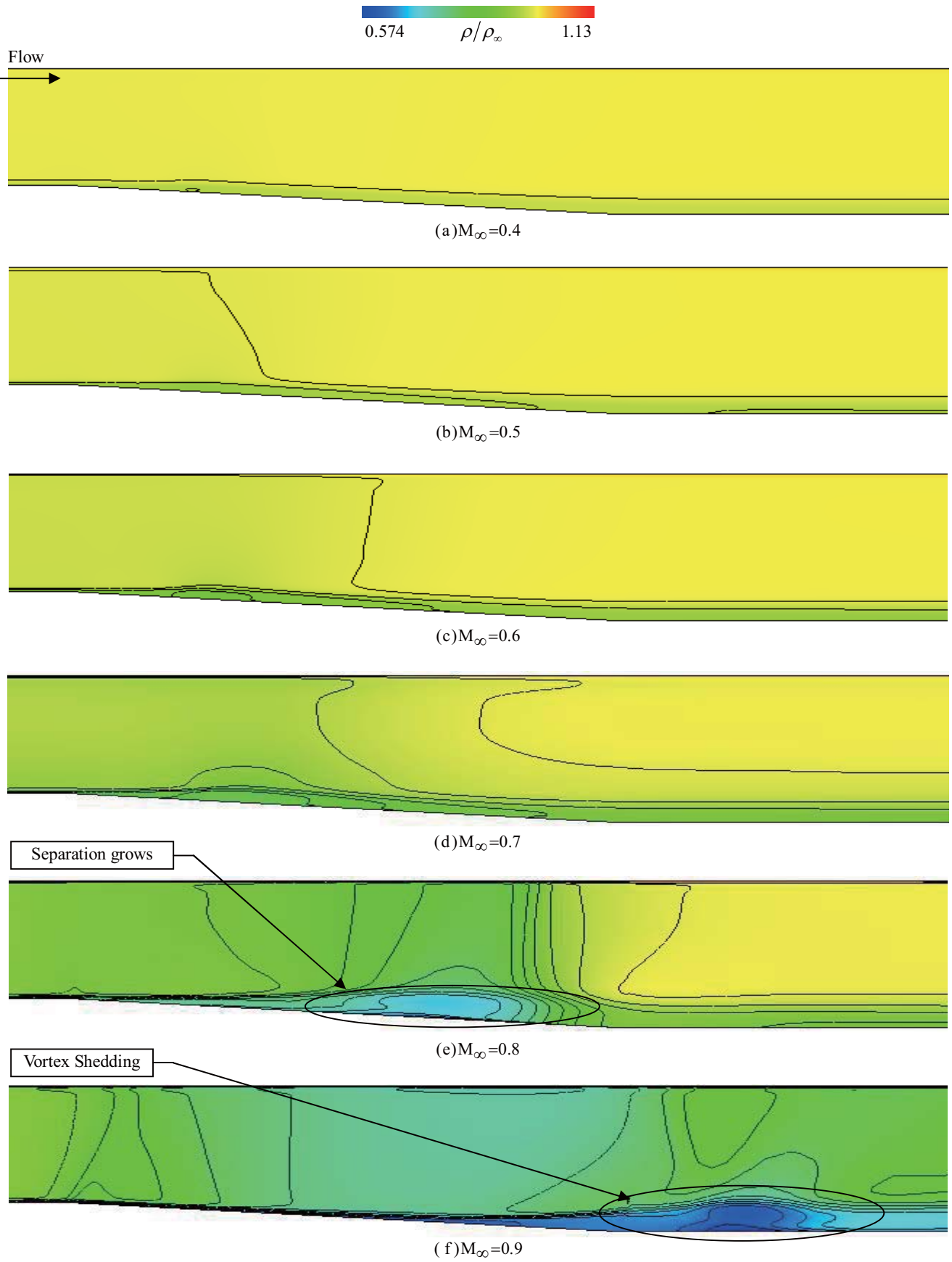


図5. 列車後方部の等密度線図 (D=5H)
 ~マッハ数による変化~

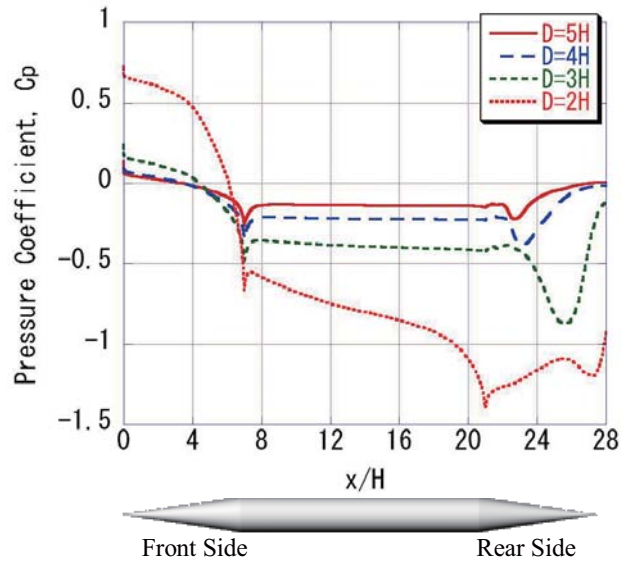


図6. 列車表面圧力係数分布 ($M_\infty=0.6$)
 ～トンネル直径による変化～

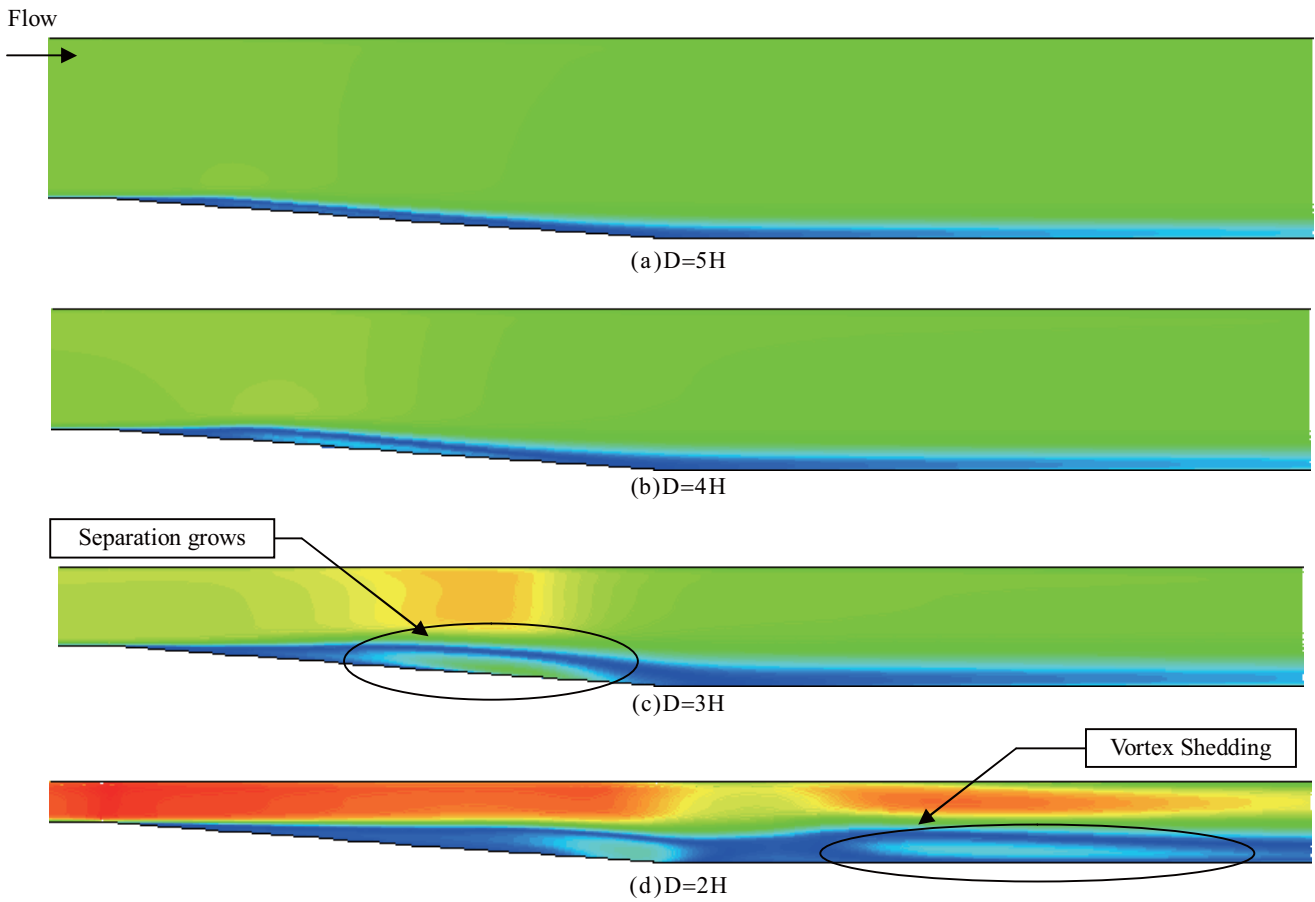


図7. 等マッハ数線図 ($M_\infty=0.6$)
 ～トンネル直径による変化～

6. 新幹線の消費電力との比較

本計算で得られた必要パワーを新幹線の消費電力と比較する。現在の新幹線の消費エネルギーは、東京～新大阪間で一座席あたり、120MJ^[6]である。この値から、本計算モデルと同様の3両に相当する新幹線の消費電力を概算すると1.2MWとなる。図9と比較すると、いずれのケースにおいてもこの値を下回っている。ゆえに、トンネル内を1/1000気圧に減圧すれば、現在の新幹線の消費電力以下で高速化が可能であることが示された。

7. まとめ

減圧したトンネル内を走行するチューブトレインの軸対称形状に対する数値解析を行い、亜音速および遷音速走行時における基礎的な空力特性を取得した。走行速度の増加に伴い、列車前方での圧力上昇、および列車後方部での流れの剥離の規模の増大が確認された。この列車前後での圧力差に伴う圧力抵抗の増大が、走行時の空気抵抗の増大を招いている。

トンネル直径を小さくすることが、建設コスト面から望まれる。しかし、その分抵抗が増大してしまい、高速化の妨げになる。本計算においては、十分な減圧がなされれば、新幹線の消費電力以下で、高速走行が可能であることが示された。適切な減圧量については、検討する必要がある。

今後は、減圧の程度を下げた解析や、三次元モデルを作成して、より実際的な解析を行うことで、高速化の詳細な検討をしていきたい。

8. 参考文献

- [1] 小沢智, 「高速列車の空気力学的諸問題」, ながれ 21, pp346-353, 2002.
- [2] 超伝導磁気浮上式鉄道実用技術評価委員会, 「超伝導磁気浮上式鉄道実用技術評価」, pp13-15, 2005.
- [3] 小川隆申, 「列車トンネル突入時のトンネル内圧縮波形成過程に関する研究」, 東京大学大学院博士論文, pp23-24, 1995.
- [4] Yee, H.; Upwind and Symmetric Shock-Capturing Schemes, NASA TM 89464, pp20-22, May, 1987.
- [5] 飯田雅宣, 吉田康夫, 前田達夫, 小川哲, 「高速鉄道に係わる空力問題の数値シミュレーション」, 第11回航空機計算空気力学シンポジウム論文集, pp243-248, 1994.
- [6] 東海旅客鉄道株式会社, 「JR東海 環境報告書 2006」, pp3, 2006.

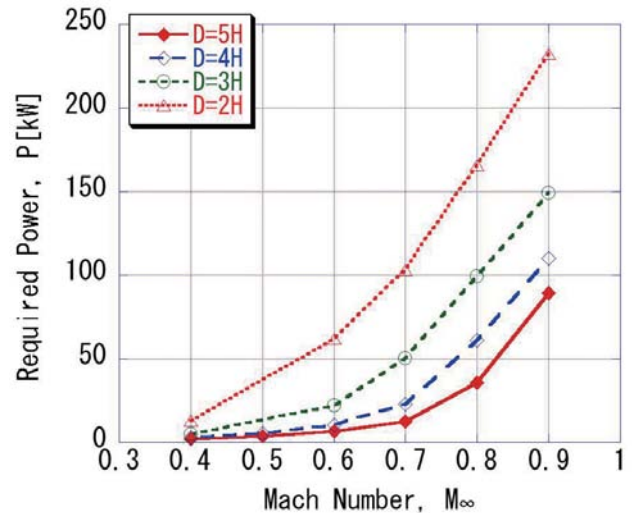


図9. マッハ数による必要パワーの変化

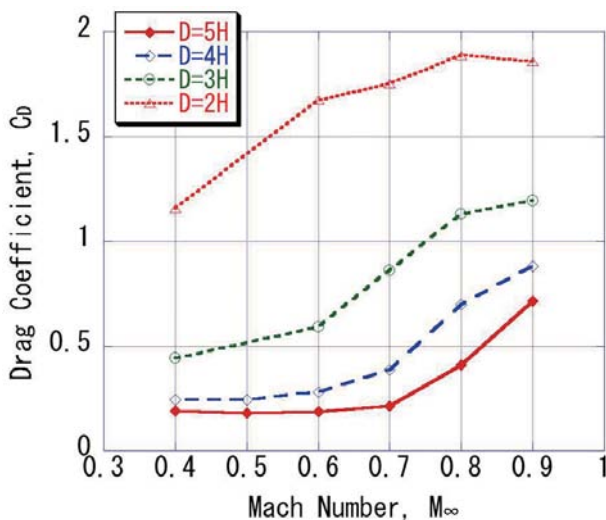


図8. マッハ数による抵抗係数の変化