

遷音速鈍頭2次元物体でのタブによるベース抵抗低減^{*1}

Base Drag Reduction of 2D Bluff Body by Using Tabs at Transonic Speeds

橋本 敦^{*2}・小林貴広^{*2}・中村佳朗^{*2}

Atsushi HASHIMOTO, Takahiro KOBAYASHI and Yoshiaki NAKAMURA

Key Words: Bluff Body, Transonic Flow, Base Flow, Drag Reduction, Flow Control

Abstract: As base drag accounts for most of the total drag for spacecraft with a large base area, reduction in the base drag improves its aerodynamic performance. In the present study, a method using a pair of tabs normal to the base surface is proposed to reduce the base drag, and its effects on drag reduction are experimentally examined for a two-dimensional, simple bluff body with a large base area, the cross-section of which consists of a circular forebody and a rectangular afterbody, by changing the tab's position and length. In addition, the flow fields around the model with/without tabs were visualized by the schlieren method with a high speed video camera, and CFD analysis was also made to supplement the experimental results. It was found that the tab method can remarkably increase the base pressure, which leads to a large decrease in the base drag. In the case where a pair of tabs with a non-dimensional length of 0.38 are installed at the base edges, the total drag is reduced by about 20.6% at a Mach number of 0.6 compared with that in the baseline case without tabs. Even when short tabs with a non-dimensional length of 0.07 are employed, about 10.0% reduction in the base drag is achieved. Thus, it was made clear from this study that the tab method proposed here is effective to decrease base drag in the transonic flow.

1. はじめに

高速飛行する物体背後に生ずるベース流れは、大きなベースを有するスペースシャトルやリフティングボディー型宇宙機等の空力特性に強い影響を与え、ベース部での負圧領域による抵抗は、遷音速領域で全体抵抗の50%に達する場合もある¹⁾。そのため、ベース流れを制御し、抵抗を低減することは重要な課題である。

航空機や宇宙機のベース流れ制御に関して、過去に多くの実験的研究が行われてきた。その1つに、ベースに対して垂直に板(Splitter plate)を付ける方法がある²⁾。これは2次元的な流れに有効で、ベース長さ以上の板を用いることでカルマン渦の発生を抑制することができる。この他にも、ベースからジェットを吹く方法²⁾、ベースにキャビティを設ける方法²⁾などが提案されており、それらの方法でも効果が確認されている。一方、低速においても自動車のベース抵抗低減の研究が盛んに行われている³⁾。その1つとして、ベースの端に板(spoiler)を付ける方法はすでに実用化されており、現在多くの車に取り付けられている。板を付けて制御する方法は、大きな設計変更を必要としないため、有望な抵抗低減方法であると考えられるが、航空機や宇宙機ではこのような研究が少なく、実用化に至っていない。そこで、本研究では、実用化されていな

い理由がその板の大きさにあると考え、今までに提案されたものよりも小さな矩形板(タブ)をベースに付ける方法を提案する。

また、X-15やスペースシャトルなどの大きなベース部を有する機体のフライトデータ解析⁴⁾によると、ベース背後の流れは、周期的なカルマン渦が放出されており、局所的に2次元的な流れになっている。さらに、実機での機体抵抗は、3次元理論の抵抗値より2次元理論値に近い⁵⁾ことが示されている。現在構想されている宇宙往還機の多くは、大きなベースを有しているため、2次元モデルを利用してベース流れを調べることは実機への応用にもつながると考えられる。

2次元モデルにおいて剥離と非定常性を伴う最も基本的な流れは円柱周りの流れであり、本研究室では円柱^{6, 7)}や角柱⁸⁾周りの高亜音速・遷音速流れの制御について研究を行ってきた。その制御方法として、物体後部に上下1対(2枚)あるいは2対(4枚)の小さなタブを取り付けて抵抗を低減する方法を提案した。結果として、円柱の場合、マッハ数 $M = 0.6$ で抵抗を 32% 低減できた⁶⁾。さらに、角柱の場合でも、35% 抵抗低減でき⁸⁾、タブによる流れ制御の有効性が明らかにされた。これらの場合には、円柱あるいは角柱後部で発生する逆流をタブで減少させることによって、渦が下流側に移動し、結果として抵抗が低減されている。

しかし、この方法は宇宙往還機のような実際的な形状にはまだ適用されていない。そこで本研究では、円柱や角柱でその有効性が確認された小さなタブを用いる手法を応用

*1 © 2008 日本航空宇宙学会

平成19年3月19日原稿受理

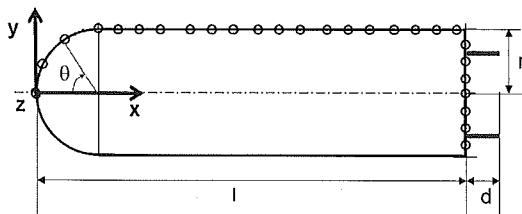
*2 名古屋大学大学院工学研究科航空宇宙工学専攻

し、宇宙往還機を想定し、簡単化された鈍頭2次元物体のベース抵抗低減について調べる。具体的には、1対(2枚)のタブをベース面中心に対して上下対称に取り付ける方法を提案する。この場合の抵抗低減を、タブの位置や長さを変化させて実験的に評価し、その有効性を調べる。加えて、シュリーレン法やCFDを用いて、タブの流れ場への影響を考察する。

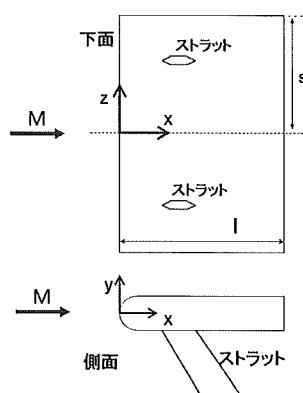
2. 実験方法

本研究では、名古屋大学航空宇宙工学専攻の誘導式回流型遷音速風洞を使用した。この風洞では、計測室下流に設置された環状エジェクターにより高圧空気を下流方向に噴出させ、風洞内に流れを誘起している⁹⁾。風洞には途中、ブリーザーと呼ばれる壁に穴が空いた部分があり、ここから流れが出入りするため、計測室に入る流れの総圧は大気圧となる。計測室は、断面が縦400×横300mmの長方形で、上下壁面にはスロットが設けられ、遷音速流れにおける壁の影響を低減している。本風洞は一様流マッハ数が $M = 0.40 \sim 1.0$ で作動し、通風時間は20秒である。本風洞では、外気の影響により圧力測定の誤差が約3%存在することを確認している。

第1図に本研究で使用した実験模型を示す。模型は宇宙往還機を模擬した2次元物体で、その断面は、半円形状の前縁部と、大きなベースを有する長方形からなる。全長 $l = 104\text{ mm}$ 、ベース高さ $2r = 26\text{ mm}$ 、スパンは風洞の計測室幅と同じ $2s = 300\text{ mm}$ (第2図)である。また、座標系(x, y, z)の原点を、スパン中心で、かつ模型先端となる位置にとり、そこから、主流方向に x 軸、ベース高さ方向に y 軸、スパン方向に z 軸とする。



第1図 実験模型及び圧力孔位置



第2図 模型支持方法(シュリーレン撮影時)

本研究では、ベース抵抗を低減させるため、2枚のタブをベース面中心に対して上下対称に取り付け、タブの長さ d と取り付け位置 y を変化させた。タブの長さは、 $d = 2, 3, 6, 10\text{ mm}$ で、ベース高さ $2r$ に対しては、それぞれ $d/2r = 0.07, 0.11, 0.23, 0.38$ となる。タブの厚みはすべて1mmである。また、タブの取り付け位置は、ベース面中心からベース端方向へ(模型上面側と下面側へ)変化させ、 $y/r = \pm 0.5, \pm 0.69, \pm 1$ の3ケースとした。なお、一様流マッハ数は、 $M = 0.6$ と 0.7 の2ケースとし、ベース高さに基づくレイノルズ数は、それぞれ、 $Re = 3.5 \times 10^5, 4.1 \times 10^5$ である。

実験内容は、1) シュリーレン法による流れ場の可視化と、2) 模型表面での定常/非定常圧力測定で、同じ形状で支持方法の異なる2つの模型を使用した。前者は、ストラット有りで、後者はストラット無しである。第2図にシュリーレン用模型とストラット支持方法を示す。前者の模型は、 $x/l = 0.21 \sim 0.54, z/s = 0.52 \sim 0.53$ と、 $x/l = 0.21 \sim 0.54, z/s = -0.52 \sim -0.53$ の2箇所でストラットにより支持されている。

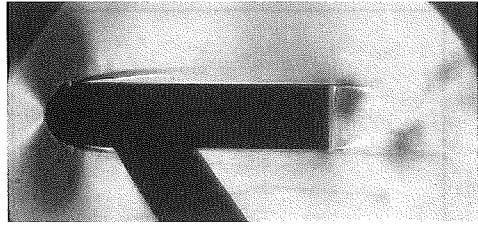
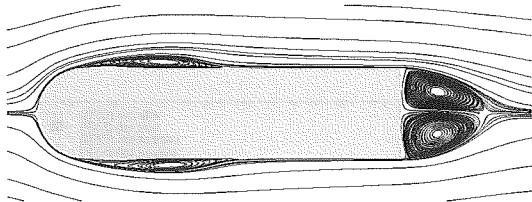
シュリーレン撮影では、光源としてハロゲンランプ(連続光)を使用し、デジタルビデオカメラにより、10,000フレーム/秒で撮影した。このフレーム速度では、後流に周期的に発生するカルマン渦を、1周期中約6フレーム撮影することができる。

また、圧力測定用模型は、風洞計測室の側面で両端支持されている。定常圧力測定は、風洞外に設置された圧力センサと模型表面に開けられた圧力孔をシリコンチューブで接続して行った。第1図に圧力孔の位置を示す。圧力孔は、半円断面の前縁部先端から物体上面方向に30度間隔で4点、物体上面 $x/l = 0.125$ から5mm間隔で16点、ベース面中心から上下対称に2.5mm間隔で9点設けた。圧力孔の位置は、前方の圧力孔の影響を受けないようにスパン方向に少しずつずらして $z/s = -0.26 \sim 0.26$ の範囲に設けた。定常圧力センサは2種類使用し、1つは、測定範囲が絶対圧で最大 5 kg/cm^2 (共和電業製PA-5KB)、もう1つは、ゲージ圧で最大 1 kg/cm^2 (共和電業製PGM-1KG)である。また、非定常圧力測定では、ベース表面に非定常圧力センサ(Kulite社製XCS-062-15-D; 测定範囲は差圧で15psi、固有振動数200kHz)を直接埋め込んだ。非定常圧力孔は、ベース面中心に1点設け、サンプリング周波数は50kHzである。

3. 計算方法

本研究ではタブによる流れ場の変化をより詳しく見るために数値計算も行った。

数値計算の支配方程式は圧縮性Navier-Stokes方程式で、有限体積法で離散化して解を求めた。時間積分にはDual Time Stepping法と、2次精度LU-SGS法を用いた。また、セル境界での解ベクトルを、van Albadaの流束制限関数を用いたMUSCL法により3次精度で求め、Roeの近似Riemann解法で非粘性流束を計算した。粘性流束は、2次

第3図 シュリーレン可視化結果 ($M = 0.6$)

第4図 時間平均場の流線 (計算)

の中心差分で求めた。

近年のベース流れの研究では、定量的な予測に対しては、RANS と LES のハイブリッド法¹⁰⁾が推奨されている。具体的には、RANS を用いて自由せん断層になる直前の境界層の厚さ及び速度分布を正確に予測し、LES を用いてベース背後の非定常流を解析するものである。しかし、本研究の流れでは、物体前方で剥離した流れが下流に移動するため、その境界層厚さ及び速度分布の予測が困難である。そのため、本研究では、乱流モデルを用いずに、少しでも細かい変動を考慮できるようにできるだけ多くの格子点を使用した層流計算を行った。

スパン方向の計算領域は長さ $4r$ とし、周期境界条件を用いて 3 次元計算を行った。総格子点数は約 503 万点である。

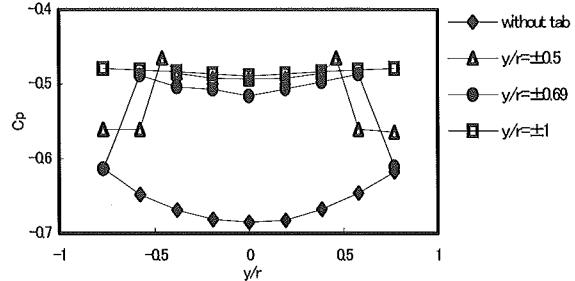
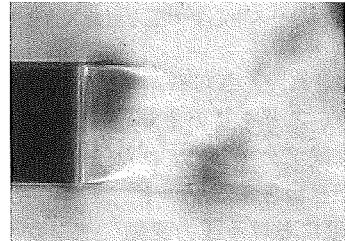
4. 結果と考察

4.1 鈍頭 2 次元物体の周りの流れ 第3図に $M = 0.6$ における鈍頭 2 次元物体周りのシュリーレン可視化結果を示す。流れは物体前方で剥離し、ベース付近では上面と下面からカルマン渦が交互に放出されている。ちなみに、カルマン渦の挙動はビデオで観察した。

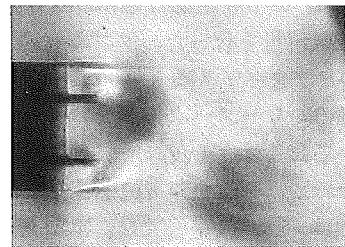
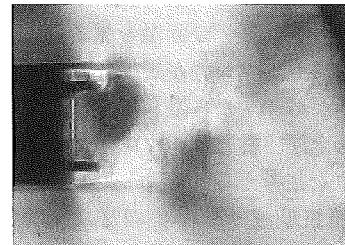
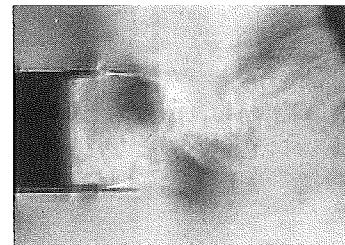
第4図に同じ条件下での計算結果を示す。時間平均した流れ場を流線で示している。実験では確認できていないが、計算結果では物体前方で剥離した流れは再付着する。また、ベース背後では、大きな 2 つの渦が形成される。

4.2 タブ位置の影響 タブによる効果はベース部付近の流れに大きく表れるので、以降、ベース流れについて見ていく。

$M = 0.6$ で、長さ $d/2r = 0.23$ のタブが有る場合と無い場合におけるベース圧力を比較する(第5図)。タブが無い場合は、圧力はベース中心に向かって減少する。一方、タブが有る場合は、どの位置に取り付けても、タブで挟まれた領域で圧力が大きく上昇する(C_p で約 0.2)。さらに、タブをベース中心から最も外側に取り付けた場合 ($y/r = \pm 1$) は、ベース面全体の圧力が上昇する。このタブ位置が、最

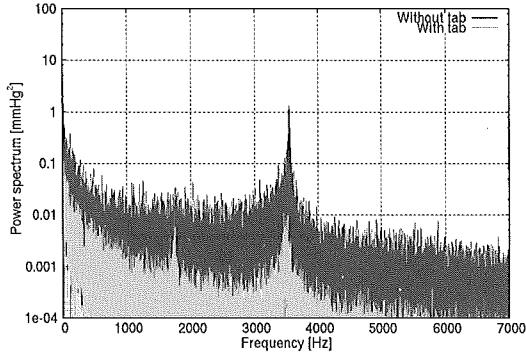
第5図 ベース面に沿う圧力分布 ($d/2r = 0.23$)

(a) Without tab

(b) With tab ($y/r = \pm 0.5$)(c) With tab ($y/r = \pm 0.69$)(d) With tab ($y/r = \pm 1$)第6図 シュリーレン可視化結果 ($d/2r = 0.23$)

も抵抗低減の効果があることが分かった。

第6図に、 $M = 0.6$ で、タブ位置を変化させた場合のシュリーレン可視化結果を示す。タブ無しの場合は、ベース近傍に渦が存在する。一方、タブを付けると、タブの先端付近で渦が発生するため、結果として、渦の位置が下流側へ移動している。また、どのタブ位置でも、同様の渦位



第7図 ベース中心での圧力変動スペクトル

置の移動が観察された。さらに、タブに挟まれた領域には、渦が流れ込まないことをビデオでも確認した。これらの結果から、渦の位置がタブで挟まれた領域の圧力上昇と関係していることが推察される。

4.3 ベース部における圧力変動 タブが有る場合と無い場合での、ベースの圧力変動を比較する。非定常圧力センサを用いて、 $M = 0.6$ におけるベース中心の圧力変動を計測し、周波数解析を行った。タブ有りの場合は、長さ $d/2r = 0.23$ のタブをベース端 ($y/r = \pm 1$) に付けた。第7図に圧力変動のパワースペクトルを示す。タブ有り・無しの両者において約3,500 Hzのピークが存在するが、タブ有りの場合はそのピーク値が非常に小さくなる。ちなみに、この変動周波数は、ベース中心では、上面と下面両方の渦の影響を受けるため、カルマン渦の周波数の2倍であると考えられる。

一方、シュリーレンビデオ画像を見ると、タブ無しの場合はベース付近にカルマン渦が周期的に回り込むが、タブ有りの場合は渦がベースから離れて存在している。以上のことから、タブを付けるとカルマン渦によるベースでの圧力変動が減少すると考えられる。

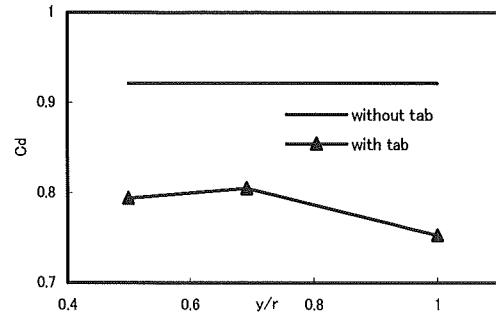
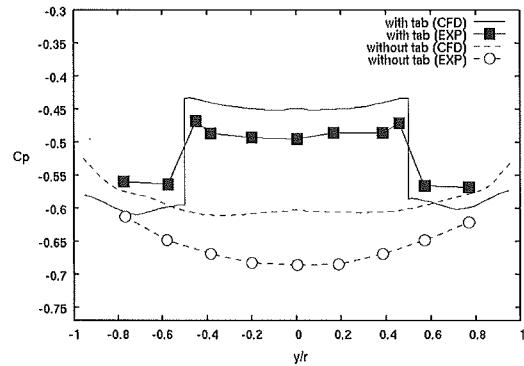
4.4 タブの抵抗低減効果 鈍頭2次元物体では、圧力抵抗が支配的なため、抵抗として圧力抵抗のみを考慮する。抵抗係数の定義は、

$$C_d = D / (0.5 \rho_\infty U_\infty^2 S)$$

であり、ここで、 D は抗力、 ρ_∞ は一様流密度、 U_∞ は一様流速度、 S はスパン方向を1とした基準面積 (=ベース高さ $2r \times 1$) である。また、抵抗を以下のように分解して考えた⁵⁾。

$$\begin{aligned} C_d^{\text{total}} &= C_d^{\text{forebody}} + C_d^{\text{base}} \\ C_d^{\text{forebody}} &= \frac{1}{2r} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} C_p \cos \theta r d\theta \\ C_d^{\text{base}} &= -\frac{1}{2r} \int_{-r}^r C_p dy \\ C_p &= (p - p_\infty) / (0.5 \rho_\infty U_\infty^2) \end{aligned}$$

ここで、 C_d^{total} は全抵抗係数、 C_d^{forebody} は先端部抵抗係数、 C_d^{base} はベース部抵抗係数であり、 θ は前縁からの角

第8図 抗力係数とタブ位置の関係 ($d/2r = 0.23$)第9図 ベース面に沿う圧力分布 ($d/2r = 0.23$)

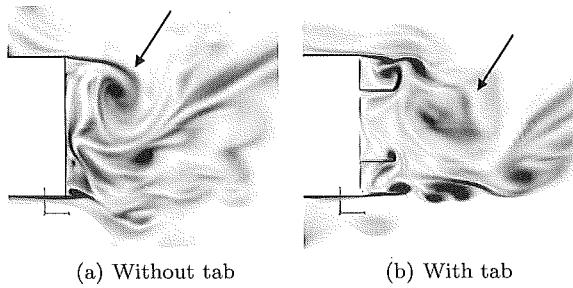
度である(第1図参照)。これらの抵抗係数は、圧力孔から得られた圧力を積分して求めた。

第8図に、 $M = 0.6$ で、タブ位置を変化させた場合の全体抵抗係数の変化を示す。どのタブ位置でも抵抗が大きく低減されている。タブによるベースでの圧力上昇量は、タブ位置によらずほとんど同じである(第5図)。そのため、抵抗低減で最大になるのは、圧力上昇領域が最も広い、タブ位置が $y/r = \pm 1$ の場合である。この場合、タブが無い場合に比べて全体抵抗は約18.3%、ベース抵抗としては約25.9%低減される。

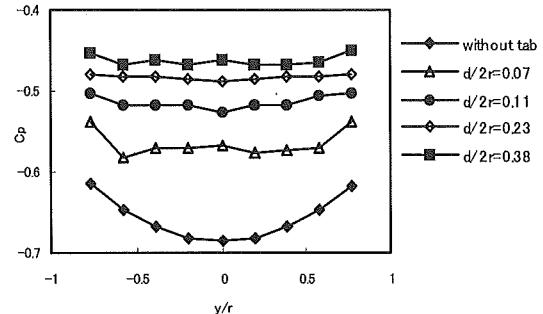
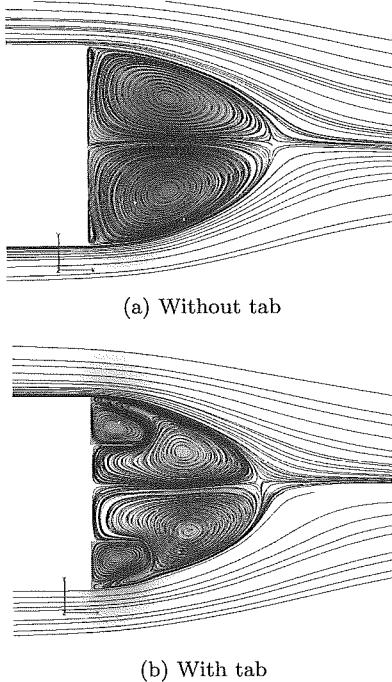
4.5 CFDによる流れ場の考察 第9図に、 $M = 0.6$ で、タブが有る場合と無い場合における、ベースでの時間平均圧力分布の実験結果と計算結果を比較して示す。タブが有る場合では、タブ長さを $d/2r = 0.23$ 、タブ位置を $y/r = \pm 0.5$ とした。計算結果は実験結果と定量的な一致は十分とは言えないが、圧力分布の傾向、つまり、タブが無い場合のベース中心部での圧力減少と、タブが有る場合のタブに挟まれた領域での圧力上昇の特徴を良く捕らえている。

また、第10図に瞬時の渦度絶対値分布を示す。第10図(a)のタブが無い場合は、渦が直接ベース部に接近する。一方、第10図(b)のタブが有る場合は、タブによって渦が下流側に押しやられ、タブに挟まれた領域に渦は侵入しない。このような渦の特徴はシュリーレンで観察された流れ場に類似している。

次に、タブ有り・無しの場合の圧力場について、渦と関連付けて考察する。ベース流れは非定常性が強いため、時



第10図 瞬時の渦度の絶対値分布

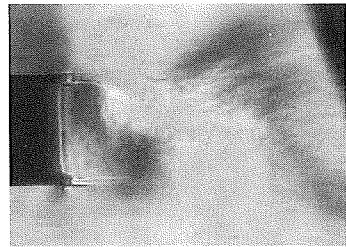
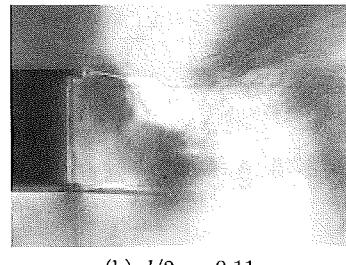
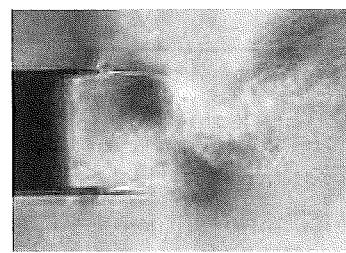
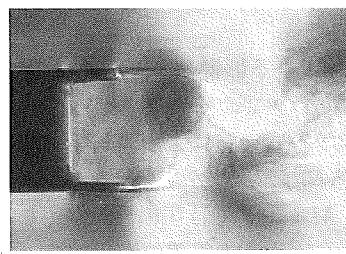
第12図 ベース面に沿う圧力分布 ($y/r = \pm 1$)

第11図 時間平均場の流線

間平均した流れ場を見ていく。第11図は時間平均流れ場の流線で、色は圧力の大きさに対応し、黒い所ほど圧力が低い。第11図(a)のタブ無しの場合、2つの強い渦が存在し、渦中心付近で圧力が低下する。また、その渦の影響でベース圧力も減少している。一方、第11図(b)のタブ有りの場合は、渦中心が下流側に移動する。その上、渦が弱く、渦中心での圧力低下も小さい。よって、タブに挟まれた領域ではタブが無い場合に比べ、渦による圧力低下の影響を受けにくい。さらに、タブは、流れをせき止める効果で、一層の圧力上昇に寄与している。

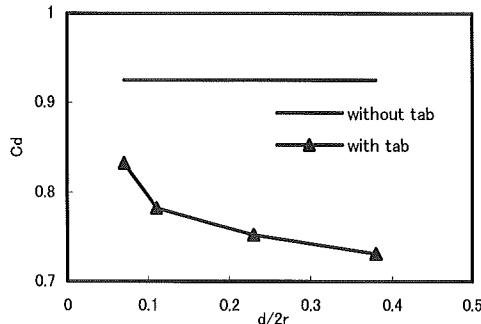
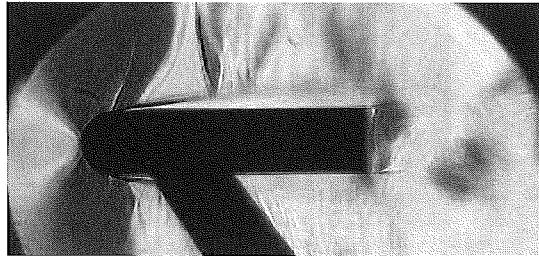
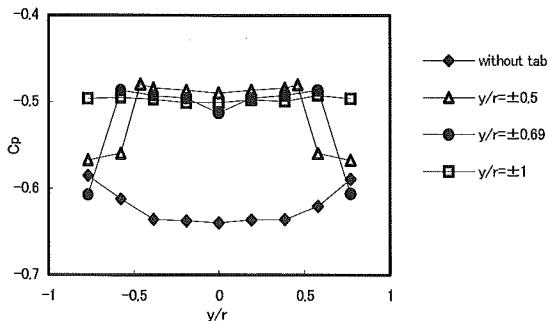
4.6 タブ長さの効果 ここでは、抵抗を最も低減できたタブ位置 $y/r = \pm 1$ において、タブ長さの効果を調べる。第12図にマッハ数 $M = 0.6$ で、タブ長さを $d = 2, 3, 6, 10\text{ mm}$ ($d/2r = 0.07, 0.11, 0.23, 0.38$) と変化させた場合の時間平均圧力分布を示す。タブが長くなるほどベース圧は増加している。つまりベース抵抗が減少する。タブが最も短い $d/2r = 0.07$ の場合でも、タブの効果は大きく、ベース中心で C_p が約 0.11 上昇する。

タブ位置が $y/r = \pm 1$ の場合、タブ長さを変化させたと

(a) $d/2r = 0.07$ (b) $d/2r = 0.11$ (c) $d/2r = 0.23$ (d) $d/2r = 0.38$ 第13図 シュリーレン可視化結果 ($y/r = \pm 1$)

きのシュリーレン可視化結果を第13図に示す。この図より、タブ長さ相当分だけ渦が後方へ移動していることが分かる。この渦の位置の変化が上述のベース圧上昇に寄与していると思われる。

第14図に、第13図と同じ条件での、タブ長さを変化さ

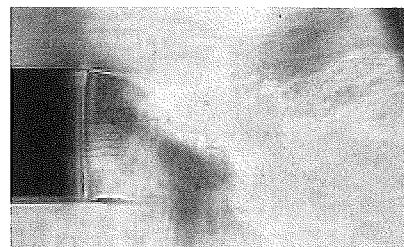
第14図 抗力係数とタブ位置の関係 ($y/r = \pm 1$)第15図 シュリーレン可視化結果 ($M = 0.7$)

第16図 ベース面に沿う圧力分布

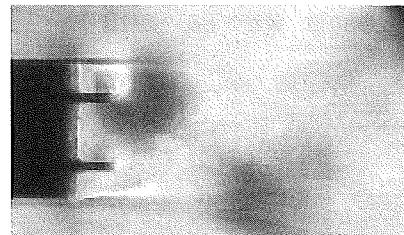
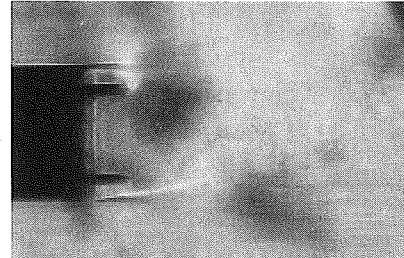
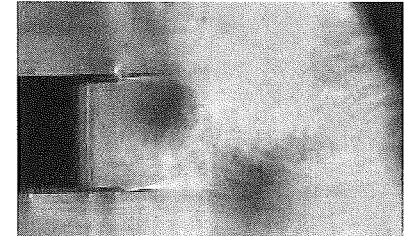
せたときの全体抵抗係数の変化を示す。タブが長くなると抵抗も減少し、タブ長さが最大の $d/2r = 0.38$ の場合、タブが無い場合に比べて全体抵抗は約 20.6%，ベース抵抗では約 29.2% 減少する。

4.7 マッハ数による影響 圧縮性の影響がより強く現れる $M = 0.7$ でのタブの効果を調べる。ベース流れを考察する前に、マッハ数変化による流れ場全体の変化について述べる。第 15 図は、タブが無い場合のシュリーレン可視化結果である。 $M = 0.7$ では圧縮性が強くなるため模型に衝撃波が発生し、渦からも衝撃波が生じる。また、造波抵抗も発生するため、全体抵抗は増加する。そのような状況で、タブの有効性を調べる。

第 16 図は、タブ長さを $d/2r = 0.23$ にして、タブ位置を $y/r = \pm 0.5, \pm 0.69, \pm 1$ のように変化させたときの時間平均圧力分布である。 $M = 0.6$ の場合(第 5 図)と比較すると、タブ無しの場合、ベース中心圧力は少し上昇するが定性的には同様の分布を示す。一方、タブを付けると、大きな圧力上昇が得られている。よって、圧縮性の影響が一



(a) Without tab

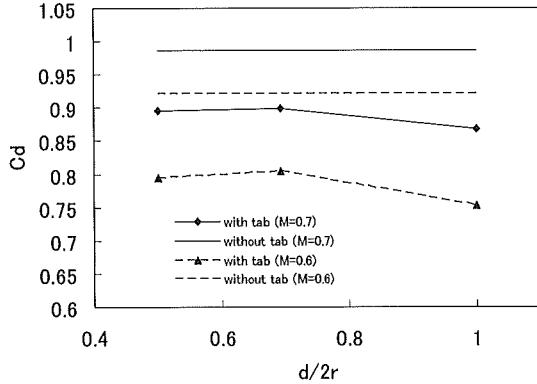
(b) With tab ($y/r = \pm 0.5$)(c) With tab ($y/r = \pm 0.69$)(d) With tab ($y/r = \pm 1$)第17図 シュリーレン可視化結果 ($d/2r = 0.23$)

層強くなる $M = 0.7$ の場合でも、本研究で提案したタブが有効であることが分かる。

第 17 図は $M = 0.7$ でのシュリーレン可視化結果で、タブを付けると、どの場合も渦の位置がタブ無しの場合に比べて、後方へ移動している。この現象は $M = 0.6$ の場合と基本的に同じで、 $M = 0.7$ でも同様のメカニズムでベース圧力が上昇していると思われる。

第 18 図に、 $M = 0.7$ で、タブ位置を $y/r = \pm 0.5, \pm 0.69, \pm 1$ に変えた場合の、マッハ数と抵抗係数の関係を示す。圧縮性や造波抵抗の影響で、マッハ数が増加すると、どのタブ位置でも抵抗は増加する。さらに、タブ位置変化によるタブ効果は、 $M = 0.6$ と同様な傾向を示し、タブ位置が $y/r = \pm 1$ のとき抵抗が最小になる。

以上のことから、圧縮性効果がより強くなる $M = 0.7$ でも、 $M = 0.6$ の場合と同様に、本研究で提案したタブを用



第18図 マッハ数と抗力係数の関係

いることにより抵抗は低減されることが分かった。

5. ま と め

本研究では、宇宙往還機を想定した、簡単化された形状の鈍頭 2 次元物体において、ベース抵抗を低減させるため、ベースに 2 枚のタブ（矩形板）を取り付ける方法を提案し、その効果を調べた。得られた結果をまとめると以下のようになる。

1) 本研究で提案したタブを用いることにより遷音速域における鈍頭 2 次元物体のベース抵抗を低減できる。本研究では 2 次元物体を取り扱ったが、近年提案されている宇宙往還機のベース流れは局所的に 2 次元的であると見なされるため、実機への応用も可能である。

2) タブの位置と長さの影響を調べ、ベース抵抗が最小となるタブ位置は、タブをベース部外縁に付けたときである。また、タブが長いほど抵抗低減効果も大きくなる。マッハ数が $M = 0.6$ 、無次元タブ長さ 0.38 のとき、ベース抵抗は約 29.2% 低減され、これは全体抵抗で考えれば約 20.6% の低減に相当する。

3) 本手法では、タブが短くても抵抗低減が可能である。具体的には、 $M = 0.6$ で無次元長さ 0.07 のタブをベース部外縁に付けたとき、全抵抗は約 10.0% 低減される。つまり、機体ベース形状の少しの修正で抵抗低減ができ、実用

性が高い。

- 4) マッハ数 $M = 0.6$ のみならず、より圧縮性の効果が強く現れる $M = 0.7$ でも同様な抵抗低減の効果がある。
- 5) タブを付けると渦の発生位置が下流に移動する。また、計算結果から、渦が下流側に移動すると圧力場が変化し、ベース圧が上昇することが明らかになった。このことから、カルマン渦が発生するようなベース流れにおいて、渦とベースの距離がベース抵抗を決定する 1 つの大事な要因であると考えられる。このとき、タブにより流れがせき止められ、圧力が上昇する効果も上乗せされる。

参 考 文 献

- 1) Viswanath, P. R.: Flow Management Techniques for Base and Afterbody Drag Reduction, *Prog. Aerospace Sci.*, **32** (1996), pp. 79–129.
- 2) Tanner, M.: Reduction of Base Drag, *Prog. Aerospace Sci.*, **16** (1975), pp. 369–384.
- 3) McCallen, R. C., Salari, K., Ortega, J. M., DeChant, L. J., Hassan, B., Roy, C. J., Pointer, W. D., Browand, F., Hammache, M., Hsu, T.-Y., Leonard, A., Rubel, A., Chatalain, P., Englar, R., Ross, J., Satran, D., Heineck, J. T., Walker, S., Yaste, D. and Sorms, B.: DOE's Effort to Reduce Truck Aerodynamic Drag—Joint Experiments and Computations Lead to Smart Design, *AIAA Paper 2004-2249*, 2004.
- 4) Saltzman, E. J., Wang, K. C. and Iliff, K. W.: Flight-Determined Subsonic Lift and Drag Characteristics of Seven Lifting-Body and Wing-Body Reentry Vehicle Configurations with Truncated Bases, *AIAA Paper 99-0383*, 1999.
- 5) Whitmore, S. A., Sprague, S. and Naughton, J. W.: Wind-Tunnel Investigations of Blunt-Body Drag Reduction Using Forebody Surface Roughness, *AIAA Paper 2001-0252*, 2001.
- 6) Layukallo, T., Hayashi, D. and Nakamura, Y.: Passive Separation Control on a Body at Transonic Speed, *Trans. Jpn. Soc. Aeronaut. Space Sci.*, **44** (2002), pp. 229–237.
- 7) 小林貴広, 中村佳朗: 遷音速域における円柱の tab による抗力・振動減少、流体熱工学研究, **40** (2005), pp. 23–30.
- 8) Layukallo, T. and Nakamura, Y.: Passive Separation Control on a Square Cylinder at Transonic Speed, *Trans. Jpn. Soc. Aeronaut. Space Sci.*, **45** (2003), pp. 236–242.
- 9) Layukallo, T. and Nakamura, Y.: Flow Stabilization in a Transonic Wind Tunnel with a Second Throat, *J. Aircraft*, **37** (2000), pp. 1033–1037.
- 10) Kawai, S. and Fujii, K.: Computational Study of Supersonic Base Flow Using Hybrid Turbulence Methodology, *AIAA J.*, **43** (2005), pp. 1265–1275.