

流 れ の シ ミ ュ レ ー シ ョ ン

桑 原 邦 郎

宇 宙 科 学 研 究 所

ろい式で、いろいろい
 り返し高信頼性のよ
 の信ズられた現と
 線りたるえらっ
 偏単一のイ
 形はコンレ
 線法ここ高
 非解・こ高
 る一求め、よ
 によ一特に、よ
 紹介なる近。計
 シを系にため、算
 値例渦きのた
 直接いは続こ
 の解あいう。は
 のをある。は
 式流法と。は
 程差分の。は
 方差化の。は
 すぎの最適的
 ク過のト最
 一を程ベの
 ト物体方す
 ・ス物体方
 形状の流多
 ナビエ・ス
 った新し

Flow Simulation

Kunio KUWAHARA

The Institute of Space and Astronautical Science
 Komaba, Meguro-ku Tokyo 153, JAPAN

(英訳住所)

Recent development of supercomputers has enabled to compute flow fields at high Reynolds numbers. In this paper, we study various unsteady flows past a two- and three-dimensional body by direct computation of the Navier-Stokes equations. The mechanism of unsteady boundary layer separation, shock wave formation and vortex interactions in the wake has become clearer by analysing the computed flow patterns. Computational fluid dynamics has come to the stage where it can predict phenomena which can not be or are very difficult to be observed by experiments.

1. はじめに

流体力学は主として実験的に流れを調べていく方向と理論的に調べていく方向とに分かれていた。理論的な研究はほとんど応用数学といった方がいいようなものが多く、工学的な研究者からは敬遠されてきた。したがって流体力学の工学的な研究は主として風洞や水槽をもちいた実験的なものが多かった。しかし計算機の発達によって実験でも理論でもない第3の研究方法である計算流体力学という新しい分野が拓けてきた。

流れを支配する基礎方程式はナビエ・ストークス方程式と呼ばれる偏微分方程式である。この方程式は多くの数物理学の方程式と違って非線形性という特別な性質を持っている。非線形性とは、単純な解を重ね合わせていくことによって複雑な解を構成していくことができないということの意味している。それゆえ、この方程式を解析的に解いて複雑な物体のまわりの流れを求めることは、絶望的である。ただし、支配方程式は確立しているのでなんらかの方法で解くことができれば、流れをもとめることが可能になる。そこで、解析的ではなくその解を数値的に求めるということは、かなり昔から、電子計算機の出現以前から試みられてきた。計算機が未発達であったころは役に立つような計算はほとんど不可能であったが、計算機と計算手法の進歩によって次第に求められる解の範囲が広がってきた。特にスーパー・コンピュータの出現によってその実用性が飛躍的に高まり、乱流のような複雑な流体運動まで基本方程式から特別な仮定なしに解けるようになってきた。また、単に実験的にわかっていた事実が計算でもとらえられるようになってきたばかりでなく、今までメカニズムのよくわからなかった現象が説明されるようになってきた。

2. スーパー・コンピュータ

ここでどうしてもスーパー・コンピュータというものに触れなければならない。スーパー・コンピュータとは現時点での最高速度の汎用計算機に比べて一桁以上優れた計算能力をもった計算機といわれる。ただしこのような高速度はどんな計算

に対してでも発揮されるというのではなく科学技術計算によくあらわれる単純な繰り返し計算にたいしてのみ有効である。このスーパー・コンピュータの高速度をうまく引き出すためにはベクトル化という手続きが必要である。流体計算はナビエ・ストークス方程式という確立された方程式の解をなるべく正確に解くということに帰着されるので、計算量は非常に多くなってしまいが、計算そのものは単純な繰り返しになる。したがってベクトル化が非常に容易でスーパー・コンピュータが利用できると、計算速度は、基になっている汎用機に比べて20-50倍程度加速される。スーパー・コンピュータのコストは汎用機のせいぜい2倍程度であるから、計算のコスト・パフォーマンスが飛躍的に上がり、実用的な問題に対しても有効な解を与えられるようになってきたのである。

流体計算に限らずスーパー・コンピュータを有効に生かしてシミュレーションをするときには汎用計算機で行なって来たのとは異なった行き方がより有効である。すなわち、原理に忠実なほど計算すべき量は増えるが、することは単純になりベクトル化が容易でスーパー・コンピュータの機能がよりよく発揮されかえって能率的になる。このときの結果の信頼性も高い。これに反して計算量を減らそうと人為的なモデルを入れると条件判断文がふえ、プログラムは複雑化し、ベクトル化がしにくくなりスーパー・コンピュータの高速度がいかされないことが多い。当然、結果の信頼性も下がってしまう。

3. 数値シミュレーションの方法

流れを数値的にシミュレートする時には差分法がよく用いられる。差分法は空間を規則正しい格子で切り、各格子点で速度や圧力という必要な物理量を考え、もとの偏微分方程式からその物理量の間関係式を導き、計算機によって各格子点での値を求めるというものである。有限要素法というかたちの差分法によく似てはいるが別の計算方法もある。格子の切り方が差分法よりはるかに自由にでき、複雑形状を取り扱いやすいが、計算の効率という面でおとる。特にスーパー・コンピュー

夕用にベクトル化することがむずかしく、今のところ大規模で精密な計算には向いていないようである。

差分法で取り得る格子点の総数は記憶容量と実用的な計算時間の制約から計算機ごとにほとんど決まってしまう。最新の大型計算機による3次元計算で $50 * 40 * 30 = 60000$ 点程度で、スーパー・コンピュータでは $300 * 200 * 100 = 6000000$ 点程度が最大であろう。

現実の物体の回りの流れを求めるには通常の直交座標系を用いるというわけにはいかず、ひとつの座標線が物体表面に沿うような座標系（これを一般座標系とよぶ）で考える必要がある。一般座標系を用いるということは高レイノルズ数流れで最も重要な境界層を十分解像するためばかりでなくベクトル化にとっても本質的である。上で述べたようにスーパー・コンピュータが一番有効に働くのは、規則正しい単純な繰り返し計算に対してである。IF文とよばれる条件文も、単純なものはベクトル化できることになってはいるが、あまり高速化はできず、ないほうがいい。現実の物体の回りの流れを求めるとき、普通のデカルト座標や極座標で差分式を作ろうとすると、物体境界の取り扱いが非常に複雑になってしまいベクトル化がむずかしい。これに対して、一般座標系で考えると、実際の計算は変換された方程式を長方形のなかで解くということになるので、規則正しい繰り返し計算になってベクトル化が大変うまくいく。

このことは保存法則に基づいた総ての偏微分方程式についていえることである。一般座標系をもちいて差分計算を行なうということは流体力学ではじめて実用化され、まだそれ以外の分野ではあまり使われていないようであるが、流体以外の数理物理学の基本方程式も保存法則に基づいて導かれていることが普通であるので、もっと幅広く使われてしかるべきであろう。

流体力学の方程式を考えるとレイノルズ数というパラメーターが非常に大切である。レイノルズ数は流れのなかでの粘性による拡散の強さの目安を与えている。レイノルズ数100程度以下の流れは拡散が強く流れは層流とよばれる滑らかなものであるが、それが10000以上にもなると

流れはその拡散が小さくなり、乱流と呼ばれる複雑なものになるのが普通である。日常経験する多くの流れはレイノルズ数10万程度以上のものが当たり前であってこのような大きなレイノルズ数の流れをいかに取り扱うかが大変重要である。もうひとつ重要なパラメーターにマッハ数と呼ばれる、流れの速さと音速との比がある。マッハ数が1近く、すなわち流速が音速に近づくと衝撃波があらわれ流体の圧縮性ということが重要になるが、1よりずっと小さいと圧縮性は普通考えなくてよい。

4. ラージ・エディ・シミュレーション

最近まで乱流の計算はむずかしいとされてきた。それは、乱流になるような高いレイノルズ数の流れでは拡散が小さく数値的に解を求めようとしても、いったん入り込んだ誤差がいつまでも残ってしまい、遂に解が爆発してしまうからである。したがって乱流の計算はいいかげんなものが多かったのだが、その中で比較的真正面から取り扱う方法にラージ・エディ・シミュレーション (LES) と呼ばれる計算法がある。特に有名なものにMoin & Kimによる平行な平板の間の高いレイノルズ数の非圧縮性流れを解いたものがある [1]。まず空間を格子に分割する。この分割の仕方が計算機的能力によってほとんどきまってしまう。この問題を最初に試みた Deardorff は CDC 6600 で $25 * 15 * 20$ という格子を用いたのに対して [2]、Moin & Kim は $128 * 64 * 64$ という格子をとることができた。いくら格子を細かくしても高いレイノルズ数の乱流ではその格子で解像しきれない小さな渦があるはずで、その格子以下の効果は粘性率が大きくなったというモデル化によって取り入れている。このモデル化に基づいた乱流の計算がLESである。境界条件は壁の上では通常の粘着条件であるが他の二方向は周期条件を用いている。この条件をうまく使うために壁に垂直な方向は普通の差分法、それに平行な二方向はフーリエ変換をもちいたスペクトラル法を採用している。計算時間は、ILLIAC M という初期のスーパー・コンピュータを用いて一例あたり基本計算に40時間、データ処理に40時間、

合計80時間を要している。その結果は大変優れたものであって、部分的にはすでに実験の精度を超えているといえるくらいである。バーストやスイープとよばれている乱流特有の大規模構造がみごとに捉えられた。

5. 乱流の直接シミュレーション

LESは差分格子では捉えられない細かな変動による効果を局所的に粘性率が大きくなったという形でモデル化している。こうするとレイノルズ数の高い流れでは分子粘性の効果が覆い隠されてしまって、流れのレイノルズ数による違いを求めることが大変難しくなる。また流れがはじめから乱流であると仮定しているので層流から乱流へまた乱流から層流への遷移をシミュレートできない。これを解決するには乱流拡散を粘性拡散で近似するというをやめなければならない。そのひとつの試みとして特別なモデルを使わずにナビエ・ストークス方程式を直接数値的に積分しようという方法がある。この場合、難しい問題が生じる。すなわち現在の計算機では乱流状態にあるすべての細かな変動を捉えられるほど格子点を取れないということである。しかし次のように考えることもできる。

乱流において重要なのは格子より小さなスケールのことではなく大きな構造であろうと考えて格子以下の効果をモデル化せず無視してしまう。こうすると拡散効果が小さくなり解の滑らかさが失われて計算が大変むずかしくなる。その難しさは流体が流れていくということを表現している移流項ないしは非線形項と呼ばれる項に起因している。その中で精度にこだわらなければ、どんなに、高いレイノルズ数の流れでも解が求まる方法に上流差分という考えがある。それは、Navier-Stokes方程式の中の非線形項を差分化するとき、流れの情報は主に上流側からくるという考えに基づいている。この上流差分は、中心差分に人工拡散項を付加したものとみなすことができる。しかしこの拡散項は粘性による拡散項と同じ形であるので、高いレイノルズ数の流れを計算しようとしても物理的な粘性拡散による効果を覆い隠してしまい、計算の信頼性はあまりなくなってしまう。

最近、この弱点を取り除くために高精度の上流差分法が使われるようになってきた[3]。それは精度を上げるために差分化に必要な格子点数を増やし2階の上流差分を考える。このとき誤差の主要項は3階微分で表現される波動型になってしまい望ましくない。しかし係数を調整することによって差分化に必要な格子点のかずを増やすことなしに精度をあげることができ、この誤差項を取り除くことができる。このスキームを用いて表面荒さのある円柱回りの $Re=40000$ 程度までの流れを計算して、はじめて数値的に抵抗係数が急に低下する臨界レイノルズ数をとらえることができた。レイノルズ数20万および40万で、 1000×100 という格子を用いてこの状態をとらえた最新の結果を図1に示す。臨界レイノルズ数前後の流れの本質的な違いをとらえている。

このスキームで重要なことは、4階微分で表わされる拡散的な数値誤差があり、それより低次の誤差は正しく打ち消されているということである。この拡散項が格子間隔以下の変化をならし、かつ2階微分の粘性拡散項より遠くへの影響がないので、レイノルズ数の高い場合をシミュレートしても解が拡散的になりすぎることはない。

もともと保存型に書かれたNavier-Stokes方程式は、どんなに粗い格子を用いても従属変数が局所的な平均値を表わしていると考えれば、拡散項を除いて考える限り正しいものであり、高レイノルズ数の流れの性質は物体境界付近を除くとあまりレイノルズ数によらないということを考えると、特別な乱流モデルなしに乱流がシミュレートできるということは当然であったと思われる。

この考えに基づいて平行平板間の乱流をシミュレートしたものが図2である。比較的粗い格子でも十分この流れの特徴を捉えることができ、フーリエ法に基づいたLESの計算結果と同等の結果をはるかに簡単に得ることができた[4]。この計算はスーパー・コンピュータS810/20で35分であり、ほとんどMoin & Kimの結果と同等のものが得られた。その上特別な乱流モデルを用いていない、すなわち始めから流れが乱流状態にあるということを仮定していないので、層流から乱流への遷移もシミュレートできた。

図3は大計算の例として球を過ぎる流れの計算結果である。格子点数は3百万点、スーパー・コ

ンピュータVP200で200時間近くを要した。球表面上の圧力分布を可視化している。球の前ではほとんど層流であった流れが剝離してリング状の渦を放出しそれが乱れて乱流に遷移していく様子が読み取れる。このように実験でもほとんど観測できないような微細構造が計算によって容易に見ることができるようになった。

結局、一見きわめて難しそうにみえる乱流の計算は、乱流であるがゆえにかえって易しかったということである。すなわち、乱流現象特有の大きな拡散があるので計算をやりやすくするために避けられない人工拡散の効果をうまく隠してくれるのである。もちろんこの人工拡散は乱流拡散を覆い隠すようなことのない、影響する範囲が局所的であるものでなければならない。

6. 圧縮性流れのシミュレーション

計算流体力学で現在非常に注目されているものには、上のような非圧縮性流れの計算ともう一つ遷音速流とよばれる音速に近い速さの流れの計算がある。一番よく用いられてきた解法はBeam-Warming-Steger (BWS) 法と呼ばれているものである。これは陰解法であって各時間ステップを進めるのに行列の反転が必要になる。BWS法ではこの行列をブロック三重対角行列の積のかたちに近似して解く。このBWS法では、計算の安定化のために4階の拡散項を陽に加えていることに注意したい。この項が格子以下の変動をうまく抑え高いレイノルズ数の流れを求めることを可能にしていると思われる。ただし、通常のBWS法では4階の拡散項以外に安定性をよくするために2階の拡散項を陰解法の部分に加えている。これは非定常問題の時には粘性拡散を大きくしたと同様の効果を持つてしまうので注意が必要である。このBWS法を2階の拡散項は加えないようにして用いて円柱を過ぎる流れを求めた[5]。また、もともとのBWS法では3点の中心差分を用いているので2次のオーダーの誤差が波動型で入ってきてしまい、格子の細かなところでは3次のオーダーで入っている4階の拡散項ではこの誤差を抑えきれなくなってしまう。そこで、差分化を3点でなく5点にして精度を上げることが望ましい。このようにして精度を上げている。Mach数 $M=0$

.98 の計算例と対応する実験の写真を図4に示す[6]。後流の中から強い衝撃波がたっている様子がシミュレートされているのがわかる。ここでも特別な乱流モデルなしに実験とよく一致する流れのパターンが得られた。

陰解法の部分を、上流差分の考えに基づいて改良して取り扱う行列をブロック3重対角型から2重対角型にして能率を上げたLUADI法による翼まわりの遷音速流れを解いた[7]。レイノルズ数 $R=1.0E5 \sim 6.7E6$ で求めた結果を図5に示す。翼型はNACA0012、迎角 $\alpha=2^\circ$ 、 $M=0.75$ である。 $R=1.0E5$ 、 $5.0E5$ では、流れは大きく非定常的に剝離をおこし、はっきりとした衝撃波は見られない。 $R=1.0E6$ になると乱流境界層が薄くなり剝離も小さくなり、 $R=3.0E6$ 、 $6.7E6$ では強い衝撃波が観察される。流れ場のレイノルズ数による定性的な変化がはっきりと捉えられている。 $R=6.7E6$ の結果の時間平均した圧力分布をを図6aに示す。実験との一致は十分とはいえないが翼後端付近での一致は流れの非定常性を考えると満足すべきものと思われる。衝撃波前後の実験値との不一致は流れの三次元性にあると思われるので三次元計算を行なった[8] (図6b)。実験との一致ははるかに改善された。格子点数は $300 \times 70 \times 70 \approx 150$ 万点で計算時間はVP200で10時間を要した。同じ方法で計算した大きく剝離をおこした流れ場の様子を図7に示す。

上の方法では、陰解法の部分の精度がもとのままであるので強い非定常問題では十分精度がでるという保証がない。陰解法の部分まで陽解法の部分とコンシステントになるようにすれば、より精度が上がり安定性も増すはずである。ただこの時には、反転すべき行列はBWS法のブロック3重対角型やLUADI法の2重対角型ではなく、ブロック5重対角型になってしまう。したがって、現時点で上で述べてきた考え方に最も忠実なスキームは「5重対角行列反転法」とでもいうべきものになってしまう。この方法を強い非定常性のある2次元の、ヘリコプターの翼のような大きく振動する翼まわりの計算をおこない剝離が翼先端からおこるのではなく翼面全体に小さな多数の渦が発生して一気に剝離がおこるといった現象が初めて解

明された [9] (図8)。

7. もうひとつの方向 — — 渦糸近似法

これまで述べて来た差分法は、正面からナビエ・ストークス方程式に取り組む正攻法であるが、相手が連立の非線形偏微分方程式であるから、スーパー・コンピューターをもってしても、記憶容量や計算時間などの点を考えると詳細な計算はなかなか容易ではない。しかし特に、縮まない流体の高レイノルズ数の流れに問題を限れば、はるかに能率よく乱流の本質をとらえてシミュレートできる計算法がある。

このような流れでは粘性の影響はきわめて狭い領域あるいは薄い層だけに局限されていて、その他の大部分の領域では流れは渦なしで粘性を無視できるという場合が多い。また渦はそのような粘性のきく領域でしか発生せず、しかもいったん発生した渦はなかなか消えないという性質がある。この事実を基礎にして、渦度をもつ領域を多数の渦糸の集団でおきかえ、渦糸間の運動学的な相互作用でおこる渦糸の運動を追跡することによって流れを調べようというのが、渦糸近似法である。この近似法は形式的にはレイノルズ数が無限大の極限の流れを扱うことになる。このモデル化によって導かれる基礎方程式が常微分方程式であるということと、2次元の場合には複素関数論がそのまま適用できることが、この方法を扱いやすくしかも数値計算に適したものにしている。

常微分方程式といっても解析的に解くことは一般には不可能であるから、数値積分に頼らざるを得ない。しかし、完全流体のオイラー方程式や粘性流体のナビエ・ストークス方程式が偏微分方程式であるのに対して、渦糸系の運動方程式は、はるかに容易に数値解を求めることができる。またベクトル化も簡単である。計算例として、この渦糸近似法によって平板を過ぎる流れを求め実験と比べた結果を図9に示す [10]。実験との一致は驚くほどであり、このような簡単なモデルのなかに乱流の本質を捉える鍵があるようである。この例から容易にわかるように渦糸近似法では乱流部分と層流部分の境界がはっきりしているという高いレイノルズ数流れの際だった特徴を非常に

よくとらえることができる。

渦糸近似法はもともと非粘性の仮定に基づいているので粘性の影響が本質的である境界層の剝離のような現象の解析には非力であるが渦運動の支配的な後流においては有力な方法である。

この渦糸近似法の三次元版はモデル化が難しくなかなか実用的な流れが求まらなかったが、最近非常に有力な方法が見いだされた [11]。まず過度の支配的な領域を多数の小領域に分割する。各小領域の代表点の位置と過度を時間を追ってもとめていく。この代表点は流れによって動くはずであるから、その運動方程式は2次元の場合と同様にして求まる。この三次元版は渦糸近似法と呼ぶのはあまり適切ではないので、離散渦法という名前が使われるようになってきた。

この三次元離散渦法による、パラシュートのモデルであるお椀型物体を過ぎる流れを図10に示した。パラシュートに透過性がない場合と50パーセントの透過率がある場合である。透過性をつけるとパラシュートが安定になることはよく知られているが、この計算結果を見ればなぜそうなるかは明らかである。

8. 結論

差分法では、そのスキームから2階微分型の数値拡散項や3階微分で表現される波動型の誤差項は取り除かれていることが望ましい。これに反して4階微分で表現される数値拡散項は粘性効果を覆い隠すことが少なく計算を安定化させる効果をもっていて、高いレイノルズ数の計算には必要不可欠と思われる。

渦糸近似法あるいは離散渦法は、渦運動が支配的な後流のシミュレーションには非常に適している。

流体運動のようにその現象を支配している方程式が確立されているときには、その方程式をできるだけ正確に解いていけば、実験に頼らずに物理現象の理解が可能になるはずである。同じような結果を得るのにどちらの方がコスト・パフォーマンスが良いかということになってしまう。これは問題ごとにことなるわけであるが、スーパー・コンピューターの出現によって、計算の方が有利な

問題がどんどんふえていくということが言える。また計算でなければ得られないような結果がどんどん始めている。

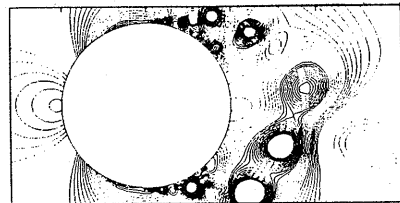
計算機と計算手法および計算結果の処理システムの発達により、単に実験で分かっていたことを計算してみる、あるいは実験より安上がりだから計算するというより、計算によってしか調べることができないような現象がいろいろ見つかりはじめて、流体力学の革命が起こりつつあると聞いていいと思われる。グラフィック・システムを用いた計算結果の可視化によって、実験による可視化とは異なった、さなざまな見方ができるようになってきた。計算流体力学は理論でも実験でもない新しいひとつの分野を確立したと言っていいだろう。今後のスーパー・コンピュータの発達によって、今まで未知であった世界がどんどん解明されていき、流体现象の工学的な応用に強力な武器となるとと思われる。

参考文献

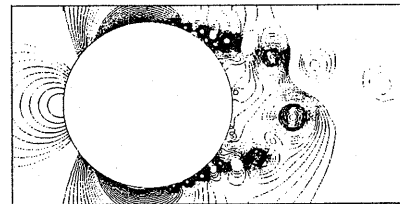
- 1) P.Moin and J.Kim : Numerical investigation of turbulent channel flow, J.Fluid Mech., vol.118 (1982) pp.341-377
- 2) J.W.Deardorff : A numerical study of three-dimensional turbulent channel flow at large Reynolds numbers, J.Fluid Mech., vol.41 (1970) pp.453-480
- 3) T.Kawamura and K.Kuwahara : Computation of high Reynolds number flow around a circular cylinder with surface roughness, AIAA paper 84-0340 (1984)
- 4) T.Kawamura and K.Kuwahara : Direct simulation of a turbulent inner flow by finite-difference method. AIAA paper 85-0376 (1985).
- 5) K.Ishii and K.Kuwahara : Computation of compressible flow around a circular cylinder, AIAA paper 84-1631 (1984)
- 6) A.Dyment, P.Grayson and C.Ducruet : Euromech Colloq., no.135 (1980) Marseilles, France. (see M.Van Dyke "An Album of Fluid Motion", the Parabolic press,

1982)

- 7) S.Obayashi and K.Kuwahara : Computation of Unsteady Shock-Induced Vortex Separation, AIAA paper 85-0183 (1985)
- 8) S.Obayashi and K.Kuwahara : Navier-Stokes Simulation of Side Wall Effect of Two-Dimensional Transonic Wind Tunnel AIAA paper 87-0037 (1987)
- 9) Y.Shida, K.Kuwahara, K.Ono and W.J.Chyu : Computation of Dynamic Stall of NACA0012 by Block Pentadiagonal Matrix Scheme AIAA paper 86-0116 (1986)
- 10) O.Inoue : A New Approach to Flow Problems past a Porous Plate, AIAA J. vol.23 1916-1921 (1985).
- 11) S.Shirayama and K.Kuwahara : Vortex Method in Three-Dimensional Flow. Proc. 9th ICNMF, Springer-Verlag (1984).



(a) レイノルス数 20 万



(b) レイノルス数 40 万

図1 円柱を過ぎる流れ、圧力の等高線

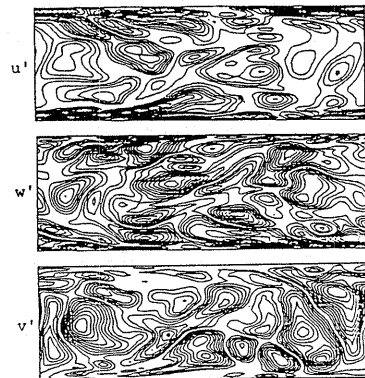


図2 平行平板間の乱流、速度変動の等高線

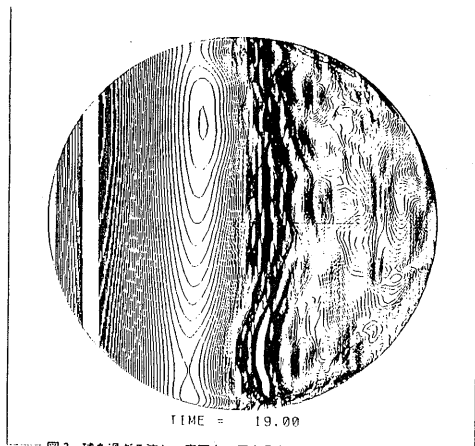


図3 球を過ぎる流れ、表面上の圧力分布

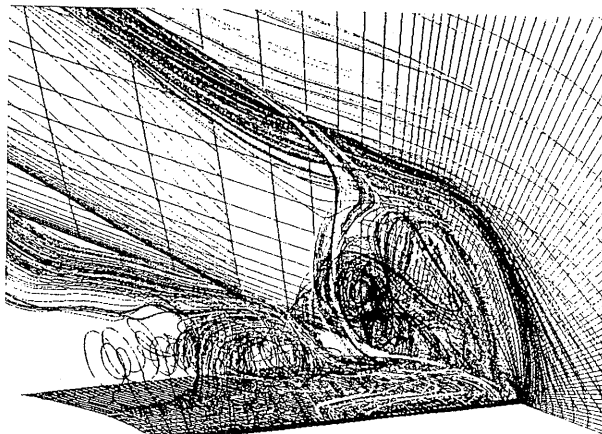
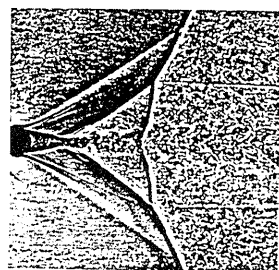
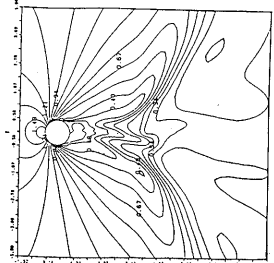


図7 翼と風洞壁の干渉、射離流線

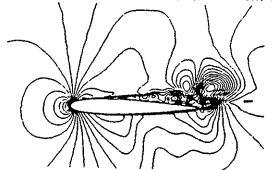


(a) 実験、シャドウグラフ

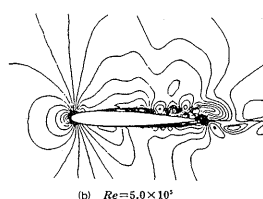


(b) 計算、密度の等高線

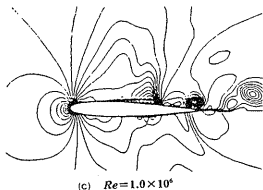
図4 円柱を過ぎる遷音速流れ、マッハ数0.98



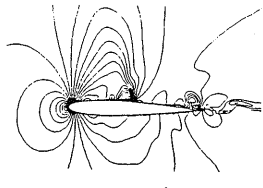
(a) $Re=1.0 \times 10^6$



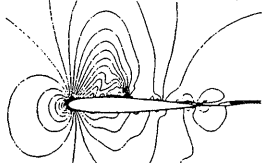
(b) $Re=5.0 \times 10^6$



(c) $Re=1.0 \times 10^7$



(d) $Re=3.0 \times 10^7$



(e) $Re=6.7 \times 10^7$

図5 翼型を過ぎる遷音速流れ

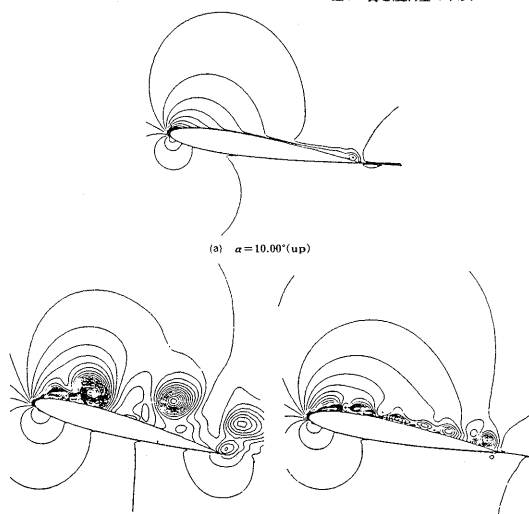


図8 回転翼回りの流れ



図9 平板を過ぎる流れ

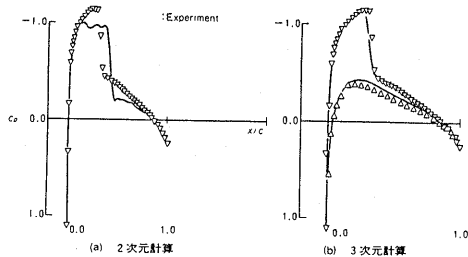


図6 翼面上の圧力分布

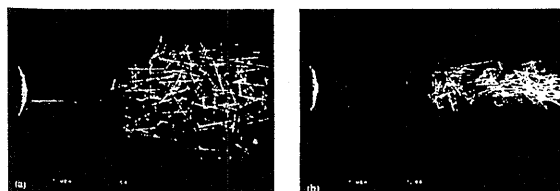


図10 3次元離散渦法によるパラシュートを過ぎる流れ