

計算流体力学における流れの可視化

白 山 晋* 桑 原 邦 郎**

Flow Visualization in Computational Fluid Dynamics

by

Susumu SHIRAYAMA

Department of Aeronautics, The University of Tokyo

Kunio KUWAHARA

The Institute of Space and Astronautical Science

ABSTRACT

To better understand the structure of a computed flow field, a visualization system for computational fluid dynamics was developed for color graphic systems. As the quantity of computational results is increasing and both time and spatial scale resolution is getting better, visualization is becoming more important.

Visualization helps very much in understanding simulated flows. The contour lines, contour surfaces and particle tracing are important, but, when analyzing the flow fields, many kinds of such techniques must be combined. Often extra information is obtained by the combination of various techniques.

1. はじめに

電子計算機の発達にともない、各方面で数値計算が行なわれるようになってきたが、計算によって解かれる系が大きくなるにしたがって、得られたデータ量が一方的に増大してしまい、それをどう処理するかということが極めて大きな問題になってきた。従来、数値計算におけるデータ処理の技法は、実験・観測データ処理技術に負うところが多かった。しかしながら、解かれる問題が、複雑になるにしたがって数値計算によって得られるデータは、時間的にも空間的にも実験によるものをはるかに凌ぐ量となってきている。これを処理するためには、汎用的な

処理方法の確立ということは難しく、取り合えず問題毎に方法を考えなければならない。一方、数値計算による解析の信頼性を増すためには、実験・観測との比較が必要である場合が多く、それらに合わせた処理も重要となってくる(文献1)。ここでは、流れ場を数値計算によって解析する計算流体力学に着目し、解析される流れ場の可視化ということで、いくつかの方法とそのために開発された道具としての可視化システムを紹介する。具体例はこのシステムをもちいて可視化した結果を主として用いている各論文にゆずることとする(たとえば文献1, 3~7)。

2. 流れの見方

自然界には、様々な流れが存在している。工学的な見地にたてば、航空機をはじめとする流体機械に、

* 東大・工(航空)

** 宇宙科学研究所

流れのもつ様々な性質が利用され、流体现象が解明されるに従い、それらの流体機械は改善されてきた。物理的にみても、流れは境界層、衝撃波、乱流等の興味深い性質を含んでおり、様々な研究がなされている。しかしながら、未だ、流体现象は幾多の謎を含んでいる。未知の現象を調べるために、まず、やらなければならないことは大まかでもいいから全体像をつかむことであろう。それには、流れ場を『見る』のが一番近道である。しかし、流れは、ほとんどの場合、そのままでは、みることができず、『見えない流れ』を追って数限りない努力がなされてきた。

一方、流れを支配する方程式を確立するためにも幾多の年月が費やされ、19世紀にナビエとストークスが、流れの運動方程式を完成させた。しかし、この方程式は、複雑な非線形の偏微分方程式であるので、その厳密解はある限られた場合にしか求めることができず、数々の近似解法が発達してきた。そのなかで数値的に運動方程式を解き流れ場を解析する手法が計算流体力学である。これは最近の計算機の発達とともに飛躍的に発展しつつある。しかし自然界のほとんどの流れがそのままでは見えないと同様に、計算によって得られた流れも、そのままでは見ることが出来ない。その流れ場をグラフィック・ディスプレイ・システムをもちいて可視化しそのなかに潜む未知の流体现象を調べることが、計算流体力学における流れの可視化の最大の目的である。

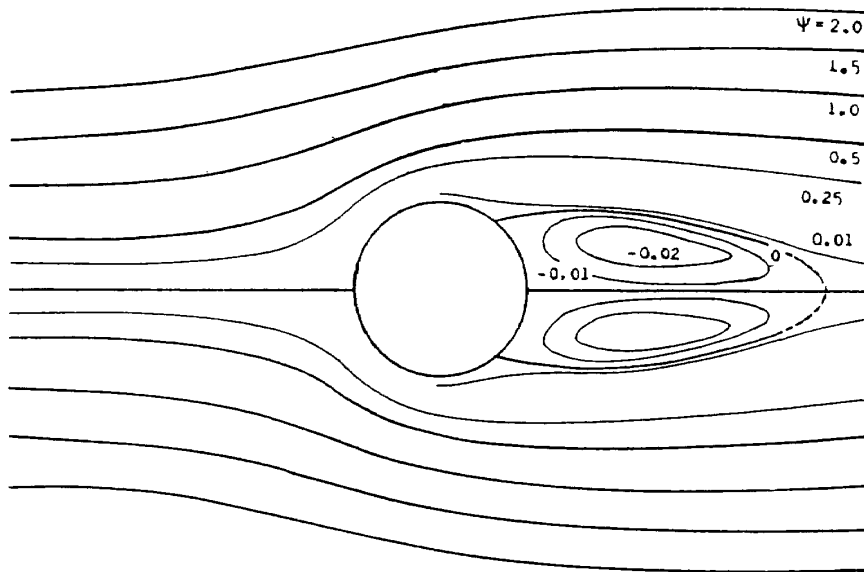
計算流体力学における数値解法は、二つの方法に大別される。一つは、ラグランジュ的な方法で、個別の流体粒子を、支配方程式に従って追っていくものである。もう一つの方法は、オイラー的な方法で、連続した空間を点列により離散化し、点上、または点により形成される要素内で物理量を求めていくものである。従って、データ処理も、それぞれの方法に対応して必要となってくる。その概略を説明すれば、ラグランジュ的な方法に対しては、流体粒子の位置そのものが、重要な情報であり、これをある空間で表示することが、基本的な作業となる。一方、オイラー的な方法においては、空間の離散化された点で得られるデータが基本量となる。格子点の座標

は与えられているので、格子点の位置で物理量を書くことが、基本処理法となる。ある意味においてこれらの作業は、ライン・プリンターに、生のデータを打ち出してしまえば済んでしまうこととなり、事実、従来、行なわれてきたことである。それゆえ、グラフィック・ディスプレイを用いた表現というのは、計算そのものの信頼性があまり高くなかったということとあいまって別の次元で考えられていた。しかしながら、計算精度の向上、計算される系の複雑化とともに、その中にある物理現象を引き出すための労力が従来の方法では、あまりにも大きくなってしまった。そこで、結果の表現ということが重要となってきたのである。ただ、『ルーチン化された結果の表現』という機械的な作業がしばらく続いたというのも事実で、それ自身は、既成のソフトウェアでもまかなえるものであった。

上に述べたように、流れの可視化では、『何をいかにして見るのか』ということが重要である。計算流体力学においては、機械的な結果の処理だけではなく、未知の流体现象を発見するために『何を見るのか』、『いかにして見るのか』という物理的な観点が要求される。また、計算で得られた物理空間は、計算精度という制限を含んでいる。計算精度を超えた結果の表示アルゴリズムは、現象自身をかえかねないので使用にあっては注意を要する。これらの意味で、道具作りが流体力学研究者に要求されるのである。

3. 二次元流れの可視化

流れの中で、『渦を巻く』という現象が古くから観測されてきた。河川などで障害物の後方に生じた渦が流され、消えていくといった光景はしばしば観察される。水の中に指を入れて前進させてみると、指の後方に水面を這うがごとく渦が生じ流されていく。このように流体现象を考える上で渦が重要な役割を担っている。計算で渦をシミュレートすることができないか。この問題に答えようとして計算流体力学が創られたとっていいだろう。まず円柱の後方にできる一対の渦が計算によりシミュレートされた(文献2)。図1に流れの様子を示す。コンピュータ・グラフィックスの世界でみられる派手さは、

図1 流線図 ($Re = 40$)

この絵には一つもない。モノクロで画かれた線の集まりにすぎない。しかしながら、一本一本の曲線の形状を求めるために多くの年月が費やされたのである。一般にいうコンピュータ・グラフィックスと流れの可視化におけるグラフィックスの違いは、まさにこの点なのである。つまり、一本一本の曲線の形状を求める手間暇と、その曲線自身が、非常に多くの情報量をもつこと、また、色は、物の実在感を与えるというよりはむしろ、それ自身がある物理量を表現しているということである。視覚的な要素を絡ませていく上で、コンピュータ・グラフィックスの利用が重要となってくる。物理量の意味を変えず研究者の結果に対する判断のインターフェイスの役割を担わせるのが、ここにおけるコンピュータ・グラフィックスの使われかたなのである。

渦現象以外に流体现象を考える上で非常に重要なものとして、衝撃波というものがある。航空機的设计においては、まず衝撃波との干渉問題ということが重要になる。計算流体力学において、衝撃波を可視化することは、物理現象としての捉え方と、それが特異点であることから数値解の信頼性の評価というふたつの局面をもっている(文献3)。

流れはレイノルズ数が大きくなるとほとんど常に非定常になる。このような非定常現象は動画化することで、静止画では観察が困難であった現象が捉え

易くなる。したがって幾つかの物理量に着目し、それらを時間を追って表わすというアニメーション機能がコンピュータ・グラフィックとして必要不可欠な機能になってきている(文献4)。

このように現象をおいかけながら、この流れの可視化システムは進化してきた。

ある意味で渦の構造を捉えること、衝撃波の位置を探ることが、このシステム構築の第一の目的であり、このシステムによるひとつの成果であった。

4. 三次元流れの可視化

三次元問題を扱う上でも、システム構築の指針は変わらない。ただ表現手段は格段に増えてくる。三次元のオイラー的方法の場合、二次元と同様に等高線図が可視化の上で役だつ。ある断面での等高線図を求め、それを三次元的に表現する。この断面での等高線を重ねていけば、ある物理量の空間の広がりを認識できる。このようにして等高面を求めた(文献5~6)。

三次元の場合、単純な形状の物体を除けば、物体表面、境界を、いかに表わすかが問題となる。この分野において、コンピュータ・グラフィックスのレイ・トレーシング的手法が最初に用いられたのが表面処理である。質感のある物体の表現は、三次元情報の認識を助ける。しかしながら、現時点で、この

機能はこのシステムには加えられていない。その理由は、ローカルな三次元機能をもつハードウェアを用いれば、ワイヤフレーム・モデルであっても、何方向かの回転により、三次元情報を十分に把握することができるからである。なににも増して、このシステムは、研究者の形状把握能力を助けるものであって、CGアートのように単に美しさだけを目指したものと異なっている。

三次元空間において、ベクトル量を表現することは、非常に難しい。ある断面を決めて、その断面内に始点をもったベクトルを画くことは、簡単なのだが、等高面を形成したときと同じように、いくつかの断面を重ねたのでは、なにがなにやら、わからなくなってしまう。そこで用いられるのが、ラグランジュ的手法なのである。ある三次元のベクトル場を $F = (f_x, f_y, f_z)$ と表わせば、仮想の粒子の位置を X としたとき、粒子の軌跡を運動方程式により求める。ベクトル場を速度場としたとき、実験における流跡線とは多少解釈が異なるが、流れ場を解析する上で、非常に有効な方法となる。視覚的な意味合いを考えた時、ベクトルのような短い線分よりもつながった一本の線のほうが、認識しやすいのである。これは断面上で画かれたベクトル場でもいえることで、実験でしばしば用いられる油膜法に対応して、Computed Oil Flow Pattern という手法が用いられる。表面上の Oil Flow Pattern は、大きな剝離の構造と、それに伴う小さな構造を捉えるのに適している。

三次元のラグランジュ的方法を代表して離散渦法がある(文献7)。二次元渦糸近似法との違いは追うべき流体粒子を、スティックと呼ばれる棒状の要素していることである。スティックを個別に三次元空間にショート・ベクトルとして表現する。この方法では最大1万本程度の要素を扱う。しかも、静止画でみる限りその三次元構造は分かりにくいものである。陰線処理、デプスキューイングにより静止画としては、わかりやすい図を得ることができようが、ここでは、さきに述べた理由で、ローカル機能により動的に表現することで定性的な把握をおこなっている。この計算方法自体、オイラー的な表現が可能なので、渦度の絶対値に対する等高面の要素を重ね

て表現することも可能である。

ひとつの絵を1フレームという言い方をすれば、ひとつの流れに対して研究段階で扱うフレームの数は、数百にもなる。計算に用いる格子点数は、標準で4万点(物体表面で2千点)、多い場合で50万から300万(物体表面で3万点程度)であるので、それぞれに対しソフトウェアにより、陰線、陰面、シェーディング等の処理を行なうには、時間的制約がきつくなりすぎる。絵が等圧面の場合で9600ボアの通信回線により、10分から60分かかる。もしローカル機能がない場合は10ないし20の見方をすることが多いので、100分から1200分の作業時間を要することとなる。

したがって、能率よく三次元流れを解析するにはディスプレイと計算機間の高速度のデータ転送が必要不可欠である。現システムで最もよく使われているチャンネル直結タイプのディスプレイを用いると100倍ほどスピードが上がり1フレーム当たり数十秒となり能率は飛躍的に上がる。しかしこれでも動画を得るには遅く三次元の非定常計算にはあと100倍程度の処理能力がほしい。

5. ソフトウェアの構成

アプリケーションソフトは、各種ディスプレイに対し汎用的に使うために、ICFDGと呼ぶアプリケーションソフトと各機種グラフィックサブルーチンのインターフェイスとなる独自のサブルーチン・パッケージをもとに書かれている。このため、このシステムは現時点の機能に対して、表示色数、ローカル機能の違いは生じるが、他のハードウェアに、簡単に移植することができる。このシステム全体をパーソナルコンピュータ等の小型システムに対しても移植できるのであるが、その場合、扱うデータ量は極めて小さいものとなる。また会話型処理のシステムとすることで、詳細な現象の把握、不必要なデータの棄却を簡単化している。

いま、計算されるデータ量が、一時刻あたり4万点の座標、速度ベクトル、そして圧力等の物理量をもつとする。これは、ほぼ1MBのデータであり、オフライン処理することは可能であるが、これだけのデータから、100本の等高線を求めるには、いま

のアルゴリズムで、10MFLOPSマシンを用いて1～2秒CPUを要するので、ミニコン程度の能力のワークステーションがないと非常に効率が悪い。ホスト側で、図形処理を行なった後で、表示のみをグラフィック・ディスプレイで行なうことにより、データ量を減らすことも可能だが、結果を判断しながら次の絵をみるという会話処理には不向きである。(ある現象を動画化して追う場合には適しているが)

このシステムの構築には、核となる部分の制作に、約1週間、現状のシステムにするまで、約1年半の期間を費やした。

6. 結 語

このようにして、計算によって得られた流れ場の可視化方法を考えていく内に、ひとつのまとまったシステムが構築されたのである。今後、計算される流れ場が、複雑になっていくとともに、さらに別の見方が必要となるだろう。離散系で表現された空間の適切な表現と、各種のアルゴリズムの改良、最適化には、計算幾何学の応用が必要であろうし、一つ一つの絵の把握すら困難な場合も考えられ、コンピュータ・グラフィック・アートでみられる様々な手法を利用せざるをえない状況もでてくるのではない

か。そのときどきに応じて、このシステムを進化させていくのが、今後の課題である。それは、この分野では、グラフィックスと計算とは切り放せないものであり、表示された絵を計算手法にまで還元させる必要があるからである。それにも増して、流れのおりなす美しい絵模様をもっと見たいという欲求が、更にこのシステムを進化させるのではないだろうか。

参 考 文 献

- 1) S. Shirayama and K. Kuwahara: AIAA-86-1043.
- 2) M. Kawaguti: Journal of the Physical Society of Japan, Vol. 8, No. 6, pp. 747-757.
- 3) S. Obayashi, H. Kubota and K. Kuwahara: AIAA-85-0183.
- 4) Y. Shida, H. Takami and K. Kuwahara: AIAA-86-0116.
- 5) R. Himeno, S. Shirayama, K. Kamo and K. Kuwahara: AIAA-85-1617.
- 6) K. Fujii and S. Obayashi: AIAA-86-1831.
- 7) S. Shirayama, R. Mendez and K. Kuwahara: AIAA-85-1488.

