技術資料

計算空気力学における図形処理

Graphics in Computational Aerodynamics

廣 瀬 直 喜*

Naoki HIROSE

Key Words: Fluid Mechanics, Design, Graphics, Computational Aerodynamics

1. ま え が き

計算空気力学は流れを数値的に計算機上でシミュレートする新しい実験法である。そのデータ処理については、従来の流体力学実験に学ぶところが多い。しかし、後者では測定可能量の種類、場所などの制約が多く、必ずしも実験者の求める情報を得られるとは限らないのに対し、計算空気力学では必要なデータの算出は容易である場合も少なくない。それも、最近進歩著しい各種図形処理装置の利用による部分が大きい。スーパーコンピュータで実用的となった三次元流れ、非定常流れの解析では、もはやラインプリンタ出力では結果の判定は理解を超えるものであり、情報アナログ化、すなわち図形処理化に頼らざるを得ない。しかし、この分野の図形処理として最適な方法や形式は確立されていない。筆者の研究所でも、共用設備はXYプロッタを中心とする旧態依然としたもので、新規なものはない。ここではその中から、幾つかを紹介する。

2. 共用図形処理系

般技研計算機は、FACOM M-380 (32 MB, 20 MIPS) 1台と M-180 II-AD (12 MB, 8 MIPS) 2台よりなり、後者に各種 I/O 端末, TSS, 風洞

* 正員, 科学技術庁航空宇宙技術研究所 (〒182 調布市深大寺東町 7-44-1)。

データ処理系 (ECLIPSE S-140, 5台ほか), 調布分室システムや共用図形処理系がチャンネルまたは回線結合されている。図形系には、モノクログラフィックディスプレイ 2台, CALCOMP XYプロッタ (XY Plotter, 以下 XY と略) 1台, 静電プロッタ (Printer Plotter, 以下 PP と略) 1台, 小形 XY プロッタ 1台がオンラインでつながるほかに、オフラインの XY プロッタ 1台がある。これらと別に、開発中の空力設計システムに専用カラーグラフィックス, ハードコピー, デジタイザなどがあるが、筆者ら一般ユーザは使えないので、詳細は不明である。これらで大量の所内ユーザの図形処理をまかなっている。

XY はユーザの慣れもあり、解析結果の表示によく利用される。インク・ボールペン, 黒, 青, 赤 3色プロッタで、正確さ, 美しさの点で保存用出力に適する。ジョブの終了から図入手までは数日かかる時もある。

グラフィックディスプレイはモニタと称し、バッチジョブのプロッタ出力 (出力先は XY, あるいは PP を選択可能) を会話モードで呼び出して、モノクロディスプレイターミナル上で見るものである。機能として、ズーム, スキップ, リワインド, ハードコピーがあるので、細部を自由に拡大表示して格子網の点検を行ったり、境界層内速度分布からはく離点を調べたりするのに便利である。モニタはジョブ終了と同時にアクセスできるので、急ぎの場合やデバッグには都合よい。欠点は、当モニタ固有のものだが、縦横寸法が 1:1 でないこと、画面ごとにスケールが変わること、応答速度

が回線結合のためおそいほか、出力量やTSS計算時間制限のネックがあること、また1人のユーザに席を長時間専有されてしまうことなどがあげられる。

PPは、メカニカルなXYプロッタに対し、静電気印字方式で高速な出力を可能とする。しかし、図の精度、分解能、保存性に難があり、印刷原稿などには利用できない。ただし、従来、XYがカバーした出力の過半数はPPでその目的を達せられ、ユーザの利用効率は上がり、XYのロードはやわらげられた。PPも回線結合で結ばれており、PPコントローラへのファイル転送時間がかかりすぎる不便さがある。PP出力を点検し、必要なら、XYへ再出力可能である。

理想的には、各端末に適した図形出力ルーチンをソフト的にカバーするライブラリを持つのが望ましいが、費用面からも、技術的にも困難な点が多く、現在はXYプロッタファイルを、異なる幾つかの装置に出力させる形成をとっている。したがって現状では、二次元平面上でのモノクロ線画による図形処理に限られる。また、アプリケーションソフトが不備で、以下の例の多くは各研究者の工夫開発による部分が多い。今後、それらの共用化への努力が望まれる。

3. 図形処理の例

計算空気力学では、格子形成、流れ解析、結果の後処理（図形処理を含む）は切り離すことで、

図1 翼胴結合体に対する三次元格子網の例

それぞれのパッケージ化ないしコンポーネント化をめざしている。三次元、非定常、ナビエ・ストークス解析など大規模計算では特に望まれる。こうすることで、よりはん用化が進められるし、それぞれ人、場所、時間をこえての取扱いができる。また、各コンポーネント自体、注意深い扱いを必要とする点や問題点を含むし、前、後処理は入出力と人手による部分が多い。以下に航空宇宙技術研究所での図形処理例を示す。

図1に高梨・伊沢⁽¹⁾の翼胴結合体三次元格子を示す。翼、胴表面は、それぞれひとつの座標面に一致する物体適合座標系で、格子形状をみるため、各座標断面を任意に選んで描き、それを任意の視点からみた形で陰線処理して出力している。細部はモニタのズームを利用する。

図2は流れ解析例で、ナビエ・ストークスコードNSFOIL⁽²⁾による翼形粘性解析の結果を等マッハ数線図であらわしたものである。境界層と衝撃波に線が集中し、集中の度合は流れの変化の大きさを示す。等高線アルゴリズムは磯部⁽³⁾のものを、曲線座標系に拡張し、指定窓寸法内のみを描くよう改造して利用した。ひとつのセル内の分布は線形補間で十分であり、むしろ衝撃波での数値振動などを正しく判断するためには、高次補間やスムージングは行わないほうがよい。等高線間隔は分布量の特性によって、必ずしも等間隔が最良ではなく、対数間隔なども時として必要である。マッハ数のほか、圧力、密度、温度、渦度、エン

図2 遷音速翼形まわりの粘性流れ、等マッハ数線図

トロピ、そしてそれらのこう配などの表示に適する。

流れのパターンを示すには流線、速度ベクトルなどがある。流線関数を従属変数に用いない最近の解析法では、ベクトル場表示が多い。トレーサを流して流跡線を描くこともある。設計に必要なのは物体表面の圧力分布が主であるが、流体力学では、空間内の流れのパターンをとらえることがやはり重要である。図3は粘性解析法による後縁はく離と伴流の速度ベクトル場を拡大図示した例である。はく離や渦の存在は視覚に訴えるのがよい。図4は藤井⁽⁴⁾の求めた三次元ナビエ・ストークス解析法によるデルタ翼はく離渦場であり、図5は同様の解析法による山本⁽⁵⁾の回収体後部流れ場の流跡線三次元表示である。オイルフローをまねたトレーサは、表面に近づきすぎると速度が小さいため計算時間を費やし、離れすぎると表面流線からの逸脱が著しくなるなど、工夫が必要である。

設計問題では、物体形状と圧力分布を図示し、視覚による確認と修正作業を行う。図6は最近、筆者ら⁽⁶⁾の開発したナビエ・ストークスによる翼設計法の出力例である。図で横軸に翼弦方向、縦

図3 後縁付近の粘性流れの速度分布の例

(a) 断面内速度分布

図4 三次元デルタ翼前縁はく離渦の模様

軸に圧力係数 C_p と翼形の厚みを取り、初期形状と圧力分布を鎖線で、設計翼の結果を白丸、三角マークで示す。実線は設計目標分布である。設計結果と目標との一致が一目りよう然で認識できよう。さらに翼の形を認識容易とするため、 y 方向を10倍に拡大し、後縁を原点にして示すなどの工夫をしてある。この設計法では、解析、設計の反復作業をTSS端末とモニタで行う、オンラインシステムにした。

図6 ナビエ・ストークス式による翼形設計法とその表示例 (マッハ数 0.75, レイノルズ数 1.3×10^7 , $C_L = 0.62$ の設計例)

図5 宇宙回収体をすぎる粘性流れの流跡線の三次元表示

後退翼設計では、いわゆる等圧線を全スパンに通すという平行後退角等圧線分布設計がある。このような設計では、表面圧力の等高線図やスパン・ローディング図がかかせない。図7、8にはある遷音速前進翼のポテンシャル解析結果の例として、表面圧力分布、スパン方向揚力分布の図の例を示す。ここに紹介した図中の文字、英数字は

図7 遷音速前進翼のポテンシャル解析例
(表面圧力分布)

図8 遷音速前進翼ポテンシャル解析例
(スパン方向揚力分布)

プロッタ出力の一部として、どのような量が出力されたのか、計算条件はどうかなどを図を一見して理解できるように工夫して、出力してある。大量の図形出力を伴う研究では、このようなキャプションにも配慮を要する。

4. アニメーション

非定常解析の解釈にはアニメーションが最適である。図9は磯貝⁽⁷⁾の遷音速後退翼フラッタの翼変形と圧力分布図の1こまでである。図中、左には主翼がねじり下げられたある時刻での形状を基準形状と重ねて示してあり、右には、その時刻における圧力分布を翼根から翼端までのいくつかのスパン位置において示す。実線は上面、破線は下面の圧力をあらわす。このような図をアニメーション化することにより、翼上下面に、それぞれ発生する衝撃波の非定常運動をはっきりと認識すること

図9 遷音速翼三次元フラッタ解析(変形と圧力)の例

図10 遷音速翼形のパフェット解析例(速度場), マッハ数0.775, 迎え角4°, レイノルズ数 2.2×10^7

ができる。図 10 は NSFOIL によるバフエット解析⁽⁸⁾で、速度ベクトルを描いた例である。この図では、非定常渦放出がみとめられる。さらに、後縁圧力、衝撃波の関係をアニメ化し、くわしく解析することにより、バフエットの詳細をはじめて認識することができた。

アニメーションの最大欠点は費用である。XY 出力を業者に渡して、モノクロフィルム化するだけで 1 分当たり 10 万円以上かかり、容易にできない。カラーアニメーションでは数千万円かかり、研究者、設計者の手にはおさまらず、TV コマーシャルに限られてしまうわけである。ビデオへの出力は解像力が悪く、必ずしも使いものにならない。

5. アメリカの状況と展望

アメリカでは最近、カラーグラフィックス化が急速に進んでいる。これは主として、CAD や航空機シミュレータなどの軍事技術からの転用が基となっているが、線画、面画、カラーハードコピー、アニメーション化など、ハード、ソフトともに、その道の専門家による分業化が進み、流体工学者はデータを渡すのみで良いと言われる。計算空力をリードする NASA エームズでは、最近、数十台のカラーグラフィックスワークステーションを導入し、個々のユーザが TSS 並みの手軽さで利用している。その模様は文献 (9)~(11) に詳しい。

国内では同様の端末を 1 000 万円以下で入手できるが、研究者がパソコン並みに使えるまでには、しばらく時間を要しよう。この分野では、いちはやくそのような端末を導入した文部省宇宙科学研

究所の桑原研究室の成果が注目される⁽¹²⁾。

パソコンのカラーディスプレイを利用したカラーグラフィックスは安価な方法として注目されるが、主計算機からのデータ転送速度ないし、転送媒体の不統一性、表現能力、ソフトウェアの欠除などの点で手間がかかりすぎるため、実用面からはちゅうちょされる。

筆者はハードで三次元回転、ズーム、陰線処理が容易にできる時代に、XY プロットで同様の出力のためのプログラムを自分自身で開発するのはむなしいと感じる。ハードの低価格化と普及は急速なので、それを待つほうが流体工学者の仕事としてはよいのではないかと考えている。そして、それはま近である。

(原稿受付 昭和 60 年 1 月 19 日)

文 献

- (1) 高梨・伊沢, 第 16 回流体力学講演会講演集, (昭 59-11), 6.
- (2) 河合・廣瀬, 航空宇宙技術研究所報告, TR-816 (昭 59).
- (3) 磯部, 航空宇宙技術研究所資料, TM-198 (昭 46).
- (4) Fujii, K. and Kutler, P., *AIAA Paper*, 84-1550 (1984).
- (5) 山本, 航空宇宙技術研究所報告, TR-819 (昭 59).
- (6) 空力 2 部, 航技研ニュース, 309 (昭 60).
- (7) Isogai, K. and Suetsugu, K., 航空宇宙技術研究所報告, TR-726 T (1982).
- (8) 廣瀬・ほか 3 名, 第 22 回飛行機シンポジウム講演集, (昭 59-11), 370.
- (9) Gregory, T.J. and Carmichael, R.L., *Astronaut. Aeronaut.*, 21-4 (1983), 14.
- (10) レビン, R.D. (石田訳), サイエンス, 3 (昭 57), 54.
- (11) Inouye, M., 航空宇宙技術研究所特別資料, SP-3 (1985).
- (12) 桑原, 第 34 回応用力学連合講演会講演論文抄録集, (昭 59-12), 15.