高速気流の数値シミュレーションと可視化*

藤井孝藏**, 田村善昭**

Numerical Simulation and Visualization for High Speed Flows

Kozo FUJII and Yoshiaki TAMURA

1. はじめに

以前に「航空機周りの遷音速流れの数値計算と可視化」という題目で解説記事¹⁾を書かせていただいたから6年の月日が経った。その間スーパーコンピュータとグラフィックワークステーションの急速な進歩と普及によって、複雑な物体形状に対する流れ場のシミュレーションを行い、その結果を美しい絵に見せることが日常茶飯事になってきている。当時最新のスーパーコンピュータ上で約80万点の格子を用いて解いた翼胴結合体周りの遷音速流のシミュレーション結果などはこの6年ですでに色あせてしまった感がある。確かに数値シミュレーション自体も、その結果を可視化表示することも以前と比較にならない位簡単にできるようになった。学会発表などでもカラーのスライドやビデオアニメーションが利用される割合は増加の一步をたどっているし、またその効果も認めざるを得ないところである。しかしいまだに、物理的な情報が何も得られない、ただ計算結果をカラーの絵にただけのスライドをだらだらと見せられることも少なくなく、そのため数値流体力学(CFD)をComputational Fluid DynamicsではなくColor Fluid Dynamicsだなどと陰口をたたかれる状況となっている。

数値シミュレーションの可視化においては単にカラーであることや単に動画であることで聴衆をひきつける時代はもう過ぎつつある。いま大切な

ことはもう一度何のためにカラーにするのか、何をどう表示することが必要なかを改めて考え直すことではないだろうか。ここでは航空機に関連した流れ場を例にとりて、この問題に対する筆者なりの意見を述べさせていただくことにしたい。

2. ビジュアライゼーションの目的

なんのためにシミュレーション結果の可視化をするのか改めて考えてみよう。グラフィックスの分野では「プレゼンテーションのためのグラフィックス」と「リサーチのためのグラフィックス」があると言われている。この分類は流体のシミュレーション結果の可視化表示にももちろん当てはまる。まずプレゼンテーションのための可視化、すなわちシミュレーション結果を他の人たちに説明する場合を考えよう。数値シミュレーションの結果を学会で発表するときや、論文を書くとき、あるいは社内で予算を獲得するときに結果を可視化したきれいなカラー写真は強力な武器である。VTRなどの動画ならばより印象的である。

一方このようなシステムは必ずしも我々研究者を満足させるものではない。なぜなら、研究の立場での可視化の本来の目的は、他の人たちに説明することではなく、流れ場を可視化することで研究者自身が流体现象を把握したいがためであったからである。言い替えると、われわれが第一に欲しいのは、時間をかけてきれいな絵を描くシステムではなく、美的でなくともよいから迅速にさまざまな方法で流れ場の様子を見せてくれるシステムである。これが「リサーチのためのグラフィック

*原稿受付 1991年1月29日

**宇宙科学研究所

ス」である。もちろん、だからといってプレゼンテーションに耐えうる絵を描くシステムを否定する気はない。複雑なレンダリングを用いて高品質な映像を作ることで初めて現象が理解しやすくなることはあるであろうから、もし高速にこのような処理が可能ならば研究のためにも十分に価値を持つ。しかし現状のグラフィックワークステーションの演算、表示の能力では汎用を目的とするのならばある程度の妥協をせざるを得ない。これから先は「リサーチのためのグラフィックス」に話を限定して、このような制限のなかで何をどう可視化することが望ましいのかを探ってみよう。

3. 何をどのように可視化するか

表示すべき情報としてまず思い付くのが密度、圧力など、物理的に意味のあるスカラー関数値の直接的な可視化である。この場合は適当に面を切り出して、その面内での等高線表示（または色表示）などを行えばよい。3次元的な等高面の表示もボリュームレンダリングの助けがあれば利用価値が高いであろう。流線、表面流線（通常実験におけるオイルフローと比較される）といった、計算で得られる物理量に何らかの演算を施して得られる情報もある。この場合は数値計算結果に演算を施すときの精度に注意することが肝要である。

これらの情報をどのように表示したら研究の助けになるであろうか。これは自分で数値シミュレーション結果を表示し結果を理解しようとするプロセスを思い浮かべれば自然と明確になってくる。マッハ数や迎え角といった流れのパラメータを変えた計算をすればそれらを同時に比較したくなるであろう。表示する関数もさまざまに変更したくなるであろう。圧力を表示したら流線を眺めてみたくなるとか、総圧の損失の様子を見たいとか、渦度の分布を見たいとかいうことは流れ場の理解の過程で重要である。3次元のデータならば表示する面を変えたり、視点を変更したりしたくなるであろう。さらには画面から何らの数値を引き出すことも大切である。たとえば衝撃波の位置や渦の中心の座標とか、そこでの物理量とか正確な数値で知ることも研究のプロセスでは生ずる。

またすべてこれらの作業はインタラクティブに行えることが望ましい。表示の速度もある程度必要となる。2時間もたってから表示結果がでるのは「リサーチ」のためには不便きわまりない。

これらの機能を具体的に実現することを目的として私たちはソフトウェア「ポスト君」を開発したが、その詳細については紙面が限られているので文献2, 3等を参照していただくことにしたい。

さてもう一度可視化情報について考えてみよう。上で述べたように、現在可視化に利用されている情報は、スカラー関数値の等高線表示のように（内挿という作業はあるが）基本的には出力データに対して演算を施さないものと、流線、表面流線といった積分等を利用した演算処理が要求されるものとに分類できる。これらの情報が可視化の対象として有用であることはいうまでもないが、それに限定される必要はない。例えば乱流の直接シミュレーションの分野ではさまざまな処理を行うことで物理現象を浮き彫りにしようという努力がなされている。次の章では一般の数値シミュレーションデータを対象とした新たな可視化の可能性を考えてみよう。

4. さらなる表示機能

前章でリサーチのための可視化システムに要求される基本機能を考えてみた。一方、現在の数値シミュレーション技術を考えたときさらに一歩進んで表示機能が期待される。具体的な例として実験装置の模擬について以下に述べる。

数値シミュレーション結果の信頼性は数値流体力学研究の課題の一つである。計算はできても結果が信頼できなければ実際の設計などの役にはたない。宣伝のためにシミュレーションの結果を利用するのであればそれらしい結果がでていれば十分であるが、もし研究開発のために利用するのであれば信頼性の評価は大切な項目となり、事実、数値シミュレーションが普及するにつれてその重要性が認識されつつある。信頼性の評価にはさまざまな方法が考えられるが、多くの場合実験結果との比較が利用される。物体にかかる力や圧力といった数値は直接比較が可能であるが、実験において可視化された写真などの場合はどう比較すべ

きであろうか。読者の多くが筆者などよりもずっとよくご存じのとおり、流体実験(特に高速気流)の可視化技術には、シュリーレン法、シャドーグラフ法、干渉計などがある。詳しいことは省略するが⁴⁾ これらの方法は光が気体の密度変化に応じて曲がることを利用している。たとえばシュリーレン法について言えば、流れを横切るような平行光線を作り、これを受ける形でたとえば3色のフィルターや鋭い剃刀の刃を用意しておくと流れ場における密度勾配等に応じて色が変化して見えたり明暗がでたりする。写真に写るのは流れ場を3次元的に横切る際に局所的な流れの状況に応じて曲がった光の集まりであるから、このようにして得られた写真は圧力、密度といった基本的な流体関数とは直接比べられるものでない。計算結果に対しても同じように仮想的な光に流れを横切らせて光の曲がり具合に応じた、たとえば密度勾配のようなものを3次元的に積分して初めて実験と同じような画像を得ることができる。これは一種のボリュームレンダリングに他ならない。もちろん数値シミュレーションの精度は計算に利用した格子精度より小さくはなりえないし、ピクセル単位に計算を行っていくとGWSの能力によっては何時間かかって一つの画像さえ得られないこともある。前述の「ポスト君」の新しいバージョンでは格子を利用したボリュームレンダリングを行い、実験での可視化に用いられる上述の手法をシミュレートし計算結果から実験と同じ出力を得る機能を持たせている^{5), 6)}。

2次元の場合の出力の例を口絵1と図1に示す。口絵1は超音速インテークの数値シミュレ

ション⁷⁾の例である。スロート付近に垂直衝撃波(この計算では背圧を制御していないので生じていない)を安定に維持することを目的として大きなチャンバーと抽気口を保持しているため計算では流れ場を七つの領域に分割して行っている。この図は計算結果に対して仮想的なフィルターの方向を縦と考え、密度の横方向の勾配($\partial\rho/\partial x$)をプロットすることでカラーシュリーレン写真を模擬したものである。通常実験におけるシュリーレン写真との比較に利用されるのは密度等高線であるが、その場合は必ずしも同じ情報を比較してはいないことを忘れてはいけない。図1は宇宙科学研究所に客員研究員として滞在している Dr. Timofeev 氏の計算による曲がり管を通過する衝撃波の非定常シミュレーションのある瞬間における干渉計写真である。(a)が計算結果⁸⁾、(b)が実験の可視化写真⁹⁾である。縞の間隔はどちらも $\Delta\rho$ を0.15と同じに設定してある。オイラー方程式による計算であるので対応は必ずしも完璧ではないが、比較が容易に行えることが分かる。

2次元の場合は光の行路積分の必要はなく、実験装置を模擬することの価値はそれほど大きなものではなく、「それらしい」とか「似ている」とかの域を脱してはいないような気もする。しかし3次元の場合にはこの価値はもっと鮮明になる。その例を口絵2に示そう。口絵2(a)は半球頭円柱を過ぐるマッハ数1.96の超音速流を撮った実験におけるシュリーレン写真¹⁰⁾である。物体前方に離脱衝撃波が生じ物体を取り囲んでいる。口絵2(b)は、計算結果で、対称面内での密度勾配(2次元的なシュリーレン写真の模擬)を描いたものであ

(a) 計算結果に対する干渉縞処理

(b) 実験での干渉縞写真

図1 曲がり管を通過する衝撃波

る。通常、この種の計算ではこのように対称面内の値（多くの場合密度等高線）がシュリーレン写真と比べられることが多い。(a)と(b)を比較してみると衝撃波の後ろで明るさに違いがあるのがわかる。実験においてこの領域に集まる光は行路上にある紙面に対して手前側の衝撃波を横切の際に曲げられ、また紙面に対して奥側の衝撃波を再び横切の際にもう一度曲げられた結果そこに集まったものである。これが場所によって異なることによって（正確には衝撃波と物体に挟まれる領域の密度変化も影響して）衝撃波の後ろでは明暗が次第に変化することになる。対称面内の値をどのようにプロットしようとこの効果は現れるはずがない。(c)は3次元的に積分を施した結果のプロットである。実験で得られている効果が現れており、正しい比較が可能であることが分かる。仮に流れ場がもっと複雑な場合にはさまざまな衝撃波やスリップラインが生じ、実験との正確な比較を行わないと、間違った解釈を引き出してしまうかも知れない。

もう一つの例を図2に示す。これは鈍頭物体まわりの衝撃波によって誘起される不安定燃焼の流れ場を軸対称の仮定のもとでシミュレートしたものの¹¹⁾でISR（リクルートスーパーコンピュータ研究所）の松尾亜紀子氏からお借りしたものである。(a)は計算結果の密度等高線を描いたもの、(b)は私たちのソフトで3次元的にシャドウグラフを模擬して光の積分を施したものである。(b)に見ら

れる燃焼面に相当する縦の筋(striation)は実験におけるシャドウグラフで観測されるものであるが、(a)のように単に密度等高線を描いたのではできていない。理由は単に軸対称であるという事実によっている。この場合は光の積分というよりは3次元的な流れを考えることで直感的にも予想できことであるが、実験と同じ出力を比べることで誤解を避けることができる。さらに今後は、光の回折や分散、実験装置の特性など2次的効果も考える必要があろう。

以上の実験装置の模擬は可視化の可能性のほんの一つの例に過ぎない。見方を変えると実験装置の模擬は、実験との比較を目的として計算結果の中から密度分布を選び、微分、積分を施したものに他ならない。数値データにおいては、たとえば密度ではなく、その他の関数値に対して、たとえばシュリーレン処理（これをシュリーレン処理と言うべきかどうかはわからないが）を施すこともできる。そのような処理をすることで何らかの物理現象が浮き彫りにされる可能性はないだろうか。流体解析の後処理は与えられたものを可視化するだけではない。さまざまな関数的な処理（微分、積分、対数、その他）を施すことで何かが見えてこないだろうか。ひるがえって、現在の可視化処理を考えると、等高線にしても流線にしても、おそらく実験において何を可視化しているかを意識することで考えられたタイプの可視化のようである。もちろん実験で見ることを通じて研究

(a) 対称面内の密度等高線表示

(b) 3次元シャドウグラフの模擬

図2 鈍頭物体まわりにおける衝撃波誘起不安定燃焼場の可視化

者はすでに経験を積んでいるためにそのような表示が分かりやすいということはあるだろう。しかし、数値シミュレーションデータの可視化だからできる、だから現象がわかりやすく理解できたといった可視化表示はないものだろうか。おそらくここでは流体力学の本当の知識が大切になってくるのに違いない。ただし、逆にある意図をもって処理を行うことで画像処理を行う人間の都合のいような可視化データを作りうるという事実にも注意をはらう必要があるであろう。

おわりに

圧縮性流れの数値シミュレーション結果の可視化を例にとって現在の可視化の問題点と今後期待される可視化について筆者の私見を述べさせていただいた。実験における可視化がそうであるように、今後、数値シミュレーションの可視化がそれ自体流体力学研究の学問分野として認識されていくことを望んで筆を置くことにする。

最後に貴重な計算結果をこころよくお貸しいただいた宇宙研客員研究員の Dr. Timofeev 氏とリクルートスーパーコンピュータ研究所の松尾亜紀子氏に感謝する次第です。

参考文献

- 1) 藤井：航空機まわりの遷音速流れの数値計算と可視化，流れの可視化学会誌，Vol.6, No. 21, 昭和61年, pp.122-127.
- 2) 田村，藤井：流体解析におけるサイエンティフィック・ビジュアライゼーション，PIXEL, No. 87, 1989/12月号.
- 3) Tamura, Y. and Fujii, K.: Visualization for Computational Fluid Dynamics and the Comparison with Experiments," AIAA Paper 90-3031, August, 1990.
- 4) リープマン，ロシュコ：流体力学，第6章，物理学業書，玉田訳，吉岡書店.
- 5) 田村，藤井：流体の数値計算結果による可視化実験の模擬，日本航空宇宙学会第21期年会講演会講演集，平成2年4月，pp.170-171.
- 6) 藤井：流体解析のためのビジュアライゼーション PIXEL, 91/1月号.
- 7) 黒田，藤井：抽気室を有する超音速インテークの数値計算，第22回流体力学講演会論文集，平成2年11月 pp.144-147.
- 8) Fursenko, A. A., Sharov, D. M., Timofeev, E. V. and Voinovich, P. A.: Numerical Simulation of Shock Wave Propagation through Channel Bends Using TVD and ENO Schemes, submitted to the ISCFD-Davis, Spt. 1991.
- 9) Mende N. P.: private communication through Dr. Timofeev.
- 10) Van Dyke: An Album of Fluid Motion, The Parabolic Press.
- 11) 松尾，藤原：鈍頭物体周りにおける衝撃波誘起不安定燃焼の数値解析，第4回数値流体力学シンポジウム講演論文集，平成2年12月，pp. 649-652.

口絵1 超音速インテーク流れの計算結果の可視化:2次元シュリーレン処理
(本文63頁参照)

(宇宙科学研究所 藤井孝蔵, 田村善昭)

(a) 実験におけるシュリーレン写真

(b) 対称面内データに対する2次元シュリーレン処理

(c) 3次元的なシュリーレン処理での可視化

口絵2 半球頭円柱まわりの超音速流 (本文63頁参照)

(宇宙科学研究所 藤井孝蔵, 田村善昭)