

分散処理による大規模流体解析のための可視化システム

田中 扶未¹, 渡辺 庸一¹

松尾 裕一², 末松 和代², 岩宮 敏幸²

A Distributed Visualization System for Large-Scale Computational Fluid Dynamics

by

Fumi Tanaka, Yoichi Watanabe

CRAY Research Japan

Yuichi Matsuo, Kazuyo Suematsu, Toshiyuki Iwamiya

National Aerospace Laboratory

ABSTRACT

Recent high performance supercomputer capabilities enable large scale fluid dynamics analyses over one million grid points and more realistic models treating complex structures and various motions. Visualization techniques as a post processing will be more important for the critical judgement on numerical results and the interpretation of physical phenomena behind numerics. Currently, large amounts of output data and advanced visualization methods require increased computer resources, therefore the distributed visualization system under network supercomputing environment, where computation-oriented parts are processed on a high performance server and user operation-oriented parts are processed on a local graphic work station(GWS), has been proposed for an effective use of computer resources. This paper describes some large-scale visualizations we performed using a distributed visualization software, EnSightTM, on a GWS and a high performance graphics server, CRAY Y-MP/M92, at National Aerospace Laboratory.

1. はじめに

航空宇宙技術研究所(航技研)では,平成5年2月,大型並列計算機 NWT を導入した¹⁾. NWT は,記憶容量 256MB, ピーク速度約 1.7GFLOPS の要素計算機 140 台から成る分散主記憶型並列ベクトル計算機であり,全体としての性能は主記憶容量 35GB, ピーク速度 236GFLOPS にも達する. この NWT の登場により,百万点を越えるような格子を用いた大規模な流体解析,あるいは複雑な形状,多様な運動を扱う複合的かつ現実的な流体解析が可能になった.

そうした大規模で複雑な解析を効率良く行うためには,格子生成や可視化等の前処理・後処理の部分を充実させる必要がある.特に,後処理としての可視化技術は,計算の良否を総合的に判断し,現象の奥に潜む物理を解釈する上で欠かせない.しかし,扱うデータ量の増大,表示法の高度化とともに,可視化のための計算機負担も過大になり,場合によっては高性能のグラフィックス・ワークステーション(GWS)をもってしても操作性や会話性が低下するという事態が顕在化している.

そこで,実際に計算機の中で可視化のために行われる処理に着目してみると,例えば流線や等値面を計算するといった大規模な計算機リソースを必要とする部分と,物体や視点を回転させる等のユーザ・オペレーションを主体とする部分から成り立っている場合が多いことに気づく.こうしたことから,用途に応じて計算機を使い分ける機能分散という考え方が計算機資源の有効利用の一手法として考え出されて来ている²⁾.

日本クレイ(株)と航技研では,NWT 等で行われる大規模な流体解析の結果を効率良く後処理するための「分散処理に基づく可視化システム」の構築とその評価を,可視化に関する共同研究の一貫として進めて来た.本報では,そのシステムの内容について述べるとともに,可視化の実例を紹介し,システムの特徴や問題点について検討する.

2. ネットワーク・スーパーコンピューティング環境下における可視化

最近のワークステーション(WS)の発達あるいはネットワークの整備には目を見張るものがある.それに伴

¹日本クレイ(株)

²航空宇宙技術研究所

い、NWTのようなスーパーコンピュータを利用する方法も、従来の専用端末方式から、高速ネットワークを通じてWS、パソコン等から接続するネットワーク・スーパーコンピューティング方式に移りつつある。そこで、そのような環境下で、スパコンで解析されたデータを可視化するときの処理形態というものについてまず考えてみることにしよう。

第一の処理形態は、スパコン上の解析結果をグラフィックス・ワークステーション(GWS)上のディスクへ転送し、GWS上のアプリケーションによって可視化する方法である。この場合、全て私的な環境の中で仕事が行え、インタラクティブ性に富んでいるという利点のため、現在最も普及している形態であるが反面、メモリ、CPUといった処理のための全リソースがGWSに依存してしまうため、大規模なデータの可視化、あるいはCPU負荷の高い可視化は行えない。

第二の処理形態は、スパコン上のグラフィックス・アプリケーションあるいはグラフィックス・ライブラリ等を用いて、スパコン上で全ての可視化処理を行って画像データを作成した後、GWS等に画像データを転送し表示する方法である。この処理形態の場合、モデルの回転、拡大等の会話的な処理が行われると処理の度に画像データ(例えば1280x1024の解像度の場合、約4MB)が転送されるため、ネットワークに多大な負荷がかかる。

第三のアプローチとして考えられるのは、スパコンとGWS間での機能分散による可視化形態である。これは、モデル表面、等値面や流線の座標値等の可視化に必要なデータをスパコン上でポリゴンデータ(ノードのX、Y、Z座標値、ノード上のスカラ値、ベクトル値)として作成し、GWS上で可視化する方法である。つまりデータ読み込み等の高速の入出力、大容量のメモリを必要とする処理、また流線作成や任意断面、等値面抽出といった数値計算によるCPU負荷がかかる処理についてはスパコン上で行い、ポリゴンデータとして作成する。作成されたポリゴンデータはネットワークを通じてGWSへと転送され、GWSでは高速のグラフィックス・ハードウェアを用いてレンダリング、および座標変換等のローカルなグラフィックス処理が行われる。従って、大量のデータを扱う仕事あるいはCPU負荷の高い操作でも効率良く可視化処理を行うことができる。

NWTの出力データは膨大で、時には1つのファイルの大きさが数百MBに及ぶこともある。このような大量のデータの可視化には、第三の機能分散による方法が優

れている。ただしこの場合、スパコンやネットワークが混んでいて応答が悪いと使い勝手に支障をきたすことがある。

3. 分散処理による可視化システムの構成

図1は航技研における分散処理による可視化システムの構成を示したものである。使い勝手の良い分散システムを実現するための一つの鍵は、計算サーバ(スパコン)とネットワークの応答を十分良くすることであろう。ここでは、ビジュアライゼーション・サーバとしてCRAY Y-MP/M92を導入するとともに、ネットワークにUltraNetとFDDIを採用することで高度な分散環境が提供されている。CRAY Y-MP/M92は主記憶容量8GB、ピーク性能約167 MIPSのベクトル型スーパーコンピュータで、膨大なNWTの出力を処理するに足る十分な能力を備えている。UltraNetとFDDIの転送速度は、それぞれ1Gbps、100Mbpsであり、通常のEthernet(10Mbps)の数十倍の速さを備えている。また、GWSとしてSGIのOnyx、Indigo²等を導入し高速グラフィックス処理を可能にしている。

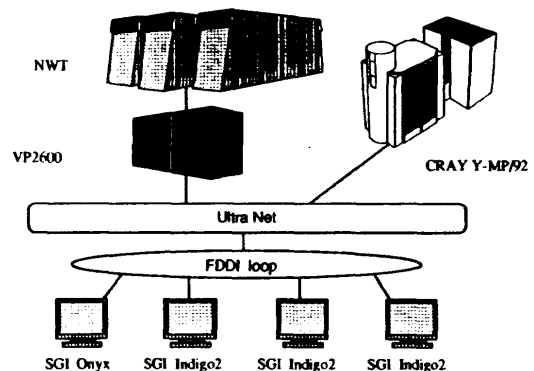


図1 可視化システムの構成

分散処理を効率良く行うためのもう一つの鍵は、ソフトウェアである。流線等を予め自分のプログラムで計算しておくというような疑似的な分散処理も可能であろうが、それでは利用者の要求を満たす多くの洗練された機能は望めない。ここでは、米国CEI社(Computational Engineering International, Inc.)で開発されたアプリケーションEnSightTM(前身はCray Research社で開発されたMPGSTM)を導入することでそれを実現した。図2は、EnSightTMの内部構成を示したものである。EnSightTMの操作は全てGWS側のユーザインターフェースを通じて行われ、CRAYとGWSとの命令を含むデータは全てソケット通信にて転送される。EnSightTMでは、GUIに

Motifを採用し、メニュー型式で可視化の機能が選択できるようになっており、通常の可視化ソフト同様、等高線表示、等値面表示、ベクトル表示、粒子追跡等の処理を高速に行うことができる。

ところで、純粋に大規模な計算もさることながら、従来計算時間の点で難しかった三次元非定常流れ解析を、並列処理によって短時間で可能ならしめたことは、NWTの一つの大きな効用であろう。従って、システムの機能として非定常問題の可視化ができることが望ましい。それには、時系列データからアニメーションを作るのを見る側にとっては最も分かりやすいだろう。EnSight™では時系列データを扱うことも可能で、GWS上での会話的なアニメーションや、VTRへのコマ撮り等の機能を豊富に備えている。これらの機能を活用することで、非定常流れの可視化を容易に行うことができる。

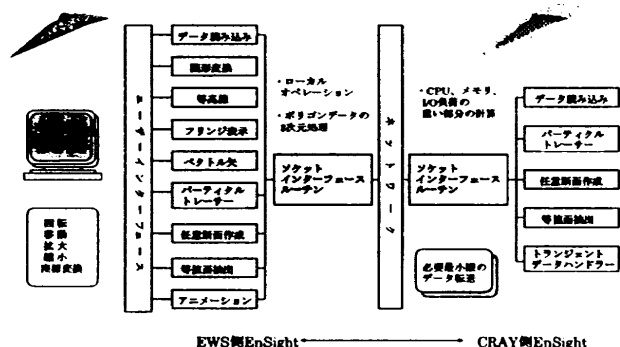


図2 EnSight™の内部構成

4. 分散処理による可視化事例

次に、本システムによって可視化した幾つかの事例を紹介しよう。表1はそれらの事例の計算、可視化の要点を示したものである。ここで、格子の列の[単],[複]は格子が単一か複合か、また[静],[動]は格子が動くかどうか、()内の数字は用いた格子点数を示している。

表1 分散処理による可視化事例の一覧

事例	格子	流れ場	次元	可視化法
1. バックステップ	単・静 (101 × 61)	定常	2	流線, 粒子追跡
2. 三次元後退翼	単・静 (191 × 32 × 51)	定常	3	任意断面等高線
3. 二次元翼	単・静 (209 × 91)	非定常	2	等高線, 粒子追跡
4. 圧縮性乱流	単・静 (96 × 96 × 96)	非定常	3	等高線, 等値面
5. 混合層	単・静 (2001 × 81)	非定常	2	フリッジ表示, 複数窓表示
7. 動静翼列干渉	複・動 (213 × 81 × 21)	非定常	3	フリッジ表示
8. 二重反転プロペラ	複・動 (176 × 288 × 41)	非定常	3	フリッジ表示, アニメ

ここでは、システム及びEnSight™の能力を診るために、様々なサイズ、種類のデータを用意し、いろいろな可視化法を試みた。特に、事例3～8は非定常解析を行い時系列データを扱った。さらに、どの場合についてもアニメーション化することを試み、最終的にVTRにした。

図3～9は、各事例における可視化の様子を参考程度に示したものである。計算条件等は図に付記した。もちろん実際の表示はカラーで解像度も良い。

図3はバックステップを過ぎる流れを可視化したものであるが、ここではAnimated Tracesという機能を用いて粒子の軌跡を示した。同図でComputation, Experimentは計算、実験における再付着点の位置を示している。図4は、翼周りの三次元流れの計算である。2D Clipという機能を用いて断面を作成し、Contourで断面内のマッハ数の等高線を描いた。図5は、大迎角の二次元翼周りの非定常流れを扱ったものである。ここでは、非定常データに対するパス・ライン(質量の無い粒子の軌跡)と呼ばれる線群をParticle Tracesの機能を用いて表示した。図6は、圧縮性一様等方性乱流のDNSの結果から、密度の等値面をIso Surfaceの機能を用いて表示した。図7は、混合層の渦度分布を面塗り表示したものである。EnSight™ではこのように複数の窓を開くこともできる。図8は、動静翼列を過ぎる非定常流れのマッハ数分布を面塗り表示したものである。ここで、計算したのは1ピッチ分だけであるが、周期性の条件を用いて複数領域を表示している。また、この場合、格子も動くという可視化の状況としては最も複雑な状況に対応しているが、問題なく処理を終えた。図9は、二重反転プロペラを過ぎる流れから表面の圧力分布を表示したものである。ここでは、Keyframeアニメーションの機能を用いて、モデルを回転させながら非定常データを可視化した。なお、図7～9ではフリッジ(塗りつぶしコンター)表示を行なった。

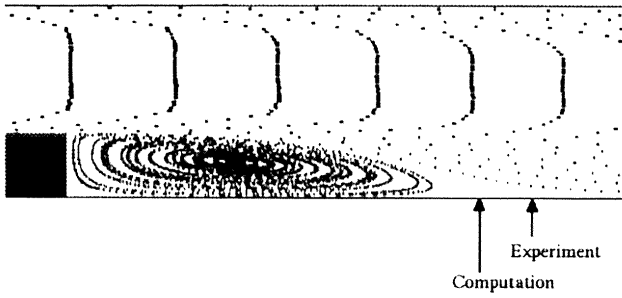


図3 粒子追跡—バックステップ流れ
($D/H = 2, Re = 45000$)

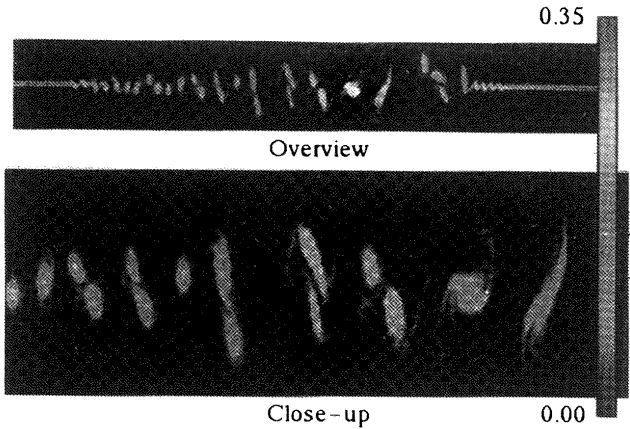


図7 渦度の等値面—混合層 ($M_c = 0.5$)

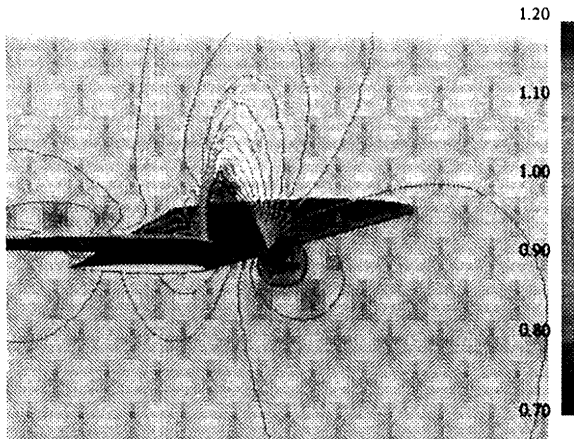


図4 ある断面でのマッハ数の等高線—後退翼を過ぎる剥離流れ ($M_\infty = 0.84, \alpha = 6.06^\circ, Re = 1.1 \times 10^7$)

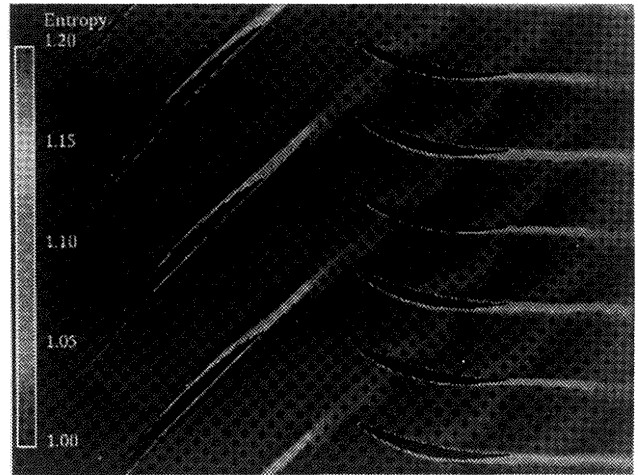


図8 エントロピーの分布—動静翼列干渉
($M_\infty = 0.51, P_{12} = 1.63, Re = 4.6 \times 10^6$)

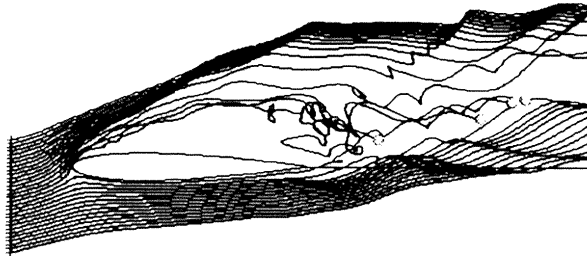


図5 パス・ライン—二次元翼を過ぎる大迎角剥離流れ
($M_\infty = 0.4, \alpha = 15^\circ, Re = 10^4$)

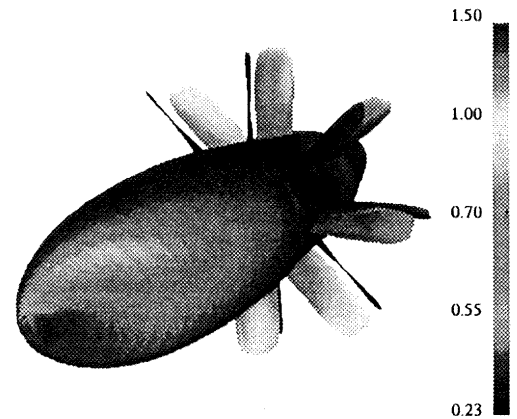


図9 表面の圧力分布—二重反転プロペラを過ぎる流れ
($M_\infty = 0.7, J = 3.2, \alpha = 20^\circ$)

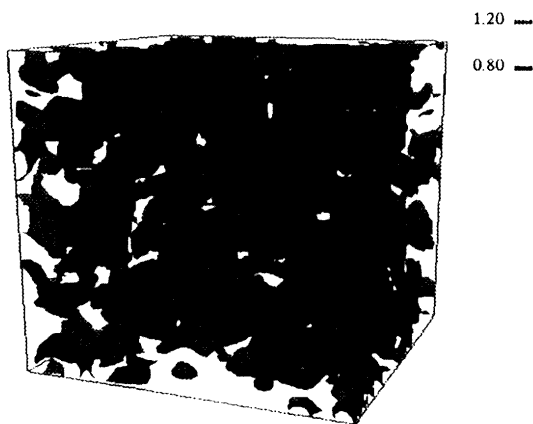


図6 密度の等値面—圧縮性—様等方性乱流
($M-t = 1.1, Re_\lambda = 30$)

5. まとめと今後の展望

大規模流体計算のための分散処理による可視化システムの構築について述べた。また、アプリケーション EnSight™を使用した可視化の実例を紹介した。システムの機能や特徴の概略がおわかりいただけたかと思う。本システムによって、NWT からの大規模な解析結果を、

容易に可視化できるようになった。また、今まで難しいとされてきた三次元非定常流れの可視化が、比較的簡単にできるようになったことの意義は大きいと思われる。

このように、一見万能のように見える分散システムであるが、欠点や問題がない訳ではない。

一つは、EnSight™がオイルフロー、ボリュームレンダリング等の機能をサポートしていない点である。これらの機能については、バージョンが上がれば対応されるだろう。最近、AVS等の他の可視化ソフトの中にも分散環境に対応するものが存在するので、そちらを使うことでこの問題は成功裡に解決できるであろう。

もう一つは、分散環境下でも表示の種類によってはWSにかかる負荷が増大してしまうことである。例えば、図6の乱流の等値面の表示では、格子サイズはたかだか 100^3 程度にもかかわらず、ポリゴンデータだけで256MBのメモリが必要となり、アニメーションを作成する場合にはコマ撮りが必要であった。従って、さらに大規模で複合的なデータを扱おうとする場合、GWSを使用した可視化ではもはや限界があると考えられる。

また、大規模な非定常データの可視化を行う場合に、ディスク上のファイルサイズが非常に大きくなってしまいうという問題も軽視することはできない。解析の時間間隔を短くすれば、より詳細な情報が得られる反面、多くのディスク容量が必要になり、一度に作成できるアニメーションの長さが限られてしまう。

これらの問題を解決する一つの有効な方法は、スパコン上で計算と可視化を同時に進める(リアルタイム・アニメーション)ことである。計算と可視化の同期をとり、必要なステップ分の計算を行った後すぐに可視化を行うようにすれば、ディスク上のファイルは必要最小限で済む。もし、会話性を重視するのであれば、AVSのような汎用可視化アプリケーションを利用すれば良いだろう。現在のところ、計算と可視化プログラムとの同期をとるのは技術的にそう難しくはなさそうである。ただ、計算に要する時間と可視化に必要な時間との間に開きがあるような場合にどうするかが問題である。これについては、スパコン上で可視化後の画像データをメモリ上に蓄積し、蓄積後のデータをUltraNetのフレームバッファに転送することで対処可能であろう。幸いなことに、航技研ではスパコン上での可視化については十分実績がある。また、UltraNetのフレームバッファが用意されているので、この可視化形態の構築を実現する環境はすでに存在して

いる。さらに、CRAYの膨大なメモリリソースを利用することによって、長時間のアニメーションを作成することも可能だろう。これらを前提に、日本クレイ(株)と航技研では今後、「リアルタイム可視化システム」の構築を進めて行く予定である。

参考文献

- 1) 三好甫,「数値風洞:要求要件と概略」,航空宇宙技術研究所特別資料SP-16(1991),pp.91-97.
- 2) Grimsrud, A. and Lorig, G., "Implementing a distributed process between workstation and supercomputer," Cray Research Inc., (1992).

付録. EnSight™による可視化の実際

ここでは、参考のためにEnSight™によって可視化する際の注意点などについて述べる。

まず、データ形式やファイルシステムについて、周知のようにNWTとCRAYではバイナリのデータ形式が異なる(NWTはIEEE, CRAYは独自)のでEnSight™でNWT上のファイルを直接読み込むことはできない。そこで、コンバータが必要になって来る訳だが、CRAYではassignと呼ばれるシェルコマンドが用意されているので、これを使えば簡単なデータ変換のプログラムを一本作成するだけで済む。具体的には、変換プログラムを実行する前に

```
assign -a filename -F f77 -N ieee u:4
```

を実行するか、CRAYのFORTRANプログラム内で

```
casgn='assign -a filename -F f77 -N ieee u:4'
call ishell(casgn)
```

と指定すれば、その後は装置番号4番のファイルに対して通常のread, writeが使える。なお、倍精度のデータに対しては-N ieee_dpと指定すれば良い。

一方、EnSight™では、入力データとして、形状ファイル、出力ファイル(スカラーまたはベクトル)及びヘッダ・ファイル、を用意する必要がある。このうちヘッダ・ファイル(テキスト)には、計算の情報や解の性質を示すフラグが書かれている。ヘッダ・ファイルの作成については、簡単なスクリプトを用意した。

EnSight™は幾つかの読み込みデータ・フォーマットに対応している。ここでは解析に構造格子を用いた関係で主にPLOT3D形式を利用した。

PLOT3D 形式は、形状ファイルを

```
write(3)jmax,kmax,lmax
write(3)((x(j,k,l),j=1,jmax),k=1,kmax),l=1,lmax),
((y(j,k,l),j=1,jmax),k=1,kmax),l=1,lmax),
((z(j,k,l),j=1,jmax),k=1,kmax),l=1,lmax)
```

スカラー・ファイルを

```
write(3)jmax,kmax,lmax,ndata
write(3)((f(j,k,l),j=1,jmax),k=1,kmax),l=1,lmax)
```

という形で書かれたものである。ここで、ndata は読み込むスカラー値の数を表す。場合によっては、EnSight 形式が都合良いこともある。このような場合には、PLOT3D → EnSight の変換コンバータを使用すればよい。

次にアニメーション機能について。EnSight™では、Flipbook と Keyframe という 2 タイプのアニメーションが利用できる。このうち、Flipbook を用いればリアルタイム・アニメーションが可能で、そのまま VTR に流し撮りすることもできる。一方、Flipbook で WS のメモリ上にロードできないような大規模なモデルの場合には、Keyframe によって 1 ステップずつ可視化を行うことができる。Keyframe アニメーションの機能と MINIVAS や VLAN といった業界標準の VTR へのインターフェースとのリンクにより、ステップ数に依存することなく長時間のアニメーションの作成が行える。

EnSight™に関するさらに詳しい情報については、いくつかのマニュアルが用意されている³⁻⁵⁾のでそちらの方を参照されたい。

付録文献

- 3) EnSight User Manual for Version 5.2, Computational Engineering International, Inc., 1994.
- 4) EnSight Learning Guide for Version 5.2, Computational Engineering International, Inc., 1994.
- 5) EnSight Learning Guide for Version 5.2 (日本語版), 日本クレイ (株), (1995).