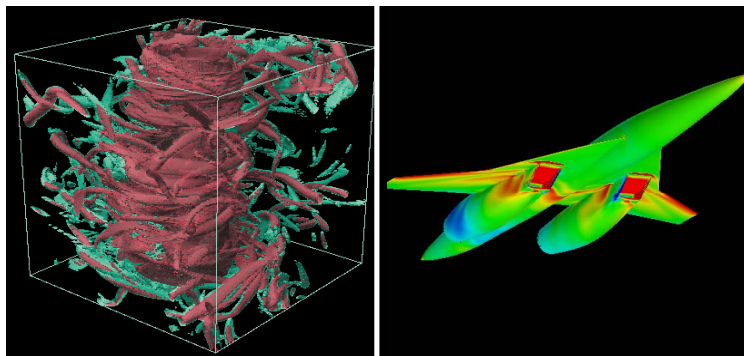


パワーウォールによる大規模流体解析の可視化

松尾裕一

航空宇宙技術研究所

目的: 航空宇宙技術研究所（以下、航技研）では、高性能スーパーコンピュータを用いた大規模CFD（Computational Fluid Dynamics、計算流体力学）解析を先駆的に実施し、流体基礎現象の解明や商用機・実験機の研究開発に適用している。近年の傾向として、扱う対象が次第に大規模化、複雑化、多様化の方向に向かっている。規模的には、乱流や燃焼現象の基礎シミュレーションでは、1000万～10億メッシュ、航空機・宇宙機の空力解析では、500万～1億メッシュの規模の問題を取り扱い（図1）、出力データは量にして時に100GBを超えるようなケースも現出している。複雑化という点で言えば、領域分割法の一つであるマルチブロック構造格子法を用いることで、エンジンナセルやフラップのついた全機体まわりの流れ解析やエンジン内部の段流れ解析が可能になって来ている。多様化という面では、時間とともに現象が変化したり物体が移動する非定常（過渡的）問題や、流体・構造などの多分野連成問題が扱われるようになって来ており、いずれの場合も既にプロダクションランのレベルでの実問題への適用が始まっている。



(a) 乱流の基礎シミュレーション (b) 航空宇宙機の全機体解析

図1 航技研における大規模CFD解析の例

このような状況の中で、航技研は、可視化処理専用のサーバとして、CRAY Y-MP M92（700MIPS、8GBメモリ）から成る中央可視化システムを運用して来たが、経年による性能の陳腐化や処理の非効率性が顕在化するとともに、新たな需要や期待が高まりつつあった。新システムの性能や機能を絞り込んで行く中で、純可視化システムとしての性能・機能の他に、研究開発スタイルの革新による業務効率の改善やアピール効果の向上に関する可能性も検討対象とし、新可視化システムが持つべき目標と戦略を次の3点に集約した。

1) CFD解析の複雑大規模化及び多様化に対応した可視化処理の高度化

リアリティ

- 解像度、写実性、没入感の向上による可視化力の増強

- 空間的な位置検出や位置関係の把握の容易化
- 解析の健全性・妥当性を短時間で判断し、無駄な計算を排除、過渡現象を詳細把握

2) CFD解析と実験 / 設計プロセスとの融合による協調的研究開発環境の確立

コラボレーション

- 計算結果、実験結果、設計構想の同一画面上での比較によるデータ信頼性及び生産性の向上
- 大型画面を用いた表示による利用者コミュニケーションの能率化

3) 研究開発成果のアピール効果の向上と広報的利用の推進

コミュニケーション

- 成果を多くの人に効果的に伝えるコンテンツ作成力
- 教育用、広報用として利用

上記の戦略を典型的な技術要件に置き換え、それに対して現状与えられ得るソリューションを検討した。(表1参照) 可視化力とアピール効果については、「何を見るか、どう見るか」という可視化の本来の目的の他に、「何をさせるか、どうさせるか」という視点からの考慮を加え、ステレオ表示や3Dポインティングの機能を備えた平面型大画面表示(パワーウォール)を採用することとした。大規模データとして1G点(10億点)を高速に処理することを想定し、高性能可視化サーバが必要と判断し、グラフィックスエンジンの仕様やメモリ量を決定した。計算サーバと可視化サーバの間で、ファイルを介しないリアルタイム処理については、GSN(Gigabyte System Network:ピーク転送性能800Mbps)と専用ソフトウェアによって対応することとした。また、サーバの持つ能力を有効に活用し、ユーザにとって最適なシステム利用性を構築することを念頭に置き、ユーザを3ランク(特別パワーユーザ、普通パワーユーザ、リモートユーザ)に階層化し、資源に応じた可視化利用環境を提供することを考慮した。

表1 新中央可視化システムへの要求要件とソリューション概要

要求要件	ソリューション
可視化力、アピール効果	大画面表示、ステレオ表示、3Dポインティング
1G点のデータ処理能力	高性能可視化サーバ(グラフィックスエンジン、64GBメモリ)
リアルタイム処理	GSNによる計算サーバとの結合、専用ソフトウェア

方法: 導入した新中央可視化システムはCeViS(Central Visualization System)と呼ばれ、図2のように可視化サーバ、パワーウォール型大画面表示装置、高性能グラフィックス端末、ノンリニアビデオ編集装置などから成っている。



図2 新中央可視化システム (CeViS) の構成概要

パワーウォール型大画面表示装置 (エアロビジョン)

CeViS システムの中核をなすのがパワーウォール型大画面表示装置 (エアロビジョン) である。前記の技術要件を満たすために、次のように仕様を決定した。全体の方式を決める上でスペースは重要なファクターであるが、今回の場合、スペース的余裕がなかったため、CAVE 型やドーム型は排除した。表示の不正確さから曲面スクリーンも対象外とし、想定人員、機能性、拡張性などからウォール型平面スクリーンが残った。画面の大きさは、実験機 (6m 程度) やエンジンが実物大で表示できるようなサイズ (4.6m x 1.5m) とした。ステレオ表示が必要ということから、プロジェクタは3管式とし、できる限り明るくしたいということから BARCO 社製の REALITY 812 という 12 インチ管を選定した。本品は、SEMU と呼ばれる内蔵エッジブレンディングユニットを有する。投影方式は、スクリーンに影が映るのを避ける等の理由からリア投影方式を選んだ。この方式の場合、バックヤードスペースが必要になるが、映像を鏡で反射させることでバックヤード部分を最小化する方式を採用し、プロジェクタや反射鏡の取付けのために鋼鉄製ボックス型構造とした。スクリーンは、映像の正確さを勘案し、ハードスクリーンとした。拡散コーティングは、客席側ではなく裏側に施すことにより、拡散面の保護、ボックス内での光乱反射の防止を図った。大画面の構成は、3面を横に結合させる方式とし、解像度は単面で現在の最高解像度 (SXGA) に耐え得るようにした。以上から決められた構成及び主要スペックを図3に示す。図4の左は前面写真、右は内部の写真である。技術的詳細は、文献1 - 3を参照されたい。

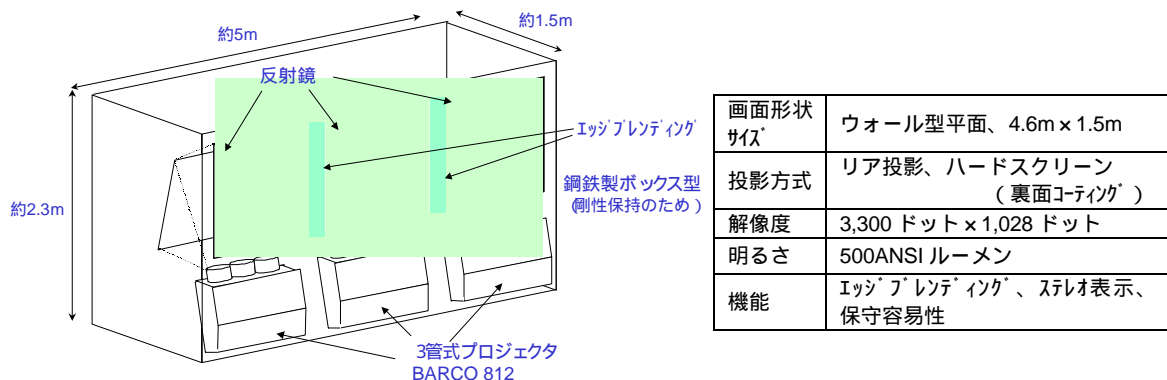


図3 パワーウォール型表示装置の構成と仕様

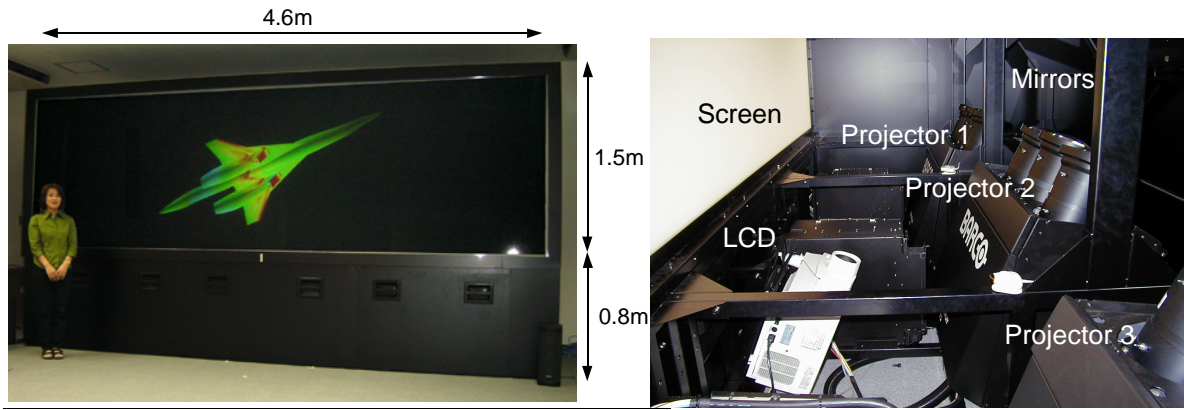


図4 パワーウォール型表示装置の前景と内部構造

実際に使えるシステムを組むためには、制御方式、ソフトウェア、付加機能、維持管理などを別途検討する必要がある。システムの制御は、図5に示したように、可視化室内に専用の制御用のデスク（制御卓）を用意し、オペレータが制御を行うような形式にした。プロジェクタの信号制御、画像ソースの切替えなどは、タッチパネルによりワンタッチで切り替えられるようにし、初心者利用性にも配慮した。ソフトウェアは、制御ソフトウェアと可視化アプリケーションが要る。可視化アプリは、専用ソフトを作り込んでしまうと表示バリエーションがなくなるので、できるだけ流通しているものを使うように設計した。大画面表示に対応する可視化アプリとして、AVS/MPE、EnSightGOLD、COVISEを導入した。FIELDVIEWなどのアプリも使えるように1パイプで表示するモードを設けた。付加機能として、3Dポインティング、会議用、パソコン画面表示などを考慮した。

結果: ここでは、幾つかの最新の可視化事例を紹介することにより、パワーウォール型表示システムの得失について論じてみたい。

パワーウォール型表示の特徴の第1は、複雑形状の全体像を一画面で見ることができることである。図5は、航空機全機まわりのCFD解析結果から表面の圧力分布を示したものである。

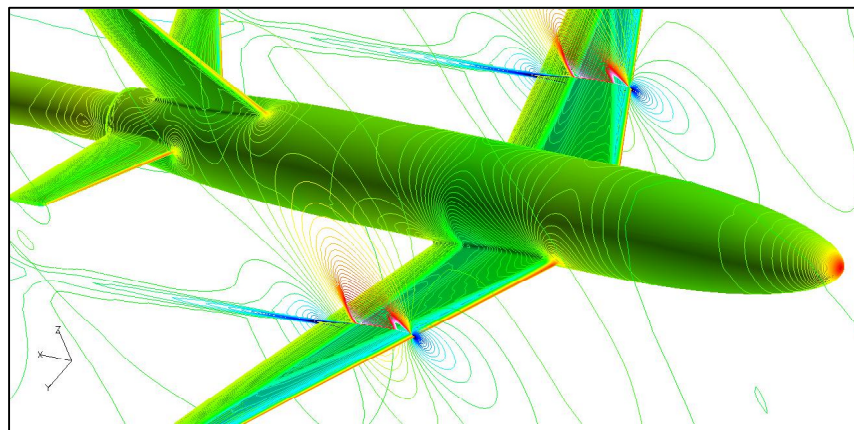


図5 航空機全機まわりのCFD解析結果（表面圧力）

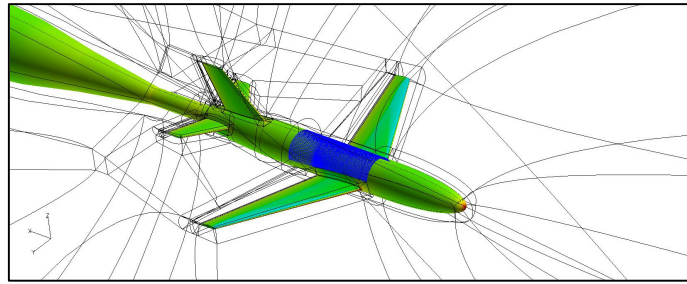


図6 航空機全機 CFD における空間ブロック分割の様子

この解析では、図6に示したように空間内に87ブロック、650万点が用いられている。これ程の規模のメッシュ分割が用いられるのは、境界層や衝撃波をきちんと解像し、数カウントの解析要求精度に応えようとしているためである。ブロック分割することで、単一格子では不可能な格子点の適切な分布を達成することができる。しかし、このブロック分割を、通常のデスクトップディスプレイで処理しようとする、それを作成する場合も含め、ブロック同士の相互関係や接合状態を把握するのが困難になり、専門のスタッフに任せざるを得なくなる。しかし、大画面に表示すると、全体把握が可能になるので、ミスや混乱が軽減されるとともに確認も容易になり、時間や経費の節減になる。航空宇宙の機体形状は細長い場合が多いので、横長画面は全体表示に適する。また、物体が移動していくような場合にも大画面表示は都合良い。ただし、全体表示はサーバに負担をかけるので、データの間引きなどの工夫が要るかもしれない。

大画面表示の特徴の第2は、複雑形状の細部まで見ることができることである。図7は、ジェットエンジン内の翼列段を過ぎる流れを5000万点以上の格子点数を用いて解析したもので、翼列の半径一定のある断面で切断したときのエントロピの分布を表示している。対象がこれほど細かくなると、デスクトップディスプレイの場合には表示が小さくなりすぎて画面に顔を近づけたくなるが、これを大画面表示で見ると、細部の状況まで比較的 naturally 理解することができる。

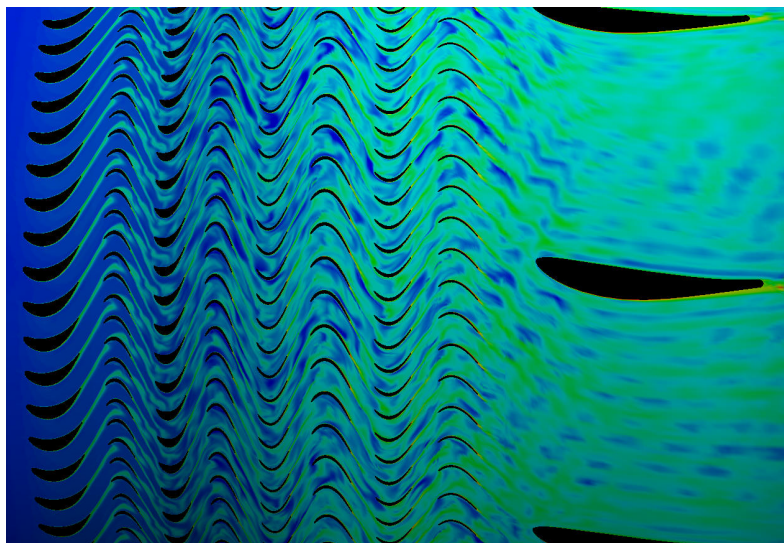


図7 エンジン内の半径一定断面上のエントロピ分布

第3の特徴として、感覚・印象の違いを指摘することができる。図8は、水素ガスの燃焼解析をボリューム可視化したものである。計算自体は、2000万点以上を使った極めて大規模なものである。同じコンテンツでも、例えばノートパソコン上で見るのと、大画面上で見るのとでは感覚的にかなり違った印象がある。学術的な記述ではないが、アピール度、写実感、鮮明度などこれほど違うものかと驚かされる。単に慣れの問題なのかもしれないし、個人差もあるだろうが、スケール効果、体験感とでも分析することができるだろうか。同じ画像を異なる大きさの画面に表示してどう感じられるかといった問題を専門的に検討してみる必要があるかもしれない。

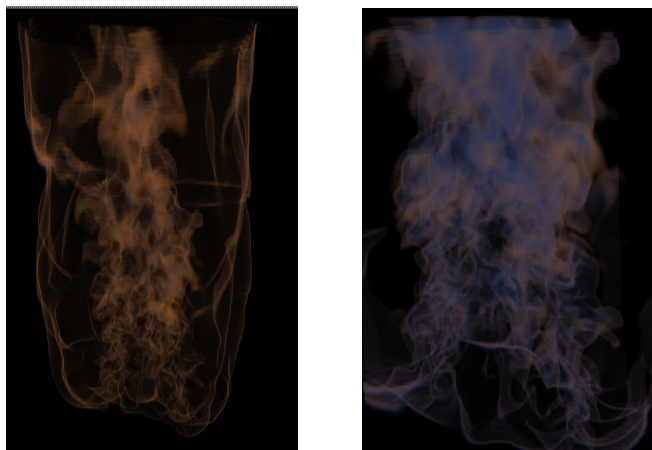


図8 水素ガス燃焼のボリューム可視化

CeViS システムは、3Dポインティング機能を有する。このような機能を導入したのは、複雑形状に対し、通常のマウス操作だけでは、オブジェクト操作や空間位置把握に限界があるとの指摘があったからである。ここでは、COVISE と呼ばれるシステムを導入した。ペンシル型のポインティングデバイスとステレオ表示を組み合わせることで、表示対象に対する回転、移動、断面カット等の操作、あるいはウォークスルーなどをペンシルの回転、移動により直接的に行うことができる。(図9参照) 適用例が未だ少なく未知な部分も多いが、新たな可視化方式として期待が持たれる。



図9 3Dポインティングの実際

結論: 以上、パワーウォール型大画面表示装置を中核とする航技研の新中央可視化システムの戦略、概要、可視化事例、課題などを紹介した。この種のシステムの宿命として、どうしても設備が大仕掛けとなり、経費もそれ相応の規模が必要となることは避けられない。それだけに、政策的必要性や学術的重要性、技術的先進性を十分に説明しきる必要がある。パワーウォール型大画面表示装置を実際に構築して映像を見てみると、その迫力、写実性、臨場感などの可視化システムとしての能力(=可視化力)は予想以上であったといっても過言ではない。それを活かすソフトウェアの充実や運用面での工夫が今後求められる。

どの分野でもそうだと思うが、シミュレーション技術は、計算機性能やグラフィックス性能の向上と相俟って発達してきたため、行き過ぎや過度の期待が必ずある。CFDでも、Colored Fluid Dynamics と言って揶揄されたこともあるが、人間の持つ特に優れた感覚である「視覚」に訴えるために、可視化において、色彩、パターン、表現力、動画などを使うことは、今後とも必要でありさえすればそれなしで済まされるということは決してないだろうと思われる。もちろんその場合、計算結果を如何に忠実に可視化するか、計算結果の特徴を如何にして出すか、というような話題とは少し趣きが違うということを、誤解を避ける意味で敢えて最後に言及しておきたい。

文献:

- 1) 松尾：航技研新中央可視化システムの概要とその戦略，航技研特別資料 SP-53, 2001, pp.149-154.
- 2) An Immersive and Interactive Visualization system for large-scale CFD, Proceedings of FEDSM'03 4TH ASME_JSME Joint Fluids Engineering Conference, Honolulu, Hawaii, USA, July 6-11, 2003.