

ボリュームレンダリングを用いた 3 次元非定常圧縮性流れの可視化 Visualization of Three-dimensional Unsteady Compressible Flow using a Volume Rendering Technique

藤田昌大^{*1}, 東大 IML, 東京都文京区弥生 2-11-16, E-mail masahiro@iml.u-tokyo.ac.jp
葛生和人^{*2}, 東大 IML, 東京都文京区弥生 2-11-16, E-mail kuzuu@ifpj.com
松本洋一郎^{*3}, 東大工, 東京都文京区本郷 7-3-1, E-mail ymats@mech.t.u-tokyo.ac.jp
Masahiro Fujita, IML, The Univ. of Tokyo, Yayoi 2-11-16, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8656
Kazuto Kuzuu, IML, The Univ. of Tokyo, Yayoi 2-11-16, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8656
Yoichiro Matsumoto, School of Eng., The Univ. of Tokyo, Hongo 7-3-1, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8656

Three-dimensional supersonic unsteady flow around a sphere with an opposing jet is numerically solved and visualized using a volume rendering technique. Semitransparent iso-surface layers are created in the present volume rendering and a visualized image is defined as a set of geometrical objects. The image can be also displayed in CABIN (Computer Augmented Booth for Image Navigation) at the University of Tokyo. The visualized flowfield becomes easier to understand in spite of physical complexity of the original flowfield.

1. 研究背景と目的

超音速流中におかれた球の前方淀み点から超音速ジェットを逆噴射すると、流れ場は図 1 のような構造となる。この流れ場は衝撃波、ジェット、剥離領域等、圧縮性流れの典型要素が 3 次元入れ子構造で存在し、さらに流れ場全体が激しく振動する非定常流のため⁽¹⁾、数値計算結果を分かりやすく表現することは容易でない。3 次元数値計算結果を可視化の際にしばしば用いられる、任意の 2 次元断面上で等値線図などを表示させるやり方は、その断面に対して流れ場が対称な場合は完全な表現方法となるが、ここで取り上げるような非軸対称流れ場に対する適当な軸対称断面上での可視化は、見るものに誤解を与える結果になりかねない。定常流の場合は非対称流れ場を正しく理解するために複数の 2 次元断面上での可視化が有効であるが、時間とともに変化する流れ場を可視化画像のアニメーションで表示しようとする、変化する複数の可視化画像を同時に眺めて理解することはきわめて困難である。また、2 次元断面を設けずに流れ場を可視化するために物理量の等値面を構成する方法がある。この方法では、流れ場の構造を表現しやすいよう選ばれた値に対して構成された等値面に光を当てて陰影を付けることによって、流れ場の 3 次元構造の理解を容易にすることができる。ただし、ここで取り上げるような入れ子構造をもつ流れ場に対して複数の等値面を構成すると内側の等値面が見えなくなり、それを避けるために等値面を切断すると 2 次元断面上での可視化と同じ問題が発生する。

一方、比較的流速の遅い非圧縮性流れの可視化にしばしば用いられるボリュームレンダリングでは、移動する流体粒子を表現することによって流れの非定常構造が可視化される⁽²⁾。亜音速流れの場合、物体後方での流れの剥離やそこで生成される渦がしばしば主要な可視化対象となるが、非対称かつ非定常な渦構造の可視化には、2 次元断面上での等値線や 3 次元等値面の構成は良い効果を生むことができない。それに対してボリュームレンダリングは 3 次元空間の奥行き方向の情報を保持したまま 2 次元画像を構成する方法であり、X 線 CT (Computed Tomography) や MRI (Magnetic Resonance Imaging) の画像処理等、医療における画像診断の分野で広く用いられている。

本研究では、ボリュームレンダリングを球まわりの超音速逆噴射ジェット流れに適用し、流体粒子とともに移動しない衝撃波を含む 3 次元非定常圧縮性流れの構造を可視化することを目的とする。その際、ボリューム情報を複数の半透明等

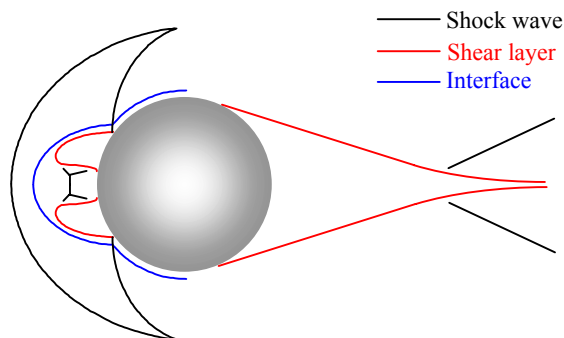


Fig. 1 Supersonic opposing jet flow around a sphere

値面の構成を介して画素情報に変換する方法を開発した。さらに可視化された画像を仮想現実体験のできる没入型多面ディスプレイ・システム CABIN (Computer Augmented Booth for Image Navigation)⁽³⁾で立体表示することによって、複雑な流れ場の構造をより理解しやすく表現する。

2. 流れ場の数値計算

2.1. 基礎方程式と数値アルゴリズム

本研究では基礎方程式として完全気体 3 次元 Navier-Stokes 方程式を採用する。乱流モデルは導入しない。基礎方程式を有限体積法で離散化し、時間積分法に線形三段階法、Newton 反復法、LU-SGS 法を組み合わせた時間 2 次精度陰解法を用いる。この方法は陽解法と異なり、A 安定のため大きな時間刻み幅を取ることができ、さらに時間精度を保つことができる。本研究の流れ場のように計算領域の格子間隔に大きな差がある場合には、2 段階 Runge-Kutta 法よりも計算コストを小さくできる⁽⁴⁾。ここで \mathbf{Q} を保存量ベクトル、 $\mathbf{R}(\mathbf{Q})$ を空間勾配項すると、基礎方程式は次のように表される。

$$\frac{\partial \mathbf{Q}}{\partial t} = \mathbf{R}(\mathbf{Q}) \quad (1)$$

準離散化法に基づいて式(1)の空間勾配項を離散化した後、線形三段階陰解法を適用すると、

$$\frac{3\mathbf{Q}^n - 4\mathbf{Q}^{n-1} + \mathbf{Q}^{n-2}}{2h} = \mathbf{R}(\mathbf{Q}^n) \quad (2)$$

となる。ここで h は時間刻み幅であり、 $\mathbf{R}(\mathbf{Q}^n)$ は離散化された空間勾配項である。式(2)に Newton 反復法を適用すると、

$$\left\{ \mathbf{I} - \tilde{h} \frac{\partial \mathbf{R}(\mathbf{Q}^m)}{\partial \mathbf{Q}} \right\} \Delta \mathbf{Q}^m = -\mathbf{Q}^m + \tilde{h} \mathbf{R}(\mathbf{Q}^m) + \frac{4}{3} \mathbf{Q}^{n-1} - \frac{1}{3} \mathbf{Q}^{n-2} \quad (3)$$

*1 中核的研究機関研究員 <http://jupiter.iml.u-tokyo.ac.jp/>

*2 客員研究員 <http://www.ifpj.com/>

*3 教授 <http://medusa.t.u-tokyo.ac.jp/japanese/member/ymatu.htm>

となる. ここで \mathbf{I} は単位行列, $\Delta \mathbf{Q}^m = \mathbf{Q}^{m+1} - \mathbf{Q}^m$, $\tilde{h} = 2/3h$, また $m=0,1,2,\dots$ は反復回数である. 式(3)を LU-SGS 法⁽⁵⁾で解いて \mathbf{Q}^m を更新する. Newton 反復の回数は5回とした. 一方, 空間勾配項のうち対流項の離散化には2次精度の陰解法用 Symmetric TVD scheme⁽⁶⁾を用いる. Roe's Riemann solver のエントロピー修正係数は線形波に対して0.2, 非線形波に対して0.1とする. また流速制限関数は2変数の minmod 関数である.

2.2. 計算領域と計算条件

球の直径を1として, 球前方に0.5, 後方に2.5, 側方に0.8離れた位置に計算境界をとる. このとき全ての計算境界で流れは超音速となる. この計算領域内に $151 \times 90 \times 101$ 点の O-O 型格子を生成した結果を図2に示す. 最小格子間隔は物体表面とノズル・リップにおいて0.001である. 境界条件として, 計算領域前方は一樣流条件, 後方は自由流出条件, 物体表面は断熱滑りなし壁条件, ノズル出口にはジェット流条件を与え, 中心軸の変数は周囲の格子点における値の平均値とする. また初期条件としてジェットなしの球に対する計算結果を与える. 全計算時間は30 msec, 計算時間刻み幅は $0.5 \mu\text{sec}$ で, このとき最大 CFL 数は12程度となる. なお流れ場の主流レイノルズ数は 1.5×10^6 , 主流およびジェット出口のマッハ数はそれぞれ4.0, 1.5であり, ジェットと主流の総圧比は0.2, 総温はともに300 Kとする. なお, 計算は東京大学情報基盤センターのスーパーコンピュータ HITACHI SR8000/128 の1 node (8 CPU)を用いて行った. 計算に要したCPU経過時間は約400時間である.

2.3. 計算結果

逆噴射ジェットの噴出によって先頭衝撃波は前方に押し出されるが, このとき半球直径 D で無次元化された中心軸上の衝撃波離脱距離 S の時間履歴を示したのが図3である. 時刻0 msecに逆噴射ジェットの噴出が開始された後, 衝撃波離脱距離は5倍程度まで増加し, その後2.5倍程度との間で激しく振動する. 振動波形を詳細に観察すると二つの異なる周波数をもつ振動から成り立っていることが分かるが, 周波数が3 kHz程度の振動はジェットの構造変化による大振幅の振動, 一方周波数が12 kHz程度の振動はジェットの渦放出による小振幅の振動であると考えられている.

図3の灰色部分, すなわち逆噴射ジェットの噴出開始前後において球に働く, 一樣流の密度 ρ , 音速 c および D で無次元化された空気力 F の時間履歴を示したのが図4である. 逆噴射ジェットによって軸力すなわち球の抵抗が減少するとともに, 横力すなわち流れの非対称性が生じている. これらの

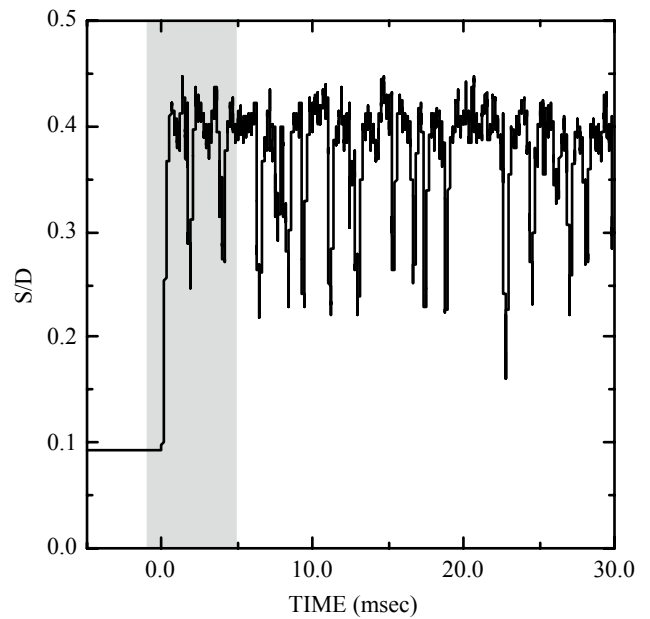


Fig. 3 Time history of shock distance on symmetric axis

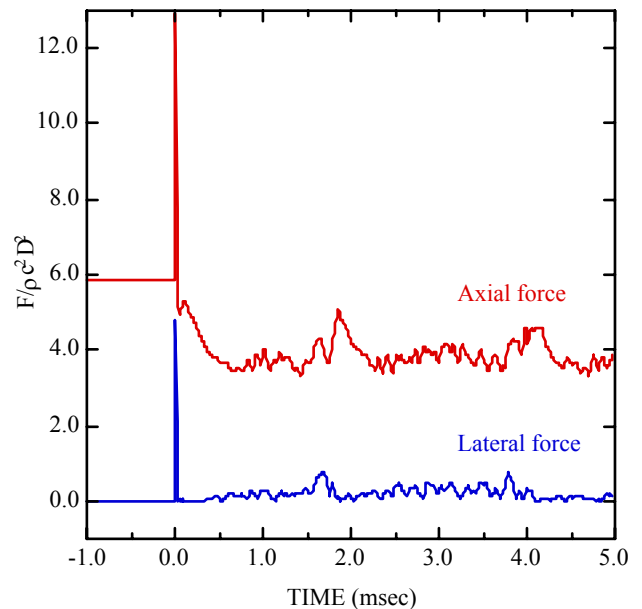


Fig. 4 Time history of aerodynamic force on sphere

力の変動は衝撃波離脱距離の変動に対応しており, 衝撃波離脱距離が減少した時に抵抗が増加し, 流れの非対称性が增大していることがわかる.

それでは, このような衝撃波や空気力の変動を生み出す流れ場はどのような構造をしているのだろうか? 以下では, 時間変化する3次元流れ場をボリュームレンダリングを用いて可視化することによって, 衝撃波や空気力の変動メカニズムの解明を目指す.

3. ボリュームレンダリングを用いた可視化

3.1. レイ・キャスト法

ボリュームレンダリングの目的は3次元空間情報(ボリューム・データ)をできるだけ忠実に2次元ディスプレイに描画(レンダリング)することである. ボリュームレンダリングは3次元物体の表面形状を描画するサーフェスレンダリングと違って物体内部の情報を表現することができるため, 空間内の密度分布等を2次元断面を設けずに表すことができる.

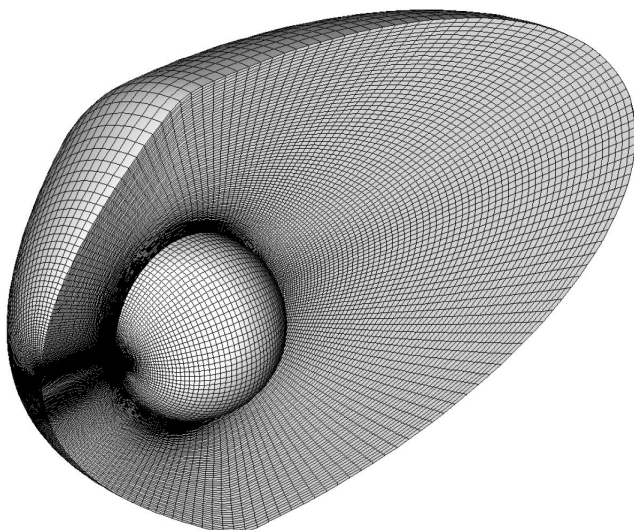


Fig. 2 Computational grid

ここでレンダリングの出力はディスプレイの各画素における RGB 輝度であるから、レンダリングの計算は画素毎におこなう。一般的なボリュームレンダリングでは、ディスプレイの各画素から何らかの投影法に従って視線を伸ばし、視線上の離散的な点における空間情報をその点での RGB 輝度に変換するとともに、それらを視線上で混合することによって、最終的に各画素の RGB 輝度を求めることになる。この方法をレイ・キャストリングといい、図 5 にその概念を示す。

空間情報を変換する離散点は、表現したい情報を持つ値に応じて決められる。すなわち情報の値がある大きさを持つ視線上の位置の中から離散点を選ぶことで、空間内の物体形状を抽出することができる。さらに、離散点における情報の値の勾配方向を考慮して RGB 輝度への変換を行うことによって、抽出された物体形状に光源による陰影が付き、形状を立体的に表現することができる。また、各離散点で得られた RGB 輝度は離散点毎に与えられる透明度に応じて混合されるため、物体内部の情報を強調して表現することが可能である。

このようなレイ・キャストリング法に基づくボリュームレンダリングはアルゴリズムが簡単であり、直交座標空間に対して容易に適用できる。ただし、一般座標空間における流体計算結果に適用する場合には、視線が通過するボクセルを求めためや、物体境界を判別して対象空間を制限するための計算量が増加する。また流体計算結果を可視化して分析する

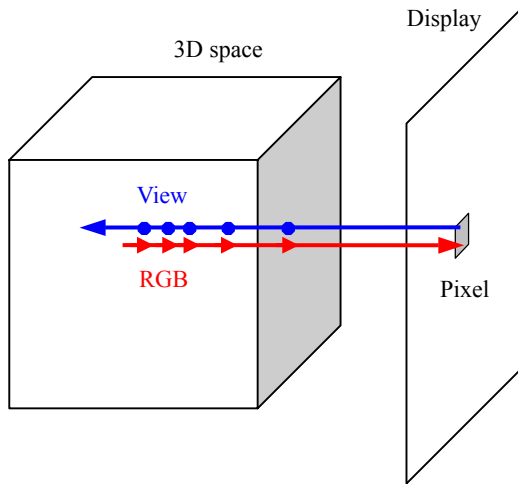


Fig. 5 Ray casting method

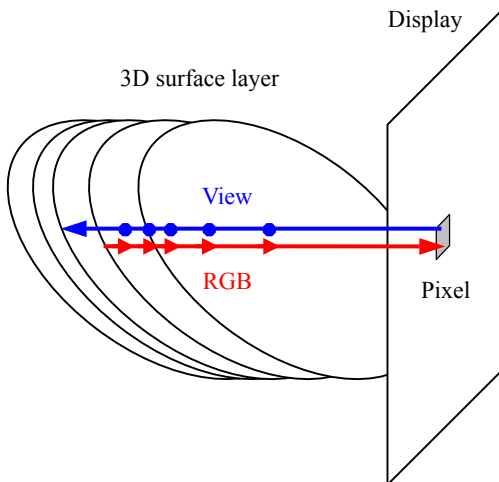


Fig. 6 Surface layer rendering method

際には、しばしばマウス等を用いて視線をインタラクティブに変更するが、上述の方法では視線を変更する度にすべてのレイ・キャストリングをやり直さなければならず、多大な計算量を必要とする。したがってこれまでボリュームレンダリングには、スーパーコンピュータや特別なグラフィクス・ハードウェアを搭載したワークステーションが用いられてきた。

3.2. サーフェスレイヤー・レンダリング法

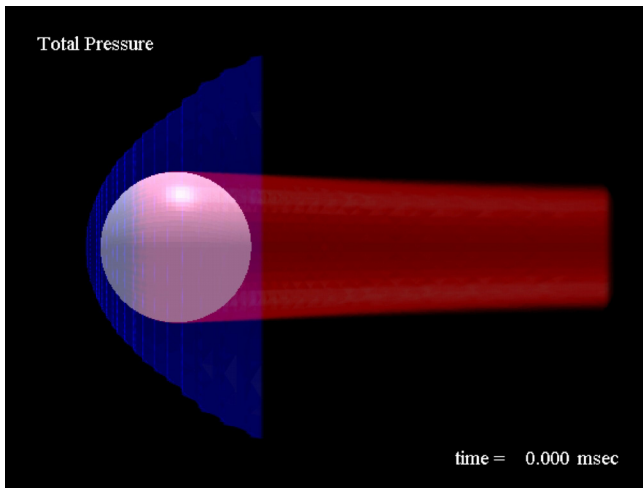
これに対して本研究では、一般のデスクトップ・コンピュータ上でインタラクティブに操作できる計算量の少ない、流体計算のために開発されたボリュームレンダリング手法⁷⁾を採用した。サーフェスレイヤー・レンダリングと名付けられたその方法の特徴は、図 6 に示すように 3 次元空間内に構成される半透明等値面層である。すなわち視線上に離散点を設定するかわりに、あらかじめ透明度の設定された複数の等値面を構成しておき、各視線がそれらと交わる点を RGB 輝度を得る離散点とする方法である。この方法は RGB 輝度計算に用いられる値の勾配を利用して、実際にそれと垂直な方向に等値面を構成しているということができ、いったんある視線方向からの可視化画像をつくれれば、空間内にポリゴンで構成される複数の半透明等値面オブジェクトを持つことになる。等値面の構成は物体を含む一般座標空間で容易に行うことができるし、等値面層に対するレンダリングは、サーフェスレンダリングの重ね合わせとして処理できる。このため本アルゴリズムは OpenGL を用いて容易に実装でき、インタラクティブな視線変更が少ない計算量で実現できる。

図 7(a)~(c)にサーフェスレイヤー・レンダリング法を用いて可視化された流れ場を示す。ボリューム・データとして流れの総圧を用いた。20 層からなる青色半透明等値面層および 30 層からなる赤色半透明等値面層は、それぞれ先頭衝撃波と剥離領域を表現できるよう、その値を選んでいる。図 7(a)はジェット噴出直前、(b)は衝撃波離脱距離が極大になる時刻、(c)は衝撃波離脱距離が極小になる時刻を表している。これらの画像と図 3 および図 4 を比較することによって以下のことが分かる。すなわち逆噴射ジェットの噴出に伴ってジェット周囲に剥離領域が生成されるとともに、流線の曲率減少と非定常流による運動量輸送の増加によって境界層の剥離が遅れ、球後方の剥離領域が縮小して抵抗減少の原因となっている。またジェットが崩壊して衝撃波離脱距離が減少すると、ジェット周囲の剥離領域が縮小して抵抗が一時的に増大するとともに、ジェット崩壊による非対称渦の生成によって流れに 3 次元性が生じている。本方法で構成された半透明等値面層によって、球前方の衝撃波、剥離領域、ジェットの入子構造が明瞭に可視化された。なお、可視化作業は著者の一人が開発した流体可視化ソフトウェア FLScope for Windows を用いて、デスクトップ・コンピュータ Dell Precision 210 (Intel Pentium III 800MHz / 256MB RAM / nVIDIA RIVA TNT2 Pro) 上でおこなわれた。一枚の画像生成に要する時間は約 1 分である。

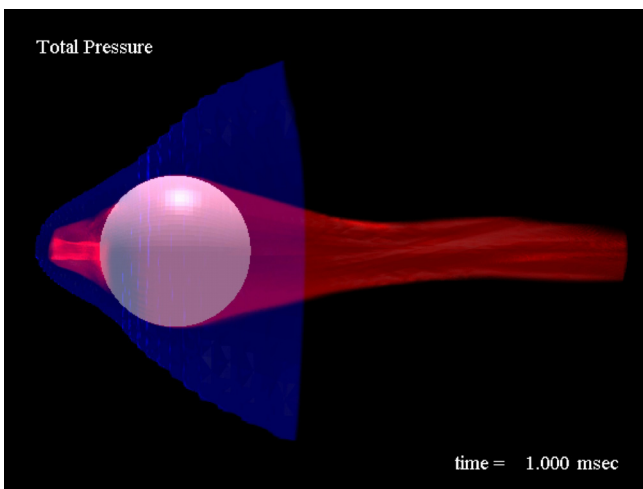
4. CABIN での可視化画像の表示

4.1. CABIN の特徴と構成

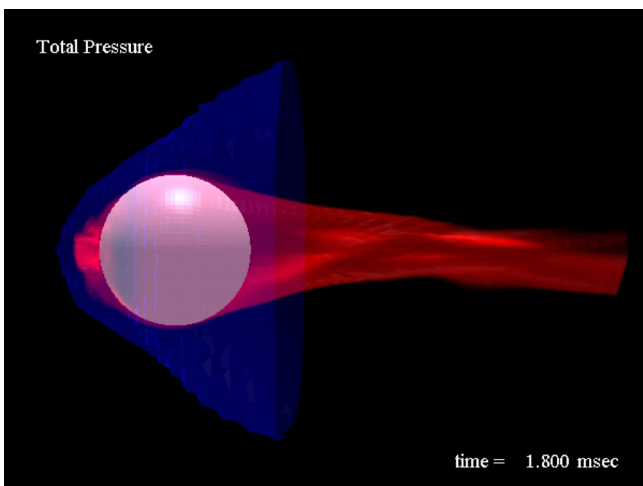
東京大学インテリジェント・モデリング・ラボラトリーに設置されている CABIN は 3 次元空間情報を高い臨場感で視覚表現するための仮想現実生成装置である。その特徴は、2.5m 立方空間の後方をのぞく 5 面を半透明スクリーンで囲んだ広視野角没入型ディスプレイと、液晶シャッター眼鏡を用いた左右視差による立体視、および磁気センサによる視線位置および方向のフィードバックにある。没入型ディスプレイによって同時に数人が広視野角立体映像を共同体験できるとともに、ディスプレイ内部で視線を変えながら移動できるだけでなく、入力デバイスによる視線方向の自由な変更も可能である。



(a) $t = 0.0$ msec



(b) $t = 1.0$ msec



(c) $t = 1.8$ msec

Fig. 7 Visualized flowfield by volume rendering

CABIN のシステム構成を図 8 に示す. 5 面のステレオ画像がグラフィクス・ワークステーションで作成され, 5 台の液晶プロジェクタによって各スクリーンに後方から投影される. このとき右眼と左眼用の映像が交互に映し出され, 赤外線エミッタによる信号に応じて, 液晶眼鏡のシャッターが開閉する. また CABIN 周辺に張られた磁場と液晶眼鏡に取り付けら

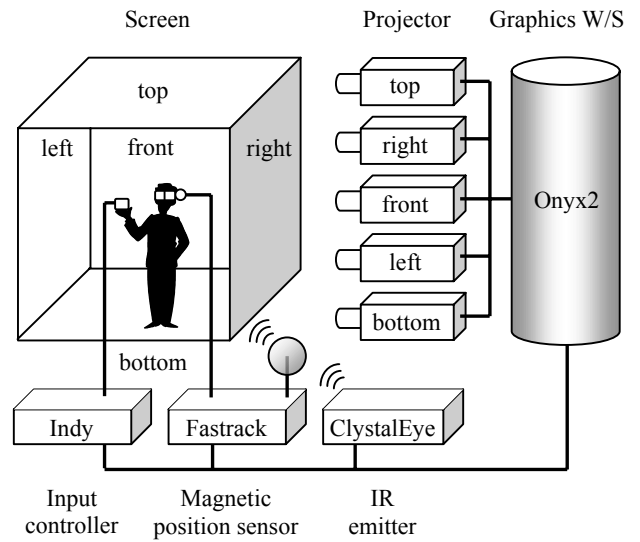


Fig. 8 Configuration of CABIN

れた磁気センサによって得られた視線方向に応じて画像が書き換えられるとともに, 操作者の入力信号は入力制御器を通してグラフィクス・ワークステーションに伝えられる.

4.2. CABIN ビューワー

CABIN を用いた流体計算結果の可視化には, スペースプレーンまわりの流線をインタラクティブに表示した研究⁽⁸⁾があるが, ボリュームレンダリング画像を CABIN に表示した例はない. これはレイ・キャスト法によるボリュームレンダリングの結果が 2 次元画像であり, 3 次元空間情報を持たないことによる. 一方, サーフェスレイヤー・レンダリング法ではボリュームレンダリングの結果を多数のポリゴンからなる 3 次元オブジェクトとして定義することができる. そこで本研究では, 球まわりの超音速逆噴射ジェット流れのボリュームレンダリング画像をファイルに出力し, CABIN 用に開発したビューワーVISOR (Visual Interface for 3-dimensional Stream with Outstanding Reality)を使用して立体映像の表示をおこなった.

VISOR は OpenGL を用いた 3 次元描画ソフトウェアであり, FLScope からボリュームレンダリングの結果をバイナリファ

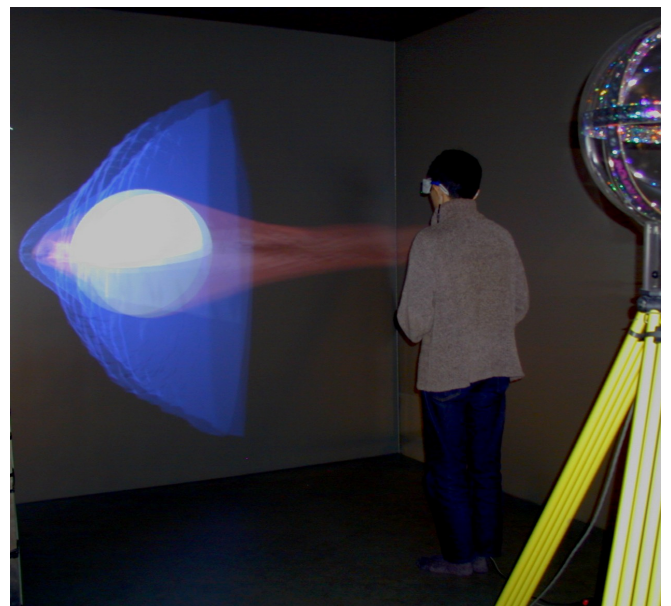


Fig. 9 Visualization in CABIN

イルで受け取ることができる。このバイナリファイルには半透明等値面層を構成する全ポリゴンの頂点と法線ベクトルが含まれており、VISOR の内部で光源を与えて照光計算を実行する。CABIN の 5 つのディスプレイに対する左右眼用の画像生成や座標変換、また視線センサおよび入力コントローラからの信号制御には IML で開発されたライブラリ OpenGL CABIN Library を利用する。

図9はVISOR を用いてCABIN でボリュームレンダリング画像を表示している様子である。流れ場の像がずれて見えるのは左右眼用の画像を交互に描画しているためであり、液晶眼鏡を装着することによって立体視が可能になる。紙面では立体視を表すことができないが、CABIN では視線の変更やコントローラからの入力に応じて画像が変化し、複雑な流れ場をいろいろな方向から高い臨場感で観察することができる。

5. 研究成果のまとめ

3次元非定常圧縮性流の典型例である球まわりの超音速逆噴射ジェット流れの数値計算結果をボリュームレンダリングを用いて可視化することによって、時間変化する複雑な流れ場の構造を分かりやすく表現することに成功した。本研究で用いたサーフェスレイヤー・レンダリング法は、ボリュームレンダリングの計算量を軽減してデスクトップ・コンピュータ上での実行を可能にするとともに、可視化結果をポータブルなオブジェクトとして定義することが可能である。その結果、ファイルとして取り出した可視化結果を仮想現実感生成システム CABIN に持ち込み、開発した CABIN ビューワー VISOR を用いて表示することによって、流れ場を高い臨場感で視覚化することができた。

6. 謝辞

CABIN での可視化の際、通信・放送機構ぎふ MVL リサーチセンター東京サイトの所有するグラフィクス・ワークステーション SGI Onyx2 Reality Monster を使用させていただいた。また CABIN ビューワーの開発に際して、東京大学大学院工学系研究科精密機械工学専攻の山本晃生講師からサンプル・プログラムをご提供いただいた。ここに感謝の意を表す。

7. 参考文献

- (1) 藤田昌大, 半球頭部まわりの超音速逆噴射ジェット流れの3次元振動, 第33回流体力学講演会講演集, 2001年.
- (2) 小野謙二他, ボリュームレンダリング法の車室内空調設計への適用, 第14回数値流体力学シンポジウム講演論文集, 2000年.
- (3) 廣瀬通孝他, 多面型全天周ディスプレイ (CABIN) の開発とその特性評価, 電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol.J81-D-II, No.5, 1998年.
- (4) 藤田昌大, 圧縮性非定常流の数値解析における時間2次精度陰解法の時間精度と計算コストの評価, 日本機械学会論文集, (投稿中).
- (5) Yoon, S., et al., Lower-Upper Symmetric-Gauss-Seidel Method for the Euler and Navier-Stokes Equations, AIAA Journal, Vol.26, No.9, 1988.
- (6) Yee, H. C., A Class of High-Resolution Explicit and Implicit Shock-Capturing Methods, NASA TM-101088, 1989.
- (7) 葛生和人, リアルタイムボリュームレンダリング, 第25回可視化情報シンポジウム講演論文集, 1997年.
- (8) 田村善昭他, 没入型多面ディスプレイによる可視化, 第11回数値流体力学シンポジウム講演論文集, 1997年.