サーフェスパスレンダリング法による流れの可視化*

— 3次元可視化新技術を用いた数値流体シミュレーション —

葛 生 和 人¹

A Flow Visualization by a Surface Path Rendering Method

— A Numerical Flow Simulation Using Newly Developed Visualization Technique —

Kazuto KUZUU

ABSTRACT

A new visualization technique was developed for a three-dimensional numerical flow simulation. This method is a kind of tracer visualizations, and based on a principle where we can actually perceive a fluid motion through smoke. In this method, several millions of transformable surface elements are released into a computational domain instead of particle tracers, and lighting and transparency effects of each surface element are considered in the visualization. By means of this visualization method, we managed to give three-dimensional effects to tracing visualization methods. In this paper, we tried to visualize some numerical flows using this method. Numerical simulations were carried out by DNS, and a few representative flow phenomena were employed. In particular, we could observe existence of complicated three-dimensional flow structures and turbulence transitions through natural convection and channel turbulence problems. As a result, we confirmed that this visualization method is quite effective for understanding three-dimensional flow structures.

Keywords : Tracing visualization, DNS, Natural convection, Channel turbulence

1. はじめに

通常、われわれが目にする流体现象は複雑な3次元構造を有する乱流状態となっている。このような流体の特性はこれまで一部の製造分野においてのみ、その設計過程で重要視されてきたが、近年高まりつつある品質や性能向上への要求は、流体解析とは無縁であった開発現場や研究分野にまでその重要性を認識させつつあるといえる。そのような流体解析の結果を判断する上で重要な役割を果たすものの1つが流れの可視化であるが、本研究では、上記の状況をふまえた上で従来の3次元流体構造の可視化手法では不十分であった表現方法の開発を目指した。

前述のごとく、流れの可視化は実験のみならず数値シミュレーションにおいても重要な役割を果たすものであるが、流体シミュレーションにおける可視化は現状では不十分な点が多いと言わざるを得ない。特に、3次元流体

シミュレーションは、実験と異なり膨大な流体情報が3次元空間データとしてそこに存在しているにも関わらず、可視化においては特定の断面を指定してベクトル表示や等値線表示を行うなど2次元的な表現にとどまりがちである。また、流体の3次元構造を理解する上では非常に有効な手段となるであろう等値面表示においても、ユーザーはあらかじめ特定の数値を設定しなければならないという制限があり、新たな流体现象の発見や流体構造を抽出するにはある程度の熟練が必要となってしまう。

一方、3次元流体構造や運動そのものを表現するための可視化技術の改善も試みられている。たとえば、3次元流線、粒子追跡法などは流体の運動状態そのものを直接的に表現するという意味で分かりやすい表現ではあるが、3次元空間内での線や点を用いた可視化表現は、奥行き感やライティングの効果を与えることが困難とされる。そのような可視化表現上のデメリットを克服するために、流線表示を単純な線表現ではなく、ある特定の流線の集合表示によりリボン状の3次元表現を実現したストリームサーフェス法^{1),2)}、あるいは粒子追跡法におけるト

* 原稿受付 2000 年 12 月 25 日

¹ 正会員 (有) 流体物理研究所

レーサーに仮想的な面情報を与えて流体の3次元構造を表現するようにしたサーフェスパーティクル法³⁾などいくつかの手法が提案されている。

また、特定の物理量の分布を3次元空間で表すことのできるボリュームレンダリング法は既に医療分野などで実用的に利用されているが、流体の可視化においても有効な手段としてしばしば採用されている^{4)~7)}。しかしながら、このボリュームレンダリング法はレイトレーシングに伴う光の散乱率や吸収率を全3次元空間で考慮しながら視点までの積分計算を行わなくてはならないため多大な計算時間を要する上に、計算空間内に複雑な形状を有する物体が存在した場合、それらを考慮したレイトレーシング計算が困難であることなどいくつかのデメリットも存在する。

このように3次元流体シミュレーションにおいては空間内に存在する多くの物理量、流体情報を有効に表現するための改善の余地は未だに残されているといえる。特に、3次元流体シミュレーションにおける流れの可視化の重要な課題は、コンピュータグラフィックス上で流体の構造や運動をいかにして分かりやすく表現するかであろう。そのような点を考慮した上で、本研究ではコンピュータ上での新たな3次元流体可視化表現法を目指している。

2. 可視化手法

2.1 煙による可視化原理

煙を使った流体運動の可視化の有効性は、煙風洞やスモークワイヤー法などを考えるまでもなく日常的に観察される煙の運動からも十分認識することができる。例えば、Fig. 1に示したように、煙突から吹き出す噴流は煙によりその流れの構造を理解することができる。

Fig. 1 Chimney plume visualized by smoke.

図中、煙突口より下流に向けてのびる1つの縦渦対が見られるが、これは煙突噴流における典型的な流体現象の1つでバイファケーション⁸⁾と呼ばれるものである。この流体構造の詳細は、実際には流れ場が乱流であるため非常に複雑なものであるが、煙の運動はそのような流体の3次元構造の特徴を的確に捉えている。本研究では、

この煙の運動を通した流体運動の可視化のメカニズムに注目し、実際の3次元流体シミュレーションにおける流れの可視化に応用することを考えた。

煙の運動が流体運動の可視化をもたらす原理を利用した可視化手法としては、前節で説明したように粒子追跡法やサーフェスパーティクル法¹⁾などあげられる。しかし、いずれの手法においても実際の煙のように流体の3次元構造を的確には捉えきれてはいない。その原因として考えられるのは、ライティング効果の欠如や想定する粒子数の不足などがあげられる。特に、可視化される煙と同等の粒子数を可視化計算で想定するのは非常に困難であり、サーフェスパーティクル法を通してライティング効果を与えたとしても粒子数の増加とともに計算時間がかかってしまう。本研究ではそのような従来の粒子追跡法の不足点を補うために点情報として設定されるトレーサーの代わりに面の向き変形などを考慮したトレーサーを追跡子として用いた。

一般に煙粒子などのトレーサーを通して流体運動が可視化されるとき、我々は煙媒体を構成する粒子の疎密度合や個々の粒子に対する光の散乱の効果と同時に観察していることになる。それらの可視化情報から、我々は流体が3次元的にどのように運動しどの方向にひずんでいるかを判断し総合的に流体運動や構造を把握している。この可視化のメカニズムを流れの可視化に応用したものが粒子追跡法であるが、本可視化手法では微小面要素をトレーサーとして採用することにより従来の可視化処理では再現しきれない光の散乱効果や3次元的な奥行き感のある描写を実現した。このようにトレーサーとして微小面要素を使用しているところから本研究ではこの手法をサーフェスパスレンダリング法と呼ぶが、以下、このサーフェスパスレンダリング法について説明する。

2.2 サーフェスパスレンダリング法

流体の運動を考えると局所的な構造はFig. 2(a)に示したような流管とその内部におかれた流体要素の変形から概念的に示すことができる。煙媒体などを通した流体構造の把握は、局所的な流体要素に含まれるトレーサー粒子の密度変化を我々が知覚することによってもたらされる。すなわち、局所的流体要素の膨張収縮過程がトレーサー粒子密度の変化に反映し、結果的に流管の拡大縮小状況が煙の濃淡によって表現されることとなる。さらにこの濃淡の変化がトレーサー粒子に対する光の散乱効果の違いをもたらし、局所的な流体運動や構造の変化が可視化されているのである。サーフェスパスレンダリング法では、Fig. 2(b)に示すようにこの流体要素を微小面要素に置き換え、その変形や膨張縮小効果を微小面要素の挙動を通して可視化している。

ここで、上で述べたように実際の流体要素に含まれる無数の煙粒子（トレーサー粒子）の密度の変化は、その流体要素の膨張収縮過程からもたらされるものであり、結果的にその要素に対する光の透過率に反映されている。

すなわち、流体要素が局所的に膨張し、その結果流管が広がるような流体構造では空間の透明度が上がり、逆に流管が狭くなるような構造では透明度が下がるという現象が観察されているはずである。このことを、微小面要素に置き換えて考えると、面要素の頂点を粒子追跡法におけるトレーサーポイントと同様に扱えばその面要素の膨張収縮を再現することが可能であり、さらに膨張収縮率に応じて面要素の透過率を変化させれば、前述の空間内の透明度の変化に対応させることができる。このことは、本手法において実際のトレーサー数の不足を補う効果を与えている。この微小面要素の膨張率と光の透過率の関係は重要なファクターとなるため膨張率の定義が必要となる。本研究においては、実際の微小体積要素の膨張収縮による透過率の変化を、2次元的な微小面要素の透過率の変化に対応させるため以下のような考え方を導入した。

まず、微小面要素を **Fig. 3(a)** に示したような微小厚みを有する3角形とし、3角形の頂点は粒子追跡法のトレーサーと同様に流体の運動にしたがって移動するように計算する。結果的に3角形要素が相似形状を維持して膨張した場合、膨張率は面積比率で置き換えることが可能である。しかし、**Fig. 3(b)** に示すように面要素の形状が変形し伸長の効果が加わった場合、面積比率が一定であっても透過率は変化しなくてはならない。これは、我々が流体要素を観察する場合、煙媒体の透明度は常に局所的な粒子の密度によるものであるため、その部分の透過率が上昇することからくる。このように、面要素の伸長と拡大の両方の効果を考慮に入れながら、面要素に対する面積次元が長さスケールの2乗に比例するという

事実から、膨張率を微小面積要素全周の長さの2乗の値に対する変化率で定義した。

以上の考え方に基づき微小面要素を3角形とした場合の面要素の膨張率 D_f は、

$$D_f = (S_0^2 + S_1^2 + S_2^2) / (S_0^2 + S_1^2 + S_2^2)_{init} \quad (1)$$

となる。ここで S_i は3角形の各辺の長さ、 $init.$ は初期値を表している。

なお、本可視化手法においては、面要素の変形効果や膨張率に対して、現実の物理現象との定量的な議論には立ち入らず、むしろ定性的な流体の見え方に意義があると考え、そこに重点をおくこととした。したがって、通常、微小面要素の透過率は上で求めた膨張率 D_f に比例する形で与えることができるが、本研究では、さらにパラメータ設定により透過率範囲を制御できるようにした。これは、ポリウムレンダリング法において指定された物理量領域を任意の輝度で表示できるようにパラメータを設定するのと同様にコンピュータ上での可視化の利点を活かしたものである。具体的には不透明度 Op (1.0 - 透過率) を用いて以下のように計算される。

$$Op = \begin{cases} Op_b \exp(-(D_f - D_{f1})^2 / \sigma) : D_f < D_{f1} \\ Op_b : D_{f1} \leq D_f \leq D_{f2} \\ Op_b \exp(-(D_f - D_{f2})^2 / \sigma) : D_f > D_{f2} \end{cases} \quad (2)$$

ここで、 D_{f1} , D_{f2} は最大不透明度で表示される膨張率範囲のためのパラメータ、 Op_b は基準となる最大不透明度、 σ は不透明度分布パラメータとして設定される。

一方、各微小面要素に対して照光効果を与えることにより流れ場の立体的な構造をより明らかにすることができる。面要素に対する照光計算では光源の方向や環境光比率の他に拡散反射率、鏡面反射率、反射輝度などいくつかのパラメータが存在するがいずれも反射面の方向をもとに計算される。本研究では画像処理プログラミングのために OpenGL グラフィックスインタフェースを利用しているため微小面要素に法線ベクトルを与えることで照光計算は内部的に処理されている。

3. 結 果

上で述べたサーフェスパスレンダリング法を用いて流体の3次元数値シミュレーションの可視化を行った結果を以下に示す。なお、計算はいずれも3次元非定常ナビエ・ストークス方程式に基づく直接数値シミュレーションで行われている。また、数値解法については、流れ場の条件がいずれも低速流であるため非圧縮流あるいは疑似圧縮流条件（熱対流に対して）を仮定しMAC法を用いて行われた。一方、離散化では対流項に対して3次精度の風上差分⁹⁾、拡散項に2次精度中心差分、時間積分ではオイラー陰解法を採用している。

3.1 粒子追跡法との比較

先ず、サーフェスパスレンダリング法と従来の粒子追跡法による流れの可視化結果の比較を行う。Fig. 4(a) および (b) は、回転するファンのまわりの流れ場を粒子追跡法とサーフェスパスレンダリング法を用いてそれぞれ表現したものである。先にも述べたように粒子追跡法はトレーサーが点要素として表示されるため照光効果を与えることができず、結果的に3次元流体構造を判別できるような表現を得るには不利である。Fig. 4(a) でも見られるように流体の構造を明らかにするためにトレーサー放出数を増やすと、逆に3次元的な構造が隠れてしまう。さらに、流れの3次元構造をより明確に表現するためには適切な位置にトレーサー放出点を設定することがポイントとなるが、未知の3次元流体構造に対して的確な放

Fig. 4(a) Flow around a rotating fan (visualized by particle tracing).

Fig. 4(b) Flow around a rotating fan (visualized by surface path rendering).

出点を設定することは非常に困難である。なお、本可視化におけるトレーサー放出点はファンの回転軸に垂直でファンの取り付け位置と同じ高さの平面内に格子状におかれるように設定されている。一方、Fig. 4(b) では同じトレーサー放出点の条件に対して3次元流体構造が捉えられている。特に、サーフェスパスレンダリング法では流体要素の膨張伸長率に応じて透過率を変化させられるため、渦の発生領域などを捉えるような可視化条件の設定が可能である。

3.2 渦生成の可視化

これまで述べてきたようにサーフェスパスレンダリング法は流体シミュレーションにおける3次元流体構造を表現できるようにすることを第一の目的としているが、その可視化プロセスの中で流体要素の伸長率に応じて透過率を変化させられることから渦生成過程を視覚化することも可能である。Fig. 5 は円柱後方のカルマン渦列の発生をサーフェスパスレンダリング法を用いて可視化したものである。計算条件はレイノルズ数156で行われたものであるが同条件で行われた可視化実験結果¹⁰⁾ (Fig. 6) に非常に近い表現が得られている。なお、可視化結果では2次元的现象として渦列が捉えられているが、数値計算は紙面垂直方向に厚みを有する3次元空間条件で行われたものである。トレーサー放出ポイントは円柱直後のカルマン渦発生領域に置かれている。

Fig. 5 Karman vortex street (present simulation).

Fig. 6 Karman vortex street (experiment Ref. 10).

同じく、渦生成を的確に捉えた可視化例として Fig. 7 に床下喚起問題の数値シミュレーション結果を示す。計算は、図中上側の3箇所の喚起口より空気を吸い出し、残りの喚起口より自由に空気が流入する条件で行われた。なお、円柱の計算と同じく紙面垂直方向に高さを持つ

Fig. 7 Air circulation under a floor.

3次元空間で計算は行われている。吸い出し速度と床下平面図の幅を基準としたときのレイノルズ数は310000である。可視化結果から床下内に生成される多数の渦を観察することができるが、特に、渦の移動、回転、流路、止水領域などが明確に表現されているようすがわかる。トレーサー放出ポイントは床下水平面内に一様に分布した格子点上に設定した。

3.3 3次元流体構造の可視化

前節ではサーフェスパスレンダリング法を用いて2次元な渦発生現象が捉えられることを示したが、同手法の本来の可視化の特徴は流体の3次元構造をより分かりやすく表現できる点である。本節では、3次元構造が非常に捉えにくいとされる乱流現象を数値シミュレーションで再現しその結果を可視化する。計算は2種類の乱流現象を再現している。1つは発熱点より上昇し乱流に遷移する自然対流問題、もう1つはチャネル乱流問題である。

自然対流の3次元流体シミュレーションでは、温度分布を表現したボリュームレンダリング法とサーフェスパスレンダリング法のそれぞれの可視化表現で比較した。計算条件は、鉛直方向に中心軸を有する直径、高さ共に1 cmの円柱を1293.15Kの発熱体として室温(293.15K)の空气中に置いたときの自然対流を再現した。Fig. 8は計算空間で、幅奥行き共に0.3 m 高さ2.0 mの直方体で、側面は室温の等温壁、上下面は自由流入出の開放条件とした。計算格子は、 $64 \times 128 \times 64$ (幅×高さ×奥行き)

Fig. 8 Computational domain.

分割の直交不等間隔格子である。

Fig. 9(a) はボリュームレンダリングによる可視化表現であるが、温度294Kから296Kという非常に室温に近い領域を視覚化することにより流体構造を表現したものである。本計算条件のように発熱体が非常に小さなおかつ乱流遷移が起こる領域が発熱体から離れている場合、乱流領域での温度変化はほとんど室温条件に近い値を示し膨張効果を無視することができるため、温度はいわゆるトレーサー的役割を果たすことが可能である。しかしながら、室温近傍のごく狭い温度領域を視覚化することは、温度分布の拡散効果と分布自体の精度低下から流体運動そのものに対する追従性の低下をもたらす可能性もある。

一方、サーフェスパスレンダリング法ではトレーサーの移動による流体運動を直接的に表現するため、温度など他の物理量の分布状態や拡散効果を考慮する必要が無く流体構造を把握できる。Fig. 9(b) は Fig. 9(a) と同じ条件でのサーフェスパスレンダリング法による可視化表現である。トレーサー放出ポイントは発熱体上方の格子領域に設定した。ボリュームレンダリング法による可視化と比較しても乱流遷移の領域や乱流の広がりを明確に捉えているのが分かる。また、流体要素の歪み効果も透過率に反映しているため乱流の内部構造も同時に捉えられている。

次にチャネル乱流について直接数値シミュレーション結果をサーフェスパスレンダリング法を用いて可視化した。計算空間は Fig. 10 に示すように $128 \times 64 \times 64$ 分割

Fig. 9(a) Natural convection (visualized by volume rendering).

Fig. 9(b) Natural convection (visualized by surface path rendering).

Fig. 10 Computational domain.

の直交不等間隔格子を用い、流入条件および上部境界面は主流速度 10 m/s 一定、流出条件は自由流出、側面および下面境界は滑り無し条件としている。また、上流側下面に擾乱発生のためのラフネスを設けている。サーフェスパスレンダリング可視化のためのトレーサー放出点はラフネス直後に設定した。

Fig. 11(a), (b), (c) は上面および側面から見たとき

Fig. 11(a) Channel turbulence (t = 1.02036s) (plan and side views).

Fig. 11(b) Channel turbulence (t = 1.29403s) (plan and side views).

Fig. 11(c) Channel turbulence (t = 1.47157s) (plan and side views).

のチャンネル乱流の状態を時系列的に並べたものである。下面境界層から発生する渦構造を観察すると、壁面乱流境界層の特徴である多くの縦渦の発生を確認することができる。通常、このような現象に対する数値シミュレーションにおける流れの可視化では数値データに対して条件抽出法などある種のフィルタリングを行い、特定の流体構造を表現する必要があるが、本可視化手法では直接的な流体運動の可視化表現から図に示したように特徴的な構造を抽出している。特に、側面図では縦渦対による壁面付近での流体の巻き上げの様子が良く再現されており乱流遷移領域での渦構造や運動を容易に観察することができる。また、縦渦対と巻き上げ現象の関係は上流側斜め上方から観察した Fig. 12 でも確認することができる。

Fig. 12 Channel turbulence (t = 1.28683s) (upper front view).

3.4 計算時間および表示面要素数

最後に、本可視化手法における計算時間と計算機メモリに関係する表示面要素数について述べる。

本可視化手法は、先にも述べたように頂点をトレーサーとして流体とともに移動する 3 角形要素を照光計算を行いながら表示するものである。したがって、可視化時の流体構造の解像度を上げるためには、面要素を細かくかつ多く設定することが望ましい。実際、前節で示された自然対流およびチャンネル乱流シミュレーションの可視化では、トータルの面要素数が前者で最大約 1152000、後者では最大約 6722000 の三角面要素が設定されている。これらの面要素に対する可視化計算時間は流速場をもとに算出されるトレーサー移動計算部分と照光計算、透過計算を含むいわゆるグラフィック計算部分の 2 つの要素で構成されているが、いずれもある程度の計算時間を要する。本プログラムは PC 上の OpenGL グラフィックスインタフェースを使用しているため、グラフィック計算部分は高速化が達成されているが、全体の可視化計算時間は、前者の計算例では 1 画面当たり約 25 秒、最大面要素数表示時の使用メモリは約 57 MB、後者では 1 画面当たり約 110 秒、使用メモリは 154 MB であった。なお、使用した環境は、いずれも WindowsNT を OS とし、ハードウェアは前者が DEC alpha21164 600 MHz, 300 MB メモリ、WindowsNT でグラフィックスアクセラレータ未使用、後者 Celeron 800 MHz, 260 MB, グラ

フィックスアクセラレータ使用である。

4. 結 論

数値流体シミュレーションにおいて解析された複雑な流体の3次元構造をより分かりやすく表現するために、コンピュータグラフィックス上での新たな流体可視化技術：サーフェスパスレンダリング法を開発し、実際の直接シミュレーション解析結果をもとにいくつかの特徴的な流体現象を可視化した。結果は、従来の可視化法では得られなかった流体構造の表現を可能にし、複雑な渦で構成される乱流現象など様々な流体現象、流体運動を3次元的グラフィックスで表現できることが確認された。特に、煙による流体の視覚化原理に基づいた本手法は実際の煙を使った流れの可視化表現に近いものを得ることができ、本研究の目的の一つである専門家以外を対象とした流体解析結果の判断に十分有効であることが確認された。

参 考 文 献

- 1) Hultquist, P.M.: Interactive Numerical Flow Visualization Using Stream Surfaces, RNR Technical Report (1990) RNR-90-009.
- 2) Hultquist, P.M.: Constructing Stream Surfaces in Steady 3D Vector Fields, RNR Technical Report (1992) RNR-92-025.
- 3) Wijk, J.J. van: Flow Visualization with Surface Particles, IEEE CG & Applications Vol. 13 (1993) pp. 18–24.
- 4) Drebin, R., Carpenter, L., and Hanrahan, P.: Volume Rendering, *Proc. Siggraph*, Vol. 22, No. 4 (1988) pp. 65–74.
- 5) Neumann, U.: Interactive Volume Rendering on a Multicomputer, *Proc. 1992 Symp. Interactive 3D Graphics*, Cambridge, Mass., pp. 95–100.
- 6) Yoo, T.S., Neumann, U., Fuchs, H., Pizer, S.M., Cullip, T., Rhoades, J., and Whitaker, R.: Direct Visualization of Volume Data, IEEE CG & Applications Vol. 12 (1992) pp. 63–71.
- 7) Rushmeier, H., Hamins, A., and Choi, M.Y.: Volume Rendering of Pool Fire Data, IEEE CG & Applications Vol. 15 (1995) pp. 62–67.
- 8) Scorer, R.S.: *Environmental Aerodynamics*, Ellis Horwood Limited (1978).
- 9) Kawamura, T. and Kuwahara, K.: Computation of High Reynolds Number Flow around a Circular Cylinder with Surface Roughness, AIAA paper 84-0340 (1984).
- 10) 種子田定俊：画像から学ぶ流体力学，p. 98，朝倉書店。