

スカラ場・ベクタ場同時可視化のための流線自動生成の一手法

古矢志帆 伊藤貴之
お茶の水女子大学大学院

A Streamline Selection Technique for Integrated Scalar and Vector Visualization

Shiho Furuya Takayuki Itoh

Graduate School of Humanities and Sciences, Ochanomizu University
{shiho, itot} @ itolab.is.ocha.ac.jp

概要

ボリューム可視化の分野において、スカラ場あるいはベクタ場の可視化の研究は、ほぼ独立に進んできた。しかし、スカラ場とベクタ場を同時に、かつ三次元的に可視化する試みは、さまざまな観点から研究の余地があると思われる。例えば気象シミュレーションの分野では現在でも、スカラ場（気温・気圧など）とベクタ場（風向）を二次元的な手法（断面上の等高線や矢印など）で可視化する事例が多い。しかし二次元的な可視化結果からは、気象現象の立体的なメカニズムを理解するのが難しい場合が多い。

本論文では、等値面と流線を用いてスカラ場とベクタ場を同時可視化するための、流線自動選択手法を提案する。本手法ではまず、複数の等値面を選択表示する。続いて本手法では、多数の流線を一時的に生成し、それらの見かけを評価し、上位に評価された流線を選択表示する。その際に本手法は、等値面による遮蔽を低減すること、流れ場の特徴を示す渦などの現象を効果的に表現すること、を考慮して流線を選択する。結果として本手法は、視点に依存せずに等値面を選択し、視点に依存して流線を選択する。

Abstract

Scalar and vector field visualization techniques have evolved almost independently. We think integration of scalar and vector visualization is still an interesting topic. For example, many researchers in fluid dynamics simulations still use 2D scalar and vector visualization techniques in one display, to demonstrate the coherency between scalar (e.g., temperature and air pressure) and vector (e.g., air flow) fields. However, it is often difficult to understand the 3D mechanism of phenomena from such 2D visualization results.

This paper presents a streamline selection technique for integrated scalar and vector field visualization. The technique visualizes a scalar field by multiple semitransparent isosurfaces, and a vector field by multiple streamlines, while the technique adequately selects the streamlines considering reduction of cluttering among the isosurfaces and streamlines.

The technique first selects and renders interesting isosurfaces. It then temporarily generates a lot of streamlines from randomly selected seed points. The technique evaluates each of the streamlines according to their visibility, and selects the specified number of highly evaluated streamlines. Consequently, the technique visualizes scalar and vector fields simultaneously, by isosurfaces selected from non-view-dependent perspective, and streamlines selected from view-dependent perspective.

1 はじめに

ボリューム可視化の分野において、スカラ場あるいはベクタ場の可視化の研究は、ほぼ独立に進んできた。しかし、スカラ場とベクタ場を同時に含むようなデータの可視化において、各々の可視化手法を単純にかけ合わせるだけでは、一画面の情報量が多くなり、煩雑な可視化結果になってしまうことが多い。例えば気象シミュレーションデータには、スカラ場（気温・気圧など）とベクタ場（風向）が含まれているが、これらの可視化にはいまだに二次元的な手法（断面上の等高線や矢印など）を用いる事例が多い。3次元コンピュータグラフィックスに習熟していないユーザの中には、二次元的な可視化結果のほうがわかりやすく感じる、と考えるユーザもいるであろう。しかし二次元的な可視化結果からでは、気象現象の立体的なメカニズムを理解するのが難しい場合が多い。そのため、このようなシミュレーションにおいて、三次元的な可視化の重要度は高いと考える。しかし、従来の可視化手法を用いて、スカラ場とベクタ場を同時に可視化しようとすると、情報量が多すぎて、スカラ場とベクタ場の可視化結果が互いに邪魔しあうような印象を受ける。このように、スカラ場とベクタ場を三次元的に可視化する試みは、さまざまな観点から研究の余地があると思われる。

そこで本論文では、スカラ場とベクタ場を同時に3次元で可視化することを目標とした、ベクタ場可視化のための流線選択の一手法を提案する。本手法では、複数の等値面を生成することでスカラ場を、そして複数の流線を生成することでベクタ場を可視化する。

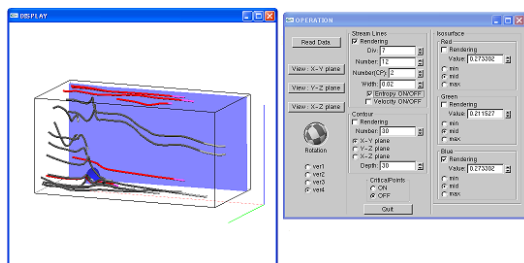


図 1: 本手法による可視化の例。

図 1 に、本手法を実装した例を示す。我々の実装は、可視化結果を表示するディスプレイ部分（図 1（左））と、可視化に必要なパラメータ操作を行う GUI 部分（図 1（右））で構成される。この実装は、ユーザが GUI 部分でパラメータを入力するたびに、ディスプレイ部分がその入力値を反映した可視化結果を表示する。

図 2 に、本手法による流線生成の手順を示す。本手法では、まず大量に流線を生成する。この生成は一時的なもので、ここから情報量の多い流線を選択し、これらを描画する。ここで流線の情報量の定義には、情報エントロピーの概念を適用している。この定義では、流線を構成している短い線分列（セグメント）が、一様に長く見えるほど、情報エントロピーの値が高くなる。本手法では、このような流線を「情報量の大きい流線」と定義し、長く見えるものを選択して描画す

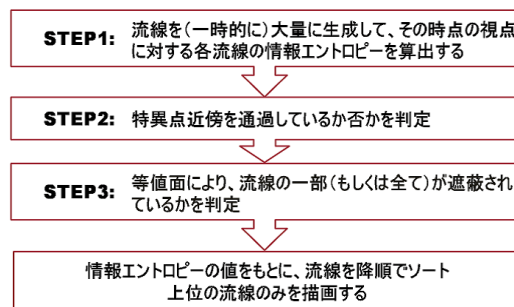


図 2: 流線生成のフローチャート。

ることにしている。さらに、流線が特異点付近を通過している場合、すなわちデータの局所的な特徴を掴むような流線である場合には、他の流線と区別し、積極的に描画する。一般的に、特異点を通過する流線は、渦巻くなどの現象により曲がっているため、長く見えにくく、結果として情報エントロピーの数値が低くなる傾向にある。よって、情報エントロピーの数値が高いもののみを選んで描画した場合には、局所的な特徴が掴みにくい流線群ばかりが描画されてしまう。これを回避するためにも、特異点近傍を通過する流線とその他の流線を区別する必要がある。また、本手法では最終的には等値面と流線を同時に描画するので、流線の選択において等値面による遮蔽も考慮する。本手法では、隠れて見えなくなってしまう流線を描画の対象に選びにくくするために、情報エントロピーの値を下げるような重みづけを行う。以上の処理は、図 2 の STEP1 ~ STEP3 の各手順に相当する。この STEP1 ~ STEP3 をもとに、情報エントロピーの数値を全ての流線に対して求める。そして、その値をもとに降順でソートし、上位の流線のみを描画することで、流線の自動生成を行う。

我々は適用事例として、本手法を気象シミュレーション結果から得られる風向・気温・気圧の時系列データの可視化を試みた。この適用事例では、大規模なデータから数値特徴を抽出し、風と気圧（あるいは気温）を同時に、適切な情報量での画面表示を実現した。本論文で我々は、気象データへの適用事例のみを紹介しているが、気象以外の大規模なシミュレーションデータに対しても適用可能な手法の確立を目指している。

2 関連研究

2.1 流線の自動生成

流線の自動生成は近年盛んに行われている研究である。特に、出発点をいかにうまく設定するか、ということに重点を置いた研究が多く発表されている。

二次元空間に流線を自動生成させる研究は、古くから行われており、今でも数多く発表されている。Liら [1] は、できるだけ流線群が離れるように、そして二次元空間をまんべんなく通るような流線群を描画する手法を提案している。渡邊ら [2] も同様に、出発点を適切に自動設定する方法を提案している。この手法

では、流れを観察するユーザの視線情報から特定の時刻におけるユーザの関心領域を自動的に検出し、その領域に対して効果的に流線を生成させるような出発点を求めている。

Verma ら [3] は、流れ場の重要度に合わせて流線の密度を制御する手法を提案し、また Mebarki ら [4] は、前に生成した流線よりも最も遠い場所を出発点として流線を生成することで、二次元空間内に密度差が生じないようにまんべんなく流線を生成するような手法を提案している。

一方、近年では三次元空間に流線を自動生成させる研究が、盛んに行われている。例えば、Li ら [5] は、出発点を三次元空間に配置するのではなく、投影面である二次元空間に配置する手法を提案している。これにより、結果的に三次元空間をくまなく通るような、しかも流線同士のクラッタリングを出来る限り回避するような、流線群を描画することに成功した。

他にも、三次元空間に流線を自動生成させる研究として、Ye ら [6] の研究が挙げられる。この研究では、流れ場の種類によって特異点を分類し、その分類から適切に、出発点を記録したテンプレートを選択することで、流線生成に必要な出発点を設定する。

以上の手法のいずれにおいても、本論文が論点とするスカラ場との同時可視化、またそのために等値面との遮蔽を低減すること、などは考慮されていない。強いて言えば Li らの論文 [5] には、等値面上に流線を生成した可視化結果が掲載されているが、ボリューム全体に大域的に流線を生成するという本論文の目標とは異なるものである。

2.2 スカラ場・ベクタ場の同時可視化

三次元的な手法によってスカラ場とベクタ場を同時に可視化する試みも、いくつか発表されている。

Hong ら [7] は、ベクタ場をアイコンで表現し、そこにボリュームレンダリングで可視化したスカラ場を合わせることで同時に可視化する手法を提案している。また Crawfis ら [8] は、splatting というボリュームレンダリングの一種を用いて雲を描画し、その上に風の流れ場を示すベクタ場のパーティクルを重ね合わせる手法を提案している。

これらの手法に限らず近年では、GPU プログラミング環境の充実により、対話的なボリュームレンダリング手法が多く発表されている。しかし一方で、GPU プログラミングに頼らない可視化手法が必要である状況も依然として存在する。本論文の提案手法は、等値面や流線を用いることで、GPU プログラミングに頼らずにスカラ場とベクタ場の同時可視化を目指す手法、と位置づけられる。

また、気象シミュレーションデータに特化した一例として Treimish ら [9][10] が、局所的な気象モデルの可視化 (ex. 主要都市の天候) を発表している。この可視化表現では、風を地表からの高さに応じて風速が強いほど長いリボンを用い、また各々の主要都市を長い棒で表現している。棒の色の变化とリボンのなびく様子が、主要都市で観測されたスカラ値と風の流れ場を表現している。しかしこの手法においては、どの地点を局所的に可視化することで最も有用な情報を得られるか、という点において議論が残っていると考えられる。

3 提案内容

3.1 特異点の探索

スカラ場やベクタ場の可視化において、興味の対象となる物理現象は、特異点周囲に観察されることが多い。本論文では特異点を、スカラ場では極大点・極小点に、ベクタ場ではベクタの長さがゼロになる位置に限定して指すものとする。

例えば気象シミュレーション結果において、スカラ場の興味の対象である代表的な特徴は、気圧であれば高気圧や低気圧、気温であれば暖気や寒気など、極大値や極小値の近傍に見られることが多い。また同様に、気象シミュレーションに限らず多くの物理現象において、渦をはじめとする特異点周辺には、ベクタ場の興味の対象である代表的な特徴が見られることが多い。特異点を可視化することで気象事象を解析する、という試みが既に発表されている [11] ことから、この分野の研究において特異点が重要視されていることがわかる。

そこで本手法でも、スカラ場とベクタ場の特異点を抽出し、その周辺の数値分布を集中的に可視化することを考える。我々の実装では、スカラ場の特異点抽出に伊藤ら [12] の手法を用いている。この手法では各々の格子点について、辺によって接続される全ての隣接格子点を対象に、スカラ値の大小関係を確認する。全ての隣接格子点よりもスカラ値が大きければ、当該格子点は極大点であり、逆に全ての隣接格子点よりもスカラ値が小さければ、当該格子点は極小点であると判定する。また我々の実装では、ベクタ場の特異点抽出に小山田ら [13] の手法を用いている。この手法ではボリュームを構成する各々の四面体領域について、 i 番目の頂点におけるベクタ値を (u_i, v_i, w_i) とするとき、

$$\begin{pmatrix} p \\ q \\ r \end{pmatrix} = M_v^{-1} \begin{pmatrix} -u_3 \\ -v_3 \\ -w_3 \end{pmatrix}$$

$$M_v = \begin{vmatrix} u_0 - u_3 & u_1 - u_3 & u_2 - u_3 \\ v_0 - v_3 & v_1 - v_3 & v_2 - v_3 \\ w_0 - w_3 & w_1 - w_3 & w_2 - w_3 \end{vmatrix} \quad (1)$$

を満たす点 $P(p, q, r)$ が四面体領域の内部にあれば、 P は特異点であると判定する。ここで点 P は、 P と四面体領域の 4 頂点を連結する辺を生成した際に、体積比 $p, q, r, (1 - p - q - r)$ を満たす 4 個の小四面体に四面体領域を分割する点である。

なお、本論文では以降、スカラ場・ベクタ場ともに最低 1 個の特異点が抽出可能であるボリュームデータを仮定する。

3.2 スカラ場の可視化

本手法では、3.1 節で定義したスカラ場の特異点を求め、それを利用してスカラ場を可視化する。現時点での我々の実装では、後述する GUI を用いてユーザに特異点におけるスカラ値周辺の値を選択させ、Marching Cubes 法 [14] を用いて等値面を生成する。各等値面はスカラ値ごとに色分けし、半透明表示する。スカラ値と等値面の不透明度は、それぞれユーザが GUI を用いて任意に指定できるものとする。

ポリウムレンダリングの分野において、伝達関数を半自動で決定する研究が活発に進められている [15][16]。これらの研究を応用し、ポリウムデータの重要な現象を表すスカラ値を自動決定することで、等値面によるスカラ場の可視化を半自動化することが可能であると考えている。

3.3 ベクタ場の可視化

3.3.1 情報エントロピーの算出

流線の生成において難しいのが、出発点の設定である。本項では、情報エントロピーにもとづいて最適な流線を選択する手法を提案する。

まず初めに、等間隔に設定した出発点から、流線を一時的に多数（我々の実装では 500 本程度）生成する。そして Takahashi ら [17] の手法を応用して、その時点の視点に対する、大量に生成した流線の各々の情報エントロピーを算出する。続いて、ある視点に対して情報エントロピーの高い流線を優先して描画することで、最適な流線を選択する。本手法では、流線が一様に長く見えるほど、情報エントロピーが高いと定義している。情報エントロピーを求める式は以下のとおりである。

$$E = -\frac{1}{\log_2(1+m)} \sum_{j=0}^m \frac{D_j}{L} \log_2 \frac{D_j}{L} \quad (2)$$

ここで各々の流線は、セグメントと呼ばれる小さな線分列の集まりで構成されているとする。本手法では、 j 番目のセグメントの、ディスプレイ上の長さを D_j 、三次元空間上の距離を L として、式 (2) に代入して情報エントロピーを算出する。ここで視点を移動すると、ディスプレイ上の線分列の見かけの長さが増減し、結果として情報エントロピーが増減する。この評価を視点移動のたびに実行することで、あらゆる視点に対して、より良い流線の組だけを描画することが可能となる。

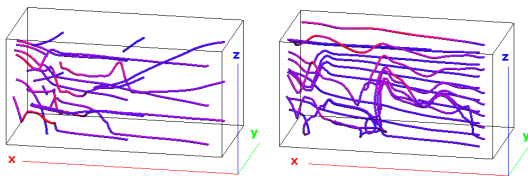


図 3: 流線生成結果の例。(左) 等間隔に流線を生成した結果。(右) 本手法を用いて流線を自動生成した結果。

既存の流線自動生成手法に比べ、我々の手法ではより少ない本数で、ディスプレイ上で長く見える情報量の高い流線を描画することが特徴である。図 3(左) は出発点を適当に設定し流線を生成した結果で、図 3(右) は 500 本の流線から本手法を用いて情報量の高い流線を選択した結果である。どちらも 18 本の流線を描画しているが、本手法を用いた結果のほうが効率よくベクタ場を可視化できている。

ただし、ポリウムの回転操作にともなって連続的に視線を移動する際に、操作にともなって連続的に流線を再生成していたのでは、表示させている流線を回転させながら観察し続ける、ということができない。また、流線の再生成に要する計算時間が、回転操作に追いつかない、ということも考えられる。そこで我々の実装では、連続的に回転操作を行っている間には流線を再生成せず、回転操作を停止した瞬間にのみ流線を再生成するものとしている。

以下に論じるように本手法では、さらに良好な流線自動生成結果を得るために、特異点、等値面による遮蔽、流線密度、の三点を情報エントロピーの算出に考慮する。

3.3.2 特異点の考慮

ベクタ場の興味の対象となる現象の多くは、渦中心をはじめとする特異点周辺に見られる。情報エントロピーが高い流線のみを選んだ場合、まっすぐ伸びる流線群が選ばれやすくなり、結果として特異点周辺の流線群が選ばれにくくなる傾向にある。その理由として、特異点周辺の流線は式 (2) における D_j が低くなる傾向にあることがあげられる。

渦をはじめとする特異点周辺の現象を効果的に観察する方法として、特異点付近に積極的に流線を生成させることが有効である [13]。本手法でも同様な考え方を適用して、各特異点の近傍に最低 1 本の流線開始点を設けることで、各特異点の近傍に最低 1 本の流線を生成する。このとき、1 本の流線が複数の特異点の近傍を通過することがありえるので、結果として 1 個の特異点の周辺に複数の流線が生成されることがある。この場合には各々の情報エントロピーを比較し上位の所定本数の流線を描画する、という手段によって特異点周辺の流線の本数を制御する。

3.3.3 等値面による遮蔽の考慮

等値面と流線を同時に描画した際に、大量の流線が等値面によって遮蔽され見えなくなってしまうという状況は好ましくない。そこで、 m_0 を遮蔽されているセグメントの総数、 α を遮蔽している等値面の不透明度として、以下の式を用いて等値面に遮蔽されている流線の情報エントロピーを求めなおす。

$$E' = (1 - \frac{m_0}{m})E + (\frac{m_0}{m})(1 - \alpha)E \quad (3)$$

ここで 3.2 節で述べたように、等値面は複数枚生成されている場合がある。流線の i 番目のセグメントが n_i 枚の等値面により遮蔽されているとき ($1 \leq i \leq m$)、不透明度が α_k の k 番目の等値面に遮蔽されているセグメントへの重みづけは、

$$D_{ik} = (1 - \alpha_k)D_{i(k-1)} \quad (4)$$

とあらわすことができる。式 (4) を再帰的に適用することで、 i 番目のセグメントに対して n_i 枚の等値面による遮蔽を考慮した重みをつけることができる。本

手法では $1 \leq j \leq n_j$ かつ $D_{i_0} = D_i$ であるとし、以下の式を適用することで情報エントロピーを求める。

$$E = -\frac{1}{\log_2(1+m)} \sum_{j=0}^m \frac{D_{jn_j}}{L} \log_2 \frac{D_{jn_j}}{L} \quad (5)$$

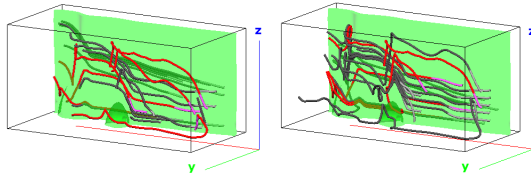


図 4: 等値面と流線の同時表示結果の例。(左) 等値面による遮蔽を考慮していない結果。(右) 等値面による遮蔽を考慮した結果。

図 4 は、本処理を適用した結果と適用していない結果を比較するものである。図 4(左) では等値面の裏側に流線が多く描画されていたのに対し、本処理を適用した図 4(右) では視点側により多くの流線が描画され、その結果、可視化結果左部分に渦が出来ているのが観察できる。このように、本処理を適用することで、等値面の遮蔽によって可視性が低下した流線の描画を減らすことができ、より効率的にベクタ場の可視化が可能であるといえる。

3.3.4 流線の密度

本手法により求めた情報エントロピーにもとづいて流線を選択すると、非常に近い場所を通る似たような流線が積極的に選ばれるという問題点がある。この問題により、局所的に流線が密集した可視化結果が得られてしまうが、これはあまり好ましくないといえる。

そこで、本手法では流線同士が一定距離以上離れた場所を通過しているかどうかを判定することで、流線の密集を防ぐ。これにより、流れを示す代表的な流線のみを選択することが可能となる。

現時点で我々は、複数の流線が同一格子内部にセグメントを生成する際に、そのセグメント間の距離が小さければ、複数の流線のうち 1 本しか表示しない、という単純な判定を採用している。しかしこの方法では、例えばディスプレイ解像度に対してポリウムの格子が細かい時などに、うまく機能しないことがある。高速かつ効果的な流線密度制御には、いくつかの先行研究 [5] があり、我々の実装にもこれらを取り込んでいくことが今後の課題の一つとして考えられる。

3.4 GUI の実装

本手法の可視化に用いる各々のパラメータは、ユーザが任意に設定出来るものとしている。そこで我々は、ユーザがインタラクティブにパラメータを操作するための GUI を搭載している。我々の実装では、GLUT 上の C++ ベースのユーザインタフェースライブラリである GLUI を用いることで、OS に依存しない単一の GUI を搭載している。

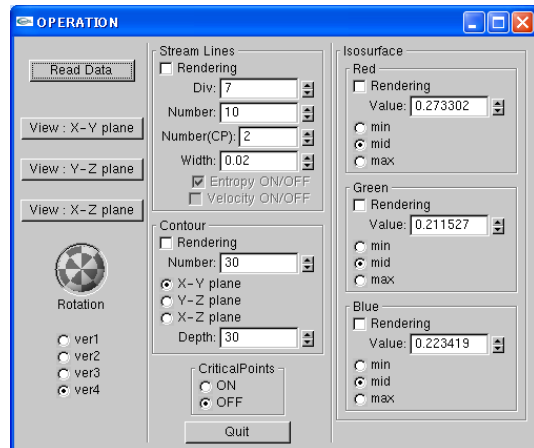


図 5: 我々の実装における GUI 画面。

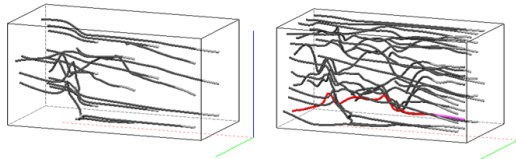
図 5 は、我々が開発している GUI の画面である。この GUI 画面では、流線と等値面の各々について、描画の有無をチェックボックスで切り替えられるようにしている。

流線については、特異点近傍を通過する流線の本数と、それ以外の流線の本数を指定できる。また、左側上部にあるトラックボールを操作することで、ポリウムの回転ができる。現時点での我々の実装では、トラックボールによる回転操作を停止した時点で、情報エントロピーを再計算し、流線を再選択する。

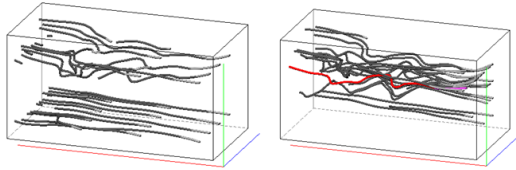
等値面の選択表示機能としては、赤・青・緑に色分けした三枚の等値面のスカラー値を指定できる。等値面のスカラー値の初期値には、ポリウム中から自動選択された 3 個の特異点におけるスカラー値（極大値または極小値）がそれぞれ表示される。ユーザは等値面の描画にチェックを入れることで、3 個の特異点周囲の等値面の表示の有無を切り替えることができる。またユーザは、表示されたスカラー値を少しずつ操作することで、特異点の周辺に等値面を生成できる。ただし現時点での我々の実装では、ポリウム中から 3 個の特異点を自動選択する効果的な手法が実装されていない。3.2 節でも前述したとおり、ポリウムデータ中の重要な現象を表すスカラー値を自動決定する手法の導入が重要であろうと考えられる。また、4 個以上の特異点を有するポリウムにおいて、特異点におけるスカラー値のいずれかを自在に選択できる GUI の導入も重要であろうと考えられる。

4 評価と考察

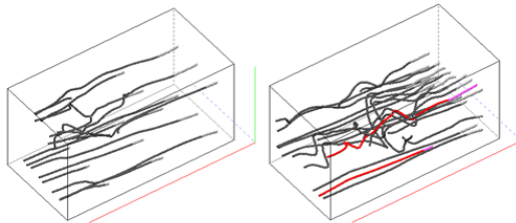
我々は本手法を実装して実行結果をつくり、複数の被験者に主観評価してもらった。本章ではその主観評価結果を示し、本手法の有効性について考察する。以下の主観評価はアンケート形式で実施し、CG や可視化の研究に携わる 12 名から得た回答を集計したものである。



(左上) 等間隔に流線を生成し、視点 A から可視化。
(右上) 本手法を用いて流線を生成し、視点 B から可視化。



(左中) 等間隔に流線を生成し、視点 B から可視化。
(右中) 本手法を用いて流線を生成し、視点 B から可視化。



(左下) 等間隔に流線を生成し、視点 C から可視化。
(右下) 本手法を用いて流線を生成し、視点 C から可視化。

図 6: 情報エントロピー適用の有無による可視化結果の違い。

4.1 情報エントロピーの算出

我々は、3つの視点から可視化結果をつくり、本手法の処理を適用する前後でどちらが良いか、アンケートによる調査を行った。図6はアンケートに用いた画像である。左の可視化結果は等間隔に出発点を設定し流線を生成した図で、右の可視化結果が本処理を適用した図である。データの局所の特徴を示す渦や高気圧付近を通る流線を赤色で、それ以外の流線を黒色で描画している。二つの画像を見比べて

- 赤色の流線がより多く描画されているもの
- 赤色ではないが、うねりが見られる流線が描画されているもの

の二点をより満たす方を選択してもらった。一点目は、データの局所の特徴を掴めているかどうかの目安であり、また二点目は、今後渦などの局所の特徴へと発達するような流線を掴めているかどうかの目安となっている。表1に、その集計結果を示す。

全体的に本処理を適用した可視化結果のほうが、よりよいという結果が得られた。評価の高かった視点 A・C に関して、アンケート回答者のコメントによると、

表 1: 情報エントロピーを算出して流線を選択する処理に関するアンケートの集計結果

	等間隔に流線を生成	本手法を用いて流線を生成
視点 A	1	11
視点 B	4	8
視点 C	2	10

- 長い流線が多く、全体的な流れ場の様子が掴みやすい
- 風がうねる様子など、本処理を適用した図のほうが局所の特徴を掴めている
- 注目すべき赤色の流線が多く描かれている

という意見があった。情報エントロピーが高い流線を選択して描画することで、長さの長い流線が選ばれ、結果的にこの二つの視点では高評価を得ることができた。

一方、視点 B に関しては、評価が分かれた。本処理を適用したほうが良いと答えた回答者は、

- 赤色の流線が描画されている
- 赤色の流線と、その周りの流れ場の様子が掴めると、データの局所の特徴を掴めていることを評価した。

反対に、本処理を適用していない、等間隔に流線を生成した結果のほうが良いと答えた回答者からは、

- 本処理を適用したものは、流線が密集しているため、全体的な流れ場の様子が掴みづらい
- こちらのほうがすっきりして見え、流れがよくわかる

という意見があった。

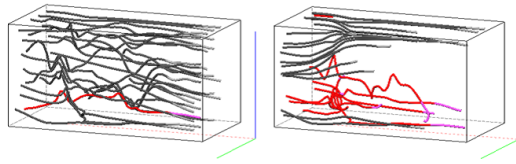
4.2 特異点の考慮

4.1 節と同様に、本手法の処理を適用する前後でどちらが良いかを、アンケートによる調査を行った。図 4.2 はアンケートに用いた画像である。左の可視化結果は特異点を考慮する前の図で、右の可視化結果が本処理を適用して特異点を考慮した図である。可視化の条件、アンケート回答者などは 4.1 節と同様である。

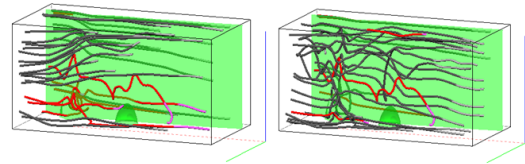
表 2: 特異点の考慮に関するアンケートの集計結果

	本処理適用前	本処理適用後
視点 A	4	8
視点 B	4	8
視点 C	4	8

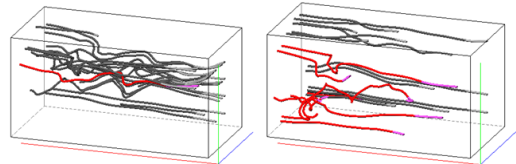
表 2 に、アンケートの集計結果を示す。本処理を適用することで、局所の特徴を示す赤色の流線がより多く選ばれたため、アンケートでも高評価を得ることが



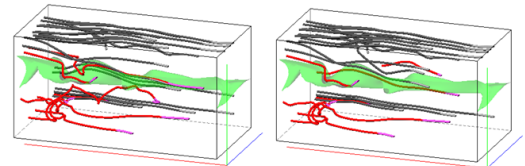
(左上) 特異点を考慮する前・視点 A から可視化。
(右上) 特異点を考慮した後・視点 A から可視化。



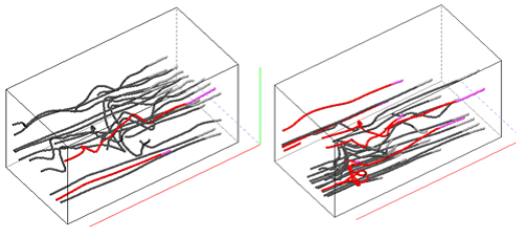
(左上) 等値面による遮蔽を考慮する前・視点 A から可視化。
(右上) 等値面による遮蔽を考慮した後・視点 B から可視化。



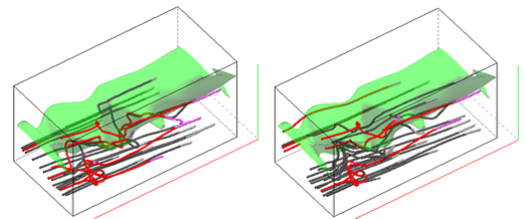
(左中) 特異点を考慮する前・視点 B から可視化。
(右中) 特異点を考慮した後・視点 B から可視化。



(左中) 等値面による遮蔽を考慮する前・視点 B から可視化。
(右中) 等値面による遮蔽を考慮した後・視点 B から可視化。



(左下) 特異点を考慮する前・視点 C から可視化。
(右下) 特異点を考慮した後・視点 C から可視化。



(左下) 等値面による遮蔽を考慮する前・視点 C から可視化。
(右下) 等値面による遮蔽を考慮した後・視点 C から可視化。

図 7: 特異点の考慮の有無による可視化結果の違い。

できた。一方で、赤という色で特異点付近を通過する流線を描画することに対し、「赤 = 重要というイメージがあり、大量に赤色の流線が描画されると、見るべき対象が多く感じる」という意見があった。描画色や、注目すべき流線の強調方法については、今後検討していきたい。

4.3 等値面による遮断の考慮

4.1 節、4.2 節と同様に、本手法の処理を適用する前後でどちらが良いかを、アンケートによる調査を行った。図 4.3 はアンケートに用いた画像である。左の可視化結果は特異点を考慮する前の図で、右の可視化結果が本処理を適用して特異点を考慮した図である。可視化の条件、アンケート回答者などは 4.1 節、4.2 節と同様である。

表 3 に、アンケートの集計結果を示す。この結果を見ると、視点によって、回答にかなりばらつきが出たといえる。本処理を適用したほうがよい結果である、という回答の多かった視点 C に関しては、

- 特異点周辺を通過する赤い流線だけでなく、その周りを通る黒い流線が、等値面に遮蔽されることなく選ばれていて良い
- 等値面と流線の関係が分かりやすい

図 8: 等値面による遮蔽の考慮の有無による可視化結果の違い。

という意見があった。この視点から見た可視化結果は、赤い流線が密集しておらず、それも評価に繋がったと考えられる。また、意見の分かれた視点 B に関しては、等値面に遮蔽されていても描画してほしい流線（例えば特異点付近を通過する赤い流線）が、本処理を適用することで消えてしまったことが問題だと指摘する意見が多かった。このことから、不透明度の数値と、遮蔽によって起こる可視性の低下に、ずれがあると考えられる。現段階の重みづけ方法では、不透明度 50% の等値面に遮蔽されている流線の情報エントロピーを、50% に減らしてしまうというを行っており、ここに原因のひとつがあると考えられる。今後の課題として、重みづけの式 (4) を再考慮する必要があると考えた。さらに、本処理を適用する前のほうが良いという回答が得られた視点 A に関しては、

- 流線が遮蔽されることなく選ばれたことで、一画面の情報量が多く感じ、煩雑な可視化結果になっている
- 重要な赤色の流線が、等値面ではなく、黒色の

表 3: 等値面による遮蔽の考慮に関するアンケートの集計結果

	本処理適用前	本処理適用後
視点 A	8	4
視点 B	6	6
視点 C	5	7

流線によって遮蔽されており見えにくい

という意見があった。風のうねる様子は、本処理を適用した可視化結果のほうが多くみられるが、それがかえって分かりにくい可視化結果になっていると評された。流線同士による遮蔽は、既存手法でも問題となっており、我々も今後この問題に取り組む必要があると考える。

5 適用事例

本手法を用いて、気象シミュレーションデータを可視化した結果を示す。本論文では、格子数 $80 \times 40 \times 80$ 個、各格子点に風の流れ場 (x, y, z) ・気圧・気温が 100 ステップ記録されているデータ [18] を使用した。なお、このデータでは z 軸正方向が上空方向である点に注意されたい。

まず前処理として、気圧を対象として、全ステップに対して特異点を抽出すまず前処理として、気圧を対象として、全ステップに対して特異点を抽出する処理を施した。その結果、極大点・極小点・鞍点の各々に該当する格子点が一つ以上見つかった 99 ステップ目を可視化の対象とすることにした。この 99 ステップ目には、極大点が 13 点、極小点が 9 点、鞍点が 25 点、合計 47 個の特異点が見つかった。このデータは温帯低気圧をシミュレーションで発生させたもので、99 ステップ目はちょうど温帯低気圧が発達する直前の状態がシミュレートされている。以後、99 ステップ目におけるスカラ場（気圧）およびベクタ場（流れ場）の数値を抽出し、可視化を行った結果を示す。

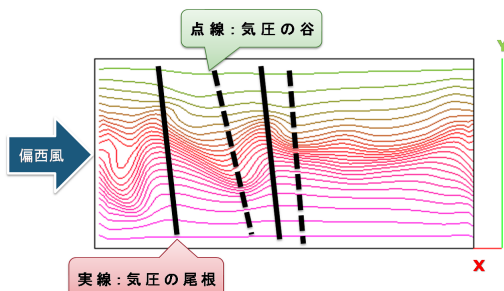


図 9: 等値線を用いた、上空付近における xy 平面の気圧の様子可視化

まず、等値線を用いて上空付近における xy 平面の気圧の様子を可視化した（図 9 参照）。破線部分に気圧の谷が、実線部分に気圧の尾根が観察できた。気圧

の谷や尾根は、西から吹く偏西風が南北にうねりながら、まるで波のように流れてきた結果、この蛇行が南に張り出してきた部分は、周りより気圧が低いため、気圧の谷となり、逆に流れが北に向かっているときは、気圧の尾根ができる。気圧の谷の部分には低気圧性の渦、すなわち下降気流が発生するといわれ、また気圧の尾根の部分には高気圧性の渦、すなわち上昇気流が発生するといわれている。

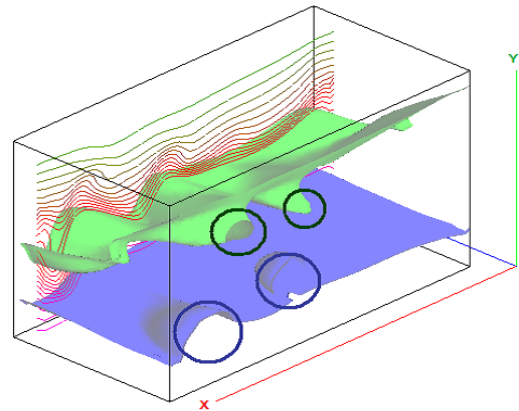


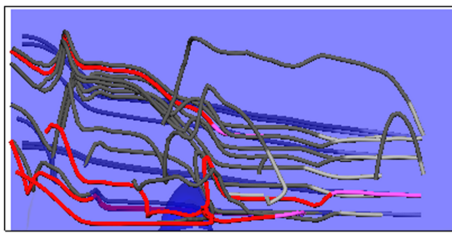
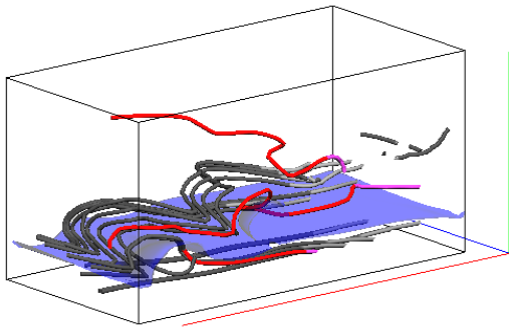
図 10: 低気圧と高気圧を可視化

図 10 は、極大値を少し下回る値を青色の等値面で、極小値を少し上回る値を緑色の等値面で可視化したものである。今回等値面は気圧のデータを可視化しているので、青の丸で囲んだあたりが高気圧を、緑の丸で囲んだあたりが低気圧を示しており、図 10 で見られた気圧の谷や尾根付近に高気圧や低気圧が発生していることが観察できる。

図 10 で見せた高気圧の近傍について、流線を生成して風の流れ場を可視化した結果を、図 11 に示す。特異点付近を通過する流線は赤色で、それ以外の流線は黒色で描画している。流れの向きが分かるように、流線の始点は薄い色で表現している。ここで図 11（上）と図 11（下）は、全く同一のスカラ場・ベクタ場に対して、視点だけを切り替えて表示した 2 つの可視化結果である。このように視点を切り替えることで、情報エントロピーが再計算され、そのつど適切な流線を描画することができる。

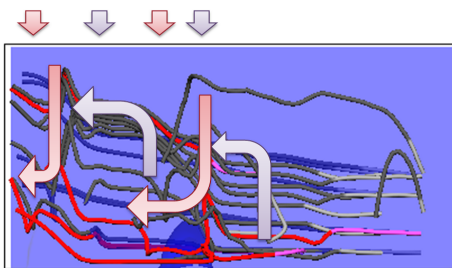
図 12 は図 11(下) に対して、図 9 で見せた気圧の谷と尾根を書き加えたものである。赤色の矢印が気圧の谷を、青色の矢印が気圧の尾根をあらわしており、谷部分には上昇気流が、また尾根付近で下降気流が発生しているのがみえる。このことから、気圧の谷の部分には下降気流が発生する現象と、気圧の尾根の部分には高気圧性の渦、すなわち上昇気流が発生する現象を確認できた。

高気圧は、通常この下降気流を伴うと言われている。下降気流が発生する原因はさまざまだが、たとえば上空付近の空気が地上付近より冷えていることで上空と地上の大気の密度差で下降気流が起こることがあるといわれている。今回気温の可視化は行っていないが、こちらも併せて可視化することで下降気流の発生メカニズムを可視化が可能ではないかと、我々は考えている。



x

図 11: 高気圧と風の流れ場を可視化した結果 .



x

図 12: 図 11(下) における, 気圧の谷と尾根付近にみられる気流の様子

6 今後の展望

今後の展望として, 以下の 2 点が挙げられる .
 特異点数の多いボリュームデータへの対処 .
 我々が现阶段で利用しているデータにおいて, ベクタ場の特異点の数は 50 前後と少数である . そのため, ベクタ場の可視化において全ての特異点を考慮することが可能であった . しかし, 特異点が大量に存在するデータに適用する場合, 全ての特異点を考慮することは困難となるため, どの特異点が重要なのかを考える必要がある . スカラ場・ベクタ場の両方において, 重要な特異点を特定するための先行研究は既にいくつか発表されており [16], これを適用することでこの課題を克服したい .
 一定時間にわたるシミュレーション結果の可視化 .
 時系列ボリュームデータの可視化 [19] は, すでに活発な議論が進んでいる . 我々が本論文にて適用したデー

タも時系列ボリュームデータの一つであるが, しかし我々の现阶段の実験では, 単一時刻におけるシミュレーションの結果を可視化しているにすぎない . これを発展させて, その前後の時刻, あるいは時系列全体を可視化することで, データの新たな特徴の発見につながると考えている . 時間変化を伴うデータの可視化において, 本手法をそのまま各時刻に適用した場合, 描画される流線が毎時刻変わり, そのため可視化結果にちらつきが生じる恐れがある . このちらつきによって, 毎時刻可視化結果が大きく変化し, 特定の流線を追って観察することや, データが時間変化に伴いどのように変化しているのかを把握することが困難になることがあると予測される . 今後の課題として, このちらつきの問題を解決することで, 本手法を時系列ボリュームデータの可視化へ応用していきたい . また時系列ボリュームデータの可視化においては, 時刻変化を表す流跡線や流脈線の適用も有用であると考えられる . これらについても検討を進めたい .

7 まとめ

本報告では, 気象シミュレーションのデータを用いて, スカラ場とベクタ場を同時に三次元で可視化する一手法を提案した . ベクタ場の可視化において流線を自動生成する際に, 情報エントロピーにもとづいて流線を選択する手法を提案した . さらに特異点を考慮することで, データの局所的特徴を掴んだ結果を得られた . また, 同時可視化時に起こりうる流線の可視性の低下 (等値面による遮蔽) を考慮した結果を得られた .

謝辞

気象シミュレーションデータを提供して頂いた, お茶の水女子大学河村哲也教授, 安田史氏に感謝いたします .

参考文献

- [1] L. Li, H.-H. Hsieh, H.-W. Shen, Illustrative Streamline Placement and Visualization, *Proceedings of IEEE Pacific Visualization Symposium 2008*, pp. 79-86, 2008.
- [2] 渡邊, 茅, 渡邊, 小野, 視線情報を用いた非定常流における流脈線と流跡線の自動配置, *Visual Computing/グラフィクスと CAD シンポジウム*, 2008.
- [3] V. Verma, D. Kao, A. Pang, A Flow-guided Streamline Seeding Strategy, *Proceedings of the conference on IEEE Visualization*, pp. 163-170, 2000.
- [4] A. Mebarki, P. Alliez, O. Devillers, Farthest Point Seeding for Efficient Placement of Streamlines, *Proceedings of the conference on IEEE Visualization*, pp. 479-486, 2005.

- [5] L. Li, H.-W. Shen, Image Based Streamline Generation and Rendering, *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, pp. 630-640, 2007.
- [6] X. Ye, D. Kao, A. Pang, Strategy for Seeding 3D Streamlines, *Proceedings of the conference on IEEE Visualization*, pp. 471-478, 2005.
- [7] L. Hong, X. Mao, A. Kaufman, Interactive Visualization of Mixed Scalar and Vector Fields, *Proceedings of the conference on IEEE Visualization*, pp. 240-247, 1995.
- [8] R. A. Crawfis, N. Max, Texture Splats for 3D Scalar and Vector Field Visualization, *Proceedings of the conference on IEEE Visualization*, pp. 261-266, 1993.
- [9] L. Treinish, Z. Christidis, Visualization Techniques for Applications of High-Resolution Numerical Weather Models, *Proceedings of the Sixteenth International Conference on Interactive Information and Processing Systems for Meteorology*, pp. 66-69, 2000.
- [10] L. Treinish, Multi-Resolution Visualization Techniques for Nested Weather Models, *Proceedings of the conference on IEEE Visualization*, pp. 513-516, 2000.
- [11] 酒井, 坂本, 小山田, 土井, 特異点可視化による気象現象の解析手法, 可視化情報学会 第9回ビジュアライゼーションカンファレンス講演予稿集 CD, 2003.
- [12] T. Itoh, K. Koyamada, Automatic Isosurface Propagation by Using an Extrema Graph and Sorted Boundary Cell Lists, *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 1, No. 4, pp. 319-327, 1995.
- [13] K. Koyamada, T. Itoh, Seed Specification for Displaying a Streamline in an Irregular Volume, *Engineering with Computer*, Vol. 14, pp. 73-80, 1998.
- [14] W. Lorensen, H. Cline, Marching Cubes: A High Resolution 3D Surface Construction Algorithm, *ACM SIGGRAPH Computer Graphics*, Vol.21, No.4, pp.163-169, 1987.
- [15] G. Kindlmann, J. W. Durkin, Semi-automatic Generation of Transfer Functions for Direct Volume Rendering, *Proceedings of the 1998 IEEE symposium on Volume visualization*, pp. 79-86, 1998.
- [16] S. Takahashi, Y. Takeshima, I. Fujishiro, Topological Volume Skeletonization and Its Application to Transfer Function Design, *Graphical Models*, Vol. 66, No. 1, 24-49, 2004.
- [17] S. Takahashi, I. Fujishiro, Y. Takeshima, T. Nishita, A Feature-Driven Approach to Locating Optimal Viewpoints for Volume Visualization, *Proceedings of IEEE Visualization 2005*, pp. 495-502, 2005.
- [18] 安田, 関口, 河村, 雲の発生を伴う温帯低気圧の簡易シミュレーションモデル, 数理解析研究所講究録, Vol. 1539, pp. 59-69, 2007.
- [19] K.-L. Ma, H.-W. Shen, Visualization Techniques for Time-Varying Volume Data, *2000 International Computer Symposium (ICS2000)*, Vol. 14, pp. 73-80, 2000.



古矢 志帆

2007年お茶の水女子大学理学部情報科学科卒業。2009年お茶の水女子大学大学院人間文化研究科数理・情報科学専攻博士前期課程修了。情報処理学会会員。



伊藤 貴之

1990年早稲田大学理工学部電子通信学科卒業。1992年早稲田大学大学院理工学研究科電気工学専攻修士課程修了。同年日本アイ・ビー・エム(株)入社。1997年博士(工学)。2000年米国カーネギーメロン大学客員研究員。2003年から2005年まで京都大学大学院情報学研究科COE研究員(客員助教授相当)。2005年日本アイ・ビー・エム(株)退職,2005年よりお茶の水女子大学理学部情報科学科助教授。ACM, IEEE Computer Society, 情報処理学会, 芸術科学会, 画像電子学会, 可視化情報学会, 他会員。