

可視化情報分析支援システムのフレームワーク

正員 白 山 晋* 正員 大 和 裕 幸**

A Framework of Analysis Support System for Visualized Information

by Susumu Shirayama, Member Hiroyuki Yamato, Member

Summary

A huge amount of data has been produced from computations and experiments in Computational Fluid Dynamics and Experimental Fluid Dynamics. Owing to the volume of data, it is quite difficult to extract useful information from these data even if using flow visualization. In this paper, we propose a framework of analysis support system for visualized information. First, a simplification of visualized information for the purpose of an efficient information extraction to analyze a flow field is discussed. It is shown that critical points on a velocity field and a vortical structure obtained by substituting the vorticity distribution into discrete vortex elements become a starting point of simplification. And then, we demonstrate that several techniques of map generalization are valid to simplify the visualized information, and the results simplified by the generalization can be effectively visualized using nonlinear magnification. Second, we consider an annotation system. Annotations are added to the clustered or symbolized objects extracted from the simplified information. Finally, we show a framework of the system, and several examples are demonstrated. It will be considered that our proposed system is useful to analyze the visualized information.

1. 結 言

流れ場を解析する際に扱うデータは、数値計算の大規模化、実験における空間データの取得技術の向上によって膨大な量になっている。多くの場合、ある種のフィルタリング操作によって不要部は棄却されるので、すべてのデータが利用されるわけではない。しかしながら、データの信頼性の向上によって棄却基準の設定が難しくなり、棄却データの中にも有益な情報をもつものが増加している。また、データ処理後の情報の複雑化に起因して、結果を解釈し有益な情報を引き出すための労力は大きくなっている。

流体解析におけるフィルタリング操作の代表は可視化であるが、上述した問題を解決することはできない。可視化情報自体が大きく、複雑なものになり、可視化結

果の解釈が難しくなっているためである。この状況を模式的に示したものが Fig.1 である。一般的には、データマイニングや知識情報処理システムが可視化後の情報量の爆発に対応するものと考えられている。しかしながら、現象の非線形性のために、直接的にデータマイニングを適用しただけでは、可視化情報が何かしらの知識として纏まるとは考えにくい。解析者の持つ既存の知識を活かし、かつ新たに創出される情報や知識を再利用可能にする可視化結果の分析を支援する仕組みが必要になっている。

本研究の目的は、そのようなシステムを構築するための要素技術と全体の枠組みを示すことである。

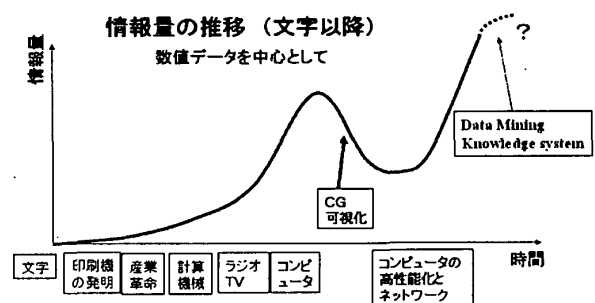


Fig.1 Increasing amount of information.

* 東京大学大学院工学系研究科

** 東京大学大学院新領域創成科学研究科

原稿受理 平成 14 年 7 月 10 日

秋季講演会において講演 平成 14 年 11 月 14, 15 日

2. 分析支援システムに対する要件

現在の可視化技術は 80 年代中期には成熟し¹⁾, 90 年代にかけてコンピュータグラフィックスの成果を取り込みながら, 流れ場の 3 次元構造の把握を中心として, 3 次元可視化システムやボリュームレンダリングなどのイメージベースの方法を加えて発展したものである²⁾。そのような可視化技術によって, 計算結果, あるいは実験結果が可視化情報として集約され, 多くの知見が引き出されている。しかしながら, 可視化においては, そのプロセス自体が知識抽出の一つの方法であり, 結果として生じる可視化情報が知識であるという認識が少なからずある。また, 可視化情報は可視化画像そのものであり, 画像ファイルとその生成過程, 利用法が統一的に管理されることはほとんどない。このため, 二つの課題:

● 系統的な知識抽出法の確立

● 可視化情報の管理

が残されている。

知識抽出法に関していえば, 流れ場の位相表現などの情報の簡素化により, 系統的な知識抽出が行われる場合もあったが^{3), 4), 5)}, 個々の解析者の見方による判断が知識抽出の核であったと考えられる。設計等の別プロセスで, 可視化をした解析者の介在なしで直接利用される可視化情報が少ない理由である。また, 可視化結果を分析するための過程も確立されていない。このように, 可視化プロセスには解析者の個々の知識に依存する部分が多く, 次のプロセスへの情報の受け渡しに暗黙知が混入することになる。可視化情報の分析支援システムを構築する上で, この暗黙知の形式知化と, 知識を再利用, あるいは転用するための仕組みを考察することが必要になる。

可視化結果を解釈する際の暗黙知を, 形式知化するためには, 知識を獲得するための仕組みを考えることが重要である。本稿では, Fayyad らの提案する知識発見のプロセス⁶⁾に従って可視化結果の解釈が行われるものと仮定する。Fayyad らの知識発見モデルでは, データ(Data)から目標となるデータ(Target Data)に着目し, 必要な部分を選別後 (Preprocessed Data), データを変換する (Transformed Data)ことを第一段階と考える。次に変換されたデータからパターンを見つけ, 分析することで知識を発見する (Patterns と Knowledge)。単純なモデルではあるが, 可視化のプロセスにも適用できる。可視化の第一段階では, 計算データや実験データから可視化対象となるデータに着目し, 表示領域, 可視化手法を決め, 可視化を行う。この際, データは幾何データ, あるいは画像データに変換される。変換されたデータの中から既存の

知識等にもとづいてパターンを見つけ, 新たな知見を得る。第一段階においてはどのようなデータに着目するのかが, 第二段階ではパターンの抽出が鍵となっているが, 共通するものは知識獲得を容易にする情報の加工であろう。

この情報の加工を,

■ 特徴領域の抽出による情報の限定

■ 情報の簡素化

■ 詳細情報と簡素化されたものの関連性を明示するための階層化

とすると, これらに情報の表示法を加えたものが分析支援システムの構成要素になると考えられる。

一方, 可視化情報の管理において, はじめに留意しなければならないのは再現性である。可視化プロセスでは, 流れ場の諸元, 計算手法, 実験手法, 用いた可視化手法, 可視化パラメータ, 可視化によって得られた知見などは, 学術論文や報告書の中で記述される。加えるならば, これらの情報が完全に記述されることは少ない。最近の可視化汎用ソフトウェアには, 手続きを記録する機能が付加されているが, 可視化手法, 可視化パラメータの記録が主であり, 可視化対象に関する情報や可視化から得られた知見までを記録するわけではない。その結果, 計算データが与えられたとしても, 同じ可視化画像を得ることは簡単ではない。さらに, ある可視化情報を他の解析者が分析する場合, その解析者の独自の解釈に置き換えられる可能性がある。また, 同一の解析者が過去の可視化情報を分析する場合でも同様のことが起こり得る。協調作業のための情報の共有や蓄積が考えられていないことが一因である。

可視化情報の共有を, 解釈という視点で考えると, 可視化結果に対する注釈付けが必要になる。例えば, 渦の位置や強さは渦度分布の等値線図によって示すことはできても, ある渦が流れ場の形成にとってどの程度重要なのかといった結果の解釈までを示すことはできない。このような解釈には個々の解析者の知識, あるいは経験が活かされる。注釈を保存し, 引用できるようなシステムが望ましい。

次節以降, システムに対するこれらの要件を満たすための要素技術について提案する。

3. 可視化情報の簡素化・階層化

3.1 特異点探索にもとづく特徴領域抽出とその問題点

Fig.2 は 2 次元キャビティ流れの速度場である。Fig.2a は速度場のベクトル表現で, Fig.2b は, 2 次元キャビティ流れの特徴を捉えた抽象的な表現である。Fig.2a に示

す結果を次のプロセスで用いる場合でも、共同で解析を進める場合においても Fig.2b のような抽象的な簡略図が付加されていれば効率的な作業が可能になるだろう。しかしながら、これを自動的に作成することは簡単ではない。熟練者のものとはいわないまでも、流体现象に対するある程度の知識が必要になる。自動化には限界があるが、自動化のために必要な技術を考えることが支援システムの構成要素を見出すための一つの手段になる。そこで、この図を自動生成する方法を考察する。

自動生成の一つの方法として、流線の表示後、流線をまとめ、簡素化していくという方法が考えられる。そこで、流れ関数を用いてこの流れ場を可視化してみる (Fig.3)。Fig.3 に示す結果と、流線に関する知識、Fig.2a における流れの方向を加味すると、Fig.2b を作ることはできる。しかしながら、流れ関数を用いた流線表示にはいくつかの問題がある。 ϕ - ω 法 (流れ関数・渦度法) のような流れ関数を従属変数とした数値計算法以外では、計算後に速度場や渦度場を用いて流れ関数を求めることになるが、境界条件や数値誤差によって精密に算出することは難しい。また、等値線による可視化において、流れ場の特徴を示す等値線の値を与えることは容易ではない。例えば、Fig.3 の左上の循環領域が不正確なのは、流れ関数の算出時の数値誤差と、表示すべき流れ関数の値が適切でないためである。さらに流線の可視化には、3次元化⁷⁾の難しさという問題がある。

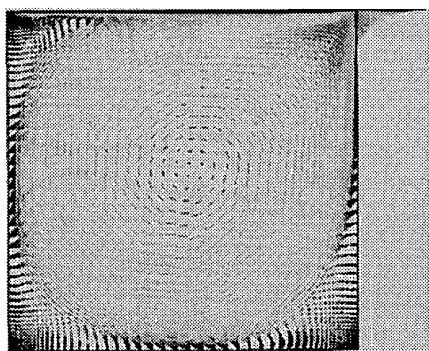


Fig.2a Velocity vector plot in a cavity flow.

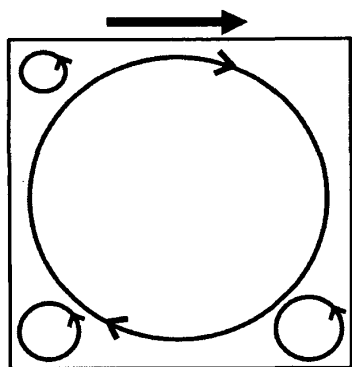


Fig.2b Velocity field illustrated by a hand.

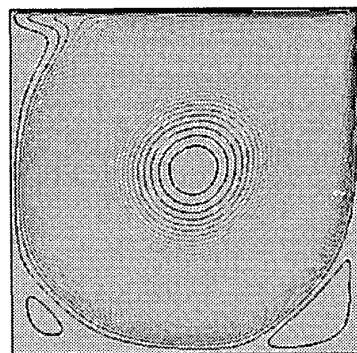


Fig.3 Streamlines in a cavity flow.

一方、Fig.2b を4つの渦心点まわりのベクトル場を組み合わせたものと見なせば、局所的な情報から全体を構成することによる自動化が考えられる。特異点探索から位相構造を抽出し、位相構造にもとづいて流れ場を解析する、あるいは位相構造を検索キーとして流れ場を特徴付けるという方法^{3), 4), 5)}の応用である。はじめに、ベクトル場全体を次の常微分方程式で表す (一般性を持たせるために3次元のベクトル場とした)。

$$\frac{dx}{dt} = \mathbf{b}, \quad \mathbf{b} = \begin{pmatrix} u \\ v \\ w \end{pmatrix}, \quad (1)$$

ここで、 \mathbf{b} はあるベクトル場を、 t は時間、あるいは擬似時間を示す。次に、適切な補間関数を用いて計算要素内でのベクトル \mathbf{b} を

$$\mathbf{b} = \mathbf{b}(x, y, z), \quad (2)$$

と近似する。この分布から特異点の位置 (x_c, y_c, z_c) を、

$$\mathbf{b}(x_c, y_c, z_c) = \mathbf{0}, \quad (3)$$

によって求める。局所的な位相情報は、式(1)を特異点まわりで線形化することによって与えられる。式(1)を線形化すれば、

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} x - x_c \\ y - y_c \\ z - z_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} & \frac{\partial u}{\partial y} & \frac{\partial u}{\partial z} \\ \frac{\partial v}{\partial x} & \frac{\partial v}{\partial y} & \frac{\partial v}{\partial z} \\ \frac{\partial w}{\partial x} & \frac{\partial w}{\partial y} & \frac{\partial w}{\partial z} \end{pmatrix}_{x_c, y_c, z_c} \begin{pmatrix} x - x_c \\ y - y_c \\ z - z_c \end{pmatrix}, \quad (4)$$

となる。右辺の 3×3 行列の成分は式(2)の偏微分によって求められ、固有値、固有ベクトルを調べることで、特異点の性質、特異線の方法がわかる。ただし、計算要素の幾何的形状によっては多大な計算時間を要するため、演算の簡易化が必要になる。一般曲線座標系を用いた格子系では以下のような簡易計算が可能である。一般曲線座標系を $\xi: (\xi, \eta, \zeta)$ とし、 $x: (x, y, z)$ との関係を

$$\begin{aligned} x &= x(\xi, \eta, \zeta), \\ y &= y(\xi, \eta, \zeta), \\ z &= z(\xi, \eta, \zeta), \end{aligned} \quad (5)$$

とする。次に座標変換行列 P を、

$$P = \begin{pmatrix} \frac{\partial x}{\partial \xi} & \frac{\partial x}{\partial \eta} & \frac{\partial x}{\partial \zeta} \\ \frac{\partial y}{\partial \xi} & \frac{\partial y}{\partial \eta} & \frac{\partial y}{\partial \zeta} \\ \frac{\partial z}{\partial \xi} & \frac{\partial z}{\partial \eta} & \frac{\partial z}{\partial \zeta} \end{pmatrix}, \quad (6)$$

と定義する。 P が正則であれば、 (x_c, y_c, z_c) の近傍で、

$$\mathbf{x}' = (P^{-1})_c \boldsymbol{\xi}', \quad (7)$$

が成立する。ここで、 $(P^{-1})_c$ は、 (x_c, y_c, z_c) における P の逆行列、 $\mathbf{x}' = (x - x_c, y - y_c, z - z_c)^T$ 、 $\boldsymbol{\xi}' = (\xi - \xi_c, \eta - \eta_c, \zeta - \zeta_c)^T$ である。式(4)の右辺の 3×3 行列を E とおき、 $(P^{-1})_c$ を両辺に掛けると、

$$(P^{-1})_c \frac{d\mathbf{x}'}{dt} = (P^{-1})_c E (P^{-1})_c \mathbf{x}', \quad (8)$$

となる。式(7)を用いれば、

$$\frac{d\boldsymbol{\xi}'}{dt} = F \boldsymbol{\xi}', \quad F = (P^{-1})_c E (P)_c, \quad (9)$$

を導くことができる。行列 F は、 E に相似変換を施したものであるから、 E と F の固有値、固有ベクトルは変わらない。ここで、

$$\mathbf{B} = P^{-1} \mathbf{b}, \quad \mathbf{B} = \begin{pmatrix} U \\ V \\ W \end{pmatrix}, \quad (10)$$

とおくと、

$$F = \begin{pmatrix} \frac{\partial U}{\partial \xi} & \frac{\partial U}{\partial \eta} & \frac{\partial U}{\partial \zeta} \\ \frac{\partial V}{\partial \xi} & \frac{\partial V}{\partial \eta} & \frac{\partial V}{\partial \zeta} \\ \frac{\partial W}{\partial \xi} & \frac{\partial W}{\partial \eta} & \frac{\partial W}{\partial \zeta} \end{pmatrix}, \quad (11)$$

となる。 \mathbf{b} を速度ベクトルとすれば、計算空間上で、反変速度ベクトル場から特異点、特異線を調べればよいことがわかる。

2次元キャビティ流れに対する特異点探索に対して、具体的な手順を示す。

(i) 反変速度ベクトルの算出

式(10)に従って、速度ベクトル場から反変速度ベクトル場を計算する。

(ii) 特異点が存在する計算要素の探索

反変速度ベクトルの Fig.4 に示す計算要素内での分布が線形であると考え、下側の三角形に着目し、 $U_{i,j}$, $U_{i+1,j}$, $U_{i,j+1}$ のうち、いずれかが異符号、あるいは0の場合は、 $V_{i,j}$, $V_{i+1,j}$, $V_{i,j+1}$ について符号を調べる。 $V_{i,j}$, $V_{i+1,j}$, $V_{i,j+1}$ のうち、いずれかが異符号、あるいは0であれば、この三角形内に特異点があるものとする。ここで、 $U_{i,j}$, $U_{i+1,j}$, $U_{i,j+1}$, $V_{i,j}$, $V_{i+1,j}$, $V_{i,j+1}$ のすべてが0の場合は除く。上側の三角形に関しても同様に調べる。

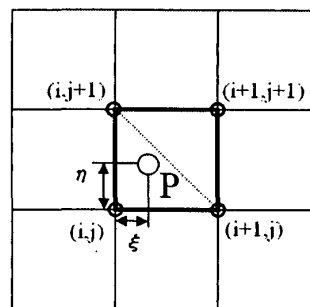


Fig.4 Local coordinates in a grid cell.

(iii) 反変速度ベクトルの補間

特異点が存在する計算要素に対して、反変速度ベクトルの分布を補間によって近似する。線形補間を用いれば、点 P 上の (U_p, V_p) は、

$$U_p = U_{i,j} + (U_{i+1,j} - U_{i,j})\xi + (U_{i,j+1} - U_{i,j})\eta, \\ V_p = V_{i,j} + (V_{i+1,j} - V_{i,j})\xi + (V_{i,j+1} - V_{i,j})\eta,$$

となる。

(iv) 特異点の特定

点 P が特異点であれば、 $(U_p, V_p) = (0,0)$ なので、

$$\begin{pmatrix} U_{i+1,j} - U_{i,j} & U_{i,j+1} - U_{i,j} \\ V_{i+1,j} - V_{i,j} & V_{i,j+1} - V_{i,j} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \xi \\ \eta \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} U_{i,j} \\ V_{i,j} \end{pmatrix}$$

によって特異点の位置を決定できる。不定になる場合は、 (i,j) を '不定 U ' として記憶しておく（上側の三角形内の場合は、'不定 U ' とする。特異点の性質は、(11)式の行列 F の固有値によって調べることができる。行列 F は、

$$F = \begin{pmatrix} U_{i+1,j} - U_{i,j} & U_{i,j+1} - U_{i,j} \\ V_{i+1,j} - V_{i,j} & V_{i,j+1} - V_{i,j} \end{pmatrix}$$

である。固有値によって、結節点、鞍状点、渦状点、渦心点に分類される。

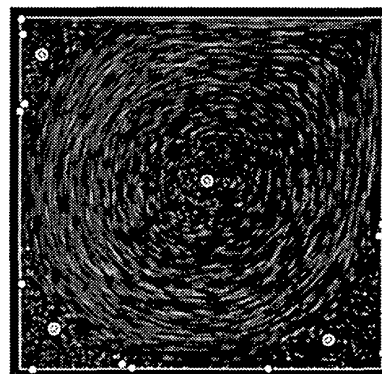


Fig.5 Distribution of critical points

Fig.5 に特異点探索の結果を示す（背景はピクセル露光法⁸⁾によって可視化した速度場であり、特異点まわりの流れ場の様子を示すために重畳した）。◎は渦心点を、○は鞍状点を表している。4つの渦心点に着目すれば、

Fig.2b のような簡易表現を得ることが可能である。しかし、いくつかの鞍状点が不完全な形で現れている。このような不完全な特異点分布は数値計算側と探索側の両方の問題で生じる。特に非圧縮性流れを扱う場合は、特異点分布は連続の式の満たされ方に影響を受ける。また、探索時の局所補間を注意深く扱わないと、保存性の高い数値計算と、高精度の探索アルゴリズムを用いても特異点の過不足を解消することはできない。実際、本稿で用いた線形補間には、特異点の見落としと種別の誤りの可能性がある。さらに、補間法を変えたいくつかの数値実験によって、固有ベクトルを精度良く求めることは困難であり、固有ベクトルを特異線の起点とした位相構造の表現法⁹⁾には問題が多いことも明らかになった。

特異点分布を利用した位相構造の抽出法の最も大きな問題は、誤差に起因して生じた特異点であっても、位相構造が特異点分布をもとに構成されることにある。また、位相だけに注目すると、位置情報と形状情報が欠落する。つまり、位相構造を調べることは、情報の簡素化には役立つが、流れ場が複雑になると、この情報だけで流れの構造を表現することはできない。そこで、提案するシステムでは、位相構造ではなく、特異点分布のみを利用する（特異点の属性は位置と種別のみとする）。特異点を特徴領域の目印として扱うことにし、他の情報を追加するという方針を採用する。例えば、Fig.5 の特異点分布にもとづき、特異点近傍から粒子追跡を行った結果を重ねると、Fig.6 のように、この流れ場の大きな特徴を把握することができる。なお、計算側の誤差に起因する特異点の過不足は、計算結果を忠実に再現するという方針を原則として許容する。

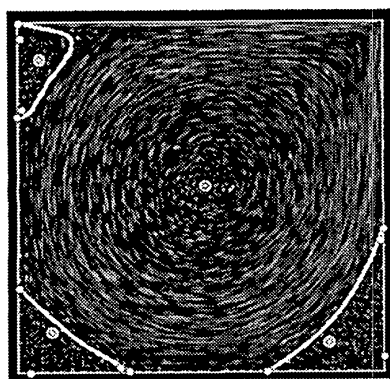


Fig.6 Critical points and particle tracking

3.2 渦要素による特徴領域抽出

位相構造の抽出と平行して、渦構造の顕在化によって流体现象を解明しようという多くの試みがなされている。2次元においては渦度分布が、3次元では渦度ベクトルの絶対値やエンストロフィ密度などが利用されて

いる。渦構造のもつ情報は、流れ場のものよりも少ないが流れの構造を表すためには十分であることが多い。そこで、渦構造にもとづいた可視化情報の簡素化を考える。問題は渦構造をどのように簡素化するかである。

著者らは、渦構造を渦要素に置き換えることでデータ圧縮が可能であることを示した¹⁰⁾。提案した方法はFayyadらの知識発見プロセスの第一段階に対応し、

- 渦構造に着目し、一次量として計算データ(Data)から渦度(Target Data)を計算する
- 渦度の必要な部分を選別し(Preprocessed Data)、一次量を保持しながら、連続に分布する渦度を渦要素(Transformed Data)に変換する

となっている。具体的な方法については、文献10を参照してほしい。この方法を用いるとFig.7に示す円柱を過ぎる流れの渦度分布を、Fig.8のように渦要素(2次元の場合は渦糸)で表現することができる。

これらの渦要素分布を特異点分布と同様に特徴領域の目印として扱い、可視化情報の簡素化の起点とする。渦要素の属性は、位置と強さであり、3次元の場合は方向が加わる。

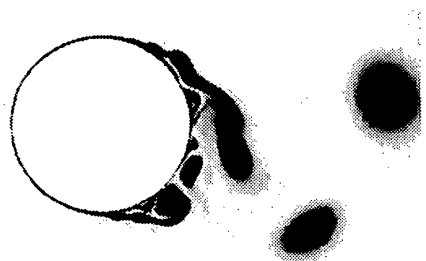


Fig.7 Vorticity field by shaded contour

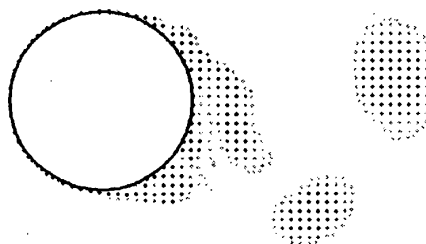


Fig.8 Distribution of point vortices

3.3 総描を利用した情報の簡素化

特異点や渦要素分布だけでは分析の支援情報として不十分である。一方、詳細情報は大きすぎるので、分析支援に必要なものはこれらを繋ぐような情報である。これをFig.2aの詳細情報とFig.2bの中間に位置づけられる情報と捉え、*中間情報*と呼ぶ。特異点分布や渦要素分布を目印として、詳細情報を簡素化するという方針によって中間情報を生成する。提案する分析支援システムでは、

この中間情報の生成に地図の総描手法を応用する。総描については付録にまとめた。

総描手法における *Elimination* を実現するものの一つが、画素ベース、イメージベースの可視化である。Fig.5 と Fig.6 の背景がこの可視化に対応する。一見すると、Fig.2a よりも情報が多いように見えるかもしれないが、Fig.2a が幾何情報として速度ベクトルをもつことに対して、Fig.5 と Fig.6 の背景は表示解像度分の輝度情報のみで構成されていることから、多くの場合、情報は減少している。また、ある画素に着目して、*Aggregation* を適用すれば、近傍の輝度は一つにまとめられるので更なる簡素化は可能である。

総描の *Aggregation* は、渦要素に対しても適用できる。渦要素群において、切り離された領域を一つの固まりとしてラベル付けを行えば渦要素のクラスターを形成することができる。さらに各クラスターの重心を

$$x_c = \frac{\sum_{m \in L} \Gamma_m x_m}{\sum_{m \in L} \Gamma_m}, y_c = \frac{\sum_{m \in L} \Gamma_m y_m}{\sum_{m \in L} \Gamma_m}, \quad (12)$$

で求めると、情報は非常に簡単なものとなる。ここで、 L はクラスターの番号、 Γ_m は、渦要素 m の循環の大きさである。この方法は、総描における *Classification and Symbolization* にも相当する。また、知識発見プロセスの変換されたデータからのパターン抽出に対応し、知識抽出の支援になると考えられる。

総描においては、簡素化された結果を詳細化し直す操作 (*Refinement*) も重要な役割を担っている。最も簡素化された情報である特異点分布や渦要素分布を起点として詳細情報を簡素化していく過程においても、部分的な詳細化が必要になる。先述したように特異点探索は、不完全な数値解や数値誤差に起因する誤情報の発生に対して脆弱であり、部分的詳細化において不整合が生じる可能性がある。そこで、流れ場に対する既存の知見から特異点分布を修正すること（具体的には、制約条件に従って特異点を削除、あるいは付加すること）が必要になる。このような既存の知見や詳細情報にもとづいた情報の修正は、分析システムにおいて備えるべき機能である。

3.4 非線形拡大表示空間を利用した情報の階層的表示

詳細情報から特徴領域を見つけ、総描により中間情報を生成した。これらの階層的な情報を利用して可視化情報分析を支援する場合には、情報の表示法が問題になる。例えば、境界層中に複雑な現象が集中する場合、狭い領域で詳細情報の簡素化が行われる。適切な簡素化が行われたとしても、視覚的に判別できなくなる。また、注釈

情報の付与が難しくなる。そこで、総描における *Exaggeration, Conflict Resolution, Typification* にもとづく表示法を提案する。

一つの方法は、特異点分布、渦要素分布や特徴線を利用した表示空間の非線形拡大 (Nonlinear Magnification¹¹⁾) である。Fig.9 に特異点分布を密度関数に対応させ、それをソース項とした楕円型格子生成法による表示用格子を示す。この格子は表示専用のものであり、物理空間と計算空間の対応を壊すものではない。

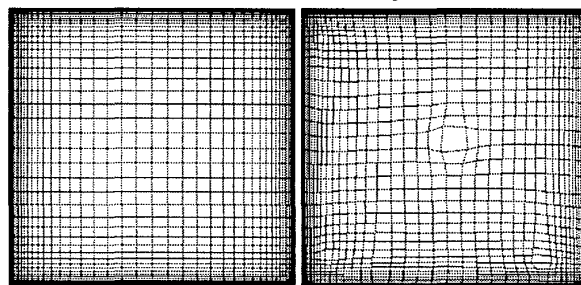


Fig.9 Computational grid (left) and nonlinear magnification for display (right)

4. 情報の管理

4.1 可視化画像の再現性

可視化画像を再現するためには、実験や計算のデータ、可視化プログラム、可視化パラメータが必要になる。最近の可視化ソフトウェアは履歴情報を保存できるようになっているので、同一のソフトウェアであれば再現することは簡単である。しかしながら、履歴情報はソフトウェアに固有であり、可視化の対象となったデータについての記述は保存されない。計算結果の可視化であれば、計算パラメータから可視化パラメータまでを一元的に管理する仕組みを考える必要がある。

4.2 注釈オブジェクト

注釈付けは画像情報を説明するためばかりでなく、情報や知識の再利用と転用のために重要な役割を果たす。提案するシステムでは、点、矢印、4角形、窓などの幾何オブジェクトを用意し、幾何オブジェクトに注釈情報を付随させる。または、注釈のために幾何オブジェクトを利用する。注釈情報が付いた幾何オブジェクトを注釈オブジェクトと呼ぶ。例えば、Fig.2b に示す矢印に‘主渦の向きを示すもの’のような注釈を加える。

4.3 利用履歴情報の保存

可視化画像を生成する工程の中には解析者がもつ知識が含まれている。知識工学で提唱されている方法を利

用すれば、生成工程の履歴情報の分析によって何かしらの知識を抽出できるかもしれない。ただし、これは可視化画像からの知識抽出ではない。分析支援システムでは、可視化画像生成工程と、画像からの情報と知識を同時に扱う。

画像情報からの知識抽出の場合、階層的な構造をもった情報が知識の獲得のためにどのように利用されるのかを、解析者の行動、判断、注釈からなる利用履歴をもとに分析する。この履歴情報は、操作手順のテンプレート化のための基礎データにもなる。注釈情報やテンプレートは、ある可視化情報を他の解析者が分析する場合や、同一の解析者が過去の可視化情報を分析する場合にも役立つ。

4.4 保存形式

再利用や転用のためには、効率的な情報の蓄積と検索が鍵となる。蓄積と検索は対の技術であり、情報に対するインデクシングが基本となる。また、情報を一元的に扱うためには構造化された記述言語が必要になる。ただし、流体運動のような非線形現象に対して得られた知見を構造化された形式で表現することは難しく、自由記述形式にも対応しなければならない。

域之内は流体計算の入出力パラメータをXMLで記述し、データの再利用性を高めた¹²⁾。XMLを利用して、計算パラメータ、可視化パラメータ、特異点分布、あるいは渦要素分布、非線形拡大表示空間生成パラメータ、注釈オブジェクト及び注釈を、タイムスタンプとタグで管理する。分析支援システムのXML文書は、

- (a) 計算データ、あるいは実験データに関する文書
- (b) 可視化に関する文書
 - (b1) 可視化画像生成工程に関する文書
 - (b2) 画像情報の簡素化に関する文書
 - (b3) 画像情報の分析に関する文書

によって構成される。一つの可視化画像に対して、以下のようなXML文書を用意し可視化情報を管理する。

```
<?xml version="1.0" encoding="Shift_JIS" ?>
<!DOCTYPE 可視化情報 [
<ELEMENT 可視化情報 (ID, ファイル名, 日時, 名称, 構成ファイル, 作成者)>
<ELEMENT ID EMPTY>
<ELEMENT ファイル名 EMPTY>
<ELEMENT 日時 (#PCDATA)>
<ELEMENT 名称 (#PCDATA)>
<ELEMENT 構成ファイル (a,b1,b2,b3)>
<ELEMENT a EMPTY>
<ELEMENT b1 EMPTY>
<ELEMENT b2 EMPTY>
<ELEMENT b3 EMPTY>
<ELEMENT 作成者 (#PCDATA)>
]
```

```
<可視化情報>
<ID id="200207101111">
<ファイル名 imagefile="cav001.bmp">
<日時>17:30 10/07/2002</日時>
<名称>2次元キャビティ流れ</名称>
<構成ファイル>
  <a infoData="CompData.xml">
  <b1 infoVis="Visual.xml">
  <b2 infoSimpl="SimplVisual.xml">
  <b3 infoAnalysis="AnalysisVisual.xml">
</構成ファイル>
<作成者>S. Shirayama</作成者>
</可視化情報>
```

タグ付き情報の相互関係を明確にするために、文書間のタグを統一し、タイムスタンプによる時間軸の管理を行う。

5. システムの全体構成

可視化情報分析支援システムの主要部は、

- 特徴領域の抽出のための特異点探索と渦構造の渦要素化
- 中間情報の形成（簡素化手法として総描を利用）
- 可視化情報の階層化（特異点分布と渦要素分布、中間情報、詳細情報）
- 既存の知見にもとづく可視化情報の修正
- 非線形拡大表示空間を利用した階層情報の表示
- 注釈を含めた利用履歴情報の保存
- 注釈や知識の再利用と転用のための情報管理

によって構成される。情報の記述にはXMLを利用する。可視化情報分析支援システムは可視化システムに組み込まれる形で構築される。

計算データの場合を例にプロセスのながれを示す。はじめに計算パラメータを属性ファイルとしてもつデータが可視化システムに渡される。次に、可視化パラメータに従って可視化画像が作成される。分析支援部において抽出された特異点分布、あるいは渦要素分布が可視化画像に付加される。これらを特徴領域の目印として、総描によって中間情報を形成する。可視化画像は、特異点分布、あるいは渦要素分布、中間情報、詳細情報という階層的な構造をもつことになる。中間情報の表示に関しては、必要に応じて非線形拡大表示空間を利用する。同時に、段階毎に生じる画像情報に対して注釈付けがなされる。この際、注釈情報のタグとして、矢印や矩形などの幾何オブジェクトが加えられる。一連の作業はタイムスタンプをともなったユーザー履歴情報として保管される。

6. プロトタイプシステムによる実行例

構成要素の中で、特異点分布の抽出部、渦要素分布の抽出部、非線形拡大表示空間生成部、インタラクティブな注釈オブジェクトの生成部を実装し、2次元可視化システムに分析支援機能として加えた。このプロトタイプシステムを用いて数値実験を行う。

はじめに2次元キャビティ流れに対して、非線形拡大表示空間を用いた中間情報の表示例を示す (Fig.9)。

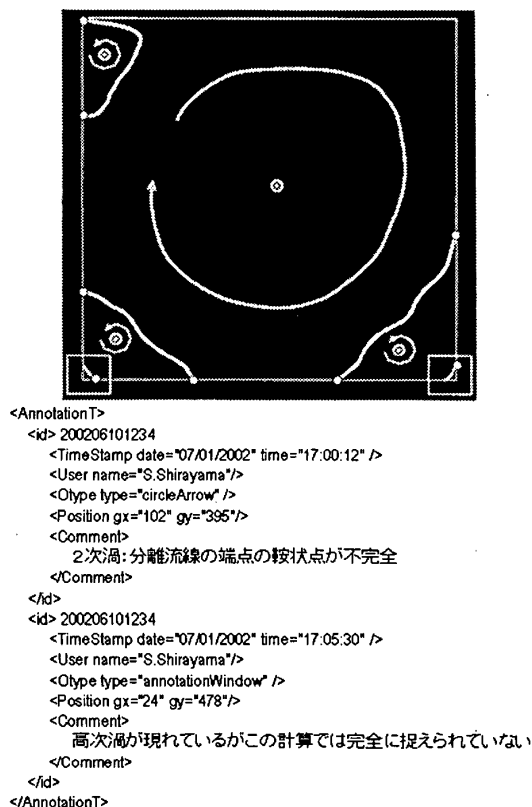


Fig.10 Simplified visual information with annotation

XML は一部を示している。矢印の識別は矢印先端の画素の座標によって行う。また、4角形の注釈オブジェクトによって、下部の左右の角に生じている高次の渦に対する注釈を与えている。このような注釈情報は、他の解析者の注意を喚起するとともに新たな知見を引き出す契機を与えるものと期待される。

非線形拡大表示空間に関しては、情報を分かり易く示すために用いられるのだが、この場合は特徴線の歪みによって逆効果となっている。しかし、3つの角の循環領域が拡大され、Fig.6では難しかった渦状点を中心とする矢印の表示が可能になるなど情報の呈示には有効であると考えられる。特徴線の歪みを小さくするためには、総描を利用すればよい。今後、改善する予定である。

次に円柱後流に対する中間情報を、渦要素を用いて生

成した例を示す (Fig.11)。図中の大きな黒丸は(12)式で算出された重心を示している。後流域の渦列の配置を可視化する試みの中で、数個の点と付与された矢印のみである程度の情報を呈示できるものはない。このような簡素化された情報と詳細情報を階層的に分析することによって、流体现象の理解が深まることが期待できる。

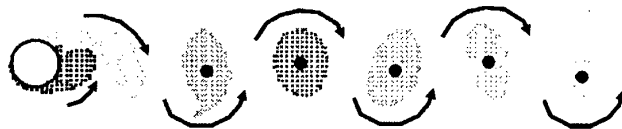


Fig.11 Time evolution of Karman vortex street showed by point vortices and simplified by the center of gravity.

最後の例は、非定常データに対する注釈付けを渦要素の変化にもとづいて行った例である。Fig.12(A)のようにある時間の渦度分布から得られた渦要素をビオサバールの法則を用いて追跡すると、Fig.12(B)が得られる。適当に選んだ渦要素の軌跡にもとづいて、流体の非定常運動を矢印によって示したものが Fig.13 である。このような矢印を Fig.12(A)のもとなる Fig.7 のような渦度分布から引き出すことは熟練者でも難しい。Fig.12(A)のように簡素化し、渦要素の特性を活かした分析によって可能になるものである。

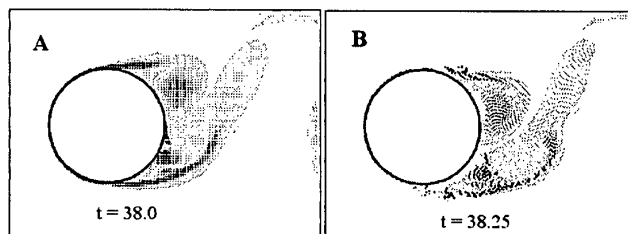


Fig.12 Time evolution of point vortices

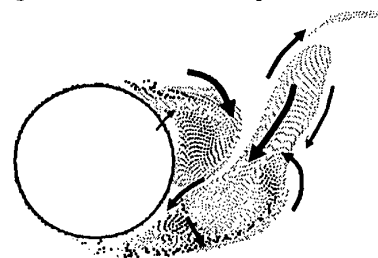


Fig.13 Time evolution explained by annotated arrows

7. まとめ

Fayyad らの知識発見プロセスにもとづき、可視化情報の分析を支援するために必要な要素技術の考察を行い、システムとしての枠組みを提案した。システムの構成要素として、特徴領域の抽出のための特異点探索と渦構造

の渦要素化, 中間情報の生成による情報の階層化, 非線形拡大表示空間を用いた階層情報の表示手法, 注釈を含めた利用履歴情報の保存が必要になることを示した。また, 数値実験によって, 詳細情報からの簡素化手法として完全な位相構造を持たない特異点分布と渦要素分布にもとづく総描が有効であることを明らかにした。

提案した分析支援システムによって生じる利用履歴情報と, 注釈情報をとともなう可視化画像は, 知識の創出, 再利用, 転用にとって有用であると考えられる。

他システムとの連携のためにXMLの仕様を確定し, 利用履歴情報からの知識抽出の方法を考察することが今後の課題である。

付録 総描とは

総描とは, 地図を必要に応じて簡略化して表現する方法のことである。総描技法を文献 13 にしたがって簡単に説明しておく。

地図にはベクトル型とラスター型の二種類がある。ここでは, 地図オブジェクトを, 点, 線, 多角形などの幾何図形と, 学校などのシンボル, 画像としての建物や区画, 道路などとする。総描技法は以下のように分類することができる。

(a) Elimination

最終的に描画される地図に対して, 視覚的に識別が難しいオブジェクト(短い道路, 小さな町等)を削除すること

(b) Simplification

厳密に表現されている建物や道路などを, 本質的な形を壊すことなく簡略化すること

(c) Aggregation

近傍にある性質の似たオブジェクトを纏めて表現すること

(d) Collapse

オブジェクトの大きさなどの付加的な情報を削除するなどして, 一つのオブジェクトを示す複数の情報を纏めること

(e) Typification

地図全体をみたときに, 同一オブジェクトが密になっている部分を簡素化し, 全体を均質化すること

(f) Exaggeration

オブジェクトを強調すること(実際よりも大きくする, 太線にするなど)

(g) Classification and Symbolization

オブジェクトをグループ化すること

(h) Conflict Resolution

オブジェクトの重なりなどが生じた場合, 再配置等によって修正すること

(i) Refinement

実際の地形や建物の配置に近づけるように建物の位置を補正する, あるいは折れ線で表現された川などを滑らかにすることなど

具体的には, これらの技法を組み合わせることで簡略化が行われている。

参考文献

- 1) Weston, R. P.: Color graphics techniques for shaded surface displays of aerodynamic flowfield parameters, AIAA Paper-87-1182, June, 1987
- 2) 白山 晋: 流体計算とビジュアルリゼーション, 日本造船学会誌, 第 856 号 (平成 12 年 10 月), pp.38-43.
- 3) Dallman, U.: Topological structures in three-dimensional vortex flow separation, AIAA-83-1735, June, 1983
- 4) Perry, A.E. and Chong, M.S.: A description of eddying motions and flow patterns using critical point concepts, Ann. Rev. Fluid Mech., vol.19, 1987, pp.125-155.
- 5) Shirayama, S.: Flow past a sphere: topological transitions of the vorticity fields, AIAA Journal, vol.30, no.2, 1992, pp.349-358
- 6) Fayyad, U., Piatetsky-Shapiro, G. and Smyth, P.: From data mining to knowledge discovery in databases, AI magazine vol.17, 1996, pp.37-54.
- 7) Hultquist, J.P.M.: Constructing stream surface in steady 3d vector fields, Proceedings of the IEEE Symposium on Visualization '92, Oct.1992, pp.171-177.
- 8) 白山 晋, 太田高志: ピクセル露光法によるベクトル場の可視化, 日本計算工学会論文集第 1 巻, 19990018, May, 1999, pp.141-147.
- 9) Helman, J.L. and Hesselink, L.: Visualizing vector field topology in fluid flows, IEEE Computer Graphics and Applications, vol.11, no.3, 1991, pp.36-46.
- 10) 白山 晋, 大和裕幸: 渦構造の抽出による非定常流れのデータ圧縮について, 日本造船学会論文集第 188 巻, Nov. 2000, pp.23-31.
- 11) Keahey, T.A. and Robertson, E.L.: Techniques for nonlinear magnification transformations, Proceedings of the IEEE Symposium on Information Visualization, Oct.1996, pp.38-45.
- 12) 城之内忠正: CFD 入出力における XML 形式の利用, 第 15 回数値流体力学シンポジウム CD-ROM 論文集, D11-2, Dec. 2001.
- 13) ESRI White Paper, "Automation of Map Generalization - the Cutting-Edge Technology", May, 1996.