

45 流れの可視化情報の設計への利用法について

白山 晋¹, 大和 裕幸²Extracting Design Concepts from Visualization Information for a Flow Field
Susumu SHIRAYAMA¹ and Hiroyuki YAMATO²

Abstract

Recent developments of numerical techniques and computer system have enabled us to obtain a highly accurate CFD results for steady and unsteady flow fields. However, we have some difficulties to utilize such results in a design process due to the huge amount of data. Major problem is a handling of those data in comparing with other results, extracting useful information, archiving in a database and exchanging among the researchers. Firstly, the flow field is visualized using some display-based techniques such as a volume rendering method for a scalar field and LIC (Line Integral Convolution) or PEM (Pixel Exposure Method) for a vector field. And then, a vortical structure is interactively extracted from the flow field. In a two-dimensional case, some point-vortices are substituted for the distribution of the vorticity. Vortex sticks will be utilized in three-dimensions. Those vortex elements represent the flow fields. Since size of data is extremely reduced, it becomes easier to extract useful information from large-scale datasets. Also, vortex elements are utilized for the comparisons, the archives and the exchanges. This procedure is similar to a technique of data mining. It will be expected that this methodology becomes a basis of extracting design concepts from visualization information.

1. はじめに

設計システムにおいては構造解析や流体解析などの技術計算を取り込む形で統合化が進んでいる。こうした状況の中で、大規模計算に起因するデータハンドリング（データマネージメント）と、可視化から得られる情報の活用法が問題となっている。両者とも古くから考察されているものの個々の計算対象や計算の目的に依存するために共通の方法論を創出することは難しい。可視化に関していえば、いかに無駄な可視化を行わないか（いかに適切な可視化項目を知るか）が重要である。大規模計算から生じるデータを扱うときには、特にこの点に留意しなければならない。しかしながら、具体的な指針を述べることは難しい。

例えば、翼からの剥離が、空間的にはどのような構造で、それがどのように表面圧力分布等に影響しているのかを可視化によって調べ、その結果を形状デザインに活かすというシナリオを考えると、ある部位の曲率を変えるとといった作業は、非常に多くの可視化作業がともない、その中で設計・解析者の技量（見た目や主観）で行われているというのが現状であろう。可視化情報という観点から考察しても同様である。このような作業は、可視化対象となるデータの選択（可視化診断量の選択）、可視化手法の選択、あるいは開発、結果の解釈という一連のプロセスを繰り返していることに相当する。この中で何かしらの現象が解明できる、また、工学的に利用可能な情報が得られれば、その可視化（データの選択法、選択された可視化手法を含めて）に対して価値が与えられる。ここで問題となるのはそうした可

視化情報が一般性をもつのか、主観によるものなのか、そして、「その可視化でなければ、その知見が得られなかったのか」ということである。実のところ、「たまたま現象がわかったときに利用した可視化に意義が与えられているに過ぎない」というケースが多い。こうしたケースではこの可視化」というのは解析者の経験と勘に依存している。目的に応じて可視化診断量、可視化手法の選択を自動的に行うという情報科学の分野からの提案はあるが、そうした方法は漠然としたものが多く、現時点で提唱されている手法を流体解析において利用することは困難である。これは情報科学の研究者が可視化対象となる物理現象をよく理解していないためであるが、流体解析側からの取り組みが不足しているためでもある。

本研究は、可視化情報を設計情報として直接的に活用するために、熟練者の経験と勘にできるだけ依存しない方法論を提案するという目的ではじめられた。

可視化結果を効果的に利用するためには、はじめに解析・設計者に与える時空間の情報を集約する必要がある。一つの方法が特徴領域の自動抽出である。特徴領域の抽出は、別の見方をすれば不要な情報を棄却するということでもある。一方、特徴領域以外の情報を簡易的に知ることが多角的な考察をするために必要となる。このため、全体可視化という方法が必要になる。全体可視化はディスプレイを基準として、表示範囲にある情報を余すことなく提供するという方法を指す。また、時空間におよぶいくつかの可視化結果を設計・解析に反映させるためには、可視化情報を整理して比較する技術が必要となる。Waveletなどの固有空間を用いればデータの比較が容易になるであろう。この際、可視化情報の中で幾何情報化（位相も含めて）できるものがあれば、設計における形状モデリングに直接利用できる可能性もある。一般に可視化情報量は大きいので効率的な圧縮

¹ 東京大学大学院工学系研究科

sirayama@nakl.t.u-tokyo.ac.jp

² 東京大学大学院新領域創成科学研究科

yamato@nakl.t.u-tokyo.ac.jp

法とデータベースの構築を欠かすことができない。可視化結果の精度は設計者に誤情報を与えないためにも重要な要素である。可視化のもととなる解析データが分散並列計算機環境で与えられることが増えているために可視化の並列化も必要となる。結局、可視化情報を効果的に次のプロセスで活用するためには、従来の可視化技術に特徴領域の抽出技術、時空間におけるデータの基底分解の技術、全情報の表示技術、可視化結果の比較技術、幾何（位相）情報の抽出技術、可視化に起因する誤差の表示技術、並列化可視化技術を加える必要がある。

2. データマイニングにもとづくデータ処理

データマイニングの基本は、単純な比較を含めた現状分析、予測（あるいは予測モデルの構築）、ルール抽出である。流体解析においては支配方程式が確立していることが多く、得られた解の中から特徴的な部分を見つけ出すこと、さらに支配方程式から簡単には類推できないルールを発見することがデータマイニングの一つの目的となる。

特徴領域の抽出に関しては、データマイニングが話題になる以前から、流れ場の位相的な表現などの多くの研究がなされている。しかしながら、分析が主体であり、ルール抽出までは至っていない。また、大まかな構造を把握できるという利点がある一方で、得られた情報を設計などの次の段階に活かしていくというプロセスは、非定常場の予測^[1]、解適合に対する応用^[2]などに見られるだけである。位相表現に関しては、数学的アプローチを除くと、流体の解析者は得られた位相情報をもとに流れ場を把握することに集中し、抽出法、表現法に留意しないことが多い。流体解析者以外は手法の開発に労力を注ぎ、流れ場の解析までは考えない。そして、共同作業による成功例も少ない。さらに Fig.1 で示すように渦度場と特異点に対応しない場合があり、誤った結論を導く可能性もある。しかしながら、特徴領域の表現は流れ場の骨格を示すマーカーとして重要な意味をもち、位相情報のような抽象化されたものは情報の圧縮として有用である。



Fig.1 Vorticity and critical points

以上の観点から、特徴領域だけを扱うのではなく、特徴領域を支援情報と位置づけて可視化から設計情報までの展開を考察する。本稿では、流れの可視化情報を次のプロセスで活かすための第一段階として渦要素抽出法を提案する。

提案する方法の概略は、以下の通りである。

(i) 全体可視化と特徴領域の表示を基本として、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。

- (ii) 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。
- (iii) 渦要素のまとまりをクラス化しラベリングする。また、クラス化した渦要素のパターンを調べる (Patterns)。
- (iv) ある部分の渦要素と物体との干渉を定性的ではあるが客観的に調べられるようにする (Knowledge)。

一連の手順はFayyadら^[3]の提案する知識発見のプロセスに相当している。

3. 渦構造の抽出

3.1 数値値によるデータの選別

流体現象を渦構造の抽出によって解明しようという多くの試みがなされている^[4,5]。2次元においては渦度を直接利用することが多い。3次元では、渦度ベクトルの解釈の難しさ^[6]から、速度ベクトル場の特異点にもとづく渦中心の同定法^[7]、渦度ベクトルの絶対値、エンストロフィ密度、圧力断面極小旋回法^[4]などの様々な提案がなされている。これらの研究は渦構造の抽出を主目的としており、抽出された構造から流れ場を解析、さらに設計情報化するためには欠落する情報も多い。このため、渦度自身を扱うこととする。

以下に円柱を過ぎる流れをもとにして提案する方法の説明を行う。

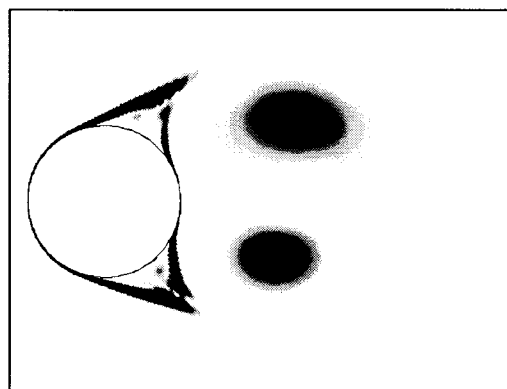


Fig.2 Vorticity field by shaded contour

スカラー場を可視化する際、大まかな構造を捉えるために等値領域が用いられることが多い。Fig.2に等値領域表示による渦度分布を示す。ただし、渦度のみ表示では設計・解析において必要となる速度場や圧力場を類推することが難しいので、いくつかの可視化を併用する必要がある。通常行われる方法は速度ベクトルの同時表示である。この際、指定領域内ですべて多くの情報を表示できる方法が望まれる。そこで、速度ベクトルを全体可視化によって表現する。全体可視化とは表示装置の表示解像度を基準として、表示範囲にある情報を余すことなく提供するという方法を指す。ベクトル場に対する全体可視化には、LIC法^[8]やピクセル露光法^[9](PEM法)があるが、可視化精

度を考慮して PEM 法を用いることとする。Fig. 3 に PEM 法による可視化結果を示す。図中の白い点は速度ベクトル場の特異点を示している。Fig. 3 において渦度と速度場の対応が視覚的に表現されていることがわかる。

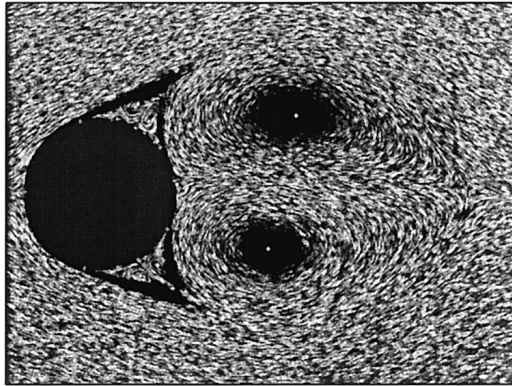


Fig.3 Vorticity field and velocity field by PEM

この可視化法と、渦度に対する敷居値により特徴領域を求める。具体的には、渦度を ω 、敷居値を ω_0 としたときに $|\omega| \geq \omega_0$ を表示対象とし、インタラクティブに可視化を行い、特徴領域を分離する。

3. 2 渦要素による渦構造の簡易表現

前節で示したように可視化によって大まかな渦構造を抽出することができる。しかしながら、設計・解析情報として速度場や圧力場が必要となったときに、敷居値によってふるいにかけられた渦度情報と格子点情報をもとに元となる流れ場の速度場、圧力場を再構築することは困難である（例えば、渦度-流れ関数法によって再構築する場合、敷居値以下の情報の欠落によって計算を収束させることが難しい）。また、境界近傍など、敷居値よりも大きな渦度をもつ部分の格子密度は高く、選択された渦度をもつ格子点数が依然として多くなる場合が想定される。

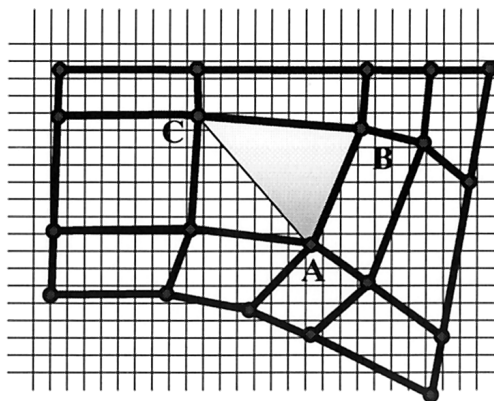


Fig.4 Vorticity distributed in a triangle.

そこで、オイラー的に得られた渦度をラグランジュ的な渦要素に変換することを試みる。渦度は物体適合格子や非構造格子などの空間的に均質でない格子点上で求められているために格子セル上で、直接、渦要素に変換すると大きな誤差が発生する。

ここではピクセル空間、または、ボクセル空間に対応するサンプリング空間を利用して、計算格子上的渦度を等間隔直交格子上に写像し、その空間上で渦要素に変換する。

計算された渦度は Fig. 4 のように格子点上に分布しているものとする。図の背景に示す等間隔直交格子を用意する。指標を (l, m) 、左下の座標を (a_L, b_L) 、右上の座標を (a_R, b_R) 、格子幅 $\Delta a, \Delta b$ とする。この等間隔直交格子を渦度サンプリング空間と呼ぶこととする。

ここで Fig. 4 の 3 角形 ABC に着目する。3 角形上の渦度 ω は、頂点の値からの線形内挿によって、

$$\omega = \alpha_0 + \alpha_1 x + \alpha_2 y \quad (1)$$

で与えられる。すべての格子セル内で渦度を線形内挿し、Fig. 5 に示すように 3 角形をラスタ変換するとピクセル空間に対応する渦度サンプリング空間の格子点上で渦度を算出することができる（3次元の場合は 3 角錐をボクセル化することで、ボクセル空間に対応する渦度サンプリング空間の格子点上で渦度ベクトルが算出される）。ここで、渦度サンプリング空間の (l, m) 上の渦度を $\omega_{l,m}$ とする。

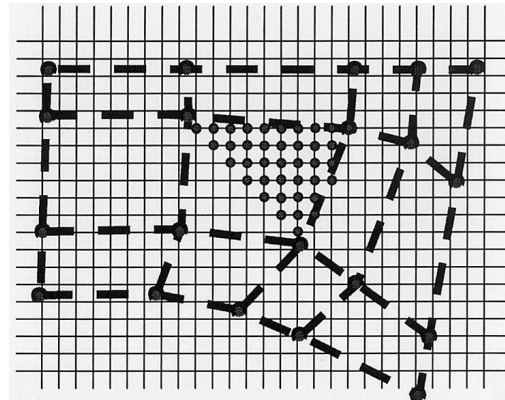


Fig.5 The triangle rasterized, and vorticity obtained on a sampling space

このようにして求めた渦度はピクセル数（ボクセル数）に相当するデータ量となるため、直接、渦要素化することは、データ圧縮の観点で望ましいものではない。よりセルの大きなサンプリング空間を用いることで、近傍の渦度をまとめて渦要素を生成する。具体的には、最終的なサンプリング空間（渦要素サンプリング空間と呼ぶこととする）のあるセルに分布する渦度を、渦度が存在する領域の重心に集中させることで渦要素化する（Fig. 6）。Fig. 6 で示した渦要素サンプリング空間のあるセルに含まれる渦度サンプリング空間の格子点を、

$$l_{e1} \leq l \leq l_{e2}, m_{e1} \leq m \leq m_{e2}$$

とし、セル内で渦度が 0 でない格子点の総数を M とする。渦要素 n の強さ Γ_n と位置 (x_n, y_n) は、 $a=a_L+\Delta a(l-1), b=b_L+\Delta b(m-1)$,

$f(\omega)$ を重み付け関数として、

$$\begin{aligned}\Gamma_n &= \sum_{l,m} \frac{1}{2\pi} \omega_{l,m} \Delta a \Delta b, \\ x_n &= \frac{1}{M} \sum_{l,m} f(\omega_{l,m}) a, \\ y_n &= \frac{1}{M} \sum_{l,m} f(\omega_{l,m}) b \quad (2)\end{aligned}$$

で求められる(本稿では、渦度が0以外のときに値1を持つ重み付け関数を用いた)。計算式は2次元のものを示したが、3次元の場合は渦要素サンプリング空間のセルは直方体となり、渦度分布はセル内の線分に変換される。2次元の場合は渦糸、3次元の場合はVortex Stick^[10]が渦要素となる。

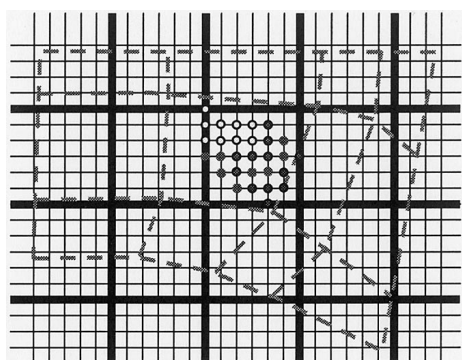


Fig.6a Vorticity distributed in a cell denotes a part of the final sampling space

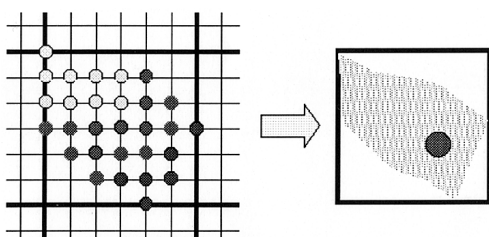


Fig.6b Vortex element generated by vorticity in a cell

ここまでの手順をまとめると

1. 渦構造を抽出する領域を決める
2. 渦度の等値領域表示と速度場のピクセル露光法による表示をもとに敷居値を決定する
3. 表示解像度程度の等間隔直交格子上で、ラスタ変換を利用した渦度のサンプリングを行う
4. 渦要素化するためのサンプリング空間を用意して、渦糸(2次元)、Vortex Stick(3次元)を生成する

となる。このようにして渦構造を渦要素で表現する。1から4の手順において、抽出領域の大きさ、敷居値、渦度サンプリング空間の大きさ、渦要素サンプリング空間の大きさ(渦要素サンプリング空間の一つのセルは渦度サンプリング空間のいくつかのセルに相当するが、これをブロックと名付ける)という任意のパラメータが存在する。これらのパラメータを最適化することが課題となる。

3.3 ラベリングによる渦領域の識別

渦要素化によって、ある位置の速度が、要素毎の速度場の重ね合わせによって算出できる。これは、ある渦領域と物体との干渉を定性的ではあるが客観的に示唆できる可能性を示している。渦要素サンプリング空間をもとに画像処理におけるラベリングの手法を用いて渦要素の番号付けを行う。Fig.7はFig.3に対応する渦糸分布である。

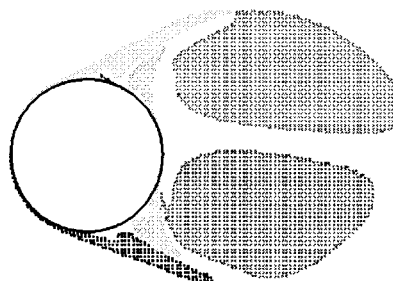


Fig.7 Distribution of point vortices (5x5 block)

3.4 渦要素による流れ場の再構築

渦要素は、2次元の場合、点の座標と循環の強さ、3次元ではセグメントの両端の座標と循環の強さで表される。ある渦要素から誘起される速度場はピオ・サバルの法則によって計算することができる。すべての渦要素からの誘起速度を重ね合わせることで、元となる流れにおける速度場が再構築される。2次元の場合、渦要素の総数を N とすれば、任意の点 (x, y) に誘起する速度は

$$\begin{aligned}u &= \sum_n^N \Gamma_n \frac{-(y - y_n)}{(x - x_n)^2 + (y - y_n)^2 + \varepsilon}, \\ v &= \sum_n^N \Gamma_n \frac{(x - x_n)}{(x - x_n)^2 + (y - y_n)^2 + \varepsilon} \quad (3)\end{aligned}$$

となる。ここで ε は分母の特異性を避けるために導入した小さな正数である($\varepsilon=0.1\Delta a$ を採用した)。ただし、この式は近似式であり、壁面の境界条件が考慮されないために物体表面近傍の速度場の再現は難しいことに留意されたい。

このような手順によってどの程度速度場が再現されるかは情

報の精度を考える上で重要である。まず小さなブロック数で再現性を調べる。Fig. 8a に 2×2 ブロックから再構築された速度場を、Fig. 8b に元データの速度場を示す。また、Fig. 9 に v 成分の等値線を示す。Fig. 9a は再構築された速度場、Fig. 9b は元データである。境界層や剪断層などのシート状の渦度場を渦点で近似した場合、式(3)の特異性によって局部的に差異を生じるが、速度場は全体的には十分に再現できている。

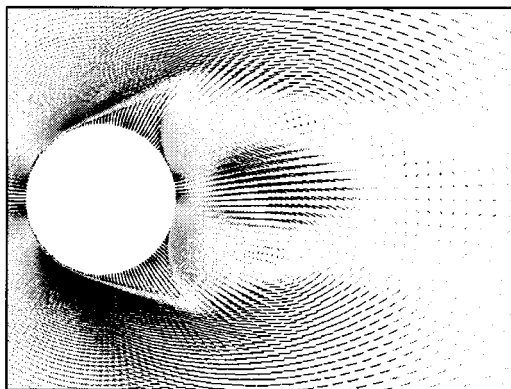


Fig.9a Velocity field recomputed by point vortices

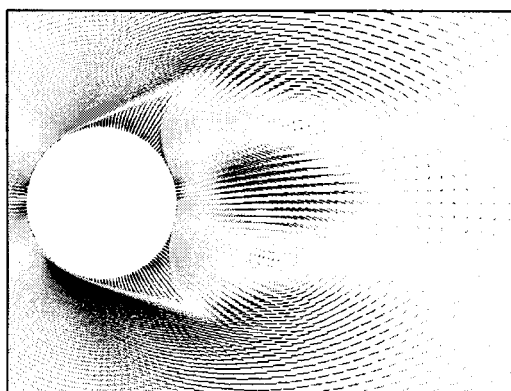


Fig.9b Original velocity field

4. 渦要素による流れ場の解析

可視化手法を利用することで生成された渦要素の分布自体は可視化情報である。この情報は、元となるデータを情報圧縮したものと考えられる（損失はあるが、画像データよりも多くの情報を含んでいる）。この情報を用いて流れ場を解析し、さらに設計情報などの上位の情報に展開することが工学的には重要である。渦要素の分布が従来の可視化情報と異なる点はある要素のある部位に対する影響を見積もることができるということである。現時点では詳細な方法を提示するまで研究は進んではいないが、以下のような展開を考えている。

Figs.11,12 は迎角 15° の 2次元翼 NACA63₁018 を過ぎる非定常流れにおける失速の様子を動画化したものから 4 時刻分のスナップショットを示したものである。Fig.11 は、本稿で提案した方法による渦要素と速度場、圧力場を重ねて表示している。一方、Fig.12 は渦要素だけを表示したものである。翼内に描かれた矢印は翼に働く力を示している。動画化されたものとこれらの図から後縁からの剥離渦と前縁からの渦の混合、引き裂き、そ

の後の後縁剥離渦の離脱が失速を引き起こしていると予想できる。渦要素から誘起される速度場を計算できるので、それを定量的に解釈できれば現象の理解が深まり、さらに翼型の改良等につなげていくことができるはずである。このシナリオは渦要素の抽出にともなう流れ場のパターン化と、各渦要素の影響を定量的に把握できるということから導くことができた。実証することが必要ではあるが、概念的には従来の可視化情報から一歩進めた情報化ができていていると考えられる。

5. まとめ

データマイニングにおける知識発見のプロセスを、可視化を中心として、流れ場の解析に適用した。具体的には、渦構造の抽出と渦要素化(Preprocessed Data, Transformed Data)、渦要素の要素同士、あるいは、物体との相互作用の検討を行った。

識別した渦要素によって非定常空間の情報圧縮とパターン化の可能性を示すことができた(Patterns)。

提案した方法によって、現象の直感的な理解と一連の結果の比較作業が容易になり、可視化情報を効果的に次のプロセスで活かすことが可能になるとおもわれる(Knowledge)。

3次元における具体例を示していないが、方法論としては同じであると考えている。3次元での議論を今後の課題としたい。

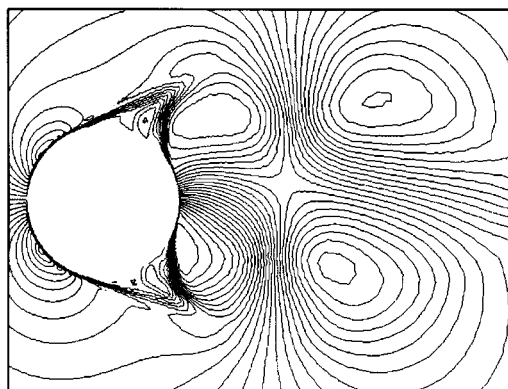


Fig.10a Contour lines for v-component of the velocity vectors

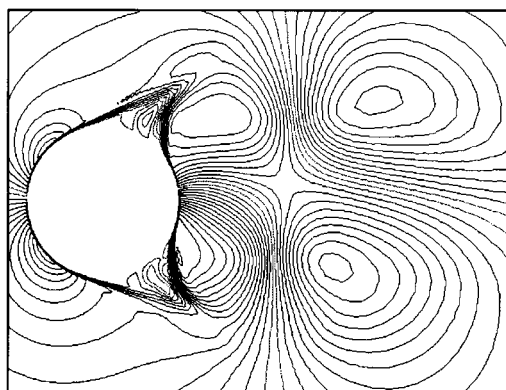


Fig.10b Contour lines for v-component of the original velocity vectors

参考文献

- 1) Shirayama, S.: Flow past a sphere: topological transitions of the vorticity fields, AIAA Journal, vol.30, no.2, 1992, pp.349-358.

- 2) 村山光宏, 中橋和博, 澤田恵介: 非構造解適合格子法を用いたデルタ翼の高迎角数値計算, 日本航空宇宙学会論文集第48巻559号, 2000, pp. 244-249.
- 3) Fayyad,U., Piatetsky-Shapiro,G. and Smyth, P.: From data mining toknowledge discovery in databases, AI magazine vol.17, 1996, pp.37-54.
- 4) Jeong,J. and Hussain, F.: On the identification of a vortex, J. Fluid Mech., vol.285, 1995, pp.69-94.
- 5) 三浦英昭, 木田重雄: 一様等方乱流における低圧力旋回渦の同定と可視化, なかれマルチメディア論文集 vol.1, July, 1998.
- 6) S. K. Robinson: Coherent motions in the turbulent boundary layer, Ann. Rev. Fluid Mech., vol.23, 1991, pp.601-639.
- 7) Sawada,K. : A convenient visualization method for identifying vortex centers, Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, vol.38, no.120, 1995,pp.102-116.
- 8) Forssell, L.K. : Visualizing flow over curvilinear grid surfaces using line integral convolution, Proceedings of Visualization '94, IEEE, 1994, pp.240-247.
- 9) 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.
- 10) Shirayama, S., Kuwahara, K. and Mendez, R.: A new three-dimensional vortex method, AIAA-85-1488-CP, Proceedings of the AIAA 7th Computational Fluid Dynamics Conference, Cincinnati, Ohio, July, 1985.

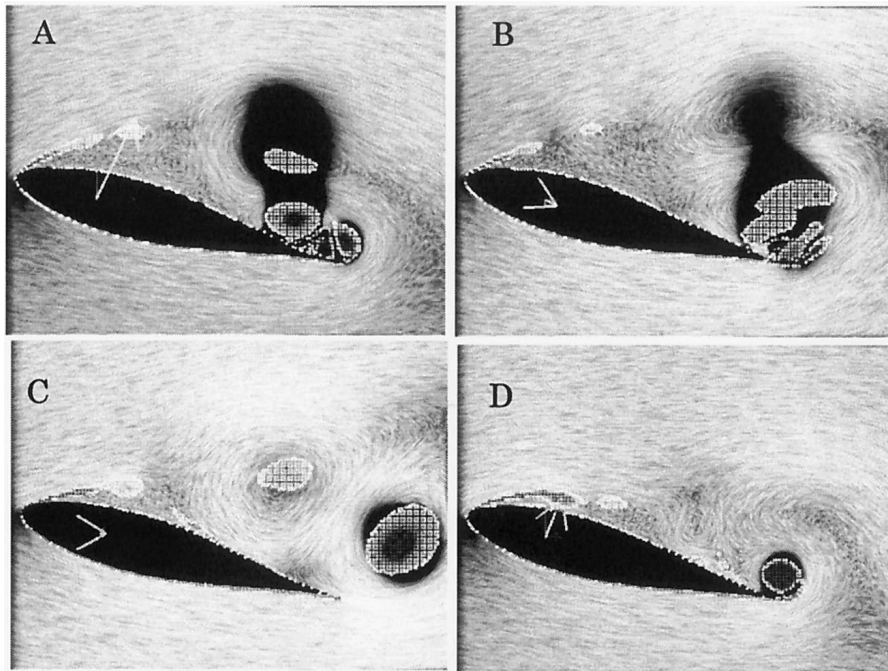


Fig.11 Unsteady flow patterns around NACA63₃_018

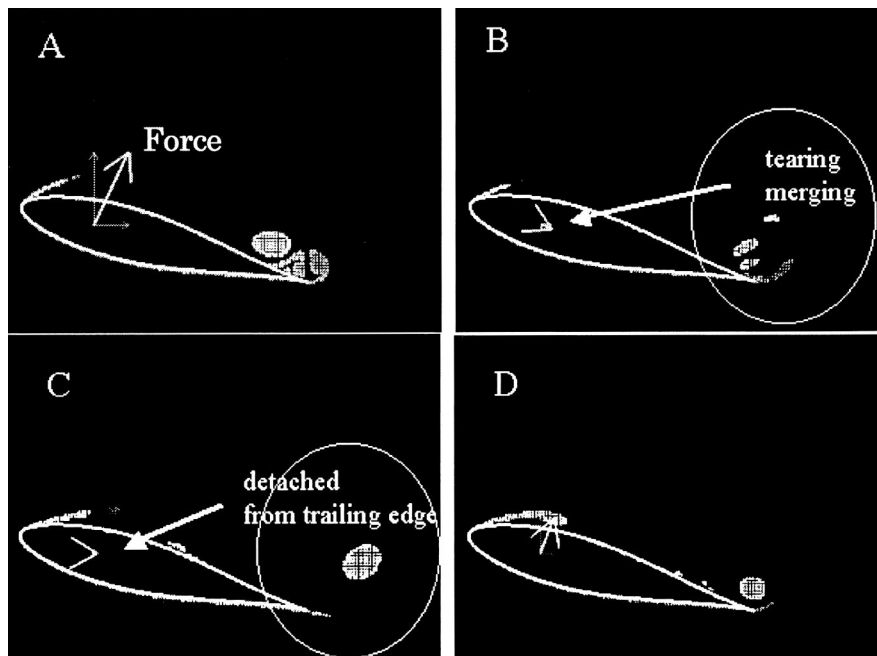


Fig.12 Static stall explained by the behavior of vortex elements