

流動現象の大規模数値シミュレーションとデータマ イニング

古川, 雅人
九州大学大学院工学研究院

山田, 和豊
九州大学大学院工学研究科

才木, 一寿
九州大学大学院工学研究院

今里, 有利
九州大学大学院工学研究科

他

<https://doi.org/10.15017/4782076>

出版情報 : 九州大学情報基盤センター年報. 1, pp.43-48, 2001-10. 九州大学情報基盤センター
バージョン :
権利関係 :

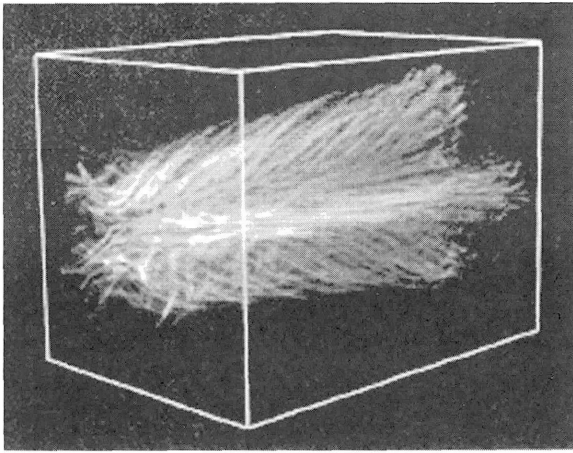


図1 Volume LIC の表示例 [1]

の速度ベクトル場がボリュームレンダリングにより三次元的に可視化されるが、流れ場の構造は目視で探し出す必要があり、複雑な流れ場から意味ある情報を全て引き出すことは容易でない。何らかの方法で流れ場の特徴を抽出しておき、その特徴のみを可視化することが望まれる。この流れ場の特徴として、渦構造に着目することが肝要である。すなわち、「渦構造を視ることで、流れ場全体がわかってくる」のである。流れ場の特異性としての渦中心を同定し、三次元渦構造を把握した上で、流れ場を詳細に解析することを勧める。

例えば動翼列流れ場では、翼端漏れ渦、馬蹄形渦、コーナー剥離渦およびカルマン渦などの巨大な渦構造が形成され、特に縦渦構造は翼列内の二次流れ場を支配している。これらの縦渦構造は、周囲の壁面境界層と干渉しながら、非一様な主流に沿って発達するので、その複雑な流れ形態から渦構造を把握するためには、解析的あるいは半解析的な渦中心（あるいは渦コア）の同定方法が必要となる。乱流の素過程における渦構造の解析に関する最近の研究と相俟って、渦コアの同定法について検討が加えられている [2]。従来の同定法を大別すると、渦度分布による方法、圧力分布による方法および Critical point 理論に基づいた方法がある。

渦度分布による方法として、渦度自体の大きさを閾値とするもの、渦度ベクトルと速度ベクトルの成す角度の余弦値で定義される無次元ヘリシティを指標とするもの [3] などがある。渦構造まわりに

境界層のような平均せん断が存在する場合、渦度の大きさから渦とせん断層（渦層）を区別することはできない。一方、無次元ヘリシティは渦とせん断層を区別できる上、渦の巻上りの強さを定量的に評価できるが、その分布のみから複雑な三次元渦構造を抽出することは容易でない。したがって、周囲の壁面境界層と干渉しながら複雑な三次元構造を呈する翼列内の縦渦を、渦度分布による方法のみから同定することは困難である。

圧力分布による方法では、渦軸に沿って低圧部が存在することに基づいて、圧力の閾値を定めその等値面を渦構造と見なす方法、圧力場が極小値を示す領域に着目して渦コアを同定する方法がある。圧力の閾値による方法では、渦が一樣流中にならない場合、同定される渦構造は圧力の閾値に強く依存することは明らかである。圧力の極小領域による方法としては、速度勾配テンソルの第2不変量 Q に着目するもの [4]、圧力のヘシアンに着目するもの [2] が提案されている。前者では、 Q が正の領域で $\nabla^2 p / \rho > 0$ となることに基づいて、渦コアが同定される。一方後者では、圧力のヘシアンから非定常変形および粘性の効果を省略して得られるテンソルの3個の実固有値のうち2個が正となる領域が、渦軸に垂直な断面上の圧力が極小となる領域に対応することに基づいて、渦コアが同定される。両方法における渦コア同定のための指標は、それぞれ Q および圧力のヘシアン行列の二番目に大きな実固有値 $(-\lambda_2)$ であり、それらの閾値から得られる等値面が渦構造として可視化される。後者では、渦軸に垂直な断面上の圧力極小域が渦コアとして同定されるので、渦軸方向に圧力勾配が存在する場合には、前者よりも正確な渦コアの同定がなされると期待される。しかしながら、この後者の方法でも、翼列流れのように流れ方向に大きな圧力勾配が存在する場合には、同定された渦コア構造が指標の閾値に強く依存する [5]。

Critical point 理論に準拠した渦コア同定法 [6][7] は、流れパターンの位相幾何学的解析 [8] に基づいている。この方法では、速度勾配テンソルが一つの実固有値および二つの共役複素固有値を持つ場合、

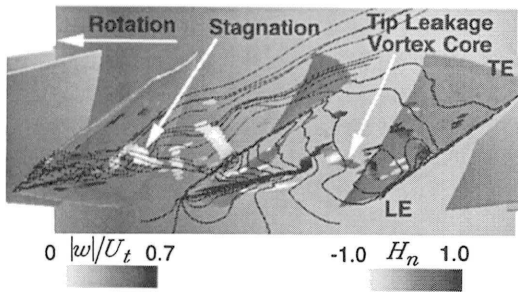
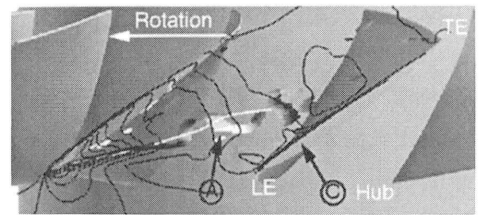


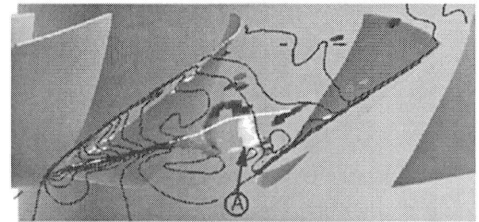
図2 軸流圧縮機動翼列の失速点近傍における翼端流れ場（右側翼間：無次元ヘリシティー分布で着色された渦コア構造およびケーシング面圧力の等高線，左側翼間：相対速度分布で着色された渦コア構造および翼端漏れ流れ流線）[9]

流れは渦状パターンを描き、その渦中心線は実固有値に対応した固有ベクトルと平行であることに基づいて渦中心線が抽出され、この中心線が計算セルを横切る場合に、その計算セル内に含まれた線分が局所的な渦中心線として同定される。全体的な三次元渦構造は、計算セル毎に抽出された渦中心線を全て表示することにより得られる。この方法では、渦コア同定のために指標を設定する必要はない。また、流れ方向に大きな圧力勾配をもつ翼列流れ内の縦渦に対しても、その渦コア構造を正確に同定できる[5]。

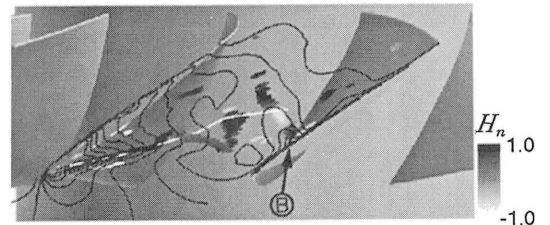
以上のとおり、翼列流れに対しては、Critical point 理論に基づいた渦コア同定法が最も適していることがわかる。しかしながら、この同定法では、渦構造が渦中心線（線分）の集合体として可視化されるため、それに沿った物理量の変化を把握することが容易でない。そこで著者らは、抽出された渦中心線自体を可視化するのではなく、計算セル内に含まれる渦中心線の数から渦コアの存在率を定量化し、その存在率を指標として等値面を表示することにより渦コアを可視化している。さらに、渦の巻き上がりの強さなど、渦の挙動を定量的に把握するために、同定された渦コアを無次元ヘリシティー H_n 分布で色付けしている。無次元ヘリシティーの定義から、その絶対値が1となる領域は、流れ方向に縦渦が強く巻き上がっていることを意味する。また、そ



(a) $t = 104.5$



(b) $t = 106.5$



(c) $t = 108.5$

図3 軸流圧縮機動翼列の失速点近傍における翼端漏れ渦の崩壊に伴う非定常渦流れ挙動（無次元ヘリシティー分布で着色された渦コア構造およびケーシング面圧力の等高線）[10]

の符号は流れ方向に対する渦の回転方向を示す。さらに、渦度の流れ方向成分とは異なり、渦の減衰にかかわりなく、渦コアに沿った無次元ヘリシティーの分布から定量的に渦の挙動を解析することができる。著者らは、Critical point 理論に基づいた渦コアの同定と無次元ヘリシティー分布の表示から渦の構造と挙動を解析する手法を "Vortex Hunter" と呼んでいる (Tornado Hunter をもじって)。この手法では、渦コアの存在率が新たな指標として導入されたが、同定される渦コアの構造はその指標の閾値にほとんど依存しない [5]。

この Vortex Hunter を用いて、低速軸流圧縮機の動翼列における翼端漏れ渦の崩壊に起因した翼端

近傍の非定常流れ挙動を解明した例[9][10]を紹介する。図2は、その動翼列流れの失速点近傍における非定常計算結果を示す[9]。これはある瞬間でのケーシング側から眺めた翼端流れ場である。Vortex Hunter で同定された渦コアがグレースケールで表示され、右側翼間の渦コア上には無次元ヘリシティ H_n の分布が、左側翼間では相対速度 w (翼端周速で無次元化) の分布が表示されている。また、右側翼間にはケーシング面圧力分布が黒い等高線で示され、左側翼間には翼端漏れ流れの流線が黒い実線で示されている。同図によると、翼前縁(図中の LE) 近傍の翼端漏れ渦コアに沿って H_n がほぼ1の値を示し、またケーシング面圧力分布に急峻な谷が認められ、漏れ渦は前縁近傍で強い縦渦として巻上がっていることがわかる。しかしながら、その下流で漏れ渦コアの軌跡が著しく曲がりくねり、渦コア上の H_n が -1 の値まで急激に減少する。この領域では、相対速度も急減し、渦コア内の流れはほぼよどみ状態まで減速されており(図中の左側翼間)、漏れ渦構造が激変していることがわかる。さらにその下流で、漏れ渦は大きく屈曲して隣接翼の圧力面と干渉する。この挙動は非定常であり、図3に示すように、漏れ渦は周期的に翼間内を大きく蛇行する[10]。渦内によどみ点が発生していることから、この失速点近傍の作動点において翼端漏れ渦は翼間内で崩壊していることがわかる。この漏れ渦の崩壊は、渦コア構造を同定することによって初めて鮮明に捕らえることができた現象である[11]。図2中の左側翼間に示された流線のみから、翼端漏れ渦の崩壊に伴う非定常渦流れ挙動(図3)を把握することはほとんど不可能に近い。以上のとおり、Vortex Hunter は翼列内の複雑な渦流れ現象を解析するための極めて強力なツールであり、図4に示すように、半開放形プロペラファン流れの LES 解析において、渦構造の非定常挙動およびそれが空力騒音発生に及ぼす効果を解明することにも貢献している[12][13]。さらに、Vortex Hunter は衝撃波を伴う渦流れ場へ

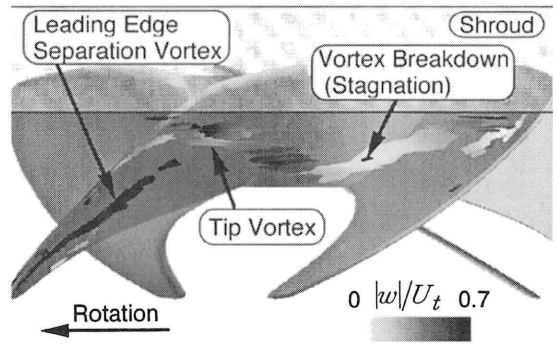


図4 半開放形プロペラファンにおける渦流れ構造(相対速度分布で着色された渦コア構造)[12]

の適用も可能であり、遷音速軸流圧縮機動翼列の失速点近傍において、翼端漏れ渦が衝撃波との干渉により崩壊することを見出すことにも役立つ[14]。

3. 解析結果

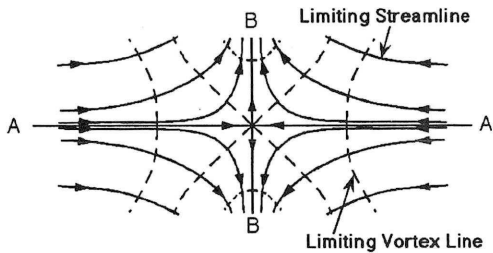
翼列内の縦渦はその形成過程自体に境界層の剥離を伴う場合がほとんどであり、さらには形成後に周囲の境界層と干渉して剥離を引き起こすこともあり、縦渦構造を同定するだけでなく、それに伴う三次元剥離形態を把握することが、流れ解析において重要となる。流れの可視化ソフトウェアの普及に伴って、三次元流線の可視化から剥離形態の解析が行いがちであるが、翼列内の複雑な三次元剥離形態を的確に抽出・解析するためには、限界流線のトポロジー解析が不可欠である。すなわち、物体壁面上の摩擦応力線(限界流線)に現れる包絡および特異点には、そのまわりに形成されている三次元流れ構造が強く反映されるので、Critical Point 理論[8]に基づいて限界流線のトポロジーを調べることによって、壁面上に縮約された二次元的な情報に過ぎない限界流線から、壁面上の三次元流れ構造を抽出するのである。

壁面上に湧き出しや吸い込みが存在しなければ、限界流線の包絡が剥離線あるいは付着線に対応する。Critical Point 理論では、限界流線に現われる特異点に着目して、限界流線のトポロジーと三次元流れ構造との関係付けがなされている[8]。

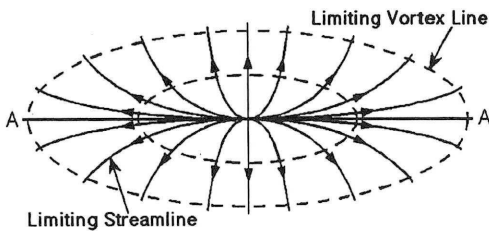
特異点は壁面剪断応力が 0 になる点として定義され、図 5 に示すとおり、一般に鞍点 (saddle), 節点 (node), 渦状点 (focus) に分類される。図 5 において、実線が限界流線、破線が限界渦線であり、両者は互いに直交している。鞍点は、一般に壁面に平行な対向する二つの流れが干渉する場合に形成される。すなわち、鞍点は壁面に現われる分岐点であり、剥離泡の前縁部に形成されることが一般に知られている。節点では、すべての限界流線が特異点から流出あるいは流入するパターンを示し、それぞれのパターンは付着と剥離に対応する。渦状点は、壁面上に端を持つ縦渦構造の形成に伴って現われる特異点である。この渦状点では、鞍点および節点とは異なって、すべての限界渦線が限界流線同様

に特異点に向かって渦巻状に流入 (あるいは流出) する。

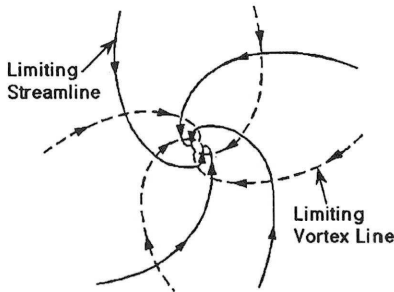
以上の限界流線のトポロジー解析と前節で述べた渦構造の同定を併用することで、翼列内の三次元剥離を伴う複雑な渦流れ構造を的確に解析可能となる [15][16]。その例 [16] を図 6 に示す。同図には、軸流タービン動翼列におけるハブ面上の限界流線およびハブ面近傍の渦コア構造が示されている。なお、渦コアは無次元ヘリシティで着色され、半透明表示されている。また、限界流線に現れた剥離線および付着線がそれぞれ SL および AL で



(a) 鞍点



(b) 節点



(c) 渦状点

図 5 特異点の種類

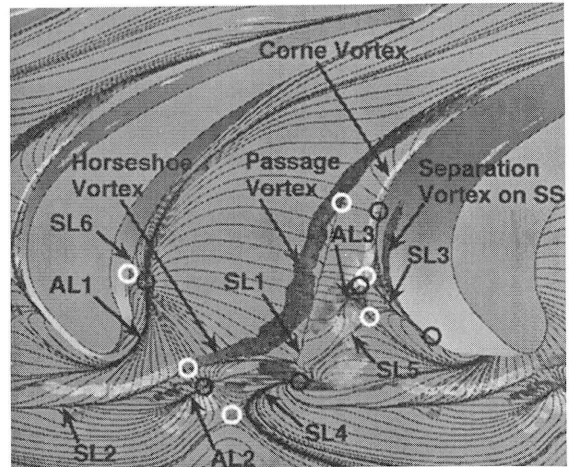


図 6 軸流タービン動翼列におけるハブ面上の限界流線および渦コア構造 [16]

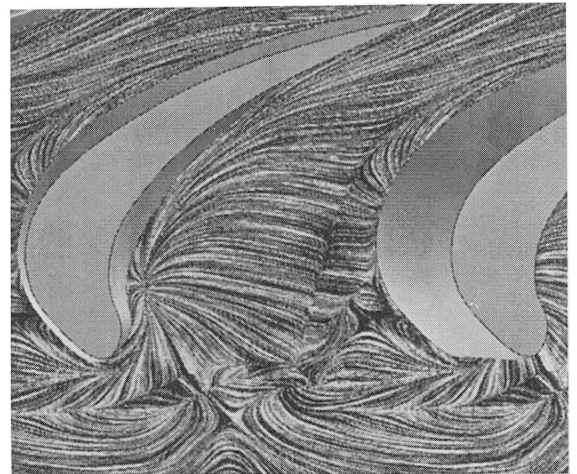


図 7 軸流タービン動翼列におけるハブ面上の限界流線 (LIC 法による可視化) [16]

よび節点がそれぞれ白丸および黒丸で示されている。ハブ面上に形成された極めて複雑な剥離・付着形態と馬蹄形渦との関係が明瞭にわかる。同図のように限界流線上に多数の特異点と包絡線が形成される場合、限界流線を線画として表示する従来の可視化法(図6)では、短時間に剥離および付着の複雑な形態を正確に把握することは困難である。このような場合には、ベクトル場の新たなアニメーシング手法であるLIC(Line Integral Convolution) [17]の導入が有効である。LIC法では、入力画像(White noise bitmap)に対して、流線に沿った重み付き積分を行い、出力画像の各ピクセル強度を得る。すなわち、速度ベクトルに沿って入力画像を局所的に滲ませることにより、限界流線の可視化が行われる。図7は、図6の限界流線をLIC法で可視化した例である。LIC法を用いると、インタラクティブな可視化作業を伴うことなく、稠密な流線の描画が可能であり、限界流線の複雑なトポロジーを簡単に解析できる。このLIC法は、三次元剥離の非定常挙動を解析する場合にも、その威力を発揮する。

4. 結 言

Critical point理論に基づいた渦コアの同定および限界流線のトポロジー解析が、複雑な流れ現象の解析にとって極めて重要であることを述べた。今後、数値計算の規模がますます拡大していくであろうことを考えると、大規模数値データから流体力学的に意味のある情報を抽出するためのデータマイニング技術を確立する必要性を感じる。この問題は流体力学に限らず、大規模なデータを扱う分野に共通した問題であり、発見科学を盛り込んだデータマイニング技術が今後のキーテクノロジーとなるであろう。

文 献

[1] Interrante, V. and Grosch, C., IEEE Computer Graphics and Applications, Vol. 18, No. 4 (1998), pp. 49-53.

[2] Jeong, J. and Hussain, F., J. Fluid Mech., Vol. 285 (1995), pp. 69-94.
 [3] Levy, Y., Degani, D. and Seginer, A., AIAA Journal, Vol. 28, No. 8 (1990), pp. 1347-1352.
 [4] Hunt, J. C. R., Wray, A. A. and Moin, P., Center for Turbulence Research CTR-S88 (1988), p. 193.
 [5] 古川雅人・ほか3名, 日本機械学会講演論文集, No. 98-3 (1998), 109-110.
 [6] Sawada, K., Trans. Japan Soc. of Aero. Space Sci., Vol. 38, No. 120 (1995), pp. 102-116.
 [7] Haimes, R. and Kenwright, D., AIAA Paper No. 99-3288 (1999).
 [8] Perry, A. E. and Chong, M. S., Ann. Rev. Fluid Mech., Vol. 19 (1987), pp. 125-155.
 [9] Furukawa, M., Saiki, K., Yamada, K. and Inoue, M., ASME Paper No. 2000-GT-0666 (2000).
 [10] 古川雅人・ほか3名, 日本機械学会論文集, Vol. 66, No. 644, B (2000), 1029-1037.
 [11] Furukawa, M., Inoue, M., Saiki, K. and Yamada, K., Transactions of the ASME, Journal of Turbomachinery, Vol. 121, No. 3 (1999), pp. 469-480.
 [12] Jang, C-M, Furukawa, M., Saiki, K., and Inoue, M., ASME Paper FEDSM99-6850 (1999).
 [13] 古川雅人・ほか2名, 日本機械学会講演論文集, No. 00-1, Vol. IV (2000), 53-54.
 [14] 古川雅人・ほか4名, 日本機械学会講演論文集, No. 00-14 (2000), 187.
 [15] Inoue, M., Furukawa, M., Saiki, K., and Yamada, K., ASME Paper No. 98-GT-091 (1998).
 [16] 古川雅人・ほか5名, 第15回ガスタービン秋季講演会講演論文集 (2000).
 [17] Forssell, L., K. and Cohen, S., D., IEEE Visualization and Computer Graphics, Vol. 1, No. 2 (1995), pp. 133-141.