

圧縮性遷移翼列流れの LES 解析

Large Eddy Simulation of Compressible Transitional Cascade Flows

松浦 一雄*・加藤 千幸*・吉識 晴夫*・長島 利夫**

Kazuo MATSUURA, Chisachi KATO, Haruo YOSHIKI and Toshio NAGASHIMA

1. はじめに

航空用、産業用ガスタービンでは、翼列の空力特性がエネルギー変換効率を大きく左右するため、従来より翼列流れに関する研究が盛んに行われてきた。中でも、低 Re 数効果を有する翼列流れの予測・解明に関する研究は、航空用低圧タービンの高空性能や、産業用小型タービンの性能等の向上のために重要であり、また、ガスタービンの小型化が進んでいる現在、今後更なる発展が必要であると考えられる。

一般に低圧タービンでは、流れの膨張による作動流体密度の低下、および高温に起因する高い粘性により、また小型タービンでは代表長さが小さいことにより、Re 数は $10^4 \sim 10^5$ オーダと低くなる。そのため、翼面に発達する境界層が剥離しやすくなる等といった低 Re 数効果を有するようになる。また、これらの境界層は燃焼器から流入する流れあるいは翼列のウエイク等、5～20%の強い主流乱れにさらされ、層流-乱流遷移状態となる。この主流乱れ (Freestream Turbulence, FST) が強い環境下において起こる遷移は、初期段階で Tollmien-Schlichting 波の増幅過程が重要となる「自然遷移」とは異なる形態を持つことが知られており¹⁾、実験あるいは Emmons の乱流スポット²⁾ に代表される定常遷移解析モデルに基づいた数値解析により、翼面上の速度、温度場の挙動が調べられてきた³⁾。ところが、境界層遷移の予測は未だ難しい問題であり、境界層剥離により問題はさらに複雑化する。

一方、近年 NS 方程式に基づき、なるべく直接的に解析を行う手法が発達し、遷移を伴う流れ場に適用されている。これら直接的解析は、非定常的な空間変動に関する情報が得られ、特に遷移プロセスが流れ場の損失生成あるいは熱伝達とどの様に関与するか解明する上で、重要な解析手段になると考えられる。その中で、LES (Large Eddy

Simulation) は DNS (Direct Numerical Simulation) に必要な計算負荷を軽減し、高精度に乱流を解析する手法として工学的応用がなされている。

そこで本研究では、主流乱れを伴う翼列内圧縮性流れの挙動、具体的に、低 Re 数効果により剥離を伴う境界層の遷移プロセスを解明することを目的として、LES を用いた数値解析を行っている。

本稿では、近年の研究動向及び今後の展望について述べた後、本研究に先立ち行われた、マッハ数 0.5 の条件下における主流乱れを伴う平板境界層遷移予測の一例について紹介する。さらに現在行っている圧縮性遷移翼列流れ解析についても簡単に触れる。

2. 近年における研究動向

本研究に関連し、等方的な乱れ及びウエイク等の組織的な乱れによる遷移あるいは、剥離を伴う遷移に対する DNS, LES を用いた近年の研究動向について述べる。

DNS を用いた等方的な乱れによる遷移解析の初期では、M. M. Rai, *et al.* (1993)⁴⁾ が約 3% の主流乱れを伴う、マッハ数 0.1 の気流下における平板境界層遷移の全体解析 ($Re_x \approx 0.5 \times 10^5 \sim 12 \times 10^5$) に成功している。この論文では主流乱れ下の境界層遷移に伴う物理的機構の解明というよりは、むしろ計算機性能の向上により、当時の段階で DNS を用いた層流-乱流遷移の全体解析が行えることを主張している。最近の DNS では、R. G. Jacobs, *et al.* (2001)⁵⁾ が約 3.6% の主流乱れ度における平板境界層を解析している。3% の条件においては、実験データに見合う、定量性の高い統計結果を得ている。さらにこの論文では、乱流スポット (図 1) 発生に至る物理的過程を考察しており、その中で 'backward jets'⁶⁾ の挙動を明らかにしている。

DNS による解析は、等方的な乱れのみならず、更にスケールが大きく、組織的な外乱が境界層に入射する場合の遷移に関しても適用されている。X. Wu, *et al.* (1999)⁶⁾ では、

*東京大学生産技術研究所 人間・社会部門

**東京大学大学院工学系研究科 航空宇宙工学専攻

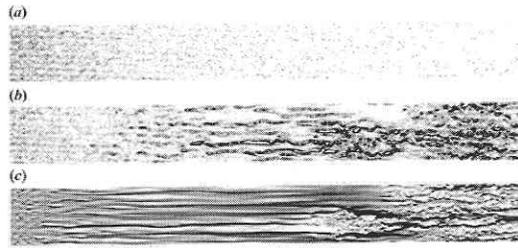


FIGURE 12. Horizontal sections through the free stream and the boundary layer. The sections are: (a) in the free-stream, (b) at $y \sim \delta$ and (c) at $y \sim \frac{1}{3}\delta$ where δ is the 99% thickness at $Re = 250$.

図1 DNSにより数値的に再現された乱流スポットの様子 (文献5から引用)

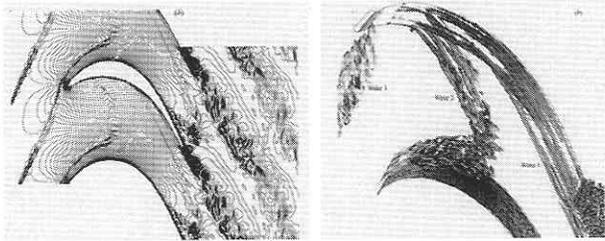


図2 ウェイクを考慮した翼列流れに関するDNS解析例 (文献8から引用. 左は速度コンタ, 右は渦構造の様子)

平板境界層に入射するウェイクが翼面境界層と干渉し、乱流スポットが形成される過程に関し解析を行っている。また、7) では平板境界層に wake が入射する際に起きる境界層遷移に関し、その温度境界層特性を RANS 計算と比較しながら考察し、更に 8) では、約 7 千万点の格子点数を用いてタービン流路内あるいは、タービン翼圧力面近傍に形成される渦構造を見出している (図 2)。

LES を用いた主流乱れによる遷移解析は、P. R. Voke, *et al.* (1995)⁹⁾ に遡る。低 Re 数修正を施した SGS モデル¹⁰⁾ を用い、主流乱れ度約 3% 及び 6% における平板境界層遷移の解析を行っている。この解析では Δx^+ (主流方向) ≈ 80 , Δz^+ (スパン方向) ≈ 14 と主流方向に粗い格子を用いているが、局所摩擦係数や境界層内速度変化に関して、Roach & Briely (1992)¹¹⁾ の実験結果と比較し、良好な結果を得ている。

ウェイクによる遷移に関する LES では、F. E. Ham, *et al.* (2000)¹²⁾ が平板境界層において、X. Wu ら⁶⁾ の DNS と DSM (Dynamic Smagorinsky Model) を用いて得られた結果とを比較している。LES の結果は DNS と比較し、遷移開始後の局所摩擦係数 C_f の上昇が若干急であり、遷移が早まった結果になったが、6) で見られた ‘backward jets’ の存在をこの解析でも確認している。

上記の他に、遷移を解析したものではないが、主流乱れが境界層に与える影響を解析したものとして 13, 14) 等が報告されている。剥離遷移に関しては、近年の DNS として、M. Alam, *et al.* (2000)¹⁵⁾ や P. R. Spalart, *et al.* (2000)¹⁶⁾ 等

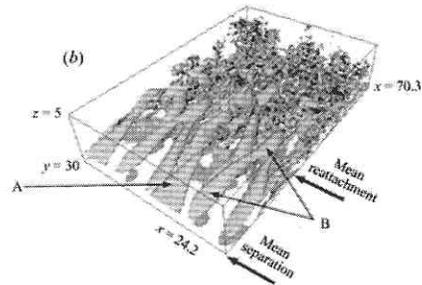


図3 遷移状態にある剥離せん断層における渦構造の解析例 (文献15から引用)

が報告されている。M. Alam, *et al.* (2000) は平板を対象に、剥離せん断層の遷移過程において、ラムダ渦や最付着付近におけるヘアピン渦等、渦構造の同定を行っている (図 3)。また、最付着後完全な乱流境界層までの発達や剥離泡における擾乱の発達条件に関しても言及している。Z. Yang, *et al.* (2000)¹⁷⁾ は、LES を用いて、円形の前縁を模擬した平板翼を対象に、曲率の影響で剥離した層流境界層の不安定性から乱流境界層に至るまでの一連の過程を解析した。それにより、剥離境界層の不安定性や、剥離域からの渦放出と剥離泡挙動との関係等を説明している。

翼周りの解析に関しては、H. J. Kaltenbach, *et al.* (1995)¹⁸⁾, K. Jansen (1995)¹⁹⁾ による NACA 4412 周りの乱流場予測への適用、Z. Liu, *et al.* (1996)²⁰⁾ による Joukowski 翼負圧面における自然遷移過程の解明等を始めとして研究が行われている。翼周り流れの解析では近年、剥離-再付着過程を伴う流れ場の予測が注目されている²¹⁻²⁷⁾。この中で H. Fujiwara, *et al.* (2000)²²⁾ は低圧タービン翼を対象に、Smagorinsky モデルを用いた LES による結果と $k-\epsilon$ モデルを用いた 2 次元 RANS による結果とを比較している。2 次元計算では、剥離-再付着過程を予測できず、LES は剥離-再付着過程を伴う流れ予測に対して、有用であると主張している。また木枝ら (2001)²¹⁾ は風力タービン用翼型を対象に解析を行い、剥離した層流境界層の発達と渦への巻き上がり、及びその後の渦構造への 3 次元的な複雑化の過程を解明した (図 4)。この研究では同時に、2 次元計算の影響についても考慮しており、2 次元計算では流れの 3 次元化への遷移を捉えられないため、3 次元流れが支配的な過程を正しく再現できないことを明らかにし、前述の H. Fujiwara, *et al.* (2000) の主張を裏付けている。また、剥離泡解析に QUICK (Quadratic Upstream Interpolation for Convective Kinematics method) を用いた解析も行っており、中心差分スキームに 6 階散逸を有する陽的なフィルタリングを用いた LES 計算との比較から、SGS モデルを陽的に付加しなくても風上スキームに内在する散逸は過大であり、剥離泡解析に際してもその影響を十分に認識しなければならないことを主張している。

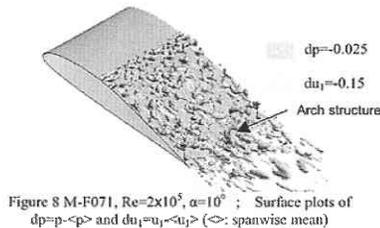


図4 翼面剥離流れに伴う3次元渦構造の解析例 (文献25から引用)

表1 遷移計算条件

| | |
|--|---------------------------|
| 主流マッハ数 | 0.5 |
| 主流全圧[atm] (平均値) | 1 |
| 主流全温[K] (平均値) | 288 |
| 主流乱れ度[%] | 3, 6 |
| Re_{x1} | $6625-2.8 \times 10^5$ |
| 形状[m] | 2.778×10^{-2} |
| $L_i, i=1 \sim 3$ | 0.250×10^{-2} |
| ※添字 i は図6参照 | 0.100×10^{-2} |
| $\Delta x_1^+, \Delta x_2^+, \Delta x_3^+$ | 20, 1-76, 15 |
| 格子点数 | $801 \times 57 \times 37$ |

3. 本研究の現状

ここで本研究の現状として、乱れを考慮した圧縮性遷移流れ解析の基礎と位置付けられる、主流乱れを伴うマッハ数0.5における平板境界層解析例を紹介する³²⁾。

本解析に関し、基礎式はフィルタ平均化3次元圧縮性Navier-Stokes方程式を用い、空間離散化に関しては、対流項及び粘性項をコロケート格子系において、2次精度中心差分を利用した。対流項には、人口粘性を陽的に付加せず、保存型から skew-symmetric 型

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\phi \bar{u}_j) = \frac{1}{2} \left\{ \frac{\partial}{\partial x_j} (\phi \bar{u}_j) + \bar{u}_j \frac{\partial \phi}{\partial x_j} + \phi \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_j} \right\}$$

に変形することで計算の安定化を図った。時間積分法はRK3を、SGSモデルは、Low Reynolds Number Model¹⁰⁾、

$$v_s = v_s - (v/\beta) [1 - \exp(-\beta v_s/v)], \beta = 4.5$$

を用いた。このモデルは非圧縮解析⁹⁾で用いられており、Smagorinskyモデルにより評価される、層流域での過剰な散逸の修正を行っている。

遷移計算条件の概要を表1に、解析領域の概略を図6に示す。境界条件はNSCBC (Navier-Stokes Characteristic Boundary Condition)³³⁾に基づき、流入境界では速度、温度を各タイムステップ毎に指定し、流出境界では無反射境界条件を課した。また、上側境界では対称境界条件を、幅方向境界では周期境界条件を課した。特に、流入境界条件は、流入境界層厚さを δ で表すとき、 $x_2 = 0 \sim \delta$ に対し、速度、温度境界層とも非圧縮相似解に基づいた乱れの無い層流境界層を、 $x_2 = \delta \sim 1.5 \delta$ まで乱れの無い一様流を流入させた。 $x_2 = 1.5 \delta$ 以上では別途実行したチャンネル計算により得られた速度変動場を、乱れ度が6%あるいは3%となるようにスケーリングし、一様流に加算して流入させた。

統計的に得られた壁面局所摩擦係数 C_f の分布を図7に示す。図には非圧縮条件の実験値¹¹⁾、圧縮性層流境界層に

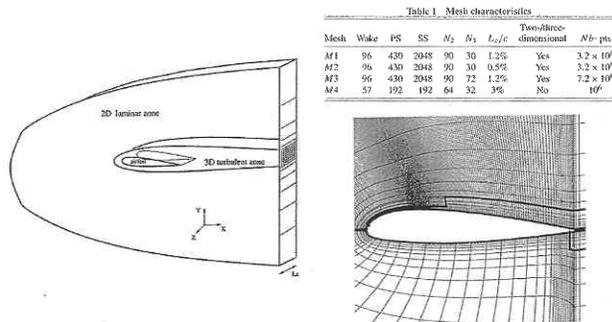


図5 高Re数翼周りの解析例 (文献31から引用。左はこの解析の概念図であり、右はその解析格子)

LESに関しては、翼弦長に基づいたRe数が 10^6 オーダーの高Re数翼周り流れに対する適用も研究が盛んに行われている^{18-19,28-31)}。

高Re数流れの予測では、増大する格子点数を結果の精度を損なわずにどのように軽減するかが重要な焦点となっており、31)では、図5に見られるように、2次元層流計算領域と、3次元乱流計算領域とをカップリングし、またスパン長を最大3%翼弦長と非常に短くした計算領域において解析を行っている(図5)。これにより実験値と比較し、妥当な予測を行うことができたとの報告がなされている。

以上、本研究に関連する近年の研究動向を述べた。遷移に対する主流乱れの効果は、基礎的な研究では主に付着境界層に関し詳細な解析が行われており、また翼列に対してはDNSによる乱れを考慮した全体的な流れ場を把握しようという解析が始まっている。一方、乱れの効果を考慮しない剥離境界層の遷移解析に関しても同様に、平板境界層のみならず、曲率を有する形状周りの剥離遷移構造を詳細に解明しようとする研究が行われている。しかしながら、乱れを考慮した場合の剥離遷移プロセスは未だ明らかでなく、本研究では今後、等方的な乱れのみならず、例えばラジアルタービン等でも重要となる、ノズルウエイク、漏れ渦、馬蹄渦等も考慮し、詳細な解析を行っていくことが課題である。

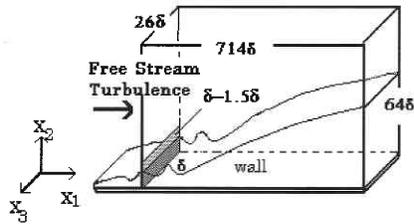
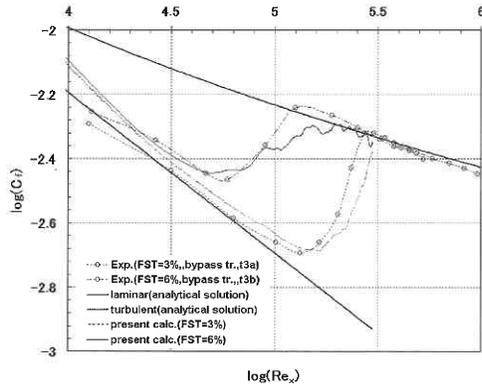


図6 解析領域の概要

図7 C_f と Re 数の関係

における C_f の理論解及び、乱流の対数則を同時に表示してある。本計算結果の C_f は主流乱れ度 6% の時 $\log(Re_{x1}) = 4.8$ 付近で、3% の時 $\log(Re_{x1}) = 5.3$ 付近でそれぞれ極小値をとり、非圧縮条件の実験値と比較し、同程度の結果を得た。一般的に圧縮性は遷移を遅らせる効果を持つが、本解析結果はそれに矛盾せず、妥当であると考えられる。

4. おわりに

本研究の現状として、本研究に関する近年の研究動向と、圧縮性流れにおける主流乱れを伴った遷移の定性的予測を紹介した。タービン翼列解析など実用解析においては、さきに述べた中心差分では計算が極めて不安定になり、フィルタリングなど、実際問題として何らかの安定化処理が必要になると考えられる。また LES に関しては、なるべく解像度の高い数値解析手法の利用が好ましい等の理由から、現在コンパクトスキームにフィルタリングの安定化を行う手法³⁴⁻³⁵⁾を用いた解析を行っている(図8)。

謝 辞

本研究は、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の「平成13年度エネルギー国際共同研究」を東京大学生産技術研究所が受託し、その一貫として実施されたものである。また研究の一部は平成13年度宇宙科学研究所企画情報センター・計算機利用共同研究に基づき宇宙科学研究所のVPPを用いて行われた。さらに、東京大学

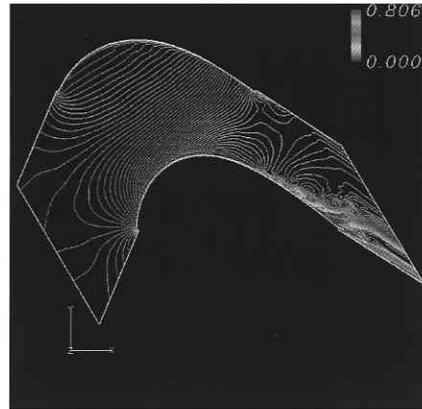


図8 遷移翼列流れ LES 解析例 (マッハ数コンタ)

大学院工学系研究科航空宇宙工学専攻寺本進講師には本研究に関し助言を頂いた。併せて謝意を表する。

(2002年12月9日受理)

参 考 文 献

- Westine, K. J. A., Boiko, A. V., Klingmann, B. G. B., Kozlov, V. V., Alfredsson, P. H., *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 281, pp. 193-218 (1994)
- Emmons, H. W., *Journal of the Aeronautical Sciences*, Vol. 18, pp. 490-498 (1951)
- Mayle, R. E., *ASME Journal of Turbomachinery*, Vol. 113, pp. 509-537 (1991)
- Rai, M. M., Moin, P., *Journal of Computational Physics*, Vol. 109, pp. 169-192 (1993)
- Jacobs, R. G., Durbin, P. A., *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 428, pp. 185-212 (2001)
- Wu, X., Jacobs, R. G., Hunt, J. C. R., Durbin, P. A., *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 398, pp. 109-153 (1999)
- Wu, X., Durbin, P. A., *ASME Journal of Heat Transfer*, Vol. 122, pp. 248-257 (2000)
- Wu, X., Durbin, P. A., 2001, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 446, pp. 199-228 (2001)
- Voke, P. R., Yang, Z., *Physics of Fluids*, Vol. 7, No. 9, pp. 2256-2264 (1995)
- Voke, P. R., *Theoretical and Computational Fluid Mechanics*, Vol. 8, pp. 131-143 (1996)
- Pironneau, O., Rodi, W., Ruyhming, I. L., Savill, A. M., Truong, T. V., *Proceedings of the ERCOFTAC Workshop held at EPFL 26-28 March 1990 Lausanne, Switzerland, Cambridge University Press*, pp. 319-347
- Ham, F. E., Lien, F. S., Wu, X., Wang, M., Durbin, P. A., *Center for Turbulence Research, Proceedings of the Summer Program 2000* (2000)
- Penearu, F. E., Boisson, H. C., Djilali, N., *International Journal of heat and Fluid Flow*, pp. 640-647 (2000)
- Xiong, Z., Lele, S. K., *AIAA-2001-1016*
- Alam, M., Sandham, N. D., *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 403, pp. 223-250 (2000)
- Spalart, P. R., Strelets, M. K., *Journal of Fluid Mechanics*, Vol.

- 403, pp. 329-349 (2000)
- 17) Yang, Z., Voke, P. R., 2001, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 439, pp. 305-333 (2001)
- 18) Kaltenbach, H.-J., Choi, H., *Center for Turbulence Research, Annual Research Briefs* (1995)
- 19) Jansen, K., 1995, *Center for Turbulence Research, Annual Research Briefs* (1995)
- 20) Liu, Z., Xiong, G., Liu, C., *AIAA-96-2081*
- 21) Held, J., Fuchs, L., *AIAA-97-1931*
- 22) Fujiwara, H., 第 14 回数值流体力学シンポジウム講演要旨集 p. 69 (2000)
- 23) 有水博, 矢部彰, 阿部裕幸, 松沼孝幸, 第 14 回数值流体力学シンポジウム講演要旨集 p. 127 (2000)
- 24) Conway, S., Caraeni, D., Fuchs, L., *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 21, pp. 664-673 (2000)
- 25) 木枝香織, 小垣哲也, 松宮輝, 谷口伸行, 小林敏雄, 第 15 回数值流体力学シンポジウム講演要旨集 p. 194 (2001)
- 26) 加藤千幸, 石橋武人, 鈴木常夫, 吉識晴夫, 第 16 回生研 NST シンポジウム講演論文集 pp. 48-59 (2001)
- 27) Mittal, R., Venkatasubramanian, S., Najjar, F. M., *AIAA* 2001-2560
- 28) 中森一郎, 井小萩利明, 第 14 回数值流体力学シンポジウム講演要旨集 p. 73 (2000)
- 29) Dahlstrom, S., Davidson, L., *AIAA* 2001-0425
- 30) Schmidt, S., Franke, M., Thiele, F., *AIAA* 2001-0434
- 31) Mary, I., Sagaut, P., *AIAA Journal*, Vol. 40, No. 6 (2002)
- 32) 松浦一雄, 平成 14 年東京大学大学院工学系研究科航空宇宙工学専攻修士論文
- 33) Poinso, T. J., Lele, S. K., 1992, *Journal of Computational Physics*, Vol. 101, pp. 104-129 (1992)
- 34) Lele, S. K., *Journal of Computational Physics*, Vol. 103, pp. 16-42 (1992)
- 35) Gaitonde, D. V., Visbal, M. R., *AIAA Journal*, Vol. 38, No. 11 (2000)