

〔特集〕基礎的な流れ

翼型上に生ずる層流剥離泡

Laminar Separation Bubbles Formed on Airfoils

*東京大学工学系研究科航空宇宙工学専攻 李家賢一†
Kenichi RINOIE

1 はじめに

翼型等の物体まわりの流れ場において、境界層が層流剥離した後、剥離剪断層内において乱流遷移を起こし物体表面に再付着する場合がある。この層流剥離点と再付着点の間の剥離域は層流剥離泡 (laminar separation bubble, 又は単にbubble) と呼ばれている¹⁾。

翼型上に生ずる層流剥離泡には short bubble と long bubble の二種類が存在する。翼型の迎角を大きくするにつれて長さを縮めながら前縁方向へ移動する剥離泡を short bubble, 再付着点位置を後縁方向へ移動しながら長さを伸ばす剥離泡を long bubble と呼んでいる。二種の bubble の性質は、表面圧力分布に関しても異なっている。short bubble は翼型全体にわたる potential flow としての圧力分布には余り影響を与えず、suction peak の後方で層流剥離した後、局所的に圧力がほぼ一定の領域をつくり、その後急激な圧力回復を起こして再付着に達する圧力分布を示す。これに対して long bubble は、非粘性流理論より得られる圧力分布とは大きく異なった分布を示し、suction peak がほとんど失われ、その後方で圧力回復を徐々に起こしながら再付着する圧力分布を示す (図 1)。

Short bubble の場合、剥離点の下流で翼面近くには、流れがほとんど静止している領域 (死水域)

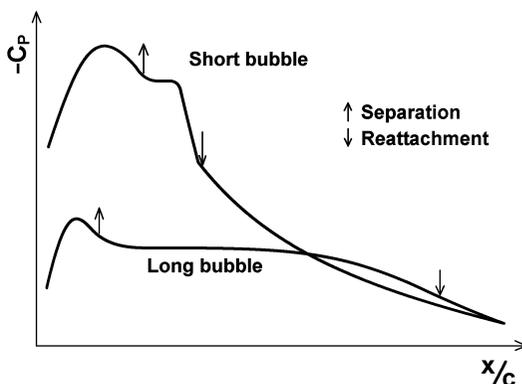


図 1 Short Bubble と Long Bubble の表面圧力分布

が存在する。流れ場はその後乱流へ遷移を起こし始め、充分乱れが発達すると再付着する。再付着点の上流側には逆流域が存在する。圧力分布において圧力が一定の領域は死水域に、圧力回復を起こす領域は逆流域にほぼ相当する²⁾ (図 2)。

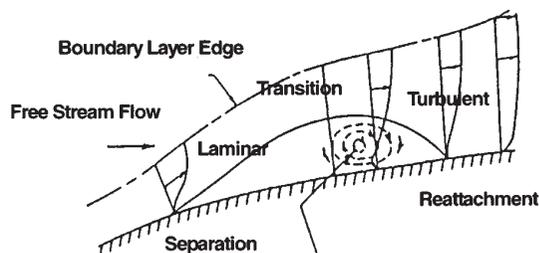


図 2 Short Bubble 内部の流れ場のパターン

*〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1

†E-mail: trinoie@mail.ecc.u-tokyo.ac.jp

Short bubble の存在している翼型の迎角を大きくしていくと、当初は剥離泡内部の圧力回復量を増大しながら short bubble として翼面に再付着していた流れが突如再付着しなくなる現象が起こる。この現象は short bubble の burst (崩壊) と呼ばれている。long bubble とは、通常この short bubble の burst 後の姿であると解釈されている。burst によって、剥離流が long bubble として翼型上に再付着せず wake 中にまで bubble が拡がってしまう場合は、揚力の急激な減少 (翼型前縁失速)³⁾ が起こる。この様に翼型上に存在する層流剥離泡の挙動は、翼型失速特性に大きな影響を与えることが知られており、burst 時期の予測法の確立に特に重点を置きながら、古くからさまざまな研究が試されてきた。

本稿では、この翼型上に存在する層流剥離泡に関する過去から現在までの研究について概観する。

2 初期の研究 - burst 予測をめざして -

Short bubble が翼型上に形成される条件について、古くは Von Doen-hoff⁴⁾ により簡単な幾何学的モデルを用いて考察が行われた。Tani⁵⁾、Owen & Klanfer⁶⁾ は実験結果を整理することにより、層流剥離点での境界層の排除厚 δ_s や運動量厚 θ_s に基づく局所レイノルズ数 (Re_{δ_s} , Re_{θ_s}) がある臨界値より大きい時には short bubble、小さい時には long bubble になるという判定法 (谷及び Owen & Klanfer の判定) を導いた。この判定法は short bubble と long bubble をかなり明確に区別するものではあるが、burst 直前で Re_{δ_s} 等が臨界値よりもかなり大きな値になっているのが普通であり⁷⁾、short bubble の burst 時期の予測につながる判定法ではない。

Crabtree⁸⁾ は、short bubble 内において回復される圧力量には限界があるとの観点から burst の条件を考えた。圧力回復係数 $\sigma = (P_R - P_S) / 0.5 \rho U_s^2$ (P_R : 再付着点での圧力, P_S : 剥離点での圧力, U_s : 剥離点での境界層外縁の流速) を考えると short bubble が burst に近づくにつれて σ は増大していくが、ある臨界値 (文献 8) によると約

0.35) に達すると burst するという判定法を提案している。一方、Tani⁹⁾ は Crabtree の判定と同様な考えに基づいて剥離剪断層内の乱れ剪断応力の大きさには限界があるとの観点から short bubble の burst する条件について考察を行なった。以上のようにさまざまな研究がなされてきたが、そのほとんどは実験の測定結果 (主として圧力分布) から burst を判定するパラメーターを求めるといった手法がとられている。しかしこれらの判定法によって正確な burst 時期の予測は実現されず、しかもこれらの判定法の根拠となる原理は明らかにされなかった。

その後 Horton¹⁰⁾ は short bubble 内部の運動量等の変化を探ることにより burst 時期の予測を試みた。しかし翼型上に生ずる short bubble は非常に小さいために、bubble 内部の速度場等の測定は困難で、十分に詳細な bubble の測定が行なわれない状態が続いていた。Horton もこのために十分なデータを得ることができず、文献¹⁰⁾ においても満足すべき結果は得られていない。結局、short bubble burst の機構に対して物理的な説明を与えることには成功せず、翼型上に生じる層流剥離泡内部の詳細な構造についても short bubble と long bubble の違いを含めて解明できない状態が続いた。

3 層流剥離泡の計測 - 熱線流速計の活用 -

前章で述べたように層流剥離泡内部の流れ場の測定結果は少なく、わずかに文献^{3), 7), 11), 12)} 等のデータがある程度であった。これらは、ピトー管や熱線流速計を用いて計測が行われたために、測定プローブを微小な bubble 内部に挿入するため流れ場に影響を及ぼしてしまうこと、またその測定原理上 bubble 内部の逆流域の正確な計測を行なうことが不可能であることが、計測上の問題であった。

これらの文献のうち、文献¹²⁾ では NACA63-009 翼型上に生ずる short bubble と long bubble に関して、翼弦長にもとづく Reynolds 数が 1.1×10^5 において、熱線流速計を用いた計測が行われ

た．前述の理由により，bubble 内部の平均流速分布や乱れ応力分布の正確な計測は行われていないが，bubble 内部で発達する乱れに関して以下のような現象が整理された．すなわち，short bubble については，bubble 内部で遷移開始付近で観察される擾乱は非対称 wake の安定論によって予測される空間増幅率最大の周波数とほぼ一致することが示された．また，long bubble については，bubble 前半において，翼面付近に低速度で低周波の乱れを含んだ順流（主流方向の流れ）が剥離流の下にあり，再付着点位置は定常ではないことが示された．

4 平均流速，乱れ応力分布の計測

- レーザー流速計の活用 -

流れ場にプローブを入れる必要がなく逆流も測定可能なレーザー・ドップラー流速計（LDA）の発達とともに，前章で述べた熱線流速計による計測の問題点は解消へと向かい始めた．文献 13 - 17) では LDA を用いて翼型上に生ずる層流剥離泡の計測が行われた．

文献 17) では，NACA63-009 翼型模型を用いて short bubble と long bubble を測定し（翼弦長に基づくレイノルズ数は 8×10^4 ），2 種の bubble の違いについて研究を行った．その結果，short bubble では剥離点より下流で乱れ応力が成長しはじめ，再付着点付近で乱れ応力が最大に達することが示された．これに対して long bubble では剥離直後から乱れ応力は急激に成長し，剥離泡中央部付近で最大となり，徐々に減少しながら再付着することが示された．更には long bubble 中で発生する乱れ応力は short bubble に比べて非常に大きいことが示された．図 3 に short bubble と long bubble の平均流速分布と乱れ応力分布の計測結果を示す．

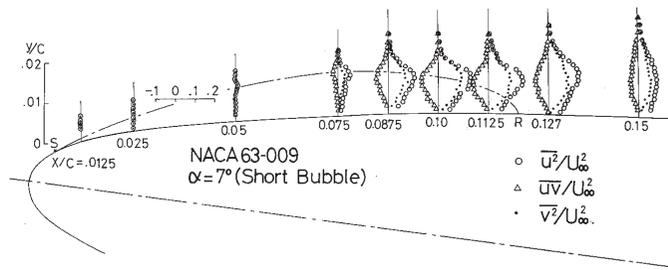
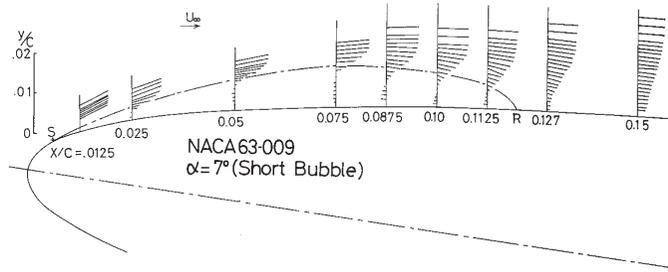
5 層流剥離泡の burst 付近の非定常的挙動

前章までの研究は，short bubble と long bubble を個別に計測し，それらの違いを明確にすることによって，burst の発生機構の解明をめ

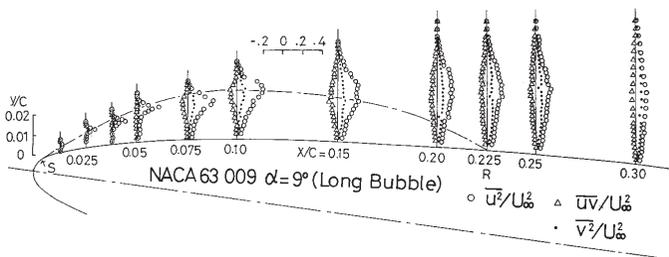
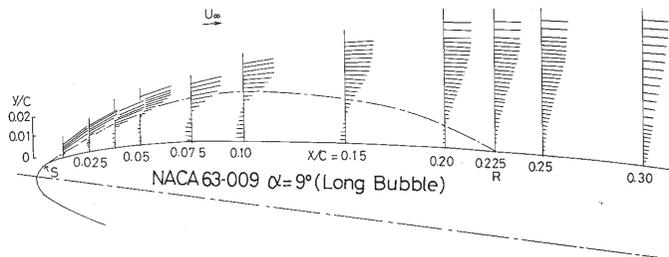
ざしていた．一方 burst を生じる迎角付近での bubble の挙動を調べることも行われるようになった．Burst 付近で bubble が非定常的挙動を示すことは，古くは文献 18) の翼型に働く空気力測定がなされた頃から知られていた．

失速付近における翼型上の流れに存在する非定常的かつ非常に低い周波数で振動する流れについて計測したのが文献 19) である．この低周波数振動の周波数を f ，翼弦長を c ，迎角を α ，一様流流速を U とすると， $St = fc \sin \alpha / U$ で定義されるストローハル数は，このとき約 0.02 であると報告されている．また文献 20) では，異なる翼型に関する同様な振動を $St = 0.005$ と報告されている．これらのストローハル数は，鈍頭物体の後流に観察される振動流れのそれ ($St \cong 0.2$) よりかなり低い値である．文献 19) によると，この時の流れは失速した状態と失速していない状態を周期的に繰り返していると報告している．その後の研究²¹⁻²³⁾から，失速していない状態では，層流剥離泡が発生していることが指摘されている．また，この低周波数振動は，後ろ向きステップ流れの剥離流れ等で観察される剥離剪断層のフラッピング現象と同種のものではないかとも指摘されている²¹⁾．この低周波数振動現象を理解することは，short bubble の burst の予測につながる重要な課題の一つであると考えられる．そこで，この低周波数振動と層流剥離泡の関係を明らかにするために，NACA0012 翼型上に生ずる層流剥離泡の失速付近における層流剥離泡の振る舞いを明らかにする実験を行った²⁴⁾（翼弦長に基づくレイノルズ数は 1.3×10^5 である）．失速直後の迎角である $\alpha = 11.5^\circ$ では，平均流速分布によると long bubble が形成されているが，このとき上記のストローハル数で表すと約 0.008 となる低周波速度変動が観察された．この速度変動を基準信号とする位相平均法を用いて 2 台の LDA によって流速測定データの条件抽出を行った．図 4 に位相が 180 異なる場合の流速分布を示すとともに，その位相にほぼ対応すると思われる瞬間における可視化写真（照射時間 5nsec）を示す．図より，前縁近くに翼弦長

翼型上に生ずる層流剥離泡

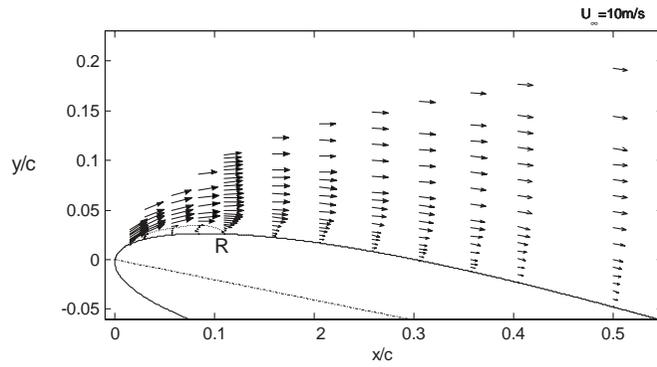
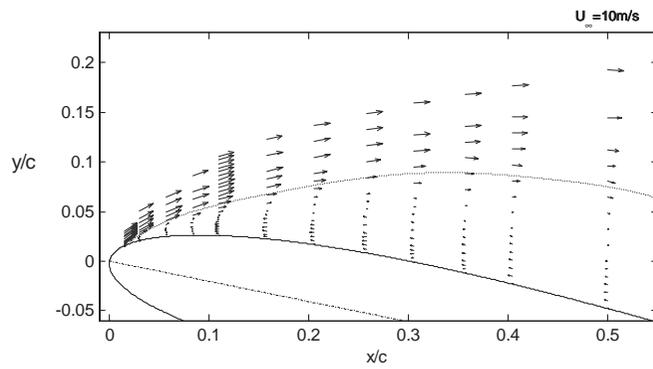
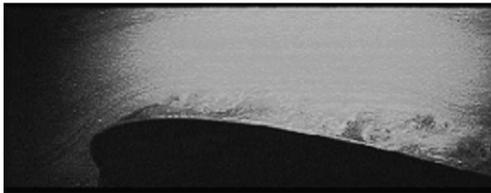


a) Short bubble ($\alpha = 7^\circ$)



b) Long bubble ($\alpha = 9^\circ$)

図3 NACA63-009 上に生ずる層流剥離泡 (平均流速分布と乱れ応力分布)

a)位相 0° b)位相 180° 

c)可視化

図4 NACA0012, $\alpha = 11.5^\circ$ における位相平均流速分布と可視化

の約 10% の短い剥離再付着領域を形作る位相 0° と翼面上全体に大きな剥離域を形成する位相 180° との間で変化を繰り返していることがわかる。第 3 節で述べた long bubble 内で観察された低周波で順流を含む流れとは、図 4 と同種の現象を示していると思われる。

一方、同じ翼型の $\alpha = 10^\circ$ では、short bubble が形成される。この流れ場は $\alpha = 11.5^\circ$ のときとは異なり比較的安定で上記と同種の低周波変動は観察されない。図 5 に可視化結果（照射時間 5nsec）を示す²⁵⁾。Short bubble 内に大きな渦塊が複数個発生している。この渦塊の間隔に基づいて渦の発生周波数を推算すると第 3 節で述べたような剥離剪断層の不安定性に基づいて発生した変動に対応していることがわかる。

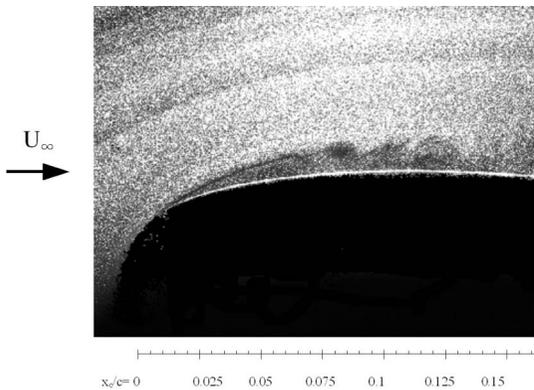


図 5 NACA0012 上に生ずる

6 数値解析の活用

ここまでは実験的研究によって得られた成果についてまとめてきた。本節では、数値計算によって層流剥離泡を表現する試みについて簡単にまとめる。1970 年代から計算機の発達により、層流剥離泡を数値解析することが多く行なわれるようになった^{26) - 30)}。しかしいずれも bubble に対するデータ不足のために剥離剪断層の振舞を決める乱れモデルの決定に困難を生じ、層流剥離泡の正確な表現ができるまでには至らなかった。

一方、近年発達してきた DNS (Direct Nume-

rical Simulations) を用いて翼型上の層流剥離泡を解くことがなされるようになってきた^{31), 32)}。この方法の発展により、層流剥離泡を精度高く表現できるようになる可能性がある。

CFD を活用して翼型の失速予測を行う試みもなされている³³⁾。前節で述べたように short bubble は定常な流れ場に近く、剥離剪断層も薄いため、簡単な 0 方程式乱れモデル程度でもモデル定数を適切に設定すれば、short bubble の再現が engineering 的には可能であると考えられる³⁴⁾。しかしながら、burst 時期の予測に関しては、本稿で述べてきたような風洞実験による現象の解明が不可欠であろう。

7 おわりに

翼型失速の原因となる層流剥離泡に関する過去から現在までの研究成果に関して概観した。計測装置の発展にともなって、圧力分布、平均流速分布、乱れ応力分布と計測される量は変遷し、剥離泡の物理的構造の理解も深まってきた。近年では剥離泡の非定常的な挙動について計測されている。本来、剥離流れは三次元的な流れであるため、剥離泡を理解するためには三次元計測が不可欠であり、今後は層流剥離泡の非定常・三次元計測へと進んでいくと思われる。これによって short bubble の burst 機構の解明がなされ、その結果を数値解析に応用することによって、翼型の最大揚力の推定も可能になるのではないかと考えられる。

引用文献

- 1) Tani, I. : Low-Speed Flows Involving Bubble Separation, *Progress in Aeronautical Sciences*, 5 (Pergamon Press, 1964) 70-103.
- 2) Young, A.D. : Some Special Boundary Layer Problems, *Z. Flugwiss. Weltraumforsch.*, 1 (1977) 401-414.
- 3) McCullough, G.B. and Gault, D.E. : Examples of Three Representative Types of Airfoil-section Stall at Low Speed, NACA TN 2502 (1951).

- 4) Doenhoff, A.E. von : A Preliminary Investigation of Boundary-Layer Transition along a Flat Plate with Adverse Pressure Gradient, NACA TN 639 (1938).
- 5) 谷一郎 : 境界層の層流剥離と遷移との関係に就いて, 日本航空学会誌, 6 (1939) 122-134.
- 6) Owen, P.R. and Klanfer, L. : On the Laminar Boundary Layer Separation from the Leading Edge of a Thin Aerofoil, Aeronautical Research Council (A.R.C.) CP 220 (1955).
- 7) Gault, D.E.: An Experimental Investigation of Regions of Separated Laminar Flow, NACA TN 3505 (1955).
- 8) Crabtree, L.F. : The Formulation of Regions of Separated Flow on Wing Surfaces, A.R.C. R&M 3122 (1959).
- 9) Tani, I. : Critical Survey of Published Theories on the Mechanism of Leading-edge Stall, *Aeronautical Research Institute, Univ. of Tokyo*, Report No.367 (1961).
- 10) Horton, H.P. : A Semi-empirical Theory for the Growth and Bursting of Laminar Separation Bubbles, A.R.C. CP1073 (1967).
- 11) Gaster, M. : The Structure and Behaviour of Laminar Separation Bubbles, A.R.C. R&M 3595 (1967).
- 12) 佐藤淳造, 綿貫忠晴, 佐原光一 : 翼型上の層流剥離渦とその Burst について, 日本航空宇宙学会第7期年会講演会講演集 (1976) 57-58.
- 13) Hoeger, M., Meyer, P. and Koerba, G.,A. : Comparison of Laser-Doppler Anemometry and Probe Measurements within the Boundary Layer of an Airfoil at Subsonic Flow, *Laser Anemometry in Fluid Mechanics II, Selected Papers from the Second Intl. Symp. on Application of Laser Anemometry to Fluid Mechanics, Lisbon* (1984) 143-157.
- 14) Bell, W.A. and Cornelius, K.C. : An Experimental Investigation of a Laminar Separation Bubble on a Natural Laminar Flow Airfoil, AIAA Paper 87-0458 (1987).
- 15) Brendel, M. and Mueller, T.J. : Boundary-Layer Measurements on an Airfoil at Low Reynolds Numbers, *J. Aircraft*, **25** (1988) 612-617.
- 16) Fitzgerald, E.J. and Mueller, T.J. : Measurements in a Separation Bubble on an Airfoil Using Laser Velocimetry, *AIAA J.*, **28** (1990) 584-592.
- 17) 李家賢一, 新郷美可, 佐藤淳造 : NACA63-009 翼型上に生ずる Short Bubble と Long Bubble の測定, 日本航空宇宙学会誌, **38** (1990) 249-257.
- 18) Jones, B.M. : An Experimental Study of Stalling of the Wings, A.R.C. R&M 1588 (1933).
- 19) Zaman, K.B.M.Q., McKinzie, D.J. and Rumsey, C.L. : A Natural Low-frequency Oscillation of the Flow Over an Airfoil Near Stalling Conditions, *J. Fluid Mech.*, **202** (1989) 403-422.
- 20) Reda, D.C. : Observations of Dynamic Stall Phenomena Using Liquid Crystal Coatings, *AIAA J.*, **29** (1991) 308-310.
- 21) Bragg, M.B., Heinrich, D.C. and Khodadoust, A. : Low-frequency Flow Oscillation over Airfoils Near Stall, *AIAA Journal*, **31** (1993) 1341-1343.
- 22) Bragg, M.B., Heinrich, D.C. and Balow, F.A. : Flow Oscillation Over an Airfoil Near Stall, *AIAA J.*, **34** (1996) 199-201.
- 23) Broeren, A.P. and Bragg, M.B. : Flow-field Measurements Over an Airfoil During Natural Low-frequency Oscillations Near Stall, *AIAA J.*, **37** (1999) 130-132.
- 24) Rinoie, K., Takemura, N. : Oscillating Behaviour of Laminar Separation Bubble Formed on an Aerofoil near Stall, *CEAS Aerospace Aerodynamics Research Conference, Cambridge* (2002) 21.1 - 21.11.
- 25) 畑甲為, 李家賢一, 武村直樹, 砂田保人 : 翼型上の Short Bubble 内部に生ずる低周波数速度変動に関する実験的研究, 日本航空宇宙学会論文集, **50** (2002) 293-300.
- 26) Briley, W.R. and McDonald, H. : Numerical

- Prediction of Incompressible Separation Bubbles, *J. Fluid Mech.*, **69** (1975) 631-656.
- 27) Crimi, P. and Reeves, B.L. : Analysis of Leading-edge Separation Bubbles on Airfoils, *AIAA J.*, **14** (1976) 1548-1555.
- 28) Cebeci, T. and Schimke, S.M. : The Calculation of Separation Bubbles in Interactive Turbulent Boundary Layers, *J. Fluid Mech.* **131** (1983) 305-317.
- 29) Vasta, V.N. and Carter, J.E. : Analysis of Airfoil Leading-edge Separation Bubbles, *AIAA J.*, **22** (1984) 1697-1704.
- 30) Cebeci, T., Hefazi, H. and Roknaldin, F. : Predicting Stall and Post-Stall Behavior of Airfoils at Low Mach Numbers, *AIAA J.*, **33** (1995) 595-602.
- 31) Lin, J.C.M. and Pauley, L.L. : Low-Reynolds-Number Separation on an Airfoil, *AIAA J.*, **34** (1996) 1570-1577.
- 32) Alam, M. and Sandham, N.D. : DNS of Transition Near the Leading Edge of an Aerofoil, *Geurts, B.J. et al. (eds.), Direct and Large-Eddy Simulation - IV* (Kluwer Academic, 2001) 285-292.
- 33) 廣瀬直喜, 中橋和博, 吉田憲司, 松尾裕一, 岩宮敏幸 : ワークショップ : 翼型失速特性シミュレーション 結果のまとめ CFDは翼型失速角を予測できるか?, 航空宇宙技術研究所特別資料SP-46, 航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム2000論文集 (2000) 175-177.
- 34) 李家賢一, 神谷信彦, 簡単な渦粘性モデルを用いた層流剥離泡の考察, 日本航空宇宙学会誌, **39** (1991) 20-27.