

遷移レイノルズ数における翼まわり流れの可視化

林 秀千人*・児 玉 好 雄*
肥喜里 邦 彦*Flow Visualization around the airfoils
in the Transition Reynolds Numbers

by

Hidechito HAYASHI*, Yoshio KODAMA*
and Kunihiko HIKIRI*

We researched the fluctuating flow characteristics on three types airfoils, NACA0008, NACA0015 and NACA65710 in the transition Reynolds Numbers ($Re=5450\sim 120000$). The visual technique with the video recorder and the camera was used. It was found that the Karman Vortex shedding (wake vortex) was generated in all Reynolds numbers at small attack angles. The core of the wake vortex was clear at the low Reynolds number ($Re=5450$), but not clear when the Reynolds number increased ($Re=16300\sim 120000$). Because the dissipation on the shear flow occurred just before rolling up of the wake vortex at high Reynolds number. There were two patterns of rolling up of the wake vortex that one was rolling up from the separated boundary layer of the airfoil and another was rolling up in the wake. At the case of rolling up in the wake, the wake vortex was rolling up near the trailing edge of the airfoil at high Reynolds number, but it was rolling up at far downstream of the airfoil at the low Reynolds number. At the case of rolling up from the separated boundary layer, the wake vortex was always rolling up just behind the dead air region which was generated between two separated shear layers at the trailing edge. When the attack angle increased, the separation bubble on the suction side was generated near the leading edge, then the turbulent boundary layer developed to the trailing edge. In this case the wake vortex was not rolling up and the dissipated wake was generated. This phenomenon often occurred when the Reynolds number increased.

1. 緒 言

流体機械の主要な構成要素である翼まわりの流動状況については、今までに数多くの研究がなされてきた。これにより流動状況や翼性能などが調べられ、流体力学的特性はほぼ解明されている^{1)~3)}。しかしながら、これらの研究は定常的な現象の解明と性能の向上に主眼が置かれ、振動や騒音の元凶として問題となる非定常現象についてはまだ不明な点が多い。

流体機械は我々の身近で使用されるために、その騒音を低減することが強く望まれている。流体機械から

発生する騒音の中で乱流騒音は、翼のまわりの変動流れ現象と密接に関係しており、騒音の低減には変動流れ現象を把握し発生機構を解明することが重要である。これに関しては種々の研究がなされ^{4)~7)}、乱れと発生騒音とのフィードバック機構が幾つか提案されている。しかしながら、その妥当性については現在も疑問点があり十分に解明されているとは言えない。

このような現状から、本研究では流体機構から発生する乱流騒音の発生機構を明らかにする目的で、一般の流体機械で現われやすい層流から乱流への遷移領域

平成7年4月30日受理

*機械システム工学科 (Department of Mechanical Systems Engineering)

のレイノルズ数において、翼まわりの流動状況、特に変動流れの特徴を可視化によって把握するものである。本報では、レイノルズ数を $Re=5450\sim 120000$ の範囲で変化させ、形状の異なる3種類の翼すなわち翼が薄く平板翼に近い場合、また翼が厚く翼面の曲率が大きい場合、翼に反りがある非対称翼形状の場合について実験を行い考察した。

2. 主な記号

- C : 翼弦長 mm
- f : 渦放出周波数 Hz
- Re : レイノルズ数
- V : 測定部流速 m/s
- L : スパン長さ mm
- X : 流れ方向座標 mm
- (翼後縁から下流を正とする)
- α : 迎え角 deg

3. 実験装置および方法

図1は本実験に用いた装置の概要を示したものである。装置の下部には大きな水貯めタンクがあり、このタンクより水中ポンプ [1] で装置へ水を供給する。装置には、所定の流速を得るための揚程を作る水槽部 [2] がある。ここでおよそ750mmの揚程を得て、さらに2段のフィルタ [3] によって流れの乱れが取り除かれる。水槽底部では水平方向に高さ110mm、幅920mmの集合胴 [4] が続いている。そこでさらに、ハニカムと金網によって流れの乱れが取り除かれる。集合胴内の下流側でノズル上流180mmには可視化用の染料注入装置 [5] がある。この装置は測定部の任意の位置へ染料を流すことができるように、注入装置が移動できるようになっている。集合胴下流に接続さ

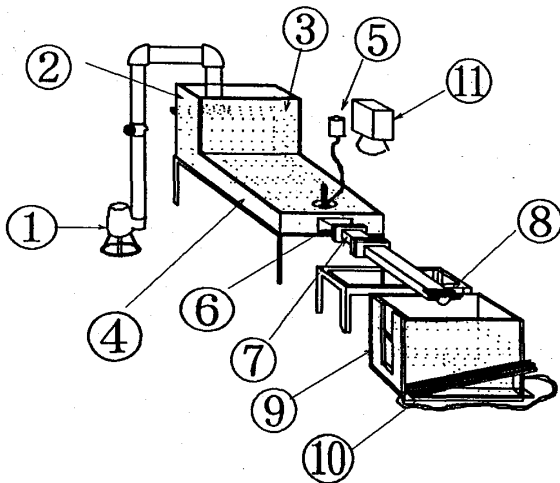


図1 実験装置の概要

れているノズル [6] は三次元に絞られており、縮流比が約18である。これによって、ノズル下流に接続されている測定部で非常に乱れが小さく、一様な流れが得られるようになっている^{8) 9)}。測定部 [7] は透明アクリル板でできており、幅100mm、高さ50mmの長方形断面をしている。供試翼はノズル出口から下流50mmに翼前縁がくるようになっており、迎え角は可変である。この測定部における流動状況は上部に置かれたビデオレコーダ及びカメラ [11] によって観測される。測定部下流には長さがおおよそ1mの直管部 [7] があり、出口に流量調整用のダンパ [8] が付いている。ダンパを出た流れは、流量測定用ボックス [9] に流れ込み、そこで流量を測定する。ここでは四角せきを用いた流量の測定^{10) 11)}を行っており、水面高さは傾斜マノメータ [10] で測定している。

供試翼は図2に略図を示す3種類であり、いずれも翼弦長Cは60mm、スパン長さLは50mmである。NACA0008翼は、対称翼で最大厚みは、前縁から30

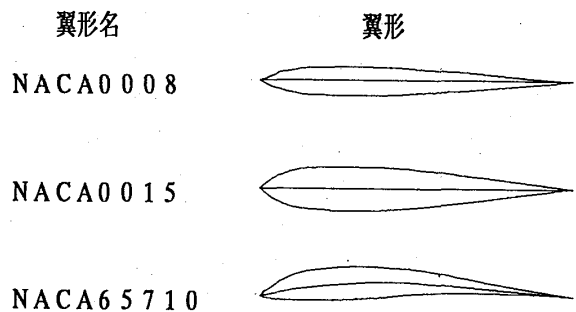
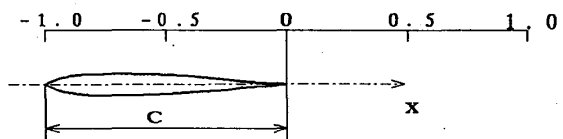
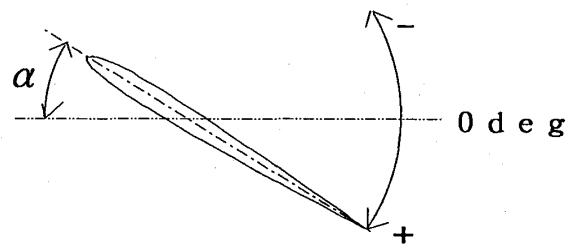


図2 供試翼



(a) 流れ方向座標



(b) 迎え角

図3 座標及び迎え角の取り方

%の位置で翼弦長の8%の4.8mmである(以後この翼を08翼と呼ぶ)。また、NACA0015翼も厚みが15%で9mmと異なる以外は08翼と同様になっている(以後15翼と呼ぶ)。NACA65710翼は、最大厚みが翼弦長の10%の6mmであり、さらに最大反りが2.3mm付いた非対称翼となっている。また、流れ方向に対する座標及び迎え角の取り方については図3に示している。

実験では、測定部流速 V を0.096m/s, 0.31m/s, 0.51m/sおよび2.3m/sに変化させてその影響を調べた。それぞれの流速でのレイノルズ数 $Re(=VC/\nu)$ は、翼弦長 C を代表寸法に取ると約5450 ($V=0.096$ m/s), 16300 ($V=0.31$ m/s), 26900 ($V=0.51$ m/s)および120000 ($V=2.3$ m/s)である。 $V=0.096$ m/s, 0.31m/s, 0.51m/sに関しては、測定部上面からビデオカメラで観察した。また $V=2.3$ m/sに関しては、かなり流速が速くビデオカメラによる観察が困難なため、

測定部の側面にストロボを、上面に光学カメラを固定し写真撮影を行った¹²⁾。撮影は、ストロボスピードを1/1800秒にして、カメラは絞り2.8シャッタースピード30秒、使用フィルムはASA400を用いた。

また、吸い込み式風洞¹³⁾を用いて熱線流速計による翼後縁近傍の後流の速度変動の周波数特性および主流に直角方向に翼後縁から0.5m離れたところで騒音を測定した。なお風洞でのレイノルズ数は約120000である。

4. 実験結果および考察

4.1 周波数特性

図4は、騒音のスペクトル分布の迎え角による変化を調べたものである。図(a), (b)はそれぞれNACA0008翼(以下これを08翼と呼ぶ)とNACA0015翼(15翼)である。図(a)の08翼では $\alpha=0^\circ$ で離散周波数騒音(DFN)の発生が見られない。 $\alpha=1^\circ\sim3^\circ$ では

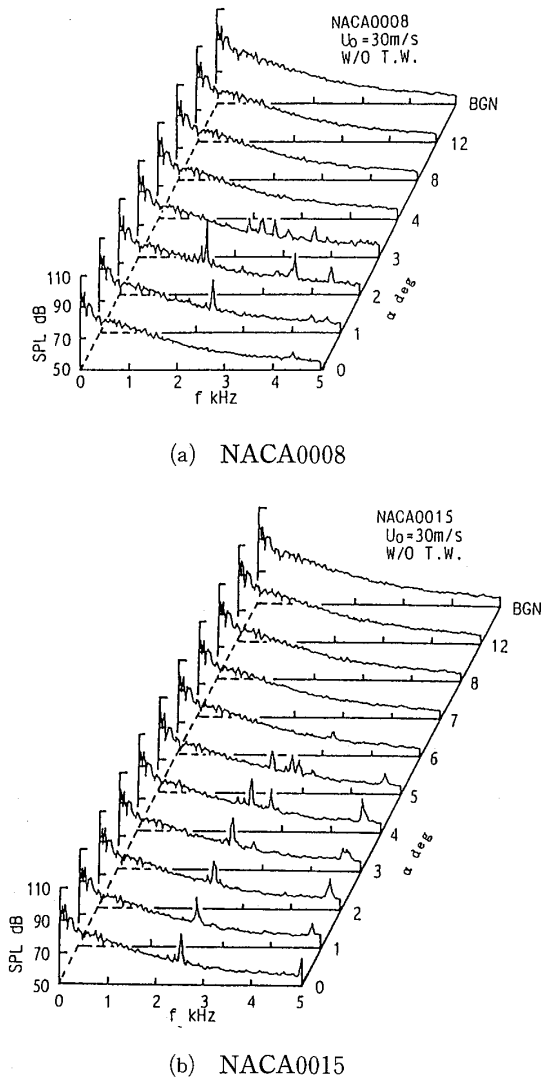


図4 騒音のスペクトル分布の迎え角による変化

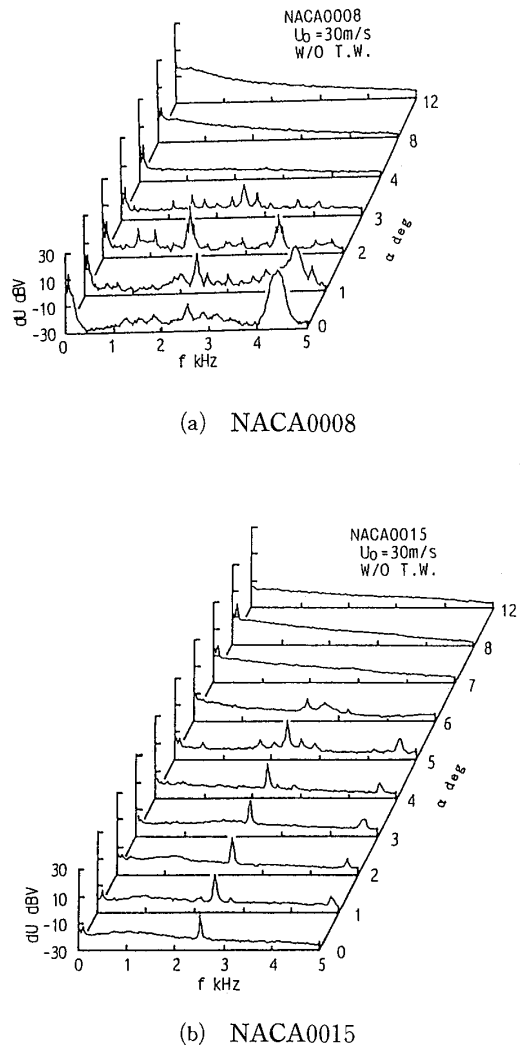


図5 後流速度変動のスペクトル分布の迎え角による変化

$f = 1 \sim 4$ kHz にピークが見られ DFN が発生している。また、その周波数は迎え角により大きく変化している。 4° 以上では DFN は見られない。図(b)の15翼では、迎え角が $0^\circ \sim 5^\circ$ の小さい場合に $f = 2.3$ kHz に顕著なピークが現れ DFN が発生している。また迎え角による DFN の周波数変化はあまりない。

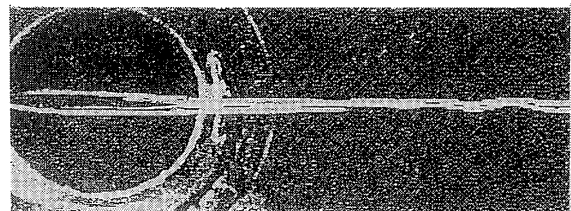
図5は後流中の最大速度変動の位置における速度変動のスペクトル分布を示している。図(a)の08翼では、DFN の鋭いピークが速度変動に対応して現れているのがわかる。図(b)の15翼でも、DFN の発生とよく対応してピークが現れている。このように翼形翼から発生する DFN が、翼まわりの流動状況、特に後縁近傍の流れの変動現象と密接に関係していることがわかる。そこで、このような遷移レイノルズ数での翼まわりの流動状況について、次に可視化によって調べた。

4.2 流動状況

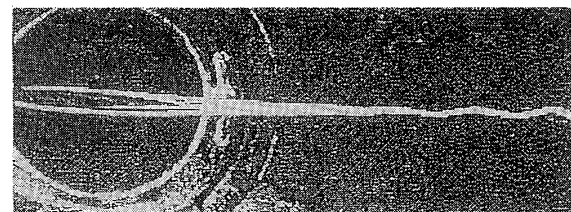
4.2.1 NACA0008翼の場合の流動様相

図6は $V = 0.096$ m/s ($Re = 5450$) における各迎え角での流れの可視化の結果を示している。図(a)は $\alpha = 0^\circ$ であるが、翼面上で流れは後縁付近まで付着した乱れのないきれいな様相を示している。後縁から下流では、翼上下面からのせん断流れがスムーズに下流へ続き、後縁後方約 $X = 1.8C$ の所から振れ始めている。この場合は流れのレイノルズ数が低いため、翼後流せん断流れが完全には巻き上がっていない。図(b)の $\alpha = 2^\circ$ の場合には、 $\alpha = 0^\circ$ の場合とほとんど変わらないが、振れ始めの位置が約 $X = 1.4C$ とわずかに後縁に近づいている。これは迎え角が付いて翼の上下面の流れがわずかに非対称となったために、上下それぞれの後流せん断流れの流速分布が異なり、両者のバランスが $\alpha = 0^\circ$ の場合より壊れやすくなったためである。図(c)の $\alpha = 4^\circ$ では、迎え角がさらに大きくなるために翼上面の負圧面側では、流れが最大厚み付近（翼前縁から $0.3C$ ）からはく離している。これに応じて、翼の後縁では翼上下面の両せん断層の間に死水領域が広がっており、この部分から、すなわち後縁直後からせん断層が振れ始めている。この場合は、 $\alpha = 2^\circ$ の場合のような上下両せん断層のスムーズな合流ではなく、後縁直後の死水領域でそれぞれのせん断層が巻き上がって後に両せん断層が衝突している。またカルマン渦の巻き上がりも明確である。図(d)の $\alpha = 7^\circ$ の場合は、上面側では前縁から流れはく離し、せん断層が大きく巻き上がっている。上面側翼上では、はく離領域に逆流が現われ、また下流にはカルマン渦が見えるものの $\alpha = 4^\circ$ に比べるとかなり乱れていることがわかる。

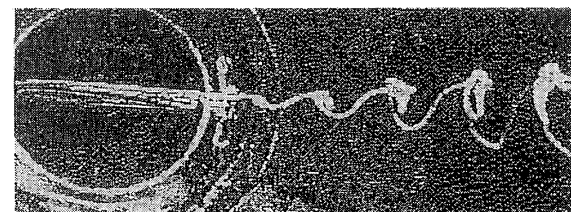
図7は、 $V = 0.31$ m/s ($Re = 16300$) において各迎え角での流動様相を示している。図(a)の $\alpha = 0^\circ$ では、流速が増加したことによって図6(a)と比べて後流の振れ始めがかなり後縁に近いところから始まっているのがわかる。これは流速が増加してレイノルズ数が高くなり流れが乱れやすくなったためである。図(b)の $\alpha = 4^\circ$ になると、図6(c)のような後流渦のきれいな巻き上がりでなく、翼上面側は翼前縁ではく離した流れがせん断層を形成してそのまま後縁まで流れたり、後縁前方で再付着したりする不安定な流れとなっている。このため後流渦があまり明確でなくなっている。図(c)の $\alpha = 7^\circ$ になると、翼上面の前縁からの流れは一旦はく離した後、はく離後の圧力低下量が大きいため、すぐ後方で再付着している。それから後縁までは乱流境界層が形成されている。この前縁近傍の層流はく離のバブルを一般にはく離泡と呼ぶ。この後、後縁まで付着



(a) $\alpha = 0^\circ$



(b) $\alpha = 2^\circ$



(c) $\alpha = 4^\circ$



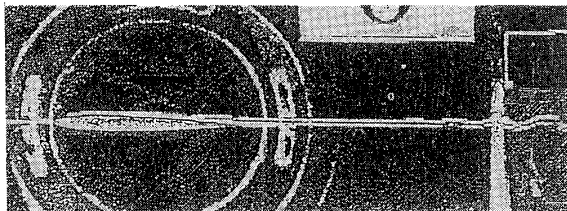
(d) $\alpha = 7^\circ$

図6 NACA0008翼の各迎え角における流動状況
($V = 0.096$ m/s)

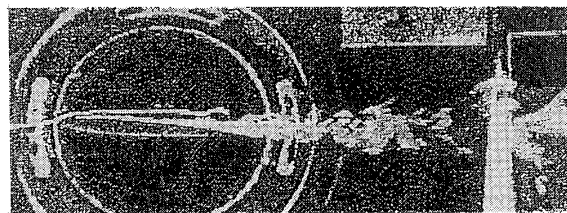
した乱流境界層は、その厚さがかなり厚くなっている。後流は後縁直後から乱れており、規則的な渦放出を観察することはできない。このことは、秋下らが提案したはく離泡と規則的変動現象との関連性¹⁴⁾を否定するものである。

図8は $V=0.51\text{m/s}$ ($Re=26900$) における迎え角での流動様相を示している。図(a)の $\alpha=0^\circ$ の場合、約 $X=1.0C$ から振れ始めている。図6や図7に比較して同じ迎え角においても流速が速くレイノルズ数が大きくなるにつれて、後縁に近い方へ移動していることがわかる。また振れ方もより明確になっている。図(b)の $\alpha=2^\circ$ では、後縁直後からせん断層の巻き上がりが生じている。この場合は、翼上面側の境界層は翼弦長の半分付近からはく離せん断層を形成している。このせん断層はそのまま後縁直後の巻き上がりへと続いている。図(c)の $\alpha=3^\circ$ になると、翼上面の流れは翼後縁近くでしばしば再付着し、後縁付近では乱流境界層が形成されようとしている。後流の規則的渦放出は生じているものの流速が遅い場合のように渦中心が明確でない。図(d)の $\alpha=5^\circ$ になると、翼前縁近くではく離泡が生じており、またその下流では後縁まで付着した乱流境界層が形成される。後流にはすでに規則的な放出渦を観察できなくなっている。

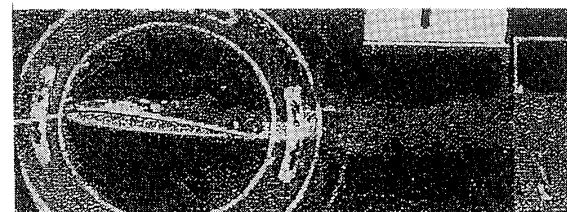
さらに流速を $V=2.3\text{m/s}$ ($Re=120000$) と増加させた場合の各迎え角における流動様相を図9に示す。この場合は、図4や図5のスペクトル分布とほぼ同じレイノルズ数になっている。この流速になるとビデオカメラによる観察が困難であるためストロボ光源を使用しカメラによる撮影を行った。図(a)は $\alpha=0^\circ$ の場合であるが、翼面上の流れは、 $\alpha=0^\circ$ における他の流速(図6, 7, 8)と同様、後縁付近まで付着した乱れのないきれいな様相を示している。後流の振れは、後縁後方約 $X=0.1C$ の翼後縁に非常に近い位置で始まっている。またその振れは、後縁後方約 $X=0.5C$ まで続きその後、明確なカルマン渦の巻き上がりが生じている。このように $\alpha=0^\circ$ の場合、レイノルズ数の増加とともに後流の振れ始めの位置が下流から後縁へと近づくが、いずれの場合も翼面上は乱れのないきれいな流れとなっており、後縁直後では翼上下面のせん断層がス



(a) $\alpha=0^\circ$

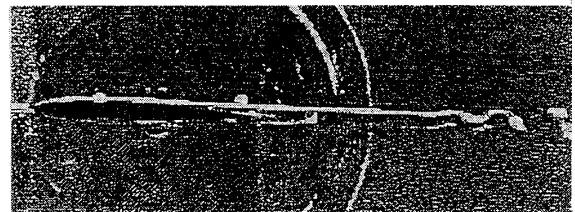


(b) $\alpha=4^\circ$

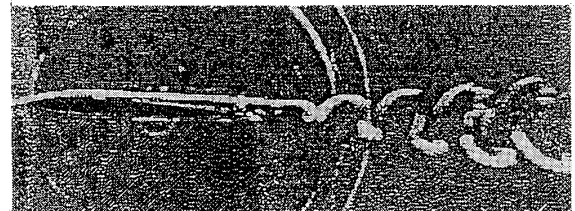


(c) $\alpha=7^\circ$

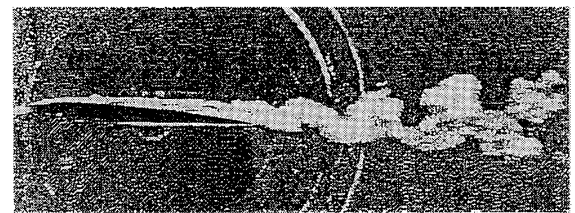
図7 NACA0008翼の各迎え角における流動状況
($V=0.31\text{m/s}$)



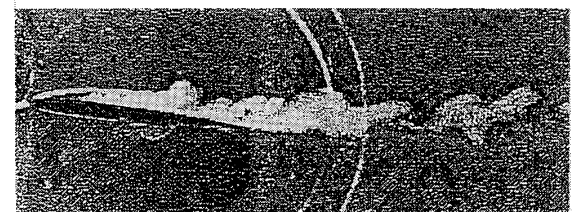
(a) $\alpha=0^\circ$



(b) $\alpha=2^\circ$



(c) $\alpha=3^\circ$



(d) $\alpha=5^\circ$

図8 NACA0008翼の各迎え角における流動状況
($V=0.51\text{m/s}$)

ムーズに後縁へとつながっている。図(b)の $\alpha=1^\circ$ の場合は、翼上面では前縁から約 $0.4C$ ではく離している。翼後縁付近では翼上下両せん断層の間に死水領域を形成し翼後縁直後からせん断層が振れ始めているのがわかる。また下流での巻き上がりは図8(b)の場合と比べるとかなり崩れてきているのがわかる。図(c)の $\alpha=4^\circ$ の場合は、翼面上で $\alpha=0^\circ, 1^\circ$ のような付着したきれいな流れではなく翼上面の前縁近くにはく離泡を生じている。さらに再付着後は後縁までかなり大きな乱れが発生し境界層が発達していることがわかる。翼後縁下流では上面側の乱れた流れと、下面側の全面付着流れが衝突している。ここで、上面側ではかなり乱れた

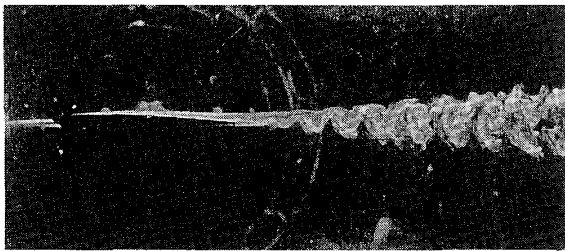
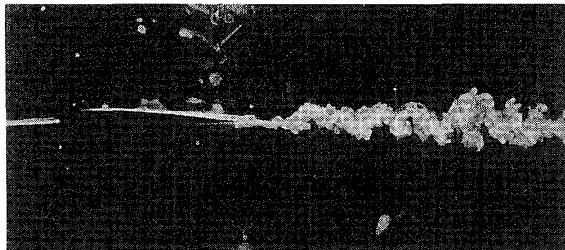
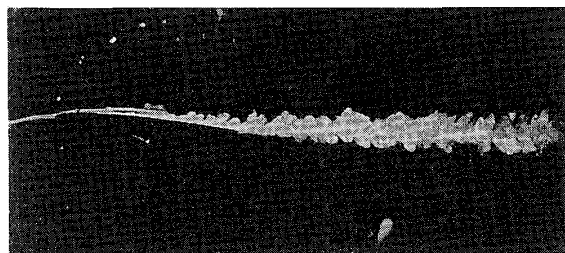
(a) $\alpha=0^\circ$ (b) $\alpha=1^\circ$ (c) $\alpha=4^\circ$ (d) $\alpha=7^\circ$

図9 NACA0008翼の各迎え角における流動状況
($V=2.3\text{m/s}$)

ものとなっているが、下面側では薄い境界層が発達して、後流中に強い放出渦を示す巻き上がりが所々に見られる。このことは、翼面上の流れの状態が後流の流動状況に大きく影響を及ぼしていることを示している。さらに下流に見られる後流渦の流れ方向間隔が $\alpha=0^\circ, 1^\circ$ に比べて狭くなっており、その周波数が高くなっていると考えられる。図(d)の $\alpha=7^\circ$ の場合になると、翼上面の流れは前縁直後にはく離泡を形成し再付着してすぐにかかなり厚い乱流境界層が形成されている。この場合は図(c)と比べると染料が境界層の全体に均一に広がっており、かなり拡散が進んでいることがわかる。この迎え角になると翼面上からの乱れは下流まで続き境界層内の乱れが広範囲にわたる周波数を含むために、後流では規則的な放出渦は見られずDFNも発生しない。

4.2.2 NACA0015翼の場合の流動様相

15翼の場合は08翼に比べ翼面形状の曲率が大きくなっている。そのために翼表面近傍での流動状況が異なることが予想される。

図10は $V=0.096\text{m/s}$ ($Re=5450$)の場合の各迎え角における流動様相を示している。図(a)の $\alpha=0^\circ$ の場合は、08翼では後流の振れ始めが後縁のかなり下流から

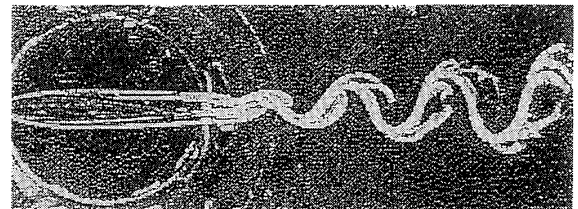
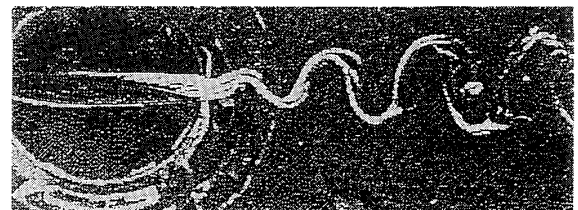
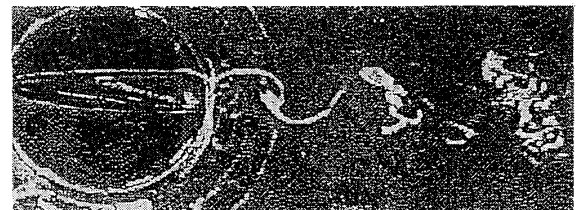
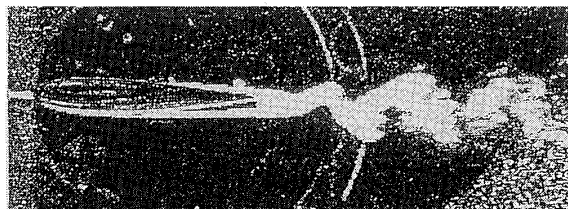
(a) $\alpha=0^\circ$ (b) $\alpha=2^\circ$ (c) $\alpha=7^\circ$

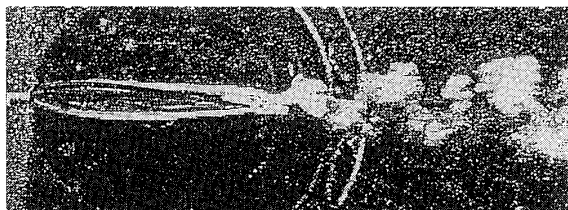
図10 NACA0015翼の各迎え角における流動状況
($V=0.096\text{m/s}$)

起こっていたが、15翼では後縁直後から生じている。この場合には、翼面上の境界層が最大厚み付近から層流はく離を起こし、はく離せん断層を形成している。このせん断層は、後縁部分に形成される死水領域直後から巻き上がっている。従って翼上下面のせん断層がスムーズに交わることなくそれぞれが巻き上がった後に衝突している。またこの巻き上がりに対応してそれぞれのせん断層も振れている。図(b)は $\alpha=2^\circ$ の場合である。この場合は翼下面側流れのはく離は明確でないが、上面側で最大厚み付近から層流はく離を起こし後縁へと続いている。ここで後流渦の巻き上がりの際に、一部の流体が死水領域内部へ逆流している。この後流渦の巻き上がりは上下へ大きく振れており渦がかなり強いことを表している。図(c)は $\alpha=7^\circ$ の場合であるが、翼上面の流れは前縁直後から層流はく離を起こしている。レイノルズ数が大きくないために、このせん断層は、あまり拡散せず翼後縁付近へと続きそこで後流渦へと巻き上がっている。翼上面側は大きな死水領域が形成される。翼上面と下面の流れの非対称性が著しいために、後流渦はあまり整った形をしていない。

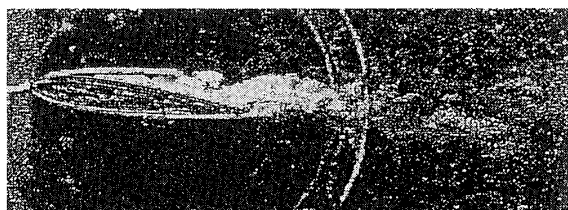
図11は、 $V=0.51\text{m/s}$ ($\text{Re}=26900$)における各迎え角での流動様相を示している。図(a)の $\alpha=0^\circ$ では、境界層が翼中央付近からはく離してせん断層を形成した後



(a) $\alpha=0^\circ$



(b) $\alpha=2^\circ$

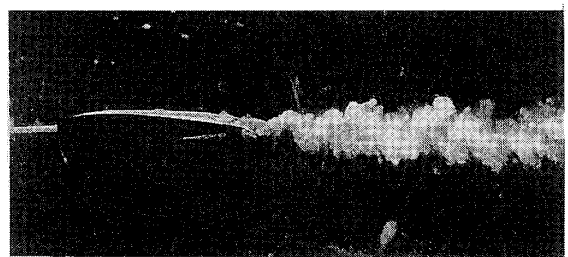


(c) $\alpha=7^\circ$

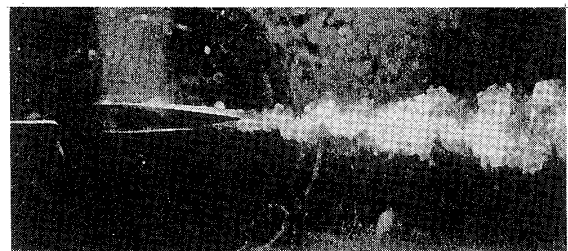
図11 NACA0015翼の各迎え角における流動状況
($V=0.51\text{m/s}$)

縁まで続いている。この場合は、せん断層が図10(a)の場合に比べ乱れており後縁から巻き上がっている。後流渦の形成があるものの核部分はあまり明確でなくなっている。図(b)の $\alpha=2^\circ$ の場合は、 $\alpha=0^\circ$ の場合よりさらに壊れた後流渦の放出が見られる。図(c)の $\alpha=7^\circ$ の場合には、翼上面側のせん断層が後縁前方から巻き上がっており、そのために翼上面のはく離領域に逆流が見られる。後縁でまきあがったせん断層は、翼に当たって安定はしないものの再び付着したような流れとなっている。このために後流の規則的渦放出は明確には見られない。

図12は、さらに流速が増加した $V=2.3\text{m/s}$ ($\text{Re}=\dots$)



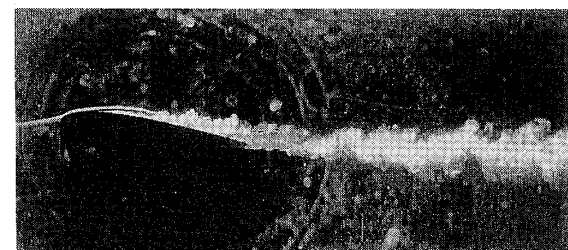
(a) $\alpha=0^\circ$



(b) $\alpha=1^\circ$



(c) $\alpha=4^\circ$



(d) $\alpha=7^\circ$

図12 NACA0015翼の各迎え角における流動状況
($V=2.3\text{m/s}$)

120000)における各迎え角での流動様相を示している。図(a)は $\alpha=0^\circ$ の場合であるが、図9(a)の08翼の $\alpha=0^\circ$ の場合では翼面上で流れは後縁まで付着したきれいな流れであったのに対し、15翼では境界層が最大厚み付近からはく離して、そのまま後縁まで続いている。しかも後縁前方からせん断流れが乱れ始めている。そのため後流渦は形成されるものの渦の拡散が速く核部分はあまり明確でなくなっている。図(b)の $\alpha=1^\circ$ では、図10, 11のような翼上面側でははく離とは異なり、翼後縁前方約 $X=0.3C$ で翼下面側流れがはく離しせん断層を形成している。後縁下流ではだいぶ形が崩れているものの後流渦が後縁直後から巻き上がっている。図(c)の $\alpha=4^\circ$ の場合も、翼下面側でははく離流れが後縁後方まで続いている。その後明確な後流渦が見られる。翼上面側では最大厚み付近から境界層がはく離して巻き上がっていることがわかる。これはそのまま流れるのではなく、翼面に沿い下面側との干渉によって規則的な周期性を持って発生している。図(d)の $\alpha=7^\circ$ の場合には、翼上面側は前縁近くにはく離泡を形成しており、その後方では翼後縁まで乱流境界層が発達している。このために、後流渦は明確には見られずかなり崩れた状態を示している。

4.2.3 NACA65710翼の場合の流動様相

次に反りがある場合の流動様相の変化を見る。図13は、 $V=0.096\text{m/s}$ ($Re=5450$)について各迎え角での流動様相を示している。図(a)の $\alpha=-7^\circ$ では、翼の上面は乱れが見られずきれいな層流境界層が発達している。一方翼下面の流れは翼前縁からはく離しており大きなはく離領域が形成されている。ここで下側せん断層がすぐに巻き上がりかなり大きな渦を形成している。また翼面上では後縁から前縁方向へ翼面に沿って逆流している。このように翼下面の流れがかなり乱れているので、後流に規則的な渦放出を観察できない。図(b)の $\alpha=-5^\circ$ になると、翼下面の流れは前縁からはく離している。しかし迎え角の大きさが小さいためにはく離したせん断層と翼との間のはく離領域が図(a)に比べてかなり狭い。せん断層はすぐに巻き上がることなく、翼後縁近くまで流れている。この場所で上面側の流れと干渉して巻き上がり、明確な規則的な渦放出が後流に観察できる。図(c)は $\alpha=-4^\circ$ とわずかに迎え角が変化した場合の流動様相である。この場合は、翼まわりの流れは翼上下面ともに後縁まで付着している。これが後縁下流へとそのまま滑らかに続いて後流渦の巻き上がりはかなり後方まで見られない。この流れは、図(d)の $\alpha=0^\circ$ まで続く。それが図(e)の $\alpha=1^\circ$ にな

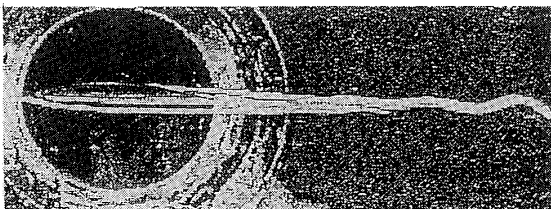
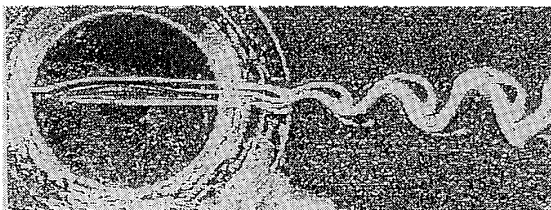
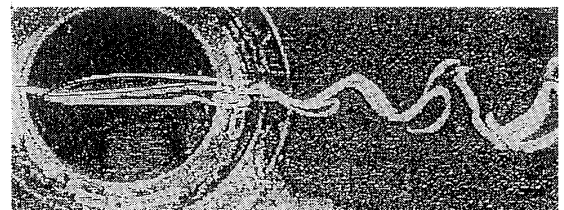
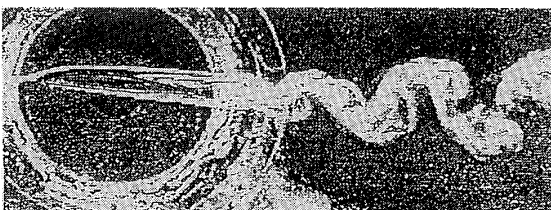
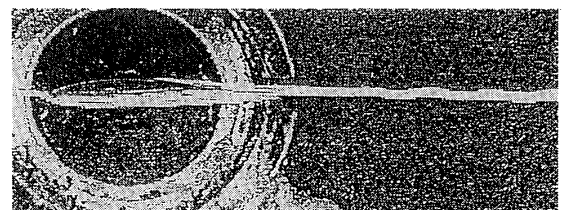
(d) $\alpha=0^\circ$ (a) $\alpha=-7^\circ$ (e) $\alpha=1^\circ$ (b) $\alpha=-5^\circ$ (f) $\alpha=7^\circ$ (c) $\alpha=-4^\circ$

図13 NACA65710翼の各迎え角における流動状況

(V=0.096m/s)

ると、今度は、翼上面側の最大厚み付近からはく離し下面側が付着している。このはく離のために後縁からせん断層が巻き上がり、規則的な後流渦放出が発生している。この渦放出は、迎え角が大きくなるとともに明確となる。図(f)の $\alpha=7^\circ$ になると、規則的な渦放出はあるものの、図(e)のような流跡線が細くつながった様相は見られない。後縁死水領域でせん断層が巻き上がる際に乱れ放出渦の中心が明確でない。さらに迎え角が大きくなるとこの乱れが次第に顕著になり規則的な渦放出が観察できなくなる。

図14は、 $V=0.51\text{m/s}$ ($Re=26900$) の場合である。図(a)の $\alpha=-7^\circ$ では、 $V=0.096\text{m/s}$ の場合とあまり変わらず、翼下面の流れが前縁からはく離し、下面のはく離領域から後流にかけて乱れた流れが観察できる。この現象は $\alpha=-3^\circ$ まで続き、図13(b)の場合のような下面はく離から明確な後流渦が形成されることはなか

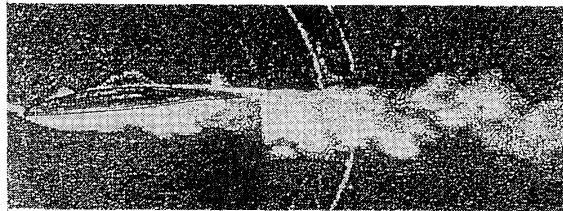
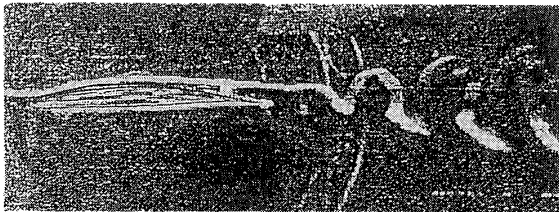
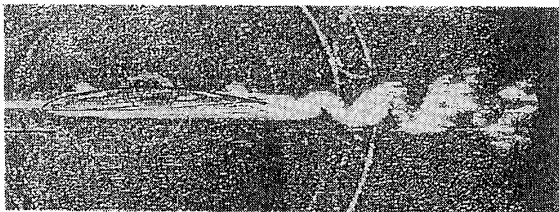
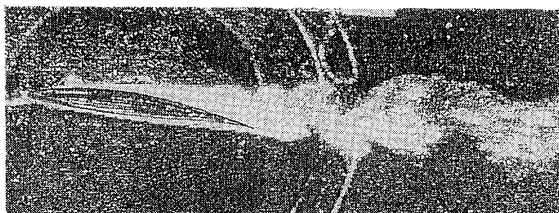
(a) $\alpha=-7^\circ$ (b) $\alpha=-2^\circ$ (c) $\alpha=0^\circ$ (d) $\alpha=7^\circ$

図14 NACA65710翼の各迎え角における流動状況
($V=0.51\text{m/s}$)

った。図(b)の $\alpha=-2^\circ$ になると、図13では $\alpha>0^\circ$ で現れていた翼上面側での流れのはく離が現れてくる。このため翼後縁に死水領域が生じて、その後方に規則的な渦の放出が現れる。また翼下面の流れも完全な付着流れとなっておらず、翼上下面のせん断層は、後流渦の放出に応じて上下に振れている。図(c)の $\alpha=0^\circ$ では、図(b)と同様に規則的な後流渦が発生している。しかし、染料が拡散して渦中心があまり明確ではない。これより迎え角が大きくなる、すなわち $\alpha>0^\circ$ になると、翼上面側では流れが前方からはく離し翼面上にはく離領域を形成している。この場合は、図13に比べて5~6倍程度レイノルズ数が大きくせん断層がかなり乱れて

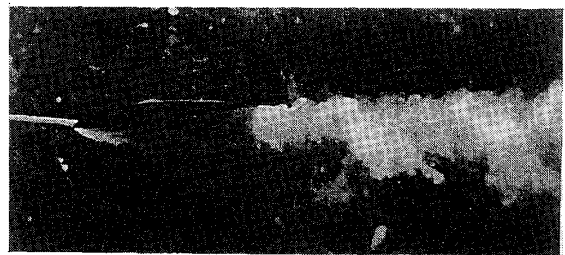
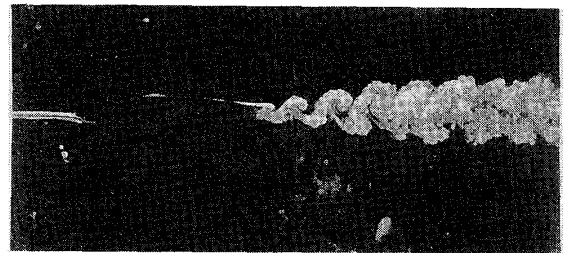
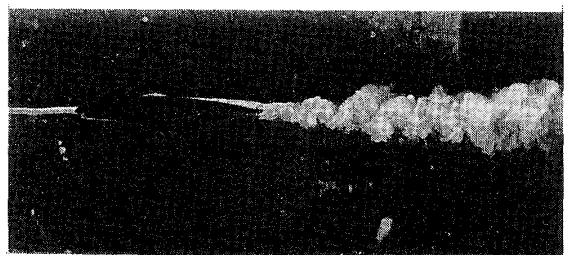
(a) $\alpha=-7^\circ$ (b) $\alpha=-2^\circ$ (c) $\alpha=0^\circ$ (d) $\alpha=7^\circ$

図15 NACA65710翼の各迎え角における流動状況
($V=2.3\text{m/s}$)

いる。(図(d)の $\alpha=7^\circ$ 参照)。迎え角がかなり大きく $\alpha > 9^\circ$ になると、それまではく離していた翼上面側の流れが急に付着する。これは翼前縁近傍で一旦はく離した流れがその後方で再付着し、そこにはく離泡が形成され、その後は乱流境界層が翼上に形成されるために後縁まで付着した流れとなるからである(図省略)。

図15は、 $V=2.3\text{m/s}$ ($\text{Re}=120000$)の場合の各迎え角での流動様相を示している。図(a)は $\alpha=-7^\circ$ の場合であるが、図14の場合と同様かなり乱れた流動様相となっている。図(b)の $\alpha=-2^\circ$ では、図14では翼上面ではく離していた流れが、レイノルズ数が増加して付着流れとなっている。図14で現われていなかった翼下面側のはく離が後縁前方から起こっており、翼後縁に続いている。翼後縁近傍では翼上下面からのせん断層が衝突して巻き上がり、明確なカルマン渦が観察される。図(c)の $\alpha=0^\circ$ では、翼上下面で最大厚み直後からはく離が生じせん断層を形成している。後流中にこのせん断層の巻き上がりがみられるもの図14(c)の場合と同様、その渦中心は明確でない。図(d)の $\alpha=7^\circ$ の場合では、翼下面では前縁からはく離し後縁まで続いている。翼上面では最大厚み付近からはく離し、その直後に再付着してはく離泡を形成し、後縁まで乱流境界層を形成しているのがわかる。このように反り付き翼の場合には、規則的な後流渦の発生が起こるのが $\alpha < 0^\circ$ の場合である。この場合後縁近くで比較的薄く、拡散していないせん断層が死水領域で巻き上がることによって後流渦が形成されることがわかる。

5. 結 論

層流から乱流へ変化する境界領域の流動条件において、一様流中に単独翼を置き、翼まわりの流動状況を可視化して流れの特徴を把握した。

1. レイノルズ数が、5000程度の低い遷移領域にある場合は、はく離せん断層もあまり乱れておらず後流渦が明確に形成される。一方、25000程度になると流れの乱れが大きくなるために後流渦の中心は拡散して明確ではなくなる。さらに、120000程度に大きくなる

と、翼面上では乱流境界層を形成し、その結果、後流でも乱れた流れとなる。

2. 翼厚みが薄く、後縁に広い死水領域が形成されない場合は、翼両面の流れが後縁でスムーズに後流へ連なり、後流渦(カルマン渦)の巻き上がりはかなり下流から起こる。この場合に巻き上がり位置は、レイノルズ数が増加するにつれて上流へ移動する。

3. レイノルズ数が約120000と大きい場合、迎え角が大きくなると、翼上面(負圧面)ではく離泡が周期的に発生し、その後乱流境界層を形成する。翼に反りがある非対称翼の場合は、対称翼に比べ $\alpha < 0^\circ$ の場合に後流にかなり明確なカルマン渦が見られる。

4. せん断層が巻き上がり、後流れから渦放出が行われる場合は、渦放出に対応した流れの変動が翼面上に生じることが予想される。

参 考 文 献

- 1) Abbot, I., H., and Doenhoff, A. E., Theory of Wing Section, (1949), Dover.
- 2) 守屋, 空気力学序論, (1962), 培風館, pp. 95.
- 3) 日本機械学会編, A 5 水力学及び流体力学, 機械工学便覧 (1987), pp. 107.
- 4) 深野, ほか 3 名, 機論, 51-469 B (1985), pp. 2828.
- 5) Tam C.K.W., J. Acoust. Soc. Am., 55-6 (1974), pp. 1173.
- 6) Fink M.R., J. Airer., 12-2 (1975), pp. 118.
- 7) Wright S.E., J. Sound & Vibr., 45-2 (1967), pp. 167.
- 8) 伊藤, 小林, ターボ機械, 9-4 (1981-4), pp. 211.
- 9) 平川, 宮崎, 平成 4 年度卒業論文 (1993), pp. 28.
- 10) 日本機械学会編, A 5 水力学及び流体力学, 機械工学便覧 (1987), pp. 2243.
- 11) 東元, 伯川, 平成 5 年度卒業論文 (1994), pp. 5.
- 12) 大宅, 平成 6 年度卒業論文 (1995), pp. 11.
- 13) 大宅, 平成 6 年度卒業論文 (1995), pp. 6.
- 14) 秋下, 機論, 47-424, B (1981), pp. 2243.