選択的吸い込みによる横流れ不安定場の制御*

江上 泰 広*¹, 小 濱 泰 昭*²

Control of Crossflow Instability Field by Selective Suction System

EGAMI Yasuhiro and KOHAMA Yasuaki

A full turbulent transition process is created on a yawed flat plate using a displacement body system in a wind tunnel. It was found that high frequency secondary instability drives the crossflow dominant boundary layer into a full turbulent state. Taking into account such transition structures, effective control of the flow field to delay the transition is possible. That is, by placing grooving line suction holes along each streamwise crossflow vortex, and as is causing selective suction in the low momentum flow, the appearance of the secondary instability is successfully delayed turbulent transition. This suction system also has an advantage over a uniform system in that the amount of suction air volume required to control the flow field is much less than in uniform suction. Thus, a great deal of energy needed for flow control is saved. We also attempted to determine the most appropriate condition for selective suctioning.

Key Words: Turbulent Transition, Three-Dimensional Boundary Layer, Aircraft Drag Reduction, Crossflow Instability, Secondary Instability, Selective Suction Technique

1. 緒 言

次世代旅客機を開発する上で、ペイロードの向上を図ることは重要なデザインコンセプトの一つとなっている。現在の航空機では、遷音速領域での造波抵抗を減少させるために主翼に後退翼が採用されている。しかし後退翼表面上の境界層は、圧力勾配の方向と主流の方向が異なるためにねじれた形となり三次元境界層を形成する。その結果三次元化した境界層の乱流遷移は、二次元的な境界層のそれと比べて早まることが知られており、この現象は横流れ不安定性と呼ばれ⁽¹⁾⁽²⁾様々な研究がなされてきている。

航空機の更なる抵抗軽減のためには、このような後退翼上の流れを層流制御する必要がある。しかしこの三次元境界層を層流化する技術は非常に難しく、未だ有効なものは考案されていない。有効な制御を実現するためには、翼表面で起こる横流れ不安定性による三次元境界層の乱流遷移のメカニズムを十分に理解しなければならず、そのため多くの研究者がこの問題に実

験^{(3)~(5)}、数値解析^{(6)~(8)}、の両面から精力的に取り組んできている。

これまで我々は、Saric & Yeats⁽⁹⁾によって考案された上部に圧力印加物体を設置した後退平板モデルを導入し、横流れ不安定性に関する実験を行ってきた⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾。この実験モデルを用いると、測定面が平板であるため壁面の曲率は考慮しなくて済み、後退翼モデルでは薄かった境界層厚さも制御できる。また同じ流れ条件を保ったまま流速を変化させることができるなど、測定する上で後退翼モデルと比べて様々な利点を有している。何よりも流れ場を制御しようとするときに極めて便利である。我々はこの実験モデル上に層流から乱流に至る全ての遷移過程を再現し、遷移過程の最終段階を熱線流速計と可視化法を併用して詳細に調べてきた。その結果、横流れ不安定性が支配的な境界層における乱流遷移は、その遷移最終段階で生じる高周波二次不安定性によって引き起こされていることが分かった⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾。そして、得られた流れの遷移機構の情報を基に遷移構造を考慮した選択吸い込みを行い、横流れ不安定場の有効制御を試みている。その結果一様吸い込みの場合と比較し、より少ないエネルギーで効果的に高周波二次不安定性の発生を遅らせることに成功した。

* 原稿受付 1996年11月22日。

*¹ 正員、東北大学大学院(〒980-77 仙台市青葉区片平2-1 1)。*² 正員、東北大学流体科学研究所。

Figure 1. Experimental set-ups and coordinate system

本研究では、さらに様々な条件下における選択吸い込みによる制御を行い、最適な吸い込み条件を明らかにすることを目的とした実験を行っている。

2. 実験装置および測定方法

図1に実験装置の概略を示す。後退角 45° の圧力印加物体と平板との組み合わせにより、単調減少する圧力分布を作りだしている。圧力勾配の方向は主流と 45° の角度を成しており、その結果三次元境界層が形成される。このような装置により後退翼上の境界層と類似の横流れ不安定性が支配的な境界層を形成し、条件を調整することにより完全乱流までの全遷移過程を作り出すことができた。圧力印加物体にはNACA0015翼形を用い、その弦長は600mm、スパン長は1520mmである。圧力印可物体の迎角および平板に対する位置は任意に変化させることができ、従って任意の圧力分布を平板上に印加することができる。平板の弦長は $C=800\text{mm}$ であり、前縁には20:1の修正楕円形状⁽¹²⁾を採用し、前縁部と平板との間で曲率の接続が滑らかになるように設計されている。このようにすることで、横流れ不安定性以外の攪乱の侵入を防ぐことができる。平板表面には48個の静圧孔が弦長方向に設けられており、平板表面の圧力分布を正確に測定することができる。また風洞壁に発達する境界層による前縁汚染⁽¹³⁾を防ぐために、後退平板の上流側の端は、図1に示すように風洞壁から150mm離して設置した。さらに無限翼を模擬するため

Figure 2. Details of the suction system

に、ポテンシャル流線の曲率を有する側板を平板と圧力印加物体の間に設置した。また用いた吸い込み装置の詳細図を図2に示す。吸い込みには、(c)図の[A]一様吸い込み、[B]選択吸い込みの2種類を用いた。[A]、[B]の吸い込み孔はともに直径0.5mm、孔間隔は1mmピッチである。全ての吸い込み孔は(a)図に示すように横流れ渦軸に沿って設けてある(主流に対して 17.7°)。[B]の選択吸い込みでは、吸い込み孔4列(スパン方向に3.5mm)を渦間隔に合わせスパン方向に11mm周期に設けてある。

吸い込みは層流領域である $x/C=0.20\sim0.30$ の位置と遷移領域である $x/C=0.65\sim0.75$ の位置の2箇所で試みた。取り込まれた空気は図(b)のように平板裏側に取り付けられたプレナムチャンバーからパイプを経て遠心ファンにより吸い込まれ、流量計によりその量が計測さ

Figure 3. Cross sectional measurement of velocity and turbulence intensity profiles for different suction surfaces.

(velocity contour line step: 5% of U_e ,
Bandpass filter range : 1.25-3kHz for disturbance f_2 ,
 $x/C=0.79$, $U_\infty=12.3\text{m/s}$, Suction volume $0.045\text{m}^3/\text{m}^2\cdot\text{s}$,
■■■■■ indicates suction positions)

れる。

測定には東北大学流体科学研究所の低乱熱伝達風洞⁽¹⁴⁾を用い、測定部を開放型にして使用した。測定部上流端のノズル吹き出し口は対辺距離が1010mmの正八角形で、測定部の長さは2070mmである。

流速の測定には熱線流速計を用い、I型の熱線プローブより得られた信号は、A/D変換されてコンピューターに取り込まれ処理される。そして必要に応じてFFTアナライザーにより解析される。熱線流速計による流速測定は0.7%以内の不確かさで校正されている。また熱線プローブは、コンピューター制御された1/100mmの精度を有する三次元トラバース装置によってトラバースされる。実験は主流速度 $U_\infty=12.3\text{m/s}$ (平板の弦長 C 基準のレイノルズ数 $Re = U_\infty C/\nu = 6.9 \times 10^5$)で行っている。このときの主流の乱れ強さは、モデルを取り付けた状態で $\sqrt{u'^2}/U_\infty=0.09\%$ である。乱流遷移点は $U_\infty=12.3\text{m/s}$ の場合で $x/C=0.77$ 付近である。

3. 結果および考察

3・1 遷移領域の吸い込み これまで乱流遷移を遅らせ、粘性抵抗を減少させるために様々な層流制御が試みられてきた。層流境界層の一樣吸い込みによる制御もその中の一つである。しかし流れ場を一樣に吸い込むためには膨大なエネルギーが必要であり、また三次元境界層の場合、必ずしも良好な結果が得られると

Figure 4. FFT analysis results of velocity fluctuations at a crossflow vortex ($U_\infty=12.3\text{m/s}$, $x/C=0.79$, $z=1.2\text{mm}$)

いう報告はなされていない。そこで我々は、流れ場の遷移機構を考慮に入れた選択吸い込みを行うことにより、少ない吸い込み量で効果的な制御を行うことを試みた。当初、縦渦の構造を考慮に入れて選択吸い込みを行うと、その吸い込みの影響を受けて縦渦はスパン方向に位置を変えてしまい、意図した流れ場の吸い込みができず、結局有効に制御することができないのではないか、との危惧がなされていた。しかしこれまでの実験から、実験条件が同じであれば渦は極めて安定して常に一定の場所に発生するという事実が判明している。これまでの研究結果⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾より、流れ場を乱流遷移へと導くのは高周波二次不安定性 f_2 であることがほぼ明らかになっている。横流れ渦の運動によって壁面近傍の低速流塊が持ち上げられ、高速流にさらされることにより境界層の中層、渦の巻き上がり部分に高せん断層がスパン方向に周期的に形成される。この高せん断層内の変曲点形不安定性により f_2 が形成されると流れ場は急速に非定常性を有しはじめ、 f_2 が8~10周期発生した後に完全乱流へと遷移してしまう。このような事実から、持ち上げられる低速流塊を阻むことにより f_2 の発生を遅らせることが出来るものと考えられる。これらのことを考慮して、この渦の巻き上がり部分の根元に選択的に吸い込み孔列を設け、この部分に集められる低速流塊のみを選択して吸い込むことを試みた。

実験は主流速度12.3m/sで行なった。この条件での自然に高周波二次不安定性 f_2 が発生する位置は $x/C=0.73$ 付近であり、乱流遷移位置は $x/C=0.77$ 付近である。吸い込みを行なう位置は $x/C=0.65\sim 0.75$ である。 f_2 の発生点は吸い込み位置中央よりやや後方である。つまり高周波二次不安定性 f_2 の発生前から、 f_2 が発生し乱流遷移にいたる直前までの遷移領域で吸い込みを行なっていることになる。また吸い込み量は $0.03\text{m}^3/\text{m}^2\cdot\text{s}$ 、一本の渦当たりでは $3.3 \times 10^{-3}\text{m}^3/\text{s}$ である。また吸い込み速度は一樣吸い込みの場合が $0.025U_\infty$ 、選択吸い込みの場合が

Figure 5. Time-averaged wall normal velocity profiles.
($U_\infty=12.3\text{m/s}$, $x/C=0.79$, $y=-26\text{mm}$)

$0.07U_\infty$ である。

図3は $x/C=0.79$ において得られた等速度線図と高周波二次不安定性 f_2 の分布であり、一様吸い込みと選択吸い込みによる制御の効果を比較したものである。図は下流側から上流を見たものであり、境界層内の横流れ速度成分は図の右向きに分布している。

(a)図は吸い込み無しの場合であり、横流れ渦はかなり大きく成長し、 f_2 も広い範囲に広がっている。また等速度線の間隔も広がり、境界層厚さも厚くなっていることから、乱流遷移直前の状態であることが分かる。それに対し制御を行った(b), (c)図では、高周波二次不安定性 f_2 の発生が大幅に抑えられている。しかし(c)図の選択吸い込みではほぼ発生が抑えられているが、(b)図の一様吸い込みではまだ f_2 が一部に大きく広がっている。これより、一様吸い込みよりも選択吸い込みの方が同じ吸い込み量でより効果的に高周波二次不安定性 f_2 の発生を抑えることができることが分かる。この理由は、先にも述べた通り縦渦の巻上がり部分に存在する低速流塊を選択的に吸い込んでおり、制御のために投入したエネルギーを有効に高せん断層の発達阻害に使用しているために、より効果的に制御できたものと考えられる。

またこの吸い込み孔自体は、吸い込まない状態では表面粗さとなり、流れ場を乱していると思われる。本研究では孔の直径が 0.1mm と一般に用いられる吸い込み孔より大きい、その理由は、遷移領域の厚い境界層位置で制御することを考えているためである。一様吸い込みの場合は選択吸い込みの場合に比べ吸い込み孔の数が多。このことも選択吸い込みの方が f_2 の乱れが少ない一因となっている可能性がある。また一様吸い込みでは横流れ渦の形があまり崩れないで保持されているのに対して、選択吸い込みでは、吸い込みによって横流れ渦の形が変形しており、同じ吸い込み量でもより横流れ渦の構造に影響を与えていることが分かる。

図4は $x/C=0.79$, $y=-26\text{mm}$, $z=1.2\text{mm}$ において熱線流

Figure 6. Time-averaged spanwise velocity profiles
($U_\infty=12.3\text{m/s}$, $x/C=0.79$, $z=0.8\text{mm}$)

速計によって測定された時間速度波形の周波数解析結果である。吸い込み無しの場合はほぼ乱流に近い周波数分布を示している。これに対して一様吸い込み、選択吸い込みの場合では高周波成分がより有効に減少できており、高周波二次不安定性 f_2 が発生し始めた遷移前の状態になっていることが分かる。

図5は $x/C=0.79$, $y=-26\text{mm}$ において測定された z 方向の境界層速度分布を示したものである。境界層の速度分布の変曲点形速度勾配は、この $y=-26\text{mm}$ で最も強くなっている。図3の等速度線図からも判断できるが、吸い込みにより低速流塊の巻上がりが抑えられ、かつ変曲点高さが低くなっている。そして、選択吸い込みの方が集中して吸い込んでいる分、より変曲点の高さが低くなっている。また変曲点での z 方向の速度勾配 du/dz も選択吸い込みの方が小さくなっており、高せん断層の形成が抑制されている。高周波二次不安定性 f_2 は、この変曲点での du/dz が強いほど、変曲点高さが高いほど発生し易いと考えられるので⁽¹⁵⁾、これよりも選択吸い込みの方が優れていることが分かる。

図6は $x/C=0.79$, $z=0.9\text{mm}$ において測定されたスパン方向の境界層の速度分布を示したものである。選択吸い込みの場合はスパン方向の速度勾配 du/dy も緩やかになっており、この測定結果からも変曲点形不安定性である高周波二次不安定性 f_2 が発生しにくくなっていることが分かる。また選択吸い込みの場合、は吸い込みにより高速域、低速域の位置がスパン方向にいく分シフトしている。選択吸い込みの場合は、吸い込み量を増やし過ぎると過度に流れ場を変形させてしまい、新たに変曲点が形成され、逆に f_2 の発生が促進されてしまうことが分かっている⁽¹¹⁾⁽¹⁶⁾。試行錯誤の結果、図6の選択吸い込みの場合の吸い込み量 $0.045\text{m}^3/\text{m}^2\cdot\text{s}$ はその限界値に近いものだと考えられる。

図7は、各吸い込み法の違いによる遷移点の変化を吸い込み量をパラメータとして示したものである。ただし $x/C=0.925$ 以降は圧力印加物体の下流側になってし

Figure 7. Transition characteristics for distributed suction ($U_{\infty} = 12.3 \text{ m/s}$)

Figure 8. Cross sectional measurement of velocity and turbulence intensity profiles for distributed suction.

(velocity contour line step: 5% of U_e ,
Bandpass filter range : 1.25-2kHz for disturbance f_2 ,
 $x/C=0.79$, $U_{\infty}=12.3 \text{ m/s}$, Suction volume $0.03 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{s}^2$
■ indicates suction positions)

まうため測定不能となっている。また遷移点は速度波形, FFT周波数解析結果を参考にしつつ形状係数より決定した。これより, 選択吸い込みの方が一様吸い込みに比べてより少ない吸い込み量で遷移点を下流に移動させていることが分かる。例えば $x/C=0.925$ に遷移点が到達する吸い込み量でみると, 選択吸い込みは一様吸い込みの $1/3$ 以下の吸い込み量で同様の制御効果を得ている。

3・2 吸い込み位置を変えた場合(スパン方向) 選択吸い込みを行う場合は, 適切な吸い込み位置を選ぶことが重要である。図8はスパン方向に吸い込み位置を多少変化させた場合の制御の結果を比較したものである。諸条件は図3の場合と同じである。(a)図のposition Aは, 縦渦の巻上がり部分のやや左側(図3と同位置), (b)図のposition Bは巻上がりのやや右側である。図より, 巻上がりのやや左側に設置したposition Aがより効果的であることが分かる。高周波二次不安定性 f_2 は壁面近傍の低速流塊が横流れ渦によって持ち上げられ, 高速流にさらされることにより境界層の中層, 縦渦の

Figure 9. Arrangements of line suction holes

巻き上がり部分に, "高せん断層プラス変曲点"形の分布がスパン方向に周期的に形成されることによって生じることは既に述べた。position A は低速流塊の横流れ成分が横流れ渦によって持ち上げられる巻上がり自体を吸い込むと共に, 低速流塊を持ち上げられる前に予め吸い込んでしまっている。これによってposition Bは, 渦の巻上がりを吸い込んでいるだけで低速流塊を有効に吸い込んでいない。よって高せん断層の形成を防ぐためには, 横流れ速度により縦渦下部に移動して来る低速流塊を, 渦運動によって巻き上げられる前に吸い込むことが重要である。

3・3 吸い込み位置を変えた場合(コード方向) 吸い込みによる制御では, 遷移領域のどの段階で吸い込むか, というのも重要な要素となる。図9はここで用いた選択吸い込みの配置を示したものである。ここでは, 自然な状態で高周波二次不安定性 f_2 が $x/C=0.70$ 付近で発生するように主流速度を 13.5 m/s に調整した。この場合の遷移位置は $x/C=0.73$ 付近である。よって図3, 図8(a)で用いた選択吸い込みを(a)standardとすると, このちょうど真ん中で f_2 が発生することになる。(b), (c), (d)はそれぞれ f_2 の発生前 ($x/C = 0.65 \sim 0.70$), 発生点 ($x/C = 0.675 \sim 0.725$), 発生後 ($x/C = 0.70 \sim 0.75$) の各段階で吸い込むことになる。図10はその結果を示している。 $x/C=0.76$ における等速度線図と高周波二次不安定性 f_2 の分布を示したものである。この時の吸い込み量は $0.06 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ である。これらの図より, (b)発生前, (c)発生点, (d)発生後の順に f_2 の発生が抑えられ, 良い効果を示すことが分かる。以上の結果より, 吸い込みによる制御を行う場合は f_2 が発生し, 非線形成長が始まる直前の線形成長段階で行うのがより効果的であることが分かる。一旦非線形成長が始まると, 容易には層流制御

Figure 10. Cross sectional measurement of velocity and turbulence intensity profiles for distributed suction.

(velocity contour line step: 5% of U_e ,
Bandpass filter range : 1.25-2kHz for disturbance f_2 ,
 $x/C=0.76$, $U_\infty=13.5\text{m/s}$, Suction volume $0.06\text{m}^3/\text{m}^2\cdot\text{s}$)

Figure 11. Transition characteristics for line suction holes ($U_\infty=13.5\text{m/s}$)

ができないものと思われる。

図11はコード方向の吸い込み位置の違いによる乱流遷移点の変化を示したものである。この図からも、 f_2 発生前に吸い込んだ(b)図の方が他の位置に比べて明らかに優れていることが分かる。他のものに比べて1/2から1/3以下の吸い込み量で同様の効果を得ることができる。また(a)図と(c)図は、ともに吸い込み位置の真ん中で f_2 が発生しているにも関わらず、(c)図の方が優れている。(a)と(c)の違いは、吸い込み孔列の長さの違いによって生じる吸い込み速度である。

このように同じ吸い込み位置、同じ吸い込み量であ

Figure12. Cross sectional measurement of velocity and turbulence intensity profiles for distributed suction using uniform suction holes.
(velocity contour line step: 5% of U_e ,
Bandpass filter range : 1.25-2kHz for disturbance f_2 ,
 $x/C=0.79$, $U_\infty=12.3\text{m/s}$, ■■■■■ indicates suction positions)

Figure 13. Transition characteristics for distributed suction ($U_\infty=12.3\text{m/s}$)

っても、吸い込み速度が速くなると((c)図は(a)図の2倍)より効果的な制御が行えたのは、吸い込み速度が増すことでより境界層の高いところまで影響を及ぼすことができたためであると考えられる。

3・4 前縁付近の吸い込み これまでは高周波二次不安定性 f_2 が発生するかなり下流での吸い込み制御について詳細にみてきた。しかし過去の吸い込みによる制御は前縁付近に適用されるものが多かった。そこで比較のために、前縁付近 $x/C=0.2\sim0.3$ で一様吸い込みを行う制御を試みた。この段階ではまだ横流れ渦はほとんど成長していない。図12はこの結果を示した

$x/C=0.79$ における等速度線図と高周波二次不安定性 f_2 の分布を示したものである。(a)図の吸い込み無しでは、吸い込み孔が表面粗さとなり流れ場が乱されてしまったため、すでに完全乱流となっている。前縁付近ではまだ境界層は薄くおよそ2.7mmであり、後方での吸い込みに比べより壁面の粗さの影響を大きく受け易くなっているためと考えられる。このため、吸い込み孔を設置しなかった場合よりも遷移が早くなっている。

図13は前縁付近での一様吸い込みによる遷移点の変化を示したものである。吸い込み量 $0.045\text{m}^3/\text{m}^2\cdot\text{s}$ で自然遷移と同じ所まで戻っている。しかし吸い込み量 $0.06\text{m}^3/\text{m}^2\cdot\text{s}$ 以上では後方の一様吸い込みとはほぼ同様の制御の効果をあげていることが分かる。

前項において吸い込みによる制御は線形段階で行うのが良いという結果が得られたが、境界層が薄く粘性形不安定性(T-S波)が生じ易い前縁付近で制御を行う際には、吸い込み孔の大きさを十分小さくすると同時に表面粗さによる悪影響を打ち消す以上の吸い込みが必要であると思われる。横流れ渦がほとんど成長していない段階での制御は選択吸い込みを適用できず、一様吸い込みで行わなければならない、これは表面粗さによる悪影響の点から不利である。よって三次元境界層の制御は、ある程度横流れ渦が成長した線形成長過程で選択吸い込みを行うのが良いと考えられる。

4. 結 言

以上、横流れ不安定性が支配的な三次元境界層の遷移機構からの情報をもとに、選択吸い込みによる横流れ不安定場の制御を行った。以下に得られた知見を記す。

(1) 低速流塊が横流れ渦によって巻き上げられる部分を選択的に吸い込むことにより、効果的に三次元境界層遷移を制御することができた。高せん断層の形成を阻害し高周波二次不安定性 f_2 の発生を遅らせることができ、遷移点は下流へと移動した。この選択吸い込みによる制御によって一様吸い込みの場合と比較して1/3以下のエネルギーで同等の効果を得ることができた。

(2) 選択吸い込みを行うときは、横流れ渦の巻き上げ部分を吸い込むと共に、巻き上げられる前に横流れ成分(低速流塊)を吸い込んでしまうことが重要である。

(3) 吸い込みによる制御を行うときは、横流れ渦が線形成長をしている段階で行うことが効果的であることが判明した。高周波二次不安定性 f_2 が発生した後、非線形成長段階で制御を行うと効果が激減する。

(4) 横流れ渦が成長していない前縁付近において、一様吸い込みによる制御を行ったところ、吸い込み孔が表面粗さとなり、有効な効果を得るためにかなりの吸い込み量が必要であった。吸い込みによる制御を行う場合は、吸い込み孔が流れ場に及ぼす悪影響を考慮にいれて、あまり早期に行わない方が良いと考えられる。

(5) 今後はさらに後退平板モデルを用いて適切な吸い込み条件を調べていく。また実機に適用する際には、遷移が前縁近傍で生じるので吸い込み孔が外乱の受容源になる可能性が考えられる。これらについては、より高いレイノルズ数のデータが取れる風洞を使用し、実機と同様の後退翼モデルを用いた実験を行い、確認していく必要があると考えられる。

文 献

- (1) Gray, W. E., *RAE TM Aero* 255, (1952).
- (2) Gregory, N., Stuart, J. T., Walker, W. S., *Phil. Trans. Roy. Soc. Lond.*, A 248 (1955), 155 - 199.
- (3) Kohama, Y., *Turbulent Management and Relaminarization*, Springer-Verlag, (1987), 19-23.
- (4) Radezlsky Jr., R. H., Reibert, M. S., Saric, W. S., Takagi, S., *AIAA Pap.*, No. 93-0070.
- (5) Takagi, S., Itoh, N., *Fluid Dynamics Research*, 14, (1994), 167 - 189.
- (6) Dallmann, U., Bieler, H., *AIAA Pap.*, No. 87-1337.
- (7) Meyer, F., Kleiser, L., Dallmann, U., *Proc. AGARD Symp. on Fluid Dynamics of Three-Dimensional Turbulent Shear Flows and Transition*, Turkey, (1988), 17-1-17-17.
- (8) Balakumar, P., Malik, M. R., *Theoret. Comput. Fluid Dynamics*, 3 (1991), 125-140.
- (9) Saric, W. S. and Yeates, L. G., *Laminar-Turbulent Transition*, Springer-Verlag, (1985), 429 - 437.
- (10) Kohama, Y., Onodera, T., Egami, Y., *Nonlinear Instability and Transition in Three-Dimensional Boundary Layers*, Kluwer Academic Publishers, (1996), 147-156.
- (11) 江上泰広, 小濱泰昭, 小野寺達也, 機論, 63-607, B (1997), 849-856.
- (12) Saric, W. S., Hoos, J., Kohama, Y., *College of Engineering and Applied Science Report*, Arizona State Univ., (1990), CEAS-CR-R-90191.
- (13) Poll, D. I. A., *Laminar-Turbulent Transition*, Springer-Verlag, (1989), 431-440.
- (14) Ito, H., Kobayashi, R., Kohama, Y., *Aeron. J.*, (1992), 141-151.
- (15) Kohama, Y., Fukunishi, Y., Wang, T., *JSME International J.*, 36 (1993), 74-79.
- (16) Myose, R. Y., Blackwelder, R. F., *AIAA J.*, 33 (1993), 1076-1080.

謝 辞

本研究を遂行するに際し、多大なる御協力を頂いた流体科学研究所技官 太田福雄氏、及び同付属工場技官 渡辺努氏、浅野和夫氏に感謝の意を表します。