

航空宇宙技術研究所報告

TECHNICAL REPORT OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TR-65

非定常境界層の安定に関する実験

小橋安次郎・恩地 瑛

1964年7月

航空宇宙技術研究所
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

既 刊 報 告

- FR-33 主翼繰返し荷重試験装置
Repeated Load Testing Rigs for Full Scale Aircraft Wing Structures 1962 年 12 月 竹内和之, 飯田宗四郎
小野幸一
- FR-34 高速軸流圧縮機の研究 (I)
—翼型と翼列の検討—
An Investigation of High Speed Axial Flow Compressor (I)
—The Selection of Compressor Cascade— 1963 年 1 月 松木正勝, 大山耕一
宮地敏雄
- FR-35 高速軸流圧縮機の研究 (II)
—単段試験装置の設計と全体性能—
An Investigation of High Speed Axial Flow Compressor (II)
—Design and Over-all Performance of a Single Stage Axial Flow Compressor— 1963 年 1 月 松木正勝, 宮地敏雄
大山耕一, 吉田 晃
西脇英夫, 岩部柱相
- FR-36 衝撃波風洞による表面熱伝達の実験
Studies of Surface Heat Transfer Using a Hypersonic Shock Tunnel 1963 年 1 月 和田 勇, 松崎利
- FR-37 Studies of the Flow in a Low Pressure Hypersonic Shock Tunnel Using an Electron-Beam Densitometer January 1963 Isamu WADA
- R-38 鋳鉄のような脆性材料からなる円板の回転強度
Strength of Rotating Discs of Brittle Material like Cast Iron 1963 年 2 月 佐藤和郎, 永井文雄
- R-39 高負荷燃焼器の研究 (第 I 報)
—その性能におよぼす各種因子の
影響の定性的考察—
A Study of High Intensity Combustor (I)
—Its Qualitative Analysis— 1963 年 2 月 大塚貞吉, 鈴木邦男
- R-40 胴体内圧繰返し荷重試験装置について
Repeated Load Testing Facility for Full-Scale Aircraft Fuselage Structures 1963 年 2 月 竹内和之, 川島矩郎
野原利雄
- R-41 輻射熱量計の較正
Calibration of Radiometer 1963 年 2 月 竹中幸彦, 江川幸一
小川 敏一
- R-42 非定常境界層の相似解とその安定
A Similar Solution of Unsteady Laminar Boundary Layer and Its Stability Characteristics 1963 年 7 月 小橋安次郎, 恩地 瑛
- R-43 超音速における操縦面の効きについて
On the Effectiveness of Control Surfaces in Supersonic Flow 1963 年 2 月 河崎俊夫
- R-44 高速翼列の実験について
(流入角の大きい減速翼列の予備実験)
Some Notes about the Effect of Tunnel Configuration and Testing Technique on Compressor Cascade Performance 1963 年 2 月 近藤 博, 藪田光弘
坂口 一, 山崎紀雄
- R-45 固有値問題 ($\sum \lambda^* A_r$) $x=0$ の数値解法
A Numerical Method for the Eigenvalue Problem ($\sum \lambda^* A_r$) $x=0$ 1963 年 4 月 戸川隼人
- R-46 翼の固有振動数に関する一解析法
On the Vibration Analysis of Aircraft Wings 1963 年 6 月 川井忠彦, 泉日出夫
戸川隼人, 林 洋一
- R-47 鋳鉄円板の回転破壊におけるコリオリの
力の影響
Influence of Coriolis' Force on the Burst of Rotating Disc of Cast Iron 1963 年 8 月 佐藤和郎, 永井文雄
- R-48 曲面に沿う境界層
Effects of Surface Curvature on Laminar Boundary-Layer Flow 1963 年 8 月 林 二 識
- R-49 高速軸流圧縮機の研究 (III)
An Investigation of High Speed Axial Flow Compressor (III) 1963 年 9 月 松木正勝, 宮地敏雄
大山耕一, 吉田 晃
西脇英夫, 岩部柱相
- R-50 境界収縮法による偏微分方程式の境界値問題の
数値解法
Numerical Method for Boundary Value Problems of Partial Differential Equations by Boundary Contraction 1963 年 9 月 樋口一雄, 能美 力

非定常境界層の安定に関する実験*

小橋安次郎**・恩地 瑛***

An Experimental Investigation of Stability Characteristics of Unsteady Laminar Boundary Layer

By Yasujiro KOBASHI and Akira ONJI

In order to determine a stability criterion of small disturbances in a boundary layer with a time-dependent outside flow, experimental studies have been carried out in a wind tunnel of a 20 cm×15 cm cross section, in which the flow speed was forced to oscillate sinusoidally around its mean value.

The results are summarized as follows:

The boundary layer velocity profiles and their stability characteristics vary with the phase of the outside flow, and are related to unsteadiness parameters $\Delta U/U_m$ and ω_x/U_m . As far as these parameters are small, the stability of the disturbances is related to the instantaneous boundary layer profiles.

記 号

- x : 流れの方向の座標
- y : 流れに直角な方向の座標
- t : 時 間
- U_0 : 境界層の外における x 方向の速度
- u : 境界層の内における x 方向の速度成分
- v : 境界層の内における y 方向の速度成分
- p : 圧 力
- δ : 境界層の厚さ
- δ^* : 境界層の排除厚
- ν : 動粘性係数
- R_x : 前縁からの距離 x を基準長さとしたレイノルズ数
- R_{δ^*} : 境界層の排除厚を基準長さとしたレイノルズ数

* 昭和 39 年 6 月 8 日受付

** 空気力学第二部

*** 空気力学第一部

ω : 正弦波流の振動数

ΔU : 正弦波流の変動速度の振幅

U_m : 正弦波流の平均速度

η : 無次元 y 座標 $\eta = \frac{y}{2} \sqrt{\frac{U_0}{\nu x}}$

β : 振動リボンの振動数

§ 1. ま え が き

境界層内の流れが層流であるか、乱流であるかによって物体の抵抗係数がいちじるしく異なることはすでによく知られている。また、飛しょう体の性能に大きな影響を与える境界層の剝離の現象、あるいは超音速流における境界層と衝撃波の干渉の現象なども、境界層が層流の場合と乱流の場合とでいちじるしく変る。

境界層内の流れが層流から乱流に移行する現象は遷移と呼ばれ、この機構を明らかにすることは実用上もきわめて重要なことであるが、また物理現象としても興味の深いものである。

境界層の外の流れが定常の場合における遷移の現象は、多くの人々によって詳しく調べられているが非定常の場合についてはあまり研究されていない。

一般に遷移現象の第一段階は、境界層内に発生した微小な攪乱の増幅から始まる。これは境界層の中の流れの安定性に関連して、Tollmien-Schlichting 波 (TS 波) と呼ばれるある特定の周波数範囲をもった攪乱が選択的に増幅されるためである。この場合、増幅される周波数と境界層のレイノルズ数との関係を安定特性といい、定常流の場合には Tollmien¹⁾, Lin²⁾ 等によって理論的に、また Schubauer-Skramstad³⁾ により実験的に調べられている。

著者等はさきに⁴⁾、境界層速度分布が時間的に相似を保つような流れについて解析を行ない、安定特性におよぼす外流の非定常性の影響を明らかにしたが、その結果によれば、外流の加速時には境界層の安定度は増し、減速時には減ずることが予想される。本報告は上述の関係を明らかにする目的で計画されたものであるが、ただ境界層速度分布が時間的に相似を保つような外流を実験的に得ることはきわめて困難であるので、単調に加速または減速する流れの代りに、外流が正弦波的に変化する場合について実験を行なうこととした。したがって、安定特性が理論の示すように速度分布のみによって決定されるという理論的保証はないけれども、その間には依然として強い関係があることが予想される。

試験は流れの速度が時間と共に正弦的に変動する風洞測定部に置かれた平板について行なわれ、定温度型熱線風速計によって境界層内速度分布 および 遷移特性の外流変動に対する関係を測定した。試験の結果、非定常性が十分弱い範囲では準定常の理論とよく一致することが明らかとなった。

§2. 実験装置

(1) 風 胴

実験は測定部断面 15 cm×20 cm, 長さ 120 cm の吹出式風胴を使って行なった。送風機は, 圧力水柱 200 mm のターボファンで 3.5 kW の超分巻整流子電動機により駆動される。送風機の吸込口には別に風量調節用の開閉弁があって, これによっても風速の調節ができるようになっている。送風機の下流には平行部があり, 4枚の案内翼とハニカム整流格子 (1.5 cm×1.5 cm) がそう入されている。平行部に続く拡散部は開き角約 27° で, 剝離防止のために, 40 メッシュのサラン製スクリーン4枚がそう入されている。集合胴部は断面 80 cm×80 cm, 長さ 30 cm で 44 メッシュのスクリーン4枚が張られている。縮流胴は断面内速度分布が一様になるように比較的長い絞り曲線をもった正弦波形で絞り比は 23:1 にとってある。測定部は長さ 120 cm で側壁は測定用ピトー管, 熱線風速計支柱のそ入移動が可能ないようにスリットを切った壁からできており, これら測定装置をそう入した場合の空気の漏洩を防ぐための密封がほどこされている。上面は測定部内部の観察が容易にできるようにガラス壁にしてある。測定部下流の吐出口には回転する円型板が置かれていて, シャッターの役目をしている。この板の形状は回転して風路を開閉する際の吐出口断面積が正弦波状に変化するように設計されており, ほぼ偏心楕円形の形状をもっている。回転板は 0.5 kW の誘動電動機に無段変速機を介して連結されており, 風速の変動を 0.5 c/s から 4 c/s の範囲で任意に変えることができる。また回転板と吐出口の間隔を調節することによって変動風速の振幅を変えることができる。

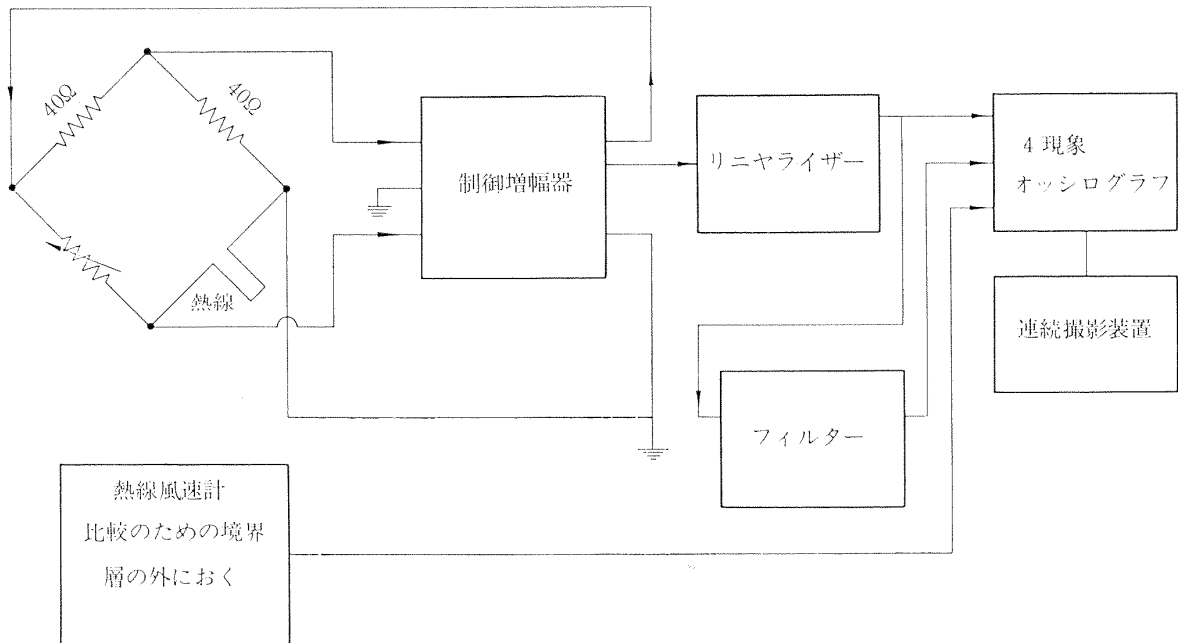
(2) 測定用平板

測定に用いられた平板は, 厚さ 1 cm, 長さ 100 cm のアルミニウム製で 20 cm の測定部断面の上下の壁面に固定されている。なお, 平板上の圧力勾配をなくするために, 測定部左右の壁は下流に向かって広げることができる。また平板の前縁は離心率 8 の楕円形に整形されている。平板前縁から 25 cm の位置に板面から 0.5 mm 離れた高さに, 厚さ 0.03 mm, 幅 3 mm の燐青銅リボンに 1 kg の張力を加えて張ってある。これは板の裏側のリボンの位置に置かれた 2 個の永久磁石のつくる磁場内において, リボンに流れる交番電流の周波数, 強さに応じて板に垂直な方向に振動し境界層に微小攪乱を与えるためのものである。

(3) 計測装置

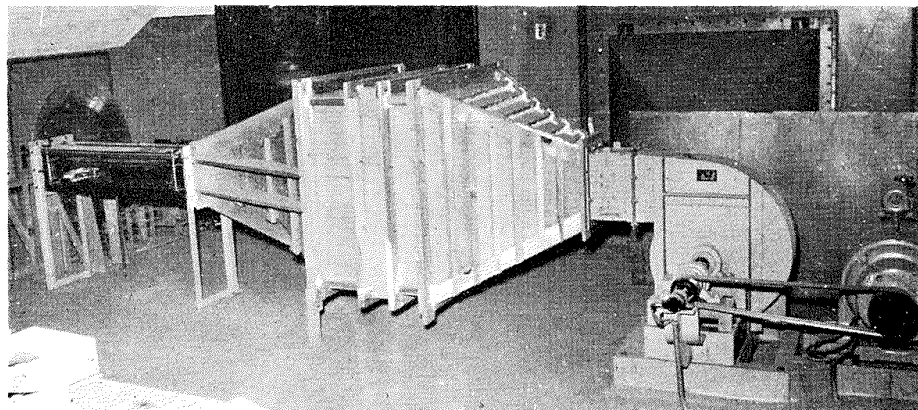
計測装置としては 2 個の定温型熱線風速計を使用した。これは電氣的に加熱された金属の細線の抵抗が風速の変動に応じて変化するのを自動的に制御して, 常に細線の温度が一定に保たれるよう電流補償を行なう制御部と出力を風速に対して線型化する線型化回路とからなり (回路の詳細は航

技研資料 TM-33 参照⁸⁾), 種々の校正装置, 洩波器等を付属する。第 1 図に装置のブロック図を示す。

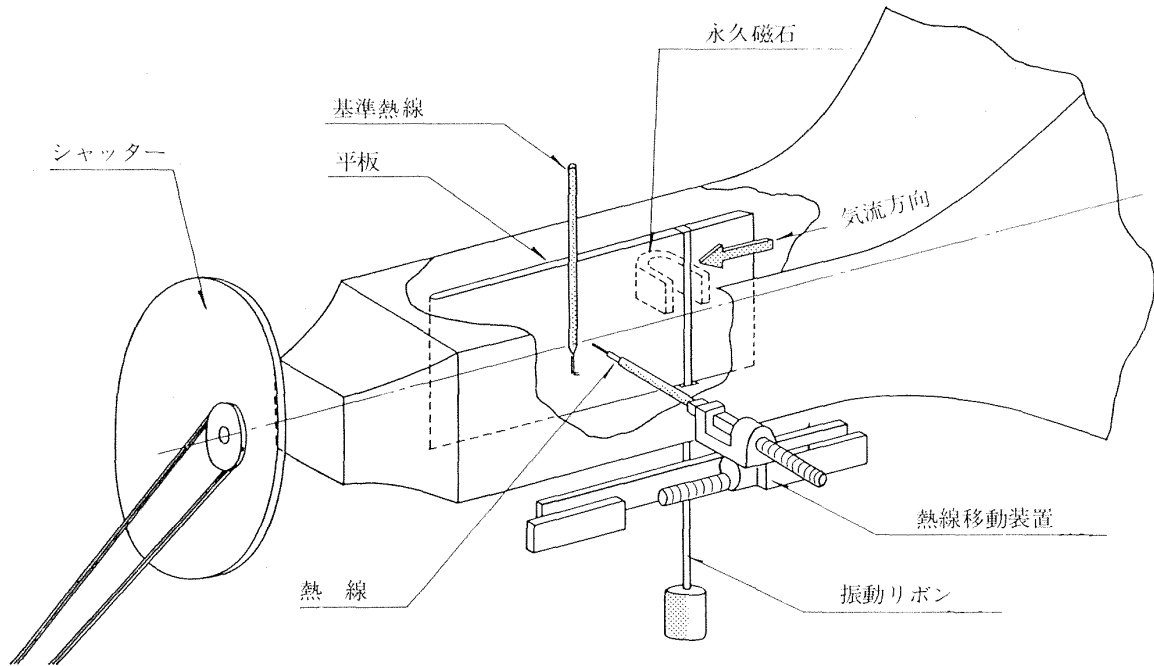


第 1 図 定温度型熱線風速計ブロック線図

使用した熱線は 5μ の白金線で, 銀を被覆したいわゆるオーラストン線から必要長さ (約 1 mm) を溶剥して使用した。熱線計の支柱は直径 1 cm の円柱で, 熱線は支柱頭部に埋め込まれた 2 本の絹針の先端に蟻付されている。支柱は壁面を貫いて支柱移動装置に支持されているが, 流れの方向には前縁から 10 cm と 80 cm の範囲を 1/10 mm, 流れに直角の方向には壁から 10 cm の範囲を 1/100 mm の精度で移動できるようになっている。第 2 図および第 3 図に装置全体の写真および略図を示す。



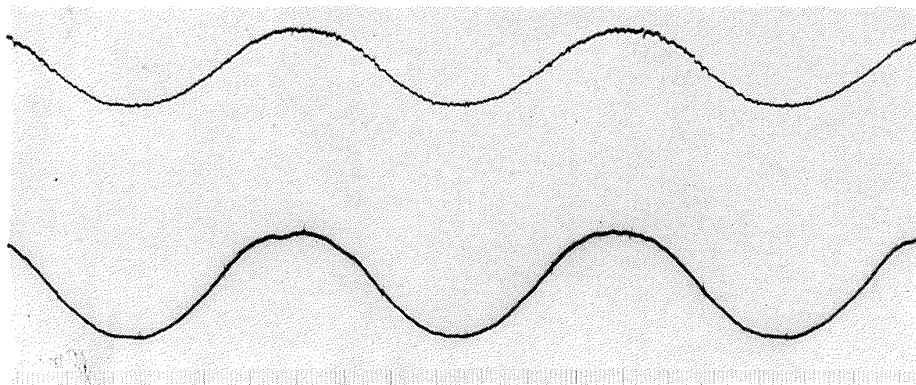
第 2 図 非定常風洞



第3図 実験 (b) 実験装置略図

§3. 測 定

(1) 速度分布 外流が時間的に変動する場合速度分布の形状を支配する因子は、レイノルズ数のほかに速度の振幅の変動率と加速の度合であることは簡単な次元解析から理解される。特に外流の変動が時間に対して正弦的である場合には、非定常性のパラメータとして $\Delta U/U_m$, $\omega x/U_m$ の二つをとればよいことが Moore⁵⁾ によって明らかにされた。ただし U_m は外流の速度の平均値, ΔU は速度の変動振幅, ω は変動周波数で, x は前縁からの距離である。本実験ではまず以上二つのパラメータをいろいろに変化させた場合に対する境界層内速度分布の測定を行なった。すなわち, 2

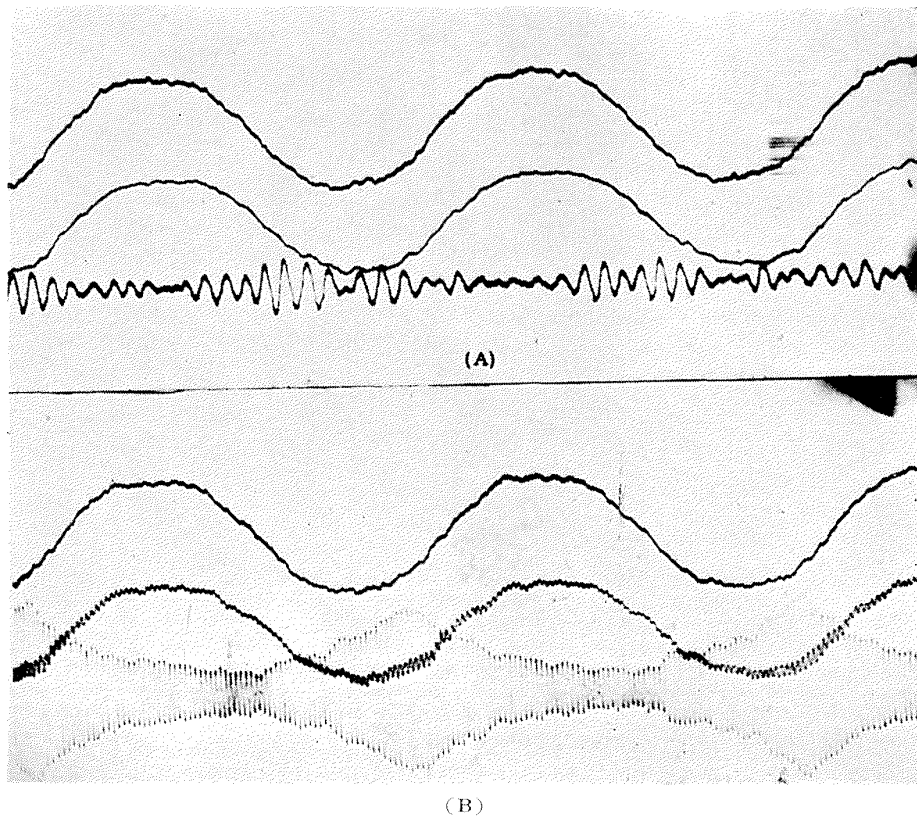


第4図 境界層速度分布測定記録

(上) 境界層外

(下) 境界層内

$$U_m = 5 \text{ m/s}, \Delta U/U_m = 0.05, \omega = 1 \text{ rad/s}$$



第5図 境界層内の乱れの時間的变化

(A) $\omega=40$ rad/s $\beta=60$ rad/s

(B) $\omega=40$ rad/s $\beta=300$ rad/s

いずれも、(上) 境界層外、(中) 境界層内、(下) 境界層内、帯域通過濾波器による。

個の熱線風速計のうち、1個を外流中に基準の位置におき、他の1個を平板に沿ういろいろの位置で板に垂直に移動させオシログラフの同時記録(第4図)から外流の変動の同一位相に対する速度を読み取り、速度分布を得た。第6図はこのようにして得られた測定結果の一例である。

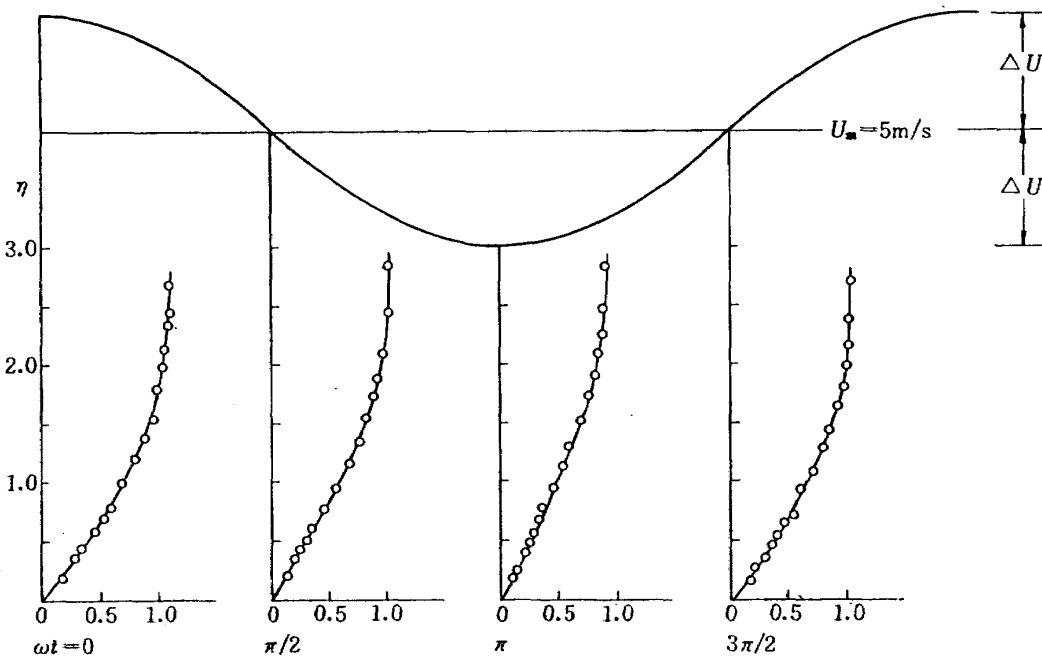
(2) 安定特性 境界層の安定特性は、なんらかの原因で発生した微小攪乱のうち特定の周波数をもったものが増幅されるか、あるいは減衰させられるかによって定義される。このような微小攪乱は自然にも依存し、また、周囲の音響的機械的攪乱によっても与えられるが、同一レベルの微小攪乱を広い周波数範囲にわたって系統的に与えることはきわめて困難である。したがって、この報告では加振りボン法によって燐青銅リボンに通ずる交番電流の電流値を一定にしておいて、周波数を広い範囲にわたって変化させる方法を取った。§2に述べた装置において、発振器により0.6アンペア程度の交番電流をリボンに通ずるとリボンは板に垂直に0.1mm程度上下振動する。この振動は境界層の流れの本質は変えないが、リボンの振動数に応じた攪乱を発生することになり、これが下流に流されるにしたがって、境界層の安定特性によってある場合には増幅され、またある場合には減衰する。したがって、リボン下流境界層内部に置かれた熱線風速計の出力には第5図のように外流の変動に応じた速度変動のほかに、リボンの振動による速度攪乱が重畳して現れてくる。第5図の

AおよびBの最下の線は浮波器を通して微小攪乱のみを記録したものである。

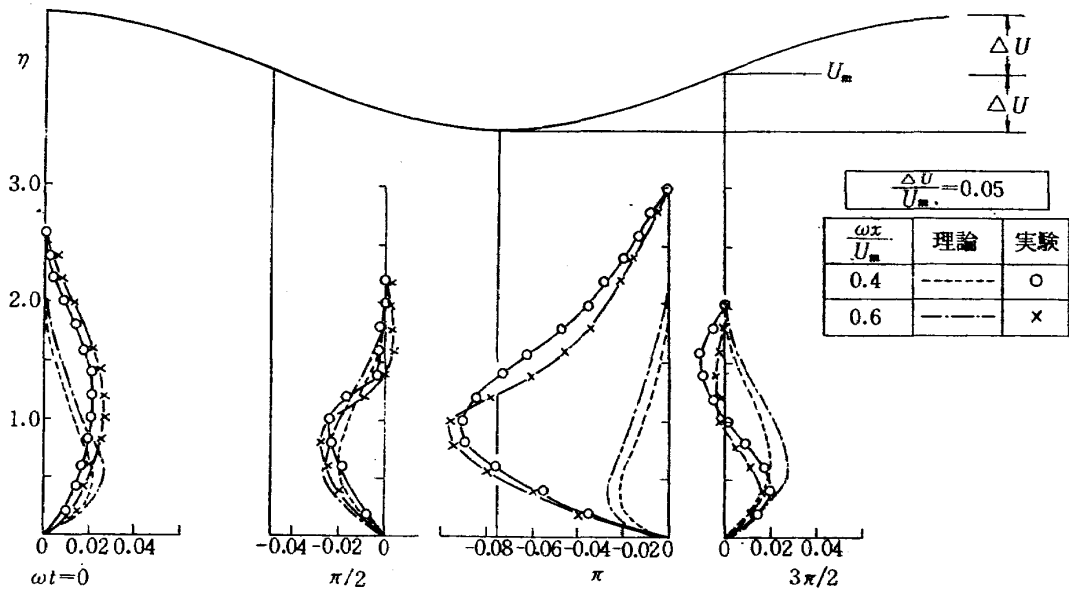
安定特性はこのような攪乱が時間的または空間的に増幅されるか、または減衰するかを調べればよく、本実験では、測定点の前後 25 mm の位置で同様な測定を行ない、外流の各位相において、攪乱の生長消滅の状況を調べた。なお第5図の攪乱の記録は、リボン位置から測定点までに達するまでの間に微小攪乱が増幅あるいは減衰した履歴を示すもので、外流の速度が同じでも加速時と減速時では攪乱の大きさが異なっているのは興味がある。ただこの1枚の記録からでは攪乱が増幅状態にあるか、あるいは減衰状態にあるかを判断することはできない。

§4. 実験結果

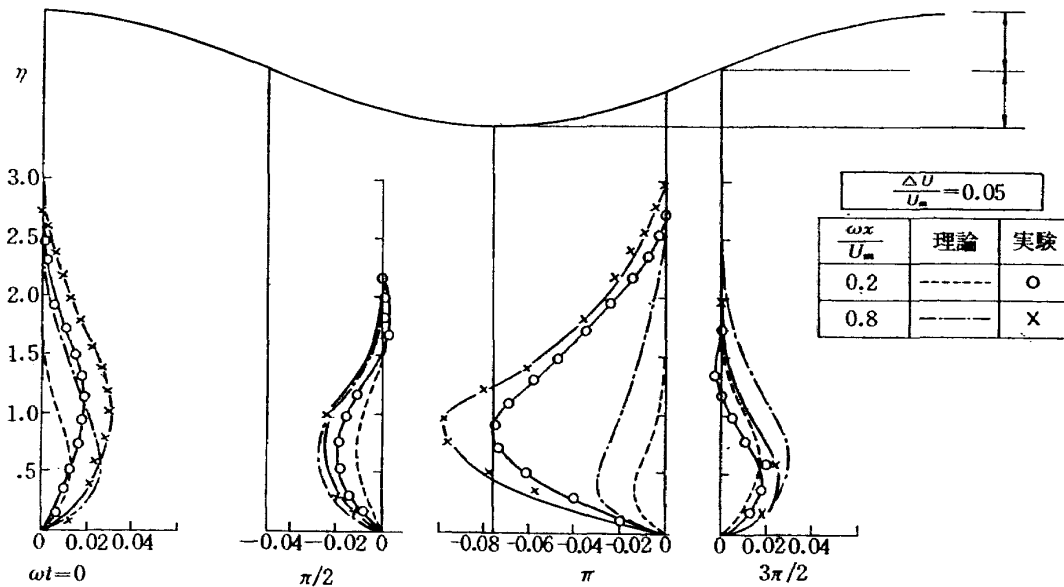
(1) 速度分布 速度分布の測定結果の一例の第6図に示す。図は外流が $U_m=5\text{ m/s}$ のまわりに $\Delta U=\pm 0.25\text{ m/s}$ だけ周期 1.1 c/s で正弦的に変動しているとき値を外流変動の位相 $0, \pi/2, \pi$ および $3/2\pi$ について読み取ったもので位相 0 の位置ではかなり丸みをもった速度分布をもっているが減速域 ($0\sim\pi$) では急速にやせてとがった分布を示すようになり加速域で回復していることが観測される。このような境界層速度分布の時間的経過をもっと詳細に調べるために、よく知られている平板の境界層速度分布 (いわゆる Blasius 分布) と比較し、偏りを第7図に示してある。なお図中破線および鎖線は、非定常境界層に関する Moore の解析法を用いて、実験の場合について計算したもので、位相 π の点で、偏差量が理論値よりもかなり大きくなることを除いては、定性的にも定量的にもかなりよい一致をみせている。



第6図 正弦変動外流に対する境界層速度分布 $\frac{\Delta U}{U_m}=0.05$ $\frac{\omega x}{U_m}=0.6$



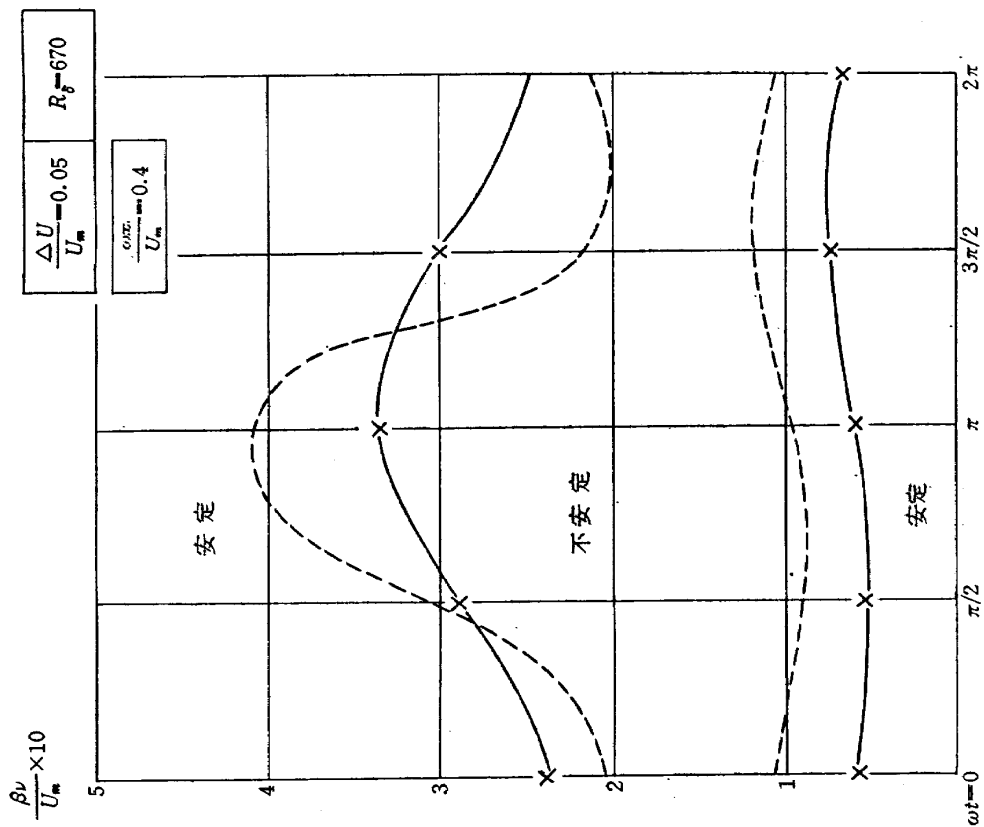
第7図 (a) 正弦変動境界層速度分布の Blasius 分布からの編り



第7図 (b) 正弦変動境界層速度分布の Blasius 分布からの偏り

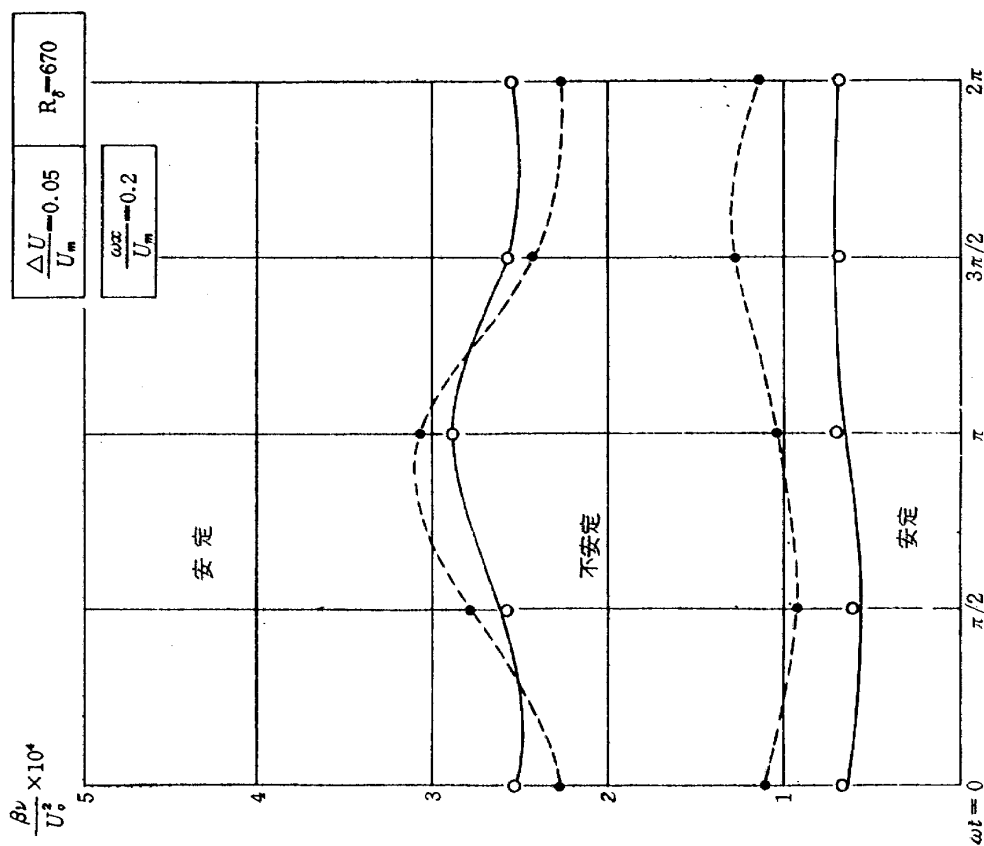
理論値が実験結果と幾分の食い違いを生じたのは風洞気流が完全には $U_0 = U_m \left(1 + \frac{\Delta U}{U_m} \cos \omega t \right)$ の形でなくかつ x 方向に $U_0 \frac{\partial U_0}{\partial x}$ に相当する静圧勾配が存在するためではないかと考えられる。

(2) 安定特性 安定特性の実験結果を第8図 (a) (b) および (c) に示す。図は外流変動の各位相に対する中立安定周波数の変化を示したもので、一般に速度分布の形状が Blasius 分布よりもやせているときは不安定領域が広く Blasius 分布よりも丸みをもった速度分布のときは不安定領域がせまくなっていることがわかる。なお図中破線で示される曲線は実測の速度分布を用い、この速度分布を用い、この速度分布が準定常的であると仮定してさきに述べた準定常安定理論⁴⁾によって求めた中立安定曲線で、その際速度分布は六次式を近似してある。第8図は非定常性が小さいときに



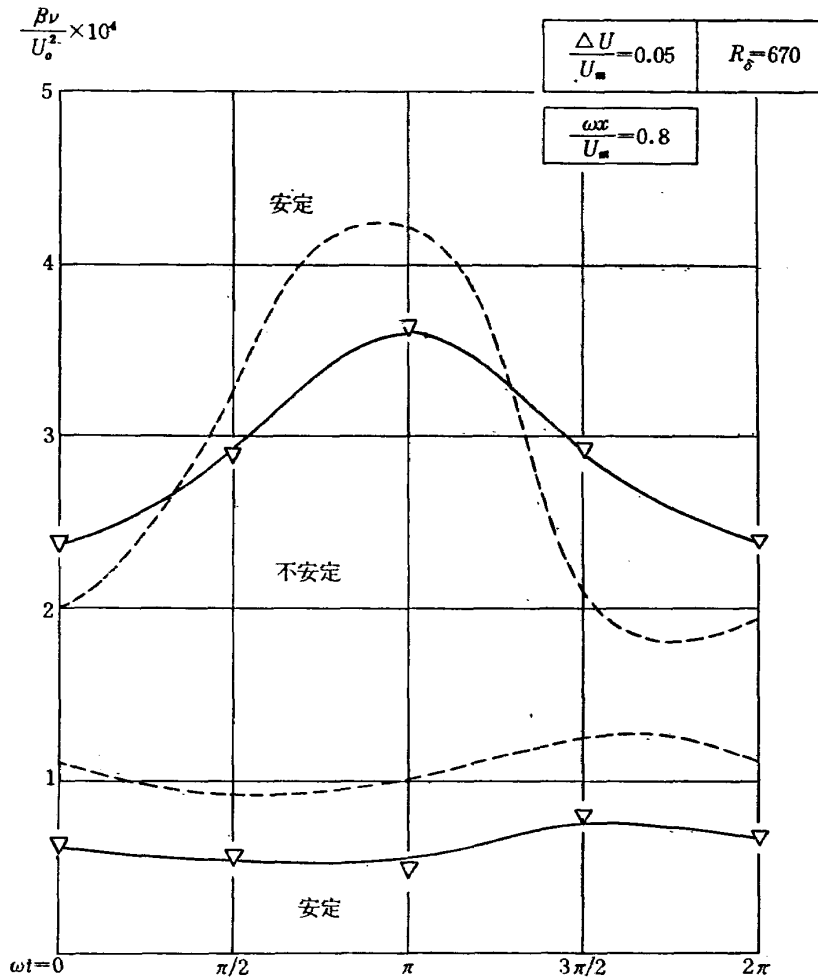
第8図 (b) 中立安定周波数分布

点線は測定速度分布に対する準定常安定理論による値



第8図 (a) 中立安定周波数分布

点線は測定速度分布に対する準定常安定理論による値



第 8 図 (c) 中立安定周波数分布
点線は測定速度分布に対する準定常安定理論による値

準定常安定理論の計算結果にかなりよく一致しているが、外流の非定常性が増すにつれてその傾向は急激に増し、理論から予想される値からずれてくることが認められる。これは準定常の安定理論では速度分布が相似を保ち、かつ微小振動の増幅度が着目する時間が一定であることを仮定しており、非定常性が強くなるにつれて、これらの二つの仮定が、次第に妥当性を欠くことから当然のことであろう。ただ非定常性が準定常の性質を強調している点、すなわち準定常理論から予想されるより以上に不安定化の傾向がみられるが、これは高次の擾乱による影響と考えられる。

む す び

非定常境界層の速度分布を測定し、その安定特性におよぼす影響を調べた。

速度分布に関して Moore の解析によって予想される時間履歴を明らかに示していることがわかった。

安定特性については、非定常性の弱い範囲では準定常の仮定を用いた線型理論とよい一致を示すが、非定常性が増すにつれて理論の傾向は強調され容易に不安定化する傾向を示してくる。この原

因としては、非定常性ととも高次の不安定性が生じることおよび攪乱の二次元性が失われることなど考えられるが、これについてはさらに複雑な遷移の機構模型を選ぶ必要があり、実験的にも二次元のみでなく三次元的な測定が要望されるものと思われる。

なお、本実験に有益な検討をいただいた、東京大学航空研究所 谷，佐藤両教授，日本大学 荻田助教授に厚く感謝します。

また、本実験の測定に用いられた熱線風速計の設計，試作を行ない，測定に多大の貢献をいただいた故榎並技官，および実験に終始助力された山本技官に厚くお礼申し上げるとともにいろいろ御教示御助力をいただいた長洲技官，河野技官に深く感謝します。

参 考 文 献

- 1) W. Tollmien: Ueber die Entstehung der Turbulenz. N. A. C. A. Tech. Memo. No. 609 (1931).
- 2) C. C. Lin: On the stability of two-dimensional parallel flows. *Quat. Appl. Math.* 3. 117-142 (July 1945); 3. 218-234 (Oct. 1945); 3. 277-301 (Jan. 1946).
- 3) G. B. Schubauer and H. K. Skramstad: Laminar boundary layer oscillations and stability of laminar flow. *J. A. S.* 14 (1947).
- 4) 小橋安次郎・恩地 瑛: 非定常境界層の相似解とその安定, 航技研報告 TR-42 (昭和 38)
- 5) F. K. Moore: Unsteady laminar boundary layer flow. *NACA T. N.* 2471 (1951).
- 6) M. J. Lighthill: The response of laminar skin friction and heat transfer to fluctuations in the stream velocity. *Proc. Roy. Soc. A* 224, (1954).
- 7) 堀 栄一: 非定常境界層の研究, 日本機械学会論文集 27 卷 174 号 (昭 36).
- 8) 榎並敬之・山本稀義: 航技研資料 TM-33 (昭和 39).

付 記

非定常境界層の解析は Lighthill⁶⁾, 堀⁷⁾, Moore⁵⁾ 等によって行なわれている。ここでは Moore の解析法を用いて外流が正弦変動をする場合の境界速度分布を求めた。Moore の方法は一種の級数展開法で、流れの函数 ψ

$$\psi = \sqrt{\nu x U_m(t)} f(\eta, \theta_0, \theta_1, \dots, \theta_n, \dots)$$

$$\eta = \frac{y}{2} \sqrt{\frac{V_0(t)}{\nu x}}$$

$$\theta_n = \frac{x^{n+1} \frac{d^{n+1}\{U_0(t)\}}{dt^{n+1}}}{\{U_0(t)\}^{n+1}} \quad (n=0, 1, 2, \dots)$$

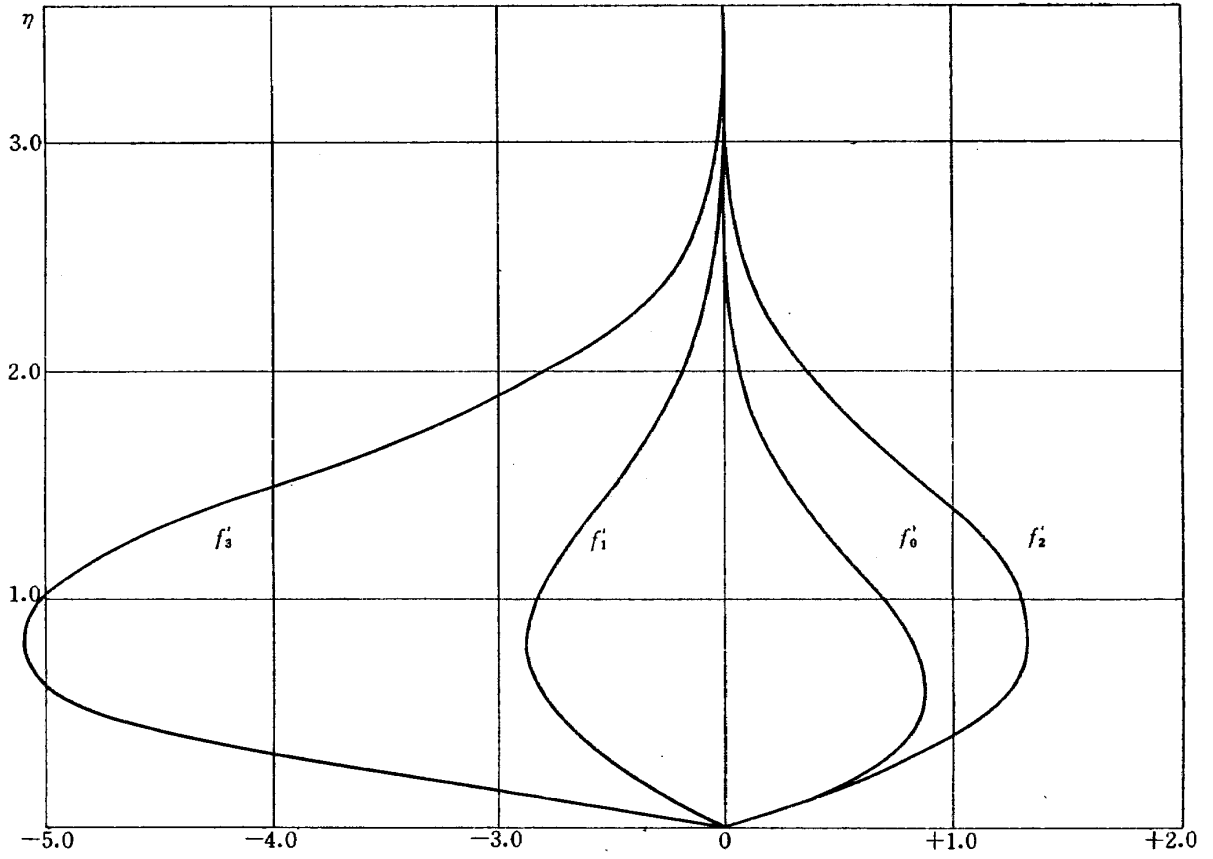
をさらに θ_n で展開し

$$f = F(\eta) + \theta_0 f_0(\eta) + \theta_1 f_1(\eta) + \dots + \theta_n f_n(\eta) + \dots$$

$$+ \theta_0^2 f_{00}(\eta) + \theta_0 \theta_1 f_{01}(\eta) + \dots$$

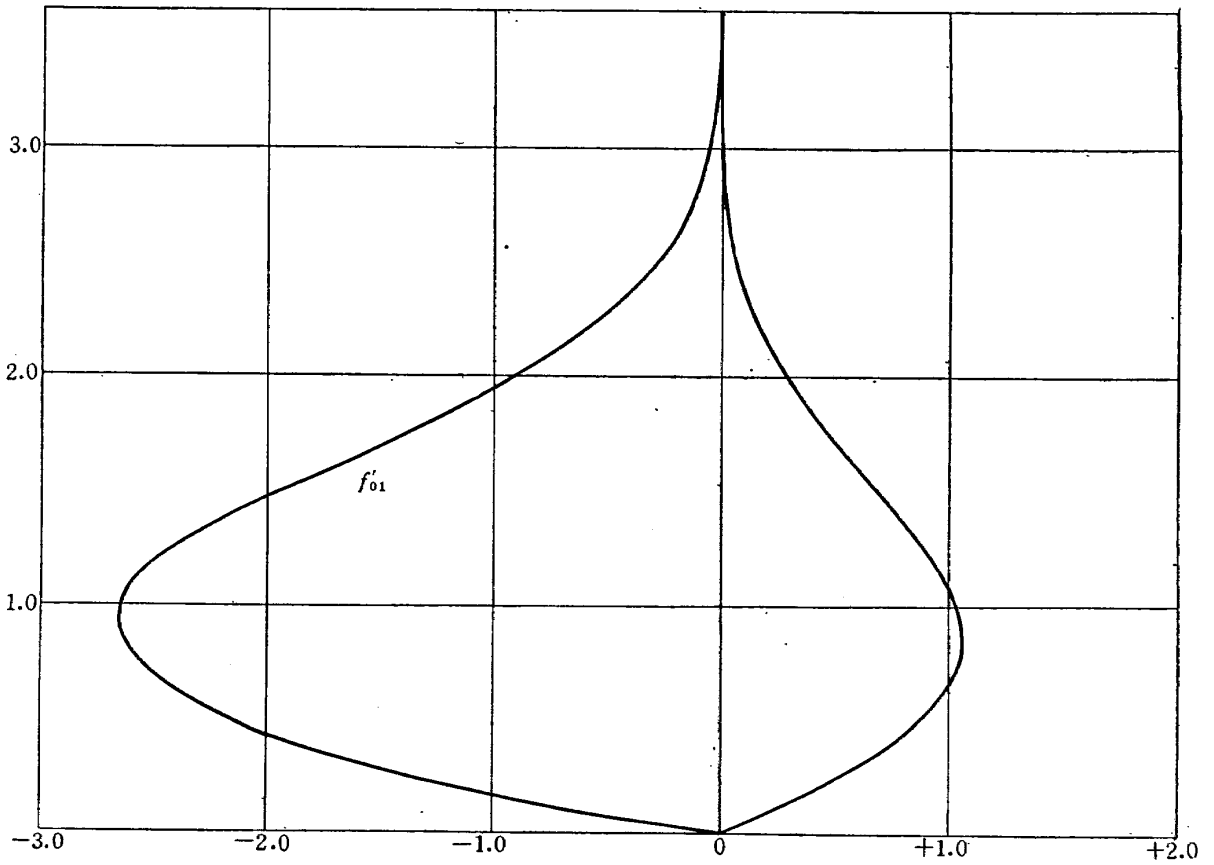
$$+ \theta_1^2 f_{11}(\eta) + \dots$$

f'

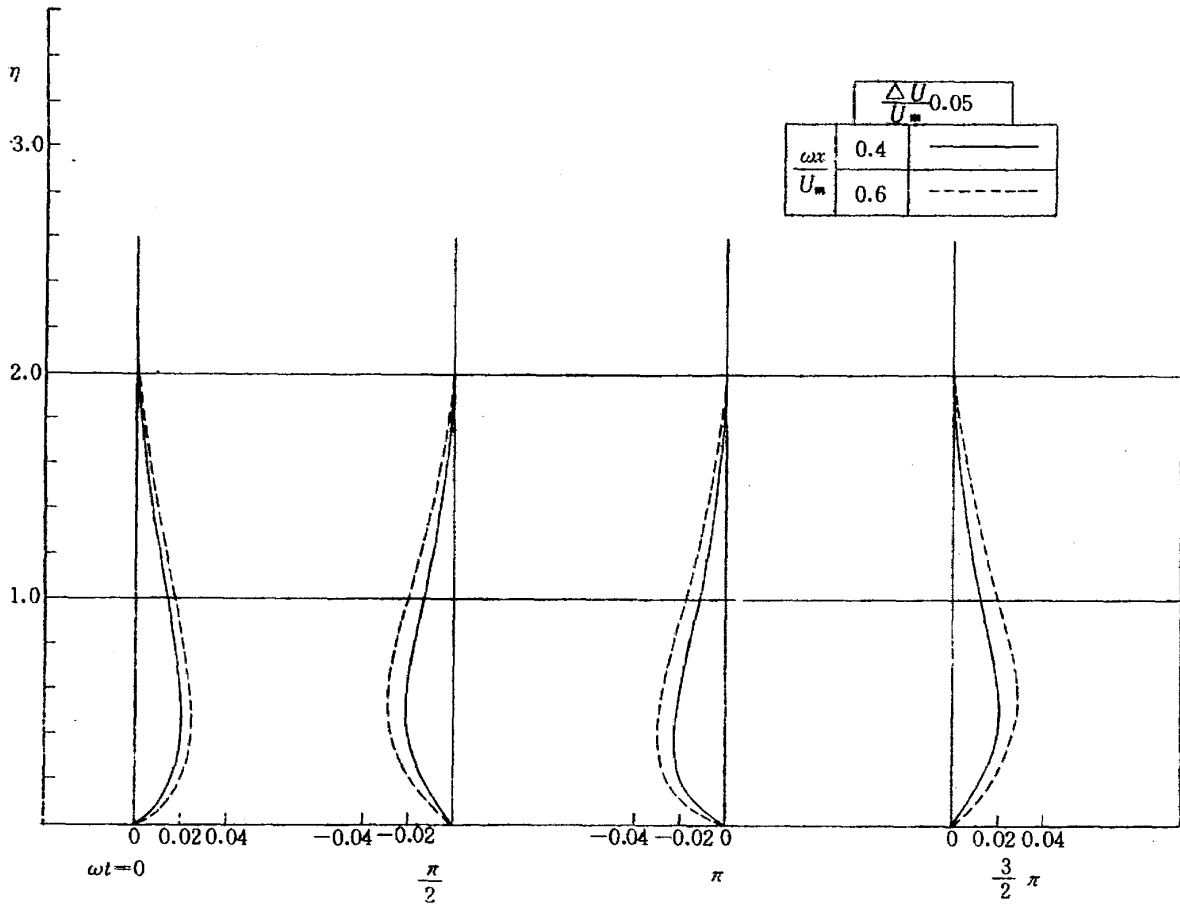


第9図(a)

f'_{00} および f'_{01}



第9図(b)



第 10 図 正弦変動境界層速度分布の Blasius 分布からの偏り

第 1 表 (a)

η	f_2	f_2'	f_2''
0.0	0.000	0.000	2.785
0.2	0.024	0.547	2.453
0.4	0.148	0.962	1.834
0.6	0.373	1.241	0.925
0.8	0.632	1.326	-0.001
1.0	0.896	1.305	-0.189
1.2	1.149	1.209	-0.788
1.4	1.373	1.007	-1.082
1.6	1.550	0.774	-1.128
1.8	1.682	0.552	-0.999
2.0	1.772	0.350	-0.771
2.2	1.826	0.211	-0.440
2.4	1.859	0.117	-0.337
2.6	1.875	0.058	-0.193
2.8	1.884	0.028	-0.092
3.0	1.887	0.012	-0.045
3.2	1.889	0.003	-0.027
3.4	1.889	0.001	-0.005
3.6	1.889	0.000	-0.002
3.8	1.889	0.000	-0.000

第 2 表 (b)

η	f_3	f_3'	f_3''
0.0	0.000	0.000	-5.815
0.2	0.149	-1.294	-5.440
0.4	0.504	-2.388	-4.346
0.6	1.065	-3.133	-2.533
0.8	1.694	-3.084	0.092
1.0	2.298	-3.027	0.916
1.2	2.887	-2.710	1.792
1.4	3.372	-2.239	2.320
1.6	3.777	-1.684	2.229
1.8	4.050	-1.190	1.881
2.0	4.281	-1.116	1.359
2.2	4.458	-0.463	0.860
2.4	4.495	-0.249	0.491
2.6	4.564	-0.125	0.258
2.8	4.579	-0.059	0.119
3.0	4.590	-0.026	0.045
3.2	4.591	-0.003	0.020
3.4	4.593	-0.001	0.007
3.6	4.593	0.000	0.003
3.8	4.593	0.000	0.001
4.0	4.593	0.000	0.000

第 1 表 (c)

η	$-f_{01}$	$-f_{01}'$	$-f_{01}''$
0.0	0.000	0.000	2.165
0.2	0.074	0.576	2.003
0.4	0.218	0.964	1.841
0.6	0.433	1.163	1.056
0.8	0.680	1.300	0.294
1.0	0.945	1.330	0.394
1.2	1.203	1.234	-0.825
1.4	1.435	1.076	-0.964
1.6	1.628	0.853	-0.908
1.8	1.778	0.649	-0.741
2.0	1.889	0.463	-0.558
2.2	1.965	0.305	-0.394
2.4	2.014	0.185	-0.269
2.6	2.042	0.104	-0.185
2.8	2.057	0.048	-0.081
3.0	2.064	0.024	-0.021
3.2	2.067	0.011	-0.009
3.4	2.069	0.007	-0.004
3.6	2.070	0.002	-0.001
3.8	2.070	0.000	0.000

と置く方法である。

F は Blasius の解であり, Moore は $f_0 f_1$ および f_{00} の数値解を求めている。この実験と比較するためにはさらに高次の項までとる必要があるので, f_2, f_3 および f_{01} の数値解を求め第9図および第1表に示した。

<p>NAL TR-65 航空宇宙技術研究所 非定常境界層の安定に関する実験</p> <p>1964年7月 14ページ</p> <p>外流が正弦的時間変動をなす場合の境界層の安定特性を、振動りポンの方法により実験的に調べた。風洞は 20 cm × 15 cm の非定常低乱風洞を用い、定温度型熱線風計により測定した。 その結果は、非定常性が弱ければ境界層の安定特性は、境界層速度分布によって決定されるという準定常安定理論とよく一致する。</p>	<p>I. 小橋安次郎 恩地 瑛 II. NAL TR-65 III. 532.526</p>	<p>NAL TR-65 航空宇宙技術研究所 非定常境界層の安定に関する実験</p> <p>1964年7月 14ページ</p> <p>外流が正弦的時間変動をなす場合の境界層の安定特性を、振動りポンの方法により実験的に調べた。風洞は 20 cm × 15 cm の非定常低乱風洞を用い、定温度型熱線風計により測定した。 その結果は、非定常性が弱ければ境界層の安定特性は、境界層速度分布によって決定されるという準定常安定理論とよく一致する。</p>	<p>I. 小橋安次郎 恩地 瑛 II. NAL TR-65 III. 532.526</p>
<p>NAL TR-65 航空宇宙技術研究所 非定常境界層の安定に関する実験</p> <p>1964年7月 14ページ</p> <p>外流が正弦的時間変動をなす場合の境界層の安定特性を、振動りポンの方法により実験的に調べた。風洞は 20 cm × 15 cm の非定常低乱風洞を用い、定温度型熱線風計により測定した。 その結果は、非定常性が弱ければ境界層の安定特性は、境界層速度分布によって決定されるという準定常安定理論とよく一致する。</p>	<p>I. 小橋安次郎 恩地 瑛 II. NAL TR-65 III. 532.526</p>	<p>NAL TR-65 航空宇宙技術研究所 非定常境界層の安定に関する実験</p> <p>1964年7月 14ページ</p> <p>外流が正弦的時間変動をなす場合の境界層の安定特性を、振動りポンの方法により実験的に調べた。風洞は 20 cm × 15 cm の非定常低乱風洞を用い、定温度型熱線風計により測定した。 その結果は、非定常性が弱ければ境界層の安定特性は、境界層速度分布によって決定されるという準定常安定理論とよく一致する。</p>	<p>I. 小橋安次郎 恩地 瑛 II. NAL TR-65 III. 532.526</p>

TR-51	人間の静的不安定系の制御能力 Human Control Ability of the Statically Unstable System	1963年9月	武田 峻
TR-52	粒状加熱器の熱特性 Thermal Characteristics of a Pabble-Bed Heater	1963年9月	林 二 識
TR-53	円管流の非定常熱伝達 第1報 —壁温が時間と流向距離のみによる場合— Thermal Characteristics of the Unsteady Flow through a Circular Pipe whose Temperature depends on Time and Flow-Directional Distance only	1963年10月	林 二 識
TR-54	偏微分方程式の混合境界値問題の差分法による数値解法 Difference Method for the Mixed Boundary Value Problems	1963年10月	三好 甫
TR-55	ボスをもった車盤の回転強度 Rotating Strength of Rotor which Has a Boss	1963年11月	佐藤和郎, 永井文雄
TR-56	亜音速および遷音速における二次元非定常空気の測定 (第I報) Measurements of the Unsteady Airloads for Two-Dimensional Flow at Subsonic and Transonic Speed Range (I)	1963年11月	中村泰治, 田辺義一
TR 57T	Measurements of the Aerodynamic Derivatives of an Oscillating Biconvex-Flat Airfoil in Supersonic Flow at Mach Number 2 to 3	January 1964	Takao ISHII Mitsunori YANAGISAWA
TR-58	高度 500 フィートないし 10,000 フィートにおける上下突風の測定および解析 Measurements and Analyses of gust Velocities from 500 to 10,000 feet altitude	1964年1月	竹内和之, 小野幸一 山根皓三郎
TR-59	磁気テープデータ処理設備とその特性 The Magnetic Tape Data Reduction System and Its Performance	1964年1月	田畑浄治, 中 正夫 山本芳樹, 三浦雅男
TR-60	変厚平板翼の振動について On the Natural Vibration of Plate-Like Wings of Variable Thickness	1964年1月	埜 武敏, 越出慎一 戸川隼人, 川井忠彦
TR-61	後退角 45°, テーパー比 0.6 の薄い片持翼の遷音速におけるフラッタ特性におよぼすマッハ数の影響の実験的研究 Some Effects of Mach Number on the Transonic Flutter Characteristics of Thin Cantilever Wings Having a Taper Ratio 0.6 and a Sweptback Angle of 45°	1964年2月	中井暎一, 小原 瑛
TR-62	超音速における翼端板効果 The Effects of End-plates at Supersonic Speeds	1964年2月	尾形吉和
TR-63	非定常流中の円柱に作用する空気力について Aerodynamic Forces Acting on a Circular Cylinder in Unsteady Flow	1964年3月	小橋安次郎, 遠藤 浩 北村清美
TR-64	航空力学における磁歪計器の応用 Some Developments of the Magnetostriction Type Measuring Instruments for the Study of Aircraft Dynamics	1964年3月	幸尾治朗

航空宇宙技術研究所報告65号

昭和39年7月発行

発行所 航空宇宙技術研究所
東京都調布市深大寺町1880
電話武蔵野(0422)(3)5171(代表)

印刷所 笠井出版印刷社
東京都港区芝南佐久間町1の53