

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 18 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420104

研究課題名(和文) 一様流中の渦状攪乱に対する前縁部受容機構の解明

研究課題名(英文) Investigation on leading edge receptivity to freestream vortical disturbances

研究代表者

伊澤 精一郎(Izawa, Seiichiro)

東北大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：90333856

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：一様流中で人為的に発生させた攪乱を平板前縁に衝突させ、その受容過程を実験と計算により調べた。その結果、境界層内の速度変動は、外部攪乱の強いピークが境界層外に存在している間だけ増幅されることが示された。また、前縁部や平板部とのつなぎ目において壁面から供給される渦度変動は、境界層内の渦度変動の生成に大きく寄与しており、両者は下流で互いに打ち消しあう方向に作用することが報告された。

研究成果の概要(英文)：Receptivity process of artificially generated disturbances in the freestream was investigated experimentally and numerically. As a result, it was shown that the velocity fluctuations inside a boundary layer are amplified when the external disturbances have a strong peak outside the boundary layer. It was also shown that the vorticity fluctuations supplied from the wall at the leading edge and at the junction contribute to the generation of vorticity fluctuations inside the boundary layer and cancel each other in the downstream region.

研究分野：流体工学

キーワード：前縁部受容性 境界層遷移 渦度攪乱

### 1. 研究開始当初の背景

境界層の遷移点を精度よく予測することは、航空機の主翼の空力設計上最も重要な課題である。特に自然層流翼のような翼型を設計する場合、気流条件に対する遷移点の予測精度が悪いと翼性能に致命的な影響を及ぼす。境界層の乱流遷移点は、主流中の変動の大きさとその変動が受容されて生成される不安定波動の初期振幅の比である受容係数に依存する。しかし、通常初期振幅は極めて小さく有限振幅に達してからでないと計測することはできない。風洞自体の特性が気流の状態に影響すること、さらに主流中の変動と受容後の波動の形態が異なることなどから、主流乱れと遷移点の関係は経験的にしかわかっていない。また、数値計算による遷移点予測も試みられてはいるものの、主流乱れと前縁部受容性の関係が未解明であるため、人為的に導入した攪乱の成長を追うことで遷移点を算出する方法をとらざるを得ないのが現状である。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、遷移点を精度よく予測するために不可欠な、境界層が発達し始める物体前縁における乱れの受容機構を明らかにすることである。実験では、一様流中に設置した翼型装置からシート噴流を発生させ、導入した乱れと下流の平板境界層内に残存する乱れの関係について調べた。数値計算では、一様流中に周期的な渦度変動を加え、実験では計測が困難な境界層内に生じる渦度変動について、一様流中から境界層に入り込む渦度攪乱と壁面から供給される渦度変動に分けて検討した。

### 3. 研究の方法

#### (1) 風洞実験

実験は、吹き出し型の低乱風洞を用いて、一様流速  $U = 5 \text{ m/s}$ 、乱れ強さ  $0.25\%$  以下で行った。図 1 に実験装置の概略を示す。平板は全長  $1610 \text{ mm}$ 、幅  $490 \text{ mm}$ 、厚さ  $10 \text{ mm}$  のアルミニウム合金製で、表面は滑らかに仕上げられており、その前縁は長短軸比  $24:1$  の楕円形状となっている。

外乱発生装置は、平板前縁から  $100 \text{ mm}$  上流にその後縁が来るように設置した。装置のケーシング形状は NACA2208 ベースの翼型

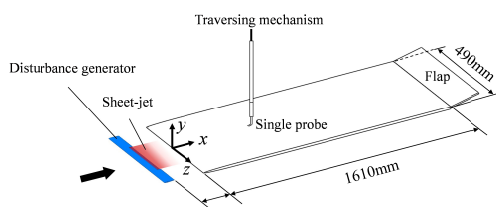


図 1 実験装置概略

(翼厚  $3.0 \text{ mm}$ 、翼弦長  $37.5 \text{ mm}$ 、翼幅  $380 \text{ mm}$ ) で、ABS 樹脂製である。装置の一端は、電磁弁及び流量調整弁を介してエアコンプレッサーに接続されており、コンプレッサーを駆動すると装置後縁から下流に向けて空気が噴出する。噴流の平均流速  $u_j$  は流量調整弁により調節し、脈動噴流を発生させる場合には、コンプレッサーが生み出す定常成分に電磁弁の周期的駆動によって得られる脈動成分を組み合わせた。外乱の導入位置は、

- i) 平板前縁周辺のみ ( $y = 0 \text{ mm}$ )
  - ii) 平板前縁上方/下方 ( $y = \pm 3 \text{ mm} / \pm 3.5 \text{ mm}$ )
- とし、それぞれのケースに合わせて装置の設置高さを変えた。脈動噴流の周波数は  $35 \text{ Hz}$  である。このとき、線形安定論による Blasius 境界層の中立安定曲線では、 $x = 400 \text{ mm}$  の位置が中立安定点となる。なお、流速の測定は単線熱線プローブを用いて行った。

#### (2) 数値計算

計算対象は、長短軸比  $5:1$  の楕円形状の前縁部を有する平板境界層とした。支配方程式は、2次元非圧縮性 Navier-Stokes 方程式と連続の式である。ただし本計算では、微小な変動成分を解像するため、時間変化のない基本流成分からの差分のみを解くこととした。計算アルゴリズムには MAC 法を用い、方程式の離散化には、対流項に 3 次精度上流差分法を、その他の空間微分項に 2 次精度中心差分法を用いた。時間進行については、粘性項に Euler 陰解法を、その他の項には 2 次精度 Adams-Bashforth 法を用いた。レイノルズ数は一様流速と楕円短軸を用いて定義し、基本流のレイノルズ数は  $10,000$  に設定した。計算格子は前縁形状に合わせた物体適合格子であり、壁面方向に  $561$  点、壁面垂直方向に  $281$  点とした。

一様流中に導入する渦度攪乱は、速度の流入境界条件として

$$u' = A_m \phi(y) \sin(2\pi ft)$$

と与えた。ここで、振幅  $A_m$  と周波数  $f$  はそれぞれ一様流速の  $1\%$  と  $0.2$  で一定とし、 $\phi(y)$  は、Lamb-Oseen 渦を想定して、

$$\phi(y) = \{1 + 1/(2\alpha_L)\} s/(y-h) \times [1 - \exp\{-\alpha_L(y-h)^2/s^2\}]$$

とした。 $\alpha_L = 1.25643$  であり、 $s$  と  $h$  は渦核半径と導入位置に対応するパラメータで、それぞれ  $s = 3$ 、 $h = 0$  とした。

導入した渦度攪乱の流下にともない、壁面では周期的に渦度変動が生成される。壁面からの渦度供給を遮断するには、壁面を滑り壁として扱えばよい。そこで本計算では、この方法により壁面からの渦度供給を部分的に遮断することで、一様流中から直接境界層内に入り込む渦度攪乱の挙動について調べるとともに、境界層内の渦度変動の成長に寄与する前縁部の渦度供給源を特定することを試みた。

#### 4. 研究成果

##### (1) 風洞実験

図2は、装置下流50mmの位置で速度を計測した結果である。一樣流中に外乱発生装置を設置することでその後流に生じていた速度欠損は、下流に向かって定常噴流を噴射することで補填され消失している。このとき速度変動のrms分布を見ると、装置後流のカルマン渦列に起因するふたこぶのピークも消失していることから、本装置によって一樣流の速度分布を変えることなく乱れだけを導入することが可能であることがわかった。

はじめに、本装置を平板と同じ高さに設置し、噴流を噴射することで平板前縁近傍にのみ乱れを導入した場合について調べた。このとき、平板の上流1mmの位置では、定常噴流では一樣流速の0.8%程度、周波数35Hzの脈動噴流では2.5%程度の速度変動となった。図3は、境界層内における速度変動のrms値の最大値の流れ方向の変化をプロットしたものである。図の縦軸は、 $x = 10\text{mm}$ における値で規格化されている。線形安定論によれば、周波数35Hzの速度変動波に対して境界層が不安定となる位置は、 $x = 400\text{mm}$ である。しかし、噴流が定常か脈動かに関わらず、境界層内の速度変動はいずれも減衰してしまい、理論が予測する2次元不安定波動であるトルミン・シュリヒティング波(T-S波)の形成は見られない。この原因について探るため、 $x = -1\text{mm}, 90\text{mm}, 400\text{mm}$ の各位置において、アンサンブル平均された速度のspan方向分布を求めた。その結果、平板前縁のよどみ点近傍ではspan方向に2次元であった乱

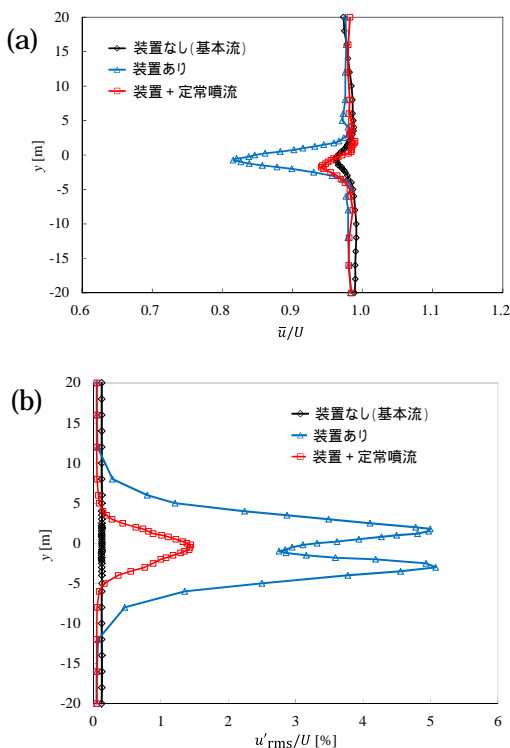


図2 平均速度と速度変動のrms分布

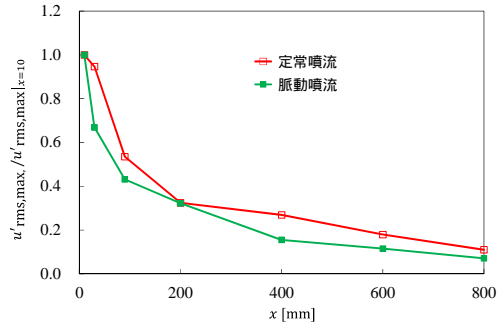


図3 速度変動 rms 値の最大値の変化

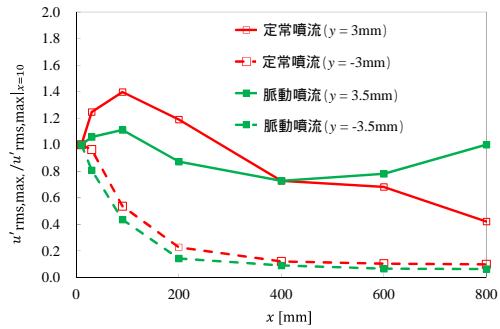


図4 速度変動 rms 値の最大値の変化  
(装置を上下にずらして設置した場合)

れは下流で3次元化しており、この乱れの3次元性が2次元T-S波の線形成長を妨げていることがわかった。

続いて、外乱発生装置の挿入位置を、平板中心高さよりも $\pm 3\text{mm}$ (脈動噴流では $\pm 3.5\text{mm}$ )だけ上下にずらして設置した場合について調べた。なお、装置と平板の厚さは、それぞれ $3\text{mm}$ と $10\text{mm}$ である。このとき、導入される乱れの強さは装置と同じ高さで最大となり、 $x = -1\text{mm}$ では、

定常噴流 ( $y = 3\text{mm}$ ) 1.5%程度

脈動噴流 ( $y = 3.5\text{mm}$ ) 3.2%程度

と強くなる。装置を下方へずらすとピークも下方へシフトするが、平板上面の境界層に着目しているため、 $y = 0\text{mm}$ の領域では、

定常噴流 ( $y = -3\text{mm}$ ) 0.8%程度

脈動噴流 ( $y = -3.5\text{mm}$ ) 1.4%程度

となる。

図4に速度変動rms値の最大値の変化を示す。平板上面境界層に達する乱れが弱い装置を下方に設置した場合、境界層内の速度変動は、図3と同様に単調に減衰した。これに対して、強い乱れが導入された装置を上方に設置した場合には、定常噴流と脈動噴流のいずれの場合においても、平板前縁から $x = 90\text{mm}$ 付近にかけて、境界層内の速度変動が一時的に増幅される様子が見られた。

これらの結果から、境界層内の速度変動は、外部攪乱の強いピークが境界層外に存在している間だけ増幅されることがわかった。

## (2) 数値計算

計算では、一様流中に横渦状の周期的な渦度攪乱を導入し、平板境界層前縁部近傍における受容過程について調べた。はじめに、平板壁面を滑り境界とすることで、一様流中から境界層内に直接入り込む渦度攪乱の挙動を調べたところ、

・一様流中から入り込んだ渦度攪乱は、境界層中腹に生じる渦度変動のピークに寄与する。

・曲率が連続的に変化する前縁部では、壁面からの渦度供給の影響が極めて大きいことがわかった。

続いて、滑り境界を課す領域を

(a) 全域滑りなし条件

(b) 前縁部の20%まで滑り壁

(c) 前縁部の70%まで滑り壁

(d) 接合部を含む前縁部から平板部へかけての110%が滑り壁

と人為的に切り分けることで、境界層内の渦度変動の成長に寄与する壁面渦度の供給源について検討した。その結果、前縁部とつながり目で壁面から供給される渦度は、下流において互いに打ち消しあう方向に作用することなどがわかった。また、曲率が不連続となるつながり目は非常に強い受容点であることも確かめられた。さらに、壁面から供給される渦度変動だけを取り出し、これを壁面境界条件としてあたえることでその挙動を調べてみた。すると、壁面から供給された渦度変動によって境界層内に形成される渦度変動パターンの波長は、流下するにつれて次第に減少し、平板部においてT-S波の波長と同程度になることがわかった。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計3件)

1. S. Izawa, T. Kato, M. Shigeta and Y. Fukunishi, Receptivity to Localized Freestream Disturbances Generated by an Airfoil with Jet Ejections outside the Flat Plate Boundary Layer Proceedings of the 14th Asian Congress of Fluid Mechanics, Hanoi-Halong, Vietnam, (Oct. 15-19, 2013), Vol.1, pp.227-229, 査読有.

2. Y. Nishio, M. Shigeta, S. Izawa and Y. Fukunishi, Relation between Deformation of Wall-normal Vortices and Leading Edge Receptivity, Proceedings of the 14th Asian Congress of Fluid Mechanics, Hanoi-Halong, Vietnam, (Oct. 15-19, 2013), Vol.1, pp.241-245, 査読有.

3. Y. Nishio, M. Shigeta, S. Izawa and Y. Fukunishi, Numerical Study on Leading-Edge Receptivity to Freestream Vertical Vorticity,

Journal of Fluid Science and Technology, Vol.8, No.1, pp.136-145, 2013, 査読有.

〔学会発表〕(計6件)

1. Y. Nishio, T. Oka, S. Izawa and Y. Fukunishi, Experimental Study of Leading Edge Receptivity to Freestream Local Disturbance, Bulletin of the American physical society 68th Annual Meeting of the APS Division of Fluid Dynamics, (Nov. 22, 2015, Boston, USA), p.169.

2. Yu Nishio, T. Oka, S. Izawa and Yu Fukunishi, Leading Edge Receptivity to Vortical Local Disturbances, International Workshop on Flow Dynamics and Spintronics, (Nov. 12, 2015. KTH, Stockholm, Sweden), p.11.

3. 井澤 博子, 林 浩幹, 西尾 悠, 伊澤 精一郎, 福西 祐, 2次元渦度攪乱に対する前縁受容性について, 第93期日本機械学会流体工学部門講演会講演論文集, (2015年11月8日, 東京理科大学, 東京都葛飾区), 0705, USB.

4. 岡 智成, 廣田 隼人, 西尾 悠, 伊澤 精一郎, 福西 祐, シート状の局所攪乱に対するブラジウス境界層の受容性, 日本流体力学会年会2014・USBメモリ講演論文集, (2014年9月16日, 国際センター, 宮城県仙台市), 042, USB.

5. 西尾 悠, 茂田 正哉, 伊澤 精一郎, 福西 祐, 横渦状攪乱に対する前縁受容性の数値的研究, 日本流体力学会年会2013・USBメモリ講演論文集, (2013年9月14日, 東京農工大学, 東京都小金井市), 254, USB.

6. 廣田 隼人, 茂田 正哉, 伊澤 精一郎, 福西 祐, 2次元翼と噴流を組み合わせ生成した局所外部攪乱に対する平板境界層の受容性, 日本機械学会2013年度年次大会DVD講演論文集, (2013年9月11日, 岡山大学君津キャンパス, 岡山県岡山市), S054053, DVD.

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕

## 6. 研究組織

研究代表者

伊澤 精一郎 (Seiichiro Izawa)

東北大学大学院工学研究科・准教授

研究者番号: 90333856