

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 6 月 22 日現在

機関番号：22604

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560974

研究課題名(和文)境界層の安定性と遷移に対する低粗度レイノルズ数の分布表面粗さの影響

研究課題名(英文) Influences of distributed surface roughness of small roughness-Reynolds-number on boundary-layer instability and transition

研究代表者

浅井 雅人 (Asai, Masahito)

首都大学東京・システムデザイン研究科・教授

研究者番号：00117988

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、微小な壁面粗さが境界層の安定性や乱流遷移に及ぼす影響を、正弦波状の壁面粗さを用いて実験的に調べたものである。まず、二次元粗さが境界層の不安定性を大きく促進するのに対し、三次元粗さはほとんど不安定性を促進しないなど、二次元と三次元の粗さの影響の違いが明確にされた。また、正弦波状の壁面粗さを二次元的配置から斜行配置へと変化させると、二次元粗さで見られた不安定性の強い促進効果が徐々に弱められ、斜行角が90度に近づくと滑面上の境界層の不安定特性に漸近することが示された。さらに、壁面の僅かな段差が不安定性に及ぼす影響も実験と数値計算により示された。

研究成果の概要(英文)：Influences of distributed surface roughness on boundary-layer instability and transition were examined experimentally by using simple corrugation models of sinusoidal geometry with various corrugation amplitudes and wavelengths. In contrast to strong destabilizing effect of 2-D corrugation, 3-D corrugation had only a small influence on the boundary-layer instability. The distinct difference in the influence of 2-D and 3-D corrugations on the boundary-layer instability was further clarified for oblique surface corrugations. Influences of surface imperfection of small step-size were also demonstrated through numerical simulations and experiments.

研究分野：流体力学

キーワード：流れの安定性 壁面粗さ 境界層 乱流遷移

1. 研究開始当初の背景

次世代航空機の開発において主翼境界層の層流化は常に重要な空力技術課題と考えられてきた。また、近年では、空気抵抗低減のみならず（あるいは平行して）機体空力騒音の低減も環境適合の観点から避けることができない技術課題としてさらに重要視されている。境界層遷移は、このような摩擦抵抗低減や空力騒音軽減に深く関わる研究分野である。層流翼の実機への適用で常に問題となるのは、境界層の不安定性と遷移に対する微小な（境界層厚さより十分小さい）表面粗さ分布の影響である。この問題については経験的なデータに頼るのみで機構の詳細はまだ十分に解明されておらず、これまでの遷移予測法においてもほとんど考慮されていない。しかしながら、分布表面粗さは僅かな粗さ（粗度高さ  $k$  と壁から  $k$  の高さでの流速  $U_k$  に基づく粗度レイノルズ数  $Re_k = kU_k/\nu < 25$ ）でも壁面近傍の流れを変えるため、安定性にも無視できない影響を持つことが最近の研究で指摘されている。

2. 研究の目的

本研究は、航空機の空力性能や空力騒音に重要な影響を及ぼす境界層遷移の予測精度向上並びに外乱環境を考慮したより現実的な遷移予測を目指した基礎研究である。特に焦点を合わせているのは、機体製作上避けることのできない僅かなレベルの壁面粗さが境界層の不安定性や乱流遷移に与える影響であり、表面粗度の安定性への影響を実験・理論両面から解明し、遷移予測精度の向上につなげることを目的としている。

3. 研究の方法

境界層の安定性に関する実験は、400mm×400mmの吹き出し式低乱風洞（最大一様流速 12m/s、乱れ強度 0.1%以下）に境界層板（1100mm）を設置して行われた。前縁から 310mm 下流（ $x$ -レイノルズ数  $Re_x=1.25 \times 10^5$ ）から正弦波状の壁面粗さ（凹凸）が始まる。T-S 波動は臨界レイノルズ数付近の境界層内に設置された振動リボンにより導入され、T-S 波動の発達に対応する微弱な速度変動は熱線流速計で測定された。粗さモデルは、流れ方向にのみ正弦波状に変化する二次元凹凸壁ならびに流れ方向およびスパン方向に共に正弦波変化する三次元凹凸壁（図 1 参照）、さらに、主流方向に対して傾斜した斜め波状壁の 3 種類である。波状壁（凹凸）の振幅は最大でも 0.42mm であり、測定領域の境界層排除厚さのせいぜい 20%程度である。これは、6m/s の実験流速条件において、ブラジウス流の壁面摩擦速度と凹凸振幅に基づく粗さレイノルズ数が波状壁開始位置付近で  $Re_k \approx 25$  に対応する。波状壁の振幅と波長を種々変えて境界層の安定性に対する壁面粗さの影響を調べた。

さらに、境界層と同様の安定特性を有する

平面ポアズイユ流について、壁面段差の影響を理論、数値計算及び実験により調べた。

4. 研究成果

(1) 二次元波状壁境界層の安定性

まず、二次元粗さの安定性に及ぼす効果を説明する。零圧力勾配の平板上境界層において、T-S 波動（境界層の不安定モード）の発達に対する分布粗さの影響を、図 2(a)に示すような微小振幅の正弦波状の壁面凹凸を採用して実験的に調べた。

図 3 は、T-S 波動と同程度の波長をもつ波状粗さについて、振幅（粗度レイノルズ数  $Re_k$ ）を変えて、T-S 波動の増幅に対する影響を調べたものである：T-S 波動の振幅比を排除厚さに基づくレイノルズ数  $Re^*$  に対して表示している。 $Re_k=2.0$  の僅かな壁面凹凸に対しても T-S 波動の増幅率は滑面壁での値を上回り、それより小さくしても滑面の値にゆるやかに近づいていくだけである。このように、二次元粗さはごく僅かでも境界層の不安定性を強める働きを持つ。

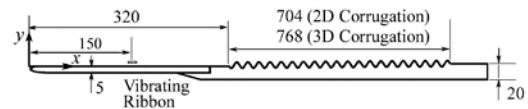


図 1 境界層平板

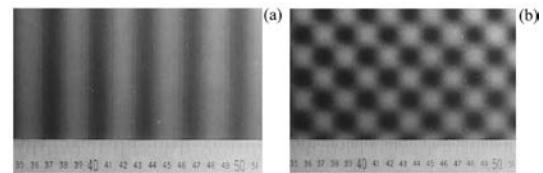


図 2 二次元 (a) および三次元 (b) 波状粗さモデル。

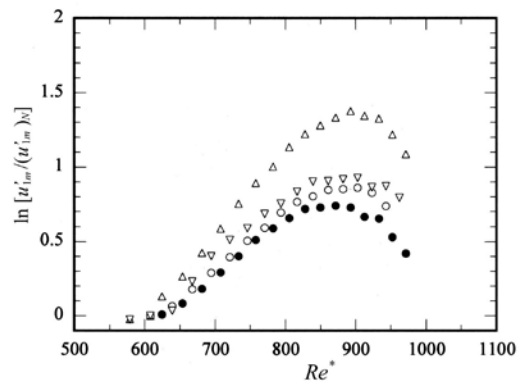


図 3 T-S 波動の増幅に対する二次元波状粗さの振幅 ( $A_w$ ) に対する依存性。  $U_\infty=6$  m/s, 無次元周波数  $F=1.5 \times 10^{-4}$ .  $\Delta$   $A_w=0.07$ mm ( $Re_k=0.68$  :  $Re^*=617$  の値),  $\nabla$   $A_w=0.12$ mm ( $Re_k=2.0$ ),  $\circ$   $A_w=0.21$ mm ( $Re_k=6.2$ ),  $\bullet$  滑面。

また、図 4 は、波状壁の振幅を一定 ( $A_w=0.21$ mm) で波長  $\lambda_w$  を変化させたときの T-S

波動の増幅を比較している。T-S 波動の増幅は波状粗さのスケール（波長 $\lambda_w$ ）にはほとんど依存せず、いずれも滑面壁よりも大きな増幅を示す。特に、 $\lambda_w=4\text{mm}$  の場合は凹凸の凹部にはく離泡が形成されるが、その場合でも不安定性が強まることもなく T-S 波動の増幅特性にほとんど変化がないことは注目すべきである。

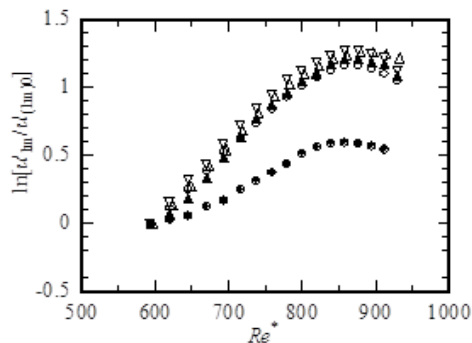


図 4 T-S 波動の増幅に対する二次元波状粗さ ( $A_w=0.21\text{mm}$ ) の影響.  $U_\infty=5\text{ m/s}$ , 無次元周波数  $F=1.5\times 10^{-4}$ .  $\circ$   $\lambda_w=32\text{mm}$ ,  $\Delta$   $16\text{mm}$ ,  $\nabla$   $8\text{mm}$ ,  $\blacktriangledown$   $4\text{mm}$ ,  $\bullet$  滑面

### (2) 三次元波状壁境界層の安定性

次に、三次元粗さの影響を説明する。図 5 は、図 2(b)に示す三次元波状壁 ( $A_w=0.21\text{mm}$ ,  $\lambda_w=32\text{mm}$ ) 上の T-S 波動の増幅と滑面での増幅を比較している。ただし、 $x=320\text{mm}$  位置での振幅 ( $u'_{1,0}$ )<sub>0</sub> に対する比で表している。二次元波状粗さの場合と異なり、T-S 波動の増幅特性は滑面の場合と一致しており、T-S 波動の増幅にはほとんど影響を与えないことがわかる。波状壁の波長を半分にして凹凸のスケールの影響を調べたが、結果はほとんど変わらなかった、また、波状壁の振幅を 2 倍にしても T-S 波動の増幅が滑面壁の場合よりも僅かに増す程度であった。これまで、二次元と三次元粗さが境界層の安定性に及ぼす効果の違いをこのように明確に示した研究はなく、注目すべき成果である。

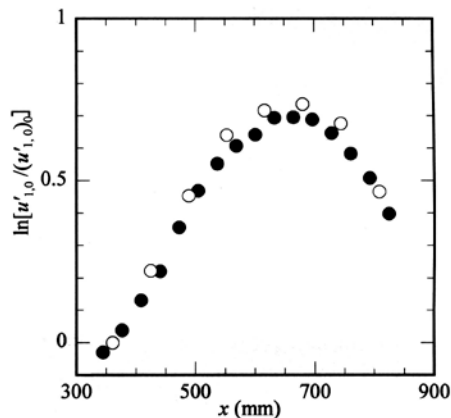


図 5 T-S 波動の増幅に対する三次元波状粗さ ( $A_w=0.21\text{mm}$ ,  $\lambda_w=32$ ) の影響.  $U_\infty=5\text{ m/s}$ , 無次元周波数  $F=1.5\times 10^{-4}$ .  $\circ$  波状壁,  $\bullet$  滑面.

ただし、波状壁の振幅が大きい場合、二次元 T-S 波動が成長した後起きる二次不安定（波動の三次元化）に強く影響することも確認された。

### (3) 安定性に対する波状壁斜行角の効果

二次元と三次元の粗さの影響の違いをさらに明確に示すために、図 6 に示すような斜行波形状の凹凸面上の境界層における T-S 波動の増幅を滑面壁の場合と比較した。斜行波の角度  $\phi=30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 90^\circ$  の 4 つの粗面モデルを採用した。いずれも振幅  $A_w=0.21\text{mm}$  である。図 7 は、二次元波状壁を  $30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$  の斜行波モデルに変えたときの T-S 波動の増幅特性の変化を示している。傾斜角  $\phi$  の増加と共に二次元波状壁の増幅率が減少し、滑面のときの値に近づいていくのがわかる： $\phi=60^\circ$  では滑面の値にかなり近づいている。壁面の波うちが流れ方向に直角、すなわち  $\phi=90^\circ$  の場合では、図 8 に示すように、増幅特性は滑面壁の場合とほとんど一致する。

このように、T-S 波動（二次元）と粗面の干渉は、粗度の三次元性が強まるにつれて、弱まるのが理解される。ただし、斜行波壁の場合二次元 T-S 波動との観照の結果、三次元波動成分が生成されるため、T-S 波動の増幅が増せば、二次不安定の引き金（攪乱源）になる。

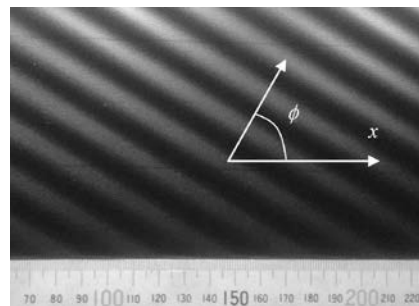


図 6 斜め波状粗さモデル ( $\phi=60^\circ$ ).

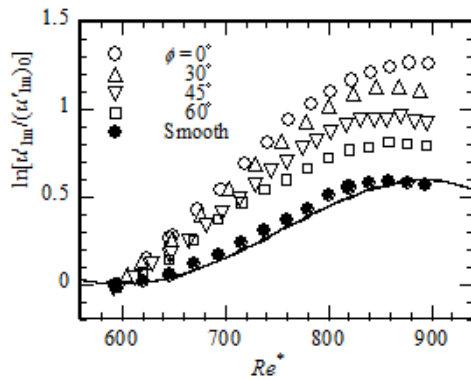


図 7 斜行粗さ壁 ( $A_w=0.21\text{mm}$ ,  $\lambda_w=16\text{mm}$ ) 上の T-S 波動の増幅.  $U_\infty=5\text{ m/s}$ , 無次元周波数  $F=1.5\times 10^{-4}$ . 実線は滑面に対する線形安定性理論.

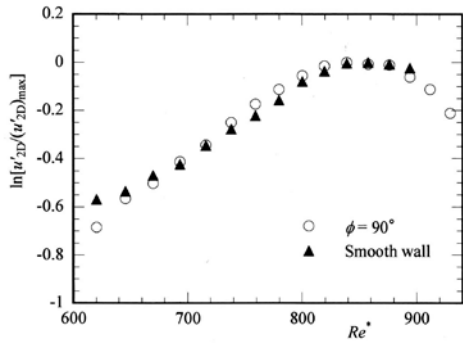


図8 90°斜行粗さ壁 ( $A_w=0.21\text{mm}$ ,  $\lambda_w=16\text{mm}$ ) 上の T-S 波動の増幅.  $U_\infty=5\text{ m/s}$ , 無次元周波数  $F=1.5\times 10^{-4}$ .

(4) 安定性に対する壁面微小段差の影響  
壁面の微小段差が流れの安定性にどの程度影響するかを理解することも層流化を考える上では重要である. ここでは, 平面ポアズイユ流において, 微小段差の影響を数値計算と実験により調べた. 線形安定性解析も同時に行われた. 図9は, 前方ステップ (□) と後方ステップ (○) の場合について T-S 波動の発達の違いを比較している. ただし, 流れ方向距離  $X$  はチャンネル半分高さ  $h$  で正規化されている. レイノルズ数は  $Re(=U_\infty h/\nu)=5000$ , 段差 (ステップ) 高さは  $h$  の僅か 1% である. 後方ステップの場合には段差のすぐ下流で振幅が増大し, 一方, 前方ステップの場合には逆に振幅が急減し, 滑面の場合 (上流域,  $X < 0$ ) に比べて増幅率 (減衰率) も変化する. 数値計算および安定性理論では, このような T-S 波動の増幅率に対する段差の影響が 500 $h$  程度下流まで続くことが見出された.

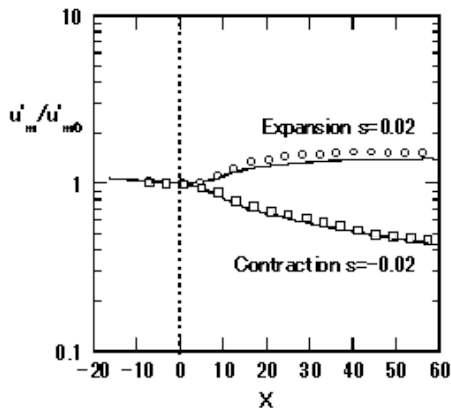


図9 壁面段差 ( $X=0$ ,  $s=0.02$ ) 下流の T-S 波動の振舞い.  $Re=5000$ , 無次元周波数  $\omega=0.27$ . 実線は数値計算結果. ○, □は実験結果.

## 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 4 件)

- ① Ma'mun M.D., Asai M. and Inasawa A.:

Instability of boundary layer on two-dimensional corrugation with various wavelengths, Transactions of Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, 査読有, Vol.58, No.3, 2015, pp.156-162.

- ② Inasawa A., Floryan J.M. and Asai M., Flow recovery downstream from a surface protuberance, Theoretical and Computational Fluid Dynamics, 査読有, Vol.28, No.4, 2014, pp.428-447, doi: 10.1007/s00162-014-0321-x.

- ③ Ma'mun M.D. and Asai M., Influences of Oblique Surface Corrugation on Boundary-Layer Instability, Journal of the Physical Society of Japan, 査読有, Vol.83, 2014, 084402. doi:http://dx.doi.org/10.7566/JPSJ.83.084402.

- ④ Ma'mun M.D., Asai M. and Inasawa A., Effects of surface corrugation on the stability of zero-pressure-gradient boundary layer, Journal of Fluid Mechanics, 査読有, Vol.741, 2014, pp.228-251, doi:10.1017/jfm.2013.653.

[学会発表] (計 3 件)

- ① Ma'mun M.D. and Asai M., Effects of oblique angle of surface corrugation on the boundary-layer instability, 日本流体力学会年会 2014, 2014 年 9 月 15-17, 仙台.

- ② Ma'mun M.D., Asai M. and Inasawa A.: An experimental investigation of the secondary instability in a boundary layer on the three-dimensional surface corrugation, 14th Asian Conference of Fluid Mechanics, Hanoi, Oct. 15-19, 2013.

- ③ Ma'mun M.D., Asai M., Inasawa A. and Shigeta M., Effects of surface corrugation on boundary layer instability, 13th International Congress of Theoretical and Applied Mechanics, Beijing, Aug. 19-24, 2012.

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

浅井 雅人 (ASAI MASAHIKO)

首都大学東京・システムデザイン研究科・教授

研究者番号: 00117988

(2) 研究分担者

稲澤 歩 (INASAWA AYUMU)

首都大学東京・システムデザイン研究科・准教授

研究者番号: 70404936