

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 5月20日現在

機関番号：22604

研究種目：基盤研究（c）

研究期間：2009～2011

課題番号：21560820

研究課題名（和文）壁面粗さの影響を考慮した境界層遷移予測の高精度化に関する研究

研究課題名（英文）Study on effects of surface roughness on the boundary-layer instability for accurate transition prediction

研究代表者

浅井 雅人 (ASAI MASAHIRO)

首都大学東京・大学院システムデザイン研究科・教授

研究者番号：00117988

研究成果の概要（和文）：

粗さレイノルズ数が5以下の微小振幅の壁面粗さ（壁面凹凸）が境界層遷移の始まりを支配する T-S 波動の増幅に及ぼす影響を零圧力勾配下の境界層で実験的に調べた。二次元と三次元の壁面粗さの影響を滑面の場合と比較した結果、二次元粗さが強い不安定化効果を示すのに対し、三次元粗さでは二次元粗さに比べ不安定効果がかなり弱くなることが示された。このような二次元粗さと三次元粗さの安定性に対する影響の違いは、平面ポアズイユ流においても実験と数値計算の両面から調べられた。

研究成果の概要（英文）：

Effects of 2D and 3D surface corrugation with roughness Reynolds numbers less than 5 on the growth of T-S waves were examined experimentally in a zero-pressure-gradient boundary layer. A distinct difference was found in the destabilizing effect between 2D and 3D corrugations. 2D surface corrugation promotes the growth of T-S waves significantly, while the destabilizing effect of 3D corrugation is much weaker than that of 2D corrugation. Destabilizing effects of surface corrugation were also examined both experimentally and numerically in plane Poiseuille flow.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,700,000	510,000	2,210,000
2010年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2011年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：総合工学

科研費の分科・細目：航空宇宙流体工学

キーワード：流れの安定性・乱流遷移・境界層・壁面粗さ

1. 研究開始当初の背景

境界層遷移予測は一般に線形安定性理論のみに基づいて行われているが、遷移予測の

基礎となる安定性解析は粗さの無い理想的な滑面壁に発達する境界層に対するものである。しかしながら、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、微小高さの分布粗さが流れの不安定性すなわちトルミン・シュリヒティング波動（T-S 波動）の増幅を促す機構はほとんど解明されておらず、これまでの遷移予測法においても全く考慮されていない。また、粗さのメカニズムの解明につながるような基礎実験自身も非常に少ない。

2. 研究の目的

本研究は、翼の層流化制御の実現や境界層遷移の予測能力の向上に不可欠な、微小な分布表面粗さが境界層の安定性と遷移へ及ぼす影響を明らかにすることを目的とする。また、摩擦抵抗（乱流摩擦抵抗）の視点で定義されている流体力学的滑面の概念を流れの安定性の視点で再検討する。実験は、零圧力勾配の境界層（ブラジウス流）に加えて、境界層と同様に T-S 波動の増幅減衰が観察できる平面チャンネル流を対象として行われた。

3. 研究の方法

(1) 境界層の安定性

境界層の安定性に関する実験的研究は、400mm×400mm の吹き出し式低乱風洞（一様流速 6m/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 $R_x=1.25 \times 10^5$) 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。

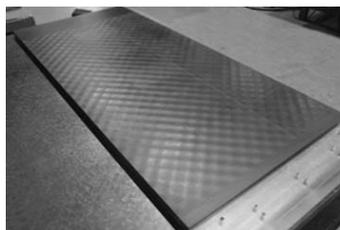
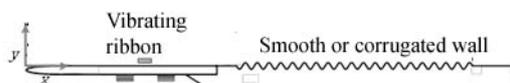


図1 三次元波状粗さを有する境界層板

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）の2種類を対象とする。これらの正弦波状粗さは、分布表面粗度の一つのフーリエ成分を抽出したものとみなすことができる。波状壁の波長は、二次元、三次元粗さとも T-S 波動の波長と同程度とした。波状壁（凹凸）の振幅は 0.21mm であり、測定領域の境界層排除厚さのせいぜい 10%程度で微小高さの粗度である。また、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は波状壁開始一付近で 2.5 程度である。従って、従来の摩擦抵抗の基準からすると流体力学的滑面とみなせる微小振幅粗面壁である。

(2) 平面ポアズイユ流の安定性

平面ポアズイユ流の安定性に関する研究は、ポアズイユ流の臨界レイノルズ数 (5772) 以上のレイノルズ数 $R=6500$ まで層流を維持できる低乱チャンネル流装置を用いて行われた。チャンネル半分高さの 4%の矩形粗さ要素をチャンネル上面にのみ周期的に配置した。粗さ間隔は無次元波数で 5 (T-S 波動の波長の 1/5 程度) である。なお、スパン方向に平行に配置した分布粗さ（二次元）およびスパン方向に対して 30° と 45° 傾けた斜め（三次元）配置粗さの3種類の粗さ分布を比較した。境界層実験と同様、振動リボン法により T-S 波動が導入され、粗さの安定性に対する効果を滑面の場合と比較した。レイノルズ数はすべて亜臨界の $R=5000$ である。

また、二次元分布矩形粗さ壁の場合に関しては、ナビエ・ストークス方程式に基づく直接数値シミュレーションによっても調べられた。

4. 研究成果

(1) 境界層の安定性に対する影響

零圧力勾配の平板上境界層において、T-S 波動の発達に対する分布粗さの影響を、分布粗さとして境界層排除厚さの 10%程度の微小振幅の正弦波状の壁面凹凸（Surface corrugation）を採用して実験的に調べた。特に注目したのは、二次元粗さと三次元粗さ壁上の境界層の微小振幅攪乱（T-S）波動に対する線形安定性の比較である。

二次元波状壁においては、実験のすべての周波数の攪乱（T-S 波動）の増幅率は滑面壁での値を上回り、かつ不安定領域は拡大し、確かに境界層を不安定化することが示された。図2は、無次元周波数 $F=1.5 \times 10^{-4}$ の場合

の例である。凹凸振幅は粗さレイノルズ数でいえば 2.5 程度であり、それによる速度分布の変化は壁のごく近傍でのみ現れるにもかかわらず流れの不安定化を顕著に促す。

一方、図 3 は、三次元波状壁における T-S 波動（無次元周波数 $F=1.5 \times 10^{-4}$ ）の実効値振幅（ u'_m ）の流れ方向の発達を滑面壁および二次元波状壁の場合と比較している。ここで、比較しやすいように、波状壁領域に入る前の位置（ $R_x=1.05 \times 10^5$ ）での実効値（ u'_{m0} ）で正規化している。T-S 波動の増幅は、二次元凹凸の場合を大きく下回り、滑面壁の場合とそれほど異ならない。このように、境界層の安定性に対する二次元と三次元の粗さ（凹凸）の影響が顕著に異なることは特筆すべきである。

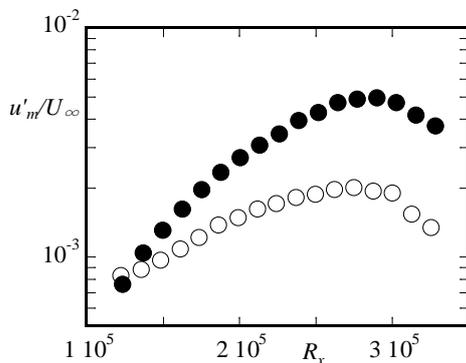


図 2 滑面壁 (o) と二次元波状壁 (●) 上の T-S 波動の成長の比較 ($F=1.5 \times 10^{-4}$).

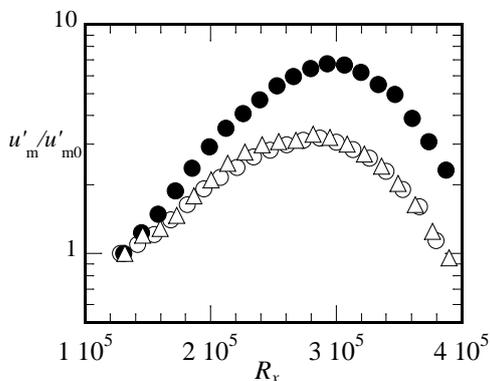


図 3 T-S 波動の増幅の比較 ($F=1.5 \times 10^{-4}$). ○ 滑面壁, ● 二次元波状壁, △ 三次元波状壁.

(2) 平面ポアズイユ流の安定性実験

図 4 は、滑面壁、二次元粗度分布、斜め粗度分布の場合の T-S 波動の空間増幅率を比較している。導入された T-S 波動は、滑面の場合せいぜい中立安定に近い振る舞いを示すのに対して、矩形粗さを二次元配置した壁の場合では T-S 波動は角周波数 $\omega=0.25 \sim 0.30$ の範囲で明らかに空間増幅率は正の値を示し、二次元分布粗さが流れの不安定化を顕著に促進することが示された。二次元粗さを 30° 傾

けた斜め配置の分布粗さでは、空間増幅率は二次元粗さに比べて小さくなり不安定化の効果が一気に弱まり滑面の値に近づくことが示された。粗さ要素を 45° まで傾けた場合においても、 30° の結果と大きな違いがない。

本実験における粗さレイノルズ数（粗さの半分高さおよび壁面摩擦速度に基づく）は約 2 であり、この値は、先述の境界層実験と同様、従来滑面壁として扱われる臨界値である 5 の半分以下である。従って、本実験で得られた結果は、これまで流体力学において滑面として扱われていた微小粗さでも、粗さが二次元的に分布している場合には、流れの安定性（T-S 波動の増幅）に強く影響を及ぼすことを示している。また、流れに対して 30° 粗さ要素を傾けただけで流れの安定特性は滑面の安定特性に近くなるということから、二次元粗さと三次元粗さの本質的な違いが存在するという結果も、境界層の実験で二次元波状壁と三次元波状壁の安定性に対する効果の違いと同様、粗さの影響を考える際に極めて重要な知見を与えている。

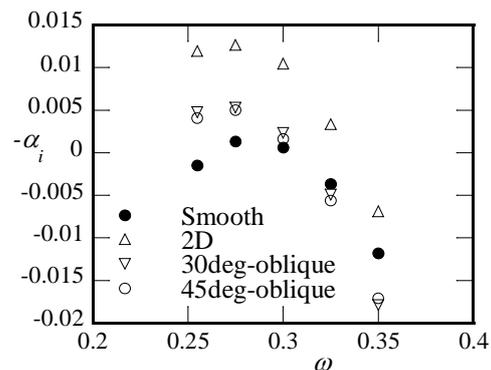


図 4 空間増幅率の周波数依存性 ($R=5000$).

(3) 粗面壁チャンネル流の安定性の数値実験
上記実験に対応する二次元矩形粗さを有するチャンネル流の線形安定性は、ナビエ・ストークス方程式の直接数値計算により詳細に調べられた。図 5 は、壁面形状が $x=0$ 位置で滑面から二次元矩形粗さが分布した粗面壁に変化した場合の T-S 波のエネルギーの x 方向変化を示している。T-S 波動は粗面壁領域に入ると、滑面の場合（平面ポアズイユ流）の垂臨界レイノルズ数 5000 の場合でも、一気に増幅に転じるのがわかる。図 5 は、この粗面による T-S 波動の増幅機構を、レイノルズ応力によるエネルギー生成により説明している。強い負のエネルギー生成が矩形粗面上流角近傍で生じる一方、粗度の下流端から凹部においては正のエネルギー生成領域が流れ方向に伸びて分布している。粗さ要素一周期分の積分値を計算するとエネルギー生成は正の値をとり、また、粗面壁でのエネル

ギー散逸を調べるとエネルギー生成に比べ十分小さく、結果として粗さ要素ごとのエネルギー収支は正となり T-S 波動の増幅を引き起こす。このような粗さの下流端での強いエネルギー生成により不安定性が促進される。

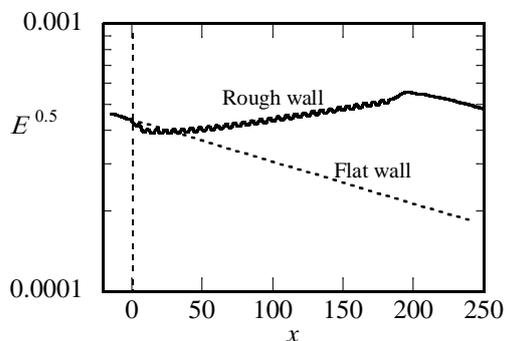


図5 T-S 波動のエネルギー増幅。

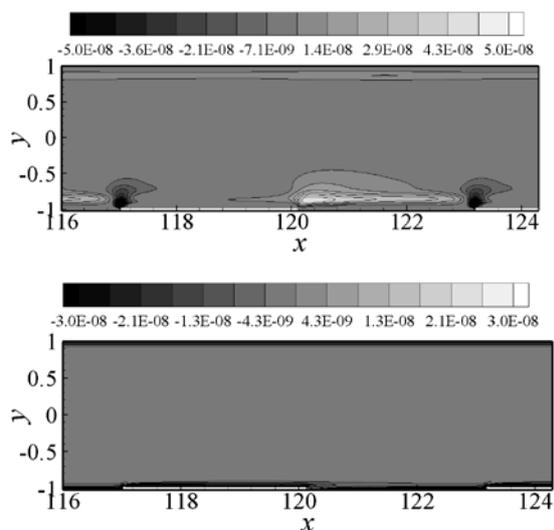


図6 矩形粗さまわりの T-S 波動のエネルギー生成(上図)と粘性散逸(下図)。

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 稲澤歩, Floryan J.M., 浅井雅人, 壁面粗さを有するチャネル流の安定性に関する数値実験, 宇宙航空研究開発機構特別資料, 査読有, 2010.
- ② Inasawa A., Asai M. and Floryan J.M., Certain aspect of instability of flow in a channel with expansion/contraction, IUTAM Book Series, Laminar-Turbulent Transition, 査読有, Vol.18, 2010, pp.501-504.

- ③ Floryan J.M. and Asai M., On the transition between distributed and isolated surface roughness and its effect on the stability of channel flow, Physics of Fluids, 査読有, vol.23, 2011, 104101.
DOI:10.1063/1.3644694

[学会発表] (計7件)

- ① 滋田雅洋, 飯島芳之, 浅井雅人, 稲澤歩, 波状壁面上の境界層の安定性に関する実験的研究, 第58回理論応用力学講演会, 2009年6月, 東京.
- ② Asai M., Effects of roughness on the stability of wall-bounded shear flows, 13th Asian Congress of Fluid Mechanics, 21 Dec. 2010, Bangladesh.
- ③ Inasawa A., Asai M., and Floryan J.M., The influence of change in surface geometry on the stability of flow in a channel, Euromech Fluid Mechanics Conference 8, 21 Dec. 2010, Germany.
- ④ 滋田雅洋, 浅井雅人, 稲澤歩: 微小振幅波状壁面上に発達する境界層の安定性に関する研究, 日本流体力学会年会 2010, 2010年9月11日, 札幌.
- ⑤ 浅井雅人, 鈴木広幸, 稲澤歩, 壁面せん断流の安定性に対する矩形分布壁面粗さの影響, 日本機械学会年次大会講演会, 2010年9月8日, 札幌.
- ⑥ Mamun M.D. Shigeta M., Asai M. and Inasawa A., Influences of surface roughness on boundary-layer instability and transition, 日本流体力学会年会 2011, 2011年9月8日, 東京.
- ⑦ 浅井雅人, 滋田雅洋, 稲澤歩: 境界層の安定性に対する壁面粗さの影響, 日本航空宇宙学会第42期年会講演会, 2011年4月14日, 東京.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

浅井 雅人 (ASAI MASAHIITO)

首都大学東京・大学院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・大学院システムデザイン研究科・助教

研究者番号: 70404936