

No. 5

表面処理による遷移および乱流制御の試み

小栗 英美*, 小濱 泰昭*

Turbulent Transition and Boundary Layer Control Using
Micron-Sized Distributed Surface Geometry

E. OGURI and Y. KOHAMA

Institute of Fluid Science, Tohoku University

The present paper deals with experimental investigation using micron-sized distributed surface geometry on a flat plate to observe effective drag reduction. Namely, objective is to verify Tani's hypothesis that distributed fine rough surface can even reduce turbulent drag in a certain range of Reynolds number. To verify above hypothesis, we directly measured the net drag of a flat plate wrapped by a sheet with micron-sized distributed surface geometries. At the range of higher Reynolds number, a limited amount of drag reduction was observed in the case of certain kinds of rough surface geometries. The present result requires a new explanation how turbulent energy is suppressed in the turbulent boundary layer. On the other hand, at the range of lower Reynolds number, 7~9% drag reduction was observed in the surface covered with micron-sized hair. By measuring velocity distributions, it was found out that these drag reduction is owing to transition delay.

Key Words : boundary layer control, micron-sized distributed surface geometry, drag reduction, turbulent energy production mechanism, turbulent transition, tripped boundary layer

1. 緒 言

交通機関の高速化を実現するにあたり、物体に働く流体抵抗を境界層制御の立場から軽減することが必要となってくる。境界層制御は、乱流遷移を遅らせる層流制御、乱流境界層中のエネルギー生成を抑制する乱流制御¹⁾のおおむね2種類に分けられる。イルカの表面に観られるコンプライアントウォール²⁾、流れ方向に微小な縦溝構造を有するリブレット³⁾の効果は良く知られている。一方、谷は表面に分布する微小な粗さ ($Re_k < 7$) における抵抗軽減の可能性を提唱した⁴⁾。そこで本研究ではこの粗さ範囲内の粗面を用いて乱流制御を試みる。また西ら⁵⁾は網状の粗面を、高田ら⁶⁾は起毛繊維を用いて抵抗軽減の可能性を示している。本研究においても採用し、その抵抗軽減が乱流制御によるものか層流制御的なものなのかを検討する。

これらを表面形状とする平板に働く流体抵抗を直接測

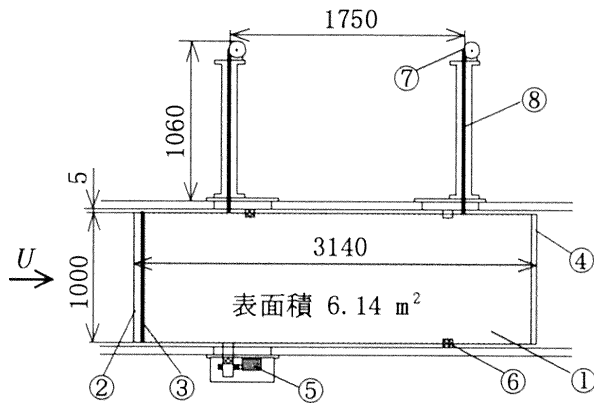
定するとともに、流れ場の状態を調べるために速度分布測定を行っている。以上の結果を踏まえ、抵抗軽減のメカニズムを解明し、抵抗軽減効果の大きな表面構造を開発することを最終的な目的としている。

2. 実験装置及び実験方法

実験には、東北大学流体科学研究所の低乱熱伝達風洞を測定部が密閉型の状態で使用した。図1に実験装置の概略を示す。測定に用いた平板は3.14m×1.0m×14mm、前縁形状は10:1の楕円形である。平板両面に滑面および数種類の表面形状の異なるフィルムないし布を貼り付ける。前縁から90mmの位置に $\phi = 0.5\text{mm}$ のトリップワイヤーを取り付け境界層を強制的に乱流遷移させている。

測定に用いた表面は9種類で、滑面を有するポリエステルフィルム、リブレット面として溝高さ17 μm 、溝間隔50 μm のポリエステルフィルム、表面分布粗面として粗さ高さが、9, 12, 30 μm の3種類の酸化アルミニウム粒子ラビングフィルム、網粗面としてポリエチレン

* 東北大学流体科学研究所



- ①表面フィルム, 布
- ②前縁 (10:1 楕円形)
- ③トリップワイヤー (φ=0.5)
- ④後縁
- ⑤ロードセル
- ⑥ガイドローラー
- ⑦平板吊り下げ装置
- ⑧ピアノ線 (φ=0.7)

図1 抵抗測定実験装置の概略 (単位: mm)

表1 各表面の構造の寸法および特徴

表面	粗さ高さ k (μm)	構造の寸法 (μm)	特徴, その他
リブレット	17	溝間隔50	頂角 110°
粗 $9\mu\text{m}$	11~13	粒子径9	—
粗面 $12\mu\text{m}$	14~16	粒子径12	—
粗面 $30\mu\text{m}$	32~34	粒子径30	—
網粗面	27~31	繊維の直径40	格子状の綾織
繊維 (A)	37~42	510×184 (流れ方向 \times 幅)	弾力性 柔軟性
繊維 (B)	62~72	360×235 (流れ方向 \times 幅)	粗さ高さ大
繊維 (C)	33~42	950×100 (流れ方向 \times 幅)	流れ方向の 糸が主流

綾織り網, 繊維粗面として織り方の異なる3種類の布を使用した。各種表面における表面または断面の顕微鏡写真を図2に, 構造の寸法および特徴を表1に示す。

平板は風洞上方から風洞壁に触れないようにピアノ線で吊り下げられる。平板に働く流体抵抗の測定には1g~5kgまで測定可能なロードセルを用い, 平板の横揺れをベアリングガイドローラーで抑制する。ロードセルからの出力信号は, 測定条件とともにコンピュータに取り込まれる。主流速度 $U = 5 \sim 65\text{m/s}$, 平板の全長 L を代表長さとしたレイノルズ数 $Re = 1.0 \times 10^6 \sim 1.4 \times 10^7$ の範囲で測定を行った。各表面につき複数回測定を行い再現性を確認している。

速度分布の測定には熱線流速計を用い, 平板に垂直な y 方向のみトラバースを行い平均速度分布等を測定し遷移レイノルズ数を求めている。

3. 実験結果および考察

3.1 乱流制御

まず流れ場の状態およびトリップワイヤーの影響について滑面の結果を図3に示す。横軸はレイノルズ数 Re の対数表示, 縦軸は抵抗測定値から平板, 表面フィルムおよびトリップワイヤーの圧力抵抗を減じた摩擦抵抗を摩擦抵抗係数 C_f で表している。 $Re < 6 \times 10^6$ では乱流境界層の値であるプラントルの式より小さく, 平板上流部に層流もしくは遷移領域が存在することを意味している。 $Re > 6 \times 10^6$ では平板全域で完全乱流境界層であるとみなすことができる。

図4はリブレット面および粗面9, 12, $30\mu\text{m}$ における粗さレイノルズ数 Re_k を摩擦抵抗係数 C_f の滑面に対する増減率で示している。 $C_f/C_{fs} < 1$ は抵抗減少, $C_f/C_{fs} > 1$ は抵抗増加を意味する。また, 平板全域で

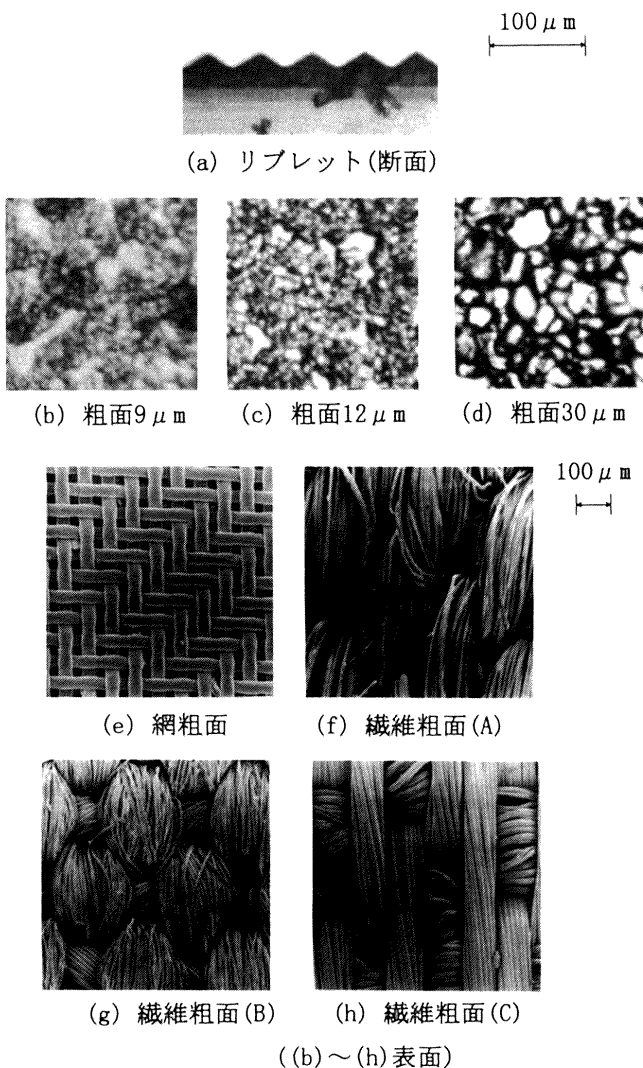


図2 各種表面の表面または断面の顕微鏡写真

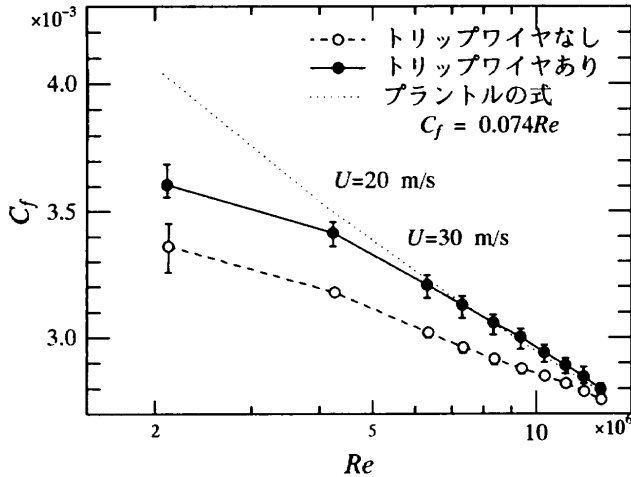


図3 滑面における流れ場の状態およびトリップワイヤの影響

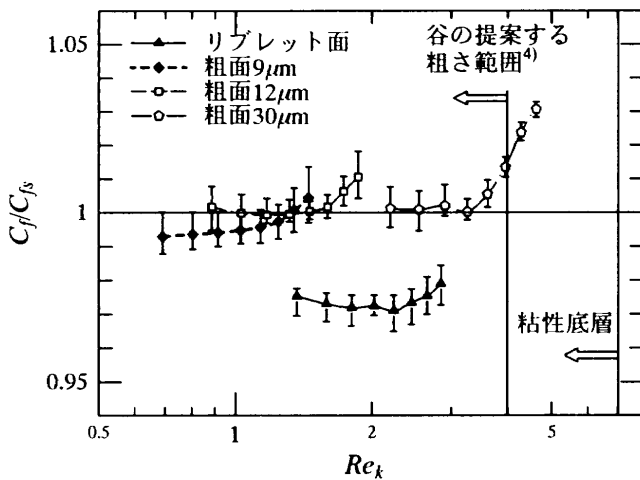


図4 各表面における Re_k に対する摩擦抵抗係数の変化率

完全乱流境界層とみなされる範囲における結果のみを示している。リブレット面では $0.9 < Re_k < 2.8$ で抵抗軽減がみられ最大3%に達している。これは本研究とほぼ等しい Re_k 範囲で測定したWalshら³⁾の結果と一致し、本測定装置が正確に機能していることを意味している。粗面 $9\mu\text{m}$ は $0.7 < Re_k < 1.25$ において0.5%とわずかではあるが滑面より低い値を示している。この範囲内での測定値のばらつきは $\pm 0.8\%$ であり抵抗減少量はその中に埋もれてしまうが、抵抗軽減の可能性はあるものとみなす。粗面 $30\mu\text{m}$ における粘性底層外縁付近の急激な抵抗増加は流体力学的に滑面の粗さ範囲を超えたためという妥当な結果といえる。

抵抗軽減は谷の提案した粗さ範囲 $Re_k < 7$ でみられるが、その範囲内の粗面 $12\mu\text{m}$ 、 $30\mu\text{m}$ では抵抗軽減はみられず、 $9\mu\text{m}$ においても $Re_k < 1.25$ の小さな粗さレイノルズ数範囲でしか確認されなかった。これは粗さが平板上流部の薄い境界層に対しては流体力学的な粗さ

として作用したためと考えられる。

今後、境界層をさらに厚くする工夫をし、平板全域で乱流境界層かつ粗さが流体力学的に滑面である範囲において測定する必要があると考えている。

3.2 強制遷移を遅らせる効果

図5は網粗面、繊維(A)、(B)における摩擦抵抗係数 C_f を滑面と比較して示したものである。測定範囲内での Re_k はそれぞれ $0.38 \sim 4.90$ 、 $0.52 \sim 6.70$ 、 $0.87 \sim 11.34$ に相当する。平板全体が完全に乱流境界層である高レイノルズ領域では滑面より大きい値となり乱流制御は認められない。一方、低レイノルズ数域において抵抗減少がみられ、網粗面、繊維(B)は $U=7.5\text{m/s}$ 、繊維(A)は $U=7.5 \sim 10\text{m/s}$ と広範囲において8~9%の軽減を示している。このような低レイノルズ数域($Re \approx 2 \times 10^6$)では、平板上流部に層流もしくは遷移領域が残っているため乱流遷移を考慮する必要がある。

まずこれら表面の自然遷移に対する効果を調べるために、トリップワイヤを取り付けない状態で測定した結果を示す。図6は滑面および繊維(A)、(C)における形状係数 H を示している。横軸は前縁からの距離を代表長さとしたレイノルズ数 Re_x である。どちらの表面においても滑面より早期に乱流遷移をしており、自然遷移に対しては弊害にしかならないことがわかる。次に滑面、網粗面、繊維粗面(A)、(B)、(C)のトリップワイヤにより強制的に遷移させられた境界層における H を図7に示す。滑面と比較して繊維(C)は8%、網粗面、繊維(B)では20%、繊維(A)においては40%も乱流遷移が遅れていることがわかる。遷移が遅れるほど抵抗値の低い領域が増すことになり抵抗測定の結果を裏付けている。

以上のことより、トリップワイヤにより強制的に乱流遷移させられた境界層において遷移を遅らせる効果が

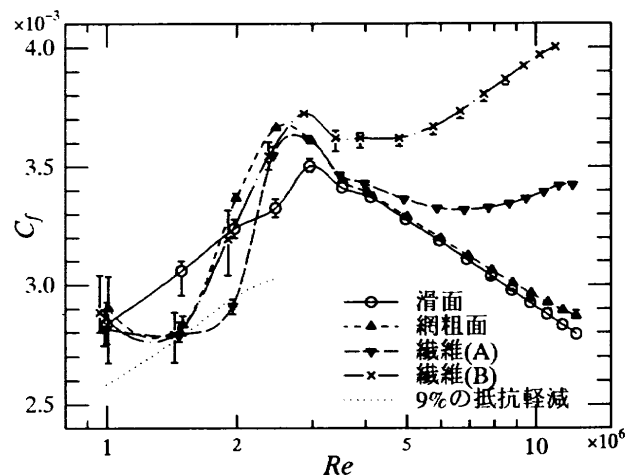


図5 網粗面、繊維粗面における摩擦抵抗係数

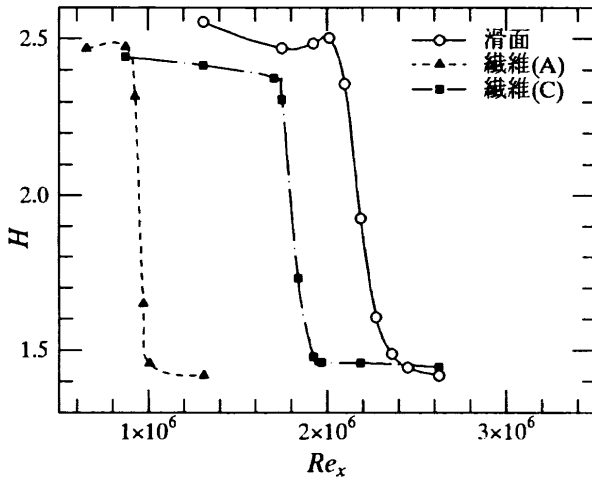


図6 滑面, 繊維粗面 (A), (C) における形状係数
トリップワイヤなし

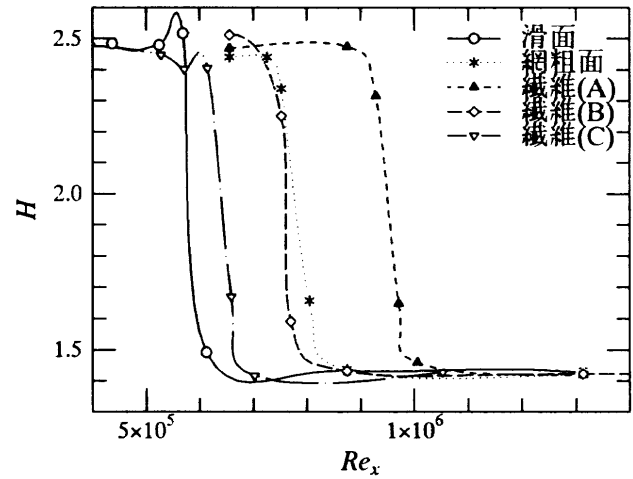


図7 各表面における形状係数
トリップワイヤあり

あるといえる。これはトリップワイヤにより乱された下流の流れ場が平衡状態に達する過程において、これらの表面構造が何らかの効果をもたらしたものと考えられる。繊維の構造から考察すると、自然遷移には粗さ高さの影響が大きいが、強制遷移には繊維の弾力性、柔軟性など他の要因が加わってくるものと思われる。

4. 結 言

本研究では、微小な表面分布粗さにおける抵抗軽減の実証および、網粗面、起毛繊維の抵抗軽減の原因を確認する目的で、抵抗の直接測定および速度分布測定を行い以下の知見を得た。

1. 微小な表面分布粗さ $9 \mu\text{m}$ において0.5%程度の抵抗軽減がみられた。
2. 網粗面、起毛繊維において強制的に遷移させられた境界層において遷移を遅らせる効果が確認された。

謝 辞

実験に際し多大なる協力を頂いた流体科学研究所技官太田福雄氏、並びに同付属工場技官浅野和夫氏に感謝の意を表します。

引用文献

- 1) M. Wallace, H. Eckelmann, and R. S. Brodkey : J. Fluid Mech., **54** (1972) 39-48.
- 2) D. M. Bushnell, J. N. Hefner, and L. Ash, Robert : Phys. Fluid, **20** (1977) S31-S48.
- 3) J. Walsh : AIAA Paper **82-0169**.
- 4) I. Tani : Proc. the Japan Academy, **65** (1989) 133-136.
- 5) 西 茂夫, 大坂英雄 : 日本機械学会論文集 (B), **60-574** (1994) 113-120.
- 6) 高田 孝, 京極啓史, 中原綱光 : 日本機械学会講演論文集, **940-53** (1994) 109.