

# 粗度の誘起する不安定性

本橋 龍郎\*

## Roughness-Induced Instability

Tatsuo MOTOHASHI

Nihon University

### ABSTRACT

Roughness in the boundary layer induces a kind of instability in its surrounding flow field. The instability generated strongly depends on its shape and position. The roughness is classified into three types: two dimensional, three dimensional and distributed roughnesses. Effect of these roughnesses on the instability is discussed.

**Key Words:** roughness, transition, flow control

#### 1. はじめに

ここ数年、孤立粗度（境界層中の微小円柱）の実験を行っている。孤立粗度によって誘起される流れの不安定性は、3次元的で複雑な振る舞いをするのが分かってきた。一方、他の粗度はどのような不安定性を誘起するのかを検討してみる必要を感じていた。そこで、単純な2次元粗度や3次元粗度よりさらに複雑な分布粗度ではどのように不安定性が誘起されるのかを調べてみることにした。

粗度まわりの流れは、一様流中のそれと異なり、境界層という剪断層をその背景にもっている。したがって、境界層の不安定性と粗度による流れの不安定性、両者が相互に影響する問題が考えられる。多くの研究は、層流の中に置かれた粗度が起こす不安定で、粗度が境界層としての不安定を直接誘導することはないように思える。

粗度の形状・分布によって簡易的に以下のように分類する。

- ① 2次元粗度：ワイヤ・フェンス等
  - ② 3次元粗度：球・円柱・円錐等
  - ③ 分布粗度：①や②の粗度を分布させたもの
- \* 2次元や3次元粗度は主に単体で扱われることが多いため、③の分類を一つ加える必要がある。③は複数の粗度が対象となる流れ場である。
- \* ③の分布にも、規則的な（周期的な）分布と不規則な（ランダム）分布を考えることができるが、通常

は不規則な分布を意味することが多い。

#### 2. 2次元粗度（単一）

Klebanoff et al. (1955) の指摘のように、2次元粗度と3次元粗度では、その下流における乱流領域の発生仕方が大きく異なる。すなわち、2次元粗度下流に発生する乱流領域は、一様流速の増大（すなわちレイノルズ数の増大）と共に、徐々に前進し、ついには粗度自身から乱流が発生しているかのように見える。3次元粗度では、現象はもっと臨界的に起こり、微小な一様流速の変化で乱流領域は急激に前進する。図1はKlebanoff等の実験結果である。横軸は粗度高さと粗度位置での排除厚さの比( $k^* = k/\delta^*$ )、縦軸は遷移レイノルズ数である。○印は2次元粗度（円柱棒）、●印は3次元粗度（球列）の結果を表す。遷移レイノルズ数の定義は、Klebanoff等の実験では、熱線流速計による風速変動波形から決定された。ただし、乱流への判断基準は明記されていない。一様流速の増加とともに $k^*$ は増加し、遷移レイノルズ数は減少する。粗度の違いによる遷移領域の挙動の相違は明らかである。この相違に対する決定的な説明は未だない。2次元粗度は、粗度直後に2次元的な剪断層を誘起し、その剪断層の非粘性的な不安定性に支配されるであろうことは予測される。下流の翼幅方向の2次元性が乱流の急激な増大を抑えている可能性は想像される。粗度直後の剥離領域の不安定性については、Tani and Sato (1956), Klebanoff and Tidstrom (1972) が研究を行っている。前者では、剥離領域の不安定性を2つに分類している。レイノルズ数が小さな場合には、剥離領域では遷

\* 日本大学理工学部

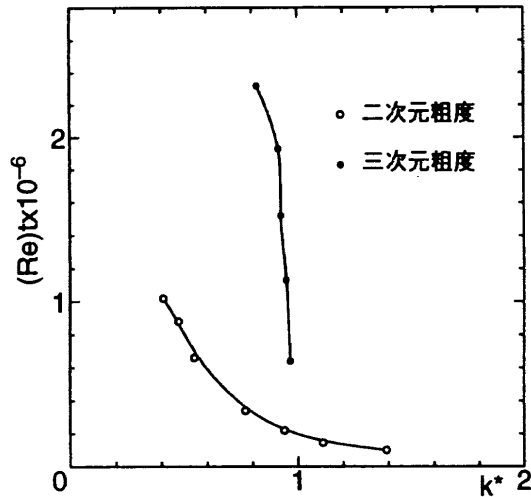


図1 粗度による遷移の相違  
(Klebanoff et al. (1955))

移が起こらず、再付着した下流の境界層中で通常の境界層の不安定性が発生する。レイノルズ数が大きくなると、剥離領域の中で遷移が起こり、その発生の機構は剥離剪断層型の不安定で説明されることを示している。さらに、Klebanoff and Tidstrom (1972) は剥離剪断層中の変動の発生機構を詳細に検討し、変動の増幅率や分布から判断して、不安定性は変曲点型の速度分布に起因することを示している。

### 3. 3次元粗度

初期の研究では、主に、粗度周りの流れの可視化に重点が置かれていた。粗度周りの流れは、2つの渦系によって特徴づけられる。1つは、粗度を取り巻くように発生する馬蹄形渦であり、もう一つは、粗度直後に発生する後曳渦である。馬蹄形渦は、長く下流方向に持続する渦で、境界層の乱流化には大いに関係するものと思われる。また、粗度直後には2次元粗度に比べると短い(～5h : h粗度高さ)剥離領域が存在する。剥離領域での流れの安定性は、著者達(1991)によって検討が行われているが、簡単な変曲点不安定性で説明できるかどうか、不明である。流れ場の一方向の剪断層(垂直方向あるいは水平方向)を問題にするのみでは不十分であると思われる。最近のKlebanoff et al. (1992)の論文でも、流れの不安定性が安定理論に支配されることを論じている。Morkovin (1991)はこのように大きな擾乱の元での乱流遷移を bypass transition と呼んでいるようである。

### 4. 分布粗度

分布粗度は、風洞実験で乱流境界層を生成するときの基本的な手段として使用されることが多い。ただ、その遷移の機構も解明されているとは言い難い。境界層の排除厚さと同程度以下の分布粗度については、TS波動の発達を促進することが、Corke et al. (1986)の実験から判明している。しかし、その他の場合については依然未解決の問題である。特殊な粗度として、平板上の溝を挙げることができる。特に、規則的な溝が平板表面上に存在する場合は、RibletやD型粗面として多くの研究者の注目を集めている。

### 5. あとがき

簡単に粗度によって誘起される流れの不安定性を概観してみた。未解決の問題が山積しているが、徐々に解明の方向に向かっていると思われる。

### 参考文献

- 1) Klebanoff, P. S., Schubauer, G. B. and Tidstrom, K. D. ; "Measurements of the Effect of Two-Dimensional and Three-Dimensional Roughness Elements on Boundary-Layer Transition", Jour. of Aero. Sci. (1955), pp.803-804.
- 2) Klebanoff, P. S. and Tidstrom, K. D. ; "Mechanism by Which a Two-Dimensional Roughness Element Induces Boundary-Layer Transition" Physics of Fluids, 15 (1972), 1173-1188.
- 3) Klebanoff, P. S., Cleveland, W. G., and Tidstrom, K. D. ; "On the evolution of a turbulent boundary layer induced by a three-dimensional roughness element", J. F. M., (1992), Vol.237, pp.101-187.
- 4) Corke, T. C., Bar-Sever, A., and Morkovin, M. V. ; "Experiments on transition enhancement by distributed roughness", Phys. Fluids, 29 (1986), pp. 3199-3213.
- 5) Motohashi, T., Ono, K., Tamura, T. and Kuwahara, K. ; "Instabilities around an isolated roughness", ASME, FED-Vol.114, (1991), pp.179-183.
- 6) Morkovin, M. M. ; "Panoramic View of Changes in Vorticity Distribution in Transition Instabilities and Turbulence", ASME, FED-Vol.114, (1991), pp.1-12.