

No.15 波状壁をもつ2次元チャネル流の安定性の実験的研究

浅井雅人（都科技大），岡本拓志（都科技大），J.M.フローリアン（西オンタリオ大）

Experimental investigation of instability of plane channel flow bounded by corrugated wall

M. Asai*, T. Okamoto* and J.M. Floryan**

*Dept. of Aerospace Eng., Tokyo Metropolitan Institute of Technology

**Dept. of Mechanical and Materials Eng., The Univ. Western Ontario

ABSTRACT

In order to clarify effects of distributed roughness on the stability of wall-bounded shear flows, the instability of laminar channel flow bounded by corrugated wall is investigated experimentally. The experiment is conducted at subcritical Reynolds numbers for the linear instability of plane Poiseuille flow. The non-dimensional wavenumber of the corrugated wall is 1.02 and the amplitude is 4% of the channel half height. It is shown that such a slight waviness of the wall surface reduces the critical Reynolds number down to about 4000.

Key Words: Channel flow, Instability, Surface roughness, Critical Reynolds number

1. はじめに

乱れの弱い環境下における境界層の乱流遷移は線形安定性理論に従う攪乱の増幅に支配される。翼の境界層を例にとれば、後退角が小さな場合にはトルミン・シュリヒティング (T-S) 波動の増幅に支配され、後退角の大きな場合には横流れ不安定に支配される。しかしながら、境界層遷移の正確な予測や制御を考えると、常に問題となるのは外乱の存在である。外乱には、気流乱れや音などが挙げられるが、さらに重要な外乱として、壁面の粗度がある。孤立した粗度の場合、気流中の音や乱れと干渉して T-S 波動を生み出す原因となり、後退翼のような横流れを伴うとそれ自身横流れ渦の種となる。一方、壁面全体に分布するいわゆる分布粗さの場合には、壁近傍の流れの様子をも変更させるので、流れの安定特性にも影響し得る。本実験的研究で注目しているのは、分布粗さが流れの安定性にどのように影響するかである。

普遍的な知識を得るためには、できるだけ理論解析¹⁾が可能な実験デザインを考えるのが懸命である。

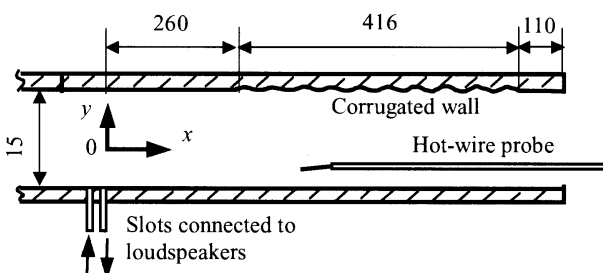


図1. 測定部の概略.

ここでは、分布粗さの最も単純なモデルとして、壁が正弦波状に波打っている場合を採用し、壁面粗さの安定性への影響を調べた。

2. 実験装置及び方法

実験は高さ 15 mm、幅 400 mm 長さ 6000 mm の長方形断面のチャネル風洞で行われた。断面のアスペクト比は 26.7 である。この幾何学形状は Nishioka et al²⁾の安定性実験で使用されたチャネルとほぼ同じである。レイノルズ数を定義する代表長さ h は流路の 1/2 高さの 7.5 mm である。中心流速は、最大 12 m/s までの範囲で可変であり、最大レイノルズ数は約 6000 である。線形安定の臨界レイノルズ数は 5772³⁾である。乱れ強さは 0.1% 以下であり、この最大レイノルズ数まで層流の平面ポアズイユ流を実現することができる。

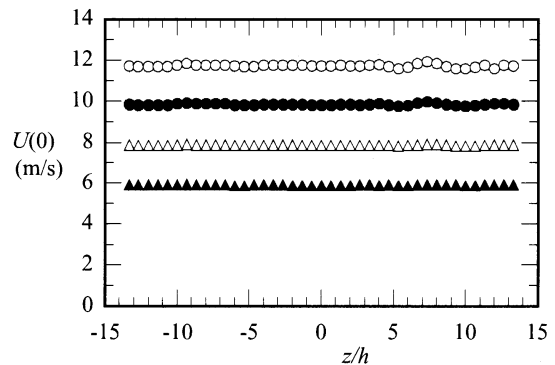


図2. チャネル中心速度 $U(0)$ のスパン方向変化。
▲ $R=3000$, △ $R=4000$, ● $R=5000$, ○ $R=5950$.

図 1 は、測定部の概略である。チャンネル下流端より 786mm と、806 mm に人工的に微小振幅攪乱（正弦波）を導入するスリット（幅 3mm，スパン長 300mm）がある。ただし、スリットは直径 0.3mm の孔が 0.6mm ピッチで千鳥上に開けられた薄板で覆われている。スリットは、それぞれ別のスピーカにつながれており、流量変動を生じないように逆位相の攪乱を導入して T-S 波動を励起している。波状壁は、波長 46.2mm（無次元波数 $\alpha_w = 1.02$ ），振幅 0.3mm（無次元振幅 $A_w = 0.04$ ）であり、チャンネル上面に攪乱源の 260mm 下流から 9 波長に渡って分布している。この測定部のチャンネル上壁は滑面壁に取り替えることができる。下壁はすべて滑面である。

座標系は、流れ方向に x （下流側の攪乱導入用スリットを原点）、壁に垂直上向きに y ，スパン方向に z である。時間平均速度 U および変動 u の測定は定温度型熱線風速計でなされた。熱線プローブはチャンネル下流端から挿入した。

3. 実験結果及び考察

本実験のチャンネル流の特性について説明する。図 2 は、中心流速のスパン方向分布である。二次元性は非常によく実現されていて、 $R=5950$ の場合でも最大 2%（peak-to-peak 値）程度である。特に二次元性の良好な $-14 < z/h < 5$ の範囲では、速度 U の y 分布はポアズイユ流の放物線分布にほとんど完全に一致することを確認している。二次元的なスパン中心で測定された中心流速を基準速度 U_c とする。

まず、滑面のポアズイユ流の安定性について線形安定性理論に従うことを確認した。図 3 は、亜臨界レイノルズ数 $R=5000$ における種々の周波数の攪乱の流れ方向発達である。ただし、 β は無次元角周波数である。励起された攪乱（基本周波数成分のみ抽出）の強さ u'_m/U_c はすべて 0.3% 程度で、二次不安定が生じない微小振幅攪乱である。また、励起された攪乱は、十分二次元的であることを確認している。図のように、亜臨界レイノルズ数のため、全ての周波数において攪乱は減衰する。減衰率は O-S 方程式から計算される値に近い。

次に、測定部の上壁を正弦波状の壁面に取り替え、微小振幅攪乱の増幅・減衰特性を調べた。図 4(a) は、 $R=5000$ における攪乱の発達を示している。 $x/h > 34.7$ から波状壁に入る。滑面の部分ではどの周波数においても減衰しているが、波状壁の部分に入ると少し下流位置から $\beta = 0.27$ (54Hz) と $\beta = 0.30$ (60.5Hz) の攪乱は増幅に転じる。また、図 4(b) は、 $R=4000$ における攪乱の発達を示している。このレイノルズ数においても減衰までには至らず、ほぼ中立安定の状態である。従って、わずかな壁面波打ちで臨界レイノルズ数が $R=4000$ まで減少することを示している。

4. まとめ

本研究では、二次元チャンネル流の線形安定性及

び正弦波状壁面の影響を調べた。チャンネル半分高さの僅か 4% の波打ち振幅で、T-S 波動の増幅に対する臨界レイノルズ数が $R=4000$ まで下がること示された。なお、理論的にも同様の臨界レイノルズ数の減少が得られていることを追記する。

本研究は、部分的に学術振興会科学研究費補助金基盤研究 C (13650963) の援助を受けた。

引用文献

- 1) Floryan, J.M. J. Fluid Mech. (1997) 29-55.
- 2) Nishioka, M. et al, J. Fluid Mech. 72 (1975) 731-751.
- 3) Orszag, S. J. Fluid Mech. 50 (1971) 689-704.

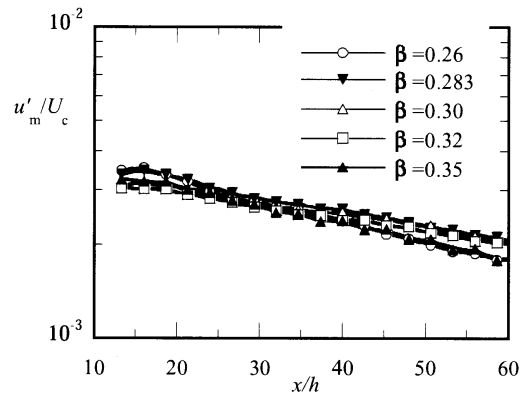


図 3. 滑面チャンネルにおける攪乱の発達. $R=5000$.

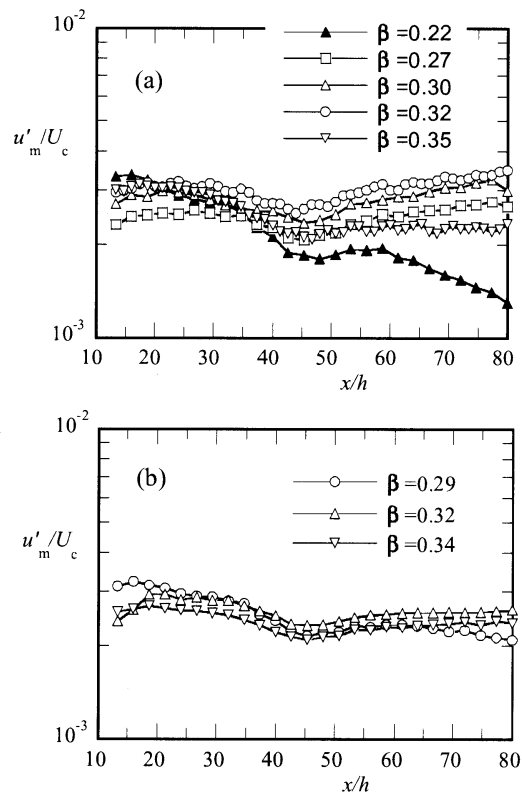


図 4 波状壁 ($\alpha_w = 1.02$, $A_w = 0.04$) の場合の攪乱の発達. (a) $R=5000$, (b) $R=4000$.