

平面チャネル流の線形安定性に対する二次元壁面粗さの影響

浅井雅人（都科技大），J.M.フローリアン（西オンタリオ大），前田友規（都科技大），

Influence of 2D surface roughness on the linear instability of plane channel flow

M. Asai*, J.M. Floryan** and Y. Maeda*

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

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

ABSTRACT

Experiments on the linear instability of flow in a wavy-wall channel are carried out to examine the effects of 2D distributed surface roughness on the stability of wall-bounded shear flows. One of the channel walls is modified by introduction of the wavy wall model with the amplitude of 4% of the channel half height and the wave number of 1.02. The experiment is focused on the two-dimensional travelling wave instability. The results are compared with the theory proposed by Floryan. It is shown that the flow is destabilized by the wall corrugation at subcritical Reynolds numbers below 5772, as predicted by the theory. For the present corrugation geometry, the critical Reynolds number is decreased down to about 4000. The spatial growth rates, the disturbance wave numbers and the distribution of disturbance amplitude measured over such wavy wall also agree well with the theoretical results.

Key Words: Channel flow, Flow instability, Surface roughness, Critical Reynolds number

1. 序論

乱れの弱い気流中における境界層の乱流遷移が線形安定性理論に従う攪乱の増幅に支配されることは周知であり，工学的な遷移予測も主に線形安定性解析に基づき行なわれてきた．しかしながら，現実に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．孤立的な粗度の場合，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表面粗さの場合には，壁近傍の流れの様子も変化させるので，たとえ微小な表面粗さであっても流れの安定特性そのものに影響を及ぼすことが考え

られる．本研究では，この分布粗さが流れの安定性に及ぼす影響を実験的に調べている．

実験では，分布粗さの最も単純なモデルとして，壁が二次元的に正弦波状に波打っている場合を採用した．実験結果はFloryan¹⁾による理論予測と比較される．

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．レイノルズ数 R 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．図1は，測定部の概略である．チャネル下流端より786 mm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3 mm，スパン長300 mm）がある．ただし，スリットは直径0.3 mmの孔が0.6 mm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っており，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46.2 mm（無次元波数 $\alpha_w = 1.02$ ），振幅0.3 mm（無次元振幅 $A_w = 0.04$ ）であり，チャネル上面に攪乱源の260 mm下流から9波長に渡って存在する．この測定部のチャネル上壁は滑面板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

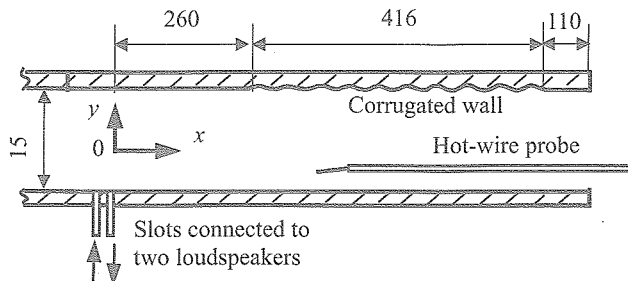


図1. 測定部の概略（単位 mm）.

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. 座標はすべてチャンネル半分高さ h で無次元化される. 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.

乱れ強さは 0.1% 以下であり, 線形安定の臨界レイノルズ数 5772²⁾ 以上の約 6500 まで層流の平面ポアズイユ流を実現することができる. また, 中心流速 U_c のスパン方向変化は, $R=6000$ の場合でも最大 2% (peak-to-peak 値) 程度であり ($-14 < z/h < 5$ の範囲では特に二次元性良好), 速度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している³⁾.

3. 実験結果

まず, 滑面壁のポアズイユ流の安定性^{4,5)}について詳しく調べ, 固有関数, 増幅率や分散関係, 臨界レイノルズ数が線形安定性理論の予測にほとんど一致することを確認した.

次に, 測定部の上壁を正弦波状の壁面に取り替えた. 図 2 は, チャンネル上半面 (波状壁側) の速度の x 方向分布を示している. レイノルズ数は $R=5000$ である. 図のように, 波状壁の影響は壁の極近傍のみであるが, 重要なのは, 約半波長にわたって弱い変曲点型速度分布が現れることである. 図 3 は, この流れ ($R=5000$) に微小振幅攪乱を導入したときの攪乱の増幅・減衰を示している. ただし, ω は無次元角周波数であり, 攪乱の強さ u'_m/U_c はすべて 0.6% 以下で, 二次不安定 (三次元化) が生じないレベルである. $x/h > 34.7$ から波状壁に入る. 亜臨界レイノルズ数のため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 $\omega=0.27, 0.30, 0.33$ の攪乱は増幅に転じる. 過渡応答領域が 4 波長領域程度続いた後ほぼ一定の増幅率 (或いは減衰率) を示し, それらは波状壁チャンネル流の線形増幅率と考えることができる. さらに低い $R=4000$ でも同様の測定を行った結果, やはり波状壁の 4 波長程度下流から一定増幅率を持って消長する. 図 4 は, $R=5000$ と $R=4000$ における攪乱の増幅率を Floryan の理論結果と比較している. 理論解は次の形をとり, $\alpha = \alpha_r + i\alpha_i$ が複素波数を表す.

$$u(x, y, t) = e^{i(\alpha x - \omega t)} \sum_{m=-\infty}^{m=+\infty} u^{(m)}(y) e^{-m\alpha_w x} + CC$$

いずれのレイノルズ数の場合も理論結果との一致は極めてよく, $R=4000$ でほぼ中立安定となることも理論予測とよく一致する. また, 攪乱の固有関数も実験と理論で良い一致を示すことも追記する.

4. 結論

二次元チャンネル流の線形安定性に及ぼす正弦波状壁面粗さの影響を実験的に調べ, 波状壁上の攪乱 (T-S 波動) の増幅特性は Floryan による理論計算

と非常に良く一致することが示された.

引用文献

- 1) Floryan, J.M., ESFD-2003 (2004).
- 2) Orszag, S. J., Fluid Mech. 50 (1971) 689-704.
- 3) Asai, M. and Floryan, J.M., Phys. Fluids 16 (2004) 1160-1163.
- 4) Nishioka, M. et al, J. Fluid Mech. 72 (1975) 731-751.
- 5) Itoh, N., Trans. Jpn. Soc. Aero. Space Sci. 17 (1974) 65-75

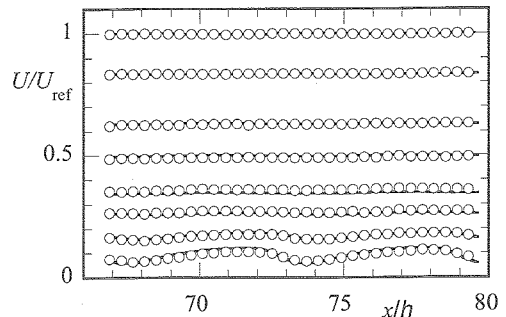


図 2. 波状壁上の基本流の速度分布 ($R=5000$). 分布は上から, $y/h=0, 0.4, 0.6, 0.7, 0.8, 0.85, 0.9, 0.94$. \circ ; 実験, 実線; 理論計算.

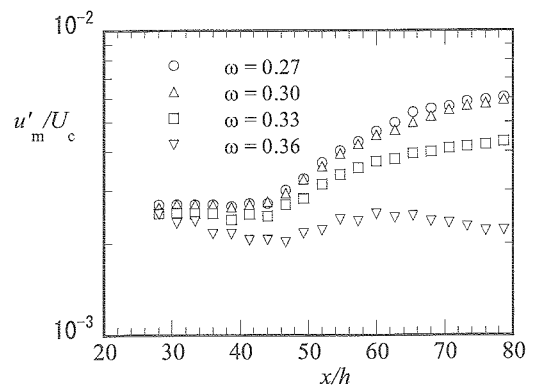


図 3. 攪乱の発達. $R=5000$.

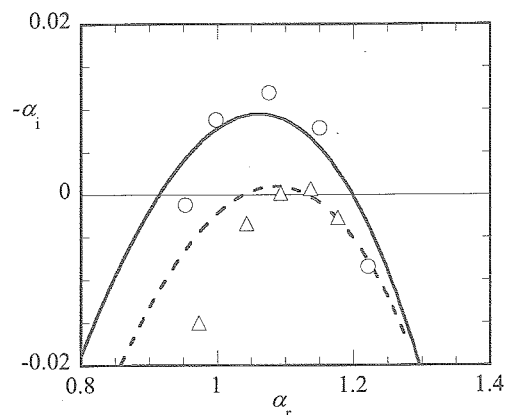


図 4. 空間増幅率 ($-\alpha_i$) と波数 (α_r) の関係. $\alpha_w=1.02, A_w=0.04$. 実験; \circ $R=5000$, \triangle $R=4000$. 理論; 実線 $R=5000$, 破線 $R=4000$.