

変曲点を持つ二次元基礎流れにおける非粘性型不安定性について

松原 雅春 (信州大学)

Inviscid instability in inflectional two-dimensional base flows

by

Masaharu Matsubara

Shinshu University

ABSTRACT

Inviscid instability may occur on streaky structures that appear in Götler vortices, Dean vortices and streaks in a flat plate boundary layer induced by free stream turbulence. The criteria and growth rates of this inflectional instability for both two-dimensional (in one-dimensional base flow) and three-dimensional (in two-dimensional base flow) viscous cases have been investigated with linear stability theory. The comparison between these cases shows that the general criterion and parameters for inviscid instability in one-dimensional base profiles can extend to that in two-dimensional base flow case. This means the criterion can be useful for prediction general breakdown of streaky structures.

Key words: Laminar-turbulent transition, Linear stability, Secondary instability, Inflectional velocity profile

1 はじめに

ストリーク構造とその崩壊による層流乱流遷移は多くの遷移過程で見られることが最近明らかになってきた。縦渦が最初の不安定性として発生する凹面境界層はもちろんしる、主流乱れが数%程度の場合の境界層遷移においても、スパン方向に境界層厚さ程度で流れ方向に極めて長いスケールを持つ低速領域、いわゆるストリーク構造から遷移が始まることが流れの可視化や熱線風速計による実験¹⁾によりわかっている。

ここでは、二次元基礎流れにおける三次元攪乱の安定性を線形安定性理論を用いて求め、ストリーク構造の代表例としての回転チャンネル流の二次不安定性の実験結果²⁾と比較する。さらに一次元基礎流れにおける安定性から導かれた、無次元パラメータと臨界値を三次元攪乱にも拡張して、その一般性を明らかにする。

2 計算方法

線形安定性の計算は Reddy³⁾のコードを用いて行った。計算には壁垂直方向にチェビシェフ多項式を用い、スパン方向にはフーリエ多項式を用いた。モード数は壁垂直方向に25、スパン方向に

10である。スパン方向のモード数は成長率の誤差が1%以下になるように決定した。二次元基礎流れとして実験で得られた回転チャンネル流の線形発達中の流れ方向平均流²⁾を用い、この時の平均流速 U_m とチャンネル幅 d に基づくレイノルズ数は $U_m d/\nu=590$ で回転パラメータ $\Omega d/U_m=0.084$ である。ここで ν は動粘性係数である。

3 結果

回転チャンネル流の実験結果と線形計算における流れ方向の攪乱振幅を図1で比べてみる。(a)は平均流速の等速線図、(b)は平均流速のスパン方向勾配、(c)は攪乱の乱れ強さ u_{rms} 、(d)は線形計算の流れ方向攪乱振幅の等高線図をあらわす。 $y=0$ は高圧面で、コリオリ力は y の負の方向に働く。乱れ強さのピークはスパン方向勾配の極値点つまりスパン方向変曲点の位置とほぼ一致しているおり、線形攪乱の分布とも似ていることから、この攪乱が非粘性型攪乱であることがわかる。計算結果のピーク位置がやや壁よりにあるのは、線形計算に二次流れを考慮していないためと思われる。つまり、 $z=5$ mm の位置では縦渦により攪乱が壁からチャンネル中央に向かう二次流れが

あり、実際の流れではこの二次流れにより攪乱ピークが中央よりに移動したと思われる。

次に安定曲線を図 2 に示す。α と Re は次式で定義される流れ方向の波数とレイノルズ数である。

$$\alpha = \frac{2\pi\Delta U}{\lambda S}$$

$$Re = \frac{1}{4} \frac{\Delta U^2}{\nu S}$$

ここで ΔU はスパン方向流速分布における流速の極大値と極小値の差、S はスパン方向における最大平均流速勾配、λ は攪乱の流れ方向波長である。

(a) は基礎流れが一次元で $U = \text{sech}^2(z)$ の場合、(b) は回転チャンネル流の平均流速を用いた二次元基礎流れの場合である。次元が違うにも関わらず両者が定性的に一致することから、上式の無次元化の妥当性が示唆される。ただし成長率を比較すると (図 3) 二次元の方が低いことが分かる。これは粘性が働く方向が流速勾配を持つ方向に加え、もう一方 (この場合壁垂直方向) 増えることによる影響と思われる。

4 まとめ

変曲点 (変曲線) をもつ二次元基礎流れにおける線形安定算を行った結果、ストリークの構造には非粘性型不安定性による攪乱が発生することが分かった。また二次攪乱の発生予測には流速差と流速勾配に基づくレイノルズ数が二次元基礎流れの場合でも有効であることが示唆された。

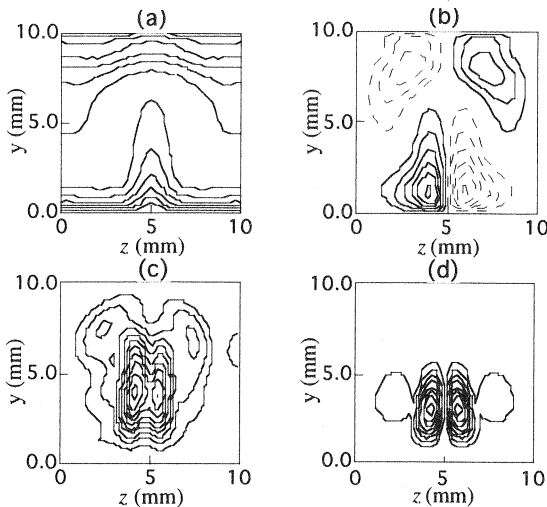


図 1 線形攪乱と実験結果との比較

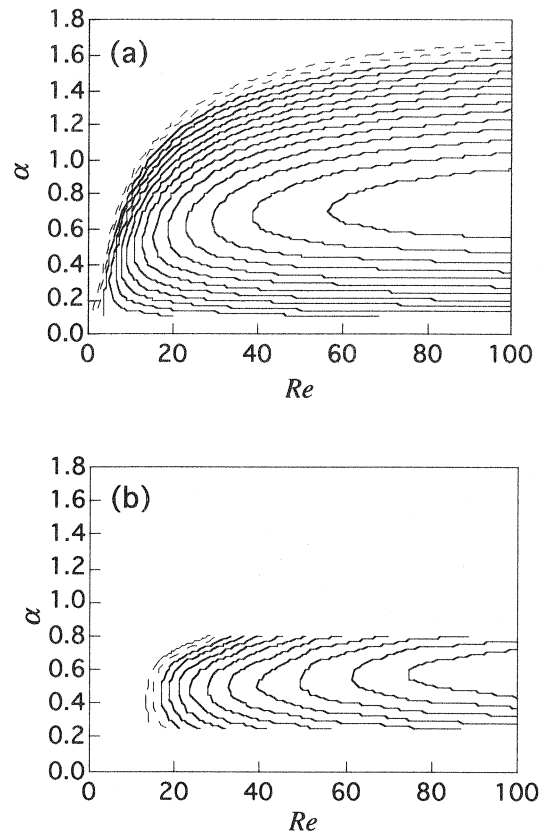


図 2 安定曲線

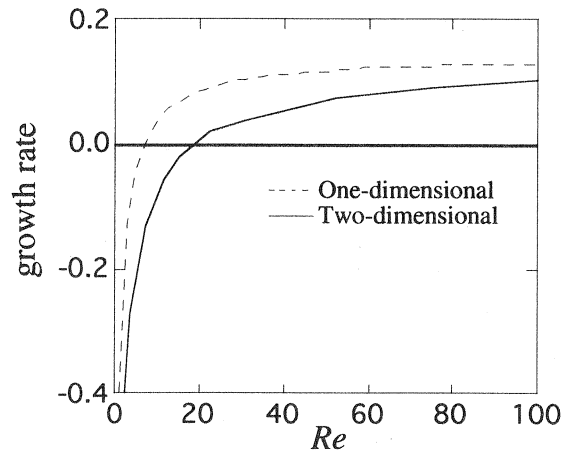


図 3 成長率

参考文献

- 1) Matsubara, M, Alfredsson, P. H., *J. Fluid Mech.* (2001). 430, 149-168.
- 2) Reddy, S., Schmid, P. J., Baggett, J. S., Henningson, D. S., *J. Fluid Mech.* (1998). 365, 269-303.
- 3) Matsubara, M, Alfredsson, P. H., *J. Fluid Mech.* (1998) 368, 27-50