

振動壁チャンネル流の遷移

跡部隆, 山本稀義 (JAXA)

Transition of a channel flow Under the oscillating-wall condition

T. Atobe, and K. Yamamoto

Japan Aerospace Exploration Agency

ABSTRACT

Transition of a channel flow with longitudinal wall-oscillation is investigated by DNS (Direct Numerical Simulation). Since this flow field can be thought as a superimposition of a channel flow with the Stokes layer because of linearity of the governing equation, the results are considered from the point of view of stability of the Stokes layer. Parametric study shows the acceleration of the transition has a correlation of the stability feature of the Stokes flow. Furthermore, it is found that the deceleration is demonstrated owing to the parameters.

Key Words: transition, channel flow, longitudinal wall-oscillation, Stokes layer

1. 序論

航空機や新幹線のように高速で移動する物体には摩擦抵抗が大きく働き燃料効率を押し下げるため、抵抗低減が重要な研究課題となっている。これまで物体形状を流線形にするなどによりある程度の効果を上げてきたが、MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) などを用いた能動制御も一定の効果があるとして注目されている。

より単純なシステムとしては Jung et al.¹⁾が Channel の壁をスパン方向に振動させることで抵抗が低減することを示した。そして Qadrio and Ricco²⁾はこの効果が約 45%にも達すると報告している。

しかし壁を流れ方向に周期変動させる系については研究例が少なく、未解明な部分が少なくない。

そこで本研究は流れ方向に壁が振動する Channel 流を対象に、DNS を中心とした数値解析を行った。系の線形性から Stokes 層との関係に着目し、その安定性と遷移との相関を調べた。

2. 計算方法

数値計算は流れ方向(x)およびスパン方向(y)に周期性を仮定し、フーリエ級数展開法を用いた。壁方向(z)には Chebichev コロケーション法を用いる。

$$\mathbf{u}(x, y, z, t) = \sum_{\mathbf{k}} \tilde{\mathbf{u}}(\mathbf{k}_x, \mathbf{k}_y, z, t) \exp[i(\mathbf{k}_x x + \mathbf{k}_y y)] \quad (1)$$

k_x, k_y はそれぞれの方向の波数成分であり、各フーリエモードのエネルギーは以下によって定義される。

$$E(k_x, k_y, t) \equiv \frac{1}{4} \int_{-1}^1 |\mathbf{u}(k_x, k_y, z, t)|^2 dz \quad (2)$$

この系のパラメーターは壁間距離と一様流で定義される Re , 壁の振動数 Ω , およびその振幅 U_w となる。系の概要を図1に示す。

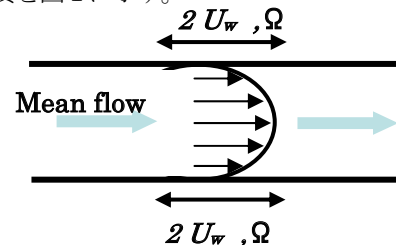


図1 振動壁チャンネル流の概要。

上記3つのパラメーターのうち、便宜上 Re は 10000 に固定する。 Ω および U_w はそれぞれ 0-0.3 の範囲で調べた。

3. 計算結果

まず始めに壁が振動しない通常の Channel 流の場合について DNS を実行した結果を図2に示す。この図は(2)式で定義される主要なフーリエモードのエネルギーの変化を示したもので、横軸は時間、縦軸がエネルギーの大きさを表す。計算では初期値としてランダムな攪乱を 10^9 オーダーで入れるとともに、計算時間の節約のため2次元 Tollmien-Schlichting (T-S) 波を 10^5 オーダーで付加している。この図より、初期の過渡期を経過した後は各モードのエネルギーが指数関数的に増加し、乱流へと遷移していくことがわかる。遷移時期を定量的に定義することが困難なため、ここでは各モードのエネルギーが一定に収束するところ、このケースでいうと $t=250$ 程度で遷移したと判断する。

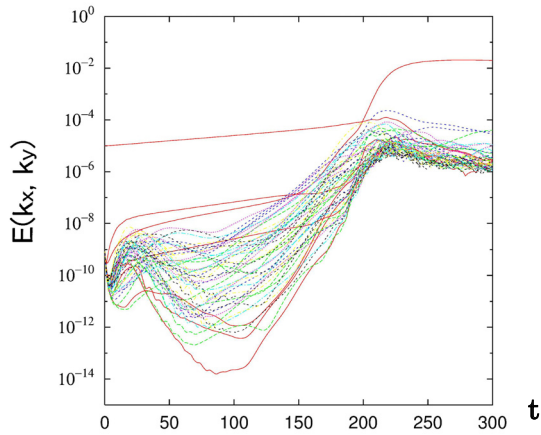


図2 チャンネル流の遷移。 $Re = 10000$ 。

次に壁を振動させたときの結果を図3に示す。パラメータは $(\Omega, U_w) = (0.2, 0.3)$ である。図2と比較すると、遷移時期も含めて全体的に同様な性質を示しており、振動の影響はエネルギーの周期的変動のみに現れていることがわかる。

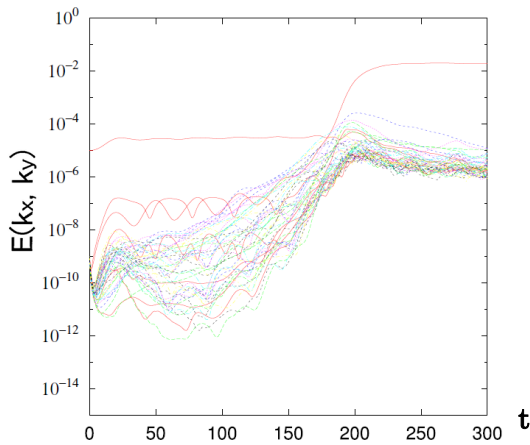


図3 チャンネル流の遷移。 $(\Omega, U_w) = (0.2, 0.3)$ 。

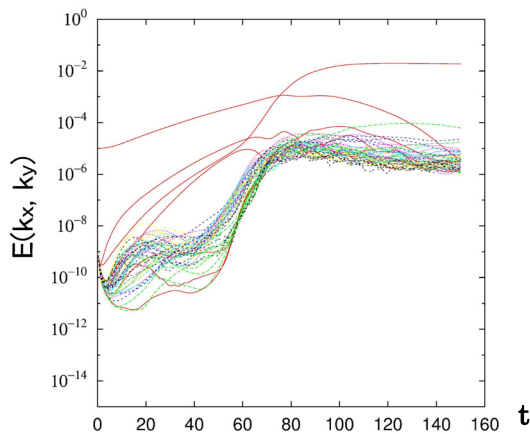


図4 チャンネル流の遷移。 $(\Omega, U_w) = (0.05, 0.3)$ 。

これとは逆に、振動の影響が大きく現れたケースを図4に示す。このときのパラメータは $(\Omega, U_w) = (0.05, 0.3)$ である。壁が一往復する前に遷移に至っており、急激な不安定化が生じていることがわかる。

これらの結果を含め、いくつかのケースについて計算した結果を図5にまとめた。図3の場合のように壁の振動の影響の少なかったものを■で、また図4のように影響の大きかったものを●で示す。また逆に遷移が遅くなる場合も観測されており、それらは◆で表した。比較的 Ω の小さい領域では遷移が加速される傾向がある。

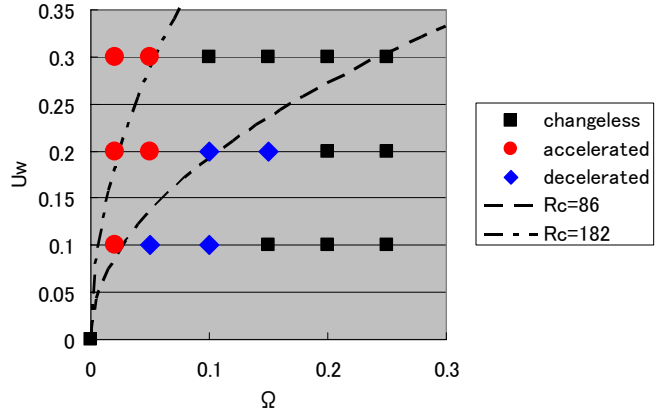


図5 壁振動の影響のパラメータ依存性。

本研究が対象とする流れ場は、二次元平行流の近似のもとで導出される線形方程式の解である平面 Poiseuille 流と Stokes 流の重ね合わせと考えることができる。そこで上述の結果と Stokes 層の安定性との関連性を調べた。Stokes 層の安定性は Kerczek and Davis³⁾の結果を用いた。彼らは Ω と U_w で定義されるレイノルズ数、

$$R_e^\delta \equiv \sqrt{2U_w^2 / \nu\Omega} \quad (3)$$

を用いて臨界レイノルズ数を計算している。そして一周期中最も不安定な瞬間で評価した値は 86、一周期で平均して評価したものは 182 と報告している。図6の曲線はそれぞれの値に基づいて作画されたもので、曲線の左上が不安定領域となる。この結果をみると、遷移の傾向と Stokes 層の安定性とはある程度の関連があると考えられる。

4. 結論

壁が流れ方向に振動するチャンネル流の遷移の様子を DNS によって調べた。その結果、壁の振動数や振幅に依存し、乱流遷移が加速、あるいは減速されることがわかった。またそのときの性質は Stokes 層の安定性とある程度関連することがわかった。

参考文献

- (1) Jung, W. J., Mangiavacchi, N. and Akhavan, R., "Suppression of turbulence in wall-bounded flows by high-frequency spanwise oscillations", Phys. Fluids A 4 (8), 1992, pp.1605-1607.
- (2) Quadrio, M. and Ricco, P., "Critical assessment of turbulent drag reduction through spanwise wall oscillations", J. Fluid Mech., 2004, pp.251-271.
- (3) Kerczek, C. Von and Davis, S. H., "Linear stability theory of oscillatory Stokes layers", J. Fluid Mech. 62, 1974, pp.553-773