二次元チャンネル流の再層流遷移における乱れエネルギーの減衰と限界レイノルズ数について

Turbulence energy decay and minimal Reynolds number in a relaminarizing two-dimensional channel flow

○ 奥村雄志 (信州大院) 正 松原雅春 (信州大)

Takeshi OKUMURA, Shinsyu University, 4-17-1 Wakasato, Nagano-shi 380-8553

Masaharu MATSUBARA, Shinsyu University, 4-17-1 Wakasato, Nagano-shi 380-8553

Key Words: transition, turbulence, channel flow, minimal Reynolds number, relaminarizing

1 はじめに

二次元チャンネル流における臨界レイノルズ数は計算から7696(チャンネル幅と平均流速を代表長さ, 速度としたレイノルズ数)とされているが, このレイノルズ数以下でも初期に強い攪乱を与える事で流れは乱流となる. この乱流状態からレイノルズ数を下げていくと攪乱はやがて減衰し層流になるが, あるレイノルズ数以上では攪乱が維持される. この攪乱を維持する最小のレイノルズ数である限界レイノルズ数の値は明確には求められていない.

Narayanan ら [1] は再層流化現象においてレイノルズ応力の減衰を外挿して限界レイノルズ数を求め, その値を 1865 ± 65 と決定している. Carlson ら [2] によると, 人工的に乱流斑点が発生できる最小レイノルズ数は1330であることを見いだしている. 田中ら [3] は粘性の増加による逆遷移過程をスペクトル法を用いた直接数値計算を行い, 逆遷移過程において乱流ストリークよりもスパン方向幅が大きいストリーク構造の発生することを見だし, 限界レイノルズ数が1470以上1600未満であると結論付けている. 一方, 限界レイノルズ数に関する研究は円管をはじめ様々な流れにおいてなされている. Faisst ら [4] は円管における再層流遷移過程のDNSによる計算で乱流エネルギーの半減期を求め, その値が無限大となるレイノルズ数3000を限界レイノルズ数としている. Peixinho ら [5] は円管における再層流遷移過程の可視化実験によって流れ方向に攪乱の存在する確率から乱流の半減期を求め, 限界レイノルズ数を 2330 ± 10 としている. しかし, Hof ら [6] は円管における実験と計算から乱流の半減期は発散することなく, 円管流れの乱流は崩壊して常に再層流化すると主張している.

チャンネル流における限界レイノルズ数の正確な値やそのレイノルズ数付近でのエネルギー変化については明確にされていない. そこで, 本研究ではチャンネル流における再層流化現象を流路をスパン方向に拡大することで実現し, 熱線流速計を用いて流れ方向に攪乱, 特にエネルギー変化を測定した. そこから得られた乱れエネルギーから限界レイノルズ数について考察した.

2 実験装置及び実験方法

本実験装置の概略図を図1に示す. 実験装置の全長は4500 mm, チャンネル幅は5 mm で, ブロウ, ノズル部, 助走区間, 拡大部, 試験部から構成されている.

流量はブロウの回転数によって調節され, ブロウからの流れは円管及びバルブを通して整流部へ入り, 絞り比29のノズル部へと流入する. ノズルによって縮流された流れは助走区間へと入る. 助走区間では入り口から100 mm, 両壁面から1 mm の位置に直径0.5 mm のトリッピングワイヤーを2本設置しており, 流れはこの下流で乱流状態となる. 次に流れは長さ1000 mm, スパン幅が入り口で190 mm(アスペクト比38), 出口で260 mm(アスペクト比52)の拡大部へと入る. この拡大部は流れが剥離を起こさず緩やかに遷移するように広がり角は 2° で設計されており, レイノルズ数はここで0.73倍へと減少する. 拡大後の流

Fig. 1: Experimental set-up.

れは長さ1700 mm, スパン幅260 mm で流路断面一定の試験部へと流入する.

本実験において流速及び乱れ強さの測定には直径 $2.5 \mu\text{m}$ の白金線をセンサとするI型プローブを用い, 定温度型熱線流速計を用いた. また, 試験部には試験部入り口から1100 mmの位置から100 mm 毎に直径50 mm の測定用プラグが5箇所設けられており, 測定はここで行った.

レイノルズ数は代表長さをチャンネル幅 d , 代表速度を幅方向平均流速 U_m として算出した. 座標系は流れ方向を x , 壁垂直方向を y , スパン方向を z とし, 原点は試験部入り口での壁面上とした.

3 実験結果

熱線流速計による $x/d = 300$ の平均流速分布を図2に示す. 縦軸は幅方向平均流速 U_m (m/s) で無次元化した時間平均流速 U (m/s), 横軸はチャンネル幅 d で無次元化した壁からの距離 y を示している. 実線は層流の理論解であるポアズイユ分布を示している. $Re = 1390$ までは速度分布がポアズイユ分布によく一致しているのが分かる. また, レイノルズ数が上がると中央部分が減速し, 壁際は加速し始め, 乱流時に見られる速度分布に近づいているのが分かる.

次に, $x/d = 300$ の速度変動分布を図3に示す. 縦軸は幅方向平均流速 U_m (m/s) で無次元化した速度変動 u_{rms} (m/s) を, 横軸はチャンネル幅 d で無次元化した壁からの距離 y を示している. $Re = 1510$ 以上では壁際にピークをもち, レイノルズ数の増加とともに乱流時に見られる乱れ強さ分布に近づいているのが分かる. $Re = 1390$ では壁際にピークがあるものの中央部との差はそれほどなく, 中央部からなだらかな分布となった. $Re = 1130$ では逆に中央部にピークを持ち, 乱れが全体的に小さいことがわかる.

この乱れ強さから算出した乱れエネルギーのレイノルズ数と流れ方向位置を変化させたグラフを図4に示す. エネルギーはチャンネル幅全体での平均である. 縦軸には乱れエネルギーを $x/d = 220$ の位置での乱れ強さで無次元化したものを, 横軸はチャンネル幅 d で無次元化した試験部入り口からの距離である. 実線はブ

Fig. 2: Mean velocity profiles at $x/d = 300$. Fig. 3: Profiles of the streamwise velocity fluctuation at $x/d = 300$.

ロットを最小二乗法で近似したものである。この図にのせたすべてのレイノルズ数において、直線は右下がりになっており、乱れエネルギーは流れ方向に減衰しているのが分かる。しかし、レイノルズ数によって傾きは異なり、レイノルズ数が高い方が傾きの絶対値は小さい。つまり、レイノルズ数が大きくなるとエネルギーの減衰率が小さくなっているのが分かる。

そこで、各レイノルズ数における乱れ強さが半分になるまでの無次元距離の半減期 τ をこの傾きより算出し、図 5 に示した。レイノルズ数の増加とともに半減期は急激に大きくなっているのが分かる。ここからレイノルズ数をさらに大きくすると、半減期は ∞ に向かうと仮定できる。そこで、縦軸に半減期の逆数 τ^{-1} をとったグラフを図 5 内に示す。実線は最小二乗近似したものである。プロットはこの実線とよく一致しているのが分かる。この直線の x 軸との交点は半減期が無限大になることを示しており、乱れエネルギーの減衰が無くなる所である。すなわち、この交点のレイノルズ数が限界レイノルズ数であると考えられ、その値は 1490 である。しかし、今回はチャンネル流の流れ方向において一部の測定に過ぎず、さらに下流でのエネルギーの減衰がどのように変化するかは確認されていない。よって、この限界レイノルズ数の見積りも十分な精度とはいえない。

また、過去の可視化実験 [7] によると、 $Re = 1300$ 付近では攪乱構造が確認されなかったものの、 $Re = 1490$ 付近では特徴的な攪乱構造が確認されている。この攪乱が維持されるものなのか消滅してしまうものなのかを判断するには、さらに下流方向に向けての熱線計測が必要であると思われる。

4 おわりに

二次元チャンネル流の再層流遷移過程を熱線流速計を用いて測定した結果、流れ方向に乱れエネルギーは減衰しており、その減衰率はレイノルズ数の増加とともに減少した。半減期を用いた見積りでは限界レイノルズ数は 1490 付近であると考えられ

Fig. 4: Turbulence energy decays.

Fig. 5: Variation of the decay rate as a function of Re and the inset is the inverse half-life versus Re and a linear fit.

る。この限界レイノルズ数の決定にはさらに広域の熱線測定等が必要であると考えられる。

References

- [1] M.A.B Narayanan and V.Ramjee, On the criteria for reverse transition in a two-dimensional boundary layer flow: *Journal of Fluid Mech.*, 31(1968)609-623
- [2] D.R. Carlson, S.E. Widnall and M.F. Peeters, A flow-visualization study of transition in plane Poiseuille flow: *Journal of Fluid Mech.*, 121(1982)133-166.
- [3] Y. Tanaka, N. Aota, M. Yoshino, M. Matsubara, A. Sasaki and Y. Tsuchiya, Direct Numerical Simulation of Relaminarization of Turbulent Flow between Parallel Plates: 第 17 回数値流体力学シンポジウム講演要旨集, (2003)8.
- [4] H. Faisst and B. Eckhardt, Sensitive dependence on initial conditions in transition to turbulence in pipe flow: *Journal of Fluid Mech.*, 504(2004)343-352
- [5] J. Peixinho and T. Mullin, Decay of Turbulence in Pipe Flow: *Physical Review Letters.*, 96(2006), 094501
- [6] B. Hof, J. Westerweel, T. Schneider and B. Eckhardt, Finite Lifetime of Turbulence in Shear Flows: *nature.*, 443(2006)59-62
- [7] T. Okumura and M. Matsubara: Experimental study on minimal Reynolds number with LDV measurement and visualization: *Proceedings of 2006 Annual Meeting, Japan Society of Fluid Mechanics.*, (2007)AM06-03-010