二次元チャンネル流における逆遷移過程で観察される攪乱について

Disturbance observed in laminarization of two dimension channel flow

○ 沼野貴之 (信州大院) 正 松原雅春 (信州大)

Takayuki Numano, Shinsyu University, 4-17-1 Wakasato, Nagano-shi 380-8553

Masaharu Matsubara, Shinsyu University 4-17-1 Wakasato, Nagano-shi 380-8553 5

Key Words: disturbance, laminarization, two dimension channel flow

1 はじめに

あるレイノルズ数以下の流れにおいて強い攪乱を挿入し流れを乱しても乱流を維持することができず層流へと遷移する。この限界レイノルズ数付近では一般的に遷移のスピードが緩やかで遷移過程において攪乱構造を確認することができることが知られている⁽¹⁾⁽²⁾。

二次元チャンネル流において、代表長さをチャンネル幅、代表速度を平均流速と置いたとき、攪乱を与えなくても流れが乱流へと遷移する限界レイノルズ数は線形安定性理論より 7696 になり、このレイノルズ数以下であっても強い攪乱を挿入することにより乱流を発達させ維持することが可能である。Badri Narayanan⁽¹⁾らは再層流化現象の起こるときのレイノルズ数をレイノルズ応力の減衰を外挿して求め、その値を 1865 ± 65 と決定している。Carlson⁽³⁾らは実験により、人工的に攪乱を挿入し、攪乱構造がレイノルズ数 1330 以下のとき攪乱が維持できず減衰していくことを示している。奥村⁽⁴⁾らはスパン幅を拡大させることでレイノルズ数を下げることで流れを乱流から層流へと遷移させ、流れの可視化による観察で限界レイノルズ数を 1500 付近とし、乱流の流れの中に乱流の特徴的構造とは異なる大きなスケール構造が現れだす $Re = 2300$ 付近を重要な臨界値のひとつとしてあげている。

本研究では奥村らと同様にスパン幅を拡大させることで乱流から層流へと遷移させるチャンネル流を用いる。ただしチャンネル試験部長さを奥村らの 2000 mm から 3500 mm にし、チャンネル幅を変更できるような実験装置を製作し実験を行った。これにより逆遷移の過程を流れ方向にさらに追うことが可能となり、またチャンネル幅を大きくすることにより、攪乱の構造が相対的に大きくなると考えられ、チャンネル幅が小さいときに比べて低い流速で同レイノルズ数にすることができるため、再層流過程で見られる攪乱構造を調べるには有利である。この実験装置を用いて可視化実験を行い、奥村らが得た実験結果と比較し、再層流遷移過程で見られる攪乱構造の特徴、性質について考察する。

2 実験装置及び実験方法

実験装置の概要を Fig1 に示す。装置は回流式でポンプ、ノズル、助走区間、拡大部、試験部、流出口により構成されている。流れはポンプによって加圧され、絞り比 18 を持つノズルによって絞られ、長さ 1600 mm、チャンネル幅 10 mm、スパン幅 500 mm の助走区間へと入る。ノズル出口から流れ方向に 100 mm 各壁から 1 mm の位置に、直径 0.5 mm のトリッピングワイヤーを初期攪乱として取り付けしており、流れを乱し助走区間で十分に発達した乱流となる。次に、流れは長さ 1400 mm スパン幅が入り口で 500 mm (アスペクト比 50) から出口で 600 mm (アスペクト比 60) になる拡大部へと入る。拡大部では剥離を起こさないように広がり角を約 2° になるように設計してある。ここでレイノルズ数はチャンネル上流部に対して 0.83 倍になる。そして流れは長さ 3500 mm の試験部へと流

Fig. 1: Outline of experimental apparatus.

入する。そして試験部から流出口に流れ出し、ポンプへと戻る。

ポンプの下流には直径 40 mm のパイプに対し、直径 30 mm の口径のオリフィスに取り付けられており、オリフィス上流 35 mm の位置とオリフィス下流 45 mm と 55 mm の位置より圧力が取り出せるようになっている。以下の式⁽⁵⁾を用いてオリフィスの上流と下流 45 mm の差圧 ΔP より流量 V を求め、試験部のレイノルズ数 Re を決定した。

$$V = CA_0 \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}}$$

$$C = 0.597 - 0.011 \left(\frac{A_0}{A_1} \right) + 0.432 \left(\frac{A_0}{A_1} \right)^2$$

ここで A_0 はオリフィス断面積、 A_1 はパイプ断面積、 ρ は密度である。さらにオリフィス下流のそれぞれにおける上流との差圧と試験部におけるレイノルズ数の関係を Fig2 に示す。下流 45 mm と下流 55 mm における差圧には 1 割程度の誤差が生じている。このことから圧力取り出し位置による圧力差からレイノルズ数は ± 100 程度の誤差があると考えられる。

可視化実験には有効画素数 659 (H) $\times$ 494 (V) の CCD カメラ (XCL-V500) を使い、シャッタースピード 1/250(s)、フレームレート 1/60(s) の条件の下で撮影する。試験部入り口から下流に 3300 mm の流れの撮影を行った。試験部入り口から撮影位置までの距離を L とし、チャンネル幅を D とした時、 $L/D = 330$ である。光源にはハロゲンランプを用い、カメラの左右からそれぞれ斜め方向に照射する。トレーサ粒子には流れのせん断面に平行に配光し、光を反射させやすい薄片状のパール顔料を (7~8 μm , 比重 3.1) を用いた。このトレーサ粒子はせん断が働く面に平行に向くため、可視化のときに縞状になる部分はせん断面が同じ方向を向いている領域を表す。

3 実験結果及び考察

Fig3 は $Re = 2700$ における可視化写真である。流れ方向は写真の左から右である。Fig3 では流れ方向に 15~25 mm スパ

Fig. 2: Contrast between Re and differential pressure.

ン方向に 7 mm 程度のスケールを持つ形状の不均一なスケールの小さい攪乱構造が流れの全体を占めている。この攪乱構造を時間ごとに追うと発生と消滅を繰り返しながら流れている。Fig4 は $Re = 2200$ における可視化写真である。 $Re = 2700$ のときにスケールの小さい攪乱構造が流れの全体を占めているのに対し、流れ方向に長い縞状構造がパッチ状に見られる。縞状構造のパッチの流れ方向とスパン方向の広がりとはどちらも 300 mm 程度でこのパッチは時間とともに流れ方向に移動している。Fig5 は $Re = 1700$ における可視化写真である。このとき縞状構造の占める割合とスケールの小さい攪乱構造の占める割合が逆転し、スケールの小さい攪乱構造がパッチ状になって見られる。このときの確認されたパッチの流れ方向とスパン方向の広がりとはともに 300 mm 程度である。Fig6 は $Re = 1400$ における可視化写真である。このとき縞状構造と層流状態が流れの大部分を占め、スケールの小さな攪乱からなるパッチが局所的に見られた。Fig7 は $Re = 1300$ における可視化写真である。光の反射が一樣で特徴的構造が見られず、完全な層流状態になったと考えられる。

本実験で $Re = 2700$ のときに観察した攪乱構造と奥村らが $Re = 2680$ で観察した攪乱構造の特徴は似ており、チャンネル幅で無次元化した攪乱のスパン方向スケールが約 0.7 となり奥村らとほぼ一致している。本実験の $Re = 2200$ のとき奥村らの $Re = 2130$ 同様にスケールの小さい攪乱の領域内に流れ方向に長い縞状構造を確認し、構造のチャンネル幅で無次元化したスパン方向スケールは大きいもので 1 程度であり、奥村らが観察した縞構造のスパン方向スケール同程度である。また本実験の $Re = 1700$ のとき、奥村らの $Re = 1660$ のときと同様にスケールの小さな攪乱構造と縞状構造の占める割合が逆転し、スケールの小さい構造がパッチ状に確認されている。

チャンネル幅を変化させてもレイノルズ数に対するそれぞれの攪乱構造の占める割合は奥村らが得た結果とほぼ同様で、遷移過程で確認された攪乱構造のスケールはどれもチャンネル幅で無次元化したらほぼ等しくなった。奥村らの試験部におけるレイノルズ数が助走区間に対して 0.73 倍なのに対し、本実験装置は 0.83 倍とレイノルズ数の変化の割合が小さくなっている。しかし実験結果を比較したとき、 L/D がほぼ同じ位置での流れが同様の特徴が現れていることから、逆遷移においてレイノルズ数の変化の大きさは、遷移過程に対して影響を与えていないと考えられる。

4 おわりに

可視化実験により再層流遷移過程は段階的に起こり、レイノルズ数に対してそれぞれ現れる攪乱構造や、それらの占める割合は奥村らが得た結果と上流と下流のレイノルズ数比を変化させてもほぼ同様であった。

Fig. 3: Flow visualization $Re=2800$.

Fig. 4: Flow visualization $Re=2200$.

Fig. 5: Flow visualization $Re=1700$.

Fig. 6: Flow visualization $Re=1400$.

Fig. 7: Flow visualization $Re=1300$.

References

- [1] M.A.Barid Narayanan : J.Fluid Mech.,31(1968)609-623.
- [2] J.Peixinho and T.Mullin : Phys Rev Lett.96,094501 (2006).
- [3] D.R.Carlson et al : J.Fluid Mech.,121(1982)133-166.
- [4] 奥村雄志, 松原雅春 : 日本流体力学会年会 2006
- [5] 日本工業標準調査会 : JIS8762, 円形管路の絞り機構による流量測定方法