

A01 壁乱流亜臨界遷移の間欠乱流パターン形成の大規模 DNS 解析

東京理科大学工学部 塚原隆裕

非圧縮性流体の壁面せん断流において、無限小攪乱に対して安定となる臨界レイノルズ数以下でも、有限攪乱の非線形成長を契機としたバイパス遷移による乱流化、いわゆる亜臨界遷移が起こる。カノニカル流の一つである平行平板間圧力勾配駆動のチャンネル流の場合は、 $Re = 1000$ 付近で局在化した乱流域が半永久的に維持する間欠乱流となることが知られている⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾。局在乱流が維持し得る大域的臨界値 Re_G （基本流がいかなる攪乱に対しても安定となる上限レイノルズ数）について、その具体値の決定には理論はおろか実験的アプローチでも困難を伴う。円管内流の Re_G は Avila ら⁽⁴⁾が大規模間欠構造の乱流パフに注目し、パフが有限寿命を持つこと、パフの分裂時間と寿命が等しいときのレイノルズ数が $Re_G = 2040$ となることを報告している。チャンネル流における大規模間欠構造は初期発達段階では乱流斑点、そして乱流斑点が成長すると乱流縞または乱流帯と呼ばれる構造を取る^{(2),(3)}。Sano & Tamai⁽³⁾は大規模水路により $Re \geq 830$ での乱流斑点の分裂と拡大を確認しているが、Tsukahara & Ishida⁽²⁾は DNS（直接数値計算）により $Re = 840$ 以下でも局在乱流が半永久的に維持する結果を得ており、 Re_G は 840 未満と考えられている。ここで、 Re はチャンネル中心速度とチャンネル半幅 δ に基づくレイノルズ数である。乱流縞および乱流帯は局在乱流の延命において重要な役割を有すると示されており^{(2),(3)}、円管内流⁽⁴⁾同様に局在乱流の成長と減衰に着目すれば Re_G を定めることが可能と考えられる。本研究では、乱流斑点成長の DNS を多数試行し、初期攪乱の条件を変更したときの乱流帯への成長確率・過程の変化や、乱流帯にともなう大規模流れに関して調査した。特に、 Re_G 付近に着目し、乱流帯の成長過程（パターン形成）についてのレイノルズ数依存性を調べることで、 Re_G の具体値の決定について議論した。図 1 に $Re = 780$ の乱流帯を示す。スケール δ 以下の微細乱流渦が偏在して斜めのマクロな帯形状の“ゆらぎ”を維持・形成していることが分かる。この乱流帯は下流側先端部が（主流方向に対して）斜めに成長し、上流側端部は減衰する構造にある。つまり、先端成長速度と（尾の）減衰速度の差が乱流帯の成長率を示すこととなる。その成長率のレイノルズ数依存性を調査すると、図 2 のような結果となった。また、乱流帯周辺の流れ場を、ローパスフィルタを通した瞬時速度場で可視化すると、帯に沿う特徴的な大規模流れを有することが分かった（図 1）。特に、帯の下流先端部を周り込むような大規模流れは成長中にのみ観察され、乱流帯全体が減衰する場合にはこの大規模流れが消失または図 1 と異なる様相を呈することが分かり、局在乱流領域（ゆらぎ）と大規模流れ（構造）の関係性を見出せた。

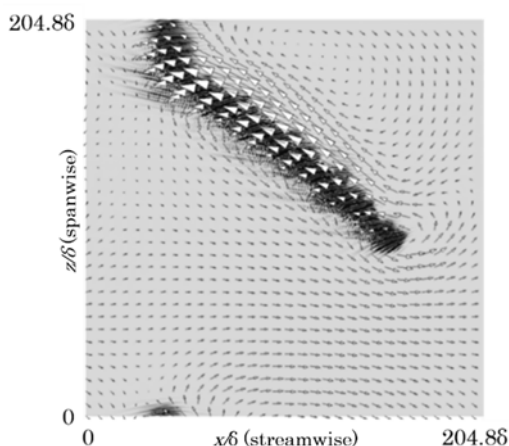


図 1. チャンネル遷移流の乱流帯。黒：乱流、灰色：層流。ベクトルは大規模流れを示す。チャンネル半幅を δ としている。

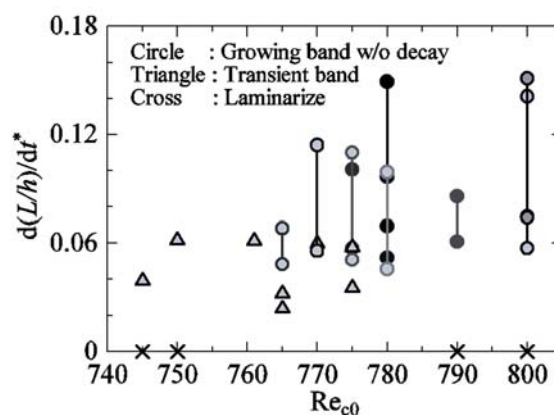


図 2. 乱流帯の成長率におけるレイノルズ数依存性。安定的に成長してパターン形成し得る臨界値は、 $Re = 765$ 程度と推定。

亜臨界遷移を呈するカノニカル流の一つにクエット流があり，ここでは環状クエット流の遷移過程および間欠パターン形成についても DNS 解析を行った．本解析対象は，二重円管の内円管が主流軸方向に滑ることにより駆動される流れである．この系は内外の円管半径比 $\eta = r_{\text{inner}}/r_{\text{outer}}$ により特徴付けられ， $\eta \rightarrow 0$ で円管内流に， $\eta \rightarrow 1$ で平面クエット流に漸近する．実際，遷移域で $\eta = 0.8$ の高円筒比では内円管に巻き付く螺旋乱流が， $\eta = 0.1$ の低円筒比では乱流パフと似た構造が生じることを発見した⁽⁵⁾．この二つの構造は，同一円筒比の環状ポアズイユ流でも生じることを報告している^{(6),(7)}．また，螺旋乱流の形成・維持には高円筒比から中円筒比までは周方向計算領域の影響が大きく，十分長い周方向計算領域を仮想的に設定することで $\eta = 0.5$ の場合でも螺旋乱流が現れることが分かった．一方，低円筒比 ($\eta = 0.1$) の場合は壁面曲率の影響が大きくなるため，周方向計算領域が長い場合でも螺旋乱流は発生しない．しかし，この場合に，乱流間欠率（局在乱流が占める空間割合の時間平均値）は小さくなるにも関わらず，螺旋乱流が生じた場合よりも低いレイノルズ数まで層流化しないことを見出した⁽⁵⁾．遷移域の乱流間欠率 F_t について着目し，壁面曲率と周方向計算領域が遷移構造と Re_G に及ぼす影響について検討した（図 3）．環状クエット流のレイノルズ数は，円筒間の半値幅と内円管移動速度に基づく．螺旋乱流が生じた $\eta = 0.5$ で仮想周方向領域 $L_\theta = 8\pi r$ を課した場合，レイノルズ数変化に対する乱流間欠率の変化傾向は，同様に螺旋乱流の発生した $\eta = 0.8$ の場合と一致している．一方， $\eta = 0.1$ ($L_\theta = 16\pi r$) の場合， F_t は $\text{Re} < 400$ で $\eta = 0.8$ と $\eta = 0.5$ ($L_\theta = 8\pi r$) での螺旋乱流が生じる場合と良く一致し， Re_G は 300 を下回った．以上の結果は，低円筒比の 1 次元性（軸方向にのみ層流・乱流が局在できる自由度を有する）が間欠パターン形成を妨げて高い Re_G となることを示し，一方で高円筒比の 2 次元性（軸方向と周方向）が間欠乱流パターン形成と低い Re_G をもたらしたことを示唆している．さらに， F_t の減衰過程でも，有向パーコレーション（DP）に似た特徴を見出した（図 4）．

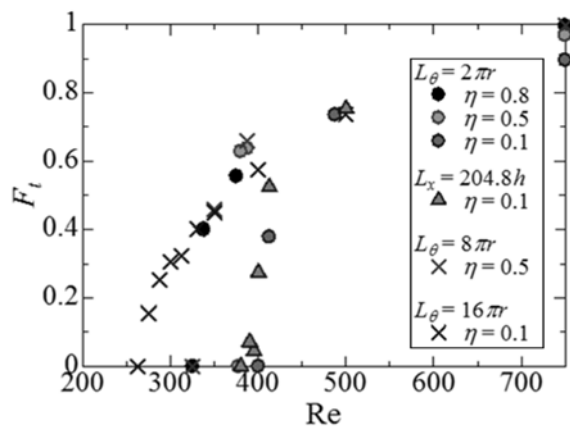


図 3. 環状クエット流の乱流間欠率の各種依存性 (Re , η , 周方向領域サイズ L_θ) . $L_\theta > 2\pi r$ は仮想領域の計算.

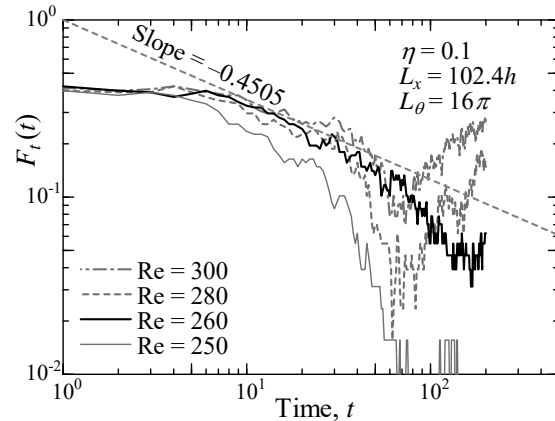


図 4. レイノルズ数を急激に下げた環状クエット流の乱流間欠率の時間変化. 仮想領域では，(2+1)DP モデルに近い減衰率.

参考文献：

- (1) T. Tsukahara et al., *Proc. TSFP4*, 935–940 (2005); *arXiv preprint*, 1406.0248.
- (2) 塚原隆裕, 石田貴大, 日本流体力学会誌ながれ, **34**, 383–386 (2015).
- (3) M. Sano and K. Tamai, *Nature Phys.*, **12**, 249–253 (2016).
- (4) K. Avila et al. *Science*, **333**, 192–196 (2011).
- (5) 國井康平, 石田貴大, 塚原隆裕, 日本流体力学会誌ながれ, **35**, 475–480 (2016).
- (6) T. Ishida, Y. Duguet, and T. Tsukahara, *J. Fluid Mech.*, **794**, R2 (2016).
- (7) T. Ishida, Y. Duguet, and T. Tsukahara, *Phys. Rev. Fluids*, **2**, 073902 (2017).