

研究種目：若手研究(B)
 研究期間：2007～2009
 課題番号：19760123
 研究課題名(和文) チャンネル流における乱流状態の低レイノルズ数極限～壁乱流の起源
 研究課題名(英文) Low Reynolds number limit of turbulent states in channel flow

研究代表者

板野 智昭 (ITANO TOMOAKI)
 関西大学・システム理工学部・准教授
 研究者番号：30335187

研究成果の概要(和文)：乱流の数値解析に従来独立な研究手段として使われてきた「分岐解析理論」と「時間発展スキーム」を相補的に用いて、平行平板間の平衡解を探索した。その結果、低レイノルズ数領域でヘアピン状の渦を有した厳密解を得た。境界層乱流に代表される壁剪断流においてヘアピン状の渦の存在が実験等で観測されてきたが、数值的・理論的にはヘアピン状の渦を有する平衡解の存在は長らく未発見のみであり、今回の解の発見は乱流秩序構造に関する極めて重要な発見だと言える。

研究成果の概要(英文)：

By means of both of the bifurcation theory and the direct numerical simulation method complementarily, which have been employed independently to investigate turbulent flows, we explore non-trivial equilibrium flows in infinite parallel plates at low Reynolds numbers. The key result obtained in this project is the discovery of the hairpin vortex state of the plane Couette flow. While hairpin-vortices have been identified as a time-dependent coherent structure in experiments of turbulent shear flows, any corresponding exact solution has never been solved.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,200,000	0	1,200,000
2008年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2009年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,200,000	600,000	3,800,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・流体工学

キーワード：壁乱流、渦構造、レイノルズ数、秩序構造

1. 研究開始当初の背景

「乱流を如何に制御するか？」これは人類が長らく取り組んできた工学的課題です。当然ながら乱流の制御にはまず乱流それ自身の理解が必要である。経験的に我々は、レイ

ノルズ数 Re が増加すると乱流が出現することを知っている。しかしながらチャンネル流(二枚の平行平板間流、図1参照)に代表されるような壁乱流の簡単なモデル(亜臨界流れ)に対してでさえ、乱流が維持できる最小

のレイノルズ数 Re_c はまだ正確には分かっていない。

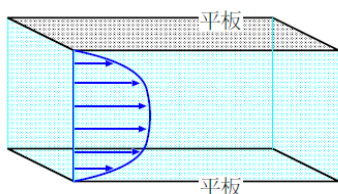


図 1: チャネル流

2. 研究の目的

本研究では、直接数値計算と分岐解析を相補的に用いた新しい解の探索方法を提案し、低レイノルズ数領域におけるチャネル流の新たな平衡解の探索、および乱流状態の調査を行う。

3. 研究の方法

模式図 (図 2) には縦軸に流れの乱れの程度を表す状態変数 A 、横軸に系のパラメータから定まるレイノルズ数 Re をとる。層流状態は $A=0$ で表される。今、乱流状態 (図 2 の青い領域) が存在する最小のレイノルズ数 Re_c を実験で調べようとして、大きな Re における乱流状態を初期条件にとり、断熱的にゆっくりと Re を下げることにしよう (図 2 の赤線部)。 Re が Re_c を下回ると流れは急に層流状態に転じるが、計測される Re_c の値は実験を繰り返す度に微妙に変化する。これは系の時間発展は初期条件に依存し、乱流解が時間的に変動する解として記述されること、また層流と乱流の区別にも非常に長い時間観察が必要となることなどが原因である。そこで本研究では Re を徐々に下げるアプローチをとらずに、以下で述べる別のアイデアを用いて Re_c の正確な値を求め、更に乱流状態の低レイノルズ数限界における相空間中の構造 (図 2 の?の部分) を調査する。

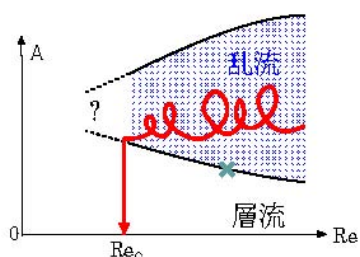


図 2: 流れの中の乱れの度合とレイノルズ数の関係

従来この問題に対して行われたアプローチには次の二つがあった。

(i) 実験や数値計算 (発展方程式の数値積分) により徐々に Re を下げる方法: このような方法によれば、時間変化する流れの解を求めることができるが、それは安定なものに限られる。実験や数値計算で実現される乱流解は Re が減少すると、何らかの理由により、ある値で急に層流へ移行し、再度 Re を増加させても乱流は再現しない—すなわち履歴現象がおきる。このため図 2 の?の付近での解析を行うためには、何らかの工夫を施す必要がある。

(ii) 分岐解析やホモトピー法: レイノルズ数の変化とともに既知の解から分岐する解を、安定性を調べながら連続的に求めながら辿る方法。実験や数値計算とは異なり、不安定な解も求めることができるが、既知の解から連続的に繋がっていない解は求めることができないばかりか、乱流解や多重周期解のように複雑な時間変化をする解も求めることは困難である。

ところで、過去に行った直接数値計算を用いた研究から、我々はチャネル流における平衡解を得ることに成功していた。この平衡解の相空間の中での位置は図 2 の×印で表現される位置にある。つまり、この平衡解は乱流状態と層流状態の境界上 (厳密には二つのアトラクターの吸引域の境界、図 2 の黒い太線) に存在している。本研究では、分岐解析を用いて境界線に沿ってこの平衡解の低レイノルズ数極限を追うことで、乱流状態の骨格部分が存在するレイノルズ数の下限を明らかにするとともに、乱流状態の起源 (図 2 の?の部分) を調査する。

4. 研究成果

[初年度に得られた研究成果]

初年度に購入した大容量メモリを積んだ最新の計算サーバにより、過去の研究から得られていた平衡解の精度の確認と、平衡解が存在するレイノルズ数の下限を求めた。解が存在するレイノルズ数の下限はおよそ 1000 程度であることが分かった。

また、初期条件を工夫することで、直接数値計算から上記平衡解とは対称性が異なる新たな解を得ることに成功した。この平衡解はチャネルを構成する二つの壁間に跨る大きな循環渦からなっている。近年進められている高レイノルズ数におけるチャネル流の数値計算や実験などで報告が続いている、チャネル乱流中の大規模構造 (大規模循環渦) との関係が予想される。

また、購入されたサーバを用いて、分子運

動論のモデルを用いて浸透現象の計算も行った。半透膜をとおした溶液の平衡状態について非一様な応力分布が再現され、浸透流の力学的な理解が得られた。

[2年目以降に得られた研究成果]

チャンネル流（平面ポアズイユ流）の平衡解の探索に用いた直接数値計算による手法を平面クエット流（平面ポアズイユ流とは異なるタイプのチャンネル流。上下壁面が反対方向に一定速度でスライドすることで壁間に発生する流れ）に対しても実施していたところ、比較的低いレイノルズ数でも存在する新たな平衡解（図3もしくは図4左）を得ること

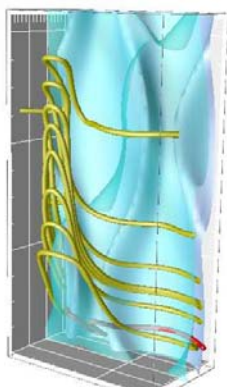


図3

に成功した。この解が存在するレイノルズ数の下限は139程度で、旧来知られてきた別の平衡解(NBW、図4右)のレイノルズ数下限(127)に近い値である。得られた解が内包するヘアピン型の渦形状は、これまで実験で確認されていた渦の形状に似ている点は特筆すべきである。すなわち、境界層乱流に代表される壁剪断流中においてヘアピン型の渦の存在が実験等で観測されてきたが、数値的・理論的にはヘアピン型の渦を有する平衡解の存在は長らく未発見のままであり、今回の解の発見は乱流秩序構造に関する極めて重要な発見だと言える。ちなみに、旧来知られていた別の平衡解(NBW)はこのようなヘアピン型の渦形状を有していない。その他、得られた解の物理的特性を調べ、その重要性を国内外の研究会で広く公表した。

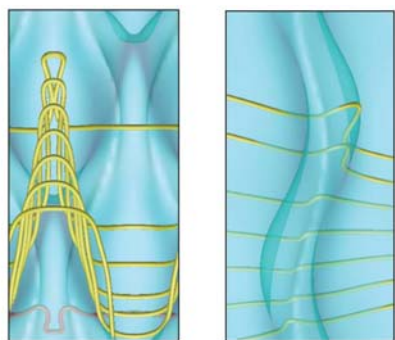


図4

[3年目に得られた研究成果]

本研究の最終年度は、2008年度に得られた平面クエット流のヘアピン型の渦を有した平衡解の物理的特性を解析し内外に公表することに充てられた。

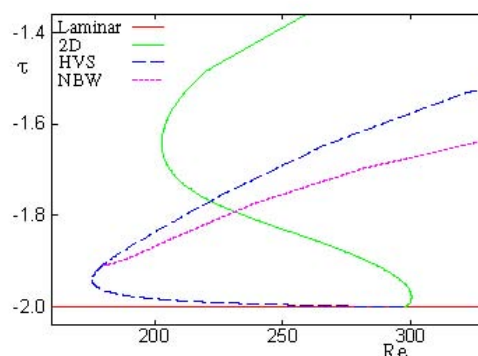


図5 ヘアピン渦の分岐図

まず第一に、解が存在する最低レイノルズ数を数値分岐解析により高い精度で求めた。この解が基本平行解から逐次的に分岐する様子について調査した(図5)。第二に、得られた解の安定性解析にも着手した。その結果、解は不安定であるものの、不安定固有値の個数は数個程度であることが分かった。不安定固有値に付随する固有モードは渦の不安定性の性質を表現するので、今後、固有モードの空間的性質を調べることで、ヘアピン渦の崩壊プロセスの理解につながることを期待される。第三に解が持つ渦のトポロジーについて解析を行った。ヘアピン渦のヘッド部分では渦のつながりかえが定常的に起きていることが分かってきた。これらの成果は招待講演を含む国内外の研究会や国際会議で発表された。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 5 件)

- ① Tomoaki Itano, Sadayoshi Toh, Kai Satoh, An Alternative Symmetry for Large-Scale Structures in Channel Flow, Theoretical and Applied mechanics Japan, 査読有, vol. 56, 2010, pp. 177-183
- ② Tomoaki Itano, Sotos C. Generalis, Hairpin Vortex Solution in Planar Couette Flow : A Tapestry of Knotted Vortices, Physical Review Letters, 査読有, vol. 102, 2009, 114501-1~4
- ③ 板野 智昭, 藤 定義, 佐藤 海, 平行平板間流れにおける渦の対称性, 京都大学数理解析研究所講究録, 査読無, Vol. 1673, 2009, pp. 112-115

- ④ Tomoaki Itano, Takeshi Akinaga, Masako Sugihara-Seki, A Numerical Study of Molecular Motion in the Osmotic Equilibrium, Theoretical and Applied Mechanics Japan, 査読有、vol. 56、2008、pp. 375-363
- ⑤ 板野 智昭、藤 定義、Fabian Waleffe、佐藤 海、チャンネル流における秩序構造と対称性、京都大学数理解析研究所講究録、査読無、Vol.1567、2007、pp. 86-91

[学会発表] (計 10 件)

- ① S. C. Generalis, New Equilibrium Couette States-The Hairpin Vortex Solution (HVS)、6th International Symposium on Turbulence, Heat and Mass Transfer, 2009/9/14、Univ. of Rome, Italy
- ② Tomoaki Itano, Symmetry of Coherent Vortices in Plane Couette Flow, 12th EUROMECH European Turbulence Conference, 2009/9/10、Univ. of Marburg, Germany
- ③ 板野 智昭、ヘアピン型渦構造を持つ平面クエット流厳密解について、日本流体力学会年会 2009、2009/09/03、東京 (東洋大学)
- ④ 板野 智昭、小型低乱風洞の試作、日本流体力学会年会 2009、2009/09/02、東京 (東洋大学)
- ⑤ 板野 智昭、平面クエット流におけるヘアピン渦解の分岐解析、第 58 回理論応用力学講演会、2009/06/09、東京 (日本学術会議)
- ⑥ Tomoaki Itano, A Bifurcation Study for Large-Scale Motion in Channel Flow, The 7th European Fluid Mechanics Conference, 2008/9/17、Manchester Univ., U.K.
- ⑦ Sadayoshi Toh, Dynamical characterization of Large-Scale Structures in Channel Flow Turbulence, Wall Bounded Shear Flows: Transitions and Turbulence, 2008/9/10、Cambridge Univ., U.K.

- ⑧ 板野 智昭、鉛直平板間の自然対流における乱流遷移と大規模秩序構造のかかわり、日本機械学会 2008 年度年次大会、2008/8/5、横浜国立大学
- ⑨ 板野 智昭、鉛直平行平板間自然対流に対する回転の影響II、日本機械学会、2007/11/17、広島大学
- ⑩ S. Toh, Unstable Periodic and Traveling Wave Solutions Corresponding to Large Scale Structures in Channel Flow Turbulence, SIAM Conference on Applications of Dynamical Systems, 2007/5/29、Utah, USA

[図書] (計 2 件)

- ① Tomoaki Itano, Springer-Verlag, Advances in turbulence XII, 2009、pp. 649-652
- ② Hiroyuki Abe, Springer-Verlag, Advances in turbulence XI, 2007、pp. 233-235

[その他]

関西大学 学術リポジトリ
<http://kuir.jm.kansai-u.ac.jp/dspace/handle/10112/1257/simple-search?query=%E6%9D%BF%E9%87%8E>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

板野 智昭 (ITANO TOMOAKI)
 関西大学 システム理工学部 准教授
 研究者番号 : 30335187