京都大学	博士（工学）	氏名	出口 健悟
論文題目	Finite amplitude solutions in sliding Couette flow （スライディング・クエット流の有限振幅解）		

（論文内容の要旨）

本論文は、同軸２重円筒間内の非圧縮粘性流れの非線形解析を行ったものであり、線形不安定性に起因する軸対称非線形解のみならず、非軸対称非線形解を、ホモトピー法を用いることで、平行平板間の平面クエット流の既知の解から接続して求め、さらに、円管ポアズイユ流の解にも接続することに成功した。幾何学的に異なるこれら３つの流れを繋ぐ変形手法を確立し、層流から乱流への遷移過程における統一的な関連付けを可能にしたものであり、７章からなっている。

第１章は序論であり、研究の背景について言及している。すなわち、流れが層流状態から乱流へと遷移していく過程をみたとき、２重円筒管内のテーラー・クエット流に代表されるような、レイノルズ数の増加とともに層流の線形安定性が失われ、逐次、解の分岐を繰り返し、最終的に乱流に至る場合とは異なり、層流自体が線形安定であるにもかかわらず、突如として有限振幅解が現れる流れがあることを述べ、この場合の代表的な流れが平面クエット流や円管ポアズイユ流であることを解説している。この有限振幅解は一般に不安定であるため数値シミュレーションでは捉える事ができず、ニュートン法を用いた数値計算による解法が不可欠であり、その解の振幅係数が果たす位相区間での力学系の役割の重要性について言及している。また、層流の速度が乱れの伝搬速度と一致する臨界層での解の振舞を知る重要性にも言及し、レイノルズ数が大きい極限での非線形漸近理論を紹介し、平面クエット流と円管ポアズイユ流を繋ぐ役割を果たすスライディング・クエット流をモデルとして考察するに至った経緯について述べている。

第２章では、スライディング・クエット流を定式化し、層流解を解析的に求め、層流解に加えられた有限振幅の乱れが支配される方程式を導き、その方程式を解く数値計算法を記述している。

第３章では、第２章で導出した方程式を線形化することで、層流の線形安定性が調べられること、また、その線形安定性を数値的に計算した結果に言及している。すなわち、内外円筒の半径比が 0.1415 より小さいときに限り、軸対称な乱れのみが流れを不安定にすること、また、不安定性が生じはじめるのは非常に大きな値のレイノルズ数であることを示している。

第４章では、第３章での線形安定性の結果をもとに、軸対称な乱れが有限の大きさの振幅となって層流が新たな解に分岐する有様を詳しく調べている。特に、軸対称有限振幅解が存在する内外円筒の半径比は 0.33ー0.4 の範囲内に収まる閾値値より小さくなくてはならないことを示している。また、この有限振幅解は大きなレイノルズ数領域で存在することから、この章で数値的に求めた軸対称有限振幅解と、レイノルズ数が大きい場合における漸近理論で求められた解との比較を試み、平均流の分布や、流れの構造が臨界層の近傍で cat’s-eye（猫の目）型の不連続性を呈していることに共通点を見いだしている。

第５章では、第４章で求まった軸対称有限振幅解があまりにも大きく現実的でないレイノルズ数領域で存在していることから、もっと低いレイノルズ数領域にも何か別の有

京都大学	博士（工学）	氏名	出口 健悟

限振幅解が存在しているのではないか、という予想のもとに、内外円筒の半径比が１となり円筒の曲率の影響が無視できる場合に対応する平面クエット流で知られている３次元有限振幅の「永田の解」から出発して、半径比を徐々に減少していくというホモトピー法により、非軸対称有限振幅解を見出している。さらに、この非軸対称有限振幅解から「対称性の破れ」が原因となり、新たに、鏡面対称解が分岐することを突き止めている。

第６章では、第５章で求まったスライディング・クエット流の鏡面対称解を、第６章で用いたホモトピー法での方向とは逆向きに内外半径比が１の場合へと接続していき、平面クエット流における鏡面対称解を得ている。さらに、スライディング・クエット流の鏡面対称解に対し、１）軸方向に圧力勾配を加え、２）内円筒の半径をゼロに近づけ、３）半径方向の展開関数に半径がゼロの時の「滑りなし」の条件を取り除く、という３段階のホモトピー法を考案することで円管ポアズイユ流における鏡面対称解に到達している。この章の終わりに、大きなレイノルズ数の領域で適応される「渦-波相互作用理論（vortex-wave interaction theory)」について言及し、乱れの臨界層近傍での自己維持メカニズムについて考察している。

第７章は結論であり、本論文で得られた成果について要約している。本論文を通じて求められた様々な有限振幅解のうち、非軸対称解はスライディング・クエット流と平面クエット流とを跨いで存在し、鏡面対称解に至ってはスライディング・クエット流を媒介にしてクエット流から円管ポアズイユ流にわたって存在していることが報告された。共に層流が線形安定性を示し層流から直接分岐する有限振幅解が不在の平面クエット流と円管ポアズイユ流という２種類の断面形状の異なる流れが共通の機構により乱れていくことを示し、普遍的な乱流遷移のメカニズムの解明に大きく貢献している。

氏　名	出　口　健　悟

（論文審査の結果の要旨）

本論文は、同軸２重円筒管内の非圧縮粘性流体が円筒の軸方向相対運動により引き起こされる流れ（スライディング・クエット流）を数値的、あるいは漸近理論を用いて解析し、得られた有限振幅解を平面クエット流と円管ポアズイユ流にホモトピー接続することにより、普遍的な乱流遷移のメカニズムを明らかにすることを目標に研究した成果についてまとめたものであり、得られた主な成果は次のとおりである。

１．スライディング・クエット流において、層流が安定性を失うのは、内外円筒の半径比が 0.1415 より小さい場合に限り、軸対称な乱れのみが流れを不安定にすること。

２．スライディング・クエット流の層流が安定性を失うとともに、軸対称有限振幅解が分岐し、その存在領域を決める内外円筒の半径比の閾値は 0.33ー0.4 の範囲に収まり、その値より小さい場合に軸対称有限振幅解が存在すること。

３．スライディング・クエット流において軸対称有限振幅解が存在しうるレイノルズ数より遥かに低いレイノルズ数領域に、平面クエット流からホモトピー法で接続した非軸対称有限振幅解が存在すること。

４．スライディング・クエット流における非軸対称有限振幅解が有する対称性を崩す鏡面対称な有限振幅解が分岐すること。

５．スライディング・クエット流における鏡面対称な有限振幅解を、平面クエット流にも円管ポアズイユ流にもホモトピー法を用いて接続することに成功したこと。

本論文は、基礎的な断面形状をもつ流れを考えることで、乱流遷移現象における普遍的メカニズムを解明する知見を提供し、学術上、実際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成２５年２月１２日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。