

学 位 論 文 題 名

「テイラー渦流れの多重解発生機構と
数値解法的高速化に関する研究」

学位論文内容の要旨

本論文では両端面の影響が無視できない小アスペクト比（円筒高さ／円筒間隙）の定常テイラー渦流れ（内円筒回転，外円筒静止）における多重解の発生機構を調べることを主目的として流れの数値解析を行った。ここで多重解とは幾何学的なパラメータやレイノルズ数などの力学的なパラメータが同一であってもテイラー渦の渦数が異なった多くの安定なモードが存在することである。実験的には流れモードがアスペクト比のみでは一意的に定まらず，流れの履歴効果や内円筒回転速度などにも依存する。

本研究では内円筒回転速度を考慮した数値計算を行い，従来の実験・数値的研究では解明されていなかった主モード・2次正規モード・2次変異モード流れの発生機構を明らかにした。また，最近その存在が明らかにされた，2次変異モード流れにともなう「extra」渦と呼ばれる小さな渦に関して，それが端面上のテイラーセルが矮小化したものであることを明らかにした。ここで主モードとは内円筒回転数を静止状態から徐々に増加させて得られる流れであり，2次モードとは内円筒回転数を急激に増加させて得られる主モードと渦数が異なる流れである。2次モードは円筒端面に隣合うセルの回転方向によってさらに2次正規モードと2次変異モードに分類される。

このテイラー渦流れは非線形問題として流体力学的に興味深い問題であるばかりでなく，工学的にも流体軸受の抵抗問題や混合手段としての利用と関連して重要な流れ場であり，流れモードによって抵抗や混合効率などが異なる。流れモードを制御するという観点から流れの非一意性や多重解の発生機構を解明し，この方面の研究の発展に寄与しようというのが本研究の狙いでもある。

一方，流れの非定常計算を経済的，効率的に行うためには計算の高速化が必須である。特に非定常の非圧縮流れ計算では計算ステップごとにポアソン方程式を解く必要があり，このポアソン方程式の解法に全計算時間の約90%以上が費やされる。ポアソン方程式を点SOR法（point

Successive Over Relaxation method)などの反復法で解く場合、インパルススタート時(急加速時)や解が分岐する際には低収束性の改善が課題になる。本研究では解の分岐問題が研究目的の一つであるため、解分岐時の計算の効率向上が重要な部分を占める。点SOR法によるポアソン方程式の解法では加速緩和係数が反復計算の収束性に大きく影響することが知られており、その制御にファジィ推論の適用を試みた。また、流れの状態によってファジィ制御規則が変化するため、制御規則が流れ状態に適応して変化するような適応制御機能が必要となる。そこで、適応制御方法として生物の適応能力を模擬したゆらぎ適応制御法を提案し、その適応効果を明らかにするとともにこの手法の有用性を示した。

本論文は全7章から構成されており、第1章ではテイラー渦流れの多重解に関する従来の研究と問題点、そして本研究で行ったテイラー渦流れの数値計算の意義と目的を概説している。また、効率のよい非定常、非圧縮流計算を実行する上での問題点と本研究で提案した計算の高速化手法の概要について述べている。

第2章では本研究で使用した差分のSMAC法(Simplified Marker And Cell method)と渦度-流れ関数法について示し、それらの計算方法の長所、短所等について述べる。また、計算の対象となる流れ場が非圧縮流れであるため、ポアソン方程式を解く必要があり、その解法として本研究で用いた点SOR法(point Successive Over Relaxation method)、線SOR法および並列計算向きのeven-odd法などの反復計算法について示した。

第3章では点SOR法の加速緩和係数の制御に適用したファジィ推論法とファジィ制御則パラメータの同定に使用した非線形計画法のハイブリッド法(共役勾配法とランダム探索法の組み合わせ)について述べた。ファジィ制御は言語的に表現できる制御規則を数値化する場合、すなわち定性的な制御則を定量的に表現するときには効果を発揮する。そして、解分岐時の数値計算法の効率化を目的として点SOR法によるポアソン方程式ソルバーの加速緩和係数制御にファジィ推論を適用し、2次元キャビティ流れの数値解析を行った。そして、ハイブリッド法によって制御パラメータの最適化をはかり、ファジィ制御の効果を示した。さらに、制御入力変数として何が適切であるのか、また適切な制御則はどのような言語規制で表現されるのかについて吟味した。

第4章では加速緩和係数の制御則が変化する場合や適切な時間刻み幅が大きく変動する問題にも対応できるように加速緩和係数のゆらぎ適応制御機構と時間刻み幅のファジィ制御について示した。対象とする流れ場は平板が移動・停止する2次元移動平板まわりの流れである。時間刻み幅、加速緩和係数を制御せずにこの流れ場の計算を行うと時間進行が非常に非効率的になり、最

悪の場合は計算が停滞あるいは発散してしまう。このような流れ場に本研究で提案するゆらぎ適応制御法を適用すると効率的な計算が可能になるばかりでなく、時間刻み幅のファジィ制御と組み合わせることによって計算進行が困難な局面をも打破する優れた方法であることがわかった。ゆらぎ適応機構とは生物が環境に適応して生きのびる機構を模擬したものである。

第5章では内円筒加速度を考慮したアスペクト比 $\Gamma=3.0$ のテイラー渦流れの3次元計算を行って、加速度が大きな場合（内円筒回転数を急激に増加させた場合）には2次正規4セルモードが生じ、小さな場合（内円筒回転数を徐々に増加させた場合）には主モード2セル流れが現れることを示した。まず、両端面の固定端条件と遠心力効果によって両端面上にセルが発生する。加速度が大きなときには端面上のセルが十分に円筒中央部へ成長する以前に、端面上のセルの循環が大きくなり、圧力場が形成されてセルの内側に新たな渦を誘起する。一方、加速度が小さな場合には新たな渦を誘起する前に端面上の渦が中央部へ広がるため、加速度の大きな場合に比較してセル数の小さなモードとなることが明らかになった。また、人工的な攪乱を入れることなしに波動テイラー渦流れに移移するところが確かめられ、実験的には得難い波動テイラー渦流れの空間相関や圧力構造などを詳細に調べた。

第6章ではよりスケールの小さなテイラー渦を捕らえるために格子数を増加させて、第5章と同様に内円筒加速度を考慮した軸対象計算を行った。その結果、加速度に依存して2次変異モード、2次正規モード、主モード流れが生じ、比較的格子の粗い前章の計算では得られなかった変異モード流れが生じる過程を明らかにした。ただし、セルの発生・成長過程は第5章で得られた結果と定性的に違いはなかった。そして、主モード流れが生じる内円筒加速時間を実験報告と比較したところ定量的にもよく一致することを示した。速度平面上での解トラジェクトリを調査したところ、わずかな初期値の差が時間とともに指数関数的に増加して他の流れモードに至るカオス的な性質があることがわかった。

第7章では本研究の結論を示し、テイラー渦流れに関する今後の研究課題と展望について示した。

学位論文審査の要旨

主査	教授	飯田 誠一
副査	教授	福迫 尚一郎
副査	教授	木谷 勝
副査	教授	板倉 忠興
副査	助教授	小河原 加久治

本論文は両断面の影響が無視できない小アスペクト比（円筒高さ／円筒間隙間）の定常テイラー渦流れ（内円筒回転，外円筒静止）における多重解の発生機構を調べることを主目的として流れの数値解析を行ったものである。ここで多重解とは幾何学的なパラメータやレイノルズ数などの力学的なパラメータが同一であってもテイラー渦の渦数が異なった多くの安定なモードが存在することである。実験的には流れモードがアスペクト比のみでは一意的に定まらず，流れの履歴効果や内円筒回転速度などにも依存する。

このテイラー渦流れは非線形問題として流体力学的に興味深い問題であるばかりでなく，工学的にも流体軸受の抵抗問題や混合手段としての利用と関連して重要であり，流れモードによって流体抵抗や混合効率などが異なる。流れモードを制御するという観点から流れの非一意性や多重解の発生機構を解明しようというのが本研究の主要な目的である。

本研究では内円筒回転加速度を考慮した数値計算を行い，従来の実験・数値的研究では解明されていなかった主モード・2次正規モード・2次変異モード流れの発生機構を明らかにした。また，最近その存在が明らかにされた，2次変異モード流れにともなう「extra」渦と呼ばれる小さな渦に関して，それが端面上のテイラーセルが矮小化したものであることを解明した。ここで主モードとは内円筒回転数を静止状態から徐々に増加させて得られる流れであり，2次モードとは内円筒回転数を急激に増加させて得られる主モードと渦数が異なる流れである。2次モードは円筒端面に隣合うセルの回転方向によってさらに2次正規モードと2次変異モードに分類される。

一方，流れの非定常計算を経済的，効率的に行うためには計算の高速化が必須である。特に非定常の非圧縮流れ計算では計算ステップごとにポアソン方程式を解く必要があり，このポアソン方程式の解法に全計算時間の約90%以上が費やされる。ポアソン方程式を点SOR法（point Successive Over Relaxation method）などの反復法で解く場合，インパルススタート時や

解が分岐する際には収束性の改善が重要な課題になる。本研究では解の分岐問題が研究目的の一つであるため、解分岐時の計算の効率向上が主要な部分を占める。SOR 法によるポアソン方程式の解法では加速緩和係数が反復計算の収束性に大きく影響することが知られており、その制御にファジィ推論の適用を試み、成功している。また、流れの状態によってファジィ制御規則が変化するので、制御規則が流れ状態に適応して変化するような適応制御機能が必要となる。そこで、適応制御方法として生物の適応能力を模擬したゆらぎ適応制御法を提案し、その適応効果を明らかにするとともにこの手法の有用性を示している。

本研究で得た主要な研究成果は以下のように要約される。

- (1) 円筒回転加速度に依存して、主モード、二次正規モード、二次変異モード流れが生じる。
- (2) 内円筒回転加速度は端面上に発生する渦の中央方向への成長速度と新たな渦を誘起するような圧力場の形成に影響して、これらの釣合によってモードが決定される。
- (3) 変異モードにともなう小さな「extra」渦の生成過程をはじめ明らかにし、これが端面のテイラーセルが矮小化したものである。
- (4) 内円筒回転加速度によるモード選択機構は初期値の影響が時間とともに指数関数的に増幅するカオス的な非線形系となっている。
- (5) ファジィ制御法をポアソン方程式の点 SOR 法ソルバーの加速緩和係数の制御と時間刻み幅の制御に適用すると、非常に効率的な計算が可能になる。
- (6) ファジィ制御のパラメータ同定法として非線形計画法の一つであるハイブリッド法が有効である。
- (7) 生物の環境適応機能を模擬したゆらぎ適応制御法のファジィ制御器への適用は、制御規則が変化する場合にも優れた追従性を示す。

これを要するに、著者はテイラー渦流れの内円筒回転加速度を考慮した数値解析を行って、多重解の発生機構に関する新知見を得ており、流れの制御に関する指針を与えた。さらに、数値計算法にゆらぎ適応機構付きのファジィ推論を適用して、数値計算の高効率化を可能とする手法を開発して、流体数値計算法の進歩に寄与するところが大きい。

よって、著者は、博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。