

博士（工 学） 竹 澤 聰

学 位 論 文 題 名

二次元チャンネル内噴流のカオス的挙動とその制御

学位論文内容の要旨

二次元の急拡大チャンネル内流れは、流れの剥離と再付着が共存する流れとして古くから知られており、流体力学の基礎を成す典型的な流れ場である。この研究は工学的にも意義があり、電子工学の基礎となるプリント基板のエッチング製作過程における応用をはじめとして電子機械、化学工学分野および樹脂形成や薄膜形成法におけるフローパターン最適制御など応用範囲も幅広い。これまでの研究によると、チャンネル内に噴き出す流れが低レイノルズ数の場合、吹出し口の直後に対称流の存在することは周知されている。しかし最近になって、低レイノルズ数においてさえも流れは安定ではあるが解は「一意的」に定まらないことが知られるようになってきた。この「一意的」に定まらないとは、非対称流れの存在を意味するが、その根本原因として剥離泡の発生・消滅が大きく関与していることが考えられる。このような自励振動現象は、周期、非周期の混在したいわゆる「非線形の確定系に生じる不規則な振動現象」とみなすことができる。

本研究の目的は、一般的な円管乱流噴流の特性を理解するのに先だって、境界条件の設定し易い二次元チャンネル内噴流について、そのカオス的な自励発振現象を解析し制御することにある。制御については「カオスを利用した制御」に着目し、発生するカオスの特徴的な『揺らぎ』を利用するOGY制御を行った。この制御はこれまで、1自由度系の単純なシステムにとどまっていたが、本研究により実用的で自由度の高いシステムへの応用の可能性を示した。また、二次元チャンネル内流れの剥離泡の発生・消滅の現象をニューラルネットワークに学習させ数値化した。そしてこの結果を用いて、壁面近傍の吸込みを援用した流れ場の情報をフィードバックするインターフェースを用いた制御の可制御性について検討し、剥離泡の縮小化や消滅による流動抵抗低減をめざした。

本論文は第1章から第7章までの全7章で構成されている。各章の内容については以下の通りである。

第1章は序論であり、円管乱流噴流の実験結果に基づく数値計算法導入の背景、チャンネル内噴流の特徴と噴流についての従来のカオス的研究、および能動制御による剥離泡の制御について紹介し、本論文の目的について述べている。

第2章では二次元チャンネル内噴流の計算条件と数値解法を示すとともに、本研究の動機付けとなったフリップフロップ現象を模擬した。その結果、チャンネルの急拡大率およびレイノルズ数の違いによって定常な対称流、定常の非対称流、第三の剥離領域の発生、剥離領域の伸張、分割などの複雑な流動場の挙動の様子を確認した。噴流中心軸上の流れ方向垂直の速度変動時系列は、フリップフロップ現象を端的に示す物理量であることを明

らかにした。

第3章ではフリップフロップ現象が周期的あるいは非周期的な現象の両方を示すことから、従来の確率・統計的手法によるカオス判定と時系列信号のウェーブレット解析を行って検討した。二次元チャンネル内噴流のダイナミクスを抽出するために、コントロールパラメータであるレイノルズ数を変化させ、速度時系列データの定性的、定量的評価を行った。その結果、時間遅れ構成によるアトラクターの空間的位相図の作成からホモクリニック軌道の存在、フラクタル次元やリアノフスペクトラムを計算し、カオス解の存在を示した。埋め込み理論によるアトラクターの位相再構成の結果、周期倍増分岐から多重周期型への軌道構成の遷移が認められた。カオス的挙動の時系列のパワースペクトルは周波数が高周波成分まで連続分布を示すこと、ウェーブレット解析によりカオス解特有の階層的樹状構造を示すことが明らかになった。カオスであることを確定するリアノフ指数の計算では正の値の固有値が存在することを示した。

第4章ではカオスの揺らぎを積極的に利用した能動制御として、OGY制御を試みた。そのために、第3章で述べたカオス的解析手法であるポアンカレ断面の選定方法に立脚してシミュレーションを行った。その結果、ポアンカレ断面を通過する軌道の固有ベクトルの直交性によって可制御性が依存することが示された。目的とする軌道上にカオス軌道を封じ込めるには、ポアンカレ断面の選択の決定的な定説がなく、任意のポアンカレ断面上の安定方向固有ベクトルの決定、fixed point近傍を通過する条件および、制御時間と制御力の強弱などの影響を受けることを明らかにした。制御に成功した不動点付近は安定方向と不安定方向との写像ベクトルがほぼ直交する結果を得た。とくに制御入力が小さくインパルシブである場合、安定した周期軌道に一度は落ち着いても、将来的に破綻して再度カオス軌道へと移行する傾向も認められ、安定した軌道を保つにはシステムの監視を行って再制御の必要があることを示した。

第5章ではカオス的挙動を示す非線形システムを定量的に評価する手立てとして、同定済みのニューラルネットワークを用いて未学習部分のカオス的時空間変動の短期予測を行った。その結果、教師信号パターン数、入力層数などのニューラルネットワークアーキテクチャの決定が重要で、これらの組み合わせに依存してネットワークの出力が2値化的形状または、中間値が存在する形状に変ることが示された。学習誤差を対数表示した場合、負の勾配をもつ学習曲線を辿って構築された結合係数は教師信号をよく近似し、学習スタイルは修正モーメント法を導入したバックプロパゲーション法が学習回数および学習誤差の収束率ともに最良の結果を得た。また、時間的なフィードバックを考慮したリカレントネットワークは Navier-Stokes 方程式を近似する力学的モデルであることが示された。ただし、非周期解に対してのモデル化はトラジェクトリーの形状によっては成功する場合と困難な場合とがあり、後者でも短期的な予測であれば可能であることを示した。

第6章ではニューラルネットワークをオブザーバとし壁面近傍の吸込みを援用するインターакティブを行った。その結果、二次元流路内に噴出される非圧縮性粘性噴流の自励振動現象に関する剥離泡の発生を抑止し、 $Re=10^4$ 以下のフリップフロップ現象の周期・非周期性の制御が可能であるという結果を得た。また、エネルギーコストの低減を考察するために流量比と制御時間を調べ、最適制御を行った。カオス解に対しての制御は周期解の学習結果をそのまま用いても周期解同様の制御が可能であることを示した。

第7章は結論であり、本研究で得られた主要な結果についてまとめている。

# 学位論文審査の要旨

主査教授 飯田誠一  
副査教授 木谷勝  
副査教授 井上良紀  
副査助教授 小河原加久治

## 学位論文題名

### 二次元チャンネル内噴流のカオス的挙動とその制御

二次元の急拡大チャンネル内流れは、流れの剥離と再付着が共存する流れとして古くから知られており、流体力学の基礎を成す典型的な流れ場である。これまでの研究によると、チャンネル内に噴き出す流れが低レイノルズ数の場合、吹出し口の直後に対称流の存在することは周知されている。しかし最近になって、低レイノルズ数においてさえも流れは安定ではあるが解は「一意的」に定まらないことが知られるようになってきた。この原因となる剥離泡の発生・消滅が関与した周期、非周期の混在する自励発振現象を「非線形の確定系に生じる不規則な振動現象」とみなすことができる。

本論文では、二次元チャンネル内噴流について、そのカオス的な自励発振現象を解析し制御している。制御については「カオスを利用した制御」に着目し、発生するカオスの特徴的な『揺らぎ』を利用するOGY制御による実用的で自由度の高いシステムへの応用の可能性を示した。また、壁面近傍の吸込みを援用したニューラルネットワークにより、流れ場の情報をフィードバックするインターラクティブな制御の可制御性について検討した。

本論文では以下のような結論を得ている。

(1) 二次元チャンネル内噴流に見られるフリップフロップ現象が周期的あるいは非周期的な現象の両方を示すことに注目し、カオス解のパワースペクトルは周波数が高周波成分まで連続分布を示すこと、同じくウェーブレット解析ではカオス解特有の階層的樹状構造を示すことを明らかにした。

(2) カオスの揺らぎを積極的に利用したOGY制御による可制御性を検討した。その結果、ポアンカレ断面を通過する軌道の固有ベクトルの直交性によって可制御性が依存することが示された。

(3) 非線形システムを定量的に評価する手立てとして、周期解を同定したニューラルネットワークを用いて未学習部分のカオス的時空間変動の短期予測を行った。その結果、教師信号パターン数、入力層数、学習アルゴリズムなどのニューラルネットワークアーキテクチャ決定の重要性を示した。

(4) ニューラルネットワークをオブザーバとし壁面近傍の吸込みを援用するインターラクティブ制御を行った。その結果、二次元流路内に噴出される非圧縮性粘性噴流の自励振動現象に関与する剥離泡の発生を抑止し、フリップフロップ現象の周期・非周期性の制御が可能であることを示した。

以上のように、筆者は、カオス的な解の存在する二次元チャネル内噴流の挙動を制御する手法を幾つか提案し、輸送効率向上に対する指針を示した。このことは、流体工学のみならず制御を必要とする分野に対して寄与するところ大である。よって、著者は、北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。