

氏名	菅野 円隆
博士の専攻分野の名称	博士（工学）
学位記号番号	博理工甲第 943 号
学位授与年月日	平成 26 年 3 月 24 日
学位授与の条件	学位規則第 4 条第 1 項該当
学位論文題目	時間遅延フィードバック光を有する半導体レーザカオスにおける複雑性解析
論文審査委員	委員長 准教授 内田 淳史 委員 教授 久野 義徳 委員 教授 重原 孝臣 委員 教授 池口 徹 委員 教授 島村 徹也

論文の内容の要旨

戻り光を有する半導体レーザは時間遅延システムであり、高速で複雑なカオスを出力する。これまでに戻り光を有する半導体レーザを用いた様々な応用が研究されており、その1つとして高速物理乱数生成が挙げられる。これはレーザカオスに対してしきい値を設定して周期的にサンプリングすることで、0と1の2値乱数列を得る手法である。レーザカオスは数GHzの高速な振動成分を有するため、従来法よりも高速な物理乱数生成器を実装することができる。

一方でレーザはコンシステンシーを示すことが知られている。コンシステンシーは同一の信号により繰り返し駆動された非線形システムが示す再現性のある振る舞いと定義される。これまでにレーザのコンシステンシーは実験的に観測されており、リザーバコンピューティングや物理的一方向性関数への応用が期待されている。

これらの応用においてカオスの複雑性は重要な評価指標である。高速物理乱数生成におけるカオスの複雑性の評価は、生成された物理乱数のランダム性を理論的に保障するために重要である。カオスの複雑性を定量化する指標としてリアプノフ指数が挙げられる。リアプノフ指数は状態空間においてカオス時系列に与えられた微小揺らぎの指数関数的な拡大率を表し、高いリアプノフ指数を有するシステムは高い複雑性を有していると言える。

しかしながら時間遅延システムは無次元を有するため、一般的なシステムとは状態空間の構成方法が異なり、戻り光を有する半導体レーザにおけるリアプノフ指数の算出はほとんど行われていない。一方で、Farmerにより時間遅延ダイナミカルシステムにおいてリアプノフ指数を算出する方法が提案されている。しかしながらコンシステンシー状態での半導体レーザにおいてリアプノフ指数による複雑性の評価は行われておらず、特にコンシステンシーと複雑性の関係については全く分かっていないのが現状である。さらにアトラクタの局所的な不安定性を評価する指標として有限時間リアプノフ指数が提案されているが、時間遅延システムにおいて有限時間リアプノフ指数を算出する手法は確立されていない。

そこで本研究では、時間遅延フィードバック光を有する半導体レーザカオスのリアプノフ指数の算出を行うことを目的とする。また光結合された戻り光を有する半導体レーザにおいてリアプノフ指数を用いて複雑

性を定量化し、コンシステンシー状態の有無との関係を調査する。さらに時間遅延ダイナミカルシステムにおいて有限時間リアプノフ指数の算出手法を提案し、戻り光を有する半導体レーザに適用する。

はじめに、戻り光を有する半導体レーザの複雑性をリアプノフスペクトラム解析により評価し、高速物理乱数生成への応用に適したレーザパラメータを調査した。リアプノフ指数から算出されたエントロピーと次元のパラメータ依存性を調査したところ、戻り光量および注入電流を最適化することで複雑性の向上が可能となることが明らかとなった。また内部パラメータとして、線幅増幅係数が大きく利得飽和係数が小さな半導体レーザを乱数源として用いることが、複雑性向上のために効果的であることが明らかとなった。

次に、一方向に光結合された半導体レーザにおいてリアプノフ指数から算出されたエントロピーと次元を用いて複雑性を評価し、コンシステンシーとの関係について調査した。複雑性はコンシステンシーの有無に依存して3つの領域に分類されることが分かった。システムがコンシステンシー状態である時、複雑性は駆動用レーザと同程度まで低下した。コンシステンシー状態でない時の複雑性は結合が無い時と同程度となるが、コンシステンシー領域の境界付近では複雑性が増加することが明らかとなった。本研究により、コンシステンシーの有無が複雑性に大きく影響を与えることが初めて明らかとなった。

また、時間遅延システムにおける有限時間リアプノフ指数の算出手法を新たに提案し、戻り光を有する半導体レーザに本手法を適用した。はじめに代表的な時間遅延システムであるマッキークラスモデルに本手法を適用した。有限時間および遅延時間の変化に対して有限時間リアプノフ指数の確率分布の標準偏差の変化を調査した。その結果、標準偏差はべき乗則に従い減少し、べき指数はほぼ-0.5となった。また戻り光を有する半導体レーザにおいて同様の調査を行った。有限時間リアプノフ指数の標準偏差は遅延時間の増加に対してべき乗則に従い減少するが、そのべき指数は-0.1程度と小さな値となり、戻り光を有する半導体レーザは他の時間遅延システムとは異なる特徴を有することが明らかとなった。

さらに、戻り光を有する半導体レーザにおいて実験的にリアプノフ指数を算出する手法を提案し、その妥当性を数値計算により示した。その結果、本手法と線形化方程式を用いて算出された最大リアプノフ指数は概ね一致し、本手法の妥当性が示された。さらに戻り光を有する半導体レーザのリアプノフ指数による複雑性評価の応用として、半導体レーザカオスの周波数帯域および自己相関関数の増減と複雑性の関係性について調査を行った。その結果、周波数帯域の増減と複雑性との関係性は低いが、一方で自己相関関数のセカンドピークの減少が最大リアプノフ指数の増加を示すことが分かった。

本研究で得られた知見は、半導体レーザを用いた高速物理乱数生成器の予測不可能性の定量化や、リザーバコンピューティングの情報容量推定への応用に有用であると期待される。

論文の審査結果の要旨

学位論文審査委員会は、平成 26 年 2 月 10 日に論文発表会を開催し、論文内容の発表に続いて詳細な質疑と論文内容の審査を行った。以下に審査結果を要約する。

戻り光を有する半導体レーザは時間遅延システムであり、高速で複雑なカオスを出力する。これまでに戻り光を有する半導体レーザを用いた様々な応用が研究されており、その 1 つとして高速物理乱数生成が挙げられる。これはレーザカオスに対してしきい値を設定して周期的にサンプリングすることで、0 と 1 の 2 値乱数列を得る手法である。レーザカオスは数 GHz の高速な振動成分を有するため、従来法よりも高速な物理乱数生成器を実装することができる。

一方でレーザはコンシステンシーを示すことが知られている。コンシステンシーは同一の信号により繰り返し駆動された非線形システムが示す再現性のある振る舞いと定義される。これまでにレーザのコンシステンシーは実験的に観測されており、リザーバコンピューティングや物理的一方向性関数への応用が期待されている。

これらの応用においてカオスの複雑性は重要な評価指標である。高速物理乱数生成におけるカオスの複雑性の評価は、生成された物理乱数のランダム性を理論的に保障するために重要である。カオスの複雑性を定量化する指標としてリアプノフ指数が挙げられる。リアプノフ指数は状態空間においてカオス時系列に与えられた微小揺らぎの指数関数的な拡大率を表し、高いリアプノフ指数を有するシステムは高い複雑性を有していると言える。

しかしながら時間遅延システムは無次元次元を有するため、一般的なシステムとは状態空間の構成方法が異なり、戻り光を有する半導体レーザにおけるリアプノフ指数の算出はほとんど行われていない。一方で、Farmer により時間遅延ダイナミカルシステムにおいてリアプノフ指数を算出する方法が提案されている。しかしながらコンシステンシー状態での半導体レーザにおいてリアプノフ指数による複雑性の評価は行われておらず、特にコンシステンシーと複雑性の関係については全く分かっていないのが現状である。さらにアトラクタの局所的な不安定性を評価する指標として有限時間リアプノフ指数が提案されているが、時間遅延システムにおいて有限時間リアプノフ指数を算出する手法は確立されていない。

そこで本論文では、時間遅延フィードバック光を有する半導体レーザカオスのリアプノフ指数の算出を行うことを目的とする。また光結合された戻り光を有する半導体レーザにおいてリアプノフ指数を用いて複雑性を定量化し、コンシステンシー状態の有無との関係を調査する。さらに時間遅延ダイナミカルシステムにおいて有限時間リアプノフ指数の算出手法を提案し、戻り光を有する半導体レーザに適用する。

第 1 章では本研究の背景、目的および本論文の構成について述べている。

第 2 章では序論として、リアプノフ指数、コンシステンシー、半導体レーザの応用について述べている。

第 3 章では本研究で用いる半導体レーザの数値モデルについて述べている。さらに戻り光を有する半導体レーザの基本的なダイナミクスとその数値的な解析方法について述べている。

第4章では、戻り光を有する半導体レーザの複雑性をリアプノフスペクトラム解析により評価し、高速物理乱数生成への応用に適したレーザパラメータを調査している。リアプノフ指数から算出されたエントロピーと次元のパラメータ依存性を調査したところ、戻り光量および注入電流を最適化することで複雑性の向上が可能となることが明らかとなった。また内部パラメータとして、線幅増幅係数が大きく利得飽和係数が小さな半導体レーザを乱数源として用いることが、複雑性向上のために効果的であることが分かった。

第5章では、一方向に光結合された半導体レーザにおいてリアプノフ指数から算出されたエントロピーと次元を用いて複雑性を評価し、コンシステンシーとの関係について調査している。複雑性はコンシステンシーの有無に依存して3つの領域に分類されることが分かった。システムがコンシステンシー状態である時、複雑性は駆動用レーザと同程度まで低下した。コンシステンシー状態でない時の複雑性は結合が無い時と同程度となるが、コンシステンシー領域の境界付近では複雑性が増加することが明らかとなった。本研究により、コンシステンシーの有無が複雑性に大きく影響を与えることが初めて明らかとなった。

第6章では、時間遅延システムにおける有限時間リアプノフ指数の算出手法を新たに提案し、戻り光を有する半導体レーザに本手法を適用している。初めに代表的な時間遅延システムであるマッキークラスモデルに本手法を適用した。有限時間および遅延時間の変化に対して有限時間リアプノフ指数の確率分布の標準偏差の変化を調査した。その結果、標準偏差はべき乗則に従い減少し、べき指数はほぼ -0.5 となった。また戻り光を有する半導体レーザにおいて同様の調査を行った。有限時間リアプノフ指数の標準偏差は遅延時間の増加に対してべき乗則に従い減少するが、そのべき指数は -0.1 程度と小さな値となり、戻り光を有する半導体レーザは他の時間遅延システムとは異なる特徴を有することが明らかとなった。

第7章では、戻り光を有する半導体レーザにおいて実験的にリアプノフ指数を算出する手法を提案し、その妥当性を数値計算により示している。その結果、本手法と線形化方程式を用いて算出された最大リアプノフ指数は概ね一致し、本手法の妥当性が示された。さらに、戻り光を有する半導体レーザのリアプノフ指数による複雑性評価の応用として、半導体レーザカオスの周波数帯域および自己相関関数の増減と複雑性の関係性について調査を行っている。その結果、周波数帯域の増減と複雑性との関係性は低い、一方で自己相関関数のセカンドピークの減少が最大リアプノフ指数の増加を示すことが分かった。

最後に第8章では、本論文で得られた成果をまとめている。

以上要するに、本論文では時間遅延フィードバック光を有する半導体レーザカオスのリアプノフ指数の算出を行うことで、複雑性の定量的評価を行った。特に光結合レーザ系におけるコンシステンシー状態と複雑性との関係を初めて明らかにした。さらに時間遅延システムにおける有限時間リアプノフ指数の算出方法を新たに提案し、その有効性を検証した。加えて、同期を用いたリアプノフ指数の算出方法の提案や周波数帯域拡大効果と複雑性との関係を明らかにした。

本論文の主な内容は、査読制のある学術論文誌に4編の学術論文として出版されており、うち3編が筆頭著者である。また筆頭著者として、査読付き国際会議録に6編の論文として公表されている。

本研究で得られた知見は、半導体レーザを用いた高速物理乱数生成器の予測不可能性の定量化や、リザーバコンピューティングの情報容量推定への応用に有用であると強く期待される。従って、本学位論文審査委員会は、本論文が、博士（工学）の学位を授与するに十分に値するものと認め、「合格」と判定した。