

短い外部共振器を有する半導体レーザにおける 間欠性カオスの検知と予測

Detection and prediction of intermittent chaos in a semiconductor laser with short external cavity

埼玉大¹, 木更津高専²

井上 聡太¹, 巳鼻 孝朋¹, 小原 翔馬², 菅野 円隆¹, 内田 淳史¹

Saitama Univ.¹, NIT, Kisarazu College²

Sota Inoue¹, Takatomo Mihana¹, Shoma Ohara², Kazutaka Kanno¹, and Atsushi Uchida¹

E-mails: s.inoue.567@ms.saitama-u.ac.jp, auchida@mail.saitama-u.ac.jp

はじめに: 自然界における通常の動作からの強い逸脱現象を突発的現象(Extreme events)と呼ぶ。機械学習を用いて突発的現象を予測し、短い時間の制御を行って予防するという研究が行われている[1]。突発的現象の例として、バーストとラミナーという2つのダイナミクスを持つ間欠性カオスが挙げられる。間欠性カオスは物理学の様々な領域で見られる決定論的な突発的現象であり、戻り光を有する半導体レーザ光集積回路でも発生することが知られている[2]。

これまでに間欠性カオスの予測に関する研究は行われているものの、間欠性カオスにおいて、時系列データからバーストの発生を予測することは困難であるという課題がある。このとき局所的リアプノフ指数がバースト発生の予兆となり得るが、間欠性カオスの予測と予防に関する研究において局所的リアプノフ指数を用いた方式は報告されていない。

そこで本研究では、間欠性カオスにおける時系列データおよび局所的リアプノフ指数を観測することで、バースト発生前の特徴量を抽出し、バースト発生を予測することを目的とする。

方法と結果: 本研究では、Lang-Kobayashi 方程式[3]を用いることで戻り光を有する半導体レーザのダイナミクスの数値計算を行った。外部鏡を用いてレーザの出力光を反射し、戻り光としてレーザに注入する。このとき、外部共振器長を 20mm に設定し、外部鏡反射率を変化させると、間欠性カオスが発生した。

Fig. 1 に間欠性カオスのラミナー部のアトラクタ(Fig. 1(a))とバースト部のアトラクタ(Fig. 1(b))を示す。また色は局所的リアプノフ指数を示す。バーストが発生するとアトラクタが増大し、局所的リアプノフ指数も大きくなることから分かる。

次に間欠性カオスのバーストを予測するための条件を設定する。キャリア密度が極小値を取ること、その点がアトラクタ上の特定の位置にあること、さらに局所的リアプノフ指数がしきい値 $\lambda_{local,th}$ を超えることの3つの条件を設定した。予測の成功率を統計的に評価するために、2つの評価指標を導入する。条件が満たされた際にバーストを正しく予測できる確率である予測成功率 P_{pre} と、バーストが発生した際にそのバーストが検知されている確率である検知成功率 P_{det} を用いた。

局所的リアプノフ指数のしきい値 $\lambda_{local,th}$ を変化させた際の、予測成功率 P_{pre} と検知成功率 P_{det} の計算結果をFig. 2 に示す。しきい値が低

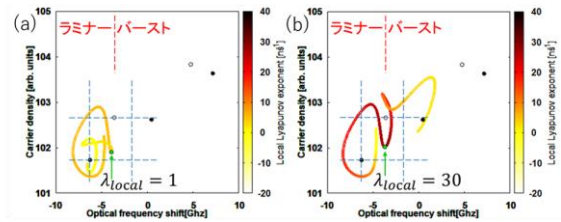


Fig. 1 Attractors of intermittent chaos with distribution of local Lyapunov exponents (LLE). (a) Laminar attractor with low LLE, and (b) burst attractor with high LLE.

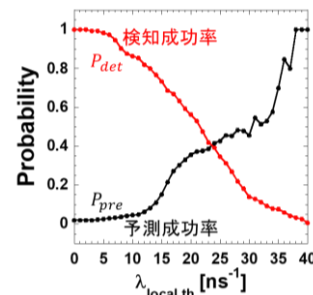


Fig. 2 Probabilities of successful prediction P_{pre} and detection P_{det} as a function of $\lambda_{local,th}$.

い場合は、局所的リアプノフ指数に関わらず条件を満たし、必ず検知に成功した。一方でしきい値を増加させると、条件が満たされず検知に失敗して検知成功率は減少するが、一方で予測の成功率は上昇した。これは、しきい値が低い場合は、ラミナーアトラクタ上で条件が満たされるため、予測に失敗する回数が多くなり予測成功率が低くなる。一方でしきい値を増加させると、バーストアトラクタに遷移するときに条件が満たされて予測成功率が増加する。以上より、 $\lambda_{local,th}$ の変化に対して、予測成功率と検知成功率にはトレードオフの関係にあることが分かった。

まとめ:

本研究では、戻り光を有する半導体レーザにおいて間欠性カオスを数値計算により観測し、時系列データおよび局所的リアプノフ指数を測定することで、バースト発生前の特徴を調査した。予測を行った結果、予測成功率と検知成功率はトレードオフの関係にあることが明らかとなった。

参考文献

- [1] V. Pyragas, et al., Physics Letters A, **384**, 126591 (2020).
- [2] A. Karsaklian Dal Bosco, et al., Optics Express, **24**, 22198 (2016).
- [3] R. Lang, et al., IEEE J. Quantum Electron., **16**, 347(1980).