

# レーザにおけるコンシステンシー現象と情報セキュリティへの応用

内田 淳史 (理工学研究科・准教授)

## 1 研究の目的

レーザに代表される多くの非線形システムは、繰り返し入力された信号に対して再現性のある振る舞いを示すことが知られており、この現象はコンシステンシー(consistency)と呼ばれている[1]。コンシステンシーとは非線形システムが同一の信号によって繰り返し駆動された時に同一の応答信号を生成する現象であると定義できる。これまでにレーザにおいてコンシステンシーは実験的に観測されており[1]、レーザカオスの超高速性を利用したGHz オーダーでの物理的一方向性関数[2]の実現への応用が考えられる。これは物理的に一方向性関数を実現する方法であり、ハードウェア依存型の情報セキュリティ方式における重要な要素技術であると考えられる。

コンシステンシー状態におけるシステム全体の複雑性は、物理的一方向性関数の評価指標の一つとなりうる。しかし一方に光結合されたレーザにおいてコンシステンシーが得られることは示されているが、結合状態におけるレーザシステム全体の複雑性に関してはこれまでに調査されていない。特にコンシステンシーを示す場合と示さない場合において、システム全体の複雑性がどのように変化するかについては全く分かっていないのが現状である。

そこで本研究では、時間遅延を有する光結合された半導体レーザにおいてコンシステンシーを観測し、その複雑性をエントロピーや次元を計算することで定量的に評価することを目的とする。

## 2 研究方法と成果

はじめに一方向結合された半導体レーザにおいてコンシステンシーが達成される条件を数値解析により調査した。3つの半導体レーザ(Drive、Response 1、2と呼ぶ)のモデルを図1に示す。本研究ではResponse 1レーザと全く同一のパラメータを有し、かつ初期状態が異なるResponse 2レーザを用意する。この2つ

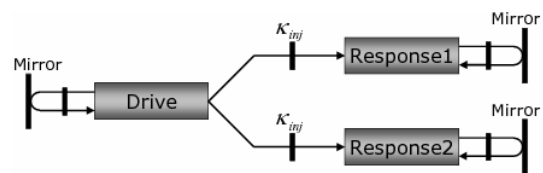


図1 結合レーザモデル

のResponseレーザにDriveレーザから同一の信号を入力した時に2つのResponseレーザ間で同一の応答信号が得られればコンシステンシーが得られたと定義する。また各々のレーザは外部鏡からの時間遅延した戻り光によりカオスが発生している。このようなモデルを考え、半導体レーザのレート方程式(Lang-Kobayashi方程式)を用いて数値解析を行った[3]。

結合が無い時の3つのレーザの時間波形とResponse 1-2間の相関図を図2(a)、(b)に示す。Response 1、2が異なる振る舞いをしていることを時間波形と相関図から確認することができ、コンシステンシー状態でないことが分かる。次にDriveからResponseへの結合強度が0.2の時の時間波形と相関図を図2(c)、(d)に示す。Response 1、2のレーザの時間波形が等しく、相関図も45度の直線であることからコンシステンシー状態であることが分かる。つまり光結合された半導体レーザにおいて結合強度を増やすことによりコンシステンシーを達成した。

次にコンシステンシーを相互相関値により定量的に評価した。図3(a)にDrive-Response間の結合強度を変化させた時の相互相関値を示す。図3(a)の実線から、結合が無い時のResponse 1-2間の相互相関値はほぼ0でありコンシステンシー状態ではないが、結合強度0.2以上に増加させると相互相関値が

ほぼ 1.0 となりコンシステンシー状態であることが確認できる。つまりコンシステンシーを達成するためには、結合強度を増加させれば良いことが分かった。

コンシステンシー状態における複雑性を調査するために、レート方程式を線形化してリアプノフスペクトラムを求め、さらにシステムの予測不可能性を示す Kolmogorov-Sinai (KS) エントロピーと、システムの次元を示す Kaplan-Yorke (KY) 次元を算出した [3]。結合強度を変化させた時の KS エントロピーと KY 次元を図 3 (b) に示す。結合強度を増加させると、図 3 (b) の実線から、システム全体の KS エントロピーは増加して結合強度 0.08 付近で最大値となることが分かった。しかしながら結合強度をさらに増加させコンシステンシーが達成される結合強度( $\sim 0.2$ )になると、KS エントロピーは急激に減少してほぼ一定値に収束した。一方で KY 次元(図 3 (b) の破線)は、結合強度を増加させると KY 次元はわずかに上昇した。また結合強度をさらに増加させコンシステンシー状態となると、KY 次元は一定値に収束した。コンシステンシー状態でのシステム全体の KS エントロピーおよび KY 次元は、Drive レーザのみに対して計算された値とほぼ同程度となっていた。つまり、結合無しの状態から結合強度を増加させると KS エントロピーと KY 次元は増大するが、さらに結合強度を増加させてコンシステンシーが達成されると KS エントロピーと KY 次元は共に急激に減少し、Drive レーザと同程度の値まで低下することが明らかとなった。

### 3 まとめ

本研究では、光結合した時間遅延を有する半導体レーザにおいてコンシステンシー状態を観測し、KS エントロピーと KY 次元を計算することで複雑性の定量化を行った。結合強度を増加させると KS エントロピーと KY 次元は共に増加するが、さらに結合強度を増加させてコンシステンシー状態となった時、KS エントロピーと KY 次元は急激に減少し、単体レーザと同程度の値に収束した。つまりコンシステンシーの有無がシステム全体の複雑性を大幅に変化させることが明らかとなった。

### 参考文献

- [1] A. Uchida, R. McAllister, and R. Roy, Phys. Rev. Lett., vol. 93, pp. 244102 (2004).
- [2] R. Pappu, B. Recht, J. Taylor, and N. Gershenfeld, Science, vol. 297 pp. 2026 (2002).
- [3] R. Vicente, J. Dauden, P. Colet, and R. Toral IEEE J. Quantum Electron., vol. 41, pp. 541 (2005).

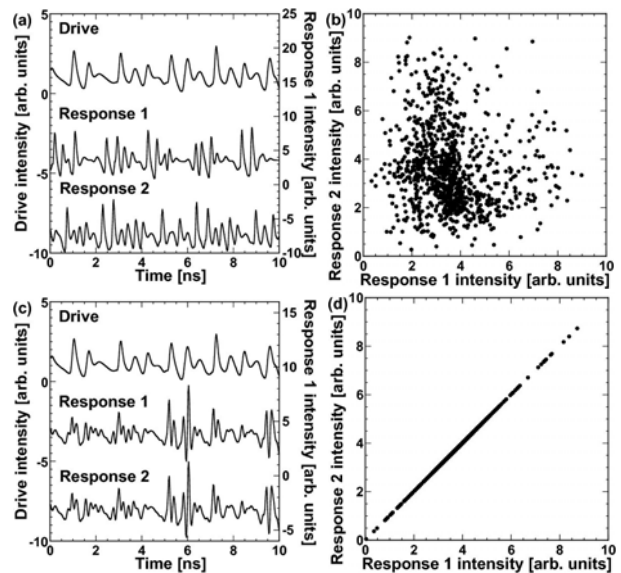


図2 レーザ出力の時間波形と相関図。

(a)、(b) 結合無し。(c)、(d) 結合あり。

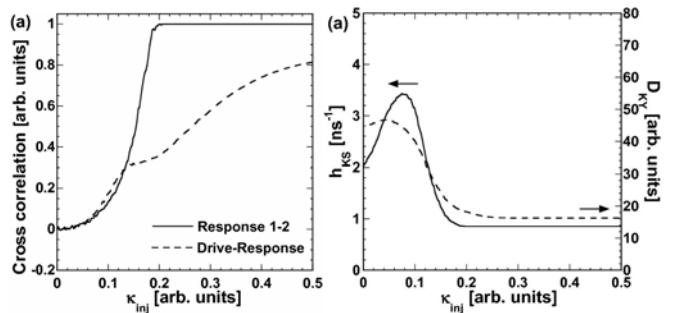


図3 結合強度変化に対する(a)相互相関値および(b) KS エントロピー (実線) と KY 次元 (破線)。