

# 戻り光を有する半導体レーザカオス時系列の サンプルエントロピーによる複雑性評価

Complexity evaluation of chaotic temporal waveforms in a semiconductor laser  
with optical feedback using sample entropy

埼玉大, °大熊 智彦, 菅野 円隆, 内田 淳史

Saitama University

°Tomohiko Okuma, Kazutaka Kanno, and Atsushi Uchida

E-mails: t.okuma.675@ms.saitama-u.ac.jp, auchida@mail.saitama-u.ac.jp

**はじめに:** 近年の情報化社会では、情報セキュリティにおける暗号化や大規模数値シミュレーション等の幅広い場面で乱数が利用されている。一般的に擬似乱数が利用されているが、周期性や再現性が存在するため、安全面の脆弱性が指摘されている。そこで近年、半導体レーザカオスを物理乱数源とした高速物理乱数生成方式が報告されている [1]。この方式の提案以降、様々な生成方式が提案され、現在に至るまでに Tb/s を超える乱数生成速度を実現している [2]。しかしながら乱数生成の高速化に伴い、物理乱数源が持つエントロピーを超えた乱数生成を行っているという問題点が指摘されている。そのため、物理乱数を生成する際は、物理乱数源である時間波形の複雑性 (エントロピー) の評価が重要である [3]。

時間波形のエントロピー評価手法として Kolmogorov-Sinai (KS) エントロピーが知られている。しかしながら、KS エントロピーが算出できるのは数値計算のみであり、実験データから算出ができない。そこで、実験データから直接エントロピーを算出する手法として  $(\varepsilon, \tau)$  エントロピーやサンプルエントロピーが提案されている [4,5]。しかしながら、戻り光を有する半導体レーザカオスに対するこれらの算出方法の有用性は報告されていない。

そこで本研究では、戻り光を有する半導体レーザカオスに対して  $(\varepsilon, \tau)$  エントロピー評価とサンプルエントロピー評価を行い、これらの手法の有用性を数値計算により示す。また、KS エントロピーとの比較を行い算出値の妥当性を示す。

**エントロピー評価方法:** 時間波形からエントロピーを算出する方法の概念図を Fig.1 に示す。はじめに、取得した時間波形をサンプリング間隔  $\tau$  により量子化を行い、時系列データを取得する。次に、時系列データ上からランダムに 1 点を選び、この点を基準に長さ  $d$  の基準ベクトルを生成する。そしてこの基準ベクトルと各成分との差が  $\varepsilon$  以内であるベクトルが時系列データ上に存在する確率  $A_i^d$  を算出する。この操作を  $R$  回繰り返す。そして、 $(\varepsilon, \tau)$  エントロピー評価では  $R$  個の確率  $A_i^d$  に対して対数値  $\log_2 A_i^d$  を求め、対数の平均値  $A^d$  を算出する。

$$A^d = -\frac{1}{R} \sum_{i=1}^R \log_2 A_i^d \quad (1)$$

一方でサンプルエントロピーでは、確率  $A_i^d$  の平均値を先に計算した後に対数を算出する。

$$A^d = -\log_2 \left( \frac{1}{R} \sum_{i=1}^R A_i^d \right) \quad (2)$$

最後にベクトル長が  $d+1$  と  $d$  の場合における  $A^{d+1}$  と  $A^d$  の差をとり、サンプリング速度  $1/\tau$  を乗算した値が時間波形のエントロピー値となる。

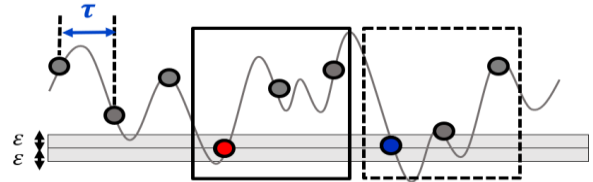


Fig. 1. Concept of the calculation of entropy from temporal waveforms.

**結果:** 戻り光を有する半導体レーザカオスに対する  $(\varepsilon, \tau)$  エントロピーとサンプルエントロピーの算出結果を Fig. 2(a) に示す。 $(\varepsilon, \tau)$  エントロピーの算出値はベクトル長  $d$  が長くなるに従って 0 に収束することが分かった。一方で、サンプルエントロピーの算出値は周期的に変化し、特にサンプルエントロピーの極小値は理論値である KS エントロピーに漸近することが分かった。また、サンプルエントロピーの算出結果に現れる周期の間隔は外部共振器内の光伝搬の往復時間  $\tau_d$  と一致しており、算出結果から時間遅延システムの特徴を観測できた。

次に、ベクトル長  $d$  の変化に対する KS エントロピーと各エントロピーとの相関値の変化を Fig. 2(b) に示す。サンプルエントロピーはベクトル長  $d$  の長さに関わらず KS エントロピーと高い相関値を示すことが分かった。これらの結果から、戻り光を有する半導体レーザカオスのエントロピー評価には、サンプルエントロピーの方が適していると考えられる。

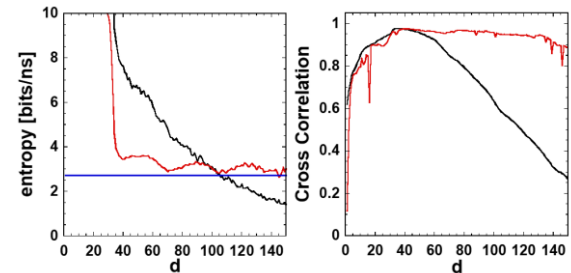


Fig. 2. (a) Numerical result of (black)  $(\varepsilon, \tau)$  entropy (red) sample entropy and (blue) KS entropy. (b) Cross correlation value (black) between KS entropy and  $(\varepsilon, \tau)$  entropy, and (red) between KS entropy and sample entropy.

**まとめ:** 本研究では、戻り光を有する半導体レーザカオスに対してエントロピー評価を行った。 $(\varepsilon, \tau)$  エントロピーに比べてサンプルエントロピーの方が半導体レーザカオスのエントロピー評価に適していることが分かった。

## 参考文献

- [1] A. Uchida, et al., Nat. Photon., **2**, 728 (2008).
- [2] R. Sakuraba, et al., Opt. Exp., **23**, 1470 (2015).
- [3] J. D. Hart, et al., APL Photonics, **2**, 090901 (2017).
- [4] A. Cohen et al., Phys. Rev. A **31**, 1872 (1985).
- [5] J.S.Richman et al, Am. J. Physiology **6**, 2039 (2000).