

レーザー カオスの同期現象

立川 真樹

周期的に振動する非線形振動子が他の振動子と結合すると周波数の引き込み現象が起こることは、例えば壁に掛けた複数の柱時計が同期することにもみられるようによく知られた現象である。それでは、異なるカオス系の間に結合が存在するとき、カオスの同期現象は生じるであろうか。これは、非線形系の振舞いを明らかにする意味で、非常に興味深い問題である。また、もしカオスの同期現象が存在するならば、それを新たな機能として積極的にデバイスに活用していくことができるかもしない。

筆者らは、カオス的な自励パルス発振をする炭酸ガスレーザーを用い、カオス信号で駆動されたレーザー カオス系が外部変調に同期^{*1}したパルス発振を起こすことを見出した。本論文では、具体的な実験結果を紹介しながら、こうした同期現象の機能性について考えてみたい。

1. 2つのレーザー系におけるカオスの同期現象

飽和性の吸収媒質を共振器内に含む炭酸ガスレーザーでは、ある限られたパラメーター領域で周期倍化分岐に伴うカオスが観測される¹⁾。筆者らは、図1に示したように、同じ発振線、吸収ガスをもつ2台の炭酸ガスレーザーを準備し、1台のレーザー（マスター レーザー）からのカオス光をもう1台のレーザー（スレーブ レーザー）の可飽和吸収セルに注入した²⁾。2台のレーザーは、お互い平行な直線偏光で発振しているが、ミラーセットによってマスター レーザーの偏光面を90°回転してからスレーブ レーザーの吸収セルに入射する。注入された光はセルのブルースター窓の裏面で反射され、吸収ガス中を通過した後もう一方の窓から出射する。これによって、マスター レーザーからのカオス光でスレーブ レーザーの吸収損失を変調することができる。ここで、吸収媒

質の緩和レートは十分速く、吸収係数は入射光強度の変化にはほぼ断熱的に追従すると考えてよい。

図2に観測されたレーザー光強度の時間変化を示す。また、2つのカオス時系列の相関を評価するために、マスター レーザーのパルスの高さ X_m を横軸に、その直後に現れるスレーブ レーザーのパルスの高さ X_s を縦軸にプロットした。光注入がない場合、2台のレーザーは独立にカオス発振をする。2つの時系列のパルス高には相関はなく、データ点はランダムに分布する。ところが、注入光のパワーがある程度大きくなると、スレーブ レーザーのカオス発振がマスター レーザーを全く模倣するようになる。対応するパルス高のプロットが $X_s = X_m$ の直線上に集まっていることから、2台のカオス レーザーが同期していることが伺える。さらに光注入を強くした場合、同期は失われ、スレーブ レーザーはより高次元のカオス発振へ移行することが明らかになった。

2. あらかじめ記録したカオス発振への同期

2台のレーザーを用いた実験では、スレーブ レーザーはマスター レーザーに同期しているが、マスター レーザー自身は自由にカオス発振しており、どのような時系列を繰り出すかは予測不可能である。もしこちら好みの

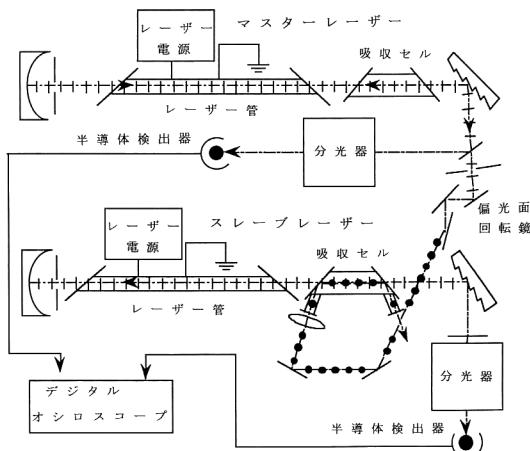


図1 実験装置の概要。

明治大学理工学部物理学科(〒214 川崎市多摩区東三田 1-1-1)

E-mail: tachikaw@isc.meiji.ac.jp

*1 ここでカオスの同期とは、狭義に捉えて、2つのカオス系が同じ時系列を発生している状態と定義することにする。

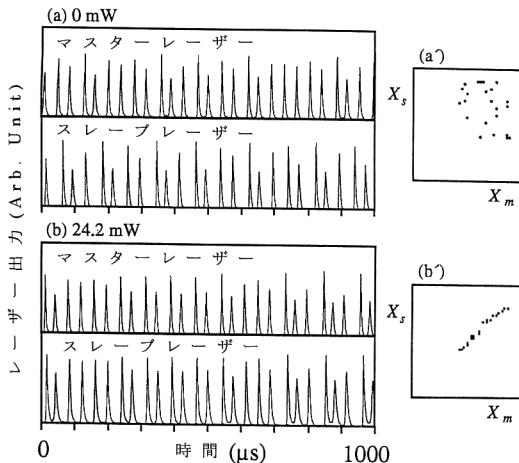
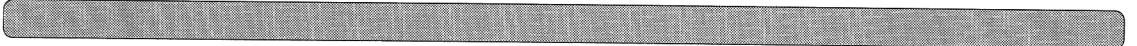


図2 2台のレーザーの出力の時間変化(a), (b)とパルスピークの相関 (a'), (b').

カオスあるいは周期信号にレーザーを安定化できれば、多彩なパルスパターンをもつ光信号発生器を作れないだろうか。

そこで筆者らは、次のような実験を行った。まずカオスレーザーが繰り出す時系列を長時間記録しておく。次にこれを電気信号に変換して、可飽和吸収セル内のシュタルク電極に印加する。吸収ガスの吸収係数はシュタルク電圧に依存して変化する。したがって、カオスレーザーの吸収損失が、過去に自分が発生したカオス信号によって変調されることになる。

実験の結果、変調信号を強くしていくにつれて、レーザーがあらかじめ記録されたカオス発振を再現することが確認された³⁾。さらに、記録された時系列の一部を切り出してそれを繰り返し変調信号として用いると、レーザーはその発振パターンを繰り返し出力することも明らかになった。

一方、同様の原理を用いて、これまで記録されていないカオス時系列を安定に出力させることも可能である⁴⁾。われわれの炭酸ガスレーザーのように比較的低次元のカオス系では、 $n+1$ 番目のパルスの高さを n 番目のパルスの高さの関数としてプロットすると（ローレンツプロット），図3に示したような1次元的な写像関数が浮かび上がる。同様の相関は、パルスの高さとパルス

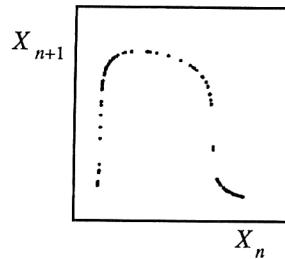


図3 カオス時系列のローレンツプロット。

間隔やパルス幅の間にも現れる。有限個のデータ点からこれらの写像関数を類推すれば、任意の初期条件から始まるパルス列のおよその形を求めることができ、これを変調信号として用いれば、レーザーにそのパルス列を実際に出力させることができる。

このように、カオスの同期現象を利用すると、レーザー系が潜在的に内包するカオスや不安定周期軌道の中から任意の軌道を選び出し、レーザーをそれに安定化させることができるのである。

カオスが同期するメカニズム、また、カオスの同期現象は自然界の他のシステムでも普遍的に起こりうるものなのかななど、まだまだ明らかにされていないことは多い。一方でこの現象は、カオスの特徴である複雑さをうまく制御するためのひとつの鍵になるのではないかと思われる。

文 献

- 1) M. Tachikawa, F.-L. Hong, K. Tanii and T. Shimizu: "Deterministic chaos in passive Q-switching pulsation of a CO_2 laser with saturable absorber," Phys. Rev. Lett., **60** (1988) 2266-2268.
- 2) T. Sugawara, M. Tachikawa, T. Tsukamoto and T. Shimizu: "Observation of synchronization in laser chaos," Phys. Rev. Lett., **72** (1994) 3502-3505.
- 3) T. Tsukamoto, M. Tachikawa, T. Hirano, T. Kuga and T. Shimizu: "Synchronization of a chaotic pulsation with its prerecorded history," Phys. Rev. E, **54** (1996) 4476-4479.
- 4) T. Tsukamoto, M. Tachikawa, T. Tohei, T. Hirano, T. Kuga and T. Shimizu: "Synchronization of a laser system to modulation signal artificially constructed from its strange attractor," Phys. Rev. E, in press.

(1997年6月23日受理)