

可飽和吸収ガスをキャビティ内にもったCO₂レーザーのレーザーカオス

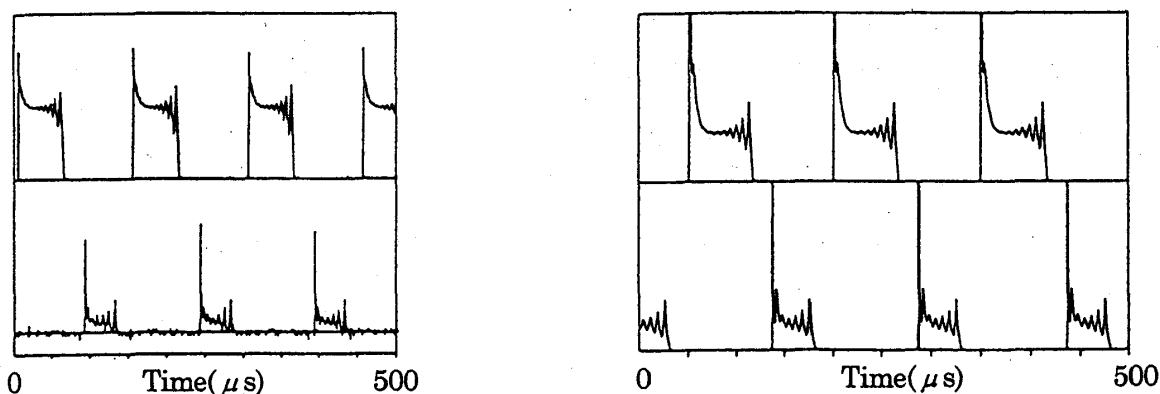
千代田学園工業専門課程 谷井 一者
 東京理科大学理学部 藤平 威尚
 山口東京理科大学基礎工学部 清水 忠雄
 東京大学理学部 立川 真樹

1. はじめに

レーザー系は電場 E 、分極 P 、反転分布 D を変数とした非線形な決定論的方程式で記述される典型的な散逸系である。NH₃レーザーのようなC級レーザー[註]においては、これら3変数は同程度の時定数をもっており、リミット・サイクル、ストレンジ・アトラクタ、カオス[1]などの現象が観測されるが、B級に分類されるCO₂レーザーでは分極 P が他の2変数と比べて速やかに平衡状態に達することから、過渡的な場合を除いて、通常それ自体では安定な定常発振しか得られない。そこで可飽和吸収ガスなどの非線形素子をレーザー・キャビティ内に挿入することで受動的な「不安定」を惹起すると、リミット・サイクルや光双安定性、カオスなどの非線形現象が観測されるようになる[2, 3]。CO₂レーザーの「受動的な不安定性」がそれを表すレート方程式によって計算機上で細密に再現される[2]ようになってから、数値計算の結果を実験によって検証することが行われるようになり、その対象も単純な単一モード発振の非線形ダイナミックスから、より複雑な多モード発振の場合に移行してきた[4]。

2. 定常パルス発振波形のシミュレーション

図1(a)は2モード同期定常発振の実験波形である。可飽和吸収媒質としてSF₆ガスを用いた。この系をモデル化すると、両モードの空間的カップリングを考慮にいたした連立のレート方程式によって表される。変数は、レーザー光子数密度、レーザー上下準位の分子数密度、可飽和吸収を与えるエネルギーレベルの分子数密度差、を各モードについてとったものである。図1(b)の計算機シミュレーション波形は的確に実験波形を再現している。再現の忠実度が高いことが



(a) 実験で得られた波形。上側はTEM₀₀モード、(b) 数値シミュレーションによって得られた波形
 下側はTEM₀₁モード。放電電流は $i = 17.5(\text{mA})$ 。

可飽和吸収媒質としてSF₆ガスを用いた。

図1. CO₂レーザーで観測される2モード同期定常発振の実験波形と、
 数値計算によるシミュレーション波形

ら、計算のパラメータを変えて数値実験を行うことが可能になってくる。

3. 数値計算で現れる双安定パルス発振とカオス

両モードが互いに同等のパラメータ・セットを持つ場合について詳しく調べると、特定のパラメータ領域で興味ある結果が(数値的に)観察される。図2は励起率(Pumping rate)を変化させた場合の一連のパルス波形である。いずれも、励起率を変えた直後の過渡的な数百パルス列は捨て、それ以降の「安定」な波形を採った。また、励起率を変えたときの変数の初期値は励起率を変化させる前の安定したパルス列の瞬時値からとった。

図2(a)は励起率が 30.4 s^{-1} の場合で、両モードは同等の2ピークパルス列を示している。励起率を増加すると(a)→(b)→(d)の変移をする。これらにおいて、パルスの繰り返し周波数は増加するが波形の基本的な形は変化していない。しかし、さらに進むと図(f)のように両モードが3ピークの、しかも互いに異なる波形をもつパルス列に遷移する。即ち、パラメータは同等であるにもかかわらず波形の異なるパルス発振をするに至る。さらに励起率を増加させると、(g)のような両モードパルス波形が再び同等になった3ピーク・パルス列が得られる。

次に、変数の初期値を受け継ぎながら逆に励起率を下げていくと、(g)から(f)へは励起率を上げていく時と同様だが、さらに下げると波形が図(f)と基本的に同等な図(e)の定常パルス列に移行する。このことは、(d)と(e)が「パルス発振の双安定性」にあることを示している。変数の初期値を任意に採ったとき、波形が最終的に(d)になるか、(e)に落ちつくか、は8変数の位相空間において、初期値のセットがどちらの吸引圏に属するかに依存する。(e)からさらに励起率を下げると図

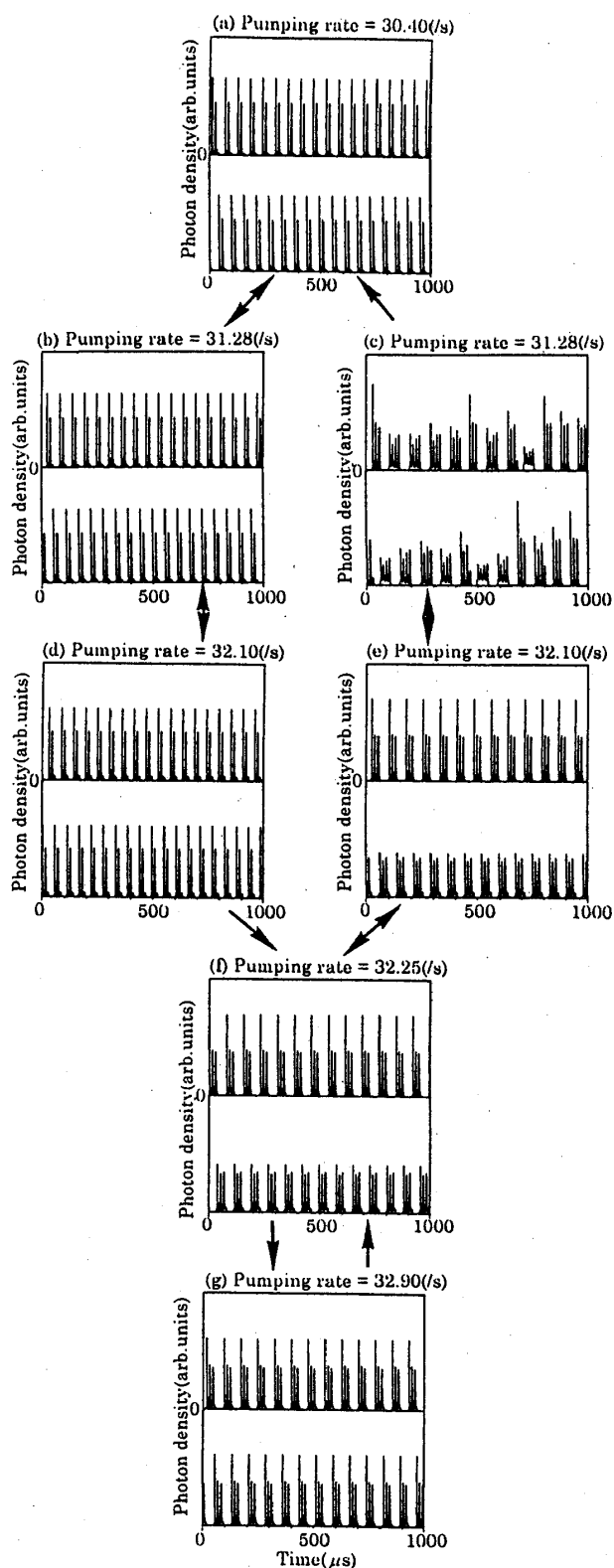


図2. 数値計算によって得られた2モードCO₂レーザーのパルス波形。励起率を変えると「ヒステリシス・ループ」を描く。

(c) のカオスに至る。カオスへの遷移は type-I 間欠性のルートを辿る。上記と同様、変数の初期値を任意に採ったとき、波形が (b) の定常パルス列に落ちつくか、(c) のカオスになるかは、初期値のセットに依存する。「計算を長時間行っても (c) から (b) に移行することはない」と断言はできないが、少なくとも長時間「安定なカオス発振」を続けることは確かである。励起率を下げると最終的に再び (a) の 2 ピークパルス列に回帰する。波形の「履歴」は (a) → (b) → (d) → (f) → (e) → (c) → (a) のサイクルをとったときに現れる。(a), (b), (d) 間、および (f), (c), (e) 間は可逆であり「履歴」は現れない。

4. おわりに

2 つの「単一でカオスを発生しうるレーザー系」が互いにカップリングしたとき、「単一」では現れない「現象」をコンピュータ・シミュレーションによって導出した。我々がこれまで単一モードや 2 モードの実験に用いてきた単純なファブリ・ペロー型共振器では 3 モード程度がカップリングの限界であり、それ以上のカップリングをもつ複雑な系を実現するにはレーザー・アレイのような特別な装置が必要である。しかし、数値計算において任意のモード数のカップリングをシミュレートすることは可能であり、その時、多数の「受動的な不安定(カオス)」系に特有な「秩序」も明らかにすることができると考えられる。

上記において 2 つのモードがカップリングしたときに(数値計算で)現れる「現象」のみを扱ったが、実験および詳しい解析は今後の課題として残されている。実験では CO₂ レーザーの 10 μm P(24), P(26) 発振線、および可飽和吸収媒質として SF₆ の組が有効であろうと考えられる。また、この「現象」は「リミット・サイクル軌道の安定性」を議論することで説明できるものと予想される。CO₂ レーザーの「受動的な不安定性」では、この他に周期倍加ルート・カオスや type-II 間欠性ルート・カオス[4, 5]、カオスの同期現象[6]などが数値的に予測され、実験的にも観測されている。

[註]

レーザーは分極 P の緩和率 γ 、電場 E の減衰率 κ 、反転分布 D の緩和率 τ の大きさの程度によって次の 3 種類に分類される。

- (1) A 級レーザー ($\gamma \simeq \tau \gg \kappa$) : He-Ne レーザー、Ar⁺ レーザー、Kr⁺ レーザーなど。
- (2) B 級レーザー ($\gamma \gg \tau \simeq \kappa$) : ルビーレーザー、Nd レーザー、CO₂ レーザー、半導体レーザーなど。
- (3) C 級レーザー ($\gamma \simeq \tau \simeq \kappa$) : NH₃ レーザー。

参考文献

1. C. O. Weiss, N. B. Abraham, and U. Hubner: Phys. Rev. Lett. 61, 1587 (1988).
2. M. Tachikawa, K. Tanii, and T. Shimizu: J. Opt. Soc. Am. B4, 387 (1987).
3. M. Tachikawa, F. L. Hong, K. Tanii, and T. Shimizu: Phys. Rev. Lett. 60, 2266 (1988).
4. K. Tanii, M. Tachikawa, T. Tohei, F. L. Hong, and T. Shimizu: Phys. Rev. A43, 1498 (1991).
5. K. Tanii, T. Tohei, T. Sugawara, M. Tachikawa, and T. Shimizu: To be published.
6. T. Sugawara, M. Tachikawa, T. Tsukamoto, and T. Shimizu: Phys. Rev. Lett. 72, 3502 (1994).