## 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。NH<sub>3</sub>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CO<sub>2</sub>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]。CO<sub>2</sub>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SF。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れ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か



(a) 実験で得られた波形。上側は TEM<sub>00</sub> 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 TEM<sub>01</sub> モード。放電電流は i = 17.5(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30.4s<sup>-1</sup>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 CO<sub>2</sub> 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 ーモードや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CO<sub>2</sub>レーザーの10µmP(24),P(26)発振線、および可飽和吸収媒質としてSF<sub>6</sub>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。CO<sub>2</sub>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 $\gamma$ 、電場Eの減衰率 $\kappa$ 、反転分布Dの緩和率 $\tau$ 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( $\gamma \simeq \tau$ )  $\kappa$ ): He-Neレーザー、Ar<sup>+</sup>レーザー、Kr<sup>+</sup>レーザーなど.

(2) B級レーザー( $\gamma$ 》  $\tau \simeq \kappa$ ): ルビーレーザー、Ndレーザー、CO<sub>2</sub>レーザー、半導体レー ザーなど.

(3) C級レーザー( $\gamma \simeq \tau \simeq \kappa$ ): NH<sub>3</sub>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).