

単一モード class A レーザーカオス(6328 Å)に対する偏光の影響

桑島 史欣*・宗宮 達也*・佐々木 俊輔*・岩澤 宏**

An effect of polarization on a single mode class A laser (6328 Å) chaos

Fumiyoshi Kuwashima*, Soumiya Tatuya*, Syunsuke Sasaki*
Hiroshi Iwasawa**

An effect of polarization on a chaotic oscillation in a class A laser to investigated. The time series, spectrum, attractor, and lyapunov exponents of linear polarized laser and random polarized laser are compared with each other. The effect of optical delayed feedback in the case of linear polarized laser is stronger than that of random polarized laser.

Keywords: カオス, class A laser, He-Ne(6328 Å)laser

1. Introduction

過去これまでの決定論的なカオスの研究は、物理、化学、生物化学だけでなく幅広い他の学術分野でも広く行われてきた。

Ruelle and Takens[1]によって証明されたように、連続変数の散逸構造系における決定論的なカオス発生のためには3変数系以上が必要になる。1975年 H.Haken[2]によって、単一モード均一拡がりのレーザー方程式と流体系のローレンツモデルとの等価性が証明され、bad cavity conditionのもとでカオス閾値が導出された。以後、T.Yamada, R.Graham[3]及び、そのグループにより内部変調を行った場合のモデルについて研究が行われた。光信号注入をした場合については L.A.Lugiano, L.M.Narducci, et.al[4]によりカオスが発生すること、また、その閾値の低下について理論的考察が行われるなど、多くの理論的研究がなされており、それらは1985年、J.R.Acherhalt, P.W.Milionni, M.L.Shin[5]によって報告されている。

レーザーの基本方程式は、電界、反転分布、誘導分局の3変数系であるが、実際のレーザーはその緩和定数($\kappa, \gamma_{\perp}, \gamma_{\parallel}$)に違いがあり、断熱消去により変数が減少する。Arecchiはこの緩和定数の大小によりレーザーを class A~class C に分類した。[6] ここで、 κ は共振器中の光損失(cavity内に光子の入れる時間の逆数)、 γ_{\perp} は横緩和定数(分極の位相がずれてくる時間の逆数)、 γ_{\parallel} は縦緩和定数(上準位の life time の逆数)である。

最初にレーザーカオス光発生を行なったのは C.O.Weiss[7]らであり、He-Ne レーザー $3.39 \mu\text{m}$ (class C) で periodic doubling route, Intermittency route などによるカオス発生を報告した。その後、主として、He-Ne($3.39 \mu\text{m}$) レーザー[8], CO₂ レーザー[9][10][11], FIR レーザー[12], 半導体レーザー[13], マイクロチップレーザー[14]等で実験が行われている。また、過飽和吸収体を用いて実質的に bad cavity condition にした色素レーザー等でも実験が行われている。[15][16] 更に、カオスを積極的に制御することが行われている。[17]

* 電気電子情報工学科 ** 福井大学名誉教授

その他、多くの実験が class C, class B レーザーにおいて行われている。Class B レーザーカオス発生の方法としては、共振器損失の変調[9]、外部からの光信号注入[18]、工学的な遅延帰還[17]などが報告され、これまでの研究は、大坪[19]によってまとめられている。

光学的遅延帰還系の理論解析は、Lang and Kobayashi [20]によって class B レーザーである半導体レーザーに対して行われている。一般的理論では、遅延帰還(delayed feedback)を加えることで、系が無次元になり、不安定性が増すということが池田不安定性[21]として提唱されている。

一方、今回の研究テーマで使用する good cavity condition の class A He-Ne (6328 Å) レーザーにおけるカオスティック発振に対する研究は非常に少ない。最初に V.I.ChetVerikov[22]により、4 mode レーザーについて研究がなされており、M.V.Danileikov[23]により、ring cavity で実質的に 2 mode で働いているレーザーの研究がなされている。しかし、これらはレーザーそのものが 1 変数系ではない。また、カオスの判定方法は、時系列とスペクトルのみで行っている。

これまでの我々の研究により、単一モード class A レーザー(1 変数系)である He-Ne レーザー (6328 Å)でも戻り光を入れ光学的遅延帰還を加え系を無限次元にすることによりレーザーカオス光が発生することが明らかになった。[24][25][26] また、一連の研究を通じて、カオスの判定方法については、時系列、FFT(スペクトル)、アトラクター、リアプノフ指数を用いて、より正確に行った。

今回の研究では、class A の He-Ne(6328 Å) レーザーに遅延帰還を加えカオスの発生を確認し、直線偏光の場合とランダム偏光の場合でカオス発生の様子を比べ、偏光の違いがどのようにカオスに影響しているか解明することを目的としている。

2. 実験と手法

直線偏光(シグマ光機 05-LHP-211)とランダム偏光(同 05-LHR-211)の単一モード class A He-Ne (6328 Å) レーザーを使用した。共に共振器のミラーの反射率は各々 $R_1=100[\%]$ 、 $R_2=99[\%]$ 、 $R_3=34[\%]$ 、ビーム径は 0.46[mm]、ビーム広がり角は 1.74[mrad]である。そして CW 出力パワーは 0.84[mW]であり、縦モード間隔は 1219[MHz]である。

He-Ne レーザーの出力鏡(M_2)から出た光は、ND(Neutral Density)フィルターを通り減衰された後、光軸に対して垂直に保ったままの外部鏡 R_3 に反射され、再度 ND フィルターにより光量を調整した後、He-Ne レーザーに戻る。このとき光学的遅延帰還がかかる。ここで、外部鏡共振器長 L_2 は内部共振器と等しい長さの 12.3[cm]としている。また、ND フィルターからの反射光はレーザーに戻らないように ND フィルターを傾けて、光軸から逃している。このときの実質的な反射率は $R_{3(\text{eff})}=T^2R_3$ と定義される。ここで、 T は ND フィルターの透過率、 R_3 は外部鏡の反射率である。外部鏡からの出力はフォトダイオードでうけて、オシロスコープを介し、サンプリング周波数 66[kHz]m サンプリング件数 512000 点で AD 変換した後コンピュータに取り込まれ、そのデータより時系列、FFT (スペクトル)、アトラクター、リアプノフ指数を解析し求め、直線偏光とランダム偏光のカオス閾値を比較する。

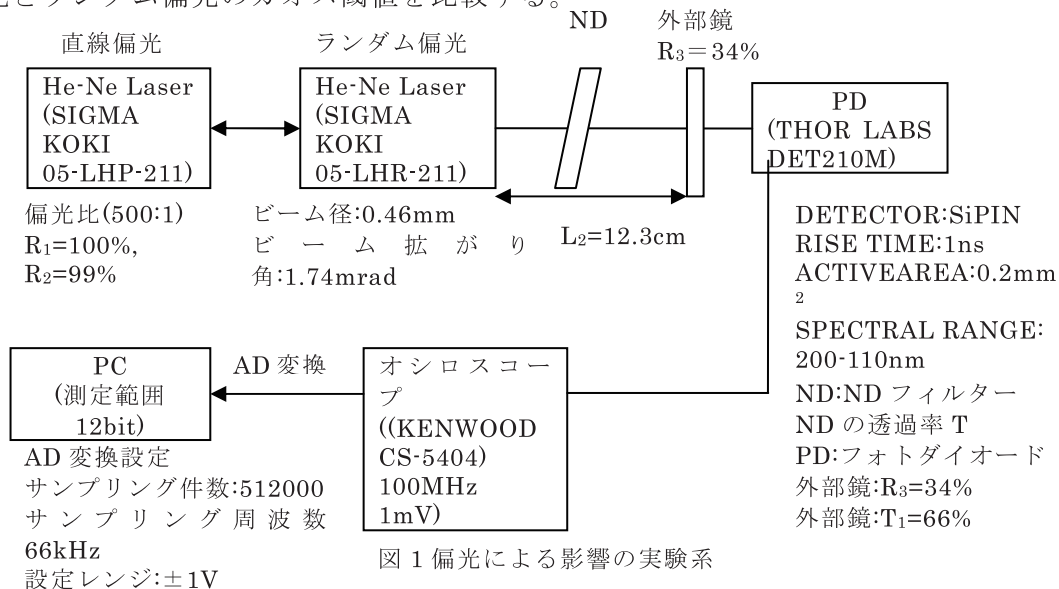


図 1 偏光による影響の実験系

3. 結果 時系列

図2は測定データを、横軸を時間[s], 縦軸を発光強度 I (Intensity) [a. u.] としてグラフに表したものである。また、測定状況は $L_2=12.3$ [cm], $R_3=34$ [%], AD 変換の設定: サンプリグ周波数: 66 [kHz] サンプリグ件数: 512000 点, パイボラ ± 1 V, オシロスコープ: SWEEP TIM/DIV 5 [ms], VOLTS/DIV 1 [mV], にしてある。

測定の結果、直線偏光・ランダム偏光の両方ともに戻り光量が、大きい場合 ($R_{3(\text{eff})}=28\%$)、比較的小さい場合 ($R_{3(\text{eff})}=1.4\%$)、その中間 ($R_{3(\text{eff})}=12.8\%$) の戻り光について、直線偏光とランダム偏光を比較してある。

戻り光量 $R_{3(\text{eff})}=28\%$ まで増加していくと、時系列はマクロな揺らぎが発生している。ランダム偏光に比べ直線偏光の方が同じ戻り光量に対して揺らぎが大きく、戻り光が効果的に働いていることがわかった。戻り光の class A レーザーは電界のみの一変数系であるため、戻り光とレーザー共振器内の電界が同じ方向を向いている直線偏光の方が戻り光の効果が大きく働いているためだと考えられる。

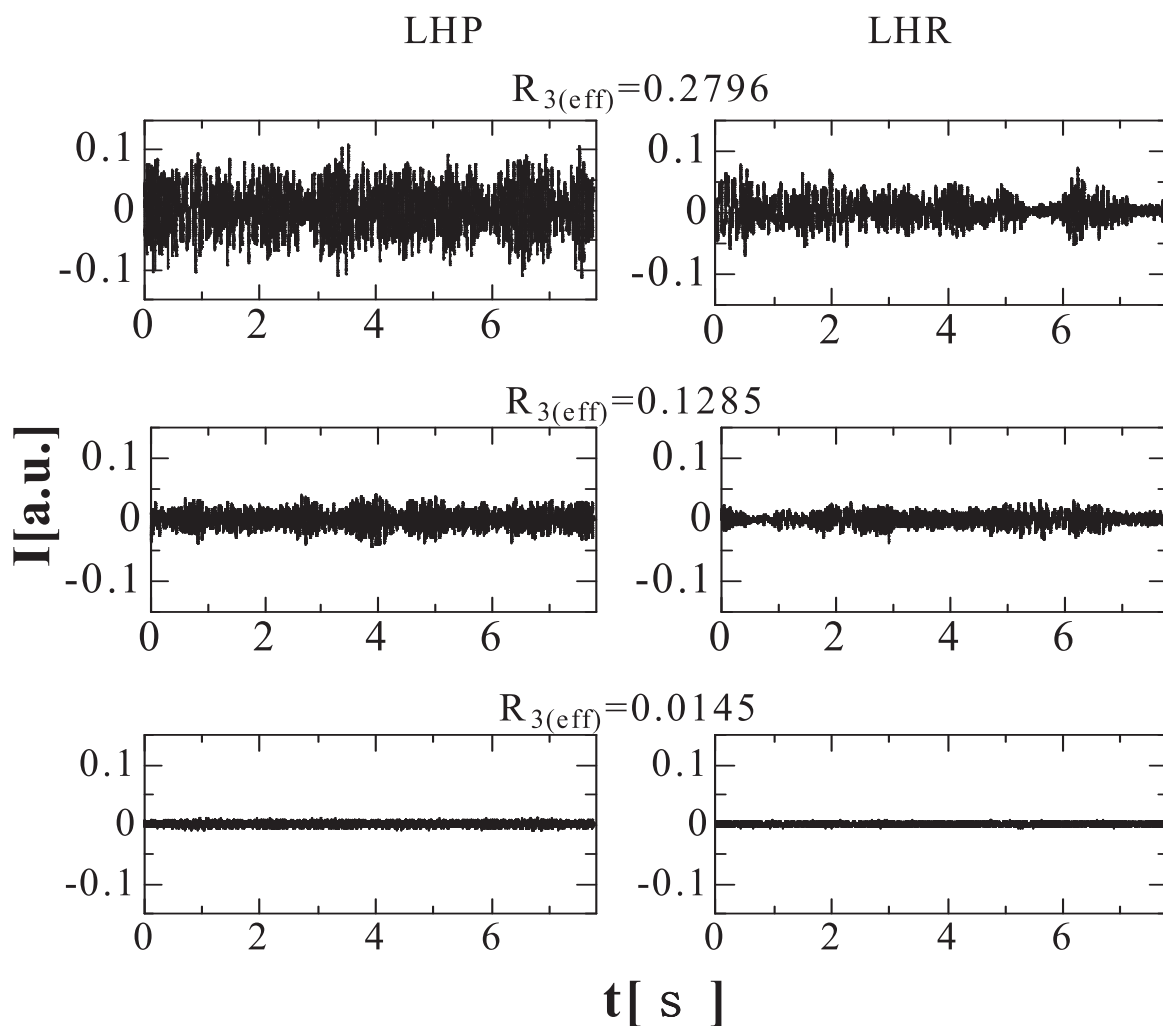


図2:時系列

FFT(スペクトル)

図 3 は測定データにどのような周波数成分が含まれているか、横軸を周波数 $f[\text{Hz}]$ 、縦軸を強度 $\text{Power}[\text{a.u.}]$ として表したものである。直線偏光では $R_{3(\text{eff})}=28\%$ で 25Hz, 57.9Hz, 158Hz、 $R_{3(\text{eff})}=12.8\%$ で 25.2Hz, 80.6Hz, 158.6Hz、 $R_{3(\text{eff})}=1.4\%$ で 25Hz, 60Hz の周波数で成分が強く出ている。ランダム偏光では $R_{3(\text{eff})}=28\%$ で 10Hz, 27.7Hz, 156.1Hz、 $R_{3(\text{eff})}=12.8\%$ で 7.6Hz, 60.4Hz, 153.6Hz、 $R_{3(\text{eff})}=1.4\%$ で 25Hz, 60Hz の周波数で成分が強く出ている。

このうち、25Hz 前後, 60Hz 前後, 160Hz 前後の成分は強く出ている。また、スペクトルの広がりランダム偏光より直線偏光の方が広がり大きいということがわかった。

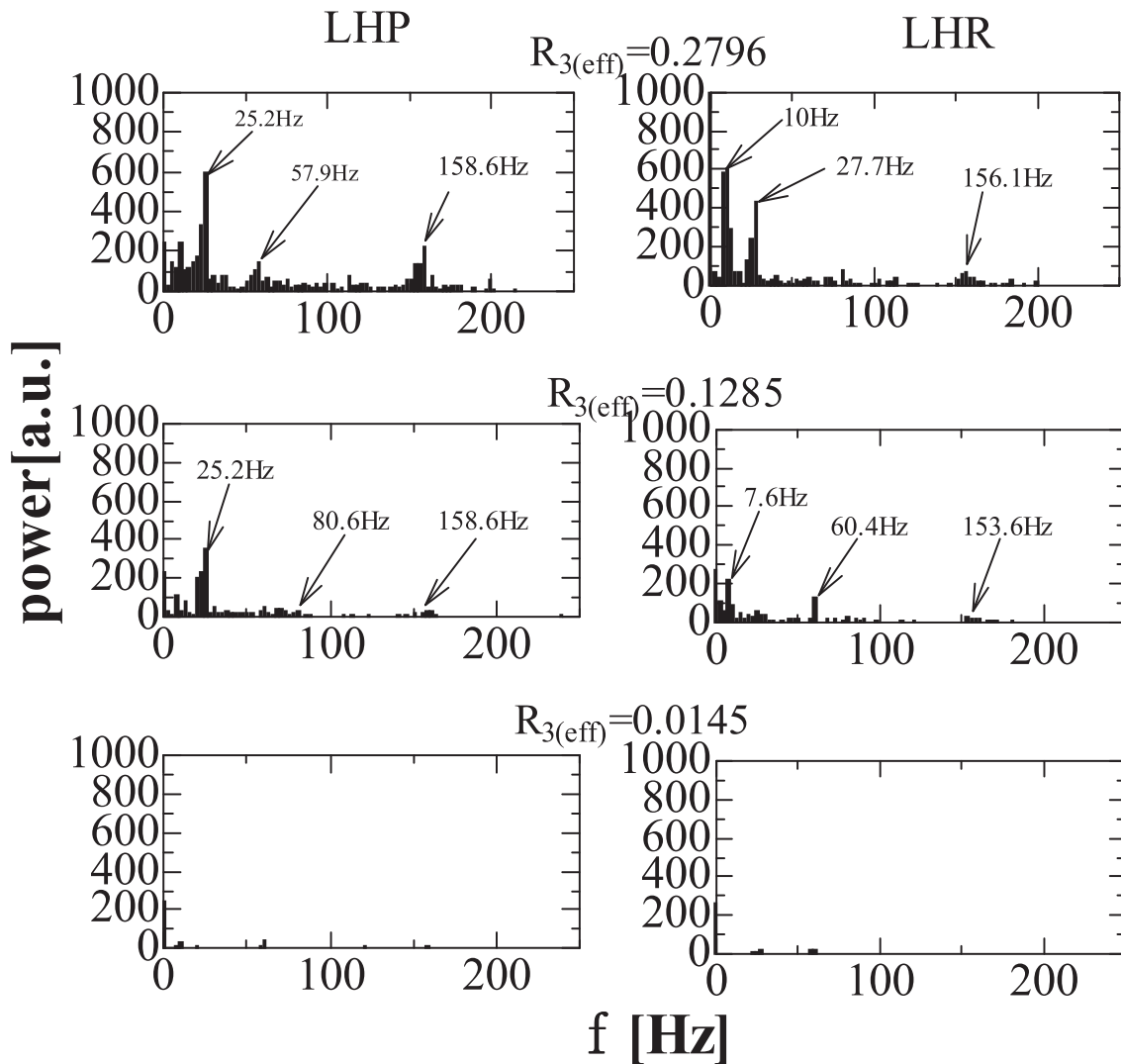


図 3 直線偏光,ランダム偏光のスペクトル(FFT)

アトラクター

図 4 は横軸を発光強度 I [a. u.]、縦軸をその時間微分 dI/dt [a. u.]としたもので、位相空間における解の振る舞いを表しており、面積の大きさがエネルギーの大きさに対応している。振れ幅は戻り光の大きさに対して、戻り光量 $R_{3(\text{eff})}$ が増加するにつれ大きくなっているが、変動の速さ（時系列の傾き）は戻り光が $R_{3(\text{eff})}$ が 28%の時も 1.4%の時もほとんど変化していない。同じ戻り光量の時、直線偏光の方がランダム偏光よりも面積が大きく、揺らぎが大きくなり、戻り光が効果的に働いているのがわかる。

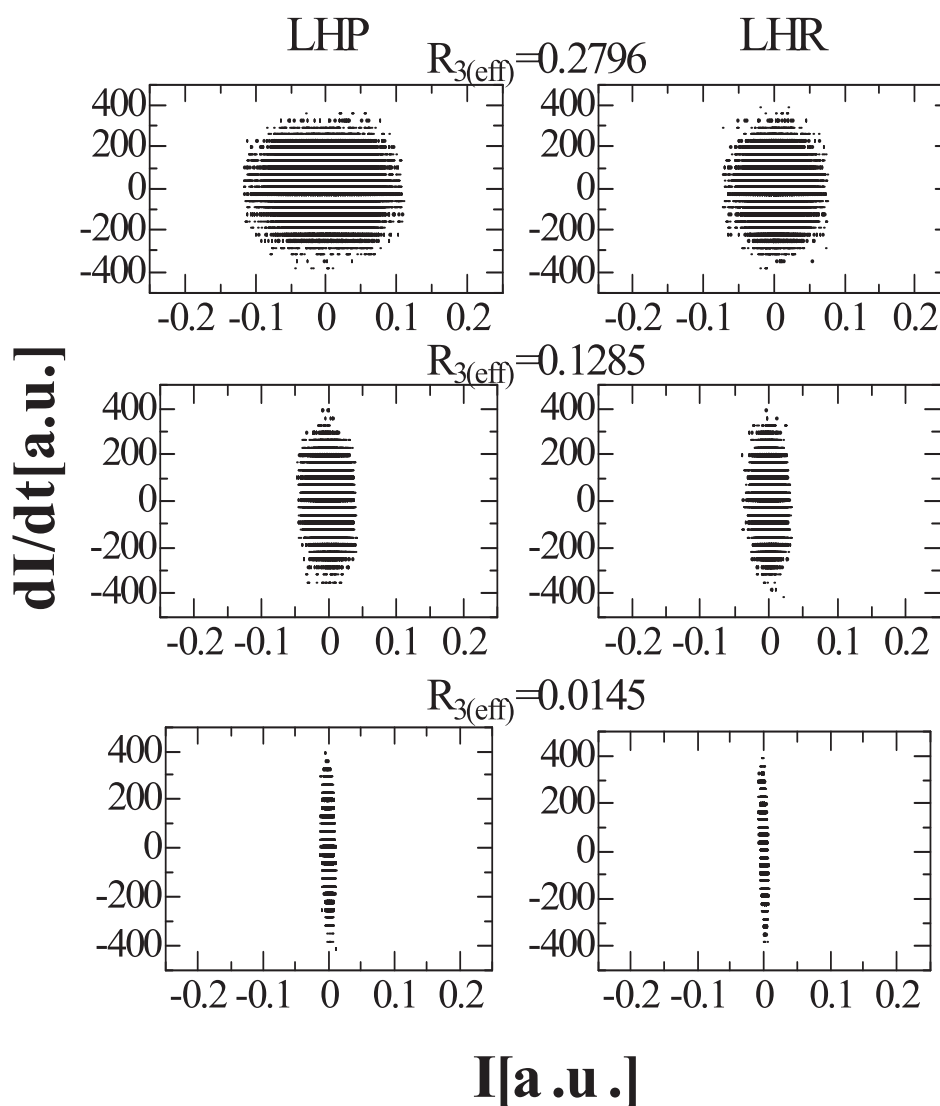


図 4 直線偏光,ランダム偏光のアトラクター

リアプノフ指数

戻り光量 $R_{3(\text{eff})}$ を 1.4% から 28% まで変えたときのリアプノフ指数 λ の変化を、直線偏光、ランダム偏光の場合について図 5、図 6 にそれぞれ示す。EVOLVE は位相空間の軌道を時間発展させる量、DIM は位相空間内の次元、TAU は時系列の点を位相空間に埋め込む時の時間間隔である。

直線偏光では、リアプノフ指数の最大値は $R_{3(\text{eff})}=25\%$ の時 $1.14[\text{s}^{-1}]$ 、最小値は $R_{3(\text{eff})}=1.4\%$ の時 $-3.59[\text{s}^{-1}]$ であった。カオス閾値(リアプノフ指数が負から正に変化した点)は $R_{3(\text{eff})}=10.5\%$ であった。

ランダム偏光では、リアプノフ指数の最大値は $R_{3(\text{eff})}=28\%$ の時 $0.94[\text{s}^{-1}]$ 、最小値は $R_{3(\text{eff})}=1.4\%$ の時 $-1.68[\text{s}^{-1}]$ であった。カオス閾値は $R_{3(\text{eff})}=18.0\%$ となった。

カオス閾値を比較すると、ランダム偏光が少し大きいという結果になった。カオス閾値の倍率は

$$\frac{\text{ランダム偏光の時のカオス閾値}}{\text{直線偏光の時のカオス閾値}} = 1.71$$

になった。

今回の実験では、ランダム偏光の 때가、直線偏光の場合と比較してカオス閾値が高くカオスの発生し難い。Class A レーザーは電界のみの一変数系のレーザーであり、戻り光電界がレーザー管内部の電界と直接カップリングしているため、偏光面の決まっている、直線偏光の方が効果的に戻り光電界がレーザー管内部電界に作用していることが考えられる。

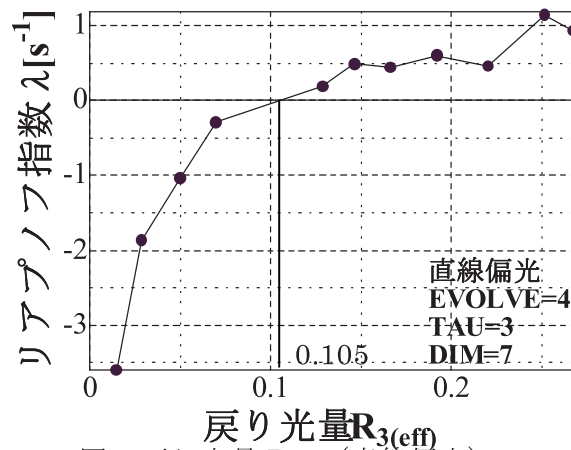


図 5 戻り光量 $R_{3(\text{eff})}$ (直線偏光)

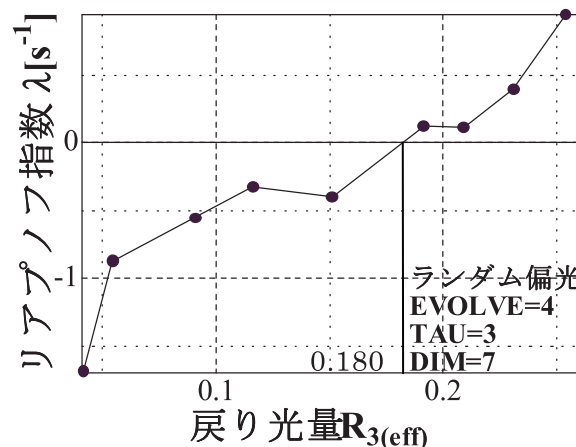


図 6 戻り光量 $R_{3(\text{eff})}$ (ランダム偏光)

4. 結論

時系列を見ると、直線偏光でもランダム偏光でも、戻り光量を大きくするにつれて変動が大きくなっており、戻り光が効果的に働いている。また、同じ戻り光量 $R_{3(\text{eff})}$ においてはランダム偏光に比べ直線偏光の方が強く揺らいでおり、アトラクターを見てもそのことが分かる。

FFT(スペクトル)の広がりも直線偏光の方が広がっており、このうち、25Hz 前後、60Hz 前後、160Hz 前後の成分は強くでている。

リアプノフ指数では、カオス閾値(リアプノフ指数が負から正に変化した点)は直線偏光で $R_{3(\text{eff})} = 10.5\%$ 、ランダム偏光は $R_{3(\text{eff})} = 18.0\%$ であった。カオス閾値を比較すると、ランダム偏光の方がカオス閾値が高くカオスの発生がし難い。カオス閾値の倍率は1.71になった。class A レーザーでは電界のみの一変数系のため戻り光がレーザー管内部の電界と直接カップリングしており、偏光面の決まっている直線偏光の方が効果的に戻り光が作用していることが考えられる。一方、ランダム偏光の場合は、偏光面が決まっていないため、戻り光電界の管内電界方向成分のみが有効に働くため、戻り光の効果が弱くなると考えられる。

5. 今後の課題

今後の課題として、第一にノイズを低減させることが挙げられる。極僅かな音や振動が入っただけでカオスの状態は大きく変化する。レーザー、電源、測定機器以外の電子機器がない静かな場所で、真夜中に実験をし、更に空気で浮かせた除振台を使用するなどの対策を行いノイズを減らすことができるのではないかと考えられる。

参考文献

- [1] D.Ruelle and F.Takens:Commum. Math. Phys.20(1971) 167.
- [2] H.Haken:Phys.Left.53(1975) 77.
- [3] T.Yamada,R.Graham:Phys.Rev.Left.45(1980)1322
- [4] L.A. Lugiano, L.M.Narducci,D.K.Bandy and C.A.Pennise:Opt.Commum.46(1982)64.
- [5] J.R.Acerhalt,P.W.Milonni and M.L.Shih:Phys.Rep128(1985)205.
- [6] F.T. Arecchi, G.L. Lippi, G.P. Puccioni and J.R.Tredicce:Opt.Commum.51(1984)308
- [7] C.O.Weiss, A.Godone and A.Olafsson:Phys.Rev.A23(1983)982
- [8] R.S.Gioggia and N.B.Abraham:Phys.Rev.Lett, 51(1983)650
- [9] F.T.Arecchi,G.P.Puccioni and J.R.Tredicce:Phys.Rev.Lett 49 (1982)1217
- [10] M.Tachikawa,K.Tanii,T.Shimizu:Phys.Rev.Lett. 59(1987)1624
- [11] M.Tachikawa,K.Tanii,T.Shimizu:J.opt.Soc.am 135(1988)1077
- [12] D.J.Biswas, R.G.Harrison, and C.O.Weiss, et al.; Instabilities and Chaos in Quantum Optics. Ed. F.T.Arecchi, (1987) 109, Springer Verlag
- [13] K.A.Shore : Proc. SPIE . 667 (1986) 109.

- [14] A.Uchida,T.Ogawa,M.Shinozuka, and F.Kannari:Phys.Rev.E.62(2000)1960
- [15] H.Almanspacher,H,Scheingraber:Phys.Rev.A34(1986)253
- [16] C.R.Stroud,K.Koch and S.Chakmajion;Cambridge Studies in Modern Optics 4(1986)274 Ed.R.W.Boyd et al.
- [17] Y.Liu, N.Kikuchi and J.Ohtsubo : Phys.Rev.E . 51 (1995) R2697.
- [18] K.Otsuka and H.Kawaguchi:Phys.Rev.A29(1984)1953.
- [19] K.Ohtsubo:Opt,Rev.6(1991)1.
- [20] R.Lang and K,Kobayashi:IEEE J. Quantum Electrom.16(1980)347.
- [21] K.Ikeda and Matsumoto:J,Status:Phys.44(1986)955.
- [22] V.I.Chetverikov:Sov.Tech.Phys.Lett.11(1985)190.
- [23] M.V.Danileiko,A.L.Kravchuk,V.N.Nechiporenko,A.M.Tselinko and L.P.Yatsenko:Sov.J.Qua Electron.16(1986) 1420.
- [24] F.Kuwashima and H.Iwasawa:Rev.Laser.Engineer 24.(1996)1337.
- [25] F.Kuwashima,I.Kitazima and H.Iwasawa:Jpn. J.Phys.37(1998)L325.
- [26] F.Kuwashima,T.Ichikawa I.Kitazima and H.Iwasawa:Jpn.I.Phys.38(1999)6321.

(平成 24 年 3 月 31 日受理)