

ソリトンレーザの過渡動作の解析

金 沢 章 弘*・藤 井 陽 一**

Akihiro KANAZAWA and Yoichi FUJII

1. はじめに

レーザ共振器内に光ファイバを組み込んでモードロックをかけると光ソリトンが発生できる。このようなレーザをソリトンレーザという。

ソリトンレーザの動作解析は、H.A. Haus らによって定常動作における一般的な考察がなされているが、発振の立ち上がりなどの過渡的な動作に対しては、ほとんど研究がなされてこなかった。

ここでは、分散、非線形光学効果、利得の影響を受けながら伝搬する超短パルスの振る舞いを追跡することによって、ソリトンレーザの過渡動作を解析する手法を確立したので報告する。

2. 基本方程式

今回考察の対象とするソリトンレーザの構成は図1に示すものとする。

Erドープファイバの利得は分布定数的になるが、これはよく知られたレート方程式によって求めることができる。

ファイバ中の光パルスの挙動は次の非線形シュレーディンガー方程式 (NLS) で表される。右辺は利得を表している。ここに求めたErドープファイバの分布利得を代入することによって、ファイバループ中でのソリトンパルスの挙動を解析することができる。

$$\text{規格化非線形シュレーディンガー方程式 (NLS) :} \\ i d q / d Z - d^2 q / 2 d T^2 + | q |^2 q = -i \Gamma q / A^2 \quad (1)$$

q : 規格化振幅, Z : 規格化距離, T : 規格化時間, Γ : 規格化利得係数, A : 分散, 非線形係数で規格化している。

*NEC 元東京大学大学院生

**東京大学生産技術研究所 第3部

3. 数値解析の手法

ソリトンの伝搬解析等の非線形方程式の数値解析には、有限要素法やビーム伝搬法などさまざまな手法が用いられているが、ここでは差分法を用いることにする。これは、他の方法よりも計算手順が簡単で、元の方程式との対応がとりやすいために計算の見通しが良いこと、使用するメモリが少なくすみ、膨大な計算時間を要せずに精度が得られることなどのためである。

レート方程式の解析は1次元の中心差分法によって行う。NLSの解析では、伝搬軸方向には中心差分を用い、時間軸方向には周期境界条件を適用した。微分から差分への展開には、通常の差分スキームを用いた。

これによって、利得の項を含んだNLSを差分方程式に書き換え、ファイバ中を伝搬する光パルスの波形の変化を追跡する。そしてループ1周ごとにパワーをモニターして、Erドープファイバの利得分布を再計算する。

数値計算にあたっては、時間軸方向T, 伝搬軸方向Zのメッシュ間隔をそれぞれ、 $dT=0.07$, $dZ=\pi/1000$ とした。

また、ポンプパワーは100mW, ファイバループ長は98mを基本的な値として用い、これらのパラメータの影響を調べる際に必要に応じてその値を変化させた。

4. ソリトンレーザの動作特性

4.1 パルス出力の形成

今までに述べた条件で数値計算を行い、パルスがファイバリングを周回するごとに出力される波形をモニターした。初期値は微弱なCW光 (1pW) とした。これは、Erドープファイバで発生した自然放光を種にして、レーザ発振が立ち上がる状況をモデル化したものである。

パルス幅は約100周ではほぼ定常状態に達している。また、ピークパワーは約40周ではほぼ定常状態に達している。

研究速報

4.2 レーザの諸パラメータの影響

さまざまな条件でのピークパワーの推移を比較すると、数値解析の基本条件において述べた基本的な条件の時にはピークパワーが早く収束するのに対し、ポンプパワーまたはEr濃度が大きい、あるいは分散が小さい場合にはピークパワーの変動が振動的になり、収束に非常に時間がかかることがわかる。

5. ソリトンレーザの安定性

前章では、動作解析の初期条件として微弱CW光を与え、ソリトンパルスへの成長を確認したが、ここでは、違った波形を初期値として、どのようなパルスが成長するかを検討する。

初期値の与え方としては、大きく分けて微弱信号とソリトンに近いパワーレベルの信号とが考えられる。前者はノイズからの発振の立ち上がりを、後者はソリトンレーザ動作中に加わったバースト的外乱の影響をシミュレートすることになる。

まず、微弱信号を与えた場合である。変調周波数と同じ周波数の三角波を与えたときのパルスの成長を図1に示す。また、同様に方形波を与えたとき、ガウシアンパルスを与えたとき、位相のずれた変調波形を与えたときの60周後の出力をそれぞれ図2, 3, 4に示す。

いずれの場合にも、パルスはソリトンに非常に近い形に成長する。

初期波形と変調波形が逆相のときを除いて、出力はソリトンに近づいていく。

しかも30週の段階で、すでに初期波形による差がほとんど消失しており、いずれの場合も60周(約30msec後)で基本ソリトンに近い波形が得られている。

ここに示した結果の全体の傾向として、このソリトンレーザはバースト的な外乱に対しては復元力が十分に働いていると言える。外乱があると、いったんは出力が乱れるが、すぐにソリトンパルスを出力する状態に復帰する。

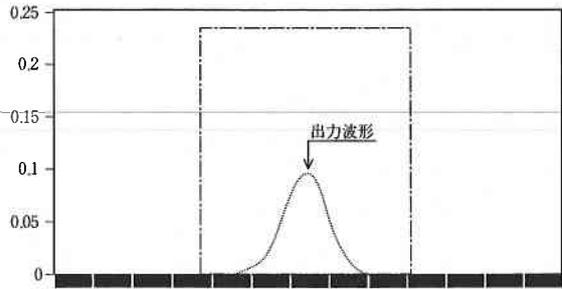


図2 入力が方形波の場合のソリトン出力波形

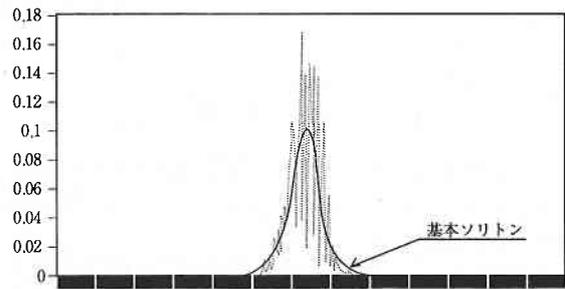


図3 ランダム雑音を入力したときの出力ソリトンレーザ波の成長

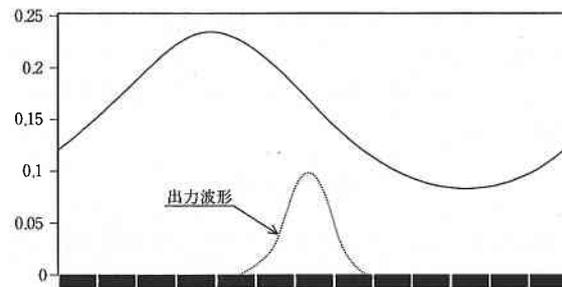


図4 モード同期位相のずれによるソリトンレーザ出力波形

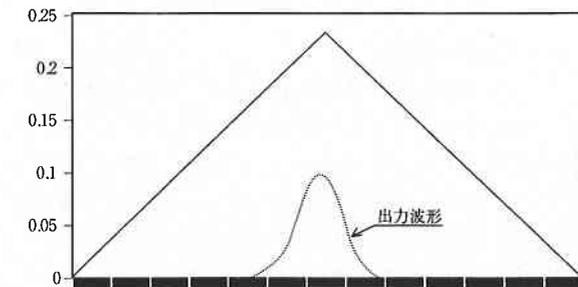


図1 三角波入力ときのソリトンレーザ波形

6. 能動モードロックの離調

次に持続する外乱、特にモードロックのタイミングのずれが生じた場合の影響について調べる。ファイバループ一周当たり170fsのタイミングのずれを与えた場合、出力は図5のようにずれていく。

このずれの大きさは、モードロックがない場合の約1/2であり、しかも常に一定のペースでずれが増大している。このことから考えて、累積するタイミングのずれに対しては、モードロック変調周波数への引き込みは起きないといえる。すなわち、モードロックは離調を起こすということである。

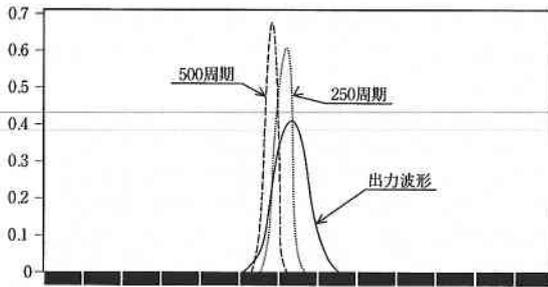


図5 パルス周回に伴うパルス位置のシフト

モードロックのタイミングずれの原因として、ファイバリングの熱伸縮が考えられる。通常のUV素線ファイバの線膨張係数は 5×10^{-7} [1/K]程度なので、約1 [K]の温度変動があると、100mのファイバリングで1周当たりおよそ170fsのタイミングずれを生じる。

したがって、安定にモードロックを実現するには、ファイバリング全体の温度安定化が必要である。この他にも、ファイバに働く応力や変調器の周波数変動など、タイミングずれの原因はいくつか考えられる。こうした諸々の点で安定性を確保することが、このタイプのソリトンレーザ実現への課題となるであろう。

7. Gordon-Haus効果

1986年に、J.P.GordonとH.A.Hausは、光増幅器を用いて光ソリトンを長距離伝送すると、受信端でのソリトンパルスの到着時間にゆらぎ(ジッタ)が生じ、これが光ソリトンの伝送容量を制約することを示した³⁵⁾。これをGordon-Haus効果という。

Gordon-Haus効果によってジッタの生じたパルスの時間偏差を δt とすると、これの二乗平均は次のように与えられる。

$$\langle \delta t^2 \rangle = \Gamma A L^3 / 9 N_0 \quad (2)$$

ここで、 Γ は単位長さあたりのファイバのパワー損失率、 A はソリトンの振幅、 L は伝搬距離、 N_0 はソリトンパルス一個あたりの光子数である。

ソリトンレーザにおいても、ソリトンパルスが増幅を受けながらファイバ中を伝搬するのでGordon-Haus効果が影響してくると考えられる。

光ファイバ通信系では、損失は伝送ファイバの損失であるが、ソリトンレーザの場合はアウトプットカップリングの分配比とモードロックの透過率で決定される。ここでは、今までのシミュレーションと同様、両者を合わせて、100mのファイバリング一周当たり透過率20%とする。ソ

リトンのパルス幅を17psとして、ソリトン条件からピークパワーは3.9mWと求められる。

このとき、 $N_0 = 5.6 \times 10^{15}$ である。これらの値から、100mのファイバリング一周につき生じるジッタは、 $\langle \delta t^2 \rangle = 1.12 \times 10^{-29}$ [sec²]と求められる。つまり、パルスのタイミングずれの標準偏差は33fsである。この値は、タイミングずれがガウシアン分布であると仮定すると、 $1/10^9$ の確率で204fsのずれが発生することを示している。

微小な確率で起きる擾乱はモードロックによって復元力が働くために、後に影響がほとんど残らない。もっとも、ノイズは確率的事象なので、ジッタが同じ方向に累積した場合、十分な引き込みが起きないことは前節で述べたとおりである。

したがって、全くモードロックからはずれてしまうパルスが微小な確率ではあるが存在することになる。

これに対し、受動モードロックの場合には、能動的にタイミングを一定に保つ機構が存在しないので、ジッタがそのまま累積されていく。パルスの時間間隔がモードロックの安定領域から外れると、いったんモードロックは解消してしまう。

このため、ソリトンパルス列の発生が中断しやすくなる。この点で受動モードロックよりも能動モードロックの方が安定性に優れているといえる。

8. 終わりに

以上述べたように、エルビウムドープファイバを増幅要素として用いるループ共振器型ファイバレーザにおいて、その発振パルスの立ち上がりの過渡条件を、数値計算によって求めた。

これから、三角波、方形波、ランダム波形等の初期入力のように、いろいろな立ち上がり条件に対しても、条件のいかんによらず安定的にパルス発振が成長することが確かめられた。

また、ファイバ中を伝搬するソリトン波形のランダムな時間遅れ、すなわち、ゴードン=ハウス限界がファイバレーザに与える影響を考察し、これを定量的に評価した。

これらの結果から、ループ共振器を持つファイバレーザの実用的設計指針が得られた。(1994年5月20日受理)

参考文献

- 1) A.Hasegawa and F.Tappert, Appl.Phys.Lett. 23,142..144 (1973)
- 2) V.E.Zakharov and A.B.Shabat, Soviet Phys.-JETP 34,62..69 (1972)
- 3) L.F.Mollenauer et al., Phys.Rev.Lett. 45,1095..1098 (1980)
- 4) A.Hasegawa, Appl.Opt. 23,3302..3309 (1984)

研 究 速 報

- 5) L.F.Mollenauer and K.Smith, Opt.Lett. 13,675..677 (1988)
- 6) K.Smith and L.F.Mollenauer, Opt.Lett. 14,751..753 (1989)
- 7) L.F.Mollenauer and K.Smith, TuA5-1 ECOC (1989)
- 8) L.F.Mollenauer et al., Electron.Lett. 27,2055..2056 (1991)
- 9) L.F.Mollenauer et al., Electron.Lett. 28,792..794 (1992)
- 10) M.Nakazawa et al., Electron.Lett. 28,1046..1047 (1992)
- 11) L.F.Mollenauer and et al., Opt.Lett. 9,13..15 (1984)
- 12) H.A.Haus and M.N.Islam, IEEE J.of Quantum Electron. 21,1172..1188 (1985)
- 13) V.L.Da Silva et al., Opt.Comm. 66,231..234 (1988)
- 14) K.Suzuki and M.Nakazawa, Opt.Lett. 14,320..322(1989)
- 15) J.D.Kafka and T.Baer, Opt.Lett. 14,1269..1271 (1989)
- 16) K.Smith et al., Electron.Lett. 27,244..246 (1991)
- 17) D.J.Richardson et al., Electron.Lett. 28,778..779 (1992)
- 18) I.N.Duling III, Electron.Lett. 27,544..545 (1991)
- 19) D.J.Richardson et al., Electron.Lett. 27,730,732 (1991)
- 20) J.Satsuma and N.Yajima, Suppl.of the Prog. of Theor-.Phys. 55,284..306 (1974)
- 21) R.I.Laming et al., Opt.Lett. 13,1084..1086 (1988)
- 22) R.J.Mears et al., Electron.Lett. 23,1026..1028
- 23) C.G.Atkins et al., Electron.Lett. 25,910..911 (1989)
- 24) S.B.Poole et al., Electron.Lett. 21,737..738(1985)
- 25) M.Nakazawa et al., IEEE J.Quantum Electron. 26,2103..2108 (1990)
- 26) J.E.Townsend et al., Electron.Lett. 27,1958..1959-(1991)
- 27) E.Desurvire et al., Opt.Lett. 14,1266..1268 (1989)
- 28) K.Inoue et al., Electron.Lett. 25,594..595 (1989)
- 29) R.Olshansky, Electron.Lett. 24,1363..1365 (1988)
- 30) P.R.Morkel and R.I.Laming, Opt.Lett. 14,1062..1064 (1989)
- 31) B.Deutsch and Th.Pfeiffer, Electron.Lett. 28,303..304 (1992)
- 32) 大槻義彦 編, 長谷川晃 著, "物理学最前線20:ファイバ中の光ソリトン", (共立出版)
- 33) 江口真史, 早田和弥, 小柴正則, 信学論文誌C-1, 6,329..337 (1989)
- 34) D.Yevick and B.Hermansson, Opt.Comm. 47,101..106 (1983)
- 35) J.P.Gordon and H.A.Haus, Opt.Lett. 11,665..667 (1986)
- 36) J.Hermann and B.Wilhelmi 著, 小林孝嘉 訳, "超短光パルスレーザー", (共立出版)