レーザー解説

エルビウム光ファイバー増幅器を用いたソリトン通信

鈴木和宣*・久保田寛和*・中沢正隆*

(1992年8月3日 受理)

Optical Soliton Communication Using Erbium-Doped
Optical Fiber Amplifiers

Kazunori SUZUKI*, Hirokazu KUBOTA* and Masataka NAKAZAWA*

(Received August 3, 1992)

Recent progress in optical soliton communication using erbium-doped fiber amplifiers is described. Soliton data signals at 10 Gbit/s have been transmitted without error over 1200 km by using 24 EDFAs. New techniques for soliton control in the time and frequency domains are also described.

Key Words : Optical Soliton, Erbium-doped fiber amplifier, Data transmission experiment.

1. はじめに

分散と非線形性とは釣り合うことにより生ずる安定なパルス光を光ファイバー中で作り出す方法が1973年にベル研究所のHasegawaとTappertによって提案された¹⁾。この安定なパルスは光ソリトンと呼ばれ、光ファイバー中で群速度分散(GVD)と自己位相変調効果と呼ばれる三次の非線形光学効果とが釣り合うことにより発生する。光ソリトンは光パルスの包絡線ソリトンであり、そのポテンシャルが波動関数の絶対値の二乗で与えられる非線形 Schrödinger 方程式 (Nonlinear Schrödinger Equation ; NLS) によって記述される。自己位相変調効果のもととなる非線形屈折率 n_2 は 3.2×10^{-16} cm/W程度であるが、このような小さな値で群速度分散を補償できるのは、光ファイバー中でのパワー密度が比較的高いためである。さらに、シリカ系ガラ

スの光ファイバーの損失は0.2 dB/km程度と大変小さいため、相互作用長が長くともソリトンを実現しやすい。

光ソリトンを用いると、幅の狭いパルスを超高速でかつ長距離に亘って波形を変えずに伝搬することができるため、将来の高度化した超高速長距離光通信の一手段として、大いに期待されている。また、シリカ系ファイバーの損失が最小となる波長1.55 μ m帯において光ソリトンを発生できること、分散に制限されない伝送システムが可能になることも光ソリトンの重要な特徴である。また、光ソリトンにより高速の光スイッチングや超短パルスの発生が可能である。

光ソリトン伝送と従来のIM/DD (Intensity Modulation/Direct Detection) 方式とを比べると、伝送容量が10 Gbit/s程度以下の場合には、低分散ファイバーを用いることにより従来の方

*NTTフィールドシステム研究開発センタ (〒319-11 茨城県那珂郡東海村白方白根162)

*NTT Telecommunication Field Systems R&D Center (Tokai, Ibaraki-ken, 319-11)

法が簡単でかつ一万km以上の伝送が可能である。しかし、伝送容量が数十 Gbit/sで、1000 km以上の伝送を実現するためにはソリトン伝送方式の方が優れている。ソリトン伝送の限界を決めるひとつの要因は、光増幅器の雑音のうちコヒーレントな成分によってソリトンパルスにジッターが発生する現象であり、これによる限界はGordon-Haus Limit²⁾と呼ばれている。

光ソリトンは、理想的な無損失伝送路では波形歪みがなくどこまでも伝搬するが、実際の光ファイバーには損失があるため、非線形パルスとしての光ソリトンの性質を維持するために光増幅により損失を補償する必要がある。従来は、誘導ラマン散乱³⁾という三次の非線形光学効果によって得られる光増幅作用により損失を補償していたが、誘導ラマン散乱の利得効率が低いため利得を得るためにはWオーダーの大きな励起光パワーが必要となり、励起光源に半導体レーザーを用いた実用的な光ソリトン通信システムを実現することが困難であるという問題があった。しかし、最近我々は、集中定数型の光増幅器を用いる新しいソリトン伝送方法を提案し^{4~7)}、それによりソリトン通信の実用化に当たっての諸問題は、殆ど解決するにいたった。その際重要な役割を果たしているのがエルビウム光ファイバー増幅器(Erbium-Doped Fiber Amplifier; EDFA)である^{8~10)}。このソリトン伝送方法はダイナミックソリトン通信と名付けられ⁸⁾、今日の光ソリトン通信の研究の中心になっている。

本論文では、まず光ソリトンの基本的な性質を述べ、光ソリトン通信における光増幅の重要性を説明する。次いで、最近目覚ましく発展しているエルビウム光増幅器を用いた光ソリトン通信について報告する。

2. 光ファイバー中での光ソリトンの伝搬

光ファイバー中の非線形光学効果の一つである自己位相変調効果(Self Phase Modulation; 以下SPMと略す)は、光カー効果に起因しており、高強度の短パルス光で光カー効果が短時間

に生ずると、屈折率の変化を通じて電場の位相 ϕ が変化する。これがSPMであり、角周波数の変化 $\Delta\omega(t)$ は

$$\begin{aligned}\Delta\omega(t) &= -\frac{\partial}{\partial t} \Delta\phi(t) \\ &= -\frac{2\pi n_2 l}{\lambda} \frac{\partial}{\partial t} |E(t)|^2\end{aligned}\quad (1)$$

で表される。ここで $E(t)$ は電場の大きさ、 n_2 は非線形屈折率、 l はファイバー長、 λ は波長である¹¹⁾。したがって、高強度の超短光パルスをファイバーに入射すると、短時間に急激な位相変化が生じ、式(1)に示すような周波数の時間変化(チャープING)がパルス内に発生する。即ち、パルスの立ち上がり部分の周波数はキャリア周波数よりも低く、立ち下がり部分では周波数が高くなる。

単一モードファイバーでは、材料分散と構造分散が釣り合う零分散波長が存在し、それより短波長側ではGVDは正、長波長側では負(異常分散)となる¹²⁾。異常分散領域を伝搬するチャープパルスは、パルスの立ち上がり部分ではパルスの中心部に比べて遅くなり、立ち下がり部分では速くなる。従って、光パルスは圧縮され、最終的にはGVDによる拡がりとSPMによる圧縮の効果が釣り合った安定なパルスとなる。これが光ソリトンの原理である^{1,11,13)}。

光ソリトンの伝搬を記述する方程式は非線形シュレディンガー方程式(NLS)と呼ばれ、次のように与えられる¹¹⁾。

$$(-i) \frac{\partial u}{\partial q} = \frac{1}{2} \frac{\partial^2 u}{\partial s^2} + |u|^2 u \quad (2)$$

ここで u は、規格化した電場の振幅、 q は規格化座標、 s は規格化時間である。式(2)の右辺第一項および第二項がそれぞれGVDと光カー効果を表している。この最低次の解(規格化した $N=1$ ソリトン)はsech型のパルスとなる。 $N=1$ の基本ソリトンに対して τ_{FWHM} のパルス幅を持つソリトンのピークパワー $P_{N=1}$ は、

$$P_{N=1} = 0.776 \frac{\lambda^3}{\pi^2 c n_2} \frac{|D|}{\tau_{FWHM}^2} A_{eff} \quad (3)$$

与えられる¹¹⁾。ここで c は真空中の光速、 D はGVD、 A_{eff} は光ファイバー中を伝播する光の有効断面積を表す。

$N=1$ ソリトンの波形は、伝搬方向に変化しないが、振幅の大きな $N=2$ 以上の高次ソリトンの場合には、 z_{sp} を周期とする波形変化を行なう。 z_{sp} を光ソリトンの周期と定義すると

$$z_{sp} = 0.322 \left(\frac{\pi^2 c}{\lambda^2} \right) \frac{\tau_{FWHM}^2}{|D|} \quad (4)$$

となる¹¹⁾。高次ソリトンを励振した場合、ある距離でパルスの急峻化が生じるためこれを用いたパルス圧縮が行なわれている。

光ソリトン通信を実現するためにはソリトンパルスのパワーとしてどのくらいが必要なのか知っておくことが重要である。まず $N=1$ ソリトンを形成するのに必要なパワー $P_{N=1}$ を波長 $1.55 \mu\text{m}$ のカラーセンターレーザパルスを $1.3 \mu\text{m}$ 帯零分散ファイバーに伝搬した場合について見積ってみる。 $\tau_{FWHM}=7 \text{ ps}$ 、 $|D|=16 \text{ ps/km/nm}$ 、 $\lambda=1.55 \mu\text{m}$ 、 $A_{eff}=1 \times 10^{-6} \text{ cm}^2$ とすると $P_{N=1}$ は、式(3)より、約 1 W となる。しかし、光ソリトン用のファイバーとして、 $1.5 \mu\text{m}$ 帯へ零分散波長がシフトした分散シフトファイバーを用い、さらにモードフィールド径の細径化を図ると $|D|=2 \text{ ps/km/nm}$ 、 $A_{eff}=2 \times 10^{-7} \text{ cm}^2$ 程度に設定できるので $P_{N=1}$ は 25 mW 程度まで小さくなる。数 10 mW から 1 W 程度のピークパワーは今日の半導体レーザと光増幅器を用いることにより発生できるため、光ソリトン通信が実現できたのである。

3. 光ソリトンの中継増幅

光ソリトンは、理想的な無損失伝送路では波形歪みがなくどこまでも伝搬するが、光損失(エネルギーの損失)があると非線形性が弱められ、最終的にはソリトンではなくなってしまう。今日のシリカ系光ファイバーの損失は 0.2 dB/

km 程度と低いが、光ソリトンを 100 km 近くにわたって伝搬させる場合、約 20 dB の光損失を伴うため、 $N=1$ のソリトンパワーを維持できない。そこで、光ソリトンの性質を失う前に、一度光増幅を行ない、弱くなった非線形性を回復させる必要がある。これを光ソリトンの中継増幅と言う。

今まで提案されたきた光ソリトンの増幅方法には2つの方法がある。1つ目は分布定数的な光増幅法であり、光損失を利得で補償し等価的に無損失の伝送路を構成する方法である。これには、誘導ラマン散乱を用いたもの^{14~16)}、分布定数的なエルビウムドープ光ファイバーを用いたもの^{17, 18)}がある。従来はラマン法が用いられていたが利得を得るために高い励起入力が必要なことから、実用性が不足していた。2つ目は、集中定数型の増幅器を用いる方法であり、従来この方法ではソリトン伝送はできないと言われてきたが、ここ数年ほどでこの方法は大きな進展があった^{4~7)}。この方法が後に詳しく述べるダイナミックソリトン通信法である。

EDFAは、長距離超高速光通信、コヒーレント通信および光CATV等に新しい領域を開く可能性を秘めているため各国で盛んに研究されており、最近のその進歩は著しい。この増幅器は石英系光ファイバーの損失が最低となる $1.5 \mu\text{m}$ 帯で動作し、その特徴としては 30 dB 以上の高利得、低雑音、広い利得帯域、無偏波依存性、飽和出力が高いこと、などが揚げられる。

EDFAはFig. 1に示すように、励起光と信号光を重ね合わせるWDM (Wavelength Division Multiplexing; 波長多重)ファイバーカップラー、偏波無依存形のアイソレーター、エルビウム添加光ファイバー、狭帯域光フィルターからなる。励起光源は波長 0.82 、 0.98 、もしくは $1.48 \mu\text{m}$ 帯の半導体レーザ(Laser Diode; LD)である。用いられるエルビウムファイバーは、エルビウムの添加濃度 $100 \sim 2000 \text{ ppm}$ 、長さ $10 \sim 200 \text{ m}$ である。ASE (Amplified Spontaneous Emission) を除去するために、帯域幅 $1 \sim 3 \text{ nm}$ の狭帯域フィルターを用いることで高いSN比が得られる。

Fig. 1 Configuration of erbium-doped fiber amplifier.

現在、利得係数5～10 dB/mW、飽和出力+10 dBm以上、変換効率70%以上のEDFAが容易に実現出来ている¹⁹⁾。この高出力特性は、EDFAがパワーアンプとして利用できることを意味している。我々はこの飽和出力が高いことを利用して、EDFAによって光ソリトンが増幅できることを世界で初めて示した²⁰⁾。EDFAは、ラマン増幅に比べて低い励起入力で数十Wのピークパワーをもつパルス信号光を増幅できるため、ソリトン通信システムに用いた場合、誘導ラマン散乱による増幅よりも優れているといえる。また、帯域幅が $1.53\ \mu\text{m} \sim 1.56\ \mu\text{m}$ と約30 nmあるため、ピコ～フェムト秒パルスを増幅することが出来ることも超高速ソリトン通信の実現のために重要である。

4. ダイナミックソリトン通信

4.1 ダイナミックソリトン通信法の原理⁴⁻⁷⁾

この方法の特徴は、入力ソリトンパルスとして $N=1.0$ の基本ソリトンに代えて少し振幅の大きいソリトンを用いることである。ソリトンパルスのピークパワーは、規格化振幅 N のソリトンに対して $N^2 P_{N=1}$ で与えられる。Fig. 2に $N=1.4$ の入力に対して入力で規格化したパルス幅および光強度が伝搬と共にそれぞれどのように変化していくかを示す。最初は分散に比べ非線形性が強いためにパルス幅が狭くなるが、伝搬するにしたがってファイバーの損失によりソリトンパルスの強度が低下し非線形効果が弱くなる。このため群速度分散が支配的となりあ

Fig. 2 Changes in normalized pulse width and amplitude vs. transmission distance.

る距離からはパルス幅が広がり始め、約33 kmでパルス幅が入力と等しくなる。従って、ここに集中定数的増幅器を設置することによりファイバーの出力端におけるソリトン振幅の低下を完全に補償することが出来る。この際注意したいのは、光強度は光ファイバーの損失により急激に変化している点である。この意味でソリトンのダイナミックレンジを使っており、ダイナミックソリトン通信法と名付けている⁷⁾。Fig. 3はこの方法で多段中継した場合の波形のパルス幅変化と規格化振幅の変化およびソリトンに発生するチャープを示したものである。 $N=1.0$ の場合、光損失による非線形効果の低下のためパルス幅が徐々に広がる。しかし、 $N=1.4$ の場合、ソリトンのパルス幅は保存されていることがわかる。通常の理想的なソリトンと異なって振幅の変化およびチャープが存在するが、情

Fig. 3 Principle of dynamic soliton communication. (a) Normalized pulse width vs. transmission distance; (b) Normalized intensity vs. transmission distance.

報を送るためのパルス幅の変化は出力端においては無い。また、全体に亘ってもパルス幅の変化は10%以下と小さい。

分布定数的なソリトン増幅の場合、もしくは中継間隔がソリトン周期に比べてかなり小さく、小さい摂動が加わる領域では $N=1$ ソリトンが完全に保存される。即ち、伝搬によるソリトンの振幅変化はない。一方、ダイナミックソリトン領域では、パルス幅は変化しないものの振幅はファイバーの損失により周期的に変化するため通常の摂動論では解析できない。HasegawaとKodamaはこのソリトンの解析を行ない、guiding center solitonもしくはsuper solitonと呼んでいる²¹⁾。光ソリトン通信の実用化の観点からは、光増幅器の数を減らすためにできるだけ中継距離を拡大することが重要である。

4.2 ダイナミックソリトン通信の実験

この方法を用いて構成したソリトン伝送の実験系をFig. 4に示す^{4,22)}。ソリトン光源は、利得スイッチした波長 $1.552\ \mu\text{m}$ のMQW DFB LDであり、このLD出力にスペクトルフィルタリング法を用いることによりTransform-limitなパルスを作り出している^{23,24)}。スペクトルフィルタリング用狭帯域フィルターとしてはファブリ・ペロー共振器(FPR)を用いており、FPRか

Fig. 4 Experimental setup for 10 Gbit/s soliton data transmission over 1200 km using EDFAs.

らパルス幅30psのパルスが得られる。このパルス列をLiNbO₃マッハツェンダー型光強度変調器により符号化する。符号化はマーク率1/2の疑似ランダムパターンもしくは固定パターンで行なった。変調器からの出力はEDFA1によりソリトンのパワー領域まで増幅される。ソリトン伝送用ファイバー(STF)は各々50 kmの分散シフトファイバーで、分散は信号光波長において平均-0.5 ps/km/nmであり、(3),(4)式より $N=1$ ソリトンパワーは0.85 mW, ソリトン周期は711 kmと計算される。24本のSTFで1200 kmの伝送路を構成し、各ファイバーに-2~-3 dBmの平均パワーで光ソリトンを入射した。この値は50 km伝送前後のパルス幅が変化しないという条件から求めたものである。伝送後の信号はエルビウム光増幅器で増幅した後、ストリークカメラで観測すると同時にInGaAs PIN PDを用いて検出した。光信号から抽出したクロックにより誤り率検出器を動作させ、符号誤り率(BER)を測定した。

Fig. 5に、ストリークカメラで観測した1200 km伝送後のソリトンの波形を示す。1200 km伝送後でもパルス幅は送り出しと変化しておらず、エルビウム増幅器のASE雑音も認められない。また、伝送後のソリトンのスペクトル幅に広がりはなく理想的なソリトン伝送が実現できている。更に、伝送後のスペクトルにおいてソリトン信号成分とASE成分の比は20 dB以上あり、十分なS/Nが得られていることがわかる。

Fig. 5 Fixed data pattern at 10 Gbit/s transmitted through 1200 km dispersion-shifted fiber.

Fig. 6に0 kmおよび1200 km伝送後のアイパターン(疑似ランダム信号で変調した際の受光パルス波形を時間的に重ね合わせた波形)を示す。伝送後の光ソリトン信号のS/N劣化、波形広がり、およびジッターの発生などに起因するアイパターンの劣化は見られていない。²²⁰⁻¹の疑似ランダム信号において符号誤り率の測定を行なったところ、30分以上にわたりエラーは発生しなかった。このことはBERが 10^{-13} 以下であることを示し、優れた伝送特性であることを示している。Fig. 7に光検出器の直前に置かれた光プリアンプへ入射するパワー(受光パワー)とBERの関係を示す。0 kmを●で、1200 km伝送後を○で示すが、両者の間にほとんど差がない。BER= 1×10^{-9} におけるパワーペナルティは0.2 dBであり、ほぼペナルティフリーな長距離伝送が実現できていることを示している。

Fig. 6 Eye diagrams of input soliton and transmitted soliton signals.
(a) Input soliton (back-to-back) ; (b) transmitted soliton.

Fig. 7 Bit error rate at 10 Gbit/s against received optical power.

次に、伝送速度の向上を狙って行なった 20 Gbit/s・1020 km ソリトン伝送実験について説明する。Fig. 8 に実験の構成を示す²⁵⁾。ソリトンのパルス幅は、パルス間の相互作用を抑制するため 12 ps に設定した。20 Gbit/s のパルスは、変調した 10 Gbit/s のパルスを 2 つの 3 dB 光カップラを用いて重ねあわせることによ

り得た。中継間隔約 50 km で 1020 km の伝送を行なった後、LiNbO₃ 変調器を用いた DEMUX (Demultiplexer; 多重分離回路) で 10 Gbit/s の信号を再生する。この DEMUX は、出力された 10 Gbit/s の信号の一部から 10 GHz のクロック (正弦波) を再生し、多重化した一方の信号列と位相を合わせて変調器を動作させることにより 100 ps 間隔で信号を取り出すという原理で動作する^{26,27)}。DEMUX の出力は受光感度を改善するためエルビウム増幅器で増幅した後 InGaAs PIN 検出器で検出した。

Fig. 9 にストリークカメラで観測した伝送前後のパルス波形を示す。1020 km の伝送前後でのパルス幅の変化は見られずエルビウム増幅器の ASE 雑音も認められていない。1020 km 伝送後のアイパターンを Fig. 10 に示す。Fig. 10 (a) は 20 Gbit/s の信号、Fig. 10 (b), (c) は 10 Gbit/s に分離した後の信号を波形観測用の広帯域受光器および誤り率測定用の受光器で観測した結果であり、1020 km 伝送後でも十分な S/N とアイ開口を持っていることがわかる。Fig. 11 は伝送前後の符号誤り率特性を示す。この図からパワーペナルティを生じておらず、エラーフロアもない良好な特性であることがわかる。符号誤り率 10^{-9} での受光感度は -30.0 dBm であった。

Fig. 8 Experimental setup for 20 Gbit/s soliton data transmission over 1020 km using EDFAs.

Fig. 9 Fixed soliton data patterns at 20 Gbit/s transmitted over 1020 km. (a) 0 km; (b) data transmitted over 1020 km coded as <1111000011>; (c) data transmitted over 1020 km coded as <1101000111>.

Fig. 11 Bit error rate of 10 Gbit/s signal demultiplexed from 20 Gbit/s signal against received optical power.

5. 光ソリトンの制御

光ソリトンは、光ファイバーの分散と非線形光学効果との釣り合いにより波形劣化無しに安定に伝搬する超短パルスであり、分散制限を越えた大容量通信を実現できるという特徴がある。しかし、10 Gbit/s以上の信号を1万km以上伝送させる場合には、ソリトンと光増幅器の雑音

Fig. 10 Eye-diagrams of transmitted soliton signals.

(a) Transmitted 20 Gbit/s signal; (b) signal demultiplexed down to 10 Gbit/s (wideband receiver); (c) signal demultiplexed down to 10 Gbit/s (narrowband receiver).

との相互作用によるジッターが蓄積され、伝送容量の拡大が難しくなる現象があった²⁾。時間領域および周波数領域においてソリトンを制御することにより伝送距離を飛躍的に延ばすことが可能となった。

光領域においてリタイミングとフィルタリングを行なうことにより、ソリトンを光制御し、ソリトンを超長距離伝搬させる実験系をFig. 12に示す²⁸⁾。11個のエルビウム光増幅器(EDFA)を用いた全長520 kmのソリトン伝送ループを構成し、その中を10 Gbit/sのソリトンのデータ信号を周回させ等価的に100万km伝送後の波形変化を測定する。その際、ループの中にLiNbO₃の光変調器を挿入し、伝送するソリトンデータパルスに対してリタイミングと雑音除去を520 km毎に行なう。リタイミングはループ内を伝搬するソリトン信号に同期して10 GHzのクロック信号で変調することにより行なう。ジッターによりパルス位置がわずかにずれた場合、変調器の透過率が最大となる位置へ向けて変調器を通ったパルスが引き戻される。これに

より、ソリトン通信において今まで不可避であったジッターを減少させ、かつソリトン間の相互作用を強制的に抑制することが出来る。また、光のバンドパスフィルターを520 km毎に挿入することにより、その帯域内にソリトンをトラップし周波数領域においてもソリトンの安定化を図る^{29~31)}。

Fig. 13に100万km伝送後のソリトン波形を示す。伝送した符号はソリトン間の相互作用が一番強く現われる10 Gbit/sの<110011>を用いた。ループ内を伝搬するソリトンのパルス幅は約40 psであり、ピークパワーは1.2 mW程度である。Fig. 13(a)はループを一周後の波形である。ループを閉じ、40万kmと100万km伝搬後のソリトン波形をFig. 13(b)および(c)に示す。これらの結果から、パルスの拡がりは発生せず、安定なソリトン伝送が実現できていることがわかる。また、符号“0”におけるASE雑音の蓄積は非常に少ないことがわかる。Fig. 14に7.2 Gbit/s-100万kmおよび10 Gbit/s-40万kmの固定パターンのソリトン伝送の結果を示

Fig. 12 Experimental setup for circulating coded soliton train in 520 km loop. LiNbO₃ modulator and optical delay are used for soliton reshaping and retiming.

Fig. 13 10 Gbit/s soliton data transmission over one million kilometers.

- (a) soliton waveforms at 500 km with reshaping;
 (b) soliton waveforms over 400 thousand kilometers;
 (c) soliton waveforms over one million kilometers.

す。Fig. 14 (a)と(b)は、7.2 Gbit/sでの $\langle 100101011001 \rangle$ および $\langle 001110100011 \rangle$ の符号化したソリトン列の伝送結果を示しており、Fig. 14 (c)は10 Gbit/sでの $\langle 00101110011 \rangle$ のソリトン伝送を示す。いずれの場合にもソリトンパルスの拡がりおよびパルス間の引込などは観測されておらず、安定な伝送が可能であることを示している。また、ソリトンの平均パワーは $-1 \sim -2$ dBmであるので、EDFAはその利得が飽和している状態で動作する。このため光領域でAGCがかり、ソリトンの幅と振幅が自動的に安定化される特徴もある³²⁾。

Fig. 14 Data patterns transmitted over one million kilometers.

- (a) 7.2 Gbit/s data coded as $\langle 100101011001 \rangle$;
 (b) 7.2 Gbit/s data coded as $\langle 001110100011 \rangle$;
 (c) 10 Gbit/s data coded as $\langle 00101110011 \rangle$.

6. おわりに

光ソリトンの基本的な伝搬特性について説明し、エルビウムファイバー増幅器を用いた光ソリトン通信法についてまとめた。エルビウム増幅器は通常のIM/DDもしくはコヒーレント通信ばかりでなく、比較的高出力なパルスを必要とするソリトンの発生と中継伝送にも最適であることがわかる。近い将来、EDFAを用いて数十Gbit/sの伝送速度で1000 km以上にわたってソリトン伝送することも可能であり、「ダイナミックソリトン通信」と名付けられた本方法は今後更に発展していくものと思われる。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、日頃ご指導を頂く
NTTフィールドシステム研究開発センター涌井
裕所長、ならびに同所光通信線路研究部川瀬正
明部長に厚く御礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) A. Hasegawa and F. Tappert : Appl. Phys. Lett. **23** (1973) 142.
- 2) J. P. Gordon and H. A. Haus : Opt. Lett. **11** (1986) 665.
- 3) R. H. Stolen and E. P. Ippen : Appl. Phys. Lett. **22** (1973) 276.
- 4) M. Nakazawa, K. Suzuki and Y. Kimura : IEEE Photonics Technol. Lett. **2** (1990) 216.
- 5) H. Kubota and M. Nakazawa : IEEE J. Quantum Electron. **QE-26** (1990) 692.
- 6) K. Suzuki, M. Nakazawa, E. Yamada and Y. Kimura : Electron. Lett. **26** (1990) 552.
- 7) M. Nakazawa, K. Suzuki, H. Kubota, E. Yamada, and Y. Kimura : IEEE J. Quantum Electron. **QE-26** (1990) 2095.
- 8) 島田禎吾 : O Pluse E, **No. 113** (1989) 75.
- 9) M. Nakazawa, Y. Kimura, and K. Suzuki : Appl. Phys. Lett. **54** (1989) 295.
- 10) 中沢正隆 : 応用物理 **59** (1990) 1175.
- 11) 中沢正隆 : 応用物理 **56** (1987) 1265.
- 12) 大越孝敬、岡本勝就、保立和夫「光ファイバーの基礎」オーム社, **75** (1977) および川上彰二郎「光導波路」朝倉書店, **66** (1980).
- 13) 長谷川晃「物理学最前線」大槻義彦編、共立出版, **69** (1986)
- 14) L. F. Mollenauer, R. H. Stolen, J. P. Gordon, and W. J. Tomlinson : Opt. Lett. **8** (1983) 289.
- 15) A. Hasegawa : Appl. Opt. **23** (1984) 3302.
- 16) K. Suzuki, Y. Kimura, and M. Nakazawa, IOOC'89, Kobe, Japan, 21C4-4 (1989).
- 17) M. Nakazawa, Y. Kimura and K. Suzuki : IEEE, J. Quantum Electron. **QE-26** (1990) 2103.
- 18) M. Nakazawa, Y. Kimura, and K. Suzuki : Opt. Lett. **15** (1990) 1200.
- 19) Y. Kimura, M. Nakazawa, and K. Suzuki : Appl. Phys. Lett. **57** (1990) 2635.
- 20) M. Nakazawa, Y. Kimura and K. Suzuki : Electron. Lett. **25** (1989) 199.
- 21) A. Hasegawa and Y. Kodama : Opt. Lett. **15** (1990) 1443.
- 22) M. Nakazawa, K. Suzuki, E. Ymada, H. Kubota, Y. Kimura : Electron. Lett. **28** (1992) 817.
- 23) M. Nakazawa, K. Suzuki and Y. Kimura : Opt. Lett. **15** (1990) 588.
- 24) M. Nakazawa, K. Suzuki and Y. Kimura : Opt. Lett. **15** (1990) 715.
- 25) M. Nakazawa, K. Suzuki, and E. Yamada : Electron. Lett. **28** (1992) 1046.
- 26) R. S. Tucker, S. K. Korotky, G. Eisenstein, L. L. Buhl, J. J. Veselka, G. Raybon, B. L. Kasper, A. H. Gnauk and R. C. Alfarness : OFC'88, Washington, U. S. A. ThB2.
- 27) L. C. Blank : Electron. Lett. **24** (1988) 1543.
- 28) M. Nakazawa, E. Yamada, H. Kubota and K. Suzuki : Electron. Lett. **27** (1991) 1270.
- 29) H. A. Haus and M. Nakazawa : J. Opt. Soc. Am. **B4** (1987) 652.
- 30) K. J. Blow, N. J. Doran and D. Wood : J. Opt. Soc. Am. **B5** (1988) 381.
- 31) M. Nakazawa, H. Kubota, K. Kurokawa and E. Yamada : J. Opt. Soc. Am. **B8** (1991) 1811.
- 32) K. Suzuki and M. Nakazawa : Electron. Lett. **26** (1990) 1032.