

# 光通信のための白色光源

スーパーコンティニウム光発生のおしくみ

スーパーコンティニウム (supercontinuum; SC) とは、高出力のパルス光が透明な光媒質を通過したときに起こる光スペクトルの超広帯域化現象を総称します。1970年に Alfano と Shapiro がガラス中において超広帯域光の発生を観測して以来、サファイア、光ファイバー、半導体材料、水、希ガスなどの多種多様な物質中での観測が報告されています。高パワーのレーザーパルスを入射した光ファイバーに通過させる実験中に偶然観測した方もあるかと思いますが、白色光を発生する現象にはハロゲンランプ等の熱光源あるいは光増幅器から発生される自然放出光がありますが、「うまく」設計された SC 光はこれらランダムな白色光とは異なり、スペクトル全域にわたって各波長成分の位相関係が連続的に保持されているという特徴があります。つまり、適当な光の位相補償を行ってやれば「光のデルタ関数」になりうる特異な白色光です。特に単一モード光ファイバー中で発生する SC 光は、高密度波長多重通信の光源として近年盛んに研究が進められています。

どんな光ファイバーでも、十分にピークパワーの高いパルス光を入射すれば超広帯域のスペクトルが発生します。しかし、波長多重通信光源となると話は別で、伝送用ファイバーとは根本的に異なる設計の単一モード光ファイバーを用います。いくつかの設計・製造法が提案されていますが、本稿では最も初期から通信光源を目指して NTT で開発されてきた SC 光発生技術の、特に現象面に絞ってご説明しましょう。

図 1 は、1994 年に盛岡らによって報告された SC 光のスペクトルです<sup>1)</sup>。ファイバー出力では約 200 nm の波長範囲にわたってほぼ平坦なスペクトルが

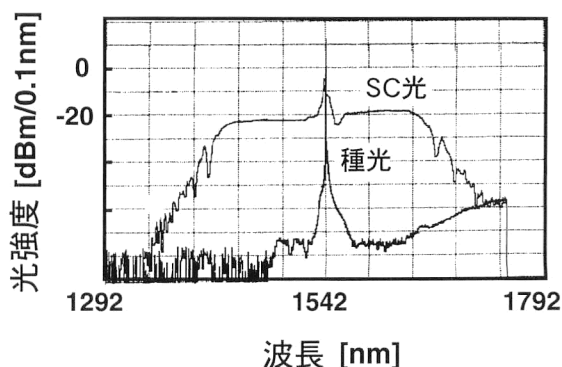


図 1 SC 光スペクトル<sup>1)</sup>。

発生されています。ファイバーに入射される種光のスペクトルと比較すると、その広がり具合がわかるでしょう。この超広帯域光を楕形の透過特性をもつ光フィルターに通すと、波長の異なる種光のコピーが金太郎飴のように作り出されます。しかもその一波一波が波長多重通信に使える品質です。光信号のスペクトルが広がる要因には三次の非線形性 ( $\chi^{(3)}$ : 自己位相変調, 四光波混合など) あるいは誘導ラマン散乱が知られていますが、標記のスペクトル形状はこれらの効果からは単純には説明が付きません。コアに特殊なドーパントを添加したわけでもありません。それでは、このスペクトルはどのようにして発生されたのでしょうか。

1997 年に森らは、ファイバーの分散値 (単位 ps/nm/km) が入射端から出射端にかけて正から負に減少し、かつ波長-分散値特性が上に凸となる設計による単一モード光ファイバーが上述のスペクトルを発生することを明らかにしました<sup>2)</sup>。これは 2 つのゼロ分散波長をもつ特殊なファイバーです。SC 光発生は古典的なビーム伝搬方程式を解くことによって定量的に説明し、設計することができます<sup>3)</sup>。

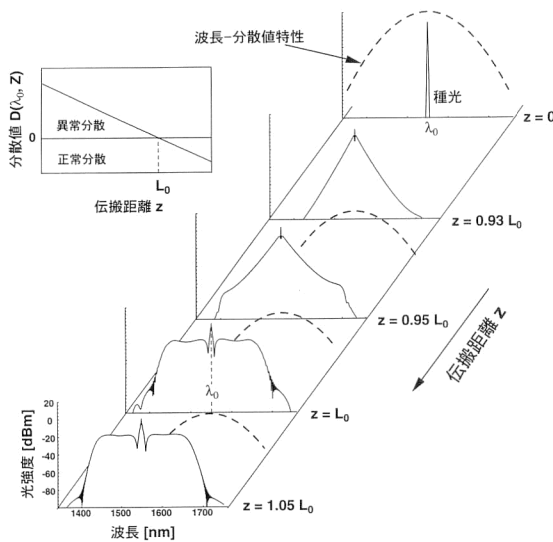


図2 分散減少/凸型分散ファイバーによるSC光の発生過程 (シミュレーション)<sup>3)</sup>.

図2は、数値シミュレーションにより明らかにされたSC光の発生・成長の過程です。スペクトル幅の狭い種光が図1に記載した矩形のスペクトルに変容する過程が再現されています。図中の放物線状の破

線はSC発生用ファイバーの波長-分散値特性を表します。 $L_0$ は実効ファイバー長とよばれる設計上重要なパラメーターで、種パルス波長において分散値がゼロとなる入射端からの距離です。伝搬距離 $0 \sim 0.95 L_0$ まではスペクトルがほぼ相似的に拡大していきませんが、伝搬距離 $0.95 \sim 1.05 L_0$ にかけて急激にスペクトルの矩形化が起こっていることがわかります。凸型の波長-分散値特性は、例えばW型の断面屈折率分布をもつ単一モードファイバーで実現されます。減少する分散値はファイバーのコア径をテーパー状に変化させることで実現されます。

SC光に特徴的な矩形のスペクトルが形成される過程をもう少し詳しくご説明しましょう。図3は時間分解スペクトルとよばれる等高線像で、横軸が波長、縦軸が時間を表します。図中で破線はゼロ分散波長を表し、灰色の領域は異常分散領域(分散値が正の領域)を表します。スペクトルの変化を光のエネルギーの流れとしてみると、非線形効果によるスペクトル拡大は波長軸方向へのエネルギーの流れ、分散の効果による波形の変化は時間軸方向へのエネ

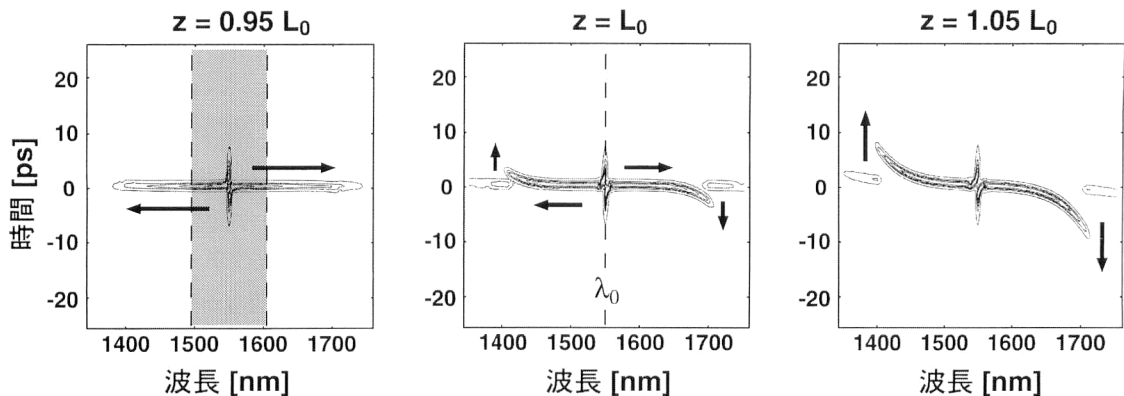


図3 伝搬距離  $L_0$  近傍におけるSC光の時間分解スペクトル<sup>3)</sup>. 矢印は光のエネルギーの流れを表す。

ルギーの流れとして解釈できます。伝搬距離  $0 \sim 0.95 L_0$  にかけて像は波長軸に沿って延びていき、時間軸方向への変移はほとんどみられません。これは分散減少ファイバーによる断熱的ソリトン圧縮（と類似の現象）が起き、時間波形の先鋭化が起きていることを示しています。ソリトン効果は異常分散領域で観測される効果ですが、不思議なことに、像の端部が正常分散領域に  $100 \text{ nm}$  近く侵入してもほとんど分散の効果（時間軸方向へのエネルギーの流れ）はみられません。伝搬距離  $0.95 L_0$  を過ぎると、像の端部は分散の影響を受けはじめて屈曲し、エネルギーは波長軸方向への変移をやめ、端部から時間軸方向に流れていきます。ところが像の中心部に注目すると、時間軸上でエネルギーが集中していて非線形性がまだ強いため、エネルギーをスペクトルの端に向かって押し広げようとします。その結果、像の端部ではエネルギーが蓄積し、スペクトルは矩形化しはじめます。SC 光の伝搬につれて、2 つのゼロ分散波長は種光波長  $\lambda_0$  に接近するため、エネルギーが蓄積するポイント（波長）も  $\lambda_0$  に近付き、スペクトルは平坦化します。伝搬距離  $L_0$  では異常分散領域は消失し全域が正常分散領域（分散値が負）となりますが、非線形性が十分弱まる伝搬距離  $1.05 L_0$  まではスペクトルは変化し続けます。時間分解スペクトルでみることによって、SC スペクトルの中心にあるピークは SC 光になりそこなった種パルス光の裾の部分だということがわかります。ここまでの説明には誘導ラマン散乱の寄与は全く登場しません。誘導ラマン散乱は SC 光発生に必要な光パワーの下限あるいは実効ファイバー長  $L_0$  の下限を低減化させる効果がありますが、SC 的な矩形スペクトルの形成に本質的な役割を果たすのは

$\chi^{(3)}$  非線形と波長-分散値特性です。入射端におけるソリトン次数の多寡は SC 光発生条件とは無関係で、実効ファイバー長  $L_0$  が十分大きければ矩形のスペクトルが発生します。

上述の分散減少/凸型分散ファイバー以外で通信用品質の SC 光を発生するファイバーとしては、1997 年に東大の多久島と菊池らによって提案された一定分散/正常分散ファイバーがあります<sup>4)</sup>。この方法は、一昔前にファイバー・回折格子対を用いたパルス圧縮法において、出力パルスの裾部分を低減化するために用いられた正常分散中の自己位相変調におけるスペクトル（と波形）の矩形化現象を効果的に利用しています。最近では、上述の SC 発生用ファイバーと比較して 1 桁以上高い非線形効果が期待される微細構造ファイバー（通称フォトニック結晶ファイバー）を利用した SC 光発生の研究が盛んです。まだ上述の NTT や東大の方式と同程度の品質の SC 光発生には成功していませんが、製造技術の進歩により将来 SC 光発生ファイバーの主流となっていく可能性が高いでしょう。

この記事に関するお問い合わせは [kato@optsun.riken.go.jp](mailto:kato@optsun.riken.go.jp), [mori.kunihiko@lab.ntt.co.jp](mailto:mori.kunihiko@lab.ntt.co.jp) もしくは [ura@dj.kit.ac.jp](mailto:ura@dj.kit.ac.jp) までお寄せください。

(NTT 未来ねっと研究所 森 邦彦)

## 文 献

- 1) T. Morioka, *et al.*: Electron. Lett., **30** (1994) 790-791.
- 2) K. Mori, *et al.*: Electron. Lett., **33** (1997) 1806-1808.
- 3) K. Mori, *et al.*: J. Opt. Soc. Am. B, **18** (2001) 1780-1792.
- 4) 多久島裕一, 菊池和朗: 電子情報通信学会ソサイエティ大会 (エレクトロニクス) C-4-4 (1997) 250.