

空間ソリトン光は、再構成可能な光導波路や超高速光スイッチなどの応用を期待されているにもかかわらず、その研究は欧米中心であり、日本では少ない。空間ソリトンの研究に携わる一人として、日本における研究がさらに活発となることを望み、本稿では空間ソリトン光の概要について述べる^{1,2)}。

光の本質的な性質として、光は回折によって広がる。特に、光を波長程度の局所領域に閉じ込めるとその回折現象は顕著に現れる。光ファイバーや光導波路では、この回折による広がりを強制的に抑えるために、媒質内部に高屈折率領域を形成して光を閉じ込めた状態で伝搬させる。空間ソリトン光は、このような外部からの強制的な作用ではなく、光自身の作用で空間的に閉じ込めた状態で伝搬する光である。すなわち、空間ソリトン光は、自身の回折作用を自身で打ち消しながら、均衡状態を保って伝搬する。

空間ソリトン光における光による光の閉じ込め作用は自己収束効果と呼ばれ、材料の非線形性に強く関わっている。ここでは、三次の非線形効果に基づく材料内部の局所的な屈折率変化によるカー(Kerr)ソリトンと、二次の非線形効果に基づく高調波とのエネルギー交換によるクアドラティック(quadratic)ソリトンについて述べる。

歴史的に最も古くから取り扱われてきた空間ソリトン光は、三次の非線形感受率 $\chi^{(3)}$ を介したカーソリトンである。 $\chi^{(3)}$ を介した非線形現象には第三高調波発生や二光子吸収過程があるが、カーソリトンではカー材料の特徴である光照射による屈折率変化が関わる。カー材料は、照射する光強度 I に対して屈折率変化 n_2I を有する。ここで、 n_2 は非線形屈折率と呼ばれ、 $\chi^{(3)}$ に比例している。 $n_2 > 0$ の場合、屈折率変化は正に作用するので、光強度が高い領域では屈折率が高くなる。中心部分に高い光強度を有するビームでは中心部分の屈折率が高くなり、ビームに対して凸レンズとして作用する。この

レンズ効果によって、光が、光自身の閉じ込め作用を実現する(図1)。このカーソリトンの形成は三次の非線形効果を導入した非線形シュレーディンガー方程式を用いて理論的にも説明されている。伝搬方向に垂直な光強度分布のうち、空間的に一次元方向のみに閉じ込められたカーソリトンは、外部からの小さな摂動を受けても安定な空間ソリトン光を保持できる。それに対して、空間的に二次元方向に閉じ込められた二次元カーソリトンでは、ある1つの光強度のビームに対してのみ安定である。そのため、光は散乱や吸収を受けながら物質内部を伝搬するので、安定な二次元カーソリトンとして存在できない。不安定状態になったカーソリトンは、多くの線条(フィラメント)に分裂して最終的に破局的な自己収束を起こす。

一方、二次の非線形感受率 $\chi^{(2)}$ を利用したクアドラティックソリトンは、カーソリトンでは形成不可能な二次元の空間ソリトン光を形成できる。非中心対称の材料に存在する $\chi^{(2)}$ は材料の屈折率変化を誘起することではなく、第二高調波発生やパラメトリック発振に寄与する。そのため、クアドラティックソリトンではカーソリトンのように材料の屈折率を変化させるのではなく、高次の高調波とのエネルギー交換を介して光の閉じ込めを実現する。一般的には、角振動数 $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ の光に対して $\omega_1 + \omega_2 =$

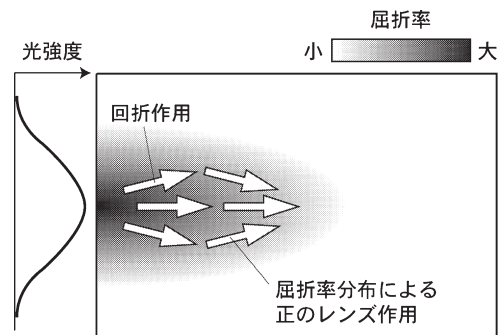


図1 自己屈折率変化による光の閉じ込め作用。

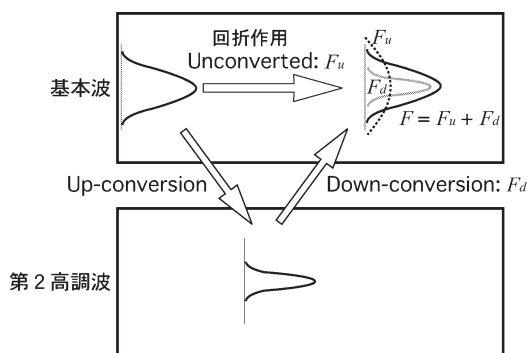


図2 クアドラティックソリトンの形成原理.

ω_3 が成立する場合を考慮する必要があるが、ここでは $\omega_1 = \omega_2 = \omega$, $\omega_3 = 2\omega$ とした第二高調波について取り扱う。図2は入射波とその第二高調波がエネルギー交換することで自己収束効果を実現している様子を示している。位相整合条件を満たした材料に光を照射すると、その基本波の一部分は第二高調波に変換される (up-conversion)。基本波のビーム径に比べて細く形成された第二高調波は、位相整合により再び基本波へ変換される (down-conversion)。第二高調波へエネルギー変換されなかった基本波 F_u (unconverted) は伝搬中に回折作用を受けて空間的に広がるが、エネルギー変換を経由してきた基本波 F_d のビーム径は元の基本波より細くなっているので、その合成波 F を元の基本波と同じ光強度分布とする条件が存在する。その結果、高調波とのエネルギー変換を介して光の閉じ込め作用を実現できる。この原理を利用したクアドラティックソリトンは、一次元および二次元それぞれにおいて安定な光の閉じ込めを実現できる。また、非等方媒質による位相整合では基本波と第二高調波のエネルギーの伝搬方向が異なるためにビームの分離 (walk-off) が発生するが、クアドラティックソリトンではこのビームの分離が抑制される特徴をもつ。

ここでは、二次および三次の非線形性が関わる場

表1 各種空間ソリトン光とその形成原理.

空間ソリトン光	ソリトンの形成メカニズム
カーソリトン	$\chi^{(3)}$ による屈折率変化
クアドラティックソリトン	$\chi^{(2)}$ によるエネルギー交換
フォトリフラクティブソリトン	フォトリフラクティブ効果による屈折率変化
インコヒーレントソリトン	時間平均されたインコヒーレント光強度の包絡線に応答する屈折率変化

合の空間ソリトン光を紹介した。誌面の関係でここでは取り上げなかったが、フォトリフラクティブ材料やインコヒーレント光源などを用いた多くの空間ソリトン光に関わる研究が報告されている。表1に、代表的な空間ソリトン光とその形成メカニズムの概要をまとめた。これらの空間ソリトンでは名称に由来しているように、粒子的な振る舞い、例えば、空間ソリトン同士の弾性衝突やエネルギー保存が確認されている。また、空間ソリトン光の相互作用による空間ソリトン光の生成や消滅、螺旋運動など特異な現象も観察されている。1960年以降に急速に発展した空間ソリトン光の研究では、さまざまな非線形現象が予言・観察され、物理的にも工学的にも大きな貢献をしてきた。これまで基礎研究を中心になされてきた空間ソリトン光の研究では、これらを積極的に用いた応用例はほとんどない状況である。現在、空間ソリトン光形成の基礎技術が確立されつつあり、今後、空間ソリトン光を応用した光計測・光制御などの研究が期待される。

(大阪電気通信大学 日坂真樹)

文 献

- 1) M. Segev and G. I. Stegeman: "Self-trapping of optical beams: Spatial solitons," *Phys. Today*, **51** (1998) 42-48.
- 2) S. Trillo and W. Torruellas (Eds.): *Spatial Solitons* (Springer, 2001).