

解説

位相共役波の発生と応用

佐藤 拓 宋

東京工業大学大学院総合理工学研究科 〒227 横浜市緑区長津田町 4259

(1988年10月25日受理)

Generation and Application of Phase Conjugate Waves

Takuso SATO

The Graduate School at Nagatsuta, Tokyo Institute of Technology,
4259, Nagatsuta, Midori-ku, Yokohama 227

1. はじめに

位相共役波とは元の光の場の位相項の符号を正負反転させた波であり、数学的にはこれらは互いに複素共役の関係にあるのでこのような呼び方をしている。伝播する波としてみるとちょうど時間軸を逆転させたような波であるため時間軸反転波ともよばれている。もちろん実際に時間を逆転することはできないが、任意の入射波にしてその位相共役波を発生することができれば、これは入射波がたどってきた経路に正確にそって元の波面を経路上の各場所で忠実に再現しながら逆方向に伝播していくという性質をもつことになる。このためきわめて多くの応用が考えられる。従来のホログラフィにおける元の場の再現も原理的にはこの位相共役波を用いていることになるが、このような波を写真乾板などを用いてホログラムとしていったん記録してからあとで発生するのではなく、実時間的に、あるいはこれに近い状態で発生する機能性光部品を位相共役器あるいは通常の反射鏡に対比させて位相共役鏡 (phase conjugating mirror 略して PCM) と呼んでいる。

このような位相共役器が最近ガスなどでの非線形効果あるいは結晶を用いて各種実現され、それらの応用も多く発表されるようになっている。

応用の多くは基本的には位相歪の実時間的な補正能力を用いているといえるが、位相共役器の利得が1以上のものも可能でありこの場合ループ・ゲインが1に近くできるので高精度でのフィードバック系の構成も可能になり、これを用いた新しい応用も考えられている。

本稿ではまず位相共役光の発生法について説明したのち、主としてわれわれの所で試みた BSO 結晶を用いて発生した位相共役波の応用例について示すが、これを手がかりにこれからの発展を考えていただくことができれば幸いである。

2. 位相共役波の発生¹⁾

最近の位相共役波の発生に関する研究の発端となったのは Yariv, Hellwarth, Bloom らによる Na, CS₂ などのガスの非線形媒質を4波混合で用いる方法である。その後微粒子セルを用いる方法なども提案されているが実際の応用という観点からするとこれらのガスなどよりも、Bi₁₂SiO₂₀ (BSO), Bi₂₀GeO₂₀, LiNbO₂₀, BaTiO₃ (BTO), KNbO₃ などの電気光学結晶のほうが時間応答、反射効率、使用可能な波長、使用可能な面積、SN比などの点で優れているので以下ではこれらを中心に示すことにする。

電気光学結晶を用いた位相共役波の発生には通常同一の波長の光を信号波、参照波、読出し波として入射しその波長の位相共役波を発生するいわゆる縮退4波混合が用いられている。すなわち図1に示すように基本的には信号波、参照波による位相体積ホログラムの形成と実時間的読出しよりなっている。信号波と参照波を図の左から入射して干渉縞を形成し、読出し波を右の方から入射して立体的干渉縞による Bragg 反射により信号波の位相共役波が発生される。具体的には干渉縞の強度のコントラストに対応して屈折率の同期的変化の分布が生じこれが位相格子を形成するのであるがその大きさは

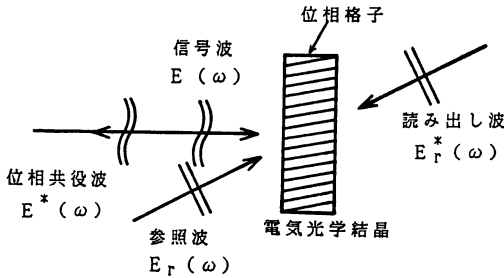


図 1 電気光学結晶を用いた 4 波混合による位相共役波の発生。信号波と参照波で位相格子が形成され位相ホログラムとして働く。

Pockels 定数に比例する。したがって BTO のように大きな Pockels 定数をもつ結晶ほど高い回折効率を期待できる。一般に強い読み出し波を使用するほど位相共役波は強く発生できるが、これはまた同時に干渉縞のコントラストを弱くするためそれには限度がある。

信号波に対する位相共役光のゲイン (位相共役鏡としての反射率) は 0.01 から 0.1 程度のものが多いが、BTO の場合にはこれを 1 以上、つまり増幅することができる。また干渉縞から屈折率への変換にはある有限の時間がかかるが、これは写真フィルムの場合と同様に一定のエネルギーを必要とするためであり、強い光を使用すると応用は早く、逆に弱い光では遅くなる。BSO の場合応答は通常 10~100 ms であり、使用可能波長は BSO, BTO 両結晶の場合とも 0.5 μm 程度である。とくに BSO 結晶の場合 He-Ne レーザーは使用できず、Ar レーザーを用いる。上にあげた結晶のなかでは、反射率が悪いものの感度が良く、光学的に均質な大きな結晶が得られる BSO と、結晶サイズは小さいが大きい反

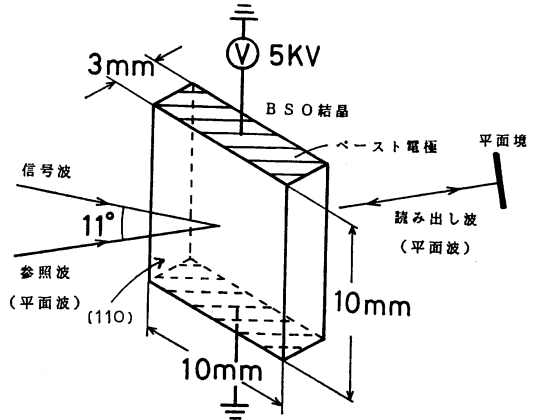


図 2 BSO 結晶を用いた位相共役器の具体的構成例。読み出し波は結晶を通過した参照用平面波を平面鏡で反射して用いている。

射率を有する BTO 結晶とがよく用いられている。

BSO 結晶の場合、図 2 に示すように、結晶の $\langle 110 \rangle$ 方向に光を入射し、また反射率を上げるために $\langle 1\bar{1}0 \rangle$ 方向には数 kV/cm の電界を印加して使用している。また BSO の場合、位相ホログラムは読み出し波を入力しないとそのまま保存されるとか、発生利得が二つの入射波による干渉縞に一定の移動速度を与えたときに最大になる、といったような特性があることも応用を考えるときに重要である。

現在実際に使用している BSO 結晶は厚さ 3 mm あるいは 10 mm で大きさが 10 mm × 10 mm のものであり、これに 5 kV の電圧をかけて Ar レーザーで使用している。また読み出し波は平面参照波の透過波を平面鏡で反射させて用いている。

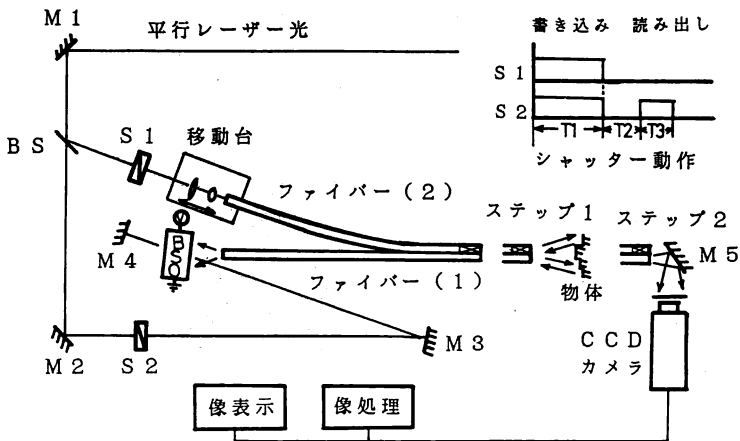


図 3 ファイバー 2 本のみを用いたファイバースコープ系の構成。ファイバー (2) は照射用にファイバー (1) は物体の空間的情報の伝送に用いている。

3. 位相共役波の応用

3.1 形状の観測

位相共役波が伝播経路中の光学的不均一特性による波面の歪を補正しながら忠実に元の場を再現していくという能力を利用すると、光を用いた物体の形状の精密な計測系が実現できる。

図3にはBSOによる位相共役器を用いたマルチモードファイバー2本のみによる極細型のファイバースコープの構成を示す²⁾。ここでは物体上の場をファイバーを通していったんBSOに記録し、その後ファイバーを物体領域からとり出したのちその先端に位相共役波により元の場を再現してこれをTVカメラで見ている。図4

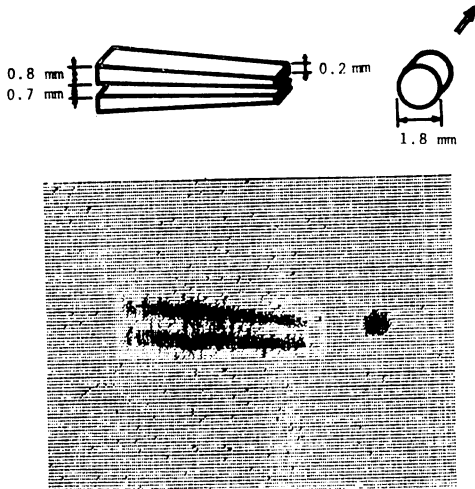


図4 微小物体の観測例。ファイバーは直径 $100 \mu\text{m}$ 長さ 60 mm であり物体の3次元の構造を見ている。移動台を動かして照射条件を変え多重露光によりスペックルの除去もしている。

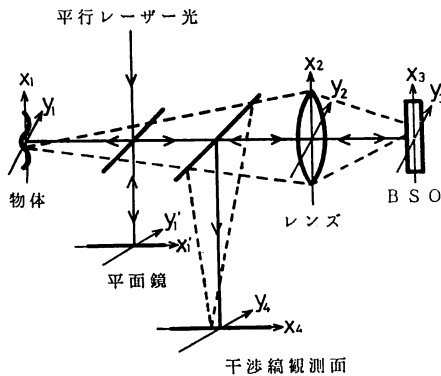


図5 BSO結晶による位相共役器で物体面上と平面鏡上の場が忠実に再現されレンズの収差によらない高精度の干渉計測が可能。

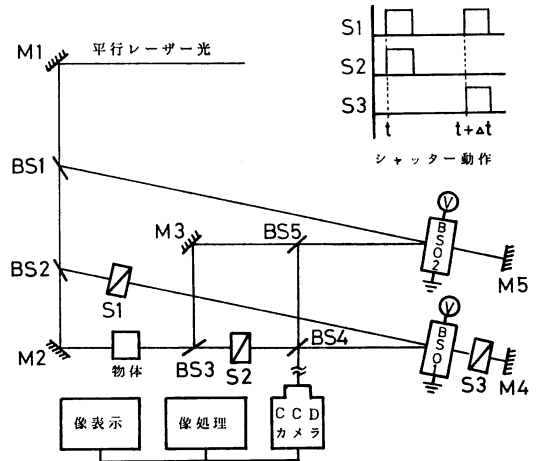


図6 二つのBSO位相共役鏡を用いたダイナミック干渉映像系。任意の時間 Δt だけずれた物体直後の二つの波面が忠実に再現されこれらの間の変化のみが干渉縞の直線からの変化として観測される。

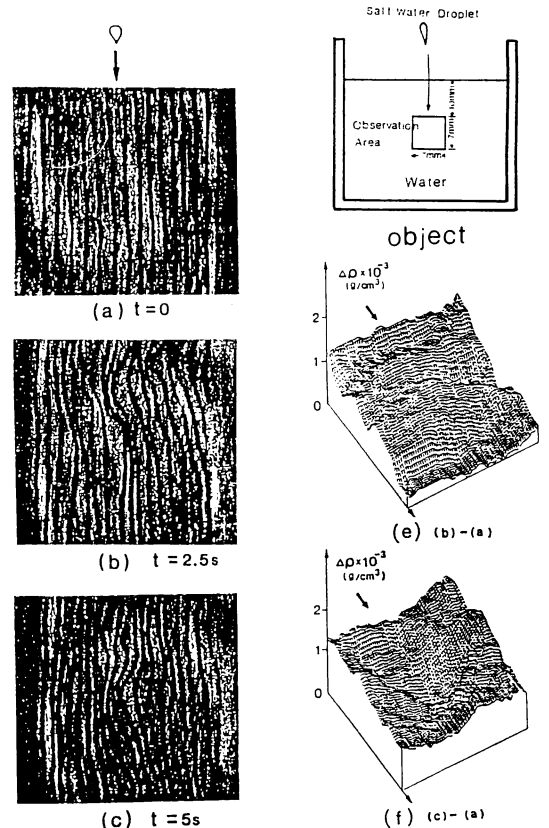


図7 水中に食塩水の水滴を落下したときの密度の変化を観測した例である。静的不均一性には全く関係なく変化のみが高精度で検出できている。

は観測例である。もちろん位相共役波を用いないとモード分散のため像は全く観察されない。

また図5には他の例としてBSO位相共役器によりレンズを通して物体の場とともに参照波の場も同時に再現することによる高精度干渉計測系の構成を示す³⁾。

3.2 形状の変化の観測

BSOを用いると位相共役波は実時間的にも発生できるが数十秒から数分遅らせても発生できる。しかもこれが容易に繰り返されることを用いると、複雑な物体の望んでいる時間の間に起こった変化のみを正確に観測できるダイナミック計測系が実現できる^{4,5)}。図6は二つのBSOを用い任意の二つの時点での物体直後の波面を一方を少し傾けて同時に再現し、これらを干渉縞としてとらえるダイナミック干渉計測系の構成を示したものである⁶⁾。波面が変化しなければ干渉縞は一定間隔の直線状

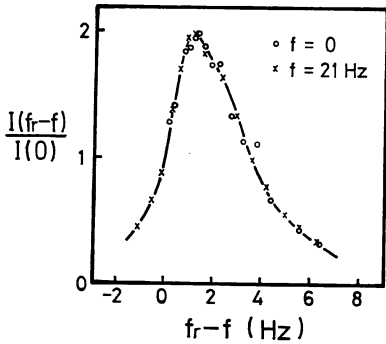


図8 BSOにおける信号波と参照波の変調周波数 f と f_r の差に対する位相共役波の利得の一例。ピークのずれの大きさは強度に依存する。

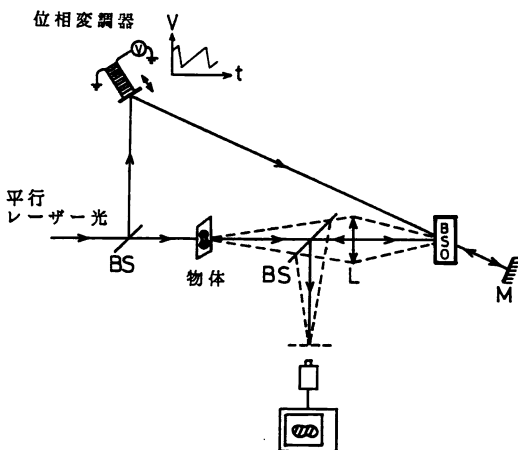


図9 時間的に変動する屈折率分布をもつ物体の各部の変化速度の大きさの像を得るための系。位相変調器の三角波の周期を変えて差周波数を走査し図8の特性と結びつけて像を出す。

のパターンとなるので、複雑な位相物体の微小変化のみが前述のパターンからのずれとして正確に観測できる。図7には観測の一例を示した。

3.3 形状の変化率の分布の計測

位相共役波の出力強度は信号波、参照波と結晶に加えている電界の三つの積の時間積分に関係しているため、参照光または電界の周波数を変えることで2次元的分布をもった、時間的に変化する信号のバンドパスフィルターとしてこれを利用することができる^{7,8)}。積分時間は用いている結晶の4波混合に対する応答時間に等しく、BSOの場合数mW/cm²の入力光強度に対して0.1s程度となる。図8には参照波と信号波の周波数 f_r と f をとともに変調し、それらの差に対する利得の一例を示した。ピークが正のほうに少しずれた所にあるのは結晶中のダイナミックなカップリングによるものであり、これは応答時間の逆数に対応して変化する。図9には、積層型PZTアクチュエータを用いた可変鏡により参照波の周波数を走査できる要素をもつ系の構成を示した。図10はこの系による観測例である。屈折率の時間変化率の空間的分布を実時間的に表示できるのでこれはダイナミック・シュリーレン映像系ともいえるものである。

3.4 光学パターンの処理と認識

位相共役器の利得を1に近づけ、これを含むフィードバック・ループを組むと光波面に対して各種の興味ある演算が可能になる。たとえば図11のように二つの位相共役器と可変鏡を用いてフィルターを構成すると、たと

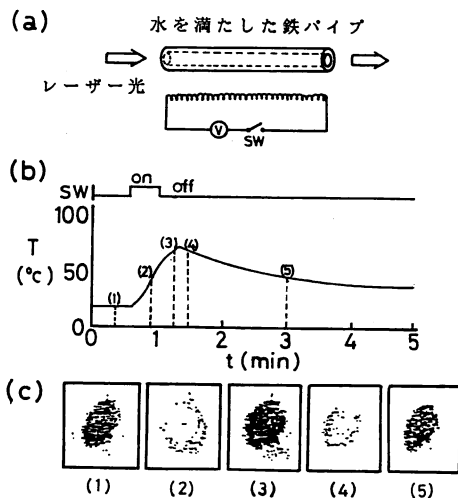


図10 加熱による水温の変化に伴う屈折率の変化率を図9の系で観測したもの。図8の特性からたとえば2Hzの所に対応する(2)、(4)の所で像が明るくなっている。

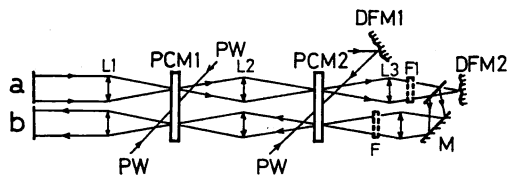


図 11 二つの位相共役鏡を用いたウィーナーフィルタ系の構成予想図

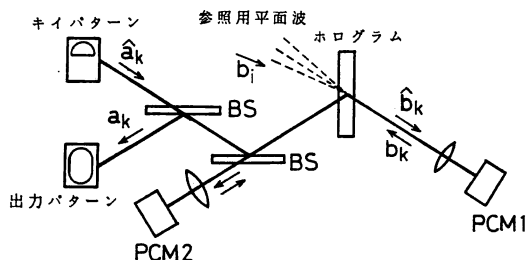


図 12 二つの位相共役鏡を用いた連想記録系の構成図。レンズ L_2 により平面波は PCM_2 上では点となるが不完全な入力による平面波からのずれは PCM の非線形特性のためこの上で点に近づき、ループをまわるとに逐次平面波に近づいていき最終的には完全な平面波による読出しとなり完全な像が再生される。

例えば可変鏡の位相関数 f , g , ループゲイン q に対して $f/|1-q \cdot g|$ という伝達特性が得られ、ダイナミックレンジの大きいウィーナーフィルタなどが実現可能となる⁹⁾。また図 12 は位相共役鏡の利得が強度に比例するため非線形な特性をもつことあるいは光強度に関して閾値特性を有すること、および利得が 1 以上にできることを用いて実現された光連想記録系を示している¹⁰⁾。ホログラムには各パターンごとに方向を少しずつ変えた平面参照波により多重ホログラムとして情報が記録され、これを不完全なパターンで読み出すと、上記の位相共役鏡の非線形特性によりこの不完全パターンによる読出し波が逐次完全な平面波に近づいていき、最終的に読み出されるパターンも完全なものになっていくというものである。

3.5 その他の応用

この他核融合、移動物体の追尾などにおいてレーザー光のエネルギーを位相共役波にのせてゆらぎのある媒質中でも効率よく伝えたり¹¹⁾、画像を忠実に伝達したりする応用¹²⁾、三つの入射波の積で与えられる 4 波混合系の出力はフーリエ変換面で見ると畳み込み積分に等しいことを利用した空間的相関演算¹³⁾、位相共役鏡で共振系を作ることによるレーザー発振モードの改善¹⁴⁾など多くの応用が考えられている。

4. おわりに

以上、位相共役波の具体的発生法とそれを用いた応用のいくつかについて示した。時間反転波がともかく自由に得られるのだと考えると、その応用の範囲も大きく広がっていくであろう。位相共役器の応答速度、効率、使用できる領域の大きさなどの改良とともに新しい計測系、情報処理系あるいは光計算機などへの応用がさらに進められると考えられる。

図作成などに協力して頂いた磯野明規氏に感謝する。

文 献

- 1) R. A. Fisher, ed.: *Optical Phase Conjugation* (Academic Press, New York, 1983).
- 2) S. Chang and T. Sato: "Optical fiberscope using phase conjugate waves," *Appl. Opt.*, **26** (1987) 5241-5244.
- 3) O. Ikeda, T. Suzuki and T. Sato: "High-accuracy surface-profile measuring system using a BSO phase conjugating mirror," *Appl. Opt.*, **21** (1982) 4468-4471.
- 4) T. Sato, T. Suzuki, P. J. Bryanston-Cross, O. Ikeda and T. Hatsuzawa: "Coherent optical image delay device using a BSO phase-conjugate mirror and its application," *Appl. Opt.*, **22** (1983) 815-818.
- 5) T. Sato, T. Hatsuzawa and O. Ikeda: "Dynamic interferometric observation of differential movement," *Appl. Opt.*, **22** (1983) 3895-3897.
- 6) S. Chang, M. Isono and T. Sato: "Dynamic interferometry using two phase conjugate waves," *Appl. Opt.*, **27** (1988) in press.
- 7) T. Sato, M. Takehara and O. Ikeda: "Two-dimensional optical spectral analyzer of oscillating object field using voltage-controlled BSO crystal," *Appl. Opt.*, **23** (1984) 4051-4053.
- 8) T. Sato, H. Kojima, O. Ikeda and Y. Odai: "Two dimensional, optical temporal bandpass filter using four wave mixing in BSO crystal," *Appl. Opt.*, **26** (1987) 2016-2019.
- 9) O. Ikeda, T. Sato and H. Kojima: "Construction of Wiener filter using phase conjugate filter," *J. Opt. Soc. Am. A.*, **3** (1986) 645-650.
- 10) T. Kohoren: *Self-Organization and Associative Memory* (Springer-Verlag, Berlin, 1987).
- 11) T. R. O'Meara: "Applications of nonlinear phase conjugation in compensated active imaging," *Opt. Eng.*, **21** (1982) 231-236.
- 12) O. Ikeda, M. Takehara and T. Sato: "High-performance image-transmission system through a turbulent medium using multiple reflectors and adaptive focusing combined with four-wave mixing," *J. Opt. Soc. Am. A.*, **1** (1984) 176-179.
- 13) J. O. White and A. Yariv: "Real-time image processing via four-wave mixing in a photo-refractive medium," *Appl. Phys. Lett.*, **37** (1980) 5-7.
- 14) R. C. Lind and D. G. Steel: "Demonstration of the longitudinal modes and aberration-correction properties of a continuous-wave dye laser with a phase-conjugate mirror," *Opt. Lett.*, **6** (1981) 554-556.