

位相共役鏡を用いた共焦点顕微鏡

河田 聡・中村 收

フォトリフラクティブ結晶は、位相共役波をほぼ実時間で発生させることができる光学素子として、あるいは現像処理が不要な実時間プログラム材料として、1980年代前半より大きな期待が寄せられた。しかし、現実には、位相共役鏡も実時間記録プログラム素子も実用化には至っていない。その理由として、材料開発や物性研究は進んではいるものの、応用目的に必然性が不足しているからではないかと考える。2光波結合を利用した光情報処理^{1,2)}等も実用化に至っていない。筆者らは、現在、光記録応用として三次元ビット記録方式の検討を進めている^{3,4)}。

一方、これら光情報処理応用に加えて、光計測へのフォトリフラクティブ結晶の必然的応用研究の開拓も必要である。とくに、位相共役波の当を得た応用研究が待たれる。本稿では、光学顕微鏡の世界にその回折限界の壁のブレイクスルーを開けた、共焦点顕微鏡の致命傷である試料の厚み・不均質性による収差を補正するために、フォトリフラクティブ結晶が効果的に用いられる例について、その原理と実験例を簡単に示す。

1. 4π 共焦点顕微鏡と位相共役鏡

共焦点顕微鏡とは、レーザービームを収束させて試料中の1点に照射し、散乱光を点検出器で検出するというレーザー走査型の光学顕微鏡である。この顕微鏡は、厚い試料に対して三次元の内部を分解して観察する optical sectioning 機能を有するが、最近 Hell によってその機能をさらに高くする 4π 共焦点顕微鏡が考案された⁵⁾。

従来の共焦点顕微鏡では、最大 2π sr の立体角内で照明光を試料中に収束させ、試料からの反射光などを結像させるのに対し、 4π 共焦点では試料を挟んで向かい合う2個の対物レンズを用い、上下両方向から最大 4π sr の立体角で照明光を収束させ、反射光/蛍光を同じ立体角内でコヒーレントに収集・結合する。これにより、奥

行き方向の空間分解能が光の回折限界近くまで大幅に高められ、その特長によって、 4π 共焦点顕微鏡は多層型光メモリーへの書き込み光学系や新しいレーザー顕微鏡として⁶⁾、また、焦点内に集め得る光のエネルギー密度が高いことから、2光子励起による蛍光顕微鏡^{7,8)}などの非線形レーザー顕微鏡への応用が有望である。

図1に位相共役鏡を用いる 4π 共焦点顕微鏡の光学系を示す⁹⁾。ここで、対物レンズ2の後ろには位相共役鏡が置かれ、入射したレーザー光の位相共役光がセルフポンプされ、この位相共役光が後退波として用いられる。

位相共役鏡を用いない 4π 共焦点顕微鏡では、前進波および後退波の焦点を光の波長程度より何倍も高い精度で位置合せしなければならず、しかもこの調整については試料内の焦点位置を移動させるたびに、また試料を取り替えるたびに行わなければならない。

図1の系では、前進波と後退波の収束位置は位相共役波の特性により自動的に一致するので、光学調整の手間が格段に軽減される。また、後退波は対物レンズ2による収差を補正し、前進波が焦点位置に形成する振幅分布を再生するので全体として収差の影響が低減する。

実際に、この位相共役鏡を伴う 4π 共焦点顕微鏡を用いて測定した例を示す。図2(a)は、直径40 nmの金微粒子からの散乱光を位相共役 4π 共焦点顕微鏡で測定した際の奥行き方向の応答である。同図(b)は、従来の共焦点顕微鏡による同一試料の測定結果である。用いた光源は、波長514.5 nmの Ar^+ レーザーであるので、(a)では光軸方向に約0.20 μm の幅までスポットが鋭くなっている。前進波と後退波の干渉縞のビジビリティーが1より小さいのは、用いた位相共役鏡 (Ceドープの BaTiO_3 結晶) の反射率が1より小さいからである。4光波混合を用いる系にすれば、いくぶん光学系は複雑になるものの反射率を向上させることができる。

2. 位相共役波を用いたダブルパス共焦点吸収顕微鏡⁹⁾

ダブルパス共焦点吸収顕微鏡は試料を2回透過させる共焦点吸収顕微鏡であり、吸収量が増強され、弱吸収試

Confocal microscopy using a phase conjugation mirror (1996年3月4日受理)
Satoshi KAWATA, Osamu NAKAMURA 大阪大学大学院工学研究科応用物理学専攻 (〒565 吹田市山田丘 2-1)

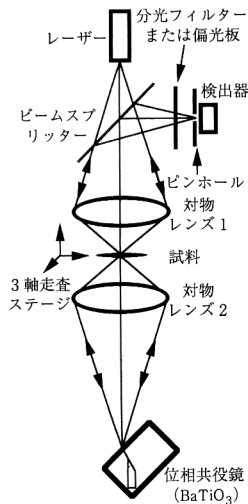


図1 位相共役波を用いる4 π 共焦点顕微鏡。

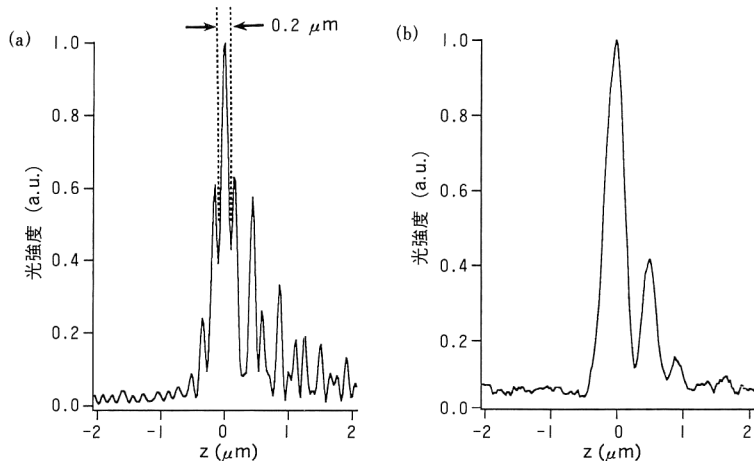


図2 直径40 nmの金粒子試料に対する光軸方向の応答。(a)位相共役波を用いる4 π 共焦点顕微鏡を用いた場合、(b)従来の共焦点顕微鏡を用いた場合。

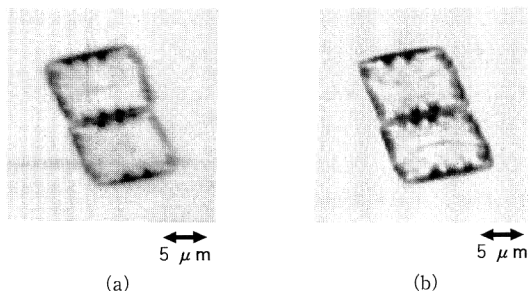


図3 ダブルパス共焦点吸収顕微鏡による珪藻の像。(a)位相共役鏡を用いた場合、(b)平面鏡を用いた場合。

料でも結像できるという特長をもつ^{9,10)}。この顕微鏡においても2個の対物レンズを用いるため、4 π 共焦点顕微鏡と同様に波面収差や光学調整の面で難があった。

図3(a)に、位相共役波によるダブルパス共焦点吸収顕微鏡を用いて珪藻を観察した結果を示す。測定系は、ピンホールの前の干渉フィルターや偏光板は取り去るほかは図1の系と同じである。光を試料中で2回透過させても像の分解能が低下しておらず、試料を透過したことによる収差が補正されていることがわかる。

一方、図3(b)は、位相共役鏡の代わりに平面鏡を用いたダブルパス共焦点吸収顕微鏡で観測した同一試料の像である。(a)に比べ位相の構造によるコントラストが付き、吸収の分布と混ざっているのがわかる。

位相共役技術が顕微鏡の使いやすい基礎技術となるには応答速度の一層の向上が必要であり、GaAsなどの半導体材料、有機材料、半導体レーザー等の利用が必要である。さらに、laser-feedback 顕微鏡¹¹⁾との結合により、より高分解能で、よりコンパクトで、使いやすい共焦点顕微鏡の実現が期待される。

文 献

- 1) Y. Kawata, S. Kawata and S. Minami: J. Opt. Soc. Am. B, **7** (1990) 2362-2368.
- 2) B. H. Soffer, G. J. Dunning, Y. Owenchko and E. Marom: Opt. Lett., **11** (1986) 118-120.
- 3) Y. Kawata, H. Ueki, Y. Hashimoto and S. Kawata: Appl. Opt., **34** (1995) 4105-4110.
- 4) H. Ueki, Y. Kawata and S. Kawata: Appl. Opt., **35** (1996) pp. 2457-2465.
- 5) S. Hell: J. Opt. Soc. Am. A, **9** (1992) 2159-2166.
- 6) 河田 聡編著：新しい光学顕微鏡 第1巻 レーザー顕微鏡の理論と実際 (学際企画, 東京, 1995)。
- 7) W. Denk, J. H. Strickler and W. W. Webb: Science, **248** (1990) 73-76.
- 8) O. Nakamura and T. Okada: Optik, **100** (1995) 167-170.
- 9) 中村 収, 藤田克昌, 川田善正, 河田 聡: レーザー顕微鏡研究会第16回講演会論文集 (1995) pp. 49-56.
- 10) H. Ohde: レーザー顕微鏡研究会第9回講演会論文集 (1992) pp. 4-7.
- 11) 藤田克昌, 河田 聡: 第56回秋季応用物理学会講演予稿集 (1995) p. 824.