

バクテリオロドプシンを用いた偏光暗号化ホログラフィック光メモリ

Secure Holographic Memory Using Polarization Encryption in Bacteriorhodopsin Film

的 場 修*・譚 小 地*・志 村 努*・黒 田 和 男*

Osamu MATOBA, Xiaodi TAN, Tsutomu SHIMURA and Kazuo KURODA

1. はじめに

生体材料を機能性光学素子に利用する研究が行われている。バクテリオロドプシンは生体膜に存在するタンパク質であり、光異性化や飽和吸収による非線形光学応答を利用して、実時間ホログラム記録、空間光変調器、ベクトル位相共役波発生、光制御型スイッチング素子などへの応用が実現されている [1-3]。バクテリオロドプシンは、大面積の試料作製が可能であり、高解像度なホログラム記録が可能である優れた材料である。

本解説では、バクテリオロドプシンを利用した応用研究の一つとして、暗号化ホログラフィック光メモリの研究を紹介する。近年、液晶プロジェクター用液晶空間光変調器や CCD カメラの大画素化、面発光レーザー等の 2 次元入出力デバイスの研究の進展とともにホログラフィック光メモリの研究が再び盛んになっている [4]。ホログラフィック光メモリは、2 次元データを用いた大容量記録と 10 Gbit/s 以上の高速読み出しが可能であるという特長をもつ。我々は、ホログラフィック光メモリに光暗号化法 [5] を導入することにより、記録データの保護を行う研究を行ってきた [6-8]。光学的暗号化法では、光の振幅、位相、偏光、波長を用いて、2 次元データの暗号化・復号が行われる。光のもつ複数の物理量に加えて、暗号化・復号に用いられる鍵は 2 次元情報なため鍵の全数が膨大になり、安全なメモリシステムの構築が期待される。

本稿で紹介する偏光情報を用いたホログラフィックメモリシステムでは、2 次元 2 値データは直交する 2 つの直線偏光として入力される。この直線偏光状態はランダム偏光変調マスクにより任意の偏光状態に暗号化される。暗号化された偏光情報を記録する材料として、バクテリオロドプシンフィルムを用いる。バクテリオロドプシンフィルムでは、ベクトル位相共役波を発生させることができる。このベクトル位相共役再生により記録時と同じ偏光変調マスクで元

信号を再生させることが可能になる。2 節でバクテリオロドプシンの光学的応答について簡単に説明する。3 節で偏光暗号化を説明した後、4 節で原理確認実験の結果を示す。

2. バクテリオロドプシンの光反応サイクル

バクテリオロドプシンは、高度好塩菌 (*Halobacterium halobium*) の細胞膜に存在するタンパク質である。バクテリオロドプシンでは、レチナールによって光応答性が発現している。その光反応サイクルを図 1 に示す。室温では、波長 570 nm 付近に吸収極大をもつ bR 状態に安定している。このとき、レチナールはトランス型である。波長 570 nm 付近の光を吸収すると、中間状態を熱的緩和により経て、波長 410 nm 付近に吸収極大をもつ準安定な M 状態に変化する。M 状態は、ミリ秒から秒オーダーで bR 状態に熱的に緩和する。また、波長 412 nm の吸収によりナノ秒オーダーで M 状態から bR 状態に戻すこともできる。M 状態では、レチナールはシス型である。ホログラム記録では、レチナールがトランス型である bR 状態とシス型

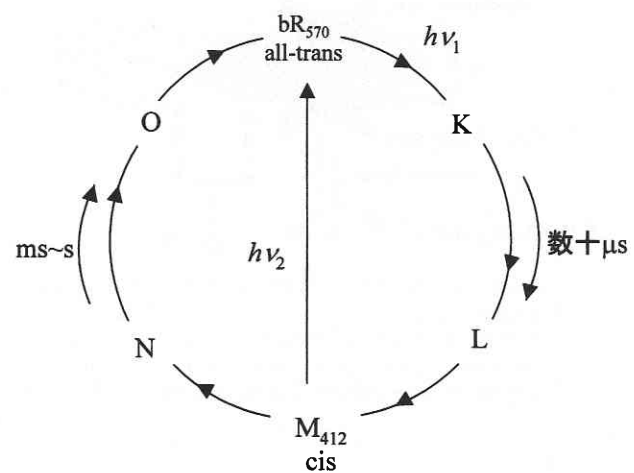


図1 バクテリオロドプシンの光反応サイクル

*東京大学生産技術研究所 物質・生命部門

である M 状態を利用する．初期状態ではフィルム中の各分子の方向はランダムであり，マクロでは等方性媒質である．直線偏光の光が入射すると光吸収により，bR 状態から M 状態へと変化する．トランス型，シス型では，偏光に対する吸収が異なるため光異方性（2色性）を示す．バクテリオロドプシンでは，レチナールの長軸方向に平行な電場の光を最も強く吸収する．偏光情報の記録は，この光異方性（トランス-シス）による光誘起異方性に基づいている．また，本研究ではベクトル位相共役波を発生するためにバクテリオロドプシンを用いている．任意入力偏光に対するベクトル位相共役波発生には，上述の偏光情報記録と強度情報記録を利用する．バクテリオロドプシンでは，互いにベクトル位相共役な 2 つの円偏光を対向ポンプ光として用いた縮退 4 光波混合により，任意偏光に対するベクトル位相共役波を発生させることができる [1, 2]．

3. 偏光暗号化

本節では，入力面 1 枚のみのランダム偏光変調マスクによる光暗号化法を概説する．2 次元 2 値信号は，図 2 (a) に示すように直交する 2 つの直線偏光に変換される．この偏光情報は検光子により容易に 2 値信号に戻すことができる．直線偏光の入力偏光分布は，複屈折ランダム偏光変調マスクにより，任意の偏光状態に変換される（暗号）．ランダム偏光変調マスクの各画素は，偏光状態の主軸の回転と複屈折による位相差の 2 つのパラメータをもつ．マスクの全数は，主軸の回転角の取りうる数を p ，複屈折による位相差の取りうる階調数を q ，マスクの画素数を N とすると， $(pq)^N$ になる．例えば， $p = 10$ ， $q = 256$ ， $N = 10^6$ の時，全数は約 $10^{3,400,000}$ になる．したがって，全数検索をリアルタイムに行うことは事実上不可能である．

暗号の過程を偏光状態を直感的に理解しやすいポアンカレ球を用いて簡単に説明する．図 3 に示すポアンカレ球では，赤道線上は振動方向の異なる直線偏光を表し，北極点，南極点はそれぞれ右回り円偏光，左回り円偏光を示す．その他の点は，楕円偏光を表す．図 3 は，直線偏光が主軸の回転と複屈折素子の位相遅延により任意偏光に変換される様子を示す．主軸の回転角を θ ，複屈折素子による位相遅延量を α とする．複屈折素子の主軸は，入射直線偏光に対して 45 度傾いているとする．ここで，入射偏光が図 3 (a) に示すように x 軸上の正の位置にあるとする．ポアンカレ球上では，主軸の回転 θ により，球上の点は経度方向に 2θ 回転する．また，複屈折素子の位相遅延により，球上の点は， y 軸を回転軸として緯度方向に α 回転する．図 3 (a) では，複屈折素子による位相遅延の後，回転を行う方法であり，図 3 (b) では，回転の後に複屈折素子による位相遅延を行う方法である．図 3 (a)，(b) より， θ ， α を θ ， $\alpha [0, 2\pi]$ にとることで，直線偏光から任意の偏

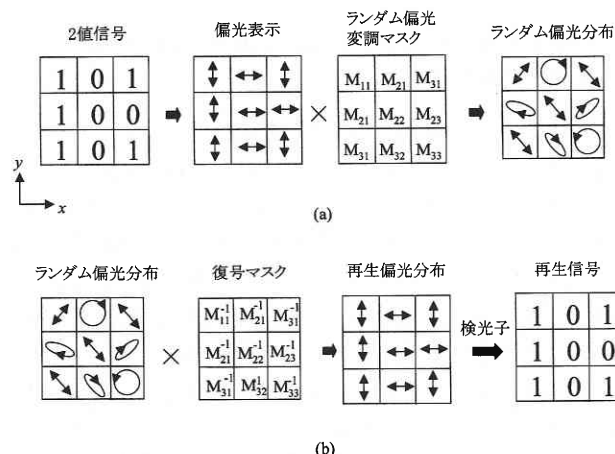


図 2 偏光暗号化の概念図；(a) 暗号化，(b) 復号

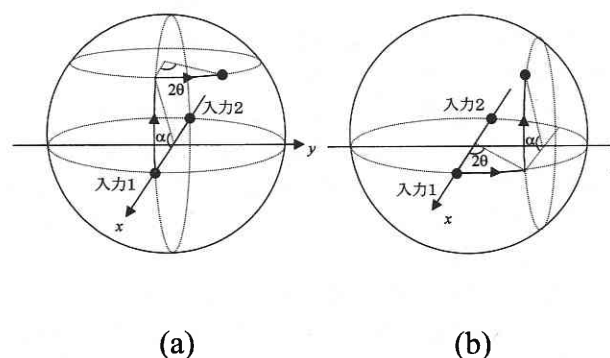


図 3 ポアンカレ球を用いた偏光状態変化の様子；(a)，位相遅延の後に主軸の回転を行う方法，(b) 主軸の回転後に位相遅延を行う方法

光状態に変換することが可能であることがわかる．ここで図 3 (a)，(b) での終状態は異なることを付記しておく．可変な位相遅延量は液晶空間光変調器により実現され，位相遅延量は液晶に印加する電圧で制御される．また，偏光の主軸の回転は，2 つの 1/4 波長板と液晶空間光変調器の組み合わせで実現される [9]．回転角は液晶に印加する電圧で制御される．

ランダム偏光状態を元の偏光状態に戻すためには，暗号化時の偏光変調マスクの逆行列となる復号マスクを用いる必要がある（図 2 (b) 参照）．また，暗号化されたランダム偏光分布のベクトル位相共役波を用いると，暗号化時と同じマスクにより入力偏光分布のベクトル位相共役分布が再生される．前者の方法では，暗号化用と復号用に 2 枚のマスクが必要であるのに対し，後者の方法では 1 枚のマスクで済む．次節で述べる実験では，後者の方法を用いた．偏光暗号化法では，フーリエ変換面にもう 1 枚のランダム偏光変調マスクを用いることで安全性を向上させることができる．

4. バクテリオロドプシンを用いた偏光暗号化ホログラフィック光メモリ

実験システムを図4に示す. 波長514.5 nmのアルゴンイオンレーザーから射出した光はビーム径を広げられた後, 2つのビームスプリッターで3つの光に分けられる. ビームスプリッターBS2で反射した光は, 入力偏光分布を通過した後, レンズL1(焦点距離100 mm)により複屈折ランダム偏光変調マスク(液晶空間光変調器)に結像される. 液晶空間光変調器は, シチズン時計株式会社製で, 画素数234×216, 画素サイズ60 μm×96 μm, 最大位相変調量1.3πradである. 液晶素子の各画素では電圧の制御により複屈折による位相差を変化させることができる. 液晶の主軸は入力偏光に対して45度傾いている. 複屈折による位相差に従って, 入力偏光分布が直線偏光から楕円偏光に変化する. 今回の実験では, 主軸の回転は行わない.

暗号化された光はバクテリオロドプシンフィルムにホログラフィックに記録される. 本研究で使用したバクテリオロドプシンフィルムは, Munich Innovative Biomaterials GmbH製[10]であり, 直径19 mm, 厚さ33 μmである. 任意偏光に対するベクトル位相共役波を発生させるためには, 互いに共役な2本の円偏光をポンプ光として用いる必要がある. ベクトル位相共役再生により, 暗号化された偏光状態のベクトル位相共役光が逆伝播する. 入力時と同じランダム偏光変調マスクを用いると液晶素子での偏光変調が補償され, 元の偏光状態が再生する. 適当な検光子を用いることで強度情報として元の2値データが回復する. 再生画像は, CCD2で観測される.

実験結果を図5, 6, 7に示す. 図5(a)は入力偏光分布を示し, 図5(b)は図5(a)を検光子を用いて強度情報に変換した画像である. 暗号化した信号の検光子を通過

した後の画像を図6に示す. 図5(b), 6より暗号化により元情報を知ることができないことがわかる. 今回実験で用いた暗号化は排他的論理和(exclusive OR)暗号化と同じである. つまり, 入力信号と暗号化マスクの信号が同じ場合に強度0を出力し, 異なる場合に強度1を出力するものである. 暗号化マスクの各画素は, 入力偏光状態を90度回転させる(状態1)か0度回転させる(状態0)働きをもつ. ベクトル位相共役再生により再生された画像を図

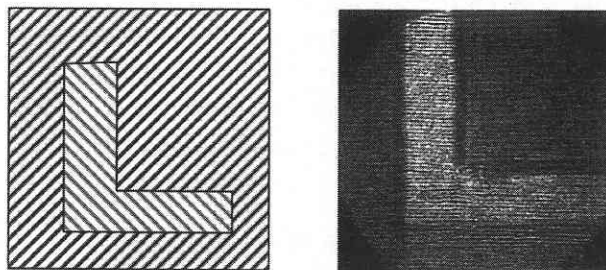


図5 入力画像; (a) 直線偏光分布, (b) 検光子を通過した後の強度画像

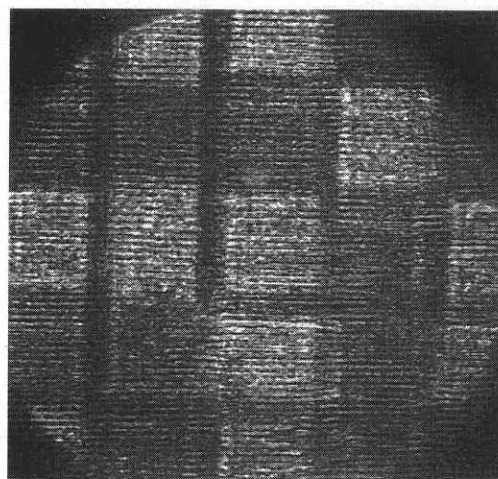


図6 検光子を用いて強度情報に変換した暗号化画像

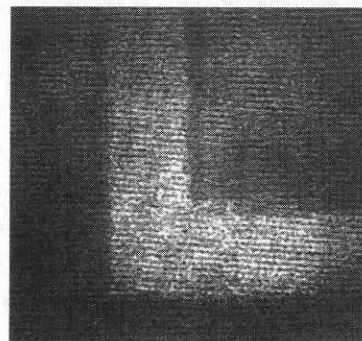


図7 復号画像

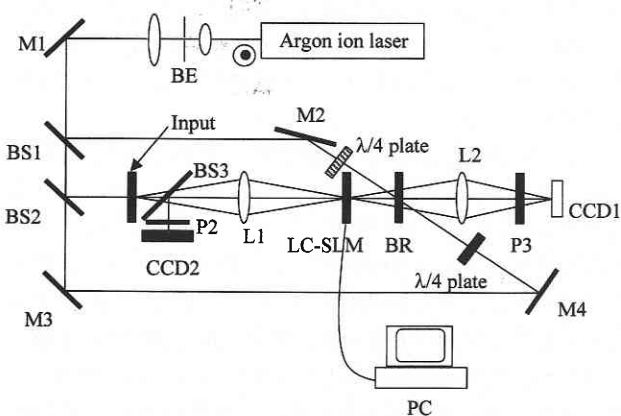


図4 光学系; BE,ビームエキスパンダー; M's, ミラー; BS's, ビームスプリッター; LC-SLM, 液晶空間光変調器; BR, バクテリオロドプシン; P's, 検光子; CCD's, CCDカメラ; PC, コンピューター

7に示す. 図5 (b), 7より暗号化時と同じ偏光変調マスクを用いることで元信号が正しく再生されることがわかる.

5. ま と め

生体材料を利用した応用研究の一つとして, 偏光情報を用いたセキュリティーホログラフィック光メモリシステムを概説した. 暗号化された偏光情報の記録材料としてバクテリオロドプシンを用いた. バクテリオロドプシンを用いることでベクトル位相共役再生が行うことができ, 暗号化時と同じ偏光変調マスクで元の信号が再生される. 原理確認実験として, 文字 'L' を用い, 暗号化および復号を行い, 良好な結果を得た. 今後, 偏光に加えて, 振幅, 位相, 波長を組み合わせることでより安全なメモリシステムを構築することが期待される.

謝 辞

本研究の一部の成果は, 財団法人双葉電子記念財団からの研究助成によるものである. また, 液晶空間光変調器を提供して頂いた, シチズン時計株式会社の井出昌史氏に感謝致します.

(2001年2月13日受理)

参 考 文 献

- 1) E.Y. Korchemskaya, M.S. Soskin, and V.B. Taranenko, *Sov. J. Quantum Electron.* **17**, 450 (1987).
- 2) Y. Okada-Shudo, I. Yamaguchi, J. Otomo, and H. Sasabe, *Jpn. J. Appl. Phys.* **32**, 3828 (1993).
- 3) 芦原聡, K. Jarasiunas, 岡田佳子, 志村努, 黒田和男, *生産研究*, 51, 575 (1999).
- 4) J.F. Heanue, M.C. Bashaw, and L. Hesselink, *Science*, **265**, 749 (1994).
- 5) P. Refregier and B. Javidi, *Opt. Lett.* **20**, 767 (1995).
- 6) O. Matoba and B. Javidi, *Opt. Lett.* **24**, 762 (1999).
- 7) O. Matoba and B. Javidi, *Appl. Opt.* **38**, 7288 (1999).
- 8) X. Tan, O. Matoba, T. Shimura, K. Kuroda, and B. Javidi, *Appl. Opt.* **39**, 6689 (2000).
- 9) J.A. Davis, D.E. McNamara, D.M. Cottrell, and T. Sonhara, *Appl. Opt.* **39**, 1549 (2000).
- 10) See <http://www.mib-biotech.de/Bacteriorhodopsin.htm>