

## ホログラフィから教わったこと

### ～急がば回れ～

長谷川智士  
宇都宮大学

日本の研究力強化のために、次世代を担う優秀な若手人材の育成が課題となっている。研究者の育成において、当然ながら指導教官の教育も大事であるが、若い時期に与えられた研究テーマから学ぶことも重要であるように思う。ここでは、私がホログラフィから教わったことを例に紹介する。特に、学生の参考になれば幸いである。

私がホログラフィの世界に入るきっかけは、大学の学部4年生の時であった。当時、所属していた光学科には5つの研究室があったが、物理の成績が割と良かった単純な理由から、光物理の研究室に進むことも考えたが、光情報処理の研究室に決めた。

(1 ページにつづく)

#### 目 次

- |  |            |
|--|------------|
| 1. 巻頭言：ホログラフィから教わったこと ～急がば回れ～                    | 長谷川智士 表紙   |
| 2. シネマトグラフ的アプローチによるメタサーフェスホログラフィの動画化             | 岩見健太郎 2    |
| 3. 高移動度フォトリフラクティブポリマー                            | 堤 直人, 他 10 |
| 4. 選択堆積法によるソーダライムガラス上への SiO <sub>2</sub> ホログラム形成 | 福井 彩, 他 19 |
| 5. Bayfol®HX フォトポリマーフィルムのご紹介                     | 堀口 治男 25   |
| 6. 次回研究会のお知らせ                                    | 巻末         |

理由は、研究室見学のときに目にした、光と計算機を駆使した実験系が魅力的に思えたからであった。そのとき感じた直感が、現在の私の研究者としての価値観に大きく影響しているように思う。与えられたテーマは、ホログラフィを用いたレーザー加工であった。格好良く言い直すと、計算機による光のデジタル制御で材料を加工することであった。

光技術におけるホログラフィは、新しい光源や光検出器の開発ほど派手さはないが、その応用範囲は広く、情報処理、計算工学、計測、顕微鏡、ディスプレイ、メモリー、およびレーザー加工と多岐に渡る。面白いのは、一見すると異なる研究テーマに見えるがお互いにつながりが出てくることである。例えば、私の研究テーマのレーザー加工を例に挙げると、高精度な加工には精密な計測が必須となるため、加工と計測には繋がりが出てくる。また、加工の計測結果を処理し有用な情報を抽出する点でも、加工と情報処理には関連がある。そのため、ホログラフィに関する研究テーマは学際的な学問であり、領域の垣根を越えた広い視野で技術を俯瞰することが重要であるように思う。

実際に私の経験を例に挙げると、光学、情報、電子、物理、機械、および材料の幅広い学問の知識が必要であった。具体的には、光学実験を行うための実験系の設計やアライメント、計算機プログラムの設計や空間光変調素子を制御するためのプログラミング、簡単な電子回路による機器制御のための電子工作、光と物質の相互作用を理解するための物理、加工における熱や応力の解析のための機械工学、加工対象となる材料の物性に関する知識、など必要なスキルは多様であった。

これらは研究において必要なスキルではあったが、ホログラフィに様々な知識や経験を学ぶ機会を与えてもらえたとも言える。これまでの研究者としての歩みを振り返ると、随分と遠回りしてきたようにも思えるが、上手いかなかった経験も含めて無駄であったことは無いように思う。むしろ、知識の厚みが増して、様々な経験に繋がりが出てくる状況に面白さを感じるようになった。

先人の言葉に「急がば回れ」とあるが、ホログラフィに関する研究テーマを通して、この言葉の意味を少し体感できたように思う。最後に、技術者・研究者を志す若い読者へのメッセージとして、ぜひ回り道をして色々な経験を積んで頂きたい。早く覚えることが目的ではなく、深く理解することが目的であって欲しいと思う。

# シネマトグラフィ的アプローチによる メタサーフェスホログラフィの動画化

## Cinematographic Approach to Metasurface Holography Movies

岩見健太郎

東京農工大学大学院工学研究院先端機械システム部門

Kentaro Iwami

Department of Mechanical Systems Engineering, Tokyo University of Agriculture and Technology

**Abstract:** Animation for a metasurface hologram was achieved using a cinematographic approach. Time-lapsed images were reconstructed using sequentially arranged metasurface hologram frames. An Au rectangular nanoaperture was adopted as a meta-atom pixel and arrayed to reproduce the phase distribution based on the help of a Pancharatnam–Berry phase. We arrayed 48 hologram frames on a 2-cm<sup>2</sup> substrate and measured and assessed the retardation of fabricated meta-atoms to reconstruct the holographic image, successfully demonstrating the movie with a frame rate of 30 frames per second.

### 1. はじめに：メタマテリアル・メタサーフェスとホログラフィ

メタサーフェスとは、サブ波長サイズの単位構造”メタ原子”を配列した位相格子であり、偏光変換素子[1]や波長板[2,3]、レンズ[4]等に応用されている。メタサーフェスによるホログラフィは広い視域角を実現できることから、ここ 7~8 年ほど盛んに研究されている[5-7]。メタサーフェスは平面的な構造を持つメタマテリアルの一種であり、メタ原子の配列によって屈折率分布を制御するという考え方に基づいている。もちろん、サブ波長構造によって偏光変換や波面変換を行うという考え方は古くからあるが[8-10]、2000 年代以降のメタマテリアル研究の隆盛や、微細加工技術の進展、そして 2011 年の Harvard 大の Capasso らによる一般化 Snell の法則の提案[11]などによって、メタサーフェスという新たな名前を

表 1 メタサーフェスで用いられる位相遅延原理

位相遅延原理	金属	誘電体
共鳴位相遅延	アンテナ共振[11] (プラズモン共鳴)	Mie 共振[12]
伝搬位相遅延	MIM 導波路[3]	誘電体導波路[9]
幾何学的位相 (Pancharatnam-Berry 位相)	位相子の回転による。[11,13] 上記 2 つと組み合わせて用いる	

得て再発見・再定義がなされてきた。

メタ原子による位相遅延の実装方法には、共鳴位相遅延、伝搬位相遅延、幾何学的位相などがある。これらをメタ原子材料とともに分類すると表 1 のようになる。いずれの場合においても  $0-2\pi$  の全位相範囲をいかにカバーするか、光利用効率ほどの程度か、メタ原子の加工性はどうかなど様々な観点からの選定が必要となる。

メタサーフェスによるホログラフィは、計算機生成ホログラム (CGH) によって得られた位相分布をメタ原子により再現することで製作される。はじめ Au ナノロッドによるアンテナ共振と幾何学的位相を組み合わせたものが報告された[5]。その後、Al ナノアンテナによる短波長化[6]や、金属ナノ開口の利用によるカラー化[14,15]がなされている。また、近年は位相と振幅を同時に制御する複素振幅ホログラムも実現されている[16]。

このようにメタサーフェスによるサブ波長周期を生かした広視域角が実現されてきたものの、変調機能がないため表示できる像は固定されてしまう。異なる像を投影するためメタサーフェスホログラムに変調機能を持たせた例として、直交偏光の利用[17]、化学変化[18]、基板の機械的伸長[19]などがあるが、いずれも表示できるフレーム数は 2~3 程度に限られ、切り替え速度も遅い。DMD による構造化照明を利用して複数のメタサーフェスフレームに順次照明することで動画化を達成した例があるが、表示できる像は、いわゆる 7 セグメントディスプレイのような限られたものになる[20]。

メタサーフェスホログラフィの別の利点として、画素サイズの小ささゆえに、与えられたある解像度においてホログラムが小さくでき、広い投影幅と高解像度が両立できる点が挙げられる。そこで、複数のホログラムフレームを順次照明することで、キネマトグラフのようにホログラフィ動画を再生することを着想した。もちろん、ホログラフィックフィルムは古くから研究されてきたが[21,22]、光記録であるためにサブ波長スケールの画素サイズは達成されていなかった。そこで本研究では、金属ナノ開口を 300 nm 周期で  $2048 \times 2048$  画素配置したホログラムフレームを 2 cm 角基板上に 48 フレーム配置し、順次照明することで最高 30 frames per second のフレームレートで再生することを試みた。

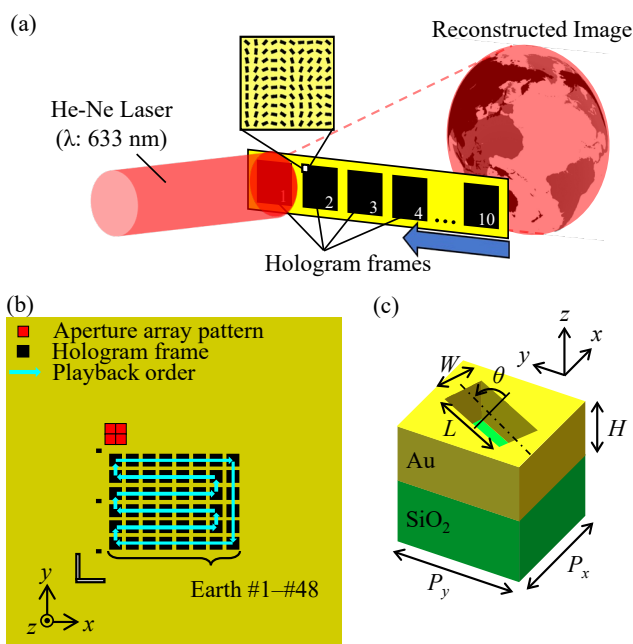


Fig. 1 (a) Schematic illustration of cinematography-inspired metasurface holographic movie. (b) Device design. 48 hologram frames are arranged on a substrate. Aperture array patterns for characterization with constant rotation angles  $\theta$  to the x-axis of the substrate at  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$ , and  $135^\circ$  were also fabricated. (c) Schematic of a metallic rectangular aperture meta-atom.

## 2. ホログラフィ再生と位相遅延の原理

本研究のコンセプトを Fig. 1(a)に示す。複数のホログラムフレームが記録された基板をステージ移動させ、レーザで順次照明することで異なる像を再生し、アニメーションを実現する。Fig. 1(b)に基板上的配置を示す。2 cm 角基板上に、 $0.6 \text{ mm} \times 0.6 \text{ mm}$  のホログラムが 1 mm ピッチで 48 フレーム配置されている。基板左上には、位相測定用のパターンが配置されている。Fig. 1(c)に画素を構成する金ナノ開口を示す。ガラス基板上に成膜した金薄膜に長方形の開口を施してあり、位相子として働く。開口の長軸方向を傾けることで、後述する幾何学的位相 (Pancharatnam-Berry 位相) の助けを得て  $0-2\pi$  の全位相範囲をカバーすることができる。

ここで幾何学的位相について説明する。これは、回転した波長板に円偏光を入射した際に生じる位相変化として説明できる。いま、入射光として左円偏光を考え、その Jones ベクトルを  $\mathbf{E}_{\text{in}} = (1, i)$  と書く。これを主軸方位が  $x$  軸に対して  $\theta$  傾いた  $1/2$  波長板に入射さ

せた際に生じる出射光の Jones ベクトルは

$$\mathbf{E}_{\text{out}} = \mathbf{HWP}_{\theta} \mathbf{E}_{\text{in}} = \begin{pmatrix} \cos 2\theta & \sin 2\theta \\ \sin 2\theta & -\cos 2\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ i \end{pmatrix} = e^{2i\theta} \begin{pmatrix} 1 \\ -i \end{pmatrix}$$

となる。ここで、 $\mathbf{HWP}_{\theta}$  は 1/2 波長板の Jones 行列である。ここから、入射左円偏光が右円偏光(1, -i)として出射され、その位相は  $2\theta$  だけ変化していることがわかる。この位相変化が幾何学的位相であり、波長板の回転角の 2 倍の位相変化を生じる。この特徴を生かし、幾何位相は古くから QHQ(Quarter-Half-Quarter)位相シフタ[23]などに利用されてきた。

1/2 波長板の代わりに、位相差  $\Delta$  を生じる位相子に左円偏光を入射した場合はどうなるであろうか。この場合の出射光は、

$$\mathbf{E}_{\text{out}} = \mathbf{RET}_{\Delta, \theta} \mathbf{E}_{\text{in}} = \cos \frac{\Delta}{2} e^{i\frac{\Delta}{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ i \end{pmatrix} + \sin \frac{\Delta}{2} e^{i(\frac{\Delta-\pi}{2})} e^{2i\theta} \begin{pmatrix} 1 \\ -i \end{pmatrix}$$

となり、左円偏光成分と右円偏光成分が混合している。注目すべきは右円偏光成分にやはり  $2\theta$  の位相変化が生じている点である。したがって、位相子を  $0 \sim 180^\circ$  回転させることで  $0 \sim 2\pi$  の位相変化が得られる。このように幾何位相は位相子の回転角のみに依存し、位相差自体には依存しない。ナノ開口位相子は製造時の寸法誤差によって容易に位相差  $\Delta$  が大きく変化するが、回転角は製造誤差の影響を受けにくい。しかも、ブロードバンド性を担保でき、カラー化に適している。利用できる偏光状態が限定されるものの、これらはメタサーフェスホログラフィにおいて非常に有利な点であり、幾何位相が広く用いられる理由でもある。

### 3. ホログラムの製作と評価

48 フレームからなる回転する地球の画像 (<https://www.videvo.net/video/globe-rotate-matte-loop/48/>) から、反復フーリエ変換法を用いて位相分布を取得した。この変換には松島らによるライブラリ WaveField Tools (<http://www.laser.ee.kansai-u.ac.jp/WaveFieldTools/>) を利用した。得られた位相分布をメタ原子の角度分布として出力するため、Python による GDS II レイアウト作成ライブラリ gdspy (<https://github.com/heitzmann/gdspy>) を用いた。

ガラス基板上に金を 120 nm スパッタ成膜し、電子線リソグラフィ (JBX-6300SL, JEOL) と Ar ミリングを用いてホログラムを製作した。製作されたホログラムの電子顕微鏡写真を Fig. 2(a)に、位相差測定用のパターンを Fig. 2(b-e)にそれぞれ示す。設計上の開口サイズは長さ 200 nm、幅 100 nm である。

Fig. 2(b-e)に示した測定用パターンを用いて、透過率と位相差をそれぞれ顕微分光測定した結果を Fig. 3 に示す。設計波長 633 nm の透過率は 5~8%、位相差は  $129^\circ \sim 139^\circ$  であった。

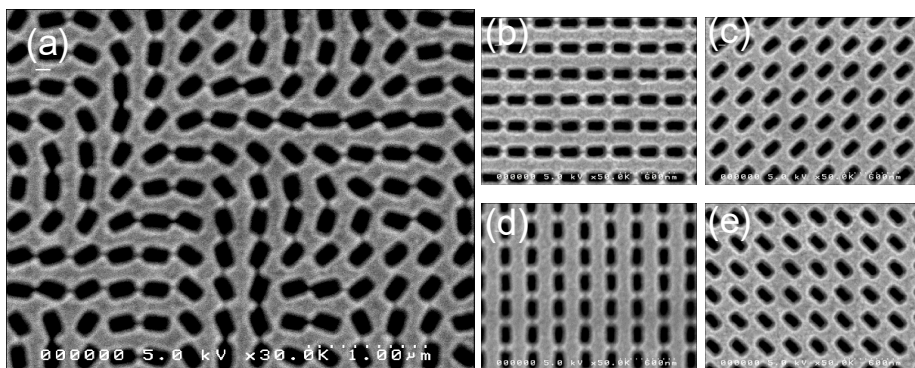


Fig. 2 Scanning electron microscopy (SEM) images of fabricated sample. (a) A hologram frame and aperture array patterns for retardation measurement with the fast axis angles  $\theta$  of (b)  $0^\circ$ , (c)  $45^\circ$ , (d)  $90^\circ$ , and (e)  $135^\circ$ .

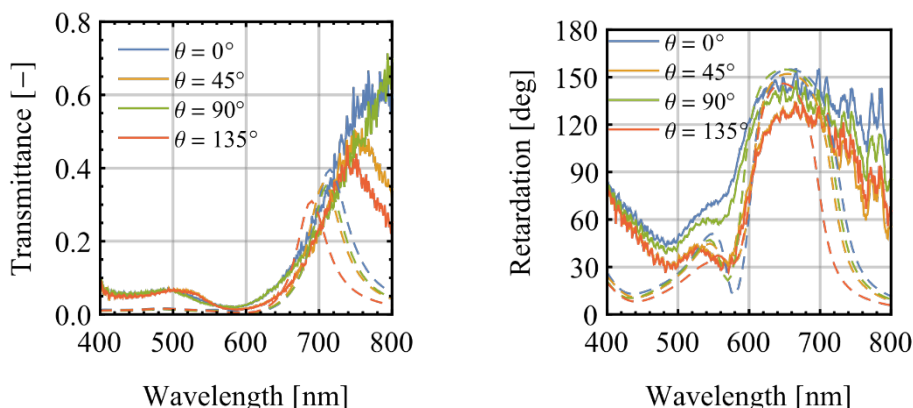


Fig. 3 Transmittance (left) and retardation (right) spectra of aperture array patterns with the fast axis angles  $\theta$  of  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$ , and  $135^\circ$ , respectively. Dashed lines show corresponding electromagnetic simulation results.

製作したホログラムをステージ駆動しながら、He-Ne レーザを光源とする左円偏光で証明した画像を Fig. 4 に示す。それぞれ、ホログラムの第 10(a), 21(b), 35(c), 45(d) フレームに対応し、異なる角度から見た地球が投影されている。中央の明点は左円偏光成分による 0 次光であり、ホログラフィ像は右円偏光成分を持っている。両偏光成分の強度比から、ホログラムフレーム中のメタ原子の平均位相差は  $122^\circ$ 、偏光変換効率は 77% と見積もられた。ステージの移動速度を最大 30 mm/s としているため、動画の再生速度としては最高 30 fps を達成することができた。

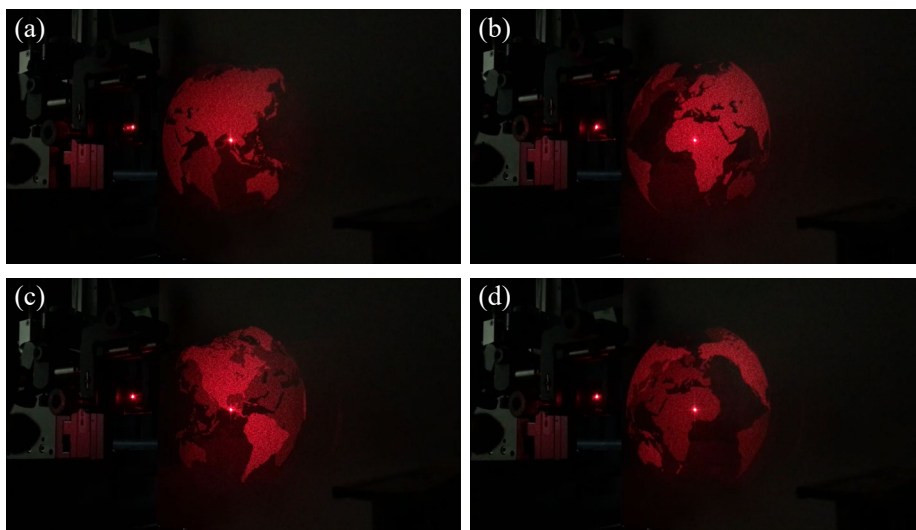


Fig. 4 Captured images of reconstructed hologram, with the frame numbers of (a) #10, (b) #21, (c) #35, and (d) #45.



Fig. 5 The intermediately reconstructed image with illumination between the frames #3 and #4.

今回のメタサーフェスホログラフィは、連続波レーザーで照明しており、フィルム映画のような間欠照明は行っていない。2つのホログラムフレームの間にレーザー（ $\phi 0.6 \text{ mm}$ ）が到達した際には、Fig. 5 に示すように2つのフレームの像が重畳されて現れた。照明側に特段の工夫を必要とせず、光学系の簡素化が図れる。

本研究では2cm角基板上にホログラムを作成したが、仮に4インチウェハ全体に描画を行ったとすると、10000フレーム程度からなる333秒程度の動画が30fpsで再生できると期待される。しかしながら、今回の48フレームの描画時間は6.5時間程度であり、ここから考えると1か月程度を要する。高感度レジストやCharacter Projection型電子線描画の利用による高速化と、描画用データ作成・変換の効率化が必須となる。



#### 4. おわりに

本研究では、キネマトグラフィ的アプローチを用いてメタサーフェスホログラフィの動画化を達成した。2048×2048 画素からなるホログラム 48 フレームを 2 cm 角基板上に作成し、順次照明することで最高 30 fps の再生速度を達成した[24]。これらメタサーフェスホログラフィを発展させ、3 次元画像の投影[25]や、誘電体メタサーフェスの利用による高効率化[26]に取り組んでいる。より将来的には、可変メタサーフェス[27]を含む超小型画素空間光変調器による高視域角ホログラフィック・ディスプレイが期待されるが、本研究はその実現までの過渡的技術として何らかの役に立てば幸いである。

#### 謝辞

本研究に多大なるご助言をいただいた東京農工大学 高木先生に感謝申し上げます。WaveField Tools をご制作いただいた関西大学 松島先生に感謝申し上げます。本研究は科研費基盤 B (17H02574) の支援を得て行われました。

#### 参考文献

1. K. Iwami, M. Ishii, Y. Kuramochi, K. Ida, and N. Umeda, "Ultrasmall radial polarizer array based on patterned plasmonic nanoslits," *Appl. Phys. Lett.* **101**(16), 161119 (2012).
2. M. Ishii, K. Iwami, and N. Umeda, "An Au nanofin array for high efficiency plasmonic optical retarders at visible wavelengths," *Appl. Phys. Lett.* **106**(2), 021115 (2015).
3. M. Ishii, K. Iwami, and N. Umeda, "Highly-efficient and angle-independent zero-order half waveplate at broad visible wavelength based on Au nanofin array embedded in dielectric," *Opt. Express* **24**(8), 7966–7976 (2016).
4. K. Iwami, C. Ogawa, T. Nagase, and S. Ikezawa, "Demonstration of focal length tuning by rotational varifocal moiré metalens in an ir-A wavelength," *Opt. Express* **28**(24), 35602 (2020).
5. L. Huang, X. Chen, H. Mühlenbernd, H. Zhang, S. Chen, B. Bai, Q. Tan, G. Jin, K.-W. Cheah, C.-W. Qiu, J. Li, T. Zentgraf, and S. Zhang, "Three-dimensional optical holography using a plasmonic metasurface.," *Nat. Commun.* **4**(May), 2808 (2013).
6. Y.-W. Huang, W. T. Chen, W.-Y. Tsai, P. C. Wu, C.-M. Wang, G. Sun, and D. P. Tsai, "Aluminum Plasmonic Multicolor Meta-Hologram," *Nano Lett.* **15**(5), 3122–3127 (2015).
7. I. Kim, G. Yoon, J. Jang, P. Genevet, K. T. Nam, and J. Rho, "Outfitting Next Generation Displays with Optical Metasurfaces," *ACS Photonics* **5**(10), 3876–3895 (2018).
8. Z. Bomzon, V. Kleiner, and E. Hasman, "Pancharatnam–Berry phase in space-variant polarization-state manipulations with subwavelength gratings," *Opt. Lett.* **26**(18), 1424 (2001).
9. P. Lalanne, S. Astilean, P. Chavel, E. Cambril, and H. Launois, "Design and fabrication of blazed binary diffractive elements with sampling periods smaller than the structural cutoff," *J. Opt. Soc. Am. A* **16**(5), 1143 (1999).
10. H. Kikuta, H. Toyota, and W. Yu, "Optical Elements with Subwavelength Structured Surfaces," *Opt. Rev.* **10**(2), 63–73 (2003).

11. N. Yu, P. Genevet, M. a Kats, F. Aieta, J.-P. Tetienne, F. Capasso, and Z. Gaburro, "Light Propagation with Phase Discontinuities: Generalized Laws of Reflection and Refraction," *Science* **334**(6054), 333–337 (2011).
12. Y. F. Yu, A. Y. Zhu, R. Paniagua-Domínguez, Y. H. Fu, B. Luk'yanchuk, and A. I. Kuznetsov, "High-transmission dielectric metasurface with  $2\pi$  phase control at visible wavelengths," *Laser Photonics Rev.* **9**(4), 412–418 (2015).
13. M. Khorasaninejad, W. T. Chen, R. C. Devlin, J. Oh, A. Y. Zhu, and F. Capasso, "Metalenses at visible wavelengths: Diffraction-limited focusing and subwavelength resolution imaging," *Science* (80-. ). **352**(6290), 1190–1194 (2016).
14. X. Zhang, J. Jin, Y. Wang, M. Pu, X. Li, Z. Zhao, P. Gao, C. Wang, and X. Luo, "Metasurface-based broadband hologram with high tolerance to fabrication errors," *Sci. Rep.* **6**(October 2015), 1–7 (2016).
15. W. Wan, J. Gao, and X. Yang, "Full-Color Plasmonic Metasurface Holograms," *ACS Nano* **10**(12), 10671–10680 (2016).
16. Z. Deng, M. Jin, X. Ye, S. Wang, T. Shi, J. Deng, N. Mao, Y. Cao, B. Guan, A. Alù, G. Li, and X. Li, "Full-Color Complex-Amplitude Vectorial Holograms Based on Multi-Freedom Metasurfaces," *Adv. Funct. Mater.* **30**(21), 1910610 (2020).
17. J. P. Balthasar Mueller, N. A. Rubin, R. C. Devlin, B. Groever, and F. Capasso, "Metasurface Polarization Optics: Independent Phase Control of Arbitrary Orthogonal States of Polarization," *Phys. Rev. Lett.* **118**(11), 1–5 (2017).
18. J. Li, S. Kamin, G. Zheng, F. Neubrech, S. Zhang, and N. Liu, "Addressable metasurfaces for dynamic holography and optical information encryption," *Sci. Adv.* **4**(6), eaar6768 (2018).
19. S. C. Malek, H. S. Ee, and R. Agarwal, "Strain Multiplexed Metasurface Holograms on a Stretchable Substrate," *Nano Lett.* **17**(6), 3641–3645 (2017).
20. H. Gao, Y. Wang, X. Fan, B. Jiao, T. Li, C. Shang, C. Zeng, L. Deng, W. Xiong, J. Xia, and M. Hong, "Dynamic 3D meta-holography in visible range with large frame number and high frame rate," *Sci. Adv.* **6**(28), 1–8 (2020).
21. M. Yamaguchi, H. Sugiura, T. Honda, and N. Ohyama, "Automatic recording method for holographic three-dimensional animation," *J. Opt. Soc. Am. A* **9**(7), 1200 (1992).
22. M. Yamaguchi, T. Koyama, H. Endoh, N. Ohyama, S. Takahashi, and F. Iwata, "Development of a prototype full-parallax holoprinter," in *Proceeding of SPIE*, S. A. Benton, ed. (1995), **2406**, pp. 50–56.
23. X. Yu and N. Umeda, "Shifting Standing Evanescent Wave Phase with a Geometric Phase Shifter," *Appl. Phys. Express* **1**(7), 072502 (2008).
24. R. Izumi, S. Ikezawa, and K. Iwami, "Metasurface holographic movie: a cinematographic approach," *Opt. Express* **28**(16), 23761–23770 (2020).
25. 泉竜太, 池沢聡, and 岩見健太郎, "メタサーフェスホログラムによる3D像投影に向けた角スペクトル法の反復最適化," in *Optics and Photonics Japan (OPJ) 2020* (2020), p. 17pC2.
26. 山田尚征, 泉竜太, 長瀬智保, 池沢聡, and 岩見健太郎, "可視光領域におけるシリコンナノ柱を用いた誘電体メタサーフェスホログラム," in *Optics and Photonics Japan (OPJ) 2020* (2020), p. 16aO14.
27. T. Shimura, T. Kinoshita, Y. Koto, N. Umeda, and K. Iwami, "Birefringent reconfigurable metasurface at visible wavelengths by MEMS nanograting," *Appl. Phys. Lett.* **113**(17), 171905 (2018).

高移動度フォトリフラクティブポリマー

Photorefractive Polymers with High Hole Mobility

堤直人\*、木梨憲司、坂井互

京都工芸繊維大学、材料化学系、京都市左京区松ヶ崎橋上町 1

Naoto Tsutsumi\*, Kenji Kinashi, Wataru Sakai

Faculty of Material Science and Engineering, Kyoto Institute of Technology, Matsugasaki, Sakyo, Japan

[\\*tsutsumi@kit.ac.jp](mailto:*tsutsumi@kit.ac.jp)

### 研究概要

フォトリフラクティブ (PR) ポリマーの分子設計、材料設計の基本ならびに PR 現象とその評価解析法を解説し、その後高移動度 PR ポリマーの分子設計、材料設計の具体を紹介する。最後に、高移動度 PR ポリマーの研究を通して、従来の評価解析法に光電流の測定を加えることにより、PR 応答時間の定量的な評価が可能となることを紹介する。

### Abstract

In this talk, we present the molecular and materials design of photorefractive (PR) polymers, PR phenomena and their analyses using conventional methods. Next, we also present the molecular and materials design of PR polymers with high hole mobility. Finally, we propose, through the study of the high hole mobility PR polymers, the quantitative estimation of PR response time using photoconductive measurements in addition to a conventional PR measurements.

### 1. はじめに

ご存知の通り 1948 年に Gabor により発明されたホログラム技術 ([1], 1971 年にノーベル物理学賞受賞) は、1960 年代のレーザーの発明も相まって、大きく進展してきた。材料面からは、感光性材料がその発展を支えてきた。多くの感光性材料は不可逆で感度の良い光化学反応を利用するものであり、得られるホログラムは静止画のホログラムとなる。さらにホログラムの作製も感光性材料を用いるために、暗視野下 (あるいは暗い赤色灯下) での作業が必要である。

近年では、デジタル技術の進展とともに、計算機合成ホログラム (CGH) と空間光変調器 (SLM) とを用いる電子ホログラフィでリライタブルなホログラムが実現されている。ただ、SLM は視野角が狭く、素子の大きさも 10 mm × 20 mm とこのままでは大面積には程遠い。8 K 並のピクセルピッチで 40 インチ程度の画面で視野角 30°を確保するためには、8 K の SLM を 10,000 (100 × 100) 必要とする。SLM の視野角の狭さと大きさの点を

克服する研究も行われている [2, 3]。

不可逆な光化学反応を利用する従来の感応性材料を、可逆的な光物理原理に基づくホログラム材料に置き換えれば、リライタブルなホログラムが実現できる。その一つが、フォトクロミック光異性化を利用するものである。本 HODIC 研究会でも 2002 年 [4]、2013 年 [5]、2015 年 [6]、2016 年 [7]、2016 年 [8] で紹介されている。もう一つが、フォトリフラクティブ (PR) 効果を利用するものである。これに関しても、本 HODIC 研究会で、1994 年 [9]、2004 年 [10]、2013 年 [5]、2017 年 [11] で報告されている。両者のデバイスは大面積であり、リアルタイムでリライタブルなホログラムを提供できる特徴を有している。この特徴を生かすことによって、現在は実現できていないが想像 (妄想) ではなく、いずれ実現するホログラム動画への新たな 1 歩となる。

PR 効果は、1966 年に Ashkin (2018 年ノーベル物理学賞受賞) らによって見出されたニオブ酸リチウム ( $\text{LiNbO}_3$ ) やタンタル酸リチウム ( $\text{LiTaO}_3$ ) などの電気光学結晶 (非線形光学結晶) 内の光照射による屈折率不均一性の発見に端を発している [12]。PR ポリマーの研究は 1991 年の Moerner (2014 年ノーベル化学賞受賞) らの研究が最初である [13]。PR ポリマーが備えるべき機能は、光導電性 (光キャリア形成と輸送)、非線形屈折率変化 (ポッケルス効果)、および空間電場形成である。従って、一般的な PR ポリマーでは、光導電性ポリマー、増感剤、非線形光学色素、および可塑剤を適切な比率で混合して所望の性能を有する PR ポリマーを設計する。PR 現象のメカニズムと連動させて、それぞれの要素材料の役割を説明する。2 光束干渉を用いる PR 現象は以下のように説明される。光導電性ポリマーと増感剤が光キャリア生成及び輸送を担い、非線形光学色素がポッケルス効果による非線形屈折率変調を担い、可塑剤は、材料のガラス転移点 ( $T_g$ ) を制御する目的で不可欠な要素となる。

本研究会では、まず、PR ポリマーの分子設計、材料設計の基本、PR 現象とその評価法、ならびに我々がここ数年来取り組んでいる高移動度ポリマーをベースとする PR ポリマーの研究の背景とその苦労話を紹介する。

## 2. PR ポリマーの分子設計と材料設計の基本 [14, 15]

光導電性ポリマーの代表格は、ポリ(*N*-ビニルカルバゾール) (PVK, PVCz) である。PVK ははじめとして数多くの有機光導電材料やポリマー類が、1960 年代以降レーザーあるいは LED プリンターやコピー機の感光ドラム材料として幅広く研究され、市場で使われてきている。1990 年代になると PR 材料の光キャリア生成及び輸送の担い手としての研究が加わり、2000 年以降では、有機太陽光発電材料や有機発光トランジスタなどの光キャリア生成及び輸送材料として研究がさらに大きく発展してきている。

PVK は手軽に入手でき誰しもがよく使い始める材料であるが、イオン化ポテンシャル

( $I_p$ ) は $-5.9$  eV、ドリフト移動度は $10^{-7}$ – $10^{-6}$   $\text{cm}^2 \text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ と低く、応答時間も数百ミリ秒～秒と動的なホログラム用途には不向きであるが、PR 効果や現象をまず体得する入門用の材料としてよく使われている。

それに対して、 $I_p$  が $-5.2$ – $5.7$  eV のトリフェニルアミン (TPA) を側鎖あるいは主鎖骨格に有するポリマー類が開発され、ビデオ速度に対応可能な PR 材料の設計が可能となっている。TPA を側鎖に有するポリ (4-ジフェニルアミノ) スチレン (PDAS) のドリフト移動度は $10^{-3}$ – $10^{-4}$   $\text{cm}^2 \text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ であり、TPA を主鎖骨格に有するポリ[ビス(4-フェニル)(2,4,6-トリメチルフェニル)アミン] (PTAA) のドリフト移動度は $10^{-2}$ – $10^{-3}$   $\text{cm}^2 \text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ である。TPA ポリマーは、有機合成及び高分子重合などの合成手段で、自分で合成するか専門業者に合成依頼をするのが通常のケースである。試薬で入手可能なものもあるが、例えば PTAA は 1 g 当たり 30 万円程度と試薬としてはかなり高価である。

上記の p 型光導電性ポリマーに対して、n 型増感剤が一般的に用いられる。PVK に対して 2,4,7-トリニトロフルオレノン (TNF) がその代表格であり、1960 年代後半から 1970 年代に詳しく研究されてきた。1980 年代以降になると、フラーレン ( $\text{C}_{60}$ ) あるいはその誘導体 6,6-フェニル  $\text{C}_{61}$  酷酸メチルエステル (PCBM) が、試薬として入手できるようになった。近年ではグラフェンがその仲間に入ってきている。

非線形光学 (NLO) 色素の主たる役割は、形成された空間電場によるポッケルス効果に基づく非線形屈折率変調格子形成である。従って、高  $T_g$  の PR ポリマーでより高い PR 性能を求めるには、高い 2 次の非線形光学性は有効に働く。しかしながら、低  $T_g$  の PR ポリマーでは、PR 特性は NLO 色素の配向による複屈折効果に支配されるようになる。それ故に、PR ポリマーでは、NLO 色素の電気光学効果 (ポッケルス効果) および複屈折に基づく分極の異方性が屈折率変調のドライブフォースとなる。

NLO 色素の性能指数 (FOM) は、複屈折に基づく分極の異方性 ( $\text{FOM}_{\text{BR}}$ ) と電気光学効果 ( $\text{FOM}_{\text{EO}}$ ) の和により評価する。FOM を次式に示す。

$$\text{FOM} = \text{FOM}_{\text{BR}} + \text{FOM}_{\text{EO}} = \frac{1}{M} \left( \frac{2\mu^2 \Delta\alpha}{kT} + 9\mu\beta \right) \quad (1)$$

ここで、 $M$ : 分子量、 $\mu$ : 基底状態での双極子モーメント、 $\Delta\alpha$ : 分極の異方性、 $\beta$ : 1 次の超分子分極率 (2 次の非線形分極率)、 $k$ : ボルツマン定数、 $T$ : 絶対温度である。

NLO 色素は、ある特定の軸方向に大きな双極子モーメントを有しており、そのために大きな光学異方性 (分極異方性) を有している。従って、 $\text{FOM}_{\text{BR}}$  は、 $\text{FOM}_{\text{EO}}$  より 10 倍以上大きな値を有する。その結果、PR 効果における非線形屈折率変調は NLO 色素の複屈折による分極の異方性が支配因子となる。アミノスチレン誘導体が一般的によく用いられる。

可塑剤は、PR ポリマーの  $T_g$  を制御する重要な役割を果たす。光導電性可塑剤である N-エチルカルバゾール (ECZ)、プロピオン酸カルバゾイルエチル (CzEPA)、TPA、(2,4,6-

トリメチルフェニル)ジフェニルアミン、および (4-(ジフェニルアミノ)フェニル)メタノールなどが用いられている。また、通常よく使われる可塑剤、フタル酸ベンジルブチル(BBP)、リン酸トリクレジル (TCP)、フタル酸ジフェニル (DPP)、フタル酸ジシクロヘキシル (DCHP) なども用いられている。

### 3. 2 光束干渉下の PR 現象発現のメカニズムおよび PR 特性の評価 [14, 15]

2 光束干渉により周期的な光の明暗パターンが生じる。周期のピッチは、照射光の波長と 2 光束間の挟み角で決まる。明部で生成したプラスーマイナスのイオン対は、プラス電荷 (ホール) とマイナス電荷 (電子) にイオン分離する。イオン分離したプラス電荷はホールキャリアとなって印加している定常電場に沿って暗部へ移動し、そこでトラップされる。対イオンのマイナス電荷 (電子) は移動できずに明部に留まる。その結果、プラス電荷とマイナス電荷の間に空間電場が形成される。形成された空間電場は NLO 色素のポッケルス効果 (電気光学効果) を介して周期的な非線形屈折率変調 ( $\Delta n$ ) を誘起させる。この際、光の明暗パターンと屈折率変調の間に位相差 ( $\phi$ ) が生じ、その位相差により PR 効果の特徴となる光利得 ( $\Gamma$ ) が、2 光波結合 (2BC) の非対称なエネルギー移動により引き起こされる。

縮退あるいは非縮退 4 光波混合 (DFWM あるいは NFWM) を用いたプローブ光の回折応答から、

$$\eta\% = \sin^2 \left[ \frac{\pi d \Delta n \cos(\theta_2 - \theta_1)}{\lambda \sqrt{\cos \theta_1 \cos \theta_2}} \right] \quad (2)$$

を用いて、回折効率 ( $\eta\%$ ) から  $\Delta n$  を評価する。ここで、 $d$ : 試料の厚み、 $\lambda$ : レーザーの波長、 $\theta_1$ 、 $\theta_2$ : 試料法線と 2 本の書き込みビームの間のそれぞれの内部角である。光利得 ( $\Gamma$ ) は (3) 式で位相差 ( $\phi$ ) と  $\Delta n$  を用いて評価する。

$$\Gamma = \frac{4\pi}{\lambda} (\hat{e}_1 \cdot \hat{e}_2^*) \Delta n \sin \phi \quad (3)$$

ここで、 $\hat{e}_1$ 、 $\hat{e}_2$ : 2 本の偏光書き込みビームの単位ベクトルである。位相差 0 で光利得なしとなる。

Kukhtarev model [16] で、位相差により生じるトラップ制限空間電場  $E_q$  は、

$$\tan \phi = \frac{E_D}{E_0} \left( 1 + \frac{E_D}{E_q} + \frac{E_0^2}{E_D E_q} \right) \quad (4)$$

となる。ここで、 $E_D = K_G kT/e$ : 拡散電場、 $k$ : ボルツマン定数、 $T$ : 絶対温度であり、 $E_0$ : 外部電場の格子ベクトル方向成分である。

トラップ密度を  $N_T$  とトラップ制限空間電場  $E_q$  は、

$$E_q = \frac{e N_T}{\epsilon_r \epsilon_0 K_G} \quad (5)$$

の関係がある。ここで、 $K_G$ : 格子ベクトル、( $K_G = 2\pi/\Delta$ 、 $\Delta$ : 格子間隔)、 $\epsilon_r$ : 比誘電率、 $\epsilon_0$ : 真空誘電率、 $e$ : 電荷素量である。

(2)、(3)、(4)、および(5)式から、定常状態での回折効率、光利得、空間電場、トラップ密度など PR 効果の説明に必要なパラメータを定量化できる。

さらに、回折応答の時間変化より、非線形屈折率変調格子の形成及び消滅過程が定量化でき、2 光波強度の時間変化より、非対称なエネルギー移動の動的な形成及び消滅過程も定量化できる。

回折やエネルギー移動の応答時間の相違は実験的に評価できるが、先の材料設計で述べた移動度の違いによる応答性の相違の議論は、これらの解析だけでは解明できない。まず、高移動度 PR ポリマーの分子設計、材料設計を次章で説明する。

#### 4. 高移動度 PR ポリマーの分子設計、材料設計

ビデオ速度の 100 倍程度の応答速度 100 $\mu$  秒オーダーを研究の目標として、高ドリフト移動度 PTAA ベースの研究を 2013 年からスタートさせた [17]。PTAA ベース PR ポリマーでは、ミリ秒オーダーの非常に速い応答時間を有する PR デバイスを作製できるものの、まず遭遇したのは 20 V  $\mu\text{m}^{-1}$  程度の低電場での絶縁破壊のし易さであった。実は、PTAA は高ドリフト移動度のおかげで、暗電流も非常に大きくさらに光照射時の光電流も数百マイクロ～ミリアンペアとなり、絶縁体の域を出て半導体の領域へ入っていた。PTAA は、そもそも有機電界効果トランジスタなどの有機半導体材料として開発されてきたポリマーであり、暗電流も非常に大きな材料である。従って、最初に取り組んだのは暗電流の抑制であった。電極として用いる ITO のフェルミレベル－4.8 eV に対して、PTAA のイオン化ポテンシャルは－5.2 eV と接近しており、容易に暗電流が流れる条件であった。そこで、ITO 電極上に自己組織化単分子膜 (SAM 膜) を形成させた ITO－SAM のフェルミ準位を－4.3 eV に引き上げて暗電流抑制に成功した [17]。

従来は、PR ポリマーは絶縁体が基本で、PVK ベースの PR ポリマーでは、PVK のドリフト移動度の低さのために暗電流もナノアンペア程度、光照射時の光電流もナノ～サブマイクロアンペア程度で、暗電流値や光電流値を気に掛ける必要はなかった。事実、ほとんどの研究において暗電流や光電流の測定及び記述すら研究論文や研究発表に出てくるとはなかった。しかしながら、PTAA ベースの PR 性の研究では、暗電流と光電流の制御が、PR 性能の向上に不可欠であることが判明してきた。

ITO－SAM による暗電流の抑制に成功し、暗電流による絶縁破壊は克服した。ご存知の通り、高速応答を狙って光強度や電場強度を上げれば、光電流は指数関数的に増大する。実は、次に遭遇したのは、この増大する光電流による絶縁破壊である。光電流を抑制する分子設計、材料設計が必要となってきた。PTAA ベース PR ポリマーでは、増感剤に PCBM

を用いており、PTAA-PCBM で効率よくホールと電子の光キャリア生成が行われており、両者が大きな光電流の担い手となっている。従って、この光電流を抑制する分子設計は PTAA-PCBM へ流れ込む光励起エネルギーを抑制する第 2 の電子トラップを入れることであり、その探索に掛った。その候補が、Alq<sub>3</sub>、OXD-7、BPhen である [18]。いずれも電子輸送性能を有している。Alq<sub>3</sub> と BPhen は PTAA と電荷移動錯体 (CT 錯体) を形成して、効率よい光励起エネルギーの捕獲効果を発揮し、光電流が抑制され、速い応答性に繋がった。表 1 に PTAA ベース PR ポリマーの PR 特性にまとめる。PVK の値も参照に掲載する。PTAA ベース PR ポリマーの回折効率は 60–80 %、光利得 120–160cm<sup>-1</sup> と PVK ベース PR ポリマーの PR 性とほとんど遜色ない。大きな違いは、応答速度である。PVK が数百ミリ秒に対して、PTAA ではミリ秒からサブミリ秒と 3 桁に亘る桁違いの応答性の差である。この桁違いの応答速度は、PTAA の高移動度による桁違いの大きな光電流に起因している。そこで、光電流からのアプローチを次章で考察する。

表 1. PTAA ベース PR ポリマーの PR 特性および光電流とそれに関連する物理量、PVK の値も参考に示す

	$\alpha$ (cm <sup>-1</sup> )	$\Delta n$	$\Gamma$ (cm <sup>-1</sup> )	$\eta$ (%)	$\tau$ ( $\mu$ s)	$\sigma_{ph}$ (nScm <sup>-1</sup> )	$\tau_G$ ( $\mu$ s)	$T_i$ (10 <sup>14</sup> cm <sup>-3</sup> )	$E_q$ (V $\mu$ m <sup>-1</sup> )
Alq <sub>3</sub>	404	0.00349	136.7	83.0	860	5.25	59	7.00	1.64
OXD-7	327	0.00278	127.3	62.6	997	6.85	45	5.65	1.32
BPhen	462	0.00313	156.4	73.3	387	4.03	77	8.00	1.87

---

	$\alpha$ (cm <sup>-1</sup> )	$\Delta n$	$\Gamma$ (cm <sup>-1</sup> )	$\eta$ (%)	$\tau$ (ms)	$\sigma_{ph}$ (nScm <sup>-1</sup> )	$\tau_G$ (ms)	$T_i$ (10 <sup>16</sup> cm <sup>-3</sup> )	$E_q$ (V $\mu$ m <sup>-1</sup> )
PVK	276	0.00159	211	91	230	0.0229	13.5	1.60	37.5

## 5. PR 応答性と光電流 [18, 19, 20]

高移動度 PR ポリマーの研究を行うまでは、光電流には注目してこなかったが、なぜ、光電流に着目したか。上記の通り、光電流が PR 応答性に関わってくることが判明したので、光電流に関わらざるを得なくなったのが、ある意味回答である。

ここで、単位面積当たりの光電流 ( $J_{ph}(E)$ ) を基にして PR 応答性を定量化する。内部光電流効率 ( $\phi_{ph}(E)$ ) と  $J_{ph}(E)$  は、

$$\phi_{ph}(E) = \frac{J_{ph}(E)h\nu}{eI_0\alpha L} = \frac{\sigma_{ph}(E)E_0h\nu}{eI_0\alpha L} \quad (6)$$

の関係がある。ここで、 $h$ : プランク定数、 $\nu$ : 励起レーザーの振動数、 $e$ : 電荷素量、 $I_0$ : 単位面積当たりのレーザー光強度、 $\alpha$ : レーザー波長でのモル吸光係数、 $L$ : 光路長、 $\sigma_{ph}(E)$ : 光電気伝導度 (光導電率)、 $E_0$ : 印加外部電場である。

内部光電流効率 ( $\phi_{ph}(E)$ ) は、光キャリア生成効率  $\eta_p$  と初期トラップ密度  $T_i$  と関係して



いる。

$$\varphi_{\text{ph}}(E) = G\eta_p = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 E_0 \eta_p}{eLT_i} \quad (7)$$

$\eta_p$  を別の方法で測定すれば、 $T_i$  は一義的に求まる。あるいは、 $T_i$  を合理的に見積もれば、 $\eta_p$  を評価できる。 $T_i = N_T$  であるので、(5)式よりトラップ制限空間電場  $E_q$  を評価できる。

光生成した全てのキャリアがトラップされる条件で空間電場が形成される時間 ( $\tau_G$ ) は、

$$\tau_G = \frac{T_i}{\left(\frac{\alpha \eta_p I_0}{h\nu}\right)} \quad (8)$$

となり、(6)、(7)、(8)式より、

$$\tau_G = \frac{\epsilon_r \epsilon_0}{\sigma_{\text{ph}}(E)} \quad (9)$$

と定義される。全光電流が空間電場形成に関与するならば、応答時間は(9)式から予測できる。PTAA ベース PR ポリマーの光電流とそれに関連する物理量を表 1 にまとめる。参照に PVK の値も掲載する。表 1 より明らかなように、PTAA と PVK の光電流の差がそのまま  $\tau_G$  の差となり、PTAA と PVK との応答速度の差が光電流の差によって定性的に説明できる。

次に、 $\tau_G$  と実測の  $\tau$  との差を考察する。実測の  $\tau$  は  $\tau_G$  の 20 分の 1 程度に遅い値である。これは何を意味しているのか。光生成した全キャリアがトラップされる条件で、 $\tau_G$  を算出した。実際に単位面積・単位時間あたりにトラップされるキャリアの数 ( $N_c$ ) が、実測の  $\tau$  を決めていると定義すると、うまく説明できる。式で書くと、

$$\tau = \frac{T_i}{N_c} \quad (10)$$

となる [18]。

## 6. PTAA と PVK との比較

PTAA と PVK での  $T_i$  と  $E_q$  の値を比べると、PTAA の  $T_i$  は  $10^{14}$  オーダー、PVK の  $T_i$  は  $10^{16} \sim 10^{17}$  オーダーであり、2 桁の相違がある。PTAA の  $E_q$  は  $1 \sim 2 \text{ V } \mu\text{m}^{-1}$ 、PVK の  $E_q$  は  $30 \sim 50 \text{ V } \mu\text{m}^{-1}$  であり、同様に 2 桁の相違がある。これは何を意味するのか。

PTAA では、桁違いの光電流のために、試料内で生じる実効の外部電場 ( $E_{\text{eff}}$ ) が非常に小さいことを予測させる、すなわち  $E_{\text{eff}} \ll E_0$  であり、そのために  $E_q$  も小さくなったと解釈するとつじつまが合う。(4)式で、 $E_0$  を  $E_{\text{eff}}$  で置き換えて、 $E_{\text{eff}} = E_q \tan \phi$  と計算でき、PTAA での非常に小さい実効外部電場を評価できる。

PVK では、光電流は小さく、 $E_{\text{eff}} \approx E_0$  となり、矛盾なく評価できる。

## 7. まとめ

高移動度 PR ポリマーの分子設計、材料設計では、従来からの増感剤に加えて第 2 の電子トラップ剤が必要であることを示し、PR 現象の高等時間の定量的な解明には、従来の評価解析法に加えて光電流、光導電率からの評価が有効であることを示した。

#### 謝辞

本研究を辛抱強く遂行してくれた野々村亜慧君、王宇君、辻村翔君、新開啓令君、桝村健人君の協力に感謝します。本研究は、平成 21 年度～27 年度 JST 研究成果展開事業 戦略的イノベーション創出推進プログラム【S - イノベ】の下で実施されました。

#### 文献

- [1] Gabor, D. A new microscopic principle. *Nature* **161**, 777–778 (1948).
- [2] Wakunami, K., Hsieh, P. -Y., Oi, R., Senoh, T., Sasaki, H., Ichihashi, Y., Okui, M., Huang, Y. - P., Yamamoto, K., Projection-type see-through holographic three-dimensional display. *Nature Comm.* **7**, 12954 (2016).
- [3] 涌波光喜, 投影型ホログラフィック 3D ディスプレイ. *HODIC Circular* **37**, 2 (2017).
- [4] 原田建治, 他, アゾベンゼン高分子薄膜を用いた表面レリーフ型ホログラム記録. *HODIC Circular*, **22**, 2 (2002).
- [5] 木梨憲司, 堤直人ら, 書き換え可能ホログラム材料. *HODIC Circular*, **33** (1), (2013).
- [6] 阿部二郎, 高速フォトクロミック材料を用いたリアルタイムホログラフィー. *HODIC Circular*, **35** (1), 6-10 (2015).
- [7] 平山竜士, 他, フォトクロミック材料と 2 制御光照射によるボリュームディスプレイ. *HODIC Circular* **36** (1), (2016).
- [8] 堤 直人, 他, 3D マルチカラーホログラフィックディスプレイデバイス. *HODIC Circular*, **36** (4), (2016).
- [9] 鄭和 翊, 他, フォトリフラクティブ効果の画像への応用. *HODIC Circular* **14** (2), (1994).
- [10] 堤 直人, 有機材料と体積ホログラム光記録材料. *HODIC Circular* **24** (4), (2004).
- [11] 荻野賢司, 有機フォトリフラクティブ材料の研究動向. *HODIC Circular* **37** (2), (2017).
- [12] Ashkin, A., Boyd, G. D., Dziedzic, J. M., Smith, R. G., Ballman, A. A., Levinstein, J. J., Nassau, K. Optically-induced refractive index inhomogeneities in LiNbO<sub>3</sub> and LiTaO<sub>3</sub>. *Appl. Phys. Lett.* **9**, 72–74 (1966).
- [13] Ducharme, S., Scott, J. C., Twieg, R. J., Moerner, W. E. Observation of the photorefractive effect in a polymer. *Phys. Rev. Lett.* **66**, 1846–1849 (1991).
- [14] Tsutsumi, N., Molecular design of photorefractive polymers. *Polymer Journal* **48**, 571–588 (2016).
- [15] Tsutsumi, N. Recent advances in photorefractive and photoactive polymers for holographic

- applications. *Polym. Int.* **66**, 167-174 (2017).
- [16] Kukhtarev, N. V., Markov, V. B., Odulov, S. G., Soskin, M. S., Vinetskii, V. L. Holographic storage in electrooptic crystals. I. Steady state. *Ferroelectrics* **22**, 949–960 (1979).
- [17] Kinashi, K., Shinkai, H., Sakai, W., Tsutsumi, N. Photorefractive device using self-assembled monolayer coated indium-tin-oxide electrodes. *Org. Electron.* **14**, 2987–2993 (2013).
- [18] Masumura K., Oka, T., Kinashi K., Sakai, W., Tsutsumi, N. Photorefractive dynamics in poly(triarylamine)-based polymer composite: an approach utilizing a second electron trap to reduce the photoconductivity. *Optical Materials Express*, **8** (2), 401 (2018).
- [19] Masumura, K. Nakanishi, I., Khuat, K. V. T., Kinashi, K., S. Wataru, Tsutsumi, N., Optimal composition of the poly(triarylamine)-based polymer composite to maximize photorefractive performance. *Scientific Reports* **9**, 739 (2019).
- [20] Tsutsumi N., Kinashi, K. “Photorefractive response: an approach from the photoconductive properties,” in Photorefractive Organic Materials and Applications, Pierre-Alexandre Blanche, ed. (Springer 2016), Chap. 3.

選択堆積法によるソーダライムガラス上への SiO<sub>2</sub> ホログラム形成Fabrication of SiO<sub>2</sub> hologram on soda-lime silicate glass using selective deposition福井 彩<sup>1</sup>, 酒井 大輔<sup>1</sup>, 原田 建治<sup>1</sup>, 西井 準治<sup>2</sup>Aya FUKUI<sup>1</sup>, Daisuke SAKAI<sup>1</sup>, Kenji HARADA<sup>1</sup>, and Junji NISHII<sup>2</sup><sup>1</sup>北見工業大学工学部地域未来デザイン工学科, 090-8507 北海道北見市公園町 165 番地<sup>2</sup>北海道大学電子科学研究所, 001-0020 北海道札幌市北区北 20 条西 10 丁目<sup>1</sup>Faculty of Engineering, School of Regional Innovation and Social Design Engineering,  
Kitami Institute of Technology<sup>2</sup>Research Institute for Electronic Science, Hokkaido University,

## Abstract

Surface relief hologram was fabricated on soda-lime silicate glass via selective SiO<sub>2</sub> deposition by corona discharge treatment. The deposition selectivity depended on the ion conductivity distribution in the glass. This electrical process is applicable to conventional optical recording techniques for thin hologram with continuous wave laser.

## 1. はじめに

電界処理を組み合わせたホログラム技術は、サーモプラスチックを用いたホログラムが知られている。光導電性材料へコロナ帯電しながらホログラム記録を行い、熱的に材料を軟化させることで、干渉縞のパターンに応じた表面レリーフ型のホログラムが記録できる。また、コロナ帯電による表面レリーフ型ホログラムの回折効率増強についても報告されている[1]。アゾポリマーに光記録された表面レリーフ型ホログラムは、コロナ放電によりそのレリーフ深さを増幅することができ、その回折効率を電氣的に増強することができる。

私たちの研究室では、コロナ放電を用いてホログラムをガラスへと転写記録する方法について研究してきた。一般的なホログラム記録材料と比べ、ガラスは透過率が高く、感光性を持たないため、従来のホログラム記録技術を使用することは難しかった。そのため、フェムト秒レーザーを使用した記録方法などがこれまでに報告されてきた[2]。私たちが研究している方法では、一般的な CW(continuous wave)レーザーにより光学的に記録できるホログラムを、コロナ放電処理を用いることで、感光性材料からソーダライムガラスへと転写記録することができる。次節にて詳述するが、本方法によりガラスに記録されるホログラムは、そのままでは回折効率が低く直接視認することは難しいが、様々な後処理により目に見える形へ可視化できることが分かっている[3]。近年の研究では、ソーダライムガラス

へ転写記録したホログラムへ気層堆積することで、 $\text{SiO}_2$  で構成される表面レリーフ型ホログラムを形成できることを報告した[4]。本稿では、この堆積処理によるホログラム形成法について紹介し、更に、コロナ放電を用いない電界処理によるホログラム増強に関しても併せて述べる。

## 2. $\text{SiO}_2$ の選択堆積コロナ放電による表面レリーフホログラムの形成

本節では、コロナ放電処理を用いたガラスへのホログラム転写記録法とその後の選択堆積処理によりガラス上へと  $\text{SiO}_2$  で構成される表面レリーフホログラムを形成する方法について述べる[4]。

### 2.1 コロナ放電処理を用いたホログラムの転写記録法と表面構造形成法

イメージホログラムの記録実験を一例とし、コロナ放電を用いたガラスへのホログラム転写記録法と表面構造化方法について、実験の手順を描いた図 1 を用いて解説する。本方法では、可視波長域のレーザを記録光源として利用するため、テンプレートとして表面レリーフ型ホログラムを記録可能な感光性材料を用いる。照射光の強度や位相情報に応じて表面レリーフグレーティングを形成可能なアゾポリマーは、このテンプレートに適しており、以下の実験では側鎖型のアゾポリマー(Polyorange tom-1, Trichemical Lab.)を用いた。ホログラムを記録転写するためのガラスとして、本研究では市販のスライドガラス(S-7213, Matsunami Glass Corp.)を用いた。

まずガラスへ記録するためのホログラムをテンプレート上に記録した。アゾポリマーをガラス上に膜厚 400 nm 程度となるようスピコートした。吸収波長となる波長 514 nm の  $\text{Ar}^+$  レーザを用い、表面レリーフ型ホログラムのイメージホログラムを記録した(図 1(a))。次に、この表面レリーフ型ホログラムをガラスへと転写記録するため、コロナ放電処理を行った(図 1(b))。コロナ放電は針やワイヤーのような鋭角な電極と平板電極などの対向電極の間に高電圧を印加した際に生じる部分破壊放電現象である。本実験では、針電極を用い、10 mm 下にホログラムを記録したサンプルを固定した。136°C に加熱した大気雰囲気内で +6 kV の直流電圧を印加することで 2 時間コロナ放電処理を行い、アゾポリマー上の

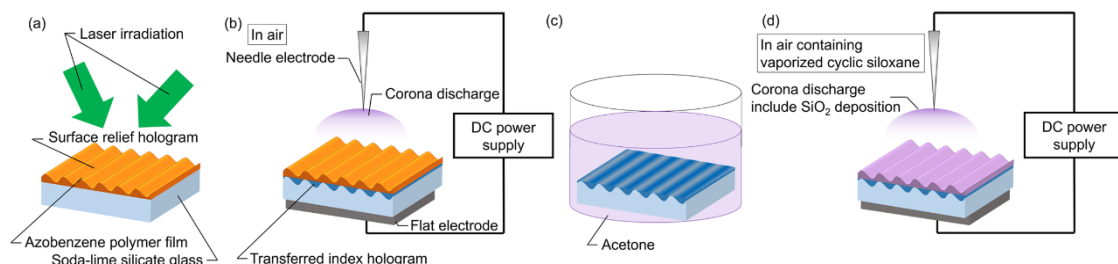


図 1：実験手順の模式図([4]より)

表面レリーフ型ホログラムをガラス内へと転写記録した。その後、ガラス上のアゾポリマーを除去するため、アセトンを用いた超音波洗浄を行った(図 1(c))。最後に、ガラス上へと  $\text{SiO}_2$  による表面レリーフ型ホログラムを形成するため、選択堆積コロナ放電処理を実施した。使用した装置はホログラムを記録転写したときと同様の装置だが、雰囲気は  $200^\circ\text{C}$  に加熱し、環状シロキサンを揮発させた蒸気を含めた中で  $+6\text{ kV}$  の直流電圧を印加し、コロナ放電処理を行った。

## 2.2 各実験プロセスにおけるホログラム

2.1 節にて説明した実験手順毎のホログラムについて、図 2 に示す原子間力顕微鏡(AFM)像を用いながら説明する。図 2(a)は、アゾポリマー上に光記録された表面レリーフ型ホログラムの表面形状を示す。今回記録したのは周期  $2\text{ }\mu\text{m}$  程度のイメージホログラムであり、回折効率は  $20\%$  だった。このホログラムへとコロナ放電処理を行った後の表面形状を図 2(b) に示す。アゾポリマー上の表面レリーフはその高さが増強されており、回折効率は  $27\%$  まで高まっていた。このようなレリーフ高さの増強は、コロナ放電により表面レリーフの谷の部分に電荷が集中しやすく、クーロン力により深さが強調されるためと考えられている[1]。本研究では、このコロナ放電処理を通して、アゾポリマー上のホログラムがガラス内に転写される。アゾポリマー除去後のガラス表面は、図 2(c) のようになっていた。ガラス表面には、ホログラムと同周期の表面形状が形成されており、回折効率は  $0.06\%$  だった。

本処理によりガラスに転写記録されるホログラムは、この高さ数  $\text{nm}$  の表面形状が本質ではなく、ガラス内の化学組成変化が本質であることがわかっている。図 3 にコロナ放電処理によりホログラムがガラスへと転写記録される原理を示す。陽極コロナにより生じる  $\text{H}^+$  などの電荷がグラウンド側のホログラムへ向けて飛来する。この時、ホログラムが表面レリーフ構造として存在しており、電荷を防ぐ役割を果たす。レリーフ構造の谷の部分程  $\text{H}^+$  はガラス内へ届きやすく、ガラス内では移動度の高い  $\text{Na}^+$  のようなアルカリ金属イオンと置換される。結果として、ガラス内ではホログラムと同じ周期でアルカリ金属イオンがカソード側へ向けて移動し、周期的なアルカリ欠乏領域が形成される。アルカリ金属イオンが欠乏した領域では屈折率がわずかに低下する。つまり、ガラス内では、屈折率変調

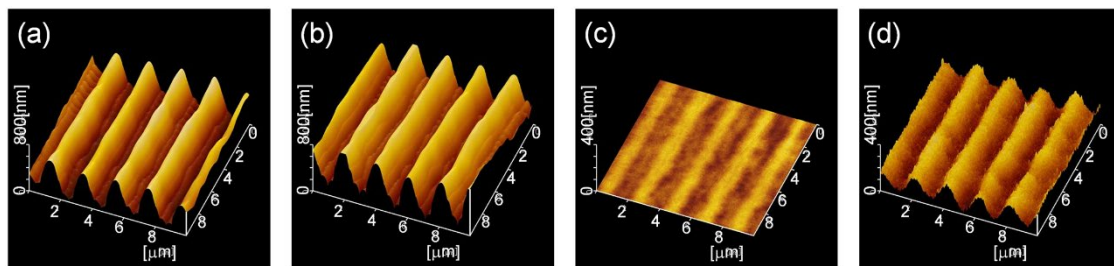


図 2：各実験手順におけるホログラムの表面形状([4]より)

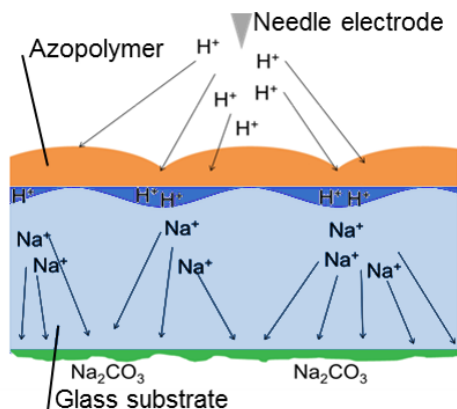


図3: ホログラムの転写記録原理

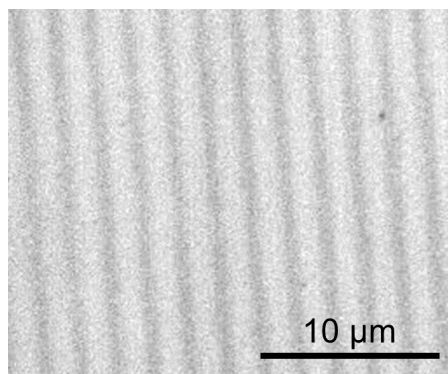


図4: レーザ顕微鏡による反射像

ホログラムとして転写記録されている。この様子はレーザ顕微鏡を用いた反射率の分布として観察することが出来る(図4)。

このガラス上へとコロナ放電選択堆積処理を行った後の表面の形状を図2(d)に示す。ガラスの表面には、これまでに転写記録してきたホログラムと同周期の表面レリーフ型ホログラムが形成されていた。50分間の選択堆積処理で、回折効率は2.3%となり、図5に示すように、ガラス上でホログラムの回折光を確認することができた。ガラスの上に形成された表面構造はSiO<sub>2</sub>で構成されていることが分かっており、コロナ放電選択堆積処理時間に応じて徐々に形成されていく。図6に本実験条件下での選択堆積処理と回折効率の関係を示す。50分間の選択堆積処理により、回折効率は40倍ほどまで増加した後、低下していく様子が見られた。

### 2.3 選択堆積コロナ放電により表面レリーフホログラムが形成される原理

ソーダ石灰ガラス内では、移動度の高いアルカリ金属イオンが電流キャリアの役割を有する。一方で、コロナ放電によりアルカリ金属イオンが欠乏した領域では、イオン伝導度が大きく低下する。四端子交流インピーダンス測定によりコロナ放電処理前後のイオン

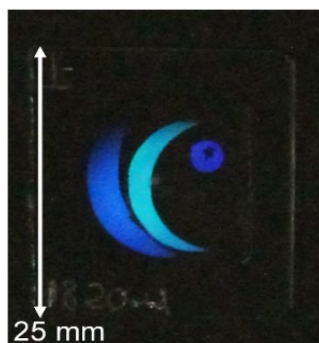


図5: ガラス上に形成されたホログラムの回折光([4]より)

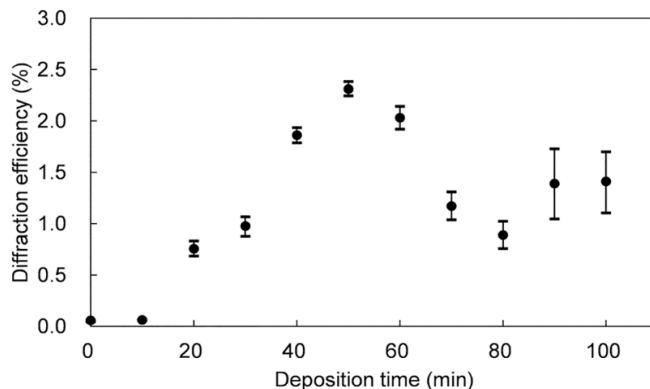


図6: 堆積処理時間と回折効率の関係([4]より)



伝導度を計測した結果を図 7 に示す。ガラス内に存在する  $\text{Na}^+$  のイオン伝導度に比べ、コロナ放電により注入された  $\text{H}^+$  の伝導度は 3 桁低かった。つまり、コロナ放電によりホログラムが転写記録されたガラスには伝導度の大きく異なる周期構造が形成されている。

したがって、コロナ放電選択堆積処理時、環状シロキサン蒸気はコロナプラズマにより分解され、荷電した  $\text{SiO}_2$  微粒子となり、グラウンド側となるガラス上へ飛来する。この時、ガラス上の伝導度がより高い領域、即ち  $\text{Na}^+$  の多く存在している領域へ向けて選択的に堆積し、表面構造を形成していく。結果として、ホログラムと同周期のレリーフ構造がガラス上に形成され、回折効率を大きく高めることができる。

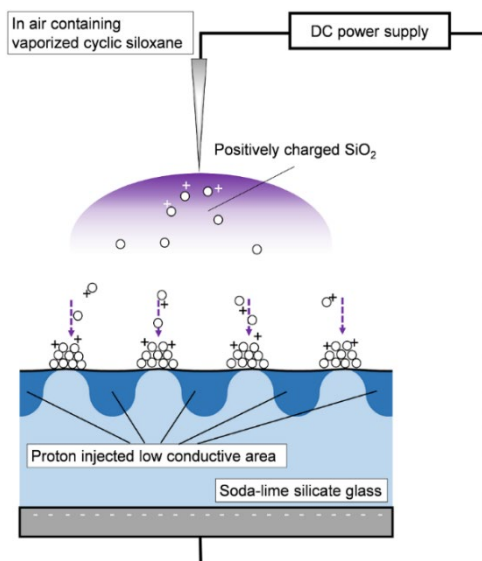
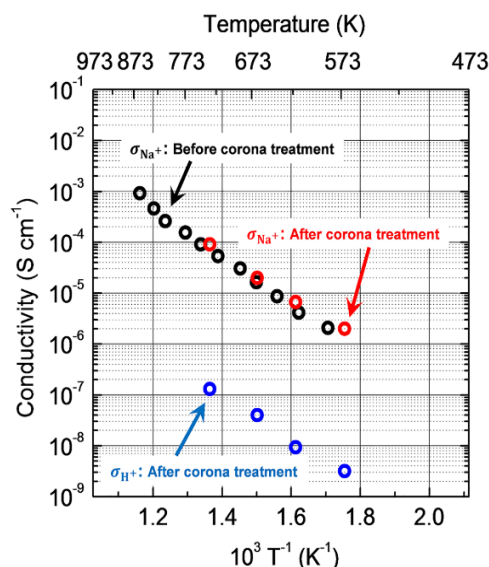


図 7: コロナ処理前後の伝導度([4]より)

図 8: コロナ放電選択堆積の原理([4]より)

### 3. コロナ放電を用いない電界処理によるホログラムの増強

ここまでは、コロナ放電処理を用いた表面レリーフホログラムへの研究について報告して来た。回折効率の増強やホログラムの転写、形成などユニークな特徴を有する一方で、コロナ放電は電界強度に分布が存在し、特に電極直下では長時間の処理でポリマーがダメージを受けてしまうことも分かっている。近年、コロナ放電を用いない直流電界により、ホログラムを増強できることが分かったため、本節にて紹介する。

本実験では、2.1 節前半で述べた方法と同様にガラス上にアゾポリマーをスピコートし、二光束干渉露光によりアゾポリマー上に表面レリーフグレーティングをホログラム記録した。図 9 に示す模式図のように、100℃に加熱したヒーターの上にサンプルを設置し、その上に機械加工した金属電極を直接乗せ、+2 kV の直流電圧を 30 分間印加した。



図 10 に、電界処理前後のホログラムを示す。図 10(a)に示すように、電解処理前には回折効率の低い部分と高い部分が存在していたが、電界処理後には電極に接していた形状に合わせて全体的に回折効率が增強されていた。一方で、電極に接していない領域では加熱により表面レリーフが消去され、結果として、電極形状に応じたホログラムを作製することができた(図 10(b))。本方法を用いることで、コロナ放電処理時に生じていたテンプレートへのダメージを軽減できる可能性が期待される。

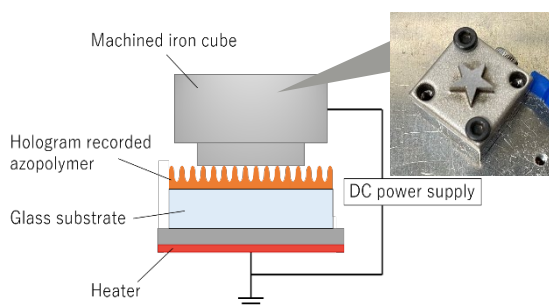


図 9：加工した金属電極を用いた電界処理の模式図

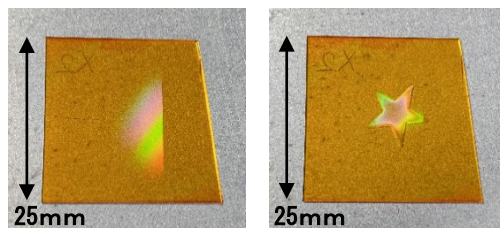


図 10：電界処理前後のホログラム

#### 4. おわりに

電界処理を用いることで、一般的な連続発振のレーザにより記録できるホログラムを透明なガラスへと転写記録する方法や、ガラス上へと表面レリーフホログラムを形成する方法について紹介してきた。ガラスに記録されたホログラムは、一般的なポリマー材料で問題となる紫外線による劣化や湿度による膨潤、熱による変形等の耐環境性において非常に優れており、超長期の情報記録や光学機能維持が期待できる。本方法はフェムト秒レーザやドライエッチングなどの高価な機器を必要とせず、ガラスへのホログラム記録が可能であるため、今後大面積のガラスへの処理を安価に実現できる可能性がある。

#### 謝辞

本研究の一部は、JSPS 科研費 JP 18K04765 および、「物質・デバイス領域共同研究拠点」の共同研究プログラムの助成を受けたものです。

#### 参考文献

- [1] K. Munakata, K. Harada, H. Anji, M. Itoh, and T. Yatagai, *Optics Letters*, **26** (2001) 4.
- [2] K. Kawamura, T. Ogawa, N. Sarukura, and M. Hirano, *Applied Physics B*, **71** (2000) 119.
- [3] 酒井大輔, 原田建治, 原悠一郎, 池田弘, 山本清, 他, *HODIC Circular*, **34** (2013) 6.
- [4] D. Sakai, K. Harada, H. Shibata, K. Kawaguchi, and J. Nishii, *PLoS ONE*, **14** (2019) e0210340.

## Bayfol® HX フォトポリマーフィルムのご紹介

堀口 治男†

†コベストロジャパン株式会社 スペシャルティフィルム事業部

〒105-0011 東京都港区芝公園 1-7-6 KDX 浜松町プレイス 7F

†E-mail: haruo.horiguchi@covestro.com

あらまし：コベストロでは、前身のバイエルマテリアルサイエンス時代の 2010 年より体積型ホログラムを実現するフォトポリマーフィルム Bayfol® HX を市場展開してきた。この Bayfol® HX はブランド保護やエンターテインメント向けの 3D イメージの描画をはじめ、省スペースながら高効率な光の回折を可能にする体積ホログラフィック光学素子 (vHOE) としてヘッドアップディスプレイ (HUD) やヘッドマウントディスプレイ (HMD) など幅広い分野に応用されている。本稿ではコベストロ製フォトポリマーフィルムの基本的な特性や取扱方法、応用事例を紹介する。

## Introduction of Bayfol® HX Photopolymer Film

Haruo Horiguchi†

†Covestro Japan Ltd. Specialty Film Business Unit

KDX Hamamatsucho Place 7F, 1-7-6, Shibakoen, Minato-ku, Tokyo, 105-0011, Japan

†E-mail: haruo.horiguchi@covestro.com

Abstract : Covestro has been developing market for Bayfol® HX, photopolymer film for volume hologram, since 2010. This sophisticated plastic film is not only used in 3D image recording for brand protection and entertainment, but it is also applied to volume holographic optical elements (vHOE) which enable highly efficient diffraction while saving space in head-up displays (HUD) and head-mounted displays (HMD). This paper introduces the basic characteristics, operations and application examples of Covestro photopolymer films.

### 1. まえがき

フォトニクスは、現代のマーケットにおいて最も重要な技術の 1 つであり、今後の技術革新を推し進める原動力となる領域である。フォトニクスは世の中のいたるところで活用され、家庭用電化製品 (DVD プレーヤー、TV コントローラー)、通信 (インターネット)、ヘルスケア (眼科手術、医療機器)、製造 (レーザー切断および機械加工)、防衛及びセ

キュリティ（赤外線カメラ、リモートセンシング）、エンターテインメント（レーザーショー）などその応用事例は多岐にわたる。

従来これらの技術は、レンズやプリズムなどの光学素子を複合した古典的な屈折光学系で構成されている。それらの光学素子は、特定の厚さを有し、さらに必要な機能が増えるごとに光学素子が増えていくため、高度に統合された光学系を作成するには非常に大きなスペースが必要となってしまう。

一方、体積ホログラフィック光学素子（vHOE）は、1枚の薄いフィルムに複雑な光学機能を組み合わせることが可能である。したがって、vHOEを用いた光学系は設計自由度が格段に向上する。さらに、薄くて透明ないわゆるシースルーアプリケーションの要件を満たすこともでき、より高度なヘッドマウントディスプレイ(HMD)やヘッドアップディスプレイ(HUD)を実現可能とする。

コベストロでは、このような vHOE の工業スケールでの量産を実現する記録材料として、Bayfol® HX フォトポリマーフィルムを開発し、2010 年より市場展開している。

本稿では、コベストロ製ホログラムフォトポリマーフィルムの構成や操作方法、応用事例などを紹介する。

## 2. Bayfol® HX の構成

### 2. 1. フォトポリマーの記録原理

フォトポリマーを用いた体積型ホログラムは、コヒーレントな光の干渉によって生じる干渉縞を屈折率の変化として、厚さ方向に 3 次元的に記録することにより作成される。屈折率変化の最大値は  $\Delta n_1$  と表され、フォトポリマーの膜厚  $d$  を掛けたダイナミックレンジ ( $\Delta n_1 \cdot d$ ) は、記録可能な明るさの範囲を示すホログラム設計における重要なパラメータとなる。

### 2. 2. Bayfol® HX フィルムの構成

コベストロ製 Bayfol® HX は図 1 に示すような構成となっており、熱可塑性ベースフィルム上にフォトポリマーが積層され、フォトポリマーはカバーフィルムで保護されている。可視光域の全ての波長で記録可能で、収縮が比較的少なく、湿式工程や加熱工程などの後処理が不要で、UV 光（及び可視光）による簡易なブリーチング処理工程のみでホログラムを完成できることなどが特徴である。また、アプリケーションや求められる機能などのご要望に応じて、各層カスタマイズが可能となっている。

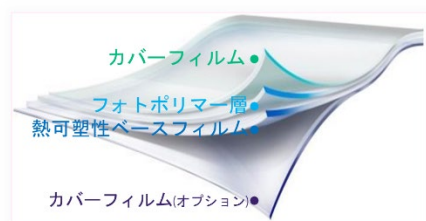


図 1. Bayfol® HX の積層構造

### 3. Bayfol® HX の取扱方法

#### 3. 1. 作業・保管環境

作業環境としては、クリーン且つ、未露光の Bayfol® HX において比較的感度の低い黄色の LED 照明下を推奨している。黄色の LED は可能な限り、狭帯域のものが好ましい。

また、フォトポリマーフィルムを使用しない際には、保管温度は 15° C 以上 25° C 以下の環境下で、遮光パック内で保管する。記録後のフォトポリマーは非常に安定している一方で、未記録のフォトポリマーは、光、湿度、熱、および異物などから避ける必要がある。

#### 3. 2. ラミネーション及び記録

ラミネートする基材は、表面洗浄用の添加剤の入っていないエタノールと光学部材用のティッシュで表面をクリーニングし、残留溶剤を除去したものを使用する。フォトポリマーフィルムのラミネーションは、ゴムローラーを用いることで気泡の混入を低減できる。

Bayfol® HX200(標準品)では、赤色>緑色>青色の順番で感度が高くなる(図 2)。使用するレーザーは、赤色で 200  $\mu$ W/cm<sup>2</sup> 以上、青色で 1mW/cm<sup>2</sup> 以上を推奨しており、それぞれの閾値エネルギーは 1mJ/cm<sup>2</sup>、3mJ/cm<sup>2</sup> となっている。

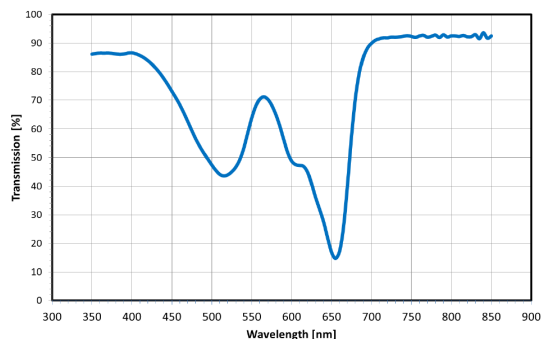


図 2. 露光前 Bayfol HX200 の透過率

### 3. 3. ブリーチング

ブリーチングは、UV 及び可視光を用いて、総エネルギーとして  $5\text{J}/\text{cm}^2$  程度照射を行う。例えば、水銀ハロゲンランプなどを使用することができるが、 $350\text{nm}$  以下の短波長の光を長時間照射すると黄変してしまうリスクがあるため、過剰な照射には注意する必要がある。また、図3に示すように UV-LED と可視光 LED を併用することで、ブリーチング後の透過率が短波長領域まで高く、より透明な vHOE が得られることが報告されている [1]。

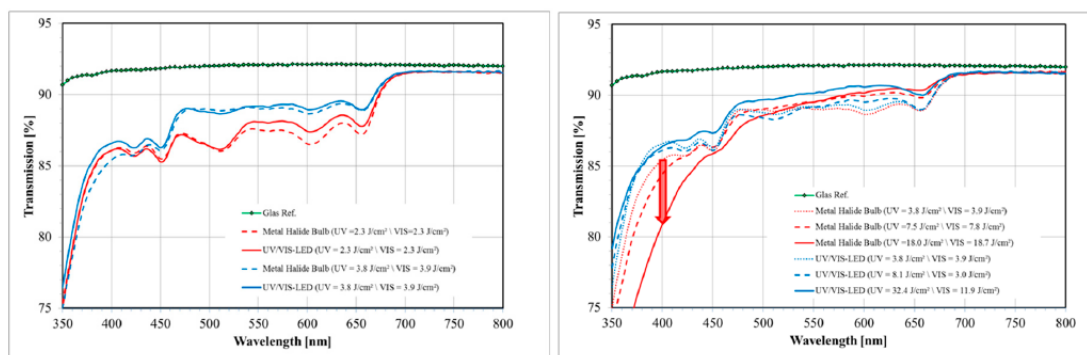


図3. 水銀ハロゲンランプ及び UV/Vis-LED を用いたブリーチング後の Bayfol® HX200 の各透過率

### 4. 開発動向

コベストロでは、フォトポリマー自体の機能向上だけではなく、vHOE 量産化に向けた技術開発や最終製品への vHOE 搭載に向けた技術開発を進めている。

vHOE を商業化していくためには安定的かつ高速にレコーディングを行っていくことが重要である。図4に保護フィルムの剥離からマスタープログラムを用いた複製記録、ブリーチング、フィルムの再巻取りまでをワンストップで行う Roll-to-Roll(R2R)のレコーディングシステムを示す [2]。

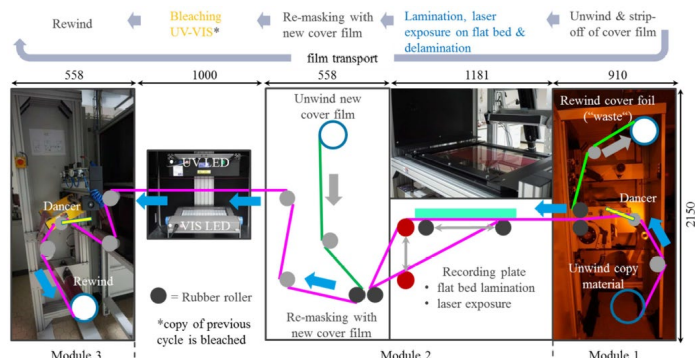


図4. R2R レコーディングシステム

さらに、製品への搭載に向けた加工技術として透明光学粘着剤(OCA)やフィルムインサート成形(FIM)により、vHOE をプラスチック部材へ統合した例も報告している [3]。

## 5. 応用事例

Bayfol® HX はセキュリティ分野やエンターテインメント向けの 3D イメージのレコーディングだけではなく、vHOE として多様な分野に応用されている。コンシューマーエレクトロニクスでは、HMD や 3D スクリーンなどで利用されている。また、自動車分野では HUD、自動車用リアランプなどへの展開に向けた検討が進んでいる。

vHOE を自動車のウインドシールドに封入し、HUD のスクリーンとして利用した場合、高い回折効率により、プロジェクタを放熱限界まで高出力にせず表示サイズを大型化できる。また、レンズ機能を付与できるため、光路長と表示サイズのトレードオフが緩和され、プロジェクタ部分を省スペース化も可能となる。さらに、今後 AR-HUD の実用化も期待されている。

## 6. 結び

本稿では、Bayfol® HX の構成及び取扱方法を示し、ワンストップでのホログラム複製を実現する R2R レコーディングシステムなど開発動向を紹介した。また、応用事例として、vHOE を HUD へ展開した場合のメリットを示した。今後もフォトポリマーの機能向上や製品搭載に向けた技術開発を継続し、幅広い領域への展開を目指していく。

## 文献

- [1]Friedrich-Karl Bruder, Thomas Fäcke and Thomas Rölle; ‘The Chemistry and Physics of Bayfol® HX Film Holographic Photopolymer’, Polymers 2017, **9**, 472
- [2]Friedrich-Karl Bruder\*, Thomas Fäcke, Fabian Grote, Rainer Hagen, Dennis Hönel, Eberhard Koch Christian Rewitz, Günther Walze, Brita Wewer, ‘Performance Optimization in Mass Production of Volume HolographicOptical Elements (vHOEs) using Bayfol® HX Photopolymer Film’, Proc. SPIE 10127, Practical Holography XXXI: Materials and Applications, 101270A (6 April 2017)
- [3] Friedrich-Karl Bruder, Sven Hansen, Tim Kleinschmidt, Roland Künzel, Christel Manecke, Enrico Orselli, Christian Rewitz, Thomas Rölle, ‘Integration of volume holographic optical elements (vHOE) made with Bayfol® HX into plastic optical parts’, Proc. SPIE 10944, Practical Holography XXXIII: Displays, Materials, and Applications, 1094402 (1 March 2019)

## 令和2年第4回 ホログラフィック・ディスプレイ研究会のお知らせ

■開催日： 2020年12月4日(金) 13:30～16:30

■場 所： Zoom によるオンライン開催

■テーマ： ホログラム記録材料の最新動向

■プログラム：

(1) シネマトグラフ的アプローチによるメタサーフェスホログラフィの動画化

岩見 健太郎 (東京農工大学)

(2) 高移動度フォトリフラクティブポリマー

堤 直人, 木梨憲司, 坂井互 (京都工芸繊維大学)

(3) 選択堆積法によるソーダライムガラス上への  $\text{SiO}_2$  ホログラム形成

福井 彩, 酒井 大輔, 原田 建治 (北見工業大学), 西井 準治 (北海道大学)

(4) Bayfol®HX フォトポリマーフィルムのご紹介

堀口 治男 (コベストロジャパン)

■参加費： 会員, 非会員, とともに無料

■問合せ先

・研究会について: e-mail [meeting@hodic.org](mailto:meeting@hodic.org)

・その他全般: HODIC 事務局

日本大学 理工学部 応用情報工学科 吉川 浩 宛

TEL/FAX 047-469-5391

e-mail [office@hodic.org](mailto:office@hodic.org)

## 令和 3 年第 1 回 ホログラフィック・ディスプレイ研究会のお知らせ

- 開催日： 2021 年 3 月ころを予定
- 場 所： Zoom によるオンライン開催
- テーマ： 未定
- プログラム： 未定
- 研究会参加申込 事前申込
- 参加費： 会員，非会員，ともに無料
- 問合せ先

- ・研究会について: e-mail [meeting@hodic.org](mailto:meeting@hodic.org)

- ・その他全般: HODIC 事務局

日本大学 理工学部 応用情報工学科 吉川 浩 宛

TEL/FAX 047-469-5391

e-mail [office@hodic.org](mailto:office@hodic.org)

---

### HODIC の WEB ページとメールリストのご案内

HODIC では、独自のドメインにて WEB ページとメーリングリストのサービスしております。WEB ページのアドレス (URL) は

<http://www.hodic.org/>

です、ぜひアクセスしてみてください。なお、WEB ページでは皆さんからの情報やメッセージも掲載できるようになっています。

メールリストサービスは、特定のアドレスにメールを送ると加入者にメールが転送されるものです。HODIC からのお知らせと会員間の自由な意見交換や情報交換のために利用しています。加入も脱退も自由で、費用もかかりません。自分から情報発信したり、分からないことを質問したりすることも可能です。インターネットへの電子メールの送受信が可能ならどなたでも参加できます。加入の申し込みは、登録したいメールアドレスから [maillist-req@hodic.org](mailto:maillist-req@hodic.org) あてに、本文に SUBSCRIBE と書いて電子メールをお送りください。ご質問は、[w3@hodic.org](mailto:w3@hodic.org) までお知らせください。



## ホログラフィック・ディスプレイ研究会役員（敬称略）

名誉会長	辻内 順平	会長	伊藤 智義（千葉大学）
副会長	山本 健詞（情報通信研究機構）	前会長	橋本 信幸（シチズン時計）
国際担当	西辻 崇（東京都立大学）	企画委員長	角江 崇（千葉大学）
会計幹事	山内 豪（大日本印刷）	事務局長	岸本 康（凸版印刷）
編集長	吉川 浩（日本大学）		

## 幹 事（５０音順）

石井勢津子（美術家）	石川 洵（石川光学造形研究所）	岩田 藤郎
植田 健治（大日本印刷）	太田 和哉（トリマティス）	鎌田 康昌（凸版印刷）
坂本 雄児（北海道大学）	佐藤 甲癸	佐藤 俊一（シャープ）
下馬場朋禄（千葉大学）	白木 厚司（千葉大学）	白倉 明（アーティエンス・ラボ）
高木 康博（農工大）	高橋 進（凸版印刷）	谷口 幸夫（大日本印刷）
福田 隆史（産総研）	松島 恭治（関西大学）	三科 智之（日本放送協会）
山口 健（日本大学）	山口 雅浩（東京工業大学）	渡邊恵理子（電気通信大学）

## 相 談 役（５０音順）

上田 裕昭（コカミルタプラネタリウム）	小野 雄三（立命館大学）	勝間ひでとし（湘南 LRT 研究 G）
桑山 哲郎	久保田敏弘（久保田ホログラム工房）	酒井 朋子（千葉大学）
永田 忠昭（arts-unis）	三田村峻右	堀内 道夫（光と風の研究所）
本田 捷夫（本田ひかり技研）		

## 編集部よりのお知らせ

編集部では皆様からの情報を募集いたしております。ホログラフィ関連のお知らせや報告などがございましたら、下記編集部連絡先までお送り下さいますようお願い申し上げます。

なお、次号会報に掲載するためには研究会開催日の１ヶ月前が締切となります。

## HODIC Circular, Vol. 40, No. 4 (Dec. 2020)

2020 年 12 月 4 日発行

編 集 日本光学会 ホログラフィック・ディスプレイ研究グループ

編 集 長 吉川 浩(日本大学)

HODIC 事務局 (入会・連絡先変更・各種問合せ等)

日本大学 理工学部 応用情報工学科 吉川・山口研究室 気付 (担当: 吉川 浩)  
〒274-8501 船橋市習志野台 7-24-1

TEL/FAX 047-469-5391 E-mail: office@hodic.org

WEB: <http://www.hodic.org/>

ご連絡はなるべく電子メールまたは FAX にてお願いいたします。

For foreign members, any corresponding to

Hiroshi Yoshikawa, Dept. Computer Engineering, Nihon University

7-24-1 Narashino-dai, Funabashi, Chiba 2748501 JAPAN

E-mail: [yoshikawa.hiroshi@nihon-u.ac.jp](mailto:yoshikawa.hiroshi@nihon-u.ac.jp)

**HODIC**