

## カラーレインボーホログラムの広視域化の試み

An Attempt to Increasing the Viewing Angle of Color Rainbow Hologram

久保田 敏 弘\*・岸 本 康\*・小 瀬 輝 次\*  
Toshihiro KUBOTA, Yasushi KISHIMOTO and Teruji OSE

## 1. はじめに

レインボーホログラムは縦方向の視差を犠牲にすることによって白色光で再生できるようにしたホログラムである。この再生像の色は眼を上下に移動することによって変化し、また見る位置によっては像の上部と下部とで異なる。この現象は見る人にとってはカラフルな印象を与えるが真のカラー像ではない。

カラー再生像をレインボーホログラムによって得ようとする研究はすでに Hariharan<sup>1)</sup> 鈴木ら<sup>2)</sup> によって行われている。彼らの方法は通常のレインボーホログラムを3原色に相当する3つの波長の光で記録するというオーソドックスな方法であるから、垂直方向のただ一カ所、すなわち記録のときにスリットを置いた位置に眼をおいたときのみ正しいカラー像を見ることができる。他の位置ではカラーバランスが全くくずれてしまうので正しいカラー像を見ることができる視域は極めて狭くなる。

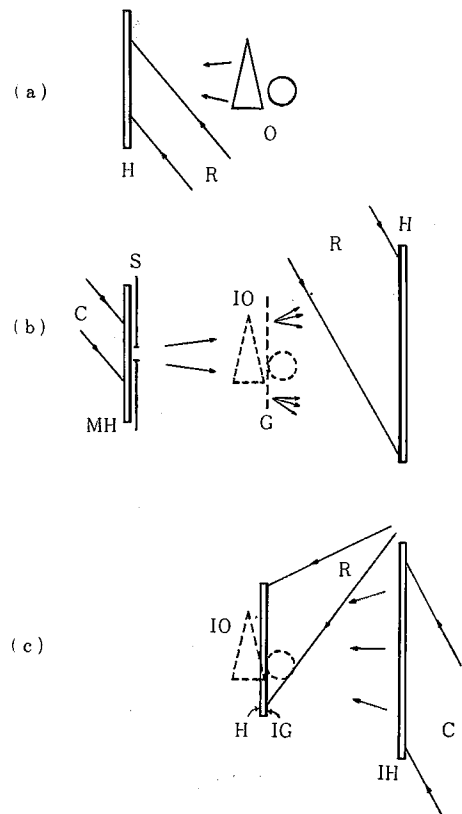
この論文は、広い範囲で正しいカラー再生像を見ることができる広視域レインボーホログラムの作製と、その再生像のほけを検討したものである。

## 2. 作製方法

## 2.1 再生像の白色化

我々が試みた方法は、物体光を多重化したホログラムを3原色に相当する3つの波長の光で作製し、そのホログラムをそれぞれの原色を中心波長とするカラーフィルターを通して再生しカラー像を得ようとするものである。

物体光あるいは参照光を多重化する技術は、レインボーホログラムの再生像を白色化する手段として考えられいくつかの報告がある<sup>3)~5)</sup> 我々は回折格子を用いて物体光を多重化した。この方法は3つの過程からなっており、図1にその光学系を示す。これは Benton の方法<sup>5)</sup> と同じであると思われるが、彼の方法の詳細はわからない。



H: 記録材料, MH: マスターホログラム, IH: 中間ホログラム, R: 参照光, O: 物体, C: 再生照明光, S: スリット, G: 回折格子, IO: 物体の再生像, IG: 回折格子の再生像

図1 白色レインボーホログラムの作製

図1 (a)はマスターホログラムの作製である。これは従来のレインボーホログラムの作製と全く同じである。

このマスターホログラムを図1 (b)に示すように、記録のときの参照光の波面と共役な波面で照明して実像を再生させる。この際、横に細長いスリットを用いること

\* 東京大学生産技術研究所 第1部

研究速報

も従来の方法と同じである。再生光中に回折格子を置き中間ホログラムを記録する。使用する回折格子は適当な格子定数を持ち、高次（少なくとも±5次程度以上）の回折光まではほぼ等しい強度をもつような位相格子である。この回折格子によってスリットはみかけ上規則正しく垂直方向に配列するため、中間ホログラムは多数のスリットから再生される多数の物体光を同時に記録することになる。

この中間ホログラムを図1(c)のように記録のときの参照光とは共役な波面で照明すれば、物体の再生像と同時に回折格子の像が再生される。この回折格子の再生像上に記録材料を置き適当な方向から参照光を加えてホログラムを記録する。このホログラムを参照光と同じ方向から白色光で再生し、従来のレインボーホログラムの場合と同じようにスリット像位置付近から観察すれば白色化された再生像をみる事ができる。それは再生される多数のスリット像の1つ1つが従来のレインボーホログラムの場合と同様に波長の分散を生じて拡がり、それらが互いに重なり合うからである。

スリット像面のどの位置でも3原色の光あるいはそれより多くの色の光が重なり合うように(b)における回折格子の間隔を選べば、垂直方向の広い視域にわたって再生像を白色化することができる。ただし、カラー再生像を得る本方法の目的のためだけに再生像を必ずしも白色化する必要はない。すなわち、最終段階でホログラムを再生するときに使用するフィルターの波長幅によるが、スリット像面位置において、フィルターを通過した光の波長の分散による拡がり隣り合うスリット像の間で互いに重なり合う程度に回折格子の間隔を選べばよい。

## 2.2 ゴースト像の除去

このようなホログラムを3原色に相当するレーザー光で記録し、再生の際記録のときの波長を中心波長とするカラーフィルターでそれぞれのホログラムを照明すれば、カラー再生像を広い視域で見ることが出来る。この際カラーホログラフィにおいて問題となるゴースト像を除去しなくてはならない。

本方法で生ずるゴースト像を除去するためには2つの方法が考えられる。1つはLeithら<sup>6)</sup>が提案しているように、図1(c)における参照光をそれぞれの波長の光に対して異なった方向から入射させることである。最適な入射角はホログラムからの回折光の方向を決める格子方程式

$$\sin \theta_{imn} = \sin \theta_{cn} + \mu_{mn} (\sin \theta_{om} - \sin \theta_{rm}) \quad (1)$$

から求めることができる。ここで、 $\theta$  はホログラム面に垂直な方向に対する光束の入射角で、添字  $i, c, o, r$  はそれぞれ再生光、再生照明光、物体光、および参照光を意

味する。 $\lambda_m, \lambda_n$  をそれぞれ記録時および再生時に使用する  $m, n$  番目のレーザー光および再生照明光の中心波長とすれば、 $\mu_{mn}$  はそれらの比として

$$\mu_{mn} = \frac{\lambda_n}{\lambda_m} \quad (m, n = 1, 2, 3) \quad (2)$$

で与えられる。したがって角度  $\theta$  の添字  $m, n$  は波長  $\lambda_m$  で記録、 $\lambda_n$  で再生する場合の角度を意味する。

カラーホログラフィにおいては、通常再生照明光の角度  $\theta_c$  は参照光の角度  $\theta_r$  に等しくとるため、 $m=n$  のときに生ずる3つの再生光は正しく重なって所望のカラー像となる。 $m \neq n$  の場合に生ずる6つの像がゴースト像あるいは cross-talk 像と呼ばれ、これらが正しいカラー像に重ならないように、またカラー像を広い視域でみることができるよう  $\theta_{rm}$  を選ばなければならない。いま、3原色に相当する波長と参照光の角度を

$$\left. \begin{aligned} \lambda_1 &= 632.8 \text{ nm}, & \theta_{r1} &= 30^\circ \\ \lambda_2 &= 514.5 \text{ nm}, & \theta_{r2} &= -45^\circ \\ \lambda_3 &= 488 \text{ nm}, & \theta_{r3} &= 60^\circ \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

とした場合を考えれば、式(1)から物体光の角度範囲が約±15°以内であればゴースト像の影響はないことがわかり、再生像を30°の視域でみることが出来る。記録波長として2つ、たとえば632.8nmと514.5nmに限ればそれぞれの参照光の入射角を適当にとることによってもっと広い範囲の視域で再生像を見ることが出来る。なお、この議論は平面ホログラムの真の像に対するものであるが、実際のホログラムでは厚みによる角度選択性のため共役像の影響は無視できる。

ゴースト像を除去する他の方法は、各波長の光に対してホログラムの面積を分割してそれぞれ別々の場所に記録する方法である<sup>7)</sup> 一般には3原色のカラーストライプフィルターを記録材料面に重ねて記録する。再生像のほけを考慮すれば、再生像の中心は一般にホログラム面にあるのが望ましい。この場合、フィルターの各エレメントの幅は狭い必要があり、再生像を観察する位置からは眼では分解できない程度であることが望ましい。しかし、あまり幅が狭くなれば再生時においてフィルターとホログラムの位置合わせが困難となり、またフィルターでの回折によって再生像が劣化する。この方法の長所は、前者の場合に比べて参照光の入射角は各波長の光に対して同一でよいため再生装置が簡単になり、またゴースト像の影響は全くないため視域を広くとれることである。

## 3. 再生像のほけ

本方法によってカラー再生像を得るためには再生の際カラーフィルターを必要とする。ホログラフィの初期の段階において、白色光を用いて再生像を得るための一手

段としてカラーフィルターを用いたことがあった。フィルターによって再生照明光の波長幅が狭くなり回折光の波長による拡がり小さくなるため、ある程度鮮明な単色の像を得ることができる。この方法をカラーホログラフィに適用すれば簡単にカラー像が得られる。したがって、この方法によって得られる再生像の質が、レインボーホログラムを使って多段階の記録過程を必要とする本方法の場合と同程度であれば本方法の価値は少ない。そこで両方法によって得られる再生像のぼけの大きさについて比較してみる。ぼけの原因はいずれも再生波長が単一でなく幅をもつことによって生ずるものであり、波長変化による再生像点の位置の変化が原因である。位置の変化は再生像点の距離および角度変化に分けられるが、ここでは特にぼけに大きく影響する角度変化について議論する。

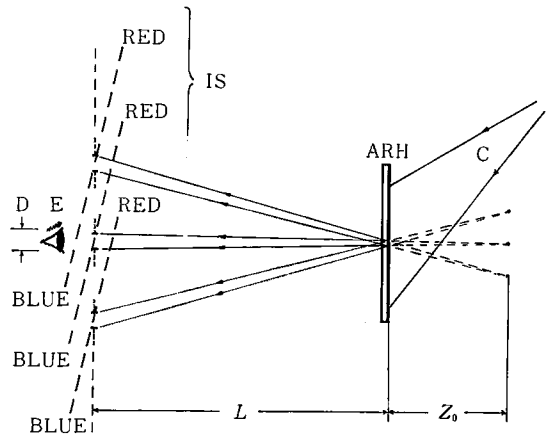
通常フレネルホログラムをフィルターを通して再生する場合の像のぼけについては  $m = n$  として式(1)によって評価できる。ゴースト像を除去する条件については、レインボーホログラムによる本方法の場合と全く同じであるため、記録光学系は式(3)で示される配置と同じとする。このとき、波長変化による再生像のぼけは  $\theta_r = 60^\circ$ ,  $\lambda_0 = 488 \text{ nm}$  で記録されたホログラムの場合が一番大きい。

ぼけの大きさはもちろん使用するフィルターの波長幅に依存する。いま、半値幅が 50 nm 程度の比較的広いラッテンフィルターを使用する場合を考えれば、この波長幅による回折光の拡がり  $\theta_{r,m} = 0$  として式(1)から  $5.1^\circ$  となる。このときの再生像のぼけの大きさ  $\delta$  はホログラムから 5 cm の距離で

$$\delta = 4.4 \text{ mm} \quad (4)$$

となる。波長幅の狭いフィルターを用いればそれだけぼけは小さくなる。もっとも、この方法では  $\theta_{r,m}$  をホログラム面に垂直な 1 つの面内に配置する必要はなく、3 つの参照光をホログラムに平行な面内で  $60^\circ$  ずつずらせて入射させるようにすれば、他の条件は同じにしてぼけの大きさは式(4)のおおよそ半分になる。

次に本方法の場合に生ずるぼけを考えると、図2に示すように波長の異なるスリット像が重なって眼に入るためである。スリット像面では個々のスリット像は波長の分散のため垂直方向に分光される。したがって物体光を多重化したことによるぼけは、隣り合うスリット像が互いに重なり合うことによって生ずる。しかし、物体光を多重化するための回折格子の面と最終的に記録するホログラムの面が一致しているため、同一の点物体に対する各スリット像はホログラムの同じ場所から回折されることになる。したがって垂直方向の再生像のぼけについて



ARH: 白色レインボーホログラム, C: 再生照明光,  
E: 眼, IS: スリットの再生像

図2 再生像のぼけ

は従来のレインボーホログラムの場合と同様に扱うことができる。

レインボーホログラムの再生像のぼけについてはいくつかの解析がある。Wyant<sup>8)</sup>によれば波長の拡がりによるぼけの大きさ  $\delta$  は近似的に

$$\delta = Z_0 \left( \frac{D+d}{L} \right) \quad (5)$$

で与えられる。ここで  $Z_0, L$  は図2に示されるように、それぞれホログラムと再生像点、ホログラムとスリット像の間の距離である。また  $D$  は瞳の直径、 $d$  はスリット幅である。典型的な例として、 $L = 30 \text{ cm}$ ,  $D = d = 3 \text{ mm}$  とし、 $Z_0$  を前の場合と同じ 5 cm とすれば

$$\delta = 1.0 \text{ mm} \quad (6)$$

となる。したがって、フィルターとして 50 nm 程度の広い波長幅をもつものを使用する場合は本方法の方が鮮明な像が得られる。

通常ホログラムを使用する場合は、フィルターの波長幅を狭くすればそれだけ再生像のぼけは小さくなる。一方、本方法の場合はスリット幅が狭いほど、またホログラムとスリットの間の距離が長いほどぼけは小さくなる。また本方法ではスリット像が波長変化による回折光の拡がりによって互いに重なる必要があるため、波長幅はむしろ広い方が望ましく、また波長幅が広くてもぼけの大きさには影響しない。

再生像の明るさの点からみれば、再生照明光の波長幅がある程度までは広い方が再生に寄与する光が多くなり明るい再生像が得られる。

ストライプフィルターを使用する場合に対する両方法の比較についてもほぼ同様の結論となる。ただし、実際にストライプフィルターを作成することを考えると、波

研究速報  
 長幅の広いフィルターはカラーフィルムなどを用いて比較的簡単に得られるが、波長幅の狭いフィルターを得るのは極めて困難である。

したがって、再生像の鮮明さ、明るさなどを総合的に判断すれば、レインボーホログラムからの再生像をカラー化する本方法の価値はあると思われる。

#### 4. 実験

本方法によって再生像をカラー化する基礎的な実験を行った。ホログラムを記録する光学系は図1に示されるとおりである。基礎的な実験のため記録波長は632.8nmと514.5nmの2つの波長とし、記録材料はHolotest 8E 75HDと10E56乾板を使った。

物体光を多重化するための回折格子は以下のようにして作成した。まず3つの平行光束を用い、1つは各光束の間の角度が $2^\circ$ 、もう1つは $10^\circ$ の回折格子を記録した。記録波長は632.8nm、記録材料は8E75HD乾板である。これらの2つの回折格子を組み合わせて、隣り合う回折光の間の角度が $2^\circ$ で $\pm 10$ 次程度まで回折光の強度がほぼ等しい回折格子を得た。

マスターホログラムのスリット幅は5mmである。最終的に得られるレインボーホログラムは、物体光の平均入射角度がホログラム面に垂直( $\theta_{om}=0$ )、参照光の入射角が632.8nmの光に対して $45^\circ$ 、514.5nmの光に対して $-45^\circ$ で記録した。それぞれの光に対して別々に記録したホログラムを組み合わせ、 $\pm 45^\circ$ の方向から記録時のそれぞれの方向に応じて赤フィルター、緑フィルターをかけたスポットライトで照明してカラー再生像を得た。使用したカラーフィルターはセルロースアセテートのカラーシートである。得られた再生像の白黒写真を図3に示す。物体は一辺が2.7cmのルービックキューブである。従来のオーソドックスな方法に比べて、 $30^\circ$ 程度の広い視域でカラーバランスのくずれない、しかも鮮明なカラー再生像を得ることができた。

#### 5. おわりに

従来の方法に比べて広い視域で正しいカラー再生像を見ることができるカラーレインボーホログラムの作製を

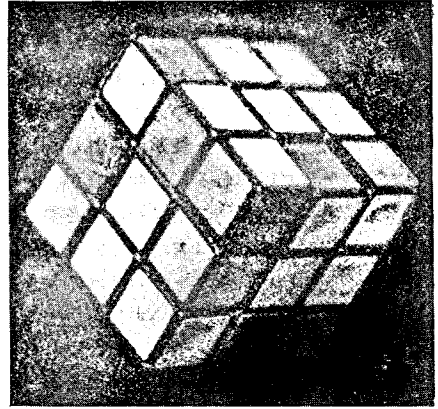


図3 本方法によって得られたカラー再生像の白黒写真

試みた。我々の方法は、回折格子で物体光を多重化して再生像を白色化したホログラムをそれぞれカラーフィルターを通した光で照明してカラー像を得る方法である。2つの波長の光を使った基礎的な実験を行った結果、 $30^\circ$ 程度の広い視域でカラーバランスのくずれない鮮明な再生像が得られた。

通常のフレネルホログラムをカラーフィルターを通して照明し、カラー再生像を得る方法と本方法による再生像のぼけの大きさ、明るさについて比較検討した結果、本方法によるカラーホログラムの作製は価値があることがわかった。  
 (1981年7月29日受理)

#### 参考文献

- 1) P. Hariharan: Opt. Letters 1 (1977) 8.
- 2) 鈴木, 齊藤, 松岡: 光学 7 (1978) 29.
- 3) S. A. Benton: J. Opt. Soc. Amer. 59 (1969) 1545A.
- 4) E. N. Leith, H. Chen, and J. Roth: Appl. Opt. 17 (1978) 3187.
- 5) S. A. Benton: J. Opt. Soc. Amer. 68 (1978) 1441A.
- 6) E. N. Leith and J. Upatnieks: J. Opt. Soc. Amer. 54 (1964) 1295.
- 7) R. J. Collier and K. S. Pennington: Appl. Opt. 6 (1967) 1091.
- 8) J. C. Wyant: Opt. Letters 1 (1977) 130.