

# リップマンカラーホログラム再生像の色変化に関する研究

西原 隆\*・久保田敏弘\*\*

\*凸版印刷(株)総合研究所 〒345 埼玉県北葛飾郡杉戸町高野台南 4-2-3

\*\*京都工芸繊維大学工学部電子情報工学科 〒606 京都市左京区松ヶ崎御所海道町

## A Study on the Change in Color of the Reconstructed Image of Lippmann Color Hologram

Takashi NISHIHARA\* and Toshihiro KUBOTA\*\*

\*Technical Research Institute, Toppan Printing Co., Ltd., 4-2-3, Takanodai-minami, Sugitomachi, Kitakatsushika-gun, Saitama 345

\*\*Department of Electronics and Information Science, Kyoto Institute of Technology, Goshokaido-chou, Matugasaki, Sakyo-ku, Kyoto 606

The change in color of the reconstructed image of the Lippmann color hologram due to the change in the angle of the illuminating beam is analysed based on the coupled wave theory. It is found that color change becomes minimum when the recording wavelengths of the primary colors are chosen as 620 nm, 540 nm, 460 nm. This result is confirmed by the experiment on Lippmann color hologram recorded with these wavelengths using pseudo color technique.

### 1. はじめに

3次元像の表示に用いられるホログラムのひとつであるリップマンカラーホログラムは、白色光による再生が可能であり、レインボウホログラムと異なり観察位置の違いによる再生像の色変化が少ない。このためカラー3次元像を表示する手段として大きな期待を持たれている。

カラーディスプレイとして用いるために、リップマンカラーホログラムの再生像の色再現については、これまでに多くの研究が行われている。久保田ら<sup>1)</sup>は、結合波理論から求めた波長選択性を用いてCIE (Commission Internationale de l'Eclairage) 座標上での色再現の解析を行った。また、Hubelら<sup>2)</sup>は、キルヒホッフ積分に記録材料の散乱ノイズの影響を加味したかたちで波長選択性を求め色再現の解析を行った。これらの研究においては最適な条件で再生を行った場合のリップマンカラーホログラム再生像の色再現について、詳細な検討がなされている。

しかし、実際にリップマンカラーホログラムを再生するときには、再生照明光の角度が異なる場合や、温度や湿度の変化により記録材料の厚みが増える場合があ

る。そのため最適な再生条件とは少し違った条件で再生されることが多い。また、このように、照明角度や厚みの変化があると、再生される色が元の色と大きく違ってしまう場合がある。このため、リップマンカラーホログラムの色再現を考える場合には、再生条件の変化に伴う色の変化についても検討を行う必要がある。

本研究では、リップマンカラーホログラムの再生照明光の角度が変化した場合の再生像の色の変化について検討を行う。まず、結合波理論から求められた波長選択性に基づいて再生像の色変化を解析し、再生照明光の角度変化に対する色の変化を最小にするような3原色R, G, Bの波長を求める。この組合せの波長を最小色変化波長と名付ける。次に、実際にカラーホログラムを作製して再生像の色変化についての測定を行い、理論解析から得られた結果との比較検討を行う。

### 2. 再生色変化の理論解析

#### 2.1 リップマンカラーホログラム再生像の色の計算方法

ここでは、久保田らが行ったと同じ方法により、Kogelnikの結合波理論によって求められる波長選択性

に基づいてリップマンカラーホログラムの再生色をCIE座標上の値として求める。なお簡便化を図るため、リップマンホログラムは吸収のない位相型のホログラムとする。

まず、リップマンカラーホログラムの波長選択性を求める。

Fig. 1(a)に示すように、波長 $\lambda_0$ のレーザー光を用いて、角度 $\theta'_r$ の参照光と角度 $\theta'_o$ の物体光でリップマンホログラムを記録する。このホログラムをFig. 1(b)に示すように、波長 $\lambda_c$ の光により角度 $\theta'_c$ の再生照明光で再生した場合、ホログラムからの再生光は、

$$\sin \theta'_r = \sin \theta'_c - \frac{\lambda_c}{\lambda_0} (\sin \theta'_r - \sin \theta'_o) \quad (1)$$

の式に従う角度 $\theta'_r$ の方向に出射される。ここで角度 $\theta'_r$ は記録材料内での値であり、波長 $\lambda$ は空気中での値である。単一の波長で記録されたリップマンホログラムの回折効率 $\eta$ は、

$$\eta = \frac{1}{1 + \left(1 - \frac{\xi^2}{\nu^2}\right) \sinh^2(\nu^2 - \xi^2)^{1/2}} \quad (2)$$

で表される。ここで、

$$\nu = \frac{i\pi n_1 T}{\lambda_c \sqrt{\cos \theta'_c \cos \theta'_r}} \quad (3)$$

$$\xi = \frac{1}{2} \{k_c (\cos \theta'_c - \cos \theta'_r) - k_o (\cos \theta'_r - \cos \theta'_o)\} T$$

$$k_o = \frac{2\pi n_o}{\lambda_0}$$

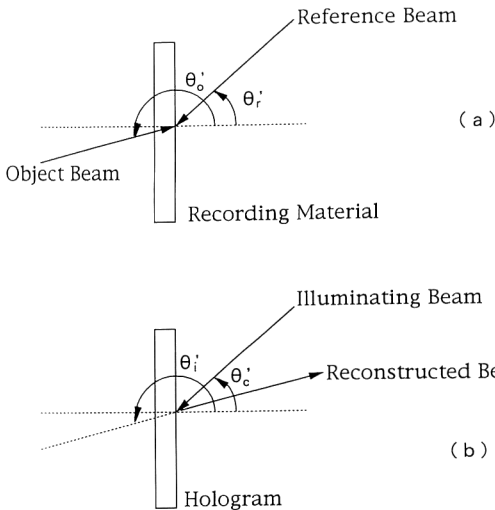


Fig. 1. Arrangement for analyzing the wavelength selectivity of Lippmann hologram. (a) Recording, (b) Reconstruction.

$$k_c = \frac{2\pi n_o}{\lambda_c}$$

ここで、 $n_o$ は平均の屈折率、 $n_1$ は屈折率変調、 $T$ は記録材料の厚みである。この $\eta$ の $\lambda_c$ 依存性が、リップマンホログラムにおける波長選択性である。

リップマンカラーホログラムの場合には、ホログラムはR, G, Bに対応した3つのレーザー光で記録される。リップマンカラーホログラムの波長選択性は、記録波長 $\lambda_0$ にR, G, Bの波長を代入しそれぞれの波長選択性を上記のようにして求めた後、それらを重ね合わせることによって得られる。このようにして求めたリップマンカラーホログラムの波長選択性から、再生像の色をCIE座標の値として求める。

リップマンカラーホログラムの再生像に対するCIEの3刺激値は、一般の3刺激値の計算式において、分光反射率を波長選択性 $\eta(\lambda)$ で置き換えた次式により求められる。

$$X = \int_{380}^{780} \eta(\lambda) E(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda$$

$$Y = \int_{380}^{780} \eta(\lambda) E(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda \quad (4)$$

$$Z = \int_{380}^{780} \eta(\lambda) E(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda$$

ここで、 $\bar{x}(\lambda)$ ,  $\bar{y}(\lambda)$ ,  $\bar{z}(\lambda)$ は等色関数であり、 $E(\lambda)$ は照明光源の分光エネルギー分布である。なお、ここでは規格化のための定数を1と置いている。

本研究では再生像の色の違いを問題にしており、これを $u'$ ,  $v'$ を用いて評価する。 $u'$ ,  $v'$ は座標上の距離が色の違いの大きさに対応しており3刺激値を用いて、

$$u' = \frac{4X}{X + 15Y + 3Z} \quad (5)$$

$$v' = \frac{9Y}{X + 15Y + 3Z}$$

で与えられる。色の違いの大きさは、記録のときと同じ条件で再生したときと、異なった条件で再生したときの色度座標上での2点間の距離 $\Delta E$ によって評価する。 $\Delta E$ は両者の像に対する $u'$ ,  $v'$ の値の違いを $\Delta u'$ ,  $\Delta v'$ として次式によって表される。

$$\Delta E = ((\Delta u')^2 + (\Delta v')^2)^{1/2} \quad (6)$$

## 2.2 再生照明光の角度変化に対する再生像の色の変化

ここでは、再生照明光の角度が変化する場合のリップマンカラーホログラムの再生色についてのシミュレーションを行う。リップマンカラーホログラムを最適な再生条件で再生する場合の再生像の色は、前述した計算において $\theta'_c = \theta'_r$ として計算するが、再生照明光の角度が変化する場合の再生像の色は、 $\theta'_c$ の値を $\theta'_r$ から変化させ

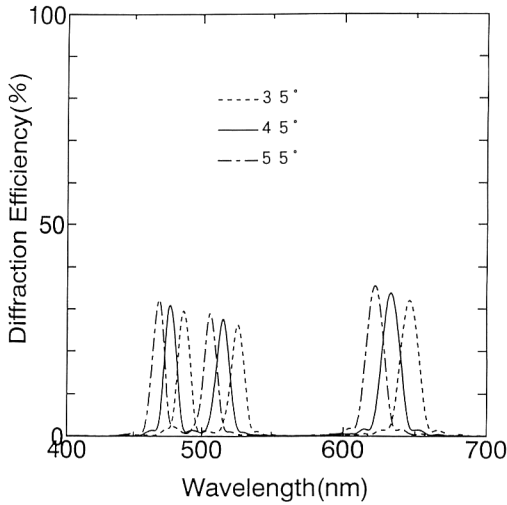


Fig. 2. Change in wavelength selectivity due to the change in angle of the illuminating beam.

て計算を行うことによって求められる。ここでは、記録のときの物体光の角度を $0^\circ$ 、参照光の角度を空气中で $45^\circ$ とし、銀塩感光材料の屈折率に対応させて平均屈折率は $n_0=1.62$ 、最大屈折率変調 $n_1=0.03$ 、また、厚さ $T=10\ \mu\text{m}$ として計算を行う。

Fig. 2に、再生照明光の角度が参照光の角度から変化した場合の波長選択性の変化を示す。ここでは、リップマンカラーホログラムは、その記録に用いられる代表的なレーザー波長である633 nm, 515 nm, 477 nmの波長の場合について検討する。再生照明光の角度を大きくした場合には、再生波長は全体的に短波長側にシフトしており、その逆の場合には長波長側にシフトしている。シフト量は波長にほぼ比例しており、空气中で $10^\circ$ の再生照明光角度の変化に対して、Rの場合25 nm程度、Bの場合15 nm程度のシフト量になっている。

次に、再生像の色変化について検討する。サンプル色として平均演色評価数の計算に用いる8色を用いる。なお、照明光源は白色光とする。

633 nm, 515 nm, 477 nmの波長の光で記録したリップマンカラーホログラムについて、再生像の色の変化を計算した結果をFig. 3に示す。再生される8色は、再生光の角度の変化に伴い、直線的にシフトするような色変化を示している。再生照明光の角度が大きくなる場合、赤色の方向にシフトしており、小さくなる場合には緑色の方向にシフトしている。約 $10^\circ$ 角度が変わったときの色変化の大きさは $u'v'$ 座標上での距離として、平均で $\Delta E=7.4 \times 10^{-2}$ と大きい値を示している。

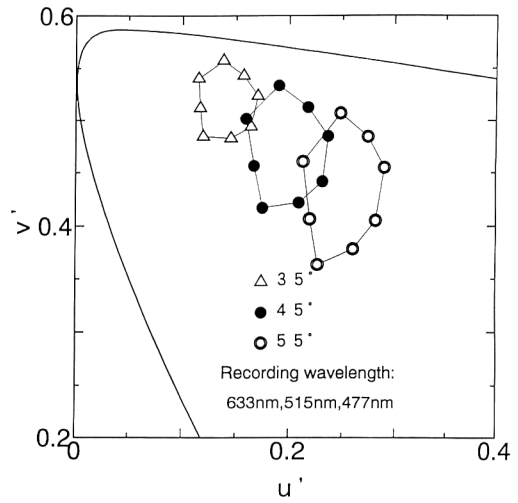


Fig. 3. CIE diagram representing the change in color of the reconstructed image due to the change in angle of the illuminating beam.

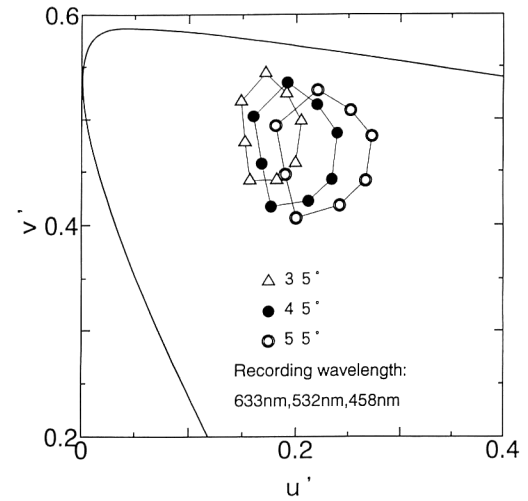


Fig. 4. CIE diagram representing the change in color of the reconstructed image due to the change in angle of the illuminating beam.

別の組合せとして、633 nm, 532 nm, 458 nmの波長を用いた場合の色変化の様子をFig. 4に示す。この場合にも色の変化は直線的であるが、Fig. 3と比べると、変化の方向と角度にかなりの違いがある。変化の方向は、Fig. 3の場合では、再生光の角度が小さくなる時緑色方向に変化しているのに対し、Fig. 4の場合では青色方向に変化している。色の変化量はFig. 3の場合の大きさに比べて、Fig. 4の場合の方が小さく、 $10^\circ$ の角度変化に対して $u'v'$ 座標上での距離は $\Delta E=3.1 \times 10^{-2}$

と、1/2以下である。

これらの結果から、再生照明光の角度変化に対して、リップマンカラーホログラムの再生像の色変化は、ほぼ直線的なかたちになり、ホログラム記録に用いるR、G、Bの記録波長の選び方によって大きく違ってくるのがわかる。そこで、次に最も色変化を小さくするような波長の組について検討した。

### 2.3 最小色変化波長

R、G、Bの波長を、それぞれ590~640 nm、510~560 nm、440~480 nmの間で1 nmおきに変化させ、それぞれの場合について、再生照明光が記録時の参照光と同じ角度から入射した場合と、参照光の角度から10°ずれた角度から入射した場合の再生像の色を求めて、 $u'v'$ 座標上での両者の間の距離 $\Delta E$ を計算し、その値が最小となるような組合せを求める。

その結果、R、G、Bの波長として620 nm、540 nm、460 nmを選んだときに色変化が最小となることがわかった。この波長に対する色変化の様子をFig. 5に示す。Fig. 5をみると、この波長で作成したホログラムの色変化は、Fig. 3、Fig. 4に示した場合の色変化に比べて明らかに小さいことがわかる。この場合の色変化を $u'v'$ 座標上での距離で表すと、再生光角度が10°変化した場合で平均の $\Delta E = 1.2 \times 10^{-2}$ の小さい値となり、前の2つの場合と比較して色の変化量が大幅に小さくなっている。

これらの波長で色変化が小さくなる理由としては、620 nm、540 nm、460 nmの波長では、角度変化に伴う

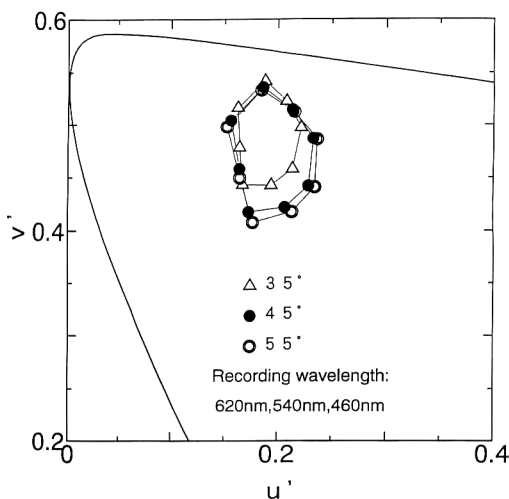


Fig. 5. CIE diagram representing the change in color of the reconstructed image due to the change in angle of the illuminating beam.

R、G、Bの変化が、再生像の各色に対してお互いの色変化を打ち消し合うかたちでバランスがとれているためであると考えられる。

そこで、記録波長が620 nm、540 nm、460 nmから、わずかにずれたときに色変化がどのようになるかをみる。代表的な色としてFig. 6の1と2の色について、この3波長で記録したホログラムと、R、Bの波長が±10 nm違った波長で記録したホログラムとに関し、再生照明光の角度が10°大きくなったときの再生色の変化の様子を求めた結果をそれぞれFig. 7、Fig. 8に示す。

Fig. 7において、G、Bの波長を一定にしてRの波長

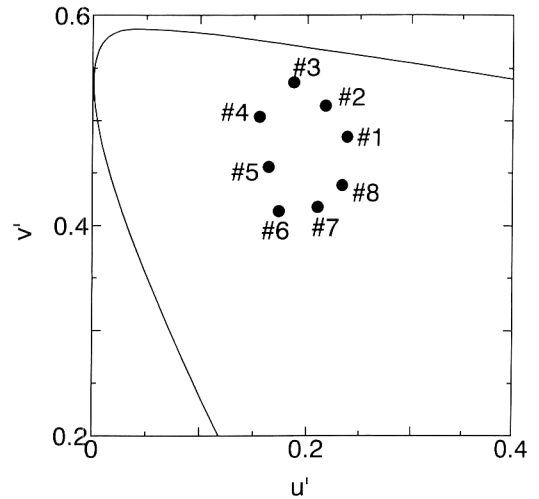


Fig. 6.  $u'v'$  coordinate for 8 colors.

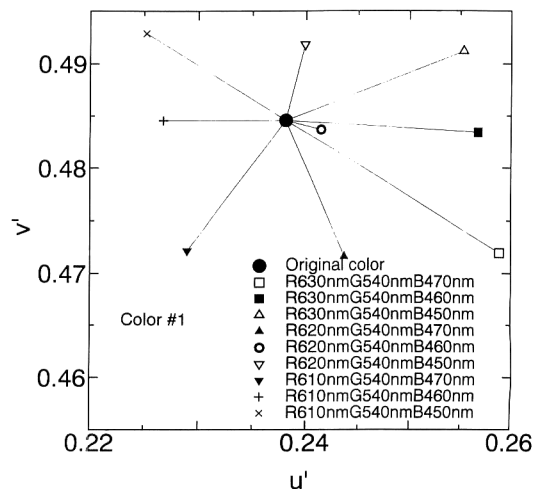


Fig. 7. Change in color of the reconstructed image of color #1 due to the change in recording wavelength when the hologram is reconstructed at an angle of 55°.

を変化させた場合、Rの方向、すなわち  $u'$  の値が変化する方向に色が変化しており、Rの波長が620 nmのときに色変化が最小になっている。同様にR、Gの波長を一定にしてBの波長を変化させた場合、Bの方向、すなわち  $v'$  の値が変化する方向に色が変化しており、Bの波長が460 nmのときに色変化が最小になっている。このことより、この色では、620 nm、540 nm、460 nm 付近の波長のときに、R、G、Bによる色変化の作用が最もよく打ち消しあい色変化を小さくすることがわかる。

Fig. 8 についても、若干の違いはあるものの、ほぼ同様の傾向がみられている。これらから620 nm、540 nm、460 nmの波長は、各色ともに平均的に色の変化が小さくなり、全体としての色変化が最小となっていると考えられる。

このことから、620 nm、540 nm、460 nmの波長の光でホログラムを作製すれば、再生照明光が変化しても再生像の色変化が最小のリップマンカラーホログラムが得られると考えられる。この最小色変化波長は参照光の角度にはあまり依存せず、30°の角度でもほぼ同じ値となっている。また、これらの波長の組合せは、久保田ら、Hubelら、Bazarganら<sup>3)</sup>が求めた最適色再現が得られる波長の組合せと近い値である。

ところで、再生像に色変化を与えるもうひとつの要因としてホログラムの厚み変化がある。これに関しては再生照明光の角度が変化した場合と同様な変化になる。ホログラムの厚みが2%変化したときの色変化が再生照明

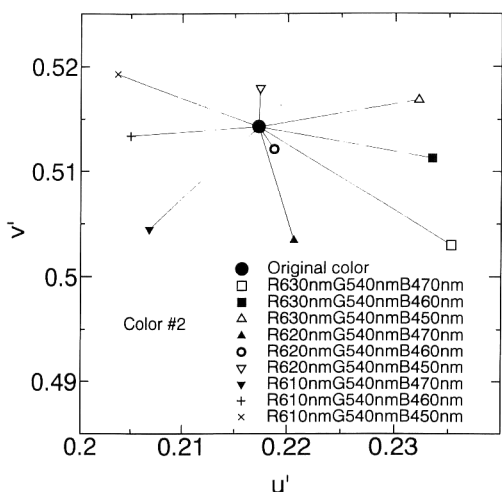


Fig. 8. Change in color of the reconstructed image of color #2 due to the change in recording wavelength when the hologram is reconstructed at an angle of 55°.

光が10°変化したときの色変化にほぼ対応している。

### 3. 再生色変化の実験

理論的に求めた結果を検証するために、2種類のリップマンカラーホログラムを作製した。ひとつは通常のレーザー光で普通に記録したリップマンカラーホログラムであり、他は、最小色変化波長で記録したと等価なりップマンカラーホログラムである。これらのホログラムについて、再生照明光の角度変化に対するホログラム再生像の色変化の測定を行った。

#### 3.1 実在するレーザー光で記録するホログラム

Fig. 9 に示す光学系により、リップマンカラーホログラムをイメージ型のホログラムとして作製した。この系で物体光は乾板の正面より、参照光は空気中で45°の角度より入射する。

ホログラムの被写体としては平面のカラーチャートを用いており、再生像の色が理論的考察で用いた8色に近くなるようなものを選んでいる。

記録材料の散乱ノイズはHubelらが指摘するように色再現に大きな影響を与えるので、散乱ノイズをなるべく少なくするために、ロシア製の超微粒子銀塩乾板 PFG-03 C をホログラムの記録材料に用いている。

記録にはRとしてHe-Neレーザーの633 nm、G、Bとして、それぞれArレーザーの515 nm、477 nmの波長のレーザー光を用いた。露光はB、G、Rの順に行い、それぞれ2.0 mJ/cm<sup>2</sup>、1.8 mJ/cm<sup>2</sup>、0.9 mJ/cm<sup>2</sup>の露光量で露光した。

露光後の乾板は、Table 1 に示すように、CW-C1 現像液<sup>4)</sup>と、EDTA 漂白液<sup>5)</sup>を用いて現像漂白処理を行

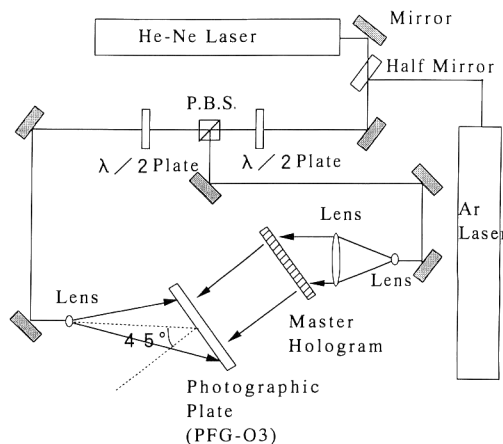


Fig. 9. Arrangement for recording Lippmann color hologram.

い、水洗後、5 g/lのソルビトール水溶液につけてから自然乾燥させた。ソルビトールを用いた処理は、現像処理に伴うホログラムの収縮を補正するためのもので、これによってほぼ記録時の厚みに戻すことができる。

### 3.2 最小色変化波長の光で記録するホログラム

2章での理論解析で色変化を最小とするR, G, B波長は、620 nm, 540 nm, 460 nmであるが、ホログラムの作製に用いられる実在するレーザー光では、620 nm, 540 nm 付近の波長の光はない。そこで、記録材料の厚みを露光時に変化させる疑似カラーホログラムの手法でR, G, Bのリップマンホログラムの波長を変化させることにより、等価的に620 nm, 540 nm, 460 nmの波長の光で記録されたリップマンカラーホログラムを作製した。

銀塩感光材料は、ソルビトール水溶液につけて乾燥させると、乳剤の厚みを膨潤させることができる。PFG-03C乾板もソルビトール水溶液を用いて膨潤することができ、溶液の濃度と膨潤率との関係はFig. 10に示したようになる。

しかし、PFG-03C乾板は乳剤が弱いため、大幅な膨潤を行ったり膨潤収縮を何度も繰り返すと干渉縞が乱れ

ることが多い。そこで、次のような手順によりリップマンカラーホログラムを作製した。

まず、何も処理しないPFG-03C乾板を用いて、515 nmの波長のレーザー光で1.8 mJ/cm<sup>2</sup>の露光を行い、G成分の画像のリップマンホログラムを乾板上に記録する。

この乾板を30 g/lのソルビトール水溶液につけてから自然乾燥させることによって乾板を約7%膨潤させる。そして、膨潤させた乾板に633 nmの波長の光で2.2 mJ/cm<sup>2</sup>, 477 nmの波長の光で0.6 mJ/cm<sup>2</sup>の露光を行い、B, Rの成分の画像をリップマンホログラムとして記録する。

この乾板に、Table 1に示すような、CW-C1現像液とEDTA漂白液を用いた現像漂白処理を行い、水洗する。その後25 g/lのソルビトール水溶液につけてから自然乾燥させることにより最初の乳剤の厚みよりも5%膨潤した状態にする。

このようにすると、Gについては記録時よりも5%膨潤されるので、記録波長より25 nm程度長い波長になり、B, Rについては記録時より2%収縮するので、10 nm程度短い波長になる。こうして最小色変化波長に近い波長のリップマンカラーホログラムを得ることができる。

実際に作製したリップマンカラーホログラムでは、ほぼ620 nm, 540 nm, 465 nmの波長で再生されるカラーチャートのホログラムとなった。

### 3.3 ホログラム再生像の色の測定

633 nm, 515 nm, 477 nmの波長で再生されるリップマンカラーホログラムと、620 nm, 540 nm, 465 nmの波長で再生されるリップマンカラーホログラムの再生像の色を、Fig. 11に示すような系によって測定した。

この系で、2つのホログラムはハロゲンランプによって、35°, 45°, 55°の角度の照明光で再生される。それぞれの場合の再生像の色を正面方向より色彩色差計を用いて  $u'$ ,  $v'$  の値を求めた。

### 3.4 結果と考察

実在するレーザー光でホログラムを記録した場合の再生像の色変化を測定した結果を、Fig. 12に示す。図か

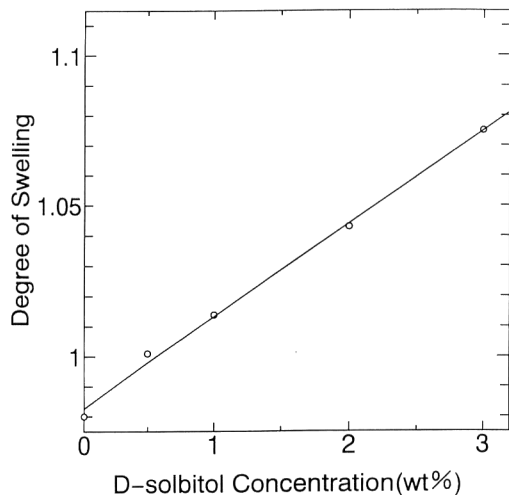


Fig. 10. Relation between the D-sorbitol concentration and the degree of swelling of the RFG-03C emulsion.

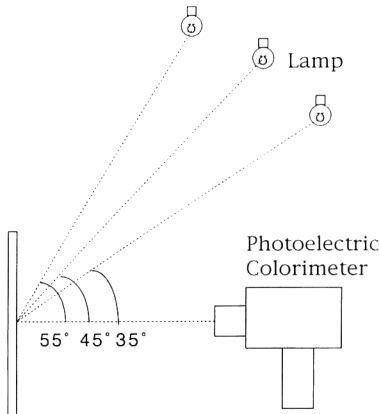
Table 1. Procedure for making Lippmann color hologram.

Stage	Chemical	Time	Temperature (°C)
Development	CW-C1 developer	5 min	15
Stop	3% solution of acetic acid in water	30 s	15
Bleach	Ferric sodium EDTA	10 min	15
Wash	Running water	3 min	15

らわかるように、再生された8色は、再生光の角度の変化に伴い直線に近い形でシフトしており、再生光の角度が35°から55°まで大きくなっていくに従い、すべての色は緑色が強い色から赤色の強い色にシフトしている。この変化の方向は理論によって求めた方向とほぼ同じになっている。色の変化量についてみると、再生照明光の角度の変化が約10°変わったときの $u'v'$ 座標上での色変化の大きさは、8色の平均で $\Delta E = 7.1 \times 10^{-2}$ となっている。この値も理論から得た値とほぼ同じである。このことより、理論による計算結果は、現実のリップマンカラーホログラムの再生像の色変化のそれに、ほぼ一致

している。

一方、最小色変化波長の場合についての結果を Fig. 13 に示す。再生像の色が理論で用いた8色とは若干違っているが、色の変化のみについてみた場合には再生照明光の角度変化に対する色変化の仕方は、Fig. 4 の理論の結果とほぼ同様である。また、Fig. 12 の場合に比べて角度変化に対する色の変化が明らかに小さくなっていることがわかる。再生光の角度の変化が約10°変わったときの $u'v'$ 座標上での平均の色変化の大きさは $\Delta E = 1.4 \times 10^{-2}$ となっており、633 nm, 515 nm, 477 nm の波長で再生されるリップマンカラーホログラムの場合の1/5以下である。このことより、理論解析で求められた620 nm, 540 nm, 460 nm の組合せによって、再生照明光が変化しても再生像の色変化が少ないことを確認することができた。なお、再生像の色が違っている原因は、作製において R, G, B の色バランスを整えるのが難しく、他の2色に比べて B 成分が30%程度強くでたためである。今後、この点については改善を行う必要がある。



Lippmann Color Hologram

Fig. 11. Arrangement for measuring the color of reconstructed image.

#### 4. 3次元物体のリップマンカラーホログラムの検討

理論および実験による検討で、620 nm, 540 nm, 460 nm の波長で再生されるホログラムで色の変化が小さくなることがわかった。そこで、カラーディスプレイとして用いることを考えて、これらに近い波長で再生される3次元物体のリップマンカラーホログラムを作製した。

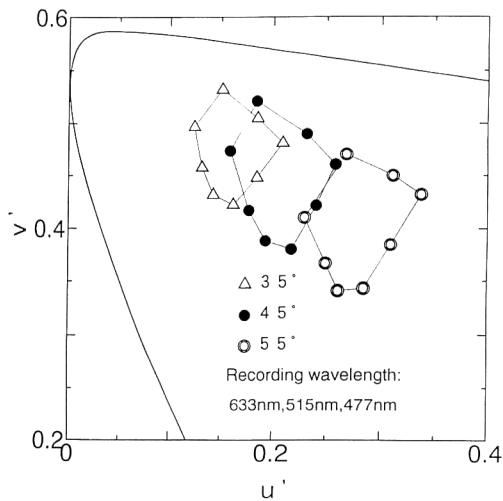


Fig. 12. CIE diagram representing the change in color of the reconstructed image due to the change in angle of the illuminating beam.

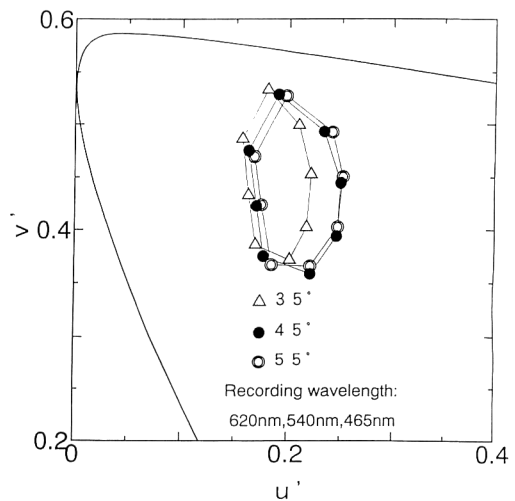


Fig. 13. CIE diagram representing the change in color of the reconstructed image due to the change in angle of the illuminating beam.

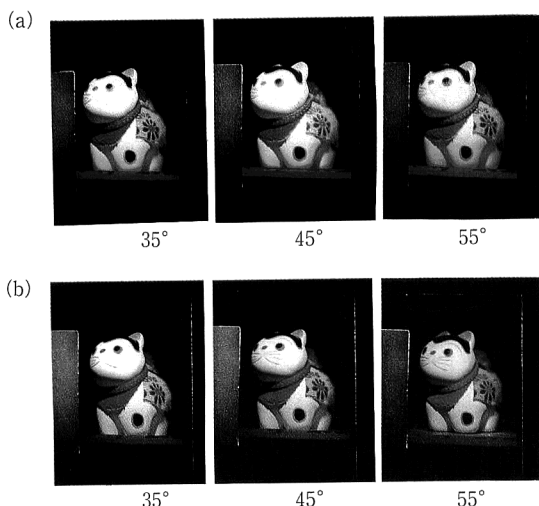


Fig.14. Photographs of the reconstructed image. (a)Recording wavelength: 620 nm, 540nm, 460 nm, (b)Recording wavelength: 633 nm, 515nm, 477 nm.

作製の方法は、カラーチャートのホログラムを作製した場合と同様である。Fig. 9 のような光学系を用いて、ソルビトール水溶液により記録材料の厚みを適当に変化させながら PFG-03 C 上にイメージ型のホログラムを作製した。なお、作製したホログラムは、ほぼ 620 nm, 540 nm, 465 nm の中心波長で再生されるホログラムとなった。

作製したリップマンカラーホログラムを 35°, 45°, 55°の角度の照明光で再生したときの写真を Fig. 14(a) に示す。また、比較のために 633 nm, 515 nm, 477 nm の波長で再生されるリップマンカラーホログラムについて同様の写真を Fig. 14(b) に示す。

写真より、45°再生の場合には 2 つのホログラムにほとんど違いはなく、きれいな再生像が得られていることがわかる。620 nm, 540 nm, 465 nm の波長で再生されるホログラムでは、撮影波長と再生波長が違っているので若干の色ずれが生じるはずであるが、今回の場合には撮影と再生の波長の変化量が小さく、また画像の立体感も数 cm 程度と小さいこともあって、まったく気にかからない程度となっている。

一方、55°再生の場合の像をみると、633 nm, 515 nm, 477 nm の波長で再生されるホログラムのほうでは

物体として用いた駒犬の体が赤みを帯びている。これに対して 620 nm, 540 nm, 465 nm の波長で再生されるホログラムでは、45°の場合とほとんど変わらない体の白い駒犬の像が得られている。

これらの結果より、リップマンカラーホログラムを 620 nm, 540 nm, 460 nm の波長に近い波長で再生させることにより、再生条件による色変化の小さい、きれいなカラー 3 次元像が得られることがわかった。

## 5. おわりに

本研究では、リップマンカラーホログラムに関して、再生照明光の角度が変化した場合について、結合波理論に基づいた波長選択性から CIE 座標上での再生像の色変化の解析を行った。

その結果、再生照明光の角度が変化した場合、R, G, B の再生波長を 620 nm, 540 nm, 460 nm としたときに再生像の色変化が最小となることがわかった。

また、これらの結果に基づいて、620 nm, 540 nm, 460 nm に近い波長を用いてリップマンカラーホログラムを作製し、再生照明光の角度が変化しても再生像の色変化が少ないカラー 3 次元像を得ることができた。

本研究においては、リップマンカラーホログラムの再生像の色を CIE 座標で検討している。しかし、観察条件によっては、色順応などを考慮した他の座標系が適している場合があり、今後この検討を行っていく必要がある。

## 文 献

- 1) 久保田敏弘, 西村正雄: “カラーホログラフィによる文化財の記録・展示 (I) —最適色再現の解析”, 日本写真学会誌, **53** (1990) 291-296.
- 2) P. M. Hubel and L. Solymar: “Color-reflection holography: theory and experiment,” *Appl. Opt.*, **30** (1991) 4190-4203.
- 3) K. Bazargan: “Factors affecting the choice of optimum recording wavelengths in true-color holography,” *Proc. SPIE*, **1600** (1991) 178-181.
- 4) D. J. Cooke and A. A. Ward: “Reflection-hologram processing for high efficiency in silver-halide emulsions,” *Appl. Opt.*, **23** (1984) 934-941.
- 5) 池上皓治: “ホログラム用感光材料と処理”, ホログラフィックディスプレイ, 社内順平編著 (産業図書, 1990) pp. 212-243.