

# ガスレーザーと固体レーザーによる光学的なフーリエ変換 ホログラムの作製と再生カラー画像の視覚的な見え方への影響

假屋 誠<sup>\*1</sup> 上原 忍<sup>\*2</sup> 飯塚 昌之<sup>\*3</sup> 中嶋 芳雄<sup>\*4</sup> 高松 衛<sup>\*4</sup>

Fabrication of Optical Fourier Transform Hologram using Gas and  
Nd:YAG Lasers and Influence on Visual Appearance of Reconstructed Color Images

Makoto Kariya<sup>\*1</sup>, Shinobu Uehara<sup>\*2</sup>, Masayuki Iizuaka<sup>\*3</sup>,  
Yoshio Nakashima<sup>\*4</sup>, Mamoru Takamatsu<sup>\*4</sup>

A blue white He-Cd laser composed of three R/G/B component beams can be directly applied to fabricate the optical Fourier transform hologram (OFTH) in place of He-Ne laser on condition that a red sensitive photographic film or plate is used. A green or blue Nd:YAG laser pumped by a laser diode is applied to fabricate the OFTH using the same material for holography. The visual appearance of deteriorated color images with cross-talk is discussed in comparison with that of an ordinary and optical FTH which can be made using a monochromatic He-Ne laser. The characteristic effect of He-Cd laser is quantitatively checked from the viewpoint of the relative position and its size of overlapped real images, so called  $\pm$  the first order diffractive images, in the OFTH against reconstructed virtual ghost images in the Fresnel hologram.

## 1. まえがき

1960年以後、種々の単色性のガスレーザーが実用化され、多色（マルチカラー）波面再生技法のアイデアが、LeithとUpatnieksにより提案された<sup>(1)-(2)</sup>。FriesemとFedorowiczは2種類のガスレーザー：Arレーザー（448.0；514.5 [nm]）とHe-Neレーザー（632.8 [nm]）を使用して簡単な光学系で3次元のマルチカラーの再生像（虚像）を実現した<sup>(3)</sup>。通常、ArレーザーとHe-Neレーザーからのビーム光出力を混合して、カラーホログラムを作製し、再生する過程で各波長に対するホログラム感光材料の特性や再生時の回折効率（視覚的な明るさ）等を含めて、クロストークと呼ばれるゴースト再生像が観察される。青白色He-Cdガスレーザーは、1本のレーザー発振管から赤・緑・青（R/G/B）色の光の3原色を同時に同じ光軸上で発振可能なために多くの技術分野で

利用されている。筆者らは、小糸製作所から商品化された青白色He-Cdレーザーを使用してカラーホログラムを作製した。カラーホログラフィー技法向きの光学系、R/G/B成分光に関する銀塩感光材料の分光感度（吸光度）特性、ゴースト再生像が生じる原因、視覚的な再生像の大きさと奥行き感等に関して検討した<sup>(4)-(5)</sup>。

リアルな3次元対象物体の可視化やカラーディスプレイ手段として、ゴースト像を簡便に除去するために光学系を工夫して単色のレーザー（例えば、He-Neレーザー）で対象物体を記録して、白色光（例えば、白熱電球、ハロゲン電球等）で再生可能なカラーホログラフィー技法が広く提案・実用化されている。白色光で再生可能なカラーホログラム作製技法としては、(a)リップマン形、(b)イメージ形、(c)レインボウ形、(d)反射・エンボス形、(e)ステレオ形等が知られている<sup>(6)-(9)</sup>。

光学的なフーリエ変換ホログラムは、文字あるい

<sup>\*1</sup> (株)ジェムコ <平成14年3月、本学電子工学科卒業>

<sup>\*3</sup> 東京工芸大学工学部電子情報工学科

2003年9月1日 受理

<sup>\*2</sup> (株)メイテック <平成14年3月、本学電子工学科卒業>

<sup>\*4</sup> 富山大学工学部知能情報工学科

はパターン認識のようなマッチド・フィルタリング技法用の複素空間フィルターとして大変に重要であり、単色でコヒーレントなレーザー光を使用して、簡単な光学系で作製できる<sup>(10)・(12)</sup>。その再生像は、スクリーン上で±1次の回折像、すなわち実像として観察される。

光学的な技法によりホログラムを記録・作製する場合、(1)レーザー光の種類と出力、(2)高解像度ホログラフィー用感光材料の分光特性と指定の現像剤、(3)フレネルホログラム、フーリエ変換ホログラム、白色光再生ホログラムなどを記録・作製するための適切な光学系、(4)レーザー光の出力に関連する露光時間、可干渉距離、物体光と参照光の強度比、(5)振動防止対策、(6)再生像を記録・評価するための接写撮影手段等を総合的に考慮する必要がある。

本研究では、簡単な光学系でフーリエ変換ホログラムを記録・作製するために、2種類のガスレーザー(He-NeとHe-Cd)と第2高調波方式(SHG, Second Harmonic Generation)によるレーザーダイオード励起(Nd:YAG)固体レーザー(以後、Nd:YAG 固体レーザーあるいは簡便に固体レーザーと略記)市販されている赤感度用のホログラフィー銀塩感光材料を使用する。特に、このホロー陰極形He-Cdレーザーの3波長成分光のパワー強度は、R/G成分光(約5~6mW)に対して、B成分光(約15mW)はほぼ3倍の強度を有する。赤感度用フィルムあるいは写真乾板を使用すると、He-Neレーザー光源(10mW)に相当するR成分光が光学的なフーリエ変換ホログラム作製時に寄与することを提案する。従来の干渉現象、単一露光にもとづくホログラフィー技法の場合、ホログラムの定式化に必要とされる単色性(波長:一定)の条件が緩和されることを実験的に検証する。また、同じ光学系と感光材料を使用して、2種類のG/B成分光を有するNd:YAG 固体レーザーで光学的なフーリエ変換ホログラムを作製し、その再生像の見え方を2種類のガスレーザーの場合と比較検討する。

一般的に、ホログラムを記録・作製する際に使用する波長と再生時の波長が相違すると再生像の奥行き感、すなわちカラー再生像の見かけの相対的な大きさ<拡大・縮小率:MR(Magnification Rate)>=「ホログラム再生時の波長」/「ホログラム作製

時の波長」>に影響を及ぼす。通常、He-Cdレーザーによる再生像では、クロストークと呼ばれるゴースト像が観察される。再生カラー画像の視覚的な大きさや見え方が、He-Neレーザーや2種類の固体レーザーを使用して作製した通常の光学的なフーリエ変換ホログラムと対比して議論される。さらに、フレネルホログラム再生像の倍率に関する理論的な近似式を適用して、光学的なフーリエ変換ホログラム再生像の倍率、すなわち相対的な大きさや見かけの位置を評価する。

## 2. 光学的なフーリエ変換ホログラム作製と定式化

一般的に、光学的なホログラフィー技法とその応用、フーリエ変換ホログラムの作製と再生には、単色でコヒーレントなレーザー光を使用する。

図1は光学的なフーリエ変換ホログラムの干渉縞の記録・作製と再生用の光学系である<sup>(13)</sup>。2次元的な透過性の対象物体と参照光に相当する点光源は同じ平面上に位置している。

2次元的な対象物体(入力画像): $o(x, y)$ のフーリエ変換は、物体光に相当して次式で定義する。

$$O(\xi, \eta) = F[o(x, y)] \\ = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} o(x, y) \times \exp[-j2\pi(x\xi + y\eta)] dx dy \dots\dots (1)$$

ここで、 $j$  : 虚数単位

$x, y$  : 実空間座標

$\xi, \eta$  : 空間周波数座標

$F[-]$  : フーリエ変換演算子

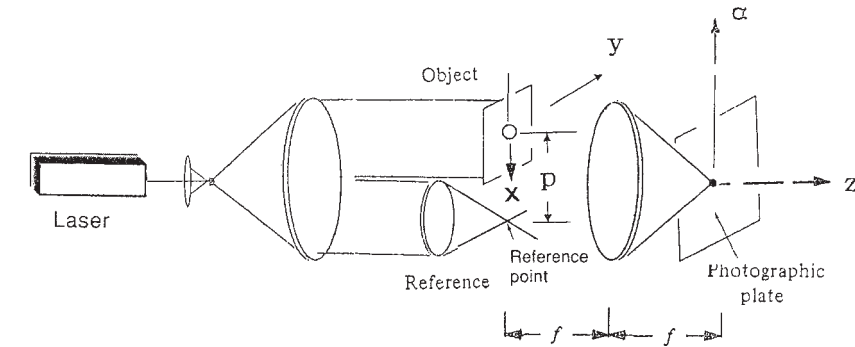
2次元的な対象物体の中心をx-y座標系の幾何学的な原点とすると、参照光に相当するx軸上の位置pにある点光源: $Cax(x-p, y)$ のフーリエ変換は、次式で定義できる。

$$R(\xi, \eta) = F[Cax(x-p, y)] \\ = Cax \exp(-j2\pi p\xi) \dots\dots (2)$$

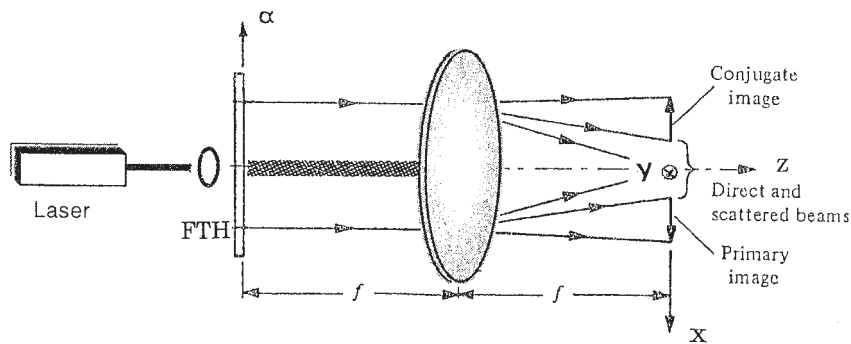
ここで、 $Ca$  : 定数

$\delta(x, y)$  : デルタ関数

図1(a)のホログラム感光材料上の干渉縞の強度分布は、(1)式の物体光と(2)式の参照光を使用して、次式で表記できる。



(a) Record and fabrication of FTH



(b) Reconstruction of FTH

< Magnification figure >

図1 光学的なフーリエ変換ホログラフィー技法

Fig.1 Optical Fourier transform holography techniques

$$I(x, y) = |R(x, y) + O(x, y)|^2 \\ = Ca^2 + |O(x, y)|^2 \\ + Ca \times O(x, y) \exp(j2\pi p) \\ + Ca \times O^*(x, y) \exp(-j2\pi p) \dots\dots (3)$$

ここで、\* : 共役記号

(3)式にもとづく干渉縞の強度分布は、定数kの線形処理として写真現像を行うことにより、ホログラムが作製・記録できる。すなわち複素振幅透過率分布に変換され、次式で表記できる。

$$U(x, y) = k \times I(x, y) \dots\dots (4)$$

ここで、k : 線形定数

ホログラムの再生過程では、点光源の代わりに再生照明光、すなわち平行な平面波:  $Cb = 1$  (振幅一定)を仮定して、図1(b)の凸レンズによる逆フーリエ変換作用を(4)式に適用する。ホログラ

ムから回折される再生像は4つの項により表記できる。

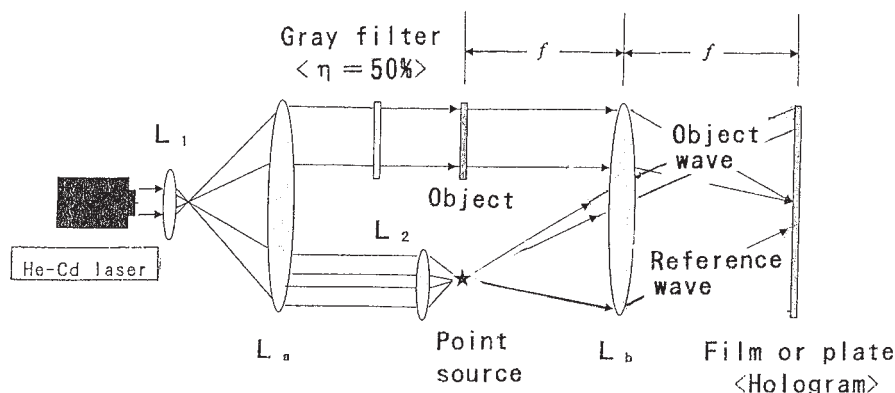
$$u(x, y) = F^{-1}[Cb \times U(x, y)] \\ = k \times Ca^2 \times \{ (x, y) \\ + (1/Ca^2) \times \{ o(x, y) \\ o(x, y) \} \\ + (1/Ca) \times o(x - p, y) \\ + (1/Ca) \times o^* \\ (-x + p, -y) \} \dots\dots (5)$$

ここで、Cb: 再生照明光 (平面波の振幅、一定)

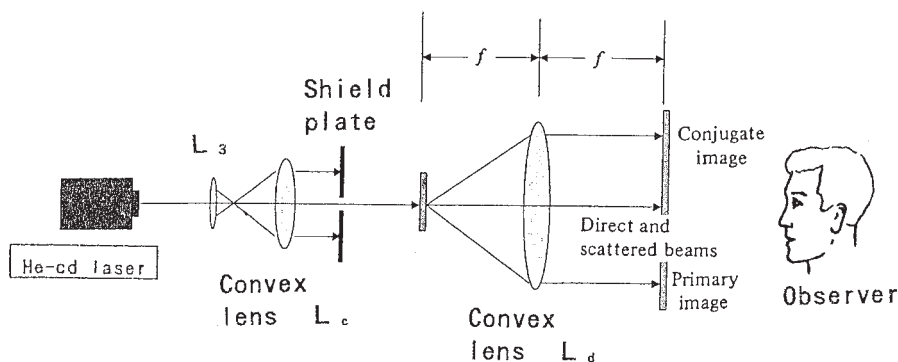
$F^{-1}[-]$ : 逆フーリエ変換演算子

: 自己相関演算記号

(5)式の第1項はホログラム再生面における光軸上の焦点(点光源)となる。第2項は原画像に関する自己相関、すなわち焦点周辺の散乱光となる。第3項は距離pだけ下向きに変位した原画像(実



(a) Record and fabrication of FTH



(b) Reconstruction of FTH

図2 He-Cd レーザーによるフーリエ変換ホログラフィー技法用の実際的な光学系

Fig.2 Practical optical setup for Fourier transform holography techniques using He-Cd laser

像)に相当する。第4項は距離 $p$ だけ上向きに変位し反転した共役画像(実像)となる。第3項と第4項は、フーリエ変換ホログラムの再生像で $\pm 1$ 次の回折像と呼ばれる。

### 3. He-Cd レーザーの特徴とフーリエ変換ホログラムの再生カラー像

He-Cd レーザー(小糸製作製、型番 KLP-330、定格光出力 30 mW)は、R/G/B 成分光の 3 波長を同時に発振するレーザー光源である。1 本のレーザー発振管から光の 3 原色を同時に発振して、見かけ上は青白色の可視光として観察できる。ホロー陰極形で紫外から近赤外の波長領域にわたって、計 12 本の発振線が確認されている<sup>(14)</sup>。これらの中

で可視光領域にある R/G/B 成分光(赤:  $r = 635.5$  と  $636$  [nm]、緑:  $g = 533.7$  と  $537.8$  [nm]、青:  $b = 441.6$  [nm] の計 5 本の発振線)が、カラーホログラフィー技法あるいは光学的フーリエ変換ホログラム作製のために有効に使用できる。

本研究で使用する He-Cd レーザーの定格出力は、約 25 ~ 30 [mW] で、各 R/G/B 成分光の割合は光軸を調整して、(5 ~ 6):(5 ~ 6):(15 ~ 18) [mW] に設定されている。なお、He-Cd レーザーは電源部とレーザー発振管部から構成され、AC 100 [V] で駆動、空冷のため設置場所の制限を受けない。

図2は実際にフーリエ変換ホログラムを作製するための光学系と再生用の光学系である。同図(a)

で、対物レンズ  $L_1$  と凸レンズ  $L_a$  は、平行なレーザー光を準備するためのコリメーター光学系である。凸レンズ  $L_b$  は 2 次元の対象物体（入力画像）からの透過光を物体光としてフーリエ変換する機能と、対物レンズ  $L_2$  からの発散光を平行な参照光に変換する。対物レンズ  $L_2$  は、簡便に球面波を作り、凸レンズ  $L_b$  を通過させることにより平行なレーザー光に変換後、参照光としてホログラム感光材料に入射させるために必要である。この光学系の特徴は、R / G / B 成分光分離用の 2 種類のダイクロイックミラー（2 色性フィルター）、ミラー、ビームスプリッター等を使用せず、光軸上で直線的な光学部品配置で参照光と物体光を分離している。灰色フィルターは 2 次元対象物体（スライド形式の透過物体）からの透過光の強度を調整するため物体光の光路中に挿入して使用する。同図（b）のフーリエ変換ホログラム再生用光学系の場合、対物レンズ  $L_3$  と凸レンズ  $L_c$ 、凸レンズ  $L_d$  は、同図（a）の対物レンズ  $L_1$  と凸レンズ  $L_a$ 、凸レンズ  $L_b$  と同じレンズで置き換え可能である。遮光板（例えば、直径 5 mm 程度の小孔）はフーリエ変換ホログラムに狭い再生光を入射するために使用する。

図 3 は 2 種類のホログラフィー用感光材料の分光感度特性、すなわち波長と吸光度（光学濃度）の関係を示す。図 3（a）は主として赤感度用（コダック製、型番 SO - 253）である。一方、同図（b）は、パנקロマチック特性を有するホログラフィー用感光材料の分光感度であり、R / G / B 領域中に代表的な 3 種類のレーザーの発振波長を示す。カラーホログラムを作製するために使用できるが現在生産中止されている。現在、代替品として、リトアニア製 PFG - 3C が入手できる。使用するレーザーの種類や特性に合わせて、種々の特性を有する感光材料が研究開発、実用化されている<sup>(5)</sup>。特に、銀塩感光材料は、簡便で指定の現像剤と共に、ホログラフィー技法のために広く使用されている。縦軸は吸光度あるいは光学濃度とも呼ばれ、 $\log_{10}(I_{in}/I_{out})$  にもとづく常用対数目盛りのため、1 目盛りが 10 倍の感度差に相当する。He - Cd レーザーを使用する場合、R 成分光（最大値として 1.8、He - Ne レーザーあるいは He - Cd レーザー領域で 1.7）の分光感度は、G / B 成分光（Ar レーザー領域で平均値として 0.8 ~ 0.9、He

- Cd レーザー領域で 1.1）の分光感度に対してほぼ 4 倍の高感度を有する。なお、上記の分光感度差  $w$  は、吸光度目盛り差  $d$  として、 $w = 10^d$   $10 \times d^2$ （0.6  $d$  1.0）で近似的に評価できる。

図 4 はコダック製のホログラム記録・作製用フィルムに、He - Ne レーザー（カンタムエレクトロニクス製、型番 3230H-PC-: 10 mW,  $r = 632.8$  nm）でフーリエ変換ホログラムを作製して、2 種類のレーザー、（a）He - Ne レーザーと（b）青白色 He - Cd レーザー、すなわち同時に R / G / B 成分を含む合成光で直接的に再生した場合である。フーリエ変換ホログラムを He - Cd レーザーで再生した場合、スクリーン上の中心から左右対称に 3 種類の実像が見かけ上 B、G、R の順に観察される。緑および青色の再生像（実像）はクロストーク像に相当して相対的な大きさや位置は互いに相違する。

一般的なフレネルホログラムの場合、単色性の波長、例えば、R 成分光の波長  $r$  によるホログラムを作製後に、He - Cd レーザー（R / G / B 成分の合成光）にもとづく再生過程に関して、ホログラムからの回折状態、すなわち R 成分光による 1 つの

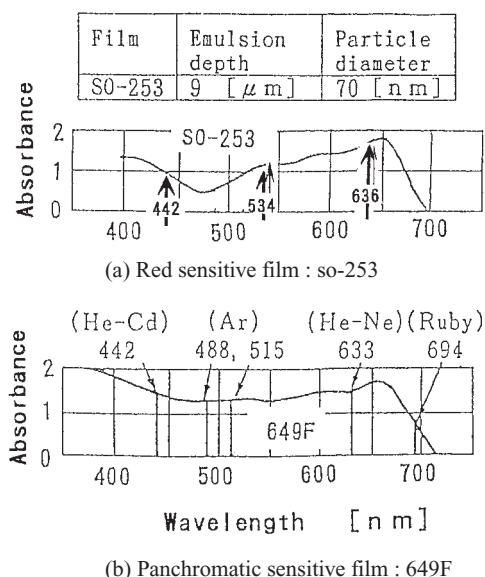


図 3 銀塩ホログラフィー用感光材料の分光感度  
Fig.3 Spectral sensitivity curves for silver halide horographic materials



White input image with black background (Transparency)

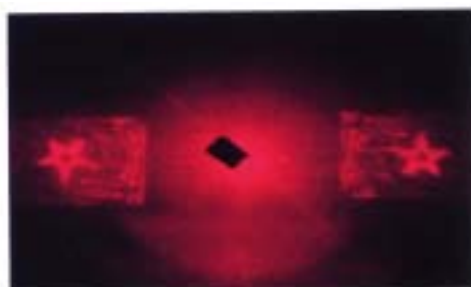
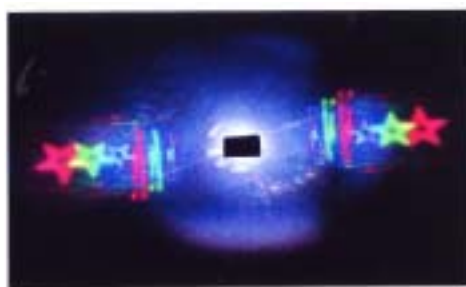
(a) Reconstruction using He-Ne laser  
<  $r = 633 \text{ [nm]}$  >(b) Reconstruction using He-Cd laser  
with R/G/B beams

図4 He-Ne レーザーにより作製されたフーリエ変換ホログラムの再生カラー像の比較

Fig.4 Comparison of reconstructed color images of OFT fabricated by He-Ne laser

真の再生像（虚像）とG / B成分光による2つのクロストーク像（虚像）が分離される。

図5は図4の場合と同様なホログラム記録・作製用フィルムを使用して、直接的にHe - Cdレーザーでフーリエ変換ホログラムを作製後、おのおの4種類のレーザーによる再生カラー像である。同図（a）（b）（c）の場合には、おのおの3種類のレーザーを独立にR、G、B色による再生カラー像でクロストーク像は観察されない。なお、同図（b）と（c）では、おのおのNd:YAG 固体レーザー<島津製作所製、型番 HK-5526-01: 50mW,  $g = 532 \text{ nm}$ と、型番 HK-5512-01: 30mW,  $b = 473 \text{ nm}$ >を使用して再生像を観察した。一方、同図（d）の場合、He - Neレーザー<10mW,  $r = 632.8 \text{ nm}$ >でフーリエ変換ホログラムを作製したときと同様に、スクリーン上に3種類の実像がB、G、Rの順に観察され、緑および青色の再生カラー像はクロストーク像に相当する。He - Cdレーザーには独立に3種の単色性の波長成分が含まれており、ホログラム再生時に使用するとクロストーク像が観察される。赤感度用のホログラフィー感光材料（フィルム）を使用しているため、見かけ上、R成分光

<すなわちHe - Neレーザー>にもとづくフーリエ変換ホログラムと等価的で類似なホログラムが簡便に作製できる。

図6は入力画像として、白い背景中に黒い文字「光」を使用し2種類のカスレーザー（He - NeレーザーとHe - Cdレーザー）と2種類のNd : YAG 固体レーザー（緑と青色）によりフーリエ変換ホログラムを作製後、おのおののレーザーによる再生カラー像を比較した場合である。2種類のカスレーザーによる再生像は視覚的にほぼ類似の見え方で、He - CdレーザーはHe - Neレーザーの代替の光源として利用できる。一方、緑色と青色固体レーザーの場合、原理的に単色光でホログラムを作製後、同じレーザーでの再生カラー像はある程度文字は識別・観察できる。例外として、図6（c）-（2）- の場合には、かなり鮮明な再生像が得られた。これは再生時に使用した緑色固体レーザーの出力が50mWと高いことに起因する。結果として、本研究で使用したホログラム記録・作製フィルム（常用対数感度目盛りのSO - 253特性、図3（a）を参照）は、緑および青色光に対してもやや低い分光感度を有することが実験的に検証された。フーリ

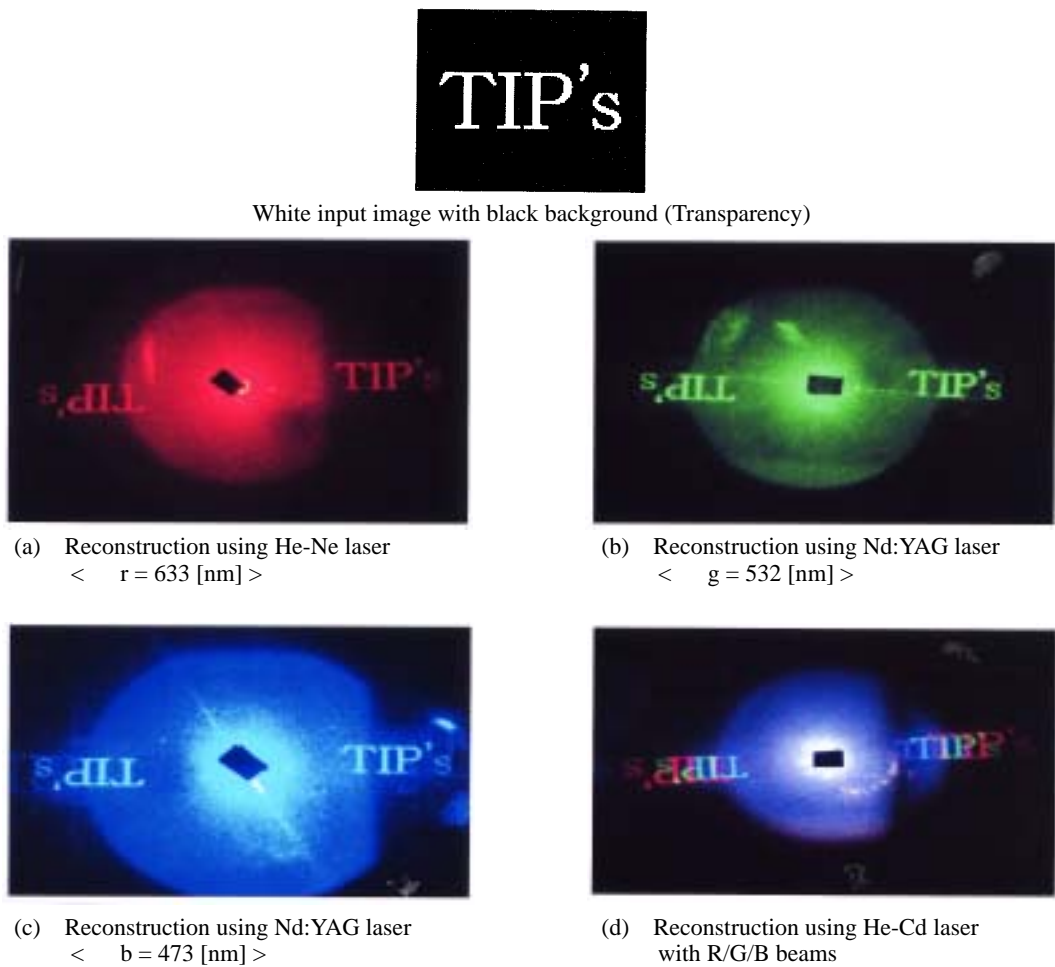


図5 He-Cd レーザーにより作製されたフーリエ変換ホログラムの再生カラー像の比較  
Fig.5 Comparison of reconstructed color images of OFT fabricated by He-Cd laser

表 1 光学的なフーリエ変換ホログラム再生像  
に関してレーザーと露光時間による視覚  
的な見え方の主観評価  
Table 1 Subjective assessment of visual appearance  
caused by typical lasers and exposure time in  
the case of optical Fourier transform hologram

Exposure time [s]	He-Ne laser [10mW]	Green LD laser [50mW]	Blue LD Laser [30mW]	Blue with He-Cd laser [30mW]
1/8				
1/4				
1/2				
1				
2				
3				

<Symbol> : fine & clear, : good & passable  
: a little blur with noise, : bad & poor  
: invisible

エ変換ホログラムの作製の場合には、直線上の光学系で、さらに対象物体からの透過光を直接的に物体光とみなして、効果的にレーザーの出力を使用している。しかし、一般的なフレネルホログラムを作製する際には、参照光に対して、3次元物体からの拡散・反射する物体光の強度が弱く、赤感度用ホログラフィー感光材料（フィルム、乾板）で干渉縞を記録することはかなり困難である。

表1は2種類的气体レーザーとNd:YAG固体レーザーを使用して、フーリエ変換ホログラムを作製後、おののおののレーザーで再生した場合、再生画像の見え方に関する主観的な5段階の評価結果である。レーザーの種類とその出力により露光時





Black input image with white background (Transparency)



(1) Reconstruction using He-Ne laser

(3) Reconstruction using Nd:YAG blue laser

(2) Reconstruction using Nd:YAG green laser

(4) Reconstruction using He-Cd laser

(a) Fabrication by He-Ne laser



(1) Nd:YAG green laser

(2) Nd:YAG blue laser

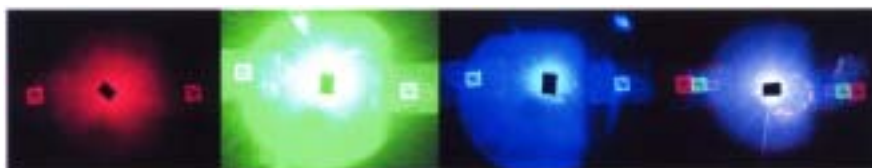
(b) Fabrication by Nd:YAG green laser



(1) Nd:YAG green laser

(2) Nd:YAG blue laser

(c) Fabrication by Nd:YAG blue laser



(1) He-Ne laser

(3) Nd:YAG blue laser

(2) Nd:YAG green laser

(4) He-Cd laser

(d) Fabrication by He-Cd laser with R/G/B beams

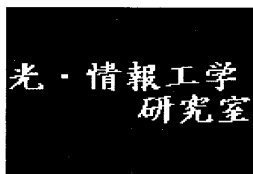
図6 4種類のレーザーにより作製したフーリエ変換ホログラムの再生カラー像

Fig.6 Comparison of reconstructed color images after fabricating FTH using four types of lasers

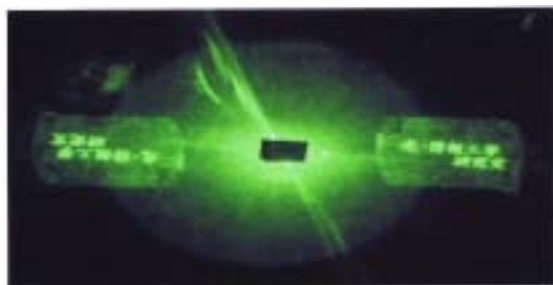
間を変えて、再生像の見え方(明るさを含めた鮮明さ)におよぼす影響を検討した。2種類の固体レーザーに対して、ガスレーザーにもとづく再生結果は明るく鮮明であり、He-CdレーザーはHe-Neレーザーの代替となりうる。なお、2次元的な対

象画像としては、数種類の簡単な文字や記号を、また赤感度用ホログラフィーフィルムを使用した。再現性のあるホログラムを作製するためには試行錯誤的な経験も必要で有効となる。

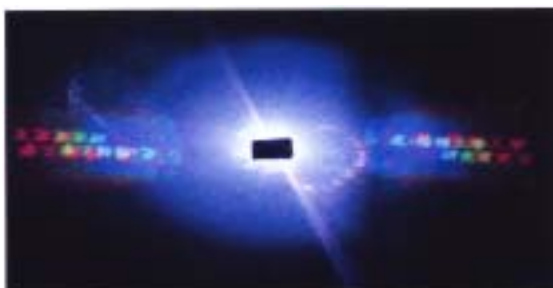




White input image with black background (Transparency)



(a) Reconstruction using Nd:YAG green laser



(b) Reconstruction using He-Cd laser with R/G/B beams

図7 He-Cd レーザーにより作製したフーリエ変換ホログラムの2種類の再生カラー像

Fig.7 Reconstructed color images by two types of lasers after fabricating FTH using He-Cd laser

図7は図4～図6の場合と同様なフィルムを使用して、直接的にHe-Cdレーザーでフーリエ変換ホログラムを作製後、緑色固体レーザーとHe-Cdレーザーによる再生カラー像である。同図(a)の再生カラー像に対して、同図(b)の場合にはクロストーク像がお互いに重なり合い、再生カラー像を劣化させている。結果として、入力画像の文字を忠実に識別・再現することが困難な一例である。

図8はHe-Cdレーザーと赤色のダイクロイックミラーによりR成分光を分離して、3次元的な対象物体のフレネルホログラムを作製後、He-Cdレーザーにもとづく再生カラー像である。対象物体はプラスチック製のプラモデルで、3種類の色と



図8 He-Cd レーザーの赤成分光により作製したフレネルホログラムを He-Cd レーザーによる再生カラー像

Fig.8 Reconstructed color image using He-Cd laser in Fresnel hologram fabricated by red beam component of He-Cd laser

大きさの異なる虚像が観察者の手前からR、G、Bの順に観察され、視覚的な奥行き感が識別できる。図4、図5、図6のHe-Cdレーザーによる再生カラー像と同様に、緑および青色の再生像はクロストーク像に相当する。

#### 4. 銀塩感光材料とホログラム作製に関する考察

多くの微小な点の集合から構成される対象物体と単色性の波長を有する点光源を仮定して、フレネルホログラムを作製後に別の異なる単色性の波長でホログラムを再生する場合には、縦・横および光軸（奥行き）方向の再生像の倍率に関する理論的な近似式が、既に提案されている<sup>(15) - (17)</sup>。ホログラムを記録・作製する際の波長を $\lambda_1$ 、ホログラム（フィルム）面を基準として、対象物体と参照光の位置をおのおの $(X_o, Y_o, Z_o)$   $(X_r, Y_r, Z_r)$ とする。再生する際の波長を $\lambda_2$ 、再生光の位置を $(X_p, Y_p, Z_p)$ とすると、ホログラムから回折される再生像（虚像）の位置 $(X_i, Y_i, Z_i)$ は、おのおの次式で算出できる。

$$\begin{aligned} X_i &= A x / B, \\ Y_i &= A y / B, \\ Z_i &= A z / B \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここで、

$$A_x = X_p Z_o Z_r + R (X_o Z_p Z_r - X_r Z_p Z_o)$$

$$A_y = Y_p Z_o Z_r + R (Y_o Z_p Z_r - Y_r Z_p Z_o)$$

$$A_z = Z_p Z_o Z_r$$

$$B = Z_o Z_r + R (Z_p Z_r - Z_p Z_o)$$

$$\text{波長の比: } R = \lambda_2 / \lambda_1$$

再生像の縦・横および光軸（奥行き）方向の倍率： $M_x y$ と $M_z$ は、おのおの次式で算出できる。

$$M_x y = \left[ 1 + Z_o \left\{ 1 / (R Z_p) - 1 / Z_r \right\} \right]^{-1} \cdots \cdots (7a)$$

$$M_z = (1/R) \cdot [M_x y]^2 \cdots \cdots (7b)$$

もし、式(7a)および(7b)で、光軸方向の位置： $Z_o$ 、 $Z_p$ 、 $Z_r$ に配置すれば、近似的に $M_x y = M_z = R = \lambda_2 / \lambda_1$ が成り立つ。

一般的に、ホログラムを記録・作製する際に使用する波長と再生時の波長が相違すると再生像の相対的な大きさや奥行き感、すなわち再生カラー像の見かけの大きさ・拡大・縮小率:MR 「ホログラム再生時の波長 $\lambda_2$ 」/「ホログラム作製時の波長 $\lambda_1$ 」>に影響を及ぼす。

図8の再生カラー像の場合、He-Cdレーザーの赤成分光( $\lambda_r = 636 \text{ nm}$ )による再生像を基準にして、緑および青色に関する再生像の見かけの大きさ、すなわち $\lambda_g = 538 \text{ nm}$ 、 $\lambda_b = 442 \text{ nm}$ の数値を使用すると近似的な再生像の拡大・縮小率は、おのおのMR 0.85と0.69となる。一方、同図のカラー写真からの測定値(実測データ)より、緑および青成分に関する再生像の縦方向の縮小率は、おのおの4.6/5.4 0.85と3.7/5.4 0.68、また緑および青成分の横方向縮小率は、おのおの3.8/4.4 0.86と3.1/4.4 0.70となり、近似的な再生像の拡大・縮小率:MRの数値と一致する。なお、これらの結果は、フーリエ変換ホログラムの再生像、すなわち図4(b)、図5(d)、図6(a)および(d)(4)の場合、He-Cdレーザーにもとづく再生像の見かけの相対的な大きさや0次回折像に相当する中心部からの距離(位置)の評価にも適用できる。単色性のレーザー光源で作製したホログラムをHe-CdレーザーのようなR/G/Bを同時に含む光源で再生すると、相異なる2種類のクロストーク像が観察され、再生像の重なりや画質の劣化の原因になる。しかし、フレ

ネルホログラムの場合、再生カラー像の大きさや奥行き感が直観的に識別・観察できる効果もある。特に、現在市販されている赤感度用の銀塩感光材料(SO-253)は、緑および青色の固体レーザーで、情報量の少ない入力画像(例えば、2値化した文字や図形)のフーリエ変換ホログラムを作製する際には適用可能であるが、通常フレネルホログラムを記録・作製への適用は、可干渉距離や物体光と参照光の強度比の制限等で困難である。

## 5. まとめ

本研究で使用したホログラフィー用感光材料(SO-253)は、GあるいはB成分光にもある程度の分光波長感度を有する。He-CdレーザーのB成分光は、RおよびG成分光に対して約3倍の強度を有するが、赤感度用フィルムを使用することにより、見かけ上R成分光<He-Neレーザーの単色光に相当>がフーリエ変換ホログラムの干渉縞形成に寄与していることを実験的に確認した。単一露光にもとづくホログラフィー技法の場合、従来の干渉現象、すなわちホログラム記録・作製のための定式化に必要とされる単色性の条件が緩和された。2種類のダイオードレーザー励起固体レーザーで光学的なフーリエ変換ホログラムを作製し、その再生像の見え方を2種類のガスレーザーで作製した場合と比較すると暗くて劣化するもののこの赤感度用銀塩材料は適用可能であった。

He-Cdレーザーによるフーリエ変換ホログラムの再生過程では、フレネルホログラムの場合と同様に、クロストークと呼ばれるいくつかのゴースト像が同時に観察され再生像の画質や見え方に影響を及ぼす。フーリエ変換ホログラムの場合、スクリーン上のゴースト像は再生像の視覚的な奥行き感でなく±1次回折像、すなわち0次回折像の中心からの距離と見かけの大きさの変化として識別できる。

一般的に、光学的なフーリエ変換ホログラムやフレネルホログラムを記録・作製する際に使用する波長と再生時の波長が異なる場合、再生像の見かけの相対的な拡大・縮小率:MRへの影響は、理論的な近似式にもとづいて簡単に予測できる。なお、カラー写真結果にもとづく実測値と2種類の波長の比

にもとづく近似式の数値データとを比較し、理論的な近似値の妥当性を検証した。

## 文 献

- ( 1 ) E.N.Leith and J.Upatnieks: Reconstructed Wavefronts and Communication Theory, J.Opt.Soc.Am., Vol.52, No.10 (1962) pp.1123 - 1130
- ( 2 ) E.N.Leith and J.Upatnieks: Wavefront Re-Construction with Diffused Illumination and Three-Dimensional Objects, Vol.54, No.11 (1964) pp.1295 - 1301
- ( 3 ) A.A.Frisem and R.J.Fedorowicz: Recent Advances in Multicolor Wavefront Reconstruction, Applied Optics, Vol.5, No.6 (1966) pp.1085 - 1086
- ( 4 ) 飯塚昌之、牛田範彦、大熊良夫: He-Cd レーザーを使用したカラーホログラフィー技法、応用光学、Vol. 2、No. 3 ( 2 0 0 2 ) pp. 1 - 8
- ( 5 ) M.Iizuka et al. : Some Considerations on Cross - Talk of Reconstructed Diffractive Color Images using He-Cd Laser and Dichroic Mirror, Proc. SPIE, Vol.4659, (2002) pp.265 - 276
- ( 6 ) 沼倉俊郎編: “ホログラフィ”、コロナ社、( 1 9 7 4 )
- ( 7 ) 辻内順平: “ホログラフィー”、丸善、( 1 9 9 3 )
- ( 8 ) 辻内順平編著: “ホログラフィックディスプレイ”、産業図書、( 1 9 9 0 )
- ( 9 ) 久保田 敏弘: “ホログラフィ入門 原理と実際”、朝倉書店、( 1 9 9 5 )
- ( 1 0 ) A.V.Lugt: IEEE Trans on Information Theory, Vol.It-10, No.4, (1964) pp.139-145
- ( 1 1 ) A.V.Lugt: “Optical Signal Processing”, John Wiley & Sons, Inc. (1992)
- ( 1 2 ) A.W.Lohmann and D.P.Paris: Computer Generated Spatial Filters for Coherent Optical Data Processing, Applied Optics, Vol.7, No.4, (1968) pp.651 - 655
- ( 1 3 ) P.Hariharan: “Basics of Holography”, Cambridge University Press, (2001)
- ( 1 4 ) 小田雅弘他: 白色レーザー、光アライアンス、Vol.10、No.6 ( 1 9 9 9 ) pp.24 - 27
- ( 1 5 ) R.W.Meier: Magnification and Third-Order Aberrations in Holography, J.Opt.Soc.Am., Vol.55, No.8 (1965) pp.987-992
- ( 1 6 ) P.C.Mehta and V.V.Rampal: “Lasers and Holography”, World Scientific (1993)
- ( 1 7 ) J.W.Goodman: “Introduction to Fourier Optics”, McGraw-Hill (1996)