

# 回折レンズの設計手法およびナノコンポジット材料による回折効率向上

是永 継博<sup>\*,†</sup>・安藤 貴真<sup>\*\*</sup>・岡田 夕佳<sup>\*</sup>・西脇 青児<sup>\*</sup>・鈴木 正明<sup>\*</sup>

## Design Method of Diffractive Lens for Imaging Use and Improvement of Diffraction Efficiency by Laminating a Novel Nanocomposite Film on the Diffractive Lens

Tsuguhiro KORENAGA<sup>\*,†</sup>, Takamasa ANDO<sup>\*\*</sup>, Yuka OKADA<sup>\*</sup>, Seiji NISHIWAKI<sup>\*</sup> and Masa-aki SUZUKI<sup>\*</sup>

Diffractive lenses are expected to improve a chromatic aberration and a field curvature of optical systems. However, for capturing a color image, the quality of the image is reduced due to unnecessary diffractive light. This paper shows a novel diffraction grating lens with nanocomposite material, and the design method of the lens for imaging use.

**Key words:** camera, diffraction grating lens, lens design, nanocomposite material, diffraction efficiency

急速な普及拡大を示すモバイル機器のみならず、家電機器やセキュリティ用途など、あらゆる分野へのカメラ搭載が加速しており、カメラには小型化、低コストは元より、用途に応じて高解像化、高画素化、高感度化、広角化などの、さらなる性能向上が求められている。また、複数のレンズを平面的に配置した複眼カメラ光学系<sup>1)</sup>やPSF (point spread function) を応用したEDOF (extended depth of field)<sup>2)</sup>カメラのように、測距やぼけ画像の再生化などこれまでにない新しい機能を備えたカメラも提案されている。

半導体プロセス技術や画像処理技術といったデジタルならではの技術の進展は、高画素化（撮像素子の画素サイズの縮小）や高解像化、高感度化等に貢献するが、カメラ技術の生命線は、やはりレンズである。特に、撮像性能を維持しつつ、レンズ枚数をいかに少なくできるかは、銀塩写真技術以来の不変のテーマである。当然のことながら、レンズ枚数の削減は、レンズの直接コストを抑制できるだけでなく、カメラモジュール組み立て時のばらつき要因の削減につながるため、実装、検査コスト低減への寄与が大きく、カメラの小型化に最も貢献できる。

回折レンズは色収差や像面湾曲などの光学収差の低減に有効であり<sup>3)</sup>、球面、非球面レンズ等の屈折レンズに組み合わせることで、レンズ枚数を低減することができる。回折ピッチが波長に対して十分大きいブレード回折格子では、波長 $\lambda$ における $m$ 次回折効率が100%になる回折格子の段差 $d$ は、式(1)で与えられる。

$$d = \frac{m\lambda}{n(\lambda)-1} \quad (1)$$

ただし、 $n(\lambda)$ は波長 $\lambda$ におけるブレード回折格子材料の屈折率である。

式(1)において、右辺は、波長 $\lambda$ に伴って変化するため、最適な段差 $d$ も変化してしまう。いいかえれば、可視光波長全域（波長400~700 nm）にわたって、単一の段差 $d$ で回折効率を単一の次数（ $m$ 次）に維持することは不可能であり、 $m$ 次以外の回折光（不要回折光）が重畳され、撮影画像の画質が劣化してしまう。回折レンズが単一波長の使用を前提とする光ピックアップへの用途に限られているのは、このような理由による。

本稿では、ナノコンポジット材料を用いることで、回折効率の最適化を可視光波長全域にわたって実現した回折レ

\*パナソニック(株) R&D本部 デバイスソリューションセンター (〒570-8501 守口市八雲中町3-1-1)

\*\*パナソニック フォト・ライティング(株) 新規・応用商品部 (〒569-1193 高槻市幸町1-1)

†E-mail: korenaga.tsuguhiro@jp.panasonic.com

レンズについて説明する。また、その独自の設計手法（帰納的設計手法）や回折格子に起因するフレアを抑制する格子構造について述べる。

## 1. 回折効率の波長依存性低減

カメラに用いることを目的に、可視光波長全域にて、特定次数での回折効率の波長依存性を低減して不要な回折光の発生を抑制する回折レンズがすでに提案されている。具体的には、複数のブレイズ回折格子を対向配置する構成<sup>4)</sup>や、ブレイズ回折格子を別材料で被覆する構成<sup>5)</sup>である。これらはガラス材料を用い、交換型のデジタルカメラの望遠レンズとして市場投入されている。

### 1.1 ナノコンポジット白色回折レンズ

波長  $\lambda$  が可視光波長全域で下記の式 (2) を満たす材料によって、段差  $d$  のブレイズ回折格子の表面を被覆し、2つの材料の屈折率差によって波長の変化を補正することで回折効率の波長依存性の問題を回避することができる<sup>5)</sup>。

$$d = \frac{m\lambda}{|n_2(\lambda) - n_1(\lambda)|} \quad (2)$$

ここで、 $n_1(\lambda)$  はブレイズ回折格子材料の屈折率、 $n_2(\lambda)$  は回折格子面を覆う材料の屈折率である。式 (2) の等式を満足するためには、長波長側ほど2つの材料間の屈折率差を拡大させなければならず、 $n_1(\lambda)$  として低屈折率・高波長分散（低アッペ数）材料、 $n_2(\lambda)$  として高屈折率・低波長分散（高アッペ数）材料を用いる必要がある。なお、塗布する材料がレンズ基材よりも低屈折率の場合、ブレイズ回折格子形状は光軸方向に沿って上下反転させる。

実用上、ブレイズ回折格子材料と、回折格子面を覆う材料の組み合わせとして、可視光波長全域で、式 (2) を満たした上で双方の屈折率差の絶対値が大きい組み合わせにより、左辺の回折格子の段差  $d$  を小さくする。その理由は、回折格子の段差が大きいと、レンズを通過する全光束のうち、回折段差を通過する光線の割合が増加して光量ロスが顕著となるだけでなく、迷光が発生して画質に影響を生じるためである。また、回折輪帯のピッチを広くして回折段差を通過する光線割合を減らすと、回折による撮像性能の向上効果が制限されてしまう。

可視光波長全域にて式 (2) を満たす例として、ブレイズ回折格子材料として高屈折率・低波長分散のモールドガラスを用い、金型によるプレスでモールドガラス表面に回折格子ブレイズを形成し、これよりも低屈折率・高波長分散の UV 硬化樹脂で被覆することで分母の屈折率差 ( $d$  線) が 0.037 (20  $\mu\text{m}$  以下の回折段差に相当) の事例が示されている<sup>6)</sup>。

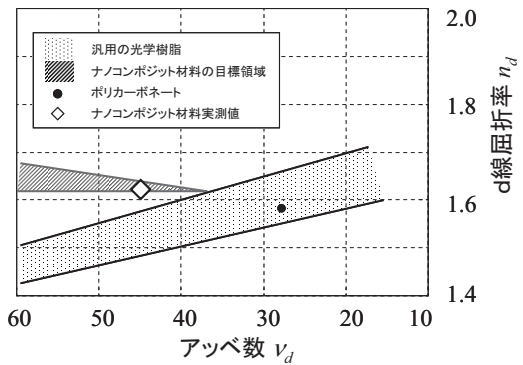


図1 樹脂材料の屈折率とアッペ数。

近年、カメラレンズとして樹脂レンズの採用が拡大している。樹脂は、金型による射出成形が容易であるため複雑な形状を大量に生産することが可能で、材料費が安価であり、ガラスに比べて軽量という種々の長を備える。カメラの高機能化、多機能化、小型化がますます求められる状況において、今後、樹脂レンズのさらなる進展が予想される。一方で、材料の屈折率は構成原子の原子屈折に依存し、樹脂材料では実際に使用できる元素が限定されるため、屈折率の制御範囲はガラスなどの無機材料に比べて狭い。したがって、屈折率とアッペ数の関係は図1に記載中の網掛け部に示される領域となるものがほとんどである。限定された汎用光学樹脂材料の選択肢の中での組み合わせで、可視光波長全域で式 (2) を満たすものは、屈折率差の絶対値が小さいものしかなく、1次回折を得る場合でも、少なくとも 50  $\mu\text{m}$  以上の深い段差の回折格子が必要となる。

そこで筆者らは、既存の樹脂材料に高屈折率低波長分散の無機ナノ粒子を分散させたナノコンポジット材料を用いることで、可視光波長全域にわたり、実用に供する回折段差深さで式 (2) を満足し、オール樹脂からなる回折レンズ構成を提案している<sup>7)</sup>。本レンズを“ナノコンポジット白色回折レンズ”とよぶ。

ナノコンポジット白色回折レンズを構成する低屈折率・低アッペ数のブレイズ回折格子材料として、熱可塑性汎用光学樹脂であるポリカーボネート樹脂 ( $n_d = 1.585$ ,  $v_d = 28$ ) を使用した場合、スカラー領域でのブレイズ回折格子の回折効率理論を用いると、1次回折効率が 90% 以上となる高屈折率・高アッペ数の材料の屈折率特性は図1の斜線領域に相当する。図2に、回折レンズ材料としてポリカーボネート、回折格子面を覆う材料としてナノコンポジット材料 ( $n_d = 1.623$ ,  $v_d = 40$ ) を用いたと仮定した場合、ナノコンポジット白色回折レンズの理論的回折効率の波長依存性 (実線) を通常回折レンズの特性 (破線) と重ねて

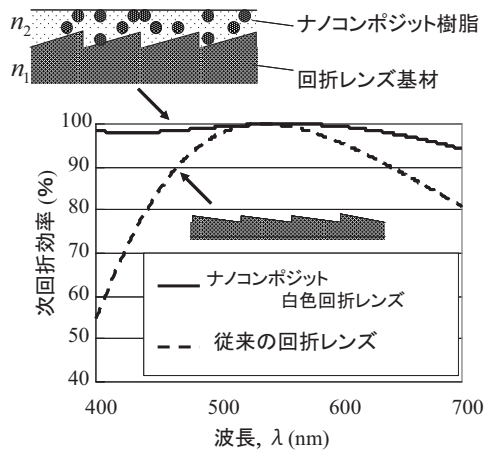


図2 1次回折効率の波長依存性(理論値).

示す。ナノコンポジット白色回折レンズの回折の段差  $d$  は  $15\ \mu\text{m}$  である。1次回折率が可視光域全域において理論上95%以上となり、不要な回折光を低減して、高性能レンズを実現できる。

### 1.2 ナノコンポジット材料の調製と回折効率の評価方法

図1の斜線領域の屈折率、アッペ数を得るために、ベースとなる紫外線硬化樹脂にナノ粒子材料を均一分散させてナノコンポジット材料膜を調製し、屈折率とアッペ数を実測し、理論値との比較を実施した。理論値は、誘電体混合物に適用される有効媒質近似の Maxwell-Garnett 理論<sup>8)</sup>にて、無機ナノ粒子、ベース樹脂のそれぞれの屈折率と体積比をパラメーターとしてナノコンポジット材料の屈折率を算出した。なお、ナノ粒子材料として、酸化チタン ( $n_d = 2.354$ ,  $v_d = 10$ ) と、酸化ジルコニウム ( $n_d = 2.096$ ,  $v_d = 36$ ) を使用した。

図3に、調製したナノコンポジット材料の屈折率・アッペ数の理論値と実測値を示す。ガラス基板上にナノコンポジット膜を形成し、プリズムカップラー装置(メトリコン社製プリズムカップラー2010)を使用して屈折率特性を確認した。ナノ粒子の体積比率が10, 30, 50体積%となるようにベース樹脂に分散させたナノコンポジット材料をそれぞれ作製し、波長405 nm, 532 nm, 633 nmにおける屈折率を測定して得られた測定値と屈折率分散式の近似式を用いてアッペ数  $v_d$  を算出した。酸化チタン、酸化ジルコニウムによるナノコンポジット材料の双方について検討した結果、いずれも無機ナノ粒子の体積比率の増大とともに屈折率が向上した。また、いずれにおいても理論値と実測値は比較的一致しており、Maxwell-Garnett 理論に基づいてナノコンポジット材料の屈折率およびアッペ数を設計できることがわかる。 $v_d = 10$  の酸化チタンを用いた場合には、少ない体積比率でもナノコンポジット材料のアッペ数

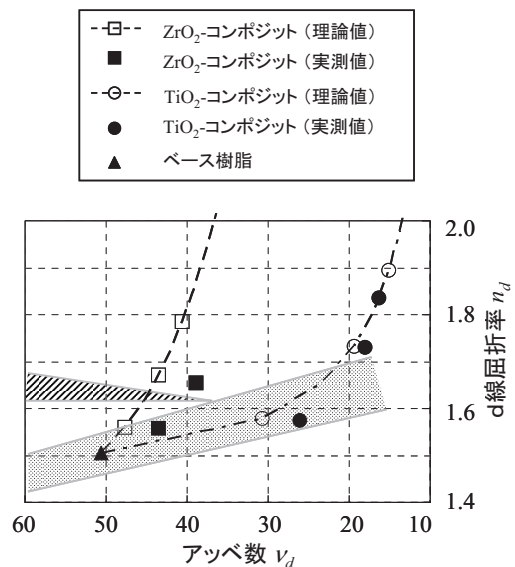


図3 ナノコンポジット材料の屈折率とアッペ数.

が小さくなってしまい、ナノ粒子の体積比率を上下しても図2の斜線領域の屈折率、アッペ数を実現できない。一方、 $v_d = 36$  の高いアッペ数を示す酸化ジルコニウムを用いれば、ナノコンポジット材料における高屈折率と高アッペ数の両立が可能であり、白色回折レンズ用として特に適していることがわかった。

光学レンズとして用いる場合、ナノコンポジット材料の透明性もきわめて重要である。無機ナノ粒子の粒径が波長より十分小さいナノコンポジット材料における透明性は、粒子によるレイリー散乱理論によって説明される<sup>9,10)</sup>。レイリー散乱は粒径、および粒子とベース樹脂との屈折率比の関数であり、かつ短波長ほど大きく影響するため、無機ナノ粒子と樹脂の屈折率差が大きいナノコンポジットにおいて透明性を確保するには、粒径が10 nm以下のナノ粒子を用い、ナノ粒子の分散状態を良好に維持することが求められる。小粒径の酸化ジルコニウム粒子(住友大阪セメント社製ナノジルコニア)を使用することによって、白色回折レンズに要求される膜厚( $30\ \mu\text{m}$ )において90%以上の可視光透過率を示すナノコンポジット材料が得られることを確認している。白色回折レンズ用途として、屈折率特性が  $n_d = 1.623$ ,  $v_d = 45$  になるようにナノコンポジット材料を調製し用いた。

非球面レンズの片面(有効径1.64 mm)上に鋸歯状回折格子(31本、深さ  $15\ \mu\text{m}$ )を同心円状に形成したレンズベースを、ポリカーボネート樹脂(帝人化成社製パンライトAD5503)を用いて射出成形で作製し、膜成形用の型を用いて表面が非球面形状となるようにレンズベース上に配置した未硬化状態のナノコンポジット材料に紫外線を照射



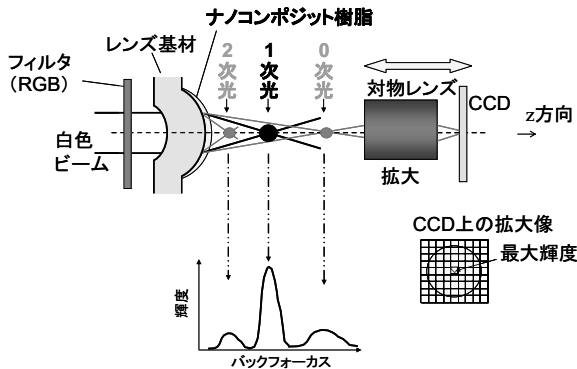


図4 回折効率の評価光学系.

し、これを硬化させることにより、屈折率調整したナノコンポジット膜を積層した白色回折レンズを作製した。

図4は回折効率の評価測定を行う光学系<sup>11)</sup>を示している。白色光源をR、G、Bの各波長フィルターを介して波長選択した後、測定対象である回折レンズに平行光を光軸(Z軸)に沿って照射すると、Z軸上に、レンズに近い側から高次の回折スポットが結像する。対物レンズをZ軸上に走査してCCD上で受光させることで、それぞれの回折スポット光を独立して観測することが可能になる。それぞれのスポットの輝度体積を測定することにより、R、G、B各波長においてナノコンポジット白色回折レンズにより集光される0次、1次、2次の各回折次数の回折効率を算出する。なお、試作したナノコンポジット白色回折レンズでは、各波長において-1次以下ならびに3次以上の回折光は確認されず、可視光波長全域で95%以上の1次回折効率が得られた。

## 2. 回折レンズの帰納的設計手法

カメラレンズ設計の際、レンズの面形状は非球面多項式で表現される。また、回折格子が形成された面では、非球面多項式に加え、位相多項式を合わせて面形状が表現される。通常、レンズ設計を行う際には、初期値を与え、数値計算により所望の目標性能を目指して個々のパラメータを変化させて漸次的に設計を行う。しかしながら、数値計算による最適化の場合は、得られる解は必ずしも最適解であるとは限らず、ローカルミニマムの問題が生じることがある。この場合、得られたレンズ性能は初期値データに依存する。広大な解空間の中で最良の最適解を確実に得るには、最適解に収束しうる範囲で、適切な初期値データを見つけ出すことが必要となる。筆者らは、解空間全体を探索し最適な初期値データを得る、新たな設計手法(帰納的設計手法)<sup>12)</sup>を考案した。

正弦条件はレンズに入る平面波を球面波に変換する条件

表1 カメラ光学系の目標仕様.

F値	2.8
半面角	±90 deg
レンズ枚数	2
焦点距離	1.6 mm

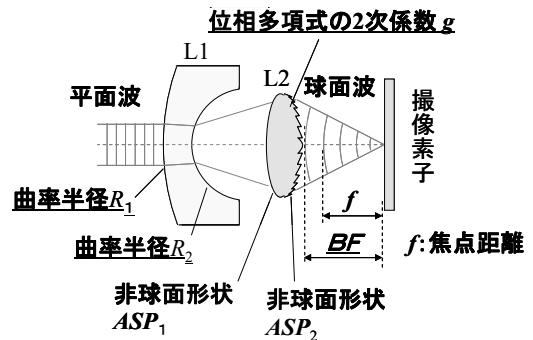


図5 解析マッピングのパラメータ.  $R_1$ : L1レンズの物体側の面の曲率半径,  $R_2$ : L1レンズの像側の面の曲率半径,  $g$ : 位相関数の2次の係数(回折パワーに相当),  $BF$ : バックフォーカス.

であり、入射平面波と集光点に向かう光線との交点が二次元面内で円(アポロニウスの円)を描き、球面収差、コマ収差を除去できるもので、集光レンズとしての理想的な条件である。

提案する設計手法は、この正弦条件を満足する、または正弦条件の不満足量を所定値内とすることを前提としている。これは、理想的な撮像条件からレンズ形状を決定する思想を用いたものであり、従来のようにレンズ形状を与えて、撮像性能を解析する設計手法とは全く逆の発想といえる。正弦条件を満足するレンズ形状は焦点距離やバックフォーカス等の任意の設定値に対して一意的に求まるため、非球面係数等の多くのパラメータを変化させる必要はなく、少ないパラメータで形状を決定できる特徴を有する。これにより、広範囲にわたる解空間を俯瞰することが可能となり、その中から代表点を複数抽出してそれらから最適解を推測する(=マッピング)、帰納的な設計手法である。

本設計手法を用いた具体例として魚眼カメラレンズの設計例を示す。表1は設計スペックであり、設計の際には主要な設計パラメータを変化させたときの撮像性能や、回折格子ピッチ最小値等の製造難易度のグラフ化を行う。以下のパラメータを使用してマッピングを実施した。それぞれのパラメータについては図5に記載している。 $(R_1$ : L1レンズの物体側の面の曲率半径,  $R_2$ : L1レンズの像側の面の曲率半径,  $g$ : 位相関数の2次の係数(回折パワーに相当),  $BF$ : バックフォーカス.)

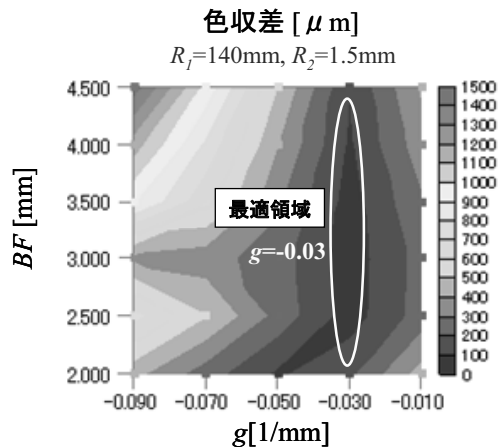


図6 色収差のマッピング。

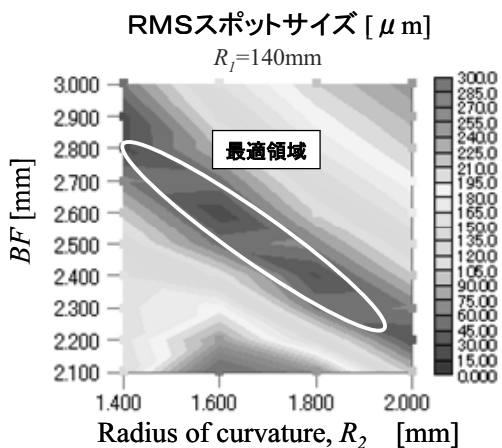


図7 RMSスポットサイズのマッピング。

半画角が $\pm 90^\circ$ の2枚構成の超広角レンズの場合にはL1レンズの $R_1$ 、 $R_2$ 面の非球面化が撮像性能上を与える効果が低いために球面とし、回折は1面のみとしている。この場合、解析パラメータは上記の4つに絞ることができ、各パラメータの設定値に対し、全体形状が正弦条件を満たすようにL2の非球面形状を決定する。4つのパラメータを段階的に変化させて作成したマッピングの一例を図6、図7に示す。図6は横軸を係数 $g$ 、縦軸をバックフォーカス $BF$ として、半画角 $60^\circ$ での色収差量を等高線化して表示しており、色収差を低減するためには、係数 $g$ の値を約 $-0.030$  [1/mm]に設定すればよいことがわかった。これは、光学系に占める回折パワーの最適条件を意味する。また、上記の $R_1$ 、 $R_2$ 以外のマップにおいても、係数 $g$ の値は $-0.030$ 程度が最適であることを確認した。

図7は、係数 $g$ の値を $-0.030$ に固定した状態で横軸を曲率半径 $R_2$ 、縦軸をバックフォーカス $BF$ として、半画角 $60^\circ$ でのRMSスポットサイズを等高線化して表示している。この結果より、高画角においてスポットサイズを低減

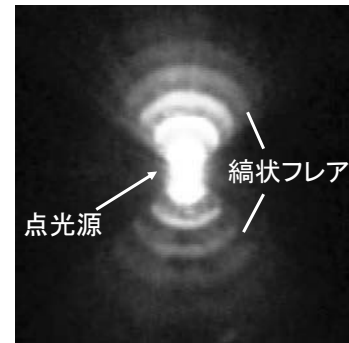


図8 点光源撮影時のフレア画像。

できる領域が存在することがわかった。これは、像面湾曲収差を低減する条件を意味する。

以上のように、帰納的設計手法により解空間全体を俯瞰的に見て、球面収差、コマ収差、色収差、像面湾曲収差等の各収差特性において望ましい解の抽出が実現でき、初期データとして局所解ではなく最適解を準備することに成功した。最終的に、帰納的設計手法で得られた最適領域の解を初期値データとして市販光学設計ソフトで最適化設計を実施することによって、ナノコンポジット白色回折レンズと非球面レンズの2枚レンズのみからなる魚眼カメラで、120万画素相当の解像度を実現した。

### 3. 回折格子に起因するフレアの低減<sup>13)</sup>

回折レンズを搭載した組レンズ光学系による撮像評価において、強い輝度の点光源を撮影した場合に、光源の周りに縞状のフレアが確認された。図8に観察画像を示す。回折レンズとして1次回折効率の高いナノコンポジット白色回折レンズを用いても同様であるため、この現象は、結像に用いている1次回折光以外の不要な次数の回折光とは無関係である。

このような縞状のフレア発生メカニズムを解明するにあたって、筆者らはフラウンホーファー回折に着目した。スリットを通過する平面波は無限遠の観測点において回折縞を形成する。この回折現象は正の焦点距離を有する光学系では有限距離(焦点面)において発生する。回折格子を通過する波面は回折格子の段差により分断されることになり、狭いスリットが存在することと等価的な作用と考えられる。

一般にフラウンホーファー回折の振幅強度分布は、開口の二次元フーリエ変換になる。点光源を撮影する際、輪帯スリットによるフラウンホーファー回折の縞暗部の、中心点からの距離 $\rho$ は次式で表される。

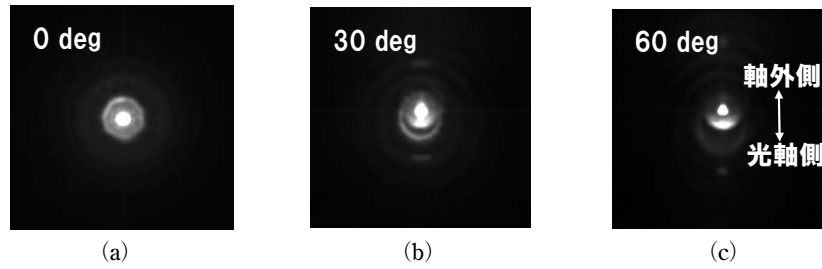


図9 点光源の実写画像 (画角依存性). (a) 半画角 0°, (b) 半画角 30°, (c) 半画角 60°.

$$\rho = \frac{\lambda R x}{\pi w} \quad (3)$$

ここで $\lambda$ は波長,  $R$ はスリットから像面までの距離,  $w$ は回折ピッチ,  $x$ は第1種の1次ベッセル関数 $J_1(x)=0$ となる $x$ である<sup>14)</sup>. 式(3)によって算出した縞間隔の理論値と, 実測値はよく一致することから, 縞状フレアの発生は回折輪帯のスリット効果によるフラウンホーファー回折像であることが明らかとなった.

点光源を撮影する際, 焦点面にて点光源から離れた位置に縞状フレアが発生すると, 撮影画像上では顕著に目立ってしまう. 式(3)からわかるように, 回折ピッチが大きいくほど, 距離 $\rho$ が小さくなり, 発生する縞が点光源に近づき, 撮影画像上では目立たなくなる. しかしながら, これは回折輪帯数を減らし, 回折格子による収差補正効果を低減させることとトレードオフになる.

レンズに形成された同心円状の回折輪帯は, 光軸からの距離により隣接する段差とのピッチは異なるとともに, 結像に寄与する光が回折格子面を通過する際, 回折輪帯の全体を通過するとは限らず, 一部分のみ通過して結像される場合がある. 回折レンズを含むカメラ光学系での集光スポットは, 異なるスリット開口形状, スリット幅を通過した複数の波面が重なって構成されているとみなすことができる. これを考慮することで, 回折レンズから発生する縞状フレアを解析, 予測する手法を構築した.

先述した120万画素相当の解像度を有する2枚組魚眼カメラは, 縞状フレアの発生が抑制できる位置に回折面を設定した上で, 帰納的設計手法を用いたものである. 図9は, 試作した2枚組魚眼カメラで撮影した光源画像で半画角0°, 30°, 60°のものであるが, 画角が大きいくほど光軸側に強い輝度のフレアが存在している. この現象は回折格子に入射する光線の入射角が大きくなるのが原因と考えて, 光軸側に偏ったフレアを低減する新規な回折格子構造を考案した.

図10に示すように, フラウンホーファー回折は回折現象による波面の端部の光の回り込みにより発生するもので

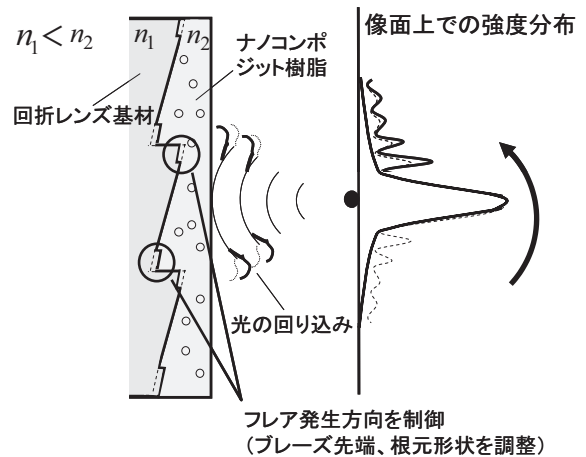


図10 位相変調型回折格子の原理.

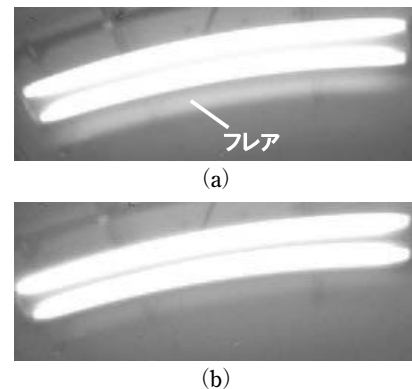


図11 蛍光灯撮影画像. (a) 位相変調なし, (b) 位相変調あり.

あることを考慮し, 回折格子のブレード先端部や根元部に凹や凸の形状を付加して, そこを通過する波面の位相をずらし (位相変調型), 像面上の縞状フレアの分布を制御するアプローチを試みた. 解析上, 先端を凹, 根元を凸とし, 狙い通りの効果を有することを確認した上で, 実際に回折レンズを試作した. 図11(a)で蛍光灯撮影時に画像中央側に発生していたフレアが, 図11(b)のように位相変調型の構造を導入することで画像周辺側にシフトし, 効果的にフレア量が低減できていることを確認した. 蛍光灯

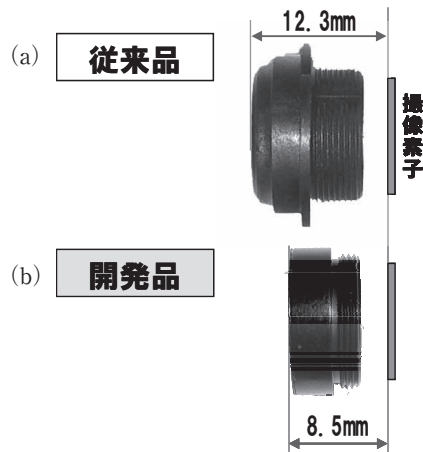


図12 カメラの外観写真。(a) 従来品、(b) 開発品。

画像中央側の部分では約2分の1のフレア強度に低減できている。これにより、強い輝度の被写体撮影時も実用上問題のない撮像用回折レンズが実現できた。

以上に述べた開発技術を用いて作製した魚眼(画角180°)、高解像(100万画素以上)のカメラの外観写真を、図12(b)に示す。図12(a)は、画角150°、30万画素相当対応のパナソニック製従来カメラで、3枚のレンズを組み合わせている。開発品は撮像用回折レンズを搭載することで、従来品よりも広角、高解像度でありながら、レンズ枚数を2枚にまで減らしており、カメラサイズ(光学長)を3分の2程度にまで縮小している。

本稿では、ナノコンポジット材料を活用した撮像用の回折樹脂レンズを提案し、撮像用途へ向けた設計手法と、その有効性について述べた。ナノコンポジット材料の屈折率、波長分散性はMaxwell-Garnett理論により試算できることを確認し、酸化ジルコニウムをナノ粒子として用いることで、汎用光学樹脂のみでは不可能な高屈折率・高アッベ数と、実用上十分な透明性を兼ね備えたナノコンポジット材料が得られた。これにより、可視光波長全域で高い回折効率を有する回折樹脂レンズが実現できた。開発したナノコンポジット白色回折レンズとその設計手法は、カメラの小型化と低コスト化に貢献するものであり、魚眼カメラに限らず撮像用途全般に適用可能で拡張性、展開性が高い

ものである。また、樹脂系材料で構成しているため、レンズアレイとしてシート化、大面積化も容易であり、撮像用途以外にディスプレイ、照明等の用途でも高機能化、高性能化に活用できる技術として期待できる。

## 文 献

- 1) M. Nagashima, M. Suzuki, T. Korenaga, K. Imada, S. Tamaki, T. Iijima, I. Oyama, T. Hirasawa, T. Suenaga, M. Tagome, S. Nishiwaki, T. Ishikawa and A. Takai: "New camera module with thin structure, high resolution and distance-detection capability," *SPIE Photonics Europe* (2006) pp. 6196-6199.
- 2) E. R. Doswki and W. T. Cathey: "Extended depth of field through wave-front coding," *Appl. Opt.*, **34** (1995) 1859-1866.
- 3) K. Miyamoto: "The phase Fresnel lens," *J. Opt. Soc. Am.*, **51** (1961) 17-20.
- 4) T. Nakai and H. Ogawa: "Development of 3-layer diffractive optical elements employed for wide incident angles," *ICO '04, Technical Digest* (2004) pp. 547-548.
- 5) S. M. Ebbstein: "Nearly index-matched optics for aspherical, diffractive, and achromatic-phase diffractive elements," *Opt. Lett.*, **21** (1996) 1454-1456.
- 6) 中村 徹, 鈴木憲三郎, 高瀬裕嗣, 倉田俊彦, 宮川晶子, 山口修一, 田口 淳, 中山尚行: "密着複層型 PF (位相フレネル) レンズの要素技術", *Optics & Photonics Japan 2005 講演予稿集*, 24pD3 (2005).
- 7) 岡田夕佳, 村田晶子, 安藤貴真, 末永辰敏, 是永継博, 鈴木正明: "高屈折率・高アッベ数ナノコンポジット材料を使用した撮像用回折レンズの開発", *高分子論文集*, **67** (2010) 390-396.
- 8) J. C. Maxwell-Garnett: "Colours in metal glasses and in metallic films," *Philos. Trans. R. Soc. London A*, **203** (1904) 385-420.
- 9) C. F. Bohren and D. R. Huffman: *Absorption and Scattering of Light by Small Particles* (Wiley-Interscience, 2004) pp. 130.
- 10) H. Mataka, S. Yamaki and T. Fukui: "Nanostructured organic/inorganic composites as transparent materials for optical components," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **43** (2004) 5819-5823.
- 11) T. Korenaga, T. Ando, S. Moriguchi, F. Takami, Y. Takasu, S. Nishiwaki, M. Suzuki, and M. Nagashima: "Diffraction grating lens array," *SPIE Electronic Imaging* (2007) pp. 6501-6528.
- 12) 安藤貴真, 西脇青児, 是永継博, 鈴木正明: "撮像用回折格子レンズの帰納的設計手法", *Optics & Photonics Japan 2011 講演予稿集*, 29pE8 (2011).
- 13) T. Ando, T. Korenaga and M. Suzuki: "Explication of diffraction lights on an optical imaging system from a Fraunhofer diffraction perspective," *SPIE Photonics Europe*, (2012) pp. 8429-8442.
- 14) A. K.-K. Wong: *Optical Imaging in Projection Microlithography* (Society of Photo Optical, Washington, 2005) pp. 45-47.

(2013年2月12日受理)