

光学系の設計に利益をもたらす ハイブリッド光学部品

スコット・スパーロルド、ジェフリー・フォアマン

ハイブリッド光学部品は多要素の光学系の設計を置き換えることができ、標準的な光学部品に利点を提供する。それらはイメージング、広帯域照明、レーザーアプリケーションなどにおいて理想的な光学系となる。

マシンビジョンやフォトニクスなど分野の進歩は、高性能の光学部品と小型の光学系の増加を可能にし、光学部品設計の継続的な変化を牽引している。現在は多要素光学系の設計を置き換えてできるハイブリッド光学部品が登場し、より優れた性能を最小の光学系サイズで実現して、顧客の要求に対応している。

ハイブリッド光学部品の名称は、光を操作する屈折面と回折面の両方に由来している。ハイブリッド光学部品の光学的な力は、2つの面からの光の相互作用で定義され、2つの面のそれぞれの力を加算して算出する。方程式1aと1bは、ハイブリッドレンズの与えられた波長におけるそれぞれの屈折力と回折力を示す。

回折面 (C_2) の波面出力係数はラジアン単位で特定され、高次球面収差の項が含まれ、光学的な力よりも大きな影響を及ぼす。光線追跡シミュレーションソフトウェアを用いてハイブリッド光学系を設計するときは、ユーザマニュアルの参照が重要になる。いくつかの符号はラジアンではなく、光学系の位相を特定している。

ハイブリッド光学系の製作

通常のハイブリッド光学系の製作は2つの技術のうちの1つ、つまり、ダイヤモンド旋削または射出成形を使用す

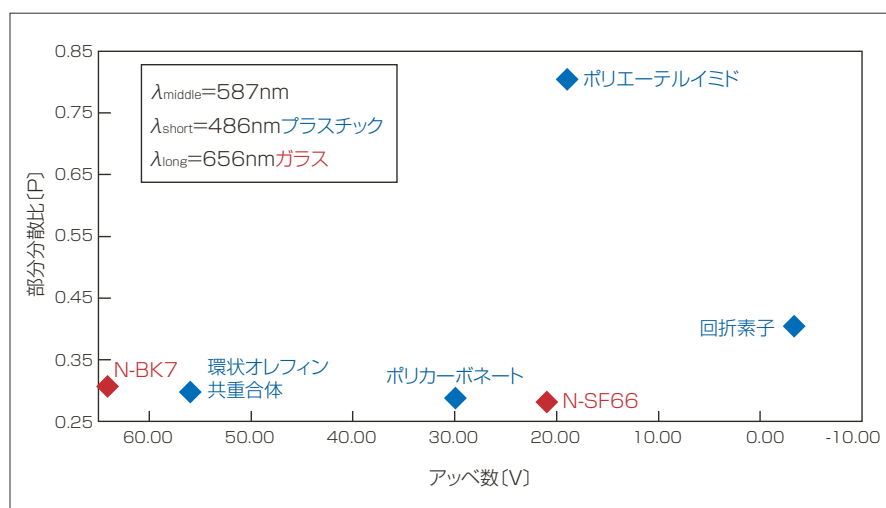


図1 多重屈折素子からなるイメージング光学系を設計するときは、この可視波長プラスチック用の部分分散マップと同様のガラス用のマップを使用して部品選択を始める。

る。ダイヤモンドチップ工具によるレンズの機械的成形が含まれるダイヤモンド旋削は、単一部分品の繰返し製作に適している。しかしながら、ダイヤモンド旋削は個別のレンズを製作する機械的工工程と時間が必要になるため、10mm以下の直径をもつレンズの大量生産への適用は難しく、不可能な場合もある。

溶けたプラスチックを金型に充填してレンズを製作する射出成形は大量生産に適している。射出成形は量産コストがダイヤモンド旋削よりも安いのが、プラスチックはガラスに比べると安定性に欠けるため、特別な注意が必要になる。適切な冷却に失敗すると、成形後のレンズには収縮と物理的応力の付

加が起り、いずれもレンズの光学的性質に障害をもたらす。赤外 (IR) スペクトルの場合はカルコゲナイドガラスを射出成形することでハイブリッド光学系が得られる。

ハイブリッド光学系の利点

ハイブリッド光学部品は伝統的な光学系に比べると、部品数の減少による光学系サイズの簡素化ばかりでなく、いくつかの付加的な利点が見られる。その1つとして、単一ハイブリッドレンズは色収差の低減や排除が可能になる。色収差は通常のレンズを使用して異なる波長を集光したときに起こり、その焦点は光学軸上の異なる場所に生成される。補正をしない色収差は像に沿つ

た着色フリンジが明瞭に現われる。

最適な色補正を行うには色補正理論の理解が必要になる。ハイブリッド光学系の場合、回折面と屈折面の両方が光学部品として機能する。色収差を除去するには、分散を補正する補正光学系が必要になる。分散は波長による焦点距離の変化として定義される。方程式2は分散によるレンズの屈折力の変化と波長との関係を定めている⁽¹⁾、⁽⁴⁾。

下付き文字の s 、 m および l は、それぞれ短波長、中波長および長波長を意味している。 V は分散の逆数である。可視光の V はアッペ数になり、不可視光の V は V 数と呼ばれる。

従来の色補正レンズのアクロマートは2つの屈折レンズの屈折力と分散を釣り合わせて、短波長と長波長を共通の焦点にする。しかし、方程式3aと3bから明らかなように、屈折分散は正值だが、回折分散は負値になる。

したがって、ハイブリッド光学系は、屈折面の光学的力と回折面の光学的力を釣り合わせて単一レンズ内の色補正を実現する。方程式4aと4bを使用すると、屈折面の光学的力と回折面の光学的力を計算できる。

しかしながら、分散には非線形性があるため、この補正は2つの波長が両極端にある場合にだけ適用できる。したがって、分散非線形性の尺度としての部分分散は、中央の波長が両極端の波長と相対的にデフォーカスする2枚レンズの二次色を計算するときに考慮すべき重要な因子となる。二次色は方程式5を用いて計算される。ここで、 Δ は屈折から回折への変化を意味している。

屈折材料の多くはガラスと同じ線上にあり、ほとんどのガラスは同等の P/V 値を持つ。可視光の値は約0.005になる。二次色を減らすには、3~5 μm の波長

方程式 1a

屈折
$\Phi_{REFR}(\lambda) = (n(\lambda) - 1) \cdot \Delta C = \frac{1}{F_{REFR}(\lambda)}$
ここで λ = 波長
$\Phi_{REFR}(\lambda)$ = 光学的力(波長の関数)
$F_{REFR}(\lambda)$ = 焦点距離(波面出力係数の関数)
$n(\lambda)$ = 屈折率(波長の関数)
ΔC = 表面曲率の変化(前面と背面)

方程式 1b

回折
$\Phi_{DIFF}(\lambda) = -\frac{2C_2 m}{\lambda_0} \lambda = \frac{1}{F_{DIFF}(\lambda)}$
λ_0 = 中心波長
$\Phi_{DIFF}(\lambda)$ = 光学的力(波長の関数)
$F_{DIFF}(\lambda)$ = 焦点距離(波面出力係数の関数)
C_2 = 回折位相面出力係数
m = 使用する回折次元

方程式 2

$\frac{\Delta\Phi_{sl}}{\Phi_m} = \frac{1}{V_m}$
--

方程式 3a

屈折
$V_{REFR} = \frac{n_m - 1}{n_s - n_l}$

方程式 3b

回折
$V_{DIFF} = \frac{\lambda_m}{\Delta\lambda}$

方程式 4a

屈折
$F_{REFR} = F_{total} \frac{V_{REFR} - V_{DIFF}}{V_{REFR}}$

方程式 4b

回折
$F_{DIFF} = F_{total} \frac{V_{DIFF} - V_{REFR}}{V_{DIFF}}$

方程式 5

$\frac{\Delta\Phi_{sl}}{\Phi_m} = \frac{\Delta P}{\Delta V}$
--

方程式 6a

$P = \frac{n_m - n_l}{n_s - n_l}$

方程式 6b

$P_{DIFF} = \frac{\lambda_l - \lambda_m}{\lambda_l - \lambda_s}$
--

方程式 7a

屈折
$\beta_{REFR} \cong \alpha_{glass} \left(\frac{1}{n_{glass} - 1} \right) \frac{Dn_{glass}}{DT}$
ここで n_{glass} = レンズの屈折率

方程式 7b

回折 ⁽⁸⁾
$\beta_{DIFF} \cong 2 \cdot \alpha_{glass}$
ここで α_{glass} = 光学系の熱膨張係数

方程式 8a

$\frac{\Delta\Phi}{\Phi} = -\beta \cdot \Delta T = -\frac{\Delta T}{V_T} \cong \frac{\Delta F}{F}$
--

方程式 8b

$\frac{\Delta\Phi}{\Phi} = -(\beta + \alpha_{housing}) \cdot \Delta T$
--

方程式 9a

$F_{REFR} = F_{total} \left(\frac{\beta_{REFR} - \beta_{DIFF}}{\alpha_{housing} - \beta_{DIFF}} \right)$

方程式 9b

$F_{DIFF} = F_{total} \left(\frac{\beta_{DIFF} - \beta_{REFR}}{\alpha_{housing} - \beta_{REFR}} \right)$

範囲に対して色補正した2枚レンズのシリコン (Si) やゲルマニウム (Ge) を用いて、2つの要素部品間の部分分散を近付ける必要がある。部分分散は方程式6aと6bを使用すれば計算できる。

複数の屈折素子からなるイメージング光学系を設計するときは、可視波長プラスチック、いくつかのガラスおよび回折素子のマップの例として示している図1^{(5)~(7)}と同様の部分分散ガラスのマップを使用して、最初の素子を選択する。ハイブリッド光学系を設計するときは回折素子のガラスチャート上の位置付けが重要になる。

2つの素子の部分分散が整合しないときは第3の材料を選択して、部分分散チャート上の3つの素子が形成する三角形の面積をできるだけ大きくする。例えば、回折素子/ポリエーテルイミド/N-BK7は最大の三角形を形成し、2つの素子による部分分散は第3の素子の部分分散に接近する。

ハイブリッドレンズのもう1つの利点は、熱変化に対して感受性の低い光学系を設計できることにある。方程式7aと7bを用いると、レンズの熱的デフォーカスや焦点距離の温度依存性の計算に必要な熱光学係数を計算できる。波長変化を温度変化に置き換えることができれば、つまり熱分散として知られる効果を利用すれば、同じ焦点距離を得ることができる。

熱光学係数は近似値だが、それは空気温度の変化による屈折の変化を考慮しないことによる。

方程式8aを使用するとレンズ自体の熱的デフォーカスを予測できる。方程式8bにはハウジングやマウントの影響が含まれている。

2面の熱変化に対する無依存性を確保するには、方程式9aと9bから分かるように、ハウジングの膨張係数 (α_{housing})

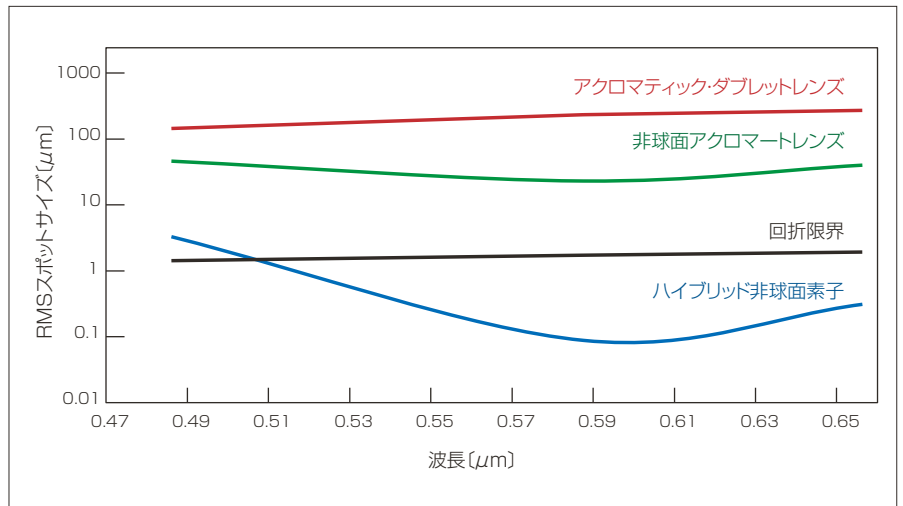


図2 直径25mmのf/1.2プラスチックハイブリッド非球面素子、アchromatic・ダブルレットレンズおよび非球面化アchromaticレンズのスポットサイズを比較している。

表1 色特性の比較*

	アchromatic・ダブルレットレンズ	非球面アchromaticレンズ	ハイブリッド素子
クラウンガラス		N-LAK34	E48R
フリントガラス		N-SF6	回折
クラウンV数ガラス		55.9	55.9
フリントV数ガラス		23.8	-3.45
クラウン部分分散ガラス		0.304	0.294
フリント部分分散ガラス		0.284	0.404
軸方向色収差		0	0
二次色		20 μm	65 μm

*直径25mmのf/1.2プラスチックハイブリッド非球面素子、アchromatic・ダブルレットレンズおよび非球面アchromaticレンズを比較している。

を含めた計算が必要になる。

ハイブリッド光学系の欠点

ハイブリッド光学系にはいくつかの欠点がある。非球面光学系の価格と同様に、ハイブリッド光学部品はダイヤモンド旋削の反復のための付加コストや射出成形用の工具コストが必要になる。

もう1つの欠点は広帯域光源を使用したときのハイブリッド光学系の回折効率が波長とともに変化することにある。例えば、中心波長を587nmに選択した可視光学系の場合、ハイブリッドレンズの656nmの回折効率は96.4%だが、486nmの回折効率は86.6%に

低下する。幸いなことに、この問題はレーザやその他の単色光源には存在しない。

最後に、ハイブリッド光学系の設計は短波長の使用には適していない。短波長の場合、ハイブリッド光学設計の線形性は許容度が低下し、レンズ性能の劇的な悪化が起こり得る。

ハイブリッド光学系の応用

ハイブリッド光学系は多様な応用のそれぞれに理想的な部品を選択できる。

軸方向撮像レンズ：ガラス2枚レンズとプラスチック2枚レンズの比較—例えば、ハイブリッド光学系の色補正

能力と非球面光学系の球面収差補正能力を組み合わせると、イメージング、眼科応用、レーザおよび広帯域照明光源との組み合わせに最適な光学系が得られる。

例えば、**図2**は直径25mm、 $f/1.2$ のプラスチックハイブリッド非球面素子をアクロマティック・ダブルレットレンズと非球面アクロマティックレンズとの比較で示している。ハイブリッド非球面素子は波長範囲のすべてにわたり最小のスポットサイズが確保されている。**表1**は色特性を比較している。

ハイブリッド円柱レンズを設計すると、色補正が可能となり、薄い線形プロファイルも生成できる。IRのGeハイブリッド非球面レンズはイメージング、広帯域中波長IR応用およびフーリエ変換IR分光計の用途に適している。

撮像レンズ：二重ガウス光学系—二重ガウス設計レンズは最新のカメラレンズの基本になっている。その設計には単レンズおよび開口絞りを対称的に挟むレンズ対が含まれる。対称的に配置することで場の収差の釣り合いが可能となり、かなり大きい視野の高速 f 数を確保できる。予備研究⁽⁹⁾によると、像面に近い最後のレンズを非球面とし、ハイブリッド素子を適切に配置することで性能が向上する。例えば、非球面設計の場合、15 lp/mmの空間周波数の変調伝達関数(MTF)をもつ光学特性($f/2.1$ 、視野 42°)は32%の全視野性能と44%の軸方向性能が得られ、非球面を後方に配置した設計は36%の全視野性能と75%の軸方向性能が得られ、ハイブリッド設計は41%の全視野性能と79%の軸方向性能が得られている。

ハイブリッド設計のMTFは非球面に比べてわずかしこ増加しないが、軸方向の色収差は $32\mu\text{m}$ 対 $124\mu\text{m}$ の劇



図3 市販のハイブリッド光学系は利用の可能性が増大している。写真はTECHSPECゲルマニウムIR非球面レンズを示している。

的な減少を示す。この軸方向の色特性の改善は、光学レンズの増加を不要にし、増加しなくても光学性能が損なわれることはない。

熱的デフォーカスを除去する軸方向撮像レンズ—ハイブリッド光学系の温度変化に対する無依存性はレーザ応用に適している。530nmのNd:YAGレーザを -40 から 80°C の温度範囲で使

謝辞

レンズサンプルおよび参照材料の資料の提供を受けたレイセオン・ミサイルシステムのミカエル・シャウ博士に深く感謝する。

参考文献

- (1) J.E. Greivenkamp, Field Guide to Geometrical Optics, SPIE(December 2003).
- (2) M. Riedl, "Diamond turned diffractive optical elements for the infrared," Proc. SPIE, 2540, 257(1995); doi:10.1117/12.219529.
- (3) D. O'Shea, T. Suleski, A. Kathman, and D. Prather, Diffractive Optics: Design, Fabrication, and Test, SPIE(December 2003).
- (4) S. Sparrold, Optics Realm web site, "Color Correction"; <http://bit.ly/rCtg1c>.
- (5) P.R. Tolley, "Pushing the Polymer Envelope," Syntec Optics white paper, orig. presented at SPIE Optics + Photonics(2005); <http://bit.ly/vCr6zO>.
- (6) S. Baumer, Handbook of Plastic Optics, 2nd Edition, Wiley-VCH(April 2010).
- (7) M. Schaub, J. Schwiegerling, E. Fest, A. Symmons, and R. Shepard, Molded Optics: Design and Manufacture, CRC Press(April 2011).
- (8) G. Behrmann and J. Bowen, "The influence of Temperature on Diffractive Lens Performance," Appl. Opt., 32, 14, 2483-2489(1993).
- (9) S. Sparrold, "Placement of Aspheres in an Optical System to increase Optical Performance," NASA Tech Briefs, 34, 4, 48-52(April 2010); <http://bit.ly/rOil43>.

著者紹介

スコット・スパーロルド(Scott Sparrold)は米エドモンドオプティクス社(Edmund Optics)の上級光学技術者、ジェフリー・フォアマン(Geoffrey Forman)は同社の製品マーケティングスペシャリスト。e-mail: gforman@edmundoptics.com URL: www.edmundoptics.com.

用し、いずれも $f/5$ と100mmの焦点距離をもつ屈折非球面とハイブリッド光学系を比較した。 60×10^{-6} の熱膨張係数と -100×10^{-6} の dn/dT をもつZeon Chemicalの環状オレフィン共重合体E48Rを使用したハイブリッド部品は温度変化の影響を受けなかった。一方で、アルミニウムハウジング($\alpha = 23.6 \times 10^{-6}$)に収容した非球面の各部品のデフォーカス度は、N-BK7非球面の $\pm 860\mu\text{m}$ からプラスチック非球面の $\pm 1.6\mu\text{m}$ の範囲であった。参照として測定した四分の一波長板の焦点深度は約 $\pm 0.025\text{mm}$ であった。

ハイブリッド光学部品の設計は、これからも顧客の要求に対応して改善が続くであろう。成形機械と金型の精度の許容範囲が広がると、ハイブリッド光学系は紫外線やその他の短波長光を使用したときの効率が増加し、性能が向上する。小型サイズ、色補正および熱安定性によって、ハイブリッド光学系の応用は拡大を続けるであろう。