

# 非対称自由曲面を組み込んだ巨大マゼラン望遠鏡の試験用カメラのスポット性能の評価

## Evaluation of spot performance of the Giant Magellan Telescope Commissioning Camera incorporating freeform lens surfaces

○佐々木敦司<sup>1,2)</sup>, 桐野宙治<sup>2)</sup>, ブカン・アンソニー<sup>1,2)</sup>

○Atsushi Sasaki<sup>1,2)</sup>, Okiharu Kirino<sup>1)</sup>, Anthony Beaucamp<sup>1,2)</sup>

Anax Optics 株式会社<sup>1)</sup>, 慶応義塾大学理工学研究科<sup>2)</sup>

Anax Optics Inc.<sup>1)</sup>, The graduate school of science and technology, Keio University<sup>2)</sup>

E-mail: beaucamp@sd.keio.ac.jp

In this paper, we explore the possibility of equipping the Giant Magellan Telescope Commissioning Camera with a deployable configuration that includes a wave plate and Wollaston birefringent prism for polarization analysis. This setup splits the light into two optical paths and makes the optical system asymmetric relative to the optical axis. By replacing one of the aspheric surface with 2 freeform surfaces, an improvement in spot size of around 9% was achieved within a field of view of 1.8 arcminutes and a wavelength range of 500 to 900 nm.

### 1. はじめに

巨大マゼラン望遠鏡 (GMT) はチリ共和国のラスカンパナス天文台で建設中の大型地上望遠鏡である。ジェイムズ・ウェッブ宇宙望遠鏡との連携により宇宙と地上から観測を行い高解像度の画像取得や良質な光学補償を実施することが期待されている。その観測試験用カメラ (COMCAM) に偏光解析機能 (GMT-Pol) を付与することが計画されており、これにより惑星や銀河の非対称性、磁場そして散乱現象の調査ならびに星間および星周媒体の研究が実施可能となる[1]。GMT の観測光学システムは主鏡と副鏡そして COMCAM のレンズ群によって構成される。主鏡は 7 枚のミラーセグメントで構成されておりその総直径は 25448 mm である。副鏡は補償光学の役割を担っておりその直径は 3167 mm である。設計視野角は 1.8 arcmin、設計波長域は 500 - 900 nm であり、観測面に約 10 mm x 10 mm の結像を行う。

偏光解析を行うため COMCAM は波長板と Wollaston 複屈折プリズムを含むが、複屈折により光線は 2 つの光路に分岐し光学軸に対して非対称な経路をとる。しかしながらシステムを構成するミラーとレンズは全て軸対象であり、ここにスポット性能や色収差を改善する余地があると考えられる。本記事では観測面直前にある非球面レンズの前面を自由曲面として再設計することで光学システムの結像性能の向上を試みる。光学システムの側面レイアウトを Figure 1 に示す。光学面の表面形状は主鏡と副鏡は楕円球面であり COMCAM のレンズは球面、AiRi 非球面または Qbfs 非球面である。Wollaston プリズムの材質はカルサイトであり中間面 S13 が 20 度傾斜している。前方から数えて 27 番目に位置する S27 Qbfs 非球面を Construction-Iteration 法[2]を用いて XY 多項式面に設計しスポットサイズの評価を行うことを目的とする。

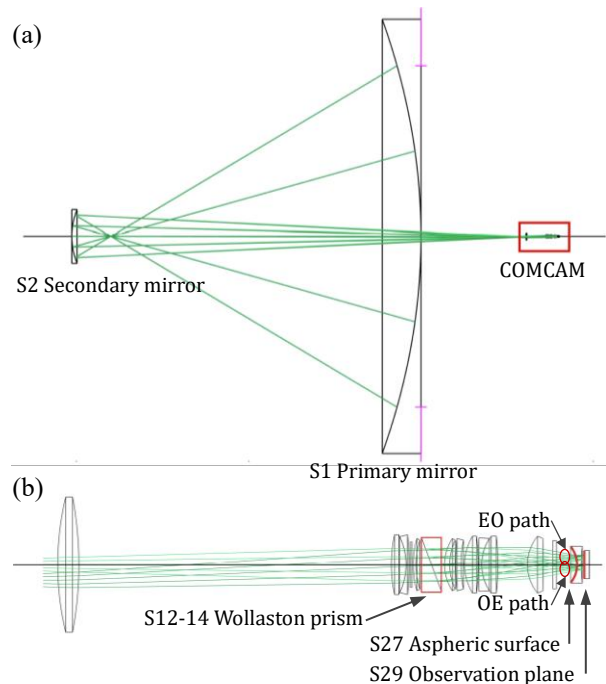


Fig 1 Layout of optical system of GMT at side view: (a) mirrors and commissioning camera (COMCAM), (b) COMCAM

### 2. 設計手法

Construction-Iteration 法を用いて自由曲面を設計するために設計面 S27 に入射する光線と観測面 S29 における目標点を定義する。この 2 つをそれぞれ光学システムの入力値及び出力値として扱いデータ点の座標及び法線ベクトルを計算する。その後データ点に対して多項式鏡面でフィッティングを行う。設計手順の概要を Figure 2 に示す。

#### 2.1. 入射光線の定義

入射光線は設計面 S27 のデータ点に入射する光線である。データ点を求めるために主鏡面 S1 に対

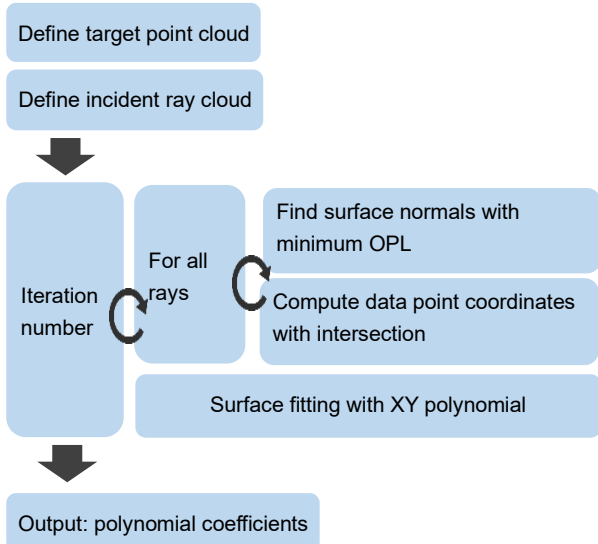


Fig 2 General flowchart of freeform surface design by construction-iteration method

して開口径 20000 mm の円形領域に 37 本の光線を 9 つの入射角 (x 軸と y 軸方向にそれぞれ -0.9, 0, 0.9 arcmin)、3 つの波長 (500, 700, 900 nm) でそれぞれ入射させ設計面における交点を求める。データ点は 9 入射角・3 波長の交点セットの平均をとった 37 点の座標群である。次に入射光線を求めるためにこのデータ点から主鏡面 S1 の方向へ逆光線追跡を行いレイ・エイミングにより S1 での最適入射点を得る。そしてこの入射点を用いて順方向に光線追跡することにより最適化された S27 への入射光線を得る。このプロセスにより全ての設計入射角と波長の光線が同一のデータ点へと入射する。これにより、自由曲面多項式フィットの安定性が向上します。Figure 3 にレイ・エイミングにより波長間で共通化された S27 のデータ点を示す。

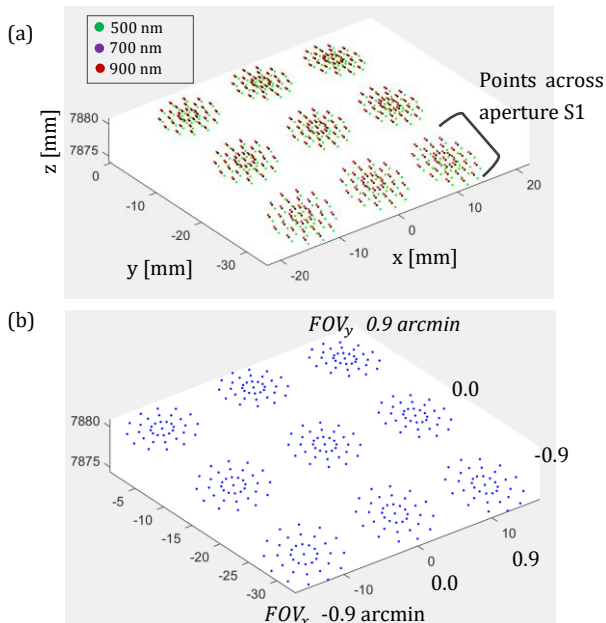


Fig 3 Ray intersection points with S27 for OE path using (a) the initial S1 grid and (b) ray aiming process

## 2.2. 目標点の定義

目標点を計算するために主鏡面 S1 に 512 本の光線を全ての入射角・波長の組み合わせで入射させ観測面 S29 でのスポットを取得する。Figure 4 に観測面での像を示す。複屈折により光線が Wollaston プリズムで O 光線から E 光線へと遷移する光路 (OE 光路) と E 光線から O 光線へと遷移する光路 (EO 光路) に分岐する。このため観測面では入射角と波長の組み合わせ数 27 の 2 倍の 54 個のスポットを得る。各スポットの座標平均をとり中心点を計算し目標点として定義する。さらに色収差低減を目的として 3 波長の目標点の平均をとり波長間で同一の目標点を定義した。

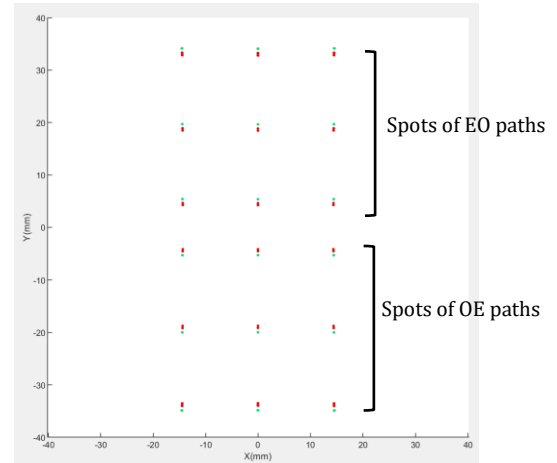


Fig 4 Spots at observation plane S29

## 2.3. Construction-Iteration 法による自由曲面の設計

$$OPL_{min} = \min \left( \sum_i^n n_i \cdot d_i \right) \quad (1)$$

$$\theta_{int} = \pi - \arccos \left( \frac{\mathbf{I} \cdot \mathbf{R}}{|\mathbf{I}| |\mathbf{R}|} \right) + \theta_R, \quad (2)$$

$$\mathbf{T} = \mathbf{I} \times \mathbf{R} \quad (3)$$

$$\mathbf{N} = \mathbf{I} \cos \theta_{int} + (\mathbf{T} \times \mathbf{I}) \sin \theta_{int} + \mathbf{T} (\mathbf{T} \cdot \mathbf{I}) (1 - \cos \theta_{int}) \quad (4)$$

$$Z = \sum_{sx=1}^s \sum_{sy=1}^s P_{sx,sy} \cdot X^{sx} \cdot Y^{sy} \quad (5)$$

$$P = (Z^T Z + w U^T U + w V^T V)^{-1} \cdot (Z^T Z_{org} + w U^T U_{org} + w V^T V_{org}) \quad (6)$$

Construction-Iteration 法の目的は XY 多項式面の最適多項式係数を求めることである。計算手順は設計面のデータ点の座標とその法線ベクトルの計算と多項式関数によるフィッティングの 2 つのステップに分けられる。第 1 のステップでは、Figure 5 (a) に示すように式(1)に示すフェルマーの原理に従って、1 つのデータ点に入射する 1 本の光線に対してその目標点までの光路長が最短になるように法線ベクトルを計算する。法線ベクトル  $\mathbf{N}$  は、入射光線ベクトル  $\mathbf{I}$ 、屈折光線ベクトル  $\mathbf{R}$ 、屈折角  $\theta_R$

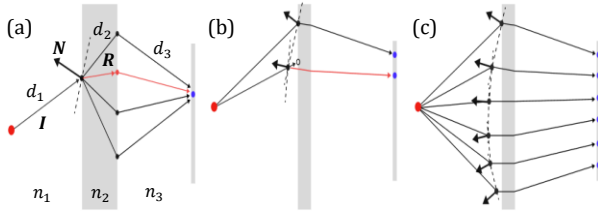


Fig 5 Computation sequence of coordinates and normals of freeform surface data points: (a) find normal with shortest OPL, (b) next ray intersection with tangential plane, (c) final set of points and normals

を用いて、式(2,3,4)によりスネルの法則とロドリゲスの回転公式によって導出される。2 つ目のデータ点の座標は Figure 5 (b)に示すように 1 つ目のデータ点で導出された平面と 2 本目の入射光線との交点によって決定される。このプロセスは Figure 5 (c)に示すように全ての入射光線を通して繰り返される。

第 2 のステップでは、式(5)に示す XY 多項式曲面を式(6)に示す設計面のサグと法線ベクトルの偏差を最小化する最小二乗法によりデータ点にフィッティングする。 $Z$  と  $Z_{org}$  はフィッティング表面と元の表面のデータ点のサグ値[mm]である。 $U$  と  $V$  はそれぞれ  $x$  軸と  $y$  軸方向の接線ベクトルである。以上の 2 ステップを 3 回繰り返し、目標点と実際の像の位置偏差を減少させる。最終的な多項式係数  $P$  は繰り返し計算の最後に得られる。

例外として繰り返し計算の 2 回目以降は前回のフィッティング計算により設計面の形状が更新される。よって全視野角・波長で同一のデータ点を設定するために第 1 ステップに入る前に 2.1 節の入射光線の定義を再び行う必要がある。複数の入射角・波長の光線に対して同一のデータ点を設定する理由は第 1 ステップで 1 つのデータ点に対してそれぞれの入射角・波長に対応する複数の法線ベクトルが定義され、第 2 ステップのフィッティングでそれらが平均化されたより代表的な法線ベクトルを取得できるようにするためである。以上に述べた設計の計算処理は光学設計ソフトウェア ANAX Hyperion®[3]によって行われた。

### 3. 性能評価

2 節に示した設計法により OE・EO 光路それぞれで 2 つの自由曲面を算出した。6 次多項式の係数を Table 1 に示す。

S27 を自由曲面に変更した光学システムに対して設計視野角・波長で光線追跡シミュレーションを行いスポット性能を評価した。Table 2 に観測面 S29 での RMS スポットサイズ [mm]を示し、Figure 6 に波長 700 nm におけるスポットのシミュレーション結果を示す。設計前の非球面と比べてスポットサイズが OE 光路で 9.18 %減少、EO 光路で 8.72 %減少した。Table 3 に色収差強度を示す。色収差強度 [mm]は波長間のスポットの中心座標の最大距離を各光路・各入射角において求め平均し

たものである。自由曲面を付与によって色収差性能に大きな変化は確認できなかった。

Table 1 Coefficients of 6<sup>th</sup> XY polynomial surfaces for (a) OE and (b) EO paths

(a) OE path

|    | Y0          | Y1          | Y2          | Y3          | Y4          | Y5          | Y6          |
|----|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| X0 | -0.0048     | -8.4846e-04 | -0.0051     | -1.5581e-05 | -1.0319e-06 | -2.3248e-08 | -1.9570e-10 |
| X1 | 3.6121e-07  | -6.5876e-08 | 1.2753e-08  | 2.4267e-09  | 1.0964e-10  | 1.5394e-12  | 0           |
| X2 | -0.0048     | 6.9120e-06  | -2.3099e-07 | -4.4891e-09 | -4.4323e-11 | 0           | 0           |
| X3 | -3.9864e-09 | 1.8272e-09  | 1.5575e-10  | 3.0000e-12  | 0           | 0           | 0           |
| X4 | -8.7040e-07 | -2.0123e-08 | -1.1106e-10 | 0           | 0           | 0           | 0           |
| X5 | 3.1104e-11  | -8.5706e-13 | 0           | 0           | 0           | 0           | 0           |
| X6 | 1.1862e-09  | 0           | 0           | 0           | 0           | 0           | 0           |

(b) EO path

|    | Y0          | Y1          | Y2          | Y3          | Y4          | Y5          | Y6          |
|----|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| X0 | -0.0057     | 0.0015      | -0.0052     | 2.6801e-05  | -1.5189e-06 | 3.4656e-08  | -3.0907e-10 |
| X1 | 7.1140e-08  | 2.2422e-08  | 2.2697e-09  | -3.4994e-10 | 1.1422e-11  | -1.1175e-13 | 0           |
| X2 | -0.0048     | -7.0024e-06 | -1.3360e-07 | -8.5193e-11 | 1.4959e-11  | 0           | 0           |
| X3 | -6.2532e-10 | -1.5652e-10 | 8.6235e-12  | -9.0708e-14 | 0           | 0           | 0           |
| X4 | -7.5477e-07 | 1.7727e-08  | -7.7573e-11 | 0           | 0           | 0           | 0           |
| X5 | 3.2715e-12  | -5.1268e-14 | 0           | 0           | 0           | 0           | 0           |
| X6 | 9.9678e-10  | 0           | 0           | 0           | 0           | 0           | 0           |

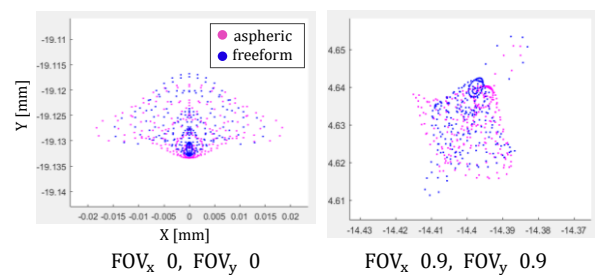
Table 2 Mean rms spot sizes [mm] for 9 FOVs and 3 wavelengths

|         | Aspheric | Freeform |
|---------|----------|----------|
| OE path | 0.01432  | 0.01301  |
| EO path | 0.01429  | 0.01304  |

Table 3 Mean spot centre intervals [mm] between 3 wavelengths

|         | Aspheric | Freeform |
|---------|----------|----------|
| OE path | 1.1141   | 1.1140   |
| EO path | 1.0839   | 1.0839   |

(a) OE path



(b) EO path

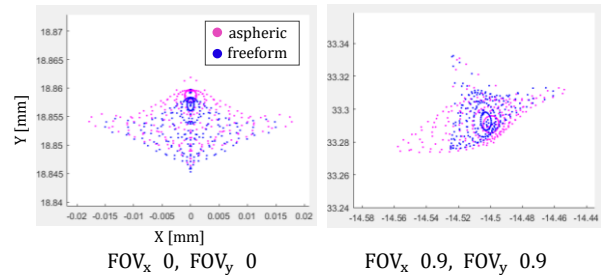


Fig 6 Comparison of spots between aspheric and freeform surface at wavelength 700 nm

#### 4. 結言

巨大マゼラン望遠鏡の観測試験用カメラシステムの非球面レンズ面 S27 を自由曲面に再設計することにより結像性能の向上を試みた。光路が光学軸に対して非対称なシステムに対して非対称自由曲面を導入することにより複屈折の OE・EO 光路ともにスポットサイズが約 9 %低減した。複数の自由曲面を組み合わせることで 10 %以上の性能向上が見込まれる。今後はレンズ面 S10/11, S15/16, S17/18, S28 にも設計を施し最適な変更箇所を調査する予定である。

#### 謝辞

この研究の一部は、NEDO (国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構) の助成事業の成果を活用して行われました。また、アリゾナ大学の Prof. Daewook Kim と Dr. Ramya Anche、MMT の Dr. G. Grant Williams と共同で実施されました。元の非球面設計パラメータと、どの表面を改造できるかについてのアドバイスを提供しました。

#### 文献

- 1) H. Tabor, R. Anche, G. Williams, J. Piotrowski, D. Kim, 2024, Investigating the polarimetric capabilities for the Giant Magellan Telescope", Proc. SPIE 13096, Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy X
- 2) Zhu, W, Duan, F, Tatsumi, K, Beaucamp, A, 2021, Monolithic topological honeycomb lens for achromatic focusing and imaging, Optica 9, 100-107.
- 3) <https://anax.jp/anax-hyperion>