

京都大学大学院理学研究科附属天文台技報  
Technical Reports from Astronomical Observatory  
Graduate School of Science, Kyoto University

Vol.6-1

ドームレス太陽望遠鏡の補償光学装置, I.光学系  
Adaptive optics system on the Domeless Solar Telescope,  
I. Optical system

一本潔<sup>\*1</sup>、仲谷善一<sup>\*1</sup>、上野悟<sup>\*1</sup>、木村剛一<sup>\*1</sup>、三浦則明<sup>\*2</sup>、

江野口章人<sup>\*3</sup>、武山芸英<sup>\*3</sup>

2022年 12月12日 初稿

<sup>1</sup> 京都大学理学研究科附属天文台

<sup>2</sup> 北見工業大学

<sup>3</sup> 株式会社ジェネシア

## 概要

より解像度の高い観測および偏光分光計測の精度向上を目的として、飛騨天文台ドームレス太陽望遠鏡 (DST) の水平分光器観測室に、波面補償光学装置 (AO) を設置した。本装置は折り曲げ鏡の切り替え機構により、垂直分光器の AO あり・なし、水平分光器の AO あり・なしの 4 つのモードから 1 つを選択することができる。tip-tilt 鏡とデフォーダブル鏡のそれぞれに直径 20mm および 77mm の瞳像をつくり、16 ないし 13 回の反射によって通常と同じ F 値の太陽像を、垂直分光器または水平分光器のスリット面に返すものである。本稿は光学系の基本的な設計指針と製作した光学素子の仕様をまとめたものである。

## Abstract

Aiming at the improvement of spatial resolution in imaging observations and accuracy in spectro-polarimetry, a new adaptive optics system was installed in the observing room of the horizontal spectrograph of the Domeless Solar Telescope at Hida observatory. With an exchange mechanism of folding mirrors, users can chose one of the following four modes, i.e., vertical spectrograph with and without AO and horizontal spectrograph with and without AO. The optical system makes 20mm  $\phi$  and 77mm  $\phi$  pupil images on the tip-tilt mirror and deformable mirror, respectively, and then sends the solar image with the same F-ratio as original onto the slit of the spectrographs. In this article, we describe the basic concept of the optical design of the system and specification of optical components.

### 1. はじめに

飛騨天文台では 2008 年より、ドームレス太陽望遠鏡 (Nakai and Hatori 1984) 垂直分光器の円形観測テーブル上に、実験的補償光学装置の開発をおこなってきた (Miura et al. 2010, 2012)。この装置は本格的補償光学装置の実用化に向けた技術開発を主たる目的としたものであり、1) 水平分光器では使用できない、2) レンズ系を使用しているため色収差がある、3) 全系のスループットが 3% (@800nm) ~ 20% (@500nm) 程度に止まる (ハーフミラー使用時)、4) デフォーダブル鏡の素子数や制御帯域の制約で波面補正の精度が不足、といった制約があり、科学観測に資するには性能が不十分であった。我々はドームレス太陽望遠鏡による回折限界分解能での偏光分光観測を実現することを目標に、水平・垂直両分光器で使用可能な本格的補償光学装置を新たに開発した。本稿はその基本的な光学設計と光学素子の製作に関する事項をまとめたものである。

### 2. 光学系の基本設計

#### 2-1. 設計条件

本補償光学装置は、平面鏡の出し入れによって水平・垂直両分光器に切り替えて使えるものとし、ドームレス太陽望遠鏡 (DST) の 2 階水平分光器観測室に光学定盤 (約 3.1m x 2m) を置いてその上に設置する (図 1)。DST の射出瞳は両分光器スリット上の像面から 20,510mm 上方にあり、その直径は 382.3mm である (F/53.6)。デフォーダブル鏡は米国サクラメントピーク太陽観測所の補償光学装置で使用実績のある Xinetics 社製 DMCD-97-S4 (97 素子、素子間隔 7mm、有効径 77.5mm) を用いる。この前提の下、以下の設計指針で光学パラメータの決定を行った。

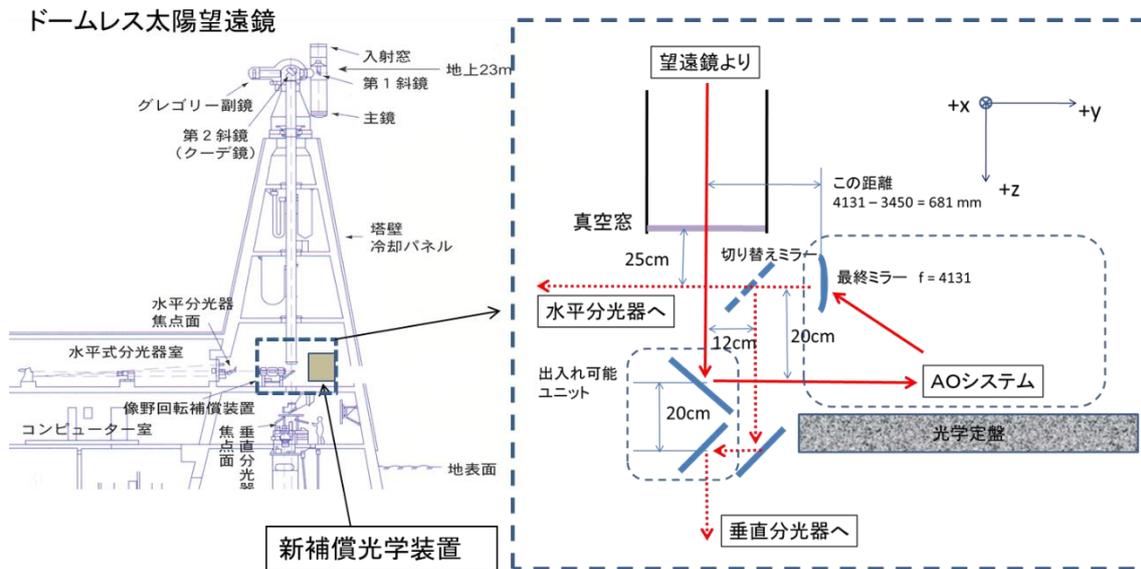


図 1. 新補償光学装置の配置

### << 設計指針 >>

- ・ tip-tilt 鏡とデフォーダブル鏡の上にはそれぞれ瞳像をつくる。
- ・ 瞳像の大きさは tip-tilt 鏡用が  $\phi 20\text{mm}$ 、デフォーダブル鏡用が  $\phi 77\text{mm}$  とする。
- ・ 光学素子の配置を見通しよくし、調整を容易にするため、AO 内に作る 2つの瞳像はそれぞれ太陽像をコリメートすることで形成し、2つの瞳像のリレーもコリメート光学系とする。
- ・ 色収差を避けるためリレー光学系はすべて鏡で構成する。
- ・ 分光器に従来と同じ F 値のビームを戻し、グレーティングの上に瞳をつくる。
- ・ 水平分光器には奇数回、垂直分光器には偶数回の反射で光を戻し、太陽像が鏡像反転しないようにする（垂直テーブル、水平像回転装置の回転方向を変えないため）。
- ・ 波長範囲 380nm~1600nm においてできるだけ高いスループットをもつこと。
- ・ 鏡切り替え装置により、垂直分光器の AO あり・なし、水平分光器の AO あり・なしの 4つのモードから 1つを選択することができることとする。

### 2-2. 設計結果

以上より各リレー光学素子の焦点距離と素子間距離を一意的に決めることができる。図 2 にそのパワー配置を示す。

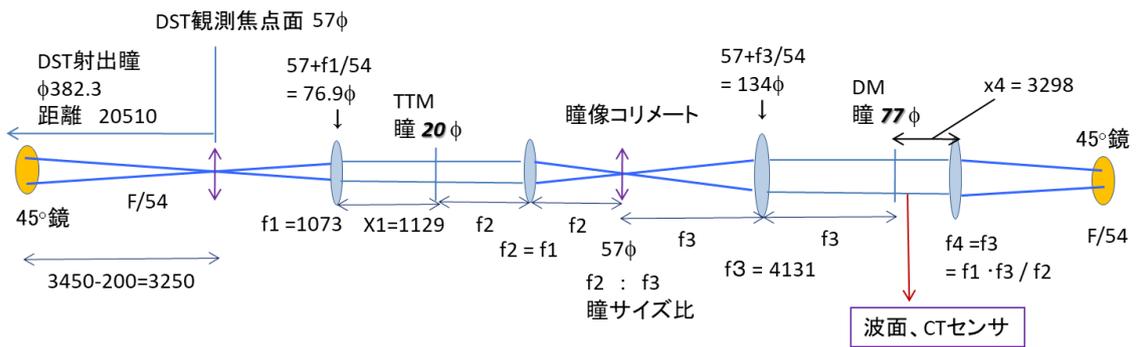


図2. 光学系パワー配置

これを複数の折り曲げ鏡を用いて約 3.1m x 2m の光学定盤 (図3) の上に配置した (図4) 表1に各ミラーの諸元を記す。2つの瞳像を作るためのコリメータと再結像素子は、それぞれ同一形状の軸外し放物面鏡のペアである。補償光学装置における鏡の反射回数は、水平分光器へは13回、垂直分光器へは16回となり、いずれもスリット上の像は従来の像に対して鏡像反転しないが、AOを通さない場合に対して180度回転する結果となった。このためDSTの観測視野の方位角情報である'inclination'については読み替えが必要である。尚、AOの使用はM1とM14~16、及びM17を光路に出し入れすることにより、垂直分光器へAOあり・なし、水平分光器へAOあり・なし、の計4つのモードから1つを選択することができる。モード切り替え装置の詳細については附属天文台技報仲谷他(執筆中)を参照されたい。

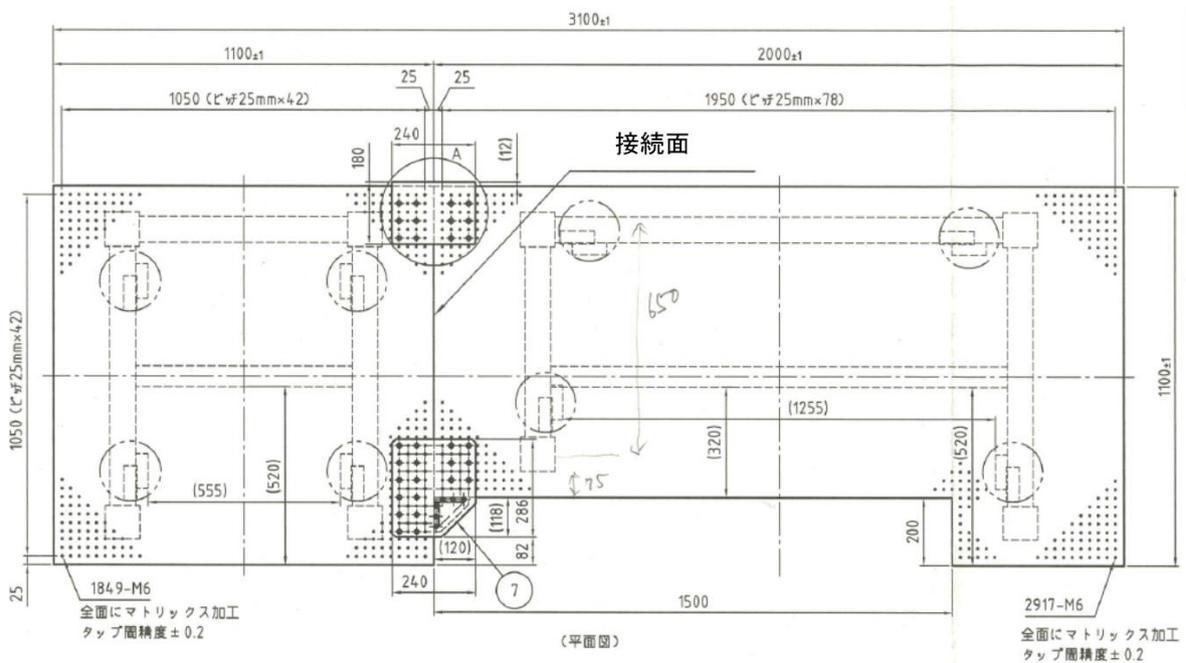


図3. 光学定盤の図面 (シグマ光機)

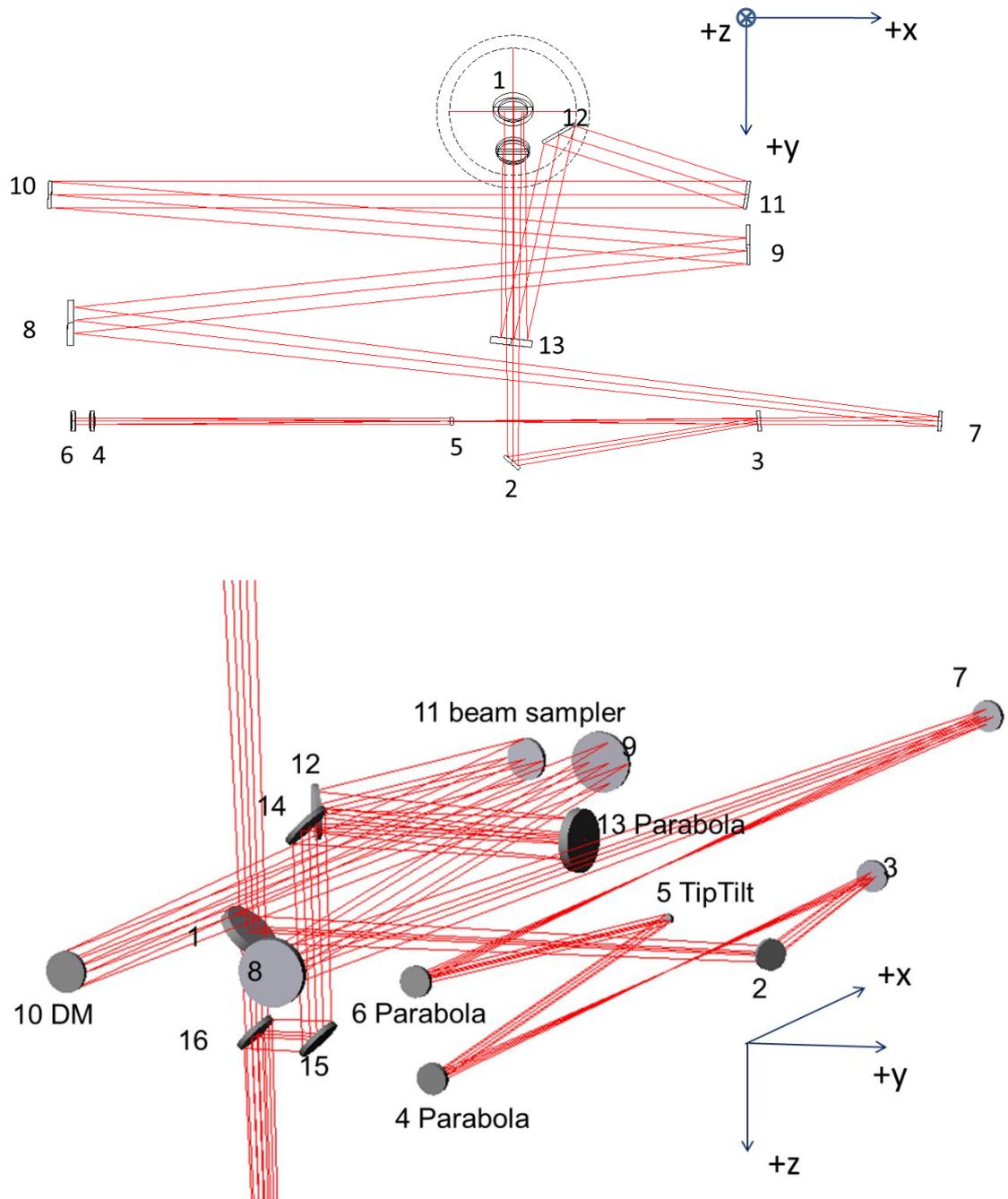


图 4. 光学系配置

表 1. ミラーの座標及び緒言

ID	種類、機能	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]	d [mm]	サイズ	コーティング	製造元
M1	折曲げ平面、出入可	0.000	0.000	200.000	1050.000	170 x 120	銀+多層膜	シグマ光機
M2	折曲げ平面	0.000	1050.000	200.000	744.355	170 x 120	”	”
M3	折曲げ平面、フォーカス調整	734.619	930.000	200.000	1991.510	90 x 90	超広帯域誘多膜	”
M4	軸外し放物面鏡、f1 = 1073	-1256.891	930.000	200.000	1072.979	80φ	アルミ+SiO2	富士光学
M5	Tip-Tilt 鏡	-188.346	930.000	102.544	1129.000	25φ	超広帯域誘多膜	シグマ光機
M6	軸外し放物面鏡、f2 = 1073	-1312.680	930.000	0.000	2595.223	80φ	アルミ+SiO2	富士光学
M7	折曲げ平面	1282.543	930.000	0.000	2608.728	90 x 90	超広帯域誘多膜	シグマ光機
M8	軸外し放物面鏡、f3 = 4131	-1316.066	700.458	0.000	2038.265	150 x 150	アルミ	岡本光学
M9	折曲げ平面	700.000	400.458	0.000	2092.706	120 x 120	超広帯域誘多膜	シグマ光機
M10	デフォーマブルミラー	-1387.290	250.000	0.000	2087.290	77.5 φ	増反射アルミ	Xinetics
M11	ビームサンプラー	700.000	250.000	0.000	582.508	120 x 120	アルミ薄膜, AR	シグマ光機
M12	折曲げ平面	146.000	70.000	0.000	628.201	170 x 120	銀+多層膜	“
M13	軸外し放物面鏡、f4 = 4131	0.000	681.000	0.000	561.000	150 x 150	アルミ	岡本光学
M14	折曲げ平面、VS-HS 切り替え	0.000	120.000	0.000	400.000	170 x 120	銀+多層膜	シグマ光機
M15	折曲げ平面、VS 用	0.000	120.000	400.000	120.000	170 x 120	銀+多層膜	”
M16	折曲げ平面、VS 用	0.000	0.000	400.000	3050.000	170 x 120	銀+多層膜	”
M17	折曲げ平面、HS Direct 用	0.000	0.000	0.000	2650.000	170 x 120	銀+多層膜	”

各ミラーの必要サイズを求めるために、瞳上5点、像面25点（図5）を結ぶ125本の光線追跡をおこない、ミラー上の光線のフットプリントを求めた（図6）。これより、各ミラーのサイズとして表1に示すような値に決めた。

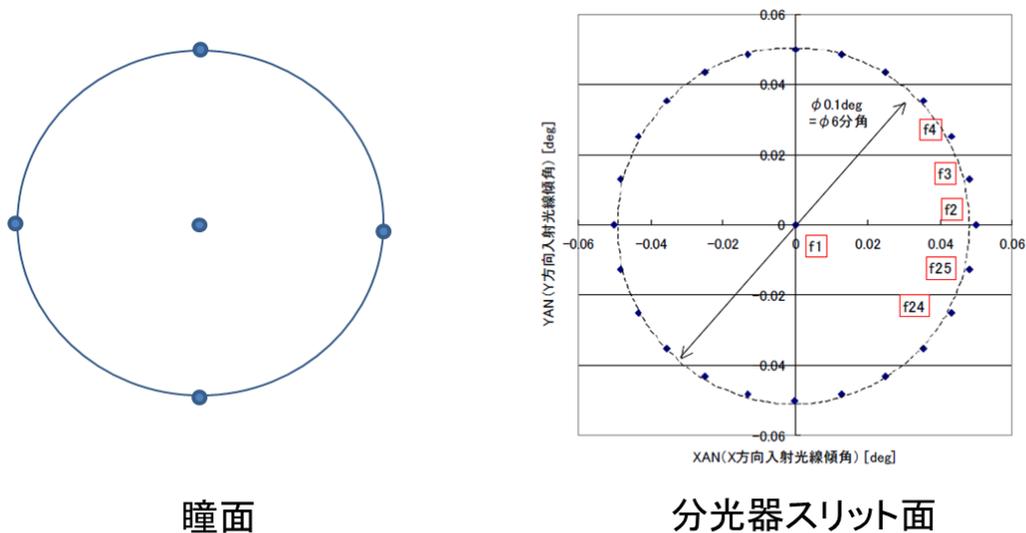


図5. 追跡した光線の瞳面（左）、像面（右）上の位置

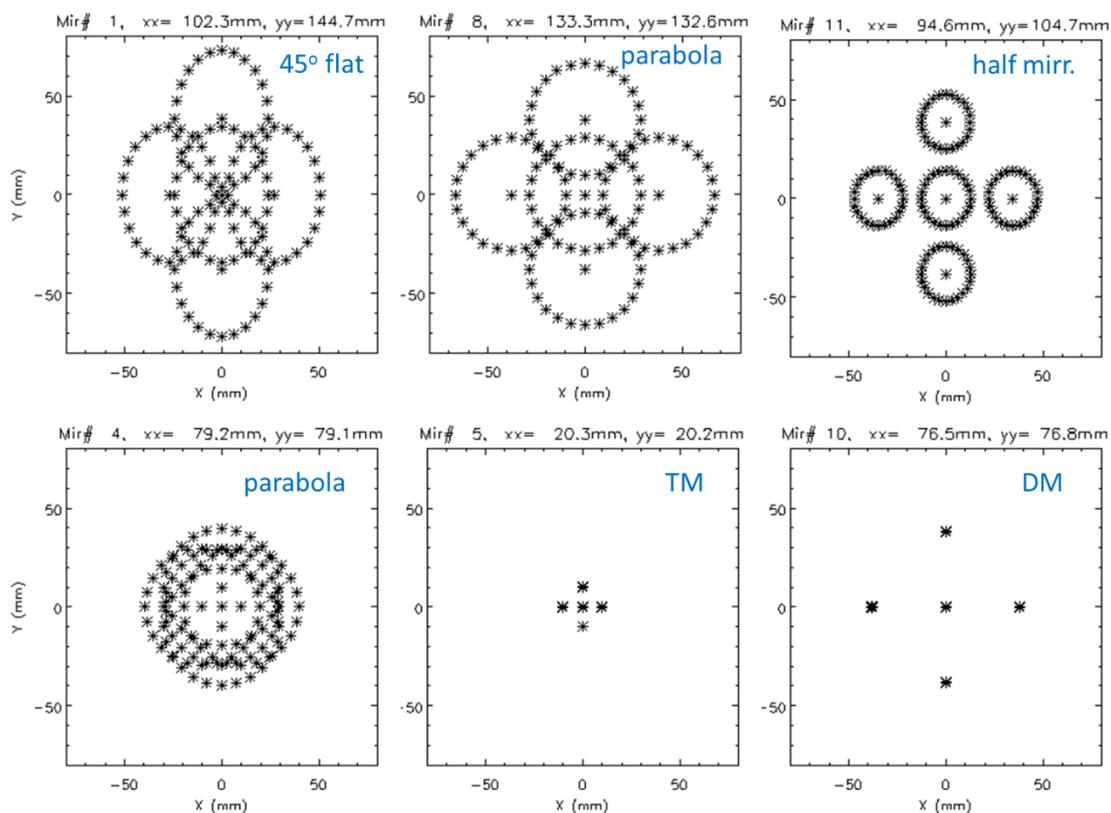


図6. 光線のフットプリント

### 3. 光学素子の製作

2つの瞳を作るための軸外し放物面鏡は、tip-tilt 鏡の 20mm 瞳用とデーフォーダブル鏡の 77mm 瞳用のそれぞれが以下の緒言と研磨仕上がりである。

- M4 & M6 (20mm 瞳形成)

$f = 1073\text{mm}$ ,  $\text{offset} = 97.6\text{mm}$ ,  $D \sim 80\text{mm}$

製造： 富士光学、 $\sim 303\phi$  の単一放物面を通常研磨し「切り出し」

波面精度： (不明) rms

- M8 & M13 (77mm 瞳形成)

$f = 4040\text{mm}$ ,  $\text{offset} = 946.7\text{mm}$ ,  $150 \times 150\text{mm}$

製造： 岡本光学加工所、クリアセラムを磁性流体研磨

波面精度：  $\sim 0.048\lambda \text{ rms @ } 633\text{nm}$

これらの形状を図 7 と 8 に、また、M8 と M13 の波面計測結果を図 9 に示す。

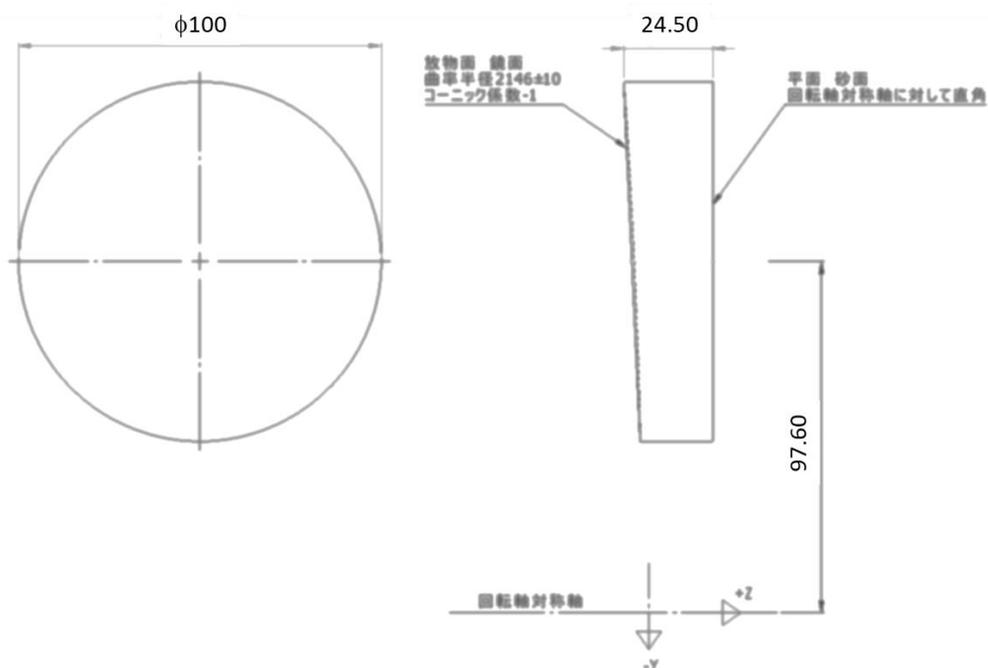


図 7. 放物面鏡図面 M4,6 (ミラー2146.JPG)

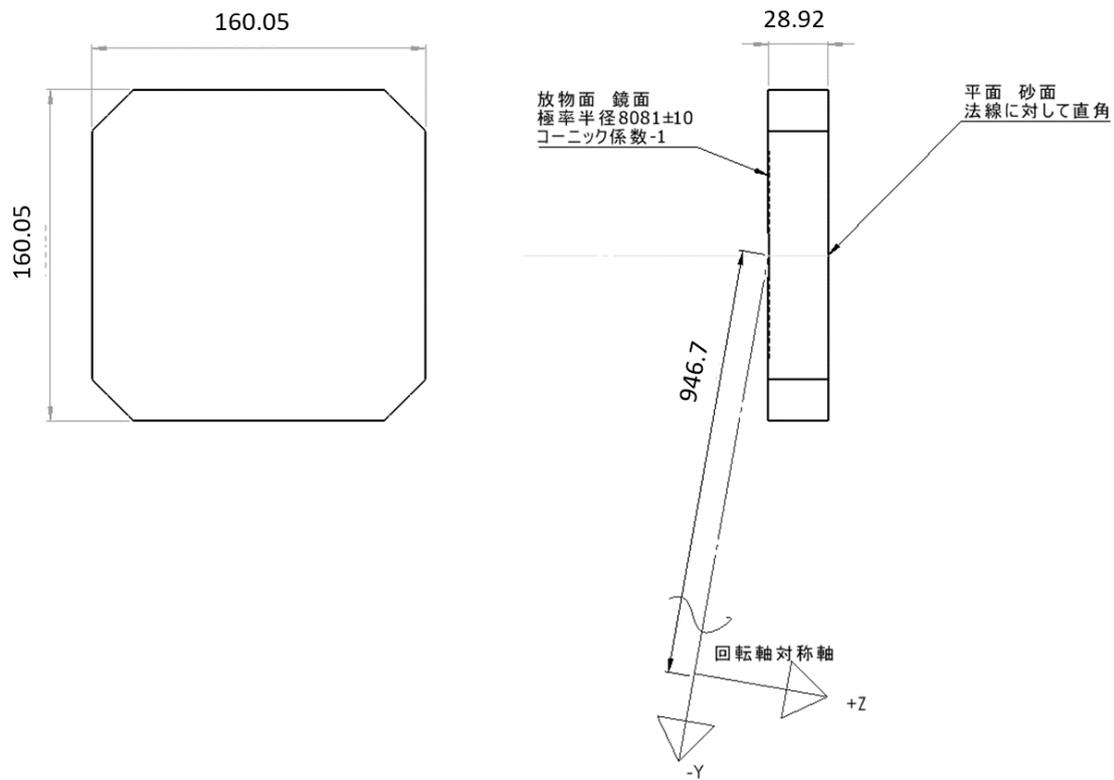


図 8. 軸外し放物面鏡図面 M8,13

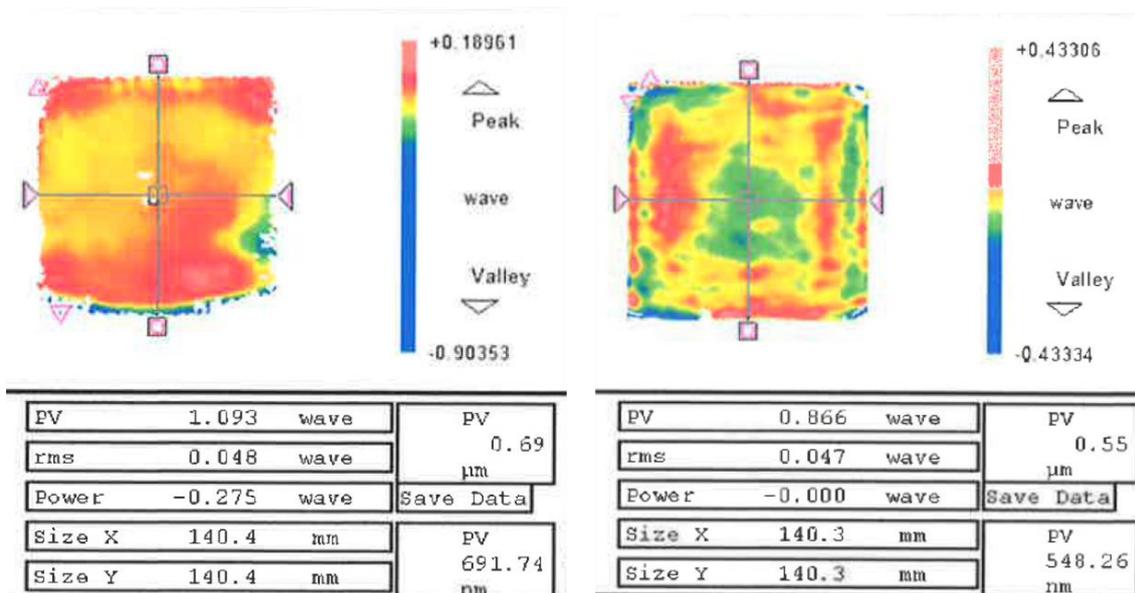


図 9. 第放物面鏡 (M8,13) 波面データ。左は 2016 年 4 月 25 日測定 (再研磨後)、右は 2017 年 6 月 2 日測定 (再再研磨後) (岡本光学提供)。

その他各平面鏡の形状を図 10 に示す。それぞれ材質は BK7 で、波面精度  $\lambda/10$ 、平行度 3 分以内の仕様となっている。

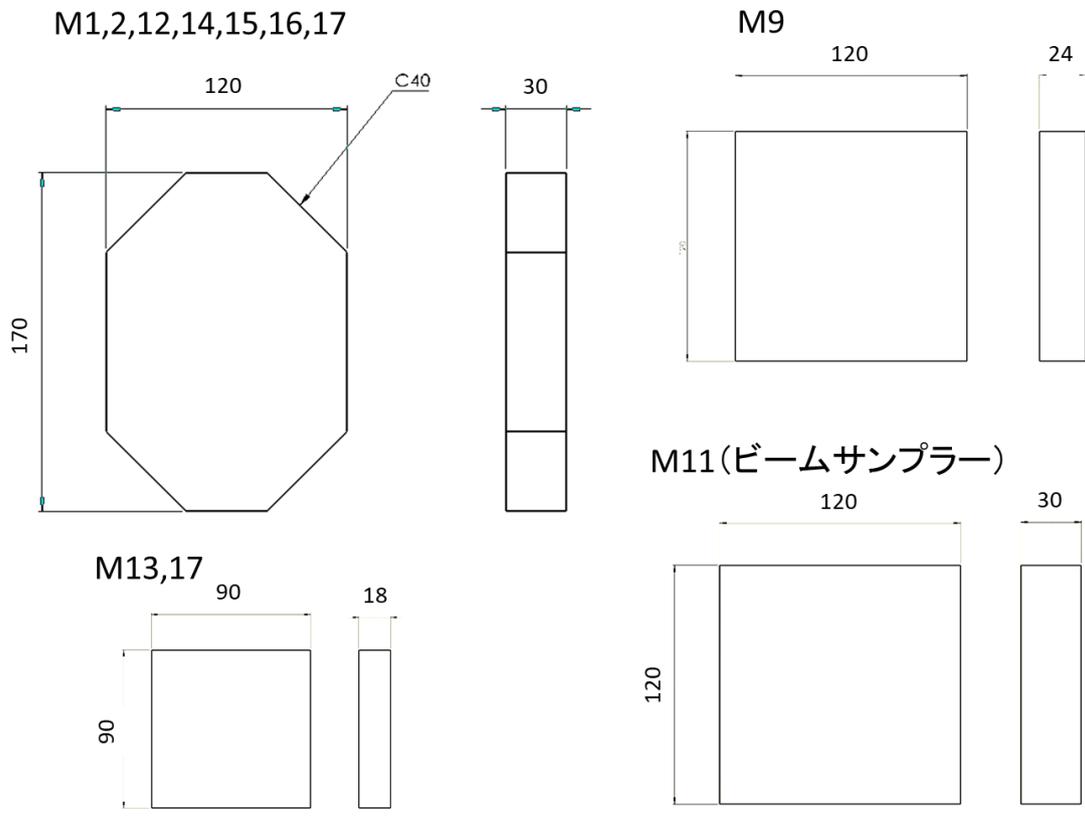
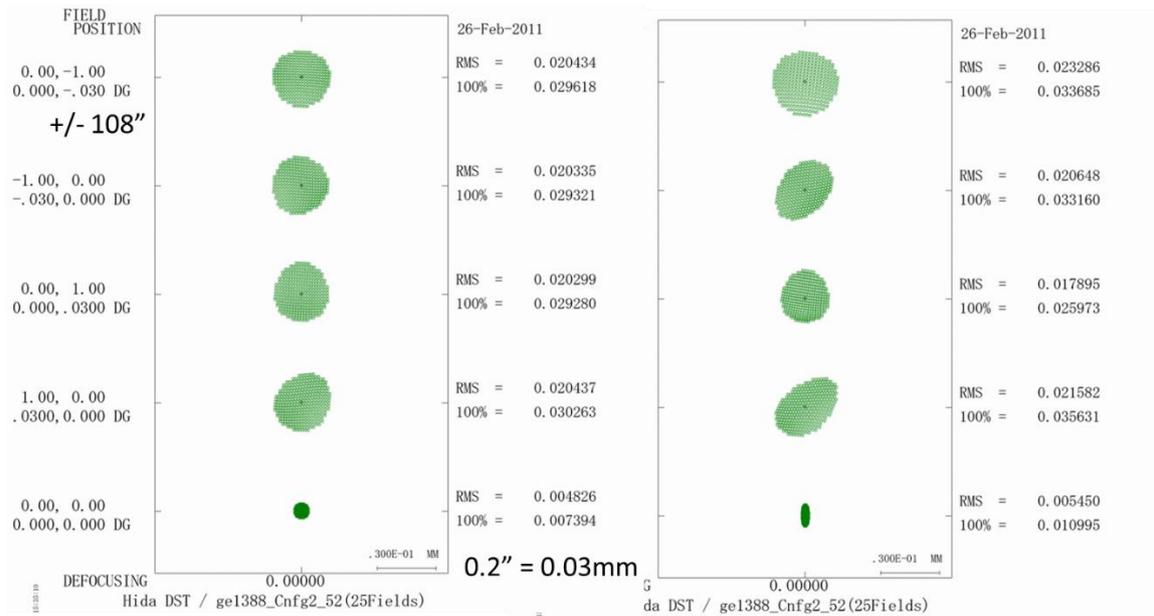


図 10. 折り曲げ平面鏡寸法。材質は BK7、波面精度  $\lambda/10$ 、平行度 3 分以内。

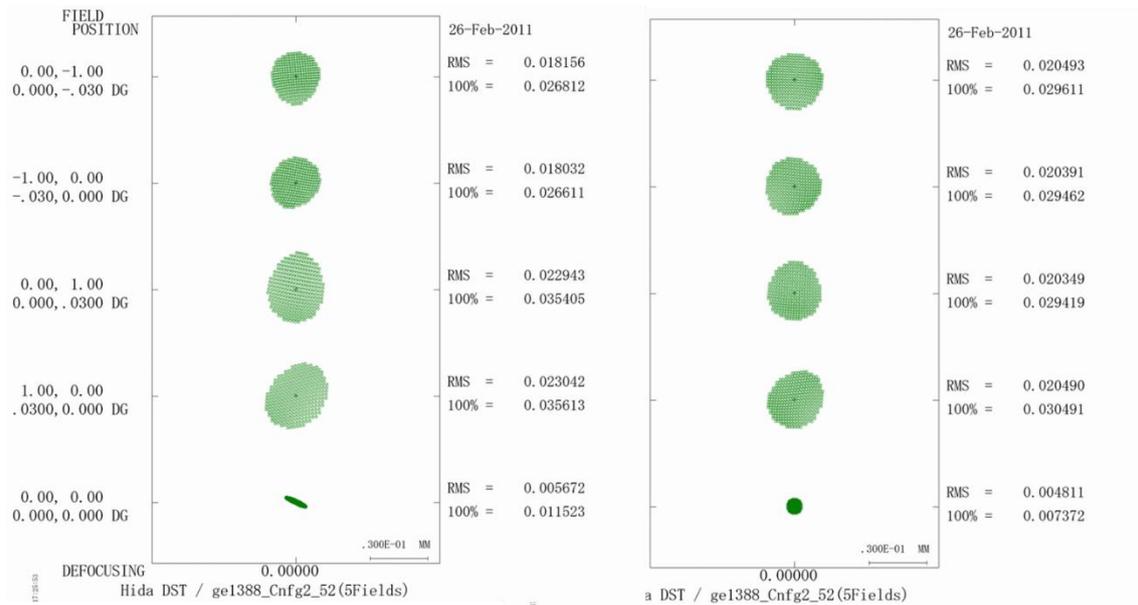
#### 4. 結像性能・トレランス解析および鏡保持機構

Code-V による光学性能評価にはジェネシア社の協力を得た。その結果を図 11 に示す。解析の結果、 $210^\circ\phi$  の視野にわたってスポットの広がりにはドームレス望遠鏡の回折限界  $\sim 0.2''@500\text{nm}$  (像面上  $0.03\text{mm}$ ) 程度であることを確認した。また、 $2\text{mm}$  程度の放物面鏡のシフトに対する像の劣化は殆ど見られず、スポットの広がり大きく変化しないことから、放物面鏡の位置は機械精度で定盤の上に固定し、光軸・フォーカス調整は基本的に平面鏡のティルトとシフトのみでおこなうこととした。各平面鏡のマウントには光軸方向の並進と 2 軸傾斜調整機構が設けてある (図 12)。



理想モデル

放物面(大)のfに80mm 誤差、位置固定スリット面にて再フォーカス



放物面(小)の1個をy+2, z+2mm シフト  
その他変えず。

放物面(小)の1個を光軸方向に+3mmシフト  
スリットで再フォーカス。

図 11. 全系を含めた理想形状ミラーにおけるスポットダイアグラム

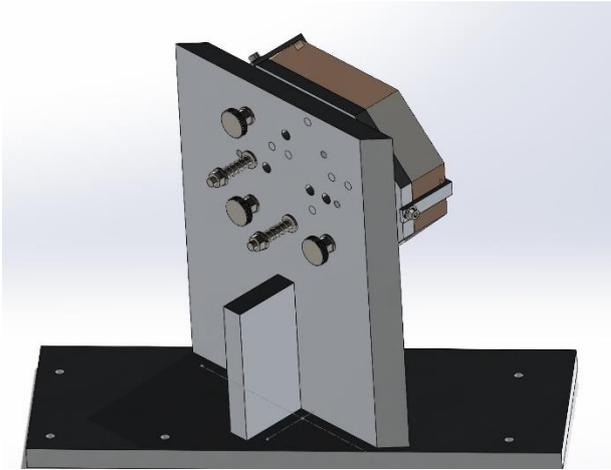


図 12 傾き調整機構 (M1,2,12,14,15,16,17)

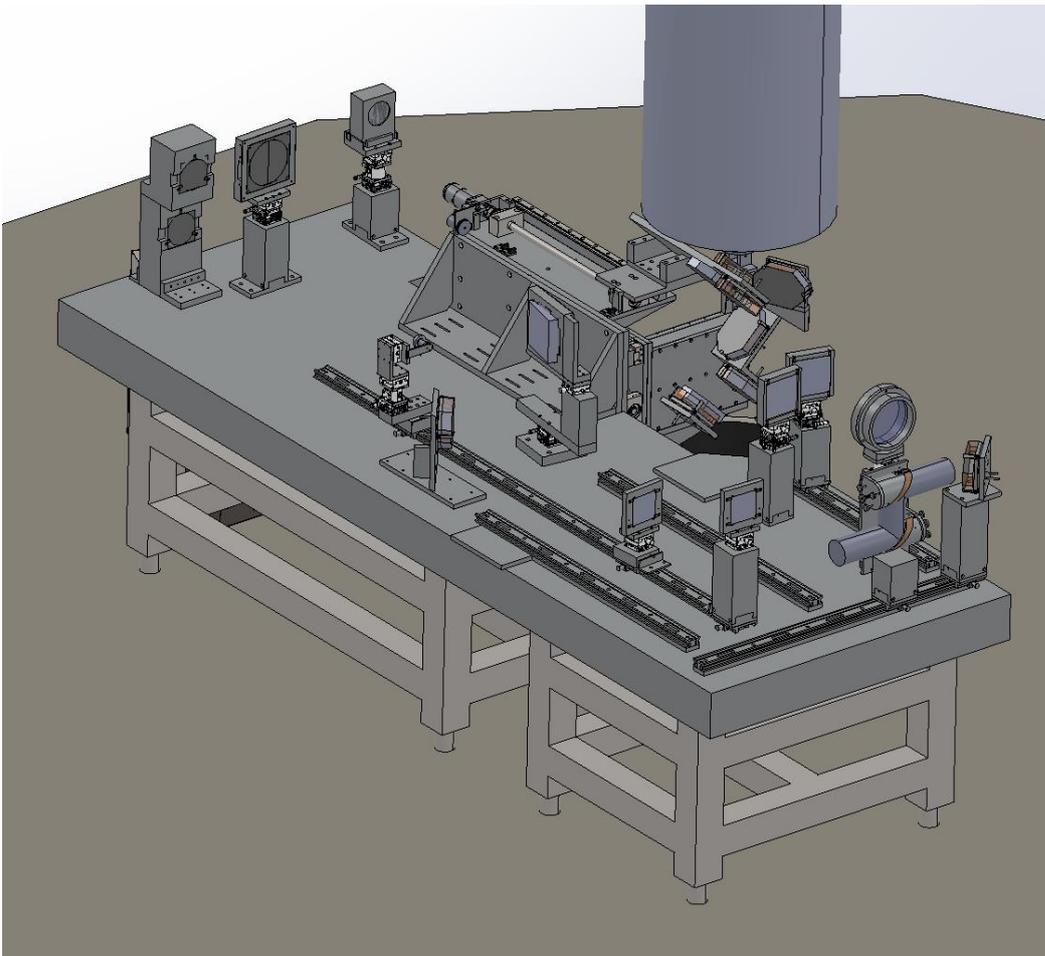


図 13. 全体組み立て図

## 5. コーティング

鏡面の反射コーティングを決定するにあたって、アルミと銀及び超広帯域反射多層膜（シグマ光機社製）の反射率の比較を行った。図 14 は波長 350～1200nm における各コーティングの反射率と、それぞれ 16 回反射した場合の透過率を示してある。これからアルミ面を 16 回反射すると可視域においてスループットが 10～30%程度まで低下し、銀では波長 600nm 以上では約 80%を維持するものの、400nm 以下で 40%以下に低下する。一方、超広帯域反射多層膜（シグマ光機社製）は 400～1200nm に渡って一回の反射率 99%以上、350～400nm において 98%以上の設計が可能であり、350～1200nm に渡って 70～80%以上のスループットを得ることが期待される。光を極力失いたくないという観測要求があるため、本システムでは折り曲げ平面鏡にはすべて超広帯域反射多層膜を施すことにした。しかし製造後に大面積の M1,2,12,14,15,16,17 については、多層膜の応力により許容できない鏡面変形（凸型）が発生していることが分かり、これらのコーティングを銀+保護誘電多層膜に変更した。放物面鏡はメンテナンスの観点からアルミにシンプルな保護膜を施した。表 1 には各ミラーに施したコーティングも記してある。

この結果、光学系内には 4 つの超広帯域反射多層膜鏡（M3, 5, 7, 9）が存在している。図 15 にその分光反射特性と遅延量（理論値）を示す。遅延量の波長依存性が大きいため、偏光観測には入念な特性評価が必要である。尚、M5（tip-tilt 鏡）には、入射角 5.34 度に最適化されたシグマ光機の超広帯域反射多層膜を、また、デフォーダブル鏡には Xinetics 社の増反射アルミコーティング（図 16）を施してある。

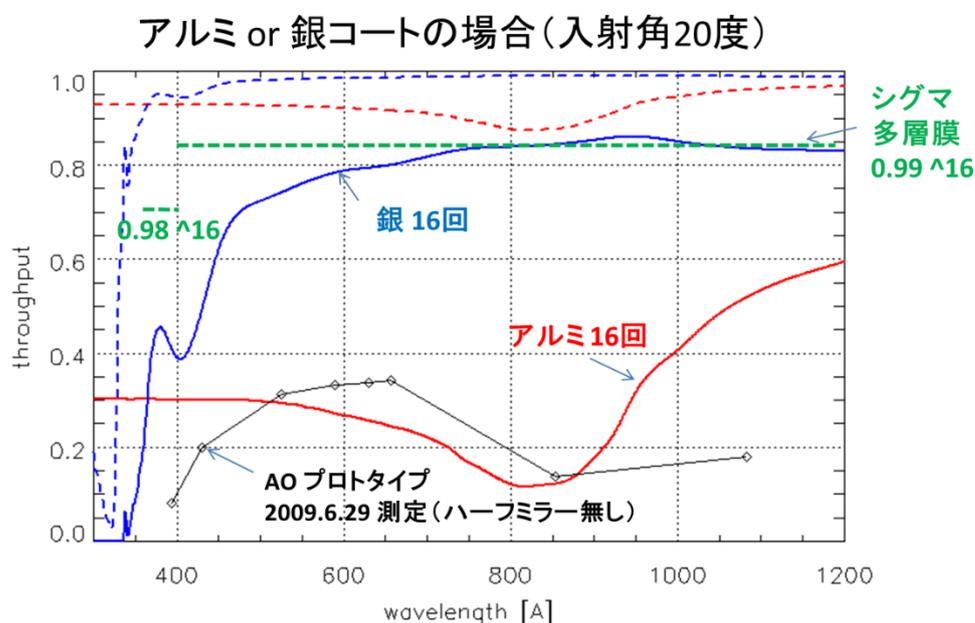


図 14. コーティングの反射率比較



システム全体 (M1~M16) を通した偏光特性を MMSP (Mueller Matrix Spectro-Polarimeter, Ichimoto et al 2006) により、AO 完成後 2021 年に測定した。図 1 7 にその結果を示す。ここで+Q (直線偏光の基準軸) の方向は図 4 にある x 軸である。大きな U-V 間のクロストークがあり、超広帯域反射多層膜起源と思われる波長方向のリップルが認められる。

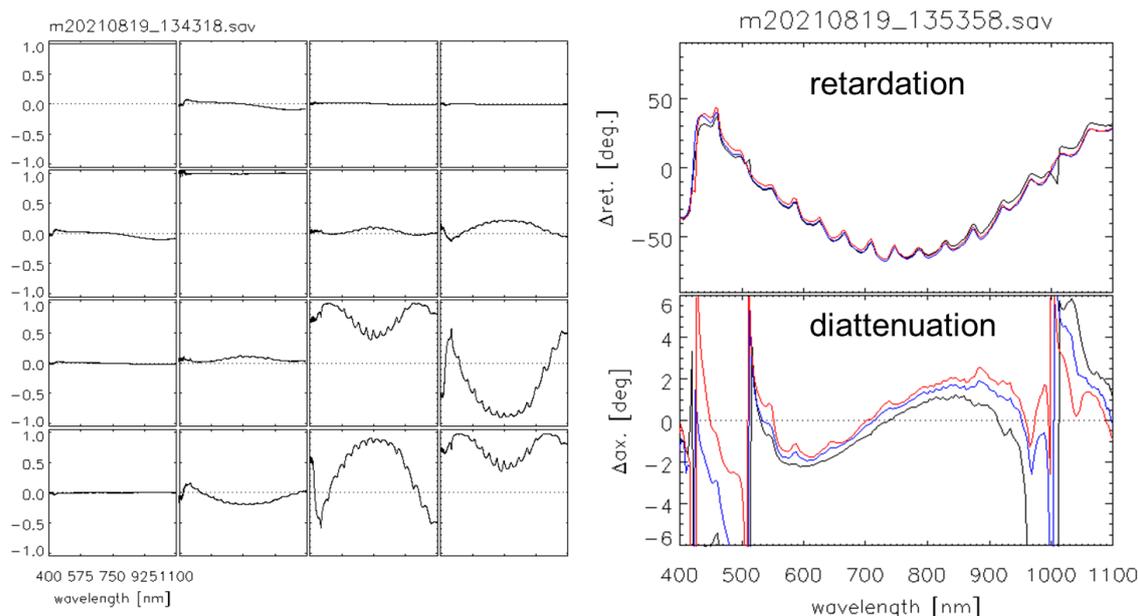


図 1 7. システム全体 (M1~M16) を通した 400nm~1100nm の波長範囲における偏光特性。左: Mueller Matrix、右: 遅延量 (上) と diattenuation (下)。右図の 3 つの線は MMSP の受光部の位置を少しずつらしておこなった 3 回の測定結果を示す。

## 6. 波面センサー光学系

デフォーダブル鏡を制御するための波面センサー及び、tip-tilt 鏡を制御するためのコリレーショントラッカーセンサーには、波面補正をした後の光束から光の一部をとりだし再結像する必要がある。センサーへの光量としては、センサーのバンド幅が広いため光量の 2~5%程度で十分である。光の一部を取り出すビームサンプラーには、平行平板ガラスにアルミの薄膜を施すこととした。図 18 上は異なる厚さのアルミ膜を施したときに予想される分光透過率である。これより、170Å 程度のアルミ膜をつけると我々の目的に叶う部分透過面ができることになる。飛騨天文台の真空蒸着装置で蒸着時間を変えながら何度か条件だし (図 18 下) を行った後、良好なアルミ膜の透過率が得られた。

センサー光学系にはビームサンプラーを透過したコリメート光を用いる。太陽像を再結像するため、昔日食観測で用いられた口径 150mm、焦点距離 2200mm の色消し対物レンズ (図 19) をビームサンプラー (M11) の直後に置いた。その後、M1 等と同じ形状の平面鏡 (ただしコーティングは当初の超広帯域多層膜のまま) で光線を 90 度折り曲げた後、45 度楕円型平面鏡を上下に 2 枚配置して光軸を定盤面から 250mm の高さまで下げている。太陽像の前にハーフミラーで光をわけ、反射光はすぐ後のコリレーショントラッカーカメ

ラに結像させている。透過光は像面に置かれた視野絞りを通した後、レンズによってコリメートし、瞳の共役位置に置かれたマイクロレンズアレイを通過して、カメラレンズにより波面センサーカメラに結像する。コリメートレンズとマイクロレンズアレイの仕様は以下の通りである。その他の詳細なパラメータは Miura et al. (2014) を参照されたい。

- コリメートレンズ
  - 製造：シグマ光機、球面アクロマティックレンズ DLB-50-200PM
  - $f = 200.1\text{mm}$ ,  $\phi 50.0\text{mm}$
- マイクロレンズアレイ
  - 製造：Nalux、特注
  - $f = 70.0\text{mm}$ (設計波長 450nm)、Pitch = 0.5mm、10x10 直交配列

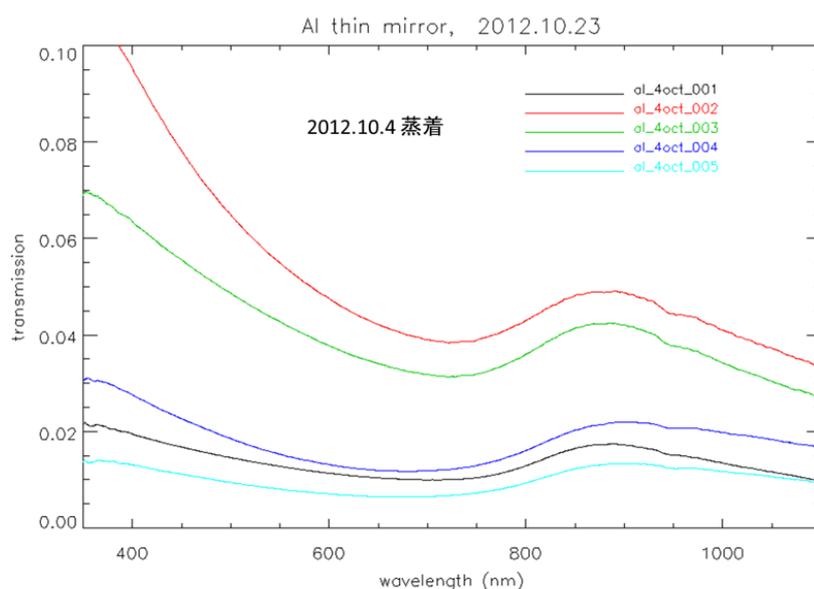
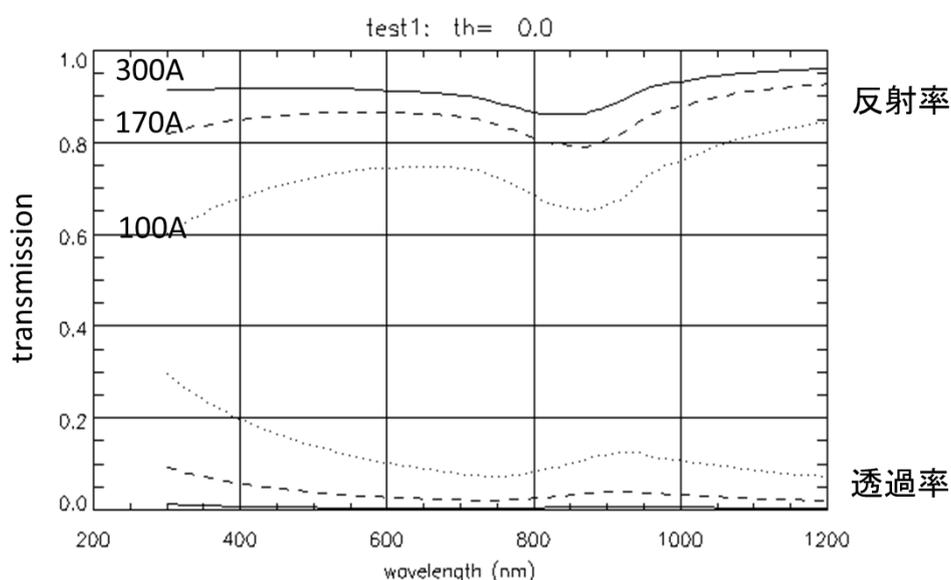


図 18. アルミ薄膜の分光透過率。上はシミュレーション、下は飛騨天文台の蒸着装置で条

件を変え施した膜の実測値 (Maya2000 分光計による)。



図 19. センサー光学系用に用いた再結像レンズ。口径 15cm、焦点距離 2200mm。メキシコ日食 (1991 年) に使用したものを流用。



図 20. 補償光学装置外観 (2014 年秋撮影)

## 7. おわりに

本補償光学装置は 2014 年の秋に設置を完了し、ファーストライトを迎えた (図 20)。当初平面鏡や放物面鏡の位置ずれに起因する非点収差や、垂直分光器と水平分光器で焦点位置が大きくずれるなどの問題が見つかった。主たる原因が、大型の 7 枚の平面鏡 (170x120mm) が超広帯域反射多層膜によってストレスを受け、凸状に変形していることが原因と分かり、これらの鏡を銀+誘電体保護膜のコーティングに変更することで改善を見た。また、大型軸外し放物面鏡 1 枚の面精度が不十分であったため、岡本光学にて 2016 年に再研磨、2017 年に再々研磨をおこなっている。

現在本装置は日常の観測に使用され、とくに tip-tilt 鏡による像安定化は 2 次元分光観測において良質な画像を取得する上で威力を発揮している。波面補償の効果は、シーイングがある程度よいときに限られているが、制御系の高性能化は現在も続けられている。一方、光学アライメントが日によってずれることがしばしばある。環境温度の安定化が望まれるところである。AO システムを用いた本格的な偏光分光観測もこれからである。精度の高い偏光キャリブレーションがこれからの課題である。

### 謝辞：

本研究は科学研究費補助金基盤研究 (A) (課題番号：22244013、H22～H25、代表：一本)、基盤研究 (B) (課題番号：22340038、H22～H24、代表：三浦)、挑戦的萌芽 (課題番号：24654045、H24～H26、代表：三浦)、基盤研究 (C) (課題番号：15K05016、H27～H29、代表：三浦) により実施したものである。また、本装置の開発にあたって、飛騨天文台職員継続的なサポートは不可欠であった。ここに感謝申し上げる。

### 参考文献：

- Ichimoto, K., Shinoda, K., Yamamoto, T., and Kiyohara, J., 2006, 国立天文台欧文報告 Vol.9, 11-19.
- Nakai, Y., & Hattori, A. 1985, Memoirs Faculty of Sciences University of Kyoto, 36, 385
- Miura, N., Yokoyama, F., Nefu, M., Kuwamura, S., Baba, N., Hanaoka, Y., Ueno, S., Nakatani, Y., Nagata, S., Kitai, R., Ichimoto, K., & Takami, H. 2010, Proc. SPIE, 7736, 773654
- Miura, N., Miyazaki, J., Kuwamura, S., Baba, N., Hanaoka, Y., Yamaguchi, M., Ueno, S., Nakatani, Y., Nagata, S., Kitai, R., Ichimoto, K., & Takami, H. 2012, Proc. SPIE, 8447, 84474D
- Miura, N., Oh-ishi, A., Aoki, S., Mogaki, H., Kuwamura, S., Baba, N., Hanaoka, Y., Yamaguchi, M., Ueno, S., Nakatani, Y., & Ichimoto, K. 2014, Proc. SPIE, 9148, 914831