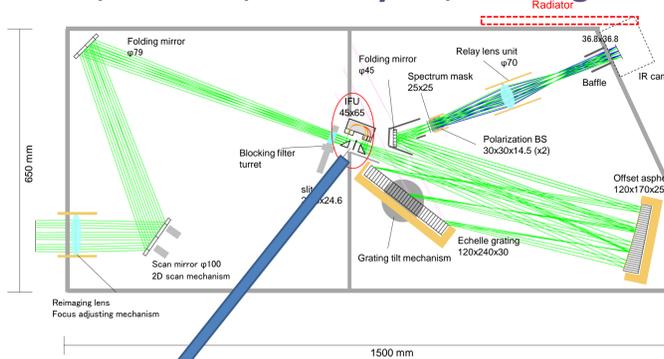


# 次期太陽観測衛星SOLAR-C用可視光イメージスライサーの開発

## Development of Image Slicer Unit for SOLAR-C Optical Telescope

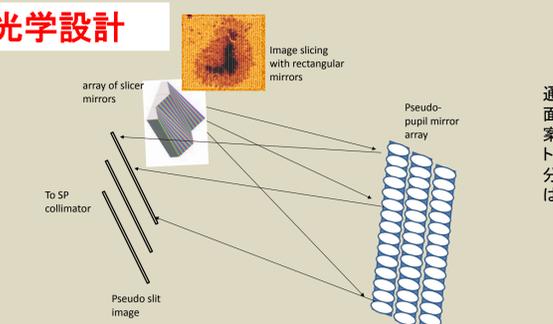
末松芳法(国立天文台), 斎藤洗輔, 小山祐嗣, 榎田弓貴也, 大倉幸伸, 中保友直, 助川隆(CANON), SOLAR-C WG  
 Y. Suematsu (NAOJ), K. Saito, M. Koyama, Y. Enokida, Y. Okura, T. Nakayasu, T. Sukegawa (Canon), SOLAR-C WG

**概要:** 太陽観測では、太陽面で起こる局所的、ダイナミックな磁気流体現象を的確に捉え、高精度分光偏光観測により現象の物理パラメータを精度よく求めることが重要であり、偏光観測に対応できる面分光装置が必須である。これまで面分光装置は様々な方式で開発され実用化されてきているが、宇宙用でしかも可視光用のものはまだ実例がない。このため、次期太陽観測衛星「SOLAR-C」搭載予定の偏光分光装置に適用可能なイメージスライサー式の面分光装置の開発を行っている。本面分光装置の特徴は、1つの分光器で通常のスリット分光と面分光を可動機構無しで両立でき、宇宙用のため最小限の軽量コンパクトな光学系を実現していることである。このため1つのスライサー鏡の幅は、スリット幅として許容できる30 $\mu$ m(0.18秒角相当)(長さ1.58mm)と非常に狭く、面精度の良いガラス研磨では実現できないものである(マイクロスライサー)。また広い視野を確保するために、スライサー鏡を45枚に対し、高精度の異なる反射角設定を実現する必要がある(8秒角 $\times$ 9.5秒角)。キヤノンの一体切削加工技術により、可視光観測に使用できる面粗度1.5nm rms以下の高性能金属鏡マイクロイメージスライサーユニットと軸外しコニック面からなる瞳鏡(1鏡の大きさ10mm $\times$ 20mm、3列 $\times$ 15行)ユニットが実現できる目処が立った。光学設計とプロトタイプ装置の光学性能評価、用いる銀コーティングの宇宙仕様評価結果について報告する。



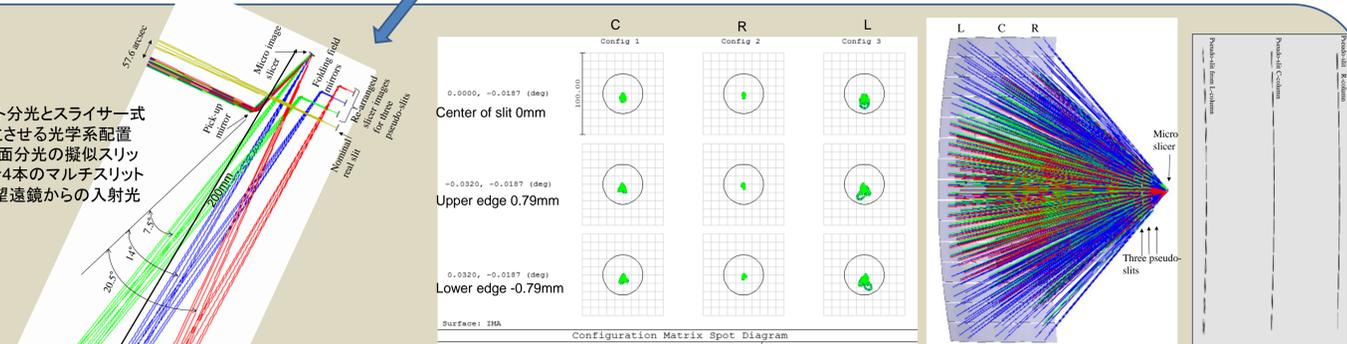
SOLAR-C光学望遠鏡の偏光分光装置の光学系レイアウト。通常のスリット分光と面分光を可動機構無しで、1つの分光器で両立させる設計。左図は、ファイバーバンドルで面分光を実現する案。本ポスターではこれをミラースライサー式の面分光を用いる案を提案している。実現性、偏光精度などの観点から両者のトレードオフを行っている。

### 光学設計



宇宙用の軽量コンパクトなスライサー式面分光を実現するため、スリット幅程度のスライサー鏡(マイクロスライサーと呼ぶ)と擬似瞳鏡で構成される光学系を設計方針とした。分光器にはテレセントリックで入射するよう、スリット面にシリンダリカルフィールドレンズを配置する。

通常のスリット分光とスライサー式面分光を両立させる光学系配置案。スリットと面分光の擬似スリット3本で、合計4本のマルチスリット分光となる。望遠鏡からの入射光はF/24。

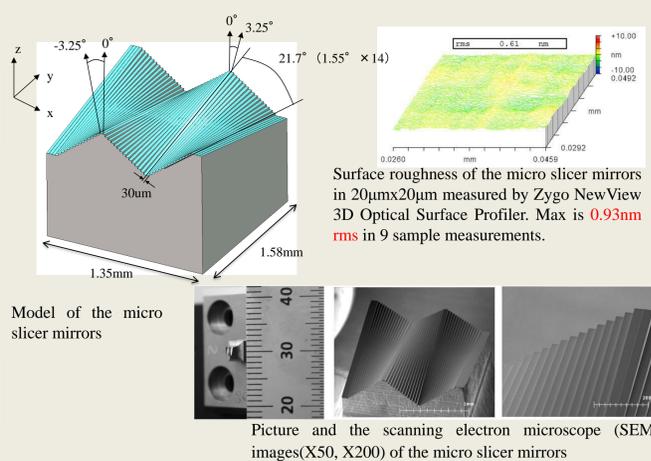


代表的なスポット図。スライサー鏡は平面鏡、擬似瞳鏡に軸外し楕円面を用いることで、良好な光学性能が実現可能である。

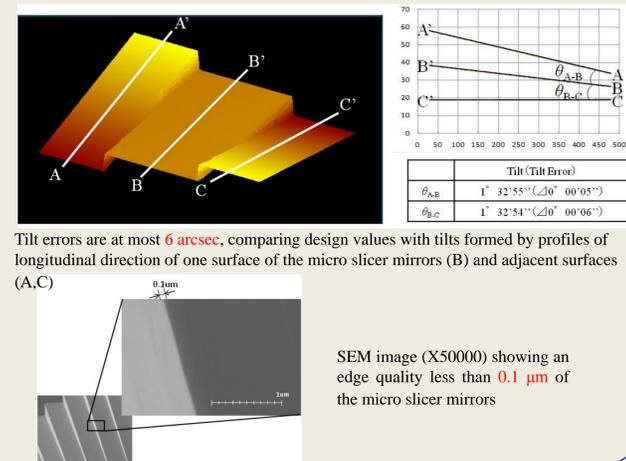
製作前に、光学系のCADデータを用いて光線追跡(ZEMAXのNon-sequential追跡)により、光学パラメータが問題ないことを確認。

### マイクロスライサーの仕様とプロトタイプ製作結果

	Dimension of each slicer mirror (mm)	Surface figure	Surface normal tilt angle $\theta_x$	Surface normal tilt angle $\theta_y$
Slicers for pupil mirrors in R-column	0.03W x 1.58 L	flat	1.55 n (deg)	-3.25 (deg)
Slicers for pupil mirrors in C-column			-1.55 n (deg)	0 (deg)
Slicers for pupil mirrors in L-column			1.55 n (deg)	3.25 (deg)
accuracy	Edge sharpness < 1 $\mu$ m	Figure error < 1 $\lambda$ (630 nm) PV Roughness < 1.5 nm rms	< 0.003 (deg) (10 arcsec)	< 0.003 (deg) (10 arcsec)



Surface roughness of the micro slicer mirrors in 20 $\mu$ m $\times$ 20 $\mu$ m measured by Zygo NewView 3D Optical Surface Profiler. Max is 0.93nm rms in 9 sample measurements.

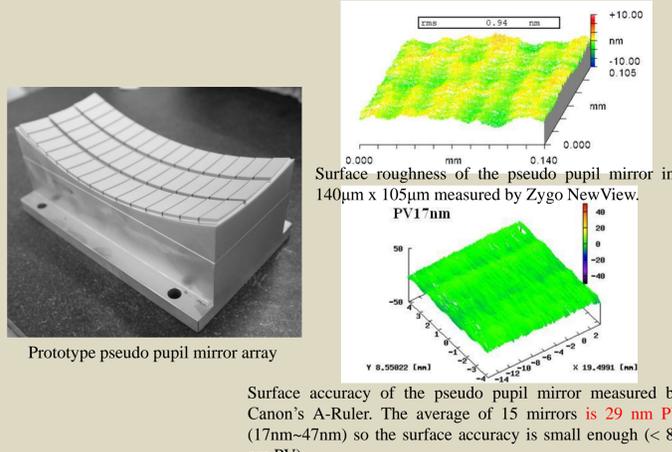


Tilt errors are at most 6 arcsec, comparing design values with tilts formed by profiles of longitudinal direction of one surface of the micro slicer mirrors (B) and adjacent surfaces (A,C)

SEM image (X50000) showing an edge quality less than 0.1 $\mu$ m of the micro slicer mirrors

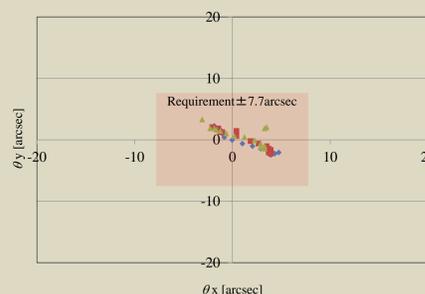
### 擬似瞳鏡の仕様とプロトタイプ製作結果

	Surface figure	Tilt $\theta_x$ from the radial direction from the each slicer center to pupil mirror center	Tilt $\theta_y$ from the radial direction from the each slicer center to pupil mirror center
R-column	R=200 (mm) k=-0.8351 $\Delta x=-4.260$ (mm)	-0.23 n (deg)	-2.5+0.0043 n (deg)
C-column	R=200 (mm) k=1.220 $\Delta x=-6.102$ (mm)	-0.23 n (deg)	-3.8-0.0043 n (deg)
L-column	R=200 (mm) k=-1.4602 $\Delta x=-7.897$ (mm)	-0.23 n (deg)	-5.1+0.0043 n (deg)
accuracy	Figure error < $\lambda/8$ (80 nm) PV Roughness < 1.5 nm rms	< 0.00215 (deg) (7.7 arcsec)	< 0.00215 (deg) (7.7 arcsec)



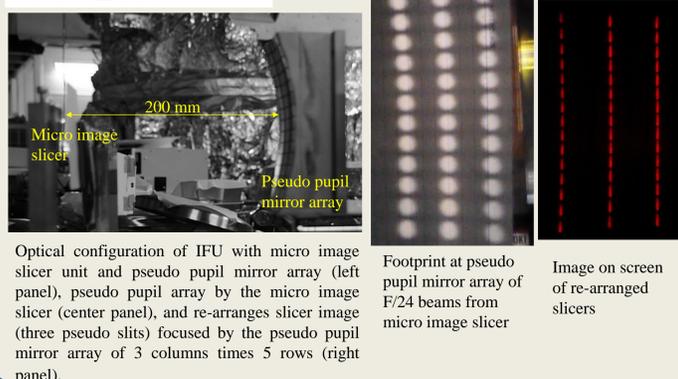
Surface roughness of the pseudo pupil mirror in 140 $\mu$ m $\times$ 105 $\mu$ m measured by Zygo NewView. PV17nm

Surface accuracy of the pseudo pupil mirror measured by Canon's A-Ruler. The average of 15 mirrors is 29 nm PV (17nm~47nm) so the surface accuracy is small enough (< 80 nm PV).

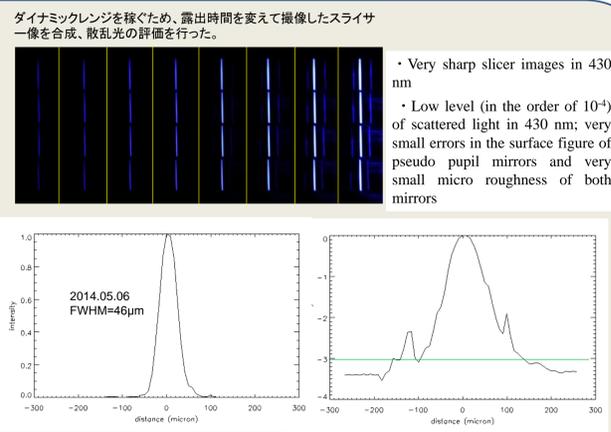


Tilt errors of the pseudo pupil mirror

### 光学性能評価

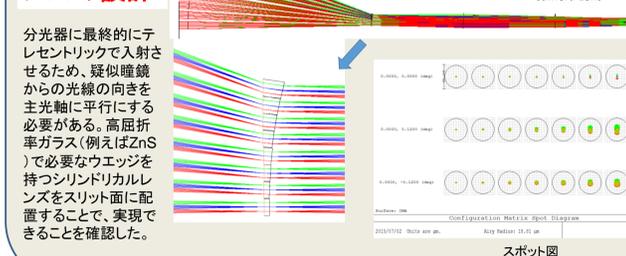


Optical configuration of IFU with micro image slicer unit and pseudo pupil mirror array (left panel), pseudo pupil array by the micro image slicer (center panel), and re-arranges slicer image (three pseudo slits) focused by the pseudo pupil mirror array of 3 columns times 5 rows (right panel).



Very sharp slicer images in 430 nm  
Low level (in the order of 10<sup>-4</sup>) of scattered light in 430 nm; very small errors in the surface figure of pseudo pupil mirrors and very small micro roughness of both mirrors

### フィールドレンズ設計



分光器に最終的にテレセントリックで入射させるため、擬似瞳鏡からの光線の向きを主光軸に平行にする必要がある。高屈折率ガラス(例えばZnS)で必要なウエッジを持つシリンドリカルレンズをスリット面に配置することで、実現できることを確認した。

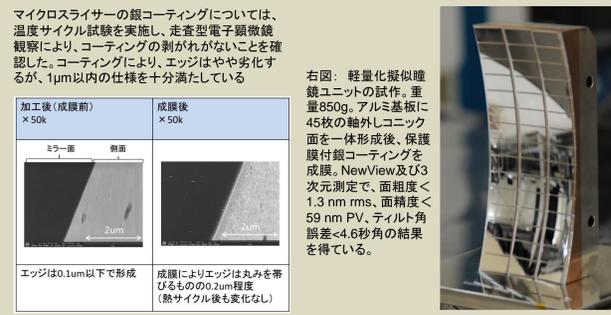
**まとめ**

- 本面分光装置は、1つの分光器で通常のスリット分光と面分光を可動機構無しで両立し、宇宙用ということで 最小限のコンパクトな光学系を実現することを特徴とする。
- このため1つのスライサー鏡の幅は、スリット幅として許容できる30 $\mu$ m(0.18秒角相当)(長さ1.58mm)と非常に狭く(マイクロスライサーと呼ぶ)、面精度の良いガラス研磨では実現できないものである。できるだけ広い視野を確保するために、スライサーを45枚配置し、高精度で異なる反射角設定を実現する必要がある(視野:8秒角 $\times$ 9.5秒角)。
- キヤノンの一体切削加工技術により、可視光(紫外でも)観測に使用できる面粗度1.3 nm rms以下の高性能金属鏡マイクロイメージスライサーユニットと軸外しコニック面からなる瞳鏡(1鏡の大きさ10mm $\times$ 20mm、3列 $\times$ 15行)ユニットが実現できる目処が立った。

- very small micro roughness < 1.3 nm rms,
- sharp edges < 0.2 $\mu$ m for width 30 $\mu$ m,
- surface figure errors < 59 nm PV
- mirror tilt errors < 10 arcsec

### 金属鏡 保護膜付 銀コーティング 宇宙仕様試験

試験項目	試験内容	試験設備	反射率変化	テープテスト(Canon)	可否
温度サイクル	温度 幅-25 $^{\circ}$ C ~ +65 $^{\circ}$ Cで50サイクル	国立天文台 ALMA恒温槽LH41-15P	変化なし	OK	○
湿度	湿度95%、温度40 $^{\circ}$ Cに48時間放置	キヤノン 恒温槽	変化なし	OK	○
真空曝露	真空度 10 <sup>-4</sup> [Pa]	キヤノン 真空チャンバー	変化なし	OK	○
放射線	加速電圧:1MV $\times$ 放射線0.4mA、照射量20cm、コンベア速度:5.07m/minで1pass当たり1Kgの表面ドーズ値。5pass繰り返し5kGy照射	放射線利用振興協会・高崎事業所 電子加速器(1号加速器)	変化なし	OK	○
紫外線照射	照射強度:2~35C 総照射量:1867 ESH	宇宙科学研究所 太刀川研・紫外線照射設備	変化なし	OK	○



マイクロスライサーの銀コーティングについては、温度サイクル試験を実施し、走査型電子顕微鏡観察により、コーティングの割れがないことを確認した。コーティングにより、エッジはやや劣化するが、1 $\mu$ m以下の仕様を十分満たしている

右図: 軽量化擬似瞳鏡ユニットの試作。重量850g、アルミ基板に45枚のスライサー鏡を一体形成後、保護膜付銀コーティングを成膜。NewView及び3次元測定で、面粗度<1.3 nm rms、面精度<59 nm PV、テイル角傾差<4.6秒角の結果を得ている。