

SOLAR-C偏光分光観測に向けた面分光装置と近赤外線カメラの性能と課題

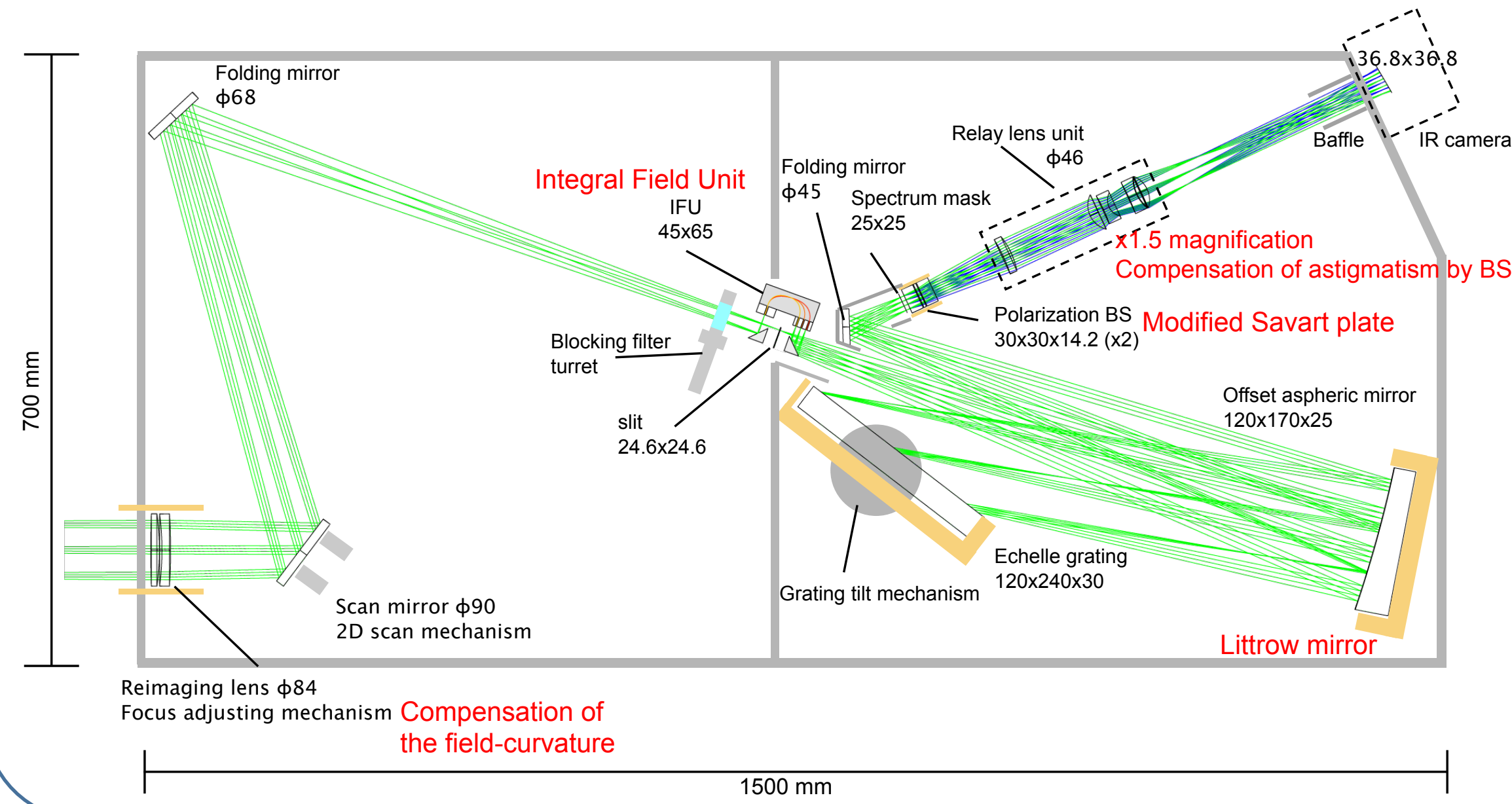
Development of an integral field unit (IFU) and a near-IR camera for high precision spectro-polarimetry in SOLAR-C

勝川行雄, 原弘久, 末松芳法, 鎌田有紀子(国立天文台), 一本潔 (京都大), 清水敏文 (ISAS/JAXA)

Y. Katsukawa, H. Hara, Y. Suematsu, Y. Kamata (NAOJ), K. Ichimoto (Kyoto U.), T. Shimizu (ISAS/JAXA) and Solar-C WG

SOLAR-Cにおける彩層偏光分光観測

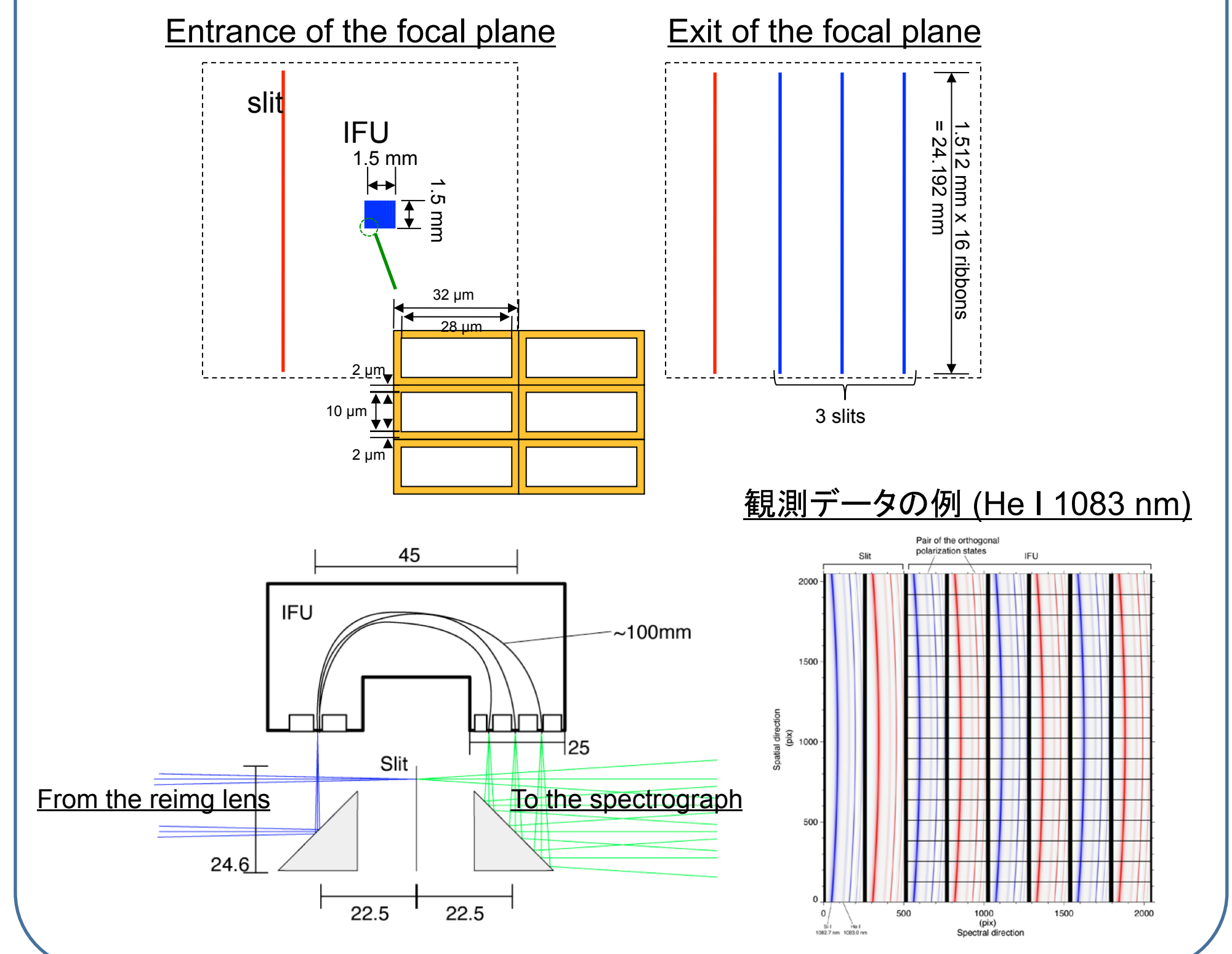
次期太陽観測衛星SOLAR-Cでは、高精度偏光分光観測により光球に加えて彩層の磁場診断を実現することが最重要要求である。分光器光学系は、リトロー鏡やリレーレンズ系等の最適化を行うことで、波長範囲500nm-1.1μmにおいて空間・波長分解能要求を実現する。本装置の特徴は、従来のスリット(1次元)分光に加え、2次元同時に偏光分光情報を取得する面分光装置を搭載することである。光学ファイバーを用いた面分光装置の開発とともに、彩層観測に適したスペクトル線のある波長1μm近傍を高感度かつ高速で観測できるカメラの性能検証を行っている。



Type	Littrow spectrograph
Entrance pupil	56.6 mm
Focal length (feed optics)	1414.4 mm (F/25.0)
Focal length (spectrograph)	720 mm (F/7.8)
Detector size	2048 x 2048, 18 μm/pixel
Pixel scale	0.07 arcsec/pixel in the spatial direction
Blaze angle	63.4° (R2 grating)
Groove density	110 /mm
Grating size	120mm x 240mm
Slit spectrograph	
Spatial sampling	0.07" by the slit width of 12 μm
FOV	143" along the slit (single slit)
Spectrum resolution	[sampling (slit width = pixel size)] $\lambda/\Delta\lambda = 2.4 \times 10^5$ [grating size] $\lambda/\Delta\lambda \sim 2 \times 10^5$
IFU spectrograph	
Spatial sampling	0.18" by the slit width of 30 μm
FOV	9.0" x 8.6" is converted into three slits.
Spectrum resolution	[sampling (slit width = pixel size)] $\lambda/\Delta\lambda = 1 \times 10^5$ [grating size] $\lambda/\Delta\lambda \sim 3 \times 10^5$
Wavelength bands	
Wavelength bands	1083.0 nm 854.2 nm 525.0 nm
Spectrum line	He I Ca II Fe I
Diffraction order	15 19 31
Wavelength sampling	45.2 mÅ 35.6 mÅ 21.9 mÅ

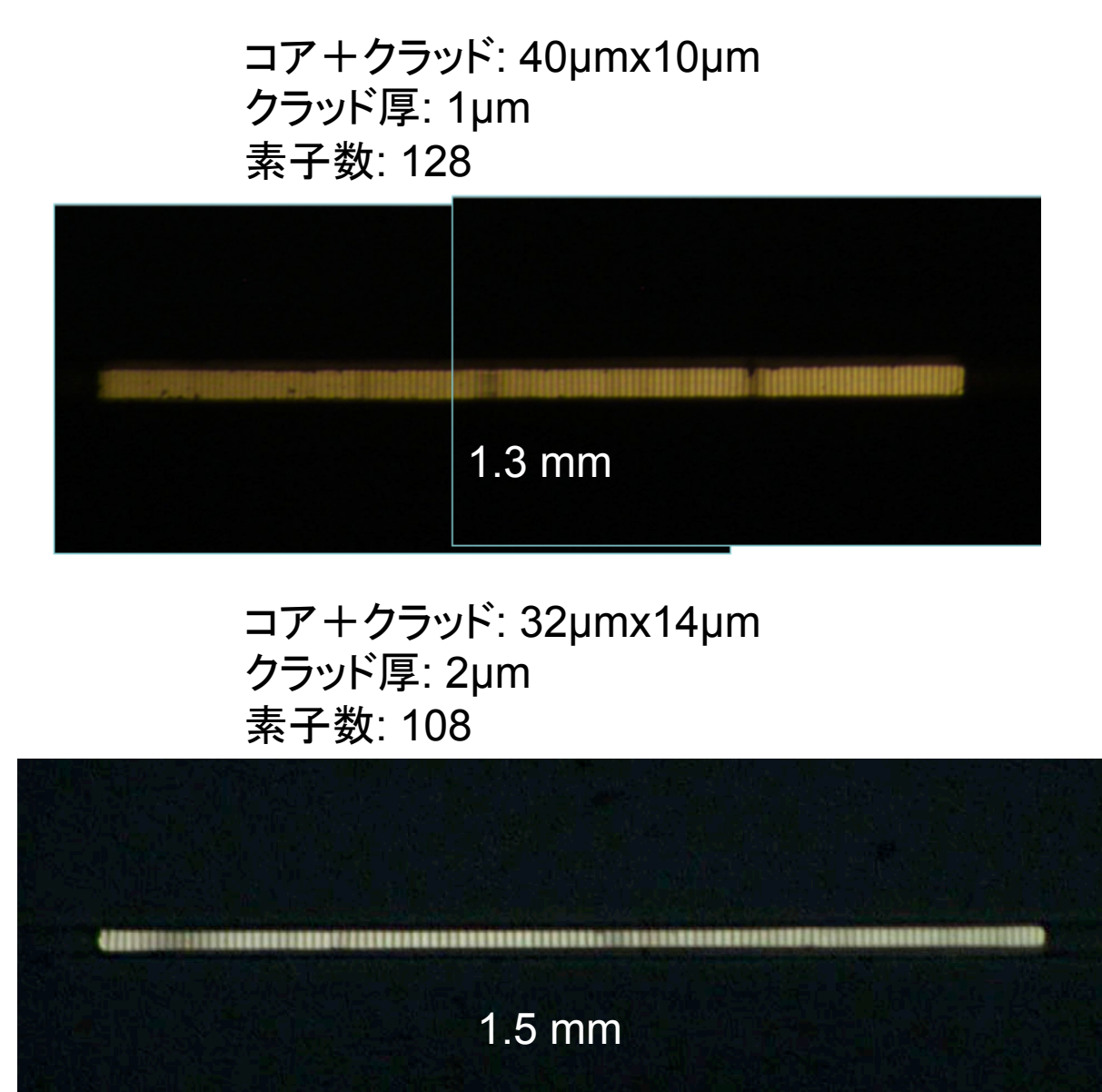
面分光装置(IFU)

面分光装置は2次元同時に偏光分光情報を取得できる一方、スリット分光はスルーポットや波長分解能の点で有利である。そこで、通常のスリットと面分光装置をどちらも焦点面上に配置する。検出器の読み出し範囲を切り替えることで、スリット分光と面分光装置の2つのモードを切り替える。



矩形コアファイバーの開発

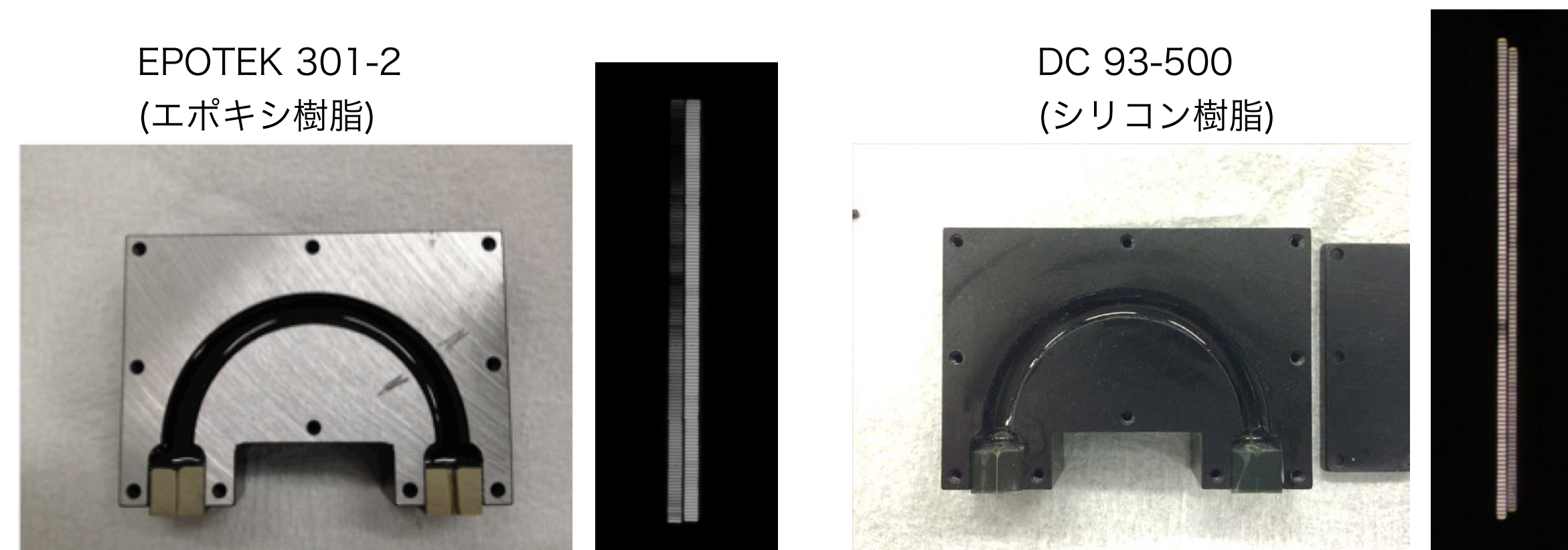
ハワイ大学(H. Lin)が開発した幅40μm、クラッド厚1μm矩形コアを1次元的に配列したファイバーリボン(材料はホウケイ酸ガラス)を入手し、面分光装置への応用に必要な項目の検証を行なった。また、SOLAR-Cで要求される波長分解能を実現するため、幅を32μmにし、さらに近赤外線域でのクロストークを低減するため、クラッド厚を2μmにしたものをCollimated Holes社(米国)と新規開発した。形状の均一性や真直度が十分にある矩形コアリボンの開発に成功した。



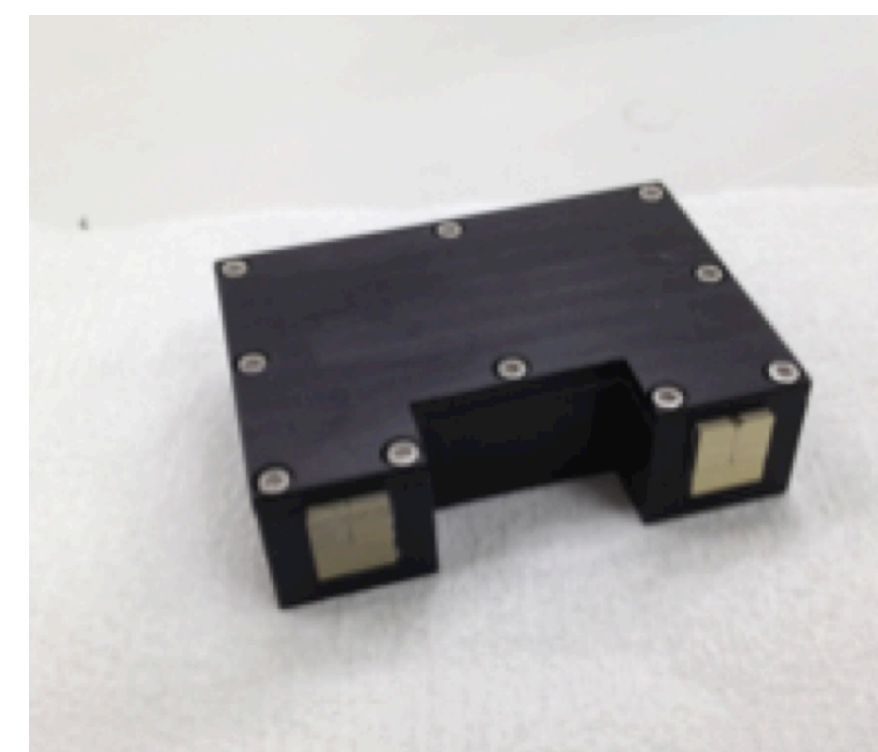
ファイバーリボンの保持構造

面分光装置は48本のファイバーリボンを束ねることで構成される。耐打上環境のため、32μm幅の細いファイバーを樹脂で筐体に固定する方式を検討した。その有効性を検証するため、2本のファイバーリボンから成る面分光装置の試験モデルを製作した。エポキシの固化や熱応力がファイバーの光学性能に与える影響について検証を行なった。

エポキシ樹脂を使用した場合、2本のりボンのうち1本の透過率が極めて低くなっていることがわかった。エポキシ樹脂によって発生していることを確認しており、固化収縮がファイバーにストレスを与えている可能性が高い。シリコン樹脂を使用した場合、その影響を小さくできることがわかった。宇宙実績のあるシリコン樹脂として、流動性のあるDC 93-500を第1候補として評価を実施している。



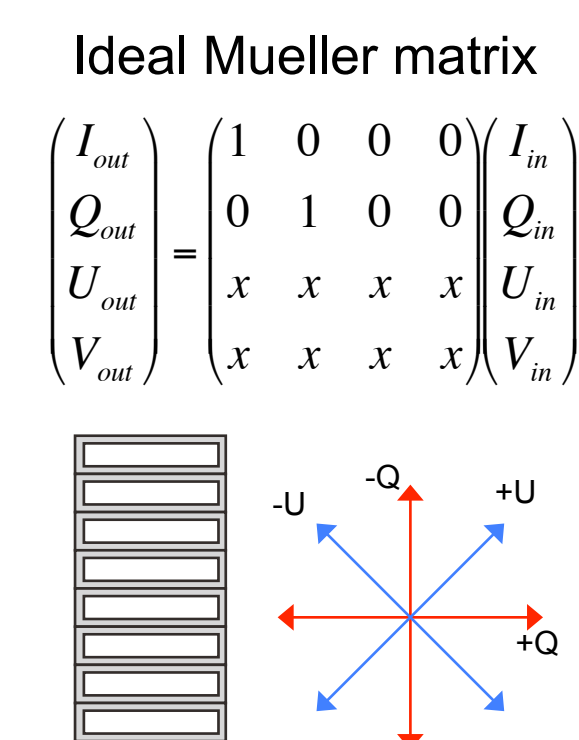
ファイバーを樹脂で固定した面分光装置試験モデルの外観



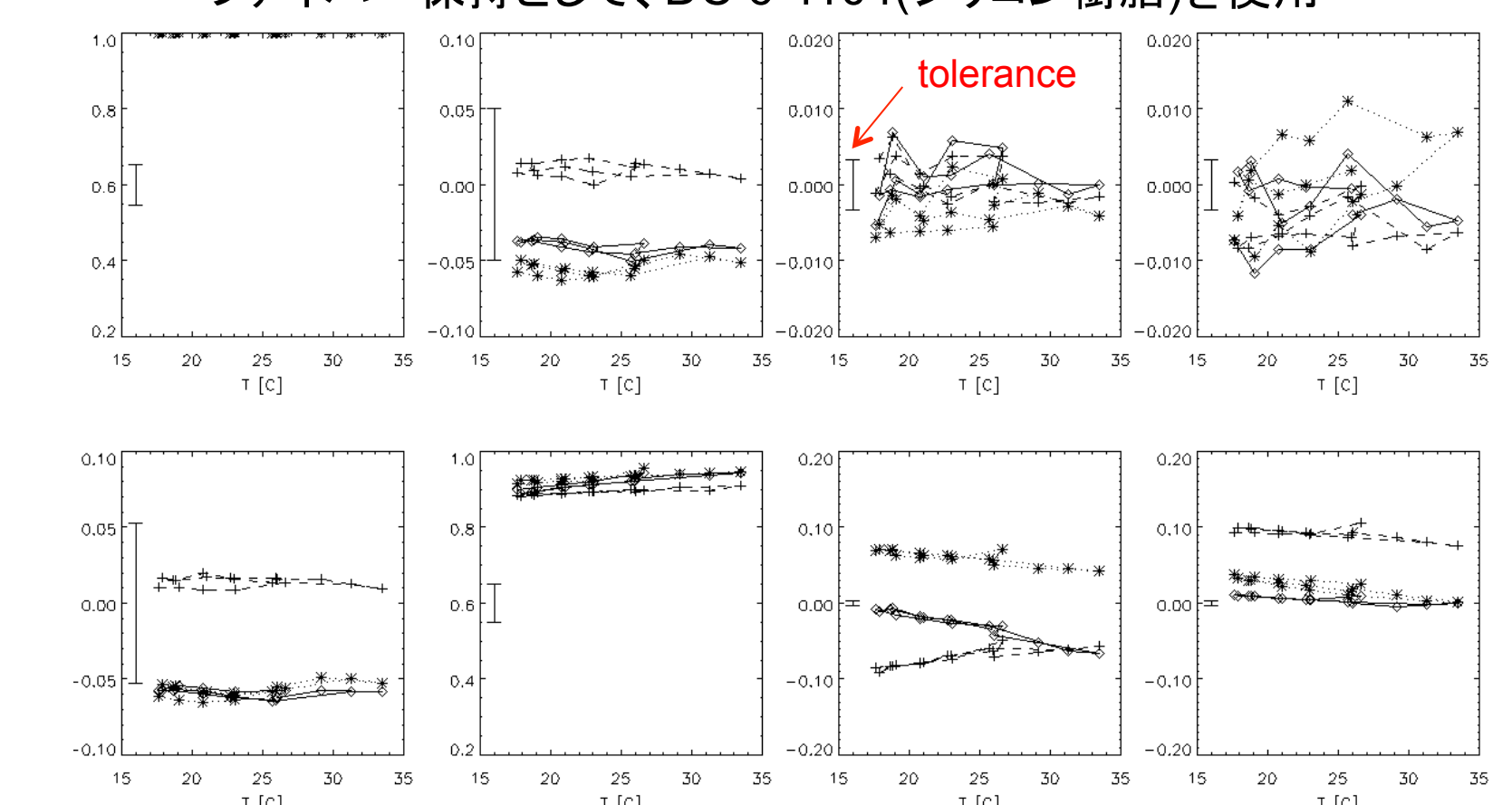
偏光保持性能

矩形コア形状の目的は、幾何学的な異方性によって、偏光維持性能をもたせることである。ファイバーの長さや曲げ方によって、偏光維持性能(Mueller行列)がどう影響を受けるかを測定した。

高精度偏光観測のためには、キャリアレーションによってMueller行列を十分な精度で把握する必要がある。温度依存性を測定したところ、要求より大きな変動(特にU→Q, V→Qのクロストーク)が見られた。エポキシ樹脂よりシリコン樹脂の方が影響が小さいが、1°C程度の温度安定性が必要になる。



Mueller行列 (1行目, 2行目)の温度依存性
ファイバー保持として、DC 6-1104(シリコン樹脂)を使用

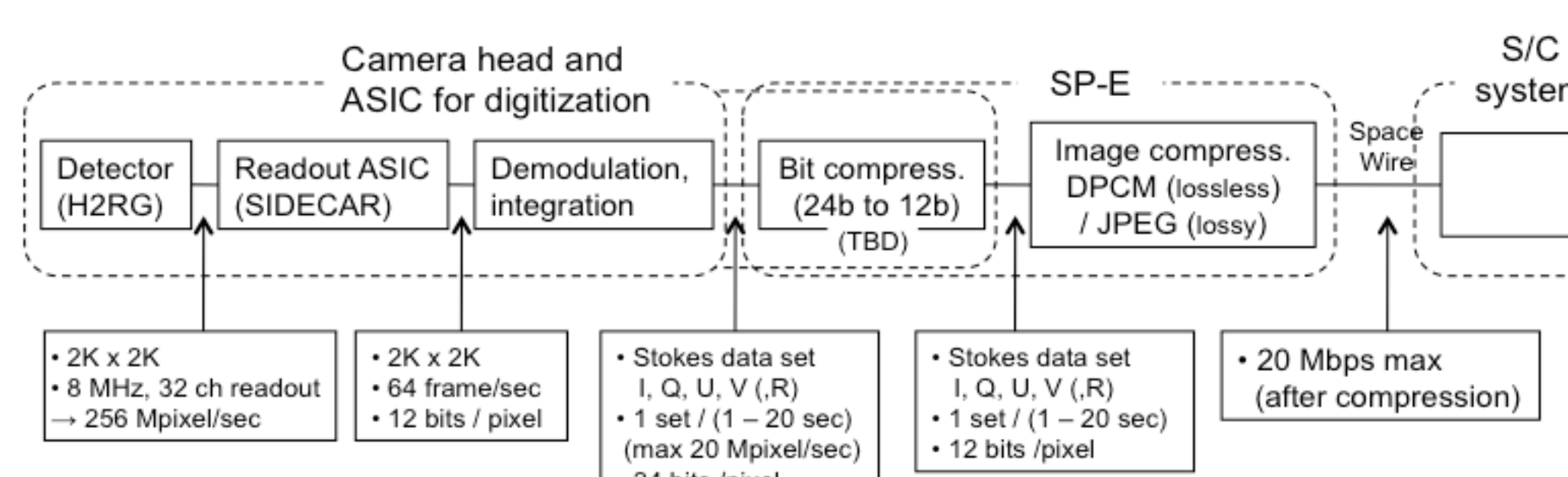


近赤外線カメラ

He I 1083 nmやCa II 854 nmの彩層ラインを高感度で偏光分光観測するために、これらの波長で量子効率0.8以上を達成できるHgCdTe検出器の使用をベースラインとしており、Teledyne社のH2RG (2k x 2k) 検出器を有力候補として検討を行なっている。読み出しASICであるSIDEARとともに、JWSTをはじめとしたスペースミッションでの利用を想定した宇宙環境試験をすでに行なっており、高いTechnical Readiness Level (TRL)を獲得している。ラジエータによる冷却のみで、200K程度まで冷却して使用する。1.7μmカットオフのHgCdTe素子なら200Kでも十分小さい暗電流(64fpsの場合)にできる。

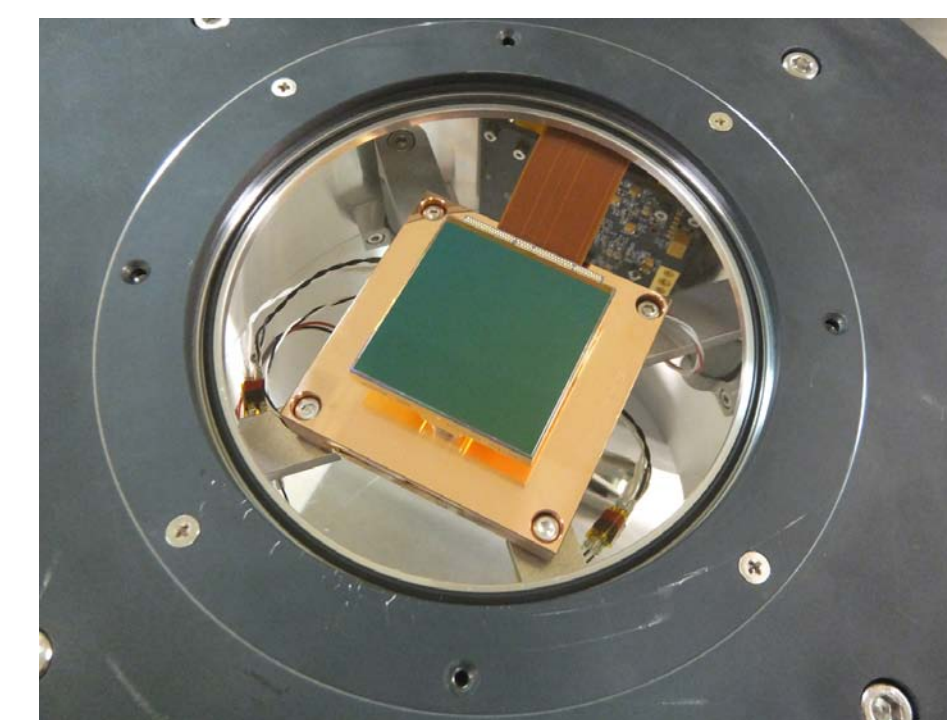
高精度偏光観測のため、1.4m望遠鏡で集光された光を漏らさず用いる必要がある。そのためには、高速読み出しが必要である。H2RGとSIDEARでは我々の要求を満たす高速読み出し(>8MHz, 32ch)も実現されている。

Detector: H2RG (Teledyne)	
Type	HgCdTe 1.7 μm cutoff
Wavelength coverage	500 - 1100 nm
Pixel format	2K x 2K
Pixel size	18 μm
QE	50-80 % (500 - 1500 nm)
Readout noise	~70 e ⁻ (reset-read)
Full well	~10 ⁵ e ⁻
Output ports	32
Temperature	Lower than 200 K
Readout electronics: SIDEAR (dual, Teledyne)	
Readout speed	8 MHz
Frame rate	64 fps
Bit depth	12 bits



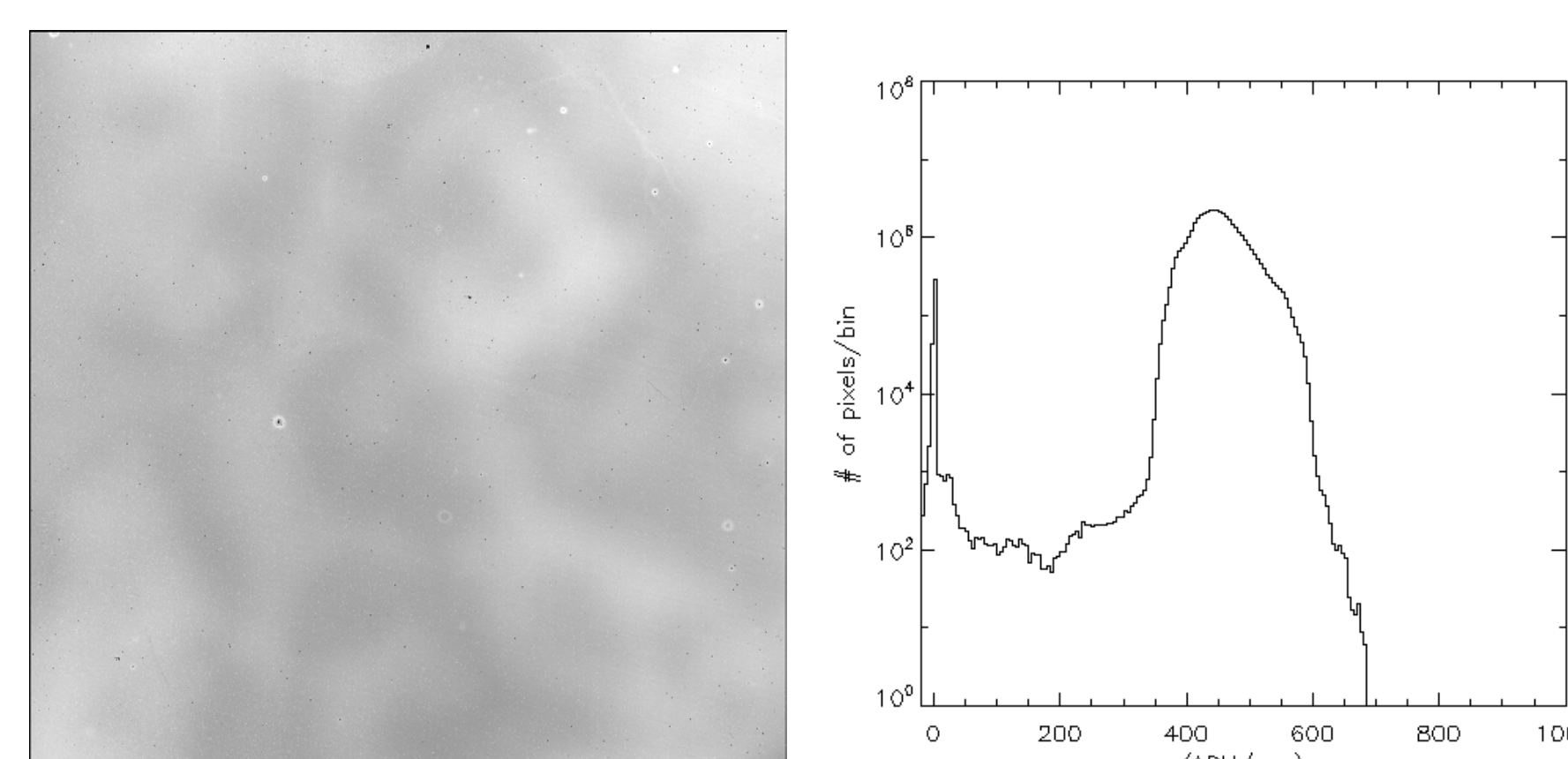
HgCdTe素子(1.7μmカットオフ) エンジニアリンググレードによる評価

使用予定の1.7μmカットオフHgCdTe素子の評価用素子と読み出しASIC (SIDEAR、ただしシングル構成なので、32fps読み出しまで対応)を入手し、使用予定温度である-100°C ~ -70°Cにおける性能実証を行うシステムを構築した。



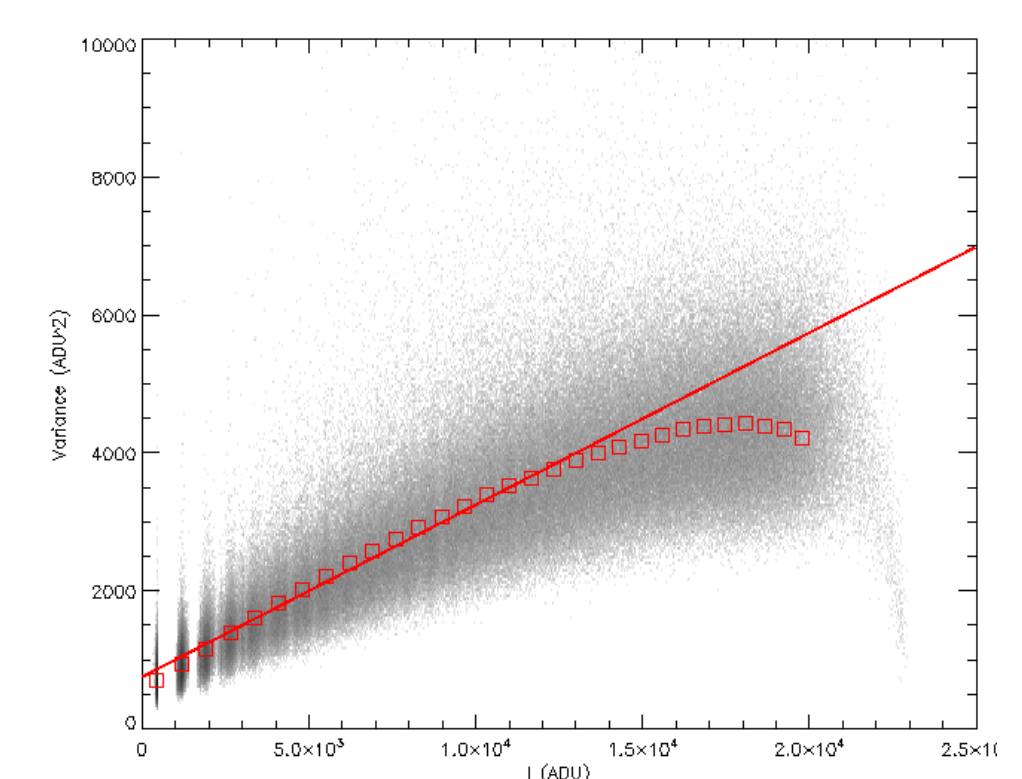
暗電流

コールドブロックを-97°Cに冷却したときの暗電流を評価した(素子の温度は-90 ~ -80°C程度)。暗電流は~1800e/sec (450ADU/sec, 4e/ADU)であった。64fpsの場合、28e/frameであり、想定される暗電流量と同程度であることを確認した。また、ホットピクセルではない使用可能ピクセルは99%以上であった。



ゲイン・ノイズ

暗電流を露出時間を変えて取得し、信号強度と分散の関係から、ゲインは4e/ADUであること、読出ノイズ(reset-read)は170eであった。まだ低速読出(100 kHz)での評価であるが、読出ノイズが大きい。システムの最適化が不十分であり、今後調査を継続する。



線形性

暗電流を露出時間を変えて取得し、線形性を評価した。比較的よい線形性を示していることが分かる。線形性から5%以上乖離する強度からfull wellを求めると、~8x10⁴ eであった。バイアス電圧を変えた時にfull wellが変わるかどうかが今後調査を継続する。

