



SUNRISE-3気球実験における国際協力

勝川行雄¹, 清水敏文², C. Quintero Noda², 久保雅仁¹, 原弘久¹, 一本潔^{1,3}
都築俊宏¹, 浦口史寛¹, 納富良文¹, 末松芳法¹, 石川遼子¹, 鹿野良平¹
田村友範¹, 大場崇義², 川畑佑典², 永田伸一³, 石川真之介⁴
J. C. del Toro Iniesta⁵, S. Solanki⁶

1: 国立天文台 2: ISAS/JAXA 3: 京都大 4: 名大 5: IAA-CSIC 6: MPS

国際大気球太陽観測実験 SUNRISE-3

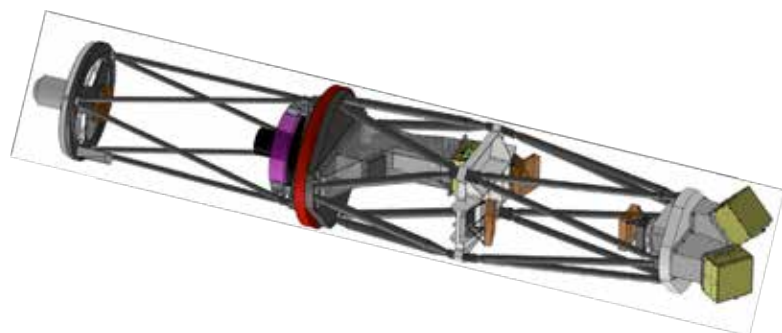
- 口径1m(ひのでの2倍)の光学太陽望遠鏡
- NASA・Long Duration BalloonでスウェーデンESRANGEからカナダまで大西洋上空の高度約35-37kmを1週間飛翔
 - 紫外線域 (波長 200 – 400 nm)の観測
 - シーイングの無い高解像度・高精度偏光観測
- 2009年と2013年に2度観測を実施
 - ドイツ・スペインの撮像装置(UV・可視)を搭載
- 2021年に3度目の飛翔SUNRISE-3を計画
 - 分光能力を強化
 - 近赤外線偏光分光装置SCIP(スキップ)を日本主導で開発



光球・彩層の高解像度・高精度偏光分光データを獲得する

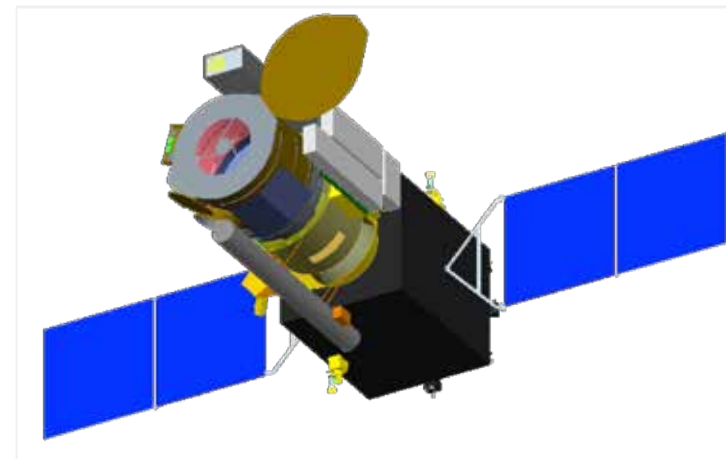
Why we joined SUNRISE-3

CLASPロケット実験



- 紫外線域(Lya 121 nm, Mg II 280 nm)の高精度 ($\sim 10^{-3}$) 偏光観測 (空間分解能 $1''$, 観測時間5 min)
- First flight in Sep. 2015,
- Second flight in Apr. 2019

SOLAR-C衛星



- 衛星搭載用分光器の光学・構造設計
 - 「ひので」では望遠鏡部を開発
 - SOLAR-Cでは焦点面装置を作りたい
- それに必要な高精度・高信頼性可動機構

SUNRISE-3気球

- SOLAR-Cで目指したφ1mと同等の口径
- 比較的短時間で飛ばすことができる



SUNRISE-3の焦点面装置



Science instruments



SUSI = SUNRISE UV Spectropolarimeter and Imager
 $\lambda = 300 - 408 \text{ nm}$



SCIP = SUNRISE Chromospheric



Infrared Spectro-Polarimeter
 $\lambda = 770 \text{ nm}, 850 \text{ nm}$



IMaX+ = upgraded Imaging Magnetograph eXperiment
 $\lambda = 517, 525 \text{ nm}$

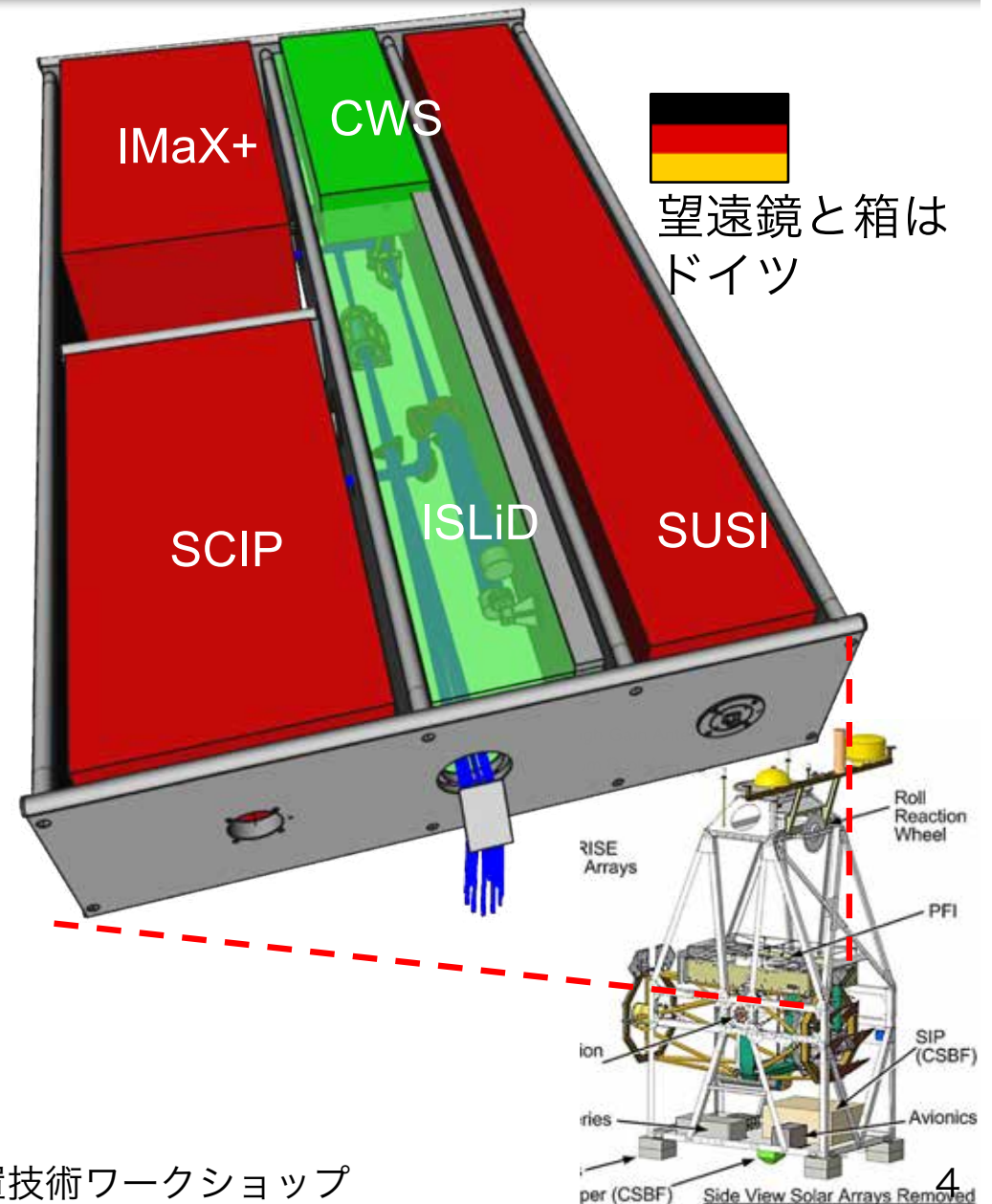
Service Units



ISLiD = Image Stabilization and Light Distribution system

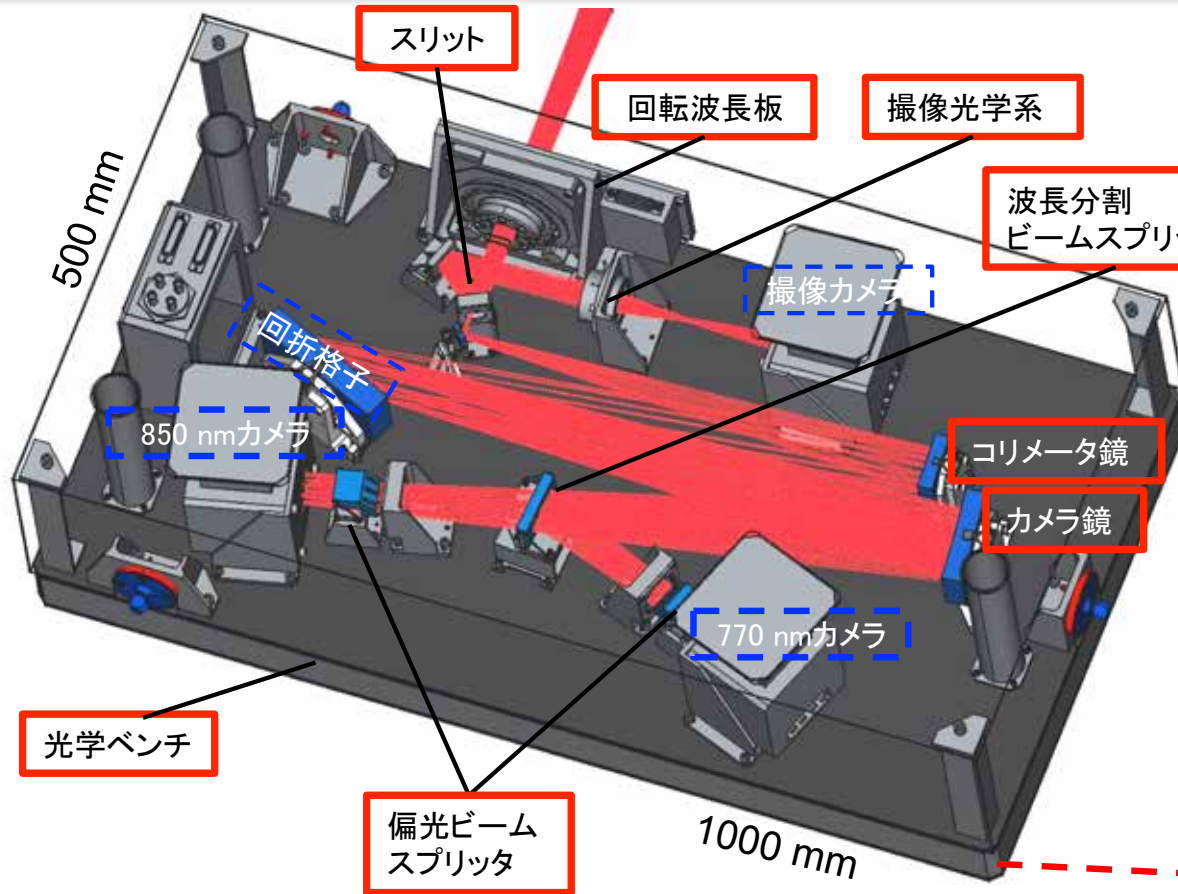


CWS = Correlation tracker and Wavefront Sensor



SCIP (スキップ)

Sunrise Chromospheric Infrared spectroPolarimeter

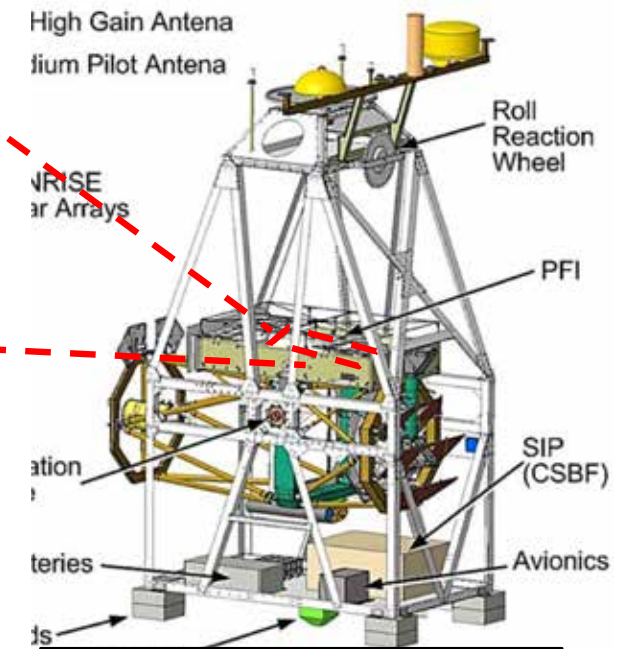


■ 高空間・時間分解能

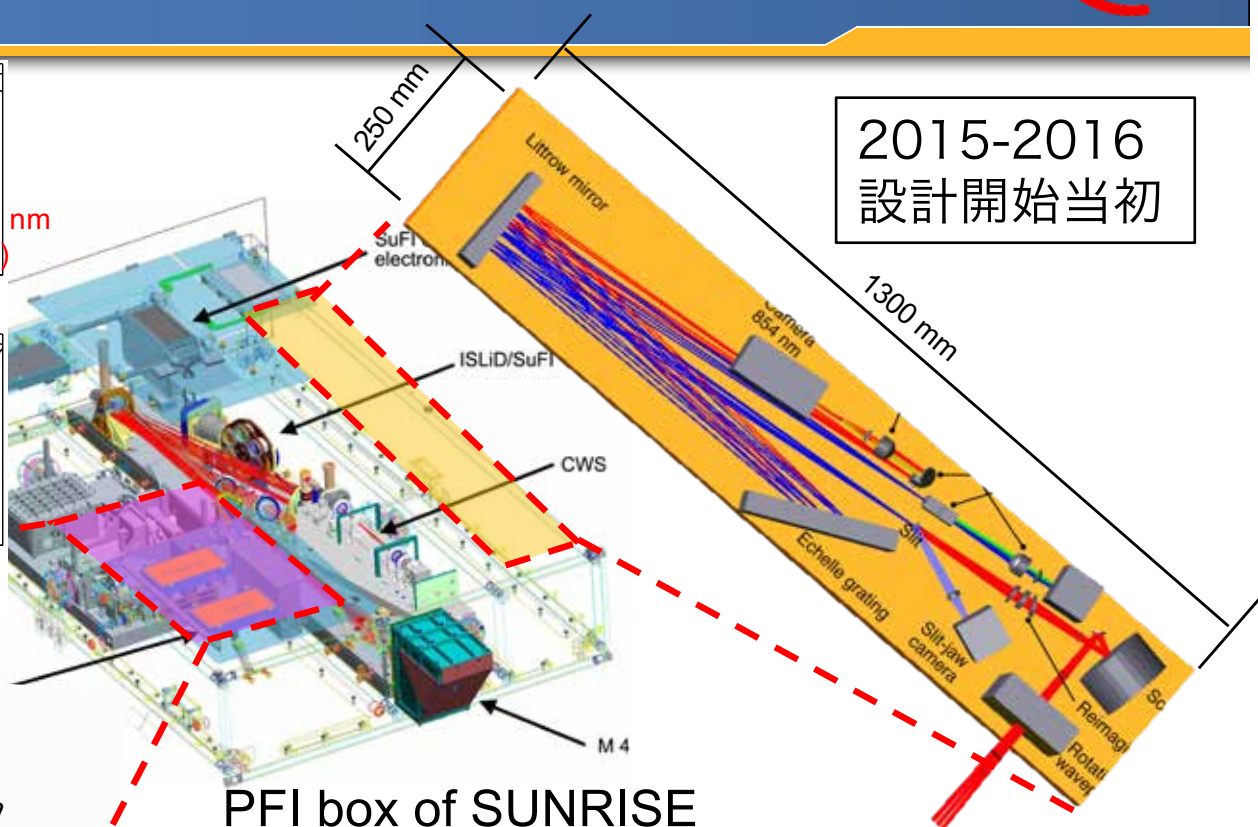
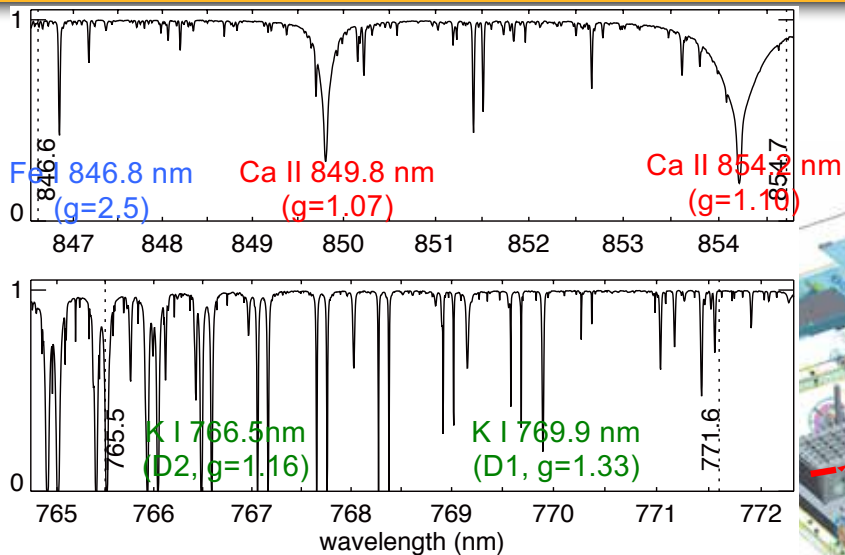
- 「ひので」より高い解像度: 0.2秒角
- 波長分解能: 1×10^5
- 0.2秒角を音波が通過する時間: 15秒

■ 高精度偏光観測

- Ca II 線で ~5 Gの磁場を測定:
0.03%(1 σ)の偏光度測定

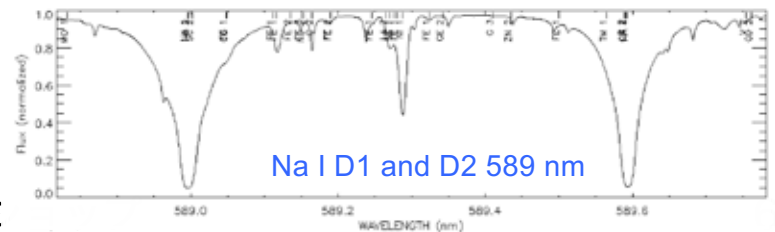
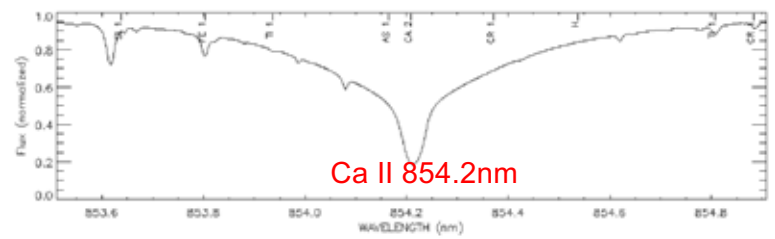
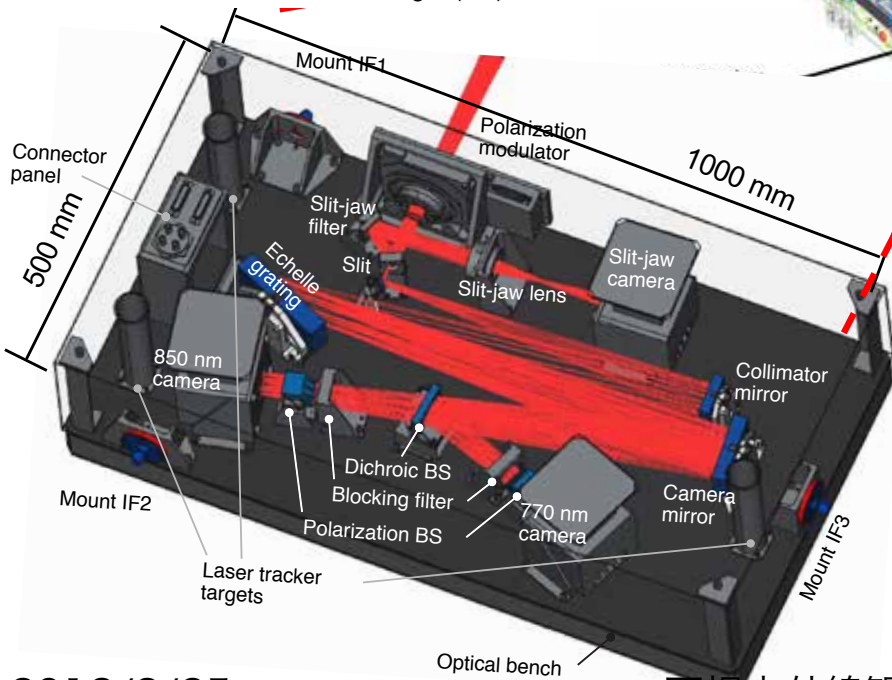


装置設計の変遷



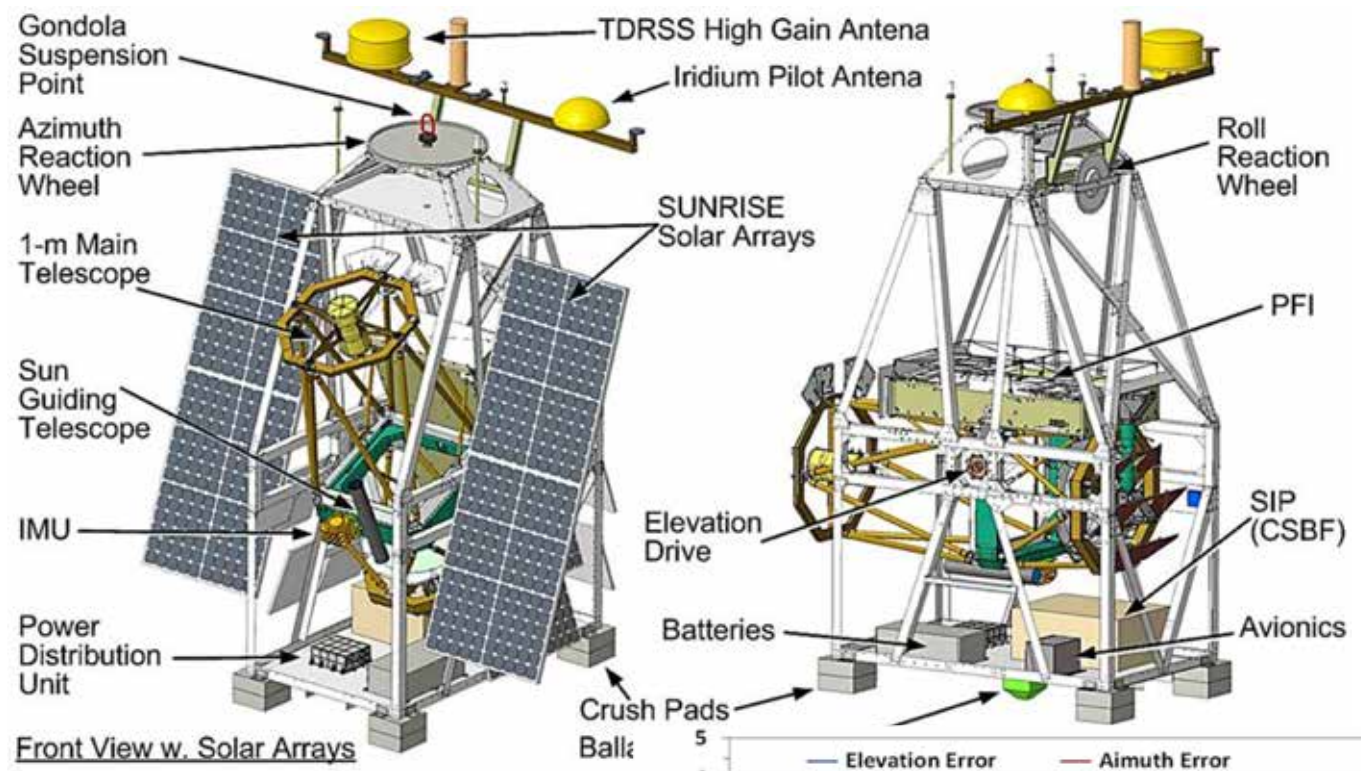
2015-2016
設計開始当初

PFI box of SUNRISE



2018/2/25

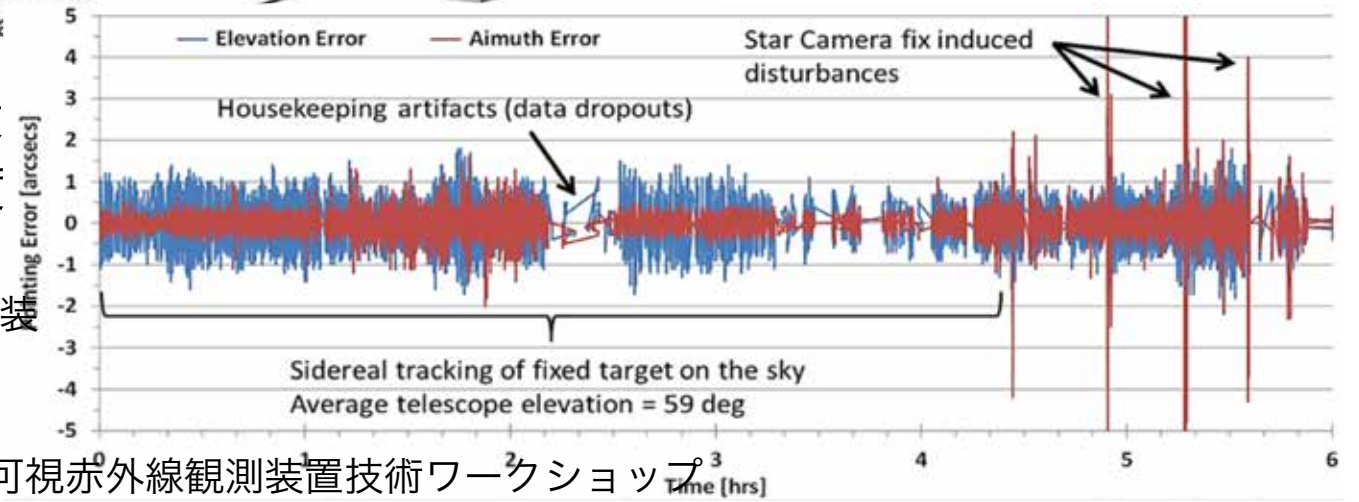
SUNRISE-3ゴンドラと指向精度



アメリカ・APLの
ゴンドラ設計

STO-2における指向制御実績
4時間に渡り<数秒角の安定度
を達成

- $0.06''$ (3σ)は装置内の像安定化装置+可動鏡で実限する

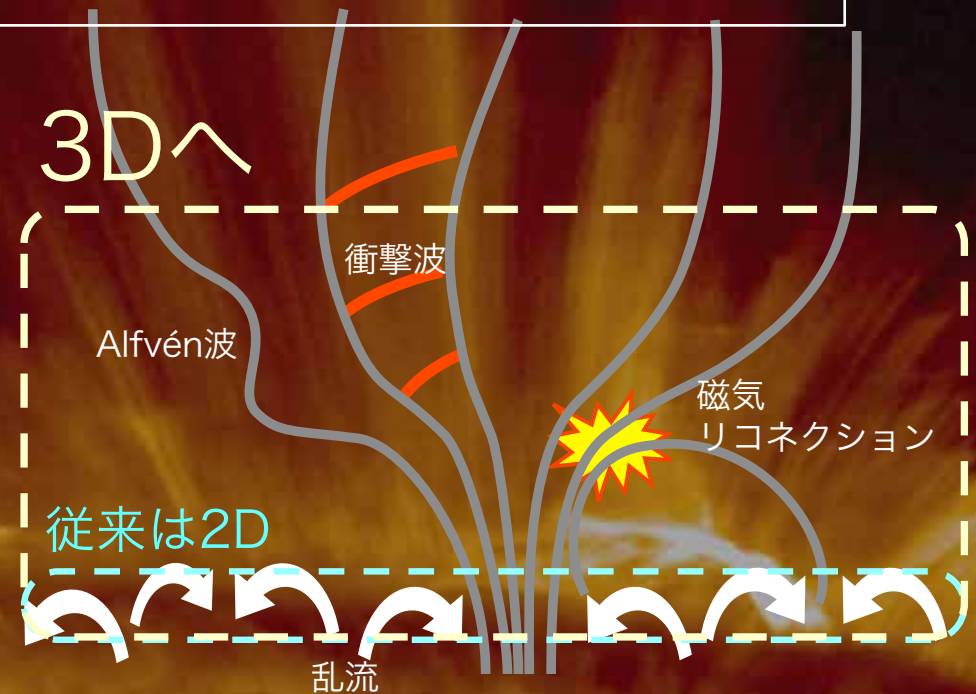


何を明らかにしたいか

恒星大気の中で磁気エネルギーの輸送と散逸が
いかになされているのか

科学課題

(1) 光球-彩層の3D磁場を
観測

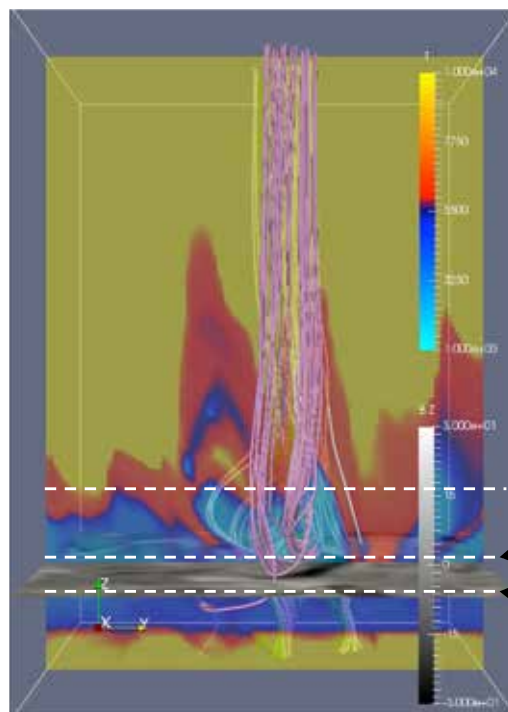


(2) 磁気リコネクションを示唆する磁場の
不連続構造を彩層で同定

(3) 彩層への波動伝播と磁場構造の関係

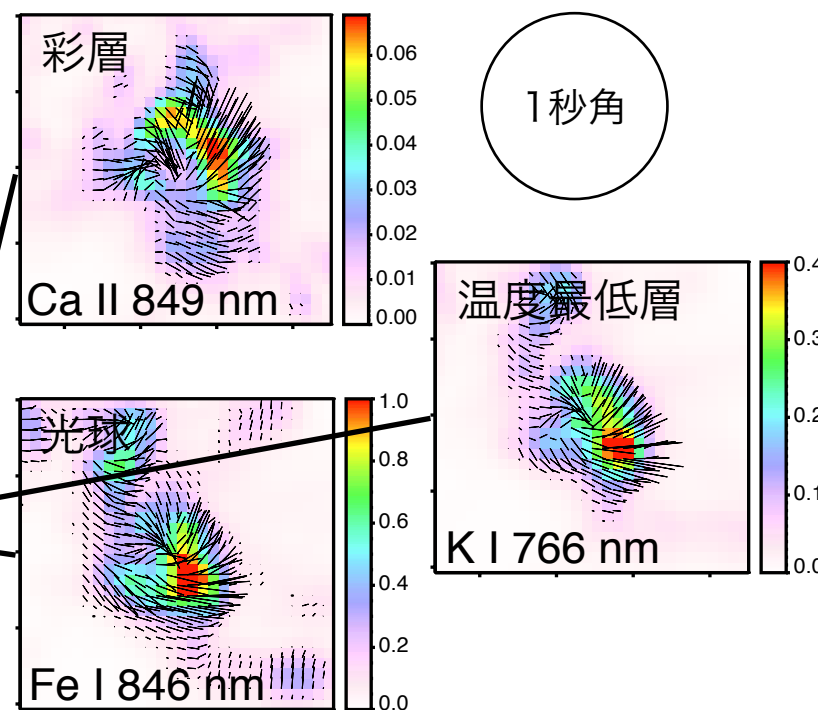
磁気エネルギーの
輸送・散逸プロセスを
MHD数値計算で再現
できつつある

- Alfvén波の伝播と
非線形モード変換
- ジェットの駆動
など



Iijima et al. (2017)

SUNRISE/SCIPで見える直線偏光



再現できているように見えるが、観測と直接比較するため

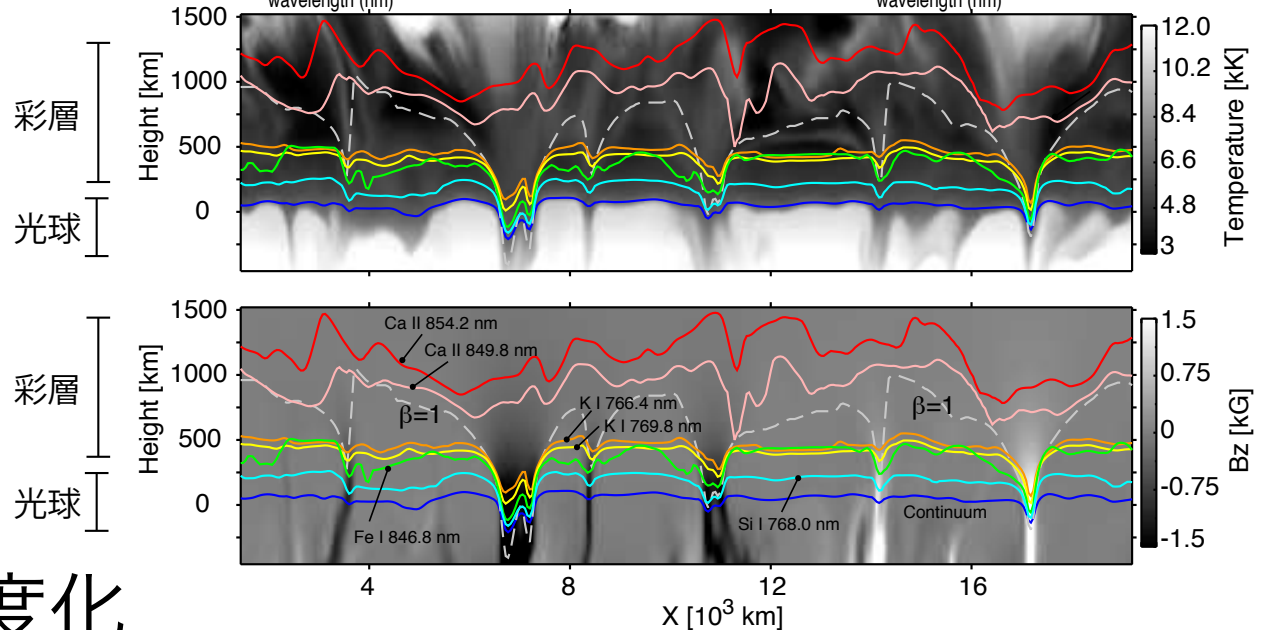
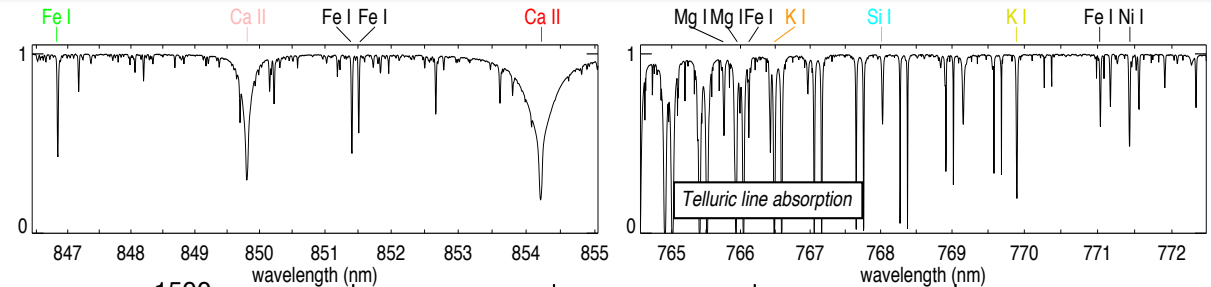
- 空間解像度の向上 → 観測においっていない
- 非平衡電離・弱電離プラズマの効果 → 散逸・熱化プロセスに影響

3D磁場観測を実現する鍵



多数のスペクトル線を同時に観測

- 光球・彩層をシームレスにカバーできる2波長帯を偏光分光観測



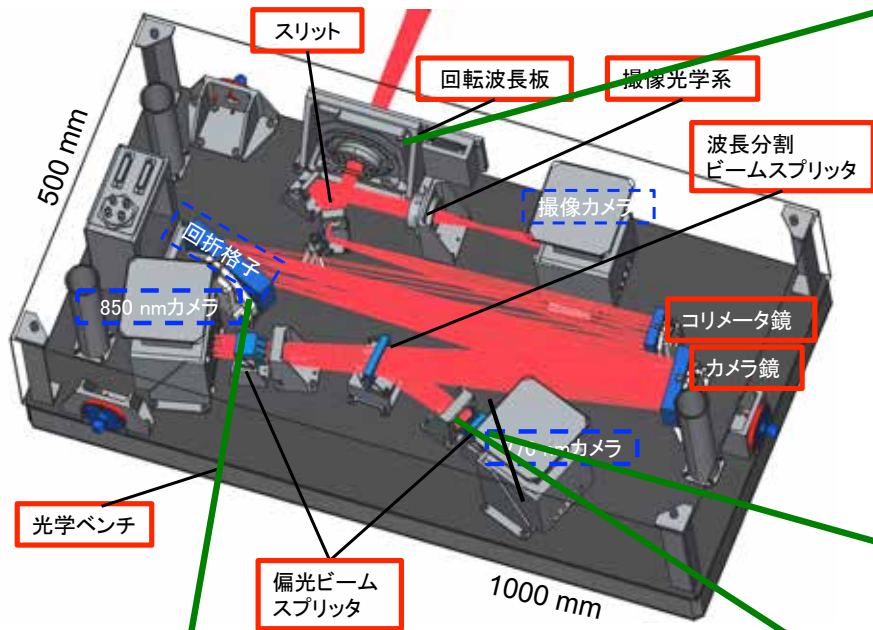
偏光分光観測の高精度化

- 弱い彩層磁場の測定のため0.03%の精度が必要 (ref. 「ひので」 0.1%)
- 「ひので」衛星と「CLASP」ロケット実験で蓄積された技術を発展
- 大口径化 (「ひので」 50 cm → SUNRISE 1 m)

SCIPの光学構造開発

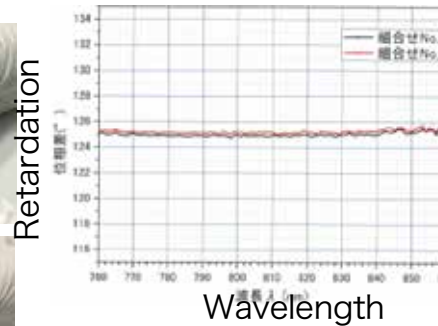


SCIP光学・構造設計 (NAOJ: 都築, 浦口, 原)



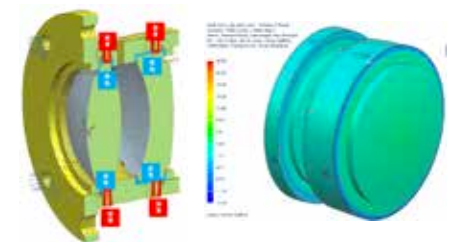
波長板 (FM)

波長・温度依存性の小さい水晶・サファイア波長板
観測波長帯で低反射率(~0.1%) ARコーティング



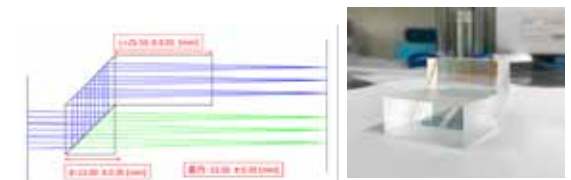
レンズユニット設計

温度変化でレンズホルダがレンズに与える応力を評価、ユニット設計を検証



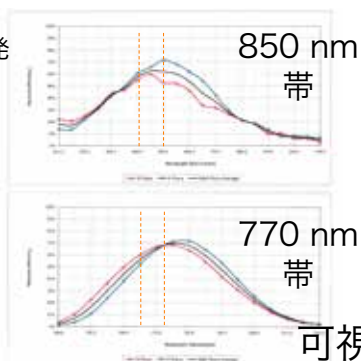
偏光ビームスプリッタ (FM製作中)

高消光比 1:400、高効率 >98%
高波面精度, 直交成分を同一焦点に結像



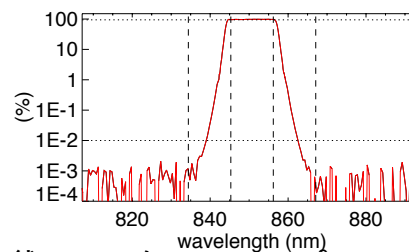
エシェル回折格子 (FM)

高効率・偏光依存の小さい
回折格子をドイツと共同開発



狭帯域フィルター (FM)

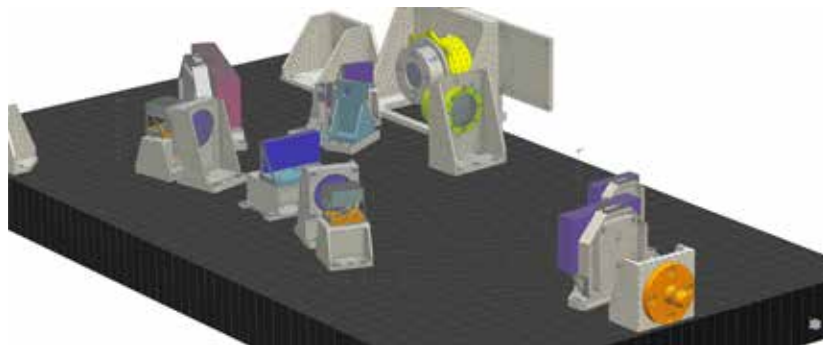
帯域内高効率>95%
帯域外高阻止率<0.01%



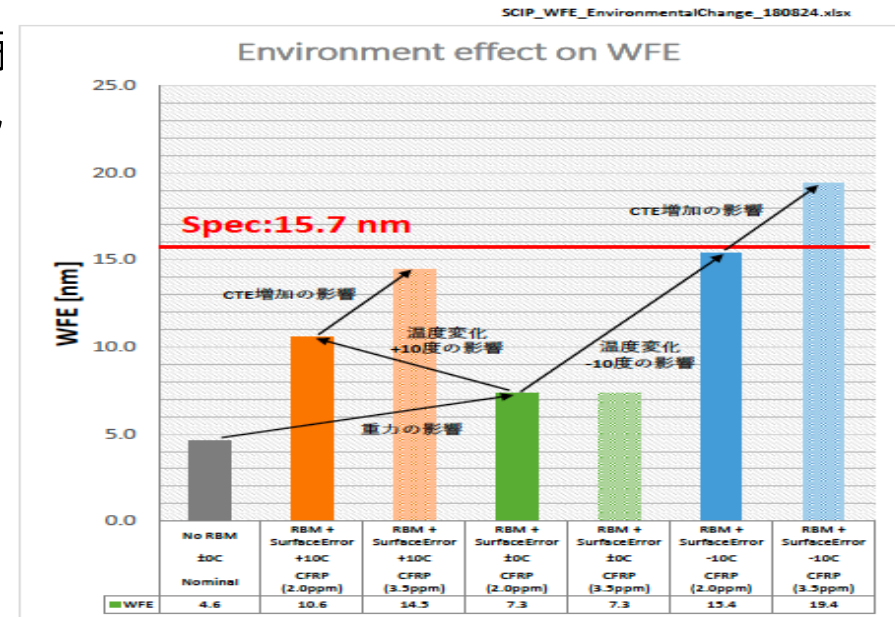
構造設計・熱設計



- 要求: $20 \pm 10^\circ\text{C}$ の運用温度範囲で性能維持
- 構造数学モデルで運用温度範囲における熱形を予想、耐衝撃性を検証 (NAOJ: 浦口)



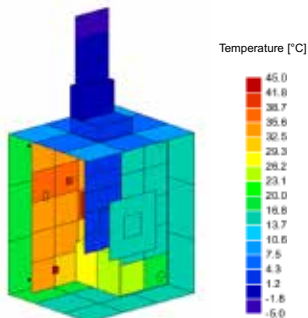
FEM analysis of the SCP structure



Nominal (0G) +10°C Y-1G Y-1G -10°C Y-1G

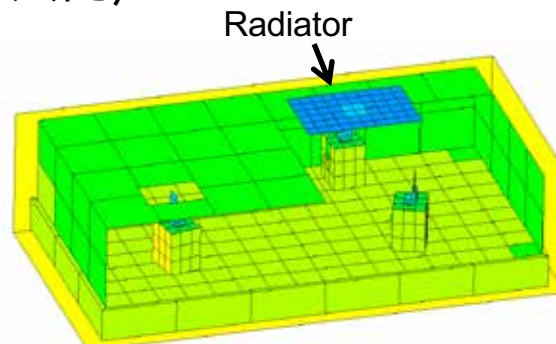
Radiator size: ~0.15 m²

- 熱数学モデルでカメラの冷却に必要な放熱面を設計、低温時に必要なヒーター容量を決定 (NAOJ田村, スペインと共同)



Thermal math model of the camera

Simulating power dissipation in the cameras



Radiator

Temperature [°C]

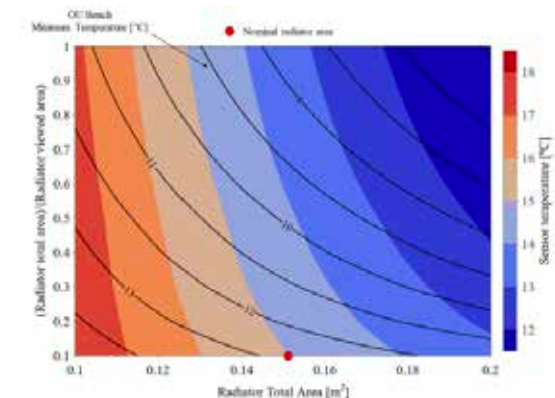
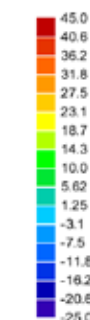
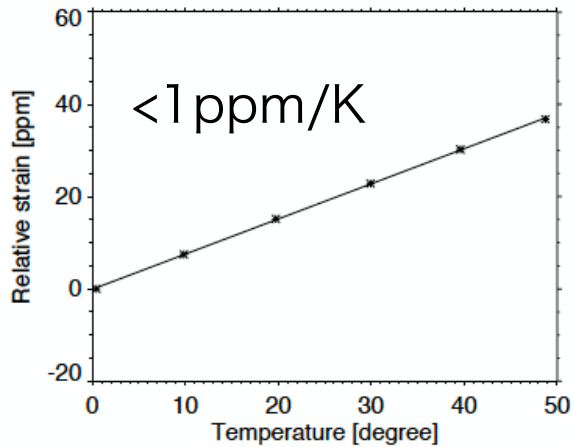


Figure 8.1: Sensor and OU bench temperatures in HDC as a function of the radiator area.

SCIPの光学構造開発



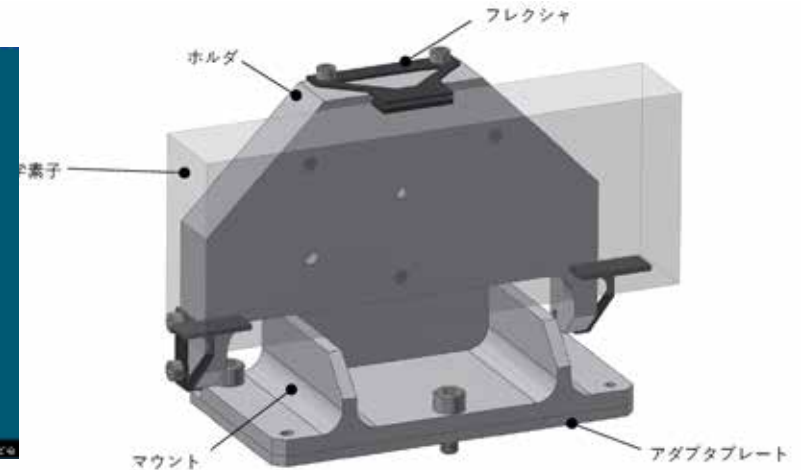
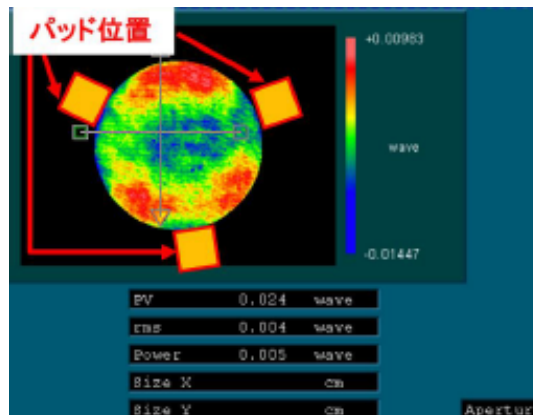
CFRPサンドイッチパネルのCTEを
ひずみゲージで想定
脱水変形量の測定 -> 継続中



納入された光学ベンチパネル (2019/2/22)



鏡をフレクシャに接着する
方式を採用
小型平面ミラーを用いて
形状変化の測定



偏光分光観測システム



- 波長板回転駆動機構 (NAOJ: 久保, ISAS: 川畑)
 - SOLAR-C向け要素技術開発、CLASPロケット実験で飛翔実証
 - 高速化 (CLASP4.8秒/回転→SCIP:0.5秒/回転) ・高精度回転制御ソフト実装ほぼ完了
- スキャンミラー駆動機構 (ISAS: 大場, 清水)
 - 次世代衛星向け要素技術開発→フライト品への発展
 - 静電容量センサーと電磁アクチュエータで鏡のチルト制御
 - ハードウェアの製作完了、制御ソフトウェアの開発・試験中

ロジックは日本側で設計

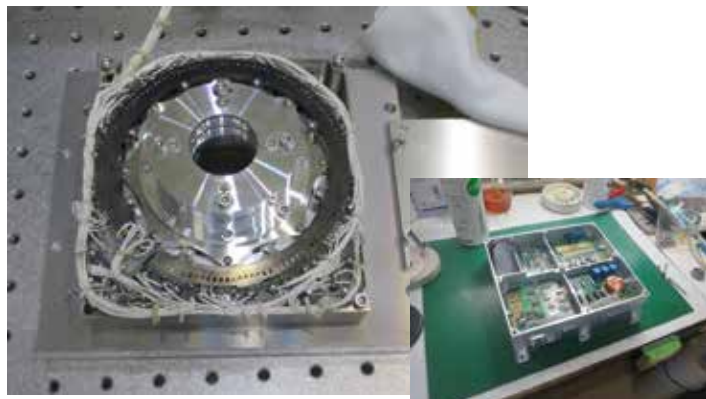
SCIP制御エレキ(スペイン担当)

撮像同期信号 (32/sec)

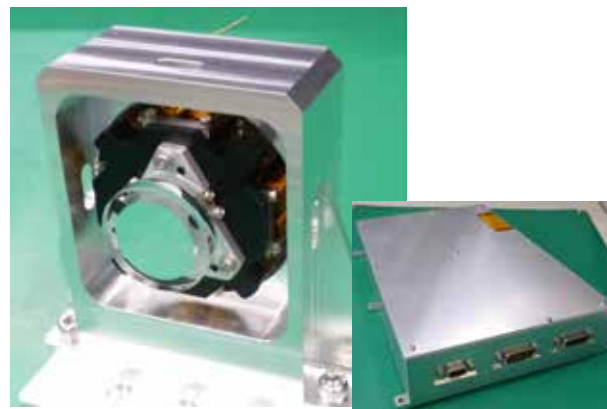
駆動信号

撮像信号 画像

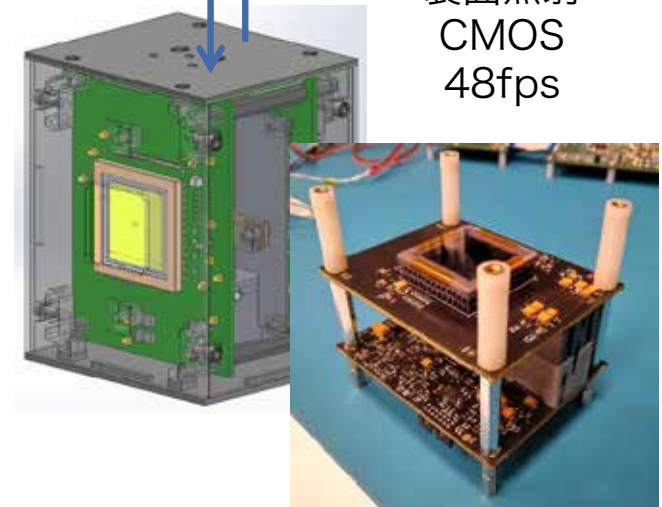
カメラ
2kx2k
裏面照射
CMOS
48fps



偏光変調装置



スキャンミラー機構



日本担当

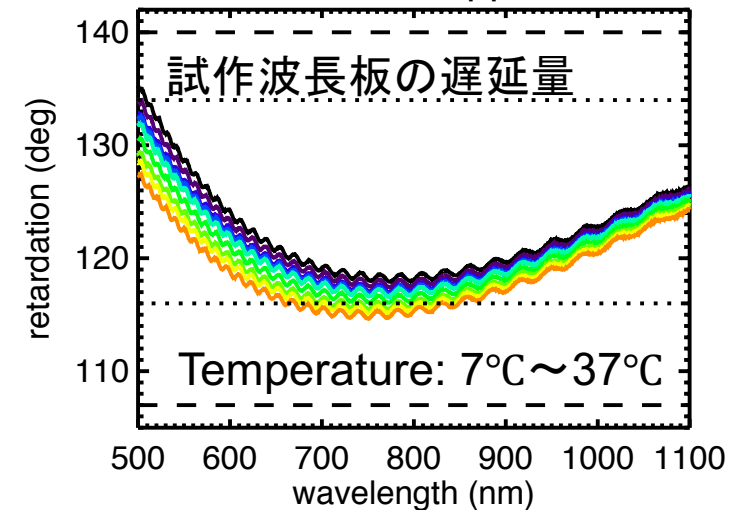
スペイン担当

回転波長板駆動機構 (偏光変調装置)

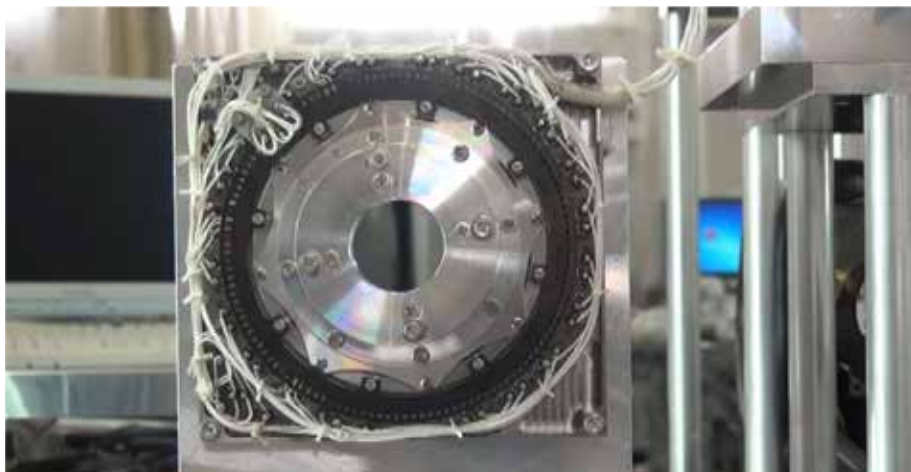
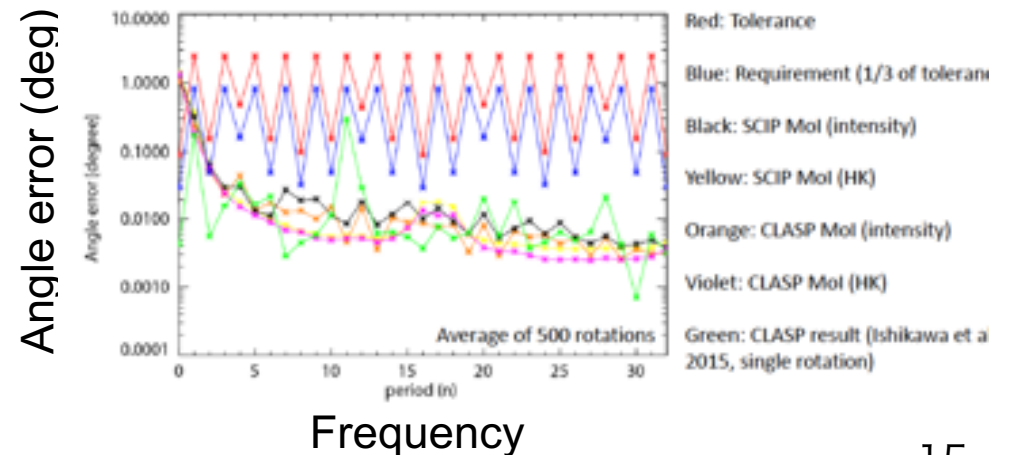


- スペース高精度偏光測定のための回転駆動機構
 - SOLAR-C向け技術開発
 - CLASPロケット実験(Ly α 偏光観測)で飛翔実証 (2015, 2019[予定])
- CLASPより高速回転(4.8sec/rot \rightarrow 0.5 sec/rot)でも一様回転を維持、低擾乱
- 波長板: 水晶とサファイアの2枚構成
 - 波長&温度依存性が十分小さいことを実証
 - 低反射率ARコートでゴーストによる偏光精度劣化を抑制
- **ドイツ担当のUV偏光観測装置にも同じ駆動機構を提供**

Measurement of the test waveplate
Quartz + Sapphire

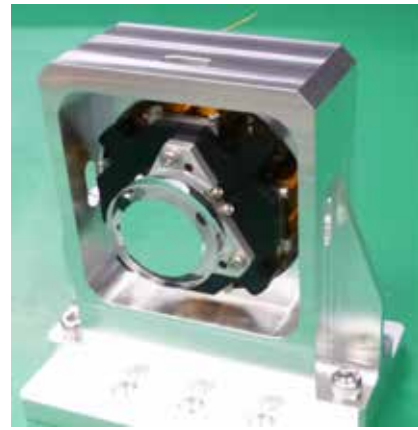


Rot. uniformity

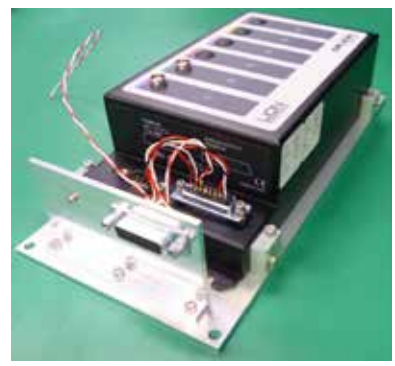
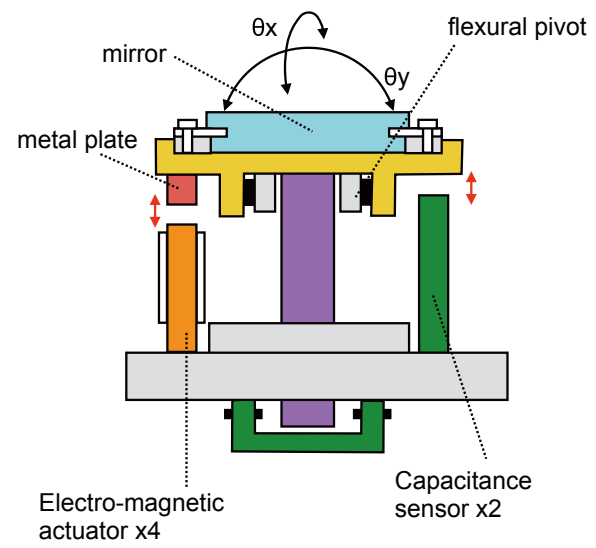


スキャンミラー機構

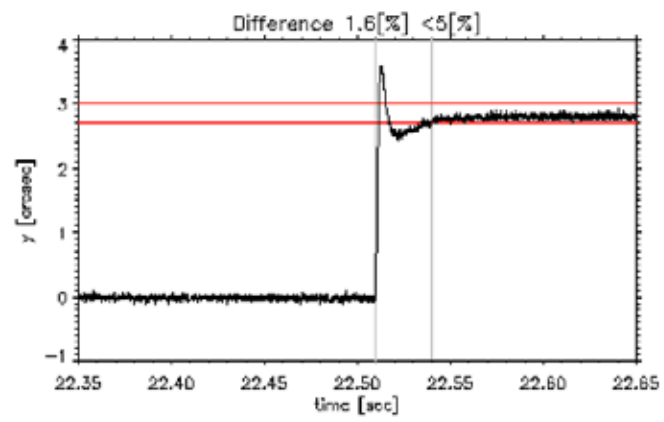
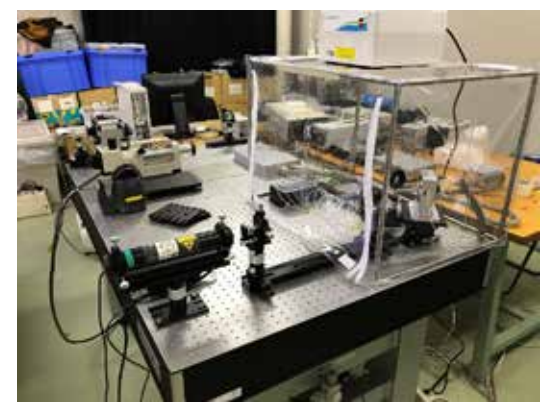
- 静電容量センサーと電磁アクチュエータで鏡のチルト制御
 - 次世代衛星向け要素技術開発→フライト品への発展
- 性能
 - 安定度: $<1''$ (3σ) 要求、実績 $<0.3''$ (3σ) ($\sim 0.01''$ の指向安定度に相当)
 - レンジ: $\pm 1000''$ ($\pm 35''$ に相当)
 - 1ステップ: $2.6''$ @ $1/16$ sec <20 msec で安定



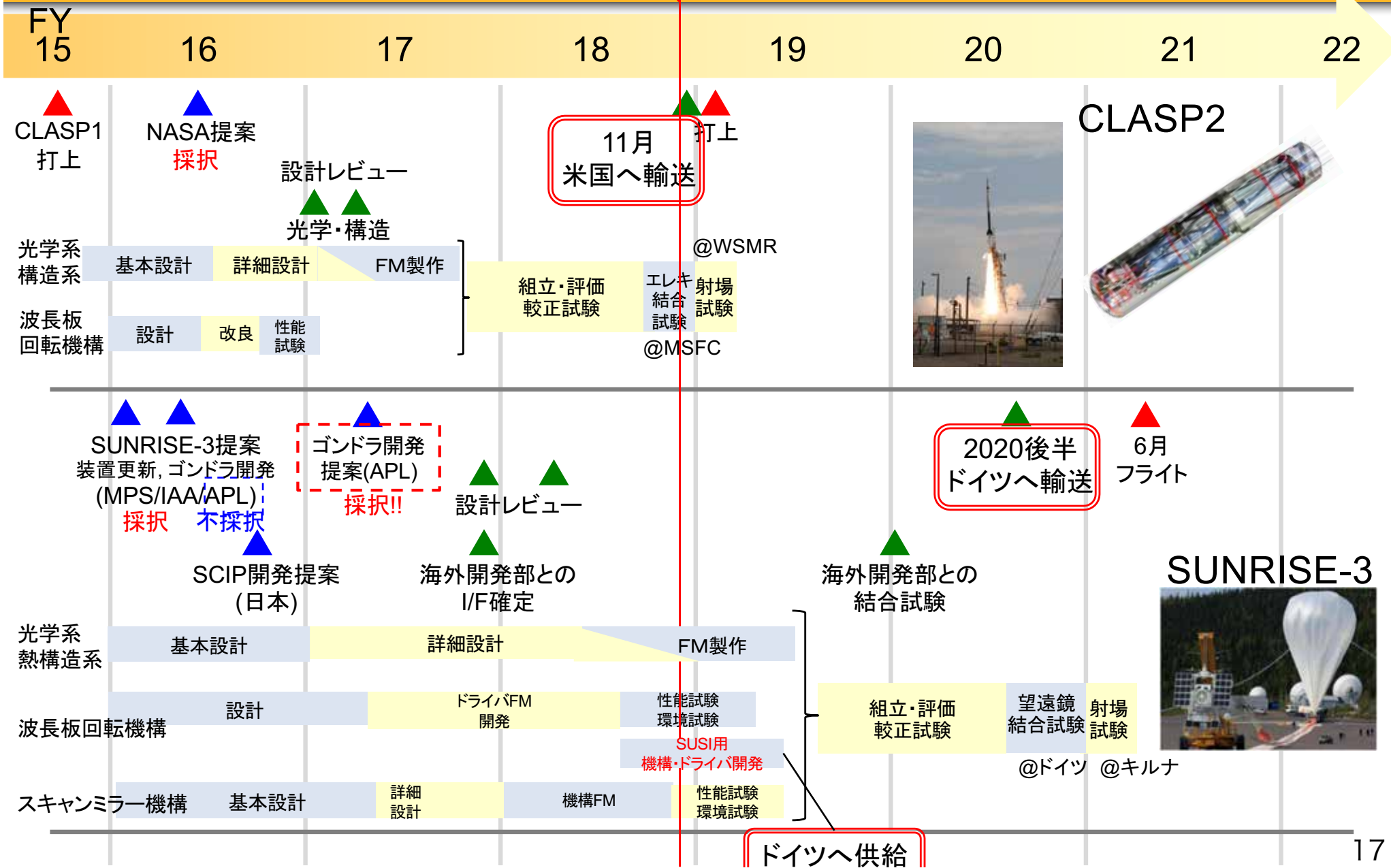
SMM-TM



SMM-IF
(静電容量センサーのアンプ)



スケジュール



■ 日本の計画

- ISAS/JAXA太陽観測小規模プログラム (FY2017-21)

 - CLASP2ロケット実験と共同

- 科研費基盤(S) (FY2018-22, [2回目で採択](#))

「気球太陽望遠鏡による精密偏光観測: 恒星大気における磁気エネルギー変換の現場に迫る」

■ 欧州は昨年の段階で予算獲得済み

- ドイツ・MPS: マックス・プランク研究所で全体の予算獲得

- スペイン IAA-CSIC: 2017-18に概念設計、2019以降FM開発

■ 米国

- JHU-APL: ゴンドラ開発予算をNASAで獲得 ([2回目で採択](#))

2021年のフライトを目指して、国際協力も着実に進んでいる

- 2歩下がって3歩進むの繰り返し
- 光学・構造
 - 上流光学系を設計してみたらかえられることが分かったら、入射光位置をずらしたい (ドイツ→日本)
 - マウントポイント位置、前と違うんだけど、、、 (日本→ドイツ)
- 熱
 - 他の機器の発熱量・熱モデルが無いと決められないと言われ遅れ(スペイン)
- 電気
 - 文書内でコネクタのオス・メスが矛盾している (日本↔スペイン)
 - 日本側の駆動機構のエミュレータを用意したけど、スペイン側でつなぐものがまだできていない
- マネージメント
 - 文書管理、スケジュール管理、協定(契約)などなど

- 国際大気球太陽観測実験SUNRISE-3
 - 2021年フライトを目指して国際協力で進めている
 - 高解像度・高精度な彩層磁場データを手にする絶好のチャンス
 - 「ひので」で世界のトップに立ったスペース偏光観測技術を発展させ、さらにCLASPやSOLAR-Cに向けて開発された技術を最大限活用し、将来の高精度偏光観測につなげる

- 大型プロジェクト・人工衛星に相当する規模の装置開発を比較的小さいグループでやるのはなかなか大変。。。