

WFOS IFU開発へ向けた 技術開発

尾崎忍夫、浦口史寛、清水莉沙、都築俊宏、宮崎聡、
服部堯（国立天文台）、石垣剛（岩手大学）、
大内正己（国立天文台／宇宙線研）、矢島秀伸、菊田聡（筑波大）、
松田有一（国立天文台）、梅畑豪紀（理研）、三橋一輝（東大）

アウトライン

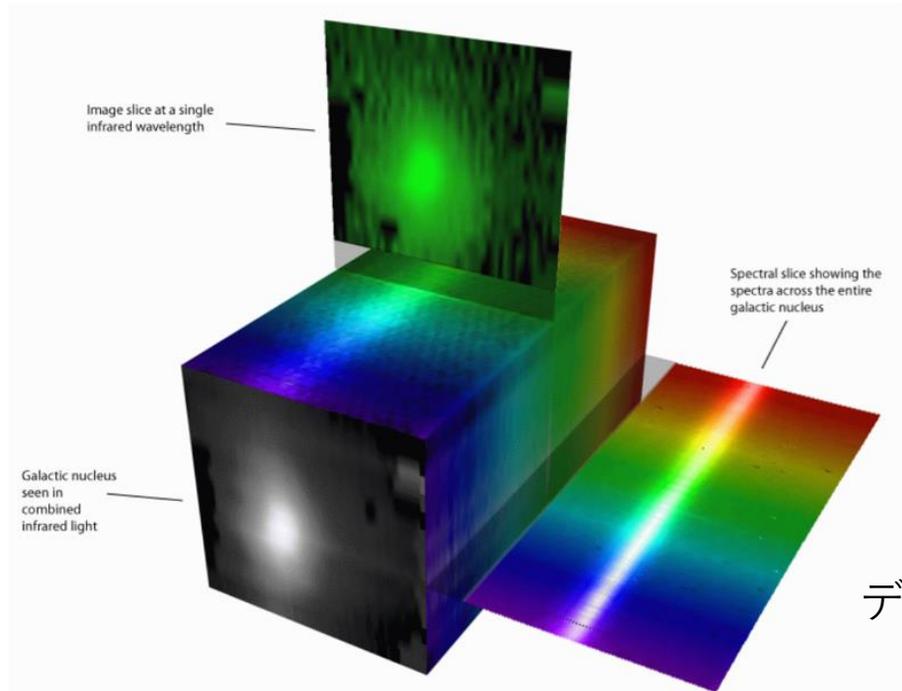
- 面分光とは
- スライサー型面分光ユニット (IFU)の加工手法
- FOCAS IFUの紹介
- WFOS IFU開発プロジェクト概要
- WFOS IFU開発へ向けた技術開発

アウトライン

- 面分光とは
- スライサー型面分光ユニット (IFU)の加工手法
- FOCAS IFUの紹介
- WFOS IFU開発プロジェクト概要
- WFOS IFU開発へ向けた技術開発

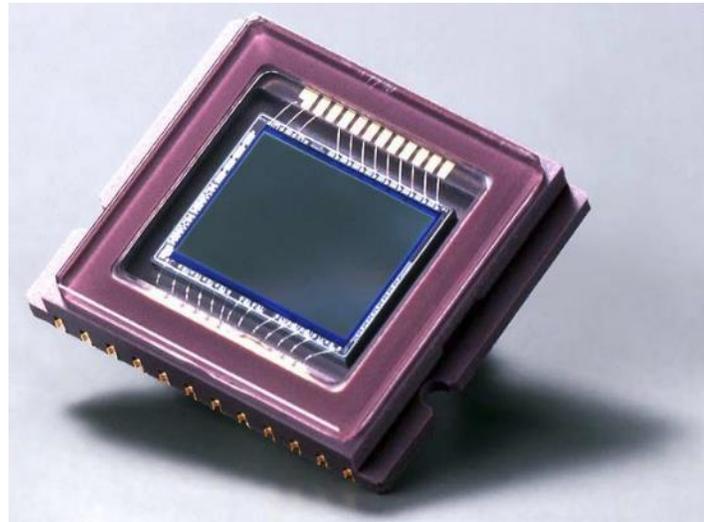
面分光

- 1度の露出で面を一気に分光する手法
 - 天候変動の影響を受けない均質なデータ
 - 貴重な望遠鏡時間を有効に活用できる時間効率性

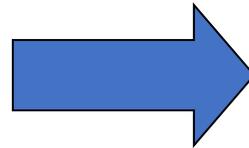


データキューブ

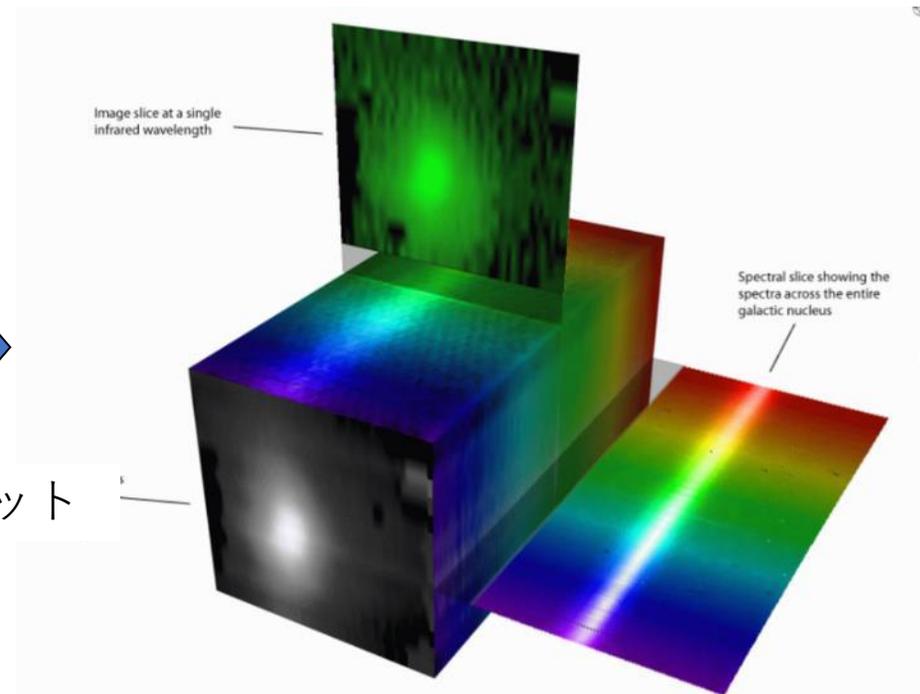
面分光ユニット (Integral Field Unit; IFU)



検出器は2次元



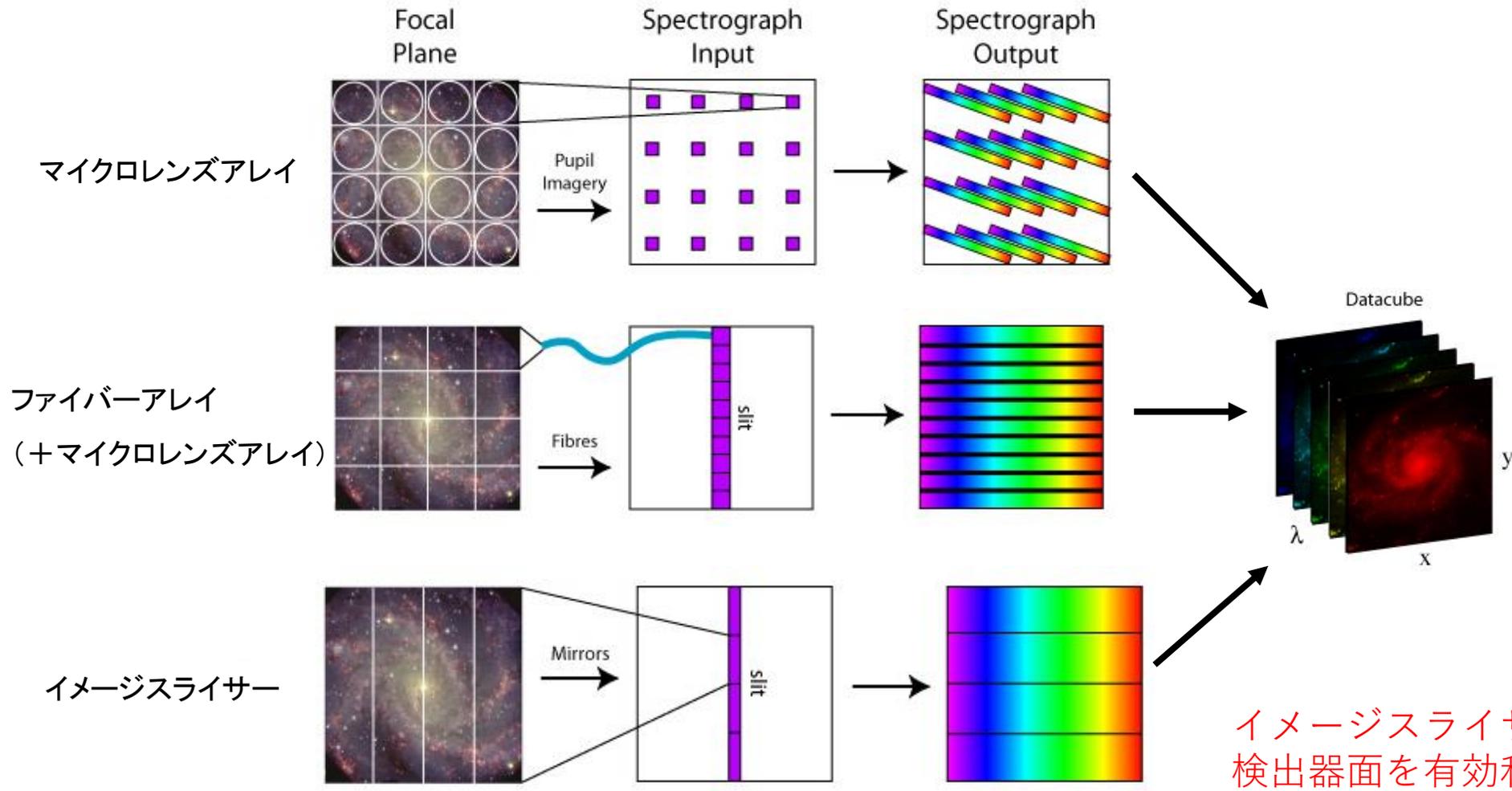
面分光ユニット



3次元

データキューブ

面分光ユニットのタイプ



イメージスライサータイプが最も
検出器面を有効利用できる

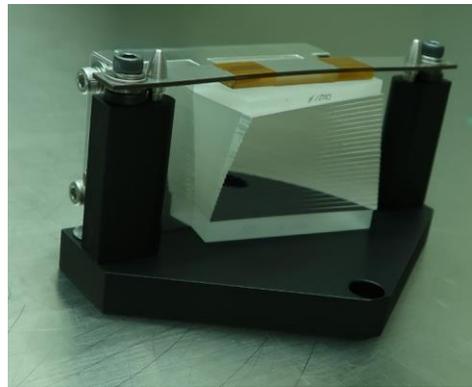
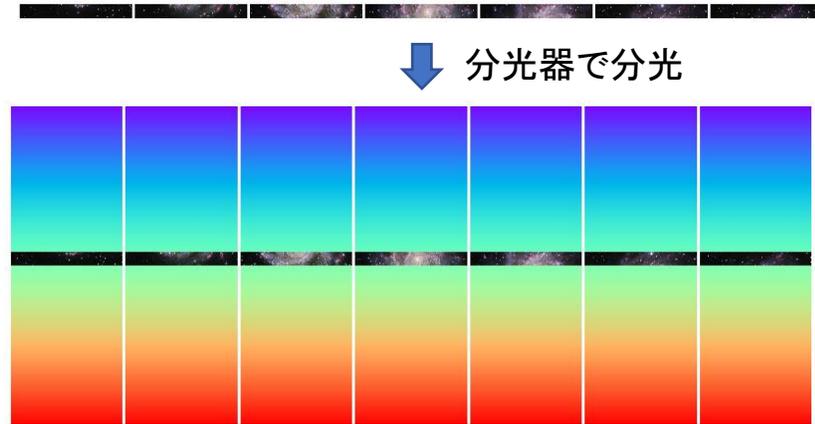
イメージスライサー型IFUの原理



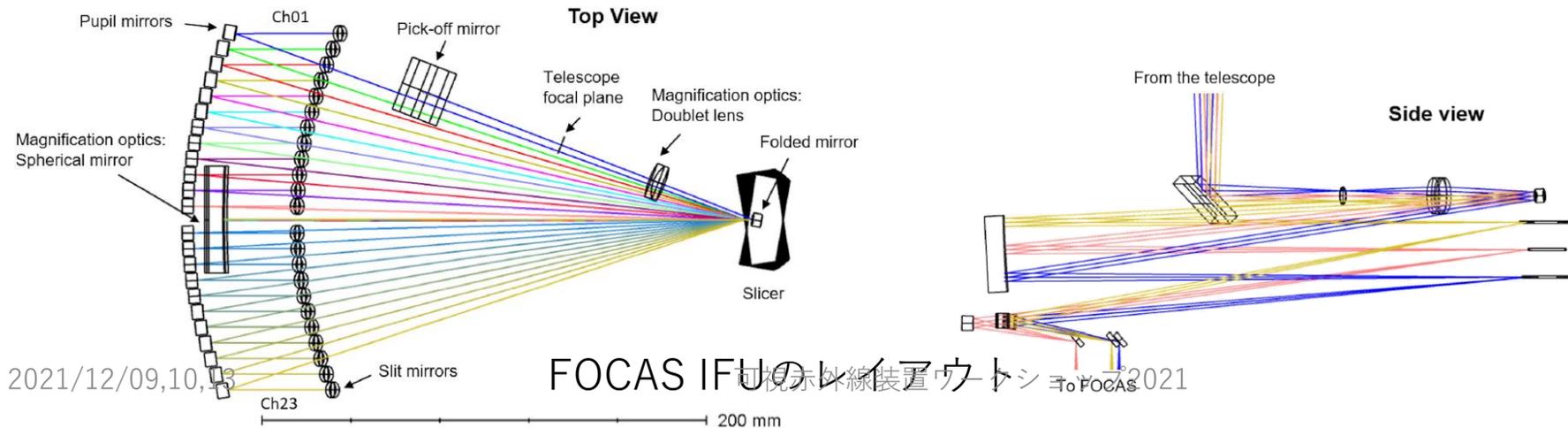
天体像をスライス



スライスされたイメージを1列に配列



イメージスライサー
細長いミラーが少しずつ角度を変えながら積み重なっている。



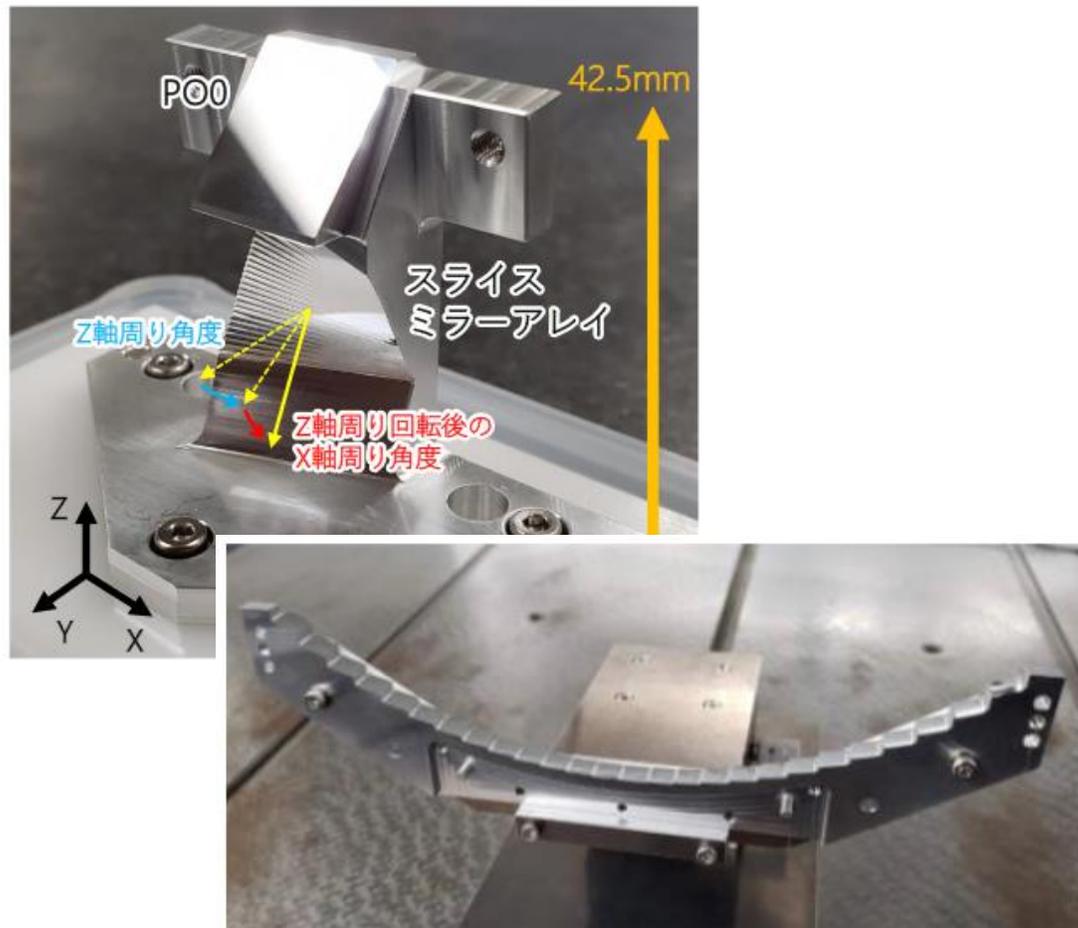
非常に多くの光学素子が必要
多くがミラー

アウトライン

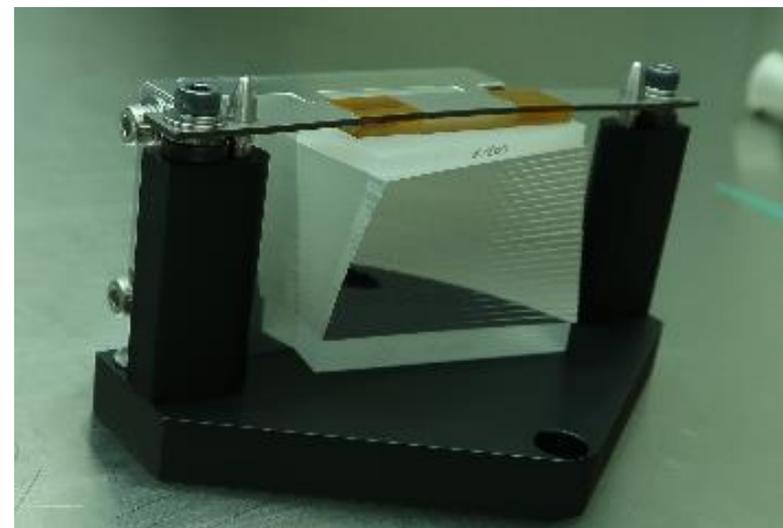
- 面分光とは
- スライサー型面分光ユニット (IFU)の加工手法
- FOCAS IFUの紹介
- WFOS IFU開発プロジェクト概要
- WFOS IFU開発へ向けた技術開発

二つの加工手法

金属を超精密加工



ガラスを研磨加工



櫛引さんの講演資料より

2021/12/09,10,13

可視赤外線装置ワークショップ2021

8-10m望遠鏡のスライサー型IFU

装置	波長域	開発機関	製造手法
MUSE	可視	リヨン大学 (フランス)	ゼロデュワーを研磨
KCWI	可視	カルテク (アメリカ)	ゼロデュワーを研磨
KMOS	近赤外	Durham University (イギリス)	金属を超精密切削
GNIRS IFU	近赤外	ダーラム大学 (イギリス)	金属を超精密切削
NIFS	近赤外	Australian National University (オーストラリア)	金属を超精密切削
SINFONI	近赤外	マックスプランク (ドイツ)	ゼロデュワーを研磨

アウトライン

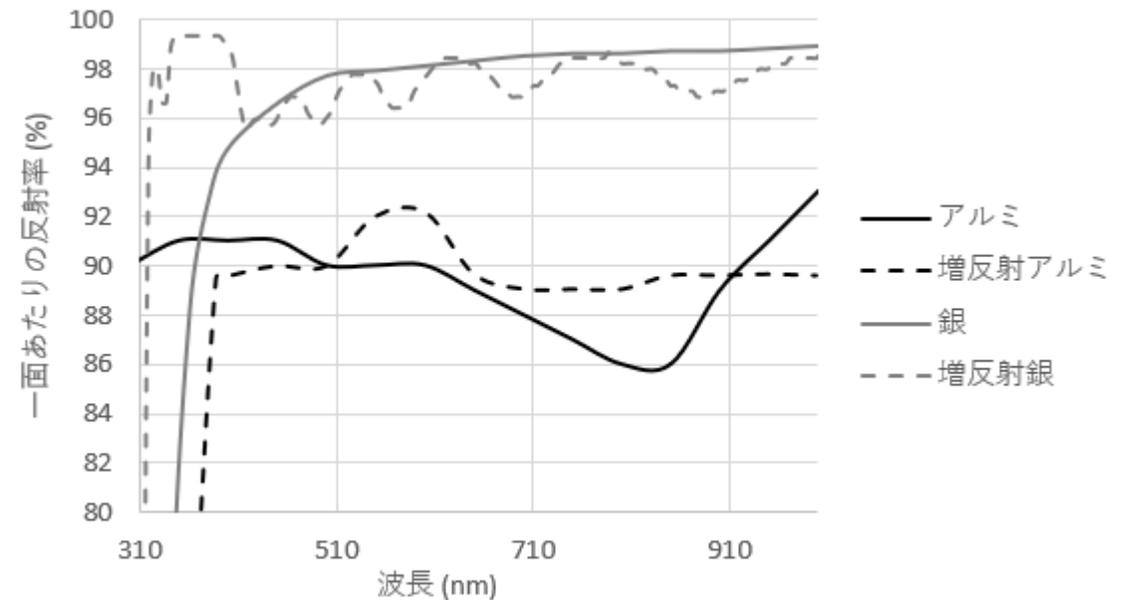
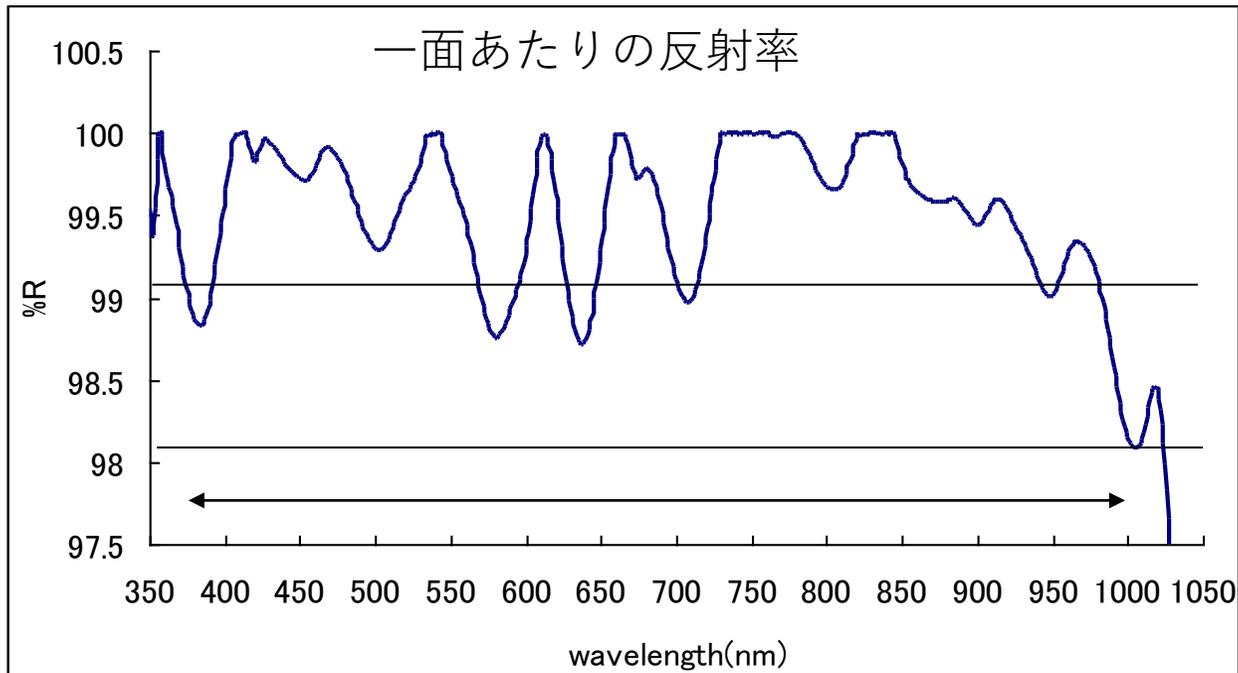
- 面分光とは
- スライサー型面分光ユニット (IFU)の加工手法
- FOCAS IFUの紹介
- WFOS IFU開発プロジェクト概要
- WFOS IFU開発へ向けた技術開発

FOCAS IFU: プロジェクト概要

- すばる望遠鏡にマッチした面分光装置を開発
 - 受光面を最も有効活用できるスライサータイプとする。
- 遠方銀河などの淡く広がった天体の観測を目的とする。
 - スライサータイプは反射面が多くなる。
 - 反射面に高反射率誘電体多層膜コーティングを採用することで、観測波長域（370-1,000nm）にわたって高いスループットを達成する。
- 既存装置を利用することで少ないコストと労力で面分光機能を実現する。
- TMT第一期装置 可視光撮像分光装置WFOS用IFUのための実証試験もかねる。

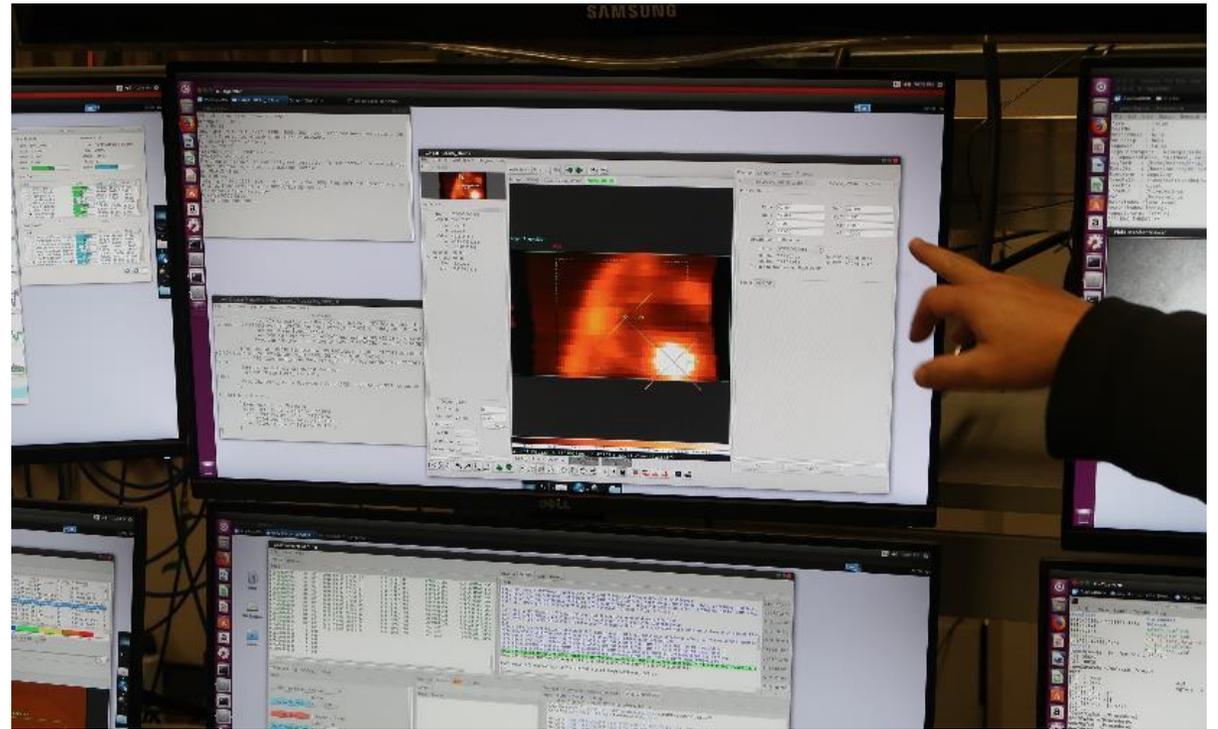
高反射率誘電体多層膜コーティング

- FOCASの観測波長域370-1,000nmで1面あたり98%以上の反射率を達成可能。
- WFOS（波長域310-1,000nm）への発展性を考えるならベストの選択
- 金属面に施すのは難しい（ようである）。 => ガラスを研磨加工



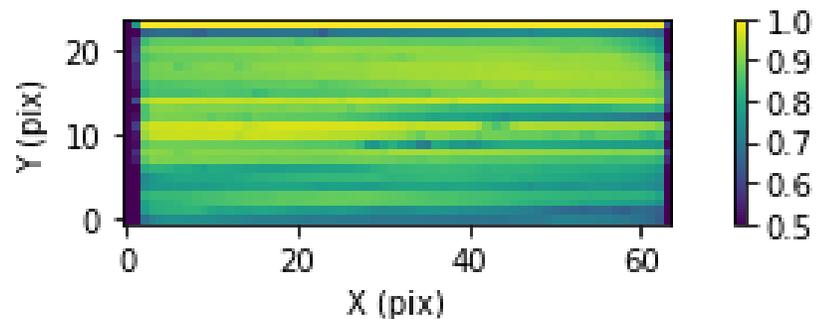
FOACS IFUファーストライト

- FOACS IFUは2018年3月にファーストライトを迎え、2019年前期より共同利用が開始された。

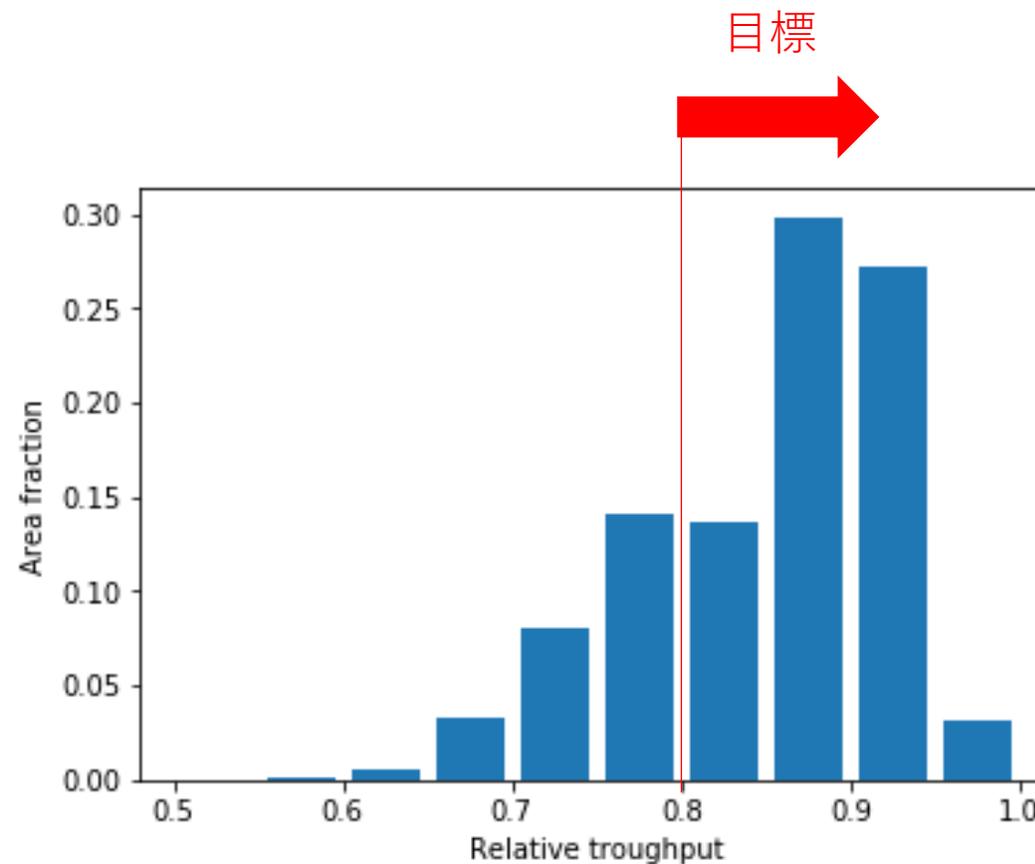
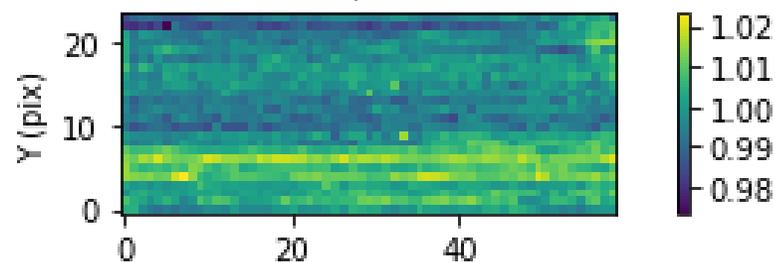


IFU単体の効率

IFU視野内での効率



望遠鏡の姿勢によって、効率が少し変わる。
=> 解析時の補正誤差 (~3%)



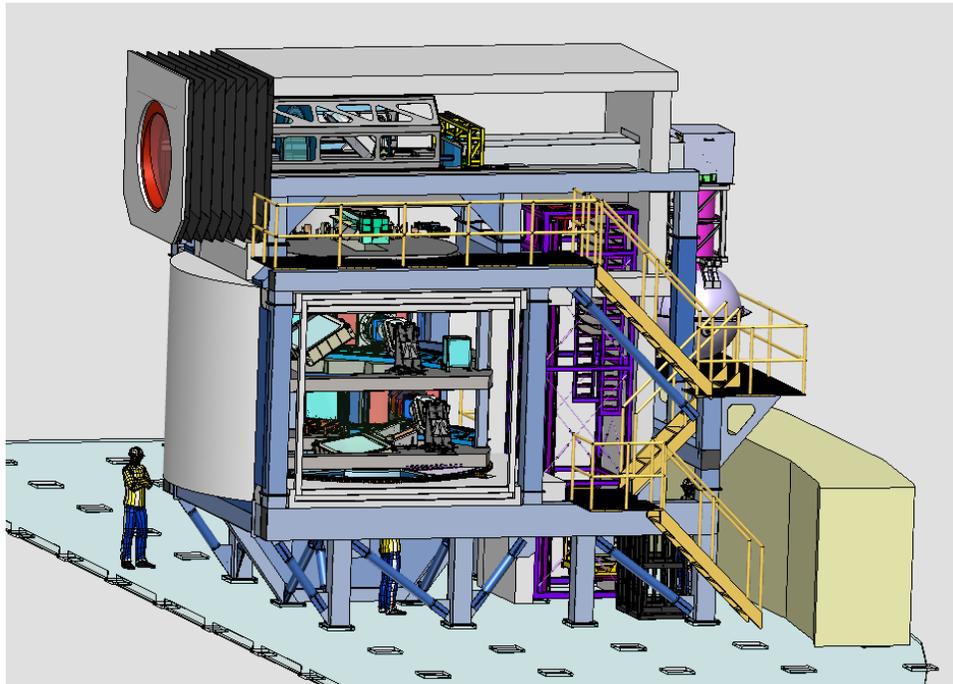
WFOS IFUではケラレをなくすことが課題

アウトライン

- 面分光とは
- スライサー型面分光ユニット (IFU)の加工手法
- FOCAS IFUの紹介
- WFOS IFU開発プロジェクト概要
- WFOS IFU開発へ向けた技術開発

Wide Field Optical Spectrometer (WFOS)

- One of the first light instruments of TMT
- WFOS has been developed by international collaboration involving U.S., China, India and Japan.



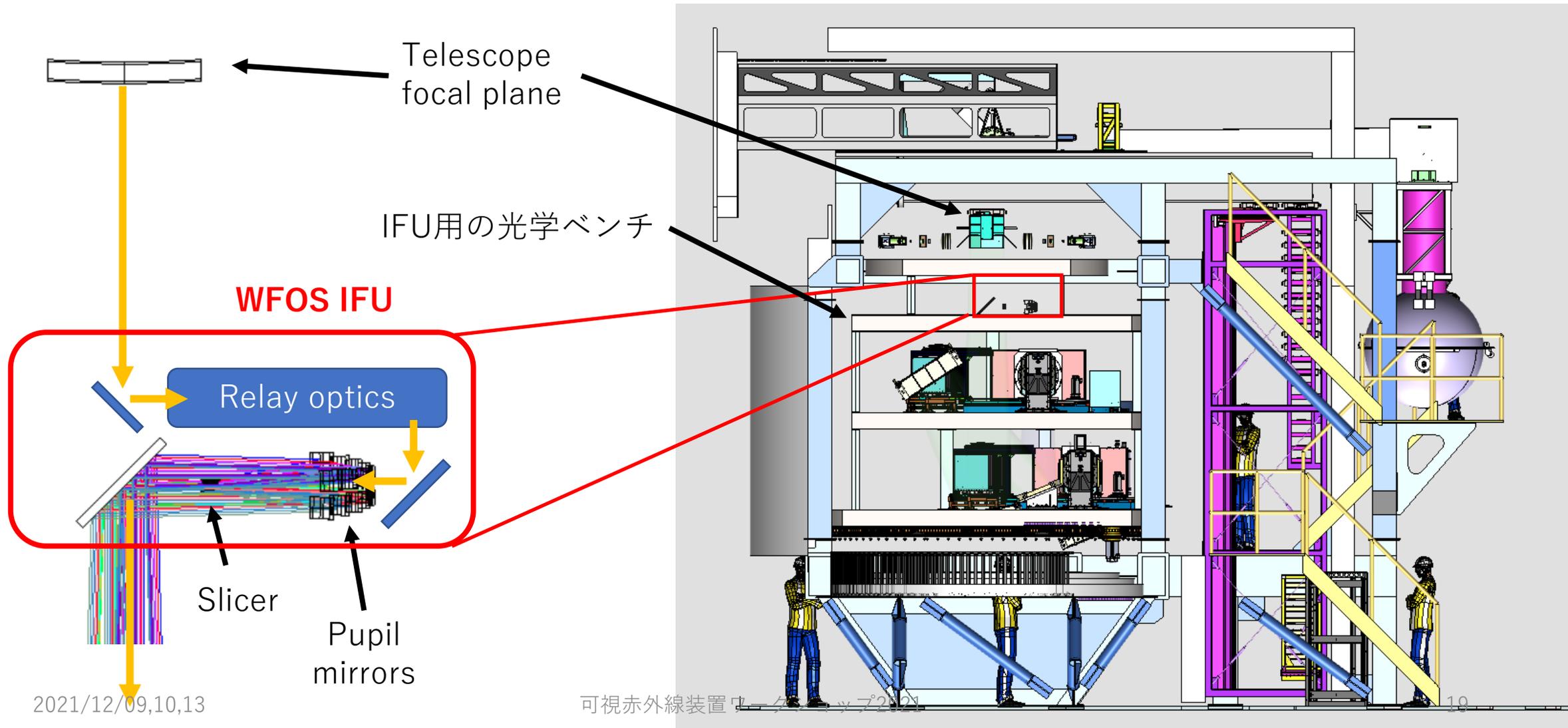
Parameter	Value
Field of View (FOV)	8.3' x 3.0'
Wavelength range	310 – 560 nm (Blue arm) 540 – 1,000 nm (Red arm)
Spectral resolution	1500 – 5000 (0.75" width)
Mode	Imaging Multi-slit spectroscopy (Integral field spectroscopy)

WFOS IFU parameters

- 2つのイメージスライサーと2つの拡大光学系を切り替えることで4つの視野・サンプリングを実現
- 大きく広がった構造を狙うためにできるだけ広い視野をカバーできるようにした。
- 将来のGLAOの搭載を見据えて細かいサンプリングのモードも用意する。

Slice number	18			
Magnification factor of relay optics	1.1		4.125	
Slice width (mm)	3.60	1.80	3.60	1.80
Slice width (arcsec)	1.5	0.75	0.4	0.2
FoV (arcsec x arcsec)	20 x 27	20 x 13.5	5.33 x 7.2	5.33 x 3.6
R=1500 grating	682	1364	682	1364
R=3500 grating	1591	3182	1591	3182
R=5000 grating (goal)	2273	4545	2273	4545

IFUの組み込み位置



超巨大望遠鏡の可視面分光装置

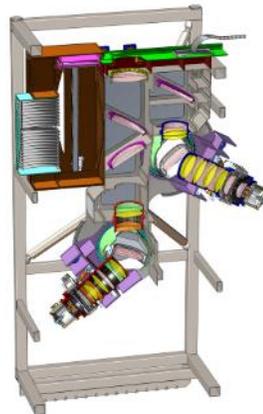
GMT



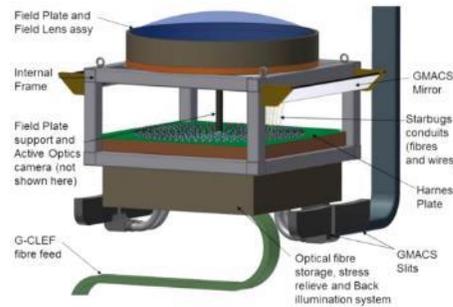
ELT



GMACS

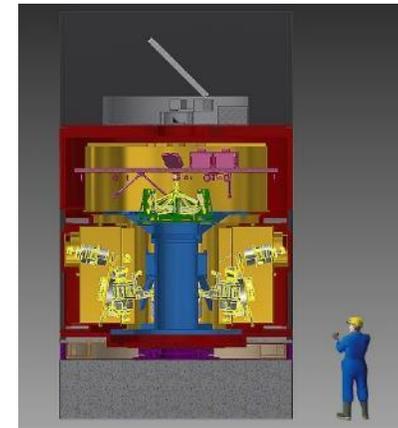


MANIFEST



MANIFEST is a fiber feeding module and provides an IFU capability for GMACS.

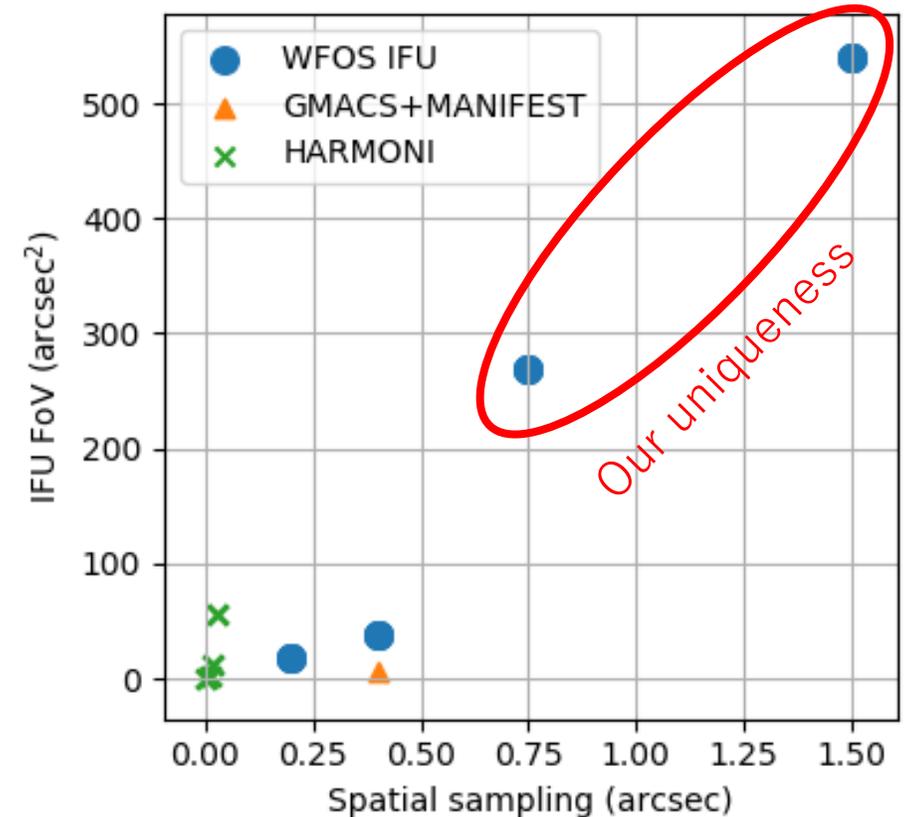
HARMONI



HARMONI for ELT is mainly for near IR, but its sensitivity extends to optical range.

Comparison with GMACS/MANIFEST and HRMONI

- HARMONI focuses on a fine spatial sampling for a narrow field.
 - Thatte et al., 2020, Proc. SPIE, 11447, 114471W
- GMACS/MANIFEST provides a multi-IFU mode with $\phi 3''$ FoV.
 - Multiplexity is 19.
 - Lawrence et al., 2020, Proc. SPIE, 11447, 1144728
- Large FoV is the uniqueness of WFOS IFU.

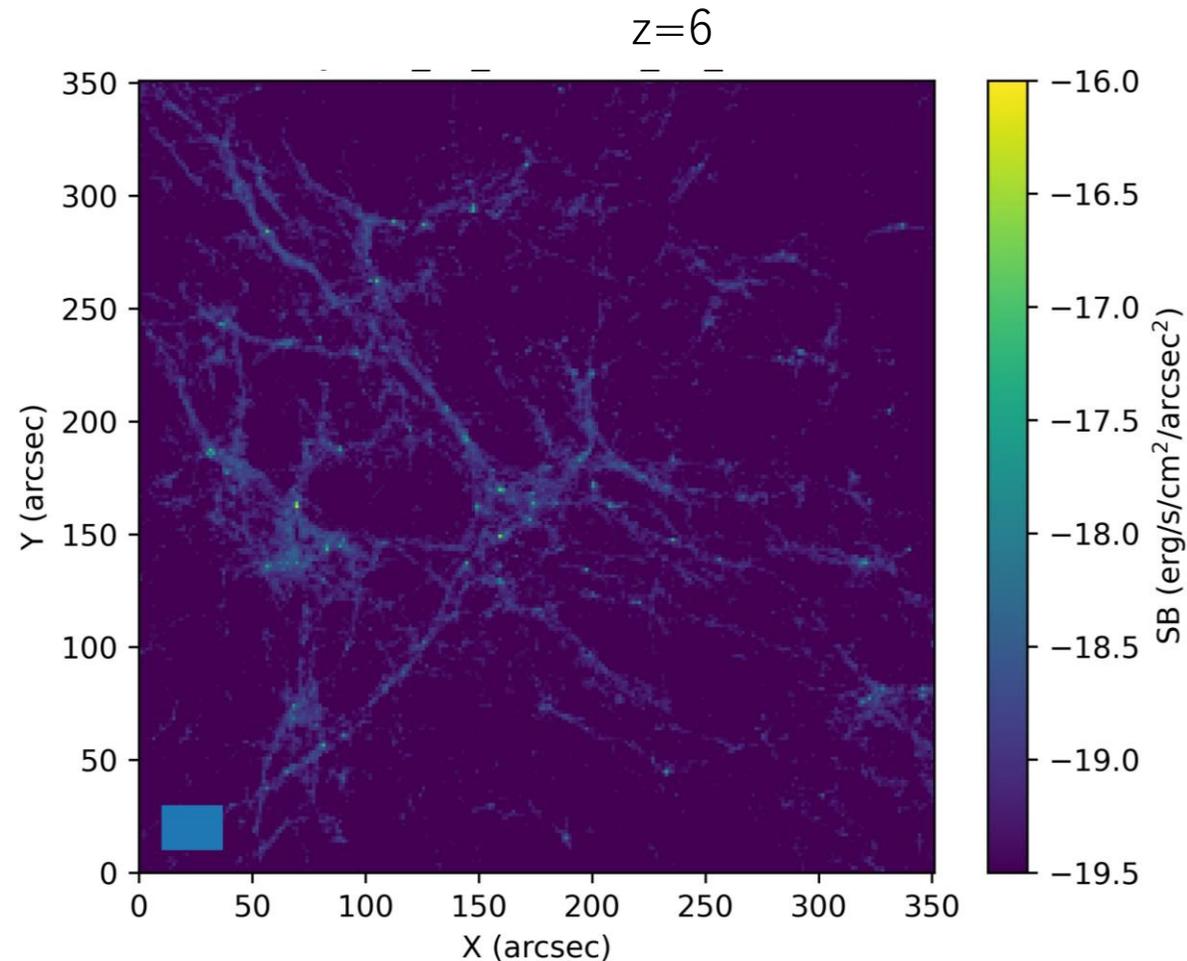


サイエンスケース

- Cosmic Webの赤方偏移進化
- 銀河進化と銀河間ガスの係わり

大規模銀河形成シミュレーション (Yajima et al. 2020)
から求めたLy α 表面輝度分布 (1辺~14cMpc)
左下四角はWFOSの最大視野

表示下限値は10時間、1 σ の検出限界
 $\sim 3 \times 10^{-20}$ erg/s/cm 2 /arcsec 2

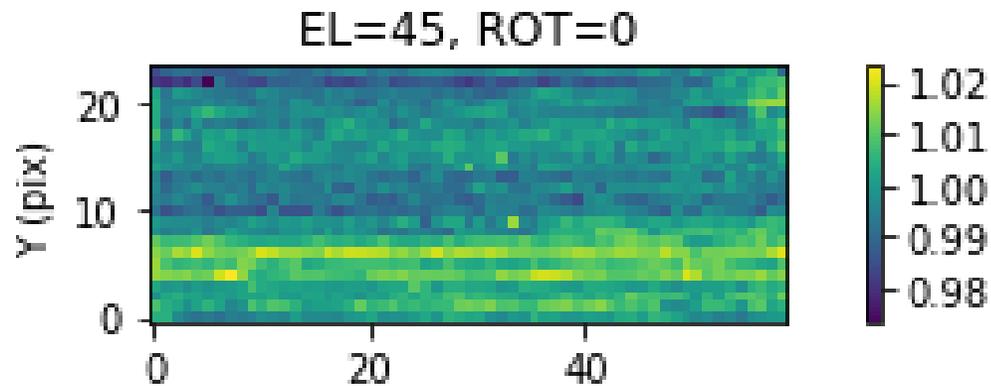


アウトライン

- 面分光とは
- スライサー型面分光ユニット (IFU)の加工手法
- FOCAS IFUの紹介
- WFOS IFU開発プロジェクト概要
- WFOS IFU開発へ向けた技術開発

WFOS IFUへ向けた基礎開発

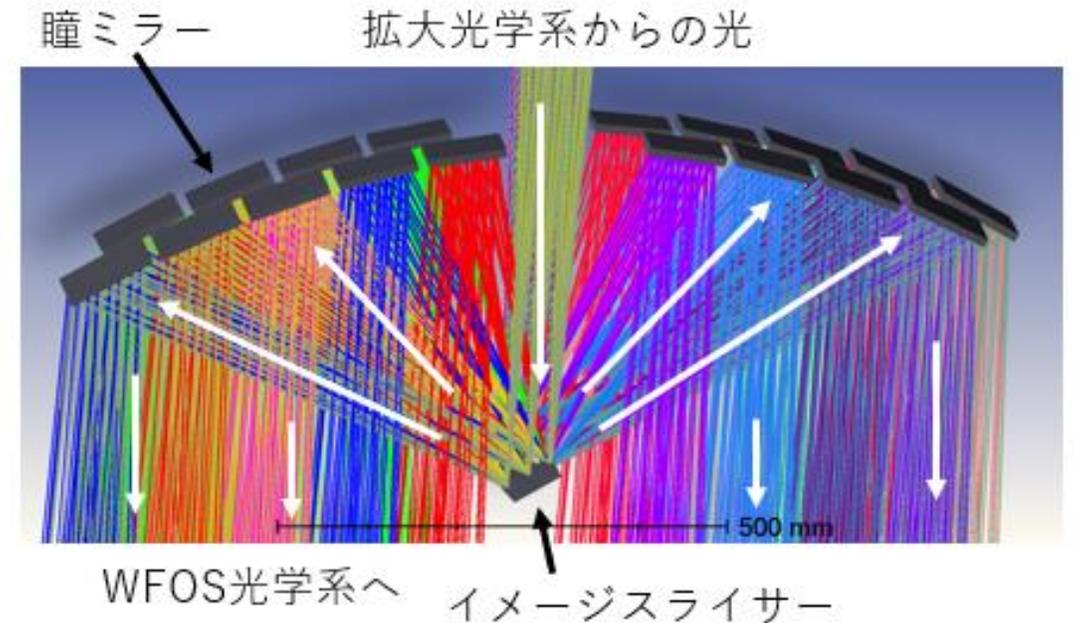
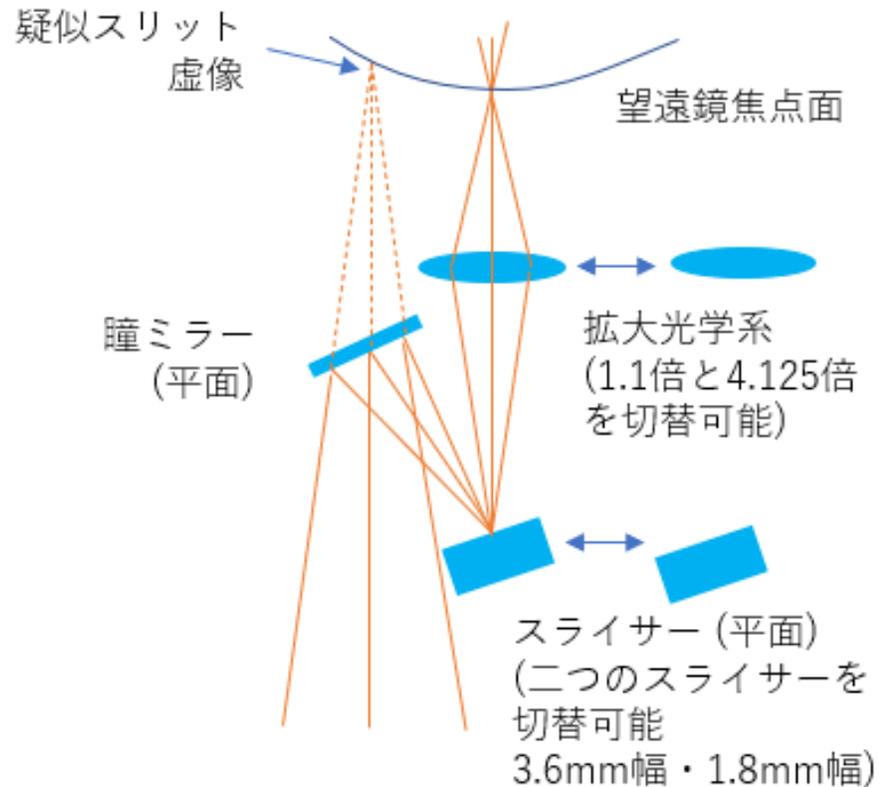
- 10時間、 1σ の検出限界 $\sim 3 \times 10^{-20}$ erg/s/cm²/arcsec²
- これは地球大気放射の0.03%
- このわずかなシグナルを検出するための基礎開発を遂行中
 - 特にフラット処理誤差の低減



FOCAS IFUのフラット処理誤差例
スライス方向は横方向

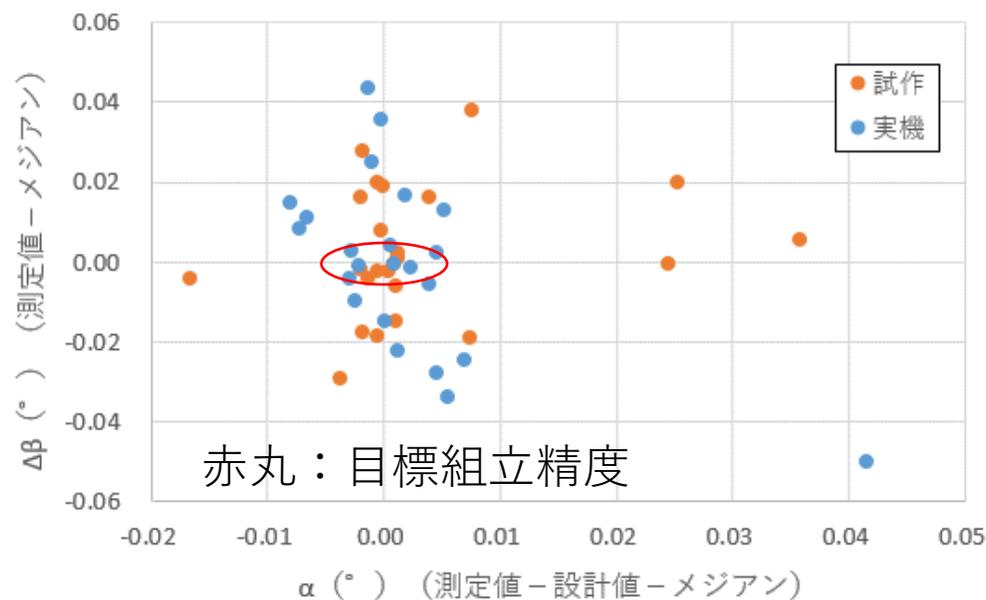
技術開発 1 : 公差の緩い光学レイアウト

- IFU主光学系をフラットミラーの2面構成にすることで、自由度を少なくして、各自由度に割り振れる公差を大きくした。
- IFU射出瞳サイズを少し小さくして、分光器内の瞳位置がずれてもケラレないようにした。

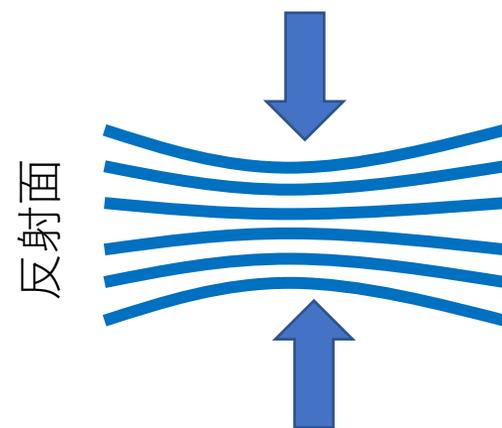


技術開発 2 : スライサー組立精度向上

- ケラレの主な原因はスライサー組立誤差によるもの。
- コーティングの応力による基板の変形が組立誤差の一因であることが判明。
- 国内企業と組立精度向上へ向けた共同開発



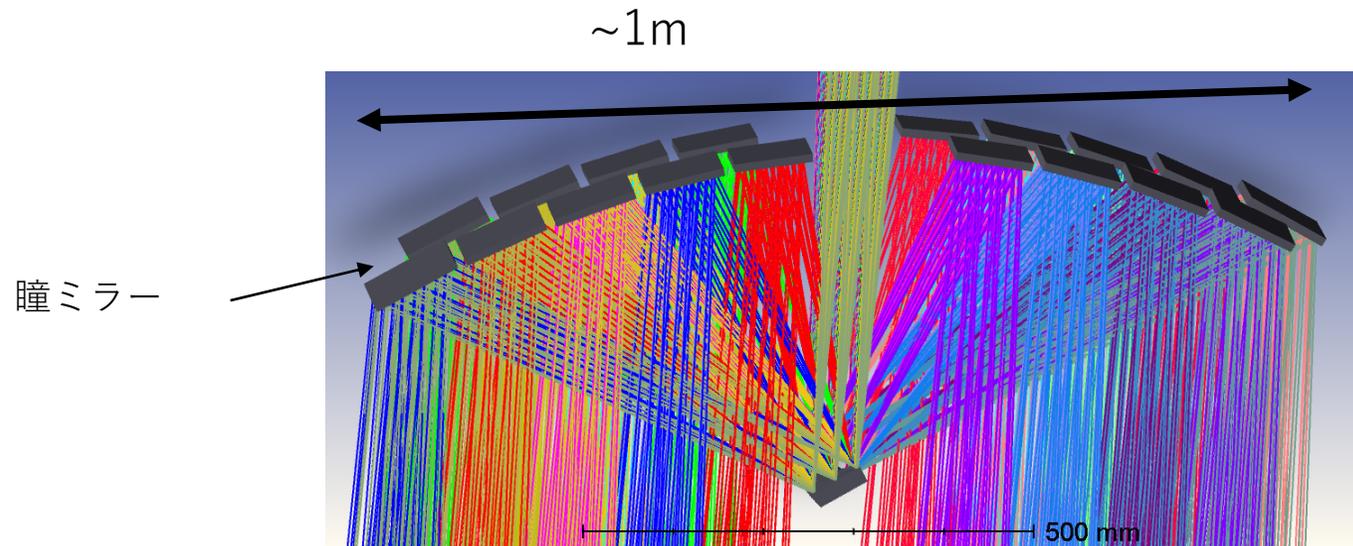
FOCAS IFUスライスミラー相対角度誤差



ガラス板を積み重ねたスライサーの断面概念図

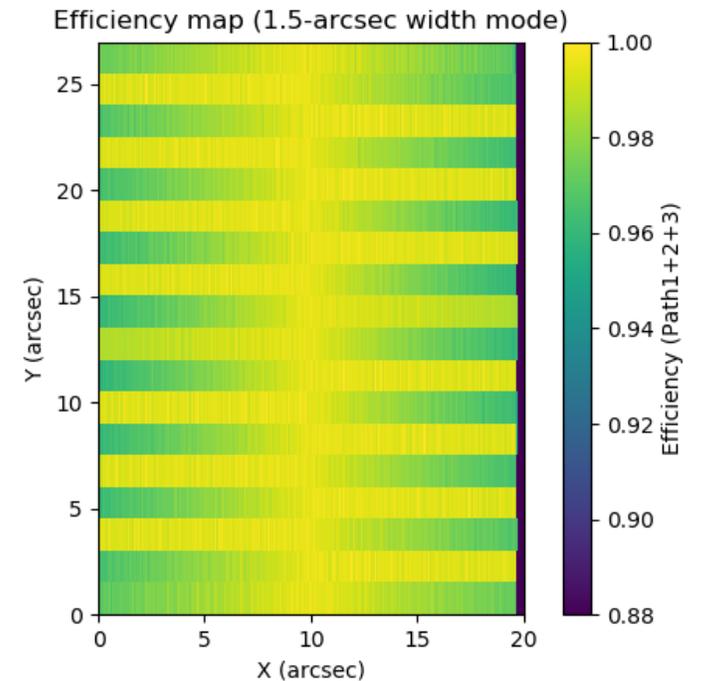
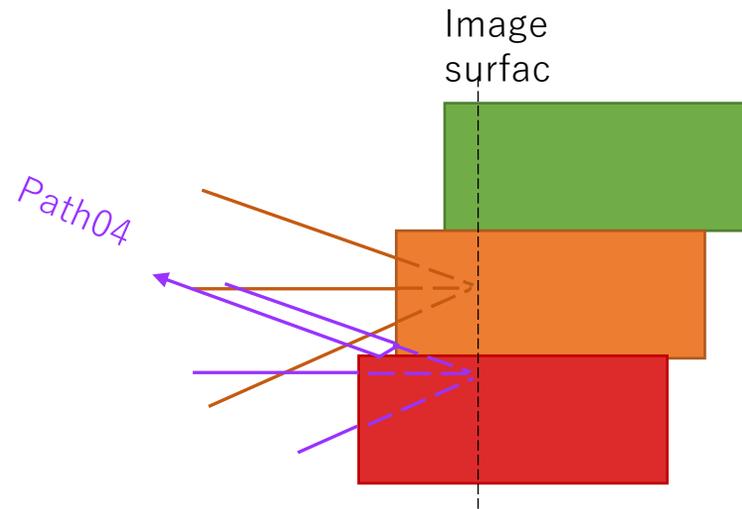
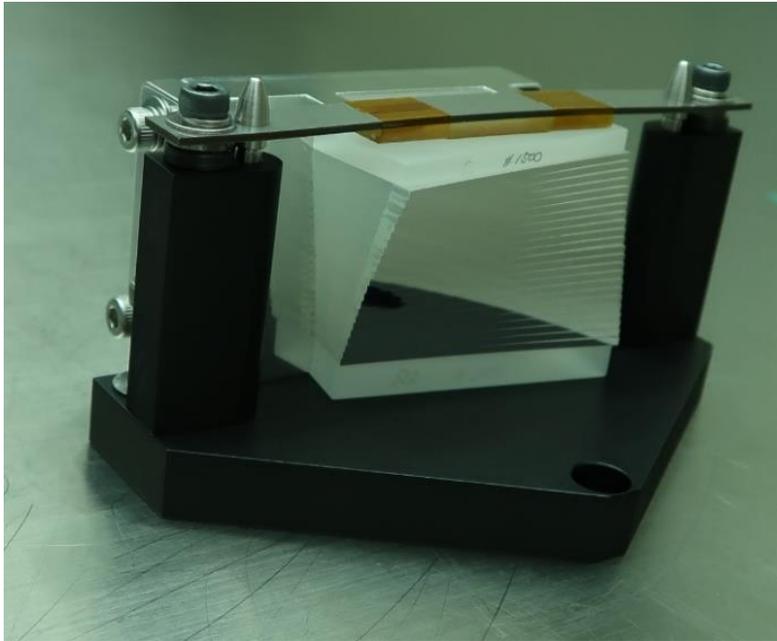
技術開発 3 : 調整手法確立

- WFOS IFUの瞳ミラーホルダーの長さは1m程度
- 各瞳ミラーを 0.03° の精度でアライメントさせるために、各瞳ミラーに調整機構を付ける。
- 調整手法の検討はこれから



技術開発 4 : フラット処理誤差補正ソフト開発

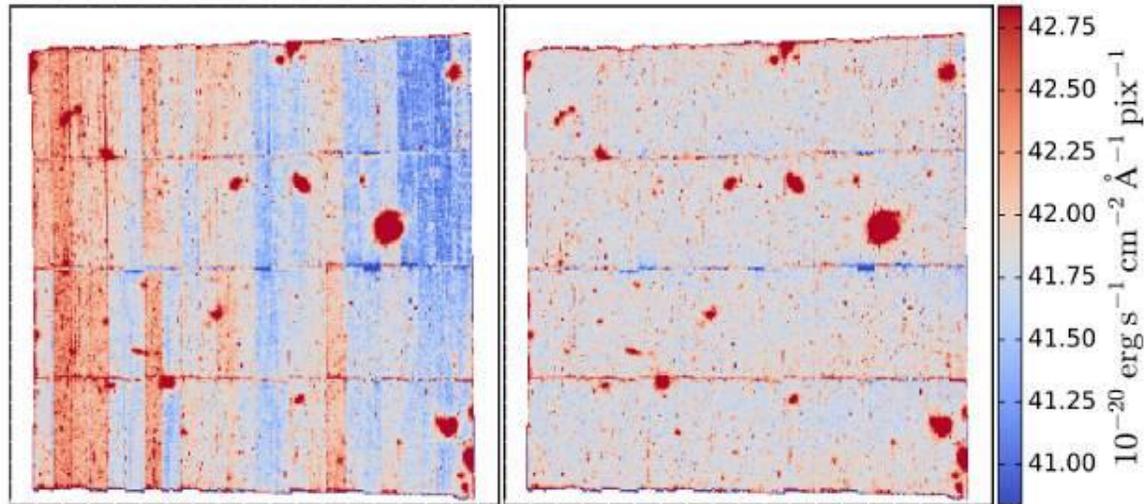
- スライサー段差でのケラレは避けられない。
- 予想されるケラレ量は3-4% (1.5"スライス幅)



スライサー段差でのケラレ
シミュレーション

技術開発 4 : フラット処理誤差補正ソフト開発

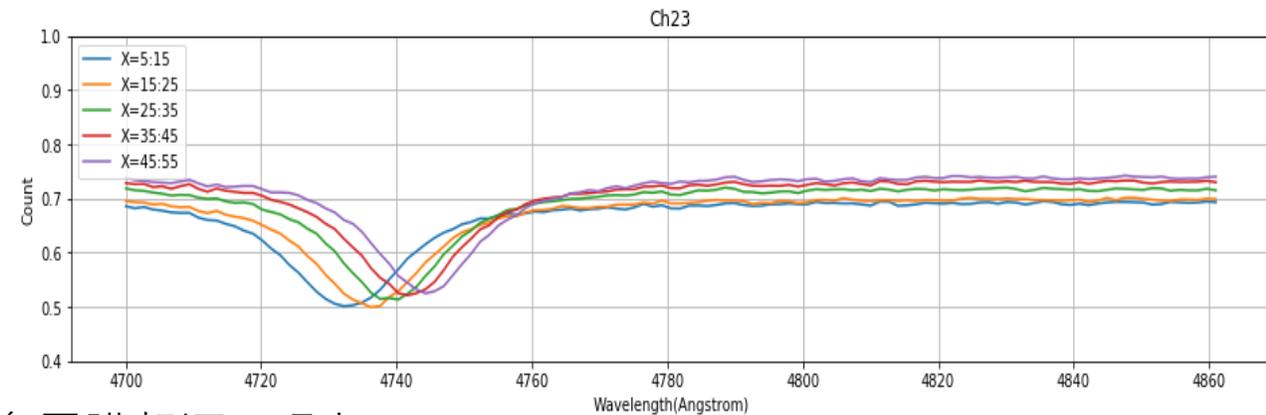
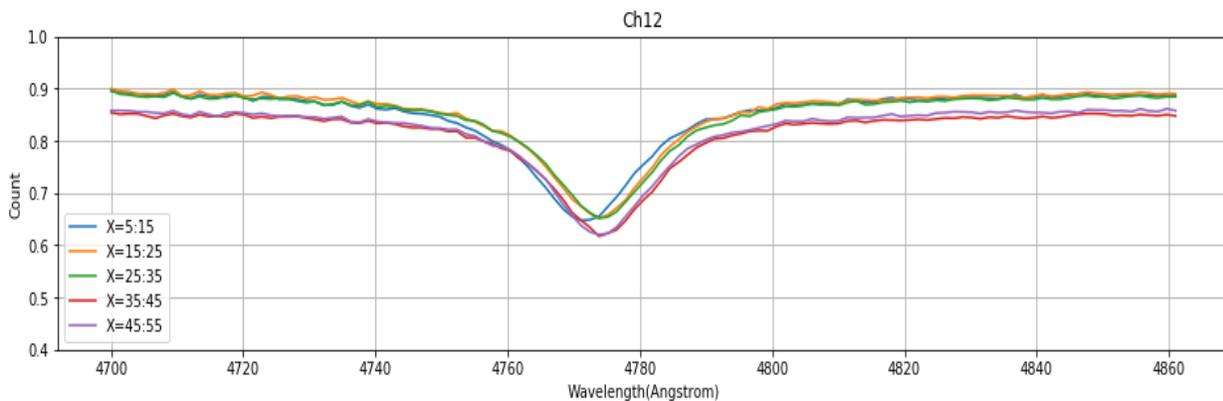
- MUSE@VLTでは既に実用化
- 大気放射成分が視野内でフラットと仮定して補正
- FOCAS IFUのデータで試験



MUSEのフラット処理誤差補正の効果 (Bacon et al. 2017)。
右が補正前、左が補正後。

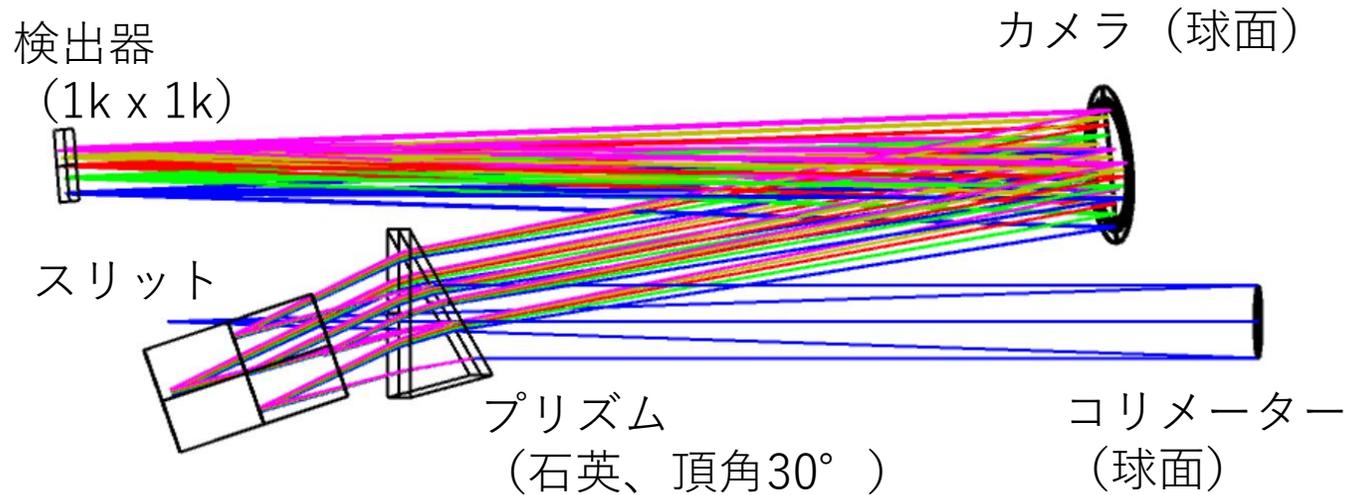
技術開発 5 : 反射率測定システムの構築

- 高反射率多層膜ミラーは成膜誤差により吸収線が生じる可能性がある。
- 波長分解能 $R \sim 15,000$ の反射率測定システムを構築し品質保証に用いる。
 - WFOSの最大波長分解 $R=5,000$ (最近では $R \sim 15,000$ までを考慮している)
 - 市販の分光光度計ではこれだけの高分散で十分なS/Nを得られるものはない。



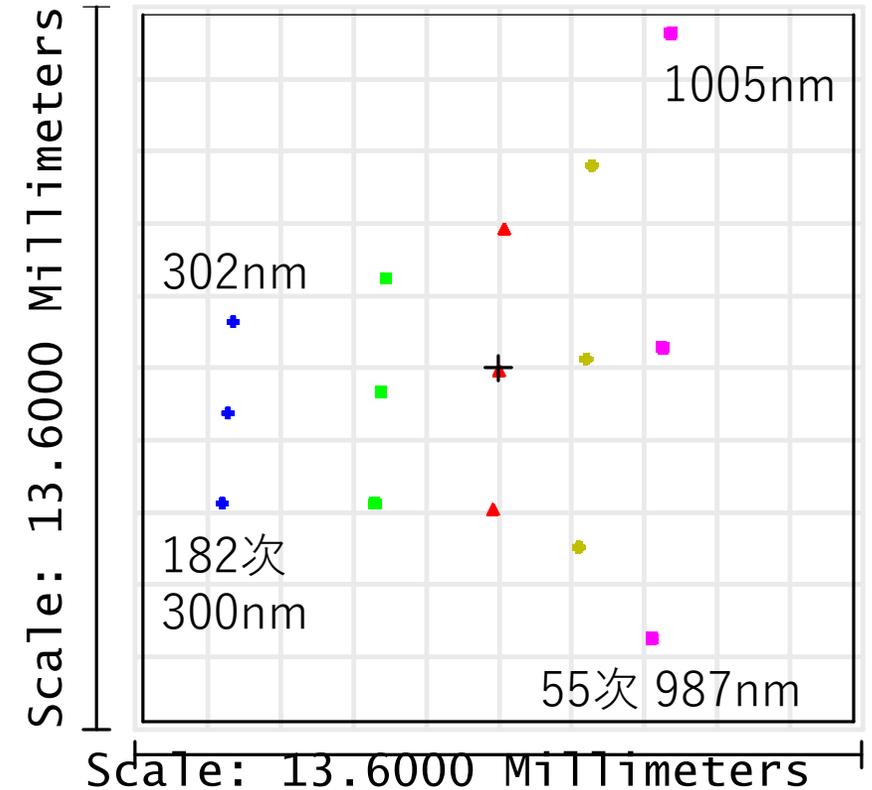
FOCAS IFUで見られた多層膜起源の吸収

分光器部設計



エシェルグレーティング
31.6本/mm

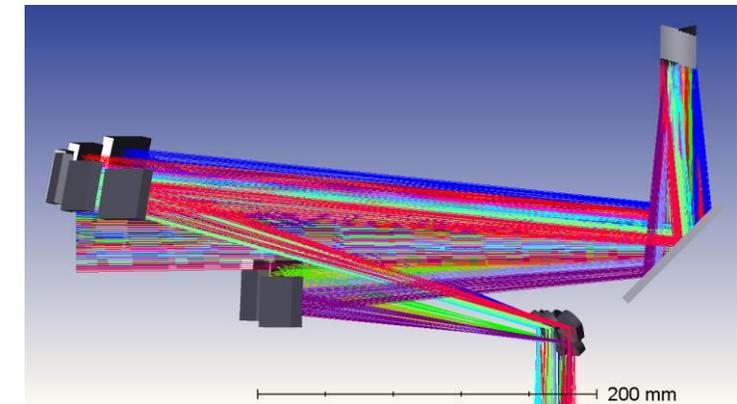
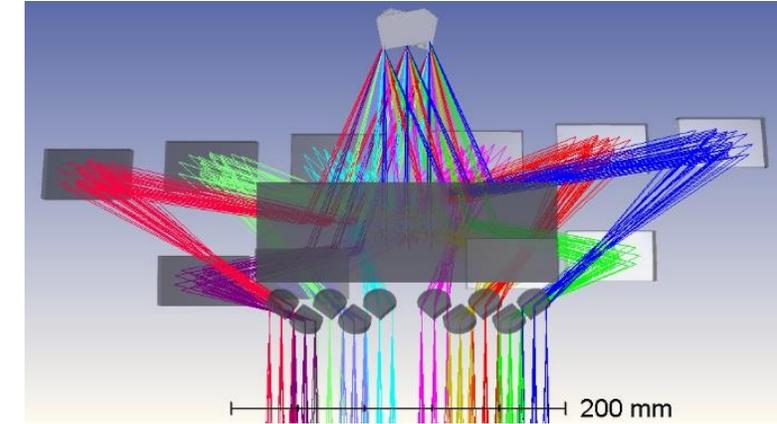
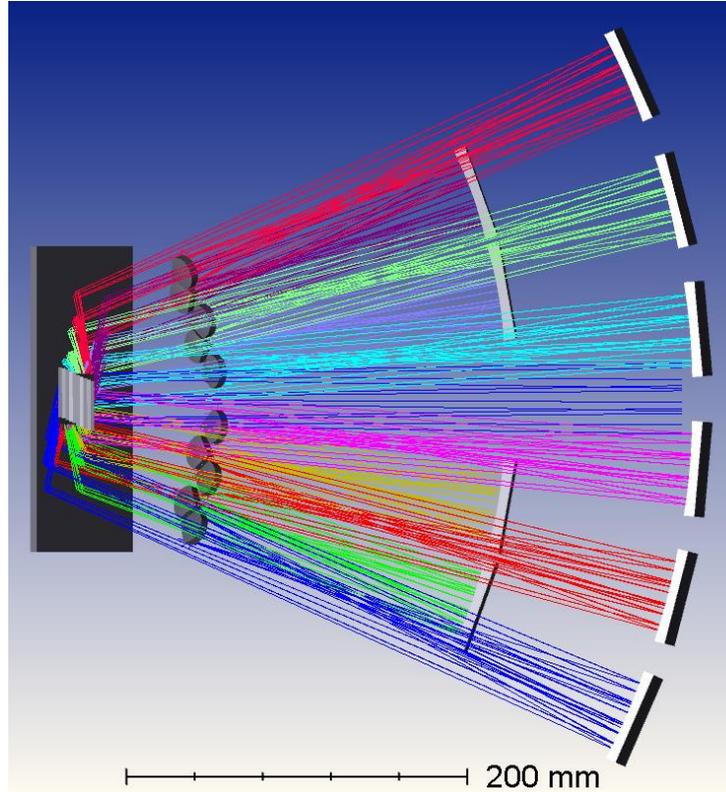
スリット幅50umでR~15,000



技術開発 6 : 実証試験

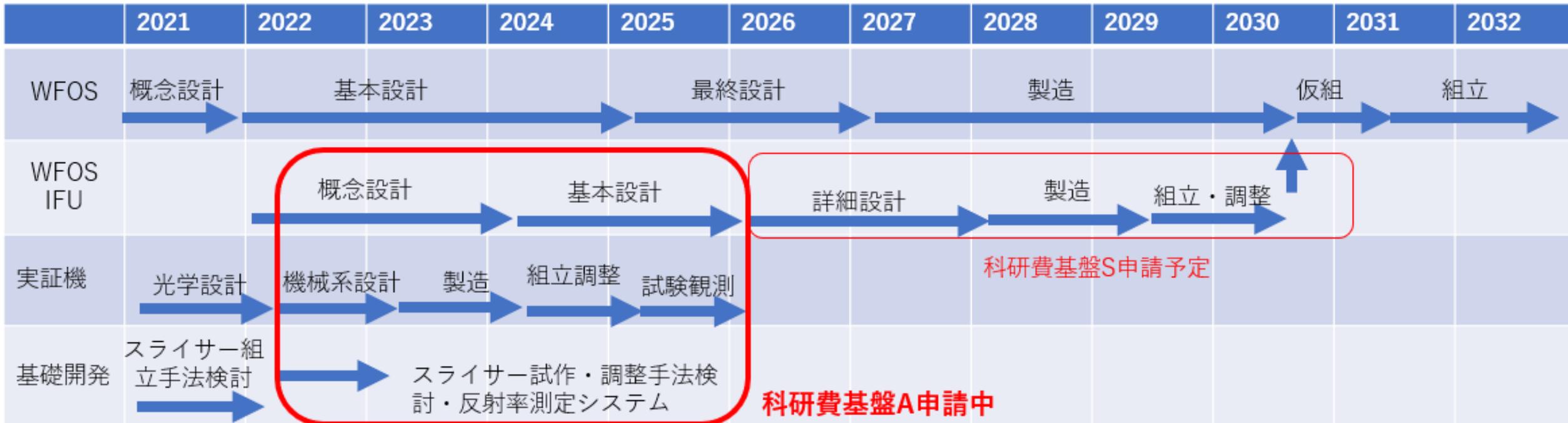
- 技術開発で得られた技術を用いて簡易的なIFUを開発し、FOCASへ組み込んで実証試験を行う。
- 光学系詳細設計中

Number of slices	10
Slice width	1.8 arcsec
Slice length	23 arcsec
FoV	23 x 18 arcsec ²
R@VPH680	1389



スケジュール

- 2025年度まで基礎開発・技術実証を行いリスク低減。得られたノウハウは随時WFOS IFUの設計へ反映。
- 2026年度からWFOS IFUを本格的に開発。
- **IFUはWFOSのアップグレード計画なので、TMT予算からIFU開発経費は出ない。**
- **全て競争的資金でまかなう必要がある。**



まとめ

- FOCAS IFUではケラレがあり、フラット処理誤差（～3%）が生じている。
- FOCAS IFUの経験を基にWFOS IFU 開発へ向けて基礎開発を進めている。
- 基礎開発と技術実証試験を2025年度までに完了させる。
- 得られた技術を投入して、WFOS IFU開発へ取り組む。