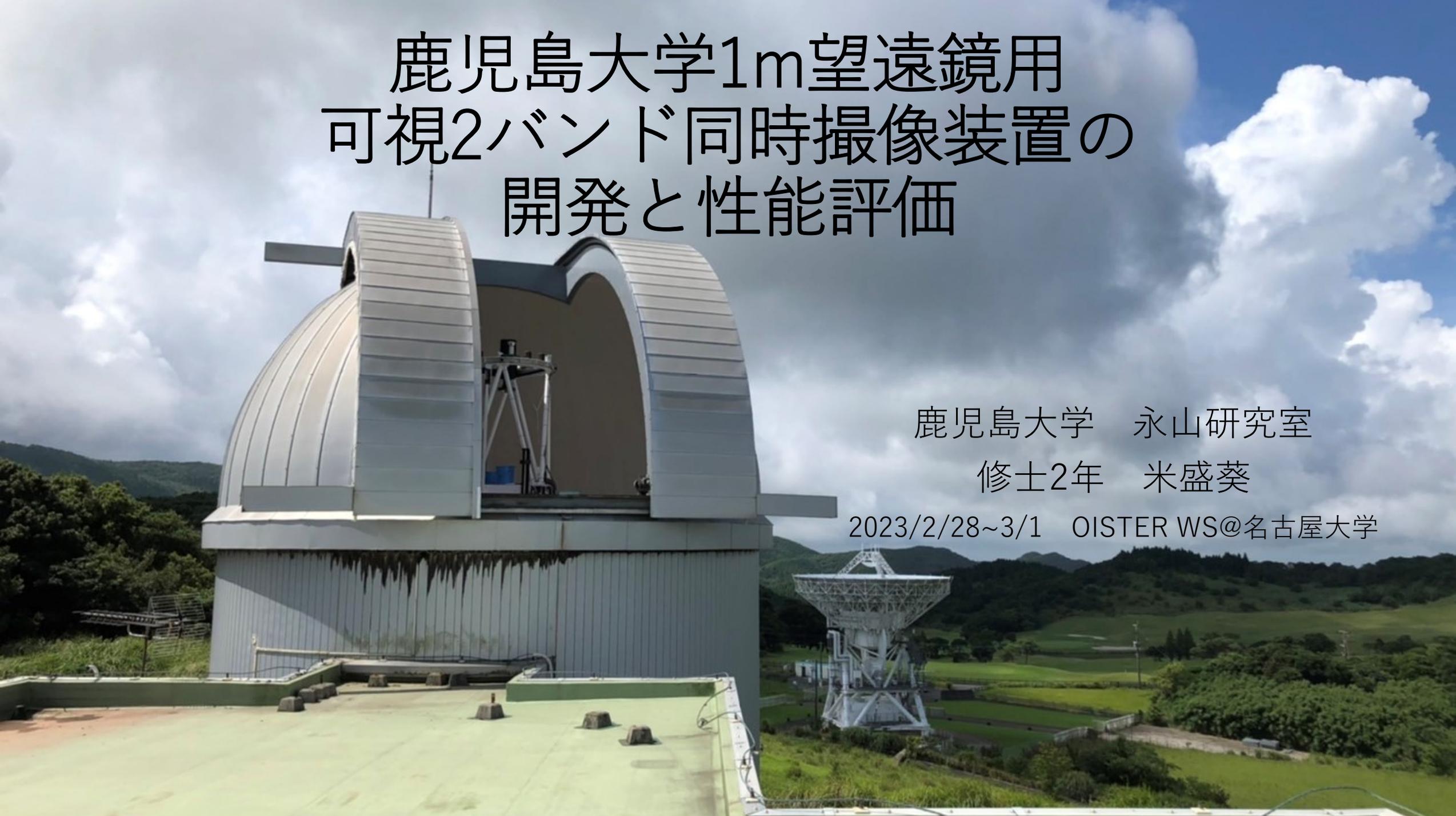


# 鹿児島大学1m望遠鏡用 可視2バンド同時撮像装置の 開発と性能評価

鹿児島大学 永山研究室

修士2年 米盛葵

2023/2/28~3/1 OISTER WS@名古屋大学



# 1m望遠鏡の機能強化を目指す

## 近赤外線3バンド同時撮像装置 (kSIRIUS)

Jバンド  $1.25\mu\text{m}$

Hバンド  $1.65\mu\text{m}$

Ksバンド  $2.15\mu\text{m}$



設計・光学試験完了  
2023年1月にファーストライト



## 可視2バンド同時撮像装置

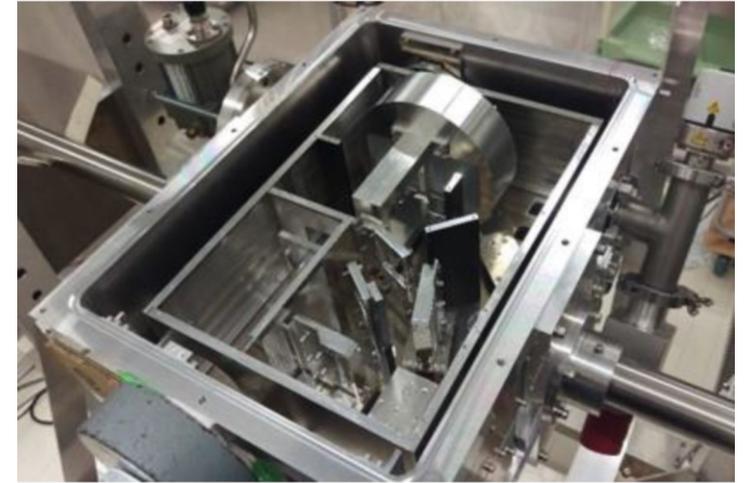
g'バンド  $0.48\mu\text{m}$

i'バンド  $0.77\mu\text{m}$

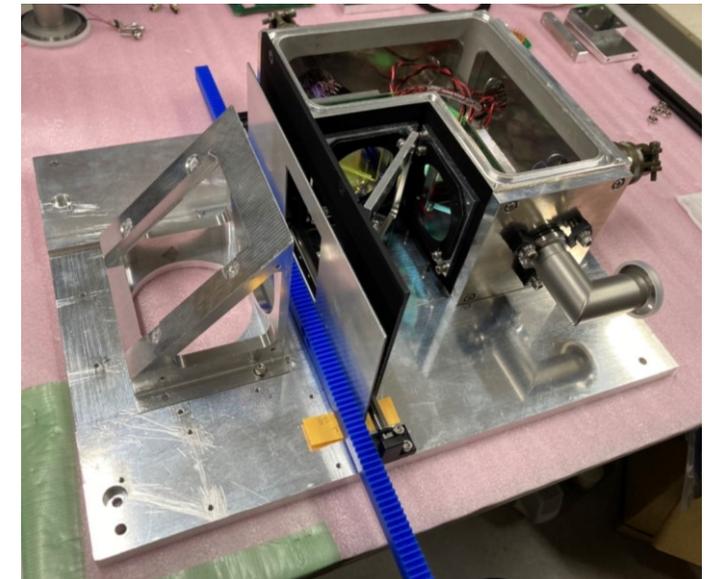


設計・光学試験完了  
2022年12月にファーストライト

近赤外線と可視光あわせて  
5バンド同時撮像を目指す

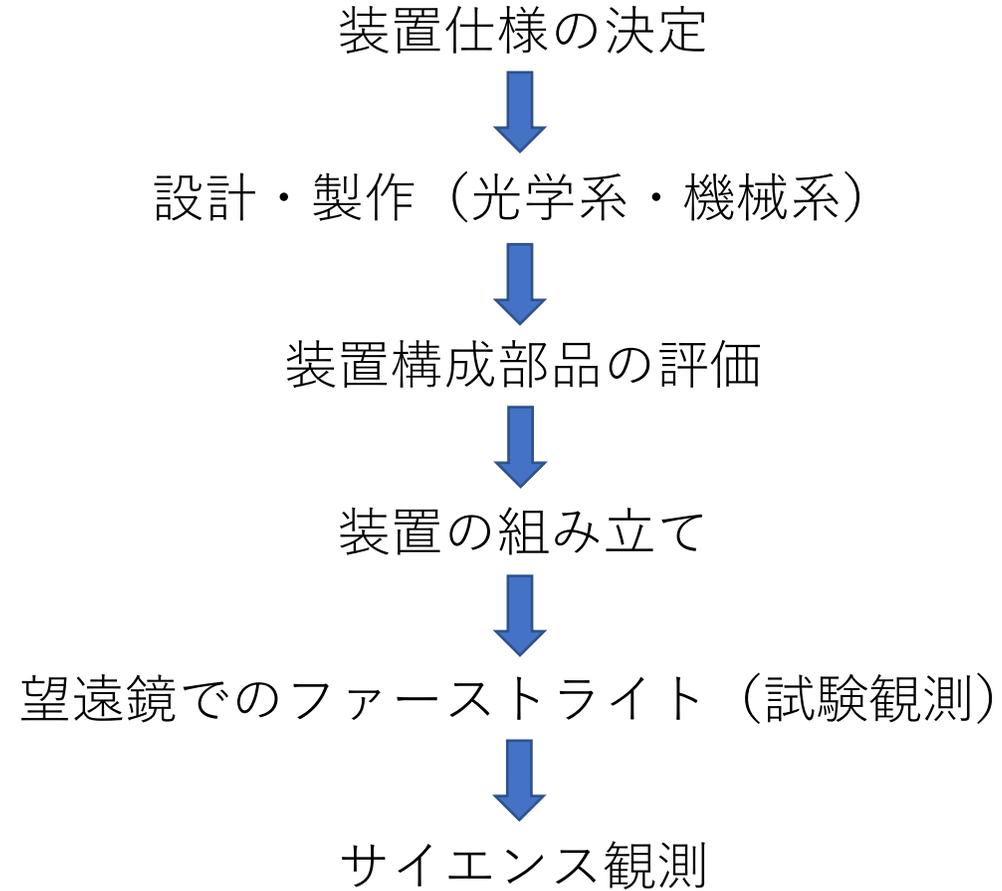


kSIRIUS



可視カメラ

# 可視カメラ開発の流れ



# 可視カメラ開発 ~2021年

装置仕様の決定

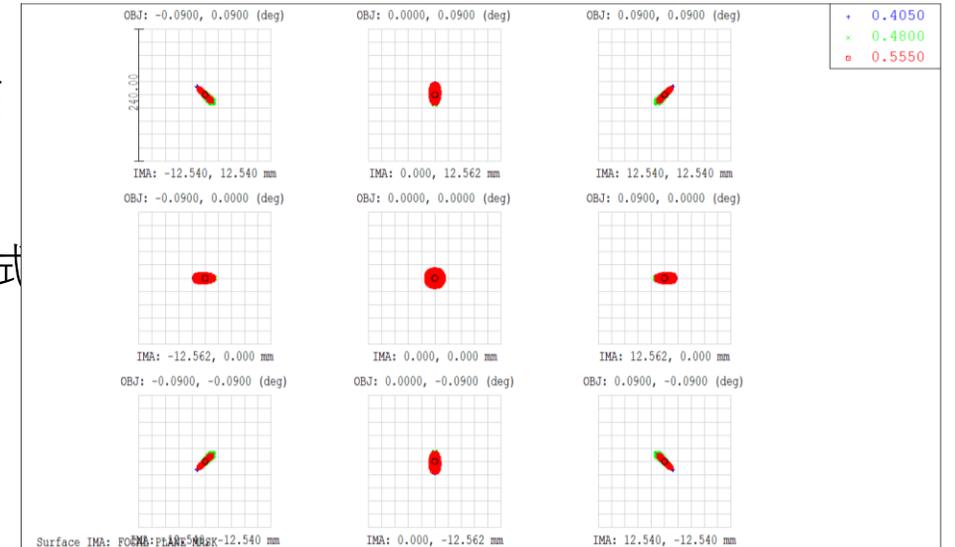
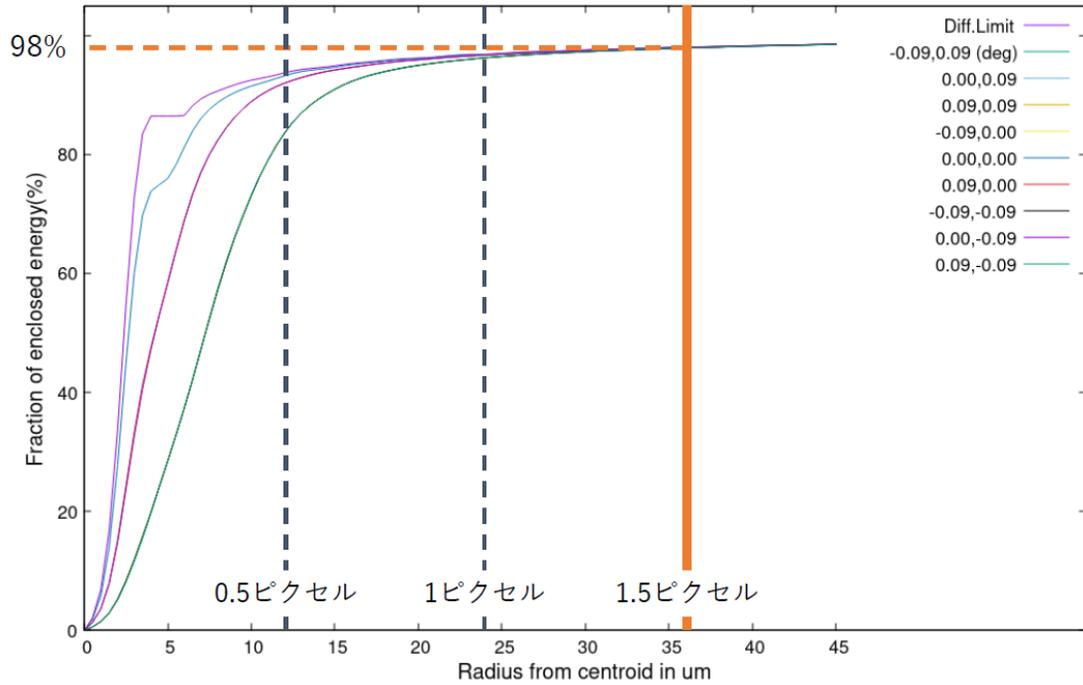
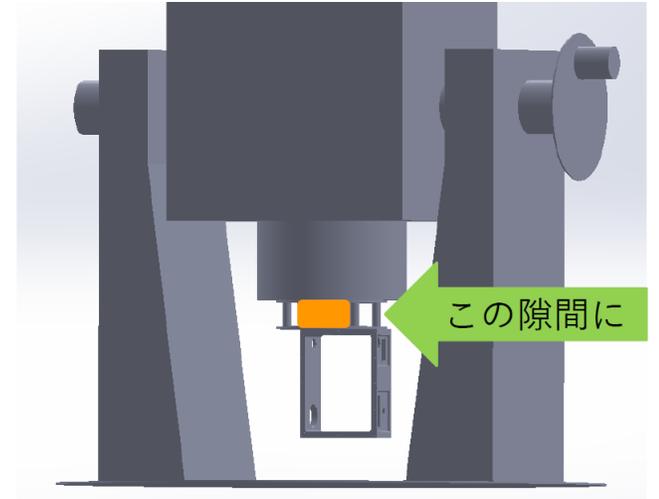
(光学系・機械系)

構成部品の評価

組み立て・評価

-ストライト (試)

レンズ観測



# 可視カメラ開発 ～2021年

装置仕様の決定



設計・製作（光学系・機械系）



装置仕様の部品評価



立て・評

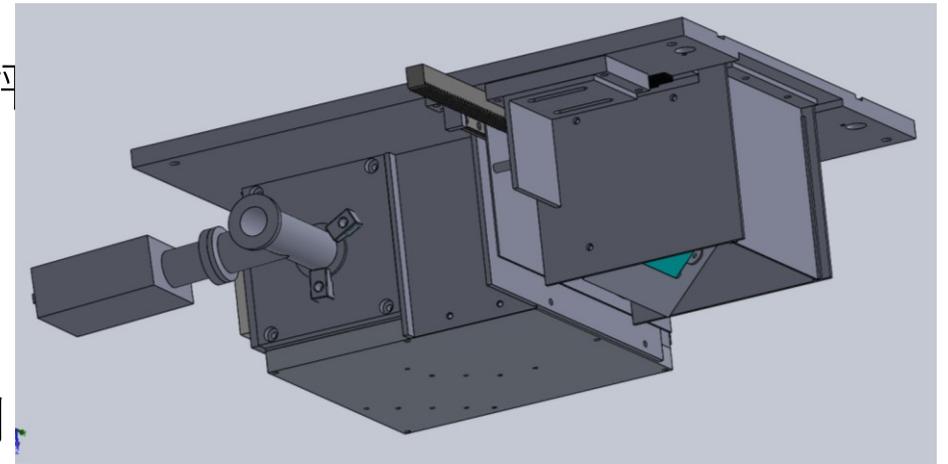
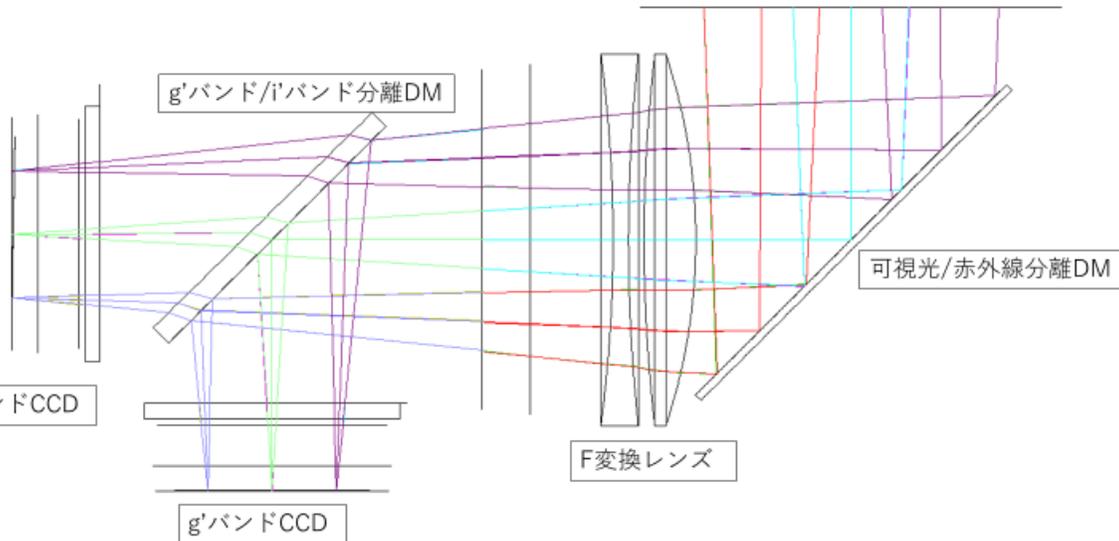


ライト



ノス観測

可視カメラ光学系



# 可視カメラ開発 2022年～

装置仕様の決定



設計・製作（光学系・機械系）



装置構成部品の評価



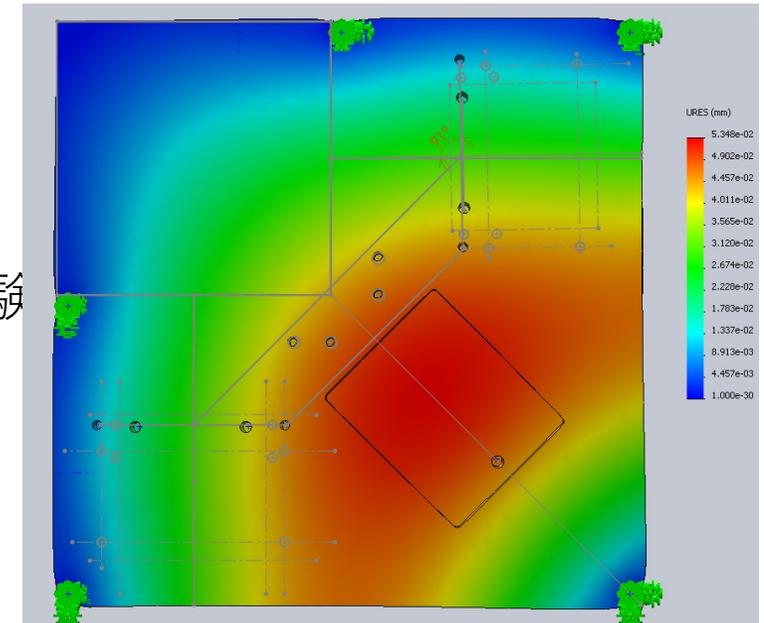
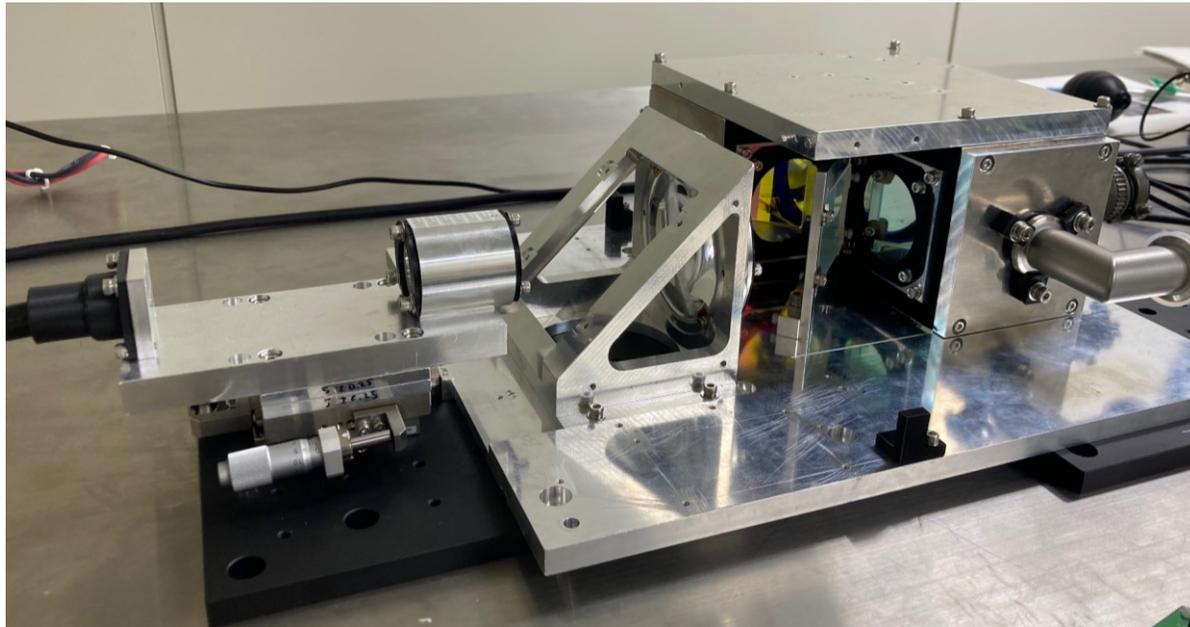
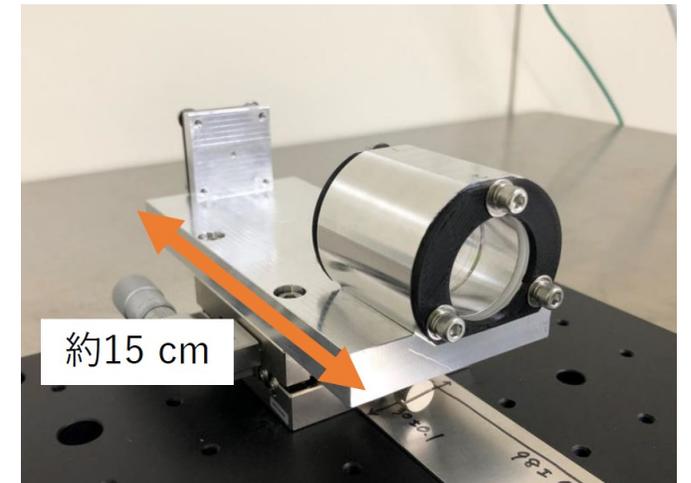
立て・評価



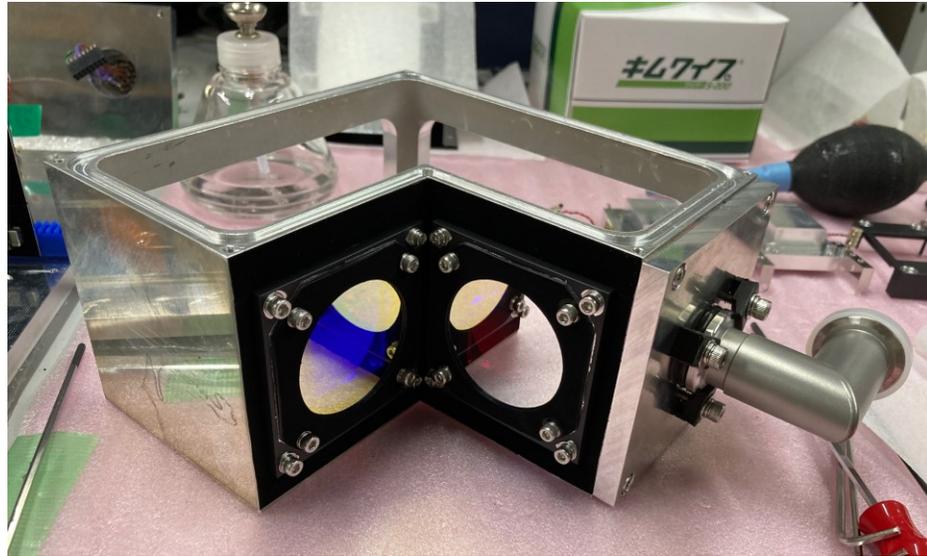
トライト（試験）



レンズ観測



# 可視カメラ開発 ~2022年



装置仕様の決定



製作（光学系・機械系）



装置構成部品の評価



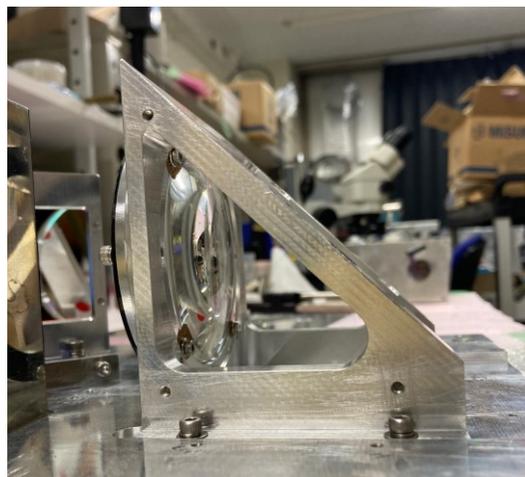
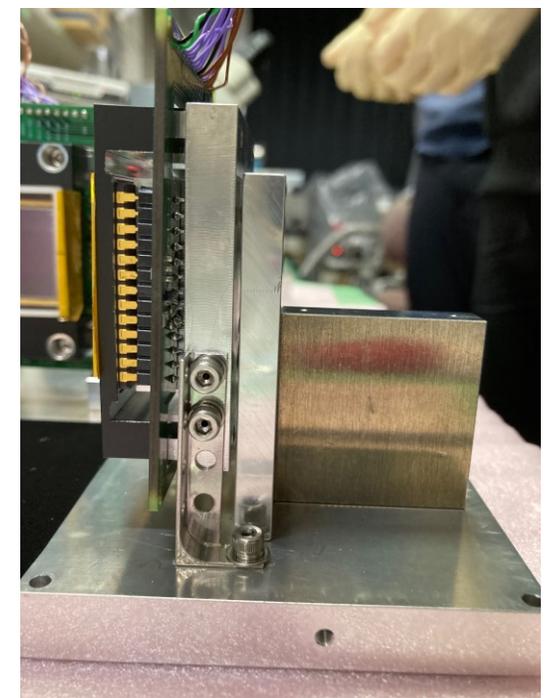
装置の組み立て・評価



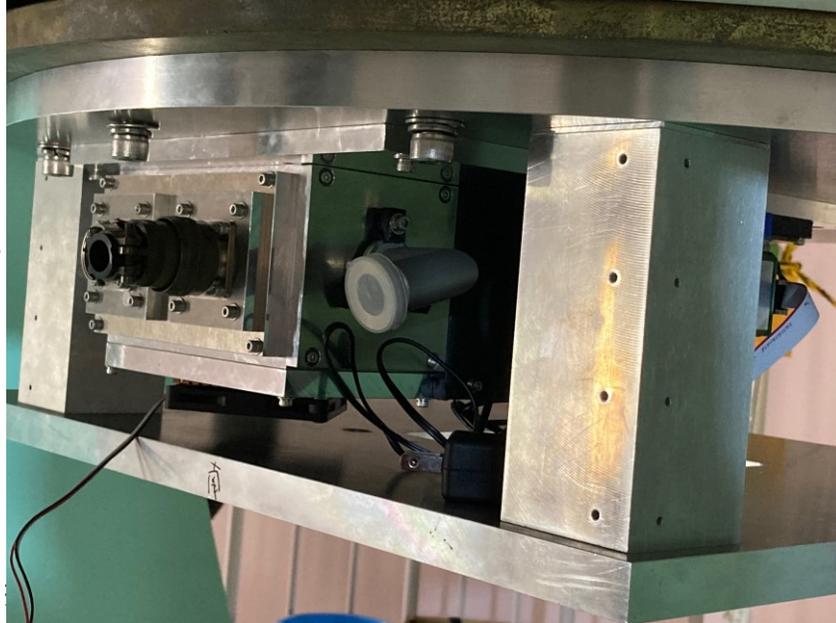
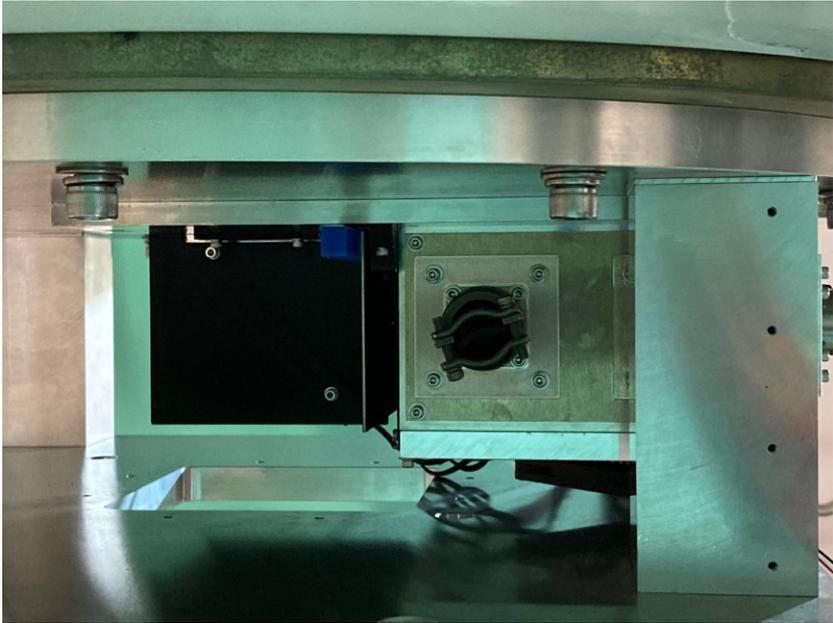
望遠鏡でのファーストライト（試験）



サイエンス観測



# 可視カメラ開発 ～2022年



望遠鏡でのファーストライト（試験観測）

サイエンス観測

# 可視カメラの特徴①

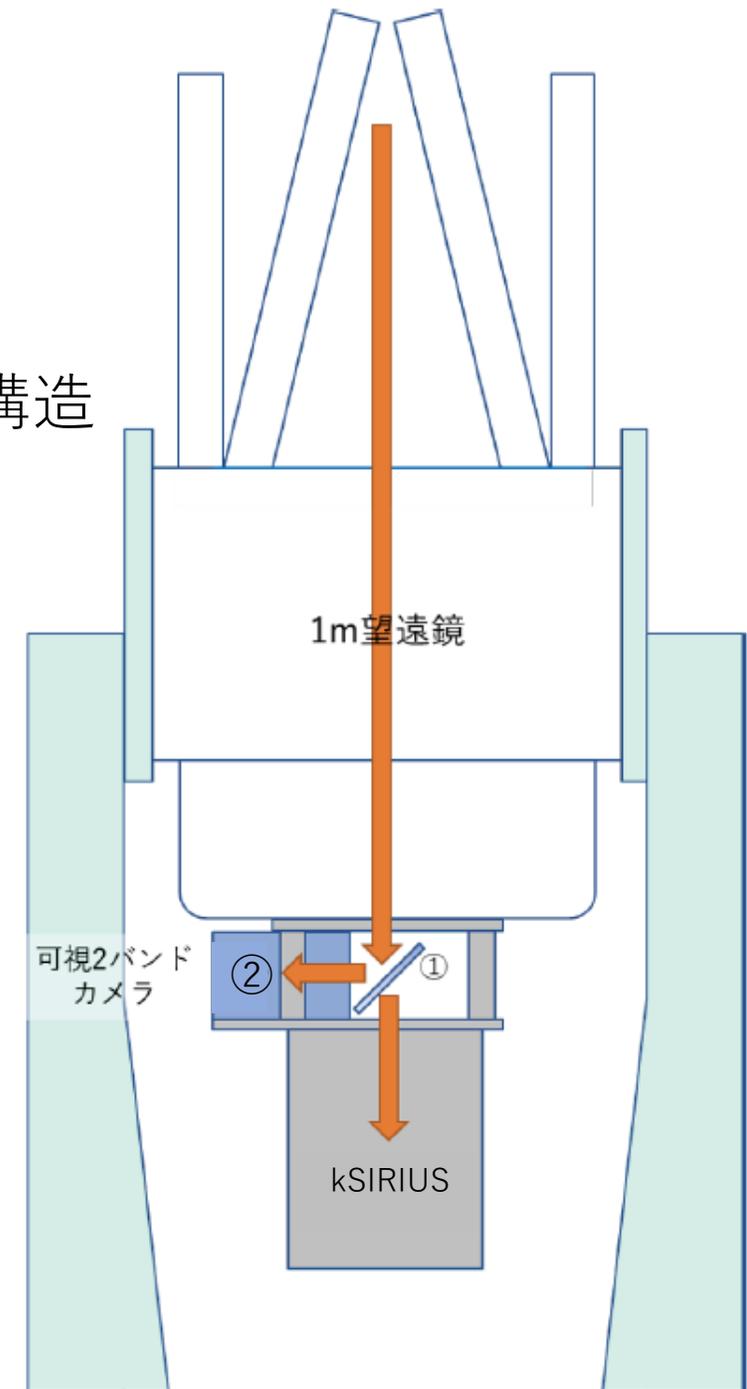
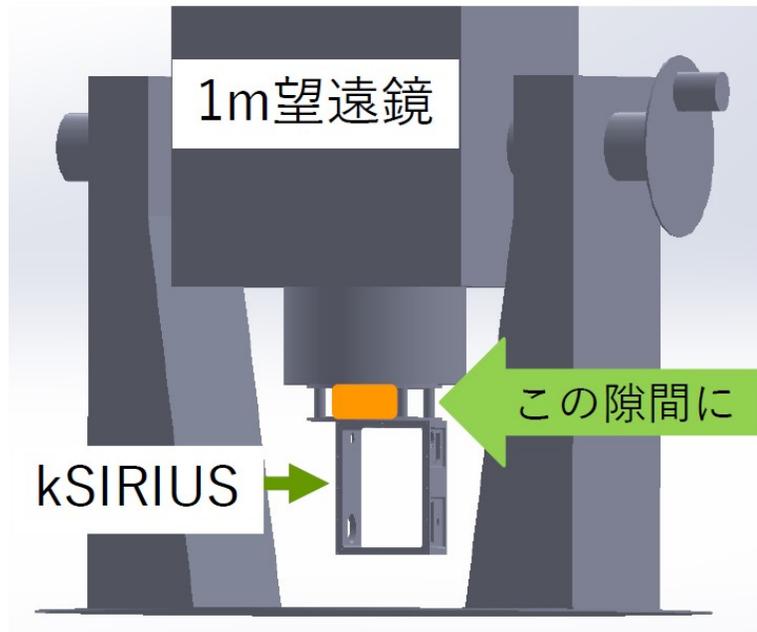
1. kSIRIUSと同程度の「画素スケール」と「視野」を実現する光学系の設置  
→可視カメラ内にF変換レンズを搭載し、望遠鏡焦点距離を12m→8mに変換

	<b>kSIRIUS</b>	<b>可視カメラ</b>
画素スケール	0.52"~0.69"	0.60"
視野	3.6'~10.8'	10.2'

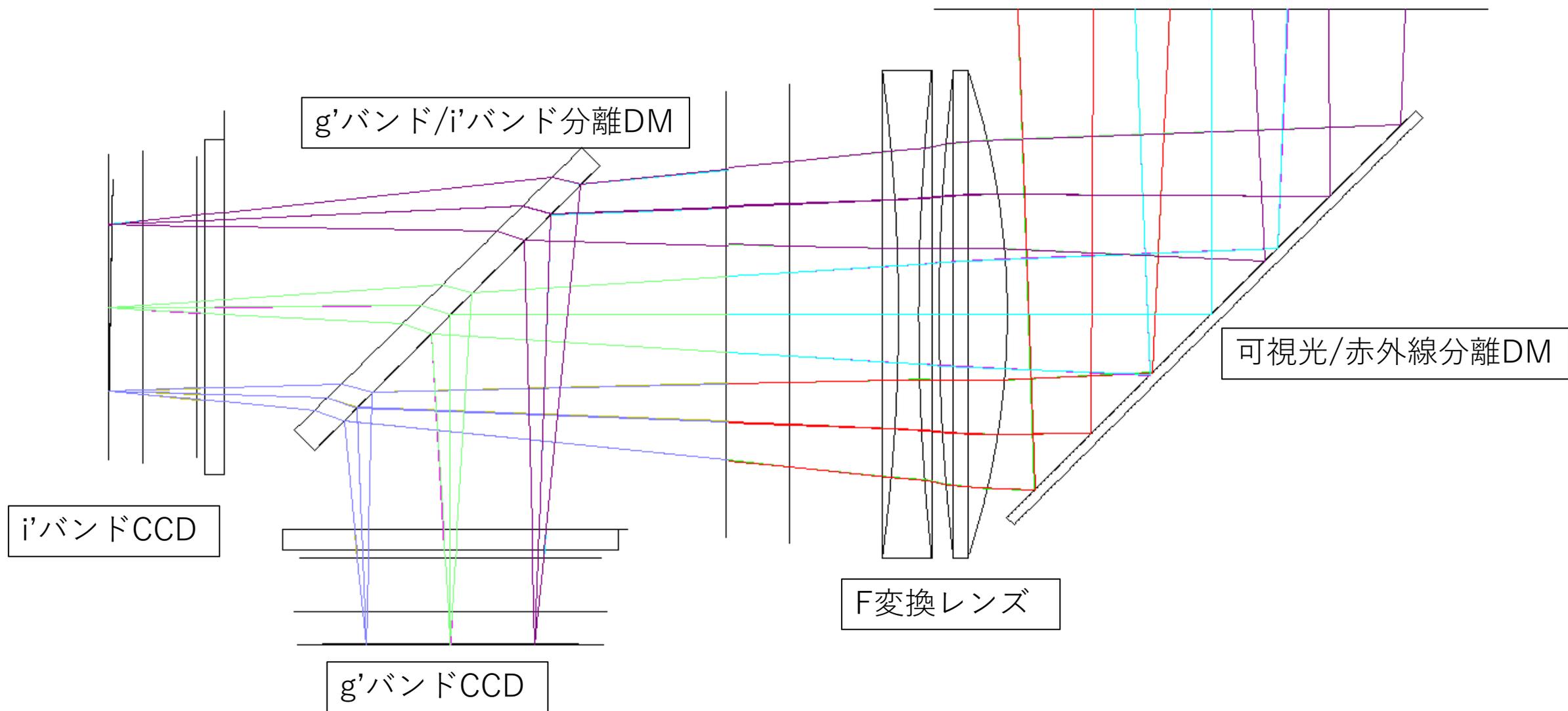
# 可視カメラの特徴②

2. 光学系・機械系共に1m望遠鏡とkSIRIUSの間  
(高さ方向141.9mm)の空間に設置可能なコンパクトな構造

- ①望遠鏡で集光した光をダイクロイックミラー(DM)で「可視光線」と「赤外線」に分ける
- ②DMで反射させた光を可視カメラに入射させる



# 可視カメラ光学系



# 可視カメラの特徴③

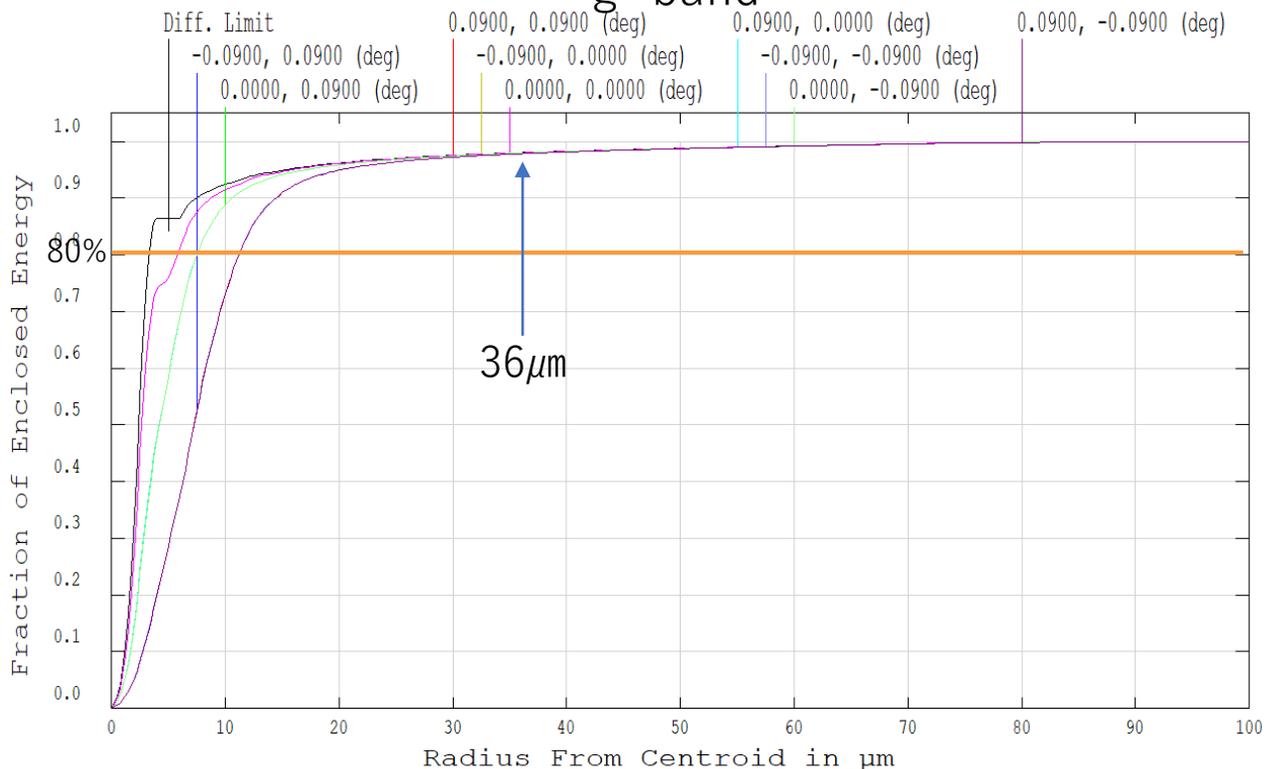
3. 入来観測所の典型的なシーイングサイズ(1.5~2.0")よりも良い結像性能の達成

→入来観測所のシーイングサイズを検出器ピクセル数に変換

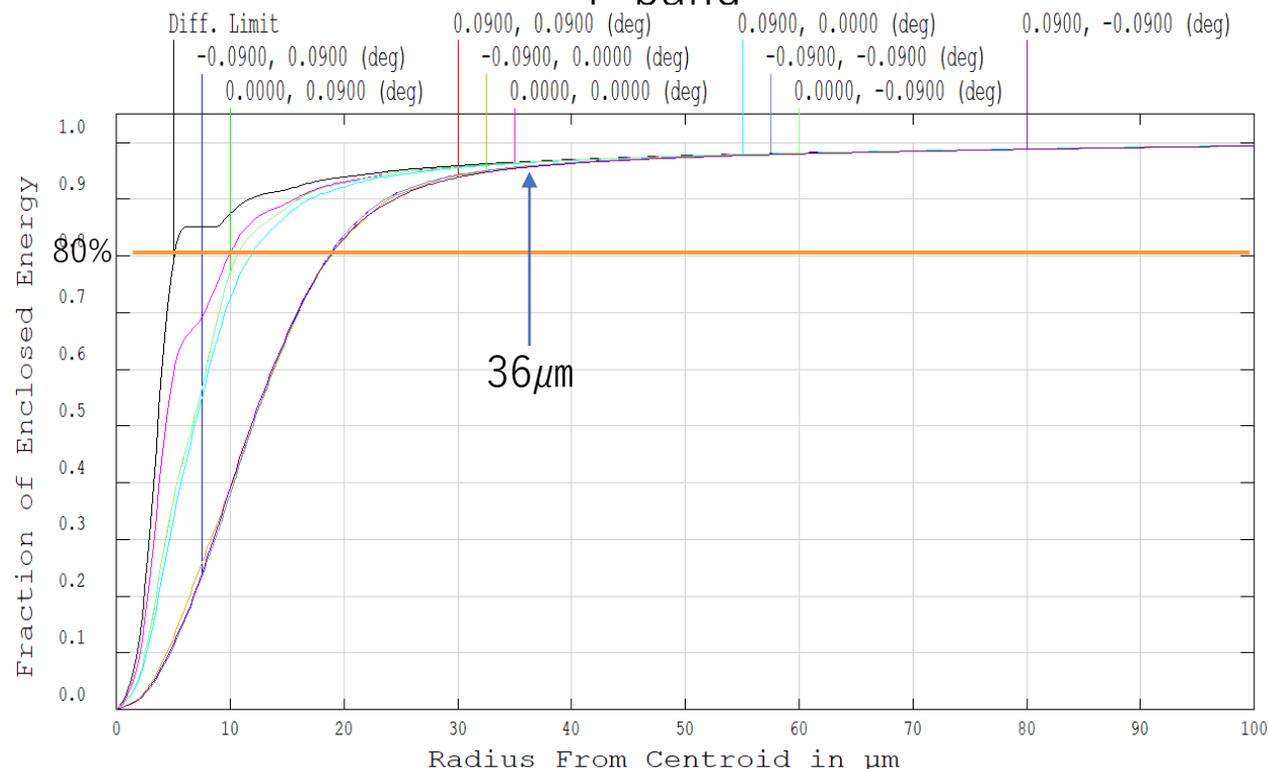
→1.5~2.0"→2.5~3.3pixels (60~79 $\mu$ m)

→検出器の3×3ピクセルに80%以上のエネルギーが到達する光学系の設計

g'-band



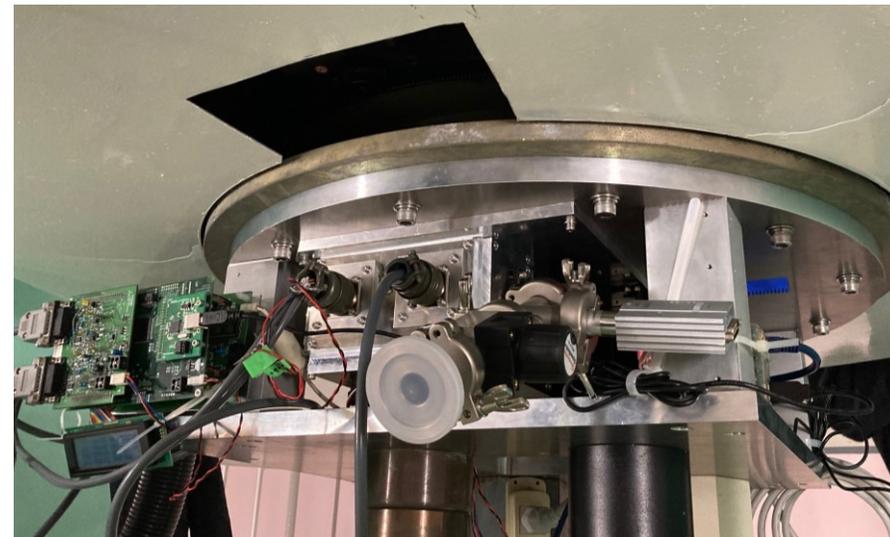
i'-band



# 試験観測

- 期間：2022年12月28日～

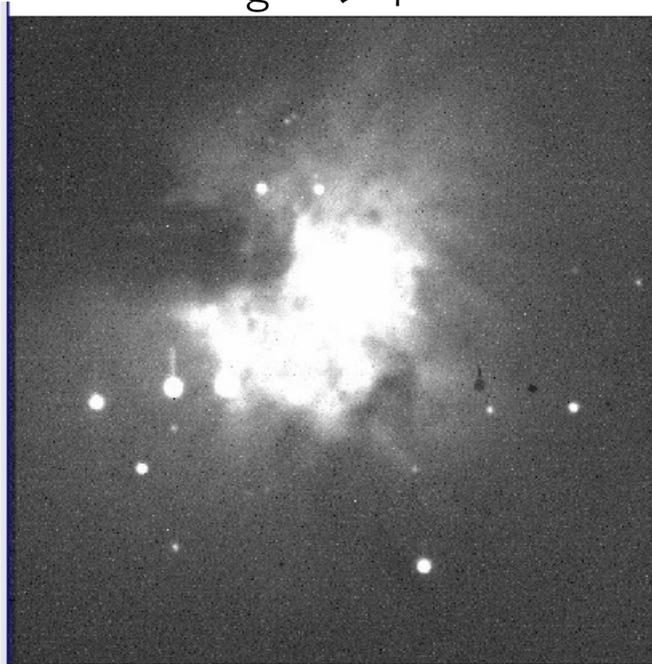
望遠鏡に取り付けた可視カメラ→



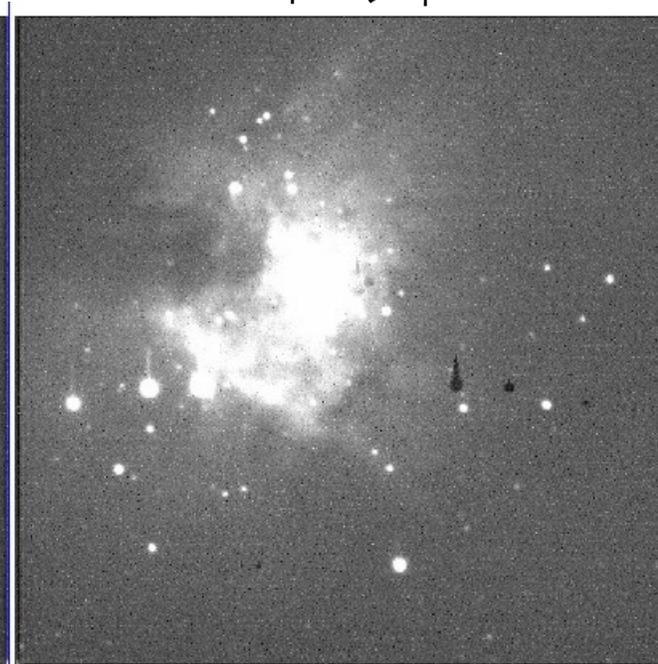
# 性能評価

- 星像サイズ
- スループット
- 限界等級

g'バンド



i'バンド

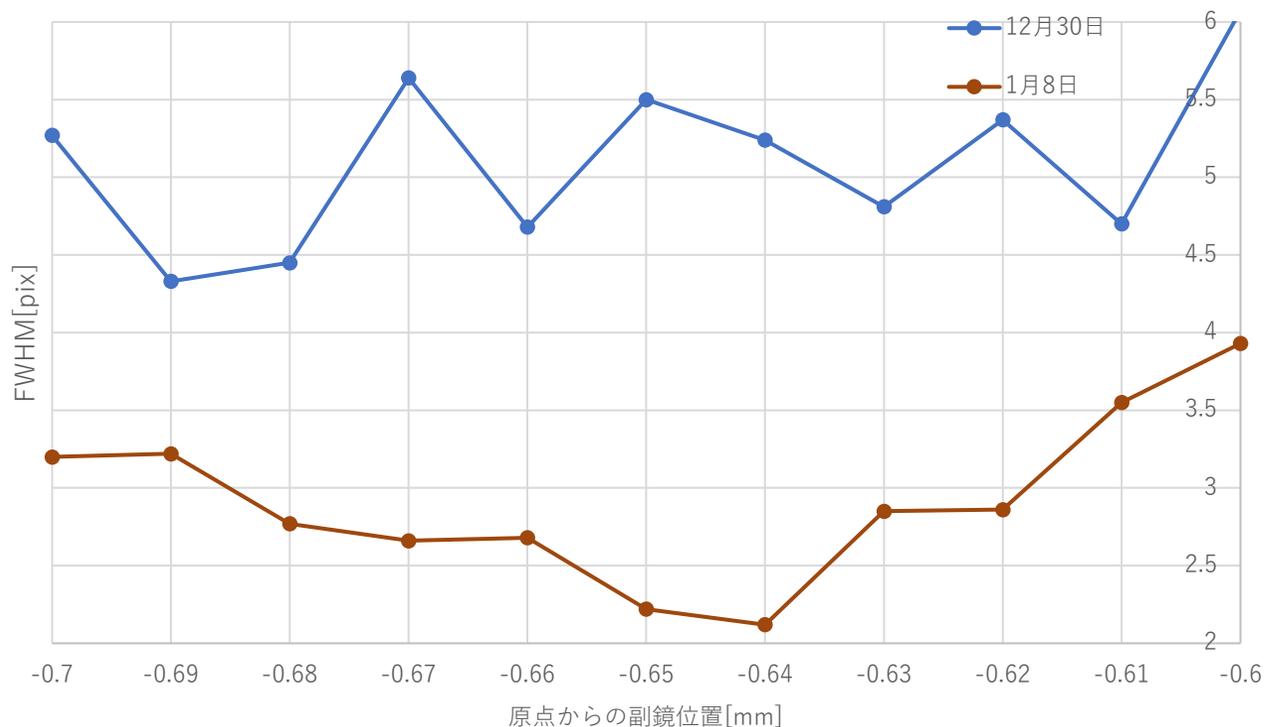


10.2'

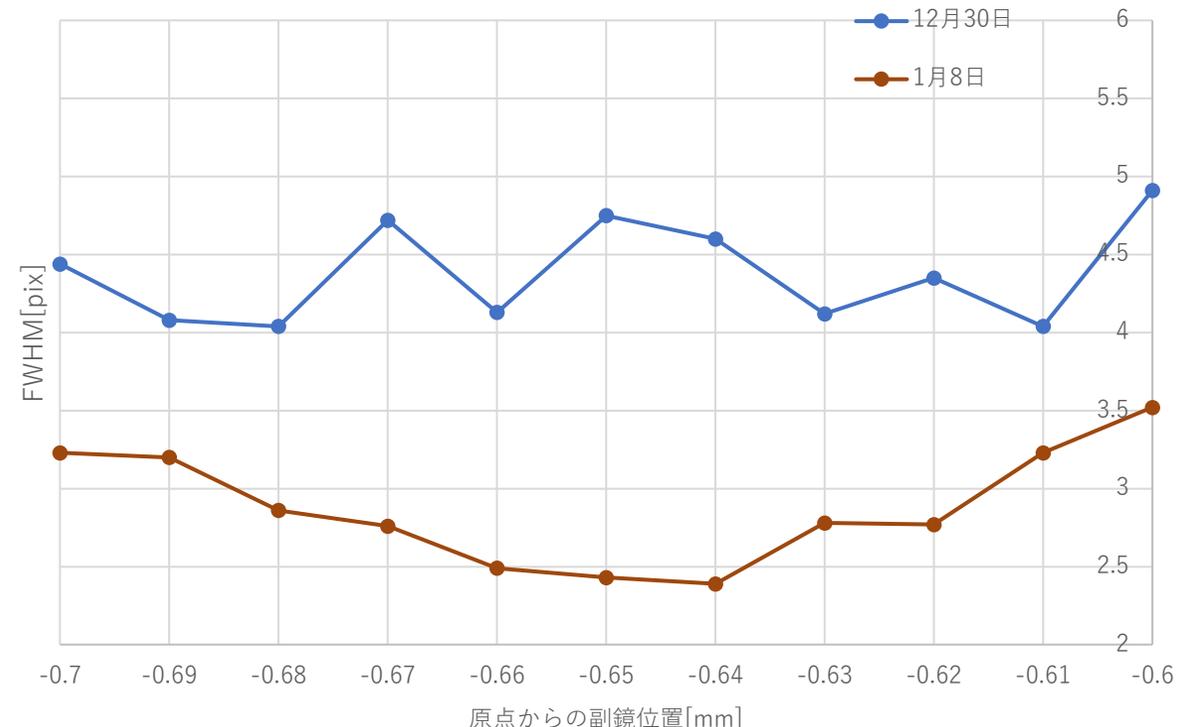
# 星像サイズ

FWHMの値から星像サイズを見積もる

FWHM g'バンド



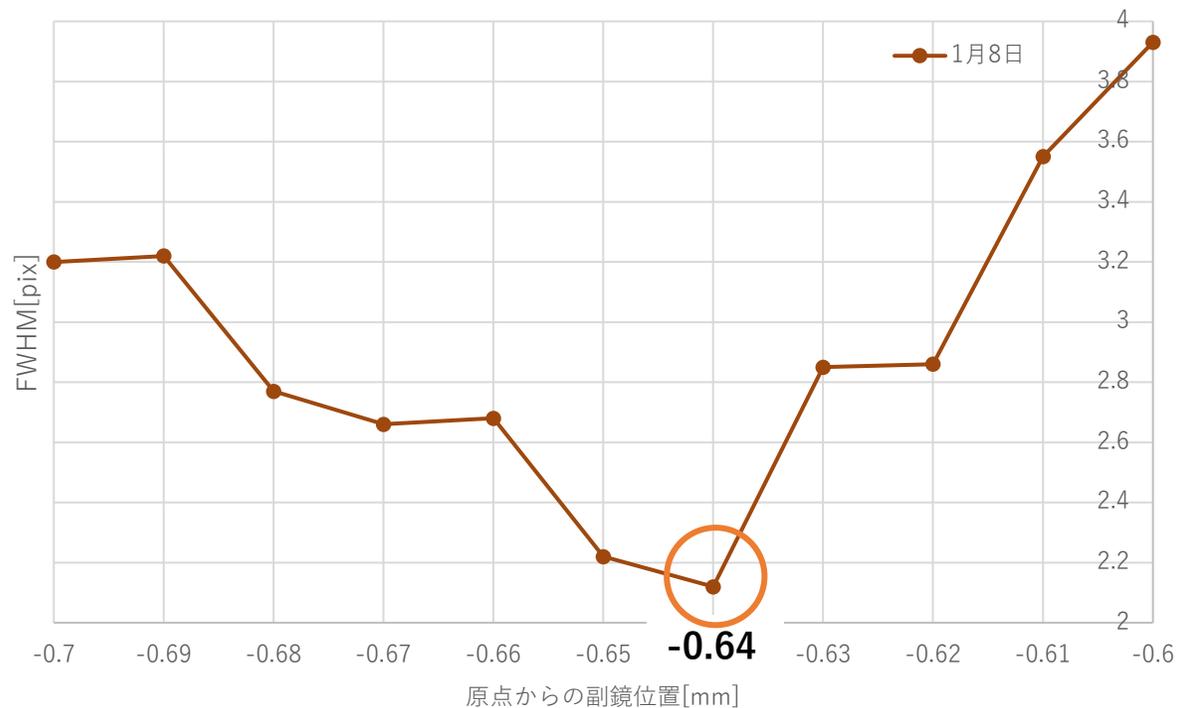
FWHM i'バンド



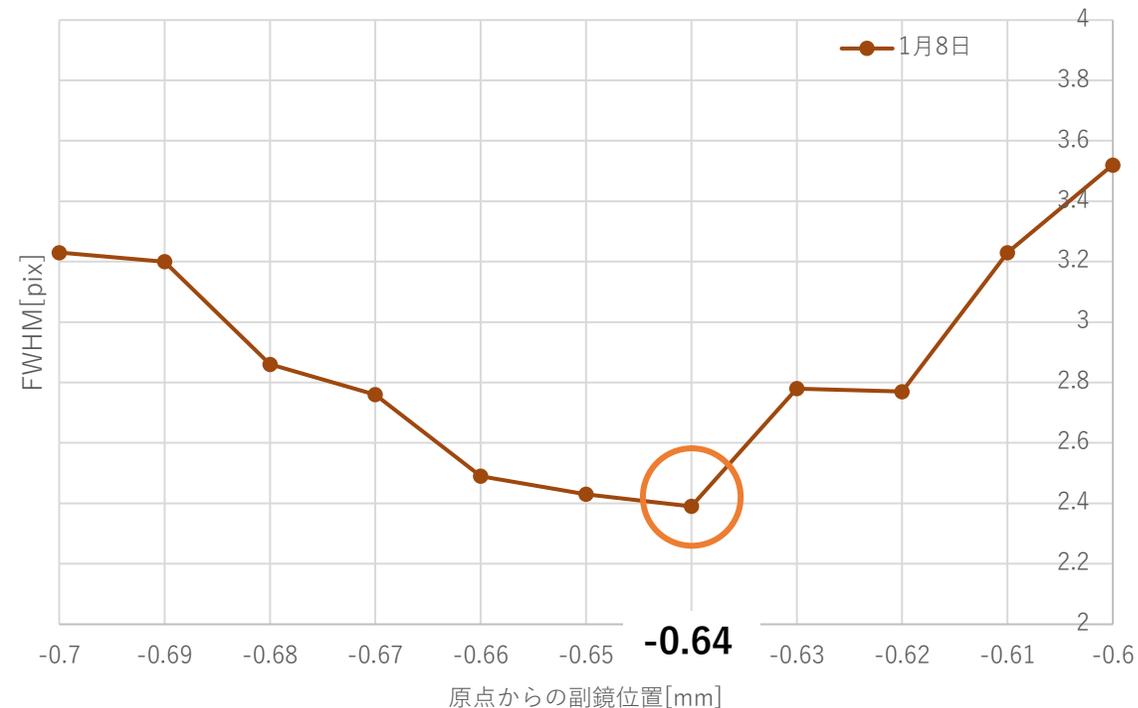
	FWHMの 最小値[pix]	星像サイズ [" ]	入来のシーイング サイズ[" ]
g'バンド	2.12	1.3	1.5~2.0
i'バンド	2.39	1.4	1.5~2.0

# 星像サイズ

FWHM g'バンド



FWHM i'バンド



	FWHMの 最小値 [pix]	星像サイズ [" ]	入来のシーイング サイズ [" ]
g'バンド	2.12	1.3	1.5~2.0
i'バンド	2.39	1.4	1.5~2.0

# スループット

スループットとは

天体からくる光のうち、検出器で検出される電子数の割合

	g'-band	i'-band
大気	60%	75%
望遠鏡	84.64%	84.64%
可視光/赤外線分離DM	95.03%	95.03%
S-BSL7	96%	96%
S-TIM8	95%	96%
g'/i'バンド分離DM	95%	93%
BPF	95%	95%
CCDの量子効率	40%	50%
可視カメラのみ	78.22%	77.38%
望遠鏡 + 可視カメラ	66.20%	65.49%
大気 + 望遠鏡 + 可視カメラ	39.72%	49.12%
大気 + 望遠鏡 + 可視カメラ + CCD	<b>15.89%</b>	<b>24.56%</b>

$$\text{実測値} = I_{obs}/I_{true}$$

$I_{obs}$ : 観測によって算出した電子数[e]

$I_{true}$ : 星の光が全て到達し、電子に変換された時の電子数[e]

$$\text{実測値(g'バンド)} = I_{g'obs}/I_{g'true} = 13.11\%$$

$$\text{実測値(i'バンド)} = I_{i'obs}/I_{i'true} = 20.59\%$$

# 限界等級

限界等級とは  
与えられた条件において観測可能な1番暗い星の等級

S/Nの式

$$S/N = \frac{I_s t}{\sqrt{N_R^2 + (I_s + I_{BG} + I_{DC})t}}$$

$I_s$ :天体から来る信号の強さ[e/s]

t:積分時間[s]

$N_R$ :検出器の読み出しノイズ[e]

$I_{BG}$ :バックグラウンドノイズ[e/s]

$I_{DC}$ :検出器の暗電流[e/s]

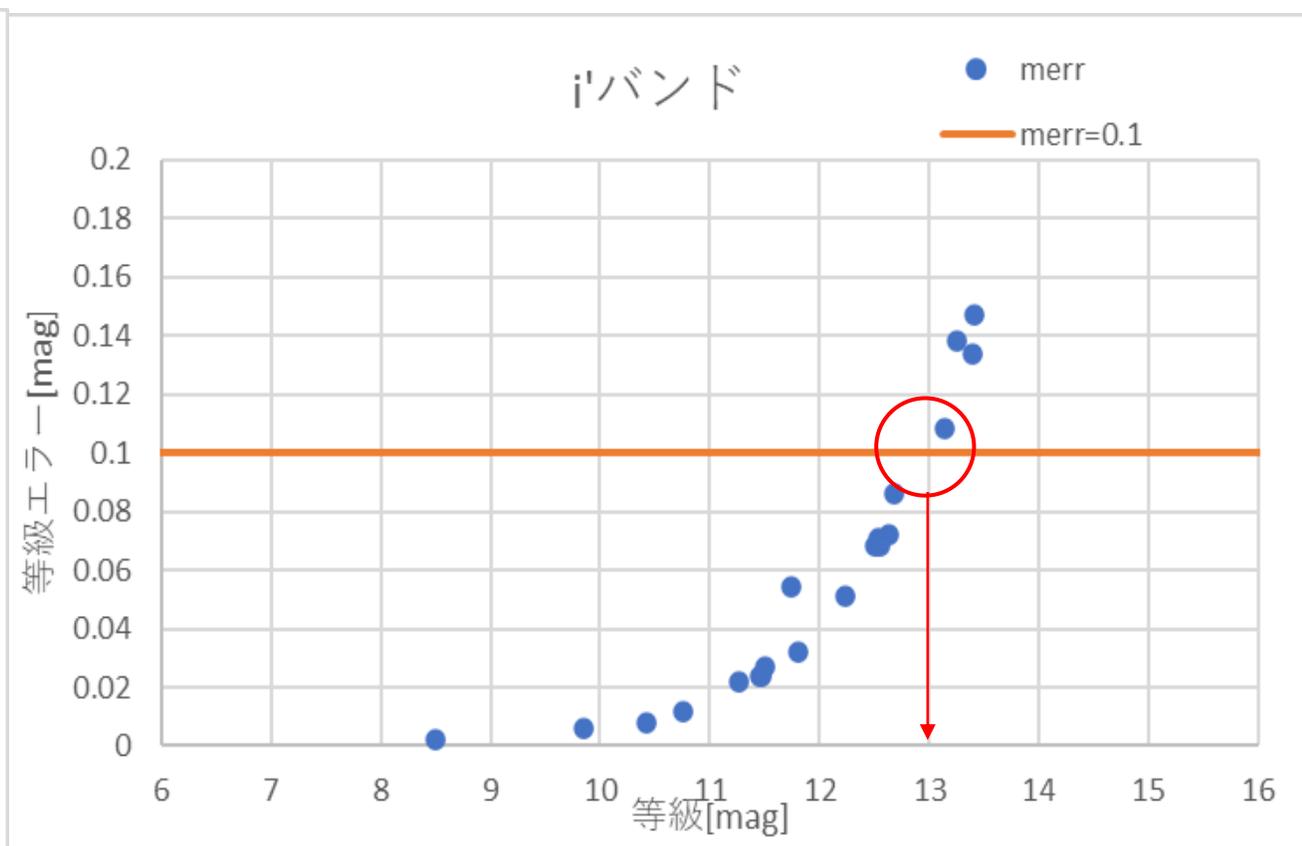
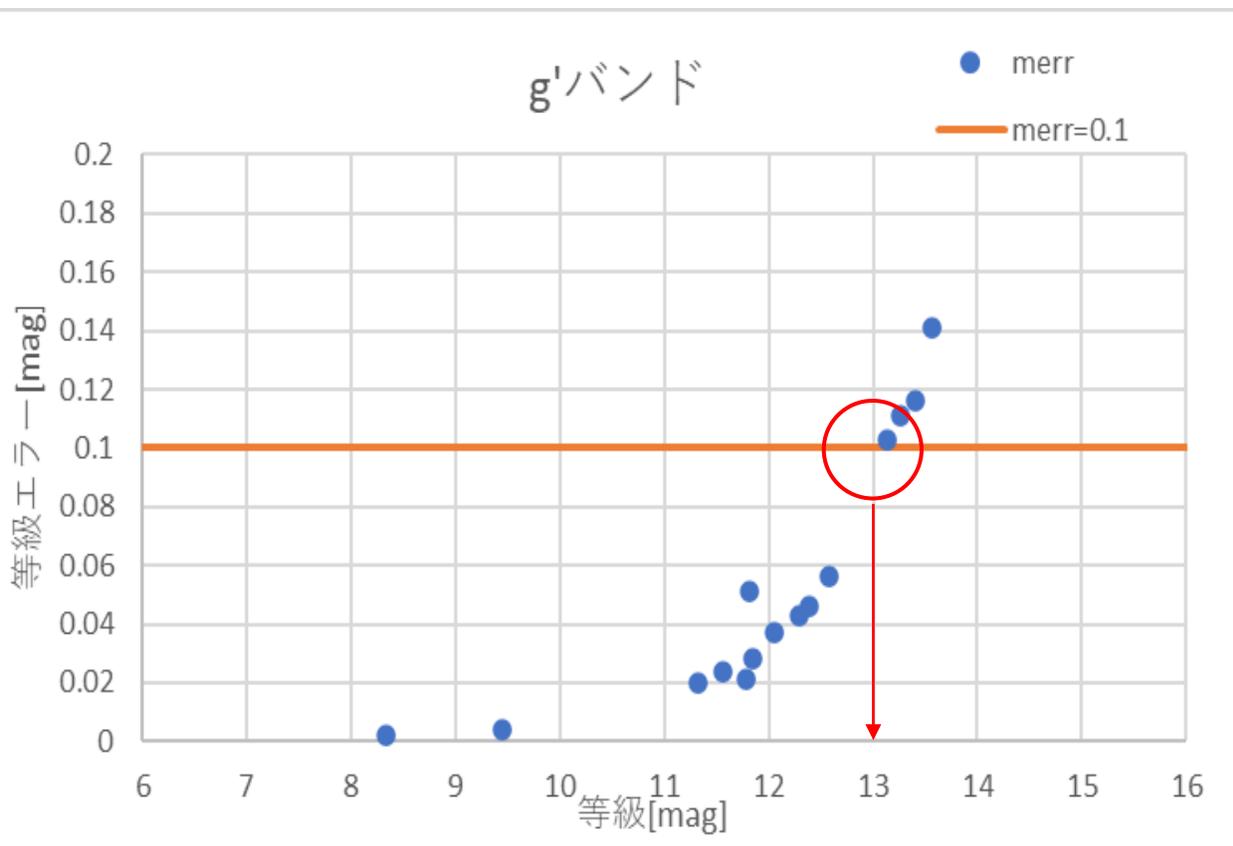
限界等級を求める際のパラメータ

	g'バンド	i'バンド
中心波長[nm]	480	770
波長幅[nm]	130	155
0等星からのFlux Density [ $erg\ s^{-1}\ cm^{-2}\ m^{-1}$ ]	$5.11 \times 10^{-5}$	$1.28 \times 10^{-5}$
光学系透過率[%]	66.2	65.5
Encircled Energy[%]	100	100
量子効率[%]	40	50
背景光[mag/arcsec <sup>2</sup> ]	19.0	18.0
読み出しノイズ[e <sup>-</sup> /pixel]	15	
暗電流@-10°C [e <sup>-</sup> /pixel/s]	10	

10秒積分、S/N=10での限界等級の期待値    g'バンド：**17.5等**    i'バンド：**17.0等**

# 限界等級の算出

PyRAFphotコマンドで得られた等級と等級エラーの関係



積分時間10秒、 $S/N = 10$ の限界等級（実測値）

g'バンド：13.0等      i'バンド：13.0等

# 考察

S/Nの式

$$S/N = \frac{I_s t}{\sqrt{N_R^2 + (I_s + I_{BG} + I_{DC})t}}$$

限界等級が明るくなった原因

- スループット：g'バンド、i'バンドともに、期待値の83%程度
- 暗電流
- 読み出しノイズ：期待値より高い

1pixel当たりg'バンド $532e^-$ 、i'バンド $467e^-$   
(実験室実験では約 $30e^-$ )

→値を実測に合わせて限界等級を改めて見積もった

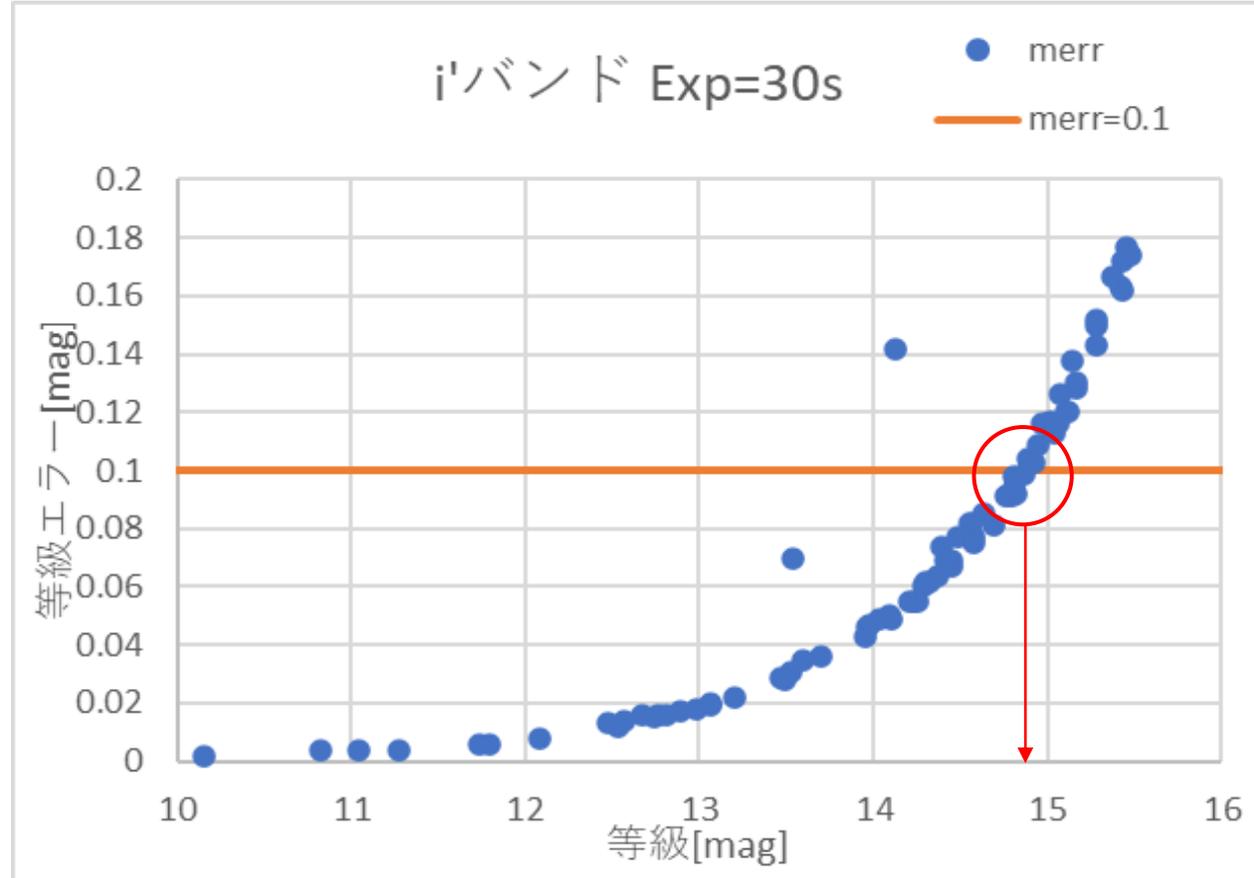
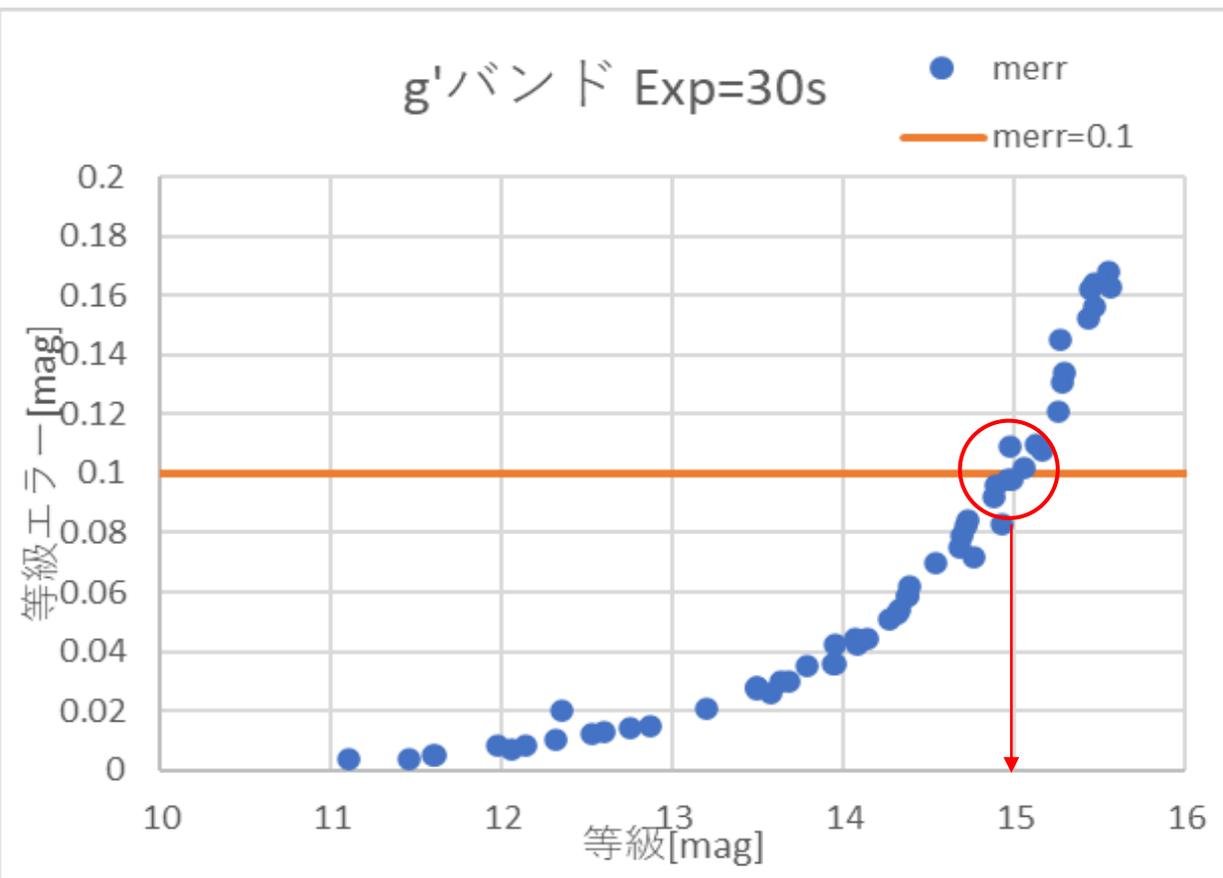
限界等級再計算の値 (10秒積分、S/N=10)

g'バンド：13.6等 i'バンド：13.6等

読み出しノイズを改善することで、より暗い天体まで観測できる可能性がある

# 限界等級の算出（改善後）

PyRAFphotコマンドで得られた等級と等級エラーの関係



積分時間30秒、 $S/N = 10$ の限界等級→

	g'バンド	i'バンド
実測値	15.0等	14.8等
期待値	18.4等	18.0等

# 5バンド同時撮像に向けて

kSIRIUS、可視カメラを合わせて可視近赤外で5バンド同時撮像を行う

各装置の駆動部分

- 可視カメラ→CCD + シャッター
- kSIRIUS→CMOS

⇒読み出しのタイミングが重要

# タイムチャート

可視カメラ



kSIRIUS



露出時間 + 12秒  
(最短露出時間2秒)

例えば… 10秒積分が22秒間隔で撮影できる

# まとめ

- 可視2バンド同時撮像装置の開発、望遠鏡に取り付けての性能評価を行った。
- 2022年12月28日～試験観測を行い星像サイズ、スループット、限界等級を求めた。
- 星像サイズ：g'バンド1.3"、i'バンド1.4"  
シーイングサイズ(1.5~2.0" )より小さい値が得られた。
- スループット：想定値15.89% (g'バンド)、24.56% (i'バンド)  
実測値13.11% (g'バンド)、20.59% (i'バンド)
- 限界等級：実測値13.0等、期待値より4~4.5等明るい  
スループット、暗電流、読み出しノイズを実測値に改めると13.6等
- 5バンド同時撮像を可能にするコマンドを作成する。