

1. 概要

村瀬 洸太郎、伊藤 洋一(兵庫県立大学)

なゆた望遠鏡のMALLSは、可視光の中低分散ロングスリット分光器である。エシェル回折格子を組み込むことで、波長分解能が35000程度の高分散分光観測が可能となった。しかし、現在使用しているCCDカメラはFLI社の2000×2000 pixelの素子を用いたカメラなので取得できる波長範囲が広くはない。また、-40℃までしか冷却ができず、暗電流が大きい。そこで、我々はe2V社から261-84というCCD素子を購入した。この素子は2000×4000 pixelで、波長400 nmから900 nmにわたって80%以上の量子効率を実現している。今迄にこのCCD素子を収納するデュワーを製作し、シャッター、真空計、温度計を取り付け、CCD素子を組み込み、真空・冷却試験を行った。製作したデュワーは冷却時に 1.0×10^{-6} Torrの真空に到達した。また、CCDチップの搭載場所で-100℃を達成した。CCD素子の駆動回路と読み出し回路はMESSIA6+Mfront2を使用し、Linuxで制御する。運用に向け安定した冷却を行うことを目的に冷凍機の交換を実施した後、なゆた望遠鏡のナスミス台に設置し試験運用を行った。試験運用時に観測に向けたソフトウェアの開発も併せて行った。更新した冷却性能の評価及び結像性能に対する検証を報告する。

2. 可視光分光器MALLS

・MALLS(Medium And Low-dispersion Long-slit Spectrograph)は、兵庫県立大学西はりま天文台が持つ可視光中低分散分光器である。MALLSには波長分解能ごとに3つの観測モードを搭載している

表. 現在のMALLSのスペック(幅1.2"のスリットを用いた場合)

	Grating (本/mm)	波長範囲 (Å)	波長分解能
低分散	150	5700	~600
中分散	1800	400	~7500
エシェル	31.6 +400	2000	~35000



なゆた望遠鏡(赤枠がMALLS)

3. MALLS搭載のカメラ

現在MALLSにはFLI社のCCDカメラ(PL23042-1-B)が搭載されており、e2V社製の2048×2048 pixelのチップ(CCD230-42)を使用している。以下の3つの問題点・改良点のために、e2V社製の新しいチップ(CCD261-84)を使用し真空引き・冷却可能なカメラ容器を開発した。

1. 暗電流

FLI社製のカメラ容器では冷却が十分ではなく(最低で-40℃)暗電流が生じるため長時間の露出に対してS/Nが悪くなる。これを解決するために暗電流が無視できる-100℃にCCD素子を冷却した。この場合に生じる暗電流は1時間に $75e^-/pixel$ 程度と予想される。

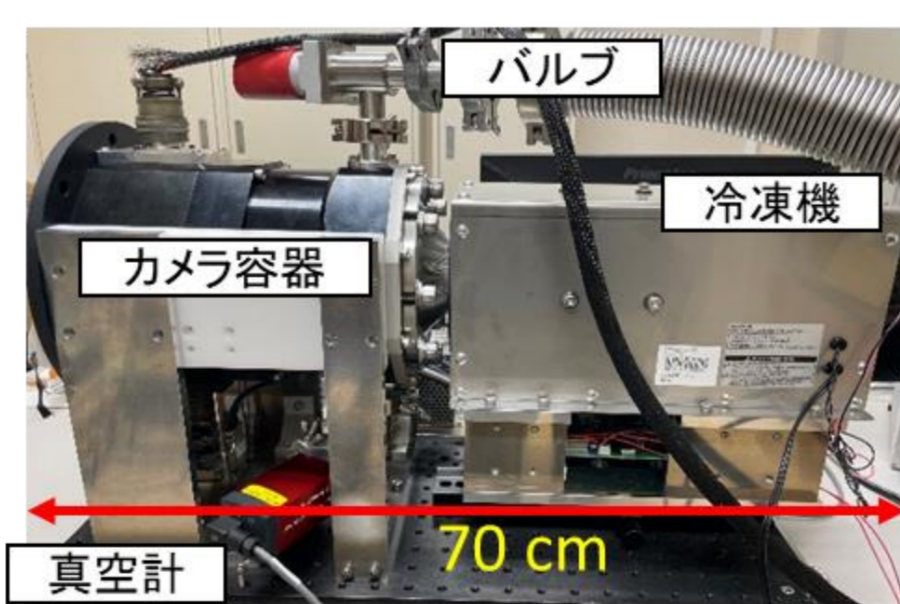
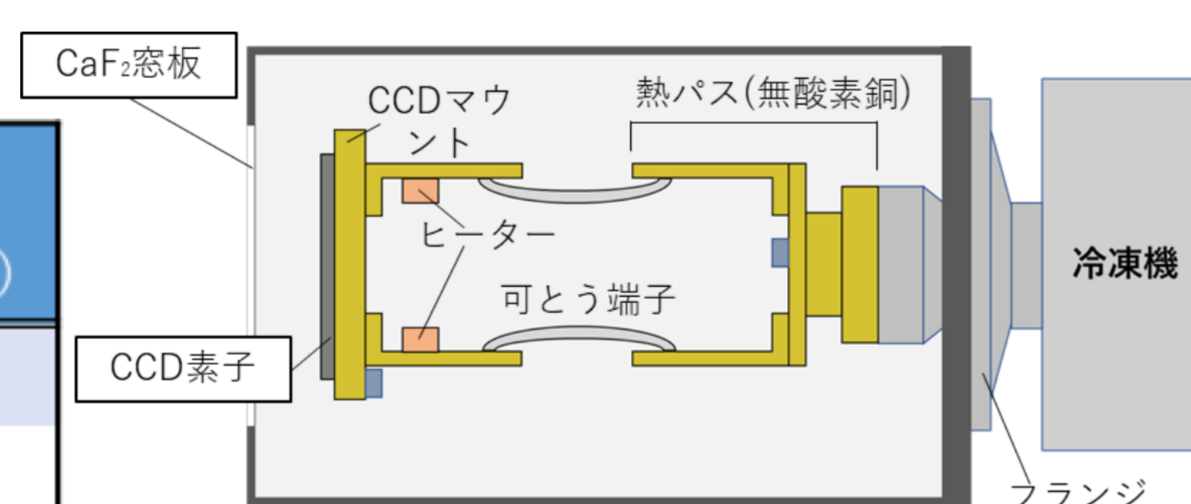
・実験室でのCCD素子の性能評価(井上.2020)

- ・暗電流は約10分の1にまで減少した。
- ・地上観測での主なノイズ源には、天体からの入射光のポアソンノイズ、背景光のポアソンノイズ、暗電流、読み出しノイズがある。暗い天体の分光では、暗電流や読み出しノイズのS/Nへの寄与が大きくなる。
- ・新CCDカメラを使えばそれらのS/Nが大幅に向上すると考えられる。

表. 2つのCCD素子の性能の比較(井上. 2020)

	新CCD素子	現在のCCD素子 (-25℃カタログ値)
Linearity (%)	99.3以上	99以上
Gain (e^-/ADU)	2.8	2.2
読み出しNoise (e^-)	15.2	12.3
読み出し時間 (sec)	31.3	30
暗電流 ($e^-/pixel/hr$)	74.3	720

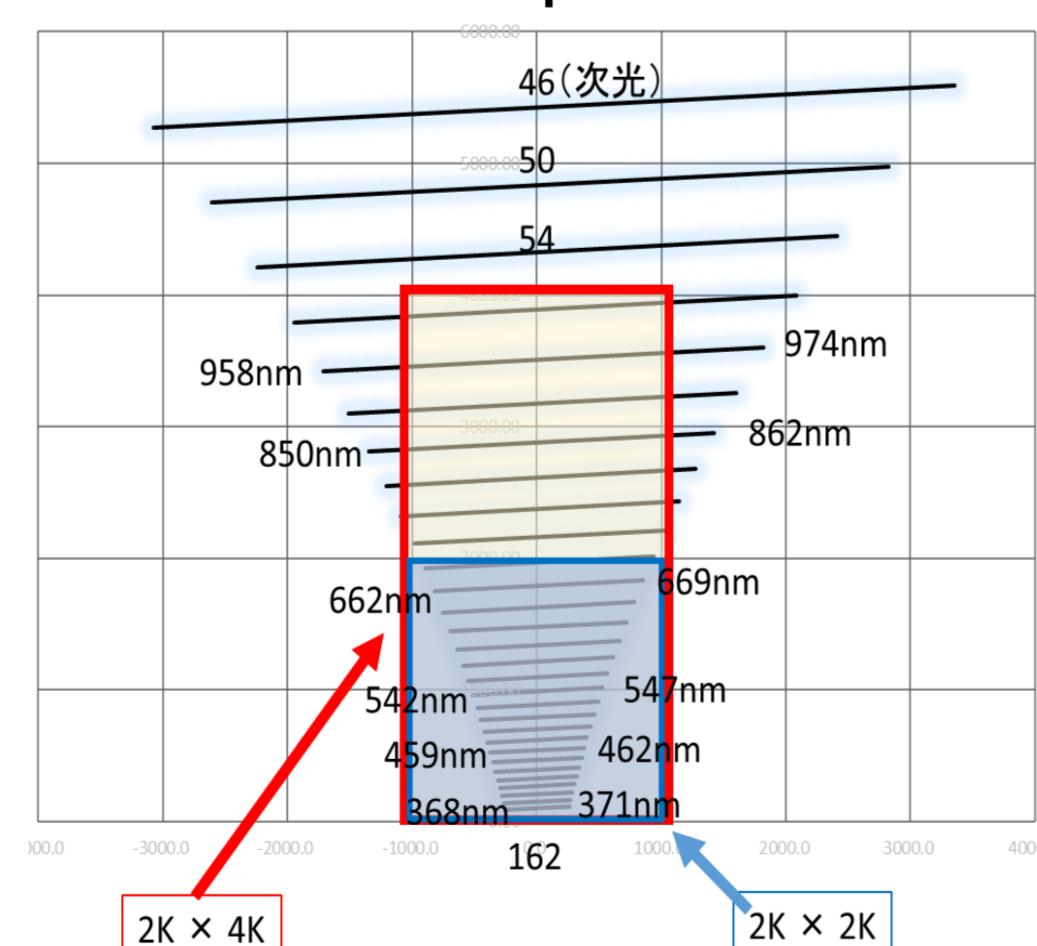
図. カメラ容器の模式図および外形



2. 波長範囲の拡大

- ・ CCD素子の面積を拡大し観測波長範囲を広げる
- ・ CCD素子のサイズは2048×2048 pixel ⇒ 2048×4096 pixel
- ・ LongSlitモードでは波長範囲が約2倍
- ・ エシェルモードでは右図の通り拡大

図. エシェルモードでのスペクトルの広がりに対応するCCD素子の大きさ
スペクトルは4本おきに簡略



3. 残光問題

現行のCCD素子で観測する際、波長校正ランプやFlatランプなどの強い光を導入後、長時間の露出を行うと画像に残光が残る問題がある。これは読み出し時のwipe、またはCCD素子に問題があると考えられる。

4. 目的

現行のCCDカメラの更新を行い、MALLSの性能向上を達成する。なゆた望遠鏡に搭載し、試験運用を行うことで性能を評価をする。

5. 測定結果

A. 真空と冷却

CCDカメラ及び各種機器をなゆた望遠鏡のナスミス台に搭載した後、真空・冷却試験を実施した。搭載前の実験室での実験では真空引きを停止した後も一定の真空度を維持することができたが、搭載後は維持が難しくなった。これはエンクロージャー内の温度に依存して冷凍機の性能が悪化し、冷却が不十分なことによる真空の悪化であることが分かった。これに対し、スポットクーラーを導入し装置周りの冷却を行うことで安定運用が可能となった。

B. カメラフォーカス

波長校正ランプを用いてフォーカスの調整を行った。各輝線に対してその断面はガウス関数を取り、そのFWHMが3 pixel以下になることが必要である。CCD素子又はカメラレンズの位置を前後させフォーカスを調整した。

右下図はCCD素子の基準からの位置とFWHMの関係を示す。

これより、フォーカスを中心で合わせた際にその周囲でフォーカスが合わないことが分かった。また、CCD素子上任意の点でのFWHMの最小値は2.4 pixel程度と、現行のカメラの1.8 pixelより大きくなった。

この数値から導出した波長分解能 $R(\times)$ は5500~13000であり同条件で撮影した現在の波長分解能16000を下回った。

以上の結果から光学系に問題があり望遠鏡からの光を補正するレンズが必要と分かった。

$$\times \text{ 波長分解能 } R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda}$$

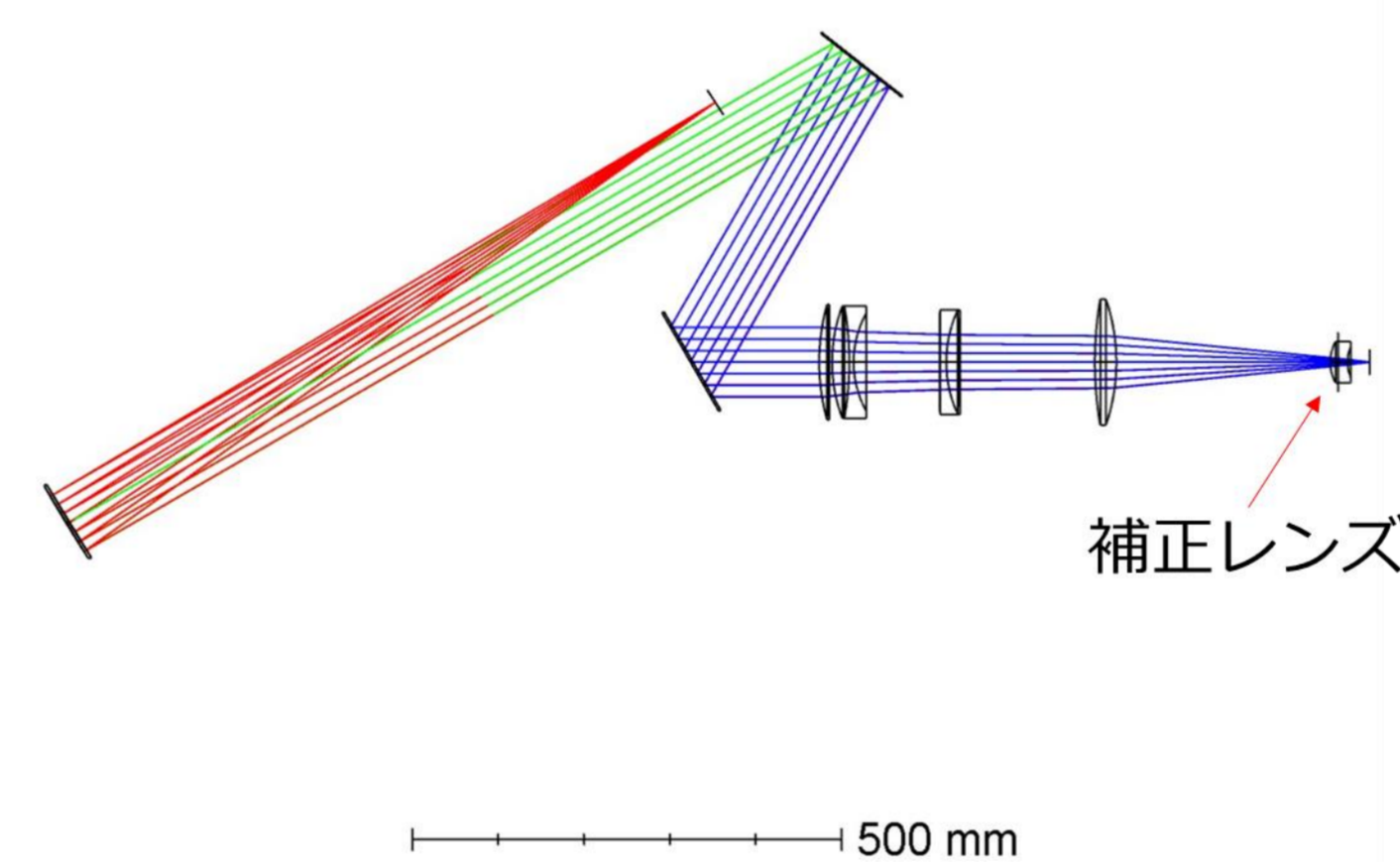


図. ZEMAXを用いた光路のシミュレーション

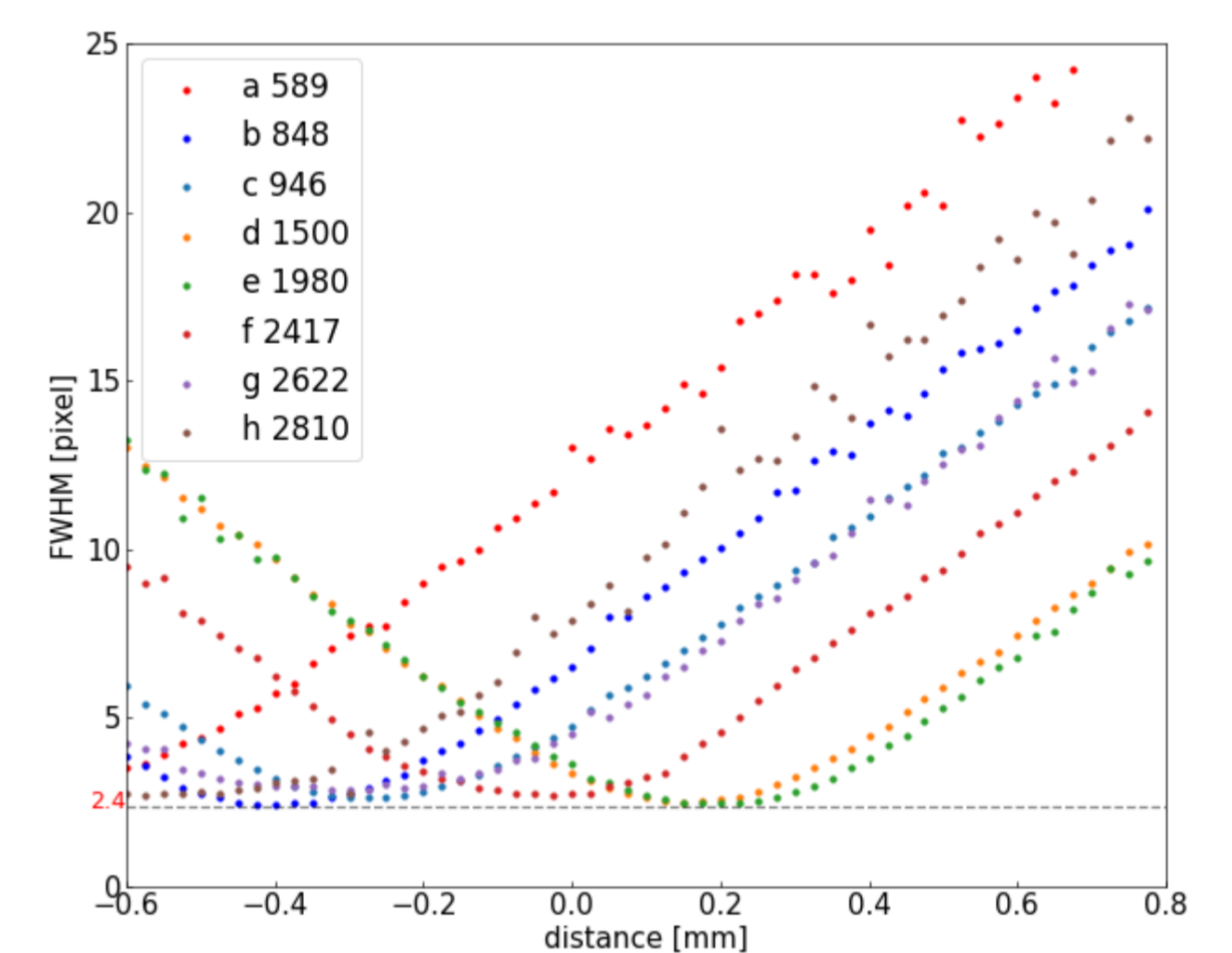


図. カメラフォーカスとFWHMの関係
凡例は輝線のy座標

6. 試験観測

2021年7月6日、LongSlitモードとエシェルモードの観測を行った。フォーカスがっていないため外側に向かって像が広がっている。

<ロングスリットモードの画像の測定条件>	
対象天体	Arcturus
積分時間	10秒
Grating	1800
中心波長	6563 Å

<エシェルモードの画像の測定条件>	
対象天体	Vega
積分時間	180秒

※フォーカス未調整のためS/Nは未計測

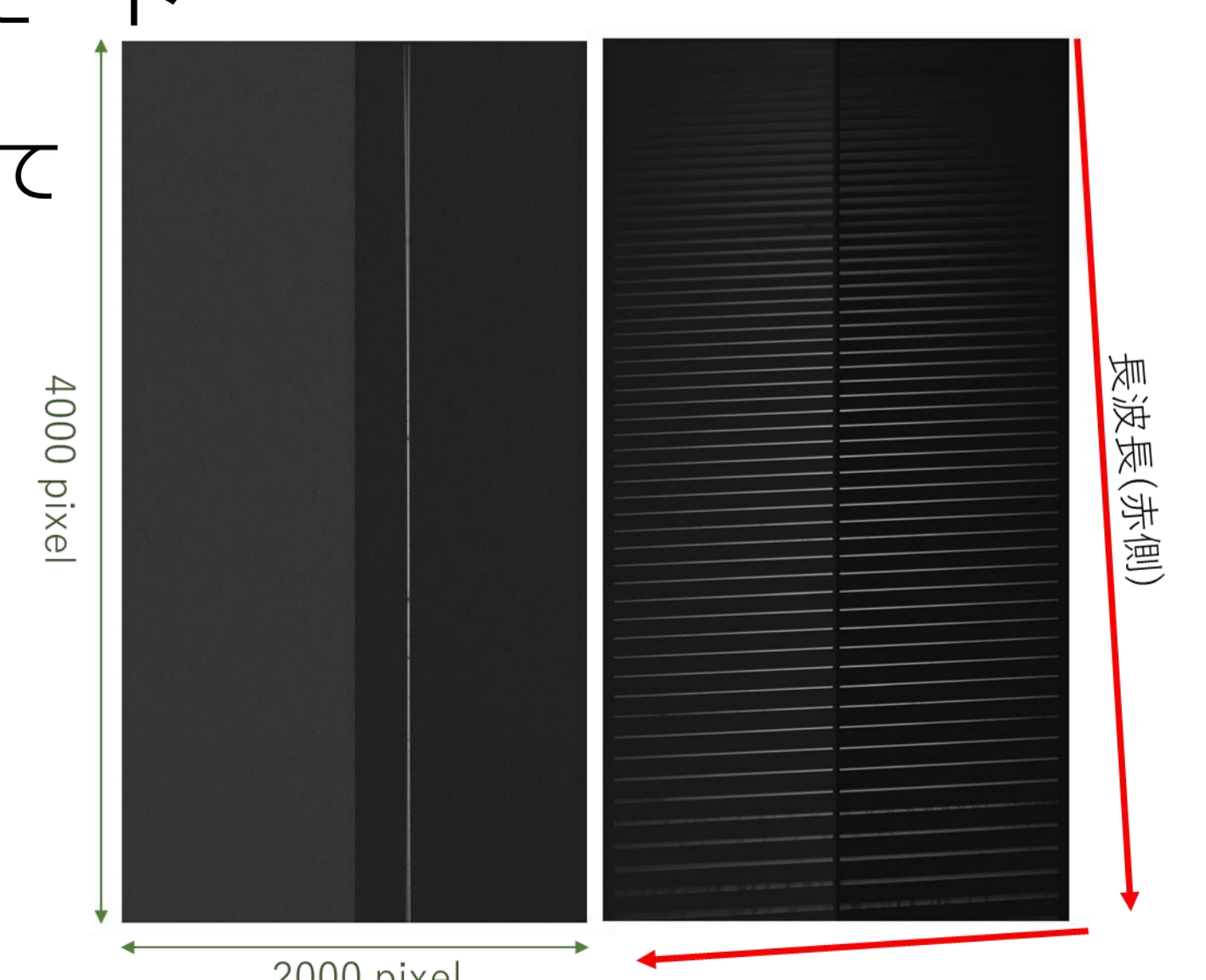


図. ロングスリットモード(左)とエシェルモード(右)の生画像

7. 今後の課題

- ・ 光学系への補正レンズの組み込みを行いフォーカス問題を解決する。
- ・ カメラ容器内に分子吸着剤を導入する。
- ・ シャッターをPCから直接制御するよう変更し正確な露出をかけられるようにする。