

# 高速分光システム 透過率および限界等級について

磯貝

2008 08/20

## ○内容

0: はじめに

1: 系全体の効率測定

1.1: slitなしの2素子プリズム分光

1.2: slitなしのグリズム分光

2: 限界等級見積もり

## 0: はじめに

- ・望遠鏡、大気、CCDカメラの量子効率も含めた系全体の効率と限界等級の推定を行う。
- ・観測対象は測光分光標準星 HR5501 (B9.5V, Vmag=5.673)  
+  $\alpha$ として、HR4963(A1IV, Vmag=4.381)
- ・今回の効率および限界等級の計算に用いた観測データ(天体)は、全て  
2008/5/31 (測光夜、主鏡蒸着直前)  
に取得したものである(フラットは別の日に取得)。
- ・データ取得後、スリット位置の微調整を行っている。  
→ 現在の設定はグリズム分光の観測波長域で今回のレポートと多少の違いあり。
- ・ダークは天体と同じ積分時間ではなく、全て33ms積分のフレームで代用している。  
(ダークカウントがかなり高いことに気付く前だったため)
- ・次ページ以降では、生画像や整約途中の画像・スペクトルなどを掲載しながら、  
効率と限界等級の見積もり結果をレポートする。

## ○ 結果のまとめ

### ・効率:

系全体(大気、望遠鏡、装置、CCD量子効率全て含む)の効率のピークは

2素子プリズム:  $\sim 13\%$  (17%) @  $\lambda = 640\text{nm}$

グリズム:  $\sim 9\%$  (12%) @  $\lambda = 610\text{nm}$

※ ()の値は地球大気外での効率

← 予想値の70-80%程度。

### ・限界等級(※):

それぞれの観測モードでの限界等級Vmag(10秒積分、 $\lambda = 550\text{nm}$ でS/N=10)は

2素子プリズム: スリットなし 15.7 mag

グリズム: 0.2mm-slit 12.4 mag

(※ダークカウント=10ADU/s, 読み出しノイズ=200[e-](いずれも実測値)を使用)

# 1: 系全体の効率測定

## 1.1: 2素子プリズム (slitなし分光)

### ・観測:

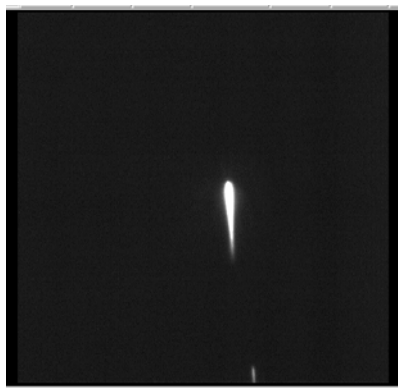
- ・観測日: 2008/05/31
- ・測光分光標準星 HR5501
- ・観測モード: slitなし
- ・積分時間: 250ms x 10枚
- ・ダーク: 33ms で代用
- ・フラット: 取得日: 05/29, 200ms x 10枚

### ・整約の手順(波長較正以外 プリズム、グリズム分光共通)

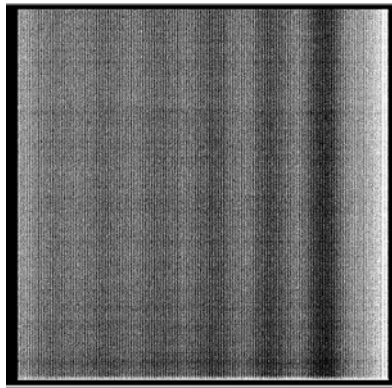
- ・1次処理
  - ・ダーク引き
  - ・ピクセル感度ムラ補正
  - ・画像回転 (rotate, 時計方向に $1.99^\circ$ , sinc関数使用)
  - ・グローバルパターン補正
- ・スペクトル1次元化(apall)
- ・波長較正(特殊な手法、詳細は分光器HP参照)
- ・flux較正

### ・生画像

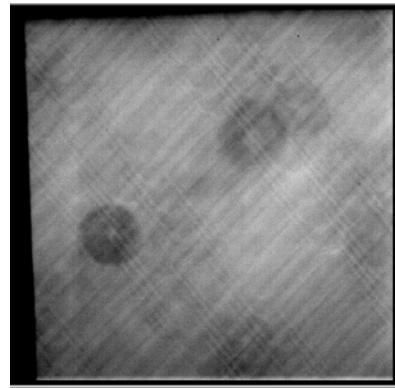
・天体スペクトル



・33msダーク(10枚の平均)



・フラット(天体と同条件、10枚平均)



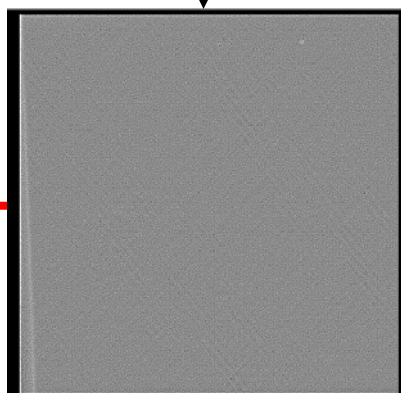
boxcar: 3x3 を使用

1次処理

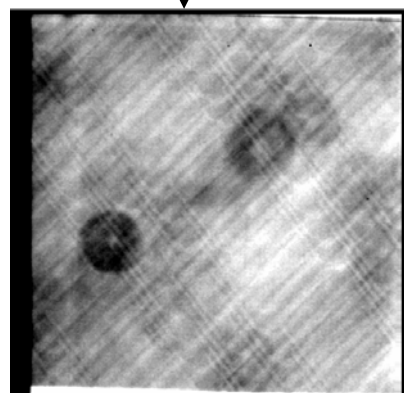
回転補正:

rotate,  $-1.99^\circ$

補間関数=sinc



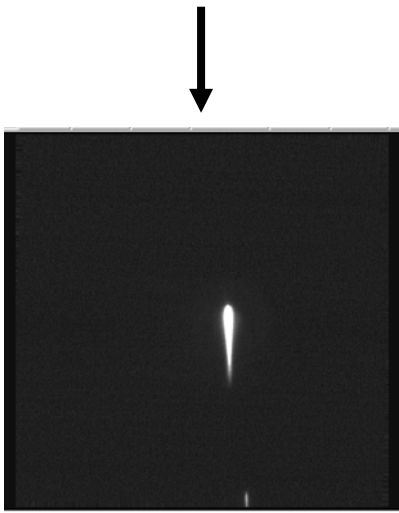
ピクセル感度ムラ補正用  
フレーム



グローバルパターン補正用  
フレーム(回転補正済み)

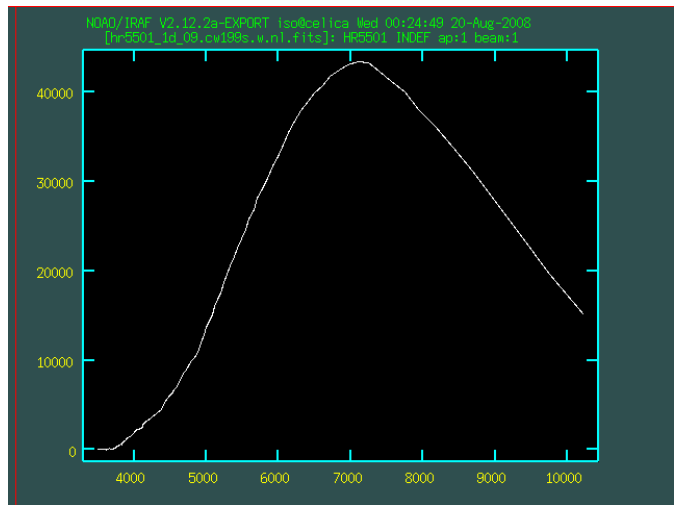
response

・天体スペクトル1次元化(波長較正後)



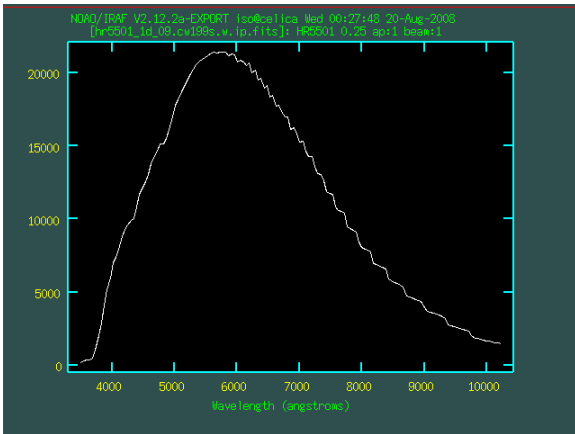
1次処理+回転補正後の  
天体スペクトル

apall



dispcor

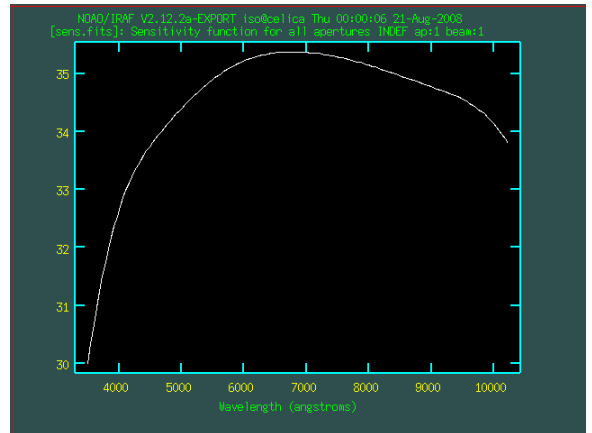
・波長幅を線形化



1ピクセル当たりの波長幅を一定にする

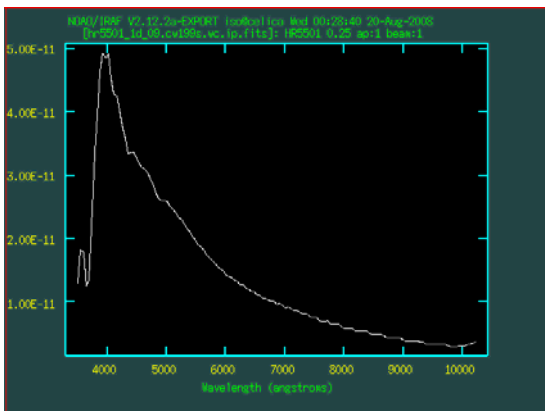
・カウントフラックス比曲線  
( $2.5 \log\{\text{カウント} / \text{FTB}\}$ ※)

standard  
sensfunc



calibrate

・フラックス較正後の天体スペクトル



※ F: 天体のフラックス $F(\lambda)$  (カタログ値)

T: 積分時間(=8s)

B: 1pix当たりの波長幅( $\text{\AA}$ )

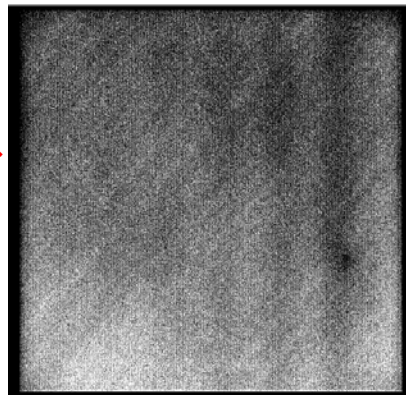
## 1.2: グリズム (slitなし分光)

### ・観測:

- ・観測日: 2008/05/31
- ・測光分光標準星 HR5501
- ・観測モード: slitなし
- ・積分時間: 8s x 10枚
- ・ダーク: 33msで代用
- ・フラット: 05/29, 400ms x 10枚

ダークカウントが高いので、  
同じ積分時間のダークを  
使用すべき

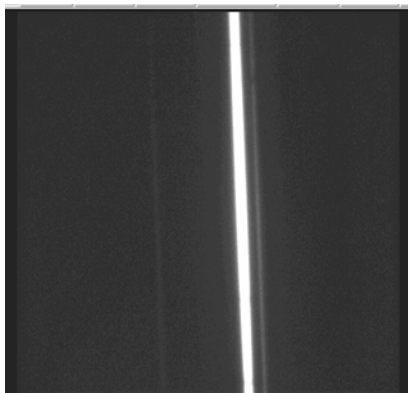
・例: 7sダーク (6/13取得)



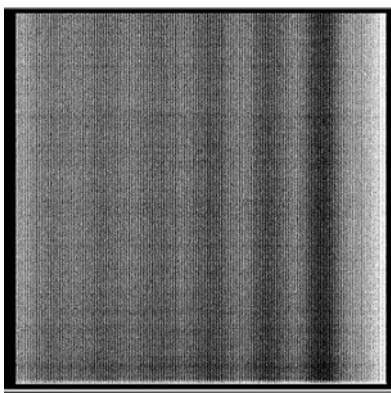
(ダークが大きいため、33msで見えていた縞模様が目立たなくなっている)

### ・生画像

・天体スペクトル



・33msダーク(10枚平均)



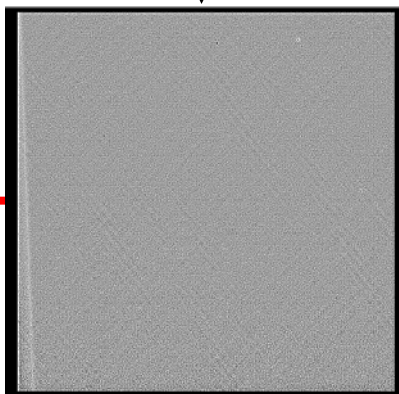
・フラット(天体と同条件、10枚平均)



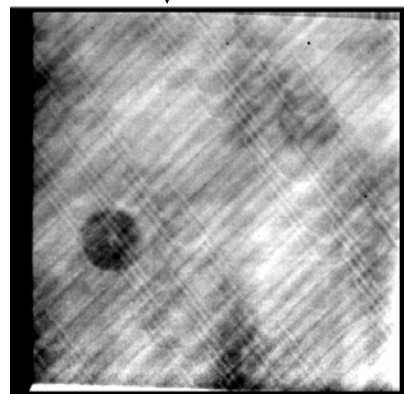
boxcar: 3x3 を使用

response

1次処理



ピクセル感度ムラ補正用  
フレーム

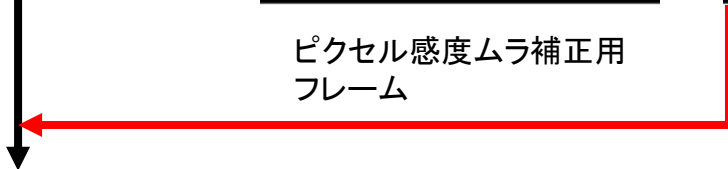
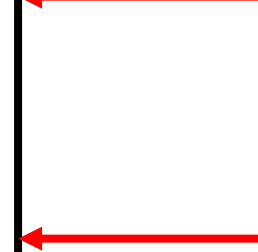


グローバルパターン補正用  
フレーム(回転補正済み)

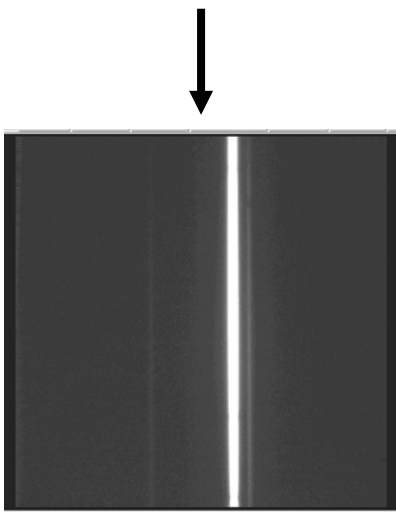
回転補正:

rotate,  $-1.99^\circ$

補間関数=sinc

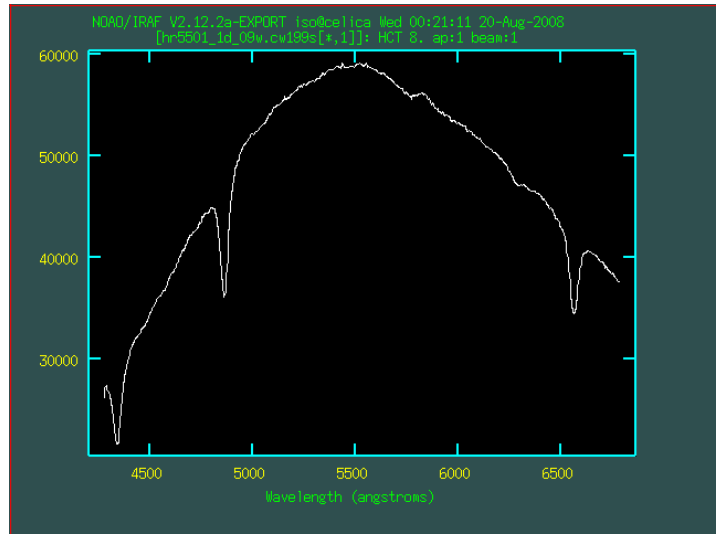


・天体スペクトル1次元化(波長較正後)



1次処理+回転補正後の  
天体スペクトル

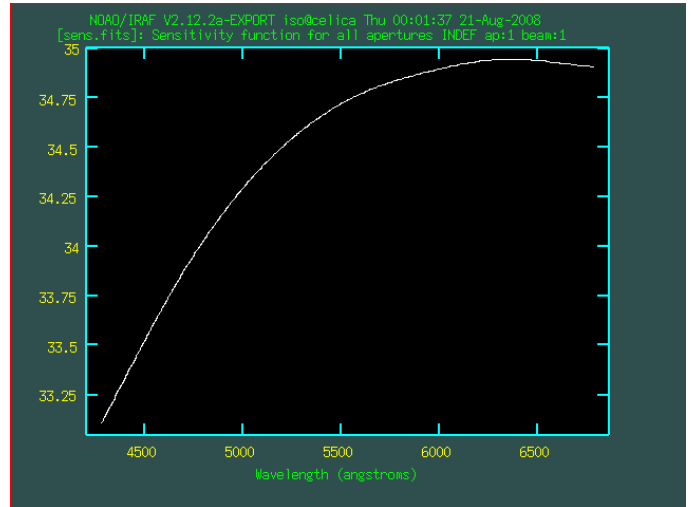
apall  
→



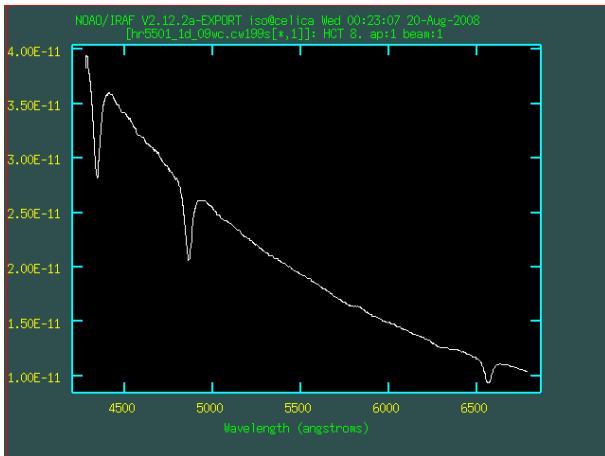
波長較正にはBalmer吸収線を使用(identify, dispcor)

standard  
sensfunc  
calibrate

・ カウントフラックス比曲線  
(  $2.5 \log_{10}\{\text{カウント}/\text{FTB}\}$  )



・フラックス較正後の天体スペクトル



# ○ 系全体の効率の推定式

フラックス較正の際に得た、カウントフラックス比曲線を用いる。

観測された天体のカウントは、以下の式で記述される。

$$\text{カウント}N(\text{ADU}) = F \times T \times B \times \pi (D/2)^2 / h\nu \times Th \times Q_E \times EM \times g \quad \text{---①}$$

F: flux [erg/s/cm <sup>2</sup> Å]	hν: 光子のエネルギー	Q <sub>E</sub> : CCDの量子効率
T: 積分時間[s]	D: 主鏡直径[cm]	EM: 電子増倍ゲイン
B: 波長幅(Å)/pix	Th: 系全体の透過率	g: ゲイン[ADU/e-]

①を式変形すると、

$$2.5 \log\{Th Q_E\} = 2.5 \log\{N/FTB\} + 2.5 \log \{h\nu / (\pi (D/2)^2 EMg)\}$$

$$= C + 2.5 \log\{h\nu\} - \underbrace{2.5 \log \{\pi (D/2)^2 EMg\}}_{\text{定数項}}$$

↑  
フラックス較正で得られるカウント  
フラックス比曲線の値そのもの

さらに、

$$h\nu = 1.986 \times 10^{-8} / \lambda_{\text{Å}}$$

$$\pi (D/2)^2 EMg = 3239.4$$

$$\rightarrow \text{定数項} = 2.5 \log(323.94) = 8.776$$

$$\left\{ \begin{array}{l} D=154 \text{ [cm]} \\ EM = 4 \text{ (sensitivity=0, 最小設定時)} \\ g = 1/23 \text{ [ADU/e-]} \end{array} \right.$$

以上より、

$$2.5 \log\{Th Q_E\} = C + 2.5 \log\{1.986 \times 10^{-8} / \lambda_{\text{Å}}\} - 8.776$$

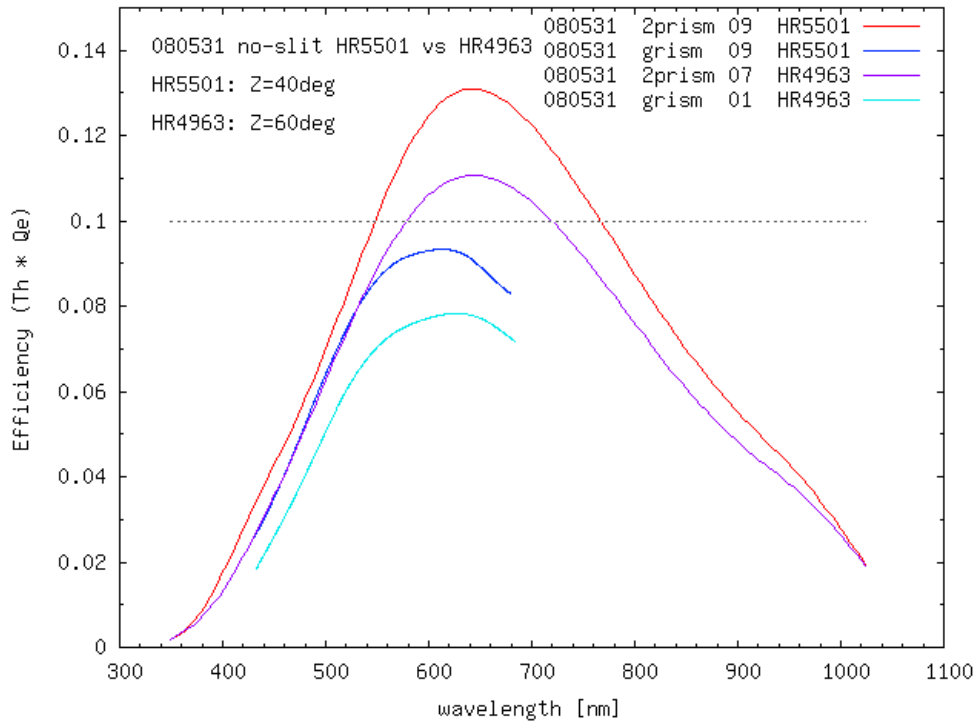
さらに、上式の右辺≡Aとすると

$$\frac{Th Q_E}{\uparrow} = 10^{A/2.5}$$

系全体の透過率にCCD  
の量子効率をかけたもの

# ○ 系全体の効率

以上より求めた系全体の効率をプロットすると、



測光分光標準星HR4963(A1IV, z~60°)から求めた効率もプロット。

効率のピークは

2素子プリズム: ~13% @ λ=640nm

グリズム: ~ 9% @ λ=610nm

おおよその効率予想値(@ λ =610nm)

2素子プリズム: ~18%

グリズム: ~11%



予想値よりもやや小さい(7-8割程度)

○効率予想値の計算:

系全体の透過率 = 大気 x 望遠鏡 x 分光器(レンズ) x 分散素子 x CCD量子効率

・大気の透過率(@z=40°) = 0.13mag/airmass(@キットピーク) x 1.31

=> 0.856 @610nm (減光率を倍にした場合(0.26mag/airmass) 透過率は 0.732 になる)

・望遠鏡

・鏡3枚 = 0.7(主鏡,蒸着直前) \* 0.8²(副鏡+第3鏡) = 0.448

・分光器

・レンズ9枚(18面) = 0.97¹⁸=0.578

・分散素子

・2素子プリズム効率 = 0.97(ガラス面)³ = 0.913

・グリズム効率 = 0.97(ガラス面)² x 0.6(回折格子効率@610nm) = 0.565

・CCDの量子効率 = 0.92 @610nm



## ○ 大気外での効率

HR5501だけでなく、異なる天頂角 $z$ のHR4963も効率を測定できているので、これらを用いて地球大気外での効率をおおまかに見積もってみる。

○ 前ページのグラフで、効率のピークを読み取り、表にする。

・2素子プリズム

天体名	$z$	$\sec z$	波長[nm]	$\text{Th}Q_E$
HR5501	40	1.305	641.6	0.131
HR4963	60	2.000	641.6	0.111

・グリズム

天体名	$z$	$\sec z$	波長[nm]	$\text{Th}Q_E$
HR5501	40	1.305	613.0	0.0933
HR4963	60	2.000	627.2	0.0783

○  $\sec(z)$  vs  $\text{Th}Q_E$  でプロットした点を直線でfitし、 $y$ 切片を確認する。

2素子プリズム: 0.169

グリズム: 0.121



地球大気の影響を除いた効率のピークは

2素子プリズム:  $\sim 17\%$  @  $\lambda = 640\text{nm}$

グリズム:  $\sim 12\%$  @  $\lambda = 610\text{nm}$

## 2: 限界等級見積もり

### ・データ整約(グリズム、0.2mmスリット分光)

#### ・観測:

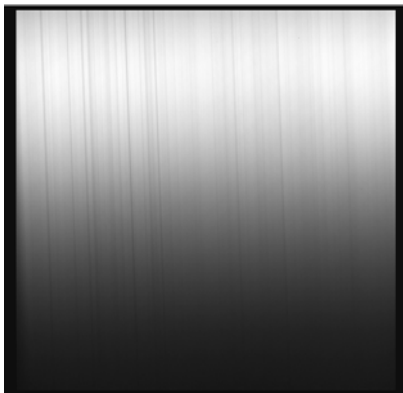
- ・観測日: 2008/05/31
- ・測光分光標準星 HR5501
- ・観測モード: 0.2mm-slit
- ・積分時間: 8s x 10枚
- ・ダーク: 33ms で代用
- ・フラット: 05/27, 10s x 10枚

#### ・整約について:

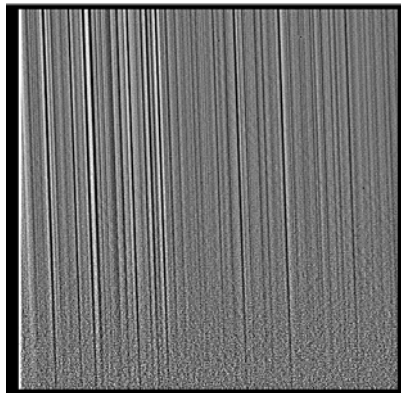
- ・整約手順は基本的にスリットなしグリズム分光と同じ。
- ・波長較正のみ、人工光源スペクトル(0.11mmスリット使用)を使用する点で異なる。  
※0.11mmスリットと0.2mmスリット像の位置が1pix以下の精度で一致するよう調整済み。
- ・フラットをベースに作成するフレームは作成パラメータを変えている(boxcarのサイズを 3x3 → 9x5 に変更)

### ・0.2mmスリットでのフラット画像・グローバルパターン補正フレーム

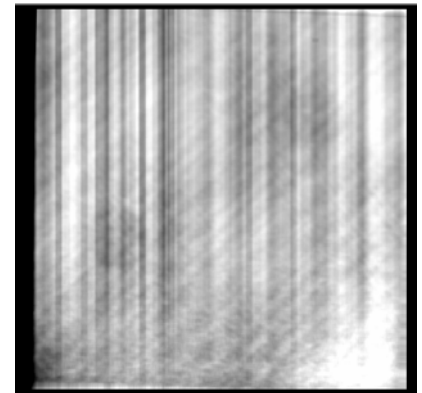
フラット生画像



ピクセル感度ムラ補正用  
フレーム



グローバルパターン補正用  
フレーム(回転補正済み)



boxcar: 9x5 を使用

※画像回転の際に使用する補間関数がピーキーにカウント変動するフレームを精度良く再現できないため、スリットなしよりも大きなboxサイズを使用している

## ○ S/Nおよび限界等級 の計算式

S/Nの計算式:

$$S/N = g N a / ( 2 g (N a + D) + r^2 )^{0.5}$$

↑  
電子増倍に起因するノイズファクター

ここで、

**N** = カウント(HR5501の測定値)

**a** = scale factor (限界等級算出のため)

**g** = 変換係数 = 23 [e-/ADU] (浜ホト提供)

**D** = ダークカウント = 100 [ADU/10sec] (実測値)

**r** = 読み出しノイズ = 200 [e-/frame] (実測値) (カタログでは 100e-)

限界等級の見積り:

限界等級 = HR5501のV等級(5.673) - 2.5 log{a/(10/積分時間)}

※限界等級は、10秒積分、電子増倍率(EM)=4=最小設定での値とする。



グラフは次ページに掲載

比較のため、Bの図では、

・ダークカウント=0 (十分にCCDが冷却されている場合に実現)

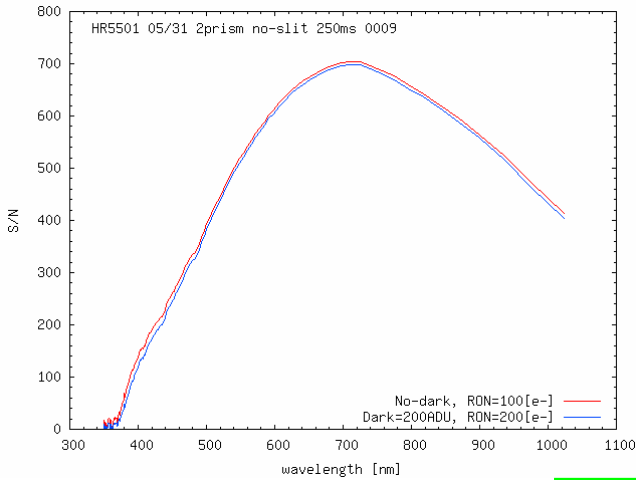
・読み出しノイズ= 1[e-/frame] 電子増倍率(EMゲイン)を200倍に設定した場合

のS/N曲線もプロットしている。

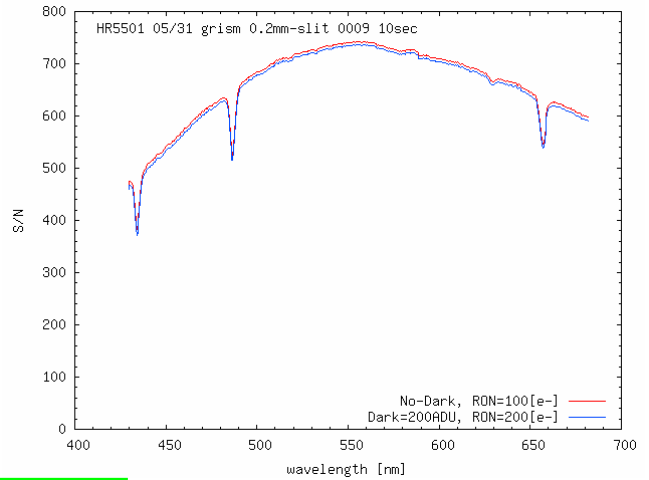
# ○ S/Nおよび限界等級の見積もり結果

## A: 観測スペクトルのS/N (※ a=1)

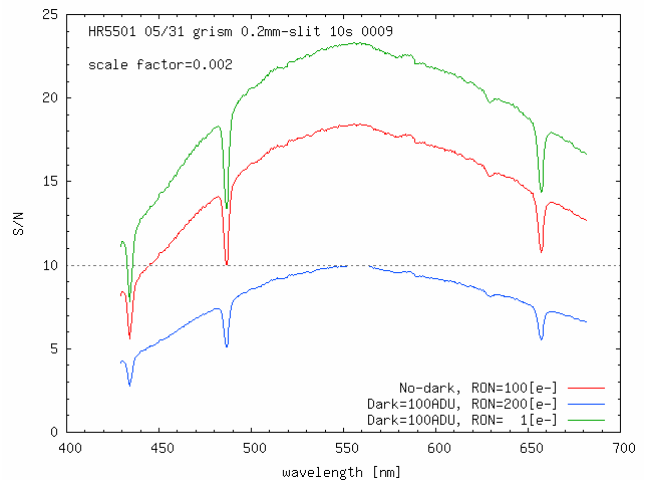
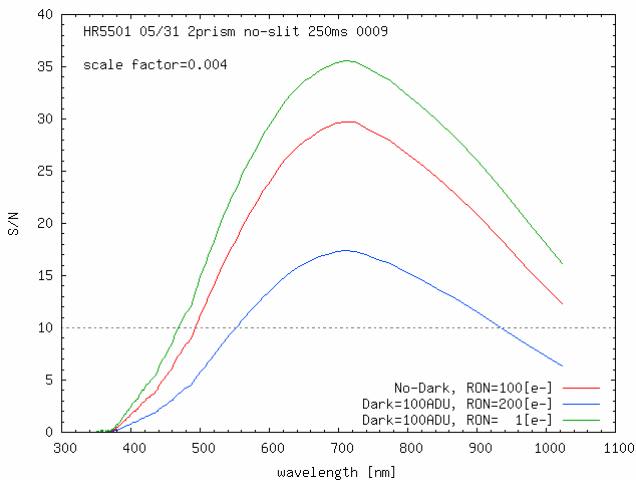
・2素子プリズム(スリットなし分光)



・グリズム(0.2mmスリット)



## B: $\lambda = 550\text{nm}$ でS/N = 10となるようaを調整



赤: ダーク=0, 読み出しノイズ=100[e-](※カタログ値)

青: ダーク=100ADU, 読み出しノイズ = 200[e-](※両方とも実測値) = 標準とする

緑: ダーク=100ADU, 読み出しノイズ=1[e-](※青の条件で電子増倍を200倍にしたケースに相当)

$a = 0.004$  (0.0014), 積分時間=0.25s

$a = 0.002$  (0.00071), 積分時間=10s

限界等級 =  $5.673 - 2.5 \log\{0.004/(10/0.25)\}$

限界等級 =  $5.673 - 2.5 \log\{0.002/(10/10)\}$

= 15.7 mag

= 12.4 mag

※ 電子増倍=200倍にすることで、さらに1mag程度深めることが可能。