

超広視野望遠鏡 *WIDGET* の 測光性能試験とステータス報告

岩切渉(埼玉大)、 栗原允(理研)

田代信、浦田裕次、恩田香織、小高夏来、菅佐原たか子、齊藤健雄(埼玉大)、
玉川徹、影山翔一(理研)、臼井文彦(ISAS/JAXA)、中田好一、宮田隆志、
青木勉、征矢野隆夫、樽沢賢一、三戸洋之、富田浩行(東京大学木曾観測所)、
他WIDGETチーム

1. ガンマ線バースト (GRB)

現代天文学最大の謎の
一つ

❖ GRB の爆発規模

ビックバン以来、**宇宙で最も大きな爆発**現象
放射が等方的として 10^{51-54} erg (10^{44-47} J) のエネルギー

❖ GRB の面白い点

超新星爆発 との関連は明らかだが、いまだ**正体は分からない**

数 10 – 100 億光年 遠方で起こる現象 (初期宇宙を見ていることに相当)

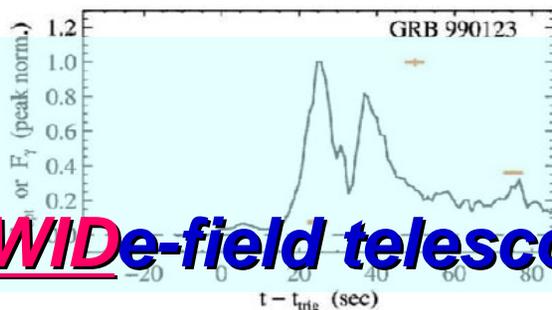
ガンマ線で強く光る**プロンプト放射**の後にX、可視、電波で光る**残光**がみられる。さらに
可視光で明るく輝く**フラッシュ**が観測されることがある (e.g. GRB990123)。

❖ GRB プロンプト放射の観測の難しさ

発生頻度 **1日1回**、全天の**どこで起こるか分からない**

継続時間 **約 0.01 – 300 秒間**

→ これまで可視光残光が発見されたものは約200例。その中でプロンプト可視光放射が検出されたものは**8例**だけである。



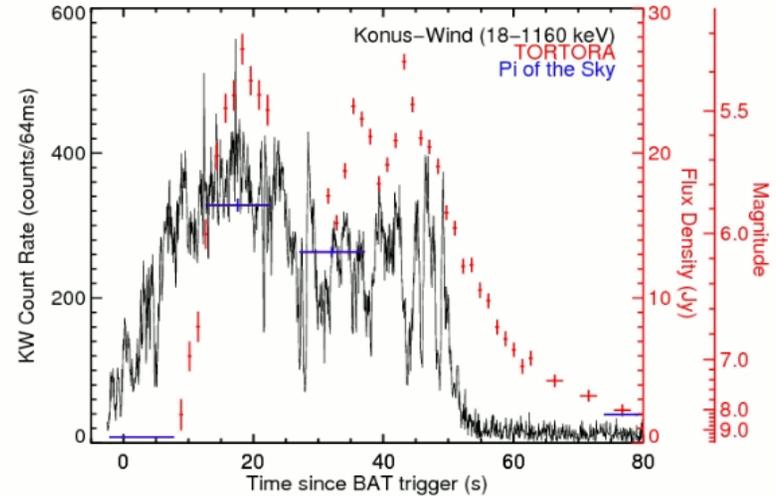
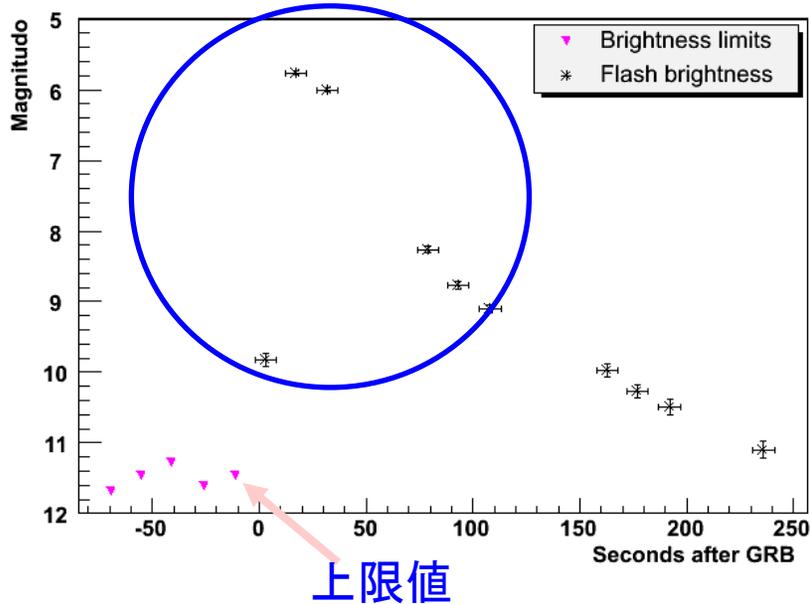
WIDGET

WIDE-field telescope for GRB Early Timing

を開発

GRB080319B

"Pi of the Sky" observation of GRB 080319B



○08年3月19日06:12:49(UT:日本はおやつの時間)に発生した**観測史上もっとも明るい**可視光フラッシュをはなったGRB。

○チリにある広視野可視光望遠鏡“Pi of the sky”ではGRB発生24分前からGRB発生フィールドの可視光画像を取得することに成功。

○可視光のピークはGRB発生から約20秒後にVバンドで**5.3等級**。(木曾からなら肉眼で見たかも・・・)

2. WIDGET

2004年 6月 ~ 2006年8月

- 観測地 : 東大 宇宙線研 明野観測所
(山梨県 北杜市 明野町)

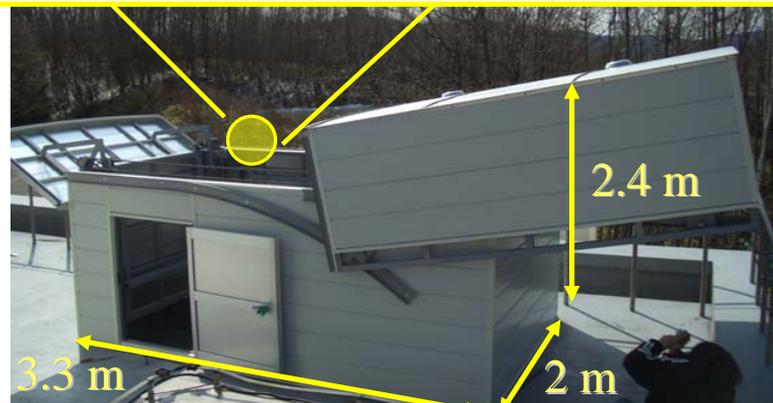
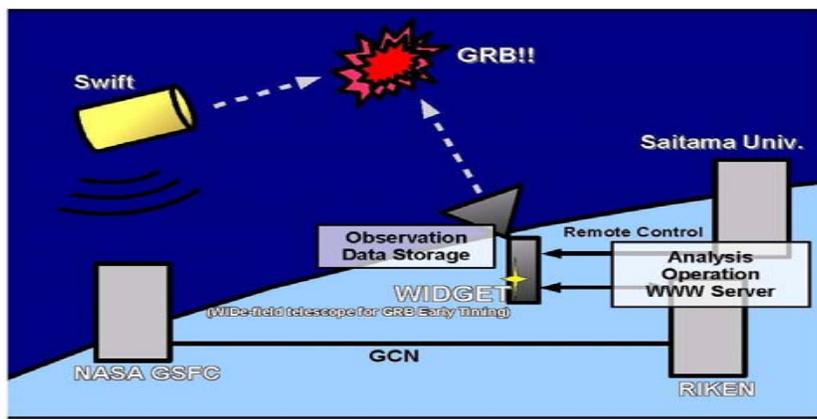
2006年11月 ~ 現在

- 観測地 : 東大 木曾観測所
(長野県 木曾郡 木曾町)
- レンズ : Canon EF 50mm F1.2
- 視野 : **32° × 32°** × 4 カメラ
- 限界等級 : V = 13 等、R = 12.5 等(5 秒 撮像)



WIDGETの画期的な点

衛星との同期運用 ⇒ GRB発生前にさかのぼれる(cf. 追観測 追尾に10-100秒程度)



WIDe-field telescope for GRB Early Timing

3.WIDGETのステータス

○これまでに
WIDGETの視野内
で発生したGRB

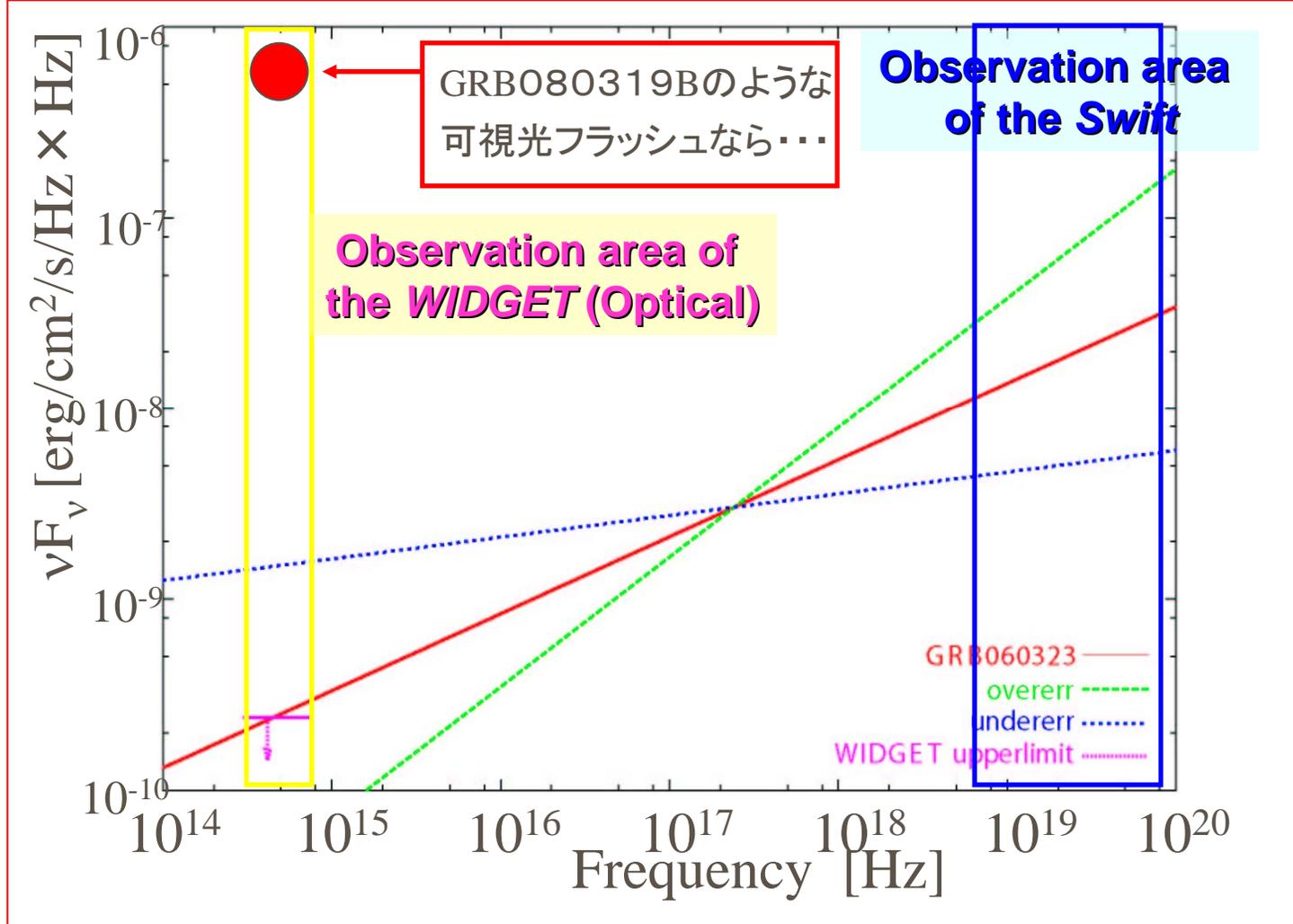
○今年の冬(1月~3
月)は小屋に雪がた
くさん積もっていたた
め運用できず...

GRB	Time coverage	観測場所
050408	(4.9) ^{4.9} ~+3.4	明野
051028	-16.0~+11.2	明野
051227	-187~+12	明野
060121A	-8~-3.5	明野
060211A	-13.2~+5.4	明野
060323	-12.5~+1.4	明野
060413	-0.4~+5.6	明野
070616	-0.5~+2.7	木曾
070810B	-1.2~+20.1	木曾
071021	-13.75~140.8	木曾

未だプロンプト可視光放射の検出には至らず。

3. WIDGETのステータス2

GRB060323のSED

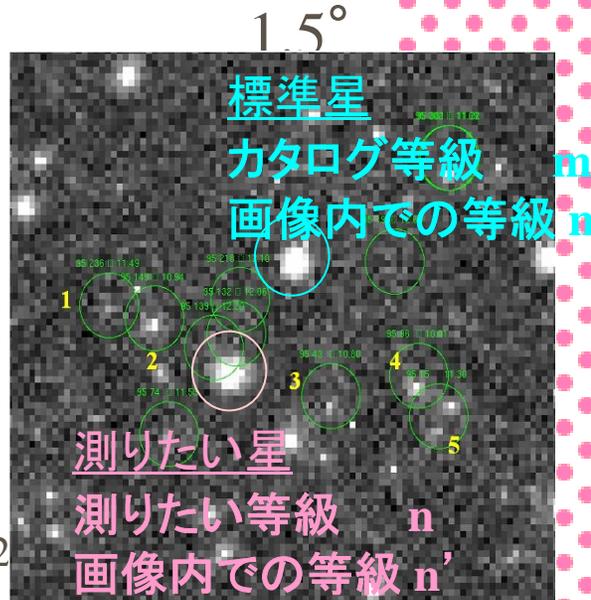
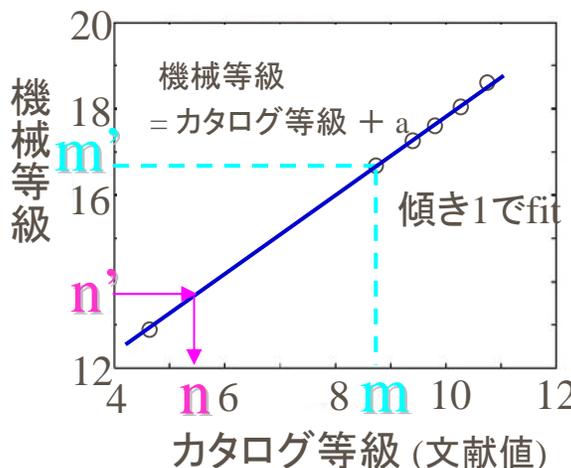


全てのバーストが可視光フラッシュを伴うわけではな

い！！

4. WIDGETの等級決定

目的と背景: 木曾移設に伴い
限界等級が深くなり、BVRIの
標準星と比較できるようになっ
たことで最適なバンドの決定と
等級決定誤差の評価を行った。



WIDGETにおいて考慮すべき点

- ❖ 標準星のカタログ等級 ⇒ バンドごとに存在
- ❖ WIDGETの機械等級 ⇒ ノーフィルターなので全バンドの積分 (CCDの感度はB, V, R, Iバンドに対応)

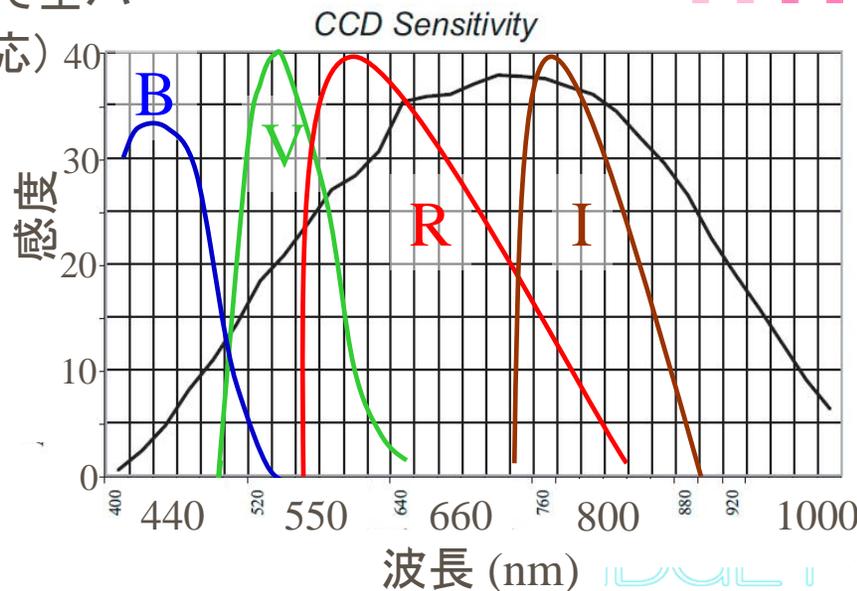
バンドごとの比較が必要

< 性能評価の目的 >

WIDGETが
星の明るさを最も正しく決定できるバンド
を調べる

- ① 最適なバンドの決定
- ② 等級決定誤差の評価

等級の決定方法



5. 性能評価に用いた標準星

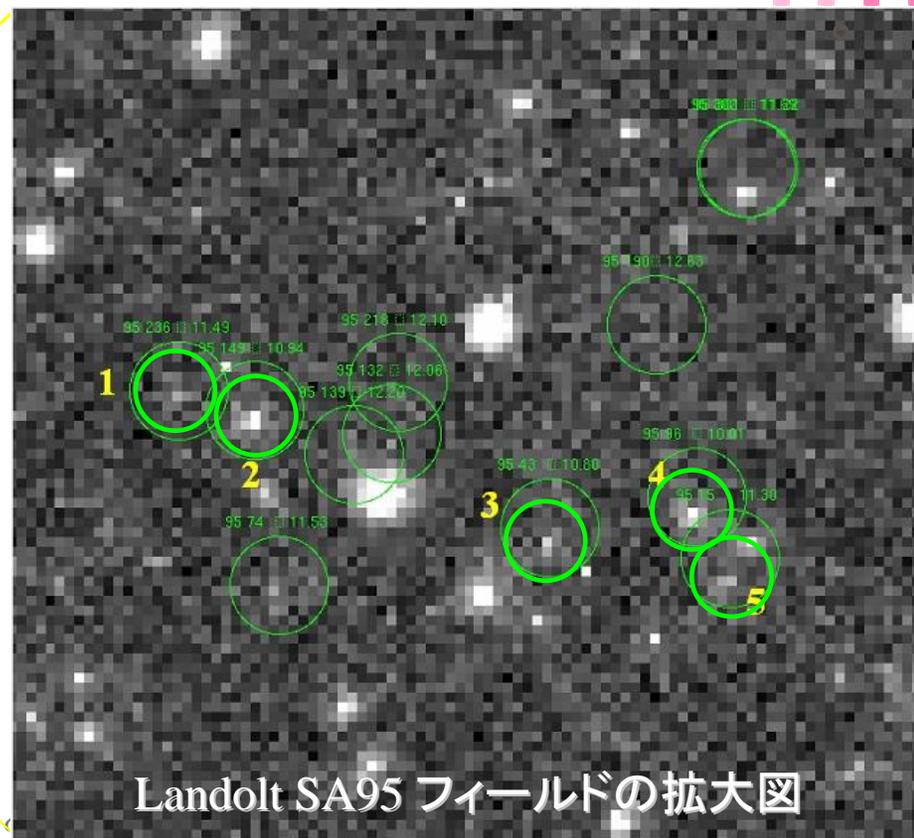
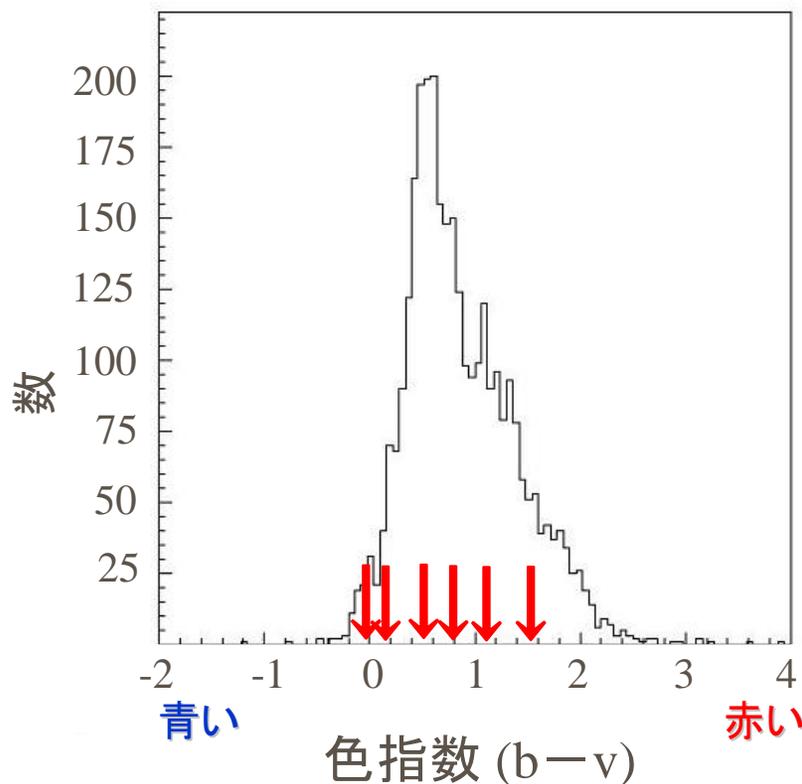
Landolt standard stars

- ❖ 8-18 等級の星が全て B, V, R, I バンド のカタログ等級をもっている
- ❖ 黄道を中心に分布している約 530 コの星が、約 20 フィールドで分布

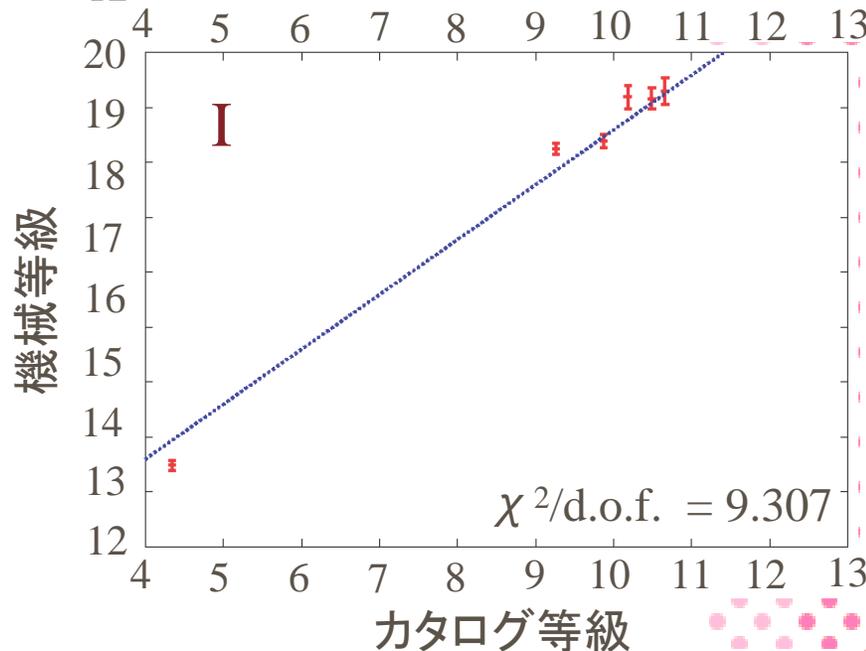
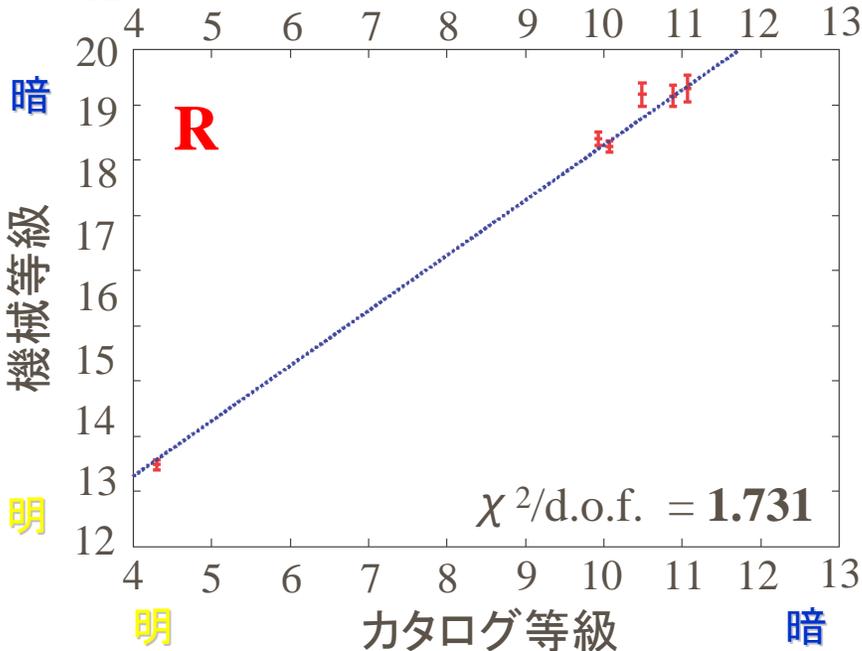
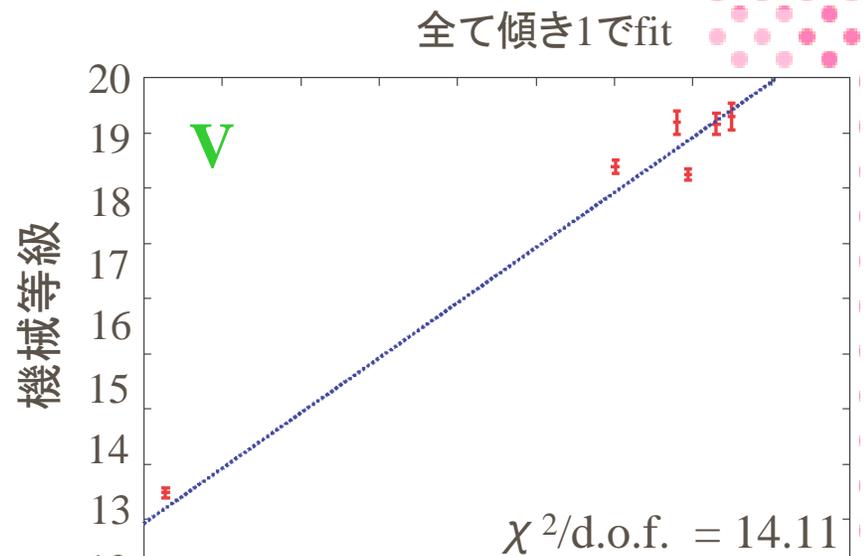
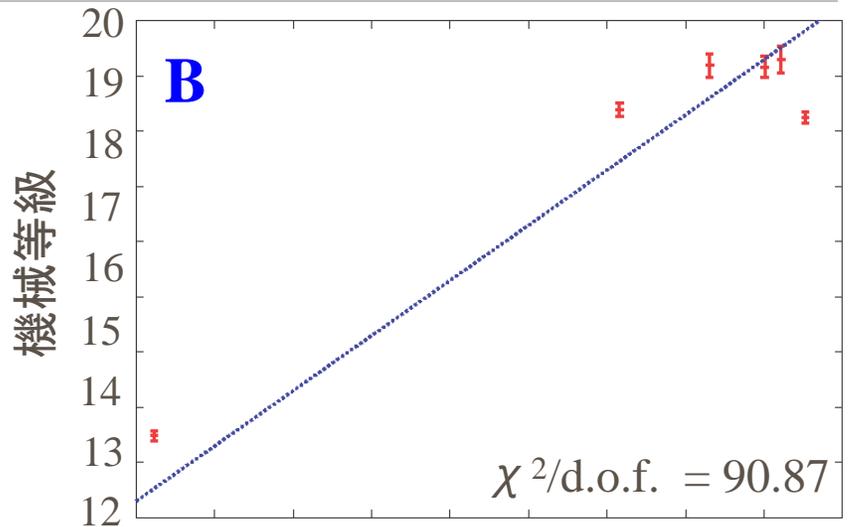
分光標準星

- ❖ 4-15 等級の星がある波長間隔ごとにfluxが測定されている。

6つの星は 画像内の星の 87% をカバー



6. 最適バンドの選択



⇒ WIDGETが最も正しく測光できるバンドは**Rバンド**である

7. Rバンドでの等級決定誤差

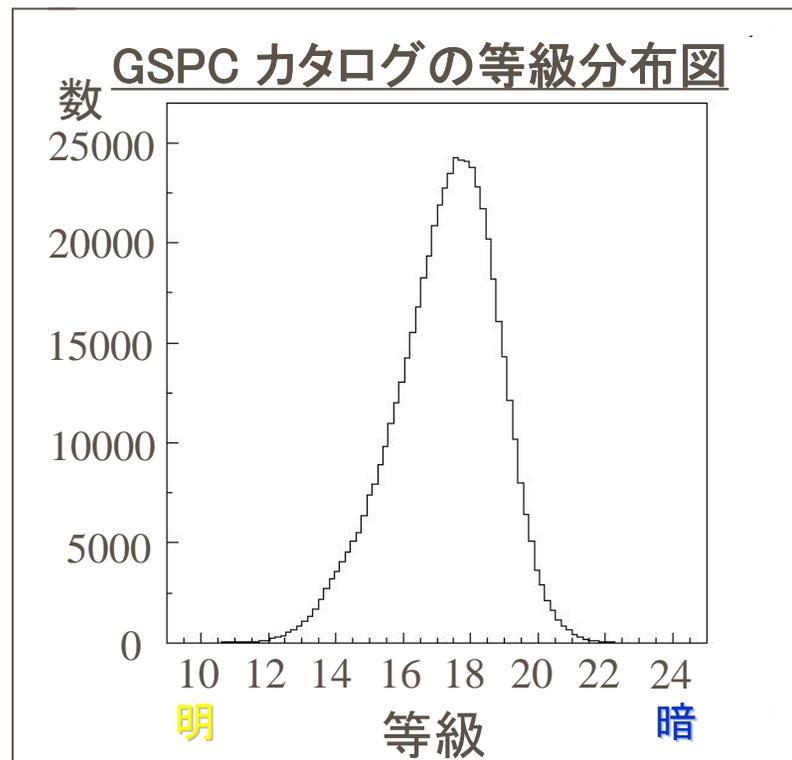
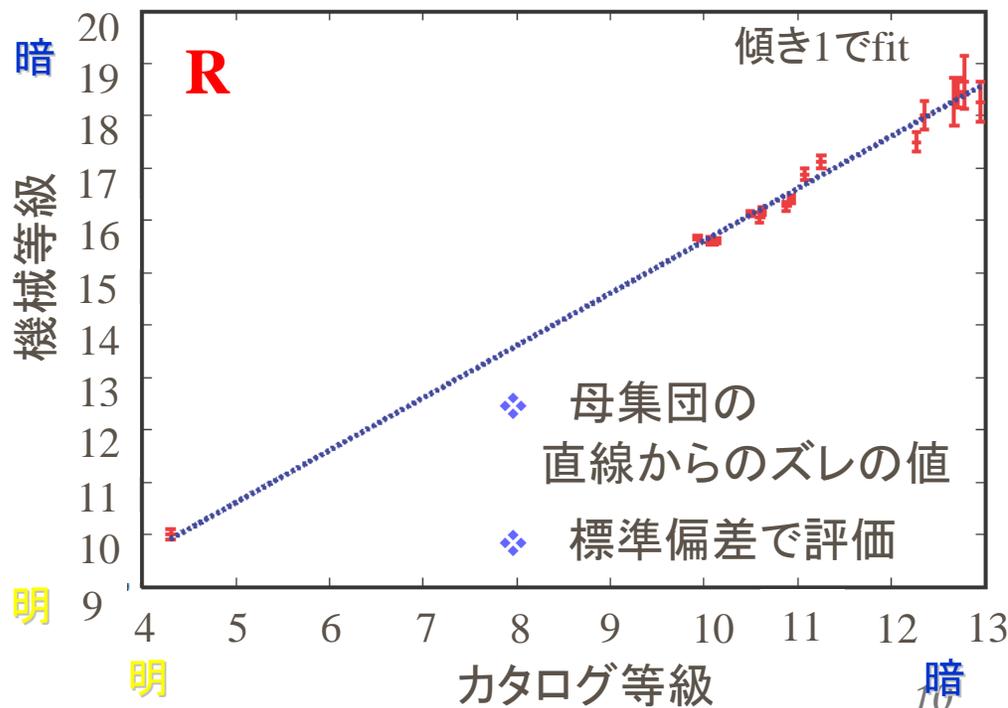
Rバンドの星の数を増やすために

⇒ GSPC (Rバンドが多く入った) カタログ を用いる

- ❖ V, Rバンド のカタログをもつ星が約 55 万個
- ❖ 9等級より暗い星が全天に分布

R バンド の 限界等級 (全 3σ)

R = 11.3 (5s), **13.0 (60s)**, 13.0 (120s), 12.9 (180s)



Rバンドの値でfitした時の分散は

⇒ **±0.2 等級**

8. まとめ

WIDGET の **最適バンドの選択** と、
等級決定誤差の評価 をおこなった

- Landolt カタログ と 分光標準星 を用いて、
Rバンドが最適 であることを示した
- GSPCカタログ を加えて、
Rバンドの等級決定誤差は
±0.2 等級 であることがわかった

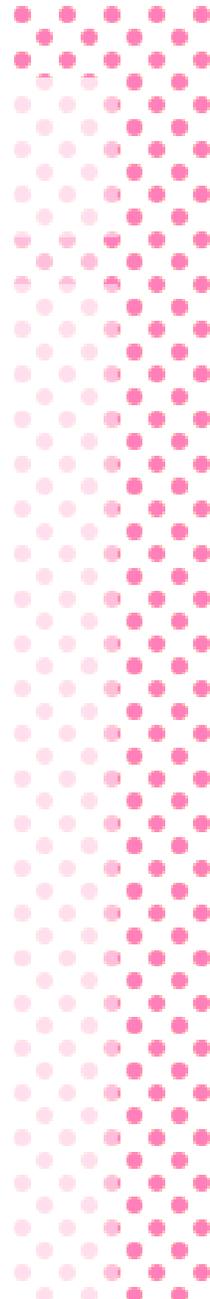
木曾シュミットを長期占有できた ら…

-正直GRBのToO観測をしていただけているだけで十分です！

→ **WIDGET、開発中のWIDGET-L、そして木曾シュミット3つの望遠鏡をあわせれば世界に先駆けた観測ができる！**

-X線の研究室なのでX線と絡めておもしろそうなネタがあれば検討して是非シュミットのプロポーザルを書きたいです(僕は点源ばかりみっていますが…)。

-少ない頭で思いつく限りは白色矮星の周期探査サーベイ、AGN電波ローブからの放射など…



WIDGET 移設前後のスペック比較

<目的>

空が暗いと見込まれる 東大木曾観測所 へ移設することで、
限界等級の向上を目指す

移設前と移設後における装置の比較

	移設前(明野)	移設後(木曾)
観測地	東大 宇宙線研 明野観測所 (2004年6月より)	東大 木曾観測所 (2006年11月より)
レンズの 焦点距離	35mm (f/1.4) Canon EF 35mm F1.4L USM	50mm (f/1.2) Canon EF 50mm F1.2L USM
視野とカメラ数	44° × 44° × 3 台	32° × 32° × 4 台

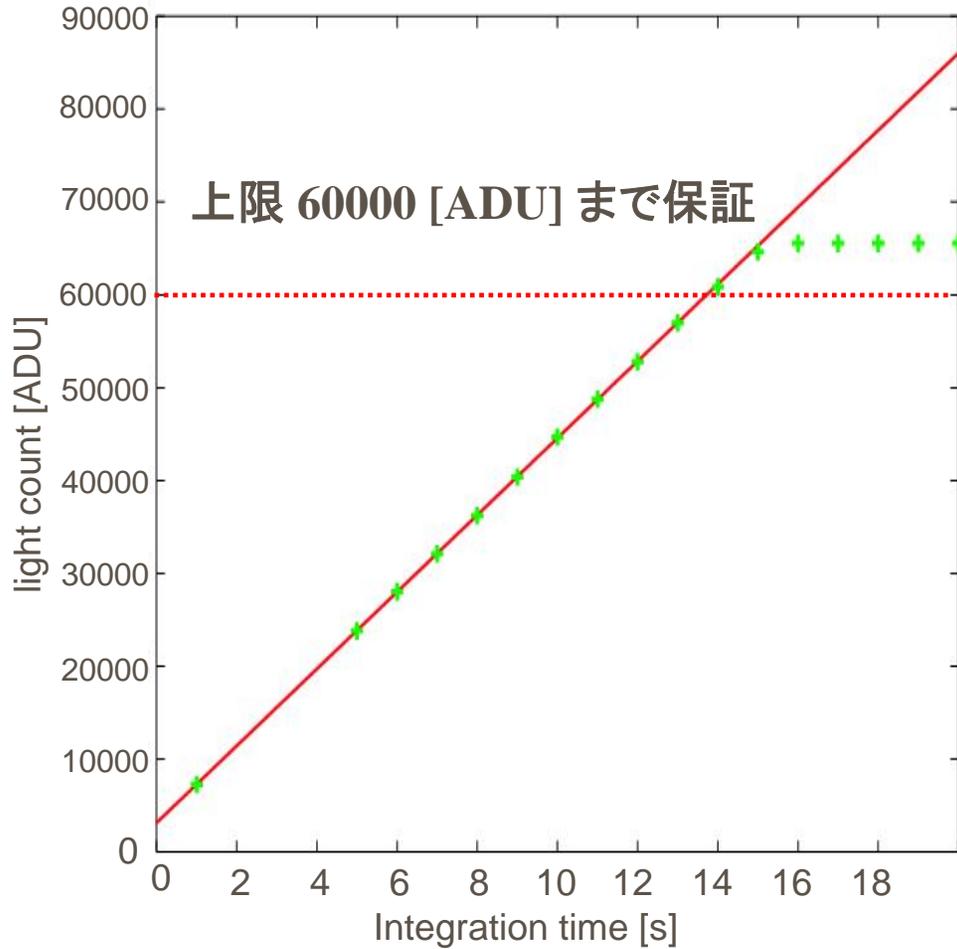
限界等級の変化 (5秒積分 1枚、1 σ) (実測値)

限界等級の向上 35mm@明野 V=11~12 等 ⇒ 50mm@木曾 V=13.0等

※35mm@明野 の限界等級はGRB060323、
50mm@木曾 の限界等級は2007年11月03日の観測

⇒ 限界等級は 約 1 等向上 V = 13.0 等 (5 秒積分、1枚、1 σ)

ADCリニアリティー



運用への反映

等級を常にRバンドで表現するために

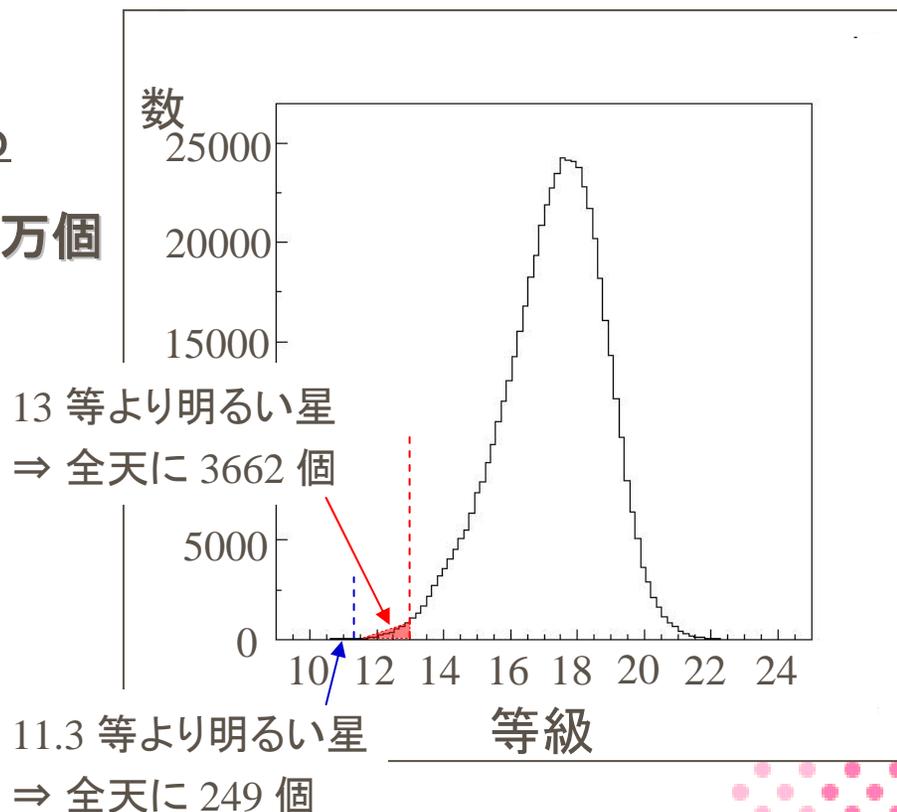
⇒ どの視野を撮像しても、常にRバンドのカタログ値を持つ星が入り、写る必要がある

GSPC (Rバンドが入った) カタログを用いる

- ❖ V, Rバンドのカタログをもつ星が約 55 万個
- ❖ 9等級より暗い星が全天に分布

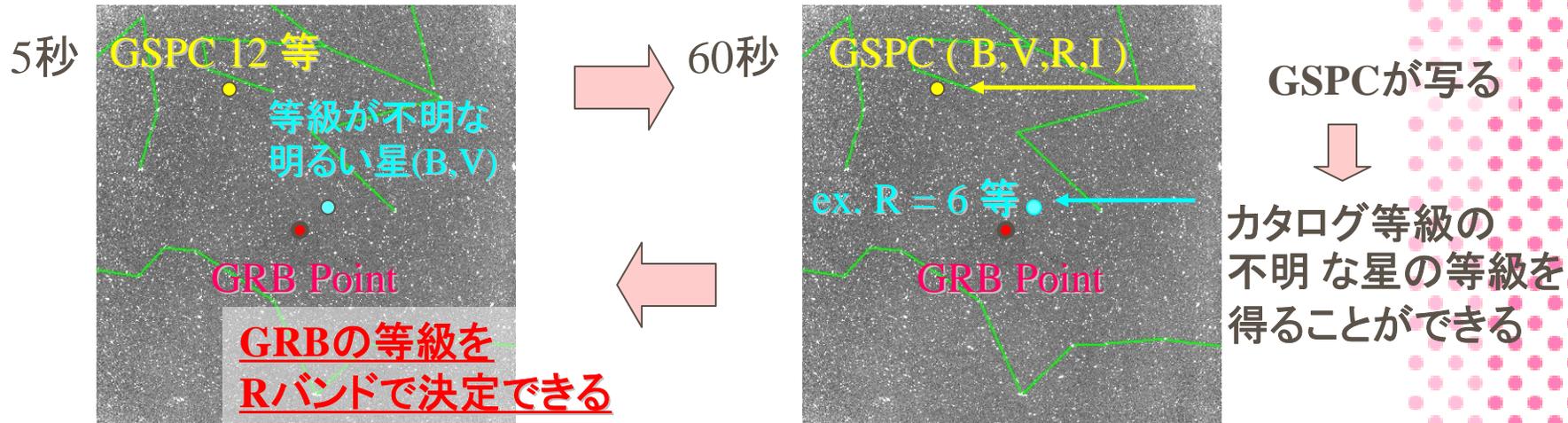
WIDGET の視野内に入る確率

- ❖ 11.3等級 ($5 \text{ s } 3\sigma$) ⇒ 4 (6) 個
cf. 通常運用 5 s 撮像
- ❖ 13.0等級 ($60 \text{ s } 3\sigma$) ⇒ 62 (47) 個

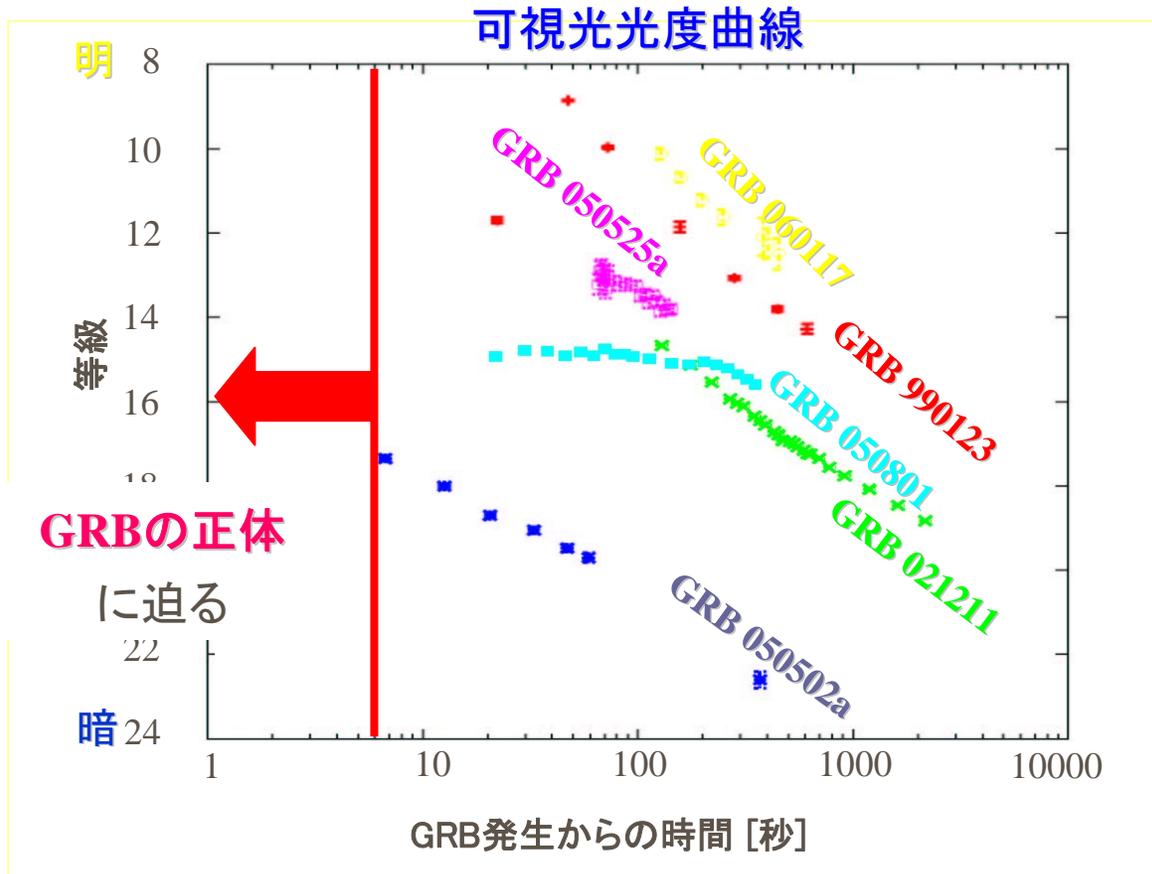


⇒ 限界等級 **13等を稼ぐ** ため、バースト後 撮像時間を**60秒**にする

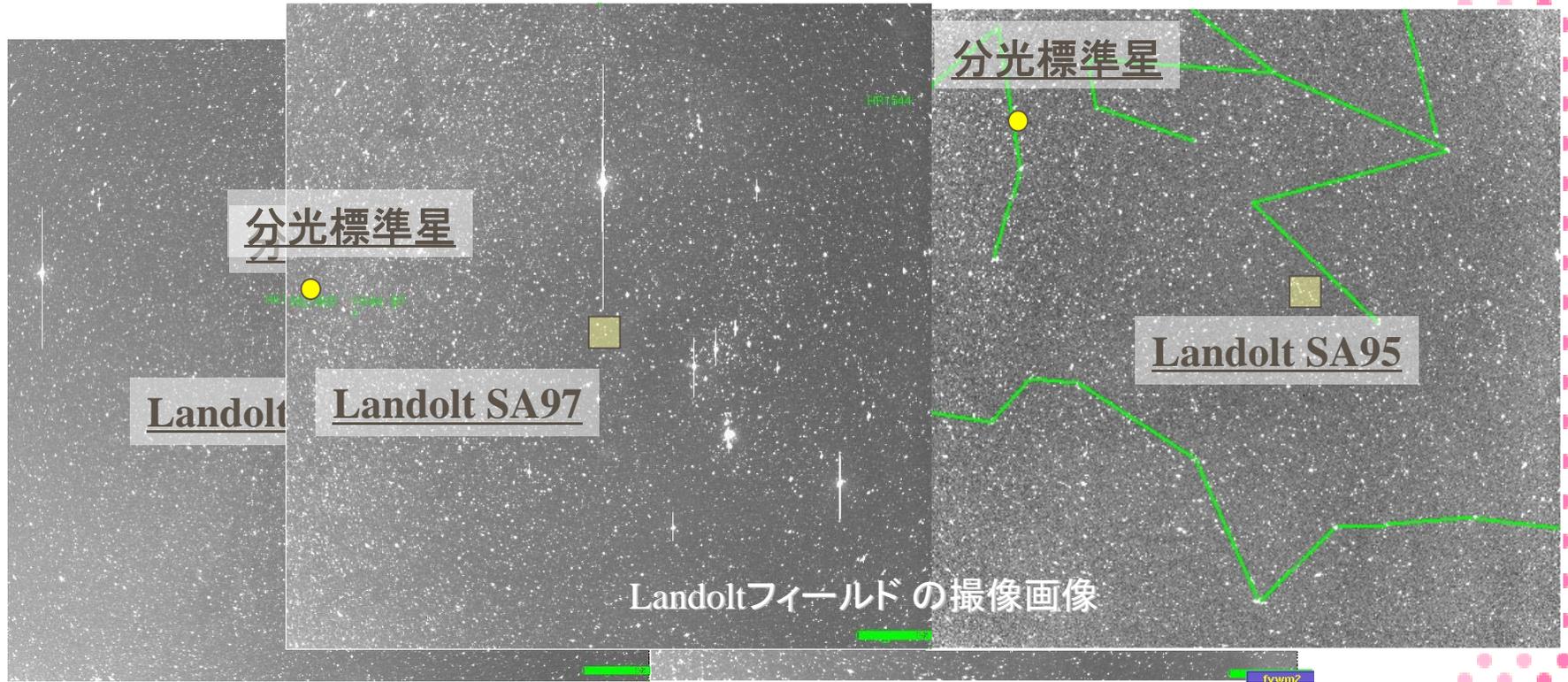
60s撮像の利点

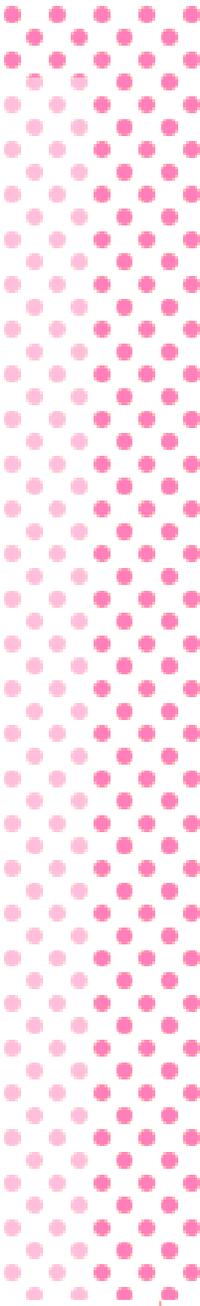


Optical light curve



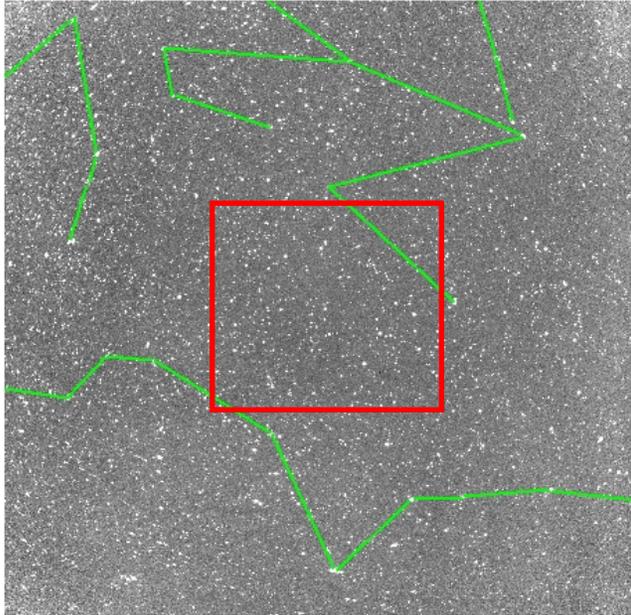
撮像画像





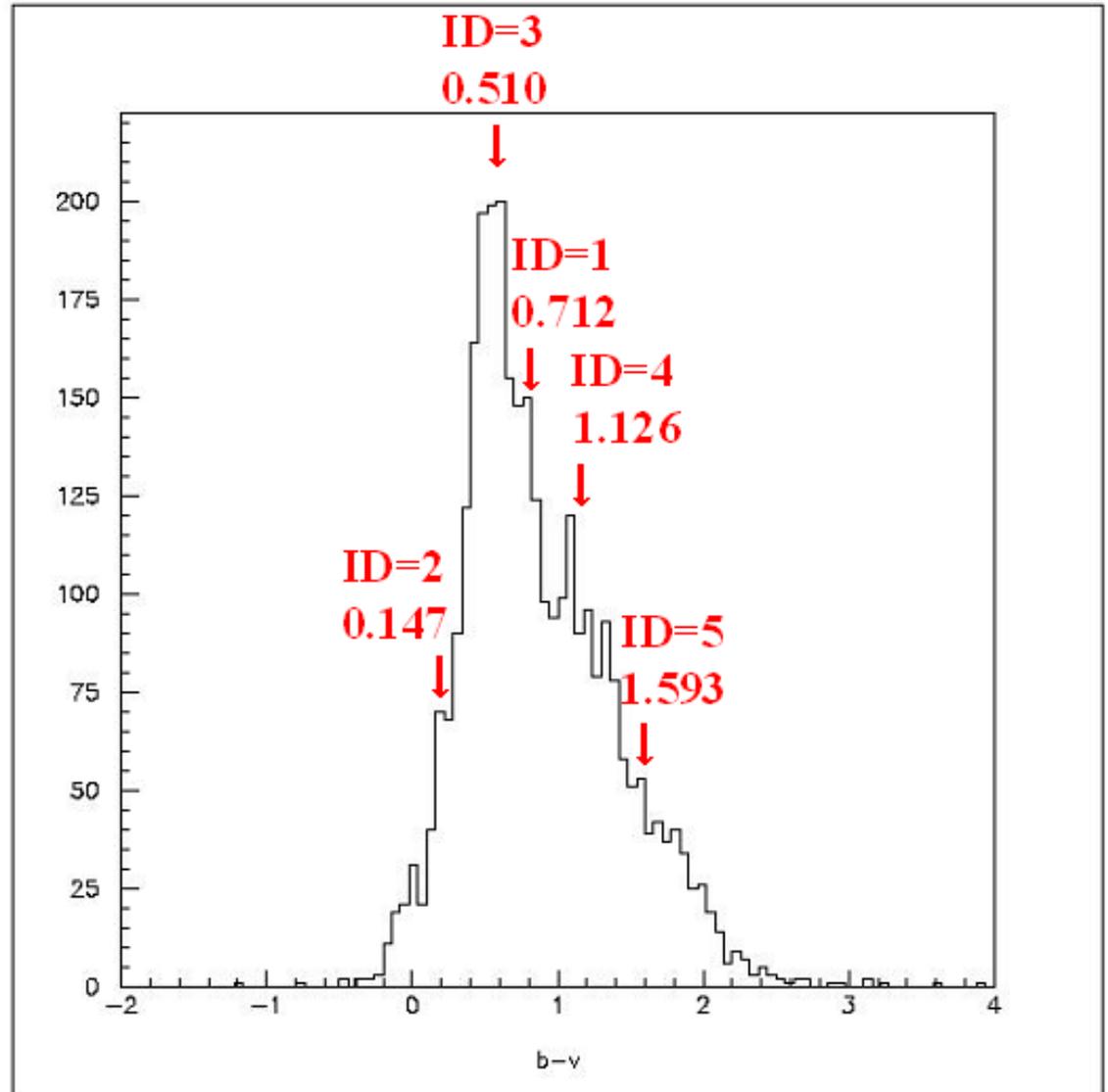
色指数の評価

SA95画像1/9内全星の、b-vのヒストグラム



SA95(180s)でidした星

Id	Star	Vmag	b-v
1	95 236	11.49	0.736
2	95 149	10.94	1.593
3	95 74	11.53	1.126
4	95 43	10.80	0.510
5	95 96	10.01	0.147
6	95 15	11.30	0.712



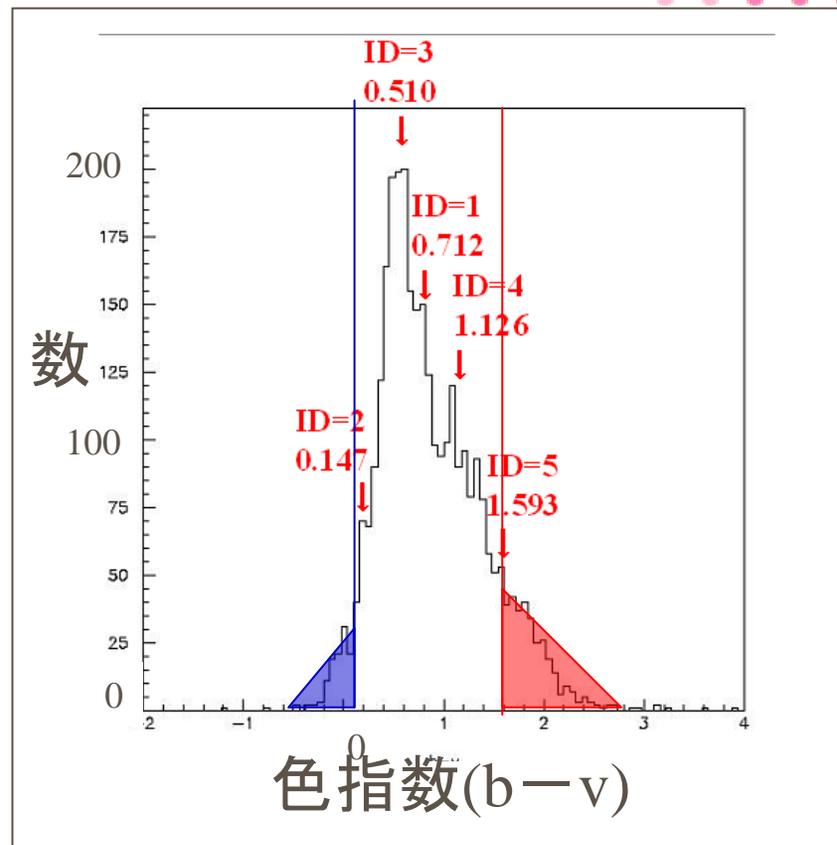
選択した星のスペクトルを調べる

色指数 (b-v) が

● 1.59 より大きい (赤い) 星 323コ

● 0.14 より小さい (青い) 星 87コ

⇒ 画像内の星 (3175 コ) の 85.2 % をカバー



(α, δ) = (04:03:30.806, -00:12:20.87) を中心とした
 $10^\circ \times 10^\circ$ の一般の星の分布 $\Rightarrow 0.14 < b-v < 1.6$ でほぼつきている
 \Rightarrow 今回、SA95内で id した 5 つの Landolt は、
一般の星の b-v の分布をほぼカバーしていると考えられる

GRB の afterglow の b-v との比較

GBR	t-To	b-v	+/-
970228	0.876	0.88	0.41
970508	1.868	0.39	0.04
	2.068	0.4	0.09
	2.848	0.46	0.05
	3.118	0.45	0.09
	3.948	0.33	0.07
	4.998	0.40	0.09
980519	0.93	0.48	0.24
980703	7.315	0.09	0.14
990123	1.092	0.32	0.07
	1.632	0.66	0.26
990308	0.140	0.33	0.24
990510	0.990	0.32	0.06
991208	4.080	0.59	0.07
	5.090	0.66	0.09
	6.080	0.63	0.09

GBR	t-To	b-v	+/-
000131	3.525	>1.13	
000301C	1.788	0.42	0.06
	2.988	0.25	0.09
	3.758	0.51	0.28
000926	2.201	0.62	0.09
	3.201	0.70	0.34
010222	0.890	0.35	0.13
	1.940	0.41	0.04
	2.960	0.51	0.05
	4.960	0.48	0.10

A&A 377,450-467 (2001)

Colors and luminosities of the optical
Afterglows of the γ -ray bursts.

限界等級

05s

band	B	B	B	V	V	V	R	R	R	I	I	I
sigma	1	3	5	1	3	5	1	3	5	1	3	5
	13.85	12.66	12.10	12.98	11.79	11.23	12.49	11.30	10.75	12.04	10.85	10.30

60s

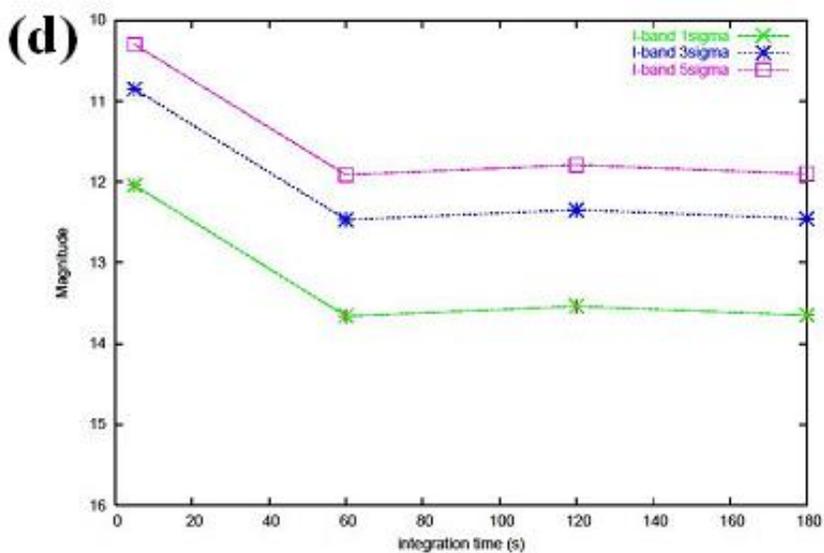
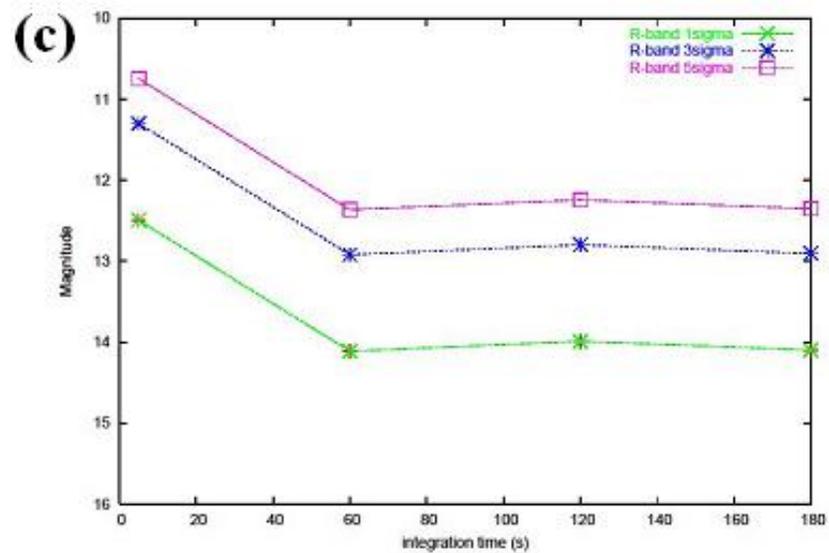
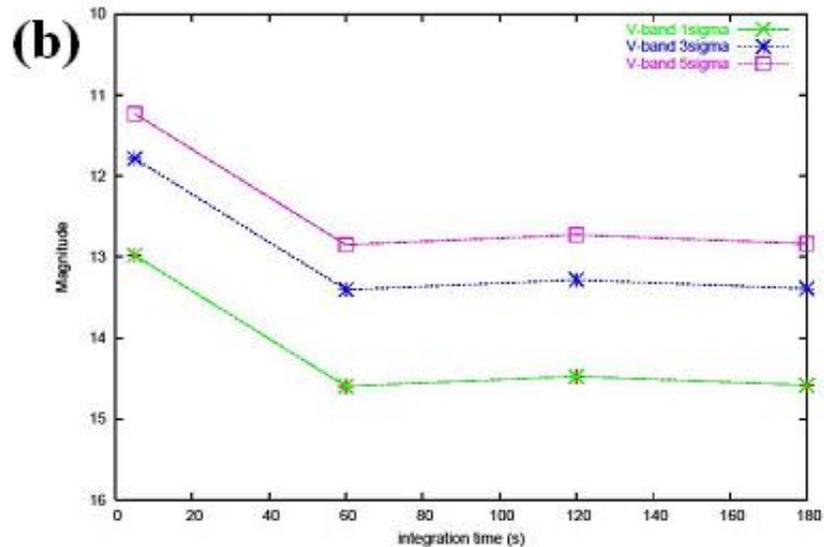
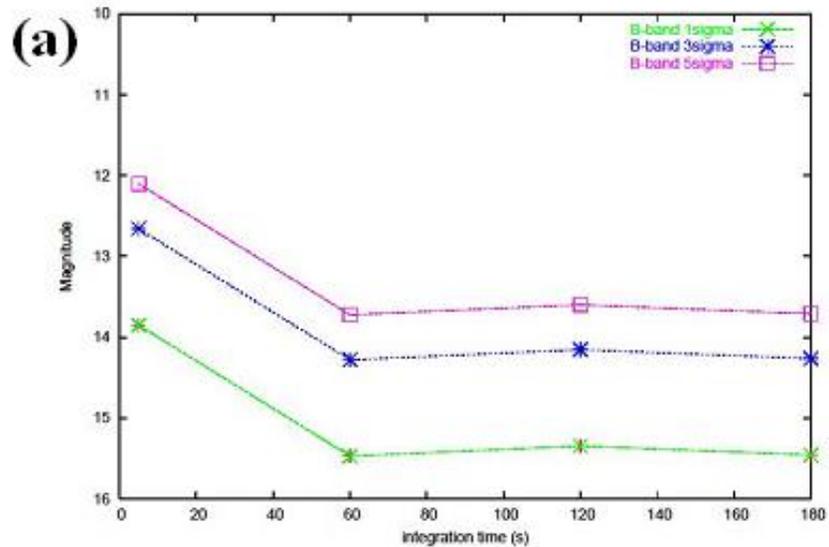
band	B	B	B	V	V	V	R	R	R	I	I	I
sigma	1	3	5	1	3	5	1	3	5	1	3	5
	15.47	14.28	13.72	14.60	13.40	12.85	14.11	12.92	12.36	13.66	12.47	11.91

120s

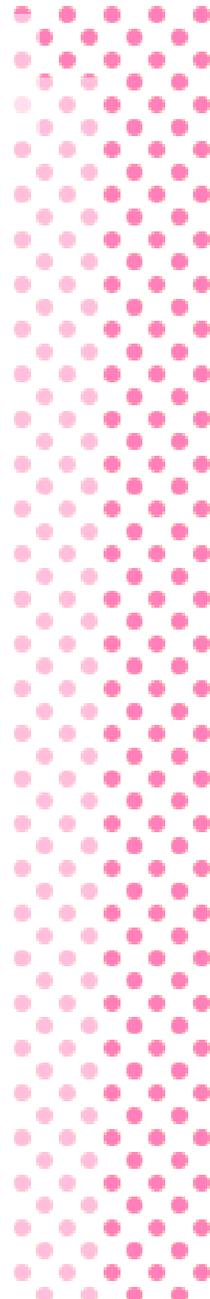
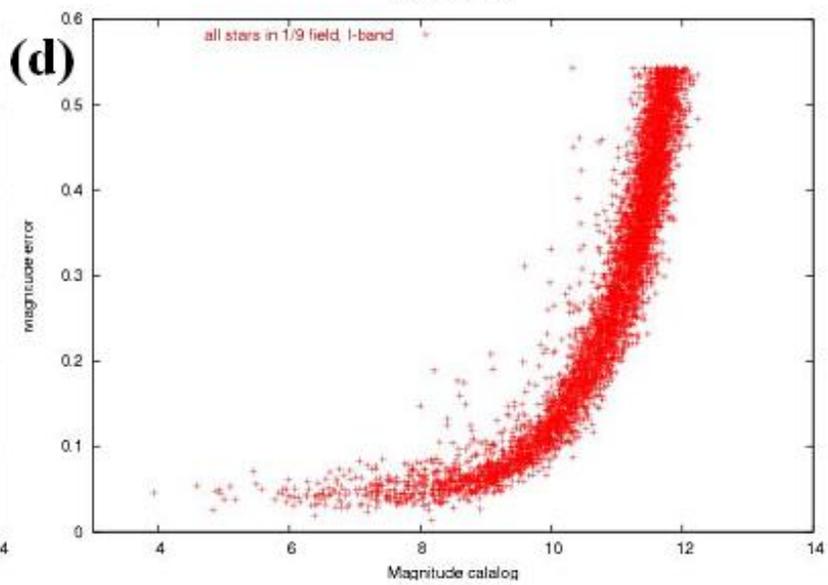
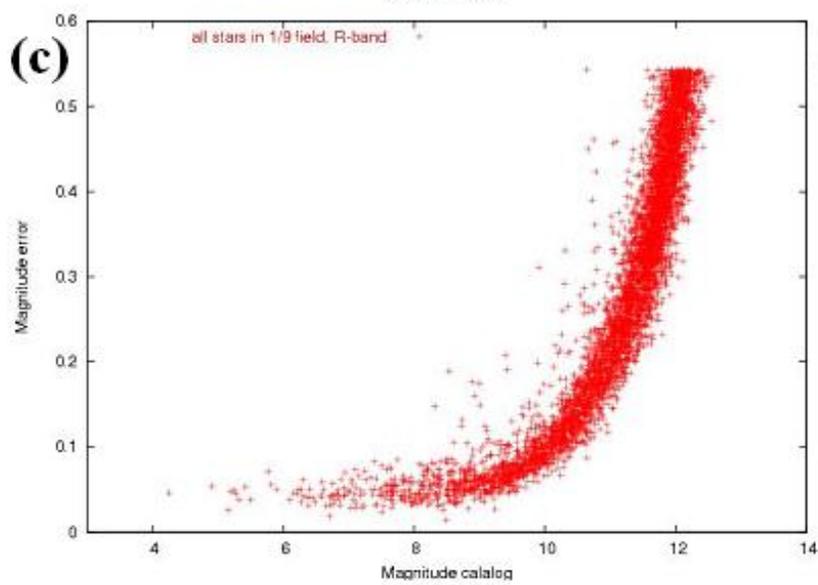
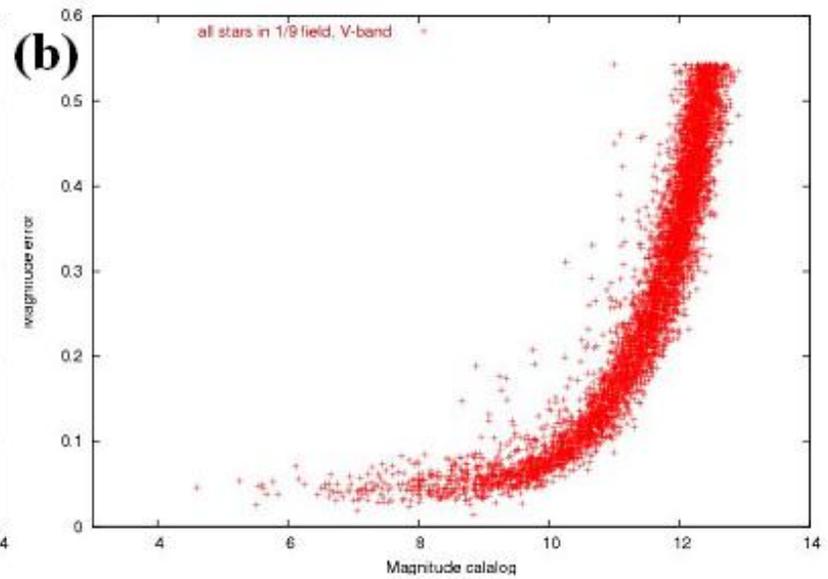
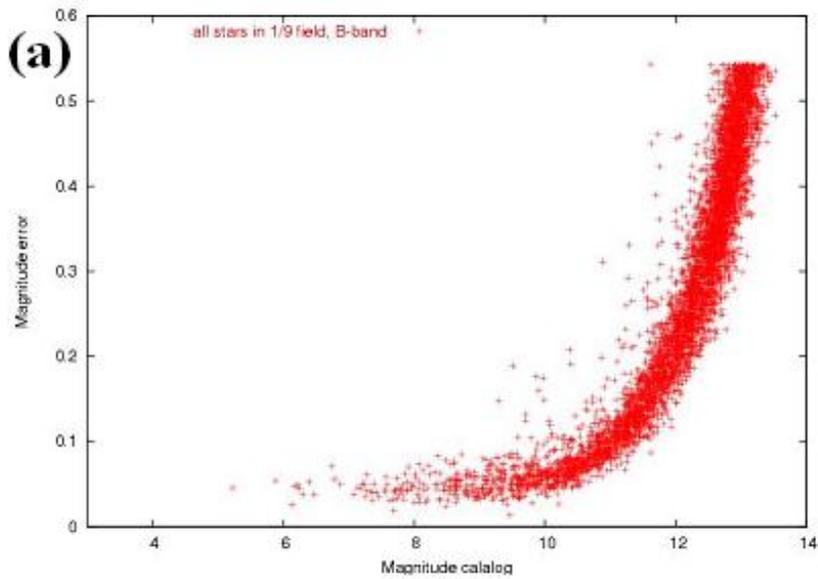
band	B	B	B	V	V	V	R	R	R	I	I	I
sigma	1	3	5	1	3	5	1	3	5	1	3	5
	15.35	14.15	13.60	14.47	13.28	12.73	13.99	12.80	12.24	13.54	12.35	11.79

180s

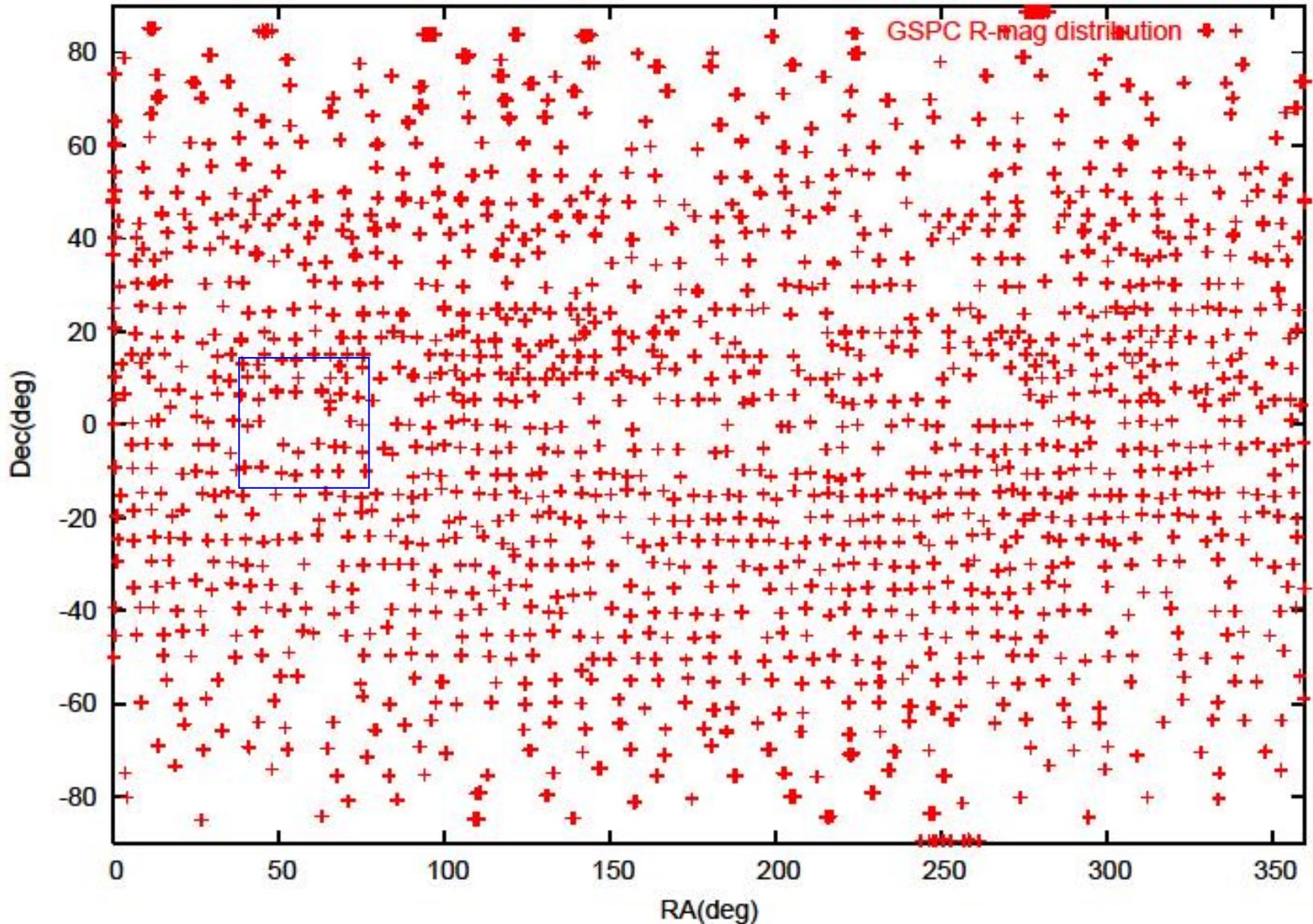
band	B	B	B	V	V	V	R	R	R	I	I	I
sigma	1	3	5	1	3	5	1	3	5	1	3	5
	15.46	14.26	13.71	14.58	13.39	12.84	14.10	12.91	12.35	13.65	12.46	11.90



60秒で限界等級は頭打ち



GSPCカタログの全天分布

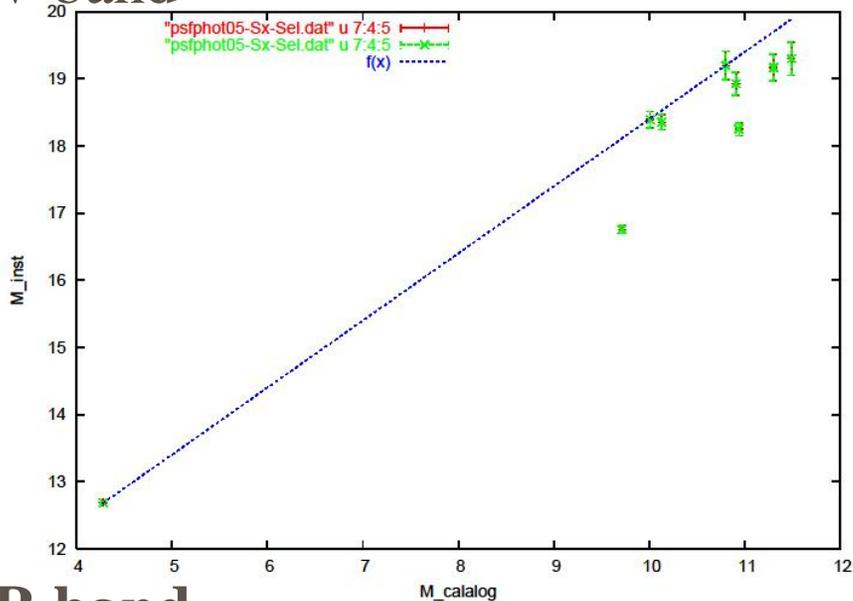


GSCPカタログ R=14mag以下の全天位置分布

全16768個

GSPCを含めたプロット

V band



#Landolt + HR1544 + GSPC fit $y=x+b$

Vバンド#

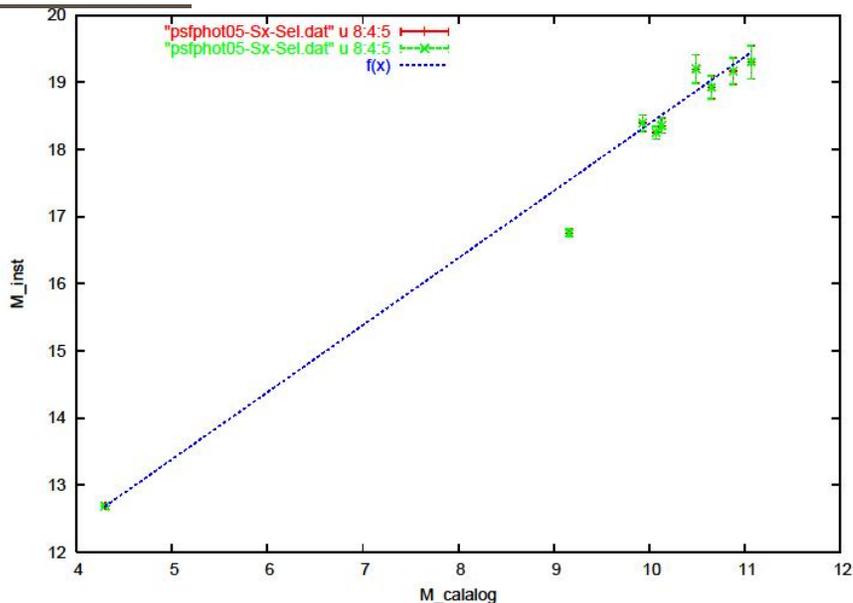
degrees of freedom (ndf) : 8

variance of residuals (reduced chisquare)

$$= \text{WSSR}/\text{ndf} : 86.2508$$

$$b = 8.40096 \pm 0.03696 \quad (0.4399\%)$$

R band



Rバンド#

degrees of freedom (ndf) : 8

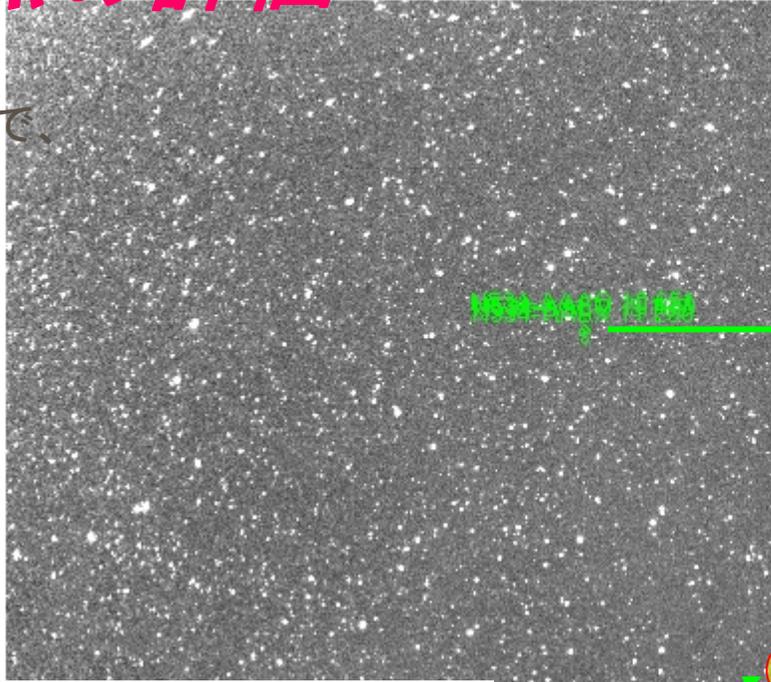
variance of residuals (reduced chisquare)

$$= \text{WSSR}/\text{ndf} : \mathbf{23.7006}$$

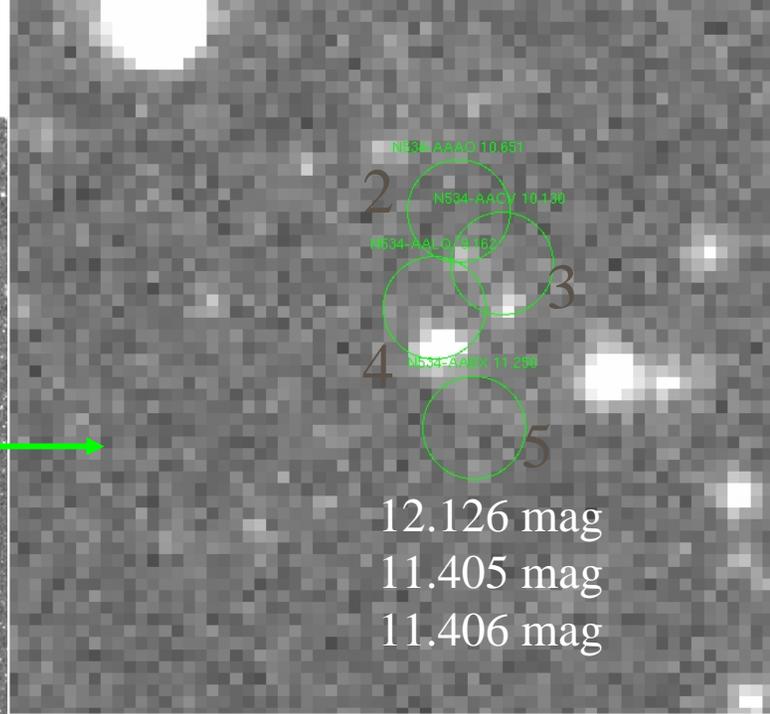
$$b = 8.38289 \pm 0.01937 \quad (0.2311\%)$$

測光原点の評価

HR1544も入れて
比較したかったので、
5sデータを用いた



測光原点



HR1544 11.061

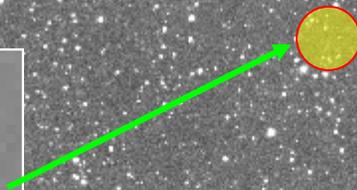
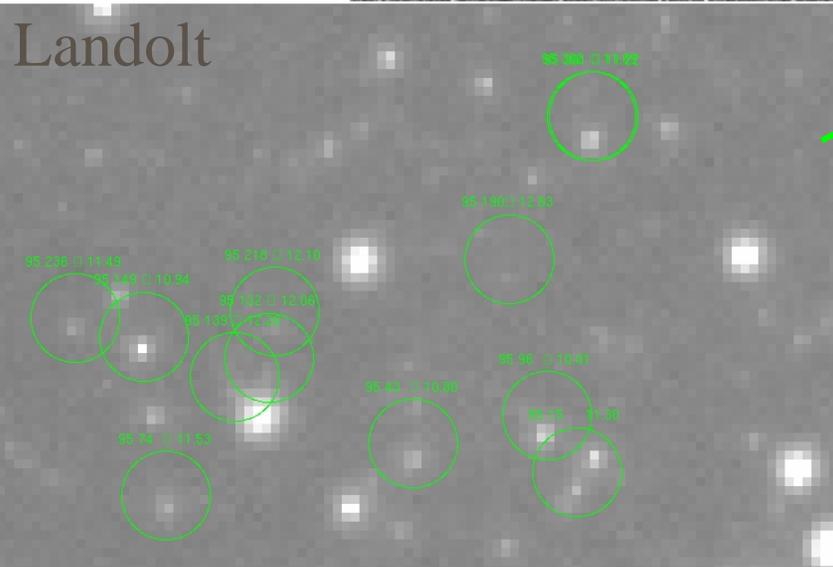
HR1545 10.130

HR1546 11.161

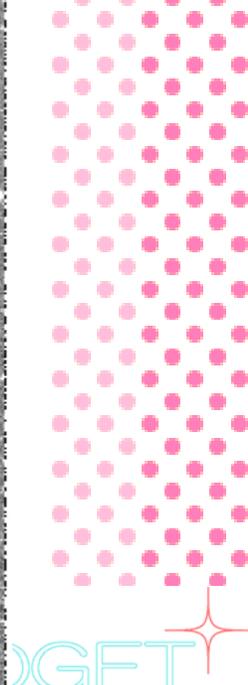
HR1547 11.250

12.126 mag
11.405 mag
11.406 mag

Landolt



測光原点



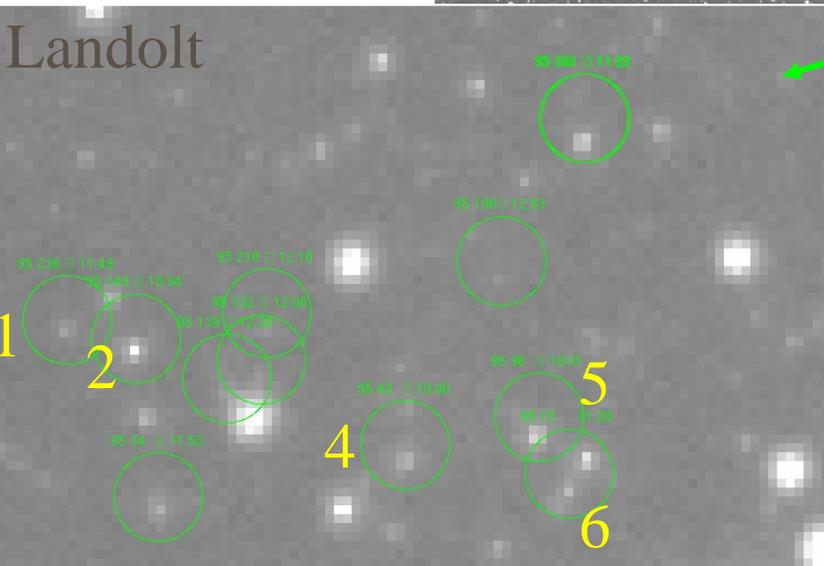
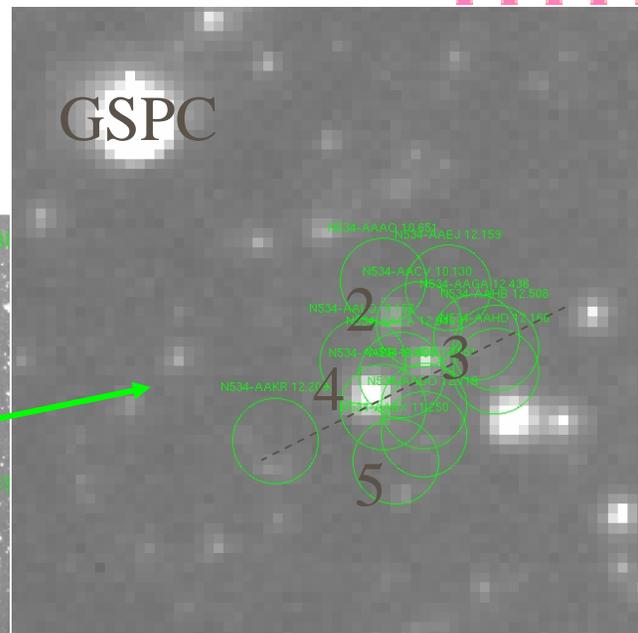
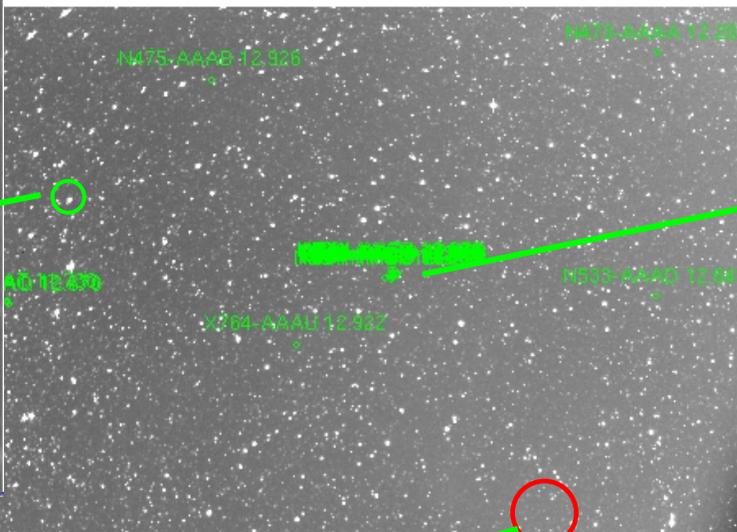
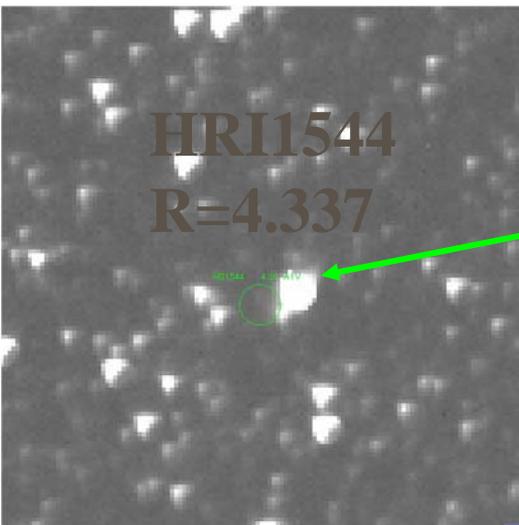
		zeropoint				catalog			
Landolt		B	V	R	I	B	V	R	I
id									
5177	1	18.048	17.318	16.898	16.488	12.22	11.49	11.07	10.66
5132	2	19.278	17.688	16.818	16.008	12.53	10.94	10.07	9.26
4929	4	16.915	16.405	16.095	15.785	11.31	10.8	10.49	10.18
4992	5	16.722	16.572	16.492	16.432	10.16	10.01	9.93	9.87
4868	6	17.963	17.253	16.833	16.443	12.01	11.3	10.88	10.49

HR1544		B	V	R	I	B	V	R	I
1722	-	16.534	16.590	16.613	16.653	4.223	4.279	4.302	4.342

GSPC		B	V	R	I
5092	2		17.073	16.814	10.910 10.651
5026	3		16.852	16.852	10.130 10.130
4989	4		18.012	17.459	9.715 9.162



エアマスの評価



secz
= 1 / cos (天頂角)

ID	elevation	天頂角	secz
Landolt1	52.107340	37.89266	1.267165705
Landolt2	52.042989	37.95701	1.268274858
Landolt4	51.729580	38.27042	1.273729196
Landolt5	51.788630	38.21137	1.276950840
Landolt6	51.598027	38.40197	1.276043950
HR1544	63.105233	26.89477	1.121278808
GSPC2	60.225179	29.77482	1.152095277
GSPC3	60.147363	29.85264	1.152992245
GSPC4	60.113798	29.88620	1.162564011
GSPC5	59.959760	30.04024	1.155248337

※ SA95field撮像時
赤道儀elevation = 39.22

エアマス(secz)による等級への影響

correction factor

$$= 10^{(0.4 \times \text{airmath}[\text{airmath}] \times A \lambda [\text{mag/airmath}])}$$

波長によって、fluxが大気に吸収される度合い

Δmag (エアマスによって落ちた等級)

←cl > help extinction
より得た式

$$\begin{aligned} \therefore \text{flux を補正} &\Rightarrow \text{flux} \times 10^{(-0.4 \times \Delta\text{mag})} \\ \text{解析magを補正} &\Rightarrow \text{解析mag} - \Delta\text{mag} \end{aligned}$$

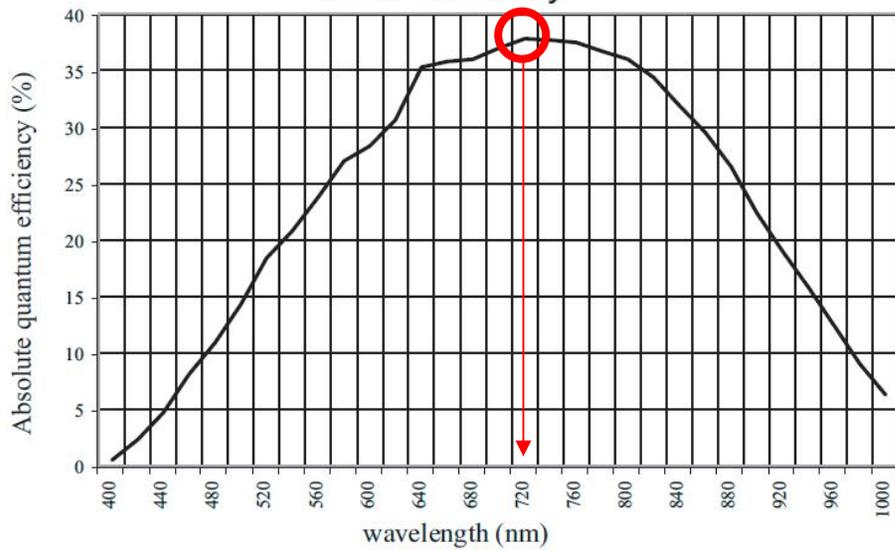
The specified images are corrected for atmospheric extinction according to the formula

$$\text{correction factor} = 10^{**} (0.4 * \text{airmass} * \text{extinction})$$

where the extinction is a tabulated function of the wavelength. The extinction file contains lines of wavelength and extinction at that wavelength. The units of the wavelength must be the same as those of the dispersion corrected images; i.e. Angstroms. If the image is dispersion corrected in logarithmic wavelength intervals (DC-FLAG = 1) the task will convert to wavelength and so the extinction file must still be wavelength. The table values are interpolated to the wavelengths of the image pixels and the correction applied to the pixel values. Note that the image pixel values are modified.

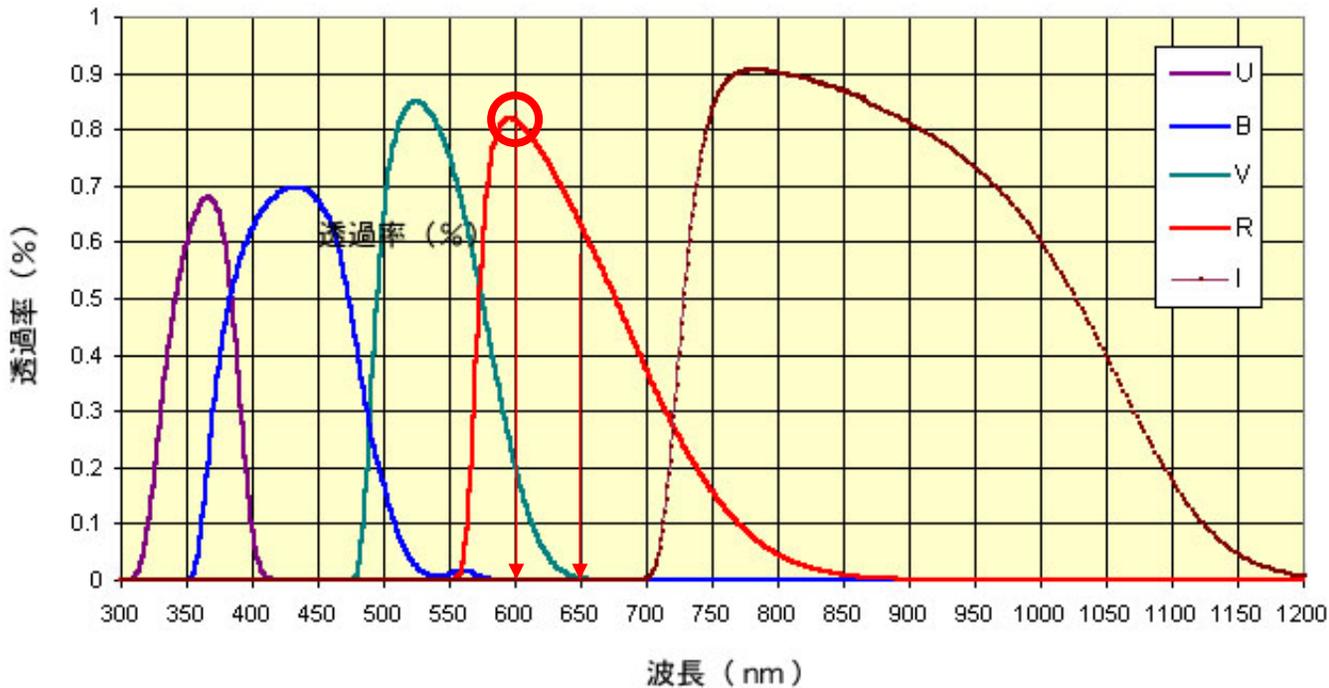
←
cl > help extinction
の一部

CCD Sensitivity



$$\lambda_{\text{widget_max}} = 720\text{nm}$$

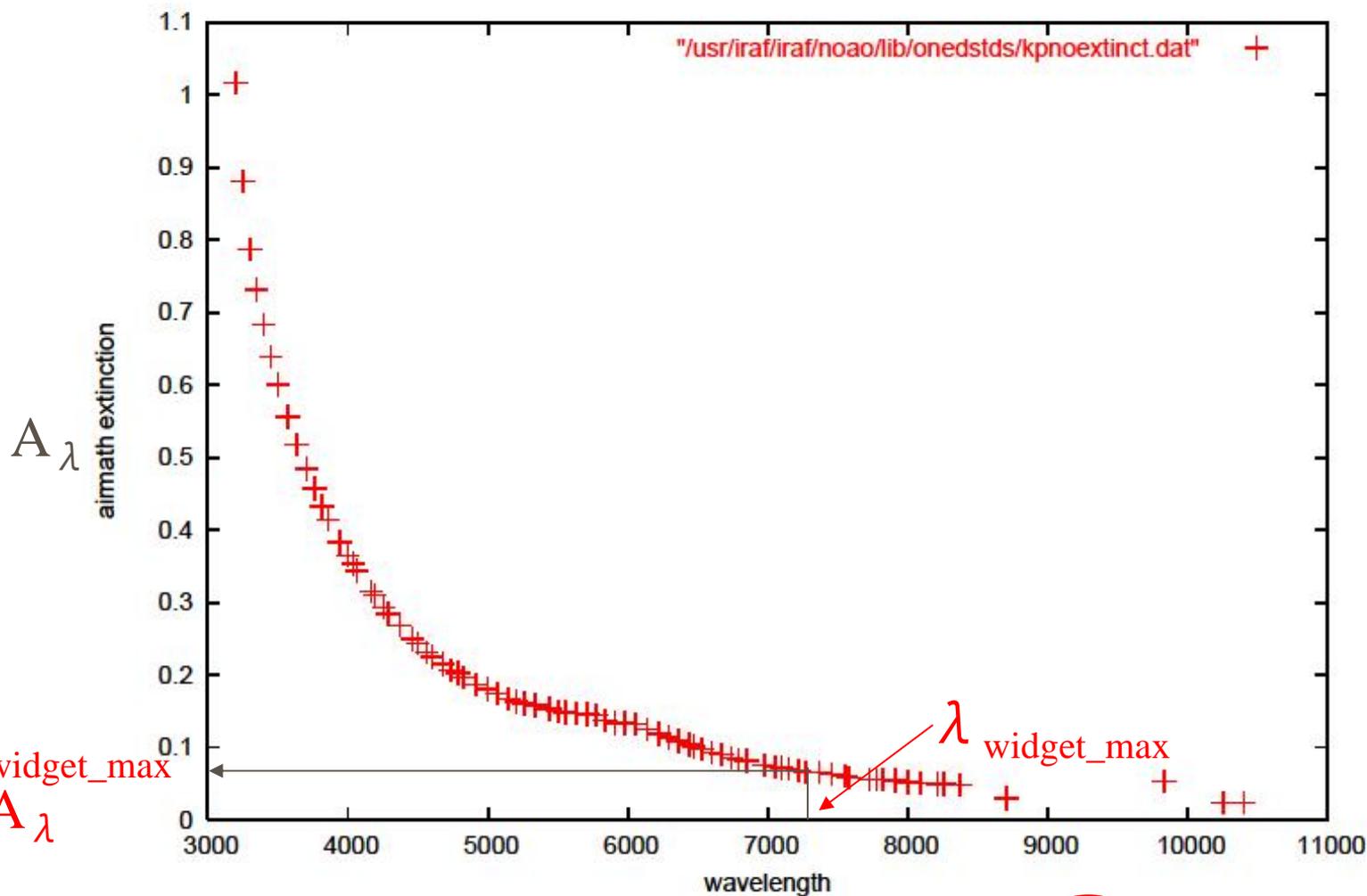
光電測光用ジョンソンフィルター



$$\lambda_{R_avg} = 660\text{nm}$$

$$\lambda_{R_max} = 600\text{nm}$$

各波長の、大気による flux の吸収度合い



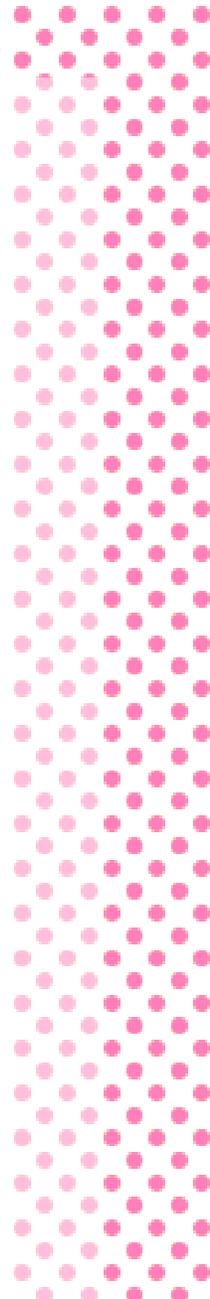
$\lambda_{\text{widget_max}} = 720\text{nm} \Rightarrow \lambda_{\text{widget_max}}$ の $A_{\lambda} = 0.068$
 $\lambda_{\text{R_avg}} = 660\text{nm} \Rightarrow \lambda_{\text{R_avg}}$ の $A_{\lambda} = 0.093$
 $\lambda_{\text{R_max}} = 600\text{nm} \Rightarrow \lambda_{\text{R_max}}$ の $A_{\lambda} = 0.133$

←
 グラフを描いた
 data fileから
 読み取った値

エアマス(secz)による等級への影響

ID	secz	λ	Δmag		
			720(wid_max)	660(R_avg)	600(R_max)
		extinction	0.068	0.093	0.133
Landolt1	1.267165705		0.086167	0.117846	0.168533
Landolt2	1.268274858		0.086243	0.11795	0.168681
Landolt4	1.273729196		0.086614	0.118457	0.169406
Landolt5	1.27695084		0.086833	0.118756	0.169834
Landolt6	1.27604395		0.086771	0.118672	0.169714
HR1544	1.121278808		0.076247	0.104279	0.14913
GSPC2	1.152095277		0.078342	0.107145	0.153229
GSPC3	1.152992245		0.078403	0.107228	0.153348
GSPC4	1.162564011		0.079054	0.108118	0.154621
GSPC5	1.155248337		0.078557	0.107438	0.153648

違う高度(約 12°)でも、エアマスによる等級差は0.01mag
 Landolt, HE1544, GSPC を同時にプロットしてよい根拠



積分時間による測光原点の違

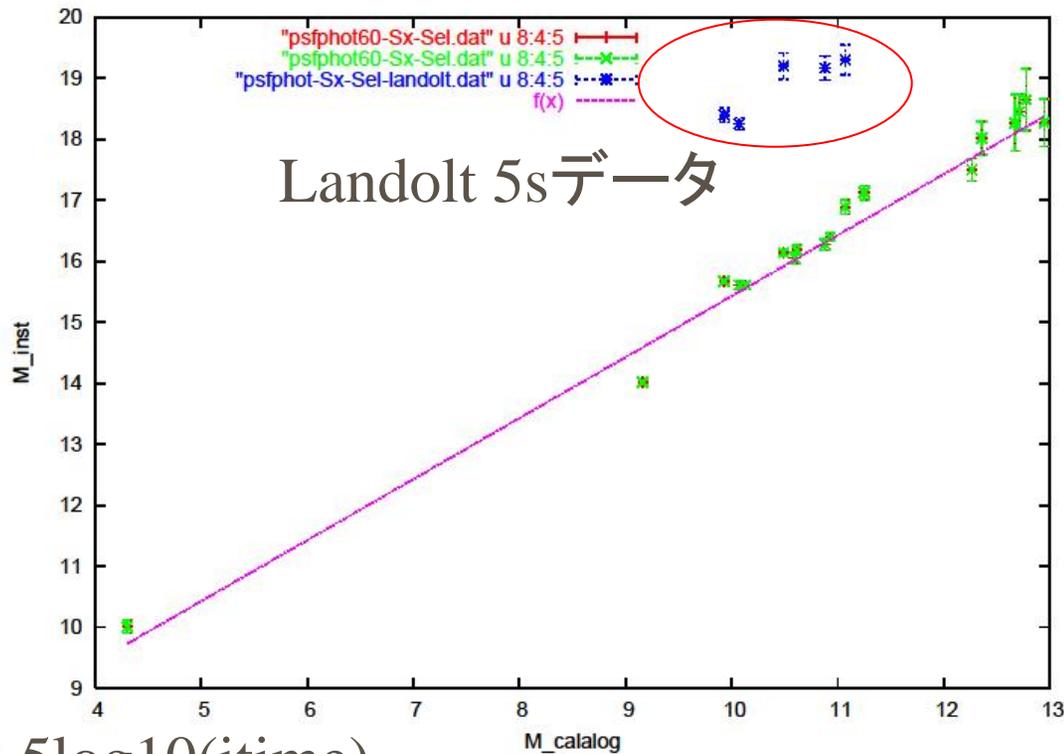
30° × 30° 画像の
GSPCの全星

+ Landolt

+ HR1544

と

Landolt 5秒データ
のプロット



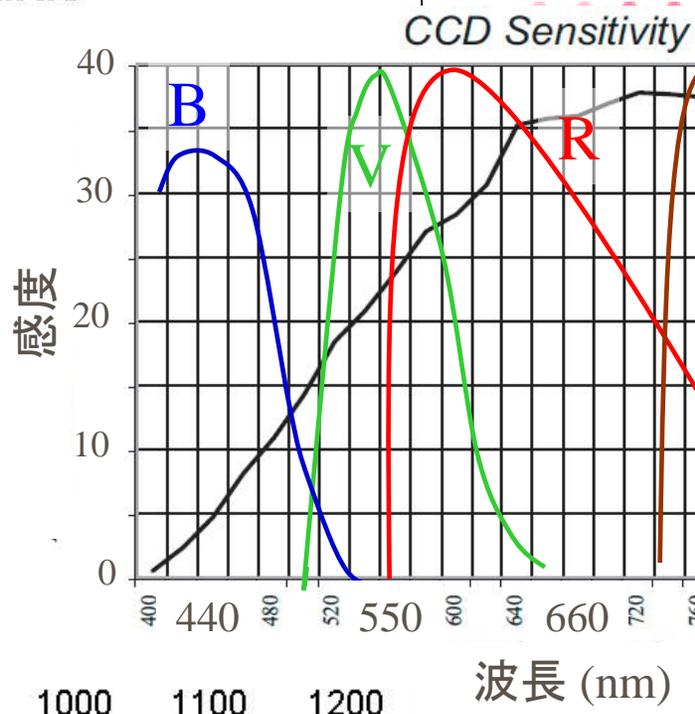
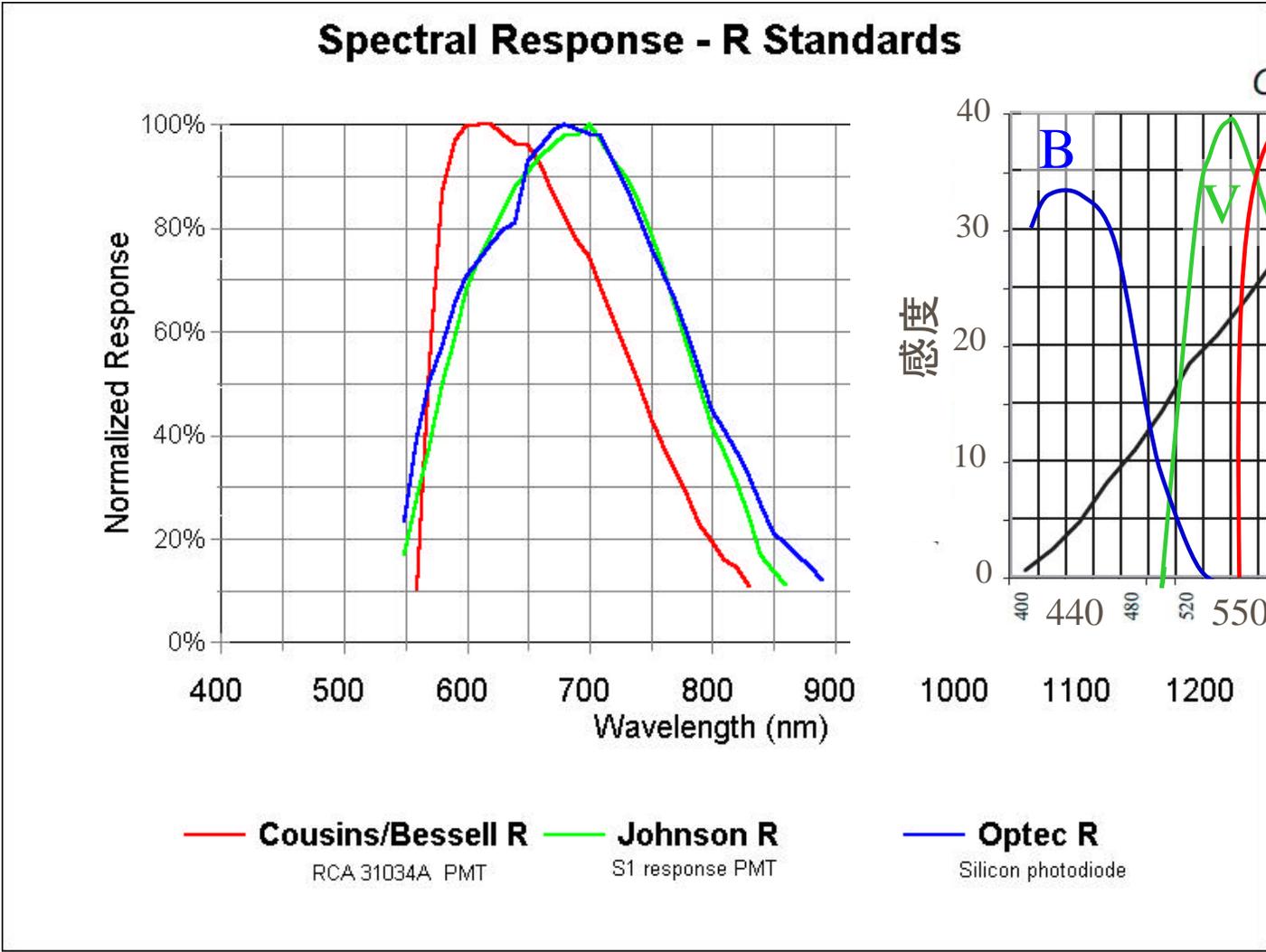
$$\text{mag} = \text{zmag} - 2.5 \log_{10}(\text{flux}) + 2.5 \log_{10}(\text{itime})$$

$$\Delta \text{mag} = 2.5 \log_{10}(60/5) = 2.689$$

5 s データの、Landolt, HR1544, GSPC でプロット
 $Y = x + a$ でfit $a = 8.383$

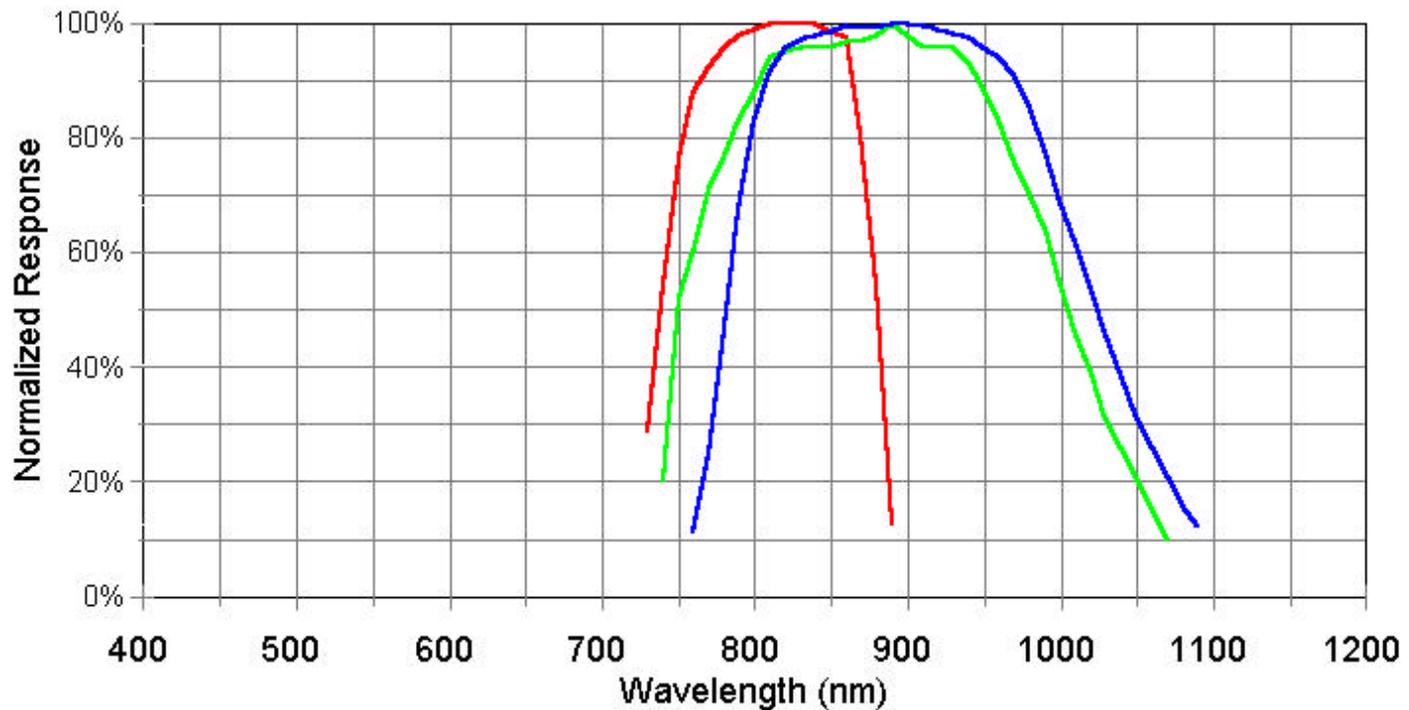
60s データの、Landolt, HR1544, GSPC でプロット
 $Y = x + b$ でfit $b = 5.616$

$$a - b = 2.767 \doteq \Delta \text{mag}$$



— **Cousins/Bessell R** — **Johnson R** — **Optec R**
 RCA 31034A PMT S1 response PMT Silicon photodiode

Spectral Response - I Standards



— Cousins/Bessell I

RCA 31034A PMT

— Johnson I

S1 response PMT

— Optec I

Silicon photodiode