

# 太陽系小天体の発見観測と位置観測に最適化した 可視広帯域フィルターの評価

奥村真一郎<sup>1)</sup>・高橋典嗣<sup>1),2),3)</sup>・吉川 真<sup>1),4)</sup>

<sup>1)</sup> 日本スペースガード協会、<sup>2)</sup> 明星大学、<sup>3)</sup> 千葉大学、<sup>4)</sup> JAXA/ISAS

Evaluations of a wide-range optical filter for deep imaging of small solar system bodies

Shin-ichiro OKUMURA<sup>1)</sup>, Noritsugu TAKAHASHI<sup>1),2),3)</sup>, and Makoto YOSHIKAWA<sup>1),4)</sup>

## Abstract

In an attempt to reduce city-light pollution, for the searching and the astrometric observation of small solar system bodies, we have designed a new wide-band filter, which we will denote as *Wi*. The new filter has a central wavelength slightly longer than the 'wavecut' wide-band filter that has been used for our observations up to the present. The sky background surface brightness is reduced by up to 10 % by using the new *Wi* filter instead of the old one. The signal-to-noise ratio in observation of small solar system bodies increases by 4-9 % with the new filter.

Key Words: Light pollution, Airglow, Filter

## 1 はじめに

美星スペースガードセンターでは2000年以来、地球近傍小惑星やスペースデブリなど地球近傍天体の発見観測・位置測定観測を実施している。天体からの光子数を稼いで信号対雑音比(S/N)を大きくするため、主に透過幅の広い波長カット(wavecut)フィルター(以降、Wフィルター)を用いた観測を行ってきた。

写真撮影やCCD撮像を前提に、星雲のコントラストを向上させるために特化したフィルターは各メーカーから市販されているが、天体の発見観測、位置測定観測に特化したフィルター、すなわちカラーの特性は問題にせず、極力多くの光子を捕らえ、かつ背景光をできるだけ減らし、測光、位置測定でのS/Nを向上させることを目的としたフィルターは作られていない。直感的には、単純に透過波長幅を広くとる(か、極端にはフィルターを外す)のがS/N向上につながると考えられるが、日本の空のように水蒸気量や街明かりの影響が多く、しかもすっきり晴れないような環境では必ずしもそうとも限らない可能性がある。

そこで、特に太陽系天体をターゲットとし、日本国内のような、必ずしも好条件でない観測サイトでの使用を前提に、可視の発見観測・位置測定観測に特化したフィルターを設計、製作し、その性能評価を行った。

## 2 バンド毎S/N評価

これまで使用してきた広帯域Wフィルターの効果と

改善すべき部分を明らかにするため、Wフィルターおよびターレットに同架されているV、R、Iの各フィルターについて、小惑星観測時のS/Nについて調査を行った<sup>1)</sup>。各フィルターの波長透過率は図1の通りである。

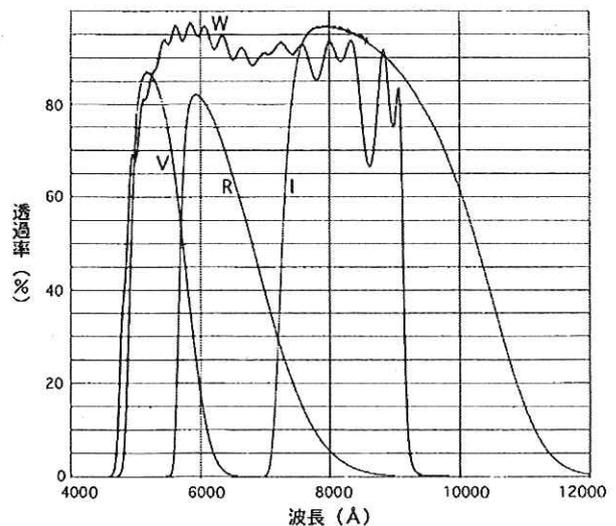


図1 美星スペースガードセンターで従来使用されてきた各フィルターの波長透過率曲線。

調査の結果のみを記すと、V、R、Iフィルターに比べて幅の広いWフィルターが確かに最もS/Nを稼ぐことができる事が確認された。また最も短波長側のVバンド

太陽系小天体の発見観測と位置観測に最適化した可視広帯域フィルターの評価

帯では星からのフラックスが少なくなる一方で空の明るさが明るく、他のバンドと比べて相対的にS/Nが悪くなっていることが同時に明らかとなった。図2は美星における夜光の可視低分散スペクトルであるが<sup>2)</sup>、これを見ると確かに5000~6000Åで空が明るくなることが理解できる。そこで、Wフィルターの波長帯から短波長側のVバンド帯をカットし、逆に長波長側を広げたフィルターを新たに作成すれば、よりS/Nを大きくすることができるとはならないかと考えた。

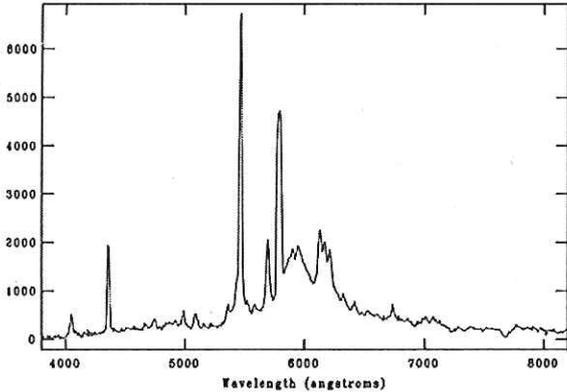


図2 開発中の小型分光器で取得した低分散の可視夜光スペクトル。波長分解能は約25Å。低空(仰角約10°)に向けて取ったため[OI](λ5577)など自然の大気光にくらべて市街光が強く出ている。

3 新Wフィルター (Wiフィルター)

図2より、5500~6000Å付近には水銀灯による輝線(λ5461、5770、5790)、5900Åを中心に約1000Å幅にひろがる高圧ナトリウム灯のD線など、S/Nを悪化させる要因となる人工的な光源が多数存在する。そこで、これらの輝線をなるべくカットするため、新たに製作するフィルターの短波長側カットオフは5900Åとした。長波長側については、水蒸気の吸収帯にかかるぎりぎりの9400Åまで延ばすこととした。その結果、新Wフィルターは中心波長7650Å、透過幅3500Åのフィルターとして製作を実施することとなった。図3は新旧フィルターの波長透過率曲線(実測値)である。

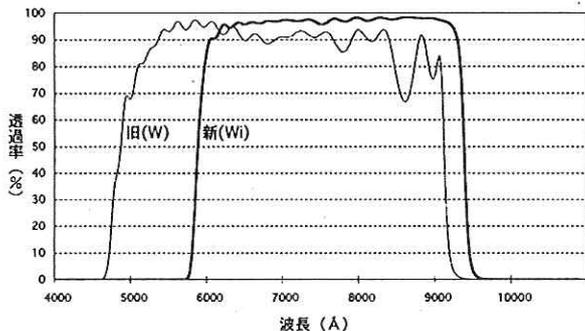


図3 新旧各Wフィルターの波長透過率曲線。

旧Wフィルターに比べて長波長側に650Å程シフトした中心波長はi'バンドの中心波長に近い事を理由に、以後新Wフィルターを「Wi」フィルターと記す。

4 新旧フィルターの性能比較

4.1 測定環境

美星スペースガードセンター50cm望遠鏡(F/2)において新旧両フィルターを同じターレットに同架し、同じ天体を両方のフィルターで交互に観測、星のフラックスと空の明るさを測定し、それぞれのフィルターを用いて測光した場合におけるS/Nを評価、比較を行った。検出にはApogee社のAP-10カメラを使用した。搭載されているCCDチップ(Thomson-Atmel社 CCD THX7899M、front-illuminated 2048×2048)の量子効率(感度の波長特性)グラフを図4に記す。ピクセルサイズは14μm、ピクセルスケールは2.9"/pixである。測光はIRAFのapphotパッケージによるアパーチャーフォトメトリ、アパーチャー半径は星像に応じて6~8pixelとした。S/Nの評価は、測光により求められた星のフラックスが3×3ピクセルに均等に分配されるとし、その時の背景(空)の明るさの1ピクセルあたりの明るさ(Digital Number (ADU)の総カウント)の平方根を各ピクセルの「ノイズ」として計算した。

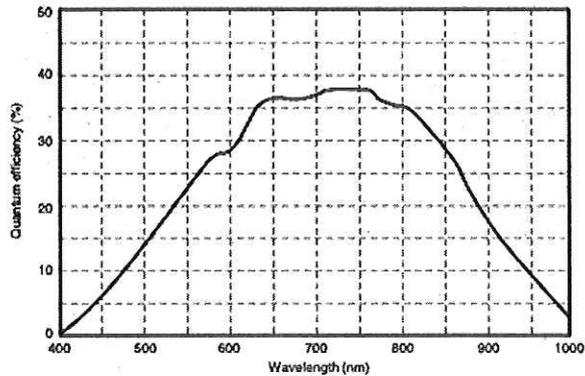


図4 測定に使用した CCD チップ(Thomson-Atmel社 CCD THX7899M)の量子効率(波長感度特性)。Atmel社のカタログより。

4.2 測定結果

S型小惑星(5)Astraea、(14)Irene、(27)Euterpe、C型小惑星(65)Cybele、(70)Panopaeaについて新旧フィルターを通して撮像したデータでの小惑星のフラックス総量と空の明るさを測定し、S/Nを計算した。観測した各小惑星の物理的性質と観測時の状況については表1の通りである。

表1 測定した各小惑星の物理的性質と観測時のコンディション

小惑星名	スペクトル型	絶対等級	自転周期 (hour)	最大変光度 (mag)	観測日 (2009)	観測時の空の状態	1秒角あたりの背景の明るさ(Vega等級)
(5) Astraea	S	6.85	16.800	0.30	6月6日	快晴、ほぼ満月(輝面比 98.5%)、月との離角 63°	18.7—19.3
(14) Irene	S	6.30	15.060	0.12	4月6日	快晴、月齢 10.5(輝面比 90%)、月との離角 56°	18.8—19.1
(27) Euterpe	S	7.00	10.410	0.21	6月6日	快晴、ほぼ満月(輝面比 98.5%)、月との離角 90°	18.8—19.0
(65) Cybele	C	6.62	4.0410	0.12	8月30日	Hazy で安定、月齢 9.7(輝面比 77%)、月との離角 65°	21.1
(70) Panopaea	C	8.11	15.797	0.12	4月6日	快晴、月齢 10.5(輝面比 90%)、月との離角 73°	19.4—20.0

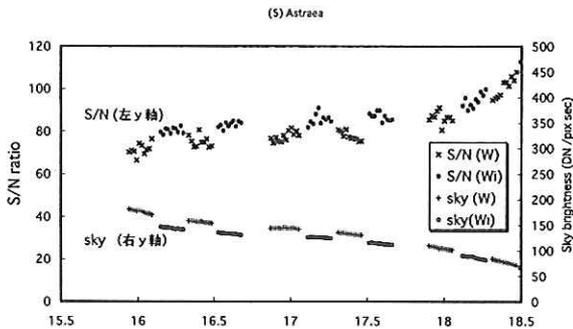


図5 小惑星(5) Astraea の新旧フィルターでの測定結果。横軸は観測時刻 (UT)、縦軸は測定されたフラックスから求めた S/N (左軸) と空の明るさ (右軸)。×印と●印はそれぞれWフィルターと Wi フィルターでの S/N、+印と○印はそれぞれ W フィルターと Wi フィルターでの 1 pixel・1秒あたりの空の明るさ。

図5は小惑星(5) Astraeaの測定値であり、WフィルターとWiフィルターでのS/Nと空の明るさの測定結果を表す。Wフィルターと比較してWiフィルターでは、空の明るさが暗くなる一方で星からのフラックスは増えるため、S/Nの向上が見られた。

他の小惑星の測定結果もあわせて考察すると、両フィルターでの背景光の明るさについて、その明るさの低減比率は背景光に比例して大きくなる傾向がある。すなわち、暗い空 (Vega等級で20~21等/arcsec程度) の場合にはWiフィルター使用での背景光低減率は2%~4%程度であるが、明るめの空 (Vega等級で19等/arcsec程度) の場合には背景光を10%以上減少させることができた(図6)。また、Wiフィルターを用いた場合の小惑星観測時のCCDへの入射光子数(総カウント数)はWフィルター使用時に比べ、S型小惑星の場合で4%~8%、C型小惑星で2%~5%増加することがわかった。その結果、星の測定値のS/Nについては、S型小惑星に対して

は $1.089 \pm 0.019$ 倍、C型小惑星に対しては $1.041 \pm 0.015$ 倍の改善が見られた(図7)。今後はもう少しサンプル数を増やしてゆく予定である。

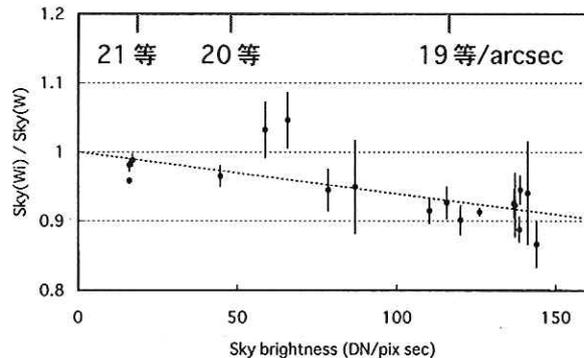


図6 新旧フィルターでの空の明るさの比。横軸はWiフィルターでの空の明るさ (1ピクセル1秒あたり)、縦軸はWiフィルターとWフィルターでの比。

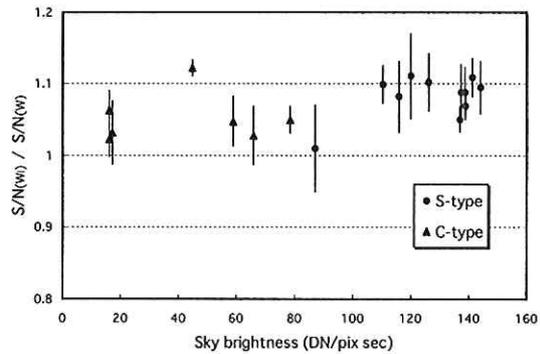


図7 同じ小惑星を新フィルターで測光した場合の S/N と旧フィルターで測光した S/N の比。●は S型小惑星、▲は C型小惑星の測定値を示す。

## 5. まとめ

これまで発見観測・位置観測に使用されてきたWフィルター(490-910nm)と新たに作成したWiフィルター(590-940nm)において小惑星観測時のS/N比の違いを調べた。Wiフィルターの質が高く、透過波長帯全域にわたって高い透過率を達成している効果もあり、WiフィルターはWフィルターに比べて透過波長幅を狭くしたにもかかわらず、小惑星観測時のCCDへの入射光子数(出力カウント数)はWフィルター使用に比べて2%~8%増加し、逆に背景光は、天頂角や方位などの条件により割合が変わるが空が明るい状況ほど効果があり、Wiフィルターの使用により最大で10%以上低減させることができた。その結果、観測時のS/Nは同じ露出時間でも4%(C型小惑星)~9%(S型小惑星)程度向上した。

なお今回使用したCCDよりも長波長側に感度の高いチップ(例えば浜ホト製完全空乏型CCDなど)を使用した観測の場合には、さらに効果が大きく出るものと予想される。

### 参考文献

- 1) 奥村真一郎, 美星スペースガードセンターの小惑星観測におけるバンド毎感度評価, スペースガード研究, 1, pp.99-66, 2008.
- 2) 奥村真一郎, 浦川聖太郎, 西山広太, 坂本 強, 高橋典嗣, 吉川 真, 田邊健茲, 太陽系小天体用小型分光システム計画, 本研究会集録

(2009年12月21日受付, 2010年1月15日受理)