

## 木曾 105 cm シュミット望遠鏡における可視光 CMOS カメラの開発

菊池 勇輝 (東京大学大学院 理学系研究科)

### Abstract

東京大学木曾観測所 105cm シュミット望遠鏡において 2011 年から運用されている KWFC(Kiso Wide Field Camera) は、 $2k \times 1k$  の CCD 8 枚を用いた  $2^\circ \times 2^\circ$  の CCD カメラであり、広視野ではあるものの、 $6^\circ \times 6^\circ$  以上の視野をもつシュミットの本来の性能を生かしきれぬものではなかった。現在我々は、このシュミット望遠鏡の視野全域を  $2k \times 1k$  の CMOS センサで覆う新しいカメラの開発を行っている。CCD と比較すると CMOS は撮像後の読み出しにかかる時間が非常に短いという特徴があり、一回の撮像ごとに 1-2 分程度を必要とする CCD に対し、CMOS では 0.01 秒以下と圧倒的に短いため、高い時間分解能をもった動画的な撮像が可能になる。これにより可視光天文学においてあまり研究されてこなかった 1 秒前後の短いタイムスケールを持つ突発天体の観測が可能となる。これまでに CMOS センサをモザイク化して広視野天文観測おこなう試みは他に例がないが、近年の技術革新により CCD に匹敵する低雑音、多素子の CMOS センサが作成できるようになったことで、その応用が可能になった。本装置の開発では、シュミットの類い稀な視野の広さに加えて CMOS センサを用いることで、短いタイムスケールの変動天体に対する高いサーベイ能力が期待される。今回は、開発中のカメラの概要とその開発計画、およびターゲットとなるような突発天体現象の概要を示すことで、本装置の開発およびそれによる新しいサイエンスの展望を示したい。

## 1 Introduction

東京大学木曾観測所では 1974 年より 40 年にわたって、口径 105cm のシュミット望遠鏡を運用してきた。2012 年から運用を開始したモザイク CCD カメラ KWFC(Kiso Wide Field Camera) は  $2^\circ \times 2^\circ$  の広い視野をもち、超新星や変光星などのサーベイ観測において多くの成果をもたらしてきた。しかし、木曾のシュミットの全視野は直径約  $9^\circ$  の円形に近く、KWFC ではこの広視野を生かしきることができていなかった。KWFC では  $2k \times 1k$  の CCD 8 枚を用いているが、これらと同じ CCD を数十枚用いて焦点面全てを覆った場合、冷却に必要な真空装置や冷凍機の重量などの理由から、実現可能な設計をすることが困難になる。そこで我々は、このシュミットの全視野を利用できる新しい装置として、CCD にかわる次世代のセンサーとなることを期待される可視光 CMOS センサーを世界で初めて用いて、超広視野カメラの開発を進めている。

## 2 CMOS センサー

今回使用する CMOS センサーは  $2k \times 1k$  フォーマットで、常温駆動でも十分な性能を実現でき、冷却装置、真空装置を使用する必要がないため、数十枚規模で用いても無理のない設計ができる。これにより、シュミットの全視野を利用することが可能となる。ただし、センサーの有効面積が 30%程度であるため、焦点面をすべてを覆った場合の視野面積は約  $20deg^2$  となる。

CMOS センサーの特徴の一つとして、読み出し時間の短さがあげられる。CCD では受光部で生じたキャリアを、水平、垂直方向レジスタによってバケツリレー方式で転送する必要があるが、CMOS では各ピクセルごとに接続されたアンプによって信号を読み出す。この読み出し方法の違いにより、読み出し時間は CCD では一枚の撮像ごとに 10-100 秒かかるのに対し、CMOS では 0.01 秒以下と圧倒的に短くなる。

また、その構造上、CMOS センサーでは部分読み出し機能の利用が可能である。あらかじめ読み出し制御のためのプログラムにより、特定のピクセルの

みを読み出すことで、さらなる高速読み出しを実現できる。

### 3 設計性能

本装置ではシュミットの全視野を覆うために 84 枚の  $2k \times 1k$  フォーマット CMOS センサーを使用する。一回の撮像では、1 枚のセンサーから約 4.5MB のデータが生成し、全 84 枚からの発生データは約 380MB となる。加えて CMOS センサーの高速読み出しを考慮すると、一晩でのデータ生成レートは数十 TB にのぼる。このような大容量のデータを処理し、保管するだけのシステム設計等の要請から、本装置の基本性能として最短積分時間 0.5 秒を実現する設計を行っている。0.5 秒積分での撮像を一晩続けた場合、生成するデータは一晩で約 25TB となる。データ取得部を 5 台の観測用 PC と各 5 台の 1 次/2 次サーバからなるシステムによって構成することで、このような大容量のデータを扱うことが可能になる。本装置の設計が実現した場合の性能と既存の望遠鏡との比較を図 1 に示す。ここでは各望遠鏡のサーベイ能力をタイムスケール、視野、限界等級の 3 つの観点から示している。本装置が実現する短時間間隔、約  $20deg^2$  の超広視野、1 秒積分で 17 等前後の深い限界等級は、他に類を見ないものであり、既存の望遠鏡に比べて、図 1 中の左側の領域を広い視野と深い限界等級でカバーすることができる。

読み出しノイズは  $2-3e$  程度、望遠鏡を含めたスループットは V-band で 44% 程度と計算されている。

### 4 実現可能なサイエンス

本装置はその約  $20deg^2$  の超広視野と短時間の連続撮像能力により、これまであまり観測研究がなされてこなかった 10 秒以下のタイムスケールを持つものを含め、突発天体現象のサーベイ観測において非常に優れた装置となることが期待される。突発天体とは超新星や古典新星などのように急激な増光を示す天体の総称である。このような現象の光度の時間変化を詳細に追うことは、物理現象の実験系としての研究価値のあるものである。Ia/重力崩壊型超新星爆

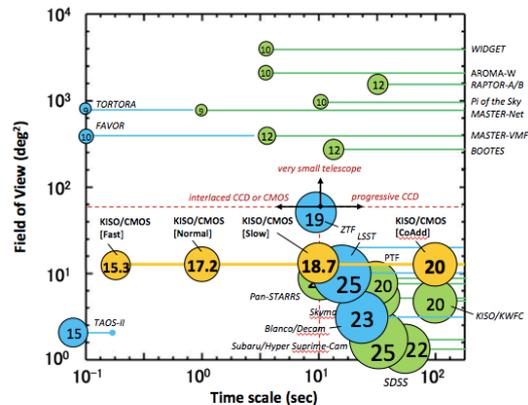


図 1: 各望遠鏡のサーベイ能力の比較。横軸は観測可能な変動天体のタイムスケール、縦軸は視野であり、各プロットの丸の大きさはそれぞれの観測可能な天体の視等級に対応する。緑色は既存の望遠鏡、青は計画中の望遠鏡、黄色が本装置の性能を表している。

発や、古典新星、ガンマ線バースト、LBV(Luminous Blue Variable) などに加え、近年では、これらに該当しない突発天体現象や、理論的な予想から、さまざまな現象の存在が示唆されている (図 2)。

しかし、これまでの観測では 1 日以下のタイムスケールの変動天体についてはあまり研究がなされてこなかった。現在 KISS(KIso Supernovae Survey) プロジェクトをはじめとするいくつかのグループでは、重力崩壊型超新星爆発の爆発の瞬間の現象であるショックブレイクアウトの観測を主な目的として、数時間の変動天体現象のサーベイを行っており、radio loud な AGN などの稀な変動天体現象も観測されるなど、短時間変動天体の観測研究も進んでいる。

本装置により実現するのは、さらに短い時間間隔での連続撮像と超広視野での観測である。これらによって期待されるサイエンスターゲットとしては以下のような稀な天体現象などが考えられる。

- 重力波候補天体の探査
- 超新星爆発の瞬間の検出
- 地球近傍天体の探査

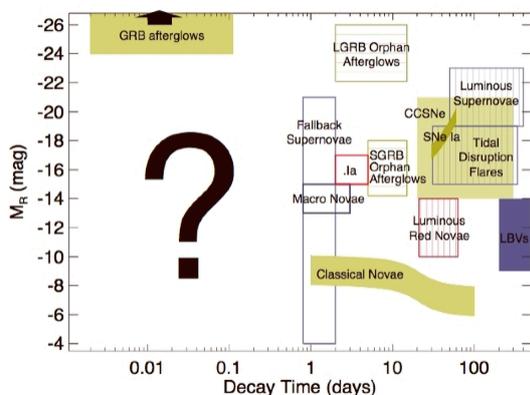


図 2: 現在知られている突発天体。横軸は減光のタイムスケール、縦軸は R-band でのピーク絶対等級を示す。(S. R. Kulkarni, 2012. arXiv:1202.2381)

- 太陽系外縁天体の探査
- スーパーフレア現象の探査
- ガンマ線バーストの瞬間の検出
- 系外惑星トランジットの探査
- 未知の短時間突発天体現象

これらを含む突発天体のうち、以下では本装置のサイエンスタゲットの中でも特徴的な二つを紹介する。

#### 4.1 重力波候補天体のフォローアップ

近年の技術の進歩により、重力波やニュートリノ、高エネルギー宇宙線などの検出による、いわゆる Multi messenger 天文学への期待が高まっている。中でも重力波天文学については LIGO や VIRGO、KAGRA といった重力波望遠鏡が数年内に世界各地に建設される計画があり、中性子星合体や重力崩壊天体などの突発現象からの重力波の検出が可能となる。しかし、これらの重力波望遠鏡による重力波源天体の位置決定精度は直径 5 度程度しかなく、それだけで波源である突発天体を特定することができない。し

たがって、重力波望遠鏡から検出のアラートを受けた場合、視野の広い望遠鏡を用いてその候補天体を即時にフォローアップ観測することが必要となる。本装置のもつ直径約 9° の超広視野は、このような重力波望遠鏡の到来予測方向をほぼ覆うことができるため、重力波源候補天体の探査に非常に適したものであると言える (図 3)。

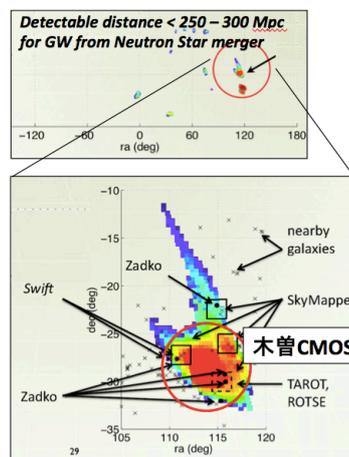


図 3: 中性子星合体が起きた場合の重力波到来方向の予測と各望遠鏡の視野の広さの比較。他の望遠鏡に比べて、広い視野を持つ本装置は重力波源の探査にきわめて有効である。(Hayama (NAOJ) 2012 [http://www.ioa.s.u-tokyo.ac.jp/event/20120220/hayama\\_main20120220\\_hayama.pdf](http://www.ioa.s.u-tokyo.ac.jp/event/20120220/hayama_main20120220_hayama.pdf))

#### 4.2 太陽系外縁天体の掩蔽現象

太陽系外縁天体 TNOs(Trans Neptune Objects) は太陽系の惑星の形成時の情報を保存しており、太陽系の形成・進化過程の解明や系外惑星系のデブリ円盤との比較の点で研究価値の高い天体である。TNOs のサイズは、数千 km 以上から数百 m 以下まで様々であるとされるが、天体のサイズはもっとも基本的な物理量の 1 つであり、サイズ分布から天体の物理的性質だけでなく、起源や進化、太陽系の物質分布を知る手がかりが得られる。しかしながら、今までに存在とその軌道わかっている 1000 個強の TNOs の

うち、サイズがわかっているのは直接観測されたわずか 80 個程度である。巨大惑星形成時の太陽系外縁部の環境やその後の進化過程を解明するには、10km 以下の TNOs が重要であるが、これらの TNOs の視等級は可視で約 29 等であり直接観測は不可能である。そこで、掩蔽現象による間接的な方法によって、TNOs のサイズを決定する。掩蔽現象とは、背景星となる恒星の手前を TNOs が通過することにより、天体サイズや距離に応じた特徴的な回折パターンによって光度変化が観測されるものであり、TNOs のサイズ・形状決定に有効な手段の 1 つである (Durech et al. 2011)。掩蔽現象の継続時間は数百ミリ秒と短く、サイズの算出に十分な光度変化をとらえるには 1 秒間に数十回の撮像を行うことが必要である。本装置の設計は、CMOS センサーの部分読み出しにより 20Hz の撮像スピードの実現を可能にするものであり、掩蔽現象の観測に十分な性能をもつことになる。また、掩蔽現象は、一つの対象となる恒星に対して  $10^{-2} - 10^{-3}$  回/年の割合で生じるものであるため、 $10^4$  個程度の恒星を監視観測し続ける必要があり、本装置の広視野はこのような多くの恒星の同時観測に非常に適していると言える。

Durech, J., et al. 2011, Icarus, 214, 652

Rau A. et al., 2009, PASP, 121, 1334

## 5 今後の展望

我々は 2016 年までに全 84 枚のうち、16 枚のセンサーを用いたカメラの完成を目指している。その後、同様の構成を拡張することによって、2018 年までに 84 枚のセンサーをもって本装置を完成させる予定である。今後、データ取得部の転送速度の実験や、読み出し部のエレクトロニクスの開発に加え、企業との協力のもと、筐体や光学の設計を行っていく。また、運用に際しては、大容量データのリダクションソフトの開発が必要不可欠であり、大きな課題の一つとなることが考えられる。

可視光モザイク CMOS カメラの開発は世界初の試みであり、本装置の成功は次世代の望遠鏡開発においても大きな意味をなすものであると考えられる。

## Reference

S. R. Kulkarni. 2012. arXiv:1202.2381