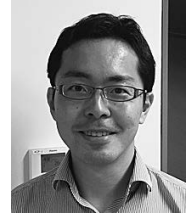


木曾超広視野CMOSカメラ Tomo-e Gozen による重力波可視光対応天体の探査



酒 向 重 行

〈東京大学大学院理学系研究科附属天文学教育研究センター・科学技術振興機構さきがけ 〒181-0015 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

e-mail: sako@ioa.s.u-tokyo.ac.jp

トモエゴゼンは重力波の可視光対応天体を世界で最初に同定することを目的に開発が進められている東京大学木曾 105 cm シュミット望遠鏡用の広視野高速カメラです。84 台の常温駆動 CMOS センサにより 20 平方度に及ぶ広い空を最大 2 Hz で連続観測できることが特長です。私たちの研究グループでは、トモエゴゼンの広視野と高速性を活かすことで、重力波望遠鏡の初期運用フェーズの位置決定精度である数百平方度を、1 時間以内に 20 等級以上の深さまで追観測する計画です。本稿の後半ではトモエゴゼンの観測装置としてのユニークネスに触れ、それにより切り開かれる広視野動画天文学の世界についてもご紹介します。

1. 探 し 物

夜空から重力波の電磁波対応天体を探し出すことはシンプルですがエキサイティングな課題です。連星中性子星合体は重力波とともに強い電磁波を放出する有力な候補ですが、その明るさ、色、継続時間、イベントレートは理論モデルに大きく依存します^{1), 2)}。このような素性のわからないモノの捕獲は実に難しく、どのような仕掛けを張るべきか途方にくれます。重力波の電磁波対応天体はいわばツチノコであり、今、世界がその姿を見たいと準備を進めています³⁾。ツチノコはチーと鳴くという話があります(図1参照)。電磁波対応天体は重力波を放出します。いずれにせよ、信号を受けた方向のやぶの中を「素早く」、「広く」、「深く」探査することが大方針です。そして、失敗にめげずに「粘り強く」挑戦し続けることが大切です。

重力波天体は原理的にコンパクトな天体の高速な運動に由来し、多くは合体・爆発現象を伴うと

考えられます。したがって、それに付随して放射される電磁波の強度も一過性で急速に減少すると考えるのが自然です。こうした突発現象の探査には、望遠鏡の口径だけでなく観測視野、機敏性、運用時間も大切な要素となります。そして、限られたリソースをいかに効率良く「素早く」、「広く」、「深く」、「粘り強く」に配分するかが鍵となります。探し物が逃げてしまう前に、意味のあるボリュームを探査すること、それを繰り返すことが重要になります。

2. トモエゴゼン

東京大学木曾観測所を中心とする私たちの研究グループでは、重力波の可視光対応天体を世界で最初に同定することを目的とした木曾 105 cm シュミット望遠鏡用の超広視野高速カメラ Tomo-e Gozen (トモエゴゼン) の開発を進めています^{4), 5)}。木曾シュミット望遠鏡は 1974 年に建設された視野 $\phi 9$ 度の広視野望遠鏡です。これまで、木曾の暗い空を活かした可視光の広域観測を進め

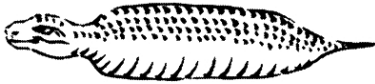


図1 信濃奇勝録（井出道貞，1756-1839）の筑摩郡（長野県木曾郡を含む地域）の頁で使用されているツチノコの挿絵。画像はWikipediaより。

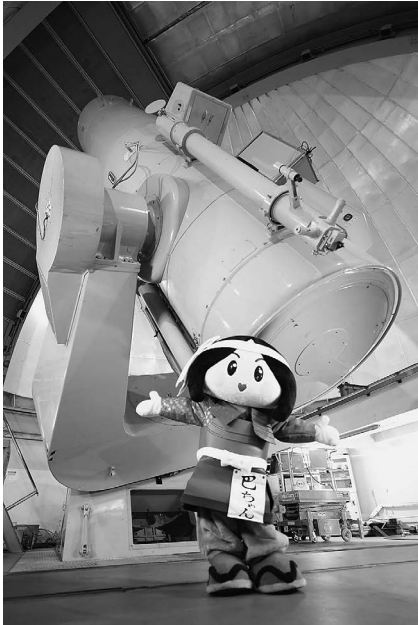


図2 東京大学木曾観測所105 cmシュミット望遠鏡と長野県木曾町役場からやってきた「巴ちゃん」。

てきました。1990年代にセンサが写真乾板からCCDに移行したことで、特長である広視野を一時的に失いましたが、その後のCCDの大型化とモザイク化により⁶⁾最近では超新星の高頻度探査や変光星の銀河面探査で数々の成果を上げています⁷⁾。そして2018年からは、84台の高感度CMOSセンサを搭載したトモエゴゼンが木曾シュミット望遠鏡の全視野を再び覆い、ほかに類のない超広視野+動画観測を実施する計画です。

なぜトモエゴゼンという名前なのか。よく聞かれます。何かの頭文字ではありません。木曾を訪れると理由はすぐにわかります。平家物語に登場する巴御前（ともえごぜん）は地元の誰もが認めるヒロインなのです（図2参照）。巴御前は木曾

義仲の片腕として源平の世を駆け抜けた、日本史上最強の女子とされています。義仲の没後は北陸へ逃れ、91歳まで生きたとされます。私たちは、優雅ながら他を超越した腕力と躍動感をもつ巴御前の姿をこの新型広視野高速カメラに重ね、the Tomo-e Gozenと名づけました。

3. あまりに広い

将来、KAGRAを含む複数台の重力波望遠鏡が稼働すると、重力波の到来方向の決定精度は数十平方度まで絞られます。こうした時代になれば、すばる望遠鏡のHyper Suprime-Camをはじめとする大集光力の広視野カメラによる極めて深い追観測が可能になります⁸⁾。中性子星合体からの電磁波放射は赤いスペクトルをもつと予言されているため⁹⁾、赤外線による広視野探査も有効な手段となるかもしれません。ただ、電磁波対応天体を「最初に同定する」には、「こうした時代が来る前」の戦略を考える必要があります。

しばらくは重力波望遠鏡が2台の時代が続きます。3台以上に増えても、観測条件や装置の準備状況により2台相当の性能しか得られない場合が多々あると予想されます。こうした重力波望遠鏡の初期運用フェーズにおける位置決定精度は数百平方度となります。いくらやぶの中からチーと鳴き声を聞いても、短期間（数時間以内）に必要なとされる深さ（20等級以上）を探査するには、あまりに範囲が広すぎます。運を天に任せて望遠鏡を空に向けるしか手段はないのでしょうか。

最近、カメラレンズや小口径望遠鏡を複数台組み合わせた全天モニタ装置が開発、運用されています^{10), 11)}。しかし、こうした装置では感度と空間分解能が不足するため可視光対応天体の探査に適しません。そこで私たちの研究グループは、広視野と機敏性を兼ね備えた高感度の観測装置の実現を目指すことにしました。重力波が到来した方向の広い空を、広視野シュミット望遠鏡を用いて繰り返しスキャンする戦略です。これには数十平

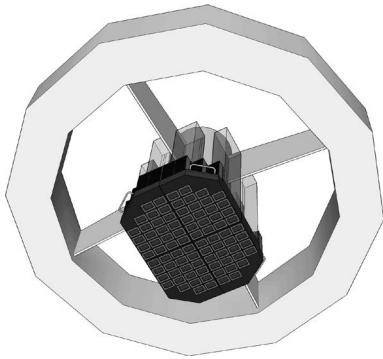


図3 超広視野CMOSカメラTomo-e Gozenを木曾シュミット望遠鏡の主焦点部に搭載したときの概観(完成予想図)。84台のCMOSセンサの個々に光学フィルタが設置される。

方度の超広視野と、読み出し時間が短く連続観測が可能なセンサを搭載したカメラシステムが必要になります。こうして生まれたのがトモエゴゼンです(図3参照)。

4. 超広視野と機敏性

可視光天文学では100%に迫る量子効率の特長の裏面照射型CCDを冷却下で用いることが常識となっています。しかし、このような高感度CCDは読み出し時間が10-数十秒と遅く、また、電荷転送の読み出し方式は機械式シャッタの併用を必要とします。そのため、10秒より短い露光フレームを連続的に取得することはできません。一方、一般社会では、一眼レフカメラからスマートフォンに搭載されるカメラまで、大部分がCCDからCMOSセンサに移行しました。CMOSセンサは量子効率でCCDに劣りますが、電圧転送のため高速性と低消費電力が特長です。また、センサ内に周波数特性のあるアンプやAD変換器等の機能性をもつことができます。これによりCCDより低い読み出しノイズ(1-2 e^-)を実現します。電気式シャッタ機能とローリング読み出し機能は、機械式シャッタを用いずに短い露光フレームを連続的に(動画を)取得できます。

トモエゴゼンは84台の高感度CMOSセンサに

て計20平方度の空を覆います。シャッタの駆動やセンサの読み出しに起因する観測のロスタイムはありません。動画データを取得しながら、望遠鏡の指向方向を短時間に次々にスイッチします。望遠鏡の移動中も動画データを取得し、不要なフレームは解析時に除去します。これにより極めて広い空を効率的にスキャンすることができます。

空の1方向で3秒間分の露光フレームを取得しながらスキャンした場合、高度30度以上の全天域(10,000平方度)を僅か2時間で18等級の深さまで観測できます。解像度は1.2秒角/画素に設定されているため、天体が混んだ領域でも突発天体を高い信頼度で検出できます。重力波の可視光対応天体の探査では観測領域と露光時間を調整することで、重力波望遠鏡の初期運用フェーズにおける位置決定精度である数百平方度の空を20等級以上の深さまで繰り返し探査する計画です。

5. 型を破る

トモエゴゼンは世界初の超広視野モザイクCMOSカメラです。84台のCMOSセンサで20平方度の超広視野を機敏に観測できます。同時期に米国パロマー天文台のシュミット望遠鏡にて運用を開始する視野47平方度のCCDカメラZTF¹²⁾とともに、次世代を牽引する超広視野探査カメラとなります。しかし、これだけではトモエゴゼンの世界を十分にご紹介したとは言えません。私たちは近年の天文観測装置の大規模化に危機を感じ、その突破口になりうる技術や概念を取り入れながらトモエゴゼンを開発しています。仕様と工程の思い切った簡略化です。下記ではその代表例をご紹介します。これにより開発期間とコストを大幅に低減できます。同じリソースでより大規模な観測装置を実現できるとも言えます。

1. CMOSセンサは高速な読み出しでも低い読み出しノイズを達成します。そのため、トモエゴゼンは木曾シュミット望遠鏡(F/3.1)搭載時に、僅か0.5秒露光で背景

フォトン限界の感度に達します。機械式シャッターや読み出しによるロスタイムがないことも加わり、10秒以下の連続露光観測ではCCDに対する量子効率のディスアドバンテージを逆転し、CMOSセンサが感度でCCDに勝ります。

2. トモエゴゼンはキヤノン社の35 mmフルHD表面照射型CMOSセンサを採用しています。このセンサの暗電流は常温でもシュミット望遠鏡搭載時の背景光（光電流）を下回ります。したがってセンサを冷却する必要がないため真空冷却装置が不要となります。この技術革新により、トモエゴゼンは同規模の広視野CCDカメラと比較し圧倒的に軽量でコンパクトなシステムを実現します。
3. トモエゴゼンの常温常圧システムは高品質な産業技術の容易な導入を可能にします。例えばCMOSセンサは光学基準ベンチに熱伝導両面テープで直接に固定されます（図4参照）。真空冷却下ではありえない手法です。構造材料、電気部品、光学素子も品質が管理された高精度品を利用できます。トモエゴゼンの光学系は常温下で精密加工した部材で構成されるため、組み立て調整が不要です。
4. トモエゴゼンはシステムを安定化するために機械可動部をもちません。光学フィルタは昼間時に手動で交換します。
5. 生成するデータも型破りです。従来のCCDカメラと異なり、トモエゴゼンは動画データを基本とします。結果、前述したように望遠鏡の駆動性能への要求を低減し、観測の効率化を実現します。生成される動画データは最大読み出し速度（2 Hz）時に30 TB/夜に達します。この動画ビッグデータのすべてをストレージに保存することはコスト面で現実的ではありません。そ



図4 木曾シュミット望遠鏡の焦点面形状（半径3,300 mmの球面）に沿って設置されたCMOSセンサ。背面のアルミ柱と両面テープにて固定されている。

のためトモエゴゼンは天文学の鉄則に反し、生データを消去することを設計の基本軸に置きます。生成される膨大なデータを逐次解析することで「心がときめく」ものだけ残します¹³⁾。動画ビッグデータから価値ある情報を逐次に抽出するには、従来の天文学の解析手法では不十分かもしれません。スパースモデリング、機械学習、データマイニングといった情報数学の導入を模索しています。

6. 広視野動画天文学がもたらす衝撃

これまでの天文学では暗いもの、細かいものの探査に多くの力が注がれてきました。しかし近年、超新星や変光星の探査など、時間軸と広視野を重視したタイムドメイン観測の注目度が上がってきています。重力波、ガンマ線バーストといった新しい突発現象の発見に加え、イメージセンサの大型化と光学系の広視野化といった技術的要因もこれを後押ししています。1950-1970年代に建設されたパロマー天文台や木曾観測所のシュミット望遠鏡が今、再注目されているのはこうした背景があるためです。

トモエゴゼンはこれまで狭い視野で進められて

きた動画天文学を20平方度という超広視野の世界へ一気に拡張します。この新しいパラメータスペースの宇宙に何が隠されているのでしょうか。秒以下のタイムスケールで変動する天体現象は少ないと感じられている方は多いと思います。私もその一人でした。考えが変わったのは2011年にキャノン社の協力で20 cm角の大型CMOSセンサを木曾シュミット望遠鏡に搭載し、試験観測を行ったときのことでした¹⁴⁾。そのCMOSセンサの感度や画素サイズは天文観測に最適化されていなかったため、当初は正直、あまり期待をしていませんでした。しかし、テレビモニタに映し出された動画データを観たときに強い衝撃を受けました。画面を埋める大量の天体（これは想像の範囲内）に加え、その前を芸術的に横断する薄雲の構造。そして、数多くの人工衛星とスペースデブリ。何よりも驚いたのは十数秒に1個流れる微光流星です。私は長年、広視野カメラの開発に携わり多くのデータに触れてきましたが、夜空に躍動感を感じたのは初めてでした。このとき、本質的に異なる世界をのぞき見た感覚を得ました。

流星やデブリといった高速移動天体は各画素上には数秒から数ミリ秒しか滞在しません。画素を通過後も露光を続けると背景光によるフォトンノイズに埋もれていくため、微かな信号は消滅してしまいます。しかし、短時間で露光を切り上げて信号を読み出せばフォトンノイズへの埋没を防げます。もし、中性子星合体のようなコンパクトで高エネルギーの現象が数秒以下の時間スケールの閃光（フラッシュ）を生成していたとしても、これまでのCCDによる低速な探査では、信号が背景フォトンの海に沈むため捉えることはできません。宇宙論的距離からのミリ秒以下の突発現象として注目されている高速電波バーストからは、未知なる可視光による同様の突発現象の存在を期待させられます¹⁵⁾。私達が探し求める重力波の可視光対応天体もこうしたフラッシュの仲間なのかもしれません。

7. 神岡から木曾へ

東京大学木曾観測所（長野県木曾町）と重力波望遠鏡KAGRA（岐阜県飛騨市神岡町）は北アルプス乗鞍岳を挟み直線で75 kmしか離れていません（東京-小田原間に相当）。前身である東京大学東京天文台木曾観測所と東京大学宇宙線研究所神岡地下観測所はそれぞれ1974年と1983年に開設されました。同時期に異なる目的のために始まった地図上に並ぶ二つの研究所が、現代において新しい分野である重力波天文学の下に連携できることに、日本の宇宙物理学の底力を感じます。1180年、巴御前は木曾義仲とともに木曾を出発し、KAGRAの近隣都市である富山市を抜け京都へ向かったそうです。重力波天文学ではこの道をさかのぼり、神岡から木曾へ、そして木曾を起点に国内、海外の重力波電磁波追観測ネットワーク³⁾へバトンをつなげていきます。

謝 辞

本稿の内容は日本学術振興会科学研究費（課題番号：25103502, 26247074, 24103001, 16H02158, 16H06341）、科学技術振興機構さきがけ、国立天文台共同開発研究から支援を受けました。将来の広視野天文学の可能性を見抜き、強靱な躯体をもつ木曾105 cmシュミット望遠鏡の実現に携わった先生方、技術系、事務系の皆様、地元の皆様、そして40年以上の長期にわたり性能の維持と改善に携わり、トモエゴゼンの時代につなげてくださった皆様へ敬意を抱くとともに深く感謝いたします。トモエゴゼンへの道を日本の技術とフロンティアスピリッツで切り開いていただいたキャノン社デバイス事業部の皆様、協力メーカーの皆様、国立天文台先端技術センターの皆様にも深く感謝申し上げます。これまで開発に携わってきたトモエゴゼンチームの皆様、いつもありがとうございます。2018年の完成に向けてがんばりましょう。

参考文献

- 1) 神田展行, 2017, 天文月報 110, 6
- 2) 田中雅臣, 2015, 天文月報 107, 19
- 3) 諸隈智貴, 2017, 天文月報 110, 14
- 4) Sako S., et al., 2016, SPIE 9908, 99083P
- 5) Ohsawa R., et al., 2016, SPIE 9913, 991339
- 6) Sako S., et al., 2012, SPIE 8446, 84466 L
- 7) Morokuma T., et al., 2014, PASJ 66, 11416
- 8) 富永望, 2017, 天文月報 110, 19
- 9) Tanaka M., Hotokezaka K., 2013, ApJ 775, 113
- 10) Shappee B. J., et al., 2014, ApJ 788, 48
- 11) Law N. M., et al., 2016, SPIE 9906, 99061M
- 12) Dekany R., et al., 2016, SPIE 9908, 99085M
- 13) 近藤麻理恵, 2010, “人生がときめく片づけの魔法”, ISBN 4763131206
- 14) キヤノン(株)ニュースリリース, 2011, <http://web.canon.jp/pressrelease/2011/p2011sep15j.html>
- 15) Keane E. F., et al., 2016, Nature 530(7591), 453

Searching for Optical Counterparts of Gravitational Wave Events with the Tomo-e Gozen Wide Field CMOS Camera at Kiso Observatory
Shigeyuki SAKO

Institute of Astronomy, Graduate School of Science, The University of Tokyo, Precursory Research for Embryonic Science and Technology, Japan Science and Technology Agency, 2-21-1 Osawa, Mitaka, Tokyo 181-0015, Japan

Abstract: The Tomo-e Gozen is a wide-field high-speed camera with 84 chips of CMOS sensor for the Kiso 105-cm Schmidt telescope, which has been being developed to search for optical counterparts of gravitational wave (GW) events. This camera is capable of taking consecutive frames with a field-of-view of 20-deg² in 2-fps. In early operational phases of GW observatories, we will conduct follow-up survey of a few hundred square degrees with a depth of $M_V > 20$ -mag with the Tomo-e Gozen.