

木曾観測所とトモエゴゼン

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

木曾観測所 森 由貴

1. 木曾観測所のあらし

大阪を出発し、名古屋で特急しなのに乗り換えて1時間半。中山道の関所の町、木曾福島へ到着します。そこからさらに車で約20分、曲がりくねった山道を上っていくと、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



図1. 木曾観測所のシュミットドーム
背後には中央アルプスの山並みが広がる。

木曾観測所(以下、木曾観測所)があります。見渡す限り、山。西に御嶽山、東に中央アルプス、北に穂高連峰を臨む、非常に景色の良い場所です(図1)。木曾観測所は、東京大学が現在国内に保有する唯一の天文台で、1974年に設立されました。

木曾観測所の主要設備は、口径105cmのシュミット望遠鏡です(図2)。シュミット望遠鏡は広い視野を持つことが特長です。筒先に補正板と呼ばれる薄いガラス板が入っており、鏡筒下部には球面鏡があります。鏡の球面収差を補正板によってあらかじめ補正することにより、広い範囲でボケのないきれいな像が得られるように設計されています。木曾シュミットも、直径9度という、オリオン座の胴体の半分ほどを一度に観測できる広い視野を持っています。

口径105cmの望遠鏡というとそんなに大きく感じられないかもしれませんが、シュミット望遠鏡としては世界第4位の口径を誇ります。また、木曾シュミットは鏡筒の長さが8mもあり、対面するとなかなかの迫力があります。架台はフォーク式の赤道儀で、総重量は70トン。落ち着いた白色が上品な、優美さを感じさせる自慢の望遠鏡です。

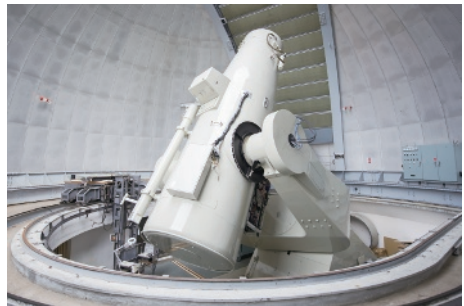


図2. 105cmシュミット望遠鏡

残念ながら木曾シュミットを目で覗いて観測することはできません。望遠鏡内部にある焦点位置に撮像装置が直接取り付けられている、写真専用の望遠鏡なのです。開所以来、木曾シュミットは変わらず活躍を続けてきましたが、その内部に備える撮像装置は時代とともに移り変わっていきました。

木曾観測所ができた当時、天文観測では写真乾板が主流で、木曾シュミットも写真乾板で撮像を行う望遠鏡として作られました。写真乾板とは、感光する写真乳剤を無色透明の薄いガラス板に塗ったものです。この薄いガラス板を望遠鏡の焦点面にセットし、望遠鏡内部に組み込まれたシャッターを開け閉めすることで写真を撮影していました。木曾観測所で主に使われた写真乾板は、厚さ1mmで縦横35.6cm×35.6cmもある大きなもので、6度×6度という広い視野を一度に撮ることができました(図3)。この写真乾板を用いて、彗星のように大きく広がった天体の観測や、紫外超過銀河の探査などが行われました。

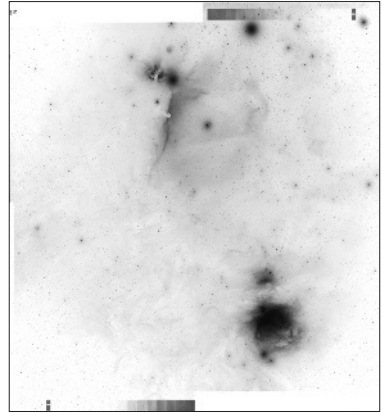


図3. 写真乾板の例
オリオン大星雲と馬頭星雲が
同一視野におさまる。

1980年代になると、写真乾板の100倍以上の感度を持つCCDカメラが登場し、木曾観測所でも開発が行われるようになりました。感度は優れるものの、写真乾板のような大きなセンサーを作ることはできず、CCDカメラの視野は狭いものでした。最初のCCDカメラの視野は12.5分角。写真乾板の0.1%の視野でした。その後視野を広げる試みが続けられ、CCDセンサーを複数並べたモザイクカメラの技術が培われていきました。その技術は、すばる望遠鏡の主力装置として活躍したSuprime-Camや可視広域サーベイとして数々の大成果を残したスローン・デジタル・スカイサーベイ(SDSS)カメラにもつながっていきました。

2. トモエゴゼンがやってきた

一昨年(2019年)、木曾観測所でまた新たな観測装置が動き出しました。その名も「トモエゴゼン」。木曾から平家打倒の狼煙を上げた源義仲とともに戦った勇猛な女武将「巴御前」からその名をもらっています。印象的な名前に負けず劣らず、トモエゴゼンは画期的な観測装置です。

トモエゴゼンは、CANONが開発した超高感度CMOSセンサを84台並べ、木曾シュミットの広い視野をカバーするという究極のモザイクカメラです(図4)。また、「動画」を撮るといふ、これまでの天文観測装置にはなかった機能を備えています。84台のデジカメで一晩中動画を撮るようなものなので、一晩で得られるデータの量は30

テラバイトにもおよびます。その膨大なデータはリアルタイムで処理され、人工知能が特徴あるデータを抽出します。「トモエゴゼン」は、世界初の天文用広視野動画カメラと人工知能ソフトウェア群からなる観測統合システムなのです。

トモエゴゼンが初めてその姿を現したのは2015年12月。東京・三鷹にある天文センター本部でCMOSセンサーを8台搭載した試験機が完成し、木曾観測所へやってきました。試験機を木曾シュミットへ取り付けて観測を行うことにより、筐体や読み出し系など諸々の設計を検証します。そして、トモエゴゼンでどんな画像が撮れるのかを、初めて目にすることができるのです。観測装置に初めて光を入れることを「ファーストライト」と言いますが、開発者にとっては期待と緊張にあふれた特別な瞬間です。

装置が車で到着したら、木曾シュミットへの取り付けです。木曾シュミットの焦点は望遠鏡内部にあるので、取り付け作業は望遠鏡の中に入って行われます。望遠鏡の中に人がいるというのは面白い絵だなといつも思います(図5)。鏡筒の中ほどにある、人が出入りするのと同じ穴から、トモエゴゼンも望遠鏡の中へ入ります。望遠鏡への搬入作業はいちばん緊張する場面です。お天気にも恵まれ、ファーストライトはとても順調に行われました。初めての画像が撮れた時には、制御室で歓声が湧きおこりました。

プロトタイプ機でその後得られた画像(動画)は我々の想像を超えるものでした。視野を動いていく人工衛星や小惑星、一瞬で通り過ぎる暗い流星が流星痕を残したり、動画で見る夜空は想像していたよりずっと賑やかだったのです。本機の開発へ、一気に期待が高まりました。

ところで、トモエゴゼンのファーストライトでは、成功祝いにケーキを食べるのが恒例行事でした(図6)。これは、数々の装置を開発してきたプロジェクトリーダーの、ファーストライトを迎える際のルーティーンです。観測に先立って、曇ったらどうするねん?と思いながらケーキを買いに車を走らせたのは良い思い出です。ト

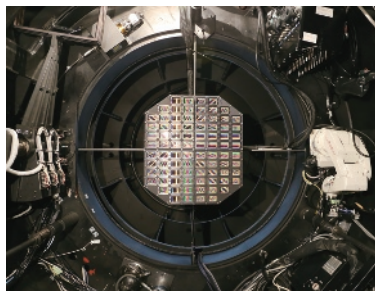


図4. 木曾シュミットの焦点に取り付けられたトモエゴゼン



図5. カメラ取付作業の様子を筒先から補正板越しに見た図

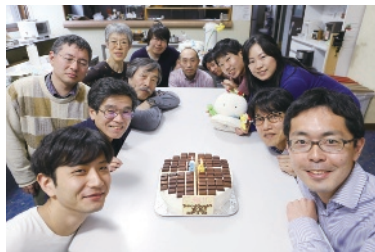


図6. トモエゴゼンフルモデル完成祝いのケーキと開発メンバー

モエゴゼンは巨体故に四分の一ずつ製作して望遠鏡焦点部で結合する方法をとったので、試験機2台、本機4台の計6回という異例の数の「ファーストライト」イベントがあったのですが、ケーキが無駄になることは一度もありませんでした。6度のファーストライトを無事に終え、トモエゴゼンは2019年10月に本格運用を開始しました。

3. トモエゴゼンのターゲット

トモエゴゼンはどんな観測をしているのでしょうか？トモエゴゼンのターゲットは「変化」です。超新星爆発や彗星のアウトバーストといった突然の変化、まだ存在が知られていない小惑星、夜空を横切る流れ星…。周期的な変光星や星の掩蔽など予測できる「変化」もありますが、多くはいつどこで起こるかわかりません。それらを逃さずいち早く捉えるため、トモエゴゼンは毎夜、夜空を「スキャン」して回っています。0.5秒×18枚(=9秒露出)の撮影をしては望遠鏡を隣の視野へ動かし、それを繰り返すことによって35度よりも高い天域を全て観測します(図7)。広い視野のおかげで、約2時間で一通りの天域を観測できます。一回のスキャンが終わったら頻度を上げ、特定の範囲を30分おきにスキャンします。最後に東から昇ってきた未観測の領域を一度スキャンして、一晩の観測を終了します。特定の天体の変動を集中的に観測することもありますが、基本的にはこの全天スキャンがトモエゴゼンの観測です。

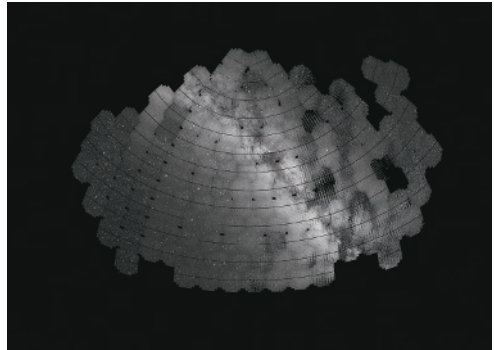


図7. 2019年9月25日の全天スキャンの合成画像。1億もの天体が写っている。

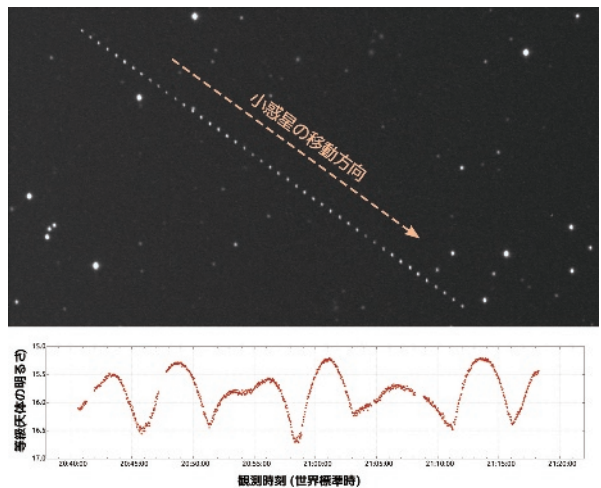


図8. 地球に5万kmの距離まで近づいた地球接近小惑星2012 TC4

上は動画データを32秒ごとに切り出し合成した写真。
下は小惑星の明るさの時間変化を示すグラフ。

得られた全天スキャンのデータは各サイエンスチームへ分配され、目的に応じた解析が行われます。例えば超新星チームでは、各画像を過去の同じ場所の画像と比較して、以前はなかった星がないかを探します。トモエゴゼンは30分ごとに夜空をスキャンしているので、爆発後30分以内の超新星を見つけることが可能です。超新星爆発の「瞬間」を捉えることは、トモエゴゼンの大きな目標の一つです。

超新星チームは時間スケールの変化を追っていますが、トモエゴゼンでは秒スケールの変化を追うことも可能です。小惑星チームでは、0.5秒×18枚のデータを解析し、地球接近小惑星(NEO)を探しています。地球に近づく小惑星は非常に動きが速く、恒星追尾で長時間露光を行うと線上に伸びてしまうので、従来の観測ではノイズに埋もれて検出が難しい対象でした。トモエゴゼンは動画観測ができる利点を活かし、これまで検出が難しかった直径数10~100mクラスの暗い地球接近小惑星を、現時点で19個発見しています。

4. トモエゴゼンの日常

太陽が沈み、天文薄明が終わって星が存在感を増した頃、ドームスリットが自動で開いて観測が始まります。トモエゴゼンの観測は、ほぼ自動で行われています。昼間のうちに研究者が観測する対象を登録しておく、夜に自動で観測が始まります。観測する順番も、天体位置を考慮して最も効率よい経路を立案し、実行してくれます。途中で天気が悪くなると自動でドームスリットを閉めて観測を止め、回復するとまた観測を再開します。人が一つ一つコマンドを実行するよりも、随分と効率よく観測ができてしまいます。

観測の進捗や装置の状態などは全てウェブブラウザで確認できるシステムを整えているので、観測者は自宅でスマホ片手に寝転びながら観測することも可能です(図9)。実行中のコマンドを確認する画面は、開発者のこだわりで効果音付き。「レシピ」と呼ばれる命令セットが成功するたびに「ピンポン」という音が響きます。エラーが起きると「ブー」という効果音が鳴ったり、観測者の連絡ツール「Slack」にも通知が飛ぶので、一晩中気を張り詰めて画面をチェックしている必要もありません。かつて写真乾板で観測を行っていた頃には、真冬の晴天時にはマイナス10度を下回るドームの中で、一晩中望遠鏡に張り付いて観測していたと聞きます。トモエゴゼンは観測者にとっても優しいシステムなのです。

前章で述べた超新星や小惑星の検出も、計算機が自動的にデータを処理して候

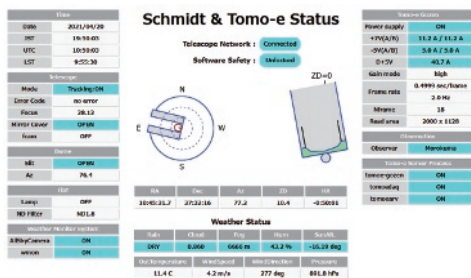


図9. 望遠鏡とトモエゴゼン、天候の状況を確認する画面。

全て水色の時は順調に観測が進んでいる。

補をピックアップしてくれます。観測者はその候補をチェックして、詳細な観測を追加で行ったり、トモエゴゼンではできない分光観測などを国内外の別の望遠鏡に依頼します。「変化」をより早く正確に検知できるよう、データを見極める「人工知能」や観測システムの改良は日々続けられています。

木曾観測所に常駐しているスタッフはわずか6人。現地スタッフの仕事は昼間がメインです。前夜の観測で観測装置や望遠鏡、ソフトウェアで問題がなかったかをチェックし、何かがあれば昼間のうちに対応します。定期的に望遠鏡やドームのメンテナンスを行い、トラブルなく観測できるようにすることも重要な仕事です。いつ重大なイベントが発生しても逃すことのないよう、観測所の全てを常に万全の状態にしておくことが、観測所スタッフの使命です。

5. トモエゴゼンへのアクセス

トモエゴゼンの全天スキャンのデータは、実は翌日にはインターネットで見ることができます。トモエゴゼンの新しいホームページにあるウェブアプリ(https://tomoe.mtk.ioa.s.u-tokyo.ac.jp/hips/index_ja.html)から、リアルな宇宙の姿を見られるのでぜひ覗いてみてください。その日見えていた彗星や小惑星、最近発見された超新星などの位置もデータに重ねて表示できるので、どんな天体が見えていたのか、またそれがどう動いて(変わって)いくのか時間を追って見てみると、ダイナミックな宇宙の姿を感じられるかもしれません。

高校生限定ではありますが、トモエゴゼンを実際に使える機会も存在します。木曾観測所では毎年3月に「銀河学校」という高校生向けの天文実習を行っています。銀河学校では、実際にトモエゴゼンを使って観測を行い、データ解析・考察・発表を行うという研究体験ができます。毎年12月ごろに募集を行うので、高校生の方はぜひチェックしてみてください。

木曾観測所は誰でも見学することができます。冬季を除いた日中に、(ガラス越しにはなりますが)シュミット望遠鏡と、過去の観測装置などを展示している展示室を見学できます。5月は新緑がきれいで、木曾の最も美しい季節と言っても過言ではありません。天候が安定し、星を見るにも絶好の季節です。トモエゴゼンが見上げる木曾の星空にぜひ会いに来てください。

著者紹介 森 由貴(もり ゆき)



東京大学木曾観測所で、事務、広報、システム保守・開発などいろいろ担当。大阪出身で、中学・高校時代は友の会会員で大阪市立科学館によく通っていました。高校時代に銀河学校に参加して木曾の魅力に取りつかれ、今に至ります…。