



第1章 木曾観測所最前線

Forefront of Kiso Observatory

招

KWFC

シュミット望遠鏡の新制御系

気象モニター

『 KWFC 開発 』 酒向 重行

『 リモート観測と自動観測の実現
を 目指して 』 前原 裕之

『 超新星サーベイ KISS 』 諸隈 智貴

『 近くから遠くを探る 』 富永 望

『 KWFC 銀河面変光天体探査
KISOGP 』 松永 典之

『 木曾観測所の教育活動 』 三戸 洋之

バラ星雲： オリオン座のペテルギウスから東に約10度離れたあたりの、いっかくじゅう座にある散光星雲（NGC2237-39）である。中心部のガスが新しく生まれた星の出す紫外線によって電離し膨張して、空洞になったため花のような形になった。中心部には散開星団（NGC2244）が見える。花びらのように見える部分にある小さな黒い塊は、星間塵が強く集中しているところで「グロビュール」と呼ばれ、このような場所で星が生まれると考えられている。直径約80光年、距離は約4600光年である。

撮影日：1989年2月6日、撮影番号：K6105、乳剤：コニカSR1600窒素増感、フィルター：なし、現像：HAC3200 6分

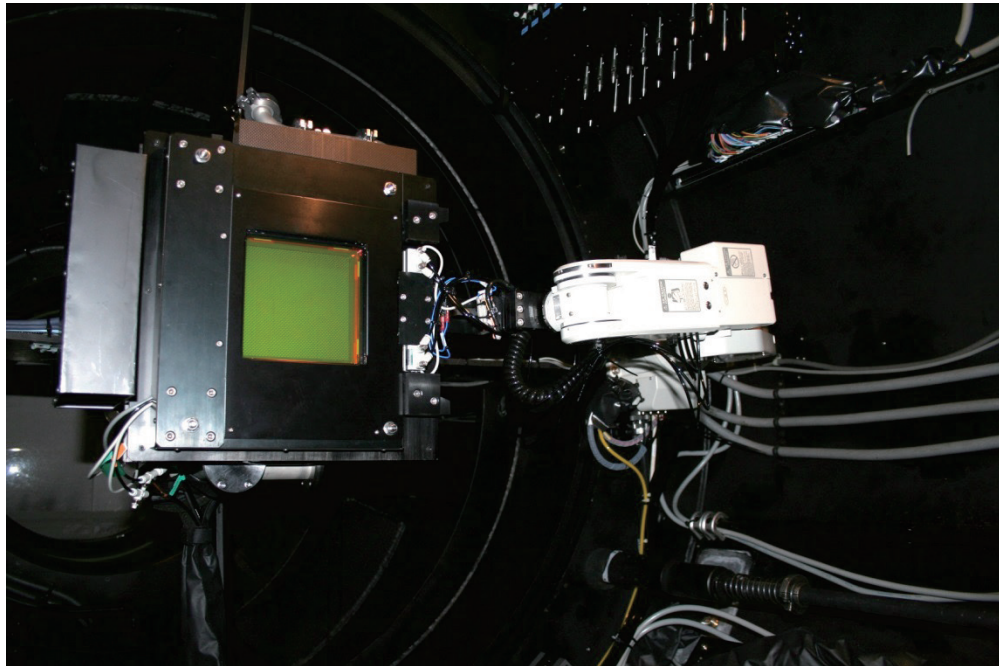
KWFC (Kiso Wide Field Camera)

KWFC (Kiso Wide Field Camera) は、木曾観測所が開発した広視野カメラである。乾板製造中止から 20 年、シュミットの最大の特徴は広視野であるが、これまでの 2KCCD では視野が 50 分角と乾板の 1/50 程度しか得られなかった。しかし、2012 年に完成した KWFC は、視野が 2.2 度角をもつ広視野カメラである。このカメラ開発には各所に新しい技術が取り入れられている。検出器は SITE と MIT/LL

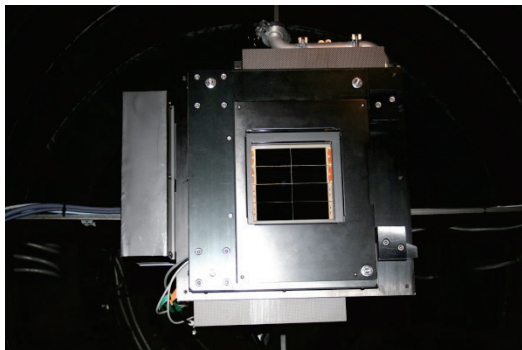
をそれぞれ 4 個ずつ、計 8 個を用いている。検出器が異なると駆動方法も異なるわけであるが、木曾開発の汎用アレイコントローラ KAC (Kiso Array Controller)を用いることで、混在するシステムでも容易にコントロールしている。また、大型フィルターの交換には、三菱製の汎用ロボットを導入し、スペースの少ない鏡筒内で、12 枚のフィルター交換を可能にしている。

KWFC 仕様

検出器	SITe ST-002A 2048 × 4094 4 個 MIT/LL ICCD20 2048 × 4100 4 個
画素サイズ	15 μm × 15 μm
受光面サイズ	30mm × 60mm
画素スケール	0.946 arcsec/pixel
総視野	2.2° × 2.2°
最短露光時間	0.1 秒
読み出し時間	120 秒
動作温度	~170K
暗電流	≤5e ⁻ /hour/pixel (@170K)
バイアス	~2400 ADU
読み出しノイズ	MIT-CCD 5-10e ⁻ SITe-CCD 20e ⁻
変換効率	~2.2e ⁻ /ADU
量子効率	SITe ~75% (6800 Å) MIT ~75% (7000 Å)
1%の直線性保証範囲	<1.1 × 10 ⁵ e ⁻ (<50000ADU)
データサイズ	FITS 形式 128MB/フレーム
シャッター	2 枚羽スライド式 (羽材 CFRP)
フィルター	16cm 角 Johnson-Cousins BVRI, SDSS ugriz, Hα, OIII
フィルター交換	ロボットアーム(三菱 RV-2SQ)による搬送方式 12 枚格納可
フィルター交換時間	45 秒
デューア窓材	直径 220mm BK7、フラットナー兼用
冷却方式	冷凍器(イワタニ パルスチューブ式 PDC-08: 8W@77K)
補助真空装置	Varian 製 イオンポンプ Vaclon Plus-20
温度コントローラ	Lakeshore model 330M
カメラコントローラ	Kiso Array Controller (KAC) システム
A/D 変換	Analog Devices AD7693 (16bit 500KHz)



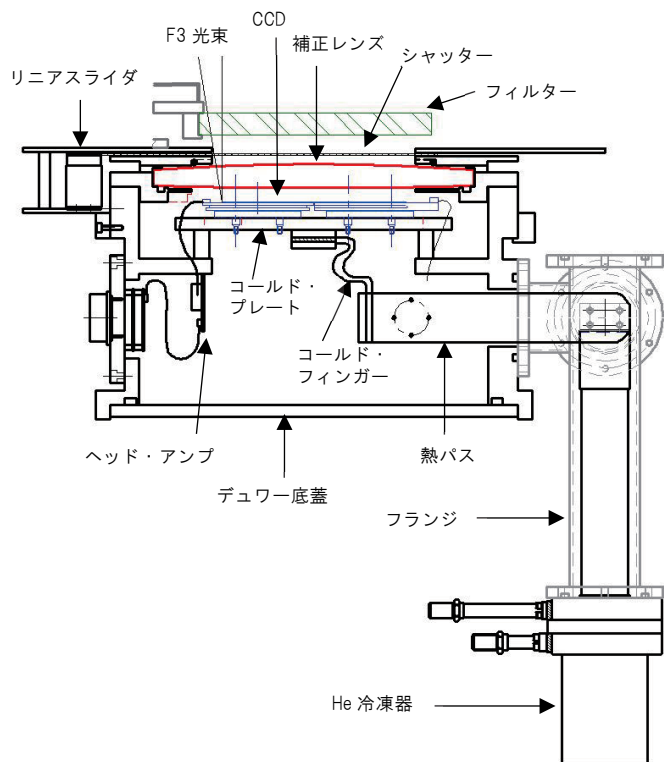
フィルター装填ロボット：白く見えているのが三菱製汎用ロボット。写真中央の緑色に見えるのがフィルターで、右上のフィルターマガジン(12枚のフィルターが装填されている)より抜き取り、焦点部に装填する。



シュミット焦点に取り付けた KWFCC：中央に黒く格子状に並べられた 8 個の CCD が見える。一番手前のホルダー部へロボットアームによりフィルターが装填される。左側黒い箱が KAC である。



KAC (Kiso Array Controller)：KWFCC の 2 種類の CCD をドライブするユニット。検出器によりドライブ電圧等が異なるが、KAC はプログラマブルにそれらを調整できる。



KWFCC 構造図：右側に長く突き出しているのがヘリウム冷凍機である。冷凍出力の姿勢依存があるため、観測で常用される高度で最大になるよう配置した。また、デュワー窓は、モザイク CCD 用のフラットナーレンズを直接使用している。

シュミット望遠鏡の新制御系

～ スリム & スピードアップ ～

木曾観測所の105cmシュミット望遠鏡は、1974年に設置され約39年間様々な観測に使用されてきた。その間、シュミット望遠鏡の制御系は1988年に電気系と制御I/O関連の改修を行った。しかし近年では老朽化により、ミラーカバー・モーターや時計駆動モーターの故障などが相次いで発生した他、新観測装置(KWFC)の観測では、観測効率を上げるために要求される駆動スピードや精度に対応できないなど、観測システム全体で多くの問題を抱えてきていた。そこで、2013年6月からの整備期間を利用して、これら不具合

の解消を図り、かつ制御システム構成の単純化を図るため、機械系も含めた制御系の大規模な改修を実施した。尚、この改修は新学術領域「重力波天体の多様な観測による宇宙物理学の新展開」の補助を受けて行われた。改修により写真のように非常にスリムになった。特にRA駆動系では、4個使用していた駆動モーターを1個だけで全スピードに対応するようにした(トラッキングも含む)。また、速度も1.3倍にアップした。因に、今回の改修で望遠鏡の総重量は400kg以上の軽量化が図られたことになる。



図1. 改修前のRA駆動系(所狭しと並んだ各種モーター)

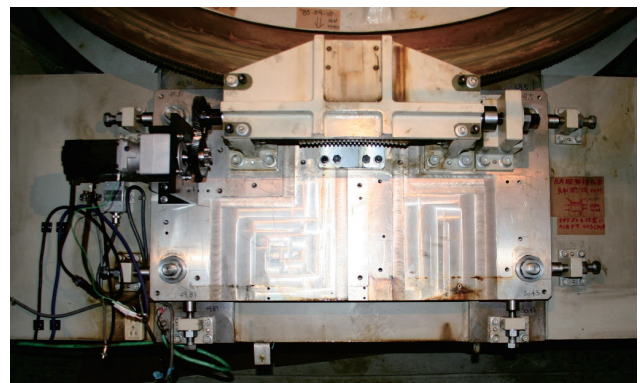


図2. 改修後のRA駆動系(左上に駆動モーターが見える)

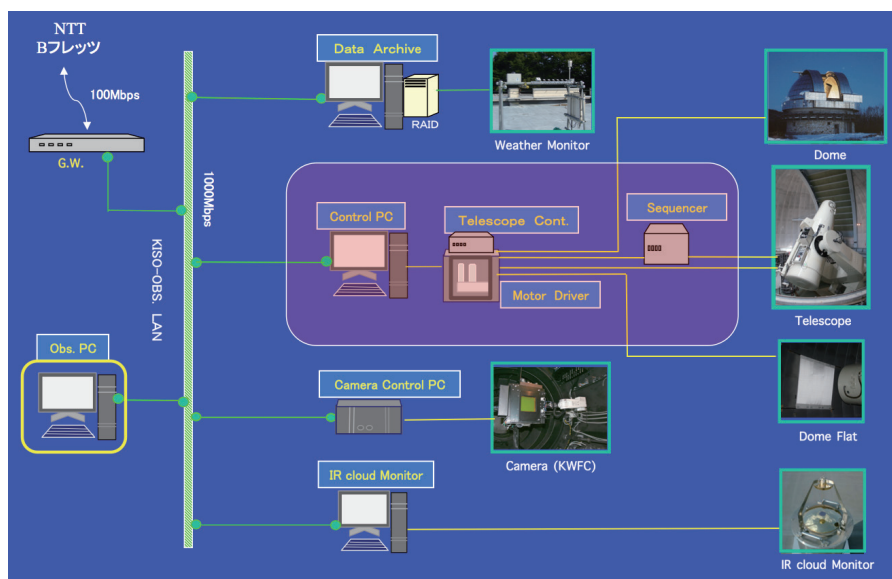


図3. 改修後の制御システム構成図(望遠鏡関連がすべて統合された:網掛け部)



図4. 改修前の制御室



図5. 改修後の制御室

気象モニター

木曾観測所では観測支援のため様々な気象観測機器を本館屋上に設置している。これらの機器で得られたデータはデータベース化されており、所内の Web サーバーを通じて提供される（図 1）。これらのデータは観測中の気象状態を容易に把握できるようにし、観測者の利便性を向上させることはもちろん、シュミット望遠鏡の観測データと組み合わせることで、観測中の気象条件が観測データに与える影響を評価することにも役立つ。また全自動観測システムにおいては、観測の可否を判断する重要な役割を担っている。2014 年現在稼働中の気象観測機器は以下の 6 つである。

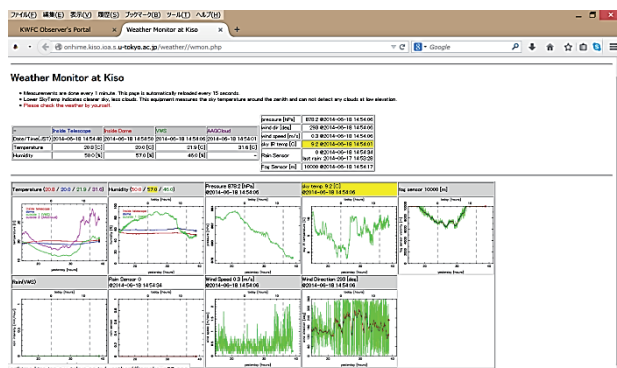


図 1. 気象データ提供用の Web ページ

■ 気象ステーション(2012 年設置)

Vaisala 社ウェザートランスミッター WXT520 を設置し、気温、湿度、気圧、風速、風向、降水量のデータを約 1 分おきに取得している。

■ 雨滴センサー(2012 年設置)

雨滴センサーはアスザック AKI1805 6 台が設置されており、センサーのデータは 1 分おきに取得され、データベースに保存される。また、雨滴を検知した時には観測室に設置されたパトランプから警報音を発する。自動観測用のプログラム稼働中は、降水を検知す

れば観測者の操作なしに実行中の観測を中止してドームを閉めるようになっている。

■ 雲センサー(2012 年設置)

上空の赤外線放射温度を測定する機器 AAG CloudWatcher を設置し天頂付近の空の放射温度を 1 分おきに取得している。外気温のデータと組み合わせることで雲の有無を判定することができる。自動観測システムではドームの開閉をおこなう判断材料の 1 つとして活用している。



図 2. 雲センサー（手前の白い装置）と雨滴センサー（中央から奥にかけて並んでいる装置）および気象ステーション（支柱の上に設置されている白い装置）

■ 霧センサー(2013 年設置)

観測中に到来する霧を検知し、観測機器を保護するために Optical Sensors 社の霧センサー Sten Löfving を設置し、視程を 1 分おきに測定している。霧以外にも雨滴や雪にも反応することを利用して、自動観測システムでは冬季の降雪の検知にも用いている。



図 3. 霧センサー

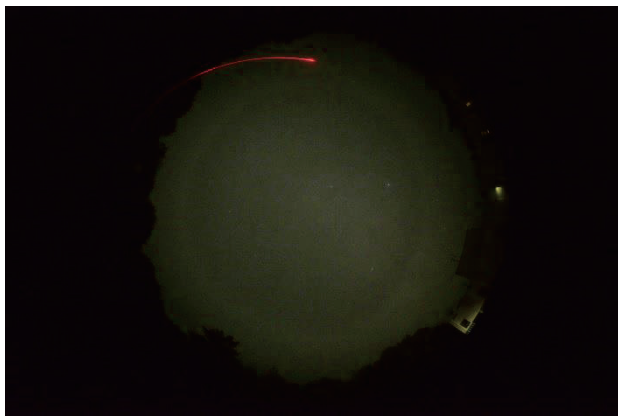


図 4. 霧発生時の様子（可視全天カメラで撮影）

■ 赤外線全天カメラ(2003 年設置)

カセグレンタイプ全天鏡(国立天文台と共同開発)と波長 8-12 μm の赤外線カメラを使った全天雲モニターで全天の雲の様子を画像データとして得ることができる。画像は 3 分おきに取得されており、過去の画像も含めて所内の Web サーバーを通じて観測者に提供される。



図 5. 赤外線全天カメラ

■ 可視全天カメラ(2012 年設置)

市販のデジタル一眼レフカメラと魚眼レンズを用いて全天の可視画像を 10 分に一度取得している。所内の Web サーバーを通じて観測者に提供される他、足立区ギャラクシティの Web サーバーにも画像を転送し一般向けにも公開している。¹



図 6. 可視全天カメラの外観



図 7. 可視全天カメラで得られた画像の例

■ その他の環境モニター

気象モニター以外にも、ドーム内および望遠鏡内の温度湿度を監視できるようセンサーが設置されており、1 分おきにデータを取得しデータベースに保存している。また、安全対策としてドーム内外や観測室、フィルター交換機構の様子をモニターするために合計 9 台の監視カメラが設置されており、観測時に異常がないかどうか、ネットワーク経由で監視することができる。

¹ <http://hoshizora.galaxcity.jp/modules/camera/>

KWFC 開発

～ 木曾観測所広視野カメラ KWFC との歩み ～

酒向 重行 (天文学教育研究センター)



木曾広視野カメラ KWFC の開発に参加した 2008 年。私はこの装置をよくある単機能な撮像装置の 1 つとして捉えていました。勿論これは私の不勉強と想像力の欠如による誤解であることが後にわかります。そして後述するように、私は KWFC とそれを取り囲む人々から多くを学ぶことになります。

KWFC は計 8 台の 2kx4k ピクセル CCD を搭載する設計です。しかし、私が開発計画に参加した時には 8 台中 7 台ものセンサが予算不足のため入手のめどがたたない状況でした。センサを無くしてカメラの開発どころではありません。これは大変な計画に参加したものだと途方に暮れる日々がしばらく続きました。ある日、土居木曾観測所所長から「すばる望遠鏡の立ち上げ時には、多くの 2kx4k CCD が製造された。そのうちの一部は性能試験に合格しなかったため、関係施設の実験室に眠っているはず。」という話を耳にしました。そこで、ホメロスの叙情詩イリアッドから忘れ去られた町トロイを再発見するシュリーマンに学べと、この未確認の情報に KWFC の未来を託すことにしました。さっそく、国内の主要な大学と研究機関に問い合わせを行いました。すると、にわかにはその伝説が事実であることがわかってきました。CCD の存在が確定すると、その所有者に CCD を木曾観測所で有効に利用させて欲しいと願い出ました。すると、多くの方々から賛同をいただき最終的に計 11 台の 2kx4k CCD が木曾観測所に新たに加わることとなりました。木曾観測所が長きに渡って日本の天文学の発展に貢献してきたその徳が、今、こうして皆様のご厚意につながったのだと感じました。特にご尽力をいただきました宮崎聡さんはじめ国立天文台すばる望遠鏡関係の皆様、佐藤修二さんはじめ名古屋大学 Z 研の皆様、川良公明さんはじめ同研究室の皆様にはこの場を借りてお礼申し上げます。

2009 年、今度は CCD の読み出しシステムの構築に

おいて予算的に厳しい状況となりました。彼は考えた結果、それまで搭載を予定していた既存の読み出しシステムを手放し、あえて独自のシステム (木曾アレイコントローラ; KAC) を新規に開発する選択をとります。勿論、新規の開発はコスト高です。しかし、当時の最先端である完全空乏型 CCD を容易に駆動できる設計としたことで、国内の多数の研究機関から協力を得ることに成功したのです。木曾観測所の征矢野隆夫さんと東大院生の加藤拓也さん (現ニコン) と共に開発を進め、KAC はわずか 2 年の期間で完成します。こうして、またしても他機関からのご厚意を受けることで開発の危機を乗り越えることができました。ただ、この共同開発は木曾観測所が長年にわたって蓄積してきた技術への信頼を無くしては成立しなかったことをここに書き留めておきます (KAC は 2014 年夏の時点で、北大、東大、広大が運用する計 4 台の装置に搭載され科学観測に用いられています)。

2010 年、この頃までには木曾観測所の青木勉さん、征矢野隆夫さん、樽沢賢一さん、三戸洋之さんのご尽力により KWFC のデュアやシャッタの製作が完了していました。そして万全な体制で始まった CCD の駆動試験でしたが、私たちが困難な状況に置かれていることに気づくのに時間は必要ありませんでした。木曾観測所に新たに集まった 11 台の CCD は、想像以上に一癖も二癖もある素性の持ち主だったので。中には、微細なボンディングワイヤが切断されていたり、なぎ倒されていたりしたチップもありました。それらを丁寧に 1 本 1 本修正していきました。木曾観測所関係者による献身的な改修と駆動試験により、ついには既存の 1 台を加えた計 8 台のチップを科学観測に使用できる水準へ到達させることに成功しました。困難はさらに続きます。特性が大きく異なる 8 台のセンサを同時かつ統合的に制御することは極めて難しく、例えるなら町の個性的な荒くれ者

たちを集めてきて世界の野球チームを作ろうと言うようなものです。8台のチップのいずれの性能も劣化させない制御パラメータの探査が必要でした。この気の遠くなる作業に征矢野隆夫さんと加藤拓也さんと共に取り組んだ日々は忘れることができません。8台の荒くれ者たちが足並みをそろえて星の像を受けることに成功したのは2011年の春のことでした。

8台のCCDがデュアの中にずらりと並ぶようになると、KWFCへの愛着とともに自由な発想を楽しむ余裕が生まれてきます。その最たるものがKWFCのフィルタ交換機構にあります。ある日、私が作成したフィルタ交換機構の提案書を見て樽沢賢一さんが言いました。「これって、工場によくあるロボットアームでやってしまえば簡単じゃないかな」。私はその言葉に衝撃を受けるとともに、そういった自由な発想を出せなかった自分を悔みました。「それ、いきましょう」。こうして、望遠鏡が観測装置を機械的にケアするという全く新しい考え方に立ったフィルタ交換機構の開発が始まりました。産業用ロボットアームとフィルタ格納庫を、望遠鏡の鏡筒の内側に固定します。フィルタの交換時には、ロボットアームが格納庫から焦点面へフィルタを1枚ずつ運んで設置します。この斬新なシステムは予想を上回る成功と、予想に反する困難を同時に生みながら、青木勉さんと樽沢賢一さんをはじめとする木曾観測所の皆さんのご尽力により、2014年夏にはロボットアームが自らの小手先で安全ロックを解除し、腕を起用にひねりながら大型フィルタを焦点面ユニットに受け渡すという実にユニークで奇抜でエレガントなシステムが完成します。

ロボットアームを介して望遠鏡とのつながりを深めたKWFCは、その後、望遠鏡との更なる融合をめざすこととなります。2012年、これまで制御的に互いに独立な存在だった望遠鏡、観測装置(KWFC)、解析計算機、気象センサを、データベースを用いて集中的に管理する統合システムの開発が始まります。このシステムを基盤に遠隔地からの自動観測と自動解析を実現することが目的です。まず、木曾観測所の所員が中心となり、望遠鏡の駆動制御部の更新、気象センサ群の更新、データベースの整備に取り組みました。これにより遠隔自動観測に耐える高精度

でロバストな基盤ハードウェアの実現に成功しました。一方、木曾観測所の前原裕之さんと松長典之さんは自身の豊富な経験と高い技術力を活かしてインテリジェントな観測統合ソフトウェアの開発に取り組みました。そして2014年には、遠隔地から天体リストを登録するだけで、所内の観測システムが気象条件を考慮しながら最適なターゲットを選択して観測を実施する自律的な自動観測システムの開発に成功しました。また、超新星探査プロジェクトKISSチーム(代表は東大の諸隈智貴さん)と銀河面変光星探査プロジェクトKISOGPチーム(代表は東大の松永典之さん)は、取得したデータをリアルタイムに解析して変動天体の候補を抽出する自動解析ソフトウェアの開発に成功しました。このKWFC+シュミット望遠鏡による極めて効率的な広視野探査システムの誕生により、現在、木曾観測所では多数の超新星と変光星の検出に成功し続けており、世界を牽引する科学成果を挙げています。

このように、KWFCは多彩なアイデアを取り込みながら望遠鏡や観測所設備と有機的に結合していきました。そして現在の木曾観測所は、木曾の大自然の中、KWFCという網膜とシュミット望遠鏡という水晶体を持つまるで1つの生命体のように振る舞いながら、日々、科学的成果を挙げ続ける存在となりました。この6年間、KWFCがそれを取り囲む人々と共に見せた展開は、当初の私が持っていたスコープを遥かに超えており、そうした中に当事者の1人として参加し貢献できたことは、観測天文学と装置開発に従事する研究者としての冥利に尽きます。このような貴重な環境を与えていただいた木曾観測所と関係の皆様には深い感謝を申し上げます。

木曾観測所はKWFCを軸とした広視野観測を進めながら、次期観測装置である超広視野高速CMOSカメラの開発を開始しました。このカメラは実にユニークで奇抜でエレガントな観測装置です。広視野高速天文学という新しい分野の先駆けとなるでしょう。このカメラの実現にはKWFCの開発で木曾観測所が手にした豊かな発想と確かな技術の適用が必要です。これからの数年間をまた、超広視野高速CMOSカメラと木曾観測所のメンバと共に歩むことができることを嬉しく楽しみに感じています。

リモート観測と自動観測の実現を目指して

～ スマホで何処からでも観測 ～

前原 裕之（木曾観測所）



木曾観測所の105 cmシュミット望遠鏡を使った観測は、暗い中ドームの中で観測するか、ドームの隣の観測室で観測するか、あるいは本館の観測室から観測するかの違いはあっても、観測所に来ること必須であることには変わらない。しかし、現在の天体観測は、望遠鏡や CCD などの観測装置を制御する計算機を用いて行われているので、計算機をネットワークにつなげて遠隔地からの観測を実現するというのは、自然な流れといえる。木曾観測所では2014年度後半をめぐりにリモート観測および自動観測を共同利用研究者にも公開することを目標に観測システムの開発整備を行っているところである。ここでは現在の途中経過を簡単に報告する。

遠隔地からの観測や自動観測を実現するにあたっては、観測できる天気なのかどうかをどのようにして判断するのが問題となる。特に自動観測の場合は気象データだけから観測できるかどうかを判定し、悪天候時には観測者の操作によらずスリットを閉めて観測を中止するといった安全対策が必須である。これには KWFC 導入と同時期に整備された気象観測機器が威力を発揮している。これまでに2年以上にわたって気象観測データが蓄積されてきたことから、どのような観測条件の時に観測が行われているか、解析や研究に耐える観測データが取得されたのかを、気象観測データと対比することで、それまで観測者が時々空の様子を見て観測できる天気かどうか判断していたものを、気象観測データだけに基づいて観測できる状態なのかどうかを判断することが可能となった。リモート観測用に開発した観測条件自動判定システムでは、(1) 雨滴センサ、(2) 空の放射温度、(3) 湿度、(4) 霧センサによる視程のデータに加えて、その時間の太陽高度を計算するこ

とで、観測できる状態かどうかを判定している。このシステムは、松永さんが木曾観測所の研究員をされていた時に開発された観測用のキューシステムと連動しており、観測中に天気が悪くなると自動的にスリットを閉めて観測キューを中断させることができるほか、天気が回復した場合には自動的にスリットを開けて観測キューを再開することや明け方薄明の時間に観測を自動停止しスリットを閉めることも可能である。

リモート観測では気象条件など観測できるかどうかの判断の自動化などが遠隔地の観測者の操作なしに行われることもあり、従来のように観測者が望遠鏡の状態を確認しながら装置の操作を行うよりは、全自動で観測が進むようにしてしまった方が不用意な操作等もなく安全である。そこで、撮影する天体の名前や座標、使用するフィルターや露出時間等の観測パラメーターといった情報を予め登録しておき、観測できる条件になった時に自動的に観測を行うシステムも構築した。このシステムは観測パラメーターを登録する Web ベースのユーザーインターフェースと、登録された情報をもとに観測できる条件等を判定して観測キューシステムにキューを自動登録するプログラムからなる。前述の通り観測キューシステムと観測条件の自動判定システムが連動していることから、観測者が事前に登録した情報に基づいて観測できる天体を選び、その天体を観測するキューを自動的に生成・登録することで、観測者の操作なしに観測を行うことができる。観測中に高度が低くなって観測できない天体は観測しないよう、キューは定期的に更新されるようにしている。このほか、登録されている観測リストから、夕方の観測前にその晩に観測する予定の CCD の読出しモード、フィ

ルーターの組み合わせで、また明け方にその晩に観測した CCD の読みモード、フィルターの組み合わせでそれぞれ自動的に BIAS, DOMEFLAT を取得する仕組みも導入した。全自動観測は今まさにテスト観測中であるが、これが本格的に導入されれば、事前に観測に必要な情報を登録しておくだけで、観測者は何もせずとも観測が行われるようになる。

遠隔地の観測所では得られた観測データをどのように観測者に送るかということも重要な問題である。2013 年まで木曾観測所と外部とを結ぶネットワークは木曾広域 CATV の回線であったため、特に観測所から外部への帯域が狭く、KWFC 生み出す大容量のデータを観測時間内に転送するのは不可能であった(三鷹の SMOKA ヘータを送るのも HDD にデータをコピーして人が運搬していた)。しかし、2013 年の年末に光回線による接続に切り替わり、観測データをネットワーク経由で外部へ転送することが可能となった。このため、観測した天体のデータや BIAS, FLAT などのキャリブレーション用のデータの FITS ファイルを検索してダウンロードするための Web ベースのシステムを作成した。プロポーザルごとに発行されている ID、パスワードを使ってアクセスし、自分の観測研究課題に関連するデータのみをダウンロードできるようになっている。また、より簡便に撮った画像を確認するために、クイックルック画像を表示する Web ページも作成した。この Web ページでは FITS 画像を JPEG 画像に変換して Web ブラウザで見ることができ、各チップのカウントのヒストグラムや最大値、最小値、平均値等の統計情報も見ることができる。撮影後 1 分程度のタイムラグはあるが、わざわざ FITS ファイルをダウンロードしなくても画像が正常に撮れているのかを Web ブラウザから確認できるため、観測状況の把握をしやすくなっている。

木曾観測所は共同利用を全国の大学や研究機関の研究者から受け付けているため、専用の望遠鏡と異なり、観測システムへの接続はインターネット経由でどこからでも行える必要がある。外部からセキュ

リティを確保した上で観測システムに接続するために、2013 年に VPN ルーターを導入した。観測所と外部を結ぶネットワークが高速化されたこともあり、VPN 接続でもほとんど観測所内と遜色なく観測に必要な情報へのアクセスや観測情報の登録、観測データのダウンロード等を行うことができる。また、これらすべては Web ブラウザを用いて行えるため、スマートフォンやタブレット PC などからも観測が可能となっている(図 1)。

観測の自動化やリモート観測への対応はまだ始まったばかりであるが、実際にテスト観測で使ってみると、KISOGP や KISS のような大規模サーベイ観測には特に向いており、観測者の負担軽減や観測時のミスの防止などにも効果があると感じている。今後は共同利用での公開が始まって本格的に運用されていく中で、ガンマ線バーストや将来的な重力波対応天体などの突発天体に対する自動即応観測など、さらに改良を加えていきたいと思う。

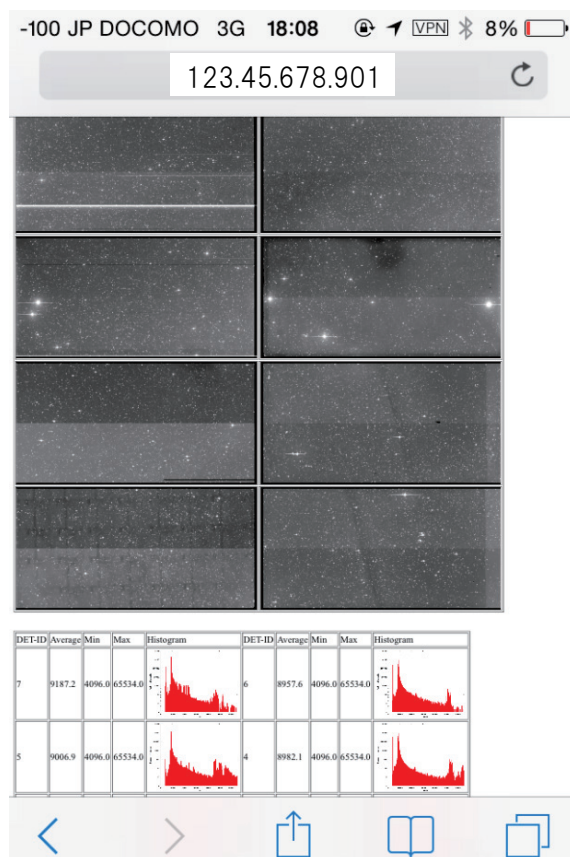


図 1. iPhone から撮像した画像の確認

超新星サーベイ Kiso Supernova Survey (KISS)

～ 世界と競うショックブレイクアウト検出 ～

諸隈 智貴 (天文学教育研究センター)



本稿では、2012年4月より開始した超新星探査 Kiso Supernova Survey (KISS)のこれまでの振り返りたいと思います。

私がポスドクをしていた国立天文台から東京大学・天文学教育研究センターへうつったのは2010年の夏のことでした。最終段階に差し掛かった KWFC の開発のお手伝いをする事になり、いよいよ観測データを用いた性能評価を行い、共同利用観測装置として公開へ、というタイミングでした。また、国立天文台・光赤外研究部・2008年末研究会で富永望くん(当時光赤外研究部所属)のショックブレイクアウトの発表がきっかけで、すばる望遠鏡の Suprime-Cam でのショックブレイクアウト観測を提案し始めるとともに、新しい広視野カメラ Hyper Suprime-Cam(HSC)を使ったすばる戦略枠観測での詳細検討を始めた時期でもありました。(そう思い込んでいたのですが、研究会プログラムを見返してみると、富永くんの話は金属欠乏星の話だったので、どうしてショックブレイクアウトの研究をいっしょにやろう、ということになったのか、今となっては謎です・・・)そんなところに、KWFC ができたら大規模な観測所プログラムを実施しましょう、という話があり、HSC でも一緒に検討を進めていた田中雅臣くん(当時東京大学 IPMU 所属)にも加わってもらったのが2011年の夏、もう3年前のことになります。

超新星爆発の、爆発のその瞬間とも言えるショックブレイクアウトの観測的研究は、謎に包まれた星の一生の最期の姿を知るための良いツールであるという科学的なモチベーションはもちろんのこと、まだ誰もまともに見たことがない(S/Nのいいきれいなデータはまだありません)爆発の瞬間を世界で初めて見てみたい、という興味もあり、格段に視野の広がった新しいカメラで、ショックブレイクアウト

の観測をしよう、という決断に至るまで、そう時間はかかりませんでした。超新星の観測は、すでに複数のプロジェクトが、小口径の望遠鏡を占有的に使って観測を進めていたこともあり、世界で最大の視野を持つカメラの一つとなる KWFC を持っていても、ユニークな結果を出すことはそう簡単ではない、せつかくなら”とがったこと”に特化したサーベイをやろう、と、我々3人が共通の認識を持っていたこともそうですが、この野心的な提案を受け入れてくれた観測所の方々の理解もあり、世界で初めて、超新星ショックブレイクアウトを研究するために最適化したサーベイを行うことになりました。サーベイの名前も、田中くんの発案で、彼の好きなロックバンドでもある KISS=Kiso Supernova Survey にあっさり決めました。ショックブレイクアウトを見つけた暁には、何かグッズでも作りたいと思っています。

KISS、そしてもう一つのプロジェクト KISOGP には、それぞれ年間約100晩の観測夜が割り振られることになりました。そのような大規模な観測は、大学院生の頃からすばる望遠鏡その他の大規模プロジェクトに混ぜていただいていた私にも経験のないことで、初めのうちはやってくる大量なデータの処理に追われる日々が続きました。机上の計算では1ヶ月に数個は超新星が見つかるはずでしたが、2012年4月のサーベイ開始後、約1ヶ月が経過しても、まだ一つも超新星が見つからないことに、我々3人、口には出さないまでも焦りを感じていました。そんな時期に、最初の超新星 SN 2012cm を2012年5月13日の晩に発見、これが偶然にも16等級台と明るい超新星(これまでKISSで見つけた超新星の中で最も明るい)で、広島大学かなた望遠鏡による分光観測でIa型の超新星だとわかったときは、うれしさよりもほっとした気持ちの方が勝っていました。当時

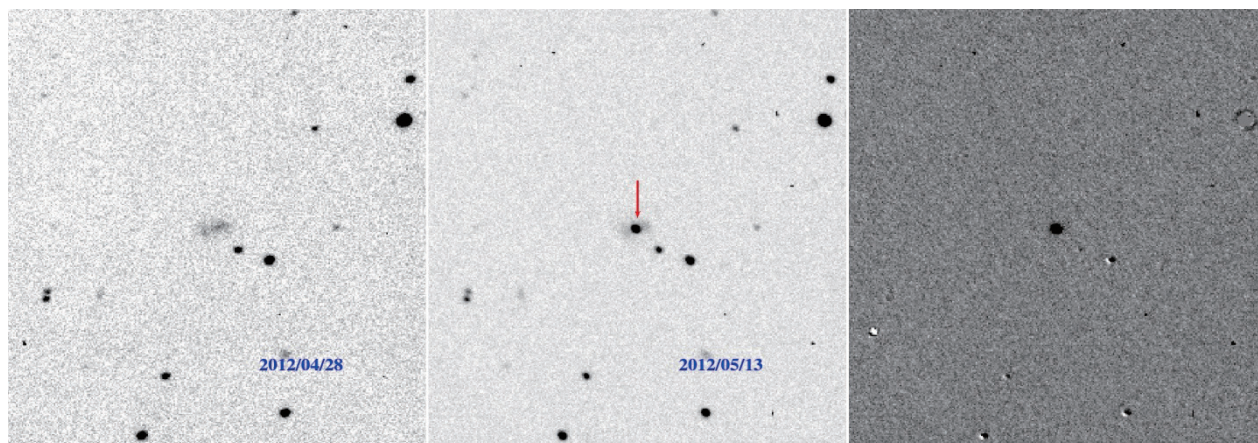


図1. 最初に見つけた超新星 SN 2012cm の発見画像。左から 2012 年 4 月 28 日の画像、2012 年 5 月 13 日の画像、これらを引き算した画像である。新しく明るく輝く天体が 2012 年 5 月 13 日の画像に写っており、引き算の画像にも残っている。

甲南大学 4 回生の森頭彰さんと 4 人で、二本木の湯で温泉につかりながら、SDSS の画像を参照画像として使う、という大きな決断をしたことのもちょうどこの頃で、以後、安定して超新星候補を見つけることができるようになりました。PC に向かってデータ解析パイプラインを作っている真っ最中だった時期で、凝り固まっていた頭をリラックスさせることができた温泉の効能は大きかったかもしれません。

こうしてかなりの部分が自動化できたとは言え、大量に産み出されるデータの流に溺れそうになるという状況自体は実はさほど改善されていませんでした。私が 2007 年に仕上げた博士論文では、すばる望遠鏡 Suprime-Cam のデータを使って超新星等の時間変動天体の研究をしたのですが、当時、引き算画像上に残ってしまう大量の”ゴミ”に大変悩まされた経験がずっと頭にあり、大きなサーベイをやるのはいいが、”ゴミ”に埋もれる毎日はずらい、どうかしないといけないがどうすればいいのか、という悩みをかかえていました。そんな日々光明が差したのは酒向さんの「アマチュア天文家への協力依頼」の提案、そしてその結果得ることができたたくさんの方々のアマチュア天文家の方々からのボランティア協力でした。夜遅くまで候補天体チェックをしてくださることはもちろん、我々にかけてくださる暖かい励ましの声に大変感謝しております。

サーベイ開始後わずか 2 ヶ月で初期成果に関する記者会見を、それも木曾で行ったことも記憶に強く残っています。予想以上にメディアの方々に取り上

げていただき、とりわけ NHK 長野放送局の方々にはその後も「知るしん。」、そしてドラマ「木曾オゾン」で我々の取り組みを面白みのある物語として全国へ紹介してくださいました。

このように、KISS は我々研究者だけでなく、いろいろな人に支えられて成り立っているわけですが、僕たちのこの取り組みは「物語」のままにはいけない、と改めて強く思います。我々 3 名の”ボード”メンバー(いつしか自分たちのことをおふざけでそう呼ぶようになりました)と数人の大学院生、大学生を主力メンバーとして進めてきた KISS。偉い”先生”(富永くんは准教授先生ですが...)が中心メンバーにいない中で非常に自由にやらせてもらっています。それだけにきちんと成果を出してそれに応えたい、という気持ちが強く、この 3 年間、かなりの研究時間を KISS に費やしてきました。詳細は富永くんの稿に書かれることと思いますが、木曾のシュミット望遠鏡で見つけないと本当の意味でショックブレイクアウトを理解したことにはなりません。大変難しい試みであることは、プロジェクト開始当時からわかっていたことではありますが、国際共同研究の枠組みでも、2014 年に入り、KISS の高頻度観測を生かしたおもしろい天体もいくつか見つかった等、科学的な成果を出せそうな時期になってきました。あとは、ショックブレイクアウトの発見が、まだ足りないラストピースでしょうか。

近くから遠くを探る

～ 木曾シュミットで見つけてこそ ～

富永 望 (甲南大学理工学部)



超新星爆発は星が一生の最期に起こす宇宙最大の爆発である。その爆発は宇宙進化の原動力であり、宇宙誕生時には存在しなかった炭素、酸素などの重元素を供給した。それだけでも重要な天体であるが、それらは非常に明るいことから宇宙そのものの研究にも用いられている。例えば、Ia型超新星を用いた宇宙の加速膨張の研究にノーベル物理学賞が与えられたことは記憶に新しい。

その中でも、我々は爆発直後一日程度の間に起こるショックブレイクアウトという現象に注目している。ショックブレイクアウトは1970年代に理論的に提案されたものの長年検出されず、2008年に初めてSwift衛星、GALEX衛星によるX線、紫外線観測が報告された現象である。我々は光と物質の相互作用を取り扱える輻射流体計算を用いて、その観測を再現する理論モデルを提出した。その結果、ショックブレイクアウトを用いるともっとも普遍的な超新星爆発が赤方偏移2を超える遠方まで観測可能となることが明らかとなった(これまでの限界は赤方偏移0.9である)。そこで、我々はすばる望遠鏡の新装置 Hyper Suprime-Cam を用いた遠方超新星の観測を提案している。

しかし、実はすばる望遠鏡を用いた観測だけでは十分ではない。というのは、ショックブレイクアウトの観測は2008年に報告された3例のみであり、その3例もX線、紫外線の観測で観測限界に近く精度がそれほど高くない。そのため、観測を再現する理論モデルを構築したとは言っても、非常に大きな誤差をもつ観測を再現したに過ぎない。さらに、輻射流体計算は非常に難しい計算であり、(もちろん正しいと思って計算しているわけだが)その理論計算を観測的に検証する必要もある。

理論計算の検証のためにはより観測の容易な近傍

天体の詳細観測が求められる。例えば、すばる望遠鏡で狙っている天体の明るさは24-27等であり、その追観測にはすばる望遠鏡と同程度の大きさの望遠鏡が必要となり臨機応変な観測体制の構築は難しい。近傍天体であれば、現在稼働中の多数の望遠鏡で追観測が可能となり、その中にはガンマ線バーストを対象とした即時追観測を得意とする望遠鏡もある。さらに、近傍天体はショックブレイクアウト後も継続的に観測可能であり(近傍天体の場合、可視光域ではショックブレイクアウトの方が暗い)、これまで多数行われてきた超新星爆発の観測とショックブレイクアウトの観測との関係も明らかにできる。ここで得られた関係は、ショックブレイクアウトでなければ超新星爆発を観測できない遠方宇宙でも近傍宇宙と同様に超新星爆発の性質を導くことを可能にする。

一方で、近傍天体を狙うということは、距離方向に探査体積を増やすことができず立体角方向に探査体積を増やす必要があることを意味する。それには広視野の望遠鏡・装置が必要であり、世界でも有数の広視野を誇る木曾シュミット望遠鏡/KWFCは近傍ショックブレイクアウトの検出に最適の観測装置である。そこで、我々はショックブレイクアウト検出を可能とする高頻度超新星探査観測 Kiso Supernova Survey (KISS)プロジェクト(諸隈さん記事参照)を推進している。

Ia型超新星の場合も、最初から遠方天体を観測していたわけではなく、近傍天体を用いてその素性を明らかにすることが必須であった。木曾シュミット望遠鏡は今後も近傍天体の検出と他望遠鏡と協力した詳細追観測によって遠方宇宙研究に貢献していくだろう。

KWFC 銀河面変光天体探査 KISOGP

～ 銀河系円盤の変光天体掃討作戦 ～

松永 典之 (東京大学 天文学専攻)



我々が住む太陽系は、銀河系と呼ばれる渦巻き銀河に属している。銀河系は、宇宙に数えきれないほどある銀河の中でごくありふれた銀河のひとつであるが、我々人類にとって、そして宇宙物理学の研究にとって、唯一無二の存在である。銀河はそれぞれ数千億個の星が集まったものであるが、銀河系では恒星ひとつひとつを観測できるため、その構造や進化を詳しく調べることができる。数十メガパーセク程度までの比較的近い銀河ならば明るい星を観測することも可能だが、それより遠くなると超新星爆発(恒星が最後に起こす大爆発)のような特殊な現象でしか個々の星を認識することができない。太陽のようなごく一般的な星を観測することができるのは、銀河系とごく近傍にあるたかだか数十個の銀河に限られる。

銀河系はこのような特徴によって、そのみならず、宇宙全体の進化を探るために他にないターゲットとなっている。たとえば、宇宙の初期に原初的なガスから生まれた星(いわゆる種族 III の星)を探せるのも銀河系内である。1990年代からさかんに行われている探査では、重元素を全くもたない星は見つかっていないものの、宇宙初期の物質進化について数多くの知見がもたらされている。また銀河系は、銀河の構造と進化の研究においても、個々の星の形成・進化のような小さなプロセスから銀河全体の進化プロセスまでを同時に調べることができる重要なターゲットでもある。

我々は、特に銀河系の骨格をなす円盤部に注目している。天の川と呼ばれるその領域には、銀河系の大部分の星とガスが集まっている。特に、1950年代以降の電波天文学の発展により、円盤部のガス分布が調べられるようになり、銀河系が渦巻銀河であることがわかっていく。一方、円盤部の星の分布を銀河系スケールの広い範囲について調べることは容易ではない。その大きな原因は、銀河面円盤部に主に存在するダスト(固体微

粒子)によって減光が起こるために、銀河系の中でも太陽から遠方の天体は可視光線で観測することが難しくなることにある。またガスの場合は、そのほとんどが銀河回転に沿って動いていることを利用して、運動から円盤中の位置が推定できるのに対し、星の場合は円盤内でも様々な運動をもつものが混在しているため、観測から星の分布を再現することは容易ではない。そこで、我々が星の分布を調べるのに利用するのは、セファイドやミラと呼ばれる脈動変光星である。これらの星は周期光度関係をもち、それによって個々の変光星までの距離を精度よく求めることができる。このため、円盤内に存在する変光星の観測を進めれば、各種の変光星に代表される星の分布を知ることができる。ただし、変光星の観測でも、やはりダストによる減光は問題となる。実際、これまでの変光星探査は太陽系に比較的近いところに限られていて、銀河系全体の星の分布を調べるには不十分であった(図1)。天の川という広い領域の変光星探査を一般に視野が小さい CCD カメラで行うことは難しく、これまでに知られていた変光星の多くが写真乾板で見つ

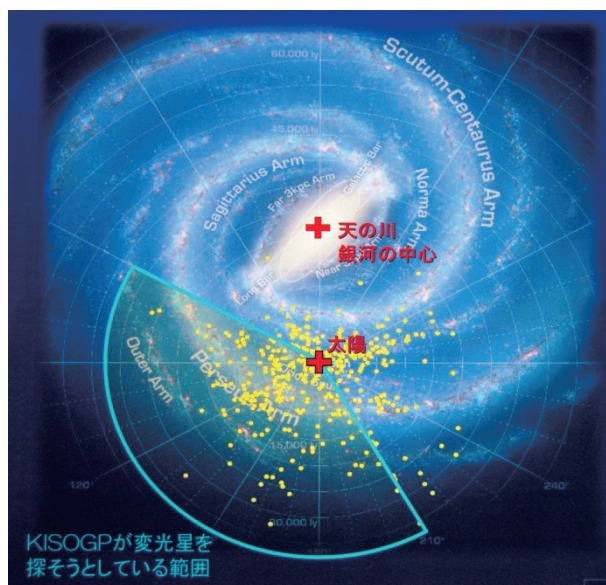


図1. KISOGP が変光星を探そうとしている範囲

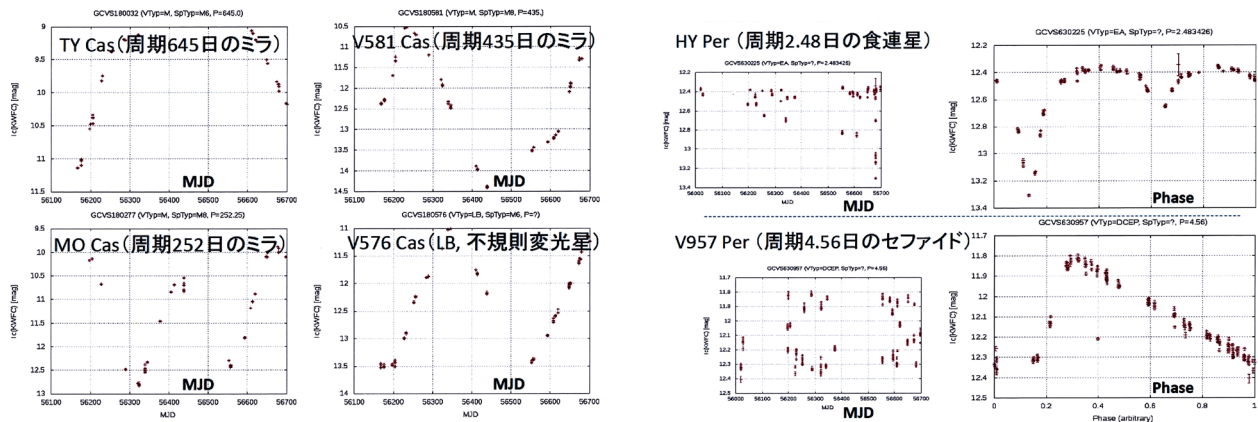


図2. ライトカーブの例（既知の天体）

かっていたということも、変光星探査がいまだ不十分であることを物語っている。

そこで、2011年に完成した木曾超広視野カメラ KWFC の視野の広さを活かし、銀河系円盤部の変光星探査を開始することにした。目的のひとつは、もちろんセファイドやミラのような脈動変光星を数多く発見し、銀河系の構造を調べることである。一方、円盤部には脈動変光星だけでなく多種多様な変光天体が存在する。たとえば、円盤部に多く存在する星形成領域の若い天体は変光することが知られており、また古典新星のような突発天体も星の多い円盤部で発見されやすい。そこで、銀河系円盤の多種多様な変光天体を包括的に発見・観測しようという目的で、銀河面の広い領域を繰り返し観測するプロジェクト(KWFC Intensive Survey of the Galactic Plane=KISOGP)を立ち上げた。観測領域は、銀河面に沿って銀経 60 度～210 度の範囲に KWFC の 80 個分の視野を並べた合計 320 平方度である(図1)。この領域中では、これまで約 1200 個の変光星が報告されている。星間減光が比較的小さくなる I バンドを用い、各視野 1 回あたりの観測では I=17 等級でも精度の高い測光(信号雑音比 30 以上)ができるように露光を行う。主な目標とする脈動変光星は、セファイド型変光星(絶対 I 等級 = -3.5)、ミラ型変光星(絶対 I 等級 = -4)、RR ライリ型変光星(絶対 I 等級 = 0)などである。銀河系の外縁方向での典型的な星間減光量を考えると、限界等級 I=17 等の探査を行うことで、ミラ・セファイドについては太陽系から 20 キロパーセク、RR ライリ型変光星については太陽系から 5 キロパーセクくらいまでの範囲にある天体を探査できる。新星・

矮新星についても、I=17 等という深さの探査はほとんど行われていないので、これまで見つからなかったような天体の発見が期待できる。

2012年4月に観測を開始し、2013年度までの2年間の観測が終わったところで、各領域 25～30 回程度の観測が順調に進んでいる。我々のこれまでの解析で、I バンドの振幅が 1 等級以上で、変光のタイムスケールが長いミラ型変光星候補天体を約 500 個検出した。その 9 割程度が、これまでに変光の報告されていない新発見の変光星であった。また、既知の食連星や X 線連星、YSO 天体(FU Ori 型など)の変光も多くとらえている。今後、振幅が 0.05 等級程度まで小さい変光星を含めて 5000 個以上の新しい変光星が見つかると考えられる。

脈動変光星に限って言えば、銀河系の変光星探査はある意味では一回きりの人類のプロジェクトである。我々が存在している銀河にある変光星を全て同定できたとすれば、その時点で変光星の分布などから研究を進めるための天体リストが揃うことになる。実際、Gaia 衛星など現在進んでいるプロジェクトによって、5 年後 10 年後には銀河系の多くの変光星が見つかると思われる。KWFC の稼動により、時代に先駆けて北半球の銀河面にある多くの変光星を見つけることで、われわれの銀河系を理解するという人類の一大プロジェクトに参加することが可能になったと言える。

木曾観測所の教育活動

～ 社会に開かれた研究機関をめざして ～

三戸 洋之 (木曾観測所)



東京大学木曾観測所では、研究成果の社会への還元と、研究活動に対する社会からの理解と協力をめざして、さまざまな教育活動をおこなっています。1974年の開所当時から、「観測所特別公開」、「出張観望会」、「観測所見学」がはじまり、その後、90年代半ばからは「天文学特別授業」、2000年前後からは、高校生を対象とした「銀河学校」、「星の教室」などがはじまり、現在までつづいています。

「星の教室」は、おもに長野県内の高校生を対象とする1泊2日の実習で、年間5、6回開催しています。実習テーマは「宇宙の年齢をもとめる」です。この実習では、知識を与えるのではなく、生徒たちの力で考えさせ、結果を導き出させることに重点をおいています。生徒たちは、5、6名の班の中で、活発に議論し、思考をすすめます。これまで、長野県内の理数科のある高校、SSH指定高校、その他都市部の高校を中心として、16校が参加しました。2004年、2005年は中学生向けの実習も開催され、7校が参加しました。

「銀河学校」は、中学3年生と高校生を対象とする3泊4日の実習で、毎回全国から30名ほどが集まり、シュミット望遠鏡を使った観測、観測したデータのコンピューターによる解析、研究成果発表などを行います。2014年までに、431名の生徒が参加しました。卒業生の中には、その後、天文学の研究に進む人もいますが、多くの方は、この実習で得た経験を財産にして、製造業、IT業、運輸業、教員、一般公務員、医師など、さまざまな分野に進路をとっています。卒業生たちは実習終了後も、共に銀河学校に

参加した、という仲間意識を強く持ち続け、自主的に同窓会活動や、教育研究活動なども行われています。

これらのほかに、「出張観望会」、「天文学特別授業」、「観測所見学」など、木曾郡内から長野県外まで、小学生から一般まで、広範囲にわたる人たちを対象に教育活動を行っています。

しかしながら、われわれが直接、社会の人たちに、天文学をはじめとする科学に対する理解を深めてもらう活動には限界があります。そこで、学校教員や、報道メディア、自治体などを通じて、間接的ながらも広範囲にわたって、社会に発信する広報活動も行っています。2014年1月22日にNHKで全国放送された、ドラマ「木曾オリエオン」は、これらの活動が結実したものとと言えます。全国のたくさんの方々に、ドラマのモチーフとなった木曾観測所の活動を知っていただけたことで、天文学をはじめとする基礎科学に対する理解を深めていただけたと考えています。



図1. 銀河学校2013: 全国から、およそ30名の高校生が集まり、3泊4日の実習を行います。

教育活動のあゆみ

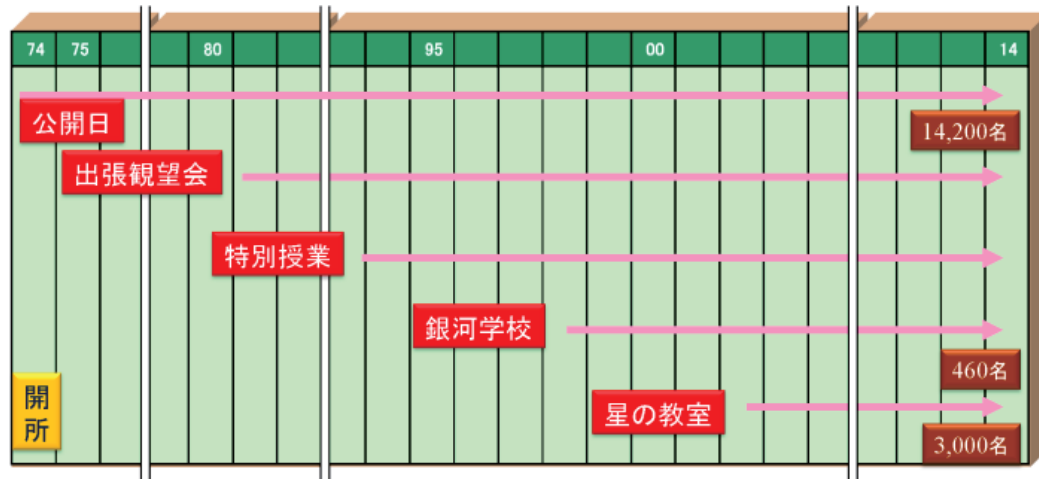


図 2: 1974 年の開所よりつづいている「公開日」は、これまでの 40 年間でのべ 14,200 名の参加者がありました。「銀河学校」は 1998 年よりはじまり、全国の高校生が、これまでおよそ 431 名参加しています。「星の教室」は 2002 年よりはじまり、主に長野県内の高校生が、これまでおよそ 3000 名参加しています。

銀河学校の参加者分布

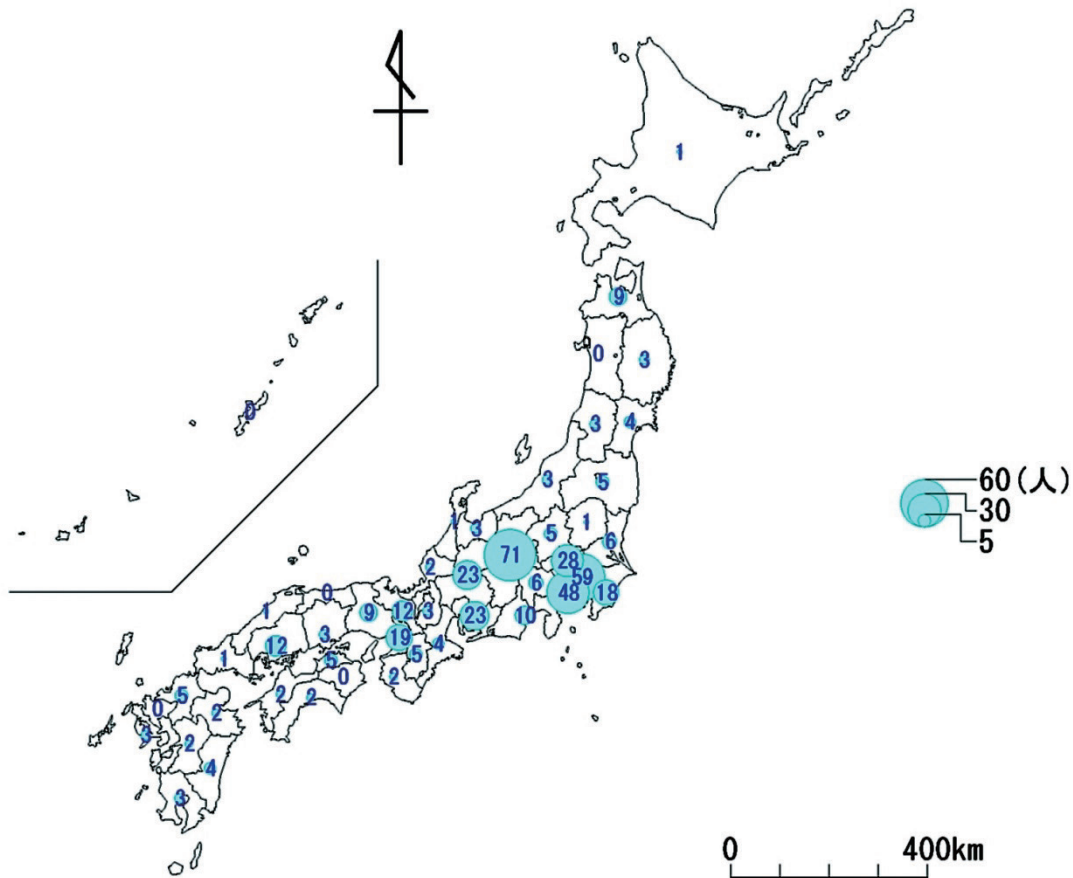


図 3. 1998 年の第 1 回から、2014 年の第 17 回まで、のべ 431 名の参加者がありました。参加する生徒は、長野県付近に強く偏ることなく、北海道から鹿児島まで、全国に広く分布しています。銀河学校は、全国の生徒に、天文学、科学の研究体験の機会を与えています。

教育活動の運営体制

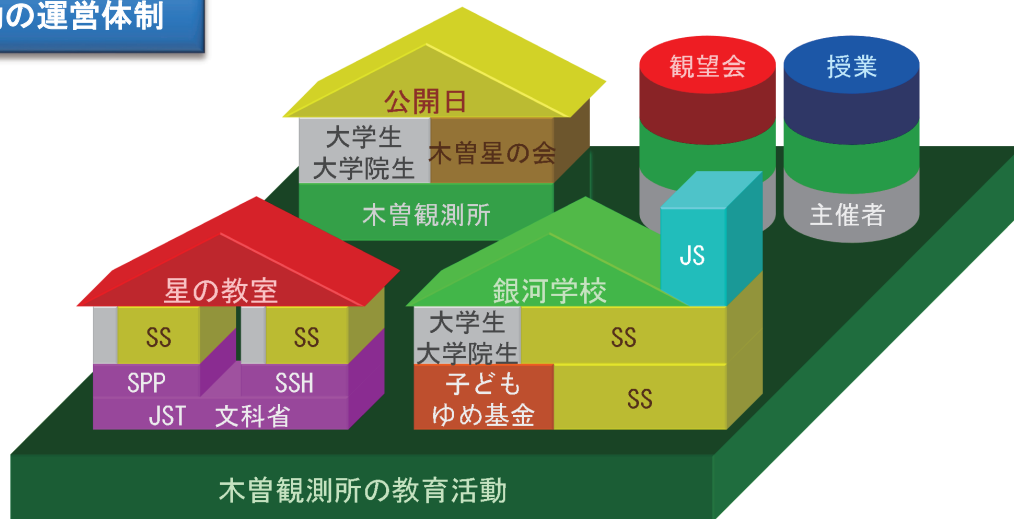


図4. それぞれの活動をあらわす積み木の1階部分は活動の財源、2階部分は活動をすすめる人材を表しています。星の教室は、JST(科学技術振興機構)によるSSH、SPP活動の一環として、SS(NPO 法人サイエンスステーション)に所属する学生の協力を得て、すすめられています。銀河学校は、国立青少年教育振興機構による「子どもゆめ基金」や SS からの援助を受け、SS、その他の学生の協力を得てすすめられています。参加者の一部は、日本天文学会ジュニアセッションにおいて、発表を行っています。公開日の開催にあたっては、木曾観測所に縁のある大学生、大学院生や、木曾星の会のみなさんの協力をいただいています。その他、出張観望会、天文学特別授業も、主催者と協力して行われています。

教育活動の対象範囲

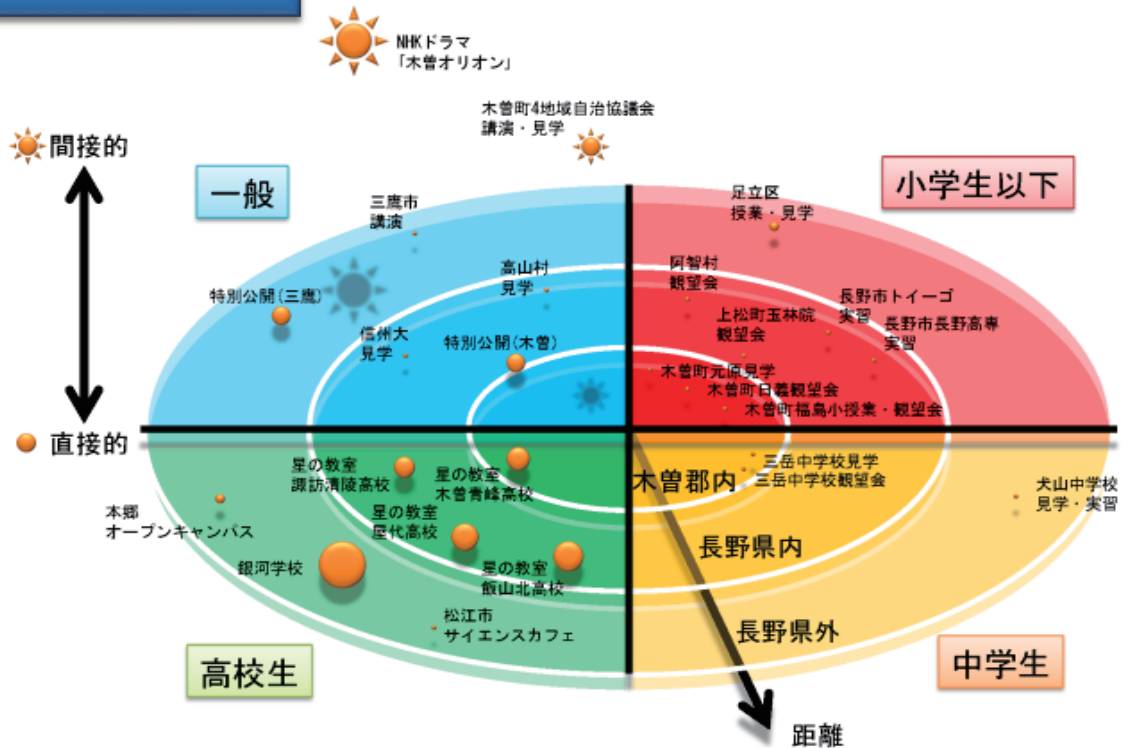


図5. 2013年度に行われた活動の対象範囲を、中心から半径方向に、観測所のある木曾郡、長野県内、長野県外と距離ごとに分け、回転方向に年代ごとに分けて範囲をしめています。各活動を表す丸の大きさは、おおよそ、参加者数と活動時間をかけあわせた値(人・日)に比例しています。

木曾観測所の教育活動は、小学生から一般まで、木曾郡内から長野県外まで、広範囲にわたって行われていることがわかります。特に、銀河学校、星の教室など、高校生を対象とした教育活動に大きな重点がおかれています。

直接的な教育活動とは異なり、間接的な活動(教員、自治体などを対象とした)は、円盤の上に印を変えて表しています。NHKドラマ「木曾オリオン」は、多くの人たちに、木曾観測所の様子を知ってもらえる機会となりました。