

京都大学天文台のせいめい望遠鏡を中心とする
将来計画

京都大学 理学研究科 附属天文台・宇宙物理学教室

岡山天文台将来計画ワーキンググループ

2025年3月10日

目次

1. はじめに	1
1.1 天文学・宇宙物理学	1
1.2 多波長天文学・マルチメッセンジャー天文学時代の光赤外線天文学	3
1.3 地上大型・宇宙望遠鏡・大規模サーベイ時代の大学天文台と中小口径望遠鏡	4
1.4 せいめい望遠鏡の目指したサイエンスゴール	6
1.5 せいめい望遠鏡建設の経緯	8
1.6 コミュニティとの関わり	9
2. 岡山天文台のこれまでと現状	11
2.1 運用	11
2.1.1 体制	11
2.1.2 京大時間と共同利用時間	11
2.1.3 クラシカル観測と To0 観測	12
2.1.4 運用中の観測装置	13
2.2 技術開発	14
2.2.1 鏡面制度計測技術	15
2.2.2 精密研削加工技術	16
2.2.3 分割鏡制御技術	17
2.2.4 軽量架台	20
2.3 科学的成果	23
2.3.1 超新星	23
2.3.2 恒星スーパーフレア	27
2.3.3 矮新星	30
2.3.4 Changing Look Quasar	33
2.3.5 惑星状星雲	33
2.4 教育的成果	36
2.4.1 学位論文	36
2.4.2 就職先・進学先	37
2.5 その他	38
2.5.1 せいめい望遠鏡稼働後のコミュニティとの関わり	38
2.5.2 民間企業との連携	38
2.5.3 社会連携	39
3. 岡山天文台の将来計画	43
3.1 概要	43
3.2 科学面での将来計画	45
3.2.1 超新星と系外突発天体	45
3.2.2 高分散分光観測で拓く恒星磁気活動現象	48
3.2.3 偏光面分光器「VISTA」(Vanguard Integral-field Spectropolarimeter For Transformative Astronomy)開発計画と	51

期待される科学成果	
3.2.4 A0 の発展	61
3.2.5 超高波長分解能分光器の開発と系外惑星探索	63
3.3 望遠鏡と基礎的観測装置開発	67
3.3.1 リモート化と自動観測化	67
3.3.2 技術開発環境と基礎的な観測装置の拡充	68
3.4 OISTER を通した国内連携の将来計画	70
3.5 国際連携と産業応用の将来計画	72
3.5.1 国際連携の拡充	72
3.5.2 産業応用の拡充	73
3.6 社会連携の将来計画	74
3.7 人材育成の将来計画	75
4. まとめ	76

執筆者と主執筆箇所

野上大作	1.1-1.4, 2.1.1-2.1.3, 2.4.1-2.4.2, 2.5.3, 3.1, 3.2.2, 3.5-3.6, 4
太田耕司	1.5, 2.4.1-2.4.2
岩室史英	1.6, 2.3.4, 2.5.1,
木野 勝	2.1.4, 2.2, 3.3.1-3.3.2
栗田光樹夫	2.2, 2.5.2, 3.4
前田啓一	2.3.1, 3.2.1,
井上 峻	2.3.2
行方宏介	2.3.2
前原裕之	2.3.2, 3.2.3
反保雄介	2.3.3
大塚雅昭	2.3.5, 3.2.3
戸田博之	2.5.3
川島由依	3.2.3
川端美穂	3.2.3
田口健太	3.2.3-3.2.4
磯貝桂介	3.2.3
山本広大	3.2.4
佐藤文衛	3.2.5
村田勝寛	3.4

協力

泉浦秀行、田實晃人、横山央明、小路口直冬

1. はじめに

本将来計画書は京都大学大学院理学研究科附属天文台と同宇宙物理学教室が共同で運用している岡山天文台の将来計画を提示するものである。そのために、まずこの1章では天文学、あるいは宇宙物理学を研究し教育する、そしてアウトリーチ活動をする意義や現在の天文学の状況を述べ、なぜ岡山天文台が必要とされたのか、どうやって天文台建設が実現されたのかを概観する。2章では2018年の岡山天文台開設までに行なった技術開発や開設後の運用について簡潔に記述し、これまでの研究や教育、その他についての実績をまとめておく。その上で、3章で将来計画を記述する。

1.1 天文学・宇宙物理学

天文学は数学と並んで、人類の文明とともに発生した世界最古の学問と言われる。当時は太陽、月、星といった肉眼で見える天体の位置やその変化から方角や日時を知るといって、単純で生活に密着したものであった。しかしその後の観測天文学の発展は、物理学の発展と密接に結びつくものであった。また一方で、通信技術、電磁波センサ技術、ロケット技術などの産業技術開発に伴って観測可能な波長域を広げてきた。

現代においては、宇宙における様々な天体やそこで起こる現象は、地球上では再現することが不可能なスケールやエネルギーの物理学の実験場と認識されている。そのため、天文学と宇宙物理学はほぼ同義で使われている。その取り扱う現象は素粒子スケールの 10^{-18} 乗 m から観測可能な宇宙のスケールの 10^{26} 乗 m と実に44桁の幅に及び、時間スケールではプランク時間の 10^{-44} 乗秒から宇宙年齢の138億年~ 10^{17} 乗秒と60桁を超える幅となる。このように、宇宙物理学は非常に極端なパラメータを取り得て、あらゆる基礎物理学を包含するものと言える。

また、宇宙物理学は、様々な他の研究分野や産業、あるいは実生活と繋がっているという面も持っている。例えば、近年の電波観測により星間空間で様々な有機化合物が生成されていることがわかっており、化学の研究者と協力して進める宇宙化学は急速な進展が起こっている。太陽系外惑星に関しては1995年の発見以来30年で、その発見数は5000を超え、多様な惑星の存在が明らかになり、系外惑星の大気の様子が研究対象となってきている。これは太陽物理学と太陽圏科学、惑星科学との距離を縮めることにも繋がっており、さらに宇宙化学も合わさって、どういう状況で生物が発生し、そして進化していくのかという宇宙生物学の研究も世界的に盛んになりつつある。より身近なところでは、宇宙天気という言葉も一般的になってきて、太陽フレアの影響で携帯電話の通信状況に影響が出る、GPSに狂いが生じる、あるいは人工衛星が使えなくなるなどの可能性があるというようなことは、既に多くの人に知られるようになってきた。

産業面では、より広い波長域で感度を持ち、より感度よく、より低ノイズで、より高速でデータを取れるような電磁波センサは、宇宙物理学研究者が企業と長年共同開発を続けてきていて、天体観測を発展させるとともに高性能なセンサを市販することに一役買っている。また、より軽量かつコンパクトで空間分解能の良い望遠鏡を作り出す技術の開発は、気象衛星で得られるデータの高度化やスペースデブリの発見とその追跡の容易化に繋がっている。

さらには、人類の宇宙進出が現実的になってきている現代において、重力環境や放射線環境が地上と全く異なる宇宙空間での人体の健康を取り扱う宇宙医学、人類が宇宙に進出することをその意義から問い直す宇宙哲学・宇宙倫理学、多様なバックグラウンドを持つ人々が共同生活を行なうために必要な法律を研究する宇宙法学など、宇宙に関する研究は爆発的に広がっている。

京都大学はこの多様な学問と宇宙との繋がりの重要性を日本の中でいち早く見抜き、関連研究者を繋ぐ役割を持つ宇宙総合学研究ユニットを発足・運営し、その成果を世に還元するために年1回開催している宇宙ユニットシンポジウムは、2025年において第18回を数えるに至っている。この宇宙総合学研究ユニットは、2024年からは京都大学大学院理学研究科内のサイエンス連携探索センター宇宙学際研究グループとして改組され、理学研究科内外の研究をつなぐ柱の一つとして活動を継続し発展させている。

アウトリーチ活動についても、天文学は異彩を放っている。日本国内には観望会などの行事を行っている公開天文台の数は400に上り、世界的にも類を見ない多さとされている。この中には科学館や博物館の中にあるものも多いが、自治体が口径数10cmの望遠鏡を持つ天文台を運営しているところも多く、中には口径1mを超える望遠鏡を設置している公共天文台も存在する。このような場所で天文学に触れ、自然の持つ美しさや多様性に惹かれ天文学を含む自然科学の研究を志した者は数多い。そうまでならなくとも、自然科学の入口として、様々な研究分野と関わりを持つ天文学の果たす役割は大きく、慢性的な理系人材不足とされる日本においてSTEM/STEAM教育の重要なテーマとなりうるであろう。

このようなアウトリーチ活動は、特に進歩の速い研究分野において題材が陳腐化しやすく、ともすれば(最先端の研究成果に鑑みて)間違った知識が一般に広がりかねない。また、表層的な解説のみになりがちで、広く深い専門性に基づくものとはなりにくい。このため、最先端の研究を行なう大学としては、最新の専門的知見をもとにダイナミックな研究の進展の広報普及活動を自ら行なう、あるいは一般的に行われているものに協力する使命があると言えよう。

研究者と一般市民が共同で研究を進める市民科学においても、天文学は様々な試みがなされ成功を収めている。例えば、すばる望遠鏡の超広視野主焦点カメラHyper Suprime-Camのデータを使って衝突銀河の形の分類を行なったギャラクシークルー

ズや、同じくすばる/HSC のデータを使って太陽系小天体を発見する COIAS などがある。花山天文台では設立当初の頃から一般市民への天文学の普及に努め、数多のアマチュア天文家の育成を行なった。現在の日本のアマチュア天文学は世界最高レベルにあり、超新星・新星・彗星・小惑星・変光星などの発見において世界をリードしている。これらの発見を受けて、アマチュア天文家と共同でせいめい望遠鏡でも追跡観測を行ない多数の重要な成果が生まれるなど、WIN-WIN の関係を築いている。

1.2 多波長天文学・マルチメッセンジャー天文学時代の光赤外線天文学

あらゆる波長・エネルギーの「光」をまとめて電磁波と表現するが、その波長によって波としての性質と粒子としての性質のどちらがどの程度強く出るかは異なる。そのため、望遠鏡も観測装置も扱う波長によって原理から大きく異なり、電波天文学・光赤外線天文学・紫外線天文学・X線天文学・ γ 線天文学というように、観測波長ごとに研究者コミュニティが異なるという時代が長く続いてきた。

しかし、電磁波の発生プロセスは多様である。一つの天体でも温度・密度・磁場強度などの物理パラメータが大きく異なる部分を持つため、部分ごとではなく、その天体の全貌を明らかにしようとする多波長での観測データを総合的に考慮しなければならない。また、光の速度が有限であるため、より遠方の天体を観測するほどより昔の宇宙の情報が得られることになる。さらに宇宙は膨張しているため、より遠方の天体ほど後退速度が大きくなり、観測される波長がより長くなる。例えば、宇宙の初期に形成された天体を観測しようとする、もともと紫外線として放射された光が赤外線として観測されることになる。そのため、多波長での観測データを総合的に検討する「多波長天文学」がこの20年くらいで重要性を増してきた。

さらにこの10年ほどで、電磁波以外で天体や現象の情報を得る手法が確立されてきた。即ち、ニュートリノと重力波である。電磁波とこれらを合わせて天体現象を研究することを「マルチメッセンジャー天文学」という。

ニュートリノを発する天体として最近までに同定されたものは、太陽からのものと1987年の大マゼラン雲の超新星1987Aからのものしか存在しなかったが、南極の氷を使ってニュートリノを捉えようとする国際共同チームによるIceCubeプロジェクト(日本では千葉大学の研究グループが主導)が2000年代に始まり、本格的なニュートリノ天文学が幕を開けた。このプロジェクトでは捉えたニュートリノ事象について世界中の天文台に即時アラートを送付するシステムの運用を2016年4月から開始し、2017年9月22日に捉えたニュートリノ事象IC170922Aでは、世界的に様々な波長の電磁波で追観測が行われる中で日本の光赤外線大学間連携 OISTERでも観測を行ない(残念ながらこの時まで岡山天文台はできていなかった)、このニュートリノを放出した天体がブレーザーであることが確定した。理論的にはブレーザー以外にも、例えば潮汐破壊現象などの高エネルギー現象でもニュートリノが観測されるこ

とが予想されているが、未だにこのニュートリノ事象以外で電磁波により対応天体が同定できた例はなく、今後の観測が期待されている。

重力波については、アルベルト・アインシュタインによる一般相対性理論で予想された。その後、間接的な観測的検証はなされていたが、直接的な重力波の観測は難しかった。しかし、2016年にレーザー干渉計を利用したアメリカの重力波「望遠鏡」LIGOで初めて2つのブラックホールの合体による重力波の検出に成功したと発表された。それ以後、ヨーロッパのVIRGOや日本のKAGRAと合わせて観測が行われ、それぞれの感度の向上も相まって、稼働している期間では数日に1回程度の検出アラートが世界中の天文台に流されている。ただし、これまでのところ電磁波で対応天体が発見されたものは2017年8月17日に検出された重力波GW170817のみで、これは中性子星同士の合体による現象であった。この1例の観測データにより、ショートガンマ線バーストとの関連や重金属の生成など多方面での研究が進んだが、さらなる電磁波対応天体の発見と追観測が切望されている。

このように、多波長天文学からマルチメッセンジャー天文学へと多くのデータを総合して、多様な天体や現象の研究を行なう流れになってきている。しかし、これらの天体现象の「もと」は恒星やそれをとりまくガスやダストを合わせた銀河であり、また多数の金属線や分子線の同定もなされてきているということもあり、これらの要素の情報を得る基礎としての光学赤外線天文学は今後もその重要性は増していくことであろう。

1.3 地上大型・宇宙望遠鏡・大規模サーベイ時代の大学天文台と中小口径望遠鏡

1609年のトーマス・ハリオットやガリレオ・ガリレイによる口径数cmの望遠鏡を使った天体のスケッチ以来、より暗い天体のより詳細な観測を行なうため、より大きな望遠鏡が開発されてきた。現在稼働しているものは、1993年に完成した口径10.4mのKeck I望遠鏡（アメリカ）をはじめとした口径8-10mクラスの望遠鏡が最大であり、日本のすばる望遠鏡を含む13台となっている。その次が3-6mクラスの望遠鏡で、世界で30台近くが運用されている。せいめい望遠鏡は口径で見れば、2025年現在、世界で28番目の大きさとなる。このような大きな望遠鏡は、光赤外線での観測の邪魔となる人工の光や空気及び水蒸気を避け、標高の高い場所に設置されたものが多い。8-10mクラス望遠鏡では、最も標高の低いところでSALT望遠鏡がある南アフリカ天文台の標高1750mである。すばる望遠鏡はハワイ・マウナケア山で標高4200mである。

口径30mクラスが次世代の超大型望遠鏡であり、アメリカが主導するELTとGMT、及びヨーロッパが主導するE-ELTの3台の開発が既に開始されている。これらはそれぞれ4000-5000mの山頂に建設され、2030年頃に相次いで観測を

開始する予定である。

このような大きな望遠鏡はどのような観測にも対応できるような汎用の望遠鏡として建設され、共同利用に供されてきた。ただし、3-4mクラスの望遠鏡では大学連合で運営するものもいくつか存在している。例えば、WIYN 3.5m 望遠鏡、ARC 3.5m 望遠鏡、Lowell Discovery 4.3m 望遠鏡などである。

そして、現代は既に3mクラス以上の望遠鏡が単一の用途に絞って作られるようになってきている。2009年には中国で有効口径4mのLAMOST望遠鏡が4000天体の低分散可視光分光観測を同時に実行できるように作られ、分光サーベイを継続的に行なっている。また口径8.4mのLarge Synoptic Survey望遠鏡を持つVera C. Rubin Observatoryが、2026年にも可視光・近赤外線を超広視野撮像観測をもとにした突発天体サーベイを開始する予定である。しかし、世界的に見ても3.8mの汎用望遠鏡の半分の観測時間を1大学で運営している例はほとんどない。ただし、近く本格稼働を開始する予定の東京大学TAO 6.5mはせいめい望遠鏡に近い運営スタイルとなる予定である。

宇宙望遠鏡に目を向けると、近年大型の可視光・近赤外線のプロジェクトが相次いでいる。2009年に稼働を開始した可視光広視野連続測光観測による系外惑星探査宇宙望遠鏡Keplerやその後継機であるTESS（ともにアメリカ）、2013年に打ち上げられたヨーロッパの可視光位置精密測定による天体測距宇宙望遠鏡Gaiaが多方面で成果を出し続けている。HSTの後継であるアメリカの旗艦ミッションJames Webb宇宙望遠鏡は可視光から中間赤外線をカバーする高空間分解能の撮像装置で、初期宇宙や銀河進化、系外惑星調査などで革命的な成果を上げつつある。アメリカのRoman宇宙望遠鏡は可視光・近赤外線での広視野撮像観測とコロナグラフ+撮像カメラ/分光器という特徴的な観測装置を搭載し、初期宇宙や銀河進化、系外惑星の特徴付けなどを目的として、2026年の打ち上げを目指している。ヨーロッパの可視光・近赤外線での超高視野撮像観測宇宙望遠鏡PLATOも、系外惑星の発見と特徴付け、特に明るい太陽型星周囲でのハビタブル惑星についての調査を目指し、2026年に打ち上げ予定である。2040年代には、アメリカが主導する紫外線-可視光-赤外線をカバーするHabitable Worlds Observatoryという超大型計画が控えている。日本でも、これら将来の宇宙望遠鏡計画に参加するとともに、近赤外線での位置天文宇宙望遠鏡JASMINEやガンマ線と近赤外線の望遠鏡を搭載する突発天体現象サーベイ宇宙望遠鏡HiZ-GUNDAMが検討されている。

このような宇宙望遠鏡は、大気や水蒸気による可視光・近赤外線の吸収や散乱、画像のぼやけでのデータの劣化や不均一がない、天候という不確定な要素がなくなり観測計画を立てやすい、（ほぼ）全天を同じ装置でカバーできるというような、大きな利点がある。地上の大型望遠鏡では、宇宙望遠鏡よりも大口径の望遠鏡を作ることが可能で集光力が大きく、大気による画像のぼやけを直す補償光学装置の開発により、

大口径を活かした非常によい空間分解能を得ることができる。

しかしながら、地上大型望遠鏡や宇宙望遠鏡は、次のような弱点も存在する。すなわち、限られた数の望遠鏡での共同利用で競争率が激しいため安定した観測時間の確保が難しく、新しい観測に手を出しにくい、装置開発のハードルが高く自分の行ないたい観測ができない場合があるし、スケジュールがきっちり決められていて突発的な天体現象の即応観測が難しい、というものである。これに加えて、宇宙望遠鏡ではプロジェクトの期間が数年から10年程度で非常に長期にわたる計画を立てにくいし、装置の不具合や経年劣化の補修が難しいということもある。そもそも打ち上げの失敗のリスクすらありうる。

これらの点では、中小口径望遠鏡の方が有利と言える。すなわち、望遠鏡の数が多く望遠鏡時間の確保がしやすいし、思いついた観測をすぐに試すことができる。トライ&エラーを繰り返して観測手法を練ることができる。突発的な天体現象の即応観測が行ないやすい。10年以上にわたる長期的な観測プロジェクトを実施しやすい。観測装置を作るハードルも低く、自分の行ないたい観測のための装置を一から設計して、部品製作、組み上げ、制御ソフトウェア作成、テスト観測・調整、解析ソフトウェア作成、本観測と一通り関わるができる（しなければならない）。多少の装置の破損は補修することができる。

このような利点があるので、教育研究機関である大学が中小口径望遠鏡を自前で持つことは、特に教育の意味で大きな意義がある。観測にしる装置開発にしる、プロジェクトの立案・実行・評価・改善のPDCAサイクルの全ての経験を（失敗も含めて）主体的にすることができる。これは大望遠鏡のみではなかなか難しい。中小口径望遠鏡ではサイエンス的に光量や観測装置という意味で限界があり大望遠鏡での観測を申請する場合でも、培った基礎的な経験は必ず活きるだろう。また、自分のプロジェクトを行なうという経験は実社会に出ても活きるはずである。

1.4 せいめい望遠鏡の目指したサイエンスゴール

2018年の岡山天文台開設時には、せいめい望遠鏡の科学目標として、1)ガンマ線バーストをはじめとする突発天体現象の解明、2)太陽系外惑星の解明、3)恒星スーパーフレアの解明の3つを我々は掲げていた。この節では、それぞれを概説する。これまでの成果や将来計画は2章及び3章で述べる。

1)の突発天体現象は、短いタイムスケールで起こる、いつ起こるか予測ができない爆発現象の総称である。発見アラートから1分1秒を争う観測が必要であることからガンマ線バーストを象徴的に掲げていたが、超新星、新星、矮新星、X線連星などはせいめい望遠鏡プロジェクト開始当初から突発天体現象として重要な研究テーマと考えていた。そして近年では、高輝度赤色新星(Luminous Red Nova)、高速青色可視光トランジェント(Fast Blue Optical Transient)、高速電波バースト(Fast Radio

Burst)など新種の現象も続々と見つかってきている。マルチメッセンジャー天文学もこの範疇に入っており、爆発最初期から短時間で状況が変化していく様を継続的に観測することが必要であることから時間軸天文学(Time Domain Astronomy)とも呼ばれている。

口径3 m以上の望遠鏡の分布図を、日本を中心とした半球上に示したものが図 1.1

である。これに示されるように、日本は中口径以上の望遠鏡の真空地域の真ん中にあり、短時間変動現象を継続的に観測する上で重要な位置にあることがわかる。特に短いタイムスケールの現象であれば、「日本でしか観測できなかった」というものまで捉えられる可能性がある。また、1.3でも述べたように中口径以上の望遠鏡は観測スケジュールがきっちり決まっていて突発天体现象に即応する観測(Target of Opportunity Observation、略してToO 観測と呼ばれる)が難しいものが多く、このような観測に素早く対応できる望遠鏡としてはせいめい望遠鏡が世界最大の口径を誇っていると行って過言ではない。架台を軽量化し望遠鏡が素早く動けるようにしたこと、一部

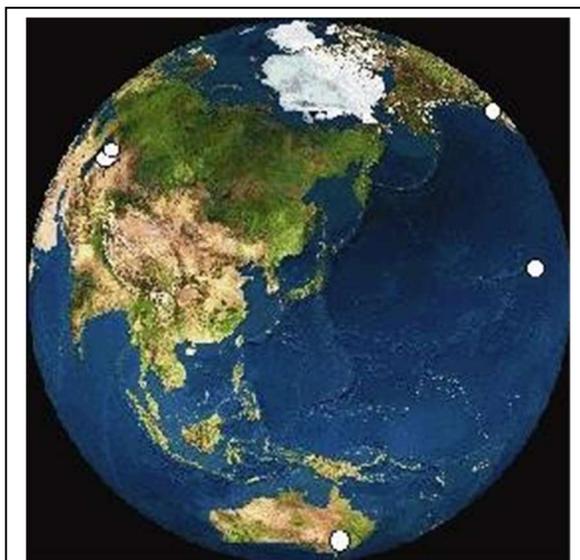


図 1.1：口径 3m 以上の望遠鏡の日本を中心とした半球状での分布図。日本付近には大きな汎用望遠鏡がなく、突発天体现象の観測の上で重要な位置にあることを示している。

の鏡を動かすだけで全ての観測装置を切り替えて使えるようにしたこと、ToO 観測にできる限り対応する運用にしていることは、この科学目標達成に資するものである。

2)の太陽系外惑星の解明に関しては、極限まで性能を高めた補償光学技術を開発し、直接撮像をすることによって系外惑星を詳しく観測しようというものである。これまで系外惑星は、いくつかの手法で多数発見されてきた。しかし、直接撮像による系外惑星の発見は、地球大気による画像の擾乱を補償する手法(補償光学)が不十分で、望遠鏡の回折限界を達成しきれないことから、数は多くない。しかし、この手法で発見が期待される、軌道傾斜角がトランジットを起こすほど高くなく、母星からやや離れた比較的軽い系外惑星が取り残されている状況であった。これには太陽型星周りの地球型惑星も含まれる。

そのため、せいめい望遠鏡用に極限補償光学技術を開発し、直接撮像によってそのような系外惑星からの光を取り出そうというプロジェクトが立案された。これが成功すれば、系外惑星の発見だけでなく、その惑星の詳しい調査が可能になり、宇宙に

おける「生命」の起源に迫る期待が持てる。さらにこれで開発した技術が、すばるや TMT などのさらに大型の望遠鏡に応用されれば、光量と空間分解能の上昇により、その期待をより一層高められる。この技術開発と実証が現在進められている。

3)の恒星スーパーフレアの解明は、京都大学のグループによりその存在が確実となった、太陽型星におけるスーパーフレアの機構や周囲に与える影響を解明しようというものである。太陽フレアは京都大学の飛騨天文台の活躍もあり、その機構がかなり解明されてきている。また、太陽フレアは 100 年以上の研究があり、エネルギーが大きなフレアほど頻度が下がり、現在観測されている最大級のエネルギーのフレアは数十年に一度くらいの頻度で起こることがわかっている。しかし、千年や 1 万年という長い時間スケールではよりエネルギーの大きな、より社会に大きな異影響を及ぼす可能性のあるフレアが起こる可能性は否定できない。

そこで、系外惑星探査衛星ケプラーの公開データを解析したところ、京都大学のグループが太陽型星で、太陽で観測された最大級の太陽フレアの 10 倍以上のエネルギーのスーパーフレアが起こることを明らかにした。しかし、そのスーパーフレアが太陽フレアと同じ機構で起こるのか、太陽フレアと同じように質量放出を起こし、高エネルギー粒子現象や強い X 線・紫外線を放射して周囲の惑星環境に影響を与えるのかは、分光観測を含むより詳しい観測で明らかにしなければならない。ただし、一つ一つの星を観測して頻度の高くないスーパーフレアを観測するためには、長い望遠鏡時間を安定的に確保する必要がある。そのため、大きな望遠鏡を自前で持つ必要がある。

ここで述べた 3 つのテーマが、岡山天文台・せいめい望遠鏡の建設当初の科学目標である。いずれも、中口径以上の望遠鏡が周囲にないこと、自由に装置や技術の開発ができること、長い観測時間を占有できることという、岡山天文台とせいめい望遠鏡の利点を活かし、最先端を切り拓こうというものである。

1.5 せいめい望遠鏡建設の経緯

日本では、東京大学附属東京天文台（のちに全国共同利用機関の国立天文台に改組される）が 1960 年に岡山に建設した口径 188 cm の望遠鏡が長らく日本最大の可視光望遠鏡であった。この望遠鏡は、実質的には全国共同利用の形態をとっており、日本の多くの研究者がこれを利用して観測的研究を行っていた。しかし、1980 年代には、一人のユーザーが利用できる夜数は年間数夜程度となり、大学独自の望遠鏡が欲しいという機運が高まった。この頃、京都大学では、宇宙物理学教室、附属天文台、物理学第二教室の宇宙線研究室の三者で、独自の 2m クラスの望遠鏡を設置しようという検討が始まった。一方、東京天文台でも 3m クラスの新望遠鏡設置を検討しており、1980 年代半ばになると、各大学の計画は諦めて、日本全体として口径 8m クラスの望遠鏡を作ろうという計画が本格化した。そして、国立天文台のすばる望遠鏡と

して結実した。

すばる望遠鏡が完成した暁には、岡山の188 cm望遠鏡は閉鎖すべきというのが当時の国の意向であった。しかし、日本の光赤外線天文学研究を、8m望遠鏡1台だけで行うというのは問題である。天文学の研究課題は多岐にわたり多様であり、中小望遠鏡で達成可能な課題もたくさんある。また、そのような天文学の研究課題の中から新しい課題が育ち、8m望遠鏡を必要とする研究に発展することもある。天文学の新たな分野を開拓して育てていくことも重要なのである。また、次世代の研究者育成のためには、院生が自分で考えたアイデアを試して試行錯誤をしながら研究するための、比較的自由に使える望遠鏡が必要である。また、望遠鏡や観測装置の開発やそのための人材育成も将来の日本の天文学の発展のためには必須である。このような観点から、光赤外線の観測天文学者の多くは、岡山188 cm望遠鏡を閉鎖するとしてもそれに代わる新たな望遠鏡がアクセスのよい場所にあることが必要であると考えていた。

2000年頃には、光赤外線天文学のコミュニティからの強い支持のもと、京都大学を中心に、岡山の地に3mクラスの望遠鏡を建設しようという計画が始動し始めた。その後紆余曲折があったが、ついに国からの予算もつき、2018年4月に京都大学大学院理学研究科附属天文台岡山天文台が設置され、2019年2月末から観測運用を始めた。

このような背景があるため、せいめい望遠鏡の観測時間の半分は、全国共同利用に供されている。残り半分の時間は京大時間（宇宙物理学教室と附属天文台関係者）として京大の裁量で運用している。共同利用は国立天文台のミッションであるので、国立天文台との協力関係のもと、運用を続けている。

1.6 コミュニティとの関わり

日本の天文学コミュニティは、1999年にすばる望遠鏡が完成して以降、多くの研究者が世界最先端のデータを用いて研究を進めることができるようになった。その一方で、国内では口径2m程度までの小口径望遠鏡しか存在せず、観測研究や装置開発の面において大口径のすばる望遠鏡との間をつなぐ望遠鏡の必要性がコミュニティの中で年々高まってきた。この中で、可視光や赤外線での観測的研究を主として行なっている研究者コミュニティは光学赤外線天文連絡会（光赤天連）であり、国内中口径望遠鏡の重要性は2005年1月に発表された光赤天連運営委員会声明において以下のように述べられている。

光学赤外線天文連絡会 運営委員会声明「基幹大学を核とした望遠鏡計画の推進」（2005年1月21日）より抜粋、文中の"6.5m望遠鏡"は東大TAO望遠鏡のことを指している。

「京都大学が提案する国内3m級望遠鏡はさらにその次の時代の発展を図るものであ

る。このためには観測研究とともに技術開発研究が欠かせないが、上記 6.5m 望遠鏡やすばるなどの大型望遠鏡は新技術開発に最適とはいえない。従って京都大学は世界最先端のユニークな技術開発を進めるために 3m 級望遠鏡を国内に設置する計画を提案する。目標は、研削による鏡面製作と分割鏡制御という革新的技術開発研究であり、国内産業との連携を強化しながら、将来の超大型望遠鏡や宇宙望遠鏡のための基礎開発となるであろう。また 6.5m 望遠鏡等に装着する観測装置の開発という役割も重要である。また国内に設置される大学望遠鏡という利点を生かした、機動性のある研究課題の展開、たとえばコンパクト天体の物理の解明、星間物質研究の新局面の開拓等でユニークな研究成果が期待される。京都大学を中心に、国立天文台岡山天体物理観測所、名古屋大学の関連研究グループが共同で望遠鏡建設を推進する。」

その後、光赤天連の 2010 年度シンポジウムでは、「中小口径望遠鏡によるサイエンスとその運用の将来」というテーマで国内の中小口径望遠鏡でのサイエンスと関連する技術開発に関して、様々な発表と議論が行われた。その後、望遠鏡建設に向けての機運が高まり、2012 年 6 月には 2 度目となる光赤天連運営委員会声明が出された。

光学赤外線天文連絡会 運営委員会声明「大学における研究教育基盤の整備」(2012 年 6 月 26 日) より抜粋。

「京都大学を中心に、国立天文台岡山天体物理観測所、名古屋大学、ナノオプトニクス・エネルギーが共同で進めている 3.8m 望遠鏡計画は、日本国内で最も観測条件の優れた岡山天体物理観測所内に建設を予定している。完成すれば国内最大の望遠鏡となり、超新星やガンマ線バーストなど突発的天文現象の即時観測や、星形成の現場の詳細観測、系外惑星探索などで世界をリードすると期待される。また国内産業との連携のもと、軽量架台、研削による鏡面製作と分割鏡制御という革新的技術を開発・実用化するものであり、将来計画の基礎開発となるものである。観測運用は同大学・国立天文台のみならず大学間の連携のもとに行われ、日本国内設置という地理的条件を生かして装置開発や観測的研究を通じて大学における学生教育にも大きく貢献することが期待される。」

以上のようなコミュニティの要望はせいめい望遠鏡の完成により現実となり、技術開発や潤沢な望遠鏡時間を用いた挑戦的な観測研究を通して、研究開発のみならず教育や若手研究者の育成に重要な役割を果たしている。望遠鏡完成以降のコミュニティの声はせいめいユーザーズミーティングとして引き継がれ現在に至っている。

2. 岡山天文台のこれまでと現状

この章では、岡山天文台の運営の 2025 年 2 月時点での状態について述べ、これまでにあがっている成果について、研究面・教育面・その他の面についてまとめる。

2.1 運用

2.1.1 体制

岡山天文台では、現状で准教授 1 名、特定准教授 1 名、特定助教 3 名、機関研究員 1 名、技術専門員 1 名、教務補佐員 2 名、技術補佐員 1 名が現地勤務し運用にあたっている。また、京都分室に岡山天文台関係の事務を所掌する事務補佐員を 1 名置いている。宇宙物理学教室からも数名の教員が運用に関わっている。

共同利用時間については国立天文台が責任を持ち、国立天文台ハワイ観測所岡山分室(以下、岡山分室とする)勤務の准教授 1 名、特定准教授 1 名、助教 1 名が運用を行っている。そして、共同利用に関して京都大学側と国立天文台側の情報共有や運用方針の決定のため、京都大学からは理学研究科長、附属天文台長、北部事務長ほか、国立天文台からは国立天文台長、岡山分室長、事務長ほか参加して、京都大学 3.8m 望遠鏡協議会を年 1 回開催している。

2.1.2 京大時間と共同利用時間

全望遠鏡時間は、望遠鏡や観測装置などの開発やメンテナンスに使うエンジニアリング時間、岡山天文台と岡山分室に所属する教職員の観測(～1 夜/人/セメスター)や岡山天文学博物館と共同で行なう観望会(～0.25 夜×2/セメスター)で使われる天文台時間を除き、京都大学の教職員と大学院生のみが PI として応募できる京大時間と日本全国の研究者が応募できる共同利用時間で半分ずつとしている。式で表せば、全望遠鏡時間=エンジニアリング時間+天文台時間+京大時間+共同利用時間、かつ京大時間=共同利用時間である。

京大時間と共同利用時間はそれぞれでセメスターごとに公募が出される。セメスターは 1 月～6 月の A 期と 7 月～12 月の B 期で分けられるが、公募される日程では梅雨で晴天率の悪い 6 月中旬から 7 月中旬と年末年始の 1 週間程度が除いてある。

2019A 期から公募が始まっており、初期はエンジニアリング時間が多かったものの、この数年は各期とも 60 数夜程度が京大時間・共同利用時間のそれぞれに割り当てられている。光赤外線大学間連携 OISTER を通してせいめい望遠鏡を使用する観測については、京大時間内のみで行えることとし、京大時間の 10 分の 1 程度までを目安としている。

プロポーザル公募の発出や提出されたものの取りまとめについては、京大時間については京大内 TAC(Time Allocation Committee)が、共同利用時間については岡山分

室が行なっている。プロポーザルの採否と割当時間の決定は、京大時間は京大内 TAC のみで行なっているが、共同利用時間については国立天文台のせいめい小委員会がレフェリーを選定して査読を依頼し、その結果をもとに採否と割当時間の決定を行なっている。その結果を京大内 TAC と岡山天文台教員が持ち寄ってスーパーTAC を開催し、実際の観測時間の割り付けを行なっている。

せいめい望遠鏡ユーザーと望遠鏡や観測装置などの情報を共有し、意見を収集し議論を行なうためにユーザーズミーティングを開いている。京大時間のユーザーズミーティングに関しては必要に応じて不定期に、共同利用時間については年1回開催されている。

2.1.3 クラシカル観測と ToO 観測

京大時間でも共同利用時間でも、観測の仕方をクラシカル観測と ToO 観測の2種類で分けている。クラシカル観測はセメスターが始まる前に観測日程を割り当てるもので、ToO 観測は突発的な現象が起こった時に行なうので事前に観測日程の割当ができず、クラシカル観測や天文台時間などに割り込みを行なうことになる観測である。

せいめい望遠鏡はサイエンスゴールとして突発天体现象の解明を掲げており、ToO 観測を重視している。このため京大時間のプロポーザルについては、原則的にクラシカル観測は ToO 観測の割り込みを拒否できないことにしている。ToO 観測のプロポーザルは京大内 TAC で SS,S,A,B,C の5段階でランク付けしており、ToO 観測同士ではランクが上のものが優先される。ただし、クラシカル観測の中でも事前に起こる時間が確定している現象を確実に観測したいというものは Time Critical 観測という枠にして、プロポーザルの科学的価値をもとに、京大内 TAC でセメスターが始まる前に上書きできる ToO 観測のランクを決めている。

ToO 観測の実施方法は、1)岡山天文台に観測をしに行く、2)事前に観測指示書を用意しておき現地で観測を行なっている方に観測を依頼する、3)現地の観測者にリモート観測を行える設定にしてもらいリモート観測を行なう、の3つがある。現在はリモート観測が安定して行える環境になっており、これが選択される場合が多い。京大時間のプロポーザルで採択された ToO 観測は京大時間のみで行なうことができ、共同利用時間で観測を行なうことはできない。逆もまた然りである。クラシカル観測を行なっていて ToO 観測の割り込みのために失った観測時間は、京大時間の中で確保している DDT(Director's Discretionary Time)内で補填を行なう。DDT は ToO 観測で採択された申請時間の10%強を目安として、セメスターの時間割り付けの時に確保している。DDT による観測時間の補填は、そのセメスター内でのみ有効としており、次のセメスターに持ち越すことはできないとしている。

2.1.4 運用中の観測装置

2024年11月時点において3台の焦点面観測装置：KOOLS-IFU、TriCCS、GAOES-RVが定常運用状態にあり、京大時間、および共同利用時間での観測に使用している。望遠鏡焦点の近くに置かれた鏡を電動ステージで動かすことで任意の装置に光路を切り替えて観測することができる。

KOOLS-IFU (Kyoto-Okayama Optical Low-dispersion Spectrograph - Integral Field Unit)

せいめい望遠鏡と同時に運用を開始した可視光面分光器で110本の光ファイバを束ねることで 8.0×8.4 秒角の視野にわたり広がった天体の各部のスペクトルを一度に取得することができる。装置の外観を図2.1に示す。可視光域の短波長側と長波長側を担う2個の低分散グリズムと $H\alpha$ 線と $H\beta$ 線付近を担う2個の中分散グリズムを搭載している。望遠鏡には光ファイバの入射部のみが取り付けられており、分光器本体はドーム棟1階に設置されている。

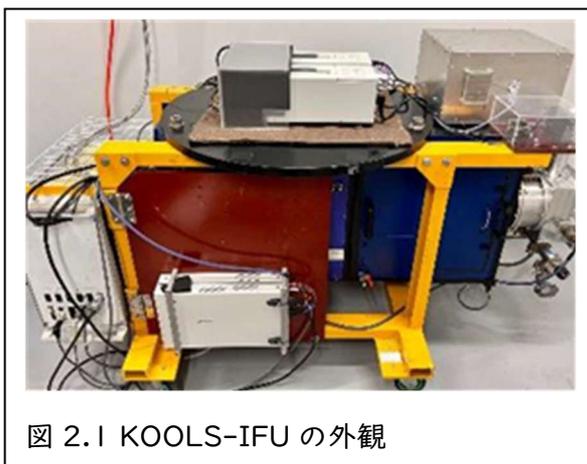


図 2.1 KOOLS-IFU の外観

銀河や惑星状星雲など広がった天体の観測をはじめ、一般的なスリット分光器と異なりスリット上に天体を導入する手間が不要なことや光量の取りこぼしが少ないことから超新星、恒星フレアなど点光源の観測にも幅広く利用されている。

TriCCS (Tricolor CMOS Camera and Spectrograph)

2021年8月より運用を開始した可視光3バンドの同時撮像分光装置で 12.6×7.5 分角の広い視野にわたりカラー画像を撮影でき、さらに高速読出しが可能なCMOS検出器を採用したことで最大で秒間98フレームの高頻度な撮像が可能である。この装置は東京大学と共同で開発した。ナスミス台の装置ローテータに取り付けたTriCCSの外観を図2.2に示す。京大時間では2023年7月より、共同利用時間では2024年7月よりスリット分光モードも供用しており、こちらも撮像モードと同じく



図 2.2 TriCCS の外観

高速での分光観測が可能である。現在は面分光モードの開発も進めている。

目標天体と参照星を同時に撮像できる広い視野と高い感度を持つことに加え、高速撮像が可能という特長を活かし、超新星などの突発現象をはじめ、1秒以下の時間スケールを持つ短時間変動天体の観測にも活用されている。

GAOES-RV (Gunma Astronomical Observatory Echelle Spectrograph - Radial Velocimeter)

2023年7月より運用を開始した可視光の高分散エシェル分光器で、ぐんま天文台で使用されていたものを東京工業大学(現東京科学大学)・国立天文台が中心となり移設・光ファイバ入射等の改良を施した。視線速度法による太陽系外惑星の検出に最適化した構造になっている。波長域516~593 nmにおいてR~6.5万の波長分解能を持つ。波長基準としてヨウ素セルを搭載しており、視線速度の決定精度は3 m/sほどである。望遠鏡には光ファイバの入射部が取り付けられており、精密空調された分光器本体はドーム棟2階に設置されている。分光器内部の光学系を図2.3に示す。主目標である太陽系外惑星だけでなく、連星系や恒星の表面活動の観測にも活用されている。

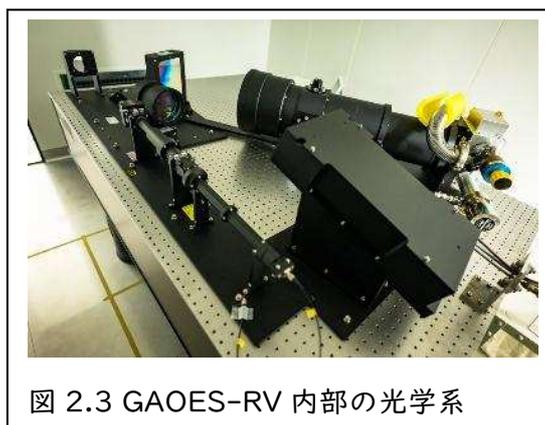


図 2.3 GAOES-RV 内部の光学系

2.2 技術開発

せいめい望遠鏡(図2.4)は日本初の分割鏡形式のアジア地域最大の望遠鏡である。この開発において、1) 鏡面を100 nmの精度で机上計測するCGH干渉計とひきずり3点法、2) 大きさ1 mの鏡を1 μm精度で加工する超精密研削加工技術、3) 大きさ1 mの18枚の鏡を10 Hz、50 nmの精度で保持する分割鏡制御技術、4) これら鏡を精密に天体の方向に向ける超軽量望遠鏡架台の開発を行ってきた。

分割鏡の必要性

望遠鏡は天体から届く光を集める主

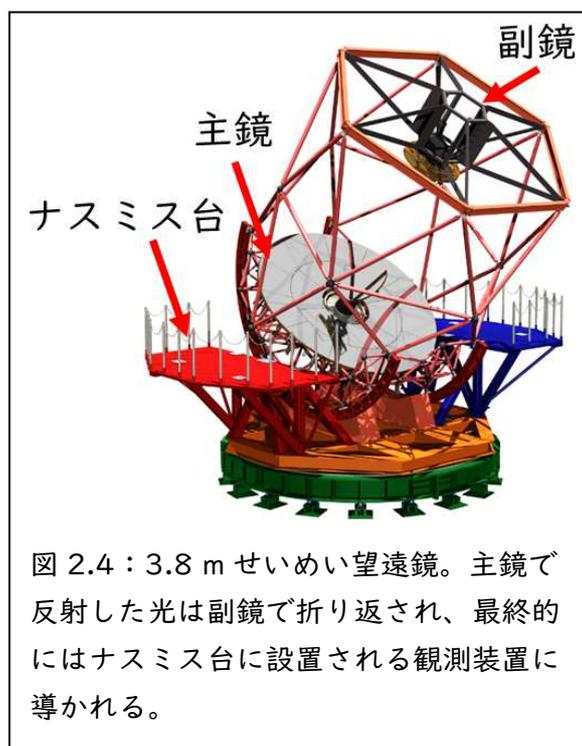


図 2.4 : 3.8 m せいめい望遠鏡。主鏡で反射した光は副鏡で折り返され、最終的にはナスミス台に設置される観測装置に導かれる。

鏡の大きさでその性能が大きく決まる。より暗く遠い天体まで検出するにはより大きな口径の望遠鏡が必要となる。せいめいはアジア地域において最大の口径 3.8 m の望遠鏡となる（日本が有する最大のすばる望遠鏡（口径 8.2 m）は米国ハワイ州にある）。

米国の Keck 望遠鏡以前は鏡が単体で作られていたため、その製造と運搬による限界を迎え、世界最大は 8.2 m である。Keck 望遠鏡（口径 10 m）で初めて鏡を複数に分割する技術が生まれた。以降、分割鏡技術は望遠鏡の大型化のための必須の技術となった。せいめい計画では国内初の分割鏡技術の獲得を目指した。せいめいの主鏡は内周 6 枚、外周 12 枚の扇型の鏡から成る。

2.2.1 鏡面精度計測技術

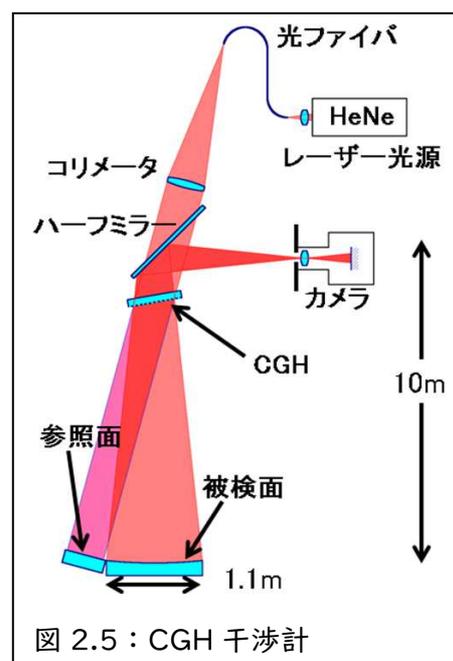
要求精度

望遠鏡の鏡に要求される精度は観測に用いる波長の $1/20$ 程度となる。せいめい望遠鏡では可視光から近赤外線を用いるため、鏡の形状精度は 50nm となる。一方、地上からの観測では大気ゆらぎで、天体からの光の位相がゆがむ。この波面の位相のゆがみは波面の空間スケールが大きくなるほど大きくなるため、鏡に要求される精度は鏡面上の距離に応じて緩くなる。したがって、鏡面上の 2 点間距離が数センチにおいては形状誤差が数十ナノメートル、1 m において 100 nm 程度までが許容される。

このような天体望遠鏡用の鏡の製造は国内では数名の鏡職人によって継続されたが、分割鏡に必要な非球面かつ非軸対称の鏡の製造技術は存在しない。このような鏡の製造には加工と計測の双方の技術が必要であり、本プロジェクトではこれらの技術獲得も目標のひとつであった。

CGH 干渉計

18 枚の分割鏡は軸対称非球面の一部を切り取った形状であるため、それぞれは非軸対称の非球面となる。この軸外し非球面鏡を計測するために、われわれは CGH 干渉計を開発した（図 2.5）。干渉計は既知の光波（参照光）と未知の光波（被検光）が成す干渉縞のパターンから被検光の波面の形状を推定するものである。本干渉計の場合、参照光として平面の参照面で反射した光波を用いる。干渉計では理想的な被検面の形状に沿った波面を生成する光学素子が必要となる。これを CGH（Computer Generated Hologram）が担う。CGH は回折格子の一種で、基板に描画された透過と遮蔽部の光子を波面が回折することで



設計された波面を生成することができる。

ファイバーからの球面波はコーリメータレンズによって、平面波に変換される。CGHで回折した1次光は被検面に沿った波面となる。一方回折しなかったゼロ次光は平面波のまま参照面に向かう。被検面で反射した被検光は再びCGHを通過するが、このうちゼロ次光のみを干渉させる。参照光もCGHを通過する際に1次光のみが被検光と干渉する。この干渉計は参照光と被検光がほぼ共通経路（コモンパス）を辿るため、ファイバーのモードジャンプ、空気ゆらぎ、および振動に強い干渉計となる。この干渉計を後述の加工機の直上に設置し、機上計測を実現した。

ひきずり3点法

干渉計は平面や凸面といった実の焦点を有さない鏡の計測を苦手とする。この問題を解決するために我々は機械式計測の3点法を応用した計測方法を開発した。ひきずり3点法の計測原理は図2.6に示すように、3個の変位計により被検面の局所的な曲率を求め、それを逐次繋ぎ合わせていくことで断面形状を推定するものである。この方法の優れている点は変位計の姿勢に依らず計測でき、干渉計のように高精度な基準や大きな空間を有さない点などが挙げられる。特に基準を有さないことは凸面を含め自由曲面に対応可能であることを意味する。我々はこの計測手法をロボットアームと組み合わせた（図2.7）。

アーム先端に研磨工具を装着すればロボットは研磨加工機を兼ねるため、極めてコンパクトな加工計測システムを実現した。

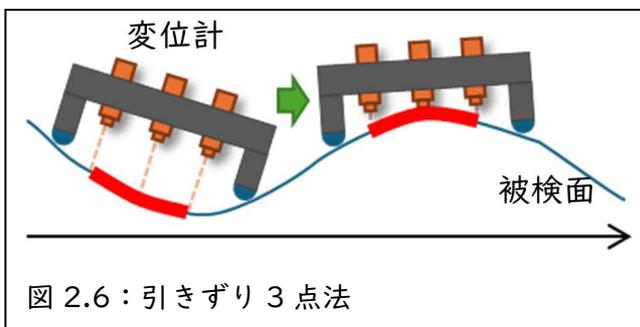


図 2.6：引きずり3点法



図 2.7：世界で2番目の大きさである直径2m軸外し放物面鏡

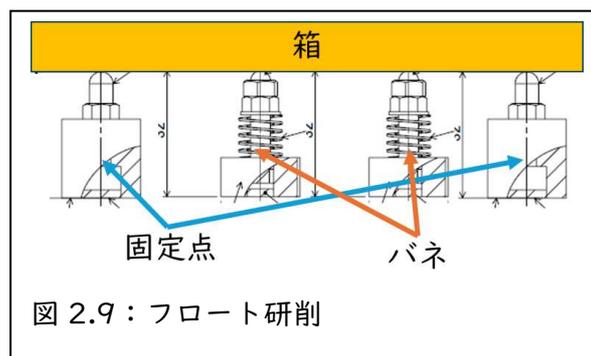
2.2.2 精密研削加工技術

鏡加工の高速化を目指して、従来の研磨加工に比べて高速化が期待できる超精密研削盤（図2.8）を用いた加工技術の開発を行った。研削加工は研磨と異なる

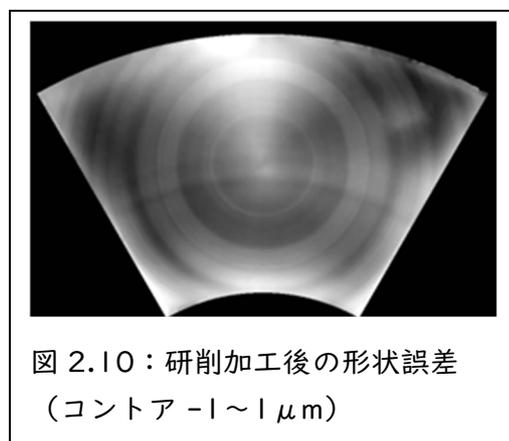


図 2.8：大型超精密研削盤

り、砥石の位置をワーク（鏡）に対して所望の形状精度以上に制御する必要がある。一方、ワークは加工抵抗によって砥石から逃げないように強固に保持される必要がある。望遠鏡用の薄い鏡を強固に支持するには、研削盤のテーブルに鏡を真空チャック等で固定することになる。この場合、テーブル上



面と鏡裏面の不整合によって、テーブルに固定した段階で鏡がひずむ。この問題を避けるために、図 2.9 に示すような多点支持機構を開発した。この支持機構は鏡を 3 つの固定点で支持し、複数のバネ支持によって鏡の自重の大半を均等に支える。言い換えると、鏡はバネによって静圧受け（フロート支持）に近い状況となる。この支持方式によって、鏡の裏面の形状誤差が加工面に影響を与えることを避けることができる。しかし、この支持方法では鏡の外力に対する強度は 3 点支持と同じであり、大変弱い。この問題を解決するために、加工抵抗とそれによる変形を事前に有限要素解析で推定し、その変形を考慮した軌道を砥石に描かせることで理想の形状を得ることができる。実際、加工圧力による変形は大きいところで $5 \mu\text{m}$ を超えるが、補正加工によって形状誤差は $1 \mu\text{m}$ 程度を達成した（図 2.10）。



2.2.3 分割鏡制御技術

分割主鏡では構成するの全ての鏡面を理想面上に並べ、その状態を維持しなければならない。望遠鏡の架台は指向方向の違いによる重力や環境温度の変化で変形するため、搭載されている鏡の姿勢にも微小な変化が生じる。そこで分割鏡間の相対的な姿勢変化を測定し、アクチュエータを使って分割鏡の姿勢変化を補正する、リアルタイム制御システムが必要となる。制御に求められる精度は鏡面形状と概ね同じ 50 nm 程度である。

せいめい望遠鏡の分割鏡制御システムは隣り合う分割鏡間の相対的な段差を測定する計 72 個の変位センサ（エッジセンサ）、各分割鏡の姿勢を動かす計 57 個のリニアアクチュエータ、エッジセンサで測定された変位からアクチュエータへの補正指令値を計算する制御器で構成される。観測開始時、および観測中に環境温度や望遠鏡の指向方向が大きく変化したときには各鏡の位置・姿勢を光学的に測定し、分割鏡制御シ

システムに指令値として設定する必要がある。各鏡の傾斜測定にはシャックハルトマンカメラ、段差の測定には位相カメラを使用する。

エッジセンサ

鏡間の相対的なずれを検出するエッジセンサ(図 2.11)には渦電流式の変位センサを使用している。回路基板上に形成されたコイルとアンプの入力容量で LC 発振回路を構成している。コイルに対向金属板が近づくと渦電流が流れ、コイルのインダクタンスが低下するため、発振周波数が上昇するのを検出する。このセンサは毎秒 200 回の測定頻度で約 2 nm の分解能を持つ。ただし温度・湿度などの環境条件により出力値が変動するた

め、段差を測定するセンサのすぐ隣に対向金属板までの距離を固定した参照用センサを取り付けるとことで、環境変動による偽のカウント変化だけを検出し、段差測定用センサの出力値を補正する。これにより典型的な夜間の気温変化 $\sim 20^{\circ}\text{C}$ に対して生じる変動を rms 30nm まで抑制した。

アクチュエータ

各分割鏡は 3 軸のリニアアクチュエータ(図 2.12)によって支持されており、鏡面の傾斜 2 軸と光軸方向への並進移動の計 3 軸の駆動が可能である。ステッピングモータと無給油潤滑の送りネジを組み合わせた構造だが、分解能約 $3 \mu\text{m}/\text{step}$ と粗いため、出力に 1/30 倍の減速機に取り付けて 100 nm の分解能を実現した。さらに 128 分割のマイクロステップ駆動を組み合わせることで電氣的な分解能は $0.8 \text{ nm}/\mu\text{step}$ となっている。減速機部分は支点到弾性ヒンジを使ったテコ構造のため、滑りや転がりによる支持と異なり、サブミクロンの微小駆動でも高い直線性を持つ。

制御器

エッジセンサの出力値を読み取りアクチュエータへの操作量を決めるのが制御器の役割である。主鏡全体に設置されたエッジセンサとアクチュエータの配置を図##に示す。エッジセンサは隣り合う鏡間の相対変位しか測定できないため、これを鏡の絶対的な位置・姿勢に変換する必要がある。とくに主鏡全体の曲率半径が変化するような

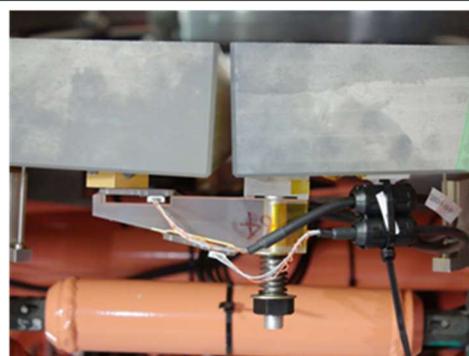


図 2.11：真横から見たエッジセンサ。右側の分割鏡から伸びたアームに測定用センサと参照用センサが取り付けられている。左側の分割鏡に付いている金色の板は対向金属板。



図 2.12：アクチュエータと減速機の構造

姿勢変化はエッジセンサでの変位量が小さいため検出が難しい。そこで図 2.13 に示すように長さ 50 mm のアーム先端にエッジセンサを取り付け、隣の鏡の下に潜り込ませることで検出を容易にした。さらに副鏡の影になる中央部に置いた機械基準である内周リングも鏡の変位を検出しやすくする工夫である。

制御対象は分割鏡 18 枚に内周リングを加えた全 19 要素×3 軸の全 57 軸となる。ただし主鏡全体の傾斜 2 軸と並進 1 軸は架台に対して固定されるため、駆動自由度は 54 となる。72 個のセンサ出力を分割鏡と内周リングの姿勢 3 軸の座標系に変換した後、積分制御で各姿勢軸に対する操作量をもとめ、最後に

鏡の姿勢からアクチュエータの操作量に変換して送信する作業を毎秒 200 回行っている。制御残差としては rms 50 nm 程度を達成している。現状では動作の安定性を優先するために制御ゲインを下げている、望遠鏡の指向完了から鏡の姿勢が安定するまでに数秒程度かかっているが、さらに制御帯域を上げる開発を続けている。

光学センサ

エッジセンサを用いたリアルタイム制御は鏡の位置・姿勢を保持するのみであり、光学的に正しい状態に調整するためのセンサが必要である。鏡の傾きを測定するセンサとしてはシャックハルトマンカメラを、鏡間の段差を測定するセンサとしては位相カメラシステムを搭載している。これらのセンサは小型装置フランジに搭載されており、ピックオフ鏡の回転・出し入れで科学観測用の装置と即座に切り替えられる。

シャックハルトマンカメラは装置内に形成した射出瞳にマイクロレンズアレイを挿入して多数の焦点を結ばせることで、それぞれの星像位置から各分割鏡での反射波面の傾きを測定する装置である。測定点は約 700(分割鏡 1 枚あたり約 40)点で、全ての測定点を使用するモードと、マイクロレンズアレイの手前に分割鏡 1 枚あたり 1 個の穴が空いたマスクを挿入することで、精度と引き換えに測定レンジを広げた粗調整モードの切り替えが可能である。測定精度は約 0.1 秒角で、約 5 等級より明るい星であれば使用できる。

位相カメラシステムは 2 つの分割鏡間を跨いで設置した小開口からの光を干渉させることで、その位相差を測定する。光源には望遠鏡焦点に置いたレーザーを用い、主鏡面上に 15mm 角の正方形開口 2 つを持つハーフミラーを設置することでダブルパス干渉計を構成しており、0.1 μm 程度の測定精度を持つ。波長の異なる 3 種類レーザー光を使用していることに加え、そのうち 1 つを波長可変レーザーとすることで波長

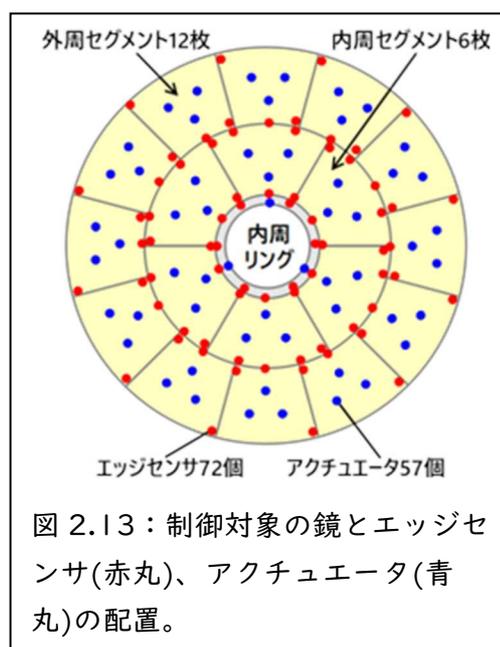


図 2.13: 制御対象の鏡とエッジセンサ(赤丸)、アクチュエータ(青丸)の配置。

周期での縮退を解き、～1mmの極めて長い測長距離を実現している。また十分な強度を持つレーザー光を使っているため昼間でも計測可能である。

運用状況

望遠鏡運用開始からこれまでは各分割鏡で焦点位置を共有し光のエネルギーを集めるだけで、結像性能はシーイングサイズ程度までしか求めない、いわゆる光バケツ状態で運用してきた。観測が長期に渡り停止するような大きなトラブルはなく、安定な運用を継続している。

2024年より望遠鏡開発時からの目標である回折限界の結像性能を実現するため分割鏡の位相合わせを開始した。7月には18枚の分割鏡の段差を可干渉距離以下まで調整し、口径3.8mでの回折限界に相当する恒星のスペックル像を撮ることに成功した(図2.14)。今後は極限補償光学装置SEICAと組み合わせて、回折限界での科学観測開始を目指す。

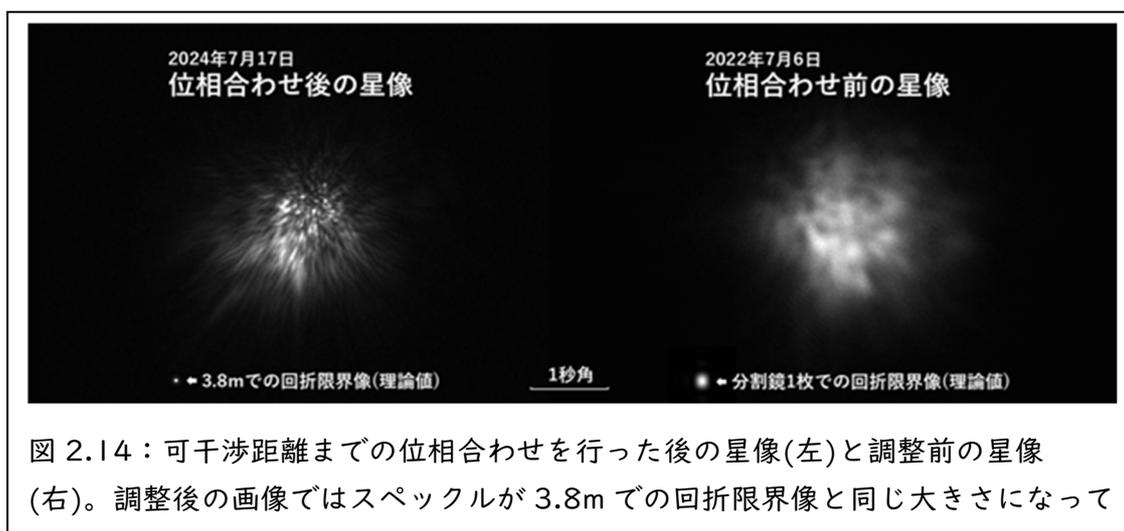


図 2.14：可干渉距離までの位相合わせを行った後の星像(左)と調整前の星像(右)。調整後の画像ではスペックルが3.8mでの回折限界像と同じ大きさになって

2.2.4 軽量架台

せいめい望遠鏡では1)従来とは異なる軸受様式を採用、2)トラス構造の多様、3)遺伝的アルゴリズムでの最適化、を行い大幅な軽量化を狙った。図2.15に3.8m望遠鏡の架台構造を示す。この鏡筒は最下部で真下から直接大きな円弧状の高度軸軸受けで支えられる。主鏡が高度軸軸受けにつながるトラスネットワークに直接支えられるた

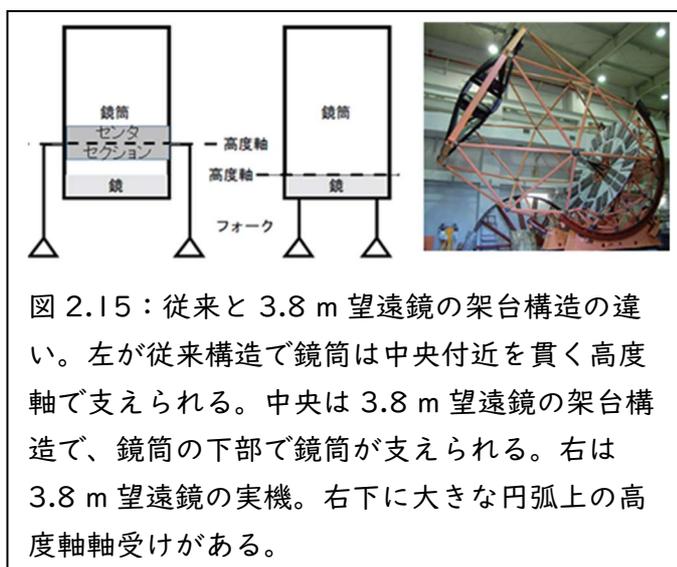


図 2.15：従来と3.8m望遠鏡の架台構造の違い。左が従来構造で鏡筒は中央付近を貫く高度軸で支えられる。中央は3.8m望遠鏡の架台構造で、鏡筒の下部で鏡筒が支えられる。右は3.8m望遠鏡の実機。右下に大きな円弧上の高度軸軸受けがある。

め、構造全体に従来構造のような曲げモーメントがはたらかず軽量かつ堅牢となる。さらに従来構造に必要な重たいセンタセクションが無くなり、フォークもコンパクトになる。これによって従来の1/3以上の軽量化を達成した。この望遠鏡の場合、中立面（センタセクション）が無い場合、光軸を保つセルリエ・トラスの設計思想を容易に行うことはできない。しかし近年の中型以上望遠鏡ではほとんどが副鏡支持機構に光軸調整用のステージを搭載するため、いまやセルリエ・トラスの意義は薄れる。

せいめい望遠鏡の分割された18枚の主鏡は、それぞれ3つのアクチュエータの上に搭載される。それらアクチュエータは鏡筒構造の変形によって起きる鏡のずれを補正するため、鏡の姿勢を制御する。計54個のアクチュエータは鏡に対して位置制御を行うため、アクチュエータの支持点は堅牢でなくてはならず、またアクチュエータのストロークにも制限があるため、鏡筒構造の変形を十分に小さく抑える必要がある。これらを支える鏡筒はトラス構造で作られ、アクチュエータはトラスの線材の節点に設置された。

トラス構造には施工性を考慮し溶接接合ではなくボルト接合で組み立て可能な太陽工業社製のシステムトラスを採用した。トラス構造はシェルやソリッド構造に比べて引っ張り圧縮力のみがはたらくため、構造解析が容易である。この特性を生かし、名古屋大学の森博氏（現名誉教授）らと遺伝的アルゴリズムによる最適化を行った。

この最適化ではより小さな質量とより小さなホモガス変形を評価関数とし、線材の配置と断面積を設計変数とした。またその際の最適化条件として1) 光路を遮蔽しないこと、2) パイプ同士の非干渉、3) パイプの選択範囲をJIS規格に限定、最後に最も重要な4) ホモガス変形が仕様値以下になること、を設定した。とくに、最後の条件に見るように、人の手によって設計された初期モデル（親モデル）の鏡筒構造はアクチュエータから仕様要求を満たさなかった。最終的には100モデル×3300世代、つまり33万のモデルを生成、評価

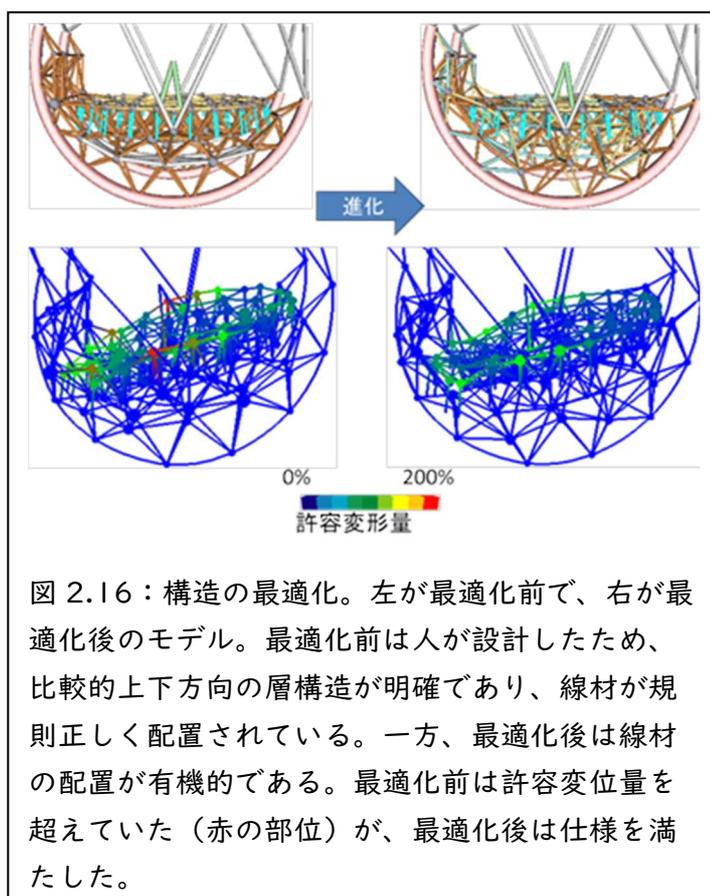


図 2.16：構造の最適化。左が最適化前で、右が最適化後のモデル。最適化前は人が設計したため、比較的上下方向の層構造が明確であり、線材が規則正しく配置されている。一方、最適化後は線材の配置が有機的である。最適化前は許容変位量を超えていた（赤の部位）が、最適化後は仕様を満たした。

し、その中の最適解の群（パレート解）から1つのモデルを選択し、実機のデザインとした（図 2.16）。この最適化により、ホモロガス変形の仕様を満たす解を得つつ、さらに20%の鏡筒の軽量化を達成した。図 2.15 の右図が実際に組み立てられた鏡筒である。

2.3 科学的成果

2.3.1 超新星

背景

天体現象の動的な側面に焦点を当てた時間軸天文学が、天文学における新分野として注目を集めている。ZTF (Zwicky Transient Facility) や ATLAS (Asteroid Terrestrial-impact Last Alert System) をはじめとする新世代のサーベイ観測により超新星爆発直後の観測が可能となるとともに、以前には知られていなかった様々な多様性が発見されている。これにより、超新星爆発に至る恒星進化の理解の欠如が明確になり、天文学における大問題となっている。現状、この分野の観測研究におけるボトルネックは発見後の詳細な追観測リソース不足にある。

目的

せいめい望遠鏡は、大口径・即時性・柔軟な ToO 体制と豊富な観測時間を兼ね備え、超新星をはじめとする突発天体の即時及びモニタリング追観測に最適な望遠鏡と言える。我々は、せいめい望遠鏡科学観測開始時より、大規模な超新星追観測を実施している。特に、100Mpc 程度以内の近傍宇宙で発生した超新星の爆発直後からの追観測に焦点をあて、これにより超新星親星の性質、星周物質の性質 (=爆発直前の活動性)、爆発の性質の多様性を明らかにすることを目的とした。以上により、その限界が明らかになりつつある既存の恒星進化の刷新のための基礎データを提供することが最終的な目標である。

成果

本課題は、東京大学 tomo-e サーベイ、広島大学かなた望遠鏡等との国内連携に加え、フィンランドやインドの研究グループをはじめとした様々な研究グループとの国際共同研究により推進している。せいめい望遠鏡による超新星の観測成果は、2024 年 12 月 18 日時点で 13 編の国際査読論文誌に掲載されており、複数の論文が査読中である。

- (1) 超新星近傍の高密度星周物質の性質の研究、それを通した大質量星の終末期における活動性の探査

非常に近傍の銀河 (M101@6.4Mpc) で発見された、赤色超巨星 (RSG) の爆発である II 型超新星 SN 2023ixf の詳細な追観測を実施し、半径 5×10^{14} cm 程度まで高密度星周物質が存在することを明らかにした[1]。また、通常より暗いタイプの II 型超新星 SN 2021gmj の周囲にも同様の高密度星周物質が存在することを明らかにし、爆発直前の活動性が、親星質量によらない普遍的なものである可能性を指摘した[2]。Ib 型 (He 星) 超新星である SN 2019ehk が”カルシウム超過突発天体 (Ca-rich transient)”へと観測的特徴を変化させたことと、やはり高密度の星周物質を伴ったことから、これが連星中性子星への進化過程で生じる前駆天体である可能性を指摘した[3]。

(2) 異なるタイプへの遷移を示す超新星

超新星の観測分類は親星の性質（RSG、He 星など）によるとされるが、近年異なる観測タイプへの遷移を示す超新星が発見され、その親星進化経路が注目されている。我々は、SN 2022crv が IIb 型（水素外層を持つ親星）から Ib 型（He 親星）へと変位を示したことを [4] を発見した。これは依然としてサンプルの少ない「遷移」超新星の貴重な報告例である。

(3) 光度曲線において double-peak を示す He 星・C+O 星起源の超新星の発見

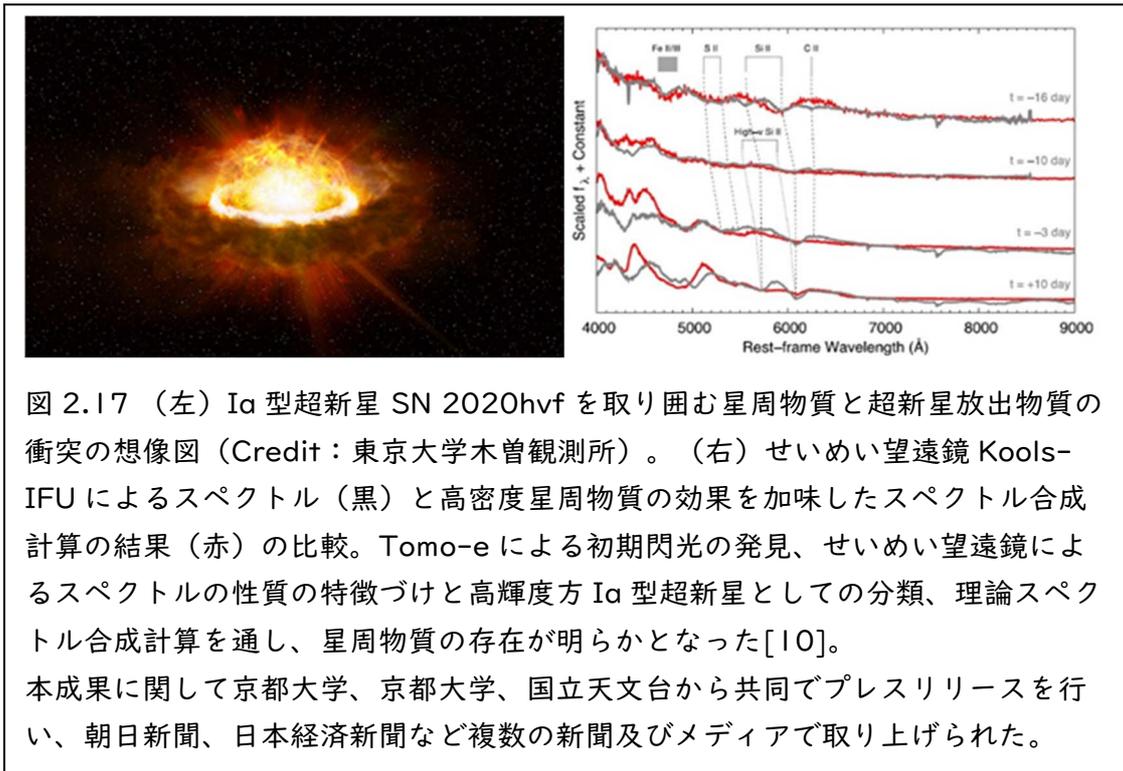
He 星あるいは C+O 星を親星とする超新星（Ib 型、Ic 型）は、一度のピークをもつ光度曲線の特徴の一つとする。我々は、Ic 型超新星 SN 2022xxf が 80 日程度離れた二つのピークを持つことを発見 [5]、さらに似た例として、超新星 SN2023aew が IIb 型=>Ic 型遷移とともに 100 日程度離れた二つのピークを示したことを発見した [6]。これらの成果により既存の恒星進化理論の限界が示されたことで、大質量星進化の刷新の国際的な動きへとつながった。

(4) 偏光で探る星周物質と爆発機構の性質

点源である系外爆発天体の効か構造を引き出すために、偏光観測は強力な手段を提供する。我々はせいめい望遠鏡による観測とともにかなた望遠鏡、VLT 望遠鏡、NOT 望遠鏡による偏光観測を実施することで、SN 2021xxf における星周構造・爆発機構における非対称性を明らかにした [1]。同様に、II 型超新星 2021yja が特徴的な偏光を示すことを発見、これが互いに直行する二成分の超新星イジェクタにより説明できることを示した [7]。星周物質・超新星放出物質の幾何形状はそれぞれ親星進化・爆発機構に迫る、国際的に見てもユニークな試みである。

(5) Ia 型超新星の多様性の研究

近年、Ia 型超新星には様々な亜種が発見されており、その多様性の起源の理解が喫緊の課題となっている。我々は、高密度星周物質を伴った”Ia-CSM”型超新星 SN 2022uem の詳細な観測を行い、数太陽質量の星周物質がディスク状に分布することを突き止めた [8,9]。せいめい望遠鏡による分光観測により SN 2020hvf が高輝度 Ia 型に分類されることを示すと同時に、Tomo-e により爆発直後のデータを取得、通常の Ia 型超新星に見られない初期光度超過を示すことを発見、これがコンパクトな星周物質の存在により説明できることを提案した（図 2.17） [10]。他にも”Iax”型超新星 SN 2019muj の詳細な追観測を実施、これが白色矮星の”不完全”爆発シナリオで良く説明できることを示したとともに [11]、”高速タイプ”である SN 2019ein の爆発直後からの分光により、高速タイプ Ia 型超新星の分光的多様性を明らかにした [12]。以上の成果は Ia 型超新星の観測的多様性を明らかにしつつその起源に迫るものとして、国際的にも高い評価を得ている。



せいめい望遠鏡を用いた超新星関連論文 (査読あり)

1. "Unravelling the Asphericities in the Explosion and Multifaceted Circumstellar Matter of SN 2023ixf", Singh, A., Teja, R. S., Moriya, T. J.; Maeda, K., Kawabata, K. S., et al. 2024, *The Astrophysical Journal*, 975, 132 (24 pages)
2. "Intermediate-luminosity Type IIP SN 2021gmj: a low-energy explosion with signatures of circumstellar material", Murai, Y., Tanaka, M., Kawabata, M., Taguchi, K., Teja, R. S., et al., 2024, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 528, 4209-4227
3. "Calcium-rich Transient SN 2019ehk in a Star-forming Environment: Yet Another Candidate for a Precursor of a Double Neutron-star Binary", Nakaoka, T., Maeda, K., Yamanaka, M., Tanaka, M., Kawabata, M., et al., 2021, *The Astrophysical Journal*, 912, 30 (14 pp)
4. "Bridging between Type IIb and Ib Supernovae: SN IIb 2022crv with a Very Thin Hydrogen Envelope", Gangopadhyay, A., Maeda, K., Singh, A., Nayana, A. J., Nakaoka, et al., 2023, *The Astrophysical Journal*, 957, 100 (21 pages)
5. "The broad-lined Type-Ic supernova SN 2022xxf and its extraordinary two-humped light curves. I. Signatures of H/He-free interaction in the first four

- months", Kuncarayakti, H., Sollerman, J., Izzo, L., Maeda, K., Yang, S., et al., 2023, *Astronomy & Astrophysics*, 678, A209 (15 pages)
6. "The enigmatic double-peaked stripped-envelope SN 2023aew", Kangas, T., Kuncarayakti, H., Nagao, T., Kotak, R., Kankare, E., Fraser, M., Stevance, H., Mattila, S., Maeda, K., Stritzinger, M., Lundqvist, P., Elias-Rosa, N., Ferrari, L., Folatelli, G., Frohmaier, C., Galbany, L., Kawabata, M., Koutsiona, E., Muller-Bravo, T. E., Piscarreta, L., Pursiainen, M., Singh, A., Taguchi, K., Teja, R. S., Valerin, G., Pastorello, A., Benetti, S., Cai, Y. -Z., Charalampopoulos, P., Gutierrez, C. P., Kravtsov, T., Reguitti, A., 2024, *Astronomy & Astrophysics*, 689, A182 (35 pages)
 7. "Evidence for bipolar explosions in Type IIP supernovae", Nagao, T., Maeda, K., Mattila, S., Kuncarayakti, H., Kawabata, M., et al., 2024, *Astronomy & Astrophysics*, 687, L17 (15 pages)
 8. "SN 2020uem: a Possible Thermonuclear Explosion within a Dense Circumstellar Medium (II). The Properties of the CSM from Polarimetry and Light-curve Modeling", Uno, K., Nagao, T., Maeda, K., Kuncarayakti, H., Tanaka, M., et al., 2023, *The Astrophysical Journal*, 944, 204 (13 pages)
 9. "SN 2020uem: a Possible Thermonuclear Explosion within a Dense Circumstellar Medium. I. The Nature of Type II_n/Ia-CSM SNe from Photometry and Spectroscopy", Uno, K., Maeda, K., Nagao, T., Nakaoka, T., Motohara, K., et al., 2023, *The Astrophysical Journal*, 944, 203 (17 pages)
 10. "Discovery of the Fastest Early Optical Emission from Overluminous SN Ia 2020hvf: A Thermonuclear Explosion within a Dense Circumstellar Environment", Jiang, J., Maeda, K., Kawabata, M., Doi, M., Shigeyama, T., et al., 2021, *The Astrophysical Journal Letters*, 923, L8 (14 pages)
 11. "Intermediate luminosity type Iax supernova 2019muj with narrow absorption lines: Long-lasting radiation associated with a possible bound remnant predicted by the weak deflagration model", Kawabata, M., Maeda, K., Yamanaka, M., Nakaoka, T., Kawabata, K. S., et al., 2021, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 73, 1295–1314
 12. "SN 2019ein: New Insights into the Similarities and Diversity among High-velocity Type Ia Supernovae", Kawabata, M., Maeda, K., Yamanaka, M., Nakaoka, T., Kawabata, K. S., et al., 2020, *The Astrophysical Journal*, 893, 143 (16 pp.)

2.3.2 恒星スーパーフレア

背景

恒星フレアは、恒星大気における突発的な増光・爆発現象であり、電波から X 線までの広範な波長域で増光が観測される。また、多数発見されている系外惑星の研究の進展に伴い、中心恒星が系外惑星大気の形成に与える影響が注目されている。特に、恒星フレアによって放射される高エネルギー放射の理解や、質量噴出現象、恒星風の特徴付けは重要な課題である。これらの現象を調査する上で、可視光におけるバルマー線や連続光の分光観測が重要な役割を果たす。しかし、恒星フレアは発生の予測が困難であり、継続時間も短いため、時間分解された分光観測の例は限られている。

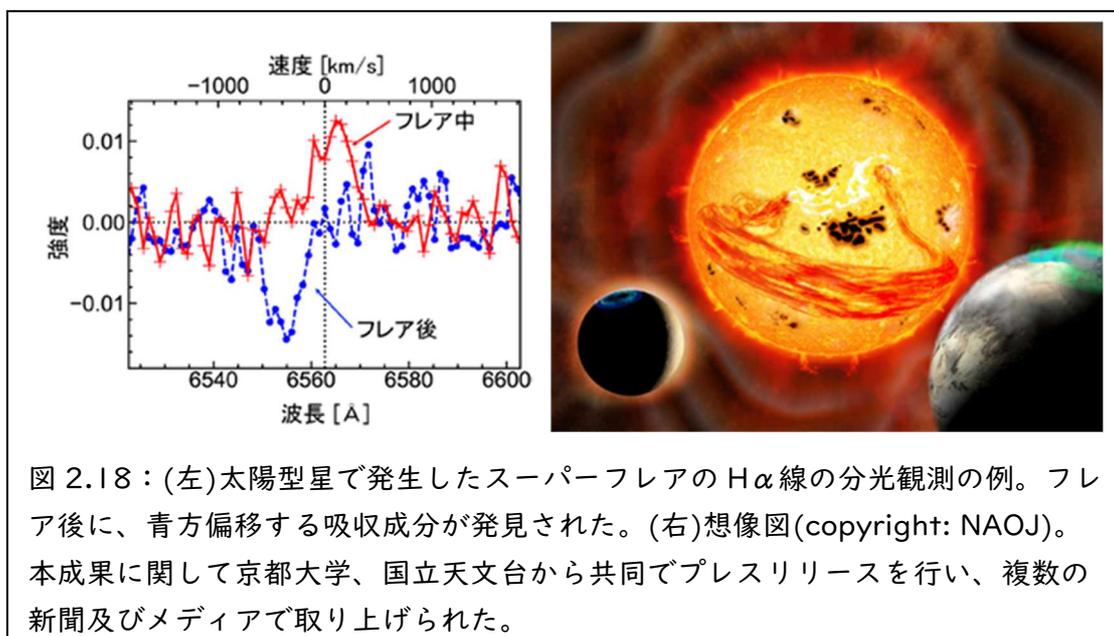
目的

せいめい望遠鏡は、稀に発生する恒星フレアを捉えるために必要な潤沢な観測時間と、高い時間分解能を実現する大口径を兼ね備えており、恒星フレア研究をはじめとする突発天体のモニタリングに最適な望遠鏡である。特に、適度な波長分解能を持つ初期装置 KOOLS-IFU は、質量噴出や高エネルギー放射の放射機構を理解する上で極めて有用な装置である。この装置を用いることで、恒星フレアが惑星間空間に与える影響を明らかにすることを最終的な目標とし、これらの現象の性質を解明することを目的とした。

成果

せいめい望遠鏡による恒星フレアの観測成果は、2024 年 12 月 23 日時点で 8 編の国際査読論文誌に掲載されており、複数の論文が査読中である。

Highlight 1. 太陽型星のスーパーフレアに伴うフィラメント噴出の発見: 太陽型星におけるスーパーフレアは、過去に太陽で発生した、あるいは将来発生しうる極端な宇宙天気現象を理解する上で重要である。我々は、若い太陽型星で発生したスーパー



レアの可視光分光観測に初めて成功した[1,2,3,4]。まず、スーパーフレアに伴い巨大なフィラメント・プロミネンス噴出が発生していることを世界で初めて発見した[1,3] (図 2.18)。この結果は、若い頃の太陽が大質量噴出を通じて若い地球環境に影響を与えていた可能性を示唆するものである。さらに、フランスのピクデュミディ天文台や NASA との国際共同研究により、多波長同時観測を実施し、質量噴出現象が発生している際の恒星表面の磁場配置を特定した。この観測により、噴出現象がどの領域からどのように発生したのかという具体的な描像を明らかにした[4]。また、TESS 宇宙望遠鏡と H α 線の同時観測により、スーパーフレアの可視連続光放射メカニズムについて、太陽フレアとは異なり、フレアループや光球放射が卓越しているという仮説を提案した[2]。これらの研究は、Kepler や TESS では明らかにできなかった空間的な描像を提供し、太陽型星周囲の惑星環境への影響を理解する上で大きな前進と言える。

Highlight 2. RS CVn 型星: RS CVn 型連星は K 型(準)巨星と G 型主系列星からなる連星系であり、太陽に比べて数桁エネルギー規模の大きいフレアを起こすことで知られる磁氣的に活動性の高い星である。我々は、RS CVn 型連星 V1355 Ori をせいめい望遠鏡と TESS 宇宙望遠鏡で同時観測し、太陽での最大級のフレアより 4 桁程度エネルギー規模の大きいフレアと、フレア中に星の脱出速度 (350 km/s) を大幅に上回る 1000 km/s 以上の高速なプロミネンス噴出を発見した[5]。本結果は、その速度の観点から、恒星での大規模コロナ質量放出 (CME) の最も強固な観測的証拠の一つであり、国内外で広く注目されている。

Highlight 3. M 型星スーパーフレアに伴う大気加熱機構: フレアの可視連続光放射は、磁気リコネクションにより生じた高エネルギーの非熱的電子が彩層下部から光球上部の大気を圧縮し高密度になることで生じると考えられおり、恒星フレアのエネルギー解放および大気加熱機構を探る上で、可視連続光の時間変化とそれに対応したスペクトルの時間変化の理解は非常に重要である。我々は、2019 年 3-4 月に行ったせいめい望遠鏡の最初の共同利用観測で、M 型星 AD Leo で発生したスーパーフレアの観測に成功した。このスーパーフレアでは、H α 線の線幅が可視連続光でのフレアピーク付近で最大となり、H α 線線幅の時間変化との可視連続光の明るさの時間変化がよく一致することが観測された。さらに 1 次元輻射流体計算による H α 線の線輪郭のシミュレーション結果と観測された H α 線の線幅を比較した結果、このスーパーフレアの放射領域の非熱的電子の密度は、典型的な太陽フレアの場合と比べて 10 倍以上高いことが分かった[6]。また、M 型星 YZ CMi で 2021 年 2 月に発生したスーパーフレアの観測では、可視連続光の増光とともに、H α 線の線輪郭に秒速数百 km ほど赤方偏移した超過成分が観測された。この超過成分は非熱的電子によって加熱された彩層プラズマが膨張し、彩層下部を圧縮する事で生じる下降流によって生じているとすると、可視連続光の明るさの変化との対応を説明できることが分かった[7]。これらの結果はいずれも恒星フレアの可視連続光の増光に非熱的電子が寄与していることを示

しており、太陽フレアの研究から提案されているフレアに伴う大気加熱機構は、規模やスケールの大きな恒星スーパーフレアにおいても共通であることを示唆する。

将来展望

前述のような成果を踏まえて、我々は恒星フレア観測に特化した H α 線および Ca II HK 線の中分散分光器 ($\lambda/\Delta\lambda\sim 13000$) の開発を進めている。この分光器は、フレアに伴う H α 線や Ca II HK 線などの彩層線の線輪郭の非対称成分や線幅の増大を、既存の低分散分光器 ($\lambda/\Delta\lambda\sim 2000$) よりも高い波長分解能で観測できる。これまでのせいめい望遠鏡の観測によって、スーパーフレアにおいて高速度 (>秒速数百 km) のプラズマ噴出による彩層線の線輪郭の非対称成分がみられる確率は 3 割ほどであることがわかっている。この中分散分光器が完成すれば、従来は捉えることができなかった、太陽フレアでよくみられるプロミネンス噴出 (典型的には秒速 80km) まで観測することができる。このため、恒星スーパーフレアに伴うプラズマ噴出現象の速度とその発生頻度分布やフレアエネルギーとの関係を調べ、それを太陽と比較するといった研究が可能となり、恒星フレアとそれに伴うプラズマ噴出現象が系外惑星や恒星自体の自転・質量の進化にどのような影響を与えるのかについて、観測に基づく定量的評価が可能となる。

さらに、この分光器は光球線をより高い波長分解能で観測できる GAOES-RV ($\lambda/\Delta\lambda\sim 65000$) との同時観測が可能ないように設計されている。このため、フレアの観測だけでなく、光球線を用いたドップラーイメージングの手法で恒星黒点の分布を調べることも同時に可能である。このため、フレア発生時の恒星黒点がどのように分布していたのかを調べ、スーパーフレアを起こしやすい黒点の性質や、プラズマ噴出現象を起こしたフレアとそうでないフレアで、黒点分布にどのような違いがあるのかを調べるといった、恒星黒点-スーパーフレア-プラズマ噴出がどのように関連して起こるのかを明らかにできると期待される。

せいめい望遠鏡を用いた恒星フレア関連論文 (査読あり)

1. "Probable detection of an eruptive filament from a superflare on a solar-type star", Namekata, Kosuke; Maehara, Hiroyuki; Honda, Satoshi, et al., 2022, Nature Astronomy, 6, 241
2. "Discovery of a Long-duration Superflare on a Young Solar-type Star EK Draconis with Nearly Similar Time Evolution for H α and White-light Emissions", Namekata, Kosuke; Maehara, Hiroyuki; Honda, Satoshi, et al., 2022, The Astrophysical Journal Letters, 926, L5

3. "Multiwavelength Campaign Observations of a Young Solar-type Star, EK Draconis. I. Discovery of Prominence Eruptions Associated with Superflares", Namekata, Kosuke; Airapetian, Vladimir S.; Petit, Pascal, et al., 2024, *The Astrophysical Journal*, 961, 23
4. "Multiwavelength Campaign Observations of a Young Solar-type Star, EK Draconis. II. Understanding Prominence Eruption through Data-driven Modeling and Observed Magnetic Environment", Namekata, Kosuke; Ikuta, Kai; Petit, Pascal, et al., 2024, *The Astrophysical Journal*, 976, 255
5. "Detection of a High-velocity Prominence Eruption Leading to a CME Associated with a Superflare on the RS CVn-type Star V1355 Orionis", Inoue Shun; Maehara Hiroyuki; Notsu Yuta, et al., 2023, *The Astrophysical Journal*, 948, 9
6. "Optical and X-ray observations of stellar flares on an active M dwarf AD Leonis with the Seimei Telescope, SCAT, NICER, and OISTER", Namekata, Kousuke; Maehara, Hiroyuki; Sasaki, Ryo, et al., 2020, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 72, id.68
7. "A Superflare on YZ Canis Minoris Observed by the Seimei Telescope and TESS: Red Asymmetry of H α Emission Associated with White-light Emission", Namizaki, Keiichi; Namekata, Kosuke; Maehara, Hiroyuki, et al., 2023, *The Astrophysical Journal*, 945, id.61

2.3.3 矮新星

矮新星は白色矮星周囲に降着円盤が形成されている系（図 2.19 左）で、準周期的に主に紫外光から可視光にわたる増光幅 1-9 等級、継続時間数日-1 ヶ月程度の増光

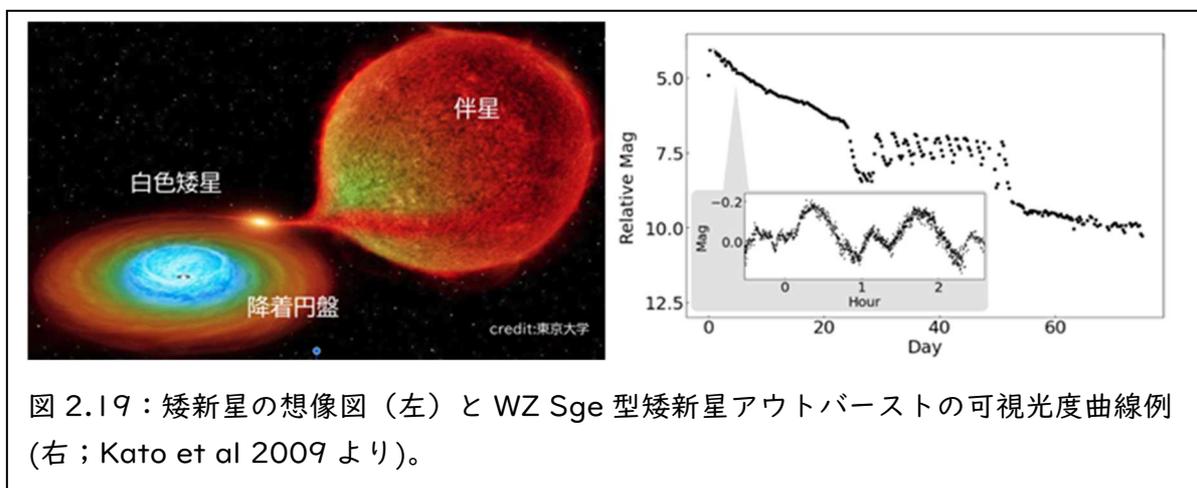


図 2.19：矮新星の想像図（左）と WZ Sge 型矮新星アウトバーストの可視光度曲線例（右；Kato et al 2009 より）。

現象(アウトバースト)が観測される(図 2.19 右)。矮新星は①最も単純な降着系かつ観測が容易である(可視で明るい/数が豊富/現象のタイムスケールが10年程度以内)、②時間進化を解くことができる円盤モデルが確立されている、③低質量連星系の進化の終着点である、ということなどから長く興味を持たれてきた。特に近年の突発天体掃天観測の発展によって、矮新星の中でも最もアウトバースト頻度が低いWZ Sge型矮新星の発見数が飛躍的に増えている。我々の研究グループではこれまでWZ Sge型を含む矮新星アウトバーストの主に潤沢な連続測光観測による詳細な研究で世界をリードしてきたが、せいめい望遠鏡の稼働以降はさらに高品質な分光データを取り込んだ研究を展開している。

ハイライト 1: せいめい望遠鏡による矮新星アウトバーストの分光サンプル (Tampo, Y. et al. 2021, PASJ, 73, 3, pp753-771)

我々はせいめい望遠鏡の稼働以降、特に銀河系内突発天体の即時分光と分類を目指した観測を数多く実施してきた(ATel 20件など)。当該論文はせいめい望遠鏡稼働開始から1年半でのこれらの観測の総括として出版された論文である。17天体の分光観測結果を報告しており(図 2.20)、この内11天体は発見時には未知の天体であった。また、うち6(13)天体は発見報告から1(5)日以内に分光観測を実施しており、せいめい望遠鏡のToO観測の高い性能と機動性を表している。加えて、我々が運営する矮新星の共同連続測光観測グループであるVSNETを通じて得た観測データから、せいめい望遠鏡で得られた分光スペクトルに含まれるH α やHe II 4686輝線の強度は天体の軌道傾斜角とよく相関しており、降着円盤の非軸対象な構造に由来するとして解釈できることを明らかにした。

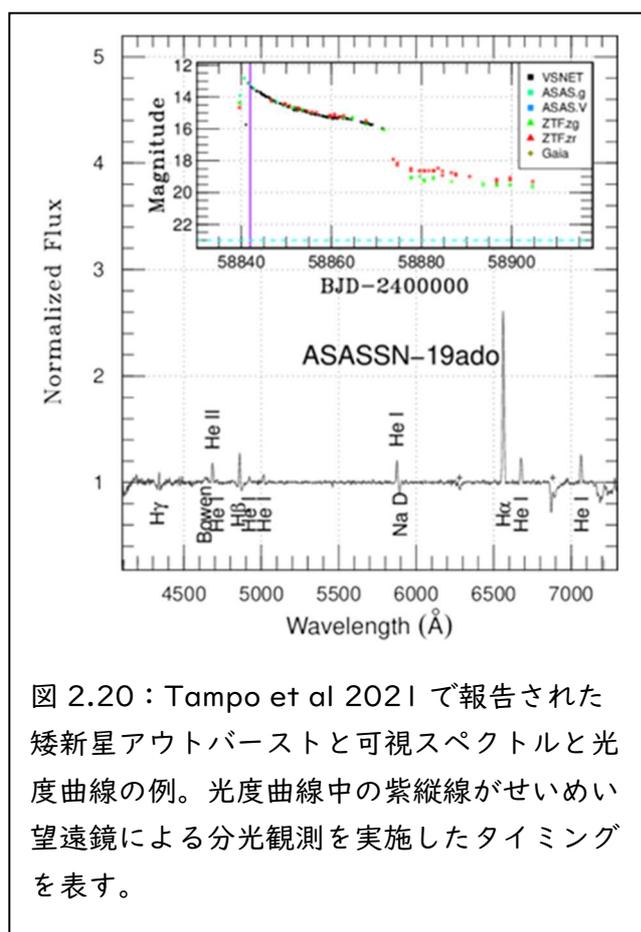


図 2.20: Tampo et al 2021 で報告された矮新星アウトバーストと可視スペクトルと光度曲線の例。光度曲線中の紫縦線がせいめい望遠鏡による分光観測を実施したタイミングを表す。

ハイライト 2: 過去最大規模の矮新星アウトバーストの観測 (Tampo, Y. et al. 2024, PASJ online-available)

当該論文では 2021 年末に発見された可視突発天体 MASTER OT J030227.28 +191754.5 について、OISTER 参加機関との協調観測などを含む詳細な可視・近赤外線観測を報告した。本アウトバーストは増光幅 10.2 等級、継続時間 60 日と既知の矮新星と比較して非常に大規模であったが（図 2.21 左）、我々はせいめい望遠鏡によるフォローアップ分光観測によってこれが矮新星であることを明らかにした（Isogai et al 2021; ATel #15074）。また、KOOLS IFU VPH495/683 によるアウトバースト中の高頻度中分散分光モニタ観測から、アウトバースト初期には降着円盤から予想されるよりも速度幅の狭い輝線成分が卓越しており、その起源として円盤風が候補となることを議論した（図 2.21 右）。加えて、本天体は当初 IceCube ニュートリノイベントのエラーサークル内の可視対応天体候補として報告されている（Zhirkov et al. 2021; ATel #15067）。結果的に今回は対応天体ではなかったが、今後せいめい望遠鏡がマルチメッセンジャー天文学を進める上で良い先行例となる研究である。

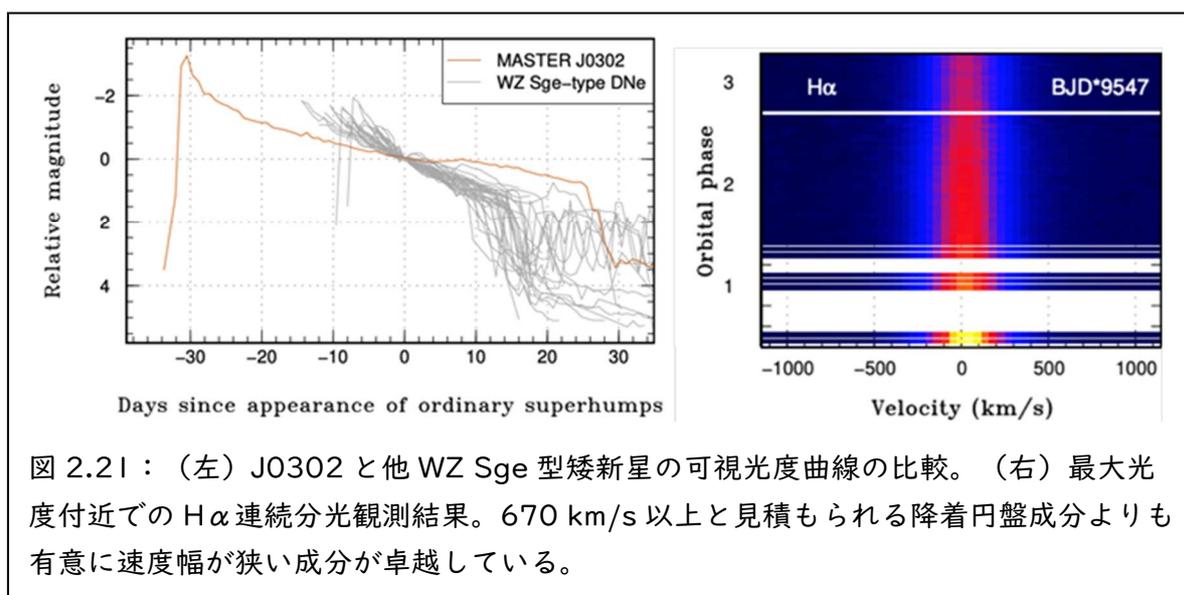


図 2.21：（左）J0302 と他 WZ Sge 型矮新星の可視光度曲線の比較。（右）最大光度付近での H α 連続分光観測結果。670 km/s 以上と見積もられる降着円盤成分よりも有意に速度幅が狭い成分が卓越している。

せいめい望遠鏡を用いた矮新星研究の展望

多波長での時間軸突発天体探査が台頭している現代天文学では、せいめい望遠鏡の ToO 観測の柔軟性は矮新星アウトバーストを含む降着現象の解明において今後も重要な役割を担うことが期待される。KOOLS IFU による低中分散分光観測だけでなく、Tampo et al. (2022) では TriCCS による矮新星アウトバーストの連続測光観測とその解析結果を報告しており、24B からは GAOES-RV を用いた高分散分光観測による矮新星研究も観測・解析を進めている。

上記以外のせいめい望遠鏡を用いた矮新星研究

- 査読あり論文

- Tampo, Y. et al. (2021) ← J2104 aka V3101 Cyg/KOOLS snapshots
- Kato, T. et al. (2021) ← BO Cet/KOOLS snapshots
- Tampo, Y. et al. (2022) ← PNV J0044/TriCCS 連続測光
- Kimura M. et al. (2023) ← J0302 の snapshot 分光結果が入っている

2.3.4 Changing Look Quasar

活動銀河核(AGN)のタイプには、広輝線が観測される1型と広輝線が見えない2型があり、この違いは一般的にはAGN周囲のダストトーラスを見込む角度の違いであるとする統一モデルで解釈されている。また、非常に稀な現象として、近傍のAGNでスペクトルが大きく変化してタイプが変化(Changing Look)する可能性があることが古くより確認されており、視線を小さいダスト雲が横切ることでこの変化が起こるものと解釈されてきた。この現象は遠方の大型のAGNでは数年という短期間では起こりえないものと考えられていたが、近年、自動化された測光モニタ観測データが蓄積されたことで、超巨大ブラックホールを伴う遠方のクェーサーでも短期間でタイプ変化が起こる(Changing Look Quasar, 以後 CLQ)場合があることが発見され、その原因など現在急速に研究が進められている。

せいめい望遠鏡でも CLQ 候補天体の観測や分光モニタ観測を継続して行っており、新たに発見した CLQ 1 天体に関する論文 1 編(Nagoshi, Iwamuro, et al., 2021, PASJ 73, 122)と、分光モニタ観測によりその天体の広輝線領域は定常成分と変動成分が異なる領域に分かれて存在していることを示した論文 1 編(Nagoshi, Iwamuro, et al., 2024, MNRAS 529, 393)として発表している。

2.3.5 惑星状星雲

背景

宇宙の物質豊化とヒトをはじめとする生命体の発生は、138億年に亘る恒星進化末期における大規模な恒星風質量放出と星間物質間の物質循環の積み重ねである。従来、老齢な銀河では「全ての恒星からの質量放出によるガス・ダストの合算質量」と「星間物質に含まれるガス・ダスト(固体微粒子、半径 ~ 0.01 ミクロン程度)合算質量」はほぼ同程度と考えられてきた。しかし、最新の観測研究により、全恒星由来のガス・ダスト質量は星間物質全体のわずか10%以下であり、90%以上が「ミッシングマス」であることが判明した。ミッシングマス問題は私たちの存在意義に関わる重要な課題であり解明が必要である。

目的

ミッシングマス問題が未解決であるのは、恒星風質量放出量が定量的に解明されて

いないためと考える。そこで、せいめい望遠鏡で取得した中小質量星の進化末期段階にある惑星状星雲の三次元分光データをもとに、中心星付近から星間物質に広がる星周殻内の原子および分子ガス・ダストの物理量空間分布を調査する。惑星状星雲は、漸近赤色巨星枝星の段階における大規模な恒星風質量放出によって形成された星周殻と、白色矮星へ進化する過程にある高温の質量放出残余星から構成される天体である。惑星状星雲星周殻には質量放出の全史が記録されているため、恒星風質量放出過程の解明において最適な天体といえる。

成果

一例として開所間もない 2019 年末にサイエンスデモンストレーションの一環として観測した炭素過多の惑星状星雲 IC2165 の成果を以下にまとめる（図 2.22 参照；Otsuka, 2022, MNRAS, 511, 4774）。

(1)望遠鏡と観測装置の波長、空気量、点源拡がり関数の関係式を確立し、逆畳み込み手法を開発することで、大気ゆらぎによる天体像の歪みと拡散を波長ごとに除去し、高解像度の三次元分光データの再構築に成功した。この手法により、天体本来のガス・ダストの物理量分布を初めて明らかにすることができた。

(2)水素輝線の観測強度比と理論強度比を比較することで、可視データのみを用いてガス・ダスト質量分布を算出する新手法を開発した。さらに、全ての物理量を完全データドリブンで得る画期的な計算コードを構築した。このコードにより、波長 0.4-1 ミクロンで角度分解能 1.3 秒角を達成、全波長にわたり点源拡がり関数が完全に一

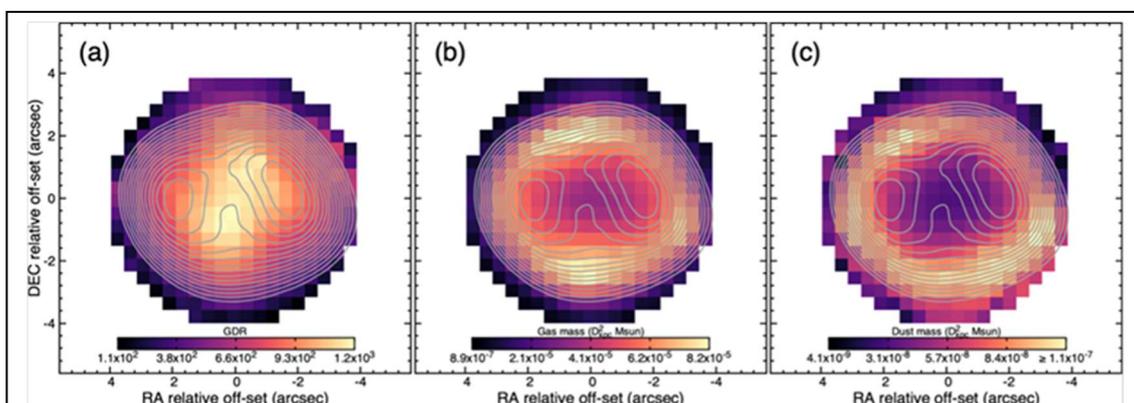


図 2.22 惑星状星雲 IC2165 の京都大学せいめい望遠鏡三次元分光データから、我々が開発した手法で高空間分解したガスとダスト質量分布を導き、恒星風が星間物質に与える化学的作用と質量放出履歴を解明する例。各パネルには、水素輝線 4861 Å のコントラストが重ねてある。(パネル a) ガス-ダスト質量比は星雲殻中央部で 800-1800 であるが、外側に行くにつれ星周物質の典型値 ~ 100 に近づいていくのがわかる。(パネル b,c) ガスとダスト質量分布は短軸の端にピークがある。漸近赤色巨星枝星に形成された片寄りのある質量分布がその後の非等質な質量放出を誘導し、楕円状星雲を形成したと推測される。

致しているガスとダストに関する物理量分布の獲得に成功した。本研究はガス・ダスト双方の物理量を「可視データのみ」で一貫して求めた世界初の例となった。

(3)星周殻のガス-ダスト比が空間的に変化していることを発見した。中心星周りの高温ガスプラズマが満たされた領域では約1000であるのに対し、星間物質との接触面付近では約100にまで減少している。この発見は従来の星周物質に対するガス-ダスト質量比の誤用が恒星風質量放出率の過小評価やミッシングマス問題の一因である可能性を示唆している。また、ダストが中心星周辺の過酷な放射線環境でも破壊されずにプラズマと共存していることを示した。

(4)ガス・ダスト質量の空間分布は一様ではなく、赤道方向に集中している。漸近赤色巨星枝星段階での非等方的な質量放出が赤道トーラス構造を形成している。赤道トーラス構造がのちの非等方質量放出、非球対称星雲殻の形成を駆動していると考えられる。

(5)元素組成の空間分布は一様ではなく、中心星からの距離や方向に応じて変化している。特に星雲殻の極方向に沿って大きな勾配が存在し、漸近赤色巨星枝星段階で生成された元素がこの方向に沿って拡散していると推測される。星周殻の形成過程や中心星の進化史が化学組成の分布にも反映されていることを世界で初めて示した。

せいめい望遠鏡を用いた惑星状星雲関連論文（査読あり）

- Otsuka, M., Ueta, T., and Tajitsu, A. "Seimei/KOOLS-IFU mapping of the gas and dust distributions in Galactic PNe: Unveiling the origin and evolution of the Galactic halo PN H4-1", 2023, Publications of the Astronomical Society of Japan, 75, 1280-1297
- Otsuka, M. "Seimei KOOLS-IFU mapping of the gas and dust distributions in Galactic planetary nebulae: the case of IC 2165", 2022, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 511, 4774-4800

2.4 教育的成果

2.4.1 学位論文

岡山天文台が完成した 2018 年度以降で、関連する研究で学士は 11 名、修士は 13 名、博士は 6 名を京都大学内で輩出している。その内訳は以下の通りである。

学士

2018 年度

恒次 (SI) + 円尾芽衣 「せいめい望遠鏡における Seeing 評価」

2019 年度

沖中陽幸 「近赤外偏光撮像装置の部品設計」

2020 年度

黒須公人 「インドネシア近赤外カメラの設計とレンズ評価」

徳地研人 「せいめい望遠鏡・主鏡制御用アクチュエータの特性評価」

橋ヶ谷武志 「せいめい望遠鏡・可視 3 色高速撮像分光装置の撮像性能評価」

2021 年度

清水里香 「インドネシア望遠鏡近赤外線カメラの開発 自重解析および熱解析」

井上峻 「RS CVn 型連星 V1355 Orions におけるスーパーフレアに伴う高速プロ
ネンス噴出」

及川雄飛 「CLQ の観測」

2022 年度

小嶋拓斗 「赤外全天雲モニタの開発」

2023 年度

市原晋之介 「せいめい望遠鏡と TESS の同時測光分光観測による、M 型星フレア
の時間発展と温度変化

修士

2018 年度

西岡秀樹 「点回折干渉計を用いた極限補償光学用波面センサの開発」

2019 年度

津久井遼 「点回折干渉計方式を用いた極限補償光学用波面センサの開発」

2020 年度

岡本壮師 「Kepler データの統計解析とせいめい望遠鏡の分光観測で迫る恒星スー
パーフレア」

反保雄介 「測光分光観測による WZ Sge 型矮新星アウトバーストの研究」

円尾芽衣 「可視 3 色同時広視野カメラの開発」

吉武知紘 「X 線連星 MAXI J1820+070 の多波長観測」

2021 年度

渥美直也 「系外惑星撮像観測のための精密制御装置の開発」

沖中陽幸「近赤外偏光撮像装置の設計と製作」

柴田真晃「IW And 型矮新星の包括的な研究」

2022 年度

黒須公人「インドネシア望遠鏡近赤外撮像カメラの開発」

徳地研人「引きずり 3 点法を応用した自由曲面の計測法の開発」

浪崎桂一「 $H\alpha$ 分光と可視光測光の同時観測で迫る M 型星スーパーフレアの彩層放射機構」

2023 年度

及川雄飛「増光 Changing State Quasar の広輝線領域に関する観測研究」

博士

2018 年度 なし

2019 年度 なし

2020 年度

行方宏介「Observational Studies of Extreme Stellar Magnetic Activities: Spots, Flares, and Mass Ejections」

2021 年度 なし

2022 年度

津久井遼「Development of the point-diffraction interferometer wavefront sensor for extreme adaptive optics」

名越俊平「Studies of the Structure and Activity History of Quasars Probed by Luminosity Variation」

2023 年度

反保雄介「Weird WZ Sge-type Dwarf Novae and Their Implications for the Evolution of Cataclysmic Variables」

田口健太「Tackling the Nature of a White Dwarf Progenitor through Prompt Follow-up Observations of Novae: A Case for V1405 Cas (= Nova Cassiopeiae 2011) as a Low-mass ONeMg White Dwarf」

吉武知紘「Multiwavelength Studies of the Black Hole X-ray Binary MAXI J1820+070 in the brightening Phase」

2.4.2 就職・進学先

2018 年度からの岡山天文台・せいめい望遠鏡関係の卒業生の進路は、学士取得者 8 名のうち民間就職が 1 名、修士課程進学が 7 名(うち 1 名は京大内の別分野、1 名は他機関)、修士取得者 10 名のうち官公庁就職が 1 名、民間就職が 6 名、博士後期課

程進学が3名、博士取得者6名のうち民間就職2名、研究員4名(うち海外1名、国内3名)である。

2.5 その他

2.5.1 せいめい望遠鏡稼働後コミュニティとの関わり

せいめい望遠鏡の稼働後のコミュニティとの関わりは、主に毎年1回行っているユーザーズミーティングで行っている。ユーザーズミーティングでは、望遠鏡や観測装置のステータスレポートの他、ユーザーによるせいめい望遠鏡で行われている研究内容の発表、新規装置に関する報告や議論、今後の運用方針に関する議論などが行われている。

現在までに6回のユーザーズミーティングが行われてきており、以下の点に関してコミュニティで議論を行っている。

2019年：共同利用への要望、ユーザーズミーティングのあり方に関して

2020年：共同利用の進め方、観測データの占有期間、せいめい望遠鏡の役割に関して

2021年：無人リモート観測 / キュー観測に関して

2022年：ToO やキュー観測の進め方、装置の提案やデコミッションの流れに関して

2023年：無人リモート観測、新規装置や現装置改修に関して

2024年：インドネシア姉妹機での共同研究、キュー・自動観測に関して

2.5.2 民間企業との連携

せいめい望遠鏡計画を飛躍的に前進させたのは、実業家である藤原洋氏からの寄附と技術開発への投資である。特に、国内に存在しなかった大型非球面鏡の製造技術の獲得を支援するために、ベンチャー企業・ナノオプトニクス研究所が設立され、ナガセインテグレックス製の大型研削盤を購入し、技術開発の環境を整えた。藤原氏は当初より、この技術の意義を把握し、将来的に30m望遠鏡(TMT)や世界の望遠鏡に鏡を供給する計画を描いていた。技術の獲得に予定よりも時間を要したこともあり、TMTへの鏡供給は実現しなかったが、我々の研削加工技術やCGHの計測技術は国内メーカーから注目を浴びた。またせいめい望遠鏡の技術開発を議論するための「技術検討会」は完全にオープンな議論の場として開催され、プロジェクトメンバー以外の多くの大学や企業の研究者・技術者が参加し、延べ52回を数えた。せいめい望遠鏡の完成以降、様々な要素技術が国内企業や研究機関に应用あるいは流用されている。関連する特許出願も8件におよび、積極的な技術移転も行い、本学に特許収入などをもたらした。特筆すべきは、インドネシアの国立研究革新庁(BRIN、ただし当初はLAPAN)が国立天文台としてTimau山に建設する新望遠鏡にせいめい望遠鏡を採用

したことが挙げられる。この望遠鏡は現在、2025年内の完成を目指している。

2.5.3 社会連携

せいめい望遠鏡の命名にあたっては、一般の方の認知度のアップと親しみを持ってもらうことを目的として、2017年10月27日から12月20日で名前の公募を行った。海外からも含めて1036通の応募があった。2018年3月に選定委員会（委員長：藤原洋・株式会社ブロードバンドタワー代表取締役会長兼社長CEO）を開催して、意味や響き、他の望遠鏡や人工衛星の名前との重複がないなど、慎重に議論した結果、愛称は平安時代の卓越した陰陽師・天文博士の安倍晴明(あべのせいめい)と科学目標の系外惑星探索は最終的に宇宙における生命の探査につながることにちなみ、「せいめい望遠鏡」と決定された。

天文台のある岡山県浅口市は、1960年の東京天文台岡山天体物理観測所の開所に合わせて同じ敷地内に岡山天文博物館を作った。さらに、「天文のまち あさくち」を謳い、2018年には岡山天文台設立に先立って公害の防止に努め星空環境を守ることを目的とした「日本一の天体観測適地を守る条例」が制定するなど、市をあげて天文学の発展に貢献してきている。この関係をもとに、岡山天文台では、社会連携活動の一環として下記のとおり年1回の施設特別公開の他、岡山天文博物館の協力を得てテレビ観望会・施設見学を行っている。以下に各イベントとその参加者数をまとめる。

○施設特別公開（京大ウィークス・岡山天文台特別公開）

実施日	参加者数	備考
2019年10月5日	約400	
2020年11月7日	169	オンライン開催2部構成、合計視聴者数
2021年11月6日	271	オンライン開催2部構成。合計視聴者数
2022年11月5日	247	
2023年10月28日	250	
2024年10月26日	155	

○せいめい望遠鏡テレビ観望会（主催：岡山天文博物館、共催、岡山天文台）

せいめい望遠鏡で撮影した映像を岡山天文博物館のプラネタリウムにリアルタイムに投影して観望する形式の観望会

実施日	対象	参加者数
2022年6月9日	浅口市職員対象テレビ観望会説明会	11
2022年12月1日	矢掛町職員対象テレビ観望会説明会	25
2023年3月26日	岡山天文博物館友の会会員を対象に試行	20
2023年5月27日	一般	30
2023年8月27日	一般	30
2023年11月25日	一般	38

2024年3月16日	一般	31
2024年5月18日	一般	38
2024年8月25日	一般	30

○見学受入れ

実施日	団体	人数
2018年4月4日	矢掛町副町長他	18
2018年4月26日	京都市青少年科学センター	5
2018年5月15日	日本プラネタリウム協議会中国四国地区 WG	12
2018年5月22日	浅口市議会議員	7
2018年5月22日	創価学会 岡山県事務所	5
2024年5月26日	岡山天文博物館オープニングイベント せいめい望遠鏡ドーム内公開	700
2018年6月1日	岡山理科大学生物地球学科	18
2018年6月16日	衆議院議員 斉藤鉄夫	1
2018年8月8日	広島大学附属中学高校	20
2018年8月9日	奈良県立青翔高等学校	8
2018年8月25日	岡山天文博物館 子ども祭り せいめい望遠鏡ドーム内公開	376
2018年10月5日	岡山県総合教育センター研修	18
2018年10月18日	岡山天文博物館 188 cm望遠鏡モニター観望会	50
2018年10月31日	岡山県議視察	12
2018年11月7日	岡山県地域振興の検討委員会	20
2019年1月13日	岡山天文博物館 冬のこどもまつり ドーム内公開	60
2019年1月14日	岡山天文博物館 冬のこどもまつり ドーム内公開	60
2019年1月14日	浅口市長案内の中国視察団	25
2019年1月24日	三菱電機	20
2019年2月7日	浅口市の教員、浅口の天文資源の教育利用検討 WG	15
2019年3月5日	岡山理科大学理学部応用物理学科	25
2019年4月9日	岡山県知事視察	
2019年4月18日	備中県民局長	
2019年5月17日	岡山理科大学生物地球学科	16
2019年6月7日	キャノン電子	
2019年7月9日	理カフェ	
2019年8月19日	岡山大学理学部化学学科 OB 会	7
2019年8月20日	カブトガニ博物館	8
2019年8月24日	岡山天文博物館 夏のこどもまつり	156
2019年8月25日	岡山天文博物館 夏のこどもまつり	

2019年8月24日	天文台基金 せいめい望遠鏡見学会	18
2019年9月20日	平塚市博物館	2
2019年10月7日	浅口市依頼：浅口市訪問のオーストラリア教員	5
2019年12月6日	水島公民館	24
2019年12月6日	寄島中学校	35
2019年12月16日	浅口市依頼：中国のジジュン市から政府代表団	6
2020年1月21日	ニコン技術部	5
2020年1月25日	恋する岡山・天文王国おかやまモニターツアー	22
2020年2月1日	恋する岡山・天文王国おかやまモニターツアー	22
2020年2月4日	岡山県知事、浅口市教育長 他 招待観望会	
2020年2月8日	恋する岡山・天文王国おかやまモニターツアー	20
2020年10月30日	大原あかね氏（大原美術館理事長）	4
2021年11月27日	井原市立高校	26
2021年12月22日	岡山理科大学	
2021年7月9日	岡山理科大学	12
2021年11月16日	金光中学	89
2022年5月13日	岡山理科大学生物地球学科	11
2022年10月26日	浅口市依頼：北海道厚岸町町議会議員 視察	8
2022年11月11日	精密工学会	22
2023年5月19日	岡山理科大学生物地球学部	12
2023年6月4日	第51回彗星会議	30
2023年6月14日	日本プラネタリアム協議会・全国プラネタリアム大会	38
2023年6月20日	国家公務員新人研修	4
2023年7月11日	姫路科学館スタッフ	3
2023年7月18日	おかやま山陽高校天文同好会	8
2023年8月17日	大阪府立三国丘高校	23
2023年10月24日	物理教育研究会 研修	10
2023年10月31日	金光学園中学	90
2023年11月29日	県西部の文化講座	25
2024年5月11日	浅口市依頼 カンボジアからの訪問者	20
2024年5月17日	岡山理科大学生物地球学科	14

○岡山天文博物館 せいめい望遠鏡見学ツアー

実施年	参加者計	備考
2019年	111	8月から14回実施
2020年	100	5回実施、3月以降コロナ対策のため中止
2021年	48	6回実施、10月再開

2022年	139	17回実施
2023年	249	29回実施
2024年	221	11月までに23回実施

3 岡山天文台の将来計画

3.1 概要

これまでに述べてきた岡山天文台の経緯や現状を踏まえ、この章では直近から今後10年程度の将来計画について述べる。

サイエンスゴールとしては岡山天文台当初と大きく変わるわけではなく、1)時間軸天文学の推進による突発天体现象の解明、2)太陽系外惑星の解明、3)恒星スーパーフレアの解明である。ただし、2章にまとめたその後の我々の研究の進展や、世界的な研究情勢の変化があり、具体的な計画は進展してきている。当初は1)ではガンマ線バーストを大きく取り上げていたが、マルチメッセンジャー天文学の進展や新しい種類の突発天体现象の発見もあり、対象が広がりを見せている。2)については、極限補償光学の研究が進展し装置開発が進んだこと、GAOES-RVの稼働により視線速度法による系外惑星の探索が進められるようになったこと、そして世界的に系外惑星の特徴づけに研究の重点が移りつつあることを反映している。3)に関しても、スーパーフレアに伴う質量放出現象の観測や多波長観測が多くなされるようになってきて、太陽フレアとの比較をもとにした研究やスーパーフレアと恒星表面の状況との関係、さらにスーパーフレアが系外惑星に及ぼす影響をより詳細に調べる試みがなされるようになってきている。これらの研究は現在開発中であったり今後開発する計画であったりする観測装置とも密接に結びつく。サイエンスゴールと主に使われる予定の新規観測装置の関係を図3.1にまとめておく。

	サイエンスゴール	1)時間軸天文学・突発天体现象	2)系外惑星	2)恒星スーパーフレア
	研究対象や内容	超新星、マルチメッセンジャー天体、新星、矮新星、AGN等	系外惑星探査（直接撮像・RV法）、惑星大気、惑星系円盤等	恒星表面現象、質量放出、活動性変化、系外惑星への影響等
望遠鏡	リモート・自動観測			
観測装置	IRS			
	NirPOL			
	MIDSSAR			
	VISTA			
	高分散分光器			
	超高波長分解能分光器			
	地表層AO			

図 3.1 サイエンスゴールと開発する観測装置

さらに長期的な発展を考えると、国際連携や産業応用、地域社会連携を今後さらに進めることが重要になる。せいめい望遠鏡のマイナーなアップグレードや観測装置の拡充は可能だとしても、同等以上の望遠鏡を我々が主体で建設し運用していくことは人員的にも予算的にも制約がある。そこで、海外の機関との連携をさらに発展させることを図る。また、これまで培ってきた技術は幅広く産業応用が可能であり実績もある。産官学連携での技術開発拠点を作り、アイデアの共有や双方向の技術移転などWIN-WINの関係を築いていく。社会連携も重要な柱である。夜間観測の環境を守り研究を継続していくために地域の協力は必要で、広く理解を得るための公開や観望会の実施、あるいは研究成果の広報活動には今後も力を入れていく。これら全てを学生と共に行なっていく、研究者としてあるいは一般人として幅広い視野を持つ総合力の高い人材育成を目指す。

3.2 節ではサイエンスゴールに関連した将来計画や付随する装置開発計画、あるいは既存の汎用分光器である KOOLS-IFU を大幅にアップグレードした装置開発計画とそれを使って新たに切り拓く研究計画を詳述する。3.3 節では望遠鏡運用の自動化と基礎的装置開発の計画、3.4 節では国際連携に関する将来計画、3.5 節では技術の産業応用に関する将来計画、3.6 節では広報活動や社会連携に関する将来計画、3.7 節では人材育成についての将来計画をまとめる。

3.2 科学面での将来計画

3.2.1 超新星と系外突発天体

背景と目的

2.3.1 節で述べたように、時間軸天文学・突発天体観測研究が世界的な広がりを見せる中で、せいめい望遠鏡を軸とした新天体発見後の即時追観測プロジェクトは一定の成果をおさめている。今後一年程度で Rubin 天文台・LSST (Legacy Survey of Space and Time) が稼働を始めることが予定されており、今後ますます発展していく分野であると考えられる。

全世界的な取り組みにより新天体の即時追観測体制が整う中で、大型望遠鏡空白地である東アジアにおいて最大口径を有し、かつ高い機動性を持った望遠鏡として、せいめい望遠鏡は独自の地位を築く高いポテンシャルを秘める。これらの特性を生かし、超新星及び系外突発天体の観測研究において、“発見直後の即時観測を起点とした Intra-night 観測体制の構築”により数時間スケールの変化をとらえ、“恒星終末期進化や新種の（未知の）突発的爆発現象についてのさらなる新知見を得る”ことで、急速に発展する突発天体研究を国際的に牽引することを目標とする。

この実現のためには多国間にわたる国際共同研究が必須であり、この取り組みを通し研究者の交流を加速するとともに、（国内にとどまらない）次世代を担う若手研究者の育成にも大きく貢献する。

内容

発見直後からの迅速な即時詳細追観測の起点として、複数台の大口径望遠鏡の半専有的な使用が不可欠である。（1）観測は天候に左右されるが、地理的に分散した望遠鏡配備により発見直後一日以内での観測の成功率が劇的に増加すること、（2）地球の自転に伴い観測値の「夜」が移動することで、intra-night 観測が初めて可能となること、の二点がポイントとなる（図 3.2）。本将来計画においては、経度の近い位置に設置された二台の 3.8m 姉妹望遠鏡－京都大学せいめい望遠鏡とインドネシア BRIN (Badan Riset dan Inovasi Nasional) Timau 望遠鏡－を用いることで、

（1）爆発直後の即時・詳細観測をほぼルーティン化し、激的な観測例の増加をもって“爆発する星の最終進化における多様性”及び“新種の突発天体の起源”に迫る。

（2）さらにこの二台による連携観測を起点として世界的な望遠鏡ネットワークでの連続追観測を遂行し、数時間スケールの変化をとらえ、恒星終末期進化や新種の爆発天体についてのさらなる新知見を得る。

本計画における国際共同研究の枠組みにおいて、以下が軸となる。（1）新天体発見のためのサーベイ計画として、東京大学 Tomo-e に加え、University of Science and Technology of China (USTC)が推進する WFST (Wide Field Survey Telescope) サーベイとの連携。WFST は 2024 年 4 月より科学観測を開始しており、現在最高性能とされる ZTF や ATLAS による発見より前に超新星を検出できてい

ることを確認している。(2) 京都大学による全面的な技術支援の下で建設が進む、せいめい望遠鏡の姉妹機であるインドネシア Timau 望遠鏡を用いたインドネシア天文コミュニティとの密接な共同研究、及び(3) intra-night 観測を実現するため、様々な経度における 1-2m 級望遠鏡へのアクセスを可能とする国際連携、特にインド及びフィンランドの研究グループとの連携。さらに、(4) 同様の枠組みによる、8m 級望遠鏡の観測時間確保および多波長観測(及びマルチメッセンジャー観測)の推進。これに加え、(5) LSST や JWST を用いた爆発前の母天体の活動性及び長期にわたるモニタリング観測、および(6) 新天体発見から追観測実施・データ解析までをほぼ完全自動化することにより、新天体発見後から数分程度での追観測開始の実現の二点も、突発天体研究の次の大きなステップとして挙げられる。

ZTF や ATLAS と言った public survey に加え、東アジア

上空を監視する Tomo-e と WFST との連携が大きな強みとなる。せいめい望遠鏡と Timau 望遠鏡により爆発後数日の時点で十分な精度の分光観測が実行できる対象は、100 メガパーセク程度までの距離で発生した超新星である。年間数十天体に対し爆発直後の分光観測を実行する。このうち、爆発後一日以内から観測できる天体数の見積もりは年間 10 天体程度である。これらの天体に対しては、Intra-night 観測を実行する。せいめい望遠鏡によるプログラムで構築したシステムにより柔軟な ToO (割り込み) 観測を実施することで、事実上の占有望遠鏡として用いることができる。

超新星をはじめほとんどの突発天体は爆発直後急速に増光するため、3.8m 望遠鏡

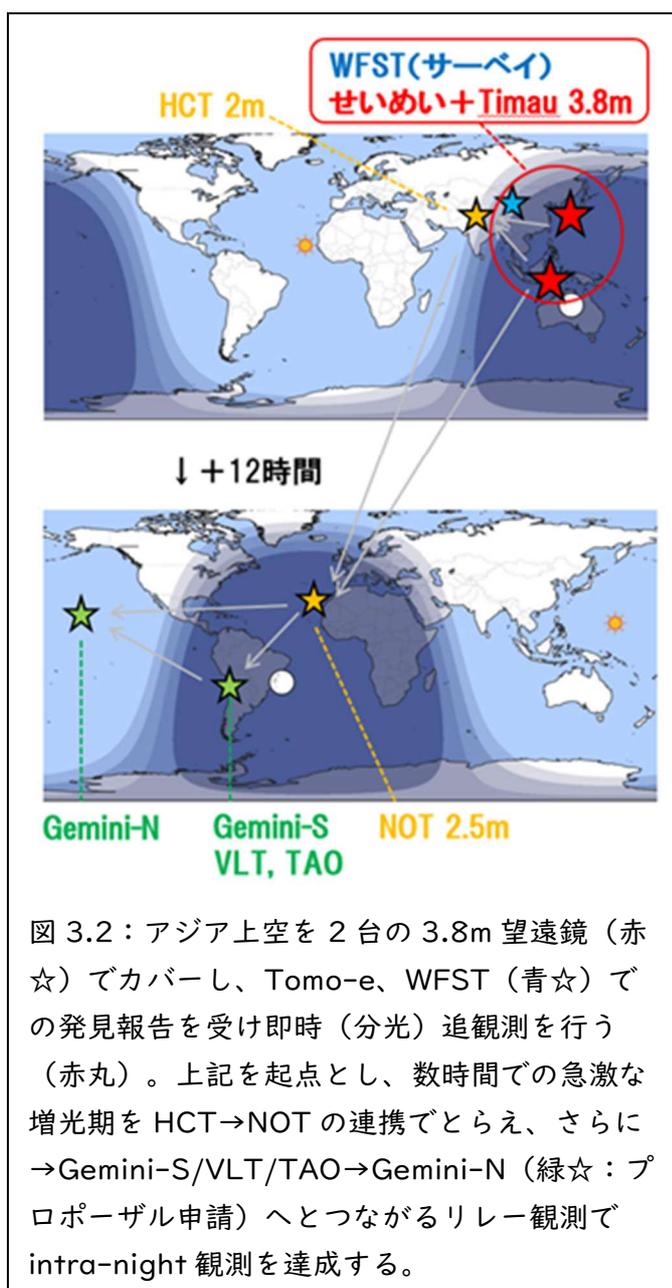


図 3.2 : アジア上空を 2 台の 3.8m 望遠鏡 (赤☆) でカバーし、Tomo-e、WFST (青☆) での発見報告を受け即時 (分光) 追観測を行う (赤丸)。上記を起点とし、数時間での急激な増光期を HCT→NOT の連携でとらえ、さらに→Gemini-S/VLT/TAO→Gemini-N (緑☆: プロポーザル申請) へとつながるリレー観測で intra-night 観測を達成する。

二台による初期観測よりも小口径の望遠鏡に、Intra-night 観測を引き継ぐことができる。数時間後にはインド 2mHCT 望遠鏡が、さらに数時間後にはカナリア諸島 2.5m 北欧 NOT 望遠鏡が待ち受ける。その後の Intra-night 観測サイトであるチリには 8m Gemini-S 及び VLT 望遠鏡が存在、ハワイには 8m Gemini-N 望遠鏡やすばる望遠鏡が存在する。せいめい—Timau 望遠鏡連携による爆発直後の初動追観測を確立することで、競争率の高い大型望遠鏡へのプロポーザル採択率も劇的に増加する。以上の枠組みを戦略的に駆使することで、LSST を最大限に用いた爆発前の母天体の活動性及び長期にわたるモニタリング観測が可能となるとともに、JWST をはじめとする種々の宇宙望遠鏡による多波長観測の実現性を高める。

上記の内容を達成するためには、ToO 発動から観測・データ解析までをほぼ自動で行うシステムの開発も必須である（3.2.1 節参照）。本計画は、せいめい望遠鏡（及びインドネシア Timau 望遠鏡）の（半）完全自動化の driving force ともなるものである。

準備状況

東京大学 tomo-e サーベイ、広島大学かなた望遠鏡等との国内連携に加え、フィンランドやインドの研究グループをはじめとした様々な研究グループとの国際共同研究を開始している。フィンランド、インドとの共同研究に関しては、これまで JSPS 二国間交流事業に採択された実績もある。また、中国 WFST を運用するグループ、インドネシア Timau 望遠鏡を有するグループとも計画に関する同意が得られており、本将来計画を強かに推進する協力関係が構築されている。インドネシアとの共同研究に関しては、2024 年度より 5 年間、本計画に沿った科研費国際共同研究加速基金（海外連携研究）が採択されている。インドネシア天文コミュニティーとの交流も加速しており、2024 年度より一名、インドネシア出身者が宇宙物理学教室・博士後期課程に入学している。

3.2.2 高分散分光観測で拓く恒星磁気活動現象

背景と目的

2.3.2 で述べたように、我々は恒星フレアによる高エネルギー放射や質量放出現象の理解を目標として、太陽型星、RS CVn 型連星や M 型星など幅広いタイプの恒星におけるスーパーフレアの観測を行ない、大気加熱機構やフィラメント・プロミネンス噴出の様子を明らかにしてきた。この武器になったのは、TESS 宇宙望遠鏡をはじめとした可視測光観測とせいめい望遠鏡と KOOLS-IFU を使う同時低分散分光観測を長時間にわたって行ったことである。また、飛騨天文台での太陽観測をもとにして、恒星としての太陽(Sun as a star)解析を行なうことで恒星の観測データと直接比較を行なうことができたことも大きい。

そこで、これまでの研究を進展させ、黒点とスーパーフレアの発生の関係やプラズマ噴出のより詳しい調査を行なう。より具体的には、どういう黒点分布や複雑さの時にスーパーフレアとそれに伴うプラズマ噴出が起こるのか、また、フレアのエネルギーと噴出するプラズマの質量・速度はどのような関係があるのか、の 2 点を明らかにすることを目的とする。このことにより、恒星や太陽が太陽系内外の惑星に与える影響や、惑星の生命誕生と存続の可能性の研究への重要な基礎情報を与え、将来的な太陽での巨大フレアに対する予報や防災に関する研究に資する。

内容

まず、恒星における黒点の様子を明らかにしていく。このため、我々は Kepler や TESS 宇宙望遠鏡で得られた光度曲線を解析し、黒点の分布の大きさや分布を調査する手法の開発を行なってきた(e.g. Namekata et al., 2020, ApJ, 891, 103; Ikuta et al., 2020, ApJ, 902, 73, Ikuta et al., 2023, ApJ, 948, 64)。この調査には、恒星の自転位相をカバーする時間分解能分光観測を行ない、光球起源の吸収線の線輪郭の変化をもとに行なうドップラーイメージングという手法(図 3.3 参照)がこれまでよく行なわれてき

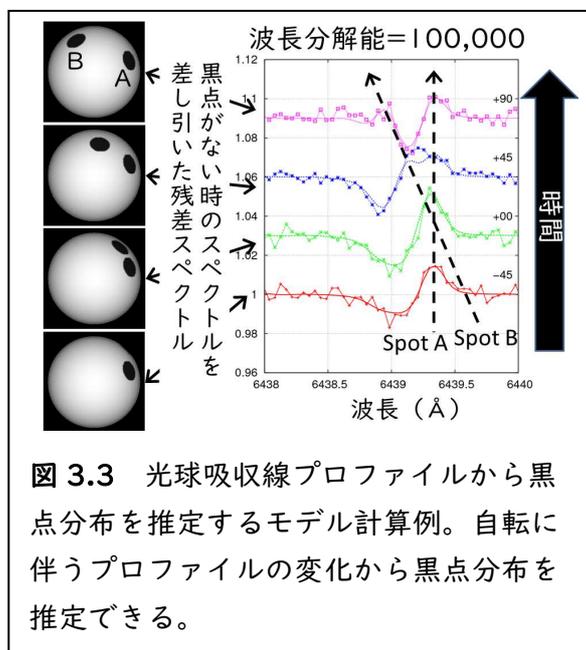


図 3.3 光球吸収線プロファイルから黒点分布を推定するモデル計算例。自転に伴うプロファイルの変化から黒点分布を推定できる。

ている。我々は現在この二つを組み合わせたより信頼度の高い手法を開発中である。

一方で、太陽研究の方から、大きなフレアを起こすかどうかは、黒点(群)の面積だけではなく複雑さも関係していることがわかってきている(図 3.4 参照)。このため、彩層起源である H α 線や Ca II HK 線、Ca II 赤外 3 重線の観測を同時に行ない、黒点

の状況を明らかにしなければならない。

このため、我々は恒星フレア観測に特化した $H\alpha$ 線と $Ca II HK$ 線のみを中分散分光観測 ($\lambda/\Delta\lambda \sim 13,000$) する分光器 MIDSSAR (MId Dispersion Spectrograph for Stellar Activity Research) の開発を進めている (3.3.2 節参照)。この分光器は、入射部でダイクロックフィルターにより光を分け、既存の GAOES-RV ($\lambda/\Delta\lambda \sim 65,000$ 、観測可能波長 $5160\text{--}5930\text{ \AA}$) も同時使用が可能で、これにより光球線による同時イメージングが可能となる。

この分光器により、フレアに伴う彩層線の線輪郭の非対称成分や線幅の増大を、太陽フレアでよくみられるプロミネンス噴出 (典型的には秒速 80km) まで観測することができる。このため、恒星スーパーフレアに伴うプラズマ噴出現象の速度とその発生頻度分布やフレアエネルギーとの関係を調べ、それを太陽と比較するといった研究が可能となり、恒星フレアとそれに伴うプラズマ噴出現象が系外惑星や恒星自体の自転・質量の進化にどのような影響を与えるのかについて、観測に基づく定量的評価が可能となる。さらにフレア発生時に黒点がどのように分布していたのかが調べられるので、スーパーフレアを起こしやすい黒点の性質や、プラズマ噴出現象を起こしたフレアとそうでないフレアで、黒点分布にどのような違いがあるのかを調べるといった、恒星黒点-スーパーフレア-プラズマ噴出がどのように関連して起こるのかを明らかにしていく。

ただし、GAOES-RV の波長分解能では自転が速い ($>15\text{km/秒}$) 恒星しか研究対象とすることができない。より進化が進み自転速度が遅くなってしまっている恒星についての研究を行なうためには、より高い波長分解能の分光器が必要となる。このための高分散分光器の開発も視野に入れている。図 3.5 はその概念設計図である。可視光のほぼ全域をカバーし、GAOES-RV よりも多数の光球由来の吸収線を観測できるため、黒点の調査の精度を上げられる。 $H\alpha$ も高分散分光ができるようになり、プラズマ噴出現象の加速の様子なども捉えやすくなる。ファイバー分光器ということもあり、 $Ca II HK$ 線も同じ分光器で観測するようにすると全体の性能が低下するため、入射部で光を分けて、MIDSSAR の $Ca II HK$ 線観測モジュールを利用し同時に観測でき

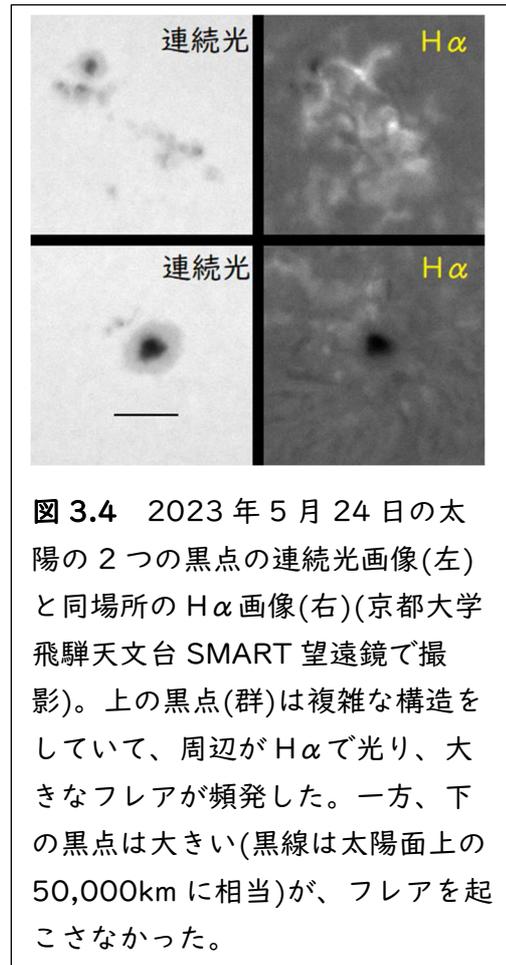
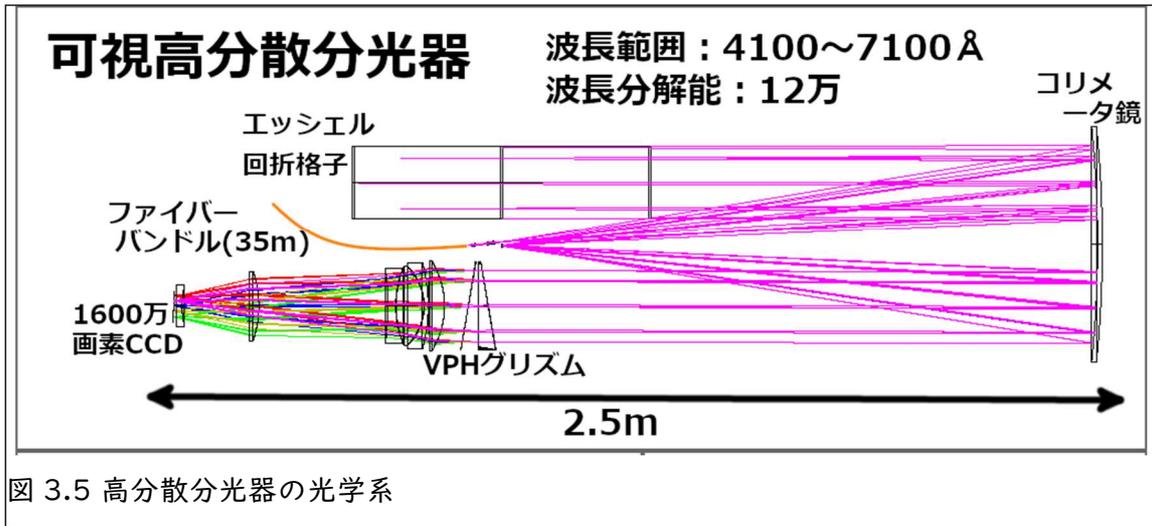


図 3.4 2023 年 5 月 24 日の太陽の 2 つの黒点の連続光画像(左)と同場所の $H\alpha$ 画像(右)(京都大学飛騨天文台 SMART 望遠鏡で撮影)。上の黒点(群)は複雑な構造をしていて、周辺が $H\alpha$ で光り、大きなフレアが頻発した。一方、下の黒点は大きい(黒線は太陽面上の $50,000\text{km}$ に相当)が、フレアを起こさなかった。

るようにする。



3.2.3 偏光面分光器「VISTA」(Vanguard Integral-field Spectropolarimeter for Transformative Astronomy) 開発計画と期待される科学成果

岡山天文台では、現状の面分光装置 KOOLS-IFU を刷新し最先端の天文学を切り開くため、世界最高性能を持つ次世代面分光装置として VISTA の開発を計画している。

KOOLS-IFU の使命とその意義

可視面分光装置 KOOLS-IFU は、岡山天文台開所以来の主力観測装置である。本装置は、重力波源対応天体の分光フォローアップを目的に製作されたが、第 2 章で何度も言及されたように、観測対象は多岐にわたる。これまでに 40 篇以上の査読付き論文に寄与し、多くの一般向けプレスリリースにも貢献してきた。KOOLS-IFU は、岡山天文台で唯一の汎用微光天体用分光器且つ国内唯一の面分光装置でもある。さらに、国立天文台の共同利用観測にも供されている。したがって、我が国の天文学研究・教育水準の向上において、欠かすことのできない存在といえる。

KOOLS-IFU の現状と新装置開発の意義

KOOLS-IFU は、1990 年代初頭に宇宙物理学教室の大谷氏が開発した分光器を祖とし 2014 年に太田氏と松林氏が面分光機能を追加した装置である。しかし、装置の中核をなす光学・機械部品は、30 年以上前に設計されたものであり、現代の技術水準には適応していない。近年、経年劣化によるトラブルが頻発しているが、入手不可能な部品も多く、安定運用が危ぶまれている。海外の 4m 級望遠鏡で稼働中の面分光器と比較すると、視野サイズ、波長カバレッジ、波長分解能、検出限界等級の全てにおいて劣っており、岡山天文台を拠点とする研究活動に大きな制約をもたらしつつある。

岡山天文台は、我が国の中核施設として観測天文学の牽引と発展が常に求められている。そのため、2030 年代の天文学を牽引できる高い競争力を有する面分光装置開発の計画を開始した。

KOOLS-IFU の現状と新装置開発の意義

KOOLS-IFU は、1990 年代初頭に宇宙物理学教室の大谷氏が開発した分光器を祖とし 2014 年に太田氏と松林氏が面分光機能を追加した装置である。しかし、装置の中核をなす光学・機械部品は、30 年以上前に設計されたものであり、現代の技術水準には適応していない。近年、経年劣化によるトラブルが頻発しているが、入手不可能な部品も多く、安定運用が危ぶまれている。海外の 4m 級望遠鏡で稼働中の面分光器と比較すると、視野サイズ、波長カバレッジ、波長分解能、検出限界等級の全てにおいて劣っており、岡山天文台を拠点とする研究活動に大きな制約をもたらしつつある。

岡山天文台は、我が国の中核施設として観測天文学の牽引と発展が常に求められている。そのため、2030 年代の天文学を牽引できる高い競争力を有する面分光装置開発の計画を開始した。

開発計画

現 KOOLS-IFU ユーザにアンケートを実施した結果、新分光器に望む機能は以下の通りとなった。

- 目的天体と背景光用の二つの独立した 15 秒角×15 秒角以上の視野がある。
- ~400-900nm のスペクトルデータを一度の露出で取得できる。
- $\lambda / \Delta \lambda$ (R)~1000 から~4000 の波長分解能を目的に応じて選択できる。
- ~500nm で AB 等級 18 の点源とみなせる天体に対し、波長分解能 4000、1 時間積分で信号対ノイズ比 (SNR) が 10 以上を達成できる。
- 偏光成分も取得できる。

以上の要件を踏まえ、装置性能仕様(表 3.1、概念図は図 3.6)を決定した。計画の総額は約 6 億円、開発期間は 3 年を想定している。

表 3.1：新分光器の仕様

視野形状/個数	サイエンスタージット用と背景光または参照星用にそれぞれ 15.3×15.3 秒角
1 視野あたりの総ファイバ本数	289 本
1 ファイバあたりの視野	0.9" × 0.9"角(入射側ファイババンドルに格子状マイクロレンズアレイの取り付けにより)
波長カバレッジ	~390-930 nm
波長分解($\lambda / \Delta \lambda$)	~1000/~2000/~4000
チャンネル数	青波長(390-610 nm) 赤波長(600-930 nm)、 ビームスプリッタにより分割
検出器	米国テレダイン社製 CCD SOPHIA SOP-4096B-154A-MBAR (4096×4096、15 μ m/pixel) を各チャンネル各視野に配置。最高読み出し速度 4.2 秒。
観測効率(スループット)	~390-930 nm で平均~15%
検出限界等級(1 時間積分、SNR=10、点源)	18.7 (R=1000@430nm、AB 等級) 17.6 (R=4000@430 nm、AB 等級)
特殊機能	偏光分光
設置場所	右ナスミスステージ下または2階

期待される科学成果

本装置は特化したサイエンスを持たない一方、汎用性に重点を置いている。そのため、従来研究の深化に加え、多様なサイエンスの開拓が期待される。KOOLS-IFU と比較したときの具体的な改善点は、平均 2 倍程度の高観測効率(高スループット)、8 倍程度の広視野、2 視野を活用した相対測光・分光および背景光測定機能、最大 2 倍の波長分解能、青側・赤側波長の同時観測による観測時間効率の向上、CCD の読み

出し速度の高速化、偏光観測機能の付加である。以下では、本装置を活かした具体的なサイエンスを一部紹介する。

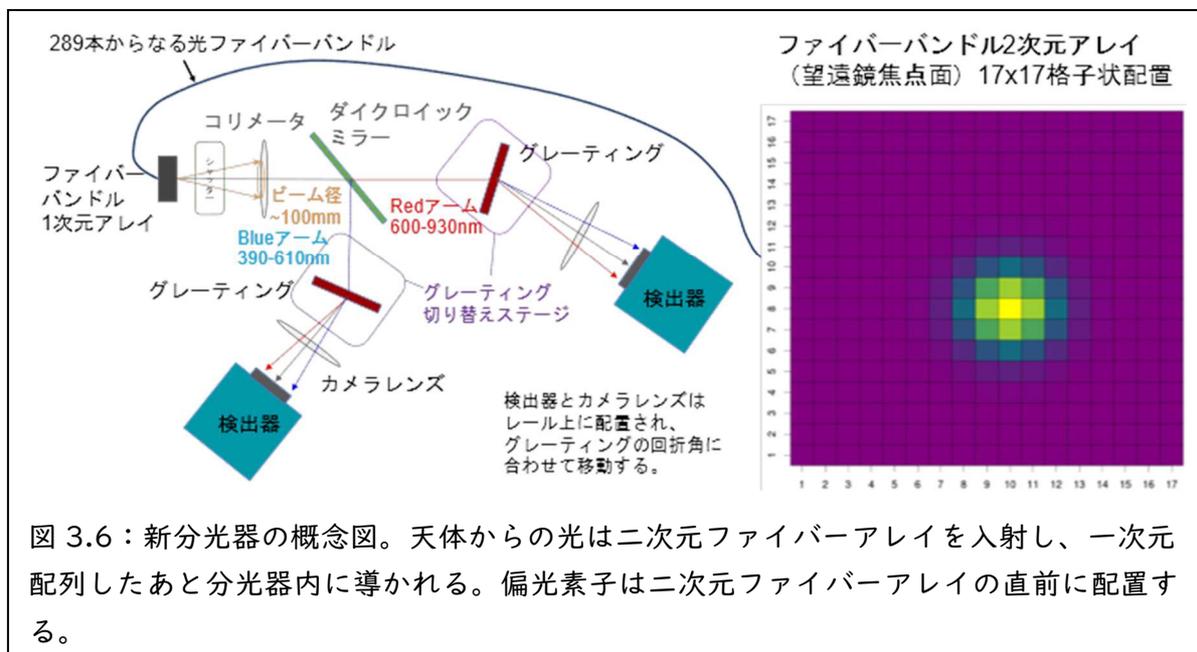


図 3.6：新分光器の概念図。天体からの光は二次元ファイバーアレイを入射し、一次元配列したあと分光器内に導かれる。偏光素子は二次元ファイバーアレイの直前に配置する。

○ 超新星

せいめい望遠鏡の機動力や集光力を生かした研究テーマの一つとして、超新星の観測的研究がある。超新星の観測的研究の歴史は長いものの、爆発直後の分光観測はまだ限られている状況である。超新星爆発によって元の星の成分は宇宙空間に飛び散っていくため、爆発から時間が経過するにつれて、より外側から希薄になっていく。星の進化の最終段階の情報を得るためには爆発直後の観測が重要になる。爆発直後はまだ超新星自体は暗く、より大きい口径の望遠鏡でのフォローアップ観測が必須となる。

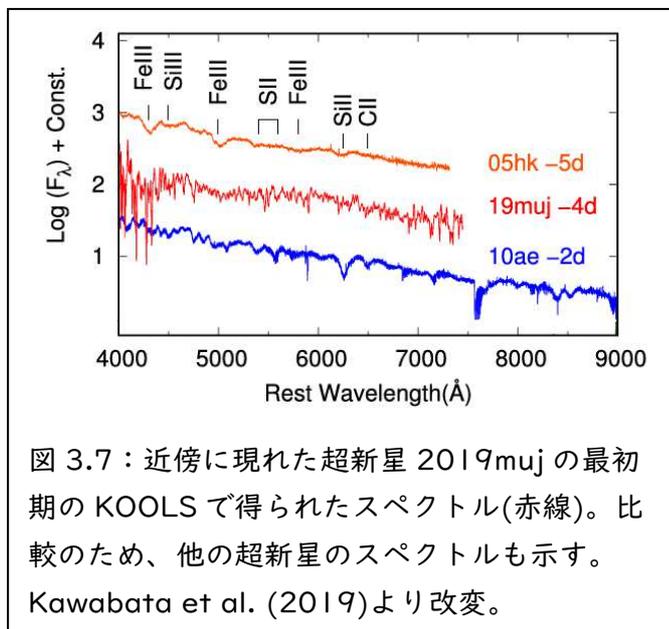


図 3.7：近傍に現れた超新星 2019muj の最初期の KOOLS で得られたスペクトル(赤線)。比較のため、他の超新星のスペクトルも示す。Kawabata et al. (2019)より改変。

超新星サーベイによる報告では 18、19 等の発見報告が多く、発見直後の超新星は現在の KOOLS では分光ができない場合がある。2024 年では 18 等での発見報告数が約 900 件に対し、16 等での発見報告が約 90 件となっている。このうち岡山から

観測できる天体となるとさらに数が限られてしまう。図 3.7 は近傍銀河で発見された超新星 SN 2019muj を約 1 日後に得られた KOOLS のスペクトルである。この時、超新星の明るさは V バンドで 17 等ほどであった。いくつか吸収線が確認することができるが、超新星の組成を詳細に調べるには厳しいものであった。本装置が完成することによって限界等級が 1 等深くなると、発見報告直後から分光観測が可能となり、これまで見落としてしまっていた爆発直後の超新星の振る舞いを捉えることができる。

KOOLS では可視光域をカバーするスペクトルを取るためには、二つのグリズムを切り替えて、それぞれのグリズムで分光を行う必要がある。これまでせいめい望遠鏡でのフォローアップでは青波長側のスペクトルを取得することをメインとしているが、Ca II triplet の振る舞いが気になると見込まれる天体については別途、グリズムを切り替えて赤波長側のスペクトルを取得している。本装置では二つのチャンネルで同時に可視光域全体のスペクトルを取得することが可能となるため、観測効率の向上が見込まれる。

また、近傍に見つかる超新星では、距離が近いために母銀河の見かけの大きさが大きく、得られる超新星のスペクトルに母銀河由来の成分も混ざってしまう場合がある。精度の良い超新星のスペクトルを得るためには、母銀河の成分をきちんと差し引くことが肝要となる。本装置による広視野化・複数視野化を活用すれば、母銀河のコンタミネーションの除去を効率よく行うことが可能になり、視野をずらしながらのデイズリング観測や、背景光のみの観測が不要となる。その結果、観測効率は大幅に上昇し、限られた望遠鏡時間でより多くの超新星の追観測し、超新星の多様性の探求することが可能となる。

○系外惑星

1995 年の初めての発見以降、これまでに 6000 個近くの系外惑星の発見が報告されている。発見された個々の惑星のスペクトルを観測することで、その惑星の大気の物理・化学的特性（温度構造や化学組成）を調べることは、その惑星の起源やハビタビリティ（生命存在可能性）を理解する鍵となる他、我々の地球や太陽系の普遍性・特殊性の解明にもつながる。

系外惑星のスペクトル観測はトランジット分光が主流となっている。これは、地球から見て惑星が中心星の前を横切るトランジット時に起こる、恒星光の減光の波長依存性を捉えるものである。トランジット時の恒星減光率は大抵の場合、1%以下であり、トランジット分光観測ではその 1%以下の減光率の波長依存性を調べる必要がある。そのため、高精度実現のための相対測光・分光が必要不可欠である。

系外惑星大気の特徴付けにおける、現在の最も大きな問題の一つが、大気中における雲の存在可能性である。上述したように、大気の化学組成を調べることはその惑星

を理解する第一歩であり、分子の吸収特徴が豊富に存在する赤外域の観測が、ハッブルやジェームス・ウェッブ宇宙望遠鏡を中心に盛んに行われてきた。その結果、大気中に雲が普遍的に存在する可能性が示唆された (Sing et al. 2016)。雲の存在は、我々の知りたい物理・化学的特性である大気温度構造や金属量、重力加速度 (質量)

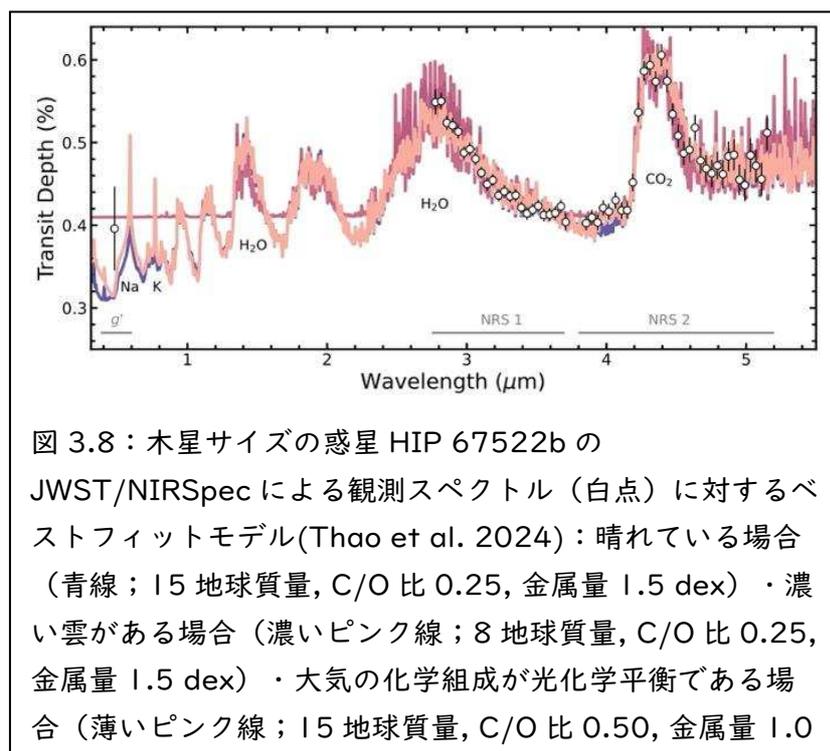


図 3.8：木星サイズの惑星 HIP 67522b の JWST/NIRSpec による観測スペクトル (白点) に対するベストフィットモデル (Thao et al. 2024)：晴れている場合 (青線；15 地球質量, C/O 比 0.25, 金属量 1.5 dex) ・濃い雲がある場合 (濃いピンク線；8 地球質量, C/O 比 0.25, 金属量 1.5 dex) ・大気の化学組成が光化学平衡である場合 (薄いピンク線；15 地球質量, C/O 比 0.50, 金属量 1.0)

などの様々なパラメータと縮退してしまう。ところが、雲の吸収の波長依存性が少ない赤外域では、雲に関する情報をあまり取り出せず、この問題を解消できない。一方、可視域に生じるレイリー散乱のスロープの有無や傾きは、この縮退を解く大きな手掛かりとなる。レイリー散乱のスロープの波長依存性は雲の有無とその特性 (粒径・密度・種類等) や大気金属量に大きく依存するためである (図 3.8 参照)。

加えて、可視域には酸化チタンや酸化バナジウム、ナトリウム、カリウムなどのユニークな分子の吸収特徴が多数含まれている。本装置によるこれらの分子の吸収特徴に対する中分散分光観測は、酸素や炭素、窒素からなる分子の吸収特徴が支配的な赤外域における観測とは相補的であり、この点においても、大気物理・化学的特性の制約に大きく役立つ。

現在、系外惑星大気観測の主力装置となっている JWST は、観測波長が $0.6 \mu\text{m}$ より長波長側である他、系外惑星の大気観測専用として初めての宇宙望遠鏡 Ariel も、可視域は 500-550 nm と 800-1000 nm の 2 バンドの測光のみである。そのため、可視域の相対中分散分光観測が可能な本装置とのシナジーにより、系外惑星大気の特徴付けを大きく進めることができると期待される。

○フレア星

恒星フレアの近紫外から可視域の連続光の SED は有効温度 (T_{eff}) が 8000-10000 K ほどの黒体放射に近いことが知られており (e.g., Hawley et al. 2003)、多くの研究

において、フレアの連続光放射のエネルギーを求める際に、 $T_{\text{eff}} \sim 10000 \text{ K}$ の仮定が用いられる。一方で、近年の時間分解した恒星フレアの多色測光や分光観測からは、フレアの規模やタイムスケールによって、フレアによる増光成分の近紫外～可視域のSEDに違いがみられることや、フレア中にSEDが変化することが指摘されている (e.g., Kowalski et al. 2013, Howard et al. 2020)。フレアの近紫外～可視連続光SEDに違いが生じる原因はまだ十分理解されておらず、この説明はフレアのエネルギー解放機構や連続光の放射メカニズムとも関連する重要な研究テーマの一つと言える。

フレア中のSEDの変化を求めるためには、高時間分解能の多色同時測光観測または分光観測が必要である。前者は適切な明るさの参照天体を同時に撮像することで高い放射強度の測定精度が期待できるが、波長方向の分解能が低いという欠点がある。逆に、後者(図 3.9)では波長分解能はよいが、放射強度の測定精度が悪い。観測で得られるスペクトルから、波長ごとの放射強度を正確に求めるためには、

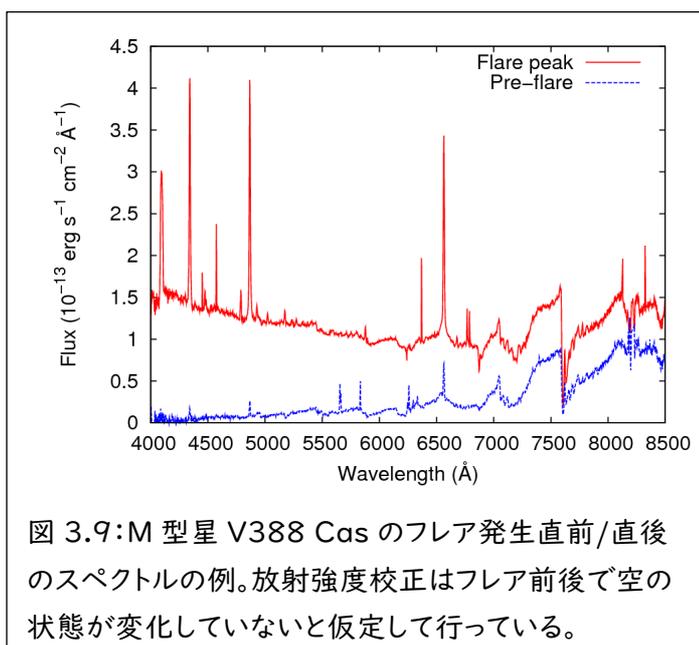


図 3.9: M 型星 V388 Cas のフレア発生直前/直後のスペクトルの例。放射強度校正はフレア前後で空の状態が変化していないと仮定して行っている。

観測対象の天体を撮った直前/直後に分光標準星のスペクトルを別途取得し、そのスペクトルを用いて放射強度校正を行う必要がある。従来の KOOLS-IFU のような 1 天体のみが観測できる分光器では、短時間の現象である恒星フレア (典型的な恒星フレアのタイムスケールは秒～分オーダー) において、フレア中に分光標準星のスペクトルを別途撮ることは現実的ではなく、高い精度で放射強度校正されたフレアのスペクトルを、時間的に連続して取得することは困難であった。

本分光器は観測天体用と参照天体/背景光用の 2 つの独立したファイバーアレイを持つため、観測を行うフレア星とその近くの参照星を同時に分光することができる。したがって、近くの参照星のスペクトルを用いてフレア星の放射強度校正されたスペクトルを時間的に連続して取得することが可能となり、フレア中のフレア成分の SED を高い精度で得ることができる。

さらに、本分光器は波長分解能($\lambda/\Delta\lambda$)が 1000 ないし 4000 あるため、フレアの連続光成分だけでなく、輝線成分の観測も可能である。フレア中にはバルマー輝線の線幅の増大や、線輪郭の非対称が生じることがあり、これらの観測はフレア中のエ

エネルギー解放メカニズムやフレアに伴うプラズマ噴出現象の解明に極めて重要である (e.g., Namekata et al. 2020, Maehara et al. 2021, Namekata et al. 2022)。

○惑星状星雲

KOOLS-IFU で行ってきた研究成果

KOOLS-IFU は一度の露出で 8 秒角 × 8 秒角の視野において独立した 110 箇所でのスペクトルが取得可能なファイバー型面分光器である。装置特長、せいめい望遠鏡のトラッキング精度と岡山における大気安定性を加味した観測手法、そして、独自開発したデータ解析法を駆使し、惑星状星雲の複雑な形成過程、さまざまな重元素量と固体微粒子質量の空間分布、星雲内で進行中の物理的・化学的プロセス、そして親星の質量放出過程に関する重要な知見の獲得に成功してきた (Otsuka 2022; Otsuka et al. 2024; Otsuka 2025)。これらは、惑星状星雲とその前駆星が宇宙の物質的/化学的進化における役割と恒星進化末期に起こる様々な機構の理解の一助となった。

KOOLS-IFU による惑星状星雲観測の技術的問題点

KOOLS-IFU は、1990 年代に開発された低分散分光器で使用されていた光学素子、それらのレイアウト、そして筐体をそのまま引き継ぐ形で開発された。そのため、入射面上に配置できるファイバー本数は百数本に限られ、利用可能な分散素子による波長分散 $\lambda/\Delta\lambda$ は ~300-2000 程度に制限されている。これにより、以下のような問題が生じている。

- (1) 視野サイズの狭さ：視野サイズが物理的に非常に狭いため、半径 10 数秒角のコンパクトな天体全体をカバーするのでさえ 50 箇所以上のマッピングが必要である。不安定な日本の空の影響も相まって観測効率が著しく低い。
- (2) 低い波長分解能：ラインブレンディング解消のために複雑な関数フィッティングが必須。実施のためにはクラスタ計算機が必要。
- (3) 感度特性の偏りと低さ：感度特性が特定の波長域に偏っており、ピーク感度でさえ 10% 程度である。微弱だが研究上重要な輝線の検出が極めて困難である。

これらの技術的問題点により、惑星状星雲における物理的・化学的特性の研究の進展が阻害されており、また合理的なタイムスケールでの成果創出が困難となっている。

VISTA で期待される惑星状星雲研究

VISTA の特徴である「広」視野、「広」波長カバレッジ、「高」波長分解能、「高」感度が達成されることで、以下の点が改善され、新しい研究成果が創出されると期待される。

- (1) 「広」視野化：KOOLS-IFU では 400 箇所以上のマッピングが必要であった半径 30 秒角を超える大型の惑星状星雲でも、VISTA では約 40 箇所のマッピングで十分となる。これにより、マッピング数の減少分、1 箇所あたりの積分時間が KOOLS-

IFU の 10 倍まで確保可能となり、高 SNR データの取得が容易になる。

(2) 「広」波長カバレッジ：KOOLS-IFU では 2 つの分散素子を用いて取得していた 0.4-0.93 ミクロンのスペクトルを、VISTA では一度に取得できるようになる。これにより、観測効率が単純に 2 倍向上する。

(3) 「高」波長分解能：KOOLS-IFU では不可能であった 10 数 km/s ビン毎での重元素量、ガス質量、固体微粒子質量の空間分布調査が可能となる。さらに、KOOLS-IFU 用に開発した独自解析手法を転用することで、これらの物理量の三次元分布を世界で初めて明らかにし、前駆星の質量放出過程や複雑な星雲殻形成過程の理解が一層深まると期待される。加えて、データ取得後の解析も大幅に容易になることは言うまでもない。

(4) 「高」感度：炭素、クリプトン、ルビジウム輝線など、前駆星の初期質量や進化最終段階における内部核融合反応の診断に必要な微弱な輝線も検出可能となる。これにより、これまで不明瞭であった点が VISTA 観測によって明確化される。

VISTA の登場により、惑星状星雲研究は新たな段階へ進むだろう。例えば、観測結果をもとに複雑な三次元構造を持つ天体の正確なモデル化が可能となり、これまでの理論モデルとの比較を通じて新たな知見が得られると期待される。また、宇宙の物質的・化学的進化における惑星状星雲の役割も一層明確になると考えられる。

○新星

KOOLS-IFU と比較して感度が上昇するため、今まで観測出来なかったより多くの新星を分光可能になる他、今まで観測可能だった新星もより短時間露出で観測可能になる。特に、赤側の高感度化により、銀河中心に位置する新星(赤外線でのサーベイ観測によって近年はこういった新星が多数見つかっている: De et al. 2021) や、ダストを放出する新星など、減光の強い新星を観測することが可能になる。この他、せいめい望遠鏡の自動観測機能の向上も相まって、M31 の新星などの網羅的な観測も可能になると期待される。

この他、広視野の面分光機能を活用し、天球面上での位置・視線速度ごとに輝線の強度解析から温度・密度などを求めることで、爆発から数十年が経過した新星残骸の 3 次元構造を推定することが可能になると期待される。新星爆発の典型的な膨張速度は数百～数千 km/s であるため、波長分解能を $R \sim 4000$ (~ 75 km/s) まで上げることが出来る意義は大きい。同様の観測は、可視光では FH Ser (Guerrero et al. 2025) などの先行観測例があるが、せいめい望遠鏡+VISTA の深い限界等級を用いれば、先行研究よりも放出物質の少ない(\sim 輝線の弱い)新星爆発の残骸に対しても、新星爆発の 3 次元構造を解き明かすことが可能になる。

一般に、チャンドラセカール限界に近い質量の白色矮星で発生する新星爆発の残骸では放出物質の質量が小さいことが知られているため、深い限界等級の恩恵は非常に

大きいと言える。温度・密度の3次元分布を解くことで、新星爆発の放出質量をより正確に求めることが出来るため、こうした新星爆発をホストする白色矮星が新星爆発で損失する質量と、降着段階で獲得する質量とのより正確な比較が出来ると期待される。これにより、新星爆発を起こす連星系の白色矮星がチャンドラセカール限界質量に到達するか否かと言う未解決問題を結論づけられる可能性がある。この問題は、宇宙論の標準光源として重要であるにも関わらず、新星のような白色矮星1つの系か、白色矮星2つの系か、いずれで発生するかが未解決であるIa型超新星爆発の母天体などとも関連している、天文学の根幹に迫る重要な課題である。

○矮新星

せいめい望遠鏡では矮新星の分光観測による研究が盛んに行われている。特に、連続分光観測から降着円盤の構造を推定するドップラートモグラフィー法は、降着円盤研究において非常に強力なツールであり、せいめい望遠鏡を使った矮新星研究の柱のひとつである(cf. 図3.10)。分光から推定した円盤構造と測光から得た周期変動・色変化などを組み合わせ、降着円盤で発生する物理機構を解明することが出来る。

近年の研究で、一部の降着円盤の活動現象では、円盤外縁部のガスが活動メカニズムに大きく関わりと示唆されている。しかし、降着円盤はケプラー回転しているため、外縁になるほど低速度で運動しており、ドップラートモグラフィーでの検出が困難である。円盤外縁部の視線速度は、天体や軌道傾斜角によっ

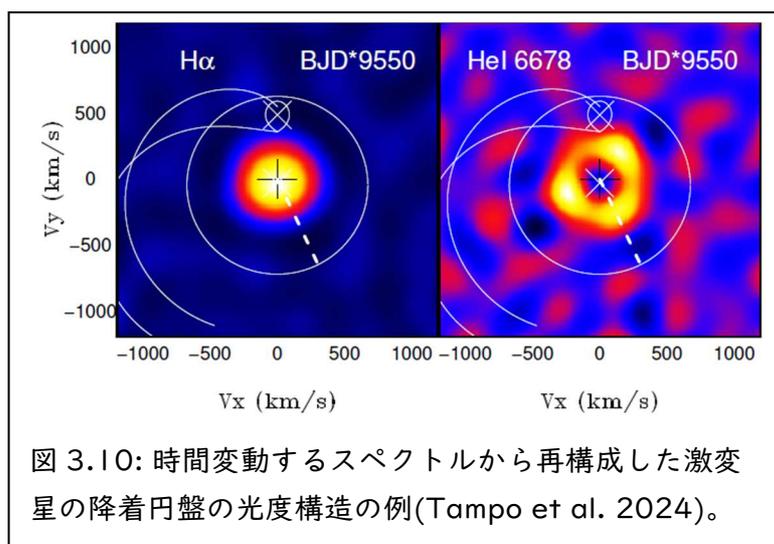


図 3.10: 時間変動するスペクトルから再構成した激変星の降着円盤の光度構造の例(Tampo et al. 2024)。

ても大きく異なるが、比較的観測しやすい天体であっても日によって60-100km/s程度しか変動しない。そのような低速度成分が高速成分と重なる状態で存在しているため、KOOLS-IFUで時間変動を研究するのは難しい。現在の倍以上の波長分解能が必須であり、本装置の完成が強く求められている。

更に、波長分解能が向上することで、これまでは天体の軌道傾斜角が低く（つまり降着円盤を真上から見ているため）視線速度が小さく時間変動の検出が難しかった天体も研究対象となる。過去の実績から、これまで軌道傾斜角30-40度程度まで観測可能だった。しかし、本装置を使うことで15度まで可能になる。更に、波長分解能

R~2000 では現装置に比べ限界等級が1等ほど深くなるため、これらの効果によってサンプル数は3倍ほどに増加すると期待される。特に WZ Sge 型矮新星の早期分光観測による研究では、観測可能なベストターゲットの数は、天候も考慮すると年に1天体未満であった。よって、理想的な観測サンプル数(10天体程度)が数年で達成される。また、より軌道傾斜角が低い天体まで観測対象となることで、現在の装置では達成不可能な、詳細な軌道傾斜角依存性が調べられるようになる。

降着円盤の活動現象は、多くの場合、連星の公転周期(1~数時間)程度の光度変動も伴う。円盤活動現象を正しく理解するには、分光観測のみではなく同時に測光観測を行い、光度変動の周期変化や色変化も捉える必要がある。例えば、g-band と i-band での振幅の違いから、光度変動の光源の物理的な位置やメカニズムを推定するといった研究がなされている。本装置を用いれば、2視野を活かした相対測光・分光が可能である。多色測光よりも格段に情報量の多い連続相対測光・分光データから、光源の具体的な温度まで見積もることができると期待される。

以上により、本装置の完成により従来では成し得なかった降着円盤構造の推定、ひいてはその裏にある物理現象の理解に繋がり、多くの天文学者が夢を見る矮新星アウトバーストの大統一理論へ近づく大きな一歩となる。

3.2.4 AO の発展

高コントラスト観測用 AO

岡山天文台では太陽系外惑星の直接撮像をめざした惑星撮像装置である Second-generation Exoplanet Imager with Coronagraphic AO (SEICA) を開発している(図 3.11)。これは波長の 1/20 まで波面補正を行える極限補償光学装置を搭載し、主星である恒星の周囲 0.2—2 秒角の範囲にある木星質量の巨大ガス惑星を観測可能で、2025 年度にはファーストライト観測が予定されている。しかし同等の能力を有した観測装置が搭載された 10m クラスの大型望遠鏡による大規模サーベイ観測がすでに多数行われており、SEICA を用いた惑星探査観測では新たな惑星を発見する可能性は低いと言わざるを得ない。

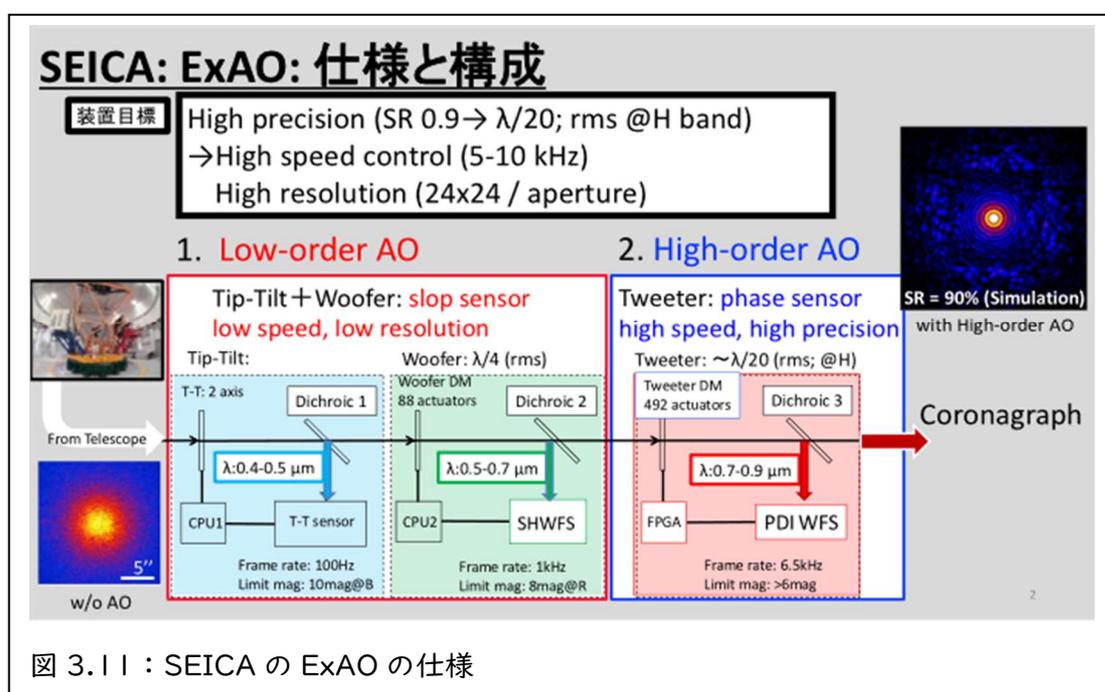


図 3.11 : SEICA の ExAO の仕様

そのため我々は系外惑星だけではなく、より重たくより明るい褐色矮星質量の伴星も新たな目標に加える。SEICA での直接撮像観測によってこれらの物理、化学特性を明らかにし、存在頻度の解析などからいまだ不明な点が多い低質量伴星形成シナリオの構築を目指す。当然ながらこうした観測は他望遠鏡でも可能であるが、それらの装置は主に惑星観測に占有、または注力しておりこれまでも、そして今後も褐色矮星観測に用いられる可能性は低い。せいめい望遠鏡の比較的潤沢な観測時間を適切に投入することで他望遠鏡では実現出来ない観測が可能になる。

また現在はより主星近傍でより低質量な惑星を検出するために 40m クラスの超大型望遠鏡に搭載される新たな惑星撮像装置が開発されている。これによってハビタブルゾーンに存在する惑星を撮像観測するだけでなく、従来用いられていた惑星の自発的な熱放射ではなく反射光による大気組成の観測、視線速度法やトランジット法など

によってすでに質量が知られている惑星の光度観測から求める質量光度関係などから統一的な惑星形成シナリオを明らかにすることが期待されている。

我々が開発している新方式の波面センサや FPGA を用いた制御装置などはこれらの超大型望遠鏡の新規装置に採用、導入が検討されており、SEICA はこうした新規技術のテストベッドとしての役割もある。今後は褐色矮星研究でも重要になる高コントラスト分光観測装置やコントラスト向上のための技術、波長帯域を絞った可視光補償光学などを開発、導入、組み込む予定である。

汎用 AO としての地表層 AO の導入

系外惑星観測に特化した SEICA 開発で培われた技術を展開し、様々な観測に対して使用可能な汎用 AO として、すばる望遠鏡の ULTIMATE-Subaru 計画同様の地表層 AO (GLAO) を、新たに導入することも検討している。汎用 AO なので多種多様な応用を想定しているが、主な研究目的は、新星残骸や惑星状星雲などを対象に、高空間分解能での面分光観測を実施し、その構造や物理的特性を明らかにすることである。現状の KOOLS-IFU を用いた面分光観測では、以下の 2 つの問題点が挙げられる。(1) 空間分解能がシーイングで制限されており、それ以上の高解像度の観測は困難である。(2) 惑星状星雲の観測では、露出の前後に位置参照星フレームを取得することで追尾による誤差が無いことを確認しているが、より長時間の露出になると誤差が顕著に現れる。そのため、正確なマッピングが可能なのは、非常に明るい天体に限られていた。

現状の SEICA は恒星周辺の惑星探査に特化しているため有効な視野が 4 秒角と狭く、波面測定に利用可能な明るい中心星が存在する前提であり、可視光は波面補正に使用されるので、そのまま面分光観測に適用するのは困難である。しかしながら GLAO を導入すれば、数十分角と SEICA よりも広い視野に対して、可視域での FWHM が 0.数秒角ほどの星像が得られると期待される。また、GLAO では複数の参照星と目標天体との相対位置が固定されているため、追尾による誤差も小さくなると期待できる。これらにより、GLAO を導入することで、上述の 2 つの問題点を克服して、次世代面分光器 VISTA (3.1.3 節) の性能を大きく向上させることが出来ると期待できる。例えば新星残骸であれば、現状では南天の VLT など 1" 程度の分解能を実現している観測例 (Guerrero et al. 2025 など) があるが、北天で潤沢な観測時間があるせいめい望遠鏡を用いれば、口径では劣るものの独自の成果を創出することが出来ると期待できる。さらに、汎用 AO として GLAO を導入することで、撮像観測など、面分光観測以外への応用も期待できる。

3.2.5 超高波長分解能分光器の開発と系外惑星探索

概要

惑星の周回によって引き起こされる主星の運動をスペクトル吸収線の波長変化としてとらえる観測手法（ドップラー効果を利用した視線速度法）は、太陽近隣の恒星系の地球型惑星「第二の地球」を発見する最有力の手段である。近年、観測技術の発展により視線速度測定精度は数十 cm/s 以下にまで向上しているが、恒星自身の表面活動による波長変動がそれより数倍大きく、実質的な測定精度向上の大きな障害となっている。

本研究では、比波長分解能 30 万の超高波長分解能と、cm/s レベルの超精密視線速度測定精度が同時に実現された革新的な高分散分光器を開発し、岡山 188cm 望遠鏡とせいめい 3.8m 望遠鏡に接続する。そして、恒星スペクトル吸収線の精密な形状計測から恒星活動の影響をリアルタイムでモニター・補正し、cm/s レベルの精度で恒星の視線速度変化を測定するという新しい観測手法を確立する。これらにより第二の地球探索に挑む。また、系外惑星探索だけでなく、恒星を始めとする各種天体の超高波長分解能観測による新たな天文学研究を推進する。

背景

可視高分散分光器を用いた精密天体視線速度測定は、今日、振幅 1m/s より小さい恒星の視線速度変動を捉えうる領域に入ってきている（地球による太陽の揺動は約 10cm/s）。しかし、振幅 1m/s より小さい変動は必ずしも惑星による主星の揺動だけでなく、例えば、脈動、対流（粒状斑）、黒点、活動サイクルなど、主星そのものの活動性等に起因するものも複数指摘されている。これらは、数分から数十年にわたる様々な時間尺度で様々な振幅の見かけの視線速度変動を引き起こすため、第二の地球を検出する際に障害となるのは器機的な測定精度ではなく、むしろ恒星自身の変動性であると言われている。実際、現在すでに 30cm/s 以下の測定精度を達成している高分散分光器が世界に複数存在するにも関わらず、この 10 年間に発見された惑星は主星の視線速度変化にして振幅 1–2m/s が最小であり、明らかに測定精度以外の要因

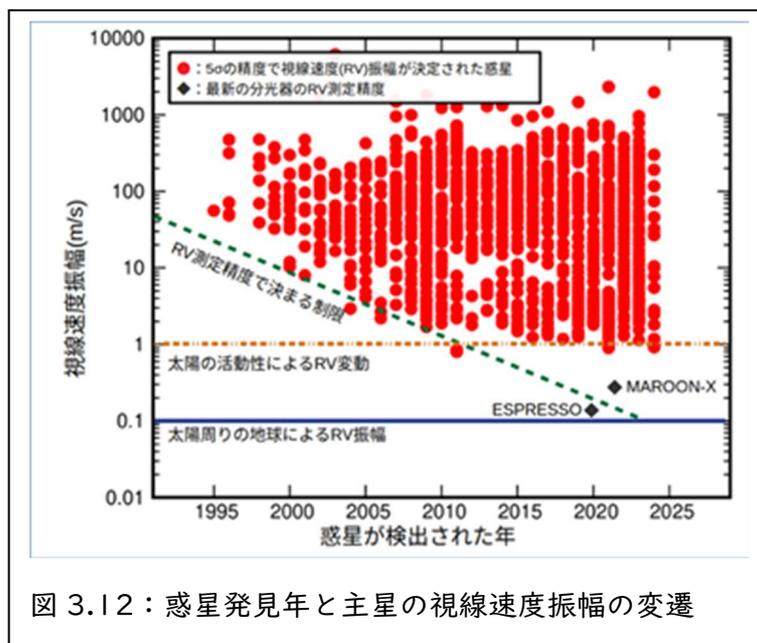


図 3.12：惑星発見年と主星の視線速度振幅の変遷

によって惑星検出が阻害されている（図 3.12）。

これを解決する有効な方法は、恒星自身の変動によるスペクトル線の形状が正確に観察できるように、分光器の器械輪郭を十分に狭くする（波長分解能を上げる）ことである。最近の研究によれば、太陽類似星の吸収線形状を正確に測定するには少なくとも比波長分解能 30 万を達成した超高波長分解能スペクトルの取得とその精密な解析が必要である（e.g. Deming et al. 2024, AJ, 167, 34）。同時に、cm/s レベルの精度での波長決定を可能にする超高精度波長基準、さらには、吸収線輪郭まで含めたあらゆる時間尺度のスペクトル変動を検出するための高頻度観測と、その観測のデッドタイムを低減する（デューティサイクルを上げる）ための検出器の高速読み出しも必須である。そして、長期にわたる豊富な望遠鏡時間も欠かせない。これらの条件の全てを満たす分光器は現在世の中に存在しない。

開発の目的

未だかつて世の中に存在していない、極めて独自性の高い超高精度・超高波長分解能分光器を開発し、岡山 188cm 望遠鏡とせいめい 3.8m 望遠鏡用に接続する。そして、これが生み出す全く新しい観測データを用いて、以下の先進的かつ革新的な観測研究を実施する。

- センチメートル毎秒レベルでの太陽型星の変動現象の解明
- 太陽近隣の太陽型星を周回する地球型惑星探索

これら以外にも、恒星を始めとする各種天体の超高波長分解能分光観測による新しい天文学研究を推進する。

要求仕様

開発する新分光器は、超高波長分解能、超広波長域、超高精度波長較正、超高速読み出し（超高時間分解能）を同時に実現する。科学目的から要求される仕様は次の通りである。

- 比波長分解能： $R = \lambda / \Delta \lambda \geq 300,000$ (30 万) ↔ 速度分解能 $\Delta v = 1$ km/s
- 観測波長域：400–900 nm 晩期 F 型–早期 K 型の星で大気吸収線が稠密に現れる波長域をカバー
- 波長較正精度：速度換算で 10 cm/s 以下（ゴール 1 cm/s） 繰り返し周波数 10GHz のレーザー周波数コム（コム自体の原理的な波長精度は速度換算で 1 cm/s 以下）
- 読み出し時間：10 秒以下（天体 300 秒、コム 10 秒を交互取得。うち天体が全観測時間の 90%以上）
- スリット幅：50 μm とし、それが検出器上で幅 20 μm に投影される(1/2.5 縮小)
 - 狭いスリット幅と高い効率を両立させるためにイメージスライサーを開発
- スリット長：2.8 mm とし、検出器上で隣り合う回折次数のスペクトルが重なら

ない垂直分散を備える

- 検出器：COSMOS-66 (10 um pitch, 8100×8100 pixels)二台で 400-600 nm と 600-900 nm の波長域を記録
- 透過効率：
 - スライサー部から入射した以降から検出器に届く直前までの総合透過効率が 20%以上
 - 地球の大気から検出器に至るまですべての要因を含めて光子検出の総合効率が 1%以上

また、400 nm 以下の波長域をダイクロイックミラーで分離し、恒星活動の指標となる I 階電離カルシウム吸収線 (CaII H & K) を同時観測するための以下の標準的なグレーティング分光器も製作する。

- 比波長分解能： $R = \lambda / \Delta \lambda \geq 30,000$ ，観測波長域 380-400 nm，反射型平面回折格子 2160 本/mm
- スリット幅：50 um，コリメーター焦点距離 1800 mm，結像光学系焦点距離 720 mm (1/2.5 縮小)
- 検出器：COSMOS-10 (10 um pitch, 3260×3260 pixels)

分光器の設置場所は 188cm 望遠鏡ドーム内を想定している。これら 2 台の分光器を 188cm 望遠鏡とせいめい望遠鏡に光ファイバーで接続する。現時点での予備的な設計例を図 3.13 に示す (@PhotoCross)。

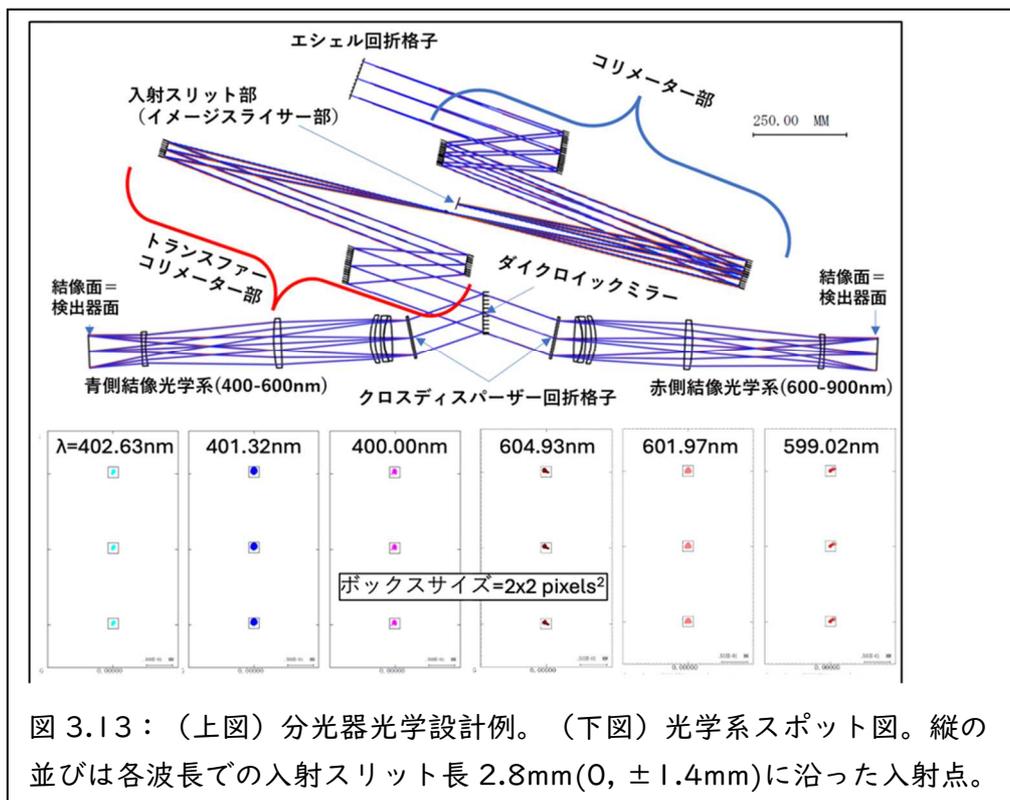


図 3.13：(上図) 分光器光学設計例。(下図) 光学系スポット図。縦の並びは各波長での入射スリット長 2.8mm(0, ±1.4mm)に沿った入射点。

主な開発要素

- 超高波長分解能・広波長域と本体のコンパクトさを両立する分光器設計
- スリット幅を狭めつつ効率を失わないためのイメージライサー
- 可視光波長全域にわたって満遍なく稠密に輝線スペクトルを発生する天文コム装置
- 超精密レベルでの大面積 CMOS カメラの特性理解
- 極めて高い反射率の反射鏡面

開発計画

計画の総額は約 5 億円（科学研究費・特別推進研究 2025-2030；研究代表者：佐藤文衛（東京科学大学））、開発期間は 3 年間で予定している。

FY 2025 天文コム製作、超高波長分解能分光器設計

FY 2026 イメージライサー等製作、CaII HK 分光器製作

FY 2027 超高波長分解能分光器製作

FY 2028 観測

-2030

3.3 望遠鏡と基礎的観測装置開発

3.3.1 リモート化と自動観測化

せいめい望遠鏡は突発天体现象の即応観測を主要な目的としているため、リモート観測・自動観測機能の実装は建設当初から議論されていた。リモート観測については COVID-19 の蔓延による移動制限に対処するため、予定を前倒して 2020 年 4 月より京大時間で、2022 年 1 月より共同利用でも天文台内に監視要員が在中する形での限定的な運用を開始した。さらにリモートからの操作に対するドーム内での安全確保のために監視カメラや人感センサ等を増設し、完全無人でのリモート観測を 2023 年 5 月より京大時間で、2024 年 1 月からは共同利用時間でも運用を開始した。

自動観測については 2022 年 1 月より Web フォームで観測スクリプトを生成し、ユーザーがコマンドラインで実行する形式での半自動観測の試験運用が開始され、2022 年後期から共同利用に公開された。また、2023 年 2 月からは作成した観測スクリプトを Queue 実行システムに登録して観測を実行するシステムの試験運用が開始され、2023 年後期から共同利用に供されている。2023 年 10 月からは、ユーザーが登録した観測天体の情報を基にプログラムが観測する天体を選び、自動的に Queue 実行システムに観測コマンドを登録し観測を実行していくシステムの開発・試験を始め、2024 年度末の時点で天気や太陽高度など観測可能な条件を判定し、人の操作なしに自律的に観測を開始・中断・再開・終了する自動観測システムの開発・試験を行っている。現状で自動観測に対応している装置は KOOL-IFU および TriCCS のみだが、近日中に GAOES-RV にも対応させる予定である。

この他、人の操作を必要としない自律判断での ToO 観測システムを開発している。突発天体现象が発生したアラートを受けて、自動的に観測スクリプトを生成し既存の Queue を登録するシステムの試験運用を 2024 年度中には開始する予定である。

現状での自動観測システムは天候の判断や取得した天体データのクオリティ判断までは実現しておらず、これらが直近の開発課題となる。天候判断については可視光よりも月明かりや街灯かりの影響を受けにくく、雲量を数値化しやすい中間赤外線カメラを用いた雲モニタを開発している。これに気象レーダーなど外部の気象情報サービスを組み合わせて、数 10 分程度先の雲分布を予測することで、Queue 実行システムにおいて効率のより観測順序の決定を可能にする。

データのクオリティ判断については、観測する天体や測定したい特徴に応じて基準が変わるため、画一的な判断プログラムを準備するのは難しい。せいめい望遠鏡の観測者からデータ解析プログラムの提供を募り、その中からデータのクオリティ判断部分を抽出してライブラリ化していく作業が必要になると思われる。分光観測においては積分時間が長い上に、1 回の積分ではクオリティ判断が可能な S/N に達していな

いことも多いため、取得されたデータを解析するだけでは観測状況の迅速な判断が困難である。そこでせいめい望遠鏡の副鏡ハブ内に小口径で広視野の同軸カメラ(図 3.14)を設置し、目標天体の周囲視野を測光モニタするシステムを開発している。これにより長時間積分の途中で曇ってきた場合でも積分を打ち切り、別の晴れている天域の天体に移行することが可能となる。

リモート観測や自動観測は突発天体现象への即応性を飛躍的に向上させるとともに、通常の観測においても観測者の負担軽減に極めて有効である。また細切れになった予備時間の有効活用にも役に立つ。その一方で学生や若い研究者が天文台を訪れる頻度が減り、観測目標を指定すればデータが出力されるだけのブラックボックスと化す恐れがある。自分の手で実行してこそ得られる観測ノウハウや、望遠鏡・観測装置を直接触れること

による観測装置の開発に対する意欲をどう教育し、維持していくかは今後の課題となる。



図 3.14：副鏡ハブに取り付けて動作試験中の筒先同軸カメラ

3.3.2 技術開発環境と基礎的な観測装置の拡充

せいめい望遠鏡の立ち上げ時期に計画した観測装置のうち SEICA、NirPol、IRS、MIDSSAR の 4 台は現在も開発を続けており、近い将来のうちに順次観測に供する予定である。国内最大の口径を有するとはいえ、現状で稼働している可視光の撮像装置・低～中分散分光器は他の望遠鏡との競争が激しく、また高分散分光器の GAOES-RV は太陽系外惑星の観測に特化しているため観測の幅を広げにくい。ここに開発中の装置が加わることで、

- (1) SEICA と分割主鏡の位相わせの組み合わせによる回折限界の空間分解能の達成
 - (2) NirPol、IRS による近赤外線での撮像・偏光・分光観測機能の獲得
 - (3) MIDSSAR と GAOES-RV の組み合わせによる中高分散分光機能の汎用化
- の 3 点において大幅に機能が強化され、今後も第一線の観測研究能力を維持できると見込んでいる。

SEICA (Second-generation Exoplanet Imager with Coronagraphic Adaptive Optics)

太陽系外惑星の直接撮像を目標にした観測装置で片方のナスミス台を専有する形で望遠鏡に搭載される。中心の恒星から 0.2 arcsec (地球から 10pc の恒星なら 2AU

の距離) 以遠に存在する木星のようなガス惑星が検出可能になると見込んでいる。非常に明るい恒星の極めて近くに存在する暗い惑星を撮像するために、恒星光を除去するコロナグラフと、極限補償光学装置 (ExAO) を組み合わせた構造になっている。

ExAO 部分は波面揺らぎを低空間周波数と高空間周波数の 2 成分に分けて補正する。このうち高空間周波数を担当する部分には偏光を利用して 3 位相を同時に取得する点回折干渉型波面センサや FPGA を利用したリアルタイム制御システムといった新規開発の要素を組み込むことであり、せいめい望遠鏡のみならず TMT など次世代大型望遠鏡への技術提供にも繋がると期待される。

現時点では低空間周波数を補償する部分までを望遠鏡に搭載して動作試験を行っている (図 3.15)。今後は高空間周波数の搭載やコロナグラフとの統合を進め、2026 年頃には全体の試験運用を開始し、2027 年頃に科学観測に供する予定である。



図 3.15 : 動作試験中の SEICA 内部

NirPol (Near-infrared Polarimeter)

近赤外線の J および Hshort バンドで同時に直線偏光観測を行う装置。2.9 分角の視野を持つ InGaAs 検出器を合計 4 個搭載しており、直交する 2 偏光成分を 2 つのバンドで同時取得する。これにより大気揺らぎに起因する測光誤差を最小限に抑え、高精度な偏光観測が可能となる。原始惑星系円盤の散乱偏光や、星間物質による偏光の観測などを予定している。

この装置は大型装置ローテータに搭載するが、光路の途中で可視光を切り分けることで TriCCS を直列に搭載し同時観測が可能な構成になっている。両者を合わせると計 5 バンドでの同時撮像装置として使用できる。TriCCS との同架試験時の写真を図 3.16 に示す。

現在は望遠鏡に取り付けて試験観測を行う段階まで到達しているが、真空・冷却を維持しての長期運用や内部の光学系の安定性にはまだ問題があり調整作業を進めている。2026 年頃には最終的な試験運用を行い、その年のうちに科学観測に供する予定である。



図 3.16 : NirPol の外観

IRS (Infrared Spectrograph)

近赤外線で目標天体と参照天体を同時に観測可能な中分散のファイババンドル型面分光器(図 3.17)。波長域は $0.9\sim 2.2\mu\text{m}$ で 4000 程度の波長分解能を持つ。参照天体のスペクトルを同時に取得することで、大気透過率が不安定な日本の空の環境下でも高い精度で測光分光が可能となる。遠方クェーサーなどの活動銀河核のスペクトル変化を長期間に渡りモニタし、活動銀河核の内部構造の違いを明らかにすることを主目標とする。



図 3.17 : IRS の外観

内部の光学系には非球面（バイコニック面）を積極的に使用することで、より少ない面数で高い結像性能を実現できる設計で、現在は鏡面の制作と評価、および調整作業を行っている。2027 年頃には試験運用を開始し、2028 年頃に科学観測に供する予定である。

MIDSSAR (MId Dispersion Spectrograph for Stellar Activity Research)

若くて自転周期が短い恒星や半径が大きく恒星、すなわち自転速度が大きな恒星に対して研究を行なう。せいめい望遠鏡に搭載されている高分散分光器 GAOES-RV を使えば、このような天体に対しては金属線の高分散分光観測は可能である。しかし、本研究で必要とするような $H\alpha$ 線と $Ca\ II\ HK$ 線を中分散以上の分解能で同時に観測できる装置は存在しない。そのため、2024 年度から $H\alpha$ & Ca 線観測装置と GAOES-RV と同時観測を可能にする光入射部の開発を行なっており、2025 年度中に完了する。

既存の GAOES-RV(波長分解能約 6.5 万、観測可能波長 $5160\sim 5930\text{\AA}$)は鉄の吸収線を多数観測できるのでこれを活用する。そして、 $H\alpha$ と $Ca\ II\ HK$ 線のみをターゲットとする波長分解能をやや落とした分

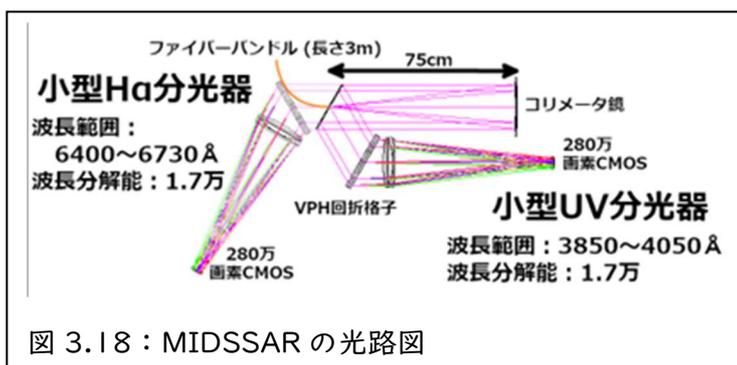


図 3.18 : MIDSSAR の光路図

光器を製作する。これらの装置で同時に観測するための仕組みとして、せいめい望遠鏡で集光される光をダイクロイックフィルターで GAOES-RV に渡す光と「それ以外」に分ける入射部を製作する。「それ以外」の光は本研究で製作する $H\alpha$ + $Ca\ II\ HK$ 分光器(図 3.18)に光ファイバーで導く。これで、GAOES-RV と本研究で開発す

る分光器とでの同時観測が実現する。

3.4 OISTER を通した国内連携の将来計画

せいめい望遠鏡は、光赤外線天文学大学間連携 OISTER に参加している。OISTER は国立天文台と国内 9 大学との連携組織であり、国内外の 13 台の望遠鏡による連携観測ネットワークにより、連携観測、装置開発、教育活動を展開している。2011 年の発足以来、第一期（2011-2016 年度）では観測ネットワークの構築と遠方ガンマ線バーストなどの突発現象観測、第二期（2017-2021 年度）では重力波・ニュートリノの対応天体探査や超新星爆発の観測、そして現在の第三期（2022-2027 年度）ではマルチメッセンジャー天文学を含む広義の時間領域天文学を推進している。図 3.19 に OISTER の参加望遠鏡マップを示す。京都大学は OISTER の取りまとめ機関としてこれらの活動を推進している。せいめい望遠鏡は、OISTER の連携望遠鏡の中で最大口径であり、その高い集光能力と多彩な撮像・分光装置を活かして、OISTER 観測網の重要な一翼を担っている。

OISTER では、2028-2033 年度の第四期に向けた将来計画を検討中である。主たる目的は、多地点・多機能望遠鏡群を活用した時間軸天文学の推進、観測装置開発とソフトウェア開発、人材育成である。次期計画では、マルチメッセンジャー天文学と



して重力波源や高エネルギーニュートリノ源のフォローアップ観測を継続する。ガドリニウム入りスーパーカミオカンデやハイパーカミオカンデによる銀河系内・局所銀河群内の超新星については、その初期段階からの詳細な観測を実施する。また、1秒以下までの時間分解能での観測により、月や惑星への小天体衝突閃光、FRB、恒星フレアなど新たな研究分野の開拓を目指す。OISTERに参加している木曾シュミット望遠鏡の広視野高速撮像装置である Tomoe-Gozen、また、Vera Rubin 望遠鏡 (LSST) で発見される突発天体については、高感度での分光観測によって物理状態の解明を行い、2025年度打ち上げ予定の紫外線観測衛星うみつばめなど他波長との連携観測も強化する。これらの活動を通じて、光赤外線天文学の将来を担う研究者の育成を行うとともに、望遠鏡・観測装置開発やソフトウェア開発を通じて、高度な科学技術の資質を持つ人材を社会に輩出する。せいめい望遠鏡は、OISTERの特色である多地点・多機能観測網の中で、高感度分光観測と高時間分解能観測を中心に、突発天体の物理過程の解明に貢献する。また、OISTERの活動を通じて、次世代の研究者育成を推進する。

3.5 国際連携と産業応用の将来計画

せいめい望遠鏡の開発の際に我々は、1) 大型非球面鏡の加工と計測技術、2) 軽量の望遠鏡構造、3) 分割鏡制御技術の獲得を達成した。計画当初より我々はこれら技術の国内外の天文研究への応用と社会還元を念頭においていた。それぞれについてのこれまでの経緯と背景は2.5.2節で述べた通りで、ここでは将来計画として3.4.1国際連携の拡充と3.4.2産業応用の拡充を記す。

我が国は少子化と経済力の停滞により、科学技術振興の予算の削減は不可避であり、岡山天文台の発展には考慮すべき点が多い。一方、TMT計画の遅れやすばる望遠鏡の戦略枠の拡大により、せいめい望遠鏡の共同利用時間枠の倍率は3倍にまで上昇している。つまり、岡山天文台のニーズは高まる一方で、運営のためのリソース確保が困難な状況である。この問題を解決するための糸口が国際連携と産業応用にある。

3.5.1 国際連携の拡充

附属天文台及び宇宙物理学居室の各研究者らは個人レベルで活発に国際的な研究を行っているが、ここでは組織として取り組んでいるインドネシアとの国際連携について記述する。インドネシアは歴史的にオランダの植民地であり、100年ほど前から60cmの屈折望遠鏡やシュミット望遠鏡などを有しているが、それ以来、設備の発展はほぼ無く、最先端の望遠鏡や観測装置の開発及びそれらを用いた観測技術を満足に有していない。一方で、インドネシアの人口増加と経済発展は目覚ましい。天文学においても世界有数の発展途上国と言え、我が国の置かれる状況とは対称的である。そのようなインドネシアと国際連携を深め、我が国がインドネシアへ技術提供と共同研

究を牽引することで、日本でさらに必要とされている、若手および女性人材の確保、国際性、望遠鏡の観測時間、新規装置の開発予算等の確保を目指す。具体的にインドネシアとの国際連携の拡充では以下を行う。なお、ベトナムとも比較的深いレベルの連携が行われているが、人材交流と育成程度にとどまるため、ここでは割愛する。

2024 年以降

- ・せいめい望遠鏡を用いたインドネシアの人材育成を年間 3 名×2 週間程度
- ・人事交流のための予算申請（マッチングファンド）を年平均 200 万円程度
- ・新規観測装置予算の共同申請を年平均 500 万円程度
- ・サイエンスの共同研究
- ・留学生の受入を年平均 1 名程度

2025 年以降

- ・本学からのせいめい望遠鏡の技術指導・支援を年間 2 名×2 週間程度
- ・岡山天文台の運用ノウハウの移転
- ・観測時間の交換を 10%以上を順次段階的に目指す
- ・天文研究以外の SX（スペーストランスフォーメーション）関連の活動

2026 年以降

- ・せいめい望遠鏡でデコミッション（運用停止）した観測装置のインドネシア側への貸与
- ・ネットワークの環境が整い次第、相互のリモート観測

さらに長期的には、インドネシアやベトナムとのこれらの活動をもとに、アジア各国や経度が異なるより広い規模で連携を深めていく。

3.5.2 産業応用の拡充

せいめい望遠鏡および岡山天文台を中心に進められている観測技術開発の大半が国内あるいは世界でトップクラスである。これらの技術を社会に還元し、人と資金が大学と社会を循環することも、岡山天文台のリソース確保において重要である。

せいめい望遠鏡計画で開発された技術のうち、産業応用として鏡の加工計測技術はすでに実績を上げている。独自の技術により、メートルサイズの非球面鏡を 10nm レベルで製造し、かつ現在は自由曲面に発展させるための開発を継続している。ナノオプトニクス研究所より始まった京大発ベンチャーは、2017 年に株式会社ロジストラボとして再出発し、せいめいで培った光学技術全般の技術移転および、鏡の加工サービスを行っている。上述のインドネシアの新望遠鏡の鏡をはじめ、国内最大の単一鏡となる 2m クラスの望遠鏡光学系や、東北大学の惑星・衛星観測に用いる世界で 2 番目の大きさとなる直径 2m の軸外し放物面鏡などの実績を上げてきた。

内閣府が策定する直近の宇宙基本計画では国土強靱化に貢献するリモートセンシングや LiDAR 技術、情報ネットワークの格差の解決と高速化を実現する宇宙光通信技術の開発を加速させるなど、スペーストランスフォーメーション (SX) の重要性が強調されている。また JAXA に 10 年間で 1 兆円の宇宙戦略基金が創設され、ベンチャー企業や大学での上記技術の開発が期待されている。これらの潮流を逃すことなく、せいめい望遠鏡の技術をさらに発展させ社会還元貢献していく。

例えば、上記のもので使われる宇宙機や人工衛星の大半には望遠鏡光学系が必要であり、上述の鏡製造技術はそのサプライチェーンの弱点を克服する技術として期待されている。系外惑星直接撮像のために開発している極限補償光学技術も、光通信の地上局用望遠鏡の受信感度を高め、高速で移動するスペースデブリの追尾誤差を改善する技術として重要である。分光や偏光観測技術もスペースデブリや喪失した衛星の物理情報を地上観測から提供できる技術として有望である。加えて、せいめい望遠鏡本体も高速で移動する低軌道衛星を正確に追尾観測できる望遠鏡として世界で最大口径であり、分光観測が可能な数少ない望遠鏡である。

これらの有望な技術を用いて、大型外部資金 (A-Step や宇宙戦略基金など) を獲得し、技術開発の拠点形成を行う。ここでは、大学研究者だけでなく、オープンラボ化することで企業にマシンタイムを貸し出し、サンプル加工などの要望などに有償で応える。大学では研究者らによる要素技術の開発を継続し、技術実証や実用化は企業主体で行う。その際に企業からは共同研究費などを獲得する。知財はすみやかに権利化し、技術移転を TLO 京都とともに行う。規模が拡大してきた場合は、コンソーシアムを形成することで、企業や他大学からの人材交流を促す。特に他分野からの天文観測技術への人の流入を促進することで、岡山天文台だけでなく、我が国の観測技術の人材を確保し、天文台の安定運用とコミュニティの成長に貢献する。

3.6 社会連携の将来計画

研究成果の還元は当然行うべきことであるが、岡山天文台の今後や天文学の発展を見据えた上でも、社会連携も一つの大きな柱と言える。

2.5.6 で述べたように、地元の理解があって天体観測適地としての環境が守られている。岡山天文博物館や浅口市と連携した施設公開・見学会や電視観望会は認知度を向上し、より広い意味での協力を深めていくために必要なことである。また、岡山天文台開所以来、せいめい望遠鏡で得られた研究成果や各種イベントに関しては積極的にホームページや、天文台公式 SNS (Facebook と X (旧 Twitter)) で広報を行ってきた。顕著な成果があがった際にはプレスリリースを行なうが、京都で行なわれる際でも zoom を利用して地元メディアも参加できるようにしてきた。このため、新聞、雑誌、テレビ、ラジオなど、様々な媒体で取り上げられてきた。

研究においては、我々はこれまでも、特に突発天体现象に関しては多数のアマチュ

ア天文家と連携してきた。必要に応じて知識の提供や観測の手法の議論を共同で行ない、アマチュア天文家から新天体発見の報告をいち早く受け、その天体の追観測データを取得・提供してもらい、せいめい望遠鏡やその他の望遠鏡での観測につなげて多数の成果をあげてきた。その場合は研究成果を発表する際に、ご本人の承諾のもと、共著者になってもらったり謝辞で名前を出したりしてきている。これらは社会連携によって研究を進めている例と言えるだろう。

このように、社会連携は研究者側からの一般への還元ということだけではなく、研究を進めることに役立っており、また次世代の天文学研究への参入者を増やすことや天文台基金への寄附の増加にもつながる。そのため、社会連携活動は今後なるべく積極的に行なっていく。

3.7 人材育成の将来計画

我々附属天文台と宇宙物理学教室は研究対象として太陽・恒星・系外惑星・銀河、そして研究手法として観測・装置開発・理論と幅広く研究を行なっている。この1大学の中の組織の中での幅の広さでは、日本のみならず世界的に見ても珍しいものと言える。また、飛騨天文台と岡山天文台という太陽観測と夜間観測の最先端クラスの天文台の両方を持つという、この意味でも世界的に稀有な組織である。この特長を活かし、高い専門性を持つと共に、広い知識と視野を持つ大学院生や若い研究者を育ててきた。

また、共同利用や OISTER を通して、国内全体の研究推進や人材育成に貢献してきた。特に OISTER では、せいめい望遠鏡の京大時間の一部を OISER の観測に提供し、観測実習を引き受けるなど、他大学の人材育成にも貢献している。

そして、3.3, 3.5-3.6 節では、望遠鏡や観測装置の開発、国際化、産業応用、そして社会連携の将来計画を述べたが、これらは人材育成にもプラスの効果をもたらす。例えば、思いついた観測や装置開発のアイデアを実現しやすい環境にあるため常に新しいことを考えて試してみる癖がつく、外国人大学院生が増え日常的に気軽に英語でコミュニケーションをとる機会や他国の情報に触れる機会があり国際性を養える、産業界の方々とも交流を持つことで自分たちの行なっている研究が社会的に持つ意味と意義を認識できる、また自分のあげた成果を伝える楽しさを体験するとともに伝える技術を習得できる、というような効果が期待できる。

このように将来計画を大学院生や若い研究者と一緒に進めることで、より進んだ発想力、企画力、実行力、国際性、社会性を身につけた人材育成が可能となる。これにより、3.2 で述べたような科学的な将来計画をさらに発展させ、あるいはまったく新しい研究を切り拓いていく人材を育成していく。このような人材は、社会的にも必要とされる人材となるであろう。OISTER を通した他大学の人材育成にも引き続き協力していく。

4. まとめ

岡山天文台は2018年4月に開設され、2019年2月のせいめい望遠鏡での科学観測開始以来、観測時間の半分を京大時間、半分を共同利用時間として運用し、丸6年が経過したところである。本将来計画書では、1章で天文学を研究する意義、光赤外線天文学を取り巻く環境、1大学が主体として中口径望遠鏡を持つ天文台を運営する重要性、初期に掲げたサイエンスゴール、岡山天文台建設についての研究者コミュニティからの期待と後押しについてまとめた。2章では現時点での岡山天文台の運営や、せいめい望遠鏡の開発のための技術開発及び民間企業との連携、京大時間でこれまでの観測で得られた研究の成果、これらの研究を通じた人材育成の成果、そして社会連携の成果を記した。

2章に述べたことを背景に岡山天文台としての将来計画を立案し、科学面での将来計画、国内外の研究面での連携の将来計画、産業応用や社会連携の将来計画、これらを通じた人材育成の将来計画を3章に記述した。科学面での個別の重要事項は自らの研究の進捗や世界的な研究の流れにより変わっていくが、安定した天文台と望遠鏡の運用、たゆまぬ技術開発と装置開発により、光赤外線天文学を発展させていく。これについては、大学が持つ中口径望遠鏡の強みを活かして、多波長連携、マルチメッセンジャー、時間軸天文学は変わらぬキーワードとなろう。

そして、国際連携と産業応用を発展させていく。国際連携は、使える望遠鏡や観測装置を増やすという点、多経度をつないで時間軸天文学としてより密なデータ取得を可能にする点の2点で非常に重要である。せいめい望遠鏡の2号機を設置するインドネシアを手始めとして、これまでの連携を深くし、相手国も増やしていく。産業応用では、これからますます重要になる宇宙開発に必要な天文学上の知識の提供や、最先端の望遠鏡やセンサーなどで共同開発を行なうこと、そして高度な専門知識を有する人材の供給でお互いにメリットがある。

社会連携は天文学そのものの認知度の向上、地元の理解度の向上、アマチュア天文家との共同研究のために、今後も継続していく。これは天文台の観測環境の維持、研究の推進、次世代の天文学参加者と寄附の増加につながる。

これらの将来計画を大学院生や若い研究者と一緒に進めていくことにより、天文学の未来を切り拓く人材育成を行なっていく。