

# 中小口径望遠鏡による これからの光赤外線天文学

吉田 道利

〈広島大学宇宙科学センター 〒739-8526 広島県東広島市鏡山1-3-1〉

e-mail: yoshidam@hiroshima-u.ac.jp



中小口径望遠鏡は、観測能力は大口径望遠鏡に劣るものの、豊富な観測時間を柔軟に運用できるという特質をもつため、特定のプロジェクトに集中することによって大きな成果を上げる可能性を秘めている。ことに、近年進展が著しい時間領域天文学においては、機動性に富んだ中小口径望遠鏡の活躍の場面は多い。迅速な反応を要する突発天体現象や、逆に長期にわたる変動現象の追跡には中小口径望遠鏡が適している。また、大口径望遠鏡では実行が難しいようなサーベイ的観測にも威力を発揮するであろう。

## 1. はじめに

天文学は幅広い対象を扱う学問である。その究極の目標が、宇宙の誕生とその進化を理解し、そのなかで繰り広げられてきた物質進化を追うことであるとすれば、その研究対象が空間スケールにおいても時間スケールにおいても多様であるのは必然と言える。

望遠鏡は、宇宙を観測するための最も基本的な装置の一つである。人類は、より遠く、より詳しく宇宙を観測するため、望遠鏡の大型化を図ってきた。光赤外線望遠鏡に限って言えば、今や世界には口径8 m以上の望遠鏡が10台以上あり、次世代の30 m級望遠鏡の建設が進んでいる。望遠鏡の大型化、高性能化が観測天文学の進むべき正しい道であるのは論を待たない。しかし、冒頭で述べたとおり、天文学の扱う対象のスペクトルは広く、少数の超高性能装置ですべてをカバーしきれものではない。大小さまざまな望遠鏡・装置で幅広く観測を行っていく必要がある。望遠鏡の

大きさに応じてそれぞれ適した研究テーマが存在する。本特集のテーマである「大学間連携による光・赤外線天文学研究教育拠点のネットワーク構築」<sup>1)</sup> 事業は、国内の大学が所有する中小口径の光赤外線望遠鏡を連携させた突発天体観測網を作り、教育研究に活用しようというわが国初の試みである。この事業が始まって5年が経過しようとしている。これを機に、これからの光赤外線天文学における中小口径望遠鏡<sup>\*1</sup>の役割と活かし方を考えてみたい。

## 2. 中小口径望遠鏡と時間領域天文学

大口径望遠鏡と比較して、集光力、解像力で圧倒的に劣る中小口径望遠鏡は、静的な天体の観測に関して深さと空間分解能ではかなわない。したがって、大口径望遠鏡ではなしえない、あるいは実行することが困難なサイエンスを追求していくことになる。

光赤外中小口径望遠鏡によるサイエンスとして、誰もが考えるターゲットは時間領域天文学で

<sup>\*1</sup> 「中小口径」という言葉にはいろいろな定義があると思うが、本稿では口径数cmから4 m程度までをひっくるめて「中小口径」と呼ぶことにする。

ある。天体は一般に変動をしている。恒星としては比較的静穏に見える太陽でさえ、時々刻々と変動しており、その活発な表面活動はわれわれの生活にも大きな影響を及ぼしている。ガンマ線バースト (GRB)、超新星、激変星、活動銀河中心核 (AGN)、恒星フレアといった高エネルギーの突発現象から、恒星の脈動、連星系掩蔽、系外惑星トランジット、太陽系天体など、さまざまな時間スケールをもった変動現象まで、時間領域天文学が扱う対象は幅広い。こうした現象を追跡するには、まとまった観測時間とフレキシブルな観測運用が必須である。大は小を兼ねるといえるが、こと望遠鏡に関しては必ずしも当てはまらない。

時間領域天文学は、時間方向に情報を蓄積していく。そのため、意味ある科学的データを得るために長時間を要することがある。この事情は大口徑望遠鏡を駆使したからといって改善されるものではない。ここに中小口径望遠鏡の活躍の場がある。

もちろん、大口徑望遠鏡は短い時間スケールの変動を高精度で追跡したり、数多くのターゲットを効率よく追跡したりすることに長けている。LSST (Large Synoptic Survey Telescope)<sup>2)</sup> は現在建設中の有効径6.7 mの広視野サーベイ望遠鏡で、数日間隔で全天をサーベイすると同時にさまざまな異なる反復周期で特定領域を観測する。これによって、視野と時間領域方向の密度の両方をカバーする。

では、LSSTが出現したら中小口径望遠鏡の出番はなくなるのか？ そうはならないであろう。LSSTは深い観測が可能であるが、それだけに明るい天体は逆に観測できない。また、観測波長域は限られており、多色同時観測もできない。分光・偏光観測能力もない。原理的に24時間連続

観測も行うことができない。LSSTは非常に強力な装置であるが、時間領域天文学のパラメーター空間の一部をカバーしているのに過ぎない (とは言え、これまでよりはるかに広大な空間をカバーしているのだが) ことを認識しておく必要がある。

以下に、中小口径望遠鏡を中心になされている時間領域天文学の研究テーマをいくつか概観しよう。

## 2.1 突発天体観測

現在、中小口径望遠鏡が最も活躍している分野が、突発天体の観測研究である。突発天体とは短い時間スケールで突然大きく明るさを変える天体のことを指し、GRB、超新星、激変星、AGNなどが含まれる。

表1に世界の主な突発天体の自動観測プロジェクトをまとめてみた<sup>\*2)</sup>。数十cmから2mまで、その主体が小口径望遠鏡であることがわかる。突発天体は、一般に出現時期も出現場所も予測不能である。そのため、広い視野を常時パトロールするか、何らかのトリガーに反応して素早く観測を行うシステムが必要となる。いずれも小口径望遠鏡の出番である。

GRBの可視残光が1997年に発見された<sup>3)</sup> 後、2000年代初頭に多くの残光追跡プロジェクトが立ち上がり、ロボット望遠鏡が建設された。表1にある多くの望遠鏡は、観測の主眼をGRBに置いていないものも含めて、GRB追跡観測を行っている。

2008年にフェルミ・ガンマ線宇宙望遠鏡<sup>4)</sup> が打ち上がると、AGNの一種であるブレーザーの多波長連携観測が活気を帯びてきた<sup>\*3)</sup>。ブレーザーは相対論的ジェットをほぼ正面から見ていると考えられている天体で、電波からガンマ線まで

<sup>\*2)</sup> もちろん、このリストは完璧なものではない。また、多くの突発天体自動観測システムは複数の観測対象をもっていることにも留意されたい。煩雑を避けるため、個々のプロジェクトについて参照文献は示していない。プロジェクト名をキーワードとしてウェブ検索されたい。

<sup>\*3)</sup> 広島大学のかなた望遠鏡 (口径1.5 m) は、まさにこの目的のために設置された<sup>5)</sup>。

表1 世界の主な突発天体自動観測プロジェクト.

プロジェクト名	望遠鏡口径 (視野*)	望遠鏡サイト	主な観測対象	開始年
MASTER	0.4 m (W), 0.07 m (W)	ロシア, 南アフリカ, アルゼンチン, カナリア諸島 (スペイン)	GRB, 超新星, 変光星	2002年
RAPTOR	0.4 m (W), 0.09 m (W)	アメリカ本土	GRB, 超新星, 変光星	2002年
ROTSE-III	0.45 m (W)	アメリカ本土, オーストラリア, トルコ, ナミビア	GRB	2004年
MITSuME	0.5 m (I), 0.9 m (I)	日本	GRB, 変光星, 系外惑星, 太陽系天体	2004年
MOA-II	1.8 m (W)	ニュージーランド	重力マイクロレンズ	2005年
TAROT	0.25 m (W)	チリ, フランス	GRB	2006年
SkyMapper	1.35 m (W)	オーストラリア	GRB, 超新星, 変光星, AGN	2008年
QUEST	1.0 m (W)	チリ	AGN, GRB	2009年
Pan-STARRS	1.8 m (W)	ハワイ	突発・変光天体一般	2009年
OGLE-IV	1.3 m (W)	チリ	重力マイクロレンズ	2010年
LCOGT	0.4 m (I), 1.0 m (I), 2.0 m (S)	アメリカ本土, ハワイ, 南アフリカ, オーストラリア, スペイン, チリ	突発・変光天体一般	2010年
KISS	1.0 m (W)	日本	超新星	2012年
Zadko	1.0 m (I)	オーストラリア	GRB, 超新星, 変光星	2012年
iPTF	1.2 m (W)	アメリカ本土	超新星, GRB	2013年
ASAS-SN	0.14 m (W)	ハワイ, チリ	超新星	2013年
RoboPol	1.3 m (I)	ギリシア	AGN	2013年
KMTNet	1.6 m (W)	オーストラリア, 南アフリカ, チリ	重力マイクロレンズ	2015年

\* W: 1平方度以上, I: 0.1平方度以上1平方度未満, S: 0.1平方度未満.

幅広いスペクトル領域で激しい変動を示す. 表1の望遠鏡群の一部はブレイザーのモニター観測も行っている. 表1には掲載していないが, 世界中の多数の中小口径望遠鏡を束ねた WEBT (The Whole Earth Blazar Telescope)<sup>6)</sup> プロジェクトもこの分野では多くの成果を上げている.

## 2.2 系外惑星探査

1995年, 恒星の視線速度モニター (ドップラー法) によりミシェル・マイヨールによって初めて太陽系外惑星が発見された<sup>7)</sup>. 彼の用いたのは, フランス・オートプロバンス天文台の1.9 m 望遠鏡である. 以来, ドップラー法による系外惑星探査が, 世界のさまざまなグループにより進められてきている. この手法は高分散分光器を必要とするため, 突発天体の場合よりも大きな口径の望遠鏡を必要とする. だが, 近傍の明るい恒星にターゲットを絞ることによって, 1-2 mの望遠鏡

も複数活躍している.

惑星が恒星の前を通過 (トランジット) するときの恒星の減光を捉えるのがトランジット法である. 最初の系外惑星のトランジットは1999年に検出された<sup>8)</sup>. トランジットによる恒星減光は非常に僅かなものであるが, 明るい恒星をターゲットとすれば小口径望遠鏡でも十分検出可能である. このため, 小口径望遠鏡を多数並べた広視野探査プロジェクトもいくつか走っている.

背景の恒星の前を恒星が通過すると, 重力マイクロレンズ効果により背景星が増光して見える. 通過する恒星が惑星を伴っていた場合, その惑星によってさらにマイクロレンズ効果が起こり背景星増光の鋭いピークとなって観測される<sup>9)</sup>. このようにして系外惑星を検出するのがマイクロレンズ法だが, マイクロレンズによる増光幅は非常に大きいため, 中小口径望遠鏡で十分検出できる.

問題となるのは集光力ではなく視野と観測頻度である。現在活躍しているのはOGLE, MOAといったプロジェクトであり(表1参照), いずれも1-2 m級望遠鏡である。

### 2.3 時間領域天文学の新たなテーマ: 重力波の電磁波対応天体探査

アインシュタインによって予言された重力波は、時空の歪みが光速で伝播する現象である。重力波の存在は中性子星連星の軌道周期減少から間接的に証明されているが、直接検出はまだなされていない<sup>\*4</sup>。しかし、建設中の最先端の重力波望遠鏡(アメリカのAdvanced LIGO<sup>10)</sup>, ヨーロッパのAdvanced Virgo<sup>11)</sup>, 日本のKAGRA<sup>12)</sup>)は中性子星の連星合体による重力波であれば、100-200 Mpcの距離まで検出できるとされており、これらの装置が完全に立ち上がった後は年間複数の重力波が直接検出できる可能性がある。重力波の直接検出は、一般相対性理論の検証であるのみならず、強重力場での物理を探る手段を与え、ひいては重力波天文学を創設する第一歩である。

重力波の電磁波対応現象の探索<sup>\*5</sup>は、重力波を発生する天体現象を特定し、物理メカニズムに迫るために極めて重要である。重力波望遠鏡のイベント位置決定精度は100平方度を超える大きなものである。このような大きな位置誤差範囲を探査して変動天体を発見するには、たいへん広い視野をもつ望遠鏡・観測装置が必要となる。また、多地点・多波長観測も必須である。

LIGO/Virgo チームは、2013年に世界中の天体

観測研究施設に呼びかけ、重力波の電磁波対応現象の追跡観測のコンソーシアムを立ち上げた<sup>\*6</sup>。これには2015年11月現在、電波からガンマ線まで、70を超える研究グループが参加をしている。このうち、約4割が光赤外線の中小口径望遠鏡を中心としたグループである。Advanced LIGOは、2015年9月に最初の本格運用を開始しており、その電磁波追跡観測も動き出している。

### 3. これからの光赤外線中小口径望遠鏡

中小口径望遠鏡は、時間領域天文学に大きな役割を果たしている。前章で挙げた例以外にも、周期的、あるいは準周期的変動を示すさまざまな天体の探査・モニター観測も中小口径望遠鏡を用いて精力的に行われている。

一方、時間領域天文学の発展に伴い、大口径望遠鏡もこの分野に次々と投入され、LSSTに代表されるような大口径専用望遠鏡すら登場するようになってきた。こうした情勢にあって、中小口径望遠鏡が向かうべき方向について、考えてみる。

#### 3.1 多地点連携と多モード観測

時間領域天文学を追求する以上、多地点連携は必須である。表1はそのことを如実に示している。複数のプロジェクトが世界の多地点に望遠鏡を置いて、連携観測を実施していることがわかる。

同時に多モード連携も重要となる。もはや、一台の望遠鏡で時間領域天文学を進めていくのは難

<sup>\*4</sup> 2015年10月時点。

<sup>\*5</sup> すばる望遠鏡のHyper Suprime-Cam (HSC)<sup>13)</sup>は、視野と感度の総合力において現在最も強力な広視野撮像カメラであり、この分野では決定打となると期待されている。しかし、すばるは汎用望遠鏡のためHSCが装着されている時期は限られており、多くの時間を重力波対応天体探査に割くことはできない。一方、重力波天体からの電磁波放射の性質や明るさ、継続時間等については多くの理論的考察はあるものの、いまだよくわかっていない。したがって、できるだけ広いパラメーター空間で探査を行う必要があり、HSCを含めた大口径望遠鏡と中小口径望遠鏡は連携して相補的に現象を探査・追跡することが肝要である。

<sup>\*6</sup> 日本の光赤外線観測グループは、このコンソーシアムに参加するため、J-GEM (Japan Gravitational wave Electro-Magnetic follow-up) プロジェクトを立ち上げ、2014年にLIGO/Virgo チームと研究協力協定 (MOU) を結んだ。J-GEMには現在、国内の複数の中小口径望遠鏡と、日本の大学が海外に設置している望遠鏡が加盟している。

しくなっている。中小口径望遠鏡が機動性に優れるとは言え、昨今の時間領域天文学の進展により、その相手とする現象のタイムスケールは多岐にわたっている。そして、単一の観測手段で得られる情報は限られており、そうした観測から現象の深い物理に迫ることは難しい。短い時間変動はなるべく多くの観測モードで同時に観測することが物理の理解を深める。日-月といったタイムスケールの変動現象においては、全地球を網羅した観測ネットワークが重要となる。変動が予測できない、いわゆる突発現象・突発天体の観測においても、全地球的監視網が必要である。

### 3.2 多波長連携

中小口径望遠鏡の特質はその機動性にある。高エネルギー天体現象は一般に速い時間変動を示し、素早い観測が必要である。また、X線やガンマ線といった高エネルギー電磁波を放射する天体は、シンクロトロン放射や逆コンプトン散乱などを主たる放射機構としているものが多く、幅広いスペクトル範囲の放射を行っている。こうした現象・天体の中には、中小口径望遠鏡で十分観測できるほど明るくなるものも少なくない。中小口径望遠鏡の機動力が生かされる分野である。

ただし、すでに世界中で走っている多数のロボット望遠鏡(表1)ネットワークの存在を考えると、これからは機動的な2 mクラス以上の望遠鏡が重要となってくると思われる。高赤方偏移天体や激しく減光を受けている天体などの詳細観測は、大口径望遠鏡を動員する必要がある。中小口径望遠鏡は、その機動力に重点を置き、電波からガンマ線に至るまでの多波長連携観測を進めるべきであろう。

### 3.3 専用化

年を超えるような長期の時間変動では、継続が重要となる。現在、岡山天体物理観測所の188 cm望遠鏡を中心に東アジアの2 mクラスの望遠鏡を用いて成果を上げている、系外惑星のドップラー探査(EAPSN<sup>et</sup>)<sup>14)</sup>は良い例である。

このようなプロジェクトを推進するには望遠鏡の専用化が必要となる。

中小口径望遠鏡が活躍するのは、時間領域天文学だけではない。大望遠鏡ではカバーしきれないサーベイ観測にも威力を発揮する。

SDSS (Sloan Digital Sky Survey)<sup>15)</sup>は、口径2.5 mの専用望遠鏡を用いて、大規模測光サーベイおよび分光サーベイを行った。初期の銀河サーベイが終了した後は、いくつかのサイエンストピックに焦点をあてた複数のサーベイを並行して走らせており、現在はSDSS-IVとして、銀河考古学のAPOGEE-2、宇宙論のeBOSS、近傍銀河の面分光サーベイのMANGAの三つのサーベイが走っている。SDSSの望遠鏡は中口径であるが、7平方度という広視野を活かして少数のプロジェクトに集中投資することによって大きな成果を上げ続けている。

偏光サーベイもこれからは重要となってくる。偏光は、天体の幾何学的構造や磁場構造を明らかにするための重要な情報をもたらす。しかしながら、光赤外線の分野では、広い視野をもつ偏光観測装置を制作するのは容易ではなく、これまで大規模な偏光天体サーベイは行われてこなかった。このため、全天にわたる光赤外線偏光情報は極めて限られており、不均一である。大口径望遠鏡用に広視野偏光観測装置を作るには、技術的な困難が数多くあるため、この分野では中小口径望遠鏡が本質的な役割を果たすであろう。

## 4. ま と め

中小口径望遠鏡によるこれからの光赤外線天文学というテーマについて、思いつくままに書いてみた。中小口径望遠鏡が時間領域天文学に向いているというのは、誰も思いつくことである。実際、世界中で多くの中小口径望遠鏡が時間領域天文学に使用されている。口径に応じたサイエンスアウトプットを最大とするため、特殊化、専用化も進んでいる。専用化を進めることで、偏光サー

ベイなど、大口径望遠鏡では実施が難しい観測研究も展開することができる。

時間領域天文学について言えば、これからは多地点連携、多波長連携をよりいっそう進め、中小口径望遠鏡の機動性と柔軟性を生かしたプロジェクトを進めていくべきであろう。また、時間軸方向の幅広いスペクトルを観測し、10年20年といった息の長い観測を推進することもこのクラスの望遠鏡の役割である。また、本文では触れなかったが、萌芽的な研究の推進（新しいアイデアを思いついたらすぐに実行）、観測装置開発、教育などに中小口径望遠鏡が果たす役割は大きい。

日本には現在多くの口径2 m以下の光赤外線望遠鏡があり、冒頭に述べたとおり、そのうちのいくつかは大学間連携という形で具体的な教育研究連携を行っている。それぞれの望遠鏡は各機関の教育研究に活用され、独自のサイエンスを展開するとともに、単独では推進できない時間領域天文学を着実に進めてきている。これから、京都大学の3.8 m望遠鏡<sup>16)</sup>、東京大学のTAO望遠鏡<sup>17)</sup>などがこれに加わる。また、既存の望遠鏡での装置開発も進められている。これらによって、口径、視野、観測機能だけでなく、多地点化という意味でも日本の中小口径望遠鏡群は幅広いスペクトルをもつことになる。今後、各機関の連携をいっそう進め、日本の中小口径望遠鏡群が、その機動力を生かした時間領域天文学の拠点となることを期待したい。そして、世界的なネットワークの一員として重要な地位を占めていくことを望む。

最初に述べたとおり、天文学は時間的にも空間的にも幅広い対象を扱う学問である以上、その推進の方策は一通りではない。対象のスケールに応じて、研究のスタイルも、求められる観測装置の規模も多様である。本稿ではあえて中小口径望遠鏡に的を絞ったが、この多様性を認識しつつ大小連携しながらサイエンスを行うことこそ本来の道であることは言うまでもない。

## 参考文献

- 1) 関口和寛, 2015, 天文月報 109, 85
- 2) <http://www.lsst.org/>
- 3) Groot P. J., et al., 1997, IAU 6584
- 4) Atwood W. B., et al., 2009, ApJ 697, 1071
- 5) 大杉節, 他, 2011, 天文月報 104, 530
- 6) Villata M., et al., 2002, A&A 390, 407
- 7) Mayor M., Queloz, D., 1995, Nature 378, 355
- 8) Charbonneau D., et al., 2000, ApJ 529, L45
- 9) Bond I. P., et al., 2004, ApJ 606, L155
- 10) Aasi J., et al., 2015, Class. Quantum Grav. 32, 074001
- 11) Acernese F., et al., 2015, Class. Quantum Grav. 32, 024001
- 12) Aso Y., et al., 2013, Phys. Rev. D 88, 043007
- 13) <http://subarutelescope.org/Projects/HSC/>
- 14) Sato B., 2014, IAU Symp. 293, 1
- 15) York D. G., et al., 2000, AJ 120, 1579
- 16) <http://www.kuastro.kyoto-u.ac.jp/psmt/>
- 17) <http://www.ioa.s.u-tokyo.ac.jp/TAO/>

### Optical-Infrared Astronomy with Small- and Mid-Sized Telescopes Michitoshi YOSHIDA

*Hiroshima Astrophysical Science Center,  
Hiroshima University, 1-3-1 Kagamiyama,  
Higashi-Hiroshima, Hiroshima 739-8526, Japan*

Abstract: Small- and mid-sized telescopes have potential to produce significant results in optical-infrared astronomy by investing their observing time exclusively to well-designed science projects in spite of their inferior observational capabilities relative to large aperture telescopes. In particular, time-domain astronomy, which is one of the most rapidly evolving research fields, fits the flexibility and quick response of small- and mid-sized telescopes very well. Various short time scale transients and long term variable phenomena are suitable targets for those telescopes. Small- and mid-sized telescopes would also play important roles in various survey observations which are not easy to be performed with large telescopes.