TMT時代のすばる望遠鏡

吉田 道利

国立天文台ハワイ観測所 (650 North A'ohoku Place, Hilo, Hawaii 96720, U.S.A.)

Subaru Telescope in Thirty Meter Telescope (TMT) Era

Michitoshi YOSHIDA

Subaru Telescope, National Astronomical Observatory of Japan, 650 North A'ohoku Place, Hilo, Hawaii 96720, U.S.A.

(Received March 11, 2018)

The Subaru telescope, which is operated by National Astronomical Observatory of Japan, is an 8.2 m optical-infrared telescope at the 4,200 m summit of Maunakea, Hawaii. Its wide-field observation capability and high angular resolution make the telescope unique and one of the most powerful devices in the world. In the TMT era, wide-field capability will be particularly critical and a key characteristic of Subaru and will complement TMT's ultra-high sensitivity.

Key Words: Optical infrared astronomy, Telescope, Wide-field observation, Adaptive optics

1. はじめに

すばる望遠鏡は、アメリカ合衆国ハワイ州ハワイ島のマウナケア山頂(標高4,200 m)に設置されている、国立天文台の口径8.2 mの光学赤外線望遠鏡である¹²⁾。その建設は1991年に開始され、1999年に完成しファーストライトを迎えた。科学運用・共同利用観測は2000年より始まり、本稿執筆現在まで順調に観測を続けている。すばる望遠鏡の運用は、1998年にハワイ州ヒロ市に設立された国立天文台ハワイ観測所が担っている。

すばる望遠鏡の特徴は、他の8-10 m級望遠鏡にはない広視野の観測能力と高い解像力である。TMT時代においては、特に、すばる望遠鏡の広視野観測能力が一つのキーとなると考えられる。本稿では、すばる望遠鏡の現状を概観するとともに、TMT時代にすばる望遠鏡の果たす役割について述べる。

2. すばる望遠鏡の概要

すばる望遠鏡の外観をFig. 1 に、諸元をTable 1, 2に示す。心臓部である主鏡は、有効径8.2 m、厚み20 cmの薄メニスカス形状の一枚鏡である。主鏡面は、平方根自乗平均形状誤差12 nmである。口径に比して非常に薄い(アスペクト比41)主鏡は、261本のアクチュエータで動的に支持されている。アクチュエータに装着された力センサを用いたフィードバック制御によって主鏡形状を保つ。TMTは分割鏡を位置制御して主鏡を支えるのに対して、すばる望遠鏡は力制御による主鏡支持である。

全体の光学系は、リッチークレチアン系であり、主焦点(F/1.83)、カセグレン焦点(F/12.2)、左右二つのナスマイス焦点(F/12.6)の4つの焦点を持つ¹⁾。主焦点については、超広視野主焦点カメラHSC用の広視野補正レンズによって直径1.5度の視野にわたって結像性能0.4秒角以下を得ている。このときのF比はF/2である。

Fig. 1 Schematic of the telescope structure of the Subaru telescope.¹⁾

Table 1 Specifications of the primary mirror.

Effective diameter	8.2 m
Thickness	20 cm
Weight	22.8 tons
Material	ULE (Ultra-Low thermal Expansion glass)
Focal length	15 m

Table 2 Specifications of the telescope mount.

Mounting	Altitude-azimuth
Optics	Ritchey-Cretien System
Height	22.2 m
Weight	555 tons
Maximum slewing speed	0.5 deg/sec
Open tracking accuracy	0.1 arcsec
Blind pointing accuracy	< 1.0 arcsec

3. 観測装置

3.1 概要

すばる望遠鏡では、2018年現在、以下の6つの共同利用観測装置を運用しており、光赤外線波長域でさまざまな観測要求に対応している。

- 可視光観測装置
 - ・超広視野主焦点カメラ HSC³⁾
 - ・微光天体分光撮像装置FOCAS⁴⁾
 - ・高分散分光器HDS⁵⁾
- 赤外線観測装置
 - ・多天体近赤外線撮像分光装置MOIRCS⁶⁾
 - ・近赤外線分光撮像装置IRCS⁷⁾
 - ・冷却中間赤外線分光撮像装置COMICS⁸⁾

ナスマス焦点には補償光学装置AO188⁹⁾が装備され、レーザーガイド星を用いた大気揺らぎ補正を行う機能を持つ。

上述の通り、すばる望遠鏡の特徴は他の大望遠鏡にはない広視野観測能力と高い解像度にある。以下では、この特徴をフルに活かした装置として超広視野主焦点カメラHSCと補償光学装置を取り上げる。

3.2 超広視野主焦点カメラHSC

超広視野主焦点カメラHSC(Hyper Suprime-Cam)は(Fig. 2)、すばる望遠鏡の主焦点に装着され、およそ直径1.5度(1.75平方度)の視野を観測できる可視光カメラである³⁾。5枚のレンズに大気分散補正系を組み合わせた広視野補正光学系、フィルタ交換機構および検出器部からなり、検出器部には2000×4000画素の完全空亡型CCDが104枚並べられている。このCCDは国立天文台が浜松ホトニクス社と共同で開発したものであり、波長0.35 μmから1.1 μmまでの可視光に感度を持ち、最大量子効率は95%以上、0.55 μmから0.9 μmまでの波長域

Fig. 2 Schematic of HSC.

にわたって80%以上の量子効率を持つ。CCDの有感波長域をカバーするg, r, i, z, yの5枚の広帯域フィルタと、帯域幅0.01 μm程度の10数枚の狭帯域フィルタが用意されている。

HSCは、望遠鏡も含めた総合的な結像性能として、視野全面に渡って星像サイズ(FWHM)が0.4秒角以下という値を得ている。点光源に対する限界等級(1時間積分, 5σ検出限界)は、gバンド(波長約0.5 μm)で27.8等級、iバンド(波長約0.76 μm)で26.5等級である。

HSCはその広視野撮像能力を活かして、遠方銀河探索、重力レンズ探索、近傍銀河の広域観測、太陽系小天体探索など、幅広い可視光天文学分野の研究に使用されている。2018年現在、HSCを用いた大規模サーベイプロジェクトとして、HSC SSP(Subaru Strategic Program: SSP)が進行中である。HSC SSPは、5年間にわたり、すばる望遠鏡の観測時間を300夜使用して、wide survey(1,400平方度)、deep survey, ultra deep surveyの3種類のサーベイ観測を組み合わせて、広く深く宇宙を探索する観測計画である。wide, deep, ultra deepのサーベイ限界等級はgバンドでそれぞれ、26.5等級、27.5等級、28.1等級である。HSC SSPは2014年からスタートし、2019年に観測終了予定である。

3.3 補償光学装置

すばる望遠鏡の標準的な補償光学装置は、188素子の可変形鏡を波面補正に用いたAO188である(Fig. 3)^{9,10)}。また、ナトリウムレーザーによるレーザーガイド星システムも装着されている。

AO188に対応した共同利用観測装置はIRCSであり、近赤外域(波長2 μm)でストレール比0.3程度の解像度で

Fig. 3 Optical layout of AO188.¹⁰⁾

観測を行うことができる。AO188の後段には、持ち込み装置として極限補償光学SCExAO (Subaru Coronagraphic Extreme Adaptive Optics)¹¹⁾が装着され運用中である。SCExAOは近赤外域で回折限界に近い解像度を達成しており(ストレール比0.8以上)、これを活用した観測装置として、プリンストン大学が開発したコロナグラフ高解像度撮像分光装置CHARIS¹²⁾が持ち込み装置として機能している。

AO188 + IRCSは、銀河や星形成領域の高解像度観測に盛んに利用されている。SCExAO + CHARISは、その高コントラスト観測性能を活かして、系外惑星探査およびその詳細観測に活用されている。

4. 観測装置開発計画

4.1 赤外線ドップラー分光器IRD

1995年に恒星の視線速度変化を精密に観測する、いわゆるドップラー法により、初めて太陽系外の惑星が発見されて以来、さまざまな観測手法により、4,000個近い系外惑星が発見されてきた。こうした目覚ましい研究の進展の中、宇宙における生命探査に繋がる研究として、地球型の惑星の探査に焦点が当たっている。

赤外線ドップラー分光器IRD (InfraRed Doppler spectrograph)は、赤外線の高分散分光器(波長分解能 $\lambda/\Delta\lambda = 70,000$)にレーザー周波数コムを組み合わせ天体分光データの高精度波長校正を行って、天体の視線速度の超精密測定をする装置である¹³⁾。本稿執筆時点では調整試験中であり、2018年後半より科学運用が開始される。IRDの目指す速度決定精度は1m毎秒であり、この精度で恒星の視線速度変化を観測することで、恒星の周囲を巡る地球型惑星を検出することを目指している。赤外線に特化しているのは、可視光をほとんど放射しない低温で軽い恒星をターゲットとしているからである。恒星自身が軽い、地球程度の質量を持つ軽い惑星でも、

数m毎秒の視線速度変化を引き起こし、IRDで検出することができる。

4.2 主焦点超広視野分光器PFS

主焦点超広視野分光器PFS (Prime Focus Spectrograph)は、すばる望遠鏡の主焦点の視野1.5度 ϕ に配置された約2,400個の開口(光ファイバ端面)に入射した天体光を、ファイバで4つの分光器に導いて同時に分光する装置である(Fig. 4)¹⁴⁾。8-10m級大型望遠鏡では最大の視野と観測多重度(同時に観測できる天体数)を持つ画期的な装置として、遠方銀河から近傍の恒星まで様々な研究分野で活躍することが期待されている。特に、多数の銀河の分光データより、宇宙における銀河の分布とその進化を明らかにして、ダークエネルギーの謎に迫ることがPFSの大きな科学的課題となっている。

PFSは、大規模な国際協力の下に開発を進められている。2018年から徐々にその構成要素がハワイ観測所に到着し、2019年から2020年にかけて組み上げ、すばる望遠鏡への装着、調整・試験観測が行われる予定である。2021年から装置が本格稼働し、共同利用に供されるとともに大規模なサーベイ観測が開始される計画となっている。

4.3 ULTIMATE-Subaru

IRD、PFSに続く次世代の観測装置として、地表大気揺らぎによる解像度の低下を補正し、広視野かつ高解像度の近赤外線観測を実現するプロジェクト、ULTIMATE-Subaruがハワイ観測所を中心として提案されている¹⁵⁾。2026年ごろの完成を目指している。

ULTIMATE-Subaruは、すばる望遠鏡の副鏡全体を可変形鏡とし、大気の地上層の揺らぎを補正する、いわゆる地表層補償光学(Ground Layer Adaptive Optics: GLAO)によって、広い視野にわたって像改善を行う。4つのレーザーガイド星を用いたトモグラフィにより、14分角

Fig. 4 Schematic of PFS. Prime focus instrument (PFI) which has 2,400 fiber positioners called "Cobra" is installed at the prime focus of the Subaru telescope. The field of view of PFI is corrected by the wide field corrector of HSC.

の視野にわたって近赤外線では0.2秒角以下の結像性能を達成する。ULTIMATE-Subaruの観測視野は、MOIRCSの4倍であり、近赤外線波長域では世界の他の8-10 m級望遠鏡の観測装置の中では最大となる。

5. TMT時代のすばる望遠鏡の戦略

5.1 TMTとすばる望遠鏡

口径30 mのTMTは、集光力がすばる望遠鏡の約13倍ある。望遠鏡の口径で決まる回折限界は、すばる望遠鏡の3.6分の1であり、補償光学が完全に機能した場合は、TMTの限界等級はすばる望遠鏡より3等近く深くなることが予想される(点光源の場合)。このような圧倒的な観測性能の差のために、遠方宇宙や微光天体の観測、高解像度・高コントラスト観測などの分野においては、すばる望遠鏡はTMTに到底太刀打ちすることはできない。特に、個別天体の分光観測に関しては、TMTの大きな集光力が新しい地平を切り拓くであろう。

しかしながら、望遠鏡の性能は単に暗いものを高解像度で観測できる能力だけで測れるものではない。広い天域を掃くサーベイ撮像観測においては、サーベイ観測能力、いわゆるetendue($A\Omega$ = 望遠鏡集光面積 × 視野)と呼ばれる指標が重要となる。Table 3に代表的な広視野望遠鏡のetendueを示す。TMTでは広視野可視分光器WFOSの視野が約40平方分と設計されている。仮にこの視野を一度に撮像できたとしても、TMTのetendueは25程度であり、すばる望遠鏡HSCの93.5にはるかに及ばない。

etendueの観点からは、現在建設中のLSST(Large Synoptic Survey Telescope; 2023 年観測開始予定)¹⁶⁾が圧倒的な性能を誇るが、LSSTは南米チリに建設されており、TMTが建設される北半球においては、HSCに勝る観測装置計画は本稿執筆現在では存在しない。さらには、LSSTは可視光の撮像能力しか持たないが、PFS、ULTIMATE-Subaruといった観測装置計画が実現すれば、すばる望遠鏡は広視野分光観測能力および広視野近赤外線観測能力を持つことになる。これらの能力は、LSSTと相補的である。

5.2 TMT時代のすばる望遠鏡の役割と価値

TMT時代にあっては、すばる望遠鏡はその広視野観測能力を活かして、TMTではできない観測研究を推進していくことが使命となる。前節で述べたように、サー

ベイ能力においては、すばる望遠鏡はTMTを遥かに凌いでいる。したがって、広い視野の撮像・分光観測を中心に据え、TMTで詳細観測を実施すべきターゲットを探索していくことが、すばる望遠鏡の主たる役割となろう。このような動向を見据えて、ハワイ観測所ではTMT完成までのすばる望遠鏡の装置整備プランを策定している(Fig. 5)。TMT完成までに、多様な観測モードを実現する現在の観測装置群を段階的に整理し、HSC、PFS、ULTIMATE-Subaruを中心とした広視野観測機能に重心を移していく。

TMT時代のすばる望遠鏡の役割として、時間領域天文学(Time Domain Astronomy: TDA)およびそれに深く関連のあるマルチメッセンジャー天文学は極めて大きな位置を占めることとなろう。TDAは宇宙における各種の時間変動現象を研究する分野であり、超新星爆発、ガンマ線バーストといった激しい爆発現象から、系外惑星の恒星表面通過現象まで、さまざまなエネルギースケールと時間スケールを扱う。近年、重力波源の電磁波追跡観測の成功¹⁷⁾を受け、電磁波のみならず、重力波や粒子観測まで含めたマルチメッセンジャー天文学が注目を集めているが、その対象となる現象は、ブラックホール合体や中性子星合体といった激しい時間変動を伴う。こうした現象はいつどこで起きるか全く予測不可能なため、その探索と追跡には、機動性に富む広視野観測装置が必要となり、特に現象の初期段階の迅速な観測は、TMTには困難であることが予想される。TMT時代のすばる望遠鏡には、その広視野観測能力を活かし、現在よりも機動的な運用体制を敷いて、TDAおよびマルチメッセンジャー天文学を強力に推進し、TMTとの相補的役割を果たすことも期待される。

TMT時代において、単にTMTのターゲット選択をするに留まらず、TMTでカバーできない幅広い研究分野を推進していくために、8-10 m級の広視野望遠鏡の重要性はますます高まると思われる。このことは、8-10 m望遠鏡時代にあって、世界の4 m級望遠鏡が果たしている役割を見れば明らかである。現在、多くの4 m望遠鏡が広視野観測能力を備え、大規模なサーベイ観測を実施している。そして、8-10 m望遠鏡を凌ぐような科学的成果を挙げている。TMT時代のすばる望遠鏡の姿を、今の4 m級望遠鏡の活躍に重ねて見ることは、あながち、穿ちすぎた見方ではないであろう。

Table 3 Etendue of wide-field observation facilities.

Telescope Instrument	Aperture (m)	FOV (deg ²)	Etendue (m ² deg ²)
CFHT MegaCam	3.5	0.9	8.7
Pan-STARRS 1	1.8	7.0	17.8
DES	4.0	3.0	37.7
ZTF	1.2	35.0	39.6
Subaru HSC	8.2	1.77	93.5
LSST	6.7	9.6	338.5

Fig. 5 Instrumentation plan of the Subaru telescope.

6. まとめ

すばる望遠鏡は、現在、多様な観測装置を備え、それらを用いて、太陽系から遠方銀河、宇宙論に至るまで、最先端の光赤外線観測研究が進められている。すばる望遠鏡の広視野観測能力は、他の8-10 m望遠鏡にはない特徴であり、しかもそれを高い解像力で実現している。TMTの活躍する時代には、すばる望遠鏡の広視野観測能力は、TMTのサイエンスを支え、TMTによる詳細観測・深宇宙探査と相補的な役割を果たすとともに、TMTでは実現が困難な観測テーマを推進していくためのキーとして、ますますその存在感および重要性を増すであろう。

参考文献

- 1) M. Iye, H. Karoji, H. Ando, N. Kaifu, K. Kodaira, K. Aoki, W. Aoki, Y. Chikada, Y. Doi, N. Ebizuka, *et al.*: Publ. Astron. Soc. Jpn. **56** (2004) 381.
- 2) N. Kaifu, T. Usuda, S. Hayashi, Y. Itoh, M. Akiyama, T. Yamashita, Y. Nakajima, M. Tamura, S. Inutsuka, M. Hayashi, *et al.*: Publ. Astron. Soc. Jpn. **52** (2000) 1.
- 3) S. Miyazaki, Y. Komiyama, S. Kawanomoto, Y. Doi, H. Furusawa, T. Hamana, Y. Hayashi, H. Ikeda, Y. Kamata, H. Karoji, *et al.*: Publ. Astron. Soc. Jpn. **70** (2018) S1.
- 4) N. Kashikawa, K. Aoki, R. Asai, N. Ebizuka, M. Inata, M. Iye, K. S. Kawabata, G. Kosugi, Y. Ohyama, K. Okita, *et al.*: Publ. Astron. Soc. Jpn. **54** (2002) 819.
- 5) K. Noguchi, W. Aoki, S. Kawanomoto, H. Ando, S. Honda, H. Izumiura, E. Kambe, K. Okita, K. Sadakane, B. Sato, *et al.*: Publ. Astron. Soc. Jpn. **54** (2002) 855.
- 6) R. Suzuki, C. Tokoku, T. Ichikawa, Y. K. Uchimoto, M. Konishi, T. Yoshikawa, I. Tanaka, T. Yamada, K. Omata and T. Nishimura.: Publ. Astron. Soc. Jpn. **60** (2008) 134.
- 7) N. Kobayashi, A. T. Tokunaga, H. Terada, M. Goto, M. Weber, R. Potter, P. M. Onaka, G. K. Ching, T. T. Young, K. Fletcher, *et al.*: *Proc. SPIE* **4008** (2000) 1056.
- 8) H. Kataza, Y. Okamoto, S. Takubo, T. Onaka, S. Sako, K. Nakamura, T. Miyata and T. Yamashita: *Proc. SPIE* **4008** (2000) 1144.
- 9) Y. Hayano, H. Takami, O. Guyon, S. Oya, M. Hattori, Y. Saito, M. Watanabe, N. Murakami, Y. Minowa, M. Ito, *et al.*: *Proc. SPIE* **7015** (2008) 10.
- 10) Y. Hayano, H. Takami, S. Oya, M. Hattori, Y. Saito, M. Watanabe, O. Guyon, Y. Minowa, S. E. Egner, M. Ito, *et al.*: *Proc. SPIE* **7736** (2010) 21.
- 11) N. Jovanovic, F. Martinache, O. Guyon, C. Clergeon, G. Singh, T. Kudo, V. Garrel, K. Newman, D. Dougherty, J. Lozi, *et al.*: Publ. Astron. Soc. Pacific **127** (2015) 890.
- 12) T. Groff, J. Chilcote, T. Brandt, N. J. Kasdin, M. Galvin, C. Loomis, M. Rizzo, G. Knapp, O. Guyon, N. Jovanovic, *et al.*: *Proc. SPIE* **10400** (2017) 16.
- 13) T. Kotani, M. Tamura, H. Suto, J. Nishikawa, B. Sato, W. Aoki, T. Usuda, T. Kurokawa, K. Kashiwagi, S. Nishiyama, *et al.*: *Proc. SPIE* **9147** (2014) 14.
- 14) N. Tamura, N. Takato, A. Shimono, Y. Moritani, K. Yabe, Y. Ishizuka, A. Ueda, Y. Kamata, H. Aghazarian, S. Arnouts, *et al.*: *Proc. SPIE* **9908** (2016) 1M.
- 15) Y. Hayano, M. Akiyama, T. Hattori, I. Iwata, T. Kodama, O. Lai, Y. Minowa, Y. Ono, S. Oya, K. Takiura, *et al.*: *Proc. SPIE* **9148** (2014) 2S.
- 16) Z. Ivezić, J. A. Tyson, B. Abel, E. Acosta, R. Allsman, Y. AlSayyad, S. F. Anderson, J. Andrew, R. Angel, G. Angeli, *et al.*: arXiv 0805.2366 (2008).
- 17) B. P. Abbott, R. Abbott, T. D. Abbott, F. Acernese, K. Ackley, C. Adams, T. Adams, P. Addesso, R. X. Adhikari, V. E. Adya, *et al.*: *Astrophys. J. Lett.* **848** (2018) L12.