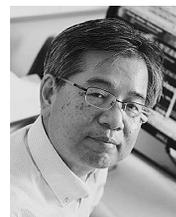


TMTの観測装置と日本の計画

高見 英 樹

〈国立天文台 〒181-8588 東京都三鷹市大沢2-21-1〉

e-mail: takami.hideki@nao.ac.jp



TMT望遠鏡では、望遠鏡建設の一環として観測開始時から稼働する3台の観測装置の製作が決定している。これら3台は、広視野可視撮像分光装置（WFOS）、近赤外撮像分光装置（IRIS）、赤外多天体撮像分光装置（IRMS）であり、TMT参加メンバーによる国際共同開発となる。このうち日本は、IRISの撮像系と、WFOS分光器のカメラ部を担当する。また、同時にこれらの赤外線観測装置のための共通の補償光学系（NFIRAOS）も開発されつつある。TMTでは、この3台に続いて望遠鏡の運営経費などを使って観測装置を2-3年に1台ずつ順次製作する予定であり、これらのうちいくつかは日本が開発をリードすることを目指して、大学が中心となり基礎開発を行いつつある。

1. はじめに

TMTはハワイ州マウナケア山頂に建設される口径30 mの光学赤外線望遠鏡で、日本、米国、カナダ、中国、インドの国際共同プロジェクトである。現在の世界最大級の望遠鏡は、すばる望遠鏡8.2 mやKeck望遠鏡10 mである。これまで1949年にパロマ山に5 m望遠鏡が建設され、以降、1980年代までは4 m級が主力であり、8-10 m級が建設されたのが1990年代であったことを考えると口径30 mの望遠鏡の建設は極めて大きなジャンプであり、それに伴って大幅な観測性能向上が期待できる。観測性能の向上は、すばる望遠鏡と比較すると、鏡の面積で14倍、回折限界の角度分解能では4倍となり、点源の天体に対する観測効率は200倍にもなる。

地上望遠鏡の有利な点は、観測装置を科学、技術の進歩に合わせて新しくしていけることである。また、人工衛星に搭載する装置と比較すると、より最先端の技術にチャレンジできること、大型の装置を搭載できること、などの魅力がある。

この望遠鏡の性能を十分に発揮するために、TMTとしては次のような観測装置を計画している。

2. 第一期観測装置

TMTでは2006年に行われた観測装置についての検討で、9台の装置が重要な装置として提案された。その中から、望遠鏡の観測開始時に必要な装置、第一期装置として、まず3台の観測装置（可視装置1台、赤外線装置2台）、および赤外線回折限界の角度分解能を達成する補償光学系を1台製作する¹⁾（表1）、図1。以下に個々の詳細を述べる。

2.1 広視野可視撮像分光装置（WFOS）

これは広い視野で多数の天体を同時にスリット分光と撮像ができる装置であり、すばる望遠鏡におけるFOCASを発展させたようなものである。補償光学を使わないシーイングリミットの装置である。当初カリフォルニアが中心となり検討を進めてきたが、現在日本、米国、中国などによる共同プロジェクトとなり、日本は分光器のカメラ部

表1 TMT 第一期観測装置と補償光学系.

装置名	補償光学	波長分解能	視野	天文学の目標, 他
近赤外撮像分光装置 (IRIS)	第一期 AO NFIRAOS	4,000-10,000	34 秒角	銀河形成, BH・AGN, 球状星団, 太陽系天体, 系外惑星など
広視野可視撮像分光装置 (WFOS)	なし (可変副鏡)	1,000-8,000	8.3×3 分角	高 z 銀河間物質, 高 z 銀河分光, 星の種族, 化学組成など
近赤外多天体分光装置 (IRMS)	NFIRAOS	3,270-4,660	2.3 分角	近赤外最微光天体, JWST 宇宙望遠鏡フォローアップ
共用補償光学系 (NFIRAOS)	—	—	2.3 分角	波長 0.9-2.5 μm , 回折限界 30 秒角視野

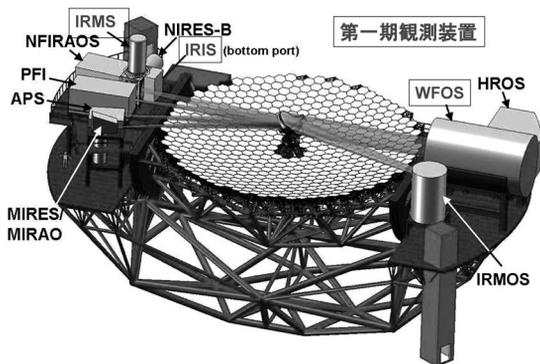


図1 TMTの観測装置配置図.

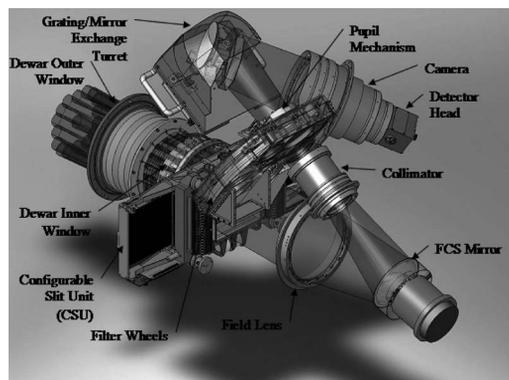


図3 IRMSと同じ設計であるKeck望遠鏡搭載のMOSFIREの光学系配置 (UCLA).

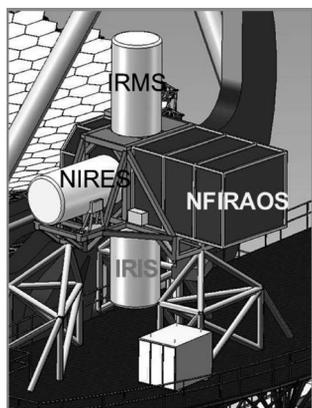


図2 補償光学装置 (NFIRAOS) に取り付けられる観測装置, IRIS, IRMS など.

分を担当する予定となっている。これについては、
 本月報の別の記事 (尾崎) で詳細な報告がある。

2.2 近赤外撮像分光装置 (IRIS)

これは、赤外域で比較的狭い視野 (34 秒角)

で、補償光学系をフルに効かせて、0.01-0.02 秒角という極めて高い分解能で、分光、撮像観測をする装置である (図2)。また、30 μ 秒角というこれまでにない精度のアストロメトリ観測も目指している。この装置については、米国、カナダとの共同開発のなかで、日本はカメラ光学系を担当しており、現在国立天文台が中心となって開発を進めている。これについては、本月報の別記事 (鈴木) で詳細報告がある。

2.3 近赤外多天体分光装置 (IRMS)

この装置は近赤外域で比較的広い視野において多天体の分光を行うために計画され、Keck 望遠鏡の装置である MOSFIRE のコピーを作り、TMT に取り付ける (図3)²⁾。MOSFIRE は、高い効率で波長域 0.9-2.45 μm をカバーし、波長分解能 3,270-4,660 で 46 天体を同時にスリット分光す

るものであり、Keck望遠鏡において6.1分角という広視野を有する。これをTMTに用いると視野2.3分角となるが、NFIRAOSに取り付けることにより、回折限界の解像度は得られないもの全視野にわたって0.2秒角程度の解像度が得られ、近～遠方の銀河進化の研究、JWSTのフォローアップなどが期待される。これによって、新たな技術開発の経費を節約し、ファーストライト時に多天体分光観測を行うことができる。

2.4 TMT装置の特徴

TMTの観測装置の配置には新しい工夫がある。観測装置はナスミス焦点に設置される。ナスミス焦点では、大型の観測装置が設置できる、観測装置がの姿勢が変わらないなどのメリットがあるが、これまでのナスミス焦点の観測では、装置を切り替えるためには観測装置を動かさなければならず、キュー観測のような機動的な観測が困難であった。

TMTでは、望遠鏡の第三鏡の角度をナスミス台の水平方向に変えることによって、観測装置を動かさずに極めて短時間で切り替える方法をとっている(図1)。その代わりに、望遠鏡の向いている方向が変わるとともに、第三鏡の角度を連続的に制御しなければならないが、それはTMTに要求される技術のなかではそれほど困難ではない。

3. 補償光学系 (NFIRAOS)

TMTでは、口径が大きくなることによって回折限界分解能が向上するが、その分大気揺らぎの影響がより深刻となる(図4)。

そのため、赤外線観測用には常時補償光学系によって大気揺らぎを補正することが必須となり、TMTとしては観測開始から使用する共用の補償光学系(NFIRAOS)をもち、3台の観測装置を取り付けられるように計画している³⁾。

NFIRAOSは、可変形鏡として地表付近の揺らぎを中心に補正する63×63素子のものと、地上11.2 kmの揺らぎを中心に補正する76×76素子

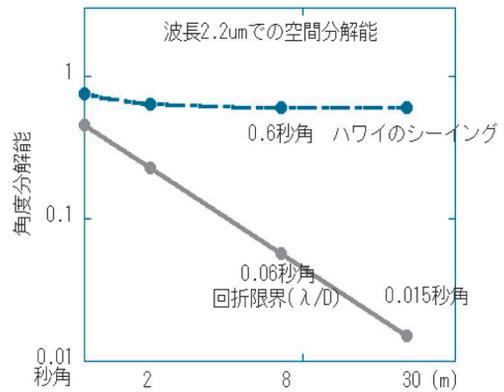


図4 大気揺らぎの影響。望遠鏡の口径が大きくなるほど影響が大きくなる。

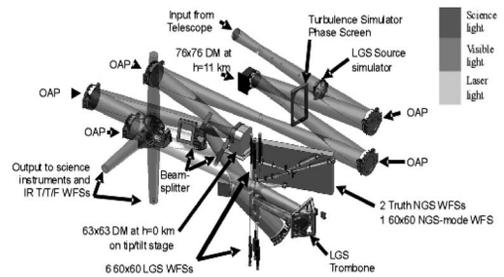


図5 NFIRAOSの光学レイアウト。地表付近の大気揺らぎを補正する63×63素子可変形鏡と、上空11.2 kmを中心に補正する76×76素子の可変形鏡を有し、広視野での補正を可能にしている。光学系全体の大きさは約8 m×6 mある。

のものを使用する。これによって広い視野にわたって回折限界の性能を確保するMulti-Conjugate Adaptive Optics (多共役補償光学)を実現する。大気揺らぎの高さ情報を得るために、上空には七つのレーザーガイド星を作り、それを6台の60×60素子の波面センサーで測定する。これによって低次補正では2.3分角、回折限界性能では30秒角程度の視野を確保できるようになっている(図5)。

また、最低7枚の鏡を通ることになるので、そのままでは鏡が発生する熱雑音のために、赤外線での感度が低下してしまう。それを防ぐために、光学系全体を零下30度に冷却し、装置からの熱放射を望遠鏡+大気の15%以下に抑える。

4. 第二期観測装置

TMTの観測装置は当初は3台からスタートするが、そのあとの第二期装置を順次製作していくことになっている。スケジュールとしては、望遠鏡観測開始の3年後から段階的に2-3年に1台ずつ6台程度を実現していくことが検討されている(表2)。

第一期装置については2006年に開発が決まった段階で、すでに基本仕様や開発をリードする機関が決まってしまうと、日本の研究者は重要な貢献はするものの、装置構想そのものをリードすることはできなかった。第二期装置については、2006年当時にカリフォルニアおよびカナダによって概念検討された装置(6-7台、表2)があるが、それで決定したものにはなっていない。2014年5月にTMT国際天文台が正式に発足したので、参加国・機関で改めて第二期装置の検討を行うこととなっている。このような状況で、日本では2007年ころからTMT国際天文台の発足に先駆けて、大学の研究者が中心となって、国立天文台TMT推進室(当時は準備室)の支援のもと、第二期装置の検討、基礎開発を行っている。現在これらのチームは、その成果を基にカリフォルニ

ア、カナダなどのチームと連携しながら、日本の研究者が対等な形で装置提案、開発を行うような体制を作りつつある。その中で、日本が主導する装置が出てくることを期待している。以下が、現在活発に基礎開発を行っている3装置である。

4.1 中間赤外分光撮像装置 MIRES/MICHI

7-25ミクロン帯の撮像、分光を行う。主としてダストを観測することによって、惑星形成、生命の手がかりを研究する。口径30mにもなると、中間赤外線域でも大気揺らぎの影響が大きく、かつ余分の熱放射を避けるために専用の冷却補償光学系を用いる⁴⁾。

撮像・分光 @7-25 μm

視野: 27.5 \times 27.5"

面分光(波長分解能300-600)

高分散分光(波長分解能60,000-120,000)など

検討チーム: 神奈川大, 茨城大, ハワイ大学, テキサス大など

4.2 近赤外広視野多天体面分光装置 IRMOS/TMT-AGE

遠方の銀河を対象に広い視野(5-10分角)の中にある、多数の天体(20程度)を同時に、波長域1-2.5 μm において回折限界分解能0.02秒角で面分光観測を行うものである⁵⁾。

表2 TMT第二期観測装置案(可変副鏡を含む)。日本のグループが現在検討している仕様を取り入れている。

装置名	補償光学	波長分解能	視野	天文学の目標、他
中間赤外分光撮像 (MIRES/MICHI)	専用冷却AO	300-120,000	30秒角	原始星キネマティクス, 原始惑星系円盤
近赤外回折限界高分散分光 (NIRE-B)	NFIRAOS	5,000-30,000		視線速度によるM型星の惑星検出, 高z銀河間物質
近赤外回折限界高分散分光 (NIRE-R)	NFIRAOS	5,000-30,000		視線速度によるM型星の惑星検出, 高赤方偏移銀河間物質
系外惑星探査 (PFI/SEIT)	専用極限AO	50-300	1秒角	極限補償光学系
可視光高分散分光 (HROS)	なし (可変副鏡)	30,000-50,000	10秒角	局所銀河の星組成, 星間物質組成・運動, 高z銀河間物質, 系外惑星
近赤外回折限界多天体分光器 (IRMOS/TMT-AGE)	専用多天体AO		3秒角IFU 5-10分角をカバー	近赤外最微光天体, JWSTフォローアップ
可変副鏡AO	可変副鏡AO			波長0.31-28 μm

このためには、多天体補償光学系 (MOAO) という技術を開発する。これは、複数のレーザーガイド星によって全視野をカバーする大気揺らぎの立体情報を測定し、その情報を基に観測天体の方向の波面を計算し、それぞれの天体用の狭視野の小型の補償光学系で波面補正・分光観測をするものである。日本では東北大が主としてトモグラフィ技術、小型可変形鏡などの基礎開発を行っている。また、現在カナダと協力してすばる望遠鏡にMOAOのプロトタイプ (RAVEN) を取り付けた観測を行い、試験観測に成功しており、TMTに向けた連携を進めている。

4.3 地球型系外惑星直接撮像装置 PFI/SEIT

星の周りの生命存在可能性がある惑星の直接観測を行う。恒星の明るい光の中にある惑星を検出するために、恒星から0.01秒角離れたところで 10^{-8} 、恒星から0.03秒角離れたところで 10^{-9} のコントラストが要求される。視野は狭く(1秒角)、波長帯は、1-1.7 μm 、低分散の分光器 ($\lambda/\Delta\lambda\sim 100$) を有する⁶⁾。

このコントラストを実現するために必要な技術開発としては、超高速・高精度補償光学系+コロナグラフ技術であり、日本ではSEITという名前で、京大、北大、国立天文台、東大がスタンフォード大、UCSBと連携をとって進めている。

5. 日本のTMT装置開発の戦略

5.1 積極的な開発への参加

第一期観測装置については、基本仕様を検討する段階では日本は参加できていなかったが、これまでのすばる望遠鏡での装置開発における経験、実績を基に、これらのチームの検討に参加し、現在ではIRIS, WFOSについては主要な光学系開発を担うなど、日本が第一期装置開発で重要な役割を果たすようになった。

5.2 国際共同開発

TMTの装置は規模が大きいために、1カ国、1機関だけでは製作が困難になってきており、国

際共同開発が基本である。ただし、参加メンバー間での装置開発に対する考え方や技術レベルの違いがあることから、オーバーヘッドが多く、開発を難しくさせる要因となる。

ただし、これには重要な利点もある。これまでの日本の観測装置開発は自国だけで行う例が多かった。そのために、世界最先端で規模が大きい計画には、なかなか参加できない状況であった。対照的に、ヨーロッパにおけるESO-VLTの装置開発では、複数の国での開発となることによって、一国での人員、予算の規模が大きくなって、VLTの主力装置を担うことができている。今回、TMTのように国際協力による開発が必然となると、否応なしに世界のトップレベルのグループとの協調、競争が必要となり、日本での装置開発グループが力をつけるとともに、国際的な認知度を高めることができるようになることが期待できる。

5.3 国立天文台先端技術センターを拠点とした開発

TMT観測装置開発においては、先端技術センターを拠点とする。現在、IRISとWFOSについてはセンターにTMTプロジェクトの研究スタッフが移るなどして、センターの技術職員とグループを形成し開発を始めている。また、TMT装置開発を行うための新しい実験棟の建設予算が認められ2015年度末に完成する。これによって、大型の装置の組み立て、試験が可能となるとともに、第二期装置の基礎開発、将来の実機製作についてもここで行うことができる。

最後に

観測装置はTMT計画のなかでは最も天文研究者が活躍するところである。まず、サイエンスにおいては、第一期装置といえどもその装置仕様はまだ確定していないところがあり、そこには各装置のサイエンスチームからのインプットが反映される。第二期装置については、何を作るかは第一

義的にはサイエンスによって優先順位が決まる。これから装置を決めていく現在、日本の研究者が積極的に検討に加わることは極めて重要である。

開発においては、すばる望遠鏡などの経験を有する日本の研究者の装置開発力はTMTでは大きな戦力になるのであるが、ここで参加していかなければ、その力を生かし、伸ばしていくことはできない。大型計画への参加は大学院生の教育とタイムスパンが合わないのではどの課題があるが、短期間のプロジェクトとうまく組み合わせることによって、大学院生が世界最高水準のプロジェクトに参加していくという道筋を作っていくべきであろう。

TMT推進室では、研究者が簡単に自身の研究テーマでどの程度の観測ができるかを試せるよう、第一期装置の観測性能をシミュレートするTMT ETCを作成した（本号の記事（橋本）を参照）。まずこれを試していただいて、TMTでの観測、装置の検討の役に立てていただければ幸いです。

参考文献

- 1) Simard L., Crampton D., Ellerbroek B., Boyer C., 2010, Proc. SPIE 7735
- 2) Mobasher B., Crampton D., Simard L., 2010, Proc. SPIE 7735
- 3) Herriot G., et al., 2014, Proc. SPIE 9148
- 4) Packham C., et al., 2012, Proc. SPIE 8446
- 5) Akiyama M., et al., 2014, Proc. SPIE 9148
- 6) Matsuo T., et al., 2012, Proc. SPIE 8446

TMT Instrument Program and Japan's Plan

Hideki TAKAMI

*National Astronomical Observatory of Japan,
2-21-1 Osawa, Mitaka, Tokyo 181-8588, Japan*

Abstract: Instrument program of TMT 30 m telescope is described. TMT will build three first light instruments and an adaptive optics system for infrared instruments. TMT is also planning to build second phase instruments every 2-3 year after the first light. Japan will contribute to a visible (WFOS) and an infrared (IRIS) first light instruments. Japanese universities also have started R&D for the second phase instrument development.