

30m光学赤外線望遠鏡計画TMT プロジェクトの進捗状況

国立天文台TMTプロジェクト
(講演者) 青木和光

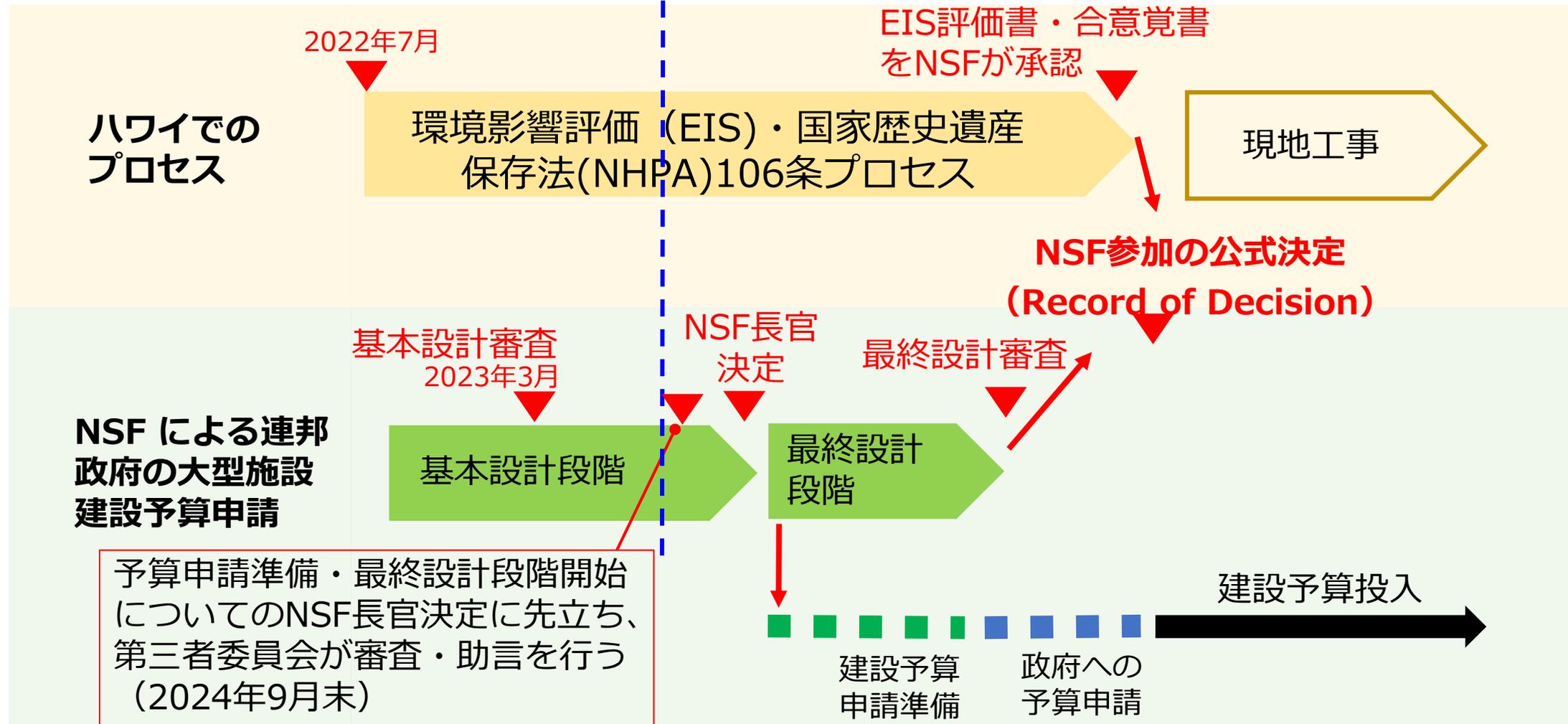
2024年9月17日

TMTプロジェクトの進捗状況

- **計画の全体状況**：TMT建設には米国連邦政府予算によるNSFの参加が必要であり、TMT計画はUS-ELTプログラムとして提案されている。NSFによるハワイにおける環境影響評価等のプロセスと予算措置にむけたプロジェクトの審査が平行して進められている。
 - **建設地ハワイの状況**：ハワイでは環境影響評価とともに国家歴史遺産保存法にもとづく地元での協議・合意形成のプロセスが進んでいる。その前提となる地元での信頼構築に向け、TMT国際天文台における対話やハワイ州によるマウナケア管理の改善が進展している。
 - **米国における予算措置にむけた進展**：US-ELTプログラムに対する米国連邦政府の予算措置に向けた動きが急になっている。NSFはUS-ELTプログラムとして最終設計段階に進める計画を決定するための審査を実施している。連邦議会は2025年歳出法案において、TMT/GMT2基によるUS-ELTプログラムへの支持を示すとともに、設計開発予算の措置を提案している。
- **サイエンス検討の加速**：2023年以降、JWSTと超大型望遠鏡のシナジーを議論する2度のワークショップ開催を含め、TMTによるサイエンス・装置の検討が活発になっている。
- **国内の状況**：今後10年の計画を文科省学術審議会のロードマップ2023に申請し、掲載された。主鏡製造再開・望遠鏡製造開始にむけた準備や観測装置の設計・開発を進めている。
- **TMT計画の意義の再確認**：光赤天連ロードマップの審査等の機会において、超大型望遠鏡の意義やTMTの特長をあらためて評価し、整理した。

建設地ハワイと連邦政府予算措置に向けたNSFのプロセス

TMT建設には米国連邦政府予算によるNSFの参加が必要であり、TMT計画はUS-ELTプログラムとして提案されている。NSFによるハワイにおける環境影響評価・国家歴史遺産保存法のプロセスと建設予算措置にむけたプロジェクトの審査が平行して進められている。



ハワイでの合意形成に向けた見通し(1/2)

● 基盤となるマウナケアでの天文学とTMTへの信頼構築

- TIOは2019年までの取り組みの問題点を総括し、ハワイでの体制を一新した。
- TIOによる地元での対話・教育支援活動により、TIOの変化に対する理解が広がっている。メディアからの取材対応やニュースレターでの発信も開始している。
- CSO・ホクケア望遠鏡の撤去完了（次ページ）。

● 先住民をはじめとする地元の意見を反映する仕組みの確立

- マウナケアに対する多様な意見をとりまとめ、管理に反映する仕組みとして、2022年に制定された新たな州法によりMKSOA（MaunaKea Stewardship Oversight Authority）が設立され活動を開始した。
- 先住民の代表も入ったMKSOAに対し、先住民からの信頼と期待も高まっている。
- 米国天文学コミュニティからも強い関心と期待が寄せられている。



TMT建設を声高に反対している人との直接対話の機会を調整している、地元のリーダーと伝統的な挨拶（2023年7月）。



地元紙でのインタビュー記事（2024年4月）。



MKSOA委員とグリーン知事のマウナケア視察（2023年8月）。TMTに反対してきた委員からは、ハワイ文化にとっての山頂の大切さが強調される一方、MKSOA設立により多くの人と話ができるようになったことを歓迎するコメントもあった。



米国天文学会（2023年1月）でMKSOA委員によるパネルディスカッションが開催され、700人ほどの参加者が、信頼関係を築き、お互いの立場を理解するようになったというパネリストの説明にスタンディングオベーションで答えた。

マウナケアの既存望遠鏡の削減

ハワイ先住民をはじめとする地元住民の意見が十分に反映されることなく、望遠鏡が建設されてきたことに対して懸念や不満が一部住民の間であり、また老朽化した望遠鏡の撤去は長年の課題でもあった。マウナケアの望遠鏡の削減に向け、2台の撤去が行われた。

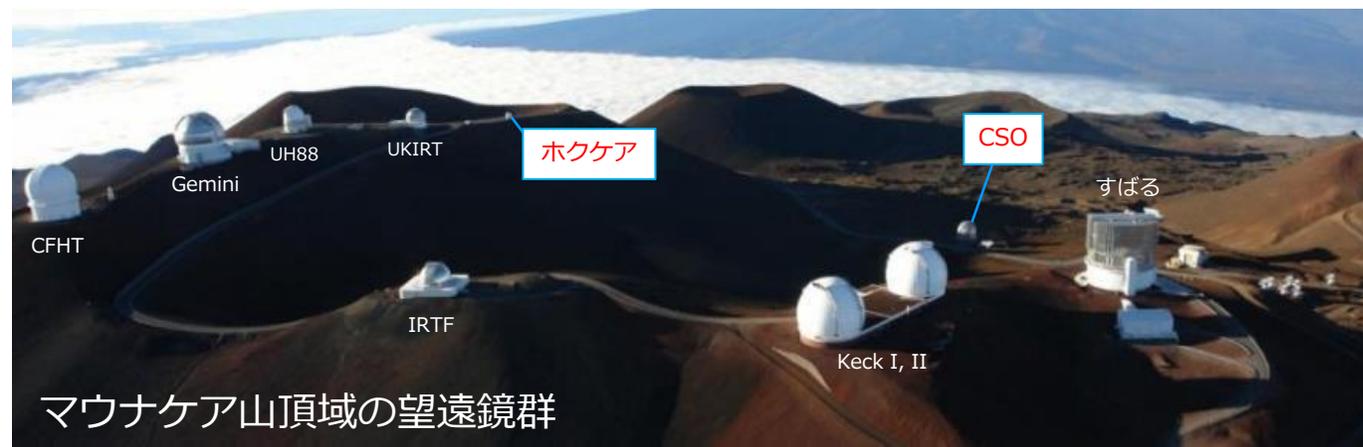
- カリフォルニア工科大学のサブミリ波望遠鏡（CSO）とハワイ大学ヒロ校（UHH）の教育用望遠鏡（ホクケア）の撤去が完了。
- 2015年に州知事は望遠鏡台数を4分の1を削減する方針を示し、ハワイ大学が作成したマスタープラン案は2033年までにTMTを含めて9台とする（5台削減）計画を示した。MKSOAのワーキンググループがマスタープランの改訂案を検討中。



Caltech Submillimeter Observatory（CSO）：カリフォルニア工科大学が1987年から運用してきた口径10.4m電波望遠鏡。2015年に運用終了。6月に撤去作業完了。



ホクケア望遠鏡の撤去作業完了



マウナケア山頂域の望遠鏡群

ハワイでの合意形成に向けた見通し(2/2)

● NSFによる合意形成プロセスの見通し

- NSFは、2022年7月、環境影響評価とともに国家歴史遺産保存法（NHPA）106条にもとづく合意形成の計画を公表し、説明会を実施するとともに意見募集を行った。NSFは先住民コミュニティとの関係構築を担う調整者（Community Liaison）を決定し、プロセスを進めている。
- NSFは2023年12月、TMT建設にNSFが出資することに関するNHPAに基づく協議に関心を表明していた団体・個人に通知を出し、協議参加者(consulting party)となる意思の確認を求めた。この結果、425の団体・個人が協議参加者として確認された。協議をハワイ州の5つの島で開催すると発表しており、協議のファシリテータの決定を進めている。
- 2024年7月にNSFウェブページにて、TMTの環境影響評価の期間を2026年まで延長すると発表された。発表では、「NHPA第106条に基づく協議手続きには当初の予定よりも複数の遅れが生じている。その結果、NSFは2026年12月31日までに決定記録を発行することになると予測する」としている。
- NSFは、TMT建設のためにはMKSOAの了解を得ることが必要とし、MKSOA委員との協議を開始している。
➡MKSOAの了解を得て、環境影響評価書や合意覚書が作成される見通し

一方、NSFによる最終設計段階や米国連邦政府の建設予算申請は並行して進められ、2025年に大きく動く見込まれる。

NSFの予算措置に向けたプロセス：米国政府・議会の動向(1/3)

NSFはUS-ELTプログラムとして最終設計段階に進める計画を決定するための審査を実施している。

● NSB（National Science Board、NSFの意思決定機関）決議・勧告

2024年2月27日、NSBはNSFに対し、NSFが負担するUS-ELTの建設費の上限を16億ドルとする決議を採択し、次回5月のNSB会合でTMTとGMTのどちらか1基への支援を選択するための今後の計画について、NSFはNSBと協議すること等を勧告した。



● 2024年5月NSB会合におけるNSF長官報告

NSBによる決議・勧告をうけて、2024年5月2日のNSB会合において、NSF長官は以下の報告を行った。

- 候補プロジェクトであるGMT、TMTのいずれか1基を最終設計段階に移行させるかを検討するために、長官に助言を提供する第三者委員会（external panel）を招集することを決定した。
- 第三者委員会は、各プロジェクトについて質問事項に対する見解を提供する。
- 予算手続きに情報が提供されるよう、第三者委員会に対し、報告書を長官に今年度末（9月）までに提出するよう求める。第三者委員会の調査結果は、議会、OMB（Office of Management and Budget）、OSTP（Office of Science and Technology Policy）、NSBに報告される予定である。

NSF TMT予算措置に向けたプロセス：米国政府・議会の動向(2/3)

連邦議会（予算に関する歳出法などの法案を審議する立法府）はTMTとGMT2基によるUS-ELTプログラムへの支持を繰り返し表明している。

- 2024年3月3日、連邦議会は2024年度NSF予算に関する歳出法案で、次回5月NSB会合で、US-ELTプログラムを大型研究設備施設建設（MREFC）勘定に含める検討をするようNSFに指示。またUS-ELTプログラムは2基の望遠鏡建設とするよう、NSBに強く促す。9日、大統領が署名し、2024年度NSF予算に関する歳出法が成立した。
- 2024年6-7月、上下両院の歳出委員会が提出した2025年度歳出法案でUS-ELTプログラムをはじめとするAstro2020提案の次世代天文学施設の設計関連予算を提案し、TMTとGMT2基の建設を強く推奨(次ページ)



TMTプロジェクトの見解

- NSFがUS-ELTの学術的価値は非常に高いと評価し、2026年度予算でのMREFC措置に向けたプロセスを具体的に示した点は非常に重要である。
- NSFが第三者委員会を設置しプロセスを進めているのは、2月のNSB勧告に沿ったものであり、プロセスはタイムラインどおりに進められている。
- 一方、予算決定に権限をもつ米国議会は2基によるUS-ELTPを推奨している。今後も議会の動向をよく見る必要がある。

NSF TMT予算措置に向けたプロセス：米国政府・議会の動向(3/3)

米国上院歳出委員会が2025年度歳出法案において次世代天文学施設予算の大幅増額を提案

- 7月に公表された連邦議会上院歳出委員会からの米国2025年度（2024年10月～）歳出法案において、Astro2020で提案された次世代天文学施設（複数）の開発を支援するために1億ドルを提供することが提案された。2024年度は、同委員会から同じ目的で3,000万ドルが提案され予算化されており、2025年度案はこれを大幅に上回る提案である。
- 2024年度に続きTMTとGMT両方の建設を強く支持する意向が表明され、Astro2020の優先計画（複数）の建設に係る資金が2026年度の大規模研究施設予算に含まれるよう、2025年度の間設計を進めることも推奨された。
- 今回初めて主要同盟国によるUSELTプログラムへの貢献についても言及され、米国以外のパートナーの存在や米国の対外関係を意識した記述になっている。
- 連邦議会下院歳出委員会が6月25日に公表した2025年度の歳出法案でも、上院歳出委員会同様、NSFに対しUSELTプログラムとして2基の望遠鏡建設を強く推奨している。下院案では、Astro2020で提案された地上天文学施設（複数）に2025年度の設計関連として3,000万ドルが提案されている。

国際的な計画推進のための日本の取り組み

● TMT国際天文台における日本の体制

- メンバー代表：川合眞紀NINS機構長
- 評議員：常田佐久NINS特任教授（常田氏は評議員会共同議長を継続）
- 評議員：吉田道利副台長
- 評議員(代表)：臼田知史TMTプロジェクト長
- 評議員会陪席：土居守台長

2024年度に入り、メンバー会議を2回、評議員会を4回（定例2回、臨時2回）開催している。いずれの会議でも、日本から提案を行い、リーダーシップを発揮している。

● 国際的な計画推進の取り組み

- 国立天文台とJSPS,JAXAの共催で、政策立案者等に向け、系外惑星と宇宙の生命を探るサイエンスと日米の計画、特にUS-ELTプログラムの理解を促進する会合をワシントンDCで開催（2024年9月19日）
- 土居台長は4月にNSFを表敬訪問し、数学物理局天文学部門長らと面会した。上記ワシントンDCでの会合にも出席、米国の関係者へUS-ELTプログラム推進の働きかけを行っている。ハワイにも2回訪問し、ハワイでの計画推進に向けて働きかけている。

ワシントンDCにて系外惑星における生命に関する日米会合を開催 ～日米の政策立案者、米国議会関係者、メディア等にUS-ELTプログラムの意義をアピール

- JSPS-JAXA-NAOJ Washington Conference
“US-Japan Conference on Life on Exoplanets:
Insights and Future Prospects”
- 2024年9月19日 JAXAワシントンオフィス
- 100人規模
- 開催趣旨：
地球型系外惑星に生命が存在するのか？という究極の疑問に答えるために、US-ELTプログラムにおいてTMTとGMTの2望遠鏡の計画が進んでいる。日本はTMTに大きな貢献をしている。さらに、HWO(Habitable World Observatory)プロジェクトがNASAで検討されている。JSPS-JAXA-NAOJによるこの会合では、これらのプロジェクトへの理解を促進し、系外惑星における生命の存在という問いにどのように迫るか、議論する。
- 日本からは、成田憲保教授（東京大）、相川裕理教授（東京大）、藤本正樹宇宙研副所長が講演

September 19, 2024
1:00-6:10pm (reception 6:15pm-)

US-Japan Conference on Life on Exoplanets
Insights and Future Prospects

VENUE | JAXA Washington D.C. Office
1201 Pennsylvania Avenue, NW
Washington, D.C. 20004

Thirty Meter Telescope

Giant Magellan Telescope

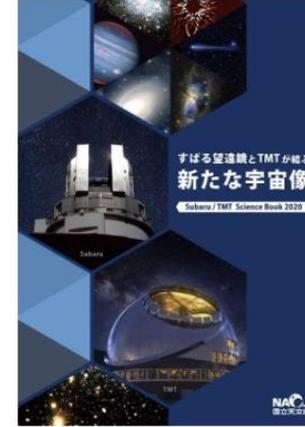
Habitable Worlds Observatory
(preliminary design)

JSPS
JAXA
NAOJ

TMT image: TMT International Observatory
GMT image: GMT Corporation
HWO image: NASA
Background image: ESA/Hubble, M. Kornmesser

サイエンス検討の進捗状況

- TMT国際天文台の科学研究検討書（Detailed Science Case）は、系外惑星研究の進展やALMA/JWST等の最新成果を反映して改訂が行われた。今後もTIO科学諮問委員会とInternational Science Development Teams（ISDTs）により改訂が行われる。
- 日本で作成したサイエンスブックも、今後改訂予定



2020年3月

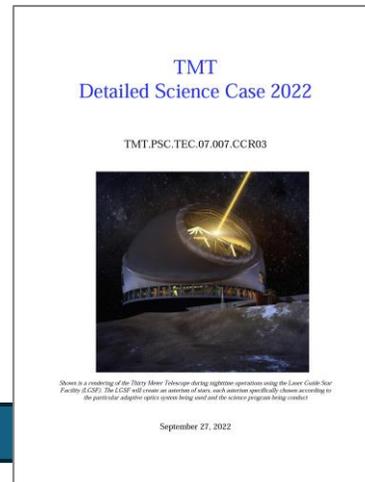
2020年出版の「すばる望遠鏡とTMTで結ぶ新たな宇宙像」の更新についての議論をTMT/すばる科学諮問委員会で開始。JWST/ALMA・国内望遠鏡による最新成果を反映する予定。

2015年4月



- 太陽系外惑星の研究・マルチメッセンジャー天文学の急速な発展を反映
- 初期観測装置にMODHISを追加

2022年9月



- ALMA/JWST等の最新観測成果を追加。TMTの役割を明確化。
- Top Level Science Goalsには変更無し。
- 編集終了。ほぼ完成。

2024年9月

Detailed Science Case 2024

超大型望遠鏡・TMTによるサイエンス検討ワークショップ

● ELT Science in Light of JWST

The scientific landscape for Extremely Large Telescopes in light of JWST. Part II. Asia

6月3-7日、東北大学

- JWSTの成果を受けて、次世代超大型望遠鏡(ELTs)での研究連携を議論。2023年12月北米 (UCLA)開催の第1回に続く、アジアでの開催
- JWSTとGemini/Subaruによる太陽系外惑星の大気の観測、JWSTによる遠方銀河の化学組成の解明やマイクロレンズ効果を受けた個々の星の検出例などが紹介され、ELTへの発展についての議論がされた。



2024年6月@東北大

● TMT eArly Career Centered, Engineers-Scientists Synergy 2024

6月10-12日、東北大学

- 若手研究者・技術者主導のワークショップ。昨年につながる2回目の開催。参加38人
- 2040年代に行うべきサイエンスとそのサイエンスを実現するための装置を議論



2024年6月@東北大

2024年6月SPIEと装置ワークショップ

- **SPIE ASTRO「天体望遠鏡と観測装置」に関する国際光工学会** 6月16-21日、横浜
 - 初の日本開催、参加者約2800人
 - Plenary Session talk:
“Moving TMT Forward” (臼田知史、嘉数悠子)



国立天文台ブース展示にてTMTの説明

- **TMT instrumentation community workshop** 6月15日、横浜
 - SPIEに参加するTMT観測装置関係者が情報交換・議論する機会として開催。国内外から50人近く参加
 - 19講演・12ポスター発表
 - TMTの観測装置・補償光学の開発
 - インドでの主鏡製作などTMT関連の活動
 - 日本における装置開発や科学検討の活動

Plenary Session での講演 (6月17日)



文科省学術審議会「ロードマップ2023」への掲載

今後の計画推進のために、新たに「学術研究の大型プロジェクトの推進に関する基本構想（ロードマップ2023）」に申請し、掲載された。

学術研究の大型プロジェクトの推進に関する基本構想（ロードマップ2023）
幅広く学術研究の大型プロジェクトを推進するに当たり、広範な研究分野コミュニティの意向を踏まえながら、透明性や公平性・公正性を確保しつつ、各計画の優先度を明らかにするために策定するもの。

- 国立天文台長を提案者、プロジェクト長を計画代表者として、学術研究の大型プロジェクトの推進に関する基本構想「ロードマップ2023」に申請（2023年6月30日）。2023年12月22日、ロードマップ掲載が公表された。
- 10年間の計画としてTMT建設計画を申請し、学術的意義や、計画の遅れがある中でその解決への取組が評価された。

国内での建設の取り組み

主鏡製造再開・望遠鏡製造開始にむけた準備や観測装置の設計・開発を進めている。

● 主鏡

鏡材製造再開に向けた熔解炉の性能検証や、今後量産工程を開始する必要がある外形加工（六角形カットと裏面加工）の試作を実施している。

● 望遠鏡

最初に材料調達・加工にとりかかる主構造部（方位軸(Az)部、高度軸(EL)部、ナスミス構造部）については2023年までにTIOによる製造前審査で高い評価を得て合格した。その際の指摘事項（安全・リスク解析等）への対応や、TIOが実施するインターフェース（I/F）検討への対応を進めている。

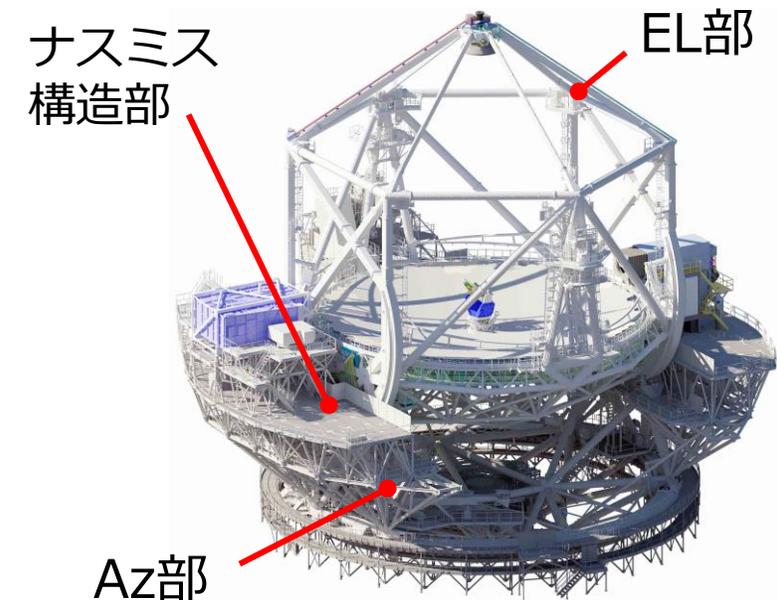
● 観測装置

IRIS：2025年はじめの最終設計審査に向けた開発・設計が進められている。

WFOS：これまで将来のアップグレードの項目となっていたIFUについて、NAOJの尾崎講師が中心となって開発を進めてきた。WFOSサイエンスチームでIFUを用いたサイエンスケース検討が始まり、IFUをベースラインへ入れる可能性の議論が開始された。



鏡材製造炉再検証のための試作（オハラ）



地上に3台もの30m級望遠鏡が必要な理由は何か？

- 可視光・赤外線は、恒星や惑星からの主たる放射波長帯であるとともに、様々な原子や分子のスペクトル線が集中しており、天体の理解のためには欠くことのできない基本波長帯である。したがって、可視光・赤外線観測は非常に幅広い天体や天体現象を対象としている。他の電磁波長域や重力波などで検出された天体現象も、その詳細を知るためには可視光・赤外線によるフォローアップが重要である。また、現象を多角的に捉えるためには、撮像・分光・偏光など多彩な観測装置が必要である。大型望遠鏡はそれらを搭載するインフラであり、1台だけでは多様な観測を実施することができない。
 - 可視光・赤外線の広い波長域をカバーするには、必要な検出器や光学系の特性などにより、観測波長に応じた観測装置を要する。観測手法も、撮像のみならず、波長分解能の異なる分光観測、偏光観測など多岐にわたる。また、広視野が必要なサーベイ観測から、回折限界までの高空間分解能観測まで幅広い観測要求がある。こうした多様な要求に応えるには複数の望遠鏡が必須である。
 - 現在8-10m級望遠鏡は13台稼働しているが、いずれも観測時間の競争率は高く、研究成果（論文）の生産性も高い。13台の内7台は北半球、6台は南半球に、経度も異なるサイトに設置され、多彩な観測装置を搭載することで、稀にしか存在しない天体や突発現象も観測することができている。視野が全天にわたる重力波望遠鏡やニュートリノ検出器と連携したマルチメッセンジャー天文学による新たな宇宙像を開拓するには、緯度経度が異なる複数のサイトでの30m級望遠鏡の稼働が極めて重要である。
- 可視光・赤外線観測で複数の望遠鏡により多様な観測を可能にし、他波長や他の観測手段との連携を強めることは、質・量ともに天文学の基盤を強化し、社会への発信や教育、技術的貢献の機会を増加させる。

地上に3台もの30m級望遠鏡が必要な理由は何か？

(続き)

- 日本としては、すばる望遠鏡を建設し運用することによって、光学赤外線分野だけでなく天文学全体のレベルが格段に上がり、国際共同研究も大きく進んだ。分野によっては日本が主導しているテーマも多い。2030年代以降の30m級望遠鏡時代においても、他国の望遠鏡に観測提案するだけでなく、国際協力による超大型望遠鏡の建設・運用に日本が主体的に参加することで、サイエンス面はもちろん、技術開発、教育、運用等といった面においても国際的に活躍できる人材を育成することができる。
 - 日本の観測装置開発技術は非常に高く、独自の技術もある。これを活かし発展させていくためには、日本が自由にアクセスできる30m望遠鏡が必要である。それにより、さらに将来計画されるであろう国際的な革新的天文・宇宙物理プロジェクトにも継続的に参画できる最先端の技術力を日本として維持・強化していくことが可能となる。
 - 競争率が非常に高いハッブル宇宙望遠鏡、アルマ望遠鏡、JWST等による研究においても日本の研究者が観測時間を得られているのは、すばる望遠鏡の時間を十分に活用し、ユニークな科学成果を出していることが重要な要因である。また近年の際立った科学成果は一つの望遠鏡から得られるデータだけでなく、様々な波長や観測手法の結果や理論の結果と組み合わせることで得られているものが多い。今後、日本の研究力を維持発展させ、世界をリードしていくためには、日本が2030年代の主力となる30m級望遠鏡を十分に使える機会を持つことは極めて重要である。

望遠鏡の諸元の違いは表にまとめていただいたが、それらを総合したときに、E-ELT, GMTにはできずTMTにしか達成できないサイエンス成果は何か？

- **突発現象のフォローアップ観測 (ToO観測)**

TMTは北半球にあることから、E-ELTやGMTでカバーできない天域・時間帯の観測を実施できることに加え、第3鏡により観測装置を短時間（10分以内）で切り替えることができ、突発現象発生後短時間での観測が可能である。 すばる望遠鏡の広視野装置による天体同定に続いてTMTで高感度分光観測を実施することができるのはTMTの大きな強みである。 観測対象としては連星中性子星合体、超新星の爆発初期などがある。

- **高コントラスト観測**

シンプルな光学系と副鏡やスパイダー等の遮光が小さいことによりきれいな像 (PSF : Point Spread Function)が得られること、マウナケアでの補償光学観測の条件がよいこと、冷却した補償光学装置とすることなどにより、TMTは高コントラスト観測に必要な性能が高い。 系外惑星の近赤外直接観測（撮像・分光）において最高の感度が達成できる。

- **紫外線・中間赤外線観測**

標高の高いマウナケアでは紫外線・中間赤外線の透過率が高く、これらの波長帯で最高感度の観測が可能となる。中間赤外線の高感度観測は、系外惑星研究において、惑星からの熱放射やオゾンの検出を可能にする。紫外線波長域 (<350nm) では、(1)小惑星や彗星のOH分子線の観測により太陽系内の水の分布を測定する、(2)連星中性子星合体等で作られる鉄より重い元素や、銀河の化学進化をトレースするLiの起源を知るのに必要な⁹Be線を測定する、といった独自性の高いサイエンスが可能である。

TMTプロジェクトの進捗状況 ～まとめとプロジェクトからコミュニティへの希望

- 米国では、NSFのUS-ELTプログラムへの予算措置にむけて動きが急になっている。2025年に入ると、NSFによる最終設計段階やハワイでの地元協議などが大きく進むと見込まれる。
- 日本（国立天文台）は、国際的な計画推進にむけて働きかけを強めるとともに、国内での担当箇所の製造開始に向けた準備を進めている。
- 2023年以降、TMT（および超大型望遠鏡計画一般）のサイエンス検討が加速している。
- **コミュニティへの希望：**
 - 超大型望遠鏡は今後の天文学および関連分野に必要であり、特に日本としてはTMTの実現が必須であることをあらためて理解していただき、コミュニティからワンボイスでTMTの必要性を様々なレベル、様々な機会に訴えていただきたい。
 - サイエンス検討が再び活発になっており、TIOの装置検討チーム（International Science Development Teams:ISDTs）に入ってもらおう等、コミュニティから引きつづき貢献をいただきたい。
 - 装置開発については、すばる望遠鏡やせいめい望遠鏡をはじめ、既存望遠鏡での装置開発でTMT装置のプロトタイプと位置付けられるものを重点的に支援するなど、これまでより幅広い支援・協力をコミュニティの皆さんと検討していきたいので、参加をお願いしたい。