

大型研究計画に関する進捗評価について（報告）

「大型光学赤外線望遠鏡「すばる」共同利用研究」について

2019年（令和元年）8月27日

科学技術・学術審議会 学術分科会 研究環境基盤部会
学術研究の大型プロジェクトに関する作業部会

目 次

はじめに	3
「大型光学赤外線望遠鏡「すばる」共同利用研究」について	
1. 進捗評価の実施方法	4
2. プロジェクトの概要	
(1) 概要と主な内容	5
(2) 実施体制	7
(3) 年次計画及び予算規模	9
3. プロジェクトの進捗状況	
(1) 科学目標の進捗状況	10
(2) 研究論文の出版状況	12
(3) 共同利用の状況	13
(4) 施設等の整備状況	15
(5) 社会や国民からの支持を得るための取組、情報発信の状況	16
(6) 情勢の変化があった場合の対応状況	15
(7) 年次計画における「計画推進に当たっての留意事項等」への対応状況	17
4. 計画の進捗評価と今後の留意点	
(1) 計画の進捗状況を踏まえた評価	26
(2) 今後の事業の推進に当たっての留意点	26
備考（用語解説等）	28
科学技術・学術審議会 学術分科会 研究環境基盤部会	
学術研究の大型プロジェクトに関する作業部会 委員等名簿	33

はじめに

文部科学省においては、学術研究の大型プロジェクトへの安定的・継続的な支援を図るべく、2012年度（平成24年度）に「大規模学術フロンティア促進事業」を創設した。

この事業は、世界が注目する学術研究の大型プロジェクトについて、科学技術・学術審議会 学術分科会 研究環境基盤部会 学術研究の大型プロジェクトに関する作業部会（以下「作業部会」という。）が策定した「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の策定－ロードマップ－」※ 等に基づき、社会や国民からの支持を得つつ、国際的な競争・協調に迅速かつ適切に対応できるように支援し、戦略的・計画的な推進を図ることを目的としている。

各プロジェクトの推進に当たっては、本作業部会が「大規模学術フロンティア促進事業の年次計画」（以下「年次計画」という。）を作成し、進捗管理を行っているところである。

「大型光学赤外線望遠鏡「すばる」共同利用研究」の年次計画においては、10年計画の5年目に当たる2017年度（平成29年度）に進捗状況等の確認を行うことが記載され、当該年度に進捗評価を実施したが、その際の「今後の事業の推進に当たっての留意事項」により、「30m 光学赤外線望遠鏡（TMT）計画の推進」の進捗評価に併せ、「TMT との一体的な運用を目指すすばるについても改めて進捗評価を行う」を行うことが付記されており、このたび、本作業部会において改めて進捗評価を実施した。

進捗評価に当たっては、関係分野の専門家（以下「アドバイザー」という。）から助言を得つつ、委員が研究現場の状況を確認するためのヒアリング及びそれらを踏まえた審議を実施した。

※ 本作業部会においては、日本学術会議の「マスタープラン」が示す学術的意義の高い大型プロジェクトのうち、推進に当たっての優先度が高いと認められるものを選定し、「ロードマップ」として策定している。2017年（平成29年）7月には「ロードマップ2017」を取りまとめた。
(URL) http://www.mext.go.jp/a_menu/kyoten/1383666.htm

「大型光学赤外線望遠鏡「すばる」共同利用研究」について

1. 進捗評価の実施方法

ヒアリング

今回の進捗評価は、次のとおり、本作業部会委員及びアドバイザーからなる評価者 11 名による実施機関からのヒアリングを通じて実施した。

- (1) 日 時：2019 年（令和元年）7 月 16 日（火）13：30～15：30
- (2) 参加委員：ヒアリングに参加した評価者は以下のとおり。（敬称略、○は主査）
（作業部会委員）○小林 良彰、城石 俊彦、鈴木 裕子、東嶋 和子、
中野 貴志、松岡 彩子、山本 智、吉田 善章
（アドバイザー）井上 一、岡村 定矩、永原 裕子

(3) 概 要：

・機関からのヒアリング（60分）

自然科学研究機構から、計画の概要、進捗状況等について説明を受けた後、質疑応答を行った。

（自然科学研究機構説明者）

常田 佐久 自然科学研究機構国立天文台長、
井口 聖 同台 副台長（企画担当）、
吉田 道利 同台 ハワイ観測所長、
岩田 生 同台 TMT推進室 副室長、
笹川 光 同台 事務部長、
本田 大輔 同台 財務課長、
岩下 金史 同台 財務課課長補佐、
山本 真一 同台 財務課司計係長、
徳田 次男 自然科学研究機構 理事／事務局長、
鈴木 隆 同機構 事務局財務課長

・まとめ（35分）

機関からのヒアリングを踏まえ、研究の進捗状況に係る確認及び今後の推進方策や留意事項等に係る検討を実施した。

※今回の進捗評価における現地調査は、現地状況に鑑み実施しないこととした。

学術研究の大型プロジェクトに関する作業部会における審議

- (1) 日 時：2019 年（令和元年）8 月 27 日（火）10：00～12：30
- (2) 審議事項：進捗評価報告書（案）の審議

2. プロジェクトの概要

(1) 概要と主な内容

すばるの計画は、ハワイ島マウナケア山頂に建設された口径 8.2m の大型光学赤外線望遠鏡「すばる」ⁱ を用いて以下の目標に沿った共同利用・共同研究を円滑に実施し、広範な天文学の分野における高水準の科学的成果を創出するものである。

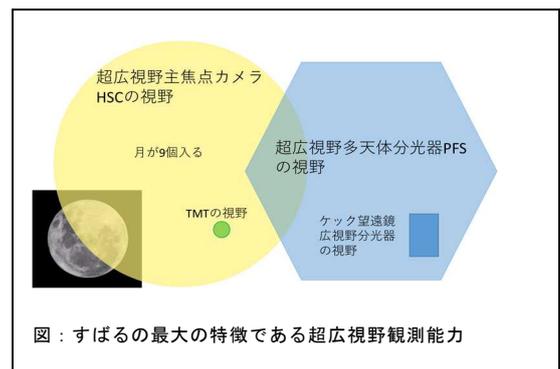
<目標ⁱⁱ>

1. ビッグバン後 10 億年以内の宇宙初期を観測し、宇宙における天体の形成過程を研究
2. 遠方宇宙を広い天域にわたって観測することにより、宇宙の大規模構造の起源を研究
3. 太陽系外惑星を直接観測し、その性質を研究
4. 重力波、ニュートリノ観測と協調した新たな天文学（マルチメッセンジャー天文学）の推進
5. 惑星系形成領域を観測し、惑星の形成過程を研究
6. 運用体制の見直しⁱⁱⁱ



すばるは、主に以下のような性能・特徴を持つ。

1. 口径 8.2m、厚さ 20cm の一枚ガラスの主鏡による世界最大級の集光性能
2. 主鏡を世界最高精度で研磨し、その歪みを自動的に高度に補正する 261 本のアクチュエータ（能動支持機構）によって支持し、また、外部の空気を乱さずに取り込み、内部の熱を効果的に排出できる円筒型のドーム
3. 非常に堅牢な望遠鏡構造による他の 8 m 級の望遠鏡にはない主焦点での超広視野観測能力^{iv}
4. 研究者の多様な観測の要求に応える主焦点を含む 4 つの焦点



すばるは、全国の大学等の研究者の共同利用施設として運用されている。観測時間の内訳は、一般共同利用に年間約 240 夜、

ⁱ すばるは、平成 3 年度から 9 年間で建設され平成 12 年度から本格運用及び共同利用観測を開始した。設置場所であるハワイ島マウナケア山頂は、標高の高さ（4,200m）、快晴や乾燥した日の多さ、星像のシャープさ（貿易風の影響）、空の暗さ（近隣に大都市がない）などから、天体観測の最適地とされている。

ⁱⁱ 「大規模学術フロンティア促進事業の年次計画（平成 30 年 8 月改定）（以下、「年次計画」という。）」において示されている。当初は、4 つの科学目標を掲げ、科学研究の進展を受けて 2018 年に見直しを行っている。

ⁱⁱⁱ 年次計画においては、「TMT に役割が引き継がれる研究テーマ、主焦点に特化した望遠鏡とする運用により終了する研究テーマ等を明確にして、すばるの運用の役割にメリハリをつけるとともに、国際協力等により、運営費の大幅な削減に取り組む」となっている。

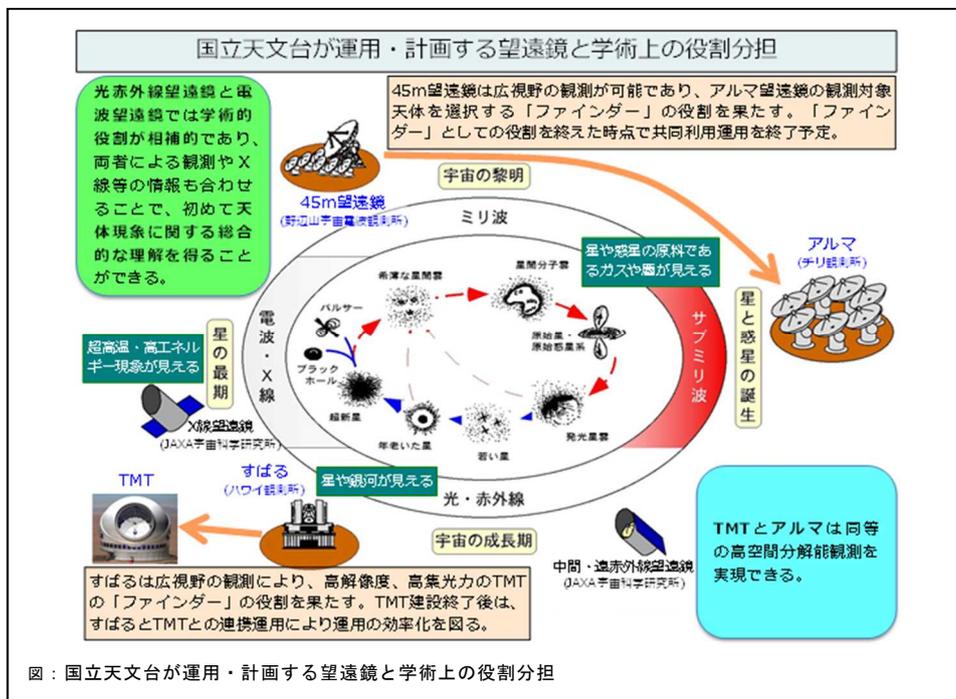
^{iv} すばるの超広視野観測能力は、狭い視野ながら詳細な天体の観測ができる TMT とは相補的な役割を果たすことができ、両望遠鏡を使用することで相乗的な観測成果を生むことが期待される。

ハワイ大学に52夜[※]が割り当てられている。この他、約20夜が突発的天体現象の観測等に、約30夜が技術試験に使用され、残りの20夜程度が望遠鏡の保守維持のためのダウンタイムとしている。

共同利用観測を開始した2000年12月から2019年1月までの間、延べ5,475人の研究者が共同利用観測のためにハワイ観測所を訪れている。2018年12月までに発表された査読論文数は1,952編で、2018年は152編の査読論文が出版されている。

また、国立天文台が運用・計画する望遠鏡と学術上の役割分担は次のとおりである。

望遠鏡	学術上の役割分担
すばる (光赤外：大型)	広視野観測により、宇宙の大規模な構造の調査をするとともに、TMTの「ファインダー」の役割を果たす。
TMT (光赤外：大型)	地球型の太陽系外惑星に生命の可能性を探り、時空の彼方にある宇宙最初の星や銀河を観測する。
アルマ (電波：大型)	光や赤外線では見えない天体や宇宙物質を、ミリ波・サブミリ波による高度な観測で捉え、銀河・惑星系の形成過程や生命の起源の解明に挑む。
野辺山45m電波望遠鏡 (電波：中型)	広視野の観測が可能であり、アルマの観測対象天体を選択する「ファインダー」の役割を果たす。



[※] 「マウナケア山での天文台運用および建設に関する国立天文台とハワイ大学の協定 (Operating and Site Development Agreement between National Astronomical Observatory of Japan and the University of Hawaii Concerning the Design, Construction and Operation of the 8-meter Japan National Large Telescope on Mauna Kea, Hawaii)」に基づく

(2) 実施体制

すばるは、現地ハワイに赴任している自然科学研究機構国立天文台の職員 21 名、現地の派遣職員約 70 名の協力、三鷹オフィスの約 20 名との連携により共同利用観測の運用を実施している。研究者コミュニティを代表するすばる科学諮問委員会では、観測所の方針から運用に至るまでの協議を行っており、委員会からの提言を観測所運営に活かしている。また、コミュニティ全体との情報共有や意見交換の場を確保するためのすばるユーザーズミーティングや光赤天連を通じて、コミュニティの意見を運用に反映させている。

マウナケア山頂を管理するハワイ大学との協力体制を基盤として安定した運用を行なうとともに、外部資金による共同開発により観測能力を強化していることも特徴としている。観測装置の設計・製作においては、国内外の機関との協力を図って、事業を確実に推進している。

主なものとして、東京大学カブリ数物連携宇宙研究機構（IPMU）、米国プリンストン大学、台湾中央研究院との 7 年間に及ぶ協力により完成した超広視野主焦点カメラ（HSC）、世界 7 カ国の機関で共同開発中の主焦点超広視野分光器（PFS）の共同開発により、世界に類のない広視野観測を実現している。さらには、東京大学、プリンストン大学との協力により

開発した近赤外線高コントラスト面分光装置（CHARIS）や自然科学研究機構アストロバイオロジーセンター、ハワイ大学と共に開発した近赤外線ドップラー分光装置（IRD）などにより、太陽系外惑星の探査を実現している。このように、最先端の研究を展開するとともに、高度な技術開発に携わる大学院生の育成に貢献している。

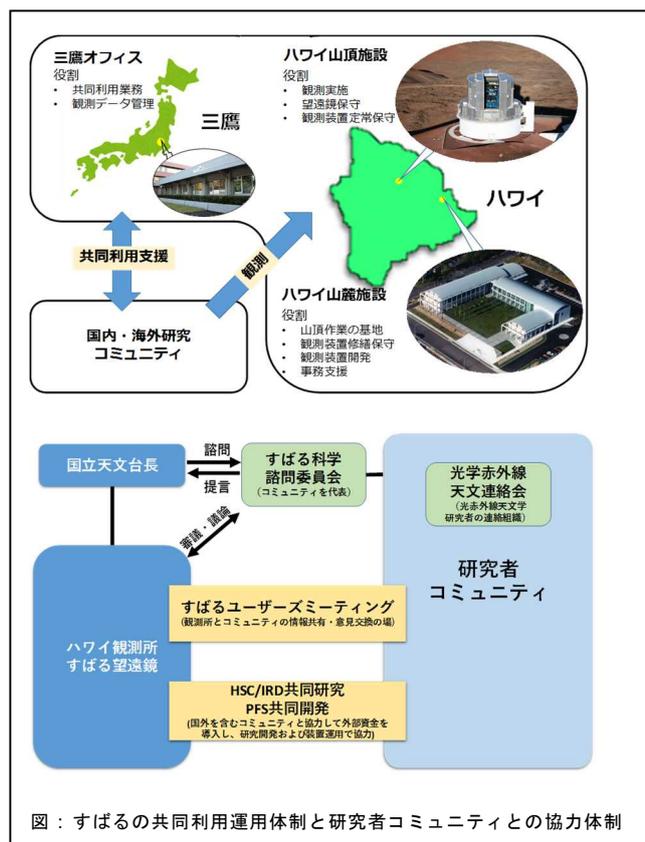
装置開発の協力機関（連携研究機関）は、以下が挙げられる。

日本：北海道大学、東北大学、東京大学、東京工業大学、名古屋大学、京都大学、神戸大学、兵庫県立大学、広島大学、愛媛大学、鹿児島大学、甲南大学、宇宙航空研究開発研究所（JAXA）、

米国：ハワイ大学、プリンストン大学、ジョンスホプキンス大学、カリフォルニア工科大学、カリフォルニア大学、ケック天文台、

台湾：天文及天文物理研究所、

中国：中国国家天文台、

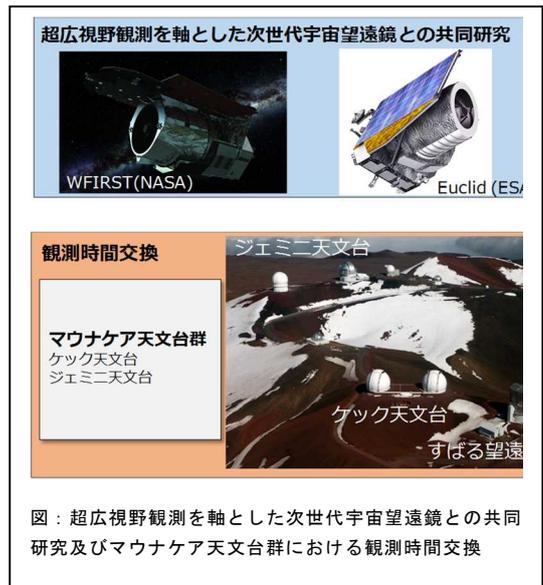


韓国：韓国天文宇宙研究所、
 カナダ：ビクトリア大学、カナダ国立研究機関、
 ドイツ：マックスプランク天文学研究所、
 オーストラリア：オーストラリア国立大学、
 フランス：マルセイユ天体物理研究所、
 この他、国際協力で運営されているジェミニ天文台などがある。

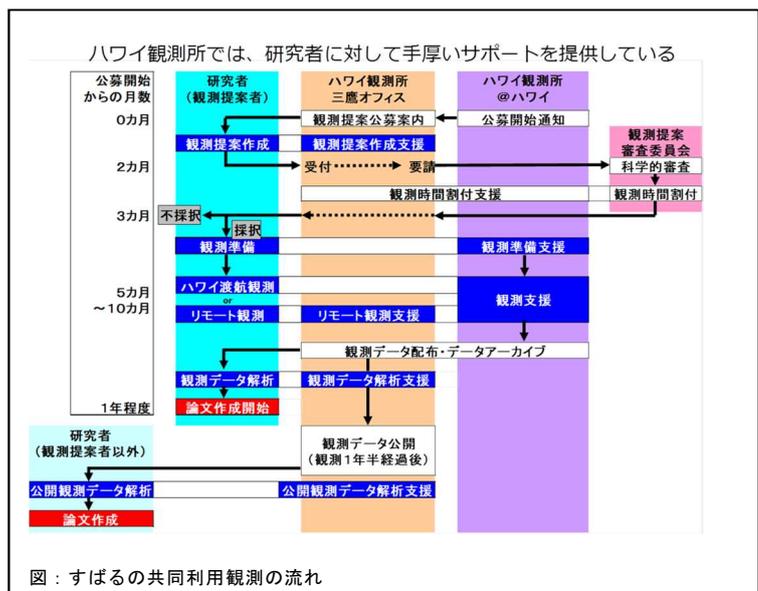
すばるの超広視野観測能力は世界的にも突出しており、その特色を生かして、マウナケア天文台群における観測時間の交換を行う。すばるの観測装置ではカバーできない波長域や観測モードでの観測などを日本の研究者コミュニティに提供している。

共同利用・共同研究を行うための実施体制^{vi}については、国立天文台三鷹キャンパスに設置されているすばる室において、コミュニティとの連携のための会議開催や観測公募、観測のためのハワイへの渡航手続、及びリモート観測のサポート等、共同利用観測を実施するための日本国内における一連の活動を実施している。また、天文データセンターとの協力によって観測データを公開するアーカイブやデータ解析のための計算機環境のサポートを行っている。

また、ニュートリノや重力波物理学の観測においても、ニュートリノ検出器スーパーカミオカンデ、アイスキューブ・ニュートリノ観測所、重力波望遠鏡KAGRAなどとすばるの連携による光学赤外線追跡観測を行うために、東京大学宇宙線研究所、千葉大学、東北大学、甲南大学等の研究者との共同研究を進めるなど、より幅広い分野の研究者との共同研究や交流を図れるよう運用体制を構築している。



図：超広視野観測を軸とした次世代宇宙望遠鏡との共同研究及びマウナケア天文台群における観測時間交換



図：すばるの共同利用観測の流れ

^{vi} ハワイ観測所は大学共同利用機関として、望遠鏡施設を世界中の研究者に公開している。年間240夜程度を共同利用観測に供しており、実施する観測プログラムを世界中の研究者からの公募により募っている。観測プログラムの公募は年2回行なわれ、コミュニティから選出された委員で構成されるプログラム小委員会における公平な審査によって実施される観測プログラムが選定。

(3) 年次計画及び予算規模

すばるに係る現行の年次計画及び予算規模は次のとおりである。

<現行年次計画^{vii}>

計画名称	大型光学赤外線望遠鏡「すばる」の共同利用研究										
実施主体	【中心機関】自然科学研究機構国立天文台【連携機関】北大、東北大、東大、東工大、名大、京大、神戸大、兵庫県立大、甲南大、広島大、愛媛大、鹿児島大、米国(ハワイ大、プリンストン大、ケック天文台)、台湾(天文及天文物理研究所)、カナダ(ビクトリア大)、ドイツ(マックスプランク天文学研究所)、ジェミニ天文台等										
所要経費	建設費総額 約395億円 年間運用経費 約20億円 ※このうち、老朽化に伴う突発的な不具合など、維持・運用経費の増額等については、実施機関に対し、本事業予算に限らない、多様な財源の確保を求める。	計画期間	建設期間 平成3～11年度、9年計画 運転期間 平成12年度より本格観測 (事前評価 平成2年、中間評価 平成12年、進捗評価 平成29年)								
計画概要	銀河誕生時の宇宙の姿を探り、太陽系外の惑星の謎に迫るため、米国ハワイ州ハワイ島マウナケア山頂に建設した口径8.2mの大型光学赤外線望遠鏡(すばる)を用いて、国内外の研究者による共同利用観測を推進する。										
研究目標(研究テーマ)	<ol style="list-style-type: none"> ビッグバン後10億年以内の宇宙初期を観測し、宇宙における天体の形成過程を研究 遠方宇宙を広い天域にわたって観測することにより、宇宙の大規模構造の起源を研究 太陽系外惑星を直接観測し、その性質を研究 重力波、ニュートリノ観測と協調した新たな天文学(マルチメッセンジャー天文学)の推進 惑星系形成領域を観測し、惑星の形成過程を研究 										
年次計画	2013 (H25)	2014 (H26)	2015 (H27)	2016 (H28)	2017 (H29)	2018 (H30)	2019 (H31)	2020 (H32)	2021 (H33)	2022 (H34)	
1. ビッグバン後10億年以内の宇宙初期を観測し、宇宙における天体の形成過程を研究											
・HSCを用いた広域深宇宙探索による、宇宙再電離期の研究。 ・ULTIMATEを用いた超遠方銀河探索											
2. 遠方宇宙を広い天域にわたって観測することにより、宇宙の大規模構造の起源を研究											
・HSCを用いたダークマターの大规模広域探索 ・PFSを用いた宇宙の加速膨張探索											
3. 太陽系外惑星を直接観測し、その性質を研究											
・HiCIAOを用いた系外惑星の直接観測 ・IRDを用いた地球型惑星探索 ・CHARISを用いた惑星大気の研究											
4. 重力波、ニュートリノ観測と協調した新たな天文学(マルチメッセンジャー天文学)の推進											
・HSCを用いた重力波に伴う重元素合成現場の研究											
5. 惑星系形成領域を観測し、惑星の形成過程を研究											
・HiCIAOを用いた惑星系形成領域の探索											
6. 運用体制の見直し	<p>TMTに役割が引き継がれる研究テーマ、主焦点に特化した望遠鏡とする運用により終了する研究テーマ等を明確にして、すばるの運用の役割にメリハリをつけるとともに、国際協力等により、運営費の大幅な削減に取り組む。</p>										
評価の実施時期	-	-	-	-	進捗評価	-	進捗評価	-	-		

<予算規模>

建設費：394.9億円

これまでの運転経費・実験経費：550.3億円

(内訳) 建設期(1991年度から1999年度) 33.2億円

運用期(2000年度から2012年度) 396.1億円

運用期(2013年度から2019年度) 121.0億円

運転経費・実験経費(2020年度以降)：年間約20億円

^{vii} 「大規模学術フロンティア促進事業の年次計画について(科学技術・学術審議会 学術分科会 研究環境基盤部会 学術研究の大型プロジェクトに関する作業部会 平成24年11月(平成30年8月改訂)」に掲載の年次計画より

3. プロジェクトの進捗状況

(1) 科学目標の進捗状況

科学目標	現在の進捗状況	達成状況
1. ビッグバン後 10 億年以内の宇宙初期を観測し、宇宙における天体の形成過程を研究	HSC の広視野を活かして、宇宙誕生後 10 億年以内の宇宙再電離期に遠方銀河を従来の 3 倍である 4 万個発見	・ HSC を用いた広域深宇宙探査による宇宙再電離期の研究 ⇒全探査の約 10%が終了した ・ULTIMATE を用いた超遠方銀河探査 ⇒ULTIMATE の概念設計が終了した。 ULTIMATE の稼働は 2026 年の予定
2. 遠方宇宙を広い天域にわたって観測することにより、宇宙の大規模構造の起源を研究	HSC を用いてダークマターの大規模広域探査を行い、これまでにない高解像度・広範囲のダークマター 3 次元分布を描き出した	・ HSC を用いたダークマターの大規模広域探査 ⇒全探査の約 10%が終了した ・ PFS を用いた宇宙の加速膨張探査 ⇒PFS の一部のコンポーネント（メトロロジカメラ）の望遠鏡装着試験が終了した。PFS の稼働は 2022 年の予定
3. 太陽系外惑星を直接観測し、その性質を研究する	自然科学研究機構アストロバイオロジーセンターと協力し、TMT につながる成果の創出を目指して、地球型太陽系外惑星の間接的検出のための観測装置を開発	・HiCIAO を用いた系外惑星の直接観測 ・ IRD を用いた地球型惑星探査 ・CHARIS を用いた系外惑星の直接観測 ⇒HiCIAO による系外惑星の直接観測計画は完了し、CHARIS による観測に移行した。IRD を用いた探査は 2019 年から 5 年間の予定で開始
4. 重力波、ニュートリノ観測と協調した新たな天文学（マルチメッセンジャー天文学）を推進	HSC を用いた重力波信号の位置誤差範囲の追跡観測で、光赤外線対応天体を検出し、連続的な追跡観測に成功	・ HSC を用いた重力波に伴う重元素合成現場の形成 ⇒中性子星合体によって金やプラチナ、生命活動の必須元素の一つであるヨウ素などの重元素が合成されている証拠を掴んだ ⇒重力波の追跡観測を継続中
5. 惑星系形成領域を観測し、惑星の形成過程を研究	多数の原始惑星系円盤を観測し、その構造を解明	・HiCIAO を用いた惑星系形成領域の探査 ⇒円盤そのものからの放射電波をより高解像度で観測するアルマでの研究へ移行・発展

①ビッグバン後 10 億年以内の宇宙初期の観測

初代星・初代銀河の性質や形成過程に深く関わる現代天文学における課題である宇宙再電離を詳しく調べるためには、ビッグバン後 10 億年以内の宇宙初期を広く深く観測し、その時代の天体の性質を知る必要がある。この研究には、すばるの集光力と広視野観測能力が極めて有効であるとされている。

すばるでは、その広視野観測能力を最大限に活かすため、IPMU、高エネルギー

加速器研究機構、プリンストン大学、台湾中央研究院との共同で1.7平方度の視野を持つHSCの開発が行われた。HSCは、ハッブル宇宙望遠鏡の約1,500倍の視野を0.4秒角(9,000分の1度角)の空間分解能で一度に撮影できる世界最高性能の超広視野カメラとして2014年から稼働している。

すばるでは、現在、HSCを用いて5年間で300夜の時間を投入するすばる戦略枠プログラムを推進中である。これにより、広域深宇宙探査が劇的に進むことが期待されている。このプログラムの初期成果として、宇宙誕生後10億年以内の宇宙再電離期に遠方銀河が4万個以上発見されている。また、この大量サンプルを用いて、銀河の人口調査を詳細に行った結果、宇宙再電離期には明るい銀河が非常に多いことが判明した。この研究は、銀河形成進化モデルに根本的な変更を迫る一方、こうした明るい銀河が宇宙再電離の原因である可能性を示している。

② 宇宙の大規模構造の起源の研究

国立天文台、東京大学などの研究者からなる研究チームは、HSCを用いたすばる戦略枠プログラムの一環として、160平方度の範囲で2,000万個以上の銀河を撮影した。重力レンズ効果による銀河の像の歪みを精密に測定し、その結果、ダークマターの3次元分布を描き出すことに成功している。その広さと解像度は、これまでの研究を遥かに上回り、史上最高のダークマター地図となっている。これにより、宇宙の過去から現在に至るまで、宇宙の中でどのようにダークマターが集積してきたのかが示されている。今後、光で見える銀河の分布と重力レンズによって解き明かされたダークマターの分布を詳細に比較することにより、ダークマターが銀河形成や進化にどのような影響を及ぼすのかが明らかになっていくことが期待される。

さらに、東京大学を中心とする研究チームは、HSCで得られた重力レンズ効果のデータをブラインド解析という新しい手法で解析している。結果、宇宙におけるダークマターの質量比(Ω_m)及び宇宙の構造形成進行の度合い(S_8)といった宇宙論パラメータを精密に求めることに成功している。本研究は、すばるのデータによって精密宇宙論が展開できることを明確に示すとともに、現在信じられている標準宇宙モデルに大きな変更を迫る可能性を示唆するものであるとされている。

③ 太陽系外惑星の直接観測

1995年に最初の太陽系外惑星が発見されて以来、現在(2019年6月)までに4,000個を超える太陽系外惑星が発見されている。惑星の明るさ、温度、軌道、大気など重要な情報を直接的に得るためには、直接、惑星の姿を撮像することが不可欠であることから、太陽系外惑星の直接撮像観測は、非常に挑戦的な課題とされている。暗い惑星がすぐ近くにある明るい恒星の光に埋もれてしまい、惑星を見分けることが非常に難しい。このため、太陽系の惑星軌道程度の広がりには位置する惑星は、これまで10例程度しか報告されていなかった。この課題に挑戦するため、すばるでは補償光学装置(AO)を用いて観測時の大気揺らぎをリアルタ

イムで補正し、望遠鏡の解像度限界に迫る高解像度撮像を実現するシステムを開発した。A0 と恒星の光を遮蔽する特殊な機能を持った観測装置、高コントラストコロナグラフ撮像装置 (HiCIAO) を組み合わせた高解像度撮像観測で、太陽系外惑星の直接撮像観測を実施している。このことにより、これまで 8 個の太陽系外惑星の直接観測に成功している。

④マルチメッセンジャー天文学の推進

2015 年 9 月 14 日の重力波の直接検出 (GW150914) は、物理学・天文学分野に大きな衝撃を与え、重力波天文学が誕生した。この時の重力波は、30 太陽質量のブラックホール同士の合体現象から放たれたものであり、重力波そのものもさることながら、宇宙に太陽の何十倍も重いブラックホールが普遍的に存在し、さらにそれが連星系をなして合体するという事実が初めて人類にもたらされ、その成因や進化について新たな研究分野が拓かれている。

すばるでは、2017 年 8 月 17 日の重力波検出の 10 数時間後に HSC を用いて重力波信号の位置誤差範囲の追跡探査観測を行い、銀河 NGC4993 の裾野に明るい可視光天体を捉えることに成功している。また、すばる及び他の日本の望遠鏡での観測結果と、国立天文台のスーパーコンピューター・アテルイの計算結果を比較した。その結果、こうした光度の時間変化は、中性子星合体からの超高速 (光速の 10% 程度の速度) 放出物中で、急速な中性子捕獲過程 (r プロセス) で鉄より重い元素が合成されるとした時の光度変化との一致を示したことなどから、マルチメッセンジャー天文学としての成果も達成されつつある。

⑤惑星系形成領域の観測

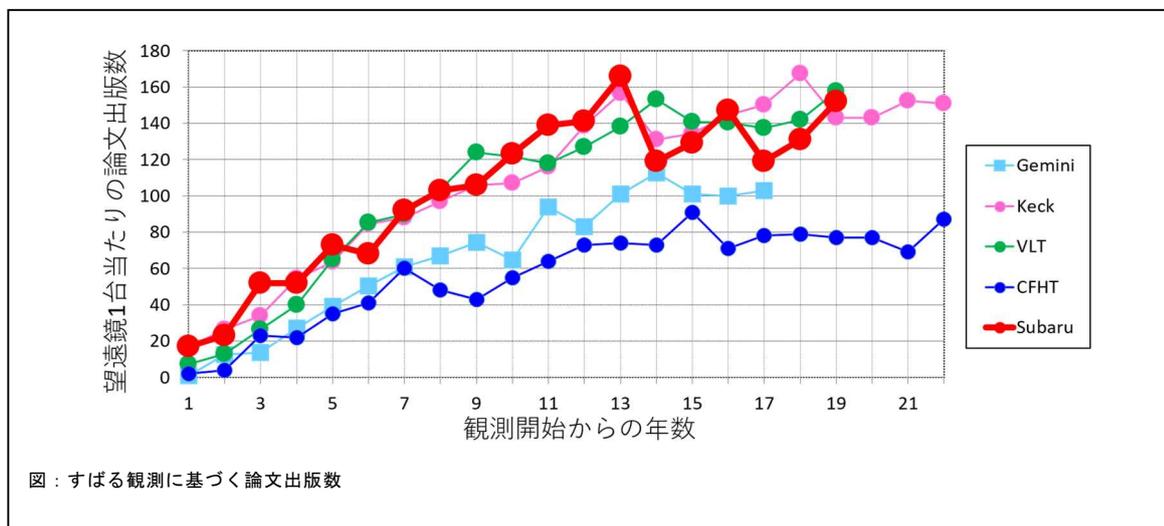
すばる戦略枠プログラムの一環として、5 年間で約 120 夜投入し、HiCIAO を用いた系外惑星系形成領域の観測が行われた (SEEDS プロジェクト)。SEEDS プロジェクトでは、太陽近傍の約 500 個の恒星の周囲の原始惑星系円盤の高解像度観測を行った。その結果、空隙構造や渦巻腕構造など様々な構造を持つ原始惑星系円盤の画像を得ることに成功し、惑星形成理論研究に大きなインパクトを与えている。

また、すばるの観測は、原始惑星系円盤が中心の恒星からの赤外線を反射して光ることを利用して行われ、原始惑星系円盤の比較的外側の構造が詳細を明らかにしている。この研究は、アルマ望遠鏡での研究に発展を遂げている。

(2) 研究論文の出版状況

2000 年の共同利用開始から 2018 年末までに、すばるの観測データを用いた査読論文は 1,952 本に上る。そのうち、Nature/Science といった著名雑誌には 28 本が掲載されている。また、すばるの論文生産率は世界の 8-10m 望遠鏡と比較してもトップクラスであり、2014 年~2018 年の統計において、Top10%論文シェアが 19.29%、Top1%論文シェアが 4.57%を占め、他の大望遠鏡と同等、あるいはそれを

上回っている。さらに、日本全体のシェアよりも大きな割合を占めており、天文学・天体物理学分野で日本の研究レベルを向上させることにも大きな貢献をしている。加えて、天文学・天体物理学分野での国際共著率も 86-89%であり、日本全体の平均値である 66-68%と比較して高い値を示している。



	2013年 - 2017年				2014年 - 2018年			
	論文数	Top10% 論文シェア	Top1% 論文シェア	国際共著率	論文数	Top10% 論文シェア	Top1% 論文シェア	国際共著率
すばる	644	18.63%	2.64%	86.34%	679	19.29%	4.57%	88.51%
ジェミニ	1,043	20.61%	3.16%	80.44%	1,054	18.88%	2.85%	79.70%
ケック	1,501	26.75%	4.06%	75.08%	1,463	23.86%	3.55%	76.69%
日本全体	10,340	12.61%	1.57%	65.67%	10,578	12.61%	1.60%	68.26%
世界全体	124,645	9.77%	0.96%	47.14%	126,006	9.31%	0.96%	48.60%

表：すばる観測に基づく論文の Top10%、Top1%論文シェア (InCites)
(注1) ジェミニ望遠鏡、ケック望遠鏡は望遠鏡2台分。
(注2) 日本全体：当該分野での日本の占める割合。世界全体：全研究分野での当該分野の占める割合。

(3) 共同利用の状況

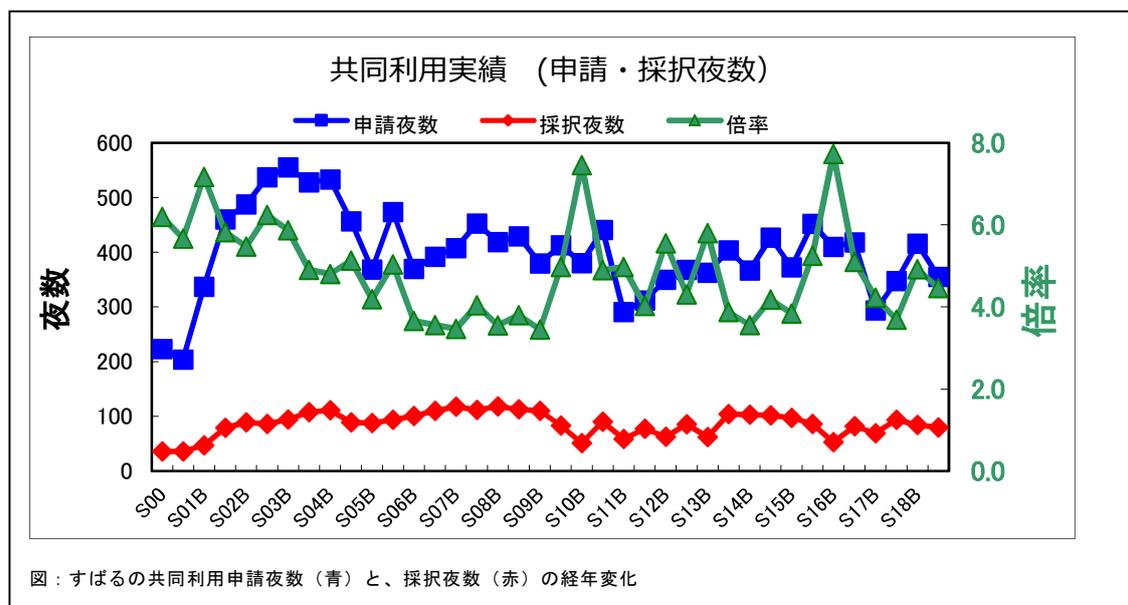
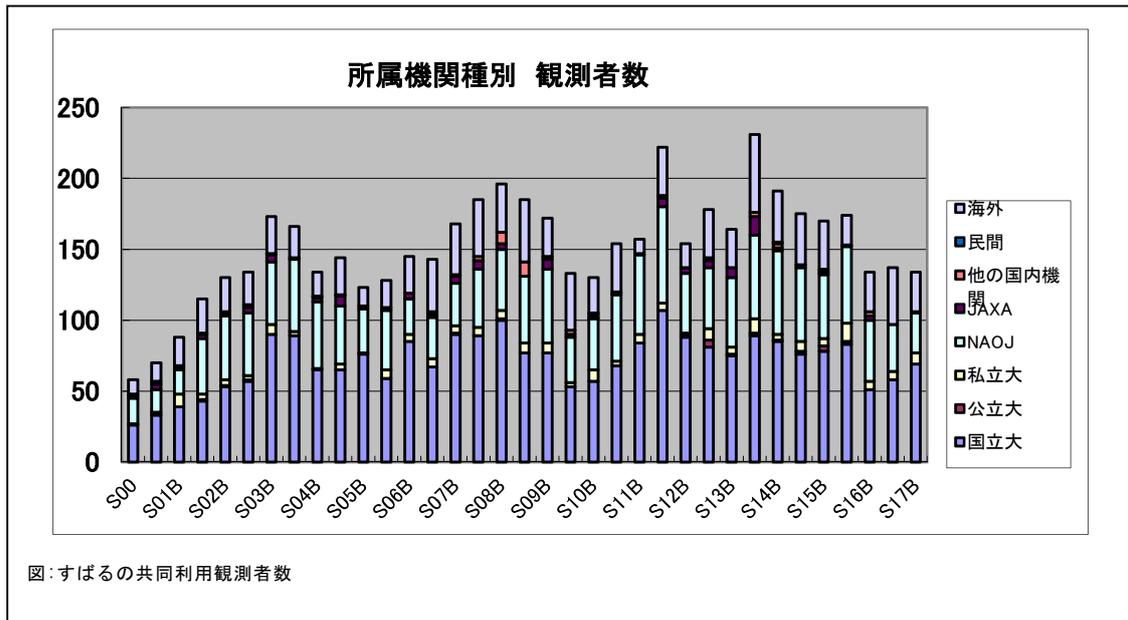
すばるは 2000 年から年間約 240 夜を共同利用に提供しており、これまでの共同利用状況は主に以下のとおりである。

- ・すばるを使用した研究者数は 2018 年末までに 15,920 名を数える。このうち、海外の研究者は 4,066 名である。
- ・年間 80-100 件の共同利用観測を実施している。実際にハワイ観測所を訪れて観測を実施した研究者（共同利用観測者）数は 5,475 名（海外 1,012 名）であり、多様な研究機関の研究者を受け入れている。
- ・研究者の所属研究機関は、国公立大学 39、私立大学 31、その他国内の研究機関 20、国内民間企業 6、海外研究機関 275 に上る。観測夜数の平均的な競

争率は約 4.5 倍であり、高い競争率を保っている。

- ・ これまでに 200 件以上の海外からの観測課題を採択している。

ハワイ大学に観測時間を提供し、また、ジェミニ望遠鏡及びケック望遠鏡とは観測時間の交換を行っている。このことにより、それぞれの望遠鏡の持つ特徴ある観測装置を研究者コミュニティに提供し、多彩な研究テーマに挑むことを支援している。さらには、国際協力による観測装置開発を通じた共同利用・共同研究により研究者及び社会に有為な人材の育成に大きな貢献を果たしている。



(4) 施設等の整備状況

当初計画で予定していた「可視光から中間赤外線に至る幅広い波長域での撮像・分光観測の機能を備える」という目標は、主焦点カメラ (Suprime-Cam)、微光天体撮像分光装置 (FOCAS) など7つの第1期観測装置群において実現を果たしている。また、第2期観測装置として、ファイバー多天体分光器 (FMOS) や多天体赤外線撮像分光装置 (MOIRCS) を開発し、共同利用に供するとともに、この間、望遠鏡の解像力を向上させるために補償光学装置の開発を継続してきた。現在は188素子の可変鏡によって大気揺らぎを補償する188素子補償光学装置 (AO188) が稼働している。

その後も研究者コミュニティからの要望に応えるため、国内外の研究機関と協力し、外部資金によるHSCの開発を行っている。また、口径8m以上の望遠鏡の中で唯一、可視光において1.7平方度以上の超広視野 (ハッブル宇宙望遠鏡の1,500倍) を星像直径0.4秒角という高い解像度で観測できる能力を手に入れている。さらに、7カ国の協力により現在開発中のPFSが2022年に実現すると、2,400個の銀河を一度に分光することが可能となる。また、3カ国の協力により開発を目指している広視野高解像赤外線観測装置 (ULTIMATE) については、概念設計評価 (CoDR) が完了している。ハッブル宇宙望遠鏡の40倍の視野でハッブル宇宙望遠鏡と同程度の高解像度の赤外線撮像実現に向けて着実に進んでおり、当初想定以上の研究成果が期待されている。

(5) 社会や国民からの支持を得るための取組、情報発信の状況

国立天文台ハワイ観測所では、社会や国民からの支持を得るため、研究者のみならず、広く一般市民に対してこれまで以下のように情報発信を行ってきた。

- ・ 科学性成果・記者発表を1999年から2018年までに250件以上を実施している。
- ・ 国内新聞掲載数は、2017年度には147件、2018年度には115件と非常に多くの人々へ科学の成果を届けると共に、科学的興味の上への一助となっている。
- ・ ホームページへのアクセス数は、1日あたり平均1,959回と非常に多くの方々が閲覧している。
- ・ 近年大幅に普及しているソーシャルメディアによる発信にも力を入れ、ツイッターのフォロワー (購読者) 数は47,000人を超え、大きな影響力を持っている。



図：新聞掲載の例

これらに加え、直接科学の魅力を伝えるために講演会や出張授業なども行なわれている。遠隔講義を含む日本各地での開催に加え、ハワイ地元の理解やサポートを得るため、ハワイにおける活動にも力を入れている。ハワイ観測所では、2004年よりマウナケア天文台群で唯一、山頂施設の一般見学ツアーを実施し、2,128グループ、10,505人（日本人6,246人、外国人4,269人）の参加を得た。

	H26年度	H27年度	H28年度	H29年度	H30年度
山麓施設での講演・講義 (人数)	23件 (389)	22件 (269)	23件 (392)	18件 (579)	16件 (472)
出前授業＋一般講演会@ハワイ (人数)	37件 (1,133)	72件 (1,947)	59件 (1,613)	64件 (1,478)	49件 (1,446)
出前授業＋一般講演会@日本 (人数)	16件 (1,453)	-	15件 (2,028)	32件 (2,098)	22件 (1,481)
リモート授業・講演会 (人数)	13件 (1,944)	16件 (975)	11件 (949)	10件 (546)	10件 (917)
広報普及イベント@ハワイ (人数)	8件 (5,940)	8件 (6,715)	13件 (6,675)	13件 (6,064)	12件 (3,570)
インターンシップ@ハワイ	0	6	4	6	7

表：一般向けの講演会・出張授業等

また、イミロア天文学センターと提携した効果的な普及活動を行っている。その他、マウナケア天文台群のスタッフ約100人が地元の学校（小学校から高校まで）を訪れるジャーニー・スルー・ザ・ユニバース等地元の天文関係のイベントでもハワイ観測所は大きな貢献を果たしている。

さらに、すばるの建設では、製作等に関わった企業による高度な技術開発が進み、国内産業における高度技術の育成に寄与している。装置開発においても、国内企業の優れたものづくりの能力が存分に活かされている。すばるで培った技術や浜松ホトニクスと共同開発した技術を駆使した広視野カメラシステムは、JAXA美星スペースガードセンターに採用され、10年に渡る長期間、無故障で監視任務に供されている。

（6）情勢の変化があった場合の対応状況

2018年度は、キラウエア火山の噴火に伴う地震により、メインシャッターやトップスクリーンなどが被害を受けた。また、8月のハリケーン・レーンによる大雨では、雨漏り、高湿により観測装置などにも被害が発生し、これらの影響により合計39夜もの観測時間を失った。



また、災害を受けた箇所以外においても、老朽化の問題が深刻化している。その中で、観測への影響が大きく、緊急に対策を行う必要のある箇所は以下の通りである。

- ・ ドーム制御系及びドーム回転系
レールがベースから浮き上がり歪んでいる。長年にわたり応急措置でしのいできたが、根本解決が必要。
- ・ ドーム気密性及び温湿度環境
ドームの気密性が悪化し、雨漏りが発生し水が溜まる事案が頻発している。
- ・ チラー・廃熱機構
チラー・廃熱機構の老朽化により、想定外の停止、予備機への自動切替の不具合、冷却水漏れなどが発生している。
- ・ 主鏡ハンドリング装置
センサー類の老朽化のため、オーバーホールが必要。
- ・ 完全無人化対応のための監視系カメラ等改修
現行の監視系カメラは 20 年前から利用しており、耐用年数を超えると共に、能力不足である。夜間でも望遠鏡、観測装置及び周辺の様子が把握できる監視系にアップグレードする必要性が生じている。



(7) 年次計画における「計画推進に当たっての留意事項等」への対応状況

年次計画においては、「計画推進に当たっての留意事項等」として、次の内容を掲げている。

「計画推進に当たっての留意事項等」

① 30m光学赤外線望遠鏡（TMT）との一体的な運用について

現時点において想定されているすばるとTMTとの一体的な運用に向けては、天文のサイエンスにおいて、短期的な成果目標の設定に困難を伴うものの、TMTが竣工するまでの間、すばるが世界最先端の望遠鏡群の一つであることに鑑み、日本の世界的な競争力の維持、向上につながるよう、すばるの持つ特徴、強みを最大限発揮して最先端の成果を目指す具体的な科学目標（アウトカム）の早期設定が必要である。

科学目標の達成に向け、すばるの機能維持・向上、観測装置の開発、観測データの取得と解析、それらに基づく研究、それぞれのバランスにおいて、限られた予算、人員に配慮しつつ、何がどこまで必要なか（アウトプット）を明らかにすることが望まれる。

また、この検討の中では、サイエンスの面に限らず、国内外の諸機関との連携協力を進めて外部資金の更なる獲得を図ることや、直面する施設・設備の老朽化対策、TMTとの一体的な運用に向けたハワイ観測所の体制の見直しなども勘案されるべきである。

更に、TMTの竣工後、大規模学術フロンティア促進事業の枠組みから外れることが見込まれていることを視野に入れ、ハワイ観測所としてすばるとTMTの両望遠鏡を一体的に運用する観点から、引き続き、互いの役割分担を進めるとともに、すばるの主焦点への特化による運用の簡素化、及び海外諸国との共同による運用負担の更なる軽減を図るなど、効率的な運営体制を構築する必要がある。

なお、TMTにおいては、実施主体によらざる予期せぬ事由があったことから、その年次計画の見直しを行う場合には、TMTと一体的な運用を図るすばるの年次計画についても、見直しが必要となる。

② 若手研究者の育成について

若手研究者は、海外諸国との共同研究や共同運用の現場において、中核的な役割を担うなど、国際的な環境の中で世界の研究者と伍して競争と協調を進める力が培われている。

その効果は、すばるによる高被引用論文数シェア等のかたちで見取ることができる。このため、若手研究者自身による研究時間の確保や、キャリアパスの形成・展開など、その自主性に基づく取組に対し、一層配慮する必要がある。

③ 研究成果の発信について

国立大学の法人化以降、個々の大学として研究成果を社会や国民に発信することが、特に求められている。また、大学共同利用機関である国立天文台においては、すばるをはじめとする観測施設・設備を、大学の基礎研究力の向上に役立てることが強く求められ、その役割を、学术界や社会に示すことが必要である。このため、研究成果について、国立天文台と大学の研究者が、それぞれどのような役割を担っているのか、整理して示すことが必要である。これにより、天文コミュニティや関連分野のコミュニティに対して、国立天文台における新たな共同研究への参画に結び付けていくことが期待される。

【「大規模学術フロンティア促進事業」の進捗管理の徹底について」（平成30年4月事務連絡）に基づく年次計画の変更における留意点（H30.8）】

実施機関による財政環境への適切な対応を求める観点から、「所要経費」欄の「※」のとおりに留意点を付している。（※このうち、老朽化に伴う突発的な不具合など、維持・運用経費の増額等については、実施機関に対し、本事業予算に限らない、多様な財源の確保を求める。）

【その他】

TMTについては計画が遅延しているため、今後時期を改めて行われるTMTの進捗評価に併せ、TMTとの一体的な運用を目指すすばるについても改めて進捗評価を行うこととし、これら留意点への対応状況と、TMT運用開始までの間におけるすばるの運用方針を確認することとする。

① 30m 光学赤外線望遠鏡（TMT）との一体的な運用について

①-1. 科学目標の設定について

TMT が竣工するまでの間、すばるが世界最先端の望遠鏡群の一つであることに鑑み、日本の世界的な競争力の維持、向上につながるよう、すばるの持つ特徴、強みを最大限発揮して最先端の成果を目指す具体的な科学目標（アウトカム）の早期設定が必要である。

すばるの 5 つの科学目標のうち、「惑星系形成領域を観測し、惑星の形成過程を研究する」については、当初目標を達成し、その研究内容はアルマ望遠鏡に引き継がれた。後の 4 つの科学目標は、それぞれの内容を発展させ、「TMT が竣工するまでの間」及びそれを越えて「すばるの特徴、強みを最大限発揮して最先端の成果を目指す科学目標」として、以下の 4 つの目標を設定した。

- 科学目標 1：ダークマター、ダークエネルギーの謎に迫る。
HSC、PFS を用いてダークマターとダークエネルギーの正体を究明し、宇宙の起源と未来を解き明かす。
- 科学目標 2：初代銀河形成期と銀河成長に迫る。
ULTIMATE でビッグバン後 5 億年程度の宇宙を探索し、初代銀河が作られた時代の天体の性質を明らかにする。
- 科学目標 3：マルチメッセンジャー天文学で物質の起源に迫る
ブラックホールや中性子星の合体、ニュートリノバーストを、重力波望遠鏡やニュートリノ観測装置、他波長望遠鏡と協力して観測し、物質の起源を明らかにする。
- 科学目標 4：地球型惑星の性質に迫る。
自然科学研究機構アストロバイオロジーセンターと密接に連携しながら IRD を用いた地球側惑星の間接探査を推進し、将来の TMT を用いた直接撮像、生命探査に繋げる。

① - 2. 科学目標達成に向けたすばるの機能向上について

すばるの機能維持・向上、観測装置の開発、観測データの取得と解析、それらに基づく研究、それぞれのバランスにおいて、限られた予算、人員に配慮しつつ、何がどこまで必要なのか（アウトプット）を明らかにすることが望まれる。また、この検討の中では、サイエンスの面に限らず、国内外の諸機関との連携協力を進めて外部資金の更なる獲得を図ることや、直面する施設・設備の老朽化対策、TMT との一体的な運用に向けたハワイ観測所の体制の見直しなども勘案されるべきである。

すばるの新たな科学目標を実現するために、PFS、ULTIMATE を開発し、可視光観測において視野 50 倍・同時分光天体数 20 倍の分光能力を、赤外線観測において 10 倍の視野とハッブル宇宙望遠鏡に匹敵する解像度の観測能力を持たせる。限られた予算、人員でこれらの開発を実現し、すばるの競争力を維持するために、観測装置の開発は外部資金を主たる財源とした国際協力で行い、運用にあたっては国際共同で行う。それと同時に観測装置の数を削減して、運用コストと観測機能のバランスを取る。また、日本からのフルリモート観測を実現することによって、夜間の望遠鏡運用コストを下げるとともに、観測旅費等のコスト削減も図る。

観測装置の外部資金による開発の実績は以下のとおりである。

- レーザーガイド星機能つき補償光学装置 (LGS/A0188) : 科研費より約 7 億円を獲得して開発。2007 年運用開始。
- HiCIAO : 科研費 (特別領域研究) により 約 2 億円を獲得。2009 年運用開始。
- HSC : 科研費、FIRST (IPMU)、国際協力 (プリンストン大学、台湾中央研究院) により、約 55 億円の外部資金獲得。2014 年運用開始。
- CHARIS : 科研費より約 4 億円を獲得。プリンストン大学との国際協力での開発。2017 年運用開始。
- MOIRCS : 科研費より約 1.7 億円を獲得して機能強化。2017 年に機能強化終了。
- IRD : 科研費より約 4 億円を獲得。ハワイ大学との国際協力での開発。2018 年運用開始。

開発中の観測装置には以下のものがある。

- PFS : 最先端研究開発支援 FIRST、科研費、国際協力 (7 か国) により、約 85 億円の外部資金を獲得して開発中。2022 年運用開始予定。
- ULTIMATE : 科研費で約 2 億円を獲得して、開発を開始した。今後、国際協力により開発資金 (総額約 50 億円) を獲得していく。

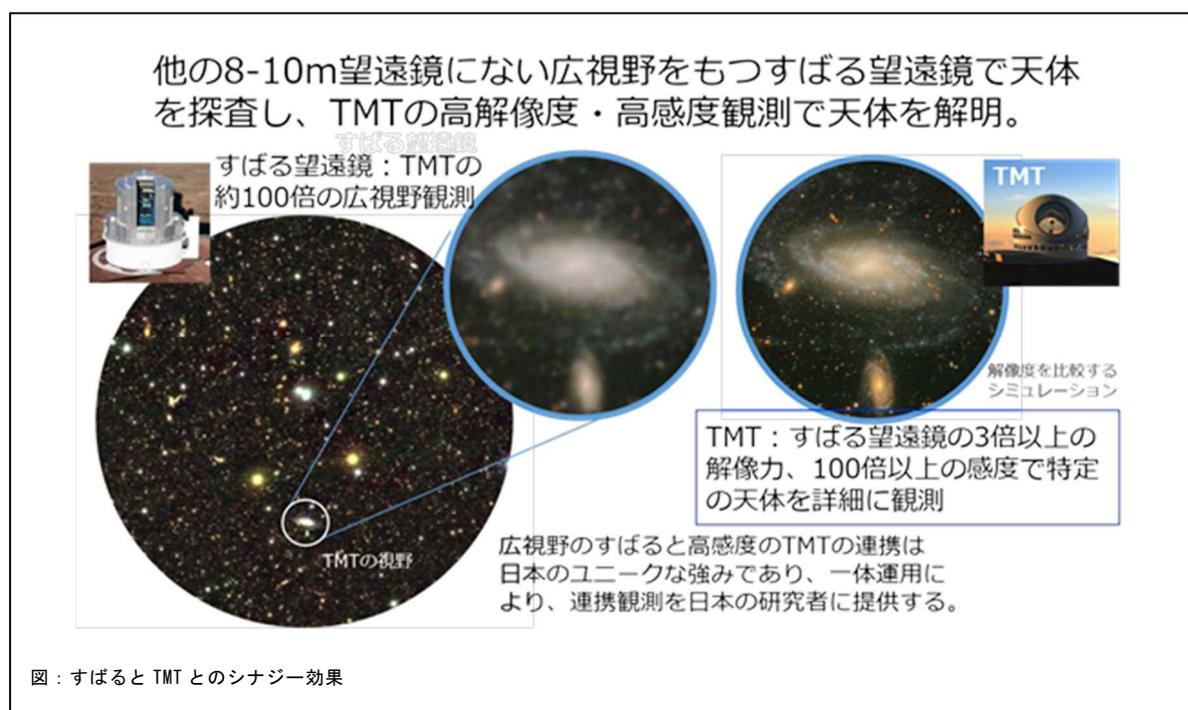
① - 3. TMT との役割分担とすばるの運用の最適化について

ハワイ観測所としてすばると TMT の両望遠鏡を一体的に運用する観点から、引き続き、互いの役割分担を進めるとともに、すばるの主焦点への特化による運用の簡素化、及び海外諸国との共同による運用負担の更なる軽減を図るなど、効率的な運営体制を構築する必要がある。

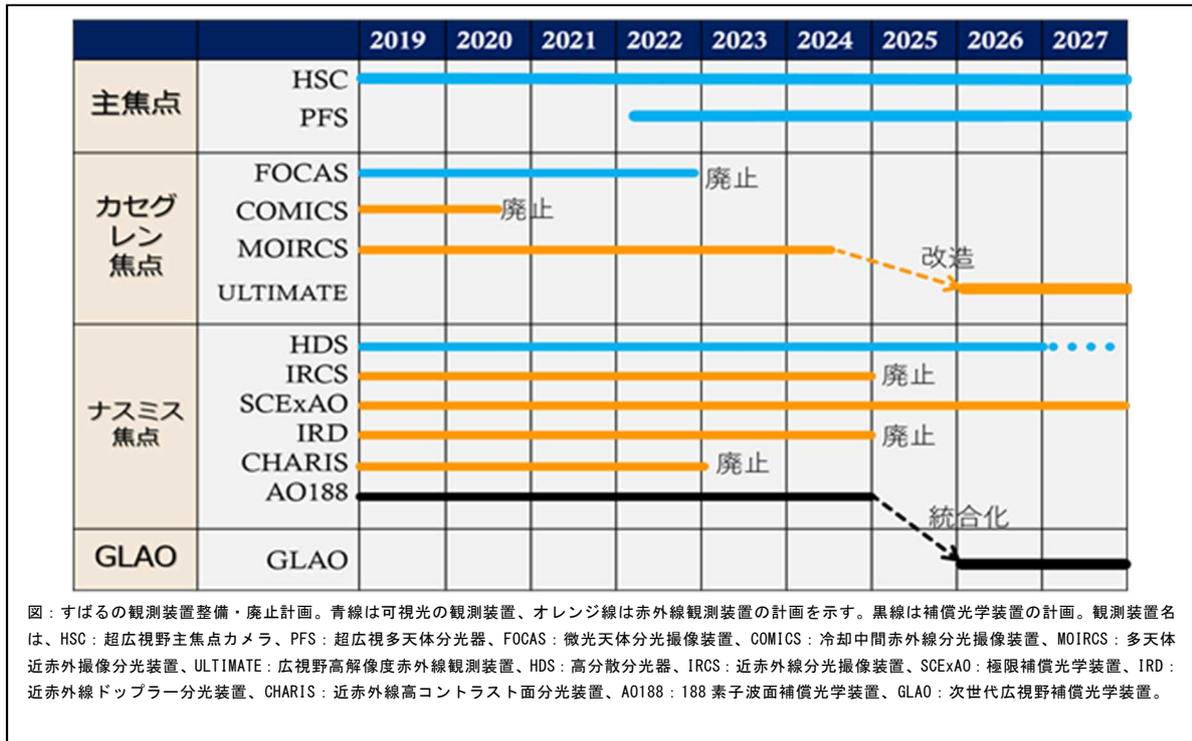
TMT とは、「他の 8-10m 望遠鏡にない広視野をもつすばるで天体を探査し、TMT の高解像度・高感度観測で天体を解明する」という役割分担を行う。

特に、HSC、PFS、IRD 及び ULTIMATE については、すばるでは TMT につながる研究を行うための主力装置として位置づけており、次のような連携観測を実施していく。

1. IRDで地球型惑星の候補を探索し、TMTで直接撮像を行って惑星を同定、さらに分光観測によって生命存在の可能性を探る。
2. HSC や PFS を用いて大規模広域探査を行い、宇宙の大規模構造を調査する。TMT では、超高精度分光観測から赤方偏移の測定による膨張宇宙の直接測定を行う。これらを合わせて、ダークマターやダークエネルギーの性質に迫る。
3. HSC と ULTIMATE は、米欧の広視野宇宙望遠鏡である Euclid、広視野赤外線サーベイ宇宙望遠鏡 (WFIRST) などと連携して広域深宇宙探査を行い、超遠方銀河候補を発見する。TMT ではこれらに対して分光観測を行い、宇宙の最初に誕生した星や銀河の形成過程など、初期宇宙の姿を解明する。



すばるは観測装置の整理及び主焦点観測機能の強化を進めており、FMOS の廃止 (2016 年)、HiCIAO の廃止 (2016 年)、Suprime-Cam の廃止 (2017 年) により、観測維持費の削減等を行っている。廃止された観測装置に代わるより高性能の観測装置として、新たに HSC を開発・運用 (2014 年観測開始) するとともに、PFS の開発を進めている。(2022 年観測予定) 今後も、順次観測装置の整理を行う予定としている。また、すばる国際共同運用に向けては、インド、カナダ、オーストラリア、東アジア諸国、アメリカ等と協議を進めている



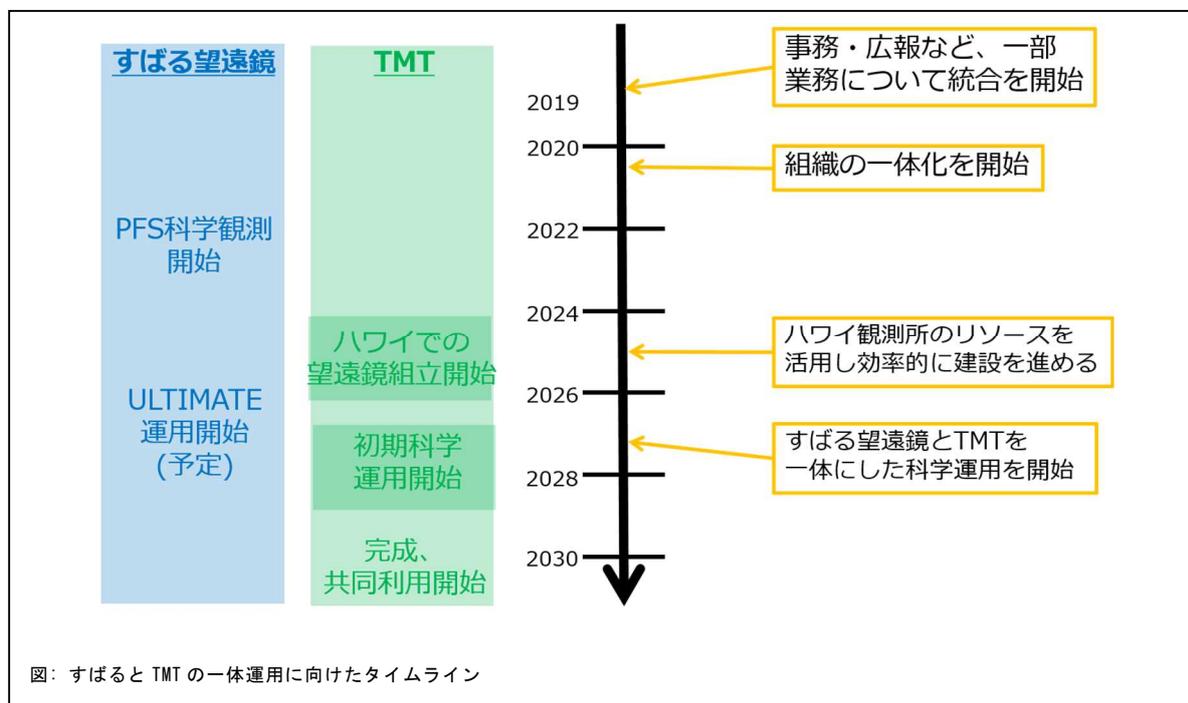
① - 4. すばると TMT の一体運用について

TMT においては、実施主体によらざる予期せぬ事由があったことから、その年次計画の見直しを行う場合には、TMT と一体的な運用を図るすばるの年次計画についても、見直しが必要となる。

国立天文台は、TMT 完成後には、TMT とすばるを一体的に運用する方針を掲げている（平成 29 年「科学技術・学術審議会 学術分科会 研究環境基盤部会 学術研究の大型プロジェクトに関する作業部会」での報告など）。その内容は、以下の 3 点である。

- 現在 TMT の建設の日本の分担分を進めている TMT 推進室は、TMT 完成後にはハワイ観測所に統合する。
- 現在すばるの共同利用運用を行っているハワイ観測所の枠組みを使って、TMT の日本分の観測時間及びすばるの共同利用運用（観測提案の募集・観測時間の割り当て及びユーザサポート）その他の活動（観測装置開発、広報・普及活動、事務管理など）を行う。
- TMT の望遠鏡運用は TMT 国際天文台 (TIO) が行い、日本が製造を担当した望遠鏡本体構造等の保守への支援にはハワイ観測所があたる。

TMT 計画の進捗状況に合わせて、すばると TMT の一体運用のタイムライン変更案が作成されているが、TMT の現地を巡る状況に鑑み、状況に応じて、改めての見直しを検討する必要がある。



② 若手研究者の育成について

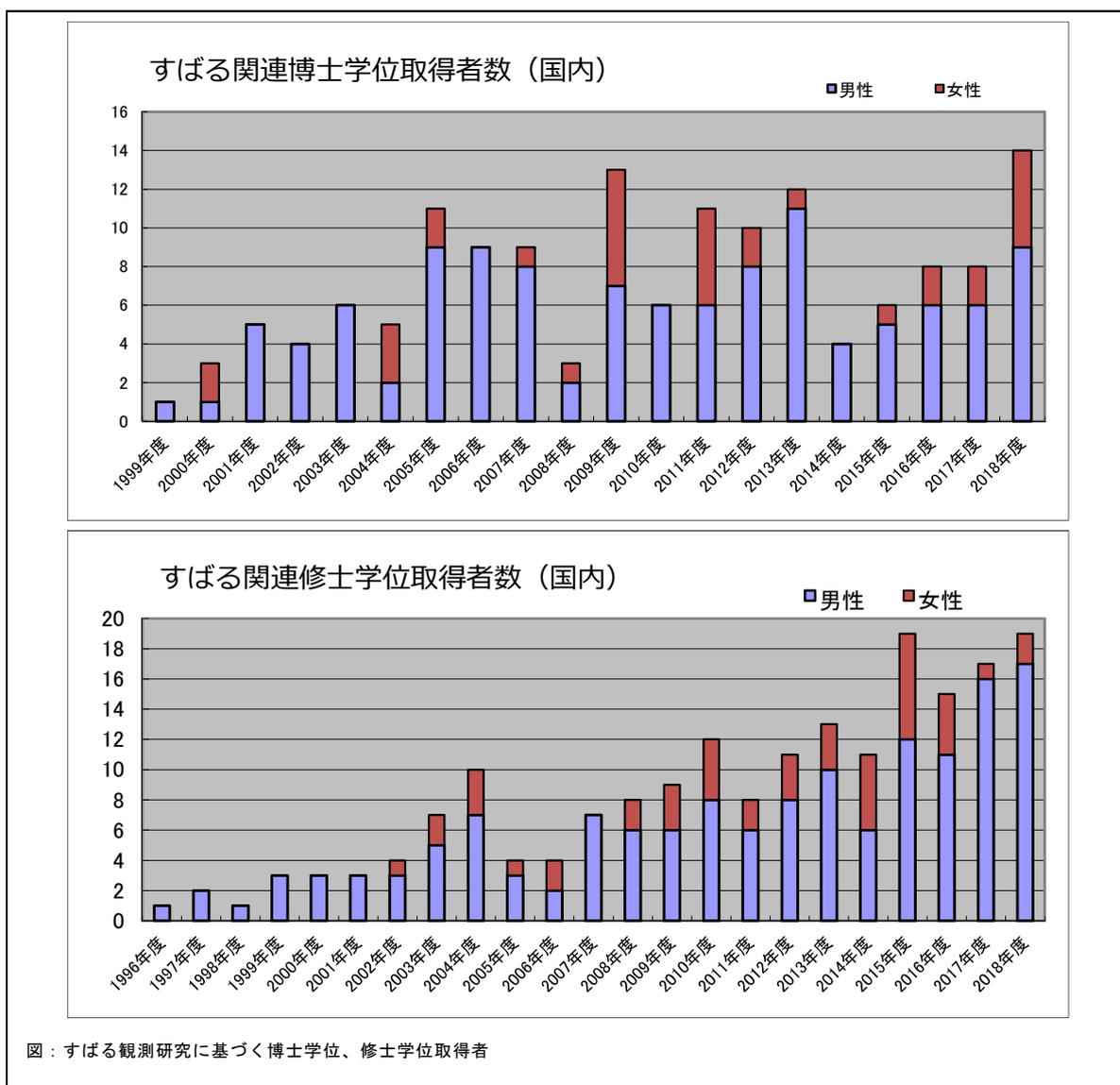
若手研究者自身による研究時間の確保や、キャリアパスの形成・展開など、その自主性に基づく取組に対し、一層配慮する必要がある。

すばるが担う重要な役割の一つとして、次世代を担う研究者の育成がある。ハワイ観測所では、総研大の授業の一環としての観測実習、日本の大学生を対象とした観測体験企画を毎年実施し、実際のすばるでの観測とデータ解析を体験する機会を提供している。また、データ解析講習会やすばるの学校を積極的に開催して、新たな大学院生・研究者がすばるの観測データを使った研究に取り組むことを支援している。近年では中国・台湾・韓国ですばるの学校を開催し、アジア諸国の特に若手研究者がすばるを使った研究を始める機会を作るなどに努めている。

若手研究者育成のための取組実績

- 大学院教育 – 博士学位取得者 148 人 (1999 年～2018 年)、修士学位取得者 191 人 (1996 年～2018 年)
- 全国の大学学部生・大学院生対象のすばるデータ解析@三鷹&海外 (直近 6 年の参加人数 : 100 人)
- 全国大学学部生対象の観測体験企画@ハワイ (直近 12 年の参加人数 : 122 人)

● 総研大観測実習@ハワイ（直近12年の参加人数：91人）



③ 研究成果の発信について

国立大学の法人化以降、個々の大学として研究成果を社会や国民に発信することが、特に求められている。また、大学共同利用機関である国立天文台においては、すばるをはじめとする観測施設・設備を、大学の基礎研究力の向上に役立てることが強く求められ、その役割を、学术界や社会に示すことが必要である。このため、研究成果について、国立天文台と大学の研究者が、それぞれどのような役割を担っているのか、整理して示すことが必要である。

国立天文台は大型の研究施設を維持運用して、それらを共同利用で研究者に提供する役割を持つ。一方、大学の研究者は、科学研究プロポーザルによって競争

的に国立天文台の共同利用時間を獲得して研究を進める。すばるでは、最新鋭の観測装置に観測時間を集中的に投資（100 夜以上）して、いち早く他の追随を許さない研究成果を上げるために、「すばる戦略枠プログラム（SSP）」を実施している。多くの大学の研究者がこれに参加しており、SSP の枠組みの中で多彩な研究を行っている

研究成果の発信については、特に、大学共同利用機関法人として、大学と共同での情報発信を重視しており、2018 年-2019 年（6 月まで）の間に、すばるを用いた研究成果を 15 件プレスリリースしている。それらの結果は、東京大学、京都産業大学、愛媛大学、東北大学、京都大学、法政大学、ハワイ大学、北アリゾナ大学、カーネギー研究所、コペンハーゲン大学、プリンストン大学、清華大学、バルセロナ大学、NASA ジェット推進研究所、中国国家天文台、情報通信研究機構などの研究者が主導、あるいは国立天文台の研究者と共同研究して成し遂げたものである。

4. プロジェクトの進捗評価と今後の留意点

(1) プロジェクトの進捗状況を踏まえた評価

① プロジェクトの進捗状況について

すばるを用いた共同利用研究は、ビッグバン後 10 億年以内の宇宙初期観測による天体の形成過程の研究や、太陽系外惑星の直接観測・性質研究等 5 つの研究テーマが設定されている。

これらの科学目標を達成するために、例えば、超広視野主焦点カメラ (HSC) を開発し、広視野を活かして宇宙誕生後 10 億年以内の遠方銀河を約 4 万個 (従来の 3 倍) 発見することや、銀河の形状を精密に測定し、重力によって光をゆがめるダークマター分布を描き出すことに成功している。また、地球型太陽系外惑星の検出に挑むため、自然科学研究機構本部の協力の下、近赤外線ドップラー分光装置 (IRD) の開発に成功している。

このように、すばるが観測開始直後から長期にわたって卓越性を保っていることは、論文総数に占める Top10%論文シェアが 19.29%、Top1%論文シェアが 4.57% であり、他の大望遠鏡と同等かそれを上回っていることや、年間 80~100 件に及ぶ共同利用観測の実施が行われていること等からも見ることが出来る。また、すばるによる観測研究に基づく博士学位取得者を 20 年間で 148 名輩出するなど、次世代を担う若手研究者の育成についても優れた実績を挙げている。さらに、こうした学術的価値のみならず、研究者と企業との共同研究によって世界的にも新しい技術開発が行われ、産業界における技術の向上や人材の育成に貢献している。例えば、HSC の製作技術及び補償光学技術は、バイオイメージングや医療用イメージングに応用可能なものであるほか、大量の観測データに係る処理技術は、データ科学の先端的な応用として期待される。

また、すばるを運用する協働体制について、東アジア天文台 (EAO) から参加する旨の方針が確認されており、オーストラリア及びカナダとの連携協力も順調に進んでいる。特に、オーストラリアからは人材面及び資金面における貢献を得るなど、日本の運用費の削減に至っている。さらに、現地の運用においては、100 名近い職員によって、年間約 240 夜の一般共同利用が滞りなく推進されている。

その他、すばるによる科学的成果・記者発表についても、1999 年から 2018 年までに 250 件以上実施するとともに、国内新聞掲載数が、2017 年度には 147 件、2018 年度には 115 件を実施し、広く社会や国民からの支持を得るための取組・情報発信が実施されている。また、公表される観測データは、遠方銀河や惑星探索などのテーマ性もあり、特に、小・中学生、高校生の好奇心を引き起こし、天文学にとどまらず、科学や文化の普及、向上に貢献している。

以上を総合的に勘案すると、本プロジェクトは順調に進捗していると評価できる。

(2) 今後の事業の推進に当たっての留意点

以上の進捗状況を踏まえ、今後のプロジェクトの推進に当たっては、以下の点に留意が必要である。

① マルチメッセンジャー天文学への貢献

近年、可視光・赤外線など電磁波を手段とする天文学と、重力波天文学、ニュートリノ観測が協調した新たな天文学（マルチメッセンジャー天文学）の重要度が増している。すばるは、超広視野主焦点カメラ（HSC）の特徴等を活かして、重力波の追跡観測により重力波源（光源）の様子を捉え、中性子星合体による元素合成の理論を証明することに成功した。引き続き、すばるの観測によって新たな天文学開拓に先導的な貢献をしていくことが重要である。

② 計画的な老朽化対策

すばるは上述したとおり、順調に成果を挙げており、今後も天文分野の最前線で活躍することが期待されている。他方で、建設開始からすでに20年以上が経過しており、老朽化や適切で定常的なメンテナンスの不十分さが顕在化してきている。その結果、地震やハリケーンによる大雨等に起因して、機器の誤動作が生じたり、雨漏り等の対応で観測時間を一部失うなど、研究を進めていく上でも問題が生じている。そのため、望遠鏡の機械系や制御系とドームなどの基幹構造・施設及び耐用年数を著しく超過している機器などで老朽化対策が真に必要なものを予め把握し、計画的な老朽化対策を講じておくことが必要である。

③ TMT との一体的な運用について

今回の TMT 計画の進捗評価では、今後の見通しが明確な状況といえる状況ではなく、建設期間の延長に伴う年次計画の延長等を承認について判断できる状況にないこと、さらに、代替候補地の可能性などすばるとの一体的運用の在り方にも課題が生じていることが確認されている。したがって、今後の TMT 計画の状況に合わせて、すばるの将来的な運用の在り方についても国立天文台が早急に検討することが求められる。

備考（用語解説等）

○宇宙再電離

宇宙で最初の天体が誕生した後、天体が発する紫外線によって宇宙全体にある中性水素ガスが光電離されること。宇宙の夜明けともいう。宇宙にあるガスは宇宙の晴れ上がり（宇宙年齢 37 万年、赤方偏移約 1,090）よりも前には高温による電離状態にあったが、次第に冷えて、その後の宇宙の暗黒時代には中性ガス状態であった。初代星（始原星ともいう）の誕生に始まる星と銀河の形成により再び電離された。【天文学辞典】

○近赤外線高コントラスト面分光装置（CHARIS）

近赤外線で太陽系外惑星の像を捉え、その分光観測を行う装置のこと。極限補償光学装置（SCE x A0）と組み合わせて、恒星からの光を取り除き、恒星の周りを回る惑星の像を高いコントラストで撮影できる。また、恒星周辺の領域を一度に分光する機能を持ち、惑星からの微かな光も逃さず分光することができる。

○近赤外線ドップラー分光装置（IRD : Infrared Doppler instrument）

太陽より軽い星の周りを回る地球型惑星を探すための高分散分光器のこと。星からの光を近赤外線波長ごとに細かく分解した強度（スペクトル）を測定することによって、星のふらつきを測定する。このふらつきを測定することによって、惑星の重さや公転周期を決めることが可能となる。

○極限補償光学装置（SCE x A0）

補償光学装置（A0）の中で、極限の解像度を実現する装置のこと。観測できる視野は大変狭い（1 秒角程度）が、その代わりに、その視野内の大気揺らぎを高精度に補正して、望遠鏡の限界解像度に迫る像を得ることができる。

○ケック望遠鏡

ウィリアム・マイロン・ケックが設立したケック財団からの寄付を受けてハワイ島マウナケア山頂に建設された、2 台の光学赤外望遠鏡。主鏡の大きさ（口径）は 10m。カリフォルニア天文学研究協会（California Association for Research in Astronomy）及び NASA が共同参加するケック天文台で運用されている。

○高コントラストコロナグラフ撮像装置（HiCIAO ; High Contrast Instrument for the Subaru next generation Adaptive Optics）

HiCIAO は、明るい天体のすぐ近くにある暗い天体の画像を撮影する装置で、太陽系外の惑星や原始惑星系円盤の発見に威力を発揮する。現在すばる望遠鏡に取り付けられている同様の装置よりも 10 倍以上暗い天体を撮影することができる。

○広視野赤外線サーベイ宇宙望遠鏡 (WFIRST ; Wide-Field Infrared Survey Telescope)

NASA が 2025 年ごろに打ち上げを予定している、口径 2.4m の赤外線宇宙望遠鏡。差し渡し約 25 分角の領域を近赤外線 (波長 $1\mu\text{m}\sim 2\mu\text{m}$) で観測できる能力を持つ。すばる望遠鏡の広視野高解像赤外線観測装置 (ULTIMATE) とは、観測できる視野がほぼ同じである。WFIRST は地上望遠鏡よりも赤外線で感度が高いが、ULTIMATE の長波長観測機能 (波長 $2\mu\text{m}\sim 2.5\mu\text{m}$) と中高分散分光機能は、WFIRST にはない機能であり、互いに相補的な役割を果たすと期待される。

○30m 光学赤外線望遠鏡 (TMT : Thirty Meter Telescope)

日本 (国立天文台)、米国 (国立科学財団、カリフォルニア大学、カリフォルニア工科大学)、中国 (国家天文台)、インド (TMT 連携機構)、カナダ (天文学大学連合) の 5 カ国の国際協力プロジェクトとして、ハワイ州マウナケア山頂域 (標高 4,012m) に、現在の世界最大の望遠鏡をはるかに上回る口径 30m の超大型望遠鏡 TMT を建設する。これによって地球型系外惑星における生命の兆候探査、銀河誕生期の宇宙史の解明、ダークエネルギーの性質の解明など、広範な研究を画期的に推し進めることを目的としている。

○SEEDS プロジェクト

2009 年に完成した高コントラストコロナグラフ撮像装置 (HiCIAO) と 188 素子補償光学装置 A0188 を用いて、約 500 個の太陽近くの恒星のまわりの惑星や星周構造を直接検出することを目指すプロジェクト。国立天文台・東京大学が中心となって推進。プロジェクトメンバーは約 120 名で、その 3 分の 2 が国内の関連研究者、3 分の 1 が米欧の関連研究者からなる国際共同プロジェクト。

○ジェミニ望遠鏡

アメリカ、イギリス、チリ、オーストラリア、アルゼンチン、ブラジルの国際共同プロジェクトとして、ハワイ島マウナケア山頂とチリ中部のパチョン山に建設された、2 台の光学赤外望遠鏡。主鏡の大きさ (口径) は 8.1m。ジェミニ望遠鏡は、アメリカ、カナダ、チリ、アルゼンチン、ブラジル、韓国が共同参加しているジェミニ天文台で運用されている。

○次世代広視野補償光学装置 (GLAO) と広視野高解像赤外線観測装置 (ULTIMATE)

補償光学は、地球大気のゆらぎをリアルタイムで測定し、鏡の形状を変化させて、天体像をより鮮明にする技術である。現在の補償光学装置では同時に天体像を補正できる空の面積は限られているのに対し、複数のレーザー光源による人口の星を使い、かつ望遠鏡の第 2 鏡を可変形鏡とすることで、従来の 200 倍以上の広い視野でシャープな天体像を得ることができる。この次世代広視野補償光学装置 (GLAO) の能力を活かす広視野の新たな赤外線観測装置を開発し、超広視野主

焦点カメラ（HSC）、超広視野分光器（PFS）と並ぶ すばる望遠鏡の主力観測装置として整備することは、2020年代においてもすばる望遠鏡が国際的な競争力を維持し、TMT と相補的な役割を果たす上で極めて重要である。

○重力波

一般相対性理論などの相対論的な重力理論一般に予言される重力場の波動的振動。一般相対性理論では、重力波は物質の四重極モーメント以上の高次モーメントの時間変化から放射される横波で、その伝播速度は光速に等しい。【天文学辞典】

○重力レンズ

遠くの天体から出た光が、途中にある銀河や銀河団の重力場によって曲げられる現象。重力場が凸レンズのように働くことから名づけられた。一般相対性理論の帰結の一つであり、重力レンズ方程式で記述される。重力場となる天体をレンズ天体、重力レンズ効果を受ける天体を光源という。【天文学辞典】

○主焦点カメラ（Suprime-Cam）

主焦点に取り付ける観測装置で、満月とほぼ同じ大きさの広い視野を一度に撮像することが可能である。銀河の誕生・進化や宇宙構造の研究、太陽系外縁部の小天体の探査等で優れた成果をあげた。約7倍の広視野化を果たした超広視野主焦点カメラ（HSC）の定常運転に伴い、2017年度に運用を終了した。

○主焦点超広視野分光器（PFS; Prime Focus Spectrograph）

PFS は、すばる望遠鏡主焦点に2,400本の光ファイバーを並べ、同時に多数の天体を観測できる分光装置であり、ダークエネルギー、銀河考古学、銀河進化などの研究に威力を発揮することが期待される。東京大学カブリ数物連携宇宙研究機構（IPMU）が全体計画をとりまとめ、国立天文台が望遠鏡インターフェースを担当し、他にアメリカ、台湾、フランス、ブラジル及びドイツが参画し、研究計画を推進している。

○ダークエネルギー

現在の宇宙の平均エネルギー密度の約4分の3を占めていると考えられる正体不明の成分。その存在が認められるようになったのは、遠方のIa型超新星の観測データによる宇宙の加速膨張の発見（1998）による（2011年ノーベル物理学賞）。加速膨張は実効的に負の重力（斥力）を及ぼすような何らかの成分が宇宙を満たしていることを示唆する。【天文学辞典】

○ダークマター

現在の宇宙の平均エネルギー密度の約4分の3はダークエネルギーによって占められているが、元素からなる通常の物質（宇宙論ではこれをバリオンと呼ぶ

ことが多い)は、全体のわずか5%以下でしかないことがわかっている。ダークエネルギー以外の宇宙の成分の8割以上(すなわち宇宙の5分の1以上)を占める成分をダークマターと呼ぶ。ダークマターは通常物質と同じく重力相互作用を及ぼすものの、それ以外の相互作用はほとんど及ぼさない。【天文学辞典】

○太陽系外惑星(系外惑星)

太陽以外の恒星を周回する惑星。1995年に発見が報告されて以来、急速に研究が進み、これまでに2000を超える惑星系候補がみついている。惑星は木星のような巨大ガス惑星と、地球のような岩石惑星に大別される。地球型の系外惑星は生命の存在可能性を探るうえで重要なターゲットであり、すばる望遠鏡などの地上望遠鏡や宇宙望遠鏡で探査が行われている。一方、生命探査のためには地球型系外惑星の直接撮像が必要となり、TMTなど次世代望遠鏡の課題となっている。

○多天体近赤外撮像分光装置(MOIRCS; Multi-Object Infrared Camera and Spectrograph)近赤外線用としては巨大な400万画素の検出器を二個搭載し、広い視野を撮像する能力を持った赤外線用デジタルカメラであり、同規模の大型望遠鏡では世界で初めて近赤外線の波長域で一度に多数の天体の分光観測を可能にした装置である。この機能により観測効率が劇的に向上し、遠方銀河の研究に威力を発揮している。

○超広視野主焦点カメラ(HSC; Hyper Suprime-Cam)

HSCは、すばる望遠鏡主焦点に設置される1.5度の超広視野角をもつ可視光カメラであり、これまでに大きな成果を挙げた30分角の視野角をもつSuprime-Camの約10倍の視野を持つ。この装置で宇宙の広い範囲の極めて多数の天体を同時に観測することができ、宇宙におけるダークマターの分布、宇宙初期の銀河、太陽系の外側の天体などの研究に画期的な進展をもたらすことができる。

○ドップラー法

太陽系外惑星の検出方法の一つで、最も古い伝統的な方法。視線速度法とも言う。惑星をもつ恒星は、惑星の重力を受け惑星との共通重心の周りを公転する。惑星の軌道面が視線方向に対して垂直(軌道傾斜角が0度)でない限り、恒星の微小な公転運動が視線方向の運動としてドップラー効果でとらえられる。恒星からの光のドップラー偏移を通してこの視線方向の運動を検出する方法をドップラー法(またはドップラーシフト法)という。【天文学辞典】

○ニュートリノ

電荷を持たないレプトンに分類される素粒子で、電子ニュートリノ、ミューニュートリノ及びタウニュートリノの3種類(それぞれの反粒子を含めると6種類)ある。これらは電荷を持つレプトンである電子、ミューオン(ミュー粒子)及び

タウ粒子と対をなしている。他の素粒子と弱い相互作用しか起こさないため、検出には巨大な検出器が必要となる。素粒子の標準理論では質量ゼロとされているが、近年ニュートリノ振動の観測によりわずかな質量を持つことが示唆されている。【天文学辞典】

○秒角

角度の単位で、1度の3,600分の1に対応する角度。どれだけ細かいものを見分けられるかという、望遠鏡の解像度（視力）を表す指標としても使われる。

○ファイバー多天体分光器（FMOS ; Fiber Multi Object Spectrograph）

FMOSは、主焦点の広い視野（30分角）の中で400個もの天体を近赤外線と同時に分光観測できる装置である。星団中の褐色矮星（恒星の中で最も低温な星）、遠方宇宙の銀河やクエーサーなど、様々な天体を統計的に研究する場面で威力を発揮する。

○補償光学装置（AO）

大気の影響による星像の乱れを実時間で補正し、望遠鏡の解像力を向上させる装置の総称である。大気揺らぎを参照星やレーザーガイド星（LGS）を用いて計測し、可変形鏡などを用いて星像の乱れを実時間で補正する。その実現方法によって、極限補償光学、広視野補償光学など数種類に分かれる。

○188素子補償光学装置（AO188）

すばる望遠鏡用に開発された、188素子の可変形鏡を用いた補償光学装置（AO）。レーザーガイド星（LGS）との組み合わせで用いられることも多い。2007年度から運用を開始した。

○マルチメッセンジャー天文学

天体現象によって発生する電磁波、宇宙線やニュートリノなどの粒子及び重力波を、情報を運ぶ運び手（メッセンジャー）と見立てて、複数のメッセンジャーを用いて天体現象を総合的に解明する天文学のこと。

○レーザーガイド星機能つき補償光学装置（LGS/AO188）

補償光学装置が働くためには、大気揺らぎを測るための参照星が必要である。しかし、星の少ない領域を観測するときには適切な参照星を観測できないことがある。そこで、地上からレーザーを打って、大気中に疑似星を作る技術が開発された。これをレーザーガイド星（LGS）という。主としてナトリウムレーザーが用いられ、上空10km程度にある大気のナトリウム層を光らせて疑似星を作る。LGSは188素子補償光学装置（AO188）と組み合わせて、2007年からシステムの運用を開始した。

科学技術・学術審議会 学術分科会 研究環境基盤部会
学術研究の大型プロジェクトに関する作業部会 委員等名簿

【学術研究の大型プロジェクトに関する作業部会委員】

(臨時委員)

小林良彰	慶應義塾大学法学部教授、社会科学データ・アーカイブセンター長
竹山春子	早稲田大学理工学術院教授
松岡彩子	宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所准教授
山本智	東京大学理学系研究科教授

(専門委員)

岡部寿男	京都大学学術情報メディアセンター教授
城石俊彦	理化学研究所バイオリソース研究センター・センター長
鈴木裕子	鈴木裕子公認会計士事務所長
田村裕和	東北大学大学院理学研究科教授
東嶋和子	科学ジャーナリスト
中野貴志	大阪大学核物理研究センター・センター長
八田英二	学校法人同志社総長・理事長
原田尚美	海洋研究開発機構 地球表層システム研究センター・センター長
樋口知之	中央大学理工学部経営システム工学科教授
吉田善章	東京大学大学院新領域創成科学研究科先端エネルギー工学専攻教授

【アドバイザー】

井上一	JAXA 宇宙科学研究所名誉教授
岡村定矩	東京大学エグゼクティブ・マネジメント・プログラム（東大EMP）チェアマン補佐
永原裕子	日本学術振興会学術システム研究センター副所長

(敬称略、五十音順)