

大型研究計画に関する進捗評価について（報告）

大型電波望遠鏡「アルマ」による国際共同利用研究の推進

平成29年11月22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
「大型電波望遠鏡『アルマ』による国際共同利用研究の推進」計画について	
1. 進捗評価の実施方法	4
2. 計画の概要	
（1）計画の概要と主な内容	6
（2）実施体制	8
（3）年次計画及び予算規模	10
3. 計画の進捗状況	
（1）科学目標の進捗状況	12
（2）「太陽系以外の惑星系とその形成過程を解明」（科学目標1）の状況	12
（3）「銀河形成と諸天体の歴史を解明」（科学目標2）の状況	13
（4）「膨張宇宙における物質進化を解明」（科学目標3）の状況	14
（5）論文の状況	15
（6）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	15
（7）前回の進捗評価（平成25年）において示された「プロジェクト推進 に当たっての留意事項等」への対応状況	16
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	20
（2）今後の事業の推進に当たっての留意点	21
備考（用語解説等）	24
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	26

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、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、「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ーロードマップー」※¹ 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。

「大型電波望遠鏡『アルマ』による国際共同利用研究の推進」の年次計画においては、10年計画の中間に当たる5年目の平成29年度に、進捗状況等の確認を行うことが記載されており、このたび、本作業部会において進捗評価を実施した。

進捗評価に当たっては、本作業部会が平成29年3月にまとめた「学術研究の大型プロジェクトの推進方策の改善の方向性」（以下「改善の方向性」という。）に基づき、関係分野の専門家から助言を得つつ、委員が研究現場の状況を確認するための現地調査、ヒアリング及びそれらを踏まえた審議を実施した。

また、このたびの進捗評価の実施に当たっては、総合科学技術・イノベーション会議（CSTI）が先に実施した「国家的に重要な研究開発の評価の結果」（平成29年3月）も活用した。

※1 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。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

「大型電波望遠鏡『アルマ』による国際共同利用研究の推進」計画 について

1. 進捗評価の実施方法

現地調査・ヒアリング

今回の進捗評価に当たっては、改善の方向性に基づき、次のとおり、東京都三鷹市にある国立天文台を、本作業部会委員等13名が訪問して現地調査を行った。

(1) 日 時： 平成29年10月24日（火）10：00～17：00

(2) 参加委員： 現地調査に参加した本作業部会委員等は、以下のとおり。（○は主査）

（作業部会委員）井本 敬二、栗原 和枝、鈴木 洋一郎、○小林 良彰、川合 知二、
新野 宏、原田 慶恵、観山 正見、安浦 寛人、横山 広美

（アドバイザー）井上 一、國枝 秀世、永原 裕子

(3) 概 要：

・機関からのヒアリング（40分）

国立天文台から、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。

（国立天文台説明者）林 正彦 台長、小林 秀行 副台長、

井口 聖 チリ観測所 東アジアアルマプロジェクトマネージャー

・現地視察（55分）

国立天文台から受信機（バンド4、8、10）の製造・試験設備及びクリーンルームについて説明を受けつつ、状況確認を行った。

・研究者との意見交換（40分）

アルマに関して、異分野連携の促進、観測データの解析、研究集会の開催、広報などに携わる若手研究者のほか、データ品質保証システム開発の東アジア代表、将来受信機開発チームのリーダー、総合研究大学院大学における教育に携わる研究者から、現場で感じている課題などについて、ヒアリングを行った。

・機関との意見交換（60分）

現地調査を踏まえ、国立天文台と、年次計画の終了に向けた今後の推進方策や、年次計画終了後の方針、若手研究者を中心とする契約職員の待遇などについて意見交換を行った。

・ まとめ（４５分）

以上を踏まえ、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行った。その後、国立天文台に、現地調査の結果の概要を伝達した。

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： 平成２９年１１月２２日（水）１０：００～１１：００

（２）審議事項： 進捗評価報告書（案）の審議

2. 計画の概要

(1) 計画の概要と主な内容

アルマ計画は、日米欧の諸国が協力して、チリ・アタカマの標高5,000mの高地に「アタカマ大型ミリ波サブミリ波干渉計（アルマ）」（以下「アルマ」という。）を建設し、運用するものである。

直径12mアンテナ50台のアレイ（＝干渉計）と、これらの性能を高度化するための「ACA（アタカマ・コンパクト・アレイ）システム」（7mアンテナ12台及び12mアンテナ4台で構成）を組み合わせ、一つの巨大な電波望遠鏡であるアルマを構成する。

アルマの特徴は、以下の3点である。

- ①ハッブル宇宙望遠鏡の10倍の高い解像度で、天体を細かく観測
- ②これまでの電波望遠鏡の100倍の高い感度で、遠くの天体を観測
- ③これまでの相関器の10倍の高い分光能力で、存在する物質を観測

これらの性能を生かして、光や赤外線では見えない天体や宇宙物質を、ミリ波・サブミリ波観測で捉えることにより、以下のアルマ科学目標の三本柱の達成を目指している。

（科学目標1）太陽系以外の惑星系とその形成過程を解明

（科学目標2）銀河形成と諸天体の歴史を解明

（科学目標3）膨張宇宙における物質進化を解明

日本（国立天文台）は、平成25年度までにACAシステム、ACAシステム用高分散相関器及び日本担当分の受信機システムを完成させた。

平成23年度から24年度にかけて初期科学運用（共同利用観測）を実施し、平成24年度には本格運用（共同利用観測）を開始した。^{※2}

アルマはその高解像度・高感度性能を遺憾なく発揮し、数々の重要な成果を既に創出し始めている

また、電波望遠鏡は、銀河や星の材料となる宇宙空間の塵やガスが発する低温の電波を観測することができ、主に、銀河や星・惑星の誕生過程を解明することに強みを持っている。一方、光赤外線望遠鏡は、活発に活動する銀河や星等が発する高温の可視光や赤外線を観測することができ、銀河や星・惑星の成長過程を解明することに強みを持っている。

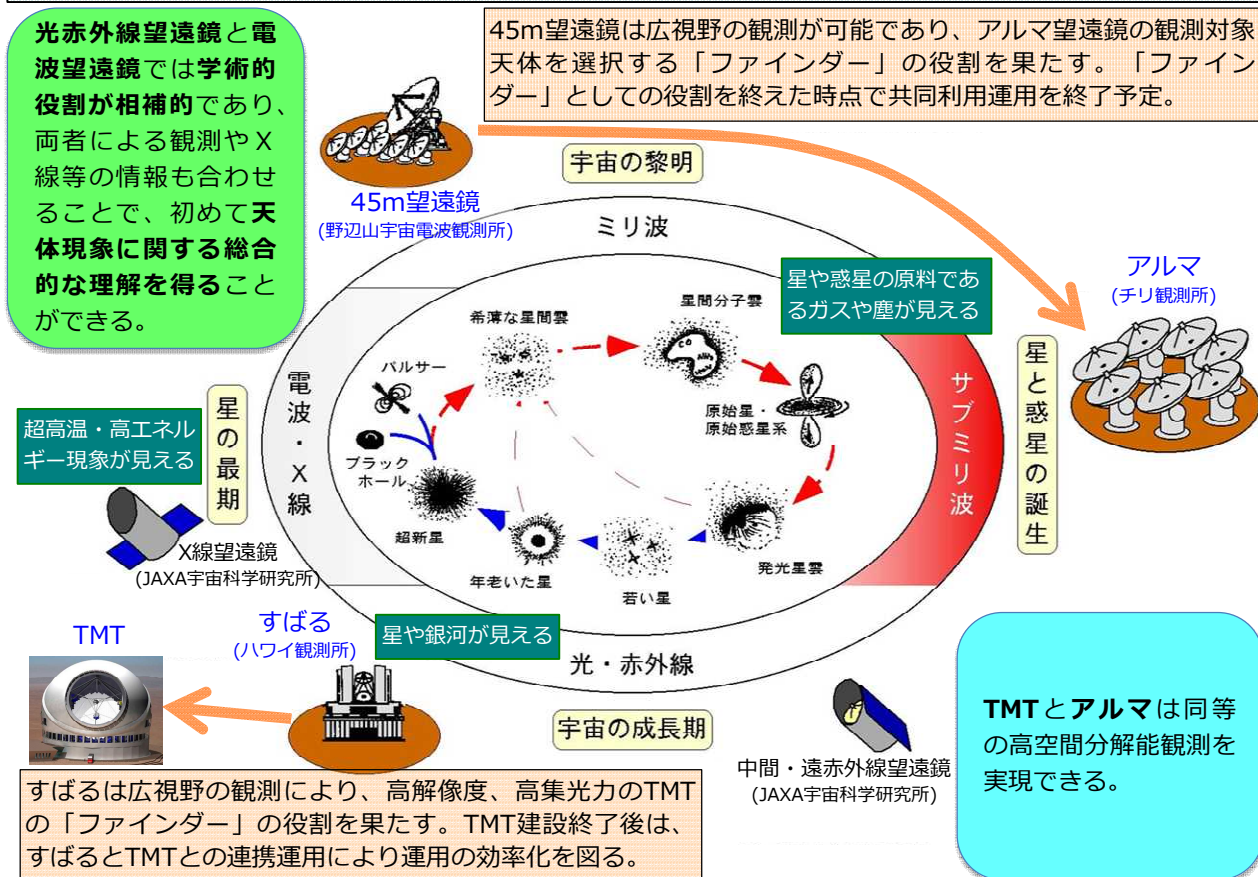
国立天文台が運用・計画する望遠鏡と学術上の役割分担は次のとおりである。

※2 当初から、日米欧が建設地であるチリの協力を得て、国際協力で建設を進めてきた。日本の建設参加は米欧に比べて2年遅れたが、開始後は建設を着実に進め、米欧に先んじてアンテナ第一号を完成させた。本計画において日本が製造した主要装置は「高精度アンテナ（12mアンテナ4台、7mアンテナ12台）」、「受信機システム（3つの周波数帯の受信機、合計219台）」、「高分散相関器」であり、平成25年度までに完成させた。この日本独自のACAシステム及び受信機システムは、従来のミリ波サブミリ波領域の観測装置を凌駕する性能を実現して、米欧のシステムと相補的な役割を果たしている。平成26年6月13日には最後のアンテナ（欧州製の12mアンテナ）が山頂施設に設置され、66台全てのアンテナの移設を完了した。平成23年度には、約1/4のアンテナ台数で初期科学運用（第1回共同利用観測）を開始した。そして、本格運用を開始した平成24年度以降、毎年1回の頻度で共同利用観測の公募を行っている。

国立天文台が運用・計画する望遠鏡と学術上の役割分担

望遠鏡	学術上の役割分担
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。
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。
すばる (光赤外：大型)	広視野観測によりTMTの「ファインダー」の役割を果たす。
岡山1.8m光学望遠鏡 (光赤外：小型)	銀河・恒星・太陽系外天体の光学赤外線観測を行うとともに、国内で観測できる望遠鏡として、学生及び院生の教育に活用する。

国立天文台が運用・計画する望遠鏡と学術上の役割分担



（２）実施体制

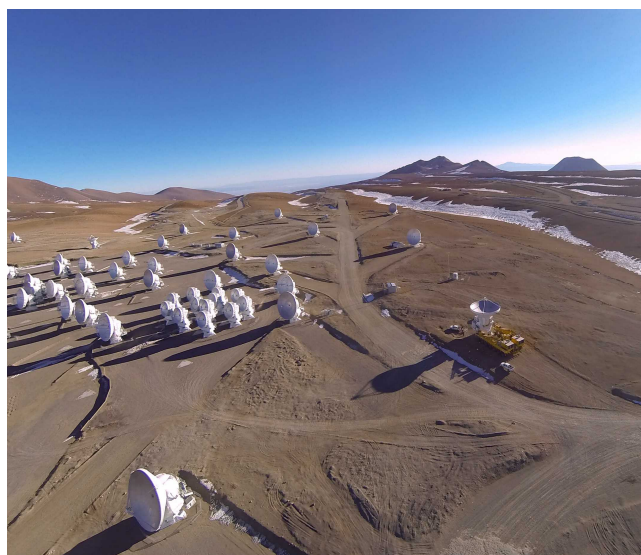
アルマは、日本の自然科学研究機構（NINS）、米国国立科学財団（NSF）、欧州南天天文台（ESO）が、チリ共和国と協力して運用する国際的な天文観測施設である。

アルマの運用費は、NINS及びその協力機関である台湾中央研究院（AS）と韓国天文宇宙科学研究所（KASI）、NSF及びその協力機関であるカナダ国家研究会議（NRCC）並びにESOによって分担される。

アルマの運用は、国立天文台が東アジアを、米国北東部大学連合（AUI）が管理する米国国立電波天文台（NRAO）が北米を、ESOがその構成国をそれぞれ代表して実施している。合同アルマ観測所（JAO）は、アルマの建設、試験観測、運用の統一的な執行及び管理を行うことを目的としている。JAOの運用に係る中核的なポジションには、日米欧から国際職員約40名が派遣され、平成29年11月現在、国立天文台職員10名が貢献している。

日米欧それぞれの執行機関によって運営管理されるアルマ地域センターでは、アルマにおける科学的な相互交流や、それぞれの地域の研究者への研究支援及び技術的支援が行われる。各地域の運用マネージャは、JAOと協力してアルマの運用及び保守を行い、地域のアルマユーザーコミュニティに科学的・社会的価値のある成果物を提供する責任を負う。

この枠組みは、平成27年12月にNINS、NSF及びESOが署名した「アルマ望遠鏡の運用に関する三者協定書」※³で規定されており、三者はこの協定に基づいてアルマの国際協力運用を行っている。

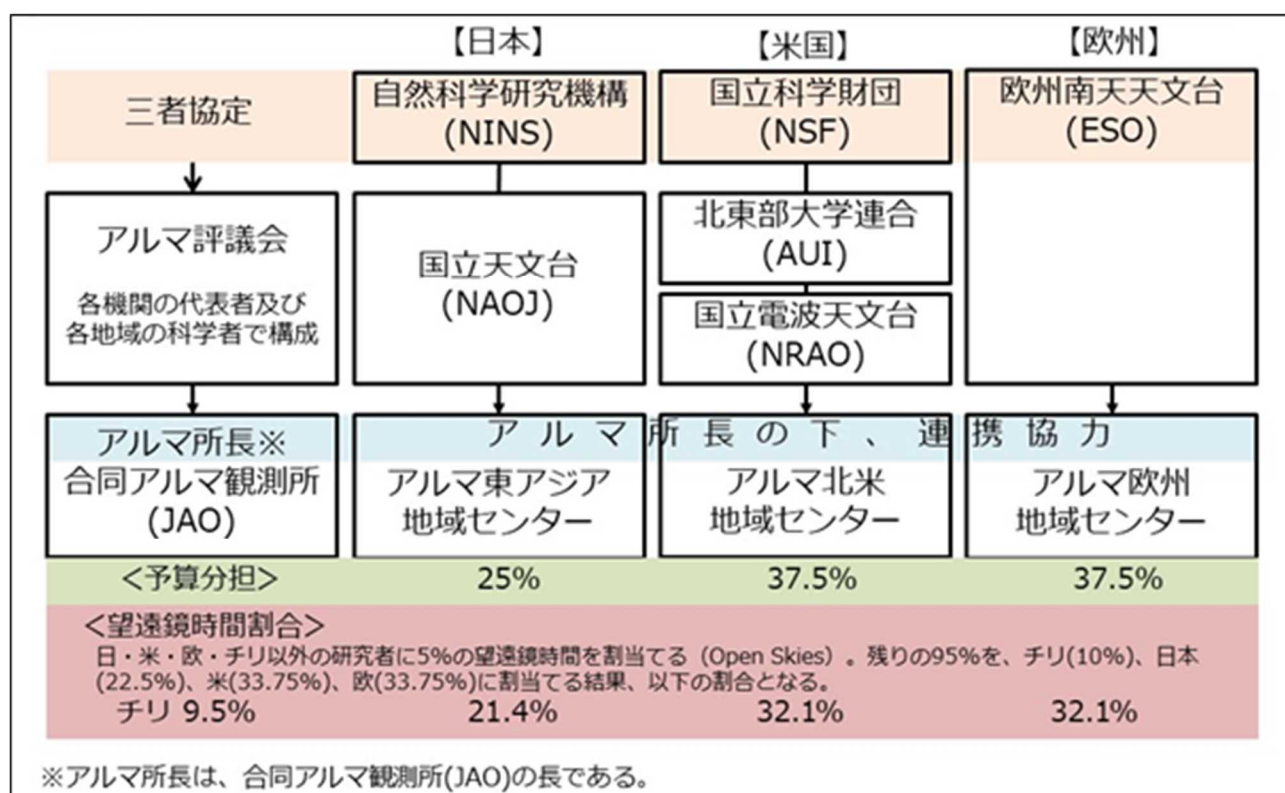


アルマ望遠鏡最後のアンテナが山頂施設に到着した直後の様子（平成26年6月）

※3 「アルマ望遠鏡の運用に関する三者協定書」に続き、平成28年11月17日、国立天文台、AUI及びESOは、「アルマ望遠鏡の三者管理協定」に署名を行った。

国際協定の枠組みとして、建設期は米欧二者と日米欧三者協定を併用していたが、今回新たに署名した2つの協定によって、日米欧三者の協定に一本化され、日米欧が対等にアルマ望遠鏡の国際協力運用を、今後30年にわたって継続する枠組みが確定した。

「アルマ望遠鏡の運用に関する三者協定書」に基づく枠組み



また、観測提案の採択から観測までの流れは次のとおりであり、高い優先順位で採択された観測提案は、早期に良い観測条件の下で観測を行うことができ、研究成果に直結する観測データを得られることにつながっている。^{※4}

- ① 観測提案は、主研究者 (P I) が所属する各地域センター^{※5}を経由して申請され、合同アルマ観測所 (JAO) が運営する「観測提案審査委員会」で審査される。
- ② 「観測提案審査委員会」では、全ての観測提案を審査し、P I の所属地域を考慮せずに、1番から最後の提案までの優先順位付けを行う。
- ③ その上で、優先順位の1番から順番に、P I が所属する各地域に割り当てられた観測時間を満たすまで観測提案を採択していく。
- ④ 採択された観測提案には、P I が所属する地域とは独立して優先順位が付されており、優先順位の高い観測提案から観測が実施される。

※4 平成23年度に初期科学運用 (第1回共同利用観測) を開始して以来、毎年1回の頻度で共同利用観測の公募を行っている。第3回共同利用観測 (平成25年12月に提案締切) では、全世界から1,381件に及び観測提案が寄せられ、それまでのハッブル宇宙望遠鏡の世界記録を塗り替えた。その後の共同利用観測でも提案件数は増加し、第6回共同利用観測 (平成29年4月に提案締切) までに全世界から寄せられた観測提案の総数は、8,241件に上る。電波天文のみならず、光・赤外、理論、物理、地球・惑星物理といった様々な分野の研究者が参加しており、これまでの望遠鏡と比べて傑出した観測性能を持つアルマに対する全世界の研究者の高い期待が示された。

※5 国立天文台では、三鷹キャンパスに「アルマ東アジア地域センター」を設置し、東アジア地域の研究者がアルマで共同利用観測を行う際の窓口としている。アルマ東アジア地域センターでは、研究者がアルマを用いて最大限の科学的成果を出せるよう、観測提案の準備から観測準備、校正された科学的なデータの配布に至るまで、アルマでの観測に関する全てのユーザーに対する支援を行っている。また、アルマのユーザー支援活動の他に、観測システムの運用・科学評価・開発や広報活動を、合同アルマ観測所 (JAO) と協力して行っている。

また、アルマ東アジア地域センターの活動は、台湾及び韓国と協力して進められている。支部が台湾の中央研究院 (ASIAA) 及び韓国天文学宇宙科学研究所 (KASI) に設置され、東アジアの研究者に対し、アルマの観測提案・観測の準備からデータ解析までを支援している。

(3) 年次計画及び予算規模

アルマに係る年次計画及び予算規模は次のとおりである。

(年次計画)

計画名称	大型電波望遠鏡「アルマ」による国際共同利用研究の推進										
実施主体	【中心機関】 日本（自然科学研究機構国立天文台）、米国（国立科学財団）及び欧州（欧州南天天文台） 【連携機関】 北大、東北大、筑波大、茨城大、東大、東工大、慶応大、明星大、工学院大、日大、日本工業大、新潟大、富山大、上越教育大、名大、京大、大阪府大、神戸大、広島大、愛媛大、九大、鹿児島大、台湾（天文及天文物理研究所）、韓国（天文学宇宙科学研究院）										
所要経費	建設費総額 約251億円 （日本負担分 全体の約25%の貢献割合） 年間運用経費 30億円					計画期間	建設期間 平成16～23年度、8年計画（受信機一部は平成25年度まで） 運転期間 平成23年度から運用開始（以後30年間運用予定） （事前評価 平成12、15年、中間評価 平成20年、進捗評価 平成25年度）				
計画概要	日米欧の三者による国際協力プロジェクトとして、南米チリのアタカマ高地（標高5,000m）に口径12mアンテナ（54台以上）及び口径7mアンテナ（12台）の高精度電波望遠鏡等から構成される「アタカマ大型ミリ波サブミリ波干渉計」を建設・運用し、天体の材料物質（低温ガス・塵）をミリ波サブミリ波観測でとらえ、惑星系や銀河等の形成過程を解明することや生命関連分子の発見を目指す。（アルマ望遠鏡は、ハッブル宇宙望遠鏡の10倍高い解像度、これまでの電波望遠鏡の100倍近い感度、これまでの相関器の10倍高い分光能力に達する性能を有する世界最高のミリ波サブミリ波望遠鏡である。）										
研究目標（研究テーマ）	1. アルマ望遠鏡の建設・運用 2. 銀河・惑星系の形成過程や生命の起源の解明										
年次計画	H25	H26	H27	H28	H29	H30	H31	H32	H33	H34	
1. アルマ望遠鏡の建設・運用 アタカマ大型ミリ波サブミリ波干渉計の建設・運用を行う。 日本は、ACA（アタカマ・コンパクト・アレイ）システム（7m×12台＋12m×4台、ACA用高分散相関器）、サブミリ波を中心とする3つの周波数バンドの受信機群を分担して運用。運用は25%分担。	受信機の設置・本格運用開始（平成25年～34年）										
2. 銀河・惑星系の形成過程や生命起源の解明 太陽系以外の惑星形成や銀河形成の解明に取り組むとともに、生命の起源に関するさまざまな物質の探査を実施する。 ・太陽系以外の惑星系とその形成過程を解明する。 原始惑星系円盤等の構造の観測から、惑星形成環境の多様性を明らかにし、惑星形成の主たるシナリオを構築する。 ・銀河形成と諸天体の歴史を解明する。 遠方から近傍に至る多様な銀河を観測し、星形成活動の変動や銀河衝突による進化の過程を解明する。 ・膨張宇宙における物質進化を解明する。 生命の起源に関するさまざまな物質の探査を実施し、生命関連物質等の発見に結びつく萌芽研究を行う。	原始惑星系円盤等の構造を観測 惑星形成の主たるシナリオ構築 遠方から近傍銀河までを観測 星形成活動の変動の解明や銀河形成のシナリオの構築 萌芽的に、さまざまな物質の探査 生命関連物質等の萌芽的研究										
評価の実施時期	進捗評価	—	—	—	中間評価	—	—	—	—	期末評価	

(これまでの予算措置の状況)

建設費(※) : 251億円(平成16年度～平成23年度までの経費)

運転経費・実験経費 : 215億円(平成16年度～平成29年度までの経費)

※日本の貢献割合は建設費全体の25%

3. 計画の進捗状況

(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. 太陽系以外の惑星系とその形成過程を解明	原始惑星系円盤を高空間分解能で分解し、惑星が誕生する現場を明らかにした。地球軌道に似た軌道を持つ惑星の誕生現場を初めて観測することに成功した。	惑星系形成の多様性を解明するための観測結果が続々と創出されている。 ⇒本科学目標の達成に必要な空間分解能を実現。
2. 銀河形成と諸天体の歴史を解明	史上最遠方の酸素の検出、重力レンズ効果によるアインシュタインリングの可視化など、多くの発見があった。	遠方から近傍の様々な銀河の観測結果が創出されている。 ⇒本科学目標の達成に必要な観測感度を実現。
3. 膨張宇宙における物質進化を解明	最も単純な「糖」分子や枝分かれ構造を持つ有機分子などの発見があった。アミノ酸など生命に直接関連する分子の発見には至っていない。	惑星形成領域からの「糖」分子の発見など、今後を期待できる成果が着実に出ている。 ⇒本科学目標の達成に必要な分光能力を実現。

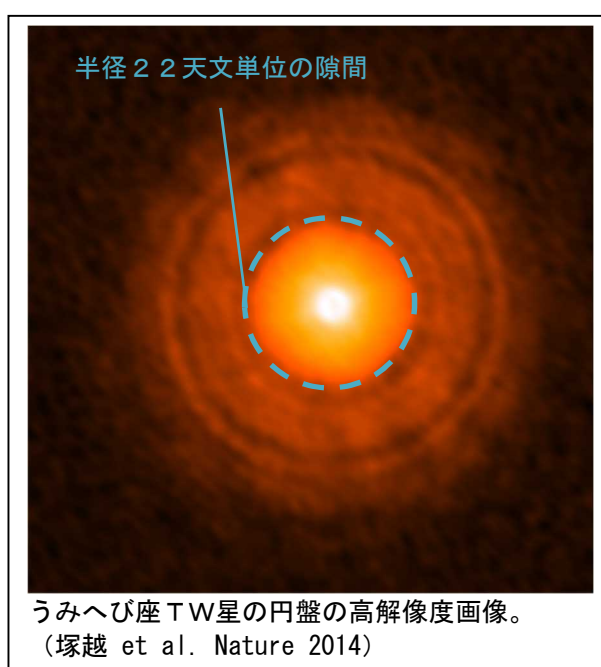
(2) 「太陽系以外の惑星系とその形成過程を解明」(科学目標1)の状況

アルマの観測から、様々な惑星誕生現場において、惑星が形成されている可能性を示す隙間が発見され、「私たちの地球がある太陽系がどうやってできたのか」という、人類の世界観に関わる重要なテーマに迫る成果が続々と出てきた。

茨城大学及び東京工業大学の研究チームは、うみへび座TW星の周囲の塵円盤を異なる2周波の電波で比較した結果、半径22天文単位の隙間内に大きな塵が欠乏（小さな塵が卓越）していることを明らかにし、理論モデルとの比較から、この隙間に多数の海王星程度の質量を持つ惑星が、既に誕生している可能性を初めて指摘した。

これに関連して、海外の研究チームでは、うみへび座TW星の周囲の塵円盤の観測から、地球軌道に似た軌道を持つ惑星の誕生現場を発見し、地球型惑星が形成されている可能性を示す画期的な成果を発表している。

また、東京大学の研究チームは、若い原始



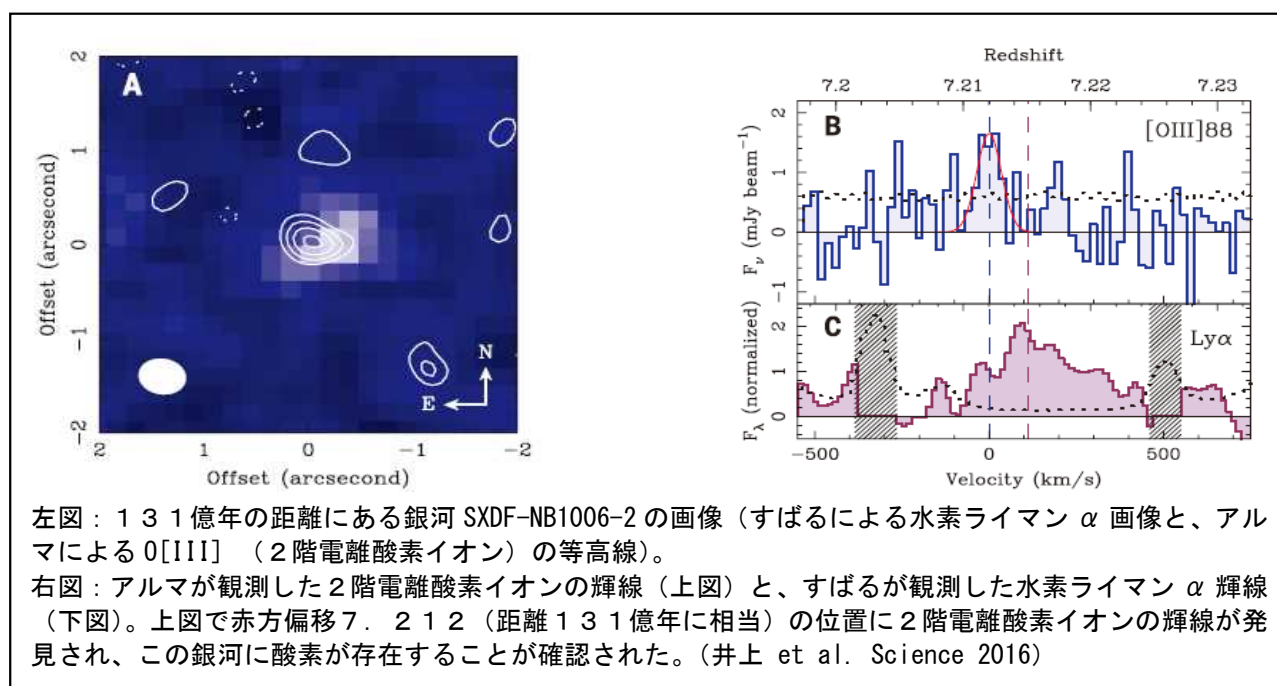
星 L1527 を観測し、生まれつつある円盤の外縁部で化学組成が劇的に変化していることを発見した。このような観測はアルマによって初めて可能になったものであり、原始惑星系円盤の構造、サイズ、そこでおこる物理現象と化学的変化の必然的な関係を示し、惑星系円盤進化の理解に大きな貢献を果たしている。今後、太陽系の成り立ちについての理解がさらに深まることが期待される。

（３）「銀河形成と諸天体の歴史を解明」（科学目標２）の状況

「銀河系がどうやってできたのか」という、銀河形成の由来に関わる重要なテーマに迫る成果が続々と創出され、初期宇宙での星形成・銀河形成を探るため、アルマが非常に強力であることが示された。

大阪産業大学の研究チームは、大型光学赤外線望遠鏡「すばる」で発見された１３１億年前の距離にある銀河を、アルマで観測し、２階電離酸素イオンの輝線を検出した。これは、酸素の存在が確認された天体としては当時の観測史上最遠方記録であった。この銀河は、宇宙誕生後１０億年までに宇宙全体がイオン化した「宇宙再電離」の原因天体の典型例と考えられ、宇宙初期の銀河形成を理解する上で極めて重要な発見となった。

その後、海外の研究チームでは、ハッブル宇宙望遠鏡で発見された銀河 A2744_YD4 をアルマで観測し、２階電離酸素イオンの輝線を検出した。赤方偏移の測定から、この銀河までの距離が１３２億年であることが分かり、酸素が検出された天体としての最遠方記録を更新した。また、塵が放つ電波の観測から塵の総量を推測した結果、活発な星形成が２億年前（今から１３４億年前）から始まったことが示唆され、宇宙初期の爆発的星形成開始時期の特定に向けた重要な成果となっている。



(4)「膨張宇宙における物質進化を解明」(科学目標3)の状況

最も単純な「糖」分子や枝分かれ構造を持つ有機分子などが、星形成領域や惑星系で発見されてきているが、「生命の材料はどこからやってきたのか」という、生命関連分子(アミノ酸)の発見にはまだ至っていない。

星形成領域での発見

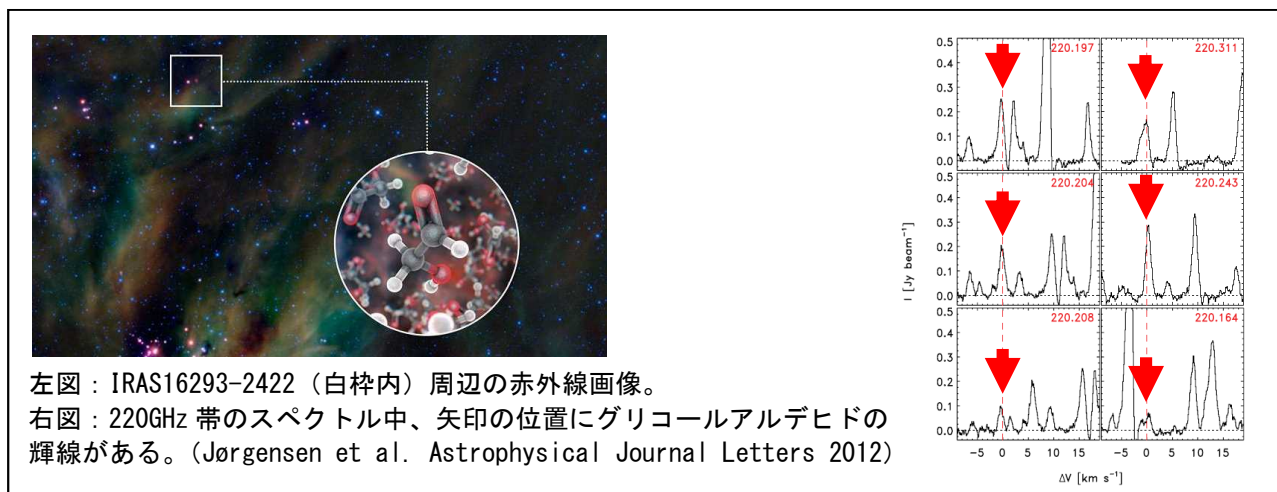
東北大学の研究チームは、大マゼラン雲の大質量原始星をアルマで観測し、原始星を取り囲む多様な分子が含まれる暖かな雲「ホットコア」を、銀河系外で初めて発見した。これまでホットコアの観測は、望遠鏡の性能不足から我々の天の川銀河の中にある天体のみに限られていたが、星や惑星の形成、そして、それに伴う物質の化学的進化といった現象は、どの銀河の中でも起こり得る現象である。今回発見されたホットコアは、銀河系内のホットコアとは組成が大きく異なることが分かり、宇宙における物質の多様性を探る一歩となった。

宇宙における物質の多様性に関し、海外の研究チームでは、銀河中心の星形成領域「いて座B2」において、枝分かれした構造を持つ有機分子イソプロピルシアニド($i\text{-C}_3\text{H}_7\text{CN}$)を、宇宙空間で初めて発見した。枝分かれ構造は、アミノ酸に特徴的な構造であり、アミノ酸のもとになり得る分子が、宇宙空間に大量に存在することが裏付けられている。

惑星系での発見

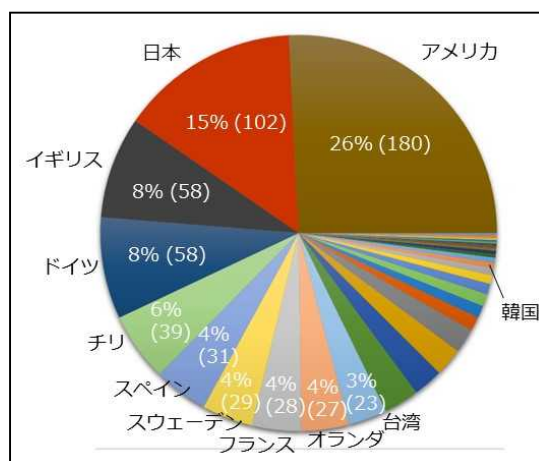
筑波大学や東京工業大学の研究者が参画する国際研究チームでは、うみへび座TW星の円盤の高感度分光観測を行い、円盤内でメタノール分子が放つ電波を初めて検出した。メタノールは様々な有機分子の材料になるため、原始惑星系円盤内での化学変化を理解するための重要な成果である。

また、海外の研究チームでは、若い太陽のような星 IRAS 16293-2422 の周りの、今まさに惑星が作られつつある領域に、最も単純な糖類分子(グリコールアルデヒド)を初めて発見した。生命に密接に関連する分子が、惑星の形成領域で既に作られていることが分かり、「地球生命の起源は宇宙？」という普遍的な疑問に迫る重要な研究成果となっている。



(5) 論文の状況

初期科学運用の開始から約5年8ヶ月の時点（平成29年6月14日）の調査で、アルマの論文総数は全世界で698本に及んだ。Nature、Science などインパクトの高い雑誌へも多数の論文が掲載されている。（Nature と Science の合計34本のうち、東アジアの研究者が筆頭者となっているものは6本）また、アルマの論文総数698本のうち、日本からの論文数は102本であった。これは米国に次いで世界第2位である。



(6) 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

国立天文台では、アルマ計画が実現（予算化）する前から積極的に広報普及活動を展開し、計画への支持を得るという立場から、研究者だけでなく、社会や国民全体を対象とした活動を推進している。

アルマ計画に関する記事は、国内外の新聞、科学雑誌、テレビニュースで随時報道され、社会から注目されている。また、メディア取材に積極的に対応することで、科学番組ではない一般教養・情報番組にも取り上げられ、普段科学に関心を持たない方々にも情報を届けている。

- ・ これまでにホームページを使った定常的な写真ニュースの掲載やプレスリリースを、建設期（平成21年～平成25年3月末）には241件、運用期（平成25年4月～平成28年11月末まで）に196件行った。そして、月刊メールマガジンの発行を行い、プロジェクトの状況を広く届けている。またツイッター（平成28年11月末のフォロワー数：31,740名）やフェイスブックの運用により、タイムリーできめ細かい情報発信を行っている。
- ・ アルマの現状と最新の成果を届けるため、全国各地における講演会を継続的に開催している。平成13年からの開催回数は200回を超え、毎回約20～200名の参加者を数える。
- ・ 「ナショナルジオグラフィック日本版」（平成26年3月）、「スーパー望遠鏡「アルマ」の創造者たち」（山根一真氏著、平



平成26年3月 ナショナルジオグラフィック日本版（同様の英語記事が英語版にも同時掲載）



平成26年1月12日 TBS「夢の扉+」

成 29 年 7 月出版) といった一般書籍や、TBS「夢の扉+」、テレビ東京「世界で働くお父さん6」といったテレビ番組でアルマが紹介され、研究者以外の層にもアピールした。

(7) 前回の進捗評価(平成25年)において示された「プロジェクト推進に当たっての留意事項等」への対応状況

前回の進捗評価(平成25年)においては、「プロジェクト推進に当たっての留意事項等」として、以下の内容を掲載している。

前回の進捗評価(平成25年)において示された「プロジェクト推進に当たっての留意事項等」

- ① 日本のリーダーシップを発揮すること
- ② 天文データの解析に係る能力、技術等の向上を図ること
- ③ 人員、経費等の振り分けを最適化すること
- ④ 若手研究者に係る育成体制の充実を図ること
- ⑤ 様々な事態(国際共同運用ゆえの問題、チリという土地柄ゆえの問題 等)への対応体制を構築すること
- ⑥ 海外で生活する職員やその家族に係る安全対策を強化すること
- ⑦ 国民や社会からの支持、国内産業の興隆などにつながるよう努めること
- ⑧ 国際共同運用に係る経費分担について、予算、決算の内容を精査して適正に行われるよう取計らうこと

①日本のリーダーシップの発揮について

1) 日本のメンバーが発言力を高め、主導権を発揮

アルマの建設に主体的に関わることにより、大型研究計画における米欧との厳しい折衝に対応できるプロジェクトマネージャーや世界に通用するシステムエンジニアを育成することができている。

平成27年12月に締結した「アルマ望遠鏡の運用に関する三者協定書」と、それに続いて平成28年11月に締結した「アルマ望遠鏡の三者管理協定」により、日本が安定したプレゼンスと高いイニシアティブを発揮できる枠組みが整っている。具体的には、アルマの最高意思決定機関であるアルマ評議会には、12名の構成員のうち3名は東アジアから選出することが協定によって定められており、アルマの意思決定プロセスにおいて、日本が強い主導権を発揮できる体制となっている。また、現在、アルマ評議会の議長を大阪府立大学の大西利和教授が務めていることは、日本が国際的に高い信頼を得ていることを示している。更に、アルマ全体の運用計画及び管理に関連する事項について、調整・解決を行うアルマ・マネジメントチーム(AMT)には、4名の構成員のうち1名は必ず日本から選出されることとなっている。現在、国立天文台の井口聖教授がAMTの構成員を務め、アルマの運用及び管理において、日本が高い発言力を確保している。

2) 台湾、韓国を含むアジア諸国の分担や連携を明確にするとともに、アジア各国の研究者コミュニティを一層支援

日本と台湾は、平成17年9月、アルマ望遠鏡建設に関する協定書に署名して以来、

様々な協力を行ってきた。建設期においては、プロジェクトマネジメント及び技術開発に係る支援を継続的に行い、台湾によるアルマ受信機組立調整試験を成功に導いた。運用期においては、平成26年8月に日本と韓国との間で、平成27年7月に日本と台湾との間で、それぞれ「アルマ運用と将来開発に関する協定書」に署名した。これにより、日本が中心となって台湾、韓国と連携の上、アルマの国際共同運用に参画する「東アジア・アルマ」が構築されている。

また、国立天文台はアジア地域の中核機関として、平成23年から東アジア・デベロップメントワークショップを、平成24年から東アジア・サイエンスワークショップを、それぞれほぼ毎年開催するなどしてユーザーコミュニティを牽引し、ミリ波・サブミリ波天文学を強力に推進する活動を行っている。

②天文データの解析について

アルマでは、観測天文学以外の研究者が、観測データを活用してサイエンスを推進できるよう、全てのデータに較正処理や解析処理を事前に施し、すぐに使える品質管理されたデータを全世界にアーカイブ公開している。これにより、観測提案者以外もアルマのデータを利用して論文を生産できるため、アーカイブを利用した論文数は現時点で全論文数の25%を超えている。データ処理と公開の実現に向けては、アルマ東アジア地域センターの解析能力（ハードウェア）を、計算機数で2倍以上、ストレージサイズで5倍以上に増強しているほか、国立天文台天文データセンターが開発・運用しているJVO（Japanese Virtual Observatory）に、Webブラウザ上でインタラクティブに操作できる可視化ツールを組み込み、研究者が自分の研究環境から直接データを吟味できるようにし、毎月1,000件程度の解析済みデータが全世界からダウンロードされている。

また、情報・システム研究機構の統計数理研究所及び国立情報学研究所との連携により、大量データのイメージング処理やアーカイブに関する研究開発を進めている。

③人員、経費等の振り分けについて（⑧国際費用分担の精査について）

すばるからアルマ、アルマからTMTへと人員を振り分けるなど、すばるやアルマの建設・運用を通して得られたノウハウを、他の国際大型プロジェクトに生かすことに努めている。

また、共同運用に係る経費については、日米欧及び合同アルマ観測所の事務部長が参加するアルマ事務部長会議（年4回開催。うち1回はFace-to-Faceの会議）において、その予算・決算の内容が適正で効率的であるかどうかを審議している。

④若手研究者の育成について

若手研究者が、アルマという世界最高性能の装置を使用し、世界水準の研究者達と協力・競争しながら研究及び開発の経験を積めることは、国際的な視野を持つ研究者を育成する観点から、最適な環境にあると言える。第6回共同利用観測（平成29年4月締切）に採択された日本のプロポーザル64件のうち47件が若手研究者によるものであり、世界的な激しい競争を勝ち抜く力を持つ若手研究者が確実に育っている。

⑤様々な事態への対応体制について

1) チリの情勢の把握

チリ現地に国立天文台の事務所を設置し、チリ観測所長をはじめとする職員を派遣するとともに、チリ現地において職員を雇用し、チリの社会、政治、経済に係る状況把握に努めている。

2) アルマの運用上想定される事態への対処

アルマでは、日米欧の合意の下、毎年5ヶ年の年次計画を見直すことによって、長期的な視野で様々な事態に対応する体制を敷いている。また、チリ観測所では、製品保証担当の職員を雇用して、装置の故障履歴の蓄積や故障率の解析を行っている。

3) 不測の事態に対処するための予備費

不測の事態に対処するための予備費の重要性について、機会を捉えて関係各所に訴えている。

なお、総合科学技術・イノベーション会議（CSTI）の事後評価結果（平成29年4月）では、「（中略）国際研究プロジェクトにおける不測の事態に柔軟に対応できるようにするための対策を検討・実施すべきである」ことが解決すべき課題とされ、「今後のアルマ望遠鏡の運用及び他の天文学関連の政策・施策につなげていくことが重要である」と指摘されている。

⑥職員やその家族に係る安全対策について

前回進捗評価を実施した平成25年以降、以下のような対応を加え、安全支援体制の強化に努めている。

- ・ 赴任者宿舎をサンチャゴ市内でも治安の良い地域に限定
- ・ 在チリ日本大使館への在留届を徹底、安全情報の周知、大使館との連携強化
- ・ 日智商工会議所加入による在チリ日本企業との交流促進・安全情報共有・緊急安否確認訓練参加
- ・ チリ刑事警察による防犯講習
- ・ 夜間のタクシー利用促進
- ・ 出張者についても宿泊地域の限定、安全講習の実施
- ・ チリ携帯電話の貸与
- ・ 国立天文台チリ事務所を、より高い安全性を確保できる場所に移転

⑦国民や社会からの支持、国内産業の興隆について

「（6）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」に示す取組のほか、アルマにおける日本の高い技術力は、様々な受賞や報道というかたちで、現に支持を得ることができている。

また、アルマでは、高精度アンテナ製作における高精度自動制御や精密加工技術、高感

度受信機開発における超伝導素子やサブミリ波光源、相関器開発における専用計算機技術など、最先端技術の開発が行われ、これらは医学分野の計測、超高速情報通信などの分野に波及している。

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

①プロジェクトの進捗状況について

アルマは、日米欧の3者によって国際共同利用研究を推進するプロジェクトである。

平成26年6月までに66台全てのアンテナが整備され、年次計画に設定した3つの科学目標を達成し得る、高解像度、高感度、高分散が実現されている。

平成24年度に本格運用を開始して以降、約5年の間に、惑星や銀河の形成過程の解明につながる観測結果を多数創出するとともに、惑星形成領域において様々な分子を発見するなど、いずれの科学目標についても、順調に成果を上げている。

以上のように、アルマが高い卓越性を示しながら進捗していることは、アルマ論文総数に占める高被引用論文（被引用数が上位1%もしくは10%の論文）数の割合^{※6}が高いことから認められる。

また、日本が製造した主要装置を統合した独自の「ACAシステム」及び受信機システムは、従来のミリ波サブミリ波領域の観測装置を凌駕する性能を実現して、米欧のシステムと相補的な役割を果たすなど、科学的成果のみならず、その優れた技術によって、米欧の日本に対する評価を高めている。

平成27年には、日米欧による「アルマ望遠鏡の運用に関する三者協定書」を締結し、日本の安定したプレゼンスと高いイニシアティブを発揮できる枠組みが整備されている。

以上のことから、国際共同研究のモデルケースとして、着実な推進が期待される。

②プロジェクトの実施体制について

アルマの建設は、日・米・欧がそれぞれ25%、37.5%、37.5%を分担した。日本は、その最先端技術を駆使して、高い観測性能を有する独自の「ACAシステム」及び受信機システムを、計画どおり整備し、21.4%の適正な望遠鏡割当時間を得ている。

アルマの運用は、日米欧による「アルマ望遠鏡の運用に関する三者協定書」に基づき、3者が対等な立場から国際共同によって運用している。また、アルマの運用等に係る統一的な執行及び管理を行う合同アルマ観測所（JAO）において、中核的なポジションの約4分の1を日本人スタッフが占めており、日本のプレゼンスが確保されている。

アルマの観測提案は、合同アルマ観測所（JAO）に設置された観測提案審査委員会の下、公平な審査を経ることとなっている。また、観測開始以降増加傾向にある提案数に対し、倍率は約4倍であり、優れた提案のみが採択される状況にあるが、そのような中、アルマの論文数に占める日本のシェアは、アメリカに次いで2位である。

国立天文台のアルマ東アジア地域センターにおいては、台湾及び韓国との連携の下、東アジアの研究者に対し、観測提案の準備から、観測準備、較正された科学的なデータの配布に至るまでの支援を行うなど、アジアにおける独自の立場から、日本のリーダーシップを発揮している。

現地における若手研究者の活躍も認められ、今後引き続き、日本のプレゼンスを維持するための人材確保、人員配置及び次世代育成が着実に推進されている。

※6 Clarivate Analytics 社の提供する Web of Science (文献データベース) に収録されている論文に基づく。

以上のほか、前回の進捗評価（平成25年）において示された「プロジェクト推進に当たっての留意事項等」に対し、天文データの解析に係る必要な設備整備と公開や、アルマの運用に携わることで若手研究者が力をつけている実態、チリ現地における職員や同伴家族の安全確保を含めた様々な事態への対応体制など、いずれも適切に進捗していることが確認された。

③学術的意義と波及効果について

アルマが実現した高解像度、高感度、高分散により、3つの科学目標に対して着実な成果が創出されている。特に、原始惑星系円盤観測において、その詳細構造を明らかにし、従来の静的な描像を覆し、惑星系形成が円盤初期から極めて動的に進むことを示すなど、生命を宿す惑星の存在、形成、進化について、決定的な役割を果たすと期待される。

こうした人類の根源的な課題に挑むことは、天文学へのインパクトのみならず、地球・惑星科学や生命科学への波及効果も大きい。また、観測データの解析、品質管理や、データの利活用に関する新技術の導入に当たり、エンジニアリングや計算・データ科学などへの分化も進みつつある。

また、採択された日本の観測提案のうち、過半数が若手研究者のプロポーザルであり、国際的な競争力を持つ若手研究者が、着実に育成されている。

更に、アルマにおいて経験を積んだスタッフが、30m光学赤外線望遠鏡「TMT」に携わるなど、アルマの建設・運用を通して得られた知見やノウハウが、他の国際大型プロジェクトに生かされている。

④社会的意義と波及効果について

アルマの成果等は、国内外の様々なメディアを通じ、人類の世界観に関わる謎や魅力を、世代を問わない興味、関心へとつなげている。

アルマのアンテナ技術、受信機技術、極低温技術は、産業界など広く社会においても通信や医療分野に応用、普及されている。

また、アルマにおいて日本が示した、従来性能を凌駕する高い技術力及びスケジュールを達しない高いマネジメント力は、国際約束の実現に係る日本の信頼性につながっており、社会的な観点からも、様々な国際協力を進め、日本の高いプレゼンスを確保する上で一層大きな意義を持つと考えられる。

以上を総合的に勘案すると、本プロジェクトは概ね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。

また、平成34年度に実施予定の期末評価においては、これら留意点への対応状況を確認する。

ただし、本プロジェクトに関し、継続して発展的に行う計画（後継計画）がある場合に

は、改善の方向性を踏まえた別途の手續により、適切な対応を図ることとする。

①日本のプレゼンスの維持、向上について

前項にあるとおり、日本は、惑星、銀河の形成過程とそこでの物質進化の解明につながる様々な研究成果、及びそれらを実現する技術の創出に貢献し、アルマにおける存在感を十分に示している。今後ともアルマ論文数を維持・増加させつつ、質においても高い位置を維持することが望まれる。また、日本は東アジアの天文コミュニティをけん引する役割を担っている。こうしたことから、引き続き、アルマにおける日本のプレゼンスを維持、向上するべく、以下のような取組を講じることが望まれる。

- ②に示す今後10年を見据えた、アルマへの新たなアプローチについて、早期に日本の構想をまとめ、国際的な議論をけん引すること。
- 「東アジア・アルマ」の枠組みにおいて、東アジアにおけるけん引役として、日本と東アジア諸国との連携に基づく、国際的な共同研究の企画・推進や、新たにアルマの共同運用に向けて人的・物的な協力を含めた検討を行うこと。また、これらの実行に当たっては、関連分野への一層の展開を意識すること。
- 次代においても日本のプレゼンスをより一層向上するため、若手研究者の育成について、国際共同研究のマネジメントに係る研さんと人脈形成の機会など、国際現場での活躍機会を引き続き確保すること。

②平成35年度以降の本プロジェクトについて

「大規模学術フロンティア促進事業」による本プロジェクトへの支援は、平成34年度を最終年度としている。

このため、平成35年度以降における本プロジェクトの推進の在り方について、コミュニティも含めた検討が必要である。また、引き続き「大規模学術フロンティア促進事業」による支援を受ける場合には、継続して発展的に行う計画（後継計画）の立案と、当該計画が別途ロードマップに掲載された後、新たな「大規模学術フロンティア促進事業」として事前評価を受けることが必要である。

この際、検討の観点は次のとおりである。

- 次の10年間ににおけるアルマが、更なる分野の発展、ひいては人類の進歩をけん引するための、後継計画（具体的な科学的目標の設定、当該目標の達成に向けた技術・手法、人材育成を含めた実施体制の確立、実現可能なスケジュールの設定 等）を早期に立案すること。この際、コミュニティのすそ野を広げるような関連分野への展開を意識すること。
- また、「東アジア・アルマ」の枠組みに基づく東アジア諸国との連携も含め、国際的な日本の負担を軽減するなど、運用費の抑制策について検討すること。
- 天文コミュニティをはじめとする学術界において、後継計画の周到的科学的評価を行い、学術的意義及び推進に当たっての優先度が他の大型研究計画と比して高いことが認められること。

③若手研究者の育成について

若手研究者の育成を図るため、アルマの運用に欠くことのできない重要な業務への配属を通じ、国際共同研究のマネジメントに係る研さんと人脈形成の機会を、引き続き確保するとともに、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。

④赴任者及び同伴家族の安全支援体制について

宿舎、事務所の配備や、大使館、地元警察との連携、各種講習の徹底など、既に様々な安全支援が図られているが、今後も引き続き、こうした取組の維持と強化が必要である。

備考（用語解説等）

○ アタカマ

チリ北部の年間降水量が100mm以下というアタカマ砂漠を中心とする地域。

○ アタカマ大型ミリ波サブミリ波干渉計（アルマ）

Atacama Large Millimeter/submillimeter Array の略。東アジア（日本が主導）、北米、ヨーロッパが協力して進めている国際共同プロジェクトで、口径12メートル50基のアンテナ群と、「アタカマ・コンパクト・アレイ：ACA（モリタアレイ）」と呼ばれる16基のアンテナ群とからなる干渉計を、チリ北部アンデス山脈のアタカマ高地に建設して運用する計画。

○ アルマ評議会

アルマ望遠鏡計画の監督・統制機関。資金の拠出元である複数当事者（NSF、ESO、NINS）、執行機関、ユーザーコミュニティの代表で構成されている。

○ 干渉計

電波観測において、複数のアンテナを組み合わせ、極めて大きな大口径のアンテナに匹敵する解像力（細かい構造を識別する能力）を実現するための装置。

○ 合同アルマ観測所

チリにおけるアルマ望遠鏡の運用及び保守を、日米欧の合同で実施することを目的として設立した組織。

○ サブミリ波

電波の中で、波長がミリメートル以下（1mm以下～0.1mm以上）のもの。原始銀河や原始惑星系など、比較的高温高密度の星間物質の観測に適している。

○ 受信機システム

天体からの信号を受信する装置。

○ 初期科学運用

アルマ望遠鏡のパラボラアンテナが16台揃えば、既存の全てのサブミリ波望遠鏡と比べ、10倍以上の観測感度を実現できる。そこで、アルマ望遠鏡では完成を待たずパラボラアンテナが16台そろった時点で運用を開始することで、いち早く科学的成果を出すことを目指した。これを「初期科学運用」と呼び、平成23年9月に開始された。

○ 星間物質

星と星の間は真空ではなく、希薄なガスや固体の微粒子及び超高速度で飛び回っている電子等がある。このような物質を星間物質と呼び、このガスから星や惑星が生まれる。星間分子もそのひとつである。

○ 電波望遠鏡

電波で宇宙を観測するための装置。アンテナ、受信機、相関器などで構成される。また、構造上では単一鏡と干渉計に区別される。すばる望遠鏡のような光の望遠鏡が、誕生後の恒星や銀河を観測するのに対して、電波望遠鏡は星や銀河の生まれる前の冷たいガスから来る電波を観測する。したがって、光（可視光）と電波の望遠鏡と併せて、星や銀河の誕生から成長の様子が統一的に分かる。

○ 秒角

角度の単位で、1度の $1/3,600$ 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。アルマ望遠鏡は0.01秒角という、ハッブル宇宙望遠鏡より10倍も優れた解像度を実現する。

○ ミリ波

電波の中で、波長がミリメートル程度（10mm以下～1mm以上）のもの。比較的低温低密度の星間物質の観測に適している。

○ 惑星系

恒星とそれを周回する惑星からなる系。

○ A C Aシステム

直径7mの超高精度アンテナ12台とその較正用の超高精度12mアンテナ4台からなる小口径の干渉計システム。

○ A C Aシステム用高分散相関器

A C Aシステムで取得した電波信号を1ヶ所に集めて、全情報を同時に処理し、天体からの信号強度や周波数、天体の位置などの情報を得る装置。

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

(委 員)

栗 原 和 枝 東北大学未来科学技術共同研究センター教授

(臨時委員)

伊 藤 早 苗 九州大学理事・副学長
※井 本 敬 二 自然科学研究機構理事・副機構長、生理学研究所長
大 島 ま り 東京大学大学院情報学環教授
川 合 知 二 大阪大学産業科学研究所特任教授
小 林 良 彰 慶應義塾大学法学部教授
鈴 木 洋一郎 東京大学国際高等研究所カブリ数物連携宇宙研究機構特任教授
原 田 慶 恵 大阪大学蛋白質研究所教授
横 山 広 美 東京大学国際高等研究所カブリ数物連携宇宙研究機構教授

(専門委員)

田 村 裕 和 東北大学大学院理学研究科教授
新 野 宏 東京大学大気海洋研究所教授
松 岡 彩 子 国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所准教授
※観 山 正 見 広島大学特任教授
安 浦 寛 人 九州大学理事・副学長

評価に御協力いただいた専門家（アドバイザー）

井 上 一 明星大学常勤教授
國 枝 秀 世 名古屋大学審議役
永 原 裕 子 東京工業大学地球生命研究所フェロー

（敬称略、五十音順）

※ 井本委員、観山委員は、「大型電波望遠鏡『アルマ』による国際共同利用研究の推進」の利害関係者であるため、評価には参加していない。