



アルマ計画

総合科学技術・イノベーション会議
事後評価資料

平成29年1月26日
文部科学省研究開発局宇宙開発利用課





目次

- アルマ計画の概要
- 「アルマ計画」の事後評価に係る調査検討の視点
 1. 国際共同プロジェクトにおけるリーダーシップの発揮
 2. 産業のイノベーション創出に与えた効果
 3. 社会・国民の理解を得るための取組
 4. 今後の運用・整備計画





アルマ計画の概要





アルマ計画の概要

宇宙・銀河系・惑星系の誕生過程を解明するため、日米欧の国際協力により、南米チリのアタカマ高地（標高5,000m）に建設した「アタカマ大型ミリ波サブミリ波干渉計」による国際共同利用研究を推進する。

○日米欧の国際共同事業で世界最高性能の電波望遠鏡を実現

日本：国立天文台（+東アジア） 米国：国立科学財団（+カナダ）
 欧州：欧州南天天文台（欧州16カ国） ※ホスト国としてチリ共和国も参加

○日本の実施主体

中心機関： 自然科学研究機構 国立天文台
 連携機関等： 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、電気通信大、新潟大、富山大、上越教育大、名大、京大、京都産業大、
 大阪大、大阪府大、大阪産業大、神戸大、広島大、愛媛大、九大、鹿児島大、等
 東アジア連携機関等： 台湾 天文及天文物理研究所（建設期の平成17年9月より参加）
 韓国天文宇宙科学研究院（運用期の平成26年8月より参加）

日本の所要経費

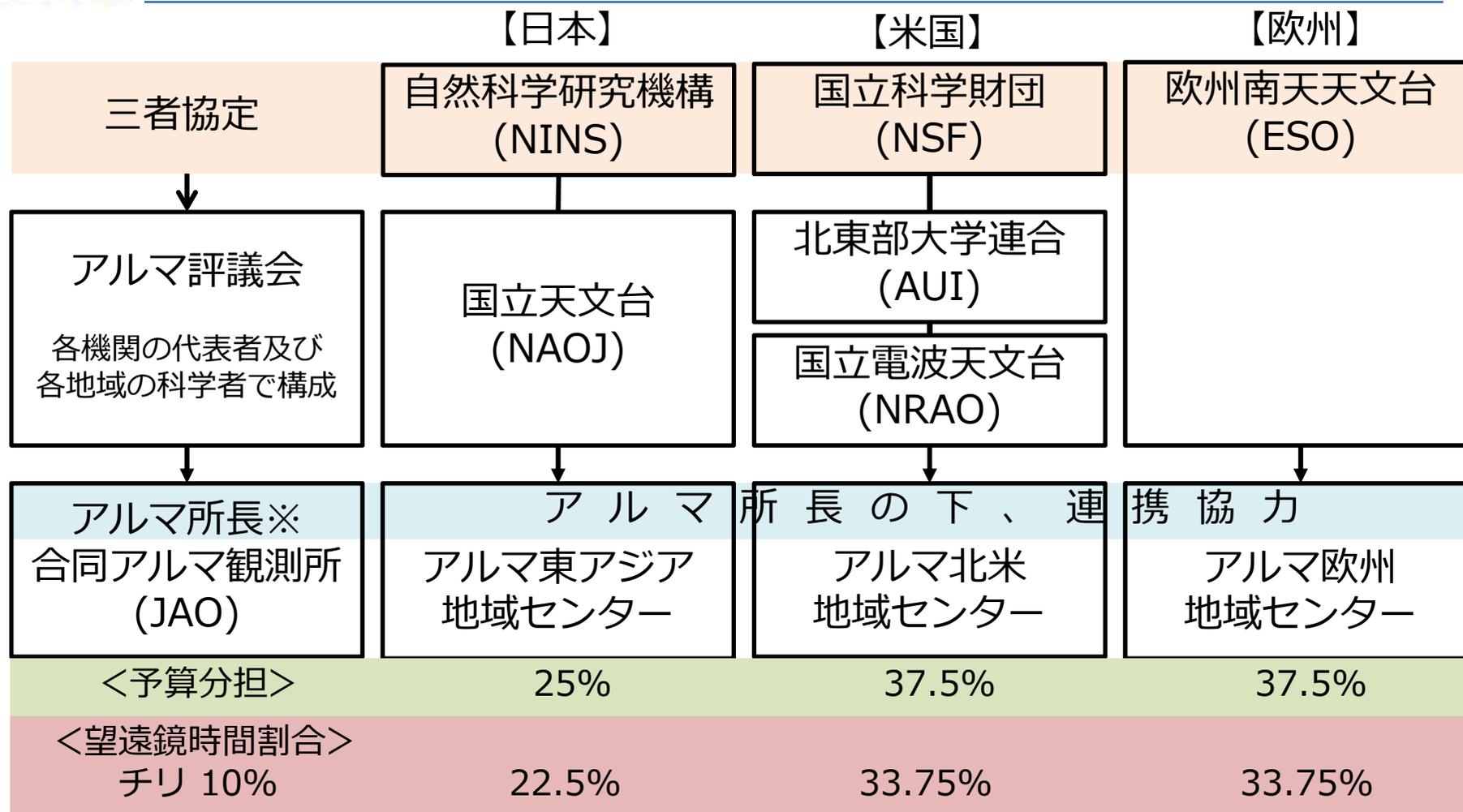
建設費総額： 251億円（内 国内建物整備費8億円）
 年間運用経費： 約30億円（本格運用開始後、30年+aの運用）





アルマ計画の概要

アルマ望遠鏡の運用体制



※アルマ所長は、合同アルマ観測所(JAO)の長である。





アルマ計画の概要

アルマ計画の参加国の機関

	日本	米国	欧州
協定締結者	自然科学研究機構 (NINS) 天文学、材料科学等の自然科学を推進する研究機関。アルマ計画を推進する予算を文部科学省を通して要求。	米国国立科学財団 (NSF) 米国の科学技術向上を目的とする政府組織であり、科学や工学に関する研究開発に対して開発費の支援を行っている。アルマ計画を推進するための予算を米国政府に要求。	欧州南天天文台 (ESO) 南天の天体を観測するために組織された国際機関であり、加盟国の拠出金により運営。その予算でアルマ計画を推進。
運用主体	国立天文台 (NAOJ) 天文学及びその関連分野の研究を実施。アルマ計画を推進。 (一部、台湾が協力)	アメリカ北東部大学連合 (AUI) 非営利の科学管理会社であり、現在、NSFとの協力合意書の下に米国国立電波天文台 (NRAO) を運営しており、アルマを推進。 米国国立電波天文台 (NRAO) 米国における電波天文学研究の中心機関。 (一部、カナダが協力)	ESO及び ESO加盟国各国の天文学関係研究機関



アルマ計画の概要

アルマ計画の計画期間

○**建設期間**： H16－H25

○**計画内容**： ミリ波からサブミリ波までを観測できる巨大電波望遠鏡（12mアンテナ54台、7mアンテナ12台等）を建設。

その内、日本は、主に、ACA（アタカマ・コンパクト・アレイ）システム（7m×12台＋12m×4台、そしてACA用高分散相関器）と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（全建設計画の25%を貢献）。よって、運用は25%分担。

○**運用期間**： **アルマ計画は建設完了後、“30年”＋α**

この運用期間30年＋αは、アルマ計画の基本を定義した「プロジェクト計画」（国立天文台、国立電波天文台/米国、欧州南天天文台が協力して立案し、アルマ評議会で承認）および「アルマ運用プラン」（国立天文台、国立電波天文台/米国、欧州南天天文台と協力して合同アルマ観測所が立案し、アルマの運用に関する三者協定で承認）にて定められた。

H23－H24（初期科学運用）

1/4のアンテナ台数で初期科学観測を開始

H25－H34（本格運用）

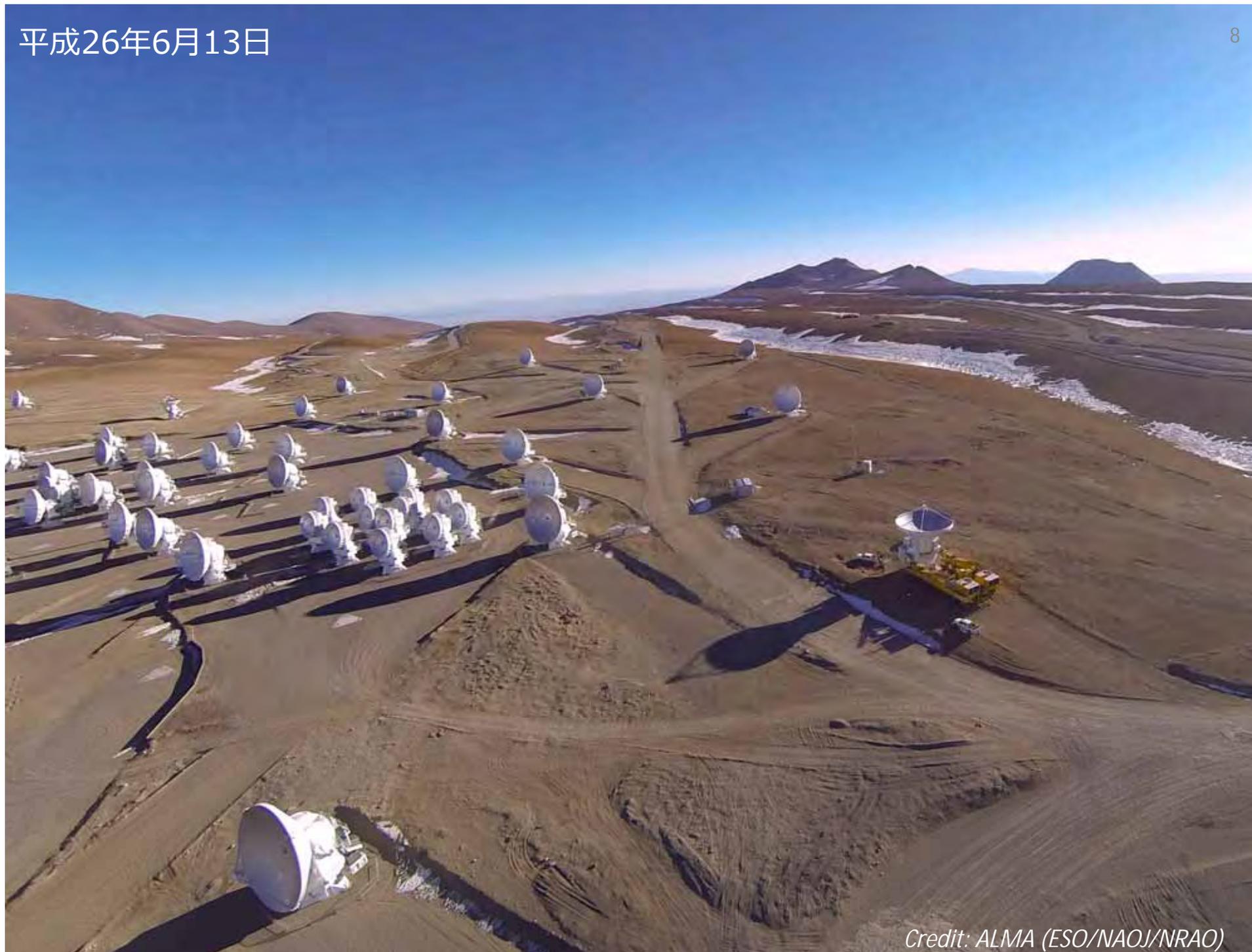
太陽系以外の惑星系形成や銀河形成の解明に取り組み、
そして生命の起源に結びつくさまざまな物質の探査を実施する。

H35－H54（さらに本格運用を継続する）



平成26年6月13日

8



Credit: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO)



アルマ計画の概要

アルマの運用に関する三者協定

平成27年12月15日：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）はアルマ望遠鏡の運用に関する三者協定書に署名。三者による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。



Credit: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO)



NINS President
Katsuhiko Sato



NSF Director
France Cordova



ESO Director General
Tim de Zeeuw



アルマ計画の概要

アルマ計画の科学目標

アルマ望遠鏡の特徴を活かし、科学目標を達成する

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

科学目標 1

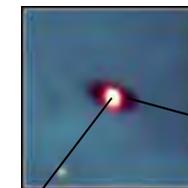
太陽系以外の惑星系とその形成を解明

科学目標 2

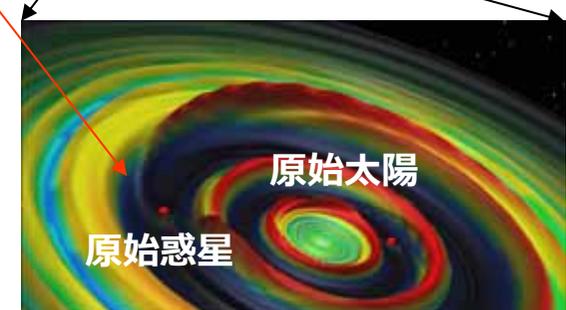
銀河形成と諸天体の歴史を解明

科学目標 3

膨張宇宙における物質進化を解明



ハッブル宇宙望遠鏡による観測



シミュレーション例
⇒アルマの観測で検証





アルマ計画の概要

アルマ科学目標に対する進捗

【アルマ科学目標に対する現在の進捗および達成状況】

科学目標	現在の進捗	達成状況
1. 太陽系以外の惑星系とその形成を解明	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 (page 24 参照)。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 (page 25 参照)。	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輩出されている。 →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	史上最遠方の酸素を検出、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 (page 26 参照)、多くの発見があった。	遠方から近傍のさまざまな銀河の観測結果が輩出されている。 →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 (page 37参照)。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。	本研究は運用期間(30年+a)をかけて臨むものである。惑星系形成領域からの「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ます。 →本科学目標の達成に必要な分光能力を実現。

「アルマ計画」の事後評価に係る調査検討の視点

1. 国際共同プロジェクトにおける リーダーシップの発揮





施設の整備・運用状況

(1) 国際共同プロジェクトとして、施設の整備及び運用に係る日本の負担は妥当であったか。

アルマ建設計画の費用対効果

- 約1,500億円規模の経費を要する高精度の巨大な電波望遠鏡が、国際共同プロジェクトとして実施されることで251億円の投資で実現。これまでの電波望遠鏡では、解像度・感度の点で不可能であった「惑星が形成される現場」や「銀河が生まれる現場」を観測するなどの優れた学術成果を生み出すことが可能となった。天文学にとどまらず、生命科学や分子科学といった未来を切り拓く知的な蓄積や創造の面で、その効果が極めて大きい。
- 日本で初めて、大型研究基盤の整備を国際共同プロジェクトとして実現したことによって、日本単独では不可能であった規模の事業を国際協力の分担という形で達成。





施設の整備・運用状況

貢献割合と望遠鏡時間割合

	日本	北米	欧州
貢献割合	25%	37.5%	37.5%
望遠鏡時間割合 チリ 10%	22.5%	33.75%	33.75%

- 当初の貢献割合については、アルマ評議会における日米欧の協議において、「負担割合 = 貢献割合」を基本的な前提。
- 建設期間中、米欧のアンテナの製造コストが上昇したため米欧はアンテナ建設予算を増加。それでも予算が不足したため、それぞれの製造台数を減少（米欧計64台→50台）。合わせて、所期の科学目標を達成できるレベルではあるが、アルマ望遠鏡の観測感度が低下することとなった（後述の「国際外部評価」参照）。
- そのため、米欧の負担割合は増え、日本の負担割合は減少したものの、アルマ望遠鏡の観測感度が低下したことの責任は米欧にあることから、アルマ評議会における日米欧の協議により、日本は当初どおりの25%の貢献割合が認められた。





施設の整備・運用状況

日本と米・欧の建設分担

日本の分担（貢献割合：25%）

ACAシステム

※米欧50台のみでは描けない正確な画像を実現



- ① ACAアンテナ
7mアンテナ 12台
12mアンテナ 4台



- ② 受信機システム
Band 4,8,10

- ③ 信号伝送・変換・
評価部
ACA用

- ④ 高分散相関器
ACA用



米欧の分担（貢献割合：各37.5%）

12m50台システム

- ① 12mアンテナ
25台（米）
25台（欧）



- ② 受信機システム
Band 3,6（米）
Band 7,9（欧）



- ③ 信号伝送・変換・
評価部
米欧アンテナ用

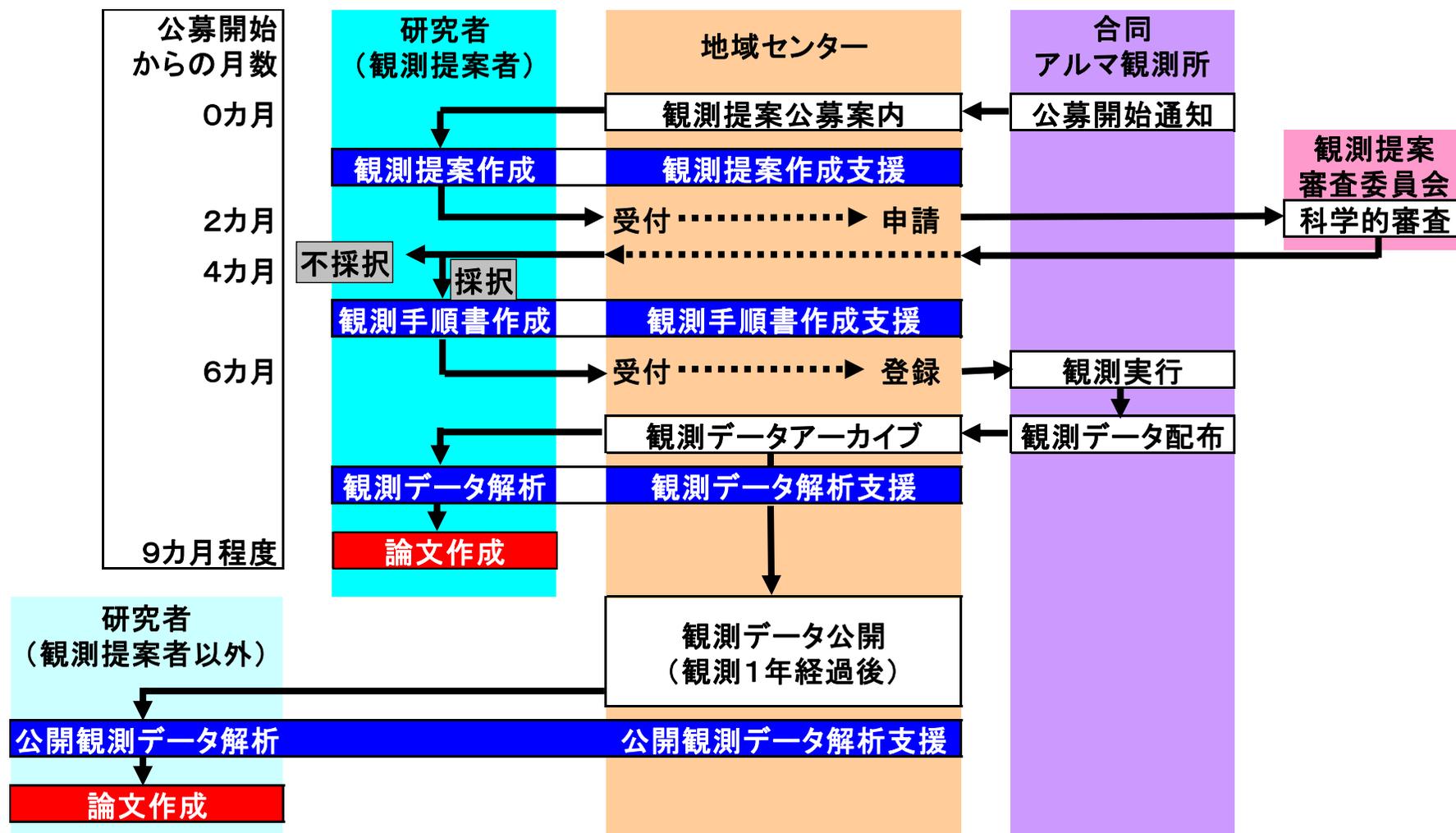
- ④ 基本型相関器
米欧アンテナ用





アルマ共同利用観測の流れ

取得したデータの取扱い



※ 観測データは1年間は観測提案者が占有。その後、世界中に公開される。



我が国の存在感

(2) 欧米に対して、我が国の存在感を示すことができたと言えるか。また、共同プロジェクトにより、どのようなノウハウが得られたか。今後活かすべき反省点は何か。

● 国際的な日本の存在感

アルマ計画は、日米欧三者で世界的な規模での初めての共同事業として進められ、世界で唯一無二のサブミリ波干渉計望遠鏡を建設する**人類史的に大きな意義のある計画**。アルマ計画を通じ、初めて日本は欧米と対等な関係で大型研究基盤の整備を実現し、その成功に大きく貢献。

アルマでは、日本は国際的な存在感を存分に発揮。たとえば、**日本の建設参加は欧米に比べて2年遅れたが、開始後は建設を着実に進め、日本は欧米に先んじてアンテナ第1号機を完成。**

〔アンテナ第1号機の完成はトップレベルマイルストーンの1つ。〕



アンテナ第1号：受入審査に合格し、日本のアンテナがアルマの第1号アンテナとなった（平成20(2008)年12月）

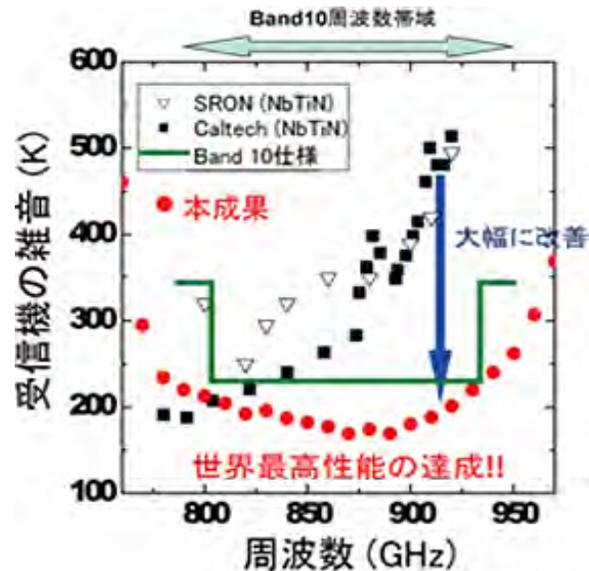




我が国の存在感

世界的に通用する先端的技術開発

アルマ望遠鏡の開発という技術的に極めて困難な課題を克服するためには、アンテナ技術、光伝送・検出技術、超伝導素子技術、導波管技術、相関器技術、受信機技術といった技術を、これまでより一層高める必要があった。



アルマの最高周波数帯であるBand 10 (787-950GHz帯) の受信機として、世界最高性能の低雑音受信機を開発することに成功。Band 10 受信機の性能に匹敵するのは、未だに日本以外では開発できていない。

アルマ望遠鏡の観測装置の開発によって、このような天文観測機器開発に必要な高度な技術に関するノウハウを、国立天文台のみならず、アルマの開発に参画した関連企業も手に入れることができた。





我が国の存在感

国際共同計画の実現への道のり

• 国際共同プロジェクトにより得られたノウハウ

国立天文台が大型計画の実績を着実に積み上げてきたことで、世界からの信頼を得てきた。そして、アルマ計画への道を作り、さらに次期国際共同計画につながっている。

国立天文台が培ってきたノウハウ

1. 野辺山45m電波望遠鏡（昭和57年観測開始）
【国内大型計画の推進と実現】
 - ◆ 世界に誇る施設の実現。天文研究では海外研究者も参画。
2. すばる望遠鏡（平成11年観測開始）
【海外拠点における大型計画の推進と実現】
 - ◆ 国際化の第一歩を踏む。但し国内計画の一環として実施。
 - ◆ 他国でも同様の大型研究基盤の施設を整備。
3. アルマ望遠鏡（平成25年本格運用開始）
【国際共同大型計画の推進と実現】
 - ◆ 完全に対等な関係で国際共同計画を推進。国際協定書を締結し、計画の25%を貢献（分担）。
 - ◆ 世界で唯一無二の大型研究基盤の施設。

国際大型科学プロジェクトを円滑に進めるために必要な①プロジェクトマネジメントおよび②システムエンジニアリングに関わるノウハウを、これらの計画を段階的に行うことで、国立天文台および本計画に関連した企業に蓄積することができた。





我が国の存在感

国際共同計画の実現への道のり

• 国際共同プロジェクトにより得られたノウハウ

日本はアルマ計画の立案で世界を牽引してきた。しかし、日本の建設予算が欧米に対し2年遅れとなったため、各種仕様設計会議などに参加できないことがあった。

日本の存在感を取り戻す挽回への道のり

1. 先行された2年間、日本の分担となるACAシステムを設計し、提案。アルマ観測画像の信頼性の向上をさらに図った。（平成25年科学技術分野の文部科学大臣賞）
 2. 2年遅れではあるが日本の建設予算が決定。（平成16年4月）
 3. 日本のアンテナがアルマ1号機アンテナとなる。日本がアルマのトップレベルマイルストーンを実現。（page 17参照）
 4. 実現が困難とされたBand 10受信機の開発に成功。（page 18参照）
- これらの研究技術成果をもって建設期の初期の段階で信頼を取り戻し、欧米とマネージメントレベルで対等な関係を獲得できた。
5. 建設期は欧米2者協定+日米欧3者協定の併用。運用期は日米欧3者協定のみ。（page 9参照）

国際共同計画で、欧米に対等に伍してこれらを実現できたのは、

- ・複数の大型計画を経験して、研究力と技術力を蓄積していたこと
 - ・国際的な約束にもとづいて、計画通り予算が措置されたこと
- によるものである。



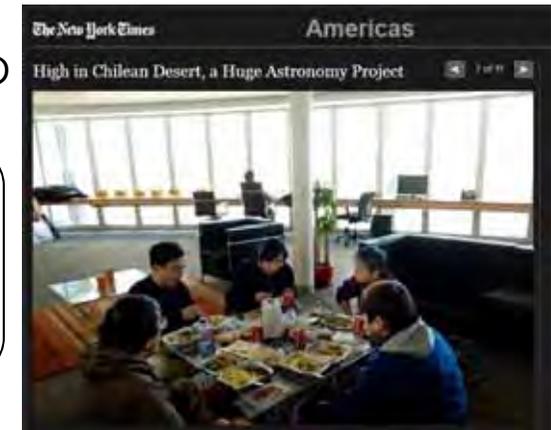


我が国の存在感 ロールモデル

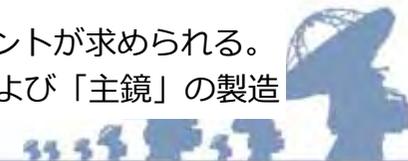
- アルマにより得られた国際的信頼
 - アルマの実現により、科学研究分野での国際大型研究基盤の整備における、あらゆる側面で、日本が十分に責任を負うことができる力を有する国であることが世界的に認知された。
- 次期大型研究計画へ
 - 国際パートナーと対等な立場での国際共同大型計画推進のノウハウ。

プロジェクトのあらゆる面に参画して、貢献を果たすことが重要。

 - 全ての運営（予算、人事、安全対策、広報、ストライキ対応など）に関与。
(例：アルマ広報で、日米欧が連携し対応。全世界への配信が可能。)
 - 成功のみならず、リスクや失敗なども共に負う必要がある。
 - 世界水準でのプロジェクト・マネージメントおよびシステム・エンジニアリングのノウハウ。
 - 日本国内に内在する、国際的に通用する技術開発力発掘のノウハウ。
- TMT望遠鏡【国際共同大型計画の推進と実現】
 - ◆ アルマと違い、1つの望遠鏡を分担して建設。より複雑なマネージメントが求められる。
 - ◆ アルマでの実績もあり、TMT計画の一番の要である「望遠鏡本体」および「主鏡」の製造を日本が担当。



チリ現地で作業を行う当時、奥村准教授（現日本女子大教授）ほか、日本人スタッフ
(The New York Times, 平成24年4月8日)





我が国の存在感

教訓

• 予備費の必要性

国際プロジェクトでは、さまざまな責任を負う事で権利を得ることができる。現在、日本の科学計画においては、予算内に予備費(Contingency)を組み込むことができない。このため、不測の事態（不慮の出来事や偶発事故など）が発生した際、日本は貢献することができず、最も重要な決断の場で存在感を示すことができない。その結果、他国からの信頼を失うことが有り得る。

リスクをある程度予見することはできるが、予見できなかった事態が発生したときこそ、プロジェクトマネージメントの力量が問われる。計画の規模が大きければ大きいほど、この予備費の存在が重要である。早く対処すれば、その影響を最小限に止められることから、予備費を計画予算内に組み込み、その用途を自由にプロジェクト内で裁量できる仕組みを構築することが必要。

• 安全意識および安全対策の改善

平成24年5月、合同アルマ観測所の国際職員として派遣していた国立天文台職員が不慮の事件により死亡。この教訓から、赴任者及び帯同家族の安全・安心の向上のための安全対策を強化。





東アジアにおけるリーダーシップ

(3) アジア地域における研究促進に向け、アジア諸国との具体的な連携が図られているか。我が国がリーダーシップを発揮していると言えるか。

• アジア諸国との連携

欧州および北米に対抗し、東アジア地域での連携を図るため、国際協定書を基に、台湾とは台湾中央研究院天文及天文物理研究所 (ASIAA)、韓国とは韓国天文宇宙科学研究院(KASI)と、国立天文台が中心となった東アジア・アルマを構築。

(台湾) 平成17年9月：アルマ建設に関する協力書に署名
平成27年7月：アルマ運用と将来開発に関する協定書に署名

(韓国) 平成26年8月：アルマ運用と将来開発に関する協定書に署名

• 東アジア・アルマにおける日本のリーダーシップ

建設期では、日本は台湾に対してプロジェクトマネジメントおよび技術開発での支援を継続的に行い、台湾の貢献であるアルマ受信機組立調整試験の活動を成功に導いた。

また、アジア地域の中核機関として、東アジア・サイエンスワークショップを開催するなど、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活発に行っている。



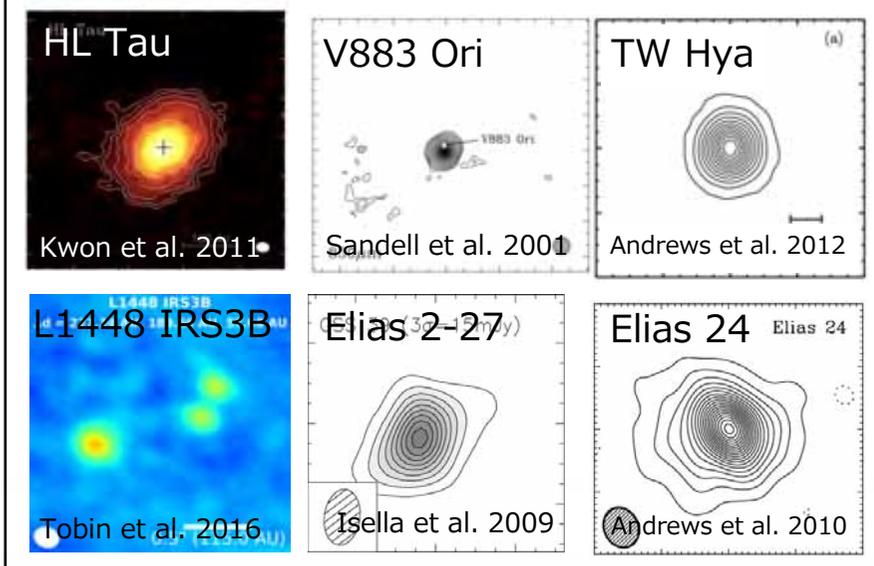


科学技術的なプレゼンス

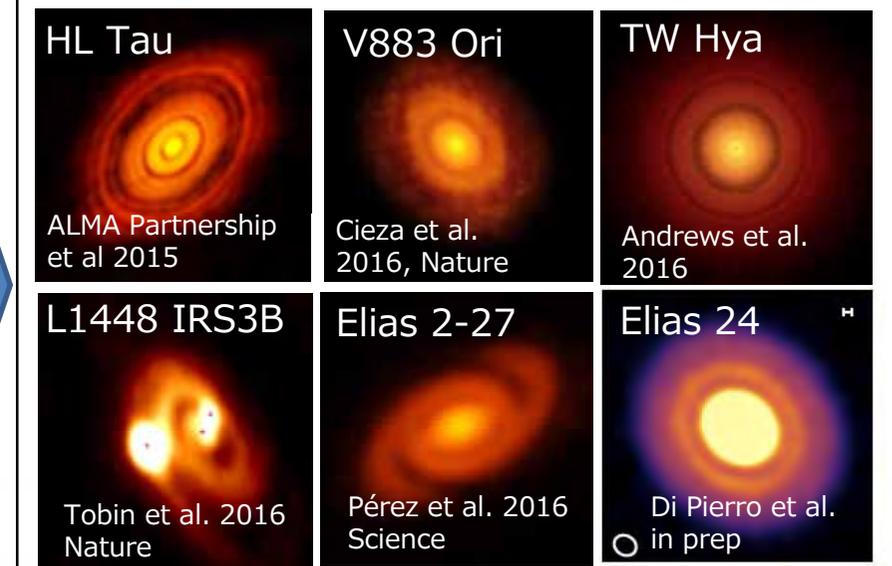
(4) アルマの運用により得られた研究成果は示されているか。これにより、天文学分野における我が国のプレゼンスは向上したと言えるか。

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すでに出しはじめている。

これまでの望遠鏡による観測



アルマ望遠鏡による観測



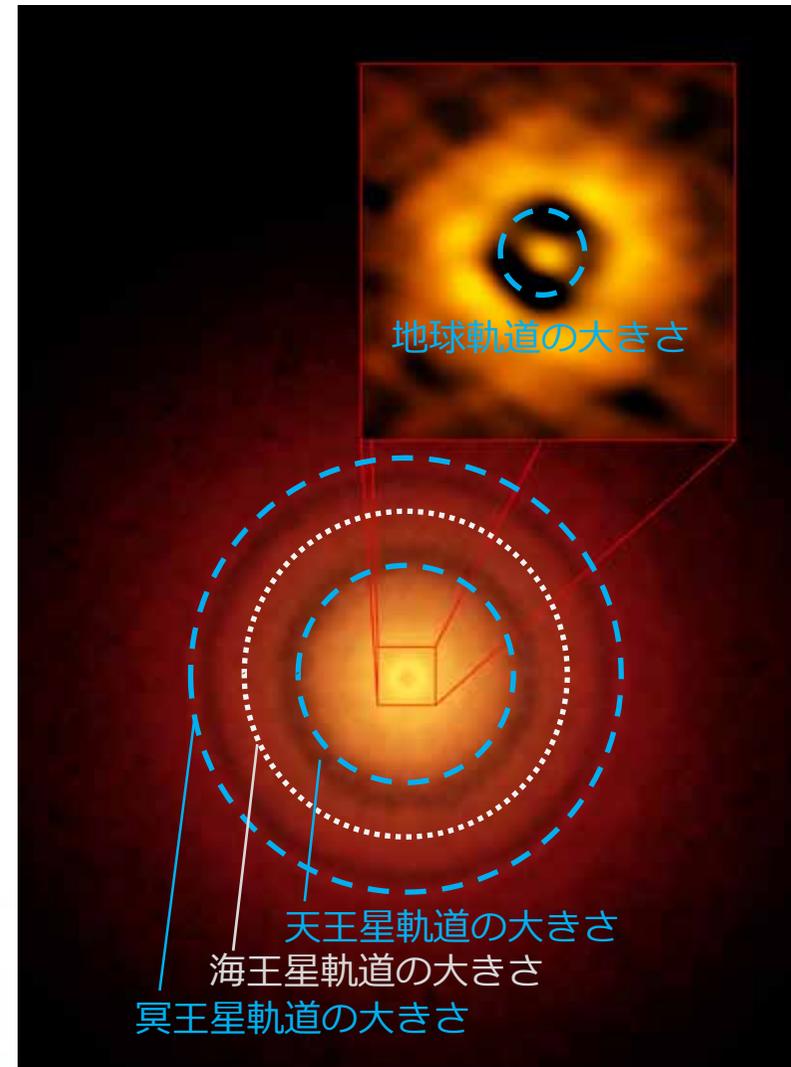


科学技術的なプレゼンス これまでのアルマ科学成果

若い星うみへび座TW星の周囲の塵円盤を、史上最高解像度で観測。**「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。

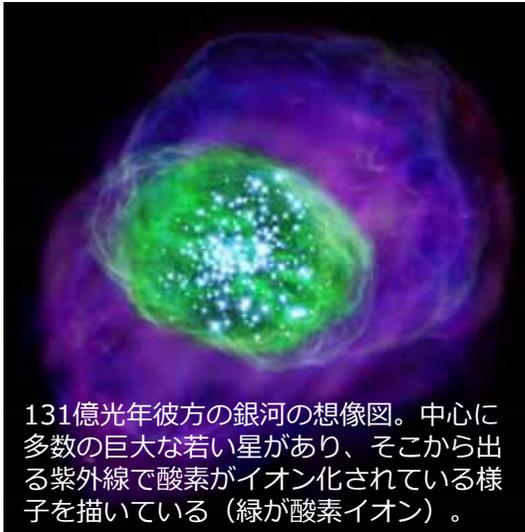
- ショーン・アンドリュース氏（ハーバード・スミソニアン天体物理学センター）らのチームは、地球軌道に似た軌道を持つ惑星の誕生現場を初めて観測。**地球型惑星が形成**されている可能性を示す画期的な成果。（Andrews et al. Astrophysical Journal Letters 2016）
- 塚越助教（茨城大学）らのチームは、異なる2周波の電波を比較した結果、強度比から半径22天文単位の間隙内に大きな塵が欠乏（小さな塵が卓越）していることを明らかにし、理論モデルとの比較から、この隙間に**多数の海王星程度の質量の惑星がすでに誕生**している可能性を初めて指摘。（塚越 et al. Astrophysical Journal Letters 2016）

（右図）うみへび座TW星の円盤の超高解像度画像。
中央部拡大図では地球軌道サイズの間隙が見えている。





科学技術的なプレゼンス これまでのアルマ科学成果



131億光年彼方の銀河の想像図。中心に多数の巨大な若い星があり、そこから出る紫外線で酸素がイオン化されている様子を描いている（緑が酸素イオン）。

アルマは、銀河形成と諸天体の歴史を解明する手がかりとなる成果も上げている。

井上准教授（大阪産業大学）らのグループは、すばる望遠鏡で発見された131億光年の距離にある銀河をアルマ望遠鏡で観測し、酸素イオンからの光を検出（**酸素の存在が確認された天体としては観測史上最遠方記録**）。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。

（インパクト）本成果はScience誌に掲載され、海外ウェブサイトも含め400件以上の記事で取り上げられるなど、世界的に注目された。

田村陽一(東京大学)、他、
Publications of the
Astronomical Society of
Japan 2015

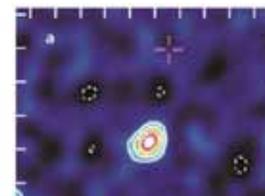


アインシュタインリング

- アルマ望遠鏡の超高解像度重力レンズ画像を最も精緻に再現できる重力レンズモデルを構築。
- 117億光年彼方にある爆発的星形成銀河に、**数百光年の大きさの塵の雲が複数ある**ことを発見。
- 重力レンズを起こす手前の銀河に、**太陽の3億倍の質量を持つ超巨大ブラックホール**があることも判明。
- 爆発的星形成銀河の形成と超巨大ブラックホールの成長過程に迫る成果。

廿日出文洋(国立天文台)、他、Nature 2014

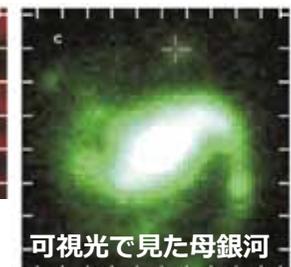
- 宇宙最大の爆発「ガンマ線バースト」が起きた、45億光年かなたの銀河をアルマ望遠鏡により観測。
- ガンマ線バーストが起きた銀河で、分子ガスと塵から出る電波を検出。**分子ガスからの電波検出は世界初**。
- アルマの高い解像度により、ガンマ線バーストが起きた銀河における**分子ガスと塵の分布の違いを初めて明らかに**。



アルマ望遠鏡で観測した分子ガスの分布



アルマ望遠鏡で観測した塵の分布



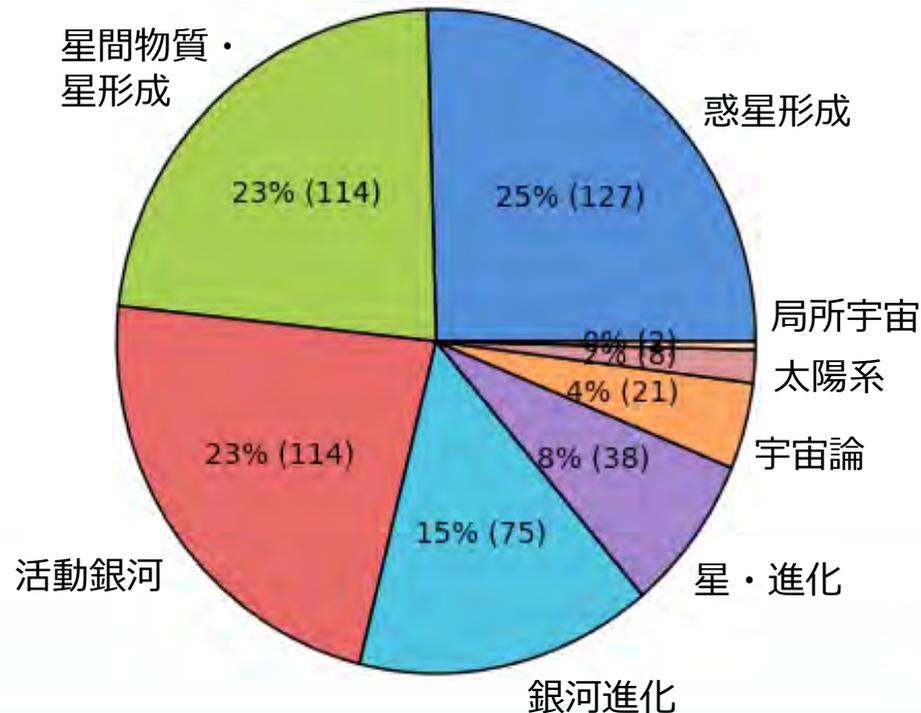
可視光で見た母銀河



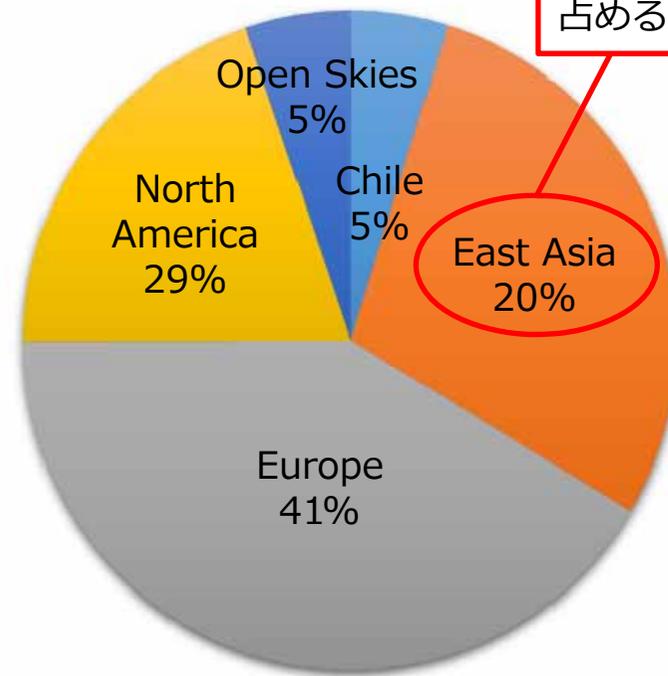
科学技術的なプレゼンス 論文数

- 初期科学運用開始から5年：総数499（平成28年11月11日付）。アルマは国際共同プロジェクトであることから、大部分が国際共著論文。
- Nature（17本）、Science（7本）など、インパクトの高い雑誌への掲載も多数（うち3本が日本人が筆頭者）。

平成28年11月11日付 論文総数499



各地域：論文数分布



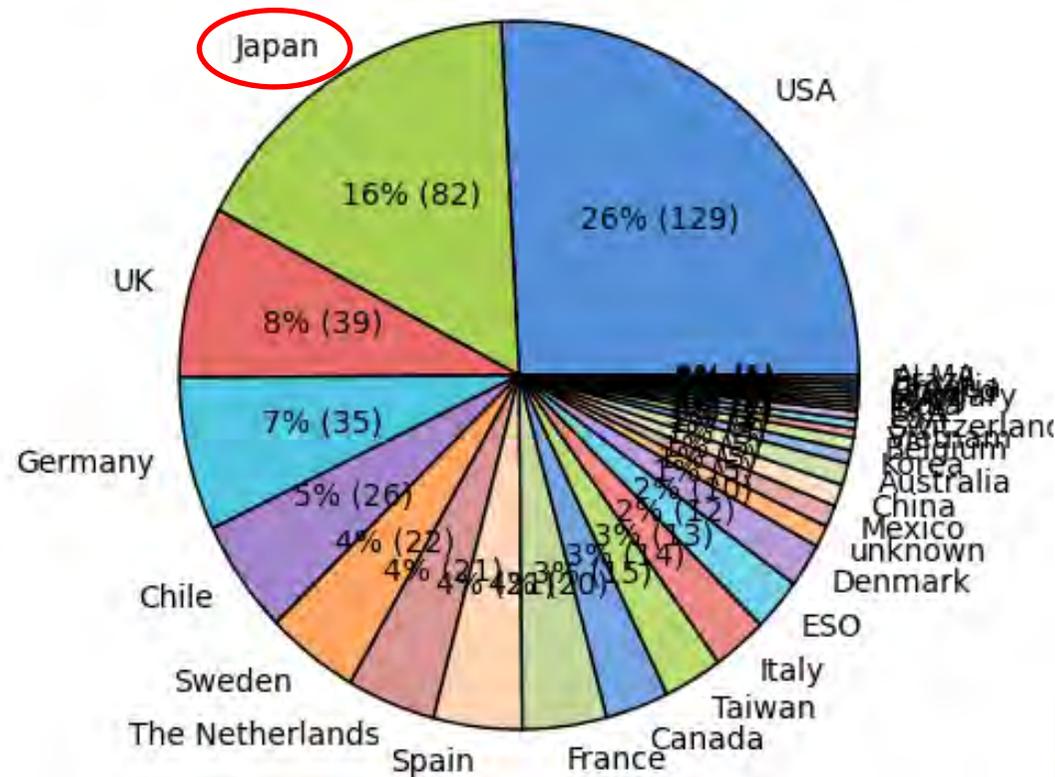
東アジアからの論文は20%を占める



科学技術的なプレゼンス 論文数

- 平成28年11月11日において、アルマの論文総数499本のうち、日本からの論文数は82本であった。これは米国に次いで世界第2位である。

Refereed ALMA publications (total: 499)





人材育成

(5) 国際的な舞台でリーダーシップを発揮できる人材及び若手研究者の育成は図られたか。

国際的な舞台でリーダーシップを発揮できる人材の育成

・ 建設期

アルマの建設に主体的に関わることによって、**大型科学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**（写真1）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た。

アルマという世界で唯一無二のプロジェクトを通して、**世界一流の技術を有するとともに、海外スタッフを統率できるエンジニアリング研究者**（写真2）を育てることもできた。



建設当初から計画に従事。アルマ評議会にて報告を行う井口教授。現在、東アジアアルマプロジェクトマネージャを務める。



現地にてアンテナ試験を牽引する水野准教授。現在、合同アルマ観測所で、チリ人スタッフ100名を擁する最大規模のグループのマネージャを務める。

・ 運用期

アルマ望遠鏡は世界的な国際共同研究のもと運営されており、合同アルマ観測所には日米欧から約40名の国際職員が参画し、その内10名が日本からの派遣。

平成29（2017）年4月予定で6名が40歳以下の若手研究者となる。





人材育成

若手研究員の育成

- 国立天文台では、アルマにおける世界最先端の観測や装置開発を通して、若手研究者の育成を行ってきた。若手研究者が、「アルマ望遠鏡」という世界最高性能の装置の使用を通じ、世界水準の研究者達と協力・競争しながら研究およ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も最適な環境といえる。

建設期

アルマ望遠鏡の性能を実現するための科学評価試験 (CSV: Commissioning Science Verification) において、日本の若手研究者が国際チームの中で主導的役割を發揮。



日本製Band 10受信機による干渉計試験に成功

Band 10受信機の開発を通じて博士号を取得し、現在では、デルフト工科大学（欧州トップクラスの研究機関）の助教として活躍する者や、国立天文台助教としてアルマの将来受信機開発をリードしている者などがある。



日本天文学会研究奨励賞の受賞講演

運用期

共同利用観測も開始し、世界水準の天文学研究者が着実に育っている。今後のさらなる進展が期待できる。

平成27年4月にめ切られた第4回共同利用の観測提案では、世界的な激しい競争の中、日本全国の大学から合計33件が採択され、内16件が大学院生であった。



「アルマ計画」の事後評価に係る調査検討の視点

2. 産業のイノベーション創出に 与えた効果





技術的成果の国際的優位性

(1) サブミリ波受信機デバイスやアンテナ技術等、本事業の中でどのような技術が培われたか。それらは、日本の強みを活かしたものになっているか。世界的に優位な技術と言えるか。

アンテナ技術

サブミリ波という短い波長帯で、アルマの厳しい要求を満たす高精度アンテナ鏡面を実現するために、高精度自動制御や精密加工技術が駆使されている。日本製のアンテナは、他国では達成できなかった高い鏡面精度を実現。また欧米に先駆けてアルマの第1号アンテナとして山頂施設に設置されるなど、世界的に高い評価を得た。

日本国内においては、アルマ望遠鏡を実現した日本のアンテナの研究開発が評価され、これまでに以下の賞を受賞。

- 平成25年 **科学技術分野の文部科学大臣賞**
「高精度天体画像観測を可能にする開口合成型電波望遠鏡の研究」
- 平成25年 **グッドデザイン賞特別賞表彰**
- 平成28年 **科学技術分野の文部科学大臣賞**
「超高精度サブミリ波望遠鏡ALMAアンテナの開発」

チリ現地での組上調整試験が終了し、山頂施設に到着したアルマ第1号アンテナ（平成21(2009)年9月）





技術的成果の国際的優位性

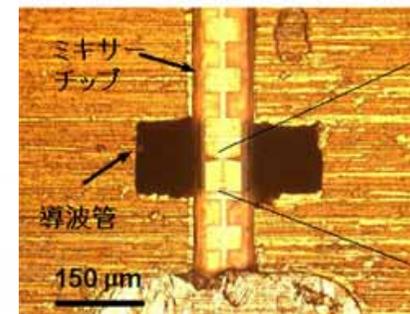
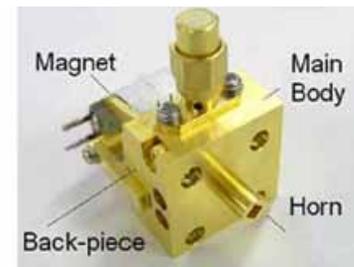
サブミリ波受信機技術

国立天文台の研究チームは、787-950GHz帯の受信機として、世界最高性能の低雑音受信機を開発することに成功。Band 10受信機の性能に匹敵するものは、未だに日本以外では開発できていない。

この成果は、平成21年6月16日に記者発表され、NHKニュースなどで取り上げられた。さらに、Band 10超伝導ミキサの写真が論文誌「Superconductor Science and Technology」平成21年11月号の表紙を飾る等、半導体分野においても秀でた成果として高く評価された。

日本国内においては、これまでに以下のような賞を受賞。

- 平成21年 **応用物理学会講演奨励賞**
- 平成22年 **超伝導科学技術賞**
- 平成23年 **科学技術分野の文部科学大臣賞**
「窒化ニオブ系超伝導体によるテラヘルツ検出技術の先駆的研究」





産業への波及効果

(2) 本事業で培われた技術成果は産業のイノベーション創出に寄与したと言えるか。
今後、どのような経済波及効果が期待されるか。

アルマの観測装置の開発を通して、以下の特許を取得した。

- **アンテナ技術**: 高精度アンテナの製作を行う過程で「アンテナ鏡面測定・調整装置」に関する技術を獲得し、特許を取得。
- **光伝送・検出技術**: 信号を高安定に長距離伝送する開発研究の成果として、光伝送および光検出器に関する技術の特許(海外特許を含む4件)を取得。
- **超伝導素子技術**: 微弱なサブミリ波信号を高感度に検出するための、超伝導素子の設計・製造に関わる特許(3件)を取得。
- **導波管技術**: サブミリ波信号を低損失で伝送するための導波管の設計・製造に関わる技術を獲得し、特許(4件)を取得。
- **相関器技術**: フーリエ変換および相関演算の最適化に関わる技術を開発し、特許(海外特許を含む2件)を取得。
- **受信機技術**: 微弱なサブミリ波信号を受信するための、極低温受信機の技術に関わる特許(海外特許を含む2件)を取得。





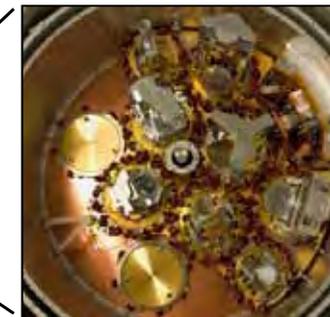
産業への波及効果

アルマ計画では、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た。これらは一般社会にすぐ応用できるものは多くはないが、将来、医学分野の計測、超高速情報通信などの分野にスピルオーバーする可能性が高い。

- 通信応用:** 微弱な電波を精密に受信する H E M T (High Electron Mobility Transistor) 増幅器の性能を実証確認。現在、HEMT増幅器は BS/CS アンテナ用増幅器や自動車の衝突センサーとして広く普及している。また、将来の高速度・大容量光通信技術の核となり得るサブミリ波発生用光源の技術開発を、情報通信研究機構と共同で実施。
- 医療応用:** アルマで培った高感度受信機の技術は、医学分野において非侵襲的検査（痛みや危険を伴わない検査）への応用が期待される。
- 極低温技術:** 日本の極低温技術はアルマ用冷凍機の最適化とノイズの低減を実現し、極低温冷凍機を研究のための「開発品」から信頼性の高い「強い商品」へと高めた。医療用の「磁気共鳴画像装置（MRI）」用の極低温冷凍機の製造・販売において、日本の冷凍機は世界シェアをほぼ独占し、世界で確固たる地位を得ている。



極低温冷凍機が搭載された
アルマ受信機真空容器



極低温冷凍機によって冷却
される超伝導受信機群

「アルマ計画」の事後評価に係る調査検討の視点

3. 社会・国民の理解を得る ための取組





アウトカムの明確性

(1) プロジェクトで期待されるアウトカムは明確になっているか。それは国民に対して分かりやすいものと言えるか。

- アルマ計画では、
 1. 太陽系以外の惑星系とその形成を解明
 2. 銀河形成と諸天体の歴史を解明
 3. 膨張宇宙における物質進化を解明
 という3つの科学目標を明確に掲げている。

これらは、

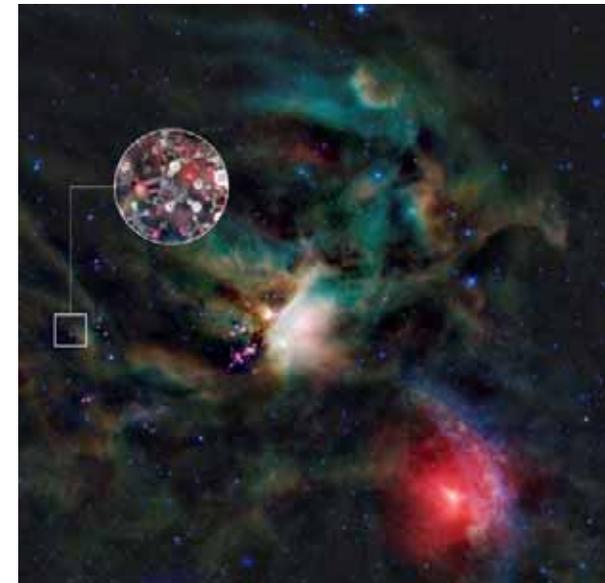
「私たちの地球がある太陽系がどうやってできたのか」

「銀河系がどうやってできたのか」

「生命の材料はどこからやってきたのか」

といった人類の世界観に関わる重要な謎を解き明かすものである。

一般講演等でも「生命の起源」と「地球型惑星の誕生」は非常に関心が高く、これらのテーマでアルマ望遠鏡は、たとえば、NHKニュース7の年始を飾る明るいニュースの1つとして、これまで平成22年1月3日、平成25年1月5日、平成28年1月3日と3度も取り上げられた。



アルマの観測により、最も単純な「糖」分子を惑星系ある領域から初めて発見した、へびつかい座の星形成領域の赤外写真。生命に密接に関連する分子が、惑星が作られる領域で既に作られていることがわかった。

Jørgensen et al. *Astrophysical Journal Letters* 2012



国民への情報発信

(2) 計画の進捗状況や我が国の国際的な活躍、研究成果等は、広く発信されていると言えるか。

- 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ており、他にはない珍しいケースと言える。計画を理解・支持してもらうという立場から、研究者による手作り広報により、研究者だけでなく国民全体を対象とした活動を推進。
- アルマ計画に関する記事は、以下のような活動を通して、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、科学に関心を持つ層以外の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知らせている。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。
 - アルマ望遠鏡の現状と最新の成果を伝えるため、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年から平成28年11月末までの開催回数は237回におよび、毎回約20～200名の参加者を数える。





地元とのコミュニケーション

- アルマ望遠鏡現地の近隣地区住民とのコミュニケーションとして、学校単位でのアルマ望遠鏡施設見学を毎月5回程度の頻度で行っている。
- 講演会などを定期的に行い、アルマへの理解促進とともに、チリ現地における日本人コミュニティとの交流も図っている。
- 施設見学・講演会など：
 - 職場施設見学
 - 星空を見る会
 - 七夕講演会（毎年開催）
 - サマーキャンプ（毎年開催）

施設見学（平成27年10月28日）



星空を見る会
（平成26年1月27日）



七夕講演会
（平成27年7月13日）





チリ現地の安全対策

- 平成24年5月、合同アルマ観測所の国際職員として派遣していた国立天文台職員が不慮の事件により死亡した。これを重く受け止め、次のような対応を行っている。
 - 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
 - 行倒れ時等の緊急連絡カード導入
 - 大手私立病院との協定締結、東京医科歯科大学ラテン・アメリカ拠点（在サンティアゴ）との関係強化
 - スペイン語習得支援の拡張
 - 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



「アルマ計画」の事後評価に係る調査検討の視点
4. 今後の運用・整備計画





今後の計画におけるアルマの位置づけ

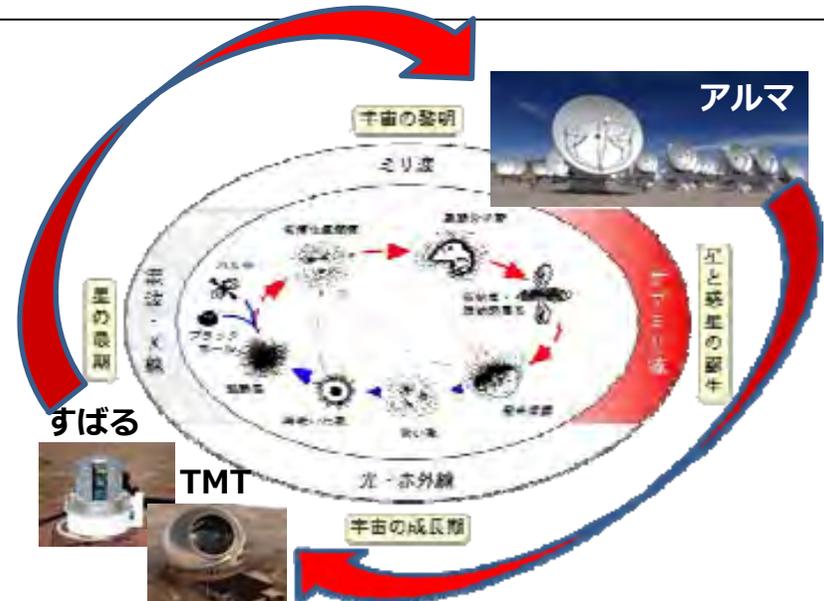
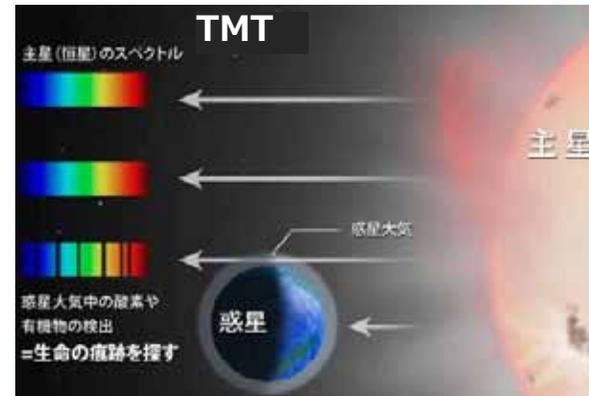
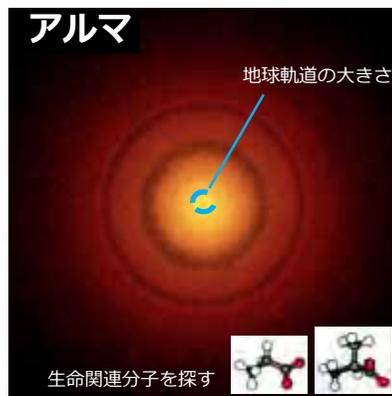
(1) 新しい望遠鏡等の設置を含む、今後の我が国の運用・整備計画は明確になっているか。その中で、アルマの位置づけは妥当と言えるか。

国立天文台では大型計画として、すばるからアルマ、アルマからTMTへと計画的な整備を実施。

宇宙を理解するためには、天体の起源と進化を多波長で相補的に観測することが必須。

すばるからTMT（光赤外線）になることでアルマと同等の空間分解能（0.01秒角）が実現できる。

アルマ（ミリ波・サブミリ波）は、ガスや塵を観測することで、惑星系の誕生、銀河の進化、生命の起源の研究を進める。TMTでは、星や惑星を直接観測することで、天体の起源と進化、宇宙の成り立ち、生命の探査の研究を進める。



光赤外線およびミリ波・サブミリ波で相補的に最高の空間分解能で観測することで、たとえば、**アルマでは地球型惑星の誕生の現場を直接撮像し、生命関連分子の検出を目指す。**

TMTでは地球型惑星を直接撮像し、バイオマーカーの検出を目指す。



今後の計画におけるアルマの位置づけ

国立天文台 大型望遠鏡計画のロードマップ

H27(2015)年

H32(2020)年

H37(2025)年

H42(2030)年

野辺山45m
電波望遠鏡

S57(1982)年: 観測開始



すばる

H11(1999)年: 観測開始



アルマ

H25(2013)年: 本格運用開始



TMT

H26(2014)年: 建設開始





得られた知見とその活用

(2) 10年間にわたる事業の中で、適切なタイミングで評価は行われたか。その中で、プロジェクトのうまくいった点、いかなかった点等、今後を活かすべき知見は得られたか。得られた知見はどのように活かされているか。

国際外部評価の状況

- 建設期では国際外部評価を毎年実施。（毎回、3日間かけて集中審議）

NINS/NAOJ（自然科学研究機構・国立天文台）、NSF（米国・国立科学財団）、ESO（欧州南天天文台）が主体となり実施。評価報告書はアルマ評議会に提出された。また、委員はこれらに所属しない各分野の専門家（天文、技術開発、マネジメント、広報普及・教育、財務）で構成された。

- 運用期は、3-5年に1度で実施する予定。（アルマの運用に関する三者協定に明記）





得られた知見とその活用

国際外部評価

建設に関わる国際外部評価

- H19-09 ALMA Annual External Review (委員-計8人、内2人が日本人)
- H20-12 ALMA Annual External Review (委員-計12人、内3人が日本人)
- H21-11 ALMA Annual External Review (委員-計11人、内3人が日本人)
- H22-10 ALMA Annual External Review (委員-計11人、内3人が日本人(議長は日本))
- H23-10 ALMA Annual External Review (委員-計10人、内3人が日本人)
- H24-10 ALMA Annual External Review (委員-計11人、内3人が日本人)

→ たとえば、大幅なコスト超過を防ぐため、サイエンス目標への影響を最小限に留める当初計画からの変更案に関し、審議。

当初計画からの変更

- コスト増による欧米アンテナ台数の削減（平成21年度科学技術・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及び国立大学法人運営費交付金の特別教育研究経費（学術研究）に関する作業部会による評価」にて評価済み）
 - 当初計画：北米：12m×32台、欧州：12m×32台、日本：12m×4台、7m×12台
 - 変更計画：北米：12m×25台、欧州：12m×25台、日本：12m×4台、7m×12台
- アンテナ台数の減少により感度の低下を招くが、観測時間を長くすることや運用効率の向上によって、所期の科学目標を達成可能。平成21年8月の文科省評価においても、妥当であると判断された。
- コスト増によるアンテナの最大展開範囲（最大基線長）の縮小
 - 当初計画：18.5km、変更計画：16km
- アンテナ展開範囲の減少により解像度の低下を招くが、原始惑星系円盤の高解像度観測で実証されたように、所期の科学目標を達成可能。





得られた知見とその活用 国際外部評価

運用に関わる国際外部評価

- H19-02 ALMA Operations Plan External Review (委員-計8人、内2人が日本人)
 - H27-04 ALMA Operations Review (委員-計10人、内3人が日本人)
- アルマ望遠鏡の運用計画に対して、予算や運用体制等、専門家による幅広い観点からの審査を実施。

安全に関わる国際外部評価

- H20-10 ALMA External Safety Review (委員-計5人、内1人が日本人)
- 本格運用の開始に先立ち、安全の専門家による外部評価を実施。

平成19年9月のALMA Annual Reviewの様子



平成年10月のALMA Annual Reviewの参加者





得られた知見とその活用 アルマ計画の評価等の反映状況 (1/4)

【総合科学技術会議における評価の実施・反映状況】

○ 平成16年度概算要求における科学技術関係施策の優先順位付け(平成15年10月)及び大規模新規研究開発の評価(平成15年11月)

① 評価結果の概要 優先順位:A

【指摘事項1】 日本が米欧より2年遅れて参加することによる、研究計画や使用時間配分等での不利の克服

【指摘事項2】 我が国がこれまで推進してきたミリ波及びサブミリ波分野における観測的研究及び装置開発等の特長を活かした研究の推進

【指摘事項3】 国民への説明責任

【指摘事項4】 他の装置の運用体制の合理化等スクラップ・アンド・ビルドの自助努力

② 評価結果の反映状況

上記指摘事項については、大規模新規研究開発の評価のフォローアップ(平成17年8月)において、「指摘事項に沿った対応が図られていると判断する。今後も引き続き、同計画を着実に推進し、当初の目標が確実に達成されることを期待する。」と評価されている。

○ 平成17年度概算要求における科学技術関係施策の優先順位付け(平成16年10月)

① 評価結果の概要 優先順位:A

【留意事項】

本計画を通じて、我が国がリーダーシップをとってアジア地域等の天文学の発展に貢献できるよう引き続き努力されたい。

② 評価結果の反映状況

台湾及び中国との間でもアルマに関する協力協定を結んでおり、中国・紫金山天文台の技術者が日本の担当するサブミリ波受信機的设计開発に参加するなど、具体的な協力が進んでいる。





得られた知見とその活用 アルマ計画の評価等の反映状況 (2/4)

○ 平成18年度概算要求における科学技術関係施策の優先順位付け(平成17年10月)

① 評価結果の概要 優先順位:A

【留意事項1】引き続き、東アジア地域協力に向けた取組を進められたい。

【留意事項2】平成19年度からの部分運用に向けて、利用段階における効率的な運用の検討にも着手されたい。

② 評価結果の反映状況

東アジア地域での協力の一環として台湾との間でアルマに関する協力協定を締結し、協力の具体的内容について検討を始めた。また、中国、台湾、日本で研究会を共同組織し、研究協力を推進した

効率的な運用の検討については、日米欧関係者での検討、観測データの効率的利用、アルマ東アジア地域センターの設置による観測から論文出版までを視野に入れた支援計画を検討している。

○ 平成19年度概算要求における科学技術関係施策の優先順位付け(平成18年10月)

① 評価結果の概要 優先順位:A

【留意事項1】我が国独自の技術を活かした国際協力に引き続き努力すること。

【留意事項2】利用段階における効率的な運用に引き続き取り組むこと。

② 評価結果の反映状況

日本の高い技術を用いた受信機の開発・製造や、我が国が独自に開発した方式に基づくACA用高分散相関器の設計・製造を進めている。効率的な運用の検討については、日米欧で協議を進め具体的、効率的な運用計画案(チリ現地での人件費高騰等の影響を抑えるための人員計画の見直し等を含む)を策定した。

平成19年2月、国際評価委員会によるレビューをワシントンDCで開催し、運用計画案について高い評価を得た。





得られた知見とその活用 アルマ計画の評価等の反映状況 (3/4)

○ 平成20年度概算要求における科学技術関係施策の優先順位付け(平成19年10月)

① 評価結果の概要 引き続き着実・効率的に実施することが適当である。

【特記事項】 利用段階における効率的な運用に引き続き取り組むこと。

② 評価結果の反映状況

平成19年2月の国際外部評価を経て平成19年3月にアルマ評議会(プロジェクトの最高意思決定機関)で策定した運用計画に基づき、運用の中心となるチリ・アルマ観測所責任者、日米欧3カ所のアルマ地域センター責任者が定期的に会合を持ち、効率的な運用を図るための検討を重ねている。

○ 平成21年度概算要求における科学技術関係施策の優先度判定等(平成20年10月)

評価結果の概要 「引き続き着実・効率的に実施することが適当である」

【特記事項】 なし





得られた知見とその活用 アルマ計画の評価等の反映状況 (4/4)

○ 平成22年度概算要求における科学技術関係施策の優先度判定等(平成21年12月)

① 評価結果の概要 着実・効率的に進めるべきである。

【指摘内容】

- 日本側の努力がアルマ計画をリードしていることや、計画変更を反映した運用費・分担割合を国民に理解させる努力が必要である。また、評議会の中における日本の発言力の確保に努めるべきである。
- アルマ計画の科学的重要性を考えれば、当初予定を早期に、かつ内容的に十分なレベルで実現することが必要である。利用段階における効率的な運用に引き続き取り組むこと。

② 評価結果の反映状況

- 国立天文台アルマプロジェクトのWEBを全面的に改訂し、日本がアルマ全体をリードしている状況を分かりやすく広報する努力を行った。また、マスコミへの働きかけを強めた結果、昨年9月からの1年間に新聞・雑誌等で24回も報道され、建設状況の広報も進んでいる。
評議会に際しては、事前の戦略会議において日本の主張点について、一層の意志統一を図り、発言力を確保している。
- 本格運用に先だって行われる初期運用は、アンテナが全台数揃わなくても既存の電波望遠鏡の性能を大きく凌駕するものであり、その観測結果から当初の科学目標の緒となる成果を挙げるべく、周到な観測準備を進めている。初期運用において成果を挙げることで本格運用での当初の科学目標の早期達成を可能とすると考えている。
アルマ全体の運用計画の改訂作業を行っており、その中で効率的な運用の実現を引き続き検討している。





得られた知見とその活用 文科省における評価結果

【文科省における評価の実施・反映状況】

○ 平成25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「アルマ計画の推進」(平成25年10月)

① 評価結果の概要

【計画の進捗状況】 順調に進捗している

【今後の運用体制】 明確に整えられてきている

【留意点】 事業推進にあたって、以下の6点に留意が必要

- (1) 日本のリーダーシップの発揮
- (2) 天文データの解析
- (3) 人員・経費の振り分け、若手研究者の育成等
- (4) 様々な事態への対処
- (5) 職員の安全対策
- (6) 社会や国民の理解

→平成26年10月、留意点への対応状況について報告済み

