

アルマ望遠鏡特集に寄せて ～本格運用期のアルマ

平松正顕・阪本成一・井口 聖

〈自然科学研究機構国立天文台チリ観測所 〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉
e-mail: hiramatsu.masaaki@nao.ac.jp

アルマ望遠鏡は2011年に初期科学観測を開始、2013年に開所式を開催して本格運用に移行した。これまでのミリ波・サブミリ波望遠鏡を大きく凌駕する感度と解像度を活かし、原始惑星系円盤の詳細な構造や、130億光年以上かなたの銀河に含まれる炭素や酸素の量、生命につながるかもしれない複雑な構造の大型有機分子の分布などを次々に明らかにしてきた。本稿ではアルマ望遠鏡特集の巻頭言として、アルマ望遠鏡の概要と現状を紹介する。

1. はじめに

「こんなのが撮れたよ！」

東アジア・アルマプロジェクトマネージャである井口が平松の居室にもってきたノートPCのディスプレイには、黒い背景に白い多重リング構造がはっきりと浮かび上がっていた。2014年10月のことだった。いまやアルマ望遠鏡を代表する観測画像となった、おうし座HL星を取り巻く原始惑星系円盤である¹⁾(図1)。同室にいた遠方銀河の研究者も加わって、この解像度でサブミリ波銀河を見たらどうなるだろうか、という推測にも花が咲いた。「アルマ望遠鏡の『本気』がこれから見られる」という期待に多くの研究者が胸を高鳴らせる、そんな画像だった。この画像は同年12月にプレスリリースされ、読売新聞の朝刊一面をカラーで飾るなど大きく報じられた。

アルマ望遠鏡は、2011年9月に「初期科学観測」として世界中の研究者から提出された観測提案に基づく科学観測を開始した。建設・性能評価と並行して科学観測を開始することになったのは、建設途上でもすでに他の同種の望遠鏡を凌駕する感度と解像度を達成していたからであり、それに対する期待を裏づけるように非常に多数の観

測提案が集まり、競争率は9倍に迫るほどだった。研究者が長年待ち続けた、そして長年の努力の末に結実したのが、このアルマ望遠鏡だ。

今回のアルマ特集では、まず本稿でアルマ望遠鏡の概要と現状を解説した後、「惑星形成」「系外銀河」「太陽系」の三つのテーマにおける研究成果のレビュー、そして数多くの個別研究成果紹介記事を研究者のみなさんにご寄稿いただく。これ

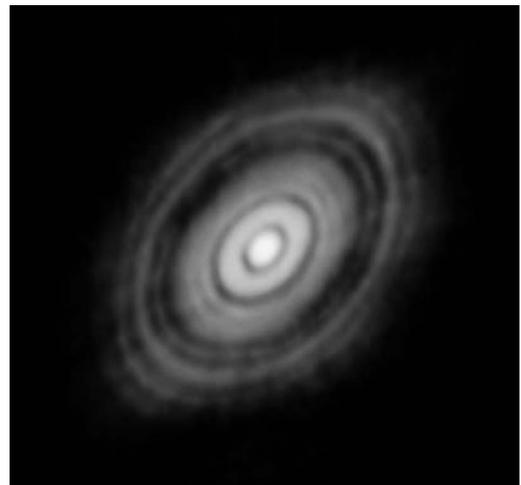


図1 アルマ望遠鏡が捉えた、おうし座HL星を取り巻く塵の円盤。

Credit: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO)

までアルマ望遠鏡が創出してきたさまざまな成果を概観する特集としてぜひお楽しみいただきたい。天文月報では2013年10月号でも初期成果について紹介する特集を組んでいるほか、個別記事でもこれまでアルマ望遠鏡によるいくつかの観測成果が紹介されていることを申し添えておく。

2. 国際プロジェクトとしてのアルマ望遠鏡

アルマ望遠鏡（正式名称は「アタカマ大型ミリ波サブミリ波干渉計」: Atacama Large Millimeter/submillimeter Array; ALMA）は、南米チリ北部、標高5,000 mのアタカマ高地に設置された電波望遠鏡だ。日本・台湾・韓国、米国・カナダ、そして欧州を中心とする欧州南天天文台の参加国、そして建設地のチリを含めて22の国と地域が協力する巨大な国際プロジェクトでもある。アルマ望遠鏡は66台の高精度パラボラアンテナを最大で16 kmの範囲に展開し、それらをつなぎ

合わせて一つの巨大な電波望遠鏡として機能させる電波干渉計となっている（図2）。66台のうちの直径12 mアンテナ50台は米欧が開発したもので、12 mアレイと呼ばれる。残りの12 mアンテナ4台と7 mアンテナ12台は日本が開発を担当した「アタカマコンパクトアレイ（Atacama Compact Array; ACA, 愛称はモリタアレイ）」を構成する。広範囲に展開される12 mアレイは、最高で0.01秒角以上の高解像度での描画を担う。一方、アタカマコンパクトアレイは、12 mアレイでは観測しにくい天球上で大きな広がりをもつ天体からの電波の絶対強度を精密に測定することで、電波画像の忠実性を高くする役割を担っている²⁾。

アルマ望遠鏡が観測する電波の周波数帯は、35-950 GHz（波長に換算すると8.5-0.32 mm）である。アルマ望遠鏡ではこの周波数帯を10の「バンド」に分け、それぞれに最適な受信機を開発している。バンド3, 4（84-163 GHz, 3.6-1.8 mm）



図2 標高5,000 mの山頂施設に並ぶパラボラアンテナ群。2012年12月に空撮されたもの。
Credit: Clem & Adri Bacri-Normier (wingsforscience.com)/ESO

およびバンド6-10 (211-950 GHz, 1.4-0.32 mm)の受信機はすでにアンテナに搭載され、科学観測に供されている。このうちバンド4, 8, 10は日本が開発を担当した受信機である。バンド5は欧州と米国の協力で開発し、日本がアルマ受信機システムへの搭載・組立調整に貢献し、2017年10月から科学観測に供される予定である。バンド1は台湾が中心になって開発を進めており、日本はチリとともに光学設計を行った。バンド2は欧州・北米のそれぞれで技術的な検討が進められており、日本はいずれに対しても光学設計で協力している。

ここで少しアルマ望遠鏡実現までの歴史を振り返っておこう。アルマ望遠鏡につながる構想は、1980年代初頭に日本と米国でそれぞれ立ち上がった。日本では野辺山宇宙電波観測所の45 m望遠鏡とミリ波干渉計が、米国ではVery Large Array (VLA) が観測を開始し、次世代の望遠鏡検討の機運が高まっていたころであった。そして1990年代初頭には、欧州でも巨大電波干渉計計画が練られ始めた。それぞれの計画は少しずつ力点の置き方が異なっていたが、さまざまな情報共有と協力の結果、3極ともに50台を超えるアンテナを結合した干渉計でミリ波とサブミリ波を観測するという類似の計画に落ち着いていった。さらなる検討と協力の模索の結果、それぞれの計画を融合し、より高性能な一つの望遠鏡を建造することとなった。2001年に東京で開催された会議で国立天文台、欧州南天天文台 (ESO)、全米科学財団 (NSF) の代表が協定書に署名し、日米欧3極共同によるチリ北部でのアルマ望遠鏡建設計画が正式にスタートした。2003年から8年間にわたる建設を経て2011年には16台のアンテナと限られた周波数帯の受信機による初期科学観測が開始され、当初から目覚ましい成果を上げた。2013年にはアルマ望遠鏡山麓施設でチリのピネラ大統領 (当時) や日本の福井照文部科学副大臣 (当時) などの要人を世界から迎えて盛大な開所式が

举行された。使用可能なアンテナ数、受信機バンド、最大基線長、科学観測に投入される時間数は徐々に拡大し、それに応じて観測成果も数多く発表されてきている。2015年には日本の自然科学研究機構、NSF、ESOの3者がアルマ望遠鏡運用に関する協定書に署名し、20年以上にわたるアルマ望遠鏡運用の枠組みが整った (図3)。現地での望遠鏡運用はこの協定に基づいて合同アルマ観測所 (Joint ALMA Observatory; JAO) が行っている。JAOには国立天文台からも研究者が参加している。

なお、アルマ望遠鏡に対する東アジアの貢献割合は全体の25%であり、北米・ESOはそれぞれ37.5%ずつとなっている。観測時間の割り当ては、全体の10%がチリに配分され、残りが貢献割合に応じて各地域に配分される仕組みになっている。

3. 観測所としてのアルマ望遠鏡

3.1 アルマ望遠鏡による観測のプロセス

アルマ望遠鏡は、共同利用装置として研究者からの提案をもとに観測を実行する。現地での運用は上記のとおりJAOが担うのに対し、各地域での望遠鏡ユーザへの窓口となるのは、アルマ地域センターである。アルマ東アジア地域センターは国立天文台に設置されている。本章では観測提案からデータ配布までの流れを追いながら、観測所としてのアルマ望遠鏡の機能と仕組みを紹介する。

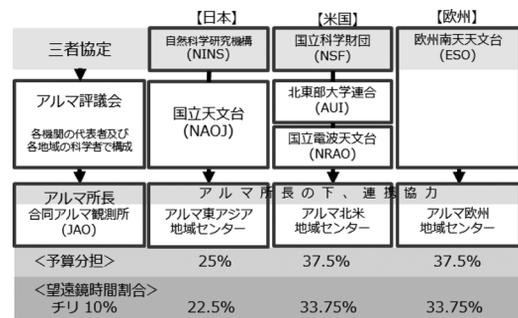


図3 アルマ望遠鏡を運用する国際的な枠組み。

アルマ望遠鏡の観測は、1年間の観測期間（サイクル）を単位として進められる。各サイクルは10月に開始され（例えば「サイクル5」は2017年10月からの1年間）、同年4月下旬に観測提案の提出締切が設定されている。観測提案審査で高いグレードを得た提案の研究者は、サイクル開始前にアルマ地域センターからの支援を得て、望遠鏡のセッティングを指示する電子ファイルを生成する。実際の観測ではJAOの望遠鏡オペレータがこのファイルを実行することでデータが取得される。アルマ望遠鏡はその日の天候やアンテナ配列などによって実行する観測を組み替えるダイナミックスケジューリングを採用しており、提案者が実際に現地へ赴いて観測を実行することはない。

得られたデータは、JAOおよびアルマ地域センターに所属するスタッフによって処理され、「品質保証」がなされるのがアルマ望遠鏡の特徴である。例えば感度が提案者の要望に達していなければ、追加観測が行われる。また処理されたデータはFITS形式^{*1}で生データや解析スクリプトとともにアルマ望遠鏡データアーカイブに登録され、提案者に提供される。このFITSデータはそのまま論文掲載用の図として使えるクオリティで作成されるため、電波干渉計のデータ解析に不慣れた研究者であってもアルマ望遠鏡の成果で論文を書くことが可能だ。もちろんデータ解析の腕に自信のある研究者は自ら解析をすることもできる。データが提案者に渡されてから1年間はデータ利用の優先権を提案者がもち、その後はデータアーカイブにて公開される。アルマ望遠鏡ではこのアーカイブデータを使った論文も数多く出版されている。

3.2 観測提案と出版論文の統計情報

2011年9月の初期科学観測サイクル0の開始から5年が経過し、観測提案も論文も数が大きく増

加している。ここでは、最新のサイクル4の観測提案と、これまでに出版された論文に関する統計情報を紹介する。

2016年4月に設定されたサイクル4の観測提案公募では、30以上の国と地域から1571件の提案が提出された。世界中から選ばれた145名の研究者によって審査が行われ、135件の提案が最高優先度（グレードA）、340件がグレードB、とされた。さらにグレードA/Bにランクされた観測が実行できないときの補欠候補（Filler, グレードC）として232件が選定された。審査においては全観測提案が一つのランキングにまとめられ、上位から順に各地域の枠に割り振られていく。このため地域によって競争率は若干異なり、サイクル4では欧州が4.9倍、東アジアが3.8倍、北米が3.5倍であった。サイクル4観測提案審査の詳細はアルマ望遠鏡サイエンスポータル^{*2}に掲載されているので、関心のある方はご覧いただきたい。

サイクル4で採択された観測提案の分野別割合を図4に示す。「観測的宇宙論・遠方宇宙」「銀河・銀河核」「星間物質・星形成・星間化学」「惑星形成・系外惑星・太陽系天体」がそれぞれ2割強ずつで、「恒星進化・太陽」が約1割という分布になっている。

次に、これまでに出版された論文についての統計情報を紹介しよう。2016年11月11日現在で501件の論文が出版されており、その分野別割合は図5のとおりである。図4と分類がやや異なるが、「惑星形成」「星間物質・星形成」「活動銀河」の分野が約1/4ずつを占めていることがわかる。またNature/Science誌に掲載された論文が24本と全体の約5%を占める。すばる望遠鏡やESO Very Large Telescopeではこれが1.5%程度であることから、アルマ望遠鏡のデータに基づく研究が大きなインパクトをもっていることがわかる^{*3}。

^{*1} Flexible Image Transport System形式。天文学データに一般的に使われるフォーマット。

^{*2} <https://almascience.nao.ac.jp/news/alma-cycle-4-proposal-review-detail-report>

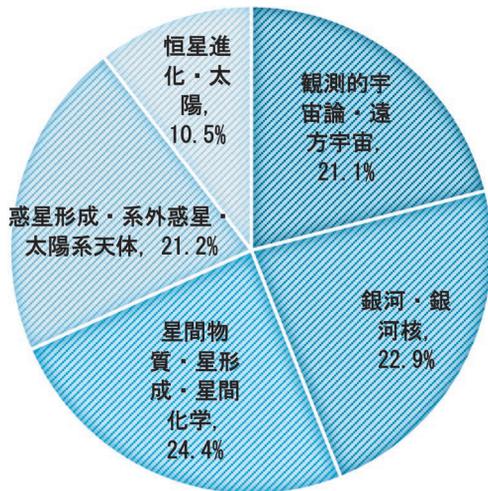


図4 アルマ望遠鏡科学観測サイクル4で採択された提案の分野別割合。

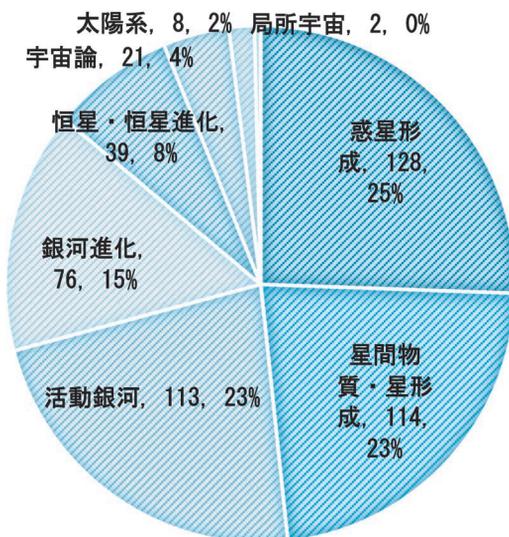


図5 2016年11月11日現在でアルマ望遠鏡データに基づいて出版された査読論文の分野別割合。数字は論文数とパーセント。

4. アルマ望遠鏡が目指すサイエンスと成果

アルマ望遠鏡は前述のとおりミリ波サブミリ波

を観測するため、低温の星間物質（ガスやダスト）の研究に適している。アルマ望遠鏡の科学目標は、大きく分けて「太陽系以外の惑星系とその形成過程」「銀河形成と諸天体の歴史」「膨張宇宙史と宇宙物質進化」の三つである。

惑星形成については、すでに0.03秒角の高い解像度で原始惑星系円盤を観測することが可能になっていることから、数多くの成果が生み出されている。代表的な観測成果は冒頭で紹介したおうし座HL星（図1）であろう。このデータは共同利用観測ではなく長基線試験観測キャンペーンで取得されたもので、その論文¹⁾は出版から1年半で引用が140件に上り、そのインパクトの大きさを物語っている。同心円状のギャップ構造の成因については、形成中の惑星によるものという解釈のほか、ダストとガスの摩擦による永年重力不安定³⁾やダスト合体とガスの凍結が組み合わさる焼結というメカニズム⁴⁾に起因するという説などが提唱され、1枚の画像を元に大きく研究が進んでいる様子が見え始める。また地球から54パーセクという近距離に位置するうみへび座TW星の観測ではリニアスケールでの分解能が1天文単位に達しており、中心星の周囲の地球軌道に相当する領域での原始惑星形成円盤の構造も描き出すことが可能になった⁵⁾。惑星形成に関連する成果については、本特集中の相川祐理氏（筑波大学）によるレビューおよび個別の研究成果紹介をご覧ください。

銀河形成についても、アルマ望遠鏡の高い感度と解像度を活かしたさまざまな研究が行われている。これまで単一鏡で行われてきた遠方銀河サーベイで見つかった「天体」はアルマ望遠鏡の高い解像度によって複数の銀河に分解され、その個々の性質を探ることが可能になりつつある。また赤方偏移 $z=7$ （距離131億光年）程度の銀河における重元素やダストの存在量測定も続々と行われて

*3 もちろん、Nature/Science誌に掲載される論文イコール良い論文というわけではない。

おり⁶⁾⁻⁸⁾、宇宙再電離期に存在する銀河の素性を明らかにしようとする試みも進んでいる。放送大学の谷口義明氏による包括的なレビューが本号に掲載されており、また数多くの個別研究成果紹介も本特集に含まれるので、詳細はそちらに譲りたい。

三つめの大目標である物質進化の観点では、生命とも関連する大型有機分子の探査がアルマ望遠鏡で進みつつある。原始星周囲での単純な糖の仲間の分子の発見⁹⁾、活発な星形成領域いて座B2での分岐した炭素鎖をもつ有機分子の発見¹⁰⁾、原始惑星系円盤でのメタノールの検出¹¹⁾などが代表的な成果といえよう。

もちろんこれら遠方の天体に限らず、太陽や太陽系内惑星・衛星の大気の観測などもアルマ望遠鏡では可能である。太陽系内の研究成果については、本特集内で京都産業大学の佐川英夫氏にレビューしていただく予定である。

5. おわりに

本稿では本格運用期に入ったアルマ望遠鏡の現状についてごく簡単に紹介した。すでに素晴らしい性能をもつアルマ望遠鏡だが、今後30年にわたって観測天文学を最先端で牽引し続けるためにいくつかの拡張計画が検討されている。例えば新しい周波数帯の受信機の開発や関連器の強化、基線長の拡大などの提案があり、すでにいくつかは開発が開始されている。今回のアルマ望遠鏡特集に含まれる数々の成果をお楽しみいただき、さらにアルマ望遠鏡の今後の成果にご注目いただきたい。

参考文献

- 1) ALMA Partnership, et al., 2015, ApJ 808, L4
- 2) Iguchi S., et al., 2009, PASJ 61, 1
- 3) Takahashi S. Z., Inutsuka S., 2014, ApJ 794, 55
- 4) Okuzumi S., et al., 2016, ApJ 821, 82
- 5) Andrews S., et al., 2016, ApJ 820, L40
- 6) Ouchi M., et al., 2013, ApJ 778, 102
- 7) Watson D., et al., 2015, Nature 519, 327
- 8) Inoue A., et al., 2016, Science 352, 1559
- 9) Jørgensen J. K., et al., 2012, ApJ 757, L4
- 10) Belloche A., et al., 2014, Science 345, 1584
- 11) Walsh C., et al., 2016, ApJ 823, L10

ALMA as a Fully-Fledged Observatory Masaaki HIRAMATSU, Satoru IGUCHI and Seiichi SAKAMOTO

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

Abstract: ALMA started early science operations in 2011 and inaugurated in 2013 to be a fully-fledged observatory. With unprecedented sensitivity and resolution in millimeter/submillimeter wavelength, ALMA has obtained the sharpest view of protoplanetary disks, measured the amount of heavy elements in galaxies 10 billion light years away, and detected signals from complex organic molecules. In this article, we describe the current status of ALMA.