



SHI

Strength in Numbers



**A legacy of reliability.
Proven performance.**

For over half a century, researchers have turned to Sumitomo Heavy Industries for the latest advancements in cryogenic technology. We think the numbers speak for themselves:

- Consistent reliability in **thousands of systems** worldwide
- Proven performance in **hundreds of applications**
- Over **five-hundred employees** around the world
- A full range of products, with over **forty models**
- A global installed base, supported by **twelve international offices**
- **One important customer: you**

Visit us anytime, worldwide. www.shicryogenics.com

 住友重機械工業株式会社

〒141-6025
東京都品川区大崎2丁目1番1号 (ThinkPark Tower)
TEL: 03-6737-2550
Email: shi.cryo@shi-g.com

NAOJ

No. 351 National Astronomical Observatory of Japan

PRINT ISSN 0915-8863
ONLINE ISSN 2436-7230

NEWS

国立天文台ニュース

望遠鏡15年

現在地と
これからの進化

2026



CONTENTS

02	イントロダクション	
04	アンテナを繋ぐ人々 ～チリ観測所から～	百瀬宗武
05	アルマ望遠鏡で挑む 究極の解像度の天体画像	朝木義晴
06	多国籍チームをつなぐ アンテナ保守の現場から	山田真澄
07	アルマ受信機の 感度の維持とさらなる進化	伊藤哲也
08	アルマ望遠鏡が切り開く 私たちの起源 ～最近の観測成果から～	アルマ プロジェクト
11	進化を続けるアルマ望遠鏡 広帯域感度アップグレード	石井 峻
12	次世代観測に向けた 受信機のアップグレード	金子慶子
13	2倍以上の感度アップを 支える高速データ転送	鎌崎 剛
14	アルマトータルパワーアレイ 新世紀の「耳」の開発	Jongsoo Kim 中本崇志
15	次の10年へ	

次号予告

次号(26年秋号)は太陽観測衛星ひのでの20周年特集——2006年の打ち上げ以来、20年にわたり最前線で太陽を見つめ続けてきた挑戦と成果を振り返ります。フレアやコロナ加熱の謎に迫った観測、そして次期太陽観測衛星SOLAR-Cへ繋がる展望を紹介します。

NAOJ NEWS / 国立天文台ニュース

No.351 2026年夏号
© 2026 NAOJ (本誌記事の無断転載・放送を禁じます)

発行日/2026年8月27日

発行/大学共同利用機関法人 自然科学研究機構
国立天文台ニュース編集委員会

〒181-8588 東京都三鷹市大沢2-21-1
TEL 0422-34-3958 (出版室)
FAX 0422-34-3952 (出版室)
国立天文台代表 TEL 0422-34-3600
質問電話 TEL 0422-34-3688
shuppan@ml.nao.ac.jp
https://www.nao.ac.jp/about-naoj/reports/naoj-news/



国立天文台ニュース編集委員会

●編集委員：小久保英一郎(委員長・天文シミュレーションプロジェクト)／石井未来(ハワイ観測所)／岩田悠平(水沢VLBI観測所)／勝川行雄(太陽観測科学プロジェクト)／平松正顕(天文情報センター)／林 満(アルマプロジェクト)／藤井友香(科学研部)／東谷千比呂(先端技術センター)

●編集：天文情報センター出版室

紙版の発送停止や発送先変更のご依頼は
こちらのフォームから
https://forms.office.com/r/97uZF7KH2Y



アルマ望遠鏡年表

2011

2011.9.30 アルマ望遠鏡、初期科学観測を開始



2012

2012.4.12 最初の観測成果プレスリリース



2013

2013.3.13 アルマ望遠鏡山麓施設にて開所式を挙行

2013.4.26 日本開発アンテナ16台山頂施設設置完了

2013.10.26 最高周波数帯「バンド10」干渉計試験成功

2014.2.18 日本製造受信機全219台出荷完了

2014.6.13 66台目のアンテナ山頂施設設置完了

2014.11.6 「視力2000」の試験観測画像公開



2015

2015.12.15 NINS、NSF、ESO アルマ望遠鏡運用に関する三者協定書に署名

2016

2017.3.8 132億光年先の酸素と塵の発見をリリース

2017.11 アルマ望遠鏡将来開発ロードマップ策定



2017

2018

2019.4.10 EHTが捉えたM87中心ブラックホール画像公開



2019

2020.1.30 「アルマ2」日本学術会議「第24期学術の大型研究計画に関するマスタープラン」重点大型研究計画に選定

2020.9.24 「アルマ2」文部科学省「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」に掲載

2020

2021.8.14 バンド1受信機、ファーストライト

2021.9 観測開始10周年アンテナ命名キャンペーン

2021

2022

2022.4.8 135億光年先の最遠方銀河候補を発見



2023

2023.5.17 アルマ望遠鏡本格運用開始10周年記念式典(東京)

2023.11.15 最高解像度5ミリ秒角を達成

2024

2024.9.10 国連事務総長がアルマ望遠鏡サイトを訪問

2024.10 新データ伝送システム、基本設計審査通過

2025

2026

2026.1 トータルパワーGPU分光計基本設計審査通過

2026.4 第2世代バンド8受信機基本設計審査通過

口径12mのアンテナ54台、口径7mのアンテナ12台の計66台を擁する世界最大級の電波観測装置、アルマ望遠鏡。2011年9月30日、当初16台の望遠鏡から、アルマ望遠鏡は初期科学運用を開始しました。以降、世界の天文学を推し進める装置として活躍し、15年を迎えます。

アルマ望遠鏡は、66台のアンテナを最大で差し渡し16kmの範囲に展開し、1つの巨大な仮想電波望遠鏡を構成する「電波干渉計」です。設置されているのは、日本から遠く離れた南米チリ・アンデス山脈にある標高5000mのチャントール高原。現地には各国からさまざまな専門性を持つ職員が集って望遠鏡の運用を担っています。今回は、チリ観測所でアンテナや受信機の点検整備をし、より高精度の観測モードの開発・試験に従事する職員にスポットを当てます。

惑星の誕生現場を高精細に撮影し、130億年を超える過去の銀河の進化の様子を明らかにし、私たち生命が誕生する化学的な豊かさの起源に挑み続けるアルマ望遠鏡の最近の成果も振り返ります。

アルマ望遠鏡15年

現在地とこれからの進化

運用開始から10年を超え、宇宙観測の地平を拡大してきたアルマ望遠鏡。さらなる10年も天文学の先頭で牽引するため、国立天文台はアルマ望遠鏡の機能を強化しながら科学観測を実行する「アルマ2計画」を、文部科学省大規模学術フロンティア促進事業の支援を受けて2023年度から実施しています。「解像度の2倍以上の向上」、「感度の約2倍向上」、「同時観測可能周波数帯域の2倍以上向上」など、観測性能の大幅向上を目指しています。現在のアルマ望遠鏡や他の望遠鏡を越えて新たな謎を解く2030年代のアルマ望遠鏡に向けた取り組みです。本誌では、その一環として、世界の研究者コミュニティでの議論を経て受信機や信号処理装置の改良計画が進んでいる「広帯域感度アップグレード(WSU: Wideband Sensitivity Upgrade)」を取り上げます。

- 1 アンテナ16台での試験観測による触角銀河。ハッブル宇宙望遠鏡画像と合成。クレジット: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO), the NASA/ESA Hubble Space Telescope
- 2 フォーマルハートの塵のリング。ハッブル宇宙望遠鏡の可視光画像と合成。クレジット: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO), the NASA/ESA Hubble Space Telescope
- 3 「視力2000」に相当する高解像度試験観測で撮影したおうし座HL星の原始惑星系円盤の画像。クレジット: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO)
- 4 132億光年先の銀河 A2744_YD4 に酸素と塵を発見。クレジット: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO), NASA, ESA, ESO and D. Coe (STScI)/J. Merten (Heidelberg/Bologna)
- 5 EHTによるM87中心ブラックホールの撮影に、アルマ望遠鏡も貢献。クレジット: EHT Collaboration
- 6 135億光年先の最遠方銀河候補HD1。クレジット: Harikane et al.

国立天文台特製の望遠鏡キットが抽選でもらえる
アンケートを開催中! (回答期限: 2026年10月31日)

https://forms.
cloud.microsoft/r/
n6NGfNmXMr



電波天文まんが「アルマーの冒険」12回「銀河電波受信編・前編～天の川銀河からやってくる電波をキャッチ!」は、こちらからご覧ください。



https://prc.nao.ac.jp/
publication/almar/
index.html



表紙画像クレジット:
Juan Carlos Rojas
-ALMA(ESO/NAOJ/
NRAO)



アンテナを繋ぐ人々

～チリ観測所から～

アルマが捉える宇宙の姿は世界中を魅了しています。その現場を近くで支えるのが、合同アルマ観測所（JAO）とチリを拠点とする関係者です。

アルマ望遠鏡はチリ北部のアタカマ砂漠・チャナントールエリアにある山頂施設（AOS）に位置しています。極度に乾燥した環境と約5000 mの標高は、他では難しい高精度な観測の実行を可能にします。周囲には他にも多くの望遠鏡が稼働しており、「アタカマ天文公園」という連合体の下で協力しています。

アルマ望遠鏡の現場拠点である山麓施設（OSF）は、AOSより低い標高（2900 m）にあります。現地職員を含め約100名が常時滞在し、サイト保守を含む多様な業務に従事しています。OSFでは最前線の現場を持つ独特の活気が感じられ、スペイン語での会話がよく聞かれるのも特徴です。

AO本部はサンティアゴにあり、NAOJを含む各国の執行機関から人材と予算の供給を受けて運営されています。日々の観測運用に加え、装置アップグレードを指揮する中枢でもあります。NAOJからは、Deputy Director of Operationsを務める水野範和教授を含め、7名の国際職員が活動中です。さらに国立天文台の技術職員2名と現地雇用職員が、JAOと連携しながらOSFでの望遠鏡保守作業を担っています。

装置としてのアルマの基盤はアンテナ間の超精密同期ですが、事業としてのアルマの推進力は関係者間の多層的連携であるというのが、多くの結節点に関わっている筆者の実感です。アルマが明かした驚くべき宇宙の姿は、国境を超えた人々の協働の賜物でもあるのです。



百瀬宗武
MOMOSE, Munetake
チリ観測所

AOSからコンパクト配列のアルマアンテナ群を眺める



標高 5000 m

山頂施設（AOS）

Array Operations Site

標高 2900 m

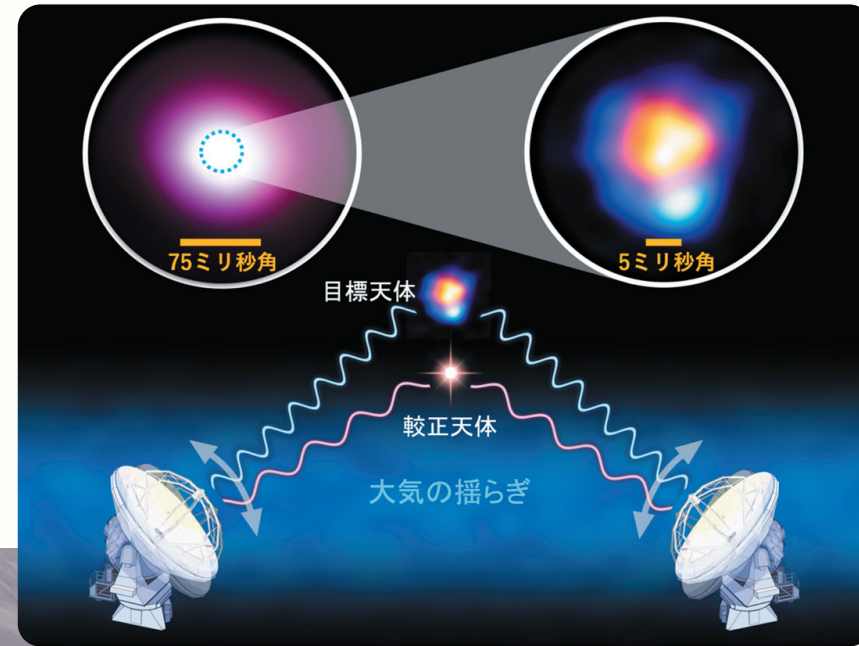
山麓施設（OSF）

Operations Support Facility

5600 m（チャナントール山頂上付近FYSE/CCAT サイト）からのAOS 遠景



夕食時のOSF 食堂の1コマ



アルマの最高解像度観測を実現するBand-to-Band法

目標天体の近くの較正天体を低い周波数で観測し、その観測量で目標天体の観測誤差を補正する。右上の白丸で囲った画像はBand-to-Bandを取り入れてバンド10受信機と最長16 kmの基線長のアンテナ配列で観測し、アルマが実現可能な最高解像度5ミリ秒角で撮像したうさぎ座R星。オレンジは星表面からのサブミリ波放射、青は891 GHzのシアン化水素メーザー放射。左上の白丸で囲った画像はバンド10受信機と最長1 kmの基線長のアンテナ配列の組み合わせで観測し解像度75ミリ秒角で撮像したうさぎ座R星の星表面とシアン化水素メーザーの放射。解像度が粗いため、2つの放射はこのイメージでは区別できない。

GUIDE 0016

解像度と電波干渉計

<https://www.nao.ac.jp/naoj-news/explanation/0016.html>



アルマ望遠鏡は基線長を延ばすほど、観測周波数を高くするほど、より高い解像度で天体を研究することができます。私は2012年からアルマ望遠鏡が基線長を伸ばすごとに性能評価を行うコミッショニングチームの一員として活動してきましたが、2017年から最長基線+高周波数（Band 8、9、10）の機能拡張・最適化の性能評価チームリーダーとしてアルマ望遠鏡で成し得る究極の解像度性能の実現に取り組んできました。その中で乗り越えなければならない大きな課題は、ミリ波で取得した干渉計位相較正データをサブミリ波で観測した天体の位相較正に応用する「Band-to-Band」の実現でした。

これは、私が20年前に博士課程で「将来のミリ波・サブミリ波干渉計観測に必要な開発研究」として取り組んだ課題で、学生時の研究を長い年月において当代最高性能のアルマ望遠鏡に応用することに因縁めいたものを感じました。多くの検討と実験の末、2023年、遂にアルマ

望遠鏡究極の解像度を達成した天体画像を発表することができました。稼働「10」年目、Band「10」受信機を用いた最大基線長配置「10」の成功、という、「10」ずくめの画像です。

達成した解像度は視力に換算すると1万2000、4キロメートル先の髪の毛を見分けることのできる性能です。この解像度を使えば、太陽系近傍の原始惑星系円盤で現在の地球と同程度の軌道を巡る惑星生成の現場にアプローチすることが可能です。実現も難しければ安定して利用することもまた難しい観測モードですが、今後アルマ望遠鏡が究極の解像度で素晴らしい成果をあげることに大きな期待を寄せています。



朝木義晴
Asahi, Yoshiharu
アルマプロジェクト

アルマ望遠鏡で挑む究極の解像度の天体画像

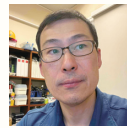
多国籍チームをつなぐアン

私 はチリ現地に、日本がアルマへ提供するアンテナの運用・保守活動を業務としています。保守活動と一言に言っても業務の範囲は広く、未知の機器トラブルの解決、故障の再発防止策を検討、設計変更が必要ならばアンテナ改修案作成、といった感じのことをおもに行なっています。

誌 面の都合で私の業務についてそれぞれ詳しく語ることはできませんが、どの業務においても共通して心がけているのは、さまざまな立場の人から寄せられる意見を集約し、最善かつ“実現可能なアイデア”にまとめ上げることです。

例 えば私の仕事環境では、アンテナ設計製作元である三菱電機 (MELCO)、アルマ観測所への日本製アンテナ提供者である国立天文台 (NAOJ)、保守および運用の責任者である合同アルマ観測所 (JAO) と大きく分けて3つの立場があり、この3者で議論になれば初めから意見が一致するということはまずありません。こういった食い違いを治め、どうにかして物事の実現に漕ぎ着けるというのが、私の業務の肝となる部分だと考えています。

J AOには、さまざまな国、文化的背景、価値観を持った人たちが集まっていますが、そんな彼らと協力するにあたっては、もちろん苦勞もあります。しかし一方で、それ自体が他では得難い体験をもたらすことも多く、やりがいを感じながら日々の業務にあたっています。



山田真澄
YAMADA, Masumi
アルマプロジェクト

テナ保守の現場から

ACA
Atacama
Compact
Array

- 1 アルマセントラルクラスターにて密集しているACAアンテナ
- 2 AOSにて運用中の12 mアンテナ2号機
- 3 AOSにて保守作業中の7 mアンテナ6号機
- 4 トランスポーターで吊り上げ中の7 mアンテナ9号機
- 5 同上
- 6 作業中の12 mアンテナ
- 7 AOSへ運搬中の7 mアンテナ

GUIDE 0017

さまざまなアンテナ

<https://www.nao.ac.jp/naoj-news/explanation/0017.html>



- 8 アンテナ内で受信機の取り付けを終え、配線作業を進めているところ。
- 9 不具合のある受信機カートリッジの交換作業。
- 10 冷凍機保守用部品と奥に見える受信機。十分な保守用部品を準備してある。
- 11 受信機をアンテナに搭載するために、シザーリフトトラックを使用する。
- 12 シザーリフトトラックからアンテナに受信機を搭載するところ。
- 13 日本で開発した3種類の受信機。左からBand 4 (140 GHz帯)、Band 8 (440 GHz帯)、Band 10 (870 GHz帯)。
- 14 受信機の冷却部。この写真には8種のカートリッジが写っているがその後2つが追加された。

私 はチリでアルマの受信機のメンテナンスを行っているエンジニアです。ほかにチリ人のエンジニア2人、技能職員13人で仕事を進めています。アルマの66台あるアンテナすべてに同じ受信機が搭載されています。金属製で上部は青い円筒形の真空冷却容器、下部はアルミ板で覆われた四角い箱の室温部分で、中に10種類の異なる周波数帯に分かれたカートリッジが入っています。青い部分は受信機の心臓部を-269度まで冷却します。これによって、超伝導という現象を用い、宇宙からくるきわめて微弱な電波を効率よく低い周波数に変換して、高感度に受信することができます。

こ の冷却には、日本のメーカー製の冷凍機が用いられています。標高5000 mから受信機を順番に標高2900 mの山麓施設に下ろし、整備を行います。1つの受信機あたりでは、2~3年に1回程度となります。定期的にメーカーから技術者を派遣してもらって、メンテナンス方法の講習を行い、技術の維持に努めています。

× ンテナ後の受信機は山頂のアンテナに搭載された後、実際に十分な感度が得られるかの評価試験を山麓施設からリモート操作で行います。観測に使われている間にも、たまに感度が劣化します。受信機の問題は、観測オペレータから

報告され、私たちがその記録を確認し、これもリモートで調整を行います。

現 在はさらに広帯域の受信機の開発が進んでおり、今年10月に新型Band 6受信機のプロトタイプ初号機が標高5000 mのアンテナに搭載予定です。日本でも新型Band 8受信機の開発が進んでおり、搭載が楽しみです。



伊藤哲也
ITO, Tetsuya
アルマプロジェクト

アルマ受信機の感度の維持とさらなる進化

アルマ望遠鏡が切り開く私たちの起源

～最近の観測成果から～

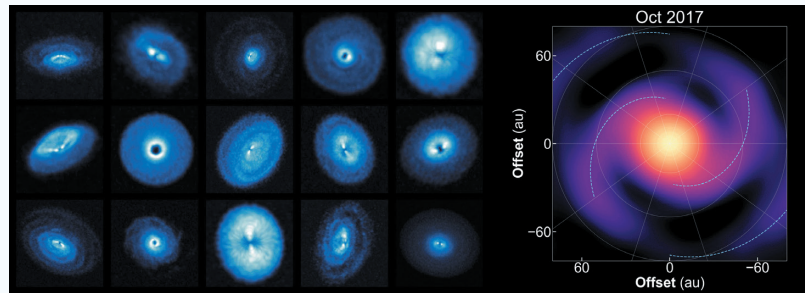
惑星系の形成

ORIGINS OF PLANETS

現在までに6000を超える太陽系外惑星が発見されていますが、太陽系のような惑星系は特別な存在なのでしょうか。惑星の誕生過程と多様性の起源、そして生命を育む環境の普遍性を探るため、アルマ望遠鏡はその高い解像度を活かして、多数の若い星の周りのガスと塵の円盤を高精細に撮影し、その運動と惑星が生まれ始める様子に迫っています。

1 原始惑星系円盤の構造をより鮮明に

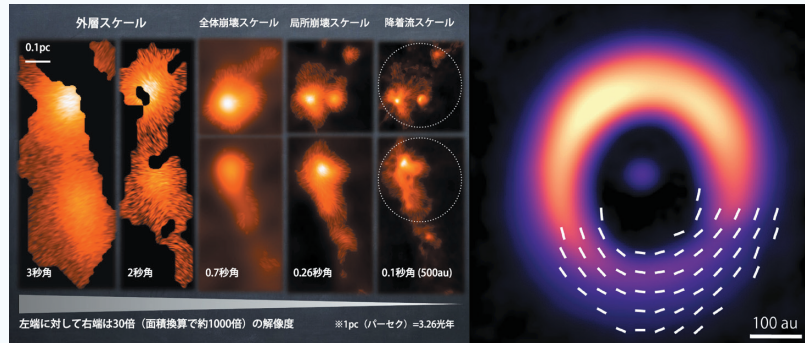
2014年に撮影されたおうし座HL星周囲の円盤はセンセーションを呼び、論文の引用は1200件を超えています。アルマ望遠鏡の解像度・感度・速度分解能の高さを活かした若い星の周りの原始惑星系円盤の観測が続いています。新たな画像化手法も開発され、円盤の構造やガスの運動が詳細に解析される中で、重力不安定性で生じる渦巻きの変化や、先に形成された惑星が塵を掃き集める様子など、円盤内で惑星を成長させる重力作用も解明されていきます。



(左) 15個の原始惑星系円盤の高感度観測画像。渦やリング、渦巻き構造など、多様な構造が明らかに。クレジット：Richard Teague, exoALMA Collaboration
(右) おおかみ座IM星周りの原始惑星系円盤の渦巻き構造。7年間の観測で、ダイナミックな変化が捉えられた。クレジット：ALMA(ESO/NAOJ/NRAO), T. Yoshida et al.

2 星形成における磁場のはたらき

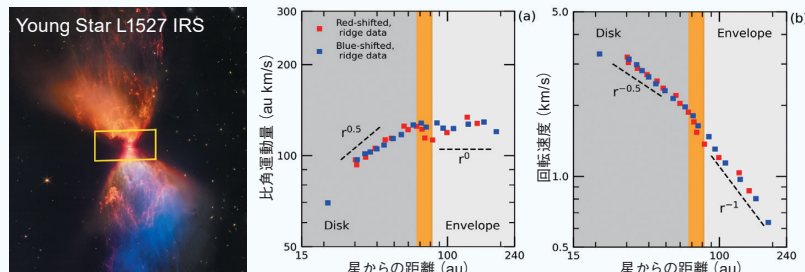
星間物質の動きに影響を与える磁場が、星が誕生する過程でどのような役割を果たすのか、議論が続いています。特に、大質量星の形成には磁場が不可欠であると考えられています。アルマ望遠鏡は、分子雲コア全体から中心部のガス降着流まで幅広いスケールの観測で、磁場が物質の流れ込みを安定させていることを示しました。また、原始惑星円盤でも磁場の3次元構造が描き出されました。磁場が作る乱流状態は、惑星形成にも影響を及ぼすかもしれません。



(左) 大質量星形成領域W51の磁場の様子。星形成過程の4段階（外層、全体崩壊、局所崩壊、降着流）のスケールを示す。クレジット：Koch et al.
(右) HD 142527星の周りの原始惑星系円盤。白線は磁場の方向。クレジット：ALMA (ESO/NAOJ/NRAO), S. Ohashi et al.

3 星周円盤の力学的進化の証明へ

分子雲コアの中心に向かって落下するガスが回転する円盤を通して星を生み出すまでの力学的進化を、アルマ望遠鏡は観測で証明しようとしています。外側を包み込む「エンベロープ」から流入するガスの角運動量が徐々に変化し、星周円盤に取り込まれてケプラー運動を始める遷移領域が特定されました。円盤と連動して回転しながら噴き出す磁気的な円盤風の発見は、星へのガス降着を妨げる円盤の角運動量を流出するガス（アウトフロー）が抜き去る重要なプロセスを示しています。



若い原始星系L1527 IRS (左) で観測されたガスの運動 (右)。グラフ中のオレンジ色の半径領域で、落下するガスが円盤に取り込まれていく。クレジット：(左) NASA, ESA, CSA, STScI; (右) Indrani Das/ASIAA

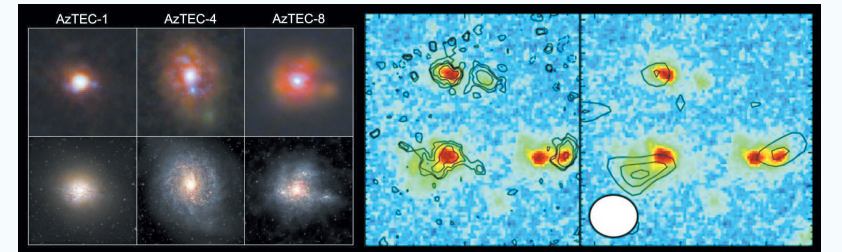
銀河の形成

ORIGINS OF GALAXIES

アルマ望遠鏡には、年間1000件を超える観測提案が寄せられ、数百テーマの観測が実行されています。その対象は太陽系の惑星・衛星や小天体（太陽も!）、天の川銀河にある星や惑星の形成現場、近傍から遠方にいたる数多くの銀河まで、多岐にわたります。アルマ望遠鏡のキャッチフレーズは“*In Search of Our Cosmic Origins*”。宇宙と生命の起源を探る「3大テーマ」でどのようなことが見えてきたのか、前回特集号（2021年12月）以降に発表された観測成果を振り返ってみます。

1 JWSTとのタッグが切り開く原始銀河の地平

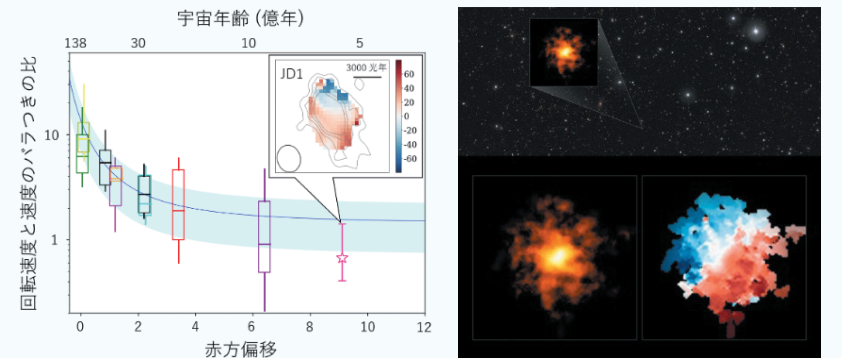
アルマ望遠鏡の最近の5年間は、ジェームズ・ウェッブ宇宙望遠鏡（JWST）が遠方宇宙の風景を書き換え始めた時代と重なります。電波と赤外線の世界最高レベルの解像力を持つ望遠鏡のタッグで、100億年以上前の宇宙にある「モンスター銀河」で猛烈な星形成を起こしているそれぞれのメカニズムを解き明かしたり、さらに古い時代の原始銀河団の密集地帯で成長中の銀河を見つけ出したり、宇宙初期で銀河が急成長する時代を切り開いています。



(左) 上段はモンスター銀河の観測画像。アルマ望遠鏡で捉えた星形成領域（青）とJWSTが捉えた恒星の分布（赤）を重ねている。下段はそれぞれのイメージ図。クレジット：国立天文台
(右) 原始銀河団A2744ODz7p9。等高線で、電離酸素（左、JWST）と塵（右、アルマ望遠鏡）の分布を示す。クレジット：JWST (NASA, ESA, CSA), ALMA (ESO/NAOJ/NRAO), T. Hashimoto et al.

2 回転渦巻銀河はいつ生まれたか

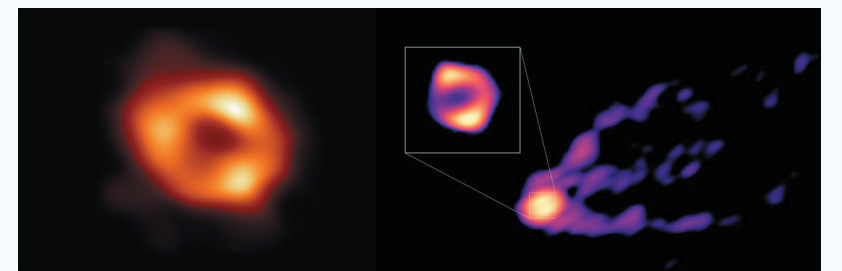
天の川銀河は、衝突・合体を繰り返し複雑な運動から数十億年かけて整然とした姿に進化したのか、継続的なガスの流入の中で成長してきたのか。最近の研究で、「宇宙網（コズミック・ウェブ）」から流れ込む多量のガスから角運動量を獲得した巨大渦巻銀河が100億年以上前の宇宙で見つかっています。ビッグバンから間もない宇宙で回転運動が発達し始めた小さな銀河を見つけ、天の川銀河に匹敵する回転円盤銀河も捉えたアルマ望遠鏡は、新たなシナリオを示すのでしょうか。



(左) 宇宙年代による銀河の回転運動の比較。縦軸の値が大きいほど、回転運動が支配的。ビッグバンから5億年後にゆるやかな回転を始めたMACS1149-JD1を捉えた。クレジット：Tokuoka et al.
(右) 131億年前の回転円盤銀河 REBELS-25。ガスの視線方向の速度（右）が回転運動を示している。クレジット：ALMA (ESO/NAOJ/NRAO)/L. Rowland et al.

3 国際望遠鏡ネットワークの一員として

アルマ望遠鏡は、最長基線長16.2kmと最高周波数950GHzで「視力1万2000」の高解像度観測の試験に成功しています。より高い空間分解能を実現するために、世界中の望遠鏡を大陸規模で結ぶVLBIネットワークも構築されています。「視力300万」で楕円銀河M87のブラックホール・シャドウを撮像したイベント・ホライズン・テレスコープ（EHT）に、アルマ望遠鏡は最も感度の高い観測局として参加しています。



(左) EHTが史上初めて映し出した天の川銀河中心のブラックホールSgr A*の「シャドウ」。クレジット：EHT Collaboration
(右) グローバルミリ波VLBI観測網との合同観測で、M87の中心ジェットとブラックホールの影を初めて同時に撮影。クレジット：R.-S. Lu (SHAO), E. Ros (MPIfR), S. Dagnello (NRAO/AUI/NSF)

宇宙の物質進化

ORIGINS OF CHEMICAL COMPLEXITY

1 太古の銀河で生まれる物質

水素とヘリウム（そして一部のリチウム）以外の、ビッグバン直後には存在していなかった重元素は、星が誕生してから宇宙に現れ、時間とともに増えてきました。さまざまな時代の銀河で重元素の存在量を調べることは、銀河がどのように進化してきたのか理解する上で重要です。アルマ望遠鏡は宇宙誕生から10億年前後の銀河の中に、酸素や窒素、フッ素、水の分子などを検出、宇宙初期の星形成でどのような星がどの程度生まれてきたのかを知る手がかりをもたらします。

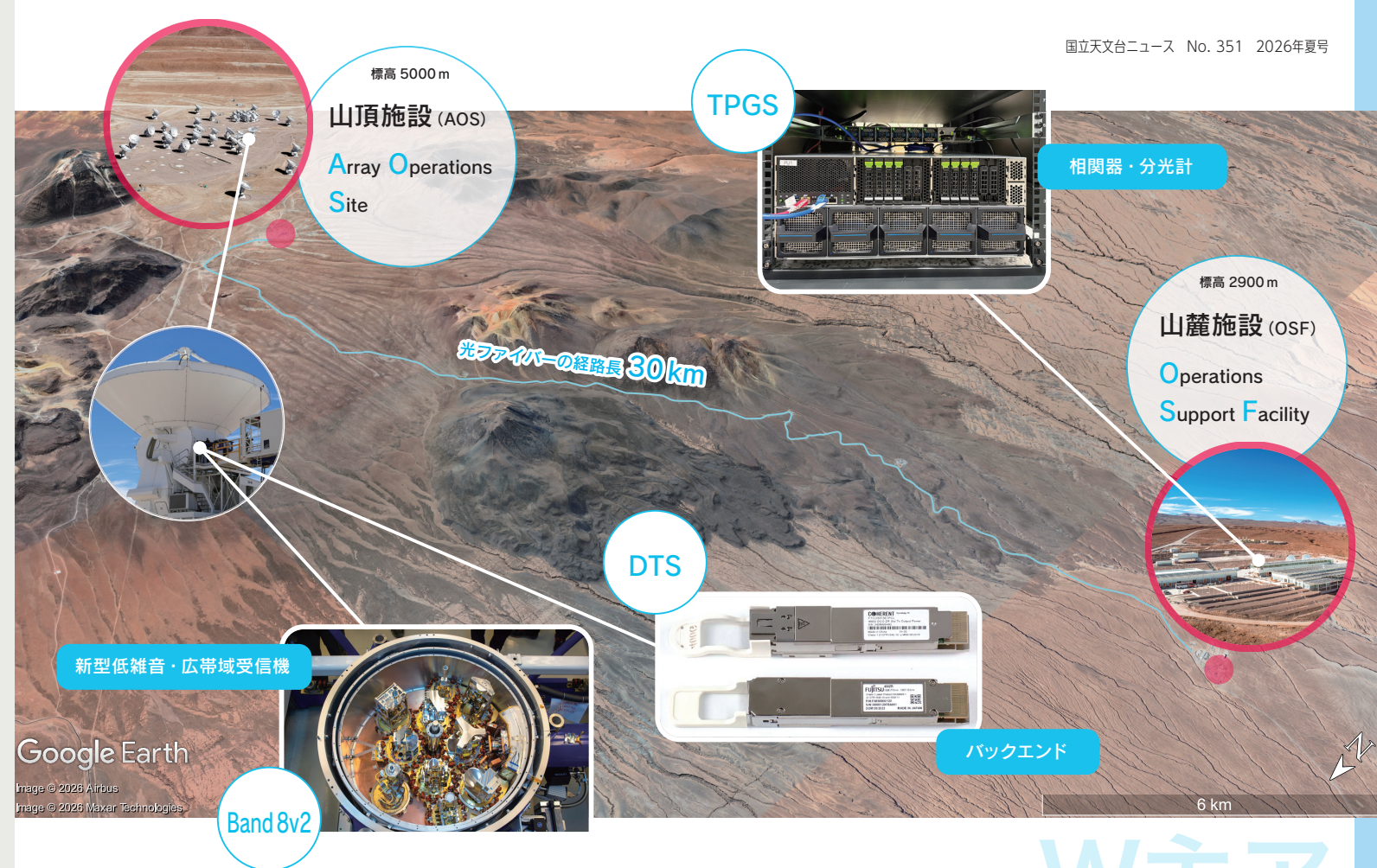
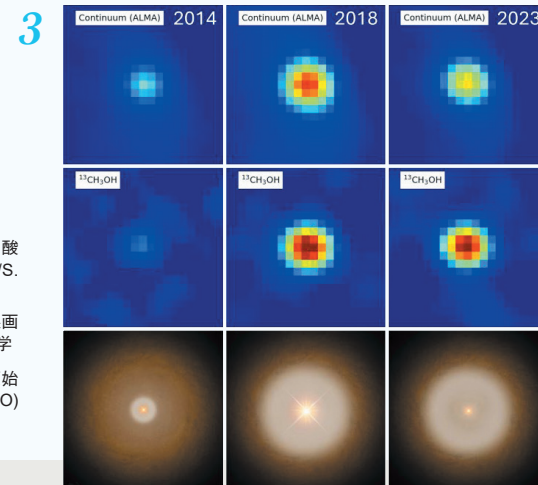
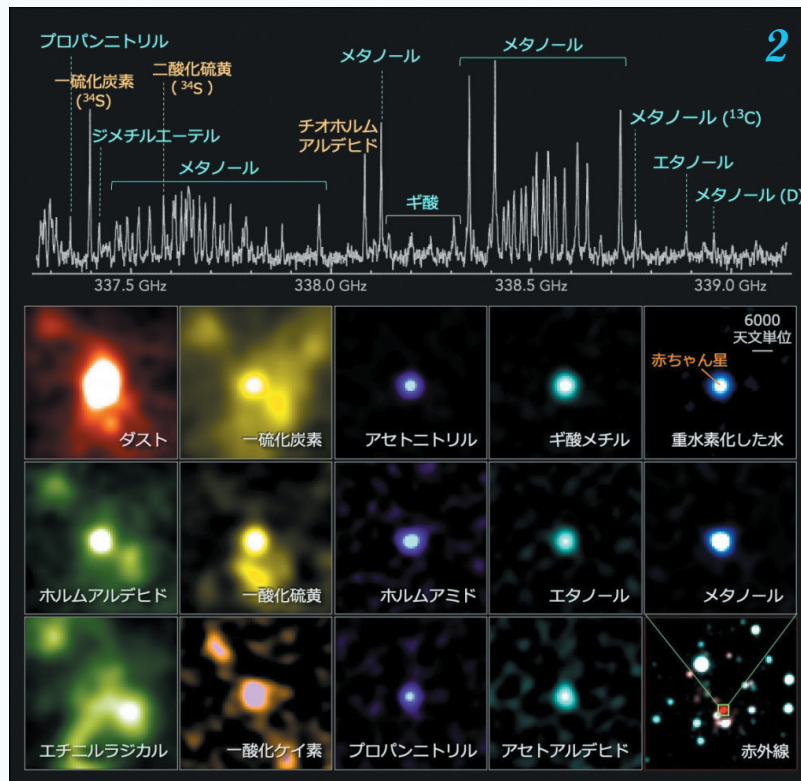
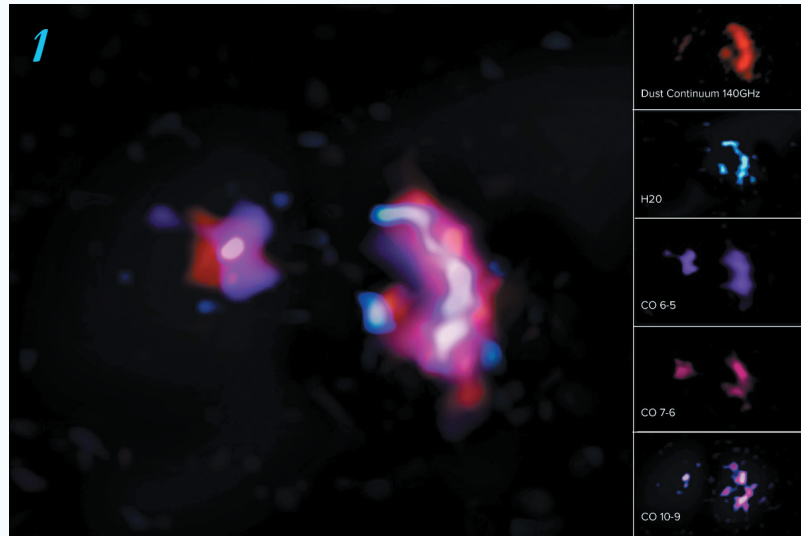
2 天の川銀河の多様な環境

高密度のガス雲が集まり、星形成と超新星爆発によりエネルギーが高い天の川銀河中心部は、複雑な化学組成を示します。アルマ望遠鏡は「中心分子雲帯 (CMZ)」を幅広い空間スケールで観測し、単純な2原子分子から有機分子まで、数十種類の分子を検出しました。一方、原始的な物質環境を残している天の川銀河の最外縁部で見つかった原始星にも、水や複雑な有機分子を含む化学的に豊かな分子ガスが付随していました。宇宙史を通じた化学的多様性の理解に、アルマ望遠鏡は貢献します。

3 惑星を生む物質の多様性

アルマ望遠鏡は、若い星の周囲で進む化学反応や、惑星に取り込まれる物質も捉えています。原始星が爆発的に増光すると周囲の塵が温められ、氷として含まれる有機分子が揮発します。この有機分子が再び凍結するまで、実際の時間スケールで変化が追跡されました。また、進化した原始惑星系円盤内で、一酸化炭素の同位体比が場所によって変化していました。太陽系の物質の同位体組成と比較すれば、その起源が分かるかもしれません。アルマ望遠鏡は、星が生まれる場所で生命の元となる材料が進化していく様子を解き明かしていきます。

- 約130億年前の大質量銀河 SPT0311-58（重力レンズ効果で2つに見える）。塵（赤）、水分子（青）、一酸化炭素分子（紫、マゼンタ、ピンク）が放つ電波を合成。クレジット：ALMA (ESO/NAOJ/NRAO)/S. Dagnello (NRAO)
- 天の川銀河最外縁部の原始星の電波スペクトル（上側）とさまざまな分子の分布（下側）。右下の赤外線画像中、緑色の四角で囲まれているのが原始星。クレジット：ALMA (ESO/NAOJ/NRAO)、下西隆/新潟大学
- 原始星 B335 の時間変化。（上段）連続波。（中段）有機分子が放つ電波。（下段）天体の想像図。原始星の増光と同時に複雑な有機分子が増え、減光後も残っている。クレジット：ALMA (ESO/NAOJ/NRAO) / J.-E. Lee et al.



進化を続ける アルマ望遠鏡 広帯域感度 アップグレード

KEY WORD
広帯域感度
アップグレード
(WSU)
Wideband Sensitivity
Upgrade

現在、2030年代に向けてアルマ望遠鏡の観測性能をさらに高めるため、アルマ2計画の主要な柱の1つである広帯域感度アップグレード(WSU)が進められています。WSUの大きな目的は、一度に観測できる周波数範囲を広げるとともに感度を向上させ、同じ観測時間でより多くの宇宙からの情報を得られるようにすることです。

そのために、低雑音かつ広帯域の受信機を新たに開発するとともに、信号をデジタル化するデジタイザ、データ伝送システム、相関器、分光計、観測やデー

タ解析のためのソフトウェアなど、多くの構成要素(サブシステム)を更新します。これにより、現在の2倍以上広い周波数範囲を一度に高感度で観測できるようにすることを目指しています。これは観測効率の点で見ると、アルマ望遠鏡をもう1つ以上増やすことにも匹敵する大きな効果をもたらします。*

東アジアでは、国立天文台を中心に、次世代のBand 8受信機 (Band 8v2)、データ伝送システム (DTS)、トータルパワー GPU 分光計 (TPGS) などのハードウェア開発を進めています。また、解析

ツールを含むソフトウェア開発や、WSUシステムのコミショニング計画、その後の科学運用への移行計画の策定にも重要な貢献を果たしています。建設期から20年以上にわたって育まれてきた国際協力をさらに発展させながら、技術面や運用面の課題を1つずつ解決し、WSUの実現に向けて取り組んでいます。



石井 峻
ISHII, Shun
アルマプロジェクト

*期待される観測効率の向上は、輝線観測で2〜3倍、連続波観測で3倍以上と見積もられています。

次世代観測に向けた受信機のアップグレード

Band 8v2プロジェクト

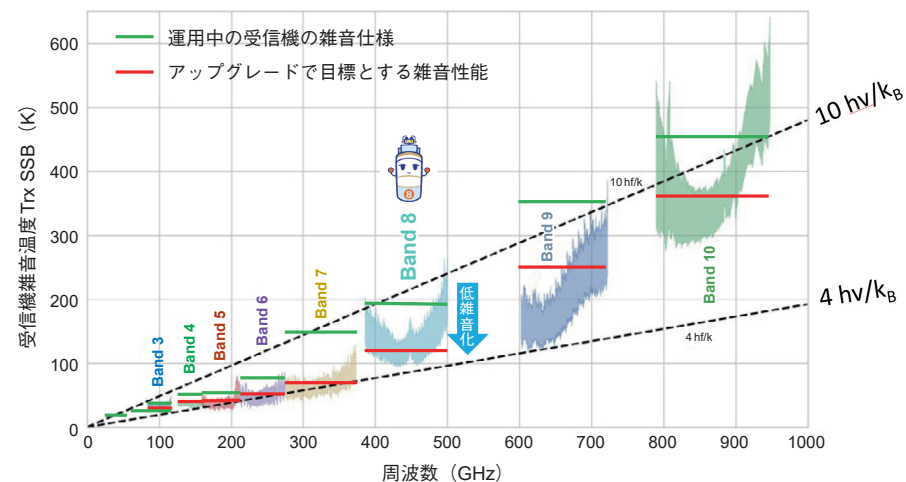
GUIDE 0018

電波分光

<https://www.nao.ac.jp/naoj-news/explanation/0018.html>



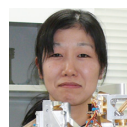
広 帯域感度アップグレード (WSU) に向けた受信機アップグレードでは、従来よりも広帯域、低雑音、低損失を実現させた高性能受信機を目指して開発を進めています。日本は10種類の受信機のうちバンド8受信機 (観測周波数: 385–500 GHz) のアップグレードを担当します。天体から届く観測信号 (RF: Radio Frequency) を参照信号 (LO: Local Oscillator) で変換した後の中間周波数 (IF: Intermediate Frequency) の帯域を、これまでの4–8 GHz から最大約4倍を目指して拡張することで、同時に観測できる情報量を格段に増やすことができます。



アルマ2030年代に向けた受信機雑音性能

計、機能、製造技術、製造環境といったレベルから見直しています。特に受信機の心臓部となる超伝導素子や、重要な光学系部品や導波管部品は、材料の選定や製造プロセスを含めて分析し、WSUの要求の実現に向けて検討しています。一方、現在運用中の受信機の搭載品の中で変更する必要がないもの、変更できないものもあり、それらを継続して使用することと併せて受信機全体を設計します。

2026年4月に基本設計審査会 (PDR) が開催され、無事通過しました。これからより詳細な受信機性能の検証と、量産製造に向けた準備を進めていきます。

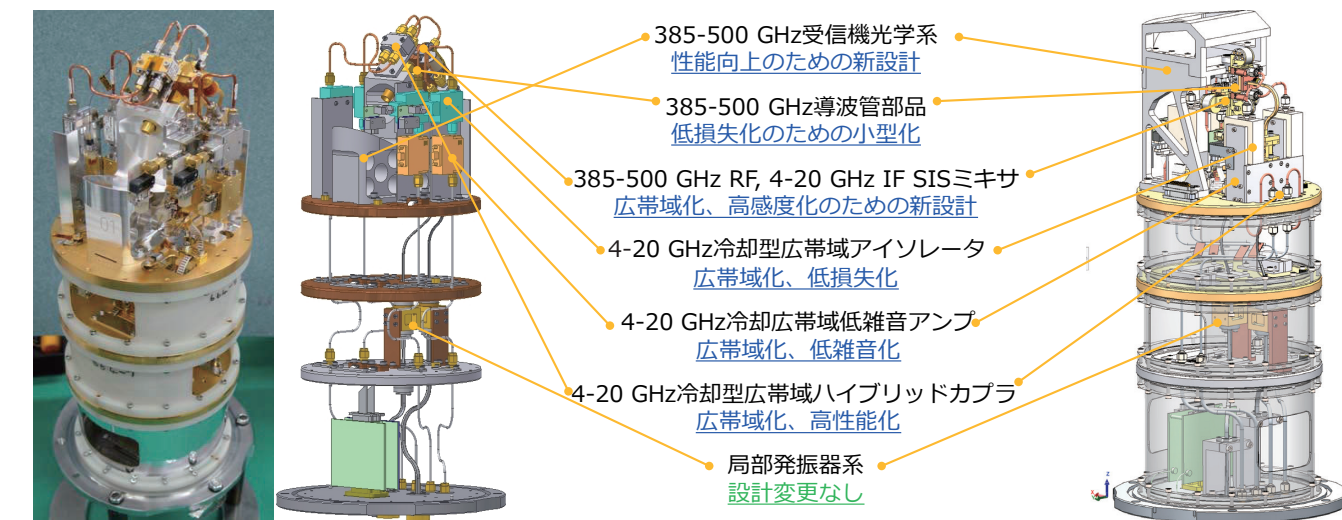


金子慶子

KANEKO, Keiko

アルマプロジェクト

帯 域を広げながら受信機の性能をこれまで以上に低雑音、高感度にする＝「できることを増やしながその質も上げる」ために、開発チームでは受信機に搭載するすべての部品1つ1つの設



運用中の Band 8v1

Band 8v2

広 帯域感度アップグレード (WSU) では、従来の約10倍にあたる1.2 Tbpsという大容量データを、従来の約3倍以上となる約50 kmの長距離にわたって伝送する必要があります。このため、データ伝送を担うシステム (DTS) を新しく開発する必要があります。

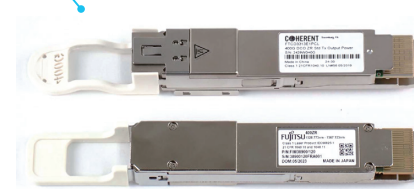
新 しいDTSは、この大容量・長距離のデータ伝送を実現するため、近年データセンター間通信で利用が進んでいる、高速・大容量かつ長距離の通信に対応した400Gイーサネット技術を採用しています。これにより、膨大な観測データをアンテナから相関器・分光計まで安定して届けることが可能になります。

D TSの開発では、この400Gイーサネットを用いることでWSUに求められるデータ伝送を実現できることを検証するとともに、標高3,000~5,000 mに相当する低圧環境での400Gイーサネット用光モジュールの安定動作や、アンテナ上の伝送路である光ファイバーのアンテナ回転に伴って生じる曲げ・ねじれといった動的な変化に対する400Gイーサネット通信の耐性について評価を行いました。

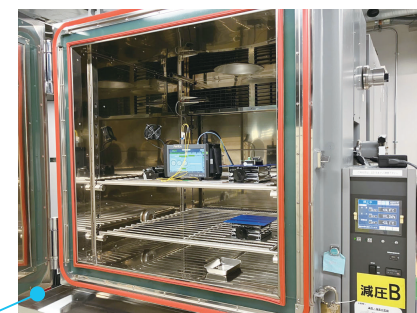
データ伝送システム (DTS)

Data Transmission System

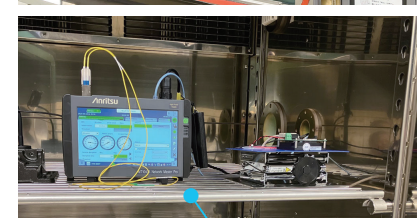
400G光トランシーバー



都産技研の減圧恒温槽と400G光トランシーバーを搭載した試験機器



都産技研の減圧恒温槽内に設置された400G光トランシーバーを搭載した試験機器



2倍以上の感度アップを支える高速データ転送 DTS プロジェクト



鎌崎 剛

KAMAZAKI, Takeshi

アルマプロジェクト



NICTにおける都市間光ファイバーを利用した400Gデータ伝送試験の様子

例 えば、国立情報通信研究機構 (NICT) と協力して実施した往復約90 kmの都市間光ファイバーを用いた400Gデータ伝送試験では、一晩にわたり400 Gbpsのデータ転送を実施し、データ落ちが1-bitも発生しなかったことを確認しました。また、東京都立産業技術研究センターの減圧恒温槽を用いた試験では、標高約5,000 mに相当する500 hPaの低圧環境下でも400G光トランシーバーが安定して動作することを確認しました。さらに、NICTの11-mアンテナに敷設されている光ファイバーを用いた試験では、アンテナを回転させながら通信を行ってもデータ伝送に影響が出ないことを確認しました。

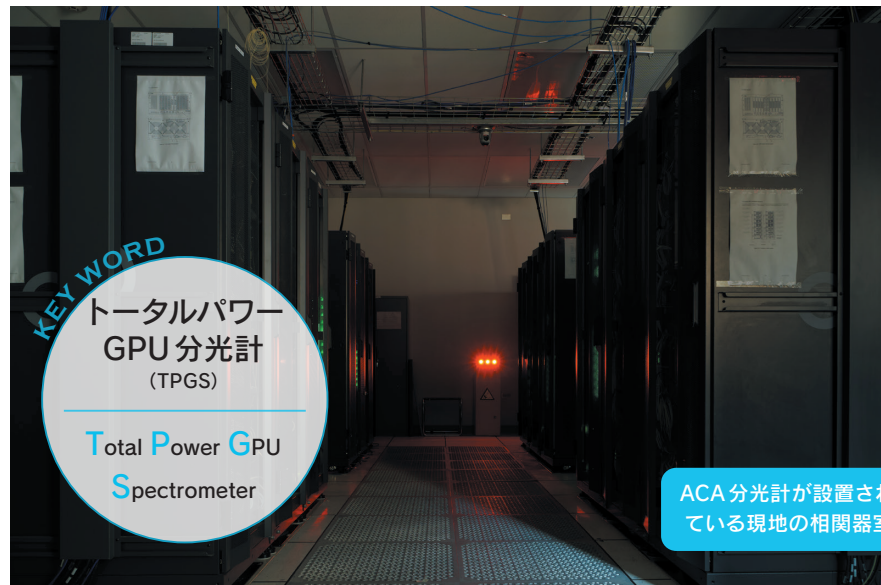
これらの検証・評価により、400Gイーサネット技術を用いることで、WSUに求められるアンテナから相関器・分光までの高速・大容量かつ長距離の通信が可能であることを実証することができました。現在、このシステムをALMAに組み込むようにするための準備と、運用の際に必要な制御ソフトウェアの開発を進めています。

アルマ トータルパワーアレイ 新世紀の「耳」の開発

TPGS プロジェクト Building the Next-Generation "Ear" for the ALMA Total Power Array: The TPGS Project



基本設計審査会集合写真



KEY WORD
トータルパワー
GPU 分光計
(TPGS)
Total Power GPU
Spectrometer

ACA 分光計が設置され
ている現地の相関器室



ACA 分光計 (アンテナ
からの信号入力部分)

トータルパワーGPU分光計 (TPGS) は、韓国天文研究院 (KASI) と日本の国立天文台の共同開発プロジェクトで、東アジア地域からアルマ国際パートナーシップへの現物貢献です。現用のACA分光計*も、KASIと国立天文台の協力で開発され、2023年10月から科学運用に供されてきました。開発チームは、光栄にも2024年の国立天文台長賞を受賞しました。

アルマ望遠鏡を電波天文学の最先端に保ち続ける「アルマ2030広帯域感度アップグレード (WSU)」の一環として、TPGSは大きな技術的飛躍に挑んでいます。最も重要な性能向上は、帯域幅を現用のACA分光計の4倍に広げ、より広い電波周波数帯域を一度に観測できるようにすることです。さらに、スペクトル分解能も劇的に向上し、ズームモードで最小1.7 kHzの分解能を実現します。宇宙の物質の化学的特徴を従来よりもはるかに詳細に調べることができるようになります。こうしたアップグレードは、星や惑星が誕生する領域の低温ガスの複雑な運動を追跡するなど、新しい研究を可能にします。

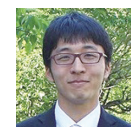
Development Kit) などの革新的な高速データ受信技術を採用しています。最新のNVIDIA製GPUに実装されるポリフェーズフィルタバンクは、20 GHz帯域の信号を最小分解能1.7 kHzのスペクトルに変換することができます。先進的データ処理により、TPGSはミリ波・サブミリ波領域における単一鏡観測で最高の分解能を達成することが期待されます。(日本語訳：内藤誠一郎)

*アタカマコンパクトアレイ (ACA) は日本が開発した16台のアンテナ群で、大きく広がった天体からの電波を受信し、電波画像の精度を向上させます。ACA分光計は、そのうち4台のトータルパワーアンテナからの信号処理を担当しています。



KIM, Jongsoo

韓国天文研究院 (KASI)



中本 崇志

NAKAMOTO, Takashi

アルマプロジェクト



GPUサーバ

KEY WORD
アタカマ
コンパクトアレイ
(ACA)
Atacama Compact
Array

その実現には大きな技術的課題を克服しなければなりません。4台のトータルパワーアンテナから入力されるデータ総量は従来システムの10倍、毎秒3.84テラビットに達します。この膨大なデータをリアルタイム処理するために、開発チームはDPDK (Data Plane

WSUに向けたハードウェア開発その3

次の10年へ

華々しい15年は、新たな観測能力を獲得していくアルマ望遠鏡にとって、まだ序章と言えるものでしょう。「アルマ2」計画を進め、大規模な性能向上を果たしたアルマ望遠鏡とともに、私たちは次の10年にどのような宇宙の姿を見ていくのでしょうか。

アルマ2計画では、新たに3つの科学目標を定めています。

地球型惑星形成領域における惑星形成過程の理解

解像度を2倍以上向上させ、より多くの惑星形成現場で、地球軌道スケールの構造を明らかにしていきます。

惑星系誕生過程での生命素材物質の理解

感度と同時観測可能周波数帯の向上で、より効率的に微小な物質まで探査し、生命の材料になりうる有機分子の分布を明らかにします。

宇宙における元素合成の開始地点の探究

遠方銀河の観測を推し進め、最初の星が生まれた時代を観測し、宇宙における元素合成の開始地点を特定します。

次世代の超大型地上望遠鏡や宇宙望遠鏡、太陽系探査機と力を合わせて、アルマ望遠鏡がどんな宇宙の姿を露わにしていくのか、そして新たにどんな謎を見つけ出すのか。引き続きご注目ください。(文責：内藤誠一郎)

