

ALMAの運用と共同利用観測

立松 健一¹

(要旨) 日米欧の国際プロジェクトとして建設中の大型電波望遠鏡計画ALMAの運用と共同利用観測に関して説明する。ALMAの運用は、研究者が現地に赴かない「サービス観測」が基本である。また、ALMAでは電波天文学者のみならず、広い研究分野の研究者の利用を基本とする。論文に使えるレベルの画像の生成を可能とする、自動パイプライン・データ解析ソフトウェアの開発がおこなわれている。また、ユーザー支援などのために日米欧の各局にALMA地域センター (ALMA Regional Center=ARC)が設置される。

1. はじめに

2回に分けて、日米欧の国際協力で建設中の大型電波望遠鏡計画「アタカマ大型ミリ波サブミリ波干渉計 (ALMA)」に関して説明させていただいている。前回2008年9月号では、計画の概要と進捗について説明させていただいた。今回は、ALMAの運用と共同利用について書きたい。ALMAが掲げる科学目標の3本柱の一つが「惑星系の誕生」である。惑星形成論は日本のお家芸でもある。ALMAは、すばる望遠鏡やハッブル宇宙望遠鏡を1桁上回る解像力、ミリ波サブミリ波の電波の特質を生かして、人類史上初めて惑星系形成の現場を直接観測できる望遠鏡と期待される。我々の太陽系の観測的研究でも、その分解能と分光性能を武器に面白い研究の展開が期待される。ぜひ日本惑星科学会の皆さんに、ALMAを用いた観測に参加していただきたい。

2. チリ

私自身、チリ渡航はこれまで10数回になる。チリへの旅は長い。成田からALMAのサイトの最寄空港カラマまでは乗り継ぎを入れて約35時間、1日半の旅行である。しかも、望遠鏡の設置される場所は、アンデス山脈のアタカマ砂漠の標高5000mの場所である。富

士山よりずっと高い。世界で最高の天文観測サイトだが、人間にはきわめてきびしい。しっかりと準備していかないと高山病にかかる可能性さえある。行くのも大変だし、行った先も大変なところである。

このような事情から、ALMAの運用は、研究者が現地に赴かずに観測が実行される「サービス観測」が基本となっている。飛行機嫌いの私のような人も安心してALMAに観測提案が出せるわけである。

3. ALMAのアンテナについて

電波望遠鏡には2種類あって、単一鏡と干渉計に分かれる。パラボラ・アンテナ1つでできているのが単一鏡で、わが国立天文台の野辺山45m電波望遠鏡はその代表例である。干渉計は、複数のパラボラ・アンテナを組み合わせて、「相関器」という装置で合成処理を行う。単一鏡型電波望遠鏡は、口径と波長に応じた分解能を持つ。分解能(ラジアン)≒波長/口径であり、同じ波長なら口径が大きいほど分解能が細かい(高い)。人間が作れる望遠鏡の大きさには限界がある。干渉計として複数のアンテナをある大きさの敷地に展開すれば、分解能≒波長/敷地の大きさとなり、単一鏡型では達成できない高分解能が得られる。干渉計の視野は、視野=波長/素子アンテナの口径となる。すなわち、「波長/アンテナ口径」は、単一鏡として使うときは分解能、干渉計として使うときは視野を表す。干渉計の場合、視野と同じ大きさのものは見えず、おおざっぱに

1. 国立天文台 ALMA 推進室



図1：ALMAの完成想像図。移動台車で配置を変えて、観測を行う。最も広げたときには大きさが18.5 kmにもなる。図は、最もコンパクトな場合。右側の一団が12mアレイ。赤枠内がACA。ACAの四隅の大きめのアンテナがTPアレイ、中の小さなアンテナが7mアレイ。

いて視野の80%ぐらいの大きさのものまでしか見えない。一方、単一鏡観測で、分解能ぎりぎりの大きさの天体ではそれが点源なのか、広がった天体なのかわからないので、分解能の2倍ぐらい以上の天体でないと、観測情報が得られない。同一口径のアンテナを用いて単一鏡観測及び干渉計観測を行った場合、「単一鏡の分解能＝干渉計の視野」程度の大きさの天体には感度がないことになる。ALMAは、12mアンテナ64台で構成される干渉計(12mアレイ)、単一鏡観測用12mアンテナ4台(TPアレイ)、7mアンテナ12台で構成される干渉計(7mアレイ)、で構成される(図1)。TPアレイと7mアレイを合わせてAtacama Compact Array (ACA)とよび、日本の建設分担となっている。

なぜ、7mアンテナが必要かという点、上記のように12mアンテナの単一鏡、干渉計では、見えない天体のサイズがあるからである。この穴を埋めるために7m干渉計を使う。すなわち、小さな構造から大きな構造にかけて、12mアレイ(干渉計)、7mアレイ(干渉計)、TPアレイ(単一鏡)で情報を取得し、完璧な電波画像を取得するわけである。電波望遠鏡の中には、CCDカメラのように複数のピクセルを持つ受信機も存在するが、ALMAの場合は、切り替えにより7周波

数帯を観測する1ピクセル受信機となる。よってTPアレイによる単一鏡観測は、ブラウン管型テレビの走査線のように、望遠鏡の向きを連続的に変えて天球上をラスタースキャンするOn-the-fly (OTF)観測が基本である。干渉計観測で、大きな画角がとりたいときは、望遠鏡の視野をステップ的に移動させつつ(たとえば六角稠密的に)、天球上で若干オーバーラップさせながら、複数視野を観測し、データ解析で合成することになる。

4. ALMAの共同利用運用

これまで、一般には、電波望遠鏡は電波天文学者による使用を前提としてきた。一方、ALMAは電波天文学者のみならず、広い分野の方に使っていただく望遠鏡を基本として、プロジェクトの設計がなされている。米欧では生化学者でも使える電波望遠鏡という表現を使ったりしている。ALMAの運用は、チリ現地のALMA観測所と日米欧にそれぞれおかれるALMA地域センターによって行われる。観測者はチリに行かずに観測手順書を準備し、観測は指示書に基づき行われる。もし、あなたがALMAの観測に適するかもし

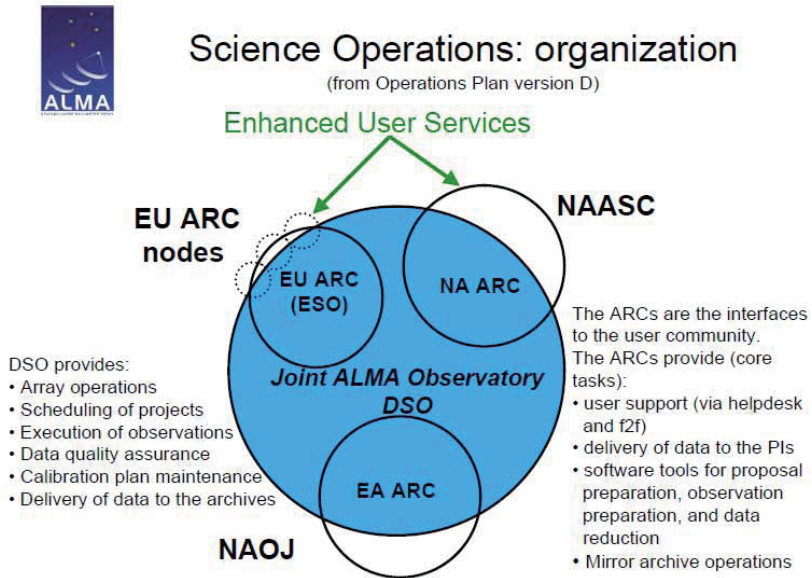


図2：ALMAの運用組織図。チリにはALMA観測所(Joint ALMA Observatory)があり、望遠鏡の運用を行う。日米欧にはALMA地域センターが置かれる。

共同利用観測の流れ

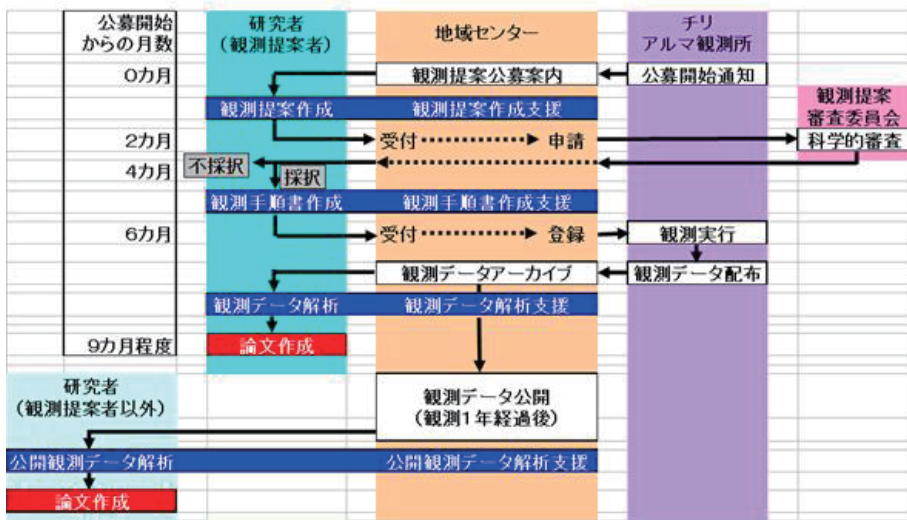


図3：ALMAにおける共同利用観測の流れ

れない研究テーマの候補を持ち、ALMAで観測することを考えたとき、何がネックになるであろうか。まず、ALMAの観測にフィットするテーマであるのか、

観測方法はどのようなのか、データ解析は簡単だろうか、山ほど聞きたいことが出てくるであろう。そのような質問に答え、ユーザー支援を行うのが

ALMA地域センター(ALMA Regional Center, 略してARC, アークまたはアー・アール・シー)である。図2にALMAの運用組織図を示す。チリにはALMA観測所(Joint ALMA Observatory)があり、望遠鏡の運用を行う。科学運用部DSO(Department of Science Operations)はその部門の一つで共同利用業務をつかさどる。日米欧にはそれぞれALMA地域センターが置かれ、それぞれのコミュニティーとALMAのインターフェースをつかさどる。日本の地域センターは東京都三鷹市の国立天文台におかれ、アメリカの地域センターはワシントン郊外におかれ、ヨーロッパのそれはミュンヘン郊外におかれ、また、ヨーロッパ各地に地域センター支所が設置される。ALMA地域センターの役割には、ALMAの共同利用の業務として共通に規定されているものcore functionsと、それぞれの地域の独自性を生かして開発運用を行うnon-core functions(Enhanced User Services)がある。

図3は、ALMAにおける共同利用観測の流れを示す。公募案内からはじまり、観測提案作成支援、観測手順書作成支援、観測データ解析支援、公開観測データ解析支援、と各ステージでALMA地域センターがユーザー支援を行う。

5. ALMA観測の視野と分解能

ALMAでは、当初、ミリ波サブミリ波の電波の「大気の窓」をすべておおう10の周波数バンドが立案され

表1: ALMAの周波数バンド

受信バンド	周波数帯域 (GHz)	雑音温度	担当機関
バンド 1	31.3 - 45.0	17 K	---
バンド 2	67 - 90	30 K	---
バンド 3	84 - 116	37 K	北米(カナダ)
バンド 4	125 - 163	51 K	国立天文台
バンド 5	163 - 211	65 K	---
バンド 6	211 - 275	83 K	北米(米国)
バンド 7	275 - 373	147 K	欧州(フランス)
バンド 8	385 - 500	196 K	国立天文台
バンド 9	602 - 720	175 K	欧州(オランダ)
バンド 10	787 - 950	230 K	国立天文台

たが、予算の制約から、そのなかの優先順位の高い7の周波数バンドがまず実現される(表1)。

84GHzで、「12mアレイの視野=TPアレイの分解能」は61秒角=約1分角、7mアレイの視野は105秒角で分解能は25秒角である。950 GHzでは、「12mアレイの視野=TPアレイの分解能」は5.4秒角、7mアレイの視野は9.3秒角で分解能2.2秒角である。12mアレイの分解能は連続波観測で0.01秒角に達するが、ライン観測の場合には、現実的な観測時間の中で達成できるS/Nがリミットとなり、おおむね0.1秒角が限界となる。最終的に得たい天体画像の大きさが、 $17 \times (300\text{GHz}/\text{周波数})$ 秒角以下の場合には、12mアレイによる単一視野観測で充分。天体画像の大きさが、それ以上のときは12mアレイによる複視野のモザイク観測が必要である。12mアレイは $14 \times (300\text{GHz}/\text{周波数})$ 秒角以上の構造には感度がないので、そのような構造の存在が予想される場合には、TPアレイと7mアレイによるACAの観測を合わせて行う必要がある。どのくらい広い範囲を観測できるかは、天体の強度と感度による。TPアレイのOTFマップのみを考えた場合、連続波であれば数度×数度のマップも描けるであろうが、ラインのマップだと30分角×30分角が上限の一つの目安になるであろう。

6. 感度計算

観測テーマが決まれば、それがALMAで受かりそうかどうか調べてみる。天体の電波強度はJy(ジャンスキー)またはK(ケルビン)であらわされる。放射流束の単位であるジャンスキーは、宇宙電波を発見したカール・ジャンスキーにちなむ。1 Jyは $10^{-26}\text{W}/\text{m}^2/\text{Hz}$ である。ビーム立体角 Ω_b あたりの流束密度 S/Ω_b と輝度温度 T_b の変換は、 $T_b = \lambda^2/2k \times S/\Omega_b$ となる。予想される強度は、類似天体の観測が過去にあれば、その強度から推測することができる。ただ、ALMAは分解能、感度においてこれまでのミリ波サブミリ波望遠鏡の性能を大きく凌駕するものである。過去に類似観測がない場合も多々あるであろう。その場合には、考察のうえ、強度を予想する必要がある。黒体放射をする物質が、レーリー・ジーンズ近似が有効な波長帯で、望遠鏡のビームを満たして存在する場合、その物質温度の強度(K)で受かる。実際にはいろいろな

原因で強度は物質温度より低くなる。光学的厚み、物質のフィリングファクター、望遠鏡の能率で、その低くなり方がさまざま。光学的厚みは、分子の輝線の場合は、分子の柱密度、分子のエネルギー準位の励起状態、ダストの場合は、ダストの柱密度、emissivity lawで決まる。また、遠方銀河の場合には赤方偏移を考慮する必要がある。ALMAの観測準備ソフトウェアには、感度計算機が組み込まれている（その開発には国立天文台の谷田貝君があたった）が、それに基づいたweb上のツールを紹介する。

<http://www.eso.org/sci/facilities/alma/observing/tools/etc/>

ここでの観測時間は、観測1点当たり、あるいは1視野あたりの時間となる。全観測時間の見積りのためには、干渉計では、所望の電波画像を得るのに必要な視野数の情報が必要である。単一鏡観測においては、ナイキスト・サンプリングとなる、分解能の1/2またはそれ以下のグリッドでデータを取得する必要がある。

実際には、観測提案準備、観測手順書の作成においては、いろいろ不明な点が出てくるであろう。ALMA地域センターでしっかりと支援していきたい。

7. ALMAのデータ解析

電波望遠鏡のデータの解析には一般にはそれなりの知識がある。ALMAでは、電波天文学者など向けの「オフライン・データ解析ソフトウェア」と、電波天文以外の人でも論文に使える電波画像を得られる「パイプライン・データ解析ソフトウェア」の2つが用意される。ALMAのオフライン・データ解析で用いるソフトウェアの名前はCASA(Common Astronomy Software Applications)という。パイプライン・データ解析ソフトも、基本的にはCASAをベースとする。CASAは、チリの母国語スペイン語で家の意味である。ちなみにALMAはスペイン語で「魂」とか「いとしい人」という意味がある。CASAは、ALMAのみならず「EVLA」にも使われる、次世代電波解析ソフトウェアである。EVLAは、27台の25mアンテナで構成されるVery Large Array(略してVLA, SF映画にもしばしば登場、たとえばジョディ・フォスター主演「コンタクト」)を強化した干渉計である。CASA開発の中心はアメリカであるが、日本、ヨーロッパにも開発部隊がある。日

本は、単一型電波望遠鏡の解析ソフトウェアの開発に歴史と経験があるので、この方面の開発を重点的に行っている。

単一鏡と干渉計では、データの取得方法が異なり、その結果データの解析方法も異なる。ALMAの場合といえば、最大に広げた場合、直径18.5kmのパラボラ・アンテナに匹敵する分解能を得ることができる。しかしながら、アンテナを18.5kmの中に敷き詰めているわけではないので、欠落している情報がある不完全なデータセットとなる。データ解析では、この不完全な部分をうめることになる。干渉計から得られる生データをビジビリティと呼ぶ。ビジビリティは天体の輝度分布のフーリエ成分であり、ビジビリティを採取して逆フーリエ変換すると天体の輝度分布が得られる。全ての空間周波数でビジビリティを採取出来れば元画像が得られるわけだが、現実には不完全なビジビリティしか得られないので、補正を行いつつ像合成をおこなう。よくつかわれるアルゴリズムがCLEAN(クリーン)である。ALMAでは、12mアレイによる干渉計観測、7mアレイによる干渉計観測、TPアレイによる単一鏡観測の3種類のデータが得られる。これはちょっと複雑である。

電波天文学者は、3種のデータを「オフライン・データ解析ソフトウェア」を用い手作業で解析するであろう。一方、電波天文以外の研究者は、「パイプライン・データ解析ソフトウェア」で調理済みの電波画像がほしいであろう。ALMAにおいては、数が少ないアンテナ台数で共同利用運用を始める「初期科学運用」の募集が2010年度に始まる予定である。この段階には「オフライン・データ解析ソフトウェア」のみが用意させる。アンテナ全台数がそろそろ「本格運用」(2012年度開始を予定)では基本的な観測モードに対して、「パイプライン・データ解析ソフトウェア」が準備される予定である。電波天文以外の人に対しては、本格運用まではALMA地域センターによるデータ解析支援が要であり、本格運用では「パイプライン・データ解析ソフトウェア」による自動電波画像生成を利用できるであろう。本格運用以降も、パイプラインの結果では納得いかない場合の再解析、データの吟味や信頼性評価、標準的でない観測モードの解析支援、公開データをつかったデータベース天文学の支援など、ユーザー支援は引きつづき必要であろう。

8. 最後に

これまで、日本の科学は、世界的なハードを準備できるが、ソフト面、すなわちユーザー支援や論文に至る最後の部分のケアが薄いという批判があった。ALMAでは、ユーザー支援に標準を設けて、その内容を規定している。サポート・サイエンティストの人数も、観測時間(望遠鏡を設置するチリの割り当て(10%)除き、日本が25%、米欧が37.5%ずつ)に応じ、日本が8年、米欧が12人ずつと決められている。科学は成果をしっかりと、刈り取ることが重要である。ALMAにおいては、ALMA地域センターがその任を担う。日本惑星科学会の皆さまにも、積極的に活用していただき、ALMAでいい成果を出すお手伝いをさせていただきたいと考えている。