

# アルマ望遠鏡による太陽観測

下条圭美

〈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: masumi.shimojo@nao.ac.jp



アルマ望遠鏡は、計画当初から太陽観測を考慮して設計・建設された望遠鏡である。しかし、太陽からのミリ波・サブミリ波は他天体に比べ桁違いに大きく、太陽観測に特化した観測モードが必要であった。2010年から太陽観測モードの開発を開始し、さまざまな試行錯誤の結果、2016年10月から始まった第5回共同利用期間“Cycle 4”から100と239 GHzによる太陽観測を共同利用に供することができた。本記事では、開発の裏舞台とともにアルマ望遠鏡の太陽観測モードの概要、主に干渉計観測についてを解説する。

## 1. アルマ望遠鏡で太陽を観測う！？

太陽はわれわれに最も近い恒星であり、莫大なエネルギーを地球にもたらしている。地球上のほとんどの活動は、太陽からのエネルギーによって維持されていると言って過言ではない。この莫大なエネルギーのごく一部が、ミリ波・サブミリ波として地球に降り注いでいる。ごく一部とはいえ他の天体から比べれば桁違いに大きく、遠い天体からの微弱な電波を観測するために作られたアルマ望遠鏡を使って太陽を観測できると考える人は普通でないだろう。ひので衛星のX線望遠鏡やひのでデータ解析システム<sup>1)</sup>、さらに野辺山電波ヘリオグラフの運用を手がけつつ、X線・電波観測データを用いて太陽研究<sup>2),3)</sup>をしていた筆者も、2010年の夏までアルマ望遠鏡と自分の人生が変わるとは全く考えていなかった。

2010年7月11日、イースター島からチリ南部を皆既帯とした日食があり、アルマ望遠鏡が設置されているアタカマ砂漠でも部分日食がおきた。

当時アルマ望遠鏡でシステムインテグレーションに携わっておられた浅山信一郎さん（現 国立天文台チリ観測所 准教授）主導により、この部分日食がアルマ望遠鏡にて捕らえられた。干渉計ではなく1台のアンテナを利用した単一鏡観測ではあったが、これがアルマ望遠鏡の太陽観測ファーストライトである。この観測に即発され、アルマ望遠鏡による太陽観測の勉強会が少人数で国立天文台・三鷹キャンパスにて行われたのが、ファーストライト翌月の8月10日。当時国立天文台野辺山太陽電波観測所で一番若いスタッフだった筆者は、この勉強会の世話役を国立天文台ひので科学プロジェクト長であった常田佐久さん（現 国立天文台 台長）から仰せつかり、現在まで続く楽しい電波干渉計生活<sup>\*1</sup>（苦行？）の始まりとなった。筆者が「次は何をしようか？」とぼんやり考えていたのを、常田さんに見透かされていたのかもしれない。

\*1 野辺山電波ヘリオグラフも電波干渉計ではあるが、筆者が野辺山に赴任した時点で、すでにスーパーに自動化が図られており、アルマ望遠鏡や他の電波干渉計とは比べられないほど観測・データ較正・像合成が超容易な電波干渉計とは思えない望遠鏡であった。そのため、筆者の“楽しい”電波干渉計生活に野辺山電波ヘリオグラフは含まれない。

## 2. 太陽をミリ波・サブミリ波で観測すると？

アルマ望遠鏡を使った太陽観測手法の開発という、この記事の本題に移る前に太陽をミリ波・サブミリ波で観測する意義を説明したい。まずは、太陽からのミリ波・サブミリ波はどこから来るのかを考えてみよう。ご存じのとおり、太陽大気は波長5,000 Åにて光学的厚さが1になる面、光球面（温度約6,000度・密度 $10^{17}$ 個/cc）から始まり、温度最低層（約4,400度）をすぎて温度が高度とともに上昇し、彩層（温度約1万度・密度 $10^{13}$ 個/cc）、低層コロナ（温度約100万度・密度 $10^{8-9}$ 個/cc）へと広がっていく。高さとともに密度が低下し温度が上昇する成層大気では、波長が長くなると光学的厚さが1になる層の高度は高くなる。太陽大気モデルを考えると、ミリ波・サブミリ波の光学的厚さが1になる面は温度最低層から彩層下部、温度にして5,000から8,000度の間に存在する<sup>4)</sup>。よって、ミリ波・サブミリ波で観測することで彩層下部の情報を得ることができる。この層はカルシウムなどの吸収線を使った研究が、はるか昔から行われてきた<sup>5)</sup>。ただしこれらの吸収線では、局所的熱平衡が成り立たない。そのため観測データの解釈が難しく、物理量を求めるのは非常に困難である。一方、ミリ波・サブミリ波では局所的熱平衡が成り立ち、さらに光学的厚さが1である層からの熱放射であるため、輝度温度はプラズマの温度そのものである。いわば、ミリ波・サブミリ波の画像は彩層下部のサーモグラムなのだ。ひので衛星の観測から激しい彩層像が示され<sup>6)</sup>、そのダイナミクスを理解することが、彩層・コロナ加熱問題を解くための鍵と考えられている。彩層下部の温度分布を仮定なしに決定できるミリ波・サブミリ波観測データは、彩層の物理的理解にとって重要である。

太陽フレアも太陽ミリ波・サブミリ波観測のターゲットである。太陽フレアでは、電子やイオ

ンが秒を切るタイムスケールでMeVレベルまで加速される。数百keVからMeVのエネルギーをもった電子が磁場によりジャイロ運動をすると、そこからミリ波が放射される（ジャイロシンクロトロン放射）<sup>7)</sup>。太陽フレアで放射されるミリ波のスペクトルから加速された電子のエネルギースペクトルを算出することが可能であり、フレアにおける粒子加速を解き明かすために重要な情報となる。近年の太陽サブミリ波観測により、これまで考えられてきたジャイロシンクロトロン放射では説明できないスペクトルコンポーネントが見つかった<sup>8)</sup>。この謎のコンポーネントを解明するためにもサブミリ波による高感度観測が待たれている。

アルマ望遠鏡を使って探る太陽物理学での科学目標は、Wedemeyerら<sup>9)</sup>にまとめられている。アルマ望遠鏡での太陽観測に興味のある方には、一読をお勧めする。

このように太陽物理におけるミリ波・サブミリ波観測の有用性は大きく、これまでもJCMT<sup>10)</sup>、CSO<sup>11)</sup>、SST<sup>8)</sup>、BIMA<sup>12)</sup>や野辺山45 m鏡<sup>13)</sup>などを使った太陽ミリ波・サブミリ波観測は行われてきた。しかしどの観測も空間分解能が10秒角を切ることはなく、これまで説明してきた科学目的には不十分であった。そこでアルマ望遠鏡である。アルマ望遠鏡の66台というアンテナ数は、長い基線による高空間分解能を実現するだけでなく、空間周波数空間（uv空間）を多数の観測データで埋めることにより画像のダイナミックレンジの著しい向上を実現する。想定される性能を考えれば、太陽電波物理学にとってアルマ望遠鏡は至高の存在であるが、太陽観測用の観測モード開発は筆者が参加するまで低調であった。米欧を含むプロジェクトの中に太陽電波研究者が一人もいなかったのが、最大の原因だったと思われる。多方面にわたる皆様のご協力により、太陽観測ファーストライトの翌年、2011年から年1回程度の頻度で、約1週間の太陽観測キャンペーンがアルマ望遠鏡にて行われるようになった。それに伴い、筆者のチ

り通いも始まった。

### 3. 明るすぎる太陽

この記事の主題ではないのだが、読者の皆さんが不思議に思っていることを解消しておこう。「なぜ白く塗装していないパラボラアンテナを太陽に向けても燃えないのか?」、という疑問である。10 m口径の太陽炉であれば鉄でさえ簡単に溶けてしまうし、実際アンテナを太陽に向けてしまって一部焦げてしまったサブミリ波望遠鏡もある。図1は太陽観測中のアルマ望遠鏡で、副鏡の影がパラボラの中心に落ちているのが、アンテナが太陽へ向いている証拠である。この状態でも燃えないのは、パラボラ面に可視光線・赤外線は乱反射し、サブミリ波より長い波長の電磁波のみ正常に反射する絶妙な凸凹のコーティングがなされているからである。いつも太陽キャンペーン初日にアンテナを太陽に向けるときは「燃えないでくれ!」と祈ってしまうのだが、そんな祈りとは関係なく燃えることのない、すごいアンテナである。太陽観測時に指向精度を保つことも含め開発はたいへんだったらしく、アンテナ開発にかかわられた

方々からは「太陽さえ観測しなければ、簡単だったのに! (笑)」とお叱りを受ける。われわれ太陽研究者は、感謝しながらお叱りを甘んじて受けなければならぬだろう。

このような素晴らしいアンテナのおかげで受信機に入ってくるのは、電波のみである。しかし、前述のように太陽から来るミリ波・サブミリ波は、ほかの天体に比べて桁違いに強い。微弱な電波を検出するために作られた受信機が過剰な入力により燃えるようなことはないが、入力電波強度と出力信号強度との比例関係が破綻し非線形応答が出てしまう。簡単にいうと受信機がサチるのである。この非線形応答を防ぐため、筆者がプロジェクトに参加する前から、太陽フィルターという電波を弱める膜を受信機の前に入れることが決まっていた。この方法には三つの問題があった。一つは膜の挿入により、空間的に感度ムラができてしまうこと。二つ目は、膜が電波を弱め、さらに膜自体が電波を放射しているためノイズレベルが上がり、較正のためのクエーサー観測ができなくなること。三つめは、膜の挿入によりアルマ望遠鏡で通常利用している較正方法が使えず、電波



図1 太陽観測中のアルマ望遠鏡 (提供: 津野晃臣)。

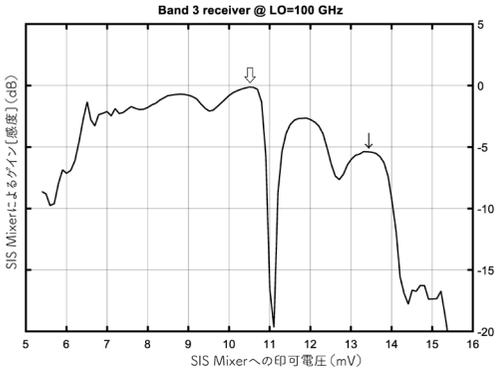


図2 SIS ミキサの印可電圧とゲインの関係. Band 3 受信機にてローカル周波数 100 GHz の場合.

強度の較正方法自体を一から開発しなければならぬことである。これらの問題を解決するため、初期の太陽観測キャンペーンでは太陽フィルターの特性測定が主な目的となった。筆者が電波干渉計観測に不慣れなことや利用できるアンテナ数の制限もあり、太陽像を合成するための観測がなかなかできなかったが、2013年までには強度較正以外の問題を解消していた。2013年10月に行われた4回目の太陽キャンペーンの観測中に、幸運にもGOES C1.9クラスのフレアが視野中心で発生、フレアループが合成画像に現れた。強度較正ができず、利用したアンテナ数も少ないため、この観測データが公になることはないが、アルマ望遠鏡による太陽観測がまさに開眼した瞬間であった。

2013年の太陽観測キャンペーンの前に、受信機そのものの感度を低下させ太陽観測に利用するという新しい観測手法<sup>14)</sup>が提案された。図2は、アルマ望遠鏡受信機の心臓部である、SIS（超伝導体-絶縁体-超伝導体）ミキサーにかける印可電圧とそのゲイン（感度）の関係を示したグラフである。通常の観測の場合、図2の白抜き矢印あたりの電圧をSISミキサーに印可し、受信機の最大感度を達成する。一方このグラフを見ると、最大感度のほかにも印可電圧がある程度変わっても感度がほぼ一定である場所がいくつかあり、その中には感度が低いポイントが存在する。このポイン

トの電圧を印可し、SISミキサーの感度を意図的に下げるとするのが新しく提案された観測方法である。実際の太陽観測では、図右側の細い矢印の電圧を掛けることになった。SISミキサーのチューニングをわざわざ外すということで、Mixer De-tuningモード、略してMDモードと名づけられている。関係者に「このモードは悪魔の仕業」と言われたことがある。感度を上げるためになみなみならぬ努力をされてきた方々からは、そう言われても仕方がない所業である。太陽観測以外を目的とした望遠鏡で太陽を観測することは、それ相応の業を背負うことなのだろう。

MDモードの利点は、太陽フィルターでの問題であった、空間的な感度ムラは起こらず、アルマ望遠鏡の標準的な強度較正方法を少し変更するだけで利用できることにある。特に強度較正方法の問題は太陽フィルター最大の問題だったので、われわれにとってMDモードは助け舟のような手法であった。2013年のキャンペーンでは急遽MDモードでの予備的な試験観測を行い、太陽フィルターを利用したときと同等の太陽画像を得ていた。

アルマ望遠鏡による太陽像合成成功の知らせは、開発環境に大きな変化をもたらした（図3）。2013年までは主に国立天文台とチリ現地のスタッフによる開発であったが、2014年には米欧の両方で太陽観測手法開発のプロポーザルが受諾され、開発チームは一気に日米欧の国際チームとなった。国際開発チーム全体のリードを、米国チームのPIでもあるNRAOのTimothy S. Bastianさんが務め、干渉計観測チームのリードを筆者が、単一鏡観測チームのリードをU.S. Air Force Research LaboratoryのStephen M. Whiteさんが務めることになった。日本側も開発をさらに推進させるため、2014年当時、国立天文台野辺山太陽電波観測所のポスドク研究員であった岩井一正さん（現名古屋大学ISEE准教授）に開発チームへ加わっていた。岩井さんは、単一鏡観測手法の開発にて



図3 左：2013年キャンペーンのグループ写真（提供：澤田剛士）。右：2015年キャンペーンのグループ写真（ALMA ObservatoryのFacebookから。クレジット：ESO/NAOJ/NRAO）。左の写真の中で太陽研究者は筆者一人。右側は全員太陽研究者。

手腕を発揮され、開発チームへ多大な貢献をされた。

MDモードの有用性は、2013年に行った予備的な試験観測の結果を見れば明らかであった。そのため、2014年からの太陽観測キャンペーンでは太陽フィルター<sup>\*2</sup>を使わず、MDモードを利用した時の問題点の洗い出しと解決、および共同利用に向けての準備が行われた。2013年までに開発した試験観測手法がMDモード検証にも流用できたので、MDモードの開発は順調に進展した。ここからは、共同利用でも利用されているMDモードでの太陽観測について解説する。

#### 4. それでもたいへんなデータ較正

電波干渉計データの較正方法を簡単に説明しよう。野辺山電波ヘリオグラフと同じ形式の干渉計を除く天体観測用の電波干渉計では、電波強度がよく知られており、干渉計でも分解できない点源の電波星、主にクエーサーを較正源<sup>\*3</sup>とする。電波干渉計は、いわば電波強度分布のフーリエ係数を測定する装置であり、点源である較正源を観測するということはデルタ関数をもつ電波強度分

布を観測することと同意である。よって較正源のフーリエ係数は、すべての項の係数が較正源の電波強度であり位相は0になるはずである。この値と実際の観測値との差を補正值としてデータの較正を行うのが、電波干渉計の較正である。しかし太陽を観測するために受信機の減衰器を設定してしまうと、受信機の感度がMDモード利用により下がっているとはいえ非常に大きい減衰率が使われ、ほとんどのクエーサーが観測できないか、必要な精度を得るために許容できない長い積分時間が必要となる。この問題を回避するためには、較正源を観測するときだけ、減衰率を低下させなければならない。一方、減衰率を変えるということは、較正源を観測するときと太陽を観測するときで装置による位相変動が異なることを意味し、較正源観測で求めた補正值を太陽のデータに適用できないことになる。そこで、減衰器は全アンテナで同じ製品なので、同じ分だけ減衰率を変えれば位相も同じ分だけ変わり、その位相変動分はアンテナ同士で消し合うのではないかと考えた。実際測定してみると、減衰率を変えることで位相は変化するが、その変化量にアンテナの個体差はなく

<sup>\*2</sup> 太陽フィルターは、次期太陽極大期におけるフレア観測での切り札として利用が考察されている。

<sup>\*3</sup> 太陽以外の場合、強度較正には強度がよく知られており安定している、外惑星の衛星や小惑星などが使われるが、太陽の近くに来る機会が少なく明るくもないので、太陽観測ではあまり利用できない。

(位相として差は2度以下)、想定どおり位相変動がアンテナ同士で消し合うことを確認した。これで、現状は減衰率の変化による位相変動を較正する必要はなくなったが、減衰器が故障して部品交換するとき、スペックは同じでも異なる製品を使われたら問題が発生する。今後も要注意な点である。

電波干渉計のデータは、前述の較正源を使った較正の前にアンテナが受けた電波強度を基準とした強度較正が行われる。通常、観測ターゲットからの電波強度は地球大気からの放射や受信機のノイズに比べて無視できるほど小さいので、観測ターゲット近くの電波源がない空 (blank sky : ブランクスカイ) の電波強度を基準にして較正が行われる。一方、ミリ波・サブミリ波での太陽は5,000から8,000度の輝度温度をもっているため、この較正プロセスにおいて無視することはできない。そのため、太陽観測においては観測期間中に利用するすべてのアンテナで、アンテナが受けた電波強度を常時計測することとなった。干渉計観測であるはずなのに単一鏡観測的なデータ較正プロセスが必要となり、太陽データの較正に時間がかかる要因となっている。

## 5. やっぱり残る太陽観測の制限

これまで解説してきたMDモードを利用した太陽観測方法は、Band 3受信機にてローカル周波数が100 GHzの場合と、Band 6受信機にてローカル周波数が239 GHzの場合のみ検証されたものである。そのため、アルマ望遠鏡の他の受信機、ほかのローカル周波数はまだ共同利用に供されていない。新しい観測周波数は今後の開発課題ではあるが、それ以外に太陽観測ならではの根本的な観測制限がある。この章では、それらを紹介しよう。

太陽は、アルマ望遠鏡の視野に比べ非常に大きい\*4。よって、太陽の縁の観測以外、視野全面が

太陽の構造で埋まることを意味する。また、視野を埋める太陽の構造は、視野程度の大きい構造から空間分解能程度の小さい構造までバラエティーに富んでいる。このような観測対象は、電波干渉計にとって苦手である。電波干渉計ではアンテナの数に応じてカバーできる空間周波数が決まり、その決められた空間周波数をもたない構造は、合成した画像から消えてしまうからである。このような現象を“resolve-out” (リゾルブアウト) と呼んでいる。リゾルブアウトの影響をなるべく小さくし、正しい像を合成するため、以下の方策を取っている。

- uv空間にてデータ点の密度を均一にするため、短い基線\*5から長い基線まで満遍なく構築する。
- 12 mアンテナだけではカバーできないので、7 mアンテナでも同時観測する。フレアなどの短時間スケール (<1秒) の現象を観測することも考え、観測データの同時性を保つためにすべてのアンテナを一つの相関器 (64-input Correlator) に接続する。
- 7 mアンテナを利用しても低周波側の空間周波数をカバーできないため、単一鏡観測も“同時”に行う。

この方策により、以下の太陽観測特有の制限が発生する。

- 66台のアンテナにより短い基線から長い基線まで満遍なく構築するためには、基線長は約500 mが限界となる。500 mの基線長を空間分解能に変換すると、1.4秒角@Band 3, 0.6秒角@Band 6。
- 7 mアンテナはアンテナ間隔が短いため、太陽高度が40度より低いと隣のアンテナの影がアンテナ面上に落ちてしまう。この制限によりチリでの冬至 (日本の夏至) では、1日2時間半しか太陽観測ができない。

\*4 太陽の視半径が約960秒角に対し、Band 3にて単一ポインティングでの視野は60秒角程度。

\*5 二つのアンテナを結ぶ線。干渉計の最小単位である。

・単一鏡観測では太陽全面を掃くためのスキャン時間を短くするために、二重円のパターンを使ったファーストスキャンを行う<sup>15)</sup>。このスキャン方式では太陽高度が70度までしか観測できない。また干渉計観測は、太陽高度が82度を超えると観測ができない。

このほかにも、7月初旬では太陽の近くに較正源として使える明るいクエーサーが存在しないので、太陽観測ができないという制限がある。太陽観測のプロポーザルを書くときには、このような制限に注意してほしい。

## 6. 太陽SVデータとノイズ算出法

2015年12月中旬に太陽観測キャンペーンが行われた。その12月の初頭に、太陽観測が次年度の共同観測期間“Cycle 4”にて公開されることが決定しており、失敗できないキャンペーンとなった。結果からいうと、キャンペーンは成功裏に終わり、共同利用観測を行ううえでの懸念事項は、ほぼすべて払拭できた\*<sup>6)</sup>。このキャンペーンにて利用できたアンテナ数は最大30台であり、アンテナ配置としては最小のC36-1(最大基線長: 160 m)相当という、アルマ望遠鏡太陽観測の最高スペックからはかなり異なる状況であった。しかし観測データは素晴らしく、その一部がScience Verification (SV) データとして2017年1月18日に公開された。このSVデータには、黒点・静穏領域・リム・フィラメント・プロミネンス・太陽全面画像(単一鏡観測)が含まれており、フレアを除く一とおりの観測対象が含まれている。

図4はこのSVデータの一部で、Band 3およびBand 6にて単一鏡観測で取得された太陽全面像(上段)と、149ポイントのモザイク干渉計観測データと単一鏡観測データを合成した黒点画像(下段)である。Band 3の観測日は2015年12月16日、空間分解能は全面像が約60秒角、黒点画像が約5秒

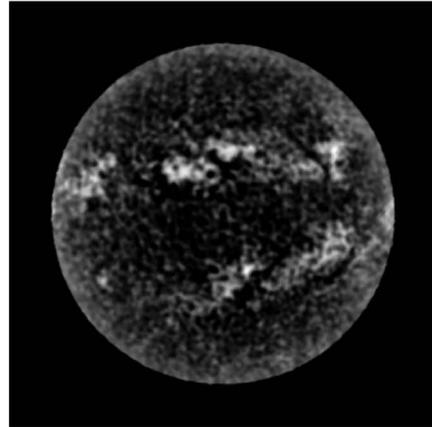
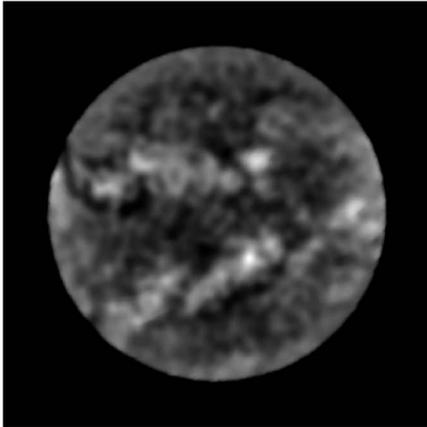
角。黒点画像の視野は240秒角である。一方、Band 6の観測日はBand 3観測の二日後の12月18日。全面像の空間分解能は約25秒角、黒点画像の空間分解能と視野は、それぞれ約2.5と120秒角である。黒点画像やその他干渉計データから合成された太陽画像は、これまでの電波画像に比べて空間分解能が著しく向上しており、素晴らしい画質である。これらの太陽SVデータから、2017年末までに5編<sup>16)-20)</sup>の査読論文が出版されている。

多くの太陽画像では、図4の黒点画像のように、ブランクスカイが視野内にない。電波干渉計データから合成した電波画像のノイズレベルは通常、ブランクスカイにおける輝度変動の標準偏差で評価する。よって、太陽画像から通常的手段でノイズレベルを算出することが不可能なのだ。太陽画像のノイズレベルを算出するために、われわれは太陽から放射されるミリ波・サブミリ波の特性を利用した。太陽大気は磁場がいたるところに存在し、そのため偏波が存在する。しかし、太陽フレアによって生成される高エネルギー電子がない限り、熱放射におけるミリ波・サブミリ波での偏波率は非常に小さい。最近の輻射輸送を含む電磁流体シミュレーションでは<sup>21)</sup>、100 GHzにおいて彩層中に100 Gaussの磁場強度があったとしても、0.1%程度の円偏波しかないことが予想されている。一方アルマ望遠鏡では、通常直行する2つの直線偏波を測定している。0.1%の偏波を計測するのはアルマ望遠鏡にとって不可能ではないが難しいことであり、数秒の積分をただけの観測データでは無視できるほど小さい。よってそれぞれの直線偏波のデータ毎に画像作成し、その二つの偏波画像の差を取れば、その差の二分の一が測定誤差を示すことになる。この方法でノイズレベルを導出した結果、Band 3の干渉計データだけ利用して合成した黒点画像のノイズレベルは輝度温度換算で3.7度、Band 6は9.8度であった。図4の黒点

\*<sup>6)</sup> と思っていたが、翌年の12月に悲劇が起こる。ただ、それは本記事とは直接関係がないので、ここで述べることは省略する。

ALMA Band3 Full-Sun 16-Dec-2015

ALMA Band6 Full-Sun 18-Dec-2015



ALMA Band3 AR12470 16-Dec-2015

ALMA Band6 AR12470 18-Dec-2015

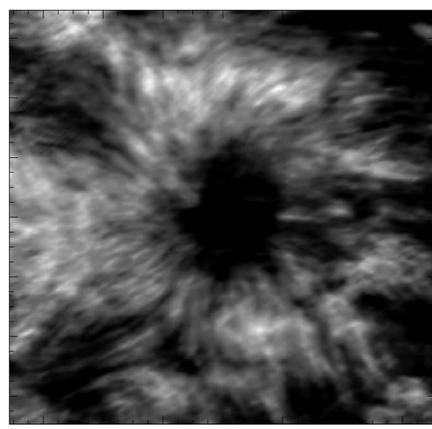
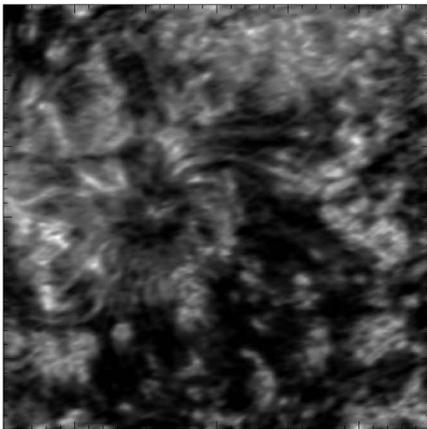


図4 太陽SVデータ上段：太陽全面画像，下段：干渉計観測と単一鏡観測のデータから作成した黒点画像．左：Band 3 100 GHz，右：Band 6 239 GHz.

画像は干渉計観測データと単一鏡観測データとが合成されているので、ノイズレベルや誤差には単一鏡観測の誤差も含めなければならない。

## 7. 最後 に

本記事は、Shimojoら<sup>22)</sup>を基に、当時の状況を含めて書いたものである。この論文で説明されている観測モードを使って、アルマ望遠鏡の共同利用観測期間Cycle 4, 5, 6にて太陽観測が行われている。しかし分光観測、偏波観測やまだ使えていない受信機など、現状の太陽観測ではアルマ望

遠鏡の大部分の機能が使えていない。今のところ利用できないサブミリ波帯では、分子線や水素の再結合線が検出できる可能性が示唆されている。今後も太陽観測モード開発を継続し、アルマ望遠鏡による太陽観測を活性化させていきたいと考えている。

最後に、チリにて2012年に逝去された森田耕一郎さんの思い出を述べて、筆を置きたいと思う。2011年から始まった太陽観測キャンペーンで筆者は、超巨大電波干渉計による太陽試験観測という、困難なミッションにもがき苦しんでいた。

そのときに救いの手を差し伸べてくれたのが、森田さんであった。データの構造やCASAやIDLによる解析方法を教えてもらい、試験観測や検証方法に対するアドバイスをいただいて、何とか仕事が順調に回るようになったのが2012年の春であった。丁寧に教えてくれる森田さんには、感謝しきれないほど助けていただいた。森田さんが亡くなる前日にも、2012年キャンペーンの観測計画についてメールのやり取りをしていた。そんなときに訃報に接し、これからどうすれば良いのか本当に路頭に迷った。森田さんがアンテナ配置を設計し、実現に尽力したモリタアレイ（7 m アンテナによる干渉計アレイ+12 m アンテナによる単一鏡観測用アレイ）は太陽観測に不可欠なコンポーネントである。モリタアレイを用いて、アルマ望遠鏡による太陽ミリ波画像が合成できている。少しは森田さんに喜んでもらえているだろうかと気になりながら、次は太陽サブミリ波画像を合成するため、今日も試験データと格闘している。

## 謝 辞

アルマ望遠鏡による太陽観測は、国立天文台チリ観測所、Joint ALMA Observatory、国際ALMA太陽観測開発チームの皆さんのご協力を得て実現したものです。このプロジェクトにかかわられたすべての方に感謝します。本研究はJSPS科研費JP17K05397の助成を受けたものです。

This paper makes use of the following ALMA data: ADS/JAO.ALMA#2011.0.00020SV, ADS/JAO.ALMA#2011.0.00001.CAL. ALMA is a partnership of ESO (representing its member states), NSF (USA) and NINS (Japan), together with NRC (Canada), MOST and ASIAA (Taiwan), and KASI (Republic of Korea), in cooperation with the Republic of Chile. The Joint ALMA Observatory is operated by ESO, AUI/NRAO and NAOJ.

## 参考文献

- 1) 下条圭美, 2016, 天文月報, 109, 723
- 2) 下条圭美, 2008, 天文月報, 101, 310
- 3) 下条圭美, 2014, 天文月報, 107, 404
- 4) Vernazza, J. E., et al., 1981, ApJS, 45, 635
- 5) 例えば, 国立天文台ニュース, 2016年3月号「特集太陽観測所一世紀を超えて」
- 6) Hinode Review Team, et al., 2018, PASJ, submitted
- 7) White, S. M., & Kundu, M., 1992, Solar Phys., 141, 347
- 8) Kaufmann, P., et al., 2004, ApJ, 603, L121
- 9) Wedemeyer, S., et al., 2016, Space Sci. Rev., 200, 1
- 10) Lindsey, C., et al., 1995, ApJ, 453, 511
- 11) Bastian, T. S., et al., 1993, ApJ, 415, 364
- 12) White, S. M., et al., 2006, A&A, 456, 697
- 13) Iwai, K., & Shimojo, M., 2015, ApJ, 804, 48
- 14) Yagoubov, P. A., 2013, Proc of 38th Internat. Conf. Infrared, Millimeter, Terahertz Waves, IRMMW-THz 2013, IEEE, New York, 1
- 15) White, S. M., et al., 2017, Solar Phys., 292, 88
- 16) Shimojo, M., et al., 2017, ApJ, 841, L5
- 17) Iwai, K., et al., 2017, ApJL, 841, L20
- 18) Bastian, T. S., et al., 2017, ApJ, 845, L19
- 19) Alissandrakis, C. E., et al., 2017, A&A, 605, A78
- 20) Loukitcheva, M. A., et al., 2017, ApJ, 850, 35
- 21) Loukitcheva, M. A., et al., 2017, A&A, 601, A43
- 22) Shimojo, M., et al., 2017, Solar Phys., 292, 87

## Solar Observations with ALMA

Masumi SHIMOJO

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

Abstract: Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA) is designed and constructed considering solar observations. However, the special observing mode is needed for solar observations, because the millimeter and submillimeter waves from the Sun are significantly larger than that from the other celestial objects. We started the development of the solar observing mode in 2010, then solar observations with 100 and 239 GHz have been provided since the 5th open-use period of ALMA "Cycle 4" that started in October 2016. In the paper, I describe the summary of the ALMA solar observing mode, that includes the background of the development.