

# アルマ望遠鏡による太陽系研究

佐川 英夫

〈京都産業大学理学部 〒603-8555 京都市北区上賀茂本山〉  
e-mail: sagawa@cc.kyoto-su.ac.jp



アルマ望遠鏡 (ALMA) の高い空間分解能力や集光能力は、太陽系天体の研究においても非常に有効である。従来のミリ波・サブミリ波での太陽系観測では、空間分解を伴った観測という視点に立つと、金星や木星といった大きな天体の惑星大気科学に関連する研究に限定されてきた。しかし、ALMAの登場によって、彗星やタイタンといった小天体の空間分解観測が実現され、さらには視直径が0.1秒角前後の小惑星すらも空間分解をした観測が成功している。本稿ではミリ波・サブミリ波帯を利用した太陽系天体観測の長所および短所を述べ、さらにALMAがもたらした太陽系研究の新展開についてレビューを行う。

## 1. はじめに: 「近く」の「明るい」天体をALMAで調べる

私の研究分野を自己紹介する際に「ALMAで太陽系の惑星を観測しています」と言うと、「系内の、しかも惑星のような明るい天体がALMAの観測対象になるのですか?」という質問を受けることがある。確かに、ALMAはその圧倒的な集光能力と空間分解能力によって、天文学者が今まで到達できなかった遠方天体の姿を映し出すことに成功している。その一方で、ALMAが達成するこれらの観測性能は、「近場の」太陽系天体に対しても唯一無二の研究機会を与えるものなのである。本稿では、これまでのALMAによる太陽系天体の観測結果を紹介するとともに、それらの観測の背景に存在する「ALMAで観測しなければならない意義」を説明していきたい。ミリ波・サブミリ波帯の観測が太陽系の研究にとってどのようにユニークなのか、そして、ALMAがいかにかに強力かということが、この紹介記事を通して皆様に伝われば幸いである。

## 2. 惑星観測におけるミリ波・サブミリ波の利点

ミリ波・サブミリ波を利用した太陽系天体の観測はALMA以前から存在し、宇宙望遠鏡の利用および宇宙空間から地球を観測した事例も含めれば、先行研究の数は決して少なくはない。これら従来のミリ波・サブミリ波帯観測においては、特に惑星の大気に関するテーマが主な研究対象となってきた。具体的には、単一鏡の観測装置では、欧米のIRAM-30 m鏡やJCMT (注: 2014年度より東アジア観測所が運用中)、日本のASTE望遠鏡などにより、金星・火星・木星・土星・海王星といった惑星や、タイタン・イオなどの衛星の大気組成や気温場、大気力学、さらには彗星コマのガス組成などが観測されている<sup>e.g. 1)–3)</sup>。単一鏡による観測では空間分解能に限界があるため、1990年代からは干渉計を用いた観測も実施されており、欧米のOVRO, CARMA, SMAやIRAM-PdBI、日本の野辺山ミリ波干渉計などが利用されている<sup>4)–7)</sup>。また、2009–2013年に運用されたサブミリ波・遠赤外線天文衛星ハーシェル

宇宙望遠鏡でも、太陽系におけるH<sub>2</sub>Oの分布を探る長時間観測プログラムが実施されている<sup>8)</sup>。宇宙空間から地球を観測している例としては、近年では国際宇宙ステーション搭載サブミリ波放射計SMILESの例が挙げられ、成層圏大気化学の研究が実施されている。

ミリ波・サブミリ波帯で惑星（特に惑星大気）を観測するねらいは何であろうか？ その答えは、この波長域には惑星大気中に存在するさまざまな分子のラインが豊富に含まれるという点と、電波観測で採用されるヘテロダイン技術の特性に見いだすことができる。

太陽系の惑星・衛星の大気を構成する主要な分子種の中で、無極性分子である二酸化炭素やメタンなどの分子を除けば、たいていの分子はミリ波・サブミリ波帯において振動・回転遷移の吸収線をもつ。惑星大気中の微量成分（体積混合比で $\sim 10^{-9}$ から $10^{-3}$ 程度の存在量）は、その存在量が僅少でも、大気化学に多大な影響を及ぼすものも多い。加えて、分子によっては大気中で凝結し雲を形成する。惑星における雲層は太陽からの入射エネルギーを吸収もしくは遮る役割を果たし、惑星の熱収支を考えるうえで非常に重要なものである。ミリ波・サブミリ波帯を用いて惑星大気中

の微量成分の空間分布および時間変動を観測することで、こうした大気化学や雲物理の議論が可能となる。また、大気中に比較的一様に分布し、かつ、光学的厚みが適度に大きい分子（例：金星・火星大気における一酸化炭素など）を用いれば、その分子スペクトルから大気温度の情報を求めることもできる。

さらに、ミリ波・サブミリ波帯の観測ではヘテロダイン技術を用いることで非常に高い周波数分解能力が実現される。この周波数分解能は、惑星大気の研究に非常に好都合なものである。その大きな利点の一つが、惑星大気を高度方向に分解して研究できるという点である。大気中の分子が作る吸収線は、分子の熱運動や分子同士の衝突などの理由により、特有の線幅で広がっている。特に大気中の分子密度がある程度以上大きい場合、吸収線の線幅は気圧の大きさに従って大きくなる。観測視線内の惑星大気の気圧が非一様な場合、視線内の各地点でその場所の気圧に応じた異なる線幅をもつ吸収線が形成され、それらを観測視線方向に積分したものが一本の吸収線として観測されることとなる（図1a）。こうした吸収線を周波数分解能が $\nu/\Delta\nu=10^{6-7}$ にも達するヘテロダインで観測すると、分子の吸収線の形（line shape）を高い

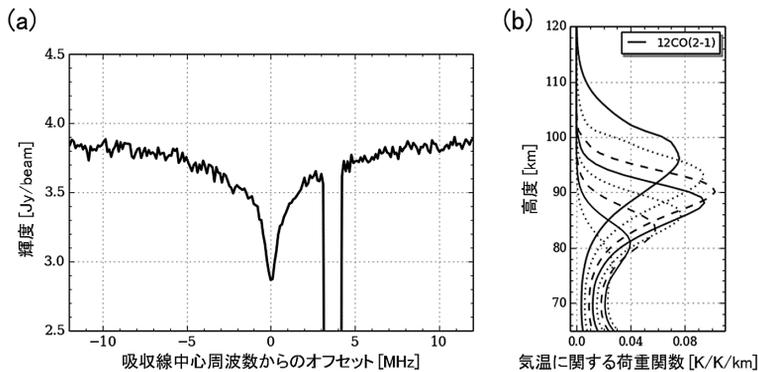


図1 (a) ALMA (Cycle-3) で観測された金星の<sup>12</sup>CO (2-1) スペクトルの吸収線中心部分。金星全球のデータを平均したもの。なお、周波数オフセット3-4 MHz付近は地球大気中のCO吸収が重なっているためにデータをマスクしている。(b) 異なる周波数オフセットでの輝度に対して金星大気のどの高度からの放射がどの程度含まれているのか(荷重関数)を示すグラフ。異なる線は異なる周波数オフセットに対応しており、荷重関数のピークが高高度に来ているものから順に、周波数オフセットが0.0, 0.4, 1, 2, 4, 8, 16, 32 MHzのものである。

精度で計測することができる。このline shapeの情報を反転解析することで、観測視線に沿った各地点での分子存在量や気温が求まる。地上から惑星を観測する場合、その観測視線は惑星大気を鉛直方向に通過する。したがって、このline shapeを利用した解析から、惑星大気の高さ方向の情報が取得可能になるのである。どの高さにどの程度の感度が存在するのかわかり、観測をする分子吸収線の光学的な厚みで決まる(図1b)。ALMAは従来のミリ波・サブミリ波帯望遠鏡よりも広い領域の観測周波数(84-950 GHz帯)での観測が可能であり、観測対象として選択できる分子吸収線の種類もより豊富である。例えば、金星・火星大気において、回転準位の異なる一酸化炭素の吸収線(230, 345, 691 GHzなど)を複数観測することで、より幅広い高さ領域の情報が取得可能となる。

ヘテロダインの高い周波数分解能の二つの利点は、惑星大気分子スペクトルのドップラーシフトを検出することで、その分子を含んだ大気塊が観測者に対してどのように運動をしているのかわかる点である。これは金星や火星の大気循環の研究で非常に大きな成果をもたらしている観測手法であり<sup>5)-7)</sup>、ALMAを利用することで、視直径より小さな惑星(天王星、海王星など)や衛星(イオ、タイタンなど)における大気循環の観測も可能となる。

### 3. Resolve Outの問題

前章では惑星観測に関するALMAの利点について述べたが、逆に、観測を行う際の問題点も存在する。ALMAの利用経験をもつ研究者は、ALMAの観測性能には干渉計の合成ビームの大きさで定義される空間分解能とともに、MRS(maximum recoverable scale)という空間スケールが定義されているのに見覚えがあるであろう。MRSというのは、「干渉計が観測できる最大の空間スケール」であり、この大きさ以上の広がりをもつ電波源の輝度分布に対しては観測感度が著し

く低下するというものである。これは、天空上の電波源に対して二つのアンテナ間の距離(基線長)に対応した空間周波数成分を測定するという干渉計の観測原理に起因する現象である。詳細な説明はここでは割愛するが、つまりは一番短い基線長のアンテナペアが測定する空間周波数成分よりも大きく広がった輝度分布構造(空間周波数成分がより小さい情報)は、そもそも観測できない(*uv*平面の中心付近を観測値で埋めることができない)ということである。

このことをresolve outと呼んでいるが、地球に近い金星・火星や巨大ガス惑星の木星・土星といった視直径が大きな惑星を干渉計で観測する際には非常に厄介な問題となる。図2に様な輝度分布をもつ視直径30秒角の惑星をALMAの口径12-mアンテナの干渉計で観測した場合の初期合成画像(dirty mapと呼ばれるもの)のシミュレーション結果を示した。12-mアンテナの配列だけで観測した場合、本来惑星の輝度分布がディスク状に現れるべき部分に大きな穴が開いているのが分かる。干渉計のデータ解析ではこのdirty mapをデコンボリューション(clean)解析することでより正しい電波画像を合成するが、今回のようにresolve outしてしまっている部分を埋めるには、観測データとは別に何らかの輝度分布情報を外部から与える必要がある。過去の干渉計による惑星観測では、「惑星全体に様に広がった輝度分布成分」を後から付け足すことでこの問題に対応している<sup>9)</sup>。Resolve outの度合いが小さい場合はこの補填方法でも支障がないと考えられてきたが、ALMAの12-mアンテナを利用した干渉計観測の場合はその大規模なアンテナ配列ゆえにresolve outの程度も著しく大きくなる。

この問題を解決するのが、12-mアンテナ干渉計よりも規模が小さい基線長で構成されたACA(モリタレイ)を併用し、12-mアンテナ干渉計では観測できない短い基線長に対応する空間周波数成分をACAで観測することである。図2下図

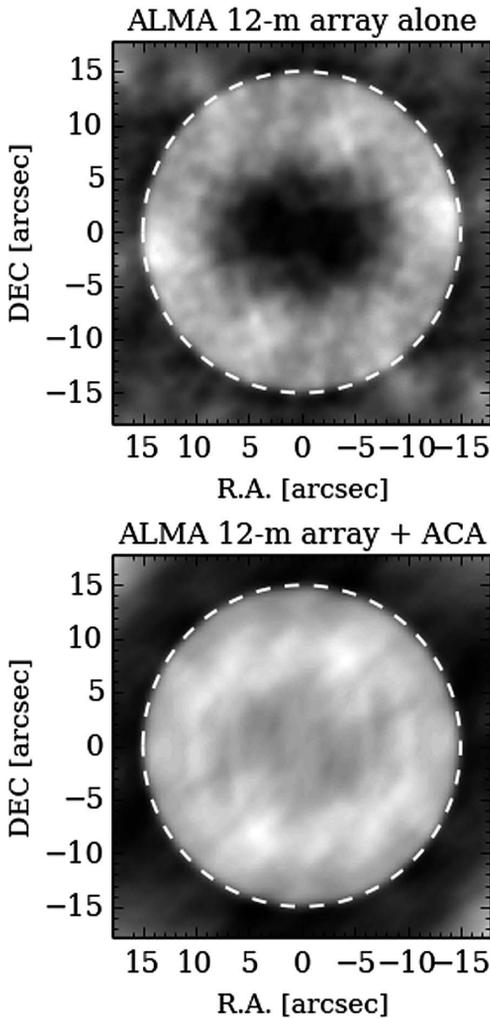


図2 ALMA観測シミュレーターを利用した面光源のresolve outの様子。視直径30秒角の様な輝度分布をもつ面光源を干渉計で観測した際の初期合成画像 (dirty map) を示す。上図は、合成ビームサイズが1.0秒角になるようなALMAの口径12-mアンテナ配列で観測した場合であり、下図は12-mアンテナの配列に加えてACAを併用した場合の例。

に、12-mアンテナ干渉計とACAを同時利用した場合のdirty mapを示した。正円の一様な輝度分布を得るまでには至っていないが、それでも、ディスク内部の輝度が十分な割合で観測されている。

現在観測が実施されているCycle-4までのALMA

の共同利用観測では、12-mアンテナ干渉計とACAの完全同時観測は約束されていない。そのため、12-mアンテナ干渉計とACAを併用した際に、両者の観測時間に時差が生じることもある。その場合は観測対象が時間変動してしまい（例えば、木星大気自転周期は10時間である）、二つの干渉計データの正しい結合ができなくなるという問題点も残っているが、それでもある程度の精度でresolve outを解決できるであろう。こうした観測技術面の発展も今後のALMAでの惑星観測を通して実現されると考えられる。

#### 4. ALMAによる観測成果

##### 彗星コマにおける有機分子の非一様分布

ALMAによる太陽系観測の最初の成果は、2013年に実施されたレモン彗星およびアイソン彗星の観測であった<sup>10)</sup>。彗星の核は太陽系形成の初期段階の物理的・化学的情報を保持した始原天体であると考えられている。その核から放出されるガスやダストは一時的な彗星大気(コマ)を形成するが、そのコマに含まれるガスの組成や生成率、あるいは核周辺への空間的な広がり具合などを観測することで、彗星の核そのもの、延いては太陽系形成の歴史への理解を深めることができる。

ALMAの観測ではHCN、HNCおよびH<sub>2</sub>CO(ホルムアルデヒド)の空間分布構造が得られた。HCNが彗星核の周りにほぼ等方的に広がっていたのに対して、HNCは極めて非一様な空間分布構造をしており、太陽とは反対側の方向に塊状に集まっている様子が示された。この観測事実からは、HCNが彗星核から直接的に噴き出している一方で、HNCはコマ内部で(おそらくは有機物を含むダストをソースとして)生成されているであろうことが考えられる。ホルムアルデヒドに関しては、レモン彗星ではアイソン彗星と比較して核の周りでより大きく広がった領域に分布していた。両彗星は太陽からの距離が異なっており(アイソン彗星が0.54 AU、レモン彗星は1.5 AU)、そ

の太陽放射の差によってホルムアルデヒドの親分子がアイソン彗星では核近傍で素早く光解離してしまうことが両彗星間でのホルムアルデヒドの分布の差異を作っていると考えられる。

これらの発見はALMAの高い空間分解能力(空間分解能がおおよそ0.5秒角)があって初めて実現されたものである。

### タイタン大気中の微量成分分布

前述の彗星観測成果の発表と時を同じくして、タイタン大気中の有機分子HNCおよびHC<sub>3</sub>Nの空間的な偏在がALMAによって明らかにされている<sup>11)</sup>(図3)。これは、アイソン彗星観測データのフラックスキャリブレーション用に観測された、しかも僅か158秒間の観測時間のタイタンのデータを解析することで得られた発見であった。

タイタン大気には大規模な大気循環が存在し、主にその大気循環の影響で大気中の特定の微量成分が極域に濃集することがカッシーニ探査機の観測などからも知られている。ALMAで得られたHC<sub>3</sub>Nのデータ(図3b)はまさにその様相を示していたが、一方で、HNCに関しては極域から少し離れた領域に濃集している予想外の結果が得られた(図3a)。HNCの観測に用いられた合成ビームが斜めに歪んだ楕円となっている影響は無視で

きないが、もしも両者の空間分布が本当に異なっているのであれば、それは非常に興味深い結果となる。過去、タイタンの大気循環は東西方向に一樣な構造をしていると考えられていたが、そうした大気循環モデルでは今回観測されたHNCとHC<sub>3</sub>Nの空間分布が異なっている理由が説明できない。この点に関しては、今後の追加観測で精度の高いデータを取得し、議論を深めていくことが期待される。

こうした科学的に大きなインパクトをもった発見が、サイエンスタargetとしての本観測ではなく、他天体を観測する際のキャリブレーション用データから得られたということは、ALMAの性能の高さを如実に示す驚くべきニュースであった。実は、タイタンは、フラックスキャリブレーション用の参照データとしてALMAで相当な頻度で観測されている。ALMAのデータアーカイブには、サイエンスタargetとしての観測データ以外にもこれらのキャリブレーション用の参照データがすべて収録されている。この原稿の執筆時点(2017年1月)で、ALMAデータアーカイブにはすでに500件以上のタイタンデータが一般研究者に公開されている。このデータセットはALMAの観測バンド全域にわたるさまざまな観

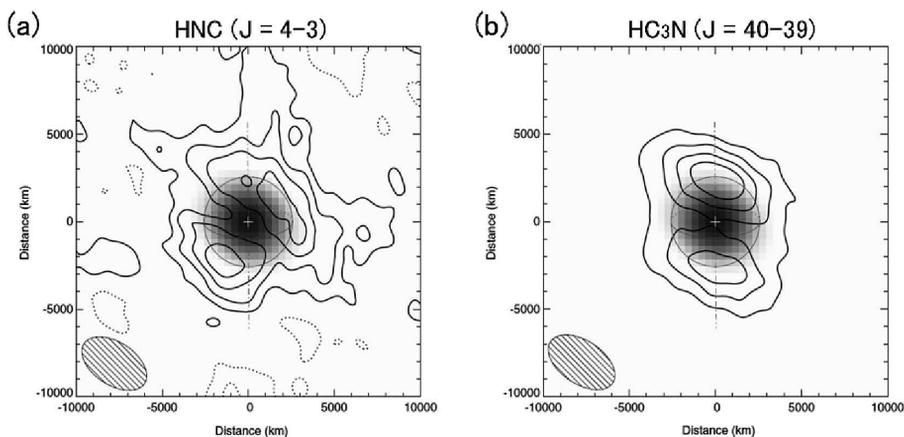


図3 タイタン大気中の(a) HNCおよび(b) HC<sub>3</sub>Nの空間分布を等値線で示したもの。色付部分は連続波でのマップ(タイタンの電波画像)であり、視直径の大きさが線で示されている。Cordiner et al. (2014) の論文<sup>11)</sup>より引用(American Astronomical Societyの許可を取得したうえでの転載)。

測周波数でのデータが含まれており、それらの中にはサイエンス用途への転用が十分に可能なデータが少なくない量で埋もれているのである。実際、このキャリブレーション用のタイタンデータから、 $C_2H_5CN$ という分子がサブミリ波帯において初めて検出され、南極上空へ偏って分布している様子も報告されている<sup>12)</sup>。

タイタンに限らず、太陽系天体（特に視直径の小さい海王星・天王星や氷衛星など）はキャリブレーション用天体としてALMAで多数観測されている。データアーカイブで公開されているそれらを真面目に掘り下げていき、新たな科学的解析を行う、いわば「宝探し」をしていく価値および必要性は十分に高いと考えられる。

### 金星上層大気の力学

ALMA以前の単一鏡および干渉計観測でしばしば研究されてきた金星大気であるが、ALMAにおいても金星大気中のSOや $SO_2$ 、HDOの空間分布がCycle-0の時点で早くも観測されている<sup>13)</sup>。本稿では、その後のCycle-3で筆者らが観測提案を行った、金星の上層大気の大気力学にも焦点を当てた研究について紹介したい。

金星大気には「スーパーローテーション」として知られる高速（風速が100 m/sに達し、4-5日で金星を一周する）の西向き風が全球的に存在している。しかし、このスーパーローテーションの存在がはっきりと分かっているのは、地表から高度70 km付近までの領域である。それより上空ではどういった大気循環になっているのかはいまだに解明されていない。近年の金星大気大循環モデルでは、大気内部で生じる波が角運動量を上向きに伝播し、高度100 km付近においても西向きの帯状流が生成される可能性が言及されている。そこで筆者らはALMAで金星大気中の一酸化炭素をマッピングし、その吸収線のドップラーシフトから金星上層大気における大気の運動を可視化した。同様の観測は過去にも行われているが、実効的な空間分解能力を確保するために、金星の視

直径がそれなりに大きくなる内合付近の時期に観測するのが常であった。この状況では地球から見えるのは主に金星の夜面となってしまう、言い換えると、過去の観測では主に夜面（あるいは金星ディスク上に昼夜が半々の状態で見えている状態）の風速場しか観測されていない。

ALMAでの観測では、先行観測例が皆無の金星昼面での風速の様子を調べることが目的としており、金星が外合付近に位置するタイミングで観測が行われた。このときの金星の視直径は10秒角程度であり、内合付近の30-50秒角という大きさと比較すると随分と小さい。しかしALMAの高い空間分解能（0.6秒角）のお蔭で、金星ディスクを十分に空間分解することができた。

この観測から求めたドップラーシフトの結果（速報値）が図4である。観測者から遠ざかる向きを風速の正の向きとしており、この結果からは、紙面の表側の半球から裏側の半球に流れていくような風速場を考えることができる。これは、昼面

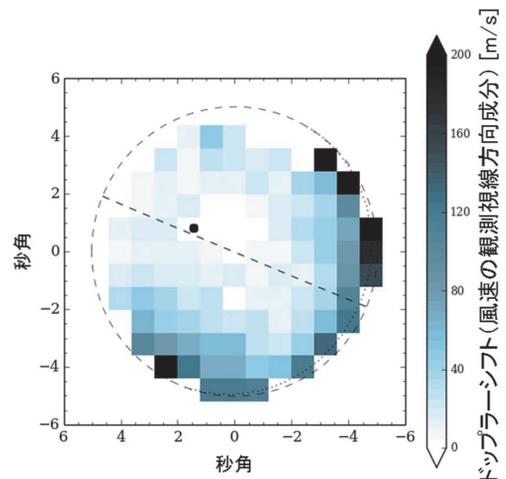


図4 Cycle-3で観測された金星 $^{12}CO$  (2-1)のデータから、ドップラーシフトの速度マップを求めたもの。観測者から遠ざかる向きを正としている。ディスク中央付近の黒点は太陽直下点を示し、金星の赤道を破線で示した。ドップラーシフト導出時の誤差が一定のレベルより大きな領域に関してはこの図中からは省いてある。

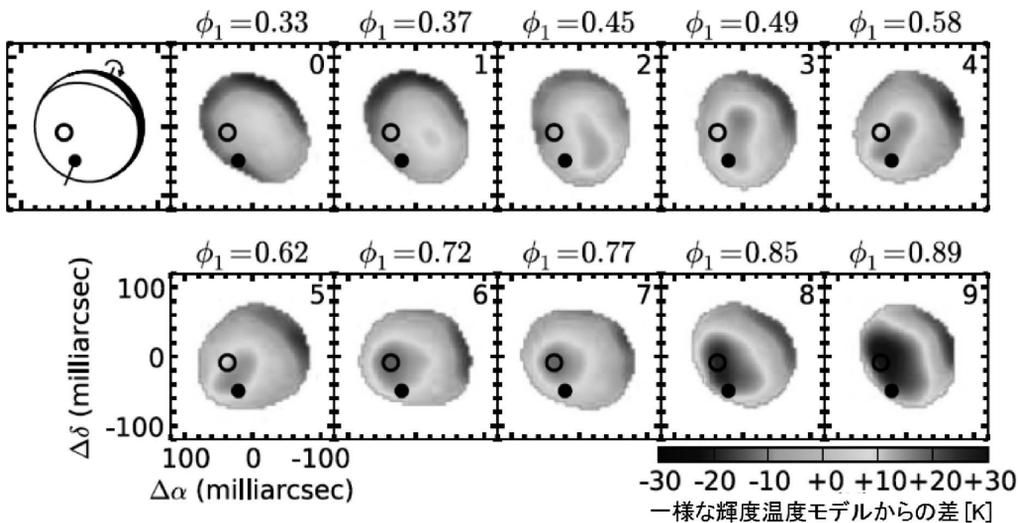


図5 小惑星ジュノーの輝度温度非一様性。自転周期7.2時間のうち、連続した約4時間分を観測したもの（ $\phi$ は自転の位相を示す）。○と●はそれぞれ太陽直下点と南極点を示す。ALMA Partnership et al. (2015) の論文<sup>14)</sup>より引用（American Astronomical Societyの許可を取得したうえでの転載）。

から夜面に流れる大気循環（昼夜間循環）の存在を強く示しているものであり、西向きの帯状流の影響は昼面では弱いということが考察される。

#### 長基線配列による小惑星ジュノー観測

本稿では最後の紹介となるが、科学的なインパクトではむしろ最大の部類に入ると考えられるのが、2014年のALMA長基線試験観測キャンペーンで取得された小惑星ジュノーの波長1.3 mmの連続帯画である<sup>14)</sup>。小惑星ジュノーは、メインベルト小惑星帯に位置する直径約240 kmの天体であり、地球から見たときの視直径は0.08-0.2秒角程度にしか達しない。この小天体を、基線長が最大で13 kmにも達するアンテナ配列を用いて観測したのである。この観測では空間分解能0.04秒角が達成され、4時間の観測時間の間に小惑星ジュノーが自転する様子も明瞭に観測されている。

この小惑星ジュノーの観測のように、太陽系天体の表面から発せられるミリ波・サブミリ波帯連続波を観測したときに得られる輝度温度は、天体の地表面温度のみを単純に反映したものではなく、

地表面のやや下方（一般的には観測波長の10倍程度の深さ）からの熱放射の輝度温度が含まれる。そのため、観測される表面輝度温度に対していくつかの仮定や他波長による補助データを併用することで、地表面の温度あるいは地表面物質の複素誘電率の情報を求めることができる。図5にはジュノーの表面輝度温度の非一様性（全域一様な輝度温度モデルからの残差）が自転の各段階で示されている。これを見ると、ジュノーの表面輝度温度は、同じ太陽直下点でも場所によってその増え方が異なっている。これはジュノーの地表面物質が空間的に非一様であり、熱慣性などの熱的性質が場所によって異なっていることを示唆している。

こうした超高空間分解能観測はALMAでしか成し得ないものであり、今までほとんど詳細観測がされてこなかったエッジワース・カイパーベルト天体などの観測が一気に現実のものとなったと言える。

## 5. さいごに

本稿ではALMAを利用した太陽系科学の現状および今後の可能性についての紹介を行った。なお、スペースの関係上、本稿では紹介し切れなかった研究成果も多数存在していることを言及しておく。もちろん、現行の観測サイクル(Cycle-4)でも太陽系カテゴリーの新規観測提案が複数採択されており、この先もさまざまな新発見がもたらされることは疑いの余地がない。

ミリ波・サブミリ波帯で観測される太陽系天体の姿は、可視光や赤外で見えている姿とはまた異なるものとなっている。ALMAとほかの光・赤外望遠鏡を連携させて観測し、複数波長を用いたサイエンスを展開するというのもこれから数多く実施されていくであろう。また、太陽系天体の場合、地上からの観測に加えて、探査機による至近距離からの観測やサンプルリターン探査が行われる。日本の金星探査機「あかつき」しかり、小惑星探査機「はやぶさ2」しかりである。こうした探査機と地上観測のシナジーもALMAに期待される研究トピックの一つである。

今後、ALMAがもたらす太陽系サイエンスのブレイクスルーに大きな期待を込めたい。

### 謝 辞

この原稿を書くにあたり、筆者の関係するALMA観測の共同研究者でもある大阪府立大学の前澤裕之氏および国立天文台チリ観測所の西合一矢氏、また、東京農工大学の飯野孝浩氏との議論を参考にさせていただいた。ここに謝意を述べる。

## 参考文献

- 1) Marten A., et al., 1993, ApJ 406, 285
- 2) Lellouch E., 1996, Icarus 124, 1
- 3) Clancy R. T., et al., 2003, Icarus 161, 1
- 4) Gurwell M. A., et al., 1995, Icarus 115, 141
- 5) Moreno R., et al., 2009, Icarus 201, 549
- 6) Moullet A., et al., 2012, A&A 546, A102
- 7) 佐川英夫, 2007, 博士論文(東京大学)
- 8) Hartogh P., et al., 2009, PSS 57, 1596
- 9) Butler B. J., Bastian T. S., 1999, in ASP Conf. 180, in Synthesis Imaging in Radio Astronomy II, eds. Taylor G. B., et al., p. 625.
- 10) Cordiner M. A., et al., 2014, ApJ 792, L2
- 11) Cordiner M. A., et al., 2014, ApJ 795, L30
- 12) Cordiner M. A., et al., 2015, ApJ 800, L14
- 13) Encrenaz T., et al., 2015, PSS 113, 275
- 14) ALMA Partnership, et al., 2015, ApJ 808, L2

### Recent Results on the Solar System Observation with ALMA

**Hideo SAGAWA**

*Kyoto Sangyo University, Motoyama, Kamigamo, Kita-ku, Kyoto 603-8555, Japan*

Abstract: The unprecedented capabilities of the Atacama Large Millimeter Array (ALMA) open a new era in the solar system science. This article describes the characteristics of millimeter- and submillimeter-wave observation of the solar system objects, and reviews new findings that were recently achieved with ALMA.