

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 6 月 2 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K14420

研究課題名(和文) アルマ望遠鏡テラヘルツリモートセンシングによる、ビッグデータ惑星科学の創成

研究課題名(英文) Construction of big-data driven planetary science with ALMA terahertz remote-sensing observation

研究代表者

飯野 孝浩 (Iino, Takahiro)

東京大学・情報基盤センター・特任准教授

研究者番号：40750493

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：アルマはミリ波・サブミリ波の波長域において世界最高の感度と空間分解能を実現するリモートセンサである。この波長域を用いた惑星大気観測には、多様な分子の3次元分布の導出、成層圏における風速の直接導出、そして分子輝線・連続波の双方を用いた気温3次元分布の導出といった強みが存在する。本研究では、特にアルマを中心とした地上大型望遠鏡群の積極的な利活用により、地上観測による太陽系内惑星大気物理・化学環境の観測的解明に挑み、その基盤となるデータ処理パイプラインの開発という工学的成果、これを用いた海王星・タイタン大気および固体天体表面の環境解明という理学的成果の双方を挙げることに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の工学的成果として、アルマ望遠鏡の較正観測用データの科学研究用データへの高速変換パイプラインの開発と運用に成功したことが挙げられる。アルマ望遠鏡は多様な太陽系内天体を1日に複数回観測しており、その莫大なデータ群は、時間・周波数方向について巨大な太陽系天文学ビッグデータである。本データ群から、最も高精細な海王星の連続波観測データを選び、世界初のサブミリ波における海王星大気構造の観測的導出に成功した。また、タイタン大気中の分子分布の時空間変動の導出、同位体の検出、速度構造の導出などにも成功しており、ごく近い将来の論文化を目指している。

研究成果の概要(英文)：The ALMA is world's largest remote sensor which enables both the highest sensitivity and finest spatial resolution using Terahertz waveband. Planetary atmospheric observational study with the waveband has strong merits as follows: derivation of 3-D distribution of various trace species, direct measurement of stratospheric dynamics, and derivation of 3-D temperature profile using both the molecular line and thermal emission. In the present study, using ground-based large telescopes, particularly ALMA, I attempted to reveal both the physical and chemical environment of the planetary atmosphere. As the technical viewpoint, I have succeeded to achieve the development of data processing pipeline. In addition, as the scientific viewpoint, I have succeeded to reveal the atmospheric environment of both Neptune and Titan, and surface structure of small bodies.

研究分野：電波天文学

キーワード：電波天文学 テラヘルツ リモートセンシング ビッグデータ 最適化問題

1. 研究開始当初の背景

ミリ波・サブミリ波電波を用いた分光観測には、多様な分子を観測可能であること、輝線形状からの分子ガスの奥行方向の分布を導出可能なこと、高い周波数分解能により大気ダイナミクスを直接導出できるなどの強みが存在する。この波長域を用いた宇宙観測はいわゆる電波天文学と呼ばれる分野であり、我が国は野辺山45m電波望遠鏡やアルマ干渉計といった巨大電波望遠鏡を利活用可能な数少ない国の一つである。しかしながら、惑星、衛星、彗星といった太陽系内天体の観測的研究は他天体に対して著しく低調であり、欧米にも大きく遅れを取っていた。研究代表者は、我が国の保有するミリ波・サブミリ波望遠鏡であるASTEを用い、木星、海王星、冥王星といった太陽系内惑星大気の分光観測に取り組み、地球と大きく異なる大気組成変動メカニズムを明らかにしてきた (Iino et al. 2014, 2016a, 2016b)。ASTE望遠鏡をはじめとする単一鏡型の電波望遠鏡には、可視・赤外に比べて空間分解能が著しく低いという特徴が存在する。ASTE望遠鏡の空間分解能は典型的な観測周波数である345GHzにおいて22秒程度であるが、惑星の視直径は木星においてすら40秒程度であり、海王星では2秒強である。そのため、分子分布や気温構造、大気ダイナミクスといった大気の特徴的な物理量の空間分布をとらえることは原理的に不可能であった。

2. 研究の目的

2012年より運用が開始されたアルマ干渉計は、開口合成技術により非常に高い空間分解能を実現する。さらに、アルマは太陽系内天体を較正天体として頻繁に観測するため、多様な天体・時期・周波数の高感度・高空間分解能観測データが蓄積されている。この較正観測データ群を科学研究用データに転用することで、これまでにない「惑星科学ビッグデータ」の構築と、この利活用による観測的太陽系天文学へのブレイクスルーが期待された。本研究では、情報科学的手法による1. 惑星科学ビッグデータの構築、2. 解析手法の開発、そしてそれらを用いた3. 科学研究および4. コミュニティの創成、を一貫通貫に推し進め、電波天文学において太陽系内天体観測を一分野として確立する。研究成果の創出に加え、国内コミュニティの創成も併せ目指すことで、研究分野を自立・確立させることを究極の目標とする。

3. 研究の方法

本研究は、2. で触れた3つのフェーズからなる。すなわち、1. 惑星科学ビッグデータの構築、2. 解析手法の開発、3. 科学研究および4. コミュニティの創成である。

3.1 惑星科学ビッグデータの構築

アルマ望遠鏡アーカイブに含まれる較正観測データについて、太陽系内天体を対象としたものを抽出し、全データを同一条件で較正・イメージングするパイプラインの開発を目指した。これに先立ち、2017年5月までにアーカイブされているデータの概要を調査した。最も頻繁に観測されているのは土星衛星タイタンであり、27.9%を占めた。海王星、天王星、カリスト、ガニメデが12-15%程度であった。データ点数は年を経るごとにほぼ単調増加し、2012年には300/年程度であったものが、2016年には800/年を超えている。データ容量も莫大であり、タイタンのみについても、2015・2016年に観測されたデータのみで60TBを超えている。また、データのイメージングを行うと、主要な輝線は較正観測のエラーとなるため観測スペクトルから抹消(マスク)されていた。このマスクの除去も課題である。本研究では、この大容量データ群を現実的な時間で処理するためのソフトウェア基盤の開発と、その運用に必要なハードウェアの構築を行った。

3.2 輻射輸送コードの開発

アルマが多く観測している海王星について、アルマの観測可能な波長域の連続波がどの高度に感度を持つかを推測する数値計算コードを開発した。連続波は衝突励起吸収(CIA)によってのみ生成されるとしている。分光データはHITRANを用い、他の分子輝線が存在しない波長域を用いた。

3.3 科学研究

ミリ波・中間赤外線による過去の海王星大気の連続波観測は、南極に局在する高温領域を検出しており、その構造・起源の解明は海王星の全球循環に新たな知見をもたらすことになる。研究代表者は、3.1で構築し

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

たデータセットから、0.35x0.23秒という高い空間分解能の観測データの抽出に成功した。本データの観測周波数は600GHz帯であり、世界で初めての本波長域による海王星温度マップの観測となる。本データと先行研究との比較により、南極高温領域の生成要因の制約を目指した。

また、海王星、天王星、タイタン、火星、ガニメデ、カリストについて、観測された分光スペクトルにおける分子名の帰属を行い、新分子・同位体の検出、ダイナミクスの導出、分子時空間分布の変動の観測的制約を目指した。

3.4 コミュニティの創成

アルマのみならず他波長での観測経験のある研究者を対象としたワークショップを実施、新たなプロポーザルの投稿や隣接研究分野との交流のための場の創出を目指した。

4. 研究成果

4.1 惑星科学ビッグデータの構築

公開済みのデータのうち200 GHz帯以上での全データのダウンロード、較正、イメージングを実施した。一連の処理のために必要な高速ストレージと計算機を準備し、特にストレージについては24台のハードディスクへの並列アクセスと高速なバス(Serial Attached SCSI)を用いることで、2.0 GB/sのアクセス速度を実現し、一般的なネットワークストレージと比べて処理時間を19-36%に短縮した。また、較正・イメージング処理を並列化する処理スクリプトを実装し、10プロセスの同時実行により実行効率を7.4倍に向上させることに成功した。高速ストレージと並列処理パイプラインの開発により、265日と推算された土星衛星タイタンのデータ処理時間を35日と実用的な時間まで短縮することに成功した。本パイプラインを用い、海王星、タイタン、ガニメデ、カリストを対象として較正観測データの較正とイメージングを実施し、科学研究を実施する基盤とした。本開発研究は[1]として出版された。

4.2 輻射輸送コードの開発と海王星全球循環への制約

3.2で開発した連続波輻射輸送コードを用いて、観測された646GHzの連続波の感度が最大になる高度領域を導出し、の高空間分解能観測データを抽出し、0.6-1.0 barであることを見出した。本研究で得られた $\pm 2.1\text{K}$ の標準偏差より卓越する高温領域は検出されなかった。先行研究はミリ波と中間赤外線によって行われており、どちらも気温だけでなく分子輝線を観測している可能性がある。本研究で用いた波長域には強力な分子輝線は存在せず、純粋に気温のみをプローブしていることが重要である。本研究により、海王星の南極域のホットスポットは、分子群の局在もしくは極端な欠乏を示していることが明らかになった。本開発研究・研究成果は[2][3]として出版された。

4.3 その他の研究成果

また、海王星大気内シアン化水素分子の空間分布、同分子を用いた成層圏風速についても解析を行い、国際学会で発表を行った。前者については論文化を目指し、輻射輸送コードの開発と物理量の導出を行っている。タイタンについては、微量分子における $^{14}\text{N}/^{15}\text{N}$ [4]や $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ 同位体比の導出に成功している。また、微量分子の時空間変動も検出されており、未発表の研究成果は今後速やかに論文化していく。特にタイタンについては、カッシーニ探査機のレガシーを持つ欧米の研究機関において盛んに研究が行われているが、これら機関の研究者らからも認知されており、2019年度より開始した若手研究にも接続したことで、今後さらに重点的に展開していく。

4.4 コミュニティの創成

共同研究者の佐川准教授(京都産業大学)を代表者とし、国立天文台との共催によるアルマワークショップを複数回開催した。ここではアルマを用いたこれまでの観測研究のサマリーや、観測アイデアの募集を通じ、新たなプロポーザルの投稿を目指した。参加者は可視・赤外の観測者から理論研究者まで多岐にわたり、多様なプロポーザルのアイデア共有やブラッシュアップを実施、実際にプロポーザルの投稿へとつながった。また、2017年のアルマワークショップにおいては、サブミリ波太陽系天文学の第一人者であるパリ天文台のラファエル・モレノ氏を招聘、招待講演を行っていただいた。ワークショップは隣接領域である

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

惑星形成コミュニティと共催し、多くの参加者を集めるとともに、惑星形成研究との連携の必要性という認識を両コミュニティに共通させることができた。このように、アルマを媒介とし、サブミリ波での太陽系天文学という分野の構築に向けて、科学成果だけでなく、人的な側面からも着実に歩を進めたことが本研究の成果である。

引用文献

[1]Takahiro Iino, Mitaro Namiki and Takayoshi Yamada, A feasibility study of exhaustive analysis of ALMA calibration data for the creation of big-data driven solar system astronomy, the Journal of Space Science Informatics Japan, 7, pp. 19 - 32, 2018

[2]Takahiro Iino, Takayoshi Yamada and Yuki Tanaka, A SIMULATION STUDY ON TERAHERTZ CONTINUUM-WAVE OBSERVATIONS OF NEPTUNE'S ATMOSPHERE FOCUSING ON FUTURE ALMA OBSERVATION, the Journal of Remote Sensing Society of Japan, 2018(3), pp. 252 - 257, 2018

[3]Takahiro Iino and Takayoshi Yamada, Spatially Resolved Sub-millimeter Continuum Imaging of Neptune with ALMA, the Astronomical Journal 155(2), pp. 92 - 96, 2018

[4]Takahiro Iino, Hideo Sagawa and Takashi Tsukagoshi, $^{14}\text{N}/^{15}\text{N}$ Isotopic Ratio in CH_3CN of Titan's Atmosphere Measured with ALMA, The Astrophysical Journal, 890(2), 95. 2020

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Iino Takahiro, Yamada Takayoshi	4. 巻 155
2. 論文標題 Spatially Resolved Sub-millimeter Continuum Imaging of Neptune with ALMA	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The Astronomical Journal	6. 最初と最後の頁 92～96
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.3847/1538-3881/aaa420	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Takahiro Iino, Mitaro Namiki and Takayoshi Yamada	4. 巻 7
2. 論文標題 A feasibility study of exhaustive analysis of ALMA calibration data for the creation of big-data driven solar system astronomy	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 AXA Research and Development Report: Journal of Space Science Informatics Japan	6. 最初と最後の頁 19～32
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） http://doi.org/10.20637/JAXA-RR-17-009/0003	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Takahiro Iino, Takayoshi Yamada and Yuki Tanaka	4. 巻 38(3)
2. 論文標題 A SIMULATION STUDY ON TERAHERTZ CONTINUUM-WAVE OBSERVATIONS OF NEPTUNE'S ATMOSPHERE FOCUSING ON FUTURE ALMA OBSERVATION	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 the Journal of Remote Sensing Society of Japan	6. 最初と最後の頁 252-257
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Iino Takahiro, Sagawa Hideo, Tsukagoshi Takashi	4. 巻 890
2. 論文標題 14N/15N Isotopic Ratio in CH3CN of Titan's Atmosphere Measured with ALMA	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 95～100
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3847/1538-4357/ab66b0	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

[学会発表] 計12件(うち招待講演 0件/うち国際学会 3件)

1. 発表者名 Determination of $^{14}\text{N}/^{15}\text{N}$ of CH_3CN in Titan's atmosphere with ALMA
2. 発表標題 Takahiro Iino, Hideo Sagawa and Takashi Tsukagoshi
3. 学会等名 EPSC2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 飯野孝浩, 佐川英夫, 塚越崇
2. 発表標題 ALMAを用いたタイタン大気アセトニトリルにおける窒素同位体比の初計測と, 銀河宇宙線由来大気化学過程への制約
3. 学会等名 惑星科学会秋季講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 飯野孝浩, 佐川英夫, 塚越崇
2. 発表標題 「アルマ太陽系天文学ビッグデータ」を用いた, タイタン大気微量分子時空間変動の観測的解明
3. 学会等名 地球惑星科学連合大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takahiro Iino, Hideo Sagawa and Takashi Tsukagoshi,
2. 発表標題 Spatial distribution of gaseous hydrogen cyanide on Neptune's stratosphere revealed by ALMA
3. 学会等名 European Planetary Science Congress 2018, Berlin (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 飯野孝浩
2. 発表標題 ALMAを用いた時間・空間分解能の太陽系内惑星大気分光観測と、太陽系内同位体勾配観測の可能性
3. 学会等名 ALMAワークショップ
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 飯野孝浩
2. 発表標題 ALMAアーカイブビッグデータを用いた、タイタン・海王星大気分光・連続波観測
3. 学会等名 宇宙電波懇談会シンポジウム2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 飯野孝浩
2. 発表標題 ALMA による Titan 大気組成時空間変動と同位体比の観測的解明
3. 学会等名 2018年度惑星科学会秋季講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 飯野孝浩, 佐川英夫, 塚越崇
2. 発表標題 アルマを用いた海王星上部対流圏における連続波放射の観測と、全球大気循環への制約
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合大会2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 飯野孝浩, 佐川英夫, 塚越崇
2. 発表標題 On the spatial distribution of Neptune's stratospheric HCN obtained with ALMA
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合大会2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Takahiro Iino, Takayoshi Yamada and Yuki Tanaka
2. 発表標題 Spatial distribution of Neptune's stratospheric temperature obtained with ALMA cycle-0 continuum observation
3. 学会等名 EPSC 2018 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 飯野孝浩, 佐川英夫, 塚越崇
2. 発表標題 ALMA分光観測による, タイタンにおける大気組成時空間変動の観測的取得と氷衛星大気化学の制約
3. 学会等名 2018年日本天文学会春季年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 飯野孝浩, 山田崇貴, 田中佑希
2. 発表標題 ALMAを用いた海王星成層圏大気構造空間分布の観測的取得
3. 学会等名 2017年日本天文学会秋季年会
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

Takahiro IINO website
<https://sites.google.com/site/iinotakahiro1980/>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----