

令和 4 年 5 月 25 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2021

課題番号：19K14782

研究課題名（和文）アルマ望遠鏡テラヘルツ分光ビッグデータで解明する、衛星タイタンの大気化学

研究課題名（英文）On the atmospheric chemical processes of Titan revealed by the terahertz spectroscopic big-data produced with ALMA

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）：世界最大のテラヘルツリモートセンサであるアルマ干渉計を用い、探査機に比肩する大気リモートセンシング技術基盤の開発・検証と、これを用いた大気化学過程研究を行った。研究成果として特に重要であるのは、土星衛星タイタンにおけるアセトニトリル分子中の窒素同位体の導出である。得られた値は窒素分子と調和的であり、アセトニトリルが銀河宇宙線解離を経て窒素分子から直接生成されている可能性が示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年、地上大型望遠鏡の技術革新により、太陽系外惑星大気の組成までもが観測的に明らかにされつつある。翻って、太陽系内惑星大気の観測的研究は、ボイジャーやカッシーニといった探査機によりブレイクスルーがもたらされてきたが、探査機の利活用の機会は極端に限定されている。本研究では、特に太陽系外天体の観測において用いられてきた地上大型電波望遠鏡を太陽系内惑星大気の観測においても利活用することで、探査機に比肩する大気化学・大気物理観測の基盤技術開発と、これを用いた惑星大気環境の解明という成果を上げてきた。今後は本研究を基盤として、タイタン・海王星の大気環境をさらに詳らかにしていく。

研究成果の概要（英文）：Using the ALMA interferometer, the world's largest terahertz remote sensor, we have developed and verified a technology platform for atmospheric remote sensing comparable to spacecraft, and studied atmospheric chemical processes using this technology. The most important result of this research is the derivation of nitrogen isotopic ratio in the acetonitrile molecule on Saturn's moon Titan. The obtained values are comparable to those of nitrogen molecule, indicating that acetonitrile may be formed directly from nitrogen molecules via galactic cosmic ray induced dissociation.

研究分野：惑星大気化学・物理

キーワード：電波天文学 大気化学 大気物理 リモートセンシング テラヘルツ ビッグデータ 逆問題

1. 研究開始当初の背景

申請者は電波望遠鏡を用いた惑星大気のテラヘルツ分光の可能性に着目し、国内外の電波望遠鏡群を用いた観測的研究に一貫して取り組んできた。

テラヘルツ帯には、1. 多様な分子の輝線の存在、2. 高い周波数分解能により大気分子の鉛直分布を導出可能、といった強みが存在するため、海外においては惑星大気観測においても多くの成果を挙げてきた。一方で、国内においては電波天文学の観測対象は太陽系外天体に集中しており、惑星大気の観測研究はほとんど行われて来なかった。申請者は国内外の電波望遠鏡群を用いた観測研究の実績を重ね、木星・海王星成層圏の硫黄化合物大気化学の制約や冥王星CO分子時間変動などの観測成果を挙げてきた。

太陽系電波天文学コミュニティの構築にも注力し、アルマを運用する国立天文台チリ観測所の支援を受けた「アルマ太陽系科学ワークショップ」を2016年より主宰している。広く惑星科学分野から参加者を集めて観測構想を練り、2018年には複数の観測提案の投稿と採択につなげた。

2. 研究の目的

1. で記した状況を受けて、本科研費プロジェクトでは、アルマを用いた太陽系内惑星大気の観測研究に取り組んだ。ボイジャー1号以来、土星最大の衛星タイタンの大気には、1) 有機分子をも含む複雑な大気微量分子組成と、その短時間での時空間変動、そして2) 大気内での大規模な $^{14}\text{N}/^{15}\text{N}$ 同位体分別、が検出されてきた。この他に例を見ない特異な環境を実現している未知の大気化学過程の解明には、ラジカル反応・イオン-分子反応に関連する、微量分子ガス・同位体分子群の時空間変動の稠密かつ長期的なリモートセンシングによる、反応経路の理解が本質的である。

本研究の科学目的は、タイタン大気の

1. 微量分子ガス群および、多様な窒素化合物分子における $^{14}\text{N}/^{15}\text{N}$ 同位体比の時空間変動ビッグデータアーカイブの構築
2. 1. を用いた、微量分子及び同位体比の変動に関連した大気化学過程の解明 がある。

本研究ゴールの達成により、

1. 地上大型電波望遠鏡による、テラヘルツ惑星大気リモートセンシング技術の確立
2. 地上観測の利点を活かし、探査との相補性のある「太陽系電波天文学」の創成という学術的波及効果を惑星科学・電波天文学コミュニティにもたらすことを目指した。

3. 研究の方法

本研究では、地上最大の電波望遠鏡であるアルマの較正観測データから研究代表者が生成した、6年間の2200点に及ぶタイタン大気のテラヘルツイメージング分光観測データに対し、「大気リトリーバル計算」により分子ガスの3次元分布の最尤解を解くことにより、1) 大気中微量分子ガス群および、2) 複数の窒素化合物中の $^{14}\text{N}/^{15}\text{N}$ 同位体比、の時空間変動の導出を行う。これまでにない分子数・時間分解能の観測データセットを用いて、各微量分子ガス種および同位体種の変動の相互相関を取り、また季節変化に伴う紫外線入射の長期変動及び、突発的な高エネルギー粒子の流入に伴う短期変動という2つの観点から解析を行うことで、タイタンの大気化学過程の解明を目指した。

4. 研究成果

本研究には、微量分子の時空間変動や同位体比からの大気化学過程の理解という理学的チャレンジ、得られた分子スペクトル形状に畳み込まれた分子の奥行き報告の分布という逆問題を解く（大気リトリーバル）という工学的チャレンジの2種の課題がある。

工学的チャレンジである大気リトリーバルコード開発では、オープンソースを用いた大気リトリーバル計算コードの開発に取り組んだ。PythonのOpen MPライクな並列ライブラリを用いた高速化と、新規に購入した物理96コアという現行最大級のコア数の計算機を併せ用いることで、1-2時間ほどという現実的な計

算時間で、窒素化合物（シアノアセチレンなど）の鉛直分布の最尤解を子午線上の7点において導出することに成功した。また、感度を持つ高度や誤差の導出にも併せて成功しており、今後の大量のデータ処理に道筋をつけた。

科学的成果として、アセトニトリル中の $^{14}\text{N}/^{15}\text{N}$ 同位体比の世界で初めての精密な導出に成功したことが随一の成果である[1]。タイタン大気の主成分は窒素であり、その娘分子としてシアン化水素やシアノアセチレンが生成されるが、窒素分子と娘分子群の同位体比は異なっていることが知られており、窒素分子の選択的光解離などによる分別が指摘されていた。我々の導出した同位体比は窒素分子に近く、アセトニトリルを構成する窒素原子は窒素分子の光解離だけでなく銀河宇宙線による解離で生成されたことを示している。本研究成果はプレスリリースし、国内外のメディアに多く取り上げられた。

また、海王星を対象としたこれまでにない高精細な分光観測により、海王星成層圏におけるシアン化水素分子の空間分布の導出に成功した[2]。シアン化水素分子は成層圏に偏在しており、何らかの化学過程によって成層圏で生成されるか、外部から持ち込まれていると考えられる。得られたシアン化水素量の空間分布は、同分子が赤道において多く、南半球の中緯度において最も少ないという帯状分布を示した。これは、海王星における対流圏・成層圏大気大循環と整合的であった。すなわち、窒素分子を含む大気の中緯度において対流圏から成層圏へと上方輸送され、成層圏で光化学反応によってシアン化水素を生成しながら水平輸送されるというものである。これにより、成層圏シアン化水素の成因の少なくとも一部は内部由来であること、対流圏成層圏結合大循環の存在が間接的に示唆されることとなった。本研究の成果は、毎日新聞、ニュートン等に幅広く掲載された。

本研究の遂行に際して、アルマを用いたタイタンの観測的研究において先導的な役割を果たしているNASAゴダード宇宙飛行センターの研究者による招待講演を、代表者がセッションコンビーナを務めた日本地球惑星科学連合大会のアルマ関連セッションで行った。新型コロナウイルス感染症の蔓延により、残念ながら招聘しての講演はかなわなかったが、世界一線のチャレンジを行っている研究者による招待講演は、太陽系内天体観測分野のアクティビティを他の惑星科学分野に紹介するまたとない機会となった。

なお、本研究は研究期間終了を待たずに、科研費基盤（B）「アルマの高精度観測による、タイタン・海王星の特異な大気化学・物理過程の網羅的解明」へと発展している。同課題では、地球物理から原始惑星系円盤、星間化学に至る隣接領域の研究者を多く集めた共同研究体制を構築し、新たな学術分野の構築を目指していく。

引用文献

[1]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

[2]Takahiro Iino, Hideo Sagawa, Takashi Tsukagoshi and Satonori Nozawa, A belt-like distribution of gaseous hydrogen cyanide on Neptune's equatorial stratosphere detected by ALMA, *The Astrophysical Journal Letters*, 903, L1, 2020

5. 主な発表論文等

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

1. 著者名 Iino Takahiro, Sagawa Hideo, Tsukagoshi Takashi, Nozawa Satonori	4. 巻 903
2. 論文標題 A Belt-like Distribution of Gaseous Hydrogen Cyanide on Neptune's Equatorial Stratosphere Detected by ALMA	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal Letters	6. 最初と最後の頁 L1~L1
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3847/2041-8213/abbb9a	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 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 95~95
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9件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 飯野孝浩, 佐川英夫, 塚越崇
2. 発表標題 アルマを用いたタイタン大気中アセトニトリルにおける14N/15N同位体比が解き明かす, 銀河宇宙線の大気化学過程への影響
3. 学会等名 地球惑星科学連合大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 飯野孝浩, 佐川英夫, 塚越崇, 野澤悟徳
2. 発表標題 ALMAで検出された海王星成層圏HCNの帯状分布構造とその化学・物理
3. 学会等名 日本天文学会春季年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 飯野孝浩, 佐川英夫, 塚越崇
2. 発表標題 ALMA observations of Titan's atmospheric composition and isotopic ratios
3. 学会等名 惑星圏研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 飯野孝浩, 佐川英夫, 塚越崇, 野澤悟徳
2. 発表標題 A belt-like distribution of gaseous hydrogen cyanide on Neptune's equatorial stratosphere detected by ALMA
3. 学会等名 惑星圏研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 飯野孝浩
2. 発表標題 A belt-like distribution of gaseous hydrogen cyanide on Neptune's equatorial stratosphere detected by ALMA
3. 学会等名 Nobeyama Science Workshop 2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Takahiro Iino, Hideo Sagawa and Takashi Tsukagoshi
2. 発表標題 Determination of $^{14}\text{N}/^{15}\text{N}$ of CH_3CN in Titan's atmosphere with ALMA
3. 学会等名 European Planetary Science Congress 2019 (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 飯野孝浩, 佐川英夫, 塚越崇
2. 発表標題 アルマを用いたタイタン大気中アセトニトリルにおける $^{14}\text{N}/^{15}\text{N}$ 同位体比が解き明かす, 銀河宇宙線の大気化学過程への影響
3. 学会等名 地球惑星科学連合大会 (国際学会)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

Iino Takahiro website https://www.iinotakahiro.com/ 海王星の赤道に横たわる猛毒ガス「シアン化水素」の帯を世界で初めて発見 https://www.u-tokyo.ac.jp/focus/ja/press/z0310_00023.html 地上大型電波望遠鏡により、土星の衛星タイタンの大気成分の詳細な観測に成功 https://www.u-tokyo.ac.jp/focus/ja/press/z0310_00018.html
--

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
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
米国	NASAゴダード宇宙飛行センター			