

惑星大気リモートセンシングのための、テラヘルツ帯分子スペクトル解析アルゴリズムの開発と検証

代表研究者	飯野 孝 浩	東京農工大学科学博物館
共同研究者	佐川 英 夫	京都産業大学理学部
共同研究者	並木 美太郎	東京農工大学工学部情報工学科

1 テラヘルツ帯惑星大気リモートセンシングの重要性とアルマの可能性、較正観測データ処理パイ

プラインの構築

ミリ波・サブミリ波からテラヘルツに至る波長域には、一酸化炭素 CO やシアン化水素 HCN、オゾンといった、地球を含む惑星大気に含まれる微量分子ガスの放射スペクトルが多数存在しており、大気リモートセンシングにおいて活用が進められている。世界的には米航空宇宙局の AURA 衛星に搭載されたマイクロ波リムサウンディング (MLS) 測器は、オゾンとその破壊に関わる分子群、また大気汚染・光化学スモッグ生成に関わる分子群等の同時観測を実用化し、大気光化学の観測的理解に不可欠な情報を提供している。

大気化学は惑星環境を決定する重要な要因であり、その理解においては、地球以外の惑星大気を含めた広範な観測的理解が重要である。その対象として、地球以上に複雑な大気化学を持つ土星衛星タイタンやガス惑星 (木星, 土星, 天王星, 海王星) は非常に重要であり、ボイジャー1 号やカッシーニ等の探査機によるリモートセンシングが行われ、大気組成やダイナミクス観測、土星衛星タイタンの多分子同時モニタリングといった成果が挙げられており、地球と異なる大気の組成とその成因について広範な理解が得られてきている。いっぽうでその観測機会は限定されており、また観測箇所がフライバイの近傍に限られるという問題があった。

そこで、地球大気の吸収の影響を受けにくいミリ波・サブミリ波電波を用いた地上からのリモートセンシングが、探査機と並ぶ成果を挙げると期待される。チリのアタカマ高地に建設されたアルマ (アタカマ大型ミリ波サブミリ波干渉計) は、直径 12 m と 7 m のそれぞれ 54 基及び 12 基のパラボラアンテナから成り、開口合成法によりミリ波・サブミリ波領域において史上最高の感度と空間分解能を実現するマイクロ波測器であり、その利活用は惑星大気のリモートセンシングにおいても強く期待される。我々はアルマが 2012 年から 1 日に複数回実施している較正観測データの科学観測への転用に着目した。太陽系内主要天体の較正観測データ点数を調べると、各天体の 1 年あたりの観測数は土星衛星タイタンで 200 点を越えており、莫大なデータがすでにストアされていることが示されている。この較正観測データ群の解析においてはハードウェア・ソフトウェアにおいてそれぞれ重要な整備・開発項目が存在する。それは、巨大なデータ群を保持し、かつ高速アクセスを可能とするストレージの整備と、網羅的な解析を可能とするソフトウェアである。アルマの全観測データは、1 年間の専有期間経過後、専用のサーバにアップロードされる。観測データの最終出力は、天球面上の x, y 点にスペクトルの情報を付与した (イメージング処理) 3 次元情報であり、公募観測の対象となる科学観測データは既にこの形式でアップロードされている。いっぽう、較正観測データの場合は前処理とイメージングをユーザが行う必要がある。較正観測データの切り出し、位相・強度較正、除去された輝線成分の復元、ドップラーシフト補正といった較正作業、そしてイメージング処理までを施すパイプラインを構築した。

2 タイタン・海王星大気における分子分布時空間変動の検出と輻射輸送コードの開発及び検証、

科学成果

パイロット解析の対象として、タイタン大気において輝線強度が高いシアノポリイン分子(HC_3N)を選択し、イメージング品質の評価と、分子分布の季節変化の導出を試みた。シアノポリインは 9.09 GHz ごとに回転量子数 J の $\Delta J = \pm 1$ の遷移に対応する回転遷移スペクトルを持ち、本研究の周波数帯では $J=24-23$ から $41-40$ の間に 18 の遷移が存在する。さらに各回転量子数について 2 つの強い振動遷移が検出されており、同分子輝線を高い空間分解能でイメージングできたデータ点数は 187 点に達した。2012 年と 2016 年の同分子輝線強度イメージからは、輝線ピークが北極と南極に存在していること、そして強度の高いピークが北極から南極に移動していることが示されている。タイタンの南北半球それぞれの積分輝線強度について、強度の高い半球の強度と、背景の宇宙空間の標準偏差との比を取った S/N は $2.2-103$ の範囲で得られ(平均と標準偏差はそれぞれ 18.7 と 17.5)、両半球への偏在を十分な S/N で検出できた。

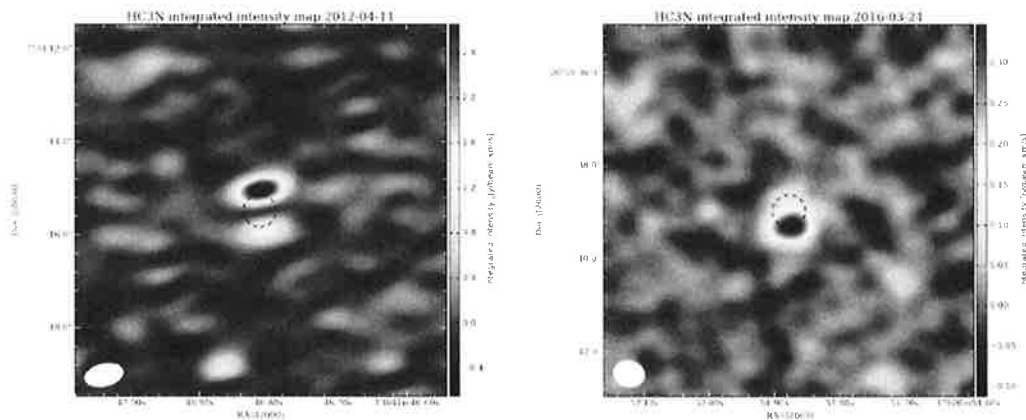


図 1 2012 年 4 月 11 日(左)と 2016 年 3 月 24 日(右)のシアノポリイン分子輝線強度図。点線はタイタンを示す。

本研究の本丸である、テラヘルツ帯分子輝線のシミュレーションコードの開発とその実観測データへの適用について記す。シミュレーションを開発した天体は海王星であり、取得済みの高 S/N 観測データとの比較が可能となる。本研究の成果はすでにアメリカ天文学会の論文誌に投稿済みである。観測時の海王星の視直径は 2.3 秒、空間分解能は約 0.4 秒であり、十分に海王星のディスクを空間分解できている。観測に用いた分子はシアン化水素であり、 354.5 GHz に位置する $J=4-3$ の回転遷移スペクトルを見出すことができる。

分子輝線スペクトル形状から分子の 1. 混合比 2. 存在高度、を導出するため、観測した遷移に対応する輝線スペクトルを模擬するコードを開発した。 p_0 および VMR の最尤値を実現したシミュレーションスペクトルを観測スペクトルにオーバープロットした。残差を点線で示しているが、観測スペクトルの標準偏差の範囲にほぼ収まっており、観測スペクトルをシミュレーションスペクトルがよく説明していることが分かる。

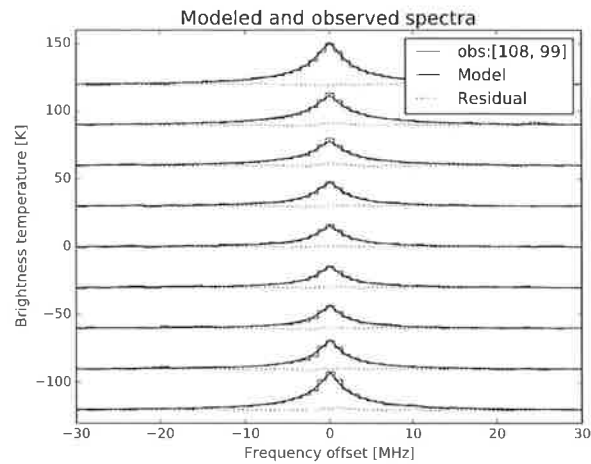


図 2 海王星の子午線において観測されたシアン化水素分子の輝線スペクトル(赤)と, p0 および VMR の最尤値を実現したシミュレーションスペクトル(赤). シミュレーションは観測スペクトルをよく説明していることがわかる.

科学的成果として, 海王星のシアン化水素分子は全球において一様に分布しているのではなく, 赤道上空で帯状に最大値を取ることが分かった. また, 輝線強度は南緯 60 度付近で最低値を取っている. この組み合わせは過去に示唆された海王星の成層圏・対流圏結合循環と良い一致を示している. すなわち, シアン化水素分子の最大値と最低値は鉛直循環の下降流および上昇流の位置と一致しており, シアン化水素分子の生成と消滅は循環によって引き起こされていることを強く示唆する結果となった. これは地球のオゾン層においても見られる現象であり, 紫外線もしくは銀河宇宙線の降り込む成層圏へと輸送された窒素分子が解離し, H_2CN 分子を経てシアン化水素を生成するという大気化学反応経路をサポートする結果である. 大規模なテラヘルツ干渉計を用いて得られた高精細な分光観測データにより, 惑星大気化学に新たな知見を与えるというひとつの事例を示すことができた.

【参考文献】

- Iino, T. & Yamada, T. Spatially Resolved Sub-millimeter Continuum Imaging of Neptune with ALMA. *Astron. J.* 155, 92 (2018).
- Hogbom, J. . (1974). Aperture synthesis with a non-regular distribution of interferometer baselines. *Astronomy and Astrophysics Supplement*, 15, 417.
- Coustenis, a., Jennings, D. E., Nixon, C. a., Achterberg, R. K., Lavvas, P., Vinatier, S., ... Romani, P. N. (2010). Titan trace gaseous composition from CIRS at the end of the Cassini-Huygens prime mission. *Icarus*, 207(1), 461-476.
- Iino, T., Namiki, M. & Yamada, T. ビッグデータ太陽系天文学の創成のための ALMA キャリブレーション観測データの悉皆的解析システムの検討と構築. *宇宙科学情報解析論文誌* 7, 19-32 (2018).

〈発表資料〉

題 名	掲載誌・学会名等	発表年月
Spatially Resolved Sub-millimeter Continuum Imaging of Neptune with ALMA	The Astronomical Journal	2018 年
ビッグデータ太陽系天文学の創成のための ALMA キャリブレーション観測 データの悉皆的解析システムの検討と構築	宇宙科学情報解析論文誌	2018 年
A SIMULATION STUDY ON TERAHERTZ CONTINUUM-WAVE OBSERVATIONS OF NEPTUNE'S ATMOSPHERE FOCUSING ON FUTURE ALMA	リモートセンシング学会誌	2018 年

OBSERVATION		
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	日本天文学会春季年会	2018 年
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	日本天文学会秋季年会	2017 年
Sub-millimeter observation of solar system planetary atmosphere	NR045m/ASTE Single Dish Science Workshop 2017	2017 年
Spatial distribution of Neptune's stratospheric temperature obtained with ALMA cycle-0 continuum observation	European Planetary Science Congress 2017	2017 年