

令和 6 年 6 月 17 日現在

機関番号：82636

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2023

課題番号：21K13985

研究課題名（和文）惑星大気テラヘルツ波放射過程理解のためのモデル構築及び実験室圧力幅測定

研究課題名（英文）Development of a radiative transfer model and laboratory pressure-broadening measurements for understanding terahertz radiation processes in planetary atmospheres.

研究代表者

山田 崇貴（Yamada, Takayoshi）

国立研究開発法人情報通信研究機構・テラヘルツ研究センター・主任研究員

研究者番号：00852261

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,500,000円

研究成果の概要（和文）：テラヘルツ波を用いた惑星大気観測は、昼夜でのパッシブ観測、高空間・周波数分解能での測定が可能である。得られた観測スペクトルの解析には放射伝達モデルが必要であり、その精度は分光パラメータの精度にも依存している。本研究では、テラヘルツ波送受信機を用いた220-500GHz帯におけるガス分光システムの構築を完了し、高精度な周波数分解能と簡易なバンド幅設定を可能にした。また、火星大気に対しての電磁波伝搬モデルと逆解析アルゴリズムの開発を完了し、観測スペクトルから、実験室で取得された吸収強度及び圧力幅パラメータ等を用いて大気鉛直プロファイルの導出及びその鉛直分解能や誤差評価を可能にした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

今後テラヘルツ波帯での分光観測機会が増加する中、高精度な観測に加え、高精度な圧力幅定数などの分光パラメータも重要となる。本研究では220 - 500GHzでの広帯域なガス分光測定を開発したことにより、測定データが不十分だった吸収線パラメータの取得が可能になった。

研究成果の概要（英文）：Terahertz-wave remote-sensing for planetary atmospheres can be carried out with passive day/night observations and high spatial and frequency resolution. Analysis of its observed spectra requires a radiative transfer model, the accuracy of which also depends on the accuracy of the spectral parameters. In this study, the construction of a gas spectroscopy system in the 220-500 GHz band using a terahertz wave transmitter/receiver has been completed, enabling high-precision frequency resolution and simple bandwidth setting. The development of an electromagnetic wave propagation model and inverse analysis algorithm for the Martian atmosphere has also been completed, enabling the derivation of atmospheric vertical profiles from observed spectra and their vertical resolution and error evaluation using absorption intensity and pressure width parameters obtained in the laboratory.

研究分野：惑星科学

キーワード：テラヘルツ波 電磁波伝搬

## 様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

惑星大気科学において、テラヘルツ波帯のダストに対する高い透過性および昼夜観測により、これまでの太陽光などを光源とした紫外外および赤外線帯域と相補的な観測が可能であり、2022年にはテラヘルツ探査着陸機 (TEREX: Terahertz Explore) による  $O_2$  (487.249 GHz)・ $H_2O$  (474.689 GHz)  $O_3$  (487.394 GHz)・ $H_2O_2$  (475.203 GHz) の観測が検討されている。しかし、分光パラメータの係数の誤差が、スペクトルの形状から鉛直分布を導出する際の最大の系統誤差要因となっている。水分子の高度分解には5%以内の圧力幅パラメータの精度が必要となっている。

圧力幅の理論予測は分子間の相互作用が複雑なため難しく、正確なスペクトルシミュレーションのためには実験による圧力幅の測定が必須である。今後テラヘルツ波の高精度な火星・木星大気観測データを有意に解析するためには、テラヘルツ波帯を網羅した  $CO_2$  ガス中における圧力幅パラメータの実測データベースが必須となっている。

### 2. 研究の目的

圧力幅実測データベースの拡充と、火星及び惑星大気における高精度なテラヘルツ波放射伝達モデルの確立による、テラヘルツ波観測の高感度解析の実現を目指す。火星大気中メタンの生成・消失過程の理解および地表水環境の理解に向けた、1)  $O_2$ ・ $H_2O$ ・ $O_3$ ・ $H_2O_2$  の  $CO_2$  ガス中の圧力幅係数の導出、2) 放射伝達モデルへの導入による、地表から高度 100 km 以上までの正確な放射伝達計算モデルの確立、3) 高精度な火星観測データ解析の実現とより詳細な大気化学過程の解明、である。

本研究目的の達成により1) 実験室基礎パラメータ測定・放射伝達モデル・観測データ解析までを一歩化したテラヘルツ惑星大気リモートセンシング観測の検討・解析技術の確立、2) 高精度なテラヘルツ波観測に不可欠な実験パラメータの拡充、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。

### 3. 研究の方法

現在開発中の火星大気探査機 (TEREX) の受信機 (システム雑音温度: 3000K、観測周波数: 486.65 - 487.65 GHz 及び 474.65 - 484.65 GHz、周波数分解能 100 kHz) を用いて  $O_2$ ・ $H_2O$ ・ $O_3$ ・ $H_2O_2$  の各  $CO_2$  ガス圧中のスペクトル線幅を 1 MHz の周波数分解能で 0.1 - 1 K 程度の雑音温度 (1) で測定し、圧力幅係数を誤差 3% 以内で導出する。さらにベクトルネットワークアナライザ及びエクステンダを用いた測定システムの検証を行い、330 - 500 GHz までの測定システムを構築する。そのために、測定ガスの蒸気圧を制御し、安定した分圧を供給できるように恒温槽を用いたガス発生装置及びガスライン、温度・圧力計測可能な温度可変ガスセル、テラヘルツ波を受信機まで効率的に誘導するテラヘルツ波光学系を開発する。

自身で開発した Non-LTE を考慮可能な放射伝達モデルを用いて、火星大気観測時の感度検討を行い、分光パラメータ由来の誤差伝搬計算を行う。

### 4. 研究成果

本研究では、テラヘルツ波送受信機を用いた 220-500GHz 帯におけるガス分光システムの構築を完了した (図 1)。アセトニトリルの多数の吸収線を用いた本システムの吸収率の線形性を評価した。線形回帰では  $R$  二乗値は 0.991 であった。線形性の評価では、低圧で行ったものの、スペクトル幅の影響を解析では考慮しきれていないため、システム特性と併せて高次評価することにより、より高い線形性の確認ができることが期待される。本システムは、上記周波数において、周波数分解能・バンド幅が任意に変更できるため、ガスサンプルの安定性・スペクトル幅に合わせた設定の最適化が可能である。本評価は周波数分解能 100kHz、IF bandwidth 300Hz で実施しており、火星大気の圧力幅によるスペクトル広がりを十分に分解可能である。

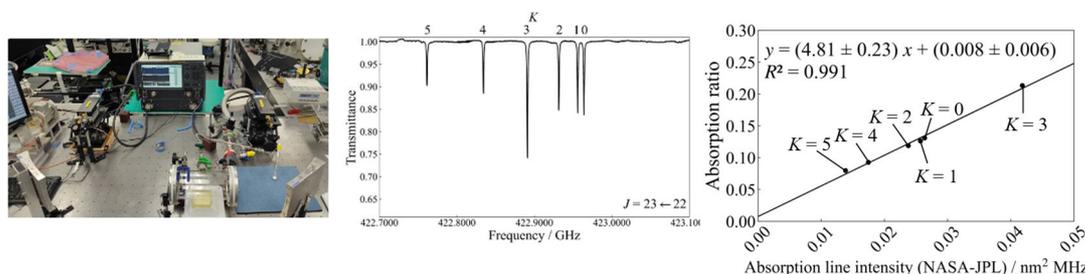


図 1. 分光測定システム開発結果。左) 構築概要、中央) アセトニトリル回転遷移の測定例、右) 線形性の評価結果

また、本研究機関を通じて実施した火星大気サブミリ波望遠鏡による観測及び、逆解析アルゴリズムの開発では、観測スペクトルから、実験室で取得された吸収強度及び圧力幅パラメータ等を用いて大気鉛直プロファイルの導出及びその鉛直分解能や誤差評価を可能にした(図2)。

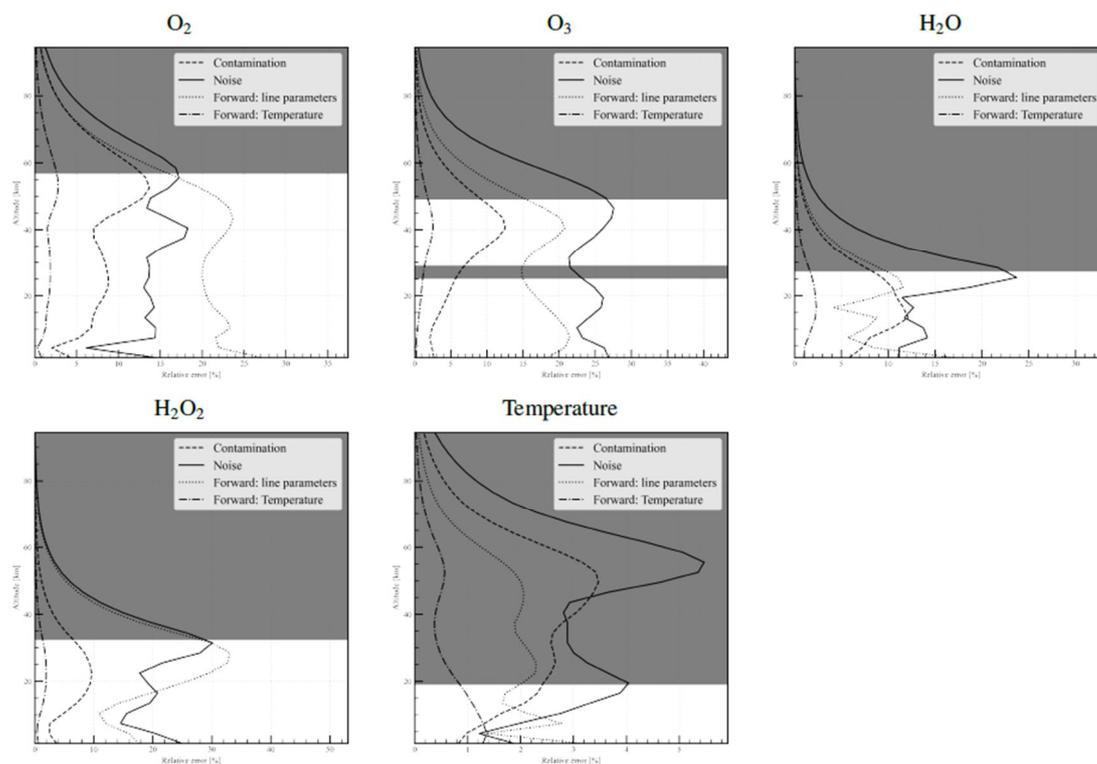


図2. 火星大気におけるテラヘルツ波観測時の鉛直プロファイル導出時の誤差要因の検討結果 [Yamada et al., 2022].

上記のとおりテラヘルツ波帯における火星大気分子観測のための、圧力幅測定装置システムの研究開発を完了した。

< 参考文献 >

Yamada et al., Observation Capability of a Ground-Based Terahertz Radiometer for Vertical Profiles of Oxygen and Water Abundances in Martian Atmosphere, *IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING*, VOL. 60, 2022.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Yamada Takayoshi, Baron Philippe, Neary Lori, Nishibori Toshiyuki, Larsson Richard, Kuroda Takeshi, Daerden Frank, Kasai Yasuko	4. 巻 60
2. 論文標題 Observation Capability of a Ground-Based Terahertz Radiometer for Vertical Profiles of Oxygen and Water Abundances in Martian Atmosphere	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing	6. 最初と最後の頁 1~11
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TGRS.2022.3152271	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 該当する

〔学会発表〕 計10件（うち招待講演 0件/うち国際学会 5件）

1. 発表者名 Takayoshi Yamada, Fudai Saito, Seidai Nara, Tomohiro Sato, Kaley A. Walker, Yukio Nakano, Yasuko Kasai
2. 発表標題 Contribution of chemical budget of D-CH4 on D-H2O in the equatorial lower stratosphere
3. 学会等名 JpGU Meeting, 2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Wang Suyun, Takayoshi Yamada, Yasuko Kasai
2. 発表標題 Terahertz Emission of the Lunar Surface: Forward Modeling
3. 学会等名 International Radiation Symposium 2022（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Takayoshi Yamada, Wang Suyun, Yasuko Kasai
2. 発表標題 Current Status of a Development of Atmospheric Terahertz Radiation Simulator (ATRASU) Including Non-LTE Effects for Future Terahertz Space Missions
3. 学会等名 International Radiation Symposium 2022（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Takayoshi Yamada, Philippe Baron, Lori Neary, Yasuko Kasai
2. 発表標題 A THEORETICAL ERROR ANALYSIS OF A GROUND-BASED TERAHERTZ RADIOMETER FOR VERTICAL PROFILES OF OXYGEN AND WATER ABUNDANCES IN MARTIAN ATMOSPHERE FOR FUTURE MICRO SPACECRAFT
3. 学会等名 44th COSPAR Scientific Assembly 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Wang Suyun, Takayoshi Yamada, Kun-Shan Chen, Yasuko Kasai
2. 発表標題 TERAHERTZ SCATTERING AND EMISSION FROM THE LUNAR SURFACE
3. 学会等名 International Geoscience and Remote Sensing Symposium 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Wang Suyun, Takayoshi Yamada, Yasuko Kasai
2. 発表標題 TSUKMI: Forward modeling for lunar terahertz exploration
3. 学会等名 Committee on Space Research 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山田崇貴、菊池初実、佐藤知紘、Kaley A. Walker、中野幸夫、吉田尚弘、笠井康子
2. 発表標題 中緯度帯成層圏下部のメタン酸化による D-H <sub>2</sub> O寄与の観測
3. 学会等名 第27回大気化学討論会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山田崇貴、金森英人、宮本英昭、小林真輝人、竹村 知洋、笠井康子
2. 発表標題 テラヘルツ波物性データベース構築のための実験室測定システムの開発
3. 学会等名 第 66 回宇宙科学技術連合講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山田崇貴
2. 発表標題 野辺山45m電波望遠鏡による火星大気のCOおよびその同位体の観測と解析
3. 学会等名 宇宙電波懇談会シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 山田崇貴(情報通信研究機構), 飯野孝浩(東京大学), 佐川英夫(京都産業大学), 笠井康子(情報通信研究機構)
2. 発表標題 サブミリ波帯大気放射モデルを利用したALMA 火星COデータの解析
3. 学会等名 日本天文学会2021年秋季年会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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