

平成 30 年 5 月 28 日現在

機関番号：14602

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05289

研究課題名(和文) 新たな電波掩蔽データ解析手法による火星大気の主成分混合比変動の解明

研究課題名(英文) Estimation of vertical profiles of CO<sub>2</sub> mixing ratio in the Martian polar nights by using radio occultation technique

研究代表者

野口 克行 (Noguchi, Katsuyuki)

奈良女子大学・自然科学系・助教

研究者番号：20397839

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：惑星探査機による従来の電波掩蔽観測では、対象惑星の大気組成比を仮定して屈折率から数密度を求め、更に静水圧平衡を用いて気温を得る。本研究では逆に、火星大気主成分の二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)が極夜で凝結することを利用して、気温の解がCO<sub>2</sub>凝結温度になるように火星大気組成比を求める手法を提案し、極夜域でのCO<sub>2</sub>混合比の鉛直分布を得た。また、極夜域でのCO<sub>2</sub>過飽和の成因についても詳細な解析を行い、大気波動(定常波及び非定常波)が重要な役割を果たしていることを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：The present study proposed a method to obtain vertical profiles of CO<sub>2</sub> mixing ratio, which is the main component of the Martian atmosphere, by using radio occultation technique. Normally radio occultation technique obtains temperature-pressure profiles of planetary atmospheres, assuming atmospheric compositions. Our method, however, estimates CO<sub>2</sub> mixing ratio in the polar nights, where CO<sub>2</sub> condensates, assuming that air temperature in observed regions is CO<sub>2</sub> saturation temperature. By using this method, we successfully obtained vertical profiles of CO<sub>2</sub> mixing ratio in the polar nights. We also showed that atmospheric waves including stationary waves and transient waves had an important role on the occurrence of CO<sub>2</sub> saturation in the polar nights.

研究分野：地球および惑星大気科学

キーワード：火星大気 二酸化炭素過飽和

### 1. 研究開始当初の背景

(1) 火星は、地球のすぐ外側を公転する惑星である。その大気は、主成分である二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)の他に、窒素(N<sub>2</sub>)やアルゴン(Ar)等を微量含んでいる。火星の極夜では、CO<sub>2</sub>が凍るほどの低温(約-130℃)となり、大気中のCO<sub>2</sub>の一部がドライアイスとなって地表面に凝結する。一方、CO<sub>2</sub>以外のN<sub>2</sub>やArはこの温度では凝結せずに一定の分圧を保つ。そのため、大気組成比はCO<sub>2</sub>の凝結に伴う減少に応じて季節変化する。なお、火星は楕円軌道を持ち、北半球の冬よりも南半球の冬の方が太陽から遠い。そのため、南半球の冬の方が低温で気圧減少も最大となり、南北非対称な季節変化を示す。

(2) 火星大気の詳細な組成は、1970年代の米国の火星着陸機 Viking や近年の探査ローバ Curiosity などによって計測されてきた。しかし、これらは地表面におけるごく限られた領域での観測である。また、火星探査機 Mars Odyssey 搭載のガンマ線分光計によって Ar の観測がなされているが、気柱平均量のため鉛直分布の情報が無い。そのため、火星におけるCO<sub>2</sub>凝結に伴う大気組成比の動的な空間分布、特に鉛直分布の詳細はよくわかっていなかった。

(3) 本研究では、惑星探査機を用いた電波掩蔽観測という手法に着目する。電波掩蔽観測は本来、惑星の大気組成比を仮定して気温を得るといった観測手法である。それに対して、本研究は逆に、極夜の地表面でCO<sub>2</sub>が凝結していることを利用してCO<sub>2</sub>混合比を求める。つまり、地表面付近では気温が凝結温度で維持されていると仮定し、CO<sub>2</sub>混合比の値を調節することでCO<sub>2</sub>の凝結温度が気温として導出されるようにCO<sub>2</sub>混合比を決定するのである。

### 2. 研究の目的

(1) 本研究では、火星探査機による電波掩蔽観測データを用いて、CO<sub>2</sub>の凝結温度が気温解として得られるようなCO<sub>2</sub>混合比を決定するという新たな手法を提案し、その有効性を示すことを目的とする。

(2) また、CO<sub>2</sub>の凝結(過飽和)が発生している経度が時間とともにどのように変化して行くかについて着目し、大気波動(特に、定常波と非定常波)との関連性も明らかにする。

### 3. 研究の方法

(1) 火星探査機 MGS による電波掩蔽観測データを使用した。気温・気圧の高度プロファイルは20,000本以上ある。

(2) 電波掩蔽観測は、探査機から発信された無変調電波が惑星大気中を通過する際に、そ

の屈折率の大きさ(大気数密度と大気組成に依存)に応じて電波の位相に変動が生じることを利用する。受信電波の位相変動の大きさに応じて、大気の屈折率の鉛直分布が得られる。火星大気を対象とした従来の電波掩蔽観測の導出過程では、過去に観測された各組成比の標準的な値を用い、大気はよく混ざっている(組成比が高度一定)という仮定の下、屈折率を大気数密度に変換し、さらに理想気体の状態方程式や静水圧平衡を用いて気温を得る。

(3) それに対して、本研究では気温プロファイルの下部ではCO<sub>2</sub>が凝結すると仮定し、得られた屈折率がCO<sub>2</sub>凝結温度を与えるようなCO<sub>2</sub>混合比を探すのである。CO<sub>2</sub>以外の成分(つまり、N<sub>2</sub>とArの和)の混合比は「100% - CO<sub>2</sub>混合比」で求められるが、N<sub>2</sub>とArは共に非凝結成分であるためにN<sub>2</sub>とArの相対比(2.7:1.6)はCO<sub>2</sub>の凝結中も変わらないと仮定できる。そのため、例えばN<sub>2</sub>の混合比をArの混合比で表せるので、CO<sub>2</sub>混合比さえ決まれば残りのN<sub>2</sub>とArも求められることになる。

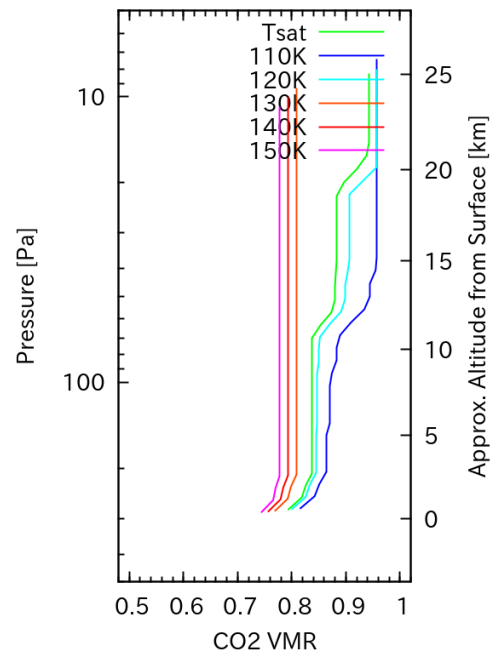


図1：本研究で提案した手法で得られた、火星大気のCO<sub>2</sub>混合比の鉛直分布の例。初期温度(高度分布の上端で与える温度)を110Kから150Kまで変えた場合の結果を示している。Tsatsatは、上端高度における気圧下でのCO<sub>2</sub>の飽和温度を示す。火星年(MY)26, Ls=140.74(夏から秋に掛けての季節), 89.70N・118.07Eで取得された火星探査機MGSデータを用いた。

#### 4. 研究成果

(1) 図1に、得られたCO<sub>2</sub>混合比の鉛直分布を示す。電波掩蔽観測で初期値として必要となる上端高度での気温を変えると、得られるCO<sub>2</sub>混合比の鉛直分布も大きく変わることがわかる。初期温度は、同時期における熱赤外観測データや、数値モデルなどからもっともらしい値を得ることが考えられる。

(2) 得られたCO<sub>2</sub>混合比の鉛直分布には、ステップ状の構造が多数現れた。極夜大気中のCO<sub>2</sub>は主に地表面付近で凝結していることを考慮すると、地表面はCO<sub>2</sub>のシンクとして働いていることになる。そのため、CO<sub>2</sub>混合比は、地表面に近くなるほど小さくとなると考えられる。CO<sub>2</sub>混合比の鉛直分布にステップ状の構造が存在するということは、このようなCO<sub>2</sub>混合比の背景場に対して、何らかの過程で局所的に大気が強くかき混ぜられていることを示唆する。

(3) また、CO<sub>2</sub>過飽和の発生する経度が時間と共にどのように変化するかを調べたところ、特に高高度において経度に固定してCO<sub>2</sub>過飽和が発生する場合に加えて、数日程度の周期で東進する成分が見つかった。過去の研究においても、冬季高緯度で波数1~3、周期数日程度の移動波(傾圧不安定波等)が存在していることが明らかになっている。そのため、定常波と移動波による重ね合わせでCO<sub>2</sub>飽和温度を下回る低温域が生成され、CO<sub>2</sub>過飽和が発生していることが示唆された(図2)。

(4) 連携研究者が提供する火星大気大循環モデルによる数値シミュレーション結果と比較したところ、やはり高高度においてCO<sub>2</sub>

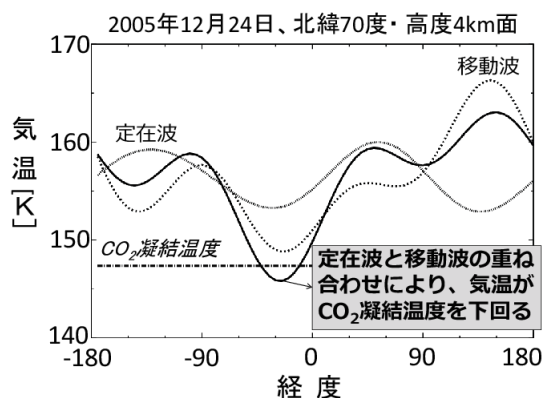


図2：経度に固定された大気波動(定在波)に加えて、東進する移動波との重ね合わせによって気温がCO<sub>2</sub>凝結温度を下回る事例。この例では、定在波及び移動波だけではCO<sub>2</sub>凝結温度を下回る気温にはなっていない。

過飽和度に電波掩蔽観測データと同様な経度依存性が見られた。また、定常波と非定常波の重ね合わせによってCO<sub>2</sub>過飽和が多く発生していることも再現された。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 1件)

Katsuyuki Noguchi, Yasuko Morii, Naoko Oda, Takeshi Kuroda, Silvia Tellmann, and Martin Paetzold, Role of stationary and transient waves in CO<sub>2</sub> supersaturation during northern winter in the Martian atmosphere revealed by MGS radio occultation measurements, J. Geophys. Res., 査読あり, 122, 2017, 912-926, DOI:10.1002/2016JE005142

[学会発表](計 8件)

Katsuyuki Noguchi, Sayaka Ikeda, Takeshi Kuroda, Martin Paetzold and Silvia Tellmann, A study on the CO<sub>2</sub> condensation in the Martian atmosphere by radio occultation, Radio Science Symposium on Earth and Planetary Atmospheres, 2015.

野口 克行、森井 靖子、小田 尚香、黒田 剛史、火星大気北半球冬季におけるCO<sub>2</sub>過飽和の経度依存性、日本地球惑星科学連合2016年大会、2016年

Katsuyuki Noguchi, Takeshi Kuroda and Hiroo Hayashi, Atmospheric CO<sub>2</sub> supersaturation observed in the Martian polar nights, Sixth International Conference on Mars Polar Science and Exploration, 2016.

野口 克行、黒田 剛史、林 寛生、火星大気におけるCO<sub>2</sub>過飽和に対する定常波と非定常波の役割、第30回大気圏シンポジウム、2016年

Katsuyuki Noguchi, Takeshi Kuroda and Hiroo Hayash, CO<sub>2</sub> SUPERSATURATION BY ATMOSPHERIC WAVES IN THE MARTIAN POLAR NIGHTS, The 6th International Workshop on the Mars Atmosphere: Modelling and Observation, 2017.

Katsuyuki Noguchi, Takeshi Kuroda, Silvia Tellmann, and Martin Paetzold, Atmospheric CO<sub>2</sub> supersaturation in the Martian polar nights: Role of large-scale atmospheric waves, European Planetary Science Congress (EPSC) 2017,

2017.

野口 克行、黒田 剛史、Paetzold Martin、  
Tellmann Silvia、火星極夜での CO2 過飽  
和に対する大気波動の影響、第 142 回地球  
電磁気・地球惑星圏学会総会・講演会、2017  
年

野口 克行、黒田 剛史、マーチン・ペッ  
ツォルド、シルビア・テルーマン、火星極  
夜での大気 CO2 過飽和に対する大気波動の  
影響、日本気象学会 2017 年度秋季大会、  
2017 年

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

野口 克行 (Katsuyuki Noguchi)  
奈良女子大学・自然科学系・助教  
研究者番号：20397839

### (3) 連携研究者

黒田 剛史 (Takeshi Kuroda)  
情報通信研究機構・ソーシャルイノベーシ  
ョンユニット統合ビッグデータ研究セン  
ター・主任研究員  
研究者番号：40613394

今村 剛 (Takeshi Imamura)  
東京大学・大学院新領域創成科学研究科・  
教授  
研究者番号：40311170