

TGO/NOMAD 火星大気観測データを用いた $^{13}\text{CO}/^{12}\text{CO}$ 比解析の初期結果

#塩原 輝満¹⁾, 青木 翔平²⁾, 吉田 奈央¹⁾, 中川 広務¹⁾, 寺田 直樹¹⁾, 笠羽 康正¹⁾, 村田 功¹⁾, 吉田 辰哉¹⁾, AnnCarine Vandaele³⁾

⁽¹⁾ 東北大学, ⁽²⁾ 東京大学, ⁽³⁾ Royal Belgian institute for space aeronomy

Carbon isotope ratio in CO on Mars observed by TGO/NOMAD: Preliminary results

#Kimie Shiobara¹⁾, Shohei Aoki²⁾, Nao Yoshida¹⁾, Hiromu Nakagawa¹⁾, Naoki Terada¹⁾, Yasumasa Kasaba¹⁾, Isao Murata¹⁾, Tatsuya Yoshida¹⁾, Vandaele AnnCarine³⁾

⁽¹⁾Tohoku University, ⁽²⁾Tokyo University, ⁽³⁾Royal Belgian institute for space aeronomy

It has been suggested that Mars once had a thick atmosphere with a surface pressure of more than about 0.5 bar around 4 Ga (e.g., Kurokawa et al., 2018). The isotopic compositions of atmospheric components have been used to constrain the Martian atmospheric evolution. In particular, carbon isotope ratios are the important tracer to constrain the origin of the organic on Mars. The isotopic ratio can be fractionated by degassing, condensation, photodissociation, molecular diffusion, and atmospheric escape to space. However, the previous observations of carbon isotope ratios are limited to CO_2 , the main component of the Martian atmosphere. Schmidt et al. (2013) suggests that $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ($\delta^{13}\text{C}$) in ^{13}CO theoretically decreases by around 200 per mil through the isotopic fractionation by photodissociation of CO_2 by the quantum mechanical methodology. Thus, in order to fully understand the carbon isotopic cycle of the atmosphere, we also need observation of the carbon isotope ratio in CO. ExoMars Trace Gas Orbiter (TGO), which started science operation in 2018, has two high-spectral resolution spectrometers that carry out solar occultation measurements, which allows us to perform a sensitive measurement of trace gas on Mars. The characterization of the isotopic ratios are one of the main science goals. In fact, previous studies with TGO measurements have shown the isotopic ratios of carbon, oxygen, and hydrogen in CO_2 from 70 to 100 km and in water vapor from surface to 50 km (Vandaele et al., 2018; Alday et al., 2020, 2021; Villanueva et al., 2021, 2022). In this study, we attempt to derive the carbon isotopic ratios in Martian CO for the first time, using infrared spectral data observed by Nadir and Occultation for MArS Discovery (NOMAD) on board TGO. Moreover, we will investigate the vertical profile of carbon isotopic ratios in CO to constrain how isotopic ratios in the lower atmosphere are transported vertically to the upper atmosphere, where the atmosphere escapes into space.

Thanks to the solar occultation technique and high spectral resolution ($R \sim 17,000$) achieved by simultaneous use of an echelle grating and Acousto-Optic Tunable Filter (AOTF), NOMAD enables us to perform a high-precision remote sensing analysis of atmospheric trace gas species and isotopic ratios. First, in this study, we have selected the best absorption lines for derivation of the isotope ratios. In order to derive the isotope ratio accurately, we need to use a set of ^{12}CO and ^{13}CO absorption lines that have similar weighting functions along the line of sight. There are many strong absorption lines of ^{12}CO and ^{13}CO in $4100\text{-}4250\text{ cm}^{-1}$ and we can observe a set of ^{12}CO and ^{13}CO absorption lines that have similar intensities in $4157\text{-}4190\text{ cm}^{-1}$, which is echelle grating of NOMAD diffraction order 185. Furthermore, considering the temperature dependence of the absorption lines and contamination of light from other diffraction orders, we chose 4180.28 cm^{-1} for ^{12}CO and 4180.86 cm^{-1} for ^{13}CO to derive isotope ratios because these lines allow the smallest uncertainty.

Solar occultation observations by order 185 of NOMAD is a new observation mode, which started from February in 2022. In this study, we have analyzed 13 orbits data from 2022/2/24 to 2022/4/8. For the retrieval, we use a radiative transfer and inversion code, ASIMUT (Vandaele et al., 2006), which were used in the previous studies with the NOMAD data. This code uses Optimal Estimation Method (OEM) (Rodgers, 2000) to find the best parameters to fit the data. Temperature and pressure profiles in the Martian atmosphere for radiative transfer calculations are obtained from the theoretical predictions by GEM-Mars GCM (Daerden et al., 2019). We use the total amount of ^{12}CO and ^{13}CO along the line of sight as free parameters, and performed the retrievals for each altitude independently. We further selected the results retrieved in each altitude by the two following criteria - (1) in order to distinguish between absorption and noise, we only selected data in which the absorption features of ^{12}CO and ^{13}CO being 5 times larger than instrumental noise (i.e., $\text{SNR} > 5$); (2) in order to ensure the similar weighting functions along the line of sight, optical depth of absorption lines of ^{12}CO and ^{13}CO is smaller than unity. As a result of these post-selections, we found that we can derive the $^{13}\text{CO}/^{12}\text{CO}$ from 20 km to 50 km. The retrieved isotope ratios show a strong depletion of ^{13}CO , $\delta^{13}\text{C}$ being between -300 and -800 per mil from 20 km to 50 km in all of the 13 orbits. When we take the average in the altitude direction for all orbits, the averaged value of $\delta^{13}\text{C} = -634$ per mil and its standard derivation is 141 per mil. The degree of the depletion of ^{13}C in CO evaluated by this preliminary result is much stronger than the theoretical estimates of the photo-induced isotopic fractionation suggested by Schmidt et al. (2013). We plan to evaluate the effects of temperature, instrumental calibration and retrieval method on these preliminary results in order to verify the validity of our observation and consider the cause of the gap with theoretical research.

40 億年前の火星は 0.5 気圧以上の現在よりも非常に厚い大気に覆われていたと推定されており (Kurokawa et al., 2018)、大気同位体組成は火星大気の進化を制約するために用いられてきた。特に炭素同位体比は、有機物の起源を制約する重要なトレーサーであると考えられており、それらは、脱ガス・凝縮・光解離・分子拡散・宇宙空間への散逸などによって変化し得ると考えられている。しかし、これまでの炭素同位体比の観測研究は、火星大気の主成分である CO₂ に限定されてきた。一方、Schmidt et al. (2013) では、CO₂ の光解離によって生成される CO の ¹³C/¹²C 比 ($\delta^{13}\text{C}$) が約 200 ‰減少することが理論的に示唆されており、火星大気の炭素同位体比循環を総合的に理解するためには、CO 中の炭素同位体比も合わせて導出することが求められている。2018 年から稼働している、欧州火星探査衛星 ExoMars Trace Gas Orbiter (TGO) は、高い波長分解能を有する赤外分光器を用いた太陽掩蔽観測を実施し、そのような同位体比の観測研究が主要な科学目標の一つである。実際、これまでの研究では、70-100km における CO₂ や 0-50km における水蒸気の炭素・酸素・水素の同位体比が調べられてきた (Vandaele et al., 2019; Alday et al., 2021, 2022; Villanueva et al., 2021, 2022)。本研究は欧州の火星探査衛星 TGO に搭載された赤外分光器 Nadir and Occultation for Mars Discovery (NOMAD) で得られた赤外スペクトルデータを用いて、火星大気 CO 中の炭素同位体比の初導出を試みた。さらに、CO 炭素同位体比の高度分布も導出し、下層大気同位体比が、大気が宇宙空間へ消失する上層大気へ、どのような分別を経て鉛直輸送されるかの制約も目指す。

本研究で用いる赤外分光計 NOMAD は、輝度の高い太陽を背景光とした太陽掩蔽観測手法と、音響光学可変素子とエッセル回折格子の併用により達成された高波長分解能 (R~17,000) により、大気微量成分や同位体比の高精度リモートセンシング分析が可能となっている。本研究ではまず同位体比導出に用いる最適な吸収線の選定を行った。正確な同位体比の計測には、観測視線方向に同じような感度を持つ ¹²CO と ¹³CO の吸収線を選ぶ必要がある。¹²CO と ¹³CO の強い吸収線は、4100-4250 cm⁻¹ に豊富に存在するが、NOMAD のエッセル回折格子次数 (order) 185 に相当する 4157-4190 cm⁻¹ の波長帯では同等の線強度で ¹²CO と ¹³CO が観測可能である。さらに、吸収線の温度依存性や、他の次数の光からのコンタミを考慮し、同波長域に存在する ¹²CO・¹³CO それぞれ 7、9 本の吸収線のうち、¹²CO は 4180.28cm⁻¹、¹³CO は 4180.86cm⁻¹ の吸収線を解析することが、最も不確定性が少なくなることを明らかにした。

NOMAD の Order185 による太陽掩蔽観測は、2022 年 2 月から運用に追加された新しい観測モードである。本解析では、2022/2/24-2022/4/8 に取得された 13 軌道について解析を行った。解析には、NOMAD データによる先行研究でも使用されている放射伝達・反転解析コード ASIMUT (Vandaele et al., 2006) を用いた。同コードは、最尤推定法 OEM (Rodgers, 2000) を用いて観測データに合う最適な変数を調べる。放射伝達計算に用いる、火星大気温度・圧力分布は、GEM-Mars GCM による理論計算 (Daerden et al., 2019) を用いた。¹²CO と ¹³CO の観測視線方向の積算量を変数とし、リトリーバルを各高度で取得されたスペクトルに対して独立に行った。得られた各高度でのリトリーバル結果は、以下の 2 つの基準でさらに選定を行った - (1) シグナルとノイズの混同を防ぐため、¹²CO と ¹³CO の吸収線の深さがノイズレベルの 5 倍以上; (2) 視線方向に同じような感度であることを担保するため、¹²CO と ¹³CO の吸収線の光学厚さが 1 以下。これらの選定の結果、¹²CO と ¹³CO の比を導出できる高度範囲が 20-50km であることがわかった。導出された同位体比は、解析した 13 軌道の全てにおいて、20-50km で $\delta^{13}\text{C} = -800$ から -300 ‰と比較的大きな同位体分別を示した。全ての結果を平均すると、 $\delta^{13}\text{C} = -634$ ‰、標準偏差は 141 ‰となった。この初期結果は、Schmidt et al. (2013) により予想された同位体分別よりも大きい。今後は、気温・装置・リトリーバルなどが結果に与える影響について定量的に評価し、初期解析結果の妥当性を検証すると共に、理論予測とのギャップの原因を考察していく予定である。