

# 一番星へ行こう! 日本の金星探査機の挑戦 その66 ～単一液滴実験から探る金星雲の化学～

生方 颯真<sup>1</sup>

(要旨) 金星の硫酸雲は放射や大気力学に影響を及ぼすだけでなく、化学反応の場としても重要である可能性があります。こうした視点から金星大気を見たとき、代表的な問題の一つとして挙げられるのが、二酸化硫黄(SO<sub>2</sub>)の鉛直分布です。雲層の上下でSO<sub>2</sub>の濃度が大きく変わるという現象は、気相反応だけでは説明が難しく、雲粒を介した反応の関与が示唆されています。本稿では、単一液滴を用いた実験を通して、強酸性条件下におけるSO<sub>2</sub>の反応性取り込みについて検討しました。その結果を踏まえ、金星雲を「化学反応の場」として捉える視点と、今後の研究の方向性について考えます。

## 1. はじめに

金星の高度約45 kmから70 kmには、硫酸を主成分とする雲が存在し、惑星全体を覆っています。金星探査機「あかつき」は、その雲の運動や形態、大気の構造を長期にわたって観測してきました。また、紫外撮像装置を用いて二酸化硫黄(SO<sub>2</sub>)や未同定の紫外線吸収物質の観測も行われており、金星大気の化学組成を理解するための重要な手がかりが得られています。「あかつき」がもたらした化学に関する観測量を適切に解釈するためには、雲を放射・力学過程の担い手としてだけでなく、化学反応の場として捉える視点も必要になると考えます。つまり金星において、気相反応だけでなく、雲粒の表面や内部で進行する多相反応が大気や雲粒の組成に影響を及ぼしている可能性があります。

このような発想は、決して金星に特有のものではありません。地球大気化学の歴史を見てみると、当初は気相反応を中心に描かれていた化学過程が、雲粒やエアロゾルを介した多相反応を考慮することで大きく書き換えられてきました。代表例として、成層

圏におけるオゾン層破壊が挙げられます。極成層圏雲の粒子表面で進行する塩素反応の重要性が認識されたことで、南極オゾンホールは理解が進展しました。また対流圏においては、雲中でのSO<sub>2</sub>酸化による硫酸塩生成が酸性雨の原因の一つとなっています。このことは、惑星大気の化学を理解する際に、気相反応だけではなく多相反応を考慮することの重要性を示唆しています。

## 2. 金星大気中のSO<sub>2</sub>

金星大気には、気相反応だけでは説明が難しく、多相反応の関与を考える必要がある現象が存在します。その一例がSO<sub>2</sub>の鉛直分布に関する問題です。これまでの観測によって、SO<sub>2</sub>の体積混合比は、高度約40 kmの雲底では100 ppmを超える一方、高度約70 kmの雲頂では100 ppb程度まで減少することが明らかになっています[1]。しかし、このSO<sub>2</sub>混合比の3桁以上の違いは、従来の光化学モデルでは説明できていません。よって雲層そのものが、SO<sub>2</sub>のシンクとして機能している可能性を考慮する必要があります。

地球大気化学の研究では、SO<sub>2</sub>は雲粒などの液相に取り込まれたのち、効率的に硫酸へと酸化されて

1. 東北大学大学院理学研究科  
ubukata.soma.q8@dc.tohoku.ac.jp

大気から取り除かれることが知られています[2]. これは反応性取り込みと呼ばれる現象です. 代表的な酸化剤として過酸化水素 ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ), オゾン ( $\text{O}_3$ ), 酸素 ( $\text{O}_2$ ), および二酸化窒素 ( $\text{NO}_2$ ) が挙げられます. これまでの地球大気を想定した研究では, 液相のpHとして2-6程度の条件が一般的でした. これに対し, 金星雲ではpHが-1を下回るような強酸性環境が想定されており, そのような条件下で $\text{SO}_2$ の酸化反応がどの程度進行するのかについてはこれまで十分に調べられていませんでした.

したがって, 金星雲を模擬した条件下で,  $\text{SO}_2$ の反応性取り込みや液相における酸化の効率を実験的に検証することが重要となります. 次節では, そのために用いた単一液滴実験の手法と結果についてご紹介します. なお, 詳細については既発表の論文[3]をご覧ください.

### 3. 単一液滴実験で探る $\text{SO}_2$ の反応性取り込み

硫酸に対する $\text{SO}_2$ の反応性取り込みを測定するため, 電気力学天秤とMie散乱・Raman散乱測定系を組み合わせたセットアップを構築しました. 電気力学天秤とは, 交流電場と直流電場による力を組み合わせて, 単一液滴を非接触で捕捉する装置です(図1). 単一液滴を用いる利点は, 壁面や粒子同士の相互作用を避けながら, 液滴そのものの反応を直接見ることができる点にあります. 電気力学天秤内にはガスを連続的に導入することができ, 背景ガスとして $\text{CO}_2$ を用い, そこに $\text{SO}_2$ , 酸化剤として $\text{NO}_2$ を導入し, これらの流量を調整して任意の体積混合比を再現しました. なお, 実験は全て室温, 1気圧条件下で行いました. これは, 温度としては金星の高度約55 km, 圧力としては高度約50 kmに相当する条件です[4].

液滴の半径は, Mie散乱スペクトルから計算しました. Mie散乱は, 球形粒子の半径と屈折率に依存します. 本実験では, 硫酸の屈折率については文献値を用いて液滴の半径を導出しました[5]. 液滴半径の時間変化を追跡した結果, 液滴の成長は $\text{SO}_2$ 単独あるいは $\text{NO}_2$ 単独ではほとんど見られず, 両者が共存した場合にのみ顕著に生じました. これは, 液滴内部で $\text{SO}_2$ が酸化され, 硫酸生成に対応する体積増



図1: 電気力学天秤の外観. 中央で発光して見える部分が, 電場によって浮遊している単一液滴である.

加が起きていることを示唆しています. すなわち, 金星類似の強酸性条件下で,  $\text{NO}_2$ が存在する場合に $\text{SO}_2$ の多相反応が起こることを実験的に示すことができました.

また, 液滴の化学組成はRaman散乱スペクトルから導出することができます. 液滴内に532 nmのレーザーを照射すると, 液滴内に存在する分子の振動や回転に応じて, わずかに波長のずれた光が散乱されます. この波長のずれは分子種ごとに固有の情報を含むため, 液滴中に存在する化学種やその時間変化を追跡することができます. 図2にRaman散乱スペクトルの一例を示します.  $900\text{ cm}^{-1}$ と $1040\text{ cm}^{-1}$ は硫酸由来のシグナルで,  $2290\text{ cm}^{-1}$ は, 時間と共にシグナルが強くなっていることから, 反応生成物に由来するシグナルであることがわかります. 文献との比較から,  $2290\text{ cm}^{-1}$ のピークはニトロソニウムイオン( $\text{NO}^+$ )由来であると考えられます[6]. このように Raman 散乱を併用することで, 液滴内部で進行する化学反応そのものを追跡することができ, 反応機構や反応速度の評価へとつなげることが可能となります.

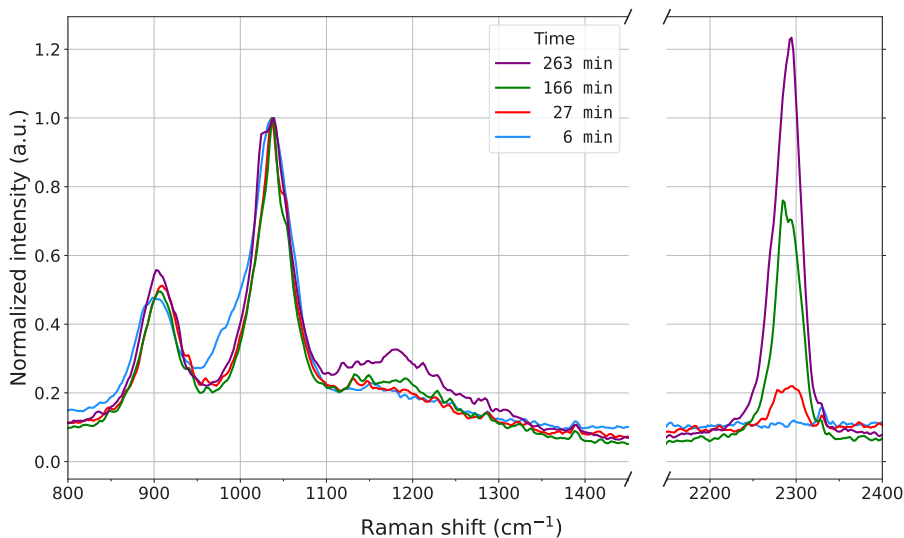


図2: 硫酸液滴におけるRaman散乱スペクトルの時間変化。背景ガスとしてCO<sub>2</sub>を用いており、そこに100 ppmのSO<sub>2</sub>と10 ppmのNO<sub>2</sub>を導入している。2290 cm<sup>-1</sup>付近のピーク強度が時間と共に増大しており、反応生成物の蓄積を示している。

## 4. おわりに

本稿では、金星大気化学を理解するうえで、多相反応も重要な過程である可能性について述べてきました。地球大気化学では、雲粒やエアロゾルを介した反応が化学種の分布や寿命を大きく左右することが知られており、同様の視点は金星のように厚い硫酸雲をもつ惑星に対しても重要であると考えられます。とくに、雲層の上下で大きく変動するSO<sub>2</sub>の濃度は、金星雲が単なる凝縮相ではなく、化学的なシンクとして機能している可能性を示唆しています。

単一液滴を用いた今回の実験は、そのような多相反応が強酸性条件下でも起こりうることを示す一例といえます。ただし、本研究で扱ったNO<sub>2</sub>によるSO<sub>2</sub>の酸化反応が、実際の金星大気中でそのまま主要な反応経路として働いていると示されたわけではありません。実際の金星雲では、利用可能な酸化剤の種類や濃度、さらには大気輸送との結合など、さまざまな要因が関与していると考えられます。今後は、「あかつき」が切り拓いてきた観測的知見に、室内実験や化学モデルを組み合わせながら、金星雲を「化学反応の場」として捉える研究を進展させていきたいと考えています。

## 参考文献

- [1] Vandaele, A.C. et al., 2017, *Icarus* 295, 16.
- [2] Liu, T. et al., 2021, *Environ. Sci. Technol.* 55, 4227.
- [3] Ubukata, S. et al., 2025, *ACS Earth Space Chem.* 9, 1525.
- [4] Seiff, A. et al., 1985, *Adv. Space Res.* 5, 3.
- [5] Palmer, K.F. and Williams, D., 1975, *Appl. Opt.* 14, 208.
- [6] Millen, D.J., 1950, *J. Chem. Soc.* 1950, 2600.

## 著者紹介



生方 颯真

東北大学大学院理学研究科博士後期課程1年。東北大学理学研究科博士前期課程修了、修士(理学)。