

一番星へ行こう! 日本の金星探査機の挑戦 その64 ～あかつきと共に歩んだ学生生活～

岩中 達郎¹

(要旨) 大学に入学した2016年から、この度博士号を取得した2025年10月までの約9年半、金星大気の研究に取り組みました。「あかつき」がリアルタイムで送り届けた貴重なデータと向き合い、その解析を行った日々は、「あかつき」と過ごした学生生活でした。本稿では、筆者の博士課程での研究内容についてご紹介します。

1. はじめに

この度、東京大学大学院理学系研究科にて博士(理学)の学位を授与されました。大学に入学した2016年から、博士号を取得した2025年10月までの約9年半、多くの方々のご指導とご支援のもと、金星大気の研究に没頭する機会をいただきました。振り返れば、私の学生生活は、「あかつき」が金星周回軌道で観測を続けた期間(2015年12月～2024年4月)とほぼ重なります。まさに「あかつき」と共に歩んだ学生時代であり、そのデータを用いて一つの研究を成し遂げられたことに、深い感慨を覚えます。

金星は地球の環境と似ても似つかない惑星です。約90気圧という高圧の二酸化炭素大気に覆われ、地表温度は約460℃にも達する灼熱の世界です。上空には4日で一周する「スーパーローテーション」と呼ばれる高速な東西風が存在します。そして、この過酷な環境を特徴づけるのが、高度約45kmから70kmにわたって惑星全体を絶えず覆う、濃硫酸の分厚い雲です。この雲は太陽光の約8割を反射し、金星のエネルギー収支を支配する極めて重要な存在です。

この硫酸雲の材料となるのが、二酸化硫黄(SO₂)です。SO₂は、雲頂付近の高度(約70km)で太陽からの紫外線を受けて光化学反応を起こし、硫酸エア

ロゾルへと変化します。このプロセスが、金星の分厚い雲を維持していると考えられています。しかし、SO₂がどのようにして雲の下から雲頂へと運ばれ、どのくらいの量が実質的に供給されているのか、そしてその変動が金星の気象や気候にどう影響しているのか、多くの謎が残されています。

私の博士研究は、「あかつき」の観測データを用いて、この金星雲頂におけるSO₂の分布とその時間・空間変動を詳細に捉え、その背後にある大気の動き(力学)との関係を明らかにすること目的としました。まさに私が研究の道を歩み始めたのと時を同じくして観測を開始した「あかつき」のデータを用いることができたことは、とても幸運なことでした。

2. 「あかつき」データと解析手法

「あかつき」に搭載された紫外撮像装置(UVI)は、283 nmと365 nmという2つの紫外線の波長で金星の雲頂を撮影することができます。283 nmはSO₂が強く紫外線を吸収する波長、365 nmは硫酸雲そのものや、正体不明ながら雲の模様を作る一因となる、未同定の紫外線吸収物質の吸収波長に対応しています。当初、この2つの波長の画像を比較することで、SO₂と未同定吸収物質の分布を捉えることを目指しました。しかし、SO₂と未同定吸収物質の吸収帶は完全に分離しているわけではなく、特にSO₂の吸

1.理化学研究所 計算科学研究センター
tatsuro.iwanaka@riken.jp

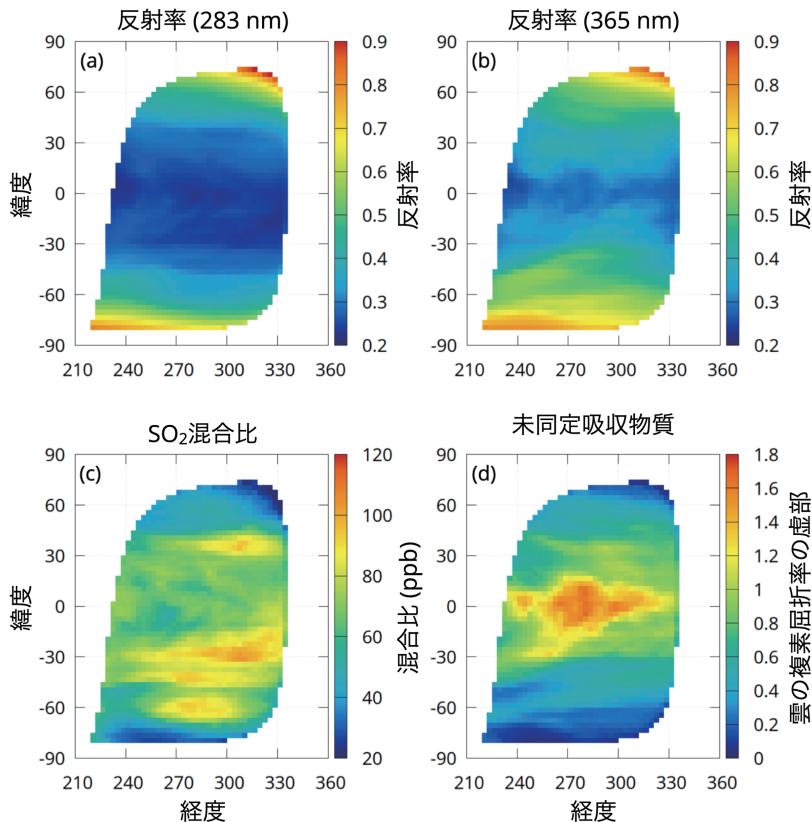


図1:「あかつき」が観測した紫外反射率からのSO₂, n_i のリトリーバルの一例。(a, b)が283 nm, 365 nmでの反射率分布,(c)がSO₂の混合比分布,(d)が n_i の分布を示す。

取が強い283 nmの波長でも、未同定吸収物質の影響が無視できません。つまり、単純に283 nmの画像が暗いからといって、そこにSO₂が多いとは限らないのです。この問題を解決し、2つの波長の画像からSO₂と未同定吸収物質(以降、 n_i と表記。雲粒子の複素屈折率の虚部で吸収の強さを表す)の分布を精度良く同時に導出することが、私の研究の中核となりました。

このため、私はまず、金星大気中での紫外線の散乱・吸収過程をシミュレーションし、大気上端での反射率を計算できる新しい放射輸送計算コードを開発しました。正20面体を再帰的に分割することで得られる格子を用いて散乱方向を離散化することで、探査機から見える金星の明るさを、あらゆる方向について高速かつ均一な解像度で計算できるようにしま

した。

次に、この放射輸送計算コードを用いて、様々なSO₂と n_i の量の組み合わせを仮定した場合にUVIが観測するであろう2波長の反射率を計算し、大規模なルックアップテーブルを作成しました。そして、実際に観測された283 nmと365 nmの反射率の組とデータベースを比較し、最もよく観測値を再現するSO₂と n_i の値を求めました。この手法により、「あかつき」が取得した膨大な紫外画像データ(2015年12月から2022年6月までの約15,000ペア)から、約2時間間隔という高い時間分解能で、雲頂SO₂と n_i の分布マップを作成することが可能になりました(図1)。開発した手法の妥当性は、地上からの赤外線望遠鏡による同時刻のSO₂観測結果との比較によっても確認されました。

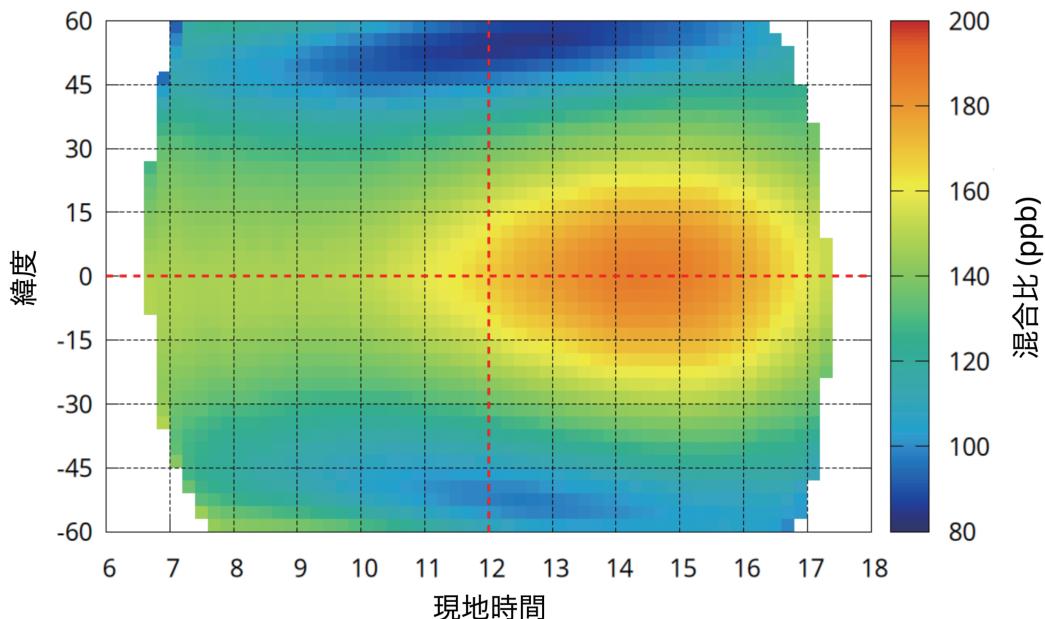


図2: 観測期間全体にわたるSO₂分布を平均することで得られたSO₂の現地時間・緯度分布。

3. 明らかになったSO₂の時空間変動

この新しいデータセットは、これまで断片的にしか知られていなかった金星雲頂のSO₂の振る舞いを、かつてない詳細さで描き出しました。

3.1 短期的な変動(数時間～数日スケール)

SO₂分布は非常にダイナミックで、数時間から数日という短い周期で急速に変化することが明らかになりました。特に赤道域では、SO₂の濃い「塊」のような構造が、形を変えながら西向きに移動していく様子が捉えられました。これは、大気波動による単なる上下振動だけではなく、実際に下層から雲頂へSO₂が供給されている場を捉えたのです。

さらに、時間と東西方向(経度)の変動を周期解析した結果、赤道域のSO₂と n_i の変動には、約4日周期で西進する成分が卓越していることが分かりました。これは、金星大気の巨大な流れ「スーパーローテーション」よりもわずかに速く伝わる「ケルビン波」と呼ばれる大規模な波動の影響と考えられます。この波に伴う上下運動が、SO₂の豊富な下層の空気を

雲頂まで周期的に持ち上げている様子が、今回のデータで初めて直接的に捉えられました。

3.2 平均的な空間分布

7年間のデータを平均化することで、信頼性の高いSO₂の平均的な分布図(現地時間と緯度に対する分布)を得ることができました(図2)。これまでの金星周回機は極軌道衛星で、特定の時期には特定の局所時間しか観測できないという制約がありましたが、「あかつき」は赤道面に近い軌道を持つため、昼間のほぼ全域を網羅的に観測でき、この種の分布図としては最も信頼性の高いものと考えています。

その結果、SO₂は赤道域で最も多く、中緯度に向かうにつれて減少する傾向が明らかになりました。これは、赤道で上昇し高緯度で下降する大規模な子午面循環「ハドレー循環」によって、SO₂が赤道から極向に輸送される効果を反映していると考えられます。

さらに興味深いことに、現地時間に対しては、SO₂は昼過ぎの14時から15時頃に明確なピークを持つことが分かりました。これは、太陽加熱によって駆動される「熱潮汐波」(特に1日に2回周期を持つ半日

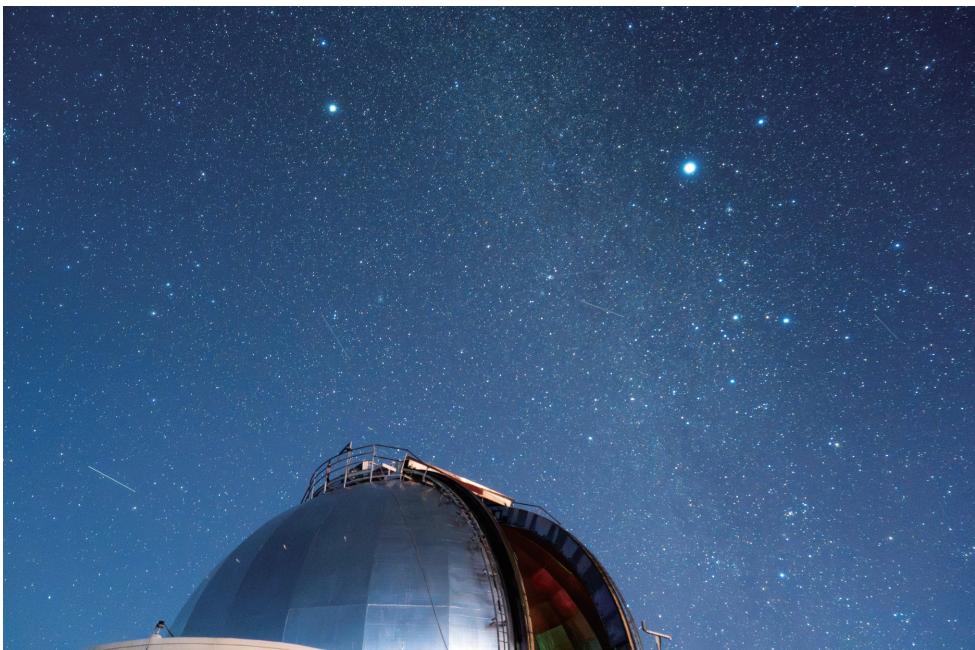


図3: ハワイ島・マウナケア山頂に位置するNASA赤外線望遠鏡施設 (IRTF)と満天の星空(筆者撮影).

潮汐波)が、上昇流を励起し、下層からSO₂を雲頂へ汲み上げている結果と解釈できます。この分布パターンは、最新の金星大気シミュレーションの結果ともよく一致しており、雲頂SO₂分布の形成における熱潮汐波の重要な役割を強く示唆するものです。

3.3 長期的な変動

2016年から2022年にかけてのSO₂とn_iの平均値の変動を求めたところ、数年スケールの増減が見られました。特に興味深いのは、この変動が、同じく「あかつき」データから導出された雲頂の平均東西風速(スーパーローテーションの速度)の変動と関連している可能性が示唆されたことです。

解析の結果、数年スケールで見るとSO₂とn_iの増減と平均東西風速の増減は正の相関(運動して変化する傾向)を示す一方で、より長期的なトレンドとしては逆の相関が見られました。これは、複雑なフィードバック機構の存在を示唆します。例えば、短期的には、未同定吸収物質が増加すると太陽光吸収が増え、大気加熱が強まって大気運動が活発化し、風速が増加するかもしれません。一方、長期的には活発化した大気運動がSO₂供給を増やし、それが雲の生成

を促してアルベド(反射率)を上昇させ、結果的に太陽光吸収と大気運動を弱める、といった負のフィードバックが働いている可能性も考えられます。この議論の検証のためには、これらのフィードバックがどのような時間スケールで応答するか、より詳細な解析が必要ですが、大気大循環と化学物質の分布の間に相互作用が存在しているかもしれない、という非常に興味深い結果が得られました。

4. おわりに

博士課程での最も忘れられない経験の一つが、2024年の2月にハワイ島マウナケア山頂にあるNASA赤外線望遠鏡施設(IRTF)に赴き、実際に金星の観測に参加したことです。UVIデータから導出したSO₂分布の妥当性を検証するために、IRTFに設置された高波長分解能の分光撮像装置「TEXES」による「あかつき」との同時観測を行いました。普段は計算機上でデータを扱っている私にとって、標高4,000 mを超える厳しい環境の中、巨大な望遠鏡を自ら操作し、遠い金星からの赤外線を捉える現場に立ち会えたことは貴重な経験でした。望

遠鏡の巨大さ、澄み切った夜空に広がる満天の星々(図3)、そして観測チームの一員としてデータ取得に貢献できた達成感、何よりも、遠く金星を周回する「あかつき」と、ここハワイの山頂から、同じ瞬間に同じ金星を見つめているという事実に、深く感動したことを感じています。衛星観測と地上観測、それぞれの強みと役割を実感し、多角的なアプローチの重要性を再認識する機会にもなりました。

私の博士研究では、「あかつき」のUVIデータを用いて、金星雲頂における二酸化硫黄の時空間変動をこれまでにない高い解像度で捉え、その変動がケルビン波や熱潮汐波、ハドレー循環といった様々なスケールの大気現象と密接に関連していることを明らかにしました。これは、金星の硫酸雲形成の鍵を握る硫黄サイクルと、それを駆動する大気力学、さらには金星の気候システムの理解へと繋がる重要な一步だと考えています。

しかし、金星にはまだ多くの謎が残されています。紫外線吸収物質の正体は何か？ 実際にどれだけのSO₂が不可逆的に雲頂へ供給されて、それがどのように、どれくらい雲へ変換されるのか？ 夜側のSO₂分布はどうなっているのか？ これらの問いに答える

ためには、さらなる観測と、より洗練された数値モデルとの連携(データ同化)が不可欠です。また、将来にはNASAやESAで大型の金星探査が計画されており、「あかつき」が切り拓いた金星研究は、まさに新たな時代を迎えようとしています。

博士課程で得た知識と経験、そして「あかつき」と共に金星を追った日々を糧に、今後もこの魅力あふれる金星、そして惑星科学の研究に貢献していきたいと考えています。最後までお読みいただき、ありがとうございました。

著者紹介

岩中 達郎



理化学研究所計算科学研究センター 特別研究員。東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻博士課程修了。博士(理学)。同センターリサーチアソシエイトを経て2025年12月より現職。