

令和 5 年 6 月 5 日現在

機関番号：15301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04042

研究課題名（和文）金星探査機あかつきのデータを用いた金星地表の研究

研究課題名（英文）Venus' Surface emissivity observed by Akatsuki IR1 camera

研究代表者

はしもと じょーじ（HASHIMOTO, George）

岡山大学・環境生命自然科学学域・教授

研究者番号：10372658

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,300,000円

研究成果の概要（和文）：あかつきIR1カメラが撮像した金星夜面の画像を用いて、金星地表の放射率を推定した。あかつきIR1のデータを精査することで、データの多くが迷光の影響を受けていることが確認されるとともに、放射輝度の較正にも問題のあることが明らかになった。迷光の影響が比較的小さいデータを選別して地表放射率の推定をおこなったが、較正の問題から定量的な議論をおこなうことはできなかった。迷光補正手法の確立と放射輝度較正のやり直しが必要とされる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

金星探査機あかつきが取得した金星夜面のデータは、迷光や放射輝度較正といった問題を抱えているが、それらを補正することで金星地表物質に関する情報を抽出できる可能性がある。金星の地表物質を推定することは、地球の双子とも呼ばれる金星の表層環境が地球と大きく異なっている理由や、地球のような生命を育む惑星が形成される条件を解明することにつながる。宇宙における知的生命の存在確率を議論するための基礎となる知見を創出するものである。

研究成果の概要（英文）：The emissivity of the Venus' surface was estimated using images taken by the IR1 camera onboard Akatsuki. We confirmed that most of the Venus' night side images were affected by stray light. Moreover, the absolute values of the radiance were shifted. We estimated the surface emissivity by selecting data which is less affected by stray light, though it was difficult to constrain the Venus' surface material. We need to establish a correction method for stray light and a recalibration of the radiance.

研究分野：惑星科学

キーワード：金星 地表

## 1. 研究開始当初の背景

金星と地球はともに約 46 億年前に誕生したと考えられているが、現在、その表層環境は全く異なっている。地球の表面には海洋が存在し生命を育む惑星となっているのに対し、金星の表面は 735K に達する高温の環境で H<sub>2</sub>O そのものがほとんど存在しない乾燥した惑星となっている。大きさがほぼ同じで太陽からの距離もほぼ等しく双子とも称される金星と地球の表層環境がこのように大きく異なっている理由を解明することは、惑星形成ならびに惑星表層環境研究の大きなテーマのひとつである。

金星の形成ならびに表層環境を理解する上で欠かすことのできないのは、金星表面物質に関する情報である。惑星表面物質の組成は固体惑星全体の組成を推定する際の基礎となるものであるが、固体金星の組成に関する情報は惑星の平均密度くらいしかなく、双子とも言う金星と地球の間にどれくらいの類似性があるのかについてははっきりしたことはわかっていない。また、表層環境、特に大気の組成を考える上で、金星表面に何が存在しているのかを明らかにすることは、現在の金星大気だけでなくその進化を解明する上でも有用な情報を与える。仮に、過去の金星には現在の地球と同程度の量の H<sub>2</sub>O が存在し、水素(H)が宇宙空間に逃散することで失われたとするならば、金星大気に残った酸素(O)は地表物質と反応したことになり、その痕跡は金星地表物質に残されているはずである。また、高温高压の金星地表においては、大気と地表物質の化学反応によって大気組成が規定されている可能性があるとも指摘されている(例えば、Hashimoto and Abe, 2005)。この場合、化学反応は温度に依存するため金星大気の組成は表層の温度に連動して変化する。大気組成は温室効果や雲の生成を通して惑星表層の温度に影響を及ぼすので、大気温度と大気組成の間でフィードバックループがつくられる。このフィードバックが金星表層環境を安定化/不安定化するかどうかは、金星地表に何が存在し、それが大気とどのように化学反応するのかに依存する。現在の金星気候システムがどのようなバランスの上にあるのかを理解するためにも、金星地表の化学組成に関する情報は必要不可欠である。

## 2. 研究の目的

研究目的は、金星探査機「あかつき」に搭載された近赤外カメラ(IR1)が取得したデータを解析して、金星地表放射率の全球分布を推定することである。金星の地表物質については旧ソ連の探査機が着陸した数点で観測がおこなわれているが、それらは広大な地面を点で観測したにすぎず、金星地表物質の地域性や全球平均組成については明らかになっていない。「あかつき」が金星周回軌道上でおこなった全球的な観測を用いることで、着陸機では得ることのできない面的な情報が得られ、金星地表物質に地域性があるかどうかを調べることができる。また、着陸機が観測した地点を参照点とすることで、点の情報を面へと広げて地表物質の全球平均組成の推定をおこなうことができる。

従来、全面が雲に覆われた金星はその地表を周回軌道上から観測することはできないと考えられていたが、近赤外域にある特別な波長では金星地表から射出された熱放射が宇宙空間に漏れ出ていることが発見され、これによって周回軌道上から金星地表を探査することが可能になった。この近赤外の窓を利用して、アメリカの木星探査機「ガリレオ」が金星フライバイ時に取得したデータや、ヨーロッパの金星探査機「ビーナス・エクスプレス」が取得したデータから、金星地表放射率の推定がおこなわれた(Hashimoto et al., 2008; Mueller et al., 2008)。しかしながら、これらのデータを取得した測器は金星地表を観測するように設計されたものではなかったため、データの質は十分でなく、金星地表放射率の推定には依然として大きな不確定が残されている。

金星探査機「あかつき」に搭載された近赤外カメラは、この近赤外域にある窓を利用した観測をおこなうように設計されており、いくつかの観測においてその性能を発揮して高い品質のデータを取得することに成功した(近赤外カメラは 2017 年 3 月に発生した機器の不具合により現在は停止している)。

## 3. 研究の方法

近赤外の窓を用いた地表放射率推定の手法(Hashimoto and Sugita, 2003)を「あかつき」近赤外カメラ(IR1)のデータに適用して、地表放射率を推定する。

探査機によって観測されるのは、金星地表から射出された近赤外の熱放射のうち、大気と雲を透過したものである。すなわち、地表放射率を推定するためには、地表から射出された放射が、大気や雲によって散乱・吸収されることによる影響を、定量的に評価する必要がある。特に、大気と雲の散乱によって光が大気と地表の間で複数回反射することは、地表放射率の推定において決定的に重要であることが示されているので、金星大気中の放射輸送を精密に計算し、大気と雲の影響をできる限りの精度で取り除く。本研究では、惑星大気の放射計算をおこなうことを念頭に新規開発された放射計算コード dcrtm (Takahashi et al., 2023)を用いて、金星大気の透過率を評価した。

大気と雲の影響を取り除くと、地表が射出する熱放射の大きさが得られる。地表が射出する熱

放射の大きさは地表温度と放射率に依存するので、ここでは地表温度は地表に接する大気と熱平衡にあると仮定して地表放射率を推定した。金星大気は熱容量が大きい(温度変化の時定数は数十年と見積られる)ため、下層大気は時間・場所によらずほぼ一様で、地表は大気とほぼ熱平衡になっていると考えることができる。「ガリレオ」および「ビーナス・エクスプレス」のデータを解析した結果は、この仮定が妥当であることを示している (Hashimoto et al., 2008; Mueller et al., 2008)。

#### 4. 研究成果

##### (1) データの品質：迷光と残像

地表放射率の推定には金星の夜面を撮像した画像を用いるが、近赤外で見た金星は太陽光に照らされる昼面が夜面に対して圧倒的に(夜面の 10000 倍以上)明るいいため、夜面は昼面から漏れ込む光(迷光)があると、その影響を強く受ける。あかつき IR1 カメラが撮像した金星夜面画像を一枚ずつ目で見て確認したところ、そのほとんどが迷光によって酷く損なわれていることが明らかになった。IR1 カメラ画像に含まれる迷光を補正するため、迷光の規則性を探したが、その全容の解明には至っておらず、IR1 カメラが取得した画像に含まれる迷光を完全に排除することはできていない。迷光によって損なわれた画像を用いるには、IR1 カメラの特性を考慮して画像から迷光を補正する手法を開発する必要がある。

また、迷光とは別に、明らかに残像と考えられるものが写った画像も見つかった。一見すると残像がないように見える画像についても、本当に残像がないのかどうかの確認が必要とされる。残像に汚染された画像を解析に用いる場合には、残像の影響を補正する処理手法を開発する必要がある。

##### (2) データの品質：較正

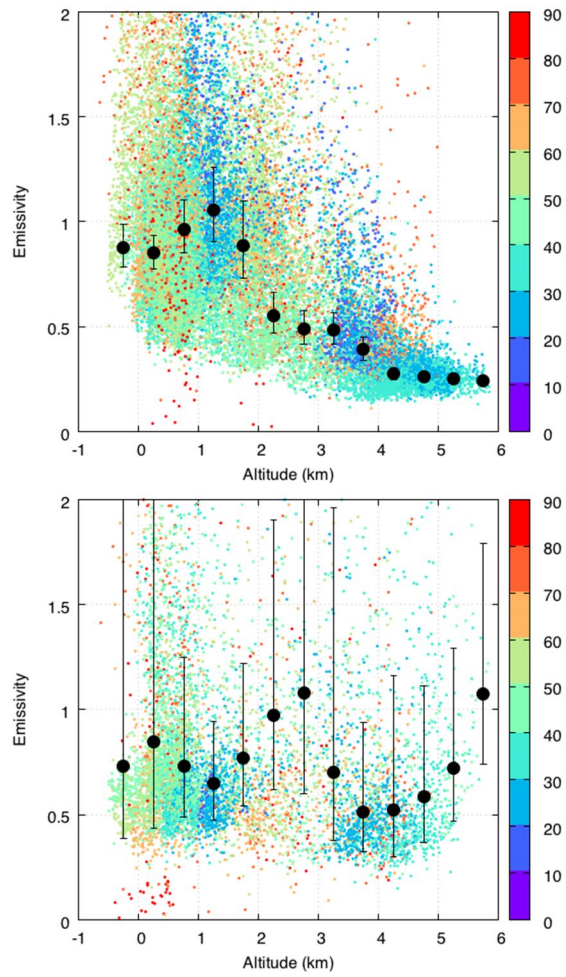
プロジェクトが公式に提供している IR1 夜面画像について、放射輝度の絶対値を他の探査機や地上観測の観測結果と比較したところ、IR1 で観測された  $1.01\ \mu\text{m}$  の放射輝度は他の観測の約 1.5 倍になっていることが確認された。いくつか放射輸送計算をおこなって放射輝度を計算したが、IR1 カメラが観測した放射輝度を説明することは難しく、IR1 カメラの放射輝度の較正には問題があると考えざるをえない。ちなみに、IR1 カメラで  $0.9\ \mu\text{m}$  と  $0.97\ \mu\text{m}$  のフィルターを用いて撮像された画像の放射輝度は、他の観測の放射輝度と同等で矛盾のない値になっている。 $1.01\ \mu\text{m}$  のフィルターでのみ放射輝度の絶対値に問題が生じている原因については不明である。IR1 カメラ  $1.01\ \mu\text{m}$  フィルターで撮像したデータから物理量を導出する際には、放射輝度の絶対値の較正に問題があることを考慮する必要がある。

##### (3) 金星大気放射輸送計算環境の整備

金星大気中の放射輸送を計算するコードを整備して、いくつかの典型的なケースについて放射輸送計算を実行した。計算結果を観測と比較して、計算が妥当なものであることを確認した。地形と熱放射の関係を知るため、金星標準大気モデル(VIRA)を外挿して高度 0km 以下の大気モデルを作成し、それを用いて地表高度が熱放射に及ぼす影響を評価する計算をおこなった。また、典型的とされる金星大気を仮定した放射輸送計算に加えて、大気組成、大気温度減率、雲水量、粒径、などを変更した計算を複数おこない、大気の変動が放射輝度に及ぼす影響を定量的に評価した。あかつき IR1 カメラが観測する熱放射は、主に金星下層雲の変動の影響を受けると考えられていたが、上層雲の変動もまた熱放射の強度に無視できない影響を及ぼすことが明らかとなった。

##### (4) 地表放射率

迷光の影響が比較的小さいと判断される画像を選別し、それぞれについて地表放射率を推定した。 $0.9\ \mu\text{m}$  と  $0.97\ \mu\text{m}$  については、データの質が悪く、推定された地表放射率から地域差を議論することはできなかった。 $1.01\ \mu\text{m}$  については、先に述べたように放射輝度の絶対値に問題があり、そのままでは地表放射率を推定することができない。しかし、絶対値は無理であっても、地域による相対的な放射率の差は議論できる可能性があると考え、地表放射率の推定をおこなった。2016年1月21日と2016年9月15日に取得された画像は、たまたまほぼ同じ地域を撮影していたため、金星地表の4分の1弱の地域について地表放射率が2回推定された。同一の場所について推定された地表放射率を比較したところ、使用した画像によって推定される地表放射率は大きく異なることが明らかになった。2枚の画像が撮影された間に地表放射率が変化したとは考えにくいことから、放射率推定に問題があると考えられる。おそらく、放射輝度の絶対値較正の問題であり、IR1 カメラのデータから地表放射率を推定するためには、絶対値較正をやり直す必要があると考えられる。



図．推定された地表放射率と標高の関係（上：2016年1月21日，下：2016年9月15日）．色付きの点は各画素についての推定値を表し，色は射出角(度)を表す．黒点は0.5km毎の高度別の平均を表す．

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計0件

〔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
---------	---------