

立教大学学術推進特別重点資金(立教SFR)

個人研究

2016年度研究成果報告書

研究代表者	所属部局・職	氏名
	理学部物理学科助教	福原 哲哉 印
研究課題	固体惑星表面における放射率の角度依存性に関する研究	
研究期間	2016年度	
研究経費 (1円単位)	(支出金額) 994,829円 / (採択金額) 997,000円	

研究の概要(200~300字で記入、図・グラフは使用しないこと)

2014年12月に打上げられた「はやぶさ2」には、申請者が開発副責任者である熱赤外カメラ「TIR」が搭載された。このカメラで小惑星「Ryugu(1999JU3)」表面の温度分布をリモートセンシング観測することで、表面の熱慣性(温まりやすさ、冷めやすさの度合いを示す指標)を見積り、内部構造の解明に迫る計画である。このためには、表面物質が持つ放射率の角度依存性を掌握しておく必要があるが、小惑星の表面物性(組成や粒径)にどれだけ依存するかという知見は乏しい。本研究では、表面物性の違いと放射率の角度依存性の関連性を実験室で再現するため、実験室で使用する熱赤外カメラで得る画像からノイズを削減するシャッタ機構の開発を行った。

キーワード(研究内容をよく表しているものを3項目以内で記入。)

[非冷却マイクロボロメータ] [熱放射] [熱慣性]

研究成果の概要 (図・グラフ等は使用しないこと。)

はやぶさ 2 に搭載され、波長 $10\ \mu\text{m}$ 帯 ($8\text{-}12\ \mu\text{m}$) を捉える熱赤外カメラ「TIR」は、リモートセンシング観測でホームポジション (小惑星から 20km の距離) から空間分解能 20m 程度で小惑星 Ryugu 表面の温度分布を画像化する。自転する小惑星の連続的な観測から温度変化の空間分布を調べることで表層の熱慣性の空間分布を導出できる。一方、はやぶさ 2 は Ryugu から試料を地球に持ち帰る。これにより小惑星表層物質の素性が明らかになるので、TIR の観測結果と持ち帰った試料の情報を熱慣性の式 $I = (\rho C \kappa)^{1/2}$ (ただし、 ρ : 密度、 C : 熱容量、 κ : 熱伝導率) に代入すると物質の圧密状態に依存する κ が求まる。はやぶさ 2 に搭載されるレーザ高度計 (LIDAR) の観測と軌道情報からは小惑星の重力分布が導出されるので、上述の圧密状態の情報と重力分布を比較することで小惑星の内部構造が表層に比べて密なのか疎なのかを推定できるようになる。過去にこのような手法で固体惑星内部の物理状態が観測的に明らかにされた例はなく、成功すれば世界初の快挙となる。そのためには TIR から導出される熱慣性の精度をできる限り向上させる必要があるが、放射率の角度依存性 (表面と TIR 視線方向との角度) をあらかじめ明らかにしておくことが必須となる。

先行研究では、地球観測データにおける放射率の角度依存性が見積もられた事や、粒径が小さい玄武岩の角度依存性は小さいという結果が報告されたことがあるが、いずれも小惑星の観測を念頭においたものではない。また、地上観測による測光データへの適用を前提とした表面粗さと太陽位相角の依存性の違いに関する報告もあるが、はやぶさ 2 観測への適用には不向きである。本研究では、小惑星表面の物理状態を推定する手法を新たに確立することを念頭に放射率の角度依存性を調べるため、真空環境で熱赤外面像を得るための実験装置の開発を行った。実験には 2014 年に打ち上げられた林野火災検知を目的とした 50kg 衛星に搭載された熱赤外カメラをもとに開発された衛星搭載用の赤外カメラを使用した。このカメラには非冷却マイクロボロメータ検出器が採用されている。冷却が不要で小型軽量化が可能である一方、 230K 以下の低温を撮像する場合にはカメラのレンズなどからの熱入力がノイズ源となってしまう。小惑星探査における撮像温度範囲は $170\text{K} - 400\text{K}$ であるため、低温時の撮像画像からのノイズ除去が重要となる。ノイズの除去にはカメラ光学系の最外部にシャッタを配置し、画像を取得して対象物画像から減算することが有効である。使用するカメラにはシャッタ機構が備わっていないため、実験に使用するシャッタ機構を新規開発した。カメラの最外部にシャッタを設置するには、口径 100mm のレンズを覆う大型のシャッタを駆動させる必要があるが、真空環境でこの大きさのシャッタ機構を確実に動作させた前例は少ない。

研究成果の概要 (つづき)

真空環境における駆動機構には潤滑油の不使用や発生した熱の排除といった開発要素が含まれる。本研究では、シャッタ機構の駆動部にリニアモータを使用し、シャッタを平行移動させる方式を採用することでこの問題を解決させた。シャッタには 100mm x 200mm の長方形のアルミを用意し、サンドブラスト処理を施したアルマイト処理を行い、シャッタ外部は断熱のための **Multi layer Insulator (MLI)** を貼付する構造とした。モータは口径この大きさのシャッタを駆動させる十分なトルクを有している。駆動時に摩擦が発生しないため、潤滑油が不要で磨耗によるコンタミの発生もないことが利点である。一方でこのモータは真空環境での動作実績がないため、不測の不具合を考慮する必要がある。シャッタの両脇には駆動用のガイドレールを設置した設計とした。片側のみに駆動力となるリニアモータをとりつけたのでは精密に平行移動ができないため、両脇に二つのリニアモータを設置し、二本の駆動ガイド用ポールに沿って駆動させる方式とした。二つのリニアモータを同期させることで円滑な駆動を実現する構造となった。リニアモータ駆動時の発熱が撮像画像に影響を及ぼさないよう、モータがカメラから熱的に独立し、実験時に真空槽の外部に排熱される構造とした。

リニアモータの真空環境における使用例はこれまでほとんど報告されていない。本研究によって実用化されたリニアモータ式シャッタ機構は、そのまま宇宙機搭載機器として使用できる設計となっている。今後の惑星探査機に搭載される熱赤外カメラにこのシャッタ機構を適用することにより、230K 以下の低温対象物を観測する際の性能を向上させることが可能となる。

研究発表 (研究によって得られた研究経過・成果を発表した①～④について、該当するものを記入してください。該当するものが多い場合は主要なものを抜粋してください。)

- ①雑誌論文 (著者名、論文標題、雑誌名、巻号、発行年、ページ)
- ②図書 (著者名、出版社、書名、発行年、総ページ数)
- ③シンポジウム・公開講演会等の開催 (会名、開催日、開催場所)
- ④その他 (学会発表、研究報告書の印刷等)

雑誌論文

Arai, T., T. Nakamura, S. Tanaka, H. Demura, Y. Ogawa, N. Sakatani, Y. Horikawa, H. Senshu, T. Fukuhara, and T. Okada, Thermal Imaging Performance of TIR onboard the Hayabusa2 Spacecraft, Space Science Reviews, in press.

Fukuhara, T., T. Kouyama, S. Kato, R. Nakamura, Y. Takahashi, and H. Akiyama, Detection of small wildfire by thermal infrared camera with the uncooled microbolometer array for 50 kg class satellite, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, DOI: 10.1109/TGRS.2017.2690996, 2017

Kouyama, T., A. Kanemura, S. Kato, N. Imamoglu, T. Fukuhara and R. Nakamura, Satellite Attitude Determination and Map Projection Based on Robust Image Matching, Remote sensing, 2017, in press.

学会発表等

福原哲哉, 岡田達明, 田中智, はやぶさ2 搭載 TIR による小惑星観測と熱物性, 熱物性シンポジウム, 岡山国際交流センター, 2016, 11.

Fukuhara, T., T. Kouyama, S. Kato, and R. Nakamura, Detection of small wildfire by the uncooled micro bolometer camera onboard small satellite, International Conference on Space, Aeronautical and Navigational Electronics, Taipei, Taiwan, 2016. 11,

Fukuhara, T., T. Kouyama, S. Kato, and R. Nakamura, Attempt to the detection of small wildfire by the uncooled micro bolometer camera onboard 50 kg class satellite, American Geophysical Union, San Francisco, USA, 2016, 12.

Fukuhara, T., T. Okada, and S. Tanaka, New application of the uncooled microbolometer array to remote sensing for asteroids and moon, Lunar and Planetary Science Conference, Woodlands, USA, 2017, 3.