

令和 6 年 6 月 10 日現在

機関番号：82645

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2023

課題番号：20K14547

研究課題名（和文）小惑星赤外観測データを用いた微惑星の熱進化・内部構造進化史のモデル化

研究課題名（英文）Thermal evolution modeling of planetesimals using thermal infrared observation of asteroids

研究代表者

坂谷 尚哉（Sakatani, Naoya）

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・特任助教

研究者番号：70795187

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、はやぶさ2中間赤外カメラTIRによる小惑星リュウグウの観測データに基づいて、母天体（微惑星）の熱進化および内部構造進化を明らかにするための手法を構築することが目的である。高解像度のTIRデータを用いて、リュウグウ表面の岩塊の熱慣性、および経験則に基づいて空隙率を求めることに成功した。微惑星の熱進化計算では、多孔質粒子層の圧密過程を計算に取り入れることで、最終的な母天体の空隙率分布を推定した。これらのリュウグウの観測データと熱進化計算のパラメータスタディの結果を照合することで、母天体となる微惑星のサイズ・形成年代を制約できることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまでも微惑星がいつ形成したのか、どのようなサイズだったのかは、隕石の観察データを用いて議論されてきた。それらは同位体組成や鉱物学的な情報に基づくものであり、サンプルが地上にないと分かり得ないものであった。それに対し、本研究の手法は、リモートセンシングデータのみに基づいた推定手法を提案した。これはサンプルリターンでなくとも、小惑星の母天体の情報を得ることができることを意味しており、特に小天体赤外観測のポテンシャルを一段と向上させる成果である。

研究成果の概要（英文）：The objective of this study is to develop a method to reveal the thermal evolution and internal structural evolution of the parent body (planetesimal) based on the observation data of asteroid Ryugu by the Hayabusa2 thermal infrared imager TIR. Using high-resolution TIR data, we succeeded in determining the thermal inertia of boulders on Ryugu's surface and the porosity based on empirical relationship between the thermal conductivity and porosity. In the calculations of the thermal evolution of the planetesimals, the porosity distribution of the evolved parent body was estimated by incorporating the consolidation process of the porous dust aggregates into the calculations. By matching these Ryugu observations with the results of the parameter study of the thermal evolution calculations, it was shown that the size and formation age of the parent body can be constrained.

研究分野：惑星科学

キーワード：小惑星 熱進化 熱慣性 赤外カメラ

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

惑星の物理的・化学的な進化のトリガーとなるのはほぼ全ての場合で熱的なプロセスであり、熱進化過程を解明することが微惑星に始まった現在の太陽系天体の進化を理解する上で本質的である。C型小惑星リュウグウを探索した小惑星探査機はやぶさ2は「小惑星の表面には隕石よりも高い空隙率を持った岩石が存在する」ということを初めて明らかにした。しかし、このような高空隙率岩石を作る物理プロセスは分かっていない。本研究では、「小惑星母天体(微惑星)の熱進化が“中途半端に”進行したことによって表面に存在する高空隙率岩石が形成された」という仮説を立てた。

2. 研究の目的

本研究課題では、はやぶさ2の最新観測データを世界に先駆けて利用し、上記仮説の実証を行う。特に、母天体(微惑星)の熱進化および内部構造進化を明らかにするための手法を構築することが目的である。

3. 研究の方法

(1) 焼結体の空隙率と熱慣性の関係の実験的な調査

TIRで観測する熱慣性と空隙率の関係を調べるため、 μm サイズのガラスビーズを用いて、空隙率をコントロールした焼結体サンプルを作製する。その熱伝導率を計測し、熱伝導率(熱慣性)と空隙率の関係式を実験的に調査する。

(2) リュウグウ表面の岩塊の空隙率の推定

TIRの高解像度画像を用いて、 m スケールのリュウグウ表面岩塊の熱慣性、および空隙率を調査する。

(3) 微惑星の熱進化計算に基づくC型小惑星母天体の制約

ダストの焼結・圧密を考慮した微惑星の熱進化計算を行い、(2)で得られた空隙率が母天体で再現される条件(サイズ、形成年代)を制約する。

4. 研究成果

「はやぶさ2」のタッチダウンのリハーサルやMINERVA-II、MASCOTをリュウグウ表面に向けて投下する運用など、探査機降下運用時の高度500m以下で取得されたTIR近接撮像データ(空間解像度45m/pix以下)を用いて、表面の岩塊の温度を網羅的に調査した。表面の熱計算結果と照合し、各岩の熱慣性を推定した。その結果、岩塊の熱慣性は正規分布的な広がりを見せ(図1b)、平均値はリュウグウ全球平均と同程度の $200\text{-}300\text{ J m}^{-2}\text{ K}^{-1}\text{ s}^{-0.5}$ であり、一部極端に小さな、および大きな熱慣性を持つ岩塊が発見された。これを図1aに示す岩塊の空隙率と熱慣性の経験式を用いて空隙率に換算すると、平均で40-50%、最大で80%以上のものが存在することが分かった(図1c)。

このような空隙率の分布を、母天体の熱進化の結果として生じたものと考えた。すなわち、母天体中心部は圧密度が大きく空隙率の小さい物質、表面に近いほど始原的な特徴を保った空隙率の大きな物質となる。母天体の破壊および再集積によって生成されたリュウグウの岩塊は、このような母天体の表層から中心部までをサンプリン

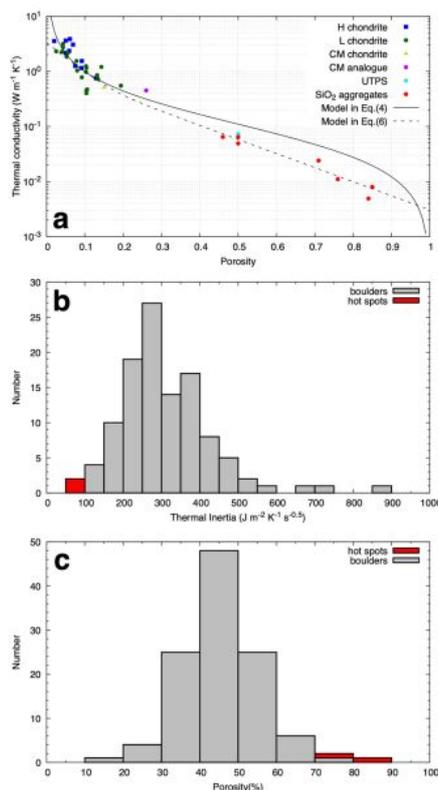


図1 (a) 熱伝導率と空隙率の関係。(b) リュウグウ岩塊熱慣性のヒストグラム。(c) リュウグウ岩塊空隙率のヒストグラム。

グしていると考えられる。様々なサイズ・形成年代の微惑星(初期空隙率 90%)に対して、Neumann et al. (Icarus 358, 114166, 2021) の手法に従って熱進化計算を行い、母天体の空隙率分布を求めた(図2)。これらの結果と図 1c の分布を照合した結果、母天体のサイズは半径 3 km 程度、形成年代 CAI 形成後 2.2 Myr という結果が最もリュウグウの岩塊の空隙率分布を説明できることが分かった。これよりも大きな、もしくは形成年代が若い母天体の場合、低空隙率物質の割合が大きくなる。

このように、本研究では赤外観測から求めた熱慣性を用いて、母天体の進化を推定する枠組みを作った。過去、このような母天体(微惑星)の情報を得るためには隕石の同位体比や鉱物学的な情報が用いられてきた。それに対して本研究では化学的な情報ではなく、物理的な情報を元にした手法を提案し、リュウグウを一例として実証することに成功した。

なお、「3. 研究の方法」のうち(1)は図 1(a)のデータを焼結体を用いて得ることを意図していたが、高空隙率焼結体の作製には成功したもの、試料の脆い性質による取り扱い性の困難さ、また line-heat source 法による熱伝導率計測センサとの接触熱伝達率の低さに起因すると思われる熱伝導率の大きな不確定性のため、十分な精度での計測ができなかった。今後、実験装置・測定手法の改善が求められる。

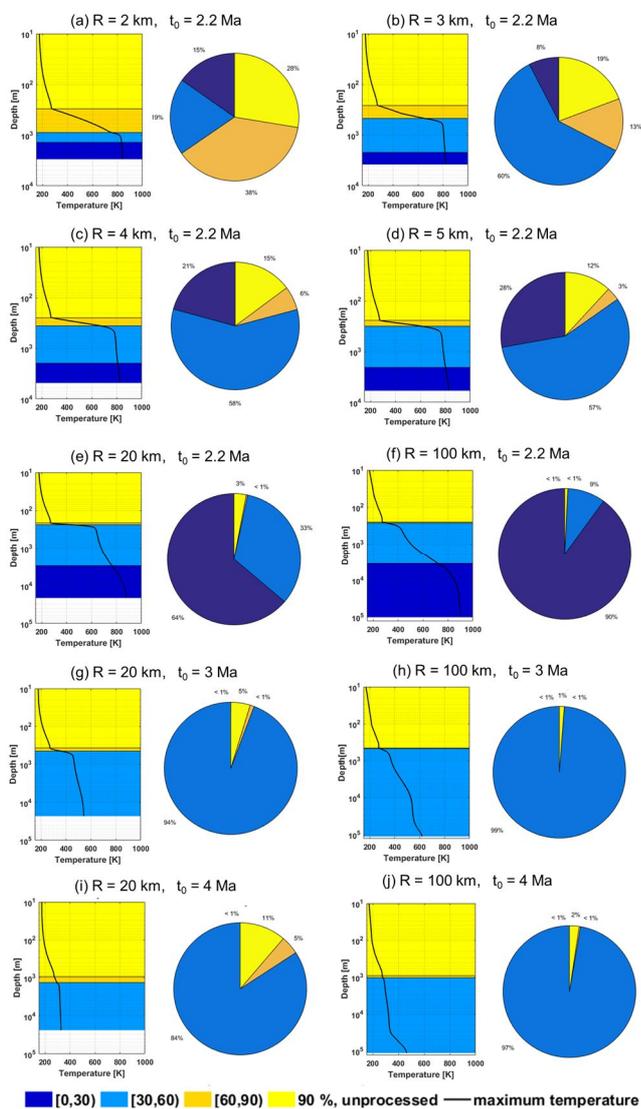


図2 微惑星の熱計算結果。Rは微惑星の半径、 t_0 は形成年代を表す。色の違いは最終的な空隙率の範囲を示す。左は深さ方向の最大温度の分布、右の円グラフは空隙率の体積分率を示す。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 4件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Senshu Hiroki, Sakatani Naoya, Morota Tomokatsu, Yokota Yasuhiro, Shimaki Yuri, Maximilian Hamm, Tanaka Satoshi, Okada Tatsuaki, Arai Takehiko, Takeuchi Hiroshi	4. 巻 43
2. 論文標題 Development of Numerical Model of the Thermal State of an Asteroid with Locally Rough Surface and Its Application	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 International Journal of Thermophysics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s10765-022-03030-z	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する
1. 著者名 Schroder Stefan, Sakatani Naoya, Honda Rie, Tatsumi Eri, Yokota Yasuhiro, Domingue Deborah, et al.	4. 巻 666
2. 論文標題 Characterization of the MASCOT landing area by Hayabusa2	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Astronomy and Astrophysics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1051/0004-6361/202244059	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する
1. 著者名 Ishizaki Takuya, Kawahara Takeru, Tomioka Kota, Tanaka Satoshi, Sakatani Naoya, Nakamura Tomoki, Nagano Hosei	4. 巻 43
2. 論文標題 Measurement of Thermal Diffusivity Distribution for Murray and Murchison Meteorites Using Lock-in Thermography	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 International Journal of Thermophysics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s10765-022-03026-9	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Sakatani Naoya, Tanaka Satoshi, Arakawa Sota	4. 巻 43
2. 論文標題 Development of a Small-Sized Line Heat Source Apparatus for the Thermal Conductivity Measurement of Extraterrestrial Soils	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 International Journal of Thermophysics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s10765-022-03007-y	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Tatsumi Eri, Sakatani Naoya, Riu Lucie, et al.	4. 巻 12
2. 論文標題 Spectrally blue hydrated parent body of asteroid (162173) Ryugu	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41467-021-26071-8	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 N. Sakatani, S. Tanaka, T. Okada, et al.	4. 巻 -
2. 論文標題 Anomalously porous boulders on (162173) Ryugu as primordial materials from its parent body	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nature Astronomy	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41550-021-01371-7	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計4件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件)

1. 発表者名 Naoya Sakatani, Satoshi Tanaka, Tatsuaki Okada, et al.
2. 発表標題 Local variation in thermal inertia around the artificial impact crater on Ryugu
3. 学会等名 Japan Geoscience Union (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 N. Sakatani, S. Tanaka, T. Okada, et al.
2. 発表標題 Thermophysical property of the artificial impact crater on asteroid Ryugu
3. 学会等名 Japan Geophysical Union (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 坂谷尚哉, 田中智, 岡田達明, 他
2. 発表標題 Anomalously porous, dark, and primitive boulders on asteroid Ryugu
3. 学会等名 日本惑星科学会秋季講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 N. Sakatani, S. Tanaka, T. Okada, et al.
2. 発表標題 ANOMALOUSLY POROUS AND DARK ROCKS ON ASTEROID (162173) RYUGU.
3. 学会等名 Lunar and Planetary Science Conference (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>小惑星探査機「はやぶさ2」観測成果論文の Nature Astronomy 誌掲載について https://www.jaxa.jp/press/2021/05/20210525-1_j.html</p>

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
---------	---------