



『熱撮像によって明らかにされた
始原天体リュウグウの多孔質な物質的特徴』
Highly porous nature of a primitive asteroid
revealed by thermal imaging

岡田達明 (ISAS/JAXA) ほか、Nature 2020
(電子版：2020/3/17 (日本時間))

T. Okada *et al.* Nature 2020
(Published on-line on 17 March 2020 (JST))

Hayabusa2 TIR Team, Joint Science Team, & Project Team



Highly porous nature of a primitive asteroid revealed by thermal imaging

<https://doi.org/10.1038/s41586-020-2102-6>

Received: 29 October 2019

Accepted: 15 January 2020



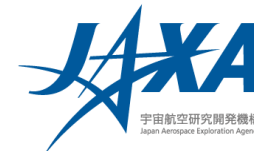
Check for updates

Tatsuaki Okada^{1,2,✉}, Tetsuya Fukuhara³, Satoshi Tanaka^{1,4,5}, Makoto Taguchi³, Takehiko Arai⁶, Hiroki Senshu⁷, Naoya Sakatani¹, Yuri Shimaki¹, Hirohide Demura⁸, Yoshiko Ogawa⁸, Kentaro Suko⁸, Tomohiko Sekiguchi⁹, Toru Kouyama¹⁰, Jun Takita¹¹, Tsuneo Matsunaga¹², Takeshi Imamura⁵, Takehiko Wada¹, Sunao Hasegawa¹, Jörn Helbert¹³, Thomas G. Müller¹⁴, Axel Hagermann¹⁵, Jens Biele¹⁶, Matthias Grott¹³, Maximilian Hamm^{13,17}, Marco Delbo¹⁸, Naru Hirata⁸, Naoyuki Hirata¹⁹, Yukio Yamamoto^{1,4}, Seiji Sugita², Noriyuki Namiki^{4,20}, Kohel Kitazato⁸, Masahiko Arakawa¹⁹, Shogo Tachibana^{1,2}, Hitoshi Ikeda²¹, Masateru Ishiguro²², Koji Wada⁷, Chikatoshi Honda⁸, Rie Honda²³, Yoshiaki Ishihara¹², Koji Matsumoto^{4,20}, Moe Matsuoka¹, Tatsuhiro Michikami²⁴, Akira Miura¹, Tomokatsu Morota², Hirotomo Noda²⁰, Rina Noguchi¹, Kazunori Ogawa^{19,25}, Kei Shirai¹⁹, Eri Tatsumi^{2,26}, Hikaru Yabuta²⁷, Yasuhiro Yokota¹, Manabu Yamada⁷, Masanao Abe^{1,4}, Masahiko Hayakawa¹, Takahiro Iwata^{1,4}, Masanobu Ozaki^{1,4}, Hajime Yano^{1,4}, Satoshi Hosoda¹, Osamu Mori¹, Hirotaka Sawada¹, Takanobu Shimada¹, Hiroshi Takeuchi^{1,4}, Ryudo Tsukizaki¹, Atsushi Fujii¹, Chikako Hirose²¹, Shota Kikuchi¹, Yuya Mimasu¹, Naoko Ogawa^{1,25}, Go Ono²¹, Tadateru Takahashi^{1,29}, Yuto Takei¹, Tomohiro Yamaguchi^{1,30}, Kent Yoshikawa²¹, Fuyuto Terui¹, Takanao Saiki¹, Satoru Nakazawa¹, Makoto Yoshikawa^{1,4}, Seiichi Watanabe^{1,28} & Yulchi Tsuda^{1,4}

¹Institute of Space and Astronautical Science (ISAS), Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA), Sagami-hara, Japan. ²University of Tokyo, Tokyo, Japan. ³Rikkyo University, Tokyo, Japan. ⁴The Graduate University for Advanced Studies, SOKENDAI, Hayama, Japan. ⁵University of Tokyo, Kashiwa, Japan. ⁶Ashikaga University, Ashikaga, Japan. ⁷Planetary Exploration Research Center, Chiba Institute of Technology, Narashino, Japan. ⁸University of Aizu, Aizu-Wakamatsu, Japan. ⁹Hokkaido University of Education, Asahikawa, Japan. ¹⁰National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), Tokyo, Japan. ¹¹Hokkaido Kitami Hokuto High School, Kitami, Japan. ¹²National Institute for Environmental Studies (NIES), Tsukuba, Japan. ¹³German Aerospace Center (DLR), Berlin, Germany. ¹⁴Max-Planck Institute for Extraterrestrial Physics, Garching, Germany. ¹⁵University of Stirling, Stirling, UK. ¹⁶German Aerospace Center (DLR), Cologne, Germany. ¹⁷University of Potsdam, Potsdam, Germany. ¹⁸Université Côte d'Azur, Observatoire de la Côte d'Azur, CNRS, Laboratoire Lagrange, Nice, France. ¹⁹Kobe University, Kobe, Japan. ²⁰National Astronomical Observatory of Japan (NAOJ), Mitaka, Japan. ²¹Research and Development Directorate, Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA), Sagami-hara, Japan. ²²Seoul National University, Seoul, South Korea. ²³Kochi University, Kochi, Japan. ²⁴Kindai University, Higashi-Hiroshima, Japan. ²⁵Space Exploration Center, Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA), Sagami-hara, Japan. ²⁶Instituto de Astrofísica de Canarias, University of La Laguna, La Laguna, Tenerife, Spain. ²⁷Hiroshima University, Higashi-Hiroshima, Japan. ²⁸Nagoya University, Nagoya, Japan. ²⁹Present address: NEC Corporation, Fuchu, Japan. ³⁰Present address: Mitsubishi Electric Corporation, Kamakura, Japan. ✉e-mail: okada@planeta.sci.isas.jaxa.jp



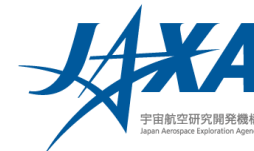
概要 (全訳)



- ◆ C型（炭素質）小惑星は46億年前の太陽系形成時の原始的物質を保存する初期太陽系の「化石」である。
- ◆ C型小惑星は炭素質(C)コンドライトの母天体とされ、惑星形成過程の理解に必須な探査対象である。
- ◆ しかし、その物性についてはほとんど分かっていない。大気突入時に崩壊して原型を留めないからだ。
- ◆ われわれは小惑星探査機「はやぶさ2」に搭載された中間赤外カメラ（TIR）を用いて、史上初のC型小惑星リュウグウの全球撮像を連続1自転分実施した。
- ◆ その結果、表層の岩塊も周辺土壌もほぼ同じ温度であり、導出される熱慣性（ $\sim 300 \text{ J m}^{-2} \text{ s}^{-0.5} \text{ K}^{-1}$ (tiu)）が極めて低い値であることが分かった。
- ◆ 固い稠密な岩塊と砂礫質のレゴリスに表面が覆われているという「はやぶさ2」の到着前の予測に反し、この結果は、岩塊が通常のCコンドライト隕石に比べてずっと空隙率が高い多孔質な物質で構成されていて、周辺土壌も同様な多孔質物質の破片（大きさ10cmかそれ以上）で覆われていることを示唆する。
- ◆ 「はやぶさ2」探査機の表面降下中の高解像度熱撮像から、表面が多孔質の岩塊や岩石片で覆われていることが確認された。
- ◆ また、岩塊や岩石片による表面凹凸の影響（ラフネス効果）によって、朝～夕の温度変化が小さくみえることがリュウグウ上の多地点で確認された。
- ◆ 低高度から熱撮像した画像には、周囲に比べてひときわ低温の岩塊「Cold Spot」が複数個発見された。その熱慣性は600tiu以上であり、地上で発見される典型的なCコンドライト隕石と同程度である。
- ◆ 以上の結果から制約されるリュウグウ形成過程は、過去にあまり圧密されていない高空隙な母天体が形成され、衝突破壊によって飛散した岩塊や破片が再集合したラブルパイル天体であろう。
- ◆ 稠密な岩塊は母天体の中心付近で圧密を受けたか、衝突破壊を引き起こした外部起源の衝突天体の生き残りであろう。
- ◆ 高空隙な小惑星の存在は、ふわふわの宇宙塵から稠密な岩石天体を形成する過程の途中の状態を示す貴重な証拠だろう



概要 (要点)



◆ 炭素質（C型）小惑星:

- 初期太陽系からの始原的物質を保存
- 水や有機物など揮発性成分に富む炭素質(C)コンドライト隕石の母天体と考えられる
- 惑星形成過程の理解に必須な探査対象
- 物性についてはほとんど分かっていない

◆ TIRによるC型小惑星リュウグウの熱撮像:

- 史上初の小惑星全球の熱撮像を連続1自転実施！
- 史上初の小惑星の超高解像度な熱撮像実施！

◆ サプライズ

- 岩塊と周辺土壌がほぼ同じ温度日変化、すなわち熱的に同等の物質。
- 岩塊の熱慣性 (~300 tiu) は、Cコンドライト隕石 (600~1000 tiu) より低く、極めて高空隙を示唆。

- 周辺土壌は砂礫質のレゴリスではなく、岩塊同様の高空隙な、10cm大の小片で覆われている。
- 温度日変化が小さい。高空隙な岩塊や岩石片による凹凸の影響 (ラフネス効果) による。
- 低温な岩塊「Cold Spot」の存在。熱慣性600tiu以上で、Cコンドライト的な物質と推定される。

◆ リュウグウ形成過程の新しいシナリオ

- リュウグウは高空隙な母天体を起源とするラブルパイル天体である。
- 母天体内部の大部分では、稠密化するほど圧密や圧縮を受けなかった。
- 稠密な低温岩塊は、母天体中心付近で圧密を受けた可能性あり。母天体の衝突破壊を引き起こした衝突天体を起源とする可能性もある。

- ◆ 高空隙な小惑星の存在は、ふわふわの宇宙塵から稠密な天体を形成する途中の過程を示している。



本論文のハイライト



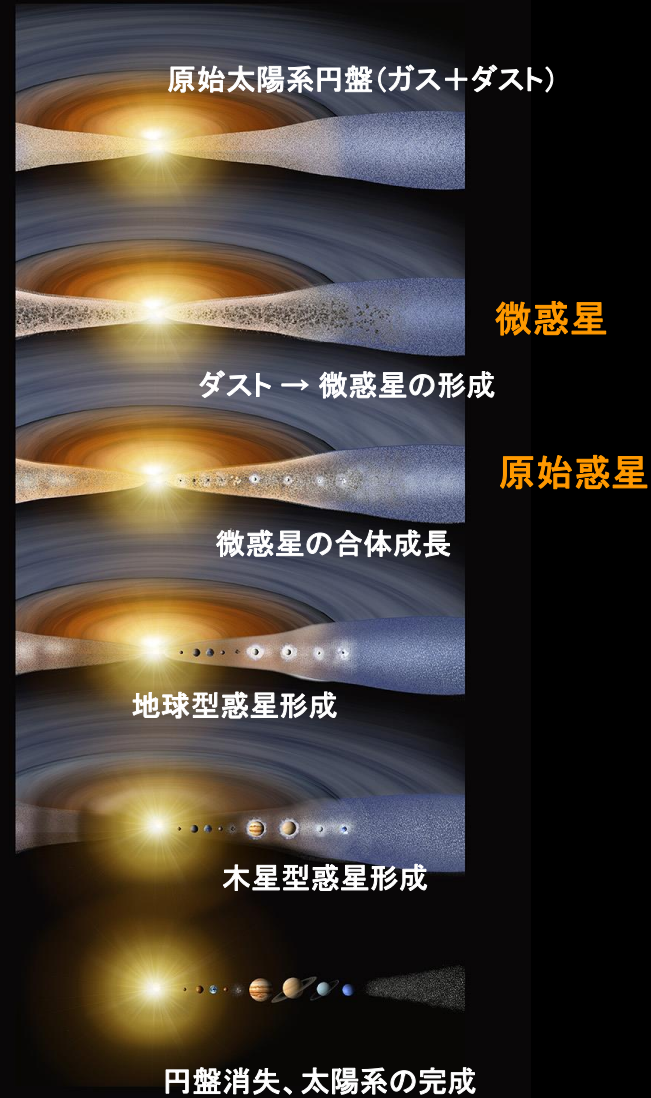
- ◆ 史上初の、高解像度かつ1自転分の小惑星全球の熱画像を取得した。
- ◆ 小惑星表面が、レゴリスではなく高空隙な岩塊や岩石片で覆われていることを発見した。例外的に低温の岩塊「Cold Spot」の存在も発見した。
- ◆ 温度日変化が小さいことが発見されたが、表面凹凸が主要因である。過去に彗星表面で観測された温度日変化が小さい現象も同様かもしれない。
- ◆ 小惑星形成シナリオの更新：始原天体(微惑星含む)の多くは圧密・圧縮を受けておらず、高空隙のままである可能性。ふわふわの宇宙塵から稠密な天体が形成され途中の段階を見ている？



はやぶさ2の科学：太陽系の誕生と進化の解明



断面図



テーマ

参考：はやぶさ2
ファクトシートより

①惑星を作った物質を調べる

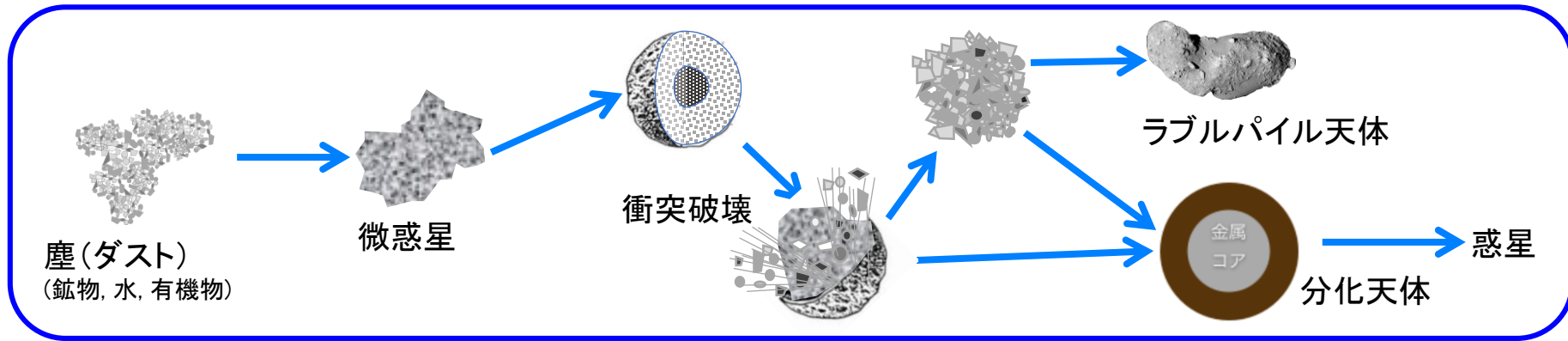
原始太陽系円盤にはどのような物質があり、惑星が誕生するまでにどのように変化したのか？

②惑星への成長過程を調べる

微惑星から惑星へ、天体はどのようにして成長していったのか？

(© JAXA)

②惑星への成長過程を調べる



参考：
はやぶさ2
ファクト
シートより

(© JAXA)

- 惑星を作る元になった天体(微惑星)の構造を解明する。
- 天体の衝突破壊・衝突合体・再集積の過程でどのようなことが起こるのかを解明する。



微惑星から惑星までの成長を解明

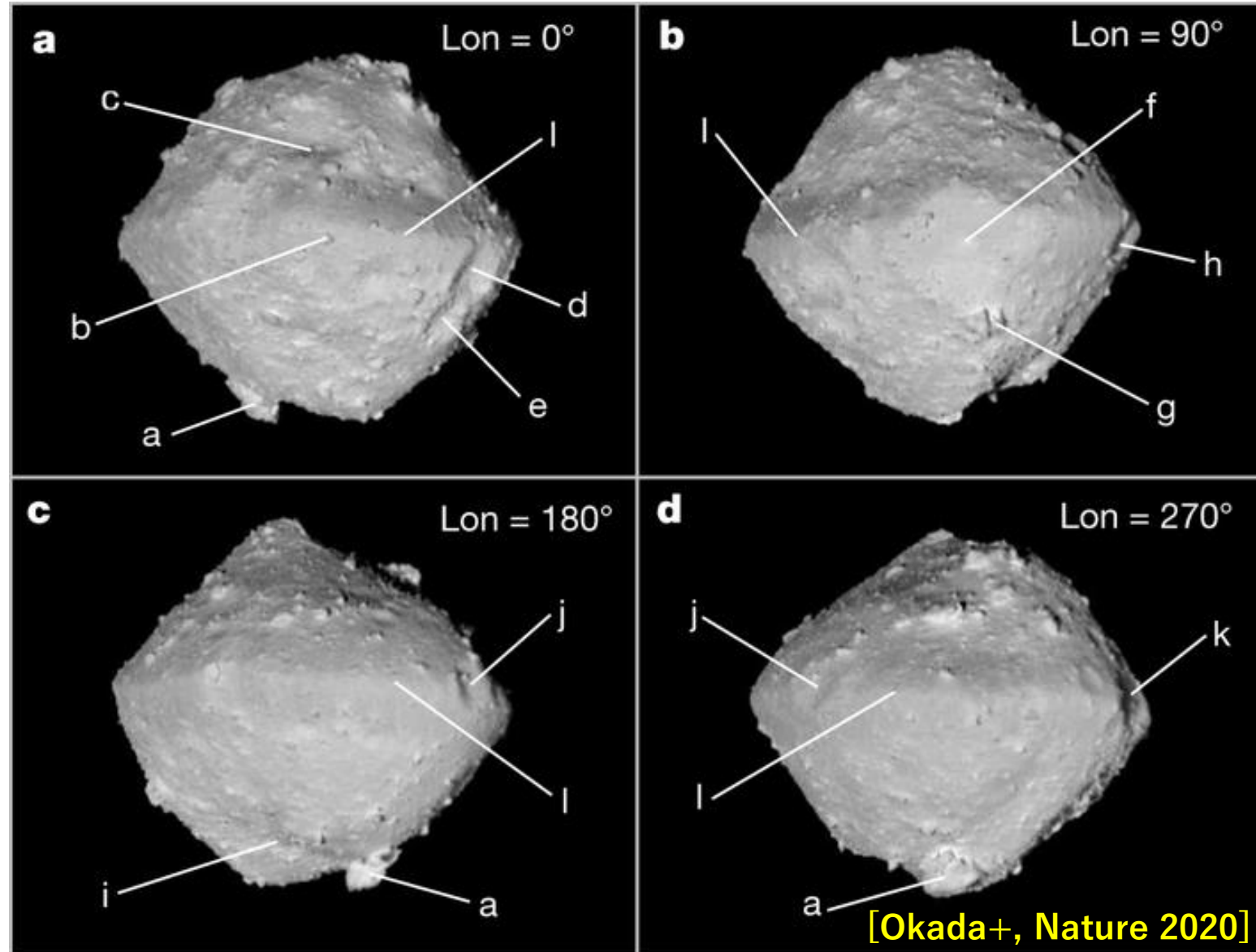
キーワード:

- ラブルパイル天体**: がれきの寄せ集めのような天体
- 衝突破壊・衝突合体**: 天体同士が衝突すると、互いに破壊しあう場合と合体して1つの天体になる場合がある
- 再集積**: 衝突によってばらばらになった破片が重力で集まること

Fig.1 TIRによる全球熱画像：形状および地形

- ◆ 全ての主要な地形や地質構造は熱画像で検知が可能
- ◆ 全球形状モデルと比較が可能（昼夜問わず観測が可能）
- ◆ 季節変動の検知が可能（南半球が夏期のため高温）

Fig. 1 中高度観測における小惑星リュウグウの熱撮像（4方向）。
 (a) Otohime Saxum, (b) Catafo Saxum, (c) Cendrillon crater, (d) Momotaro crater, (e) Kibidango crater, (f) Urashima crater, (g) Ejima Saxum, (h) Kintaro crater, (i) Tokoyo Fossa, (j) Brabo crater, (k) Kolobok crater, and (l) Ryujin Dorsum (the equatorial ridge)

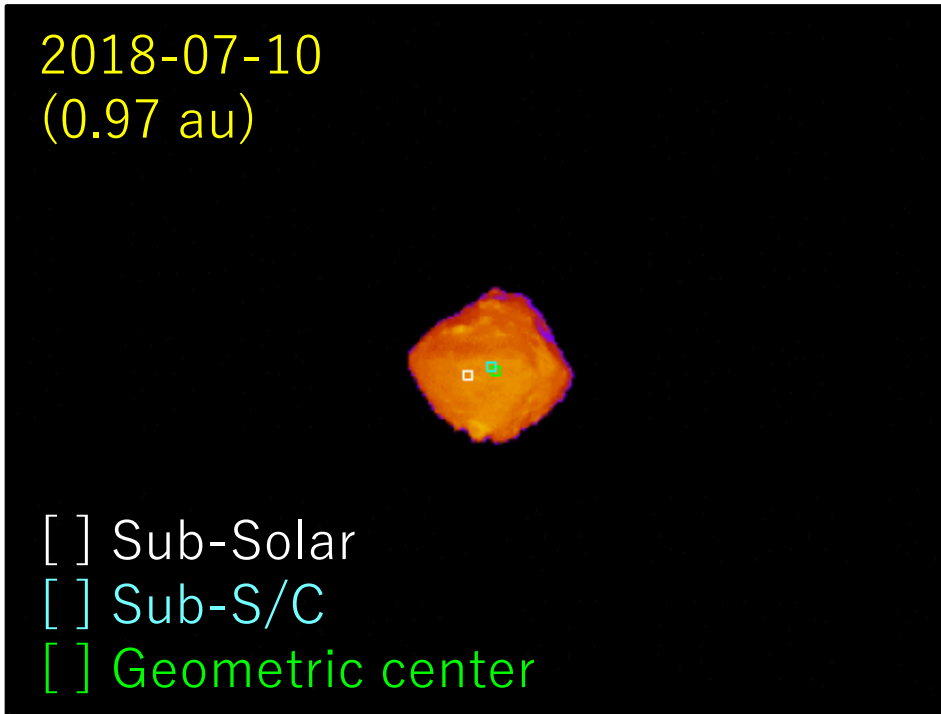




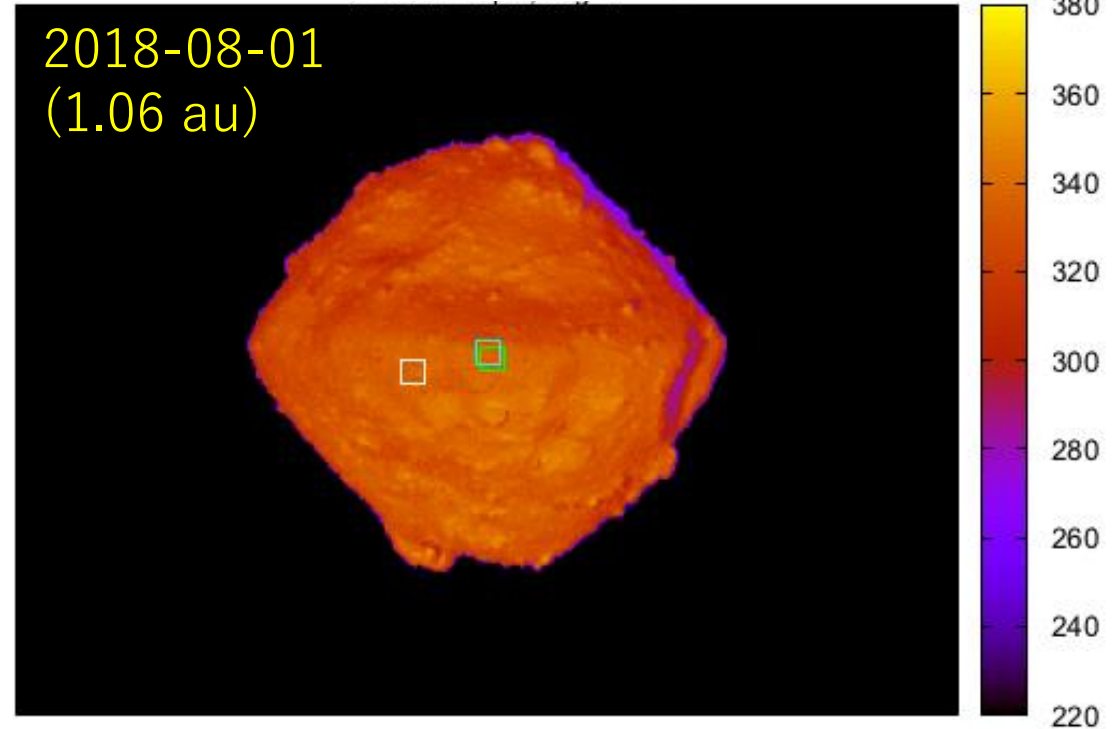
参考: 全球熱モデル (HP、MID)

[Okada+, Nature 2020,
Supplementary Information]

Box-A: 20km (~18m/pixel)



Mid-Alt: 5km (~4.5m/pixel)



- **Box-A:** 史上初の空間分解かつ1自転分の小惑星全球熱撮像
- **Mid-Alt:** 岩塊の温度は周辺土壌と同程度 → いずれも低熱慣性、高空隙物質



Fig.2 全球熱撮像：観測vs計算 ⇒

超高空隙!?



◆ 温度日変化の観測値は、熱慣性を変えた計算値に比べて変化が小さい。

➤ 非常に高空隙かつ激しい凹凸

◆ 岩塊と周辺土壌が同じ温度

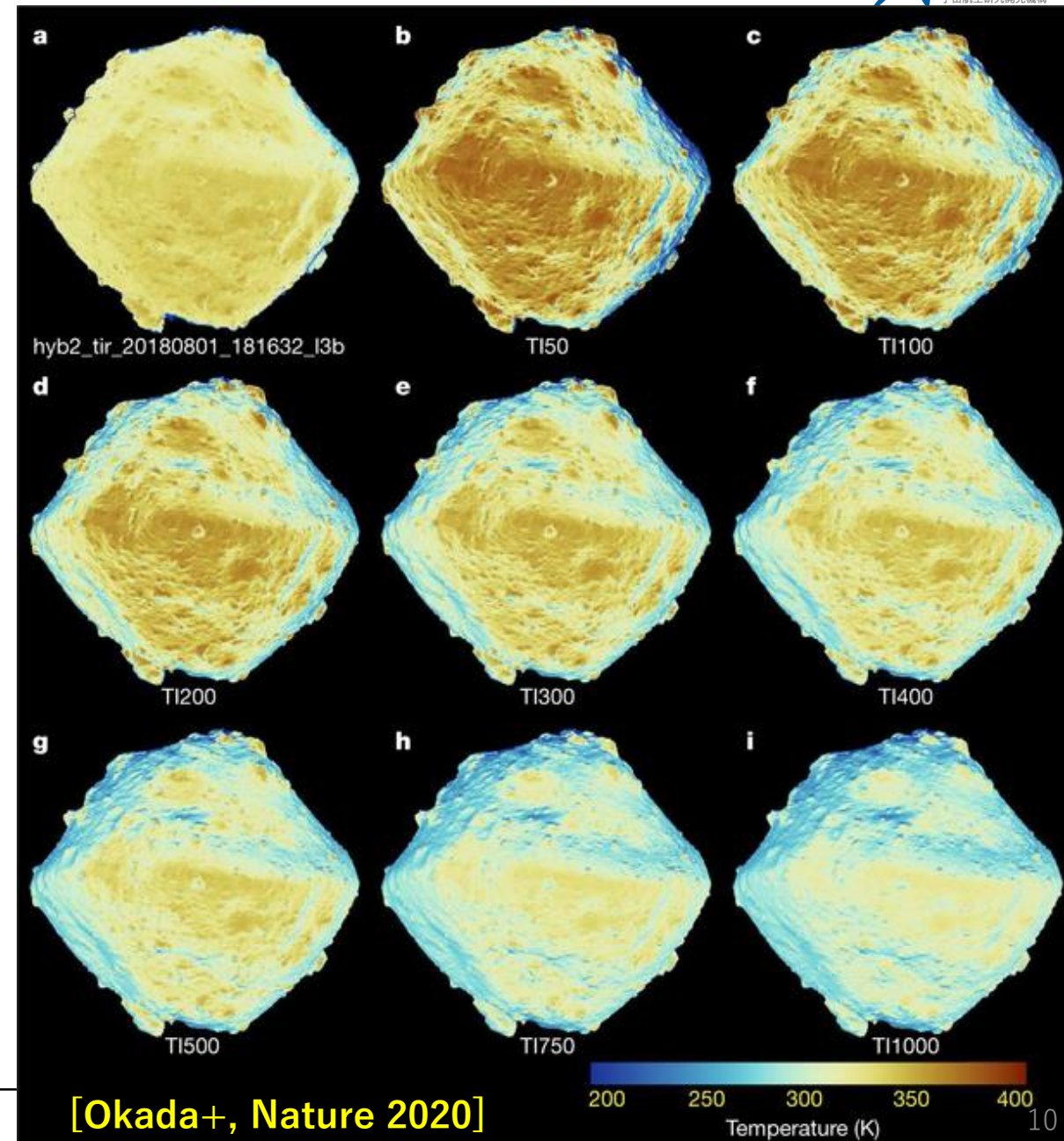
➤ 超高空隙な物質: $TI = 300 \pm 100$ tiu,
(Cf. Cコンドライト(典型): $TI = 600-1000$ tiu)

➤ MASCOT/MARAがその場測定した岩塊と同等:
 $TI = 282^{+93}_{-35}$ tiu [Grott+, 2019]

➤ 地上観測の結果と同等:
 $TI = 150-300$ tiu, [Mueller+, 2017]

Fig. 2 中高度観測での観測値を形状モデルにプロットした図と、熱慣性を50～1000tiuで与えた場合の計算結果との比較。

a, 中高度観測中の2018年8月1日18:16:32にTIRで撮像したリュウグウの輝度温度を形状モデル (SHAPE_SFM_200k_v20180804) 上にプロットした図。b-i, ラフネス効果無しの熱モデルで計算した熱画像。b. 熱慣性: 50 tiu, c. 100 tiu, d. 200 tiu, e. 300 tiu, f. 400 tiu, g. 500 tiu, h. 750 tiu, i. 1,000 tiu。リュウグウの熱慣性として 300 ± 100 tiu が最も観測と合致する。

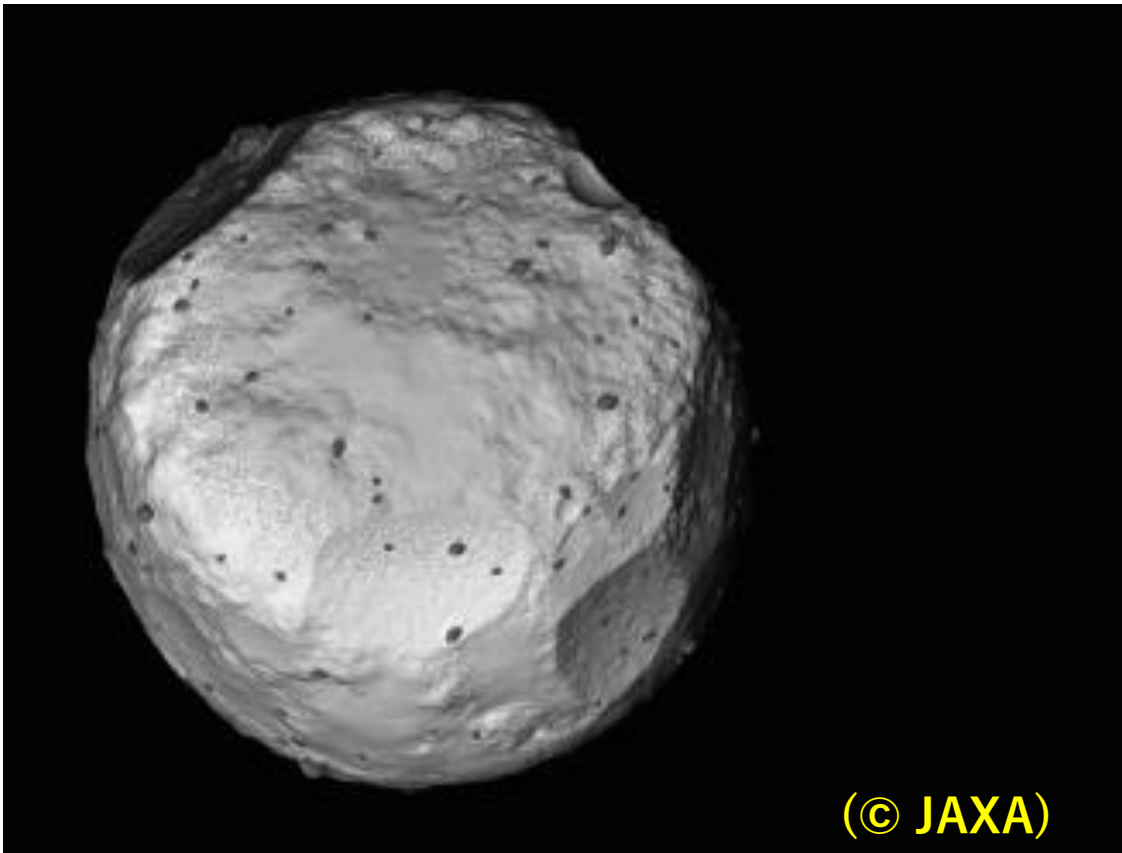


[Okada+, Nature 2020]

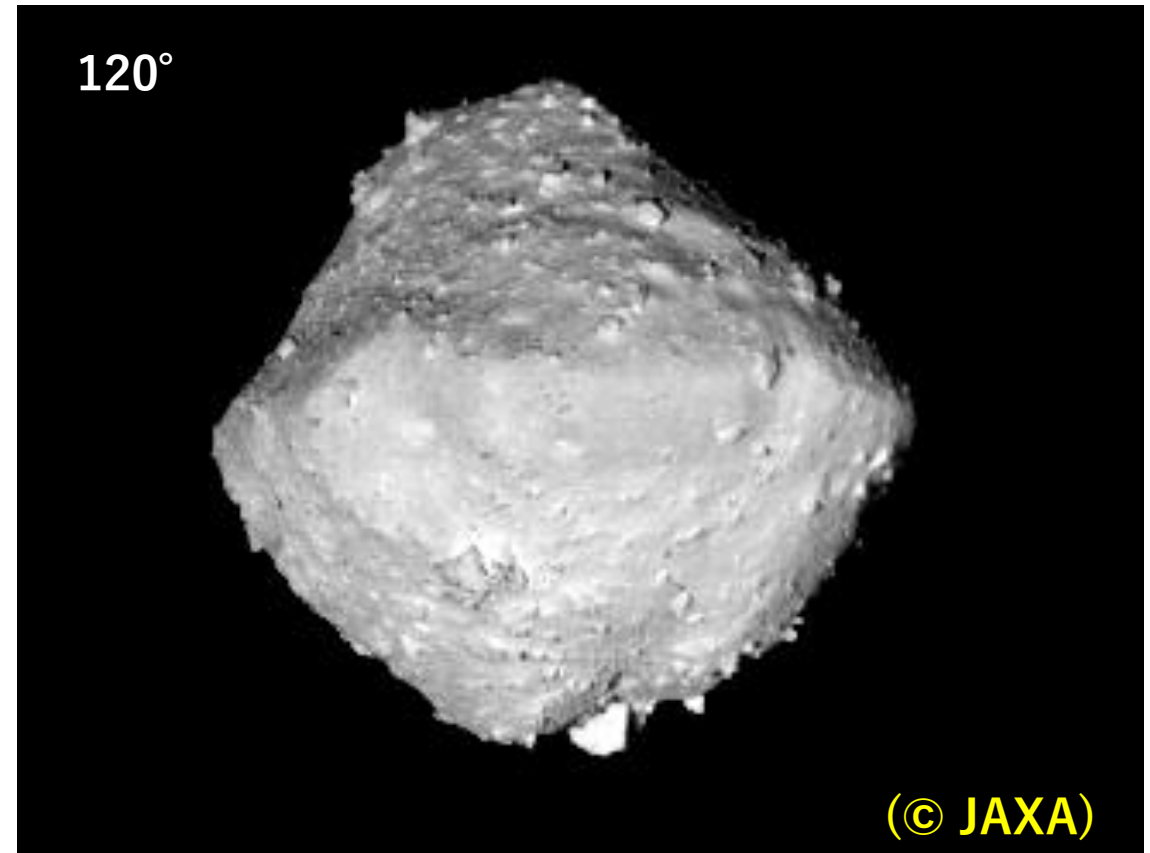


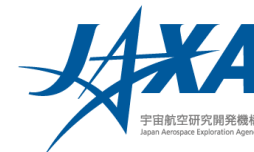
参考: 岩塊は想定外に低い熱慣性 ～ 非常に高空隙な物質で構成される ～

Ryugoid (参照モデル小惑星)@Mid-Alt
(到着前の訓練画像)
TI (仮定): 岩塊: 1600tiu, レゴリス: 300tiu



Ryugu (観測値) @Mid-Alt
(観測結果: LT= 120° longitude)
TI (導出): 岩塊 & 周辺土壌: ~300tiu





- **岩塊**：高空隙な物質かつ凹凸の激しい表面（緯度依存性は非常に低い）。
- **周辺土壌**：10cm大以上の高空隙な岩石小片で覆われる。

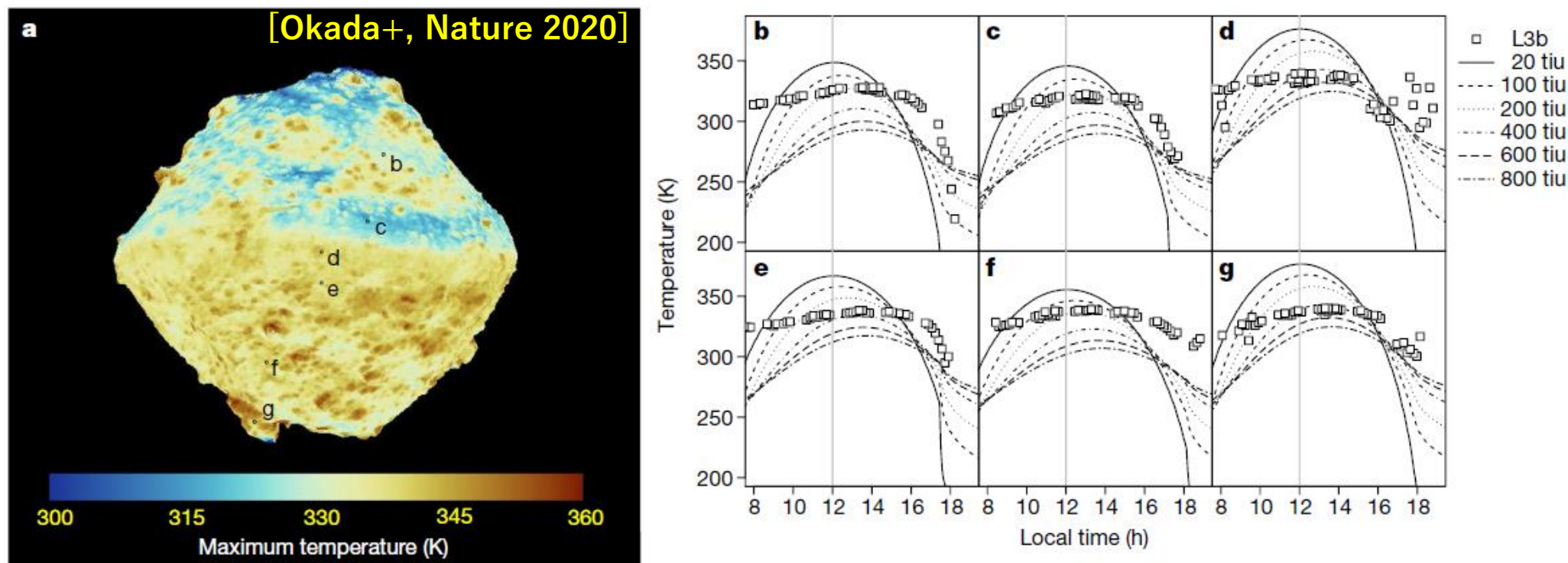


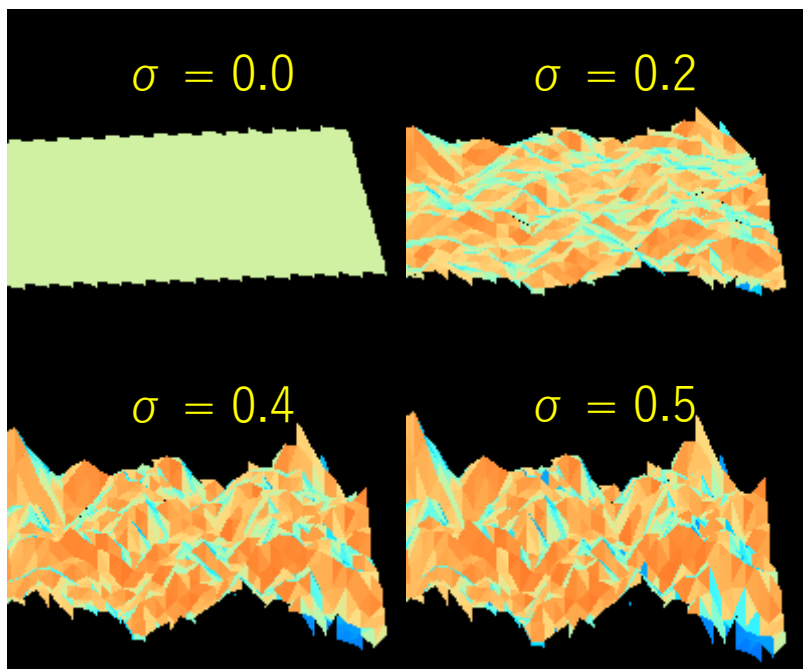
Fig. 3 1日の最高温度の分布と各6地点の温度変化の様子と、単純な熱モデルとの比較. **a**, 中高度観測中の2018年8月1日にTIRが観測したリュウグウ表面の最高輝度温度を形状モデル (SHAPE_SFM_200k_v20180804) 上にプロットした図。 **b–g**, TIRで観測したパネル **a** 上の点 **b–g** の温度 (□) と、各点の位置で様な熱慣性 $20 - 800 \text{ tiu}$ を与えた場合の計算値 (破線) との比較。 **L3b** は輝度温度を形状モデル上にプロットしたプロダクト。各点のポリゴンID、緯度・経度、地点の特徴は、Extended Data Table 1. に示す。



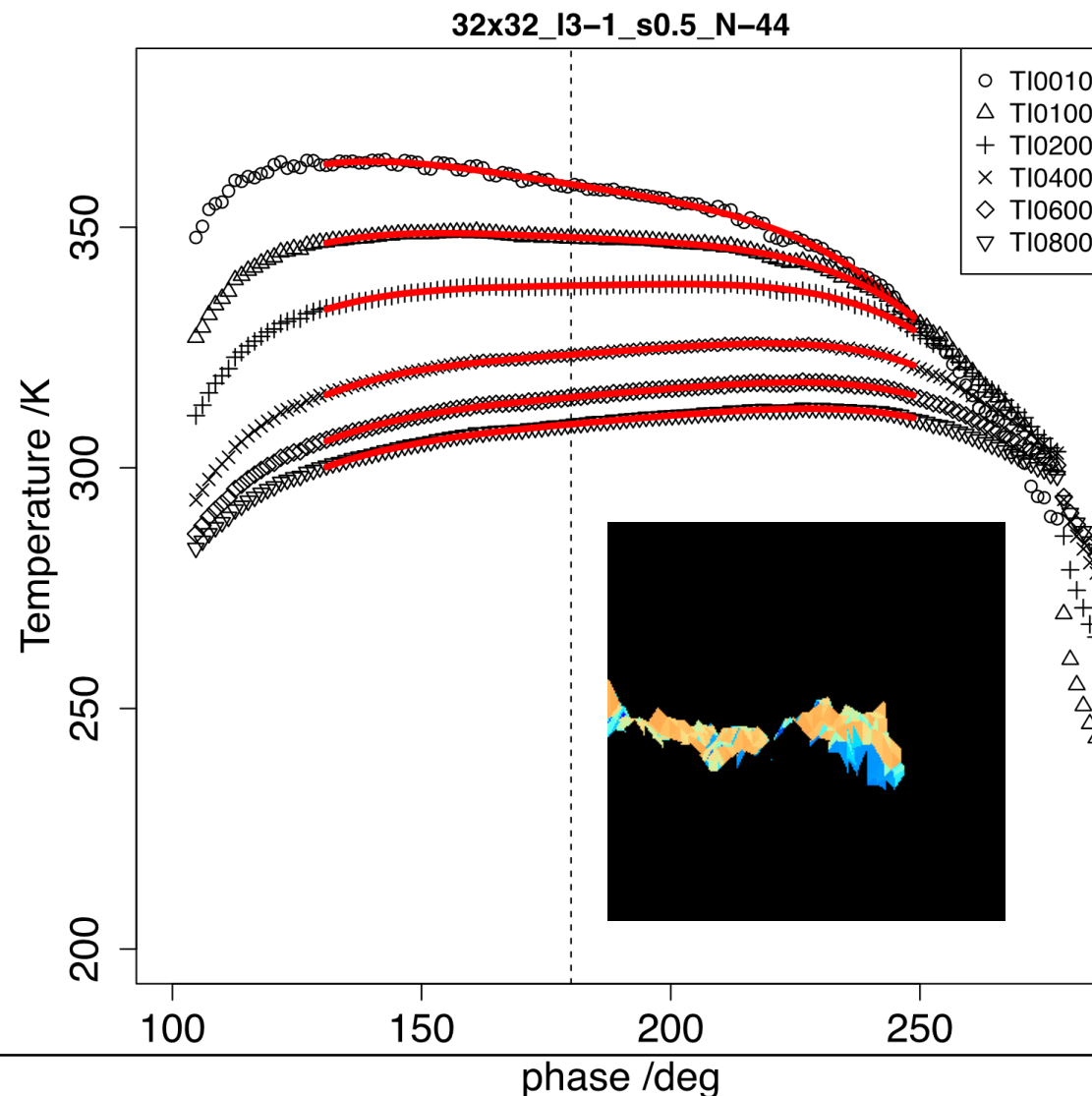
参考: 表面凹凸の影響

■ 凹凸表面の熱物理モデル

- ラフネス・パラメータ: σ
 - 鉛直方向の変位
- パラメータサーチ:
 - 熱慣性の範囲 TI: 10 to 800 tiu
 - ラフネスの範囲 σ : 0.0 to 0.5
 - 緯度の範囲 Lat: -88° to 88°



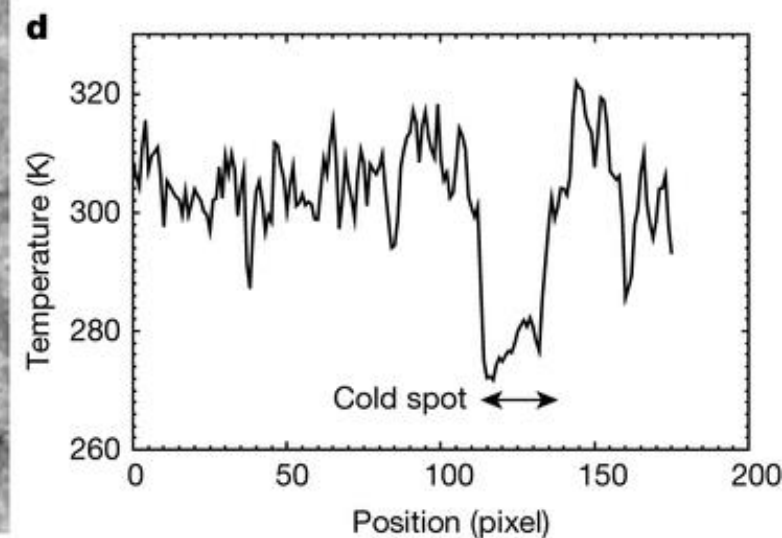
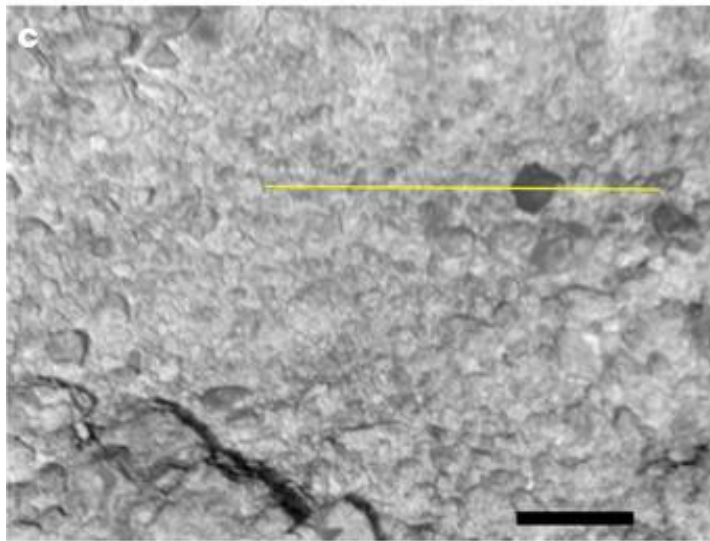
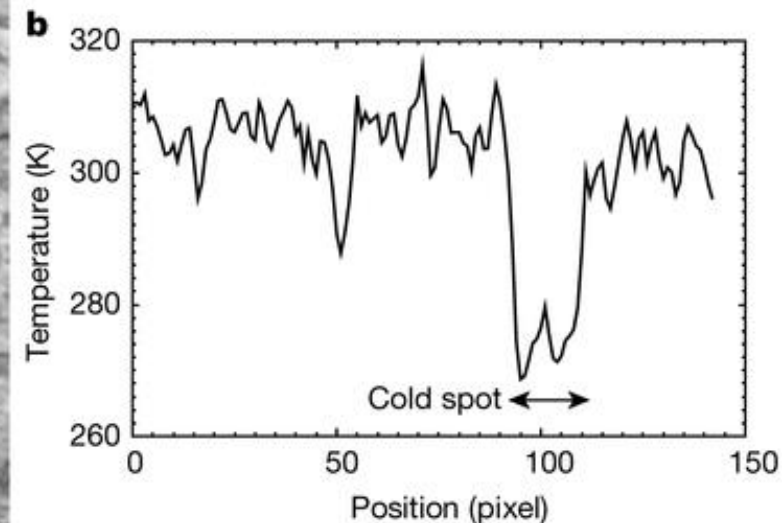
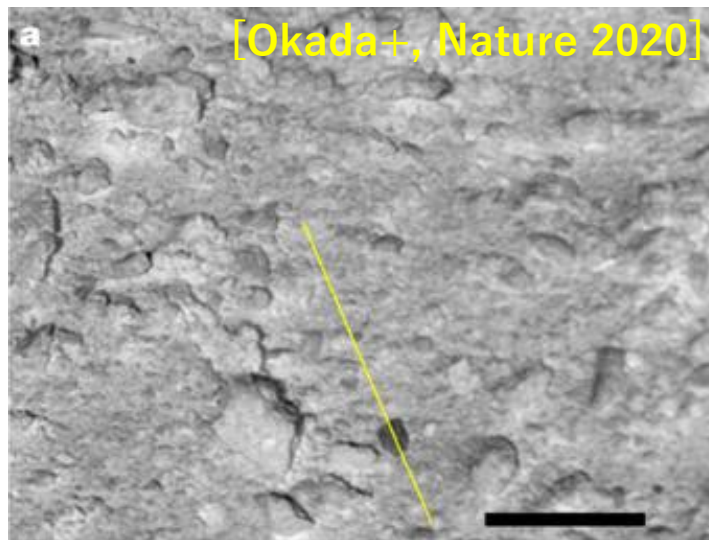
Ref. 8: Shimaki+ (2019, LPSC)
ラフネスモデル: Senshu+ (2019, LPSC)
→ 改訂版投稿中:
Shimaki+ *submitted to Icarus*



◆ 降下中の高解像度熱撮像：

- 表層は熱慣性 200-300 tiu 程度の高空隙な岩塊や岩石小片(> 10cm)に覆われている。
- 周囲より20K以上も低温の岩塊を複数発見。熱慣性は600-1000 tiuで、Cコンドライトと同等である。

Fig. 4 降下中高解像度熱画像中で発見された「Cold spot」と呼ばれる冷たい岩塊。 **a**, タッチダウンリハーサルTD1-R1-A中の2018年10月15日13:34:44(UTC)に、高度78.8mからTIRで撮像したリュウグウ表面の熱画像。 **b**, パネルa上の黄色線上の温度プロット。「Cold Spot」の岩塊で顕著な温度低下が観測された。 **c**, タッチダウンリハーサルTD1-R1-A中の2018年10月15日13:44:20(UTC)に、高度21.9mからTIRで撮像したリュウグウ表面の熱画像。ともに、温度が周辺よりも20K以上低く、稠密で圧密を受けた岩塊であることを示唆する。スケールはパネルaが5m、パネルcが1mである。





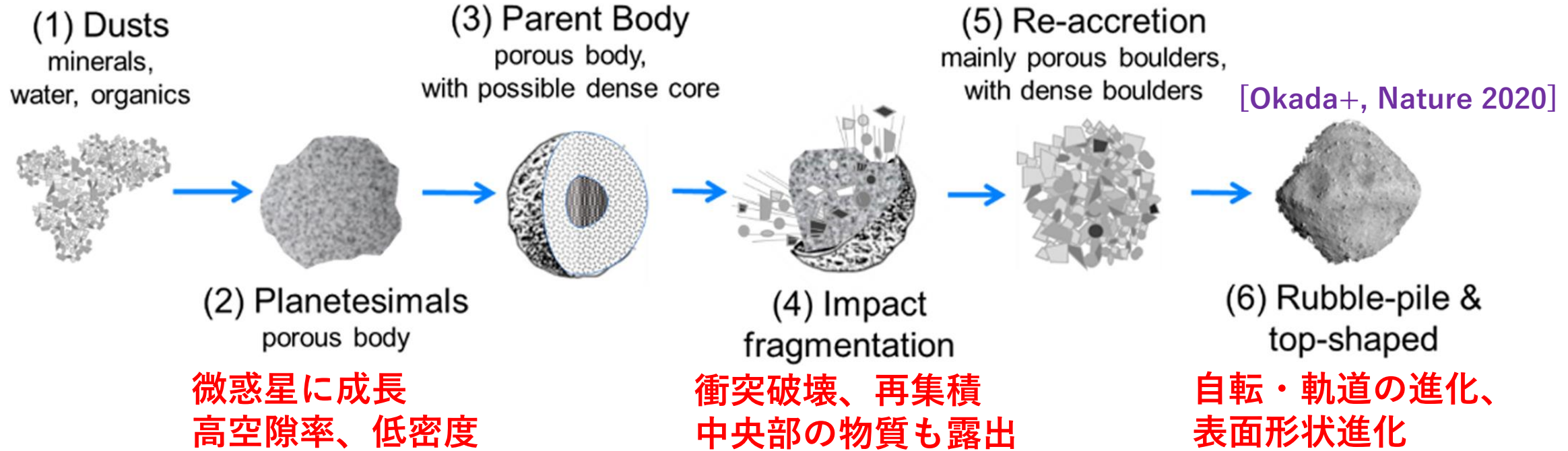
Extended Data Fig. 4: リュウグウ形成シナリオ ～ 高空隙な微惑星仮説～



ふわふわの宇宙塵
寄せ集まって成長

母天体形成：高空隙、熱進化
は微小、中心部はやや圧密？

ラブルパイル天体。高空隙な岩
塊と岩石片、一部に圧密岩塊



Extended Data Fig. 4. 多孔質な母天体からのリュウグウ形成シナリオ：(1) 原始太陽系円盤内で高空隙な塵が集まり始める。(2) 小さな塵や小石サイズの塊が集積してゆき、高空隙な微惑星が形成される。(3) やがてリュウグウの母天体が形成されたが、低重力下で圧密が効かないため大部分は高空隙のままであった。重力荷重で内部ほど圧密されていた可能性はある（図ほど明確な境界があるとは限らない）。(4) 母天体が天体衝突によって破壊された。母天体内部の破砕物が、現在のリュウグウ表面の岩塊であろう。(5) 破片が集まって現在のリュウグウが形成された。表面の岩塊や岩石小片の大部分は高空隙なままであるが、一部の稠密な岩塊は母天体の中心付近で圧密されたものかもしれない。(6) 自転や自転速度の変化に伴って現在の形状（コマ型）に変形した。



まとめ



◆ TIRによるC型小惑星リュウグウの熱撮像:

- 史上初の小惑星全球の熱撮像を連続1自転実施！
- 史上初の小惑星の超高解像度な熱撮像実施！

◆ サプライズ

- 岩塊と周辺土壌がほぼ同じ温度日変化、すなわち熱的に同等の物質。
- 岩塊の熱慣性 (~300 tiu) は、Cコンドライト隕石 (600~1000 tiu) より低く、極めて高空隙を示唆。
- 周辺土壌は砂礫質のレゴリスではなく、岩塊同様の高空隙な、10cm大の小片で覆われている。
- 温度日変化が小さい。高空隙な岩塊や岩石片による凹凸の影響 (ラフネス効果) による。
- 低温な岩塊「Cold Spot」の存在。熱慣性600tiu以上で、Cコンドライト的な物質と推定される

◆ リュウグウ形成過程の新しいシナリオ

- リュウグウは高空隙な母天体を起源とするラブルパイル天体である。
- 母天体内部の大部分では、稠密化するほど圧密や圧縮を受けなかった。
- 稠密な低温岩塊の存在は、中心付近で圧密を受けたほど母天体が大きかった可能性を示す。母天体の衝突破壊を引き起こした衝突天体を起源とする、外部起源の可能性もある。

◆ 高空隙な小惑星の存在は、ふわふわの宇宙塵から稠密な天体を形成する途中の過程を示している。

- 多孔質な状態が普遍的に存在した可能性を示唆する重要な結果である。



Appendix

『熱撮像によって明らかにされた
始原天体リュウグウの多孔質な物質的特徴』

Highly porous nature of a primitive asteroid
revealed by thermal imaging

岡田達明 (ISAS/JAXA) ほか、Nature 2020

T. Okada *et al.* Nature 2020

Hayabusa2 TIR Team, Joint Science Team, & Project Team



Extended Data Table 1

温度日変化の測定点の情報

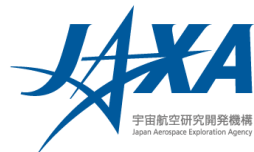
[Okada+, Nature 2020]

Site	Polygon ID	Longitude	Latitude	Remarks
b	157464	27.8 °E	32.5 °N	Smooth region in northern mid latitude
c	152944	13.9 °E	3.9 °N	Smooth region in northern low latitude
d	147342	0.2 °E	5.5 °S	Catafo Saxum (boulder, PM landmark)
e	147896	2.7 °E	18.3 °S	Smooth region in southern mid latitude
f	194355	329.1 °E	47.0 °S	Smooth region in southern low latitude
g	183108	290.4 °E	68.8 °S	Otohime Saxum (boulder)

PM: Prime meridian



Extended Data Table 2 TIR 主要運用内容： 本研究で使用する2019年10月半ばまでの観測運用



[Okada+, Nature 2020]

	Date	Solar distance [au]	SPE angle [deg]	Lowest Altitude	Maximum Resolution [/pixel]	Contents of TIR Observations
1	2018/06/06	0.964	16.7	2000 km	Point source	Light curve observations & search for moons
2	2018/06/18	0.971	17.7	200 km	180 m	Light curve observations & search for moons
3	2018/06/30	0.986	18.5	20 km	18 m	Light curve observations & search for moons // First set of HR global thermal images of an asteroid
4	2018/07/10	1.004	19.0	20 km	18 m	Global mapping for 1 rotation : Box-A
5	2018/07/20	1.027	19.2	6.5 km	6 m	Global mapping for 1 rotation : Box-C
6	2018/08/01	1.056	19.0	5 km	4.5 m	Global mapping for 1 rotation : Mid-Altitude
7	2018/08/06-07	1.073	18.7	< 1 km	0.9 m	HR images : Gravity Measurement
8	2018/08/25	1.127	17.5	22 km	20 m	Global mapping for 1 rotation : Box-B (South pole)
9	2018/08/31	1.145	16.9	22 km	20 m	Global mapping for 1 rotation : Box-B (Dusk side)
10	2018/09/20-21	1.209	14.4	50 m	4.5 cm	Close-up images: MINERVA-II release
11	2018/10/03-04	1.244	12.6	50 m 2~3 km	4.5 cm 1.8 m	Close-up images: MASCOT release HR images : MASCOT hovering at 3 km
12	2018/10/14-15	1.273	10.8	10 m	0.9 cm	Close-up images: TD1-R1-A

SPE, Sun-Probe-Earth HR, high-resolution



参考:

「はやぶさ」 小惑星イトカワ 帰還試料

◆ S型小惑星イトカワ
からの帰還試料

➤ LL5-6 隕石 (左x2)

◆ 熱進化, 空隙少

➤ LL3-4 隕石 (右x2)

◆ 始原的, 微細粒,
多孔質

[Images JAXA/ASRG]

https://curation.isas.jaxa.jp/ao/docs/sample_top.html

RA-QD02-0010

Thermally
altered,
“non-porous”

0.1 mm

60Pa 07-Dec-10 000000 WD17.2mm 10.0kV x450 100um

RA-QD02-0013

0.05 mm

60Pa 07-Dec-10 000000 WD17.4mm 10.0kV x800 50um

RA-QD02-0184

Primitive,
fine-grained
“porous”

0.05 mm

60Pa 30-Sep-11 000000 WD17.3mm 10.0kV x700 50um

RA-QD02-0136-01

0.1 mm

60Pa 16-May-11 000000 WD16.0mm 10.0kV x300 100um



Hayabusa2 ミッションの流れ

打ち上げ
2014/12/3 打上



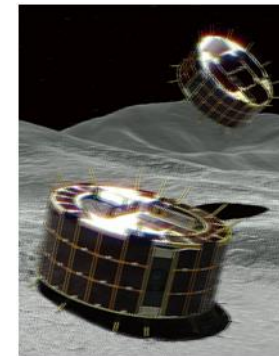
地球スイングバイ
2015/12/3, 2015



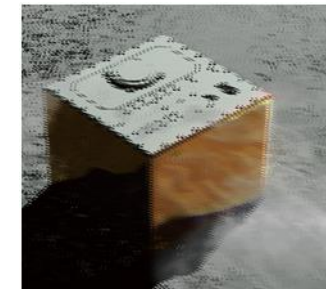
小惑星到着
2018/6/27



MINERVA-II-1
September 21,
2018

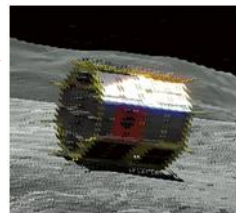


MASCOT
October 3, 2018

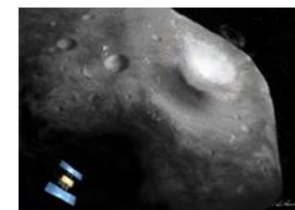


Earth return
End of 2020

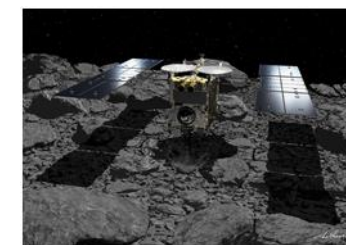
小惑星離脱
Nov 13, 2019



2nd Touchdown **SCI衝突実験**
July 11, 2019
April 5, 2019



1st Touchdown
February 22, 2019

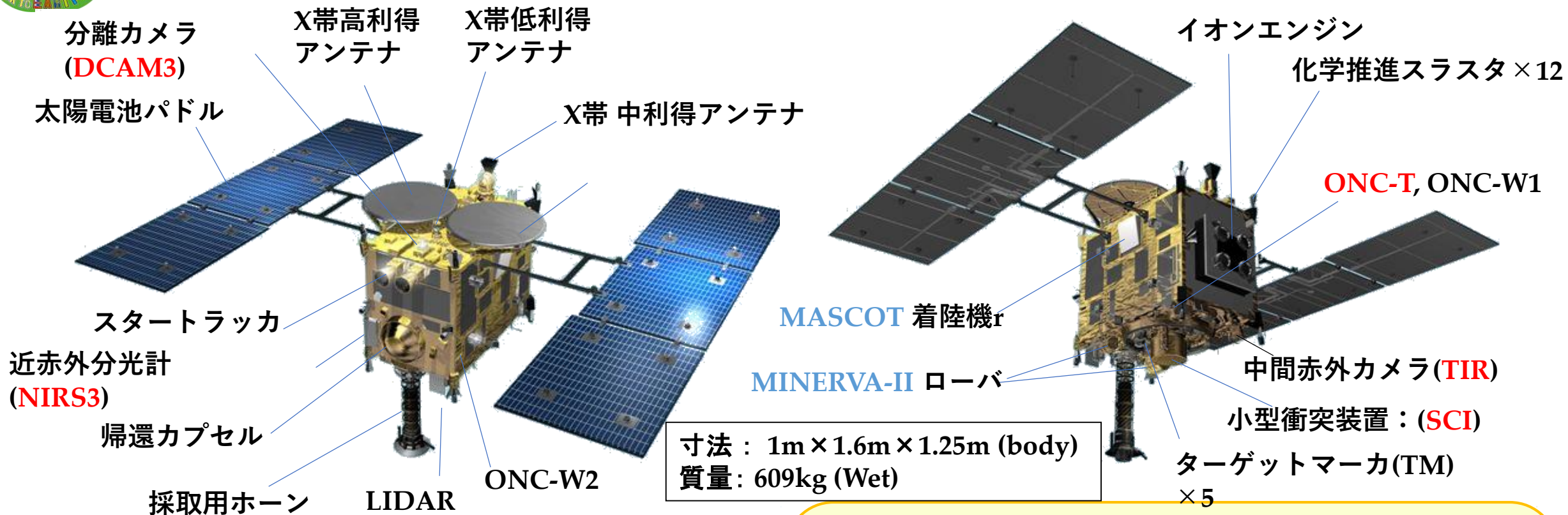


MINERVA-II-2 & TM

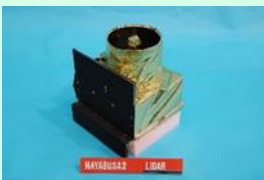
(image credit: illustrations including spacecraft by Akihiro Ikeshita, others by JAXA)



Hayabusa2 探査機



ONC-T



LIDAR



NIRS3



TIR

科学観測機器

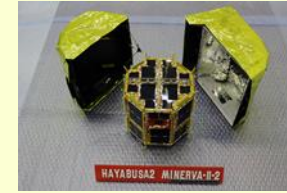


by DLR and CNES



II-1 : by JAXA MINERVA-II Team

II-2 : by Tohoku Univ. & MINERVA-II consortium



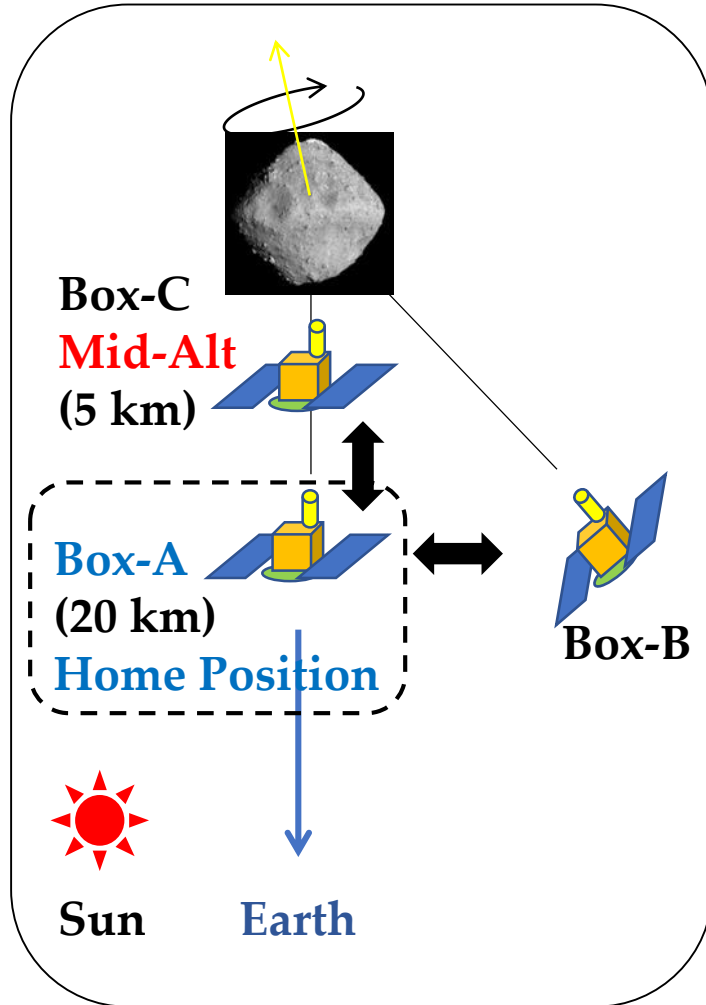
小型着陸機 & ローバ



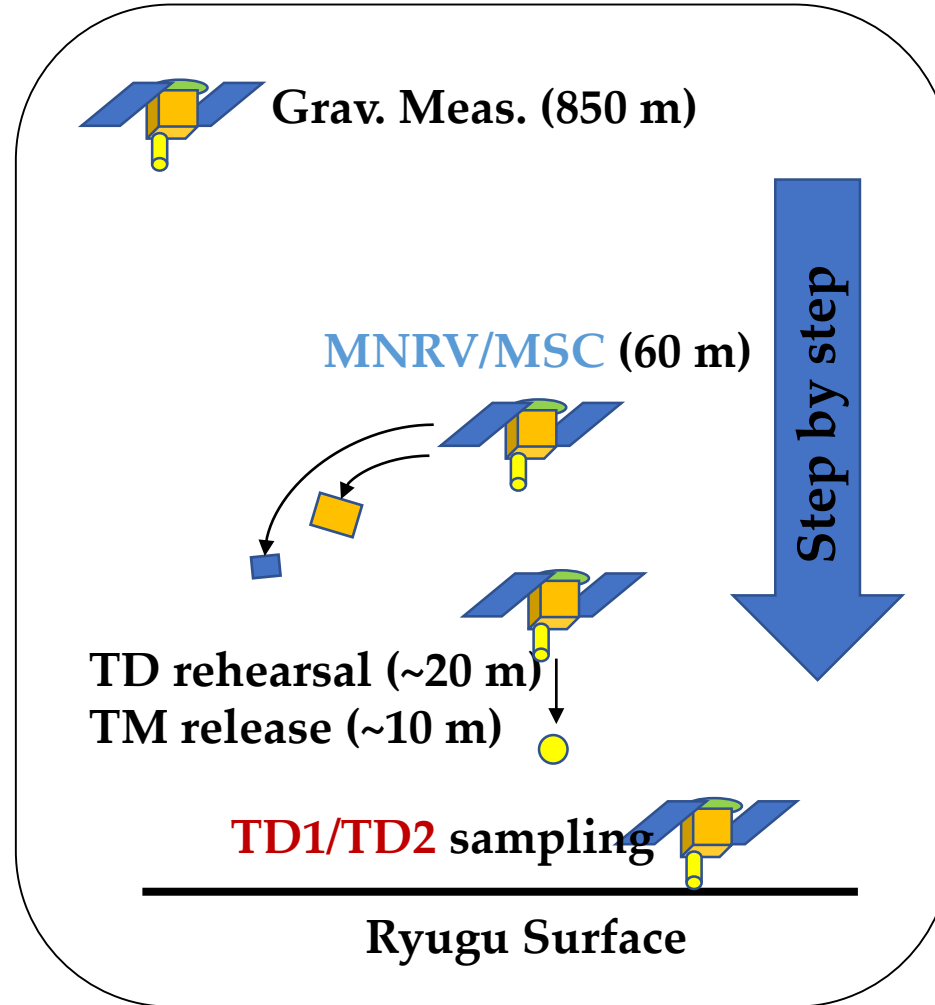
Hayabusa2 運用



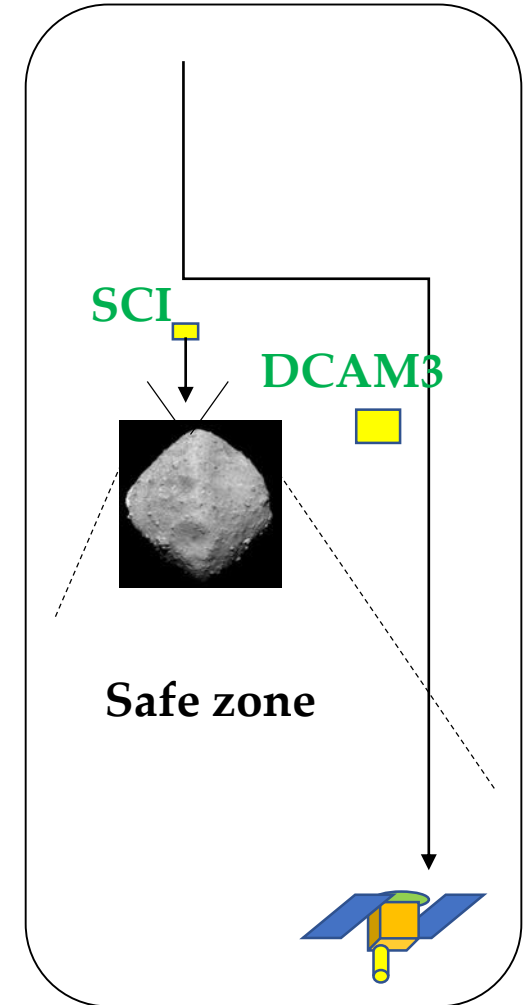
ホバリング 運用:
1 自転観測.



降下 降下運用
降下中高解像度撮像



SCI 分離運用.:
衝突実験.



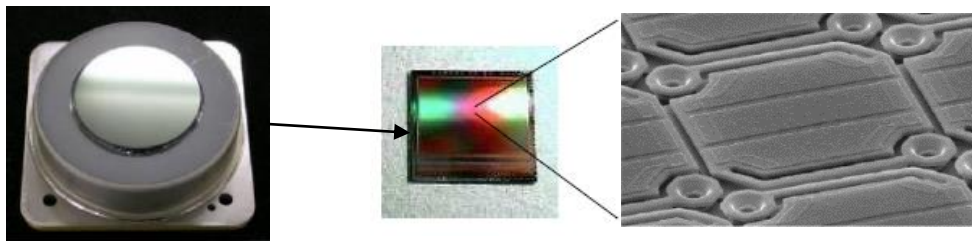
(image credit : JAXA)



TIR (Thermal Infrared Imager)

■ 非冷却マイクロボロメータ

→ 小型軽量の観測装置の実現

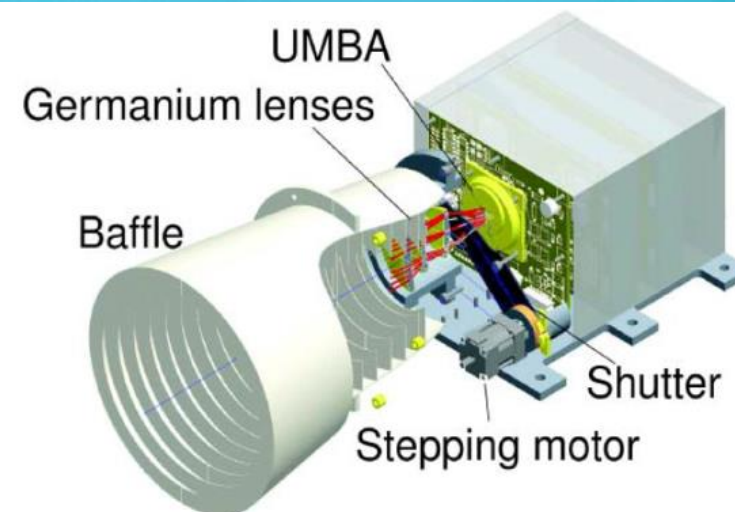
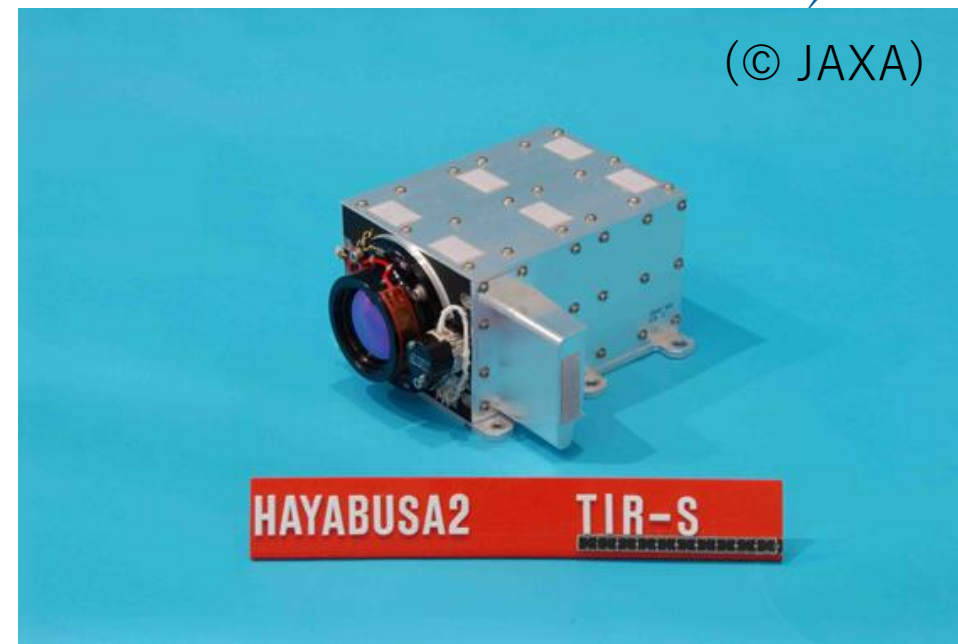


[Hihara+ 2014]

■ TIRの機能・性能

→ Light-weighted thermal infrared imager

- | | |
|---------------------------|-----------------------------------|
| • Total Mass | : 3.28 kg |
| • Power Consumption | : <20W |
| • Detector | : 2D uncooled bolometer |
| • Observation wavelength | : 8–12 μm |
| • Observed temperatures | : -120 to +150 $^{\circ}\text{C}$ |
| • Relative accuracy(NETD) | : < 0.3 $^{\circ}\text{C}$ |
| • Dimensions | : 328 × 248 (effective) |
| • Field of View | : 16.7° × 12.6° |
| • Spatial Resolution | : 18 m (20-km alt./HP) |
| | : 5 cm (50-m alt./Mid-Alt) |
| • No. of Summation | : 2 ^N (N=0,1,2,...,7) |



[Fukuhara+ 2011 EPS], for Akatsuki Venus Orbiter



TIR観測原理

- ◆ TIRは惑星探査ミッション初の熱撮像、小惑星表面の物理状態を調査
- ◆ TIR は小惑星表面温度の日変化を調査する。温度変化幅、最低温度などから熱慣性やラフネスの推定、時刻の正確な把握・調整などを実施する
- ◆ 温度日変化は細粒の土壌や多孔質の物質（低熱慣性）では大きい傾向にあり、逆に稠密な岩石（高熱慣性）では小さく、最高温度の時刻が遅れる傾向にある。

➤ 熱慣性(TI)

- 表面物理特性(空隙率、粒径、粒子サイズ分布)
- 熱慣性 (TI, $\text{J m}^{-2} \text{K}^{-1} \text{s}^{-0.5}$):

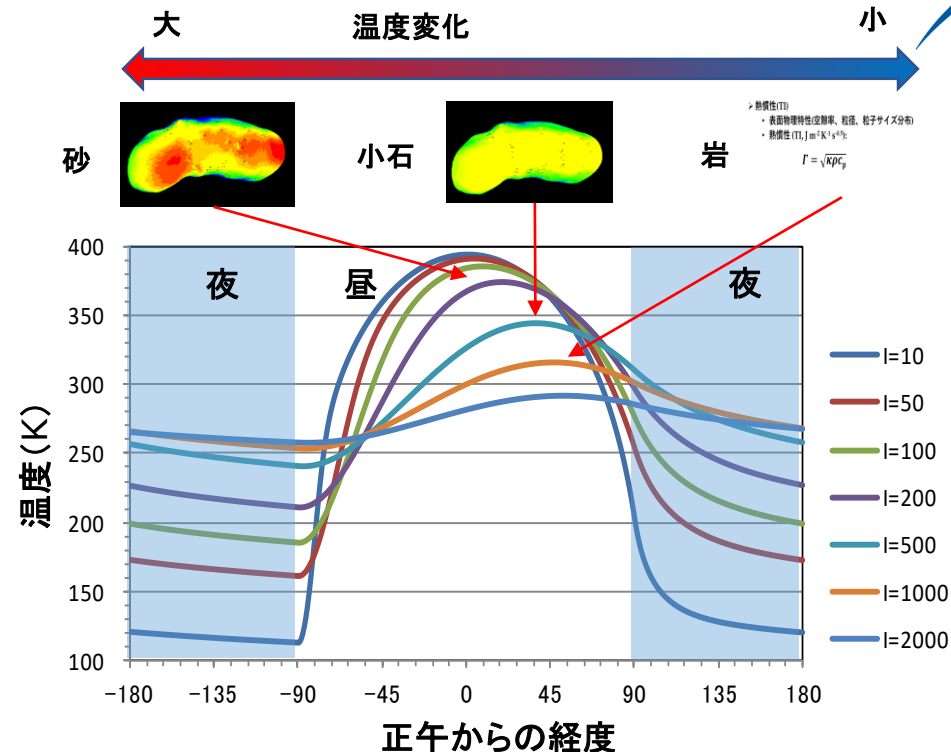
$$\Gamma = \sqrt{\kappa \rho c_p}$$

κ : 熱伝導率

ρ : 密度

c_p : 定圧比熱

[Okada+, 2014]



25143 Itokawa	433 Eros	The moon	1 Ceres
$\Gamma = 600$	$\Gamma = 150$	$\Gamma = 50$	$\Gamma = 10$
Coarse regolith and boulders	Finer and thicker regolith	Mature and fine regolith	Very fine regolith ??