

小惑星探査機「はやぶさ2」 記者説明会

2020年6月11日

JAXA はやぶさ2プロジェクト



本日の内容



「はやぶさ2」に関連して、

- ・現在の軌道計画
- ・第2期イオンエンジン運転の状況
- ・最近発表された科学論文

について紹介する。



目次



0. 「はやぶさ2」概要・ミッションの流れ概要
1. プロジェクトの現状と全体スケジュール
2. 現在の軌道計画
3. 第2期イオンエンジン運転の状況
4. ONCによるリュウグウの測光観測
5. TIRによるリュウグウの熱物性推定
6. 今後の予定



「はやぶさ2」概要



目的

「はやぶさ」が探査したS型小惑星イトカワよりも始原的なタイプであるC型小惑星リュウグウの探査及びサンプルリターンを行い、原始太陽系における鉱物・水・有機物の相互作用を解明することで、地球・海・生命の起源と進化に迫るとともに、「はやぶさ」で実証した深宇宙往復探査技術を維持・発展させて、本分野で世界を牽引する。

期待される成果と効果

- ・水や有機物に富むC型小惑星の探査により、地球・海・生命の原材料間の相互作用と進化を解明し、太陽系科学を発展させる。
- ・衝突装置によって生成されるクレーター付近からのサンプル採取という新たな挑戦も行うことで、日本がこの分野において、さらに世界をリードする。
- ・太陽系天体往復探査の安定した技術を確立する。

特色:

- ・世界初のC型微小地球接近小惑星のサンプルリターンである。
- ・小惑星にランデブーしながら衝突装置を衝突させて、その前後を観測するという世界初の試みを行う。
- ・「はやぶさ」の探査成果と合わせることで、太陽系内の物質分布や起源と進化過程について、より深く知ることができる。

国際的位置づけ:

- ・日本が先頭に立った始原天体探査の分野で、C型小惑星という新たな地点へ到達させる。
- ・「はやぶさ」探査機によって得た独自性と優位性を発揮し、日本の惑星科学及び太陽系探査技術の進展を図るとともに、始原天体探査のフロンティアを拓く。
- ・NASAにおいても、小惑星サンプルリターンミッションOSIRIS-REx（打上げ:平成28年、小惑星到着:平成30年、地球帰還:令和5年）が実施されており、サンプルの交換が取り決められていることに加えて科学者の相互交流が行われており、両者の成果を比較・検証することによる科学的成果も期待されている。



「はやぶさ2」主要緒元 （イラスト 池下章裕氏）

質量	約 609kg
打上げ	平成26年(2014年)12月3日
軌道	小惑星往復
小惑星到着	平成30年(2018年)6月27日
地球帰還	令和2年(2020年)
小惑星滞在期間	約17ヶ月
小惑星出発	令和元年(2019年)11月13日
探査対象天体	地球接近小惑星 Ryugu(リュウグウ)

主要搭載機器
 サンプリング機構、地球帰還カプセル、光学カメラ、レーザー測距計、科学観測機器(近赤外、中間赤外)、衝突装置、小型ローバ



ミッションの流れ概要



打ち上げ
2014年12月3日



地球スイングバイ
2015年12月3日



リュウグウ到着
2018年6月27日



MINERVA-II-1分離
2018年9月21日



MASCOT分離
2018年10月3日



ターゲットマーカ分離
2018年10月25日



地球帰還
2020年末

リュウグウ出発
2019年11月13日

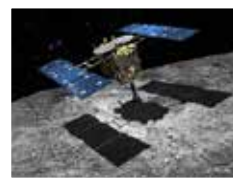
終了 →



MINERVA-II-2
2019年10月3日



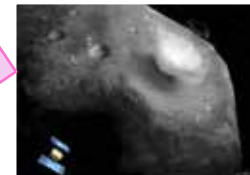
ターゲットマーカ分離
2019年9月17日



第2回タッチダウン
2019年7月11日



ターゲットマーカ分離
2019年5月30日



衝突装置
2019年4月5日



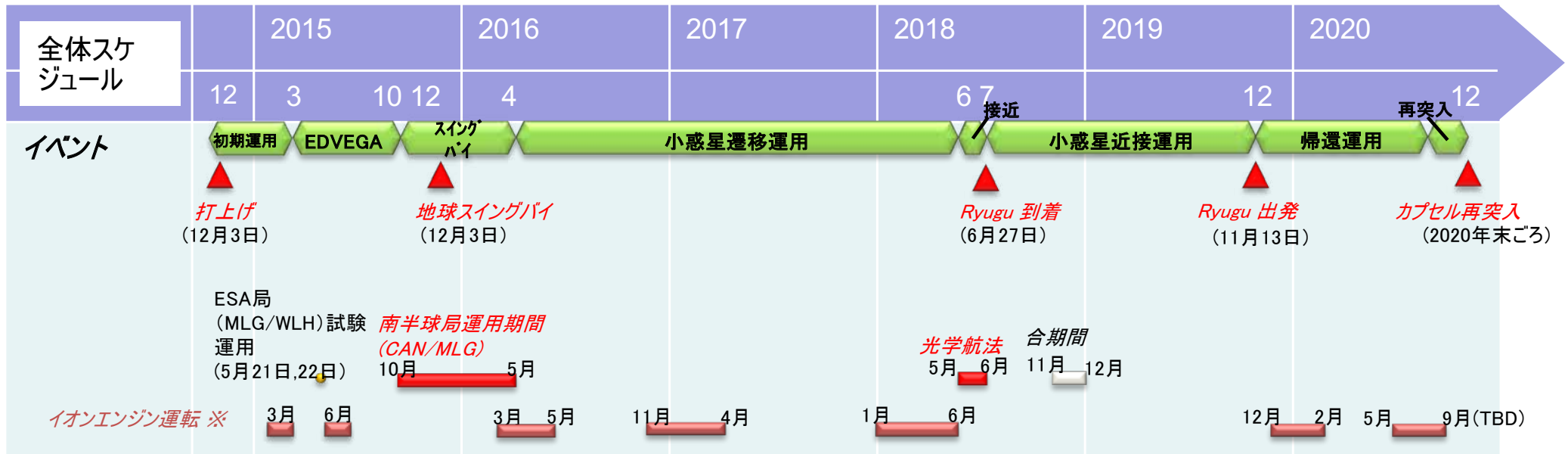
第1回タッチダウン
2019年2月22日

(画像クレジット: 探査機を含むイラストは 池下章裕氏、他はJAXA)

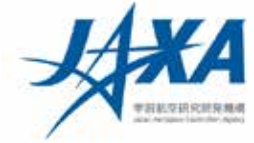


1. プロジェクトの現状と全体スケジュール

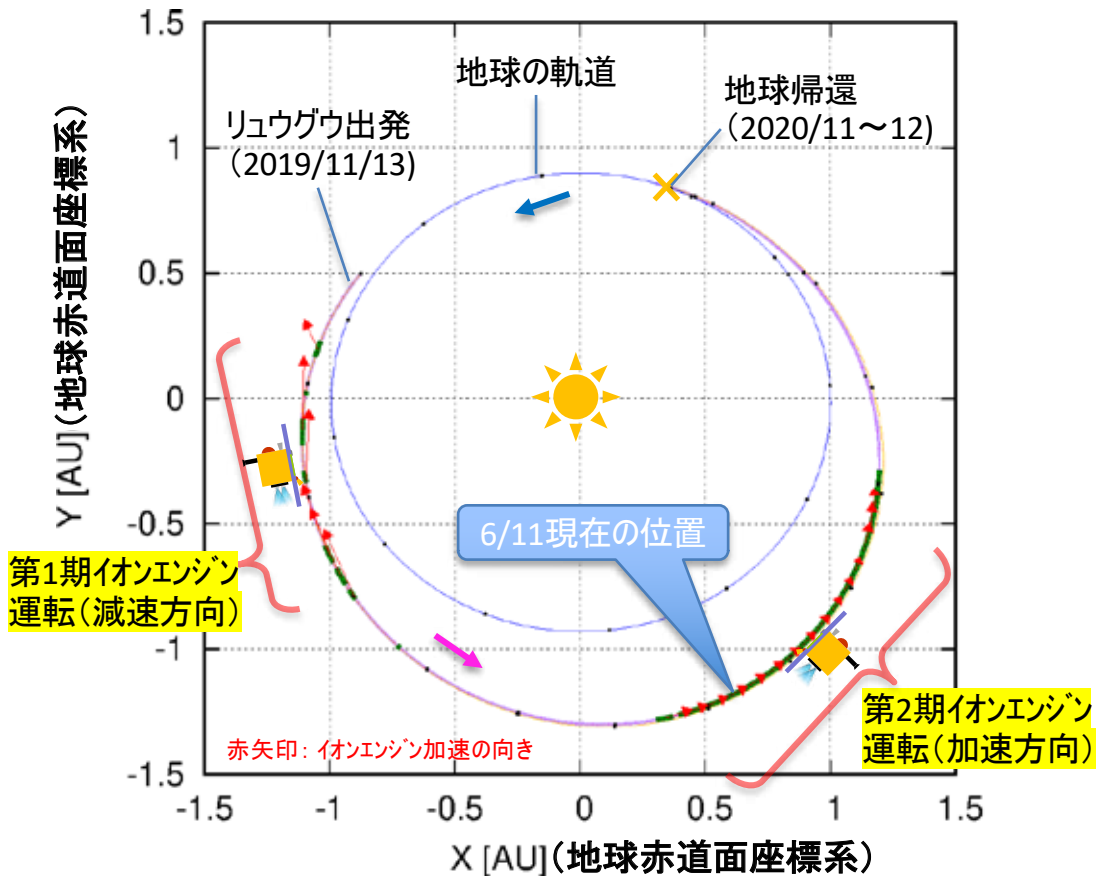
- 現状：
- 第2期イオンエンジン運転を5月12日から開始した。
 - 新型コロナウイルス感染防止対策を行いつつ、計画通りの運用を行っている。
 - カプセル回収についてのオーストラリアとの協議は継続中。



(画像クレジット: JAXA)



2. 現在の軌道計画



(画像クレジット: JAXA)

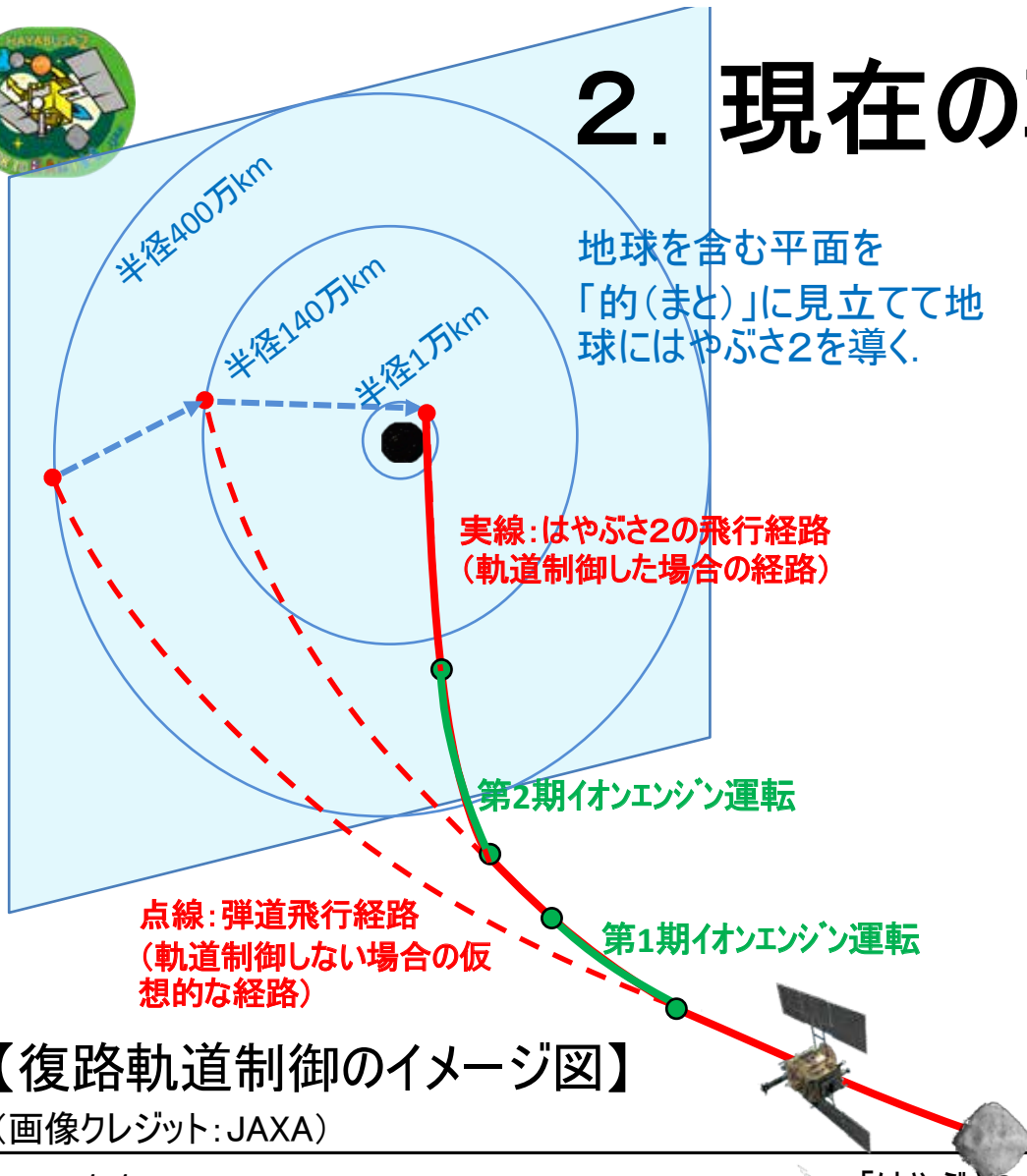
- 6/11現在の軌道
 - 地球距離 1.3億km
 - 太陽距離 2.1億km
(復路の遠日点を5/9に通過)
 - リュウグウの距離 264万km
 - 飛行速度 23.0km/s
 - 総飛行距離 48.6億km
(残り3.8億km)
 - 復路イオンエンジンノルマ 42%達成

- 第1期運転はタイミング調整のため減速方向にイオンエンジンを噴射。第2期は最終精密誘導のために加速方向へ噴射。



2. 現在の軌道計画

地球を含む平面を「的(まと)」に見立てて地球にはやぶさ2を導く。



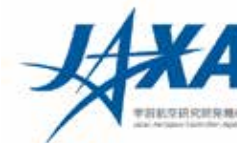
【復路軌道制御のイメージ図】

(画像クレジット:JAXA)

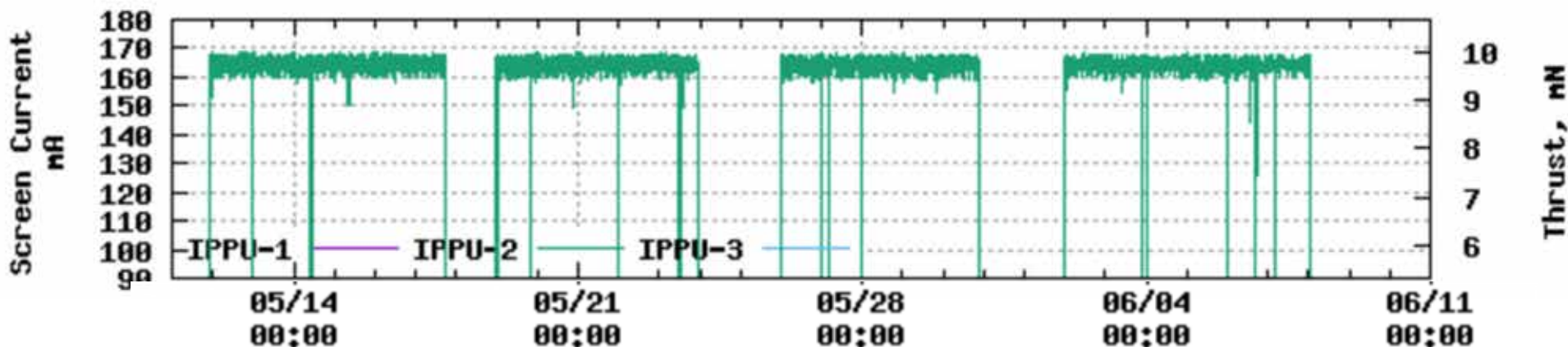
- 第1期イオンエンジン運転により、地球最接近距離400万km→140万kmの軌道に乗り換えた。
- 第2期イオンエンジン運転により、地球最接近距離を140万km→1万km以下(地球の縁のすぐ外側を通る軌道)にませ換える計画。
- 第2期イオンエンジン運転の見通し:
8月末までにはほぼ必要な噴射量は噴き切り、その後一旦イオンエンジンを止め、精密軌道計測した上で、1週間程度のイオンエンジンによる精密な軌道調整を行う予定。
- 全体として9月いっぱいまでには「はやぶさ2」のイオンエンジン運転の全工程を完了する予定。



3. 第2期イオンエンジン運転の状況



- 復路第1期イオンエンジン運転では、2019年11月20日から2020年2月20日までに動力航行881時間、 $\Delta V=100\text{m/s}$ 達成し、往路と合わせ合計7396時間の運転を完了していた。
- 2020年5月12日より第2期としてイオンエンジン運転を開始した。
- 現在はイオンエンジン1台を推力9.7mN程度で運転中。8月より2台運転に変更し、5-9月までに運転時間合計2014時間、 $\Delta V=160\text{m/s}$ を達成し、運転を完了する見込み。
- 推進剤キセノンは3.5kg程度消費する。9月末時点では約55%相当の約35kg残る。



*IPPU=イオンエンジン電源

(画像クレジット: JAXA)



4. ONCによるリュウグウの測光観測



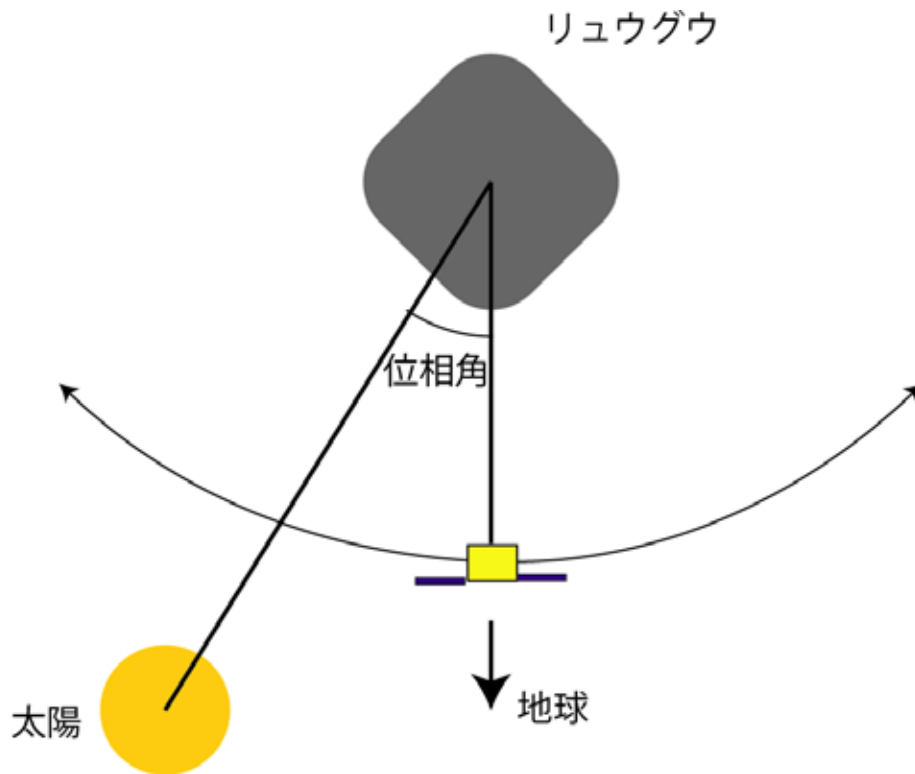
“Global photometric properties of (162173) Ryugu” 「(162173)リュウグウの全球測光特性」

Tatsumi et al. (2020) *Astronomy&Astrophysics*

- 2018.07–2019.01の約半年間のONCによるリュウグウ測光観測の結果をまとめた。
- 地上観測とONC観測と比較すると、誤差範囲内で一致するため、ONCの較正精度が高いことが示された。
- 全球の反射率マップから、リュウグウの反射率の不均質を明らかにした。
- リュウグウの平均幾何アルベドは $4.0 \pm 0.5\%$ 、標準反射率は $1.87 \pm 0.14\%$ と暗く、炭素含有量が $>2\text{wt.}\%$ と高いことが示唆された。
- リュウグウで弱いPhase reddening効果（位相角が大きくなると赤くなる効果）が確認された。表面に微粒子が存在すると考えられる。Bennuでも同程度のPhase reddeningが確認され、表面状態が似ている可能性がある。



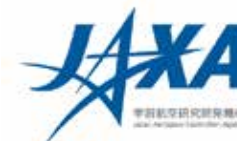
4. ONCによるリュウグウの測光観測



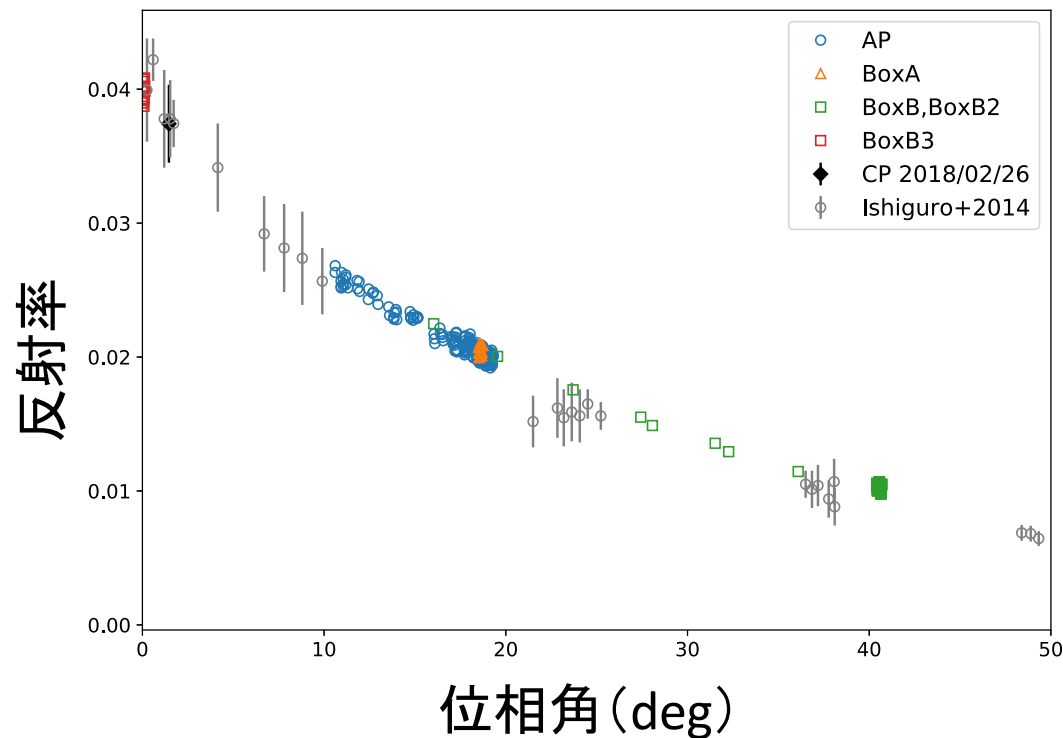
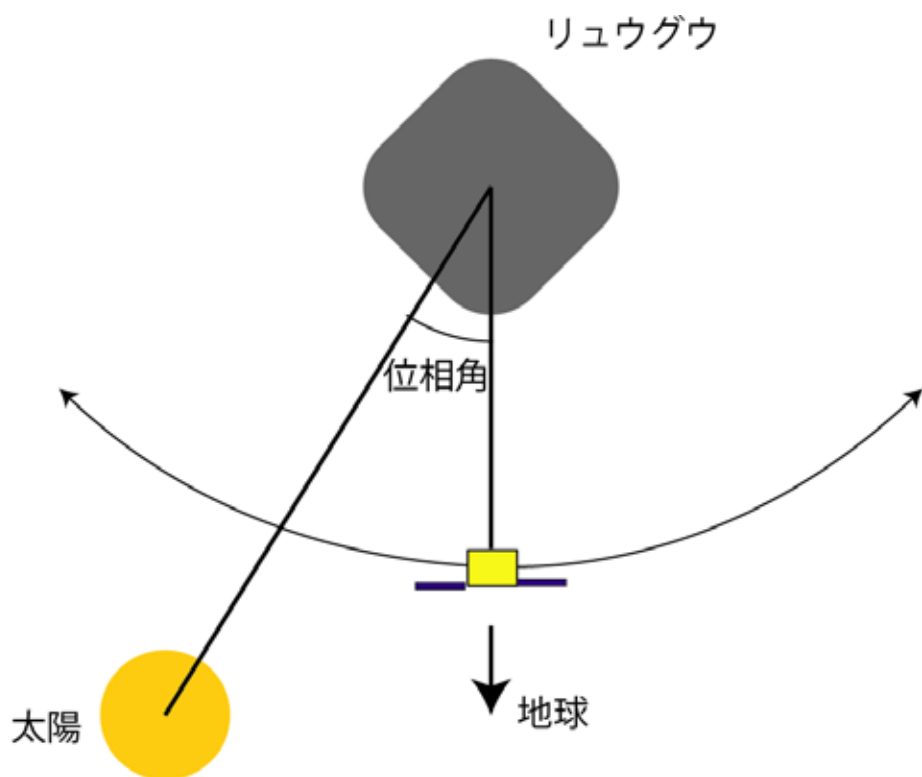
- 2018.07–2019.01の約半年間のONCによるリュウグウ観測から測光関数、反射率(アルベド)を求めた。
→照明角度や観測角度によって反射率が変化するので、幅広い角度条件での観測が必要。
- 太陽と地球の位置関係が変わることにより、幅広い位相角でのリュウグウの観測が可能になった。
- 表面状態などを知る手がかりになる。



4. ONCによるリュウグウの測光観測



リュウグウの測光関数



カラー: ONC観測、灰色: 地上観測

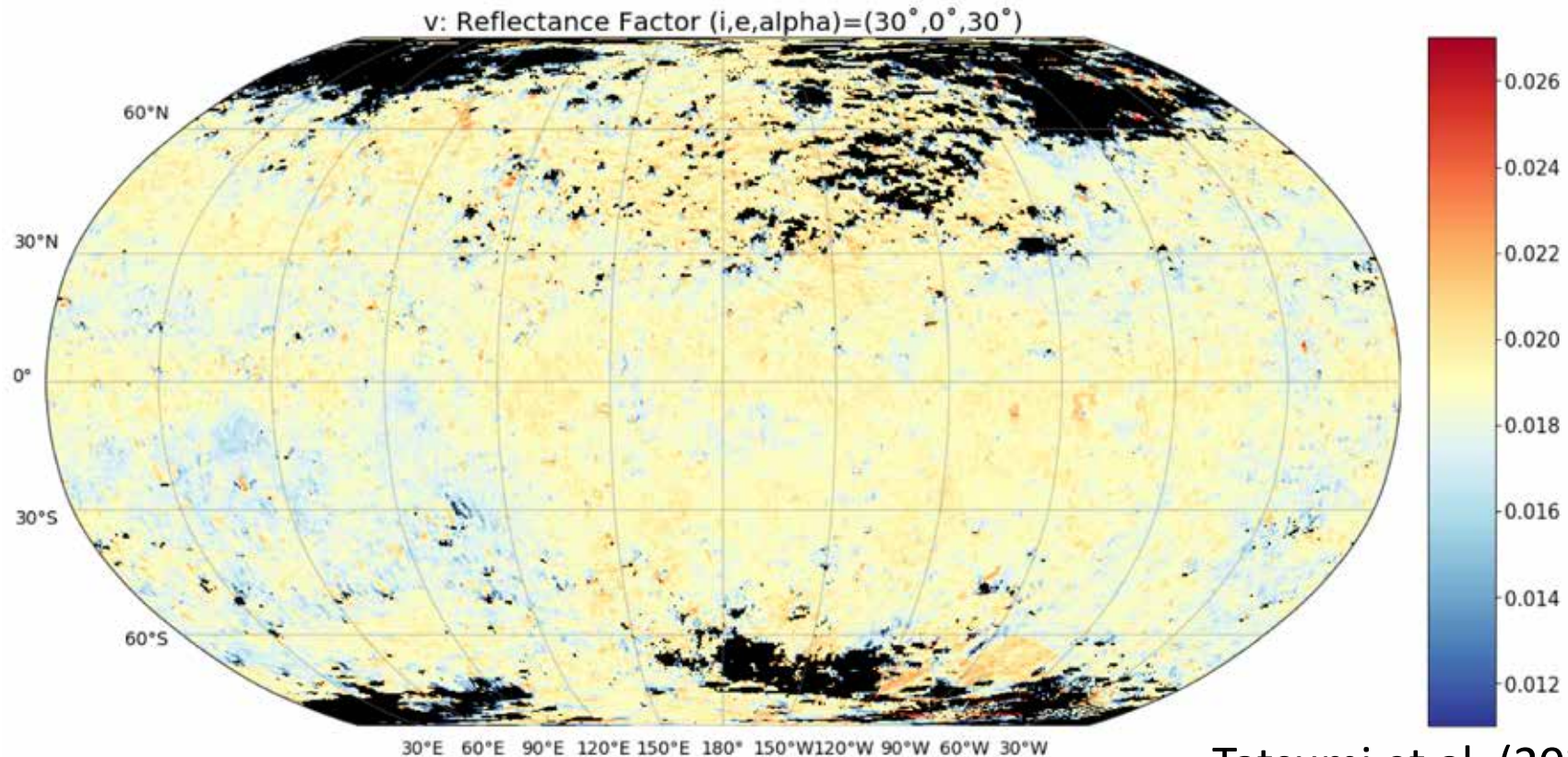
Tatsumi et al. (2020)



4. ONCによるリュウグウの測光観測



- ONCの観測によりリュウグウの全球標準反射率(アルベド)マップが作成された。



Tatsumi et al. (2020)

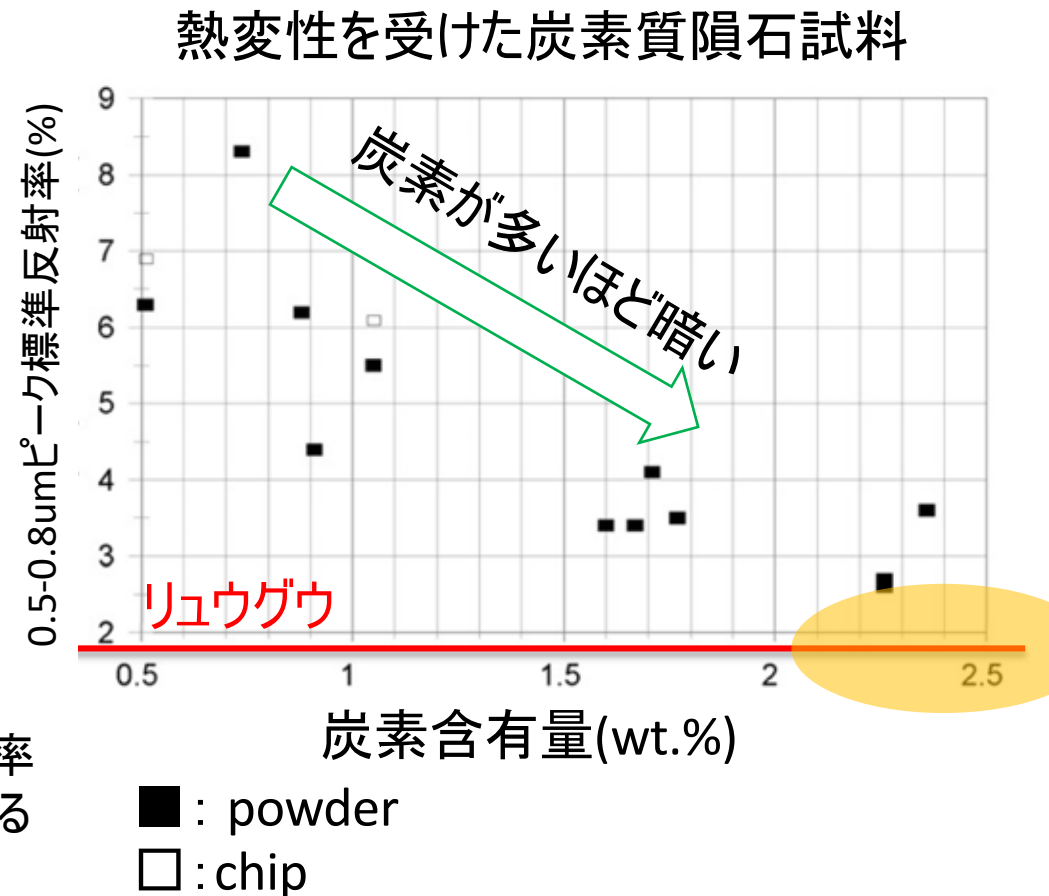


4. ONCによるリュウグウの測光観測



- ONC観測と地上観測との比較により、リュウグウのスペクトルが誤差範囲内で一致することが確認できた。
→ONC較正精度保証
- 幾何アルベド*: $4.0 \pm 0.5\%$
標準反射率**(REFF(30,0,30)):
 $1.87 \pm 0.14\%$
→熱変成を受けた炭素質隕石と整合的で、炭素含有量は $>2\text{wt.}\%$ と予想される。

*正面から光を当てて、正面から明るさを測った時の反射率
**正面から30度傾いた方向から光を当てて、正面から明るさを図った時の反射率



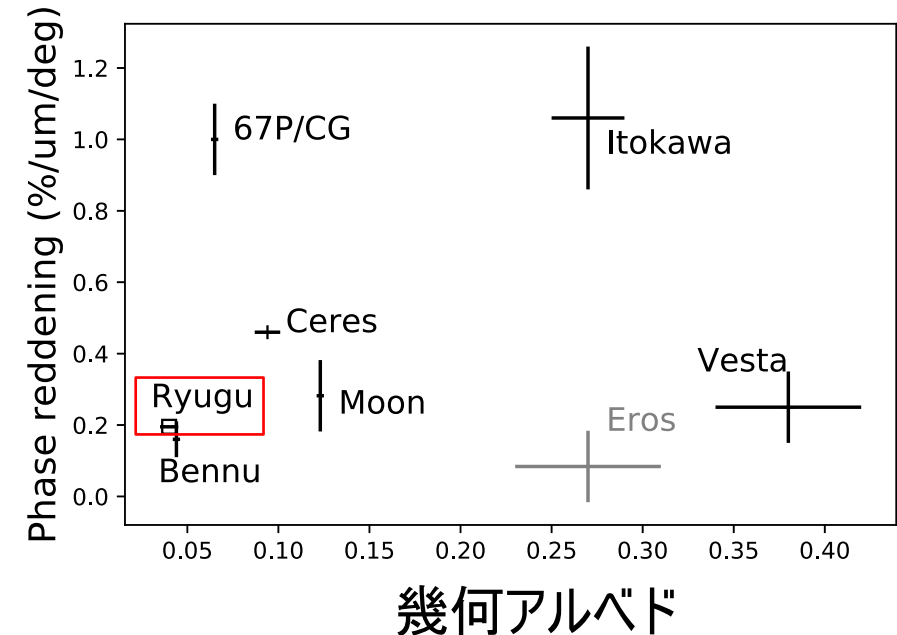
Cloutis et al. (2012)



4. ONCによるリュウグウの測光観測



- リュウグウ表面で位相角が大きくなるとわずかに色が赤くなる現象 (Phase reddening) が観測された。
 - 波長長程度の微粒子の存在を示唆。
 - 天体表面での光の多重散乱を示す。しかし、イトカワに比べるとその効果は非常に小さい。
 - Phase reddeningはBennuと同程度。
→似た表面反射特性を持つと考えられる。



Tatsumi et al. (2020)



5. TIRによるリュウグウの熱物性推定



“Thermophysical properties of the surface of asteroid 162173 Ryugu:
Infrared observations and thermal inertia mapping”

「小惑星162173リュウグウの表面熱物性：赤外観測と熱慣性マッピング」

Shimaki et al. (2020) *Icarus* 348, 113835

<https://doi.org/10.1016/j.icarus.2020.113835> 掲載：2020年5月16日

- 2018年8月1日のTIR観測と凹凸表面の熱モデル計算から、リュウグウの熱慣性分布と凹凸度分布を推定した。
- リュウグウの熱慣性は一様に小さく、**スカスカな岩塊が全球で一様に分布していることがわかった。**
- **リュウグウの表面はアア溶岩と同程度にデコボコであることがわかった※。**
- 得られた熱慣性と凹凸度は、リュウグウの軌道進化の計算に大きく影響する。



アア溶岩(野口里奈氏提供)

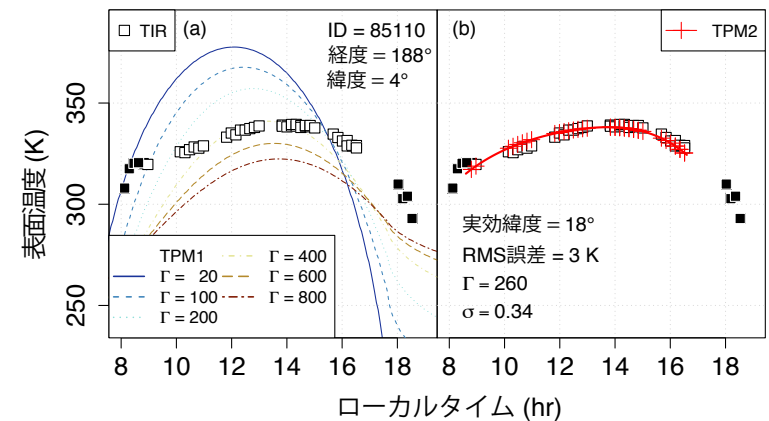
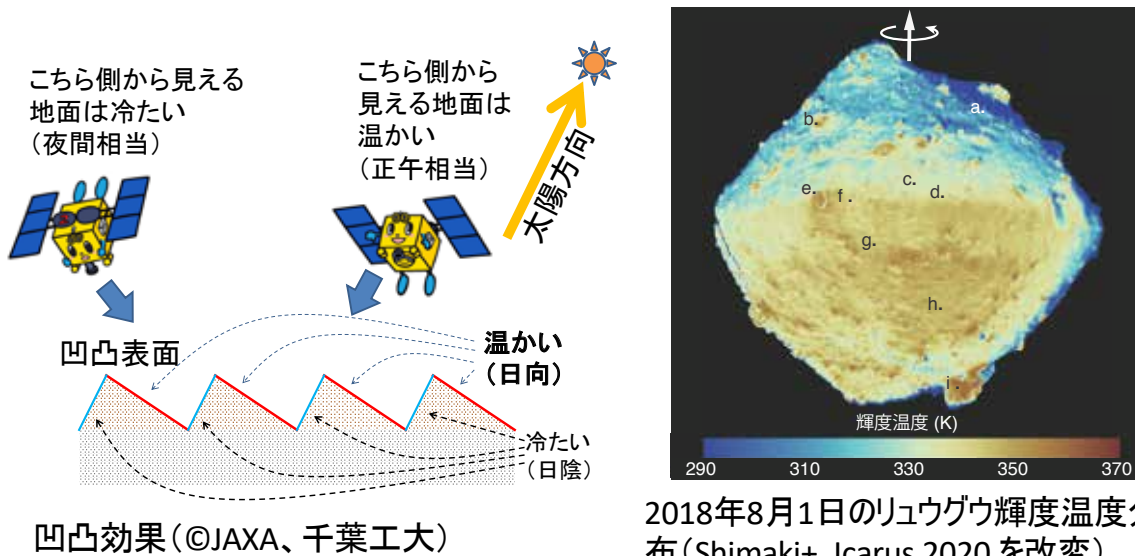
※リュウグウは数メートル四方での凹凸度合い、アア溶岩は数十センチメートル四方での凹凸度合い



5. TIRによるリュウグウの熱物性推定



- TIRの熱画像と凹凸表面の熱モデル計算から、小惑星の表面温度に対する凹凸効果を実証した。



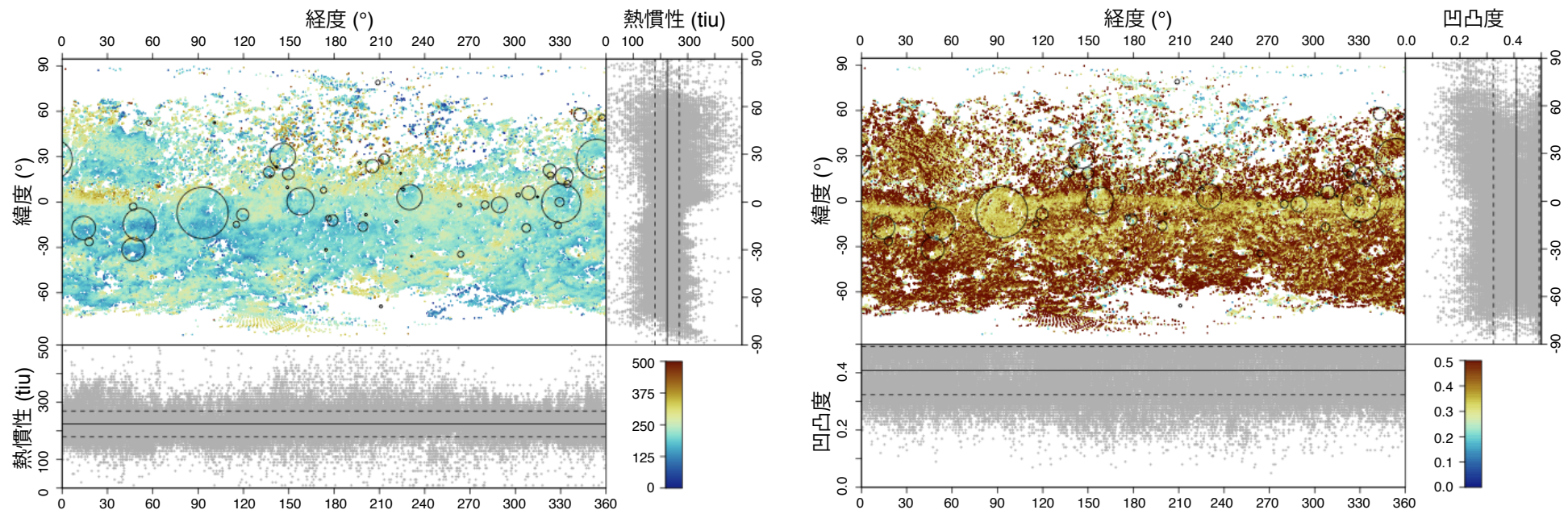
(a) TIRと凹凸効果なし熱モデル(TPM1)による温度履歴。(b) 凹凸効果あり熱モデル(TPM2)による温度履歴。 Γ と σ はそれぞれ熱慣性と凹凸度。(Shimaki+, Icarus 2020 を改変)



5. TIRによるリュウグウの熱物性推定



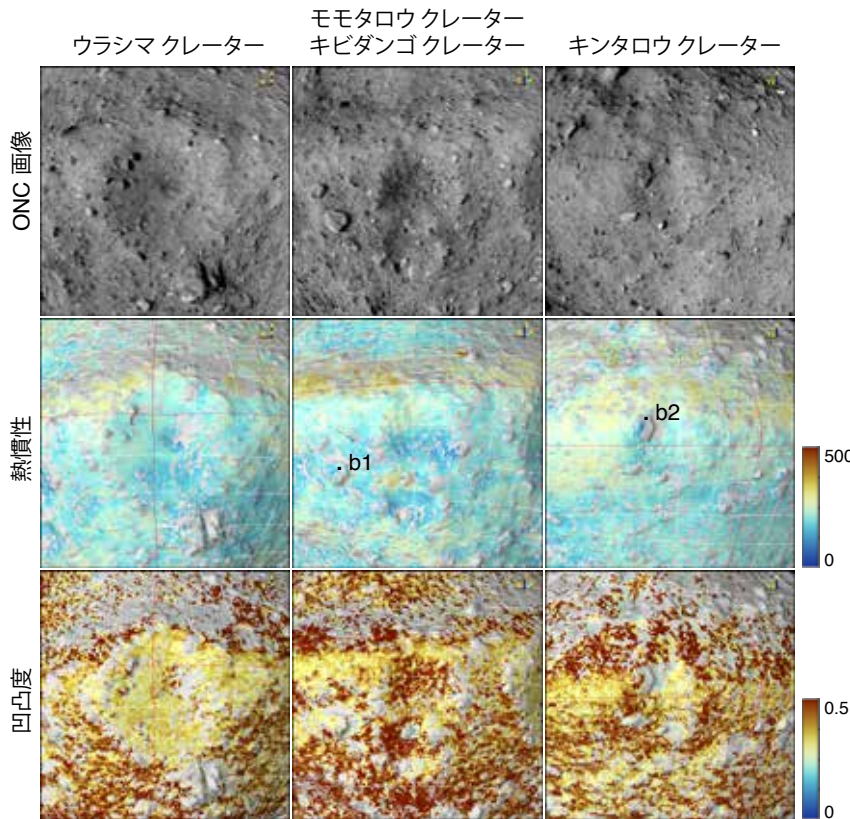
- 凹凸効果：地上・フライバイ観測から予見。ホバリング観測と2次元イメージングによって高い時間・空間分解能(4.5m)を実現
- 全球熱慣性： $225 \pm 45 \text{ J m}^{-2} \text{ s}^{-0.5} \text{ K}^{-1}$ (tiu) (300±100 tiu, Okada+, Nature 2020) → スカスカな岩塊が全球で一様に分布
 - 稠密な岩石(玄武岩等)は >2000 tiu、多孔質な炭素質コンドライトは600-1000 tiu
- 全球凹凸度：RMS傾斜で $47 \pm 5^\circ$ 、アア溶岩と同程度※、赤道リッジで小 → 赤道-中緯度間の物質移動を支持する傍証
 - ※リュウグウは数メートル四方での凹凸度合い、アア溶岩は数十センチメートル四方での凹凸度合い



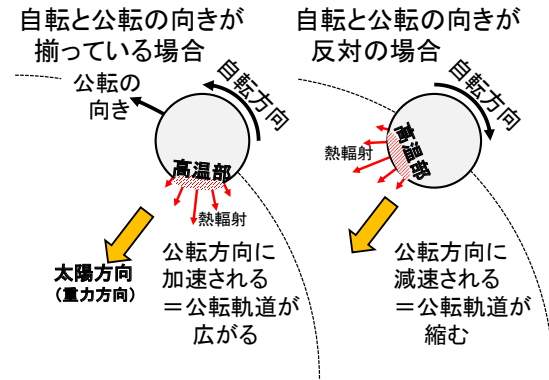
(左)リュウグウの熱慣性マップ。○は主なクレーター。(右)リュウグウの凹凸度マップ。(Shimaki+, Icarus 2020 を改変)



5. TIRによるリュウグウの熱物性推定



大きなクレーターと岩塊のONC画像、熱慣性、凹凸度 (Shimaki+, Icarus 2020 を改変)



ヤルコフスキー効果 (©JAXA、千葉工大)

- 大クレーター: 熱慣性は全球平均値と同等
→ 衝突放出物や衝突圧密の痕跡は見られない
- 大岩塊: 熱慣性は全球平均値より低いものも存在
→ 低密度な「さざれ石」のような構造を示唆
- 波及効果: 得られた熱慣性と凹凸度は、ヤルコフスキー効果 (軌道変化)、YORP効果 (自転速度変化) に影響
→ リュウグウの軌道進化の計算に大きく影響する



6. 今後の予定



■ 運用の予定

2020年5月12日～ 第2期イオンエンジン運転

■ 記者説明会等

2020年7月(TBD) 記者説明会@TBD

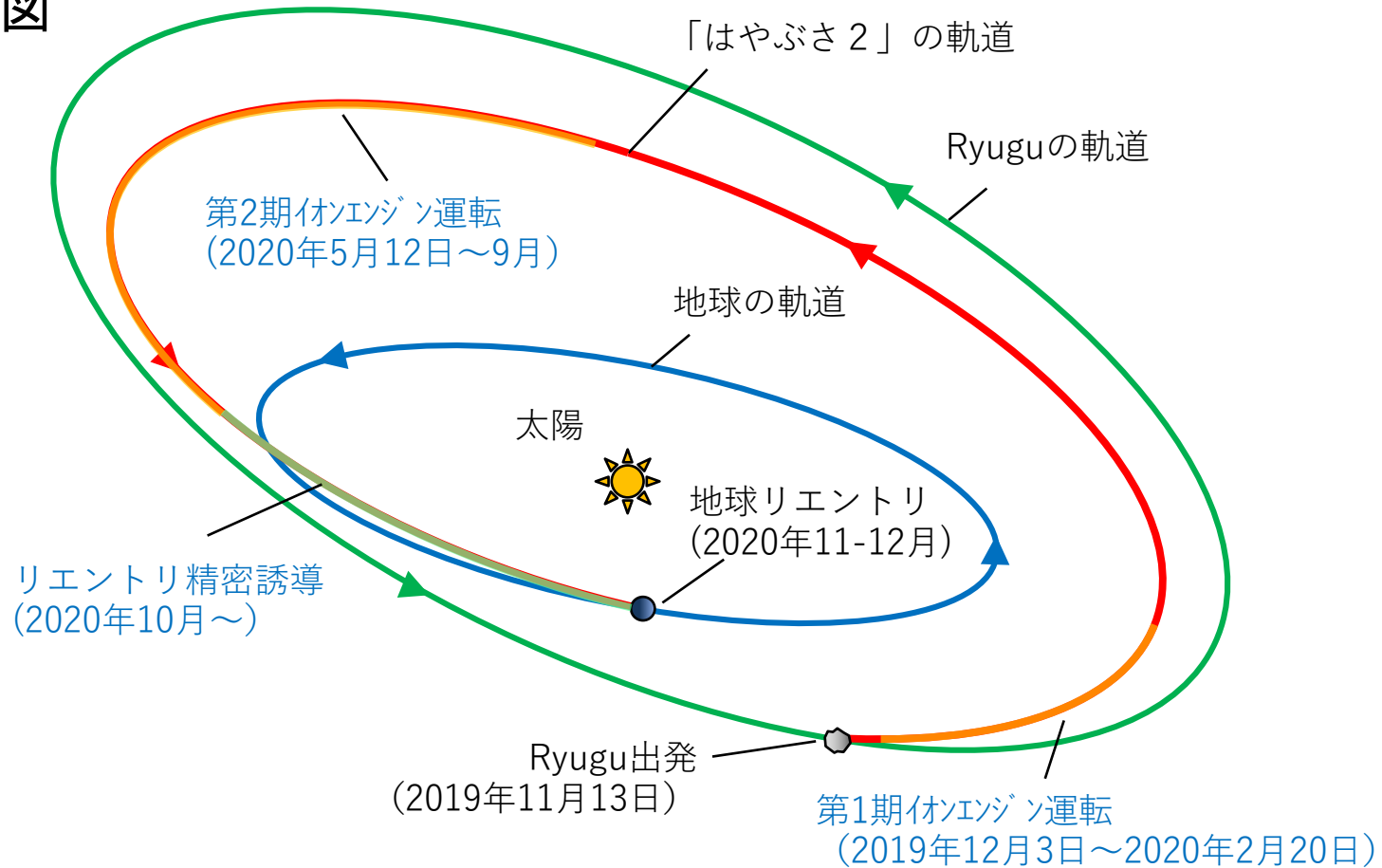


参考資料



帰還巡航運用計画

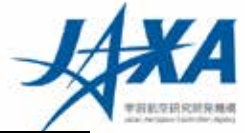
帰還フェーズ軌道図



(画像クレジット: JAXA)



電気推進系(イオンエンジン)



- 名称: $\mu 10$ (みゆーてん)
- キセノン※をプラズマ(イオン)にし、電圧をかけて加速して噴射する。
- イオンの生成には、マイクロ波放電方式を用いている。
- 4台搭載し、最大で3台の同時運転を行うことで、最大で28mN以上の推力を発生する。
- キセノンは約60kg搭載し、合計で2km/s程度の加速を行う。
- 地球から小惑星また小惑星から地球へのクルージング時の軌道 変更に使われる。

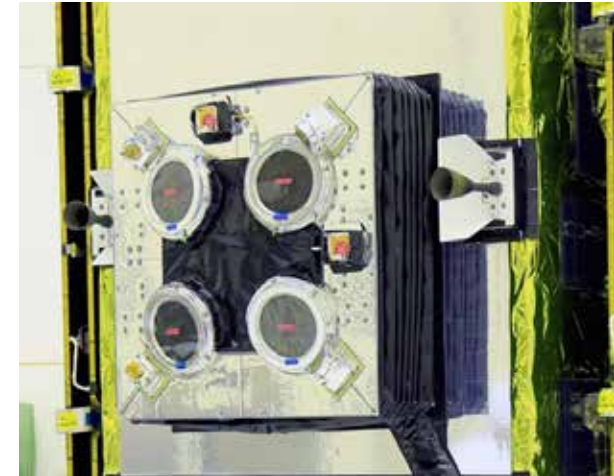
※キセノンを使う理由

- 単原子分子であるために2原子以上からなる気体よりも電離電圧が小さい。そのため加えたエネルギーが加速に使われる割合が多くなる。
- 他の物質と反応しにくい。
- 質量(原子量)が大きいので、加速の効率がよい。



(© JAXA)

フライトモデルの真空チェンバ内での噴射試験の様子



はやぶさ2イオンエンジン (© JAXA)



参考：イオンエンジンのしくみ

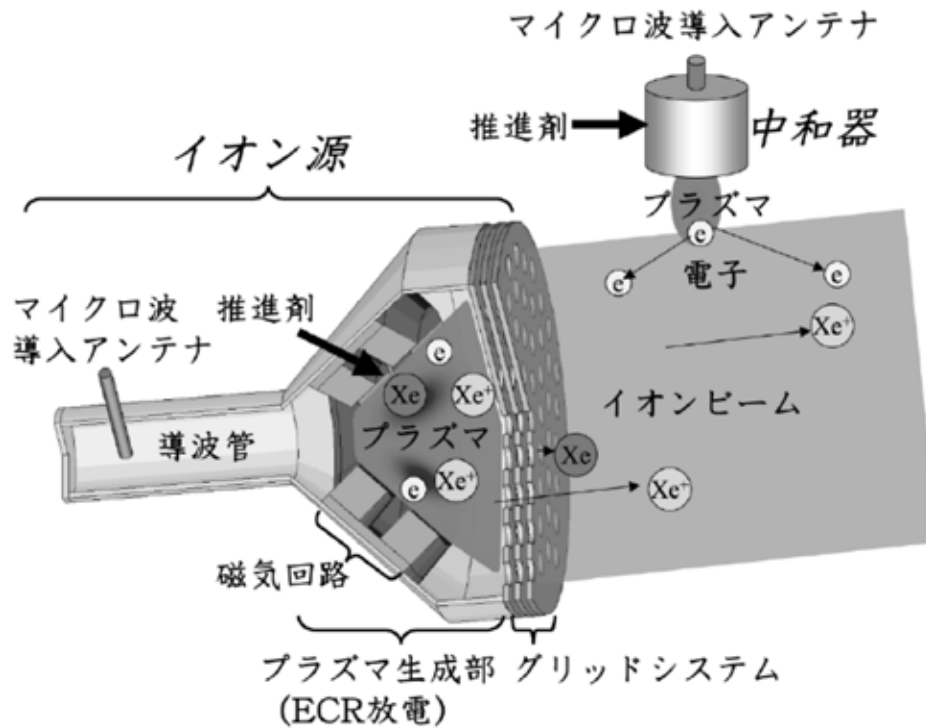


図 マイクロ波放電式イオンエンジンの概略図

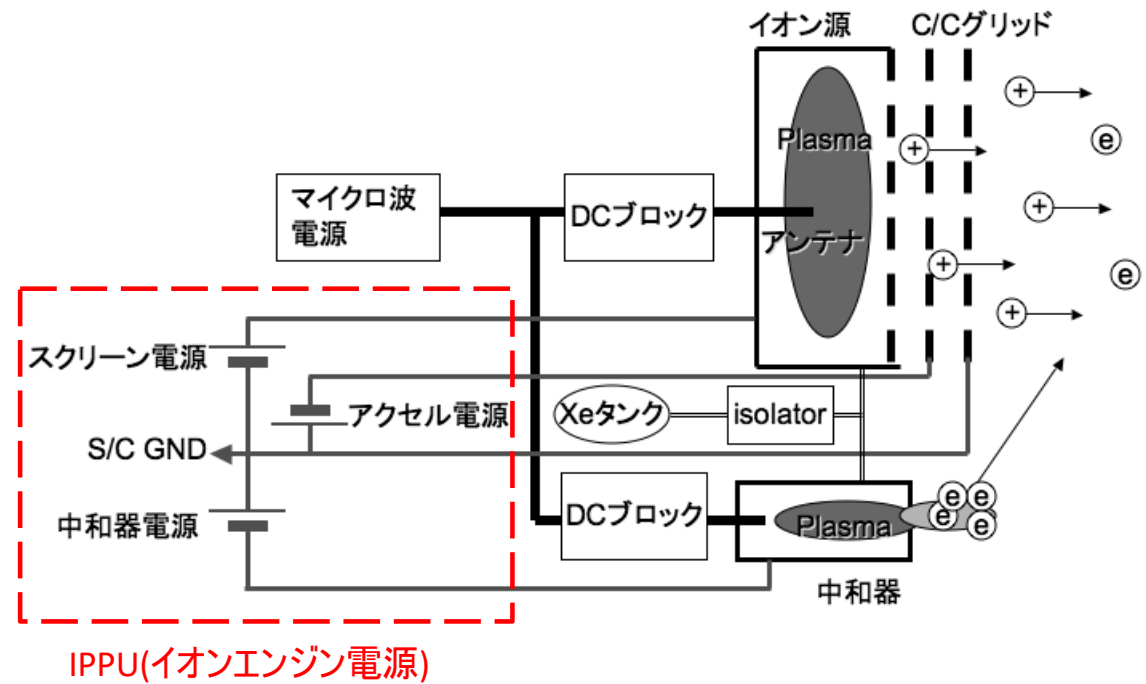


図 マイクロ波放電式イオンエンジンのシステム図

(画像クレジット: JAXA)

注) 日本の宇宙科学研究所で開発されたイオンエンジンはマイクロ波放電式イオンエンジンである。

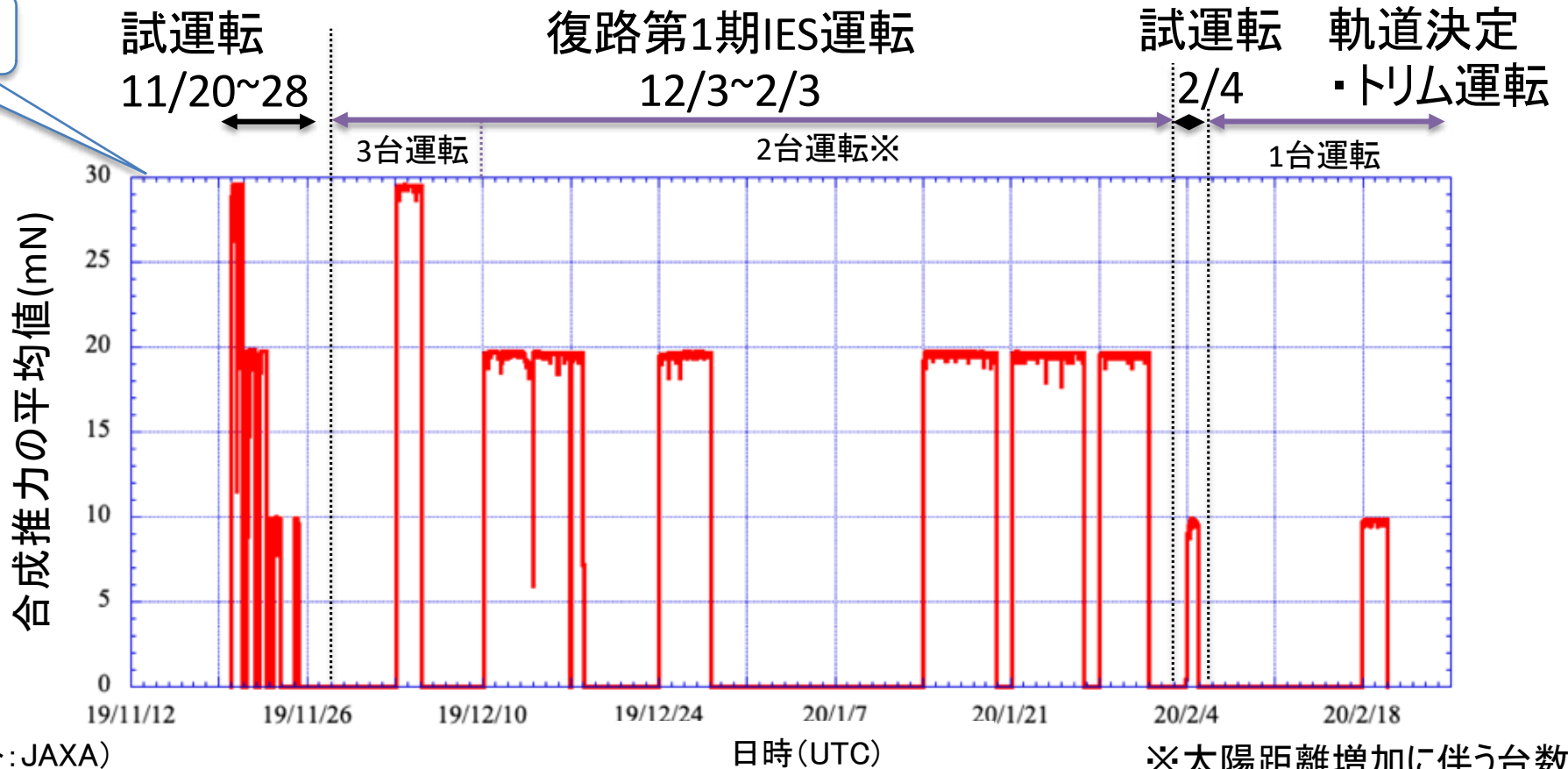


第1期イオンエンジン運転結果



リュウグウ離脱後のイオンエンジン運転履歴(2019.11.20~2020.2.20)

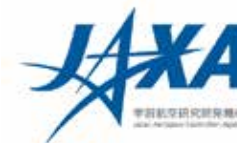
11/13 さよなら
リュウグウ



(画像クレジット:JAXA)



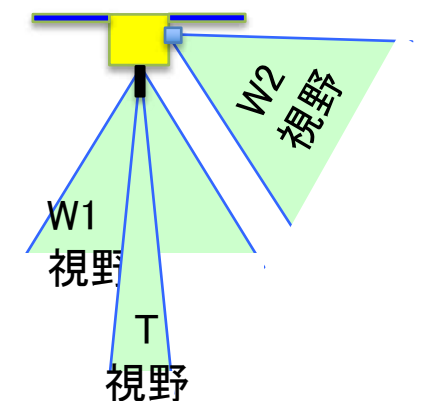
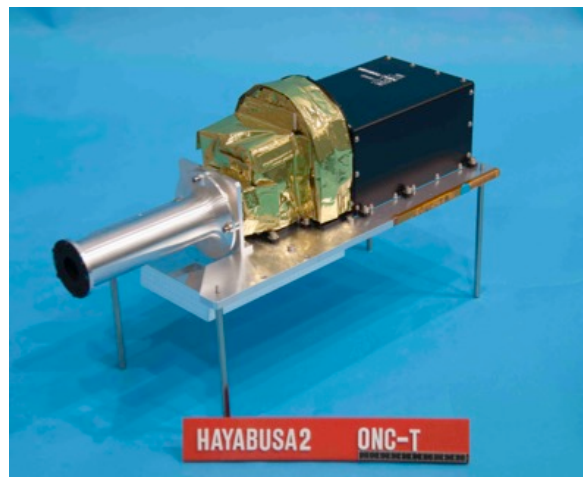
光学航法カメラ: ONC



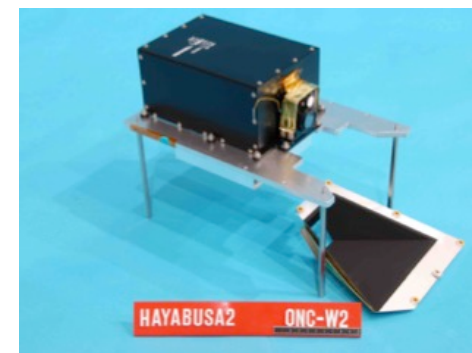
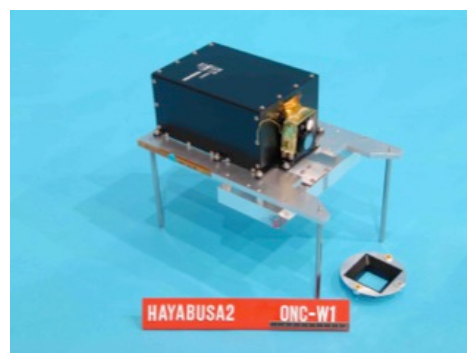
Optical Navigation Camera

目的: 探査機誘導と科学計測のために恒星と探査小惑星を撮像する。

	ONC-T	ONC-W1	ONC-W2
検出器	二次元 Si-CCD (1024 x 1024 ピクセル)		
視野方向	直下(望遠)	直下(広角)	側方(広角)
視野角	6.35° × 6.35°	65.24° × 65.24°	
焦点距離	100m ~ ∞	1m ~ ∞	
空間分解能	1m/pix @高度10km 1cm/pix @高度100m	10m/pix @高度10km 1mm/pix @高度1m	
観測波長	多色 (390、480、550、700、860、950、589.5nm、Wide)	単色 (485nm ~ 655nm)	



(画像クレジット: JAXA)





中間赤外カメラ: TIR

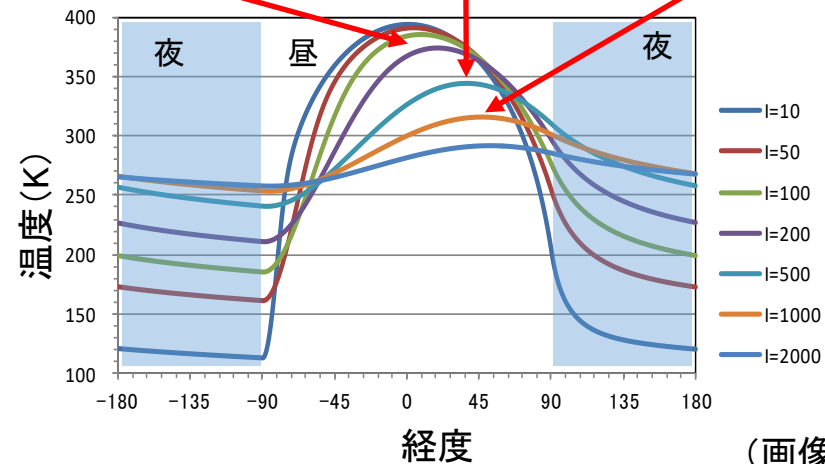
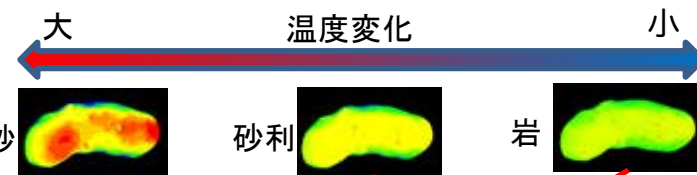


Thermal Infrared Imager

小惑星の表面温度は太陽に照らされる昼間は上昇、夜間は低下するという日変化をする。

砂のように細粒の土質や、空隙の多い岩石では表面温度の日変化は大きく、中身の詰まった岩石は日変化が小さい。

小惑星からの熱放射の2次元撮像(サーモグラフ)することによって、小惑星表面の物理状態を調べる。



(画像クレジット: JAXA)

・検出器	2次元非冷却ボロメータ
・観測波長	8~12 μm
・観測温度	-40~150°C
・相対温度精度	0.3°C
・画素数	328 × 248 (有効)
・視野角	16° × 12°
・解像度	20m (高度20km)、5cm (高度50m)