

HAYABUSA2搭載レーザー高度計LIDAR を用いた小惑星(162173) Ryuguの表面ラフネス

Surface Roughness of Asteroid (162173) Ryugu using a Laser Altimeter LIDAR on HAYABUSA2

2019年度・萌芽研究

阿部新助¹, 増田陽介¹,
並木則行², 松本晃治², 野田寛大²,
千秋博紀³, 照井冬人⁴, 水野貴秀⁴,
平田成⁵, 出村裕英⁵

1) 日本大学大学院 理工学研究科 航空宇宙工学専攻

2) 国立天文台

3) 千葉工業大学PERC

4) JAXA

5) 会津大学

目次

研究背景

- ・ レーザー高度計による小惑星の表面ラフネス
 - ・ 研究目的
-

解析手法

- ・ ベースラインの計測と地形傾斜の除去
-

解析結果・考察

- ・ 小惑星Ryuguのグローバルラフネスマップ
 - ・ 小惑星Ryuguのハースト指数
-

結論

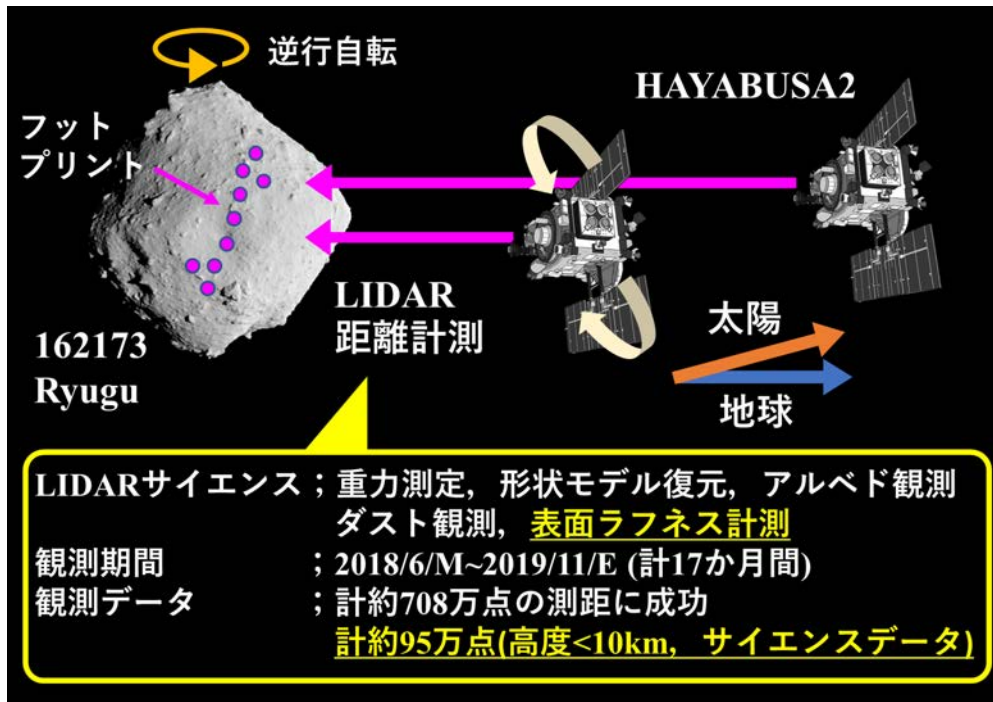
研究背景

● HAYABUSA2搭載レーザー高度計LIDARによるサイエンスミッション

小サイズの小惑星の形成過程及びその地質活動を明らかにし、その衝突進化モデルを検証する

✓ 小惑星の表面地形と内部構造の定量的な調査

LIDAR



LIDARの主な諸元 Mizuno, et al. (2017).

項目	性能
測距範囲	30 m–25km
空間分解能	0.5 m
測距誤差 (1 σ)	± 1 m (at 30 m) < ± 5.5 m (at 25 km)
サンプリング周波数	最大1Hz
フットプリントサイズ	1.5 mrad (高度1km以上) 20.4 mrad (高度1km以下)

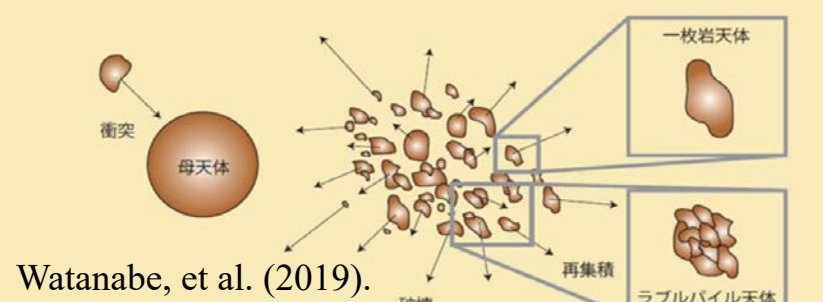
Namiki, et al. (2019)., Matsumoto, et al.,(2020)

研究背景

● C-type小惑星(162173) Ryuguの物理特性

Ryuguはラブルパイル小惑星

- 瓦礫が弱い自己重力で緩く繋がった高空隙率小天体
- **Porosity; Itokawa>40%, Ryugu>70%**



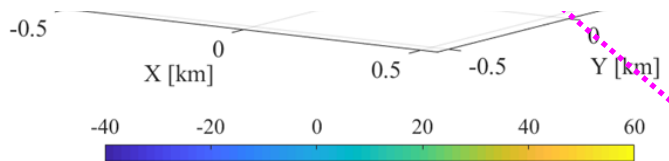
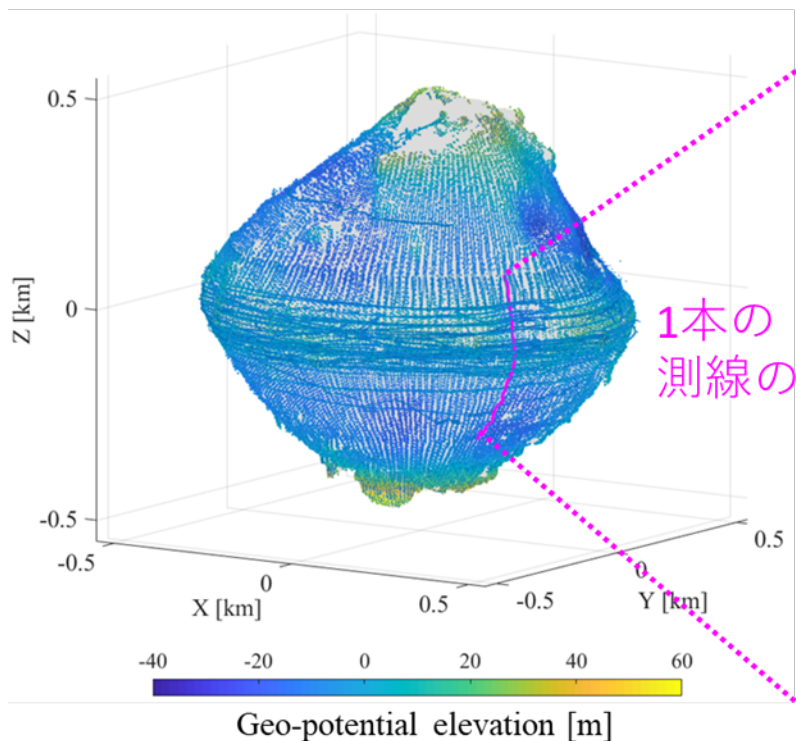
項目	諸元	Watanabe, et al. (2019).
自転周期	7.6326	hour
サイズ	1.04×1.00×0.89	km
体積	0.377 ± 0.005	km ³
質量	(4.4 ± 0.06) × 10 ¹¹	km ³
バルク密度	1.19 ± 0.02	g/cm ³
内部空隙率	> 50%	(仮定する隕石種による)

➤ 小惑星の表面地形は過去の衝突破壊・再集積の痕跡を残していることが期待される



研究背景

● レーザー高度計LIDARによる小惑星の表面ラフネス

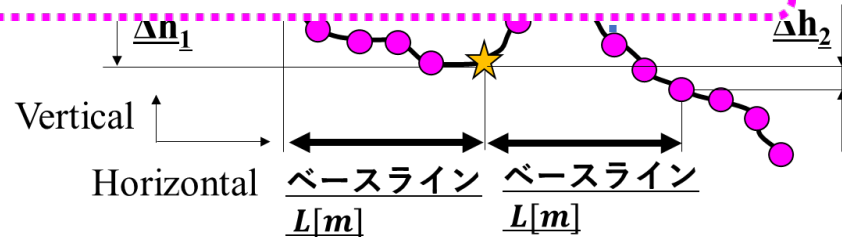
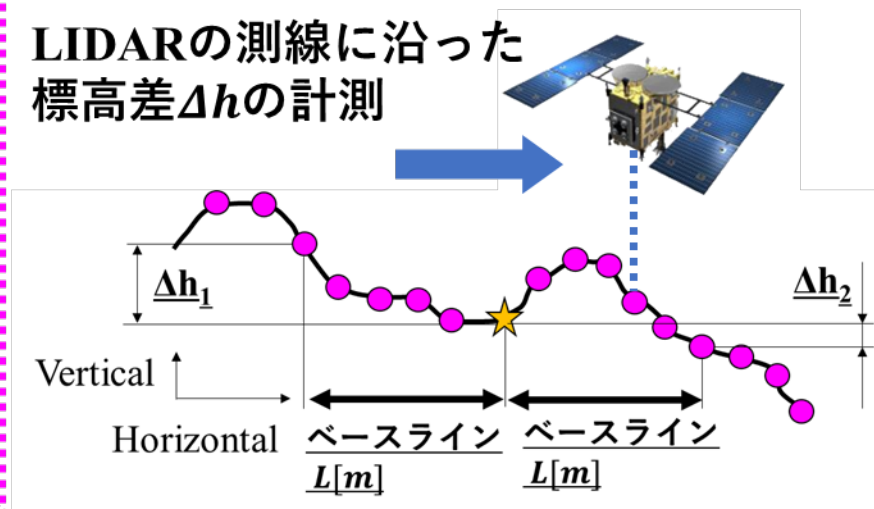


標高 = ジオポテンシャル高度[m]

➤ 重力の等ポテンシャル面からの高さ

$$\sigma(L) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \{\Delta h_i(L)\}^2}$$

LIDARの測線に沿った
標高差 Δh の計測



研究背景

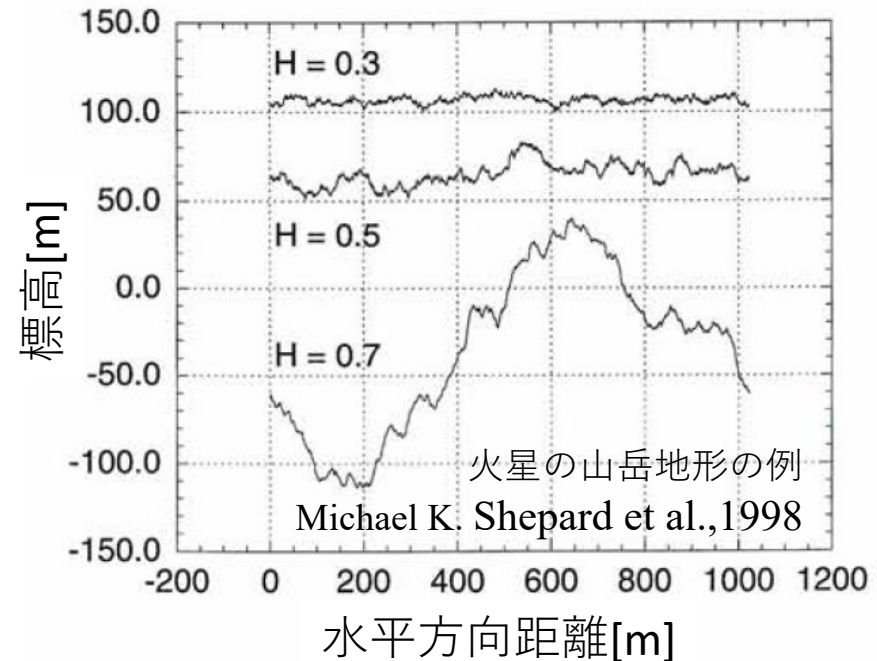
● 小惑星Ryuguと他の天体との表面ラフネスの比較

自然界の地形におけるベースライン L 毎の表面ラフネスは「ハースト指数 $H(0\sim 1)$ 」の冪乗で表される Michael K. Shepard, et al. (2001).

$$\sigma(L) = \sigma_0 L^H \quad H(0 < H < 1)$$

➤ 「ハースト指数」：その天体の粗さのトレンドを示す指標

- ✓ Eros: 亀裂入りの一枚岩天体
 - ハースト指数 $H=0.97$
 - ✓ Itokawa: ラブルパイル小天体
 - ハースト指数 $H=0.51$
- H.C.M. Susorney, et al. (2018, 2019)



内部構造及び表面地形の異なる小惑星同士で明確な違い

研究目的

- 小惑星の表面ラフネスの計測はItokawaとErosの2例のみ
 - **小天体ラフネスには依然不明点が多い**
- 小惑星Ryuguでは初となる表面ラフネスのグローバルマップとハースト指数を計測
 - クレータやボルダー(岩塊)等の特徴地形との相関
 - 小惑星ItokawaやEros等の他天体との比較



- ① 小惑星Ryuguの表面地形の描像を定量的に明らかにする
- ② ラブルパイル小惑星の表面ラフネスとハースト指数がその表面地形と地質活動の歴史にどういった解釈を与えるのか明らかにする

目次

研究背景

- ・ レーザー高度計による小惑星の表面ラフネス
- ・ 研究目的

解析手法

- ・ ベースラインの計測と地形傾斜の除去

解析結果・考察

- ・ 小惑星Ryuguのグローバルラフネスマップ
- ・ 小惑星Ryuguのハースト指数

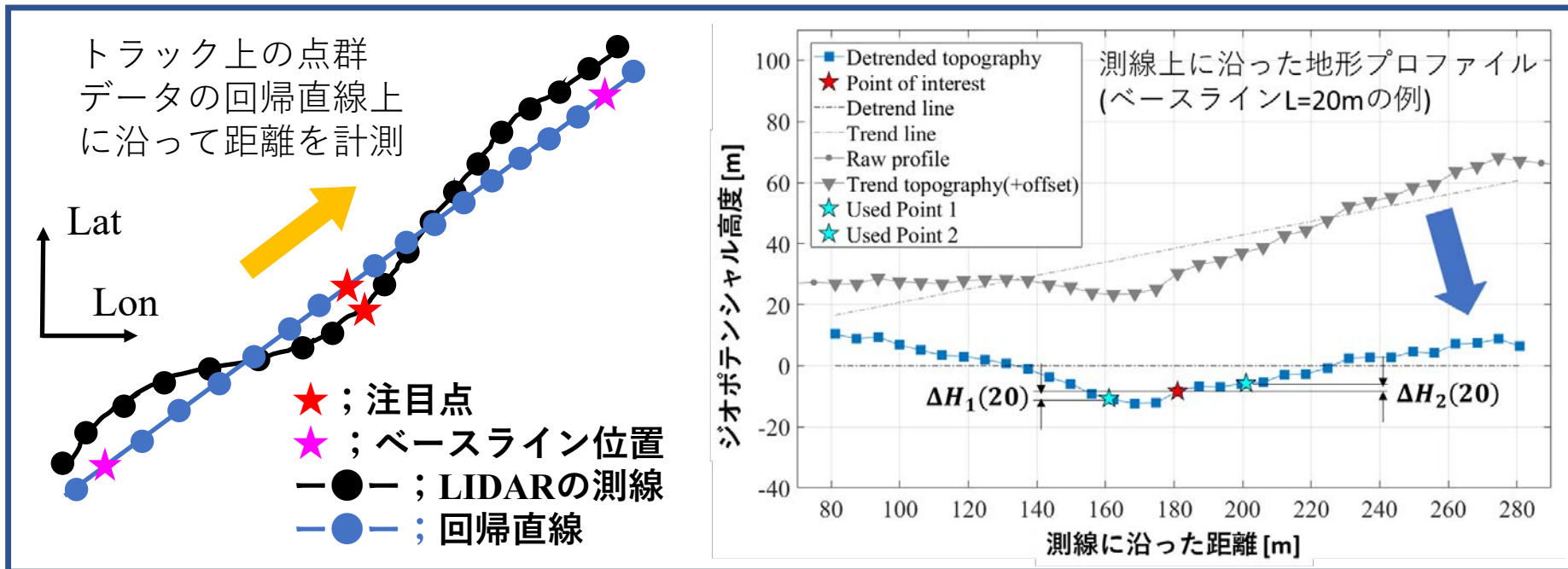
結論

解析手法

● ベースラインの計測と地形のトレンド除去

- Step.1 LIDARデータを1本ずつの直線的なトラックに分割
- Step.2 トラックの回帰直線上に沿ってベースラインを計算
- Step.3 計測するベースライン L の前後5倍の範囲の傾斜を除去

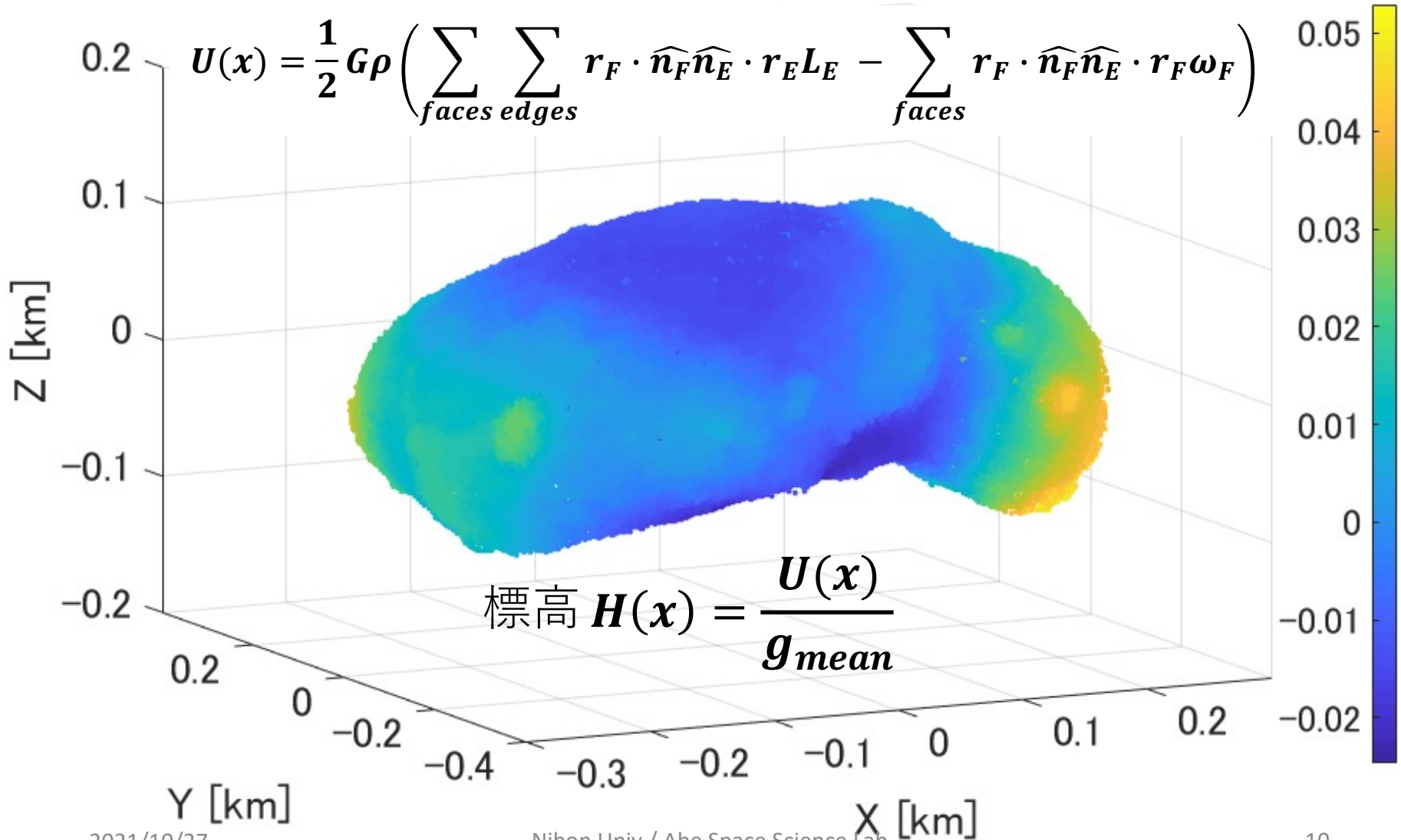
Michael K. Shepard, et al. (2001). H.C.M. Susorney, et al. (2017)



- 一連の処理を、 $L=8m\sim 60m$ の範囲で実行し標高差を計算
- 形状モデルの各メッシュ毎に表面ラフネスを計算する

解析手法～標高の計算～

③ 形状モデルを密度一定の多面体として計算 (Wener&Scheeres,1997)

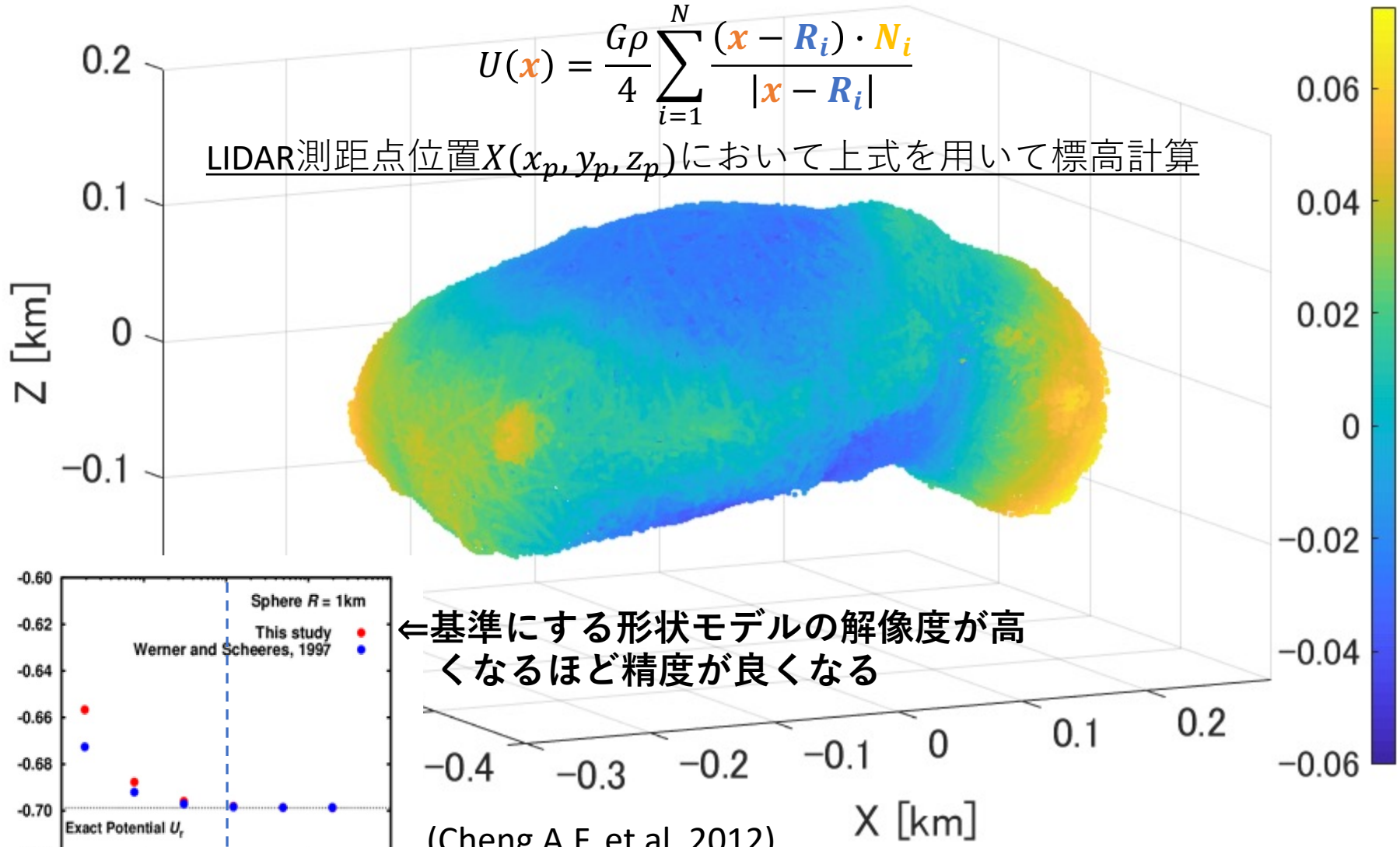


解析手法～標高の計算～

②形状モデルを微小体積要素に分割して計算 (Cheng A.F,2002,2012)

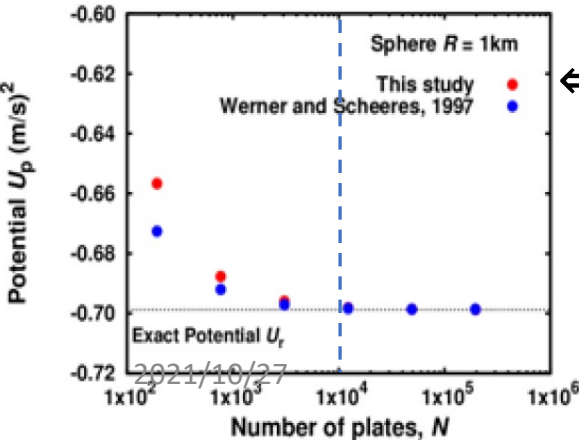
$$U(\mathbf{x}) = \frac{G\rho}{4} \sum_{i=1}^N \frac{(\mathbf{x} - \mathbf{R}_i) \cdot \mathbf{N}_i}{|\mathbf{x} - \mathbf{R}_i|}$$

LIDAR測距点位置 $X(x_p, y_p, z_p)$ において上式を用いて標高計算



←基準にする形状モデルの解像度が高くなるほど精度が良くなる

(Cheng A.F. et al, 2012)

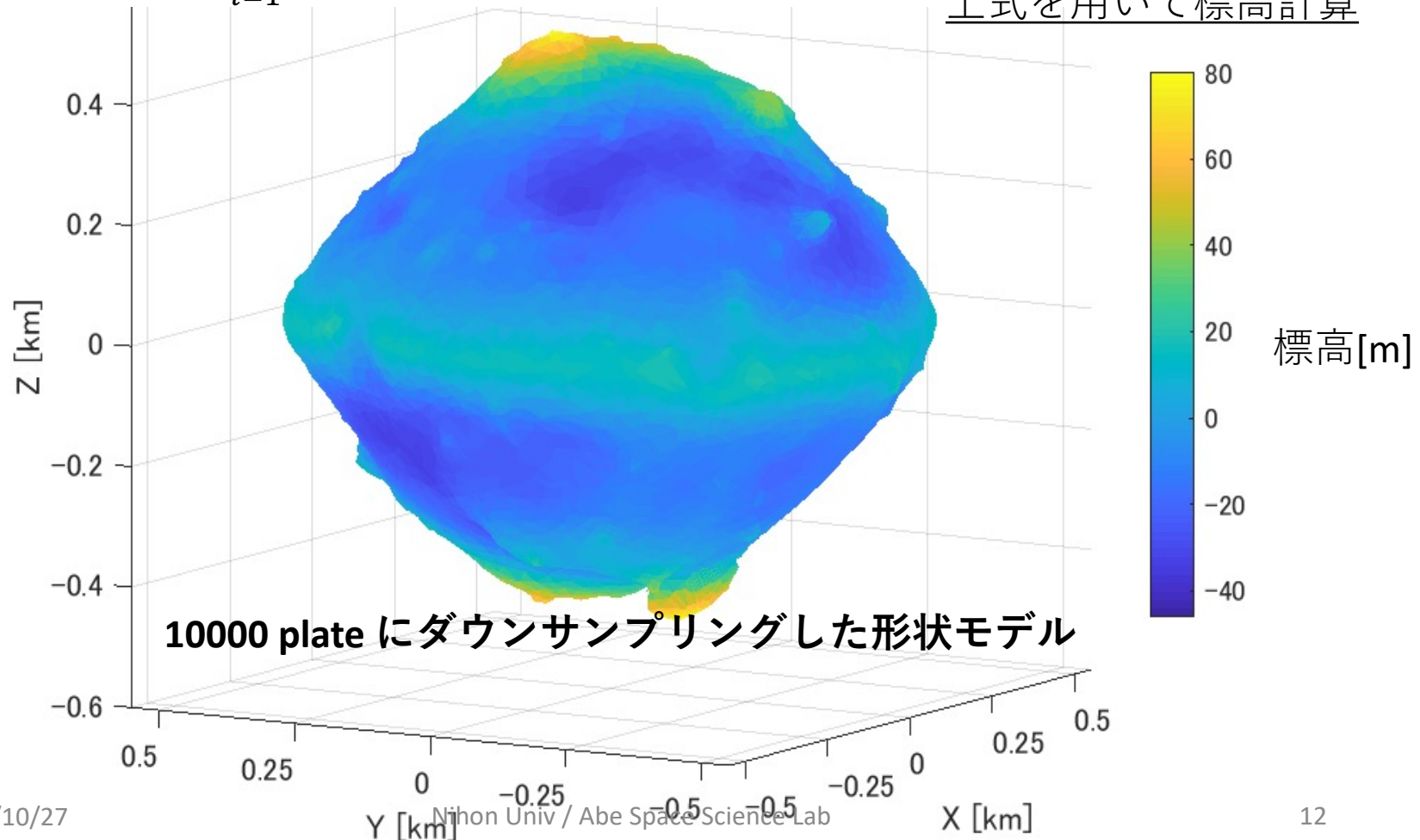


解析手法～標高の計算～

② 形状モデルを微小体積要素に分割して計算 (Cheng A.F,2002,2012)

$$U(\mathbf{x}) = \frac{G\rho}{4} \sum_{i=1}^N \frac{(\mathbf{x} - \mathbf{R}_i) \cdot \mathbf{N}_i}{|\mathbf{x} - \mathbf{R}_i|} \Rightarrow H(\mathbf{x}) = \frac{U(\mathbf{x})}{g_{mean}}$$

LIDAR測距点位置
 $X(x_p, y_p, z_p)$ において
上式を用いて標高計算



目次

研究背景

- ・ レーザー高度計による小惑星の表面ラフネス
- ・ 研究目的

解析手法

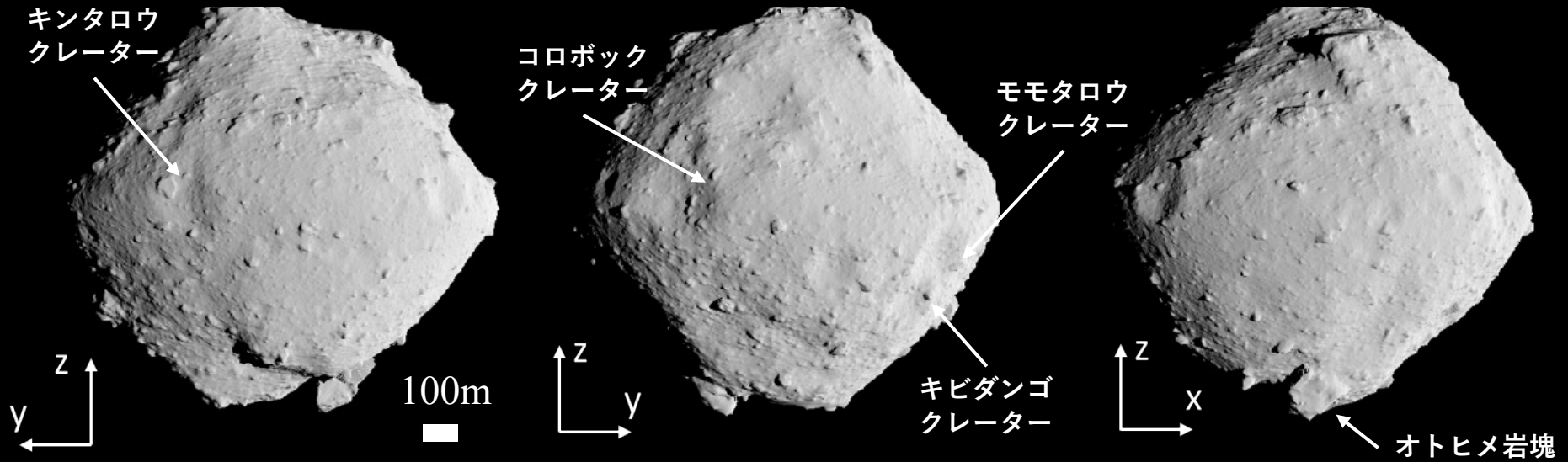
- ・ ベースラインの計測と地形傾斜の除去

解析結果・考察

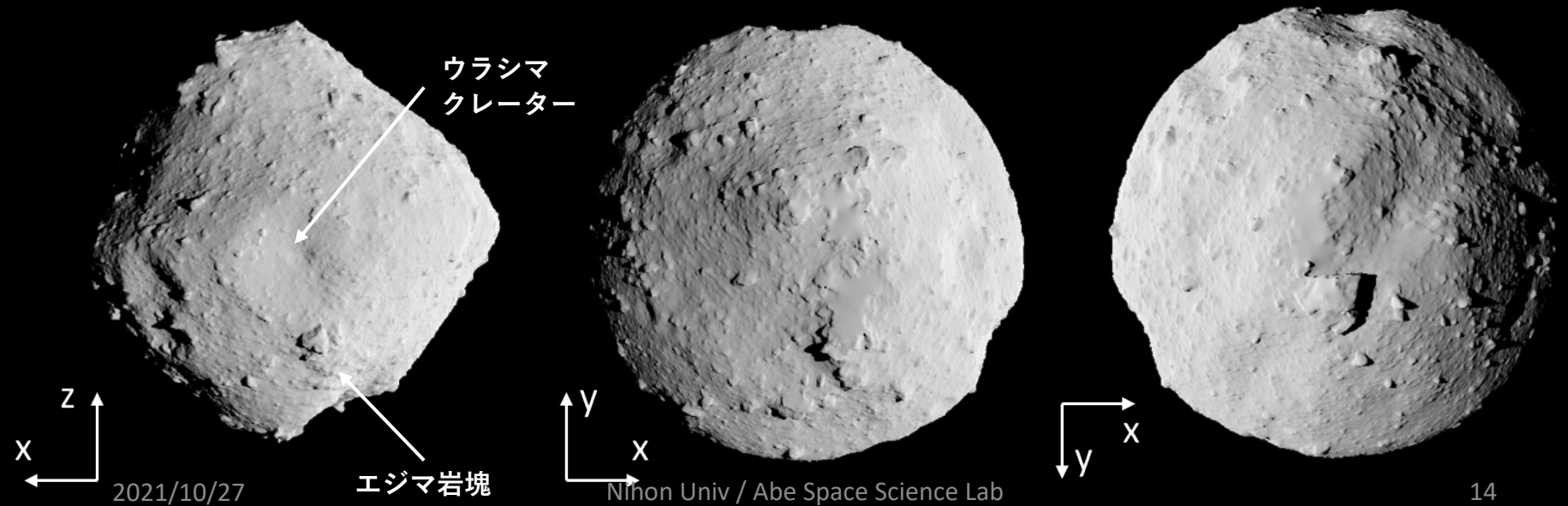
- ・ 小惑星Ryuguのグローバルラフネスマップ
- ・ 小惑星Ryuguのハースト指数

結論

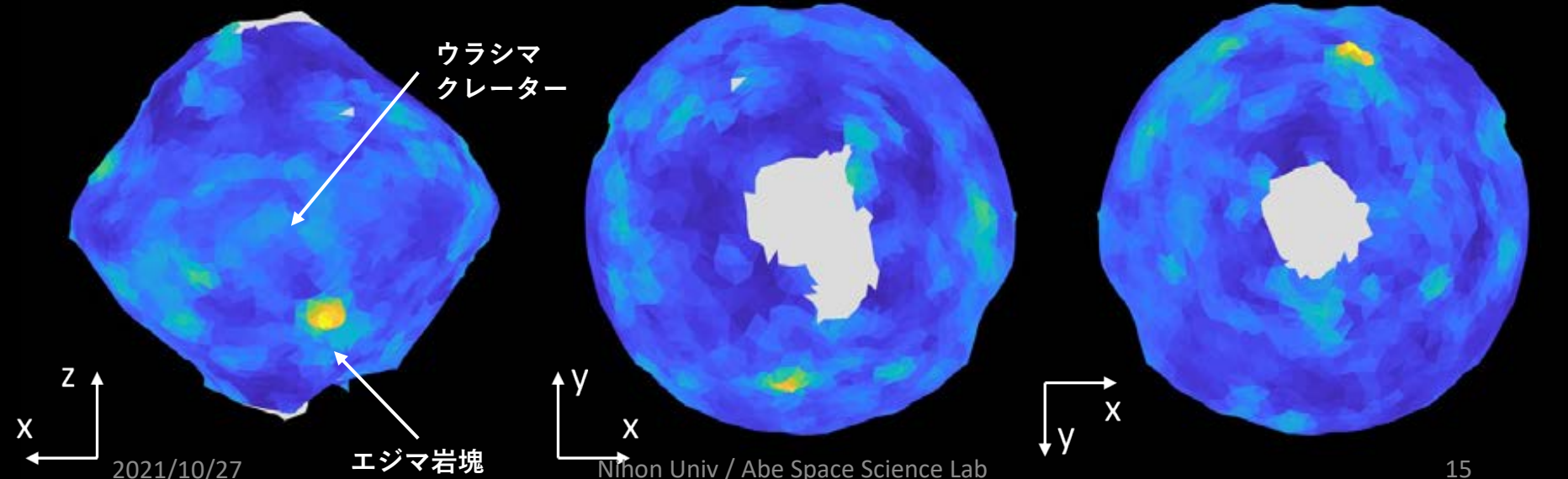
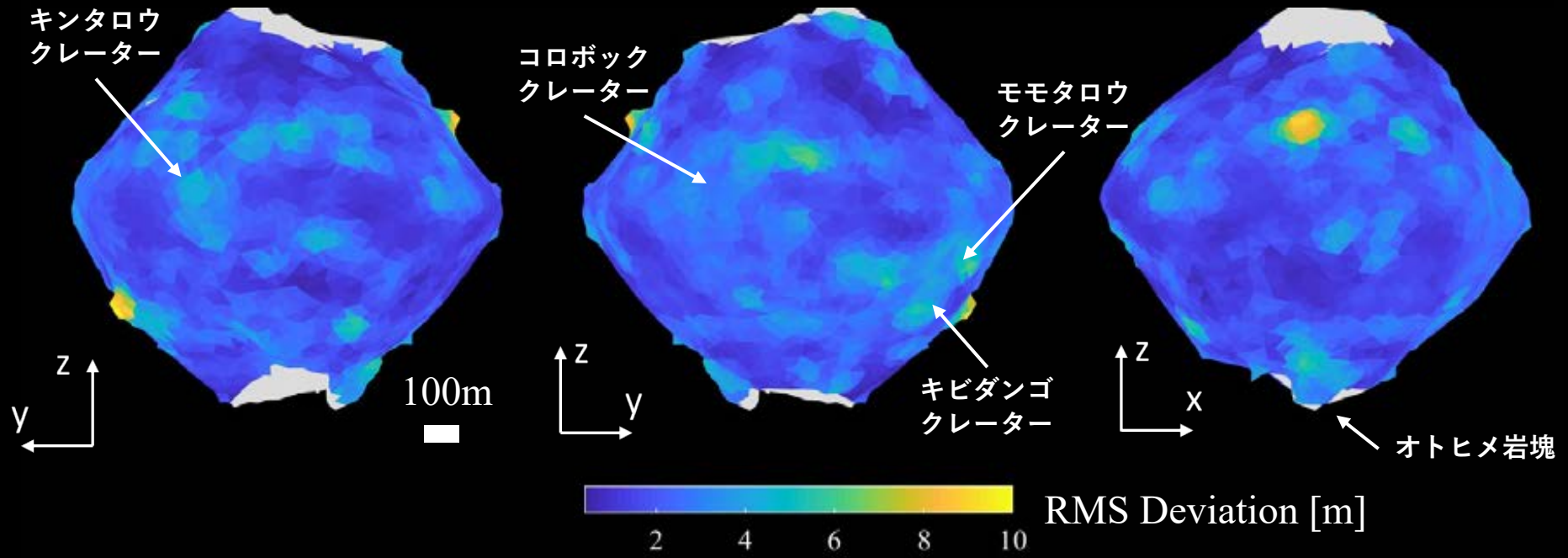
小惑星Ryuguの外観



Credit ; JAXA, University of Tokyo, Kochi University, Rikkyo University, Nagoya University, Chiba Institute of Technology, Meiji University, University of Aizu, AIST



ラフネスグローバルマップ(ベースライン20m)



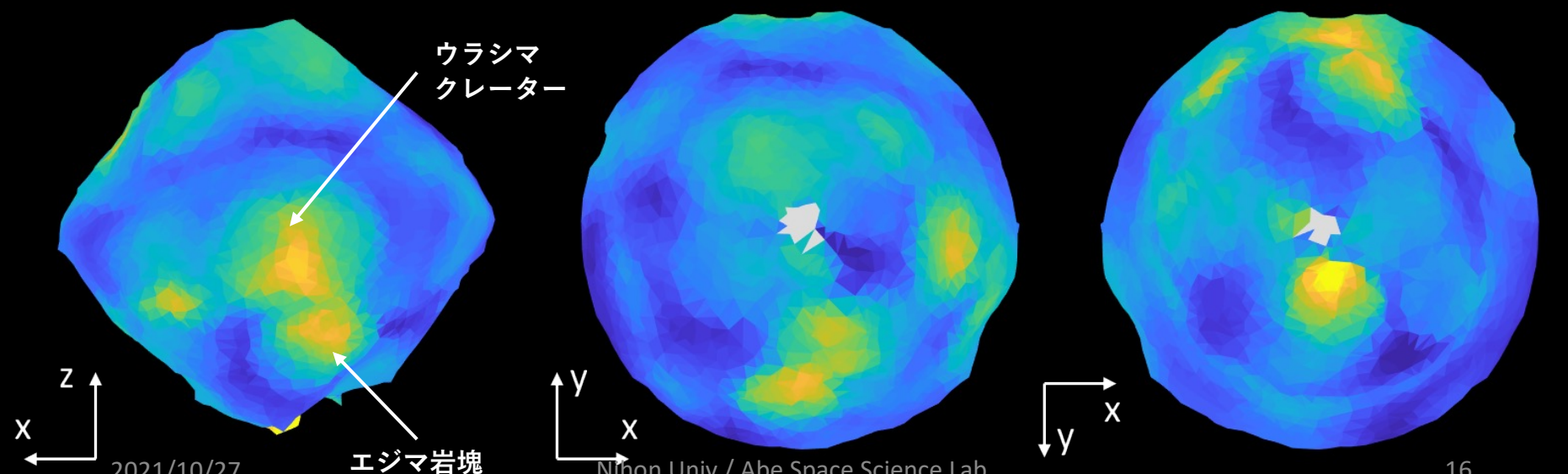
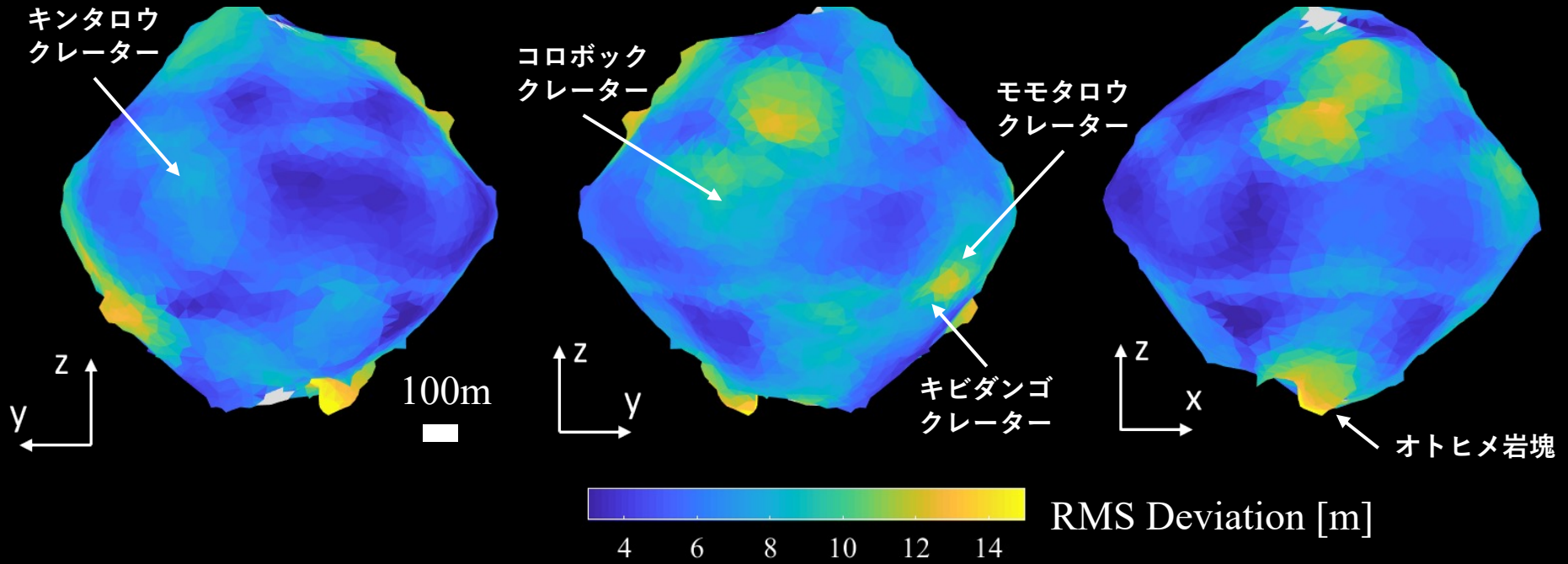
2021/10/27

Nihon Univ / Abe Space Science Lab

15

ラフネス計算に必要な標高差数(100個)に達していない領域は灰色にしている

ラフネスグローバルマップ(ベースライン60m)



2021/10/27

Nihon Univ / Abe Space Science Lab

16

ラフネス計算に必要な標高差数(100個)に達していない領域は灰色にしている

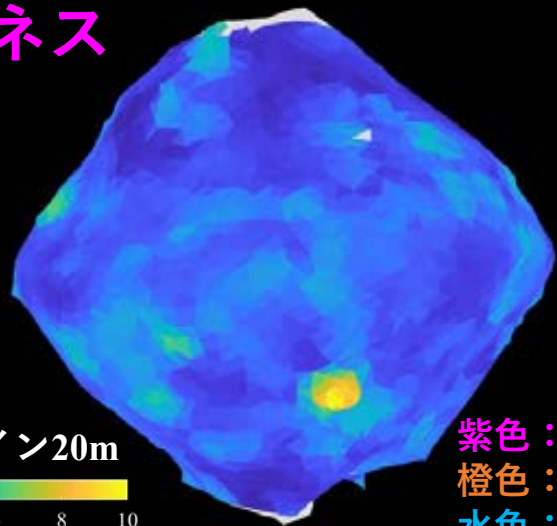
考察①～小惑星Ryuguの表面地形と表面ラフネス～

ボルダー地形の表面ラフネス

➤ 計測した全ベースラインでボルダー分布と弱い正の相関あり

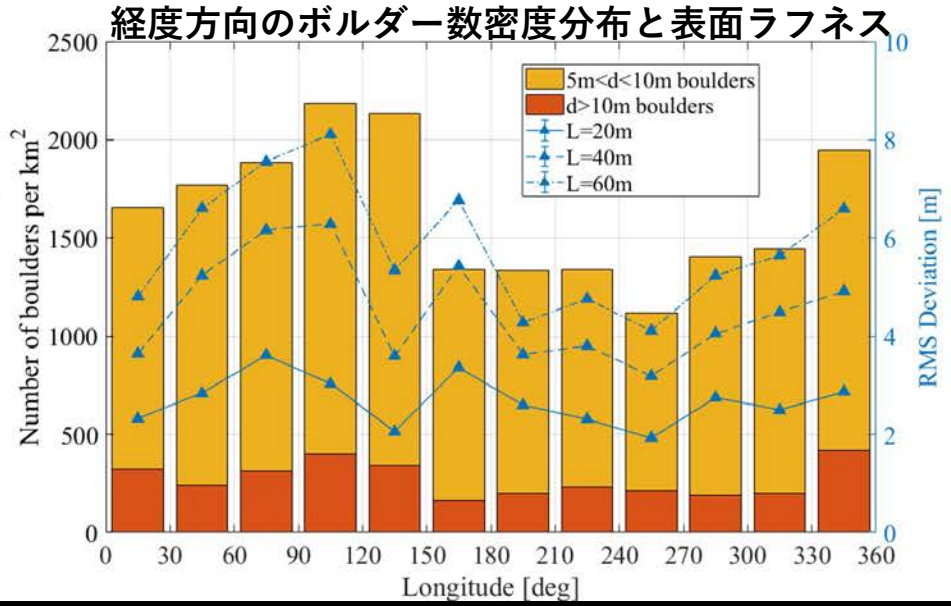
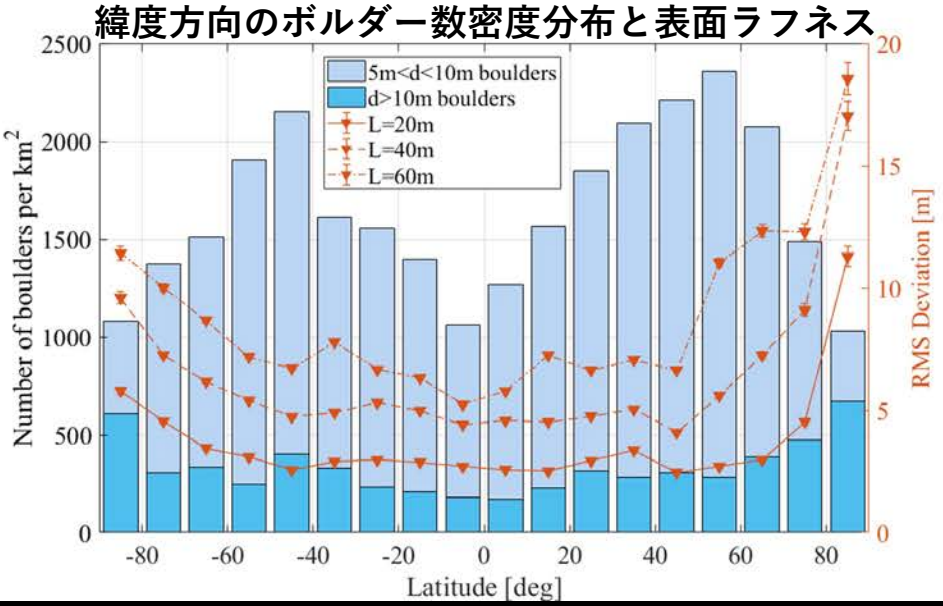
➤ Itokawaのような地形の2分性(ラフ域とスムーズ域)は見られなかった

➤ 全球の大規模な表層進化



紫色 : $5 < D < 10$
 橙色 : $10 < D < 20$
 水色 : $20 < D < 40$
 青色 : $D > 40$

Michikami, et al. (2019).

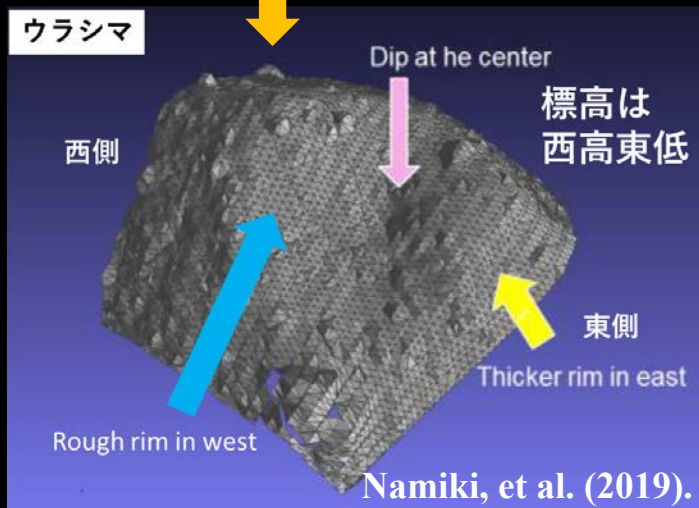
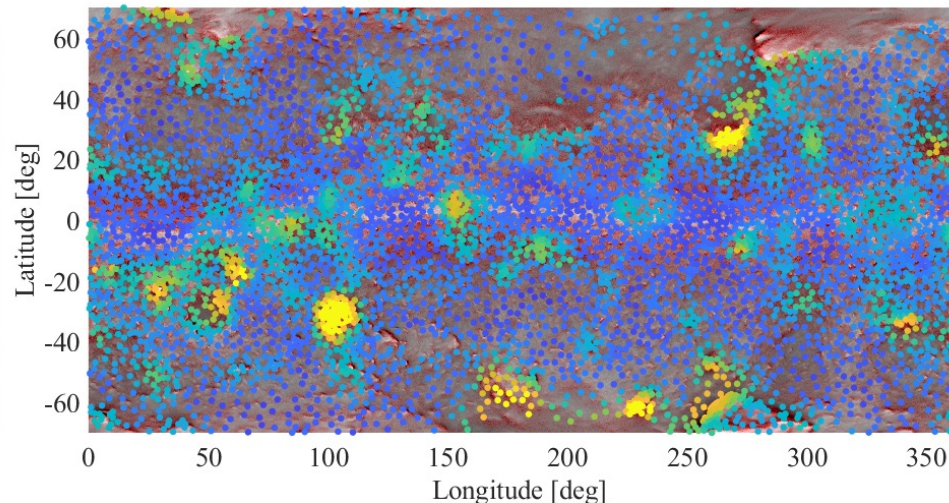
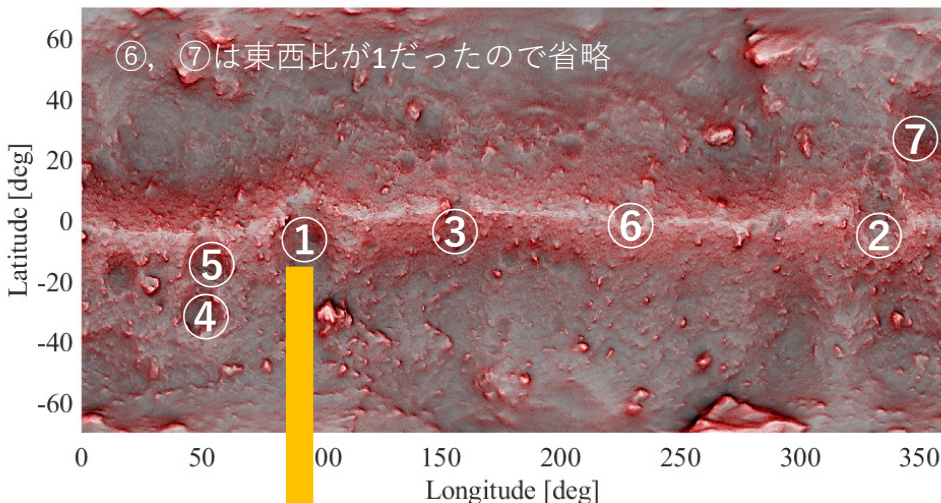


ボルダーヒストグラムはMichikami, et al. (2019).をreplot

2021/10/27

クレータ地形の表面ラフネス

- ✓ 赤道の大クレータはItokawaにはない明瞭なリムと東西非対称性あり
- ✓ クレータ地形の東西非対称は**高速自転の効果によるもの** Thomas, et al. (1998).
- ✓ 赤道クレータのラフネス⇒**僅かだが有意に西側 > 東側**
- **Ryuguの表面ラフネスは高速自転時代に受けた衝突地形を反映**



クレータ名	緯度/経度 [deg]	半径 [deg]	西側/東側 [m]	比率 (西側/東側)
①ウラシマ	92.9, -8.1	20	3.73 > 3.31	1.1
②コロボック	333, -1.5	14	2.98 > 2.68	1.1
③キンタロウ	157.8, 0.4	11	4.79 > 3.11	1.5
④吉備団子	51.1, -30.2	12	4.40 < 5.12	0.86
⑤モモタロウ	53.2, -12.1	13	3.18 < 3.59	0.89

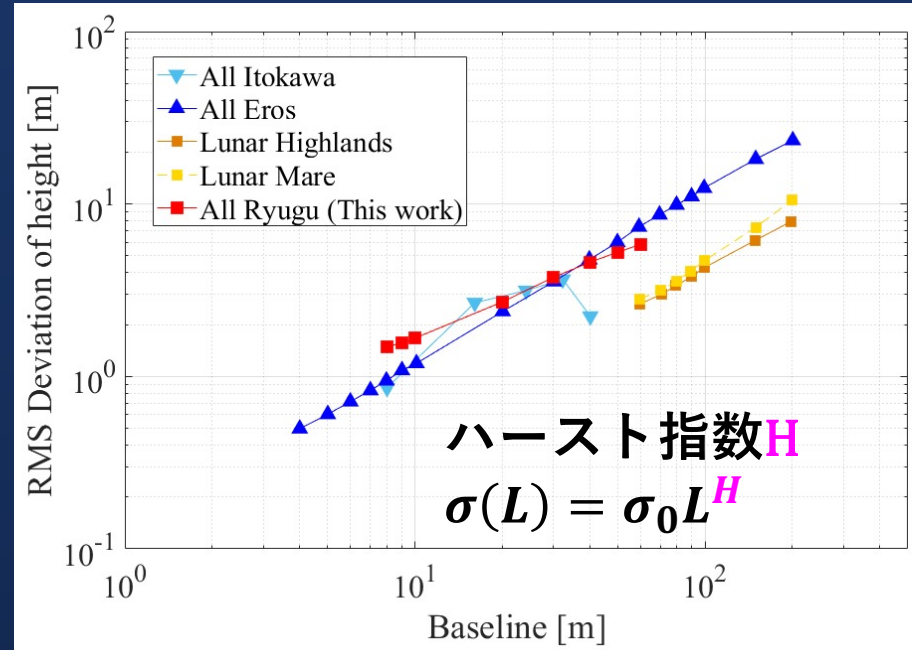
赤道から離れたクレータラフネス⇒西側 < 東側

➤ **形成時期or形成メカニズムが異なる可能性**

考察②～ラブルパイル小惑星におけるハースト指数～

- 全球のハースト指数が1付近の天体は衝突クレータに支配的
 - 衝突クレータ形成・維持には十分な内部強度が必要
 - **内部構造の違いを反映している可能性が有意に高い**

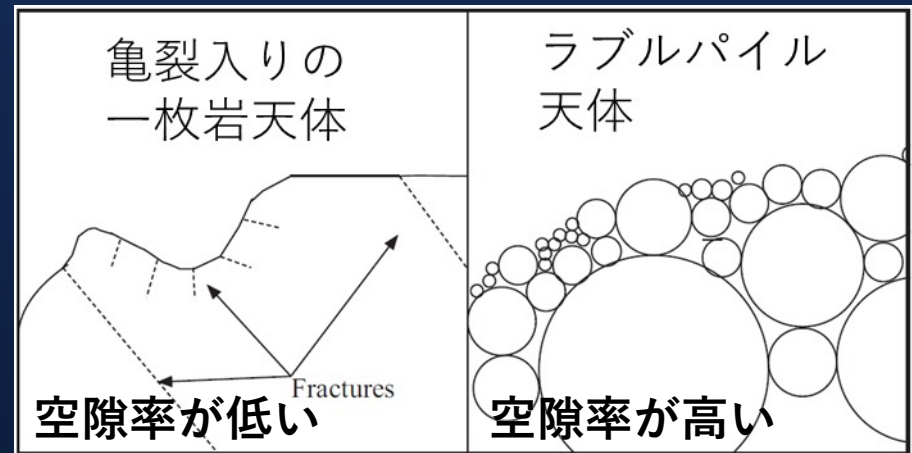
Susorney et al., (2019)のDeviogramにover-plot



空隙率
高い

	L[m]	Hurst Exponent [-]
25143 Itokawa	8~32 (All Tracks)	0.51 ± 0.07 (Susorney et al.(2019))
162173 Ryugu	8~60 (All Tracks)	0.69 ± 0.04 (This Study)
8~30 (All Tracks)	0.74 ± 0.08 (This Study)	
433 Eros	4~200 (All Tracks)	0.97 ± 0.01 (Susorney et al.(2018))
Lunar -Mare	60~200	0.91 ± 0.01 (Susorney et al.(2018))
Lunar -Highlands	60~200	1.00 ± 0.02 (Susorney et al.(2018))

空隙率
低い



内部分化

考察②～ラブルパイル小惑星におけるハースト指数～

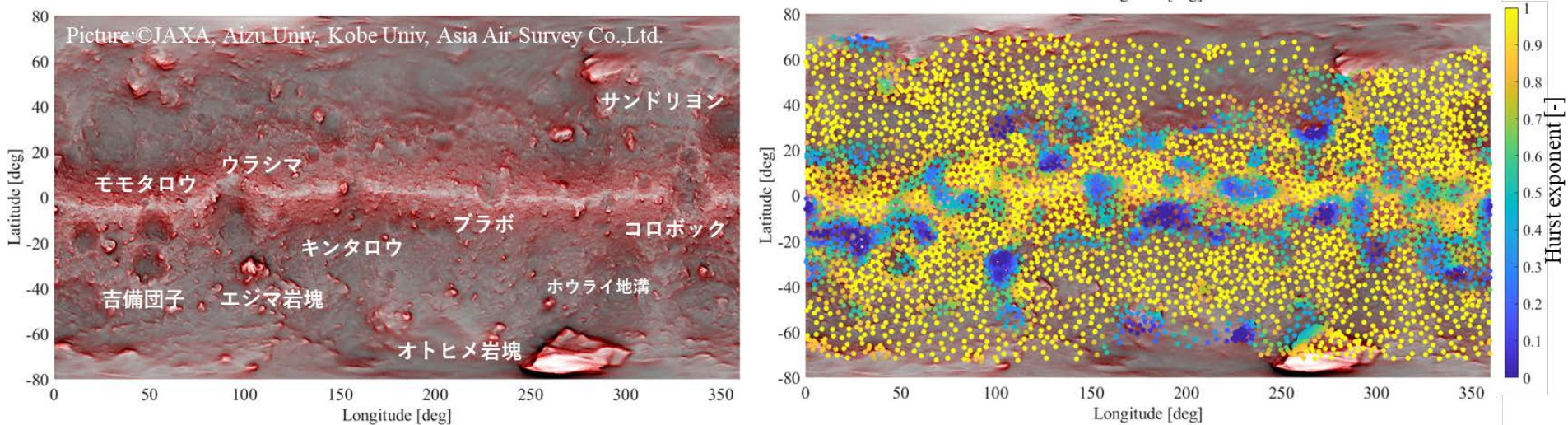
● 小惑星の局所地形におけるハースト指数

ハースト指数が低い領域

- 複数の特徴地形が混在/複雑な地質活動を経た地形
- **過去に地形変性・浸食を経た地形を反映**

ハースト指数が高い領域

- 空間的な起伏変化の持続性が高い地形
- **過去に地形変性・浸食を経ていない始原的な地形を反映**



地形変性の有無や表面年代の違いも反映している可能性

- ✓ 将来、同じラブルパイル小惑星Bennu(2020年現在、探査機OSIRIS-Rexが探査中)のハースト解析が為されれば、この仮説を検証できる Nihon Univ / Abe Space Science Lab 20

結論

- 本研究では、小惑星Ryuguでは初となる表面ラフネスのグローバルマップとそのハースト指数を見積もった。
その結果、

① Ryuguの表面地形

- Itokawaのような地形2分性はなく、Ryuguは過去の
全球大規模な表層進化の末に現在の姿になったこと
が示唆される
- クレータラフネスの東西非対称性から、赤道付近と
それ以外のクレータで形成時期が異なる可能性が
示唆される

② ラブルパイル小惑星におけるハースト指数

- その表面が衝突地形に支配的かどうか
- 表面地形だけでなく内部構造の違い
- 過去に何らかの地形変性を経たか(始原的かどうか)

成果の公表状況（学会発表・学術誌投稿等・予定を含む）

1. Y. Masuda, S. Abe, et al. "The Surface Roughness of 162173 Ryugu Based on the Topography from Hayabusa2 Laser Altimeter (LIDAR)", 51st Lunar and Planetary Science Conference, LPSC Abstract #2181, 2020
<https://www.hou.usra.edu/meetings/lpsc2020/pdf/2181.pdf>
2. 増田陽介「HAYABUSA2搭載レーザー高度計LIDARを用いた小惑星(162173) Ryuguのラフネス」, 2019年度 日本大学大学院理工学研究科 航空宇宙工学専攻 修士論文
3. 阿部新助, 他「はやぶさ2搭載レーザー高度計LIDARに基づく小惑星(162173)リュウグウの表面ラフネス」, 2020 JpGU-AGU.

A/I

- LIDARラフネスデータ・アーカイブを公開予定
- ラフネス計算ソフトウェア (MATLAB) も公開予定
（公開先TBD；会津大 or 日大WEB, ISAS/DARTS等）
- 公開データを使った成果論文

ご支援に感謝いたします！

APPENDIX

研究背景

● 小惑星Ryuguと他の天体との表面ラフネスの比較

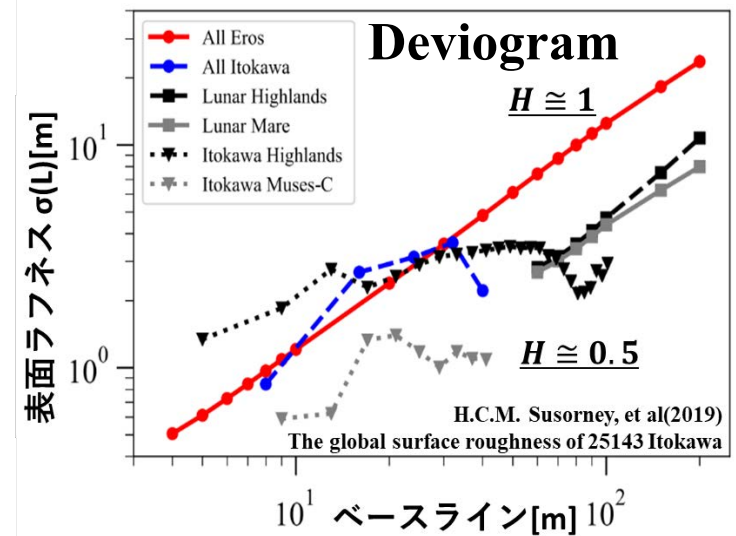
ベースライン毎の表面ラフネスはフラクタル次元 D を有するハースト指数 H の冪で表される Michael K. Shepard, et al. (2001).

$$\sigma(L) = \sigma_0 L^H \quad H(0 < H < 1), \quad D = 2 - H$$

- 「自己相似性」：細部を拡大すると全体に一致する
- 「フラクタル」：「自己相似性」を有する複雑図形
- 「ハースト指数」：その天体の粗さの傾向を示す

- ✓ Eros: 亀裂入りの一枚岩天体
- ✓ Itokawa: ラブルパイル小天体

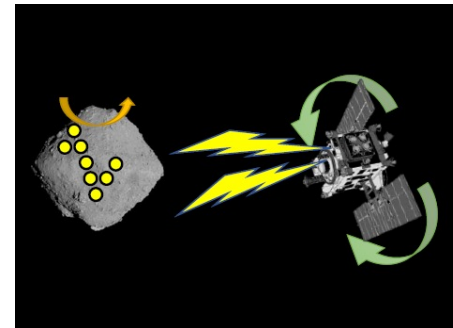
**内部構造及び表面地形の異なる
天体同士で明確な違い**



LIDARの小惑星全球観測データ

● LIDAR観測データ

- LIDARの小惑星全球スキャン観測(BoX-C観測)
- 高度10km以下-約95万点



高度を変化させて緯度方向に全球をスキャン観測
フットプリント
~8m

● 小惑星RyuguのTopography

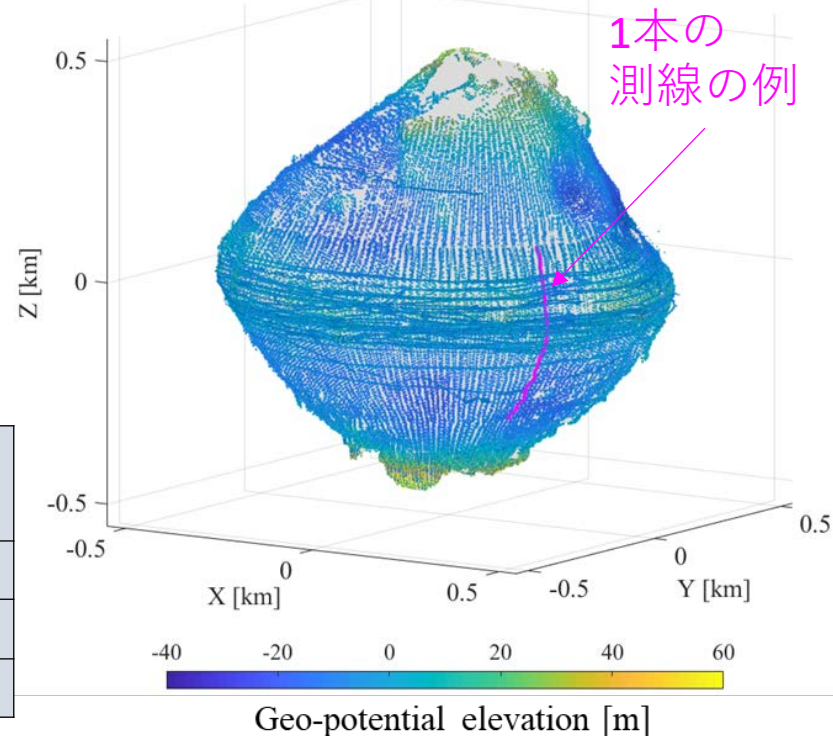
- 標高=重力(引力+遠心力)ポテンシャル/局所重力加速度

$$\Phi(x_i) = \frac{G\rho}{4} \sum_{p=1}^N \frac{(x_i - R_p) \cdot N_p}{|x_i - R_p|} - \frac{1}{2} \Omega^2 (x_i^2 + y_i^2)$$

$$e(x_i) = \frac{\Phi(x_i) - U_r}{|g_i|} \quad \begin{array}{l} R_p \text{ はメッシュ中心のXYZ} \\ N_p \text{ は} R_p \text{ の法線ベクトル} \end{array}$$

計算手法	密度一定, 形状モデルを微小要素に分割 (Cheng, et al, 2012)
形状モデル	49152メッシュモデル
バルク密度	1.19 g/cm ³ (Watanabe, et al., 2019)
自転速度	0.0133 rad/s (Watanabe, et al., 2019)

約95万点のフットプリントと標高値(カラーバー)を形状モデルにプロット



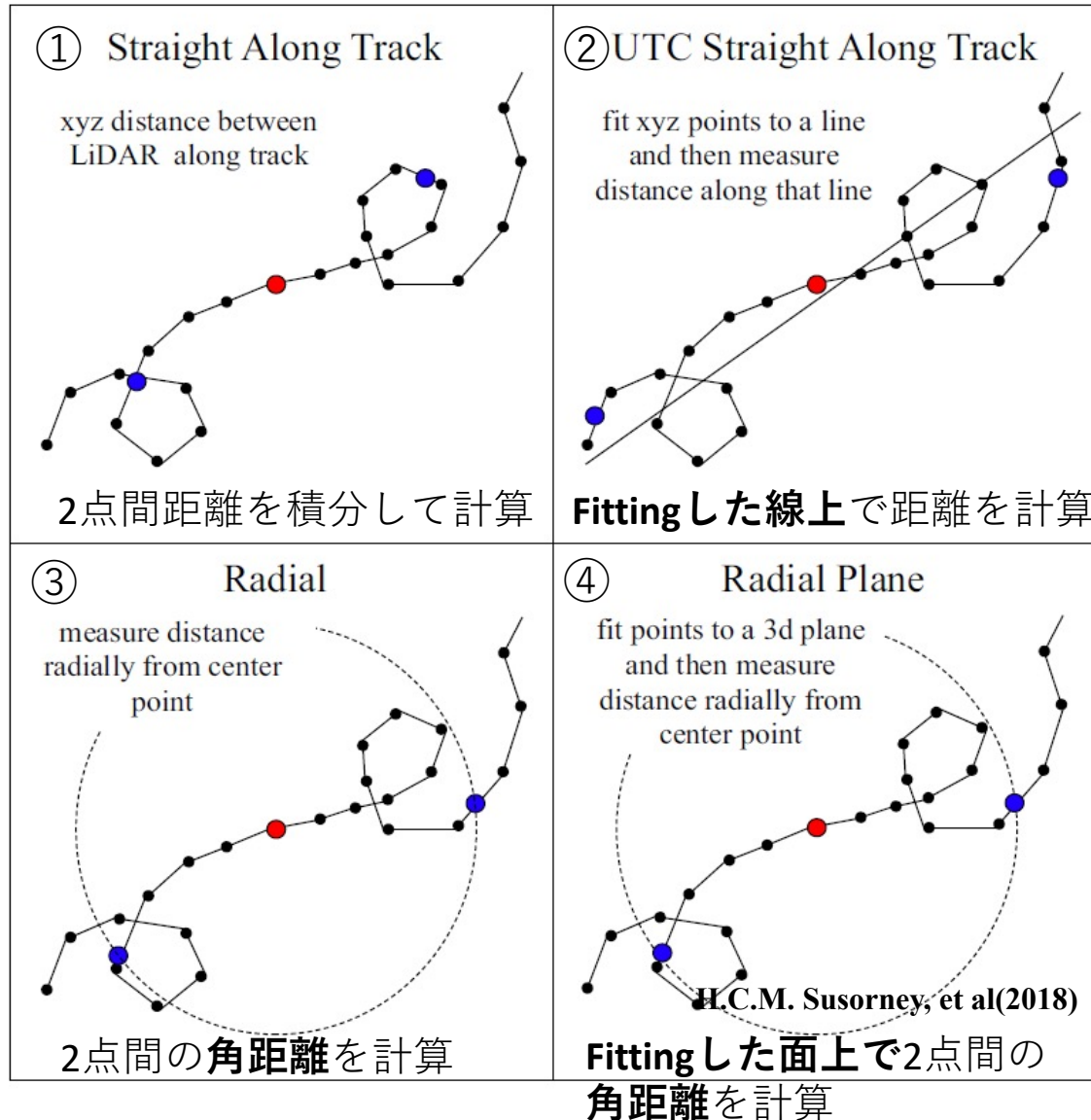
解析手法～ベースライン計算手法～

どの手法を選択するか の検討

- 小惑星Eros, 水星
手法② (Susorney et al., 2017, 2019)
- 小惑星Itokawa
手法④ (Oliv et al., 2008)
- 小惑星Itokawa
手法③ (Susorney et al., 2019)

使用するデータセット
のフットプリントが
直線的かジグザグか

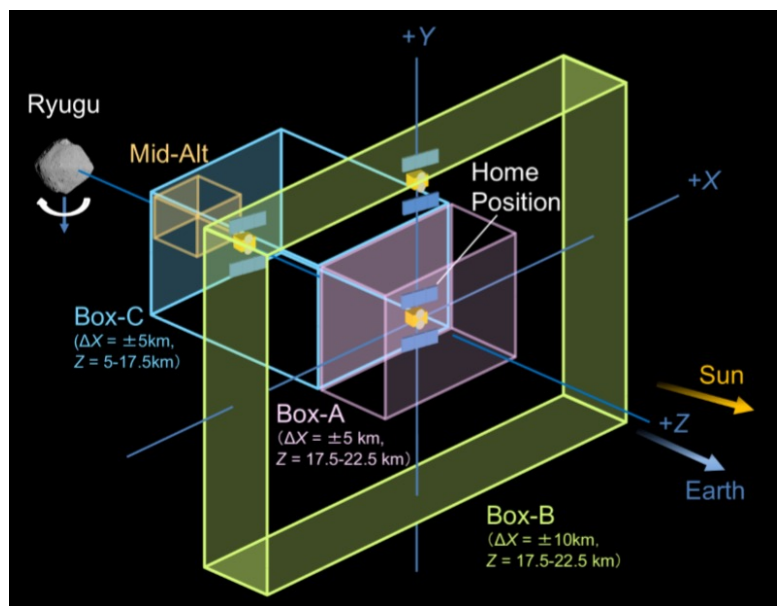
本研究では手法②で
ベースラインを計算する



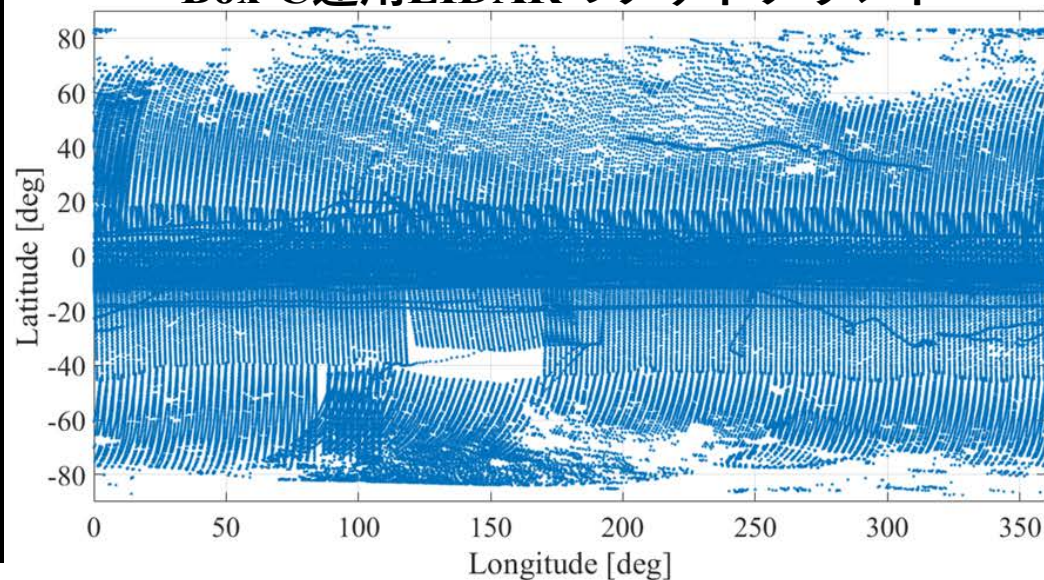
LIDARの小惑星全球観測データ

ホームポジション(高度20km) から高度を下げた中高度での全球スキャン観測

Flight events	Date	Number of data	Notes
Box-C全球スキャン観測	2018/7/19-20	35343	高度10km~15km, 90°N-90°S, ~360°E
Box-C赤道スキャン観測①	2018/10/30-31	32896	高度10km以下, 20°N-40°S, ~360°E
Box-C赤道スキャン観測②	2019/7/25-26	76871	高度10km以下, 30°N-30°S, 120~180°E
Box-C南半球スキャン観測	2019/10/8-9	24532	高度10km以下, ~90°S, ~360°E
Box-C北半球スキャン観測	2019/10/25-26	24144	高度10km以下, ~90°N, ~360°E



Box-C運用LIDARのフットプリント



- LIDARの測線は小惑星の自転と探査機の姿勢を変えることで全球をスキャン
- 結果的に測線が緯度方向で急激に変化する