

はやぶさ2宇宙の旅 ～2回のタッチダウンはいかに 成し遂げられたか～

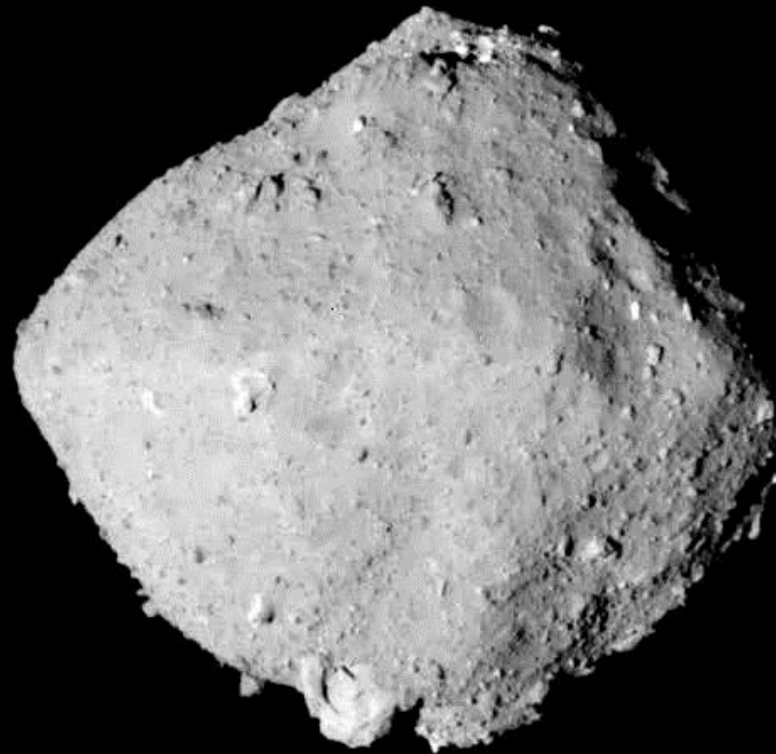
渡邊誠一郎

(34回生, 名古屋大学大学院環境学研究科
はやぶさ2プロジェクトサイエンティスト)

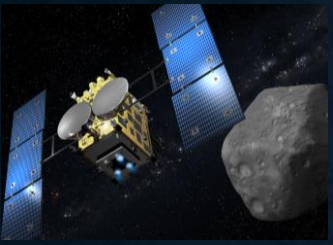
清水東高 オンライン番外交流会
2021年4月25日(日) 15—16時



1. はやぶさ2のリュウグウ探訪



Credit: JAXA/U Tokyo/Kochi U/Rikkyo U/Nagoya U/Chiba Inst of Tech/Meiji U/U Aizu/AIST



はやぶさ2の旅路

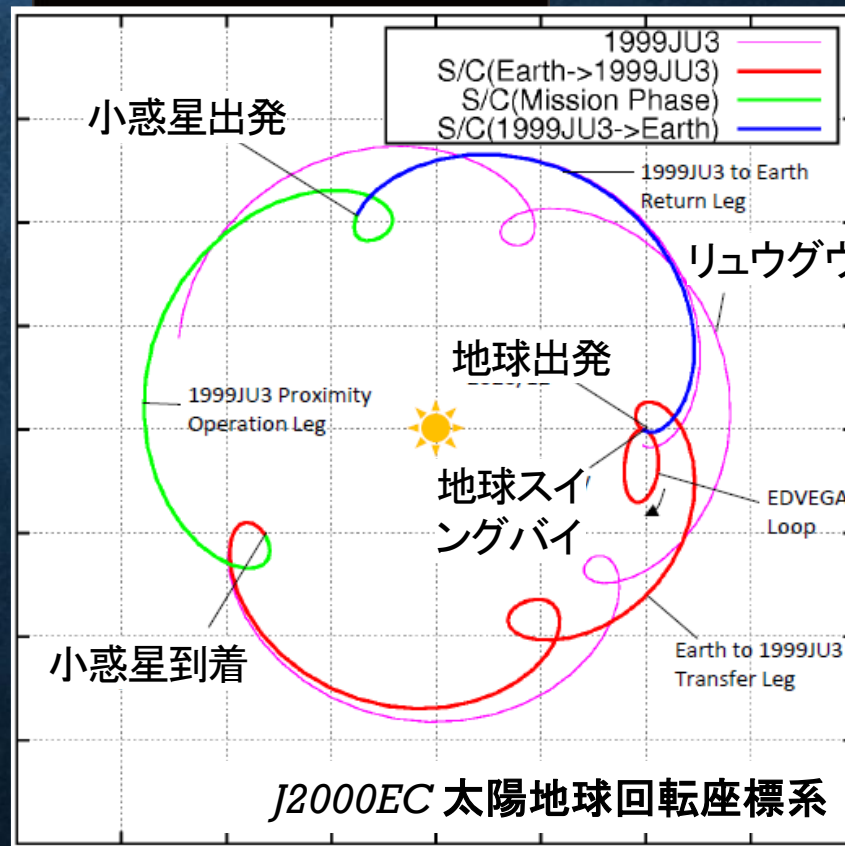
- 打上げ: 2014/12/03 ⇒ 小惑星リュウグウ
- リュウグウ到着: 2018/06; 出発: 2019/11
- カプセルの地球帰還: 2020/12/6 (日本時間)



はやぶさ2は2014年12月3日種子島宇宙センターからH-IIAロケットで打ち上げられた © JAXA



公転周期: 1.30年
 近日点距離: 0.96 au
 遠日点距離: 1.42 au
 ※ au: 天文単位



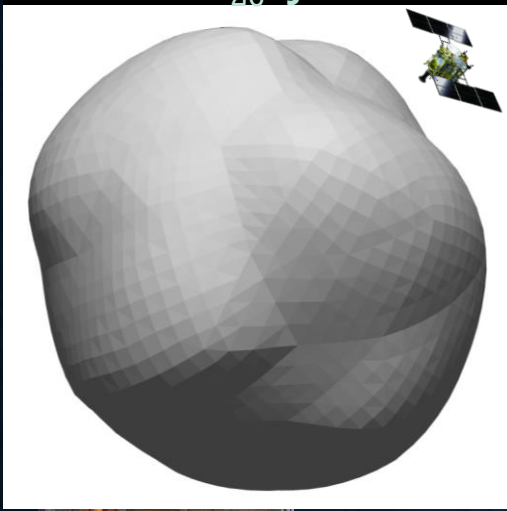
中心: 太陽
 右横: 地球
 (固定)

紫: 小惑星軌道
 【探査機軌道】
 赤: 往路
 緑: 近傍運用
 青: 復路

ミッションの流れ

日付はすべて日本時間

1999 KY₂₆ Jul 2031



地球スイングバイ
Dec 3, 2015



リュウグウ到着
Jun 27, 2018



MINERVA-II1 着陸
Sep 21, 2018



MASCOT 着陸
Oct 3, 2018

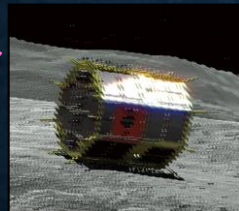


リュウグウ
出発
Nov 13, 2019



地球帰還
Dec 6, 2020

MINERVA-II2
分離
Oct 3, 2019



ターゲット
マーカ放出
Sep 17,
2019



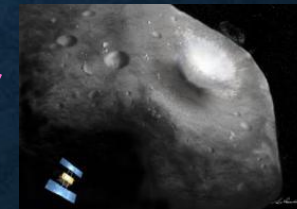
第二回目
タッチダウン
Jul 11, 2019



ターゲット
マーカ分離
May 30,
2019



衝突装置 SCI
Apr 5, 2019



第一回タッチダウン
Feb 22, 2019



ターゲットマーカ
分離
Oct 25, 2018





はやぶさ2の機器構成

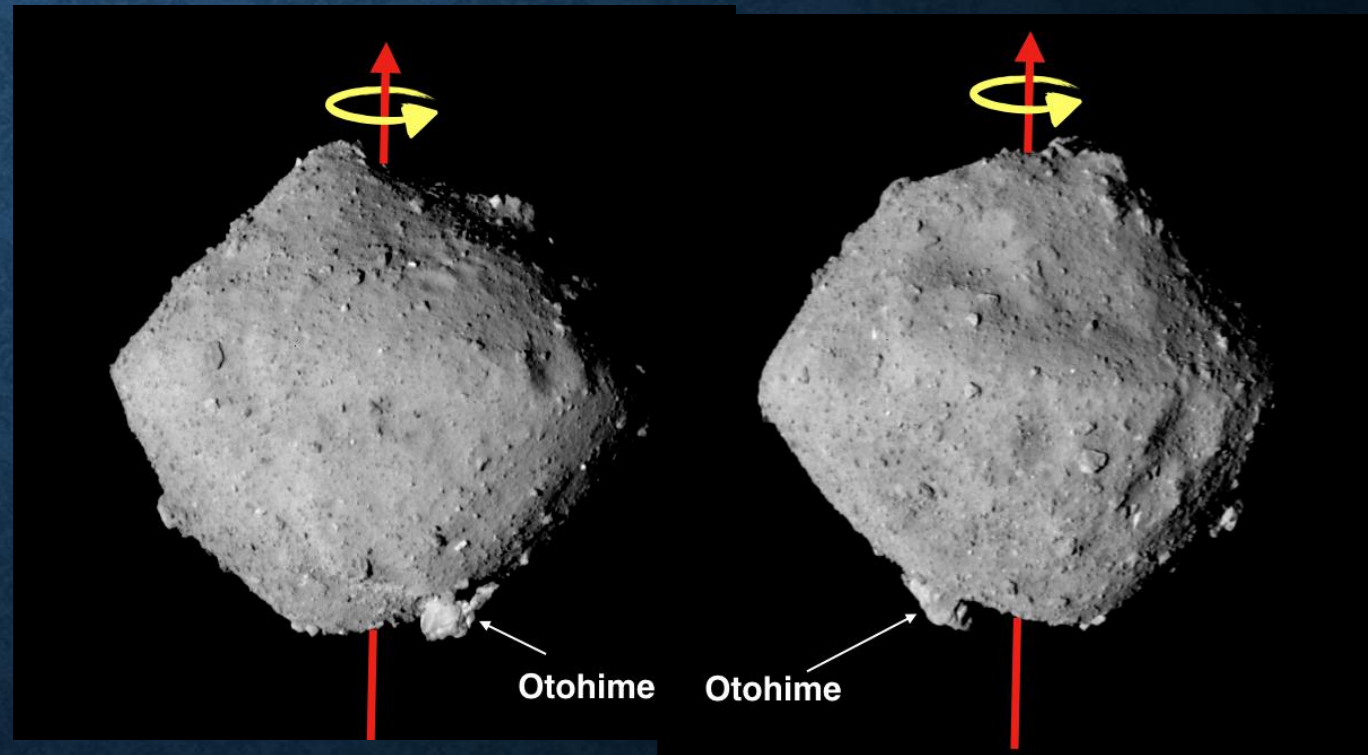




2. 小惑星リュウグウの姿

- 自転: 傾斜角: 172° , 周期: 7.6326 h
- そろばん珠の形状 (Spinning-top shape)
鋭い赤道リッジ (山脈) をもつ
- 赤道半径 R_E : 502 ± 2 m
 - 極半径 R_P : 438 ± 2 m ($R_P/R_E = 0.873$)
- バルク密度: 1.19 ± 0.02 g/cm³ (= Bennu)
(↑ 質量 / 体積 (粒子間のすきまも含めて))
- 空隙率 > 50% [構成粒子の物質密度が
> 2.4 g/cm³ (= Orgueil CI隕石)として]

Watanabe+ 2019, *Science* **364**, 268

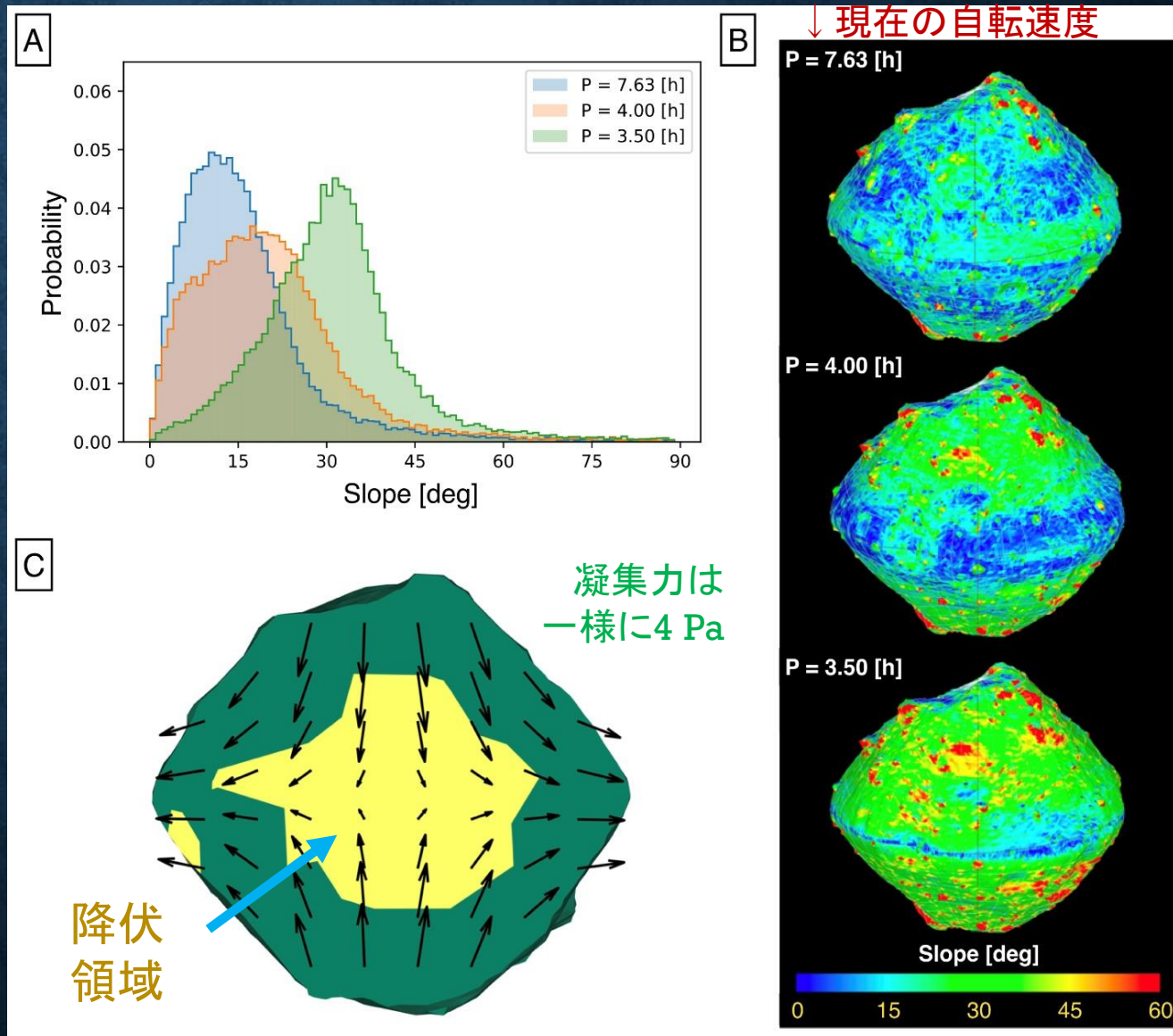




リュウグウの形状形成

Watanabe+ 2019, *Science*

- 万有引力と遠心力の合力の方向と斜面に垂直方向がなす角: **slope**
- 天体の形状と自転軸方向を保ち、現周期7.63時間より速く自転させ、**slope分布の変化**を見る数値実験
- [A] Slopeのヒストグラム
- [B] Slopeの空間分布
- **自転周期 3.5時間**の場合は、表面は概ね30~35°程度のslopeをもつ
- この角度は上から砂を降らせてつくる砂山の斜面の傾斜にほぼ等しい。
- [C] 数値実験より、内部の凝集力が弱いと、中心部(図の**黄色**)で“崩れはじめる”(降伏する)ことがわかった

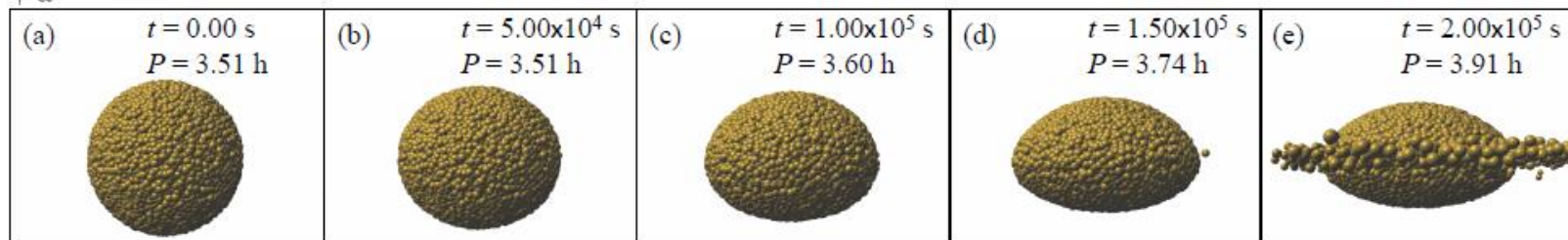




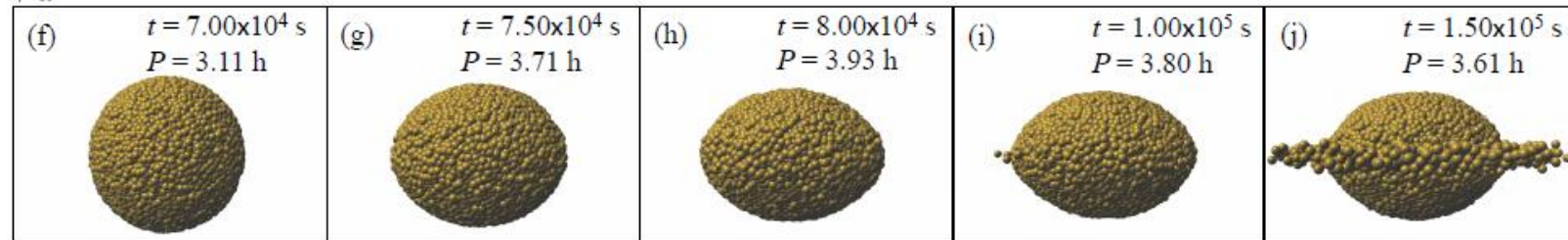
加速回転粉体球の変形シミュレーション

Sugiura+ 2021, *Icarus* accepted

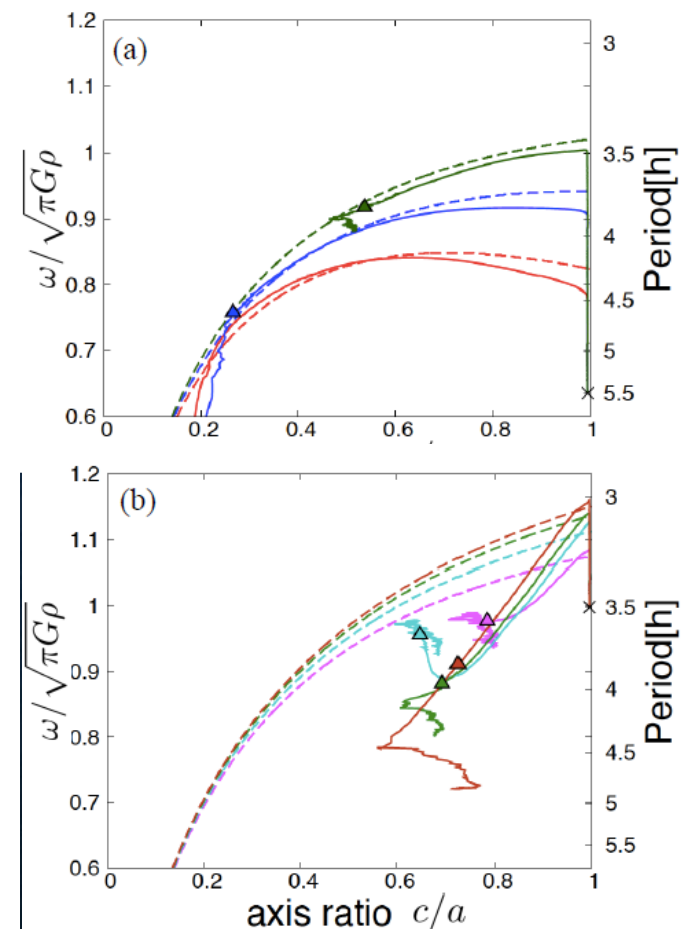
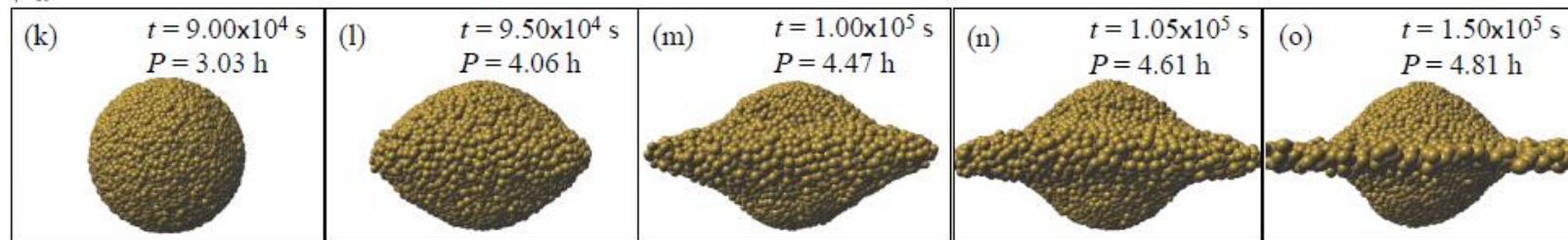
$\phi_d = 40^\circ$



$\phi_d = 60^\circ$



$\phi_d = 80^\circ$





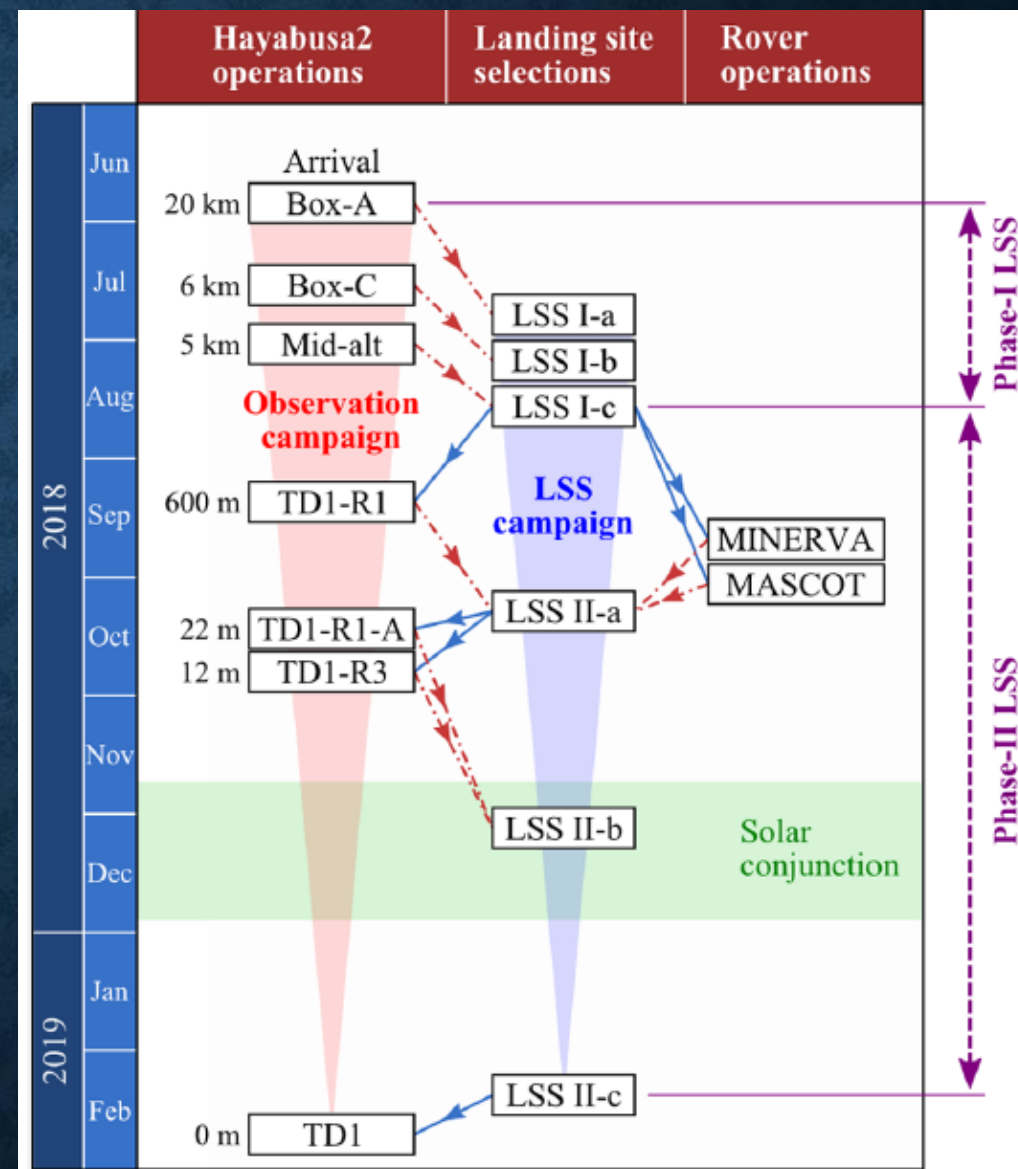
3. 着地点の探索

- “Hayabusa2 **Landing Site Selection**: surface topography of Ryugu and touchdown safety,” S. Kikuchi, S. Watanabe, T. Saiki *et al.*, *Space Science Reviews*, **216** (7), #116, 2020

以後, **Kikuchi+ 2020a** と表記

Hayabusa2 までの小天体着地探査

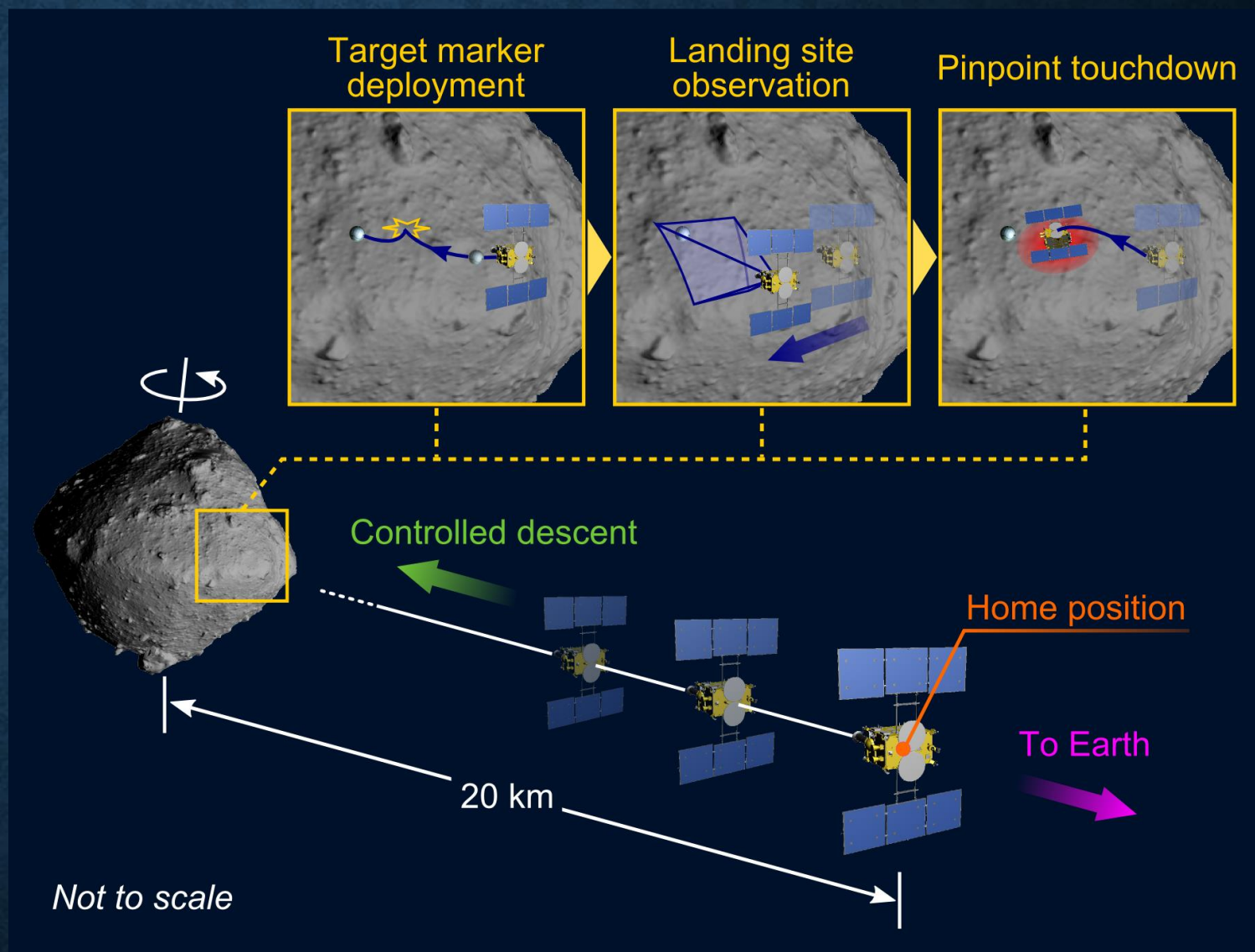
着地探査	天体	着地点	着陸精度
NEAR Shoemaker	エロス	Himeros depression	500 m
Hayabusa	イトカワ	Muses Sea	30 m
Rosetta/Philae	67P/C-G	Agilkia	112 m
Hayabusa2	リュウグウ	Tamatebako Uchideno-kozuchi	1.04 ± 0.05 m 0.59 ± 0.02 m



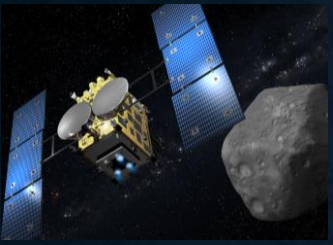


観測運用

- ホームポジション(HP)
 - リュウグウと地球を結ぶ線上の高度20 kmにホバリング
 - 天体全体の観測は主にHPから行う
- 降下運用
 - HPと小惑星中心を結ぶ線上をゆっくり($< 1 \text{ m/s}$)と降下
- 太陽方向は概ね地球方向だが、季節によって最大 40° ほどずれる。



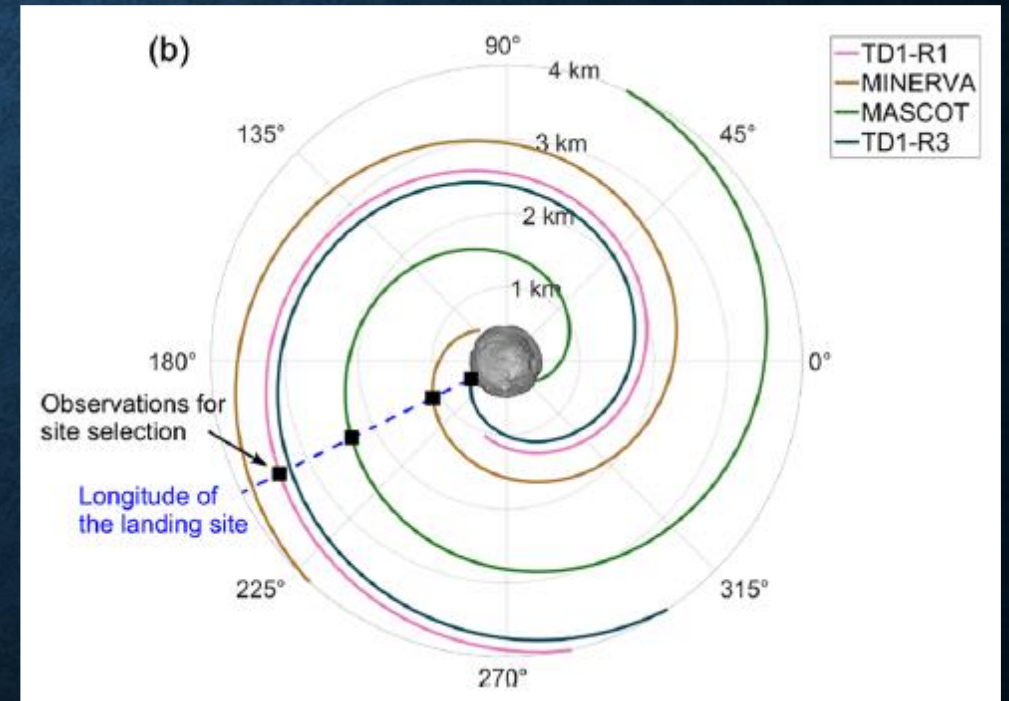
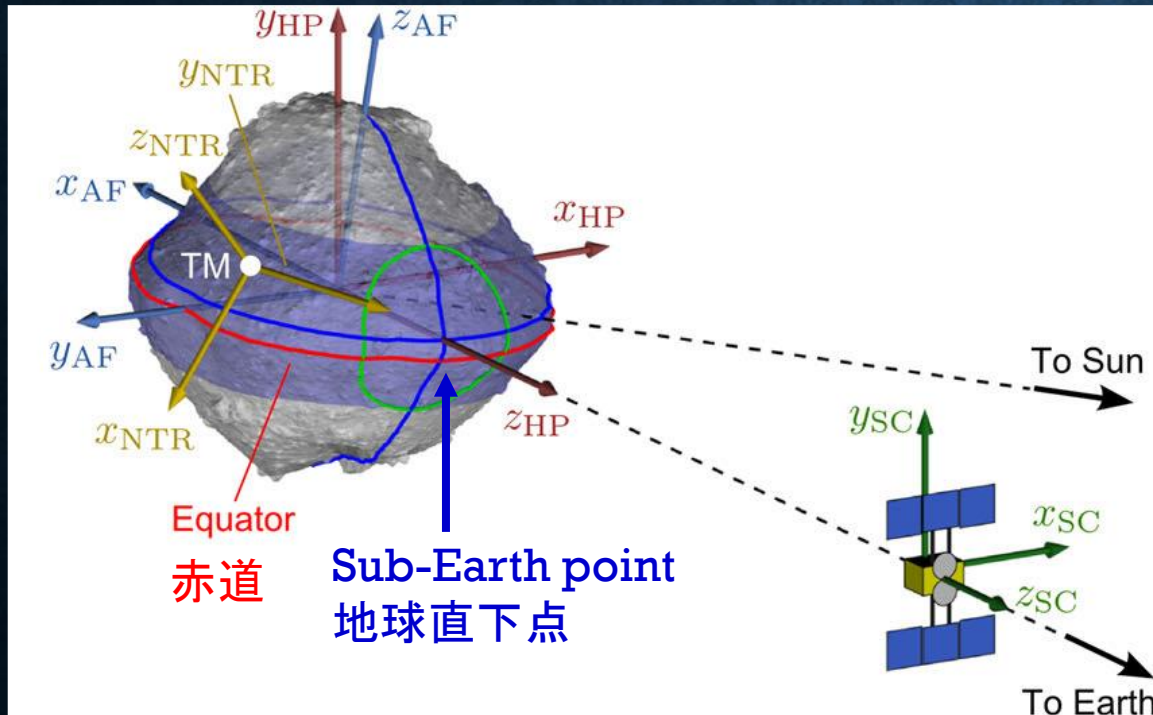
Kikuchi+ 2020a

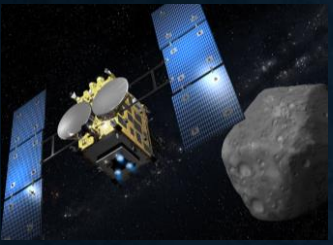


いろいろな座標系

- J2000太陽中心黄道座標系, ホームポジション座標系(HP), 小惑星固定座標系(AF), ターゲットマーカ中心座標系(NTR), 探査機座標系(SC)

小惑星固定座標系(AF)での探査機の探査機降下軌道
リハーサル／着陸機分離時の降下





タッチダウン候補点が満たすべき条件

工学条件 [LRF:レーザー測距器;SAP:太陽電池パドル;RCS:スラスタ, SH:サンブラホーン;TM:ターゲットマーカ]

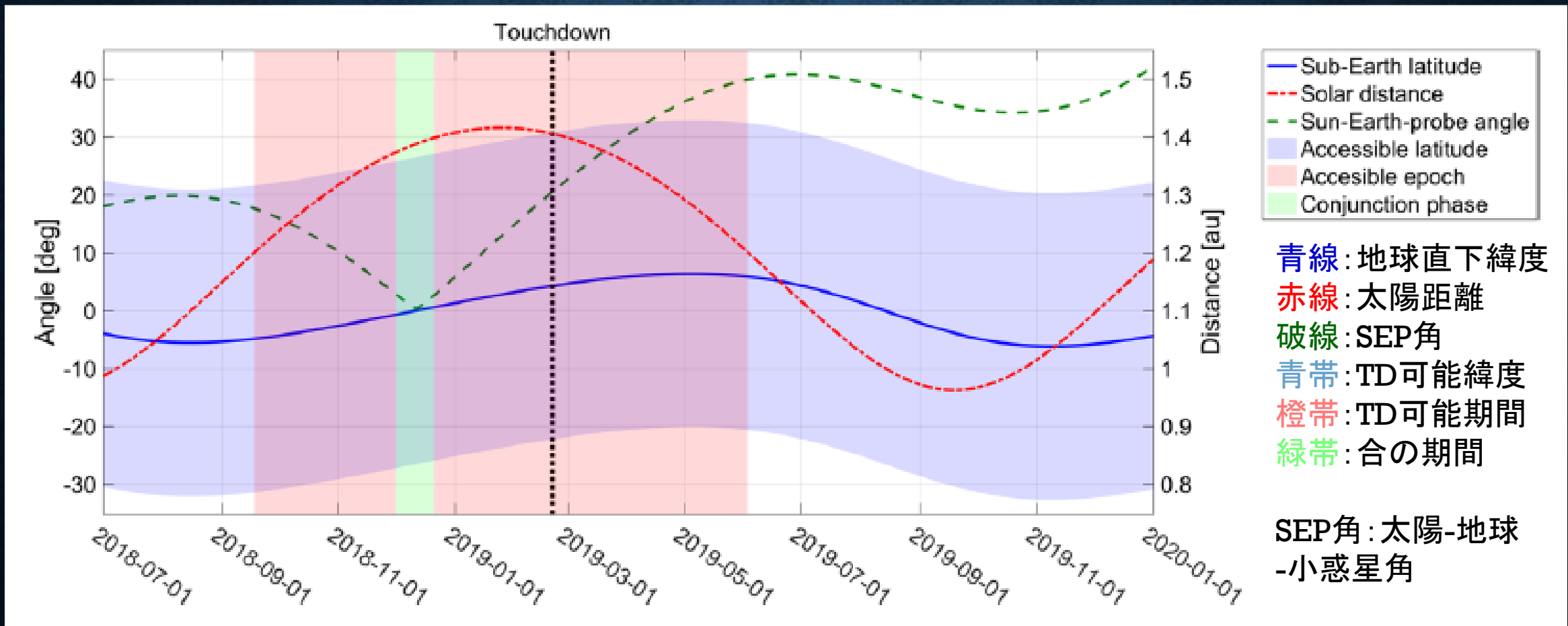
パラメータ	要求	根拠	パラメータ	要求	根拠
太陽距離	> 1.2 au	熱設計(後緩和)	岩塊高 (R < 3.7m)	< 1.8 m	SAPクリアランス
太陽-地球-測器角	> 3度	通信確保	岩塊高 (R < 1.0m)	< 0.7 m	RCSクリアランス
サブアース距離	< 200 m	誘導精度	接地速度:水平	< 10 cm/s	SH変形限界
太陽天頂角	< 40度	太陽電池パワー	接地速度:垂直	< 4 cm/s	SH変形限界
表面傾斜角	< 30度	LRF計測性	採取ホーン接地角	< 40度	SH変形限界
最終降下高度	> 7.4 m	LRF計測性	TMを見込む角	< 25度	TM視認性
表面温度	< 370 K	熱設計	自由落下時間	> 50秒	姿勢収束

理学条件

パラメータ	要求	根拠	パラメータ	要求	根拠
波長2.7 μm 吸収	存在すること	含水鉱物量	表面粒子の粒径	< 10 mm	採取量の確保
0.55 μm 反射率	低いこと	有機物量	全般的観測量	特殊でない	天体代表性



太陽-地球-リュウグウの位置関係



青線: 地球直下緯度
 赤線: 太陽距離
 破線: SEP角
 青帯: TD可能緯度
 橙帯: TD可能期間
 緑帯: 合の期間

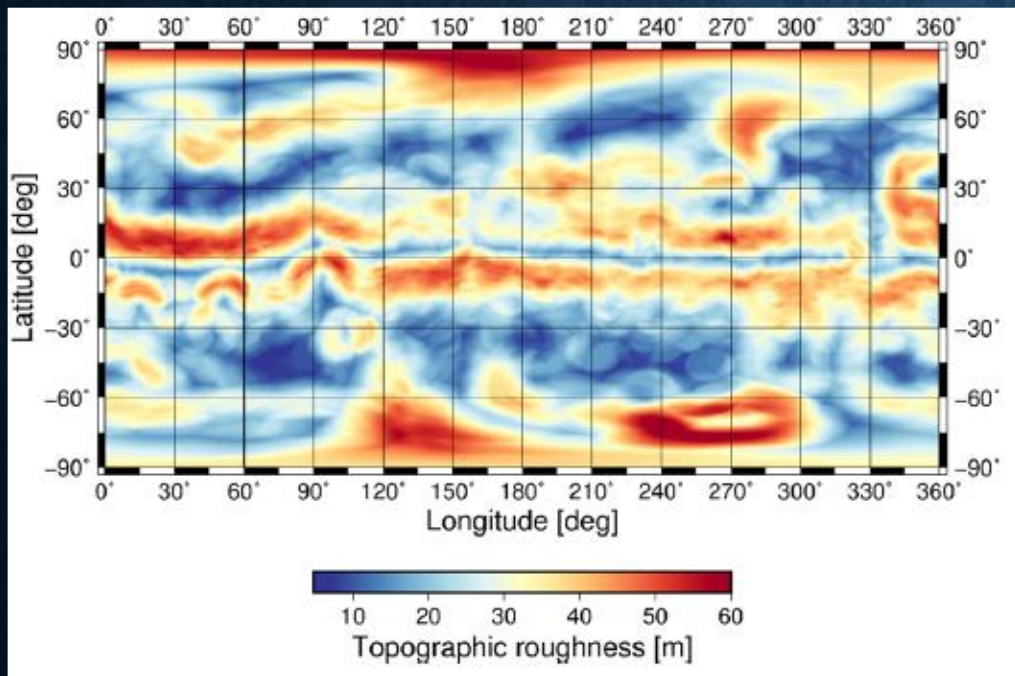
 SEP角: 太陽-地球-小惑星角



地形とボルダー

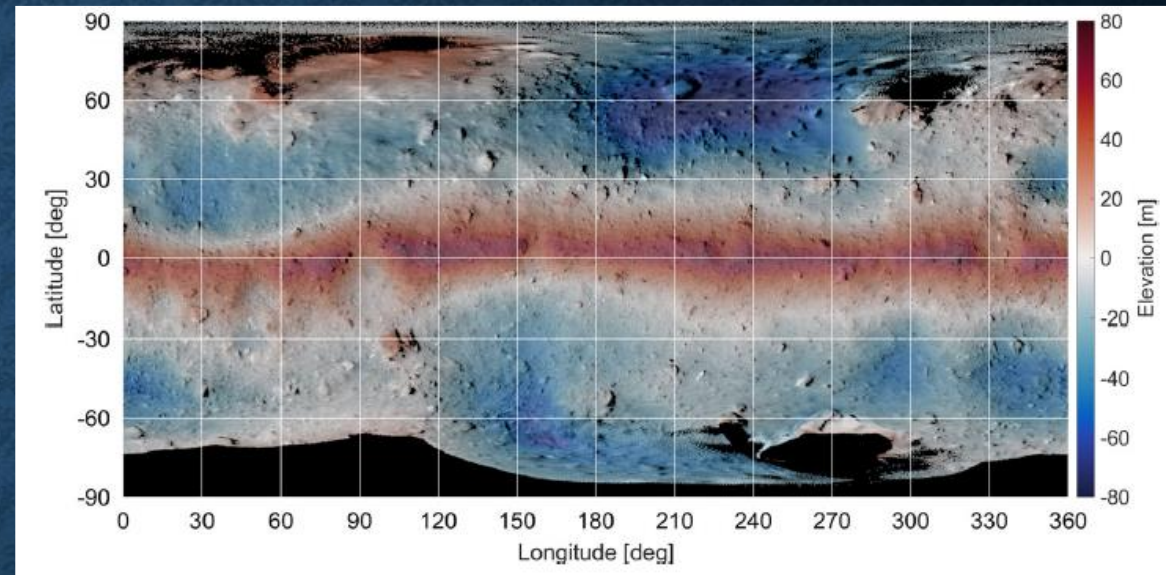
当初の着陸精度

ラフネス(半径50 m以内の最大標高差)

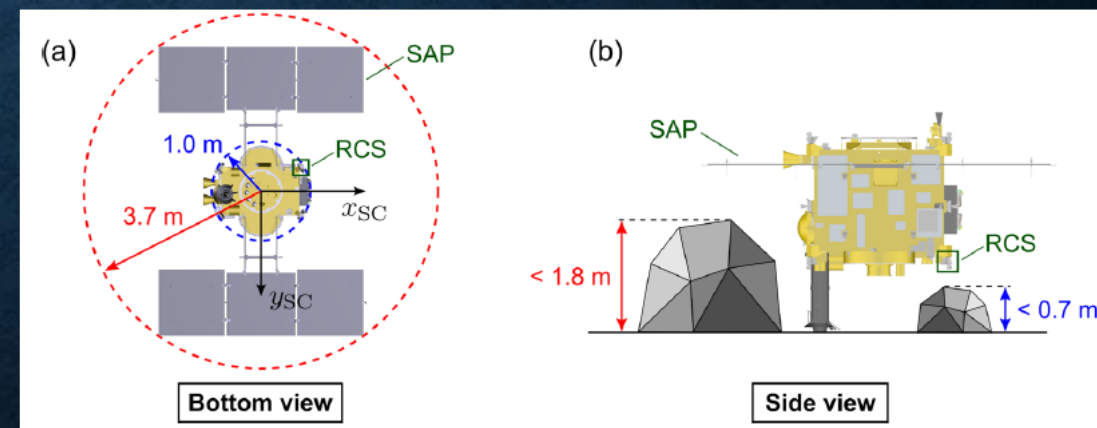


Kikuchi+ 2020a

標高分布



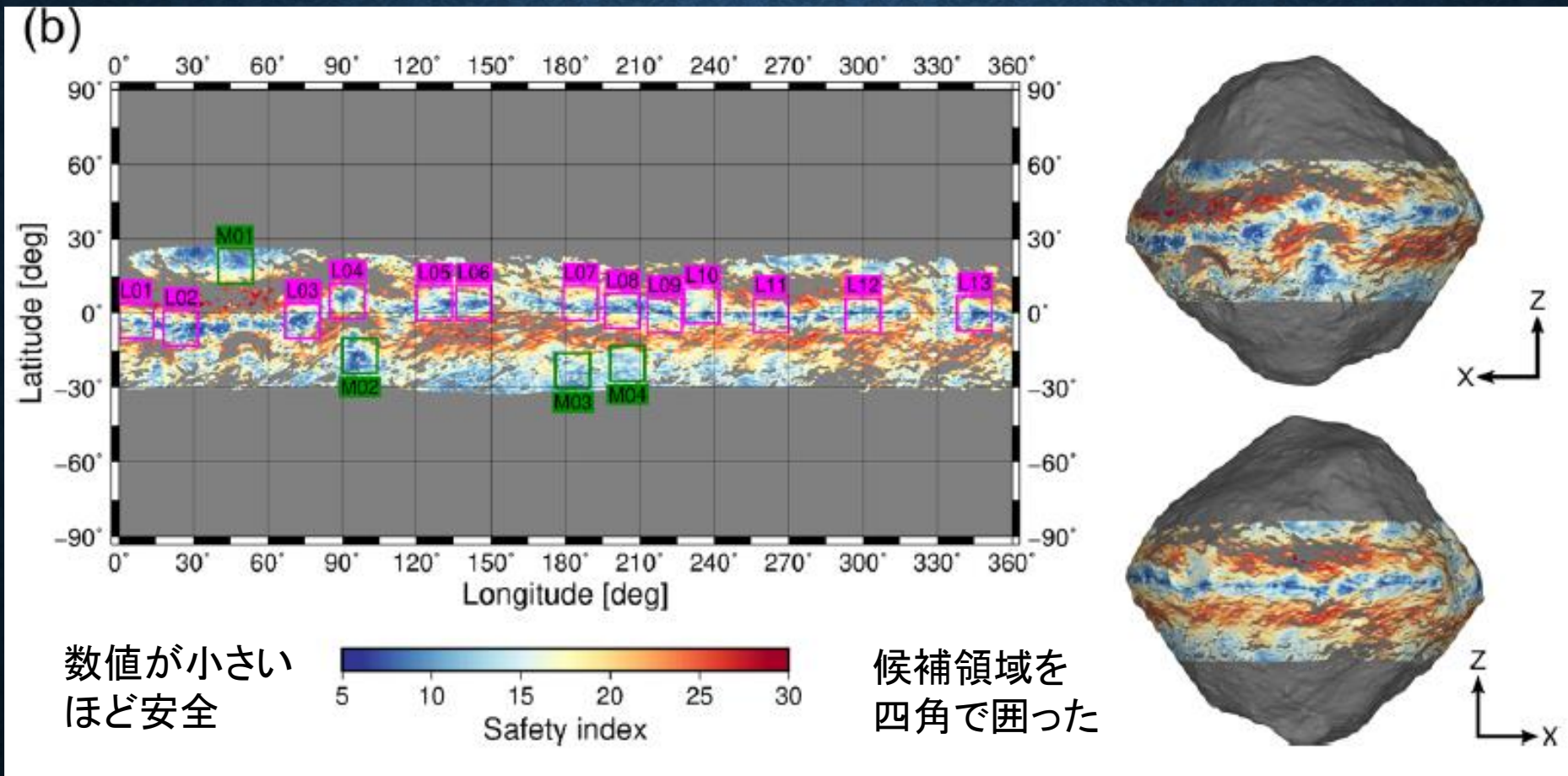
探査機のクリアランス





探査機安全指数

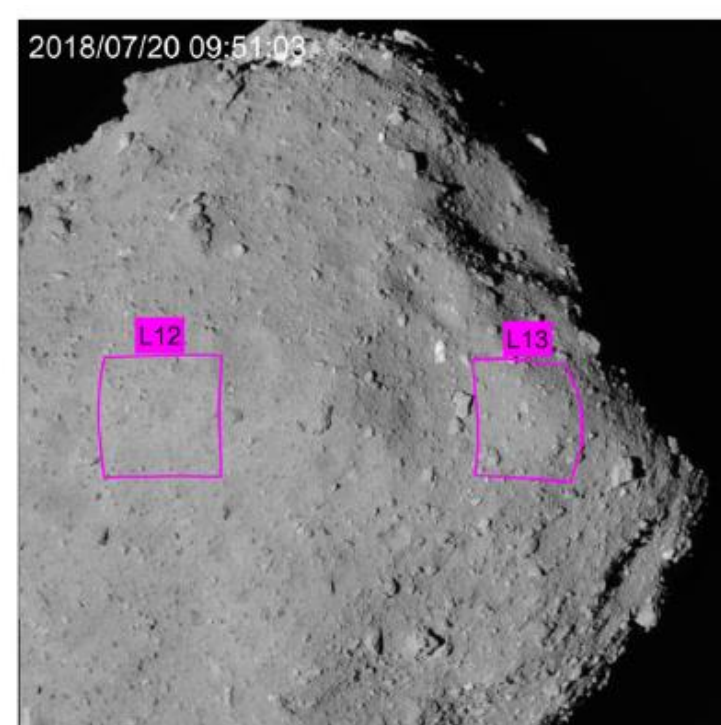
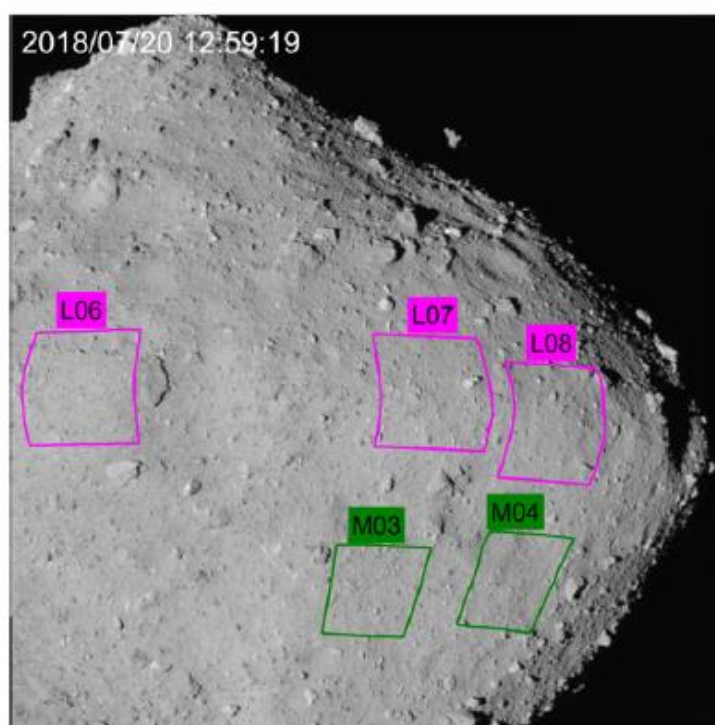
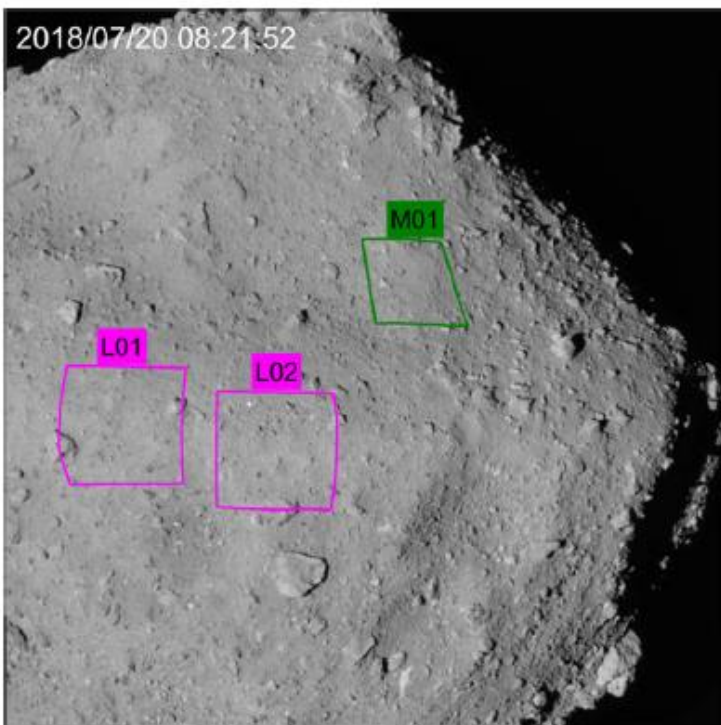
- ① サブアース距離 $< 30^\circ$; ② 太陽入射角 $< 40^\circ$; ③ 表面傾斜 $< 30^\circ$; ④ 最大起伏差 < 40 m





タッチダウン候補領域

- 2018年7月20日, 高度約6 km (Box-C)からのONC-Tによる撮像(一部のみ掲載)





候補点の選定

2018年8月半ば

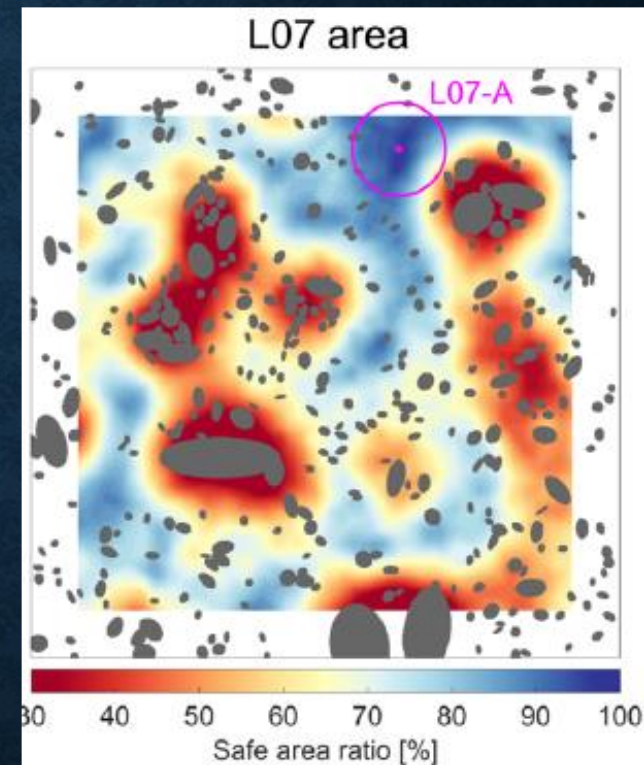
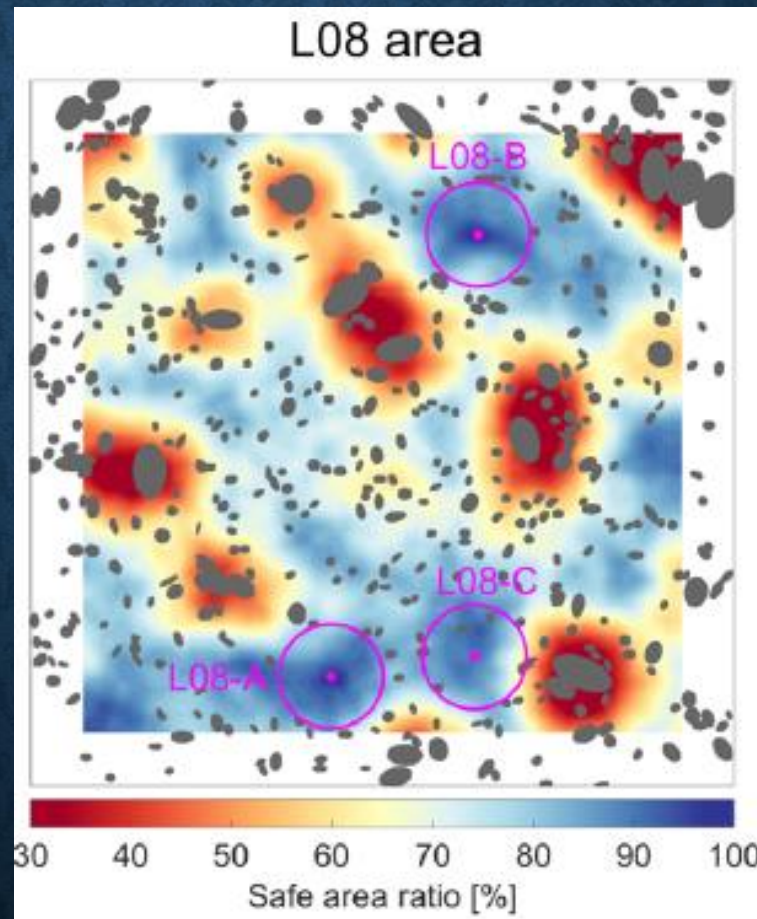
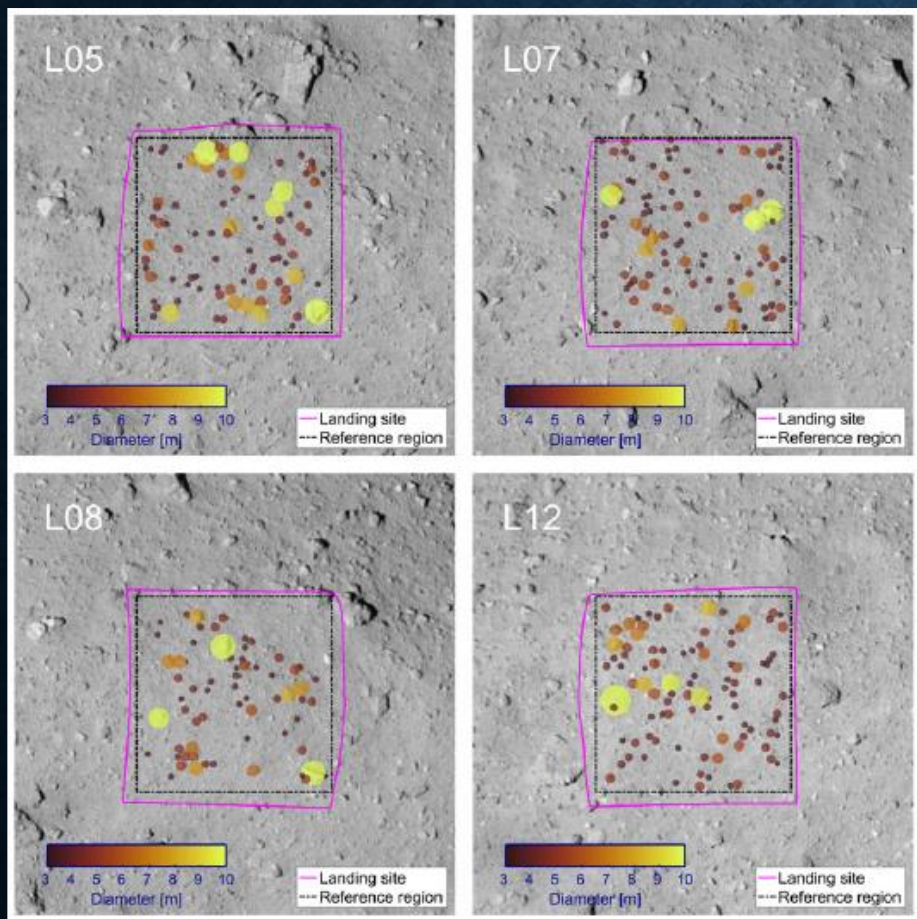
- 工学的総合評価: 右の表
- 理学的総合評価: 候補点間に大きな差は無い
- 工学系はサブアース距離を配慮して, 赤道付近の候補点(L**)を優先したい意向
- 理学系もより本来の物質的性質を保持していると推定される赤道域には魅力を感じていた
- **L08を第一候補**とし, L07, B04をバックアップとした.
- さらにMINERVA-II 1とMASCOTの着陸候補も選定

Site	Boulder	Topography on the east side	Flatness	Feasibility
L01	Poor	Fair	Fair	No
L02	Poor	-	-	No
L03	Poor	-	-	No
L04	Poor	Poor	Poor	No
L05	Fair	Fair	Fair	Yes
L06	Good	Poor	Fair	No
L07	Fair	Good	Good	Yes
L08	Good	Fair	Good	Yes
L09	Fair	Poor	Fair	No
L10	Fair	Poor	Fair	No
L11	Fair	Poor	Fair	No
L12	Good	Fair	Fair	Yes
L13	Poor	Good	Poor	No
M01	Fair	Good	Good	Yes
M02	Fair	Poor	Fair	No
M03	Fair	Fair	Good	Yes
M04	Good	Good	Good	Yes

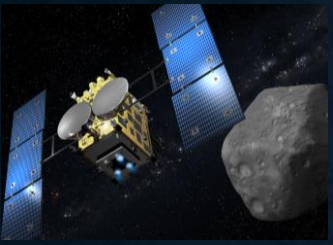


岩塊 (ボルダー) との戦い

近づくほど 新たに危険性のある岩が見つかる....



L08-Bを第一候補,
L07-Aをバックアップ



4. タッチダウン・シーケンスの変更

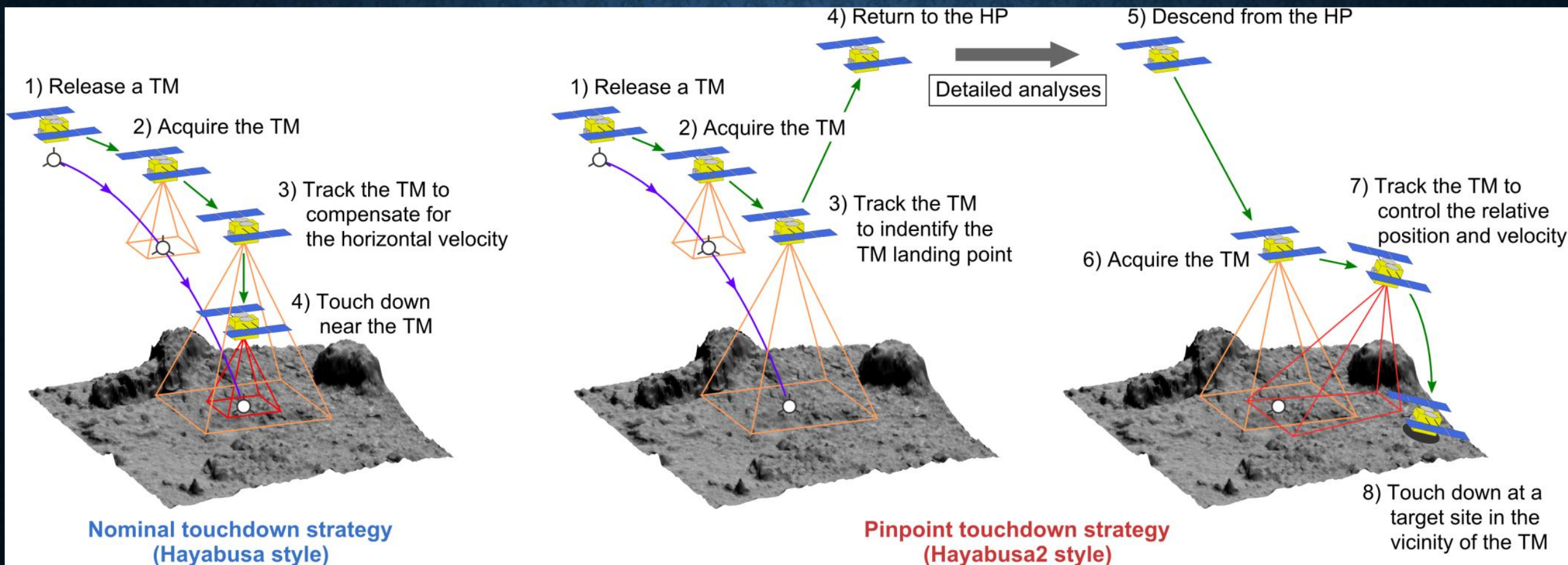
従来のタッチダウン戦略

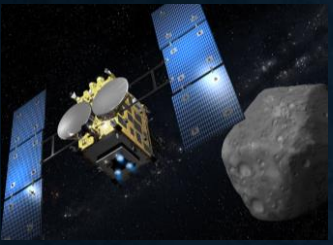
新しいタッチダウン戦略(2段階)

Kikuchi+ 2020a

ターゲットマーカ(TM)接地

ピンポイント・タッチダウン



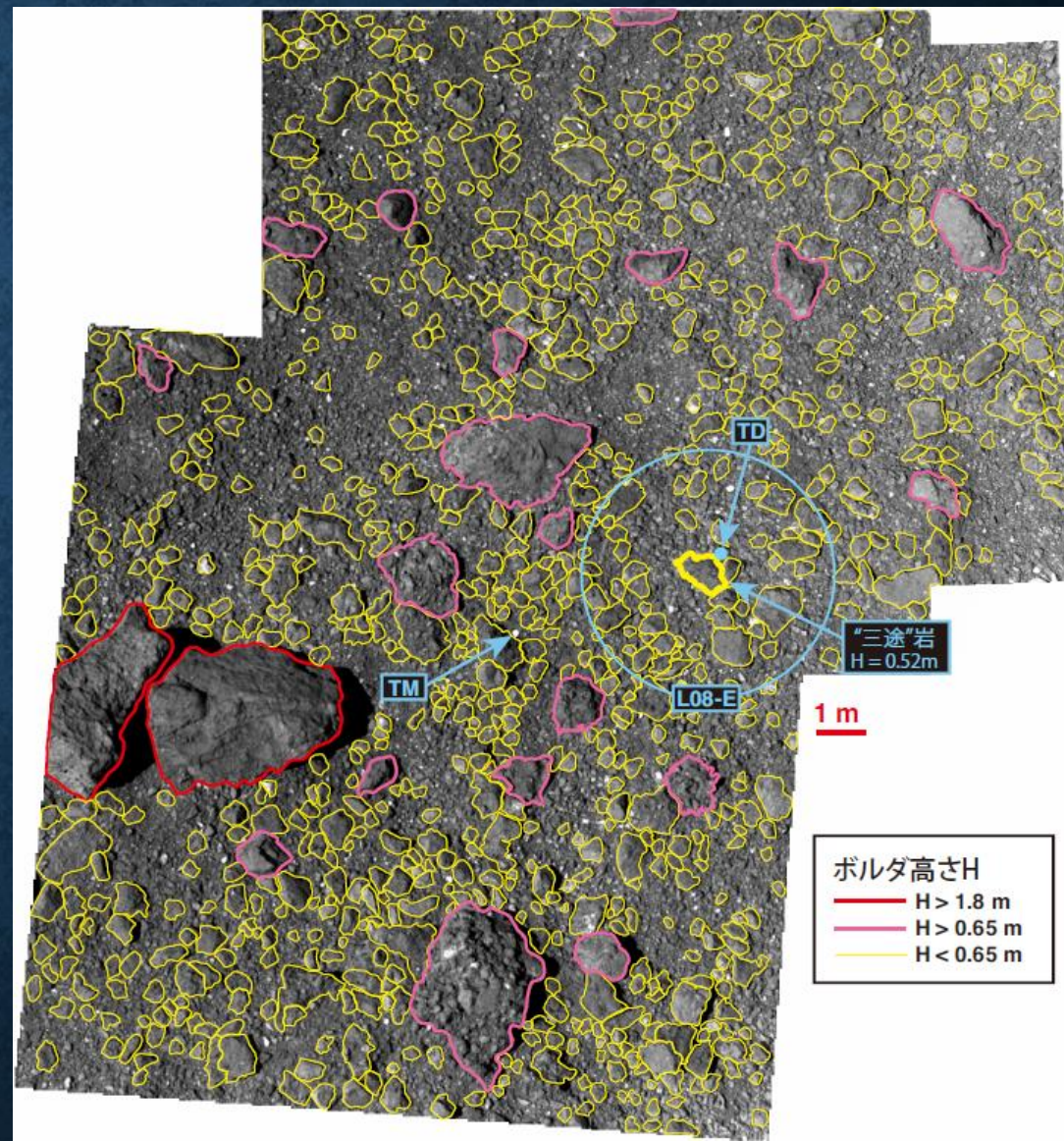
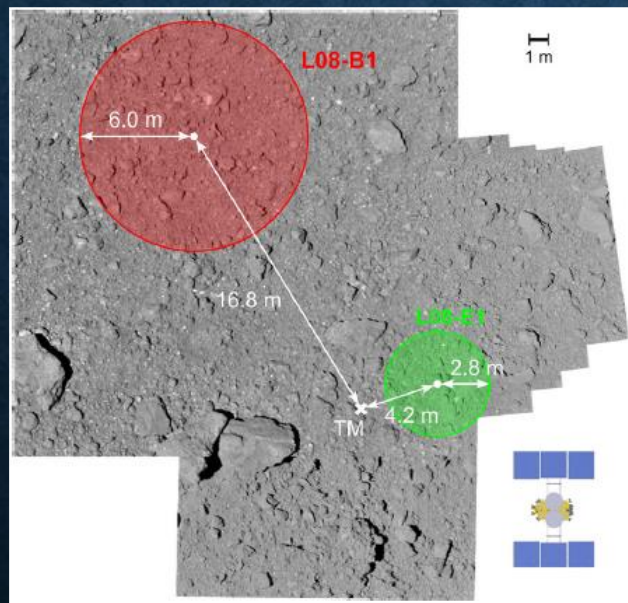
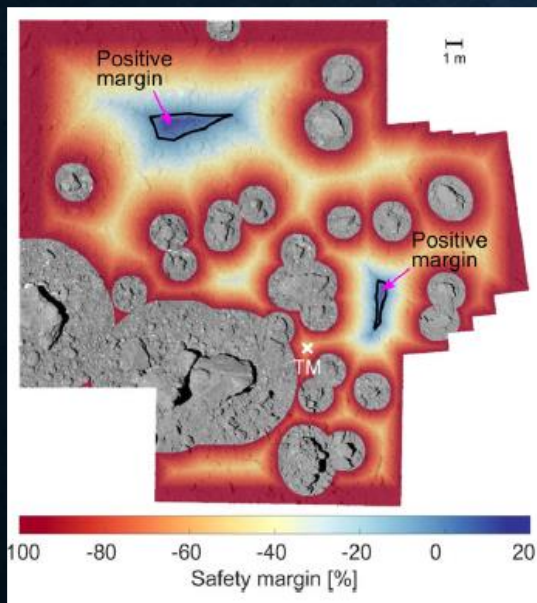


ボルダーの高さを計測

- ターゲットマーカ(TM)が南に16.8 mそれて停止
- TMから4.2 m離れた, **L08-E1**を新たな目標領域に
- 影の長さと局所地形モデルから岩の高さを推定 ⇒

安全マージン = $(D - E)/E$

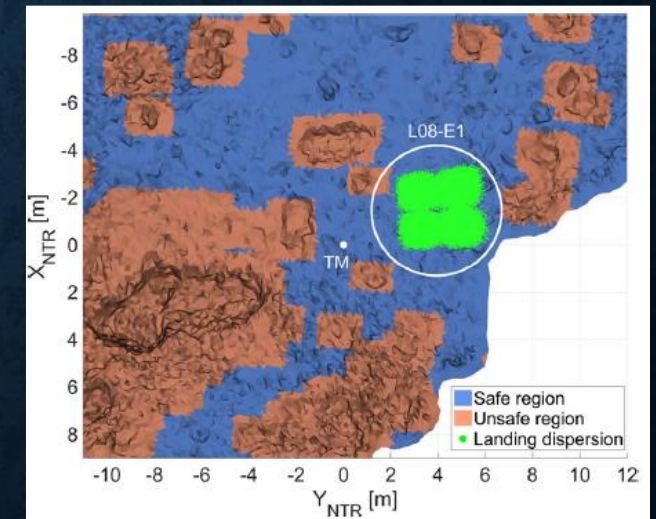
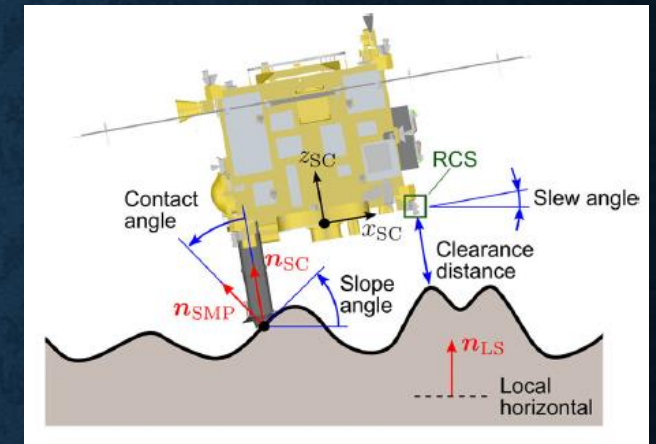
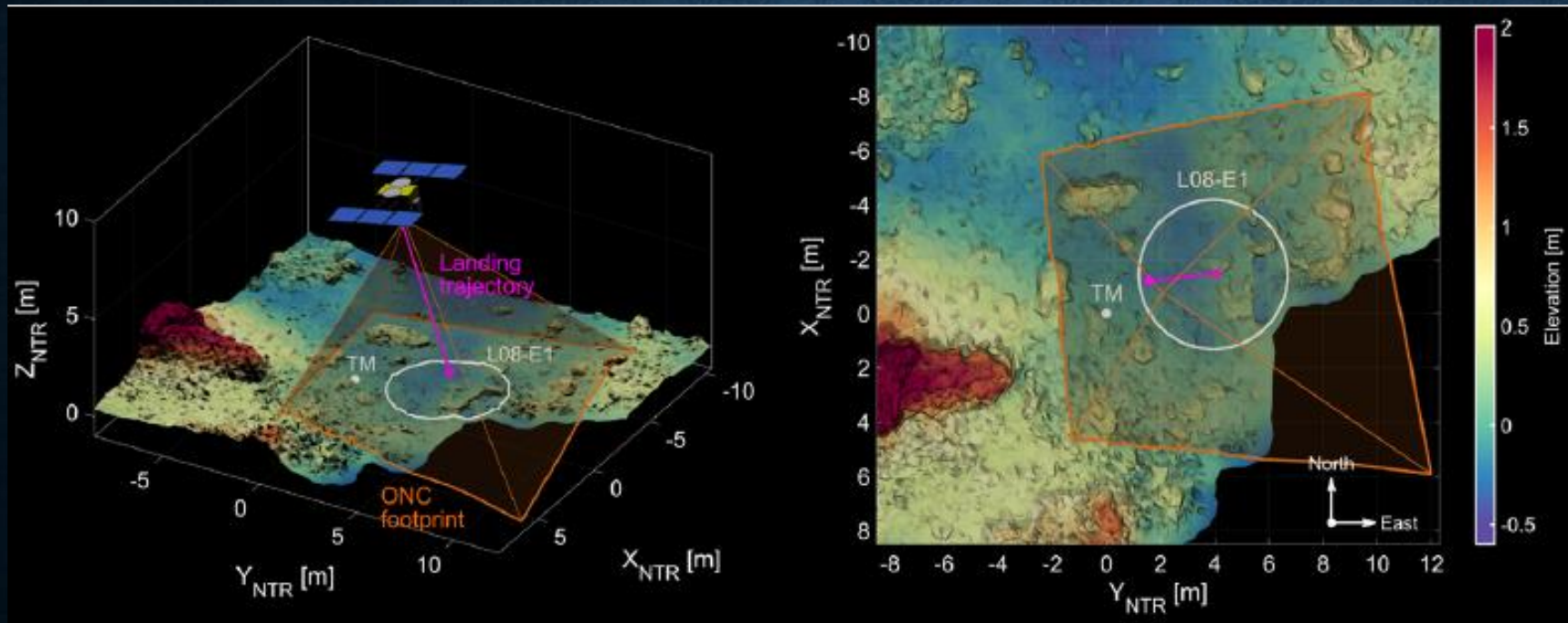
B1から**E1**に目標変更





ターゲットマーカ(TM) ⇒ 目標点

- TMを視認しながら, オフセット移動(下図)
- ヒップアップの着陸姿勢(右上図)でクリアランスを確保



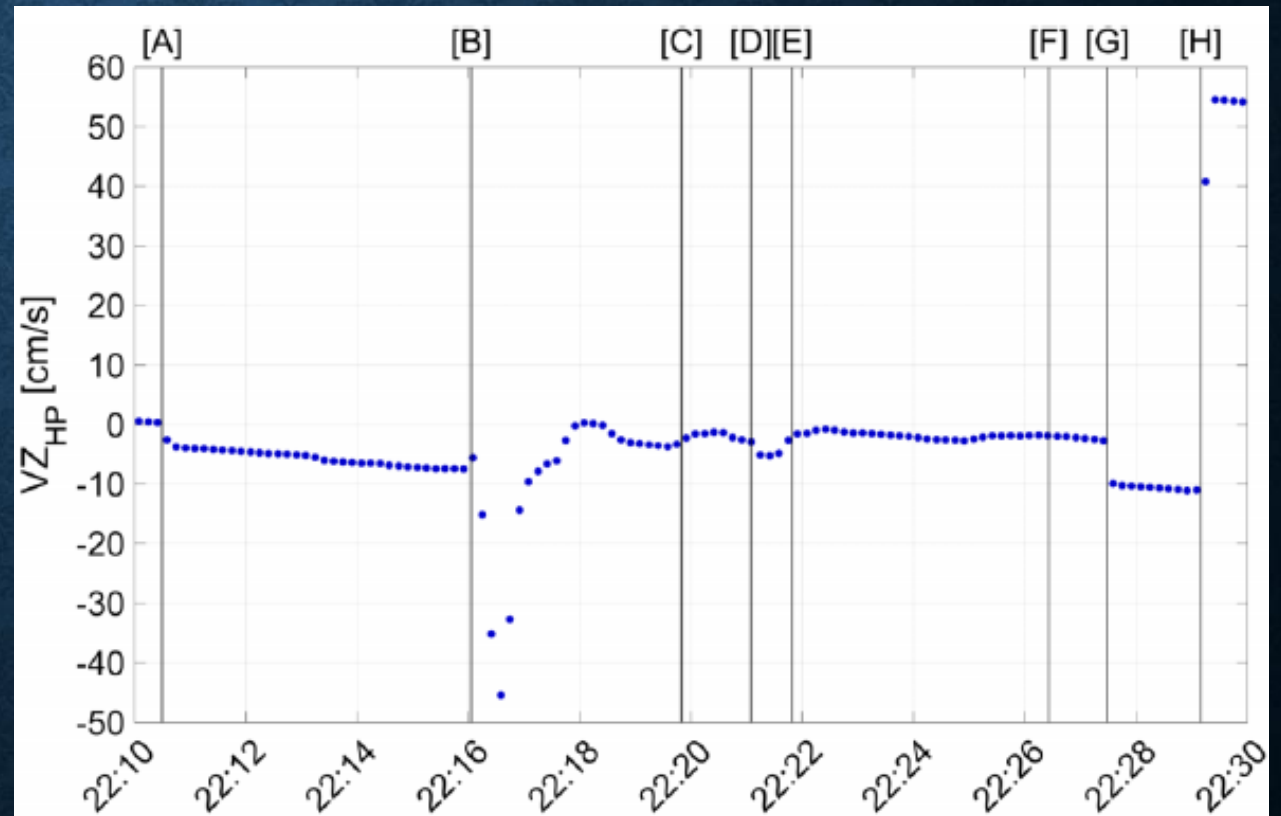


5. 第一回タッチダウンの経過

Kikuchi+ 2020

20 km	降下開始 (5 h遅れ)	21/13:13:38
5 km	降下減速 ΔV	21/18:33:38
45 m	TM捕捉 (161 s hov)	22/07:10:19
45 m	降下 ΔV	22/07:10:30 [A]
28 m	LIDAR \rightarrow LRF	22/07:16:03 [B]
8.5 m	表面に沿う姿勢へ	22/07:19:50 [C]
8.5 m	水平移動マヌーバ	22/07:21:05 [D]
8.5 m	TD姿勢へ	22/07:21:49 [E]
8.5 m	状態収束	22/07:26:26 [F]
8.5 m	最終降下 ΔV	22/07:27:29 [G]
1.0 m	TD検知・弾丸発射	22/07:29:09 [H]
1.0 m	脱出 ΔV	22/07:29:09
210 m	地球指向姿勢へ	22/07:35:03
6 km	減速 ΔV	22/10:40:33

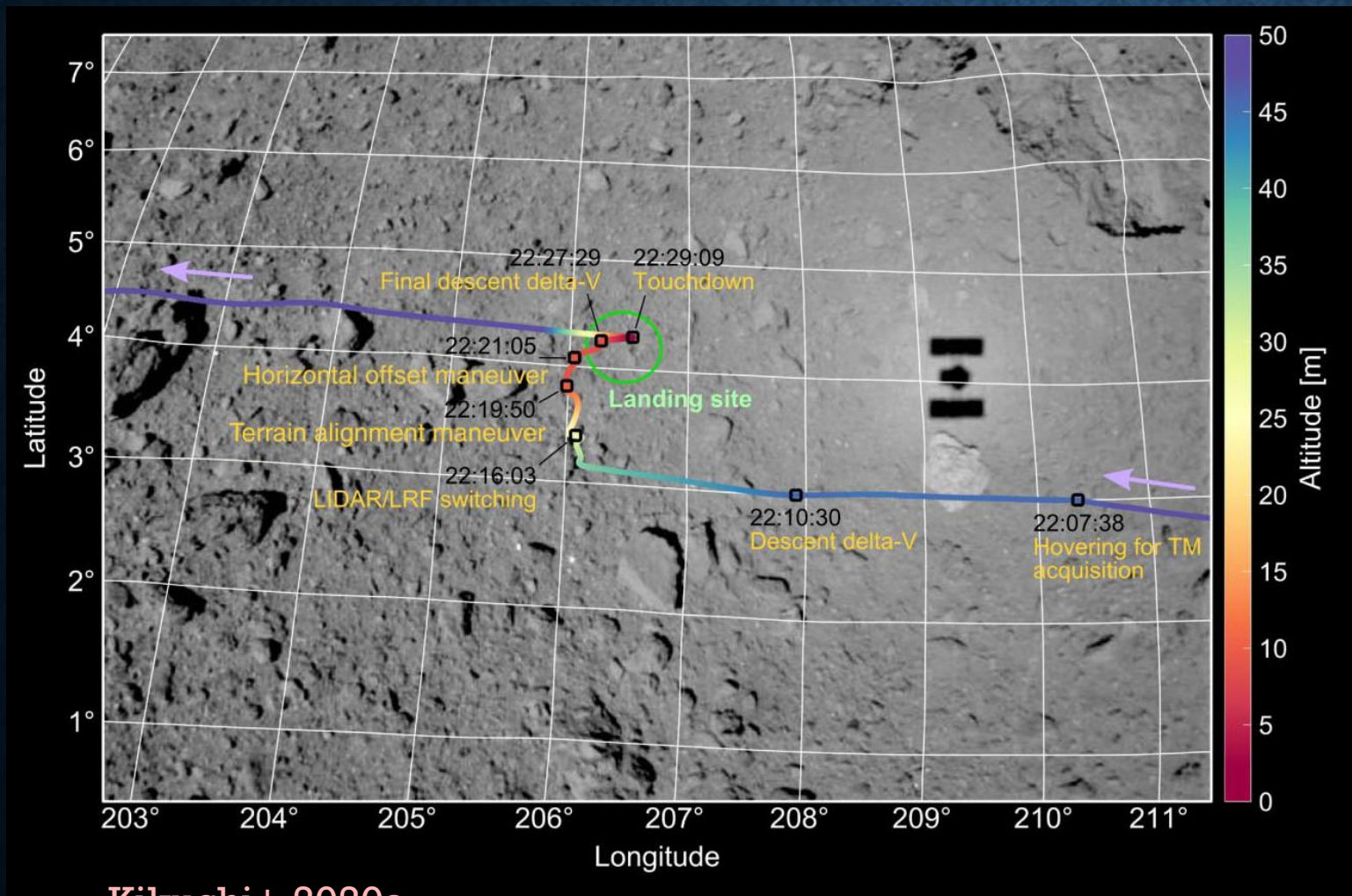
ドップラー速度 (電波周波数変化から得られる視線方向速度)



※ LIDAR: レーザー高度計; LRF: レーザー測距器; TD: タッチダウン; TM: ターゲットマーカ; ΔV : 加減速スラスタ噴射



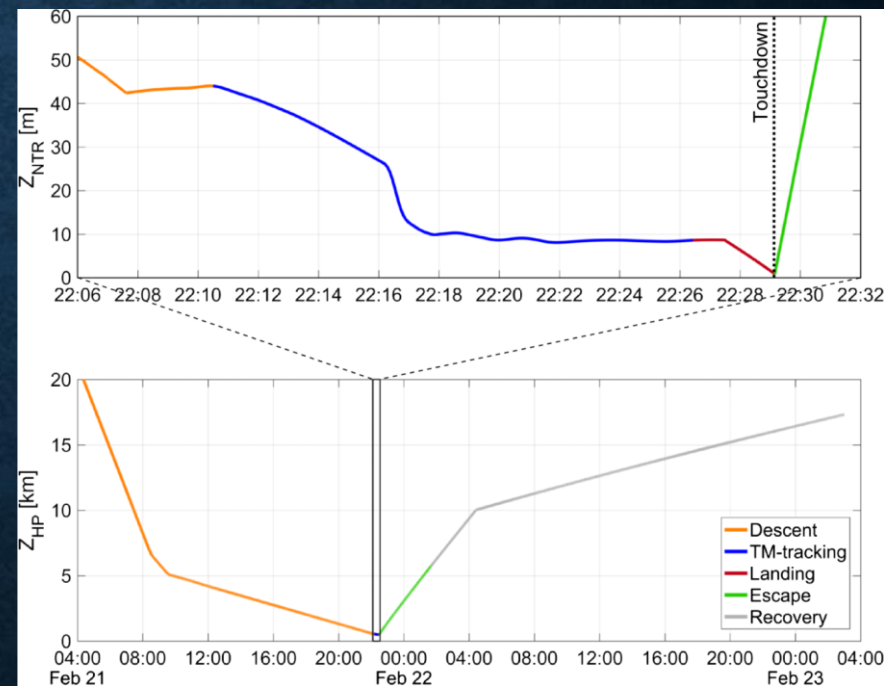
第一回タッチダウン(TD1)の軌跡



Kikuchi+ 2020a

Kikuchi et al. 2020b,
J. Spacecraft Rockets **57** (5),
doi.org/10.2514/1.A34683

探査機高度の時間変化(上:TD前後)





TD1の瞬間

モニタカメラ Cam-H
5倍速(間隔:2秒→
1秒→2秒)

高さ8.5 mから
8 cm/s で降下

試料採取用弾丸と
スラスタ噴射で
表面の砂礫が
舞い上がる

成功を祝う
紙吹雪のように
感じた！

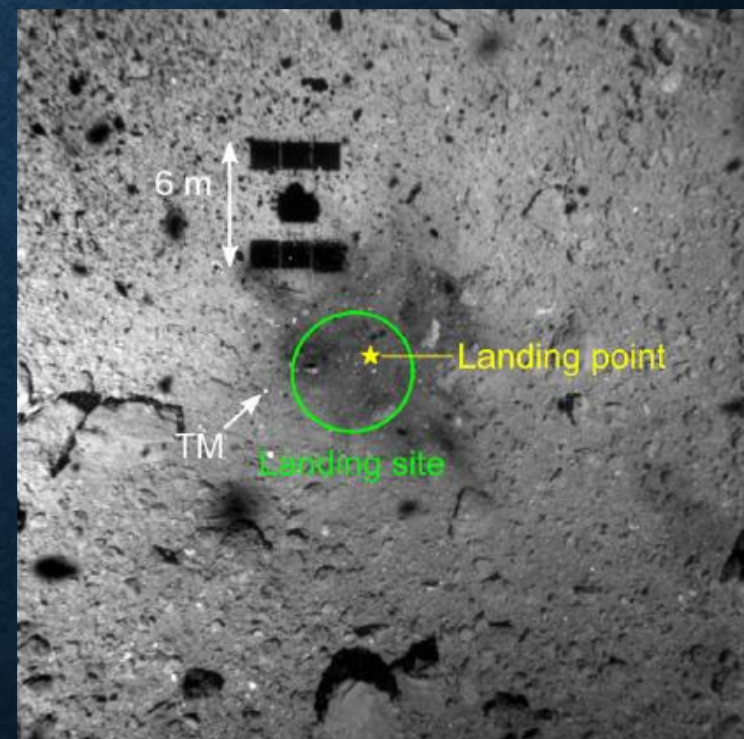
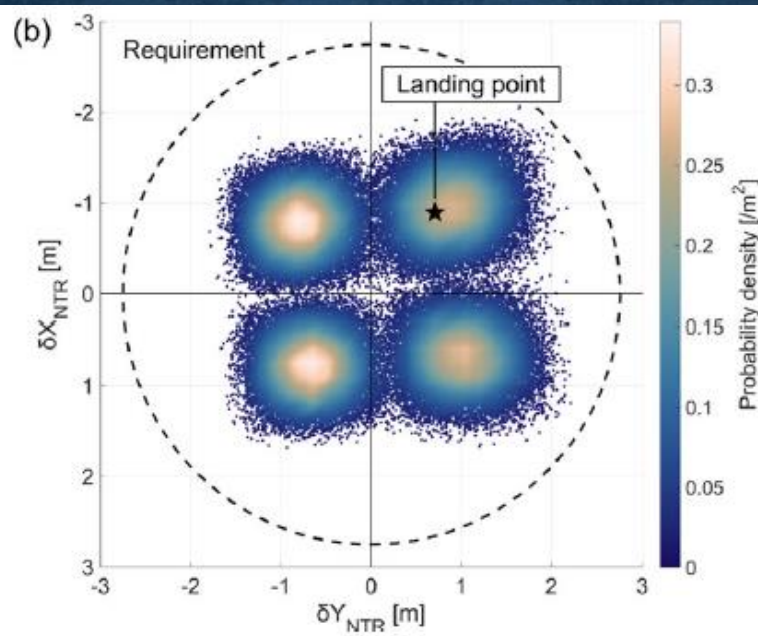
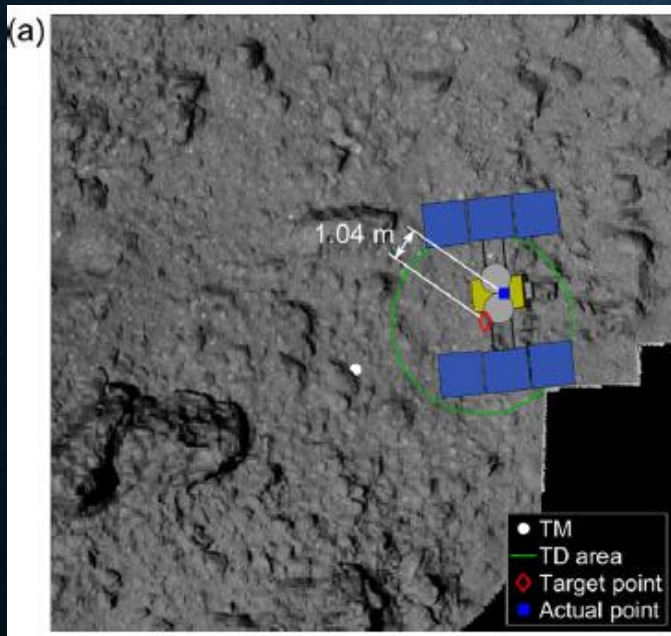
©JAXA





第一回タッチダウン精度

- 目標点からのずれ, わずか 1.038 ± 0.046 m
(しかも, こんなに正確にずれを評価できた)
- サンプルングはおそらく成功 \rightarrow 帰還試料で成功確認





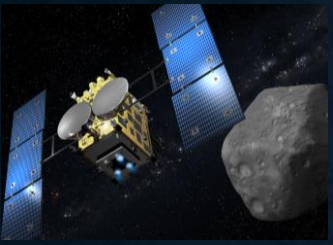
6. 宇宙衝突実験：衝突装置 (SCI) 打上げ前の地上試験の様子

岐阜県飛騨市神岡町



試験期間：2013/10/13 - 2013/10/15

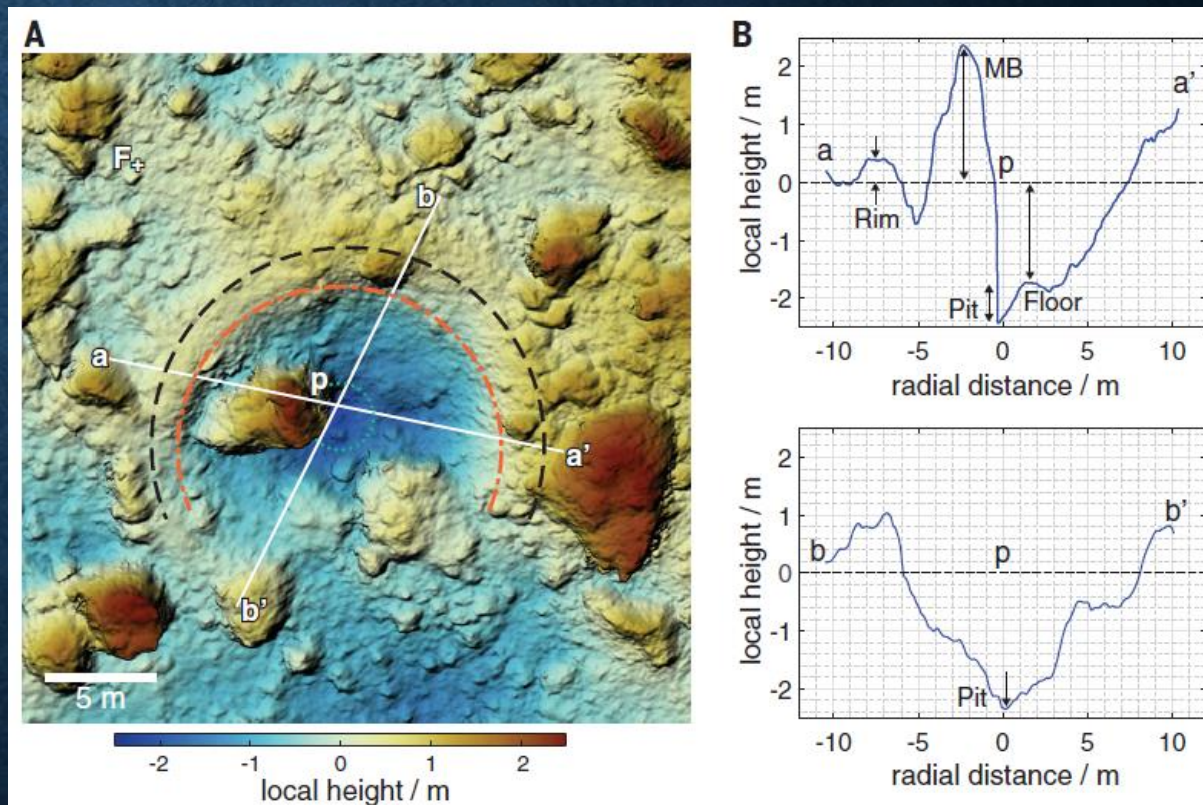
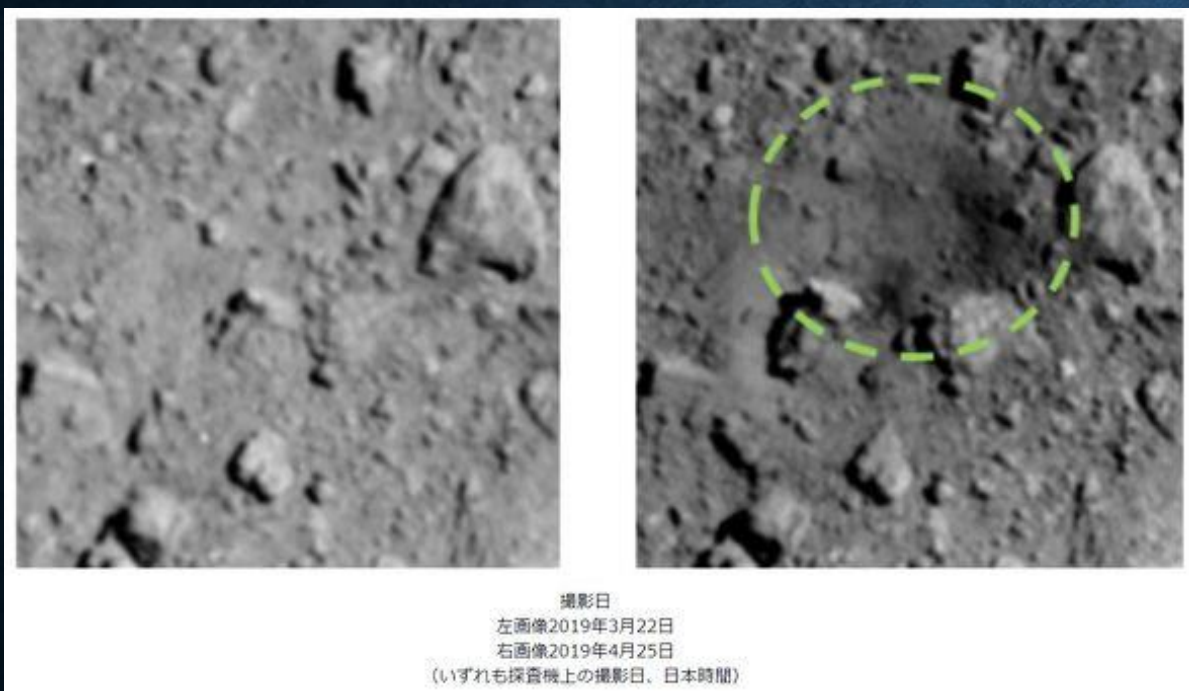
Credit：JAXA/日本工機

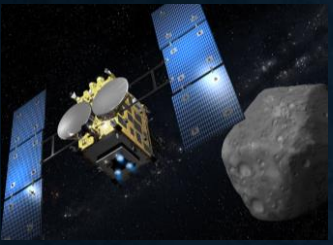


リュウグウでの人工クレーター生成実験

SCI クレーター(リム間直径で 約18 m)

局所数値標高モデル(Local DEM) (深さ 約2 m)



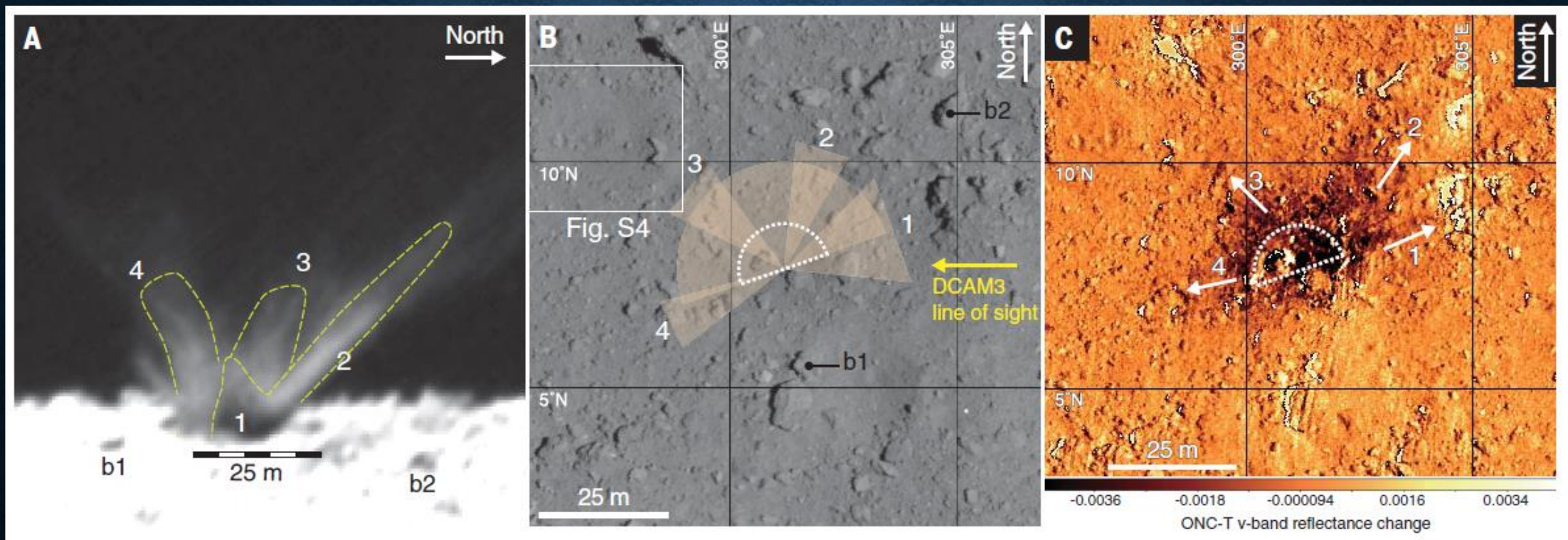


クレーター放出物カーテンのレイ構造

左: DCAM3画像, 右: 可視光反射率変化

衝突前ONC-T画像に放出物方向を重畳

Arakawa+ 2020, *Science*



Arakawa et al. *Science*, Kadono et al. *ApJL* 等は, 宇宙衝突実験の幕開けを告げる画期的な成果と言える。



TD2 の 決断

こちはや →
漫画版
Vol.11
第二回
タッチ
ダウン



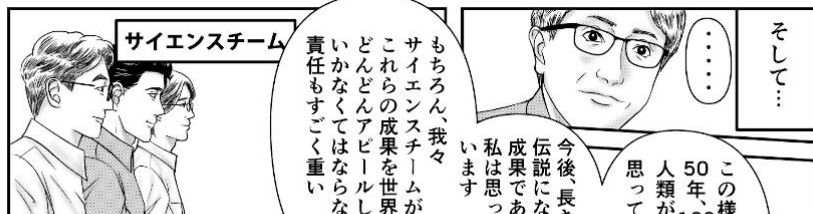
6月6日
検討会
(運用会議)



ISAS 執行部
注目のなか、
プロジェクトは
TD2目標を
C01領域へ切り
替える方針を
示しました

工学チームからは
第2回タッチダウンの
実現性について

サイエンスチームからは、
地下物質採取の
サイエンスの意義について
それぞれ報告がされ、



そして…

もちろん、我々
サイエンスチームが
これらの成果を世界へ
いかにアピールして
責任もすくなく重
い

今後、長きに渡り
伝説になる
成果である
私は思っ
ています



工学チーム

これらを実現して
くれた工学チームの
士気の高さに一同、
本当に感動しています

人工クレータ

サイエンスチーム
ワナベ先生



この日、
サイエンスチームは
改めて工学チームへの
熱い信頼を表明、

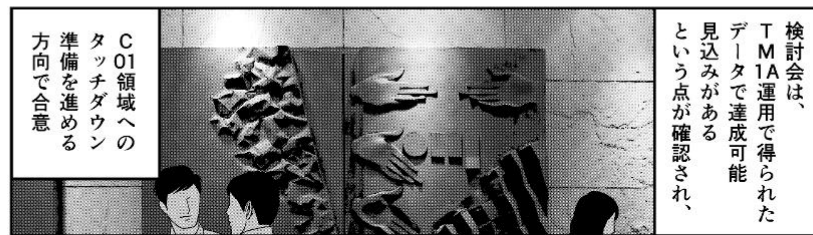
我々は
この工学メンバーの
高いチーム力を
信頼している

さら
に成果を
積み上げられるのなら
ぜひ、期待したい



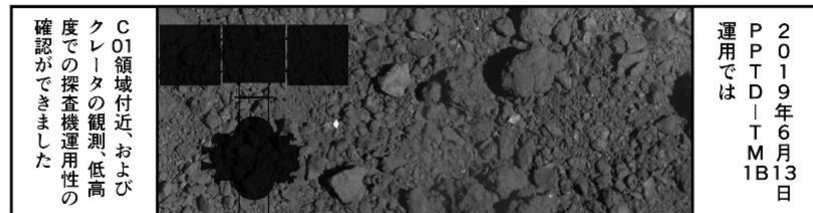
工学チームは
そのスタンスに支えられ
また、その期待の重さを
ひしひしと感じました

サイエンスチームは
誰も守りに
入っていないんだ
ぞくぞく



検討会は、
TMA運用で得られた
データで達成可能
見込みがある
という点が確認され、

C01領域への
タッチダウン
準備を進める
方向で合意



C01領域付近、および
クレータの観測、低高
度での探査機運用性の
確認ができました

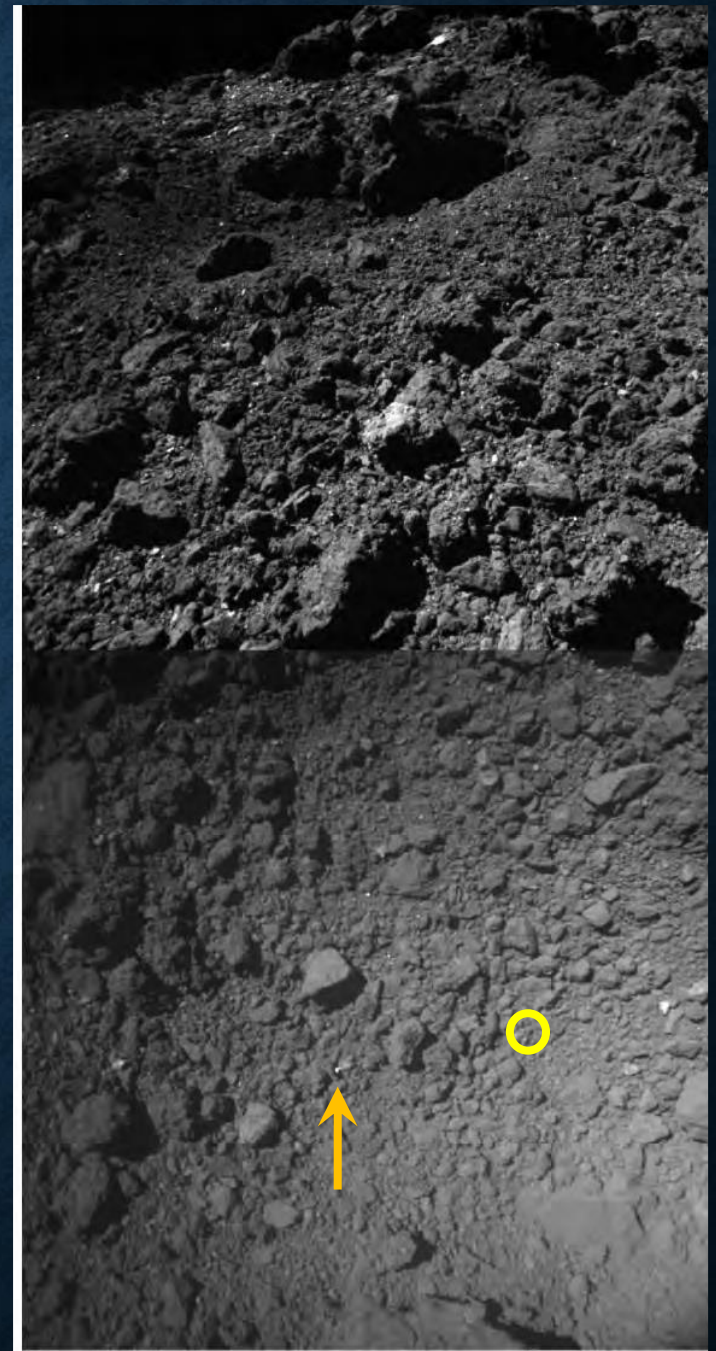
2019年6月13日
PPTD-TM1B13
運用では



SCIクレーター近傍にタッチダウン

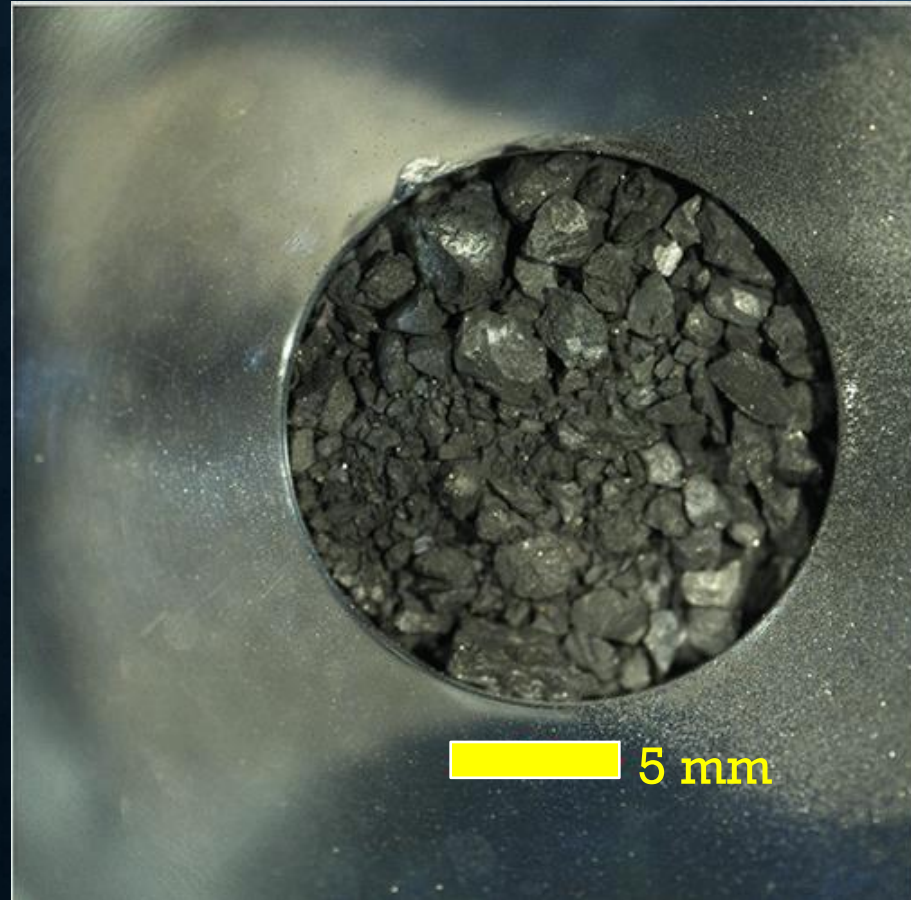
Credit: JAXA/神戸大 ↓

Right: Credit: JAXA/U Tokyo/Kochi U/Rikkyo U/
Nagoya U/Chiba Inst of Tech/Meiji U/U Aizu/AIST

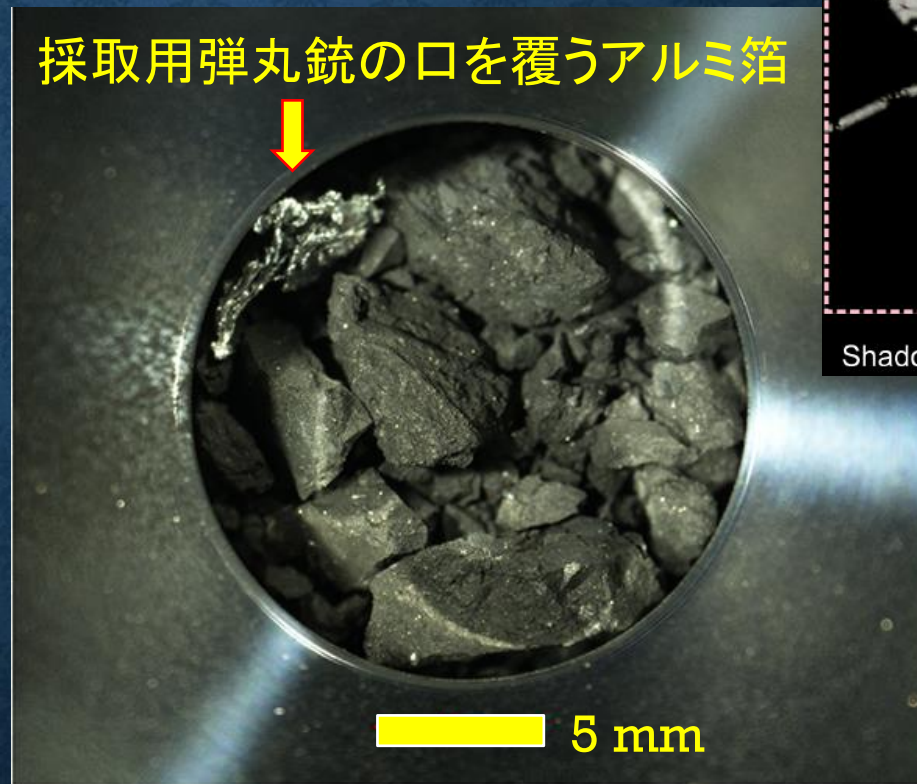




7. もたらされたリュウグウ試料

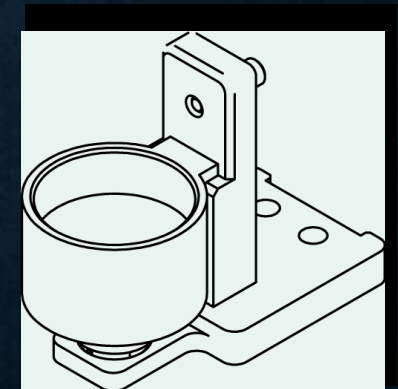
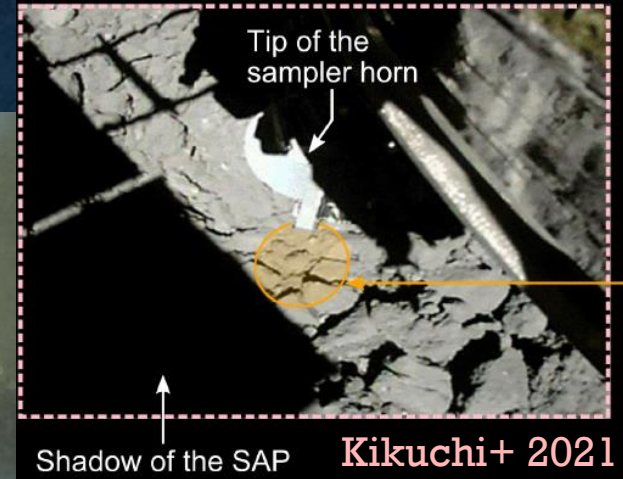


キャッチャー-A室から回収した粒子



採取用弾丸銃の口を覆うアルミ箔

キャッチャー-C室から回収した粒子



回収容器既観

©JAXA