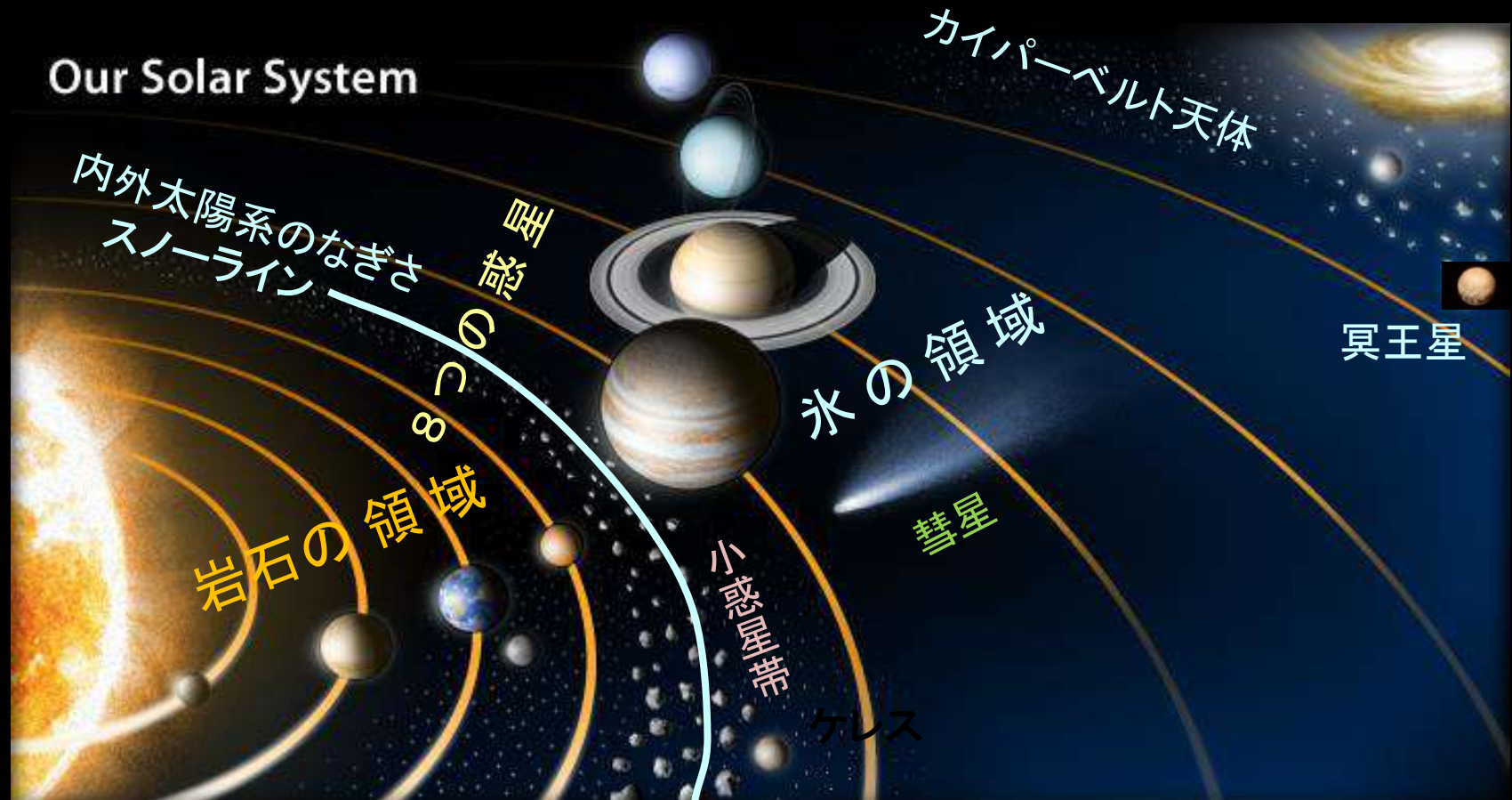


はやぶさ2がリュウグウへの 射撃に成功！ 人工クレーターからの宝物はなに？

渡邊 誠一郎
名古屋大学／JAXA宇宙科学研究所

太陽系の中の小惑星の位置



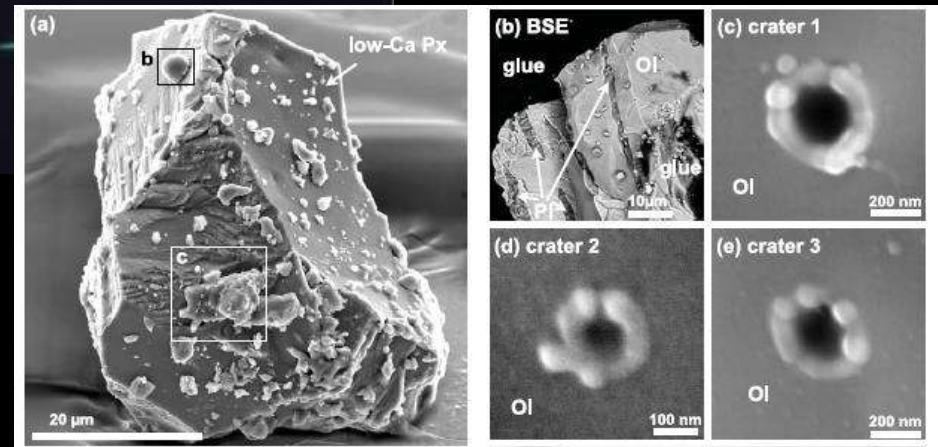
© NASA (<https://solarsystem.nasa.gov/planets/images/splash-planets.jpg>) 一部加筆

1 au : 太陽-地球間の平均距離(軌道長半径)で約1.5億 km, auとは「天文単位」の略号

はやぶさサンプル分析からの“発見”



E. Nakamura et al. (2012) *PNAS*



- 粒子表面に1 μm 程のとけた液体の粒がたくさん付着して固まっていた(左)
- 数百nmの微小クレーター, 縁にとけた液体の粒がじゅずつなぎ(中央)
- 今までの隕石研究の常識を超えた発見, 小天体の表層部分の実像!

2012年以降, 国際的に研究提案を募集し, 「はやぶさ試料」を配布

はやぶさ:S型小惑星 → はやぶさ2:C型小惑星 水 有機物

2013/02/15 09:26:36

チェラビンスク隕石



隕石と惑星間塵

【隕石】

- コンドライト (Ch)
 - 普通Ch
 - 炭素質Ch
 - エンスタタイトCh
- 分化隕石
 - エコンドライト
 - 石鉄隕石
 - 鉄(石鉄)隕石

やまと-82038 (LL3)



タギッシュレイク隕石



【惑星間塵 (IDP)】 [質量の大半]

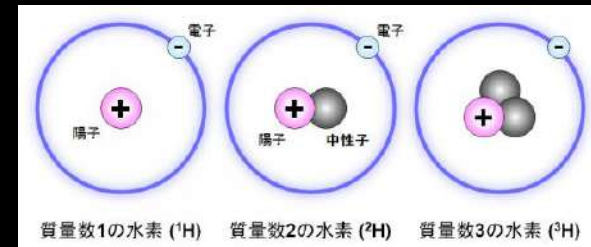
- カンラン石, 輝石に富むものや
- 含水鉱物, 有機物に富むもの



惑星間塵

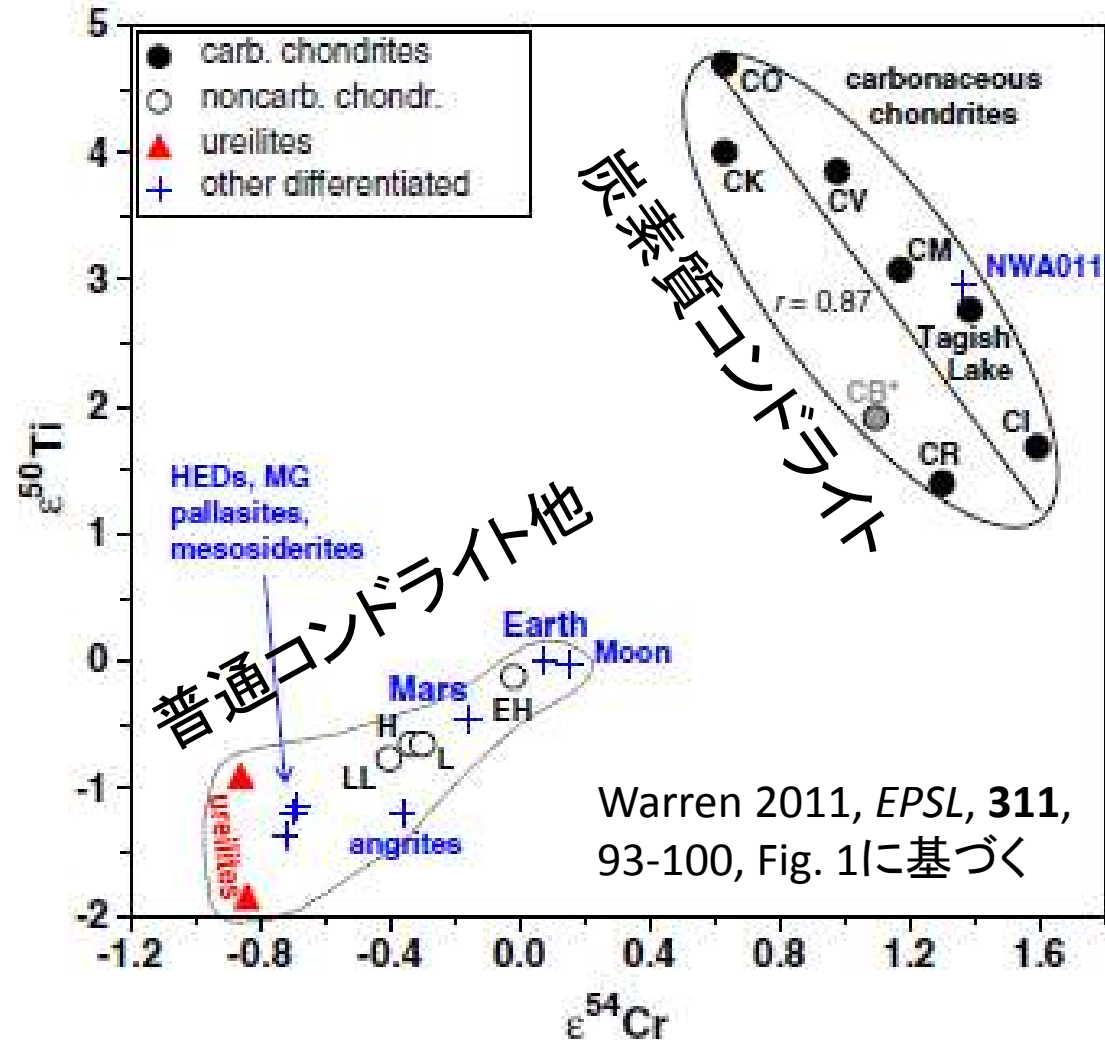
隕石の起源 の同定

同位体
とは



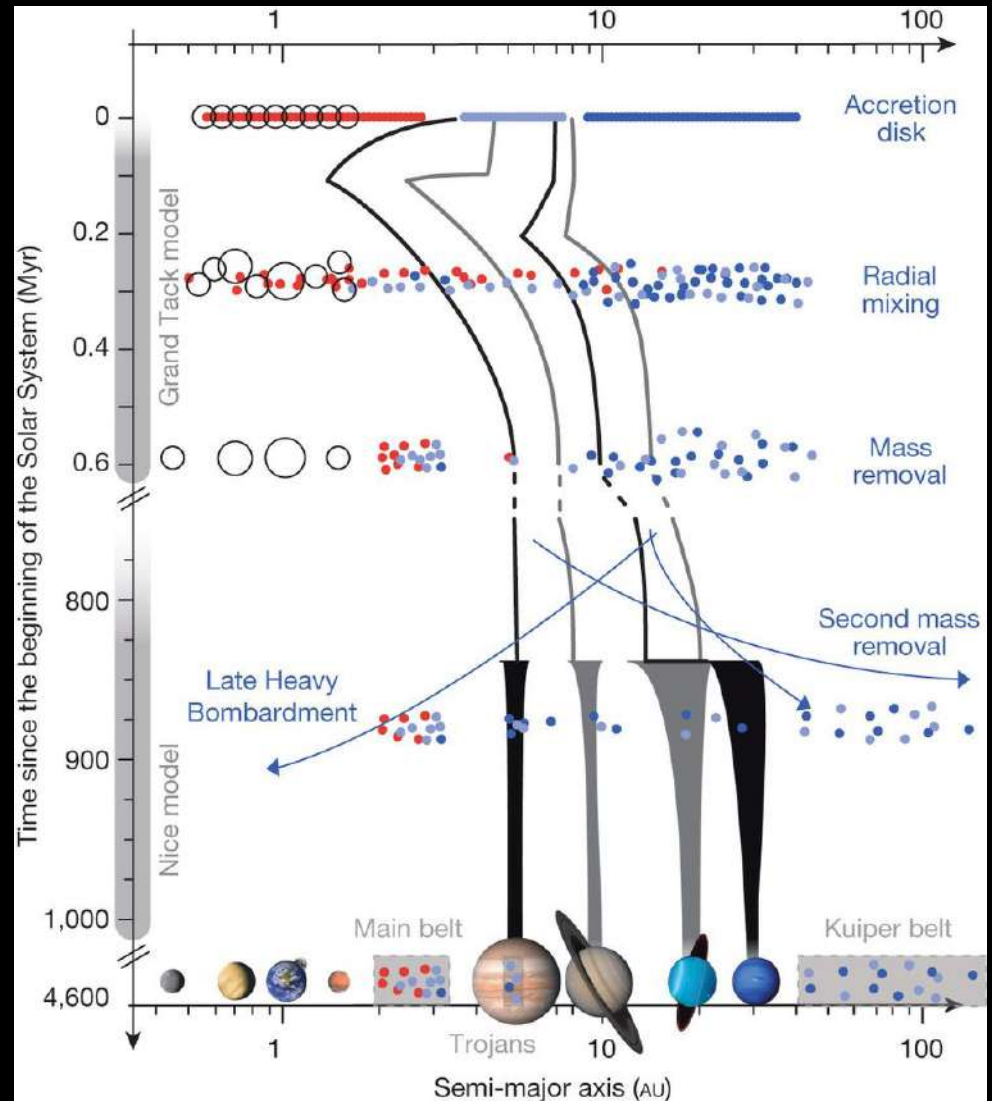
- 同位体比は
「**指紋**」

- 普通コンドライトと炭素質コンドライトでは中に含まれているチタン Ti や クロム Cr, 酸素 O などの元素の同位体の比が大きく異なる。



惑星形成期の 大動乱

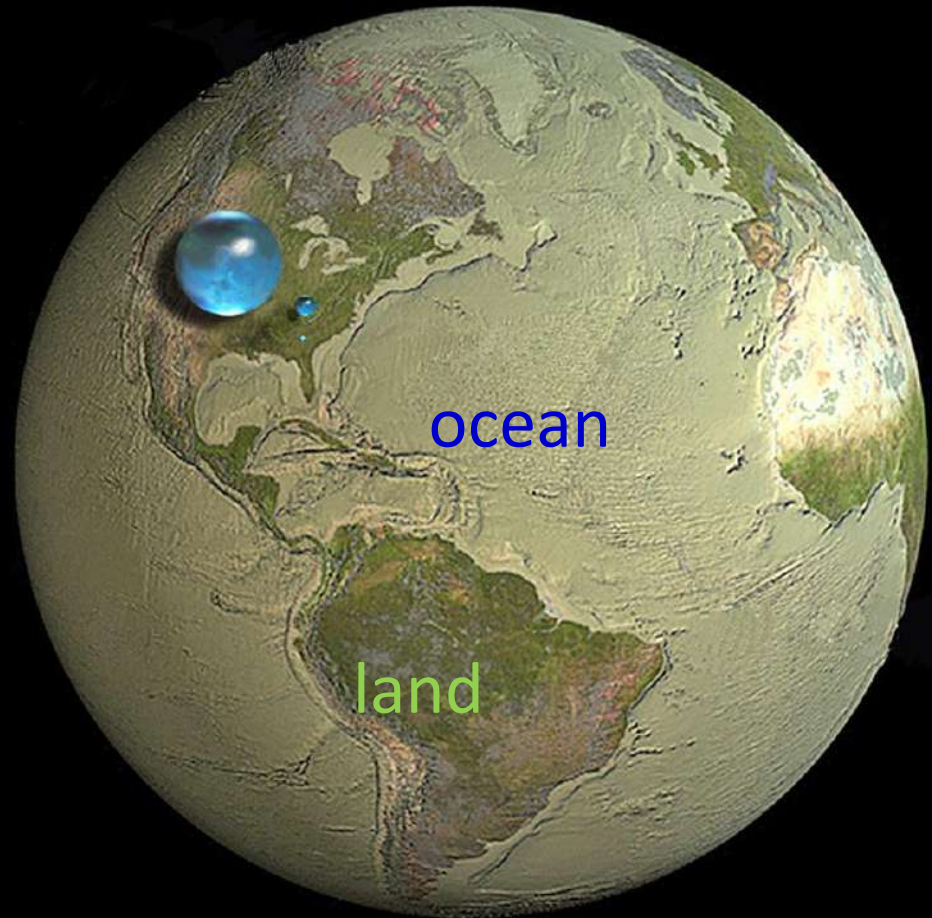
- Grand Tack Model
Walsh et al. 2011.
- **木星・土星**が大きく
軌道を変えて、
内外の小天体をかき混ぜた。
- これにより、木星より
外側で生まれた小天
体のうち、小惑星帯
に運ばれたものが、
C型小惑星となった。



Walsh et al. 2011, *Nature* **475**, 206.

地球の水の起源の謎

- 海水は地球質量の0.023%に過ぎない.
- マントルに含まれる水を入れても < 0.1%
- 生命には絶妙な量
- その起源は？
 - 彗星
 - 炭素質小惑星
 - 太陽系円盤ガス
- ...



All Earth's Water Credit: Howard Perlman, USGS;
globe illustration by Jack Cook, Woods Hole
Oceanographic Institution (©); Adam Nieman

はやぶさ2ミッション

- 内外太陽系の境界(スノーライン)付近での、惑星のできかたを調べる.
- 微惑星での物質進化を明らかにする.
- 炭素を含む小惑星のこわれ易さなどを明らかにし、衝突でのこわれ方やできる破片の大きさを解明する.
- 地球へ水・有機物がどのように運ばれるかを調べる.

⇒ C型(炭素質)の地球接近小惑星リュウグウへ

- リモートセンシング観測: ONC, TIR, NIRS3, LIDAR
- 表面を「その場で」測定: ローバー, ランダー
- 人工クレーター生成実験: 衝突装置SCI, DCAM3
- 表面・地下試料を地上に持ち帰り, 総合的に分析



はやぶさ2ミッションの流れ

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



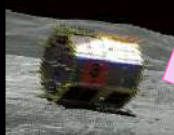
MINERVA-II1分離
2018年9月21日



MASCOT分離
2018年10月3日



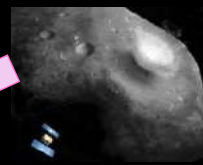
リュウグウ出発
2019年11月13日



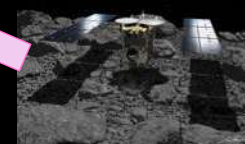
2回目のタッチ
ダウン
2019年7月11日



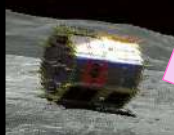
衝突装置
2019年4月5日



1回目のタッチダウン
2019年2月22日



MINERVA-II2分離
2019年10月3日



地球帰還
2020年末



終了 →

(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)

小惑星リュウグウの姿

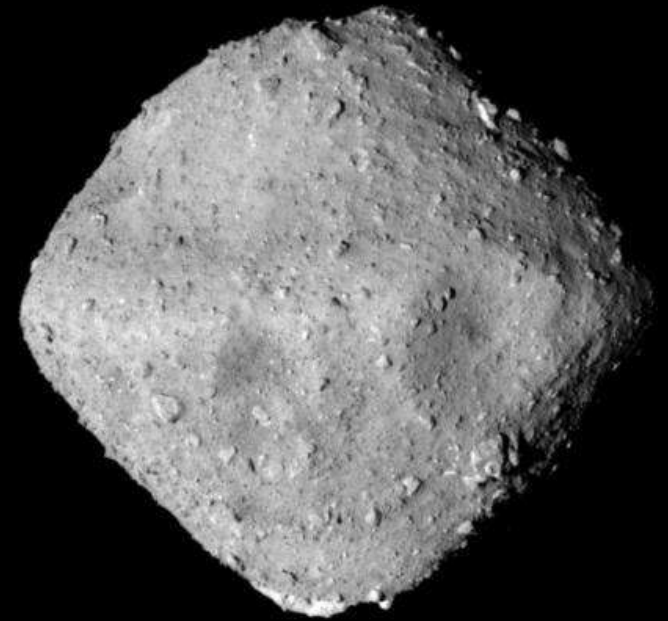
リュウグウ軌道要素

$a = 1.1896 \text{ au}$,

$e = 0.19028$,

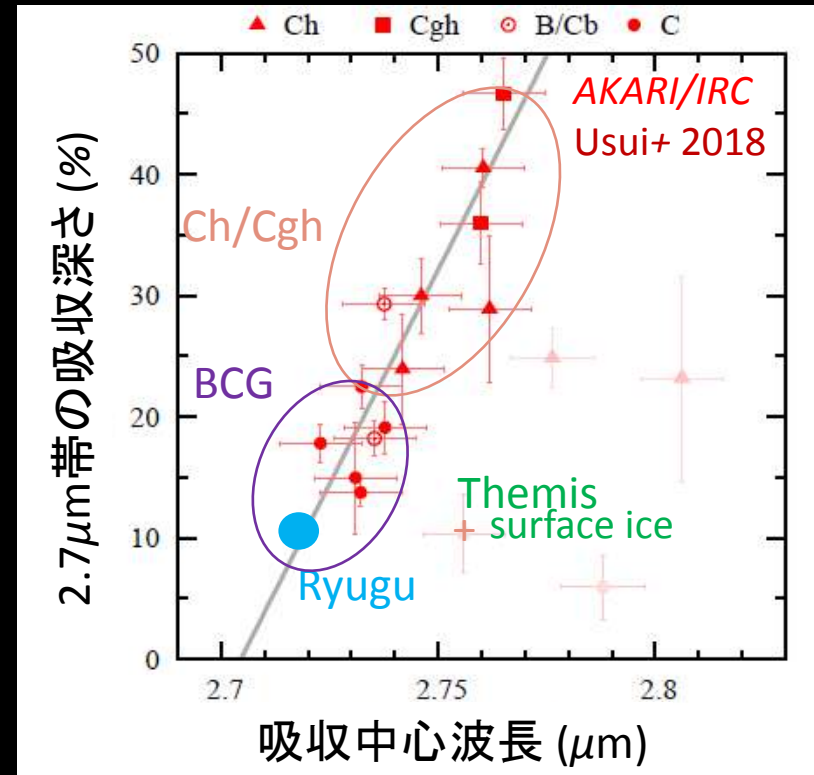
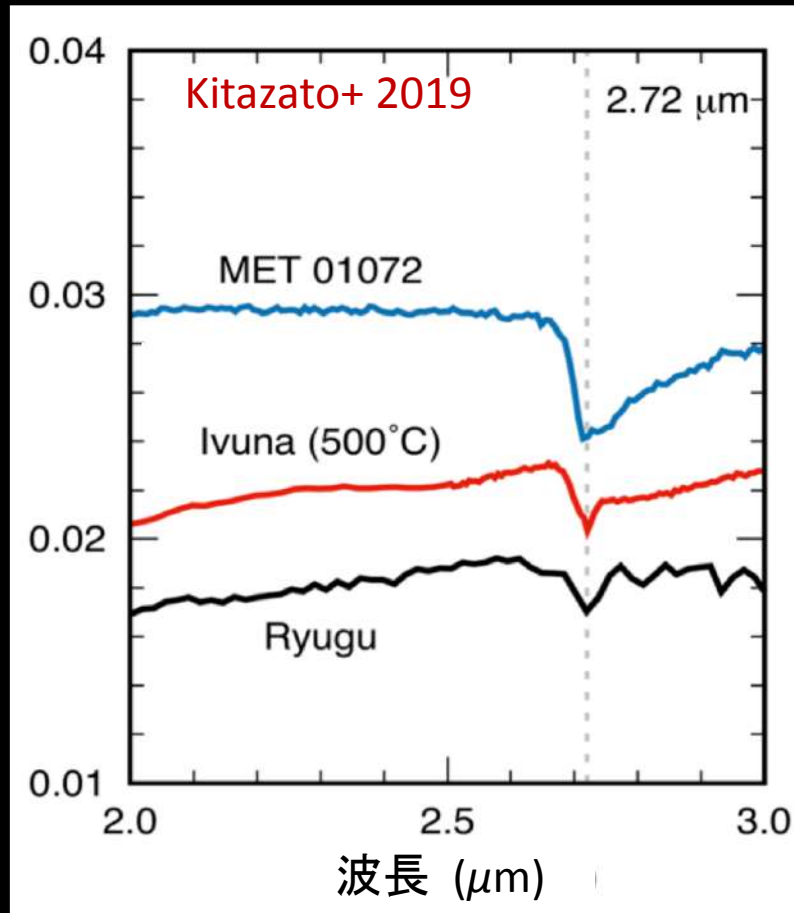
$i = 5.8840^\circ$

- 自転軸の傾き: $\sim -172^\circ$, 自転周期: 5.2567 日
- コマ型(そろばん玉型) [赤道山]
- 赤道/極半径: 502 m / 438 m
- 密度: 1.19 g cm^{-3}
- 空隙率: 60%程度 (すかさか)
- 岩塊(ボルダー)が高密度に分布
- 非常に暗い表面, クレーター散在
- スペクトル: 平坦で吸収に乏しい
- 南北温度が非対称(季節で変化)
- 熱画像: 朝は急に昇温, 昼は長時間高温



画像クレジット: JAXA, 東京大, 高知大, 立教大, 名古屋大, 千葉工大, 明治大, 会津大, 産総研

近赤外分光計NIRS3 →岩石中に水を発見



リュウグウは有機物を多く含む
惑星間塵と関係する可能性もある。

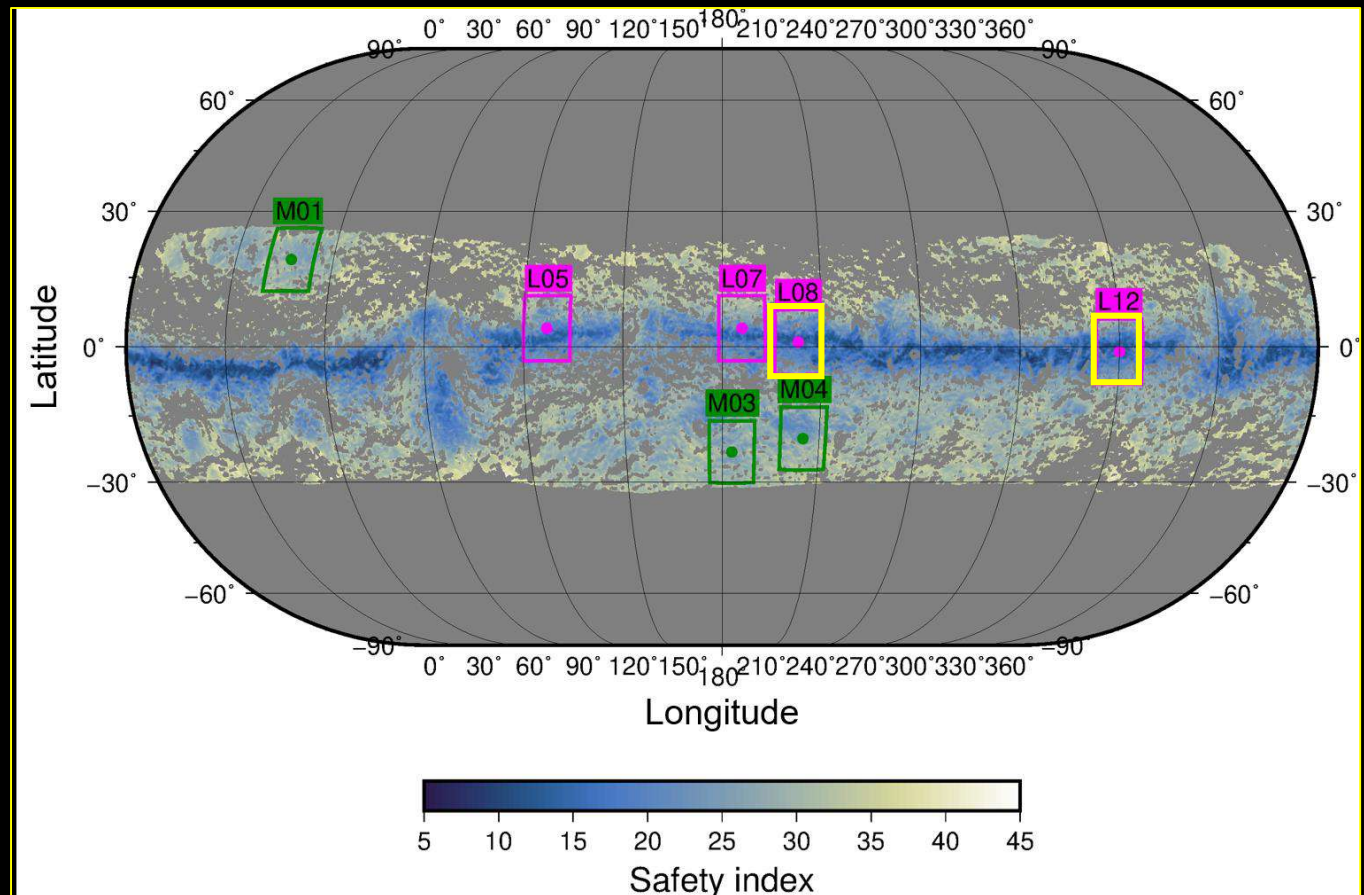
地形の名称：子供向けのお話から

* サンドリオン



試料採取のための着地点の選定作業

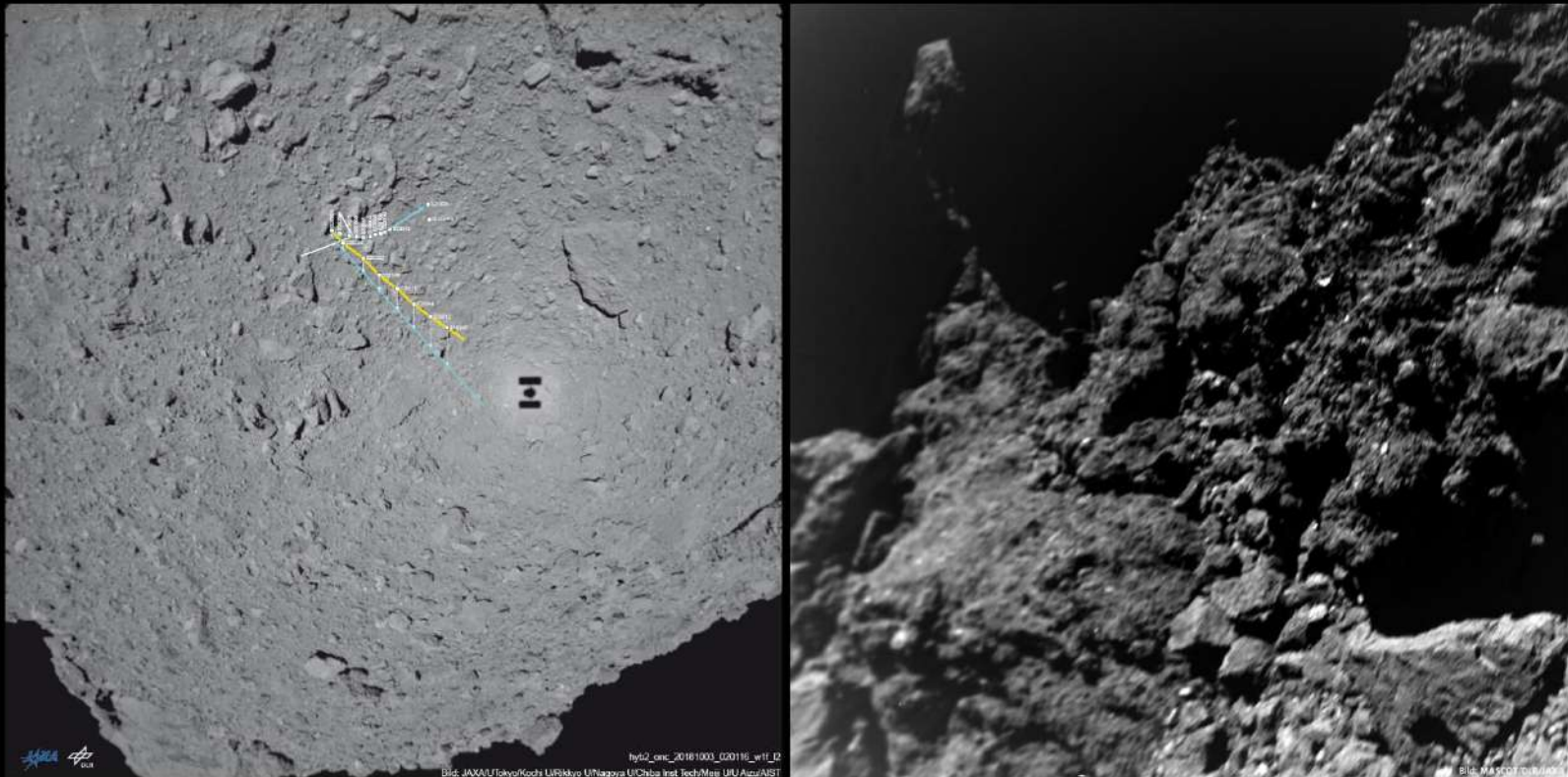
- L: 低緯度
- M: 中緯度
- L08を第1回タッチダウン候補点に
- L12を衝突装置SCIの目標(=第2回TD)



画像クレジット: JAXA

MASCOT降下経路と表面画像

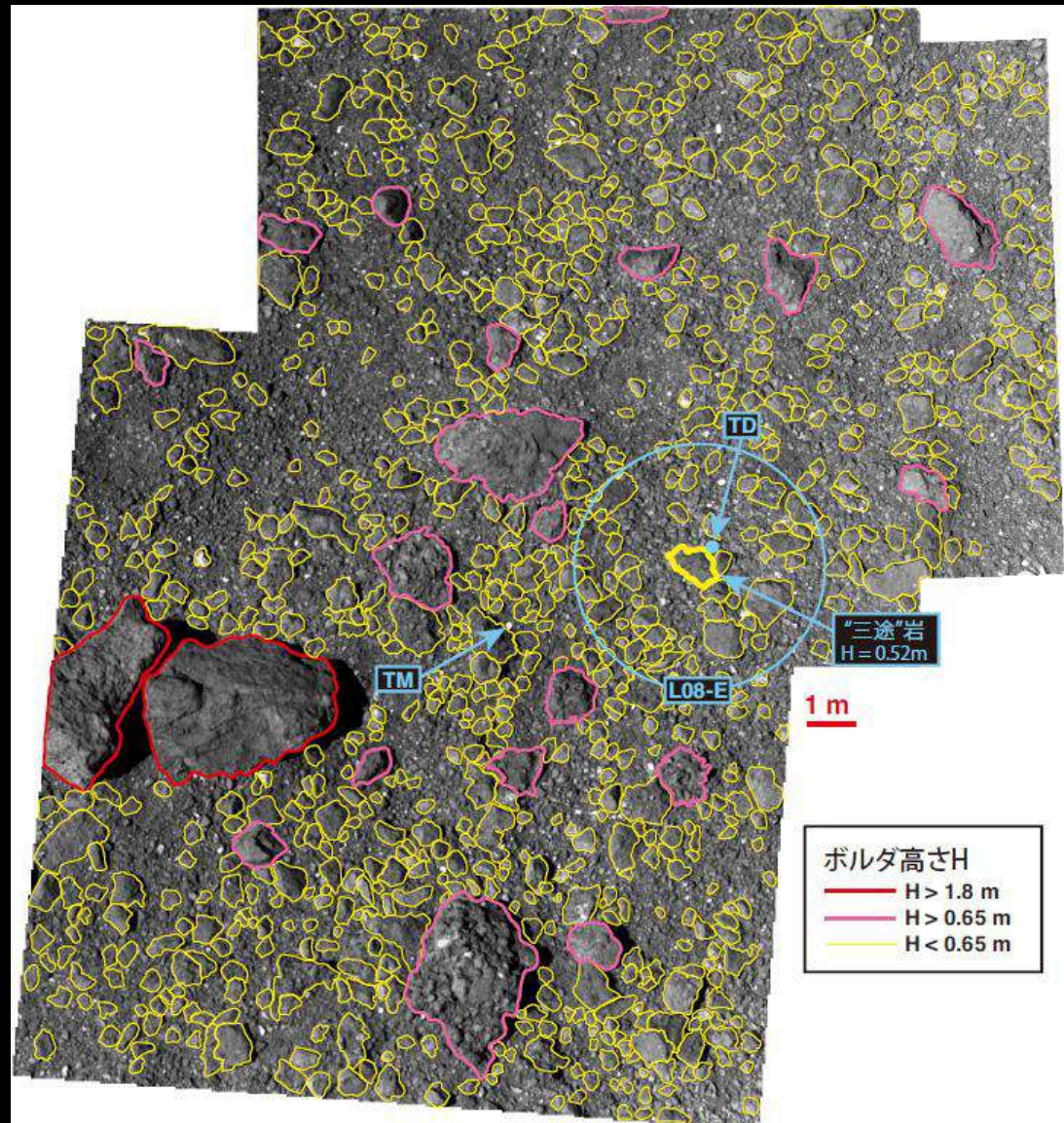
01:57:20—**02:03:24** (1st bounce)—02:14:04 (静止), 00:55:09 +1 day



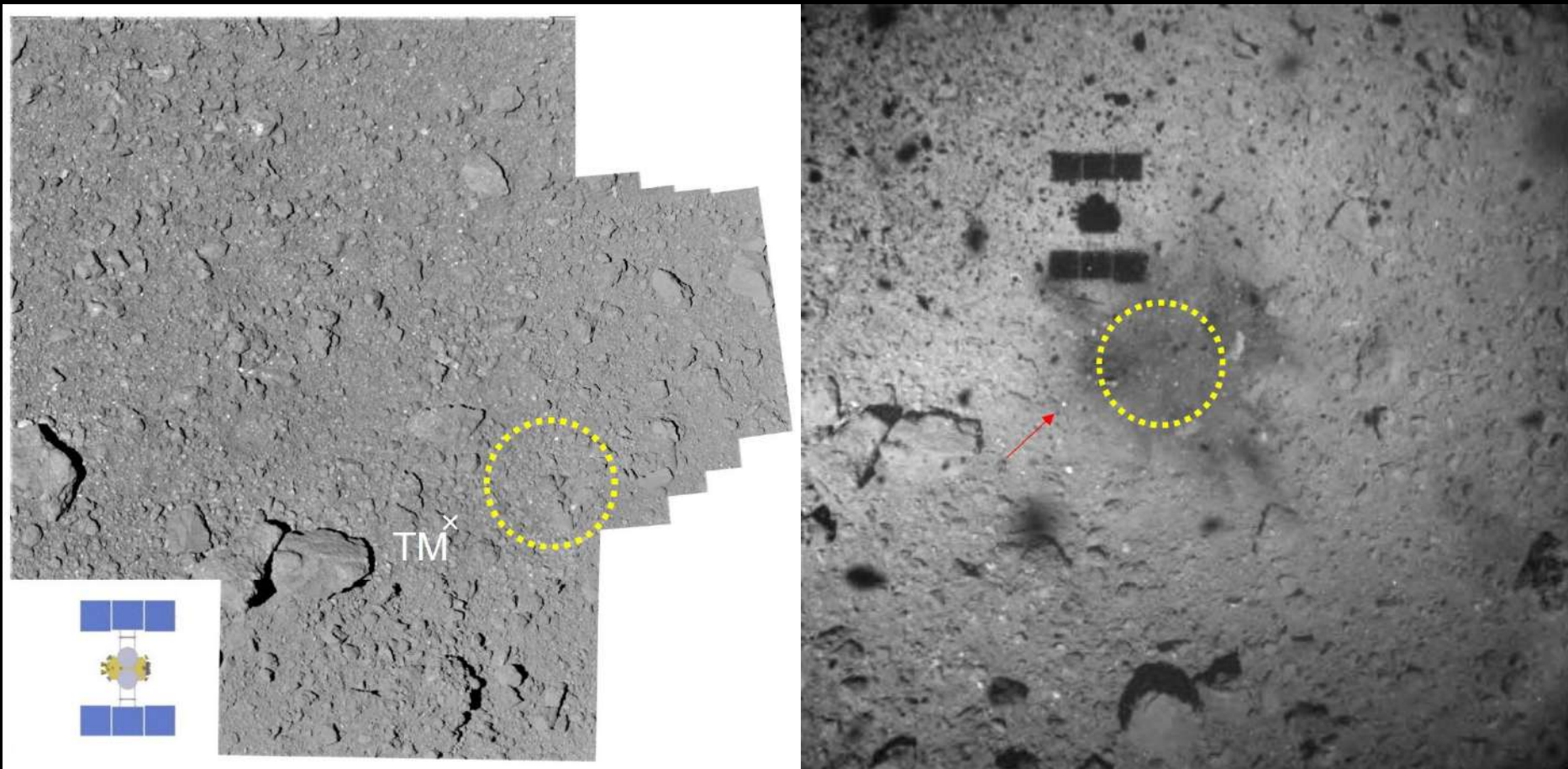
画像クレジット: (左: ONC-W1; 02:03:24) JAXA, 東京大, 高知大, 立教大, 名古屋大, 千葉工大, 明治大, 会津大, 産総研
(右 MASCAM: 02:03頃) MASCOT/DLR/JAXA (左)の位置同定はONC立教大チームによる。

岩塊の高さの徹底した計測

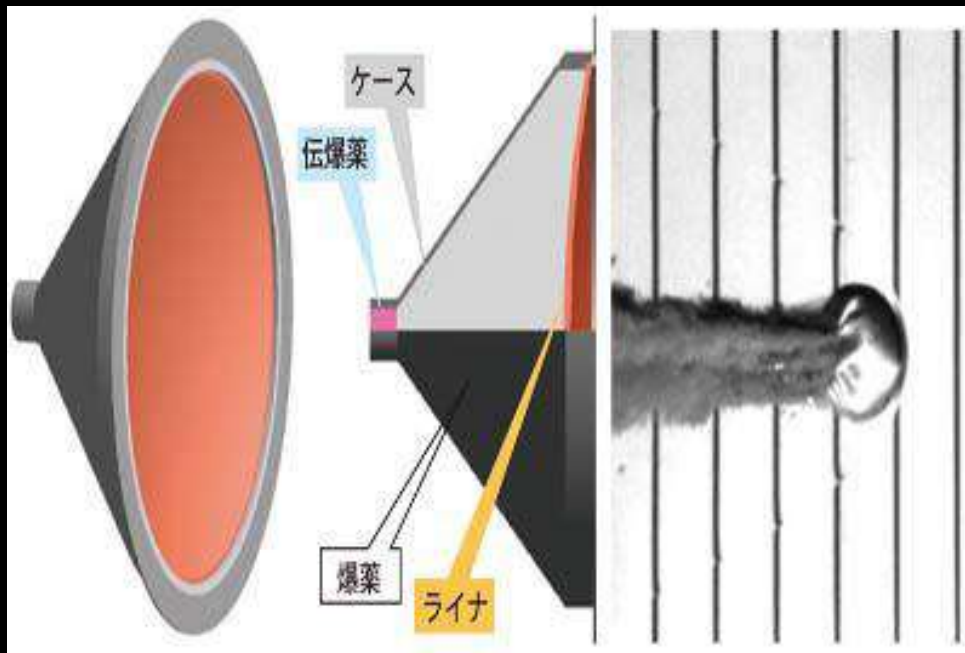
- 理学チームが
着地点付近の数
十cm以上の大き
さの岩塊の高さを、
影の長さや局所
地形モデルから
すべて計測
- 工学チームが
それに基づいて
探査機移動の
シミュレーション



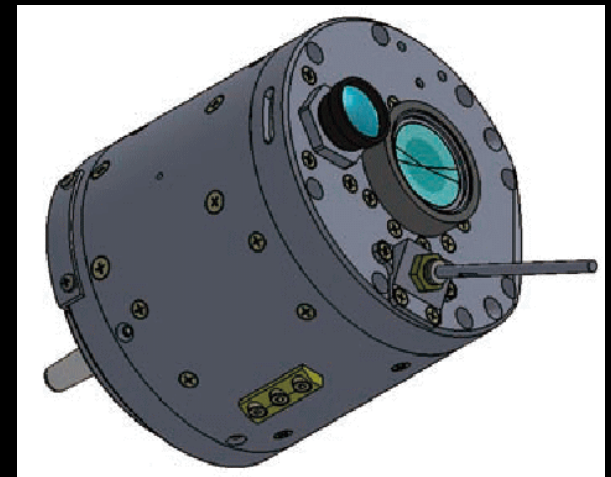
第1回タッチダウン前後の 着地点付近の変化



衝突装置SCIと分離カメラDCAM3

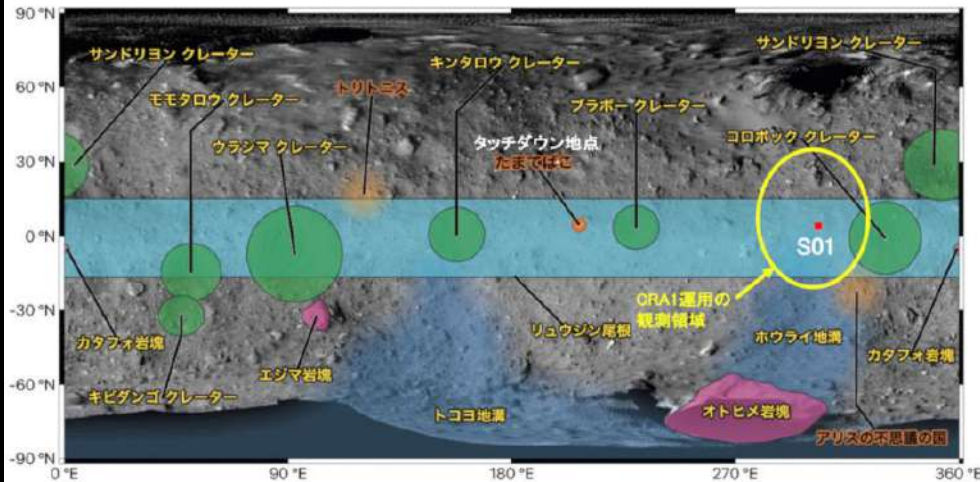


衝突装置 SCI

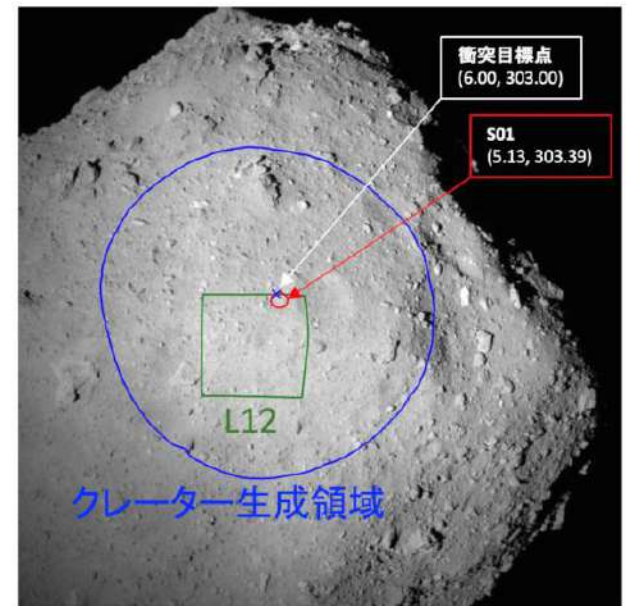


小型分離カメラ
DCAM3

衝突装置SCIの目標領域

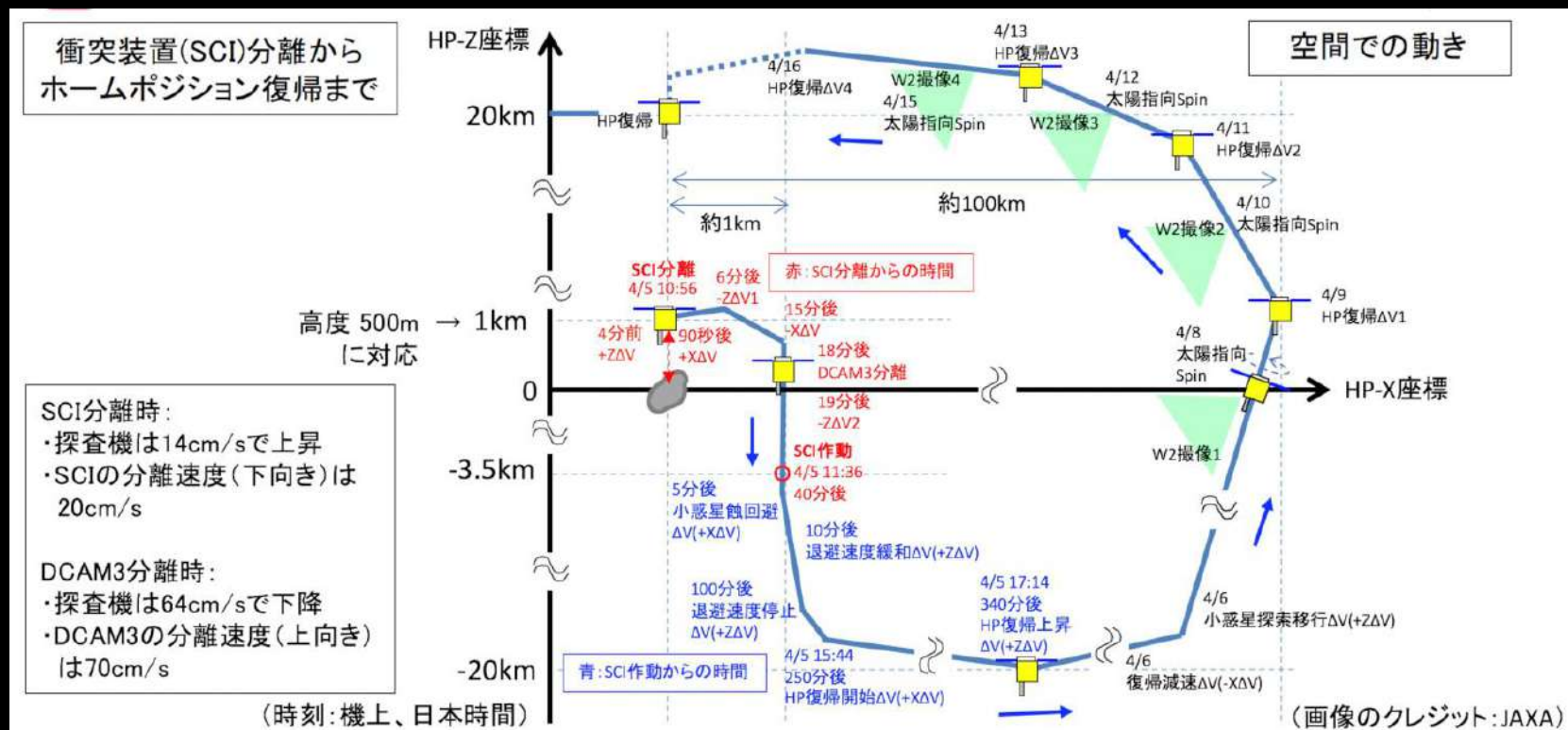


注) CRA1運用の観測領域は衝突装置によるクレーター生成領域と同じである。



(画像のクレジット: JAXA, 東京大, 高知大, 立教大, 名古屋大, 千葉工大, 明治大, 会津大, 産総研)

衝突実験時の探査機の動き



SCIの地上試験

撮影日: 2013/10/13 - 2013/10/15

クレジット: JAXA/日本工機

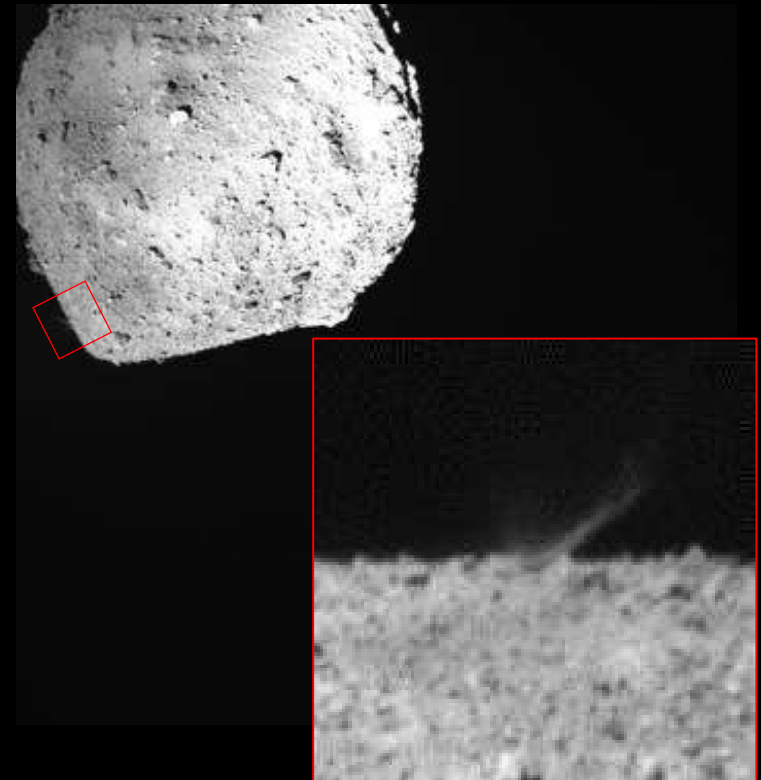


SCIにより生成された人工クレーター

2019年4月5日



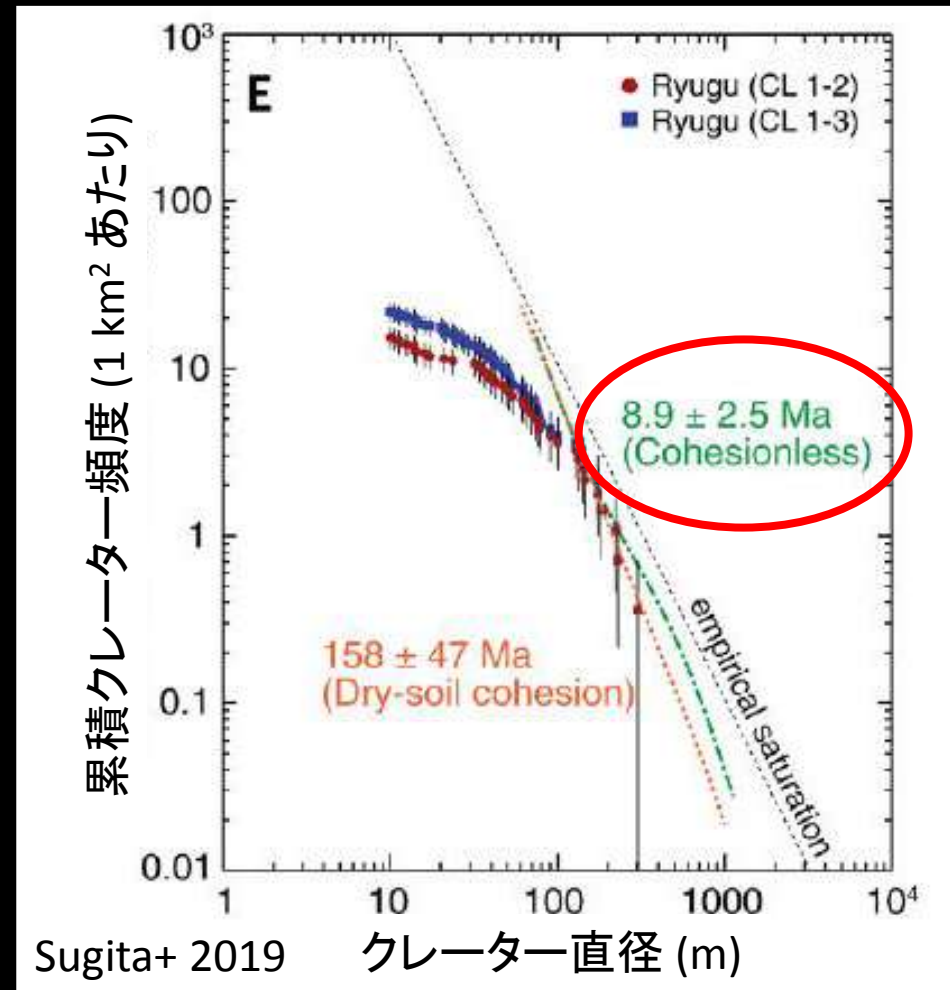
画像クレジット: JAXA, 東京大, 高知大, 立教大,
名古屋大, 千葉工大, 明治大, 会津大, 産総研



画像クレジット: JAXA, 神戸大, 千葉工大,
高知大, 産業医科大

SCI衝突実験からわかったこと

- クレーター年代学の不定性
 - 640万年～2億年
 - 衝突エネルギーとクレーター直径の関係が不明だった
- SCI衝突実験により上限に近い大きさのクレーターが生成
- 表面年代は若い方である可能性大



SCI人工クレーターと 第2回タッチダウン点

- SCI人工クレーターからわずかに20 m余りの地点にタッチダウンに成功.
2019年7月11日
- SCIクレーター形成によって地下から掘削された物質が混じっている可能性が高い.
- 第1回タッチダウンでの試料と比較分析が可能

画像クレジット: JAXA, 東京大, 高知大, 立教大,
名古屋大, 千葉工大, 明治大, 会津大, 産総研



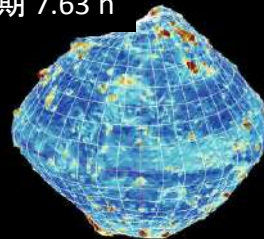
近傍運用でのサイエンス成果

- *Science* 誌の4/19号に3編の論文(+表紙), 8/23号にMASCOT成果論文1編が掲載
- *Nature Astron.*, *Astrophys. J.*, *Icarus*, *Astron. & Astrophys.* 等一流誌にも論文掲載

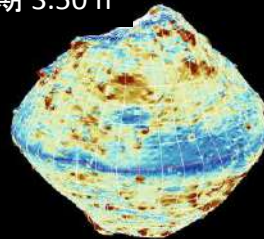


コマ型形状が過去の
高速自転で生成された
ことを示す Watanabe+ 2019

周期 7.63 h

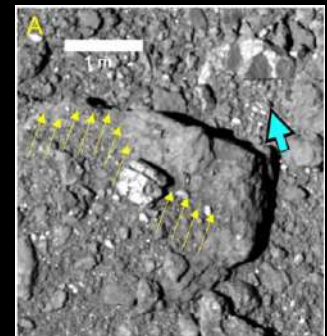
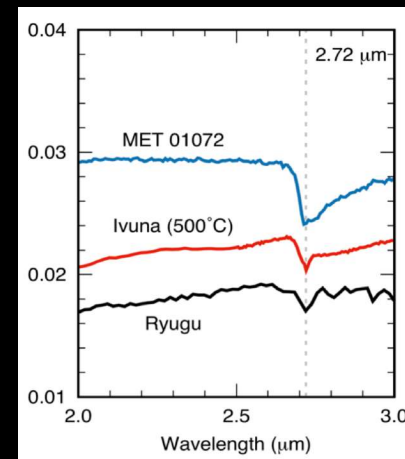


周期 3.50 h



母天体を制約 Sugita+ 2019 →

鉱物中の水の存在を確認
Kitazato+ 2019



半円状のSCI クレーター (Arakawa+ 2019; 査読中) →