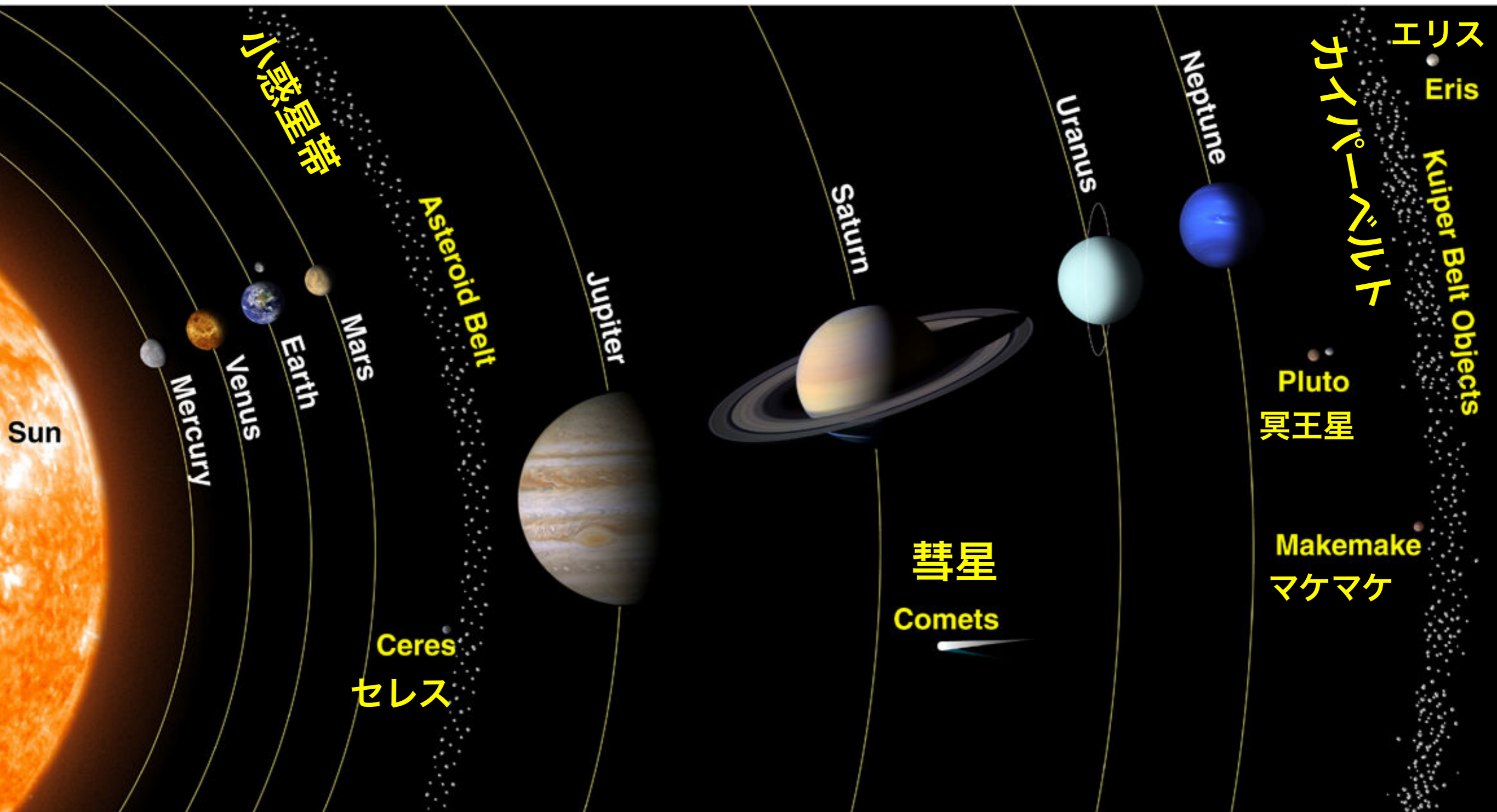


# 第12章 太陽系



# 太陽

水素・ヘリウムを主成分とする電離したガスのかたまり

## 大きさ

半径：696000 km

質量： $1.989 \times 10^{30}$  kg

- 地球の約 33万 倍

太陽系全体の質量の 99.87 %

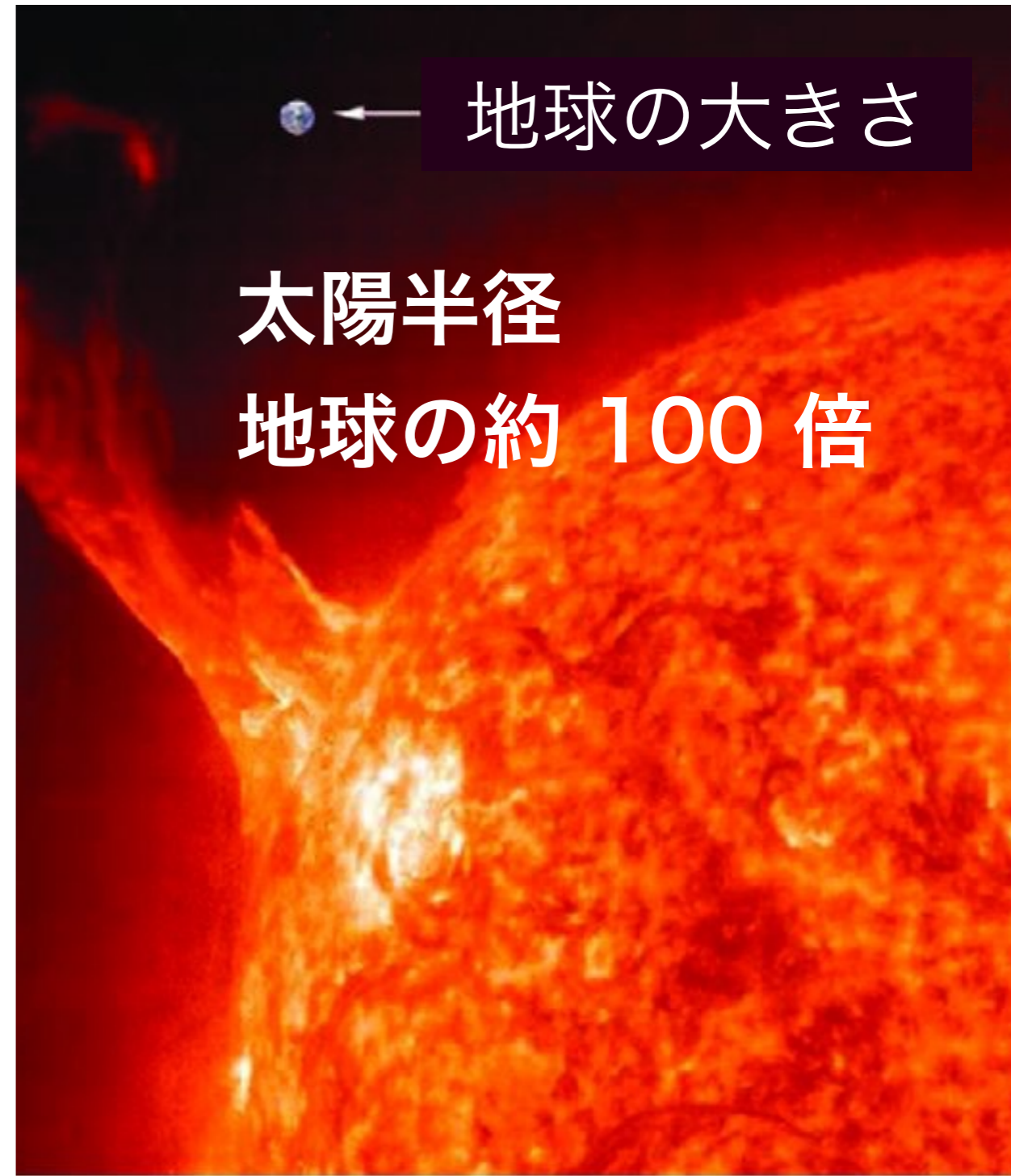
## 太陽放射

中心部で水素核融合反応

表面温度 約 5,800 K

## 太陽風

太陽から吹き出す高温プラズマ



# 太陽系惑星の定義

- (a) 太陽の周りを公転している
- (b) 重力によって球形となっている
- (c) 軌道上から他の天体を一掃している 天体

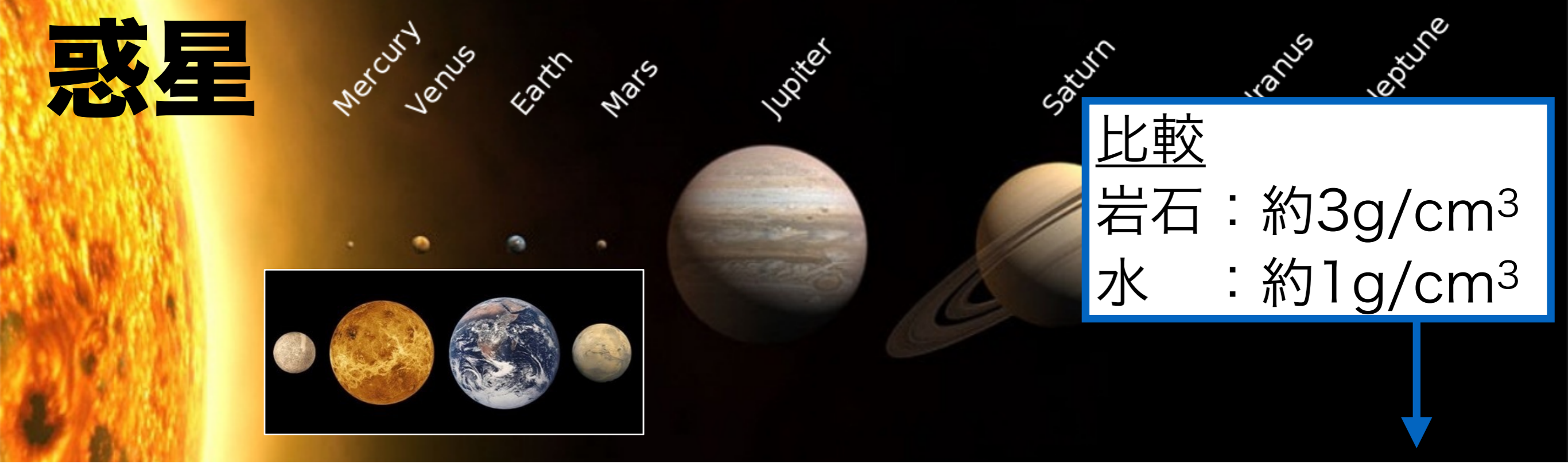
## 準惑星 (Dwarf Planets)

- (a), (b)を満たすが(c)を満たさない天体 ※衛星を除く
- 冥王星, エリス, マケマケ, ハウメア(カイパーベルト), セレス(小惑星帯)

## 太陽系小天体 (Small Solar System Bodies)

- (a)のみを満たす天体 ※衛星を除く
- 小惑星, 彗星, 惑星間塵

# 惑星

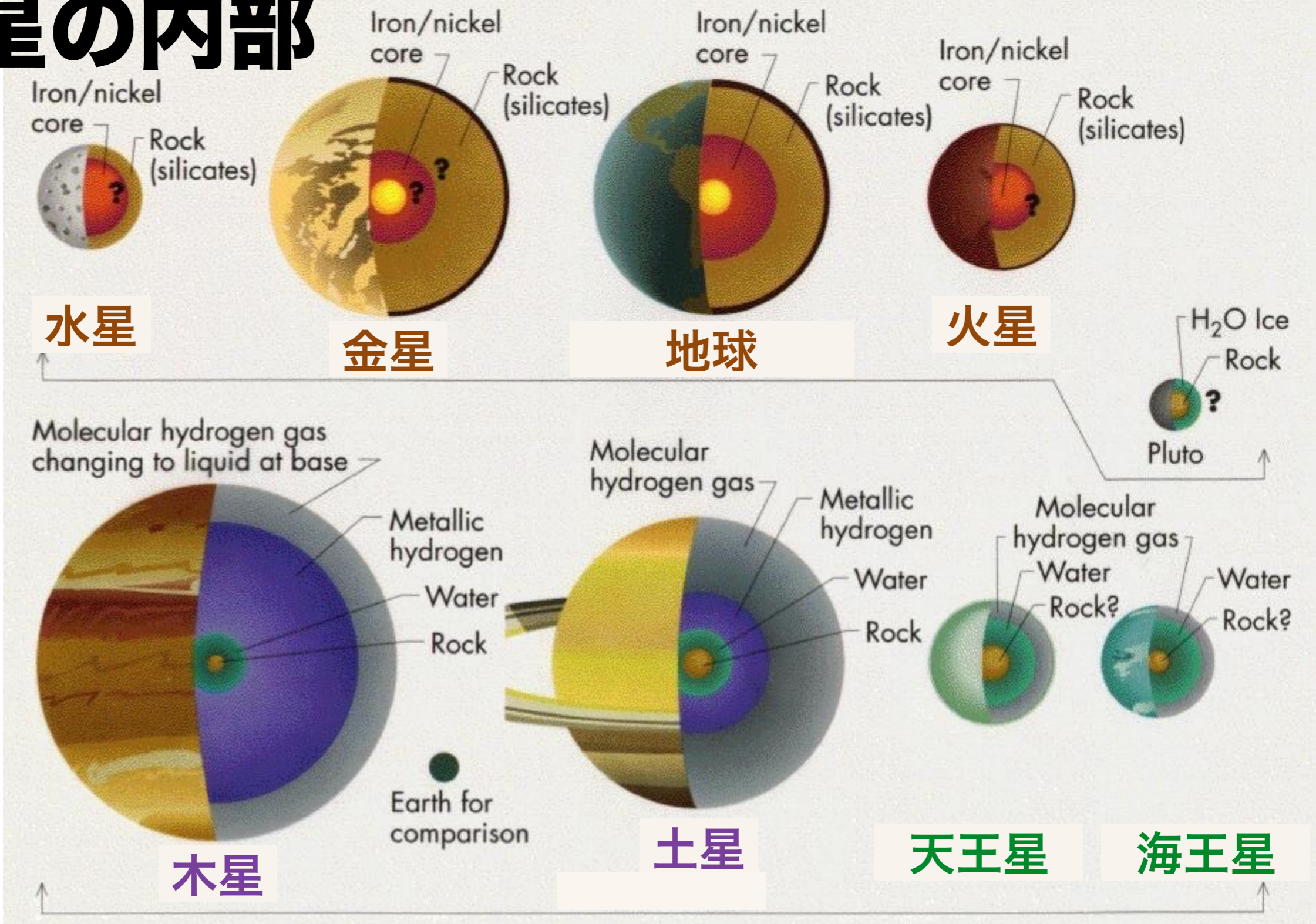


比較  
 岩石：約 $3\text{g/cm}^3$   
 水：約 $1\text{g/cm}^3$

	軌道長半径 [AU]	質量 (地球=1)	半径 (地球=1)	密度 [ $\text{g/cm}^3$ ]
水星	0.39	0.055	0.38	5.43
金星	0.72	0.815	0.95	5.20
地球	1	1	1	5.52
火星	1.52	0.107	0.53	3.93
木星	5.20	317.89	10.97	1.33
土星	9.54	95.18	9.14	0.688
天王星	19.2	14.54	3.98	1.27
海王星	30.1	17.15	3.86	1.64

1AU：太陽-地球間の距離,  $1.5 \times 10^{11}$  m, 地球質量： $5.97 \times 10^{24}$  kg, 地球半径：6371 km

# 惑星の内部

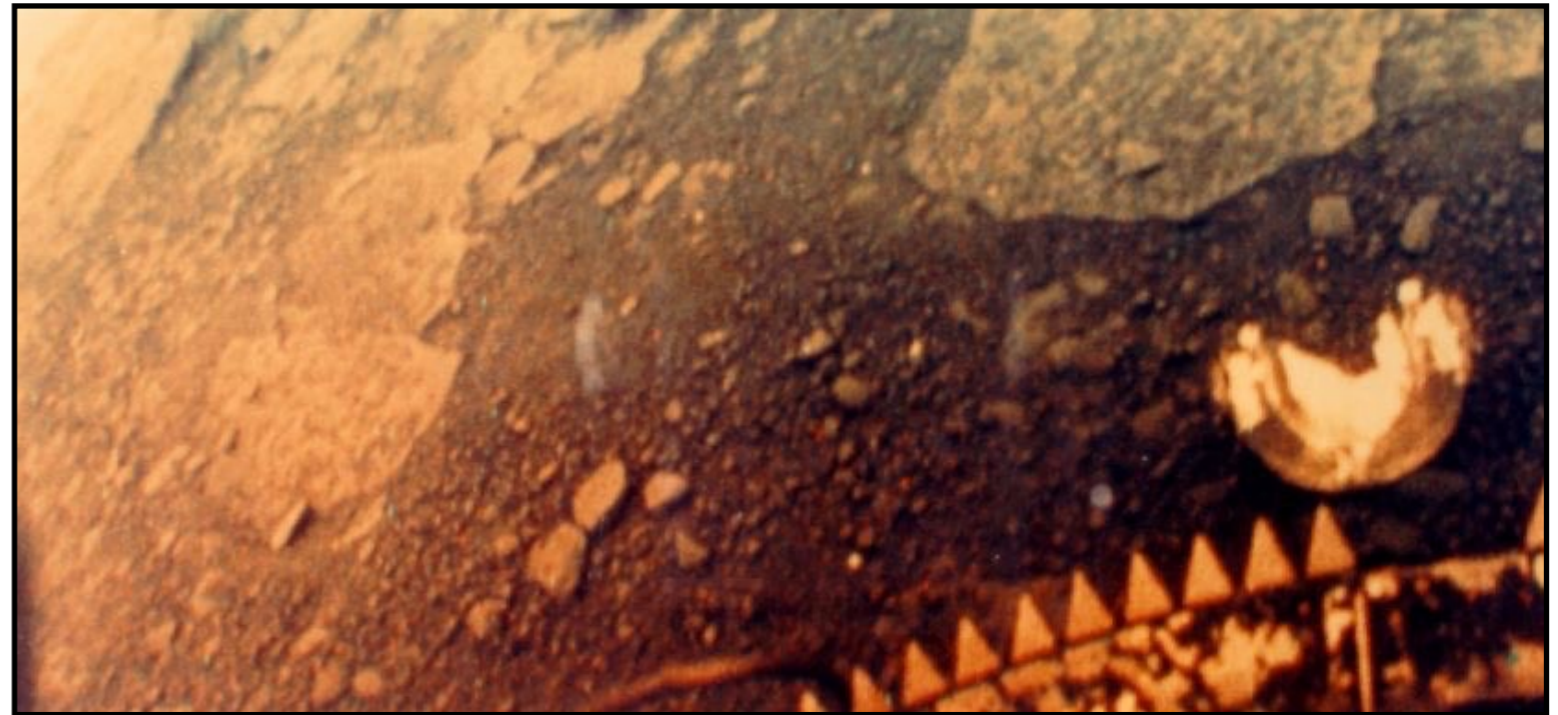


**岩石惑星**： 岩石(地殻, マントル), 金属 中心核

**巨大ガス惑星**： 大部分が水素・ヘリウムガス, 中心核(岩石, 氷)

**巨大氷惑星**： 水素・ヘリウムガス, 大部分が氷

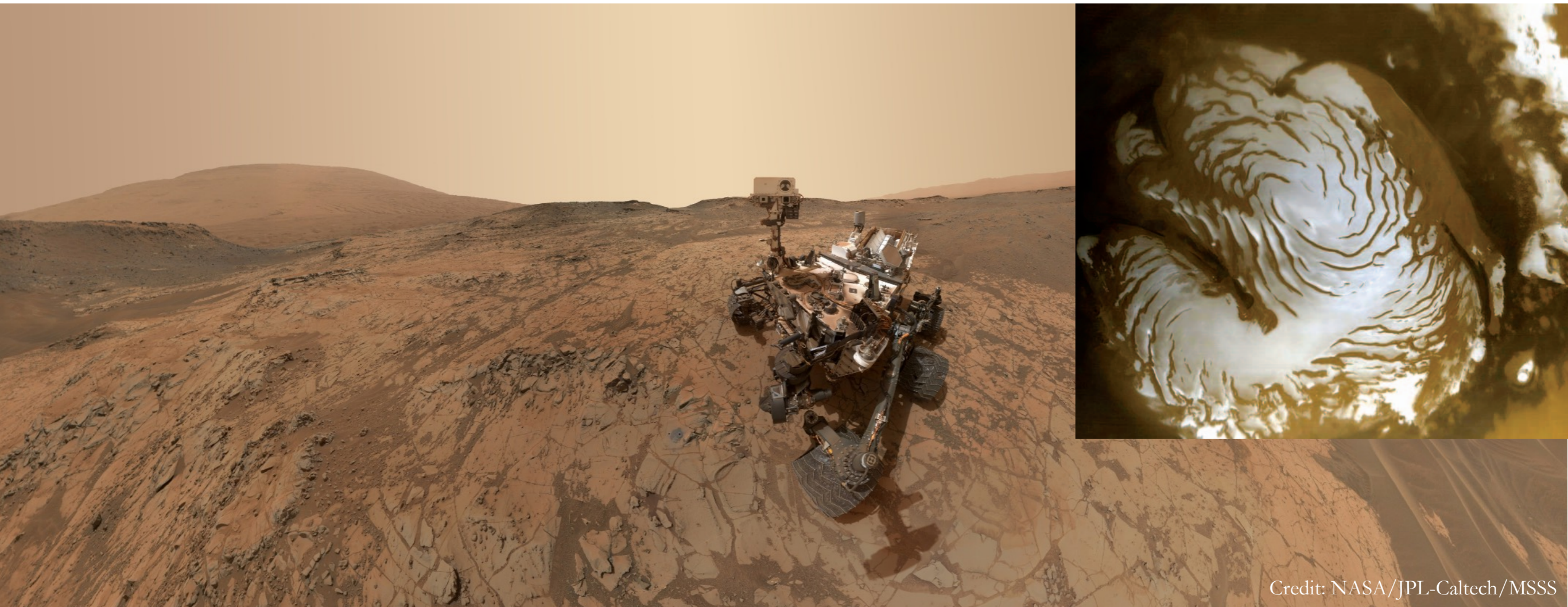
# 金星：乾燥した灼熱の惑星



探査機ベネラ13号が  
撮影した金星の地表 (credit: NASA)

- 平均気温 約 $470^{\circ}\text{C}$   $\leftrightarrow$  地球 約 $15^{\circ}\text{C}$
- **ぶ厚い $\text{CO}_2$ 大気** 約 93 気圧  $\rightarrow$  温室効果**強**
- 濃硫酸の雲に覆われている
- **乾燥した地表**

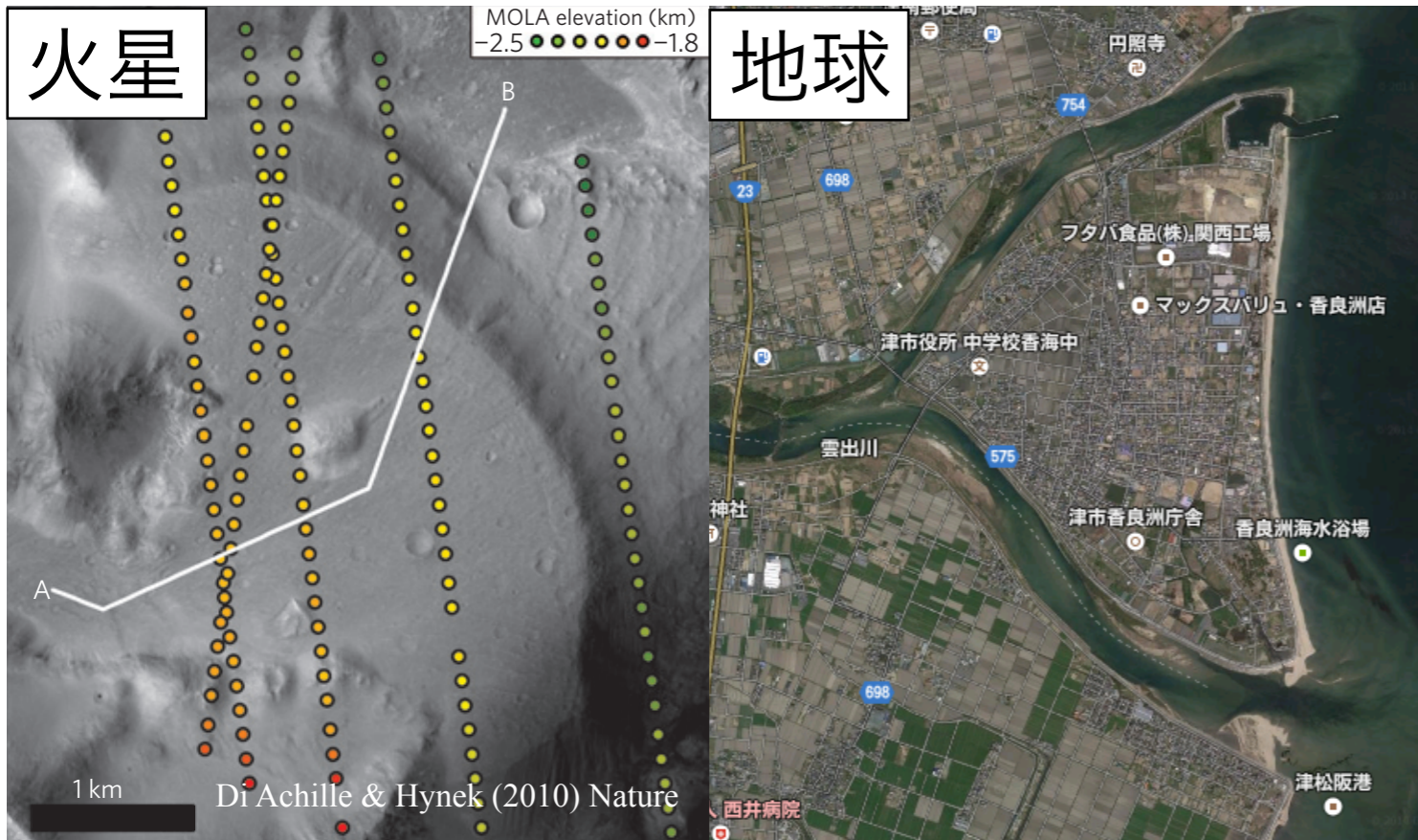
# 火星：冷たく乾燥した惑星



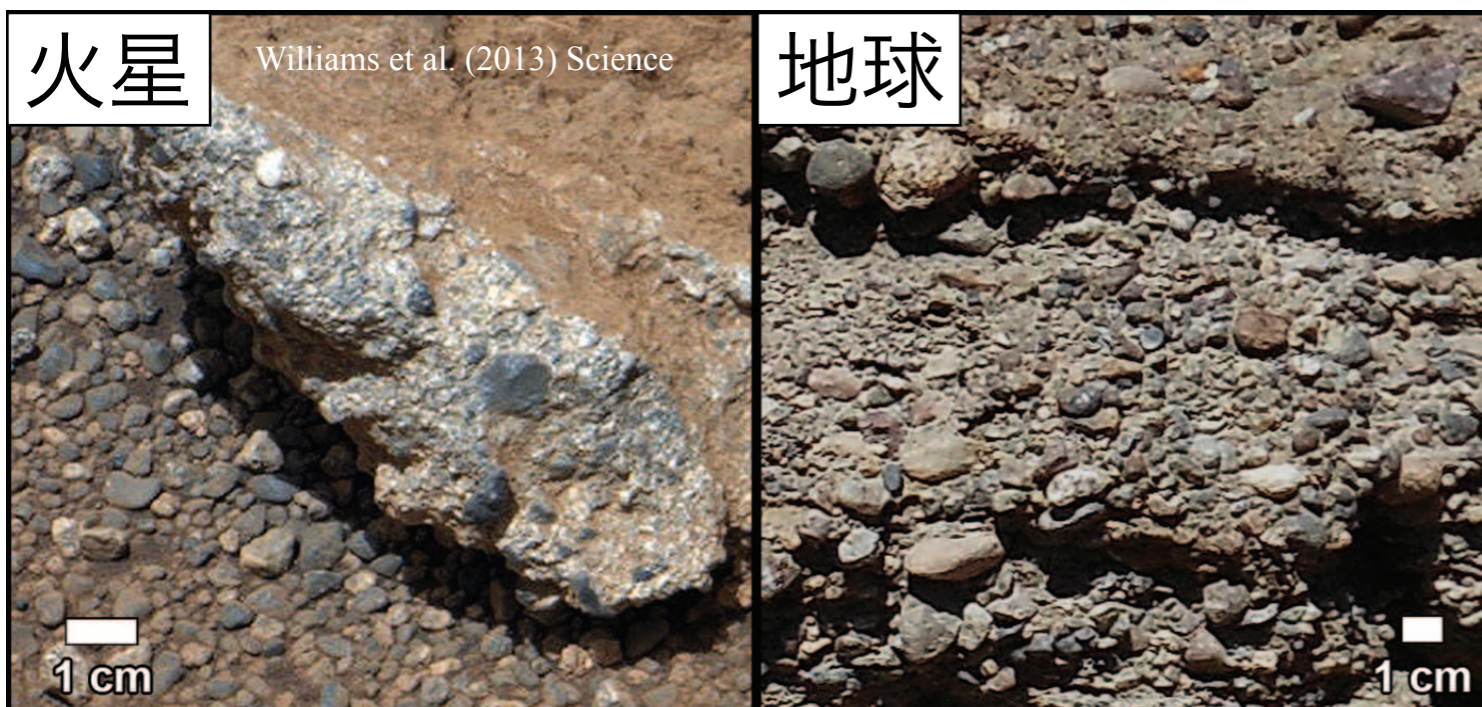
Credit: NASA/JPL-Caltech/MSSS

- 平均気温 約 $-60^{\circ}\text{C}$   $\leftrightarrow$  地球 約 $15^{\circ}\text{C}$
- **希薄な $\text{CO}_2$ 大気** 約 0.006 気圧  $\rightarrow$  温室効果弱
- 乾燥した地表, **北極・南極に僅かな氷**があるのみ  
全球平均 20 mの海に相当  $\leftrightarrow$  地球 約 3 km

# 火星の水の痕跡



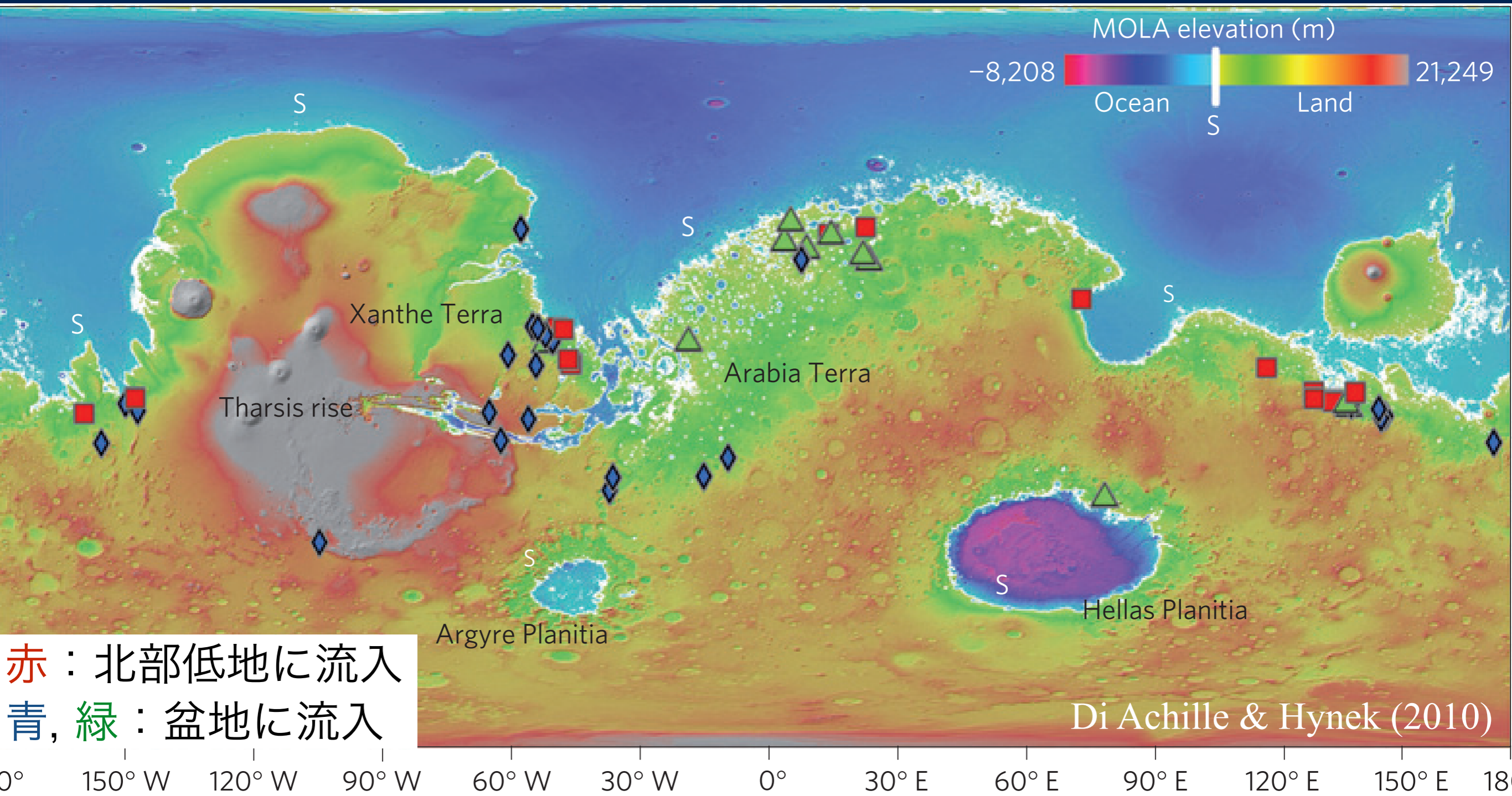
- 数多くの火星探査
  - Mars Global Surveyor, Curiosity, ...
- 水に関連した地形の発見
  - 溪谷, 三角州
  - 角の取れた小石, 堆積岩



↔現在の火星は寒冷  
平均気温  $>0^{\circ}\text{C}$ とするには  
数気圧の $\text{CO}_2$ 大気が必要



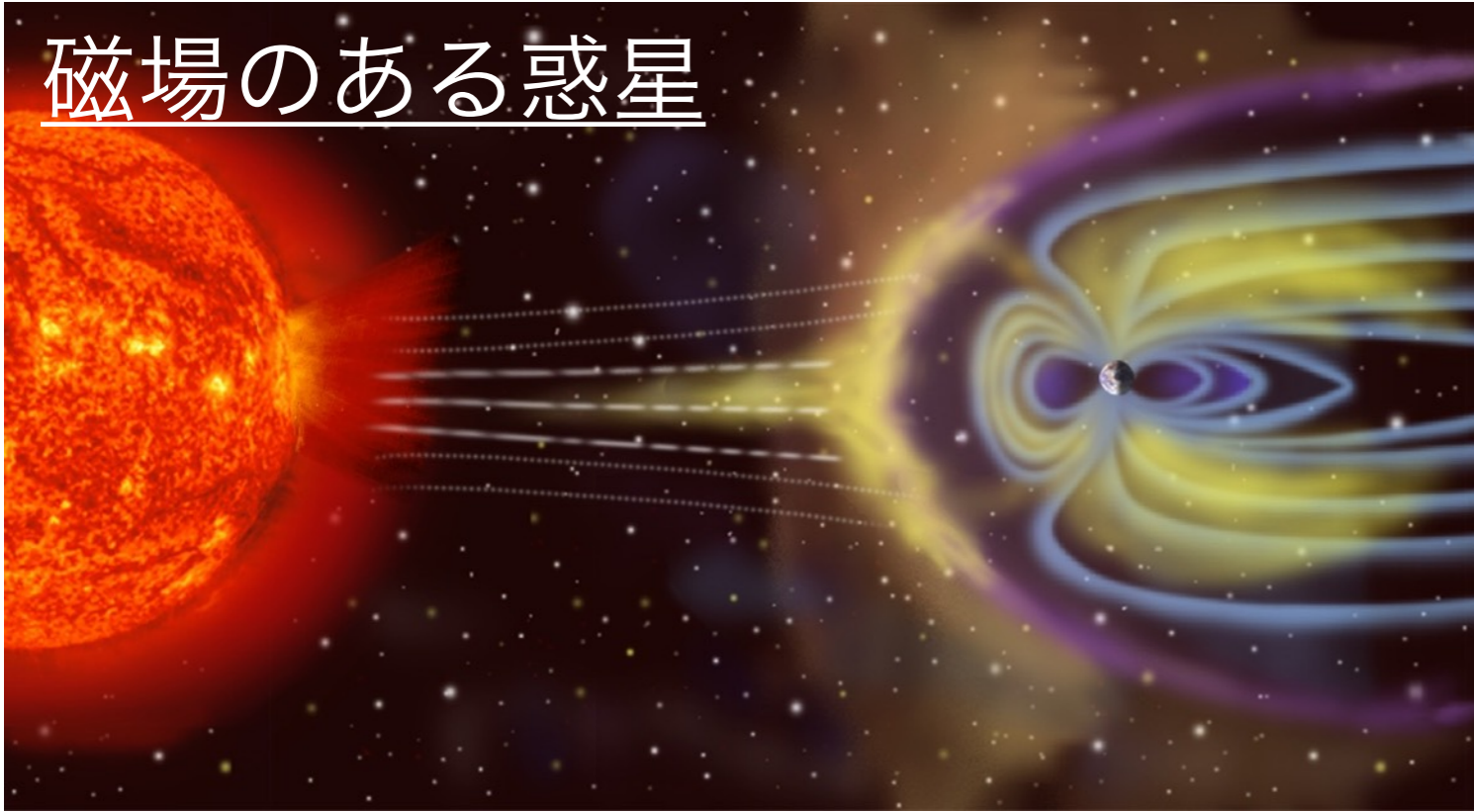
# 火星の三角州地形の分布



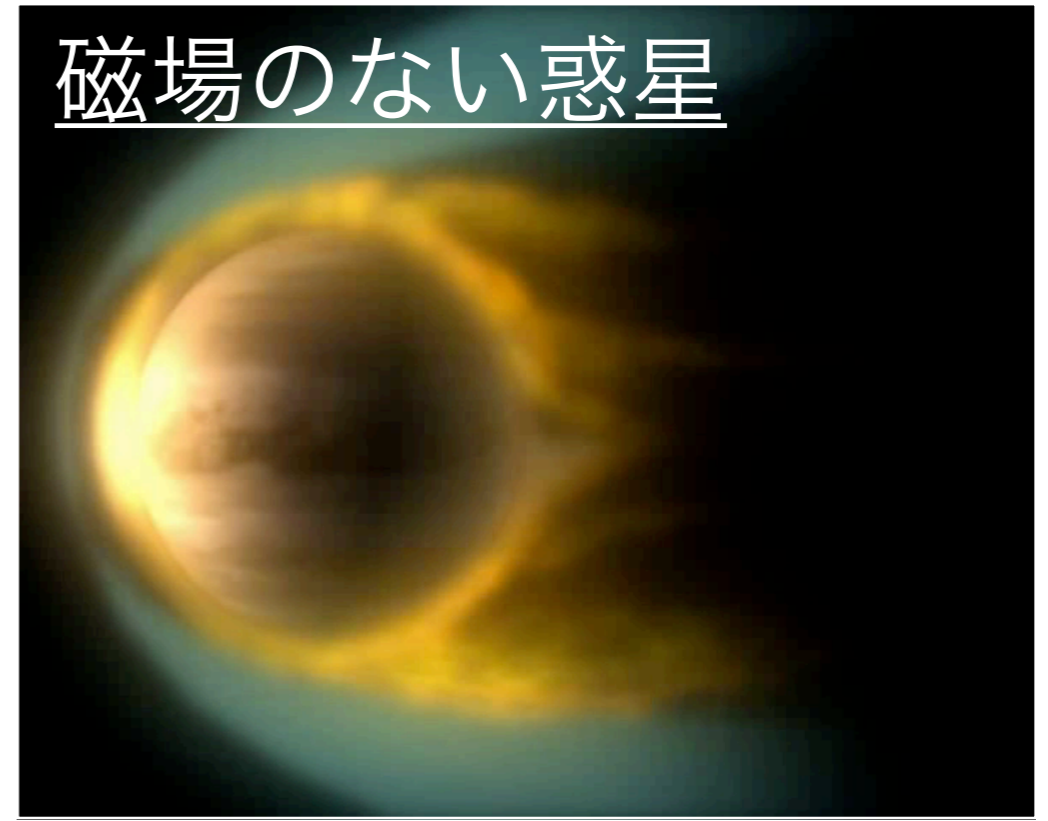
三角州は北部低地を取り囲むように存在 ⇒ かつての海？

# 太陽活動による大気の流出

磁場のある惑星



磁場のない惑星

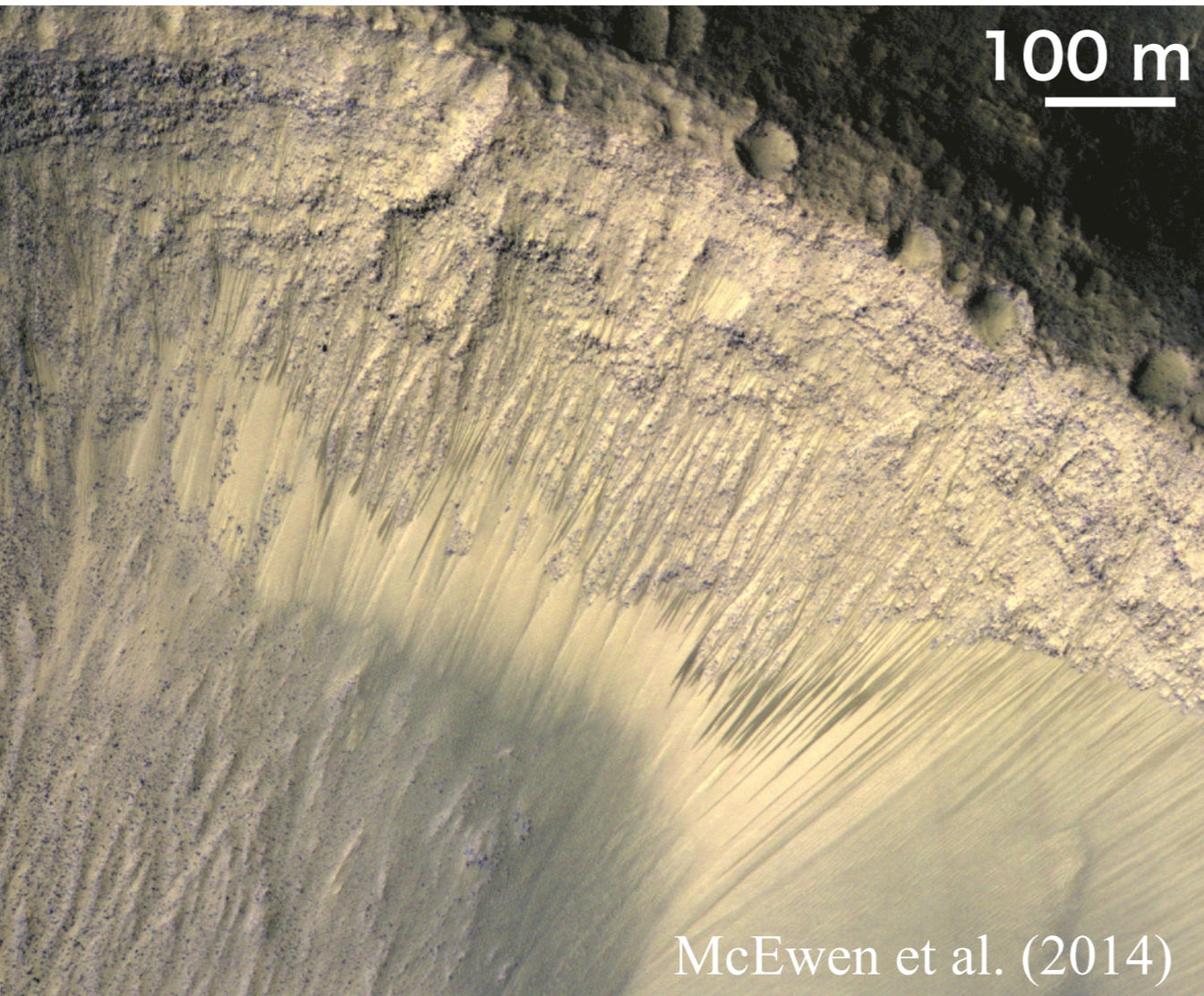


**大気散逸**：極端紫外線放射, 太陽風によって上層大気が流出

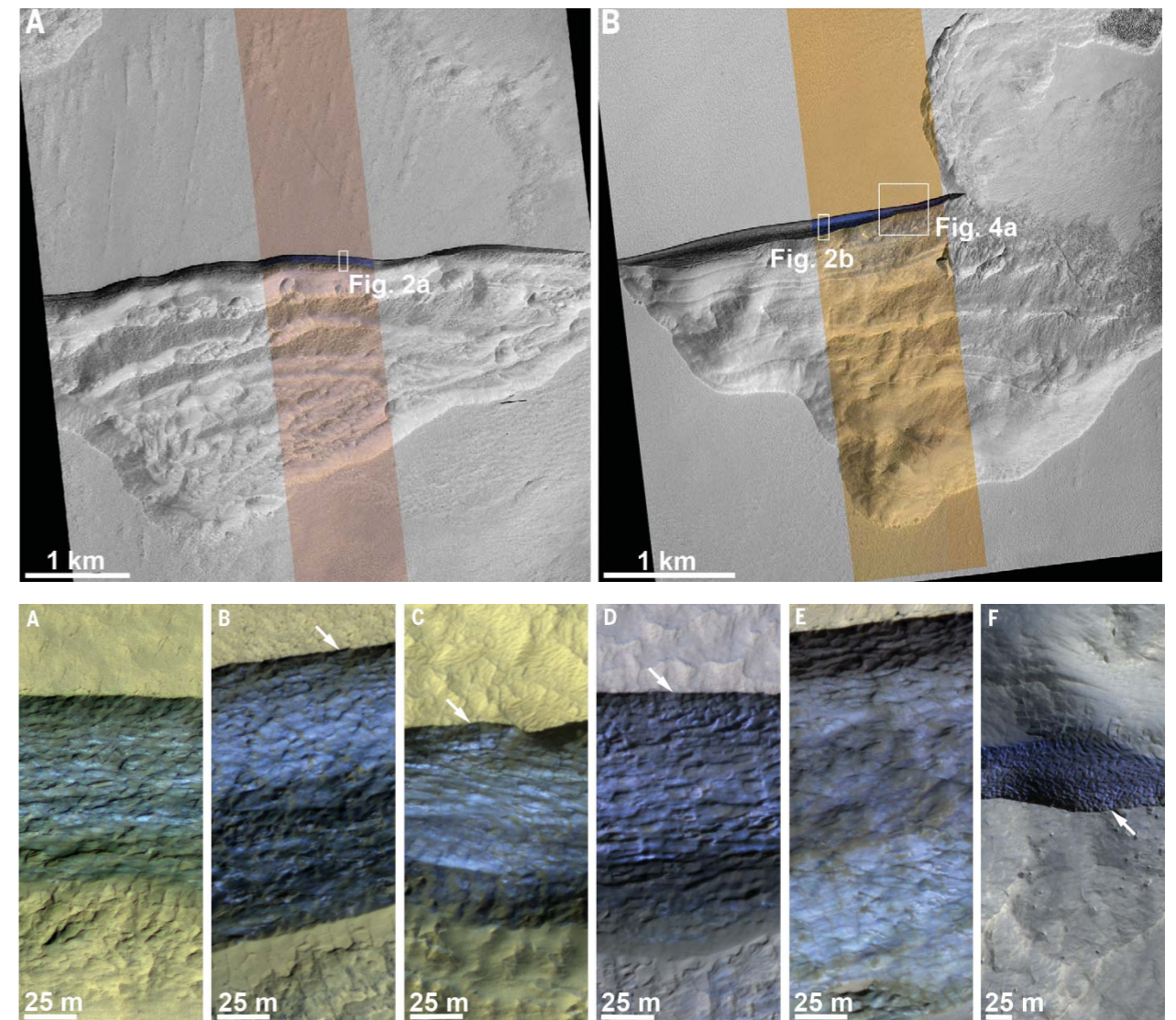
- 磁場がある(地球) ⇒ 太陽風が侵入しない**磁気圏**を持つ
- 磁場がない(火星, 金星) ⇒ 太陽風が大気に影響
- 地球磁気圏：地球半径の約 11 倍
- ↔ 金星・火星の電離圏界面：惑星半径の1/10以下(数100 km)

# 火星の水の行方

## 春夏に現れる流水(?)地形



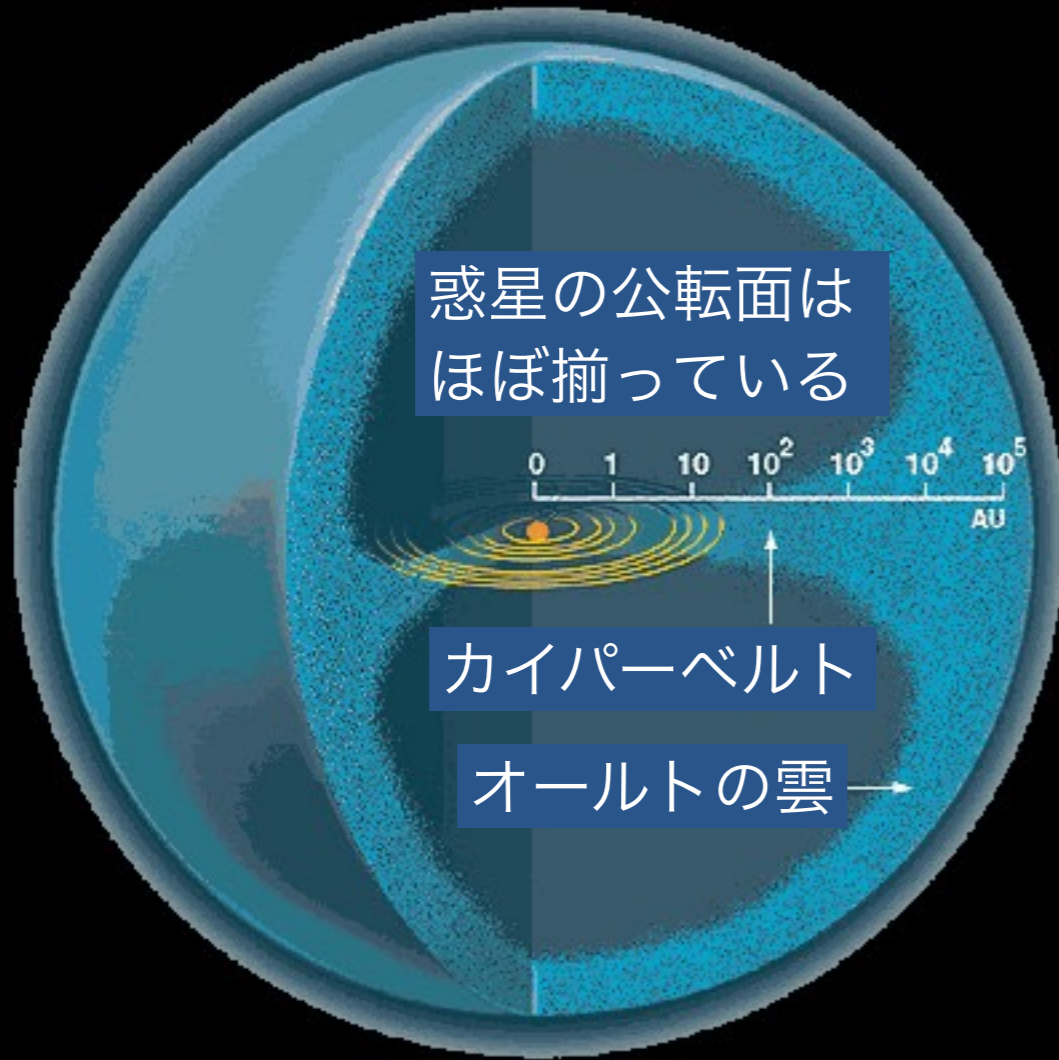
## 急斜面に露出した地下氷



Dundas et al. (2018)

- 火星の水の一部は宇宙空間へ流出
- 極冠に加えて、低中緯度に地下氷層があるかもしれない

# 太陽系外縁天体



冥王星  
半径1,188 km

2014 MU<sub>69</sub>  
長径31.7 km

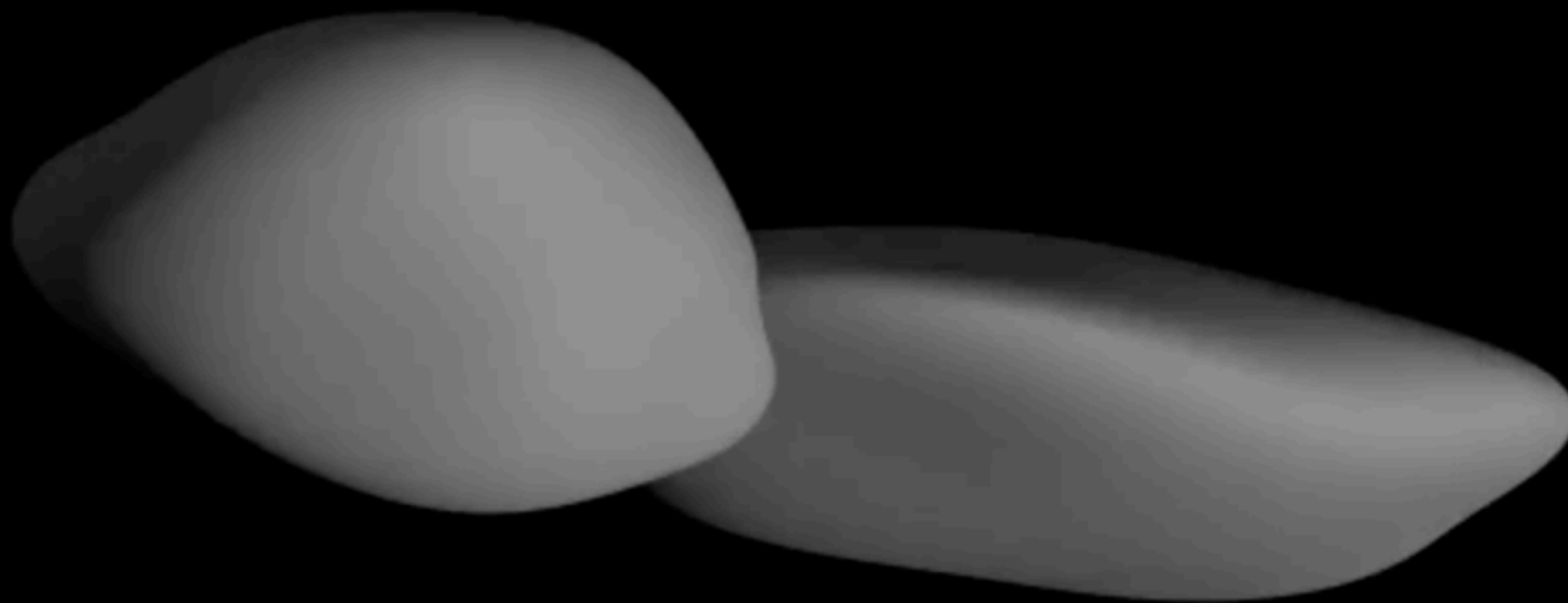


探査機  
New Horizons  
が撮影



- 海王星より遠くにある小天体群
- カイパーベルト, オールトの雲(長周期彗星の起源)など
- 1000個以上見つかった



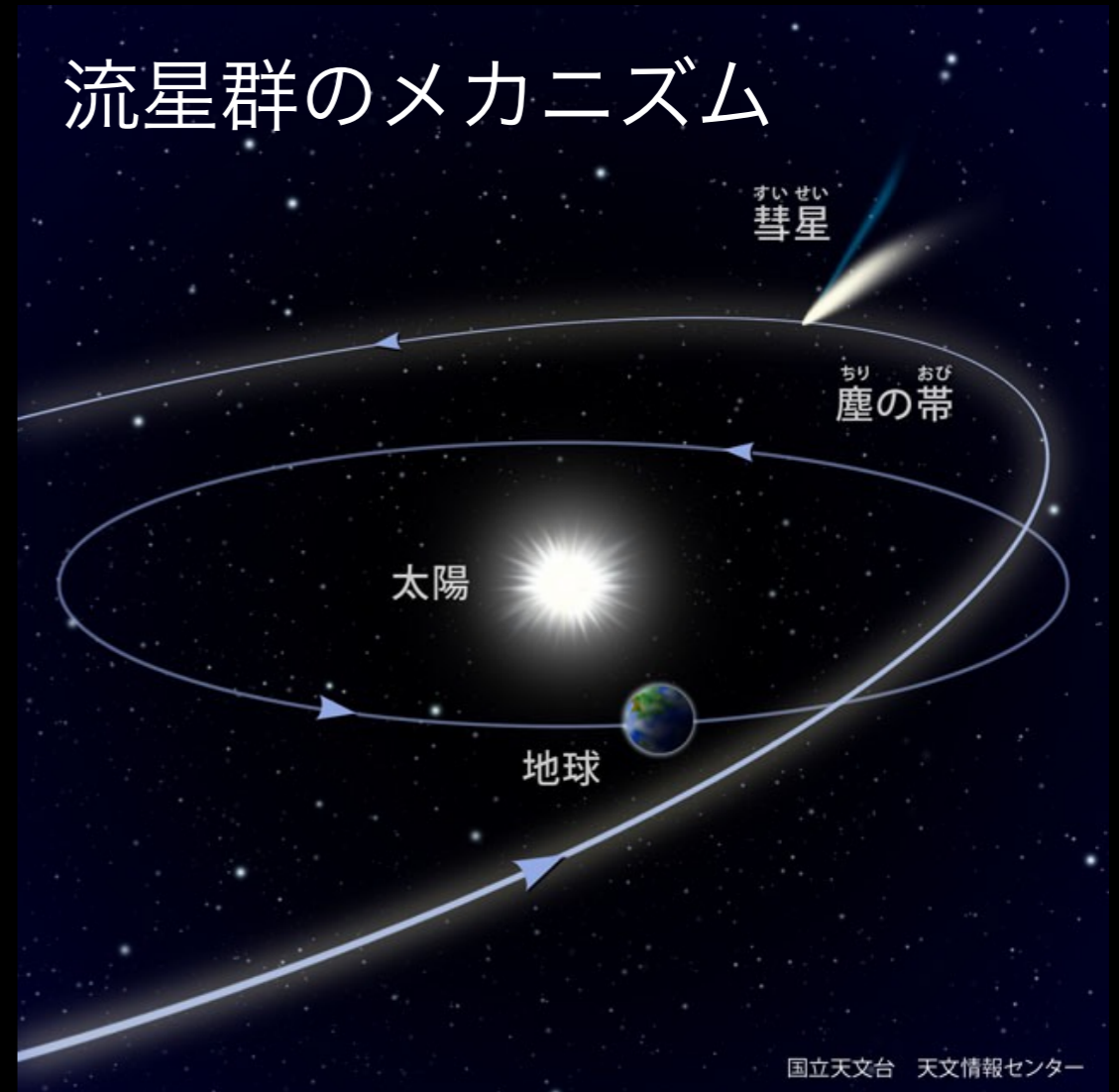


# 彗星



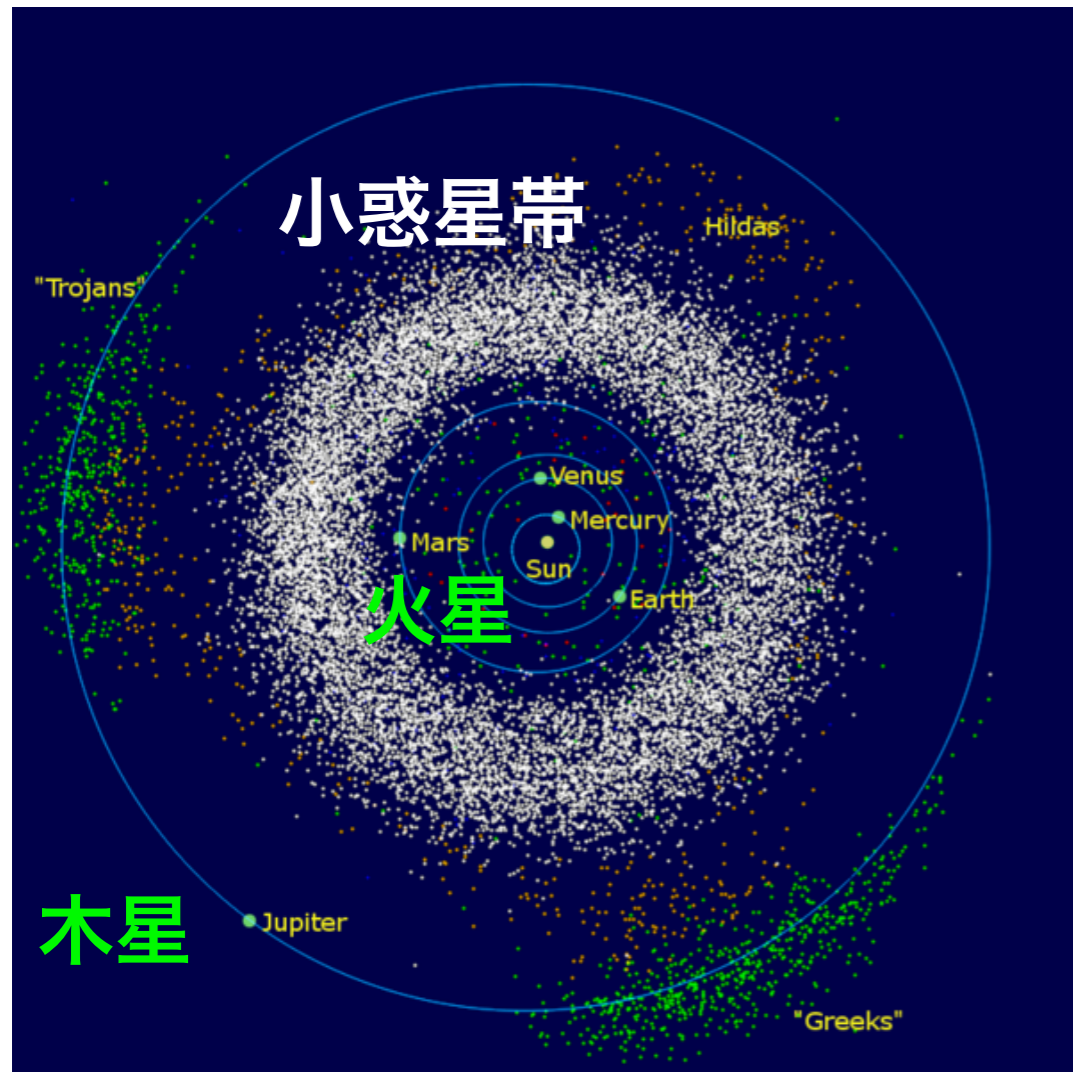
ヘールボップ彗星(1997年)

<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Halebopp031197.jpg>



- 太陽の影響で塵やガスを放出する, 氷と岩石のかたまり
- 太陽系形成期に氷惑星になり損ねた天体
- 地球型惑星に水や有機物をもたらした? (否定的な意見もある)

# 小惑星帯



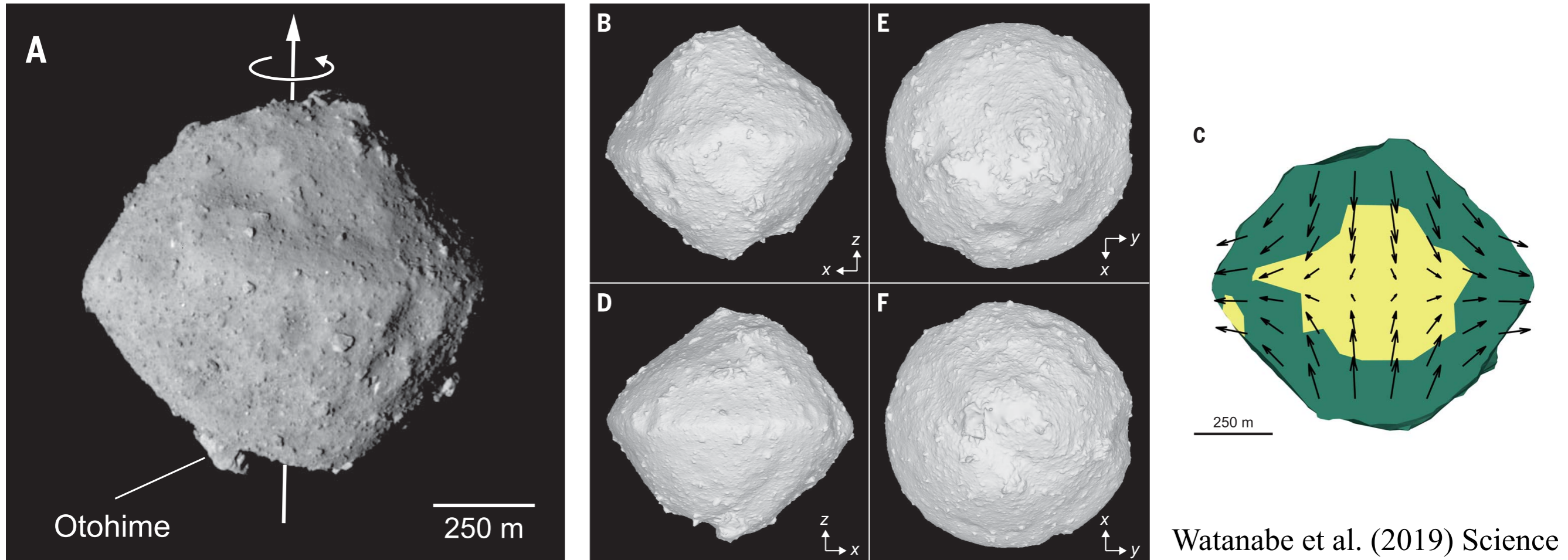
探査機 Dawn が撮影

- 火星と木星の間にある小惑星群
- 1km以上のものは約100万體。総質量は地球の約 3000 分の1
- 水や有機物に富んでいるものも (炭素質コンドライト隕石の起源)  
⇒ 地球型惑星への揮発性元素(水・大気・有機物のもと)供給？





# はやぶさ2の捉えた小惑星リュウグウ



Watanabe et al. (2019) Science

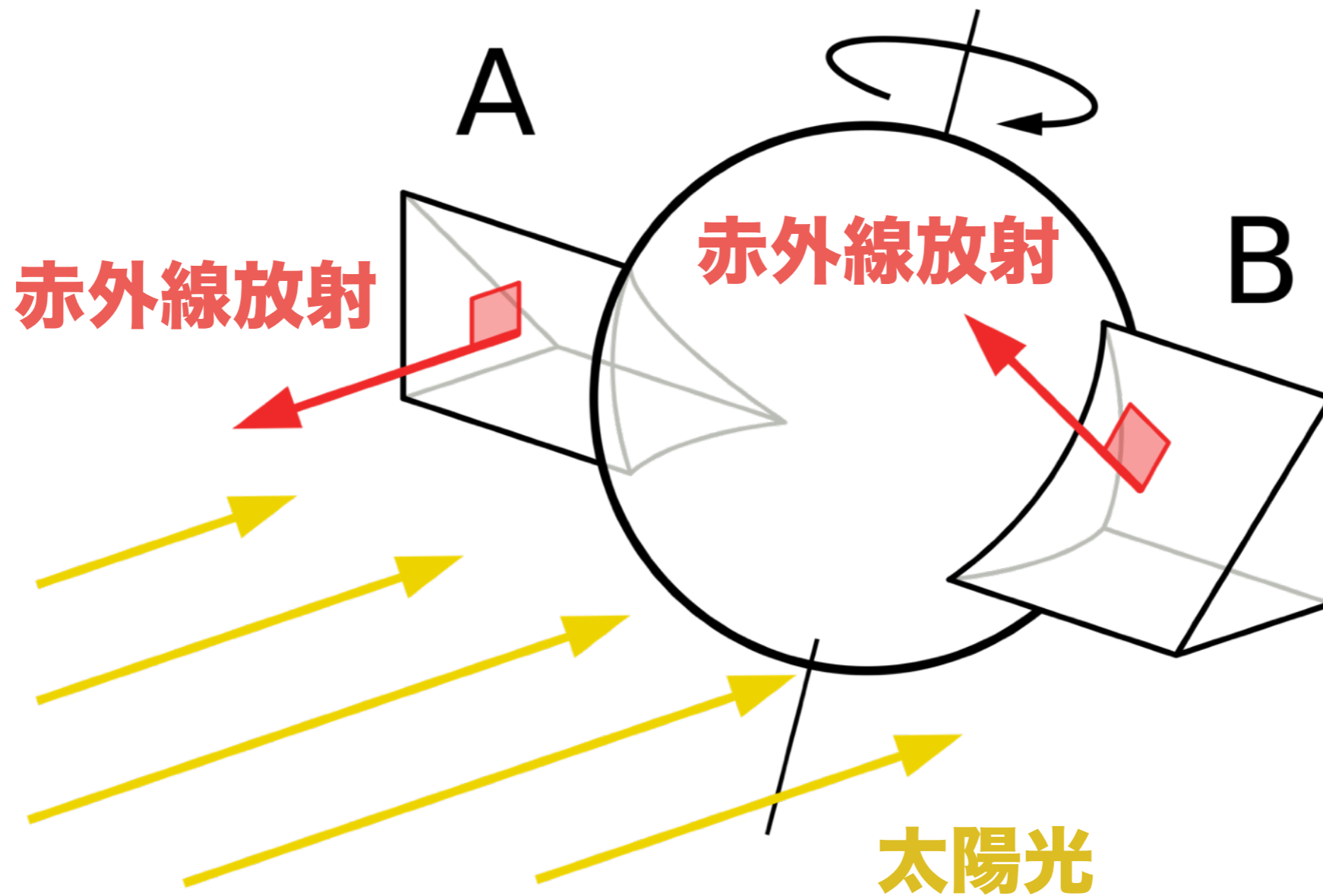
## ラブルパイル(破砕集積)天体

- ・ 密度  $1.19 \pm 0.02 \text{ g cm}^{-3}$  ( $\leftrightarrow$  岩石 約  $3 \text{ g cm}^{-3}$ )  $\Rightarrow$  空隙が多い

## コマ型の形状

- ・ (過去の)高速自転による変形
- ・ 赤道リッジ(尾根)は“新鮮”(宇宙風化していない)?

# YORP効果による自転速度変化

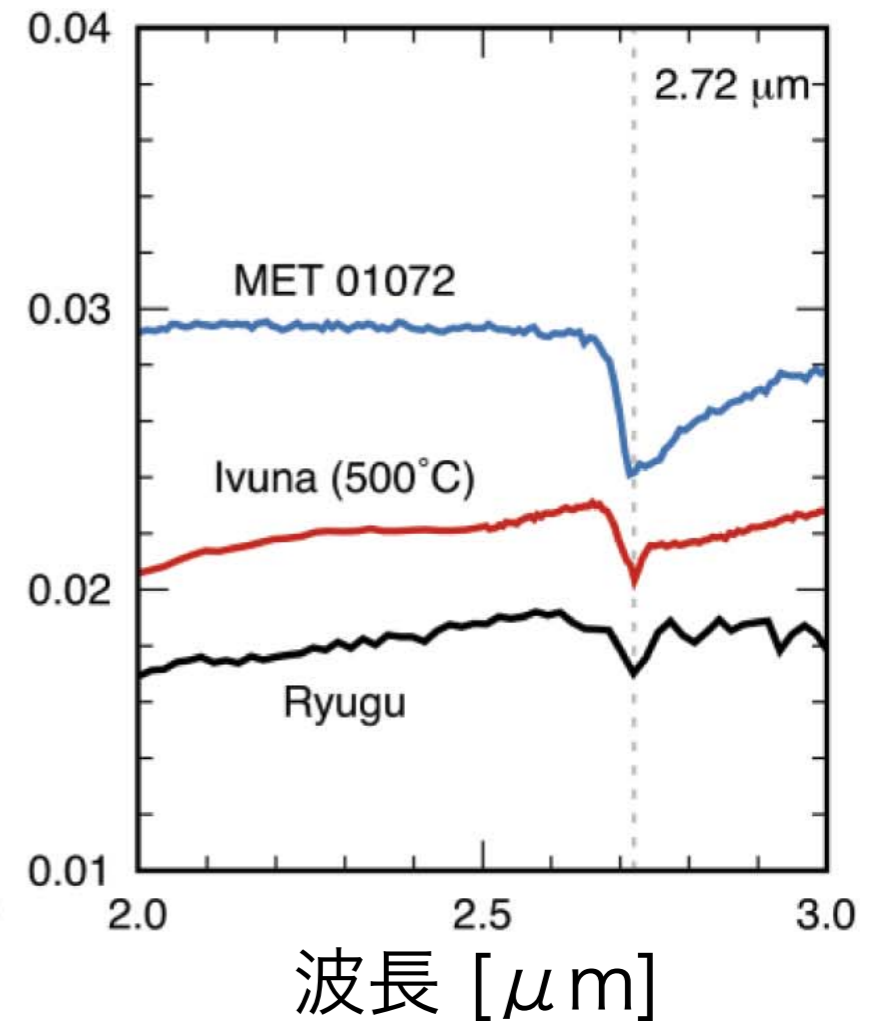
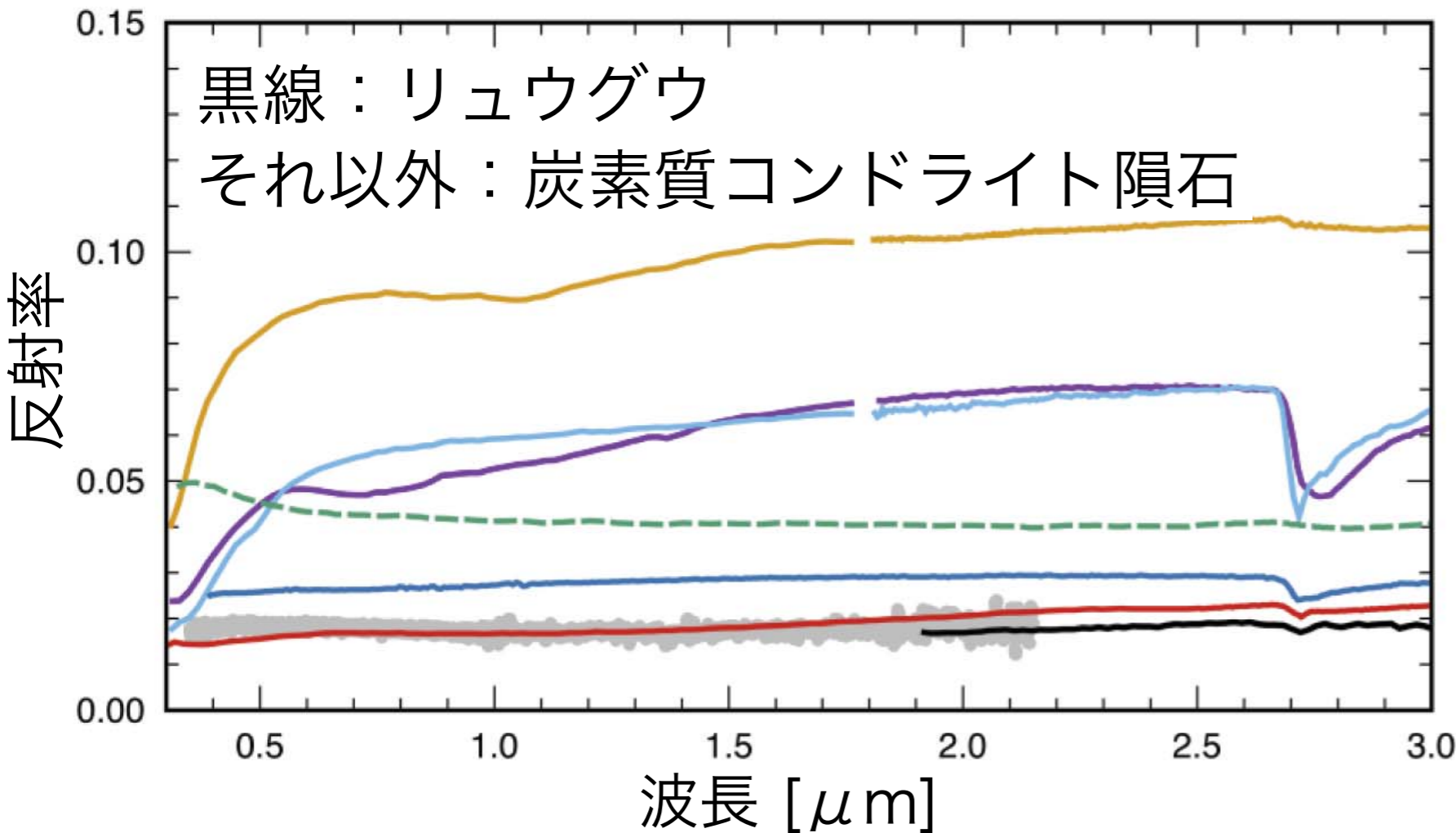


[https://en.wikipedia.org/wiki/Yarkovsky-O'Keefe-Radzievskii-Paddack\\_effect](https://en.wikipedia.org/wiki/Yarkovsky-O'Keefe-Radzievskii-Paddack_effect)

## Yarkovsky-O'Keefe-Radzievskii-Paddack (YOAP) 効果

いびつな形状の小天体は太陽光入射と天体の熱放射のアンバランスによって生じるトルクにより、自転速度や軸の向きがゆっくりと変化する

# はやぶさ2の近赤外スペクトル観測



Kitazato et al. (2019) Science

## 水(含水鉱物)の証拠

- ・ 2.7  $\mu\text{m}$ 吸収帯  $\Rightarrow$  岩石と水の化学反応でできた含水鉱物

## 炭素が豊富にある可能性

- ・ 反射率 約2% は炭素質コンドライト隕石よりさらに暗い
- ・ 炭素(有機物)が豊富で暗く見えている可能性



約13000 km

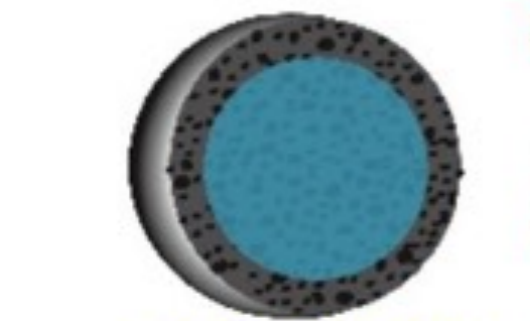


約0.9 km

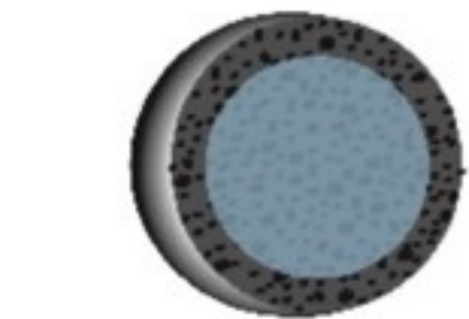
# リュウグウ形成の仮説

母天体候補天体

45.6億年前



水-岩石反応



少しだけ  
水-岩石反応

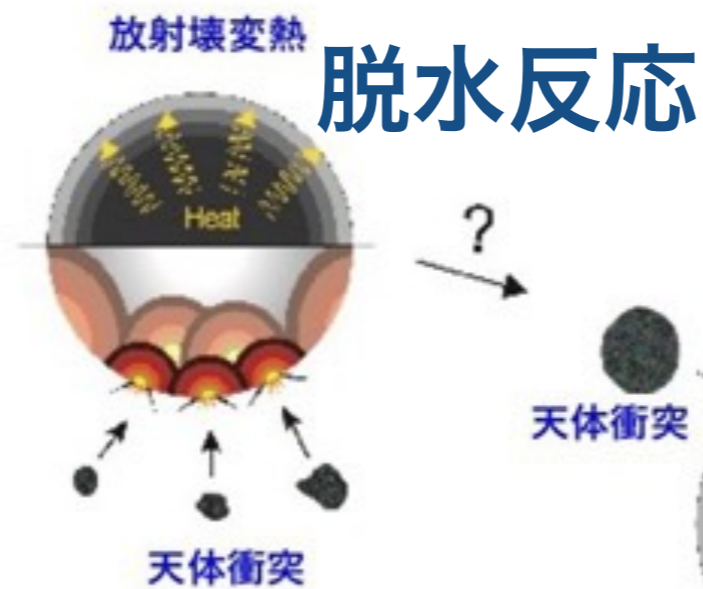
リュウグウ

シナリオ1  
内部加熱  
放射壊変熱  
脱水反応

シナリオ2  
衝突加熱

部分的な脱水

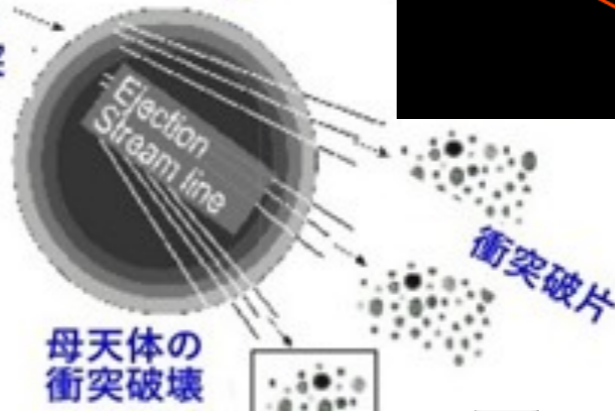
シナリオ3  
低度の水質変成



天体衝突

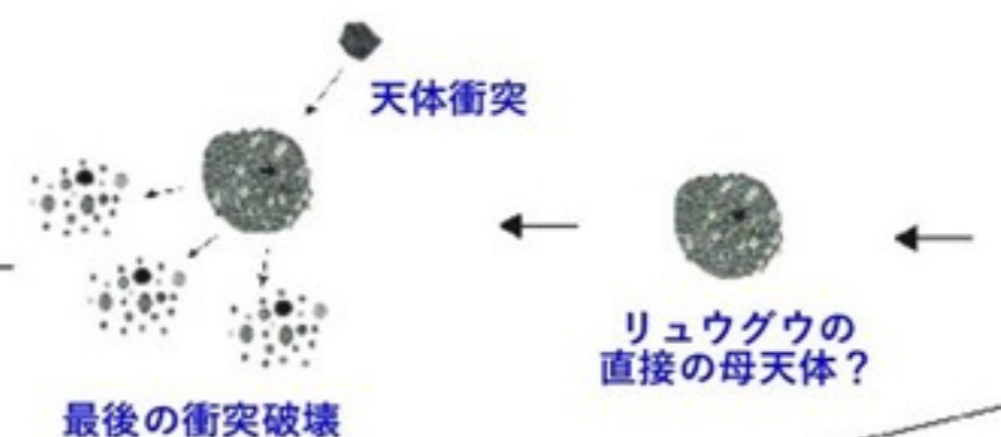
天体衝突

?



母天体の衝突破壊

母天体の破壊



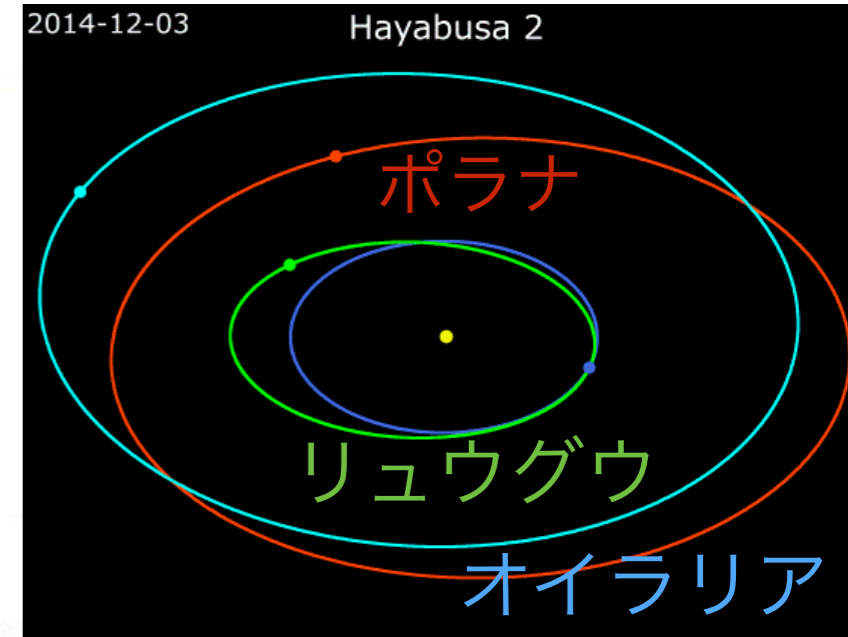
?

?

リュウグウの  
直接の母天体?

最後の衝突破壊

ラブルパイル天体形成



Sugita et al. (2019) Science, JAXAプレスリリース資料

[http://www.jaxa.jp/press/2019/03/20190320a\\_j.html](http://www.jaxa.jp/press/2019/03/20190320a_j.html)

# サンプル採取

- リュウグウ表面は岩だらけ
- 安全性を重視した候補地点選定  
半径 100 m → 3 m に予定変更
- 2/21-22にタッチダウン成功

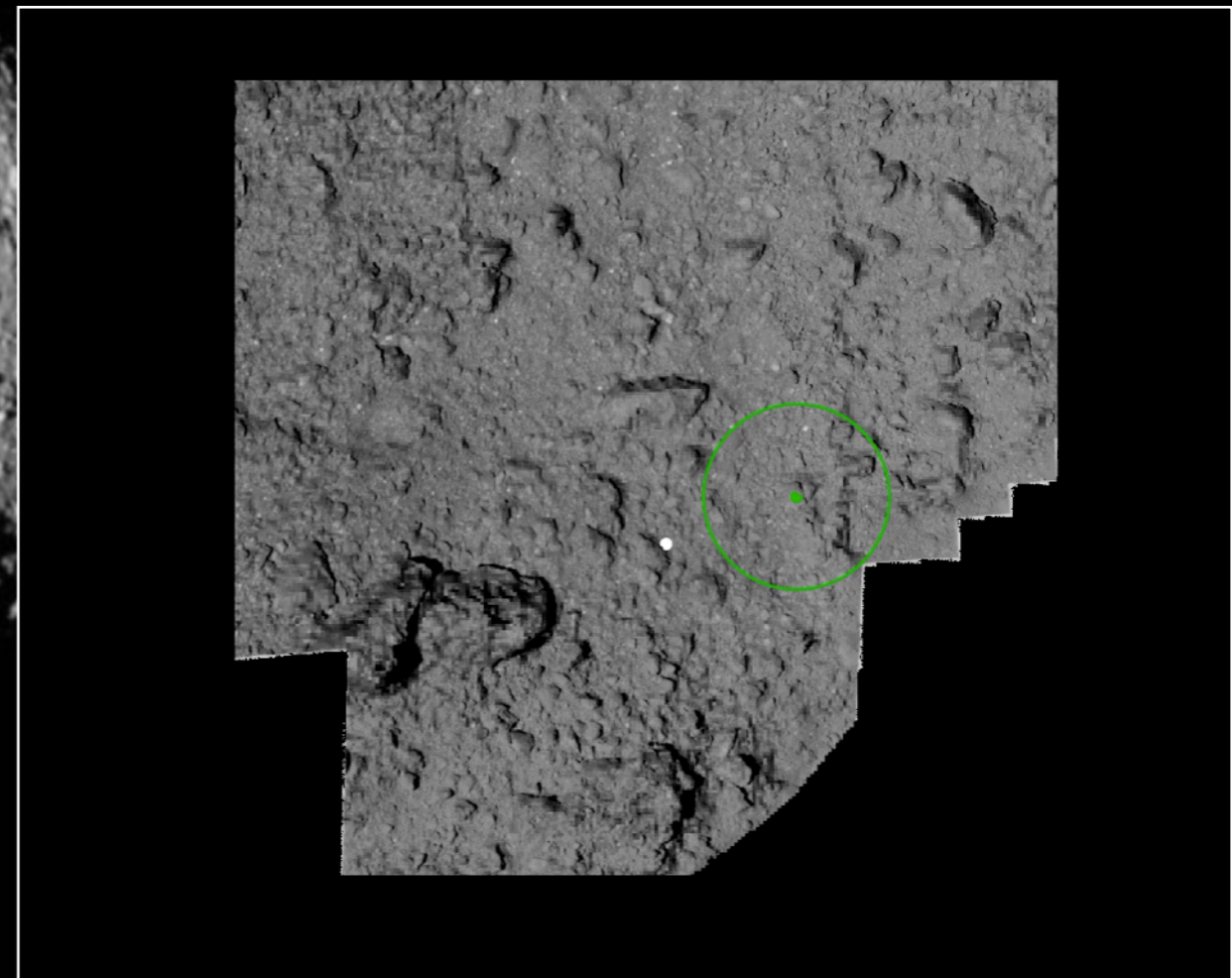
着陸候補地域  
約100 m

L07

L08

M04

半径約 3 mのタッチダウン地点周辺

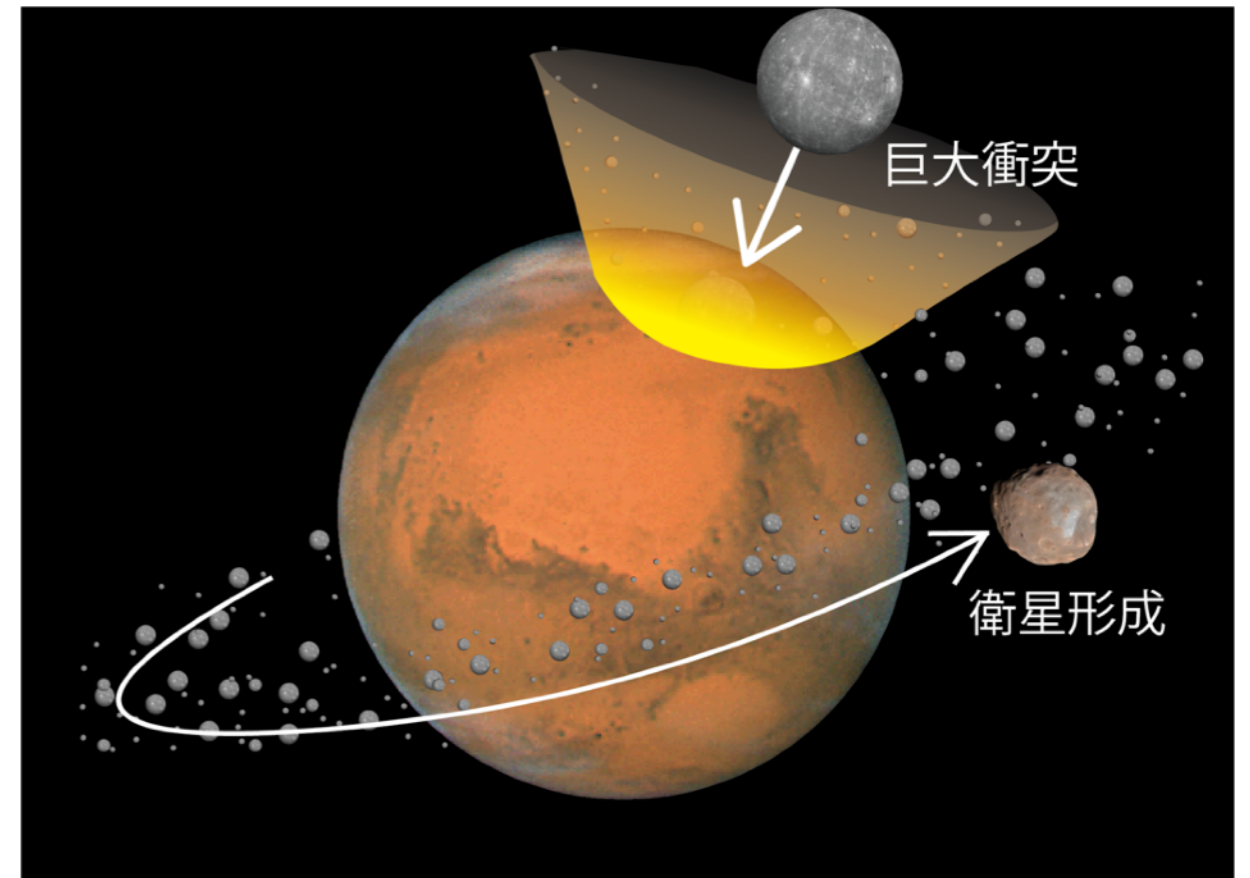
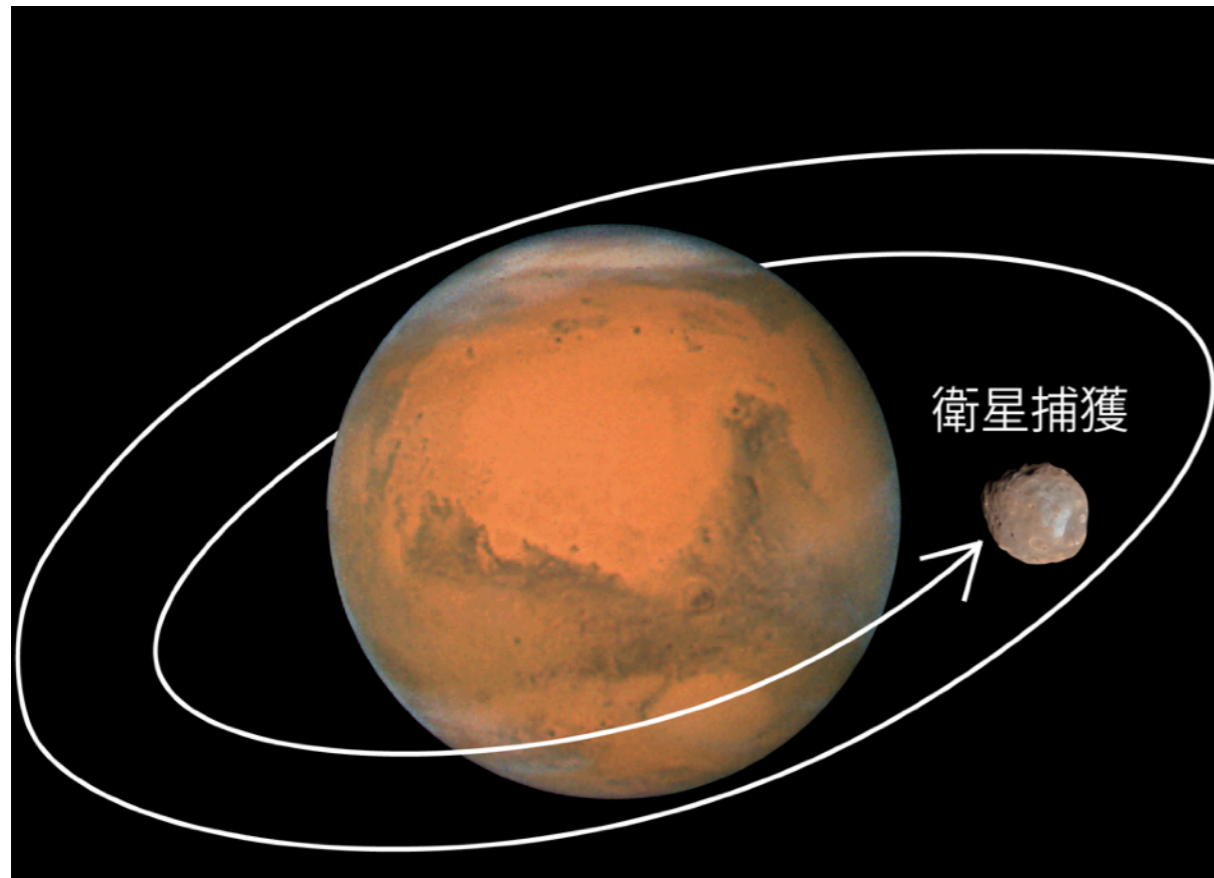






# 火星衛星サンプルリターン(MMX)計画

2つの衛星(フォボス, ダイモス)の起源の謎：捕獲 vs 衝突



- 2024年打ち上げ予定
- 火星衛星からサンプルを採取し、その起源を解明する
  - ⇒ 捕獲起源の場合、小惑星帯から天体がやってきた証拠
  - ⇒ 衝突起源の場合、火星物質も同時に採取できることになる
- 火星大気の詳細観測も行う

# まとめ

## 太陽 (Sun)

水素・ヘリウムが主成分。水素核融合 ⇒ 太陽放射, 太陽風

## 惑星 (Planets)

- **岩石惑星(地球型惑星)** : 岩石(地殻, マントル), 金属中心核
- **巨大ガス惑星** : 大部分が水素・ヘリウムガス, 中心核(岩石, 氷)
- **巨大氷惑星** : 水素・ヘリウムガス, 大部分が氷

## 準惑星 (Dwarf Planets)

- 冥王星, エリス, マケマケ, ハウメア, セレス

## 太陽系小天体 (Small Solar System Bodies)

- 小惑星, 彗星, 惑星間塵 (太陽系外縁天体, 小惑星帯)

## 地球型惑星の水・大気・有機物

- 揮発性元素に富んだ小惑星・彗星が起源
- 太陽活動などの影響で表層環境は時間進化

# 演習問題

1. 地球の表面は7割が海に覆われており、その平均深さは約4kmである。海水の総質量をkgの単位で求めよ。また地球総質量に占める海水の割合を求めよ(答えは有効数字1桁の精度とする)。
2. 地球の海水は、内部に水を含む多数の小惑星の衝突によって供給されたとする。これらの小惑星の含水率を10%とした時、小惑星の総質量をkgの単位で求めよ。また、この総質量はリュウグウ( $4.5 \times 10^{11}$  kg)何個分に相当するか(答えは有効数字1桁の精度とする)。