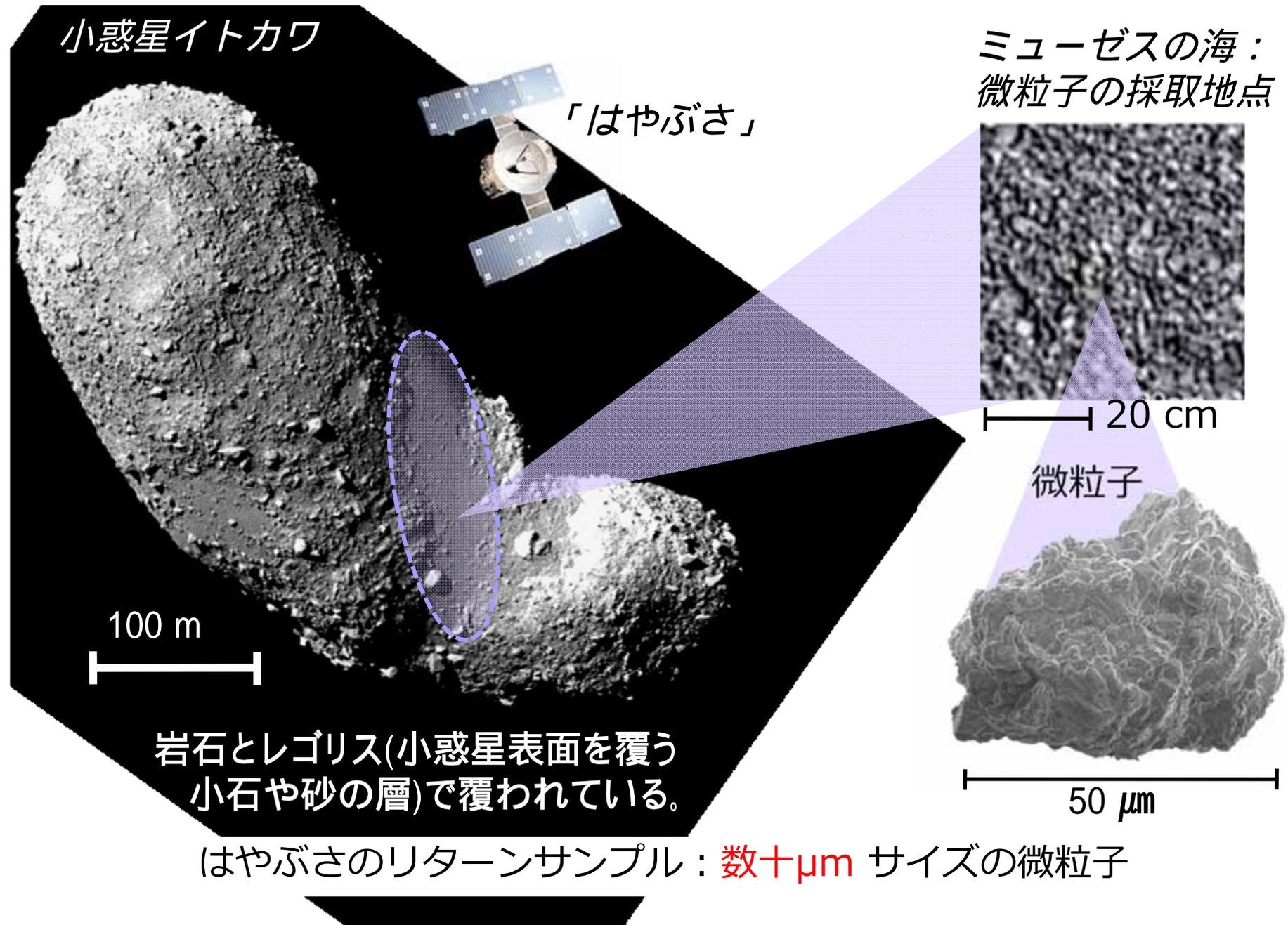


微粒子表面の模様に残る 小惑星イトカワの歴史

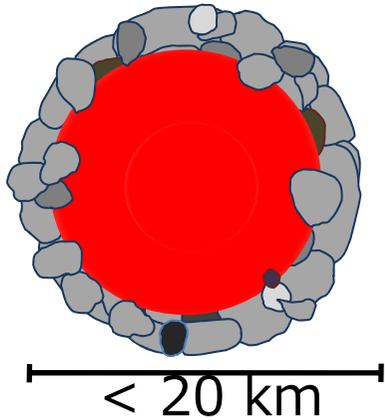
2016.6.22 地球外物質研究グループ
松本徹

研究背景：探査機はやぶさによる小惑星物質のサンプルリターン

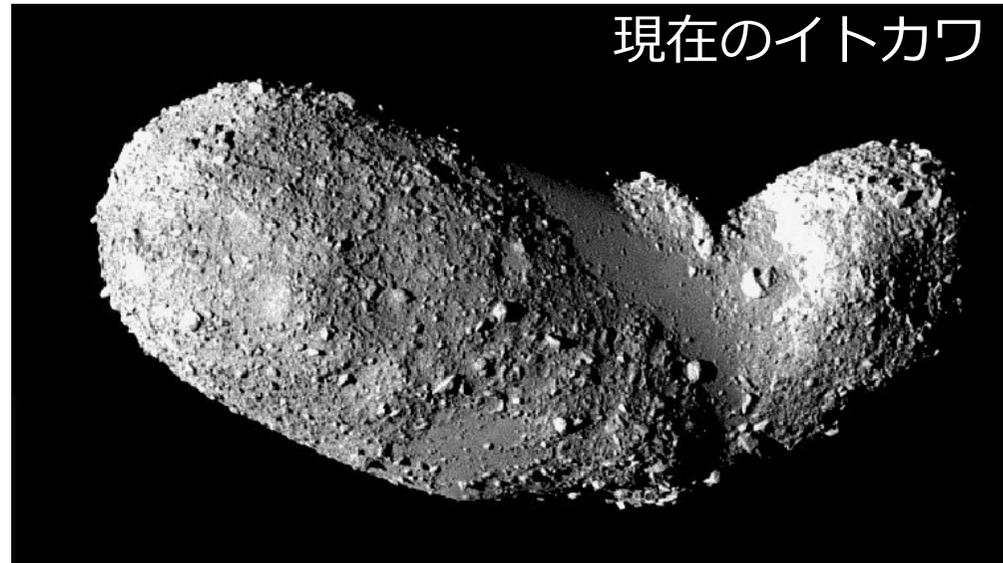


研究背景：小惑星イトカワの進化史

イトカワの母天体



母天体の破壊・破片の集積



母天体の破壊・破片の集積により、小惑星イトカワが形成
(Fujiwara et al., 2006; Nakamura et al., 2011; Yurimoto et al., 2011 など)

研究背景：小惑星イトカワの宇宙風化

小惑星イトカワ

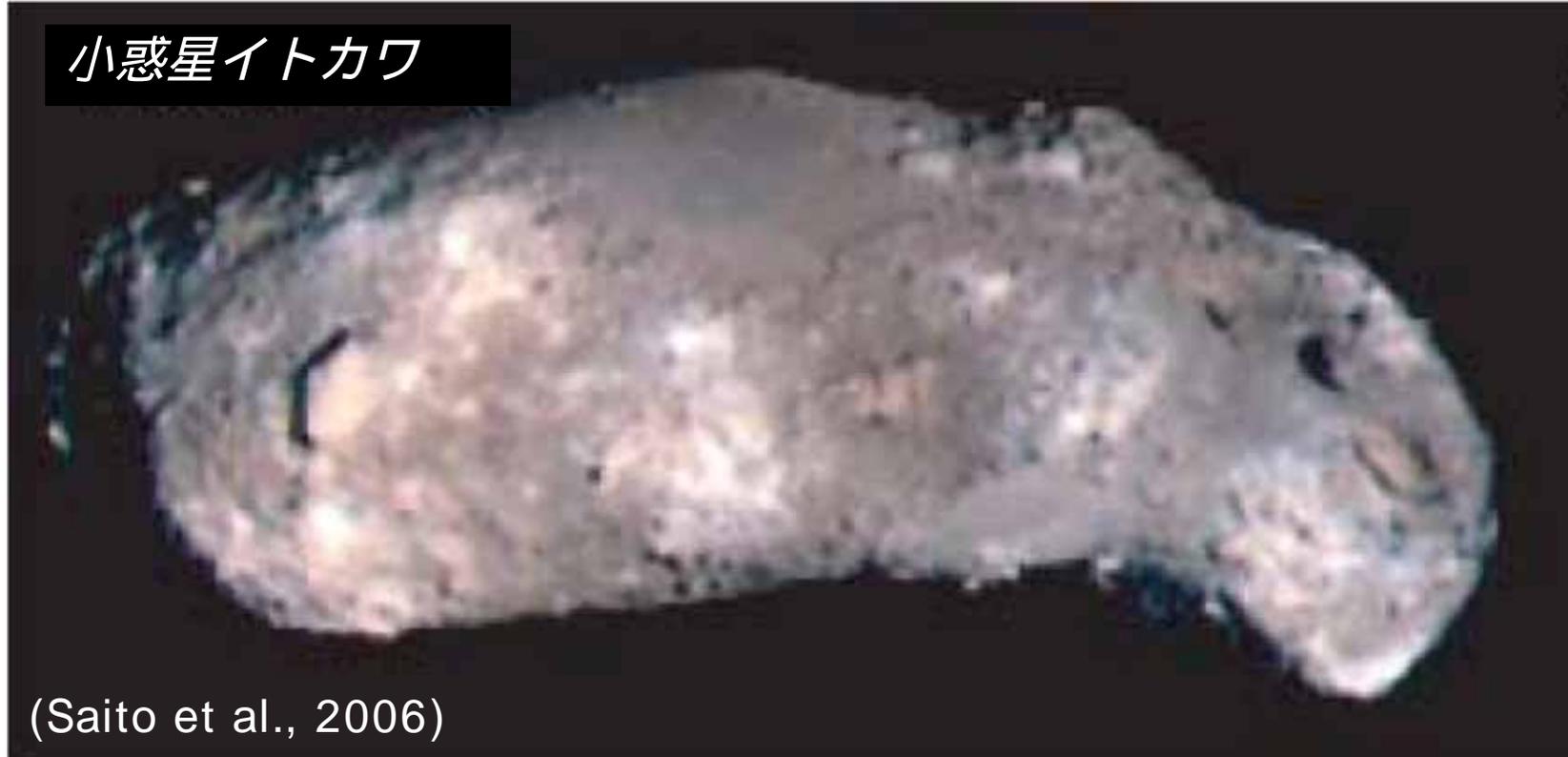


(Saito et al., 2006)

イトカワ表面の色が変化する**宇宙風化**という現象が進行。
(Abe et al., 2006; Hiroi et al., 2006; Ishiguro et al., 2007, 2014)

研究背景：小惑星イトカワの宇宙風化

小惑星イトカワ



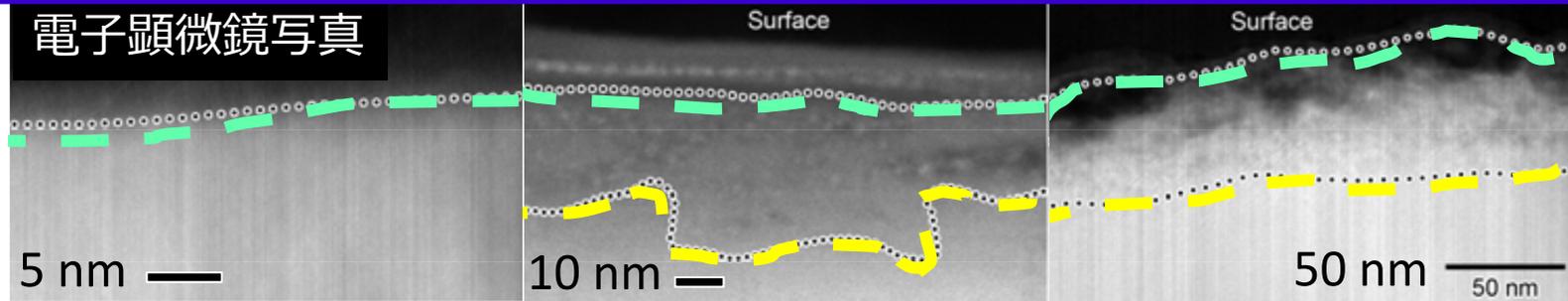
(Saito et al., 2006)

- 表面の明るさの違い → 宇宙風化の進行度の違い
(Abe et al., 2006; Hiroi et al., 2006; Ishiguro et al., 2007, 2014)
- 地滑り等で新鮮な表面が露出される効果で明るさの違いが生じる。
(Ishiguro, et al., 2007)。

研究背景：イトカワ微粒子表面の宇宙風化リム

(Noguchi et. al., 2014)

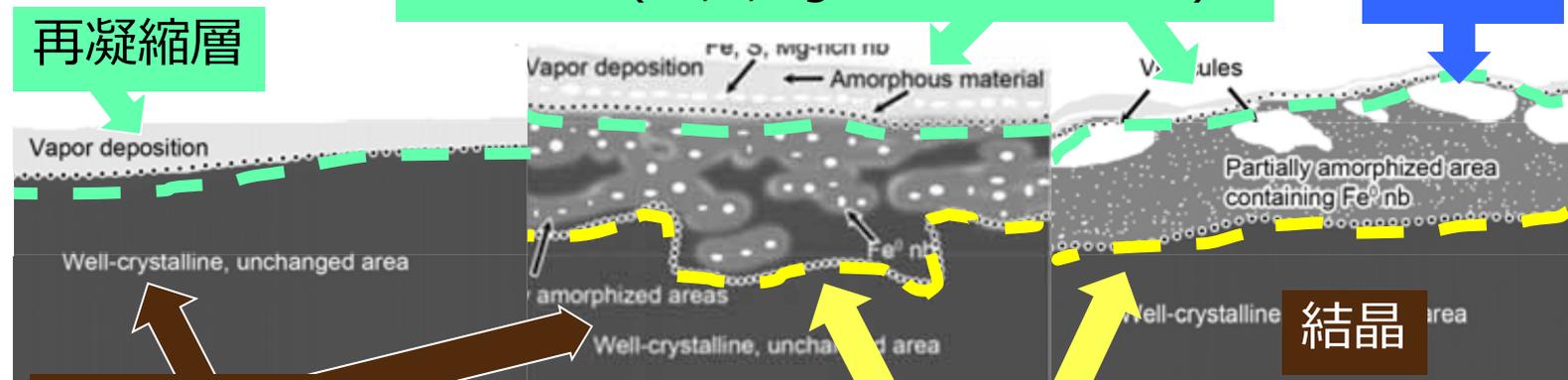
太陽風の照射によるリムの成長



再凝縮層

再凝縮層(Fe,S,Mg-rich 粒子を含む)

泡構造



結晶の領域

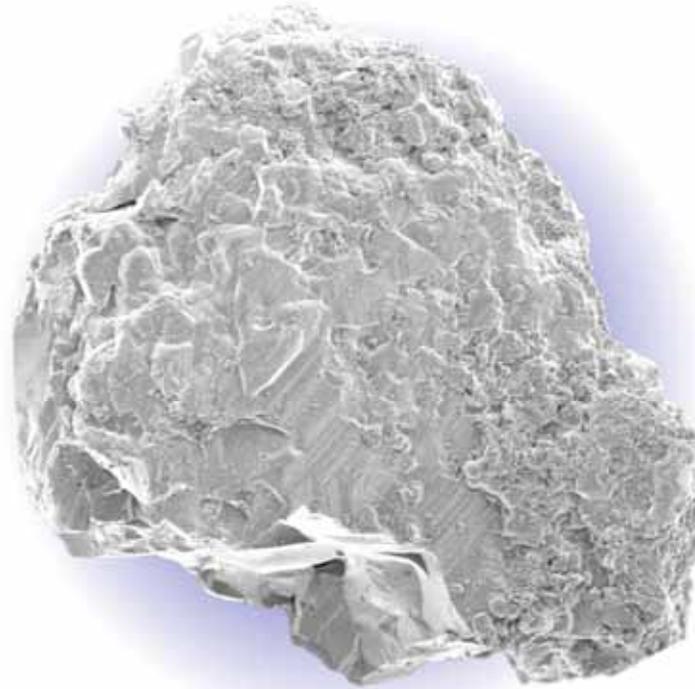
結晶

部分的に結晶構造が壊れた層。鉄のナノ粒子を含む。

- ・宇宙風化リム: **主に太陽風の照射**で結晶が壊れた(非晶質の)構造。微粒子表面の数十nmまでの深さに見られる。
- ・小惑星の色の変化を引き起こす、ナノサイズの鉄も含む。

微粒子表面の模様に残る 小惑星イトカワの歴史

松本徹

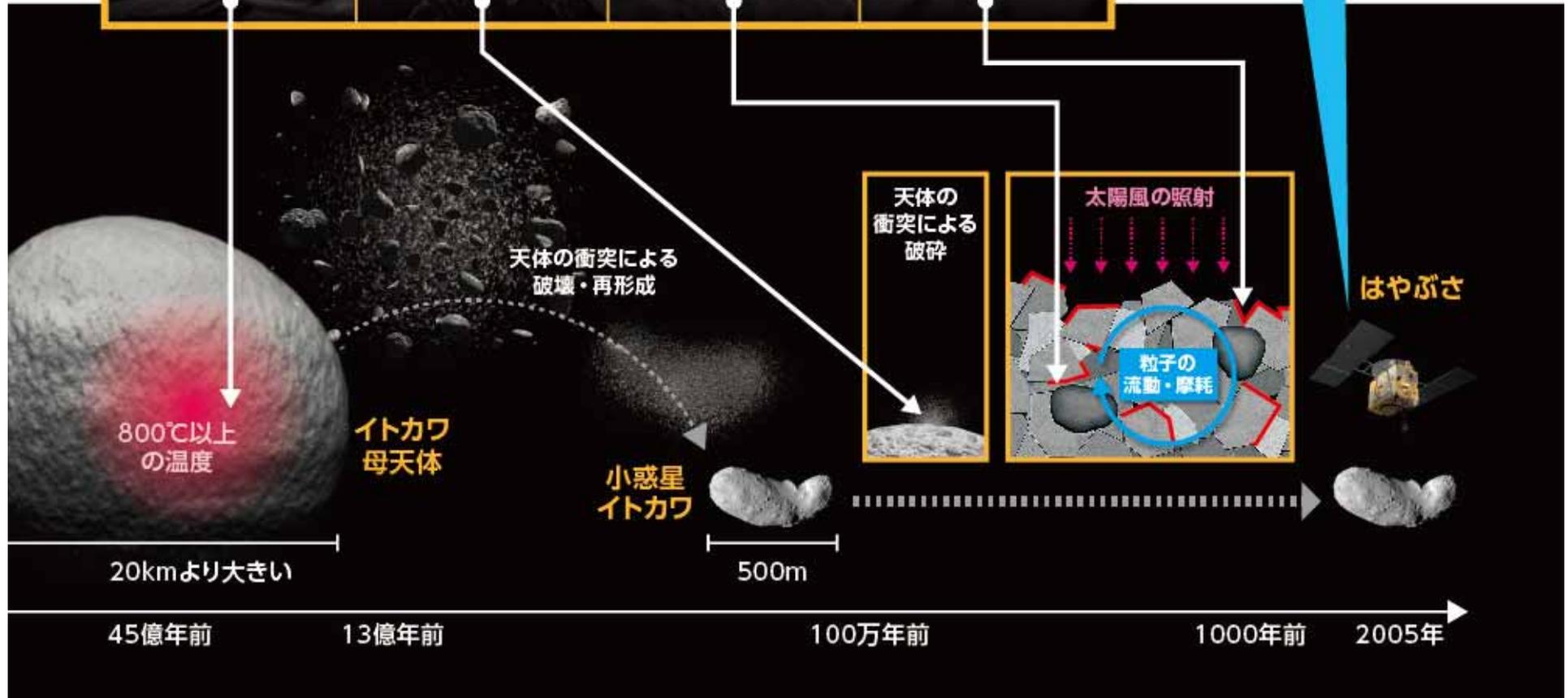
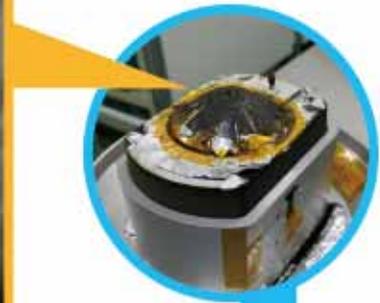
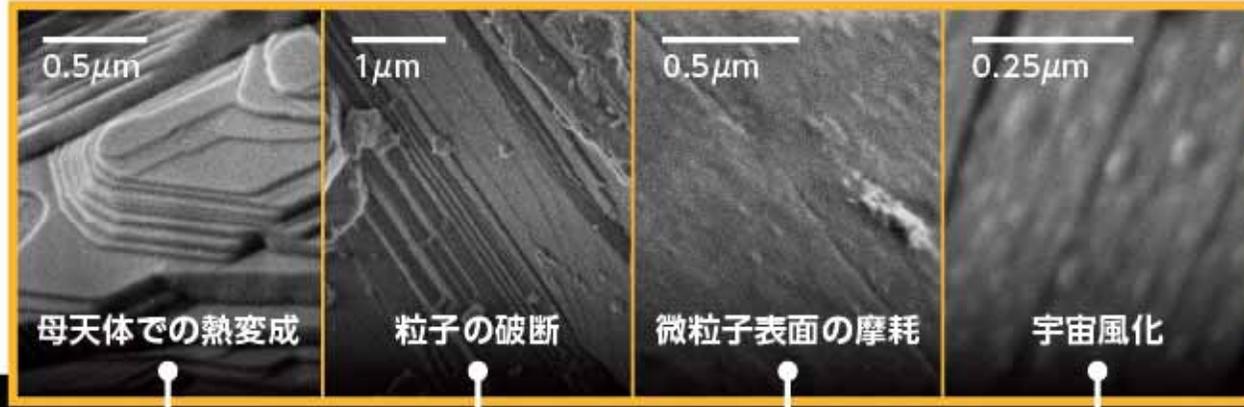


論文タイトル : Nanomorphology of Itokawa regolith particles: Application to

発表論文 : space-weathering processes affecting the Itokawa asteroid
Geochimica Cosmochimica Acta

微粒子の表面模様

探査機「はやぶさ」が持ち帰った
26個のイトカワの微粒子



研究の背景

- これまでの研究から・・・

イトカワ微粒子:

主に太陽風照射により宇宙風化リムが発達。

小惑星イトカワ:

宇宙風化が進行 + レゴリスの活発な流動により、
宇宙風化を受けた表面が若返る。

- のようなレゴリスの流動の痕跡を、微粒子の特徴と結びつけることはできていなかった。

本研究では・・・

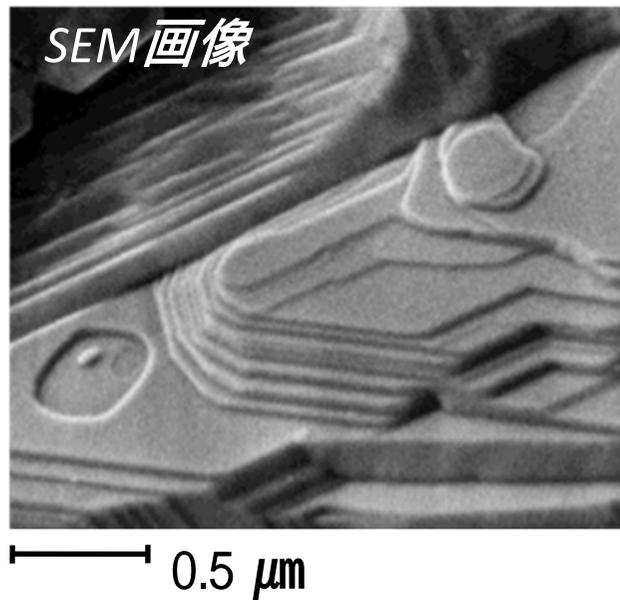
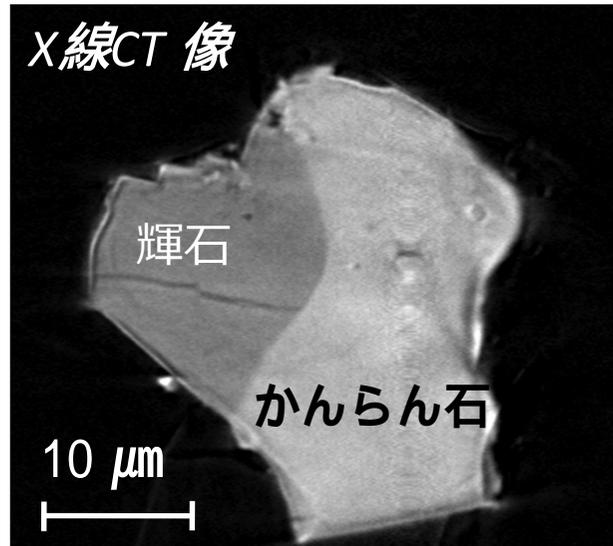
- ・ イトカワ微粒子の表面に記録された模様に注目
- ・ 表面模様
 - レゴリス流動や宇宙風化の痕跡
 - 小惑星イトカワの歴史
 - イトカワの母天体の歴史
- ・ 一つの研究チームが分析できる微粒子数が少なく、本格的な研究は未発達。
 - これまでの観察事例は5粒子のみ (Nakamura et al., 2012)

試料

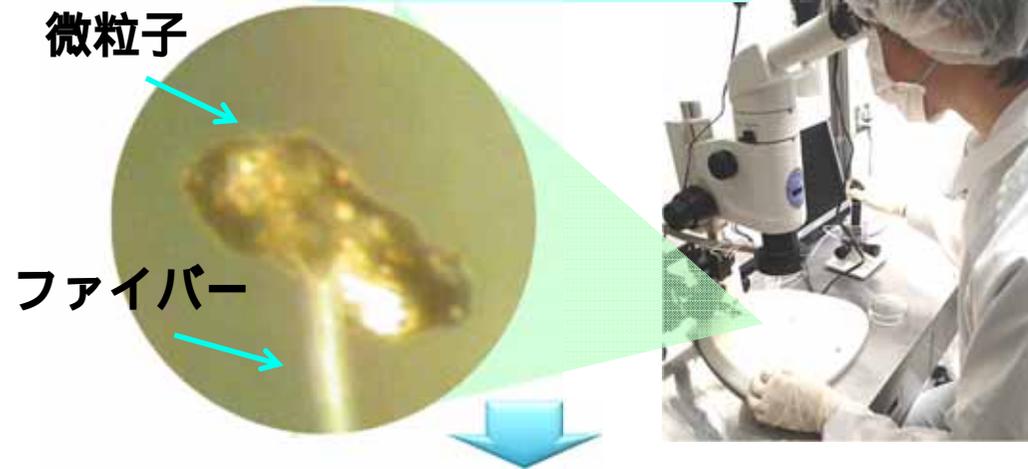
- ・ 小惑星イトカワから回収した微粒子、26個 を分析
(通常、1研究チーム当たりが分析できる粒子数は1 - 2粒、特別に多い場合でも4 - 5粒)
- ・ 下記を観察、比較
 - ・ 地上の鉱物の破断面
 - ・ 普通コンドライトLL5 (小惑星イトカワに対応すると考えられる隕石種)の鉱物表面

研究手法と結果

分析の流れ



粒子の固定



3次元外形・内部の観察

X線マイクロトモグラフィー(CT)
@大型放射光施設 SPring-8

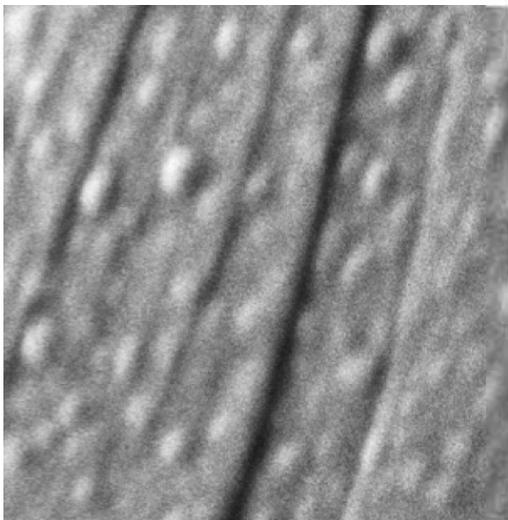
表面模様の観察

走査型電子顕微鏡(SEM)

@大阪大学・京都大学・東北大学・
日立ハイテクノロジーズ

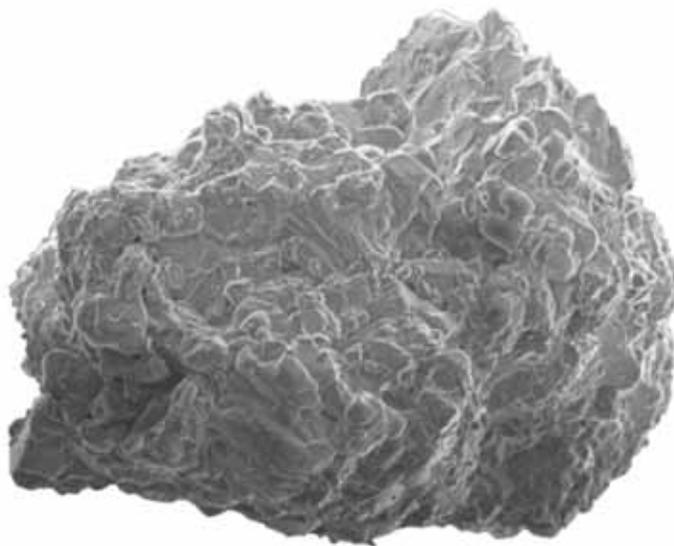
ナノメートルスケールで見たイトカワ微粒子の様相

宇宙風化



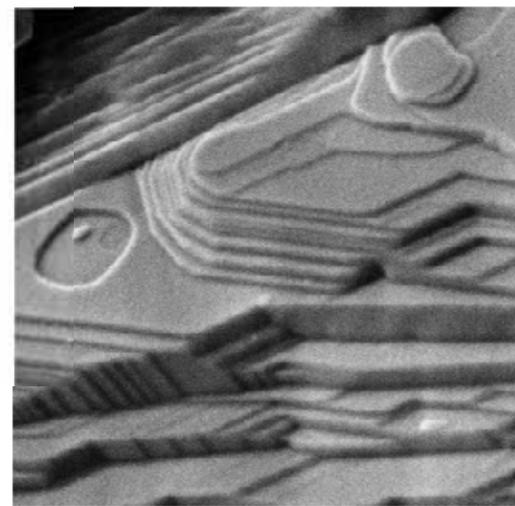
0.25 μm

微粒子表面の摩耗



50 μm

イトカワの母天体内部での熱変成

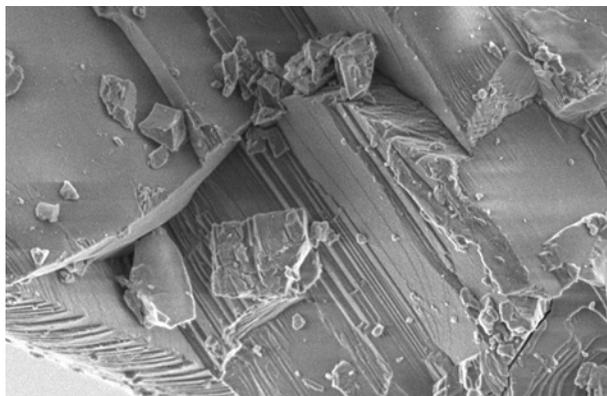


0.5 μm

粒子の破断



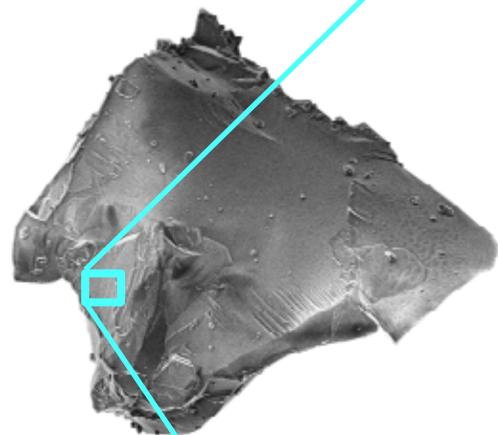
2 μm



5 μm

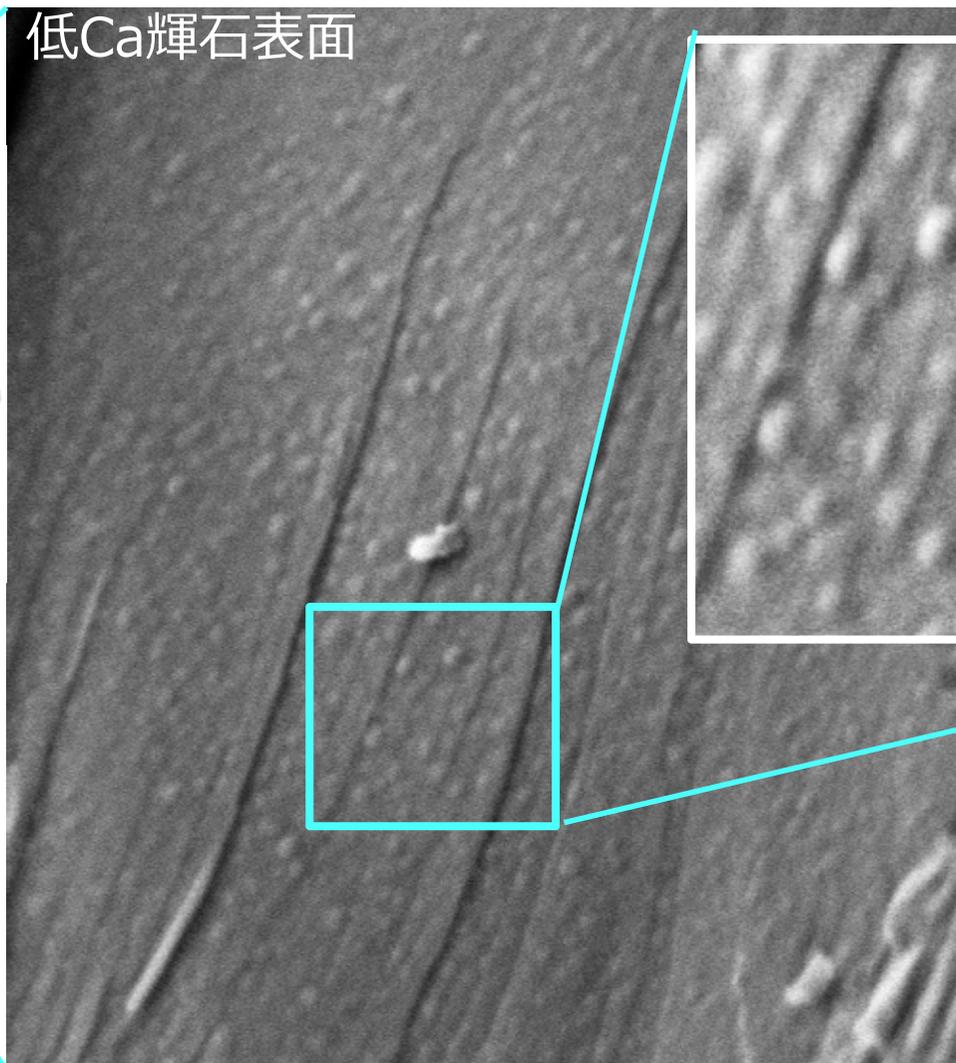
宇宙風化リムの模様

イトカワ微粒子
(RB-QD04-0043)

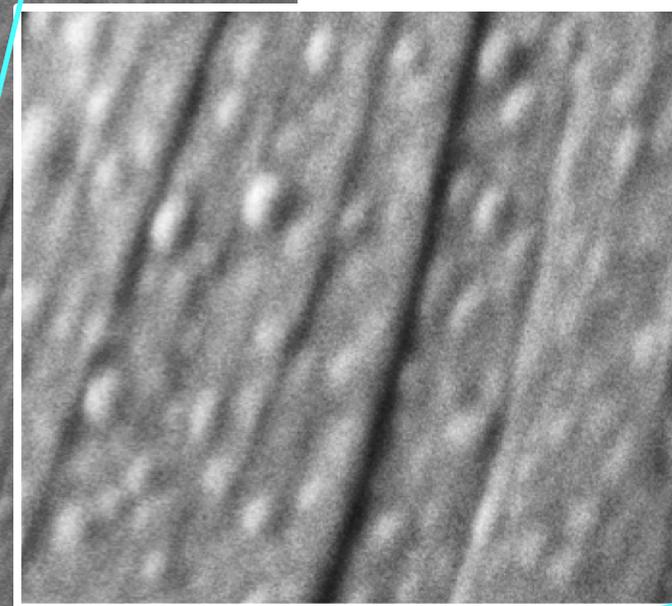


35 μm

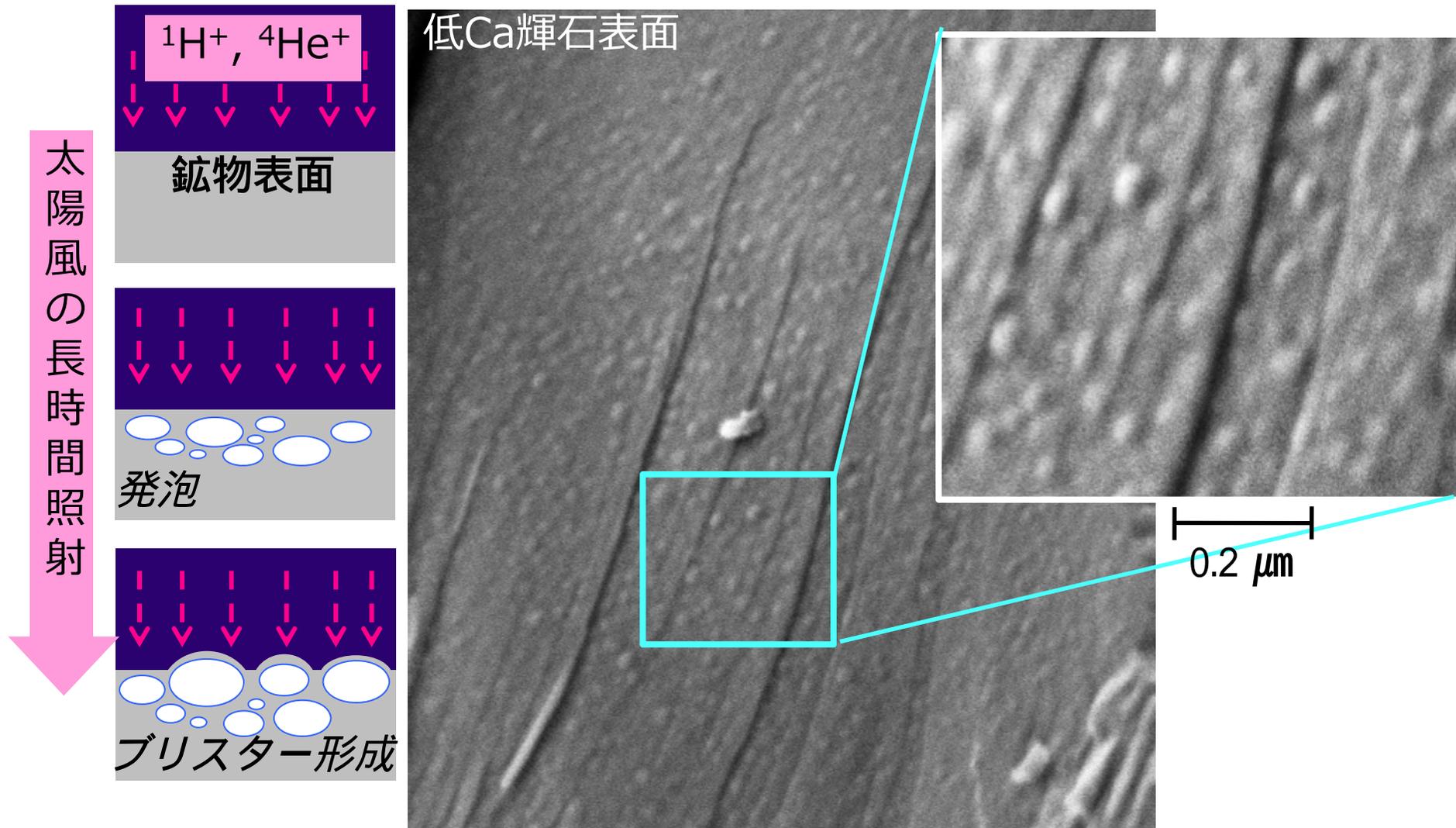
低Ca輝石表面



0.2 μm



宇宙風化リムの模様



- ・ **ブリストラー(水ぶくれ状)構造**は宇宙風化の証拠。
- ・ 太陽風(HやHeガス)の蓄積で形成。(Noguchi et al., 2014)

不均一なブリスターの分布

ブリスターのない場所

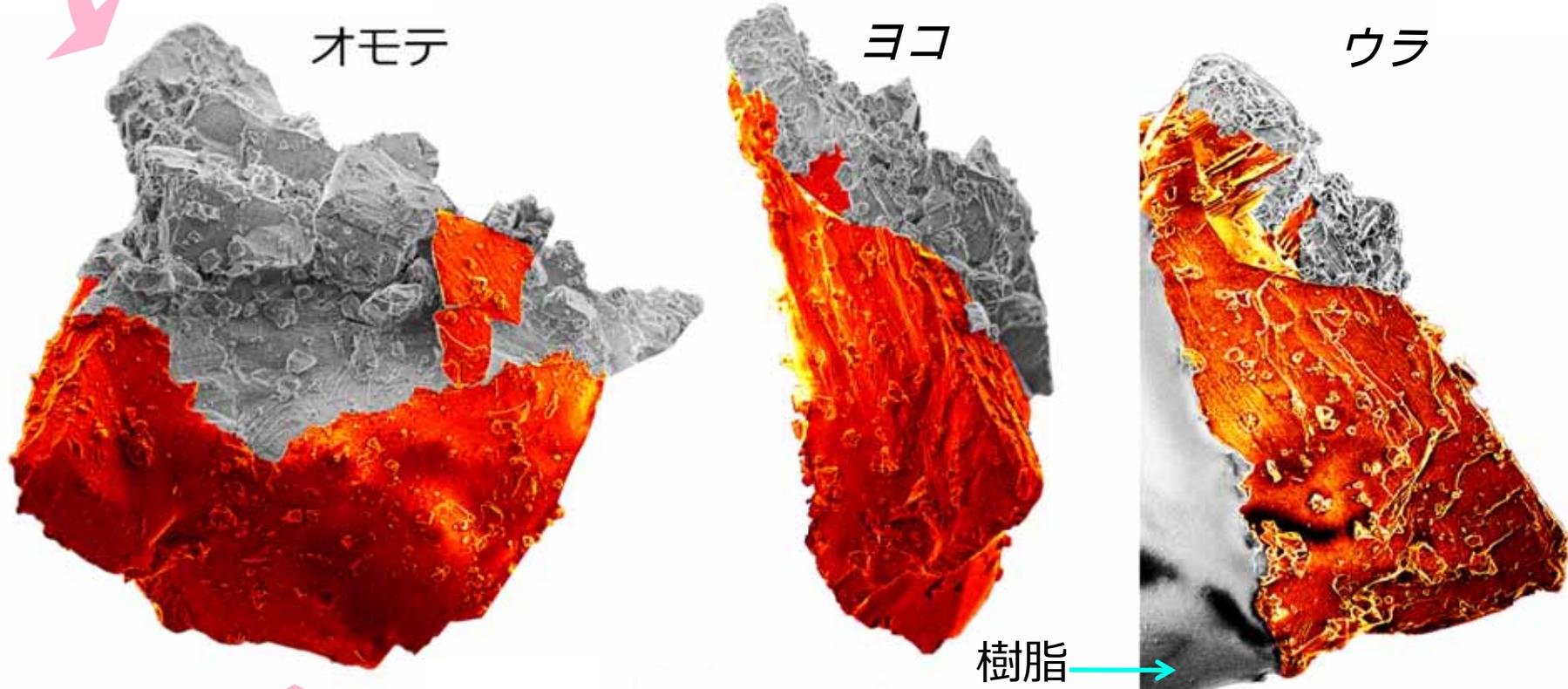
- 太陽から遮蔽。
- 微粒子の粉碎。

赤:ブリスターが分布する領域

オモテ

ヨコ

ウラ



樹脂

ブリスターは反対側の表面に存在
→ 微粒子の流動

微粒子表面模様の摩耗

X線CTで撮影した微粒子断面

鋭いエッジを持つ表面

かんらん石

輝石

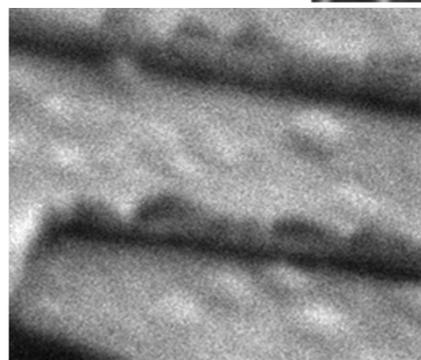
10 μm

丸みを帯びた表面

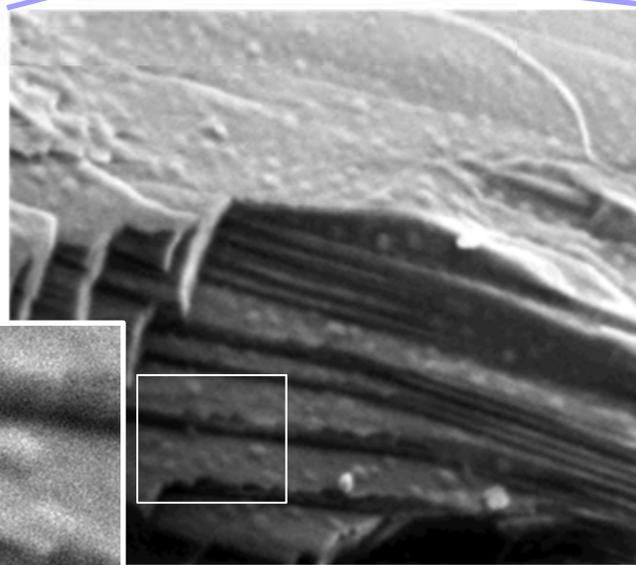
輝石

10 μm

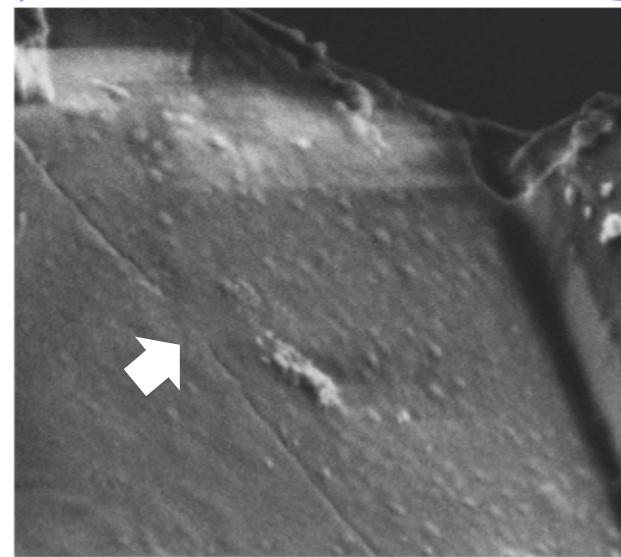
ブリストーも見える



0.2 μm



0.5 μm



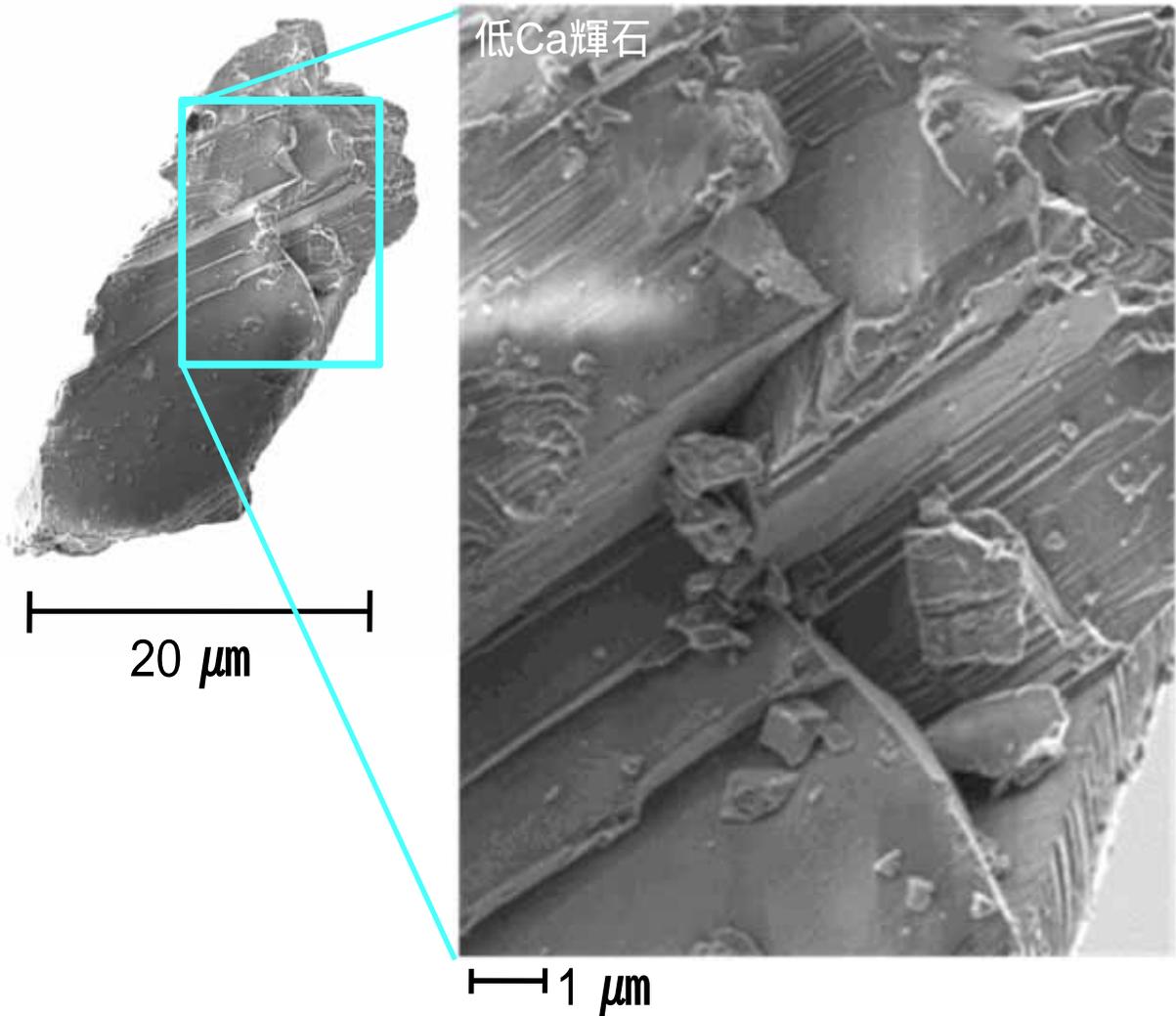
0.5 μm

→ 摩耗を受けた表面
微粒子の流動時に、粒子同士がこすれ合う。

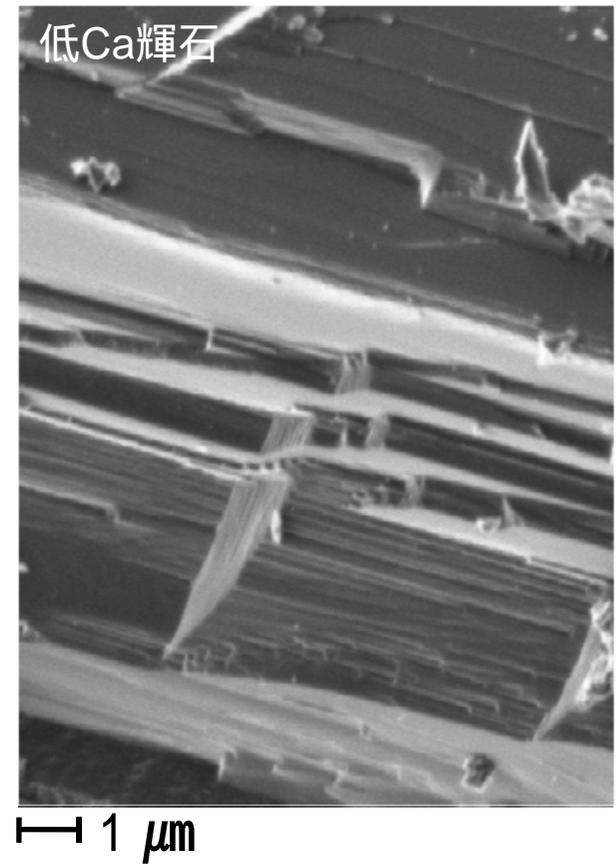
表面模様のタイプ

- ・ 平行な階段状の模様

イトカワ微粒子



地上の鉱物を砕いた
破断面

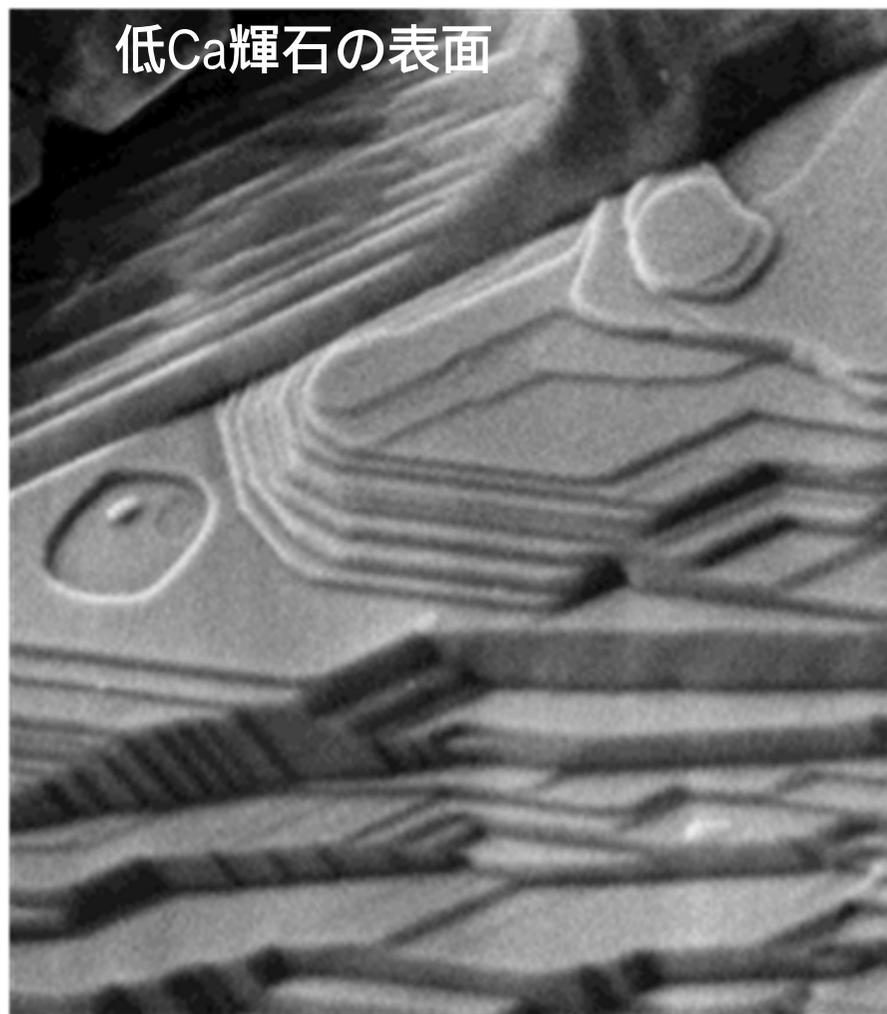


- ・ 微粒子の形成時にできた鉱物の破断面

表面模様タイプ

・多角形・同心円状の階段模様

・自形の微粒子で覆われる。
(自形：鉱物特有の結晶の形を持つ粒子)

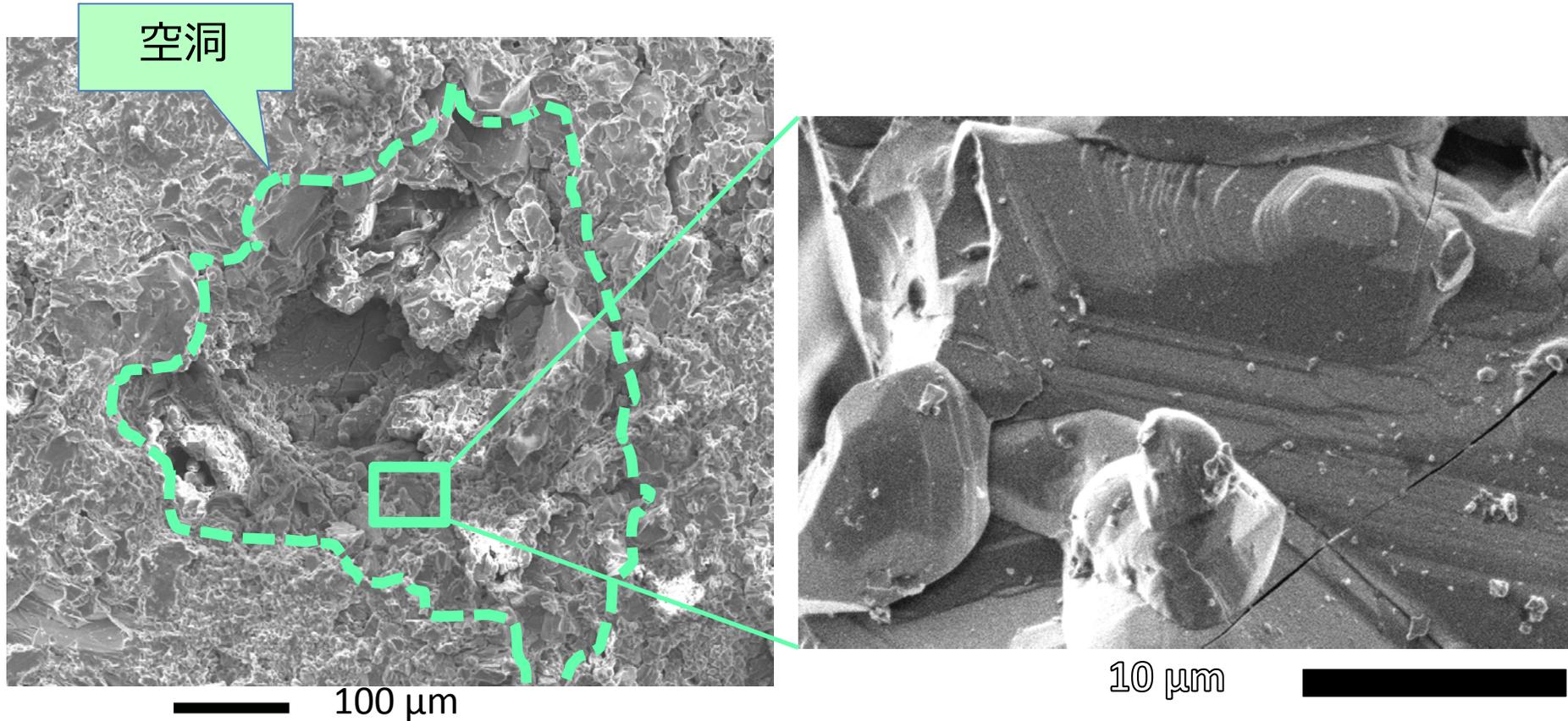


0.5 μm



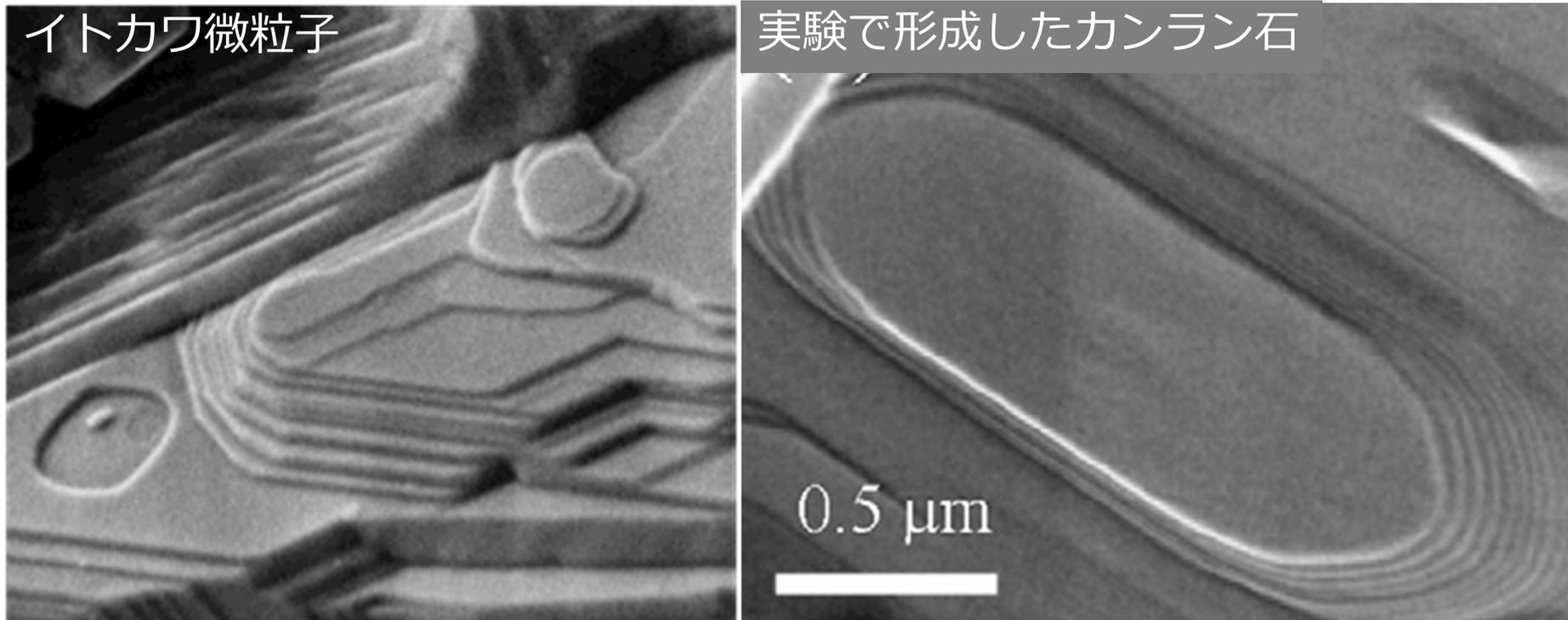
1 μm

普通コンドライト隕石(LL5)中の空洞



- ・隕石内部には、自形の粒子が発達した空洞(“^{しょうどう}晶洞”と呼ぶ)が存在。
→イトカワ微粒子の表面に類似。

鉍物の蒸発・凝縮実験 (Kobatake et al,2008) とイトカワ微粒子の比較

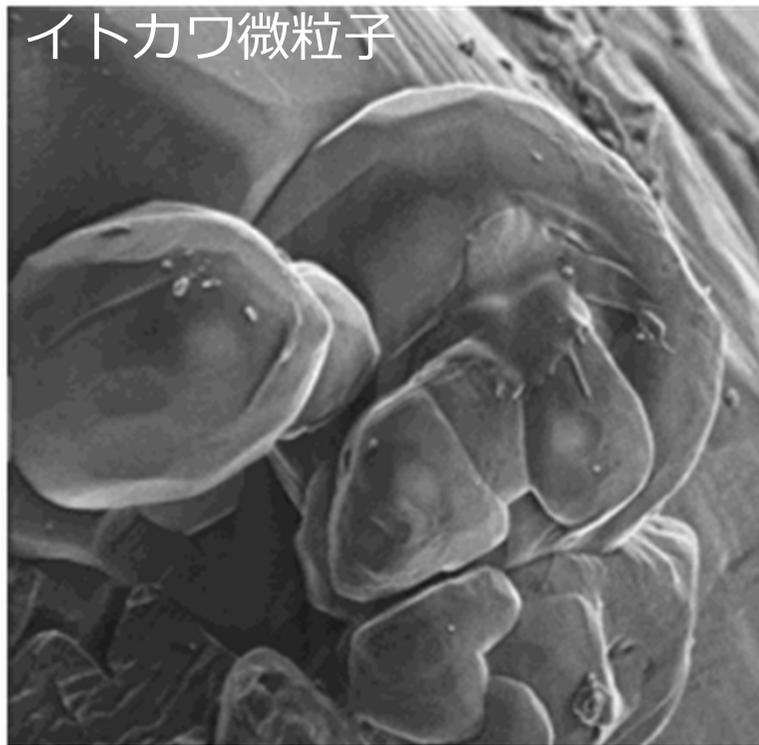


- ・ 蒸発、凝縮実験で形成した鉍物は500°C以上の**高温**で形成。
- ・ 自形の鉍物、同心円の階段模様は、岩石の隙間にガスが入り込み、それが高温で結晶化したときに形成。

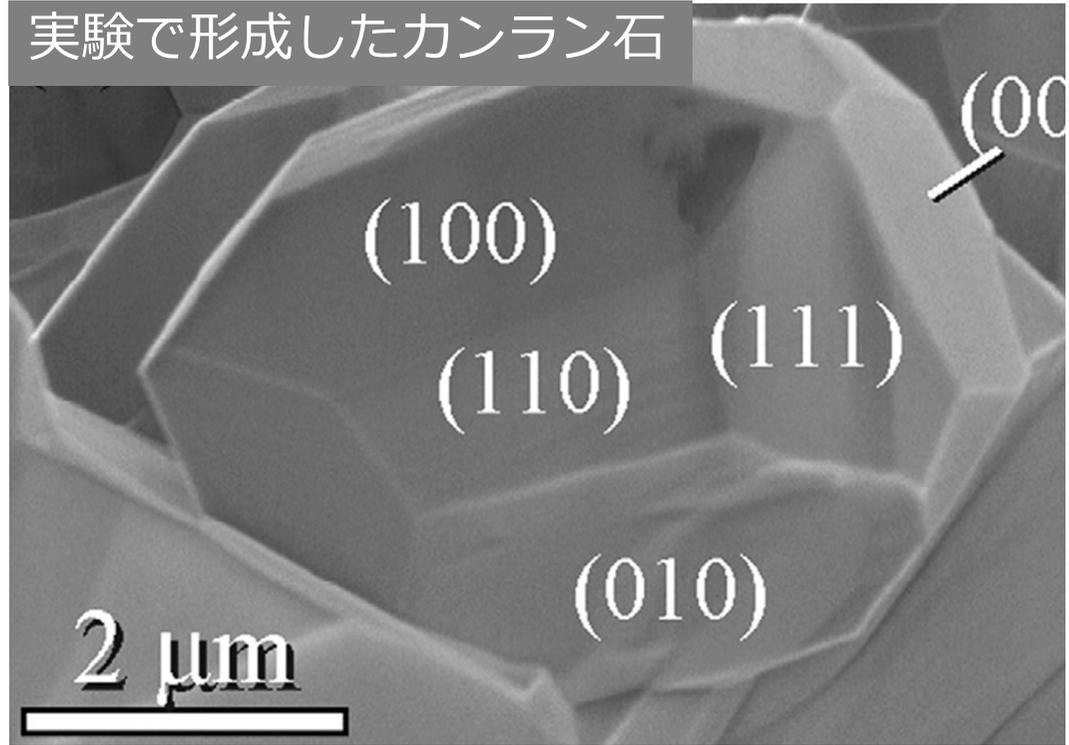


- ・ 当てはまる環境は、**小惑星イトカワの母天体内部**。

鉍物の蒸発・凝縮実験 (Kobatake et al, 2008) とイトカワ微粒子の比較



1 μm



- ・ 蒸発、凝縮実験で形成した鉍物は500°C以上の**高温**で形成。
- ・ 自形の鉍物、同心円の階段模様は、岩石の空洞にガスが入り込み、それが高温で結晶化したときに形成。



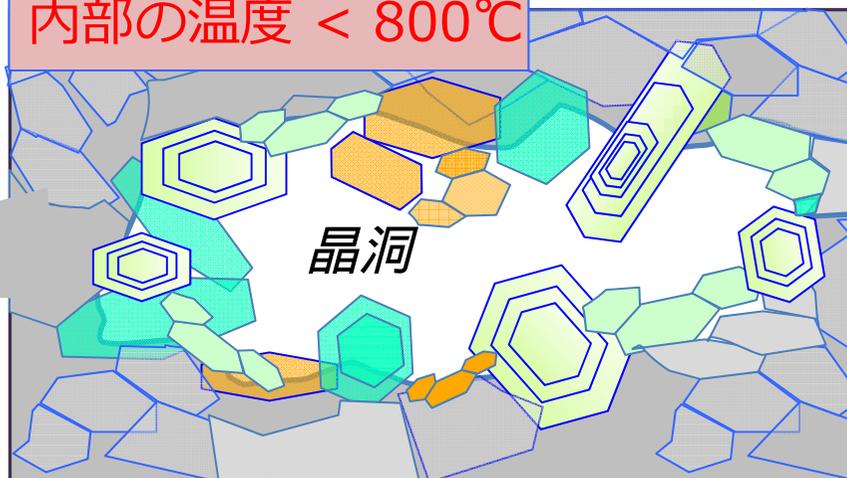
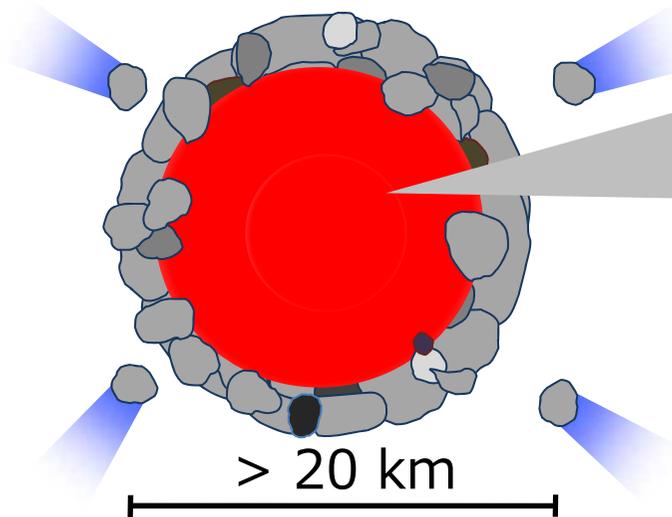
- ・ 当てはまる環境は、**小惑星イトカワの母天体内部**。

考察

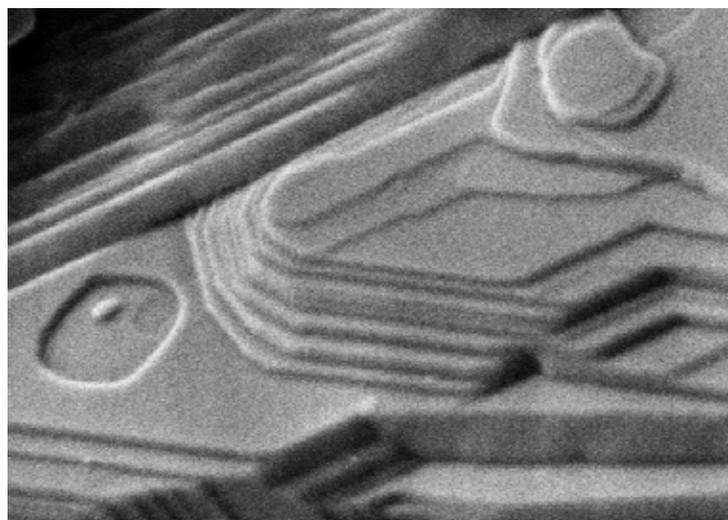
表面模様には刻まれたイトカワの歴史

45億年前:イトカワの母天体

内部の温度 < 800°C



- ・ 鉱物結晶は、母天体の熱変成作用、もしくは天体衝突による加熱により形成。

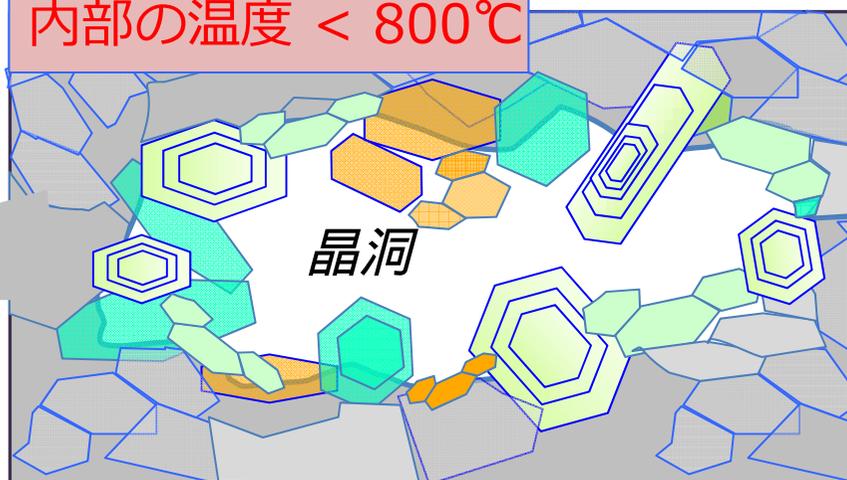
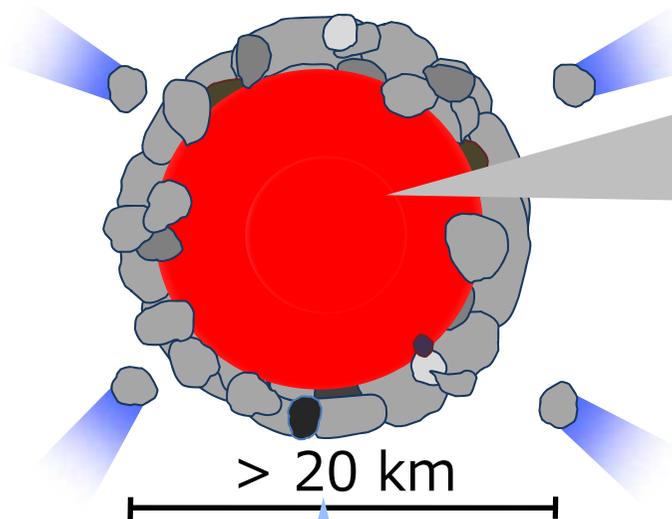


0.5 μm

表面模様には刻まれたイトカワの歴史

45億年前:イトカワの母天体

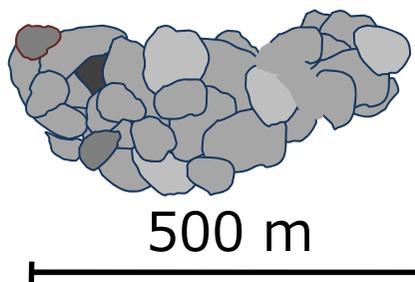
内部の温度 < 800°C



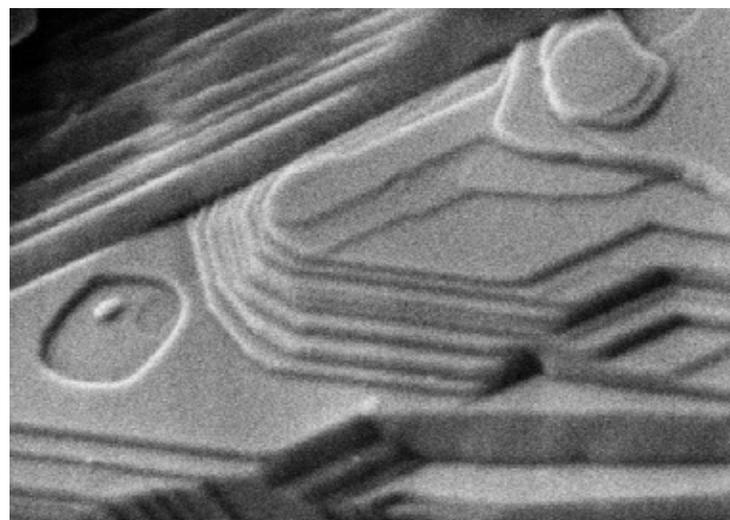
母天体の破壊・破片の集積



13億年前:小惑星イトカワ



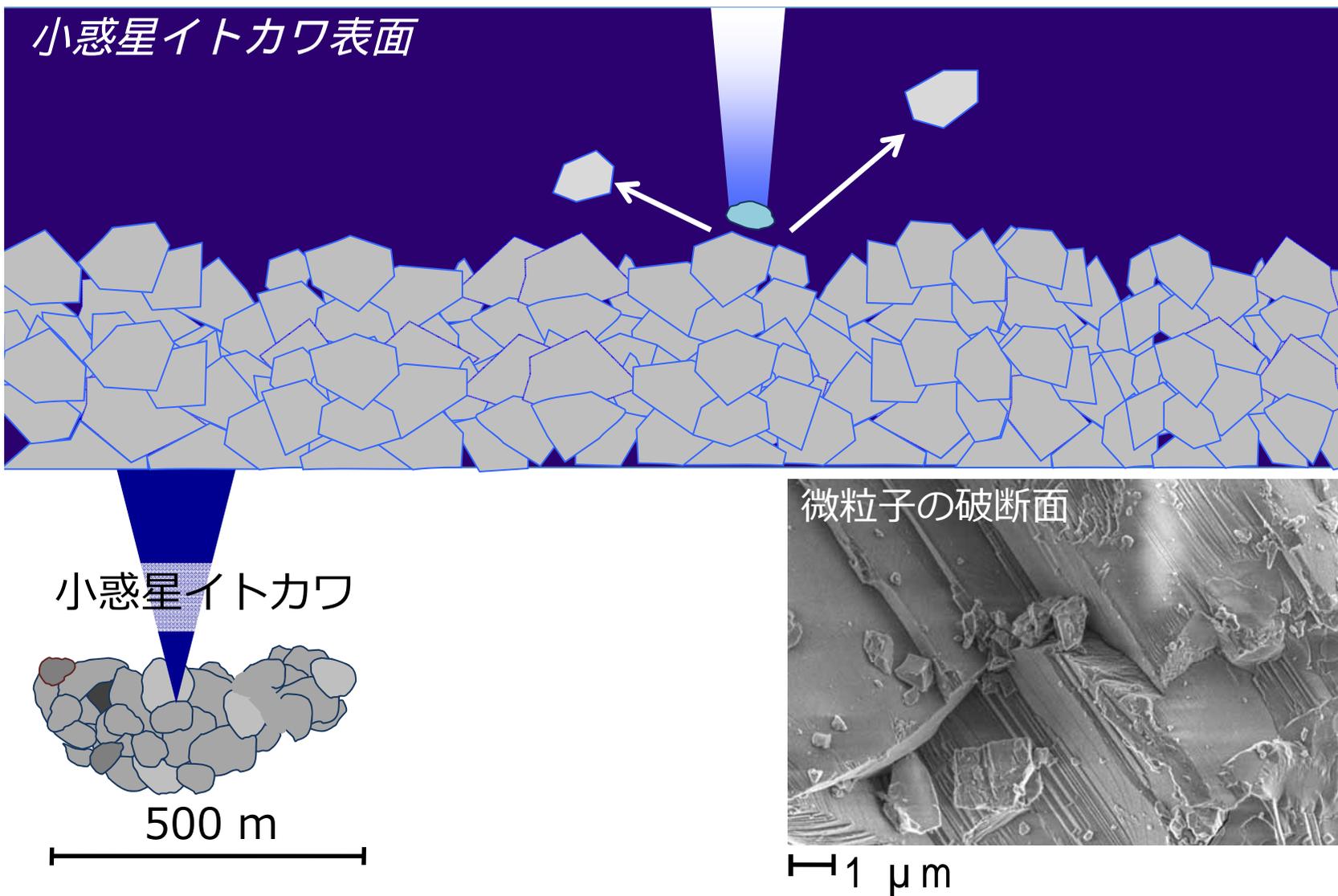
- ・ 鉱物結晶は、母天体の熱変成作用、もしくは天体衝突による加熱により形成。



0.5 μm

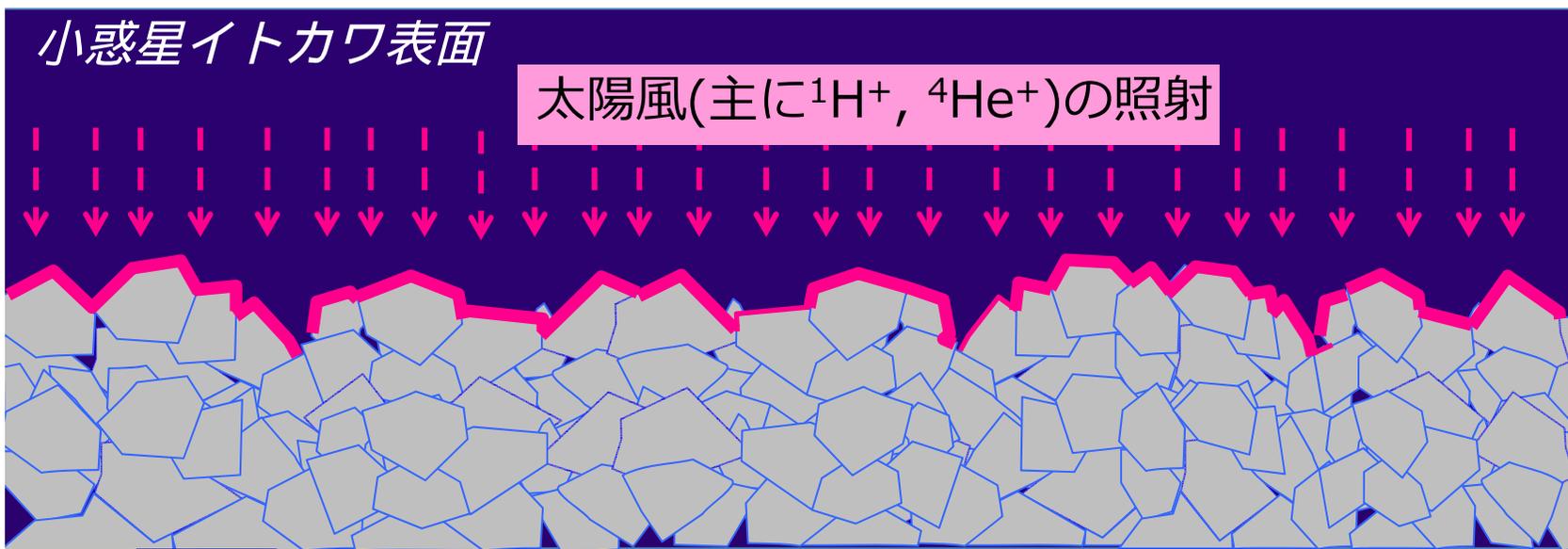
表面模様々に刻まれたイトカワの歴史

13億年前～：天体衝突によるレゴリスの形成やレゴリス内の粒子の粉碎

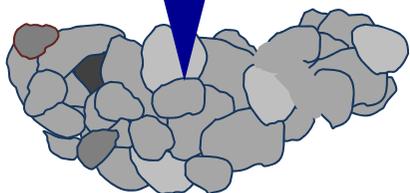


表面模様々に刻まれたイトカワの歴史

1000年：最表面の微粒子に太陽風の打ち込み



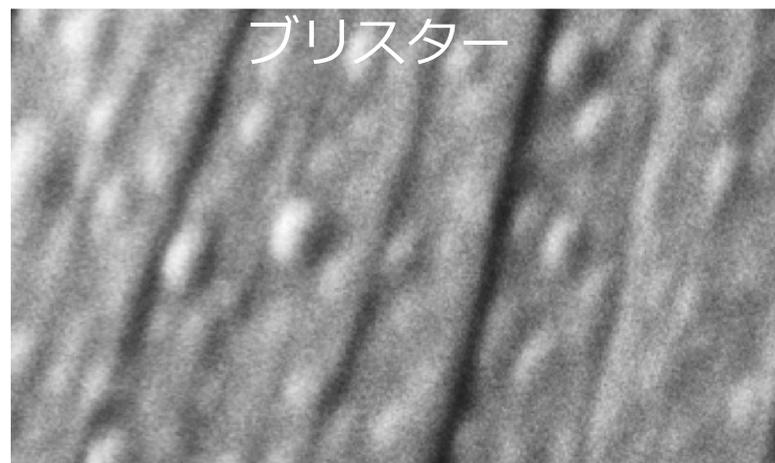
小惑星イトカワ



500 m



ブリストラー

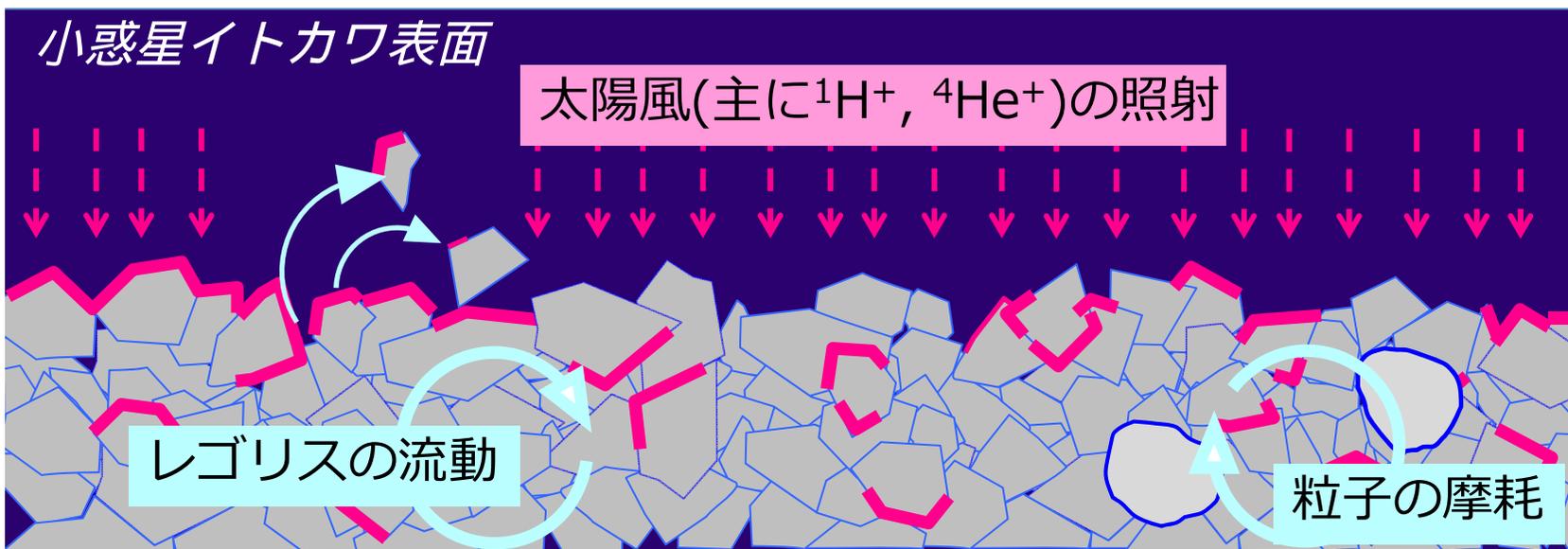


0.25 μm

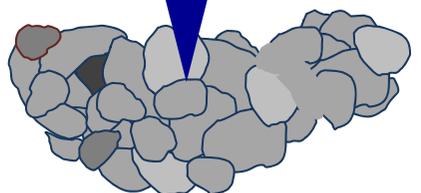


表面模様々に刻まれたイトカワの歴史

- >100万年:
- ・レゴリスの流動
 - ・一部の粒子の摩耗。
 - ・宇宙風化を受けたイトカワ表面の若返り



小惑星イトカワ



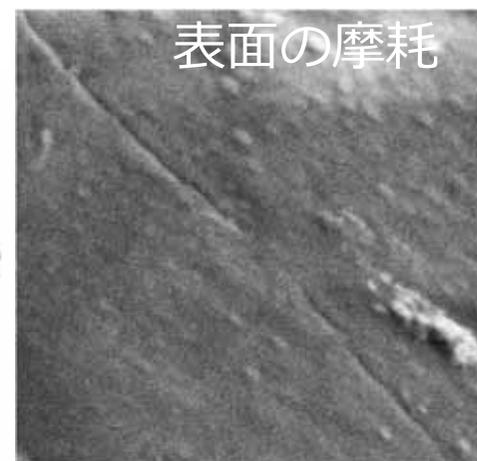
500 m



ブリスターの不均一分布

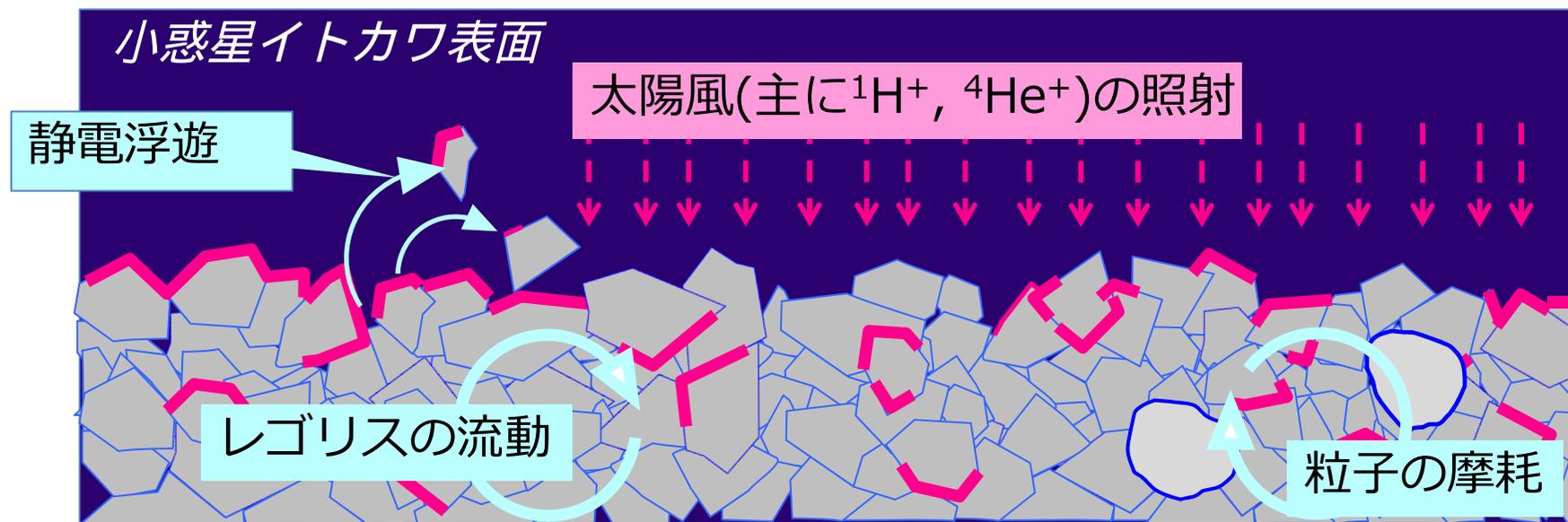


表面の摩耗



1 μm

表面模様刻まれたイトカワの歴史

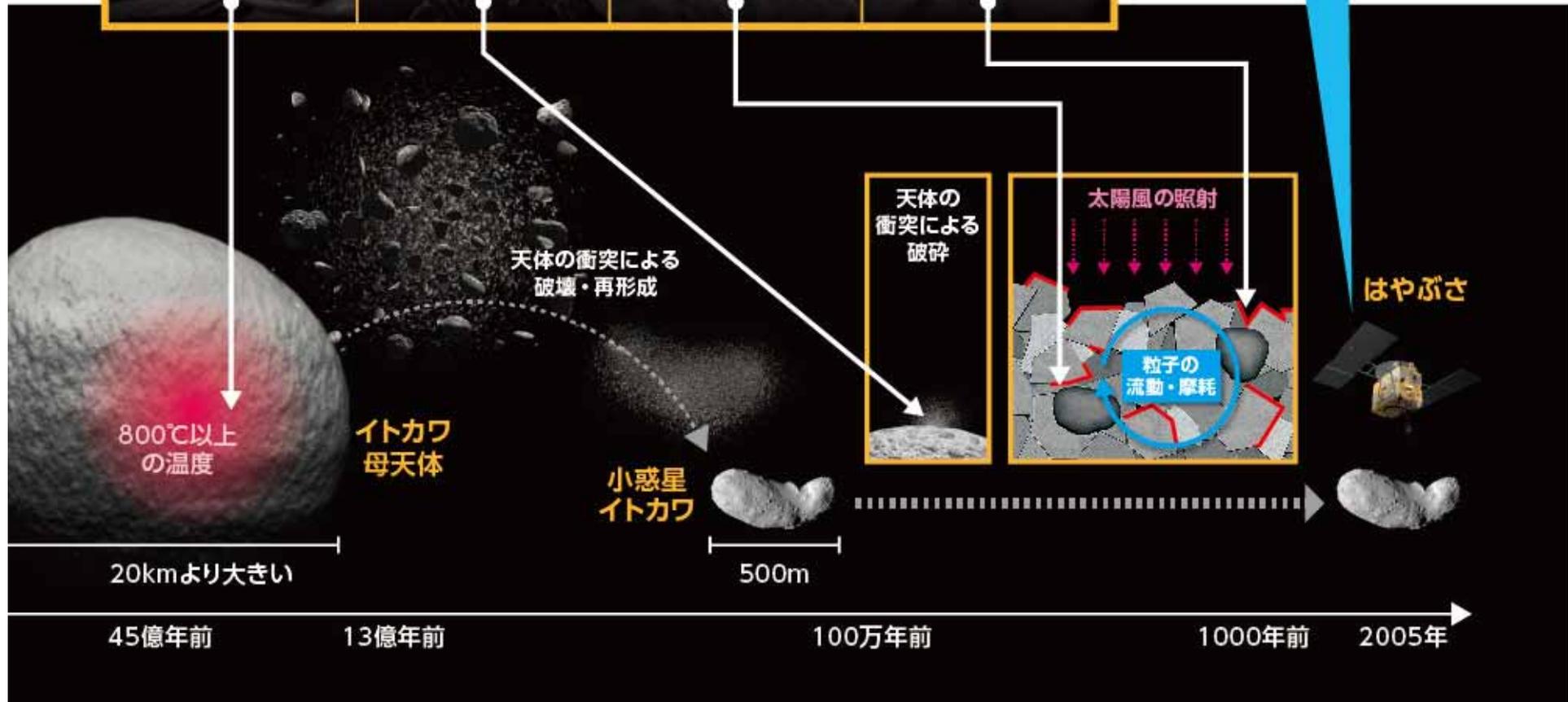
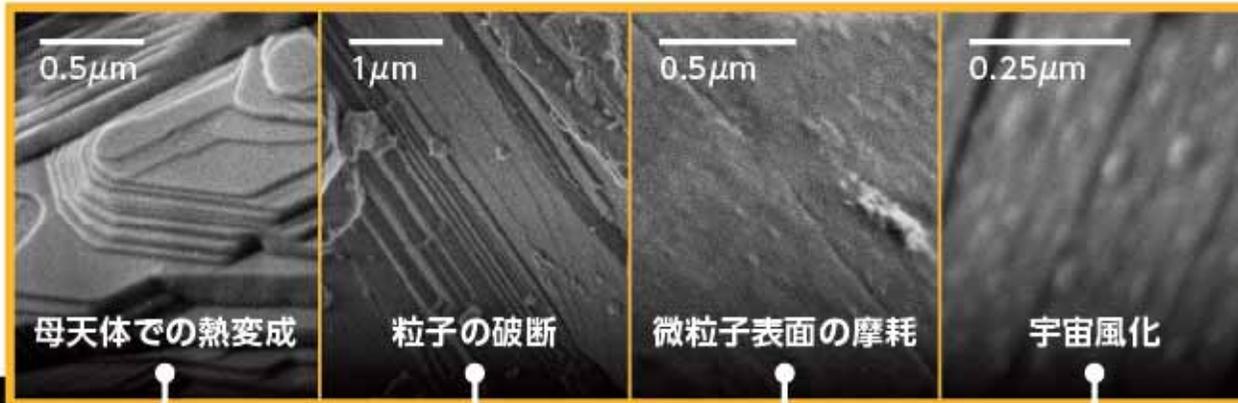


小惑星イトカワのレゴリス流動の原因



微粒子の表面模様

探査機「はやぶさ」が持ち帰った
26個のイトカワの微粒子



まとめ

- X線CTや電子顕微鏡を用いて、イトカワ微粒子の表面模様を観察し、系統的な分類を試みた。結果、微粒子の表面模様は、
 - ①微粒子がイトカワ表面に露出していた時に太陽風により作られたもの、
 - ②イトカワ表面でのレゴリスの流動時にできたもの、
 - ③天体衝突によるレゴリス形成時にできたもの、
 - ④イトカワの母天体時代にできたものに大別されることが分かった。
- その解析から、
 - イトカワ母天体の岩石中には晶洞が存在し、熱作用によって、晶洞内部の鉱物の蒸発・凝縮が起こっていた、
 - イトカワ表面では現在に至るまでレゴリス粒子の形成・流動が起きており、この作用を伴い、微粒子の宇宙風化が進行している、ことが分かった。
- 上記のように、微粒子のナノメートルスケールの模様から、イトカワ、そしてイトカワ母天体にまで遡る歴史を読み解くことができることを初めて示した。

はやぶさ2(C型小惑星) & 火星衛星サンプルリターン計画



今後のリターンサンプルの分析でも、サンプルの表面模様の観察は、粒子の来歴や天体の進化を解き明かすための重要な手法になる。

- ❖ 表面観察は非破壊分析。
→表面観察によって、サンプルの履歴を理解した上で、高度な破壊分析を組み合わせることで、より正確にサンプルの来歴を明らかにできる。
- ❖ 多数のサンプルを観察することが容易。
→統計的な情報が得やすく、サンプルの特徴の全体像を理解することができる。
- ❖ リターンサンプルのみがもつ情報を知ることが可能
 - 隕石では天体の砂の表面模様の痕跡は消えてしまっている。
 - 小惑星のサンプルの表面模様から、隕石では分からない、C,D型小惑星での宇宙風化、小惑星の進化過程の理解が進むと期待される。