

# イトカワレゴリス粒子の3次元構造

土山 明

大阪大学・大学院理学研究科・宇宙地球科学専攻

初期分析コアメンバー

海老原充(首都大)、岡崎隆司(九大)、北島富美雄(九大)、中村智樹(東北大)  
長尾敬介(東大)、奈良岡浩(九大)、野口高明(茨大)、塚本尚義(北大)

海外共同研究者

Scott Sandford(NASA/ARC)、Trevor Ireland(ANU)、Michael Zolensky(NASA/JSC)

CTチーム

上相真之(宇宙研)、松島亘志(筑波大)、片桐淳(筑波大)、道上達弘(福島高専)  
門野敏彦(阪大)、上杉健太郎(JASRI)、竹内晃久(JASRI)、鈴木芳生(JASRI)  
中野司(産総研)、野口遼(阪大)、松本徹(阪大)、松野淳也(阪大)  
永野崇(阪大)、今井悠太(阪大)、大神稔皓(東北大)

はやぶさプロジェクト

向井利典(宇宙研)、安部正真(宇宙研)、矢田達(宇宙研)  
藤村彰夫(宇宙研)、吉川真(宇宙研)、川口淳一郎(宇宙研)

# CARTE DU JOUR

- (1) はやぶさ計画とリモートセンシング：概要
- (2) 初期分析とその成果：概要
- (3) マイクロCT
- (4) イトカワ表面物質（3D内部構造）  
LL隕石との比較
- (5) イトカワレゴリス（3D外形）  
月レゴリスとの比較
- (6) イトカワレゴリス（表面観察）

# CARTE DU JOUR

**(1) はやぶさ計画とリモートセンシング: 概要**

**(2) 初期分析とその成果: 概要**

**(3) マイクロCT**

**(4) イトカワ表面物質 (3D内部構造)**

**LL隕石との比較**

**(5) イトカワレゴリス (3D外形)**

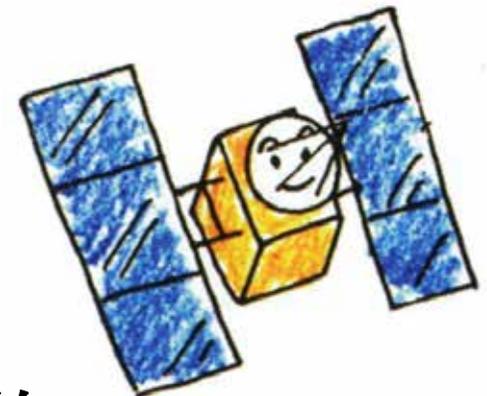
**月レゴリスとの比較**

**(6) イトカワレゴリス (表面観察)**

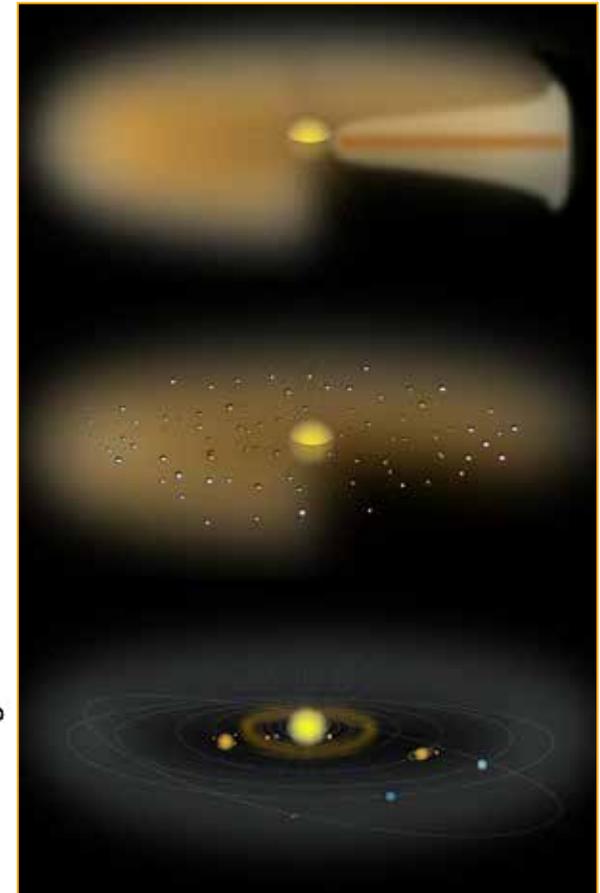
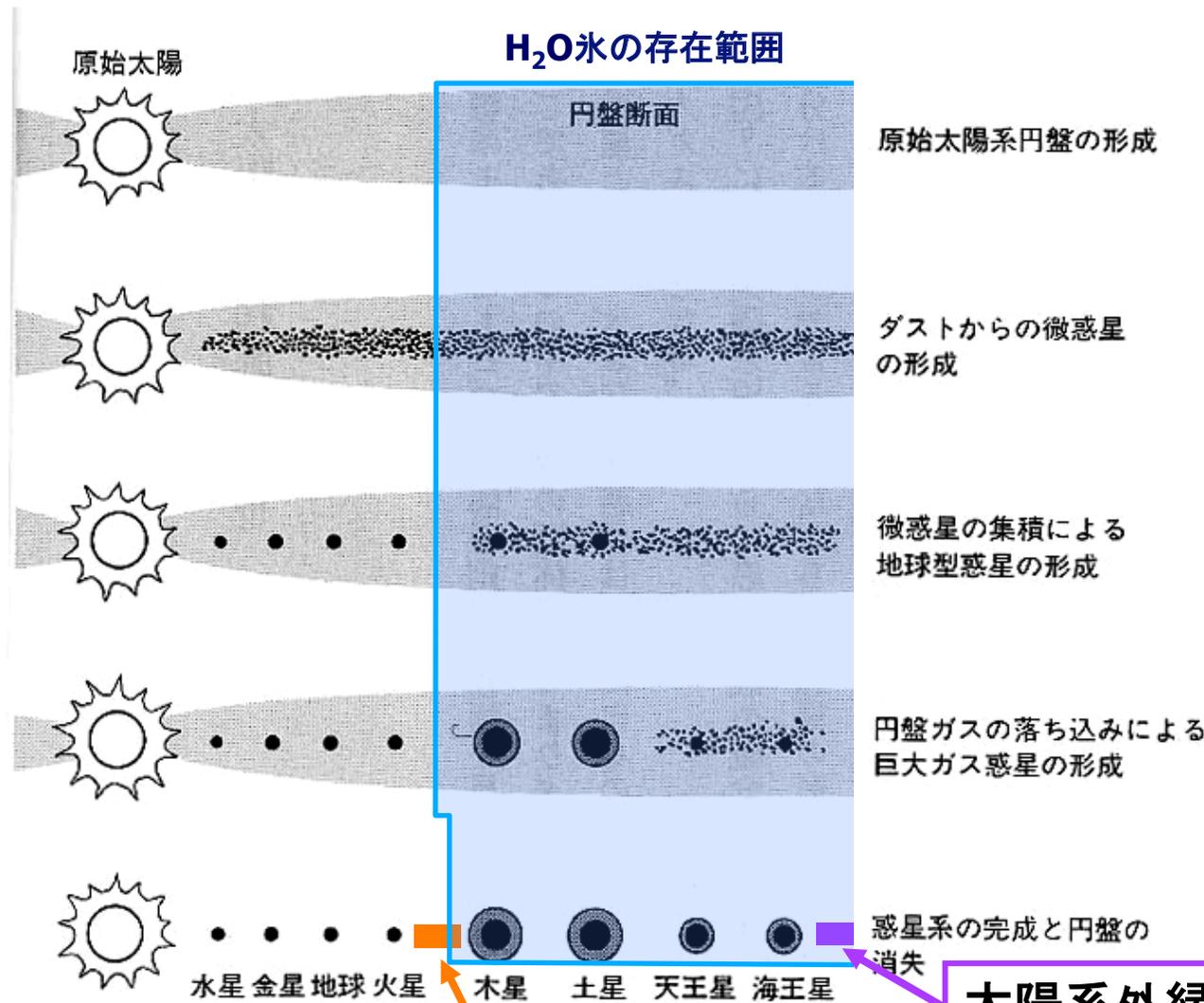
# 『はやぶさ』計画



- ✓ 2003年5月9日: 打ち上げ
- ✓ 2005年9-11月: 小惑星イトカワの観測  
表面からのサンプル採取
- ✓ 2010年6月13日: サンプル地球帰還  
サンプル・キュレーション開始
- ✓ 2011月1月: **初期分析開始**



# 太陽系形成と小惑星



九大旧中村研HPより

井田(2003)より

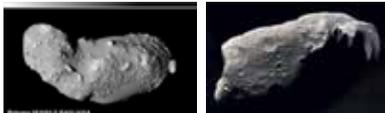
図7 原始太陽系円盤から惑星ができるまで

太陽系外縁天体

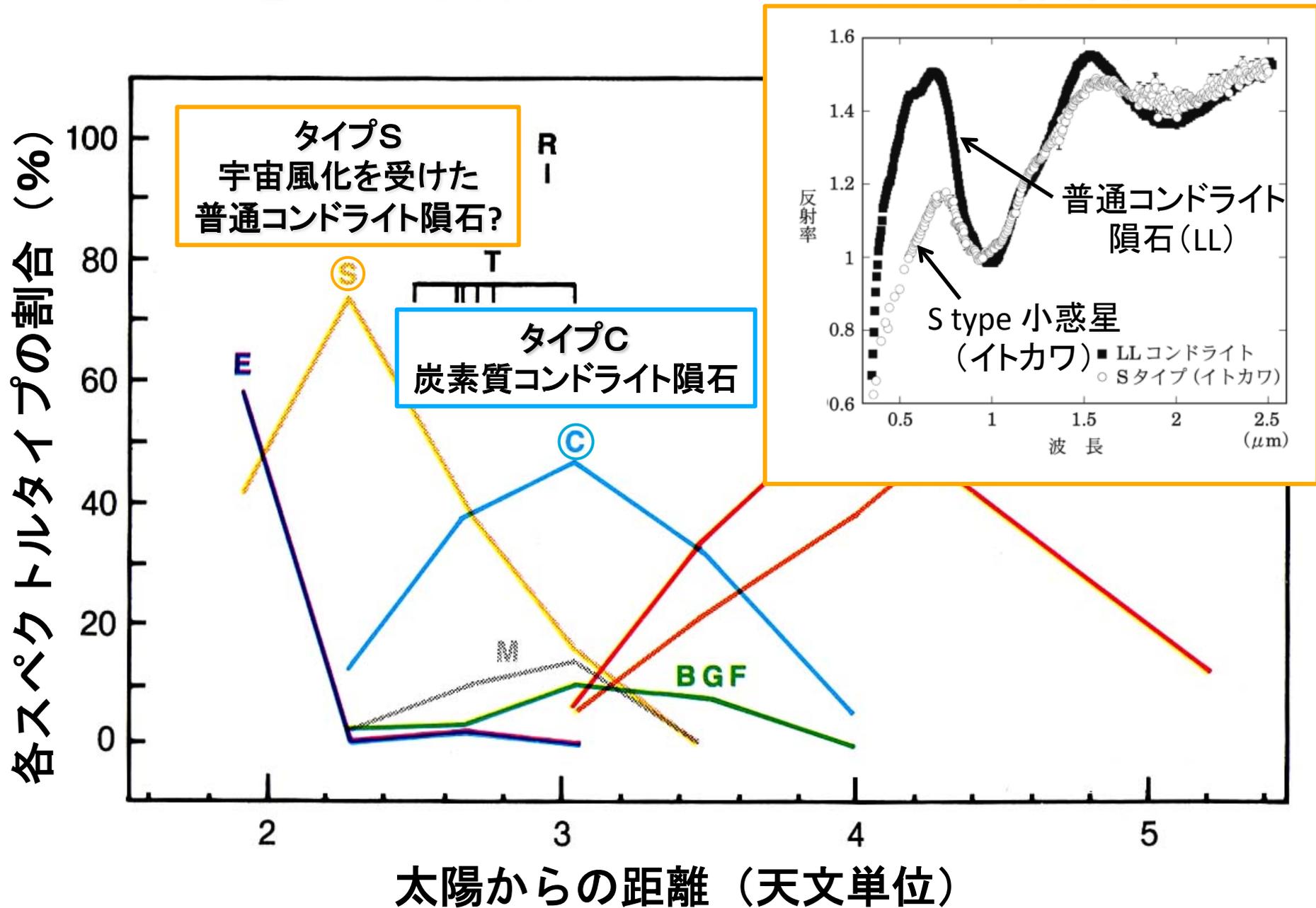
彗星

小惑星帯

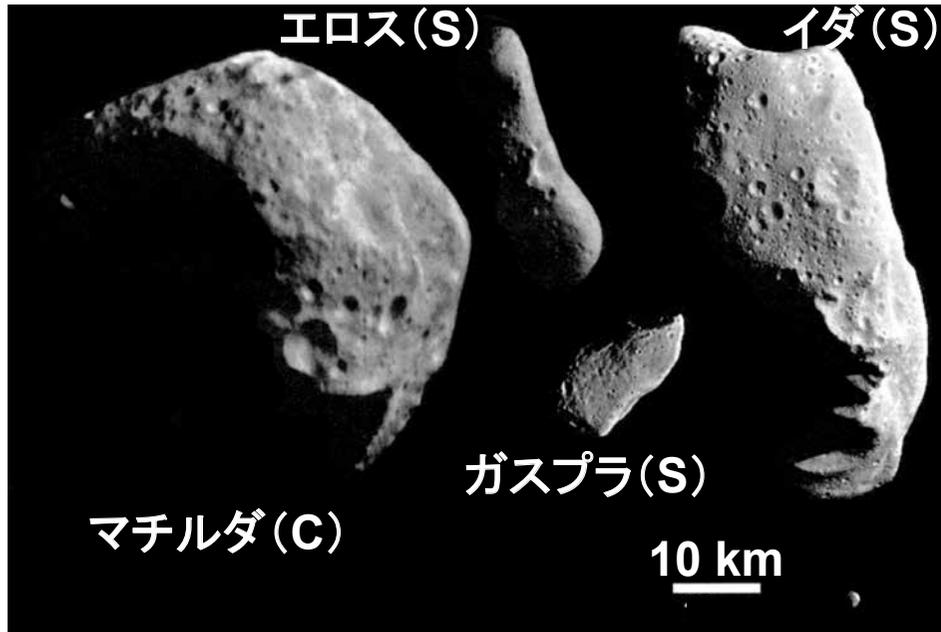
冥王星



# 小惑星の反射スペクトルタイプの頻度

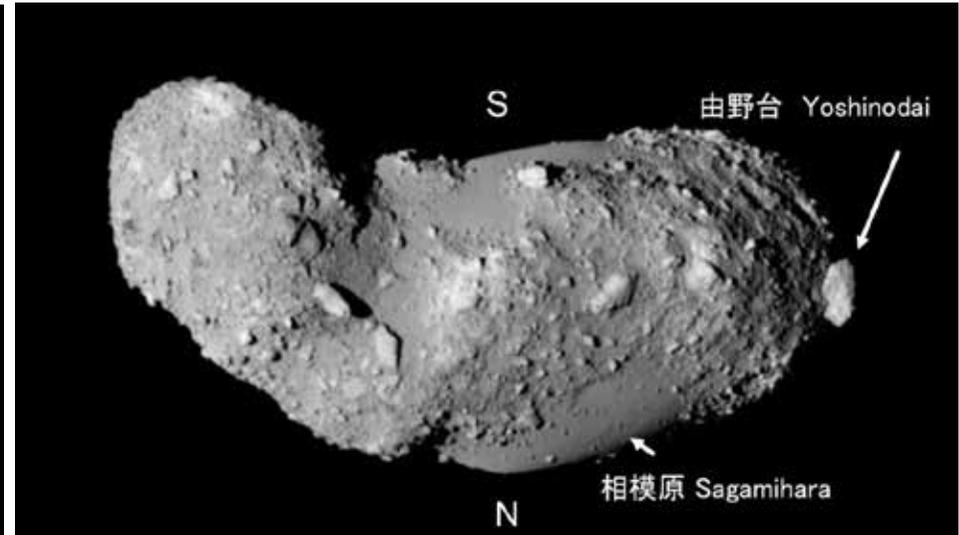


# これまで撮影された小惑星とイトカワ



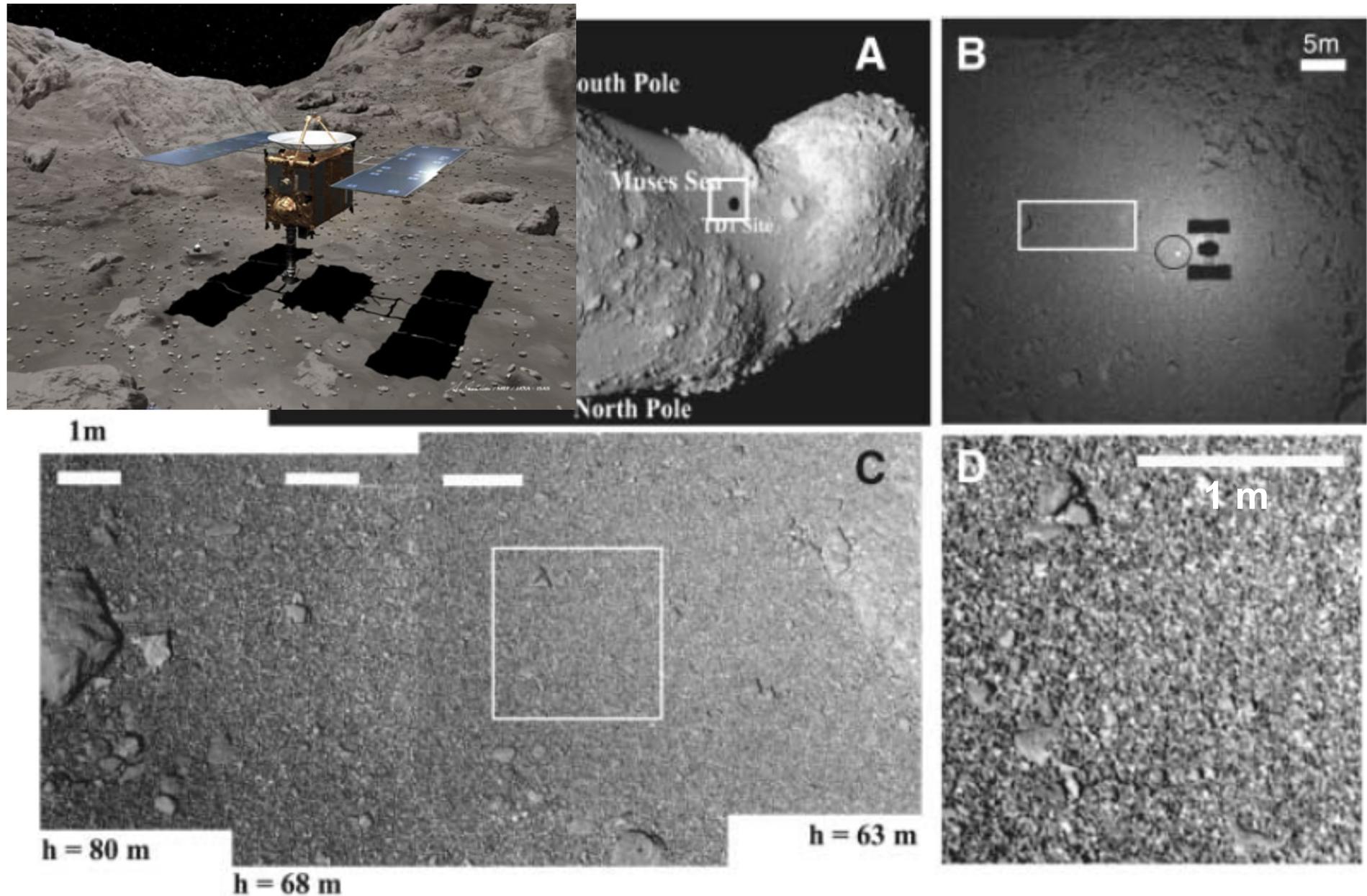
・イトカワ(S): ~0.5 km

大きな小惑星:  
表面はレゴリス(隕石衝突でできた細かな砂)におおわれて、  
クレーターができています

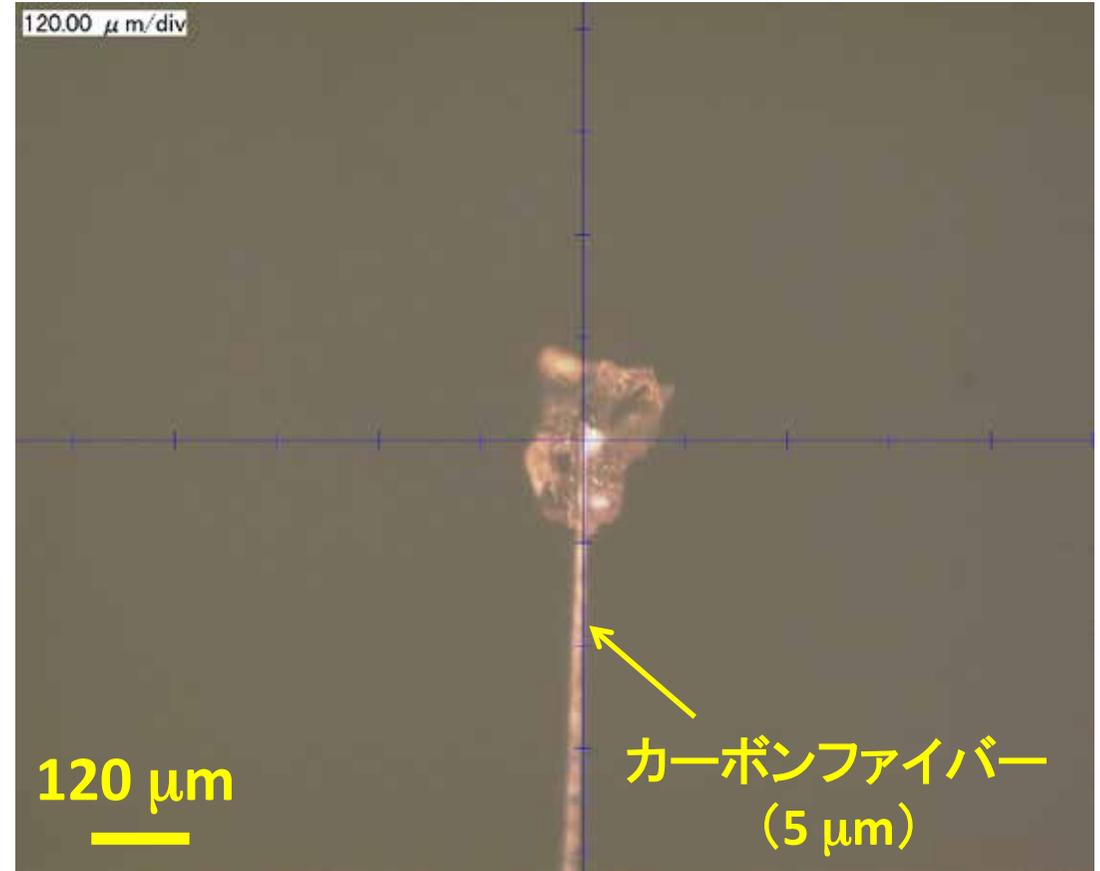


小さな小惑星(イトカワ):  
大きな岩(ボルダー)がゴロゴロ

# サンプリング: MUSES-C Regio



# イトカワ粒子



宝石のようにきれいだった

# CARTE DU JOUR

(1) はやぶさ計画とリモートセンシング：概要

(2) 初期分析とその成果：概要

(3) マイクロCT

(4) イトカワ表面物質（3D内部構造）

LL隕石との比較

(5) イトカワレゴリス（3D外形）

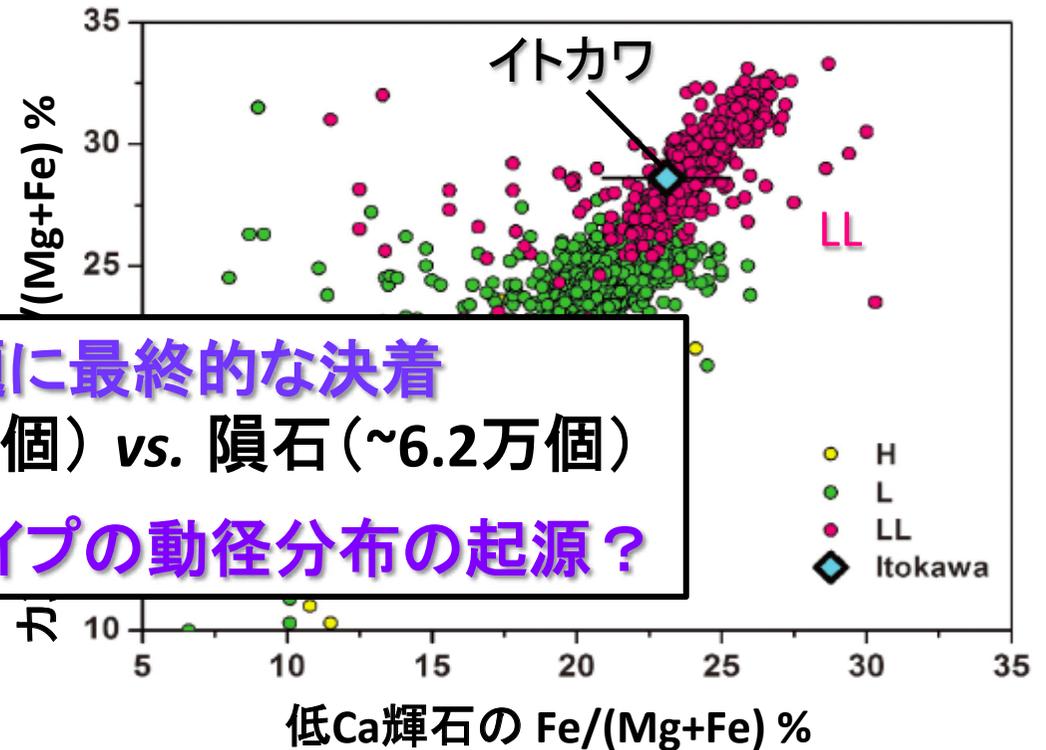
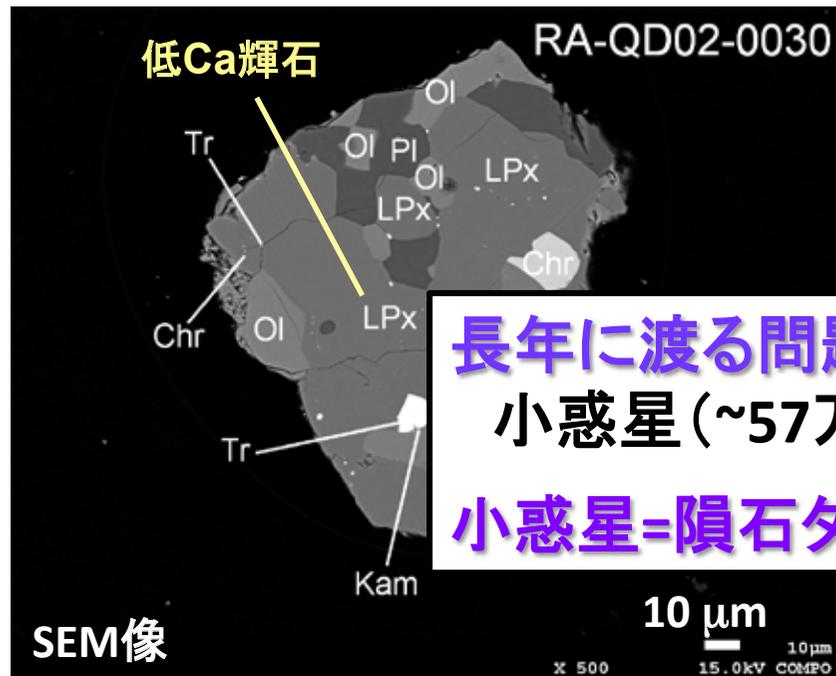
月レゴリスとの比較

(6) イトカワレゴリス（表面観察）

# 大学合同初期分析サブチームと主要メンバー

- ・鉱物学・岩石学的研究：X線回折、電顕(SEM/TEM)、EPMA、XRF  
中村智樹(東北大)、野口高明(茨城大)
- ・3次元構造：マイクロCT  
土山明(阪大)
- ・元素組成：中性子放射化分析  
海老原充(首都大)
- ・同位体・微量元素組成：SIMS  
坂本尚義(北大)
- ・希ガス同位体組成：ガス質量分析  
長尾敬介(東大)・岡崎隆司(九大)
- ・不溶性炭素質物質：顕微ラマン、赤外、X-PEEM  
北島富美雄(九大)
- ・有機物：HP-LC、GC-MS、TOF-SIMS  
奈良岡浩(九大)

# イトカワを作った母天体の物質: LLコンドライト



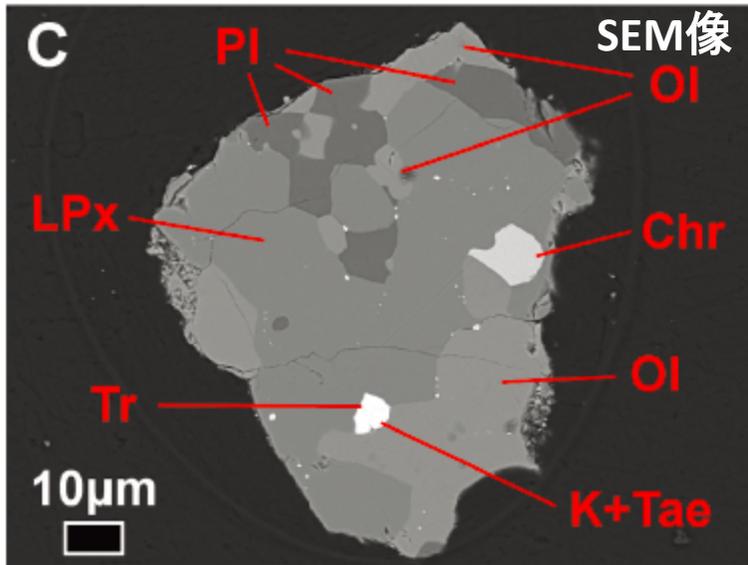
長年に渡る問題に最終的な決着  
小惑星 (~57万個) vs. 隕石 (~6.2万個)  
小惑星=隕石タイプの動径分布の起源?

- 鉍物の化学組成 (Nakamura+ 2011)
- 鉍物の酸素同位体組成 (Yurimoto+ 2011)
- 鉍物の微量元素組成 (Ebihara+ 2011)
- 鉍物の種類と存在比 (Tsuchiyama+ 2011)

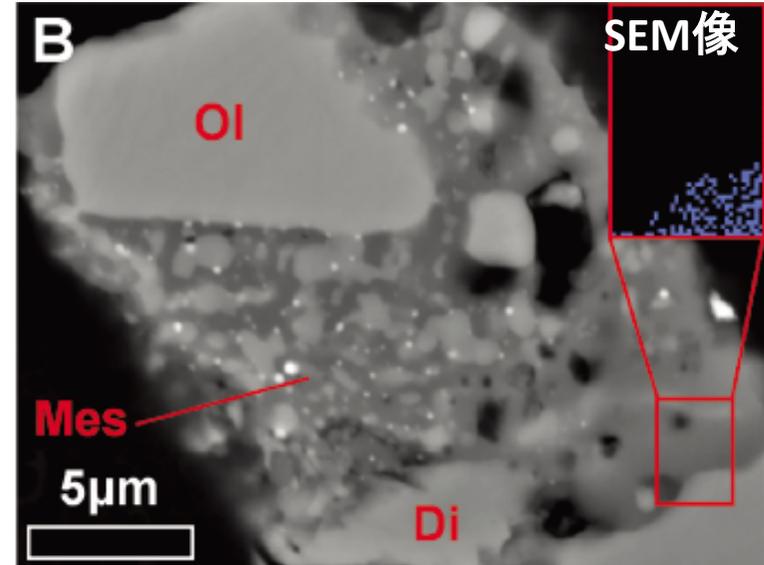
⇒ 普通コンドライト(LLコンドライト)

✓ 反射スペクトルからの推定を直接的に実証

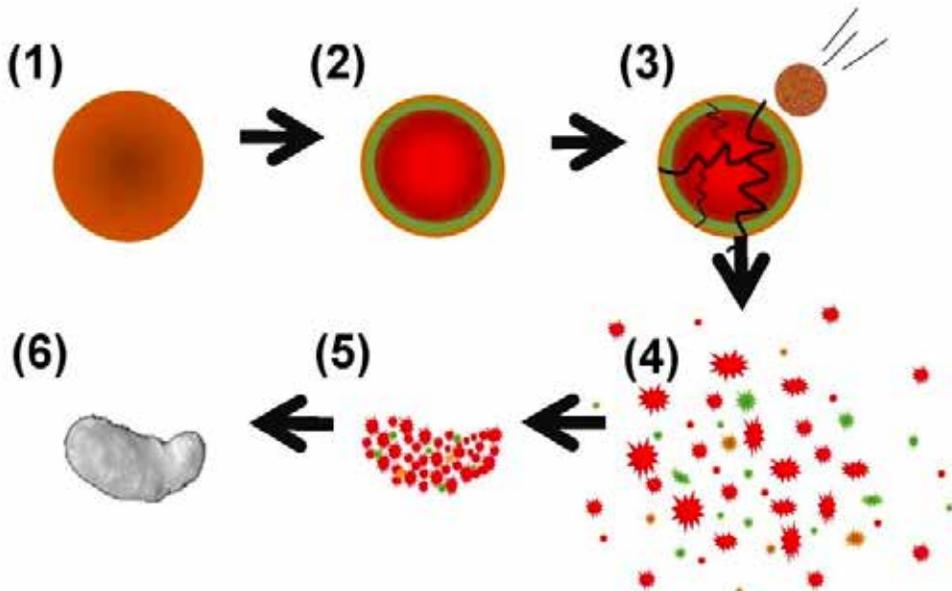
# イトカワを作った母天体の物質：熱変成



熱平衡組織 ⇒ LL5/6 (~800°C)  
・ 大きな母天体 (>20 km)



やや非平衡な組織 ⇒ LL4 (~600°C)  
・ 母天体の浅い部分

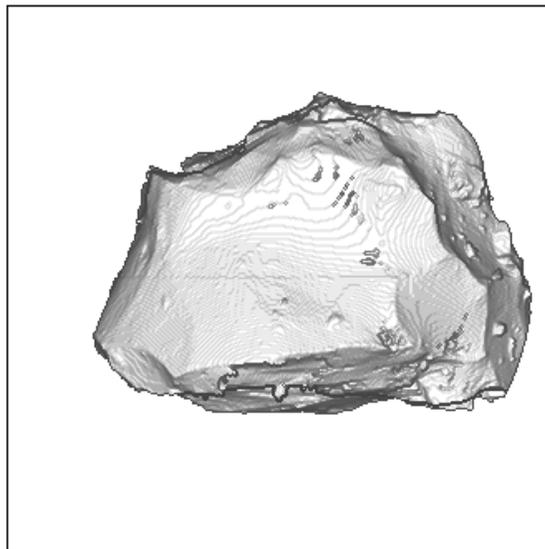


熱源： $^{26}\text{Al}$   
(半減期：71.7万年)

Nakamura+ (2011)

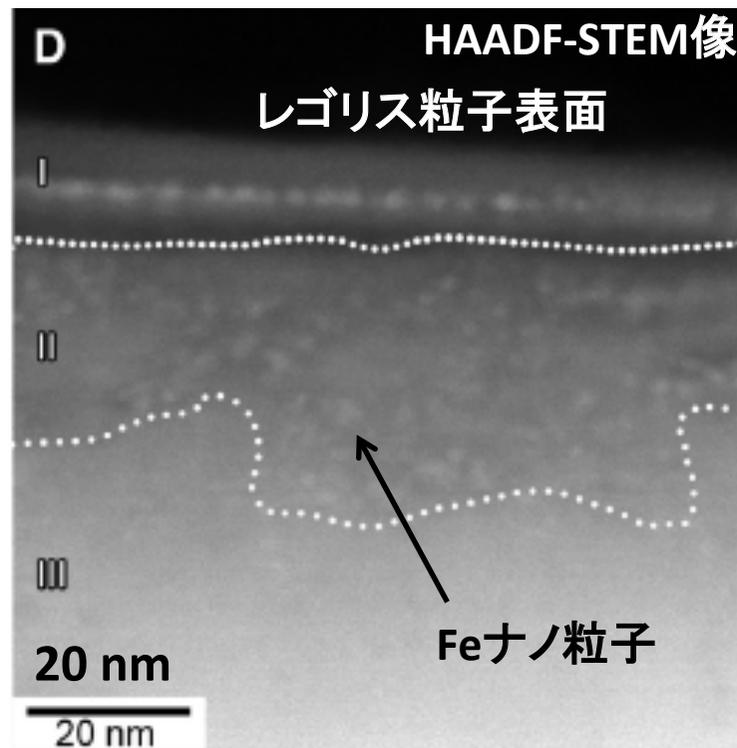
# 小惑星表面でのプロセス:宇宙風化

CT



30  $\mu\text{m}$

レゴリス粒子の3D外形  
衝突破片の摩耗  
(Tsuchiyama+ 2011)



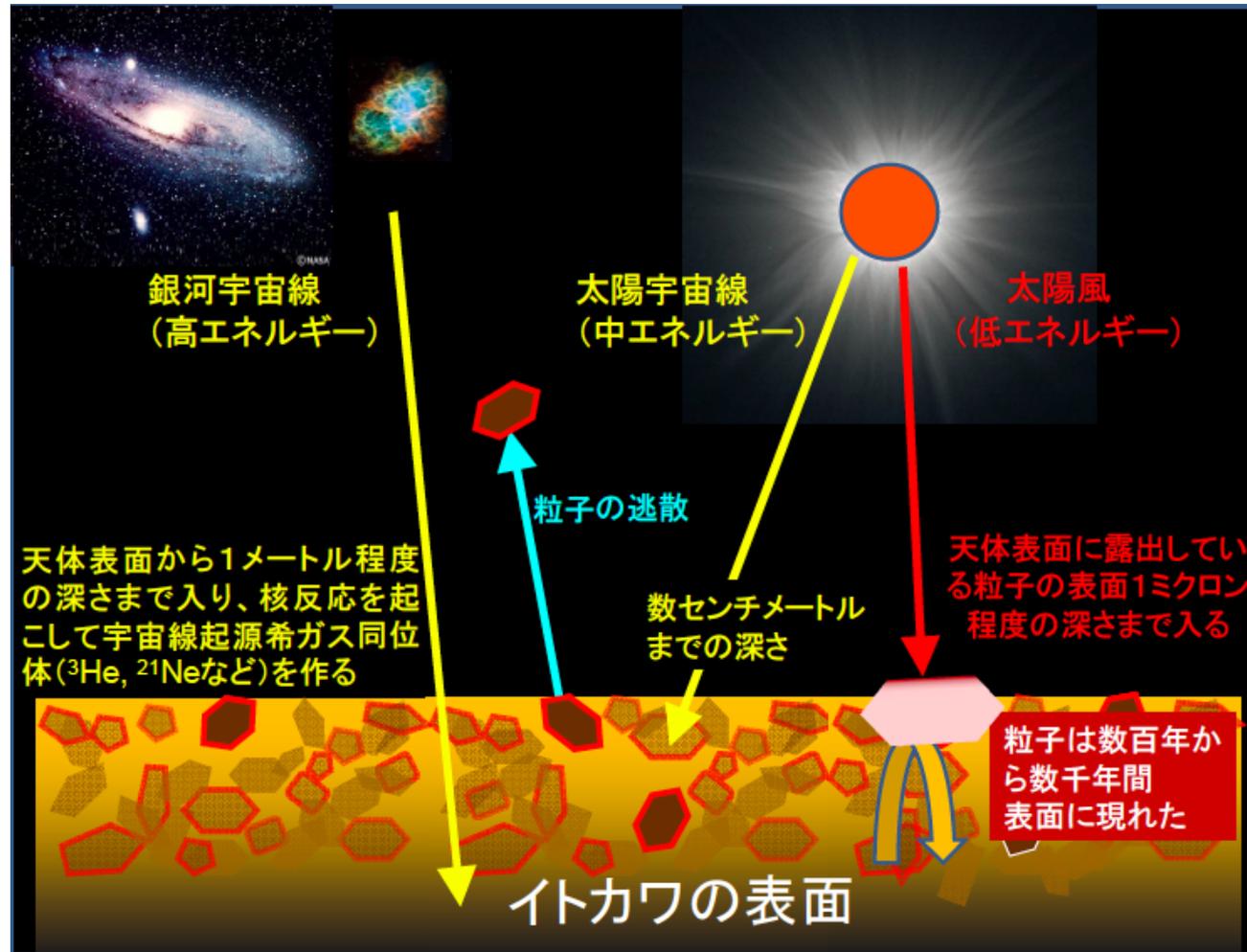
粒子表面に見出された宇宙風化  
(Noguchi+ 2011)

レゴリス粒子のサイエンス: **隕石からではわからない情報**

⇒ 宇宙風化の実証(太陽風の照射、微隕石の衝突)

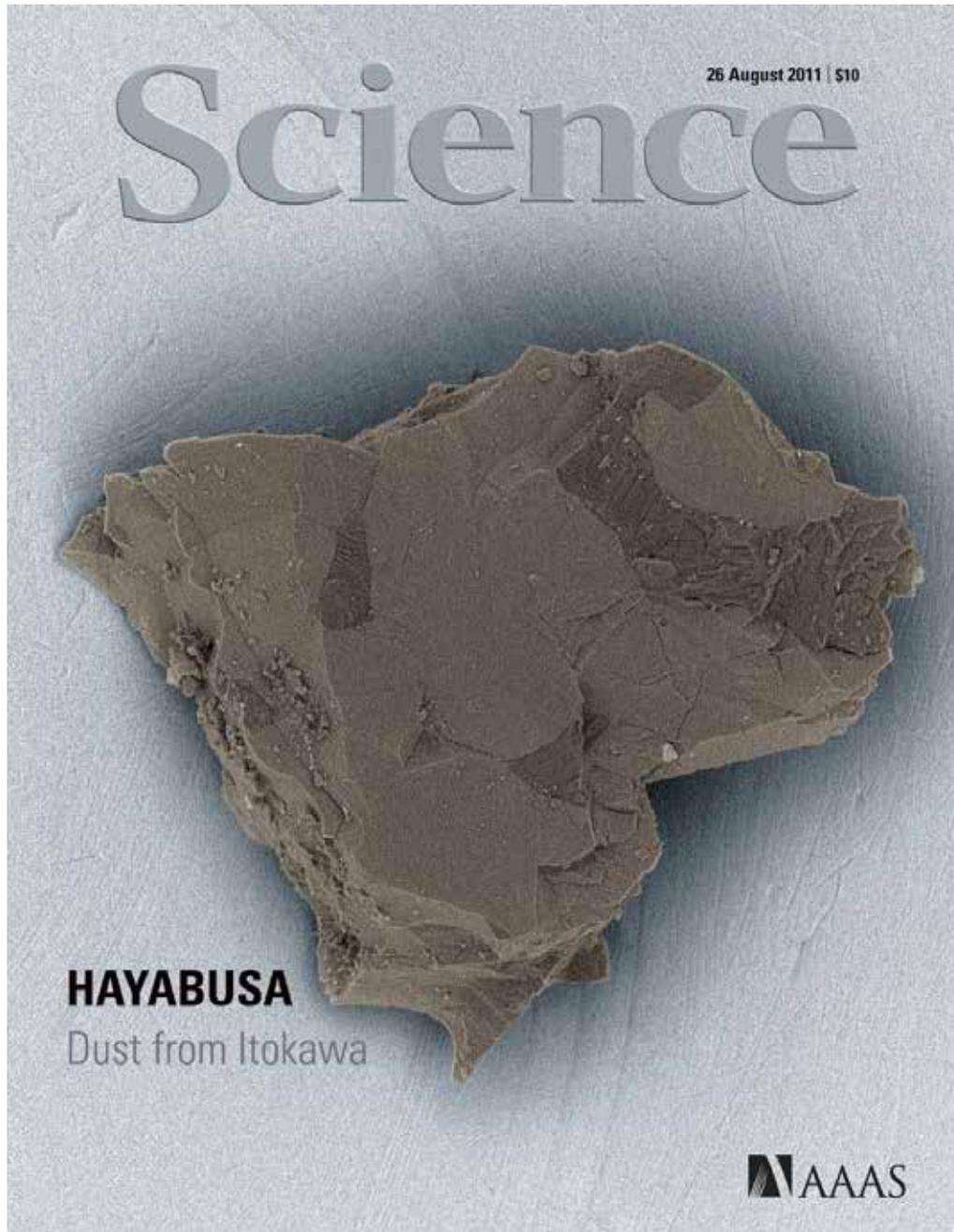
✓ 大気をもたない天体表面の反射スペクトルを変化させる原因

# 宇宙環境と表面プロセス：希ガス同位体組成



レゴリス粒子に打ち込まれた希ガス (Nagao+ 2011)

- ・太陽風成分を検出：粒子がイトカワ最表面にいた時間  $\sim 150$  y
- ・銀河宇宙線成分は検出されない：レゴリスとしての寿命  $< \sim 8$  My
- ・粒子の逃散率： $\sim 10$  cm/My ( $\sim 10$ 億年でイトカワはなくなる)



**Science, 26 August 2011**

**Nakamura et al.**  
**Itokawa Dust Particles: A Direct Link Between S-Type Asteroids and Ordinary Chondrites**

**Yurimoto et al.**  
**Oxygen Isotopic Compositions of Asteroidal Materials Returned from Itokawa by the Hayabusa Mission**

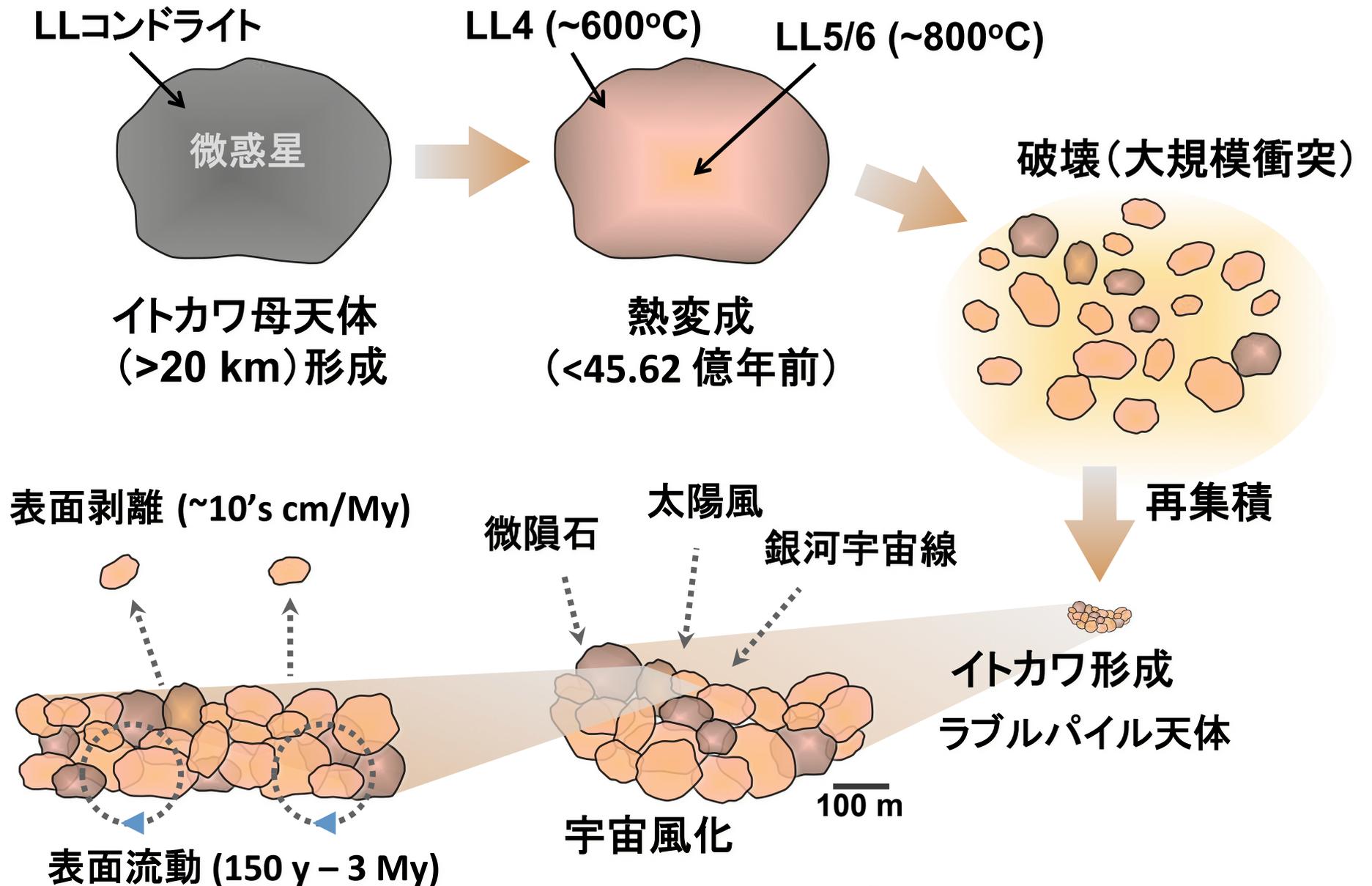
**Ebihara et al.**  
**Neutron Activation Analysis of a Particle Returned from Asteroid Itokawa**

**Tsuchiyama et al.**  
**Three-Dimensional Structure of Hayabusa Samples: Origin and Evolution of Itokawa Regolith**

**Nagao et al.**  
**Irradiation History of Itokawa Regolith Material Deduced from Noble Gases in the Hayabusa Samples**

**Noguchi et al.**  
**Incipient Space Weathering Observed on the Surface of Itokawa Dust Particles**

# はやぶさサンプル初期分析の成果



サンプル: ~200  $\mu\text{m}$  径の相当球

# CARTE DU JOUR

(1) はやぶさ計画とリモートセンシング：概要

(2) 初期分析とその成果：概要

(3) マイクロCT

(4) イトカワ表面物質（3D内部構造）

LL隕石との比較

(5) イトカワレゴリス（3D外形）

月レゴリスとの比較

(6) イトカワレゴリス（表面観察）

# 放射光を用いたマイクロCT：実験

結像型吸収トモグラフィー:

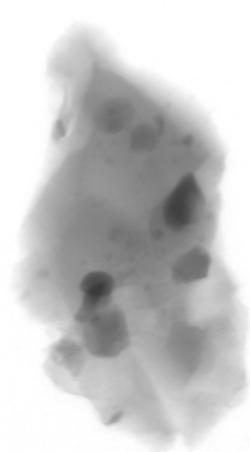
BL47XU, SPring-8

高分解能: 86, 99, 213, 252 nm/pixel

定量的なコントラスト(線吸収係数)

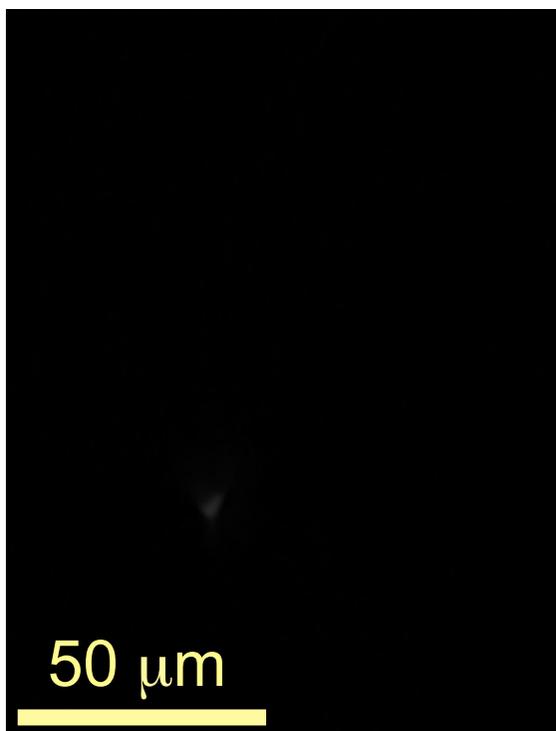
⇒ 鉱物の3次元空間分布(3次元組織)

イトカワレゴリス粒子の3次元外形

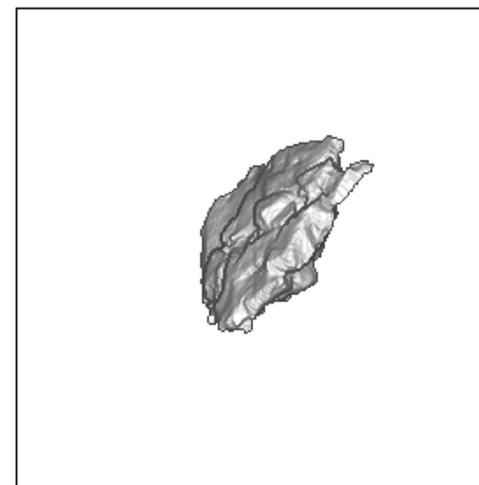


投影像

Sample: RA-QD02-0031



CT像 (8 keV)



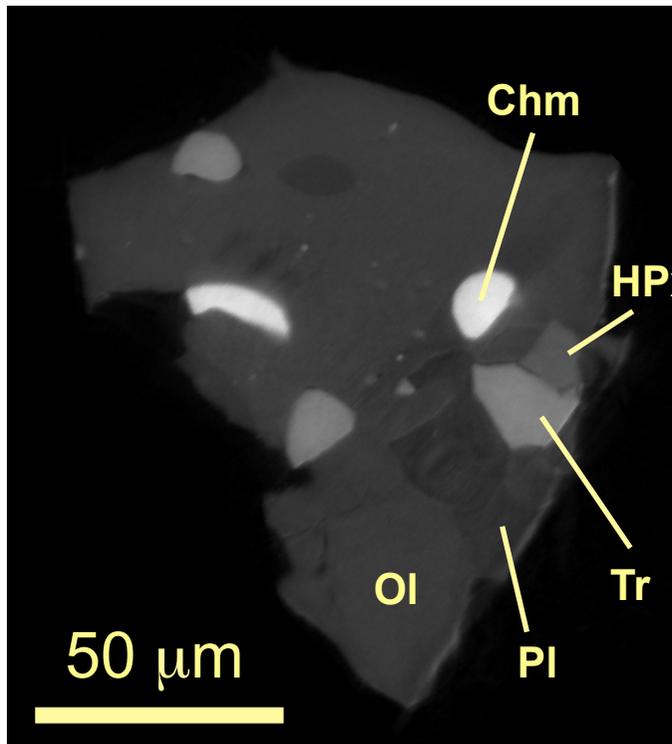
3次元外形像

# Analytical Dual-energy Microtomography

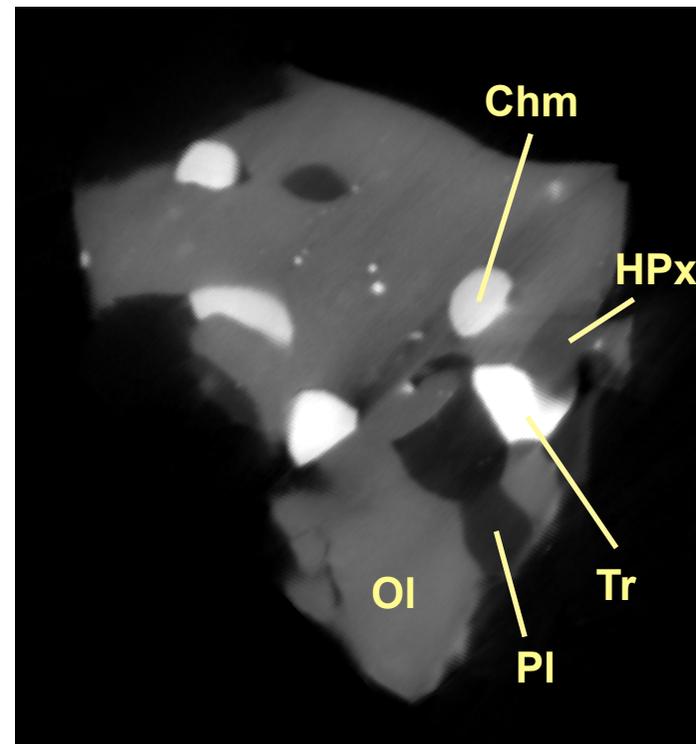
CT像の画素サイズ: 86, 99, 213, 252 nm/pixel

X線エネルギー: 7, 8 keV (Fe K吸収端: 7.1 keV)

⇒ X線線吸収係数から鉱物の同定可能



CT image (7 keV)



CT image (8 keV)

Ol: カンラン石  $(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4$

HPx: Caに富む輝石  $\text{Ca}(\text{Mg,Fe})\text{Si}_2\text{O}_6$

Pl: 斜長石  $(\text{Na,Ca})(\text{Al,Si})_2\text{Si}_2\text{O}_8$

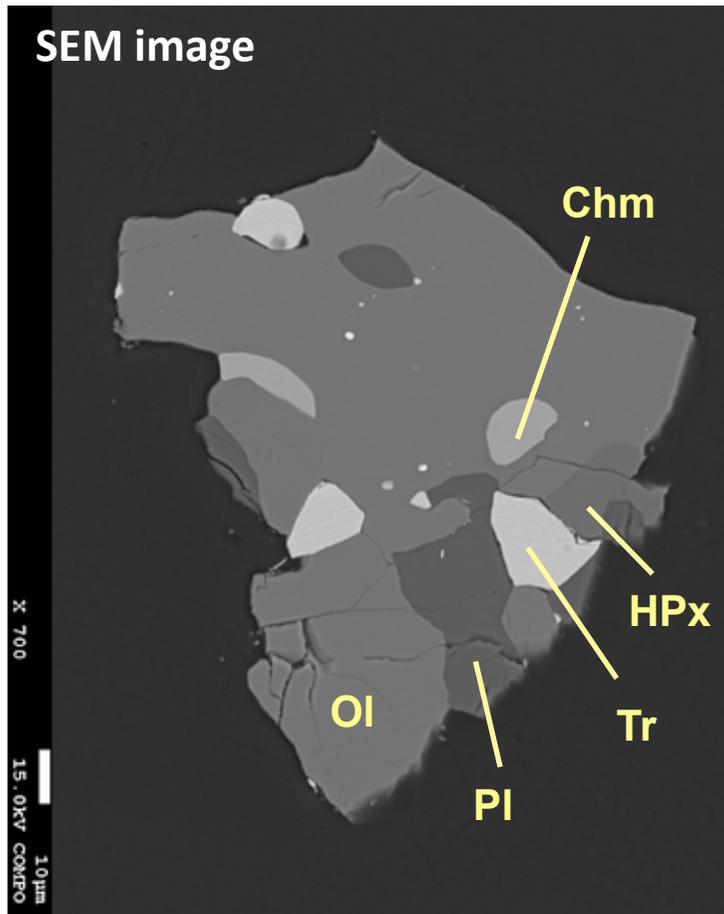
Chm: クローマイト  $\text{FeCr}_2\text{O}_4$

Tr: トロイライト  $\text{FeS}$

Sample: RA-QD02-0031

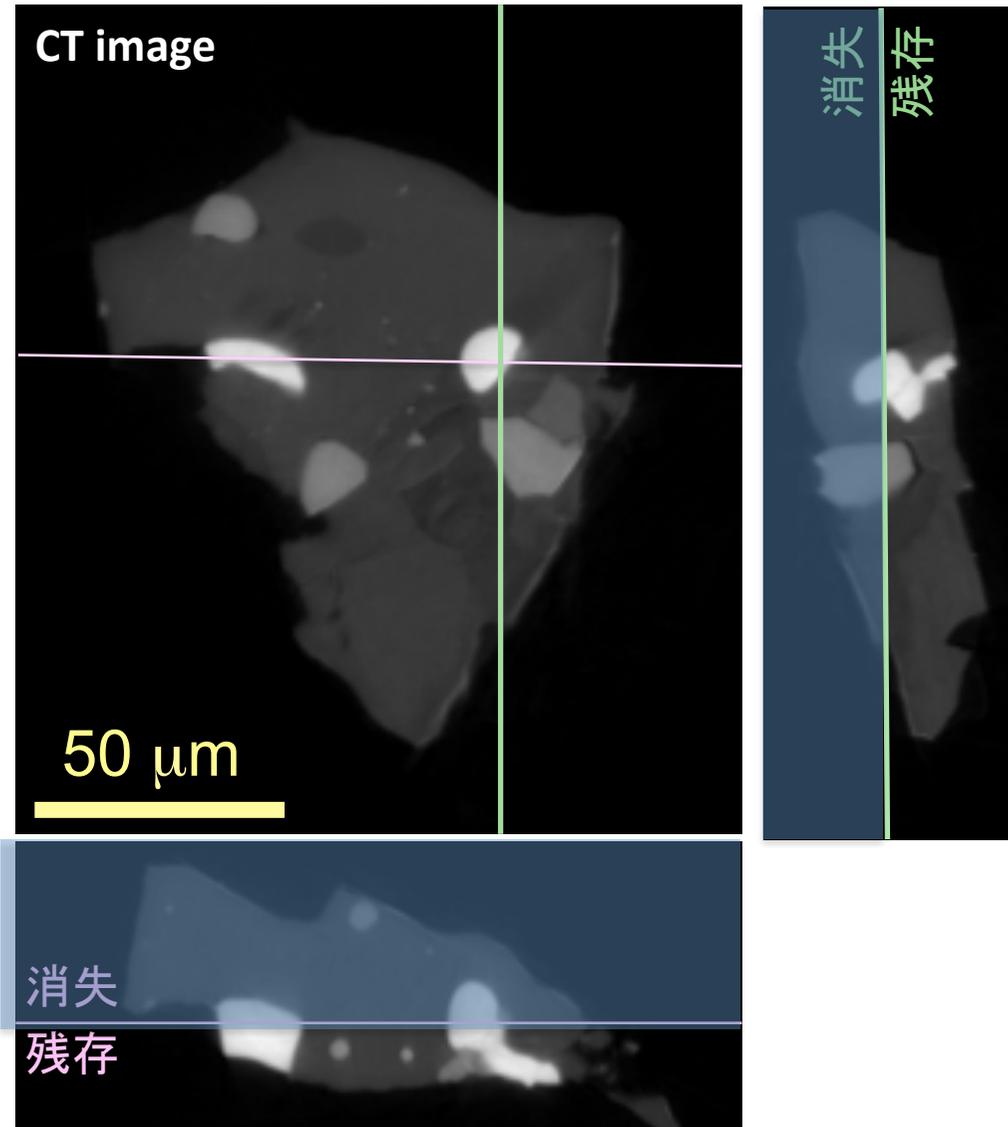
# 破壊分析のデザイン

## 最適な切断面を得る



研磨後のSEM像

Sample: RA-QD02-0031



CT像(7 keV)

研磨面に平行になるように回転してある

# CARTE DU JOUR

- (1) はやぶさ計画とリモートセンシング：概要
- (2) 初期分析とその成果：概要
- (3) マイクロCT
- (4) イトカワ表面物質(3D内部構造)  
LL隕石との比較
- (5) イトカワレゴリス(3D外形)  
月レゴリスとの比較
- (6) イトカワレゴリス(表面観察)

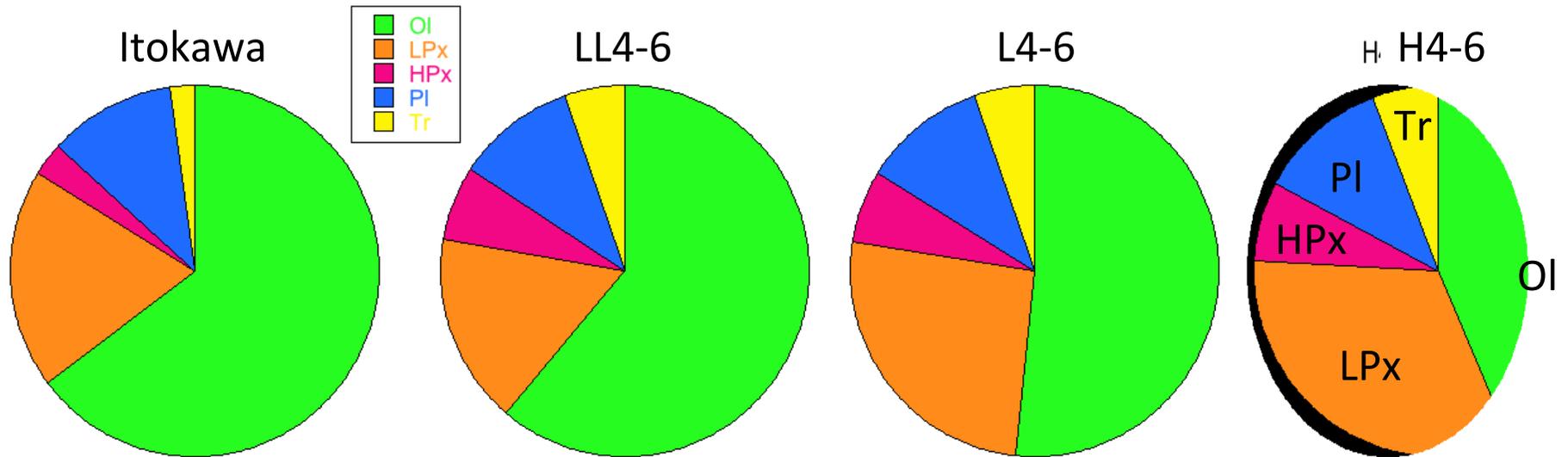
# サンプル

Sample size: ~30-180  $\mu\text{m}$

	表面 FE-SEM	3D構造 X線マイクロトモグラフィー
Itokawa		
40粒子(A室)*		✓
4粒子(A室)	✓	✓
4粒子(B室)	✓	✓
LL6コンドライト		
12粒子(Kilabo隕石)		✓
15粒子(Ensisheim隕石)		✓
LL5コンドライト		
15粒子(Tuxtuac隕石)		✓

\* Tsuchiyama+ (2011)

# 鉱物の存在比(モード組成)⇒LL5/6 コンドライト



OI: カンラン石  $(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4$   
 LPx: Caに乏しい輝石  $(\text{Mg,Fe})\text{Si}_2\text{O}_6$   
 HPx: Caに富む輝石  $(\text{Ca,Mg,Fe})\text{Si}_2\text{O}_6$   
 Pl: 斜長石  $(\text{Na,Ca})(\text{Al,Si})\text{AlSi}_2\text{O}_8$   
 Tr: トロイライト  $\text{FeS}$

CT (Tsuchiyama+ 2011)

体積:  $4.2 \times 10^6 \mu\text{m}^3$  (~200  $\mu\text{m}$ 径の球)

質量: 15  $\mu\text{g}$       空隙率: 1.4 %

粒子密度:  $3.4 \text{ g/cm}^3$  (平均密度:  $3.1 \pm 0.2 \text{ g/cm}^3$ )

イトカワの空隙率:  $\sim 39 \pm 6 \%$  (←イトカワの密度  $1.9 \text{ g/cm}^3$ )

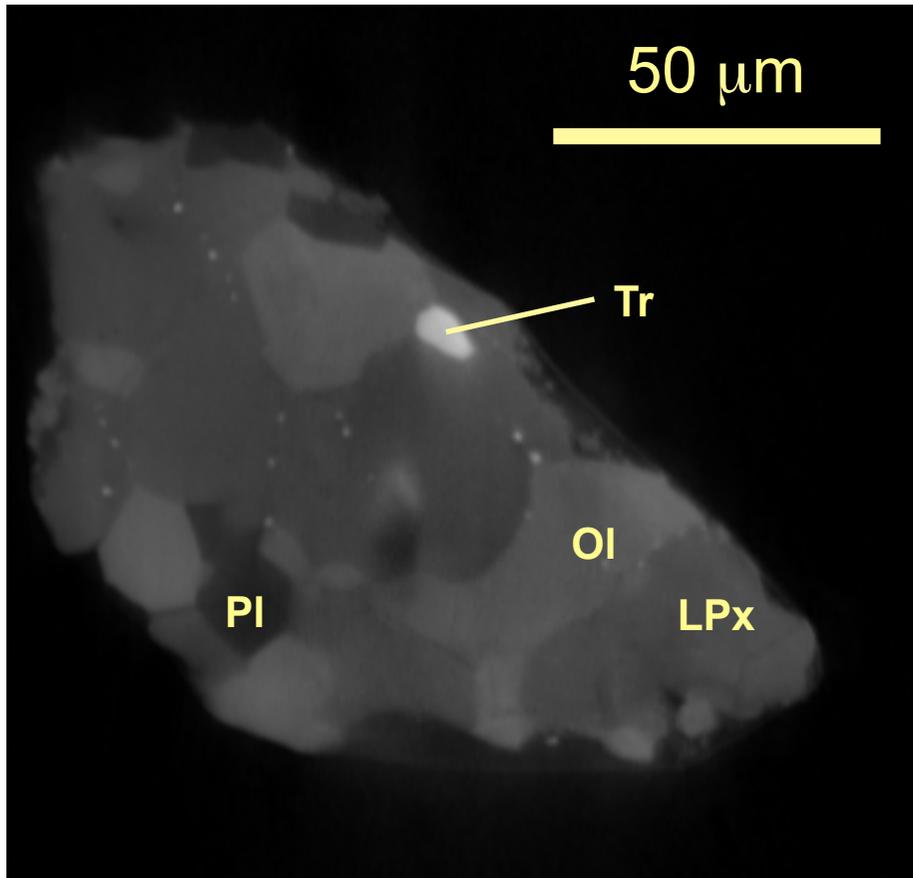
⇒ ラブルパイルモデル (Fujiwara+ 2006)

# 3D組織: Itokawa vs. LL5,6 particles

	<b>Itokawa</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>LL6</b>	<b>Kilabo</b>	<b>Ensisheim</b>	<b>LL5</b>
<b>Minerals</b>							
<b>Polymineralic</b>	<b>22</b>	19	3	<b>13</b>	6	7	<b>9</b>
<b>Monomineralic</b>	<b>26</b>	25	1	<b>14</b>	6	8	<b>6</b>
<b>Voids</b>							
<b>Abundant</b>	<b>19</b>	16	3	<b>0</b>	0	0	<b>8</b>
<b>Porous</b>	<b>5</b>	5	0	<b>0</b>	0	0	<b>5</b>
<b>Inclusions</b>	<b>19</b>	16	3	<b>0</b>	0	0	<b>6</b>
<b>None/Rare</b>	<b>29</b>	28	1	<b>27</b>	12	15	<b>7</b>
<b>Cracks</b>							
<b>Abundant</b>	<b>7</b>	7	0	<b>8</b>	6	2	<b>11</b>
<b>None/Rare</b>	<b>41</b>	37	4	<b>19</b>	6	13	<b>4</b>
<b>Edges</b>							
<b>Sharp</b>	<b>35</b>	32	3				
<b>Rounded</b>	<b>13</b>	12	1				
<b>Total</b>	<b>48</b>	44	4	<b>27</b>	12	15	<b>15</b>

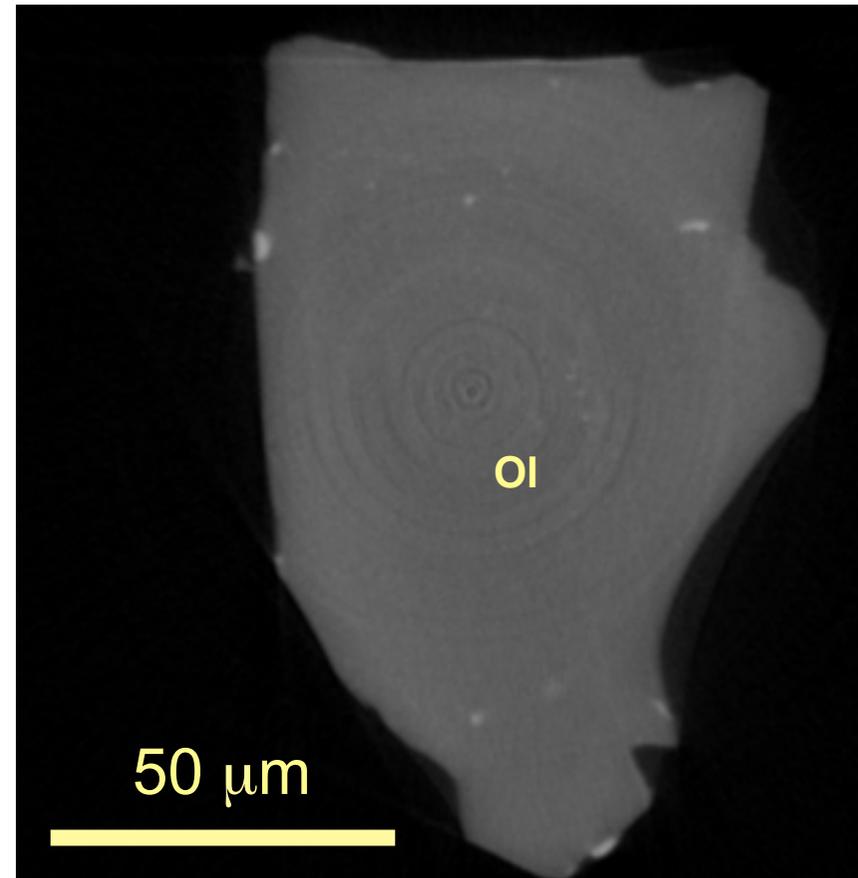
# 3D組織: 鈹物粒径

**Polyminerallic**  
22/48 粒子 (46%)



CT image (8 keV)  
RA-QD02-0030

**(Almost) Monominerallic**  
26/48 粒子 (54%)  
OI:17, LPx:6, PI:3



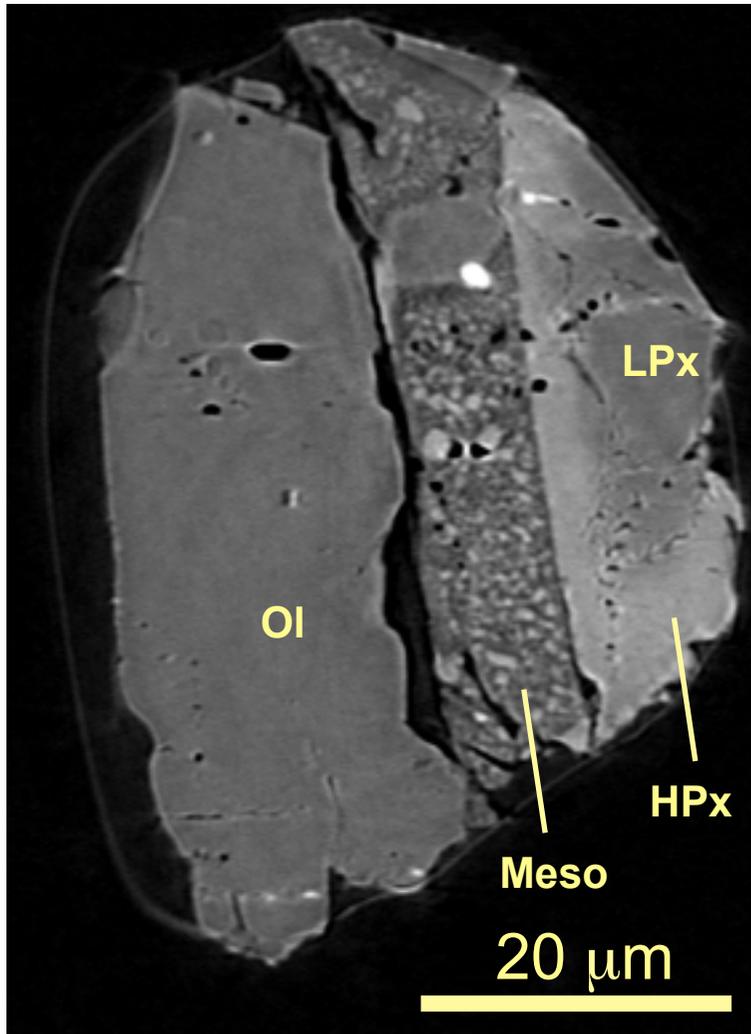
CT image (7 keV)  
RA-QD02-0023

# 3D組織: Itokawa vs. LL5,6 particles

	Itokawa	A	B	LL6	Kilabo	Ensisheim	LL5
<b>Minerals</b>							
Polymineralic	22	19	3	13	6	7	9
Monomineralic	26	25	1	14	6	8	6
<b>Voids</b>							
Abundant	構成粒子サイズ: LL6とLL5の区別はつかない						8
Inclusions	19	16	3	0	0	0	6
None/Rare	29	28	1	27	12	15	7
<b>Cracks</b>							
Abundant	7	7	0	8	6	2	11
None/Rare	41	37	4	19	6	13	4
<b>Edges</b>							
Sharp	35	32	3				
Rounded	13	12	1				
<b>Total</b>	<b>48</b>	<b>44</b>	<b>4</b>	<b>27</b>	<b>12</b>	<b>15</b>	<b>15</b>

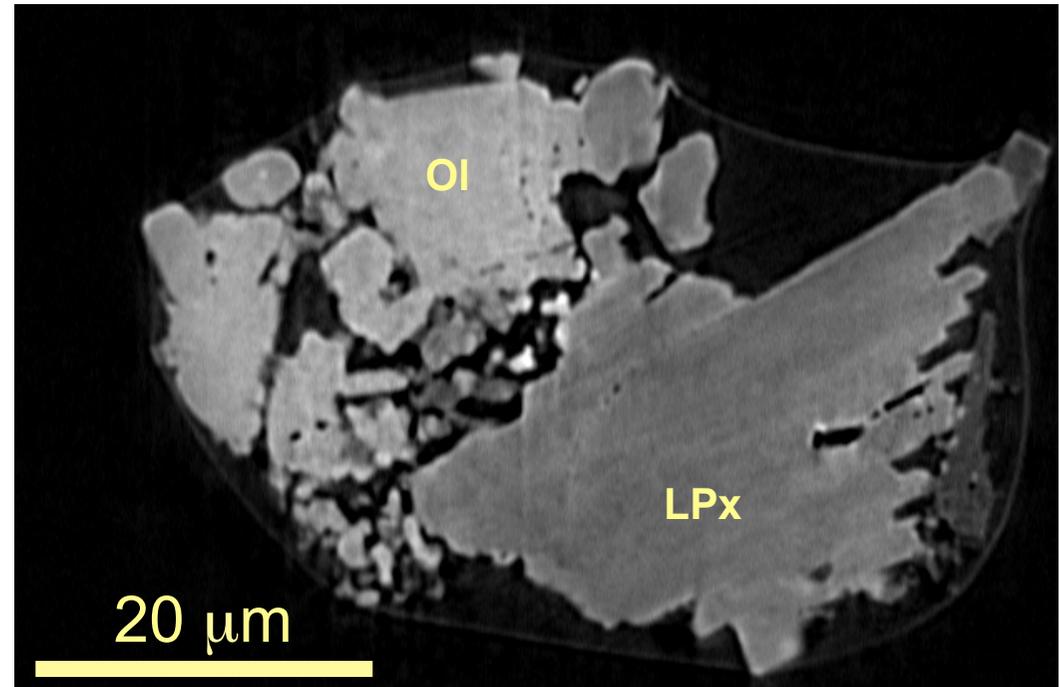
# やや非平衡な組織をもつもの: LL4

コンドリュールの欠片?



CT image (7 keV)  
RA-QD02-0048

不均一な組成 (LPx)  
Fe/Mg比の変動



CT image (8 keV)  
RA-QD02-0060

# 3D組織: 空隙に富む粒子 (CT)

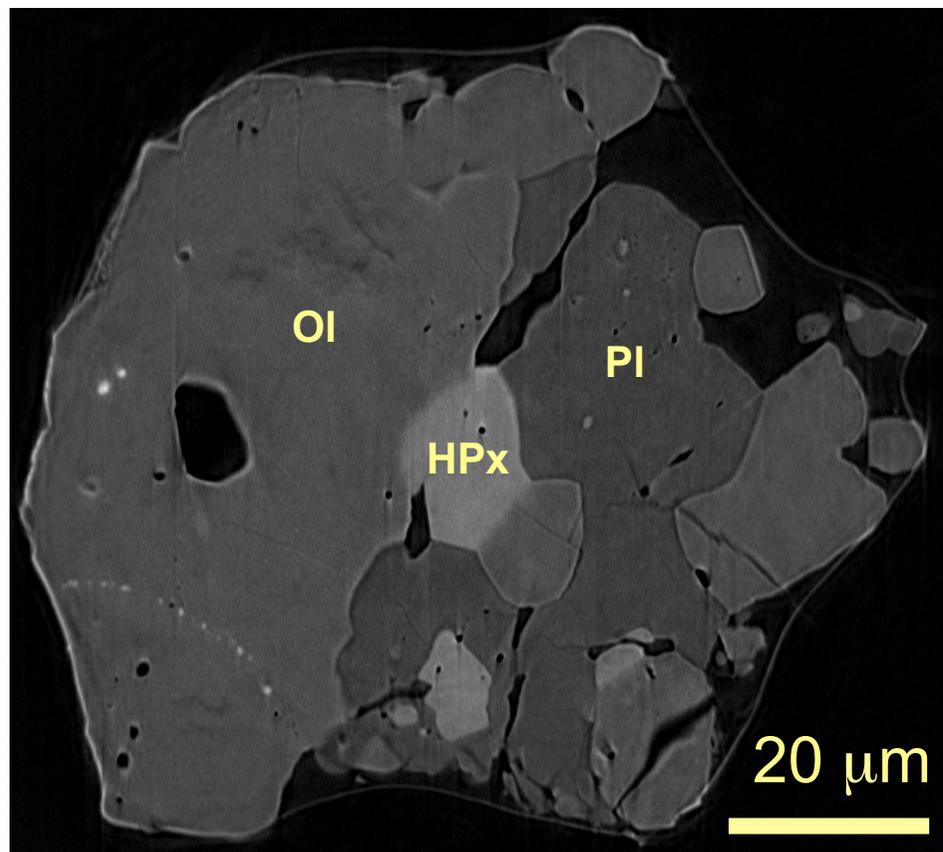
19/48 粒子 (40%)

大きな丸い空隙 (porous)  
(大規模) 衝撃変成起源?

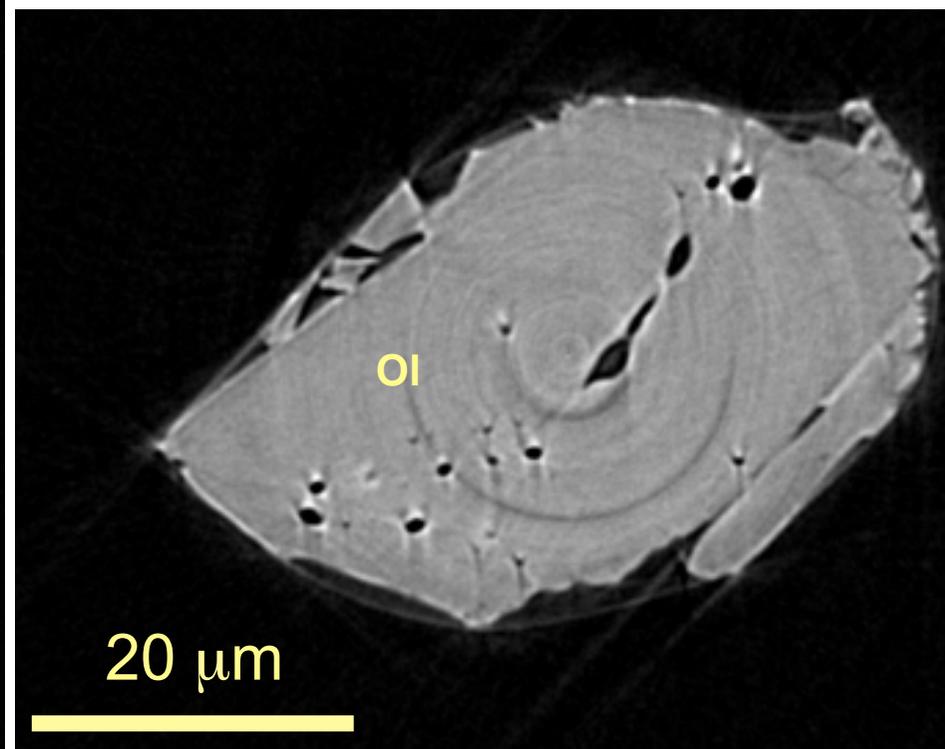
5/48 粒子 (10%)

空隙包有物 (inclusions)  
熱変成起源?

19/48 粒子 (40%)

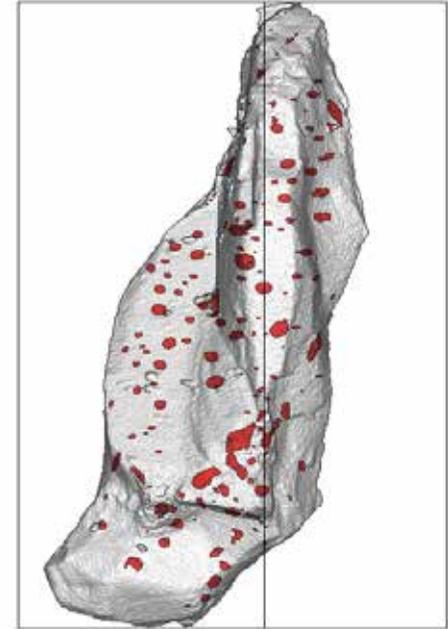
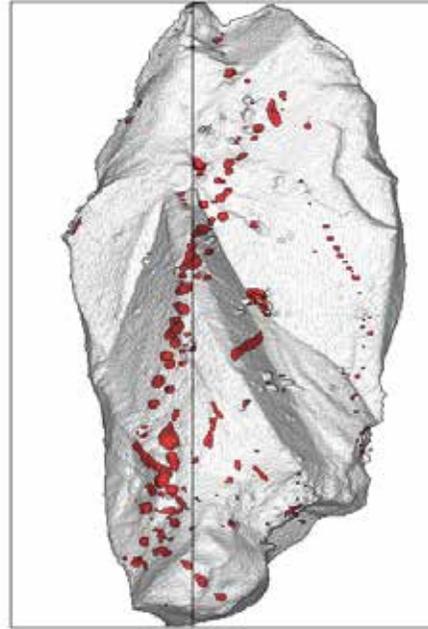
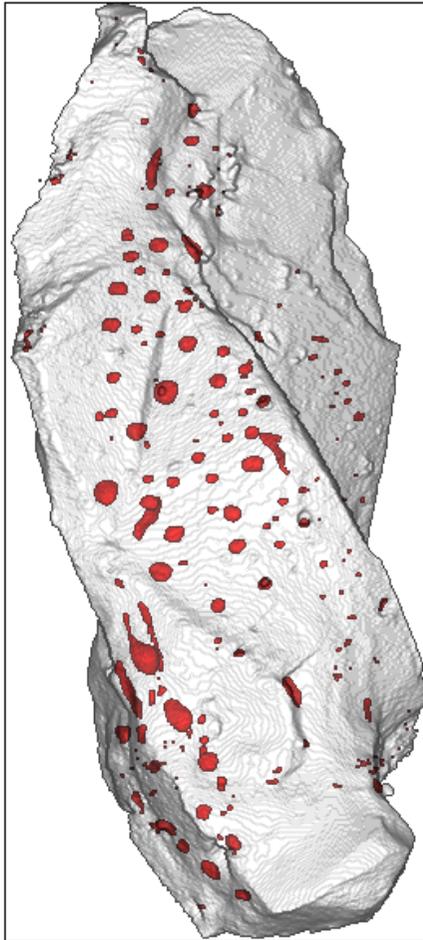


CT image (7 keV)  
RA-QD02-0013 (porosity: 4.8%)

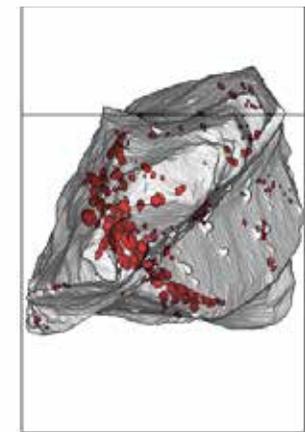


CT image (7 keV)  
RA-QD02-0019 (porosity: 3.9%)

# 空隙包有物の面状分布 (CT)



- ✓ 面状に分布
  - ✓ やや伸長した空隙が一方方向に並ぶ(チューブ状の空隙も存在)
  - ✓ 単結晶
- ⇒ クラックが熱変成で閉じた (healed crack) ?



20  $\mu\text{m}$

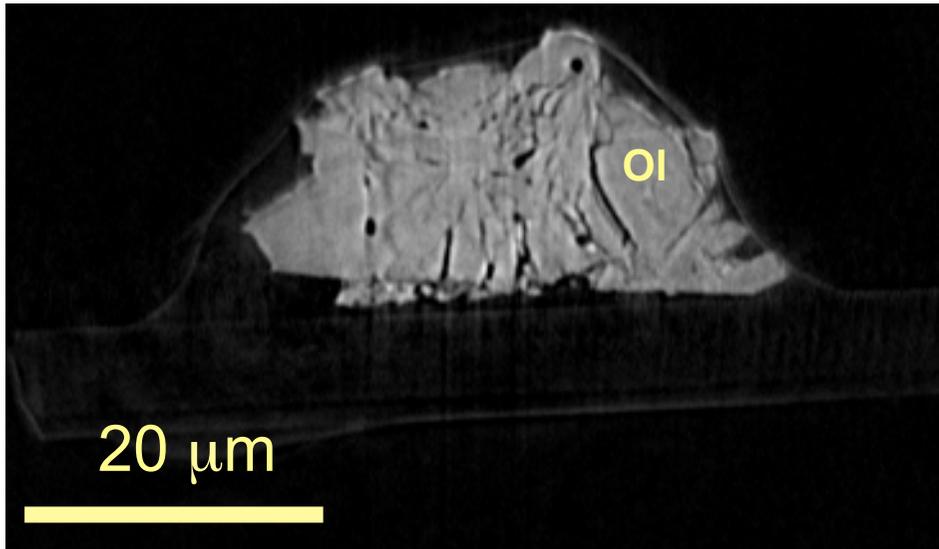
RA-QD02-0014 (porosity: 0.7%)

# 3D組織: Itokawa vs. LL5,6 particles

	Itokawa	A	B	LL6	Kilabo	Ensisheim	LL5
<b>Minerals</b>							
Polymineralic	22	19	3	13	6	7	9
Monomineralic	26	25	1	14	6	8	6
<b>Voids</b>							
Abundant	19	16	3	0	0	0	8
Porous	5	5	0	0	0	0	5
Inclusions	19	16	3	0	0	0	6
None/Rare	29	28	1	27	12	15	7
<b>Cracks</b>							
Abundant	LL6とLL5の違いは隕石の個性に見える						11
None/Rare	41	37	4	19	6	13	4
<b>Edges</b>							
Sharp	35	32	3				
Rounded	13	12	1				
<b>Total</b>	<b>48</b>	<b>44</b>	<b>4</b>	<b>27</b>	<b>12</b>	<b>15</b>	<b>15</b>

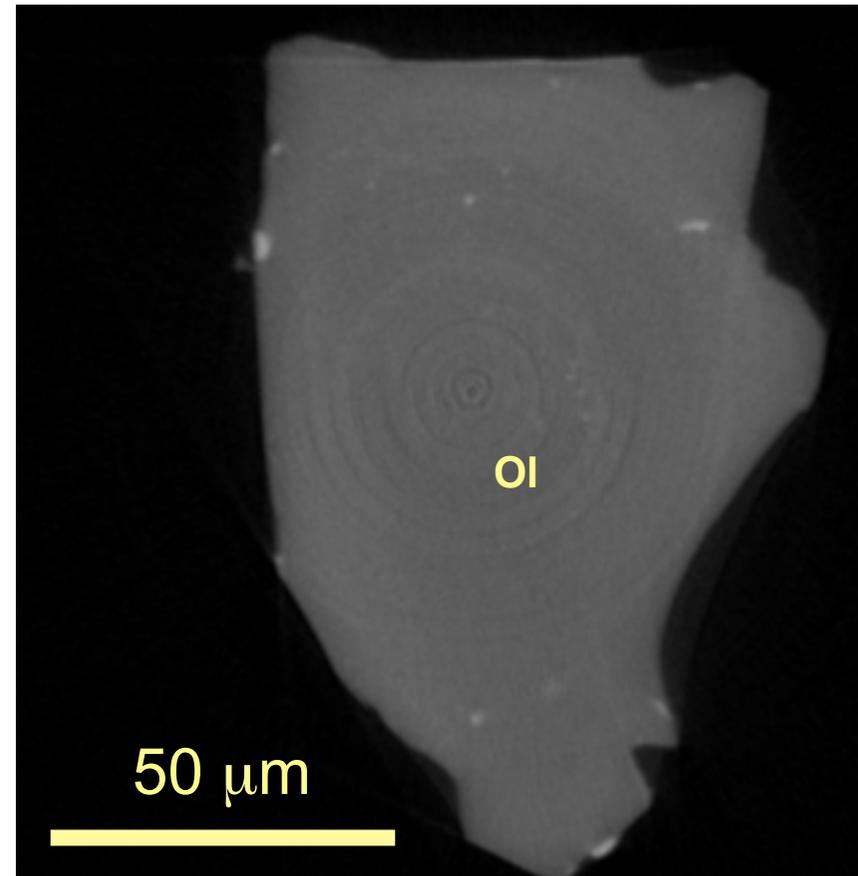
# 3D組織:クラック

クラックに富む  
衝撃変成したものが熱変成？  
7/48 粒子 (15%)



CT image (7 keV)  
RA-QD02-0062-1

クラックは(ほとんど)ない  
41/48 粒子 (85%)



CT image (7 keV)  
RA-QD02-0023 (porosity: 0.0%)

# 3D組織: Itokawa vs. LL5,6 particles

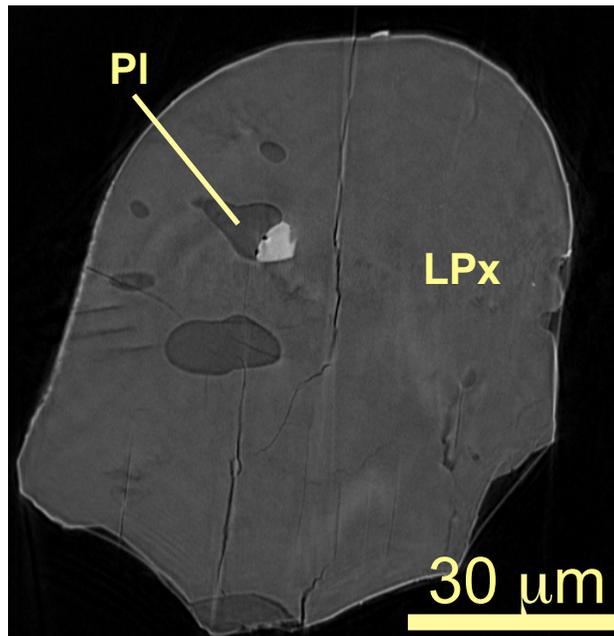
	Itokawa	A	B	LL6	Kilabo	Ensisheim	LL5
<b>Minerals</b>							
Polymineralic	22	19	3	13	6	7	9
Monomineralic	26	25	1	14	6	8	6
<b>Voids</b>							
Abundant	19	16	3	0	0	0	8
Porous	5	5	0	0	0	0	5
Inclusions	19	16	3	0	0	0	6
None/Rare	29	28	1	27	12	15	7
<b>Cracks</b>							
Abundant	7	7	0	8	6	2	11
None/Rare	41	37	4	19	6	13	4
<b>Edges</b>							
Sharp	15	12	1				
Rounded							
<b>Total</b>	<b>48</b>	<b>44</b>	<b>4</b>	<b>27</b>	<b>12</b>	<b>15</b>	<b>15</b>

Porousな粒子が多いとクラックも多い？

# CARTE DU JOUR

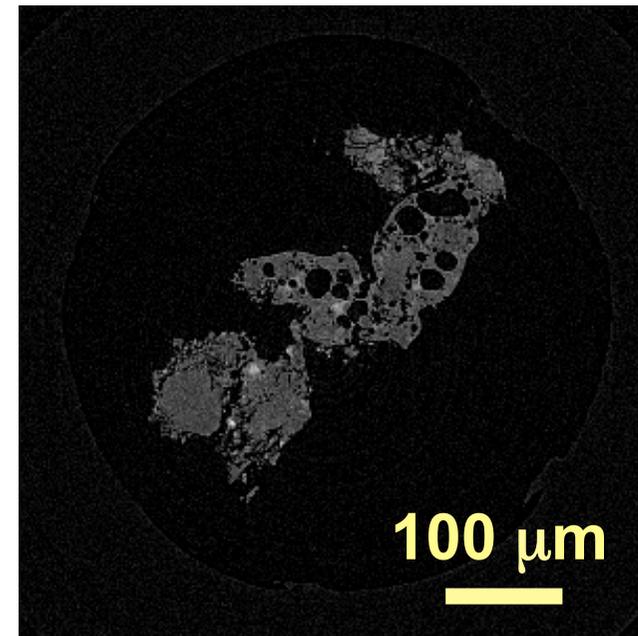
- (1) はやぶさ計画とリモートセンシング：概要
- (2) 初期分析とその成果：概要
- (3) マイクロCT
- (4) イトカワ表面物質（3D内部構造）  
LL隕石との比較
- (5) イトカワレゴリス（3D外形）  
月レゴリスとの比較
- (6) イトカワレゴリス（表面観察）

# イトカワ粒子：溶融組織がない



イトカワ粒子には溶融組織が  
観察されない  
(Tsuchiyama et al., 2011)

☞ 衝突速度：小  
~5 km/s  
(小惑星同士の相対速度)

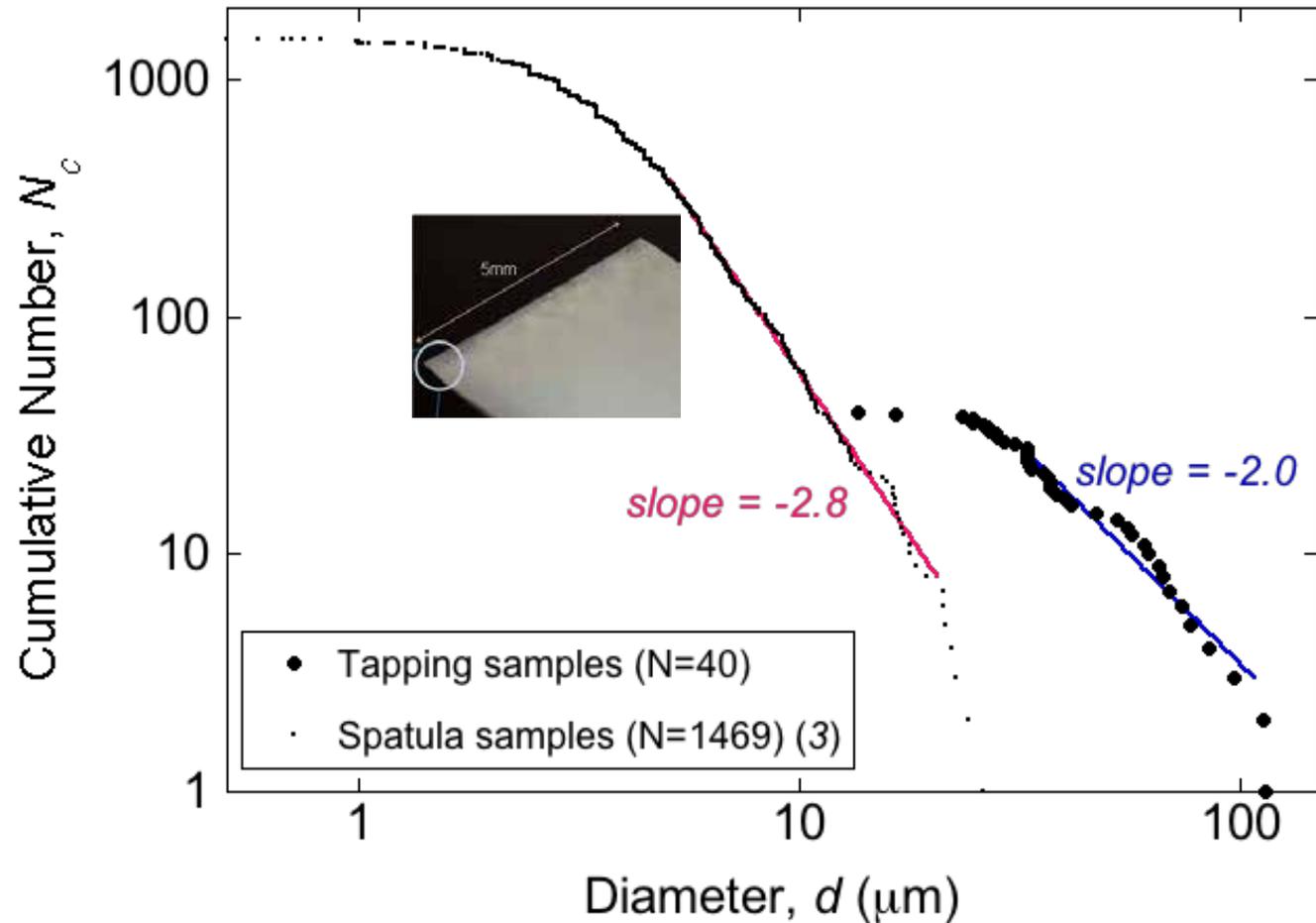


Agglutinate：月レゴリス粒子  
(Apollo 16)の溶融組織  
(Katagiri et al., 2010)

☞ 衝突速度：大  
>~10 km/s  
(>地球の脱出速度)

衝突実験 (e.g., Kadono, 2010) ととも整合的

# 粒子サイズ分布



✓ 累積サイズ分布:

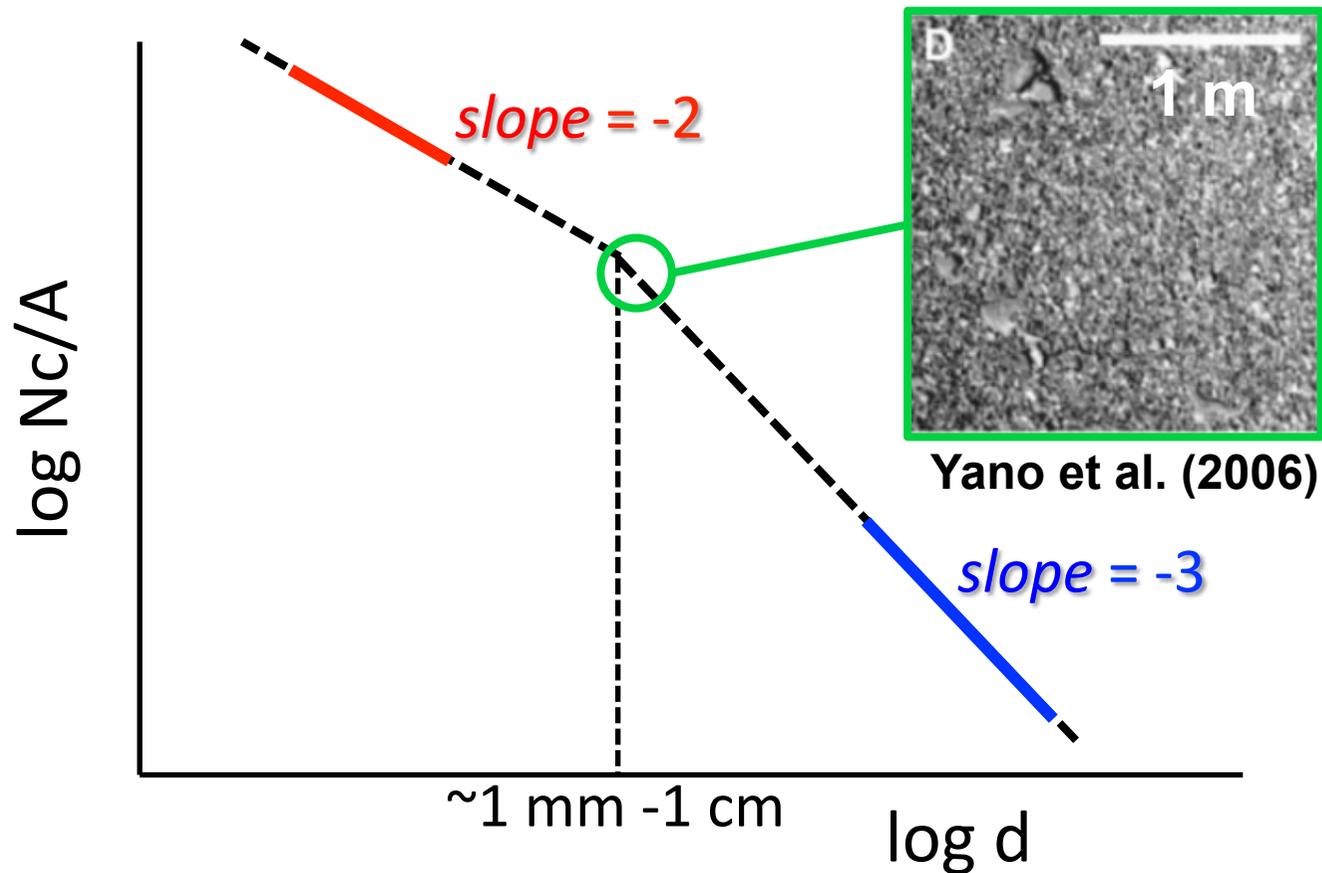
タッピング・サンプル (N=40): log slope;  $n \sim -2.0$

スパチュラ・サンプル (N=1469, Nakamura et al., 2011):  $n \sim -2.8$

大きな粒子はサンプル時に破砕されている  $\Rightarrow n \rightarrow -2$

イトカワ粒子 (10-100  $\mu\text{m}$ ):  $n \sim -2$

# 粒子サイズ分布: イトカワ レゴリスとボールダー



## ✓ 累積サイズ分布:

イトカワ レゴリス(10-100  $\mu\text{m}$ ):

$n \sim -2$

イトカワ ボールダー(5-30 m):

$n = -3.1$  (Michikami et al., 2008)

エロス ボールダー (15-80 m):

$n = -3.2$  (Thomas et al., 2001)

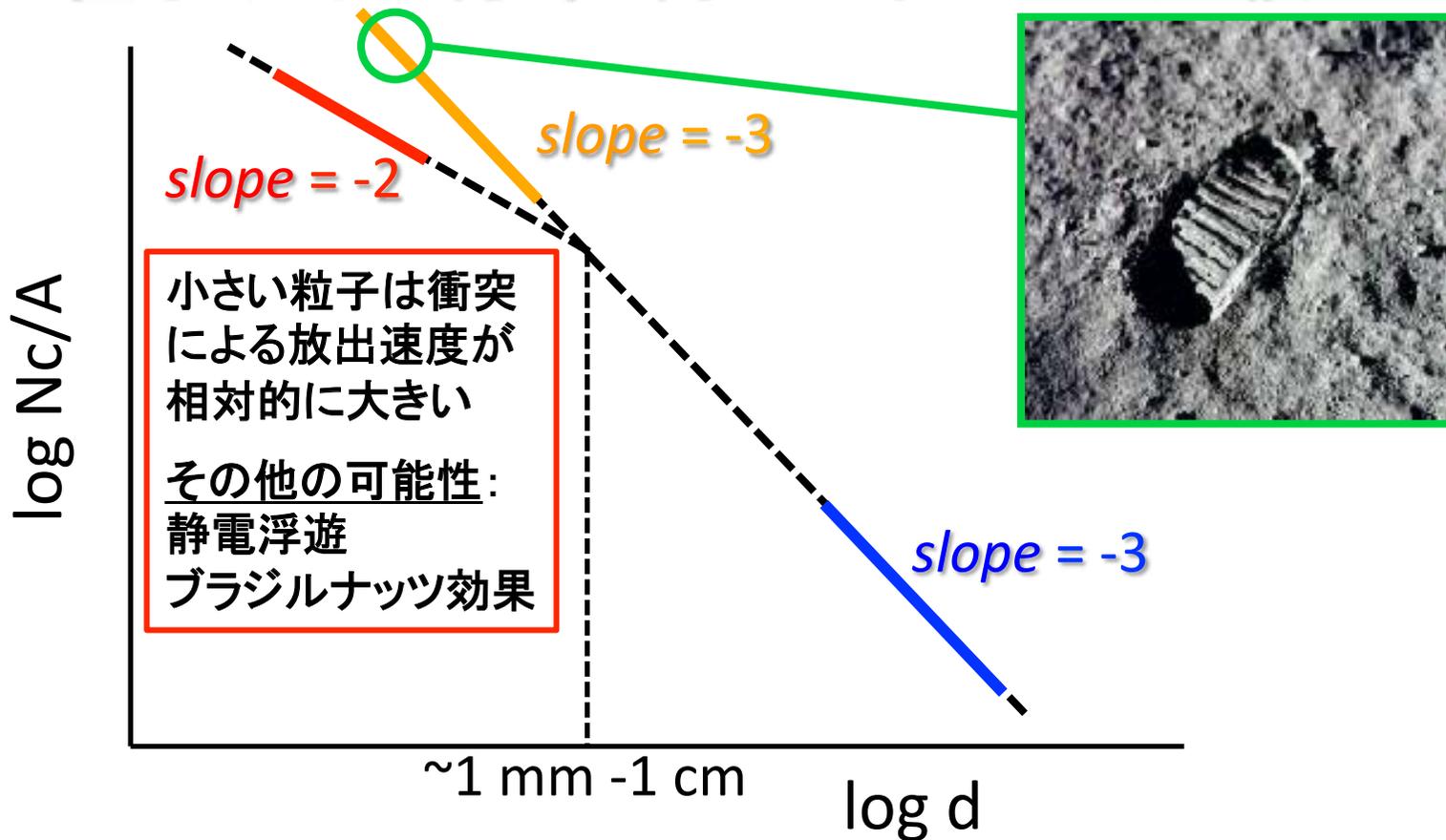
月レゴリス (20-500  $\mu\text{m}$ ):

$n \sim -3.1 \sim -3.3$  (Heiken et al., 1991)

破壊実験破片:

$n = -2.0$  (Fujiwara et al., 1977)

# 粒子サイズ分布：月レゴリスとの比較



## ✓ 累積サイズ分布:

イトカワ レゴリス(10-100  $\mu\text{m}$ ):

$n \sim -2$

イトカワ ボールダー(5-30 m):

$n = -3.1$  (Michikami et al., 2008)

エロス ボールダー (15-80 m):

$n = -3.2$  (Thomas et al., 2001)

月レゴリス (20-500  $\mu\text{m}$ ):

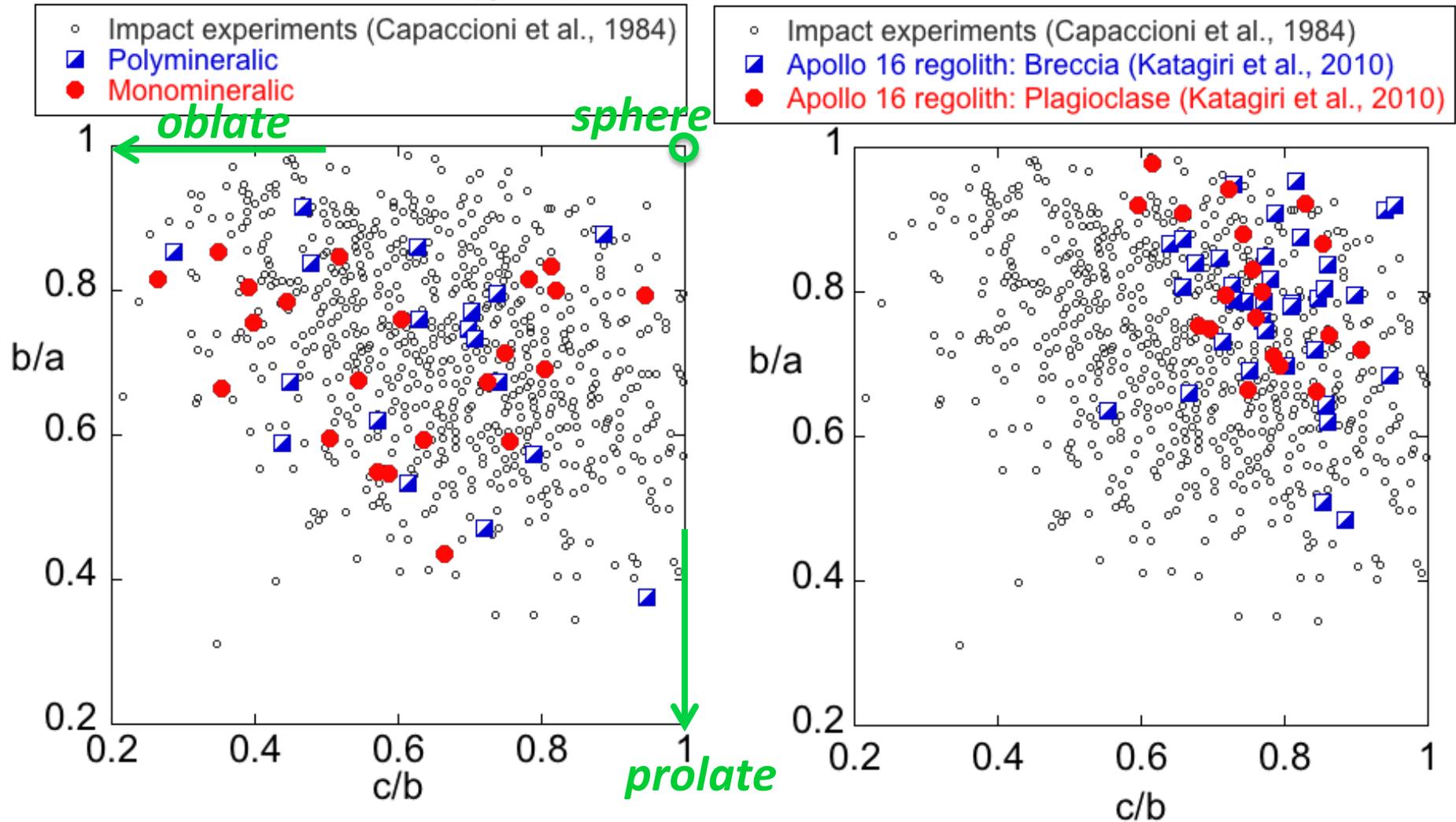
$n \sim -3.1 \sim -3.3$  (Heiken et al., 1991)

破壊実験破片:

$n = -2.0$  (Fujiwara et al., 1977)

# 粒子形状分布(3軸比形状)

楕円体近似:  $a > b > c$

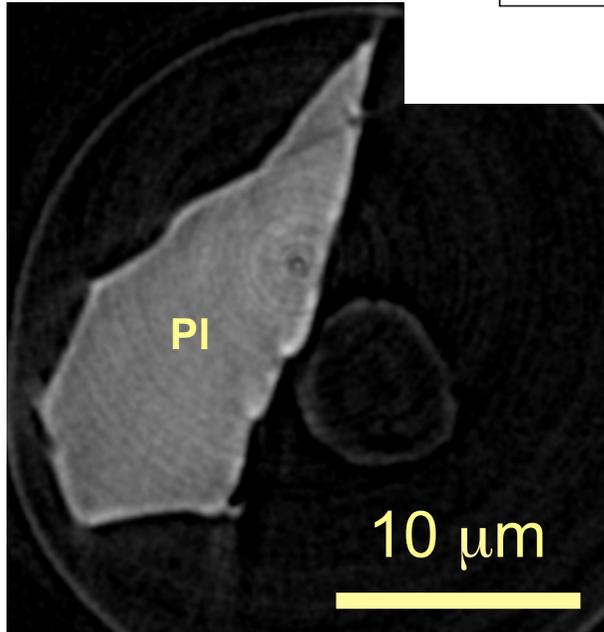
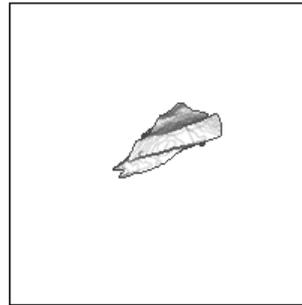


衝突実験破片 vs. イトカワ粒子  
P=0.17 (Kolmogorov-Smirnov (KS) test)  
⇒ イトカワ粒子は衝突破片  
(residence time: ~数100万年)

衝突実験破片 vs. 月レゴリス  
P=0.00 (KS test)  
⇒ 月レゴリス粒子は進化している  
(residence time: ~10億年)

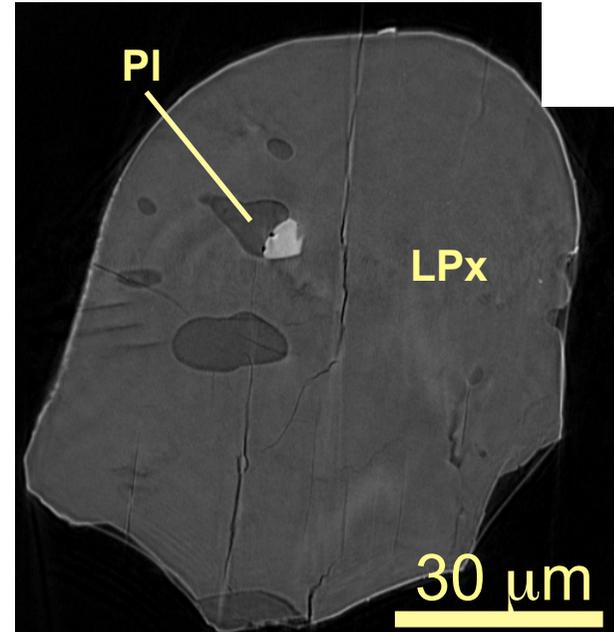
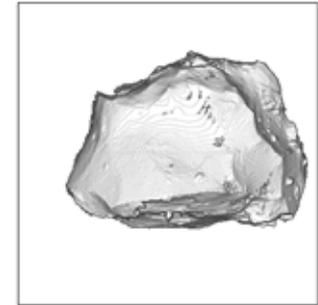
# 表面構造: エッジ

シャープなエッジ  
30 粒子 (75%)



CT 像 (7 keV)  
RA-QD02-0025-2

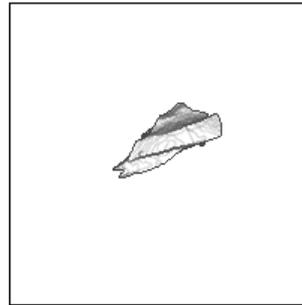
丸みをおびたエッジ  
10 粒子 (25%)  
外形も球状に



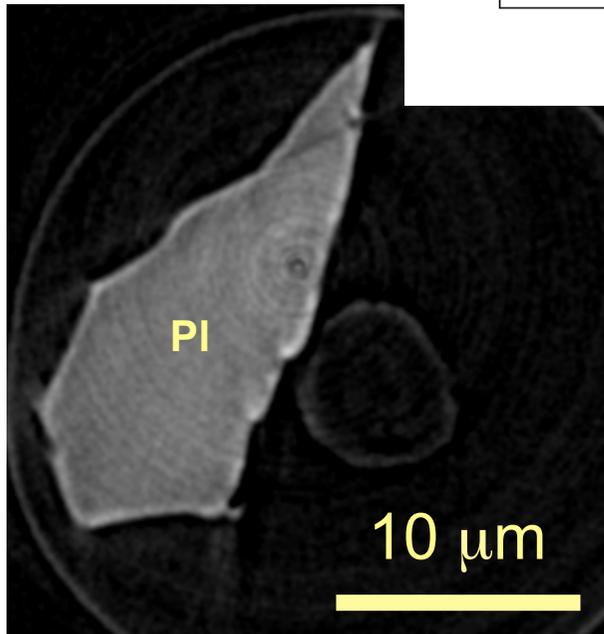
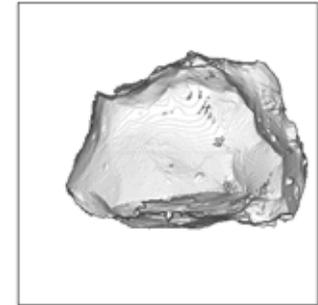
CT 像 (7 keV)  
RA-QD02-0042

# 表面構造: エッジ

シャープなエッジ  
30 粒子 (75%)



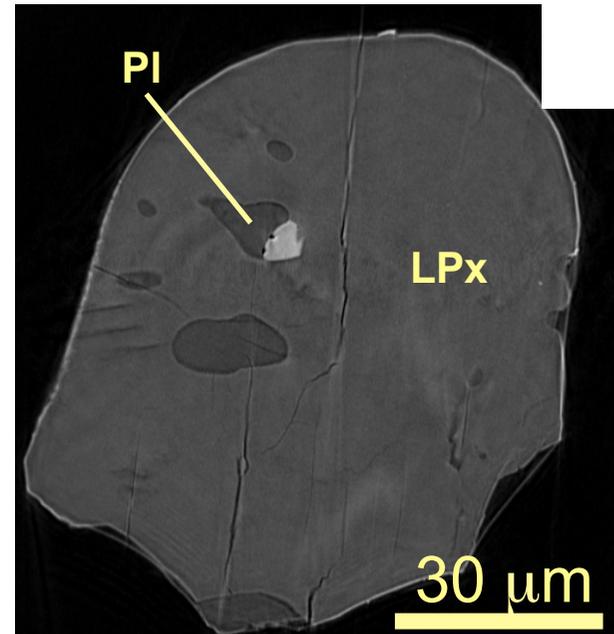
丸みをおびたエッジ  
10 粒子 (25%)  
外形も球状に



CT 像 (7 keV)  
RA-QD02-0025-2



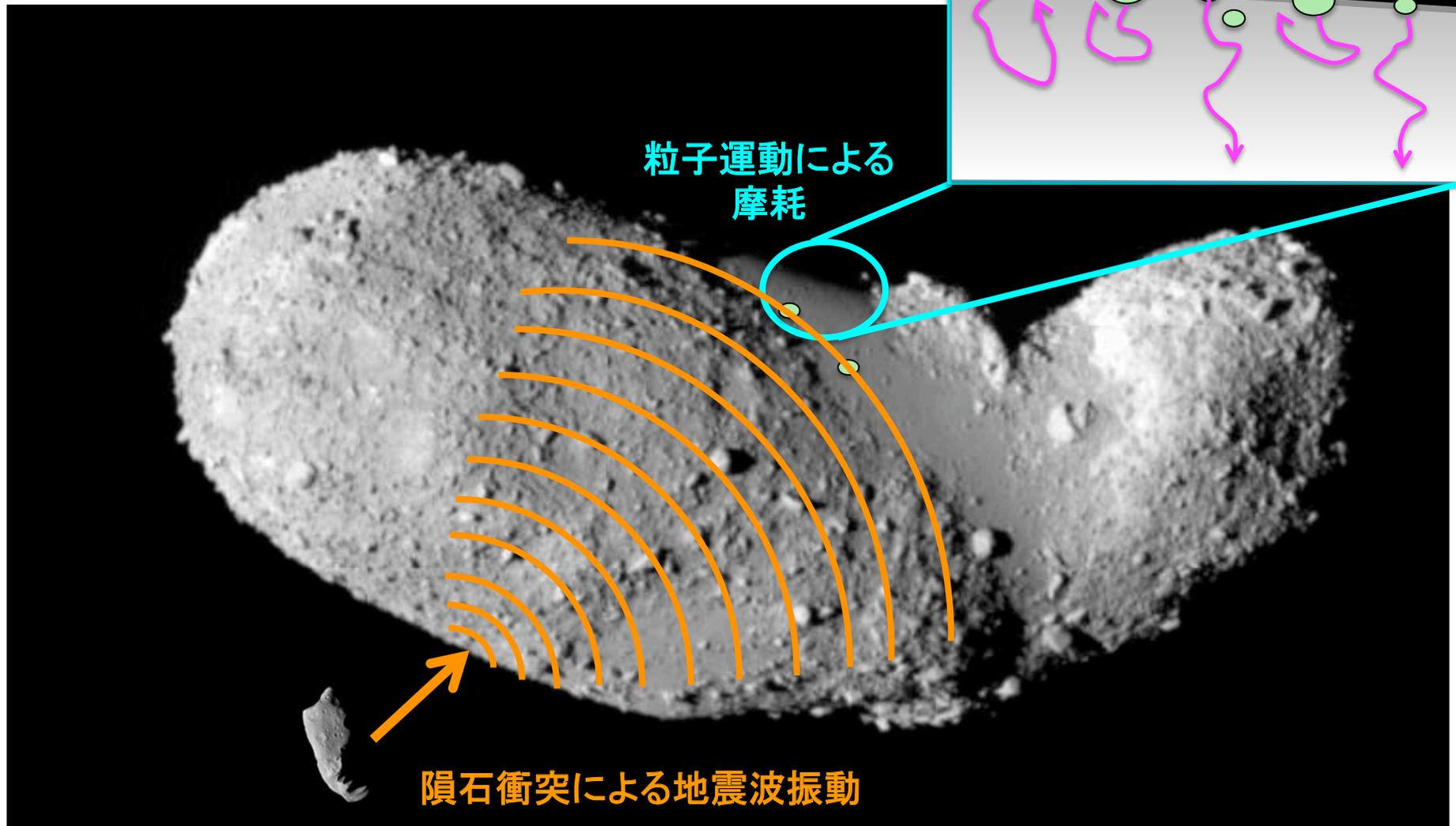
摩耗



CT 像 (7 keV)  
RA-QD02-0042

# レゴリスの進化

- ✓ レゴリス粒子は隕石衝突の地震により誘導された粒子運動により摩耗される
- ✓ 大きな粒子は Brazil-nut effect により表面に偏析したかもしれない



# 粒子表面形状

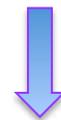
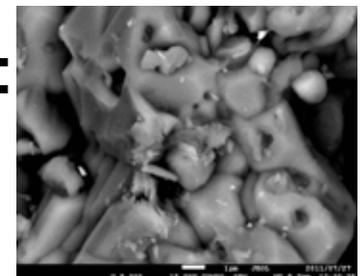
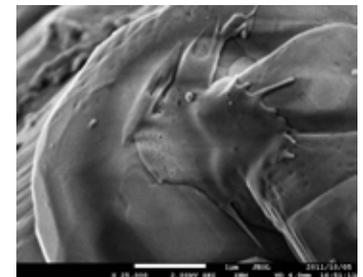
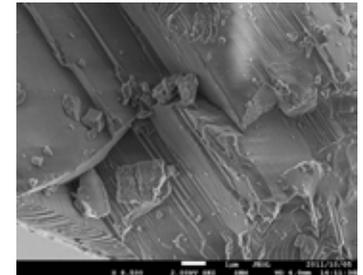
外形(CT)と微細表面形態学(FE-SEM):  
⇒ 粒子表面年代学?

**A-type:** シャープなエッジをもつ粒子:  
新しい面(シャープなステップ)

**B-type:** 丸みを帯びたエッジをもつ粒子:  
古い面(エッジの丸い自形結晶、  
メルトスプラッシュ、斑点状構造)

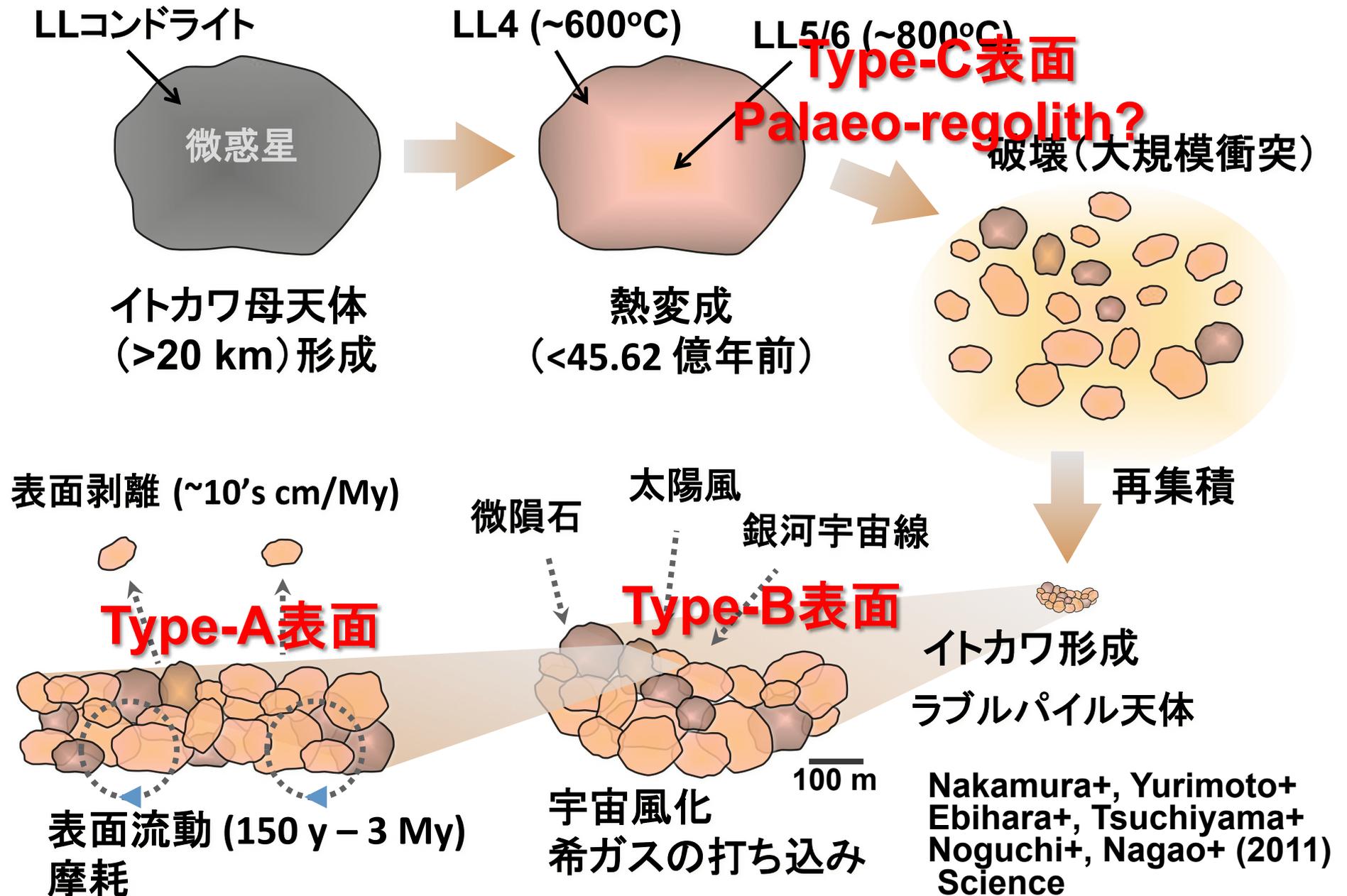
**C-type:** ポーラスな粒子/エッジの丸い自形結晶:  
(大規模)衝撃変成起源?

新しい



古い

# イトカワの形成・進化(まとめ)とレゴリス粒子



# まとめ

## (1) イトカワ表面物質(3D岩石鉱物学)

鉱物の構成比(モード)、組織 ⇒ LL5/6

LL5とLL6の区別はCTでは容易にはつかない

やや非平衡な粒子(LL4)が混合している

2種類の内部空隙: 大きな空隙-ポラス(衝撃起源?)

小さなインクルージョン(熱変成起源?)

## (2) イトカワレゴリス(3D形態学)

衝突による大規模な融解はない

粒子サイズ分布 ⇒ ~cmサイズの粒子がイトカワ表面に卓越

粒子形状分布(3軸比) ⇒ 衝突破片

一部丸みを帯びたエッジ ⇒ 摩耗(地震波誘起の粒子運動?)

## (3) イトカワレゴリス(粒子表面構造)

外形と微細表面構造から粒子表面の古さを推定できる

⇒ 粒子表面年代学?

一部の粒子はイトカワ形成前のレゴリス粒子 (palaeo-regolith)?

# はやぶさサンプル初期分析の成果: 今後の課題

