



委 2 1 - 1



はやぶさの初期科学成果について

JAXA宇宙科学研究本部

教授 川口 淳一郎

助教授 吉川 真

はやぶさによるイトカワ観測の科学的意義

- 小惑星は惑星形成史の比較的初期の状態をとどめている。
- 小惑星は、現在発見されているだけで数十万個を越え、地上観測による分光タイプから、約1ダースに分類されている。
そのうち、イトカワのような「S型」は、火星と木星の間にある小惑星帯から地球軌道の近くの宇宙空間までで、最も主要なタイプである。最もありふれた小惑星を探索することによって、最も一般性のある小惑星像を描き出せる。
- 地球上で見つかる主要な隕石の種類である「普通コンドライト」と「S型小惑星」の対応関係を、イトカワのリモートセンシング観測とサンプルリターン後の試料分析によって明らかにする。
- はやぶさを皮切りに、引き続き主要な分光タイプの小惑星サンプルリターン探索を進めることで、小惑星の分光タイプと隕石タイプとの対応関係を明らかにし、内側に地球型惑星の材料、外側に木星型惑星の材料を多く含むと考えられる小惑星全体の物質分布図を作成することができる。

はやぶさに搭載されている観測機器

- **可視分光撮像カメラ(AMICA)**
CCD 視野 5.7° 8バンドフィルター
1500枚以上の画像取得
- **レーザー高度計(LIDAR)**
高度50mで1mの計測精度 167万ヒット
- **近赤外線分光器(NIRS)**
64チャンネルInGaAs 検出器 波長 $0.8\sim 2.1$ ミクロン
視野角 $0.1 \times 0.1^\circ$ (6~90m分解能)
総スペクトル数 80,000 以上取得
- **蛍光X線分光器(XRS)**
CCD 視野 3.5° 5.9keVで分解能160eV
総スペクトル数 約6,000

はやぶさが求めたイトカワの基本物理量

史上最小の天体は、内部がスカスカ

軌道要素: 長半径 = 1.3238AU 離心率 = 0.2801 傾斜角
= 1.6223° 近日点 = 0.953AU 遠日点 = 1.6947AU

サイズ(m): 主軸 X=535, Y=294, Z=209 (±1m)
取り囲む箱のサイズ 550x298x244 (±1m)

自転周期: 12.1324 時間

自転軸の向き: 慣性空間 [128.5, -89.66] (黄道面にほぼ垂直)

小惑星 [90.53, -66.30] (逆スピン)

自転軸のふらつきは測定誤差内

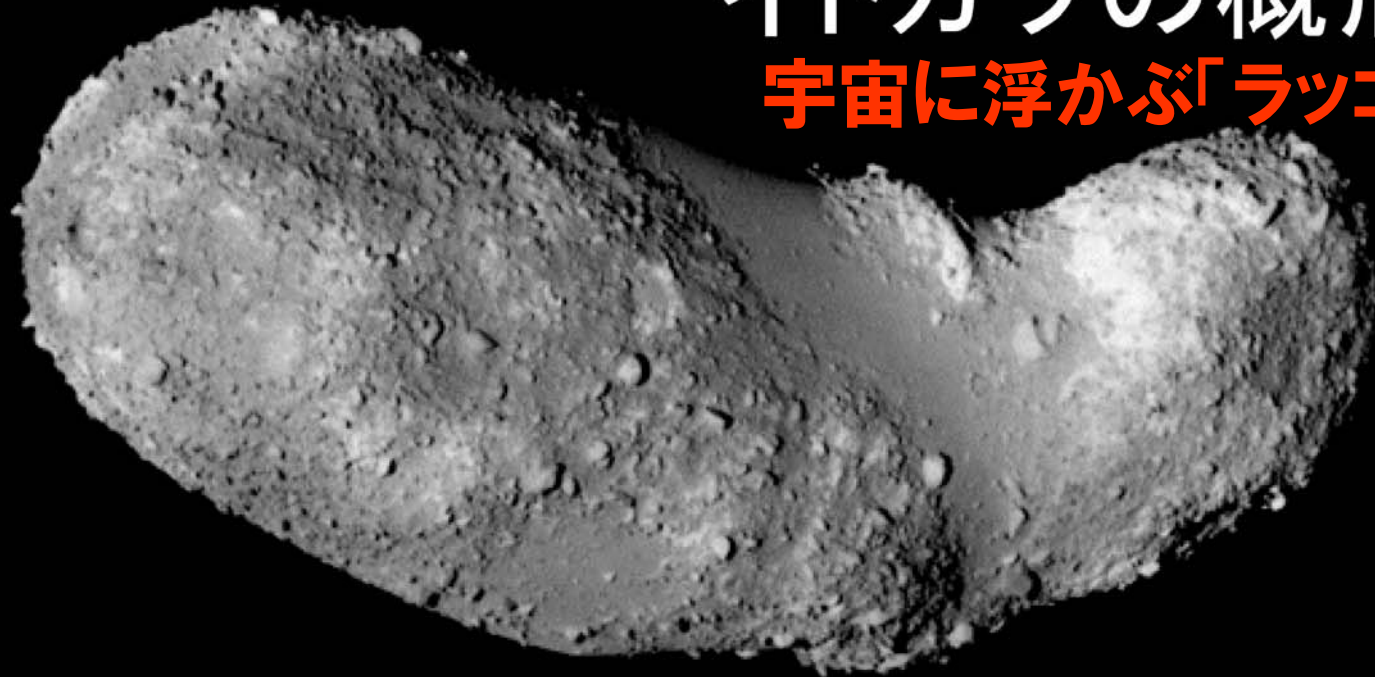
質量: $3.510 \times 10^{10} \pm 0.105 \times 10^{10}$ kg

密度: 1.90 ± 0.13 g/cm³

(注) 経度は「ラッコ」の頭にある黒いボールドーを起点に取った東経で測定
青色は地上観測によって予めわかっていた値

イトカワの概形

宇宙に浮かぶ「ラッコ」



太陽系黄道面を海面、小惑星をそこに浮かぶラッコに見立てた。頭部と胴体、くびれた首、腹から両脇に掛けてと背に滑らかな表面が見える。右は、運用中の関係者に出回ったアスキーアート。



+315 deg / 2005-09-14T16:10:09.98 / 2376966803

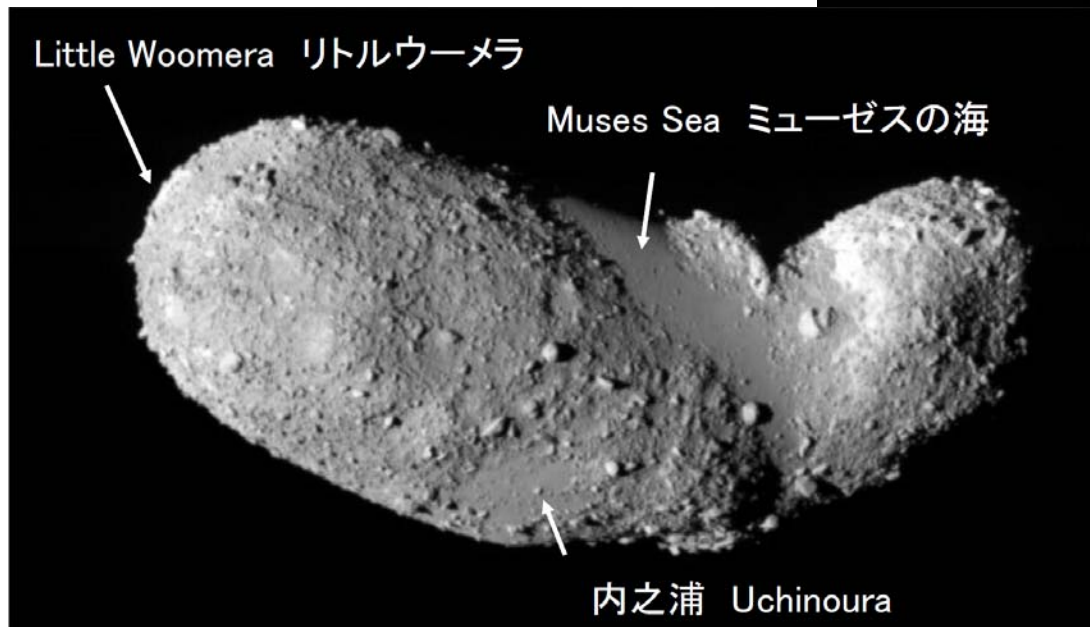
イトカワの特徴的な地形

誰も想像できなかった微小天体の素顔

東側

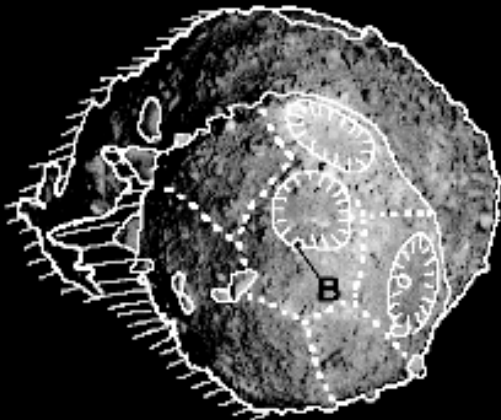


西側

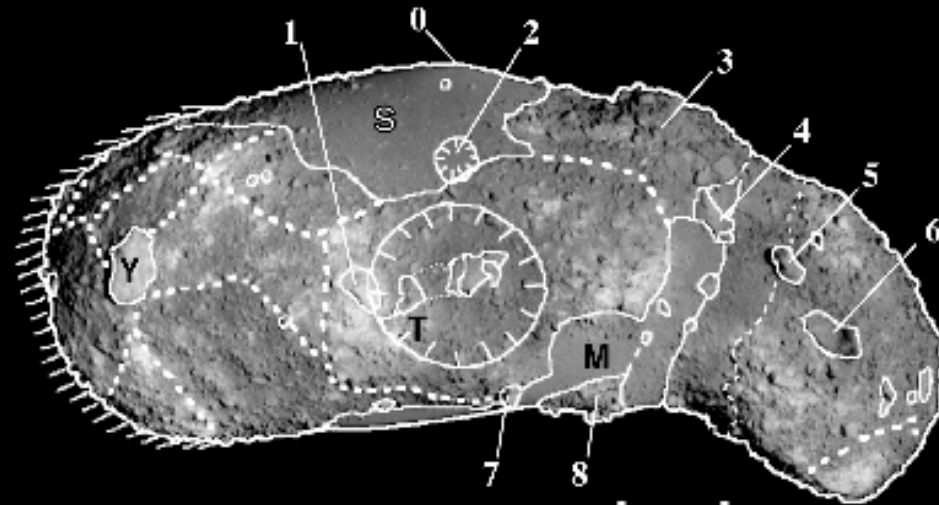


Saito, et al., *Science* (2006)

Demura, et al., *Science* (2006)



「ラッコ」頭部 Head-ward part
(Longitude = 0)

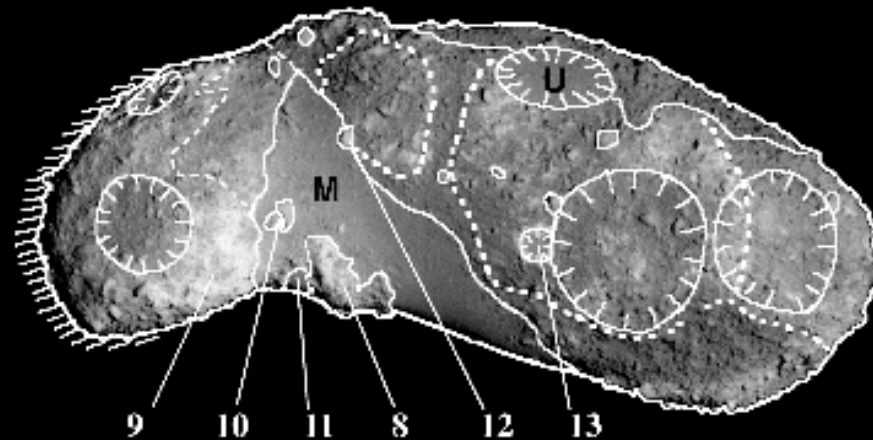
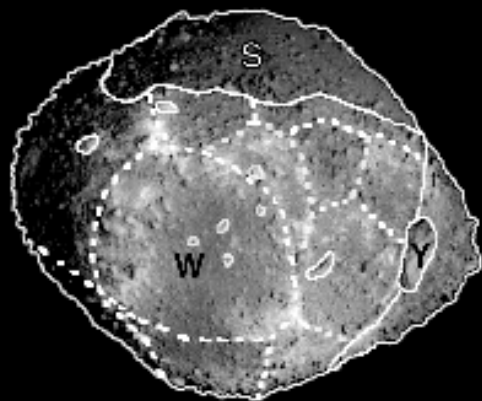


胴 西側 首 頭

イトカワ地質図

「ラッコ」胴部 (Longitude = 180)
Body-ward part

頭 首 東側 胴



イトカワの地名一覧

惑星探査にゆかりのある和名もたくさん

- **地名 (Region Name)**
 - T: Tsukuba Region (筑波、日本の追跡局)
 - M: Muses Sea Planitia (はやぶさのコードネーム”MUSES-C“に因む)
 - S: Sagami-hara Planitia (相模原、日本の管制局)
 - W: Little Woomera Region (オーストラリア・ウーメラ、地球帰還カプセル回収予定地点)
 - U: Uchinoura Region (内之浦、はやぶさ打上地)
 - O: the North Vertex (ノース ヴァーテックス、北極頂点の意味)
 - 3: Sanriku Ridge (三陸、観測気球打上げ場)
 - 8: Yatsugatake Ridge (八ヶ岳)
 - 9: Shirakami Slope (白神)
 - 11: Noshiro Smooth Terrain (能代、ロケット地上試験場)
- **岩塊 (Boulders)**
 - B: the Black Boulder (ブラック ボールダ、黒い岩で経度0° の目印)
 - Y: Yoshinoda Boulder (由野台、相模原管制室の所在地)
 - 1: Kakuta Boulder (角田、ロケット地上試験場)
 - 4: Kokubunji Boulder (国分寺、国産ロケット発祥の地)
 - 5: Pencil Boulder (ペンシル、M-Vに連なる最初のロケット名)
 - 6: M-V Boulder (はやぶさ打上ロケット名)
 - 7: Hilo Boulder (イトカワを地上観測したハワイすばる天文台の観測ベースの所在地)
 - 10: Mountain View Boulders (カプセルの試験を行ったNASA Ames研究所の所在地)
 - 12: Usuda boulder (臼田、はやぶさ地上追跡局)
- **クレーター (Craters)**
 - 2: Fuchinobe Crater (淵野辺、宇宙科学研究本部最寄駅)
 - 13: Komaba Crater (駒場、旧宇宙科学研究所の元所在地)

イトカワの表面

ファセット: 昔の衝突跡? 母天体の名残?

遠目には角の取れた印象だが、近づいてみると頭部と尾部にファセットという平坦面ないし凹面が多数見られる。



くびれた首



ファセットとは、曲面の一部を切り落としたようなもので、イトカワの場合その縁は多少の高まりとなっている。この起源は衝突ないしイトカワ形成前の母天体上の原地形の一部と考えられている。

首の部分の詳細

- くびれた構造は一周し、地滑りも見られる。

A



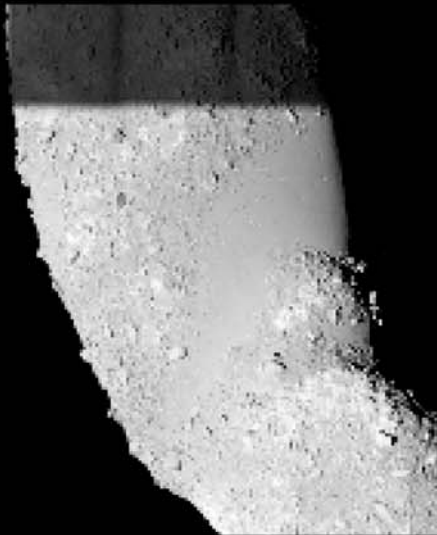
B



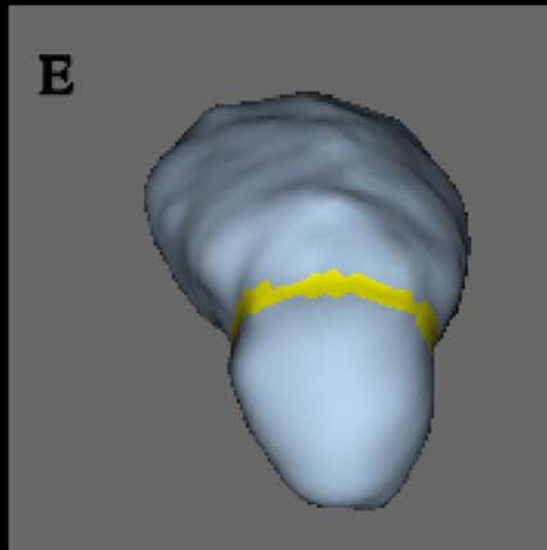
C



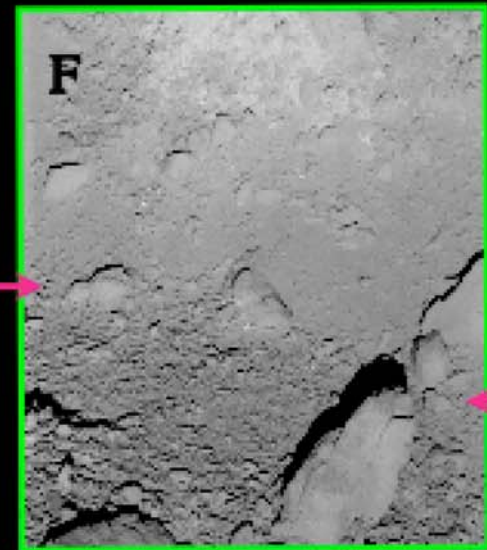
D



E



F



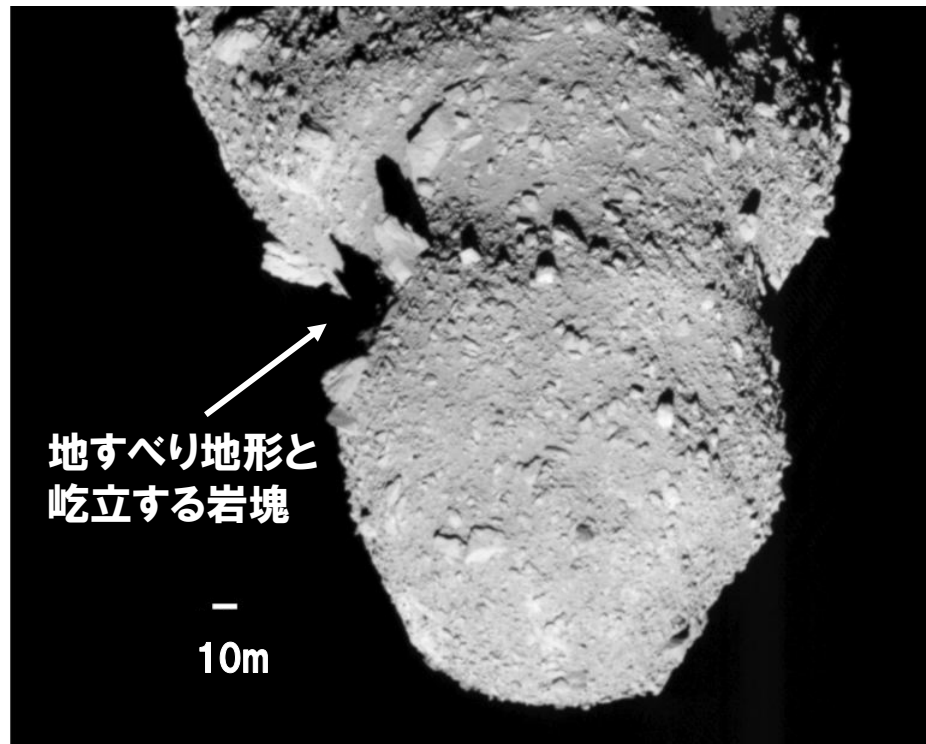
Demura, et al., *Science* (2006)

イトカワの二分性

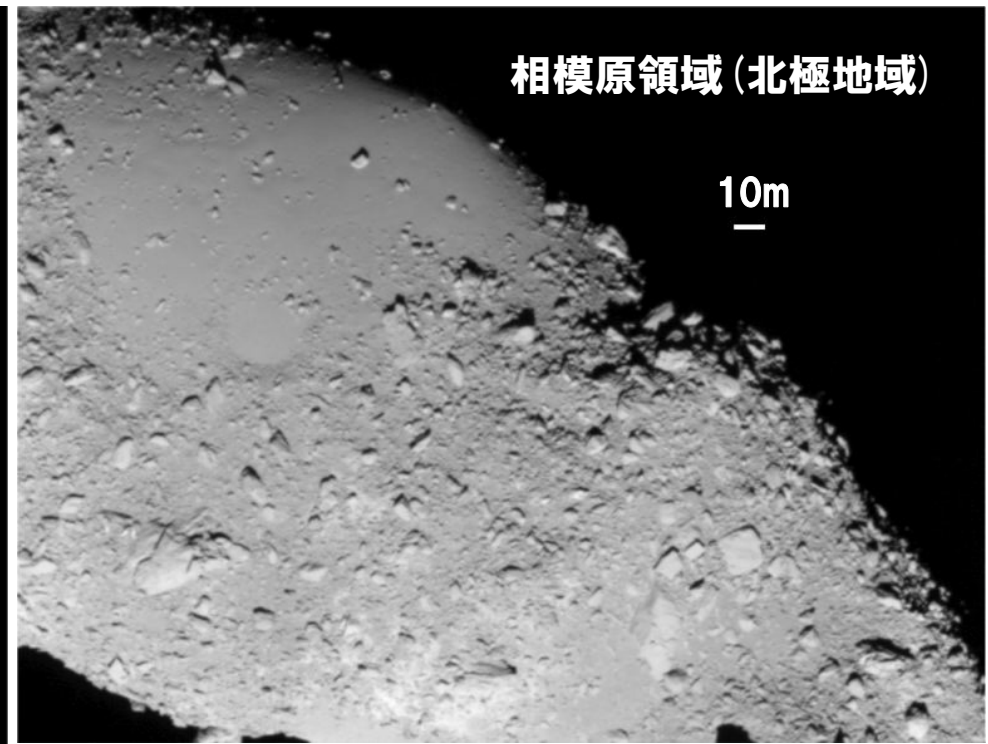
小さな世界に、多様で複雑な地形

ラフ地域： 多くのボールドー(岩塊)が堆積

スムーズ地域： cm-mmのサイズの比較的そろった小石からなる



険しい地形
(ラフ地域)

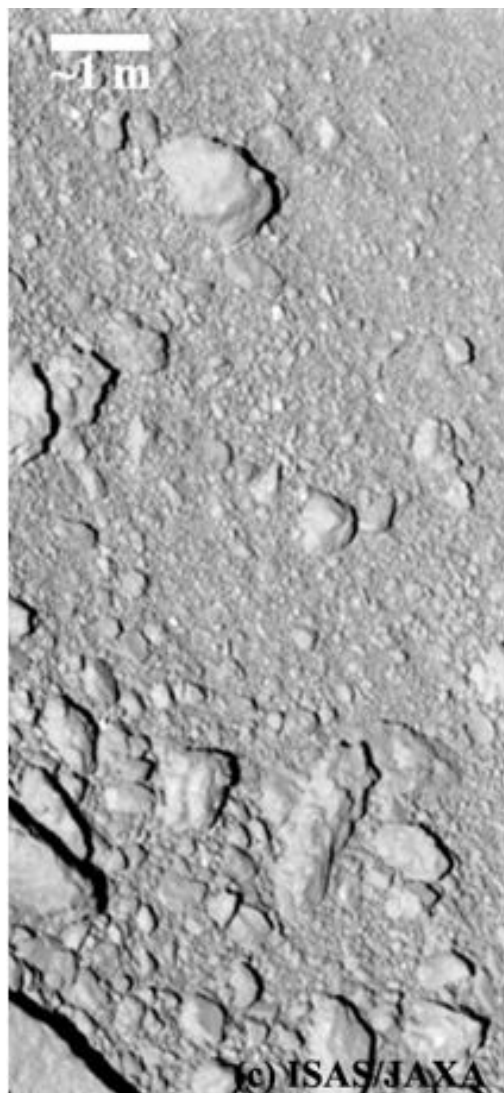


滑らかな地形
(スムーズ地域)

ラフ地域とスムーズ地域の境界

粒径の分布が変わっていくのが分る

- 岩塊が密集したラフ地域からスムーズ地域(例: 「ミューゼスの海」)へ移動するにつれ、より細かな岩石の比率が増えていく
- 右図は1画素当り20mm程度の高分解画像の一部。



スムーズ地域:
平らな領域

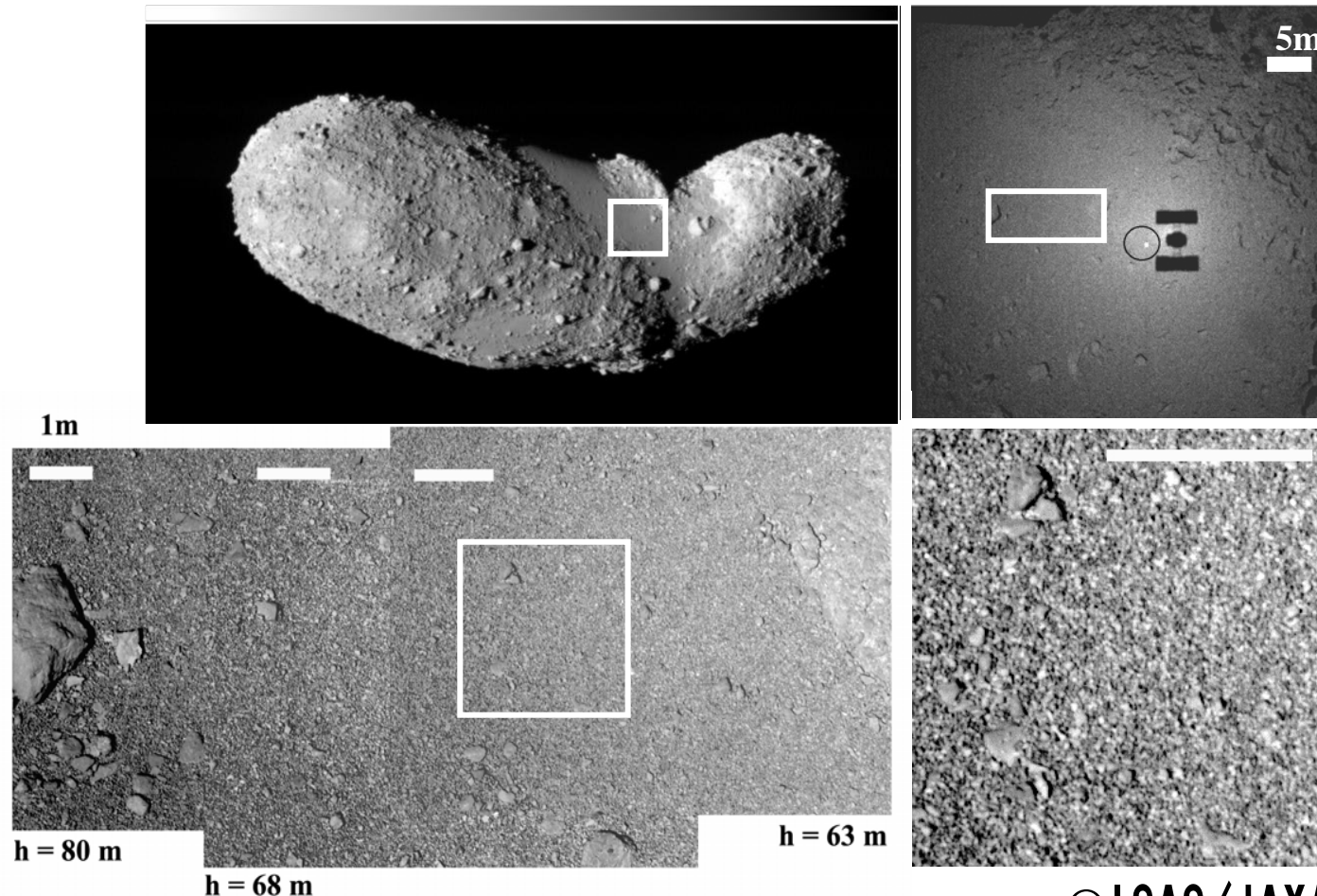
↑
構成粒子が
小さくなっていく

ラフ地域:
岩塊が密集した領域

(11月17日公開画像より)

第一回着陸地点付近の表面の性質

ミューゼスの海は「小石の平原」だった



© ISAS/JAXA

* (1) 史上最高分解能の小惑星画像、(2) 世界初の小惑星表面からの離着陸、
(3) 世界初の小惑星輻射温度の直接測定から解明。

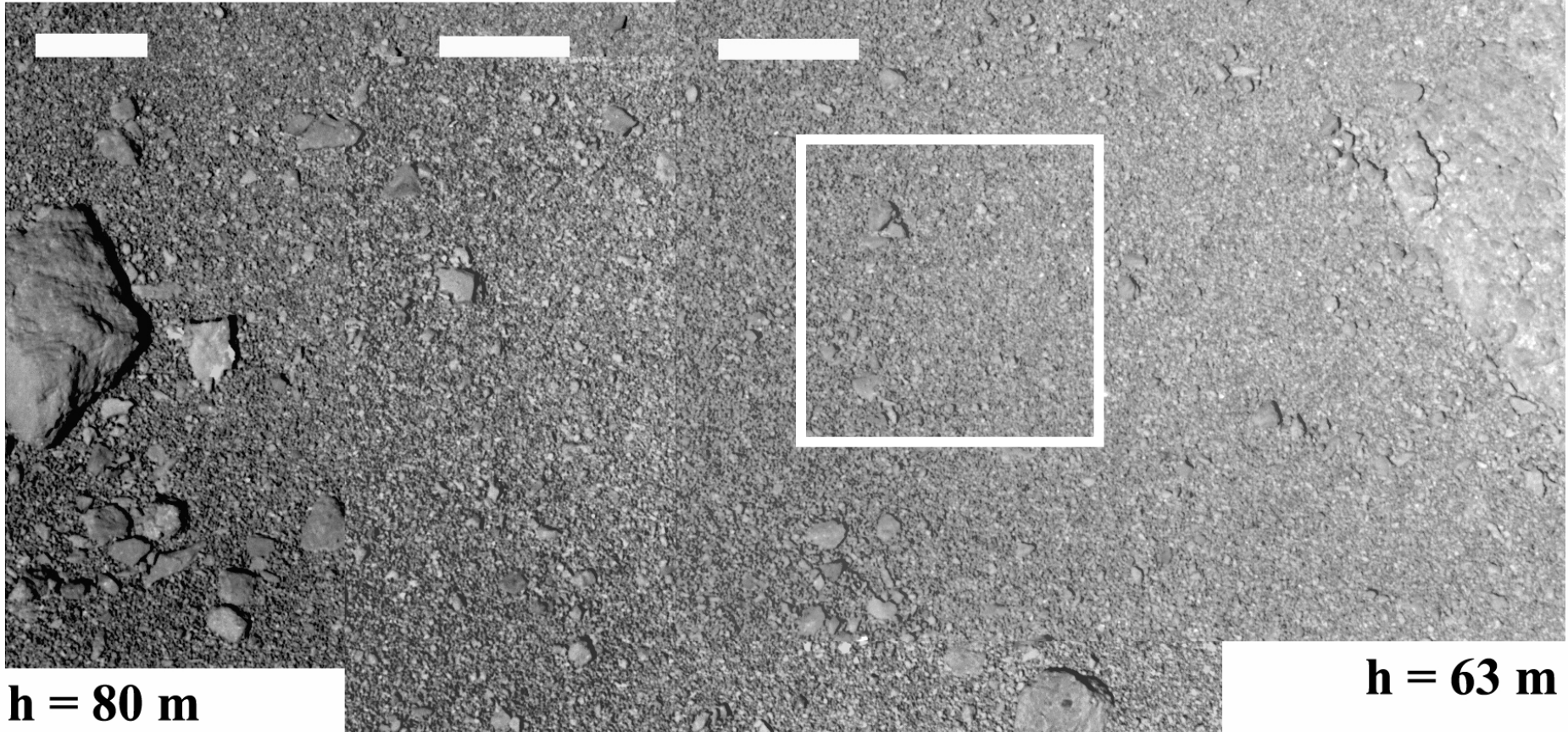
* 地球に回収するサンプルはこの地域のかげらである。

Yano, et al., *Science* (2006)

空間分解能6-8mmの着陸地点最接近画像

史上最も詳しい小惑星表面の画像

1m



$h = 80 \text{ m}$

$h = 68 \text{ m}$

$h = 63 \text{ m}$

Yano, et al., *Science* (2006)

- 地表高度80~63 m (カメラの焦点距離ぎりぎり) まで降下中に捉えた「ミューゼスの海」の様子
- 表面の大半では、数cm大に大きさが揃った小石が、まるで平坦な舗装道路のように詰まっている
- 最接近画像の空間分解能は、一画素当り6-8 mm。探査機によるリモートセンシングの地質学というより、地球上での岩石学調査と同レベルの情報量を持っている。

同縮尺の表面： 小惑星エロス、イトカワ、地球上の比較



JAXAの「はやぶさ」探査機による、小惑星イトカワ表面のはやぶさポイント付近
©ISAS/JAXA



砂利を敷き詰めた舗装道路 ©ISAS/JAXA

成人男性の靴

NASAの「NEARシューメイカー」探査機による、小惑星エロス表面の砂池付近

© NASA, APL/JHU

Yano et al., *Science* (2006)

色と明るさの双方の不均一性の発見

今までの小惑星にはない傾向



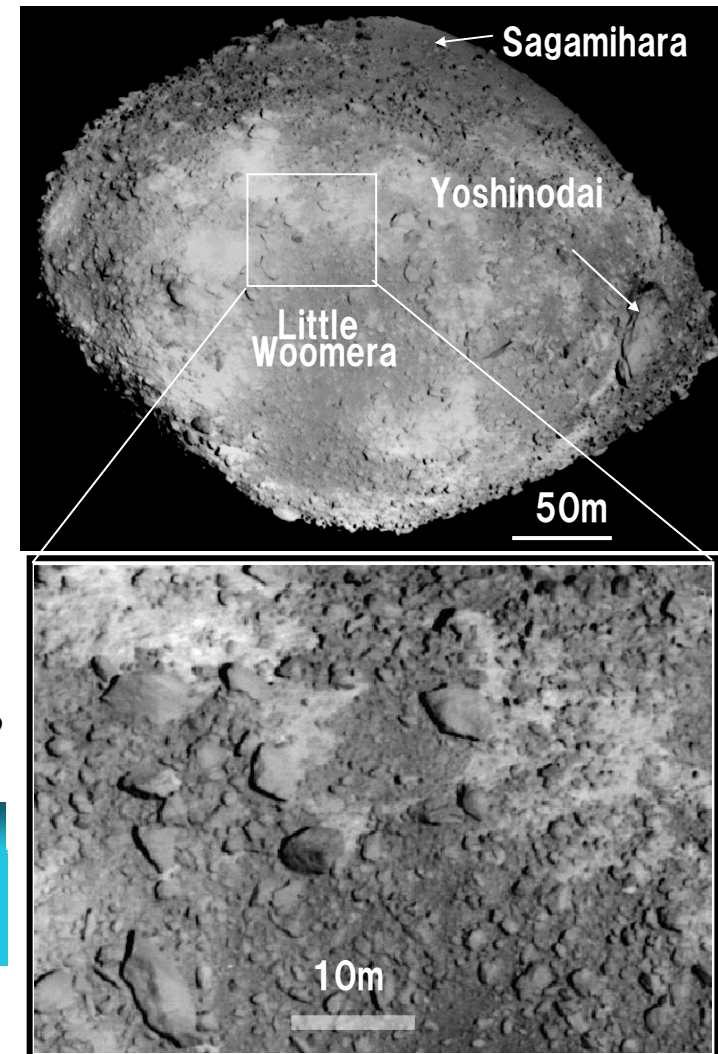
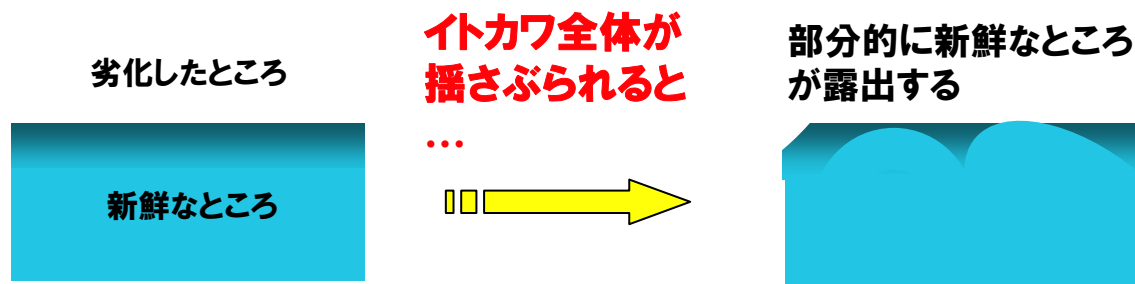
- 今までに探査された小惑星では、色と明るさが両方とも大きく変化するものは見られなかった。
- 全般的に、**明るい部分は青っぽく、暗い部分は赤っぽく**見えている

Saito, et al., *Science* (2006)

明るい部分と暗い部分の混在

宇宙風化と激しい地質活動の証拠？

- 縁が明るい部分を拡大すると、明るい物質と暗い物質が混在していた。
- 放射線や微小隕石によって劣化(風化)した暗い物質が表面にあり、新鮮で明るい物質がその下にあったとすれば、大きな隕石衝突でイトカワが揺さぶられた際に、表面の劣化した物質が局所的に剥げてその下の新鮮な部分を露出させた可能性がある。

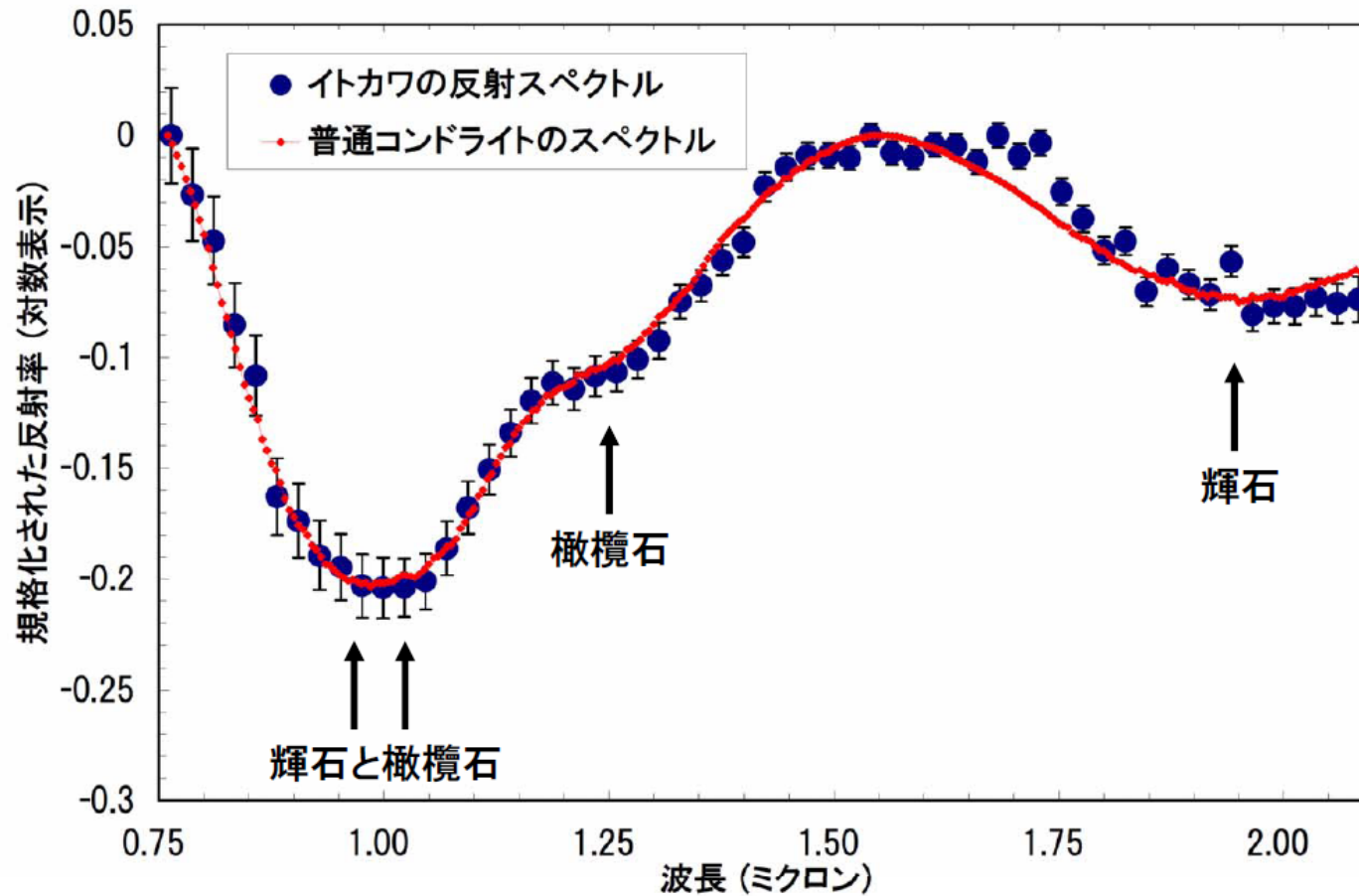


Saito, et al., *Science* (2006)

近赤外波長域の反射スペクトル

やはりS型小惑星は普通コンドライトのふるさと

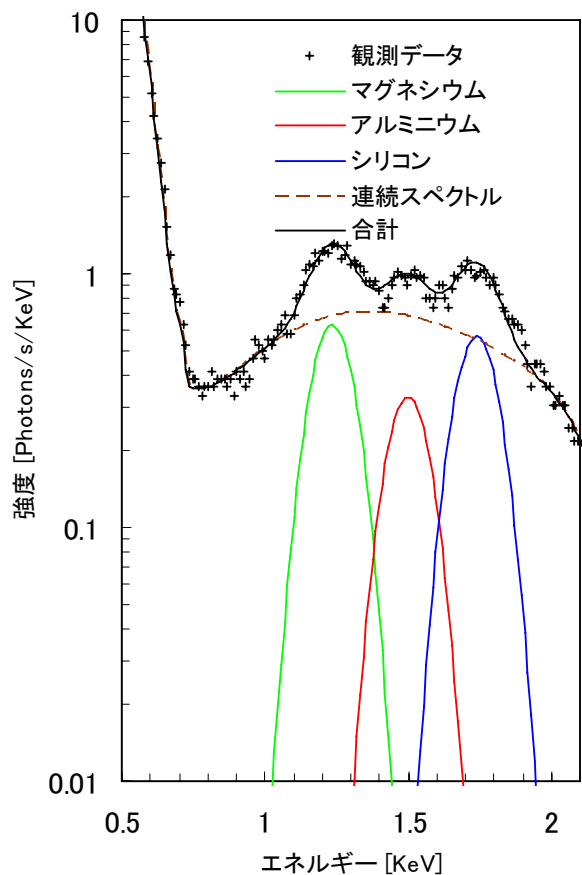
- ・イトカワの表面には輝石と橄欖石が存在する
- ・イトカワの反射スペクトルと普通コンドライトのスペクトルは似ている
- ・S型小惑星と普通コンドライトの対応関係を支持する結果を得た



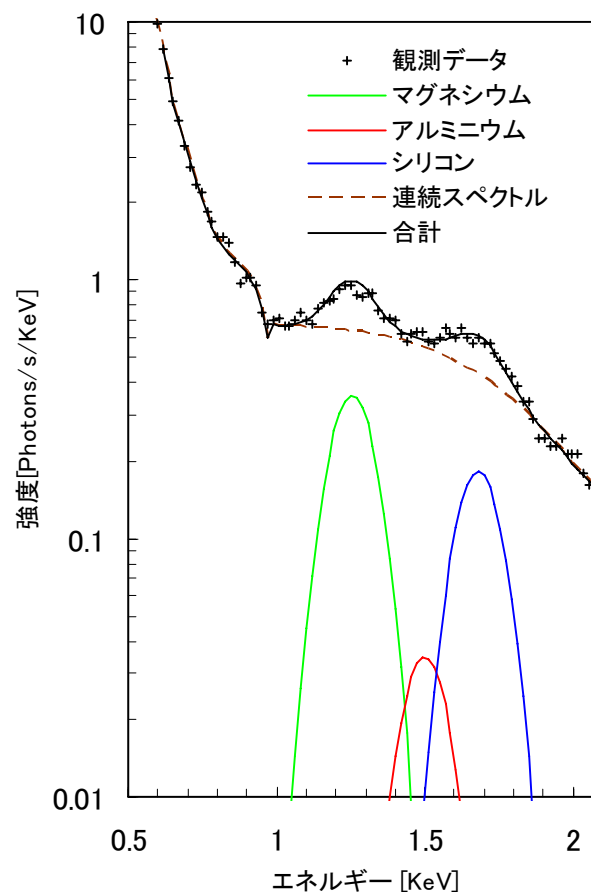
小惑星イトカワのX線観測

普通コンドライトと似た元素組成

搭載標準試料からのX線スペクトル



イトカワからのX線スペクトル



•標準試料と比較して、マグネシウムとシリコンの蛍光X線強度比(Mg/Si)が大きく、アルミニウムとシリコンの強度比(Al/Si)が小さい。

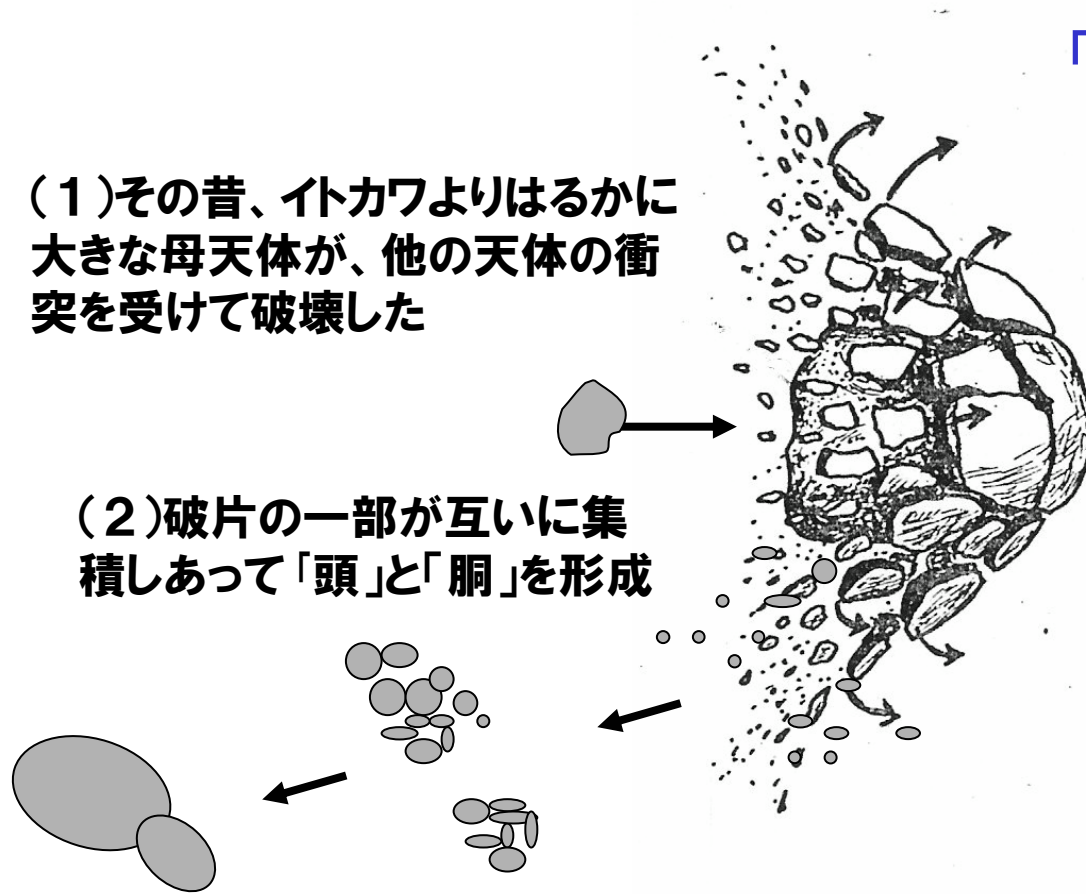
イトカワ誕生のシナリオ

がれきを寄せ集めて作られた、ラッコのかたち

(1) その昔、イトカワよりはるかに大きな母天体が、他の天体の衝突を受けて破壊した

(2) 破片の一部が互いに集積しあって「頭」と「胴」を形成

(3) 頭と胴が接合して、現在のイトカワになった



「がれき寄せ集め説」の状況証拠

- 低密度～40%もの空隙率
- 形状(頭と胴)が丸みを帯びている
- 表面が岩塊で覆われている
- 細長いリッジのような全球に及ぶ構造がない(エロスや火星衛星には見られる)
- ファセットの一部は内部の破片が露出したもの?
- 傾斜角が全体に小さく(多くの地域で緩和)、単体のかたちではない
- 大きな岩塊は、表面のクレーターから放出されたものではなく、さらに大規模な衝突から生まれたはず

まとめ(1/2):

はやぶさが解き明かしたイトカワの謎

- (1) イトカワは、小惑星の形成過程の有力な仮説だった「がれきの寄せ集め(ラブルパイル)構造」をもつことが明らかになった、最初の小惑星である。
- (2) イトカワのラッコのような形状と高い空隙率は、より大きな母天体が衝突破壊を受けたのち、飛散中の破片群の一部が互いに重力で再び集まって「がれきの寄せ集め」としてラッコの「頭」と「胴」が作られ、さらに二つが合体したという形成シナリオを支持している。
- (3) イトカワはこれまでの探査機がたずねたうちで最小の天体である。その地形は岩塊に覆われた険しい地域とcmオーダーの砂利が敷き詰められた平坦な地域に、くっきりと分かれている。史上最高の分解能の最接近画像などから、最もポテンシャルの低い地域ですら深い粉体層に覆われていないことが分かった。これほど明確な二分性を持った小惑星は、イトカワ以外に見つかっていない。これは微小天体ゆえの特徴であり、惑星形成の第一歩を考える上でのまったく新しい知見をもたらしてくれた。

まとめ(2/2):

はやぶさが解き明かしたイトカワの謎

- (4) 複雑な地形にも関わらず、全球を通じて鉱物、主要元素組成の分布はほぼ一様であり、多少の違いは粒径や宇宙風化で説明できる。これは一度も分化していない始原的な小惑星であることを示唆している。またこれらの物質情報は、S型小惑星であるイトカワの材料が普通コンドライトに対応していることを支持している。
- (5) イトカワは地上観測によるスペクトル型(S型)、自転周期、その他の属性からみても、ごくありふれた小惑星であり、大きさも1kmを切る小型ゆえに数も圧倒的に多い。イトカワ以前の惑星探査機が訪ねた小惑星は全て、10kmオーダーであった。今回のはやぶさ探査によって、人類は初めて、もっともありふれた小惑星の真の姿を目の当たりにした。これは今後の全ての小惑星探査における重要な指標となる。また、地球に衝突する危険性のある小惑星に対する、史上初の探査でもある。
- (6) イトカワの誕生と進化には、衝突—破壊—集積プロセスが複雑に働いたことが推定される。この過程は惑星系の進化を考える上でもっとも重要なプロセスのひとつであり、今後の研究によって、さらにこのメカニズムの理解を深めることができる。