



# 星のかけらを取りにいく ～小惑星探査機「はやぶさ」の 科学と技術～

2009年9月29日

六本木・泉ガーデン・コンファレンスセンター「ROOM-1」

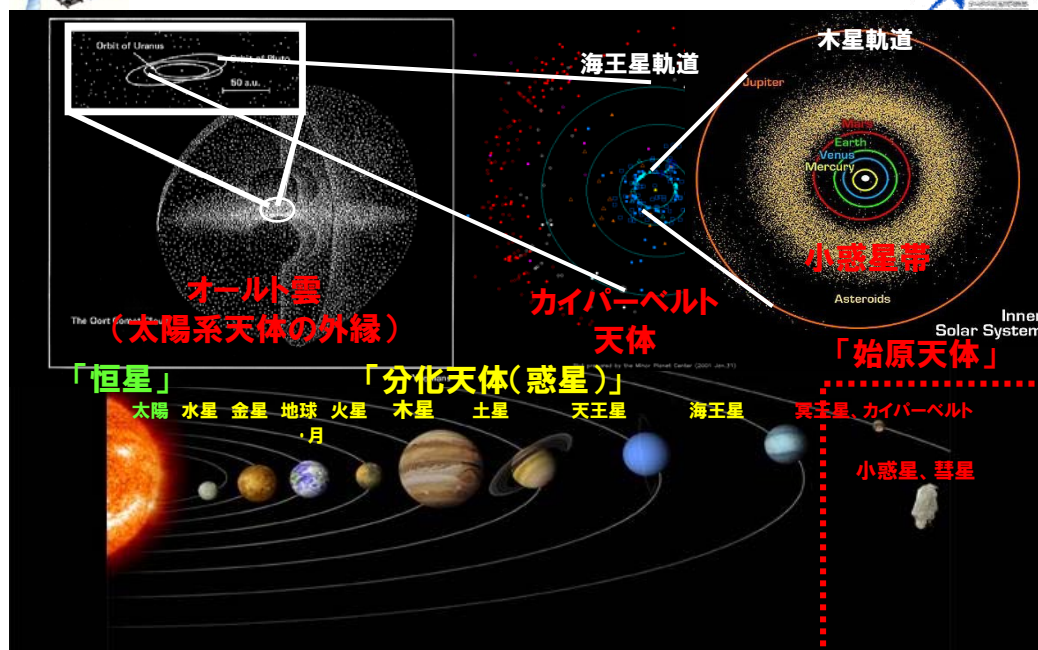
矢野 創 (やの・はじめ)

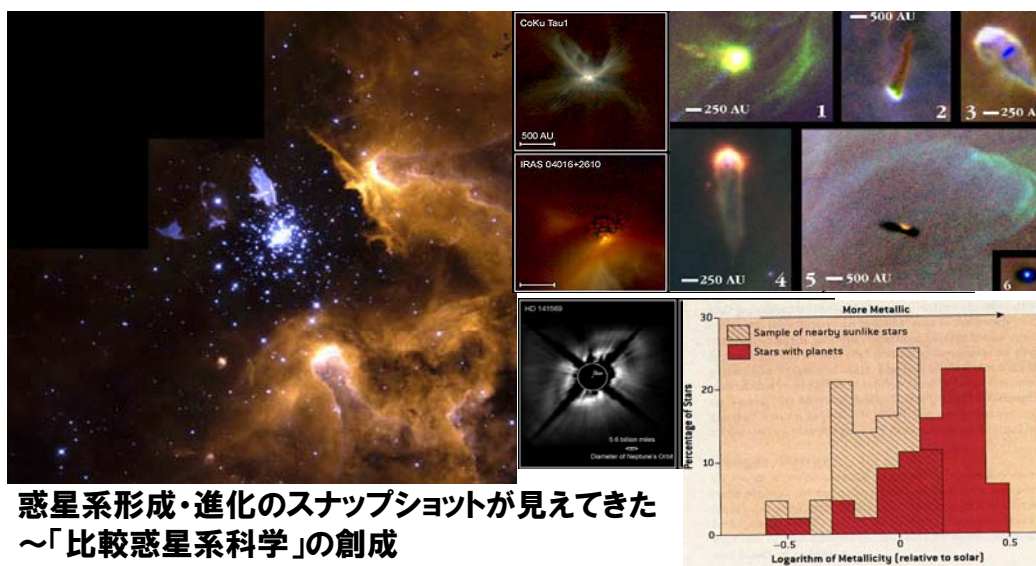
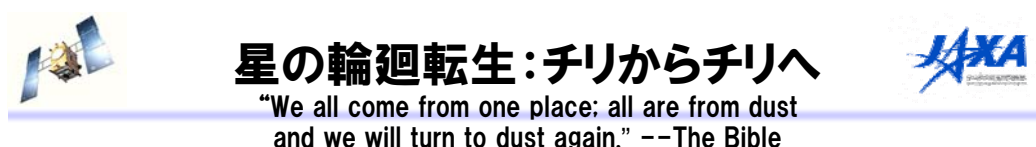
宇宙航空研究開発機構(JAXA)・  
宇宙科学研究本部 (ISAS) & 月・惑星探査プログラムグループ (JSPEC)

1



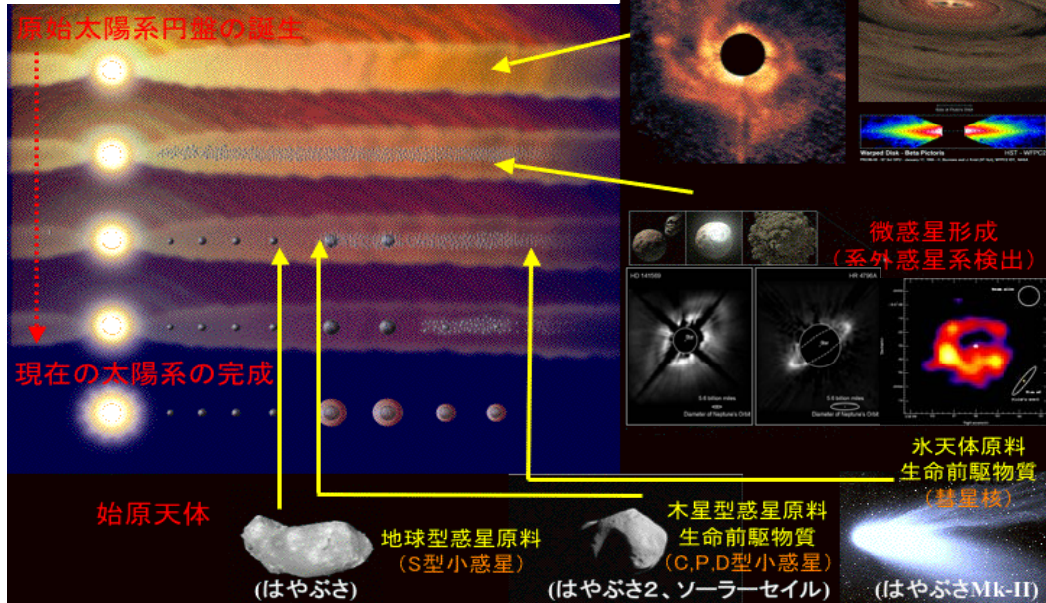
## 太陽系の構造と天体の種類



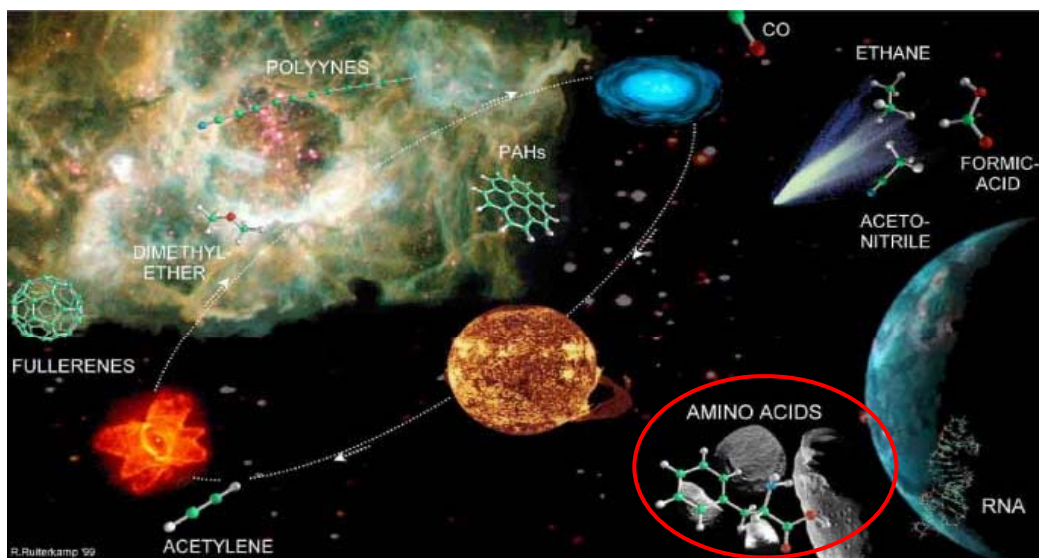


## 太陽系の始まりの調べ方

月・火星等の分化天体では解明できない、**太陽系誕生時の物質・構造・環境・変遷を解き明かす**のが、始原天体の役割



## 宇宙空間で見つかる生命前駆物質





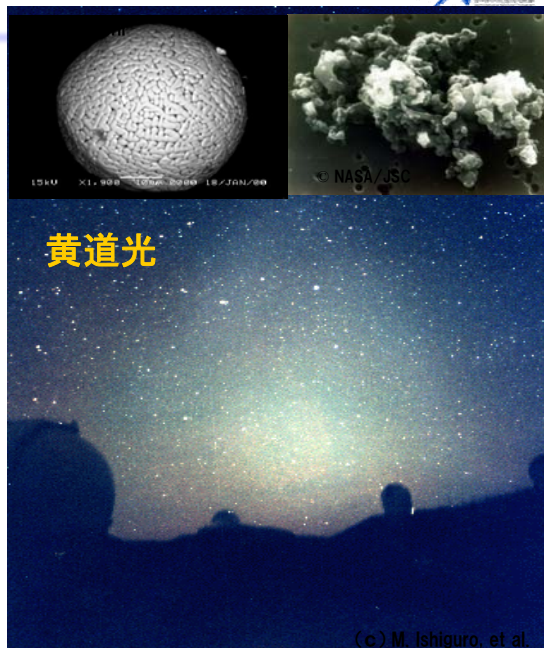


## 太陽系起源宇宙塵の観測と採取・分析



### 「宇宙塵」(マイクロメテオロイド)

- \* 宇宙起源(彗星、小惑星、惑星・衛星、星間塵など)の<1mmサイズの固体微粒子
- \* 光学的には黄道光、ダストバンド(小惑星族)、ダストトレイル(彗星)として観測
- \* 深海底、極地氷床、成層圏、地球低軌道などから採集(それぞれにサイズ分布、物理・化学変成、磁性などにバイアスあり)
- \* 年間2~6万トンの宇宙物質降下量の99%以上を占める

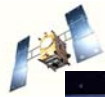


## しし座流星雨： 生命前駆物質輸送の風景？

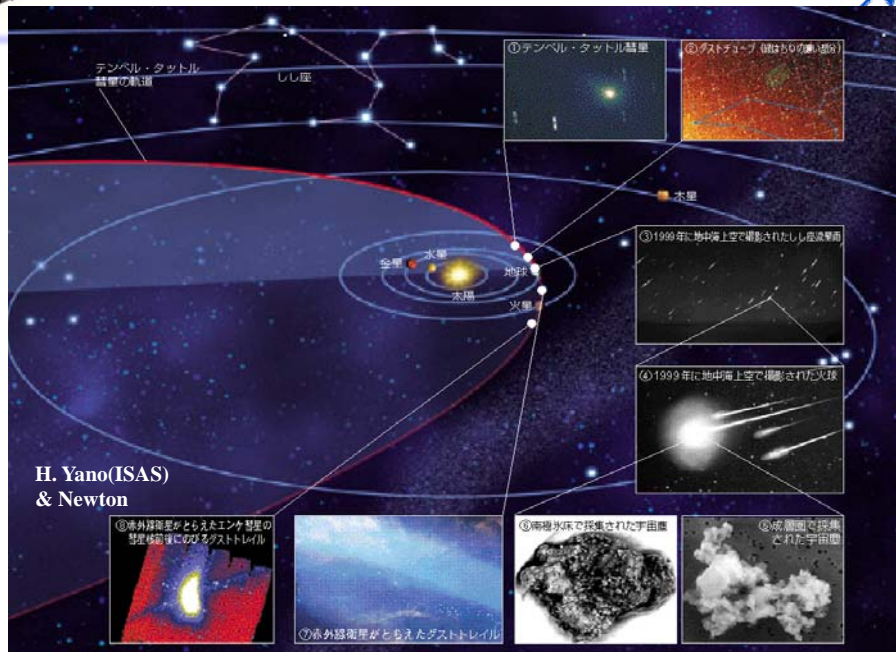


HDTV-II with  $f=28\text{m}$  F1.4 lens,  $\text{FOV}=59.7^\circ \times 33.5^\circ$

Zenith Hourly Rate : ZHR  $\sim 4,000 \text{ hr}^{-1}$  at 02:02 UT on November 18, 1999.  
(画像提供: NHK, 矢野創 (ISAS)、画像加工: 誠文堂新光社・天文ガイド・中西氏)



## 流星群・彗星ダストトレイルの観測



9



## パンスペルミア説と始原天体



### \* 地球生命の起源の基本命題

- (1) 生命前駆物質と水の起源
- (2) 「パンスペルミア説」対「ユーレイ&ミラー実験」

### \* 両者の融合？

- (1) 星間空間こそが生命前駆物質の故郷？(L-D体不均衡問題)
- (2) 高分子有機物が進化した「ゆりかご」は？(Greenberg Model)
- (3) CHZ(原始地球・火星)への運搬機構？(小天体衝突、流星)
- (4) 原始地球環境でのDNA、RNA誕生？

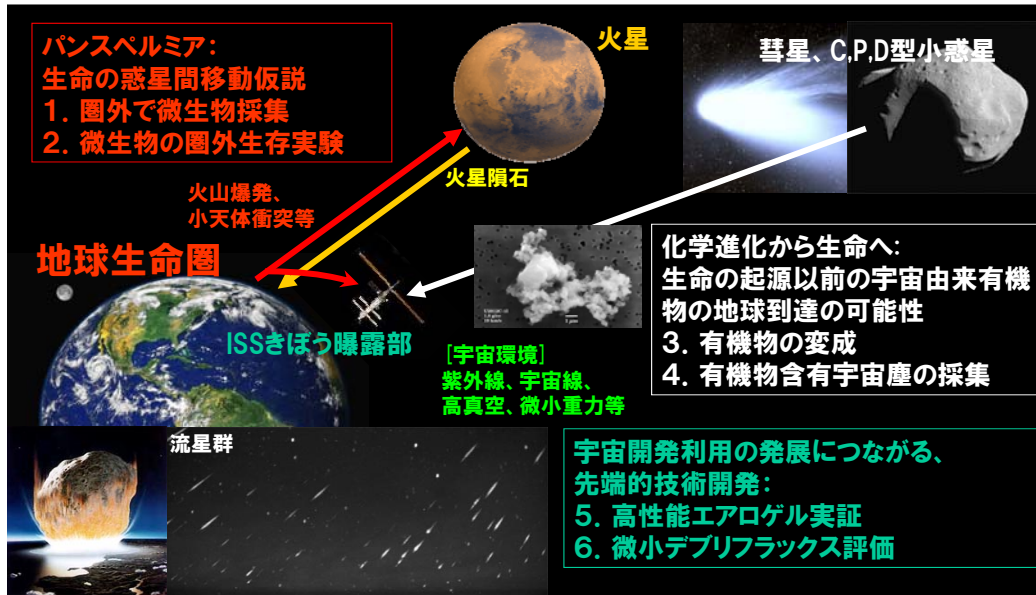
### \* 小天体探査・宇宙物質分析からの知見

- (1) 短周期彗星コマはCHON粒子を大量に放出する
- (2) 地球海水のD/H比は固体惑星・ガス惑星よりも、彗星に近い
- (3) コンドライト隕石中から、水や塩や糖やPAH、アミノ酸を含む数十種類の有機物などが発見されている
- (4) 現在も2-6万t/年の宇宙物質が地球に降下、99%以上は1mm未満の宇宙塵

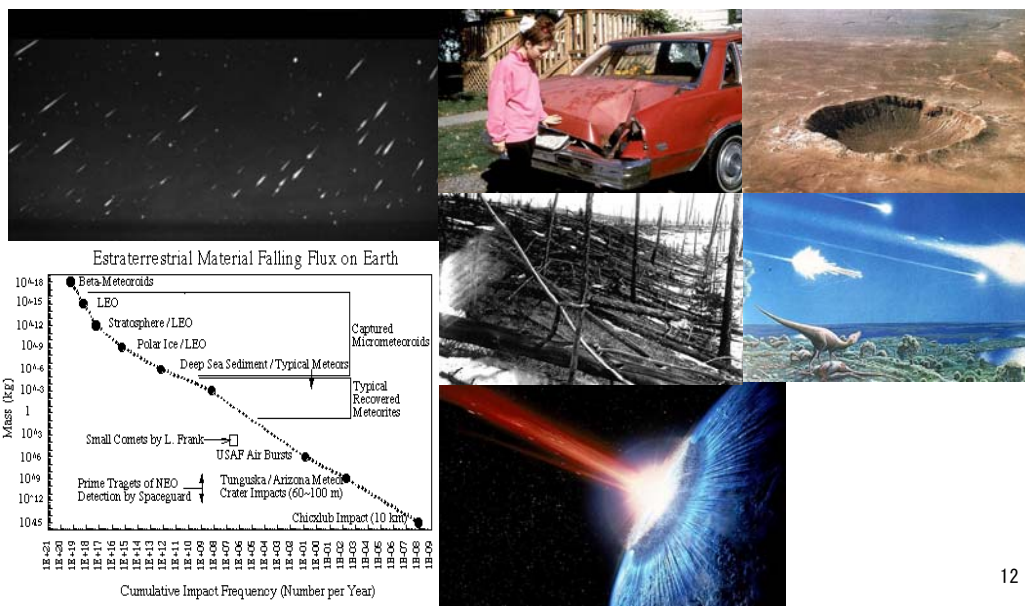
10



## 国際宇宙ステーションをつかった運搬機構の実証



地球に降り注ぐ始原天体の頻度・規模の「適切さ」:  
生命原材料を供給すると同時に、種の大量絶滅に関わるものの、  
地球生命を全滅させるほどではない







## 小惑星の多様な意義



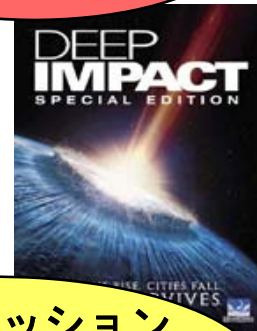
### 科学

太陽系と生命の起源と進化を知る



### スペースガード

天体の地球衝突問題に対処する



### 資源

遠い将来、宇宙空間での鉱物や水資源としての活用可能性を探る

### 有人ミッション

火星以前の有人深宇宙探査ミッションのターゲットとなる

13  
13



おいしい料理を作るには、調理方法(進化過程)だけでなく、原材料・食材(起源)の性質を正しく理解する必要がある。



大豆



小麦

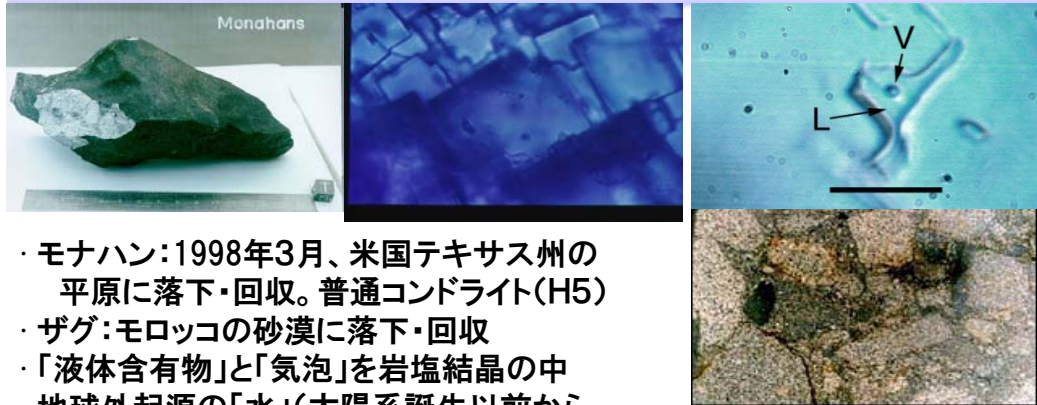


味噌ラーメン

14

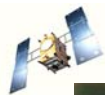


## 宇宙起源の水：モナハン、ザグ隕石



- ・モナハン：1998年3月、米国テキサス州の平原に落下・回収。普通コンドライト(H5)
- ・ザグ：モロッコの砂漠に落下・回収
- ・「液体含有物」と「気泡」を岩塩結晶の中
- ・地球外起源の「水」(太陽系誕生以前から星間空間に存在？)が現在も地表に到達している、世界初の証明
- ・小惑星起源の場合、形成当初1000万年ほどの期間には、母天体内部に、短期間でも「液相」の水が存在したことになる。

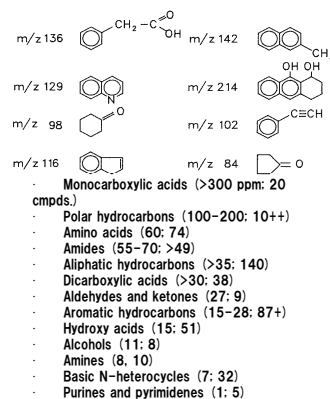
15



## 隕石・宇宙塵試料中の有機物



- ・宇宙塵試料の鉱物組成は、普通コンドライトよりも、炭素が豊富なCM, CI炭素質コンドライトにより似ているものが多い
- ・ハレー彗星起源の塵は、>10質量%のCHON物質を含んでいる
- ・アミノ酸を含めて、70種類以上の有機物が炭素質コンドライト中に発見されている
- ・地球生命同様、L体アミノ酸がD体より数~18%卓越(Murchison)
- ・太陽系誕生以前に形成された星間物質(ダイヤモンドを含む)も、同様の炭素質コンドライト隕石中に発見されている(Allende)



16





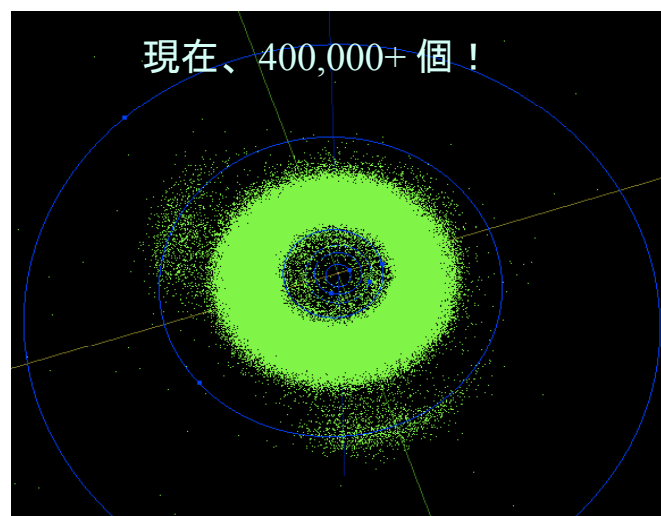
## ターギッシュレイク隕石



- ・2000年1月にカナダ・ユーコンの氷結湖上に落下・回収
- ・他の炭素質コンドライトを卓越した質量%の炭素含有率
- ・D型小惑星の分光型に対応する初の隕石(きわめて脆い)
- ・突入軌道はメインベルトの外縁に外挿された
- ・現在も世界各地でコンソーシアム研究が実施されている

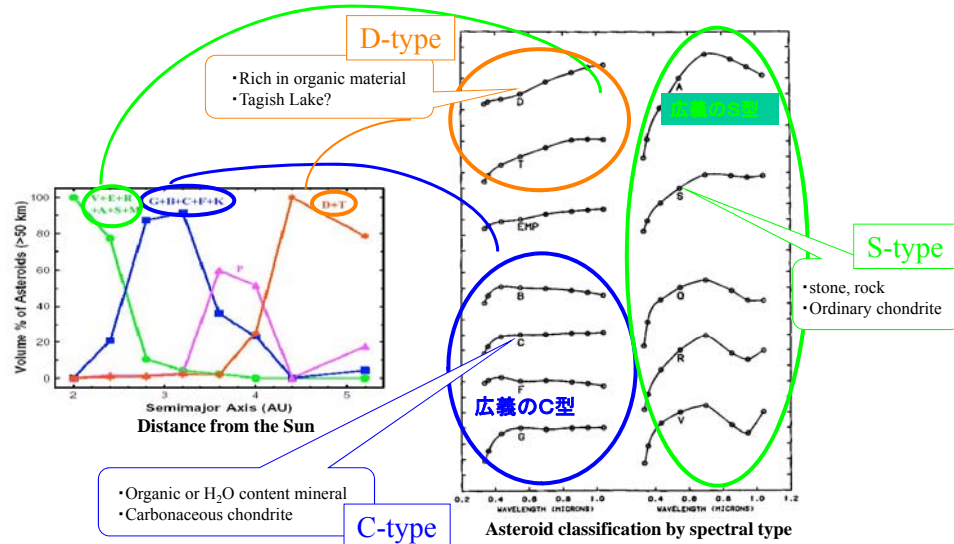


## 小天体の数は多い





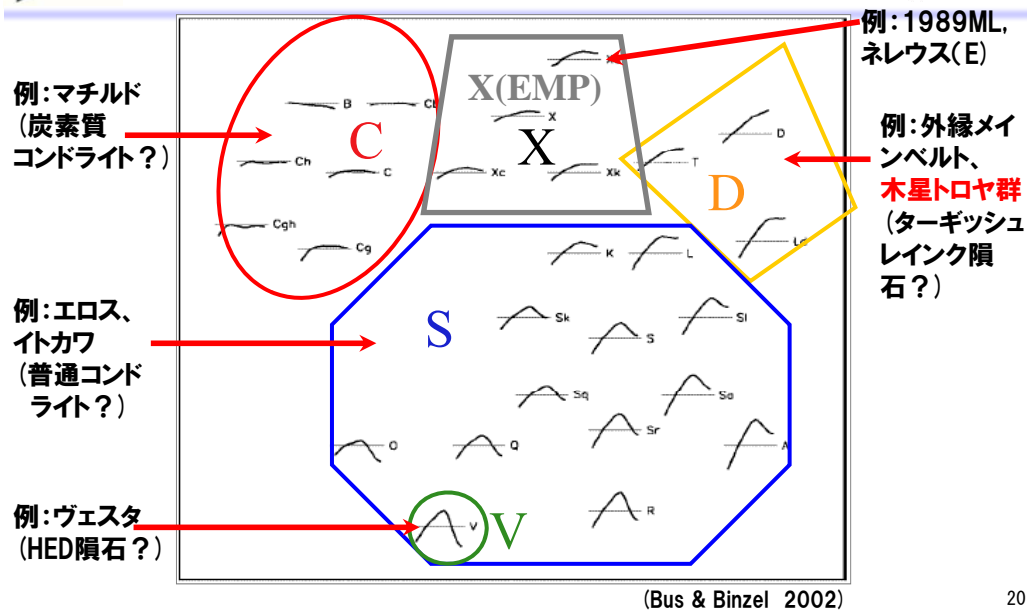
# しかし、グループに大別



19  
19



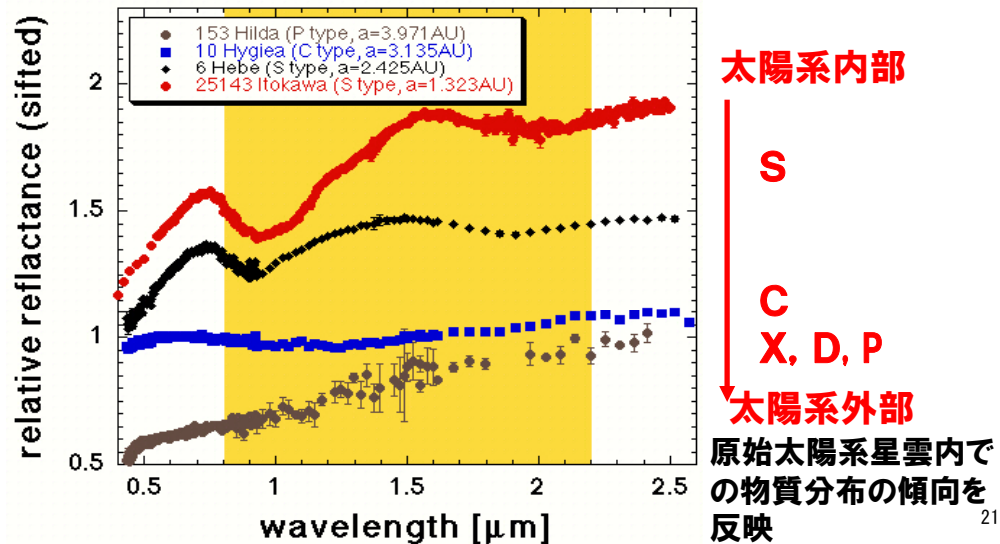
## 地上観測と物質分析の結合:「スペクトル」型の分類



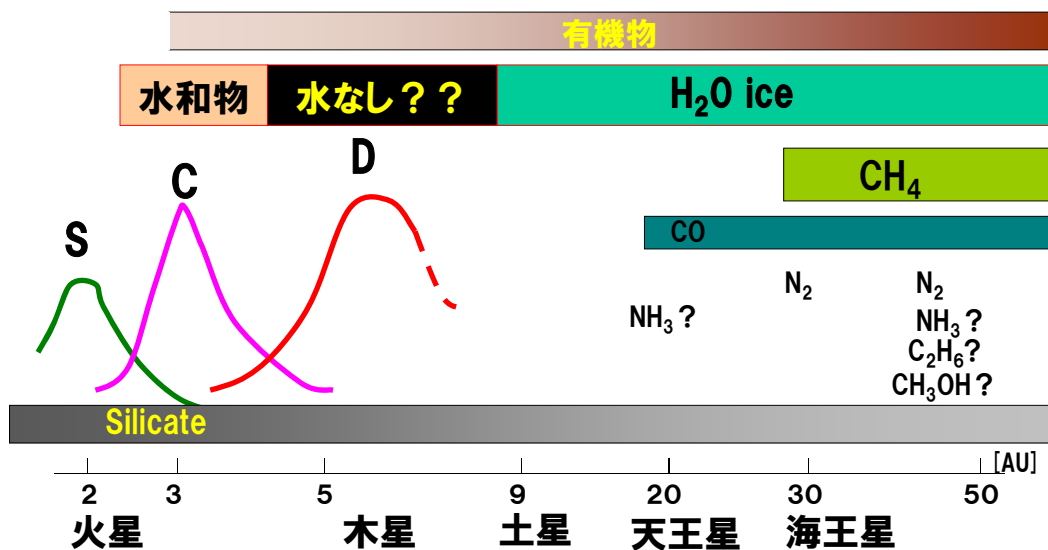
20



## 日心距離に応じたメインベルト小惑星スペクトル型の推移



## 太陽からの距離によって、天体の材料の分布は変わる







## 惑星探査の手段 ～宇宙に行かずにできることも多い～



- \* 地上での隕石・宇宙塵採集・分析
- \* 地上からの望遠鏡観測
- \* 気球・航空機からの観測
- \* 観測ロケット搭載実験
- \* 地球周回軌道からの望遠鏡観測

南極観測隊  
すばる望遠鏡  
赤外観測、Leonid MAC  
S-310, S-520  
ハッブル宇宙望遠鏡

### \* 惑星探査機

- > フライバイ (近傍通過時に観測)
- > オービター (周回してその場観測)
- > インパクト、ペネトレータ
- > ランダー、ローバ (天体表面に着陸・移動)
- > サンプルリターン (試料を地球に持ち帰る)

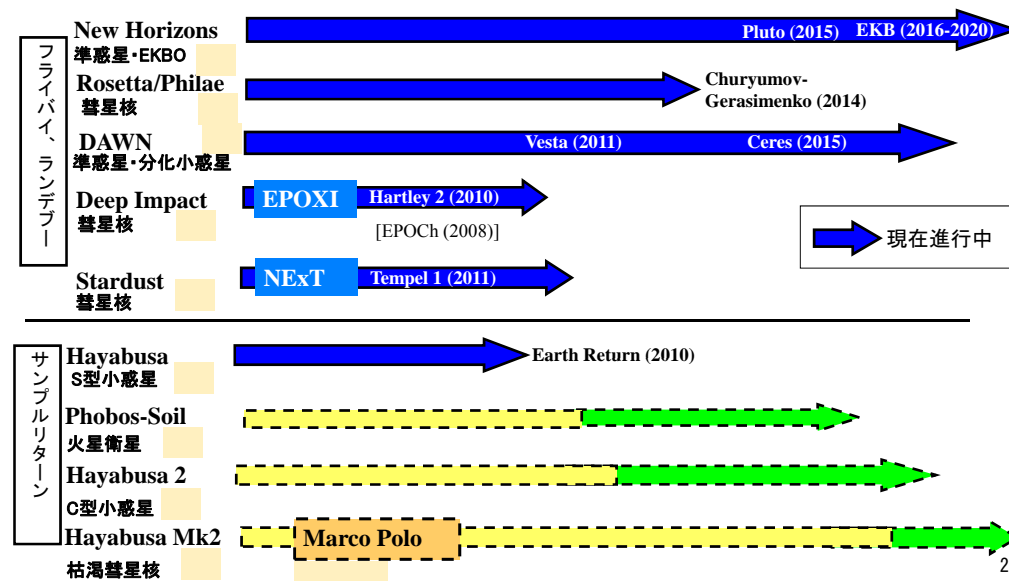
さきがけ、すいせい  
のぞみ  
Deep Impact、Lunar-A  
Phoenix  
はやぶさ



23



## 現在の小天体探査ミッション



24  
24



## サンプルリターン： 利点と過去の実例



- ・Apollo計画は計6台のべ12人の宇宙飛行士を送り込み、計95km<sup>2</sup>を探索し、382kgのサンプルを持ち帰る。
- ・旧ソ連は無人ローバLuna17(Lunokhod 1)・Luna21(Lunokhod 2)を使い、50km弱を走破、300gのサンプルを持ち帰る

＊ 重い物質分析装置を多数搭載しなくてよい

＊ 探査機設計時代の分析技術に制限されず、回収時の最先端の分析施設を利用できる。試料を保管・管理することで、将来にわたって研究機会を確保できる。

＊ 打ち上げ前は「観測」研究者、帰還後は「分析」研究者の参加が期待できる。

月： Apollo, Luna

太陽風： Genesis

彗星塵： Stardust

小惑星： Hayabusa

25



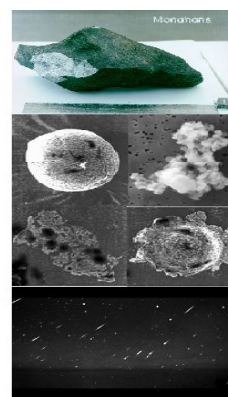
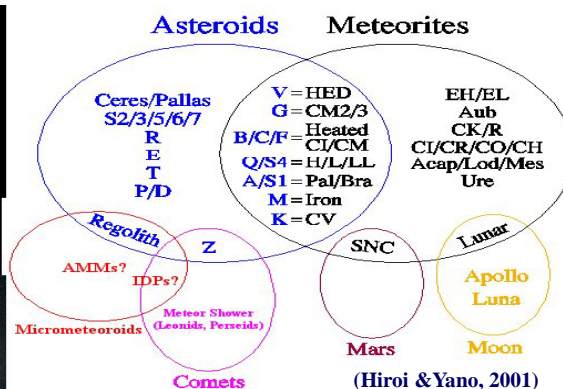
## 小惑星研究：分析？観測？探査？



- ・ 母天体が明らかな隕石・宇宙塵試料はほぼ皆無。(月、火星、ヴェスタを除く)
- ・ 小惑星の分光パターンは、天体表面の組成、地形、サイズ分布、粒形、宇宙風化などに大きく依存。

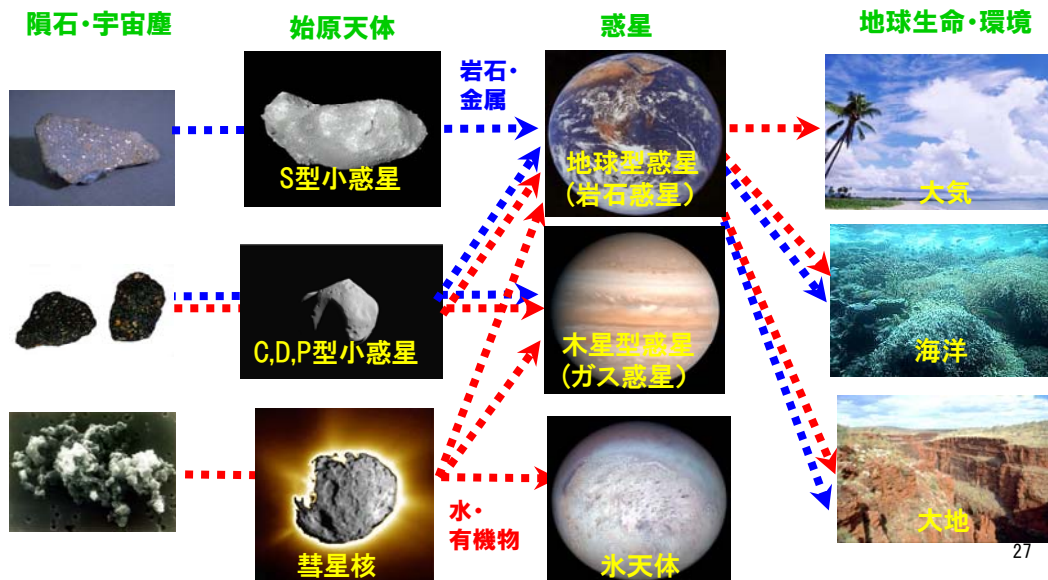
=>これら分析、観測の欠点を補うデータを取得し、両者の「橋渡し」を行うことが、探査ならではの貢献である。

=>主要なスペクトル型の小惑星の代表例を訪れ、隕石・宇宙塵試料や地上観測との対応を着け、「小惑星の博物学」を早期に決着させることが最重要。





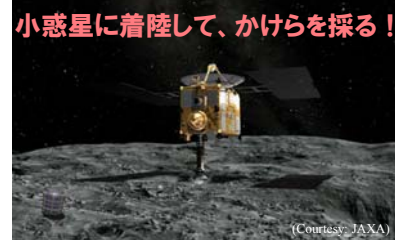
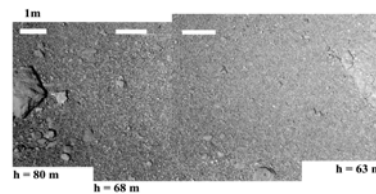
## 小惑星や彗星は地球、生命の原材料



## はやぶさ: 史上初の小惑星往復探査の旅



鹿児島県から打上げ



- ・内之浦から打ち上げ: 2003年5月
- ・地球スイングバイ: 2004年5月
- ・イトカワランデブー: 2005年9月
- ・離着陸 & 試料採集: 2005年11月
- ・小天体出発: 2007年4月
- ・地球帰還: 2010年6月

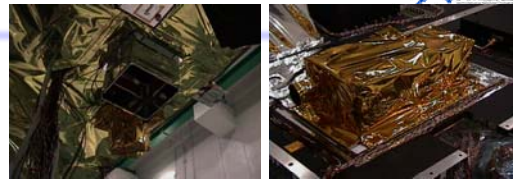
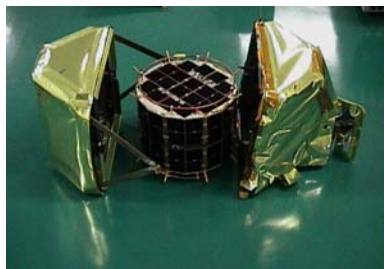




## 小惑星に伴走しながら、その場で科学観察

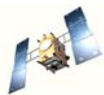


- \* 近赤外線分光器
- \* X線分光器
- \* 多色測光光学カメラ
- \* レーザー高度計
- \* ホッピングロボット (MINERVA)
- \* サンプラー



搭載機器	測定項目	科学目標
試料採集装置(サンプラー)	採集試料の組成、組織、形態、絶対年代	始原物質とその生成条件、変成の度合いとその条件、衝突年代の決定、有機物の探索、小惑星の表面状態、固さ
光学カメラ (AMICA)	NEOのサイズ、形状、自転周期、自転軸の傾き、表面地形、クレータ統計、広帯波長での分光偏光反射特性、試料採集地点の記載、宇宙塵濃集や衛星の有無	物質種、衝突進化、内部進化の跡、隕石スペクトルとの比較、表面物質の状態(レゴリス粒度、宇宙風化作用)の地域的多様性、彗星的小惑星の判断
レーザー高度計 (LIDAR)	NEOの質量、重力場、形状、表面地形、バルク密度、波長1ミクロン付近での反射能	物質種の決定、衝突史、熱史、スペクトル型と表面物質・状態との対応づけ、内部構造の推定
近赤外線分光計 (NIRS)	NEOの波長0.85-2.10ミクロン付近の分光	表面の鉱物組成、水質変成、スペクトル型と表面物質の対応付け
蛍光X線分光計 (XRS)	NEOの表面の主要元素分析 Mg, Al, Si, S, Ca, Ti, Fe, Ni, 等	全表面にわたる主要な物質種の分布

29



## はやぶさによるイトカワの科学観測概要



### \*日時:

2005年9月中旬～11月下旬  
10月中はツアー観測 (右図)

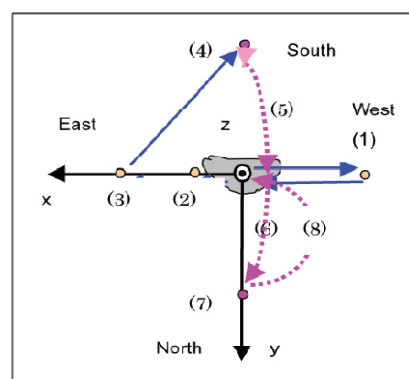
### \*場所:

イトカワから20km～3kmの距離

### \*観測項目:

形状、地形、表面高度分布、  
反射率(スペクトル)、鉱物組成、  
重力、主要元素組成

など



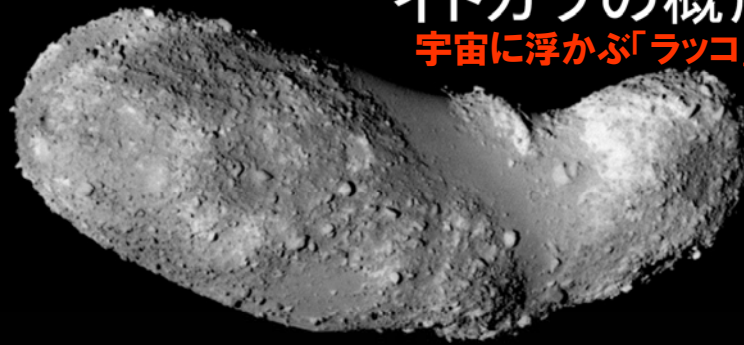
ツアー観測の経路: (1)～(8)の順で移動

地球側(ほぼ太陽側)から見たイトカワが図中央

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

30

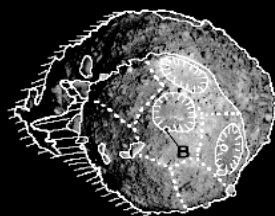
# イトカワの概形 宇宙に浮かぶ「ラッコ」



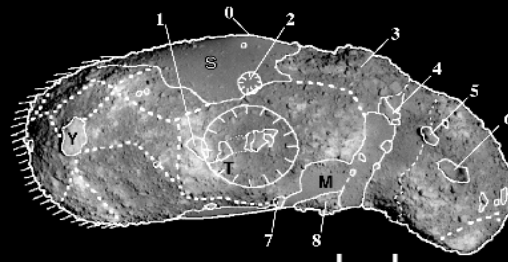
太陽系黄道面を海面、小惑星をそこに浮かぶラッコに見立てた。頭部と胴体、くびれた首、腹から両脇に掛けてと背に滑らかな表面が見える。右は、運用中の関係者に出回ったアスキーアート。



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



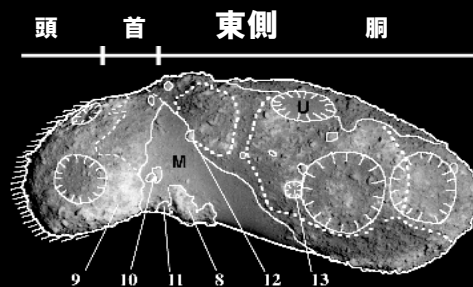
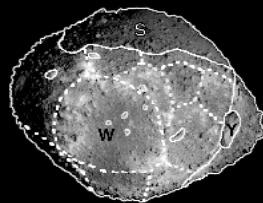
「ラッコ」頭部 Head-ward part (Longitude = 0)



胴 西側 首 頭

## イトカワ地質図

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

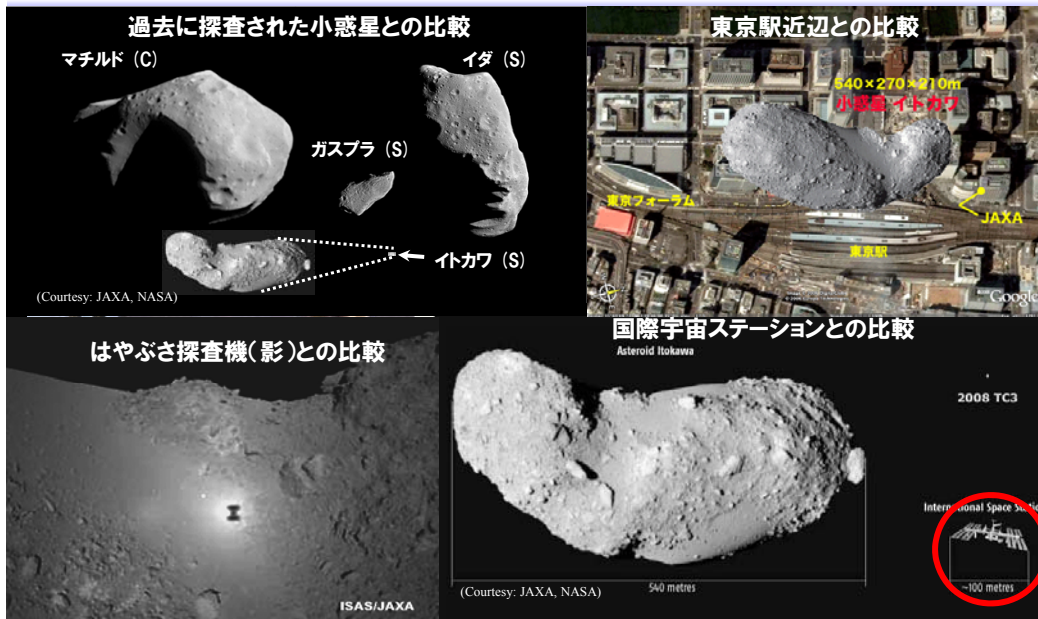


頭 首 東側 胴

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

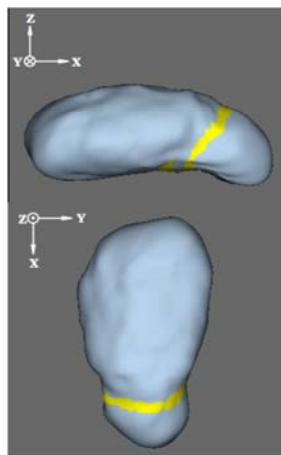


## イトカワの大きさ(小ささ)を実感しよう

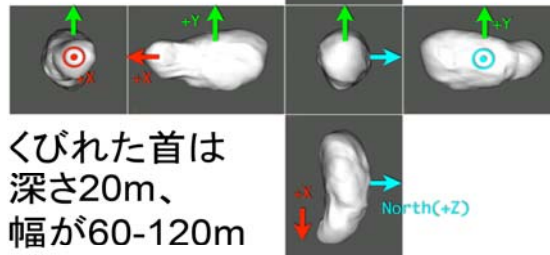


## イトカワ形状モデルと展開図

タッチダウンに不可欠な小惑星の立体図を作る



- ステレオ視で作成した形状モデル/展開図



- くびれた首は深さ20m、幅が60-120m



## イトカワの表面

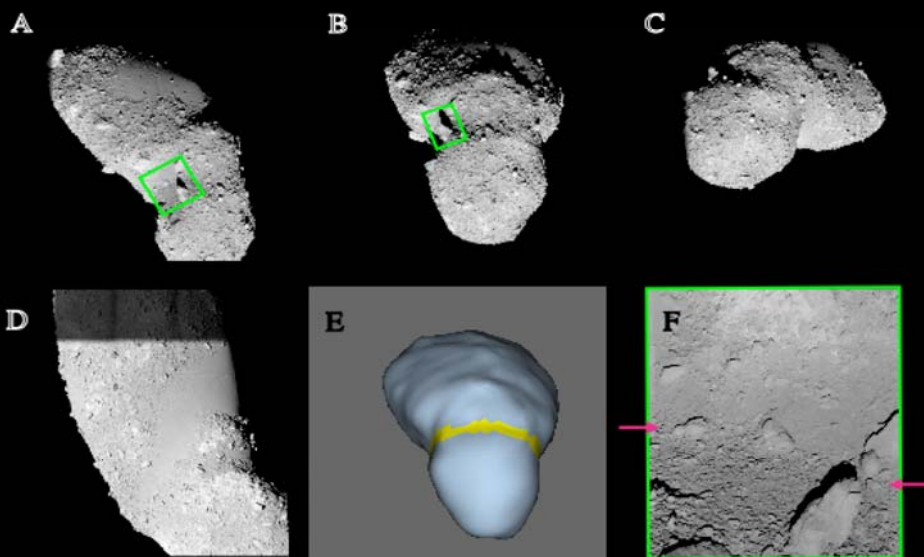
遠目には角の取れた印象だが、近づいてみると頭部と尾部にファセットという平坦面ないし凹面が多数見られる。



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。



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

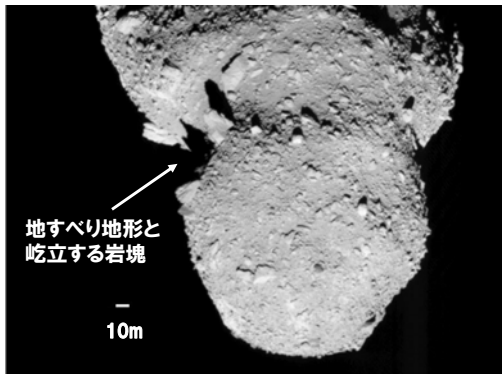


## イトカワの二分性 小さな世界に、多様で複雑な地形

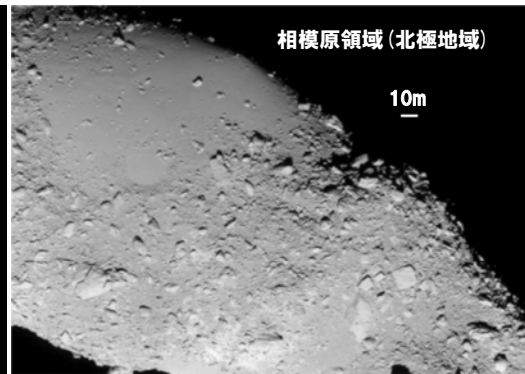


ラフ地域： 多くのボールダー(岩塊)が堆積

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)

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

37



## 地球上の地形は、大きな重力や熱エネルギーによる 地面、大気、水の運動・循環から形作られる



岩塊(ボールダー)



砂利の平原



地滑り



砂の堆積

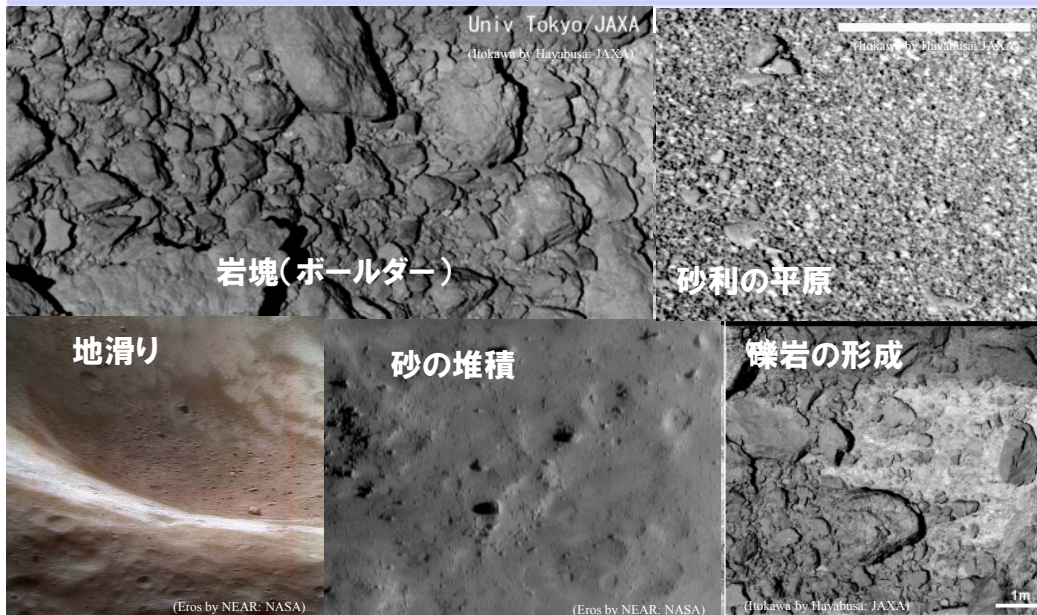


礫岩の形成

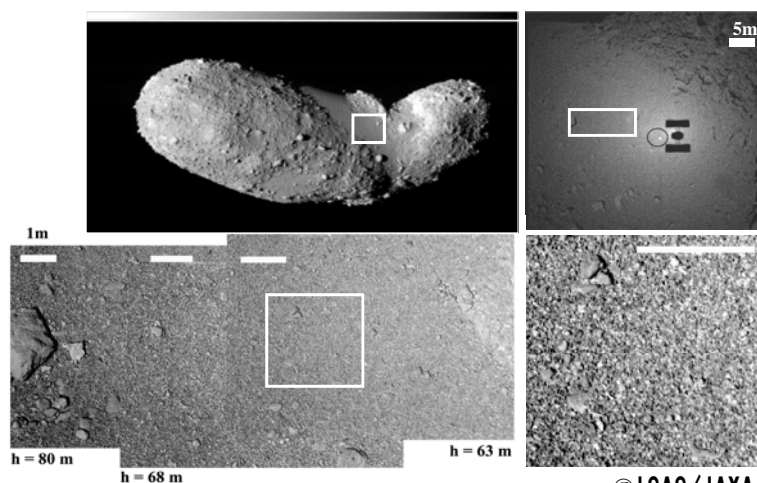




空気も水もなく、重力も極めて小さな小惑星の  
地形にも、地球に似た地形をたくさん発見。なぜ？



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



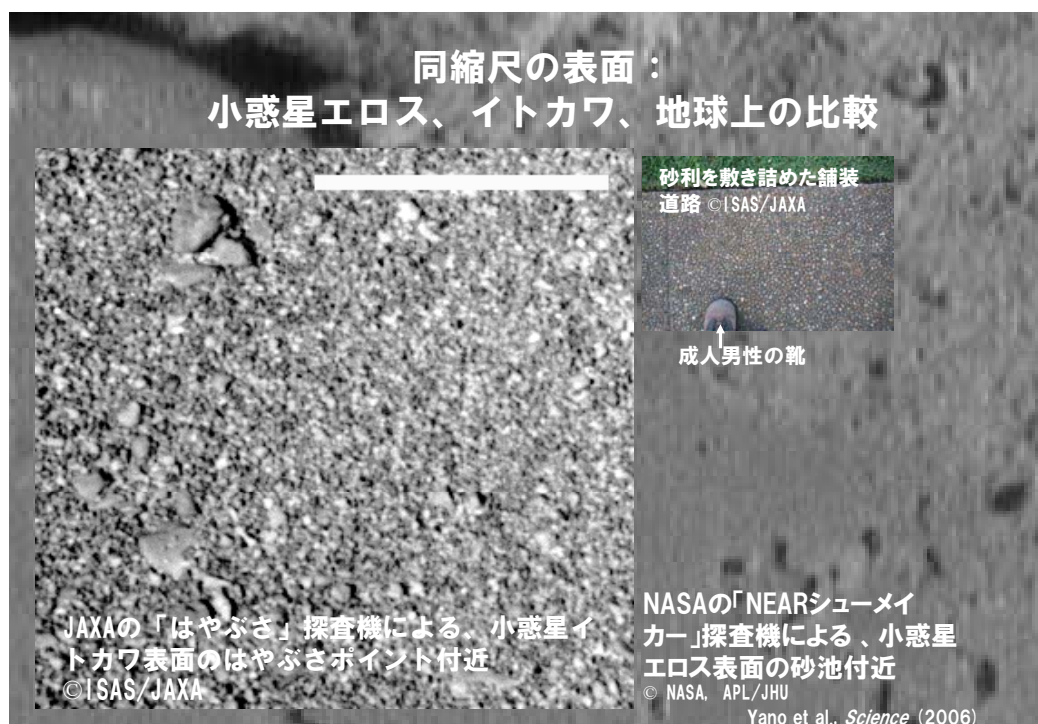
©ISAS/JAXA

\* (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。

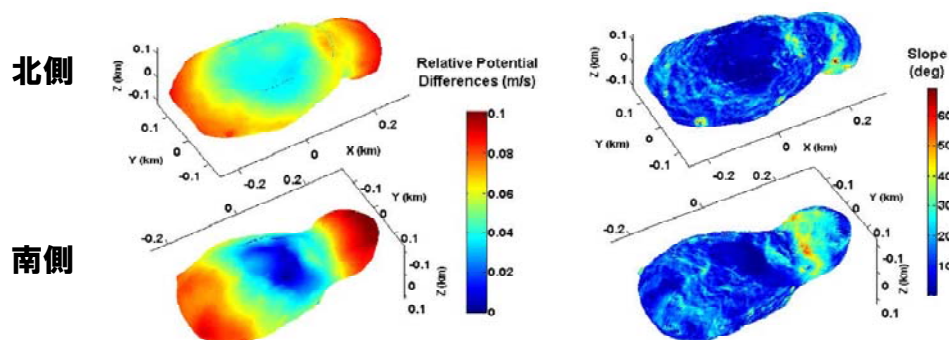
\* 地球に回収するサンプルはこの地域のかげらである。

Yano, et al., *Science* (2006) <sup>40</sup>





**平らな地域の形成**  
**わずかな重力に沿った、外力による小石の移動**



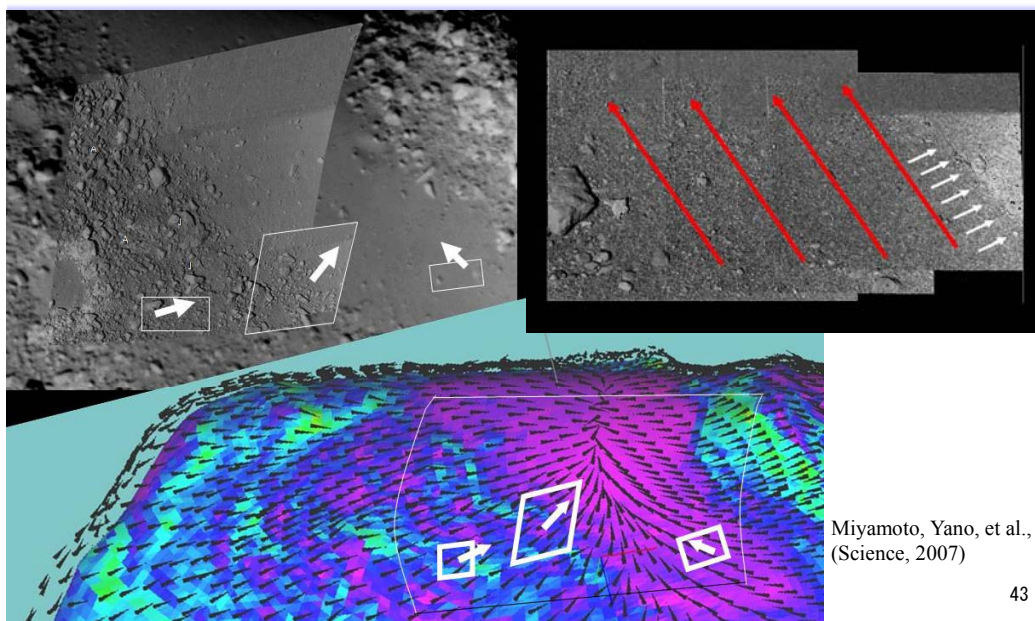
- ・ 細粒の物質が選択的に重力ポテンシャルが低い領域へと集積していった形成された可能性がある。
- ・ 衝突時の振動、あるいは 地球などへの接近時の重力摂動などが上記の物質移動を起こした原動力として考えられている

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

42



## イトカワ表面の物質移動の証拠



Miyamoto, Yano, et al.,  
(Science, 2007)

43



## イトカワ表面で地球に似た地形ができた理由？



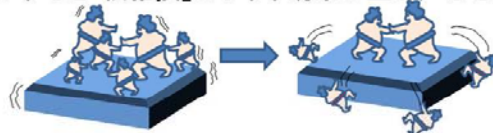
### 考えられるシナリオ

1. イトカワはかつて、全体が何度も揺らされていた

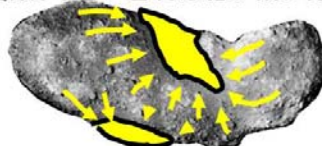


「振動」の原因は  
・小天体の衝突  
・潮汐力  
・イトカワの「合体」  
などが考えられる

2. すると「紙相撲」のような効果が生じ、「ふるい」わけられた



3. その結果、小さい岩石は低い所に集まった



宮本 (2007) より

44



## 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

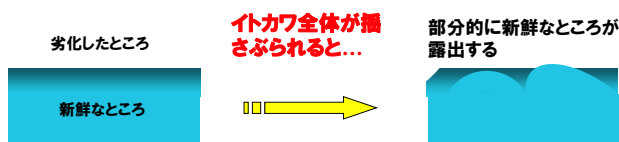
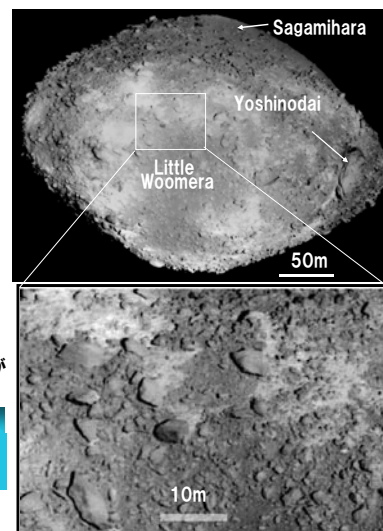
Saito, et al., *Science* (2006) 45



## 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)

46

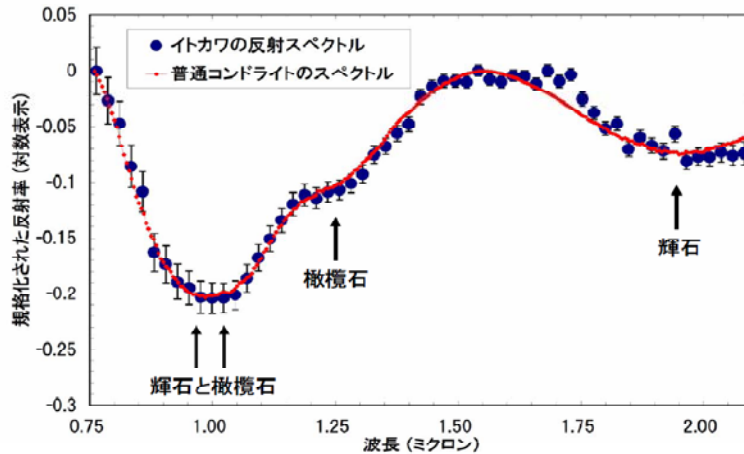


## 近赤外波長域の反射スペクトル



### 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



M.Abe, et al., *Science* (2006)

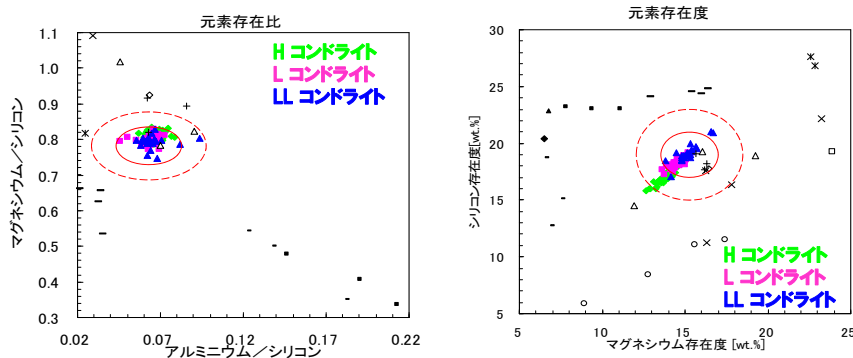
47



## イトカワ表面の主要元素組成の特徴



### 地域ごとの元素のばらつきはあまり見られない

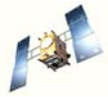


- ・イトカワの主要元素存在比は、 $\text{Mg}/\text{Si}=0.78 \pm 0.09$ 、 $\text{Al}/\text{Si}=0.07 \pm 0.03$
- ・普通コンドライト隕石の元素組成に近く、LL または L コンドライトと考えられる。但し、始原始的な Eコンドライトである可能性も否定できない。
- ・イトカワの場所による元素存在比の違いは見つからない。組成はほぼ一様である。

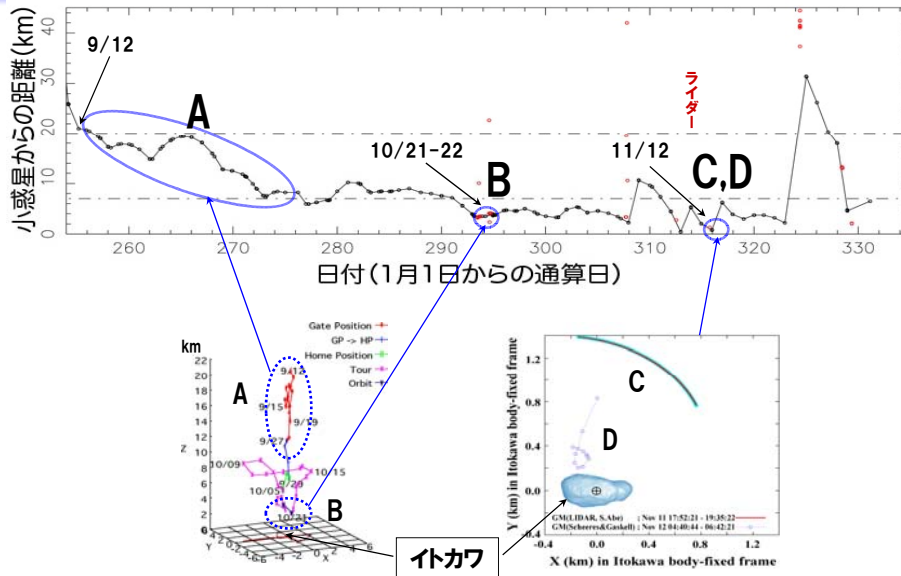
Okada, et al., *Science* (2006)

48

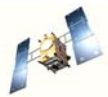




## 質量推定を行ったところ



49



## 推定された質量



各期間でのGM推定値 (GM = 万有引力定数 × 質量)

A	1.98			2.34			2.70
B		2.17		2.29		2.41	
C ライダー			2.27		2.39		2.51
D			2.21		2.36		2.51



赤い○が推定値で、棒線が誤差範囲を示す

GMの値:  $(2.34 \pm 0.07) \times 10^{-9} \text{ km}^3/\text{s}^2$

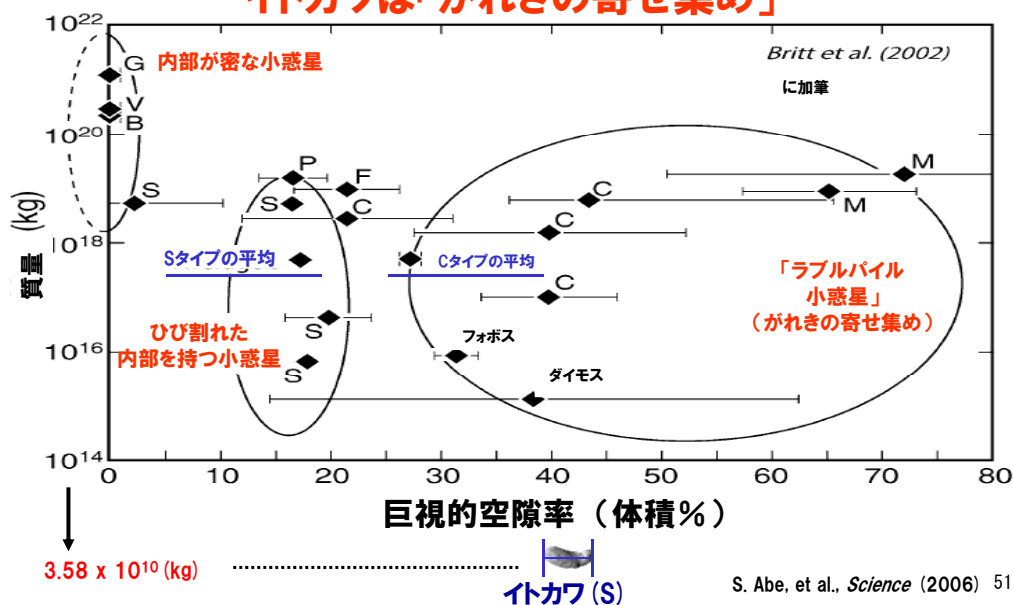
↓  
質量:  $(3.510 \pm 0.105) \times 10^{10} \text{ kg}$

↓  
密度:  $1.90 \pm 0.13 \text{ g/cm}^3$



50

## 世界初の微小小惑星の空隙率推定 イトカワは「がれきの寄せ集め」



## イトカワ誕生のシナリオ



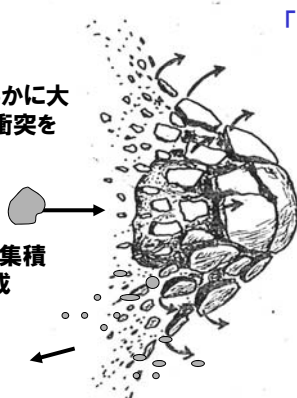
## がれきを寄せ集めて作られた、ラッコのかたち

## 「がれき寄せ集め説」の状況証拠

(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

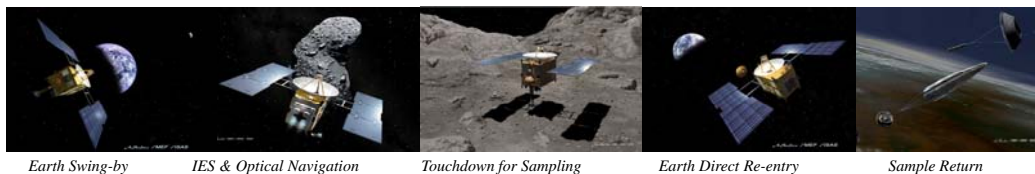


- ・ 低密度～40%もの空隙率
- ・ 形状（頭と胴）が丸みを帯びている
- ・ 表面が岩塊で覆われている
- ・ 細長いリッジのような全球に及ぶ構造がない（エロスや火星衛星には見られる）
- ・ ファセットの一部は内部の破片が露出したもの？
- ・ 傾斜角が全体に小さく（多くの地域で緩和）、単体のかたまりではない
- ・ 大きな岩塊は、表面のクレーターから放出されたものではなく、さらに大規模な衝突から生まれたはず

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

52

# **まとめ はやぶさ：微小小惑星の探査と地球圏外の深宇宙往復航行**



## **<工学実証>**

- (1) 電気推進エンジンによる深宇宙航行
- (2) 自律航法・姿勢制御
- (3) 微小重力天体からの試料採取
- (4) 惑星間軌道からの地球帰還

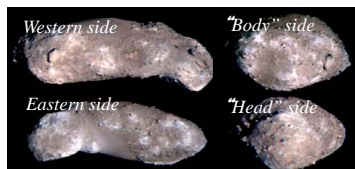


## **<科学的発見>**

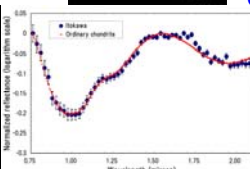
\* 微小NEOの概念の刷新

=>「ラブルパイル(瓦礫の寄せ集め)天体」の存在を実証

=>「S型小惑星」と「普通コンドライト」間の橋渡しがほぼできた



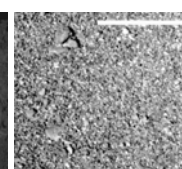
Color & Albedo Variation



Spectral Link to LL Chondrites



Target Marker with 0.9M Names



Pebble field in 6mm res.

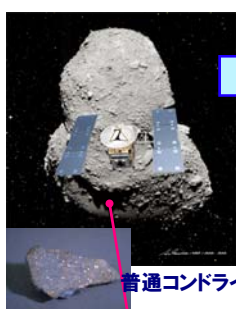


# **始原天体へのプログラム探査**



## **はやぶさ**

Itokawa = S型小惑星



普通コンドライト

## **はやぶさ2**

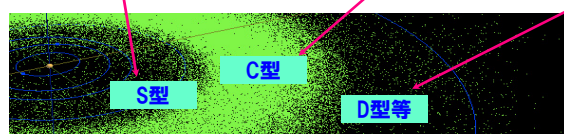
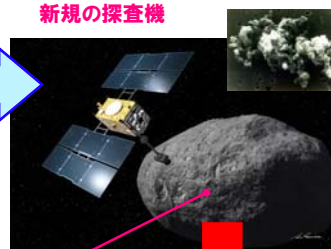
1999 JU3 = C型小惑星  
「はやぶさ」と同型機



炭素質コンドライト

## **マルコポーロ**

D型小惑星, 枯渇珞星核  
新規の探査機



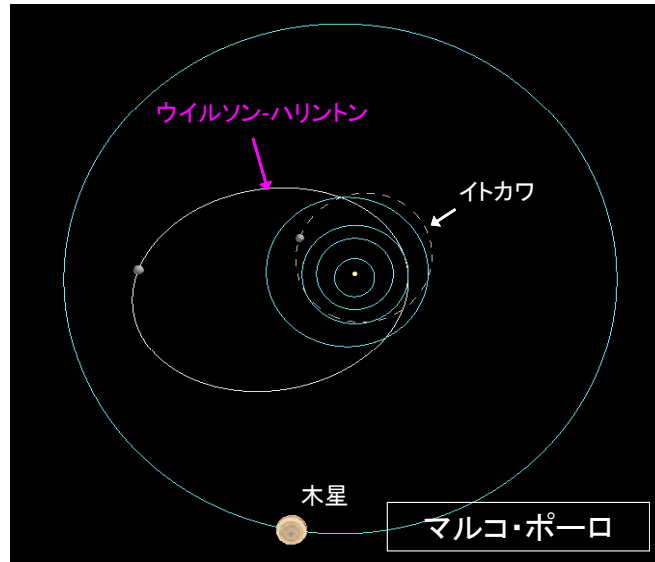
小惑星帯



宇宙塵? ターギッシュレイク隕石?



## 探査候補となっている天体の軌道



55



## 「はやぶさ2」の検討

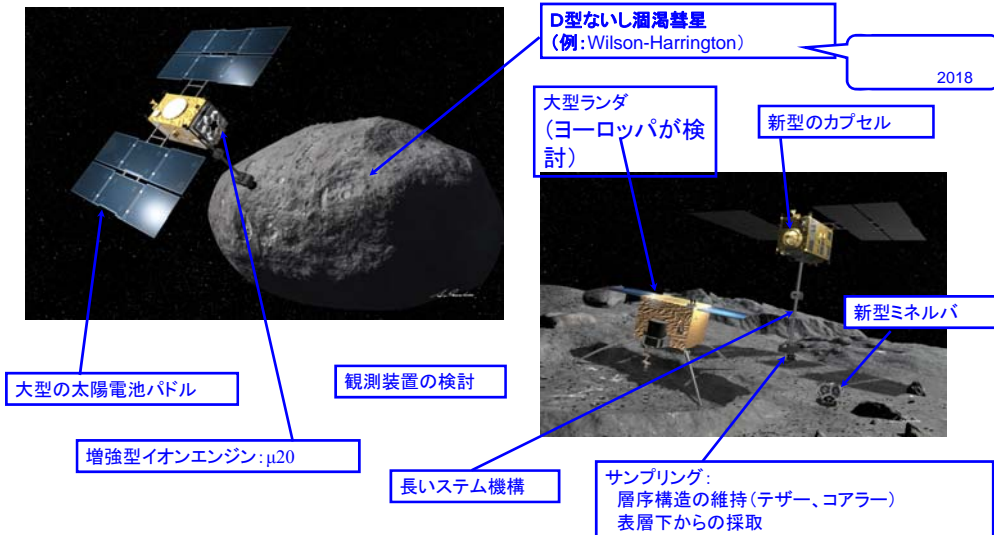


56

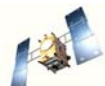




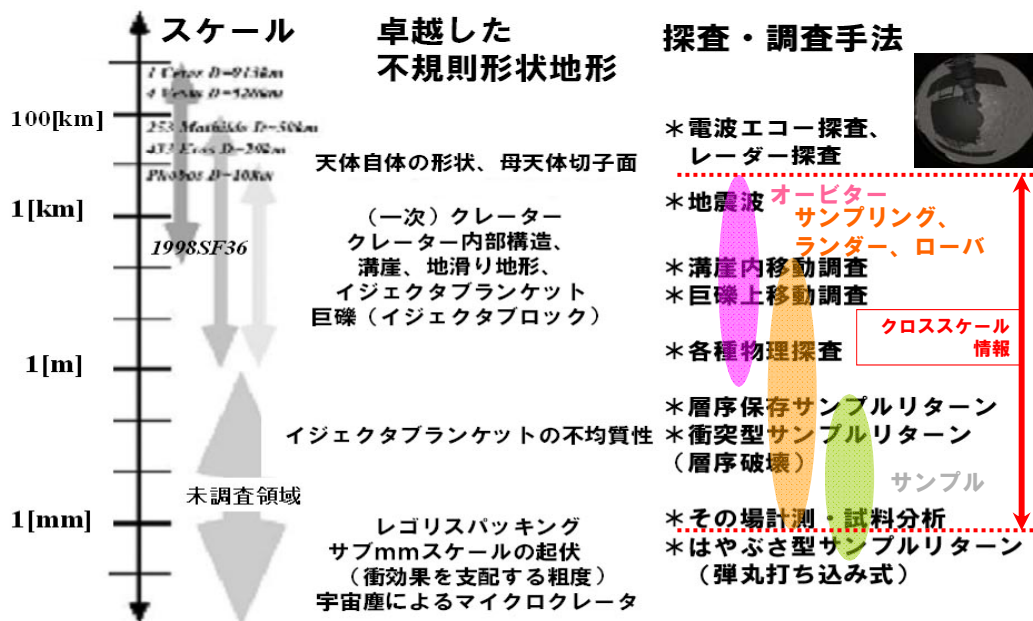
## 「はやぶさMk2 → Marco Polo」の検討



57  
57



## 深さ毎の始原天体内部構造の探査戦術





## その先は？「はやぶさに人が乗る日」

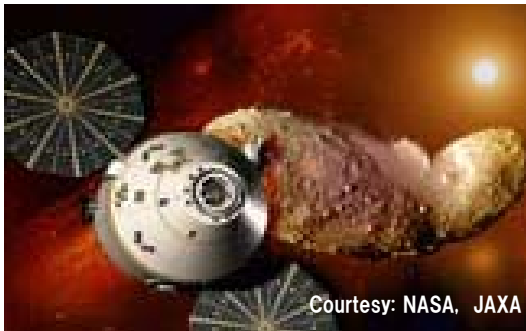


＊「月から直接火星へ」という宇宙探査ロードマップは、宇宙工学的には不合理。

→2006年からNASA、IAA独立に有人NEO探査の検討開始。

→現在NASAが月探査用に開発中のオリオン号とアレスロケットだけで可能な、史上初の有人深宇宙探査。(月面着陸一回より安い！)

→地球に衝突する小惑星への探査などスペースガードへの応用も視野に。



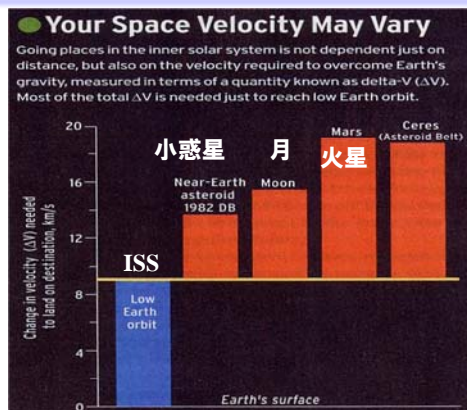
Courtesy: NASA, JAXA



59

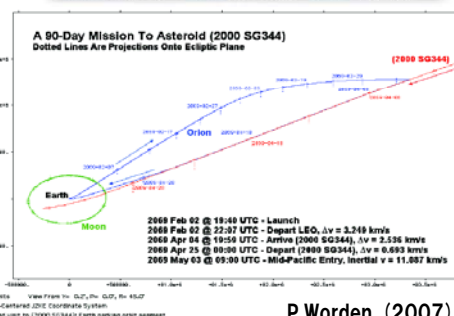


## 小惑星往復は、実は月面に着陸よりも簡単



NASAでは2006-2007年にJPL, JSC, Amesらの研究者・技術者が内部技術検討を実施し、結果をHQに報告。

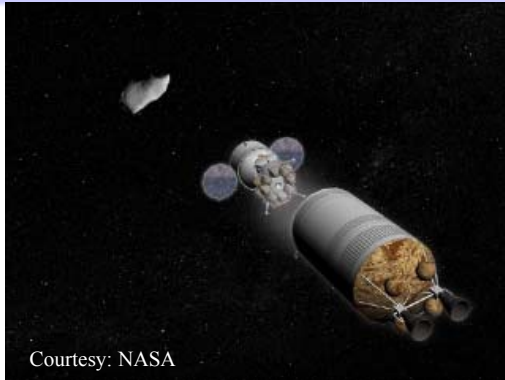
「史上初の有人深宇宙探査ミッション」の最も早いタイミングとして、有人月面着陸(2020年)前後の実施を想定。



P.Worden (2007)



## NASAが検討中の有人小惑星有人探査



- \* 月面着陸機が要らない。
- \* 重力に逆らって着陸するための燃料、表面を離脱するための燃料も要らない。
- \* はやぶさが往復探査を実証しつつある。
- \* 人間がロボットを遠隔操作、あるいはその場で直接操作。



テムザック社・人間の動きをトレース

## 「はやぶさ」から始まる、太陽系大航海時代 ～太陽系往復探査と人類の活動圏の拡大～

