

赤外線天文衛星「あかり」 小惑星に水を発見

小惑星の進化過程に赤外線観測で迫る：
リュウグウなど始原的小惑星を理解する大きな手がかりに



臼井 文彦

神戸大学大学院理学研究科 惑星科学研究センター
2018年12月17日

発表の概要

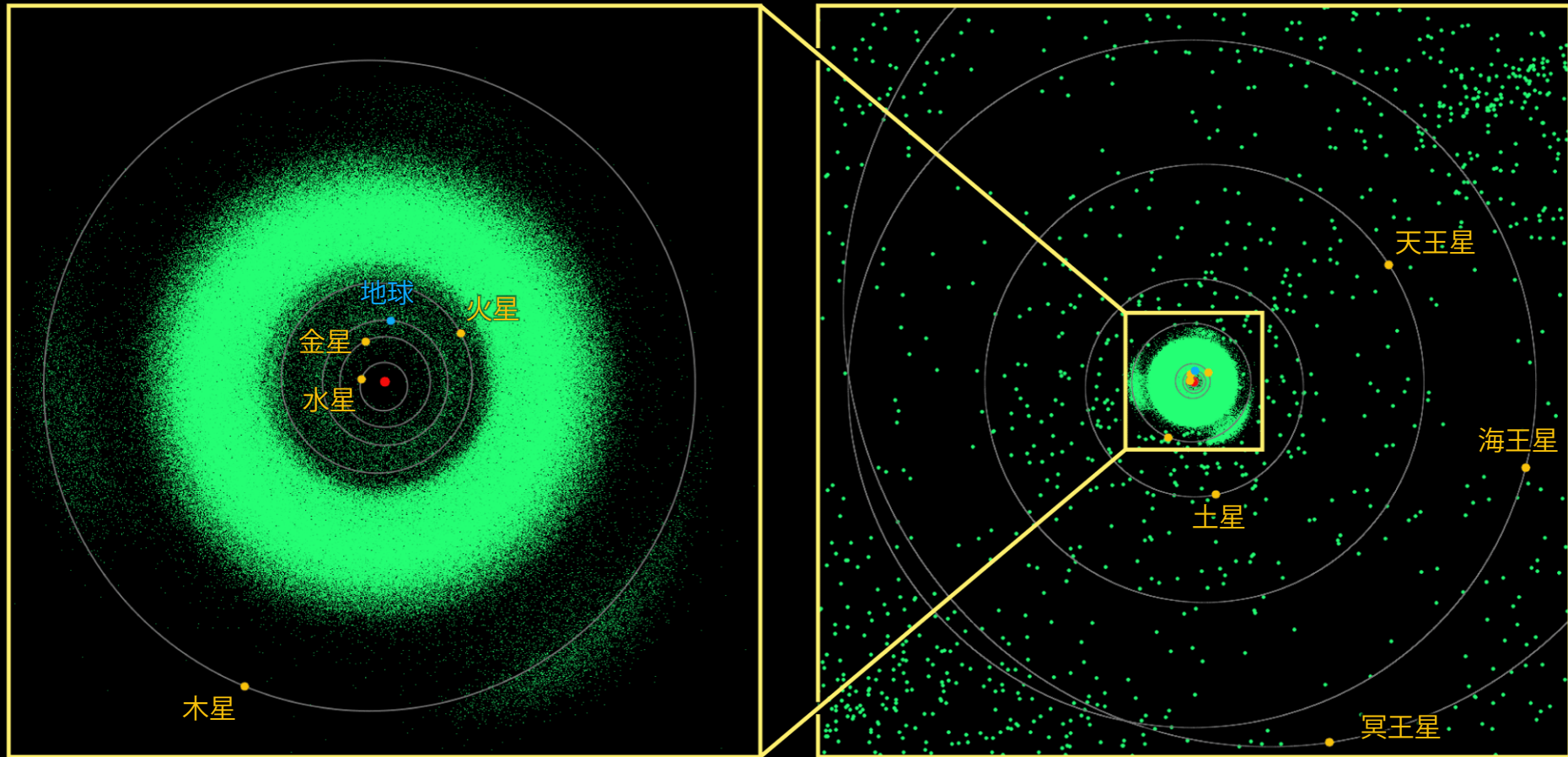
- 赤外線天文衛星「あかり」を用いて小惑星の分光観測を行い、数多くの小惑星に「水」を発見した。
 - 液体の水ではなく、岩石と水が反応してできる「含水鉱物」に着目した。
 - 小惑星の赤外線のスpekトルに含水鉱物の特徴を発見した。
- 小惑星探査機「はやぶさ2」が探査を行っている小惑星リュウグウのような始原的な小惑星の進化の過程を明らかにした。
- 地球の水の起源についても理解が進むと期待される。
- 本研究は *Publications of the Astronomical Society of Japan* (日本天文学会 欧文研究報告) 2018年12月17日に掲載された。

目次

- はじめに
 - 太陽系科学における小惑星の位置づけ
 - 小惑星における水の存在：「含水鉱物」
- 観測
 - 光を成分に分けて分析する分光観測
 - 赤外線による観測と赤外線天文衛星「あかり」
 - 「あかり」による小惑星の観測
- 結果
 - 「あかり」によって得られた小惑星の赤外線反射スペクトル
 - C型小惑星・S型小惑星の反射スペクトルの傾向
- 議論
 - C型小惑星の形成と進化の過程
 - 小惑星探査機による観測と本研究との関係性
- まとめ

太陽系の天体の分布 (2018/12/17)

太陽系内のさまざまな天体には、現在、あるいは過去に
何らかの形で水が存在していたことがわかってきた

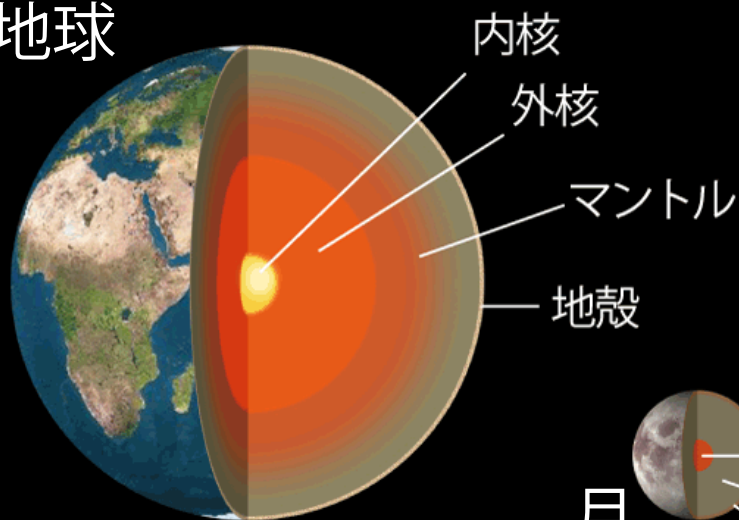


小惑星789,069個の存在が知られている
(2018年10月26日時点)

地球型惑星

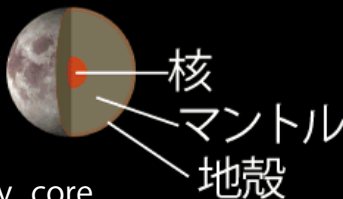
小惑星

地球



https://en.wikipedia.org/wiki/Planetary_core

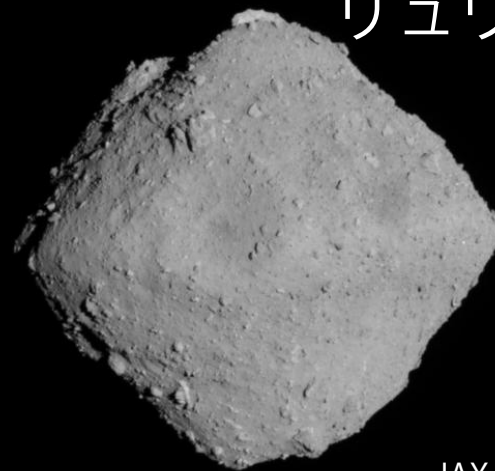
月



内部の岩石が一度融けている
(分化)

組成がリセットされている

リュウグウ



UTC 2018-06-30 14:13

(c) JAXA, U. of Tokyo, Kochi U., Rikkyo U., Nagoya U., ChibaTech, Meiji U., U. of Aizu, AIST

JAXA, 東大など

形成してから大きな熱的変成
を受けていない
(未分化)

太陽系が作られた当時の姿を
ほぼそのまま残している(始原的)

小惑星を調べることで、太陽系や惑星がどのように作られてきたか
そして生命の誕生の謎にも迫ることができる

小惑星における「水」の存在

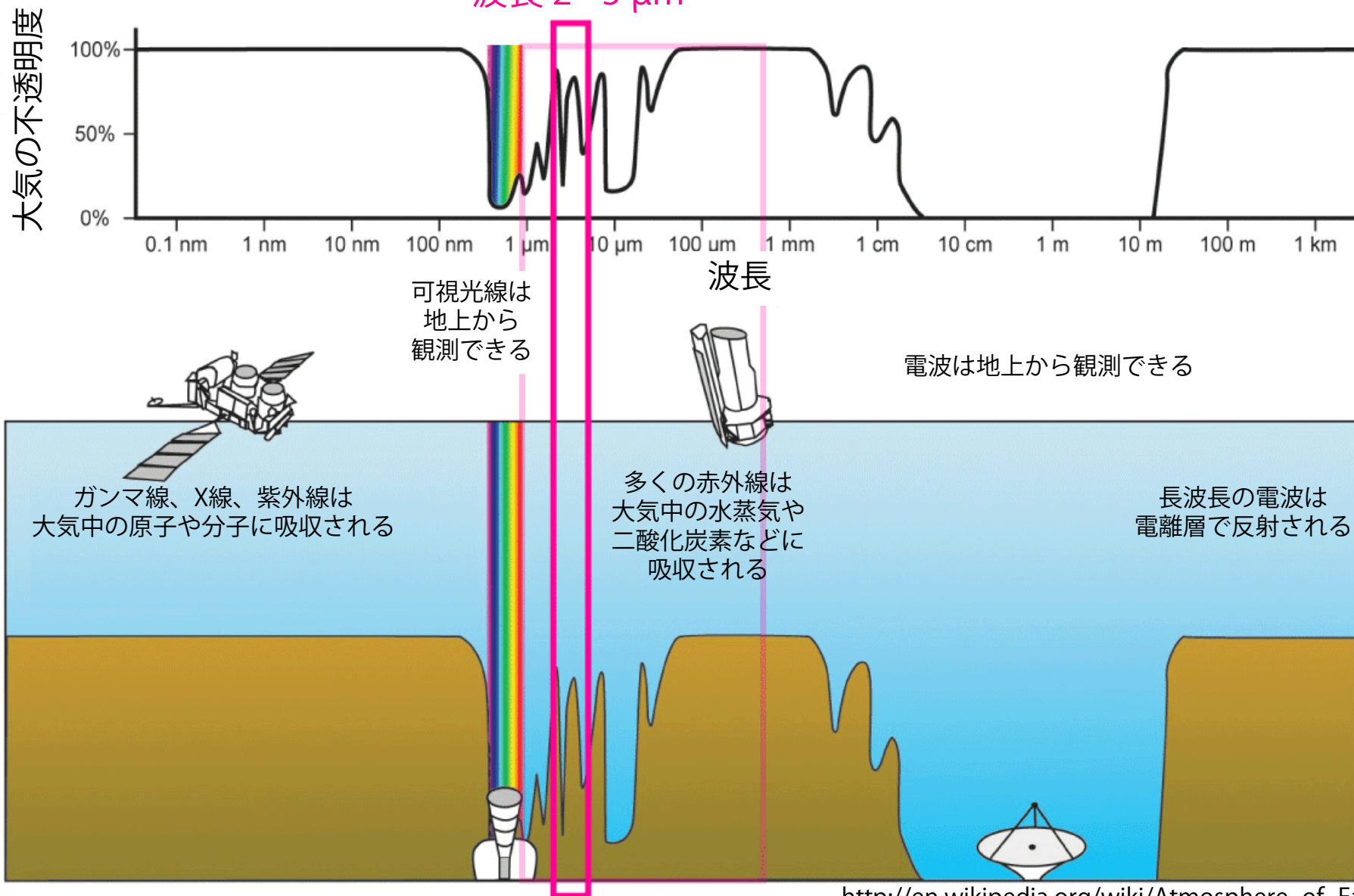
- 小惑星における水の存在
 - 太陽系形成時の環境や地球の水の起源について重要な情報が得られる。
 - 氷 や水蒸気などとして小惑星において水が検出された例が報告されている。
 - 宇宙資源探査の観点でも小惑星における水の存在は注目されている
(将来の有人宇宙探査における生命維持や推進剤への活用が想定されている)。
- 含水鉱物：
 - 酸素原子と水素原子からなる水酸基(OH結合)や H_2O を何らかの形で構造の中に含む鉱物。
 - 地球で採集される隕石中に含水鉱物が発見されている。
 - 小惑星内部で、無水鉱物と液体の水が反応して生成される(水質変成)。
 - 含水鉱物は水の昇華温度以上になっても安定に存在するので、生成後の温度変化によってリセットされない水の存在を示す重要なトレーサーになる。

太陽系における水の分布を研究するには
さまざまな小惑星について含水鉱物の存在を調べる
ことが重要である

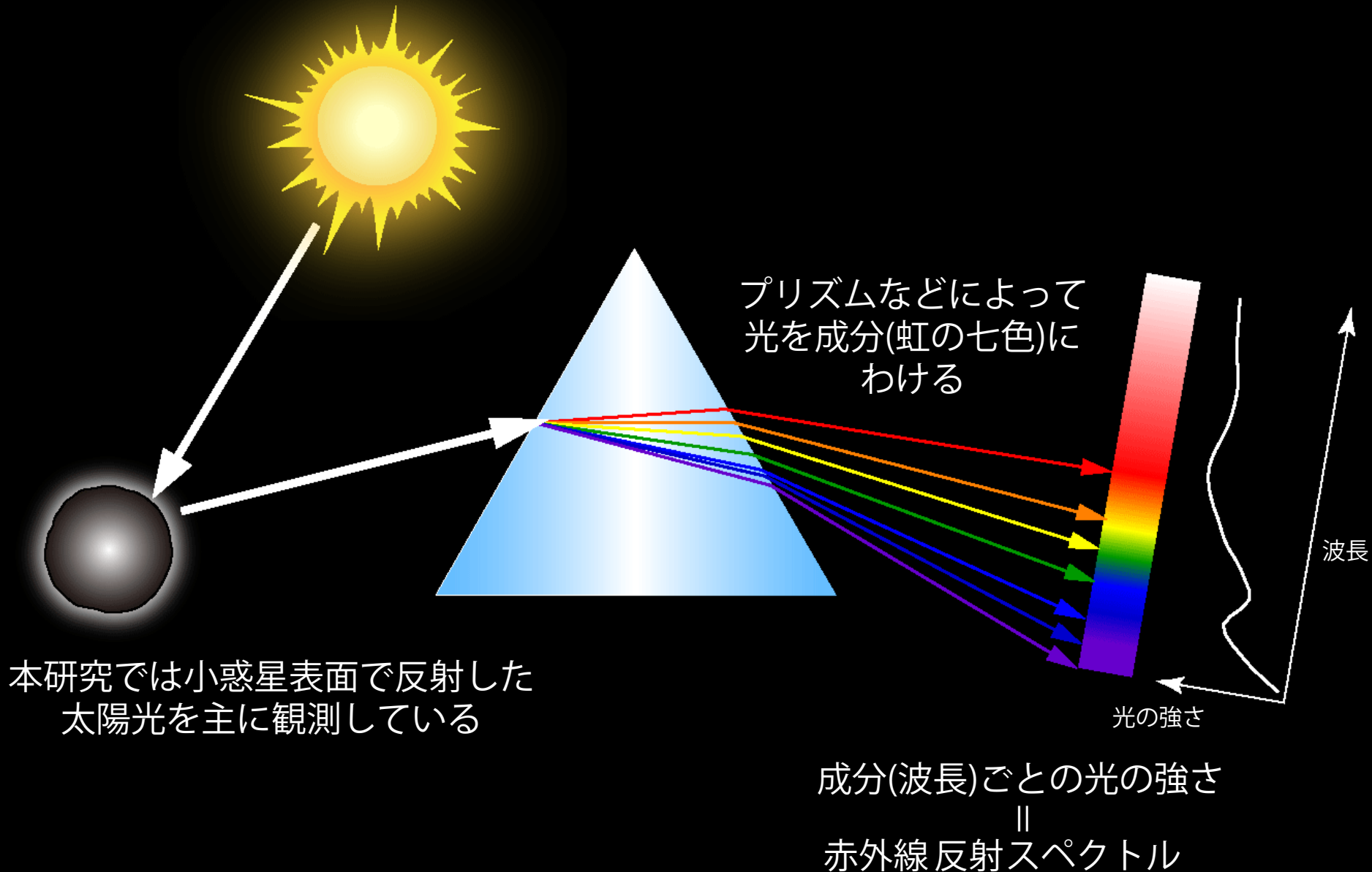
地球大気の透過率 (大気の窓)

7 / 27

本研究で注目する範囲
波長 2 - 5 μm



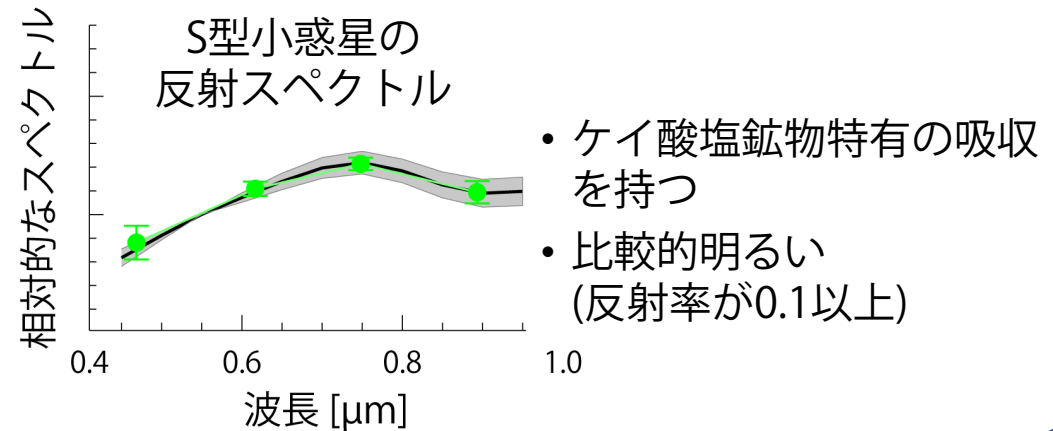
小惑星の分光観測



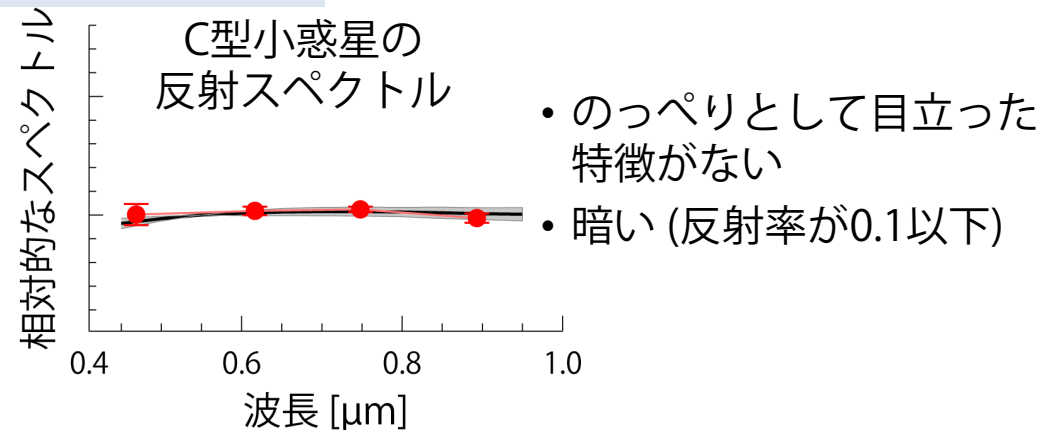
小惑星のスペクトル分類

- 小惑星は可視光での反射スペクトルの形や反射率から分類
- 隕石のスペクトルとの比較から、小惑星表面の物質を推定

普通コンドライトとS型小惑星



炭素質コンドライトとC型小惑星



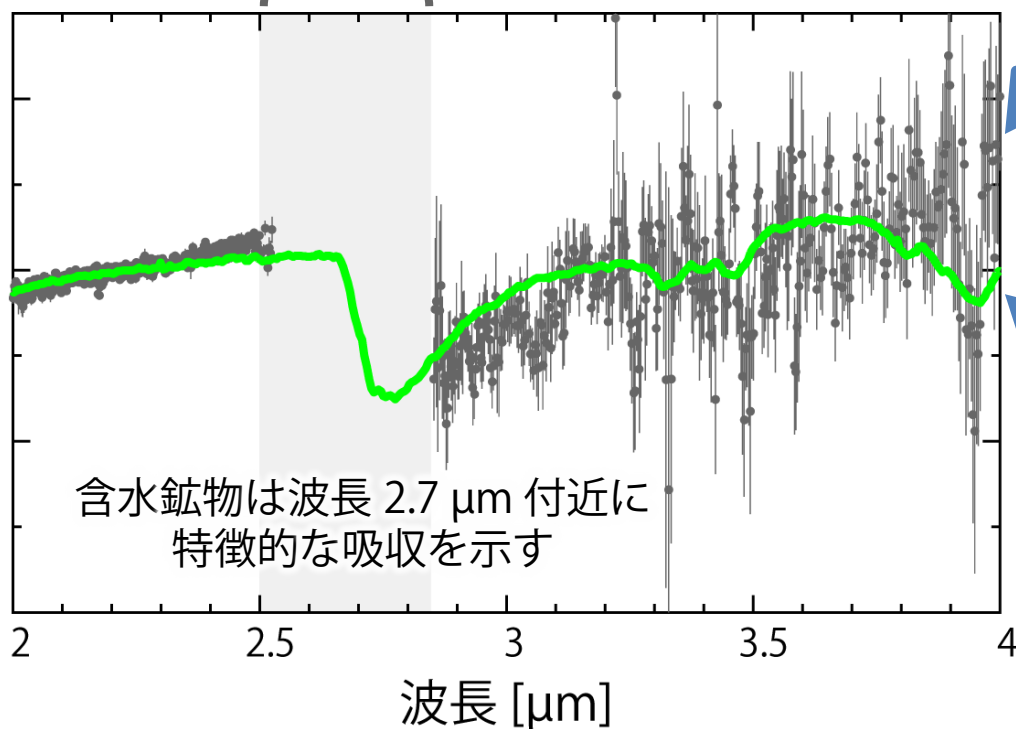
これまでの小惑星の赤外線分光観測 10 / 27

C型小惑星 (511) Davidaの例

Takir & Emery (2012), Takir et al. (2013)

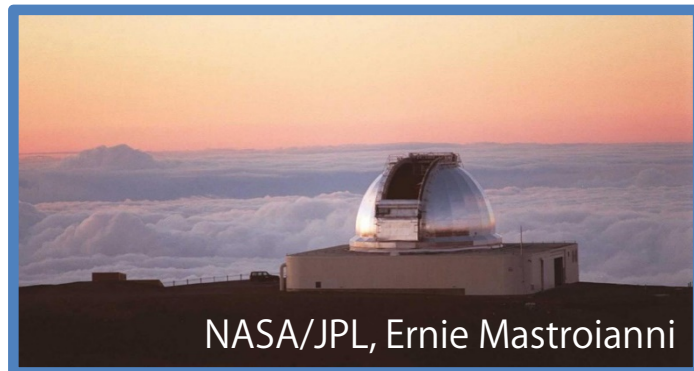
波長 2.5-2.85 μm の赤外線は地球大気の水蒸気や二酸化炭素で遮られてしまうため、地上天文台からは観測ができない

反射スペクトル



地上天文台での観測

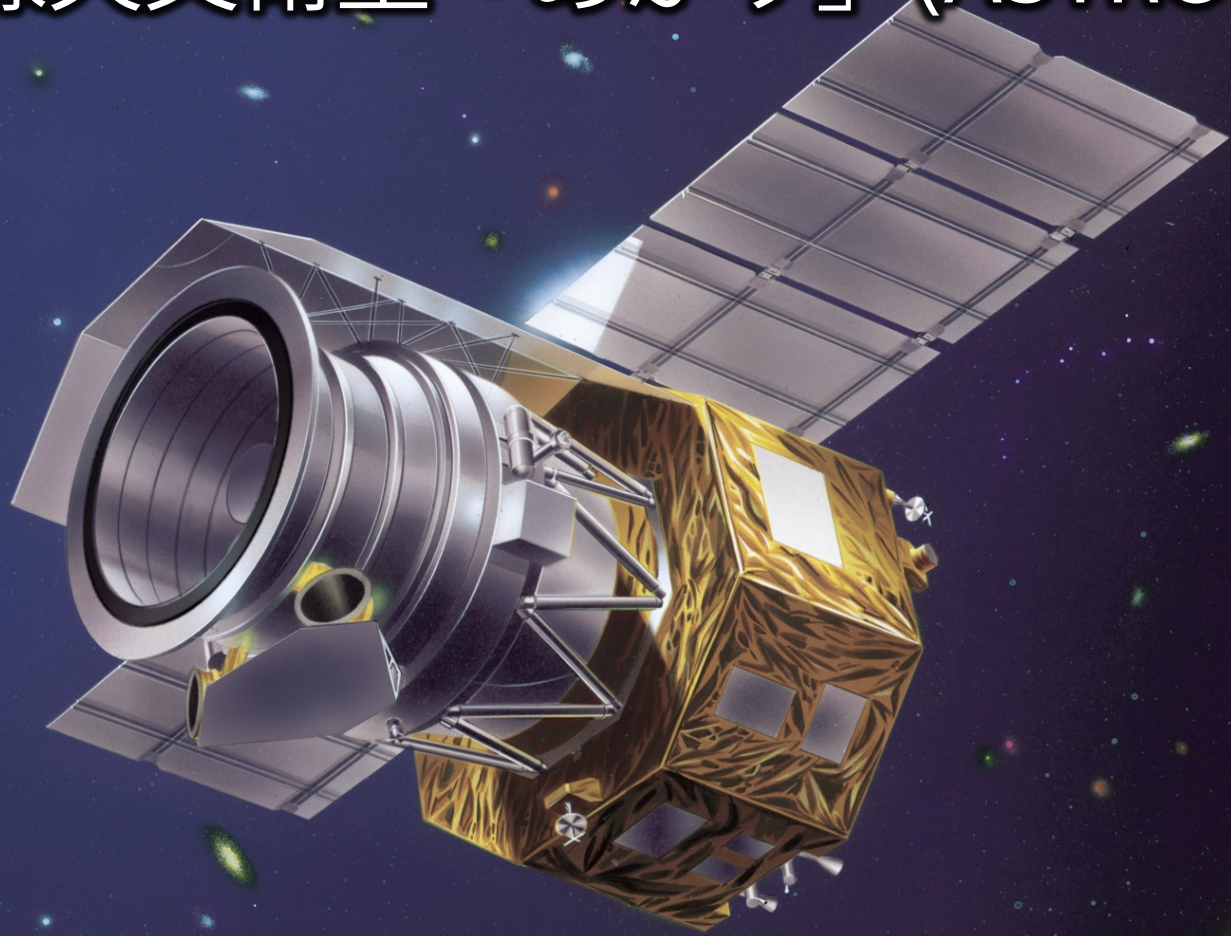
ハワイ島・マウナケア山頂(標高4200m)など



地球で採集された隕石を実験室で測定



赤外線天文衛星「あかり」(ASTRO-F)



2006/02/22 JAXA内之浦宇宙空間観測所から打ち上げ
高度700km 地球周回軌道 (太陽同期極軌道)
2011/11/24 停波・運用終了



2002/06/05

12 / 27

宇宙科学研究所
飛翔体環境試験棟
(神奈川県相模原市) にて

赤外線天文衛星「あかり」
(ASTRO-F)
2006/02/22 打ち上げ

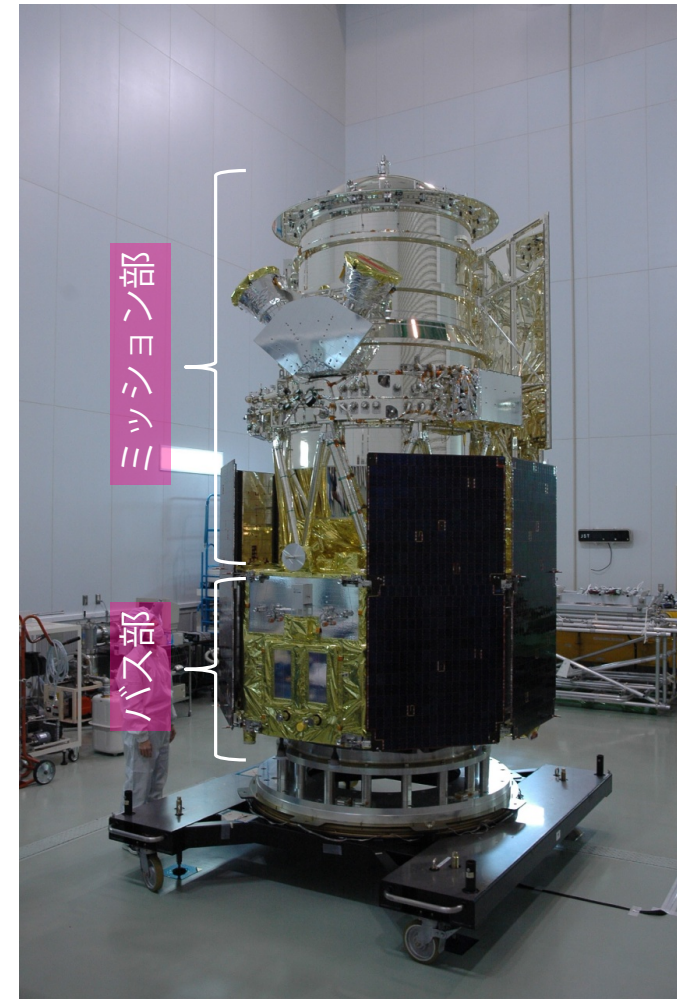
小惑星探査機「はやぶさ」
(MUSES-C)
2003/05/09 打ち上げ
2010/06/13 地球帰還

写真提供：石黒正晃氏(ソウル大学)

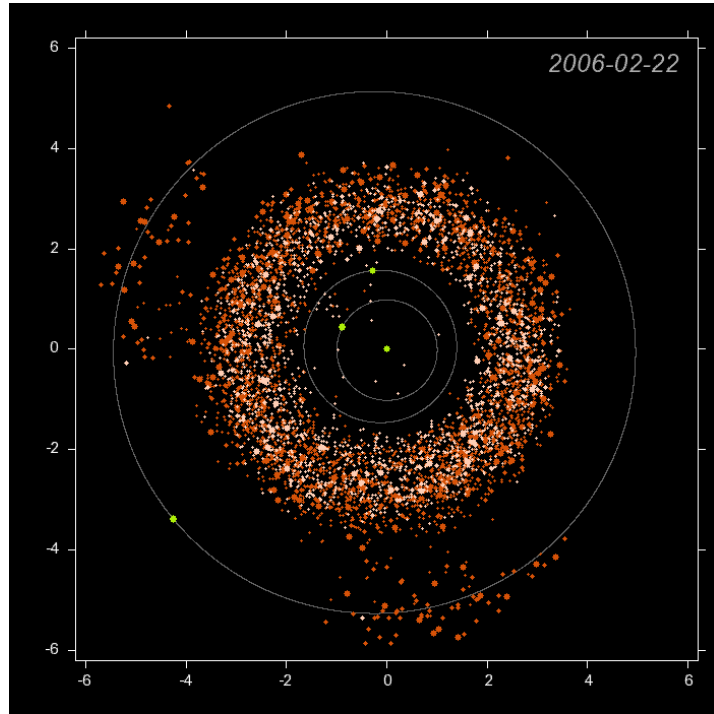
赤外線天文衛星「あかり」(ASTRO-F)^{13/27}

日本初の本格的な赤外線天文衛星

- 軌道：高度約700 km 太陽同期極軌道
- サイズ：5.5×1.9×3.7m (パドル展開時)
- 質量：952kg (打ち上げ時)
- 望遠鏡：Ritchey-Chrétien式 (主鏡68.5cm, SiC)
- 冷却：液体ヘリウム (170 ℓ) + 機械式冷凍機



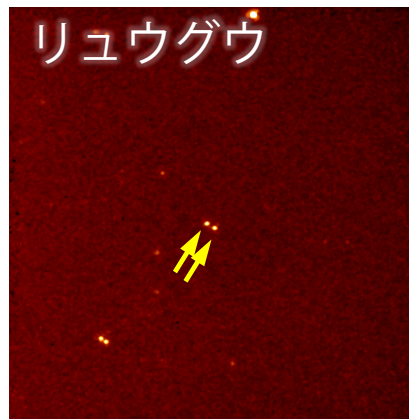
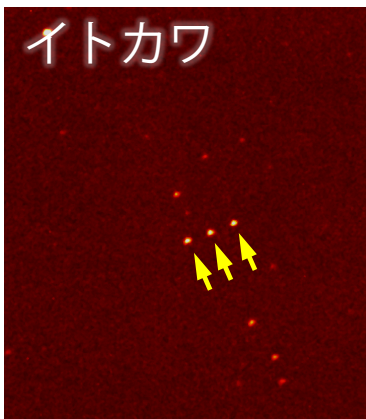
「あかり」による小惑星観測



「あかり」で得られた小惑星の分布

- 全天サーベイ観測から5000個を超える小惑星の直径と表面反射率を決定した。
 - Usui et al. 2011
 - 第20回 日本天文学会欧文研究報告論文賞受賞 (2016年3月)
 - 小惑星帯の総質量の98%以上を完全に網羅した世界最大規模のデータベースになっている (Usui et al. 2013, 2014)。

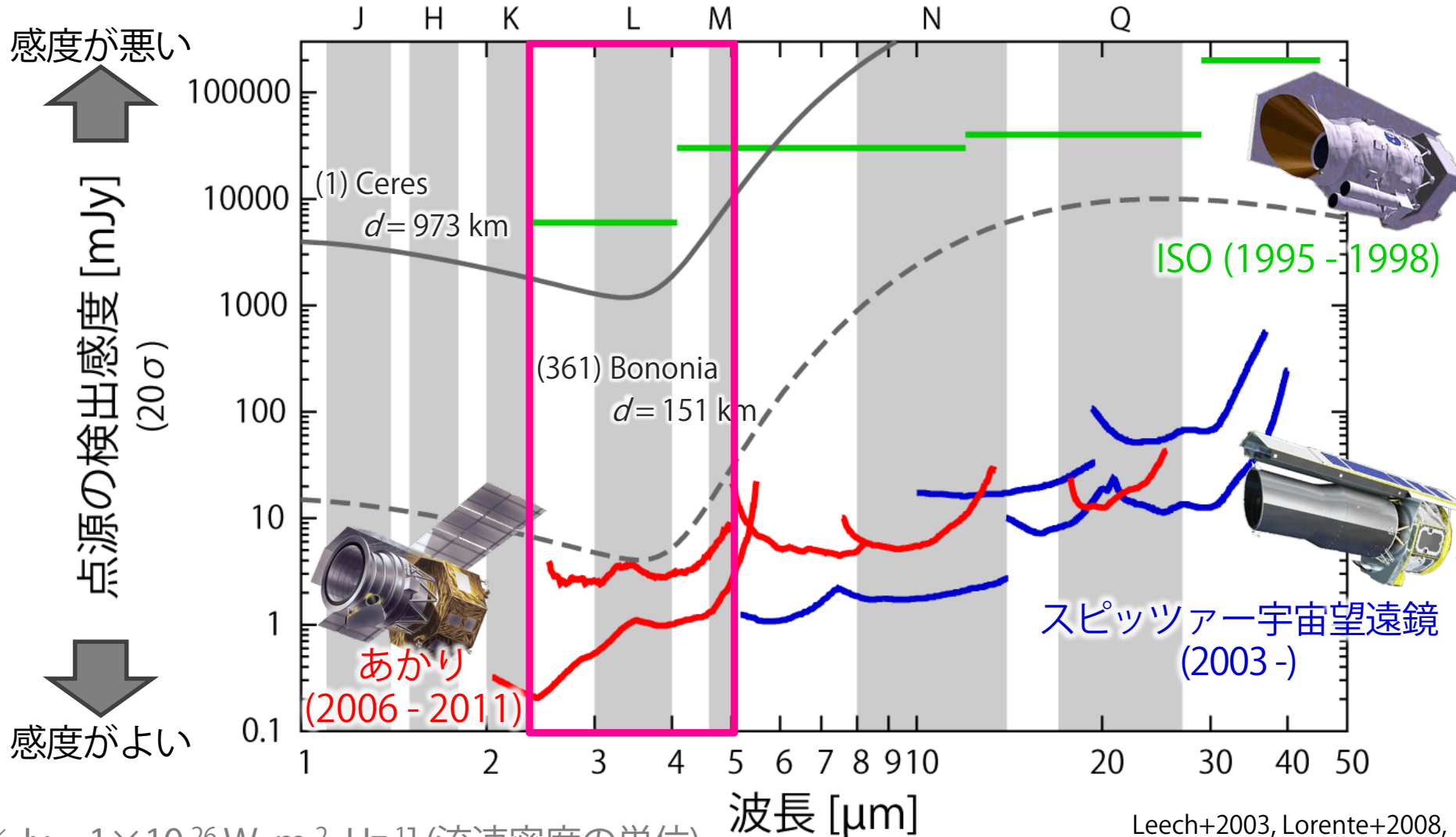
- 撮像観測から小惑星イトカワやリュウグウの直径を求めた
 - Hasegawa et al. 2008、Müller et al. 2014, 2017など
 - 対象の大きさを精度よく決定することで、小惑星探査に対して重要なデータを提供した。



小惑星の撮像観測(実際のデータ)

「あかり」の分光観測機能

- 「あかり」は幅広い波長範囲を連続的にカバーできる。
- 特に2.5-5 μm は他にはないユニークな点である。

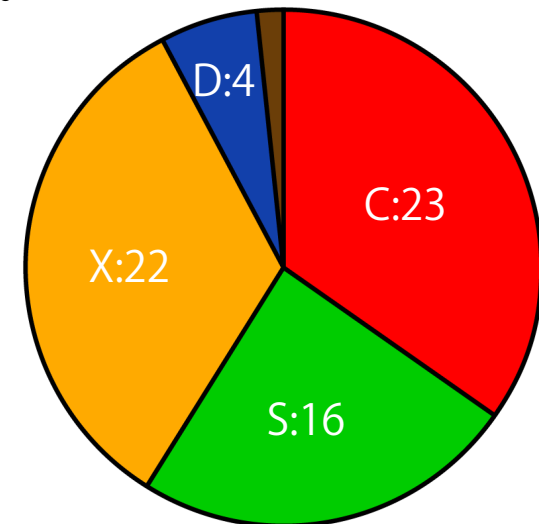


※ $\text{Jy} = 1 \times 10^{-26} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{Hz}^{-1}$ (流速密度の単位)

Leech+2003, Lorente+2008,
IRS Instrument Team+2011

「あかり」による 小惑星の赤外線分光観測

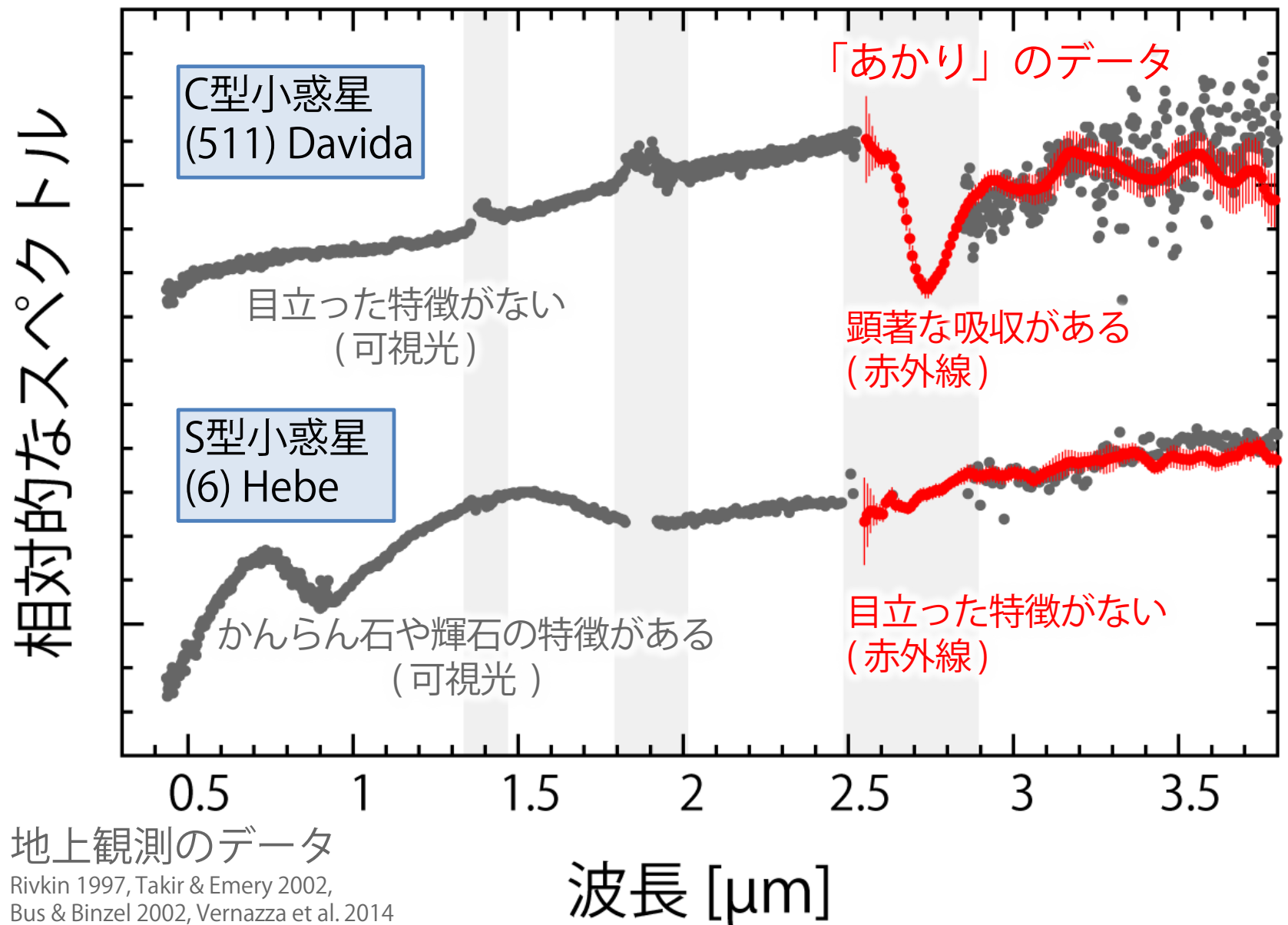
- 波長 2.5-5 μm の分光観測
- 観測期間：2008年5月 - 2010年2月
- 1回の観測時間：約10分間 (実際の露出時間：350-400 秒)
- 観測対象：小惑星 66 天体
 - 新発見ではなく、以前から知られていた小惑星で、別の観測から軌道(太陽からの距離)、直径、反射率などの情報がわかっているもの。
 - 小惑星帯において大きめの天体を選んだ。
(直径 40-1000 km)
- データ解析
 - 観測データは、市販のソフトウェアではなく、「あかり」チームが独自に開発した専用のプログラムを用いて解析処理を行い、天体のスペクトルを得た。



観測した小惑星の
スペクトル分類の内訳

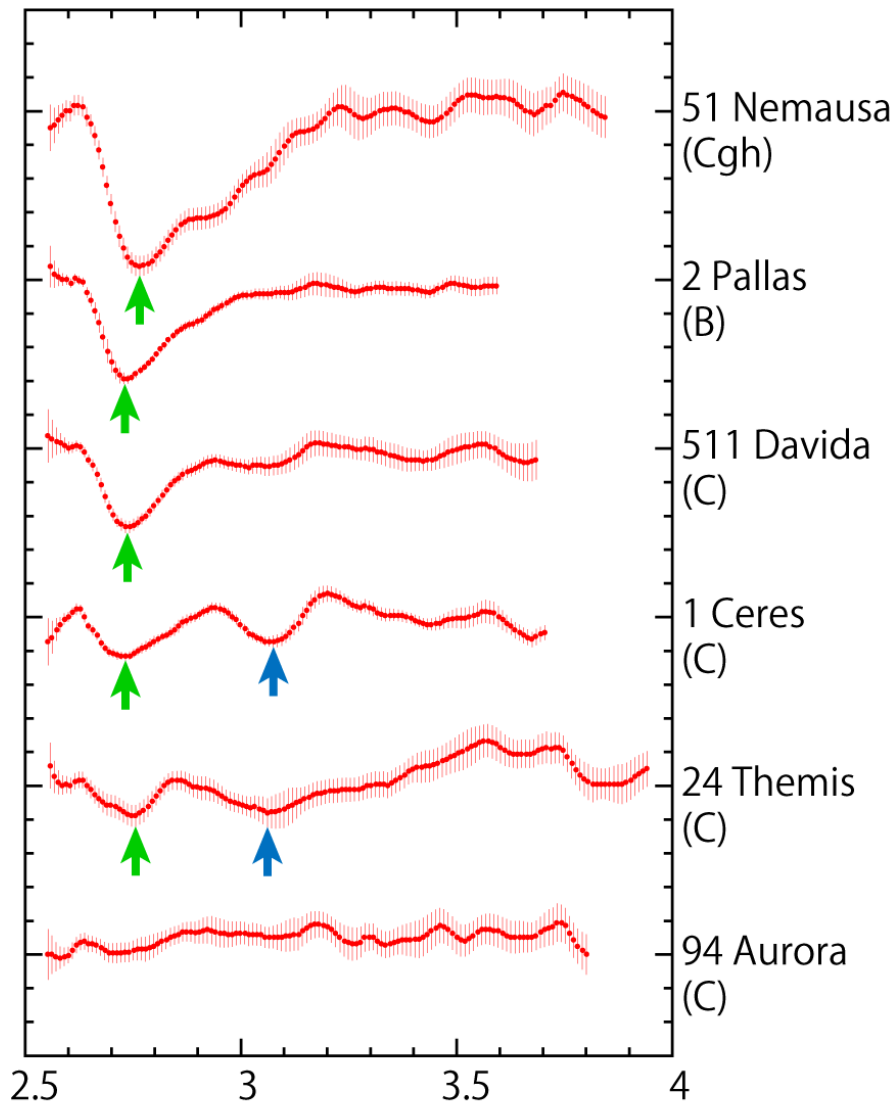
C型小惑星とS型小惑星の反射スペクトル^{17 / 27}

(可視光-赤外線)



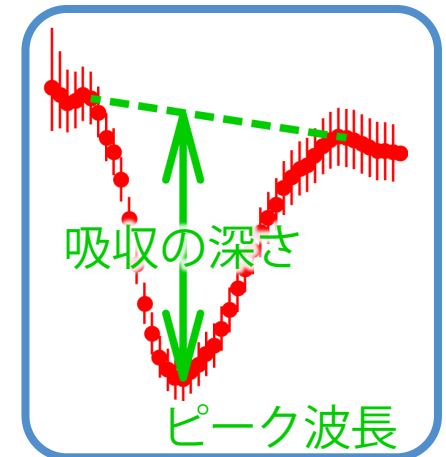
C型小惑星の赤外線反射スペクトル 18 / 27

小惑星の相対的なスペクトル

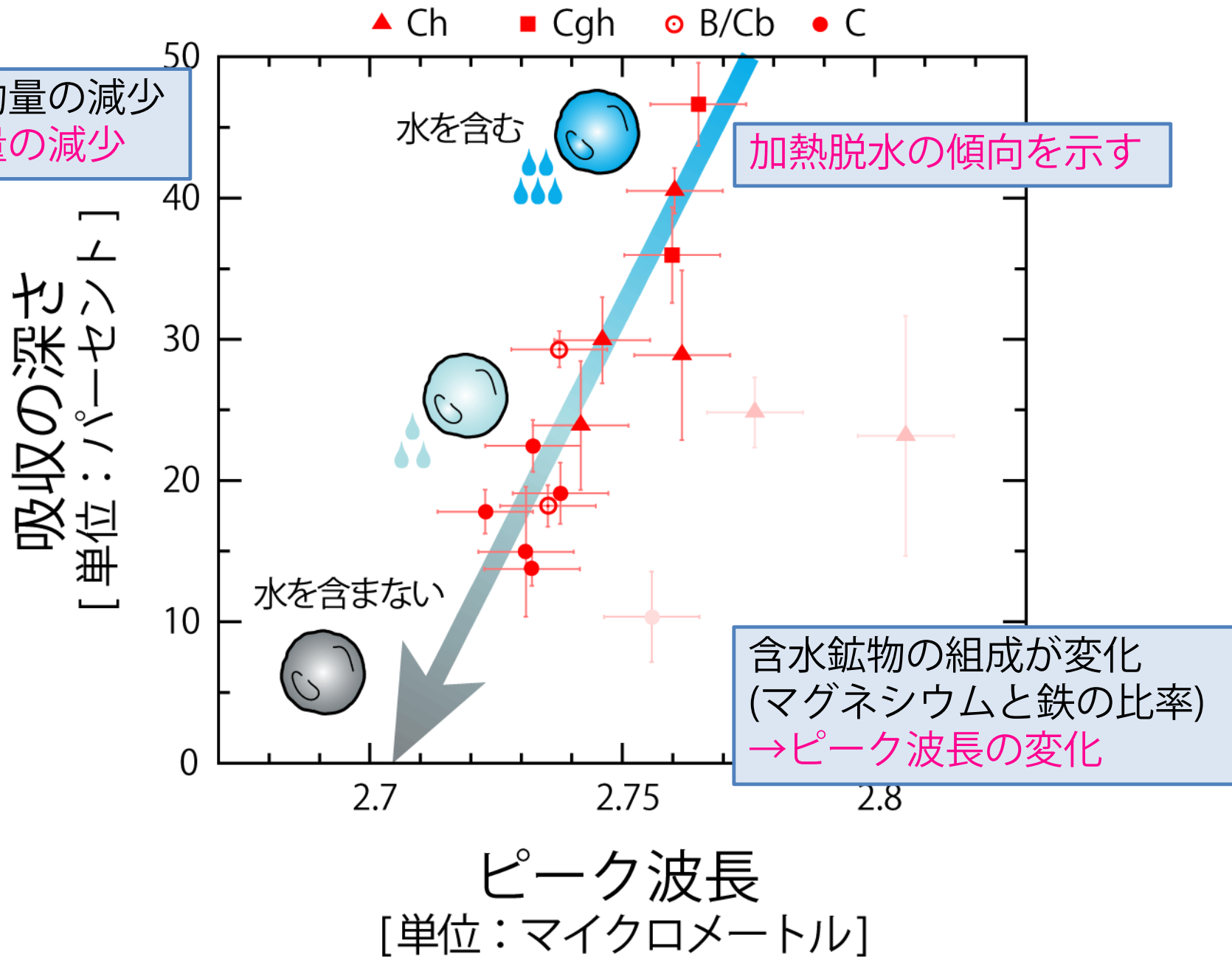


観測された光の波長
[単位：マイクロメートル]

- C型小惑星22天体を観測
 - 17天体には波長2.7 μm 付近に吸収が見られた(含水鉱物)。
 - 5天体には波長3.1 μm 付近に吸収が見られた(氷、アンモニア化物など)。
 - 3天体には顕著な吸収が検出されなかった。
- 波長2.7 μm 付近に吸収を持つ17天体について、ピーク波長(吸収がもっとも深くなる波長)とその吸収の深さの関係に注目する。

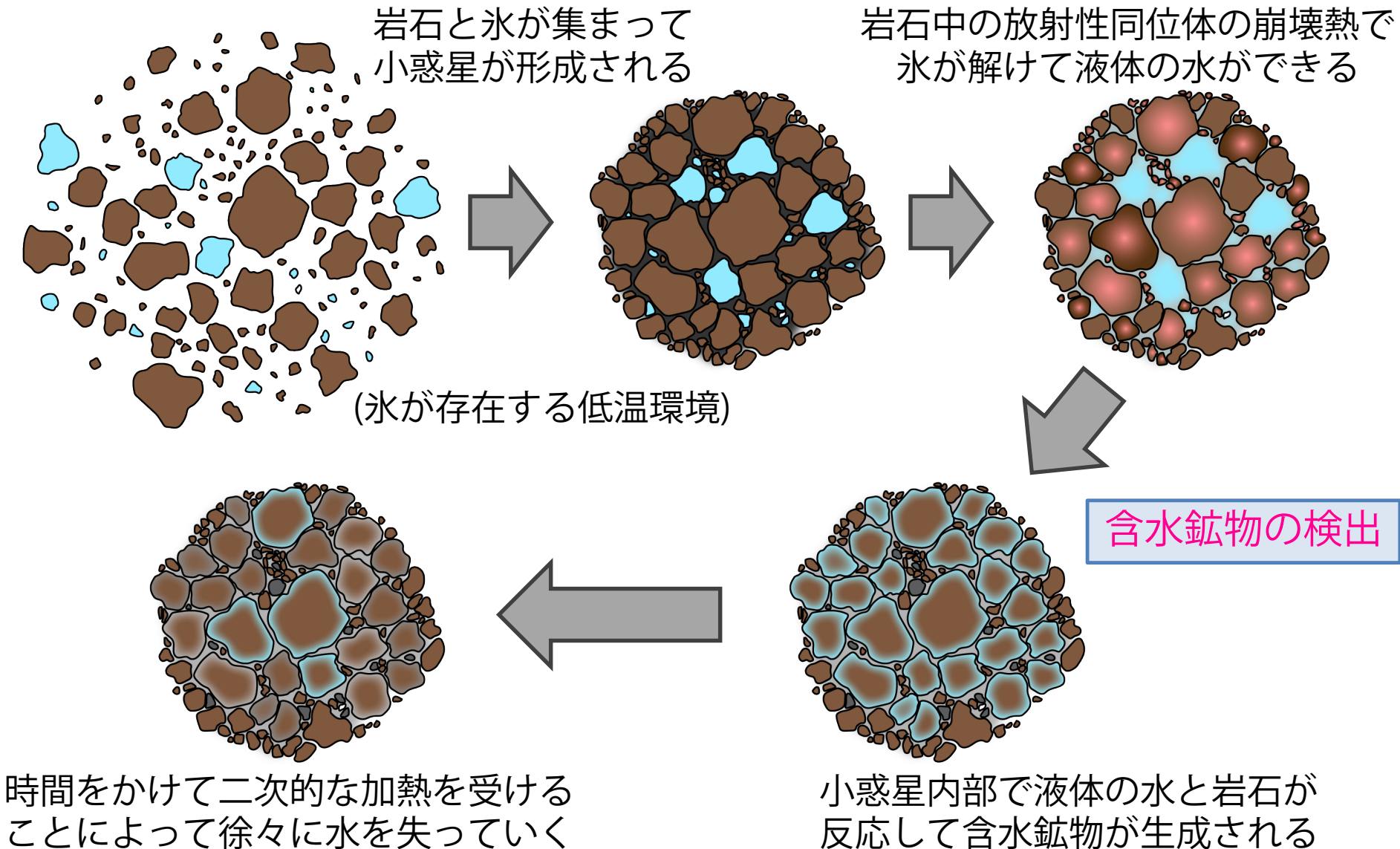


C型小惑星の吸収の深さとピーク波長^{19/27}



C型小惑星の形成と進化の過程

20 / 27



図は天体の断面図を表す (Scott & Rajan 1981を改変)

小惑星探査機による観測

小惑星探査機「はやぶさ2」

小惑星リュウグウ (Cg)
(直径 約 900 m)



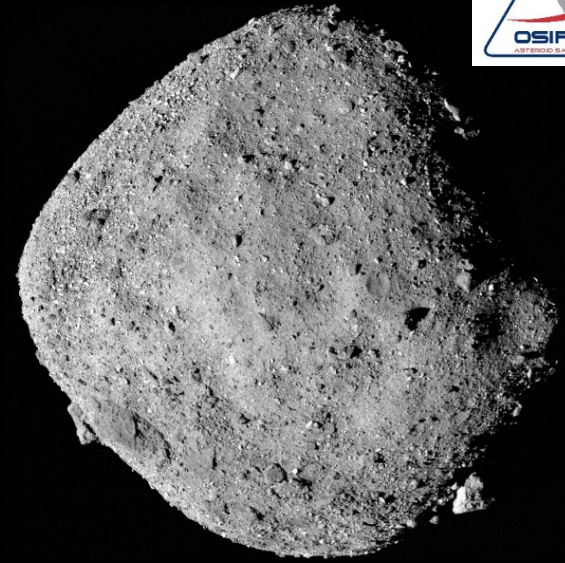
JAXA, 東大など

(c) JAXA, U. of Tokyo, Kochi U., Kikyo U., Nagoya U., ChibaTech, Meiji U., U. of Aizu, AIST

「予想よりも水が枯渇しているようである」
(2018/8/7 記者会見より)

小惑星探査機 OSIRIS-REx

小惑星ベヌー (B)
(直径 約 500 m)

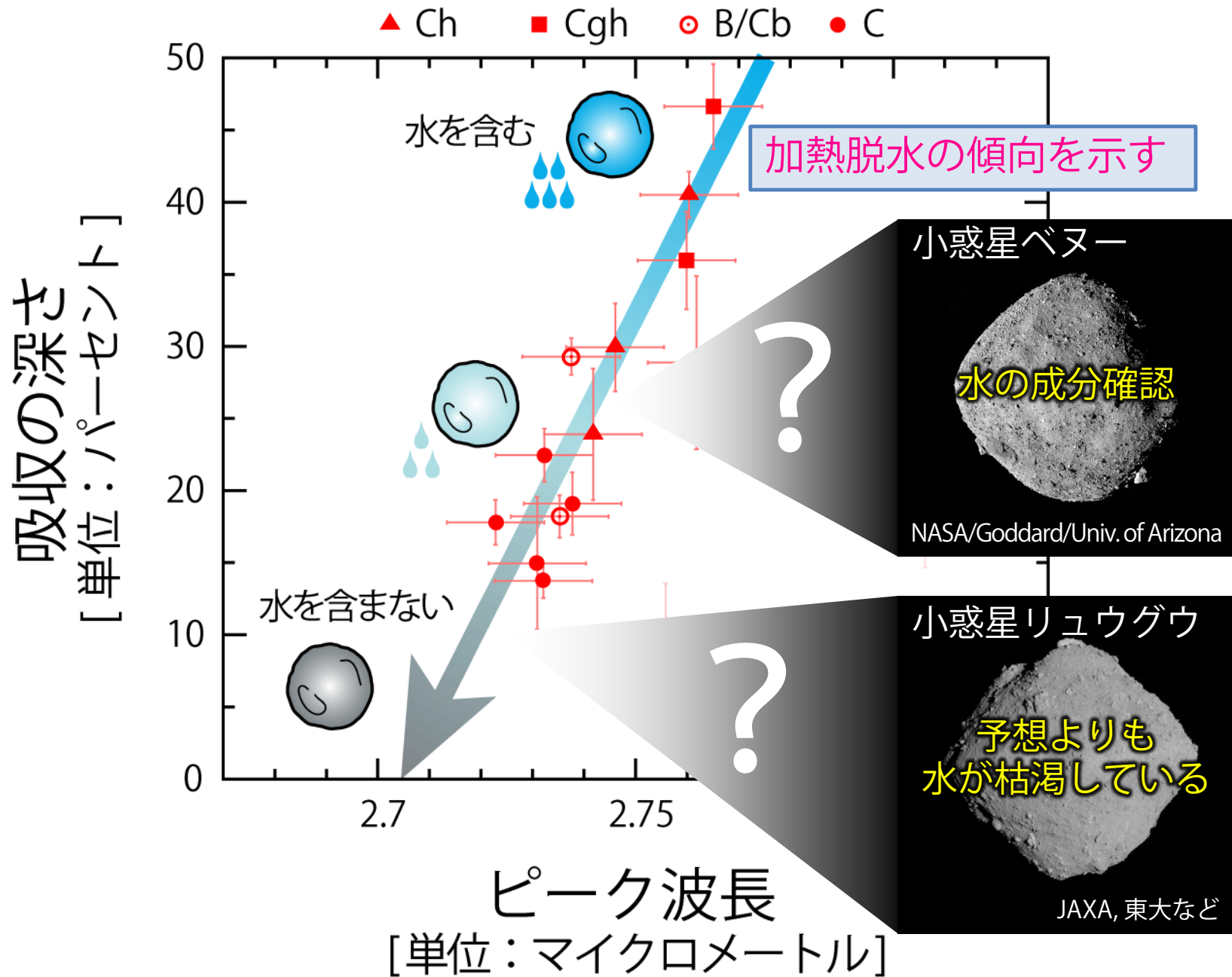


NASA/Goddard/Univ. of Arizona

「水の成分確認」
(2018/12/11 ウェブ発表より)

「はやぶさ2」もOSIRIS-RExも赤外線で小惑星を観測する
機器を搭載している

C型小惑星の吸収の深さとピーク波長^{22 / 27}



天文観測

(地上・地球周回軌道から)

- ほとんどの場合、空間分解して見ることができない。
- 表面特性が平均化されてしまい、地域差はわからないことが多い。
- 多くの天体を網羅的に観測できる。
- 幅広い範囲の物質分布を研究する手がかりになる。

小惑星探査

(探査機)

- 1つの天体に対して、全球にわたり詳細な観測ができる。
- 表面状態の地域差や地質学的な観測を行うこともできる。
- その場で分析を行うこともできる。
- 1つ(場合によっては数個)の限られた天体にしか行くことができない。
- 詳細な軌道制御が必須で、たまたま小惑星に出会うことはない。

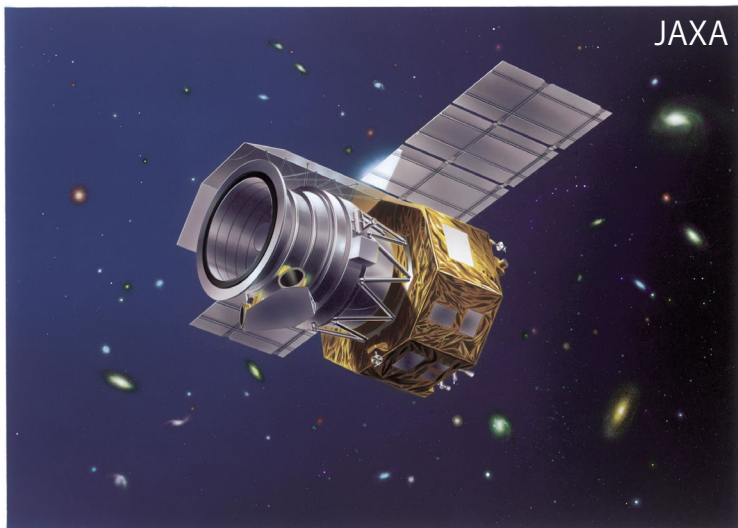
- 持ち帰ったサンプルを実験室で詳細に分析することができる。

—— サンプルリターン ——

天文観測と小惑星探査は相補的に研究が進められている

今後の展望

- 小惑星の赤外線スペクトルのパターン
 - 波長 $2.7\text{ }\mu\text{m}$ 付近(含水鉱物)、波長 $3.1\text{ }\mu\text{m}$ 付近(氷のような揮発性物質など)のスペクトルの違いを引き起こす要因は何か？
(小惑星の大きさ、形成された時点での太陽からの距離、その他…)
 - 地球で採取される隕石の測定結果との詳細な比較
 - さらに多くの小惑星の観測が必要
- 宇宙望遠鏡を使った赤外線分光観測(波長 $3\text{ }\mu\text{m}$ 帯)の次の機会



赤外線天文衛星「あかり」
(2006-2011)
望遠鏡の口径：68.5 cm



ジェイムズ・ウェッブ宇宙望遠鏡
(2021年打ち上げ予定)
望遠鏡の口径：6.5 m

赤外線天文衛星「あかり」による 小惑星の赤外線分光観測

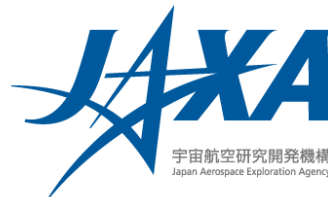
- 赤外線天文衛星「あかり」を用いて小惑星の分光観測を行い、数多くの小惑星に「水」を発見した。
 - 液体の水ではなく、岩石と水が反応してできる「含水鉱物」に着目した。
 - 小惑星の赤外線のスเปクトル(波長2.7マイクロメートル付近)に含水鉱物の明確な特徴を発見した。
- C型小惑星について
 - 観測した8割近くのC型小惑星に含水鉱物を検出した。
 - ピーク波長と吸収の深さに一定の関係が見いだされた。これは加熱脱水の傾向と考えられる。
 - 小惑星探査機「はやぶさ2」やOSIRIS-RExの結果を理解するうえでも重要な情報を提供することになる。
- 地球の水の起源についても理解が進むと期待される。

発表論文

- 題目：
AKARI/IRC Near-Infrared Asteroid Spectroscopic Survey: AcuA-spec
- 著者：
臼井 文彦¹、長谷川 直²、大坪 貴文²、尾中 敬³
¹神戸大学大学院 理学研究科 惑星科学研究センター
²宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所
³東京大学大学院 理学系研究科 天文学専攻
- 掲載誌：
Publications of the Astronomical Society of Japan
(日本天文学会 欧文研究報告) 2018年12月17日に掲載
DOI: 10.1093/pasj/psy125



神戸大学



東京大学 大学院
理学系研究科・理学部
SCHOOL OF SCIENCE, THE UNIVERSITY OF TOKYO

謝辞

- 本研究は
神戸大学を中心に、宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所、
東京大学などの協力により行われました。
- 本研究は
JSPS科研費 (JP15K05277, JP17K05381, JP17K05636)
の助成を受けています。

