

次世代サンプルリターンミッションの候補天体検討

○鳥生有理⁽¹⁾，脇田茂⁽²⁾，浦川聖太郎⁽³⁾，洪鵬⁽⁴⁾，白井文彦⁽¹⁾，松岡萌⁽¹⁾，坂谷尚哉⁽⁵⁾，
田中智⁽¹⁾，長谷川直⁽¹⁾，黒田大介⁽⁶⁾

⁽¹⁾宇宙航空研究開発機構，⁽²⁾パデュー大学，⁽³⁾日本スペースガード協会，⁽⁴⁾千葉工業大
学惑星探査研究センター，⁽⁵⁾立教大学，⁽⁶⁾京都大学

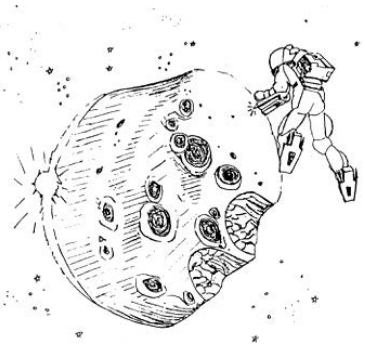
探査機による小天体サンプルリターンは、大気圏突入時に消失してしまう隕石中の脆弱物質（多孔質物質や揮発性物質）を保持した帰還試料の詳細な地上分析を可能にする。帰還試料の物質科学は、現在様々に提案されている惑星形成モデルを制約する上で非常に重要である。さらに、探査機リモセンによるマルチスケールサイエンスや室内実験との比較など、惑星科学分野の総合的な発展に寄与する。そこで我々は、有志による次世代サンプルリターン勉強会を毎月開催し、候補天体について検討を進めている。本発表では、2030年代に小天体サンプルリターンミッションを行うための候補天体案を報告する。

小天体から試料を地球に帰還させる場合、近日点が地球軌道付近にある天体は復路の設計が容易となるため、燃料節約になる。そこで、JPL小天体データベースから近日点距離が0.9~1.1au、軌道傾斜角が10°以下の小天体を候補として抽出し、文献からスペクトル型や活動性等を調査した。帰還試料の科学価値を考慮して、探査候補天体としてE型、S型、C/B型、D型小惑星、彗星、活動小惑星、二重/三重小惑星を検討した。サンプルリターンの未踏天体という観点では、E型と彗星が候補天体として有望である。また、各候補天体への軌道設計を行い、いずれの天体でも2030-31年打上、2041-45年帰還という軌道を得た。B型活動小惑星として107P/(4015) Wilson-Harrington、D型小惑星として162998 (2001 SK162) が候補に挙げられたが、107Pは活動性に、2001 SK162はスペクトルSN比とアルベドについて不定性があるため、今後の追観測を検討している。

次世代サンプルリターンミッションの 候補天体検討

* 寫生有理⁽¹⁾, 脇田茂⁽²⁾, 浦川聖太郎⁽³⁾, 洪鵬⁽⁴⁾, 臼井文彦⁽¹⁾,
松岡萌⁽¹⁾, 坂谷尚哉⁽⁵⁾, 田中智⁽¹⁾, 長谷川直⁽¹⁾, 黒田大介⁽⁶⁾

(1)宇宙航空研究開発機構, (2)パデュー大学, (3)日本スペースガード協会,
(4)千葉工業大学惑星探査研究センター, (5)立教大学, (6)京都大学

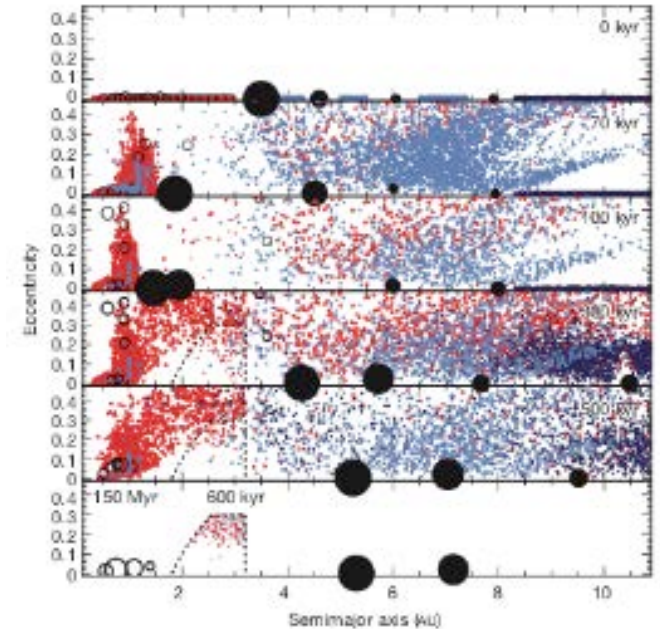


これまでの経緯とNGSR活動実績

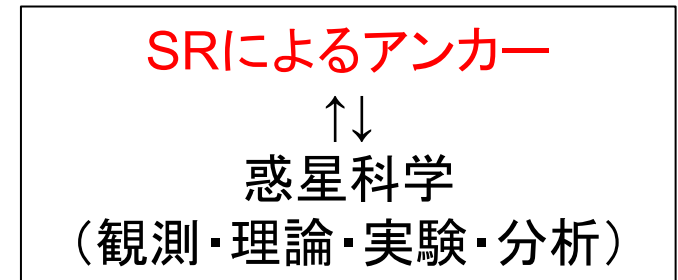
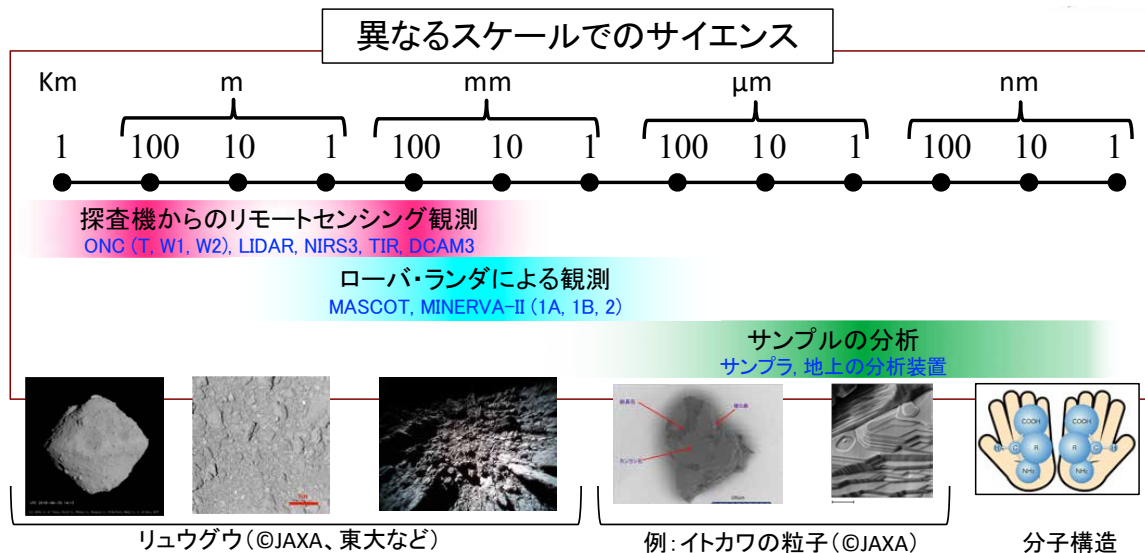
- はやぶさ2ヘリテージによる2030年代のサンプルリターン(SR) を考えたい
 - ◆ 2019-12: はや2理工若手雑談会
 - ◆ 2020-02: はやぶさ3(仮)理工ブレスト
 - ◆ 2020-06: 次世代SR工学MTG
 - ◆ 2020-07: 次世代SR (NGSR) の理学雑談検討開始
 - ◆ 2020-09: ISAS惑星探査WS(鳶生、菊地)
 - ◆ 2020-10: NGSR#00: NGSR概要(鳶生)、活動小惑星(脇田)
 - ◆ 2020-11: 惑星科学会秋季講演会(鳶生)
 - ◆ 2020-11: NGSR#01: 小惑星と隕石(洪)
 - ◆ 2020-12: NGSR#02: Wilson-Harrington(W-H)(浦川)
 - ◆ 2021-01: NGSR#03: トロヤ群小惑星(癸生川)
 - ◆ 2021-02: NGSR#04: 候補天体検討その1(鳶生)
 - ◆ 2021-02: 東北大学惑星圏研究会(瀧川、兵頭、渡邊、黒川、藤谷、阿部、鳶生)
 - ◆ 2020-03: NGSR#05(藪田)

なぜサンプルリターン(SR)なのか？

- 物質科学による惑星形成論への制約
 - ◆ 古典的惑星形成論と巨大惑星移動モデル
- 隕石/IDPのサンプリングバイアス
- マルチスケールでのサイエンス
 - ◆ 地上観測、探査機リモセン、その場観測、地上分析



Walsh+ (2011) *Nature*



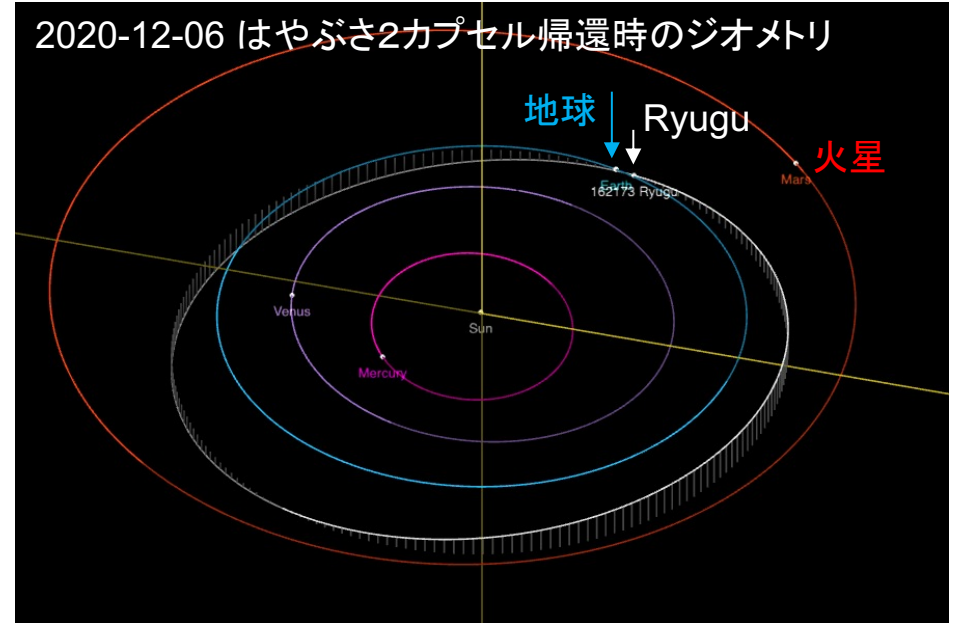
どのようにサンプルリターンするか？

■ 小惑星サンプルリターンの手順

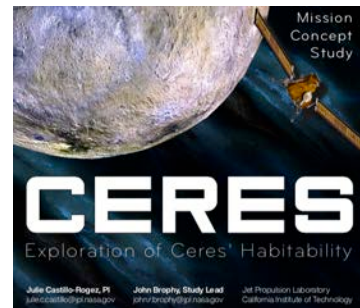
- ◆ 小惑星ランデブー
- ◆ サンプルング
- ◆ 地球帰還
 - 探査機**推力**・電力、天体自転速度、**帰還軌道設計**が問題

■ SR候補天体の選定

- ◆ 前提条件:ドライ重量<0.9トンの化学推進探査機 ($dV < 2 \text{ km/s}$)
 - 近日点~1 AU、軌道傾斜角<10°
 - 自転速度>(3.5) hrs
 - 2030年代に打上可能
 - SR試料の科学価値
 - リモセン・その場観測の科学価値
- ◆ **SR候補天体を複数選定したい**



MMX (JAXA): 3トン探査機によるPhobosへのSR計画



CERES: Exploration of Ceres' Habitability – (NASA): 4.7トン探査機によるCeresへのSR計画(案)

なにをサンプルリターンするか？

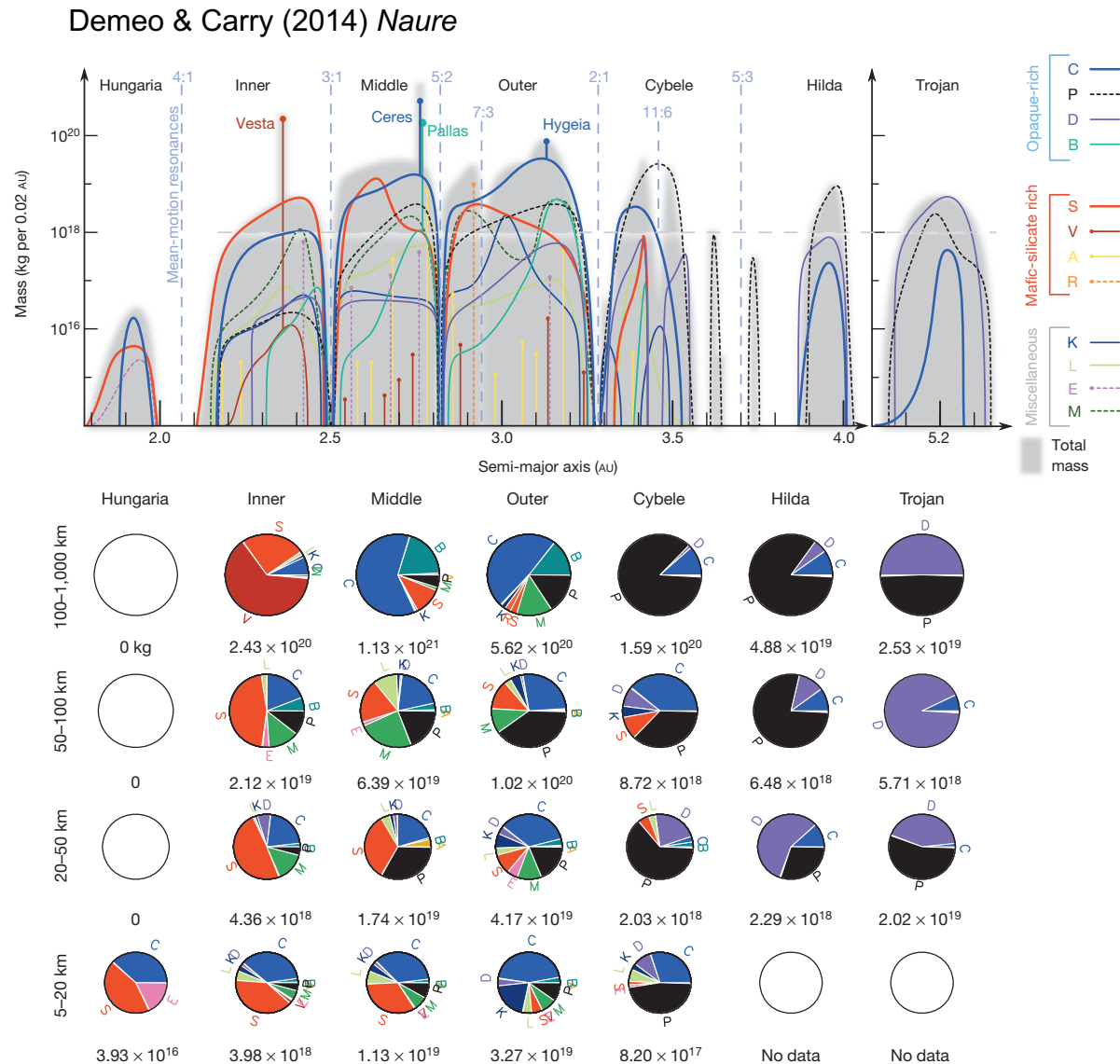
■ 期待されるSR物質(≒隕石≒スペクトル型)が重要

- ◆ 小惑星スペクトル型の動径分布混合: 惑星移動による擾乱の結果? [Demeo & Carry 2014]
- ◆ E: 地球型惑星の構成要素?
- ◆ S: 最頻のNEA
- ◆ C/B: 水質変成と有機物
- ◆ D: 水と有機物、彗星物質?

■ MBA→NEAへの軌道進化

- ◆ Yarkovsky効果による動径移動と惑星摂動(平均運動共鳴、 v_6 永年共鳴)による染み出し

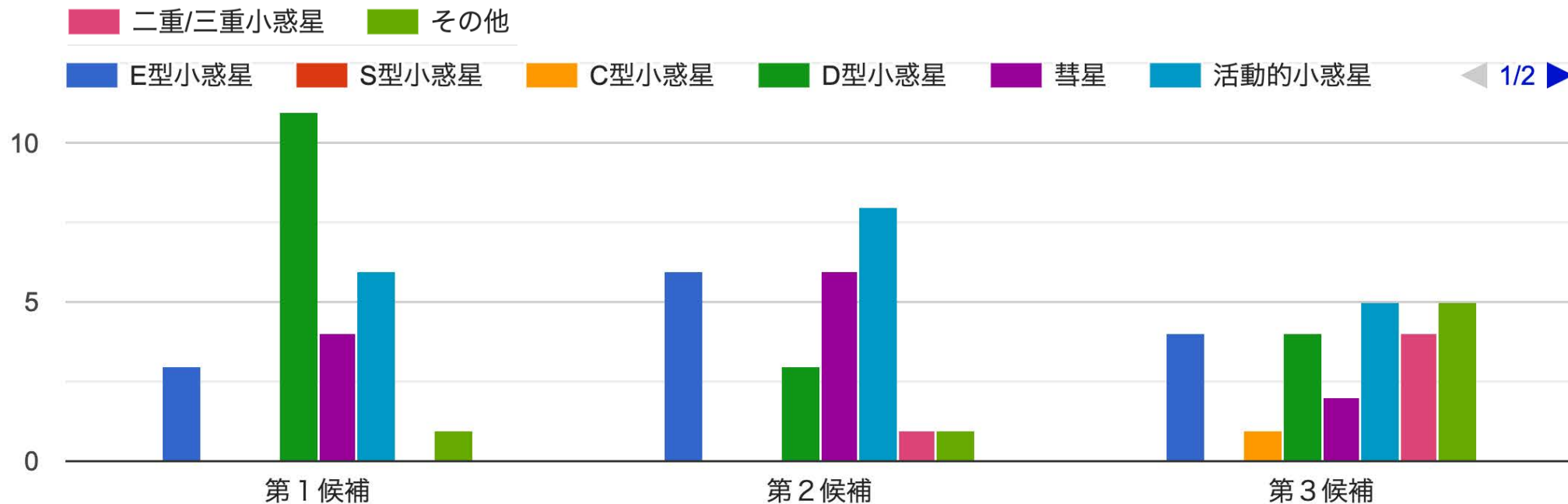
■ NEAからのSR≒MBAからのSR?



SR探査候補天体(案)

候補天体	隕石/SR試料	重要性	関連探査
E型 (Xe, $p_v > 0.4$)	EC	地球型惑星の構成要素?	BepiColombo
S型	OC Itokawa (<1g)	最頻NEA→惑星防衛	Hayabusa
C/B型	CC Ryugu (5.4g) Bennu (>60g)	水質変成、有機物	Hayabusa2 OSIRIS-REx
D型	Tagish Lake	有機物・水、彗星物質?	MMX OKEANOS Lucy
彗星	IDP Wild2 (<1g)	有機物・水、彗星物質	Rosetta Comet Interceptor CAESAR
活動小惑星	--	彗星-小惑星	Destiny+
二重/三重小惑星	--	天体衝突史、YORP	DART/Hera

次の中から3つ候補天体を選ぶとしたら、どれですか？ (n=25)



第1候補の人気はD型→活動的小惑星→彗星

候補天体(案)

リファレンスミッションの検討

■ 候補天体の探索(理学)

- ◆ 小天体データベース(JPL SBDB)からNEAを抽出(2020-06時点)
- ◆ 文献から天体特徴を追加(スペクトル型、バイナリ、活動小惑星等)
- ◆ 前提条件による制限($0.9 < q < 1.1 \text{ au}$ 、 $i < 10^\circ$)
 - candidates_reg_v6.xlsx
 - 暫定科学スケールによる評価(未完)
 - $>0.3 \text{ km}$ の天体を抽出

■ 軌道設計(工学)

- ◆ 化学推進と惑星スイングバイとによるSR軌道成立性を検討

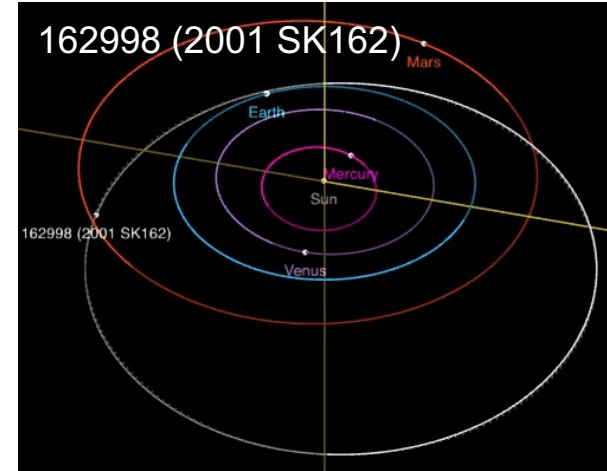
D型小惑星

■ 有機物と水、彗星物質？

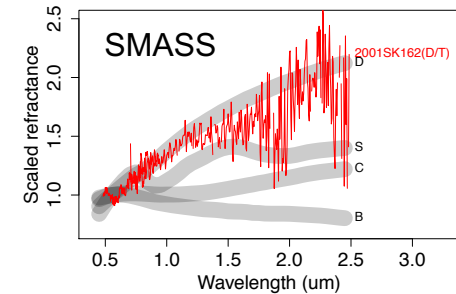
- ◆ 惑星移動でTrojansにTNOs(D型)が捕獲された [Demeo & Carry 2014]
- ◆ 太陽系遠方物質は重い(H,N)同位体組成 [Marty 2012]
- ◆ 水質変成なし？Trojanに3-4 μ m微吸収あり(O-H or N-H) [Brown 2016]
- ◆ Tagish Lake, IDPの母天体？ [Hiroi+ 2001, Vernazza+ 2015]

■ 162998 (2001 SK162)

- ◆ 自転周期が非常に遅い
- ◆ **スペクトル・アルベドに不定性あり**^c
 - 追観測@2025-10 (V~19)
- ◆ **軌道設計:2031年打上→2042年帰還(2yrDVEGA: 1290m/s)**



パラメータ	値
直径 [km]	0.875 (5) 1.9 (4) ^a
アルベド	0.161 0.03 (+3/-2) ^a 0.03-0.177 ^c
自転周期 [hr]	68
公転周期 [yr]	2.67
q [au]	1.011
i [deg]	1.7
スペクトル	T, D ^b



Data are from (JPL SBDB; ^aMueller+2011; ^bBinzel+2019; ^cAlí-Lagoa, personal communication).

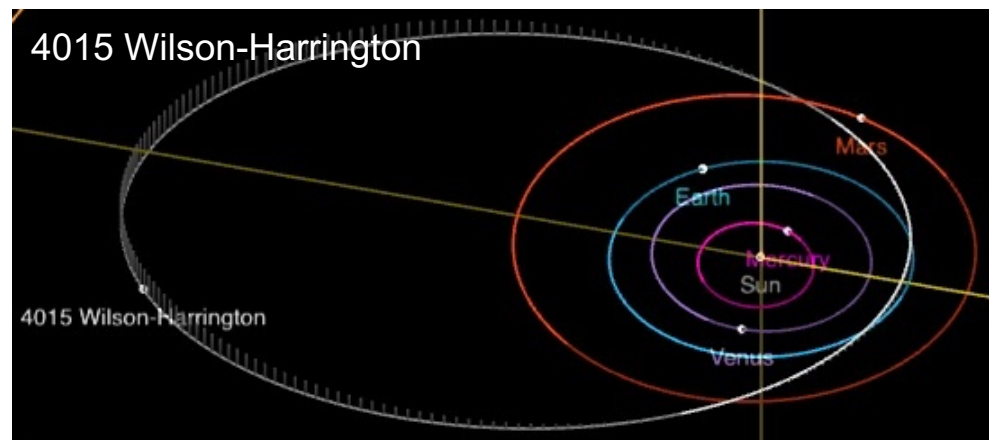
活動小惑星(C/B型)

■ 彗星-小惑星遷移天体

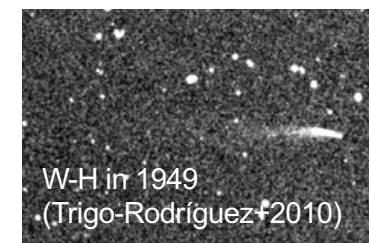
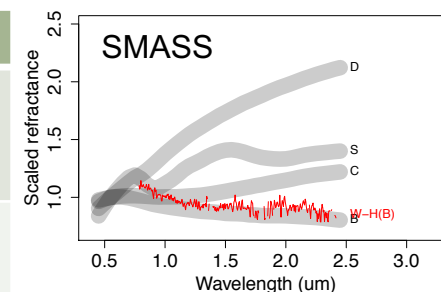
- ◆ 活動的小惑星、メインベルト彗星、枯渇彗星 [Jewitt+ 2015; Hsieh+2018;]
- ◆ 活動性の要因: 氷の昇華、自転起因の分裂、衝突 [Jewitt+ 2017; Hirabayashi+ 2014; Ishiguro+ 2011]

■ 107P/ (4015) Wilson-Harrington

- ◆ 1949年のみ彗星活動 [e.g. Ishiguro+ 2011]
 - 活動性の追観測@2022-07 (V~17)
 - 揮発性物質は残存しているか?
 - Akariによる $3\mu\text{m}$ 含水鉱物吸収測定は困難 [Bach+ 2017]
 - 軌道力学的な起源: MB外側(65%)、JFC(4%) [Bottke+ 2002]
- ◆ 軌道設計: 2031年打上→2043年帰還 (EVEEAE: 1410m/s)



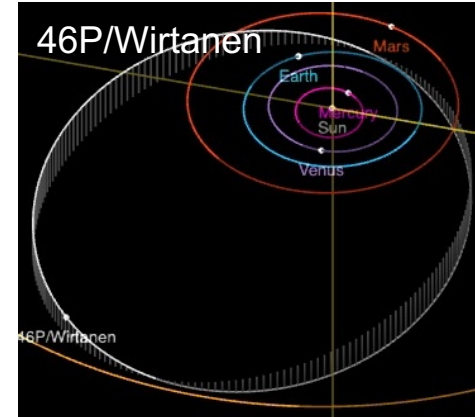
パラメータ	値
直径 [km]	4.0 (5) 3.46 (32) ^a 3.74–4.39 ^d
アルベド	0.05 (1) 0.059 (11) ^a 0.040–0.055 ^d
自転周期 [hr]	3.5736
公転周期 [yr]	4.26
スペクトル	CF ^b , B ^c
q [au]	0.968
i [deg]	2.8



Data are from (JPL SBDB; ^a Licandro+2011; ^c SMASS; ^d Bach+2017, ^b Tholen 1989).

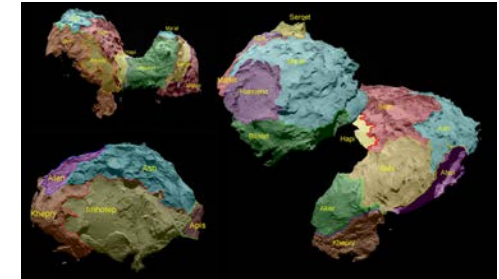
彗星

- 有機物・水、彗星物質
 - ◆ 岩石ダスト、氷、有機物の集合体
 - ◆ 67P/C-G
 - 多様な地質(ダスト被覆地域、ピット/円形地形、窪地、平坦地、暴露固化表面) [Thomas+ 2015]
 - ダスト-氷比4:1 [Pätzold+ 2016]
 - ◆ 低温SRCが必要。CAESARとの競合/連携?
 - ◆ 彗星核 P/2016 BA14 (PANSTARRS) はD型スペクトル [SMASS]
- 46P/Wirtanen
 - ◆ 軌道設計:2031年打上→2045年帰還 (EVEEAE: 1822m/s)
- 320P/McNaught
 - ◆ 軌道設計:2030年打上→2042年帰還 (EEAE: 1817m/s)



パラメータ	値
直径 [km]	1.2 1.20 (4) ^a 1.11 (8) ^b
アルベド	0.04 ^{a,*} 0.04 ^{a,*}
自転周期 [hr]	6.0 (3) ^a 6-7.5 ^b
公転周期 [yr]	5.44
q [au]	1.055
i [deg]	11.7
スペクトル	--

Data are from (JPL SBDB; ^aLamy+1998; ^bBoehnhardt+2002). *Assumed.

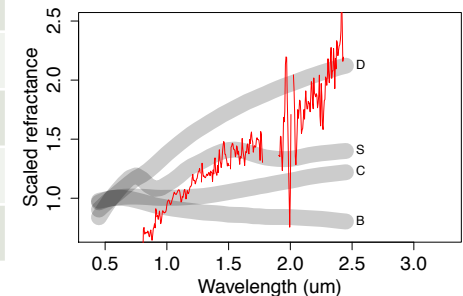


67P/C-G [Thomas+ 2015]



CAESAR (NASA):
67P/C-GへのSR計画

P/2016 BA14 (PANSTARRS)
[SMASS]



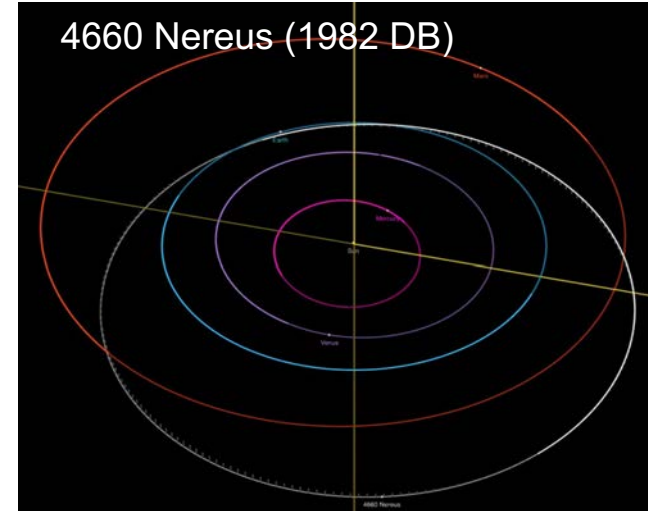
E(Xe)型小惑星

■ 地球型惑星の構成要素？

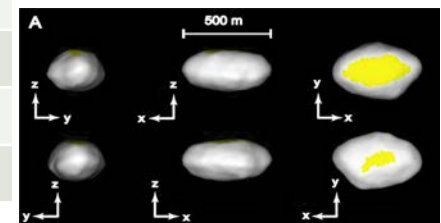
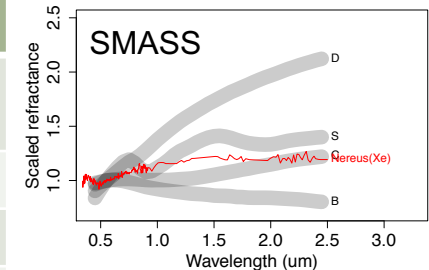
- ◆ 惑星移動でHungariansに岩石小惑星(E型)が捕獲された [Demeo & Carry 2014]
- ◆ ECの起源？ECの同位体組成は月・地球に一致 [Dauphas 2017]
- ◆ 水星・金星・地球の主構成要素 [Brasser+ 2017]

■ 4660 Nereus (1982 DB)

- ◆ 高アルベド天体、EC(aubrite)のアナログ [Binzel+ 2004 PSS]
- ◆ 楕円体形状、SC/OC=0.74 (~cm表面ラフネス) [Brozovic+ 2009]
- ◆ 軌道設計: 未実施



パラメータ	値
直径 [km]	0.33 0.55x0.33x0.24 ^b
アルベド	0.55
自転周期 [hr]	15.1
公転周期 [yr]	1.82
q [au]	0.952
i [deg]	1.4
スペクトル	Xe ^a



Data are from (JPL SBDB; ^a Binzel+ 2004; ^b Brozovic+ 2009).

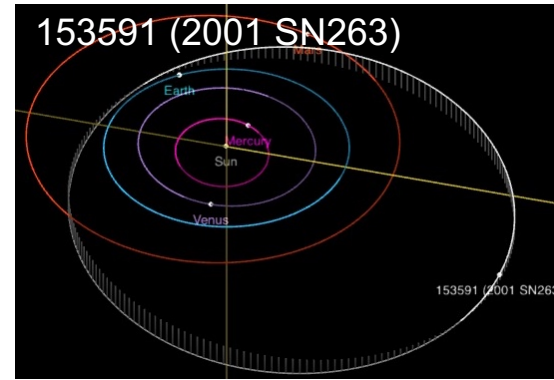
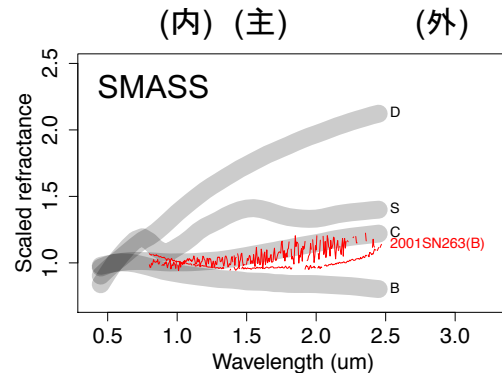
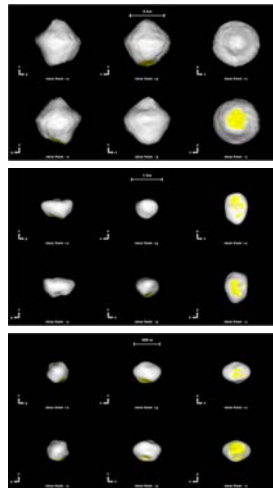
三重小惑星 (C/B型)

■ 天体衝突史、YORP

- ◆ 成因: 自転分裂 (近くて小さい) or 衝突破壊 (遠くて大きい) [Lindsay+ 2015]
- ◆ 複数天体からのSR

■ 153591 (2001 SN263)

- ◆ B型: $0.7\mu\text{m}$ 、 $2.7\mu\text{m}$ 吸収は不明
- ◆ 外衛星は潮汐ロック [Becker+ 2015]
- ◆ **軌道設計: 2031年打上→2042年帰還**
(2yrDVEGA: 1832m/s)



[Lindsay+ 2015]

Multiple Asteroid Systems (MASs)	
Type-1' (T1)/Group L': Large asteroids w/ small satellites $D_1 > 90 \text{ km}$ $D_2 < D_1/5$ $e < 0.3$ $a/R_1 < 15$	Formation Hypotheses - Rotational mass shedding* - Ejecta from large impact†
Type-2' (T2)/Group B': Similar Size Double Asteroids $D_1 = D_2$ $a/R_{cm} = 3-8$ R_{eq} radius of sphere with equivalent volume as the MAS	Formation Hypothesis - Rotational fission*
Type-3' (T3)/Group A': Small asynchronous systems $D_{sm} < 10 \text{ km}$ Mass ratio < 0.2 Can be triple systems	Formation Hypothesis - Part of NEA evolutionary sequence driving by 'rubble pile' physics‡
Type-4' (T4)/Group B': Contact-binary Asteroids	Formation Hypotheses - Rotational fission* - Re-accretion of T2-like system affected by Binary YORP‡

* Descamps and Marchis (2008) † Durda et al. (2004)
 ‡ Pravec and Harris (2007) § Jacobson and Scheeres (2011b)

パラメータ	値 (主星)	値 (内衛星)	値 (外衛星)
直径 [km]	2.5 (3) 2^a	0.77 (12)	0.43 (13)
アルベド	0.048	--	--
自転周期 [hr]	3.4256 (2)	13.43 (1)	16.4 (5)
公転周期	2.8 [yr] ^a	~144 [hr]	16.4 [hr]
密度 [g/cc]	1.1 (2)	1.0 (3)	2.3 (1.3)
q [au]	1.036	--	--
i [deg]	6.7	--	--
スペクトル	B ^b	--	--

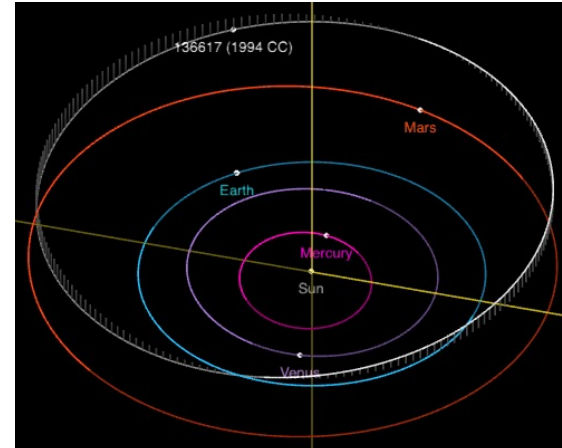
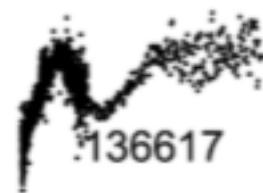
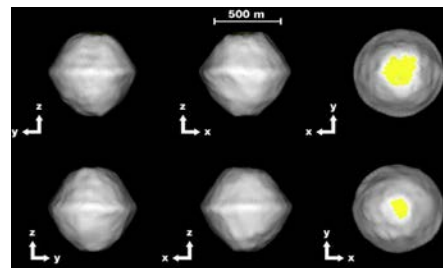
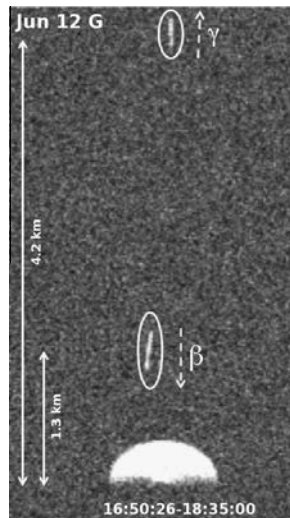
Data are from (^a JPL SBDB; Becker+2015; ^b Binzel+2019).

三重小惑星(S型)

- 天体衝突史・YORP
- 最頻NEA→惑星防衛
 - ◆ SR試料はItokawa微粒子のみ
 - ◆ 宇宙風化の実測

■ (136617) 1994 CC

- ◆ 内衛星は潮汐ロック [Brozovic+ 2011]
- ◆ 軌道設計: 未実施

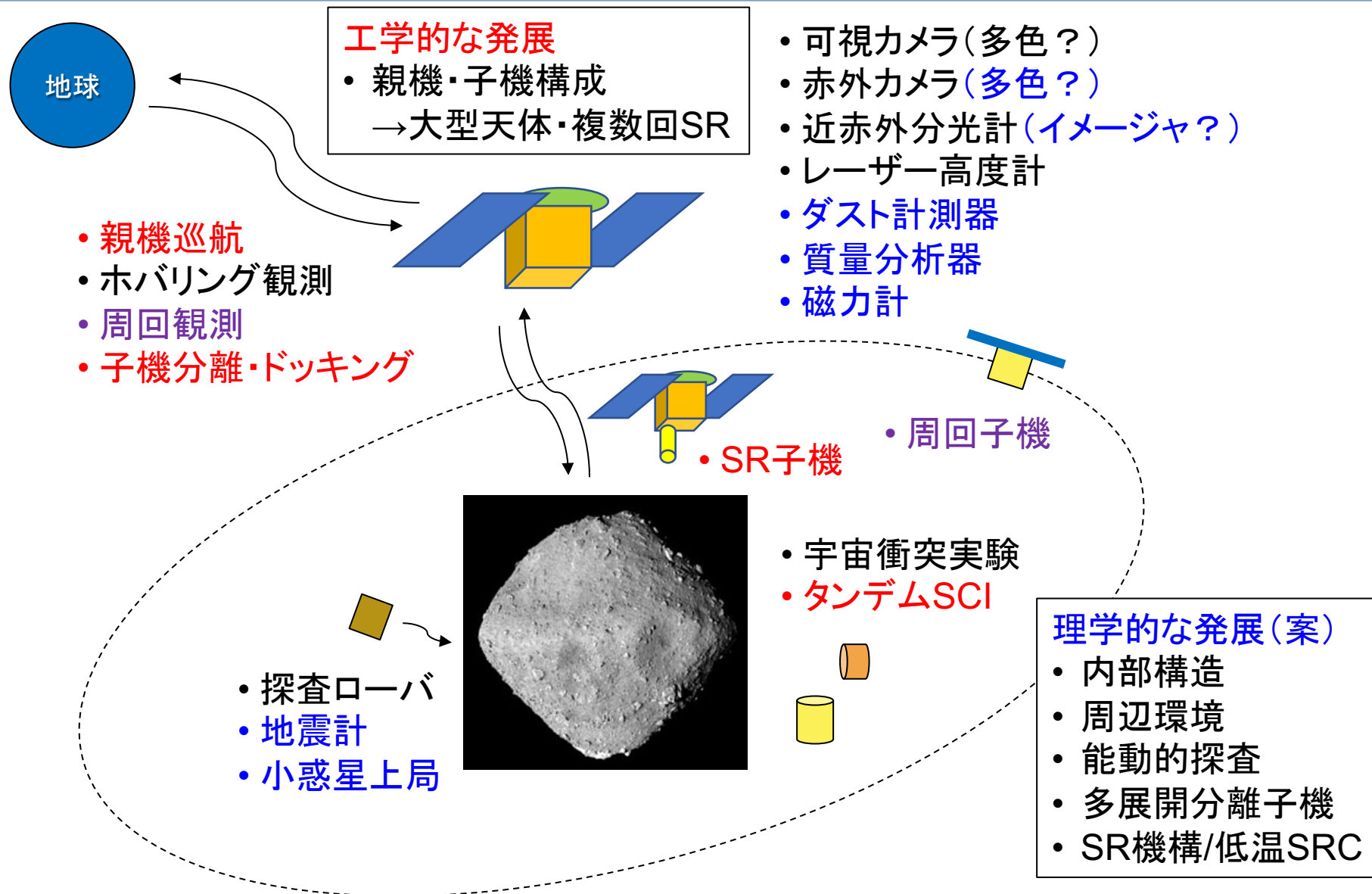


パラメータ	値 (主星)	値 (内衛星)	値 (外衛星)
直径 [km]	0.62 (6)	0.11 (3)	0.08 (3)
アルベド	0.42	--	--
自転周期 [hr]	2.38860 (9)	26 (12)	14 (7)
公転周期	2.10 [yr] ^a	26 [hr]	9 [days]
密度 [g/cc]	2.1 (6)	--	--
q [au]	0.955	--	--
i [deg]	4.7	--	--
スペクトル	S_comp ^b , Sq	--	--

Data are from (Brozovic+ 2011, ^a JPL SBDB; ^b Binzel+ 2019).

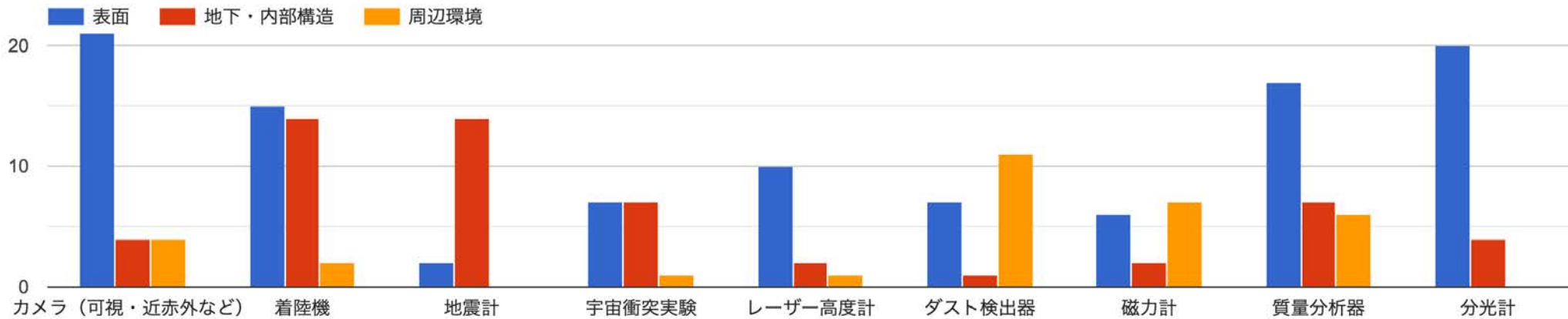
ミッション機器(案)

発展したSR探査形態(案)



サンプルリターン以外にしてみたいことは？

サンプルリターン以外にしてみたいことは？観測手法と観測対象の組み合わせを選んでください。



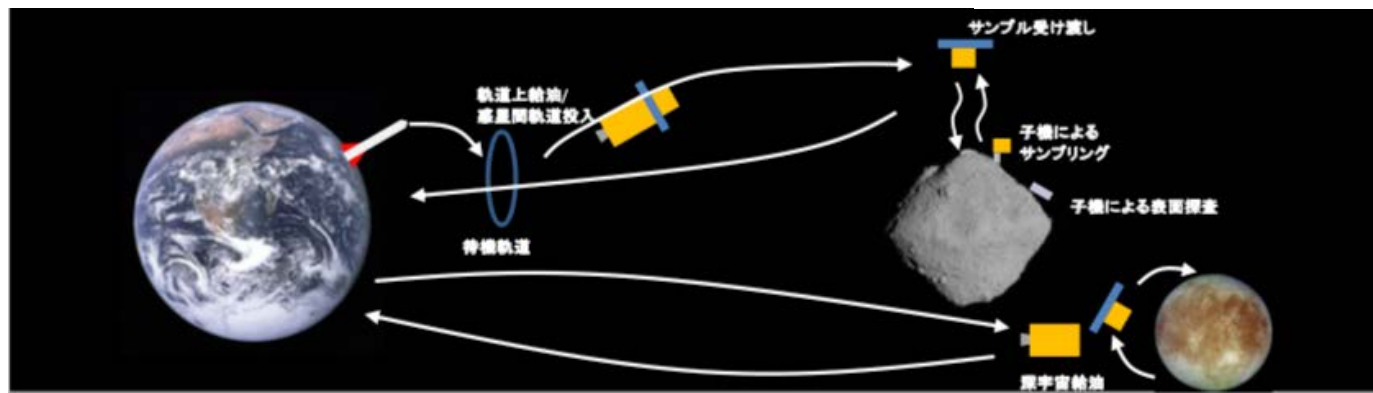
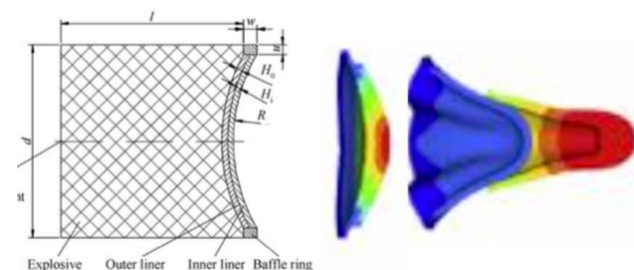
その他に、次世代サンプルリターンでやりたいこと

- 彗星/氷天体/Ceresからのサンプルリターン
- 全てのスペクトル型の小惑星からの試料回収
- 着陸機+投石機で小石を投げ上げ、探査機で捕獲
- MBの極めて赤い小惑星 or 火星軌道内側の長寿命小惑星
- 天体を周回しての内部構造探査
- いろいろな面白い天体: NASAのLucyと似た天体か、日本独自の天体か、M型か
- 熱赤外カメラによる物性探査、レーダによる表層・内部探査
- SRは重要だが、「リターン」なし(その場計測など)も重要
- メインベルトからのサンプルリターン

工学チームの検討状況

■ 次世代サンプルリターン探査システムの研究

- ◆ 2020年度ISAS戦略的開発研究経費(代表:佐伯)
- ◆ 活動区分:RG
- ◆ 目的:SRの自在性の向上
- ◆ 検討事項:
 - NEA(W-H、D型)へのリファレンスミッション
 - 親機・子機システム(SR子機)
 - タンデムSCI
 - 発展型TM
- ◆ 2021年度はWGとしての活動を計画



まとめ

- サンプルリターンによるアンカー ⇔ 惑星科学(観測・理論・分析・実験)
 - ◆ SR前提条件: 化学推進0.9トン探査機($dV < 2$ km/s)
 - ◆ SR候補天体: E型, S型, C/B型, D型, 彗星, 活動小惑星, 二重/三重小惑星
 - 複数天体で重要性・軌道設計が評価された
 - どのようにSR優先順位をつけるか?
 - ◆ 発展したSR探査形態: 親機・子機システム

- 今後
 - ◆ E型などのSR重要性の勉強会・議論
 - ◆ ミッション機器の勉強会・議論
 - ◆ 工学チームとの連携