

http://www.esa.int/Our_Activities/Space_Science/Rosetta

先行する類似ミッション(ESAロゼッタ)による
彗星核のその場探査～2014年夏

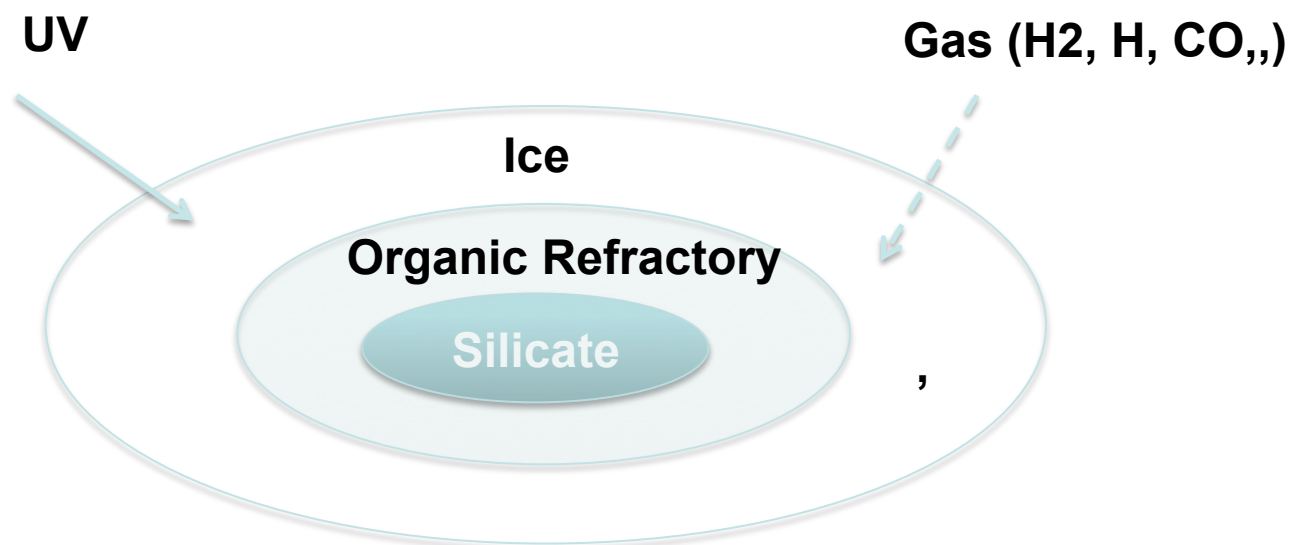
Rosetta

Philae

Churyumov-Gerasimenko 彗星

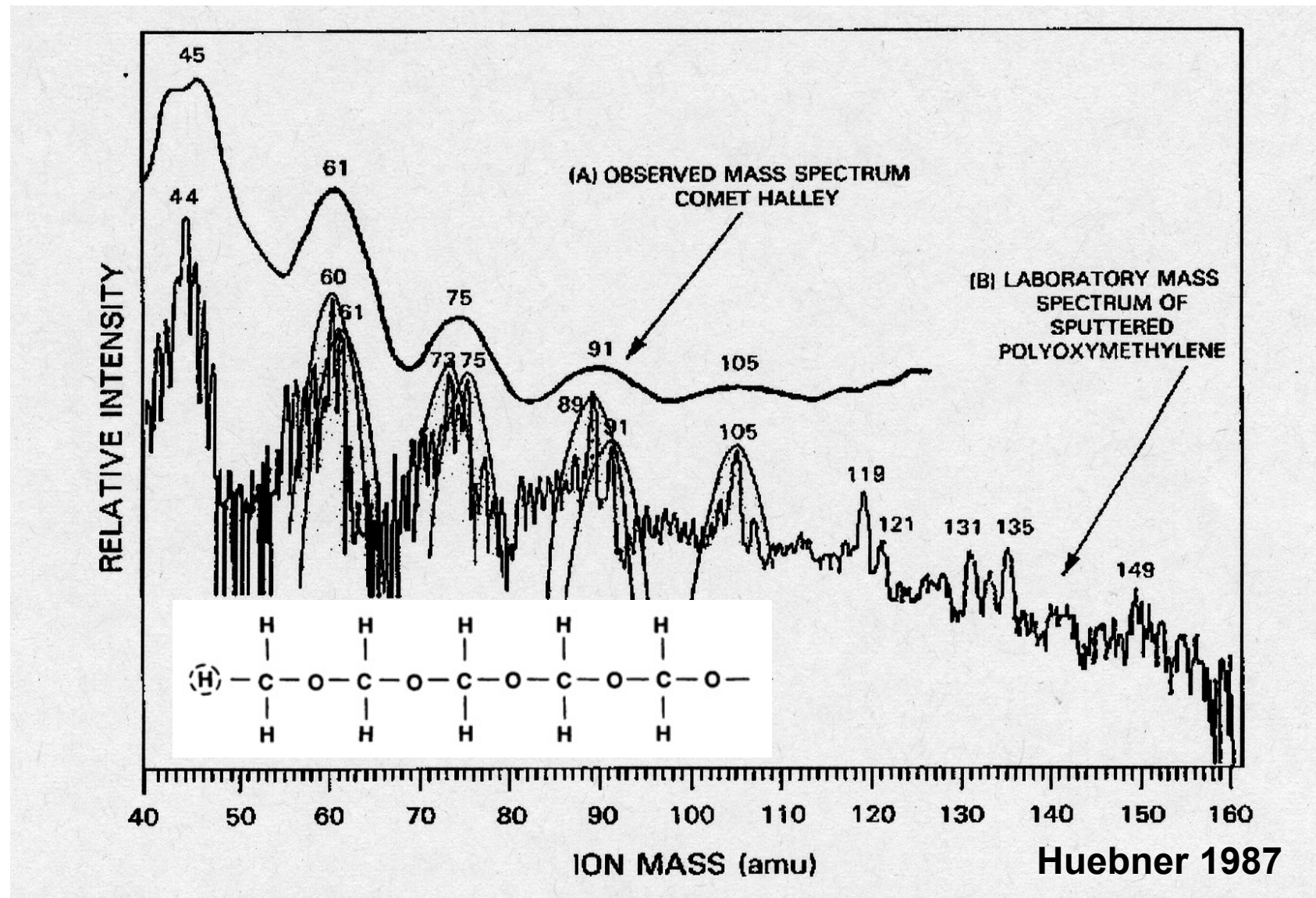
Greenberg の星間塵モデル

- ・塵($\sim 0.1\mu\text{m}$)上での水素付加反応 (Watanabe and Kouchi 2008)
 $\text{CO} \rightarrow \text{HCO} \rightarrow \text{H}_2\text{CO} \rightarrow \text{CH}_3\text{O} \rightarrow \text{CH}_3\text{OH}$
- ・氷への紫外線照射による有機物生成 (Greenberg 1982)



- ・極低温環境における重い水素・窒素同位体の濃集
- ・ **H_2CO の重合による高分子 (POM) 形成**
(Schutte et al. 1993)

Giotto 搭載 PUMA によるハレー彗星起源有機物 (CHON)
ダストの質量分析結果 -> **POM**の存在を強く示唆



Rosetta 搭載 TOF-SIMS COSIMA

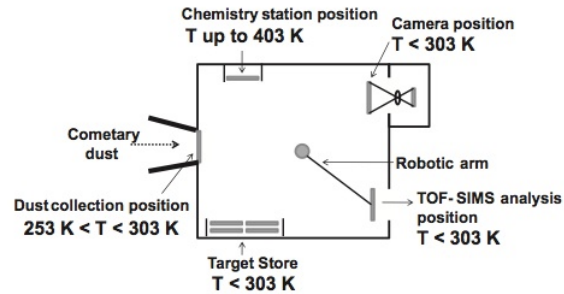


Fig. 1. Schematic view of COSIMA based on Kissel et al. (2007). The temperatures that cometary dust could encounter in COSIMA are reported.

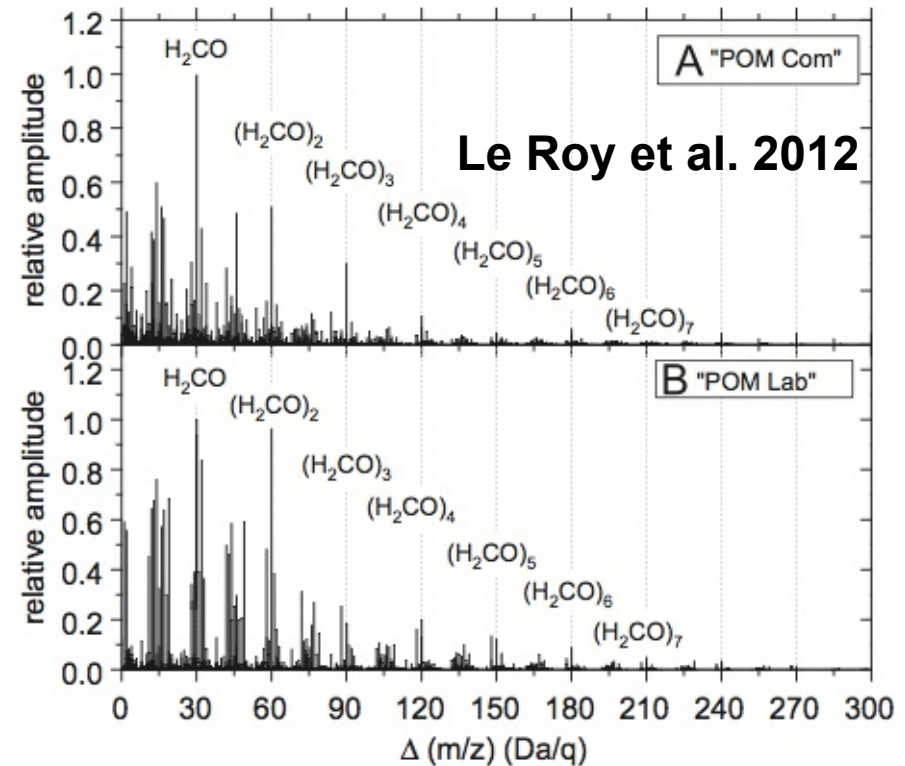
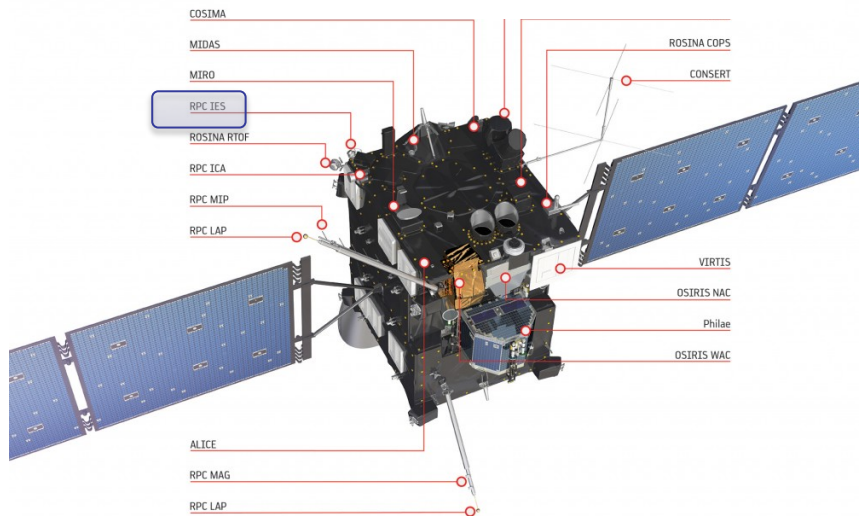
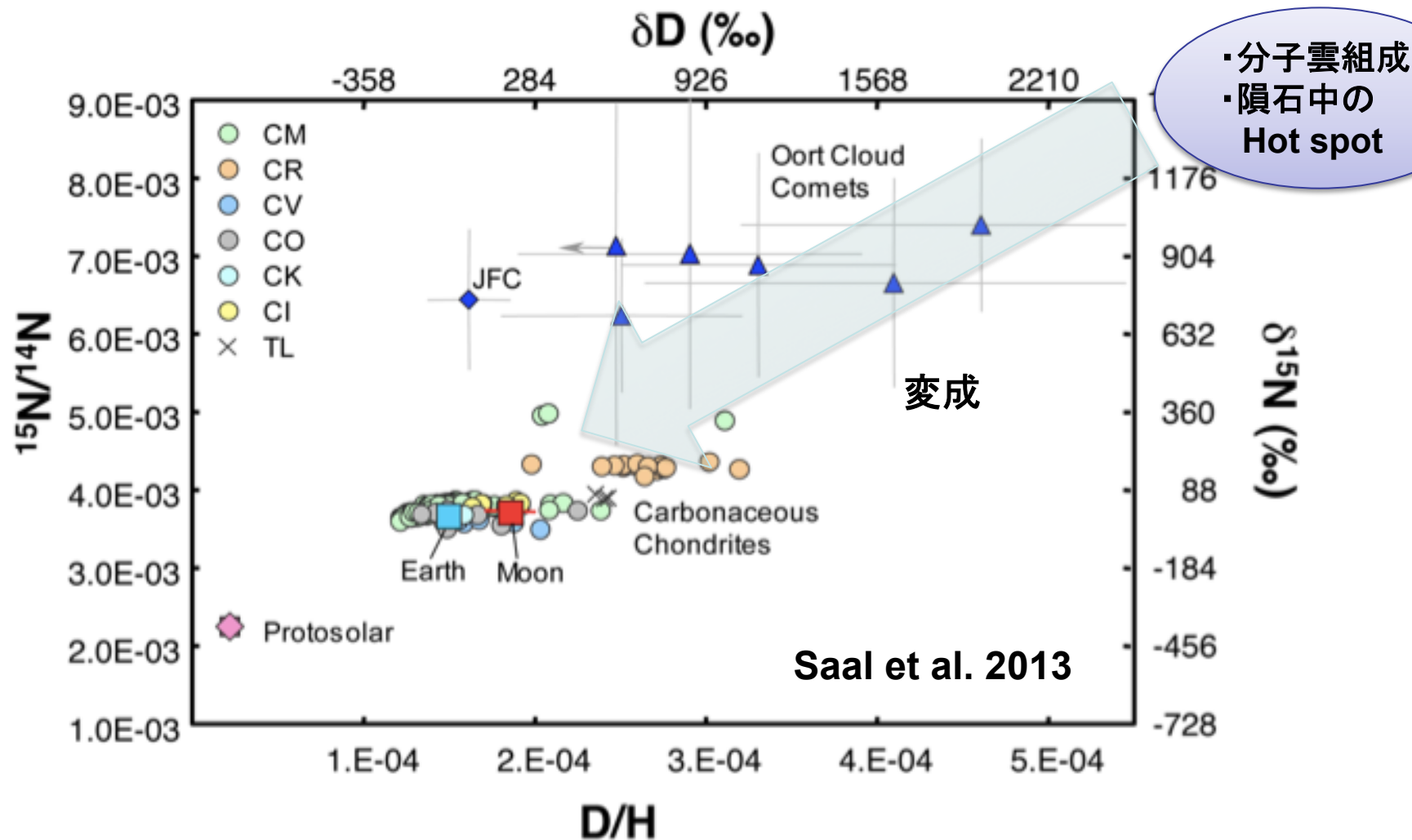


Fig. 7. Sum of peak intensity product as a function of the centroid difference $\Delta(m/z)$ with class interval width of 0.005 Da/q for commercial POM (A) and POM Lab (B). (A) ("POM Com") is normalized to the intensity at $\Delta(m/z)=30.013$. (B) ("POM Lab") is normalized to the intensity at $\Delta(m/z)=30.008$.

Churyumov-Gesimenko 彗星にも POM が存在？
隕石中の不溶性有機物(IOM) は 水質変成したPOM？ (Kebukawa et al. 2013)

小惑星(炭素質隕石)と彗星(ガス)の 水素／窒素同位体比



彗星では小惑星(～地球／月)よりも重い同位体が濃集

小惑星(隕石)と彗星(ガス)の炭素同位体比

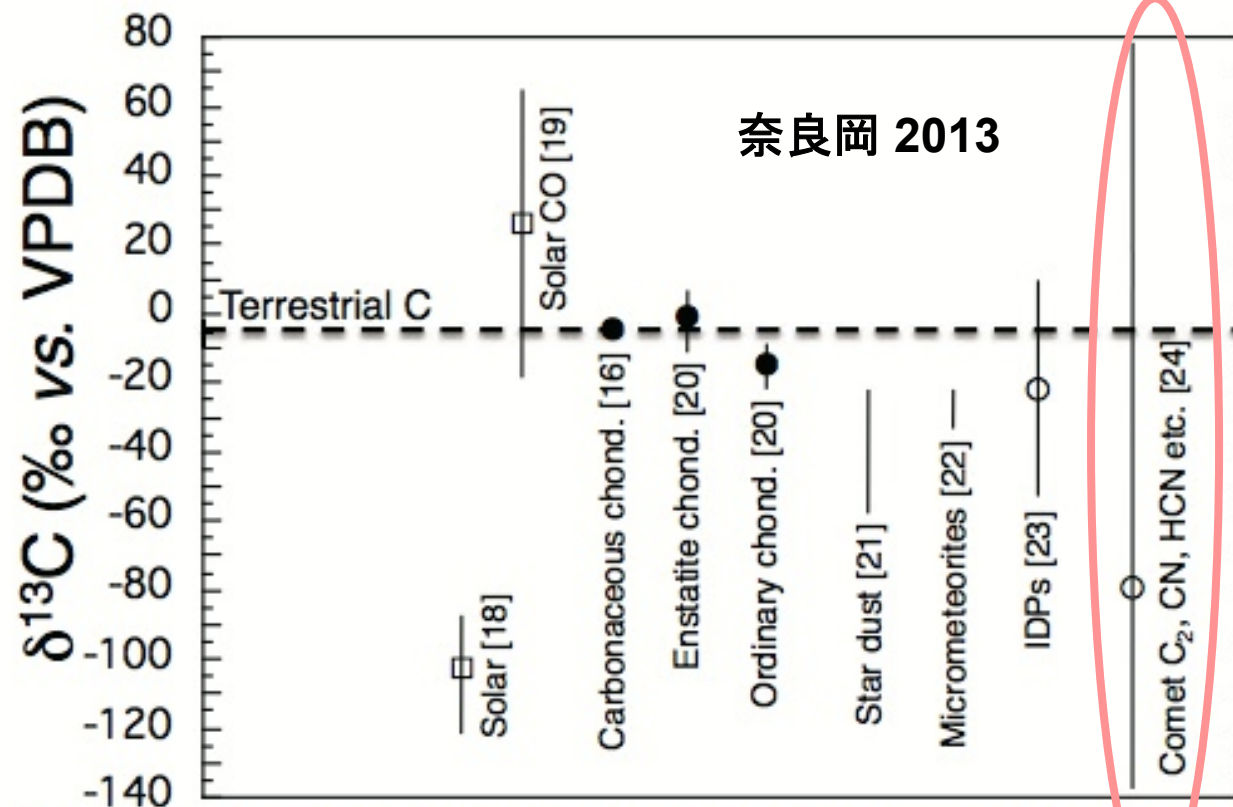
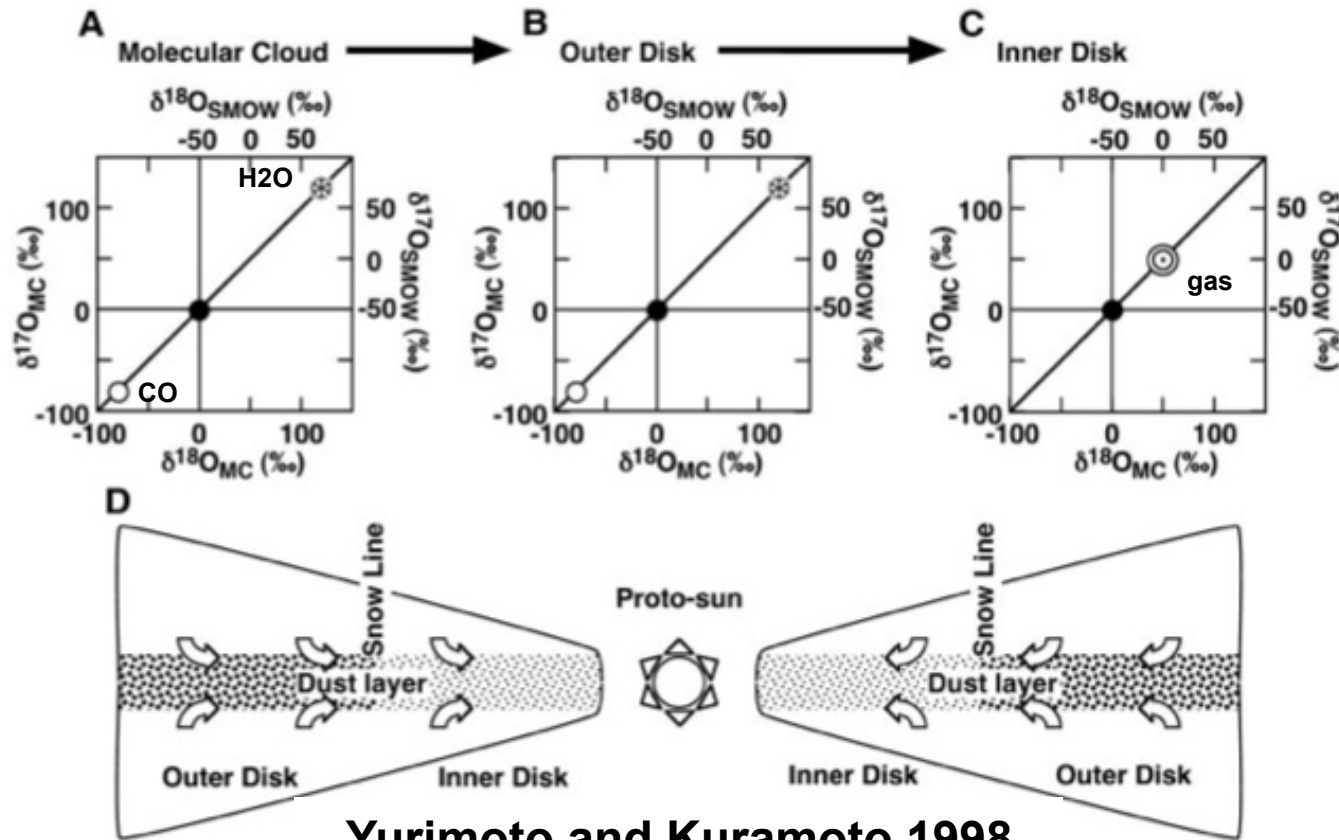


図2：地球外物質の炭素同位体組成。記号はおおよその中央値，[]内は参考文献番号を示す。

彗星は小惑星(～地球／月)よりも軽い同位体が濃集？

CO の自己遮蔽効果による酸素同位体分別

→ Snow line 以遠のH₂Oは重い酸素同位体に富む



Yurimoto and Kuramoto 1998

トロヤ群小惑星で重い酸素同位体に富む(～始源的な)
H₂O氷が見つかれば彗星と同じ起源

Acfer 094 隕石中の重い酸素同位体に富む物質 ～金属鉄／硫化鉄と始源的な水との反応で形成

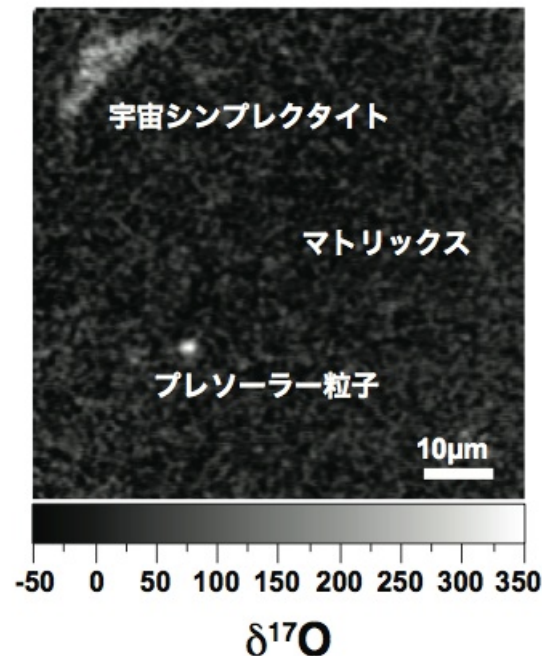


図2: Acfer 094コンドライトの $^{17}\text{O}/^{16}\text{O}$ 同位体比分布。ほぼ均質な同位体組成のマトリックス中に酸素同位体異常を示す $10\mu\text{m}$ サイズの領域(宇宙シンプレクタイト) ($\delta^{17}\text{O}=+180\%$)とプレソーラー粒子($\delta^{17}\text{O}=+400\%$)が写っている。

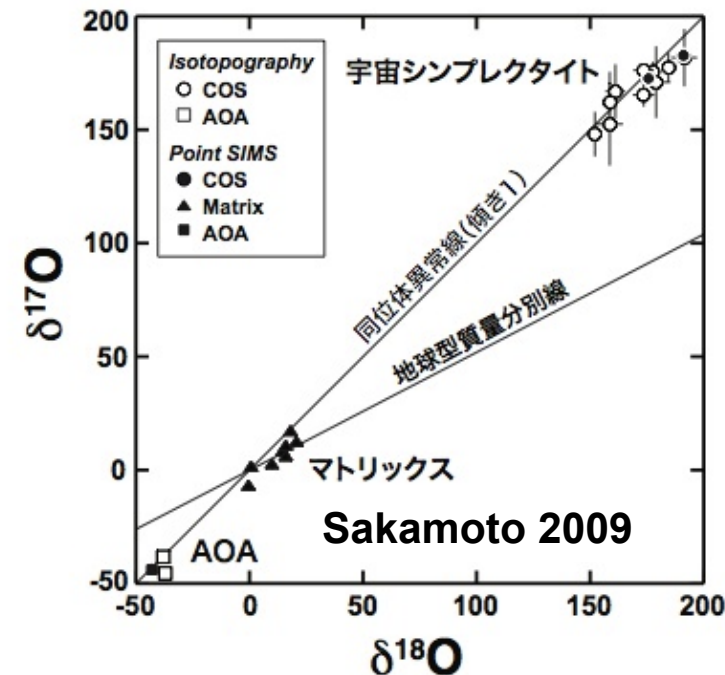


図4: 宇宙シンプレクタイトの酸素同位体組成を示した3酸素同位体図。AOAおよびマトリックスも同時に示してある。宇宙シンプレクタイトの酸素同位体組成は、傾き約1の太陽系の同位体異常線の延長線上にプロットされる。

→トロヤ群小惑星表面のH₂O氷自体が失われていたとしても
始源的なH₂Oとの反応で形成された物質は存在する

始源天体探査の中での位置付け

太陽からの距離

		内側	外側
天体サイズ	大	Ceres (NASA Dawn)	Pluto and EKBO (NASA New horizon)
	小	1999 JU3 (JAXA Hayabusa-2) Bennu (NASA Osirix-ReX)	67P/Churyumov-Gerasimenko (ESA Rosetta) Philae ランダーが始めて彗星核 表面物質の同位体データを取得

Trojan asteroids

彗星・EKBO・小惑星との比較から
木星トロヤ群の起源を明らかに

候補天体の選定条件

- 軌道
 - 木星ラグランジュ点に捕獲後、現在までずっと安定
 - 電力ソーラーセイルでランデブー＋着陸探査可能
- スペクトル
 - トロヤ群天体に典型的なスペクトル型(D/P)
- サイズ
 - 地上・宇宙望遠鏡観測で自転軸・自転周期・スペクトル型が事前に決定できる程度に大きい
 - 多様な表面を持ち熱変成・水質変成の履歴を復元しやすい
(衝突寿命が長い大きい天体が有利)

すべての条件を満たす天体を現時点で3つ同定

候補天体の物理特性のまとめ

名前	群	自転周期 (時間)	振幅 (等級)	直径(km)	アルベド	その他
(1868) Thersites (2008P-L)	L4	10.416+/-0.014	0.14+/-0.01	78.89+/-2.02	0.055+/-0.003	近赤スペクトルあり
		Mottola et al. (2011) 1994年		AKARI		
(2363) Cebriones (1977TJ3)	L5	20.05+/-0.04	0.22+/-0.01	84.61+/-1.68	0.057+/-0.003	D-type (EAR-A-5-DDR-RAXONOMY-V6.0) B-V: 0.753 (EAR-A-5-DDR-UBV-MEAN-VALUES-V1.1) ECAS (1983-5-9) (EAR_A_2CP_3_RDR_ECAS_V4_0 (ecas.tab)) u-v 0.127 b-v 0.082 v-w 0.188 v-x 0.325 近赤スペクトルあり
		Mottola et al. (2011) 1994年		AKARI		
		20.081+/-0.001	0.22		0.0599	
		Galad & Kornos (2008)		IRAS-A-FPA-3-RDR-IMPS-V6.0		
		20.5+/-0.5	0.15		0.029	
		Skiff et al. (2012)		EAR_A_2CP_3_RDR_ECAS_V4_0		
		3.8	0.18			
		Binzel & Sauter (1992)				
		記述なし	>0.35			
		Hartman et al. (1988)				
(5028) Halaesus (1988BY1)	L4	24.937+/-0.015	0.29+/-0.01			D-type (sdsstax_ast_table.tab) (2797) Teucer collisional family のメンバー (Beauge & Roig 2001)
		Mottola et al. (2011) 1996年				

トロヤ群小惑星のサイズと寿命

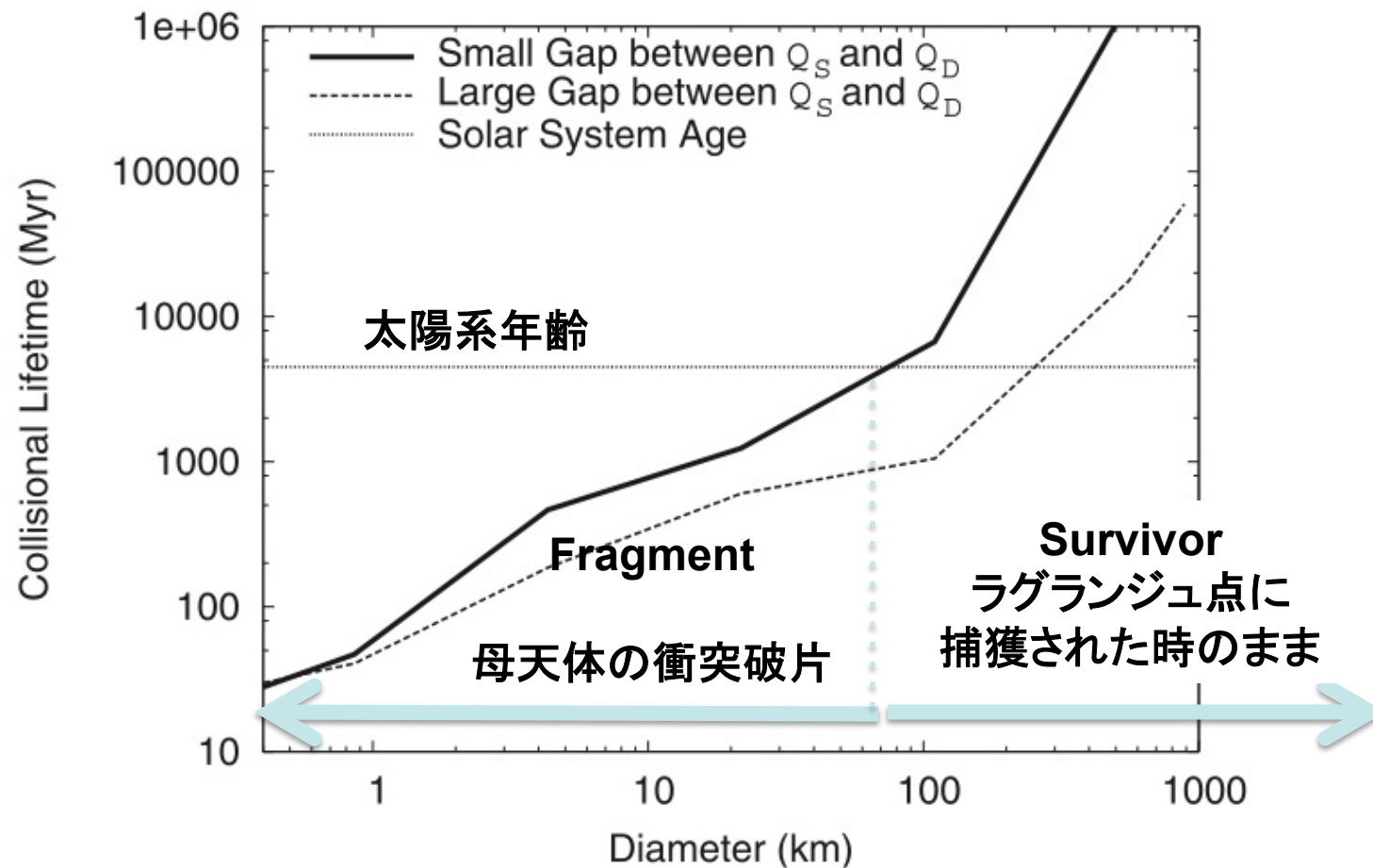
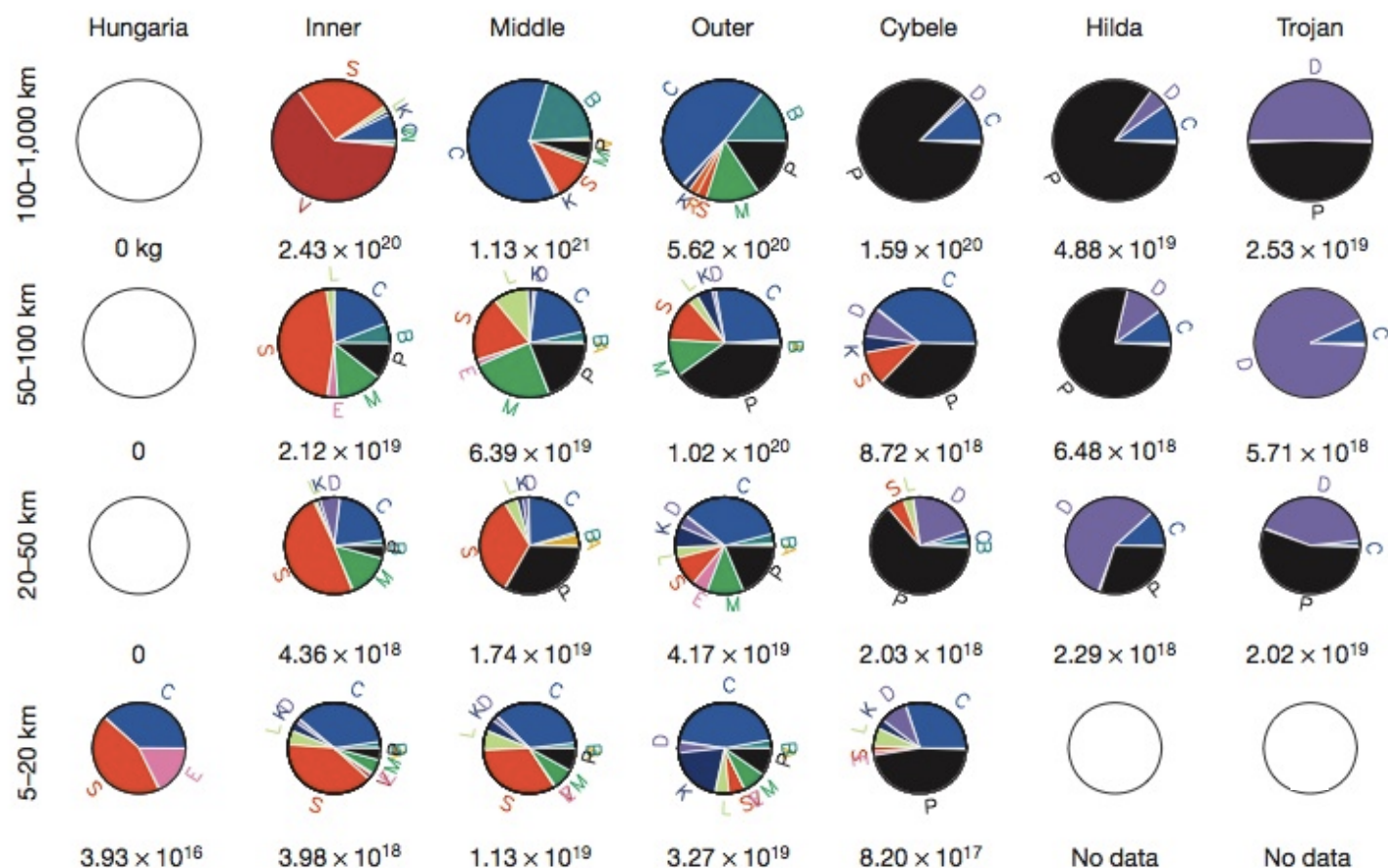


Fig. 6. Mean collisional lifetimes of L_4 Trojans obtained using the $Q_{S,1}$ (solid line) and $Q_{S,4}$ (large-dashed line) laws presented in Fig. 3b, which show a small and a large gap between Q_S and the Q_D law from Benz & Asphaug (1999), respectively. The horizontal short-dashed line represents the age of the Solar System.

小惑星帯は様々なスペクトル型が混在しているが
トロヤ群小惑星はほとんどが DあるいはP型

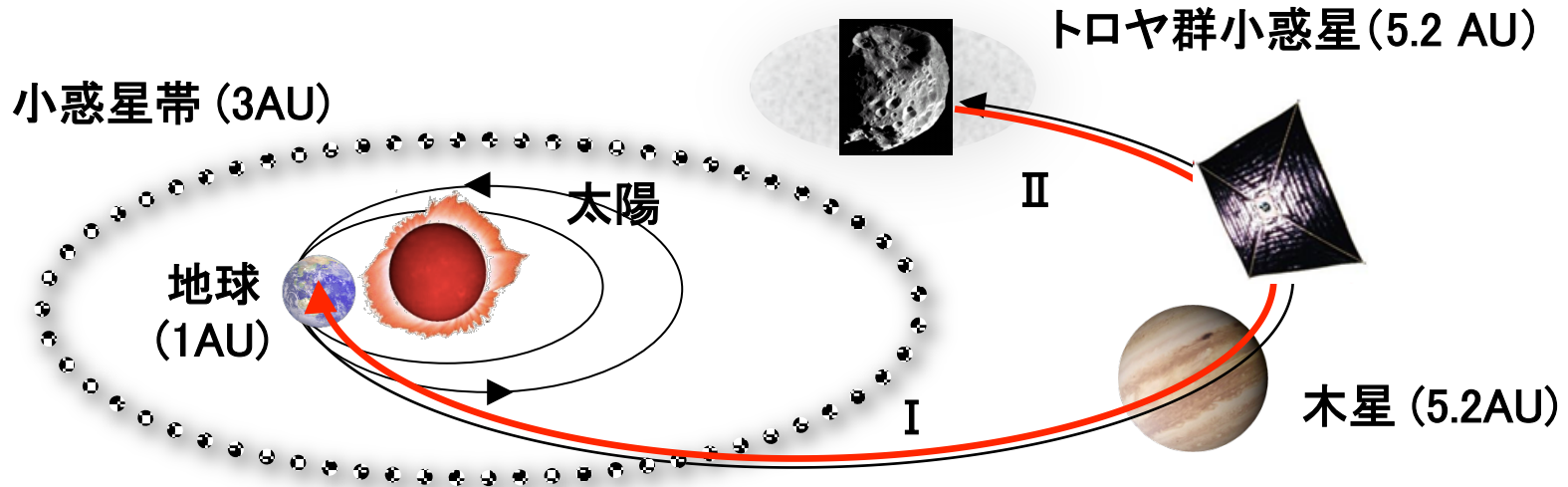


DeMeo 2014

今後の地上観測の進展により候補天体はさらに増やせる
→ 打上バックアップwindow を確実に確保

ノミナルミッションシーケンス

(赤字部分はエクストラ)



<サイエンス>

I. クルージングフェーズ

- ・赤外線背景放射の掃天観測
- ・黄道光の立体的観測
- ・太陽系ダスト分布のその場計測
- ・ガンマ線バーストの偏光観測
- ・小惑星帯フライバイ観測
- ・木星磁気圏観測

II. ランデブーフーズ

- ・トロヤ群小惑星のリモートセンシング観測
- ・トロヤ群小惑星への着陸その場観測 + サンプルリターン

<スケジュール>

- ・2023年: 打ち上げ
- ・2025年: 地球スイングバイ
- ・2029年: 木星スイングバイ
- ・2037年: トロヤ群小惑星到着
(子機の分離・着陸)
- ・2039年: トロヤ群小惑星出発
- ・2047年: 木星スイングバイ
- ・2049年: 地球帰還

ミッション設計前提条件

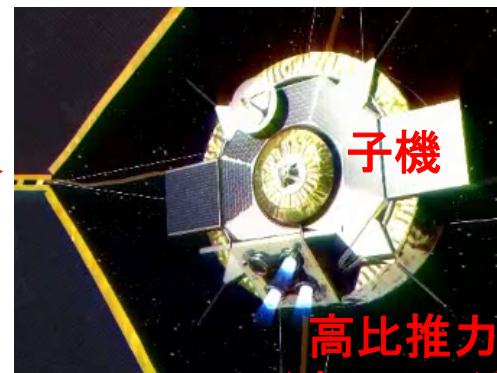
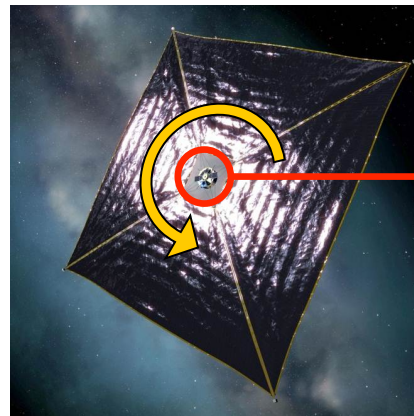
- ・軌道

打ち上げ後, EDVEGA & 木星経由で大型のトロヤ群小惑星ランデブ.
トロヤ群小惑星ではHPから周回軌道投入(合計1年以上滞在).
トロヤ群小惑星から木星経由で地球帰還.

- ・システム

H2クラスで2022年~2024年打ち上げ、全体質量: 1500kg
セイル面積: 3000m², 発電量: 5kW@5.2AU
イオンエンジン比推力: 8000秒, 運転時間: 40000時間以内
シングルスピン方式, スピンレート: 0.1rpm以上、

大型ソーラーセイル
& 薄膜太陽電池



高比推力
イオンエンジン

ミッション解析状況

- 木星スイングバイ: **活用する** or **活用しない**

直接軌道でも, 年数は変わらない(低推力のため)

木星スイングバイによって燃料を減らせ, 軌道傾斜角も変更可.

- 帰還: **親機** or **子機(電気推進)** or **子機(化学推進)**

子機は, 電気推進だとシステム重量大, 化学推進だと燃料重量大.

親機のクルージング燃料は往復で200kg以下→復路の燃料はバックアップに

- 着陸: **子機** or **親機**

親機の場合, 20km以上の天体では燃料消費の観点で親機が降りるのは困難

親機のサイズを考えるとサンプリング(伸展マスト等)にも問題.

子機の場合, サンプルの親機への引き渡しが最大の課題

＜想定するサクセスクライテリア＞

- フルサクセス: 子機で着陸しその場観測を行う.

- エクストラサクセス: 親機にサンプルを渡して, 地球に帰還し分析する.

※フルサクセスまででサンプル分析以外のサイエンスはすべて実施できる.

エクストラサクセスに必要なリソース(カプセル, 燃料等)は最小限(数10kg)とする.

(フルサクセスを確実に実施するためのマージン燃料等と兼ねる)

子機(Lander)の検討

子機Wet: 195 kg, 子機Dry: 162 kg

サブシステム	名称	個数	重量[kg]	消費電力[W]	備考
電源			27.16		
	1次電池		23.53		SMADよりエネルギー密度 250Wh/kg
	制御器		2.29	5.4	重量・消費電力をはやぶさより5割減
	スイッチングレギュレーター		1.35		重量をはやぶさより5割減
通信			2.40	6.5	アンテナはサイエンスのレーダーと共通
	TX/RX		2.4	6.5RX:1.5W, TX:5W (出力 1W = 効率20%)	
C&DH			7.47	34.2cf)	Philae : 12.7W
	TCIU		2.86	19.0	はやぶさ仕様
	DHU		3.71	10.0	はやぶさ仕様
	PIM	3	0.34	2.0	はやぶさ仕様
	データレコーダー		0.56	3.3	はやぶさ仕様
RCS			18.47		全体通してはやぶさ参考
	燃料タンク		4.87		はやぶさ相似 + 1kg
	スラスター	12	3.60		5N
	その他(弁、バルブ、配管等)		10.0		1液式:10kg, 2液式:20kg

サブシステム	名称	個数	重量[kg]	消費電力[W]	備考
AOCS			38.61	147.0	全体通してはやぶさ参考
	AOCU		5.38	24.85	
	精太陽センサ		0.85	0.47	
	粗太陽センサ	5	0.43	0.00	
	IRU		0.72	7.25	はやぶさ2個→子機1個
	加速度計	4	0.40	1.88	
	スタートラッカー		0.85	3.50	エアロキャプチャ資料より
	リアクションホイール	3	2.83	6.00	重量:はやぶさとの慣性モーメント比より
	RWのドライバー		0.69	↑	消費電力:「衛星設計入門」p.265 MPCの2.5kg級RW
	ドライバー		4.39	10.42	重量:はやぶさRWとの質量比より
	ONC-エレキ(デジタル)		3.66	17.98	アナログのエレキと同じ割合だけ消費電力が減少すると仮定
	ONC-エレキ(アナログ)		1.01	24.60	はやぶさ設計書p.606:カメラ1台ドライブ時
	ONC-W1		0.72	↑	広角カメラ
	ONC-W2		0.89	↑	広角カメラ
	ONC-T		1.59	↑	望遠カメラ
分離機構			3.60		Philae参考
	電気計装		7.79		機器重量の7%
構造			24.48		
	構造		19.5		ウェット重量の10%
	脚		5.0		

サブシステム	名称	個数	重量[kg]	消費電力[W]	備考
熱			2.10		
	熱計装		2.10		
サイエンス			30.00	30.0	サンプル採取デバイス含む
機器重量 (total の値)			111.34		除:電気計装、構造、カプセル、RCS
推進剤			32.72		

・メインのサイエンス機器は日本の開発するマルチターンTOF型質量分析装置。

・この装置による同位体分析のためにサンプリング手法や子機設計も最適化

・ESA の彗星探査機 Rosetta は Philae というランダーを搭載しており、彗星核表面で GC-MS による質量分析を行う。この装置(COSAC,PTOREMY)の発展型をバックアップオとして搭載することを検討する

・表面の微小地形観測カメラ、赤外線分光計、熱赤外カメラについても、はやぶさ2に搭載される MASCOT ランダー搭載機器のヘリテージ活用を検討