


DARTS

Drilling system for Aggregated Research in comeTary interior Structure

- 
- 今田 大皓
 - 桑原 正輝
 - 枝本 雅史
 - 谷 貴人
 - 河合 優太

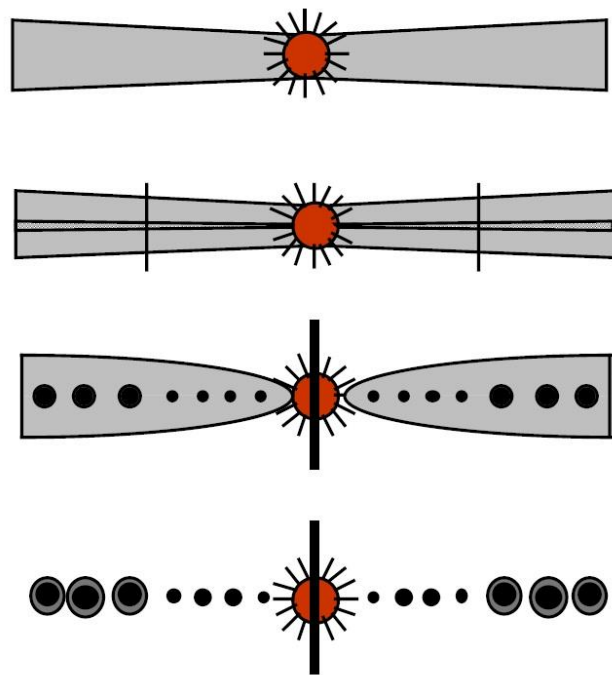
背景

太陽系の形成過程で μm オーダーの粒から km オーダーの微惑星に至る過程はよくわかっていない

彗星は太陽系形成過程での熱変性を受けていないと言われ、彗星の内部構造に微惑星の進化が刻まれていると考えられる

→内部構造を調べることで、微惑星進化のヒント
が得られるかもしれない

現在、いくつか彗星核の構造モデルが提唱されている



彗星核の内部構造(モデル)

いくつか提案され、次の(b)と(c)が有力とされる

(a) Icy-Conglomerate model

(b) Fluffy-Aggregate model

自己相似形の氷／岩石が集まってできる

(c) Primordial-Rubble-Pile model

氷／岩石の集合体で多くの空隙を含む

(d) Icy-Glue model

内部構造を記述するパラメータ

密度、空隙率、強度、熱伝導率

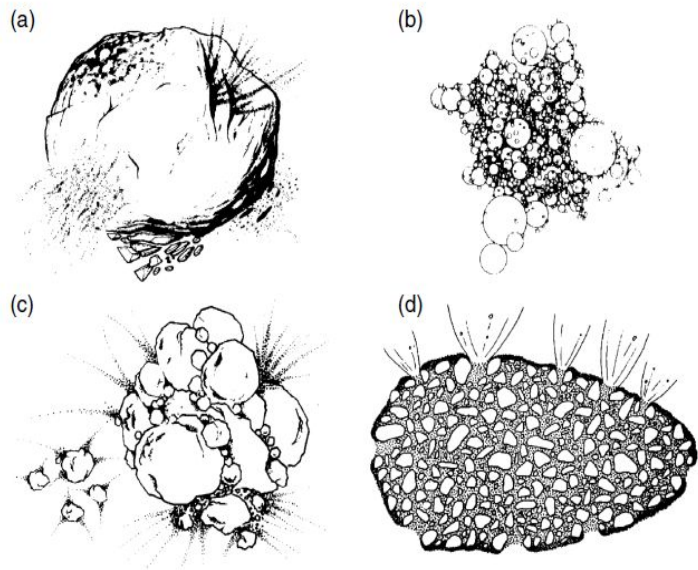


Fig. 2. Artists' concepts of various models for cometary nuclei: (a) Whipple's icy conglomerate model as envisioned by Weissman and Kieffer (1981); (b) the fractal aggregate model of Donn *et al.* (1985); (c) the primordial rubble pile model of Weissman (1986); and (d) the icy-glue model of Gombosi and Houppis (1986). All but (d) were proposed prior to the spacecraft flybys of comet 1P/Halley in 1986.

彗星核の内部構造

彗星核の内部構造は探査機で取得した画像から推測していた

彗星、小惑星では内部構造を観測した例はほとんどない

観測例: Rosetta, CONSERT

90 MHz の電波、空間分解能 20 m

非一様性は見られなかった、Primordial-Rubble-Pile model を支持(初日の講義より)

はやぶさ

イトカワはRubble-Pileと考えられている

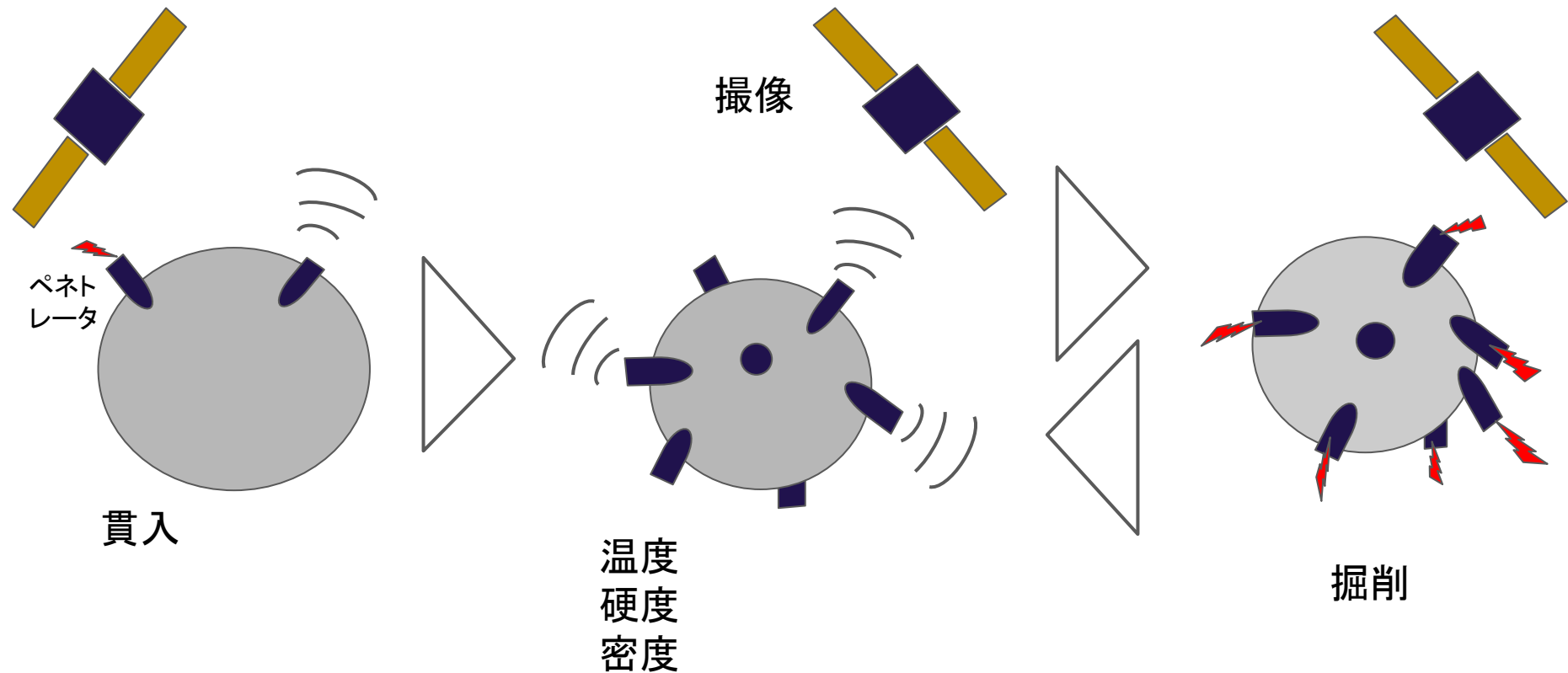
科学目的

彗星内部構造モデルを観測事実から検証し、彗星の進化の理解を深める.

ミッション要求

1. 分裂した彗星に接近し、破断面および彗星全体の表面を10mの空間分解能で調べる
2. 表面から1.0m以深の物理量を深さ方向に1~10cmの分解能で明らかにする.
 - 硬度分布.
 - 温度分布(温度0.05Kの精度)
3. 5mの空間分解能で彗星内部の密度分布を調べる.

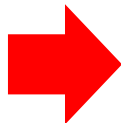
観測の概念図



観測対象の選定

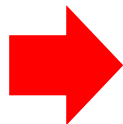
- 目的: 彗星核の内部構造の理解
- 選定条件: 最近分裂したことが確認された木星族の彗星 (Fernandez (2009))

3つの彗星が該当



Full Name	e	a [AU]	q [AU]	Q [AU]	i [deg.]	Period [yr]	First Obs	Last Obs	Split Year
57P/duToit-Neujmin-Delporte	0.50	3.45	1.73	5.18	2.85	6.42	1970/7/27	2015/11/17	1996以降
73P/Schwassmann-Wachmann 3	0.69	3.09	0.97	5.21	11.24	5.44	2005/10/13	2016/10/12	1995
60558 Echeclus (2000 EC98)	0.46	10.68	5.82	15.54	4.34	34.90	1979/9/23	2016/11/9	2005

1つに絞るため、軌道要素で閾値を設定($e \leq 0.5$, $i \leq 10$ deg., $5 < Q \leq 6$ AU, $P \leq 6.42$ yr)



57P/du Toit-Neujmin-Delporte

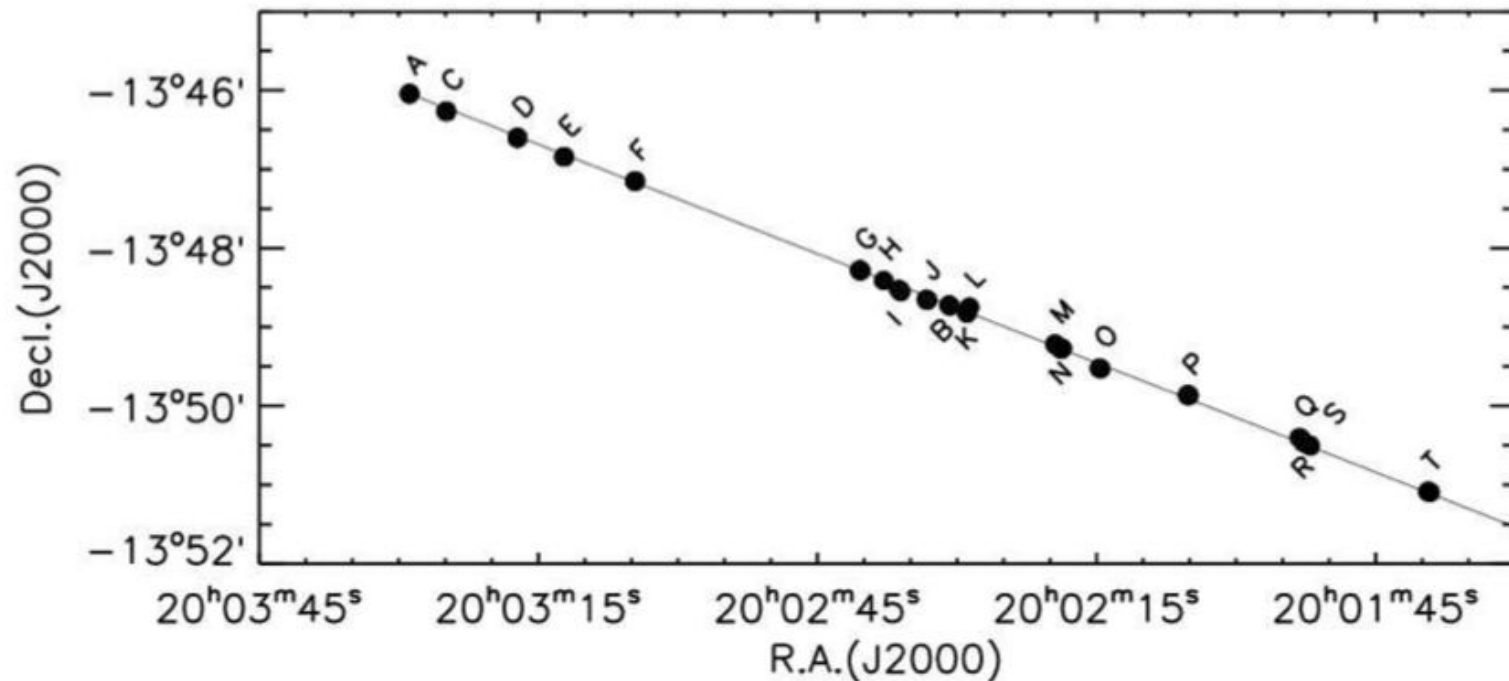
観測対象: 57P/du Toit-Neujmin-Delporte



Mosaic of the region near comet 57P, the head of which is at left, and the discovered fragments (circled and labeled with official designations). North is up and east is to the left, the standard orientation in the sky. The comet was observed while it was almost 180 degrees away from the Sun, so the Sun, Earth, and the comet are almost along a straight line in space. As projected onto the sky, the comet's motion with respect to the Sun is almost due east. The fragments all trail along behind the comet and have virtually the same motion. Image by Yan Fernández, University of Hawaii.

軌道要素: $e = 0.50$, $i = 2.85$ deg., $Q = 5.18$ AU, $P = 6.42$ year

観測対象: *57P/du Toit-Neujmin-Delporte*



軌道要素: $e = 0.50$, $i = 2.85$ deg., $Q = 5.18$ AU, $P = 6.42$ year

システム要求

ミッション要求

破断面および形状を 10mの空間分解能で調べる.

深度 1.0m以深の硬度分布を測定する.

深度 1.0m以深の温度分布(分解能 0.05K)を測定する.

5mの空間分解能で密度分布を調べる.

システム要求

空間分解能 10m/pixelの可視光カメラを搭載する.

分解能 10^{-11} G, 耐加速度 10^4 Gの加速度計を搭載する.

分解能 0.05Kの温度計を搭載する.

ペネトレータに対象彗星に貫入・推進するため 50Nの推進力を持つ固体燃料を搭載する.

2つ以上のペネトレータを搭載する.

ペネトレータと母船間の通信を用いて誘電率を測定する.

ミッション機器

機能	装置	要求
撮像	カメラ	分解能10mで 彗星表面を撮像可能
誘電率測定	送受信機	分解能10m
温度測定	温度計	0.05Kの精度で 温度測定可能
硬度測定	加速度計	感度： 10^{-11} G

本ミッションで開発するペネトレータ

- ・固体推進薬を用いた鉛直方向に連続した測定

固体推進薬：モデルロケット用小型エンジンを想定

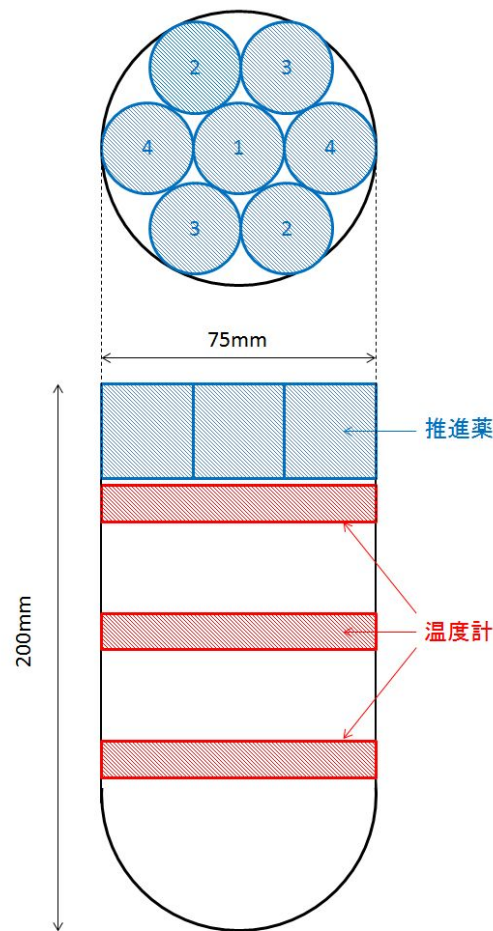
(最大推力50 N, 力積50 Ns程度)

- ・仮定：彗星表面の硬度 < 月表面の硬度

⇒ 月表面で十分に掘削可能な設計を要求

(c.f. Deep Space 2 & LUNAR-A)

- ・温度計、送受信機、推進薬を搭載



ペネトレータの概念図

システム要求

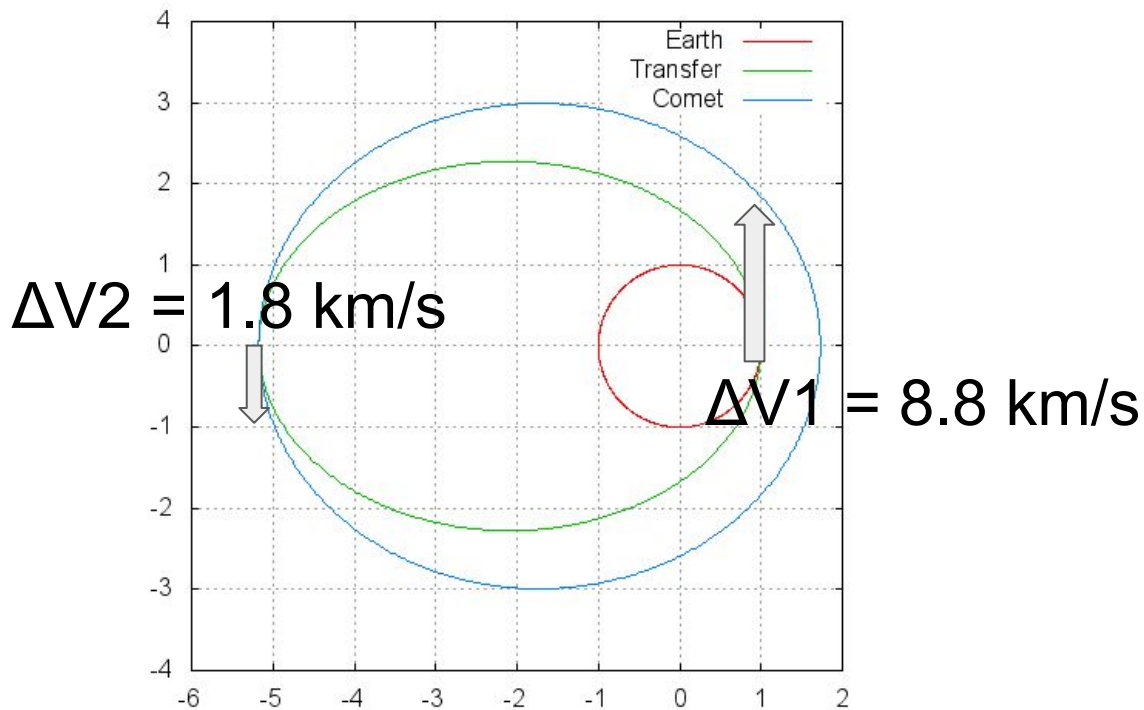
機器		個数			質量 [kg]			電力 [W]			備考
ミッション機器		1			47			TBD			
	カメラ		1			23			TBD		c.f. Rosetta
	バネトレータ		10			24			TBD		c.f. LUNAR-A & Deep Space
				10			6			TBD	c.f. LUNAR-A & Deep Space
				10			-			TBD	c.f. LUNAR-A & Deep Space
				10			-			TBD	c.f. LUNAR-A & Deep Space
				10			-			TBD	c.f. LUNAR-A & Deep Space
				10			0.17			TBD	c.f. LUNAR-A & Deep Space 容量：600mAh エネルギー密度：500Wh/kg
バス機器		1			1230 (TBC)				TBC		c.f. Rosetta

軌道計画

	初期軌道 (地球公転軌道)	目標軌道 (57P/duToit-Neujmin-Delporte)
軌道長半径 [AU]	1	3.4525
離心率	0	0.49929
軌道傾斜角 [deg.]	0	2.8483
昇交点経度 [deg.]	-	115.21
近日点 [AU]	1	1.7287
遠日点 [AU]	1	5.1764

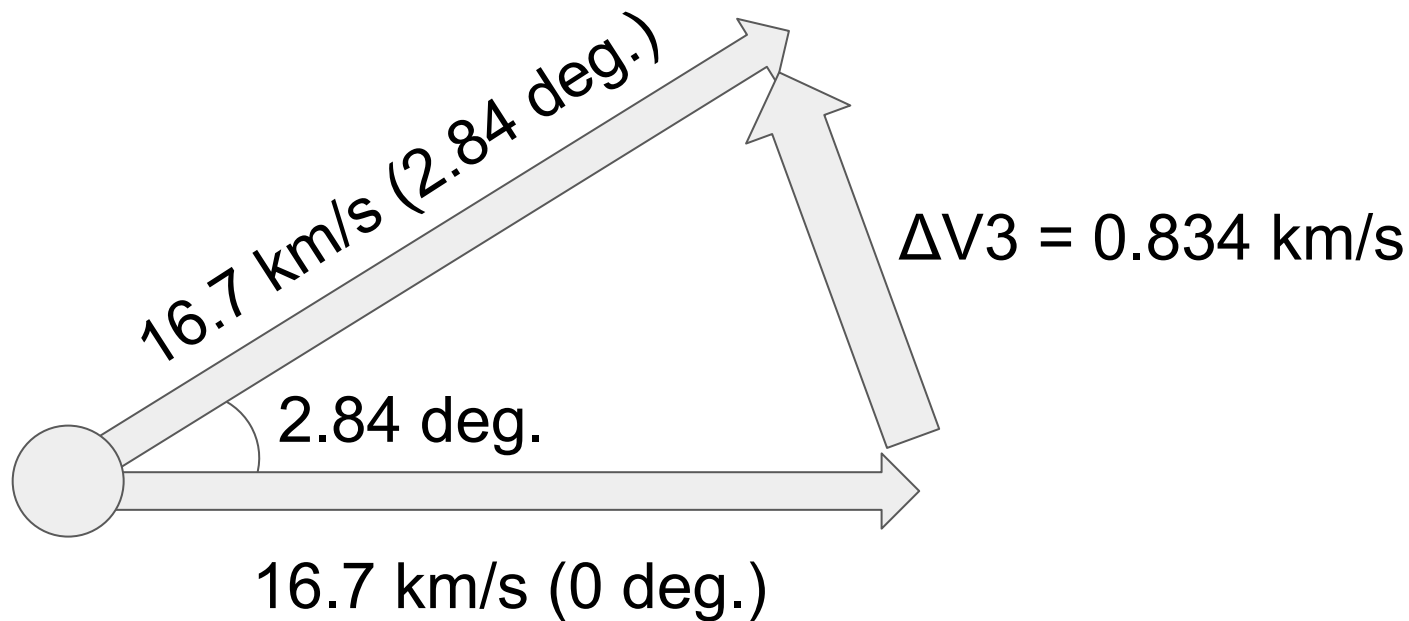
軌道遷移(1)

- ・地球円軌道から2-impulse Hohmann transferで軌道傾斜角以外を合わせる



軌道遷移(2)

昇交点において軌道傾斜角を合わせ彗星ランデブー

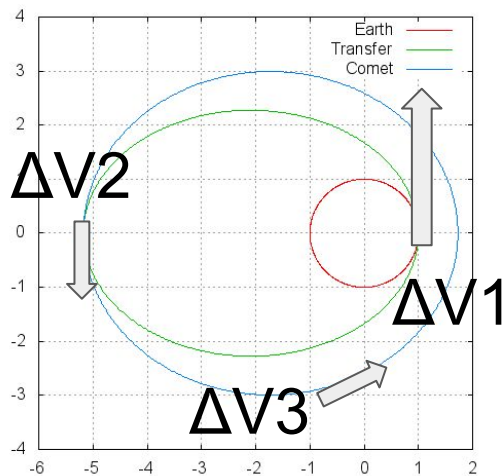


彗星ランデブー軌道への投入試算

初期条件として探査機質量 3,000 kg, 地球公転軌道上からスタートと仮定

スラスタとして, かぐやメインスラスタ(500 N, 319 s)を仮定

3,000 kg \rightarrow $\Delta V1$ \rightarrow 181 kg \rightarrow $\Delta V2$ \rightarrow 101 kg \rightarrow $\Delta V3$ \rightarrow 77.3 kg



$\Delta V1$ の評価

初期質量3000 kg, 8.8 km/s 増速と仮定

かぐやメインスラスタ : 500 N, 319 s → 加速フェーズ 51764 s = 14.4 hours

→必要な推進剤 : 2819 kg

解決策

- ・地球脱出軌道への投入能力が高い打ち上げロケットの使用
- ・スイングバイ
- ・高性能電気推進機の使用(I_{sp} 10,000 sで推進剤 256 kg : 長時間加速のため要再計算)

ΔV_2 の評価

初期質量2500 kg, 1.8 km/s 増速と仮定

かぐやメインスラスタ : 500 N, 319 s → 加速フェーズ 9000 s = 2.5 hours

→必要な推進剤 : 1100 kg

解決策

- ・スイングバイ
- ・高性能電気推進機の使用 (Isp 10,000 sで推進剤 46 kg : 長時間加速のため要再計算)

ΔV 3の評価

初期質量2000 kg, 0.8 km/s 増速と仮定

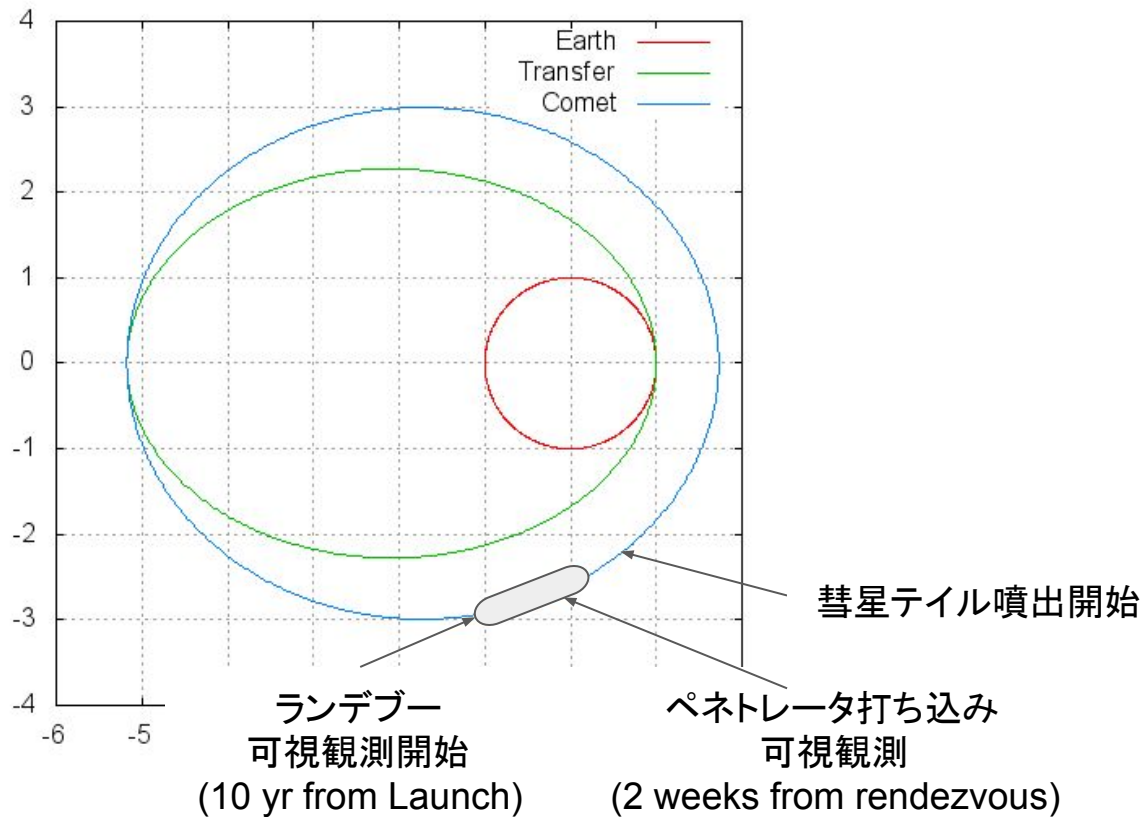
かぐやメインスラスタ : 500 N, 319 s \rightarrow 加速フェーズ 3200 s = 53 min

\rightarrow 必要な推進剤 : 470 kg

解決策

- ・スイングバイ
- ・高性能電気推進機の使用 (I_{sp} 10,000 sで推進剤 21 kg : 長時間加速のため要再計算)

軌道投入後運用シーケンス



サクセスクライテリア

ミニマムサクセス

探査機で対象の彗星にランデブー後、破断面および形状を撮像する。

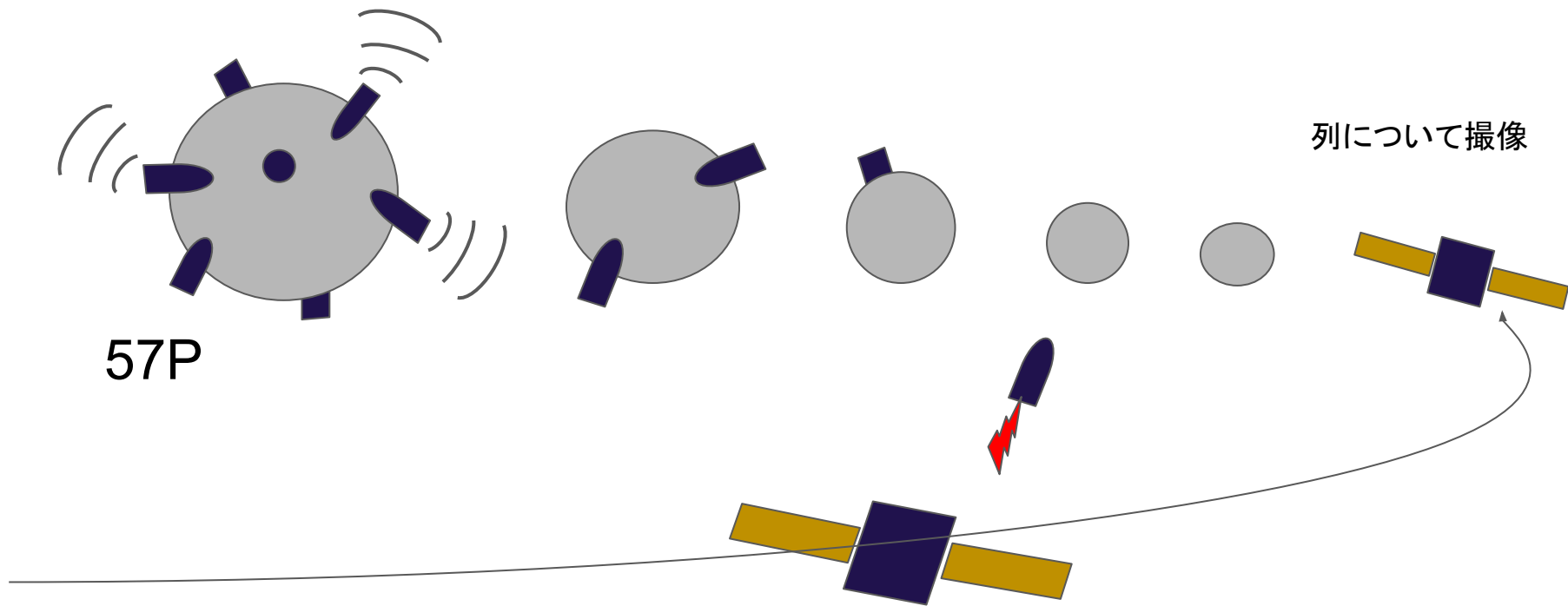
フルサクセス

ペネトレータから得られたデータを用いて、内部構造モデルを検証する。

エクストラサクセス

彗星、小片の撮像を継続し、1周期分モニタ観測を行う。

概念図： 分裂した核の調査



今後の検討事項

減らせるリソースの検討

Rosettaのバスを踏襲しているため、必要以上に重い

リスク

機器	リスク	対策
カメラ	予期せぬ迷光の混入	データ処理時の除去
ペネトレータ	表面に貫入できない	突入角の再設定 推進薬の追加
	掘削できない	対策なし
加速度計	貫入の衝撃に耐えられず壊れる	冗長性を持たせる
温度計	表面と接触不良	掘削し接触不良の 部分の隙間を埋める
固体燃料	着火できない	対策なし
バッテリー	容量が足りない	対策なし

Appendix

システム要求(案2)

ペネトレータ(ミッション機器)

	要求
加速度計	分解能 10^{-11} [G], 耐加速度 10^4 [G]
温度計	分解能0.05[K], 耐温度 $\pm?$ [K]
通信機	90MHz(送受信)
個数	≥ 2
運用期間	ランデブー後のミッション期間
ロケットモータ	推進力50[N], 1.5[m]以上貫入

可視光カメラ(ミッション機器)

可視光カメラ	空間分解能10[m/pixel] データ量 2K×2K×2 [Byte]
--------	---

母船(バス機器)

	要求
ミッション期間	7年
軌道	57P/du Toit-Neujmin-Delporte



今回、衛星はRosettaを使用するものとし
ミッション機器のシステム設計を中心に議論。

背景

彗星 (comet) は微惑星起源と考えられる始原天体

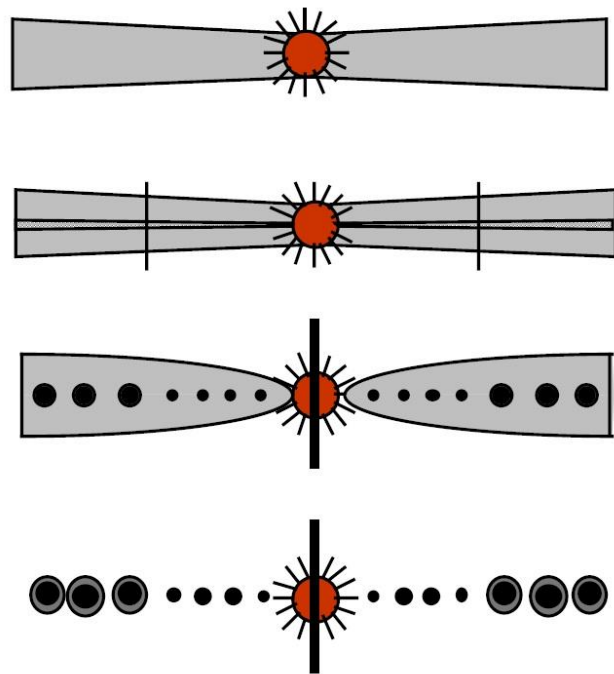
微惑星...

原始惑星のような大きな熱変成を受けていない

= 原始惑星形成時に消失した情報を保持している

- ・ 微惑星の構造 → 惑星成長過程の理解
- ・ 太陽系形成時の物質 → 宇宙生命論の知見拡充

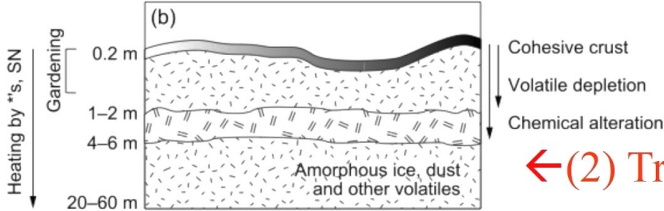
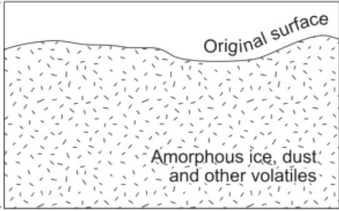
原始木星の暴走成長 → アステロイドベルト天体, カイパーベルト天体 (彗星)



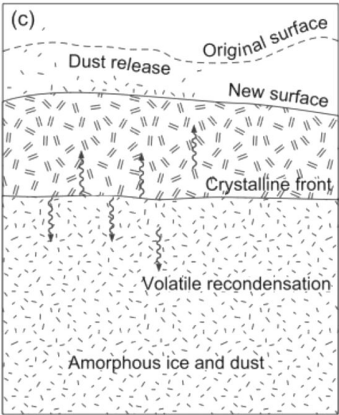
調査（発表用ではない）

必要に応じて適宜移動させてください。

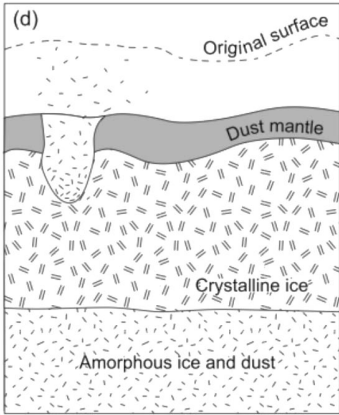
(1) Hypothetical planetesimal →



← (2) Trans-Neptunian object



(3) Fresh comet →



← (4) Old comet

内部構造探査の意義

内部構造を探査する意義(水谷仁1987)

- 惑星の起源・進化過程の理解に重要. リモートセンシングにより表面探査が主流←地震計による惑星内部が調べられているものは月のみ

分かること

1. 惑星の層構造(地殻・マントル・コア)
2. 惑星の材料物質←地震波速度
 - (1)原始太陽系星雲内でのガスから塵への凝縮過程
 - (2)微惑星から惑星への集積過程→各成分の量比をもとに制限条件をつけられる.
3. 磁場の起源

惑星の磁気のもとにはコアのダイナモ作用と信じられているが、発生に必要なコアの性質やサイズがどのようなものかわかっていない.

惑星の材料物質

1. 初期凝縮元素(難揮発性元素) Ca, Al, Ti, U, Th, REE
2. 珪酸塩 Mg, Si, O -- Mg/Si比, Mg/Fe比-- 地震波速度 + 鉱物組成
3. 金属鉄, 親鉄性元素 Fe, Ni, Co, Pt, Au -- コア(彗星は?)
4. 揮発性元素(凝縮温度=1300~600K) -- 地殻
5. 高揮発性元素(凝縮温度<600K)-- 地殻

(参) CRAF NASA

Comet: Kopff

Sensor: Accelometer-- Strength of the surface, layering if exist.

Gamma-ray spectrometer for elemental composition measurement

Passive and active temperature sensors.

differential calorimeter

evolved gas analyzer for composition of the cometary materials

Shape: Golf tee - like, 1.5m long

太陽光・赤外線スペクトロメータ



過去のペネトレータ

	LUNAR-A	Deep Space2	CRAF
形状	単一	分離型	単一・TerraBrake
通信	△	○	○
信頼性	○	△	○
備考	安価・軽量・シンプル	複雑	ミッション中止(予算)

調べる項目

- ・57P がいつ破砕したのか。（推定方法，資料）
- ・各センサの要求分解能，測定範囲（可視カメラ，加速度計，熱流量計）
 - ←4つのポンチ絵をもとにした分類で十分か（違う問に対する回答の絵）

氷ペネトレータ

彗星核や**エウロパ(数キロの氷層)**に代表される氷天体には、生命の前駆物質となる有機物質が存在する可能性が高く、将来的な探査対象として重要.

宇宙線汚染を受けていない地下のサンプルを観測する上でも重要.

先行例: CRAF(NASA) -- Kopff

行く彗星

- ・小惑星彗星は微惑星と呼ぶには辛い
- ・小惑星に行くのも意義深い(氷があるか?)

- ・木星族 57P, 73P(1995年破碎)傾斜角

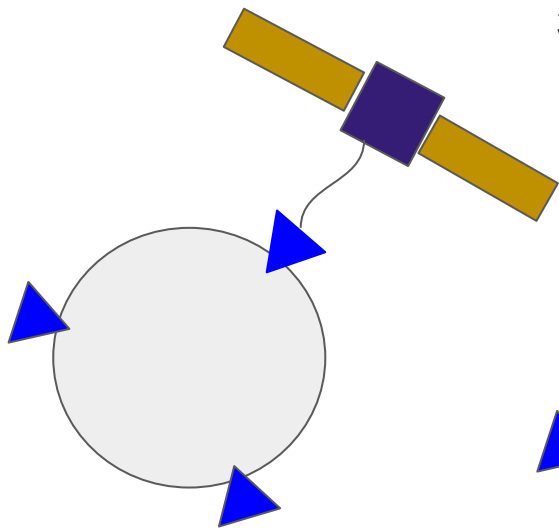
2002年発見, 少なくとも17個, 新鮮な断面がある可能性(外観+ペネトレータ)

自転速度を見積もる必要がある.

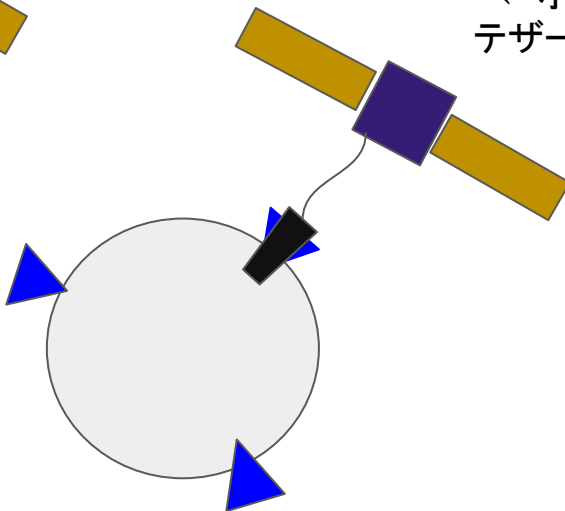
挑戦的提案

- 利点: 衝突に耐えられないセンサ類を搭載可能
信頼性を高められる(冗長性)
欠点: システムの複雑化・重量化

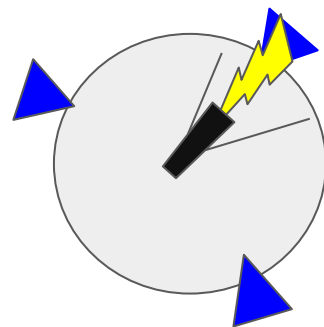
自転周期を合わせなければいけない。
←小さい彗星では難しい？
テザーの難易度。



Phase1: アンカリング
・地震計を使った計測
・衝突によるダイナミクス計測
ペネトレータ(CRAF)



Phase2: ランダ
成功したアンカ伝いに掘削装置を設置



Phase3: ドリリング
掘削装置で内部探査
(成分・層構造・分子種)

熱流量計・温度計

$T_s = 230\text{K}$ (Fillae)

Res = 0.05K Apollo

可視カメラ

惑星の大きさをもとに視野と分解能を調査

・ロゼッタをもとに決定 (10m/pixel)

ペネトレータ

利点:

通常ランダーに比べて着陸燃料が少ない.

低質量ゆえに一度に複数の機体の打ち上げが可能.

欠点:

機体にかかる衝撃が大きい. ミッションを達成した例は存在しない.

技術課題

母船/ペネトレータ間の通信系のロバスト化 / サブリメーションを起こっていないところにピンポイント着陸 /

先行例: LUNAR-A -- 月, Deep Space 2 -- 火星