

第6回衛星系研究会

火星衛星探査計画MMXの火星衛星探査計画MMXのサンプリング装置の概要と現状について

2018/8/30

宇宙航空研究開発機構

○澤田弘崇

発表内容

1. MMXサンプルリターンミッションの目標
2. MMXサンプリング装置のコンセプト
3. サンプリング装置の検討状況
4. まとめとサンプルリターンミッションの展望（私見）

MMXのミッション目的と意義（太陽系探査技術）

本計画における宇宙工学の役割は、第一義的には、惑星科学ミッションの技術的実現を図ること。加えて、宇宙工学自身の使命、「より遠くへ、より自在に」の観点から、本ミッションで獲得する**太陽系探査技術**について、目標を設定している。

1. 火星圏への往還技術および惑星衛星圏への到達技術を獲得する（**宇宙航行**）。
2. 火星衛星表面への到達技術・滞在技術および天体表面上での高度なサンプリング技術を獲得する（**ロボティクス**）。
3. 新探査地上局との組合せた高速通信技術を獲得する（**深宇宙通信**）。

1.MMXサンプルリターンミッションの目標

フォボスの起源をリモート観測とサンプル分析から**解明する**

過去の探査で培ったリモートセンシングとその場観測技術 + はやぶさシリーズで開発された**サンプルリターン技術**

⇒システムや運用の制約がある中で、**科学/工学成果を最大化する探査が重要**

⇒フォボス表面に降り立ち確実にサンプルを採取し、表面もより詳細に観測する

サンプルリターンによって、**より確実に火星衛星形成の謎を**解明することを目指す。はやぶさシリーズのヘリテージを活かし、**信頼性が高く将来ミッションに資するサンプルリターン技術の確立**

Phobos
Distance: 82,545 km
Radius: 13,920 km
Apparent diameter: 15" 38' 24.2"

2005 05 22 19:00:32 UTC
Field time: 1.1

Chase Phobos
FOV: 35° 50' 52.5" (1.00x)

1.MMXサンプルリターンミッションの目標

【理学ミッション要求】

- 複数地点から**10g/回以上**のサンプル採取
 - やぶさ2のミニマム要求0.1gに対して**100倍**の採取量要求となる
 - 採取量の増加は、はやぶさ2採取方式の見直しが必要であり、収納スペース拡張やサンプルリターンカプセルのサイズ大型化が必要
- 表層から**地下2cm**以深さを含むレゴリスを採取
 - 宇宙風化の影響が小さいサンプルを採取するために、表層だけでなく数cm地下からの採取が要求として加わった。また1000個以上のサンプルを地上で分析するために、レゴリスを必ず含んだサンプルを採取することが要求

【工学ミッション要求：高度なサンプリング技術の獲得】

- 高度なサンプリング技術とは、他天体上に着地するための誘導航法技術と、他天体上で複雑かつ難易度の高い理学要求に対応できるサンプリング技術との融合によって実現するものである
 - 将来想定されるサンプルリターンミッション、その場分析等の探査に資する技術を2020年代前半に実現し、探査手法の幅、可能性を広げることが可能なサンプリング装置の開発。
- MMXでは、はやぶさシリーズのタッチダウン（数秒の接地）時にごく少量のサンプルを採取する方式ではなく、数時間の着地中に採取場所/対象に自由度のある採取方法を実現
 - 採取場所や探査機本体への移送方法に自由度を持たせるためにマニピュレータを採用し、サンプル採取する機構部にはレゴリスから1cm程度の小石までサイズ、更には確実に地下数cm以深から採取できるコアラー機構を採用した
 - 将来のサンプルリターンミッションに資する技術の実証

2.MMXサンプリング装置のコンセプト

サンプル採取方法のトレードオフ (2016~)

◆ サンプル採取システムへのミッション要求 (理学)

- 複数の地点から10g/回以上のサンプルを採取できること
- 表層から2cm以上の深さまでを含むサンプルを採取すること
- レゴリスを含んだサンプルを採取すること

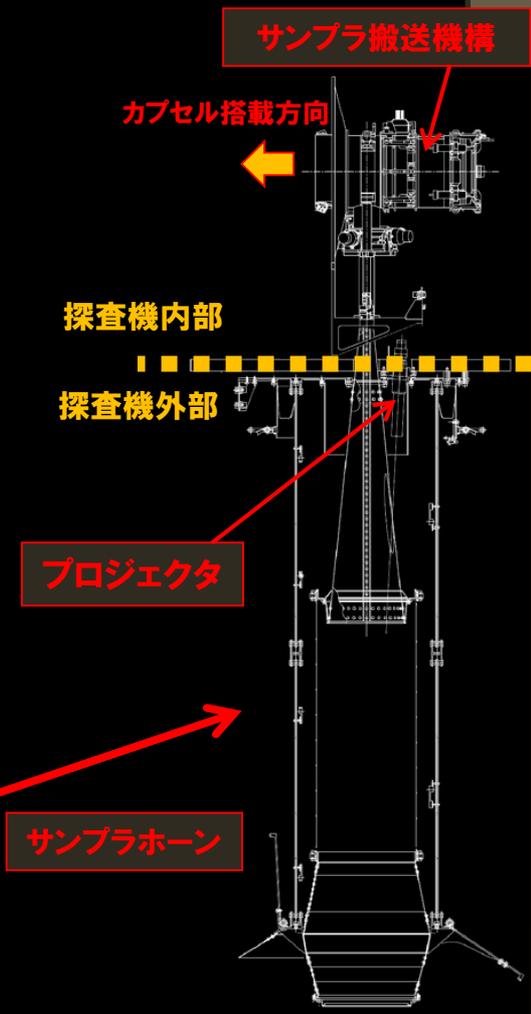
◆ はやぶさ2

**最大の特徴である弾丸方式を
MMXではそのままでは使えるか？**

- ? □ 弾丸方式によるサンプル採取技術の確立
- □ メタルシールによる高性能密閉コンテナ
- □ サンプルの捕獲とカプセルへの搬送, ラッチ・シール機構の開発

MMXサンプリング装置へ適用可能

Hayabusa2 sampling image



2.MMXサンプリング装置のコンセプト

サンプル採取方法のトレードオフ（2016～）

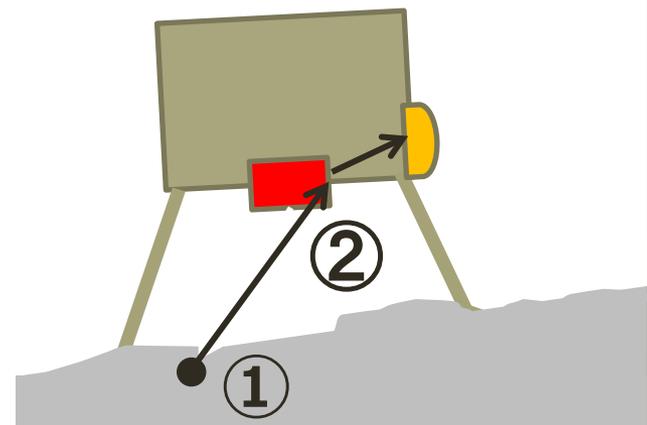
サンプリング手法のトレードオフ⇒2つの機能に分解して評価

①サンプル採取方法（火星衛星表面でのサンプル採取方法）

- 弾丸方式
- 粘着方式
- ドリル方式
- コアラー方式
- スコップ方式
- マニピュレーション方式
- ブラシ方式
- ニューマテック方式

②サンプル移送方法（表面で採取したサンプルを本体まで移動）

- 弾丸方式 + サンプラホーン
- ドリル方式(回転機構による方式)
- テザー方式
- STEM方式(伸展機構による方式)
- マニピュレーション方式(ロボットアーム等)



2.MMXサンプリング装置のコンセプト

マニピュレータ+コアラー機構方式を採用



3. サンプル装置の検討状況

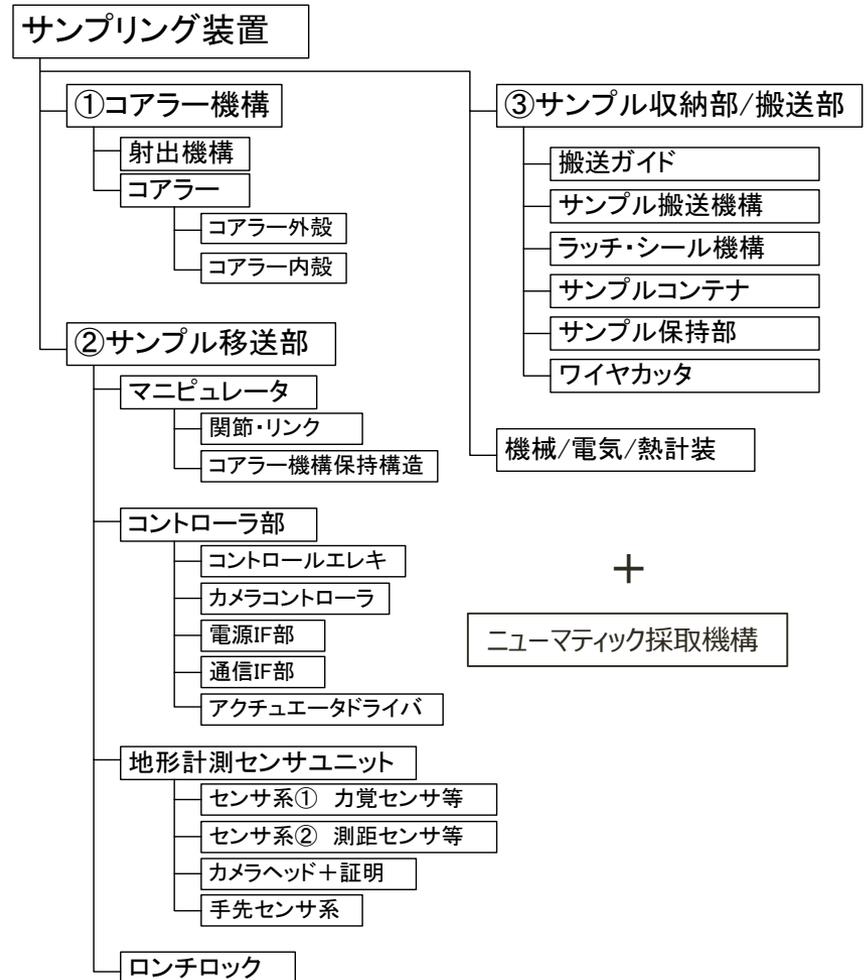
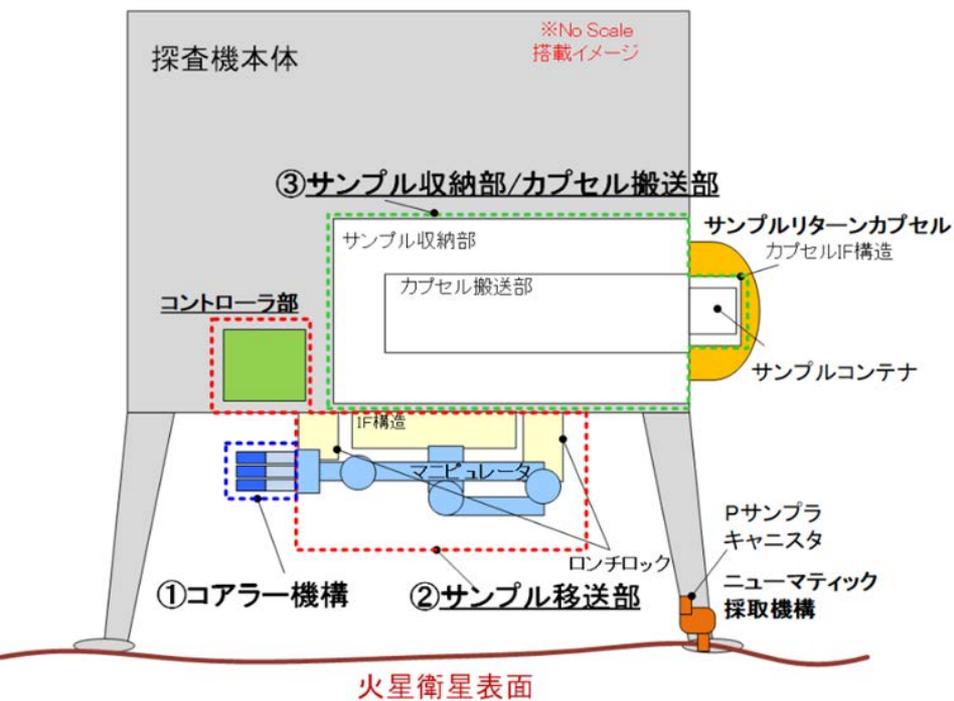
3. サンプル装置 検討状況

• 経緯と現在の状況

- JAXA内で実施したトレードオフ結果をベースに2016年後半より複数業者と概念検討を開始。
- MMXサンプル装置の中核となるマニピュレータ周り（画像，地形計測センサも含む）と制御系は複数業者に、サンプルを収納しカプセルに搬送する機構は「はやぶさ2のサンプル」開発業者に、コアラー機構は特殊アクチュエータを使って小型化することを目指し特殊技術をもった業者と検討を進めた。
- サンプル採取においてキーとなるコアラー機構については先行して2016年からBBM開発に着手し、2017年末までに基本的な動作試験は完了し、MMXとして用いるコアラー機構のコンセプトは固まった。
- サンプル収納部は、はやぶさ2の設計を踏襲するが、サイズアップが必須。リスクを識別し、大きなリスクは事前に潰すために2017年度に機能試験モデルを試作し、動作試験を実施。
- 2018年度は、ガスを利用したニューマティックサンプル採取機構を同時搭載の実現性について検討を進めている。

3. サンプル装置 検討結果

システム構成



3. サンプル装置 検討状況

● 主要諸元

合計40.5kg±数%

ID	構成部	サイズ[mm]	フットプリント [mm]	質量 [kg]	電力[W]	搭載要求
①	コアラ機構	N/A	N/A	4.0	ロンチロック解除: 10W センサ動作時 (TBD): 10W	マニピュレータ先端に固定されているためシステムへの搭載要求はなし
②	サンプル移送部			27.3	ロンチロック解除: 10W 動作時: 30W 採取時: 50W スタンバイ: 10W	
②-1	マニピュレータ	600 × 1300 × 400 (打ち上げ時)	600 × 1300	17.0	ロンチロック解除: 10W 動作時: 30W 採取時: 50W スタンバイ: 10W	-Z面(火星衛星表面方向) 外部, もしくは±X面外部 サンプル収納部の開口部にアクセスできる位置 ニューマチック採取機構にアクセスできる位置
②-2	コントローラ部	300 × 340 × 200	300 × 340	8.0	20W	探査機内部 サンプル移送部からハーネス長300mm以内の距離
②-3	地形計測センサユニット (本体系)	200 × 600 × 80	(200 × 800) 探査機搭載時には ②-1のフットプリントに含まれる	1.5	最大20W	マニピュレータと同じ面, かつマニピュレータのフットプリント内に搭載される
②-4	ロンチロック×2	100 × 100 × 150 (×3個時)	(100 × 100) (×3個) 探査機搭載時には ②-1のフットプリントに含まれる	0.8	ロンチロック解除: 30W 射出時: 10W	マニピュレータと同じ面, かつマニピュレータのフットプリント内に搭載される
③	サンプル収納部/搬送部	400 × 450 × 400	400 × 450	7.2	アクチュエータ駆動: 30W	-Z面(火星衛星表面方向) 内部, もしくは±X面内部 カプセルに直接接続する位置, カプセルと同パネルに搭載
	ハーネス・熱計装	TBD	N/A	2.0	N/A	TBD
合計質量				40.5		

3. サンプル装置 検討状況

運用イメージと前提条件

- 火星衛星表面滞在時間：150分（2.5時間） フォボスの昼間3.7時間 -1時間程度
 - サンプル運用時間：90分（1.5時間）
 - 前後の30分は探査機とサンプル装置の状態確認

- サンプル運用の内訳：
（時刻の単位は[分]）
 - (1) T=0 火星衛星表面の撮像，地形計測
 - (2) T=10 画像およびデータ転送時間（10）（通信レートは2kbpsを想定）
 - (3) T=25 片道伝搬遅延時間（15） ⇒地上にて画像および地形データを取得
 - (4) T=35 地上にて得られたデータから，どの地点のサンプルを採取するか人が判断（10）
 - (5) T=40 指定された地点からサンプルを採取するためのコマンドを作成（5）
⇒マニピュレータ先端の位置プロファイル，関節の速度プロファイル等
この際，1地点ではなく複数地点を，優先度をつけて指定
⇒コマンド発送
 - (6) T=55 片道伝搬遅延（15） ⇒探査機側でコマンド受信
 - (7) T=65 マニピュレータを指定された位置まで制御（10）
 - (8) T=70 コアラ機構を動作（5）
 - (9) T=75 マニピュレータの位置を軌道上で自律的に制御しコアラを引き抜く（5）
 - (10) T=85 マニピュレータを駆動し離脱時に安全な姿勢へ制御（10）
 - (11) T=90 サンプル装置の状態を確認し（5）

以上90分

3. サンプル装置 検討状況

地上

軌道上

※運用モード

※動作モード

運用フロー案

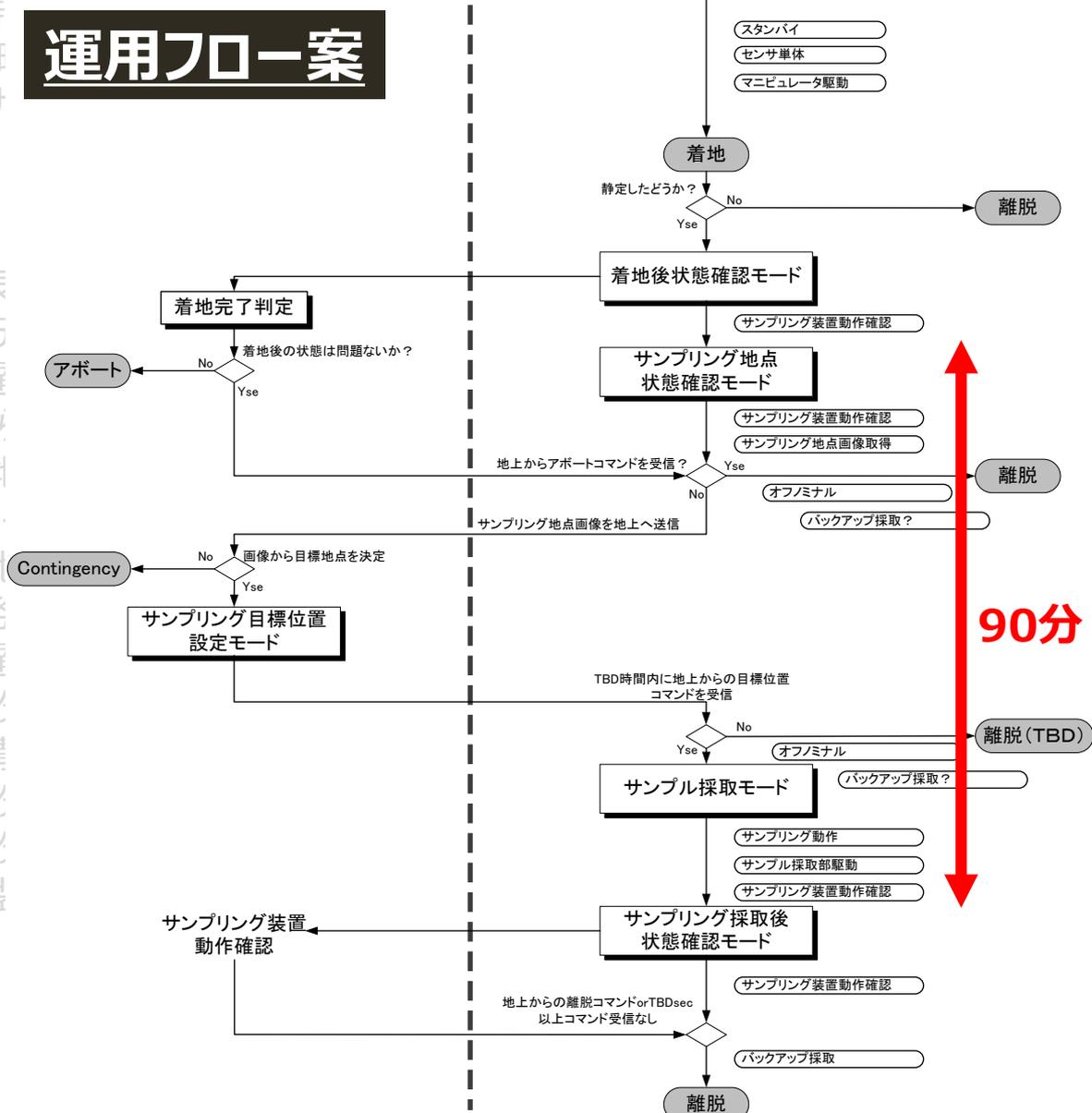
運用イメージと前提条

- 火星衛星表面滞在時間：2時
 - ▶ サンプル運用時間：1時
 - ▶ 前後の30分は探査機とサ

- サンプル運用の内訳：
(時刻の単位は[分])

- (1) T=0 火星衛星表
- (2) T=10 画像および
- (3) T=25 片道伝搬遅
- (4) T=35 地上にて得
- (5) T=40 指定された地
- ⇒ マニピュレ
- この際、1地
- ⇒ コマンド発
- (6) T=55 片道伝搬遅
- (7) T=65 マニピュレー
- (8) T=70 コアラー機構
- (9) T=75 マニピュレー
- (10) T=85 マニピュレー
- (11) T=90 サンプル装

以上90分



90分

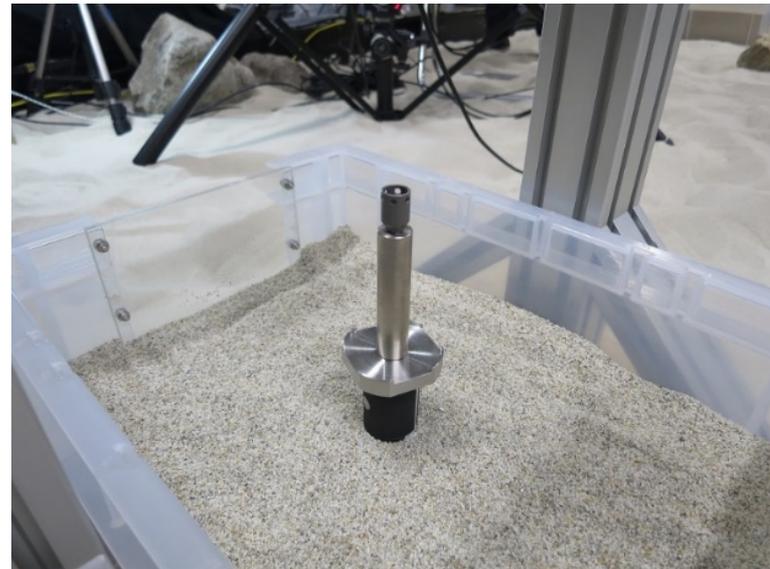
3. サンプルング装置の検討状況

3.1 コアラー機構BBM開発

3.1 コアラー機構BBM開発

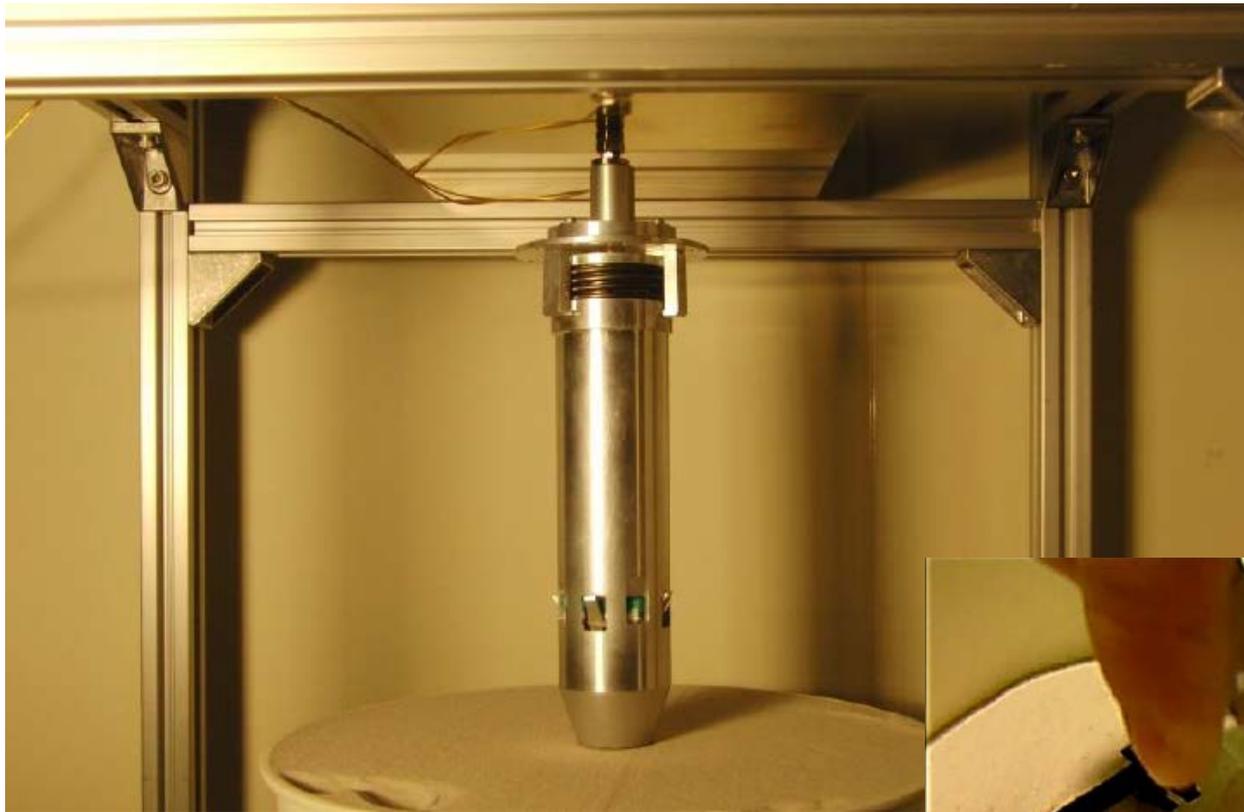
■コアラー機構の実現性を評価するために機能検証モデルを開発し、コアラー射出機構や、砂礫への貫入性能についてJAXAインハウスで基礎実験を実施(2016～)

- 珪砂4号～9号に対して、ミッション要求を満たすコアラーサイズ、射出速度、必要エネルギーの評価
- コアラー機構駆動時の発生反力の評価
- 粒径1cm程度の砂利に対する評価



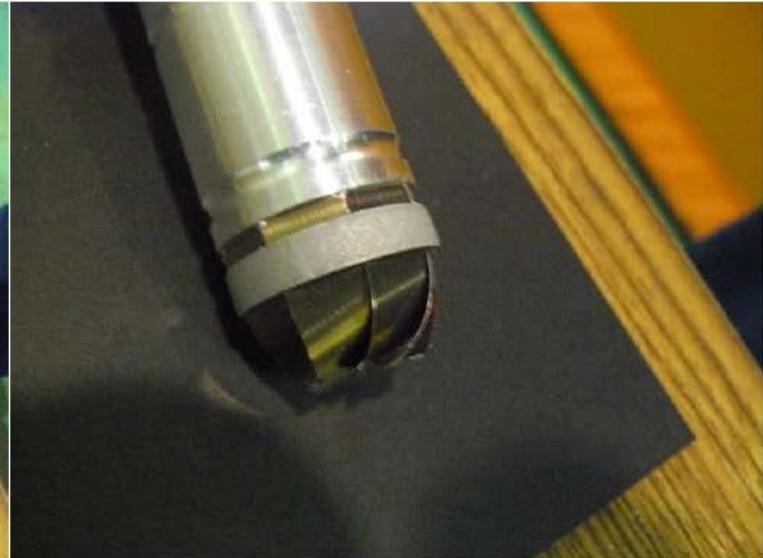
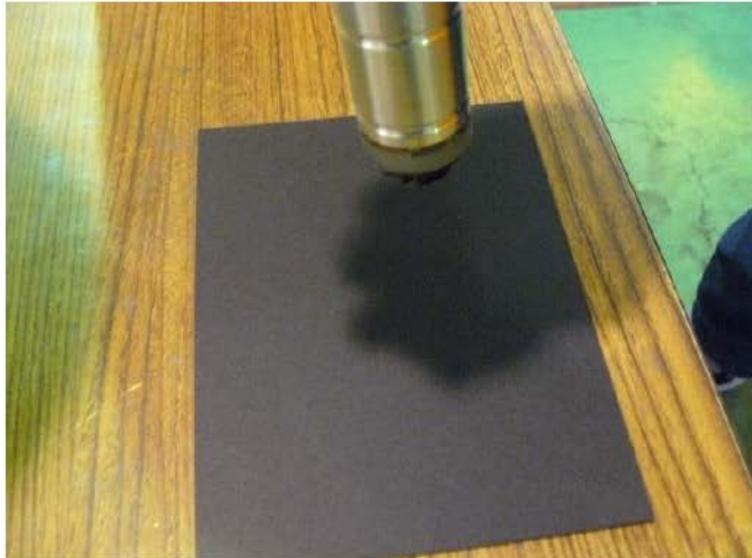
4.コアラー機構BBM開発

- BBM1開発 (2016~)



4. コアラー機構BBM開発

- BBM2開発 (2017~)

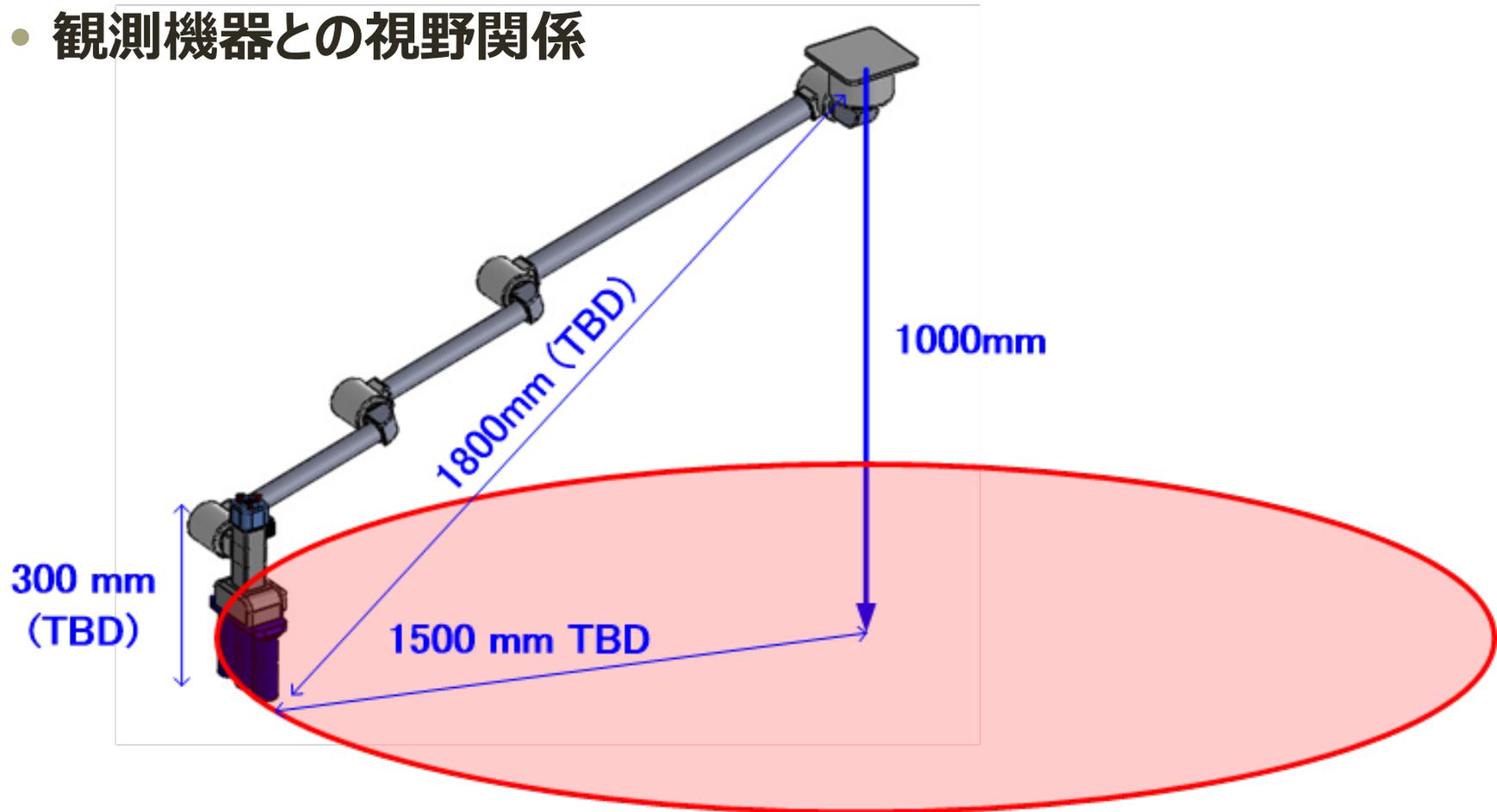


3.サンプリング装置の検討状況

3.2 マニピュレータ

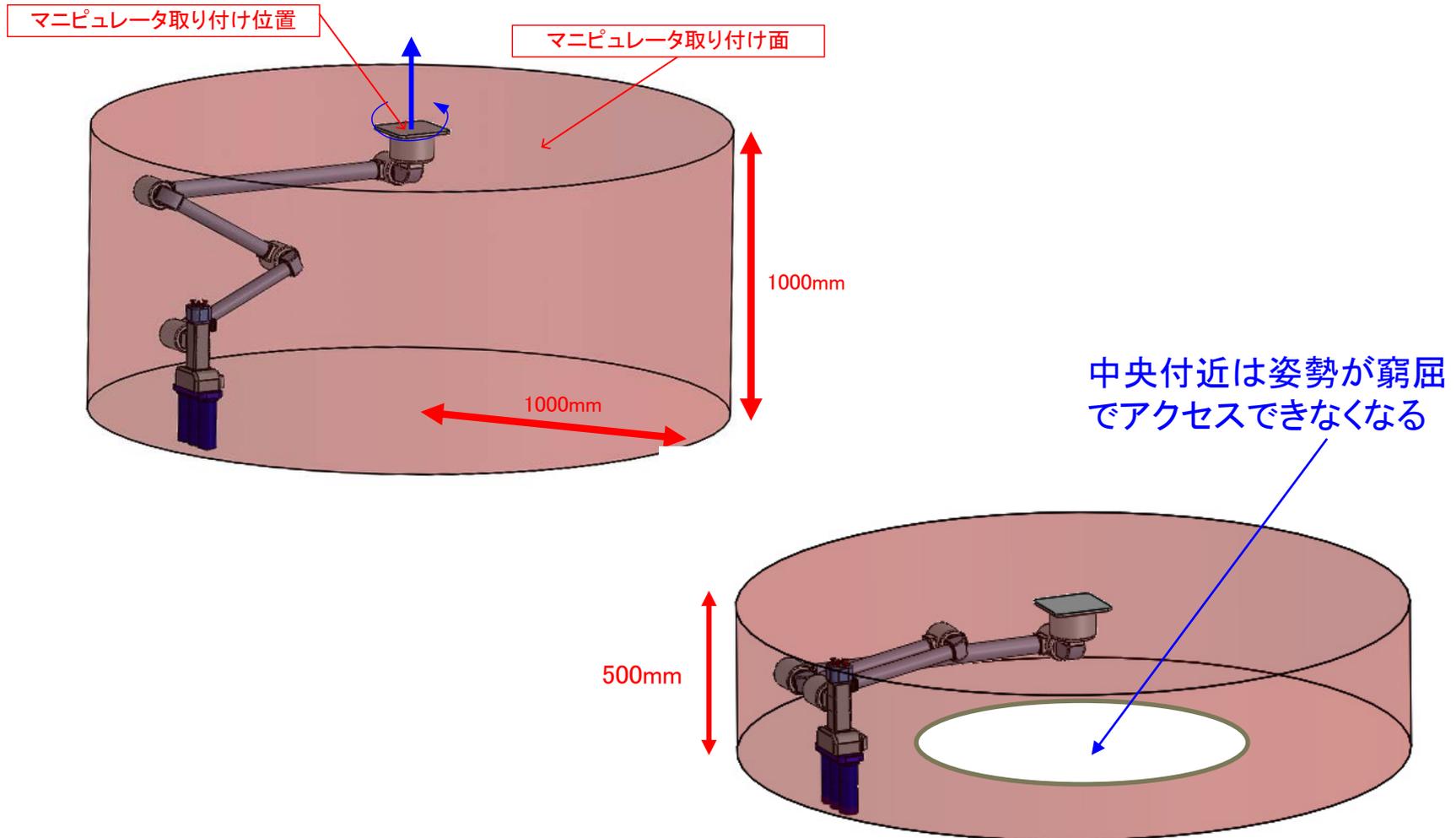
3.2 マニピュレータ

- マニピュレータ長、自由度数、自由度配置をトレードオフ
- フォボス表面へのアクセス性
- ニューマティック採取機構へのアクセス性
- 観測機器との視野関係



3.2 マニピュレータ

- フォボス表面が探査機底面から1mの場合のアクセス性
- 表面までの距離が0.5mになると窮屈な姿勢になりアクセス性は悪化

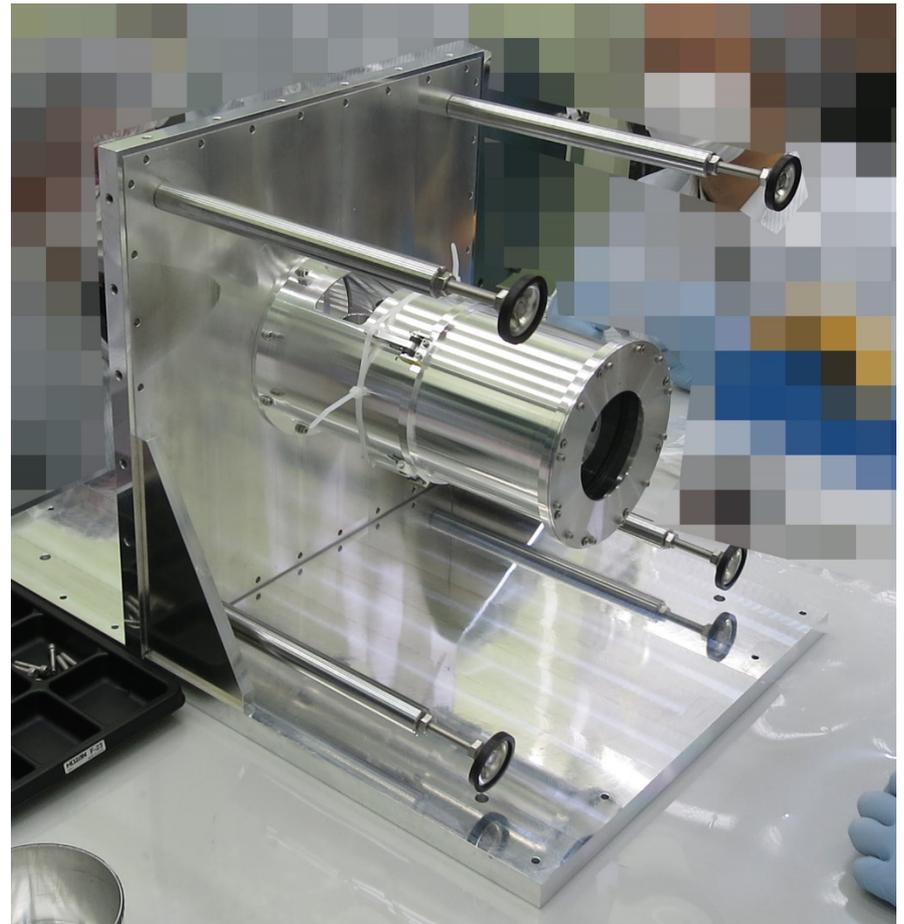


3. サンプルング装置の検討状況

3.3 サンプル収納内部/カプセル搬送部

3.3 サンプル収納部/カプセル搬送部の概念検討

- 大型化による新たな課題を抽出するために機能試験モデルを試作し、重力方向/重力垂直方向に搬送試験
- クリアランスの設計や、その他駆動部に関する問題はないことが確認できた
- カプセル側に与える衝撃が想定以上であり、新たな課題として抽出された



4.まとめ

- JAXAが検討を進めている、火星衛星探査ミッション**MMXに搭載されるサンプリング装置の概念検討の状況**について報告した
- はやぶさ2の技術ヘリテージを活かしつつ、将来の惑星探査ミッションにおけるサンプル採取、サンプルリターン技術を見据えて、汎用的に応用が可能な**マニピュレータを採用し、高度なサンプリング技術獲得**という工学ミッション要求を満たすシステムを考案、検討を進めている
- 火星衛星表面の不確定性、厳しい運用制約によるリスクを低減するためにガスを持ちいたニューマティックサンプル採取機構の実現性を検討し、同時搭載するための調整を進めている。
- サンプリング装置の中核となる、②サンプル移送部（**マニピュレータ周りと制御系**）は現在、複数業者に提案要請（RFP）を出しており、今年度中に開発業者の選定し、基本設計へ着手する。

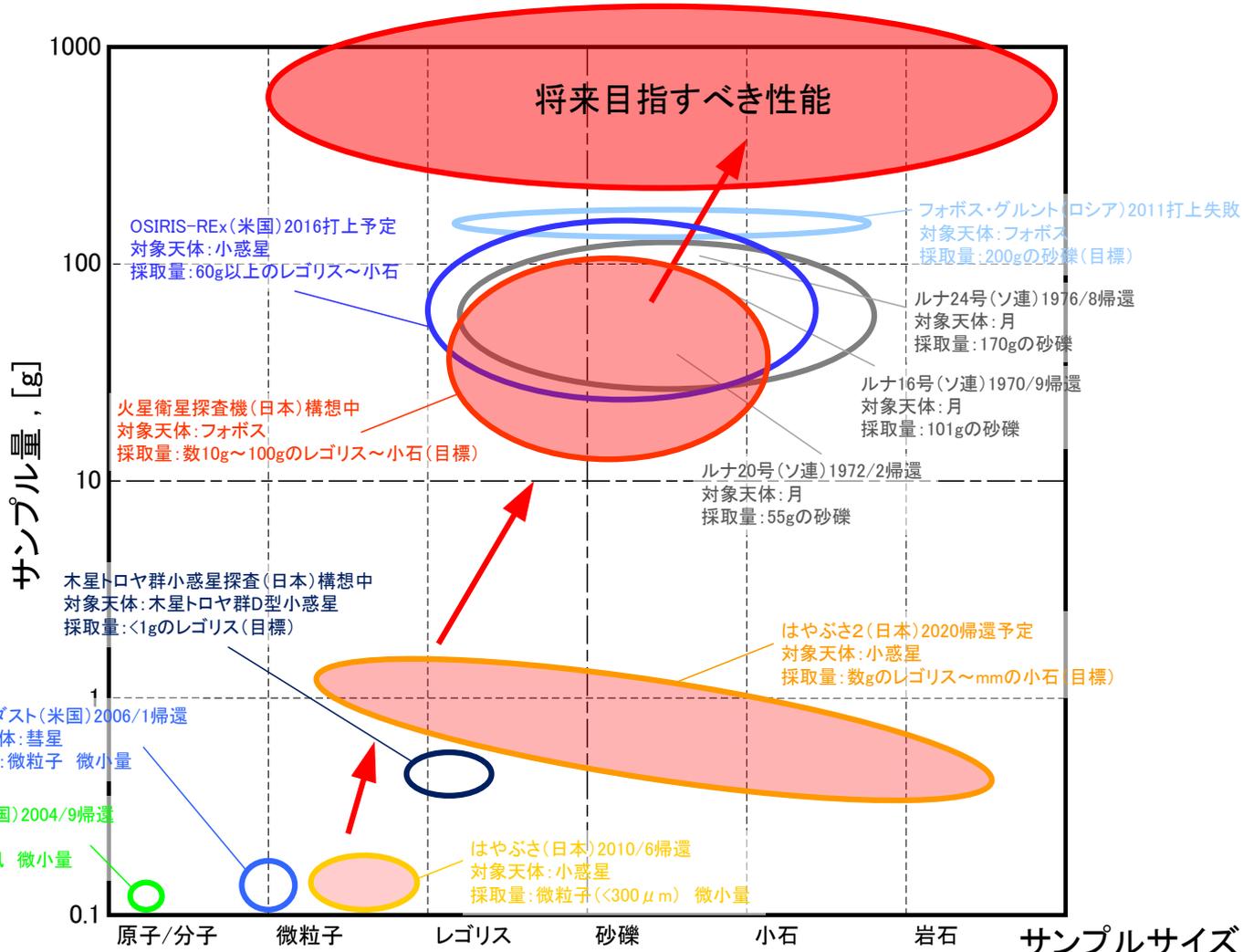
将来のサンプルリターンミッションの展望

- 過去のミッションで地球に持ち帰ったサンプル

探査機名	打ち上げ	帰還	サンプル量 [g] (計画値含む)	天体	名前	サンプル種別
ルナ16号	1970/9/12	1970/9/24	101	月	-	レゴリス～砂礫
ルナ20号	1972/2/14	1972/2/25	55	月	-	レゴリス～砂礫
ルナ24号	1976/8/9	1976/8/22	170	月	-	レゴリス～砂礫
スターダスト	1999/2/7	2006/1/15	0.1以下	彗星	ヴィルト第2	微粒子
ジェネシス	2001/8/8	2004/9/8	0.1以下	太陽風	-	微粒子(太陽風)
はやぶさ	2003/5/9	2010/6/13	0.1以下	小惑星	イトカワ	微粒子
フォボス・グレント	2011/11/9	打上失敗	200	火星衛星	フォボス	レゴリス～砂礫
はやぶさ2	2014/12/3	2020予定	0.1g以上	小惑星	リュウグウ	レゴリス～小石
OSIRIS-REx	2016/9/3予定	2023予定	60g以上	小惑星	ベンヌ	レゴリス～小石
火星衛星探査機	2024計画中		10以上	火星衛星	フォボス	レゴリス～小石

将来のサンプルリターンミッションの展望

- 目標とする性能
- サンプル量の増加と多様化



将来のサンプルリターンミッションの展望

- サンプルリターンカプセルへの要求（要望）

探査機名	直径	質量	リエントリ速度
はやぶさ	400	16.3	12.1
はやぶさ2	400	16.3	11.7
スターダスト	800	45.8	12.8
ジェネシス	1520	225	11.0
OSIRIS-REx	800	45.8	12.2
アポロ(参考)	3900	5560	10.0

