

火星の表層環境・気候の進化 の解明

ポテトチーム ～ 火星 de かき氷 ～

大熊成裕
芝池諭人
小澤祐亮
宮田洋佑



目次

1. ミッション定義
2. ミッション要求
3. システム要求
4. システム配分
5. システム設計
6. 結論

1. ミッション定義

1-1. トップ目標

火星の現在と過去の生命居住可能性の解明

1-2. 探査の目的

火星の極冠を調べて、火星の表層環境・気候の進化を理解する

1-3. 貢献（アウトカム）

極冠の氷層の性質を理解し、

- 関連する火星固有の惑星科学を解明する
- 有人探査に向けた火星移住への情報を収集する
- 地球の惑星科学や、地球温暖化問題などへ応用する

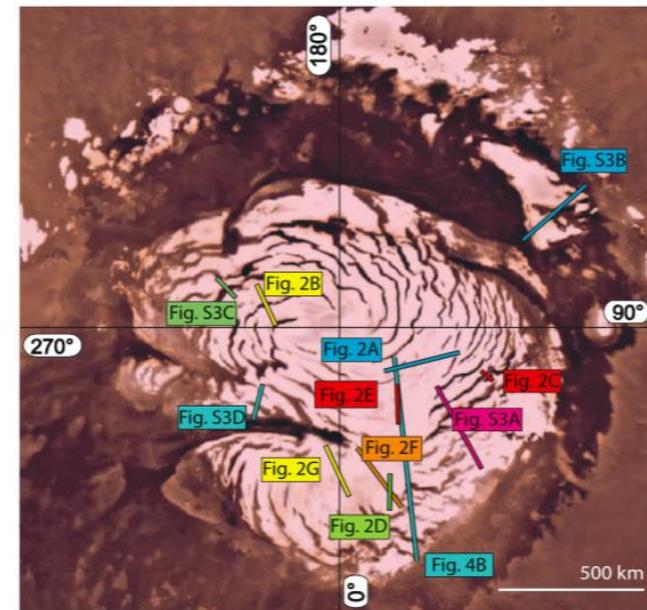
2. ミッション要求

2.1 ミッション定義からのブレイクダウン

2.1.1 探査場所

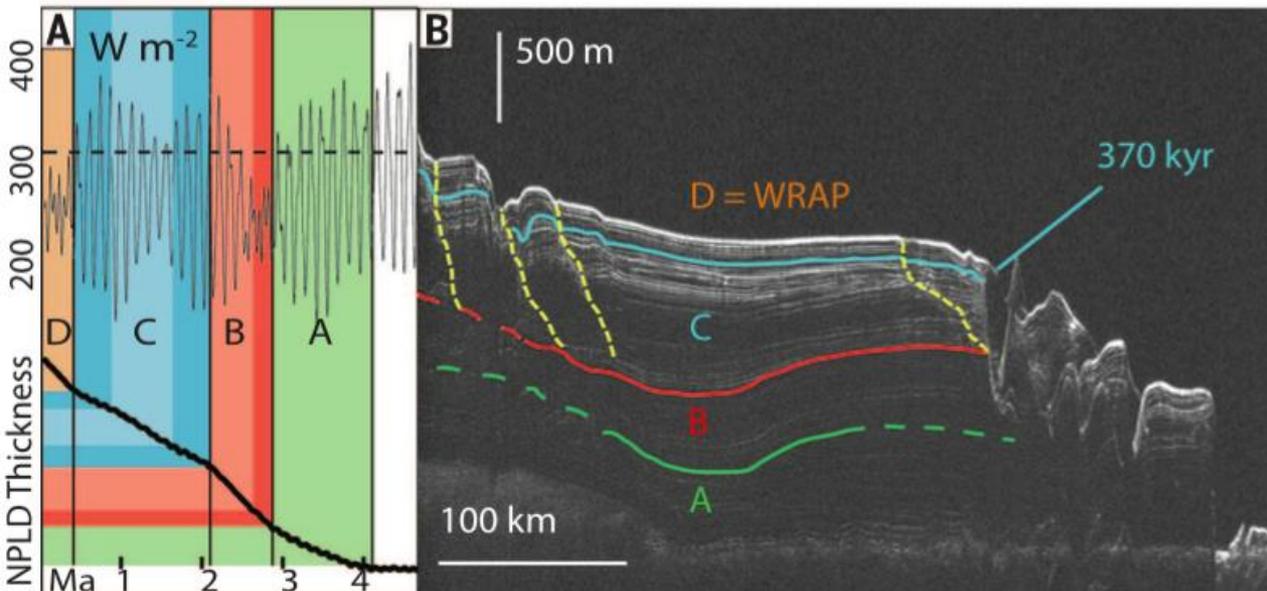
North Polar Layered Deposits

- 北極(夏が白夜、冬が極夜)
- 差し渡し約1000kmのH₂O氷
- 縞状の谷
- 毎年収縮を繰り返す
- 冬にはCO₂雪が1.5-2m積もる



(Smith et al. 2016)

SHARAD (Shallow Rader)による観測：北極氷の層状構造



- 積層と浸食の繰り返しを記録した、層状の氷
- 400万年ほどかけて形成
- 37万年前は前回の氷河期の終わり

(Smith et al. 2016)

2. ミッション要求

2.1 ミッション定義からのブレイクダウン

2.1.2 具体的な観測対象とそこから得られる情報

- 氷床(H₂O, CO₂)の組成比・同位体比
 - CO₂存在比 → 各年代での表層にあったCO₂の大気量や循環への制約
 - Oの同位体比 →
 1. 温度の推定
 2. 火星隕石と現在の火星の酸素同位体比のズレへの示唆
 - Cの同位体比 → 生命存在の証拠
 - N₂, Ar の存在量 → 生命を構成する元素などの存在量
- 氷に含まれているダストの種類(形状、組成)、年代
 - 各年代の表層環境への示唆(地表面の岩石種、海の有無、風の強さ、火山)
 - ダスト含有気体の組成 → 大気量、組成への示唆
 - 有機物の有無
- 現在の大気諸元・CO₂雪
 - 現在の表層環境
 - 降雪の仕組み

2. ミッション要求

2.2 ミッションサクセスクライテリア

➤ フルサクセス：

北極氷床中のCO₂の存在比、Oの同位体比、観測位置を調べることで、同じ氷期サイクル内の年代と気温が推定可能なデータを複数箇所取得

No	項目	条件	根拠
1	探査場所	北極の斜面	様々な年代の観測が可能
2	探査範囲	2km以上	後述
3	サンプリング箇所	80m間隔で25点以上	後述
		地表（H ₂ O氷）面下100mm	H ₂ O氷床の成長速度が1mm/年 → 十分な厚さ
4	サンプリング対象	H ₂ O氷	前述
		閉じ込められたCO ₂	前述
5	サンプリング量	1g	O同位体比の測定に必要 (他の測定値への制約は今後の課題)
6	探査期間	夏（半年）	火星の新雪が無い期間
7	観測データ取り扱い	すべての取得データを地球に送信可能	すべての取得データを解析・分析するために必要

2. ミッション要求

2.2 ミッションサクセスクライテリア

———目標精度———

- 年代の間隔：1.5万年

火星の気候変動に影響を与える火星の日射量変化の周期：7万年（伊藤2004）

→ 周期を分解可能：1.5万年

- 年代の期間：37万年

前回の氷河期の終わり：37万年前（モデルに依存する）

———計測精度———

- 最小移動距離：2km

氷期37万年の層が斜面約2kmに相当

- サンプル間隔：約80m間隔

約7万年の周期 → 約1.5万年ごとに判別可能

氷期37万年の層が斜面約2kmに相当 → 1.5万年の層が水平80m相当

- サンプル回数：25回

2. ミッション要求

2.2 ミッションサクセスクライテリア

➤ エクストラサクセス：

1. 北極氷床中のCO₂の存在比、Oの同位体比、観測位置を調べることで、別氷期サイクル内の年代と気温が推定可能なデータを得る

1. フルサクセスに必要な機器で可能な他の測定
 - 質量分析計を使った、N₂など（リン、硫黄）など生命を構成する元素の存在量
 - 質量分析計（orレーザースペクトロメーター）を用いたCの同位体比（H₂O氷サンプラーによるCO₂氷のサンプリング）
 - ランダーのカメラによる初雪観測（最高解像度1.5mm、探査機が秋～冬まで保った場合）
 - （質量分析系を使った、宇宙塵を構成する元素の存在量）

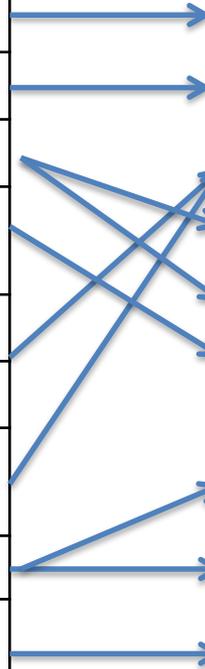
- ・ オプション：新たに計測機器を追加搭載して可能になる他の測定
 - ガスクロマトグラフィーを用いた有機物量の測定
 - X線回折によるダストの測定

3. システム要求

ミッション要求を受け、システム要求を以下表に整理した。

No	項目	条件
1	探査場所	北極の斜面
2	探査範囲	2km以上
3	サンプリング箇所	80m間隔で25点以上
		地表 (H2O氷) 面下100mm
4	サンプリング対象	H2O氷
		閉じ込められたCO2
5	サンプリング量	1g
6	探査期間	夏 (半年)
7	観測データ取り扱い	すべての取得データを地球に送信可能

No	システム要求
A	北極目標地点に10km×10km精度で軟着陸可能な機能を持つ
B	探査機が2km以上の探査が可能である
C	左記を観測可能なミッション機器を搭載
D	探査箇所が同定可能であること
E	多点観測が可能である
F	探査機が氷を掘ることが可能なサンプラを有する
G	探査機の寿命が北極において火星年半年である
H	夏に着陸する
I	ミッションデータを探査機が地上システムへ送信可能である



3. システム要求

3.1 観測のために必要なミッション機器

No	項目	質量	用途
1	QMS（レーザー込み）	7kg	O同位体比の測定
2	LIBS（QMSのレーザー使用）	3kg	CO2の存在量の測定
3	サンプラー（ドリル・マニピレーター・サンプル容器）	5kg	<ul style="list-style-type: none">サンプル（氷）を掘り出し取得する掘り出したサンプルをローバー本体に移動する
4	サンプルハンドリング機構	5kg	サンプル、サンプル容器、ドリルを取り替える
	合計	20kg	

4. システム配分

(前提)

- 打ち上げロケット:H2-A 202型
- 打ち上げ能力:4000kg以内(GTO投入前提)

(探査機的主要機能配分)

□ 着陸機

1. 地球～火星への航行
 2. 月面への軟着陸
 3. ローバと地上システムの通信中継
 4. ローバの相対位置航法
- (着陸機の位置を基準に火星上の進んだ距離)

□ ローバ

1. 氷層を広く(2km以上)探査
2. サンプルを採取する
3. サンプルの観測データを着陸機/地上へ送信

(質量配分)

- 探査機(WET):2200 kg

No	質量配分項目		kg	仮定
1	キックモータ(GTOから火星までの必要推薬量)		1000	・Mars Pasthfinderでの必要推薬量と同じと仮定 (探査機総質量が近いので、仮定は妥当)
2	着陸機	a.地球～火星までの航行に必要なバス機器 (SAP, 推進, 構造, アンテナ, 熱・計装等)	230	・火星探査機のぞみのバス部重量230kgを想定すれば十分より
		b.カプセル+火星突入から着陸までに必要な推薬量	570	・Mars Pasthfinderの実績:570kgより
		d.着陸機に必要なバス機器 (aとは別のSAP,推進, 構造, アンテナ, 熱・計装等 +着陸脚, 姿勢制御系, 着陸誘導系, OBC, 電源系, 通信系)	200	・Mars Pasthfinderの実績:200kgより
3	ローバ		200	・総質量をミッション機器の10倍と仮定(MSLの実績) ・ミッション機器をQMS:7kg, レーザスペクトロメータ:3kg, サン プラー:5kg, サンプルハンドリング機構:5kgの合計20 kgと仮定
4	総計		2200	

5. システム設計

5.1 コンフィグレーション検討

5.1.1 探査機構成(1/2)

ローバと着陸機の組み合わせ、及び、周回機の有無についてトレードオフを実施し、「着陸機+ローバ型の周回機無し」のコンフィグレーションとした。

評価基準

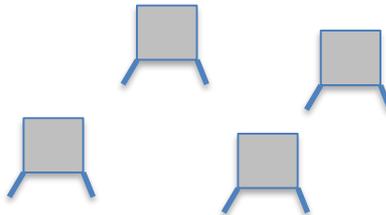
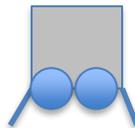
◎ (2点) : 他と比べて一番良い

○ (1点) : 他に良い候補があるが十分実現可能である。

△ (0点) : 劣っている部分が多いが実現不可能ではない

× (-1点) : 一番劣っている、もしくは、実現が難しい

着陸機とローバの組み合わせトレードオフ

項目	着陸機 + ローバ	着陸機 多数	ローバのみ
概要	着陸機能と表面走行機能を分離 	多数の着陸機を用意する 	ローバに着陸機構を設ける 着陸時  走行時 
重量	○ 「ローバのみ」より劣るが、現実可能である	× 探査箇所が多いため、重量が莫大になる	◎ ローバ1機で良いため、一番軽い
開発費	○ 2機分の費用が必要であるが、設計次第で実現可能	× 探査機が多く必要なため、費用も莫大になる。	◎ バス機器が共通に出来て、コストが一番低い
設計制約	◎ 着陸機とローバ個々で設計可能なため制約条件は少ない	○ クリティカルなものは無い	△ 軌道上と惑星上で各サブシステムを共通設計にする必要があり、制約条件が多い。
実績	◎ 多くの実績あり、SLIMの着陸・ローバ展開システム技術を使用可能	◎ 左と同様	△ 新規開発要素（新機構や共通設計思想）が多く、実績が無い
総合点数	6点	1点	4点

5. システム設計

5.1 コンフィグレーション検討

5.1.1 探査機構成(2/2)

評価基準

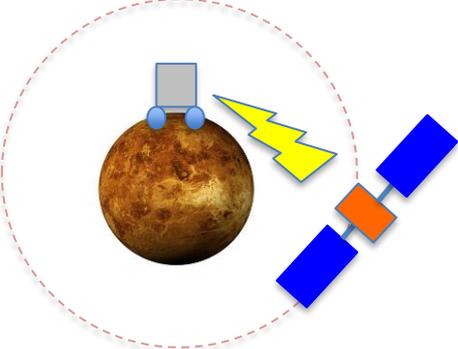
◎ (2点) : 他と比べて一番良い

○ (1点) : 他に良い候補があるが十分実現可能である。

△ (0点) : 劣っている部分が多いが実現不可能ではない

× (-1点) : 一番劣っている、もしくは、実現が難しい

周回機の有無 トレードオフ

項目	周回機無し	周回機有り
概要	火星上の探査機のみで探査 	火星上の探査機と協調探査可能 
質量	◎ 周回機1機分の質量が削減可能であり、ミッション系や冗長系に配分可能	△ 周回機1機分重い
可視	○ 右よりも可視は少ないが、地上システムの個数と運用で大きな問題無し	◎ 周回機を中継することで可視時間・回数が多い
航法	◎ 着陸時の絶対航法と移動中の相対航法を組み合わせることで、十分システム要求の位置同定可能	◎ 周回機との電波航法で地上システムの位置同定が可能
開発費	◎ 周回機分の開発費が削減可能	△ 周回機1機分の開発費必要
総合点数	7点	4点

5. システム設計

5.1 コンフィグレーション検討

5.1.2 着陸機(1/3)

着陸機システムへの要求整理

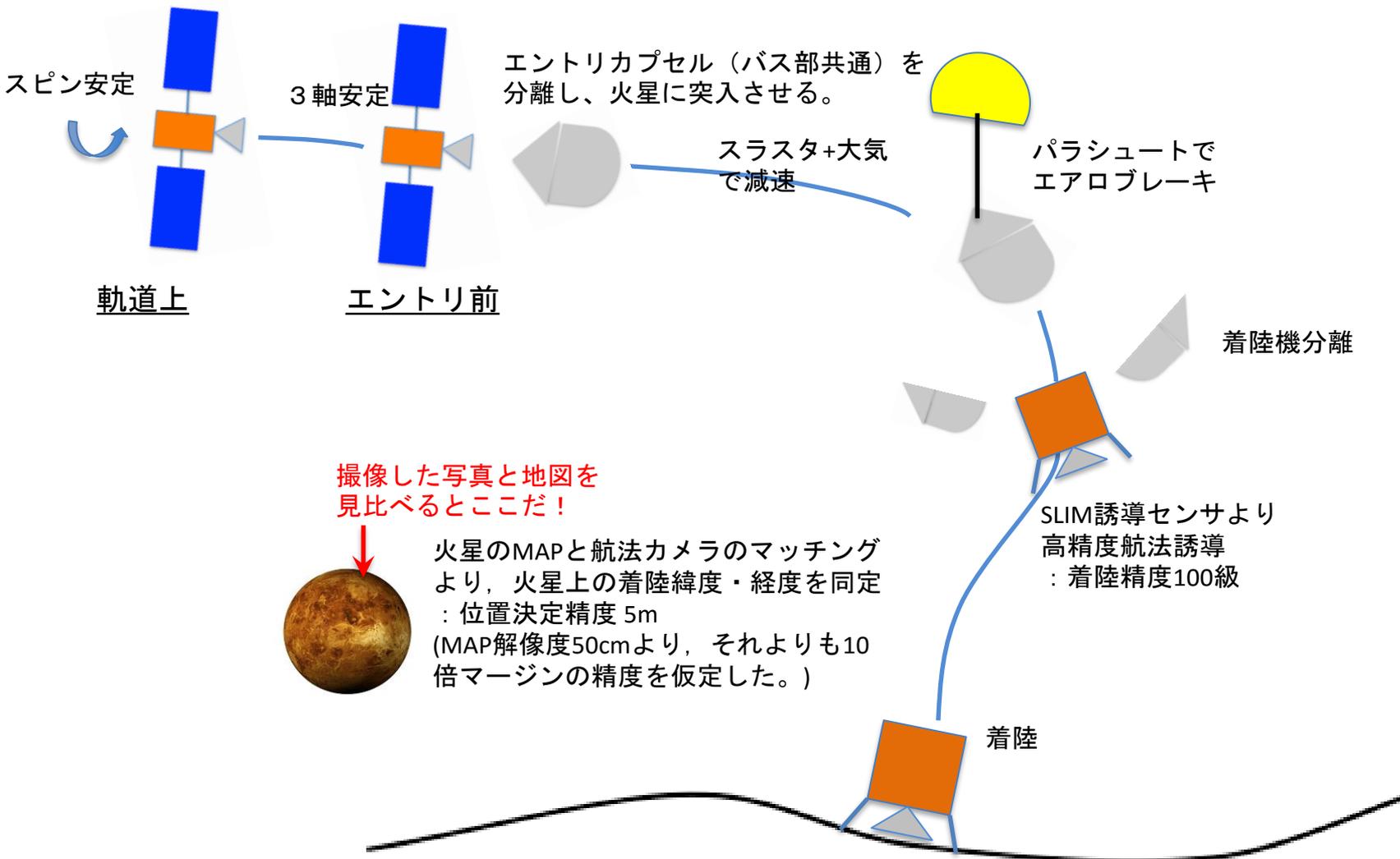
No	システム要求項目	適用	着陸機システムでの設計 (サブシステムへの影響)
A	北極目標地点に10km×10km精度で軟着陸可能な機能を持つこと	○	(姿勢制御系) : ・火星まで: スピン安定制御 ・火星エン트리直前: 3軸姿勢制御 (着陸航法誘導制御系) : ・SLIMと同程度の航法誘導センサ及び制御システムを搭載 (構造系) : ・SLIMと同様の着陸脚型 ・エントリカプセル(主構造)を搭載 ・パラシュートを搭載
B	探査機が2km以上の探査が可能であること	-	-
C	ミッション観測対象を観測可能なミッション機器を搭載のこと	-	-
D	探査箇所が同定可能であること	○	(ローバ航法誘導系) ・着陸機の絶対航法とローバの相対航法を組み合わせた同定方法を採用
E	多点観測が可能であること	-	-
F	探査機が氷を掘るサンブラを有すること	-	-
G	探査機の寿命が北極において火星年半年であること	○	(太陽電池パドル系) ・パドルを鉛直横向きに倒し、太陽方向を追従するパドル機構システムを採用 (熱制御系) ・着陸脚と本体をFRP素材で伝導断熱し、本体の下面はMLIで輻射断熱する方式を採用
H	夏に着陸可能のこと	○	(軌道制御系) ・のぞみ同等の化学推進系を使用し、夏に着陸可能な打ち上げウィンドウを設定
I	ミッションデータを探査機が地上システムへ送信可能であること	○	(通信系) ・多数実績のあるミッションデータをXバンド、HKデータをSバンド通信方式とし、着陸姿勢に依存しないように回転機構を採用。
J	氷のままサンプル採取可能である	-	-

5. システム設計

5.1 コンフィグレーション検討

5.1.2 着陸機 (2/3)

着陸シナリオを下図に示す。

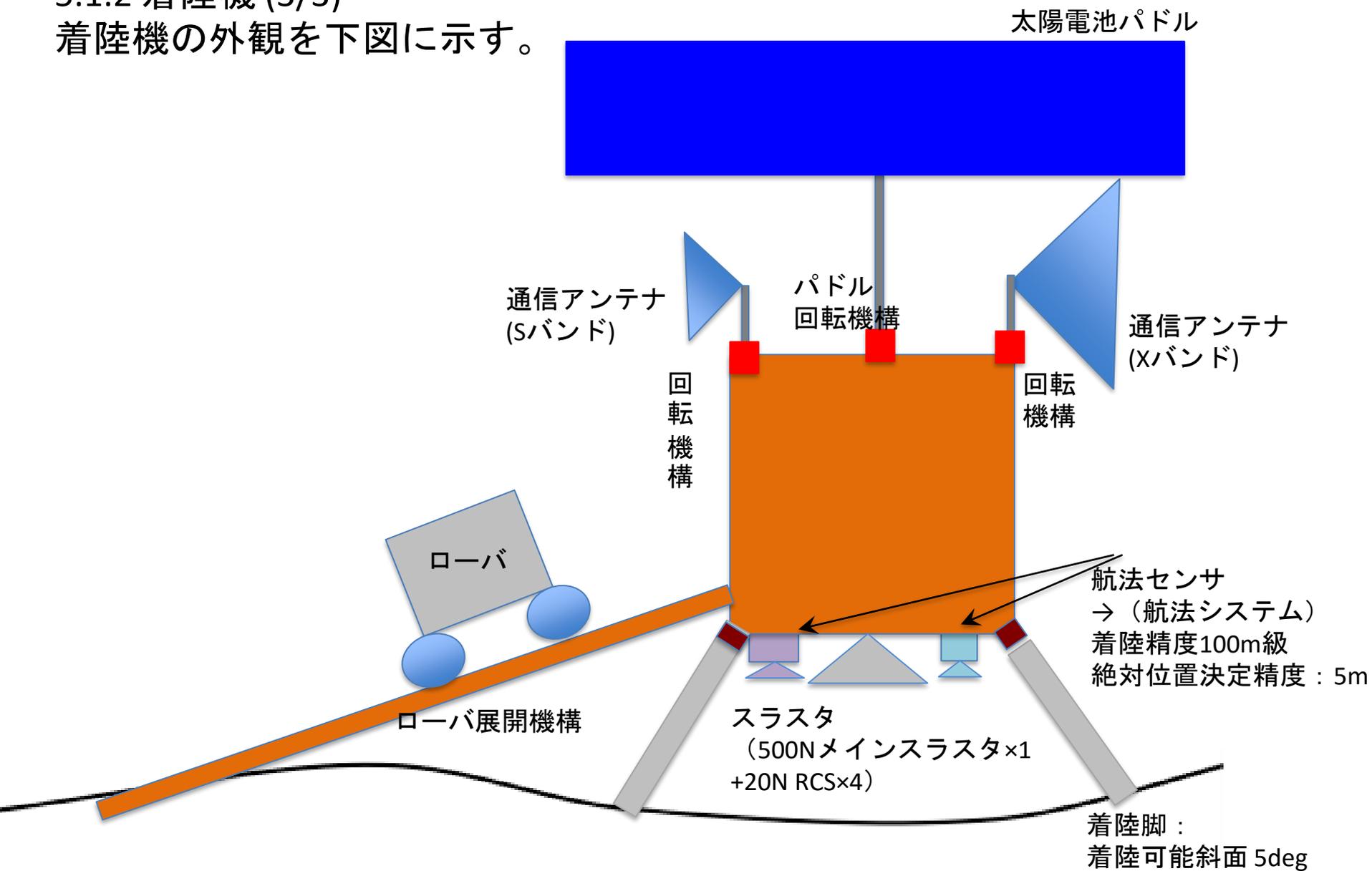


5. システム設計

5.1 コンフィグレーション検討

5.1.2 着陸機 (3/3)

着陸機の外観を下図に示す。



5. システム設計

5.1 コンフィグレーション検討

5.1.3 ローバー(1/6)

ローバシステムへの要求整理

No	システム要求項目	適用	ローバシステムでの設計 (サブシステムへの影響)
A	北極目標地点に10km×10km精度で軟着陸可能な機能を持つこと	—	—
B	探査機が2km以上の探査が可能であること	○	(移動機構系) ・トレードオフの結果、クローラ型を採用
C	ミッション観測対象を観測可能なミッション機器を搭載のこと	○	(ミッション系) ・要求ミッション機器を搭載する。
D	探査箇所が同定可能であること	○	(ローバ航法誘導系) ・着陸機の絶対航法とローバの相対航法を組み合わせた同定方法とする。
E	多点観測が可能であること	○	(移動機構系) ・Bと同様
F	探査機が氷を掘るサンプルを有すること	○	(サンプラー) ・表面から100mm下の氷を溶かさずに採取可能なパイプ型ドリルを搭載
G	探査機の寿命が北極において火星年半年であること	○	(太陽電池パドル系) ・パドルを鉛直横向きに倒し、太陽方向を追従するパドル機構システムとする。 (熱制御系) ・車輪と本体をFRP素材で伝導断熱し、本体の下面はMLIで輻射断熱する。
H	夏に着陸可能のこと	—	—
I	ミッションデータを探査機が地上システムへ送信可能であること	○	(通信系) ・多数実績のあるミッションデータをXバンド、HKデータをSバンド通信とする。
J	氷のままサンプル採取可能である	○	(サンプラー) ・表面から100mm下の氷を溶かさずに採取可能なパイプ型ドリルを搭載

5. システム設計

5.1 コンフィグレーション検討

5.1.3 ローバー(2/6)

評価基準

◎ (2点) : 他と比べて一番良い

○ (1点) : 他に良い候補があるが十分実現可能である。

△ (0点) : 劣っている部分が多いが実現不可能ではない

× (-1点) : 一番劣っている、もしくは、実現が難しい

移動機構トレードオフ

項目	車輪型	クローラ型	多脚型
走破性	△ スリップが多い × 斜面が登れないリスク高	◎ 走破性が高い(地球上での氷上実績あり)	◎ 走破性が良い
質量	◎ 重くなり	△ 構成が複雑で重い	△ アクチュエータ数が多く重い
速度	△ 氷の上では不明	◎ 惑星ローバの移動速度は氷上でも実現可能性高	△ 作動に時間がかかる
寿命	◎ 長い	○ 車輪ほどは長くない	△ アクチュエータ作動回数が多く故障リスク高
総合点数	3点	5点	2点

サンプラートレードオフ

項目	先端鋭角型	ホール型	融解型
電力	◎ 特に問題ではない	◎ 特に問題ではない	△ ヒーター熱に非常に電力を使用
実績	○ 案は存在する	◎ 地球上の北極であり	○ 案は存在する
寿命	△ 30か所以上取るので、先端が摩耗する恐れあり	◎ ホール型に歯が付いており摩耗しにくい	△ 自身も熱くなるので電子機器の温度環境が激しい
サンプル	◎ 要求通り採取可能	◎ 要求通り採取可能	× CO2が採取できない
総合点数	5点	8点	1点

5. システム設計

5.1 コンフィグレーション検討

5.1.3 ローバー(3/6)

下表に、ドリルについてトレードオフした。

評価基準

○ (1点) : 優

× (0点) : 劣

ドリルトレードオフ

項目	マニピュレータ型	直下型
逆トルクへの反動	×アームの耐久力に依存するので、頑丈なアームが必要	○車体の重心に近いので、安定
破片の散乱	○車体からある程度距離があるので安定	×車体下部に直撃する可能性がある
移動中の機器保管	○車体上部は障害物の影響を受けないので安全	×斜面の凹凸に依存する
採集の自由度	○車体の移動可能範囲よりも広範囲で自由度が高い	×車体の侵入可能な領域に限られる
重量	×アームの分重量がある	○パイプドリル分だけに限られる
機構の開発/	○多くのローバで実績がある	×完全に新規
操作の簡易性	×関節が多く複雑	○必要なのはサンプルと観測機のインタフェース部分に限られる
点数	4点	3点

5. システム設計

5.1 コンフィグレーション検討

5.1.3 ローバー(4/6)

下表に、ローバーの外観図を示す。

カメラ×2, LRF

→地形を見て着陸地点から
相対的にどれだけ進んだか
1m精度で位置決定

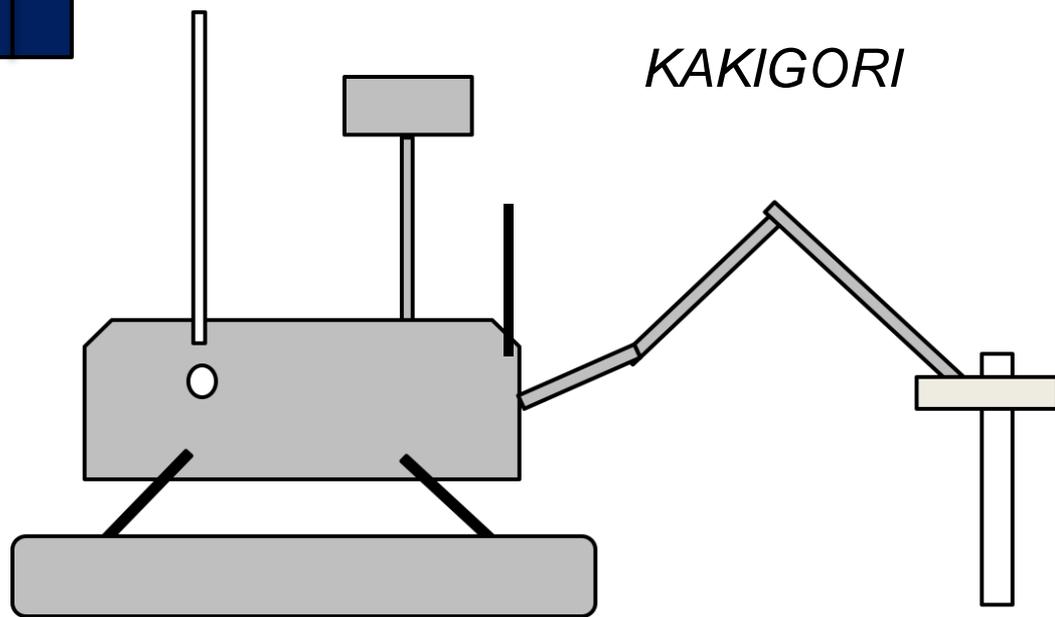
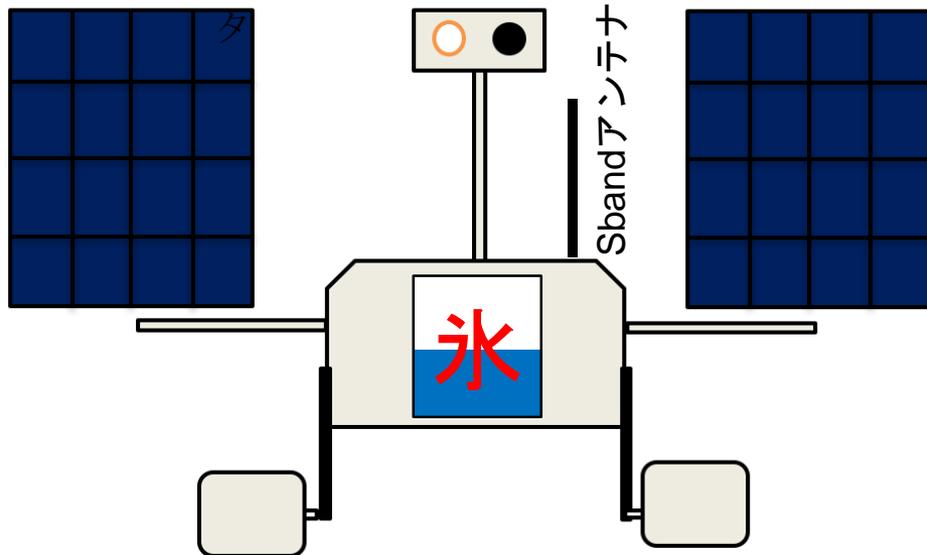
SAP

Sbandアンテナ

KAKIGORI

クローラ :

- ・ 移動速度 30m/h
- ・ 表面をギザギザにして、氷との摩擦係数を上げる

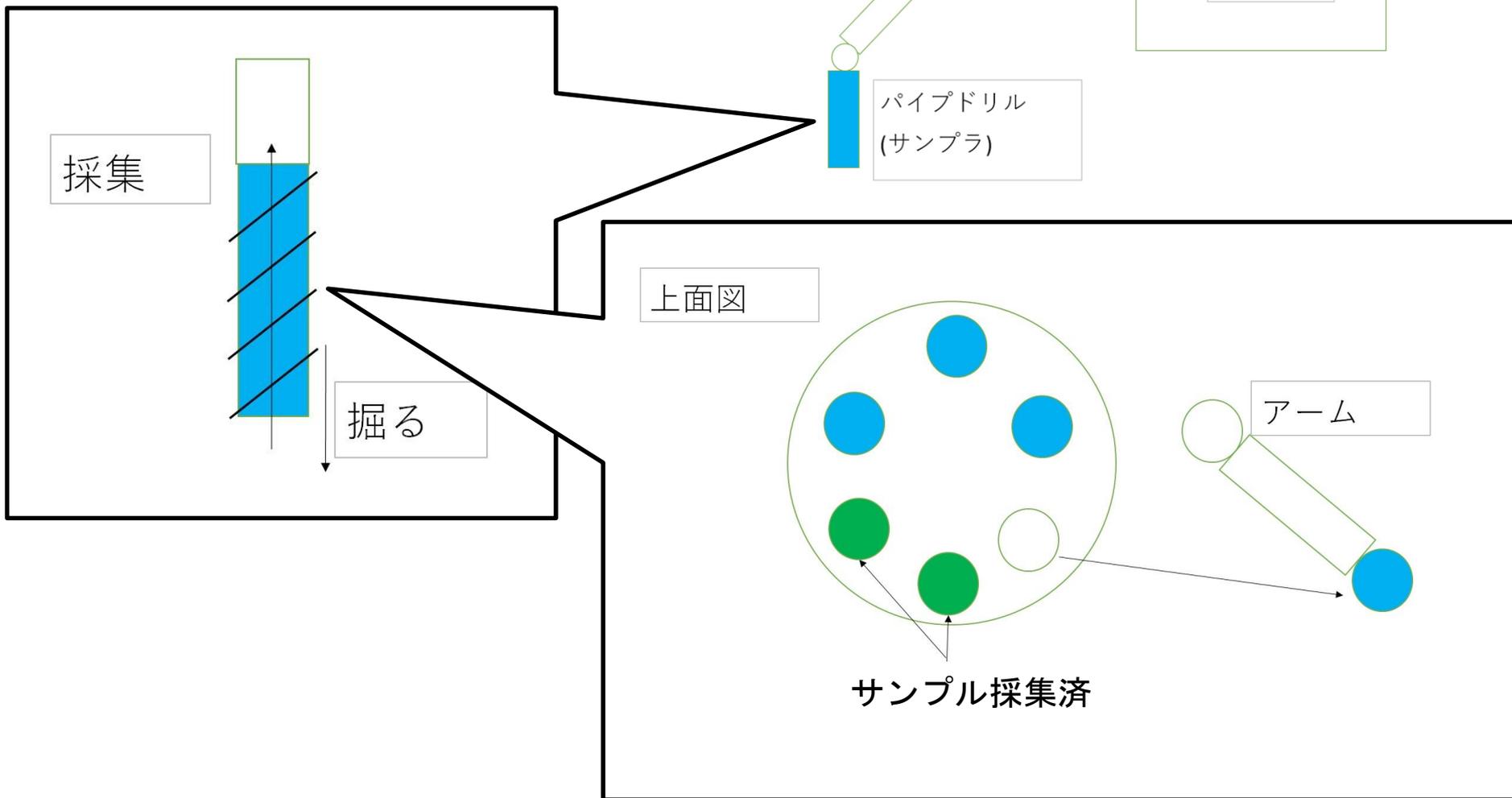


5. システム設計

5.1 コンフィグレーション検討

5.1.3 ローバー(5/6)

下表に、サンプラー及びドリルの外観図を示す。

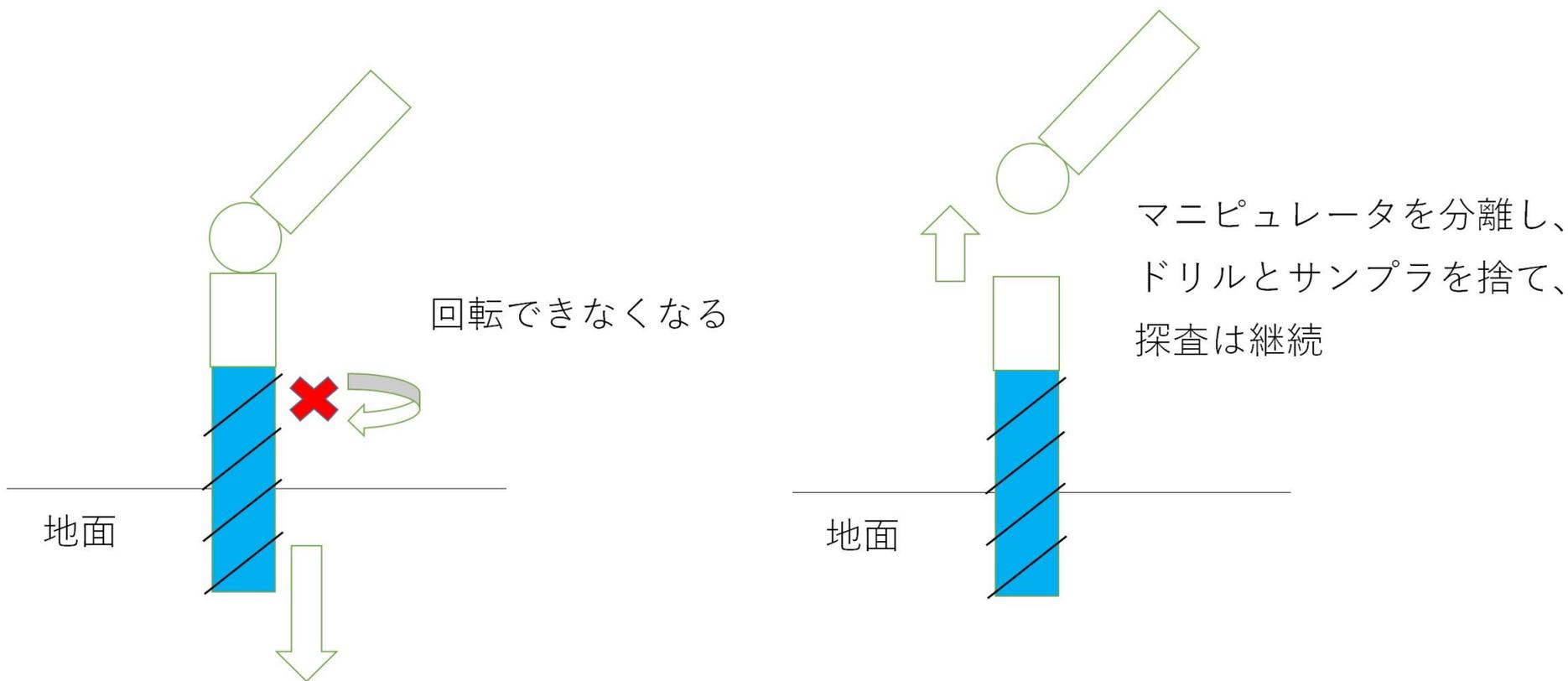


5. システム設計

5.1 コンフィグレーション検討

5.1.3 ローバー(6/6)

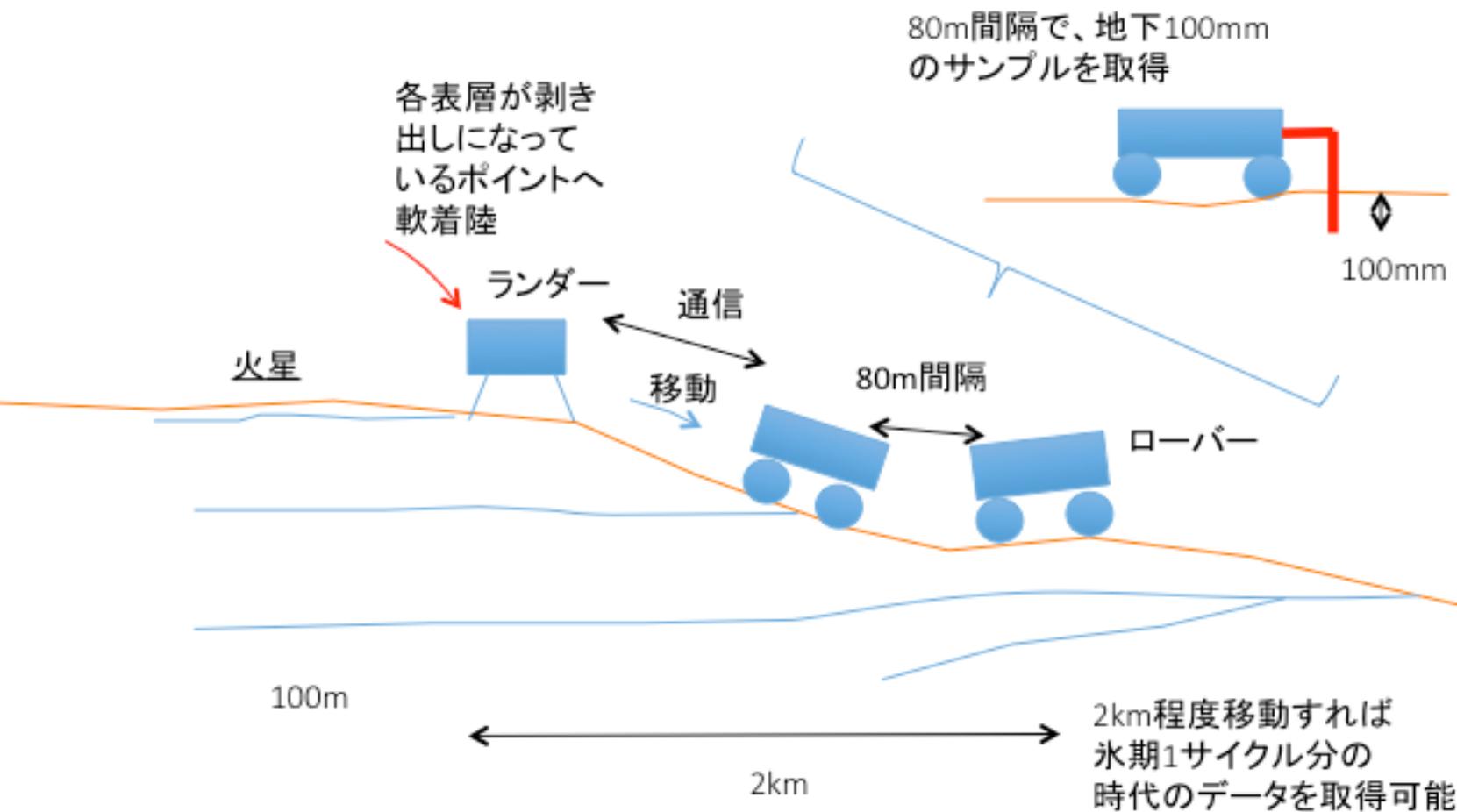
マニピュレータはサンプラとは分離可能で、
有事の際は下図のように分離して探査を継続する。



5. システム設計

5.1 コンフィグレーション検討

5.1.4 ミッションシナリオ



5. システム設計

5.2 リスク分析

開発課題										4:2度以上				
										3:1度実績	3:ミッション続行不可			
										2:実績なしだが、推進・可動部	2:フルサクセス実行不可			
										1:実績なしで上記以外	1:フル実行可能、バックアップ必要			
フェーズ	電源	熱制御	姿勢	推進	航法・誘導	通信	機構	Mission	外的	リスク内容	発生可能性：P	影響度：I	新規開発要素 penalty	リスクスコア：P*I+S
惑星間遷移時			○		○	○				ロスト	4		3	12
										ロケットの航法誘導不良によりノミナルの軌道に乗れない	2		1	2
MOI時					○	○				軌道決定精度不良によるMOI失敗	4		1	4
			○	○	○	○				MOI用個体モータ精度不良によるMOI失敗	4		1	4
				○						MOI用固体モータの故障によるMOI失敗	3		3	9
					○	○			○	不可視領域侵入中の通信不可によるロスト	1		3	3
周回軌道上待機時	○	○	○	○	○	○		○		待機時間が長くなることによる、機器の故障	3		1	3
着陸機投入		○			○	○				投入角度が悪くて、目的地の誤差楕円内に落ちられない	1		2	5
		○			○	○				投入角度が悪くて、必要以上の空力加熱を受け、崩壊	3		3	5
							○			パラシュートが開かない	3		3	9
							○			カプセルが開かない	1		3	3
							○			振動によって、機器が壊れる	1		2	2
					○					着陸場所の光学環境が悪く、航法カメラでの撮像ができない	1		1	5
着陸機着陸					○			○		傾斜がきついとこに、着陸してしまう	1		1	5
		○								着陸機のRCSの動作不良	1		1	5
					○				○	着陸位置の地面が良くない	1		1	1
ローバ発進							○		○	着陸機のローバ展開機構が開かない	1		2	5
ローバ移動					○		○		○	表面が柔らかく、沈み込み	1		3	5
					○		○		○	表面が柔らかく、スタック	1		3	5
					○		○		○	表面の摩擦係数が小さく、スリップ	1		1	5
サンプリング中							○	○	○	氷の表面が硬く、削れない	1		2	5
	○							○	○	太陽光の入射量が予想より小さく、電源が足りない	1		1	5
	○					○			○	CO2の雪が降りだし、アンテナSAPの効率が悪くなる	1		1	5
		○					○	○	○	マニピュレータの関節が凍り付く	1		1	5
		○					○	○	○	ローバのキャタピラが地面に凍り付く	1		1	5

6. 結論

6-1. トップ目標

火星の現在と過去の生命居住可能性の解明

6-2. 科学的な目的

火星の極冠を調べて、火星の表層環境・気候の進化を理解する

6-3. 工学的実現可能性

システム設計の結果、本探査ミッションの実現が可能であることを概ね確認できた

6-4. 貢献（アウトカム）

本探査ミッションにより以下が期待される

- 関連する火星固有の惑星科学の解明
- 有人探査に向けた火星移住への情報の収集
- 地球の惑星科学や、地球温暖化問題などへの応用

終わり