

火星大気循環の解明 ～ダストデビルの内部調査～

Team TOMATO 

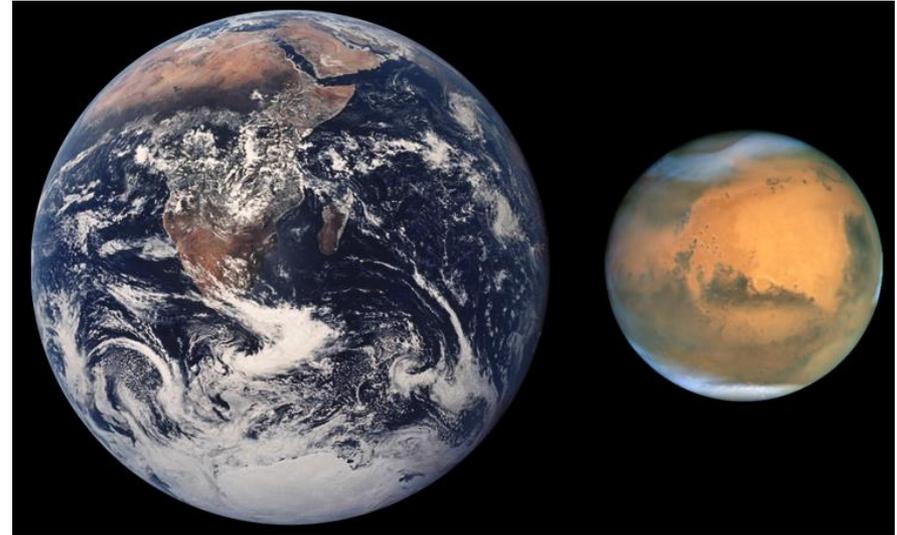
CPS探査ミッション立案スクール 2016/08/26

目次

- ・ 背景
- ・ ミッション定義/ミッション要求/システム要求
- ・ システム仕様

背景：火星の特徴

- 軌道長半径:1.5 AU
- 軌道周期：1.881年
- 自転周期：1.026日
- 季節変化がある
 - 比較的地球に似た惑星



- 大気の特徴
 - 薄く、冷たく、乾燥
 - 平均 6 hPa(1/160 気圧)、~220 K、液体の水がない
 - 極氷の凝結(冬極)と昇華(夏極)
 - 平均地表気圧の16%におよぶ圧力変化
 - ダストの存在

火星大気循環構造

- 火星大気はどのような循環構造を持っているか？
 - シミュレーション・観測双方を用いて研究を行う。
- 火星大気循環構造モデル
 - 火星全球での風速・温度・物質分布を計算する。
 - 様々な物理過程を考慮する
(例：**放射過程**、**乱流過程**、**地表面過程**、**ダスト巻上げ/重力沈降過程**、**CO₂ 大気の凝結/昇華過程**による大気量変動)。
- 大気中のダスト存在量を正確に見積もることが重要。

ダストの供給源

どのようなサイズのダストが、どの地点にどれくらい供給されるか？

- 供給源：ダストストーム、ダストデビル
 - これらの現象による巻き上げ量を正しく推定する必要がある。
 - 現象を正しく理解することが重要。

ダストデビルに関する研究

- 観測：カメラによる観測が主、圧力計、風速などから観測されたものもある

→カメラ：現象の結果のみ観測可能＝発生条件の制約は困難
圧力計、風速：データ点数が少なく全体構造が分からない

- ダスト巻き上げ量の推定法
 - ダストデビルのサイズ、ダスト量(明るさから)、垂直方向速度、継続時間から
 - ダストデビルの通った跡から
- ダスト量、速度は直接観測ではない

ミッション定義

地球型惑星の大気循環を理解する。

- 火星の気象を明らかにする

- 大気循環の理解

- ダスト供給量に影響するダストデビルについて理解する。

- 発生したダストデビルだけでなく、ダストデビル発生前後の環境のデータも得る。

- 形成から消失までの時間変化を追う

- ダスト量、渦内の流れを直接観測する

ミッション要求

- ダストデビルの直接観測を行う。
 - 確実にダストデビルの発生する領域で観測を行う
 - 直径、高さ、風速、圧力、温度、ダスト量の測定
 - ダストデビルの時間変化を追う
 - 発生/消滅位置・時間および移動経路の観測
 - ダストデビル発生前後の環境および周囲のデータも得る。

Extra

- 季節変化を調べる
- 1火星年分のデータの取得

ミッション要求とシステム要求

ミッション要求

発生/消滅位置・時間および移動経路の観測

ダストデビルの直径、高さ、風速、圧力、温度、ダスト量の測定

ダストデビル発生前後の環境および周囲のデータの取得

季節変化を調べる

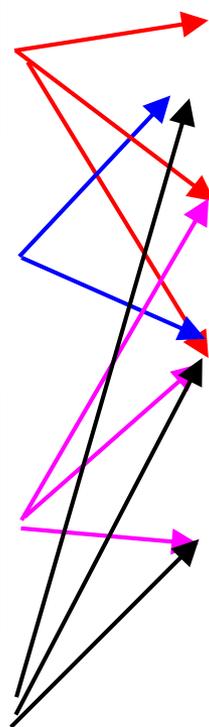
システム要求

地表で風速・圧力・温度・ダスト量を測定できること

適切な密度で複数の測定点を持つこと

長さ・位置情報を画像から取得できること

同じ観測点で連続したデータを得ること



赤字はExtra

システム仕様

要求：適切な密度で複数の観測点を持つこと

→地表に複数の測定点を設置する

- 観測場所：Gusev Crater

 - 過去にダストデビルの発生が確認されている

 - 10～50 Dust Devils/day · km²

- 測定点数：100点程度

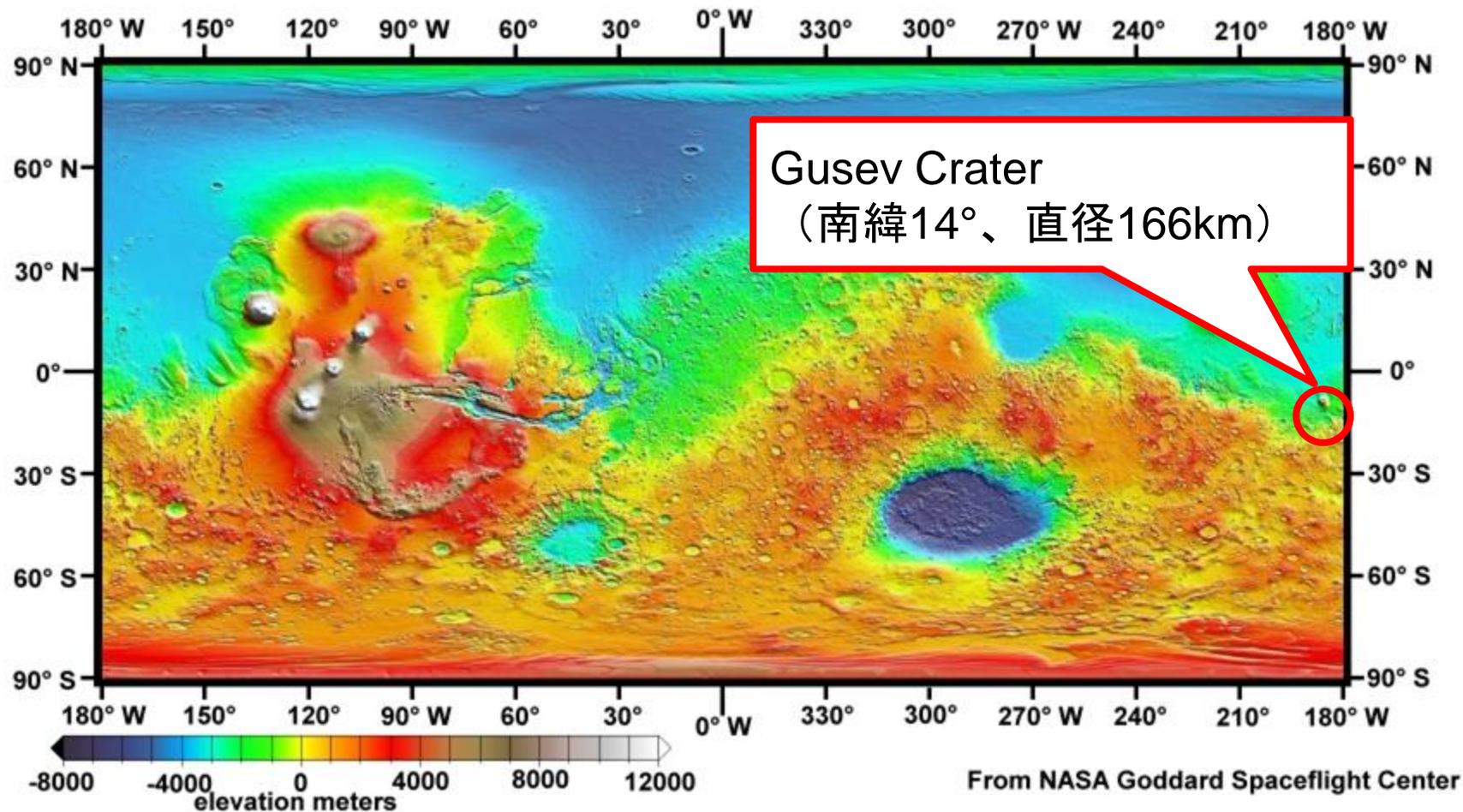
- 測定範囲：1km² (1km×1km)

- 測定期間：半年 (火星春分～)

観測場所

ダストデビル観測場所：Gusev Crater

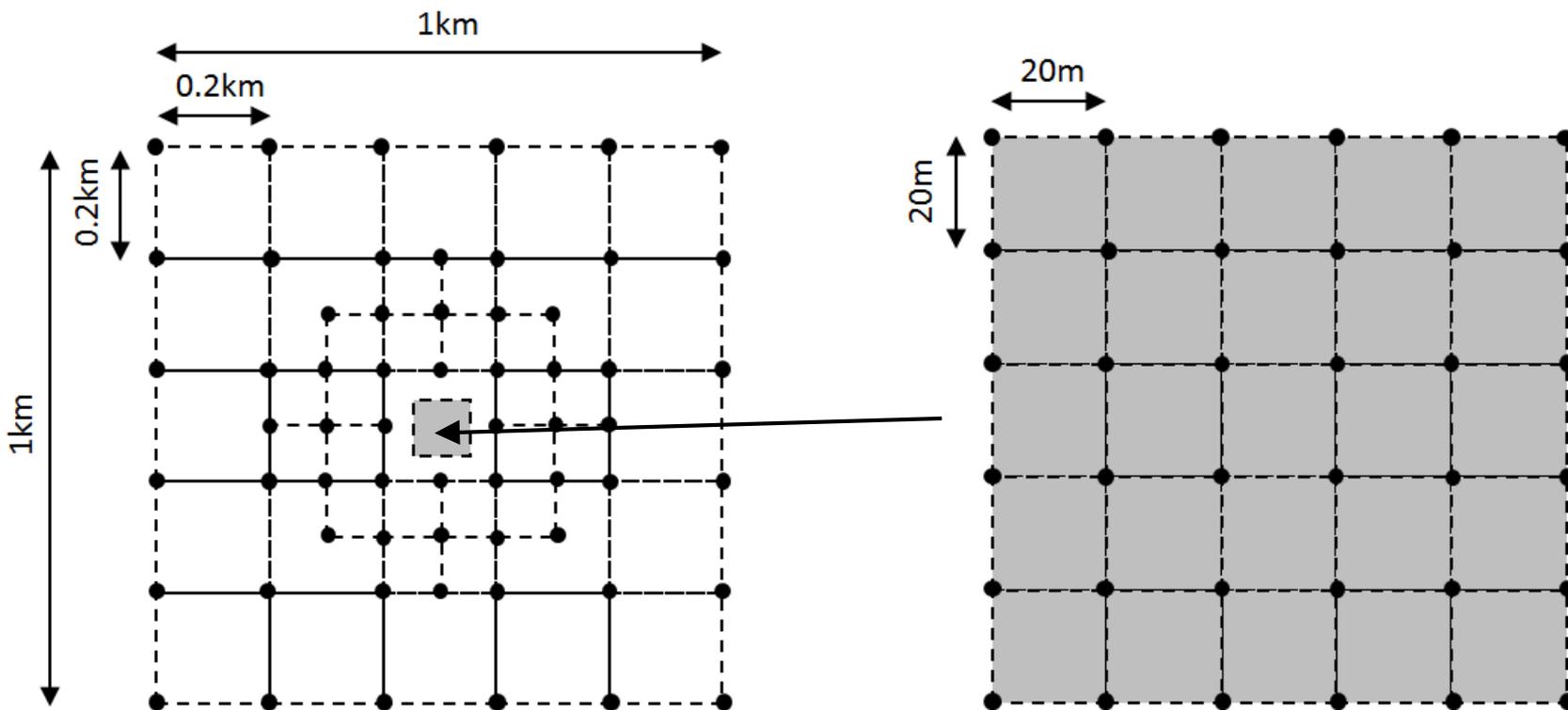
- ・ ・ ・ 「Spirit」 が着陸し、ダストデビルの発生を確認した



測定範囲

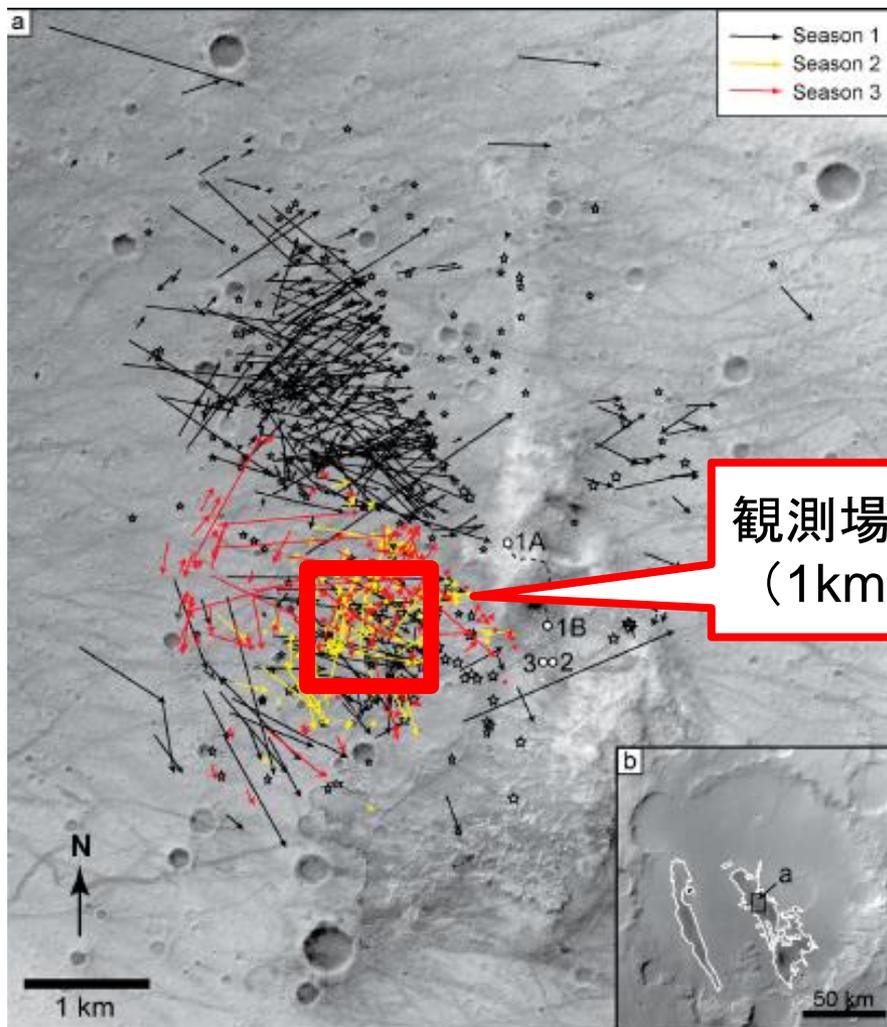
測定点の配置：1km×1kmの範囲に100点程度

- ・ ・ ・ 多くのダストデビルは直径20～40mのため、一部測定点の間隔を20mとし、詳細な測定を目指す。



測定範囲

過去の観測結果 (Greeley et al, 2010)



観測場所のイメージ
(1km×1km)

ダストデビル@ Gusev Crater

- SpiritによるGusev Craterでの観測値(Greeey et al, 2010)
- カメラによる観測

		Season 1	Season 2	Season 3	
Dust Devil Seasons	開始時期, sol (L_s)	421 ($L_s 173^\circ$)	1103 ($L_s 181^\circ$)	1785 ($L_s 189^\circ$)	南半球の春
	終了時期, sol (L_s)	691 ($L_s 340^\circ$)	1239 ($L_s 267^\circ$)	2058 ($L_s 355^\circ$)	南半球の夏～秋
観測個数		533	137	274	
観測個数頻度, $\text{km}^{-2}\text{sol}^{-1}$		51	11	20	
メジアン径, m		19	24	39	
水平方向移動速度, ms^{-1}		2.5	2.2	1.5	
垂直方向移動速度, ms^{-1}		1.6	1.0	1.0	
平均寿命, s		170	129	156	

システム仕様

要求：長さ・位置情報を画像から取得できること

→地上に設置したブイから観測場所を撮影する

【撮影方式のトレードオフ】

	軌道上から 撮影	地上ブイから 撮影	地上ローバーから 撮影
メリット	観測範囲全体を上 空から撮影可能	撮影機器搭載ブイ への置き換えによ り可能	撮影点の変更が可 能
デメリット	静止軌道からの撮 影となり、適切な 分解能は望めない	複数点（3点以上） からの撮影が必要	複数点（3点以上） からの撮影が必要
評価	×	○	△

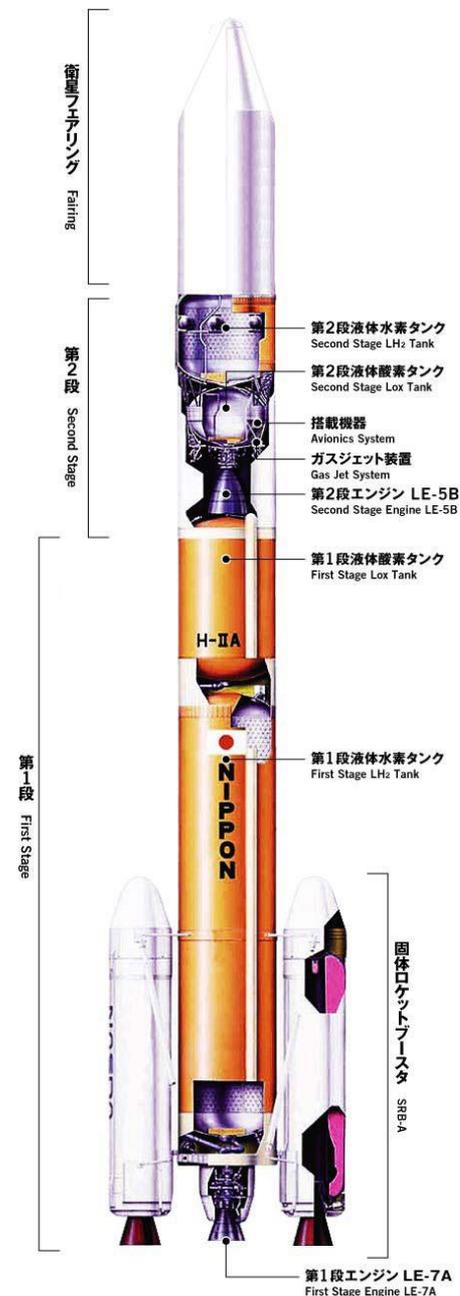
使用ロケット

H2A 202

代表的軌道	軌道高度例	打ち上げ能力
静止軌道	約36,000km	約4.0t
低高度軌道	約300km	約10t
太陽同期軌道	約800km	約4.4t
地球重力脱出	月・惑星探査	約2.5t

参考

http://www.jaxa.jp/projects/rockets/h2a/index_j.html

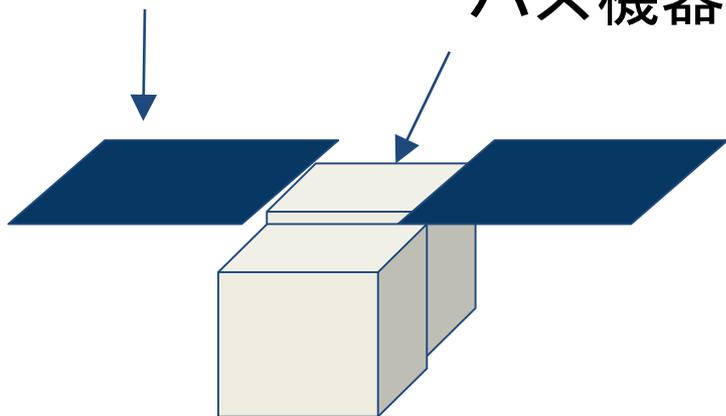


探査機の概観

探査機全体

太陽電池パドル

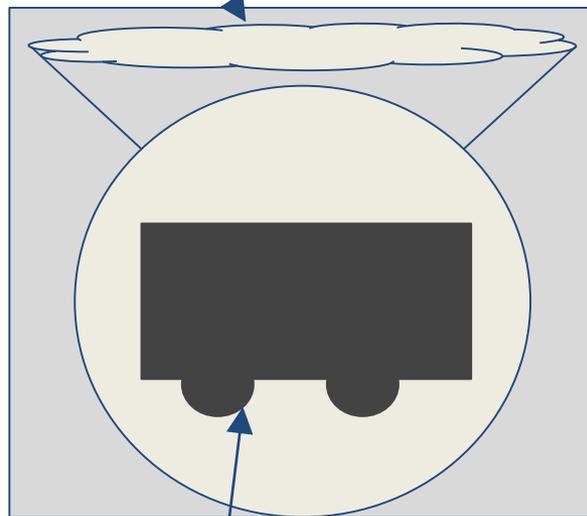
バス機器



ランダー

ランダー

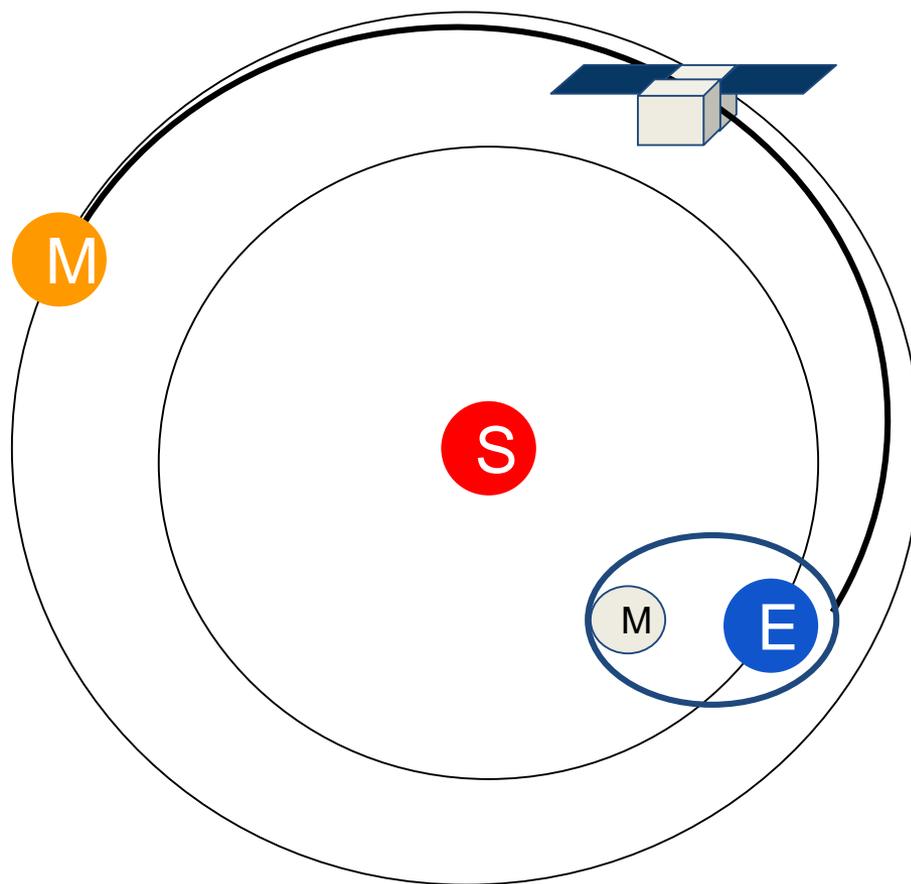
パラシュート



ローバー

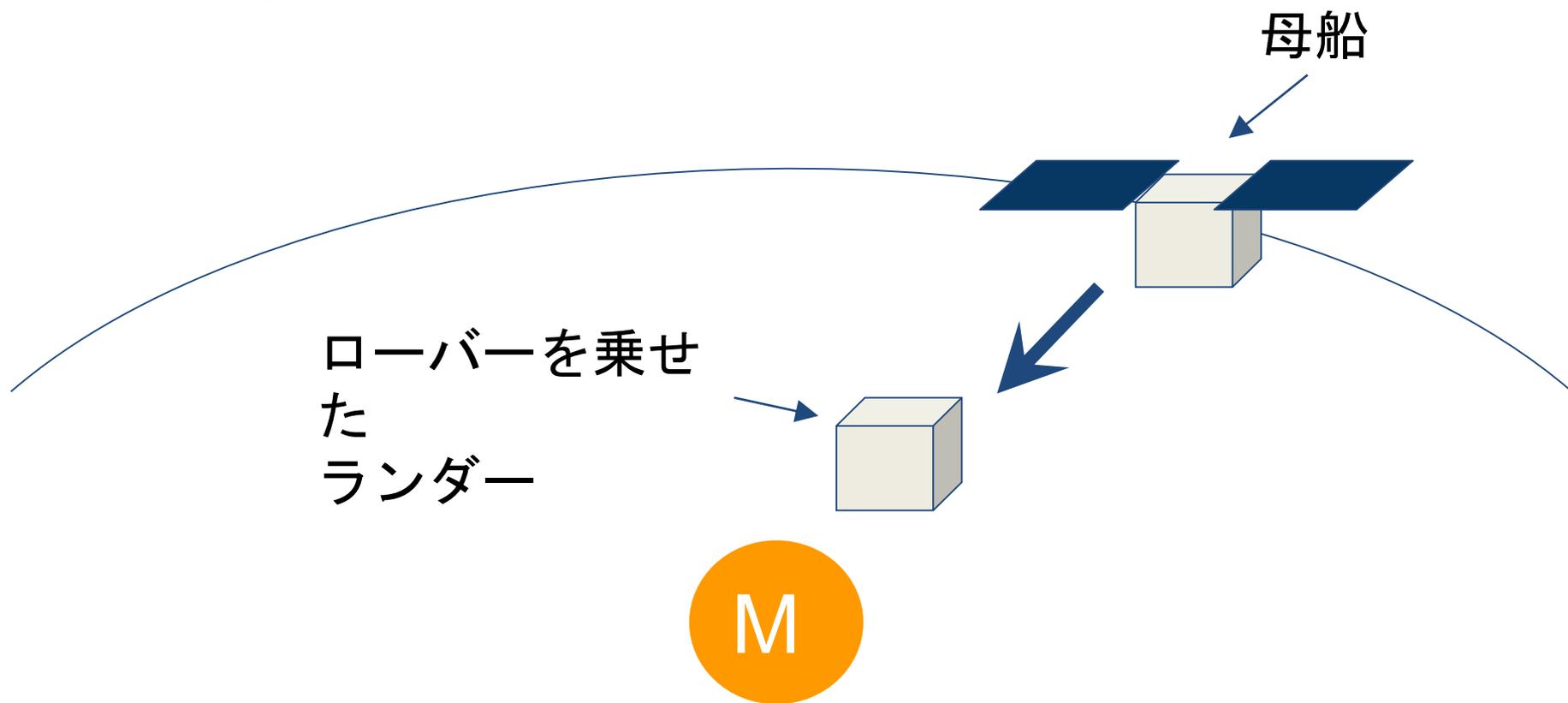
ミッションシーケンス

打ち上げ後，月スウィングバイを2回行い，
火星までの軌道に遷移する



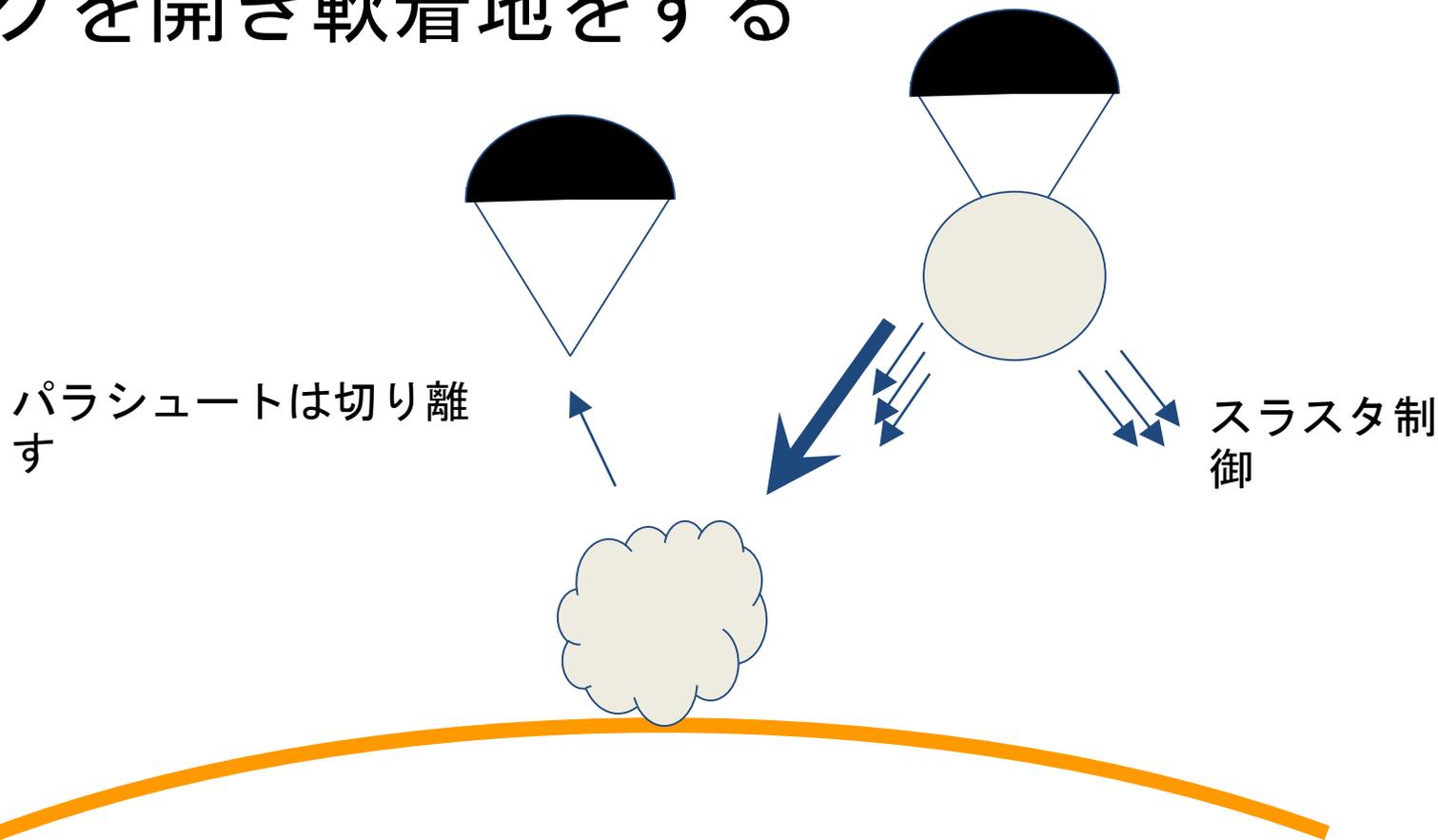
ミッションシーケンス

火星の周回軌道に投入後、観測機器をランダーを目標の位置に落下するよう投下する



ミッションシーケンス

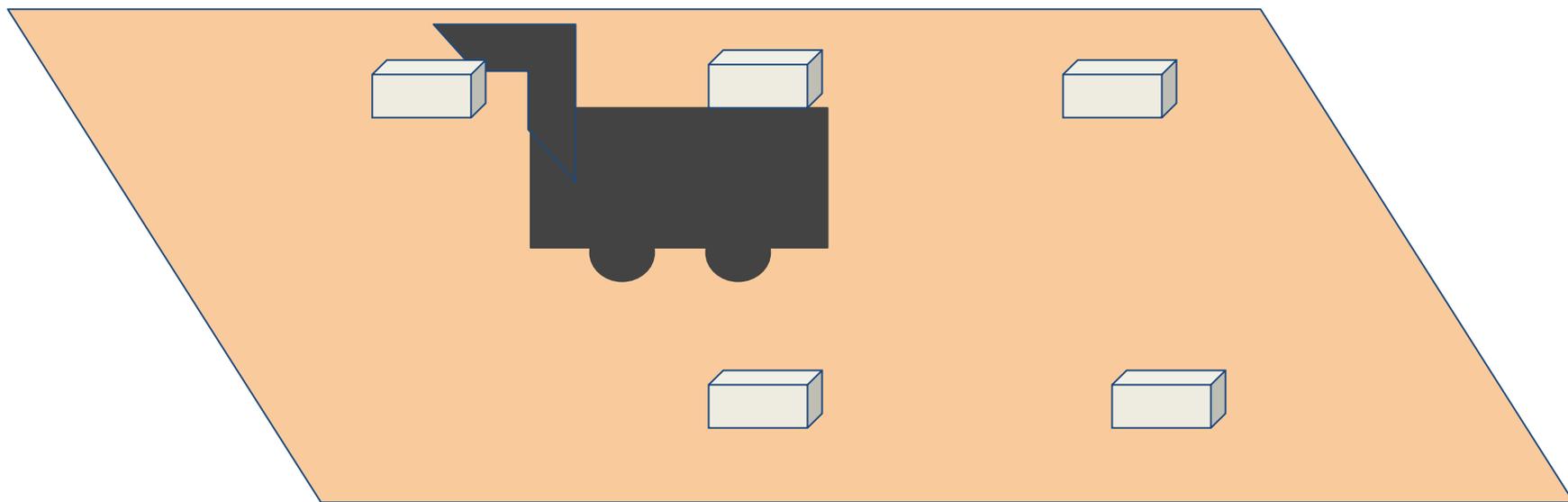
投下後，パラシュートを展開し減速をする
スラスタ制御をしながら降下し，最後はエア
バックを開き軟着地をする



香

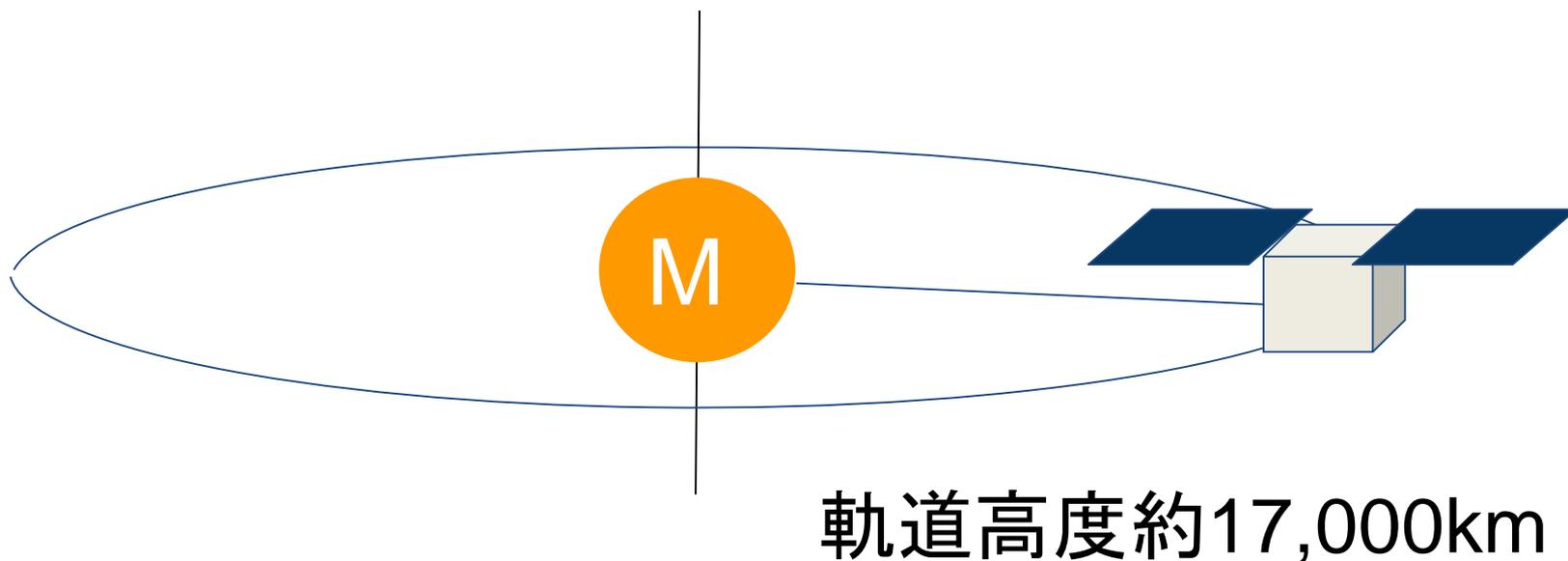
ミッションシーケンス

着地後，定点ブイを決められた点に配置する



ミッションシーケンス

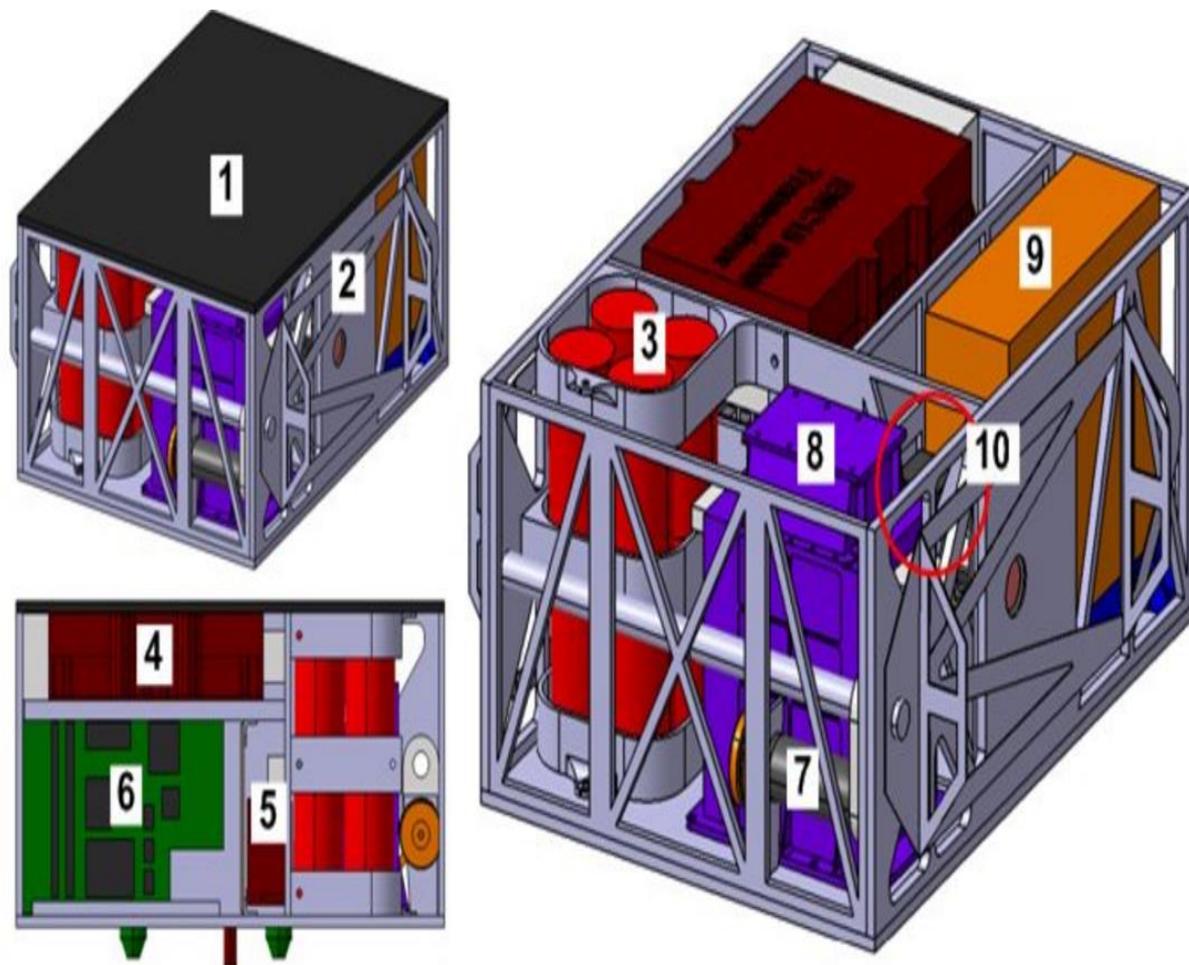
- ・母体を火星の静止軌道へ遷移させる場合
静止軌道上で観測棒を配置した領域を常時観測する



ローバー諸元

項目	数値	備考
質量	700kg	本体500kg+ブイ 1kg×100機+100kgマージン
外形寸法	長さ3m	TBD
姿勢制御系	TBD	TBD
発生電力	1 kW	TBD
ミッション期間	0.5地球年	ブイと同じ
走行距離	田植え方式	確実にブイを配置
観測機器	撮像カメラ	定点観測の様子、ダストの鉛直方向挙動を撮影
	デジタルレコーダ s/x通信アンテナ	ブイの観測データの記録 ハブ→オービタ→地球

定点ブイ概観



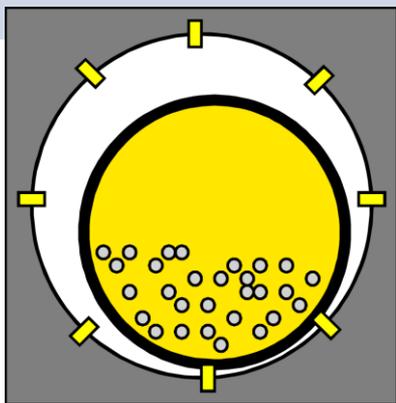
- (1) sandwich top plate
- (2) main AI structure
- (3) battery pack
- (4) transceiver unit
- (5) Rx-filter
- (6) common E-box
- (7) motor and gear
- (8) Instrument 1
- (9) Instrument 2
- (10) Camera

定点ブイ諸元

項目	数値	備考
質量	800g	TBD
外形寸法	10×10×10cm	TBD
発生電力	5W	TBD
作動可能温度	-50~	
ミッション期間	0.5地球年	火星春分から夏/秋まで
位置間隔	20m間隔	温度・気圧分布
	100m間隔	移動速度・履歴
固定方法	TBD	
観測機器	風速計	風向、風速
	気温計	周辺温度
	気圧計	周辺気圧
	ダストカウンター	ダスト粒径、数

定点ブイバス機器仕様

項目	数値	備考
構造系	10cm角	TBD
電源系	太陽パネル一面+バッテリー	風力発電も？
通信系	S,X	~100kb
熱制御系	MLI	TBD
姿勢制御系	3軸ジャイロorボール状感知機 (rf. MASCOT https://solarsystem.nasa.gov/docs/pr456.pdf)	ジャイロは重い高価



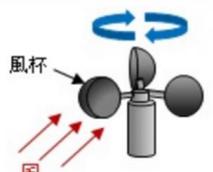
参照

(<https://solarsystem.nasa.gov/docs/pr456.pdf>)

定点ブイミッション機器仕様

	測定レンジ	分解能	タイムステップ	備考
風速計	1-50 m/s	0.1m以下	0.5s	風向も測定したい
温度計	100-300 K	0.1 K以下		
圧力計	500-900 Pa	0.1 Pa以下		
ダストカウンタ	1 μ m-TBD	1 μ m以下		ダストデビル内の風速(1-数十m/s)でこの分解能が出れば良い
観測点の分布	1 km \times 1 km	20 m \times 20mの領域を含む		分布範囲は多少狭くとも良い
観測点の個数	100個			

風速計

風杯型風速計	風車型風速計	超音波式風速計
		
<p>【特徴】 半球型の風杯と呼ばれる羽に風が当たり軸が回転し、その回転数から風速を測定する 風速測定のためのシンプルなもの、風向も測定できない</p>	<p>【特徴】 プロペラ飛行機の胴体部の形を、プロペラの回転数から風速を測定する 後部に風見鶏(鉤まついていません)があり、風向も同時に測定できる</p>	<p>【特徴】 超音波の発信部と受信部を向かい合わせ、その間の超音波の伝播時間の変化から風速を測定する 耐候性に優れており、僻地に設置されることが多い</p>

熱線風速計

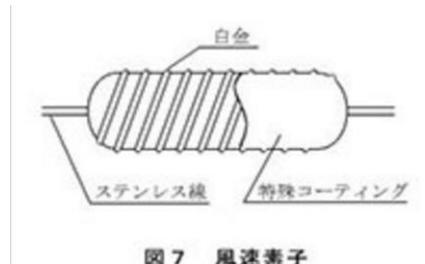


図7 風速素子

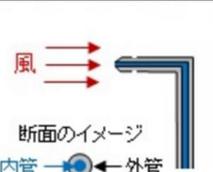
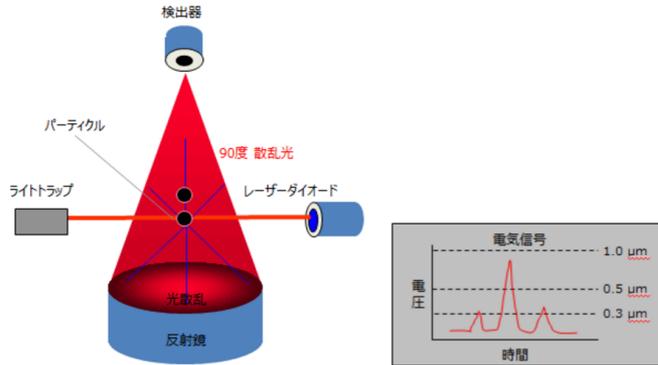
ピトー管式風速計	熱線式風速計	ベーン式風速計
		
<p>【特徴】 先端に穴の空いた内側の管と、側面に穴の空いた外側の管を組み合わせた二重の管で、2つの管に生じる差圧から風速を測定する 高速の飛行機での速度測定や風洞に使われている ピトーの由来は、発明者のアンリ・ピトーから来ている</p>	<p>【特徴】 白金線や半導体を用い、一定の温度にした素子から奪われる熱量の変化から風速を測定する 室内の空調測定等、もっとも多く使用されている アネモマスター、クリモマスター等と呼ばれている</p>	<p>【特徴】 風車・翼の回転数から風速を測定する プロペラ式風速計とも呼ばれる ベーン(vane):羽、翼、風見</p>



図8 受感部の一例

ダストカウンタ

光散乱方式とは？

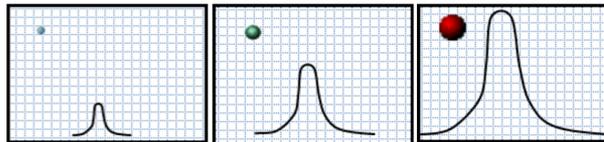


1. パーティクルカウンターに内蔵されている吸引ポンプにより、サンプルを一定量取り込みます。
2. サンプル取り込み中に、レーザーダイオードから790nmのレーザー光をサンプルに照射します。
3. サンプル中に粒子がある場合、その粒子によって散乱した光は、光軸から90度(70度)等に設けられている検出器で捕捉されます。
4. 粒子の大きさによって、検出器を経由して受ける電気信号の大きさ(波形高さ)が異なり、その波形をカウントした回数が粒子数になります。

空気清浄度クラスによる測定粒径と上限濃度

粒子径によってパルス（電気信号）が得られます。

サンプル中の粒子により光が散乱した際の電気信号(電圧上昇)を粒子数および粒子径として算出します。



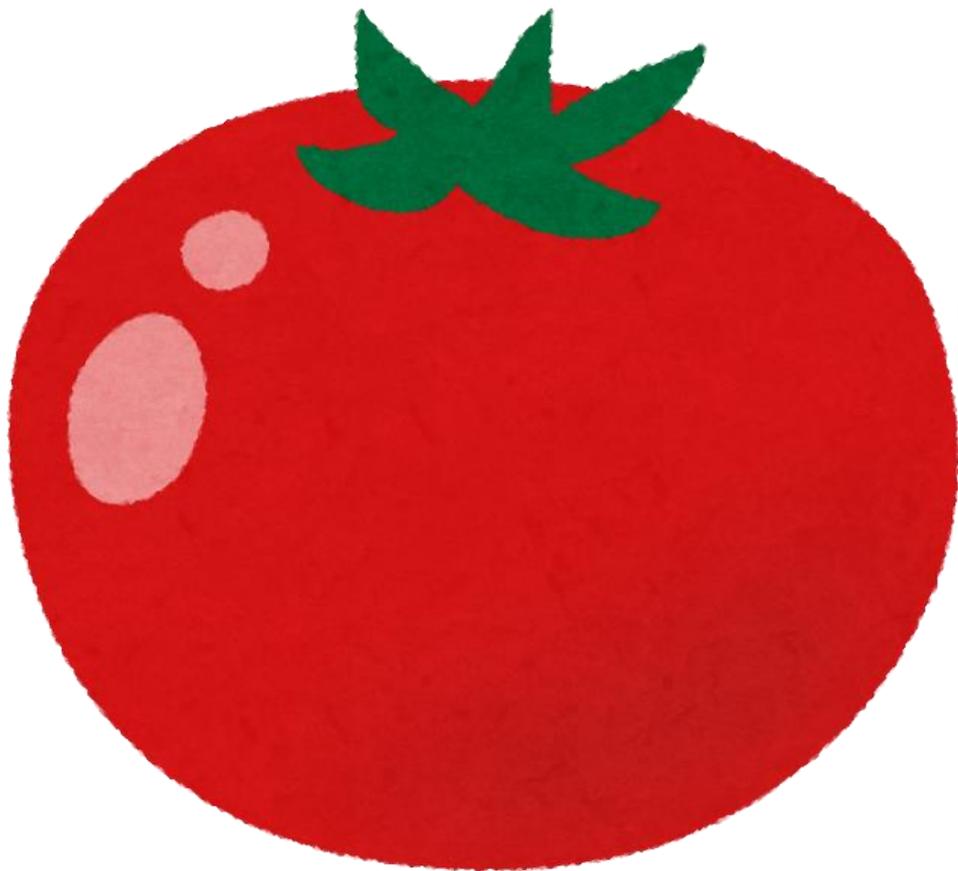
ISO 14644-1	清浄度クラス	米国連邦規格 (Fed. Std. 209E)					
		0.1μm	0.2μm	0.3μm	0.5μm	1.0μm	5.0μm
Class 1		10	2				
Class 2		100	24	10	4		
Class 3	1	1,000	237	102	35	8	
Class 4	10	10,000	2,370	1,020	352	83	
Class 5	100	100,000	23,700	10,200	3,520	832	29
Class 6	1,000	1,000,000	237,000	102,000	35,200	8,320	293
Class 7	10,000				352,000	83,200	2,930
Class 8	100,000				3,520,000	832,000	29,300
Class 9					35,200,000	8,320,000	293,000

<https://ls.beckmancoulter.co.jp/products/particle-counter/data/04>

主要な課題

	考えられるトラブル	解決法(案)
衛星	火星周回軌道への投入失敗	予め再投入可能軌道を選択
ローバー	着地がうまくいかず	衛星にもカメラを搭載しておき、観測衛星としてのミッションを行う
ブイ	上手く動作しない	個数を多くすることでリスクを下げる 故障個数があまりに多い場合はローバーを用いて移動探査ミッションに変更する
	通信ネットワークのトラブル 各ブイ→ローバー(→衛星)→地上局	衛星or地上局との直接通信網も用意する

おわり



ミッション要求とシステム要求

ミッション要求

ダストデビル周囲の環境の把握

ダストデビルの大きさの把握

ダストデビルの発生/消滅位置・時間の確認

長期的なデータの取得
赤字はExtra

システム要求

ダストデビル周囲のダスト量・風速・気温・気圧を測定できること

ミクロな観測

上空からのダストデビルの画像を取得できること

マクロな観測

システム仕様

システム要求

地表で風速・圧力・温度・ダスト量を測定できること

適切な密度で複数の測定点を持つこと

長さ・位置情報を画像から取得できること

同じ観測点で連続したデータを得ること

システム仕様

定点ブイシステム仕様参照

上空からあるいは複数点からの観測

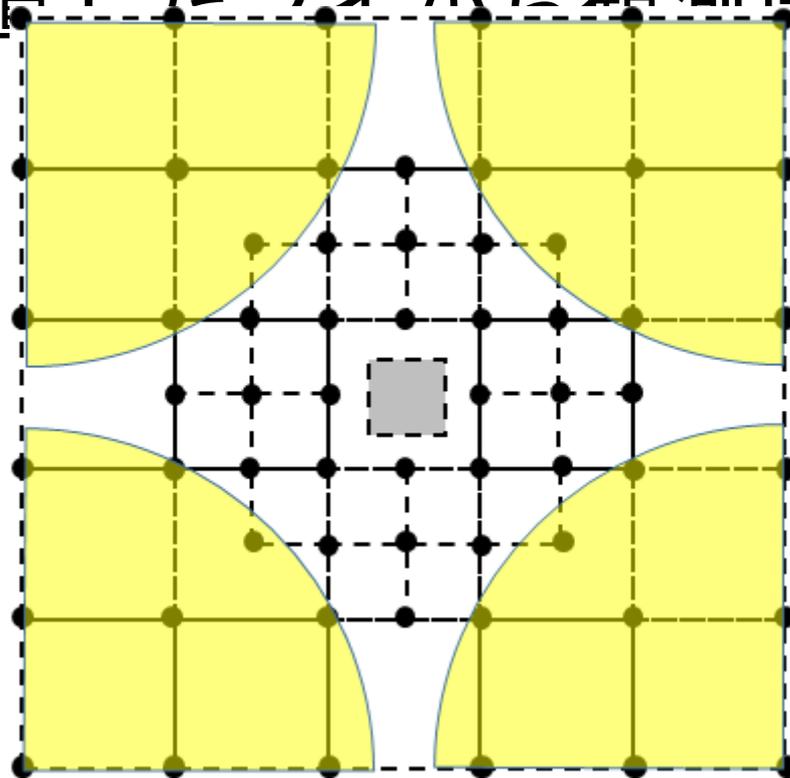
ミッション期間:半年以上
観測点を固定する



システム仕様

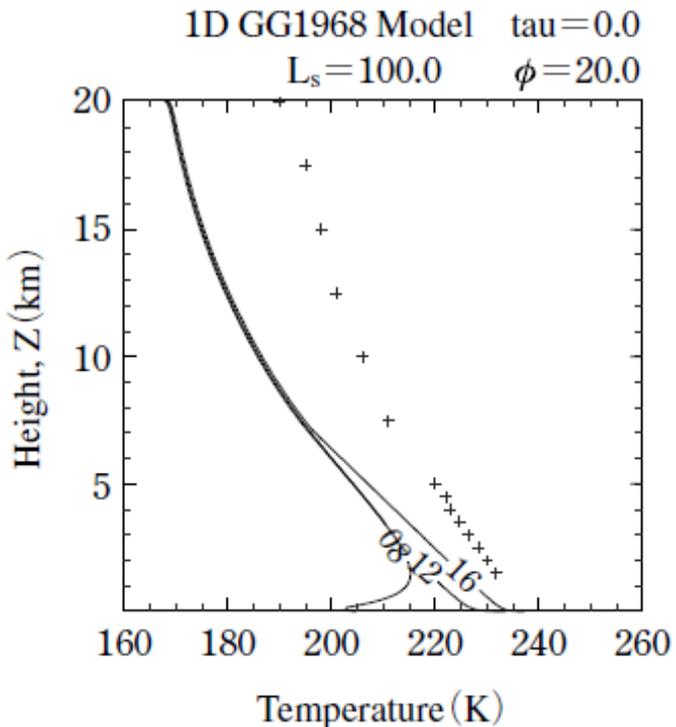
要求：長さ・位置情報を画像から取得できること

→四隅に設置したブイから観測場所を撮影する



ダストの影響

- 観測された鉛直温度分布と、ダストを考えない鉛直1次元放射対流モデル



実線：モデル計算

+：観測結果

- ダスト存在量増
→ダストによる放射加熱量増
→惑星規模の循環が強まる.

- 供給源
ダストストーム、ダストデビル

- どのようなサイズのダストが、どの地点にどれくらい供給されるか？

(小高, 2007)

システム仕様

要求：上空からのダストデビルの画像を取得

できること

→軌道上探査機から観測場所を撮影する

- 軌道：静止軌道（高度約17000km）

 - 南緯14°程度なので撮影可能

- 分解能：5m以下

 - ダストデビルの直径は20～40m