

Observations of discharge phenomena in the Martian atmosphere using electromagnetic and acoustic wave detectors

(電磁波・音波計測器による火星大気中における放電現象の観測)

Mitsuteru Sato¹, Masayuki Yamamoto², Keigo Ishisaka³,
Yukihiro Takahashi¹, Kazunori Ogohara⁴, Masashi Kamogawa⁵,
Hideaki Miyamoto⁶, and Takumi Abe⁷

¹Faculty of Science, Hokkaido University, Kita-10, Nishi-8, Kita-ku, Sapporo, Hokkaido,
060-0810 Japan

²School of Systems Engineering, Kochi University of Technology, 185, Miyanokuchi,
Tosayamada, Kami, Kochi, 782-8502 Japan

³Faculty of Engineering, Toyama Prefectural University, 5180, Kurokawa, Imizu, Toyama,
939-0398, Japan

⁴School of Engineering, the University of Shiga Prefecture, 2500, Hassaka, Hikone, Shiga,
522-8533 Japan

⁵Department of Physics, Tokyo Gakugei University, 4-1-1, Nukui-kitamachi, Koganei, Tokyo,
184-8501 Japan

⁶University Museum, University of Tokyo, 7-3-1, Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-0033 Japan

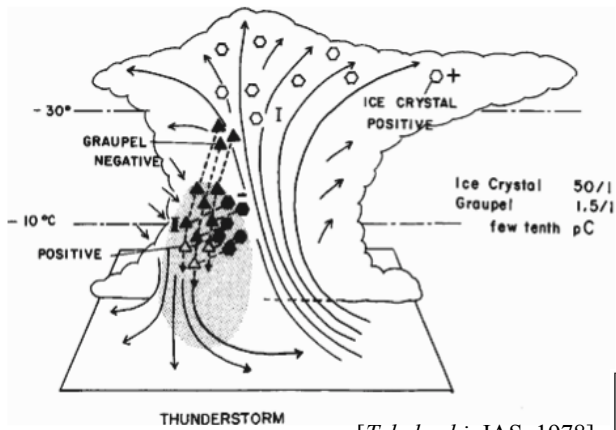
⁷Department of Solar System Sciences, Institute of Space and Astronautical Science (ISAS),
3-1-1 Yoshinodai, Sagamihara, Chuo-ku, Kanagawa, 252-5210 Japan

ABSTRACT

Discharge phenomena can be commonly observed on the planets containing the atmosphere, such as Earth, Jupiter, and Saturn. In the Martian atmosphere, it is expected that electrical discharges are generated at the dust devils and dust storms due to the triboelectric effects of the dust grains. We are proposing the observations of the electromagnetic and acoustic waves excited by those discharges and a composite instrument package of electromagnetic and acoustic wave detectors for the Mars EDL mission. At the presentation, science scope of this observation and the detailed specifications of the instruments are introduced.

1. サイエンススコープ

Terrestrial Lightning Discharge

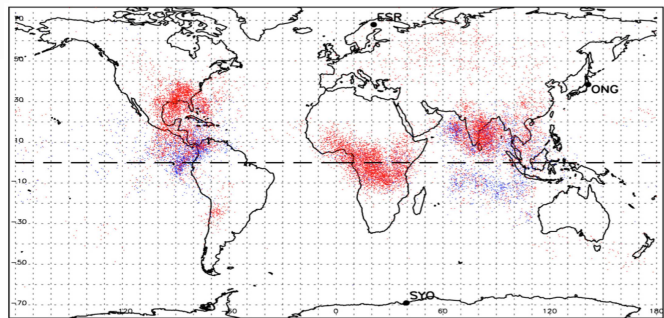
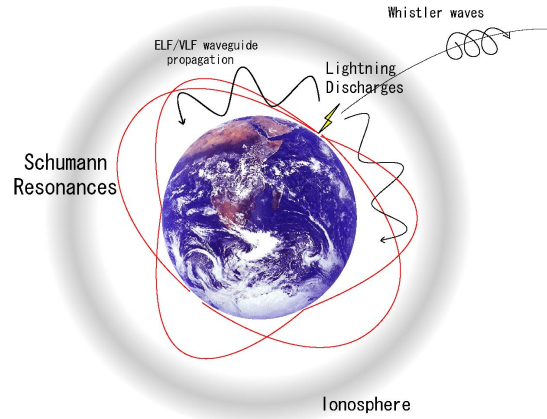


[Takahashi, JAS, 1978]

雲内の電荷分離：

あられと氷晶の衝突 (H₂O)

- 氷晶： 正電荷
- あられ： 負電荷



雷放電電波：全球雷活動のセンシングツール

1. サイエンススコープ

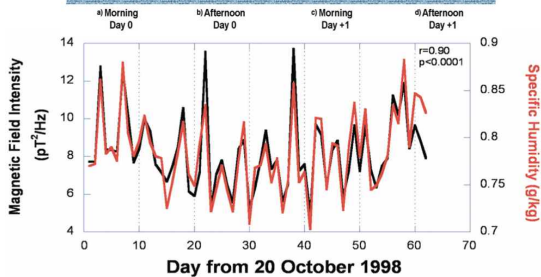
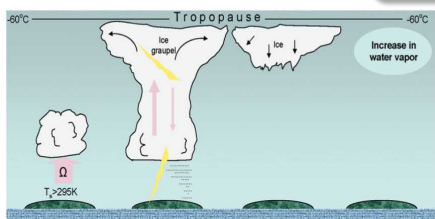
鉛直対流

(台風, 水蒸気量, 温度異常)

指標

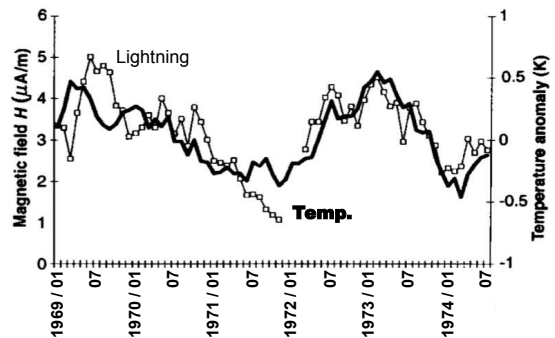
雷放電

雷電波強度 - 水蒸気量



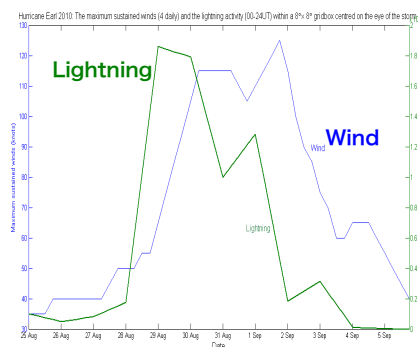
[Price and Asfur, 2006]

雷電波強度 - 温度異常



[Williams, 1992]

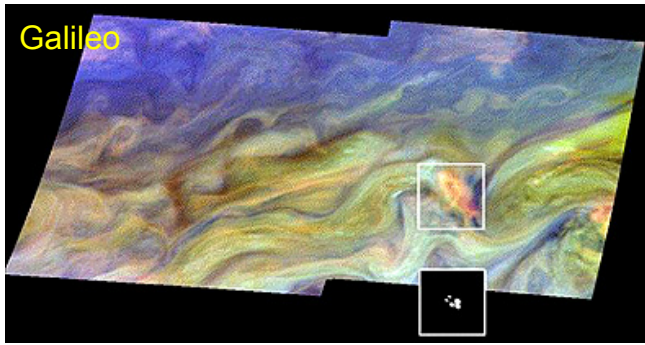
雷頻度 - 台風強度



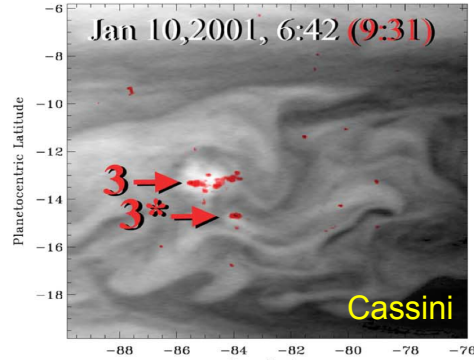
[Price et al., 2009]

1. サイエンススコープ

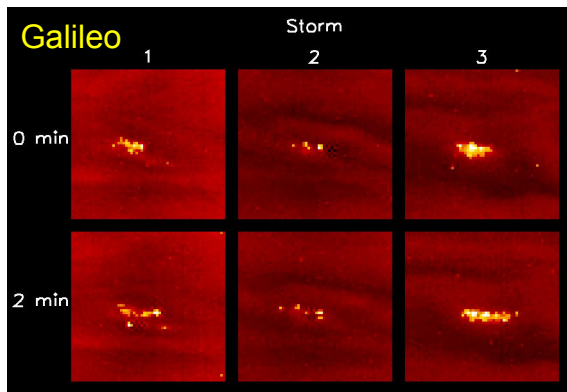
木星の雷放電



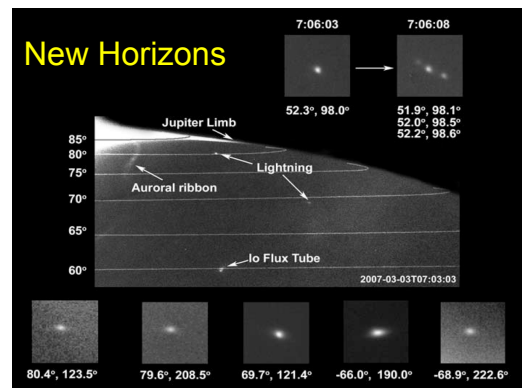
[Gierasch et al., 2000]



[Dyudina et al., 2004]



[Little et al., 1999]



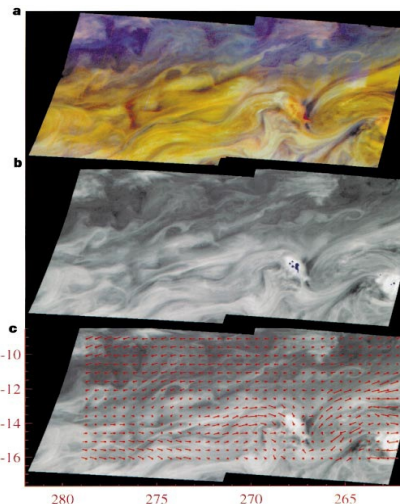
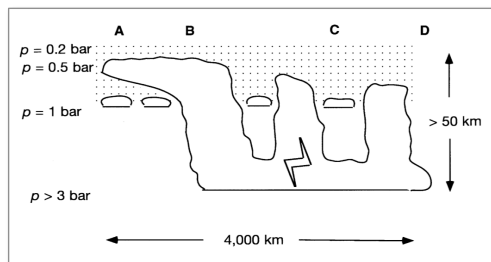
[Baines et al., 2007]

第47回 月・惑星シンポジウム, 2014-08-04, ISAS/JAXA

1. サイエンススコープ

積乱雲(雷雲)が縞模様の成因?

内部熱源による水雲鉛直対流の駆動



3波長合成画像

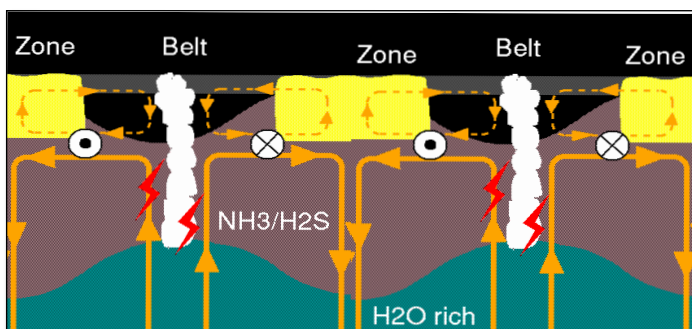
- ・青: 889nm(メタン吸収)
- ・緑: 727nm(弱メタン吸収)
- ・赤: 756nm(メタン吸収なし)

2波長合成画像

- ・青: 889nm(メタン吸収)
- ・day-side continuum

風速ベクトル合成画像

[Gierasch et al., 2000]



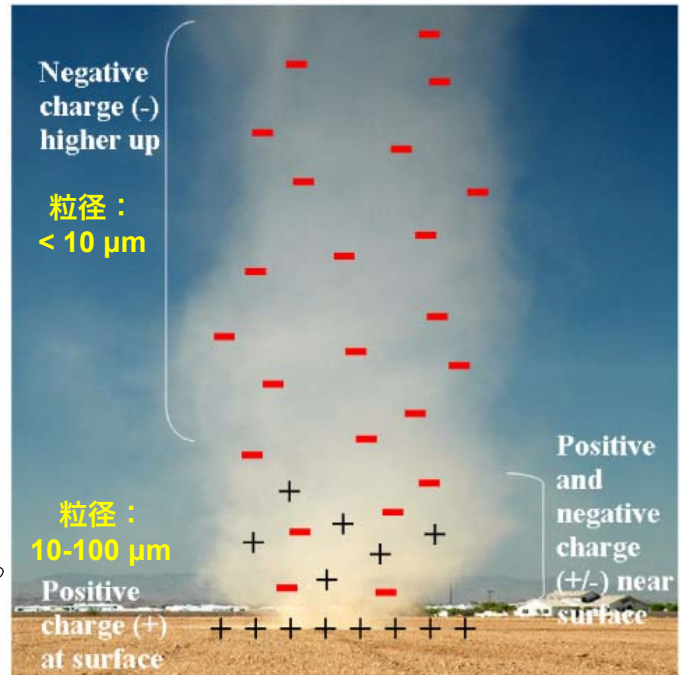
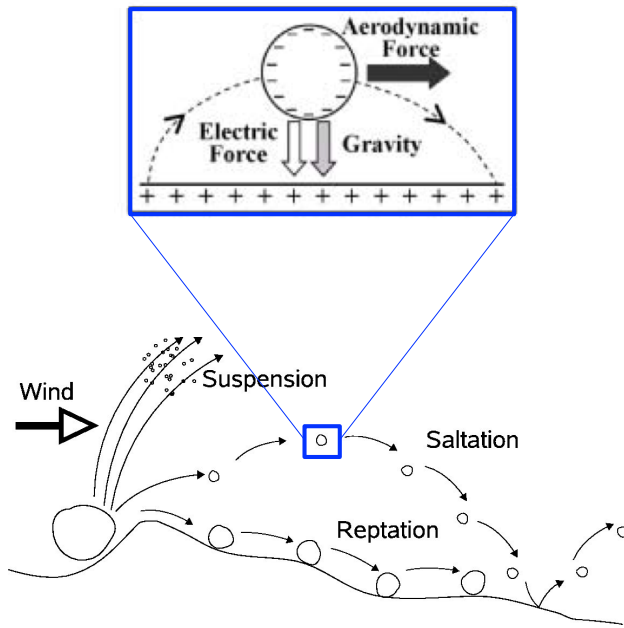
木星の雷放電を調べることは、大気の鉛直対流構造・対流の強さを調べることに他ならない

第47回 月・惑星シンポジウム, 2014-08-04, ISAS/JAXA

1. サイエンススコープ

砂粒の巻上げとダストデビル そして火星

Tribocharging Effects



[Renno and Kok, 2008]

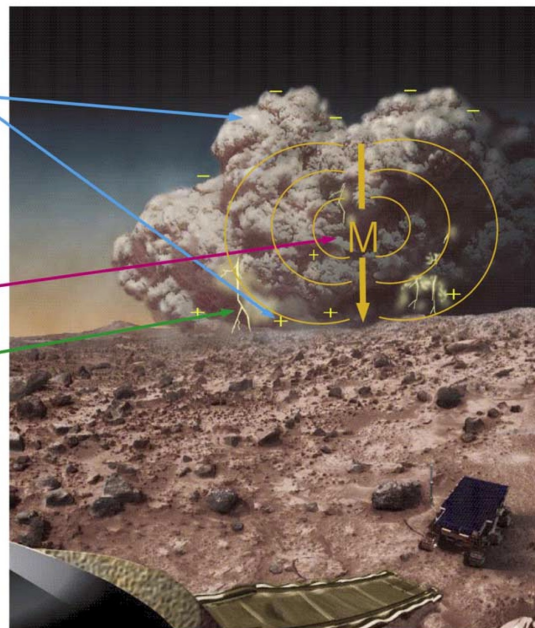
1. サイエンススコープ

火星：ダストデビルの電氣的構造と絶縁破壊

ダストの摩擦による電荷分離

THE ELECTRIC DUST DEVIL

- Triboelectric interactions: Lighter grains (-) charged, Heavy Grains (+) charged [Ette, 1971]
- Light Grains blown upward in convective process - charge separation
- Create Electric Dipole Moment, M , and Dipolar Electric field
- Swirling grains = Change in Moment (dM/dt)
- Terrestrial Devils we see:
 DC E-fields from M
 Radio emission from dM/dt
 Induced Potentials on Surfaces



[Farrell et al., 2004]

絶縁破壊電場(E_k)

地球: $E_k = 6,000$ (kV/m)

火星: $E_k = 20$ (kV/m)



火星は地球に比べて低圧であるため、放電がより発生し易い!



有人探査に対する脅威

- 低圧大気中の放電
- 電波通信障害
- 宇宙服へのダストの付着

1. サイエンススコープ

(理学的役割)

- 地球以外の惑星中の放電現象の理解
- 世界初の火星表面での放電・音波の観測
- 電波・音波計測によるダストデビルのリモートセンシング (時刻・位置・規模)
- ダストデビルの発生頻度・放電強度分布

THE ELECTRIC DUST DEVIL

- Triboelectric interactions: Lighter grains (-) charged, Heavy Grains (+) charged (Elite, 1978)
- Light Grains blown upward in convective process - charge separation
- Create Electric Dipole Moment, M, and Dipolar Electric field
- Swirling grains = Change in Moment (dM/dt)
- Terrestrial Devils we see: DC E-fields from M, Radio emission from dM/dt, Induced Potentials on Surfaces

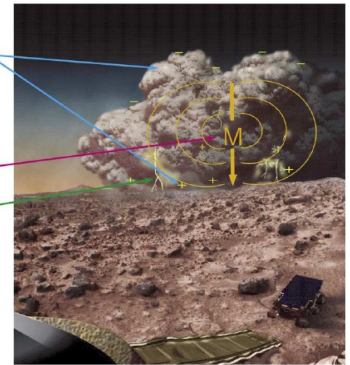
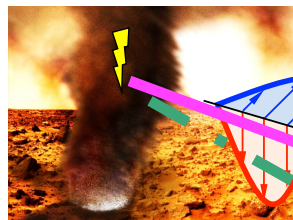
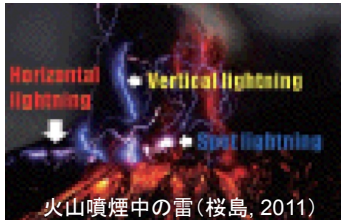


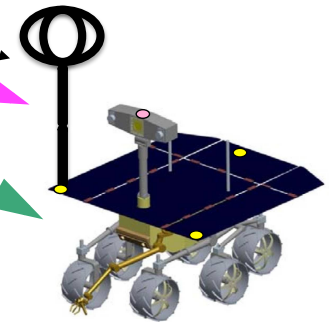
Figure 2. An illustration of the Electric Dust Devil.

[Farrell et al., 2004]



$$P = E \times H$$

電場・磁場計測が重要



(工学的役割)

- 将来の着陸探査機・有人活動に対するハザード分析
- モーター駆動等の機械音の計測と異常状態の理解への貢献

第47回 月・惑星シンポジウム, 2014-08-04, ISAS/JAXA

2. サクセスクリテリア

科学目標目的

- (理学的) 雷放電による電磁波の検出 (E, B)
- 雷放電・火星ダスト現象による音波の検出
- 火星大気中での人工音の検出
- (工学的) 放電によるハザードの推定
- ダストイベントによるハザードの推定
- 火星大気中の音波意思伝達の可能性探索

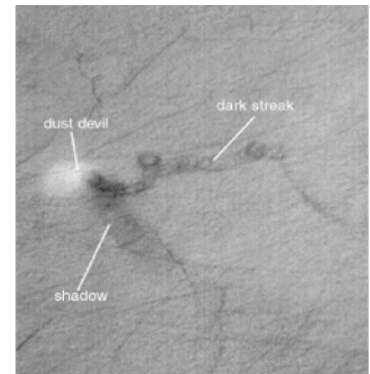


Figure 1. A MGS/MOC image of a dust devil (from M. C. Malin et al., MOC2-220, NASA's Planetary Photojournal <http://photojournal.jpl.nasa.gov/>, 11 December 1999).

[Farrell et al., 2004]

(ミニマムサクセス)

火星放電の検出. ダストデビル発生数の日周期変動を把握する.

(フルサクセス)

メソ (数100 km) スケールでのダストデビル分布を明らかにする, 放電による探査機本体への危険性評価を行う.

(エクストラサクセス)

ダストイベントのうち放電を伴う割合, 直径, 持続時間, 光学的厚さとの相関を明らかにする. 火星における隕石現象の検出.

第47回 月・惑星シンポジウム, 2014-08-04, ISAS/JAXA

2. サクセスクリテリア (詳細)

サクセスレベル	達成項目
ミニマムサクセス	<ul style="list-style-type: none"> ダストデビルに伴う放電現象を <ul style="list-style-type: none"> ➤ 1例以上検出 (電波・音波) ➤ 発生位置と時間・空間変動を1イベントについて特定 ➤ 放電規模の推定を1イベント以上
フルサクセス	<ul style="list-style-type: none"> ダストデビルに伴う放電現象の電波・音波・発光の検出 ダストデビル日周期変動と地方時依存性の統計的把握 (最低1ヶ月の長期観測を実現したい) ダストデビルの空間発生分布の特定 (近傍1 km分解能, 遠方10 km分解能) 放電による危険性評価 (放電規模分布と遭遇頻度による定量評価)
エクストラサクセス	<ul style="list-style-type: none"> ナビ・カメラ検知領域内での相関統計評価 <ul style="list-style-type: none"> ➤ 放電を伴うダストデビルの割合 ➤ 直径, 持続時間, 光学的厚さ 火星隕石の検出 (電磁場変動を伴わない大規模衝撃波の1例以上の検出)

第47回 月・惑星シンポジウム, 2014-08-04, ISAS/JAXA

3. 新たに獲得する知見

- 火星における放電の検出, 放電規模分布に関する新たな知見
- 火星における音の検出, 音速に関する新たな知見
- ダストデビルの分布・発生頻度 (時間、空間)
- ダストストームの発達過程に関する知見: 発生・移動・盛衰
- ダストデビル発生の依存性 (地方時, 季節, 気象条件, 地表面状況) の統計的理解
- ダストイベントへの静電場の貢献度の理解
- 電離圏・地表面/地下構造の推定 (電磁波の伝搬パスにおける減衰量から表面の誘電率=水分布の理解)
- 隕石落下・気圧波イベントの頻度 (衝撃波の検出)
- 音速分布から火星大気の利用 (緩降下時や近接した2点観測が可能な場合)
- 高度20 km以下の音速分布 (大気構造) (分離等の点火音の利用)
- 放電が探査機や有人活動に与えるハザードの定量的知見 (SKG) ・貢献
 - ※ SKG: Strategic Knowledge Gap

第47回 月・惑星シンポジウム, 2014-08-04, ISAS/JAXA

4. 機器への要求事項

機能要求	精度要求
<ul style="list-style-type: none"> 電界+磁界+音波+発光の同時計測 可能な限り長期間の連続した計測 イベントの自動検出と波形記録 センサの外部搭載 (E, Bアンテナ, マイク, フォトダイオード) ナビ・カメラとの同時運用 	<ul style="list-style-type: none"> 相対時刻同期精度: 0.1 ms以上 (電波・音波理学機器間) 方位推定精度: $\pm 1^\circ$ (目標) 距離推定精度: ± 100 km (目標)

- ✓ 電場: 400 km先の雷電場を15 cm長Ant.で検出 \Rightarrow 1/100規模で45 cm長なら12 km先
- ✓ 磁場: 100 km先の雷磁場は70 pT \Rightarrow 40 cm四方ループアンテナで1/100規模を検出可
- ✓ 音波: 落雷音圧0.2~20 Pa @ <10 km=80~120 dB (SPL) 1/100規模で40~80 dB
- ✓ 発光: GLIMSで400 km先の雷発光観測 \Rightarrow 可視圏内で100 kR~10 MRの発光検出可

-
- 電界用1成分鉛直アンテナ (450 mm長) : DC~10kHz
 - 磁界用2成分直交ループアンテナ (400 x 400 mm等価面積以上) : 10Hz ~10kHz
 - 3成分マイク (最大限の三角形配置, マージン込30 dB以上) : 10Hz ~ 10kHz
 - 1成分フォトダイオード (水平360度視野) : CO₂発光輝線 (300-400nm)

第47回 月・惑星シンポジウム, 2014-08-04, ISAS/JAXA

5. 機器の構成・仕様

5.1 機器の構成

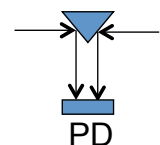
電界アンテナ+磁界アンテナ+マイク+フォトダイオード(PD)、プリアンプ回路

制御ユニット(受信回路、自動検出回路、相関処理回路、コマンドI/F、テレメータI/F)

5.2 機器の仕様

展開式鉛直アンテナ、展開式直交ループアンテナ(マスト展開を活用)

マイク通気孔、PD地平線方向集光用光学系、露出部の低温対策(ヒーター)



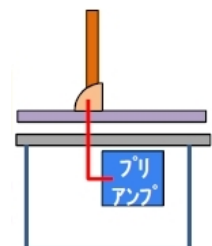
5.3 設計方針

共通データ処理回路によるリアルタイム自動解析と優先度順データ蓄積

マイク+PDは共通パッケージ化可能(低温対策として)

プリアンプ回路はアンテナ直下の本体内部に搭載

受信機+データ処理回路はローバー本体内部に搭載



5.4 プラットフォームへの要求事項

ハーネスは可能な限り最短に(EMC対策)

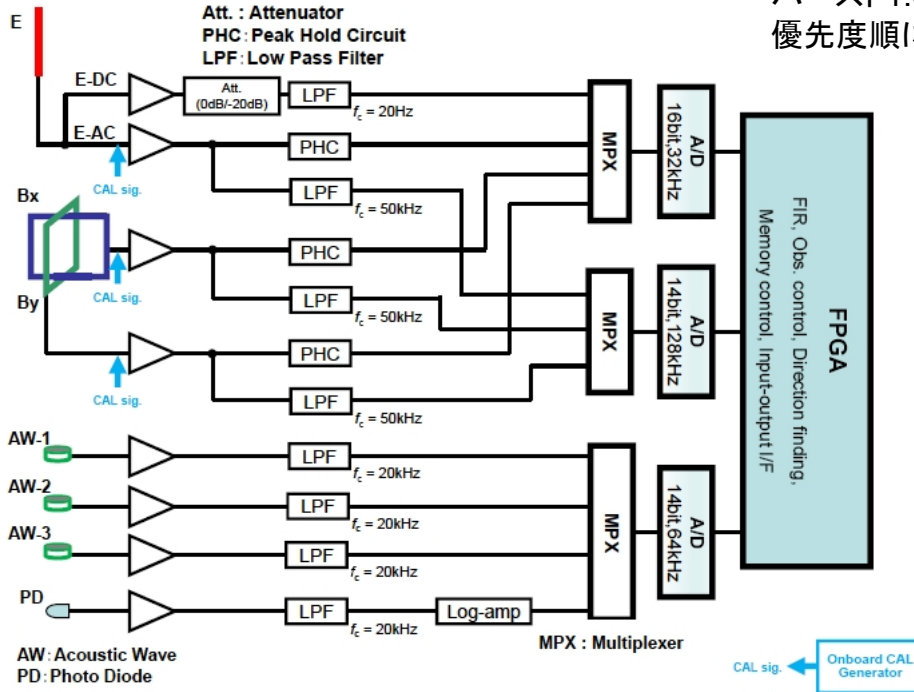
EMCの最低条件は一般機器レベル(各機器からの積極的な輻射を排除)

発光観測も含め基本的に昼間仕様とする(可能なら限定的な夜間運用も希望)

第47回 月・惑星シンポジウム, 2014-08-04, ISAS/JAXA

5. 機器の構成・仕様

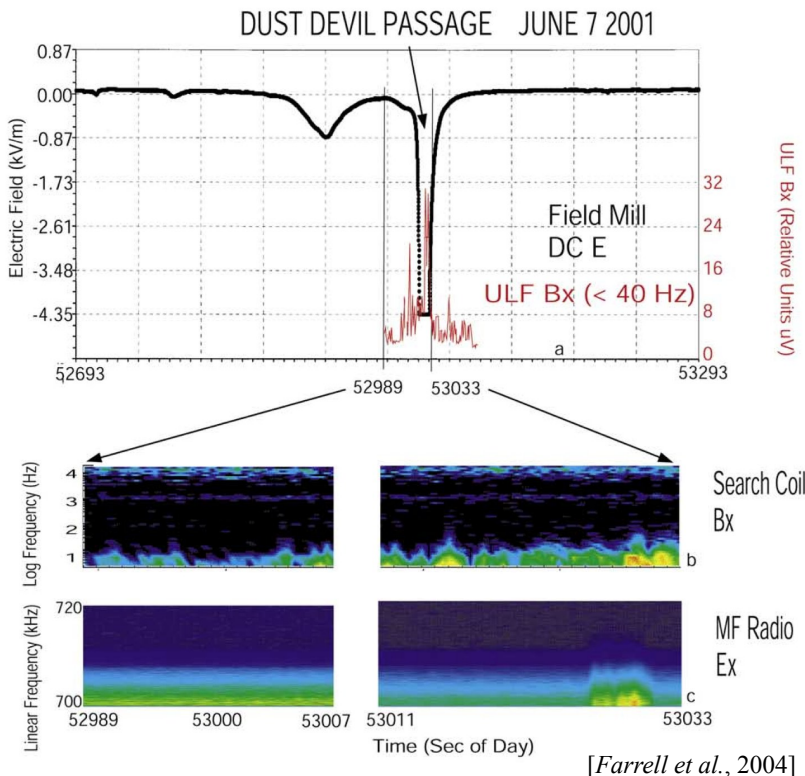
機器構成のブロック図



ノミナル100 kB/hour
バースト1.6 MB/hour
優先度順に分割送信

5. 機器の構成・仕様

地球のダストデビル観測例



観測されたDC電場 (E_z)

$$E_z > 4.35 \times 10^3 \text{ (kV/m)}$$



サチュレーションしているため、実際はもっと大きい値になっている



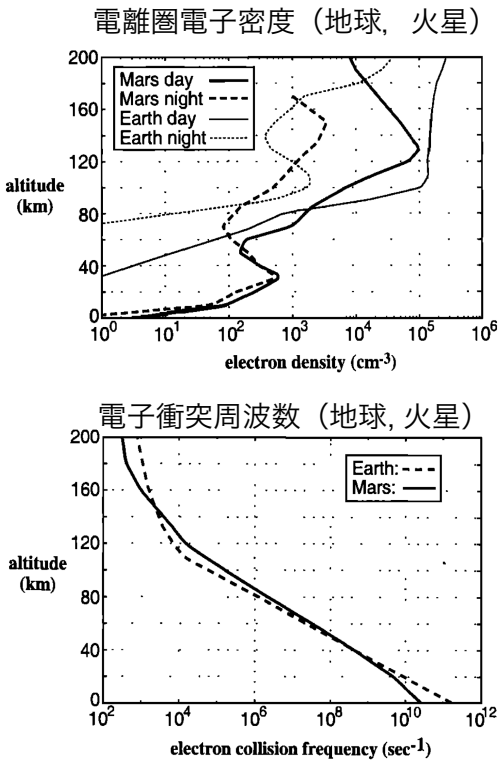
$E_z = 10 \text{ kV/m}$ と仮定すると...

火星の絶縁破壊電場

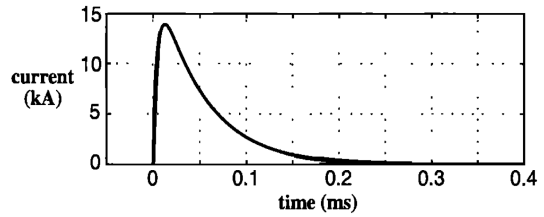
$$E_k = 20 \text{ kV/m の約50\%}$$

5. 機器の構成・仕様

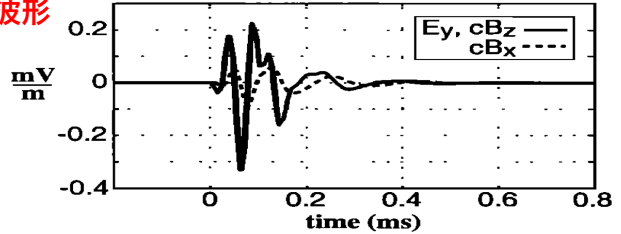
ダストデビルから放射される電磁波



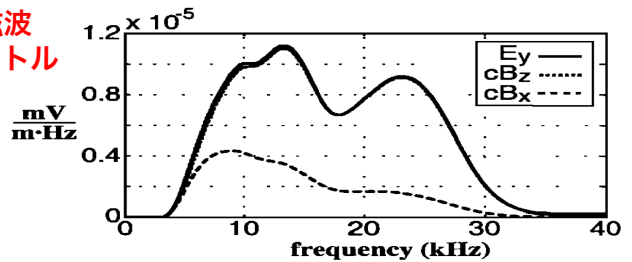
電流波形



電磁波波形



電磁波スペクトル



[Cummer and Farrell, 1999]

第47回 月・惑星シンポジウム, 2014-08-04, ISAS/JAXA

5. 機器の構成・仕様

検知予測範囲の推定(電場)

- JEM-GLIMSでは高度400 kmで観測を実施し雷電波を検出できている。よって、GLIMSと同じ15 cmのアンテナを用いた場合、「地球の雷と同等規模の放電が火星で起きれば最低でも400 km遠方の雷は 検出できる」とする。(GLIMSの場合、電離圏での電波反射の効果はあるのだが…)
- ある雷放電が(*Idl*)の電流モーメント変化をもつとき、電磁波の放射電界強度は下式に従う(電界強度は距離に一次反比例)。

$$E \approx \frac{1}{4\pi\epsilon_0 c^2} \frac{1}{r} \frac{d[Idl]}{dt}$$

測定周波数範囲: 電界成分 DC~10 kHz

- アンテナ有効長は波長スケールに較べて極めて小さいので、受信システムの感度は単純にアンテナ長さに一次比例すると仮定。

以上から、電磁波観測では、アンテナ長の違いによる検知予測範囲は以下にまとめられる。

	検知予測範囲		
	アンテナ長 = 5 cm	アンテナ長 = 15 cm	アンテナ長 = 45 cm
地球の雷と同等規模の放電	130 km	400 km	1,200 km
地球の雷の1/10の規模の放電	13 km	40 km	120 km
地球の雷の1/100の規模の放電	1.3 km	4 km	12 km

※ ただし、雷放電から放射された電波のほとんどは電離圏で反射されるため、GLIMSの高度まで伝搬してくるものは稀と考えられる。このため、地上において雷放電電波の直達波を計測する場合、検知予測範囲は上記の数値よりも大きくなると考えられる。

音波観測では、静電破壊による衝撃波が励起した音波の検出範囲は、マイクによる検出下限周波数に近い10 Hz程度の場合、大気粘性による減衰効果が少なく50 km程度伝搬する。

第47回 月・惑星シンポジウム, 2014-08-04, ISAS/JAXA

5. 機器の構成・仕様

検知予測範囲の推定(磁場)

雷放電のスペクトル (磁場)

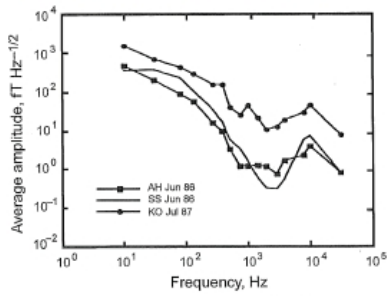


Fig. 13.14. Average ELF-VLF noise amplitudes in femtoTesla per square root of hertz at Arrival Heights, Antarctica (AH), Sondrestromfjord, Norway (SS), and Kochi, Japan (KO) for the months of June 1986 (AH and SS) and July 1987 (KO). Overall average amplitudes for 16 narrow-band frequencies are shown. Adapted from Spaulding (1995) and Fraser-Smith *et al.* (1991).
[Rakov and Uman, 2003]

- 南極Arrival Heights(AH)で観測される雷の磁場スペクトル強度は,

$$P(f) = 10 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}} @ f=10 \text{ kHz}$$

- 磁束密度強度を計算するには,

$$B = \sqrt{\int_{f_1}^{f_2} \{P(f)\}^2 df}$$

- 積分の帯域幅を5kHzとすると,

$$B = \sqrt{100[\text{fT}^2/\text{Hz}] \times 5000[\text{Hz}]} \\ = 700[\text{fT}] \\ = 0.7[\text{pT}]$$

- 磁場放射項は下式に従う。距離に一次反比例。よって雷からある距離の場所での強度は,

$$H_{\phi} \propto \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{1}{c^2 r} \frac{\partial^2 [M]}{\partial t^2} \right)$$

測定周波数範囲: 磁場成分 1 kHz ~ 10 kHz

※ 周波数帯域 f=1-10 kHzにおける推定強度

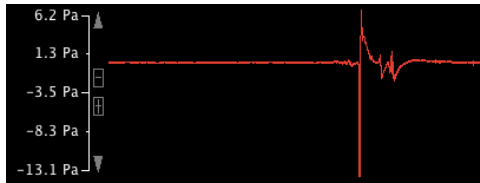
雷からの距離 [km]	100	200	400
磁束密度強度 [pT]	70	35	18

※ 火星ダストデビルでの放電規模が地球の雷と同じ場合は上記の値となる。放電規模が1/10なら強度も1/10。

5. 機器の構成・仕様

検知予測範囲の推定(音波)

- 地球の雷放電による雷鳴は、10 km圏で発生した場合、0.2~20 Pa (P-P)程度の最大振幅。
- 音圧レベルは、20 μPaを0 dBとするdB SPLで表記される。
- 0.2~20 Paを変換すると、80~120 dB SPLであり、火星放電が1/100規模と仮定すれば、40~80 dB SPL。
- 0 dBの音圧 (20 μPa at 1 kHz) は、可聴最小音圧で規定されており、一般的なマイクで10 dBは明瞭に検出可。
- 静電破壊による衝撃波が励起した音波の検出範囲は、可聴下限周波数に近い100 Hz程度の場合、大気粘性による減衰効果が少なく50 km程度伝搬する。減衰は周波数の2乗に反比例するため、計算上は10 Hzの雷音波は5000 km、1 kHzの雷音波は500 mの伝搬が期待値である。
- デルタ関数的な雷鳴では全周波数成分で励起されるが、大気粘性による距離減衰効果により低周波ほど広域が検知できる。



測定周波数範囲: 音波成分 10 Hz ~ 10 kHz

距離12 km, 最大振幅 20 Paの雷鳴観測例(山本他, 2014)

以上から、音波観測では、マイクの違いによる検知予測範囲は以下にまとめられる。

	検知予測範囲		
	10 Hz (複数マイク必須)	100 Hz	1 kHz
地球の雷と同等規模の放電	5000 km	50 km	500 m
地球の雷の1/10の規模の放電	500 km	5 km	50 m
地球の雷の1/100の規模の放電	50 km	0.5 km	5 m

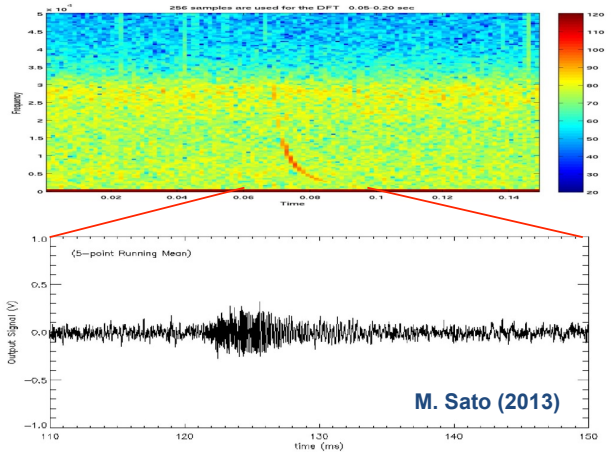
6. 機器の開発レベル(TRL)

電界観測:ISS-SLIMS TRL=7~9
 磁界観測:MMO, ERG TRL=6
 音波観測:S-310-41 PDI TRL=6~7
 発光観測:ISS-GLIMS TRL=7~9



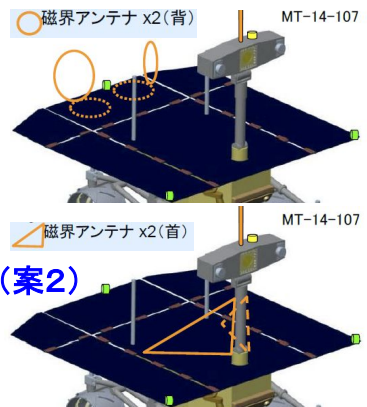
以上は TRL ≥ 6

電磁波・音波複合
 自動データ処理:
 TRL=4~5



展開式円環ループアンテナ(案1)
 TRL=4~5

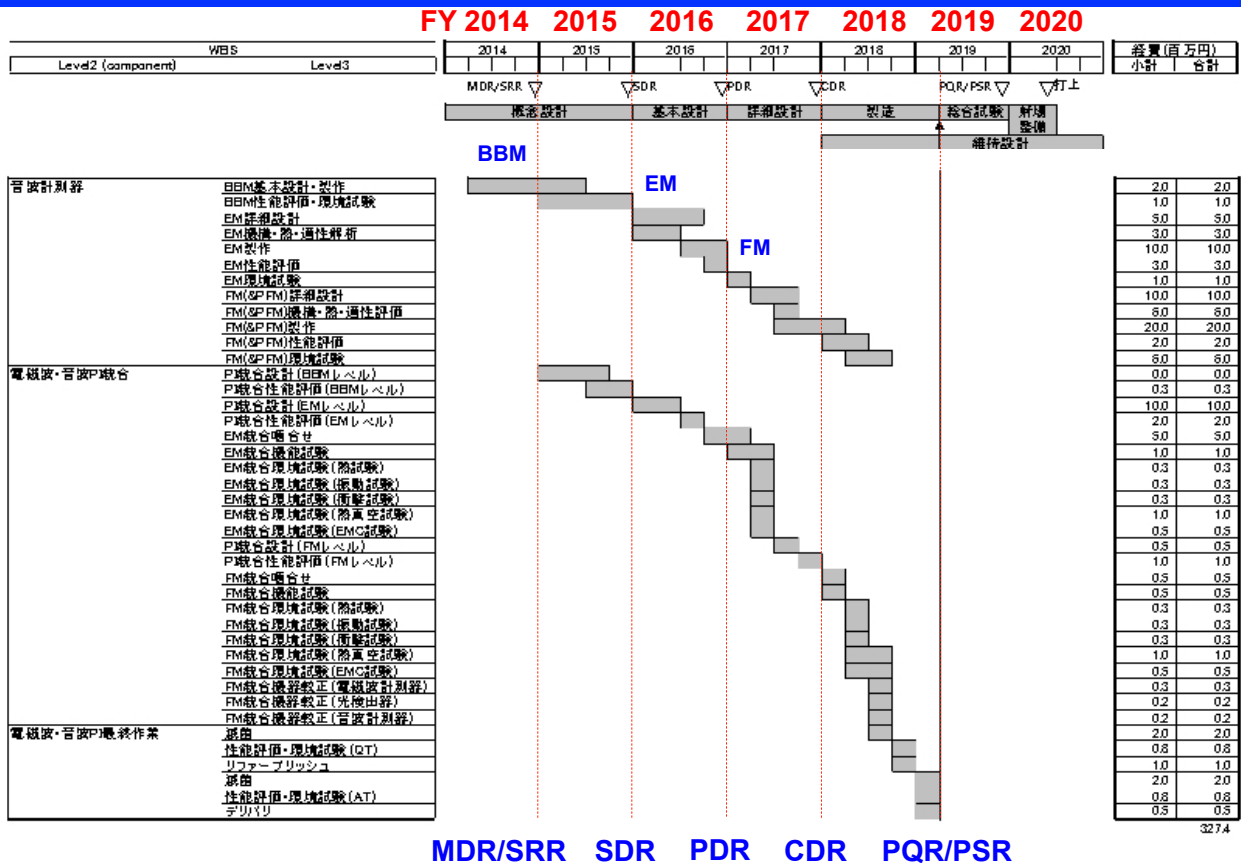
マイク(緑):太陽電池末端に3箇所
 PD(黄):マスト頭
 電界アンテナ(橙):マスト頭or首に並行



展開式マスト一体型ループアンテナ(案2)

(ローバー側との共同開発が必須)

7. 開発計画



8. 機器開発体制

※ 小規模WGとしてMars 2020 AOへの応募時に構築した国際チームを継承

PI:	山本 真行	(高知工科大学 システム工学群)
Co-I:	佐藤 光輝	(北海道大学 大学院理学研究科)
	石坂 圭吾	(富山県立大学 工学部)
	小郷原 一智	(滋賀県立大学)
	高橋 幸弘	(北海道大学 大学院理学研究科)
	鴨川 仁	(東京学芸大学)
	阿部 琢美	(ISAS/JAXA)
協力者:	Yoav Yair	(The Open University of Israel)
	Karen Aplin	(University of Oxford)
	Franck Montmessin	(LATMOS, Institut Pierre-Simon Laplace, France)
	Jean-Jacques Berthelier	(LATMOS, Institut Pierre-Simon Laplace, France)
	William Farrel	(GSFC/NASA)
	清水 久芳	(東京大学 地震研究所)
	足立 透	(気象研究所)
	石原 吉明	(JSPEC/JAXA)
	小嶋 浩嗣	(京都大学 生存圏研究所)

八木谷 聡 (金沢大学)
尾崎 光紀 (金沢大学)
芦原 佑樹 (奈良高専)
千秋 博紀 (千葉工業大学)

9. リスク分析と対策

技術的観点

- マスト展開に合わせた直交ループアンテナ展開システムの構築
- 厳しい低温環境・熱サイクル環境へのアンテナ・マイク・PDの対応
- 惑星環境保護への対応
- EMCへの対応
- 厳しいデータ送信容量の中、有意なデータが得られるか

時間的観点

- マスト展開に合わせた展開システムに関するローバー開発側との共同対応

コスト的観点

- 設計費不足のためメーカーによる詳細設計を未実施
- 惑星環境保護への対応

人的観点

- 惑星環境保護への対応

10. プラットフォーム搭載性

長期間の連続観測の実現が重要(最低1月は必要) ⇒ ローバー・ランダーとも搭載可能
低EMCノイズ環境に依存して性能向上 ⇒ ランダーが多少は有利
複数地点観測(オプション) ⇒ 近距離なら100 mスケール分解能、遠距離なら広域観測
火星降下着陸時の音波観測(オプション) ⇒ 鉛直プロフィール

必然性・有効性

スコープ	A	A	B	B	C	C	D	D
	有効性	必然性	有効性	必然性	有効性	必然性	有効性	必然性
ローバ	—	—	4	5	4	5	—	—
ランダ	4	5	4	5	4	5	4	5
(複数地点案)	1	1	5	5	5	5	5	5

A:飛行機、B:ローバ、C:長距離ローバ、D:ランダ

第47回 月・惑星シンポジウム, 2014-08-04, ISAS/JAXA

必然性・有効性 (詳細)

有効性

A-飛行機: 1点(考慮外)

音波計測は風切り音を観測できる程度の可能性。鉛直分布には不向き。短期間でNG。

BC-ローバ: 4点

50 cmクラスの展開式アンテナの搭載可能性が高いローバでは、地球と同規模の放電なら1200 km、1/100規模の放電なら12 kmの範囲で放電検出が可能。デメリットとして、ローバ自身の移動等の機械動作中はノイズに埋もれる可能性がある。

OP ランダと合わせた複数地点での同時観測ができれば100 mスケールの空間分解能が可能。

OP オプション提案である小型「産み落とし」機器では、EMC環境の大幅改善が見込まれ、S/Nでランダ・ローバからの電磁場観測を凌駕する。ランダ・ローバ・小型産み落とし機器の3点観測が実現すれば、10 km圏内で発生する放電に対し100 mの空間分解能に至る。

D-ランダ: 4点

ランダは駆動系機械動作がない点でEMC条件的にやや有利。2地点ランダで距離が1000 km程度の場合、50 cmクラスの電界アンテナが搭載できれば、火星ダスト現象による放電の同時観測が成立し、広域観測が可能となる。

(ABC-ランダ: 4点)

着陸後にランダが観測・中継装置として長期稼働可能なら、ローバより安定な電磁波計測地点を提供できるが、短期稼働のランダならば考慮外(1点)となる。

必然性

すべて: 5点

電磁波・音波観測カテゴリ内では必然性についての優劣はない。例えば機器選定でナビ・カメラなど他の観測機器との組合せの必然性の優劣は考える。新規性としては、火星での電磁波による放電観測や音の観測は世界初であり、必然性は高い。

第47回 月・惑星シンポジウム, 2014-08-04, ISAS/JAXA

11. プラットフォームへのリソース要求

【下記の点が許容範囲内にあるか？】

- 重量： 総重量 2.6 kg 本体1.6, E-Ant. 0.1, B-Ant. 0.2, Mic. 0.1, PD 0.1, Cable 0.3
- 容積： 230x170x60 (エレクトロニクス部) , 450 (E-Ant.) , 400x400 (B-Ant.) x2, 20x20x10 (マイク) x3, 50x30x30 (PD) [mm]
- ピーク電力 / 電圧 / 電流： 5.4 W / 12 V / 450 [mA]
- 総電力 129.6 (最大運用) ~ 30.3(昼間最小運用) [Wh/1火星日]
- 保存温度範囲 -55°C~+125°C
- 動作温度範囲 -40°C~+60°C

※ 展開物がある: 鉛直アンテナ、直交ループアンテナ

※ EMC条件がある: PI側から厳しいEMC条件は要求しないが不要輻射回避を希望

ヒーター必要電力解析例 (畠中氏による)	機器名	消費電力 [個単位]	数量	寸法/形状情報	必要ヒータ電力[W]					
					下限温度 [°C]		非動作時		動作時	
					非動作	動作	昼間	夜間	昼間	夜間
	電界アンテナ	0	1	棒状、長さ100mm以上	情報無	情報無	0	0	0	0
	磁界ループアンテナ	0	2	円環ならφ100mm	情報無	情報無	0	0	0	0
	マイク	0.53	3	50x30x30、ε=0.2を想定。	-55	-55	0.19	1.3	0	0
	フォトダイオード	0.8	1	50x30x30。30x30だけε=0.8, 他はε=0.2と仮定。	-55	-40	0.1	0.5	0	0
	(メインエレキ/構体内)	3	1		-40	-40	0	0	0	0
	(ハーネス熱リーク)									
	自己消費電力合計	5.4					0.3	1.8	0.0	0.0

注) ヒータ電力は個数分の合計値。 必要ヒータ電力合計[W] (原案時)

第47回月・惑星シンポジウム, 2014-08-04, ISAS/JAXA

12. プラットフォームの優先度

優先度と各プラットフォーム案に対する考慮点

↑	高	ローバー + ランダー	ローバー移動により距離が変化する2地点で観測可
		ランダー + ランダー	遠方の2地点間からの広域観測可
		ローバー	移動性による様々な条件での観測が可能
		ランダー	ローバーよりEMC条件が良い可能性あり
	低	飛行機 (風切り音?)	寿命短く不適(ランダーが着陸後長期稼働なら有効)

- 要点
- 長時間計測できるほど遭遇確率が高まり統計的に良好なデータが得られる。
 - EMCノイズの少ない時間帯が多く取れるほど良質なデータが得られる。
 - 複数地点からの観測が可能なら高い空間分解能が得られる。
 - アンテナサイズが大きく取れるほど電磁波の受信感度的に有利となる。
 - マイク間距離が長いほど方向探知や音速計測の精度で有利となる。
 - 夜間観測ができるほど発光との同時観測の可能性が高くなる。
 - ナビ・カメラ等との同時観測ができるほどダスト現象との同定が確証的になる。

第47回月・惑星シンポジウム, 2014-08-04, ISAS/JAXA

13. ロードマップとの整合性

- 国際チームを構築した観測提案であり現在のところ外国提案との競合はない
(Mars 2020を含め、これまでの提案では、探査機の主目的に合致しないなどの理由で選外となってきたため、海外の火星着陸探査への過去提案も含め研究コミュニティからの共同提案とできた)
- ただし、ExoMars/ローバーでは鉛直電界1成分の観測を実施：
 - ポインティングベクトルが推定できない：放電方向・位置は特定できず
- 独自の放電ハザード解析の知見 (SKG) を提供可能
- 有人探査に向けたハザードの理解に対する国際ロードマップへの貢献が可能
(将来の火星着陸探査、有人火星探査への長期ロードマップに沿った提案となる)
- 火星着陸探査でしか実現できない観測提案であり、気象観測やナビカメラとともに観測することで火星ダスト現象の分布や発生条件の検証が可能となる
(比較惑星学の観点から、長期ロードマップにおける重要点の1つに合致する)

第47回 月・惑星シンポジウム, 2014-08-04, ISAS/JAXA

14. まとめ

- ✓ 電磁波と音波の同時観測により火星での放電を高精度リモートセンシング
- ✓ 地球以外の惑星大気中における世界初の放電観測・音波観測を実現
- ✓ 火星大気中ダストイベントの広域探査 (~400 km) が可能
- ✓ 砂の惑星の気候制御へのダストイベントのインパクトを定量可能
- ✓ ダストイベントに繋がるマイクロダスト持ち上げへの静電場の貢献度を定量
- ✓ 将来の火星有人探査に向けたハザード知識の蓄積にも貢献
- ✓ 世界初の「火星雷」や「火星の音」は一般へのアピール、アウトリーチにも重要

第47回 月・惑星シンポジウム, 2014-08-04, ISAS/JAXA