

火星地表面大気環境を模擬した音響伝搬特性の計測

山本 真行、藤津 裕亮
(高知工科大学 システム工学群)

目的: 電磁波・音波・発光観測のターゲット

- ✓ 電磁波音波の同時観測により火星放電を高精度リモートセンシング
- ✓ 地球以外の惑星大気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
- ✓ ストーム形成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
- ✓ 火星における流星・隕石の検知(火星軌道上の流星体Fluxの測定)
- ✓ 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

火星放電電磁波観測として提案
↓
NASA Mars 2020 AO への提案: 電磁波と音波の観測を複合(2014)
↓
JAXA中型AO MELOSサブ機器としての提案(2015)
↓
着陸探査用機器への開発を地道に継続 & PD-SR計画の一部としての提案 (火星夜面発光観測)

電磁波・音波観測の地表面・生命探査への活用

- ✓ 活動領域(水流、ガス放出、表層崩壊、ダスト現象)の探査
- ✓ 放電や隕石によるハザード検知
- ✓ ダストイベントによるハザードの事前察知
- ✓ ローバー機能の状況確認

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

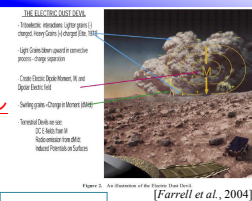
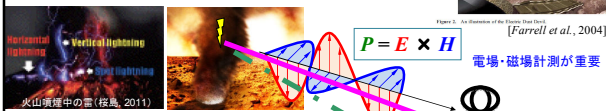


Figure 2. An illustration of the electric mantle. [Farrell et al., 2004]



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

2. サクセスライテリア

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査

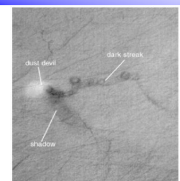


Figure 1. A MIS-MAR image of a dust devil (Olson M. C. Malin et al. MIS-MAR 2001, NASA's Mars Reconnaissance Orbiter). Photographed http://photojournal.jpl.nasa.gov/ 11 December 1999.

[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能力確認。

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
 - ダストデビル発生時の依存性(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理解(縦降下時や近接した2点観測が可能の場合)
 - 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

4. 機器への要求事項

機能要求	精度要求
• 電界+磁界+音波+発光の同時計測	• 相対時刻同期精度: 0.1 ms以上 (電波・音波理化学機器間)
• 可能な限り長期間の連続した計測	• 方位推定精度: ±1° (目標)
• イベントの自動検出と波形記録	• 距離推定精度: ±100 km (目標)
• 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	

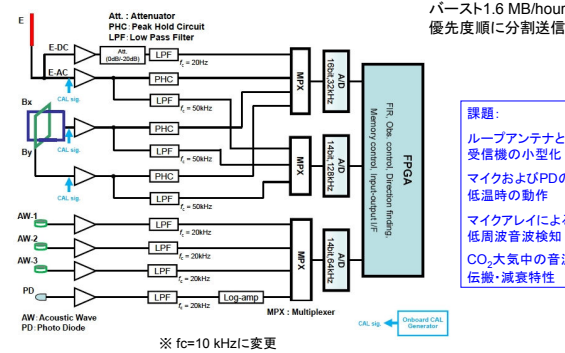
- ✓ 電場: 400 km先の雷電場を15 cm長Antで検出 ⇒ 1/100規模で45 cm長なら12 km先
- ✓ 磁場: 100 km先の雷磁場は70 pT ⇒ 40 cm四方ループアンテナで1/100規模を検出可
- ✓ 音波: 落雷音圧0.2~20 Pa @ 10 km=80~120 dB (SPL) 1/100規模で40~80 dB
- ✓ 発光: GLIMSで400 km先の雷発光観測 ⇒ 可視圏内で100 kR~10 MRの発光検出可

- 電界用1成分鉛直アンテナ(450 mm長): DC~10 kHz
- 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): 10 Hz ~ 10 kHz
- 3成分マイク(最大限の三角形配置、マージン30 dB以上): 10 Hz ~ 10 kHz
- 1成分フォトダイオード(水平360度視野): CO₂発光輝線(300-400 nm)



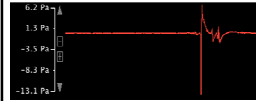
5. 機器の構成・仕様

機器構成のブロック図



検知予測範囲の推定(音波)

- 地球の雷鳴は、10 km圏で0.2~20 Pa (P-P)程度の最大振幅。
- 音圧レベルは、20 μ Paを0 dBとするdB SPLで表記される。
- 変換値で80~120 dB SPL。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 μ Pa 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は明確に検出可。
- 静電破壊による衝撃波が動い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<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。
- δ 関数的雷鳴は全周波数成分で動起される。大気粘性による距離減衰効果により低周波ほど広域まで検知。



マイクBBM → (マイクアレイ)

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	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

今回の実験の背景・目的

背景

- ▶ 宇宙航空研究開発機構 (JAXA)
 - ▶ 2020年代火星探査機の打ち上げ計画
 - ▶ 探査用ローバーにマイクを搭載
 - ▶ 火星大気中での音波源の特定
 - ▶ 音波の伝搬特性の解明

目的

- ▶ 過酷環境下でのマイクの動作特性の解析
- ▶ コンデンサ、MEMSマイクのうち適したマイクの選定

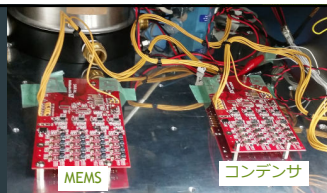
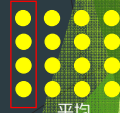


Fig.1 マイクブレッドボードモデル (BBM)



平均

火星

環境

- ▶ 大気圧 7 hPa
- ▶ 気温 -15°C~-120°C

表.1 大気組成

	分子	容積比[%]
地球	窒素	78.10
	酸素	20.90
	アルゴン	0.93
	二酸化炭素	0.03
	水	0.00~2.00
火星	二酸化炭素	95.32
	窒素	2.70
	アルゴン	1.60
	酸素	10

自然現象

- ▶ 地震
- ▶ 砂嵐による雷
- ▶ ガス放出

データの取得が行われていない

インフラサウンド

- ▶ 20 Hz以下の人間には聞こえない音波
- ▶ 超長距離伝搬

- ▶ 大きな物体や膜面が急激に移動するときが発生
 - ▶ 雷や地震、津波など

音波について (火星大気中)

- ▶ 大気圧 7 hPa
- ▶ 平均分子量が **大**
- ▶ 音速 **遅い**
- ▶ 減衰 **やや大きい**

$$音速 c = \sqrt{\frac{\gamma P}{\rho}} = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}}$$

γ : 比熱比 P: 圧力 R: 気体定数
 ρ : 密度 T: 絶対温度 M: 平均分子量

$$p = p_0 e^{-mx}$$

p: 受音点の音圧 p_0 : 基準点の音圧
m: 減衰係数 x: 距離

実験内容

@高知工科大学(2)

- ▶ 真空チャンバを密閉容器として使用
- ▶ スピーカーから音波を出力 (10, 15, 20, 25, 30, 40 Hz)
- ▶ シリンジポンプで微気圧変化 (三角波) を作り出す

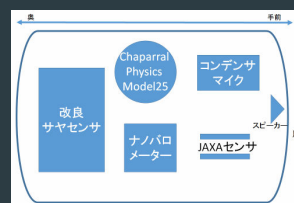


Fig.4 チャンバ内部



Fig.5 シリンジポンプ

解析結果 @高知工科大学

▶ シリンジを用いて1 Paの気圧変化を0.1 Hzで出力

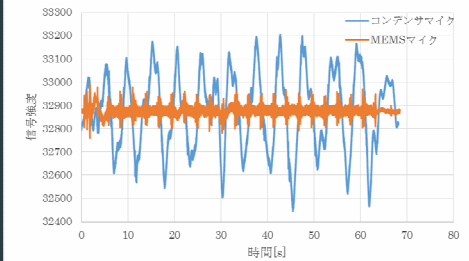


Fig.8 インフラサウンド波形

13

解析結果 @高知工科大学

▶ シリンジを用いて1 Paの気圧変化を0.1 Hzで

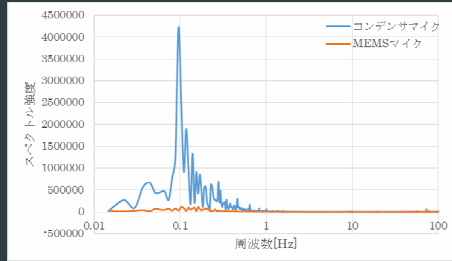


Fig.9 周波数スペクトル

14

解析結果 @高知工科大学

▶ 較正実験

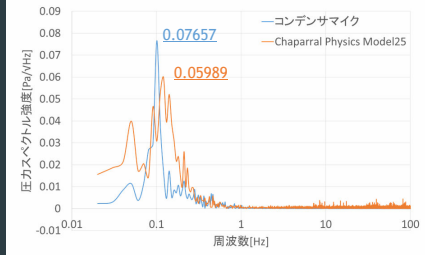
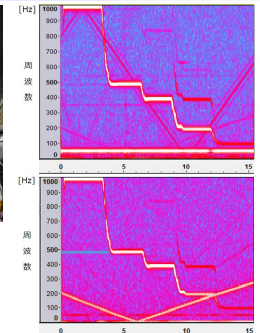
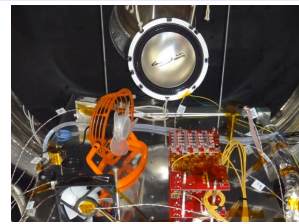


Fig.10 較正・比較

15

7. 低温環境下試験(-120°C, CO₂大気 7 hPa)

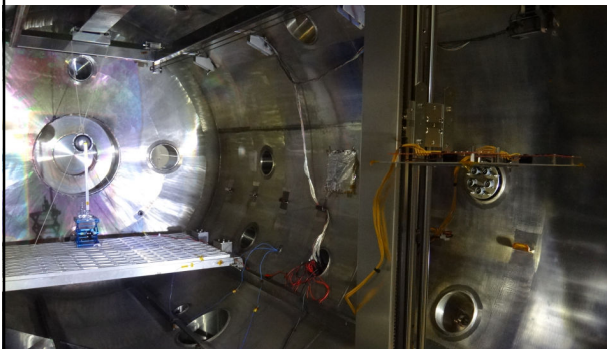


- 2015/ 1/8 ~ 9 に千葉工業大学にて火星環境下での音波計測性能を検証した。
- 2015/12/ 8 ~ 9 に高知工科大学にて低周波音波の検知特性試験を実施した。
- 2016/ 1/25 ~ 29 にJAXA宇宙科学研究所にてCO₂大気中の距離減衰特性を計測予定。(スペースプラズマ共同利用を申請)

■ MEMS型(上)およびコンデンサ型マイク(下)による音波検出時のダイナミクススペクトル(7 hPa, -120°C, CO₂大気): 1000, 500, 400, 200, 100 Hzの各周波数のサイン波をアナログ信号発生器により順次手入力

16

チャンバ内の設置の様子



17

スピーカーとマイクBBM



18

実験内容

@JAXA in 相模原(1)

- ▶ 大型サイエンススペースチャンバ
 - ▶ 直径 約2.5 m 奥行 約4 m
- ▶ 音波減衰の計測
 - ▶ 二酸化炭素、アルゴン
 - ▶ (10, 20, 50, 100, 200, 300, 400, 500 Hz)
- ▶ 低周波測定
 - ▶ リークバルブから約1秒のガス流入(手動)



Fig.6. 大型サイエンススペースチャンバ

19

解析結果

@JAXA in 相模原

▶ 低周波測定(バルブ開閉)(0.14 MPa)

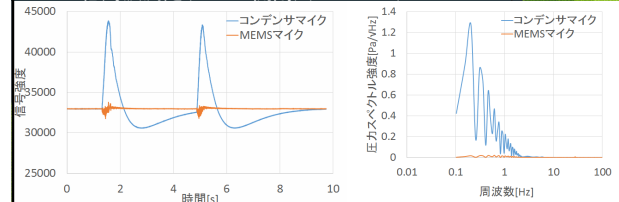
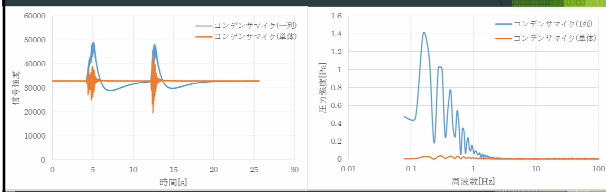


Fig.11 CO₂ 100% 圧力 7 hPa

20

アレイ配置によるメリット



Ar₂ × 10⁴

21

まとめ

- スピーカー破損のため、残念ながら当初目的の1つの音波減衰特性取得はできなかった。
- リークバルブを活用した微量大気流入実験により、ガス放出を模擬した実験に成功した。
- 極限環境での低周波音の検知には、コンデンサマイクのアレイが適しているという結果となった。

22