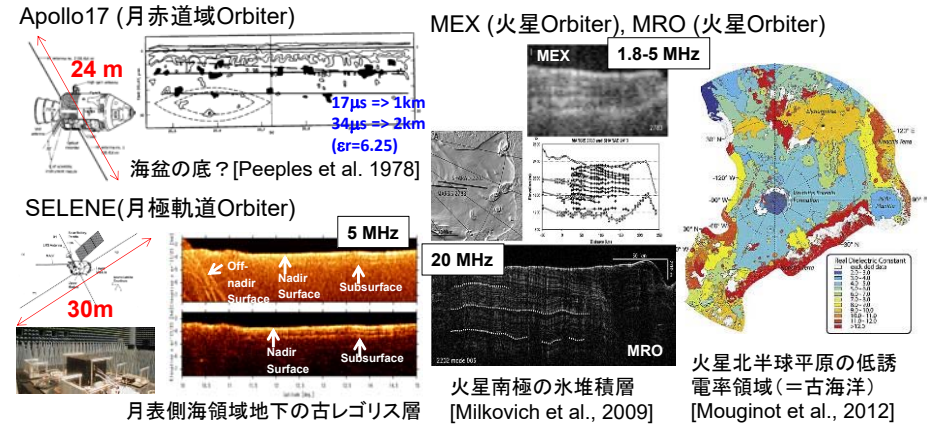


# 火星・月地下氷探査のためのレーダサウンダー

熊本 篤志<sup>1</sup>, 臼井 寛裕<sup>2</sup>, 黒川 宏之<sup>2</sup>, 野口 里奈<sup>2</sup>,  
 東 真太郎<sup>3</sup>, 石山 謙<sup>4</sup>, 土屋 史紀<sup>1</sup>, 寺田 直樹<sup>1</sup>,  
 宮本 英昭<sup>5</sup>, 西堀 俊幸<sup>4</sup>, 岩田 隆浩<sup>4</sup>, 尾崎光紀<sup>6</sup>,  
 関 華奈子<sup>5</sup>, 山崎 敦<sup>4</sup>, 大竹 真紀子<sup>4</sup>  
<sup>1</sup>東北大, <sup>2</sup>東工大, <sup>3</sup>九大, <sup>4</sup>JAXA, <sup>5</sup>東大, <sup>6</sup>金沢大

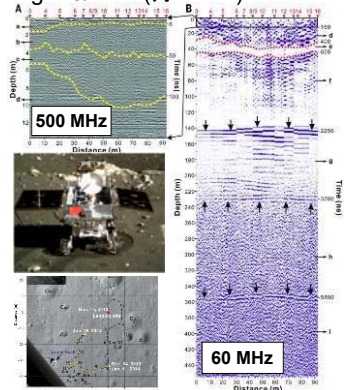
## 低周波レーダサウンダーによる固体惑星の広域地下探査

月 赤道域オービターによる広域探査(HF,VHF) (Apollo17, 1972)  
 極軌道オービターによる全球探査(HF) (SELENE, 2007-2008)  
 →月表側海領域の古レゴリス層→火山活動の履歴  
 火星 極軌道オービターによる全球探査(HF) (MEX, 2005-)  
 極軌道オービターによる全球探査(VHF) (MRO, 2006-)  
 →極域氷堆積層・北半球低地の低誘電率領域→火星気候の進化



## 高周波レーダサウンダ(GPR)による高精度地下探査

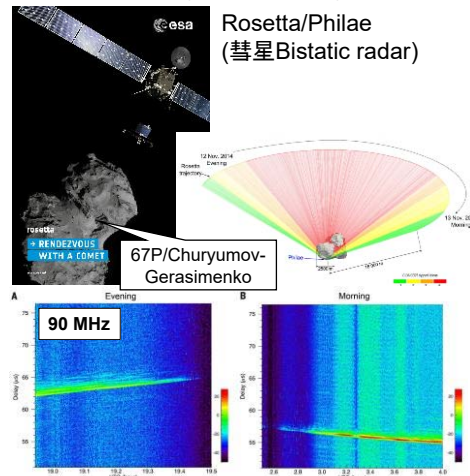
月 ローバ搭載GPR(VHF,UHF) (Chang'E 3, 2013-2014)  
 火星 ローバ搭載GPR(UHF) (ExoMars, 計画中)  
 Chang'E 3/Yutu (月Rover)



ImbrianからEratosthenianにかけて形成された地下層 [Xiao et al., 2015]

## Bistatic radar sounderによる小天体内部探査

彗星 周回機&着陸機(VHF) (Rosetta, 2014)  
 Rosetta/Philae (彗星Bistatic radar)



視線平均のバルク誘電率1.27 [Kofman et al, 2015]  
 深いほど減少 (1.7→1.3/100m) [Ciarletti et al. 2015]

## 火星における宇宙天気・宇宙気候探査計画

(Grimm et al., 2017)

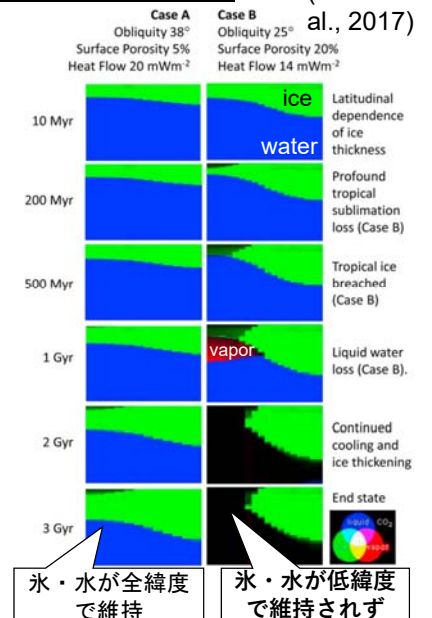
火星：過去にハビタブルな環境を持っていたことがあったが、現在は失っている惑星→宇宙空間への大気散逸プロセスの解明が課題。

火星の氷(水)がどのくらい存在していて、現在表層から上層大気までどう循環していて、上層で酸素としてどのように散逸しているか

周回衛星搭載地下サウンダによる火星表層の氷(水)分布の探査を提案

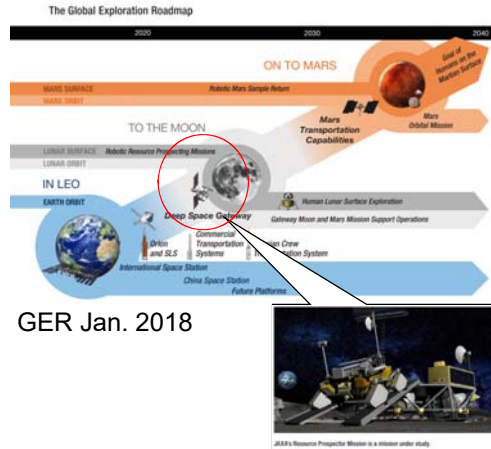
- ・高緯度：氷の存在が理論・観測の双方から確認されている。
- ・低緯度：氷(水)の有無は理論的に未決着。有の観測報告も間接的

→火星では未実施の高分解能(1.5m)地下探査レーダサウンダ観測で低緯度の氷を観測(検討中)



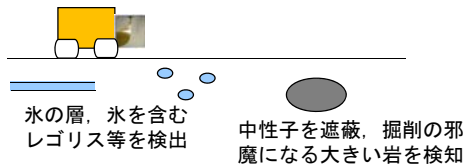
# 月極域着陸探査

GER(Global Exploration Roadmap) : 各国の宇宙機関のロードマップをまとめたもの。将来の火星有人探査に向けた月の資源探査・開発・拠点化のシナリオを提示  
 日本はインドと共同で、月極域での無人着陸探査を検討中。資源利用可能な氷の探査が主目的。



GER Jan. 2018

- ローバ搭載地中レーダーによる分解能1cm, 探査深度3mの地下水探査を提案
- 氷の層, 空隙に氷を含むレゴリス等が見つかる誘電率コントラストを検出
  - 中性子分光計, 掘削分析の運用・データ解釈を支援



# サウンド仕様案：火星

機器名	UHF帯地中レーダサウンド
英語名	UHF Subsurface Rader Sounder
搭載形態	衛星側面にアンテナを搭載 本体は衛星内部
質量	2kg以下(本体) 0.5kg(アンテナ)×4(or 2)
電力	10W
サイズ	200 x 150 x 30mm(本体) 750 mm(アンテナ)×4(or 2)
データ量	163Mbps×α(TBD)
仕様	<Active> 送信周波数: 50-150MHz, 変調方式: 疑似雑音BPSK変調, パルス幅: 5.11μs, パルス繰返周期: 50μs, 探査深度: 100-200m, 垂直距離分解能: 1.5m(真空中), ダイポールアンテナ×2対(円偏波送受信) <Passive> 電子密度計測(10 <sup>3</sup> -10 <sup>6</sup> /cc) 波動計測(1kHz-100MHz)

# サウンド仕様案：月極域

機器名	高分解能地中レーダー
英語名	HGPR (High Resolution Ground Penetrating Radar)
搭載形態	ローバ月面側にアンテナを搭載 本体はローバ内部
質量	0.9kg以下(本体) 0.1kg(アンテナ)×2
電力	<4W
サイズ	200 x 150 x 30mm(本体) 105 x 105 x 3mm(アンテナ)×2式
データ量	4480Mbit/10分
仕様	送信周波数: 1-15GHz, 変調方式: 直線状FM変調, パルス幅: 0.05μs, パルス繰返周期: 1μs, 探査深度: 3m, 垂直距離分解能: 0.01m(真空中), アンテナ形式: ヴィバルディアンテナ×2面(円偏波送受信)

# 火星レーダサウンド・仕様検討

ノイズレベル: 受信機のNoise Figure **1dB**として  
 $S_o > N_o \rightarrow S_i (=S_o - G) > N_i (=N_o - G) \dots$  銀河雑音レベル+1dB  
 $3 \times 10^{-21} \text{ Wm}^{-2} \text{ Hz}^{-1} \text{ str}^{-1}$  [Cane, 1979]  $\rightarrow N_g = 3 \times 10^{-20} \text{ Wm}^{-2} \text{ Hz}^{-1}$   
 受信機が受け取る電力は

$$P_{GN} = \frac{G_A \lambda^2}{4\pi} Y = \frac{1.64 \times (3\text{m})^2}{12.56} \times 3 \times 10^{-20} \text{ Wm}^{-2} \text{ Hz}^{-1} \times 100 \times 10^6 \text{ Hz}$$

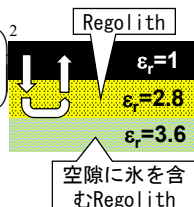
$$= 3.5 \times 10^{-12} \text{ W} = \text{-84dBm}$$

レーダエコー電力:

$$P_{RX} = \frac{P_{TX} G_A^2 \lambda^2}{(4\pi)^2 R^4} \sigma = \frac{10\text{W} \times (1.64)^2 \times (3\text{m})^2}{(12.56)^2 (300 \times 10^3 \text{m})^4}$$

$$\times 3.14 \times (234 \times 10^3 \text{m})^2 \left( 1 - \left( \frac{\sqrt{2.8} - 1}{\sqrt{2.8} + 1} \right)^2 \right) \left( \frac{\sqrt{4.9} - \sqrt{2.8}}{\sqrt{4.9} + \sqrt{2.8}} \right)^2$$

$$= 6.3 \times 10^{-13} \text{ W} = \text{-92dBm}$$



分解能(真空中) ΔR: 帯域幅BWによる.

$$\Delta R = \frac{c}{2 BW} = \frac{1.5 \times 10^8}{100 \times 10^6} = \text{1.5m}$$

Range圧縮: パルス長τ, 帯域幅BWによる

$$G_z [\text{dB}] = 10 \log_{10} (\tau \times BW) = 10 \log_{10} (5.12 \times 10^{-6} \times 100 \times 10^6) = \text{27dB}$$

減衰率: 周波数f, 火星表層の複素誘電率εr, tanδによる

(火星表層の複素誘電率: 3(1+itanδ), 0.005<tanδ<0.012とする)

$$\alpha = 0.182 \times f [\text{MHz}] \sqrt{\epsilon_r} \tan \delta = 0.182 \times 100 [\text{MHz}] \times \sqrt{3} \times 0.012 = \text{0.38dB/m}$$

$$= 0.182 \times 100 [\text{MHz}] \times \sqrt{3} \times 0.005 = \text{0.16dB/m}$$

可探深度: 減衰率α, レーダシステムの信号雑音比SNRによる

$$D_{\min} = \frac{S - N - NF + G_z}{\alpha_{\max} [\text{dB/m}]} = \frac{18}{0.38} = \text{47m}$$

$$D_{\max} = \frac{18}{0.16} = \text{112m}$$

Doppler周波数偏移: 探査機水平速度4.2km/s, アンテナ半幅角39度×2として

$$\Delta f = f \frac{v}{c} = f \frac{V_s \sin \theta}{c} = 150\text{MHz} \frac{4.2\text{km/s} \times 0.63}{3 \times 10^8 \text{m/s}} = 1323\text{Hz}$$

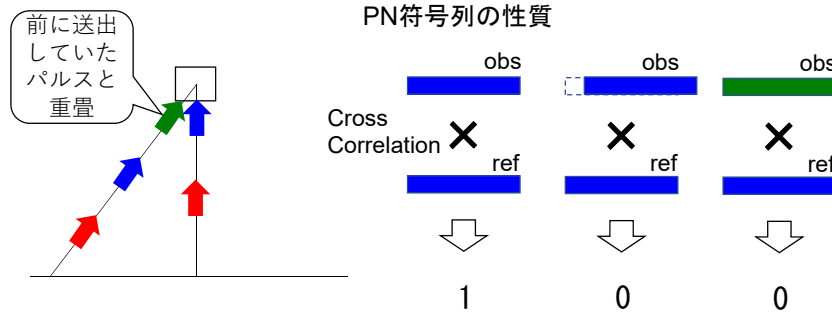


水平方向のパルス圧縮(Azimuth圧縮・合成開口処理)でundersampleにならないためにはPRF>**2.7kHz**の必要がある.

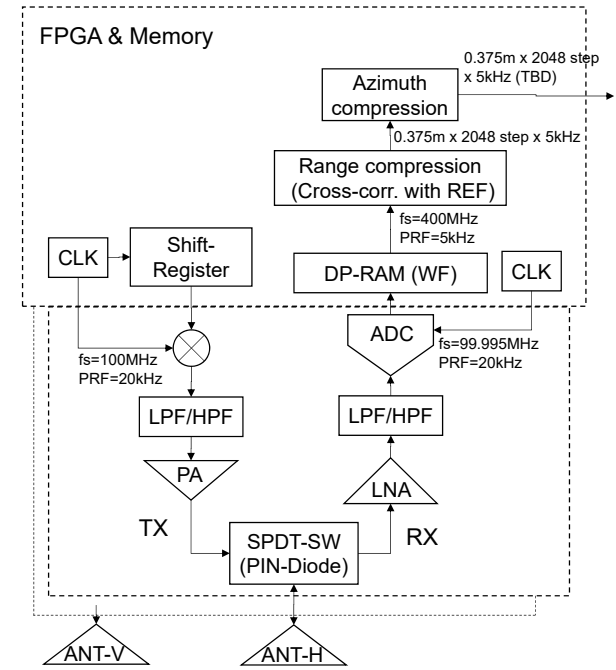
## Pulse送信間隔 (Pulse Repetition Interval)

斜め下からのエコーが重畳しない必要あり  
 → 179us@H=100km. (より高高度ではその倍)  
 等価サンプル方式でこの時間を空けようとするAzimuth圧縮に十分なPRF(>2.7kHz)が取れない。

重畳しても識別できればよい?  
 → PN (疑似乱数) 符号BPSK変調方式に変更. パルス毎に符号を変更(符号列4種でH=100kmに対応可能. 符号列36種でH=1000kmに対応)



## Block Diagram



## レーダサウンダでは氷(水)どのように観測されるか?

### 1. 誘電率コントラストを検出

地中では岩石・空隙・氷が様々なスケールで混在

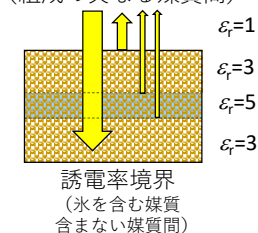
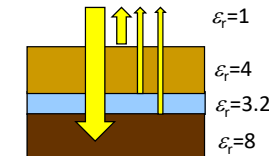
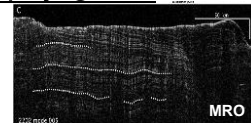
真空:  $\epsilon_r=1$ , basalt:  $\epsilon_r=7.3$  (3.12g/cc),  
 氷:  $\epsilon_r=3.2$  (0.92g/cc), 水:  $\epsilon_r=80$  (1g/cc)  
 $\tan\delta=0.005 - 0.012$

分解能より粗いスケールでの混在  
 →異なる媒質間の誘電率境界から反射

岩石と氷の間の誘電率境界からのエコーの遅れ時間  
 →氷層の深さ・形状

分解能より細かいスケールでの混在  
 →ある等価誘電率(bulk誘電率)の媒質とみなされる。

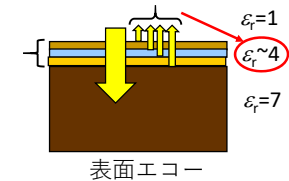
同じ化学組成でも、空隙率・空隙に含む媒質に応じて  
 bulk誘電率が変化→誘電率境界をつくりうる。  
 →氷を含む媒質の深さ・形状



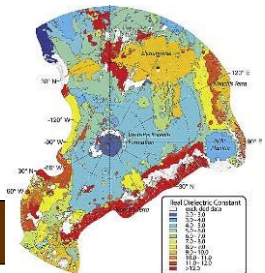
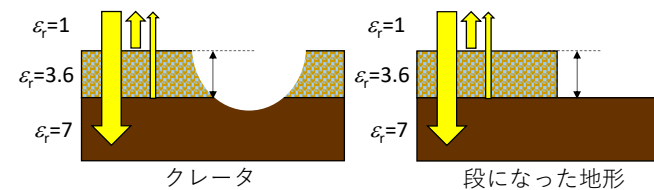
## レーダサウンダでは氷(水)どのように観測されるか?

### 2. bulk誘電率を導出

表面エコー強度から反射率を推定し誘電率が決定可能  
 このとき表面付近の薄い層は分解しきれてないが  
 分解能程度の深さまでのbulk誘電率としては求まる。  
 ※エコー強度には反射面のroughnessも影響  
 補正のためには高精度地形データが必要



レーダパルスの伝搬距離が地形から決定できる場合、  
 エコーの遅れ時間からbulk誘電率を導出可能



## 氷の有無による表層媒質のbulk誘電率の変化

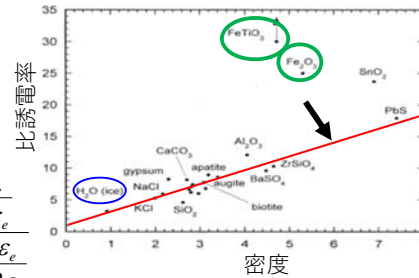
各媒質の誘電率・密度：

真空:  $\epsilon_r=1$ , basalt:  $\epsilon_r=7.3$  (3.12g/cc),

氷:  $\epsilon_r=3.2$  (0.92g/cc)

Maxwell Garnett mixing relation

$$\epsilon_{bulk} = \epsilon_e + 3\epsilon_e \frac{f_1 \frac{\epsilon_1 - \epsilon_e}{\epsilon_1 + 2\epsilon_e} + f_2 \frac{\epsilon_2 - \epsilon_e}{\epsilon_2 + 2\epsilon_e}}{1 - f_1 \frac{\epsilon_1 - \epsilon_e}{\epsilon_1 + 2\epsilon_e} - f_2 \frac{\epsilon_2 - \epsilon_e}{\epsilon_2 + 2\epsilon_e}}$$



氷を含まない空隙率45%のレゴリス

$$\epsilon_e = 1 \quad \epsilon_1 = 7.3 \quad f_1 = 0.55 \quad f_2 = 0 \quad \rightarrow \epsilon_{bulk} = 2.78$$

空隙の100%が氷で満たされたレゴリス

$$\epsilon_e = 1 \quad \epsilon_1 = 7.3 \quad f_1 = 0.55 \quad \epsilon_2 = 3.2 \quad f_2 = 0.45 \quad \rightarrow \epsilon_{bulk} = 4.86$$

空隙の10%が氷で満たされたレゴリス

$$\epsilon_e = 1 \quad \epsilon_1 = 7.3 \quad f_1 = 0.55 \quad \epsilon_2 = 3.2 \quad f_2 = 0.045 \quad \rightarrow \epsilon_{bulk} = 2.93$$

※氷が融解した場合は (tanδも含め) 大幅変化 ( $\epsilon_r=80$ )

## Summary

1. 現在検討が進められている火星における宇宙天気・宇宙気候探査計画に、周回機搭載レーダサウンダによる火星表層氷探査を提案している。観測周波数50-150MHz, 垂直空間分解能1.5mで、探査深度は50-110mと見積もられる。
2. 現在検討が進められている月極域探査計画に、ローバ搭載高分解能地中レーダによる月表層氷探査を提案している。観測周波数1-15GHz, 垂直空間分解能1cmで、探査深度は2m程度と見積もられる。
3. レーダサウンダでは、(1)氷を含まない媒質と氷を含む媒質がつくる誘電率コントラストの深さ・形状, (2)氷を含む媒質のbulk誘電率の値から媒質に含まれる氷の量, などの情報が得られることを期待している。
4. 氷によらない誘電率コントラストも存在しうる。