P-199 火星探査ローバー搭載用地中レーダーの検討状況

西堀俊幸（ISAS/JAXA）、宮本英昭（東大）、真鍋武嗣（大阪府大）、新原隆史（東大）、臼井寛裕（東工大）、小熊みどり、逸見良道（東大）

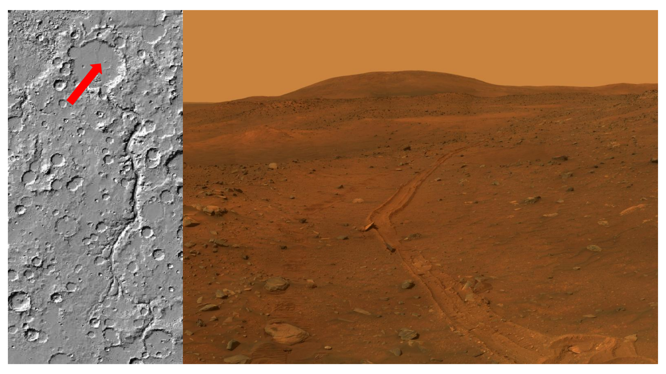
私たちは火星探査における次のインパクトの大きな発見のひとつは、「現在の内因的な活動度」で、たとえば断層運動や火山活動、熱水／地下水活動などの形で観察できるであろうと考えている。こうした活動が存在することは強く示唆されているものの、火星の地表が均質なレゴリスで覆われていることから、広範囲・高精度のリモートセンシング観測が行われた現在にいたっても、確実な発見がなされていない。そこで私たちは、表面のレゴリス層を透過し地下構造を探査できる地中レーダーを火星ローバーの搭載機器として提案している。この機器は電磁波が土壌を透過することを利用し、表土の厚さや基盤岩までの深さ、溶岩等の層序の認定や褶曲・断層などの地質構造を理解するのに極めて有益である。地中レーダーの特性上、最も発見が容易で、かつ生命活動の発見に直結するために最大のインパクトを持つものが、地下水の存在の検出である。地下水を発見できれば、生命探査を実施する上で最適な場所を最も効率的に知ることができるため、生命探査を強くバックアップすることができる。

1. 背景

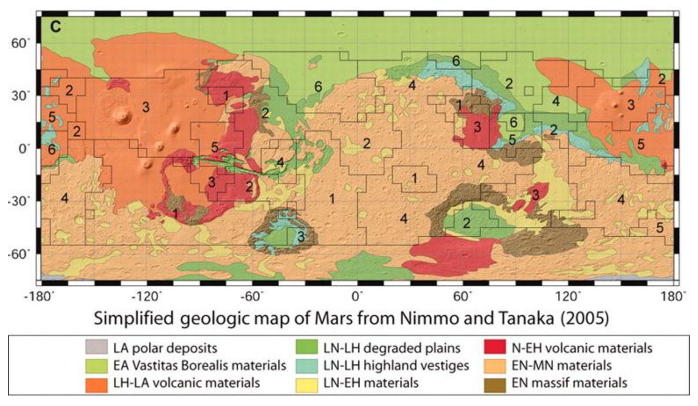
火星は地球よりも太陽から遠く、大きさも小さいために、熱的に不活発になるまでの時間が短く、たとえば火山やテクトニクス、表層での水や氷の流動に伴う浸食活動の意味では、次第に小さな活動度へと遷移したことは、地質学的にみても疑いがない。磁場も早期に消失し地球とは異なった大気の散逸・進化を経験していたはずである。その結果、地表面付近の大気圧は極めて薄くなり、昼夜の温度勾配が大きくなっていった。季節による大気圧変化も大きくなり、結果として現在は風成活動が最も活発な地質現象になっている。これが少なくとも数億年続いた結果として、火星表面は極めて均質化された風成堆積物によって覆われることとなった。

たとえば探査車スピリットは、30億年以上前の古い湖成堆積物の上に予定通り着陸したにもかかわらず、最初の5か月間、3 km程度を移動していても、玄武岩質の物質しか見つけることができなかった。またマーズグローバルサーベイヤ周回機に搭載されたTESは、当初風化堆積物や水和物などを全く発見することができず、当初北部平原は均質な玄武岩で覆われ全く液体の水の痕跡が見つからないとしていた。この現象は重要な示唆を持つ。すなわち、入念に選び抜かれた着陸地点に行かない限り、これほど変化に富む火星であっても、全く単調で均質な火星像しか描けなくなってしまう可能性があるからだ。

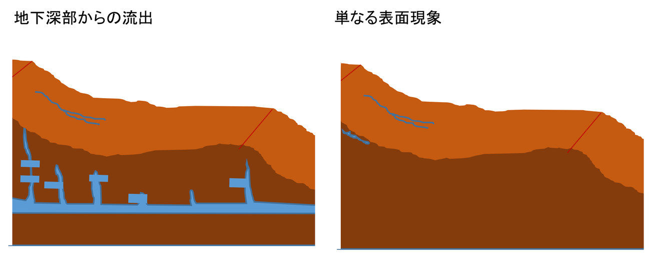
そのため地下の構造を調査することは、火星科学をさらに進める上で極めて意義深い。従来の探査では周辺の地形的特徴などから地下構造を推察することでこうした作業を行ってきたが、これに客観性を持たせ、表層探査によって科学的意義を深める意味で、地中レーダー法は有効である。



スピリットは湖成堆積物が積もっていることが確実と考えられていたグーセフクレーターに見事に着陸した（左図、赤矢印）が、最初の5ヶ月間は玄武岩質の成分の土壌しか見つけることができなかった。その後グーセフクレーターは洪水堆積物の氾濫原であることは確かだが、別の場所から来た表土に覆われていることが明らかにされた。このように表土は、その場の地質を覆い隠してしまうため、リモートセンシングによる表層探査を困難にし、地表面での調査を行うにしても、表土の構造を理解し適切な露頭を選ばないと、調査の意味付けが薄れてしまう。



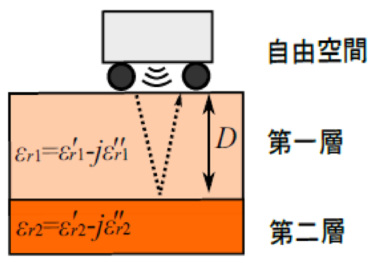
GRSによる水平解像度約220 kmの地表面の化学的分布（数字）とTaylor et al (2010)とNimmo and Tanaka (2005)による地質学的な区分（色）との不一致。地表を覆う表土がその場の地質学的な履歴と全くといってよいほど関係が無いことが分かる。つまり表土とそれ以外の区分が火星の地質調査では極めて重要となる。

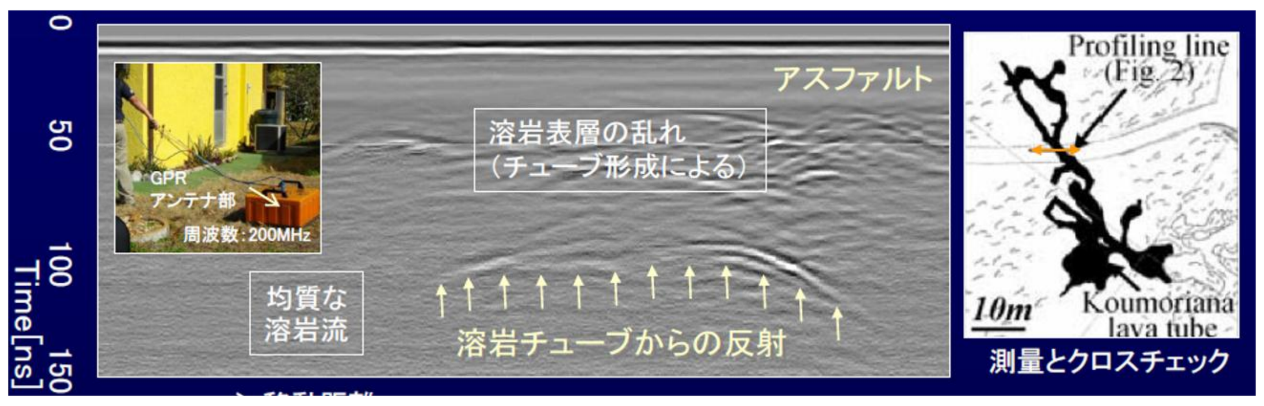


GPRでは地下にある液体の水の発見が特に明瞭に行える。生命探査スコープでは地下水の流出跡と考えられているRSLと呼ばれる構造を調査することを検討しているが、その検証や地下の水道の構造の把握を行うことは、火星の内因的な活動度を理解する上でも極めて重要な科学目標となる。

2. 次世代のローバーと地中レーダー（GPR）

ローバーや着陸機に地中レーダー(GPR)を搭載した探査例はこれまで存在しない。一方で周回機からの類似した原理による計測例は月・火星双方で行われていて、特に火星に対しては基本的には乾燥・凍結している火星土壌での電磁波探査の有用性は確認済と言える（例としてMars Express搭載のMARSISやMars Reconnaissance Orbiter搭載のSHARADが挙げられる）。ただしこれらは周波数帯域が大きく異なり、大きな構造はある程度理解できるが、地質学的に重要になる表層のレゴリス層の厚さを調べたり、断層や地層を把握するだけの解像度を持っていない。逆に言えば、極冠の探査により、こうした電磁波探査の有用性は明らかにされており、地表面からのクラッタを最低限に抑えることができれば、極めて有用な情報が得られることを示唆しているともいえる。地表面のクラッタを抑制する最も効率的な方法は、なるべく地表付近に送受信アンテナを近づけることであり、その究極的な形が今回の提案するローバー搭載の地中レーダーである。





原理的には、上図にあるように、地上に電磁波の送信機を設置し、地下に向かって電磁波を照射する。この際、媒質中の誘電率が変化する界面において、電磁波が反射・屈折する原理を利用する。いろいろな経路を経て反射波が地上に戻ったところを受信機でとらえることで、レーダーから送信した電磁波の遅延時間と受信強度を観測位置に対して記録し、地下構造をマッピングする。

右図は2006年に私たちが公表した富士山の溶岩流の内部構造を地中レーダーでマッピングした例で、この論文はアメリカ地球物理学連合の論文誌Geophysical Research Lettersでハイライト・ペーパーに選ばれている。このように土木工学分野で検討が進んだ地中レーダー法は、地質学的にも極めて簡便に応用することができることは、近年次第に明らかにされつつある。特に水が存在しない、またはごく限られた場所にしか存在しない火星においては、特に有用な地下探査手法となることが考えられる。

3. 地中レーダーの科学目標と測定要求

私たちはローバー搭載GPRによって、着地点の地下構造を明らかにし、特に地下水や若い流動地形など、内因的な活動度を発見／記載することを目標とする。サクセスレベルを右表にまとめ、検出が期待できる地下構造について下表にまとめた。ここで示した地質構造を検出する場合の測定要求は、以下のようになる。

1. 最低100mを1m程度移動しながら計測（計測はミリ秒で終了）を行う。広範囲に移動しながらの観測も目標とする。
2. レンジ分解能（深度方向の解像度）を30cm程度とする（HiRISEと同程度の解像度とすることで、地質構造の空間的把握が容易になるため）
3. 可探深度を10m以上とする。

サクセスレベル	内容
ミニマムサクセス	火星上の1点において、地下に電磁波を放射し、反射波を受け取ることでその地点の地下構造を知る。この反射波の形状から、特にその場における表土（レゴリス層）の厚さについての知見を得ることができる。
ノミナルサクセス	ローバーを移動しながら複数地点で電磁波を放出し、反射波を受けることで、その側線に沿った10 m程度の深度の地下構造を明らかにする。
エクストラサクセス	ローバーを広範囲に移動させながら、さまざまな側線に沿った地下構造を明らかにする。地下水活動や火山活動、断層運動などをターゲットとして、これらの直接的な検出を行う。

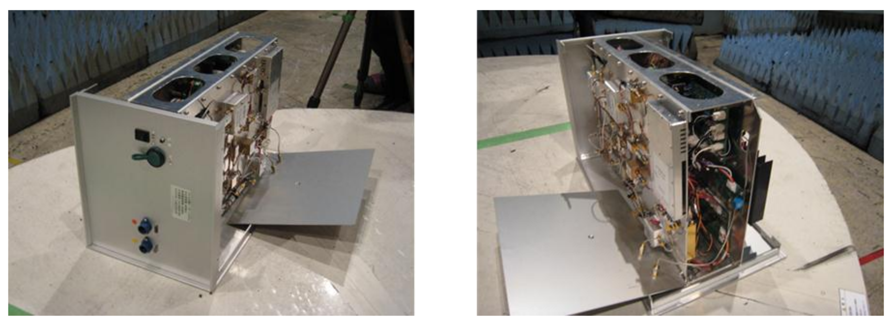
発見できる現象	GPRで区別できる類似した現象	根拠となる観測
帯水層など水を含む層	水を含まない層、氷	誘電率の差、減衰率
レゴリス層	基盤岩	反射面の形状と誘電率の差
断層	褶曲構造、貫入構造	主に反射面の形状
貫入構造（ダイク等）	割れ目、断層	主に反射面の形状
貫入岩体（ラコリス等）	ソルトドーム、風成・水成堆積物	主に誘電率の差
塩類の集合体	シリカ堆積物、貫入岩体、氷	主に誘電率の差
レンズ状の氷	塩類、貫入岩体	主に誘電率の差、反射面の形状
風性堆積物等、表土に埋もれた地質構造	単なるレゴリス層	主に反射面の形状

4. 開発状況

2002年ごろから、ISASのW/G活動の下で、惑星探査機の着陸機に搭載可能な小型軽量かつ高性能なGPRの開発を目指して検討を開始している。惑星探査用として小型軽量化を狙うため、GPRは等価時間サンプリングを用いた広帯域ダイレクトコンバージョン受信機と直接RF変調波を生成する送信機（オールディジタル化）が特徴である。2010年にGPRのブレッドボードモデル（BBM）を製作し、本方式の基本性能を室内（電波暗室）において確認済みである。

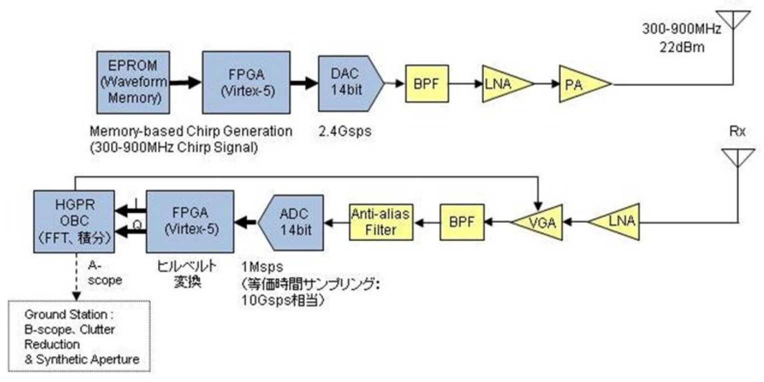
GPRの開発目標仕様

項　目	仕　様
レーダーシステム	パルス圧縮レーダー
変調方式	直線状FM変調（重み付き）
送信電力	1 W以下（平均電力）
送信周波数	300～900 MHz（TBD）
送信時間	0.33 μs（TBD）
送信間隔	1 μs（TBD）
観測レンジ	0 – 150 m（TBD）
距離分解能	0.25 m以下
送受信アンテナ	ヴィヴァルディアンテナ
消費電力	4 W以下 (観測時最大)
質量	900 g以下
大きさ	200 mm × 150 mm × 30 mm以下

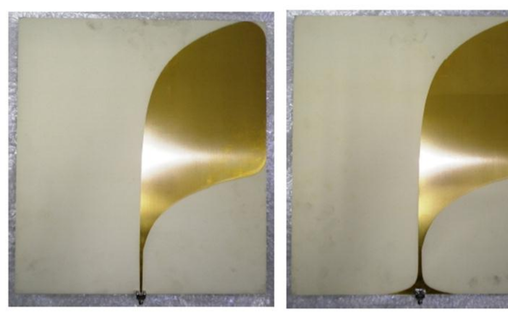


GPR BBM
（2011年度改修）

- 【送信部】：ROMに記録したチャープ波形をFPGA(Xilinx社製Virtex−5)と高速DACにより再生し、直接レーダ波を生成する. 送信アンテナは広い帯域かつ指向性が良好なVivaldiアンテナを使用する. → 送信波形に任意の重み付けが可能（レンジサイドローブを低減）
- 【受信部】：等価時間サンプリングを用いたダイレクトコンバージョン受信機でI/Q信号をFPGA内のヒルベルト変換で得る構成する. また, 受信利得を調整するVGAを追加した. → 小型化が可能



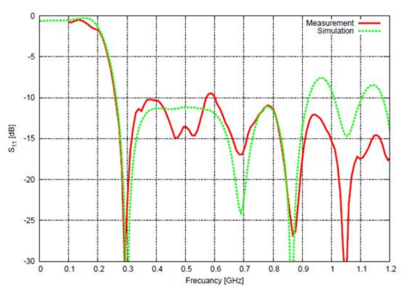
GPR BBMのブロックダイアグラム



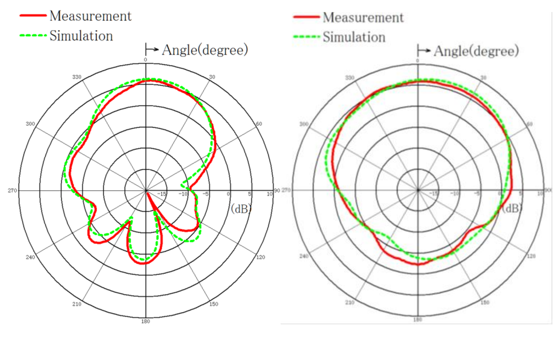
GPR用試作アンテナ（Vivaldi タイプ）
（表側と裏側，送受信別）

GPR用アンテナ(BBM)の仕様

項　目	仕　様
アンテナ形式	ヴィヴァルディアンテナ(TBD)
利得	5.3 dB 以上（TBD）@800 MHz
ビーム半値幅	100度以下 (TBD)@800 MHz
入力インピーダンス	50 Ω
VSWR	1.5以下
コネクタタイプ	SMA
寸法	350 mm × 350 mm × 3 mm以下
質量	300 g以下



試作したアンテナのS11特性（解析値と実測値の比較，必要帯域において，−10dB以下のリターンロスに成功した.



試作したアンテナの放射特性（解析値と実測値の比較，左がE面，右がH面）

現在、ローバー搭載用のGPRとして概念検討を実施中であり、それと並行して、地上試験用アンテナ（T-bar fed slot アンテナ）の製作を進めている。今後は地上においてフィールド試験を実施し、観測性能の確認を継続して行く予定である。

This document is provided by JAXA.