

並木則行, 荒井朋子, 小林正規, 千秋博紀, 和田浩二, 大 野宗佑, 石橋高(千葉工業大学 PERC), 臼井寛裕 (JSC/NASA), 小松吾郎(IRSPS), 宮本英昭, 橘省吾, 杉 田精司, 長勇一郎(東京大学), 岡田達明, 大竹真紀子, 久保田孝(ISAS/JAXA), 出村裕英•小川佳子•浅田智 朗•平田成•北里宏平•奥平恭子•寺薗淳也(会津大学 Arc-Space), 高橋幸弘(北海道大学)

2011年1月7日





- 科学目標:気候変化と火星の熱化学進化の化学結合 を解き明かす
- 観測目的:火山岩の組成分析で火星のMORB(初生メ ルト)を発見する
- 観測形態:ローバによる長距離地質調査
- ・ 観測地域(着陸候補地点):火山岩地域の若いクレー ター(直径10 km)からの放出物
- 搭載候補機器:

双眼立体視カメラ用液晶波長可変フィルタ,マクロ分 光カメラ&岩石研磨部,X線蛍光回折分 析,LIBS,GPR,磁力計,K-Ar年代計測器,気象観測 パッケージ+ローバ,グラインダ



火星科学の主要な問題

- 南北非対称性 (dichotomy)
- 内部活動 · 熱史 (origin and evolution)
 - 磁場の継続時間

3

- コアの状態、マントルの熱史
- 火成活動、プレートテクトニクスなし
 - 固定した場所で長期継続
 - マントルの構造と運動、熱史
- 過去、温暖湿潤環境or寒冷乾燥環境? (environmental change)
 - CO₂の行方(炭酸塩、大気消失)
 - 水の行方(海、地下水・氷、堆積岩)
 - 火星表面の高硫黄濃度(火成岩+堆積岩)
 - ランパートクレーターの形成機構
- 大量の酸化鉄

互いにカップリング

- 生命の存在可能性 (astrobiology)
 - メタンの観測(春・夏に高濃度, H₂Oとは異なる空間分布, 古年代地域 に高濃度 Villanueva et al., DPS meeting, 2009)



生命の誕生には環境,特に水が重要な役割を果たしているはずである.太古,火星の気候 は温暖湿潤で,液体の水が存在していたと考えられている.一方,現在の気候は寒冷乾燥 である.水はいつ,どこに,どのように存在したのか?アメリカとヨーロッパの宇宙機関はこ の点に目的を絞り込み,"フォロー・ザ・ウォーター"(水の痕跡を探せ)という標語を掲げてー 連の火星探査を実施してきた.狙ったのは過去に存在した水の記録を刻んだ堆積岩である .他方で,火星環境史という観点で注目すべきは大規模な火山活動が気候変動に与えた影 響である.火山は火星内部の熱化学進化を明らかにする窓であると同時に火星気候進化, 環境変動,生命の生存可能性という連鎖反応のスイッチでもある

く メービン メービン メート ション とトレンド

- Noachian Early Hesperian \rightarrow Amazonian
 - Andesitic \rightarrow Basaltic
 - Alcaline \rightarrow subalcaline
 - Incompatible-element (K, U, Th, LREEs, Al) enriched → depleted
 - Iron-poor \rightarrow rich

・ *火星のMORBを探せ*

※ MORB: 地球上部マントルが部分溶融して産出する火山岩. 地球マントルの組成と 化学進の解明に大変重要な役割を果たした.



(Taylor & McLennan, *Planetary Crusts*, 2009)





Fig. 6.3 Plot of $(Na_2O + K_2O)$ versus SiO₂ for igneous rocks from Mars. Plotted are the fields for SNC meteorites, igneous rocks from the Gusev plains and Columbia Hills analyzed by the Spirit rover and the two lowest sulfur rocks analyzed by Pathfinder. Dotted lines represent boundary between alkaline and subalkaline volcanic series. With few exceptions, these rocks are basaltic but exhibit considerable diversity within that compositional range such that both alkaline and subalkaline compositions are present [16]. Also plotted is the estimate for the bulk composition of the martian crust (see Section 6.5).

© NASA/JPL-Caltech/Univ. of Tennessee



Fig. 6.10 Plots of potassium and thorium abundances on the martian surface, measured by GRS, as a function of apparent surface age compared to abundances in martian meteoritics. Boxes represent standard error of estimate interval over the age range considered. Note that younger terrains have lower K and Th consistent with greater contributions from an incompatible-element-depleted crust during Amazonian times. Iron abundances (not shown) exhibit a small but statistically significant increase between Noachian and Hesperian/Amazonian times. Adapted from Ref. 78.

初生メルトから解明されるマントル 熱化学進化

• Multiple-saturation points for the Martian primary melt



・マントルの温度圧力勾配

• Dry or wetマントル(要トレンド)

• Valence sate vs fO₂ [*Papike et al.*, 2005]



・マントルの酸素分圧

IW = Iron (Fe)-wüstite(FeO) buffer



- 代表的な火成活動はニカ所
- Local geologyからglobalな気候変 動を議論



溶岩流の直接サンプリング

- 低高度(高度1 km以下)という要請
 - タルシスやエリシウムなど火山体自体は着陸困難
- 着陸地点は一様な溶岩流か,複雑に錯綜した溶岩流地域か?
 - 起源が明確である・ない
 - 着陸精度は低くても良い・悪い
 - 幅広い組成・年代のサンプリングが可能・不可能
- 若い露頭があるのが理想的
- 着陸精度(10~100 km)に対して走行距離(<10 km)



エリシアム平原の比較的新しい溶岩流



堆積岩とは,堆積物が累積し続成作用を受け固結することで できる岩石である.火星における堆積岩の大部分はダストが 降り積もって形成された風成層や,衝突に伴うイジェクタ層だと 考えられる.水が長期間存在していたとすると,生命が持続的 に存在可能だったかもしれず,したがって堆積岩中に有機物と して生命の痕跡が保存されている可能性がある.

> オポチュニティが撮影した,ケープ・セントビンセント(ビクトリア・クレー ター内)の露頭写真.斜交層理が発達した砂丘堆積物と解釈されてい



地形学的研究により示唆される海岸線の位置 (図のContact 1, 2). 火星の北部低地にかつて海が存在したのか は、1980年代から今に至るまで論争が続いている 大きなテーマである.地形・地質学的研究としては ,例えばHead et al. [5]は、マース・周回機のレーザ 高度計(MOLA)の地形データをもとに海岸線地形 の存在を支持した.ガンマ線分光計 (GRS)により 得られた元素分析の結果、カリウムやトリウムなど の水溶性の高い元素が、推定されている海岸線よ り標高が低い場所に相対的に多く含まれているこ とから、かつて海が存在した可能性が高いと考え られている.



湖底堆積物とシーケンス層序学

近年、火星の湖底堆積物の形成史を理解するために、シー ケンス層序学的手法を適用した研究が増えている. シーケン ス層序学とは、海水準変動を中心にすえて地層の成因を解 釈するというもので、地球上では石油根源岩探査などに活用 されている. 例えば, Dromart et al.は, Melas Chasmaの壁面 の露頭で、急傾斜のクリノフォーム(水中に形成される急傾斜 の斜面堆積物)やチャネルのような窪みが存在することから ,かつてこの場所には相当量の水が存在し,水面下で大規 模な堆積作用が起きていたことを示唆している. 水中で形成 された堆積層だとすると、流れに伴い粒子サイズの分級(細 粒化)が起きている可能性がある.生命起源の有機物が火 星に存在する場合、細粒堆積岩中に濃集している可能性が 高く, Dromart et al. はクリノフォームの先端部付近を今後の 探査地点の候補として挙げている. 同様に, Pondrelli et al. は、Eberswaldeデルタのシーケンス層序学的解析を行い、デ ルタ堆積物は3つの堆積シーケンスに区分できること、クレー ター湖内の湖水面変動に伴い堆積したと考えられることなど を明らかにしている、シーケンス層序学は今後の探査機の着 陸地点の選定を行う上で重要な解析手法と認識されつつあ る.







リノフォーム.

10 堆積岩から読む火星の気候進化

火星の気候進化過程を解明するためには、二酸化炭素や水の行方、および表層の酸化還元 状態や酸性度といった表層環境の変遷を明らかにする必要がある.これまでの軌道からのリ モートセンシング探査結果によれば、含水鉱物や赤鉄鉱・硫酸塩岩・炭酸塩岩が火星表面に 存在することが明らかになっている(図3-6,例えば、[3,12]).そのため、過去に水が火星表面 に大量に存在していたことが示唆され、現在でも地下水の存在が示唆されている.また、その ような堆積岩の存在から、表層の酸性度や酸化還元状態の変遷についても示唆が得られてい る.とくに、硫酸塩岩と炭酸塩岩などの堆積岩の形成地域および形成順序を知ることは、表層 環境の酸化還元状態や酸性度の変遷、表層水の行方および大気中の二酸化炭素の行方を 知るうえで欠かせない、しかしながら、その詳細な産状や形態、組織は不明である.



モートセンシングデータにもとづく炭酸塩岩の分 布図. CRISMデータによる全球分布図.



層状ケイ酸塩(赤色), 硫酸塩岩(青色), その他 含水鉱物(黄色)の全球分布図.





- 工学目的のナビゲーションカメラに液晶波長可変フィルタを付加することで、鉱物の同定を可能に、
- 液晶にかける電圧で、透過する波長を制御できるバンドパスフィルタ
- 2次元画像の分光計測ができる
- 透過波長の選択を機械的な切換なしに行う
- 同一直線上に分光光学系を構成できる
- 液晶波長可変フィルタとフィルタ駆動ユニットから構成
- 空間分解能はエ学カメラ本体の設計に依存(1000 x 1000 pixのCCDもしくはCMOSで, 距離1 mで 0.27 mm/pix程度)
- 重量は500 g~1 kg
- 光学特性(温度)環境試験 実施予定







- ・ 鉱物組成、量比→可視・近赤外波長分光データ
- 結晶サイズ、分布→岩石研磨+顕微画像(平均結晶サイズ200µmを想定)

R−SIP仕様概要



13 観測機器: Laser Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS)

- レーザーを使用した発光分光法
- 遠隔的な計測が可能
- 高空間分解能(100~500 μm)
- 短時間分析が可能:数十秒~数分
- 多様な元素について調べられる
 - 主要元素、微量元素、揮発性元素、など
- 重量 7 kg (マージン20%, ジンバル機構を含まない)
- 電力 18 W(平均)



特徴:

- ・FPGA(Vertex5)による送信波形の再生と周波数逓倍による送信信号の発生
- ・送受信アンテナを共用する接続と別にする接続が切り替え可能
- ・受信機はデジタルI/Q検波方式で構成

重量:約2.5kg

大きさ:230mm×260mm×460mm

地中レーダ

GPRの試作モデルの制作が完了 GPR用アンテナとしてビバルディアンテナを採用し、その解析と特 性測定が終了 GPR試作モデルとアンテナを結合し電波試験を実施





14 観測機器: K-Ar年代測定器

原理

- LIBSによるKの定量
- QMSによるArの定量
- ・試料中の40K/40Ar*比

→岩石固化年

特長

- LIBS-QMSのみのシンプルな新方式
- ・岩石内の不均一に左右されない
- •スポット分析によって単一試料から アイソクロンが引ける

課題

- Kの輝線が見えるか? 高真空(10-6 mb)でのK輝線確認
- Arlt放出されるか?
 - 高濃度合成ガラス試料を用いた実験 でAr=10⁻¹cc/gを確認
- ・天然試料でもArを検出できるか?
 Eucriteを購入し試料準備中



	重量	電力	見積もり元	備考
QMS、ポンプ一式	15kg	~300W	民生品	開発中
真空チャンバー	?	?		開閉・回転機 構も搭載?
Nd:YAGレーザー (100mJクラス, 10Hz)	19kg	44W	LALTレーザー (NdːYAG, 100mJ, 1Hz; 電源・制御込)	ChemCam様 小型レーザー も視野に
分光器	~3kg	<3W	MSL ChemCam	波長域・分解 能要検討
ゲッターポンプ (ヒーター)	<1kg	100W	民生品	ピーク温度 (800℃)は10分
サンプル採集用アーム	?	?		
サンプル研磨用 グラインダー	?	?		RAT様のもの

★科学目標

- ・岩石・土壌の岩石タイプを決定する ・熔岩の母岩の性質を知る
- ・岩石の表層進化過程を知る

★観測対象

- ・火山地帯、熱水変成地帯、河川下流の 堆積地域の露頭、岩石、土壌
- X線蛍光による元素分析:
- Z=11²⁸ (Na, Mg, Al, Si, S, P, Cl, K, Ca,

置(XRFD)

- Ti. Fe. Ni. …)
- X線回折による主要鉱物:
- 無水鉱物、含水鉱物 ★観測方法
- ・ローバで走行(1km以上)し、適当な試料の表層を研削 する
- ・研削前、研削後についてそれぞれ本機器を接近させ て測定
- ・表層進化を受けた後の表層、受ける前の母岩の両方 を分析する
- (試料を採取しローバ内に取込み、内部搭載の機器で 分析する方法もある)





観測機器:X線蛍光回折分析装

10

Energy (keV)

★機器特性

- X線検出系
- •検出器 CCD (Hamamatsu DEEP-1 etc)
 - 画素数 1k x 1k 以上
- ·励起源 1次X線管
- モニタ撮像系
- ·検出器 CMOS
- 画素数 1k x 1k (or 512 x 512)
- ・励起源 LED(UV~1µm)
- 較正系
- ・回転式フタの内側に標準試料搭載

(_) **\$** 2- [Clark, et al. 2008] 40 50 60 70 D-spacing (Å) 20(2) 100mm 図:センサ部の模

Enstatite 610

Anorthite -204



式図。小型X線管 からの1次X線で 励起したX線蛍 光・回折線を2次

元 CCD で 検 出 す る

Anorthositic Gabbro

- ★諸元
- ・重量 センサ部:<1kg、回路部:<1.5kg ・サイズ センサ部:<100 x 100 x 100 ・電力 10W(TEC使用時) ・データ量 X線データ:2~3MB/sample 画像データ:<4MB/sample



パッケージ

基本的な気象要素の観測

気温, 気圧, 日射

小型·軽量

総重量 < 100 g

開発チーム

乙部(福岡大), 酒井(京都大)

火星表層環境 p~6 mb, T~170-270 K 宇宙研の大気球 到達高度 53 km (p~ 1mb, T~200K)

観測機器:磁力計

短周期電磁場測定

- ループアンテナ3成分及び鉛直電場ダイポールアン テナ1成分を用いた広帯域電波受信機により、dust stormからの放電電磁波放射(sferics)と電磁圏現象 に起因するプラズマ波動を観測する。
- 1点観測でも放電の位置評定は可能
- ループアンテナ本体の重量は400 g程度 (展開後は 1辺の長さが60 cmの正方形を3つ組み合わせた正 八面体. 展開前の大きさは1辺の長さが60 cmの正 三角形, 高さ10 cmとなる)
- 受信機の重量は約5kg, 電力は3 W以下を目指す
- ULF帯磁場測定
 - フラックスゲート磁力計
 - (単体)重量約1kg, 電力1W
 - +サバイバルモジュール, ヒータ(観測機器保全が 必要な場合)
 - EMC試験が必要?(ランダ,ローバ本体からある程 度離れれば、EMC条件は緩和)
 - 大気静電場測定
 - 鉛直電場ダイポールアンテナと受信機を用いてDC 成分を観測

17 *ローバ* _{第3世代}

• Micro6シリーズ(JAXA宇宙研・中央大・明治大共同開発)

1日の自律走行距離(火星を想定)

- 平均移動速度:0.01 m/s (実際には0.01-0.05 m/s)
- 移動のための運用時間:2 hours
- 単純計算で、0.01×2×3600=72 m / 1日
 (# MERは1日 40 m)
- ・ 1ヶ月(20日運用)で 約 1.4 km
- 走破性能(火星を想定)
- 段差乗り越え:20 cm(車輪径:20 cmの場合)
- 傾斜角:15 deg~30 deg
 - (表面の状態による# MERは38 degを走破)

<研削研磨>

レゴリスや宇宙風化作用の影響を取り除くため、岩石の表面を研削研磨し、フレッシュな面を観測することにより、組織の詳細な分析を可能とする.



<システムの構造 と試作ホーン>







