特集「変遷 する火星環境」

火星の地形のまとめと水の歴史

小川 佳子¹, 栗田 敬²

1. はじめに

昨夏の約6万年ぶりとも言われた地球との大接近に 始まり、年末の日本初の火星探査機 Nozomi 到着の話 題(残念ながら最終的な結果は失敗に終わった)、そ して今年1月以降の探査ラッシュごと火星は今注目を集 めている.特に、MER (Mars Exploration Rovers)に よる観測データは、私達に強いインパクトを与え続け ており、火星の水と生命の存在の可能性についての議 論を高めている.

本稿は、このような時期において、これまでの探査 機による光学観測に基づいた火星表面地形のレビュー を行う.現在の火星探査の目的・動機を支える大きな 背景には火星の水の存在があり、それはそもそも地形 によって直接示されてきた.地形情報の把握は、その 限界と可能性を含め、今後もたらされる探査データを 適切に理解・解釈する上で必須である.本稿では特に 水が関連した地形に焦点を絞り、これまでの観測事実 を整理し、成因の解釈について現在までに確実に受け 入れられていることと未だ議論中であることを区別し てまとめる.また、地形に関する観測と研究の現状を 紹介する中で、今回のNozomiの失敗に屈することな く再度期待される日本の次の火星探査において表層の 観測ターゲットになり得る側面を少しでも示唆できれ ばとも望んでいる.

本文の構成は以下の通りである.2章で、火星の表 層・地形観測の概観を述べる.探査の歴史を簡単に振 り返り、火星における光学観測の種類に触れる.3章 で、現在までに観測されている表面地形のうち、特に 火星に特徴的な、その形成に水が関連したと解釈され ている代表的な地形をとりあげ、詳しく紹介する.4 章では、その流水地形の形成過程と星表層部の水環境 について考察する.中でも、大洪水地形 (outflow channel)周辺の地形形成に関連して、著者らの提案 するシナリオを紹介する.最後に、5章において、今 後の火星探査観測と研究の展望について議論する.

2. 火星の地形観測

2.1 火星探査の歴史

表1にこれまでの火星ミッション(現在展開中の探 査機も含む)の概要一覧を記す.

火星探査の歴史は、①1960年代半ばから1980年代初 めまで、と②90年代半ば以降、の2つの時代に大きく 分かれ、その境には15年余の空白の期間がある.①は マリナー4号(1965年)からバイキング1、2号(1976-78/82年)に至る、いわば火星探査の創世記であり、 火星の全体像をまず知ることが主な目的だった.地上 望遠鏡観測の時代では知り得なかった火星表面の表層 の様子を探査観測によって映し出す試みに初めて成功 していった時代である.②はMars Pathfinder(1997年) 以降現在(2004年)に至るまでの期間にあたる.バイ キングの成果を受けて、さらに精細に、目的とターゲッ トを絞った効率的かつ多面的な観測が行われている. 将来の有人探査を見据えての、「詳細な地図づくり」 と「火星地上でのデータ取得と蓄積」を目指した系統 的調査²³が進められている(5.1節参照).

2. 東京大学地震研究所

^{1.} カリフォルニア大学バークレー校

^{*1} 米欧の4つの探査機; Mars Global Surveyor, Mars 2001 Odyssey, Mars Exploration Rovers (以上, 米国/ NASA), Mars Express (ヨーロッパ/ ESA) が同時に観測を行なっている.

^{*2 「}周回衛星によるリモートセンシング観測」と「着陸船(ランダー)/探査車(ローバー)による直接観測」の2つの大きな流れがある. ここでいう、リモートセンシング観測、とは火星(惑星)地表面からの遠隔計測を指し、地上にランダー(着陸船)やローバー(探査 車)を降ろしてデータを取得する、その場(in situ)観測、の探査と区別される.

代表的な参考サイト	http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/tmp/1964-077A.html	http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/tmp/1969-014A.html	http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/tmp/1969-030A.html	http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/tmp/1971-051A.html	http://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/viking.html		http://nssdc.gsfc.nasa.gov/Planetary/viking.html		http://mars.jpl.nasa.gov/MPF/index.html		http://mars.jb.msa.gov/mgs/	http://mars.jpl.mssa.gov/odysesy/index.html	http://www.sci.eea.int/export/SPECIALS/Mars- Express/index.html	http://mersrovers.jpl.nasa.gov/home		http://www.jaza.jp/missions/projects/sat/explanation/nozmi/index-j.html
装飾線器	Visible camera (vidicon), Magnetometer. Cosmic ray telescope. Dust detector. Solar plasma probe. Trapped radiation detector \mathfrak{A} \varkappa	Visible camera (vidicon), IR spectrometer , IR radiometer, UV spectrometer $\mathcal{U} \not \cong$	Visible camera (vidicon), IR spectrometer X IR radiometer, UV spectrometer X \mathcal{X}	Visible camera (vidicon), IR interferometer spectrometer, IR radiometer, UV spectrometer $\mathcal{U} \succeq$	Visible camera (vidicon). IR spectrometer t t \mathcal{L}	Visible camera, Gas chromatograph mass spectrometer, X Ray fluoresence spectrometer, Neutral mass spectrometer, Barometer, Thermometer, Anenometer, Seismometer 42 22	Visible camera (vidicon), IR spectrometer. IR radiometer $\mathcal{X} \not \succeq$	Visible camera, Gas chromatograph mass spectrometer, X ray flourescence spectrometer, Neutral mass spectrometer, Barometer, Thermometer, Amenometer, Magnetometer \mathcal{U} \mathcal{U}	Visible camera (CCD, 440-1090 nm, stereo), Accelerometer $t_a^{} \not {\mathcal E}$	X Ray spectrometer. Panoramic camera \mathcal{U} \mathcal{U}	Visible camera (CCD, bund pass 0.5-0.9 μ m, red, blue), Thermal Emission Spectrometer (6.25-60 μ m, 4.5-100 μ m, 0.3-2.7 μ m), Laser Altimeter (1.06 μ m Mi; YAG laser), Magnetometar/Electron reflectometer	Energetic particle spectrometer (15-500MeV), Gamma Ray Spectrometer (0.2-16MeV), Thermal Emission Imaging System (IR and Visible), Neutron spectrometer, High-energy neutron detector \mathcal{X}	Visible Camera (CCD, Stereo Color), IR and Visible mapping Spectrometer (0.50-1.1 μ m, 1.0-5.2 μ m, CCD), Fourier spectrometer (1.2-5.0 μ m), 545.0 μ m), UV and IR spectrometer (118-320 μ m, 1.38 μ m) ' t^{-2}	Panoramic camera. Miniature themal emission spectrometer, X ray spectrometer, Mossbauer spectrometer Microscopie imager t^{L}_{s}	Panoramic camera, Miniature themal emission spectrometer, X ray spectrometer, Mossbauer spectrometer Microscopie imager $t^2\mathcal{L}$	Visible camera. Neutral mass spectrometer. Dust counter, UVinuging photometer. XUV spectrometer $t^{2} \not L$
主な観測と代表的成果	最初の火星近接撮像<クレーターの発見>	表面撮像、気象観測	表面撮像、気象観測	最初の軌道周回撮像<太陽系最大の火山および 大峡谷、洪水痕跡の発見>	全球の鮮明な可視撮像(一部カラー及びステレ オ撮像)<地形起伏の詳細解明>	最初の軟音陸船、地表環境モニタリング、大気 成分および地表物質の元素分析, 地球型生命の 探索<有機物の存在を否定>	Viking 1 (Orbiter) と同様	Viking 1 (Lander) と同棟	自己制鋼の軟着陸技術のデモンストレーション	最初の小型火星探査車(地上を動き回って観測)	最初の全球均質マッピング(可視画像、熟赤外 放射鋼度、標高、重力場、残留磁化) <精細な 画像によるガリーの発見>	全球の各種マッピング (可視撮像、赤外分光、 中性子線エネルギー分光) <表面就物分布、表 面水分分布の解明>	大党観測ならびと全球の各種マッピング(可視厳変、 中間赤外分光、サウンディングレーダー)<立体視 地形図、表面鉱物分布、地面凍土層分布の解明>	探査車(ローバー)による地質調査	探査車(ローバー)による地質調査	上層大気と太陽風の相互作用の解明を目指して いたが、2003-12周回軌道投入を断念し、火星 を近接通過
観測期間	(closest approach) 1965.07.14	(closest approach) 1969.07.31	(closest approach) 1969.08.05	1971.11.13-1972.10.27	(Orbiter) 1976.06.19-1980.08.17	(Lander) 1976.07.20–1982.11.13	(Orbiter) 1976.08.07–1978.07.25	(Lander) 1976.09.03–1980.04.11	(Lander) 1997.07.04–1997.09.27	(Micro-rover: Sojourner)	(Mapping Operations) 1990-2002.04 (Data Relay Mission) 2002.04 [犠紀年]	(Science Mission) 2002.01-2004.06 (Data Relay Mission) 2004.02-[継続中]	(Mars Orbit Insertion) 2003.12 (Nominal Mission) [熊総中]	2004.01.04-[継続中]	2004.01.25-[維統中]	
打上げ	1964.11.28	1969.02.24	1969.03.27	1971.05.30	1975.08.20		1975.09.09		1996.12.04		1996.11.07	2001.04.07	2003.06.02	2003.06.10	2003.07.07	1998.07.04
繊え・国	U.S.	U.S.	U.S.	U.S.	U.S.		U.S.		U.S.		U.S.	U.S.	ESA	U.S.	U.S.	Japan
ミッション名/ スペースクラフト名	Mariner 4	Mariner 6	Mariner 7	Mariner 9	Viking 1		Viking 2		Mars Pathfinder		Mars Global Surveyor	Mars 2001 Odyssey	Mars Express	Mars Exploration Rovers-Spirit	Mars Exploration Rovers-Opportunity	Nozomi

火星の地形のまとめと水の歴史 / 小川,栗田

125

表1:これまでの火星ミッションの概要一覧([31]表4.9を一部改変,2004年5月現在).

2.2 火星における光学観測の種類

惑星地形の観測は周回衛星によるリモートセンシン グ(以下リモセンと略す)光学観測が主要であり、火 星でこれまで行われたのは、(1)撮像観測、(2)分光(ス ペクトル)観測、(3)高度マッピングの3種類である. 図1にこれまでの火星の光学観測の解像度と波長域の 広がりを示す.

(1) 撮像観測

可視カメラによる写真・撮影画像データによる観測 を指す.撮像観測により直接目で見た場合と同じよう に表面の様子を視覚的に捉えることができる.映し出 される表面地形は解像度の制約を受けており,解像度 は衛星軌道 (火星からの距離) とレンズの質の他に, 受光器 (イメージ・センサー)の性能に大きく依存し ている. ❶のマリナー,バイキングの時代まで使用さ れたのは vidicon であった (最高解像度~100m/pix).



図1:これまでの火星探査における主な光学観測機器の解像 度と波長域([31]図4.24を一部改変). マリナー9号フ ライバイ,緑:バイキング1&2号周回衛星,Mars Global Surveyor 周回衛星(MOC, TES), Mars Express 周回衛星(HRSC, OMEGA, SPICAM, PFS), Odyssey (THEMIS), Mars Reconnaissance Orbiter.

❷の Mars Global surveyor (以下 MGS と略す) 以降の細密画像(同~1m/pix)はCCDの開発がもたらしたものである. 撮像解像度の向上により, それまでは

識別されなかった火星表面の小さい構造 (3.1節^(c)参 照) が初めて映し出されるようになった.

(2) 分光観測

分光観測は観測波長域 (バンドパスフィルターの設 定波長域) に応じて,可視,赤外,紫外域の観測に便 宜的に分けられる、赤外分光観測は、可視撮像と並び、 表層の情報として特に重要である.赤外分光により、 (a)鉱物の検出及び種類の同定とその空間分布,(b)表面 温度の分布、^(c)熱慣性 (thermal inertia)³ の分布を求 めることができる.(a)の鉱物の検出では,水の存在の 証拠となるため、特に熱水鉱物の吸収線を含む波長領 域が最近の観測では設定されている (近 - 中間赤外) (5.1節参照).また、その種類の同定により生成当時 の水環境(温度・圧力)を制約することも可能である. (b)の表面温度は地下構造の推定(凍土層の厚さや帯水 層の深さ)や大気の循環を知る上で重要な情報である. 測定には熱赤外の波長域が使用される.(c)の熱慣性は 昼夜の(b)の差から見積もられる.表面物質の識別や粒 子の細かさを推定することができる. これまで MGS の TES, Odyssey の THEMIS により, 熱赤外域を中心 に観測が行われてきた (図1参照). 特に THEMIS の 観測は比較的解像度が良く(平均で100m/pix),その データに基づく(c)の議論が盛んである.尚,通常,1 つの分光観測機器は赤外域から可視域にかけて複数の チャネルをもっており,両波長域の観測がセットで行 われることが多い. また, 紫外分光観測からは, 上層 大気の成分や状態についての情報が得られる.

(3) 高度マッピング

高度データの取得により地形を3次元のイメージで 正確に捉えることができるようになる.それは地形の 成因,形成過程を考える上で重要な情報である. MGS の MOLA 以前は,バイキング画像から間接的に 高度/形状が推定されるのみだった⁻⁴. MGSに搭載され たレーザー高度計 MOLA (Mars Orbiter Laser Altimet er; 1.06 μ m YAGレーザー) は,鉛直誤差 < 10m,水

^{*3} 物質の温度変化に対する抵抗の度合いを示す尺度. 熱の保持力(冷えにくさ熱せられにくさ)を表す量.

^{*4} 影の分布(長さ)から高度を推算する光学的(photometric)な方法とステレオ画像を用いた推定法の2つ.前者は誤差が大きく精度上の問題があり、後者は撮像時の条件が揃ったペアの画像が必要なため適用できる場所が極めて限られた.



図2:火星の表面形状の地図(NASA, MGS/MOLA teamによる高度マッピングデータより).火星の地表はその地質的な特徴か ら主に3つの領域に分けて捉えられる;1. 巨大楯状火山と巨大峡谷の載るタルシスドーム(高まり),2. 南半球の古い高地, 3. 北半球の新しい平原/低地.

平誤差 (spot size) ~130m, ショット間隔 (alongtrack spacing) ~330m という高精度で,初めて火星 全球の高度測定を行った⁵⁵.可視撮像では捉えられな かった,凹凸のかすかな表面の構造も高度マッピング により見えてきている[1]. MGS の MOLA の高度分 布データは現在複数の形式 (グリッド状,ライン状) で配布されており,用途に応じて簡単に地形の形状を 知ることができるようになっている (図2).

火星の表面地形一水による直接 的な浸食・堆積作用を示す地形一

光学探査観測により現在までに明らかとなっている 火星の表面地形のうち、その形成に水が主要に関わっ たとされる地形について、整理・分類して紹介する. (以下用いられる火星の地域名とその位置については 図2と各脚注を参照.尚、火星ではクレーター年代学 に基づき相対的に地表年代が求められており、それは 大きく3つの時代に区分される.古い方から、

^{*5} 約400km 上空の周回軌道上から火星地表面にレーザーを打ち,反射時間(往復時間)を利用して観測点の高度を求めるという測定原 理による. 観測点は数万にも及ぶ軌道(2年余の周回軌道)に沿って密に配置されている.

Noachian, Hesperian, Amazonian と呼ばれ, その名称 が一般的に使用されている.絶対年代の目安としては, Noachian-Hesperian の時代境界が35-38億年前の間, Hesperian-Amazonian 境界が18-35億年前の間に位置す ると見なす.この相対的な年代区分と層序の関係(地 層累重の法則)を合わせ,具体的な地形の形成年代が 推定されている.

3.1 河川床(類似)地形の種類と分類

マリナー9号とバイキング1,2号による画像撮像以 来最も注目されてきた地形の1つは,河川の底に類似 した地形,河川床(類似)地形である.現在「底」を 埋めて流れるものはないが,かつて地表付近の水の流 れ[®]により表面が浸食された跡と想像されるものであ る.この浸食を示す地形群により,火星における過去 の水の存在の可能性が指摘されてきた.その線状の長 い凹み地形(谷状の地形)は,しばしば水による浸食 という意味を付加して,流水(類似)地形(fluvial-like features)とも呼ばれる.形状によりいくつかの分類 がなされている.以下,代表的な3つの地形,(A)大洪 水地形 (outflow channel),(B)流水谷地形 (fluvial valley),(C)ガリー(gully)をとり挙げる.

(A)大洪水地形 (outflow channel) (図3^(a))

河川床(類似)地形の中でも、確実に表面を液体の 水が流れて(run-offによって)浸食した跡として解釈・ 分類されているチャネル(水路)地形である.スケール は谷地形として最大であり、全長100-数1000km,全幅 10-100km,深さ10m-1kmにも及ぶ.大量の液体の水が 一気に流れ、地表面を直接削り取った浸食地形であると して認められている.主な根拠は以下の観測事実である.

衛星写真で写した,地球のかつて(氷河期の終わ り)の大洪水の跡に酷似している

底部 (floor) に涙形の丘 (streamlined hills) が残 されている

底部 (floor) に水勢でできた溝⁷ (scour) が見られる

における地球の代表的な地形は米国ワシントン州



図3:(a)アウトフローチャネル (Ares Vallis: 20N, 33W付 近). その底部には液体による浸食を示す涙形の丘が 見られる (本文参照);バイキング・モザイク画像; 上側が北,右側から光.(b)チャネルド・スキャブラン ド (ワシントン州:地球). ミズーリ氷河期の決壊に よって起きた大洪水の跡が現在も残っている. Image courtesy of NASA Planetary Data System Imaging Node, U.S. Geological Survey, Flagstaffof. AZ.

東部にあるチャネルド・スキャブランド (図3(b)) で ある.更新世末期(約1万年前),氷河湖ミズーリ湖の 決壊により大量の水 (最大で2500km) が放出されて洪 水が起き、水が地表を削り取った跡が現在も残されて いる[2]. 地球の周回衛星 (ランドサット) が写した その衛星写真 (図3(b)) とバイキングが撮像した火星 の大洪水地形 (outflow channel) の画像 (図3^(a)) を 比較して見ると、合流のパターンが良く似ているのが わかる[®]. と は表面を流体が流れた直接的な証拠 である. 流れの向きが何かの障害物 (例えばクレーター) によって変えられた結果,避けて通った跡が の島状 地帯 (上流側に突出し下流側で先細りした涙形)とし て残される.また、底部には表面の物質がえぐり取ら れ運び去られた跡 (scour marks) が残る. 流体が流 れない限りこのような形状は表面に残らない、さらに 液体の水以外の物質(例えば溶岩や氷河の流れ等)で それらの形状を作ることは難しい。。他にも細い溝状 の食刻痕(etched or plucked zones) など、地球の洪水 跡に特有の形と酷似した形状が火星の大洪水地形 (outflow channel) に数多く確認されている[3][4][5]. 大洪水地形 (outflow channel) は主にChryse Planitia

*6 地表,地下水のいずれも含む.

^{*7} すり跡, 泥を洗い流した跡.

^{*8} スケールは大きく異なる(火星の方が地球のものより桁で大きい。)その点は問題とされる.

^{*9} その他,液体炭化水素,液体二酸化炭素による各侵食,風化,液状化現象など,水による浸食以外の様々なアイディアもかつて検討 された. 観測事実と照らし合わせ,水以外の可能性は現在ほぼ否定されている.

(22-50W, 14-40N); Elysium Planitia (207-275W, 19
S-47N); Hellas Planitia (264-323W, 23-66S);
Amazonis Planitia (134-183W, 8S-40N)の4つの地域
(図2参照)に集中して分布している.その多くが峡谷
(chasma) や乱雑帯 (chaos/chaotic terrain) と呼ばれる陥没地形,あるいは大規模な fracture から発して、
低地に向かう方向に走っている (4.1節参照).

大洪水地形 (outflow channel) のほとんどの形成時 期は Hesperian (約35-18億年前の間) とされる[6]. しかし,一部は Amazonian (10-20億年前より新しい) にも形成されていたと考えられており,オリンポス山 (Olympus Mons, 133.5W, 18.5N) (図2参照)の溶 岩流の上に見られる小規模のチャネルは,1-2億年前 より古くはないとも言われる[7].

大洪水地形 (outflow channel) の最大の謎はその膨 大な量の水をどう供給するかにある (4.1節参照). (B) 流水谷地形 (fluvial valley) (図4)^{*0}

典型的なサイズは、長さ1-1000km,幅1-10km,深 さ100-200m程度で、大洪水地形(outflow channel) に比べて格段に小規模であり、また大洪水地形 (outflow channel)にはほとんど見られない支流の構 造が多数見られるのが特徴である.一般的に、上流部 の支流が相互につながってネットワークを形成してい るものが多く、特に「バレーネットワーク (valley network)」とも呼ばれる.大多数(約70%)は古い南 部高地に卓越して分布するが、両半球の火山の山腹に も顕著に観測されている.

< 南部高地の流水谷地形 >

流水谷地形 (fluvial valley) として特に大規模なも の (長さ100km,幅1-10km程度) が含まれるが、そ れらの底の形状 (bedform) には流体の流れを直接的 に示唆する地形がない (観測されていない)[™]. この 点が大洪水地形 (outflow channel) と明らかに異なる. 成因については、地下を水が流れ、そのサッピング (掘り崩す) 作用によって徐々に時間をかけて地表が 浸食され形成されたと解釈されている.その主な根拠 は以下の観測事実である.



図4:パレーネットワーク (Nirgal Vallis:41W, 28S付近); パイキング・モザイク画像;上側が北,右側から光. 発達した支流構造が見られる. Image courtesy of NASA Planetary Data System Imaging Node, U.S. Geological Survey, Flagstaff. AZ.

支流が切り株状 (stubby) に、先細りせずに始まっている.

支流が主流と同程度の深さから突然始まっている. 先行する谷状地形 (valley) や割け目 (fracture) に沿う形でネットワークを発達させている.

流水密度 (drainage density) が0.015-0.16km/km と 極めて低い (地球の典型的な流水谷 (stream valley) の値は1km/km)

これらは地下水の動きによって形成されるサッピング 谷地形の典型的な特徴であり,表面を水が流れて (run-off して)形成される谷の形状とは明らかに異な る.しかし地球では実際に,表面の水の流れと地下水 の流れは降水循環を通してつながっているため,runoff 谷とサッピング谷の形成は相補的で空間的に近く に分布しているのに対し,火星ではそれが見られてい ない.降水循環が簡単には期待できない火星で地下水 を継続的に流す仕組みは謎である (4.2節参照).

形成年代は、古くは Noachian、多くは重爆撃時代の終わり頃(38億年前頃)とされ、Hesperian が始まる頃までには形成はほぼ終わったと考えられている.
 <火山上の流水谷地形>

サイズは比較的小規模だが、その流水密度は0.3-2.3 km/km で地球の流水谷の値に近い.そのネットワーク 構造は先行する割け目 (fracture) を無視して発達し ている.これらの観測事実から、その成因について、 表面を水が流れて浸食して作られたとする考えが有力 である[8].しかし、多量の水が必要であり、その水

^{*10} 各称に注意. 直訳すると「流水谷」だが、表面の水を直接水が流されて侵食されたことは意味しない.

^{*11} Nirgal Vallis (41w, 28S付近: 図4), Ma'adim Vallis (183W, 218付近) など. Ma'adim Vallis は MER の Spirit が降り立ったクレーター につながっている流水谷地形である. Bahram Vallis (58W, 21N付近)の下流部には例外的に涙計の丘(流水の跡)が残されてい るとの指摘がある.

源は不明である (4.2節参照). 形成年代は,南部高地 の流水谷地形 (fluvial valley) より若く, Hesperian に 入ってから形成されたものが多い. Alba Patera (105-115W, 37-44N) (図2参照) のバレーネットワーク (valley network) は例外的に若く, Amazonian の間に 形成されたと考えられている.

(C)ガリー (gully) (図5)

ガリー (gully) は、上記の2つの谷地形に比べて非 常に細く浅く短い (幅10-数100m,深さ数10m以下程 度,長さ100m-数km),小規模な筋状の地形である. 水の流れる小峡谷,溝といった意味をもつ.4年前 (2000年),MGS 搭載のMOC (Mars Orbiter Camera)の 精細高解像度画像によって発見された[9].その形成 年代は極めて若く,最近数100万年以内と考えられて いる¹².南半球の中 - 高緯度地域に不連続に観測され ている (がこれまでの撮像観測点はスポット状で全球 に偏りがある.)クレーター,谷地形,極域のpit (小 さい陥没地形),グラーベンなどの内壁の一部に分布 している.

ガリー (gully) の起源については全く決着がつい ていない.地下からの湧水 (浅い[9][10]あるいは深 い[11]帯水層からの浸透流),雪解け水[12][13],地 下氷の融解[14]などの可能性が指摘されている(他に [15]).あるいは、ドライアイスの懸濁流(suspended flow)[16],乾いた(水なしの)地滑り[17]と考える 向きもある. 流れたものが水であるかも含め, まだ議 論が続いている. 最近では観測データ解析に基づく統 計的な議論を Heldman and Mellon (2004) [18]が行っ ている.

3.2 その他の水関連の地形

北半球に指摘される海岸線[19] (4.3節参照), 堆積 盆地 (basin),扇状堆積層 (apron) [20],大峡谷の内 部に見られる層状のメサ (mesa;周囲が崖になって いる平らな岩石丘) [21]は,水が少なくとも一時的に 大規模にたまった証拠とも解釈されている.尚,南北 両極冠の残存極冠は水氷として一般的に認められてい る.また,一部の地域に多角地形 (polygon) やエスカー (esker) 等の地球の凍土地形や氷河地形に似た構造が 観測されている.水の間接的な作用 (液体の水が付加 したことによる流動性の獲得)を示す地形としてはラ ンパートクレーター[22] (また4.3節参照),峡谷内地 滑りなどが多数観測されている.

4. 流水地形と表層環境

4.1 大洪水地形(outflow channel)への水の供給と形成過程 火星の様々な地形は、表層部にかつて豊富な水が存 在していたことを確実に示しているが、その水が星全 体としてどのような形でどれくらいの期間とどまって



図5:クレーターの内壁のガリー (Newton Crater 内部の小クレーター:41. 1S, 159. 7W 付近); (a), (b):バイキング・モザイ ク画像, (c): MGS/MOC 画像;上側が北、右側から光. Image courtesy of NASA Planetary Data System Imaging Node, U.S. Geological Survey, Flagstaff. AZ.

いたか (あるいは現在もどこかにとどまっているか), また、全球で循環していたのか/いなかったのか、の 判断は難しい.火星表層部の水環境とその変化は現在 最も注目されている重要な問題の1つである. それを 解くためには、当時の流水地形の形成過程(水源と水 の動き)を明らかにすることが第一の鍵となる.しか しその研究が観測データ量の飛躍に比べてそれ程進ん ではいないのが現状である、その理由は、まだ全ての 観測データの解像度が十分ではないこと (リモセン観 測の限界かもしれないが)の他に、当時の火星におけ る制約条件(確実に固定できる条件)がほとんどない ために当時の流水に関する情報を得る手段に乏しいこ と、地球からの応用が(これまでのところ)あまり通 じない世界のように見えること、にあると言えるだろ う. つまり、他の気候変動の問題などと一緒に組み合 わせて考えなくてはいけない、そしてそれが地球の歴 史では経験しなかったような環境であった可能性が高 いと考えられるためである.

ここで大洪水地形 (outflow channel) に着目したい. 個々の流水地形から当時の火星の水環境に関して潜在 的に得られる主な情報は、形成年代(但し、相対年代) と流れの特徴(流量,水の総量,継続時間)である. 水の総量及び継続時間の推定についてはかなり不確定 だが、形成年代と流量に関しては比較的定量的な議論 が可能である.また、重要な考察の1つに、源流部の 形状がある.大洪水地形 (outflow channel) は流水地 形の中でも特にその始まりの部分が共通して明らかな 特徴を持つ(後述).そしてその形成は週から月単位 で行われたと推定されており[23]、イベントが起こっ た年代も比較的狭い年代に収まっている.よって当時 の気候に関わらず不安定な大洪水イベントで形成され たという説明が可能だ、しかし、地球では考えられな い程の大量(最大流量~10⁶⁹ m³/s)の水の源が従来か らの謎であった. 著者らは以下のように火山性の凍土 融解が大洪水地形 (outflow channel) にもたらされた 液体水の発生に大きな役割を果たしたと考えている.

大洪水地形 (outflow channel) が圧倒的に集中する

Chryse Planitia の大規模なチャネルの上流部をたどる と、そのほとんどが乱雑帯(chaos/chaotic terrain)に つながっている(例:図6).乱雑帯(chaos/chaotic terrain)とは深さ1-3km程度、水平スケール10-100km 程度の陥没地形であり、周囲が絶壁で囲まれた、崩落 の形状を持っている.底部の表面には割け目(fracture) が走り、メサ状のブロックの塊が多数転がっている¹¹³. それは下から'もの'(水)が噴出して破砕したように 見える地形である.その乱雑帯(chaos/chaotic terrain) のほとんどは大規模な火山帯に隣接しており、十分な 熱源が期待できる地域に分布している.これらの観測



図6: 乱雑帯 (Chaos) (0N, 39.7W): バイキング・モザイ ク画像; 上側が北, 右側から光. 四角の囲みの中のブ ロック状の塊が見える地形を指す. 大洪水地形の始ま り部分に位置する (本文参照). Image courtesy of NASA Planetary Data System Imaging Node, U.S. Geological Survey, Flagstaff. AZ.

事実に基づき,著者らは,乱雑帯(chaos/chaotic terrain)の地下でマグマの貫入に由来する凍土融解が 起き,その地下の融解水が地上に解放され大洪水地形 (outflow channel)の水源となった可能性が高いと考 えている.凍土が融解する際には水の生成と同時にそ の中に対流が発生し,その対流の熱輸送効果が融解過 程の進行に重要な影響をもたらす.従来その点が着目 されていなかった.そこで対流の効果を適切に評価し た火星の凍土融解過程の数値計算を行い,融解水の生 成を定量的に見積もった[24].

その主な結果を図7に示す.マグマから凍土に運ば れる熱輸送は対流により活発化かつ局在化し、水の生

*13 こぶ (knob) 状の小さい丘が卓越して分布する乱雑帯 (chaos) もある.



図7: 凍土内の温度分布の時間発展([24] Fig. 3を一部改変); 数字は無次元化時間. 中心部の白い(pdf カラー図で は黄色)領域の一回り外側が融解水の分布領域に相当 する. 定常状態では融解領域がプリューム(マッシュ リュム)の形状になり地表近くに多くの液体水が存在 していることを示す.

成効率を高めるだけでなく特徴的な液体の水(融解水) の分布形状をもつことが明らかとなった.このシミュ レーション結果は火星の地表面のすぐ近くに大量の液 体が生成し得る可能性を示しており,その後に引き続 く圧密あるいは液状化現象によって水を容易に地上に 供給することが可能である.著者らは,図8に示され るような,圧密によって分離した融解水が自噴し,地 上に大量の水が解放されて,大洪水地形(outflow channel)が陥没地形(乱雑帯)を形成したとする一 連のシナリオを提唱している[24].さらに,このプロ セスが起きれば付近に熱水鉱物ができるはずであることから、この形成シナリオが、乱雑帯領域を狙った中間赤外分光観測(熱水鉱物の検出^{*14})によって検証できると考え、今後の探査データに期待している.

4.2 流水地形と気候変動の問題とつながり

一方,大洪水地形 (outflow channel) と異なり,バ レーネットワーク (valley network) の形成には10⁶年 以上の浸食(継続)時間が必要とされ[25],一時的な 大洪水の説明では難しい. そのような流水地形の形成 を説明するために従来から「過去の温暖・湿潤な火星 環境」の考え方™がある.火星の気候変動を大前提と し,地球と同様の,降水を介した水循環がかつての火 星に存在したと仮定する説であるが、詳細はまだ明ら かになっていない、最近では CO2等の温室効果ガス の他に自転軸の傾きの変化なども要因として考慮され, 大気大循環モデル (GCM) を使って気候変動と地形 形成を統一的に説明しようとする研究の流れが特に強 い.しかし、単純な気候変動では形成年代の若い火山 上のバレーネットワーク (valley network) およびガ リー (gully) の形成を説明するのは難しい (その頃 には火星が寒冷化してしまうため).特にバレーネッ トワーク (valley network)の形成は歴史を通じて水が 関わり継続的に行われてきた可能性が高い. 別の考え 方としては、熱水循環が挙げられる[26].この場合、 火山やクレータリング時の熱の輸送が降水に代わる.



図8:1.24帯(Chaos)及びアウトフローチャネルの形成シナリオ([24] Fig.9を一部改変);マグマの貫入により凍土下部が加熱 され、凍土内の水の融解が始まる.融解水は多孔質対流を起こし、やがてマッシュルーム状の融解領域を形成する(図7参照). 融解領域内での水と岩石の密度差により圧密を起こし液体の水が上部に分離され、自噴し、地上に水を解放する(アウトフ ローチャネルへの水の供給)と同時に陥没地形(乱雑帯)を形成する.

^{*14} 例えばカオリナイト, クロライトなどの粘土鉱物

^{*15} 流水地形形成当時の火星では継続的に流水が起こっていた、つまり、現在の地球のように、降水によって水循環システムが働いていた(過去における温暖・湿潤な火星)が、その後、地表環境が変化し、寒冷・乾燥化した、とする考え方。

継続性を維持する水循環システムの候補として特に重 要だろう.

4.3 水の行方

ところで、上記のような流水地形から示されるよう な、火星地表付近にかつて存在した豊富な(液体)水 はどこへ消えたのか?現在私達が火星上で直接目にで きる H₂O は、南北両極冠の残存極冠と大気中の水蒸 気だけである.太陽系星雲の凝縮・進化過程から元素・ 物質の分配により理論的に見積もられる火星形成時の 尤もらしい水の保持量と比較すると収支がほとんど合 わない[27].現在表面的に確認される水の量では少な 過ぎる¹¹⁶. また、水の相図からも、火星の現在の低圧・ 低温(平均約210K、4-9mbar)の地表環境では、液体 の水は少なくとも地表面には安定に存在できないこと は明らかである.

水の行方としては、(a)宇宙空間への飛散、(b)地下へ の蓄積(液体=帯水層あるいは固体=凍土層として地 表下に貯蔵)の2つの可能性が主に考えられる.(a)に ついて観測からの主な根拠は(上層)大気中の重水素/ 水素比である.火星のその値が地球の海水の値の約6 倍とされる[28].重く逃げ難い重水素が相対的に多く 残っている事実は、火星における大気散逸過程¹¹⁷を示 唆しており、水が宇宙へ失われたことを裏付ける証拠 となっている.

しかし,火星には地球の凍土地域で見られるような 多角地形 (Polygon) やサーモカルストに似た地形が 多く観測されている (3.2節参照).火星が当初持って いたと推定される水量の全てを大気を介した散逸で失っ たとは考えにくい.(b)のように,少なくともその一部 は地下にしみ込んで,帯水層,凍土層として貯えられ ている可能性が高い[29].

大洪水地形 (outflow channel) を形成した水は低地 にたまり,一時的あるいは継続的に海や湖を形成した (その後地下に潜るあるいは蒸発したかもしれないが) という考えがある. Parker et al. [19]は北部平原/低 地に(多重の)海岸線の跡を見いだしている.著者ら はそれとは独立に代表的な北部平原/低地であるUtopia Planitia付近(225-275W,15-45N)とChryse Planitia 付近(30-75W,15-45N)においてクレーターの形状 解析を行い,その結果,流動化イジェクタのパターン が提唱されている海岸線を境に有意に分かれることに 気づいた[30].一般にクレーターの形状は地下構造を 反映する.この解析結果はかつての海と思われる領域 に,より激しい衝突イベントを引き起こす地下構造, つまり揮発性元素があることを示している.大洪水地 形(outflow channel)を形成した水が北の低地側に集 まり,地下にしみ込む際,CO²大気をとりこんでクラ スレートを形成した可能性があると著者らは考えてい る.

尚,一昨年(2002年)のGRS[™]による観測からも, 火星の地表付近での水の比較的豊富な分布が示されて いる.

5. 今後に向けて

5.1 残されている課題と観測

火星の水に関連した観測課題は以下の2つに集約される.

課題 現在水がどのような形態でどの場所にどれくら い分布しているのか,あるいは失われつつあるのか (地下,地表,大気・高層も含める).

課題 過去の水の量や状態を示す物質・地質的痕跡 (鉱物,岩石,土壌などの化学組成など)が残されて いないか.

である.さらに,

小さいスケール (数100m 以下) の新たな水関連の 地形の発見.

も付け加えられるかもしれない.これらが明らかとな れば火星の水の歴史・変遷を知り,関連する地形形成

*16 脱ガス段階での火星の水の量は~10[°]km[®]であるのに対し、北極の残存極冠が1.2-1.7×10[°]km[®](2km の厚さを仮定)(Zuber, M.T. et al., 1998, Science 282, 2053.),大気中の水蒸気が約1.3^{km[®]}という収支になっている。南極冠の水の量は相対的に非常に少ないと思われている。

^{*17} 火星は固有の磁場をほとんど持たず、太陽風が大気と直接相互作用すると考えられている.大気中のH₂Oは紫外線によって 分解され、火星の低重力環境下では、軽いHが宇宙空間へ逃げ出す(散逸する)と予測されている(Oは地表面の酸化に使われる)).散逸の具体的物理メカニズムについてはいくつか説がある.

^{*18} Odyssey 搭載のガンマ線分光器 (Gamma Ray Spectrometer). 高エネルギー中性子の検出によって表層の土の中の水素を観測する.火星表層での水素は水分子に由来するものであるので、水素の存在はすなわちH₂O (地表下の氷)の存在を示す. http://grs.lpl.arizona.edu/latestresults.jspを参照.

の謎を解く足がかりが得られる. 観測の方向性として は以下の2つ:リモセン観測による全球マッピング観 測(課題,及び)と,表面に降りる着陸船(ラ ンダー)及び探査車(ローバー)が実施する地質調査 (課題 中心)がある.

課題 に向けた観測として主要なのは分光マッピン グ観測(2.2参照)とランダー・ローバーによる地質 観測である.分光観測に関しては,現在展開中の中間 赤外域の観測(OMEGA⁽¹⁹⁾)によって,炭酸塩,熱水 鉱物が検出されることが期待されている.一方のラン ダー及びローバー観測(「その場観測」)では,搭載さ れた小型分光器(赤外,X線)や顕微鏡によって表層 の土や岩石を分析し,鉱物組成や元素組成,結晶構造 などの化学情報を得ることができる.現在も観測継続 中の MER がその代表である.これまでにヘマタイト や磁鉄鉱,そして硫酸塩の検出や岩石の層理の発見な どの新しい情報を次々ともたらした.塩類の存在や縞 状の層理はかつての海の痕跡ともされる.

課題 に関しては,解像度の向上を目指した Mars Reconnaissance Orbite⁻²⁰が2005年打ち上げ予定である. この探査が成功すれば,十分な解像度で全球について の詳細画像が揃うことになるだろう.

課題 の,地表に存在する水成分については,極冠 の観測が主となるが,MOLA により北極冠の詳細な3 次元画像が得られ,水の量が推定されている(4.3節 参照).また最近ではOMEGA により南極冠の H₂O 成 分も検出され観測されつつある.

このように、現在までの多様な火星探査により、課題 ~ に関する総合的な成果として、大まかに次の ような現状認識が成り立っている.「地形からかつて の火星にかなりの水があったことは明らかであり、そ れを示唆する直接的な物質・地質的痕跡もローカルに 得られている.それはもしかすると一時的には海の規 模だったかもしれない.また、全球の表面鉱物のマッ ピングも十分な解像度で行われつつある.その中でか つての水の存在を示すと解釈できる鉱物も見つかって いる.一方で,現在の火星は,表面上水に枯渇してお り,水の行方の謎は解決されていない.極冠の水の量 に関してはより正確に見積もられつつある.」

ここで,課題 について,地表面以外の探査観測が ほとんどないことに注目すべきである.特に地下浅部 (10⁰⁻¹km 深さのスケール)の構造、つまり帯水層、凍 土層の存在と分布と状態を明らかにすることは、水関 連の地形形成を明らかにする上で必須と言えるが、こ れまでの直接的な測定は Odyssey の GRSによるごく 浅部 (m 程度まで)の表層の土中の水成分の観測に 限られている.現在 Mars Express の MARSIS²¹ によっ てレーダーによる観測が進行中であるが今の所はあま りうまく作用していないようだ.現在の帯水層,凍土 層の存在と分布と状態を明らかにするための観測が. 今後最も注目されていく探査観測の1つであると著者 は考えている.尚、Nozomi が当初観測を予定してい た、上層大気、電離圏に着目した火星探査・極端紫外 等の光の短波長側のリモセン観測は比較的手薄であり, まだ観測の余地が残されているかもしれない.

さらに、以下の点にも注意を払うべきである.現在 手にしている、一度得られたはずのリモセンデータも 全球として見ると不完全であり問題点が多い.例えば 地形情報として重要な高度データだが、MGS の MOLA によるマッピングデータは、軌道の変則性や データの取りこぼしにより実は全球の解像度はかなり 不均質である.場所によって測定地点は6、7km 以上 も離れている.これではガリー(gully)のような小 規模な流水地形の始まりの高度分布(その成因の議論 に有用)や、小さいクレーターの形状解析(月や氷衛 星などの他の惑星・衛星と火星の地質の比較の上で重 要)の統計的な議論にはとても不十分である.MGS 以降直接の高度データは得られておらず、また今後も 予定されていない.また、撮像観測に関しても、火山 やクレーター、峡谷、谷状地形等の~1km 以上のス

^{*19} Mars Express 搭載の赤外分光器 (Observatoire pour la Mineralogie, l'Eau, la Glace et l'Activity).

^{*20} 現在最も早く予定されている火星ミッション.従来の周回衛星によるリモセン観測とランダー/ローバーによる直接観測の間の解像度のギャップを埋めることを目的とし、数10cm / pix という驚異的な高解像度でマッピング観測を実現する予定.

^{*21} Mars Express 搭載の地下サウンディングレーダー/高度計 (Mars Advanced Radar for Subsurface and Ionosphere Sounding). ラジ オ波 (1.3-5.5 MHz) を用いたレーダーにより地下の層の境界面を検出する. 約5km の深さあるいはそれ以深まで検出が可能とされて いる.

ケールの比較的大規模な地形全体を映すのに必要十分 な解像度を持った鮮明な画像セットはバイキング以来 一度も得られていない²². 今後これらのデータを補強 するための観測も必要だろう. 探査の新規性を求める 以外の別の視点を持つことも重要である.

ランダー及びローバー観測 (「その場観測」) も,引 き続き今後が特に期待されている.「その場」観測は 地質情報として貴重である一方、着陸地点近傍のロー カルなサンプルの情報しか得られないため、今後サイ トを増やしてデータを蓄積していくことが必要だ²³. 海の存在の議論に例を取れば、どれくらいの広がりで、 どれくらいの期間存在していたのかを知るためには、 離れた複数のサイトでの観測と、岩石の年代測定が必 須であり、それは新たな探査を行う以外に方法がない. そしてそれはこれまでのデータ解析の結果と技術の蓄 積を生かして行われる効率的な探査となり、負担は少 なくなる.さらに、次の「その場」観測の段階として は、将来的に、ネットワークランダーによる観測(複 数のランダーを使用した同時観測)が可能になるかも しれない. 火震波を用いて, 深部, 浅部を含めた内部 構造が明らかになれば観測課題 の地下の水の究明に 結びつくだろう. 複数のステーションによる定常観測 は火星の気象観測としても重要である.

5.2 火星の研究について

これまで火星には太陽系内の他の惑星に比べ圧倒的 多数の探査機が送りこまれてきた.そしてこれからも 続くだろう.なぜ火星か.研究対象とする意義と重要 性はどこに置かれているのか.よく言われることだが, 第一に,地球との対比が挙げられる.現在の火星の地 表/表層環境は,太陽系の中で地球と(大きく異なる がそれでも)最も類似している.個々の惑星の進化の 分岐路,多様性を生み出す要因を探る上で,現在の火 星,そして過去の火星を知ることが地球(の現在と過 去)を知る最も有用な試金石の1つであることは間違 いない.

第二に,火星は氷衛星と並び地球以外で水が存在す る数少ない星の1つだからである.水は私達にとって 物質として比較的馴染みが深いにも関わらず,今まで のところ異なる惑星環境下での素過程や振る舞いをう まく説明できていない(地球からの単純な外挿が成り 立たない).火星表面に刻まれた豊富な水の存在を示 す記録はどのように解釈されるのか.今でも水は地表 下にたくさん眠っているのか.また現在でもちょっと した条件の不安定さが生じれば地上への大量の水の流 出が起こり得るのか.火星の星としての水循環の仕組 みは地球とは大きく異なっている可能性がある.それ 自体を知ることが大変興味深い.また,水の存在は生 命探査の観点からも特に関心が高い.

今後も、引き続き、水と潜在的生命をキーワードに 多様な探査が計画され、データがさらに蓄積されてい くのは確実である.火星の研究には、他の惑星・衛星 の研究と比べて、膨大な量の観測データが存在するの が特徴だ.その利点は十分に生かしきれているだろう か.観測・データ解析に比べ、モデルの構築、理論計 算あるいは実験に基づく定量的議論が遅れている気が する.観測データが示唆する全ての可能性を吟味しな がら積極的にモデルを打ち立てて謎に取り組む姿勢が 必要とされている.そのモデルを次の探査観測でチェッ クできるような循環が確立されると火星の理解が今後 効率的に深まっていくだろう.

謝辞

本稿の推敲にあたり活発な議論をいただきました並 木敦子さんに感謝致します.また査読の過程において 編集委員と匿名で査読して頂いた方に大変有益なコメ ントをいただきました,本稿の改訂を助けて頂いたこ とを深く感謝致します.

^{*22} Odyssey 搭載の赤外分光器 THEMIS (Thermal Emission Imaging System) による可視画像は鮮明だが全球はカバーされていない. MGS も低解像度画像撮像用のカメラの不具合でうまく作用しなかった.

^{*23} これまで行なわれた着陸探査はまだほんの数カ所に限られている(Viking Lander-1号: Chryse Planitia (47. 49W, 22. 27N), VikingLander-2号: Utopia Planitia (225. 74W, 47. 67N), Mars Pathfinder: Ares Vallis flood plain (33. 22W, 19. 13N) MER-Spirit: Gusev crater (185W, 155近辺), MER-Opportunity: Meridian; Planum (6W, 25近辺). 既に次の着陸探査計画 も進んでおり、2007年には米国/NASAによるフェニックス (Phoenix) が打ち上げ予定である. このミッションは火星上で特に氷に富む 地域への着陸とその調査を目指している. さらに、2009年以降には、Mars Science Laboratory, まだ評価中(under study)ではあ るがサンプルリターン(地球へ火星試料を持ち帰ること)の計画(Mars Sample Return Lander) がある.

引用文献

- Frey, H.V.et al., 2002, Geophys. Res. Let. 29, doi : 10. 1029/2001GL013832.
- [2] Pardee, J.T., 1942, J. Geophys. Res. 45, 1569.
- [3] Baker, V.R., and Milton, 1974, Icarus 23, 27.
- [4] Baker, V.R., 1982, Univ. of Texas. Press., The Channels of Mars.
- [5] Baker, V.R., et al., 1992, Univ. of Ariz. Press., Mars.
- [6] Marsursky, H. et al., 1977, J. Geophys. Res. 82, 4016.
- [7] Mouginis-Mark, P. J., 1990, Icarus 84, 362.
- [8] Gulick, V.C., 2001, Geomorphology 37, 241.
- [9] Malin, M.C. and K.S. Edgett, 2000, Science 288, 2330.
- [10] Mellon, M.T. and R.J. Phillips, 2001, J. Geophys. Res. 106, 23165.
- [11] Gaidos, E.J., 2001, Icarus 153, 218.
- [12] Lee, P. et al., 2002, Proc. Lunar Pulanet. Sci. Conf. 33rd, 2050.
- [13] Hartmann, W.K. et al., 2003, Icarus 162, 259.
- [14] Costard, F. et al., 2002, Science 295, 110.
- [15] Christensen, P.R., 2003, Nature 422, 45.
- [16] Musselwhite, D.S. et al., 2001, Geophys. Res. Let. 28, 1283.
- [17] Treiman, A.H., J., 2003, Geophys. Res. 108, doi : 10. 1029/2002JE001900.
- [18] Heldmann. J.L. and M.T. Mellon. 2004, Icarus 168, 285.
- [19] Parker, T. et al., 1993, J. Geophys. Res. 98, 11061.
- [20] Malin, M.C. and K.S. Edgett, 2003, Science 302, 1931.
- [21] Luchitta, B. K. et al., 1994, J. Geophys. Res. 99, 3783.
- [22] 出村裕英, 2000, 遊星人 9, 1.

- [23] Baker, V.R., et al., 1991, Nature 352, 589.
- [24] Ogawa, Y., et al., 2003, J. Geophys. Res. 108, d oi : 10. 1029/2002JE001886.
- [25] Gulick, V.C., and V.R. Baker, 1993, Lunar Planet.
 Sci. Conf. 24th, 587.
- [26] Gulick, V.C., 1998, J. Geophys. Res. 103, 19365.
- [27] Rossbacher, L. S. and S. Judson, 1981, Icarus 45, 39.
- [28] Owen, T.J, et al., 1983, Science 240. 1767.
- [29] Clifford, S.M., 1993, J. Geophys. Res. 98, 10, 973.
- [30] Kurita and Ogawa, 2003, LPI, Sixth International Conference on Mars, abstract no. 3096.
- [31] 山口靖他編, 2004, 資源・環境観測解析センター, 「地球観測データの利用(1)」.