

火星における惑星地形学

『火星の風成地形・特徴とその意味』での議論を踏まえて

会津大学コンピュータ理工学部¹
出村 裕英²

米国 NASA および欧州宇宙機関の立て続けの探査で盛り上がっている火星。この天体では、地球とは異なる観点から地形学が注目されている。計算理論地形小研究会の活動に合致するものを感じたため、話題提供した表題を更に膨らませて、惑星地形学とその注目点、そして課題についてまとめさせて頂きたい。最後に、現在非常に入手が容易に成りつつある月惑星データの出発点についてもまとめる。

1 火星におけるメインテーマ

火星は 1970 年の Mariner 4 から始まり、常に太陽系探査の 1 トピックとして注目され続けてきた。1970 年代末の Viking ミッションにより、ようやく火星全球を約 300m/ pixel で撮像することができた。着陸船の情報と併せて、火星と地球の類似点と相違点が明らかにされた。すなわち、ほぼ同じ自転軸傾斜で四季があり、1 日の長さはほぼ等しいが 1 火星年は約 2 地球年であること、双方とも大気を持つが火星は地球の 1/200 の気圧しかなく可降水量は全火星水深にして数ミクロン程度、火星気温はほとんどの地域で氷点下であること、共に珪酸塩の地殻を持つが液相の水は地球でしか見つかっていないこと、などである。しかし、現在の凍結乾燥した砂漠環境は、探査機画像からのイメージとは大きく食い違う。例えば、川幅 100km 級・水深 100m 級という大洪水の跡が多数発見され、クレータ年代で 38 億年前の古い地表には至る所に地球様の樹枝状河川痕跡が見られる。地形様式が気候帯に支配されることは地球で周知の通りだ。しかし、どうみても現在の火星環境には似つかわしくない、液相の水による浸食地形があちこちで見つかるのである（図 1）[1]。これをどうしたら理解できるか、が火星の研究の大きなテーマとなっている。昔の火星はもっと温暖湿潤だったのだろうか？それとも一時的に地球型水循環をすることがあったのだろうか？もし液相の水が定常的に存在できれば（地球外）生命が発生できたかもしれない、そうした証拠を確認したい、というのが火星探査車の主目標で、その発見がこのところ新聞を騒がせているわけである。1990 年代後半より、手探りの探検から綿密な

¹ 〒 965-8580 福島県会津若松市一箕町鶴賀

² E-mail: demura@u-aizu.ac.jp

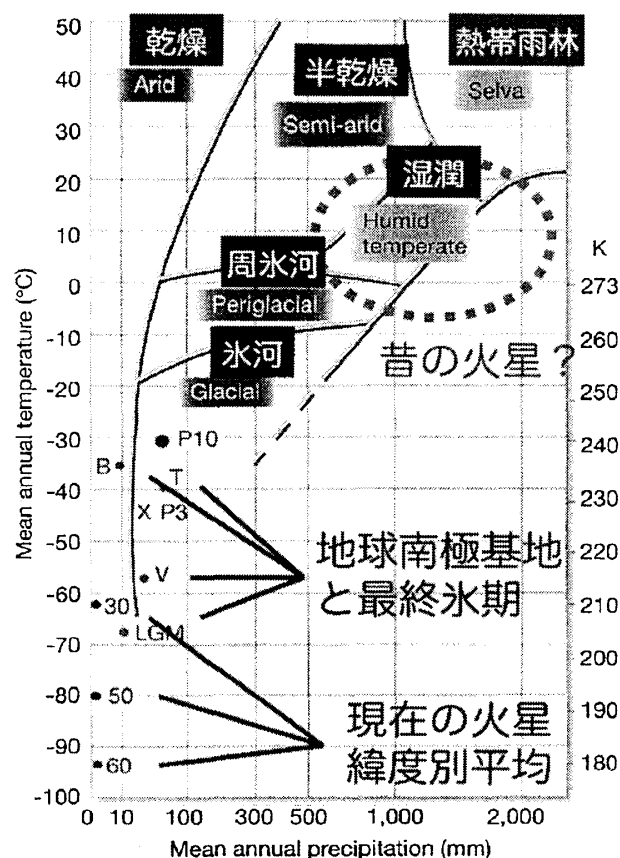


図 1: 気候が決める地形の種類 (Baker 2001 の図に追記) [1] 横軸 (年間降水量) 500 ミリ/年で降水・河川浸食優勢 (熱帯雨林・湿潤) と風浸食優勢 (乾燥・半乾燥) とが分かれる。また縦軸 (年平均気温) 氷点で周期的凍結破碎浸食もしくは氷河浸食優勢 (周氷河・氷河) とそれ以外とが分かれる。

調査の段階に移り、全球が均質な精度で観測されるようになった。Mars Global Surveyor の広角カメラによる全球マッピングと、分解能 1 m を誇る高解像度カメラによるピンポイント撮像、高度計による全球形状、赤外観測による岩相・鉱物分布調査、そして Mars Odyssey による元素分布と潜在的帯水層の把握、2004 年現在は欧州宇宙機関による Mars Express も極周回軌道に投入されている。いわゆる、マーズラッシュである。現在の火星気候および古気候を理解する主流は、計算機上の仮想気候実験室に基づいている。観測事実に基づく境界条件で火星大気大循環モデルを計算し、擾乱を与えたり進化させたり、いろいろ試されている。しかし、取得情報の精度が地球ほど良くないこともあり、なかなか過去の火星像についてはっきりしたことが言えていない。むしろ、探査機のもたらす地形から、過去の情報を抽出できないか、より厳密な検討をすべきだろう。火星表層環境の変遷、このテーマでは、惑星地形学の寄与が欠かせない。これまで火星表面で見つかつて

いる地形は、衝突クレータ、火山、断層による地溝・地塁などの構造地形、極冠（水・二酸化炭素の氷）、河川、そして風成地形である。そして火星表面での営力は地球に比べて極めて小さく、20億年前と言われるクレータ地形が容易に識別できてしまっている。かすかな差異を定量化できれば、古環境情報を読み取れたり、火星表層環境進化史を編める可能性があるのだ。地形と現在の火星環境が矛盾しても問題ない。地形の語る古環境と現在の火星環境、双方を火星史の流れの中で正しく位置づけることがいま求められている。そのためには計算機実験・モデル実験を問わず、地形営力の一般化した理解が必須であることに賛同してもらえるだろう。現在の観測では求められない物理量を、どのように地形から抽出するか、次に述べる。

2 火星古環境に切り込む惑星地形学の勘所

火星大気大循環モデルを支配し、かつ現在の探査機で測定できない代表的物理量にはいろいろなものがあるが、代表的なものは大気圧力・温度・風系（風速）である。これらを知る手がかりは大きく分けて水と風の二つがある。まず水について。水は温度と圧力に応じて固体・液体・気体などと変化することは周知の通りだが、その相図で最も注目すべき点は、水の氷点の温度依存性が非常に小さいことである。気圧がどう変わろうと、水の氷点はほぼ273Kなのだ。そして水は、液相と固相で営力の担い手としての振る舞いを大きく変えてしまう。例えば、川が作った地形と氷河が作った地形の識別は容易である。周氷河地形は周期的な融解・固結を繰り返した証拠になる。地形として現れる水の固液相変化は、そのまま273Kの温度計として使えてしまう。ある周氷河地形の緯度依存性や地域性から、その地形を作った時代の火星大気構造を論ずる重要な根拠が得られるかもしれない。最大のトピックは、火星洪水河川が作ったであろう河川末端の湖もしくは海の消長、南極域の氷河地形とされている各種痕跡、そして周氷河地形の種類別分布が示す過去の気温分布である。いずれも火星古環境を制約する重要な鍵である。そして、風について。砂丘地形などを形作る構成物質の粒径分布および表面摩擦が未知のため、現状で抽出できる定量情報は卓越風向とその変遷である。それらを知る最大の手がかりはバルハン砂丘の形態である（図2）[2]。面白いことに、現在の火星気圧と風速では活動していないと思われる化石風成地形が中規模クレータ底などで見つかっている。もしかすると、気圧などある一定の条件が整わないと幾つかの砂丘群は活動しないのかもしれない。現在の大気大循環とバルハンの示す風系とが整合しない箇所は、そうした過去の活動期の風系を示しているのかもしれない。今後の着陸探査で粒径分布や表面摩擦が分かってくれば、過去の気圧・風速の情報が分離できるかもしれない。本研究会で議論されたものとして、涙滴状バルハン（図3）[3]の成因が挙げられる。その後のメイリングリスト上での議論や計算から、これが卓越風系の変遷を示していることが示された。三日月状バルハンの角の部分が、卓越風向変化に沿って向きを変えつつある遷移状態であることが理解された。なお、本研究

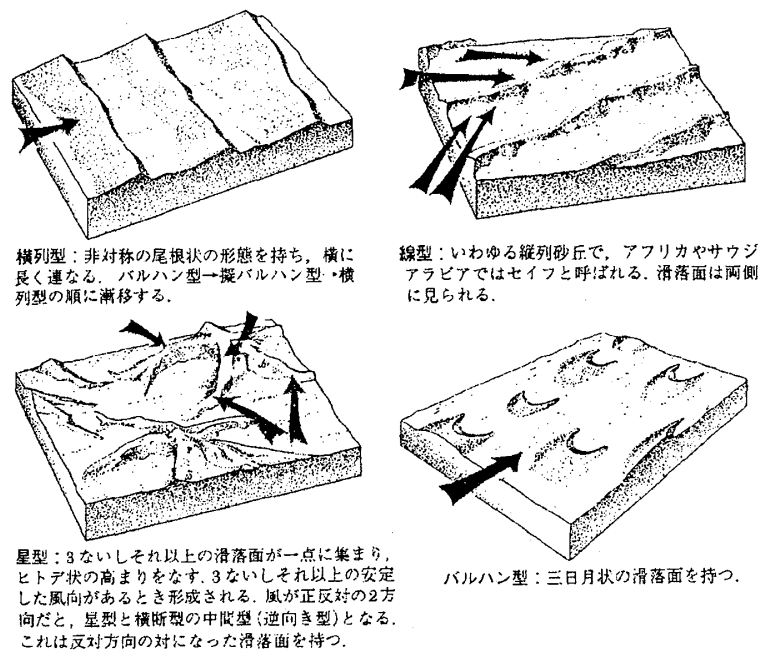


図 2: 卓越風向と砂丘形態（原図は McKee 1979） [2] 卓越風向に従って砂の供給量が多い場合に横列型、少ない場合に三日月状砂丘バルハン型ができる。卓越風向が2つないしそれ以上あると、線型・星型と変化する。

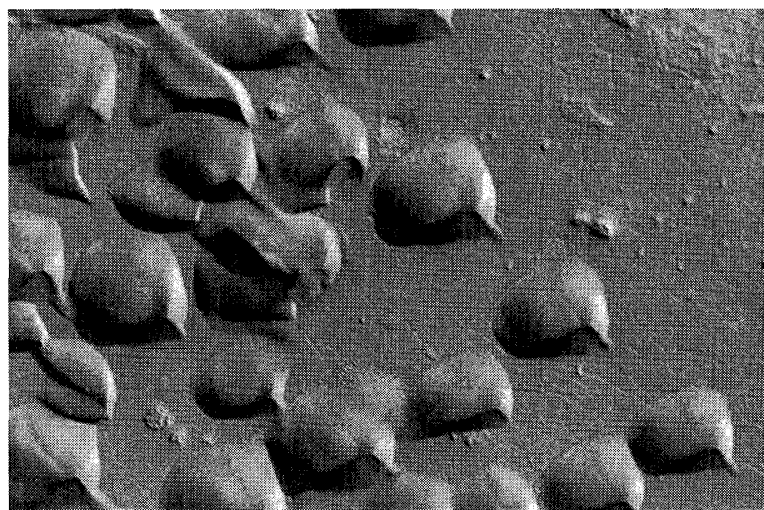


図 3: 涙滴状バルハン [3] 原図を90度時計回りに回転してある。太陽は右上手にあり、陰影パターンから起伏が読み取りやすい。縦が約3 kmである。中央上のバルハンがかろうじて原形をとどめており、これらが遷移しつつある地形であると分かる。

会で示した風系と風速・表面摩擦もしくは粗度の議論は拙著 [4] を参照して欲しい。

3 惑星地形学における課題

言わずもがなではあるが、地球上の地形学は防災・国土保全の観点から研究されることが多い。そのため、豊富な実測データに基づいて簡便且つ正確な予測ができる経験式ができれば十分役に立ってしまい、それ以上の物理的洞察が省略される傾向が無いとは言えない。どうしてもケースバイケースの個別論議に留まり、一般化しようという圧力が少ないように見える。最近の計算機上模擬実験の進歩には目を見張るものがあるが、全ての物理素過程を繰り込んで計算しているわけではない。幾つかの物理的背景がはっきりしないパラメタに押しつけてしまっている例が多々見られる。そうしていて誰も困らないのは、地球上で『現実はこちらなる』ということを知り尽くしているために、一般化された予言能力の必要性が小さいためなのだろう。しかし、火星上の地形学では、経験式で押し通すわけにはいかない。地球と似たような地形が見つかったとしても、それが地球と同じ機構で生じているのかどうか保証の限りではないのだ。地球外地形や環境のデータは今後も増えて行くだろうが、地球並に大量のデータから回帰的に物を言えるようには当分ならないだろう。目に見えている地形だけから、その機構と意味するところを判断しなければならない。例えば、火星では地球とは比べものにならないほど大きな洪水河川跡が見つかったが、その浸食量と河床勾配から流量と継続時間を算出するというテーマを採りあげよう。地球上の河川で簡単に押さえるには、 Manning の式が有用である。しかし、この式を、重力加速度が地球の半分、温度も圧力も、もしかすると流れの構成物質や溶存物質が違ってもいい火星の河川に、そのまま適用して良いという根拠がどこにあるのだろうか？しかし、その適用限界が分からないまま、とりあえず使われているというのが現状である。たとえアナロジーから出発したとしても、今後の惑星地形学では地形形成機構をモデル化・一般化した議論・考察を進めるべきである。前述の勘所と併せることで、非常に面白くなる。

4 月惑星探査成果を入手する出発点

NASA の火星探査データは、CDROM 媒体およびインターネットを介してのダウンロードで入手することができる。前者は NSSDC (National Space Science Data Center)[5] を介してほぼ実費しか掛からない。後者は実質無料である。データの検索は、Planetary Data System のデータ検索サイト [6] が充実してきている。NASA の成果は NASA ホームページが宣伝熱心であるが、それ以外に NASA Planetary Photojournal[7]、NSSDC Photo Gallery[8]、そして NASA 火星画像データの処理を一手に引き受けている MSSS (Malin Space Science Systems)[9] といったウェブページサイトが有名である。いずれのデータもデータ処理者のクレジットがつき、再配布は認められない。しかし、公開されている生デー

タ、および後述の ISIS を用いてそれから処理生成したデータについては、NASA と当該ミッションのクレジット付記を条件に、自由に使うことができる。最近の火星探査データには SIS(SOFTWARE INTERFACE STANDARDS DOCUMENT) というインターフェース規定文書が入っている。データ解析者はこの規定に沿ってツールを開発し、データを処理することができる。生データの校正・投影ツールは米国地質調査所 (USGS: U.S. Geological Survey) の astrogeology team が主体となって開発・提供している ISIS (Integrated Software for Imaging Spectrometer)[10] が有用である。UNIX ベースの本フリーパッケージは、画像データ取得・補綴・輝度校正・幾何補正・画像集成 (モザイク)・図化・表示といった基本機能に加えて、各種フィルタリング処理・ストレッチ・統計処理・画像演算・スペクトルライブラリ関数処理・スペクトル外挿&表示などが行える。ユーザはシェルスクリプトに組んで校正・投影・集成までバッチ処理し、その後は各解析テーマに沿って IDL や Photoshop 等のツールを選ぶ例が多い。ISIS の使い方の実際は、当該ウェブページのドキュメントを参照して欲しい。

参考資料

- [1] Baker, V.R. (2001) Nature vol.412, p.228-236.
- [2] 層序学と堆積学の基礎、愛智出版 (1999) 第 6 章. 原図: Mckee, E.D. (ed.)(1979) A study of global sand seas, USGS Professional Paper 1052.
- [3] Mars Global Surveyor, Mars Orbiter Camera “Wirtz Crater Dune Field” MGS MOC Release No. MOC2-330, 04 April 2003 (Images Credit: NASA/JPL/MSSS) http://www.msss.com/mars_images/moc/2003/04/04/wirtz/.
- [4] 出村・西川・高田 (2001) 日本惑星科学会誌遊星人 vol.10,no.4,p.202-207.
- [5] NSSDC (National Space Science Data Center) <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/> NSSDC CDROM Catalog <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/cd-rom/>.
- [6] PDS 内画像データ検索サイト <http://starbrite.jpl.nasa.gov/pds/index.jsp>; PDS 内データ取扱ツールサイト <http://pds.jpl.nasa.gov/tools/index.html>.
- [7] NASA Planetary Photojournal <http://photojournal.jpl.nasa.gov/index.html>.
- [8] NSSDC Photo Gallery http://nssdc.gsfc.nasa.gov/photo_gallery/; Catalog of Spaceborne Imaging <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/imgcat/>.
- [9] MSSS (Malin Space Science Systems) <http://www.msss.com/>.
- [10] ISIS <http://isis.astrogeology.usgs.gov/Isis2/isis-bin/isis.cgi/>.