

火星のアストロバイオロジー探査はどこまで進んだか

杉田 精司*

(2011年7月31日受付, 2011年10月21日受理)

An outlook of astrobiology exploration of Mars

Seiji SUGITA*

* Graduate School of Frontier Sciences, University of Tokyo
5-1-5 Kashiwanoha, Kashiwa, Chiba 277-8561, Japan

Now, many planetary bodies in our Solar System are of strong astrobiological interests, but Mars still continues to be the most feasible planet to look for life. Mars scientific exploration has focused on water, habitability (i.e., climate), and signs of life. This paper reviews major questions about these three issues and discuss an outlook of future Mars missions. The questions addressed in this paper are: (1) Did Mars have warm and wet climate in the past? (2) Is there methane in the Mars atmosphere? (3) Why hasn't organics been found on Mars? Current answers based on a review of recent researches found in the literature are the following. First, we are obtaining more and more data indicating that Mars had wet and warm climate, but the duration of such climate is very unclear. One possibility is that warm and wet climate may have been short lived (perhaps tens of years to tens of thousands of years each time) but occurred many times during the first several hundred million years in the Mars history. Second, the recent criticisms on the reports for methane discovery on Mars that they may have been errors due to telluric $^{13}\text{CH}_4$ absorption lines pose a serious question about these reports, although the criticisms do not necessarily account for all the reported data. Thus, methane on Mars should be regarded as a possibility at present and needs further investigation with much higher fidelity. Third, the discovery of perchlorate on Mars by the Phoenix mission opened up the possibility that organics on Mars surface may have been oxidized by O_2 released by perchlorate during pyrolysis and form chlorocarbons as detected by Viking landers. This oxidation process by perchlorate in pyrolysis may have been the reason why no organics have been found on Mars. Following these progresses, Mars exploration is stepping forward to a sample return mission. Although this will be an extremely exciting mission, it may make Mars exploration programs rather inflexible over the next decade or more. Thus, well-focused very small Mars probes, which can be relatively easily launched by a nation that have not landed on Mars before, such as Japan, may be able to make important contributions to Mars astrobiology.

Key words: Astrobiology, Mars exploration, Paleo-Martian climate, Organic detection on Mars, MELOS

1. はじめに

過去約半世紀の太陽系探査の結果, 太陽系内に生命

探査の対象となりうる惑星が幾つも見つかってきた。内部海を持つエウロパ, 有機物のもや (tholin) や炭化水素の湖沼を持つタイタン, おそらく有機物を含んだ内部海から来る間欠泉を吹き出しているエンセラダスなど, 非常に魅力的な惑星があることが分かってきた。しかし, これらはいずれも太陽系の中でも地球か

* 東京大学新領域創成科学研究科
〒277-8561 千葉県柏市柏の葉5-1-5

ら遠く、大型の着陸探査機を飛ばすことは容易でない。この点、地球の隣の惑星である火星は、重力的に地球から最も近い惑星である上、過去に生命を育んでいた可能性も高く、生命探査の実現性が最も高い惑星である。

とはいえ、火星での生命探査は容易ではない。その難しさの1つは、火星での生命探査において何を標的にするのがベストなのか明確でないことである。そこで、かなり安全率を大きく取って、「生命が存在するには最低このくらいの条件は必要であろう」という最大公約数的な緩い条件に沿って探査が行われることになる。最大公約数的な条件の代表が液体の水の証拠であり有機物の存在である。しかし、これらは火星生命の必要条件でしかなく、十分条件ではない。もしかしたら必要条件ですらないかもしれない。だが、液体の水と有機物の存否の問題が解けずして火星の生命探査は前に進めないこともまた現実である。このジレンマを抱えた状況において、多くの火星研究者が一致している点は、サンプルリターン探査が火星生命調査の唯

一確実な方法だとの意見である。特に、火星隕石に含まれていない堆積岩や表土の試料（特に粘土鉱物や有機物を含む試料）が得られれば大きな進展をもたらすだろうという予想を疑う声はほとんどない。しかし、サンプルリターン探査には、有人探査ほどではないにしても他の無人探査計画に比べればはるかに巨大な予算が必要となる。そのため、何度もサンプルリターン探査を繰り返すことはできない。火星サンプルリターン探査は一発必中で行わねばならない。

このような状況のもと、Fig. 1に示すように、NASAは巨額の予算を使って多数の火星探査機を打ち上げ、最大公約数的な計測で着実に成果を挙げながらジワジワと攻めてきており、その延長線上にサンプルリターン探査を位置づけている。2011年3月に公開されたアメリカの惑星科学分野での Decadal Survey (Committee on the Planetary Science Decadal Survey, 2011) に集められている研究者の声も現在の戦略を概ね賛成している印象である。掛かる時間の長短は大いに変わりうるが、今後もサンプルリターン探査に向

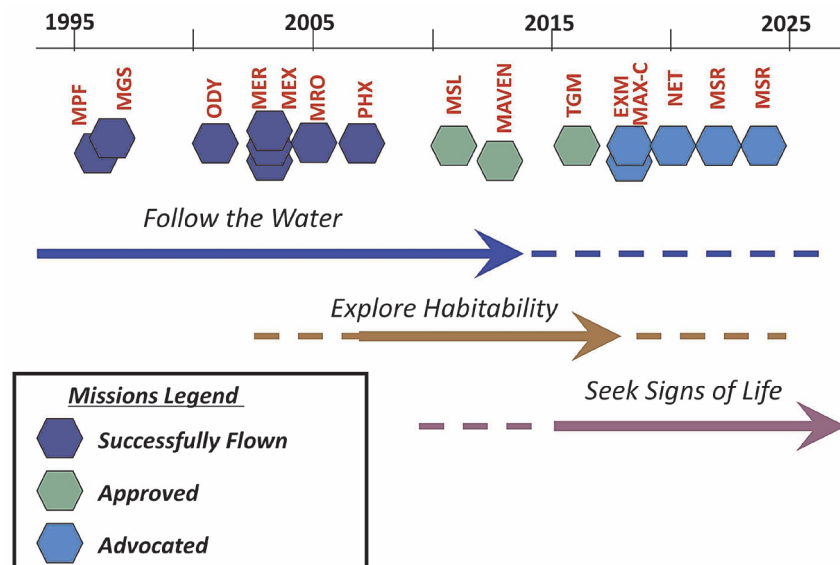


Fig. 1 A list of proposed and executed missions for Mars. The MEAPAG key strategy has also evolved from “Follow the water” and “Explore Habitability” to “Seek Signs of Life” over the last two decades. The acronyms in the figures are as follows. MPF: Mars Pathfinder; MGS: Mars Global Surveyor; ODY: Mars Odyssey; MER: Mars Exploration Rovers (Spirit and Opportunity); MEX: Mars Express; MRO: Mars Reconnaissance Orbiter; PHX: Phoenix; MSL: Mars Science Laboratory; MAVEN: Mars Atmosphere and Volatile Evolution; TGM: Mars Trace Gas Mission; EXM: ExoMars, Max-C: Mars Astrobiology Explorer-Cacher; NET: Mars Network Landers; MSR: Mars Sample Return Mission. The image is modified from Mustard (2009).

けて大型の計画を進める方針で行く可能性は高そうである。

その火星探査の進展の中で見えてきた大きな課題は2つある。暗い太陽のパラドックスの問題が解決しないことと火星表層に有機物が見つからないことである。さらに、この両者に関連して火星大気に微量の CH_4 が検出されたことが火星のアストロバイオロジー探査の方向付けに大きな影響を与えている。本稿では、これら3つの主要問題に焦点を当てて火星の表層環境および有機物の探査の現状をまとめ、それを踏まえて今後の火星探査について展望を行う。

2. 太古の火星の表面に液体の水は流れていたのか？

火星生命の可能性が議論された契機は、Mariner 9号機による河川状地形の発見であった。その後のViking 周回機による詳細な火星表面の撮像観測によって様々なタイプの河川状地形が発見され (Carr and Clow, 1981), 液体の水が存在する温暖湿潤気候を過去の火星が保持していた可能性が真剣に検討されることとなった (e.g., Sagan and Mullen, 1972; Pollack *et al.*, 1987)。しかし、この河川状地形を作った物質が、水なのか氷河なのか、あるいは全く別の流体なのかを推定する上で決め手となる証拠は見つからなかった。Viking 着陸機による火星の表面物質と大気の調査によって、火星表層が非常に酸化的事であることが判明したこともあり、炭化水素などが河川状地形を形成した主たる流体であると主張する説は殆ど見られない。しかし、水の氷が河川状地形を作ったとする説は根強い。また、Outflow channel と呼ばれる巨大な河川状地形には、長期間の温暖な気候は不要である (e.g., Carr, 2007)。地下に永久凍土として蓄えられた水氷が地下のマグマの加熱などによって融け、一気に地表に流れ出した可能性が高い (e.g., 小川・栗田, 2004)。実際、Mars Reconnaissance Orbiter (MRO) 探査機などのレーダー観測からも、outflow channel の河口域には堆積物らしい層状構造は報告されていない。また、Viking 1号や Mars Pathfinder 探査機が着陸した Chryse 盆地や Acidalia 盆地は、幾つかの巨大な outflow channel が流れ込んでいる典型的な河口域であるが、この地域の表土の直下には広範な面積にわたって玄武岩質の岩石層が広がっていることが MRO の Compact Reconnaissance Imaging Spectrometer for Mars (CRISM) による近赤外反射

分光計測から判明し (Salvatore *et al.*, 2010), これらの地域が溶岩流で覆われていることを強く示唆している。

そのため、大量の水が火星の表面を流れたのかどうかは、長らく結論が出せない状況であった。そういう意味において、アメリカの火星科学コミュニティーが火星探査の中心課題であると唱えた “Follow the water” という標語は、通俗的な響きはあるものの科学的にも非常に大きな意味を持っていた。この標語に沿って、周回機および地上ローバーによる火星探査が精力的に進められた結果、この状況は大きく変わってきた。例えば、Fig. 2に示すように、Mars Exploration Rover (MER) 計画の Spirit ローバーは非常にきれいな桶型の斜交層理を持つ露頭などを発見している (Squyres *et al.*, 2007)。桶型の斜交層理は、風成堆積物にも見られることもあるものの、流れ速度の変化を伴った水中でできることが多く、表層を氷で覆われていない状態で液体の水が火星表面に存在していたことを示唆する。さらに、周回探査機からの撮像観測から明瞭な三角州状地形などの地形が発見された (e.g., Malin and Edgett, 2003; Irwin *et al.*, 2005)。Fig. 3aの例に見られるように三角州は上面が平坦になっていることが特徴であるが、この特徴がほぼ一定の水面高度を保つ静水中 (海や湖沼など) での形成を物語っている。これは、ごく短期間の流水や氷河あるいは地下水流でも形成の可能性がある河川地形とは異なり、長期間の液体の水の存在を強く示唆する。さらに、南部高地と北部低地の境界の長大な崖面に沿っても三角州が多数発見され (Di Achille and Hynek, 2010), 火星の4割もの面積を占める北部低地がかつて海であったとする仮説 (Head *et al.*, 1999) を支持する論調を作っている。しかし、静水の場合には高濃度の塩分が溶けて水的大幅な融点降下を起こしている可能性もあり (食塩水の場合 -21°C まで凝固点降下できる)、地表面温度の指標として使うには少し注意が必要である (雨が降らない雪と塩湖だけの世界もありうる)。その点、陸上に形成する扇状地の場合には、液体の水の存在期間についての指標としての力は弱いものの、流水で作られるため高濃度の塩水が形成した可能性は低い。一般的には、流水がかなりの長期間にわたって流れ続けると形成できない地形であるので、真水が存在できる水の三重点の温度圧力 (6 mb, 0°C) 以上の気候環境が長期間にわたって継続したことを示すかなり確度の高い地質証拠となる。調査の結果、Fig. 3b

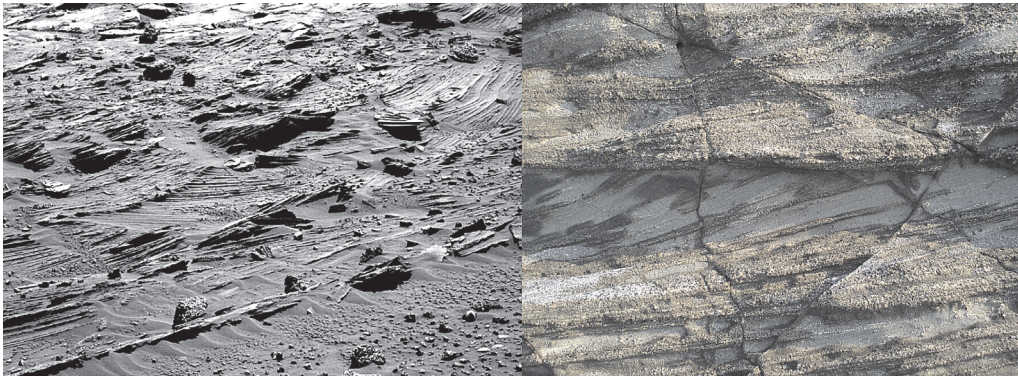


Fig. 2 (Left) A classic trough-shaped cross bedding structure found by Spirit rover around Home Plate in Gusev crater on Mars (Squyres *et al.*, 2007; Pancam image 2P195076279) and (right) a trough-shaped cross bedding structure on the shore of Jogashima island in Japan. Although trough-shaped cross bedding structures are not necessarily made by a liquid flow, the great similarity between these structures suggests that Mars once had active fluid motion near the surface. The left image is reproduced from Squyres *et al.* (2007) with permission from AAAS.

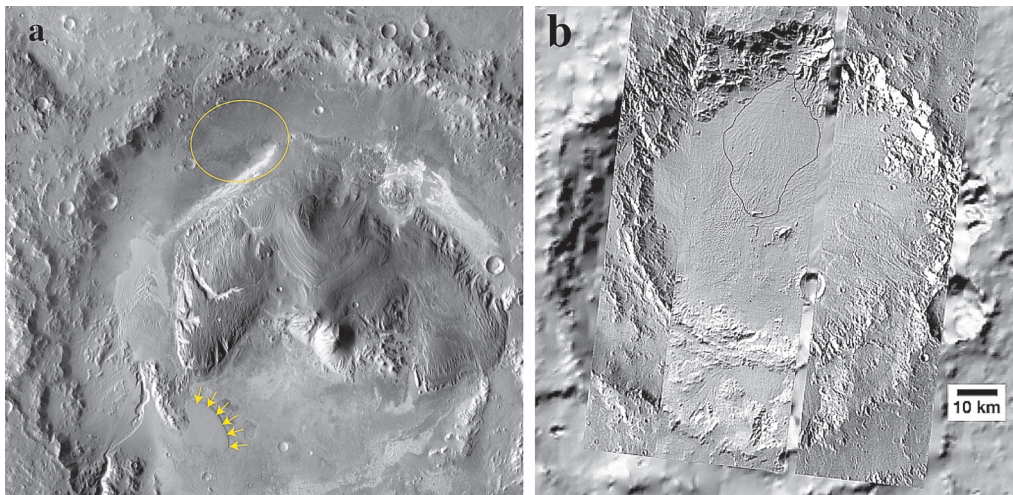


Fig. 3 Typical Martian craters with fluvial features. (a) Gale Crater with Day IR mode. A 154-km-diameter crater Gale has been chosen to the landing site for Mars Science Laboratory (MSL) mission, whose approximate landing ellipse is shown in the figure. There are delta deposits on the crater floor, suggesting that there was a standing water body for an extended period of time in the past (Irwin *et al.*, 2005). A typical delta is indicated by arrows. Image courtesy by Christensen, P. R., N. S. Gorelick, G. L. Mehall, and K. C. Murray, *THEMIS Public Data Releases*, Planetary Data System node, Arizona State University, <<http://themis-data.asu.edu>>. (b) A 99-km-diameter crater (centered 19.5°S, 39.5°W) on Mars contains a number of alluvial fans. One of them is marked with outline in the figure. There are many craters with alluvial fans in the southern highland on Mars, suggesting that there was surface water in the past. The image is reproduced from Moore and Howard (2005) with permission from AGU.

に示すような扇状地が火星の南部高地の多くのクレーターの壁面に見つかった (e.g., Moore and Howard, 2005)。しかし扇状地ないし三角州と見られる地形を詳細に観察すると、同心円状に曲線状の段差のついた地形 (stepped delta) となっている場合がかなりあることが分かってきた (Kraal *et al.*, 2008)。Stepped delta はわずか数十年単位の時間スケールで形成されることがあり、長期間の $P > 6 \text{ mb}$ $T > 0^\circ\text{C}$ の気候環境の継続という解釈には注意が必要である。また、Mars Global Surveyor (MGS) 探査機の Mars Orbiter Camera (MOC) による可視画像の分析で砂やシルトのような遠洋性の非常に細かい粒子の堆積物であると解釈されていた地点が、最高解像度 30 cm を誇る MRO 探査機の High Resolution Imaging Science Experiment (HiRISE) カメラで観測した結果、直径 2 m もの大きな岩塊がいたる所に分布していて海の証拠とはなり得ないことが判明したケースも報告されている (McEwen *et al.*, 2007)。これらの批判は、一般に液体の水の証拠とされる地形を用いて火星上に本当に水が流れていたと断定することの難しさを物語っている。しかし同時に、個別の地形の解釈に関する批判という点では説得力を持っているものの、火星が温暖湿潤気候を全く持たなかったことを支持する証拠となるわけでもない。全般的に言えば、初期火星 (特に Noachian¹) には液体の水の雨が降るほどの温暖湿潤気候があったことを示唆する地質的証拠はかなり集まってきたと言える状況にある。ただ、その温暖湿潤気候の継続期間については議論が分かれている。数十年から数万年以上を主張する研究報告はあるが、億年単位の永続期間を主張できる証拠は得られていない。

このような火星探査の進展に並行して火星気候の理論研究も精力的に行われてきた。その中で最も重要な研究と言えるのが、Kasting (1991) による CO_2 温室効果の限界の問題である。 CO_2 が大量に惑星表層にあったとしても大気中に存在できる CO_2 の分圧の上限値は蒸気圧で押さえられてしまうため、温室効果は無限には大きくなれない。そのため、固体惑星表面が太陽から受けとる放射がある程度より小さいと、惑星表層中にどれだけ多くの CO_2 があったとしても温暖湿潤気候は達成できなくなってしまうという指摘であ

る (Fig. 4)。地球では解決された暗い太陽のパラドックスが火星では簡単には解けないということである。この指摘以来、 SO_2 ガス (e.g., Yung *et al.*, 1997; Halevy, 2007; Johnson *et al.*, 2008), CO_2 の雲粒子 (Forget and Pierrehumbert, 1997; Mischna *et al.*, 2000; Colaprete and Toon, 2003), CH_4 ガス (Kasting, 1997) などによる温室効果によって火星の暗い太陽のパラドックスの問題を解消する可能性のある温室効果気体や過程が提案および検討されてきた。特に SO_2 による温暖化効果の評価については General circulation model (GCM) を用いた詳細な計算が行われ、温暖化効果の継続時間は 100~1000 年単位と短めながら、500 mbar と控えめの CO_2 分圧の大気に対して火星の火成活動で供給されると予想される SO_2 濃度 (数~200 ppm) で、283~315 K という温暖湿潤気候を作るに十分な表面温度が得られるという結果が得られている (Johnson *et al.*, 2008)。こうした理論計算と

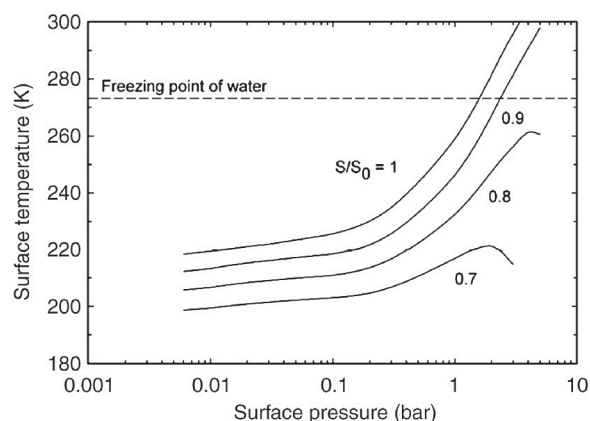


Fig. 4 Surface temperature as a function of surface pressure on Mars for CO_2 - H_2O atmospheres. Different solar luminosities S are used for different curves. The current solar luminosity is indicated by S_0 . When the solar luminosity is the same as the current value or only 10% less, a very thick CO_2 atmosphere will warm Mars above the freezing point (0°C) of water shown with the horizontal dashed line. However, if S/S_0 is 0.8 or less, CO_2 will start condensing before the surface temperature exceeds 0°C . The image is reproduced from Tian *et al.* (2010) with permission from Elsevier.

1 火星の大きな年代区分は、古い方から現在にかけて Noachian, Hesperian, Amazonian と3つある。これらの境界年代については 35~37億年前と20~33億年前という見積もりがあるが、火星には絶対年代計測例が1つもないため、その確度は極めて低い (e.g., Doran *et al.*, 2004)。

並行して、火星表層の物質探査調査から、これらの温室効果の可能性を後押しする発見がなされている。例えば、Noachian 後期から Hesperian¹にかけての地層において硫酸塩岩が大量に見つかったことから Noachian 後期に火山ガスとして SO_2 が大気に放出されたとする説が提案され (Bibring *et al.*, 2006), 火星の初期大気には SO_2 の濃度が非常に高い時代があった可能性が現実味を帯びてきている。また、大気中の CO_2 が液体の水と共に火星の初期史に大量に存在していたならば、炭酸塩岩として固定化されるため現在の火星の内部にかなり大量に眠っていなければおかしいはずである。火星隕石中には少量見つかるものの、全球をカバーできるリモートセンシング的な観測手法では長らく発見されないままであった (Bibring *et al.*, 2005) ため、 CO_2 による強い温室効果仮説の大きな弱点の1つと数えられてきた。火星の地中に CO_2 が大量に眠っていないのであれば、多くが宇宙空間に散逸したという可能性もある。火星大気の散逸過程には大きな不確定性があるものの、現状の理解では Hesperian 以降に宇宙に散逸した CO_2 量は数10~数100 mbar であろうという見積りが一般的であり (e.g., Lammer *et al.*, 2008), 宇宙への大気散逸も問題解決の決定打とはなっていない。そのような状況であるため、炭酸塩岩は本当は地下に眠っているけれど表面に露出した炭酸塩岩は紫外線照射の強い火星表層環境では光分解してしまい、リモートセンシング観測では見つからないのではないかという、やや苦しめの提案までなされていた (e.g., Muhkin *et al.*, 1996)。しかし、ごく最近になって、火星の地溝帯 (Ehlmann *et al.*, 2008) やクレーターの中央丘 (Michalski and Niles, 2010) において地殻深くの地層が露出している場所に大量の炭酸塩岩が発見された。大気1 bar 分の CO_2 といっても炭酸塩岩にすれば1 km の厚みで火星表面の2%を覆っていれば賄ってしまうので、炭酸塩岩帯の発見が火星大気史に持つ意味は大きい。さらに、後で詳述するように、 CH_4 についても ppb レベルの微量が大気中で発見されたという報告がある。

しかし、これらの発見に触発されて行われた詳細な気候理論研究の結果は、温暖湿潤気候説を必ずしも支持するものではなかった。まず SO_2 ガスについては、エアロゾルを大量に生成してしまうため赤外線遮蔽と共に日射遮蔽効果も強まってしまったために Johnson *et al.* (2008) などが主張したほど正味の温室効果は大きくないという指摘が大気化学計算に基づいてな

れており (Tian *et al.*, 2010), 旗色が良くない。また、 CO_2 の雲粒子については、赤外輻射の遮蔽効果は確かにあるものの、5 bar という非常に高い CO_2 量が大気に存在していて且つ雲の全球被覆率が100%でないと CO_2 - H_2O 大気だけで火星を 0°C 以上に暖めることはできないという厳しい条件が得られている (Colaprete and Toon, 2003)。さらに、 CH_4 の温室効果については、 $P_{\text{CO}_2} \gg P_{\text{CH}_4}$ の条件であれば炭化水素系のエアロゾルはほとんど生成しないため温室効果は比較的効果的に効くであろうという定性的な見解までは述べた報告 (Pavlov *et al.*, 2000) はあるが、 CH_4 の温室効果を定量的に見積もった計算結果は報告されていない。また、主成分を CO_2 とする火星大気では紫外線の照射によって光分解が促進されるため、 CH_4 は安定に存在できないという問題もある (e.g., Kasting, 1997)。このように現状では、現在よりも25%ほど低い太陽光度の時代に地球の半分程度の強度の太陽放射しか受けられない火星において、液体の水の雨が降るほどの温暖な気候を定常的に作ることができるメカニズムは発見されているとは言えない状況である。

このように、火星表面において液体の水が長期間にわたって継続的に存在したとはっきり言い切れる証拠を地質学的調査からも気候理論計算からも出せていないため、少数意見ながらも寒冷湿潤気候を主張する説が根強く残っている。ただ、最近の寒冷湿潤気候説の多くは間欠的温暖湿潤気候説とも呼べるようなものが多くなりつつある (e.g., Fairén, 2010; Warner *et al.*, 2010)。間欠的温暖湿潤気候説が議論されるようになった背景には、連続的温暖湿潤気候の成立が現在の惑星気候理論からは非常に困難であるために苦肉の策として出されているという比較的消極的な理由の他に、火星は大気の主成分である CO_2 自体が凝縮する温度環境にあるために小さな外的擾乱によって惑星気候が大きな応答をする (e.g., Gierasch and Toon, 1973) という積極的な理由もある (c.f., 地球では大気主要成分の O_2 や N_2 は全球凍結状態になっても凝縮しない)。

こうして提案されてきた間欠的温暖湿潤気候仮説の中で最も典型的なものは、小天体の衝突によって一時的に温暖気候がもたらされるというものである (Carr, 1989; Segura *et al.*, 2002)。例えば、Segura *et al.* (2002) は、1次元時間発展型の気候構造計算を用いて、天体衝突が永久凍土地帯に起きると地殻中に

氷として固定されている H_2O が一気に蒸発し、その水蒸気によって大気の温室効果能力が一気に高まることを示した。この温室効果のおかげで地表が暖まると水の蒸気圧が上昇するため、より多くの水蒸気が蒸発するという正のフィードバックが働き、火星の温暖化が実現する。このような天体衝突による過渡的な温暖化モデルは、含水鉱物露出地域の直近に衝突角礫岩と見られるブロック状の岩石を大量に伴った地層が存在する観測事実 (Fig. 5, Grant *et al.*, 2008; Mustard *et al.*, 2009) と調和的である。ただ、全球平均で厚さ 10 m 分の水分を大気に蒸発させるのに直径 200 km もの大きな天体の衝突が必要である (直径 2000 km 程度のクレーターに相当) 上に、「雨期」の継続期間は 5 年程度と非常に短い (Segura *et al.*, 2002) という問題もあった。その後、水の凝縮の潜熱や雲による温室効果など詳細を考慮した計算の結果からは、もっと小さい直径の天体衝突からも同様の「雨期」が形成できる可能性が示されている (Segura *et al.*, 2008)。ただ、雨期の継続時間は数年程度しか継続しないという結果を得ている。また、その雨期全期間中の総雨量は数 m 以下 (≒日本の1年間降水量) と小さく、火星表面に見られる各種の流水地形を説明するにははるかに小さく (Segura *et al.*, 2008)、気候理論と地質記録の間のギャップは埋まっていないのが現状である。

このように、液体の水が火星地表に存在した期間の長短については、議論が大きく分かれている状況である。温暖湿潤気候が連続して続いた期間は、たった数百年かもしれないし、数千万年かもしれない。しかし、温暖気候が連続する単一期間が短い場合には、温暖気候の出現は1度や2度ではなく、Noachian から Hesperian にかけての数億年の長期間に渡って断続的に何度も出現してきたことは確からしそうである。それは、河川状地形が様々なクレーター数密度の地域にわたって分布していることから推定されている (e.g., Carr, 1995; Hynek *et al.*, 2010)。ある非常に短期間の1時期のみに温暖湿潤気候が存在したのであれば、火星上のどの河川状地形もほぼ同じクレーター数密度を持つてしまうはずである。同様に、扇状地についても様々なクレーター年代のものが見つまっている。中には、非常に若いクレーター年代を持つものもあり、Amazonian²に入ってから形成されていた可能性が高いことが示されている (Grant and Wilson, 2011)。液体の表層水を必要とする地形の形成期間は、火星史のかなり広い時間帯に跨っていたと考えてもよさそうである。今後は、温暖湿潤気候の継続期間と出現頻度に関する調査が「火星の水」に関する中心テーマとなって、火星の生命探査の先導役を果たすものと思われる。

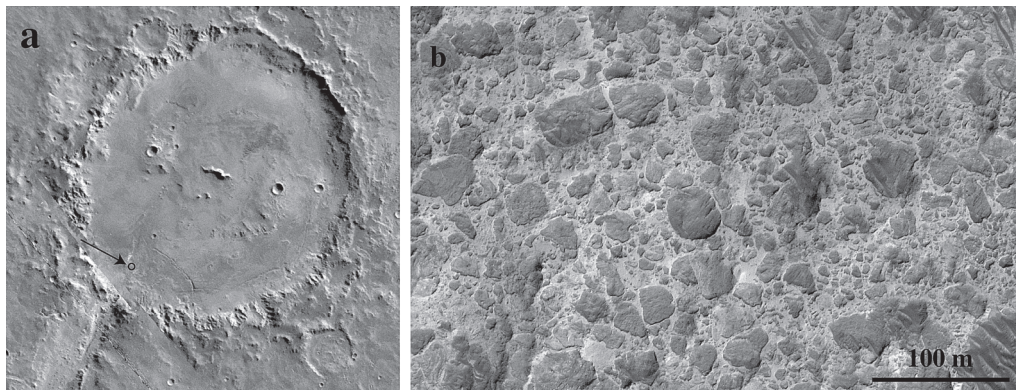


Fig. 5 Holden Crater on Mars. This 140 km-diameter crater was one of the four landing site candidates for MSL and is been considered as one of the seven reference landing sites for the ExoMars/MAX-C joint rover. (a) The entire view of Holding crater. The small circle pointed by the arrow shows the location of the megabreccia shown in (b). Image source: Viking Orbiter Mosaic, U.S. Geological Survey. (b) A HiRISE image (PSP_001666_1530) of Megarebreccia found on the wall of Holden crater. These large blocks ranging up to 50 m in diameter are likely of impact origin (Grant *et al.*, 2008). Image courtesy: NASA/JPL/University of Arizona.

2 脚注1を参照。

3. 古火星の温暖湿潤気候と生命の可能性をつなぐ鍵：メタン (CH_4)

前節で述べた火星の温暖湿潤気候の問題を解決する鍵としても、生命の痕跡としても CH_4 は、非常に重要な意味を持っている。そのため、火星大気中の CH_4 の役割については古くから議論されてきた (e.g., Kasting, 1997)。しかし上述したように、 CO_2 を主成分とする火星大気中では CH_4 は安定に存在できない。そのため、現在の火星の大気に少量でも CH_4 が見つかる可能性は非常に低いと考えられてきた。ところが、この数年で火星大気に CH_4 を発見したとする報告が相次いで出されている (Formisano *et al.*, 2004; Krasnopolsky *et al.*, 2004; Geminale *et al.*, 2008, 2010; Mumma *et al.*, 2009; Fonti and Marzo, 2010)。最初の2004年の報告は、データ解釈の唯一性を裏付ける証拠が強くなかったことや CH_4 の推定濃度が上限値と解釈すべき状況であったりして、議論の余地がありとの受け止められ方が一般的であった。しかし、その後の報告で、独立に行われた研究であったにも関わらず、 CH_4 の推定濃度が10~60 ppbとお互いに矛盾しない数字が提出され、解釈の唯一性についてもより詳しい吟味ができるデータが提出されて、火星大気中の CH_4 発見の信憑性は一気に高まった。しかも、火星大気中の CH_4 は、時間空間の関数として大きな変動をしているというデータが示され、 CH_4 の発生源の推定までされた (Mumma *et al.*, 2009)。 CH_4 発生源の付近には蛇紋石が発見されている Nilli Fossae や泥火山が多数ある Isidis 盆地がある。蛇紋岩化反応が推測される Nilli Fossae では水素の発生とそれに伴うフィッシャー・トロプッシュ反応による CH_4 の生成が期待される (Ehlmann *et al.*, 2009)。また、泥火山からは、地殻に蓄えられている CH_4 が高温のマグマの力を借りずにかなりのフラックスで噴出できる可能性がある (Komatsu *et al.*, 2011)。もしこのようなプロセスが火星史で一般的であれば、上記の火星の古気候の問題に大きな進展をもたらす可能性がある。

しかし、現在の火星大気環境では CH_4 などの炭化水素の寿命は数百年程度と推定されている (e.g., Krasnopolsky *et al.*, 2004)。そのため、年単位以下の時間的な変動や数千 km 以下の距離で変動があるとするという観測結果は、現在の大気化学の理解とは大きくかけ離れている (したがって信じがたい) という批

判が巻き起こった (e.g., Lefèvre and Forget, 2009; Webster and Mahaffy, 2011)。加えて Zahnle *et al.* (2011) は、Mumma *et al.* (2009) による地上観測が地球大気中の $^{13}\text{CH}_4$ の回転吸収線の時間変動による影響を補正しきれなかったために地球との相対速度を持った火星の $^{12}\text{CH}_4$ による吸収線であると誤認してしまった危険性が極めて高いと指摘している。

これらの批判の中でも最も強い影響力を持っているのが、Zahnle *et al.* (2011) による分光解析法についての批判である。この論文の発表を受けて、Mumma *et al.* (2009) らの観測は否定されてしまったと考えている研究者も多い。逆に Mumma *et al.* (2009) の観測は否定されたとしても Mars Express 衛星からの観測には影響がないから、 CH_4 の検出の証拠は揺るがないという考えもある。だが、事態はもう少し複雑である。この CH_4 に関する議論は火星の古気候の問題とも生命の問題とも密接に絡んでおり、今後の火星探査において重要な意味を持つ。以下では、 CH_4 検出に関して考察する。

まず、Formisano *et al.* (2004) や Geminale *et al.* (2008) らの Mars Express の Planetary Fourier spectrometer (PFS) については、波長分解能が 1.3 cm^{-1} しかなく CH_4 の回転線分解には不十分であること、結果として CH_4 の指標として使うことになった 3018 cm^{-1} での Q branch に属する回転線群による吸収強度は火星大気の光路長と相関がないこと、逆に H_2O の吸収量との相関が高いことなどの問題がある。これらの問題は、この Mars Express の PFS の性能の問題は論文発表時からある程度問題視されていたことでもあり、Mars Express のデータが CH_4 観測の決定打とは見なされなかった理由でもある。したがって、Mumma *et al.* (2009) の結果が強く否定されてしまった場合には、PFS のデータのみで CH_4 の検出を主張することはかなり厳しいと言わざるを得ない。

では、Mumma *et al.* (2009) による地上観測による CH_4 検出の問題点はどうか。まず、地球大気には 1800 ppb もの CH_4 が存在する。火星の CH_4 を 20 ppb とすると、火星大気計測の時に太陽光が入射射出の2度大気を通過することや地上望遠鏡観測は空気の薄い高地の上から行われていることを考慮しても、2000:1の比率で地球 CH_4 の吸収量の方がはるかに卓越する。そのため、火星の CH_4 吸収線と地球の CH_4 の吸収線の波長位置がドップラー効果でなるべくずれるように、相対速度が最大 ($\pm 17 \text{ km/s}$) に近い時期を狙っ

て観測が行われる。このとき、 3000 cm^{-1} の波長に対して $\pm 0.17\text{ cm}^{-1}$ のズレが生じるが、大きな圧力広がりを持った地球 CH_4 の吸収線から逃れきることはできない。また、近隣に何本も吸収線が不等間隔で存在するために、ドップラーシフトの方向によっても吸収線同士の干渉が緩くなったり厳しくなったり非対称な効果が生じることになる。Mumma *et al.* (2009) が CH_4 を検出した観測時期はドップラーシフト量が -0.17 km/s の時のみで、この条件では火星の $^{12}\text{CH}_4$ の吸収線の波長が地球の $^{13}\text{CH}_4$ の波長位置とちょうど一致するのである (Fig. 6)。さらに彼らは、地球大気による吸収の補正に理論モデルを用いている。 O_3 や H_2O では近隣に幾つもの吸収回転線があるので同一のスペクトルからの情報を用いて地球大気吸収の補正を正確にモデル計算することが可能である。しかし、 $^{13}\text{CH}_4$ の場合には、どの観測においても1本しか見られないため、補正のための参照に使える吸収線がない。そのため、補正計算には $^{12}\text{CH}_4$ の吸収線強度を参照することになる。すると、地球大気中の $^{13}\text{CH}_4/^{12}\text{CH}_4$ 比が重要な問題となる。地球大気中の CH_4 の $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$

比は93.4なので、先ほどの比率2000を勘案すると (火星 $^{12}\text{CH}_4$)/(地球 $^{13}\text{CH}_4$) ≈ 0.05 となる。地球の $^{13}\text{CH}_4$ と比較しても火星の $^{12}\text{CH}_4$ の方が圧倒的に少ないのである。また、地球大気中の CH_4 の炭素同位体比は、Pee Dee Belemnite (PDB) 標準試料の炭素同位体比より4.7%だけ軽いので、もしPDB標準値を使って地球大気の $^{12}\text{CH}_4$ の吸収線強度観測値から $^{13}\text{CH}_4$ の吸収線強度を推定すると、ちょうど火星の $^{12}\text{CH}_4$ の吸収線強度程度の補正誤差が生じてしまうことになる。このような疑念が正しければ、Mumma *et al.* (2009) の主張する CH_4 の吸収線は、地球大気の $^{13}\text{CH}_4$ の吸収線の補正しきれなかった残差であり、季節変動のように見えたのは $^{13}\text{CH}_4$ の吸収線が $^{12}\text{CH}_4$ の吸収線の短波長側のみに存在することに起因していたことになる (Zahnle *et al.*, 2011)。さらに、Mumma *et al.* (2009) では、複数の CH_4 回転吸収線を検出していることを信憑性の証の1つとしているが、同一の観測において複数の回転吸収線が見えているわけではない点も注意が必要である。ここまで材料が揃ってしまうと、地球大気の $^{13}\text{CH}_4$ の吸収線の補正のやり残しを火星の CH_4 と誤認

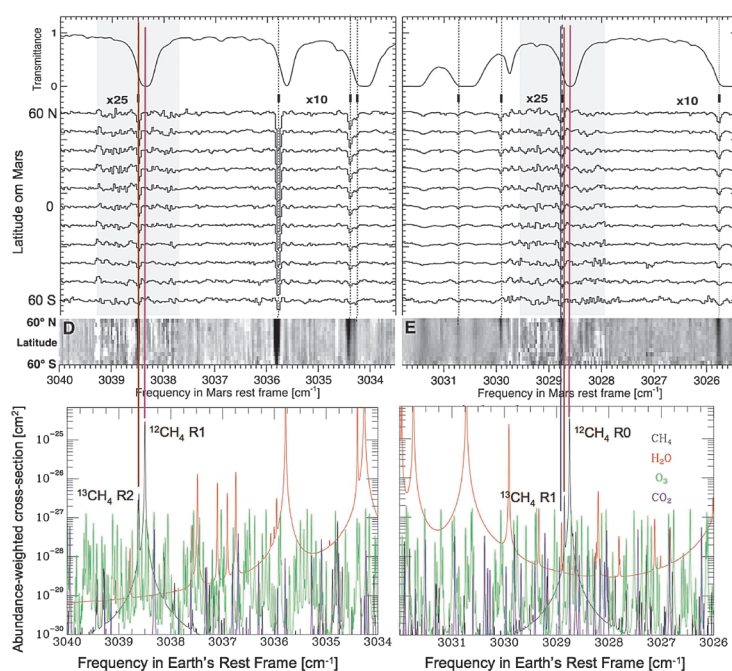


Fig. 6 Comparison between a high dispersion observation of Mars atmosphere by Mumma *et al.* (2009) and theoretical calculation of methane absorption in the telluric atmosphere. Note that the $^{13}\text{CH}_4$ absorption lines coincide with claimed Mars methane ($^{12}\text{CH}_4$) line. This coincidence demonstrates the challenge of detecting methane on Mars through telluric atmosphere. The image is reproduced from Zahnle *et al.* (2011) with permission from Elsevier.

したと疑いたくなってしまう。

ただし, Zahnle *et al.* (2011) の批判にも弱点はある。Mumma らは分子分光データベース HITRAN (Rothman *et al.*, 2009) で用いられている PDB 標準値の炭素同位体比をそのまま使ったことを認めているとのことであるが, 4.7% 重すぎる炭素同位体比を使って地球大気の補正をすると $^{13}\text{CH}_4$ の吸収線は補正が効き過ぎて誤差は輝線のように現れるはずである。しかし, Mumma *et al.* (2009) の結果では, きちんと吸収線のような凹みが得られている (Fig. 6)。このように, Zahnle *et al.* (2011) の批判は, 非常に詳細かつ明確だが, Mumma *et al.* (2009) が間違っていたと判断できるまでの説得力があるとは言い難い。ただ, 生データや解析プログラムを提供してもらわずに追加解析することには限界があるのは当然である。Mumma *et al.* (2009) が議論していなかった様々な問題を指摘している点では大いに注目すべき内容となっている。さらに, Mumma *et al.* (2009) が火星の CH_4 が検出できていると主張している1つの理由に火星の緯度方向 (望遠鏡のスリット方向) の CH_4 濃度の違いが見えている点がある。つまり, 地球大気による影響 (補正漏れなどを含む) であるとすれば, 火星のディスク面内での変動として現れずに, 火星全体一様になるはずであるという主張である。しかし, この空間方向の CH_4 濃度の変動が火星大気内で見つかることこそが大きな驚きであり, この変動の「検出」を観測と解析の正しさの証拠と位置づけていることに多くの研究者が疑問を感じているというのが現状である。

このように見てくると, Mars Express のデータ解釈の問題と併せて, 火星大気に 10 ppb レベルの CH_4 が存在するかどうか, さらに季節的・地域的な変動があるのかどうかは, 現状では肯定も否定もできないと言わなければならない。Mars Science Laboratory (MSL) 探査以降に期待されている詳細な観測は, これまでの観測結果の追試というより本番の観測という位置づけで考えた方がよさそうである。

4. 火星における有機物の調査

2節で述べたように, 火星の温暖湿潤気候の1回の継続期間と維持機構は不明なものの, 合計では長期間にわたって温暖湿潤気候が成立していた可能性が高い。となれば, 火星に生命活動があったとしても不思議ではない。さらに, 火星の地下浅部では, 表面より

ずっと長期間 (すなわち硫酸塩岩, 赤鉄鉱, 蛇紋石, 炭酸塩岩などの鉱物生成に必要な期間にわたって) にわたって液体の水が存在していた可能性が高い (Klingelhofer *et al.*, 2004; Bishop *et al.*, 2008; Ehlmann *et al.*, 2008, 2009)。さらに, Spirit の着陸地点である Gusev クレーターには, 過去に熱水循環系の存在した可能性が高い (Squyres *et al.*, 2007)。したがって, 火星の古気候には不明な点が残るものの, 生命が誕生してもおかしくない環境は火星の様々な場所に存在していたと言える。もし生命が誕生して繁栄していたならば, 有機物が火星表層に残る可能性は高い。

しかし有機物の調査は非常に難しい。まず, 軌道上からのリモートセンシング的手法による調査は容易ではない。 γ 線分光などの元素計測法では大気中の CO_2 や土壌中の H_2O 氷との干渉が起こるため, C や H の濃集を指標とする有機物探索はできない。そこで, 有機物の分子構造に起因した光学特性が出る波長帯での光学観測として $3\mu\text{m}$ 帯の近赤外分光法での観測が候補となる。しかし, 一般に有機物の吸収は弱く, 特に含水鉱物と共存している場合には, OH の吸収帯と重なるために観測は容易ではない (e.g., 廣井・杉田, 2010)。また, これまで火星周回衛星に搭載された近赤外分光観測装置は $3\mu\text{m}$ 帯をカバーしておらず, これらのデータを用いた有機物の検出は今後も期待できない。そのため, 地上探査機による直接的な計測が必須である。

火星表面での有機物の調査は Viking と Phoenix 探査で試みられ, 2011年打ち上げ予定の MSL でも行われる予定である。Viking と Phoenix の計測からは有機物が発見されたという報告はない。そのため, MSL による有機物探査に対しても楽観できないと考えられている。ただし, Viking の有機物計測の解釈について, 最近になって興味深い説が提唱されたので, 以下ではそれについて述べる。

これまで, Viking 1号 (0.1 wt%), 2号 (0.9 wt%), Pathfinder (0.55 wt%), Spirit (0.06~0.68 wt%), Opportunity (0.2~2.6%) のいずれの探査機が着陸した地点においても () 内に示すようになり高い濃度の Cl が検出された (e.g., Gellert, 2006)。また, Mars Odyssey 探査機の γ 線分光計測からも 0.2~0.8 wt% の Cl が南北緯度 ± 50 度以内の表面から検出された (Keller *et al.*, 2006)。しかし, これらはいずれも元素存在度の計測であったので Cl の分子状態について

ては推定するしかなく、おそらく塩素イオン (Cl^-) であろうと推定されてきた。ところが、Phoenix 着陸機に搭載された Wet Chemistry Lab で表土を分析したところ、高濃度の過塩素酸イオン (ClO_4^- , 0.4~0.6 wt%) が検出された (Hecht *et al.*, 2009)。一方、 Cl^- の濃度は 0.01~0.04 wt% であったので、Cl の大部分が過塩素酸イオンであることになる。この過塩素酸イオンは、非常に強い酸化剤だが、正四面体の対称性の良い構造を持つため反応論的にはかなり安定であり、常温では有機物と共存しても反応しない。今のところ、 ClO_4^- は Phoenix の着陸地点以外で計測が試みられていないため、火星の他の地点での存在度について実証的な議論はできない。しかし、最近の光化学理論計算からは、最近 20~30 億年間の火星では、火山活動による気相への塩素供給と乾燥した環境があるため、様々な過塩素酸生成の反応経路が持続して、0.1 wt% 程度の過塩素酸イオンが生成できる可能性があるとの結論が得られている (Catling *et al.*, 2010)。

また、Viking 着陸機的气相色谱グラフ質量分析装置 (GCMS) の分析では、有機物が ppb レベルの検出限界で全く検出されなかったことはよく知られた事実だが (Biemann *et al.*, 1976, 1977)、同時にクロロメタン (CH_3Cl) やジクロロメタン (CH_2Cl_2) が数~数十 ppb レベルで検出されている。火星環境では、このようなクロロカーボンの存在が考えにくいことと、塩素の同位体比 0 ($^{37}\text{Cl}/^{35}\text{Cl}$) が地球のそれに近かったために、地球物質のコンタミであろうと判断されてきた (Biemann *et al.*, 1976, 1977)。

しかし、Phoenix による過塩素酸イオンの発見によって少し解釈が変わってくるかもしれない。つまり、Viking や Phoenix の分析器の前処理ユニットが熱分解炉であり、この中で過塩素酸イオンが O_2 を発生して有機物を酸化してしまった可能性が出てきたのである。Phoenix の分析チームによる地上検証実験では、過塩素酸マグネシウムをメリト酸と共存させて分析したところ、メリト酸の分解物と認識できる分子は検出できず、かわりに 300°C 付近で発熱と CO_2 の発生が観測されるという結果を得た (Ming *et al.*, 2009)。これは過塩素酸の酸化力によるメリト酸の燃焼を示唆している。メリト酸は、Benner *et al.* (2000) によって火星表面に存在する可能性が示唆されている有機分子である。メリト酸は非常に安定であるため、Viking の GCMS の熱分解路でも分解しない可能性が高い。また、この物質は、脂肪酸化合物の酸化によっ

ても生成されるので、隕石中の有機物が酸化的な火星環境中で生成される可能性がある。つまり生命活動など特別な有機合成反応がなくても火星表面に存在している可能性が十分にある。この過塩素酸塩による有機物酸化の可能性は、著者たち自身が予備的な結果であると断っているので注意が必要だが (Ming *et al.*, 2009)、注目すべき結果ではある。

その後、Navarro-Gonzalez *et al.* (2010) が新たな地上検証実験を行い、火星の模式地としてよく使われるアタカマ砂漠で得たごく少量の有機物 (約 30 ppb) しか含まない乾燥土壤に過塩素酸マグネシウムを 1 wt% 加えて熱分解 GCMS にかけたところ、ほとんど全ての有機物が分解してしまった上に Viking で見られた CH_3Cl と CH_2Cl_2 が検出されるという結果を得た (Fig. 7)。Biemann (2007) が批判するように、Navarro-Gonzalez らが検出できない量の有機ガスでも Viking の GCMS では検出が可能なのかもしれない。しかし、クロロカーボンが熱分解炉の中で生成したと有機物が大幅減少したことは間違いなく、Viking の有機物計測の結果を見直す上で重要な発見である。もしかすると、少量ながら存在している火星の有機物を、Viking の GCMS 分析や Phoenix の四重極質量分析器による初期分析では見逃したのかもしれない。

このように火星の有機物探査の状況を総合することによって、今後の有機物探査について幾つかの重要なポイントが明らかになる。まず、火星表面付近に有機物が全く存在しないことの方がおかしい。火星に生命由来の有機物が存在するかはさておき、炭素質隕石由来の有機物がかなり降ってきているはずである。火星への小天体衝突頻度に基づいた推算によれば、過去 30 億年にわたって火星表面に堆積した宇宙起源の有機物は 2 kg/m^2 にもなる (Benner *et al.*, 2000)。非常に酸化力の強い火星大気に直接曝されている表面には、有機物の存在を期待することは難しいかもしれないが、地下を掘って火星大気の直接の影響が及ばない深さで測定すれば、何らかの有機物は出てくる可能性は十分にある。また、過塩素酸に富む土壤においては、GCMS の前処理として熱分解装置を使う手法は、有機物分析には適していないのかもしれない。しかし、MSL の GCMS にも熱分解炉が使われており、有機物分析に際して熱分解炉の使用に注意があろう。MSL にはもう間に合わないが、レーザー脱離質量分析計のような熱分解を伴わない手法が火星のその場有機物分

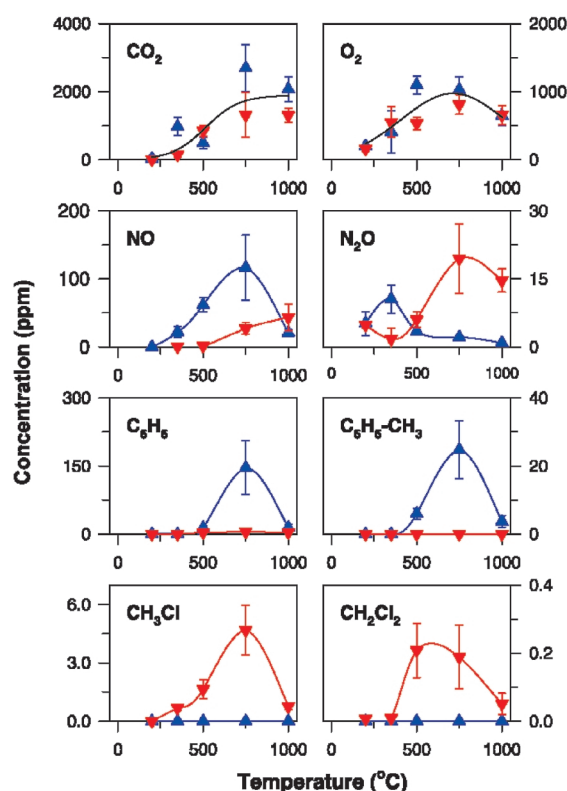


Fig. 7 Gas chromatograph mass spectrometry (GCMS) measurements results of pyrolyzed gas from Mars simulant soils from Atacama desert in Chili with (red) and without (blue) mixing magnesium perchlorite ($\text{MgCl}_2 \text{O}_8$). Perchlorite was detected by Phoenix lander in the polar region on Mars. The image is reproduced from Navarro-Gonzalez *et al.* (2010) with permission from AGU.

析には向いているのかもしれない (C.P. McKay, private communication, 2010)。

もう一つ重要なポイントは、Viking も Phoenix も移動手段を持たない単点着陸機であった点である。Spirit ローバーの場合、着陸地点では水の証拠がほとんど見つからなかったが、何ヶ月かけて入念な観測をしつつ数 km の距離を走破して調べた結果、水の存在を示す確かな証拠を幾つも発見することができた。もし Spirit が移動手段を持たなかったと仮定する

と、観測期間をどれだけ長くしても水の証拠は殆ど見つからなかったであろう。火星は、月のように天体衝突で物質的に均質化が進んだ星とは異なり、水平方向の不均一性あるいは多様性に非常に富んでいる。火星探査においては、移動手段の確保や多地点計測が非常に重要な要件となる。

5. 米欧の火星探査の今後

2011年7月22日に MSL の着陸地点³を Gale クレーター (Fig. 3a) に選んだとの発表があったが、MSL の着陸地点選択はこれまでの着陸地点選択に比べて遙かに大きな影響を今後の火星探査計画全体を及ぼす。MSL の次に計画されている Mars Astrobiology Exploration-Cacher (MAX-C) 計画では、コアサンプルの採取と円盤状のサンプルホルダーにコアサンプルを収納する試験を行うことが主な任務となる予定である。MAX-C は MSL に比べて半分の大きさしか持たない上、複雑なサンプル採取機構と収納機構を搭載しているため、搭載できる科学計測機器は数分の一に減ってしまう。また、ESA の ExoMars との合体案が実施される場合でも、科学機器の種類は MSL からは大幅減になることは避けられない。ExoMars は、地下2 m までの深さまで掘削できるドリルを搭載して、酸化的な火星大気に曝されていない地下の物質を調査することを大きな売りとしている。このような地下調査は MSL では全く実施されないため、MSL と MAX-C では計測項目が相補的である。そういう意味では、MSL によって地表面から興味深いデータが得られた場合には、ほぼ同じ地点に着陸して確実に科学的成果を挙げようとする方針には一定の合理性がある。全く別の着陸地点を選ぶ選択肢も当然検討されるであろうが、MSL の計測がうまく行った場合にはこの選択は非常に難しいものとなるはずである。さらに MAX-C で魅力的なサンプルが採取された場合には、そのサンプルホルダーは数年間にわたって火星表面上のローバー中で待機させられ、サンプル回収用の小型ローバーと火星軌道への帰還用の小型ロケットのみを搭載した着陸機の到着を待つという具合の計画となっている。もし火星サンプルリターン探査 (MSR) に

3 Gale クレーターが MSL の着陸地点として選ばれた理由については、明確な発表はないものの地質学的な多様性に富み地層層序も非常にはっきりしていることが、選択の大きな理由になったようである。他にも Eberswalde クレーター、Holden クレーター、Marwth Vallis の3ヶ所が、MSL 着陸地点の最終候補として残っていた。いずれの候補地にも水の証拠と粘土鉱物が見つかっており生命探査の可能性がある。また、安全な着陸ができると予測されている。ちなみに、Nili Fossae などは、MSL の技術では安全な着陸が保証できないことが最終候補地から外れる大きな原因となった。

において、新たな地質探査とサンプル取得を実施しようとする、新たに MSL のような豪華な地質調査機能と MAX-C のようなサンプル採取機能が必要となり、現在検討されている2機分割方式でも計画が成り立たなくなってしまう。これでは予算が千億円単位で増えてしまい実現が遅れてしまう。そのため、なるべく MSL と MAX-C を有効利用して MSR を早期に実現させようという考え方をとり続ける可能性は非常に高い。

このような状況であるため、今後20年近くのアメリカの火星着陸探査や試料採取探査は、MSL の着陸地点選択とその地点での成果によって大きく影響を受けてしまう。ことによると、サンプルリターン探査の実現まで、MSL の着陸地点となった Gale クレーター内のみにずっと探査機を送り続けることになるかもしれない。この場合、MSL の着陸地点以外の魅力的な着陸候補地の探査は非常に限られたものになってしまう。しかし、今後の火星科学の進展から、他の候補地に非常に重要な発見が隠されている可能性が指摘されるかもしれない。そのような場合には、日本を含めた火星に着陸したことのない「火星探査新興国」が、小型でも機動性のある探査機の着陸探査を Gale クレーター以外の魅力的な着陸地点に送り込むことに非常に重要な意味が出る。その際には、小型探査機であることと多地点着陸など火星表面の面的な観測範囲を広げられることが、大きなポイントになると予想している。次節では、このコンセプトに沿った提案例を紹介する。

6. 日本の火星探査の展望

上述のように、NASA は巨額の予算をかけて多数の火星探査機を打ち上げて生命探査に向けて最大公約数的な計測で着実に成果を挙げながら外堀から埋める方針でジワジワと攻めてきている。とはいえ、すべての項目を網羅的に探査できているわけではなく、いろいろと大きな穴もある。水や有機物など生命探査に直接結びつきそうな項目に探査の重点が置かれすぎたため、火星を惑星システムとして捉えるために不可欠な内部構造や火成活動史の解明を目指した探査は行われていない (e.g., 杉田ほか, 2009)。これらの探査項目は日本が火星探査を行う際に非常に重要な視点であり、日本の複合火星探査計画 MELOS において検討されている (e.g., 佐藤, 2009; 宮本ほか, 2010)。もう一つの視点は、Viking 以来の火星探査の結果と

して格段に増えた火星についての知見を活かして探査項目に関する思い切った選択をして、小型軽量の探査を目指そうという視点である。例えば、 CH_4 をエネルギー源として成長するメタン酸化菌の探索を行う興味深い提案が MELOS に向けて検討されている (山岸, 2011)。また、存在の有無が論争となっている CH_4 の正確な計測を超小型地上着陸機で行うことも魅力的な提案である (関根, 2011)。

また、火星など大気を持つ惑星の着陸のための小型軽量探査機については、工学面から大きな進展がある。惑星大気圏突入の際に最も重要なパラメーターは、機体の総重量 M ではなく大気との衝突断面積 S あたりの重量 M/S である。この M/S が小さいほど大気圏突入の際に機体が受ける加熱率は低くなる。天然の物体の形は、アスペクト比が1から極端にずれることが少ないため、 M/S を小さくしようとすると物体の直径や総重量自体が小さくなる必要がある。しかし人工物には、その縛りはない。 S を非常に大きくできれば、ある程度の M の値を確保しつつ M/S を小さくした設計が可能である。その場合、大気圏への突入において、重量のかさむヒートシールドやアブレーター塗装などを不要とすることも可能である (山田・鈴木, 2005)。このようなデザインの大气突入機体は日本で開発されており、ロケットや気球を使った高度数十 km の高層大気からの落下実証実験なども実施されている (Fig. 8)。さらに、重力が小さいために、大気再突入速度が低く大気の密度勾配が緩い火星の場合には、地球大気への突入に比べて条件が良い。

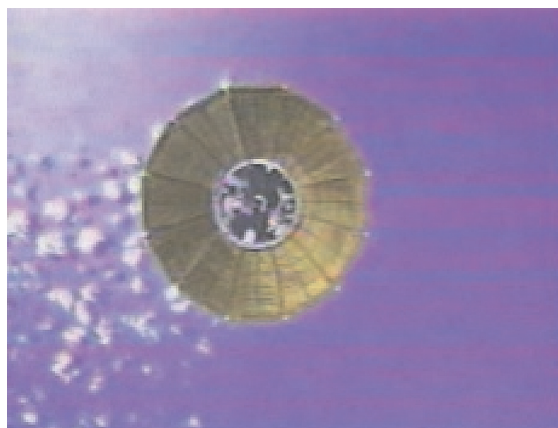


Fig. 8 A photograph of an expansion test of a foldable atmospheric reentry system for Earth. The auto-expansion reentry system was released at 40 km of altitude off Sanriku shore in Japan. Image courtesy: K. Suzuki.

そのため、一機250 g 程度まで小さい機体を作ること
も可能であると見積もられている (鈴木, 2010)。ま
た、科学計測器を載せるために多少大きめの機体
を作って1 kg 程度くらいの重量になったとしても、10
kg 程度のペイロードに10機もの小型着陸機を搭載
することができる。このような超小型の着陸機であ
れば、一気に複数機の展開を行うことも可能である。日
本が火星探査機を火星軌道周回に送るとき、あるいは
諸外国が火星周回探査機を送るときにピギーバック装
置として搭載をすることも可能であろう。

米欧の大型火星探査計画が進展する中において、彼
らの数分の一の予算を使って日本の独自色をアピール
できる火星探査を行うことは容易ではない。しかし、
上に見てきたように火星は非常に多様性に富んだ星で
あり、良くも悪くも常に科学者の予想を裏切ってきた
星である。米欧の火星探査計画が超大型のサンプルリ
ターン探査へと収斂していくフェーズにあつては、こ
のような超小型の探査機を用いて少数の特色ある観測
項目に焦点を絞った生命探査を実施して大きな成果を
挙げる余地は、むしろ広がりつつあるのかもしれない。

謝 辞

藪田ひかる博士には本論文の執筆機会を戴き、また
原稿に注意深い添削をして戴きました。匿名の2名の
査読者は大変丁寧に原稿を見ていただき、建設的なご
意見を戴きました。ここに謝意を表します。

引用 文 献

- Benner, S. A., Devine, K. G., Matveeva, L. N. and Powell, D. H. (2000) The missing organic molecules on Mars. *Proceedings of National Academy of Science*, **97**, 2425–2430.
- Bibring, J. P., Langevin, Y., Gendrin, A., Gondet, B., Poulet, F., Berthe, M., Soufflot, A., Arvidson, R., Mangold, N., Mustard, J., Drossart, P. and the OMEGA team (2005) Mars surface diversity as revealed by the OMEGA/Mars Express observations. *Science*, **307**, 1576–1581.
- Bibring, J. P., Langevin, Y., Mustard, J., Poulet, F., Arvidson, R., Gendrin, A., Gondet, B., Mangold, N., Pinet, P., Forget, F. and the OMEGA team (2006) Global Mineralogical and Aqueous Mars History Derived from OMEGA/Mars Express Data. *Science*, **312**, 400–404.
- Biemann, K. (2007) On the ability of the Viking gas chromatograph-mass spectrometer to detect organic matter. *Proceedings of National Academy of Science*, **104**, 10310–10313.
- Biemann, K., Oro, J., Toulmin, O. III, Orgel, L. E., Nier, A. O., Anderson, D. M., Simmonds, P. G., Flory, D., Diaz, A. V., Rushneck, D. R. and Biller, J. A. (1976) Search for organic and volatile inorganic compounds in two surface samples from the Chryse Planitia region of Mars. *Science*, **194**, 72–76.
- Biemann, K., Oro, J., Toulmin, O. III, Orgel, L. E., Nier, A. O., Anderson, D. M., Flory, D., Diaz, A. V., Rushneck, D. R. and Simmonds, P. G. (1977) The search for organic substances and inorganic volatile compounds in the surface of Mars. *Journal of Geophysics Research*, **82**, 4641–4658.
- Bishop, J. L., Dobrea, E. Z. N., McKeown, N. K., Parente, M., Ehlmann, B. L., Michalski, J. R., Milliken, R. E., Poulet, F., Swayze, G. A., Mustard, J. F., Murchie, S. L. and Bibring, J. P. (2008) Phyllosilicate diversity and past aqueous activity revealed at Mawrth Vallis, Mars. *Science*, **321**, 830–833.
- Carr, M. H. (1989) Impact recharging of CO₂. *Icarus*, **79**, 311–327.
- Carr, M. H. (1995) The Martian drainage system and the origin of valley, networks and fretted channels. *Journal of Geophysical Research*, **100**, 7479–7507.
- Carr, M. H. (2007) *The surface of Mars*, Cambridge University Press, Cambridge, pp. 322.
- Carr, M. H. and Clow, G. (1981) Martian channels and valleys: Their characteristics, distribution, and age. *Icarus*, **48**, 91–117.
- Catling, D. C., Claire, M. W., Zahnle, K. J., Quinn, R. C., Clark, B. C., Hecht, M. H. and Kounaves, S. (2010) Atmospheric origins of perchlorate on Mars and in the Atacama. *Journal of Geophysics Research*, **115**, E00E11, doi: 10.1029/2009 JE003425.
- Colaprete, A. and Toon, O. B. (2003) Carbon dioxide clouds in an early dense Martian atmosphere. *Journal of Geophysics Research*, **108**, E45025, doi: 10.1029/2002 JE001967.
- Committee on the Planetary Science Decadal Survey (2011) *Vision and Voyages for Planetary Science in the Decade 2013–2022*, The National Academies Press, Washington, D.C., pp. 410.
- Doran, P. T., Clifford, S. M., Forman, S. L., Nyquist, L., Papanastassiou, D. A., Stewart, B. W., Sturchio, N. C., Swindle, T. D., Cerling, T., Kargel, J., McDonald, G., Nishiizumi, K., Poreda, R., Rice, J. W. and Tanaka, K. (2004) Mars chronology: assessing techniques for quantifying surficial processes. *Earth Science Review*, **67**, 313–337.
- Di Achille, G. and Hynek, B. M. (2010) Ancient ocean on Mars supported by global distribution of deltas and valleys. *Nature Geoscience*, **3**, 459–463.
- Ehlmann, B. L., Mustard, J. F., Murchie, S. L., Poulet, F., Bishop, J. L., Brown, A. J., Calvin, W. M., Clark, R. N., Des Marais, D. J., Milliken, R. E., Roach, L. H., Roush, T. L., Swayze, G. A. and Wray, J. J. (2008) Orbital identification of carbonate-bearing rocks on Mars. *Science*, **322**,

- 1828–1832.
- Ehlmann, B. L., Mustard, J. F., Swayze, G. A., Clark, R. N., Bishop, J. L., Poulet, F., Des Marais, D. J., Roach, L. H., Milliken, R. E., Wray, J. J., Barnouin-Jha, O. and Murchie, S. L. (2009) Identification of hydrated silicate minerals on Mars using MRO-CRISM: Geologic context near Nili Fossae and implications for aqueous alteration. *Journal of Geophysical Research*, **114**, E00D08, doi: 10.1029/2009 JE003339.
- Fairén, A. G. (2010) A cold and wet Mars. *Icarus*, **208**, 165–175.
- Fonti, S. and Marzo, G. (2010) Mapping the methane on Mars. *Astronomy and Astrophysics*, **512**, id.A51. doi: 10.1051/0004-6361/200913178/3.141592654.
- Forget, F. and Pierrehumbert, R. T. (1997) Warming early Mars with carbon dioxide clouds that scatter infrared radiation. *Science*, **278**, 1273–1276.
- Formisano, V., Atreya, S. K., Encrenaz, T., Ignatiev, N. and Giuranna, M. (2004) Detection of methane in the atmosphere of Mars. *Science*, **306**, 1758–1761.
- Gellert, R., Rieder, R., Brückner, J., Clark, B. C., Dreibus, G., Klingelhöfer, G., Lugmair, G., Ming, D. W., Wänke, H., Yen, A., Zipfel, J. and Squyres, S. W. (2006) Alpha Particle X-Ray Spectrometer (APXS): Results from Gusev crater and calibration report. *Journal of Geophysical Research*, **111**, E02S05, doi: 10.1029/2005 JE002555.
- Geminale, A., Formisano, V. and Giuranna, M. (2008) Methane in Martian atmosphere: Average spatial, diurnal, and seasonal behaviour. *Planetary and Space Science*, **56**, 1194–1203.
- Geminale, A., Formisano, V. and Sindoni, G. (2010) Mapping methane in martian atmosphere with PFS-MEX data. *Planetary and Space Science*, **59**, 137–148.
- Gierasch, P. J. and Toon, O. B. (1973) Atmospheric pressure variation and the climate of Mars. *Journal of the Atmospheric Sciences*, **30**, 1502–1508.
- Grant, J. A. and Parker, T. J. (2002) Drainage evolution in the Margaritifer Sinus region, Mars. *Journal of Geophysical Research*, **107**, E9, 5066, doi: 10.1029/2001 JE001678.
- Grant, J. A. and Wilson, S. A. (2011) Late alluvial fan formation in southern Margaritifer Terra, Mars. *Geophysical Research Letters*, **38**, L08201, doi: 10.1029/2011 GL046844.
- Grant, J. A., Irwin, R. P., Grotzinger, J. P., Milliken, R. E., Tornabene, L. L., McEwen, A. S., Weitz, C. M., Squyres, S. W., Glotch, T. D. and Thomson, B. J. (2008) HiRISE imaging of impact megabreccia and sub-meter aqueous strata in Holden Crater, Mars. *Geology*, **36**, 195–198.
- Halevy, I., Zuber, M. T. and Schrag, D. P. (2007) A sulfur dioxide climate feedback on early Mars. *Science*, **318**, 1903–1907.
- Head, J. W. III, Hiesinger, H., Ivanov, M. A., Kreslavsky, M. A., Pratt, S. and Thomson, B. J. (1999) Possible Ancient Oceans on Mars: Evidence from Mars Orbiter Laser Altimeter Data. *Science*, **286**, 2134–2137.
- Hecht, M. H., Kounaves, S. P., Quinn, R. C., West, S. J., Young, S. M. M., Ming, D. W., Catling, D. C., Clark, B. C., Boynton, W. V., Hoffman, J., DeFlores, L. P., Gospodinova, K., Kapit, J. and Smith, P. H. (2009) Detection of perchlorate and the soluble chemistry of Martian soil at the Phoenix Lander site. *Science*, **32**, 64–67.
- 廣井孝弘・杉田精司 (2010) C型小惑星の探査における可視・近赤外分光の役割. 日本惑星科学会誌 遊星人, **19**, 36–47.
- Hynek, B. M., Beach, M. and Hoke, M. R. T. (2010) Updated global map of Martian valley networks and implications for climate and hydrologic processes. *Journal of Geophysical Research*, **115**, E09008, doi:10.1029/2009 JE003548.
- Irwin, R. P. III, Howard, A. D., Craddock, R. A. and Moore, J. M. (2005) An intense terminal epoch of widespread fluvial activity on early Mars: 2. Increased runoff and paleolake development. *Journal of Geophysical Research*, **110**, E12S15, doi: 10.1029/2005 JE002460.
- Johnson, S. S., Mischna, M. A., Grove, T. L. and Zuber, M. T. (2008) Sulfur-induced greenhouse warming on early Mars. *Journal of Geophysical Research*, **113**, E08005, doi: 10.1029/2007 JE002962.
- Kasting, J. F. (1991) CO₂ Condensation and the Climate of Early Mars. *Icarus*, **94**, 1–13.
- Kasting, J. F. (1997) Planetary Atmospheres: Warming early Earth and Mars. *Science*, **276**, 1213–1215.
- Keller, J. M., Boynton, W. V., Karunatillake, S., Baker, V. R., Dohm, J. M., Evans, L. G., Finch, M. J., Hahn, B. C., Hamara, D. K., Janes, D. M., Kerry, K. E., Newsom, H. E., Reedy, R. C., Sprague, A. L., Squyres, S. W., Starr, R. D., Taylor, G. J. and Williams, R. M. S. (2006) Equatorial and midlatitude distribution of chlorine measured by Mars Odyssey GRS. *Journal of Geophysical Research*, **111**, E03S08, doi: 10.1029/2006 JE002679.
- Klingelhöfer, G., Morris, R. V., Bernhardt, B., Schröder, C., Rodionov, D. S., de Souza, P. A. Jr., Yen, A., Gellert, R., Evlanov, E. N., Zubkov, B., Foh, J., Bonnes, U., Kankleit, E., Gütlich, P., Ming, D. W., Renz, F., Wdowiak, T., Squyres, S. W. and Arvidson, R. E. (2004) Jarosite and Hematite at Meridiani Planum from Opportunity's Mössbauer Spectrometer. *Science*, **306**, 1740–1745.
- Komatsu, G., Ori, G. G., Cardinale, M., Dohm, J. M., Baker, V. R., Vaz, D. A., Ishimaru, R., Namiki, N. and Matsui, T. (2011) Roles of methane and carbondioxide in geological processes on Mars. *Planetary and Space Science*, **59**, 169–181.
- Kraal, E. R., van Dijk, M., Postma, G. and Kleinhans, M. G. (2008) Martian stepped-delta formation by rapid water release. *Nature*, **451**, 973–976.
- Krasnopolsky, V. A., Maillard, J. P. and Owen, T. C. (2004) Detection of methane in the martian atmosphere: Evi-

- dence for life? *Icarus*, **172**, 537–547.
- Lammer, H., Kasting, J. F., Chassefière, E., Johnson, R. E., Kulikov, Y. N. and Tian, F. (2008) Atmospheric escape and evolution of terrestrial planets and satellites. *Space Science Review*, **139**, 399–436.
- Lefèvre, F. and Forget, F. (2009) Observed variations of methane on Mars unexplained by known atmospheric chemistry and physics. *Nature*, **460**, 720–723.
- McEwen, A. S., Hansen, C. J., Delamere, W. A., Eliason, E. M., Herkenhoff, K. E., Keszthelyi, L., Gulick, V. C., Kirk, R. L., Mellon, M. T., Grant, J. A., Thomas, N., Weitz, C. M., Squyres, S. W., Bridges, N. T., Murchie, S. L., Seelos, F., Seelos, K., Okubo, C. H., Milazzo, M. P., Tornabene, L. L., Jaeger, W. L., Byrne, S., Russell, P. S., Griffes, J. L., Martinez-Alonso, S., Davatzes, A., Chuang, F. C., Thomson, B. J., Fishbaugh, K. E., Dundas, M., Kolb, K. J., Banks, M. E. and Wray, J. J. (2007) A Closer Look at Water-Related Geologic Activity on Mars. *Science*, **317**, 1706–1709.
- Malin, M. C. and Edgett, K. S. (2003) Evidence for Persistent Flow and Aqueous Sedimentation on Early Mars. *Science*, **302**, 1931–1934.
- Michalski, J. R. and Niles, P. B. (2010) Deep crustal carbonate rocks exposed by meteor impact on Mars. *Nature Geoscience*, **3**, 751–755.
- Ming, D. W., Lauer, H. V. Jr., Archer, P. D. Jr., Sutter, B., Golden, D. C., Morris, R. V., Niles, P. B. and Boynton, W. V. (2009) Combustion of organic molecules by the thermal decomposition of perchlorate salts: Implications for organics at the Mars Phoenix Scout Landing Site. *40th Lunar and Planetary Science Conference*, Abstract #2241.
- Mischna, M. A., Kasting, J. F., Pavlov, A. and Freedman, R. (2000) Influence of carbon dioxide clouds on early Martian climates. *Icarus*, **145**, 546–554.
- 宮本英昭・平田成・橘省吾 (2010) 火星-ウソカラデタマコト. 東京大学総合研究博物館, pp. 175.
- Moore, J. M. and Howard, A. D. (2005) Large alluvial fans on Mars. *Journal of Geophysical Research*, **110**, E04005, doi: 10.1029/2004 JE002352.
- Mukhin, L. M., Koscheev, A. P., Dikov, Yu. P., Huth, J. and Wänke, H. (1996) Experimental simulations of the photodecomposition of carbonates and sulphates on Mars. *Nature*, **379**, 141–143.
- Mumma, M. J., Villanueva, G. L., Novak, R. E., Hewagama, T., Bonev, B. P., DiSanti, M. A., Mandell, A. M. and Smith, M. D. (2009) Strong release of methane on Mars in northern summer 2003. *Science*, **323**, 1041–1045.
- Mustard, J. F. (2009) Mars state of knowledge, how things have changed since the last DS, objectives and strategies for the next planning period. *Mars Exploration Program Analysis Group Meeting #21*, July 29–30, Providence, RI.
- Mustard, J. F., Ehlmann, B. L., Murchie, S. L., Poulet, F., Mangold, N., Head, J. W., Bibring, J. -P. and Roach, L. H. (2009) Composition, Morphology, and Stratigraphy of Noachian Crust around the Isidis basin. *Journal of Geophysical Research*, **114**, E00D12, doi: 10.1029/2009 JE003349.
- Navarro-González, R. E., Vargas, de la Rosa, J., Raga, A. C. and McKay, C. P. (2010) Reanalysis of the Viking results suggests perchlorate and organics at midlatitudes on Mars. *Journal of Geophysical Research*, **115**, E12010, doi: 10.1029/2010 JE003599.
- 小川佳子・栗田敬 (2004) 火星の地形のまとめと水の歴史. 日本惑星科学会誌 遊星人, **13**, 124–136.
- Pavlov, A. A., Kasting, J. F., Brown, L. L., Rages, K. A. and Freedman, R. (2000) Greenhouse warming by CH₄ in the atmosphere of early Earth. *Journal of Geophysical Research*, **105**, 11,981–11,990.
- Pollack, J. B., Kasting, J. F., Richardson, S. M. and Poliakov, K. (1987) The case for a warm wet climate on early Mars. *Icarus*, **71**, 203–224.
- Rothman, L. S., Gordon, I. E., Barbe, A., Chris Benner, D., Bernath, P. F., Birk, M., Boudon, V., Brown, L. R., Campargue, A., Champion, J. -P., Chance, K., Coudert, L. H., Dana, V., Devi, V. M., Fally, S., Flaud, J. -M., Gamache, R. R., Goldamn, A., Jacquemart, D., Kleiner, I., Lacome, N., Lafferty, W. J., Mandin, J. -Y., Massie, S. T., Mikhailenko, S. N., Miller, C. E., Moazzen-Ahmadi, N., Nauyemenko, O. V., Nikitin, A. V., Orphal, J., Perevalov, V. I., Perriin, A., Predoi-Cross, A., Rinsland, C. P., Rotger, M., Simečkoveá, M., Smith, M. A. H., Sung, K., Tashkun, S. A., Tennyson, J., Toth, R. A., Vandaele, A. C. and Vander Auwera, J. (2009) The HITRAN 2008 molecular spectroscopic database. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, **110**, 533–572.
- Sagan, C. and Mullen, G. (1972) Earth and Mars: Evolution of atmospheres and surface temperatures. *Science*, **177**, 52–56.
- Salvatore, M. R., Mustard, J. F., Wyatt, M. B. and Murchie, S. L. (2010) Definitive evidence of Hesperian basalt in Acidalia and Chryse planitiae. *Journal of Geophysical Research*, **115**, E07005, doi: 10.1029/2009 JE003519.
- 佐藤毅彦・久保田孝・宮本英昭・岡田達明・松岡彩子・今村剛・尾川順子・川口淳一郎・MELOS ワーキンググループ (2009) MELOS 複合探査の概要と科学目標「火星はなぜ赤いか?」. 日本惑星科学会誌 遊星人, **18**, 66–68.
- Segura, T. L., Toon, O. B., Colaprete, A. and Zahnle, K. (2002) Environmental effect of large impacts on Mars. *Science*, **290**, 1976–1980.
- Segura, T. L., Toon, O. B. and Colaprete, A. (2008) Modeling the environmental effects of moderate-sized impacts on Mars. *Journal of Geophysical Research*, **113**, E11007, doi: 10.1029/2008 JE003147.
- 関根康人・火原彰秀・鈴木宏二郎・杉田精司・松井孝典 (2011) “Small is beautiful” planetary missions: 小型軽量多点の化学探査が目指す惑星の化学と生物学. 日本地球惑星科学連合2011年大会, PPS023-P04.
- Squyres, S. W., Aharonson, O., Clark, B. C., Cohen, B. A.,

- Crumpler, L., de Souza, P. A., Farrand, W. H., Gellert, R., Grant, J., Grotzinger, J. P., Haldemann, A. F. C., Johnson, J. R., Klingelhöfer, G., Lewis, K. W., Li, R., McCoy, T., McEwen, A. S., McSween, H. Y., Ming, D. W., Moore, J. M., Morris, R. V., Parker, T. J., Rice, J. W. Jr., Ruff, S., Schmidt, M., Schroder, C., Soderblom, L. A. and Yen, A. (2007) Pyroclastic Activity at Home Plate in Gusev Crater, Mars. *Science*, **316**, 738–742.
- 杉田精司・宮本英昭・橘省吾・岡田達明・出村裕英・大森聡一・並木則行・高橋幸弘・三浦弥生・長尾敬介・三河内岳・佐藤毅彦 (2009) MELOS の目指す火星表層科学探査. 日本惑星科学会誌 遊星人, **18**, 79–83.
- 鈴木宏二郎・FS ランダー検討グループ (2010) C 案 [空中探査] FS ランダー計画, 火星-ウソカラデタマコト. 東京大学総合研究博物館, pp. 159–167.
- Tian, F., Claire, M. W., Haqq-Misra, J. D., Smith, M., Crisp, D. C., Catling, D., Zahnle, K. and Kasting, J. F. (2010) Photochemical and climate consequences of sulfur outgassing on early Mars. *Earth and Planetary Science Letters*, **295**, 412–418.
- Warner, N., Gupta, S., Lin, S. -Y., Kim, J. -R., Muller, J. -P. and Morley, J. (2010) Late Noachian to Hesperian climate change on Mars: Evidence of episodic warming from transient crater lakes near Ares Vallis. *Journal of Geophysical Research*, **115**, E06013, doi: 10.1029/2009 JE 003522.
- Webster, C. R. and Mahaffy, P. R. (2011) Determining the local abundance of martian methane and its $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ and D/H isotopic ratios for comparison with related gas and soil analysis on the 2011 Mars Science Laboratory (MSL) mission. *Planetary and Space Science*, **59**, 271–283.
- 山岸明彦 (2011) 火星での生命探査計画. 日本惑星科学会誌 遊星人, **20**, 108–116.
- 山田和彦・鈴木宏二郎 (2005) 柔構造周りの超音速流れと膜面エアロシエル宇宙輸送機. ながれ, **24**, 265–272.
- Yung, Y. L., Nair, H. and Gerstell, M. F. (1997) CO_2 Greenhouse in the early Martian atmosphere: SO_2 inhibits condensation. *Icarus*, **130**, 222–224.
- Zahnle, K., Freedman, R. S. and Catling, D. C. (2011) Is there methane on Mars? *Icarus*, **212**, 493–503.