総 説

火星のメタン

Methane on Mars

石丸 亮¹ 小松吾郎^{2,1}
松井孝典¹

*Ryo Ishimaru¹, Goro Komatsu^{2,1} and
Takafumi Matsui¹*

2011年9月15日受付.

2012年1月29日受理.

¹ 千葉工業大学惑星探査研究センター
Planetary Exploration Research Center, Chiba Institute of Technology, 2-17-1 Tsudanuma, Narashino, Chiba 275-0016, Japan

² ダムンツィオ大学国際惑星科学研究大学院
International Research School of Planetary Sciences, Università d'Annunzio, viale Pindaro, Pescara, 42, 65127 Italy

Corresponding author; R. Ishimaru,
ishimaru.ryo@it-chiba.ac.jp

Abstract

Four research groups have independently reported the possible detection of methane in the Martian atmosphere using spacecraft and ground-based observations. Although each observation uses different instruments and has specific uncertainties, these observations produce similar results in terms of seasonal variations and global mean amounts of methane, implying that methane may be present in the current atmosphere of Mars. If methane is present on Mars, it is likely to be of geochemical and/or biological origin. A release of methane from the subsurface to the atmosphere may be associated with the formation of specific landforms, such as mud volcanoes, as observed on Earth. Although the presence of such landforms has been suggested on Mars, a causal link between these landforms and atmospheric methane has not been confirmed. We report that the observed lifetime of methane on Mars is shorter than that estimated from conventional photochemical models, with this short lifetime requiring rapid consumption of methane by a currently unknown process. This article summarizes observational results and our current understanding of physicochemical processes involved in the production, release, and consumption of Martian methane, and outlines future observation plans for documenting the abundance of methane on Mars.

Keywords: Mars, Methane, Spacecraft observation, Ground-based telescope observation, Serpentinization, Biology, Clathrate, Planetary geology

はじめに

地球上で生命活動との関連が深いとされるメタンが、火星大気中に存在することが最近報告されたことにより (Formisano et al., 2004; Krasnopolsky et al., 2004; Geminale et al., 2008, 2011; Mumma et al., 2009; Fonti and Marzò, 2010), 火星に大きな注目が集まっている。地球大気に含まれるメタンの大部分が生物起源であるため、火星のメタンが地球同様、生命活動に由来する可能性は十分にあると考えられている (例えば, Atreya et al., 2007)。一方で、非生物のプロセスでメタンが生成される場合もある。非生物プロセスで最も有力と考えられているのが、液体の水が関わる岩石・鉱物の化学過程である (Oze and Sharma, 2005 など)。火星生命の存在と比較すると、後者はインパクトに欠けると思われるかもしれない。しかしながら、既に熱的活動を停止してしまったかのように見える現在の火星において、明確な地質活動、しかも液体の水の存在にも繋がる証拠が発見できれば惑星科学上非常に重要であるといえる。さらに、後述するように火星のメタンは地下から放出されたと考えられるため、メタンの輸送を介して惑星内部・表層・大気が相互作用

するシステムとして、火星を捉えることもできる。したがって、火星のメタンの挙動を明らかにすることは、惑星システムの形成や進化の理解を深めることにもなるだろう。そのような複雑なシステムが関与する火星のメタンの性質を理解するためには、様々な分野の知見が必要となる。実際に欧米では、惑星科学以外にも地球の地質学・化学・生物学・気象学・雪氷学などを専門とする研究者が、火星のメタンの研究やメタンの観測をターゲットとする次期火星探査計画に取り組んでいる。一方、日本でも火星のメタンの理論的・実験的研究や探査計画が始まりつつあり、今後益々学際的な広がりが期待される。

本稿では、第一に、これまでのメタンの観測の概要とその観測で明らかにされた火星のメタンの特徴について紹介し (1章)、第二に、その観測結果を説明するために提唱されている主なメタンの生成・放出過程と消費過程について、今なお残された課題と問題点も含めて、それぞれ解説する (2, 3章)。最後に、今後直近で予定されている国内外の火星のメタン観測について概観する。

Fig. 1. Seasonal changes in the latitudinal distribution of methane column density observed by the Planetary Fourier Spectrometer (PFS) of the Mars Express platform (fig. 4 of Geminal et al., 2011); colors correspond to methane column density in units of $10^{15}/\text{cm}^2$. The reader is referred to the online version of this article for detailed interpretation of colors in the legend.

火星のメタンの観測

火星大気中のメタンの観測は、大別して火星周回探査機による観測(以下では探査機観測)と地球上の望遠鏡による観測(以下では地上観測)に分けられる。以下では、各観測について個別に紹介した後に、これらを総合して、これまでの観測から何がわかったのかについて論じることとする。

1. 探査機観測

探査機観測で最初にメタンの検出を報告したのはマーズ・エクスプレスである(Formisano et al., 2004; Geminal et al., 2008, 2011)。マーズ・エクスプレスはフーリエ分光器(Planetary Fourier Spectrometer; 以下ではPFS)を搭載しており、この分光器により、火星表面で反射された太陽反射光を観測し、その反射光が火星大気を通過することで生じるメタンの ν_3 バンドQブランチ(およそ 3018 cm^{-1})の吸収を検出している。PFSは微量のメタンを観測するにはS/N比(シグナル/ノイズ比)が低いため、3火星年(2004–2010年の約6年間、1火星年は約687地球日)に渡って観測された大量の観測スペクトル(100個以上)を平均することでノイズを低減している。また一方で、PFSのスペクトル分解能が非常に低いことから($\delta\nu = 1.3\text{ cm}^{-1}$)、数多くのメタンの吸収線が集中する吸収帯を単一の吸収として測定してしまうというデメリットがある。そのため、メタン量をパラメータとしてPFSと同じ解像度を仮定して人工的に作った合成スペクトルと比較することでメタン量を間接的に算出している。

結果として見積もられたメタン濃度は全球平均で $10 \pm 5\text{ ppb}$ (火星大気の大気圧 $\sim 600\text{ Pa}$ に対する比)である。PFS観測により計測されたメタン濃度の緯度分布の季節変化をFig. 1に示す(Geminal et al., 2011; Fig. 4)。横軸の

Solar longitude(L_s)は、火星の軌道上における北半球の春分点から測った角度に対応しており、火星の季節を指定する際に使われるパラメータである。火星の北半球の春分、夏至、秋分、冬至がそれぞれ $L_s = 0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$ となる。この図によると、北半球の夏期($L_s = 90^\circ\text{--}180^\circ$)に北極域でメタン量が増加していることがわかる。大気大循環モデルによると北極へのメタンの輸送は起こらないため(Lefèvre and Forget, 2009)、北極域でのメタンの濃集は北極にメタンの発生源が存在する可能性を示唆している。夏に北極冠が昇華することで、地下に貯蔵されていたメタンが放出されたのかもしれない(例えば、Chassefière, 2009)。従来の大気化学モデルによると、火星大気にメタンが存在する場合の寿命は数百年程度と推定される(例えば、Krasnopolsky et al., 2004)。ところが、実際の観測では、北半球の冬に急激にメタンの量が減少しており、寿命が大気化学モデルによる推定の1/100程度(1火星年程度)であることがわかった。このメタンの急激な減少を説明する試みが現在も続いている(メタンの消費過程の詳細は3章で紹介する)。

もう一つの探査機観測としてマーズ・グローバル・サーベイヤーによるメタン観測が報告されている(Fonti and Marzo, 2010)。マーズ・グローバル・サーベイヤーに搭載されている熱放射分光計(Thermal Emission Spectrometer; 以下ではTES)により3火星年(2000–2006年の約6年間)に渡ってメタンの ν_4 バンドQブランチ(約 1306 cm^{-1})が観測されている(Fonti and Marzo, 2010)。微量のメタンを観測するにはS/N比及びスペクトル分解能($\delta\nu = 6.25\text{ cm}^{-1}$)が非常に低く吸収線を直接観測することができないため、約300万個の観測スペクトルを用いた特殊な統計処理(クラスター解析)により、メタン量とその分布を間接的に導出して

Fig. 2. Spatial and temporal distribution of methane observed by the Thermal Emission Spectrometer (TES) of the Mars Global Surveyor platform (fig. 2 of Fonti and Marzo, 2010), showing observations taken over 3 Martian years (MY). The left, center, and right panels show seasonal changes during the first, second, and third MY of observations, respectively, with results limited to latitudes between 60°S and 60°N. The reader is referred to the online version of this article for detailed interpretation of colors in the legend.

いる。Fig. 2 が TES 観測から得られたメタン分布である (Fonti and Marzo, 2010; Fig. 2)。TES 観測で報告されている結果は北緯 60° から南緯 60° までであることに注意して欲しい。PFS 観測と同様にメタン量は北半球の夏期 ($L_s = 90^\circ - 180^\circ$) に最も多く、冬期に向けて減少する傾向が見られている (Geminal et al., 2011)。一方で、大気中のメタン濃度の高い地域は PFS 観測とは対照的に低-中緯度に集中している。具体的には、Tharsis, Arabia Terra, Elysium の 3 地域に濃集している。Tharsis と Elysium は古火山であり、残留地熱の存在を示唆する報告もある (Dohm et al., 2008)。Arabia Terra に関しては、地下水の存在が観測から示唆されている (Boynton et al., 2007) のに加え、表面では含水鉱物が見つかった (Mustard et al., 2008)。これらの証拠は、メタンの生成過程が熱や水が関係する、例えば熱水活動や生命活動であることを示唆しているかもしれない (Fonti and Marzo, 2010)。メタンの生成過程の詳細については 2 章で論じる。

探査機観測の問題を挙げるとすれば、スペクトル解像度が低いために、吸収線を直接観測できていないことである。そのため、特殊な解析をすることで間接的にメタン量を求めている。しかしながら、PFS 観測の場合には、観測スペクトルと合成スペクトルの形状 (吸収線の深さや幅など) の一致が良いわけではないとの指摘もある (Zahnle et al., 2011)。合成スペクトルはメタン以外の入力パラメタ (水蒸気量、氷粒子量、大気構造など) にも依存するが、観測とのずれがメタン量の推定にどの程度影響するかについては実はよくわかっていない。TES 観測の場合には、PFS 観測以上に解像度が低

く、二酸化炭素や水蒸気の吸収がメタンの同定に影響している可能性が提示されている (Zahnle et al., 2011)。

2. 地上観測

地上望遠鏡による観測は、重量制限のある探査機に比べてスペクトル解像度が高い分光器を使用できる利点がある。一方で、地球大気を介して火星大気を観測することから、観測スペクトルには火星大気だけでなく地球大気による吸収が含まれる。そのため、いかに地球大気起源の吸収を除去するかが課題となる。

ハワイのマウナケア山の Canada-France-Hawaii 望遠鏡 (口径 3.6 m) のフーリエ分光器 ($\delta\nu = 0.0163 \text{ cm}^{-1}$) により火星表面で反射された太陽反射光を観測し、火星大気を通過することで生じる火星大気メタンの ν_3 バンド P4 吸収線 (約 2979 cm^{-1}) を検出している (Krasnopolsky et al., 2004)。この観測では、火星が望遠鏡の視線方向に近づいている時期を選んでいため、火星からの反射光が青い波長側にドップラシフトして観測される。結果的に、火星大気起源の吸収線は地球大気起源の吸収線 (火星からの反射光は地上望遠鏡に到達するまでに地球大気も通過する) から分離される。観測スペクトルから推定されるメタン量は全球平均で $10.05 \pm 2.9 \text{ ppb}$ である (Krasnopolsky et al., 2004)。しかし、S/N 比が非常に低いため、明確なメタンの吸収が無いという指摘もある (Zahnle et al., 2011)。

もう一つ、地上観測によるメタンの検出が Mumma et al. (2009) により報告されている。Mumma et al. (2009) は高分散分光器 (エッセル赤外分光器) を搭載した Infrared Telescope Facility により、メタンの ν_3 バンド R0, R1 吸

Fig. 3. Methane distribution in the Martian northern hemisphere summer of 2003 (fig. 3 of Mumma et al., 2009). The reader is referred to the online version of this article for detailed interpretation of colors in the legend.

収線を観測している (Mumma et al., 2009). この観測はスペクトル分解能が高いこと ($\delta\nu = 0.08 \text{ cm}^{-1}$), S/N 比が高いこと, 空間分解能が比較的高いことから, 火星メタンの観測の中で最も注目されてきた. Canada-France-Hawaii 望遠鏡の観測と同様に, 火星の吸収線がドップラーシフトする時期を選んで 2003 年に観測している. 観測からは, 北半球の夏において Fig. 3 (Mumma et al., 2009; Fig. 3) のような塊状のメタンの濃集地域が見つかった. 一方で, 北半球の初春に相当する 3 年後の観測においては, メタンが極少量しか見つからない. 以上のように暖かい季節にだけメタン量が多い傾向は探査機観測の結果とも調和的であり, 表面が暖められることでメタンの放出が活動的なこと, そしてメタンの寿命がかなり短い (3 年以内) ことを示唆している. メタンの濃集する地域は具体的には Terra Sabae (Arabia Terra の東部), Nili Fossae, Syrtis Major と呼ばれる低緯度地域である. Terra Sabae 北西方の Arabia Terra は既に述べたように, 水の存在が示唆される地域である. Nili Fossae もまた水の存在下で形成する含水鉱物 (蛇紋岩) や炭酸塩が見つかった (Poulet et al., 2005; Ehlmann et al., 2008, 2010). これらから水が関与するメタン生成プロセスの存在が示唆されている (詳細は 2 章). これら地域のメタンの濃集は TES 観測でも観測されている (Fig. 2).

ところが, 最近になって Mumma et al. (2009) の観測に対する反論が Zahnle et al. (2011) により報告されている. 前述のように Mumma et al. (2009) はドップラーシフトした火星のスペクトルを観測していたが, Zahnle et al. (2011) の指摘によると, ドップラーシフトした火星の $^{12}\text{CH}_4$ の吸収波数と地球大気中の $^{13}\text{CH}_4$ の吸収波数が非常に近くなり, Mumma et al. (2009) の観測のスペクトル解像度 (0.08 cm^{-1}) を持ってしても両吸収線が重なってしまう. 地球大気中の $^{13}\text{CH}_4$ の吸収は火星大気に存在すると報告されている数十 ppm の $^{12}\text{CH}_4$ の吸収よりもはるかに深いので, 観測スペクトルから地球大気中の $^{13}\text{CH}_4$ の吸収を除去することは非常に難しい可能性がある (Zahnle et al., 2011). Mumma et al. (2009) に地球の $^{13}\text{CH}_4$ の扱いについての記述が無いことに加え, Zahnle et al. (2011) の反論に対する Mumma からの返答も現在のところなされていない. 今後の報告が待たれる.

3. メタン観測のまとめ

探査機観測はメタンの吸収線を直接観測するにはスペクトル解像度が低いこと, Mumma et al. (2009) の観測は地球大気中の吸収が混在している可能性があるなど, それぞれの観測が固有の問題を抱えているため, 現状では絶対的にメタンが火星に存在するとは断定できない. しかしながら, 異なる観測機器, 異なる吸収線の観測, 異なる観測時期においても同様の季節変動 (北半球の夏に多く冬に少ない) が観測されていること, 全球平均で 10 ppb 程度のメタンが観測されていることなど共通点が多いことは, メタンが存在していることを示唆しているかもしれない. Fig. 4 はメタンの濃集が観測された地域を図示しているが, PFS 観測では北極でメタンの濃集が観測されているのに対し, TES 観測と Mumma et al. (2009) による地上観測では低緯度でメタンの濃集が検出されている. これらメタンの分布は一見矛盾するようにみえるが, それぞれ観測期間・観測場所が異なるため, 必ずしも同じメタンの分布を見ているわけではないため矛盾はしないともいえる (いずれかの観測が間違っている可能性も否定はできないが). 例えば, 極域でのメタンの濃集を観測しているのは PFS 観測のみであるが, 他の観測では極域の信頼できる観測ができていないためそもそも見つけることができない. 対照的に PFS 観測では, 低緯度でのメタンの濃集が明確に見られないが (実は Arabia Terra 付近にメタンの吸収が若干見られるが明確ではない (Geminal et al., 2011)), これは他の観測とは異なる期間のスペクトルを平均しているために異なるメタン分布を観測している可能性がある (PFS 観測は 2004–2010 年, TES 観測は 2000–2006 年, Mumma et al. (2009) の地上観測は 2003 年). 極域と低緯度のどちらが真のメタン発生源なのかという議論もされているが, どちらもメタンの発生源であることは否定できない. 一方で Mumma et al. (2009) の観測時期は TES 観測の期間に含まれるが, 前述したように, 両観測は同地域でメタンの濃集を観測しているため調和的であるといえる.

以上のような観測を鑑みて, (メタンの存在に対して懐疑的な研究者は確かにいるけれども) 多くの火星の研究者は,

Fig. 4. Map showing regions of high atmospheric CH_4 concentrations determined by spacecraft and ground-based telescopes; these data are superimposed on a topographic map of Mars. Dashed, black, and white circles show the positions, but not exact distributions, of CH_4 -rich regions documented by PFS, TES, and telescope observations of Mumma et al. (2009), respectively.

メタンの量・分布・発生源・挙動には不確実性があるとはいえ、火星にメタンが存在することを前提として研究している。実際、メタンを直接観測することを主要なミッションとする火星探査機がNASA、ESA(欧州宇宙機関)により次々と計画されており、今後益々火星のメタンに注目が集まることが予想される(4章で詳しく述べる)。次章では、火星のメタンが存在するとした場合、どのようにメタンが生成し、どのように放出されると考えられているのかについて紹介する。

火星のメタンの生成・放出過程

前章で述べたように、火星のメタンは特定の地域に局在して分布しているように見える。火星大気の流れによる拡散のタイムスケールは非常に速いため(数か月; Atreya et al., 2009; Lefèvre and Forget, 2009), 局在したメタン分布を実現するには観測された時期(かその直前)にその地域でのメタンの発生が必要である。

大気中での光化学反応(例えば, Bar-Nun and Dimitrov, 2006)や火星外からの隕石・彗星衝突(例えば, Formisano et al., 2004; Atreya et al., 2009)により、表層でメタンが生成・供給されることは物理的には起こり得る。しかしながら、今回火星で観測されている局所的なメタン分布がそのような表層プロセスにより発生したとは考えにくい。というのも、火星大気の局所的な地域だけで光化学反応が起こったとは考えにくいし、メタンが検出された地域で天体衝突が最近

起こったという報告がないからである。そのため、観測されたメタンは地下から放出されたと考える方がもっともらしい(例えば, Mumma et al., 2009)。

地球上では、火山がメタンの放出源の一つとして知られている。地球上における火山ガスにはメタンの数百倍の二酸化硫黄が含まれるため(例えば, Walker, 1977), もしメタンが火山ガス起源でかつ火山ガス組成が地球と火星で似ているならば、火星でも二酸化硫黄が存在するはずである。ところが、火星では二酸化硫黄は未だ検出されていない(Encrenaz et al., 2001; Nakagawa et al., 2009)。したがって、火星のメタンが火山起源である可能性は低いと考えられている(Atreya et al., 2007)。

ここでは特に、地下でメタンを生成するプロセスとして有望視されている蛇紋岩化作用と生命活動について以下で詳しく述べる。地球大気に含まれるメタンの約9割が生物起源であることが知られている(Atreya et al., 2007)。地球と似た天体である火星においても、メタンが生物起源である可能性は十分にある(Atreya et al., 2007)。生命活動には液体の水が必要であるが、現在の火星においても水の存在を示唆する証拠が観測されている。火星周回機マーズ・オデッセイのガンマ線分光器による観測は、火星の広範囲に渡って水分子が地下数メートル以内に存在することを明らかにした(Feldman et al., 2004)。一方で火星着陸探査機フェニックスは着陸地点の表面付近で水氷を見つけている(Smith et al., 2009)。非常に低温・低圧である火星表面付近では水は液体として安定に存在できないが、地温勾配次第では深くなるほど地温勾配に従い温度が高くなり、また同時に深さと共に圧力が高くなるため、深さ数kmで液体の水が安定化するという見積もりもされている(Mellon and Phillips, 2001など)。そのような場所に帯水層として液体の水が存在しているならば、生物が生存する可能性は否定できない。火星上でメタンを生成する生物の候補としてメタン菌がよく取り上げられる。メタン菌は以下の化学反応(代謝)でメタンを生成する(Atreya et al., 2007)。

メタン菌が代謝のために必要とする物質は火星上で調達可能である。水素は以下で述べる蛇紋岩化作用((3)式)によって作られるか、あるいは大気から拡散・供給される可能性がある。二酸化炭素と一酸化炭素は大気に含まれるのでやはり拡散で地中に供給される。

岩石・鉱物の化学過程の一つである蛇紋岩化作用も有望なメタン生成プロセスとして提唱されている(Oze and Sharma, 2005など)。蛇紋岩化作用は、苦鉄質珪酸塩(かんらん石や輝石)が液体の水と反応(水和反応)して蛇紋石を形成する過程であり、その過程で同時に水素が生成される。

(3) 式の量論係数は珪酸塩の組成に依存する。この反応で形成された水素は地殻中や帯水層中の炭素粒子や二酸化炭素と反応しメタンを形成する。

式(4), (5)の反応は反応速度が非常に遅いため、触媒として遷移金属(例えば、鉄やニッケル)およびその化合物が必要とされることに注意して欲しい。地球の深海底にブラックスモーカーと呼ばれるメタンを放出する熱水噴出孔が存在するが、このブラックスモーカーの環境を模擬した実験では、確かに蛇紋岩化作用が起きることが確かめられている(Foussouskos and Seyfried, 2004)。この反応は火星の地下の温度圧力条件でも十分に起こり得ることが示されている(例えば、Oze and Sharma, 2005)。しかし、蛇紋岩化作用が起こるかどうかは、珪酸塩の鉄／マグネシウム比、二酸化炭素濃度、pH など環境条件にも大きく依存することが報告されている(Oze and Sharma, 2005; Oze and Sharma; Jones et al., 2010 など)。火星環境での蛇紋岩化作用を理解するためには、火星環境を模擬した系でのさらなる理論的・実験的研究が必要となるだろう。

生命が存在するならば驚くべき結果であるし、蛇紋岩化作用が起こっていたとしても火星上での地質活動の証拠となるため極めて興味深い。ここで述べた生物活動と蛇紋岩化作用はいずれも水の存在が必須であるが、興味深いことに、前章で述べた通りメタンが見つかった場所(Arabia Terra, Nili Fossae)においても水の存在を示唆する証拠が見つっている。また Nili Fossae では蛇紋岩化作用の材料物質のかんらん石が見つかったのに加え(Hamilton and Christensen, 2005)、生成物の蛇紋岩も見つかった(Ehlmann et al., 2010)。Nili Fossae 付近の年代が 36–45 億年と古い(Greeley and Guest, 1987)、少なくとも過去に Nili Fossae で蛇紋岩化作用が起こっていたことを示している。ただし、蛇紋岩化作用が起こったとしても金属触媒や気相が同時に存在しないとメタンが形成しないと考えられているため(McCollom and Seawald, 2003)、必ずしもメタンが形成するわけではないことに注意が必要である。一方で、もしメタンが Nili Fossae で過去の蛇紋岩化作用で形成されていたとしても、現在観測されているメタンとは大きな時間のギャップがあるため、Nili Fossae で観測されたメタンの起源を過去の蛇紋岩化作用に求めることは単純ではない。

これまで挙げたメタンの生成プロセス以外にも、ケロジェンと呼ばれる有機物の熱分解によりメタンが生成されるかもしれない。ケロジェンは堆積層中の有機物が高温高圧下に曝されることで形成する高分子有機物である。このプロセスは、地球上の主なメタン生成プロセスの一つとして知られている(Etiope et al., 2011)。火星でも例えば、過去の天体(彗

星や炭素質隕石)衝突により供給された有機物や、過去に生命が存在していたならばその遺体などから、ケロジェンが形成する可能性が指摘されている(Etiope et al., 2011)。ケロジェンは高熱が与えられない限り安定であるためメタンの間接的なリザーバーとなりえることから、現在観測されているメタンの供給源として働く可能性がある。ここでの課題としては、ケロジェンの材料となる有機物の起源はそもそも何であるのか、ケロジェンを分解する加熱プロセスは何であるのか(例えば、火成活動や天体衝突など)、など残されており今後のさらなる検討が必要であろう。

地下で作られた(放出された)メタンは土壌中もしくは基盤岩の割れ目などを徐々に拡散し、障害が無ければそのまま大気へ放出されるだろう。しかしながら、火星環境ではクラスレートとして地下に貯蔵される可能性も考えなくてはならない(例えば、Chastain and Chevrier, 2007; Komatsu et al., 2011)。クラスレートは水分子の籠の中にガス分子を閉じ込めて安定化する固体物質である。メタンクラスレートは日本近海の高圧・低温環境でも発見されており一般にも比較的良くその存在が知られている。クラスレートは高圧・低温環境で安定な物質である。地球の海底では圧力が高いため、地球の温度環境であってもクラスレートは形成しうる。対照的に、火星は非常に低温であるため、クラスレートの形成に高い圧力が必要ではない。火星の平均表面温度 200 K では、地下 15 m 以深に相当する圧力でメタンクラスレートが安定化するため(Max and Clifford, 2000)、火星の地下の広範囲でクラスレートが形成することができる。ここで重要なのは、クラスレートがメタンのリザーバーとして働くことができるということである(Chastain and Chevrier, 2007; Komatsu et al., 2011)。メタンクラスレートは長期間メタンを貯蔵することが可能なため、過去に作られ貯蔵されていたメタンを現在観測していても矛盾は無い。実際、過去の火星は現在よりも温暖な環境であったことに加え火成活動も活発であったとされているため、生命活動や蛇紋岩化作用を通じたメタン生成には適していたかもしれない。クラスレートのリザーバーとしての働きを考えれば、先に述べた年代の古い Nili Fossae の蛇紋岩生成と現在観測されているメタンを関係づけることも可能となる(Atreya et al., 2011)。

クラスレートの存在を考えると、実は生命活動や蛇紋岩化作用以外のメタン生成プロセスであっても現在のメタン観測を説明できる可能性が出てくる。例えば、過去に起こった天体衝突であっても、生成されたメタンが地下に浸透してクラスレートとして貯蔵されれば、現在観測されているメタンの供給源となりえるのである。火星のメタンがいつ作られたのか(過去なのか、現在なのか)、その生成プロセスは何であるのか、は火星のメタンに関わる最重要テーマであるにも関わらず未だ取り組むべき課題は多いといえる。

もし大気中のメタンがクラスレート起源である場合、クラスレートを不安定化することが、クラスレートを分解しメタンを放出するための必要条件となる。クラスレートを不安定化する最も単純な方法は温度上昇か圧力減少である。断層・地滑り・地震などで地下への荷重が減れば、クラスレート層

が減圧されクラスレートが不安定化するかもしれない (Chastain and Chevrier, 2007; Komatsu et al., 2011). 一方温度上昇に関しては、例えば、日射や火成活動(現在の火星では活発でない可能性が高い)による加熱が考えられる (Chastain and Chevrier, 2007; Ishimaru et al., 2010 など). 特に日射加熱はメタンの季節変動(大気中のメタンは夏に多く冬に少ない)を説明する上で重要であるかもしれない. 実際、日射により生じる表面温度の季節振動が地下を伝導し、クラスレートの安定—不安定の季節サイクルを引き起こす可能性が示唆されている (Ishimaru et al., 2010).

ただし一方で、季節に連動して昇華・凝結する氷もまたメタンの噴出孔を開閉することでメタン放出の季節変動を引き起こすかもしれない (Mumma et al., 2009). 気温の低い高緯度帯、例えば PFS 観測でメタンが見つかった極域などでは (Geminale et al., 2011), このような氷が関わるメタンの季節変動が重要であるかもしれない.

メタンが地表から大気へ放出される際には、特徴的な地形を伴う場合がありうる (Komatsu et al., 2011). 地球の例で言えば、泥火山、ポックマークなどが代表的なメタンを放出する地形であり、火星でも似たような状況があったとしても不思議はない. しかしながらメタンはそのような特徴的な地形のみならず普通の断層、地滑り、衝突クレーター、火山、サーモカルスト、または特にはっきりした地形のないところからも出てくる可能性もある. いずれにせよ泥火山とポックマークはメタンの地中からの放出との関係が深い地形であり、ここで特に取り上げる.

泥火山は地球の陸上、海底に広く分布するメートルからキロメートルスケールの堆積火山の地形であるが (e.g., Mazzini, 2009), 溶岩や火砕物の代わりにガス、水、泥や岩石片が混合した物質が噴出して形成される. その形状も円錐形やパンケーキ状の小丘、さらにはそれらに付随する舌状の泥や岩石片の混合流れ堆積物と多様である. ガスは活発な噴出活動が終息した後も泥火山から出続ける場合が多い. ガスはたいていメタンが主要な成分であるが、二酸化炭素が出ている泥火山も見ついている (Etiope et al., 2002). 地球上のほとんどの泥火山の放出ガスは堆積層起源であるため、その場合放出ガスには二酸化硫黄が含まれないことが知られている. もし火星に泥火山が存在している場合にも同様に堆積層からガスが放出されており、二酸化硫黄が放出されていないのかもしれない.

火星においても泥火山ではないかと推測されている地形が北部平原を中心に軌道上からの探査機観測によって数多く見ついている (e.g., Davis and Tanaka, 1995; Ori et al., 2000; Skinner and Tanaka, 2007; Oehler and Allen, 2010; Komatsu et al., 2011). たいていは直径が最大数千メートルの小丘地形で頂上にクレーターがあることが多い (Fig. 5). 最終的に泥火山説を証明するには着陸して露頭の観察やサンプル分析が必要になってくるかもしれない. しかし火星に泥火山があるとした場合、どのような地質条件で形成されたのか、いつ頃できたのか、形成時にメタンが実際に放出されたのかなど、いろいろな解決すべき諸問題がある.

Fig. 5. Martian mounds interpreted as mud volcanoes within Acidalia Planitia (Oehler and Allen, 2010); the image used is High Resolution Imaging Science Experiment (HiRISE) image PSP_008522_2210.

ポックマークは地球の海の大陸棚に多く見ついている直径 50–100 m、深さ数 m の円形に近い形状の窪地であるが (Hovland and Judd, 1988), さらに巨大なものも存在する. ポックマークは海底下の堆積物とその下部から移動してきた水やメタンなどのガスによって液状化されて形成されたと考えられているが、地球の陸上では明確にポックマークと認識されている地形の報告例がない. メタンはポックマークの形成後もその場所でも出続けることもある. 火星にポックマークがあったとしても、似たような窪地状の地形である衝突クレーターが多数存在することもあり、その発見は非常に難しいであろう.

火星のメタンの消費過程

1 章で述べたように、火星の大気中のメタンの寿命は数か月程度と非常に短いことが観測から推定されている. 一般的なメタンの消費過程として光化学反応がある. 光化学反応に

はメタンを分解する反応として、高高度(火星では高度 80 km)で直接紫外線が分解する反応と、低高度で紫外線により水分子が分解して生成される O ラジカル・OH ラジカルがメタンを分解する反応が含まれる(Krasnopolsky et al., 2004 など)。しかしながら、火星の条件でこれら光化学反応によるメタンの寿命は数百年と見積もられており(Krasnopolsky et al., 2004)、現実に観測されたメタンの寿命の数百倍に相当する。したがって、大気化学反応以外の非常に強いメタンの消費過程が火星に存在している必要がある。

火星におけるメタンの消費過程として、過酸化水素が付着した土壌やダスト粒子による不均一化学反応(heterogeneous chemistry)が度々提案されている(例えば, Atreya et al., 2007; Geminale et al., 2008; Lefèvre and Forget, 2009; Mumma et al., 2009)。過酸化水素は、主に(1)光化学反応(Krasnopolsky, 1993 など)、(2)鉱物-水間の反応(Huguenin et al., 1979)、(3)ダストストーム(砂嵐)中でのダスト間の静電場による電気化学反応(Atreya et al., 2006)、からの生成が提唱されている。生成される過酸化水素の量は、大気中の飽和量を超える可能性があり、この場合、土壌や浮遊ダスト表面に凝結・吸着すると考えられている(Atreya et al., 2007)。過酸化水素は酸化力が強いので、過酸化水素が付着した土壌やダスト粒子は当然メタンの分解に効果的であると考えられてきた。しかしながら、過酸化水素を付着させた火星模擬土壌を使用した最近の実験からは、この過程によるメタンの分解速度は非常に遅く、観測されているメタンの急激な消費を説明することができないと報告されている(Gough et al., 2011)。ただし、鉱物上の反応により、過酸化水素が反応性のさらに高いラジカル(OH や HO₂)や超酸化化物(O₂⁻ など)に変換される可能性が提唱されているため(Atreya et al., 2011; Gough et al., 2011)、引き続きさらなる検証が必要となるであろう。

本稿では詳しく述べないが、メタンの他の消費過程として、メタンの土壌への物理吸着、極域での氷形成に伴うメタンの捕獲、生物の呼吸によるメタンの消費も考慮されているが、いずれも再現実験や数値計算では良い結果が得られておらず、火星のメタンの挙動を説明するに至っていない(Meslin et al., 2011; Trainer et al., 2010; Zahnle et al., 2011)。以上のように、火星のメタンの消費過程については未だ有力なプロセスが提示されておらず、火星のメタンに関わる最大の謎の一つとされている。

今後の観測

これまで述べたように、火星のメタンについては、その起源や関連する物理・化学過程の理解が不十分なばかりでなく、そもそも存在するかどうかですら明確とは言えない。したがって、今後の観測により、新たな制約を与えることが必須といえる。

火星大気を地上望遠鏡から観測する有望な方法として、スペクトル分解能が非常に高いレーザー・ヘテロダイン分光器を使用した望遠鏡観測が提唱されている(例えば, Nakagawa

et al., 2011; Passmore et al., 2009)。レーザー・ヘテロダイン分光器であれば、Mumma らの観測(Mumma et al., 2009)と同じ観測条件であっても、地球大気中のメタンの吸収と火星のメタンの吸収を分離して観測することが原理的に可能である。詳細なメタンの噴出孔の特定は難しいかもしれないが、Mumma らの観測同様、大体のメタンの分布とその時間変動を観測することは地上観測からでも可能であろう。

メタンを観測できる火星探査機も次々と計画されている。NASA により 2011 年 11 月 26 日に打ち上げられた着陸探査車ミッション、マーズ・サイエンス・ラボラトリー(Mars Science Laboratory; 以下では MSL)は、メタンの観測を最重要課題の一つとして挙げている。メタンを直接測定できる分析装置として四重極質量分析器、ガスクロマトグラフ、波長可変レーザー分光器(Tunable laser spectrometer; 以下 TLS)を搭載しており、火星のメタンの存在を初めて立証できると期待されている(Webster and Mahaffy, 2011)。MSL の着陸予定地である Gale クレーター(南緯 4.6 度、東経 137.2 度)は、メタンの濃集が見つかっている地域ではないが、火星大気の非常に早い拡散を考慮すると、分解される前に拡散してくるメタンを観測できる可能性は十分にある。これまで観測されているメタンが全球平均で 10 ppb 程度であるのに対して、TLS が ppt(1 兆分の 1)の精度で測定できることも MSL 観測に期待する理由の一つである。また一方で、TLS のスペクトル解像度が 0.0005 cm⁻¹ と非常に高いため(Webster and Mahaffy, 2011)、¹³CH₄ と ¹²CH₄ の吸収線(これら同位体の吸収線の波長は非常に近い)を分離して測定できることは非常に魅力的である。炭素の同位体比(¹³C/¹²C)はメタンの起源、特に生物起源かどうかを知るための手がかりとして重要である。地球の生物は軽い同位体 ¹²C を好んで取り込むため、生物起源のメタンや有機物は ¹²C に富むことが知られている。もし火星の生物が地球と似た同位体分別を起こすのならば、¹²C に富むメタンの存在は、火星に生物が生息している(もしくは生息していた)証拠である可能性がある(Webster and Mahaffy, 2011)。MSL の着陸予定地点 Gale クレーターには、水が流れ込んで形成する扇状地や水中で形成する粘土や硫酸塩が含まれる層状の地形が存在する(Kerr, 2011)。このような地形に堆積している可能性がある有機物は、生命の痕跡探索や前生物学的な化学進化を理解する上で重要な MSL のターゲットとされている。加えて、MSL による土壌や岩石の化学分析で、メタンの生成に関わる蛇紋岩やその生成に関わる環境条件の指標を得られる可能性だけでなく、メタンの消費に関与する物質(例えば、過酸化水素やその派生物)が検出されるかもしれない。一方、2016 年には、ESA 主導のミッション、火星周回探査機トレース・ガス・オービターが計画されている。まだミッションの選定の段階であるが、火星大気中のメタンを含む微量ガスやダスト・エアロゾルを、これまでの探査機観測より高解像度・高 S/N 比で観測することを目的としている(Zurek et al., 2011)。この観測により火星のメタンの時間変動・空間変動が高精度で測定され、本当にメタンが季節変動をするのか、メタンの噴出地域はどこなのかについての決

着がつくことが期待される。また、メタンと他の微量ガス・エアロゾル・ダストの挙動の相関を調べることで、メタンが関与する新しい物理・化学過程の発見に繋がるかもしれない。

日本の火星探査計画 MELOS (Mars Exploration with Lander-Orbiter Synergy) (佐藤ほか, 2009) でもメタンに関わる探査が検討されている(山岸ほか, 2012)。一つはメタン検出器としてレーザレーダが提案されている。レーザレーダは小型であるにも関わらず、遠隔でメタンが検出できる、原理的にはメタンの同位体が測定できるなど非常に実用的といえる。レーザレーダにより、火星メタンの起源、放出源や消費過程への制約が与えられるかもしれない。他方で、メタンをエネルギー源とする火星生命の発見を目指す生命探査計画が提案されている(山岸, 2012)。具体的には、メタン量の多い地域で蛍光顕微鏡によりメタン酸化菌を探索することが主な目的である。いずれもこれまでに無い日本独自の計画であり、火星科学の進展に大きく資することが期待される。

謝 辞

有益なコメントを、査読者山岸明彦博士、関根康人博士、ならびに、担当編集委員後藤和久博士にいただきました。ここに記して、改めて御礼申し上げます。本総説は千葉工業大学惑星探査研究センターの Contribution No. 18 になります。

文 献

- Atreya, S. K., Wong, A. S., Renno, N. O., Farrell, W. M., Delory, G. T., Sentman, D. D., Cummer, S. A., Marshall, J. R., Rafkin, S. C. R. and Catling, D., 2006, Oxidant enhancement in Martian dust devils and storms: implications for life and habitability. *Astrobiology*, **6**, 439–450.
- Atreya, S. K., Mahaffy, P. R. and Wong, A-S., 2007, Methane and related trace species on Mars: Origin, loss, implications for life, and habitability. *Planet. Space Sci.*, **55**, 358–369.
- Atreya, S. K., Witasse, O., Chevrier, V. F., Forget, F., Mahaffy, P. R., Price, P. B., Webster, C. R. and Zurek, R. W., 2011, Preface, Methane on Mars: Current observations, interpretation, and future plans. *Planet. Space Sci.*, **59**, 133–136.
- Bar-Nun, A. and Dimitrov, V., 2006, Methane on Mars: product of H₂O photolysis in the presence of CO. *Icarus*, **181**, 320–322.
- Boynton, W. V., Taylor, G. J., Evans, L. G., Reedy, R. C., Starr, R., Janes, D. M., Kerry, K. E., Drake, D. M., Kim, K. J., Williams, R. M. S., Crombie, M. K., Dohm, J. M., Baker, V., Metzger, A. E., Karunatillake, S., Keller, J. M., Newsom, H. E., Arnold, J. R., Brückner, J., Englert, P. A. J., Gasnault, O., Sprague, A. L., Mitrofanov, I., Squyres, S. W., Trombka, J. I., d'Uston, L., Wanke, H. and Hamara, D. K., 2007, Concentration of H, Si, Cl, K, Fe, and Th in the low- and mid-latitude regions of Mars. *Jour. Geophys. Res.*, **112**, E12S99, doi:10.1029/2007JE002887.
- Chassefière, E., 2009, Metastable methane clathrate particles as a source of methane to the Martian atmosphere. *Icarus*, **204**, 137–144.
- Chastain, B. K. and Chevrier, V., 2007, Methane clathrate hydrates as a potential source for martian atmospheric methane. *Planet. Space Sci.*, **55**, 1246–1256.
- Davis, P. A. and Tanaka, K. L., 1995, Curvilinear ridges in Isidis Planitia, Mars: The result of mud volcanism? *Lunar Planetary Science Conference XXVI*, 321–322.
- Dohm, J. M., Anderson, R. C., Barlow, N. G., Miyamoto, H., Davies, A. G., Jeffrey, T. G., Baker, V. R., Boynton, W. V., Keller, J., Kerry, K., Janes, D., Fairén, A. G., Shulze-Makuch, D., Glamoclija, M., Marinangeli, L., Ori, G. G., Strom, R. G., Williams, J., Ferris, J. C., Rodríguez, J. A. P., de Pable, M. A. and Karunatillake, S., 2008, Recent geological and hydrological activity on Mars: The Tharsis/Elysium corridor. *Planet. Space Sci.*, **56**, 985–1013.
- Ehlmann, B. N., Mustard, J. F., Murchie, S. L., Poulet, F., Bishop, J. L., Brown, A. J., Calvin, W. M., Clark, R. N., Marais, D., 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. and Murchie, S. L., 2010, Geologic setting of serpentine deposits on Mars. *Geophys. Res. Lett.*, **37**, L06201, doi:10.1029/2010GL042596.
- Encrenaz, T., 2001, The atmosphere of Mars as constrained by remote sensing. *Space Sci. Rev.*, **96**, 411–424.
- Etiopie, G., Caracusi, A., Favara, R., Italiano, F. and Baciuc, C., 2002, Methane emission from the mud volcanoes of Sicily (Italy). *Geophys. Res. Lett.*, **29**, 1215.
- Etiopie, G., Oehler, D. Z. and Allen, C. C., 2011, Methane emissions from Earth's degassing: Implications for Mars. *Planet. Space Sci.*, **59**, 182–195.
- Feldman, W. C., Prettyman, T. H., Maurice, S., Plaut, J. J., Bishop, D. L., Vaniman, D. T., Mellon, M. T., Metzger, A. E., Squyres, S. W., Karunatillake, S., Boynton, W. V., Elphic, R. C., Funsten, H. O., Lawrence, D. T. and Tokar, R. L., 2004, Global distribution of near-surface hydrogen on Mars. *Jour. Geophys. Res.*, **109**, E09006, doi:10.1029/2003JE00216.
- Fonti, S. and Marzo, G. A., 2010, Mapping the methane on Mars. *Astronomy & Astrophysics*, **512**, A51. doi:10.1051/0004-6361/200913178
- Formisano, V., Atreya, S., Encrenaz, T., Ignatiev, N. and Giuranna, M., 2004, Detection of methane in the atmosphere of Mars. *Science*, **306**, 1758–1761.
- Fousoukos, D. I. and Seyfried, W. E., 2004, Hydrocarbons in hydrothermal vent fluids: The role of chromium-bearing catalysts. *Science*, **304**, 1002–1005.
- Geminal, A., Formisano, V. and Giuranna, M., 2008, Methane in Martian atmosphere: Average spatial, diurnal, and seasonal behavior. *Planet. Space Sci.*, **56**, 1194–1203.
- Geminale, A., Formisano, V. and Sindoni, G., 2011, Mapping methane in Martian atmosphere with PFS-MEX data. *Planet. Space Sci.*, **59**, 137–158.
- Gough, R. V., Turley, J. J., Gerrell, G. R., Cordova, K. E., Wood, W. E., Dehaan, D. O., McKay, C. P., Toon, O. B. and Tolbert, M. A., 2011, Can rapid loss and high variability of Martian methane be explained by surface H₂O₂? *Planet. Space Sci.*, **59**, 238–246.
- Greeley, R. and Guest, J. E., 1987, *U. S. Geol. Surv. Map I-1802-B*.
- Hamilton, V. E. and Christensen, P. R., 2005, Evidence for extensive, olivine-rich bedrock on Mars. *Mars. Geol.*, **33**, 433–436.
- Hovland, M. J. and Judd, A. G., 1988, *Seabed Pockmarks and Seepages, Impact on Geology, Biology, and the Marine Environment*. Graham and Trotman Ltd. London, 293p.
- Huguenin, R. L., Miller, K. J. and Harwood, W. S., 1979, Frost-weathering on Mars: experimental evidence for peroxide formation. *Jour. Mol. Evol.*, **14**, 103–132.
- Ishimaru, R., Komatsu, G. and Matsui, T., 2010, Solar insolation-induced destabilization of subsurface clathrates on Mars: Implications for the martian atmospheric methane. *41st Lunar and Planetary Science conference XXXXI*, #1580.
- Jones, L. C., Rosenbauer, R., Goldsmith, J. I. and Oze, C.,

- 2010, Carbonate control of H_2 and CH_4 production in serpentinization systems at elevated P-Ts. *Geophys. Res. Lett.*, **37**, L14306, doi:10.1029/2010GL043769.
- Kerr, R. A., 2011, How an alluring geologic enigma won the Mars rover sweepstakes. *Science*, **333**, 508–509.
- 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 carbon dioxide in geological processes on Mars. *Planet. Space Sci.*, **59**, 169–181.
- Krasnopolsky, V. A., 1993, Photochemistry of the Martian atmosphere (mean conditions). *Icarus*, **101**, 313–332.
- Krasnopolsky, V., Maillard, J. P. and Owen, T. C., 2004, Detection of methane in the martian atmosphere: evidence for life? *Icarus*, **172**, 537–547.
- Lefèvre, F. and Forget, F., 2009, Observed variations of methane on Mars unexplained by known atmospheric chemistry and physics. *Nature*, **460**, 720–723.
- Max, M. D. and Clifford, S. M., 2000, The state, potential distribution, and biological implications of methane in the Martian crust. *Jour. Geophys. Res.*, **105**, 4165–4171.
- Mazzini, A., 2009, Mud volcanism: Processes and implications. *Mar. Petrol. Geol.*, **26**, 1677–1860.
- McCormell, T. and Seawald, J. S., 2003, Experimental constraints on the hydrothermal reactivity of organic acids and acid anions: I. Formic acid and formate. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **67**, 3625–3644.
- Mellon, M. T. and Phillips, R. G., 2001, Recent gullies on Mars and the source of liquid water. *Jour. Geophys. Res.*, **106**, 23165–23180.
- Meslin, P. Y., Gough, R., Lefèvre, F. and Forget, F., 2011, Little variability of methane on Mars induced by adsorption in the regolith. *Planet. Space Sci.*, **59**, 247–258.
- 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., Murchie, S. L., Pelkey, S. M., Ehlmann, B. L., Milliken, R. E., Grant, J. A., Bibring, J. P., Poulet, F., Bishop, J., Dobrea, E. N., Roach, L., Seelos, F., Arvidson, R. E., Wiseman, S., Green, R., Hash, C., Humm, D., Malaret, E., McGovern, J. A., Seelos, K., Clancy, T., Clark, R., Marais, D. D., Izenberg, N., Knudson, A., Langevin, Y., Martin, T., McGuire, P., Morris, R., Robinson, M., Roush, T., Smith, M., Swayze, G., Taylor, H., Titus, T. and Wolff, M., 2008, Hydrated silicate minerals on Mars observed by the Mars Reconnaissance Orbiter CRISM instrument. *Nature*, **454**, 305–309.
- Nakagawa, H., Kasaba, Y., Maezawa, H., Hashimoto, A., Sagawa, H., Murata, I., Okano, S., Aoki, S., Moribe, N. and Mizuno, A., 2009, Search of SO_2 in the Martian atmosphere by ground-based submillimeter observation. *Planet. Space Sci.*, **57**, 2123–2127.
- Nakagawa, H., Aoki, S., Kasaba, Y. and Okano, S., 2011, Heterodyne infrared spectroscopy for ultra high-spectral resolution observations of planetary atmosphere. *Japan Geosci. Union Meet., Abstr.*, 2011. PCG033-P09.
- Oehler, D. Z. and Allen, C. C., 2010, Evidence for pervasive mud volcanism in Acidalia Planitia, Mars. *Icarus*, **208**, 636–657.
- Ori, G. G., Marinangeli, L. and Komatsu, G., 2000, Gas (methane?)-related features on the surface of Mars and subsurface reservoirs. *Lunar Planetary Science Conference XXXI*, #1550.
- Oze, C. and Sharma, M., 2005, Have olivine, will gas: serpentinization and the abiogenic production of methane on Mars. *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L10203, doi:10.1029/2005GL022691.
- Oze, C. and Sharma, M., 2010, Serpentinization and the inorganic synthesis of H_2 in planetary surfaces. *Icarus*, **186**, 557–561.
- Passmore, R. L., Bowles, N. E., Weidmann, D., and Smith, K. M., 2009, Using infrared laser heterodyne radiometry to search for methane on Mars. *Workshop on Methane on Mars*, Session8, poster13.
- Poulet, F., Bibring, J.-P., Mustard, J. F., Gendrin, A., Mangold, N., Langevin, Y., Arvidson, R. E., Gondet, B., C. Gomez, and the Omega Team, 2005, Phyllosilicates on Mars and implications for early martian climate. *Nature*, **438**, 623–627.
- 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 (Sato, T., Kubota, T., Miyamoto, H., Okada, T., Matsuo, A., Imamura, T., Ogawa, J., Kawaguchi, J. and MELOS WG.), 2009, MELOS 複合探査の概要と科学目標「火星はなぜ赤いのか?」. 日本惑星科学会誌(遊星人) (*Planetary People*), **18**, 66–68.
- Skinner, J. A., Jr. and Tanaka, K. L., 2007, Evidence for and implications of sedimentary diapirism in the southern Utopia highland-lowland boundary plain. Mars. *Icarus*, **186**, 41–59.
- Smith, P. H., Tamppari, L. K., Arvidson, R. E., Bass, D., Blaney, D., Boynton, W. V., Carswell, A., Catling, D. C., Clark, B. C., Duck, T., Dejong, E., Fisher, D., Goetz, W., Gunnlaugsson, H. P., Hecht, M. H., Hipkin, V., Hoffman, J., Hviid, S. F., Keller, H. U., Kounaves, S. P., Lange, C. F., Lemmon, M. T., Madsen, M. B., Markiewicz, W. J., Marshall, J., McKay, C. P., Mellon, M. T., Ming, D. W., Morris, R. V., Pike, W. T., Renno, N., Stauffer, U., Stoker, C., Taylor, P., Whiteway, J. A. and Zent, A. P., 2009, H_2O at the Phoenix landing site. *Science*, **325**, 58–61.
- Trainer, M. G., Tolbert, M. A., McKay, C. P. and Toon, O. B., 2010, Limits on the trapping of atmospheric CH_4 in martian polar ice analogs. *Icarus*, **208**, 192–197.
- Walker, J. C. G., 1977, *Evolution of the Atmosphere*. Macmillan, Pub. Co. Old Tappan, 318p.
- Webster, C. R. and Mahaffy, P. R., 2011, Determining the local abundance of Martian methane and its $^{13}C/^{12}C$ and D/H isotopic ratios for comparison with related gas and soil analysis on the 2011 Mars Science Laboratory (MSL) mission. *Planet. Space Sci.*, **59**, 271–283.
- 山岸明彦 (Yamagishi, A.), 2012, 火星における欧米の生命探査計画と MELOS 計画での生命探査. 地質雑 (*Jour. Geol. Soc. Japan*), **118**, 675–682 (本特集号).
- 山岸明彦・吉村義隆・長沼 毅・宮川厚夫・出村裕英・豊田岐聡・本多元・小林憲正・三田 肇・大野宗祐・石丸 亮・小林喬郎・戸野倉賢一・石上玄也・佐々木 晶・宮本英昭 (Yamagishi, A., Yoshimura, Y., Naganuma, T., Miyakawa, A., Demura, H., Toyoda, M., Honda, H., Kobayashi, K., Mita, H., Ohno, S., Ishimaru, R., Kobayashi, T., Tonokura, K., Ishigami, G., Sasaki, S. and Miyamoto, H.), 火星生命探査機器群提案—細胞, アミノ酸, メタン検出を目的とした—. 日本惑星科学会誌(遊星人) (*Planetary People*), **21**, 276–282.
- Zahnle, K., Freedman, R. S. and Catling, D. C., 2011, Is there methane on Mars? *Icarus*, **212**, 493–503.
- Zurek, R. W., Chicarro, A., Allen, M. A., Bertaux, J.-L., Clancy, R. T., Daerden, F., Formisano, V., Barvin, J. B., Neukum, G. and Smith, M. D., 2011, Assessment of a 2016 mission concept: The search for trace gases in the atmosphere of Mars. *Planet. Space Sci.*, **59**, 284–291.

(要 旨)

石丸 亮・小松吾郎・松井孝典, 2012, 火星のメタン. 地質雑, 118, 664–674. (Ishimaru I., R., Komatsu, G. and Matsui T., 2012, Methane on Mars. *Jour. Geol. Soc. Japan*, 118, 664–674.)

火星大気中にメタンが存在していることが4つのグループの火星探査機観測及び地上望遠鏡観測から報告されている。いずれの観測も固有の問題を抱えているが、異なる観測機器・条件であっても調和的な結果(季節変動, 全球平均量など)が得られている。このことはメタンの存在が確からしいことを示唆している。火星のメタンの起源は、地下での非生物の地質作用, 生物活動, または両者の組み合わせが有力であると考えられているが、現状では十分な証拠が得られておらず未だ火星科学最大の謎の一つとされている。一方、メタンが大気に放出される際には、地球同様、泥火山のような特徴的な地形を伴う可能性がある。そのような地形は火星上で見つかっているが、メタンとの関連は明らかにされていない。本稿では、火星のメタンの観測やこれまで提唱されているメタンの生成・放出・消費過程を紹介するとともに、それぞれに残された課題と今後の展望について解説する。