火星の海・湖・アウトフローチャネルの比較惑星地質学

The comparative planetary geology of oceans, lakes and outflow channels on Mars

Abstract

Recently obtained high-resolution satellite imagery has enabled the detailed study of Martian geology and sedimentology. The identification of hydrological features, such as ocean, lakes, valley networks, and outflow channels, on the ancient surface of Mars is critically important to assess the history of water on the planet and to improve our understanding of the Martian climate record. Increasing evidence supports the presence of Noachian age lakes and valley networks, and Hesperian age oceans and outflow channels, although whether these features were formed by liquid water is still controversial. Clay minerals, such as phyllosilicates, have been identified in Noachian sediments within purported paleo-crater lakes, consistent with a fluvial and/or lacustrine origin. These rocks have been targeted by US and European space agencies as possible landing sites for future rover missions, with an outcrop in a hypothesized paleo-crater lake basin selected as the landing site for the next National Aeronautics and Space Administration (NASA) expedition to Mars. Increasing the research contribution of terrestrial geologists during future Martian exploration is key, because determining terrestrial analogues for features on Mars is critically important for the interpretation of Martian geological data.

Keywords: Mars, Ocean, Lake, outflow channel, Geology

後藤和久^{1†} 小松吾郎^{2,1}

Kazuhisa Goto^{1†} and Goro Komatsu^{2,1}

2011年9月15日受理.

2012年1月31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 42, Pescara 65127, Italy

[†] 現所属: 東北大学災害科学国際研究所

Present address; International Research Institute of Disaster Science, Tohoku University, Aoba 6-6-40-102, Aoba-ku, Sendai 980-8579, Japan

Corresponding author; K. Goto,
goto@irides.tohoku.ac.jp

はじめに

火星に対する人々の関心は、火星の成り立ち、特に火星に生命が存在したのかという点にあるであろう。地球外での生命の痕跡を探ろうとした場合、最も近く、そして見つかる可能性が高い惑星ともいえる。そして、アメリカ航空宇宙局(NASA)や欧州宇宙機関(ESA)などがこれまで打ち上げてきた衛星や着陸機、ローバー(探査車)などでの探査も、最終的な科学目標はかつて火星に生命が存在したのか、あるいは場合によっては現在もどこかに存在しているのかということに焦点が絞られている。

生命が誕生するのに不可欠な要素はいくつか考えられるが、その中でも最も重要なのは、水が存在するか否かである。地球上で、初期生命の誕生は海の中であったという考えが大勢を占めている。今日では非常に乾燥している火星についても、多くの研究者が過去に存在した水の痕跡を求めて研究を進めてきたといっても過言ではない。実際に、NASAの探査計画は、これまでは“follow the water”をキャッチフレーズに掲げてきた(例えば、Hubbard et al., 2002; 小松, 2012)。水の痕跡を追えば、その先に生命の痕跡が見つかるはずだという考えに基づいている。例えば最近では、オポチュニティやスピリットなどのローバーが火星表面の露頭で観察できる岩石や層序を分析し、硫酸塩鉱物や酸化鉄、

あるいはシリカなどの存在やそれらの産状から、かつて火星には液体の水が存在したという結論に至った(例えば、Squyres et al., 2009)。このように、「水の痕跡を追う」従来の探査は、一定の成果を挙げたといえる。そして、2011年11月にNASAが打ち上げ、2012年8月に着陸した Mars Science Laboratory (MSL) は、水がかつて火星に存在したことが確からしいと考えられるようになって最初に行われる探査であり、水の痕跡を追ってきた従来の探査から一歩進んで、火星はかつて生命が存在可能な環境だったのかを探るといふ探査目標が掲げられている(Grotzinger, 2009)。

火星にかつて生命が存在したのか、または火星は生命が存在可能な環境だったのかを探るといふことは、地球上で地層を調べ、地球史を解明する作業と同等の手順といえる。特に、生命の痕跡を地層中から見つけようとするならば、地球上の経験からいえば、堆積岩を調べることになる。地球上では、堆積岩は一般に海や湖、河口域など、水の影響を受ける場所で形成される場合が多く、したがって生命の痕跡を見つけることができる可能性が高いといえるからである。

火星においても、確実性の高い堆積岩はいたるところで報告されている(例えば、Malin and Edgett, 2000)。そして、2007年以降に利用可能となった High Resolution Imaging Science Experiment (HiRISE) のような、25 cm という超高解像度画像を持ってすれば、詳細な地層解析まで行うこと

ができる。実際に、地層の走向・傾斜や地層対比まで加えた、火星の詳細な地質図作りも行われている(例えば, Tanaka et al., 2003, 2008; Stack et al., 2010)。さらに, Compact Reconnaissance Imaging Spectrometer for Mars (CRISM) のような赤外線分光計を用いれば、火星表面の鉱物組成を知ることができる(Murchie et al., 2007)。なお、このような火星探査史や生命探索も含めた将来探査計画については、小松(2012)、並木ほか(2012)や山岸(2012)が、どのような衛星画像が得られているのかについては、後藤ほか(2012)がまとめているので、詳細は割愛する。

火星の堆積岩の大部分は、ダストが降り積もって形成された風成層や、爆発的噴火由来の火山灰層、衝突に伴うイジェクタ層だと考えられる(例えば, Milliken et al., 2010)。例えば、オポチュニティが探査したビクトリア・クレーターの壁面の露頭では、みごとな斜交層理が発達した砂丘堆積物が観察できる(Squyres et al., 2009)。一方、水(もしくは他の液体)の作用によるとされる堆積岩も、クレータ湖(例えば, Fassett and Head, 2008a)やアウトフローチャネル(Baker and Milton, 1974; Komatsu and Baker, 1997)、巨大峡谷内(Chapman and Tanaka, 2002)、かつて海が存在した可能性のある北部低地(Parker et al., 1987; Baker et al., 1991)などで報告されている。水が長期間存在していたとすると、生命が持続的に存在可能だったかもしれない、したがって水の作用下で堆積した堆積岩中に有機物やバイオマーカー、地球化学的シグナルとして生命の痕跡が保存されている可能性がある(Komatsu and Ori, 2000)。そのため、こうした堆積岩はNASAやESAの探査の重点対象と見なされており、盛んに研究が行われている(Grotzinger, 2009; Grant et al., 2010)。

本稿では、欧米の火星探査計画の目的や探査地選定手法を理解する上で重要な、火星の堆積作用と水についての最新の研究を解説する。ただし、火星の水に関連した研究は多岐に渡り、そのすべてを本総説で取り扱うことは難しい。特に、過去に水が存在できたかやその存在量、現在の水の状態などについては、大気進化にも関連する問題でもある。そこで本稿では、水の作用で堆積したと考えられる堆積岩や地形学的研究の中でも、欧米の探査における重点研究対象と見なされている、海洋、バレーネットワーク(valley networks)、アウトフローチャネル、古クレータ湖の起源や成り立ちに焦点を絞り概説する。

火星の地質史の概観

火星の地質時代は、ノアキス紀(45.7~37億年, Noachian era)、ヘスperia紀(37~33~29億年, Hesperian era)、アマゾニア紀(33~29億年~現在, Amazonian era)の3つに区分される(Fig. 1, 例えば, Taylor and McLennan, 2009)。ただし、ここでの年代値は、クレータ年代学(惑星表面のクレータ密度からその場所の形成年代を調べる学問, Hartmann and Neukum, 2001; Barlow, 2010)に基づくものなので、地球上で岩石の絶対年代を求めたものとは精度が大きく異なる点に留意が必要である。火星の地形は、大きく

は北部の低地と南部の高地に区分でき、北部のほうがより形成年代が新しい(衝突クレータが少ない)という特徴がある(Fig. 2)。

ノアキス紀初期から中期(~38億年前まで)は、マグマオーシャンの形成や隕石重撃期などが主要なイベントである(Carr and Head, 2010a, b)。隕石重撃期終了後のノアキス紀後期の特徴を端的にまとめると、クレータやバレーネットワークの生成率および岩石の侵食率が他の時代に比べて高いこと、巨大火山であるタルシス(Tharsis)の形成の大部分はこの時期に起きていること、そしてフィロケイ酸塩鉱物のような、玄武岩(火星の大部分を占める)の風化作用によりできる粘土鉱物の堆積が顕著なことである(例えば, Bibring et al., 2006; Carr and Head, 2010a)。ヘスperia紀の特徴は、ノアキス紀から続く火山活動と大規模な溶岩平原の形成、バレーネットワークの生成が低下する一方で、峡谷や巨大なアウトフローチャネルの形成が顕著になり、海洋が一時期存在した可能性が考えられること、侵食率が非常に小さくなること、フィロケイ酸塩鉱物のような粘土鉱物の割合が減少し、硫酸塩鉱物の堆積が顕著になることが挙げられる(例えば, Carr and Head, 2010b)。アマゾニア紀は、それ以前の時代と比べて変化の少ない時代といえる。例えば、地形変化や隕石衝突、テクトニクス、火山活動のいずれも規模が小さく、風化作用も極めて小さい(Golombek et al., 2006)。

火星においては、地球との岩石の侵食率の違いも顕著で、いずれの時代でも地球上での侵食率に比べて数桁低い(Golombek and Bridges, 2000; Golombek et al., 2006; Carr and Head, 2010b)。テクトニクスがないこともあり、数十億年前の地形・地層とはいえ地球上とは比較にならないほど良い保存状態で残っている。

Bibring et al. (2006)は、マース・エクスプレスに搭載されたObservatoire pour la Minéralogie, l'Eau, les Glaces et l'Activité(OMEGA)という機器を用いて調べた全球の鉱物分布に基づき、古い時代からそれぞれフィロケイ酸塩鉱物(非酸性水による変質作用)、硫酸塩鉱物(酸性水による変質作用)、無水酸化鉄(水が作用しない環境)が卓越する3つの時代に区分している(Fig. 1)。そして、ノアキス紀の終わりに、それまでの湿潤でアルカリ性の環境から、酸性の環境へと変わるイベントがあったと推定している(Poulet et al., 2005; Bibring et al., 2006)。この変化は、大規模な火成活動に伴う揮発性元素や硫黄の放出に伴うものと考えられる(Carr and Head, 2010a)。そして、火星での生命の存在可能性は、フィロケイ酸塩鉱物が卓越している時代が最も高いと考えられることから(Bibring et al., 2006; Chevrier et al., 2007; Milliken et al., 2007; Ehlmann et al., 2008a; Mustard et al., 2008)、現在の火星探査計画においても、フィロケイ酸塩鉱物が堆積している場所が重点探査地域として多数挙げられている(例えば, Grant et al., 2010)。

このように、少なくともノアキス紀末の一時期においては、温暖かつ水が豊富に存在した環境にあったことを示す証拠が多々存在する(例えば, Warner et al., 2010)。ただし、二酸化炭素による温室効果であれば、炭酸塩岩が大量に堆積

Fig. 1. Comparison between the geological histories of Earth and Mars, based on Bibring et al. (2006) and Carr and Head (2010b).

していることが期待されるが、炭酸塩岩が存在した痕跡は報告例が増えてきているもののまだ乏しい(Ehlmann et al., 2008b; Michalski and Niles, 2010; Morris et al., 2010). そのため、二酸化炭素ではなく、二酸化硫黄やメタンのような温室効果ガスが大気中に存在し、温室効果をもたらしていた可能性も示唆されている(Haveli et al., 2007; Carr and Head, 2010a).

バレーネットワークとアウトフローチャネル

ノアキス紀後期では、天体衝突や火山活動による局所的な熱水活動も含めた環境条件のため、比較的豊富な量の水が広範囲に存在した可能性が考えられ、流水の作用により形成されたと考えられるバレーネットワークもこの時期に発達している(Carr, 1996; Craddock and Maxwell, 1993; Irwin and Howard, 2002; Fassett and Head, 2008b; Morgan and Head, 2009; Carr and Head, 2010a). バレーネットワークの下流端は、衝突クレーターのような低地に繋がっており、そこにはデルタや扇状地が存在する(後藤・小松, 2012). エベルスヴァルデ・クレーター(Eberswalde crater)やホールデン・クレーター(Holden crater), ニリ・フォッサ(Nili Fossae) (Fig. 2)などがその代表例で、一部はMSLの最終着陸候補地点にもなるなど、水と生命の痕跡を見出すための重点対象と見なされている(後述を参照, 例えば, Fassett and Head, 2005).

バレーネットワークの形成は、ヘスperia紀初期に低下する(Fassett and Head, 2008b). しかも、比較的豊富な水の

作用により形成されたと考えられるノアキス紀のバレーネットワークに対し、ヘスperia紀のバレーネットワークは、火山活動に伴う局所的な地熱効果により、火山頂部に堆積していた雪が溶け出してできたものではないかと考えられる(Fassett and Head, 2008b).

アウトフローチャネルとは、巨大な洪水でできたと考えている地形群である(Baker and Milton, 1974; Baker, 1978; Komatsu and Baker, 1997; Ivanov and Head, 2002; Burr et al., 2002; Pacifici et al., 2009). 地球上においても、最終氷期末期に北米のコルディレラ氷床の南縁で巨大洪水が発生し、チャネルド・スカブランドと呼ばれるアウトフローチャネルに類似した地形を形成したことが知られている(Baker, 2009). ノアキス紀においては、マウルス・ヴァリス(Mawrth Vallis)などの一部の例を除いて、大規模なアウトフローチャネルが存在しないのが特徴である(Carr and Head, 2010b). 大規模なアウトフローチャネルの多くはヘスperia紀に形成されたと考えられ(Tanaka et al., 2005), 4章で述べるように海が形成されたと考えられる時期と一致している. アウトフローチャネルは、最大で全長1000 km以上、全幅数百km以上、深さ1 km以上にもおよび、洪水の規模がとてつもなく大きかったことを示唆している(Komatsu and Baker, 2007). クリュセ平原周辺部に多く存在するアウトフローチャネルの上部の一部は巨大なマリネリス溪谷に接続していて、それぞれの地形の形成になんらかの相互関連があるのかもしれない(Fig. 3a). しかしながら、アウトフローチャネルには、氷河や土石流などの流体によ

Fig. 2. (a) Map showing outflow channel sources (Clifford and Parker, 2001), targeted marine craters (Ormö et al., 2004), previous and the final four MSL candidate landing sites (Grant et al., 2010), paleo-crater lakes (Fassett and Head, 2008a), delta deposits (Di Achille and Hynek, 2010), and paleo-shorelines (Ormö et al., 2004) overlain on MOLA topography; line A-A' denotes the position of the cross-section shown in (b). (b) Cross-section showing MOLA topographic variations between points A and A' in part (a).

て形成された (Lucchitta, 1982; Tanaka, 1999) とか、あるいは溶岩チャンネルだった (例えば, Sakimoto and Zuber, 1998; Leverington, 2004; Basilevskaya et al., 2009), さらに液体と気体の CO_2 によって潤滑支持された土石流によってできた (Hoffman, 2000) など、他の仮説も一部存在する。

アウトフローチャネルの上流端は、地面が崩壊してできた地形から始まっている例が多く、降水により溜まった水が流れ出したのではなく、おそらく地下に貯蔵されていた大量の水が短期間に放出されたものと考えられる (Carr and Head, 2010b)。アウトフローチャネルを流れた水の最大流量は、チャンネルド・スキャブランドなどの地球上の巨大アウトフローチャネルとの比較から、 $10^6 \sim 10^9 \text{ m}^3/\text{s}$ 程度と見積もられており (例えば, Baker, 1982; Robinson and Tanaka, 1990; Komatsu and Baker, 1997; Burr et al., 2002; Wilson et al., 2004; Ghatan et al., 2006; Leask et al., 2007), 非常に大規模な流れであったことが示唆されている。アウトフローチャネルを形成したとされる大洪水は、大量の堆積物とともに北部平原に流れ込んで、そこに一時的に海を形成したり (Baker et al., 1991, 2000), 同時に大気中に放出された水や炭酸ガスなどが火星の気候変動を引き起こした可能性 (Baker et al., 1991, 2000) もあり、火星の水循環を考える上で重要な地形とされている。アウトフローチャネルから流出した堆積物は、これまでの火星探査での興味の対象の一つ

とされており、Viking 1 Lander や Mars Pathfinder Lander の着陸地点ともなっている (Fig. 3a)。

海 洋

1. 海岸線地形

火星の北部低地は、全球の約 3 分の 1 を占めている (Fig. 2)。北部低地にかつて海が存在したのかどうかについては、1980 年代から現在に至るまで論争が続いている。1980 年代から 1990 年台半ばごろまでは、当時利用可能であったバイキング画像を用いて、地形学的に議論が行われていた (例えば, Parker et al., 1987, 1989, 1993; Baker et al., 1991; Scott et al., 1995)。特に議論の中心となってきたのが、北部低地の一部を区切る明瞭な地形学的境界が存在する点である。この境界線は、火砕流や溶岩流の流れ下った極限の境界を示しているという考えもあるが (例えば, Tanaka et al., 1992), 一方で同じ境界は海岸線地形であると解釈されてきた (例えば, Parker et al., 1989)。

火星に海が存在した可能性を指摘した論文の多くはヘスperia 紀ごろを対象としており (例えば, Parker et al., 1989; Head et al., 1999), 同時期に起きた大規模洪水とアウトフローチャネルの形成に関連づけて議論されている (例えば, Baker et al., 2000)。火星に海が存在したということは、水が大量かつ長期に渡り持続できるだけの温暖な環境があったものと推定できる。Baker et al. (2000) は、散発的な火成活

Fig. 3. (a) MOLA topography showing Valles Marineris and circum-Chryse outflow channels. (b) Depositional fan at Jezero Crater (Image: NASA/JPL/University of Arizona: PSP_002387_1985). (c) HiRISE image of the Vastitas Borealis Formation (VBF; Image: NASA/JPL/University of Arizona: TRA_000846_2475), showing many boulders (approximately 1 m in diameter) deposited on the surface of the VBF (McEwen et al., 2007).

動に伴う大規模洪水と一時的な温暖化によって海洋(Oceanus Borealis)が形成されたとする、MEGAOUTFLO 仮説(Mars Episodic Glacial Atmospheric Oceanic Upwelling by Thermotectonic Outburst)を提唱している。

Parker et al.(1989)は、海岸線と思われる2つの線状地形を見出し、それぞれコンタクト1、2(Contact 1, 2)と名づけた。これらは、ほぼ全球を取り巻くように一周しているという特徴がある。コンタクト1の平均高度は-2.54~-2.55 km(Clifford and Parker, 2001; Di Achille and Hynes, 2010)で、コンタクト2の平均高度は-3.792 km(Carr and Head, 2003)と推定されているが、研究者により推定値に幅がある点に留意する必要がある。クレーター年代学に基づき、コンタクト1はヘスペリア紀に形成され、コンタクト2はヘスペリア紀かそれより新しい時代に形成されたと推定されている(Head et al., 1999)。その後、Clifford and Parker(2001)は、これらの名前を“Arabia shoreline(= コンタクト1)”および“Deuteronilus shoreline(= コンタクト2)”と変更している。ただし、“shoreline”は海岸線であるという解釈を含むため、Parker et al.(2010)では、より一般化して“Arabia level”, “Deuteronilus level”と呼ぶことを提唱している。本稿では、火星研究者の間で一般的に定着しているコンタクト1、2を採用することとする。また、それ以外にも、Meridiani shoreline と呼ばれる標高-1.5 kmの海岸線地形も提唱されており(Fig. 2, Edgett and Parker, 1997)、さらにコンタクト1とMeridiani shorelineを組み合わせた海岸線も提唱されている(Fairén

et al., 2003)。Ormö et al.(2004)によれば、現在の地形でコンタクト1-Meridiani shorelineの標高まで水で満たされたとすると、平均水深は1.99 km(最大水深3.75 km)、コンタクト2の標高まで水で満たされたとすると、平均水深は0.54 km(最大水深1.46 km)と推定される。

一方、海洋の存在に否定的な意見もある。その多くは、海岸線とされてきた場所で Mars Orbiter Camera(MOC)や Thermal Emission Imaging System(THEMIS)などの10-20 m程度の解像度をもつ画像で観察すると、海岸線特有の地形が見られないというものである(Malin and Edgett, 1999; Ghatan and Zimbelman, 2006)。それに対しParker et al.(2010)も、HiRISEなどのより高解像度な衛星画像を用いて解析を行い、地球上で見られる古湖岸線地形(とくに潮汐作用の影響が少ない地球の古湖岸線が火星の海岸線に類似していると考えられている)と類似した地形がコンタクト1、2それぞれに見られることを報告している(Fig. 4a)。海岸線をめぐる議論がなかなか決着しない背景には、高解像度衛星画像の撮影範囲が限られていることから、研究対象とする地域がどうしても限られ、局所的な議論の域を出ないことに加え、海岸地形は他の地形とは異なり変化が小さく、軌道上からは識別が難しいことが挙げられる。さらに、地球のように月サイズの大きな衛星を火星は持たないため潮汐作用が小さく、また嵐のように海岸線地形に大きな影響を及ぼす現象の規模も小さかったと考えられるため、海岸線地形がはっきり認識できないという可能性も考えられる(Dohm et al., 2009; Parker et al., 2010)。さらに、火星の

海岸線を示す痕跡が地球と同様であるとは限らない(Dohm et al., 2009) ことも考えると、局所的な画像解析に基づく海岸線地形の議論だけでは海洋の存在を確定するのは難しいと考えられる。

一方、海岸線地形は等ポテンシャル面に分布するはずであるから、平面的な連続性は重要な証拠になると考えられる。Head et al.(1998, 1999)は、Mars Orbiter Laser Altimeter(MOLA)の地形データをもとに海岸線地形の存在を評価し、コンタクト2については、数箇所の例外を除いて等ポテンシャル面と良く一致することから、海岸線地形であることを支持した。MOLAのデータを使って明らかになったこととして、北部低地の地形が極めて平坦であることが挙げられる(Fig. 2)。さらに、Head et al.(1999)は6つの主要なアウトフローチャネルについて調べ、これらの末端部の平均標高は、コンタクト2の平均標高と60 m程度しか違っていないことから、コンタクト2は、アウトフローチャネルと同時期(ヘスペリア紀)に形成されたものと結論した。それに対して、コンタクト1については、MOLAデータの解析によれば場所によって1キロメートルを超える標高値のばらつきが認められたため、海岸線地形ではないと結論づけた。一方、Perron et al.(2007)は、コンタクト1, 2の海岸線地形の標高のばらつきは長周期変動をしており、地軸の変化によって説明できるとし、コンタクト1, 2は海岸線である可能性を支持している。

2. 海洋の存在を示すその他の証拠

近年では、Gamma Ray Spectrometer(GRS)により得られた元素分析の結果、カリウム(K)やトリウム(Th)などの水溶性の高い元素が、推定されている海岸線より標高が低い場所に相対的に多く含まれていることから、かつて海が存在した可能性が高いという報告が出されている(Dohm et al., 2009)。また、Di Achille and Hynek(2010)は、デルタ地形(Fig. 3b, いずれもノアキス紀後期からヘスペリア紀に形成されている)のフロント部の高度の多くが、-2540 m (± 177 m)付近に集中しており、この高度がコンタクト1の標高と良く一致することから、コンタクト1が海岸線である可能性を支持した。

では、海洋底に相当する北部低地には何が堆積しているのだろうか。北部低地のうち、高度の低い部分はVastitas Borealis Formation(VBF)と呼ばれ、海洋底に堆積した細粒堆積物(Kreslavsky and Head, 2002)、またはアウトフローチャネルから運搬されてきた堆積物が凍ったもの(Carr and Head, 2003)などと解釈されてきた。その総面積は $1-2 \times 10^7 \text{ km}^2$ 、最小体積は $3 \times 10^6 \text{ km}^3$ とも見積もられており(Carr and Head, 2010b)、VBFの境界はコンタクト2とおおむね一致する(Clifford and Parker, 2001)。ところが、HiRISE画像を用いた解析の結果、VBFは直径2 m以下の巨礫のサイズの堆積物で埋め尽くされていることがわかってきた(McEwen et al., 2007)。巨礫の多くは衝突クレーター周辺に堆積しており、これらの大部分は衝突イジェクタだと考えられるが、McEwen et al.(2007)の解析によれば、クレーター周辺以外の場所にも比較的均質に巨礫が分

布していることから(Fig. 3c)、周氷河作用などにより巨礫を含む堆積物の再堆積が起きた可能性が示唆されている。McEwen et al.(2007)は、細粒堆積物が見出せなかったことと巨礫が大量に存在していることから、VBFは海洋が存在したことの証拠にはならないとしている。

3. 海洋研究の将来展望

上述のように、認定が難しい海岸線地形や、VBFの成因に対しては反論が残っているものの、これらは海洋の存在自体を否定するほど強力な反論とは言えない。また、巨礫の存在やそれらが再堆積していること自体は、火星の海洋の存在を必ずしも否定することにはならないし、25 cmの解像度では細粒堆積物(砂や泥など)が存在するかどうかを判別することはできない。巨礫が再堆積している理由についても、まだその詳細は不明であり、より深く考察する必要があるであろう。さらに、炭酸塩岩などが北部低地で検出されていないことも、反論の一つとして挙げられる(例えば、Hoffman, 2000)。しかし、炭酸塩岩が検出されないのは、ダストや堆積物で表面が覆われているだけかもしれないし、地球上でも炭酸塩岩が分布するのは低緯度域に限られているから、高緯度に位置する火星の海洋底に炭酸塩岩が堆積していなければいけないわけではない。また火星の海洋が酸性であったとすると、炭酸塩鉱物は生成しにくい(Fairén et al., 2004)。そのため、炭酸塩岩がないからといって海洋の存在を否定することにもならない。さらには、炭酸塩鉱物が必ずしも海洋の存在を直接的に示唆するわけでもない。

それ以外の間接的証拠を考慮すると、ヘスペリア紀に前後して、北部低地に海洋が一時存在したという説は、惑星地質学的にはおおむね認められつつあるようである。ただし、水(液体)が当時存在しうる大気条件だったのか、存在したと考えられる大量の水が果たして現在どこに貯蔵されているのかなどは、海洋の存在を議論する上で解明しなければならない重要な問題といえる(Carr and Head, 2010b)。

火星の海洋に関する研究は、比較惑星地質学の観点から、地球の海洋や海洋底堆積物に関する研究を行っている地質・地形学者の貢献が期待される研究対象でもある。ただし、Dohm et al.(2009)が述べているように、地質・地形学的な海洋研究の難しさもある。例えば、上述のように地球とは違い火星は大きな衛星を持たないため、潮汐作用による堆積物や地形の存在は期待できない。また、地球上に見られる砂州などの地形が観察されないのは、形成後の侵食やダストの堆積による埋没だけでは説明できず、その理由は未だにわかっていない(Dohm et al., 2009)。さらに、海は氷で覆われていて、海岸地形・堆積物の形成に重要な役割を果たす波浪作用が限定的であった可能性もある(Ghatan and Zimbelman, 2006)。

その一方で、海洋への天体衝突により発生する津波は、火星の海洋を大規模に擾乱させ、堆積物の移動や地形変化を引き起こした可能性がある(Matsui et al., 2001; Mahaney et al., 2010)。Ormö et al.(2004)は、コンタクト1, 2を仮定し、それぞれの海洋の深さでも海洋底にクレーターが形成されうる規模の衝突頻度と海洋の持続時間を考え、コンタク

Fig. 4. (a) Possible paleo-shoreline feature, as interpreted by Parker et al. (2010; Image: NASA/JPL/University of Arizona: PSP_009998_2165). (b) Stepped delta, as interpreted by Kraal et al. (2008; Image: NASA/JPL/University of Arizona: PSP_009595_1715). (c) Layered deposit in Gale Crater (Image: NASA/JPL/University of Arizona: PSP_008002_1750).

ト1で定義される海洋が存在した場合、0個から160個程度の海洋衝突クレーターが形成され、コンタクト2で定義される海が存在した場合、1–2個から1400個の海洋衝突クレーターが形成されると推定した。そして、Ormö et al. (2004)は、実際に海洋衝突クレーターの可能性があるクレーターを報告している(Fig. 2)。さらに、de Villiers et al. (2010)も、Arabia Terraに限って調べても、数十個の海洋衝突クレーターの候補が存在すると述べている。海洋への天体衝突が起きていたとすると、クレーターのガリ(海水がクレーター内に浸入する際に形成される溝)や巨大津波による海岸付近での土砂堆積・侵食などが起き、特有の地形・堆積物が形成される可能性や(Matsui et al., 2001; Ormö et al., 2004; Dohm et al., 2009; Mahaney et al., 2010)、周辺に堆積しているイジェクタ起源の巨礫の再堆積が起きる可能性もある(Iijima et al., 2011)。海洋における津波とその堆積作用や地形変化は、海洋の存在を示す重要な痕跡になる可能性があり、今後の進展が望まれる分野といえる。

上述の海洋の議論はヘスperia紀が中心であったが、ノアキス紀に海洋が存在した可能性を指摘した論文は極めて少ない(Moore and Wilhelms, 2001; Howard et al., 2005)。ただし、Clifford and Parker (2001)の推定では、ノアキス紀の一時期に海洋が存在した可能性があり、地形学的な痕跡が消失またはダストにより埋没している可能性も考えられる(Head et al., 2002; Carr and Head, 2010b)。ノアキス紀は、湿潤かつアルカリ性の環境下で生命には適した環境だったのではないかと考えられていることから(Bibring et al., 2006)、将来の火星探査計画の立案のためにも、後述のようにノアキス紀の海洋についてはさらなる研究を行う必要がある。

火星の海洋に関するもう一つの重要なテーマは、海洋が長期間存在したかどうかである。Ormö et al. (2004)は、Fairén et al. (2003)およびHartmann and Neukum (2001)

のモデルに基づき、コンタクト1の海岸線を形成したノアキス紀–ヘスperia紀初期の海洋とコンタクト2の海岸線を形成したヘスperia紀後期–アマゾニア紀初期の海洋の持続時間を、いずれも10万年から8億年の間と見積もっている。一方、数百年程度のごく短期間だけだったのではないかといい、見積もりもあり(Segura et al., 2002; Banfield, et al., 2003; Hoefen et al., 2003)、評価材料が少ないこともあって議論が進展していない。海洋の存在期間の推定は、火星に生命が存在可能だったのかを議論する上でも重要なテーマといえ、今後重点的に研究されるべきである。

クレーター湖とシーケンス層序学

火星には、かつて数多くの湖(クレーター湖など)が存在したと考えられ、その多くがノアキス紀後期からヘスperia紀にかけて形成されたと考えられる(Fig. 2, 例えば, Cabrol and Grin, 1999; Ori et al., 2000; Malin and Edgett, 2003; Pondrelli et al., 2005; Di Achille et al., 2006, 2009; Fassett and Head, 2008a; Komatsu et al., 2009)。例えば、エベルスヴァルデ・クレーターやホールデン・クレーターなどでは、水などの液体がクレーター内部に流れ込んだ際にできる水路(河川?)と、運搬された土砂がクレーター内部に堆積してできる扇状地状三角州が存在している(Pondrelli et al., 2005, 2008; 後藤・小松, 2012)。また、ステップ状デルタ(Fig. 4b, Kraal et al., 2008)やギルバートタイプのデルタ地形(Ori et al., 2000)も報告されており、こうしたデルタ地形の形成時間は数十年から千年以上と推定されている。

クレーター湖だったと考えられる場所の高解像度画像分析を行うと、周期的な成層構造を持つ地層を観察することができるとある(Fig. 4c, 例えば, Malin and Edgett, 2000)。地層の重なり自体は、水の作用以外にも隕石衝突や火山放出物の堆積などの要因も考えられるが、Laskar et al. (2004)

Fig. 5. (a) MOLA map showing the topography of Gale Crater and its surroundings; positions of available HiRISE images are indicated by black rectangles. (b) THEMIS image of Gale Crater with the MSL landing site shown as an ellipse. (c) Representative MSL rover path in Gale Crater (Image: NASA/JPL/University of Arizona: PSP_009294_1750) with interpreted mineral distribution of Thomson et al. (2011).

や Carr and Head (2010b) は、周期的な成層構造を説明するためには、天文学的要素による気候変動を考慮すべきであると指摘している。

近年、火星の湖底堆積物の形成史を理解するために、シーケンス層序学的手法を適用した研究が増えている。シーケンス層序学は、海水準変動を中心にすえて地層の成因を解釈するというもので、地球上では石油根源岩探査などに活用されている。例えば、Dromart et al. (2007) は、マリネリス溪谷群の一つ Melas Chasma (Fig. 2) の壁面の露頭で、急傾斜のクリノフォーム (水中に形成される急傾斜の斜面堆積物) やチャネルのような窪みが存在することから、かつてこの場所には相当量の水が存在し、水面下で大規模な堆積作用が起きていたことを示唆している。水中で形成された堆積層だとすると、流れに伴い粒子サイズの分級 (細粒化) が起きている可能性がある。生命起源の有機物が火星に存在する場合、細粒堆積岩中に濃集している可能性が高く、Dromart et al. (2007) はクリノフォームの先端部付近を今後の探査地点の候補として挙げている。同様に、Pondrelli et al. (2008) は、エベルスヴァルデ・クレーター内のデルタのシーケンス層序学的解析を行い、デルタ堆積物は3つの堆積シーケンスに区分できること、クレーター湖内の湖水面変動に伴い堆積したと考えられることなどを明らかにしている。こうした

シーケンス層序学的研究は、後述のように2011年に打ち上げられたMSL計画での探査候補地点の選定に大きく影響した。

火星の堆積岩を対象とした将来探査

1. MSLの着陸地点選定プロセス

NASAが2011年11月に打ち上げ、2012年8月に着陸したMSLは、火星はかつて生命が存在可能な環境だったのかを調べることを目的としており、火星上の生命の痕跡 (有機物やバイオマーカー、同位体比など) を調べることに重点が置かれている (Grotzinger, 2009)。MSLの着陸候補地点の選定は2006年ごろから始まり、当初50地点ほど提唱されていた調査地点は、科学的価値の高さと技術的に着陸とローバーによる探査が可能かという両面から2011年春までに4地点に絞り込まれた (Grant et al., 2010)。特に、工学面からの制約は火星探査においては重要で、例えばMSLのローバー探査を行うには、電源の都合上、南・北緯30°の範囲内でなければならない、さらに着陸精度 (直径20 km) とローバーの移動可能距離 (> 20 km) も考慮する必要がある (Grant et al., 2010)。

調査の最終候補地として挙げられた4地点は、エベルスヴァルデ・クレーター (24°S, 327°E)、ホールデン・クレー

Fig. 6. Oblique view of rock layers exposed on the side of a mound inside the Martian Gale Crater (HiRISE Digital Elevation Model data; credit: NASA/JPL-Caltech/University of Arizona/USGS, <http://www.jpl.nasa.gov/spaceimages/details.php?id=PIA12507>).

ター(26°S, 325°E), マウルス・ヴァリス(24°N, 341°E), ゲール・クレター(Gale crater)(5°S, 137°E)で、いずれも水の作用によるとみられる堆積層が確認されている場所である(Fig. 2)。これらの地点については、HiRISEやCRISMのデータが集中的に取られ(Fig. 5a, 5b)、詳細な研究が進められてきた。エベルスヴァルデ・クレターとホールデン・クレターは近接しており(Fig. 3a)、いずれもノアキス紀後期ごろ(ただし、エベルスヴァルデ・クレターのほうが先に形成されている)に形成されたと考えられ、これらのクレター内にはノアキス紀後期に堆積したデルタ堆積物や湖成堆積物の痕跡が見られる(Moore et al., 2003; Pondrelli et al., 2005, 2008; 後藤・小松, 2012)。さらに、フィロケイ酸塩鉱物を含む堆積層が存在していることもわかっており、クレター湖内での粘土鉱物の沈殿が起きていたものと考えられる(Grant et al., 2008; Milliken and Bish, 2010)。そのため、かつて生命が存在した痕跡が見つかる可能性が高いとされている(Farmer and Des Marais, 1999; Summons et al., 2010)。マウルス・ヴァリスでは、厚い層状の堆積物が堆積しており、やはりノアキス紀のフィロケイ酸塩鉱物が堆積していることが明らかになっている(Bibring et al., 2005; Poulet et al., 2005; Loizeau et al., 2007; Michalski and Noe Dobrea, 2007; Bishop et al., 2008; Wray et al., 2008)。コンタクト1の海岸線付近にあり、かつてはクレター湖だったと考えられるゲール・クレターには、層厚5 kmに及ぶ堆積層が存在し(Malin and Edgett, 2000)、フィロケイ酸塩鉱物を含む層と、より上位の硫酸塩鉱物を含む層の露頭が露出している(Fig. 6, Milliken et al., 2010)。他の場所と異なり、ここではBibring et al. (2006)によって提唱されたフィロケイ酸塩鉱物に富む時代から硫酸塩鉱物に富む時代への変化を連続的に追うことができるかもしれず、火星の気候変動を解明できる可能性が高い重要な地点といえる(Milliken et al., 2010; Thomson et al., 2011)。

そして、2011年7月に、MSLの着陸地点はゲール・クレターに決定された。その理由は、火星の気候変動を解明するための露頭を連続的に調査できるからだというものである。そして、クレターの底に着陸をして、中央丘を登る過

程で、フィロケイ酸塩鉱物に富む地層の露頭から、硫酸塩鉱物に富む地層が露出している上位層までを探索する予定となっている(Fig. 5c)。この点で、まさに地質調査がこの探索の主目的に掲げられたとも言える。MSLは、キュリオシティ(Curiosity)の愛称でこの時から呼ばれ、2012年8月にゲール・クレターに着陸し、すでに探索を開始している。

このように、MSLの着陸候補地点の選定プロセスから、米国を中心とする火星研究者が何をどのように明らかにしようとしているのかが見えてくる。具体的には、①Bibring et al. (2006)により提唱されたように、フィロケイ酸塩鉱物の存在を湿潤かつアルカリ性の環境で水が存在した重要な証拠としてとらえ、②フィロケイ酸塩鉱物を含むノアキス紀後期の堆積層が確認されるクレター湖などを重点的に画像・スペクトル解析し、③シーケンス層序学的研究を応用することで有機物やバイオマーカーなどが濃集している可能性が考えられる細粒堆積物の露頭を特定し、④着陸機の着陸精度とローバーの移動距離を考慮して、目的地に技術的にたどり着ける場所を決定する、ということである。実際に有機物やバイオマーカーの濃集があるのかなどは別としても、手順としては地質・地形学的なアプローチに則っているといえる。このような選定プロセスを経て、最も地質調査に適したゲール・クレターが着陸地点に決まったことは大変興味深い。これは、もともと地球を対象に地質・地形学的研究を行っていた研究者がMSL計画の中心人物として携わっていることや、石油業界に所属していた地質学者が欧米の火星探索計画に参入していることなどに大きく影響されているものと考えられる。

2. MSL後の将来探索

MSL後のNASAやESAの探索計画については、小松(2012)が述べるように流動的であり将来の変更も十分ありうる。しかしその概要を述べると、“follow the water”や“seeking habitable environments”からさらに一歩進み、“seeking evidence of life”をキャッチフレーズに生命探索を前面に押すものになる(例えば、Beaty et al., 2010)。2018年には、欧米の宇宙機関の共同によるローバーの生命探索が計画されている。これらの探索の中心になるのが地表

掘削である。火星の表面環境は宇宙線などの影響で有機物の保存が難しく、地下にある物質の調査を行うことは火星探査の重要項目とされている。

一方、欧米の火星探査がフィロ珪酸塩鉱物の堆積が見られるノアキス紀後期のクレーター湖に集中している点に留意する必要がある。クレーター湖では、水が存在した期間が短い可能性も考えられ(例えば, Jerolmack et al., 2004; Bhat-tacharya et al., 2005), 生命がクレーター湖内または流入河川の上流部で誕生し、有機物や地球化学的痕跡として検出できるほど堆積しえたのか、はたして生命の痕跡探しを目的とした探査計画に最適な場所なのかという疑問が残る。また、海洋の痕跡が多く報告されている時代(ヘスペリア紀)とは、これらのクレーター湖の形成時期がずれているという問題がある。地球上で生命の痕跡を見つけようと思った場合、海洋底堆積物が主要な研究対象になると考えられる。その一方で、海洋が形成された可能性のあるヘスペリア紀は、硫酸塩鉱物が厚く溜まる酸性の環境だったと考えられ(Bibring et al., 2006)、ヘスペリア紀の堆積岩は生命の痕跡探しを目的とした欧米の惑星探査計画には適さないと思われているようである。生命の誕生には海が不可欠という考えに立てば、ヘスペリア紀の酸性環境で本当に生命は存在し得なかったのかを追及するべきであろう。同時に、欧米の興味が集中しているノアキス紀後期に海洋が存在した可能性も検討の余地があり、地形学的に痕跡が見つからなかったとしても、地質・堆積学的にノアキス紀の海洋の存在可能性を突き詰めていく必要があると考えられる。

お わ り に

本稿では、海、クレーター湖、アウトフローチャネルなどを中心に、水の作用でできた地質、地形を概説した。欧米の火星探査計画は、生命の痕跡の発見を最終目標とし、その前段階として火星の水の痕跡を追い求めてきた。現在得られている超高解像度画像やスペクトルデータ、地形データを用いて、数十 cm ほどの解像度での議論まで可能になってきており、地形学中心だった火星研究から、いよいよ地質・堆積学へと移りつつある。これは、生命の痕跡を見つけるという最終目的を達成するためには、広い火星の中でピンポイントで着陸地点を定めて地質調査を行い、さらには鉱物や有機物の分析を行う必要があるからである。そのためには、日頃から地球上の露頭を対象に地質学的調査、研究を行う地質学者の知識や経験が必要となるのは、必然のように思える。実際に、MSL は地質学者が計画の中心を担う最初の探査ということが出来るが、今後の欧米の火星探査計画においても、地質学者はすでに欠かせない存在になりつつある。日本においても、火星の将来探査が検討されているが(並木ほか, 2012; 山岸, 2012)、地質、堆積学などの分野にまで火星研究の裾野を広げて、惑星地質学分野の研究を行うことで、将来の火星探査計画に貢献することが期待される。

謝 辞

査読者である田近英一氏および匿名の査読者、編集担当で

ある七山太氏には、本稿を改善するにあたって極めて有益なご意見を賜った。以上の方々に謝意を表する。本稿は、千葉工業大学惑星探査センターの Contribution number 19 である。

文 献

- Baker, V. R., 1978, The Spokane Flood controversy and the martian outflow channels. *Science*, **202**, 1249–1256.
- Baker, V. R., 1982, *The Channels of Mars*. Texas Univ. Press, Austin. 198p.
- Baker, V. R., 2009, The Channeled Scabland: A Retrospective. *Ann. Rev. Earth Planet.*, **37**, 393–411.
- Baker, V. R. and Milton, D. J., 1974, Erosion by catastrophic floods on Mars and Earth. *Icarus*, **23**, 27–41.
- Baker, V. R., Storm, R. G., Dohm, J. M., Gulick, V. C., Kargel, J. S., Komatsu, G., Ori, G. G. and Rice, J. W. Jr., 2000, Mars' Oceanus Borealis, ancient glaciers, and the MEGA-OUTFLO hypothesis. *Abstr. 31st Lunar and Planet. Sci. Conf.*, 1863.
- Baker, V. R., Strom, R. G., Gulick, V. C., Kargel, J. S., Komatsu, G. and Lake, V. S., 1991, Ancient oceans, ice sheets and the hydrological cycle on Mars. *Nature*, **352**, 589–594.
- Bandfield J. L., Glotch T. D. and Christensen P. R. 2003, Spectroscopic identification of carbonate minerals in the martian dust. *Science*, **301**, 1084–1087.
- Barlow, N. G., 2010, What we know about Mars from its impact craters. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, **122**, 644–657.
- Basilevskaya, E. A., Neukum, G. and the HRSC Co-Investigator team, 2009, The Olympus volcano on Mars: Geometry and characteristics of lava flows. *Sol. Syst. Res.*, **40**, 375–383.
- Beaty, D. W., Allwood, A. C., Vago, J. and Westall, F., 2010, Sedimentology, stratigraphy and astrobiology on Mars in 2018, potentially using two rovers. *Abstr. First Int. Conf. on Mars Sedimentology and Stratigraphy*, 6024.
- Bhattacharya, J. P., Payenberg, T. H. D., Lang, S. C. and Bourke, M., 2005, Dynamic river channels suggest a long-lived Noachian crater lake on Mars. *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L10201, doi:10.1029/2005GL022747.
- Bibring, J. P., Langevin, Y., Gendrin, A., Gondet, B., Poulet, F., Berthé, 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. F., 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.
- Bishop, J. L., Noe Dobrea, E. Z., 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.
- Burr, D. M., Grier, J. A., McEwen, A. S. and Keszthelyi, L. P., 2002, Repeated aqueous flooding from the Cerberus Fossae: Evidence for very recently extant, deep groundwater on Mars. *Icarus*, **159**, 53–73.
- Cabrol, N. A. and Grin, E., 1999, Distribution, classification, and ages of martian impact crater lakes. *Icarus*, **142**, 160–172.
- Carr, M., 1996, *Water on Mars*. Oxford University Press, New York, 248p.
- Carr, M. and Head, J. W., 2003, Oceans on Mars: An assessment of the observational evidence and possible fate. *Jour. Geophys. Res.*, **108**, 5042, doi 10.1029/2002JE001963.
- Carr, M. and Head, J. W., 2010a, Acquisition and history of wa-

- ter on Mars. In Cabrol, N. A. and Grom E. A., eds., *Lakes on Mars*. Elsevier, 31–67.
- Carr, M. and Head, J. W., 2010b, Geologic history of Mars. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **294**, 185–203.
- Chapman, M. G. and Tanaka, K. L., 2002, Related magma-ice interactions: Possible origins of chasmata, chaos, outflow channels, and surface materials in Xanthe, Margaritifer, and Meridiani Terrae, Mars. *Icarus*, **155**, 324–339.
- Chevrier, V., Poulet, F. and Bibring, J. P., 2007, Early geochemical environment of Mars as determined from thermodynamics of phyllosilicates. *Nature*, **448**, 60–63.
- Clifford, S. M. and Parker, T. J., 2001, The evolution of the martian hydrosphere: implications for the fate of a primordial ocean and the current state of the northern plains. *Icarus*, **154**, 40–79.
- Craddock, R. A. and Maxwell, T. A., 1993, Geomorphic evolution of the martian highlands through ancient fluvial processes. *Jour. Geophys. Res.*, **98** (E2), 3453–3468.
- Di Achille, G. and Hynek, B. M., 2010, Ancient ocean on Mars supported by global distribution of deltas and valleys. *Nature Geosci.*, **3**, 459–463.
- Di Achille, G., Hynek, B. M. and Searls, M. L., 2009, Positive identification of lake strandlines in Shalbatana Vallis, Mars. *Geophys. Res. Lett.*, **36**, L14201, doi:10.1029/2009GL038854.
- Di Achille, G., Marinangeli, L., Ori, G. G., Hauber, E., Gwinn, K., Reiss, D. and Neukum, G., 2006, Geological evolution of the Tyras Vallis paleolacustrine system, Mars. *Jour. Geophys. Res.*, **111**, E04003, doi:10.1029/2005JE002561.
- Dohm, J. M., Baker, V. R., Boynton, W. V., Fairén, A. G., Ferris, J. C., Finch, M., Furfaro, R., Hare, T. M., Janes, D. M., Kargel, J. S., Karunatillake, S., Keller, J., Kerry, K., Kim, K. J., Komatsu, G., Mahaney, W., Schulze-Makuch, D., Marinangeli, L., Ori, G. G., Ruiz, J. and Wheelock, S. J., 2009, GRS evidence and the possibility of paleoceans on Mars. *Planet. Space Sci.*, **57**, 664–684.
- Dromart, G., Quantin, C. and Broucke, O., 2007, Stratigraphic architectures spotted in southern Melas Chasma, Valles Marineris, Mars. *Geology*, **35**, 363–366.
- Edgett, K. S. and Parker, T. J., 1997, Water on early Mars: Possible subaqueous sedimentary deposits covering ancient cratered terrain in western Arabia and Sinus Meridani. *Geophys. Res. Lett.*, **24**, 2897–2900.
- Ehlmann, B. L., Mustard, J. F., Fassett, C. I., Schon, S. C., Head, J. W., Des Marais, D. J., Grant, J. A., Murchie, S. L., 2008a, Clay minerals in delta deposits and organic preservation potential on Mars. *Nature Geosci.*, **1**, 355–358.
- 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., 2008b, 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. *Jour. Geophys. Res.*, **114**, E00D08, doi: 10.1029/2009JE003339.
- Fairén A. G., Dohm J. M., Baker V. R., De Pablo M. A., Ruiz J., Ferris J. C. and Anderson R. C. 2003, Episodic flood inundations of the northern plains of Mars. *Icarus*, **165**, 53–67.
- Fairén, A. G., Fernández-Remolar, D., Dohm, J. M., Baker, V. R., and Amils, R., 2004, Inhibition of carbonate synthesis in acidic oceans on early Mars. *Nature*, **431**, 423–426.
- Farmer, J. and Des Marais, D., 1999, Exploring for a record of ancient Martian life. *Jour. Geophys. Res.* **104** (E11), 26977–26995.
- Fassett, C. I. and Head, J. W., 2005, Fluvial sedimentary deposits on Mars: Ancient deltas in a crater lake in the Nili Fossae region. *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L14201, doi:10.1029/2005GL023456.
- Fassett, C. I. and Head, J. W., 2008a, Valley network-fed, open-basin lakes on Mars: Distribution and implications for Noachian surface and subsurface hydrology. *Icarus*, **198**, 37–56.
- Fassett, C. I. and Head, J. W., 2008b, The timing of martian valley network activity: constraints from buffered crater counting. *Icarus*, **195**, 61–89.
- Ghatan, G. J. and Zimbelman, J. R., 2006, Paucity of candidate coastal constructional landforms along proposed shorelines on Mars: Implications for a northern lowlands-filling ocean. *Icarus*, **185**, 171–196.
- Golombek, M. P. and Bridges, N. T., 2000, Erosion rates on Mars and implications for climate change: Constraints from the Pathfinder landing site. *Jour. Geophys. Res.*, **105**, 1841–1853.
- Golombek, M. P., Grant, J. A., Crumpler, L. S., Greeley, R., Arvidson, R. E., Bell III, J. F., Weitz, C. M., Sullivan, R., Christensen, P. R., Soderblom, L. A. and Squyers, S. W., 2006, Erosion rates at the Mars Exploration Rover landing sites and long-term climate change on Mars. *Jour. Geophys. Res.*, **111**, E12S10, doi:10.1029/2006JE002754.
- 後藤和久・小松吾郎 (Goto, K. and Komatsu, G.), 2012, 露頭が見えてきた火星の地質学. 地質雑 (*Jour. Geol. Soc. Japan*), **118**, VII–VIII (本特集号).
- 後藤和久・小松吾郎・齋藤 仁 (Goto, K., Komatsu, G. and Saito H.), GIS を用いた火星画像・地形データの解析法, 地質雑 (*Jour. Geol. Soc. Japan*), **118**, 683–688 (本特集号).
- Grant, J., Golombek, M. P., Grotzinger, J. P., Wilson, S. A., Watkins, M. M., Vasavada, A. R., Griffes, J. L. and Parker, T. J., 2010, The science process for selecting the landing site for the 2011 Mars Science Laboratory. *Planet. Space Sci.*, **59**, 1114–1127.
- Grant, J. A., Irwin III, 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.
- Grotzinger, J., 2009, Beyond water on Mars. *Nature Geosci.*, **2**, 231–233.
- Hartmann, W. K. and Neukum, G., 2001, Crater chronology and the evolution of Mars. *Space Sci. Rev.*, **96**, 165–194.
- Haveli, I., Zuber, M. T. and Schrag, D. P., 2007, A sulfur dioxide climate feedback on early Mars. *Abstr. 38th Lunar and Planet. Sci. Conf.*, 1173.
- Head, J. W., Hiesinger, H., Ivanov, M., 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.
- Head, J. W., Kreslavsky, M., Hiesinger, H., Ivanov, M. A., Pratt, S., Seibert, N., Smith, D. E. and Zuber, M. T., 1998, Oceans in the past history of Mars: test for their presence using Mars orbiter laser altimeter (MOLA) data. *Geophys. Res. Lett.*, **25**, 4401–4404.
- Head, J. W., Kreslavsky, M. A. and Pratt, S., 2002, Northern lowlands of Mars: evidence for widespread volcanic flooding and tectonic deformation in the Hesperian period. *Jour. Geophys. Res.*, **107**, 5003, doi:10.1029/2000JE001445.
- Hoefen T. M., Clark R. N., Bandfield J. L., Smith M. D., Pearl J. C. and Christensen P. R., 2003, Discovery of olivine in the Nili Fossae region of Mars. *Science*, **302**, 627–630.
- Hoffman, N., 2000, White Mars: A new model for Mars surface and atmosphere based on CO₂. *Icarus*, **146**, 326–342.
- Howard, A. D., Moore, J. M. and Irwin III, R. P., 2005, An intense terminal epoch of widespread fluvial activity on Mars:

1. valley network incision and associated deposits. *Jour. Geophys. Res.*, **110**, E12S14, doi:10.1029/2005JE002459.
- Hubbard, G. S., Naderi, F. M., Garvin, J. B., 2002, Following the water, the new program for Mars exploration. *Acta Astronautica*, **51**, 337–350.
- Iijima, Y., Goto, K., Minoura, K., Komatsu, G., and Imamura, F., 2011, Numerical modeling of the impact-induced tsunami on Mars. *Abstr. 2011 PERC Planet. Geol. Field Symp.*, **8**.
- Irwin, R. P. and Howard, A. D., 2002, Drainage basin evolution in Noachian Terra Cimmeria, Mars. *Jour. Geophys. Res.*, **107**(E7), doi:10.1029/2001je001818.
- Ivanov, M. A. and Head, J. W., 2001, Chryse Planitia, Mars: Topographic configuration, outflow channel continuity and sequence, and tests for hypothesized ancient bodies of water using Mars Orbiter Laser Altimeter (MOLA) data. *Jour. Geophys. Res.*, **106**(E2), 3275–3295.
- Jerolmack, D. J., Mohrig, D., Zuber, M. T. and Byrne, S., 2004, A minimum time for the formation of Holden Northeast fan, Mars. *Geophys. Res. Lett.*, **31**, L21701, doi:10.1029/2004GL021326.
- 小松吾郎 (Komatsu, G.), 2012, 火星探査計画の動向: 地球の類似地質・地形の重要性と地質学者の役割. 地質雑 (*Jour. Geol. Soc. Japan*), **118**, 597–605 (本特集号).
- Komatsu, G. and Baker, V. R., 1997, Paleohydrology and flood geomorphology of a Martian outflow channel: Ares Vallis. *Jour. Geophys. Res.*, **102**, 4151–4160.
- Komatsu, G., Baker, V. R., 2007, Formation of valleys and cataclysmic flood channels on Earth and Mars. In Chapman, M. G., ed, *The Geology of Mars: Evidence from Earth-Based Analogs*. Cambridge University Press, New York, 297–321.
- Komatsu, G., Ori, G. G., 2000, Exobiological implications of potential sedimentary deposits on Mars. *Planet. Space Sci.*, **48/11**, 1043–1052.
- Komatsu, G., Di Achille, G., Popa, C., Di Lorenzo, S., Pio Rossi, A. and Jose Alexis Palmero Rodriguez, 2009, Paleolakes, paleofloods, and depressions in Aurorae and Ophir Plana, Mars: Connectivity of surface and subsurface hydrological system. *Icarus*, **201**, 474–491.
- Kraal, E. R., van Dijk, M., Postma, G., Kleinhans, M. G., 2008, Martian stepped-delta formation by rapid water release. *Nature*, **451**, 973–976.
- Kreslavsky, M. A. and Head, J. W., 2002, Fate of outflow channel effluents in the northern lowlands of Mars: The Vastitas Borealis Formation as a sublimation residue from frozen ponded bodies of water. *Jour. Geophys. Res.*, **107**, 5121.
- Laskar, J., Correia, A. C. M., Gastineau, M., Joutel, F., Levrard, B. and Robutel, P., 2004, Long term evolution and chaotic diffusion of the insolation quantities of Mars. *Icarus*, **170**, 343–364.
- Leask, H. J., Wilson, L. and Mitchell, L. K., 2007, Formation of Mangala outflow channel, Mars: morphological development and water discharge and duration estimates. *Jour. Geophys. Res.*, **112**, E08003, doi:10.1029/2006JE002851.
- Leverington, D. W., 2004, Volcanic rilles, streamlined islands, and the origin of outflow channels on Mars. *Jour. Geophys. Res.*, **109**, E10011, doi:10.1029/2004JE002311.
- Loizeau, D., Mangold, N., Poulet, F., Bibring, J. P., Gendrin, A., Ansan, V., Gomez, C., Gondet, B., Langevin, Y., Masson, P. and Neukum, G., 2007, Phyllosilicates in the Mawrth Vallis region of Mars. *Jour. Geophys. Res.*, **112**, E08S08, doi:10.1029/2006JE002877.
- Lucchitta, B. K., 1982, Ice sculpture in the martian outflow channels. *Jour. Geophys. Res.*, **87**, 9951–9973.
- Malin, M. C., Edgett, K. S., 1999, Oceans or seas in the Martian northern lowlands: High resolution imaging tests of proposed coastlines. *Geophys. Res. Lett.*, **26**, 3049–3052.
- Malin, M. C. and Edgett, K. S., 2000, Sedimentary rocks of early Mars. *Science*, **290**, 1927–1937.
- Malin, M. C. and Edgett, K. S., 2003, Evidence for persistent flow and aqueous sedimentation on early Mars. *Science*, **302**, 1931–1934.
- Mahaney, W. C., Dohm, J. M., Costa, P. and Krinsley, D. H., 2010, Tsunamis on Mars: Earth analogues of projected Martian sediment. *Planet. Space Sci.*, **58**, 1823–1831.
- Matsui, T., Takamiya, I., Imamura, F. and Tajika, E., 2001, Tsunami generation and propagation in possible ancient ocean on Mars. *Abstr. 32nd Lunar and Planet. Sci. Conf.*, 1716.
- 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, L., 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, C. 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.
- Michalski, J. R. and Niles, P. B., 2010, Deep crustal carbonate rocks exposed by meteor impact on Mars. *Nature Geosci.*, **3**, 751–755.
- Michalski, J. R. and Noe Dobrea, E. Z., 2007, Evidence for a sedimentary origin of clay minerals in the Mawrth Vallis region, Mars. *Geology*, **35**, 830–833.
- Milliken, R. P. and Bish, D. L., 2010, Sources and sinks of clay minerals on Mars. *Phil. Mag.*, **90**, 2293–2308.
- Milliken, R. E., Grotzinger, J. P. and Thomson, B. J., 2010, Paleoclimate of Mars as captured by the stratigraphic record in Gale Crater. *Geophys. Res. Lett.*, **37**, L04201, doi:10.1029/2009GL041870.
- Milliken, R. E., Mustard, J. F., Poulet, F., Jouglet, D., Bibring, J. P., Gondet, B. and Langevin, Y., 2007, Hydration state of the Martian surface as seen by Mars Express OMEGA: 2. H₂O content of the surface, *Jour. Geophys. Res.*, **112**, E08S07, doi: 10.1029/2006JE002853.
- Morgan, G. A. and Head, J. W., 2009, Sinton crater, Mars: evidence for impact into a plateau icefield and melting to produce valley networks at the Hesperian-amazonian boundary. *Icarus*, **202**, 39–59.
- Moore, J. M. and Wilhelms, D. E., 2001, Hellas as a possible site of ancient ice-covered lakes on Mars. *Icarus*, **154**, 258–276.
- Moore, J. F., Howard, A. D., Dietrich, W. D. and Schenk, P. M., 2003, Martian layered fluvial deposits: implications for Noachian climate scenarios. *Geophys. Res. Lett.*, **30**, E06001, doi:10.1029/2003GL019002.
- Morris, R. V., Ruff, S. W., Gellert, R., Ming, D. W., Arvidson, R. E., Clark, B. C., Golden, D. C., Siebach, K., Klingelhöfer, G., Schröder, C., Fleischer, I., Yen, A. S., Squyres, S. W., 2010, Identification of carbonate-rich outcrops on Mars by the Spirit Rover. *Science*, **329**, 421–424.
- Mumma, M. J., Villanueva, G. L., Novak, R. E., Hewagama, T., Bonev, B. P., DiSanti, M. A., Mandell, A. M. and Smith, M., 2009, Strong release of methane on Mars in northern summer 2003. *Science*, **323**, 1041–1045.
- Murchie, S., Arvidson, R., Bedini, P., Beisser, K., Bibring, J. P., Bishop, J., Boldt, J., Cavender, P., Choo, T., Clancy, R. T., Darlington, E. H., Des Marais, D., Espiritu, R., Fort, D., Green, R., Guinness, E., Hayes, J., Hash, C., Heffernan, K., Hemmler, J., Heyler, G., Humm, D., Hutcheson, J., Izenberg, N., Lee, R., Lees, J., Lohr, D., Malaret, E., Martin, T., McGovern, J. A., McGuire, P., Morris, R., Mustard, J., Pelkey, S., Rhodes, E., Robinson, M., Roush, T., Schaefer, E., Seagrave, G., Seelos, F., Silvergate, P., Slavney, S., Smith, M., Shyong, W. J., Strohhahn, K., Taylor, H., Thompson, P., Tossman, B., Wirzbarger, M. and Wolff, M.,

- 2007, CRISM (compact reconnaissance imaging spectrometer for Mars) on MRO (Mars Reconnaissance Orbiter). *Jour. Geophys. Res.*, **112**, E05S03, doi:10.1029/2006JE002682.
- 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., Noe Dobrea, E., 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., Des Marais, 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., Wolff, M., 2008, Hydrated silicate minerals on Mars observed by the Mars reconnaissance orbiter CRISM instrument. *Nature*, **454**, 305–309.
- 並木則行・小松吾郎・臼井寛裕・杉田精司・宮本英昭・久保田孝・石上玄也・出村裕英・岡田達明・三浦弥生・長勇一郎・後藤和久・千秋博紀・和田浩二・石橋高・荒井朋子・小林正規・大野宗祐・火星ローバ検討グループ, 2012, (Namiki, N., Komatsu, G., Usui, Y., Sugita, S., Miyamoto, H., Kubota, T., Ishigami, G., Demura, H., Okada, T., Miura, Y., Chou, Y., Goto, K., Senshu, H., Wada, K., Ishibashi, K., Arai, T., Kobayashi, M., Ohno, S., and Mars Rover Group), ローバによる火星地質調査計画. 地質雑 (*Jour. Geol. Soc. Japan*), **118**, 606–617 (本特集号).
- Ori, G. G., Marinangeli, L. and Baliva, A., 2000, Terraces and Gilbert-type deltas in crater lakes in Ismenius Lacus and Memnonia (Mars). *Jour. Geophys. Res.*, **105**, 17629–17641.
- Ormö, J., Dohm, J. M., Ferris, J. C., Lepinette, A. and Fairén, A. G., 2004, Marine-target craters on Mars? An assessment study. *Meteorit. Planet. Sci.*, **39**, 333–346.
- Pacifici, A., Komatsu, G. and Pondrelli, M., 2009, Geological evolution of Ares Vallis on Mars: Formation by multiple events of catastrophic flooding, glacial and periglacial processes. *Icarus*, **202**, 60–77.
- Parker, T. J., Gorsline, D. S., Saunders, R. S., Pieri, D. C. and Schneeberger, D. M., 1993, Coastal geomorphology of the Martian plains. *Jour. Geophys. Res.*, **98**, 11061–11078.
- Parker, T. J., Grant, J. A. and Franklin, B. J., 2010, The northern plains: A Martian oceanic basin? In Cabrol, N. A. and Grom E. A., eds., *Lakes on Mars*. Elsevier, 249–273.
- Parker, T. J., Saunders, R. S., Schneeberger, D. M., 1989, Transitional morphology in the west Deuteronilus Mensae region of Mars: Implications for modification of the lowland/upland boundary. *Icarus*, **82**, 111–145.
- Parker, T. J., Schneeberger, D. M., Pieri, D. C. and Saunders, R. S., 1987, Geomorphic evidence for ancient seas on Mars. *MECA Symposium on Mars, Evolution of its Climate and Atmosphere*, 96–98.
- Perron, J. T., Mitrovica, J. X., Manga, M., Matsuyama, I. and Richards, M. A., 2007, Evidence for an ancient martian ocean in the topography of deformed shorelines. *Nature*, **447**, 840–843.
- Pondrelli, M., Baliva, A., Di Lorenzo, S., Marinangeli, L. and Rossi, A. P., 2005, Complex evolution of paleolacustrine systems on Mars: An example from the Holden crater. *Jour. Geophys. Res.*, **110**, E04016, doi:10.1029/2004JE002335.
- Pondrelli, M., Rossi, A. P., Marinangeli, L., Hauber, E., Gwinn, K., Baliva, A. and Di Lorenzo, S., 2008, Evolution and depositional environments of the Eberswalde fan delta, Mars. *Icarus*, **197**, 429–451.
- Poulet, F., Bibring, J. P., Mustard, J. F., Gendrin, A., Mangold, N., Langevin, Y., Arvidson, R. E., Gondet, B., Gomez, C., the Omega Team, 2005, Phyllosilicates on Mars and implications for early martian climate. *Nature*, **438**, 623–627.
- Robinson, M. S. and Tanaka, K. L., 1990, Magnitude of a catastrophic flood event at Kasei Vallis. *Mars. Geology*, **18**, 902–905.
- Sakimoto, S. E. H. and Zuber, M. T., 1998, Flow and convective cooling in lava tubes. *Jour. Geophys. Res.*, **103** (B11), 27465–27487.
- 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., Matsuoka, A., Imamura T., Ogawa, J. and Kawaguchi, J.), 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.
- Scott, D. H., Dohm, J. M. and Rice, J. W., Jr., 1995, Map of Mars showing channels and possible paleolake basins. *Miscellaneous Investigation Series Map I-2461*. U. S. Geological Survey.
- Segura, T. L., Toon, O. B., Colaprete, A. and Zahnle, K. 2002, Environmental effects of large impacts on Mars. *Science*, **298**, 1977–1980.
- Squyres, S. W., Knoll, A. H., Arvidson, R. E., Ashley, J. W., Bell III, J. F., Calvin, W. M., Christesen, P. R., Vlark, B. C., Cohen, B. A., de Souza Jr, P. A., Edgar, L., Farrand, W. H., Fleischer, I., Gellert, R., Golombek, M. P., Grant, J., Grotzinger, J., Hayes, A., Herkenhoff, K. E., Johnson, H. R., Jolliff, B., Klingelhöfer, G., Kundson, A., Li, R., McCoy, T. J., McLennan, S. M., Ming, D. W., Mittlefehldt, D. W., Morris, R. V., Rice Jr, J. W., Schröder, C., Sullivan, R. J., Yen, A. and Yingst, R. A., 2009, Exploration of Victoria crater by the Mars Rover Opportunity. *Science*, **324**, 1058–1061.
- Stack, K. M., Grotzinger, J. P. and Milliken, R. E., 2010, Statistical analysis of bed thickness distributions in layered deposits on Mars. *Abstr. First Int. Conf. on Mars Sedimentology and Stratigraphy*, 6013.
- Summons, R. E., Amend, J. P., Bish, D., Buick, R., Cody, G. D., Des Marais, D. J., Dromart, G., Eigenbrode, J. L., Knoll, A. H., Sumner, D. Y., 2010, Preservation of Martian organic and environmental records. Posted April 2010, by the Mars Exploration Program Analysis Group (MEPAG) at /http://mepag.jpl.nasa.gov/reports/S.
- Tanaka, K. L., 1999, Debris-flow origin for the Simud/Tiu deposit on Mars. *Jour. Geophys. Res.*, **104**, 8637–8652.
- Tanaka, K. L., Rodriguez, J. A. P., Skinner, J. A., Bourke, M. C., Fortezzo, C. M., Herkenhoff, K. E., Kolb, E. J. and Okubo, C. H., 2008, North polar region of Mars: Advances in stratigraphy, structure, and erosional modification. *Icarus*, **196**, 318–358.
- Tanaka, K. L., Scott, D. H. and Greeley, R., 1992, Global stratigraphy. In Kieffer, H. H., Jakosky, B. M., Snyder, C. W., Matthews, M. S., eds., *Mars*. University of Arizona Press, 345–382.
- Tanaka, K. L., Skinner, J. A. and Hare, T. M., 2005, *Geologic map of the northern plains of Mars*. U. S. Geol. Surv., Sci. Inv. Map 2888.
- Tanaka, K. L., Skinner, J. A., Hare, T. M., Joyal, T. and Wenker, A., 2003, Resurfacing history of the northern plains of Mars based on geologic mapping of Mars Global Surveyor data. *Jour. Geophys. Res.*, **108** (E4), 8043, doi:10.1029/2002JE001908.
- Taylor, S. R. and McLennan, S. M., 2009, *Planetary Crusts: Their Composition, Origin and Evolution*. Cambridge Univ. Press, Cambridge. 402p.
- Thomson, B. J., Bridges, N. T., Milliken, R., Baldrige, A., Hook, S. J., Crowley, J. K., Marion, G. M., de Souza Filho, C. R., Brown A. J. and Weitz, C. M., 2011, Constraints on the origin and evolution of the layered mound in Gale Crater, Mars using Mars Reconnaissance Orbiter data. *Icarus*, **214**, 413–432.
- de Villiers, G., King, D. T. Jr. and Marzen, L. J., 2010, A study of candidate marine target impact craters in Arabia Terra, Mars. *Meteorit. Planet. Sci.*, **45**, 947–964.
- Warner, N., Gupta, S. Lin, S. Y., Kim, J. R., M. J. P., Morley, J., 2010, Late Noachian to Hesperian climate change on Mars:

- Evidence of episodic warming from transient crater lakes near Ares Vallis. *Jour. Geophys. Res.*, **115**, E06013, doi:10.1029/2009JE003522.
- Wilson, L., Ghatan, G. J., Head, J. W. and Mitchell, K. L., 2004, Mars outflow channels: a reappraisal of the estimation of water flow velocities from water depths, regional slopes and channel floor properties. *Jour. Geophys. Res.*, **109**, E09003, doi:10.1029/2004JE002281.
- Wray, J. J., Ehlmann, B. L., Squyres, S. W., Mustard, J. F. and Kirk, R. L., 2008, Compositional stratigraphy of clay-bearing layered deposits at Mawrth Vallis, Mars. *Geophys. Res. Lett.*, **35**, L12202, doi:10.1029/2008GL034385.
- 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.

(要 旨)

後藤和久・小松吾郎, 2012, 火星の海・湖・アウトフローチャネルの比較惑星地質学. 地質雑, **118**, 618–631. (Goto, K. and Komatsu, G., 2012, The comparative planetary geology of oceans, lakes and outflow channels on Mars. *Jour. Geol. Soc. Japan*, **118**, 618–631.)

近年の衛星画像の精度向上などにより, 火星の堆積岩に関する研究が急速に進展している. 火星には, 水の作用により海や湖, バレーネットワーク, アウトフローチャネルが形成された痕跡がいたるところに残されており, 気候変動を含む火星史を理解する上で極めて重要である. 実際に, ノアキス紀の古クレーター湖の壁面の堆積岩露頭には, フィロケイ酸塩鉱物のような粘土鉱物が豊富に含まれることがわかっている. こうした堆積岩は, アメリカやヨーロッパの宇宙機関の火星探査の着陸候補地点となっており, 水と生命の痕跡を発見するための重要な研究対象とみなされている. 2011年11月には, アメリカ航空宇宙局の最新探査機が打ち上げられ, 古クレーター湖中の露頭を対象として地質調査を行なう予定である. こうした将来探査計画の中で, 地質学者の知識と経験が大いに有効であり, 惑星地質学分野での貢献が期待される.