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

The status of Mars exploration: the importance of terrestrial analogs and the role of geologists

Abstract

小松吾郎^{1,2}

Goro Komatsu^{1,2}

2011年9月16日受付.

2012年1月17日受理.

¹ ダモンツィオ大学国際惑星科学研究大学院
Present address: International Research
School of Planetary Sciences, Università
d'Annunzio Viale Pindaro 42, Pescara 65127,
Italy

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

Corresponding author; G. Komatsu,
goro@irsps.unich.it

Recent Martian exploration has been characterized by a dramatic improvement in the quality and quantity of data returned from Mars, as exemplified by high-resolution remote sensing data obtained by Martian orbiters, and outcrop data obtained by landers and rovers. A number of future Mars missions intend to target specific geological environments and will focus on astrobiological research. Other missions are even more ambitious and plan on returning samples to Earth for detailed laboratory-based analysis. The availability of abundant high-quality data is gradually opening opportunities for terrestrial geologists to investigate Martian geology by applying experiences derived from terrestrial analog sites. The geological environment of Mars resembles that of Earth, endorsing the validity of terrestrial analog studies to increase our understanding of geological processes on Mars. The majority of terrestrial analog sites have been located in cold and/or dry environments, such as the polar regions and continental deserts, with other analog sites being topically specific, including impact craters or volcanic fields. Although Asia, and Japan in particular, has to date not been considered an important area for planetary geology research, use of the wide variety of geological conditions present in this region as Martian analogs would be a significant addition to currently existing terrestrial analog studies.

Keywords: Mars exploration, terrestrial analogs, comparative planetology, geologists, perspectives

はじめに

我々の太陽系のなかで、火星(Fig. 1)ほど地球に似た地質作用を持つ惑星はない。火星は、地球のように岩石からなる地殻を持ち、水がその地表あるいは地下で大きな役割を果たしてきたと考えられている。地球で起きうる地質作用の代表的な区分、衝突クレーターの形成、構造運動、火成作用、水・大気・重力による物質の移動集積、風化・変質・変成作用のすべてにおいて、現在起きているか、または過去に起きた証拠が提示されている惑星は、地球以外には火星しかない。

比較惑星学的手法は、惑星地質研究における基本的アプローチである。これは、惑星表面の地質作用の研究にあたって、地球での類似作用の研究経験や知識が役に立つという前提による。惑星の表面の環境や歴史は相互に違っているが、それでも共通点は多い。火星においては、重力は地球の約3分の1強、大気圧は地球の100分の1以下と、これらの環境条件は大きな相違点である。また、窒素や酸素が主成分の地球大気と違って、火星の大気組成はほとんど二酸化炭素であることにも留意する必要がある。しかしながら、地球のよ

うに地表をケイ酸塩鉱物、鉄酸化物などからなる岩石や砂が覆い、火山や谷地形、砂丘などが点在する風景は基本的に地球と変わらない。さらには、現在の火星は非常に乾燥しているが、各地で河川や湖沼が存在したためにできたと解釈される地形や堆積物が見つかっており、過去の水の量が現在よりも豊富に存在した時期があったと考えられている(例えば、後藤・小松, 2012a)。

このように、火星は地球との共通点が多く、その地質あるいはその地表での現れとも言える地形の研究において、地球との比較が惑星地質研究のなかで大きな比重を占めるようになってきた。それゆえ、火星の地質研究者たちの中には、地球のフィールドワーク(野外調査)を重要視して自ら行っている者が少なくない。彼らは、火星の地質理解につながる比較対象地である地球上の類似地質・地形サイト(terrestrial analog sites)での調査を精力的に行ってきたのである。本論文では、比較惑星学の視点を持ったフィールドワークの重要性を、火星探査の動向の簡単な紹介とともに議論し、将来の展望を考察する。

Fig. 1. Images of Earth and Mars: (a) Earth photographed by Apollo 17, and (b) Mars image acquired by the Hubble Space Telescope; images provided by NASA.

火星探査の動向

米国が主導してきた火星探査の歴史は要約すると、1980年代に終了したパイキング計画(1976–1982年)以前と以後に分かれるとも言えるかもしれない。パイキング計画は、その前のマリナー9計画(1971–1972年)などの結果を踏まえて、地表に着陸し生命探索を目指した大掛かりな探査であった。着陸地選定に利用したオービター(軌道周回機)が撮影した膨大な数の画像が、その後20年近くも火星研究の基礎データとして使用された。研究は大いに進展したが、90年代に入って、しだいに新しいデータが入ってこないなどの理由でその活動が鈍り、1997年に地表に着陸したマーズ・パスファインダー計画のランダー(着陸機)とローバー(探査車)が、文字どおり新しい火星探査時代の先導を果たすまでは、しばらく停滞期にあったと言える。

21世紀初頭の一連の欧米の火星探査では、パイキング計画に続けて「火星の生命」を主題としている(山岸, 2012)。最終的には生命の痕跡を探したり、あわよくば生命そのものを見つけてしまおうという野心的な基本線を軸に、探査が行われたり将来計画が立てられている。アメリカ航空宇宙局NASAとヨーロッパ宇宙機関ESAは、今までは別々に火星探査を行ってきたが、最近ではこの主題を前提にして共同での将来計画の策定も始めている。またロシアや中国なども火星探査への関わりを表明している。

Fig. 2. Craters studied as terrestrial analogs. (a) Inner rim walls of Meteor Crater, Northern Arizona, a well-preserved impact crater formed by a meteorite or asteroid impact with the Earth's surface, where astronauts underwent training before Apollo flights. (b) Craters formed by nuclear testing that closely resemble impact craters, including the Sedan Crater, Nuclear Test Site, Nevada. Photographs taken by Goro Komatsu.

まず、現在までに広範に行われている作業として、1990年代後半以降に順次探査活動を開始した一連のオービター群(マーズ・グローバル・サーベイヤー、マーズ・オデッセイ、マーズ・エクスプレス、マーズ・リコナサンス・オービター)などで得られた高精度リモートセンシングデータを解析する(後藤ほか, 2012)ことにより、火星の地質を研究して生命の存在に適した環境があるかを調べ、あるいは過去に生命が存在した可能性のある地域の特定を行っている。その面でのキーワードは「水を追え」である。特に、液体の水が存在した可能性のある堆積盆地やその生成に水が必要な鉱物の探索を行ってきた。そして、そのような地域の一部は、すでにオポチュニティとスピリットと呼ばれる2機のマーズ・エクスプレッション・ローバーで地表面の物質や露頭の直接観察まで行われている(例えば, Squyres and Knoll, 2005)。さら

Fig. 3. Examples of previously studied terrestrial analogs. (a) Lava tube, Hawai'i Volcanoes National Park, the Island of Hawai'i. (b) Lava channel, Craters of the Moon National Monument and Preserve, Snake River Plain. (c) Dune fields in Gran Desierto in the western U.S.A., located at the junction between Baja California and mainland Mexico in southern California. (d) Dry falls landscape in the Channeled Scabland of eastern Washington State, with this morphology thought to have formed by catastrophic flooding caused by failure or failures of dammed glacial lake(s) during the last ice age. (e) Valley formation within the Colorado Plateau, a process that is assisted by erosion caused by groundwater movement with consequent sapping or collapsing of overlying roof material. Photographs taken by Goro Komatsu.

にフェニックス・ランダーは、高緯度地帯で地表下の凍った水の存在確認を行った (Smith et al., 2009)。

今後の予定については流動的な要素が多いので、ここに記すのはあくまで最近の計画策定作業に沿った、地質学や生命探査に直接関連のある探査計画である。まず、2012年に火星に着陸し、オポチュニティと命名されたNASAのマーズ・サイエンス・ラボラトリーは、小型バスくらいの大きさがあるローバーで、地質調査に加え有機物の直接測定も目指している。その次のステップとして、火星にメタンが見つかったとの報告(石丸ほか, 2012)を受け、ESAが主体のトレースガス・オービターが考慮されている。火星のメタンの存在はまだ確定はしておらず異論もあるが、しかし本当に存在していれば火星探査の計画策定に大きな影響をおよぼす可能性を秘めている。実際、地球ではメタンは生命起源であることが多く、火星でも似た状況ではないかとの類推で、軌道上からメタンの多く分布している地域をリモートセンシング

で特定しようという計画だ。

これらの探査の後に来る計画としては、火星の生命探査を主目的としたエクソ・マーズ・ローバーをESA主導で送り込むことが議論されている。火星の地表では有機物が強い紫外線や酸化条件の影響で破壊されてしまうと考えられている。そのため地表から2 m ぐらいまで掘り進めて取るコアサンプルの調査も、可能性として挙げられている。このようなローバーの探査計画には、もう一つの目的がある。火星の地表付近の物質サンプルを地球に持ってくるという別の将来計画があるが、そのための地質調査やサンプル収集も行ってしまうというものである。

それでは日本の火星探査はどうなっているのか。並木ほか(2012)や山岸(2012)に現状が紹介されているが、2020年代の実現を目指して Mars Exploration with Lander-Orbiter Synergy (MELOS) と呼ばれる探査計画が現在考慮されている。基本線としては、欧米とは違う独自色のある探査

を行おうという方向で議論がなされ、大気の変遷と地表あるいは地殻の関係を調べることが大きな目標になっている。いずれにせよ、地質や地形の調査研究が大きな比重を占める可能性があり、その場合日本においても地質学者の惑星地質学分野への参入、比較惑星学を意識したフィールドワークの必要性が出てくる可能性は十分考えられる。

惑星地質学における地球の類似 地質・地形の研究の歴史

惑星地質学における地球の類似地質・地形の比較研究は、1960年代のアポロ宇宙飛行士のトレーニングで月の地質や地形と共通点のある地球の場所を調査、利用したことにはじまる。例えばアリゾナ州北部のコロラド高原に存在する、隕石衝突で形成されたメテオ・クレーター(盆地の直径約1.2 km)は保存状態が良く、この時期に詳しく調査された代表的な類似地質・地形サイトである(Fig. 2a)。その後、NASAが類似地質・地形の研究をシリーズ化したのが、具体的には次のような例が挙げられる(Fig. 3a-3e)：

- ・ハワイとスネーク川平原の火成作用
- ・南カリフォルニアの風成作用
- ・氷河時代の大洪水の跡であるワシントン州東部のチャンネルド・スカブランド
- ・コロラド高原の谷地形

このうち、ハワイとスネーク川平原の火成作用については月と火星との比較が考慮され、その他は火星との比較が考慮された。これらの類似地質・地形サイトについてはフィールド・ガイドブックが出版されたり(Greeley, ed., 1974; Greeley and King, eds., 1977; Baker and Nummedal, eds., 1978; Greeley et al., eds., 1978; Howard et al., eds., 1988)、理解を進めようと研究のサポートが行われた。これら以外に特筆すべきユニークな例としては、ネバダ州の核実験場で形成された核爆発によるクレーター群が、衝突クレーターの類似地形として価値が認識され、比較研究が行われた(Fig. 2b)。

その後、惑星探査の不調が続いたこともあって、地球の類似地質・地形の研究は一時下火となった。しかし、1997年に火星着陸をはたしたマース・パスファインダー計画の予備研究で、その価値の再確認がなされ、アメリカ北西部の巨大洪水地形チャンネルド・スカブランドにおいて類似地質・地形についての会議が1995年に開催された(小松, 1995)。地球の類似地質・地形について開催される会議は、太陽系天体と地球の地質や地形についての比較研究を中心トピックとするため、会場近辺で野外巡検を行うことが慣例となっている。チャンネルド・スカブランドでの類似地質・地形会議は、マース・パスファインダーが火星の大洪水が起きたとされている場所(後藤・小松, 2012b)に着陸することになったため開催された会議だった(Fig. 4a, 4b)。

その後、マース・グローバル・サーベイヤーを皮切りに、2000年代には新たな火星探査時代が始まった。次々に地球に送られてくる画像データは非常に高精度であり、火星の地質作用の理解を強力に押し進めている。地球の類似地質・地

Fig. 4. Scenes from the 1996 planetary geology field workshop at Channeled Scabland, eastern Washington State. (a) These large boulders were transported and deposited in the Ephrata Fan by catastrophic flooding. (b) Prototype rover testing over a boulder in the Ephrata Fan; the Mars Pathfinder mission, which landed on Mars in 1997, used the Sojourner rover to study a boulder field hypothesized to have formed by ancient catastrophic flooding on Mars. Photographs taken by Goro Komatsu.

形の重要性は、さらに高まったと言っても過言ではない。このため、類似地質・地形に関する会議開催が増加傾向にある。例えば、2010年にはエルパソで堆積学と層序学を対象にした会議や、ハワイで火山学関係の会議が開かれた。惑星の砂丘に特化した会議としては、2008年アラモゴルド、2010年アラモサでの会議が挙げられる。また、今までアメリカに偏っていた類似地質・地形の会議開催も、最近ではカナダやヨーロッパなどでも行われるようになってきた。例えば、2002年エトナ山での会議は、ヨーロッパで最初のものとして特筆される(小松, 2002)。2011年には、アジア地域で初めてとなる類似地質・地形に関する会議が北九州市で開催され、あわせて会議参加者たちは野外巡検で九州中央部の火山地帯を訪れた(Komatsu et al., eds., 2011)。

このような地球の類似地質・地形への興味上昇の時流に乗り、ケンブリッジ大学からこのトピックについて「The Geology of Mars: Evidence from Earth-based Analogs」というタイトルの専門書が出版され(Chapman, ed., 2007)、アメリカ地質学会からは類似地質・地形についての論文を集めた本も「Analog for Planetary Exploration」というタイ

Fig. 5. Comparison between (a) Sunasenrigahama on Aso Volcano and (b) a Martian landscape at the Viking 1 landing site. Images provided by Kazuhisa Goto.

Fig. 6. Representative global terrestrial analog sites; modified from Komatsu (2008).

トルで刊行された (Garry and Bleacher, eds., 2011). 各種学術雑誌も、類似地質・地形の研究についての特集号を組むことが多くなってきており、学界全体での注目度があがってきていることが特筆されよう。

地球の類似地質・地形が存在するサイトは、惑星探査機器の試験や宇宙飛行士のトレーニングにも役立てられている。実際、カリフォルニアのシルバー塩湖で行われたローバーのシミュレーションなどでは、衛星画像と搭載機器で得られたデータを総合して、現地の地質を解釈するというかなり高度な実験が行われている (Stoker et al., 2001)。日本でも、伊

豆大島の三原山で、月や火星探査にも応用が期待される無人観測ロボットを対象とした会議が、2009年から継続的に開催されている (無人観測ロボットシンポジウム実行委員会, 2009)。また、2011年には火星の風景に良く似た阿蘇山の砂千里ヶ浜 (Fig. 5a, 5b) においても複数のローバーが走行試験などを行った。火星の探査や植民を目指す国際的な市民団体である火星協会が、カナダ北極圏のデボン島やユタ州の砂漠地帯で行なっているような将来の有人惑星探査シミュレーションの実証実験も、地球の類似地質・地形との関連で重要である (例えば, Lee and Osinski, 2005)。このように、

惑星環境に似た地質や地形がある地球上のサイトには、純粋な科学研究以外にも惑星探査のために活用すべき利点が多くある。

地球の類似地質・地形の研究の実際

1. 火星の地質や地形との比較研究対象となる地球のサイト

前述したように、火星は地球に似た惑星と言われるが、現在の大気環境は非常に寒冷乾燥している（例えば、Jakosky and Mellon, 2004; 大野, 2012）。火星の地表での大気圧は、約 10 ミリバール以下である。二酸化炭素による温室効果はあるが、火星は太陽から地球に比べて約 1.5 倍の距離にあるため、火星の赤道域の平均気温は約 220 K と極寒である。火星の気柱の平均水量は地球と比べて約 1000 分の 1 で、非常に乾燥している。

このような現在の火星の環境を考慮して、一般に火星と比較される地球のサイトは、寒冷地域あるいは乾燥地域が多く選ばれてきた (Fig. 6)。各種の周氷河地形が豊富に存在するカナダ北極圏 (Lee, 2007) や、氷とマグマの相互作用で有名なアイスランド (Smellie and Chapman, 2002)、高緯度地帯での小規模河川作用が観察されるグリーンランドのジェイムソン・ランド (Costard et al., 2007)、南極大陸のドライバレー、アメリカ西部乾燥地帯などが類似地質・地形サイトの存在する地域として認知され、研究が行われているのは、上述の理由による。また、特定の地質作用を観察できるハワイの火山地帯や、ワシントン州東部のチャンネルド・スカブランド、アリゾナ州のメテオ・クレーターやドイツ南部のリース・クレーター (盆地の直径約 24 km) (Osinski and Melosh, 2004) など盛んに調査され、火星との比較が行われてきた。さらには、サハラ砂漠や北米の乾燥地帯に広く分布する乾湖なども、火星上で最近多く見つかってきている硫酸塩鉱物など (関根, 2012) の形成条件を考察する上で重要となるであろう (Ori et al., eds., 2001; Komatsu et al., 2007)。サハラ砂漠やオーストラリア内陸部の、現在水がほとんど流れていない古河川系は、火星の干上がった河川の形成を探る意味でも研究価値が高い (Komatsu and Baker, 2007)。

ランダーやローバーが地表で行う地質調査によって明らかにされた露頭も、地球の例と対比されている。例えばオポチュニティ・ローバーが撮影した露頭やその周辺には、一般に風成作用で堆積したと解釈されている層理が発達した地層が観察され (長谷川, 2012)、その層には酸化鉄に富んだ球状粒子が大量に存在する (後藤・小松, 2012a)。このような条件に合う地球の類似地質として、ユタ州やアリゾナ州に広く分布するナバホ砂岩を挙げることができる。ナバホ砂岩に含まれる球状粒子は、酸化鉄に富むコンクリーションで、その生成プロセスは火星で見つかる同様の粒子の生成プロセスの理解に寄与している (Ormö et al., 2004)。またオポチュニティによる火星の表層物質の研究から、酸性硫酸塩環境が推測されているが (Squyres et al., 2006)、地球上でそのような条件があるスペイン南部のリオティント周辺が重要な類似地質サイトとされている (Fernández-Remolar et al.,

Fig. 7. Examples of potential volcanological terrestrial analog sites in Japan, including (a) Mount Fuji, a typical composite volcano; (b) Showa Shinzan, a high-viscosity lava dome; (c) the northern rim of the Aso Caldera, one of the largest and best-preserved calderas in the world; and (d) mud pools in the Beppu hot spring area. Photographs taken by Goro Komatsu.

Fig. 8. Examples of potential terrestrial analog sites in Asia. (a) The Azas Plateau contains a wide range of potential terrestrial analog sites, including subglacial volcanoes, and glacial and peri-glacial landscapes; the table-shaped mountain in the photograph is the subglacial Sorug–Chushku–Uzu volcano, Tuva Republic, Russia, now exposed after melting of glacial cover. (b) The Gobi Desert of southern Mongolia, an area characterized by many dry lakes. The recent discovery of salt minerals on Mars, possibly formed by evaporation, may indicate the presence of ancient Martian dry lake environments. (c) Layered flood basalts, Ajaparvat Peak, India. (d) Lonar Crater and a lake inside its rim, a rare example of an impact crater formed in basalt; viewed from the Dhara Canyon, India. Photographs taken by Goro Komatsu (a, b) and Chaitanya Giri (c, d).

2004).

2. 日本を含むアジア地域での類似地質・地形研究

Fig. 6 を見てもわかる通り、研究が多くなされている地球の類似地質・地形のサイトは、現在までのところほとんどが北米かヨーロッパに偏在している。アジア各国では日本が送った「セレーネ」やインドの「チャンドラヤーン 1 号」、中国の「嫦娥 1 号」などの月探査機、さらには日欧共同の水星探査機「ベスピコロンボ」など太陽系天体の地表を探る探査計画が増えている現状があり、議論が始まっている日本の火星探査機「MELOS」も考慮に入れば、今後は比較惑星学に寄与するフィールドワークが日本を含むアジア太平洋地域でも活発に行われていくはずである。例えば日本や西太平洋の島弧群には多様な火山地形が存在している。アジア大陸に目を向けると、広大な乾燥地帯に乾湖、風成地形などが分布し、高山や高原地帯には氷河・周氷河地形がそろっているため、潜在的な類似地質・地形が数多い。

日本国内の有力候補地としては、まず火星でも多く観察される火山関係が例に挙げられよう。火山や溶岩の多様な形態もさることながら (Fig. 7a-7c)、火山性堆積物も広く分布している。火成活動が現在も活発なことも、その作用を直接観察できる点で得るものが大きい。また、温泉は火星で過去に活動していた形跡が見つかっている地質現象であるが(例え

ば, Squyres et al., 2008), 日本には膨大な数の活動中の温泉がある (Fig. 7d)。火星の原始的な生命は温泉で生きていた可能性もあり、宇宙生命学の観点からも研究価値がある。山がちの地勢を持つ日本列島では、地すべりなどが多く発生し、火星をはじめとした惑星で普遍的な地すべり作用の研究に寄与する余地が多々ある。また河川や海洋の存在は、侵食や運搬堆積の作用の観察を可能にする。

アジア大陸内陸部では、南シベリアのアザス高地 (Fig. 8a) やゴビ砂漠 (Fig. 8b) をはじめとするモンゴル高原一帯において氷河・周氷河地形、火山、乾湖、風成地形、衝突クレーター、大洪水跡など、火星と比較可能な多種多様な地質作用や地形が豊富である。実際、モンゴル高原一帯は、アジア地域における類似地質・地形としてのポテンシャルの高さから、今後さらなる検討の価値があると提唱されている (小松, 2008)。またインド亜大陸には、洪水玄武岩溶岩で形成されたとされる厚い層状構造 (Fig. 8c) や、そこに形成された保存状態の良いロナ・クレーター (盆地の直径約 1.8 km) (Fig. 8d) などが存在している。

3. 類似地質・地形の比較惑星学研究における地球を研究する地質学者の関与

惑星地質学の創世は 1960 年代の米国とソビエト連邦の月探査レースに始まるが、興味深いことにこの時期に米国にお

いてこの分野を作り上げた研究者は、地球の野外地質学のトレーニングをしっかりと受けてきたか、あるいは実際に地球の地質学を仕事としてきた者が多い。しかしながら、最近の惑星地質学の研究においては、そのような地球の地質学の経験を持つ研究者の関与が必ずしも高くはない。これは、アポロ以降の惑星探査での天体表面への着陸が少なく、露頭規模の観察を行う機会があまり多くなかったことに関係しているのかもしれない。

一般に惑星表面の探査では、地球の地質学の歴史と逆で、まず大地形の情報が入り探査が進むにつれて徐々に地域、そして露頭レベルの観察ができるようになる。現在の火星探査においては、地球の地質学者が一番馴れているスケール、例えば露頭の情報が手に入り始めたところである。現に最近、惑星地質学専門の研究者たちが地球のフィールドワークを行なうなど、地球の地質学者と共同で仕事をした結果の論文が増えてきている。野外調査を行なっている地質学者の惑星地質学への関与を増やすこと(松井ほか, 2012)、そして惑星地質学専門の研究者たちや惑星探査技術者たちに地球の多様な環境をもっと良く知ってもらうことの両方が、今後の惑星地質学の発展に重要であり、地球の類似地質・地形におけるフィールドワークでは、これらが可能である。

丸山ほか(2008)でも想像されているように、将来の火星探査では地質学者自身が表面を闊歩し、地球の歴史をひも解くように、赤い惑星(火星)の成り立ちを明らかにする時代が必ずやってくる。ただし、その時までじっと待っている必要はまったくない。地球ほどではなくとも、研究に値するデータはすでにある。あとは地球という一つの惑星で経験をじっくりとつんだ地質学者たちが、もう一つの惑星の地質研究に取り組む興味と気概があるかどうかである。

謝 辞

東北大学の石渡 明氏、熊本大学の渋谷秀敏氏、および編集担当である後藤和久氏には、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。

文 献

- Baker, V. and Nummedal, D., eds., 1978, *The Channeled Scabland-A Guide to the Geomorphology of the Columbia Basin*, Washington. NASA, Washington, D. C., 186p.
- Chapman, M. G., ed., 2007, *The Geology of Mars: Evidence from Earth-based Analogs*. Cambridge University Press, Cambridge, 474p.
- Costard, F., Forget, F., Jomelli, V., Mangold, N. and Peulvast, J.-P., 2007, Debris flows in Greenland and on Mars. In Chapman, M. G., ed., *The Geology of Mars: Evidence from Earth-Based Analogs*, Cambridge University Press, 265–278.
- 無人観測ロボットシンポジウム実行委員会, 2009, 第1回伊豆大島無人観測ロボットシンポジウム報告(Rep. 1st Observ. Robot Symp. Field Exper. Izu-Oshima Volcano). http://astrosis.ess.sci.osaka-u.ac.jp/oshimal_report/oshimal_report.html.
- Fernández-Remolar, D., Gómez-Elvira, J., Gómez, F., Sebastian, E., Martín, J., Manfredi, J. A., Torres, J., González-Kesler, C. and Amils, R., 2004, The Tinto River, an extreme acidic environment under control of iron, as an analog of the Terra Meridiani hematite site of Mars. *Planet. Space Sci.*, **52**, 239–248.
- Garry, W. B. and Bleacher, J. E., eds., 2011, *Analogs for Planetary Exploration*. Geol. Soc. Amer. Special Paper, 483, 567p.
- 後藤和久・小松吾郎(Goto, K. and Komatsu, G.), 2012a, 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(Goto, K. and Komatsu, G.), 2012b, 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(Jour. Geol. Soc. Japan), **118**, 618–631(本特集号).
- 後藤和久・小松吾郎・齋藤 仁(Goto, K., Komatsu, G. and Saito, H.), 2012, 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).
- Greeley R., ed., 1974, *Geologic Guide to the Island of Hawaii, a Field Guide for Comparative Planetary Geology*. NASA, Washington, D. C., 257p.
- Greeley, R. and King, J. S., eds., 1977, *Volcanism of the Eastern Snake River Plain, Idaho, a Comparative Planetary Geology Guidebook*. NASA, Washington, D. C., 308p.
- Greeley, R., Womer, M. B., Papon, R. P. and Spudis, P. D., eds., 1978, *Aeolian features of Southern California, a Comparative Planetary Geology Field Guide*. NASA, Washington, D. C., 264p.
- Howard, A. D., Kochel, R. C. and Holt, H. E., eds., 1988, *Sapping Features of the Colorado Plateau, a Comparative Planetary Geology Field Guide*. NASA, Washington, D. C., 108p.
- 長谷川 精(Hasegawa, H.), 2012, 風成砂丘から見る火星およびタイタンの大気循環システム. 地質雑(Jour. Geol. Soc. Japan), **118**, 632–649(本特集号).
- 石丸 亮・小松吾郎・松井孝典(Ishimaru, R., Komatsu, G. and Matsui, T.), 2012, 火星のメタン. 地質雑(Jour. Geol. Soc. Japan), **118**, 664–674(本特集号).
- Jakosky, B. M. and Mellon, M. T., 2004, Water on Mars. *Physics Today*, **57**, 71–76.
- 小松吾郎(Komatsu, G.), 1995, 地球上での火星体験「マーズパスファインダー」ワークショップ報告. 惑星地質ニュース(Planetary Geology News), **7**, No. 4.
- 小松吾郎(Komatsu, G.), 2002, シシリアで開催の惑星地質野外ワークショップ. 惑星地質ニュース(Planetary Geology News), **14**, No. 4.
- 小松吾郎(Komatsu, G.), 2008, 火星の地質と地球のフィールドとの比較. 宮本英昭・橘 省吾・平田 成・杉田精司編, 惑星地質学(Planetary Geology), 東京大学出版会(Univ. Tokyo Press), 140–147.
- Komatsu, G. and Baker, V. R., 2007, Formation of valleys and cataclysmic flooding on Earth and Mars. In Chapman, M. G., ed., *The Geology of Mars: Evidence from Earth-Based Analogs*, Cambridge University Press, 297–321.
- Komatsu, G., Goto, K. and Shibuya, H., eds., 2011, Volcanic and geothermal activities along the Beppu-Shimabara graben as terrestrial analogs for comparative planetary geology. 2011 PERC Planetary Geology Field Symposium, Guidebook for Field Trip. Planetary Exploration Research Center, Chiba Institute of Technology, Narashino, 62p.
- Komatsu, G., Ori, G. G., Marinangeli, L. and Moersch, J. E., 2007, Playa environments on Earth: Possible analogues for Mars. In Chapman, M. G., ed., *The Geology of Mars: Evidence from Earth-based Analogs*, Cambridge University Press, 322–348.
- Lee, P., 2007, Haughton-Mars Project 1997–2007: A decade of Mars analog science and exploration research at Haughton Crater, Devon Island, High Arctic, Abstr. 2nd International Workshop on Exploring Mars and its Earth Analogues, XXX.
- Lee, P. and Osinski, G. R., 2005, The Haughton-Mars Project: Overview of science investigations at the Haughton impact structure and surrounding terrains, and relevance to plane-

- tary studies. *Meteor. Planet. Sci.*, **40**, 1755–1758.
- 松井孝典・小松吾郎・後藤和久(Matsui, T., Komatsu, G. and Goto, K.), 2012, 火星探査計画における地質学者への期待. 地質雑(*Jour. Geol. Soc. Japan*), **118**, 595–596(本特集号).
- 丸山茂徳・ドーム, ベーカー(Maruyama, S., Dohm, J. and Baker, V.), 2008, 火星の生命と大地 46 億年(*Life on Mars and 4.6 Billion Years of Geological History*), 講談社サイエンティフィク(Kodansha Scientific), 256p.
- 並木則行・小松吾郎・白井寛裕・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(Namiki, N., Komatsu, G., Usui, T., Sugita, S., Miyamoto, H., Kubota, T., Ishigami, G., Demura, H., Okada, T., Miura, Y. N., Cho, Y., Goto, K., Senshu, H., Wada, K., Ishibashi, K., Arai, T., Kobayashi, M., Ohono, S. and Mars rover group), 2012, 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).
- 大野宗祐(Ohno, S.), 2012, 火星の表層環境模擬実験装置. 地質雑(*Jour. Geol. Soc. Japan*), **118**, 689–693(本特集号).
- Ori, G. G., Komatsu, G. and Marinangeli, L., eds., 2001, Chott el Gharsa and Chott el Jerid. *Workshop on Exploring Mars surface and its terrestrial analogues, Fieldtrip Guidebook*. International Research School of Planetary Sciences, Università d' Annunzio, Pescara, 92p.
- Ormö, J., Komatsu, G., Chan, M. A., Beitler, B. and Parry, W. T., 2004, Geological features indicative of processes related to the hematite formation in Meridiani Planum and Aram Chaos, Mars: a comparison with diagenetic hematite deposits in southern Utah, USA. *Icarus*, **171**, 295–316.
- Osinski, G. R. and Melosh, H. J., 2004, A search for terrestrial analogues to Martian layered ejecta structures. *Abstr. Mars crater consortium meeting VII*, 0704.
- 関根康人(Sekine, Y.), 2012, 鉱物・化学組成から読み取る火星の環境変動史. 地質雑(*Jour. Geol. Soc. Japan*), **118**, 650–663(本特集号).
- Smellie, J. L. and Chapman, M. G., eds., 2002, *Volcano-ice interaction on Earth and Mars*. Geological Society, London, Special Publication, **202**, 431p.
- 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., Staufer, U., Stoker, C., Taylor, P., Whiteway, J. A. and Zent, A. P., 2009, H₂O at the Phoenix landing site. *Science*, **325**, 58–61.
- Squyres, S. W. and Knoll, A. H., 2005, Sedimentary rocks at Meridiani Planum: Origin, diagenesis, and implications for life on Mars. *Earth. Planet. Sci. Lett.*, **240**, 1–10.
- Squyres, S. W., Arvidson, R. E., Ruff, S., Gellert, R., Morris, R. V., Ming, D. W., Crumpler, L., Farmer, J. D., Des Marais, D. J., Yen, A., McLennan, S. M., Calvin, W., Bell, J. F. III, Clark, B. C., Wang, A., McCoy, T. J., Schmidt, M. E. and de Souza, P. A. Jr., 2008, Detection of silica-rich deposits on Mars. *Science*, **320**, 1063–1067.
- Squyres, S. W., Knoll, A. H., Arvidson, R. E., Clark, B. C., Grotzinger, J. P., Jolliff, B. L., McLennan, S. M., Tosca, N. J., Bell, J. F., III, Calvin, W. M., Farrand, W. H., Glotch, T. D., Golombek, M. P., Herkenhoff, K. E., Johnson, J. R., Klingelhöfer, G., McSween, H. Y. and Yen, A. S., 2006, Two years at Meridiani Planum: Results from the Opportunity Rover. *Science*, **313**, 1403–1407.
- Stoker, C. R., Cabrol, N. A., Roush, T. R., Moersch, J., Aubele, J., Barlow, N., Bettis, E. A., Bishop, J., Chapman, M., Clifford, S., Cockell, C. S., Crumpler, L., Craddock, L., De Hon, R., Foster, T., Gulick, V., Grin, E., Horton, K., Hovde, G., Johnson, J. R., Lee, P. C., Lemmon, M. T., Marshall, J., Newsom, H. E., Ori, G. G., Reagan, M., Rice, J. W., Ruff, S. W., Schreiner, J., Sims, M., Smith, P. H., Tanaka, K., Thomas, H. J., Thomas, G. and Yingst, R. A., 2001, The 1999 Marsokhod rover mission simulation at Silver Lake, California: Mission overview, data sets, and summary of results. *Jour. Geophys. Res. Planets*, **106**(E4), 7639–7663.
- 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).

(要 旨)

小松吾郎, 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, **118**, 597–605. (Komatsu, G., 2012, The status of Mars exploration: the importance of terrestrial analogs and the role of geologists. *Jour. Geol. Soc. Japan*, **118**, 597–605.)

近年の火星探査は, 取得データの質と量の飛躍的な向上で特徴づけられ, 高解像度リモートセンシングや露頭のデータが例として挙げられる. この延長としての将来の探査計画は, 生物探査を視野に入れた地質環境精査が目標であるが, サンプルを地球に持ち帰り詳細分析をする計画もある. 大量かつ質の良いデータは, 地球の地質を研究してきた地質学者たちの火星研究に寄与する可能性を高めた. これは, 彼らの経験や研究しているフィールドの特性が, 火星の地質の変遷や地形形成の理解に貢献するという前提による. 火星の表面の作用は, 地球のそれと共通している面があり, 様々な地球の類似地質・地形が火星研究に役立てられてきた. 極域や大陸内部の砂漠など寒冷, 乾燥している場所が多いが, 特定の地質作用が観察される衝突クレーターや火山などのフィールドもある. 現在まで, 日本を含むアジア地域は惑星地質学研究においてはほとんど活用されてこなかったが, この地域の多種多様な地質や地形は, 火星との比較対象として今後大きな役割を果たす可能性を秘めている.