

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 7 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2011～2015

課題番号：23340126

研究課題名(和文) 火星の地下に巨大な海が存在したか 新しい仮説の提唱と複合的アプローチによる検証

研究課題名(英文) Ancient subsurface aquifer on Mars; a new hypothesis with validations through different approaches

研究代表者

宮本 英昭 (Hideaki, Miyamoto)

東京大学・総合研究博物館・准教授

研究者番号：00312992

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,100,000円

研究成果の概要(和文)：火星にはかつて強い磁場があり、液体の水が大量に存在していたことなどから、生命が誕生していた可能性があるとして議論されている。本研究は将来の火星生命探査も視野に入れ、海や温暖湿潤気候という観点から火星固有の水循環の様式について多角的に検討した。特に海仮説の大きな矛盾点とかねてから指摘されていた海岸線の欠如という問題点については、ヘスperia代に発生した巨大津波による地形改変の証拠を見つけることに成功し、長年続いた論争に終止符を打つことができた。地下に大量に蓄積された水(氷)がアウトフローチャネルの形成に本質的に重要であったことなども明らかにし、将来の探査計画における着地点候補もまとめることができた。

研究成果の概要(英文)：Series of evidence indicates that ancient Mars had a strong magnet field and holded vast amount of liquid water on its surface, which have intrigued astrobiological interests. We investigated the water circulation system of Mars in terms of ocean formations, subsurface aquifers, and water circulations. The biggest discrepancy in the ocean hypothesis was the failure to identify shoreline features. One discovery of this work offers a simple solution to this long-lasting problem; tsunami modified the shorelines and deposits spread on them. This work also clarified that large amount of water in the subsurface could be identified as numerous depressions, which are essential for the formation of outflow channels. This work also discussed about the possible link between ancient aquifer and recurrent slope lineae (RSLs), which are surface emanations of small amount of water flows, and concluded that RSLs would be the best target for future landing mission to Mars for astrobiological purposes.

研究分野：惑星科学

キーワード：火星 水 海 アウトフローチャネル 水循環 生命探査 津波

1. 研究開始当初の背景

地球では、生命の誕生と初期進化は海の中で生じたと考えられている。その海が存在は、その後の地球の表層環境進化、さらには内部進化において決定的に重要な役割を果たしてきた。火星においても、形成後の最初の時代（ノアキス代）に、海が形成されていた可能性は高いとされる。火星隕石の微量元素濃度から、天体の内部に取り込まれた水の半分程度が脱ガスし、火星全球で考えると少なくとも1～数km程度の厚さの量の水は地表付近にもたらされたようだ(Lunine et al., 2003)。大量の水は、当時から低地であった北部平原に集まったと考えられる(Baker et al., 1991)。

しかしこうしてできたと考えられる海の証拠として、確実なものは実はそれほどない。またこのころに生命が誕生していたとしても、地球のように生命が繁栄することはなかった。この理由は、火星が地球より早くに冷え切ってしまったからであるとされている。火星は地球よりも太陽から遠く、半径が地球の半分しかないため、熱源の尺度となる半径の3乗と冷却の尺度となる半径の2乗の比が異なることから、地球よりも火星が冷え易いことに疑いは無い。実際火星の地質学的な活動度は、ヘスペリアン以降にはかなり低下し、アマゾニアンになると極めて限られたものになっている。現在の火星の表層環境は極度に乾燥し凍結し、大気も散逸し地球の150分の1まで薄くなった。その結果、地表面は長期間にわたり強度の紫外線照射を経験し、地表面に生命が繁殖することは難しくなったと考えられる。液体の水が残存しているとしても、これは極めて地下深くの帯水層の形(Clifford, 1993)と従来は考えられており、ここにアクセスすることは困難である。

現在の火星は完全に死に絶えているのかどうかという点に関連して、2001年に打ち上げられた Mars Odyssey 探査機は、現在の熱および水の活動度を探ることを目的としていたが、THEMIS(および MGS の TES)の長期間にわたる観測を通じて、いかなる熱異常も液体の水の流出も見出すことができなかった。こうした理由から、火星科学の究極的な目的の一つである生命体の発見は、地下数キロメートル以下にアプローチしないと不可能であるとする見方が示されるようになり、現在の火星の生命探しは米国の火星探査のスコープから外れることとなった。

2. 研究の目的

こうした見方に対して、私たちは現在も火星に内因的な活動度が残っているとする立場を取る。なぜなら、実際近年になって、THEMIS や TES の解像度よりも小さ

い、ごく最近の内因的な活動度を示唆する現象が見つかるようになってきていたからだ。たとえば近年の火山活動の存在を示唆する地形や、ごく近年の断層の発達も報告されている[Spagnuolo et al., 2011]。さらにガリーと呼ばれる地表の流水起源と考えられる地形の中には、季節変化を示すものがあり[Dunda et al., 2010]、地下のなんらかの活動度に依存しているとする説も提唱されている。

ところが肝心の過去における海が存在と矛盾する証拠も多い。たとえばガンマ線スペクトルメータによる元素存在度は、水溶性である K と難水溶性である Th との比率が変化せず、海が存在したにしては水質変成の効果が見えない点は奇妙である(Taylor et al, 2006)。また、水で風化されやすいカンラン石を含む玄武岩の溶岩が、近赤外反射分光計測(CRISM)によって広く北部平原の露頭に見つかっている(Bibring et al., 2006)し、北部平原には、そもそも含水鉱物すら見つからない。つまり化学的に見ると、北部平原は水の風化を受けていない火山性堆積物である。さらに、太陽光度が数十%も低い30億年以上前において、海や水循環を維持できるほど温暖湿潤な気候は、CO₂の温室効果などを含めても理論的には難しいことが指摘されている(Kasting, 1991)。加えてヘスペリア代に急に寒冷乾燥気候へ変化したとする場合、その理由も不明瞭であるし、流水地形や含水鉱物がヘスペリア代に急激に減少する原因も見つかっていない。

こうした矛盾を解決し、火星特有の水循環について理解することが、本研究の目的であった。このことは同時に、過去における火星におけるアストロバイオロジー的な側面での検討を進める上で極めて重要であり、日本で開発が進む生命探査機器の実証的活用を、着陸探査候補地点という意味で洗い出すという意味でも大切な意義があった。

3. 研究の方法

そこで本研究では、大規模な水の存在とその流動の痕跡と考えられる地形の徹底的な検出と、その全球的な分布について重点的に調査を行った。この際、HEMIS IR(day)画像をベースマップとしたうえで地理情報システム ArcGIS 上に座標投影し、そのうえに多数のCTX画像を座標変換してつなぎ合わせ、写真地質学的な解析が行える基盤を作った。さらに MOLA 高度データも同様のベースマップへと取り込み、マッピングのための基礎データとした。

こうして整えたデータセットを用いて、特定の地形的特徴に焦点を絞り、広範囲に及ぶマッピングをつづけた。

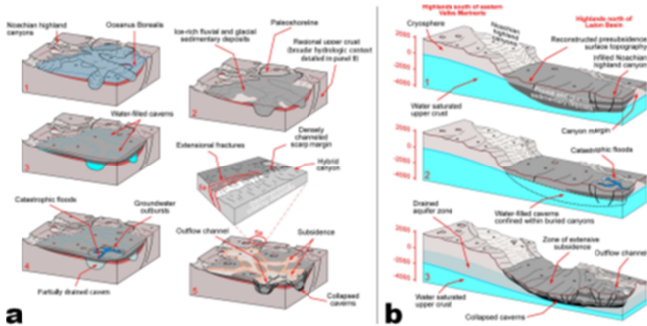


図1 アウトフローチャネルのマッピングを通じて得た、帯水層の進化と陥没地形/アウトフローチャネル形成の進化モデル(発表論文8)

特にアウトフローチャネルの底面の高度分布について、広範囲にわたって調査を行った。この際、従来の類似した研究で用いられてきた THEMIS IR 512 データを用いるよりも、はるかに解像度の高い CTX 画像をベースマップとして用いることで、鍵となる地形的特徴を正確にとらえることができるようになった。特に津波堆積物と解釈できるロープ状地形の発見は極めて重要で、こうした鍵となる地形の分布を正確にとらえることが、本研究の遂行において重要な役割を果たした。また流水地形についてはさまざまな新しい仮説を提唱することとなったが、それらの流動解析は過去に開発した数値モデル等を利用した。

4. 研究成果

当初から予定していた通り、Hebrus Vallis について、上で作り上げたデータセットを用いて詳しく調査した。その結果、莫大な量の地下水が長期間にわたって火星の地下に閉じ込められており、ときおり泥火山などを通じて地表面に噴出していること、さらにこのアウトフローチャネルの末端部では、大量の流水が地下空洞へと流れ込み、その後地下の帯水層へと浸出していったことが明らかになった。さらにこの空洞の形成と流水活動との間には、泥火山の活動が重要な役割を果たしていることがわかった(発表論文 11, 12, 13, 14, 15)。

この成果を受けて、クリュセ地域やマリネレス峡谷周辺まで広く広がるアウトフローチャネルのマッピングを行った。特にアウトフローチャネル底面の高度分布に注目し、これらが地下空洞と関係している可能性があることを考慮し、その地形的特徴とクレーター年代との関連も含めてタイプごとに分布を整理した。その結果、クリュセ地域周辺においても、地下帯水層の役割は極めて大きく、ここから流出した大量の水が一部凍結し別の層を作り、そこから二次的に流出することにより地下空洞を作っていることが明らかになった(発表論文 5, 7, 8, 9,

10)。この概念図を図1に示した。

この研究に関連して、なぜ北部平原に海がかつて存在していたのに、その痕跡(特に連続した海岸線地形)が欠如しているのか、という問題にも取り組んだ。やはり主に CTX と MOLA 高度データを基礎とした高解像度ベースマップを利用し、線状構造を持つテラス状地形やロープ状地形の分布を調べ、これと等高線と比較した。その結果、かつて存在していたと考えられる海岸線地形は、こうした後の堆積物によって広範囲にわたって擾乱を受けていたことがわかった。そのためこうした特徴的な堆積物の構造を詳しく調べ、これらはかつて存在していた北部平原の海へ隕石衝突が生じた際の津波堆積物であるとする新説を提案した(図2)。そのように考えると、海岸線地形の部分的な欠如は矛盾なく説明できるし、広範囲におけるアウトフローチャネルの水の供給源の分布とも調和的である(発表論文 1, 3, 4)。

こうした研究成果は、長期間における地下帯水層の存在を示唆している。ところで近年になって報告された Recurring Slope Linear (RSL) と呼ばれる地形(図3)は、水が関与して形成された可能性が最も高い地形と言われている。この地形を HiRISE の高解像度画像で繰り返し観察したところ、地表にみられる液体の長さが春~夏にかけて次第に長くなり、冬になると消えることが確認された。こうした地形が見つっている場所は興味深いことに、特定の緯度帯や方位を持つわけでは無い。強いて言えば、多くは古い年代を示し、かつ塩化物など水の存在を強く示唆する堆積物が周囲で見ついている場所である。こうしたことは、RSL の形成は地下水を起源としていることを強く示唆している。さらに火星周回機(Mars Express)および地上望遠鏡(IRTF など)からの観測により、火星大気中にメタンの存在が示唆されている。メタンの生成は無機的にも有機的にも生じうるが、やはり何らかの内因的な活動度を示唆する重要な

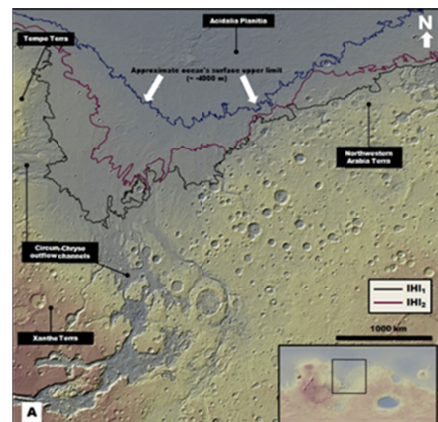


図2 海岸線がかつて存在していた場所と、津波堆積物等による擾乱を受けた場所の比較(発表論文1)

現象である。さらにメタンと酸化鉄を用い(酸化鉄によりメタンを酸化する)エネルギーを獲得する細菌が地球上には存在している。火星の環境は生命の生息環境としては過酷な環境であるが、近年の極限環境微生物学の発展から、地球の様々な極限環境でも生命の生存が可能であることが明らかとなって来ている。放射線耐性菌として知られている *Deinococcus* 属の細菌は、火星表面の放射線量率 (150 mGy/年) でも生存可能であり、多くの微生物もまた火星表面であっても紫外線を避けることのできる深度 (数 cm 表面下) であれば十分生存可能であることが実験的にも検証されつつある。こうした状況を考慮すると、火星の表面下には、現在でもハビタブルな環境が存在している可能性があり、かつ、こうした場所へ地表からアクセスできる場所が存在していることが考えられる。

そこで代表者が科学のとりまとめを行っていた火星着陸探査ワーキンググループでは、この RSL が長期間存在している地下帯水層への窓として考えられるのではないかと考え、これこそ日本が目指す火星生命探査計画にとって重要な骨子となると位置付けた。つまり火星に現在も内因的な活動度が存在するとしたら、それが観察できる場所こそ、最も生命探査に適した場所であると考えられる。そのためこうした場所を丹念なデータ解析の末に探し出したうえで、その場において将来生命検出実験を行うことができれば、極めて科学的に大きなインパクトのある実験を行うことができる。こうした理由から、内因的な活動度と RSL との関連を、将来の着陸探査に資する領域において検討することにした。

内因的な活動度とは、たとえば断層運動や火山活動、熱水/地下水活動などの形で観察できると考えられるが、こうした活動が現在も存在することは強く示唆されているものの、火星の地表が均質なレゴリスで覆われているために、広範囲・高精度のリモートセンシング観測が行われている現在にいたっても、確実な発見がなされていない。そのため特に液体の水の関与の可能性が高いとされる RSL 周辺に着陸し、これが内因的な原因によって生じているかどうかを明らかにすることは、火星の

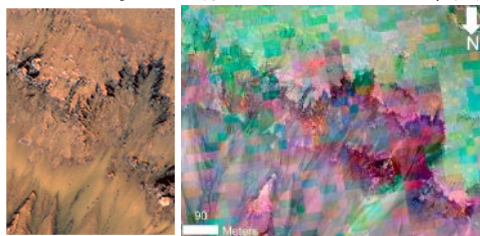


図3 RSL と呼ばれる現在も水が流れているとされる地形 (左)。画像のカラーは季節変動し、粒子の細かさや酸化鉄の量が変化していることに対応していると考えられている。

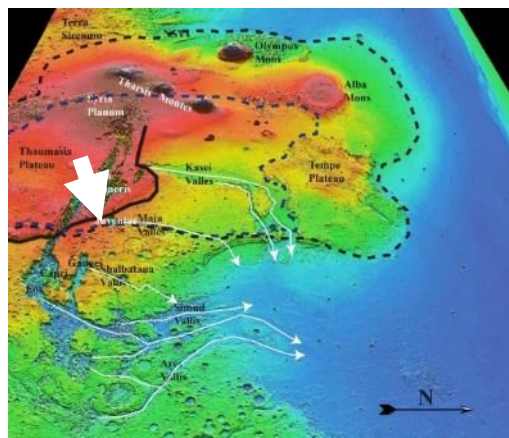


図4 本研究で見いだされた、将来の火星着陸探査に有望な着陸地点候補 (Juvantae Chasma と Melas Chasma、発表論文2)

熱的進化史、および表層進化史を考える上でも重要である。液体の水が現在の火星の地表あるいは地下浅部に存在するかどうかは、火星の科学において長らく議論になっている話題であり、その確認は大きな科学的成果となるが、また将来の有人探査への応用(水の現地利用など)を考えた場合でも極めて重要である。換言すれば、生命検出の可否に関わらず、火星科学上極めて重要な問題に答えることができる観測を行うことができるだろう。

火星の表面下には、現在でもハビタブルな環境が存在している可能性があるが、直接こうした場所へ検出器を送り込んだり、ボーリングを行うことは、困難を伴う。しかしそのようなことをせずとも、地表付近にハビタブルな環境へのアクセスを許す場所が見つかるのかもしれないことを、本研究は示しているともいえる。こうした可能性の高い場所の具体例として、以下に示すように Melas Chasma と Juvantae Chasma (図4) が着陸地点として極めて有望である。

提案している2地点は、どちらも太陽系最大の峡谷であるバレスマリネレス峡谷に位置している(図4)。バレスマリネレスが特徴的なのは、大規模な流水活動、火山活動、構造運動等を経験している点である。都合の良いことに、赤道周辺の低高度に位置するため、着陸や通信等の運用面においてメリットが多い。

Melas Chasma はバレスマリネレスの中でも最も深い地点に位置している。この地点から東方向にある Aurorae Chaos などのカオス地帯へと続き、その北側に巨大な洪水跡であるアウトフローチャネルを通じて北部平原へと続いている。アウトフローチャネルの傾斜は北部平原に向けてむしろ逆向きの傾斜となっていることなどから、北部平原へと水が流れるために、少なくとも 1km 程度の水深があった(e.g., Golombek 1989)と考えられている。これに調和的な証拠として、塩化物や層

状ケイ酸塩が様々な場所で見つかっており [e.g., Gendrin et al., 2005, Murchie et al., 2009, Roach et al., 2010; Weitz et al., 2012, 2014]、極めて豊富な水に満ちていた環境であったと考えられている。谷の平坦な底面にある複数個のクレター壁に、繰り返し RSL が形成されていることが確認されている (confirmed RSL)。こうしたことから、この地域に着陸することができれば、過去の水の痕跡から現在の流水に至るまで、水がさまざまな条件で関与した地域を調査することが可能となる。

Juventae Chasm はノアキアンの年代を持つ深い壁面に囲まれた陥没地形で、硫酸塩の極めて明瞭な層状構造堆積物 (ILD) が見つかっており、この谷から北側に巨大な洪水跡であるアウトフローチャネル (Maja Valles) へとつながっている。こうしたことから、過去において豊富に水が存在した環境であると考えられている。提案している着陸地点周辺には、ノブ状の小高い山があり、その上部に繰り返し RSL が形成されることが確認されている (confirmed RSL)。この地域も Melas Chasma と同様に、過去の水の痕跡から現在の流水に至るまで、水がさまざまな条件で関与した地域を調査することが可能となる。

以上のように、本研究の成果が根幹となり新たな火星像を描像することができた (発表論文 2, 3, 4 など公表)。さらにこの描像に基づく探査計画を火星着陸探査ワーキンググループの共同研究者らと作り上げ、これは正式に 2015 年に JAXA の AO に応募する形で提案を行った。なおその際の着地点候補は、その後も NASA における将来の有人飛行の際の有力な着地点候補としても検討されている (学会発表 5)。

5 . 主な発表論文等

【雑誌論文】(計 18 件)

1. Rodriguez, J.A.P., A.G. Fairen, K.L. Tanaka, M. Zarroca, R. Linares, T. Plats, G. Komatsu, H. Miyamoto, et al (2016) Tsunami waves extensively resurfaced the shorelines of an early Martian ocean, *Scientific Reports*, 6, 25106, DOI: 10.1038/srep25106
2. 宮本英昭、小松五郎、他 (2016), 地形学からみた火星の表層環境史と生命探査、*地学雑誌*, 125, 171-184.
3. Dohm, J.M. and H. Miyamoto (2016) Geomorphological indication of ancient, recent, and possibly present-day aqueous activity on Mars, *J. Geophy.*, 125, 121-132, 2016.
4. Fairen, A. G., J. Dohm, A. Rodriguez, E. Uceda, J. Kargel, R. Soare, J. Cleaves, D. Oehler, M. Banks, G. Komatsu, W. Fink, S. Robbins, J. Yan, H. Miyamoto, et al (2016), The Argyre Region as a Prime Target for in situ Astrobiological Exploration of Mars, *Astrobiology*, 16(2), 143-158.
5. Rodriguez, J. A. P., et al. (2015), New insights into the Late Amazonian zonal shrinkage of the martian south polar plateau, *Icarus*, 248, 407-411.
6. Dohm, J. M., T. Hare, S. Robbins, R. Soare, S. Conway, D. Buczkowsky, J. Kargel, M. Banks, A. Fairen, G. Komatsu, H. Miyamoto et al. (2015), Geological and hydrological histories of the Argyre province, Mars, *Icarus*, 253, 66-98.
7. Rodriguez, A., T. Plats, V. Gulick, V. Baker, A. Fairen, J. Kargel, J. Yan, H. Miyamoto, N. Glines, (2015), Did the martian outflow channels mostly form during the Amazonian Period?, *Icarus*, 257, 387-395.
8. Rodriguez, A, J. Kargel, V. Baker, V. Gulick, D. Berman, A. Fairen, R. Linares, M. Zarroca, J. Yan, H. Miyamoto, N. Glines (2015), Martian outflow channels: How did their source aquifers form, and why did they drain so rapidly?, *Scientific Reports*, 5.
9. Hirata, N., H. Miyamoto, and A. P. Showman (2014), Particle deposition on the saturnian satellites from ephemeral cryovolcanism on Enceladus, *Geophysical Research Letters*, 41(12), 4135-4141.
10. Rodriguez, J. A. P., V. C. Gulick, V. R. Baker, T. Platz, A. G. Fairen, H. Miyamoto, J. S. Kargel, J. W. Rice, and N. Glines (2014), Evidence for Middle Amazonian catastrophic flooding and glaciation on Mars, *Icarus*, 242, 202-210.
11. Mahaney, W. C., J. M. Dohm, S. Schwartz, N. Findling, K. M. Hart, S. J. Conway, C. C. R. Allen, H. Miyamoto, and A. G. Fairen (2014), Mineralogy, chemistry and biological contingents of an early-middle Miocene Antarctic paleosol and its relevance as a Martian analogue, *Planetary and Space Science*, 104, 253-269.
12. Michikami, T., A. Hagermann, H. Miyamoto, S. Miura, J. Haruyama, and P. S. Lykawka (2014), Impact cratering experiments in brittle targets

with variable thickness: Implications for deep pit craters on Mars, *Planetary and Space Science*, 96, 71-80.

13. Miyamoto, H. (2014), Unconsolidated boulders on the surface of Itokawa, *Planetary and Space Science*, 95, 94-102.
14. Hirata, N., and H. Miyamoto (2012), Dust levitation as a major resurfacing process on the surface of a saturnian icy satellite, *Atlas, Icarus*, 220(1), 106-113.
15. Rodriguez, A., M. Bourke, K. Tanaka, H. Miyamoto, J. Kargel, V. Baker, A. Fairen, et al (2012), Infiltration of Martian outflow channel floodwaters into lowland cavernous systems, *Geophysical Research Letters*, 39.

【学会発表】(国際学会、招待講演のみを記載、12件)

1. Miyamoto, H. Geomorphological view of the aqueous history of Mars and candidates of current habitable environments, Japan Geoscience Union meeting, May 22-26, 2016
2. Rodriguez, A., et al, North pole spiral trough in-situ formation as a water-ice source to lower latitude glacial and periglacial environments on Mars, 47th lunar and planetary science conference, March 21-25, 2016
3. Rodriguez, A. A. Fairen, R. Linares, M. Zarroca, T. Platz, G. Komatsu, J. Kargel, H. Miyamoto, V. Baker, N. Glines, Tsunami waves extensively resurfaced the shorelines of an early martian ocean, 47th Lunar and planetary science conference, March 21-25, 2016
4. Miyamoto, H. et al, Geological implications of landing-site candidates of the MELOS mission, Japan Geoscience Union meeting, May 24-28, 2015
5. McEwen, A. M. Chojnacki, H. Miyamoto et al., Landing site and exploration zone in eastern Melas Chasma, First landing site exploration zone workshop for Human missions to the surface of Mars, Oct 27-30, 2015
6. Dohm, J.M. S. Maruyama, H. Miyamoto et al., The Mars planet-tectonic-basement hypothesis, 46th Lunar and planetary science conference, March 16-20, 2015
7. Yamagishi, A. K. Fujita, E. Imai, A. Miyakawa, H.

Miyamoto, S. Ohno, T. Ozawa, S. Sasaki, Y. Yoshimura, T. Usui, Life detection microscope for in-situ imaging of living cells on Mars, 45th Lunar and planetary science conference, March 17-21, 2014

8. Miyamoto, H. et al., Updates on the MELOS 1 Japanese Mars exploration mission, 10th annual meeting of Asia Oceania geoscience society, June 20, 2013
9. Miyamoto, H. et al., Science and landing-site candidates of the MELOS 1 EDL demonstrator, Japan Geoscience Union meeting, May 19-24, 2013
10. Satoh, T., T. Kubota, K. Fujita, T. Okada, T. Iwata, T. Imamura, A. Oyama, K. Yamada, H. Miyamoto et al., Overview of Japan's MELOS 1 mission: Mars exploration for life/organism search, International astrobiology workshop 2013, Nov 28-30, 2013
11. Dohm, J.M, R. Anderson, H. Miyamoto, et al., Dynamic early Mars, Third conference on early mars: geologic, hydrologic, and climatic evolution and the implications for life, May 21-25, 2012
12. Yamagishi, A, Y. Yoshimura, H. Honda, A. Miyakawa, T. Satoh, G. Ishigami, J. Haruyama, K. Kobayashi, T. Naganuma, S. Sasaki, H. Miyamoto, Melos life search proposal: Search for microbes on the Mars surface with special interest in Methane-oxidizing bacteria, 39th COSPAR scientific assembly, Jul 14-22, 2012

6 . 研究組織

(1) 研究代表者

宮本英昭 (MIYAMOTO, Hideaki)
東京大学・総合研究博物館・准教授
研究者番号 : 00312992

(2) 研究協力者

Alexis Rodriguez
Planetary Science Institute, Senior Scientist