

火星表面における岩石の風化プロセスと風化生成物

佐藤 昌人* 八反地 剛** 松岡 憲知**

Rock Weathering Processes and Products on Martian Surface

Masato SATO*, Tsuyoshi HATTANJI** and Norikazu MATSUOKA**

[Received 14 January, 2015; Accepted 18 June, 2015]

Abstract

Weathering processes on Martian surface are among the essential issues for both understanding landform evolution and exploring water availability on Martian surface. Studies are reviewed on various weathering processes on Martian surface based on images, data collected by rovers, and laboratory approaches. Recent explorations by the Mars Exploration Rovers reveal that chemical weathering occurs on the surface of basaltic regolith. Dissolution of olivine and oxidation of Fe produces weathering rinds on basaltic surface regolith. Rock interiors also show vugs and veins filled with light-toned efflorescence indicative of chemical weathering. In particular, in high-latitude areas the two Viking landers and the Mars Pathfinder observed honeycomb weathering, angular rock fragments, and polygonal cracks in bedrock. Most of these features are also observed in the Antarctica and other cold deserts on Earth, and are generally attributed to physical weathering such as salt crystallization, thermal weathering, and/or frost weathering. Some studies successfully estimate periods and rates of weathering on the Martian surface, which promote a further understanding of environmental changes and landform evolution.

Key words : dissolution, salt weathering, frost weathering, thermal cracking, Antarctica, Mars

キーワード : 溶解, 塩類風化, 凍結破碎, 熱破碎, 南極, 火星

I. はじめに

Viking 1 号, 2 号 (以下, Viking) により撮影された画像から, 岩石に蜂の巣状の穴やタフoni 状の地形, 土壌中に含まれる角礫など数多くの風化生成物が確認され (Mutch *et al.*, 1976a, b), 火星表面における岩石の風化が注目されるようになった。火星表層の風化プロセスを知ることは, 現在の火星表面の侵食・堆積プロセスを知るうえで重要である。風化により細粒化した碎屑物が,

風成塵となって移動・堆積することから, 風化は火星表面の地形変化と深く関わっている。

風化が起こるためには, 多くの場合, 液体の水が必要となる。Mars Reconnaissance Orbiter に搭載された High Resolution Imaging Science Experiment (以下, HiRISE) や Phoenix により撮影された画像などから, 現在の火星表層に水, 少なくとも氷 (H_2O ice) が存在することがほぼ確実視されている (例えば, Smith *et al.*, 2009; Martínez and Renno, 2013; Ojha *et al.*, 2014)。

* 筑波大学大学院生命環境科学研究科

** 筑波大学生命環境系

* Graduate School of Life and Environmental Sciences, University of Tsukuba, Tsukuba, 305-8572, Japan

** Faculty of Life and Environmental Sciences, University of Tsukuba, Tsukuba, 305-8572, Japan

表 1 火星の風化研究に関連するおもな地上探査機と搭載機器。

Table 1 Mars exploration rovers and instruments for rock weathering studies.

Mission	Location	Mission duration	Scientific instruments	References
Viking 1 & 2	22.47 ± 0.15°N, 48.0 ± 0.5°W (Viking 1) 47.89°N, 225.86°W (Viking 2)	1976–1982	Stereo Color Cameras, X-ray Fluorescence Spectrometer	Soffen and Young (1972), Clark <i>et al.</i> (1977)
Mars Pathfinder	19.33°N, 33.55°W	1997	Imager for Mars Pathfinder (IMP), Alpha Proton X-Ray Spectrometer (APXS)	Foley <i>et al.</i> (2003b), Shirley and Matijevic (1995), Golombek <i>et al.</i> (1997)
Mars Exploration Rovers (Two Rovers: Opportunity & Spirit) (MERs)	1.94°S, 354.47°E (Opportunity) 14.57°S, 175.58°E (Spirit)	2003–current	Panoramic Camera (Pancam), Miniature Thermal Emission Spectrometer (Mini-TES), Alpha Particle X-ray Spectrometer (APXS), Mössbauer Spectrometer (MB), Microscopic Imager (MI), Rock Abrasion Tool (RAT)	Bell <i>et al.</i> (2003), Christensen <i>et al.</i> (2003), Gorevan <i>et al.</i> (2003), Herkenhoff <i>et al.</i> (2003), Klingelhöfer <i>et al.</i> (2003), Rieder <i>et al.</i> (2003), Squyres <i>et al.</i> (2003, 2004a, 2004b)
Phoenix	68.22°N, 234.25°E	2008	Robotic Arm (RA), Robotic Arm Camera (RAC), Surface Stereo Imager (SSI), Microscopy, Electrochemistry, and Conductivity Analyzer (MECA), Thermal and Evolved Gas Analyzer (TEGA)	Kounaves <i>et al.</i> (2003, 2009), Guinn <i>et al.</i> (2008), Hoffman <i>et al.</i> (2008), Keller <i>et al.</i> (2008) Lemmon <i>et al.</i> (2008), Smith <i>et al.</i> (2008)
Mars Science Laboratory (Curiosity Rover) (MSL)	4.59°S, 137.43°E	2012–current	Alpha-Particle X-ray Spectrometer (APXS), Laser-Induced Remote Sensing for Chemistry and Micro-Imaging (ChemCam), Chemistry and Mineralogy (CheMin), Dynamic Albedo of Neutrons (DAN), Mars Hand Lens Imager (MAHLI), Mast Camera (Mastcam)	Edgett <i>et al.</i> (2009), Gellert <i>et al.</i> (2009), Blake <i>et al.</i> (2012), Golombek <i>et al.</i> (2012), Maurice <i>et al.</i> (2012), Mitrofanov <i>et al.</i> (2012), Wiens <i>et al.</i> (2012)

また、過去の火星表面には現在よりも温暖かつ湿潤な環境が存在した可能性が指摘されている (Carr, 1982; Jakosky and Phillips, 2001)。風化生成物の形成過程や風化期間、分布を知るとは、過去の火星表層の環境（どの程度の水が存在していたのか）を把握するうえで重要な手掛かりとなる。例えば、Mars Exploration Rovers (Spirit, Opportunity と呼称される 2 台の探査機、以下では MERs と略称する) により、Meridiani Planum において、同定されたジャロサイトやゲータイトなどの鉱物は、形成過程において液体の水が必要とされている (例えば、Squyres *et al.*, 2004a, 2006; Clark *et al.*, 2005; McLennan *et al.*, 2005)。

Viking や Mars Pathfinder (以下、Pathfinder)

など初期の探査機は、生命探査や気象観測を主目的としており (表 1)、岩石やその風化に関する知見は質量元素比や画像による判断に限られていた (例えば、Mutch *et al.*, 1976a, b; Jones *et al.*, 1979; Guinness *et al.*, 1982; Arvidson *et al.*, 1983; Golombek *et al.*, 1997)。2004 年以降、MERs により、地表面に露出した岩石の質量元素比や鉱物組成の詳細な調査が行われ、岩石の風化に関する定量的なデータが得られるようになった (例えば、Bell *et al.*, 2003; Gellert *et al.*, 2004; Arvidson *et al.*, 2006; Ashley *et al.*, 2011; Fleischer *et al.*, 2011)。また、MERs に搭載された岩石研磨装置 (Gorevan *et al.*, 2003) により、岩石表面と内部の状態を比較することが可能となり、火星表面での岩石の風化に関する多くの知見が得られた

表 2 火星表面と地球（南極, Dry Valleys）の気温, 湿度環境. 各地点の値として, Viking 2 号着陸地点周辺および南極, Dry Valleys は Marchant and Head (2007), Mars Science Laboratory (Curiosity) 着陸地点周辺は NASA (2013), 地球全体は国立天文台 (2008) をそれぞれ用いた.

Table 2 Temperature and moisture data for Martian surface and Earth surface (Dry valleys, Antarctica). Data sources Marchant and Head (2007) for the Viking 2 landing site and Dry Valleys, Antarctica; NASA (2013) for the Mars Science Laboratory (Curiosity) landing site; National Astronomical Observatory (2008) for global mean, respectively.

Location	Earth		Mars	
	Global	Dry Valleys, Antarctica	Curiosity landing site (4.59°S, 137.43°E)	Viking 2 landing site (47.89°N, 225.86°W)
Mean annual temperature (Annual range) (°C)	15 (−70 ~ 55)	−30 ~ −10 (−30 ~ 0)	−40 ~ −30 (−80 ~ 0)	−90 ~ −80 (−110 ~ −20)
Atmospheric pressure (hPa)		1013		6
Moisture in air	1.0 ~ 2.8% in atmospheric composition	40 ~ 70% RH	0.03% in atmosphere composition	

(Arvidson *et al.*, 2004; Gellert *et al.*, 2004; McSween *et al.*, 2004, 2006; Haskin *et al.*, 2005)。このように, 近年, 火星表面における岩石の風化に関する研究は急速に進展しつつある。

本稿では, これまでの研究で得られた火星での岩石の風化に関する知見に加えて, 南極や寒冷砂漠など地球上でもとくに寒冷かつ乾燥した環境 (表 2) を対象に行われた風化研究とも比較しながら, 火星表面での風化について概説する。一般に風化は, 化学的風化と物理的風化, 生物風化の 3 つに大別される (松倉, 1994, 2008)。化学的風化は岩石が水や空気との化学反応により, 岩石の性質が変化する現象であり, 物理的風化は温度変化や塩・氷の晶出により, 岩石が破壊・細屑化する現象である。生物風化は生物活動などに伴って岩石の性質が変化する現象であるが, 本稿執筆時点において, 火星表面での生物活動の痕跡は発見されていないことから, 本稿では化学的風化と物理的風化をとりあげる。

II. 化学的風化

化学的風化は水や空気との化学的反応により, 岩石の化学的性質が変化する現象の総称である。一般に化学的風化には, 溶解, 酸化, 水和, 加水分解などが含まれる。地球上では花崗岩の風化残留物である砂質の土壌 (マサ) の形成や, 石灰岩の溶解によるカルスト地形の形成において,

化学的風化が重要な役割を果たしている。また, 造岩鉱物の溶脱や鉄の酸化により, 表層の厚さ数 mm ~ 数 cm に風化皮膜が形成される (例えば, Oguchi, 2001; Dixon *et al.*, 2002; Mahaney *et al.*, 2012)。風化皮膜の厚みは風化時間を反映すると考えられており, 同一地域内での礫の風化皮膜の厚さから, 段丘や氷河堆積物の相対年代を把握する試みも行われている (例えば, Ricker *et al.*, 1993; 栗山ほか, 2006)。

1) 火星表面の赤色土の形成

火星表面が赤色であることは古くから知られており, 地球から観測した赤外線スペクトルの分析から, リモナイトなどの酸化鉄が存在する可能性が指摘されていた (Sharonov, 1961; Moroz, 1964; Draper *et al.*, 1964)。また, Viking や Pathfinder が撮影した画像から, 火星表面は赤色の土壌と礫に覆われていることが直接示された (Mutch *et al.*, 1976a, b; Golombek *et al.*, 1997; Moore *et al.*, 1999)。

Viking により測定された質量元素比から, 着陸地点周辺の礫は酸化鉄を含む風化玄武岩であると判断され, 土壌は Fe や S, Cl に富むことが示された (表 3)。また, Pathfinder 着陸地点周辺の土壌も, Fe, Mg を多量に含んでいることが示されている (表 4)。Pathfinder 着陸地点周辺の岩石は玄武岩ないし玄武岩質安山岩であり, 周辺の土壌もこれらの岩石の風化生成物であると考え

表 3 Viking により測定された、土壌の質量元素比 (Clark *et al.*, 1982 を一部改変).

Table 3 Chemical compositions of the Viking lander soil samples, measured with XRFs (adapted from Clark *et al.*, 1982).

Sample	Type	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	SO ₃	Cl	K ₂ O	CaO	TiO ₂	Fe ₂ O ₃
Viking 1										
C-1	fines	6	7.5	(43)	7	0.7	0	6	0.65	17.6
C-2	crust	—	—	(42)	9	0.7	0	5.5	0.57	17.3
C-5	crust	7	6.9	42	9.5	0.9	0	5.6	0.60	17.4
C-6	deep fines	6	7.3	44	6.7	0.8	0.04	6.0	0.61	17.3
C-7	fines	5	7.4	44	6.8	0.6	0	6.0	0.63	19.0
C-8	fines	6	7.1	43	5.9	0.65	0	5.8	0.71	18.8
C-9	bulk	5	7.5	45	7.2	0.8	0	6.0	0.71	18.9
C-11	deep fines	6	7.2	—	—	—	0	5.4	0.64	17.7
C-13	crust	7	7.0	(43)	9	0.9	0	5.4	0.59	18.2
Viking 2										
U-1	fines			42	8.4	0.3	0.03	5.8	0.60	18.9
U-2	under rock			43	8.1	0.6	0.02	5.8	0.63	17.6
U-3	fines			44	7.6	—	0	5.95	0.64	18.3
U-4	under rock			44	7.9	0.45	0	5.7	0.52	16.9
U-5	bulk			43	8.3	0.6	0	5.3	0.44	16.3
U-6	deep fines			42	7.9	0.3	0	5.5	0.48	17.1
U-7	deep fines			42	7.6	0.4	0	5.5	0.51	17.5
U-8	bulk			41	(8.5)	—	0	5.6	0.47	—

表 4 Mars Pathfinder により測定された、土壌と岩石の質量元素比 (Brückner *et al.*, 2003 を一部改変).

Table 4 Chemical compositions of the Mars Pathfinder rock/soil samples, measured with APXS (adapted from Brückner *et al.*, 2003).

	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	Cl	K ₂ O	CaO	TiO ₂	Cr ₂ O ₃	MnO	Fe ₂ O ₃
Soils													
A-2	3.2±0.7	8.7±2.0	10.4±0.8	40.9±0.8	0.9±0.2	6.0±1.2	0.7±0.2	0.50±0.04	6.1±0.4	0.7±0.2	0.3±0.1	0.5±0.1	21.2±0.9
A-4	3.2±0.7	8.0±1.9	10.6±0.8	41.0±0.9	1.2±0.2	6.9±1.4	0.8±0.2	0.50±0.07	5.6±0.4	1.0±0.3	0.4±0.1	0.4±0.1	20.4±0.8
A-5	3.2±0.6	7.1±1.7	10.4±0.8	40.7±0.9	0.6±0.1	5.7±1.1	0.8±0.2	0.50±0.05	6.1±0.4	0.6±0.1	0.5±0.1	0.20±0.06	23.7±1.0
A-9	2.6±2.4	6.4±1.6	10.2±0.9	41.7±0.9	0.8±0.2	6.6±1.4	1.2±0.3	0.70±0.09	6.4±0.5	0.8±0.2	0.2±0.1	0.1±0.1	22.2±1.0
A-10	1.8±0.7	7.5±1.7	9.8±0.7	41.3±0.9	0.6±0.1	6.4±1.3	0.8±0.2	0.40±0.04	6.0±0.4	0.8±0.2	0.3±0.1	0.4±0.1	24.0±1.0
A-15	2.7±0.8	6.7±1.6	9.9±0.8	43.2±1.0	0.6±0.1	5.2±1.1	0.8±0.2	0.70±0.07	5.5±0.4	0.8±0.2	0.3±0.1	0.3±0.1	23.2±1.0
Indurated Soil													
A-8	3.1±0.8	6.4±1.5	10.5±0.8	45.0±1.0	0.5±0.1	5.5±1.1	0.9±0.2	0.80±0.06	7.0±0.5	0.7±0.2	0.1±0.1	0.3±0.1	19.1±0.8
Rocks													
A-3	3.2±0.5	2.1±0.5	12.8±0.9	54.1±1.1	0.7±0.1	2.0±0.4	0.5±0.1	1.1±0.07	5.7±0.4	0.6±0.1	0.10±0.04	0.3±0.1	16.7±0.7
A-7	4.9±0.8	5.2±1.2	11.2±0.9	47.4±1.1	0.5±0.1	4.4±0.9	0.8±0.2	0.70±0.06	6.6±0.5	0.7±0.2	0.10±0.1	0.4±0.1	17.1±0.7
A-16	4.9±0.9	4.1±1.0	11.5±0.8	48.0±1.1	0.6±0.1	3.0±0.6	0.6±0.1	0.80±0.07	6.9±0.5	0.7±0.2	0.00±0.04	0.3±0.1	18.6±0.8
A-17	3.6±0.8	3.9±1.0	10.7±0.8	53.9±1.2	0.5±0.1	1.7±0.4	0.5±0.1	0.80±0.09	7.7±0.6	0.5±0.2	0.10±0.1	0.4±0.1	15.8±0.7
A-18	4.0±0.7	3.4±0.8	12.3±0.9	50.0±1.1	0.6±0.1	3.0±0.6	0.7±0.2	1.0±0.08	6.0±0.5	0.7±0.2	0.10±0.1	0.4±0.1	17.9±0.7

られている (Brückner *et al.*, 2003; Foley *et al.*, 2003a)。Viking や Pathfinder により測定された土壌の質量元素比はよく似ている。また、土壌中に多量の Fe が含まれることから、火星表面の土壌が赤色を示すおもな原因は、酸化鉄であると考えられるようになった。

高温多湿で岩石の化学的風化が著しい地球の熱帯・亜熱帯地域には、ラテライトと呼ばれる赤褐色の土壌が広く分布している。ラテライトは岩石中の長石や輝石などが溶脱した後の残留物であり、おもにゲータイトやヘマタイト、リモナイトなどの酸化鉄や粘土鉱物で構成される (Tardy and Nahon, 1985; Valix *et al.*, 2001)。一方、火星表面の岩石中には、Na や Ca など溶脱しやすい元素がある程度残留しており (表 4)、地球のラテライト土壌のように、溶けやすい元素の溶脱により火星表面の赤色土が形成されたとは考えにくい。

MERs に搭載された Mössbauer spectrometer (MB) (Klingelhöfer *et al.*, 2003) により、Columbia Hill (Arvidson *et al.*, 2006; Morris *et al.*, 2006) や Meridiani Planum (Herkenhoff *et al.*, 2004; Squyres *et al.*, 2006) において、土壌からヘマタイトやゲータイトなどの酸化鉄が同定された。ヘマタイトやゲータイトは、かんらん石や火山ガラス、磁硫鉄鉱などの酸化により形成されることが明らかにされており (Schwertmann, 1985; Posey-Dowty *et al.*, 1986; Chevrier *et al.*, 2004)、次節で述べるような玄武岩の酸化により、火星表面の赤色土も形成されたと考えられるようになった (Chevrier and Mathé, 2007)。

ただし、ヘマタイトは火山性の熱水活動などにより形成されることもあり (Baker *et al.*, 2000; Morris *et al.*, 2005)、すべてのヘマタイトが風化生成物であるとは限らない。とくに Meridiani Planum にみられる粒状のヘマタイトは、地下水から凝集したと考えられている (Chan *et al.*, 2004; Herkenhoff *et al.*, 2004)。

2) Gusev クレーター周辺の玄武岩の化学的風化

MERs は Microscopic Imager (MI) (Herkenhoff *et al.*, 2003) と Panoramic Camera (Pan-

cam) (Bell *et al.*, 2003) により高解像度の画像観察が可能であるほか、Alpha Particle X-ray Spectrometer (APXS) (Rieder *et al.*, 2003) と MB による質量元素比や造岩鉱物の同定が可能である。これらの装置による分析の結果、Spirit が着陸した Gusev クレーター周辺の地表に露出した岩石の多くは Mg に富む玄武岩であると判断された (例えば、Gellert *et al.*, 2004; McSween *et al.*, 2004)。露出した岩石の多くは下部が土層に埋没しており、角や上部など風食を受けやすい部分を除き、岩石表面は Fe に富むダストに覆われている (例えば、Arvidson *et al.*, 2004; Bell *et al.*, 2004; Greeley *et al.*, 2004, 2006)。

Gusev クレーターに露出した玄武岩のうち、“Adirondack”, “Humphrey”, “Mazatzal” と名づけられた 3 つの玄武岩 (図 1) を対象に詳細な調査が行われた。MERs に搭載された Rock Abrasion Tool (以下、RAT) のブラシで玄武岩表面のダストを除去したところ、岩石表面には幅 2 mm 程度の六角形状のくぼみが数多く発見された (図 2a)。これらのくぼみは、かんらん石が溶脱した跡であると考えられている (McSween *et al.*, 2004, 2006)。一方、RAT により研磨した後の表面は黒色を示し、内部のかんらん石は未風化のままであった (図 2a)。岩石表面と研磨後の岩石内部の質量元素比を調べたところ、岩石表面では Mg, Ca が内部に比べて減少する一方、Na, K, Al はわずかに増加する傾向を示した (Gellert *et al.*, 2004; McSween *et al.*, 2004, 2006)。また、岩石表面では Fe 全体に占める Fe^{3+} の割合 ($\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}_{\text{total}}$) が高かった (Morris *et al.*, 2004, 2006)。

Mg^{2+} の減少や $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}_{\text{total}}$ の増加といった化学組成の変化は、かんらん石の溶解・酸化により説明される (Morris *et al.*, 2006; Hausrath *et al.*, 2008a)。地球上では、コスタリカの玄武岩の場合、かんらん石と火山ガラスの溶解速度は同程度であり、スバル諸島の玄武岩の場合、かんらん石よりも火山ガラスの溶解速度が大きい (Hausrath *et al.*, 2008a, b)。しかし、火星表面で得られる水の pH は非常に低く、溶解過程が地球上とは異なることが示されている (Tosca *et*

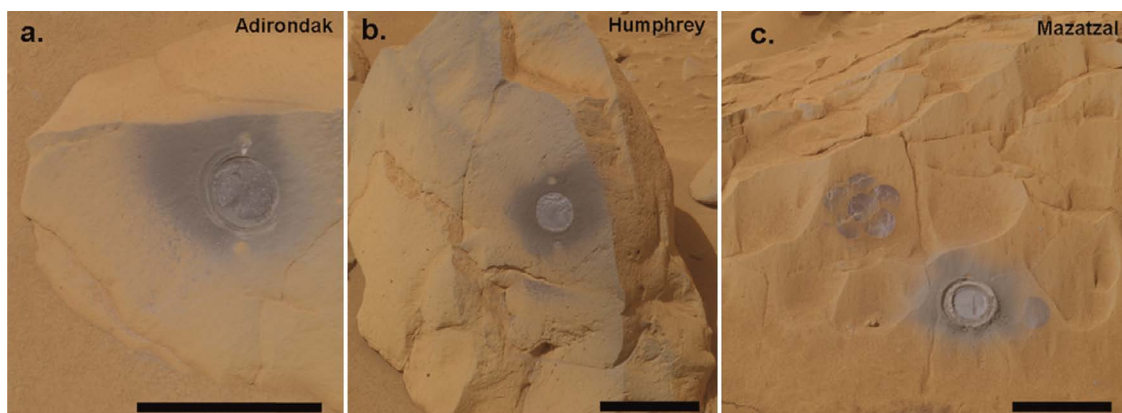


図 1 Gusev クレーターの玄武岩。図中のバーの長さは 10 cm。(McSween *et al.*, 2006 より抜粋) (a) Adirondak, (b) Humphrey, (c) Mazatzal.

Fig. 1 Basaltic rocks in Gusev Crater (adapted from McSween *et al.*, 2006). The scale bars are 10-cm long. (a) Adirondak, (b) Humphrey, (c) Mazatzal.

al., 2004; King and McSween, 2005; Hurowitz *et al.*, 2006)。Hausrath *et al.* (2008a) は、火星の pH、温度環境における各造岩鉱物の溶解速度を計算し、火山ガラスや輝石に比べ、かんらん石の溶解速度が大きくなることを示した。

火星表面で得られる水の pH が非常に低い原因として、「岩石表面に付着した微量の水と火山性のガスに含まれる SO_2 の反応により生じる H_2SO_4 」(Clark and Baird, 1979; Banin *et al.*, 1997; Tosca *et al.*, 2004), 「土壌や岩石中に含まれる塩類の溶解」(Clark *et al.*, 1982; Burans and Fisher, 1990; Morris *et al.*, 2000, 2006) などがあげられている。Golden *et al.* (2005) は玄武岩試料を濃硫酸溶液の直上に設置した状態で容器全体を 145°C に保ち、風化実験を行った。その結果、玄武岩中のかんらん石が酸化され、 MgSO_4 や $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$, CaSO_4 (水和物も含む) などの硫酸塩が形成された。III 章で述べるように、火星の土壌中には硫酸塩、塩化塩などの塩類が大量に含まれており、これらの塩類は玄武岩の化学的風化により形成されたと考えられる。また、これらの塩類が水に溶解すると、玄武岩の溶解過程に影響を及ぼす。Hausrath and Brantley (2010) は、 CaCl_2 と NaCl の混合溶液を用いて

溶解実験を行い、溶解塩が玄武岩中に含まれる鉱物の溶解速度に影響を与えることを指摘している。

“Humphrey” の表面を RAT により約 2 mm 研磨した部分には、かんらん石の結晶がみられない風化皮膜と、明瞭なかんらん石の結晶を伴う未風化の層が確認できる (図 2a) (McSween *et al.*, 2004, 2006; Hausrath *et al.*, 2008a)。Hausrath *et al.* (2008a) は、先述したかんらん石の溶解速度から、“Humphrey” にみられる風化皮膜の形成期間は 22 k.y. 以上であると述べている。一方、“Mazatzal” の場合、表面を約 4 mm 研磨した部分には周囲より暗い色を示す風化皮膜があり (図 2b), それより深部には白色の物質で充填されたクラックや間隙が確認された (Arvidson *et al.*, 2004; Haskin *et al.*, 2005)。このことは“Mazatzal”において、岩石内部まで液体の水が浸透し、化学的風化が起こったことを示している (McSween *et al.*, 2004, 2006)。また、Opportunity により調査された隕石の表面にも薄い風化皮膜がみられた (Ashley *et al.*, 2011; Fleischer *et al.*, 2011)。Yen *et al.* (2005) は火星大気湿度変化により、岩石表層にごく少量の水が吸着し、吸着水により化学的風化が起こる可能性を指摘した。した

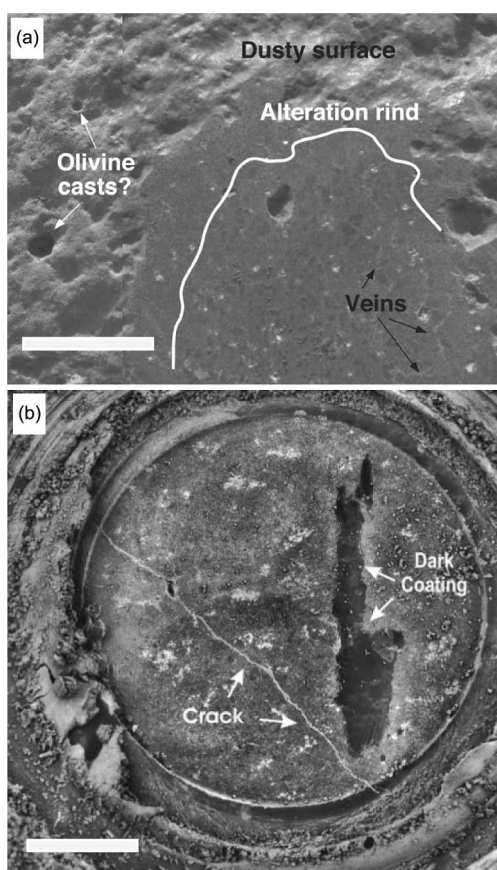


図 2 RAT により研磨された Gusev クレーターの玄武岩の MI 画像。図中のバーの長さは 1 cm。(a) Humphrey (McSween *et al.*, 2004 を一部改変), (b) Mazatzal (Arvidson *et al.*, 2004 を一部改変)。

Fig. 2 Composite MI images of an oblique RAT grind into basaltic rock. The scale bars are 1-cm long. (a) Humphrey (adapted from McSween *et al.*, 2004), (b) Mazatzal (adapted from Arvidson *et al.*, 2004).

がって、風化皮膜の少なくとも一部は現在の乾燥した環境下で形成されたと考えられる。一方、“Mazatzal”のように岩石内部まで化学的風化が起こるためには、現在よりも多くの水分が必要となる。McSween *et al.* (2004) は、“Mazatzal”の形成過程について、表層の風化皮膜が現在の液体が少ない環境下で形成されたのに対し、岩石内部の白華物やクラックは現在とは異なる液体に富む環境下で形成されたのではないかと述べている。

III. 物理的風化

物理的風化は温度変化や塩・氷の晶出により岩石が破壊・細屑化する現象であり、塩類風化、凍結破碎（凍結風化）、熱破碎（熱風化・日射風化）、乾湿風化（スレーキング）などに細分される。

Viking や Pathfinder により探査が行われた高緯度地域には、岩石に蜂の巣状の穴やタフオニ状の地形 (Mutch *et al.*, 1976a, b; Rodriguez-Navarro, 1998), “Puzzle rocks” と呼ばれるクラックを伴った岩石 (Jagoutz, 2006; Levy *et al.*, 2009) などがみられ、物理的風化が起きていることが示唆されている (図 3)。MERs により探査が行われた低～中緯度地域でも、物理的風化により形成されたと思われる角礫や粗砂が、土壤中に多量に含まれている (Smith *et al.*, 1997; Bell *et al.*, 2004; Squyres *et al.*, 2004b, c)。岩石とその周辺の土壌の化学組成や構成鉱物はよく似ており (Gellert *et al.*, 2004; McSween *et al.*, 2004, 2006), 土壌中には未風化のかんらん石や輝石が残留していた (Morris *et al.*, 2004, 2006)。したがって、土壌の一部は物理的風化により形成されたと考えられている (Morris *et al.*, 2004)。

これまでの火星探査は、有機物や水の有無を探査するため、岩石や土壌の化学的分析に主眼が置かれており、火星の岩石の物理的性質やその変化についてはほとんど明らかになっていない。しかし、南極や寒冷砂漠との比較などから、火星での物理的風化についての検討が数多く行われている (例えば, Rodriguez-Navarro, 1998; Marchant and Head, 2007; Laity and Bridges, 2009; Head *et al.*, 2011)。

1) 塩類風化

地球上では、乾燥地域や沿岸地域における主要な風化として、塩類風化に関する研究が数多く行われてきた。乾燥地域 (Goudie and Day, 1980; Viles and Goudie, 2007) や海岸周辺地域 (Mottershead, 1989), 南極地域における岩屑の生産にも塩類風化が寄与している (図 3f)。また、塩類風化により形成される地形として、タフオニやノッチのような cavernous weathering (例えば,

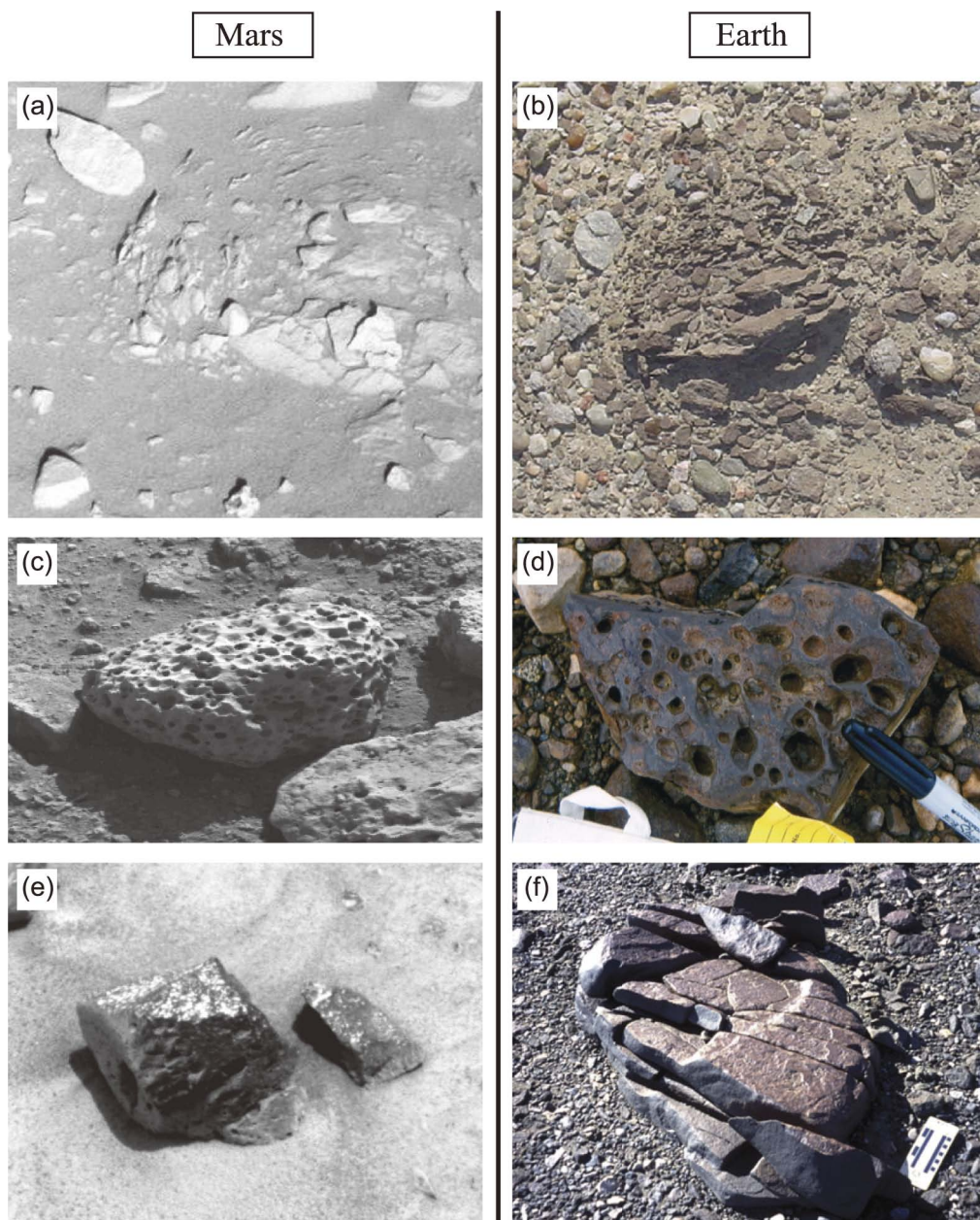


図 3 火星と地球における物理的風化を受けた岩石の比較。(a) Spirit により撮影された破碎礫 (Jagoutz, 2006), (b) 塩類風化により破碎した礫 (Jagoutz, 2006), (c) Viking 2 号着陸地点付近の岩石にみられる蜂ノ巣状の穴, (d) 蜂ノ巣状の穴があいた玄武岩 (南極, Dry Valleys). (Marchant and Head, 2007), (e) Spirit により撮影された角礫, (f) 複数のクラックより細片化した礫 (南極, Dry Valleys) (Marchant and Head, 2007).

Fig. 3 Physicall weathering on Mars and Earth. (a) Rock fragments photographed by the Spirit Lander. (adapted from Jagoutz, 2006), (b) A salt damaged rock in Gran Salar, Argentina (adapted from Jagoutz, 2006), (c) Pitted rocks near the Viking 2 landing site. Pits are 1-2 cm in diameter, (d) Pitted fine-grained dolerite rocks in Dry Valleys, Antarctica (adapted from Marchant and Head, 2007), (e) Splitted rock photographed by the Spirit Lander, (f) In situ splitted rocks in Dry Valleys, Antarctica (adapted from Marchant and Head, 2007).

Bradley *et al.*, 1978; Mustoe, 1982; Matsukura and Kanai, 1988; Matsukura and Matsuoka, 1991, 1996; McBride and Picard, 2000, 2004) (図 3d), キノコ岩やフードゥーなどと呼ばれる台座岩 (Chapman, 1980) などがあげられる。

塩類風化により岩石が破壊される際のメカニズムとして, (a) 塩類を含む溶液から塩類が結晶として成長する際に発生する応力, (b) 塩結晶の水和により発生する応力, (c) 塩結晶の熱による膨張圧力の3つがあげられている。とくに (a) の乾燥時に析出する塩による破壊力は大きく, さまざまな塩を用いて, 多くの実験が行われた (例えば, Goudie *et al.*, 1970; Goudie, 1974, 1986, 1993; Cooke, 1979)。その結果, 岩石の種類, 水分条件などにより多少の差があるものの, Na_2SO_4 , Na_2CO_3 , MgSO_4 は塩類風化に対する影響力が大きいことが明らかとなっている (Goudie and Viles, 1997)。一方, NaCl や CaSO_4 は室内実験では顕著な塩類風化を引き起こさないが, 野外では塩類風化に有効な塩であることが示されている (高橋ほか, 1993; Clarke, 1994)。

探査機により撮影された火星表面の画像から, タフォニや土壤に含まれる角礫など, 塩類風化により形成されたと考えられる地形が確認されている (図 3a, c)。火星表面において, 塩類風化が生じている可能性を初期に言及した研究として, Malin (1974) と Clark and Van Hart (1981) がある。Malin (1974) は, 高濃度の塩水は火星表面の寒冷な環境下でも凍結しない可能性, 火星表面と南極内陸露岩域にみられる地形の類似性をあげ, 火星表面で塩類風化が起きている可能性を指摘した。また, Clark and Van Hart (1981) は, Viking により測定された土壤の質量元素比から, 火星の土壤中に多量の硫酸塩, 塩化塩, 炭酸塩が含まれている可能性を指摘した。Pathfinder や MERs の着陸地点周辺の岩石表面や土壤にも, Cl, S などの元素が多量に含まれることが明らかになっている (例えば, Clark *et al.*, 1982; Rieder *et al.*, 1997; Brückner *et al.*, 2003; Gellert *et al.*, 2004; McSween *et al.*, 2004, 2006)。Campbell *et al.* (2008) は, Spirit が地上を走行した時に

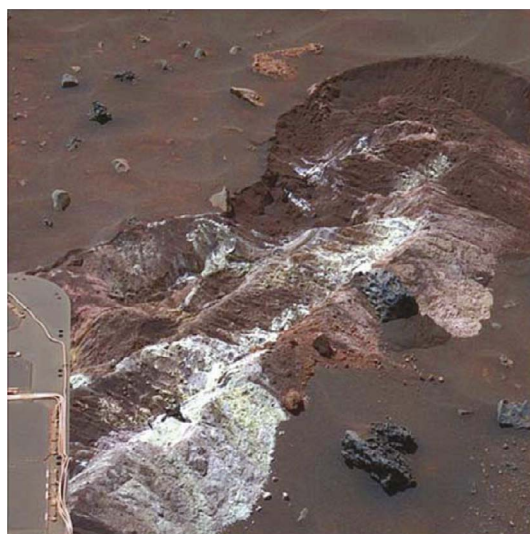


図 4 Spirit 通過時のわだちに露出した火星土壌中の白華物 (Campbell *et al.*, 2008)。

Fig. 4 Pancam image of efflorescences in Martian soils exposed on a wheel track (Campbell *et al.*, 2008).

乱された土壌中に大量の硫酸塩が含まれていたことを報告している (図 4)。また, Phoenix 着陸地点周辺の土壌中でも, CaCO_3 が 3 ~ 5 wt% ほど含まれていることが示されるなど (Boynton *et al.*, 2009), 火星表面の土壌中には, 広範囲にわたり, 多量の塩類が含まれていると考えられる。

MERs や Pathfinder などに搭載された APXS や MI は土壌を構成する鉱物粒子と溶解塩を分けて分析することができないため, 溶解塩の構成元素や種類を直接同定することはできなかった。しかし, Phoenix に搭載された Wet Chemistry Laboratory (以下, WCL) は, 土壌サンプル中に含まれる塩類を測定容器内で溶出液に溶解させることにより, 溶解塩を構成するイオンを同定する機能をもっていた (Kounaves *et al.*, 2003, 2009)。WCL による測定の結果, Phoenix 着陸地点における土壌中の溶解塩は ClO_4^- に富むことが示され, $\text{Mg}(\text{ClO}_4)_2$ や NaClO_4 , $\text{Ca}(\text{ClO}_4)_2$ などの過塩素酸塩が土層中に析出していると考えられている (Hecht *et al.*, 2009; Kounaves *et al.*, 2010)。また, Mars Science Laboratory (Curi-

osity と呼称される) により探査が行われた Gale クレーターにおいても、岩石中に過塩素酸塩が含まれることが報告されている (Ming *et al.*, 2014)。ただし、過塩素酸はロケットエンジンの推進剤としても用いられるため (Hecht *et al.*, 2009)、地上探査機の着陸等により、過塩素酸塩が土壌や岩石中に混入した可能性も否定できない。

Mg(ClO₄)₂ や NaClO₄ はそれぞれ相対湿度が 66%RH, 44%RH 以上で潮解性を示し、濃溶液は -80 ~ -50℃ 程度まで液体として存在できることが室内実験により示されている (Chevrier *et al.*, 2009a, b; Zorzano *et al.*, 2009; Gough *et al.*, 2011)。また、Curiosity により観測された Gale クレーター地表面における温度湿度変化は、過塩素酸塩の潮解、塩溶液の蒸発が起こるために必要な条件を満たしており、夜間のみ土壌中に少量の過塩素酸の溶液が存在する可能性が指摘されている (Martín-Torres *et al.*, 2015)。Martín-Torres *et al.* (2015) の指摘が事実であるならば、大気中の水蒸気圧変化に伴う過塩素酸の潮解・再結晶により、塩類風化が起こりうる。

一年を通して気温が 0℃ を下回り、乾燥した環境である南極内陸露岩域では、粒状分解による岩石表面の剥離 (French and Guglielmin, 2002) や塩類の集積 (Selby and Wilson, 1971; Matsuoka *et al.*, 2006)、タフォニ (André and Hall, 2005; Marchant and Head, 2007; Strini *et al.*, 2008; Head *et al.*, 2011) (図 3d)、塩類に富むシルト土層 (Campbell and Claridge, 1987; Matsuoka *et al.*, 2006) などがみつかっており、塩類風化が起きていることが示唆される。Parsons *et al.* (2005) は、南極の Dry Valley にみられるタフォニ状の穴について、穴の底部に白色や黄色の析出物がみられることを報告している。さらに、Marchant and Head (2007) は、Dry Valley のタフォニ状の穴について、日射により温まりやすい黒色の岩石ほど穴が多くみられることを指摘し、タフォニの形成過程を次のように説明した。(1) 日射により温められた岩石上面で、風雪などの雪が融けて、水分が与えられる。(2) 融雪水が岩石表面を溶解しながら、岩

石のくぼみの部分に集まる。(3) 融雪水の蒸発時に塩類が析出して、塩類風化が起こる。さらに、Marchant and Head (2007) は、タフォニ状の穴があいた岩石は、Dry Valley 内でもとくに乾燥した地域に多くみられるとしており、火星のような乾燥した環境でも、同様の過程でタフォニ状の穴が形成される可能性を指摘している。

この節の冒頭であげた 3 つの主要な塩類風化のメカニズムのうち、(a) の乾燥時に析出する塩による破壊が発生するためには、液体の水が必要不可欠である。しかし、現在の火星表面で得られる液体の水は限られている。一方、(b) の水和反応に伴う塩類の膨張による破壊では、液体の水は必ずしも必要ではない。大気中にある程度の水蒸気が含まれていれば、塩類が水和・膨張して、塩類風化が起こりうる。火星に多く存在すると考えられている塩類のうち、CaCO₃, Mg(ClO₄)₂, NaClO₄, MgSO₄, CaSO₄ は複数の水和状態をとることが知られている。Kong *et al.* (2014) はチベット高原の Dalangtan Playa において、土壌表面に含まれる硫酸塩の水和状態が夏季と冬季で異なることを示した。また、Dalangtan Playa の湿度は 0 ~ 40%RH と低く、火星の低緯度地域の湿度とほぼ等しいことから、硫酸塩の水和・脱水反応により、塩類風化が起こりうることを指摘した。

2) 凍結破碎

これまで、地球上の寒冷地域における岩屑の生産、岩盤のクラック発達における主要な風化として、凍結破碎に関する多くの室内実験 (McGreevy, 1981; Murton *et al.*, 2006) や野外観測 (Amitrano *et al.*, 2012; Girard *et al.*, 2013) が行われてきた。Matsuoka (2001) は岩石中あるいは土層中で生じる凍結破碎を、(a) 日周期で間隙中の水分がその場で凍結膨張するタイプと、(b) 年周期で凍結面への水分の移動を伴うタイプの 2 種類に分類した。これらの凍結破碎が生じるために必要な水分条件は、(a) では「岩石の水分飽和度が 80% 以上の高い値を示すこと」、(b) では「地下水面や季節融解層といった水分の供給源が近くに存在すること」であり、いずれ

の条件でも、多量の水が必要となる。

火星表面において、凍結破砕が生じている可能性を最初に指摘したのは Huguenin *et al.* (1979) である。また、同時期に Viking により、冬季に地表を覆う霜のような白い物質が撮影された (Jones *et al.*, 1979; Wall, 1981)。近年、火星の表層に氷が存在することがほぼ確実であると考えられるようになった。とくに高緯度地域の浅層部に、氷に富む層が存在している広く存在している可能性が指摘されている。Smith *et al.* (2009) は、Phoenix の着陸地点周辺に凍土層が存在することを報告している。また、HiRISE での観測により、北緯 40 度以上の地域に新たに形成された複数のインパクトクレーターの底部に、土壌をほとんど含まない氷の層が露出していることが示された (Byrne *et al.*, 2009; Dundas *et al.*, 2014)。

Opportunity により探査が行われた Meridiani Planum の堆積岩には、層状もしくはポリゴン状のクラックが数多くみられる (Clark *et al.*, 2005; Squyres *et al.*, 2006)。Murton and Lautridou (2003) や Murton *et al.* (2006) は、チョークに生じた層状のクラックや角礫等の形成要因として、アイスレンズ形成による凍結破砕をあげている。

先述のように、凍結破砕が生じるためには、岩石の間隙中に多量の水が必要となる。したがって、現在の火星表面で凍結破砕が生じる場所は限られていると考えられる。Hecht (2002) や Marchant and Head (2007) は現在の火星の気圧・温度条件では、液体の水はほとんど存在できないとしている (図 5)。一方、III 章の 1) 節で述べたように、過塩素酸塩の濃溶液は、現在の火星環境でも液体として存在できる。これらの濃溶液は $-80 \sim -50^{\circ}\text{C}$ の融点をもつため、火星表面のきわめて低い温度条件でも、凍結破砕が生じている可能性がある。また、過去の火星には、地軸の傾きが大きく、とくに高緯度地域では、現在よりも温暖かつ湿潤な環境が存在した可能性が指摘されており、広い範囲で凍結破砕が生じていた可能性がある (Mustard *et al.*, 2001; Marchant and Head, 2007)。

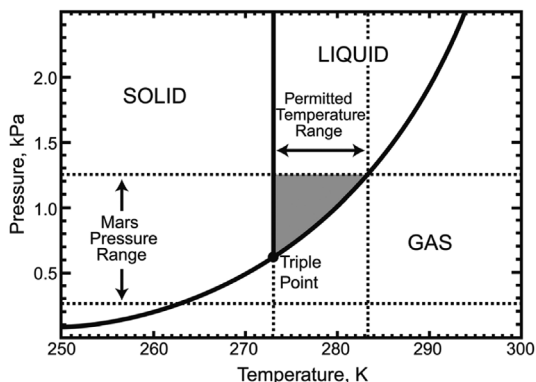


図 5 水の状態図。図中の着色部は、火星において液体の水が存在できる温度-気圧範囲。(Head *et al.*, 2011)。

Fig. 5 Phase diagram for water in pressure-temperature space. Shaded area represents the range of pressures and temperatures on Mars where liquid water can exist (Head *et al.*, 2011).

3) 熱破砕

熱破砕は、岩石の温度が急激に変化する際に発生する応力により、岩石が破壊する現象を指す。地球上では砂漠地域や周水河地域にみられる岩石表面の剥離や露岩に発達したクラック、角礫の形成要因 (例えば、Goudie, 1989; Hall, 1998; Chan *et al.*, 2008; Moores *et al.*, 2008)、山火事跡地にみられる岩石の破砕要因 (Dorn, 2003; Shakesby and Doerr, 2006) として、熱破砕があげられている。化学的風化や凍結破砕などが起こりにくい乾燥した環境下では、相対的に重要な風化であると考えられている。しかし、室内実験では熱破砕による明瞭なクラックの発達は確認されておらず、微細なクラックが観察されているのみである (Bahr *et al.*, 1986)。熱破砕による岩石の細片化や角礫の形成可能性については、まだ議論の余地が残されている。

Rodriguez-Navarro (1998) はタフォニ、Levy *et al.* (2009) は岩石中のクラックが火星で形成される要因として、熱破砕をあげている。Hall and André (2001) は南極において岩石の表層やクラック内の温度変化を測定し、熱破砕によりクラックが形成された可能性を指摘している。ま

た、Hall (1998) や Hall *et al.* (2008a, b) は南極において、岩石表層の深さ数 mm までの温度変化を観測した。その結果、岩石表面では $1^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 以上の急激な温度変化が発生しており、深さ数 mm 程度の比較的小さな凹凸が熱破碎により形成されうること指摘している。しかし、深さが 20 cm 程度の大きなタフォニでは、タフォニ内壁よりも外部の方が温度変化は大きく、熱破碎だけでは深さが 10 cm を超えるような大きなタフォニの形成を説明することは困難である (Hall and André, 2006)。

Yong and Wang (1980) は風化実験を行い、岩石を 120°C まで加熱した際、温度変化 ($0.4 \sim 12.5^{\circ}\text{C}/\text{min}$) に伴って岩石から微細な音が発生することを報告した。この音は岩石に微細なクラックが発生した際の破壊音であるとされる。温度変化が急激な条件ほど、音の発生頻度は大きく、熱破碎がより活発に起きることを示した。火星の気温の日較差は $50 \sim 90^{\circ}\text{C}$ と非常に大きく (Kieffer, 1976; Martin *et al.*, 2003; Martín-Torres *et al.*, 2015)、地球に比べ、熱破碎がより活発に起きている可能性がある。したがって、礫に可視的なクラックが発生するような、急激な温度変化が火星表面で起きている可能性は否定できない。しかし、Viles *et al.* (2010) は玄武岩を用いて、地球と火星の温度サイクルと気圧を再現して風化実験を行ったが、試料の風化速度にほとんど違いはなかった。火星表面の角礫形成に熱破碎がどの程度寄与しているかという点について、さらなる研究が必要である。

IV. まとめ

本稿では、風化のタイプごとに火星における風化生成物の特徴、地球と火星の風化プロセスの比較、および風化に関連する室内実験の結果を紹介した。現在の火星表面で起こりうるおもな風化として、①少量の水による化学的風化による風化皮膜の形成、②塩類風化による岩石表面の剥離やタフォニの形成、基盤岩のクラック発達、③熱破碎によるクラックの発生と角礫の形成の3つがあげられる (図 6)。また、過去の温暖・湿潤な環

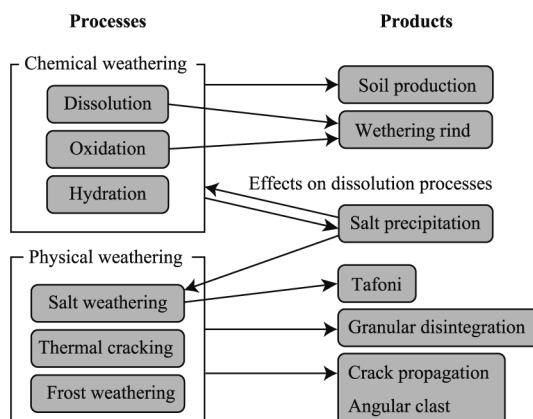


図 6 火星における岩石の風化プロセスと風化生成物。

Fig. 6 General diagram of rock weathering processes and products on Martian surface.

境で起きていた風化として、④多量の水による岩石内部までの化学的風化、⑤凍結破碎によるクラックの発生と角礫の形成があげられる。しかし、これらは主として、火星表面の数地点での限られた観察・分析結果に基づいており、推測に基づく部分も多い。

寒冷砂漠での観察・観測や室内実験は火星表面における岩石の風化について、多くの知見や予測をもたらす。先述したように、Hausrath *et al.* (2008a) は、火星表面における岩石の風化皮膜の厚さと環境条件を風化モデルに適用して、風化皮膜の形成期間を推定した。しかし、同様な手法で、火星での風化生成物の形成速度や期間を推定した研究は少ない。今後、南極などの寒冷砂漠で観測された風化生成物の形成期間や室内実験から得られた岩石の風化速度をもとに、火星での岩石風化速度を推定していく必要があるだろう。

物理的風化は基盤岩のクラック発達や角礫の形成に寄与しており、火星表面の地形変化とも密接に関係している。しかし、これまでの火星探査では、岩石の構成元素や鉱物の同定に重点が置かれており、岩石の物理的性質や風化速度についてはほとんど調べられてない。今後、火星の岩石の物理的性質についての探査を行い、風化生成物の粒径やクラックの分布、規模などを定量的に把握す

ることは重要である。また、火星での物理的風化を想定した室内実験をさらに行っていくことが求められる。

また、岩石の化学的性質や化学的風化については、低～中緯度地域では MERs の探査により、すでに詳細な分析が進んでいるが、高緯度地域でも同様の化学的風化が生じているとは限らない。岩石の化学的性質、風化プロセスについても、さらに広範囲での探査や、室内実験などによる検証が必要である。火星における岩石の風化に関する研究について、現地探査と室内実験の両面から進めていくことにより、火星における地形発達や過去の環境の推定という点においても、新たな進展がもたらされるであろう。

文 献

- Amitrano, D., Gruber, S. and Girard, L. (2012): Evidence of frost-cracking inferred from acoustic emissions in a high-alpine rock-wall. *Earth and Planetary Science Letters*, **341-344**, 86-93.
- André, M.-F. and Hall, K. (2005): Honeycomb development on Alexander Island, glacial history of George VI Sound and palaeoclimatic implications (Two Step Cliffs/Mars Oasis, W Antarctica). *Geomorphology*, **65**, 117-138.
- Arvidson, R.E., Guinness, E.A., Moore, H.J., Tillman, J. and Wall, S.D. (1983): Three Mars years: Viking lander 1 imaging observations. *Science*, **222**, 463-468.
- Arvidson, R.E., Anderson, R.C., Bartlett, P., Bell, J.F., Blaney, D., Christensen, P.R., Chu, P., Crumpler, L., Davis, K., Ehlmann, B.L., Fergason, R., Golombek, M.P., Gorevan, S., Grant, J.A., Greeley, R., Guinness, E.A., Haldemann, A.F.C., Herkenhoff, K., Johnson, J., Landis, G., Li, R., Lindemann, R., McSween, H., Ming, D.W., Myrick, T., Richter, L., Seelos, F.P., Squyres, S.W., Sullivan, R.J., Wang, A. and Wilson, J. (2004): Localization and physical properties experiments conducted by Spirit at Gusev Crater. *Science*, **305**, 821-824.
- Arvidson, R.E., Squyres, S.W., Anderson, R.C., Bell, J.F., Blaney, D., Brückner, J., Cabrol, N.A., Calvin, W.M., Carr, M.H., Christensen, P.R., Clark, B.C., Crumpler, L., Des Marais, D.J., de Souza Jr., P.A., d'Uston, C., Economou, T., Farmer, J., Farrand, W.H., Folkner, W., Golombek, M., Gorevan, S., Grant, J.A., Greeley, R., Grotzinger, J., Guinness, E., Hahn, B.C., Haskin, L., Herkenhoff, K.E., Hurowitz, J.A., Hviid, S., Johnson, J.R., Klingelhöfer, G., Knoll, A.H., Landis, G., Leff, C., Lemmon, M., Li, R., Madsen, M.B., Malin, M.C., McLennan, S.M., McSween, H.Y., Ming, D.W., Moersch, J., Morris, R.V., Parker, T., Rice, J.W., Richter, L., Rieder, R., Rodionov, D.S., Schröder, C., Sims, M., Smith, M., Smith, P., Soderblom, L.A., Sullivan, R., Thompson, S. D., Tosca, N.J., Wang, A., Wänke, H., Ward, J., Wdowiak, T., Wolff, M. and Yen, A. (2006): Overview of the Spirit Mars Exploration Rover Mission to Gusev Crater: Landing site to Backstay Rock in the Columbia Hills. *Journal of Geophysical Research*, **111**, E02S01.
- Ashley, J.W., Golombek, M.P., Christensen, P.R., Squyres, S.W., McCoy, T.J., Schröder, C., Fleischer, I., Johnson, J.R., Herkenhoff, K.E. and Parker, T.J. (2011): Evidence for mechanical and chemical alteration of iron-nickel meteorites on Mars: Process insights for Meridiani Planum. *Journal of Geophysical Research*, **116**, E00F20.
- Bahr, H.-A., Fischer, G. and Weiss, H.-J. (1986): Thermal-shock crack patterns explained by single and multiple crack propagation. *Journal of Materials Science*, **21**, 2716-2720.
- Baker, L.L., Agerbroad, D.J. and Wood, S.A. (2000): Experimental hydrothermal alteration of a martian analog basalt: Implications for martian meteorites. *Meteoritics & Planetary Science*, **35**, 31-38.
- Banin, A., Han, F.X., Kan, I. and Cicelsky, A. (1997): Acidic volatiles and the Mars soil. *Journal of Geophysical Research*, **102**, E12, 13341-13356.
- Bell, J.F., Squyres, S.W., Herkenhoff, K.E., Maki, J.N., Arneson, H.M., Brown, D., Collins, S.A., Dingizian, A., Elliot, S.T., Hagerott, E.C., Hayes, A.G., Johnson, M.J., Johnson, J.R., Joseph, J., Kinch, K., Lemmon, M.T., Morris, R.V., Scherr, L., Schwochert, M., Shepard, M.K., Smith, G.H., Sohl-Dickstein, J.N., Sullivan, R.J., Sullivan, W.T. and Wadsworth, M. (2003): Mars Exploration Rover Athena Panoramic Camera (Pancam) investigation. *Journal of Geophysical Research*, **108**, E12, 8063.
- Bell, J.F., Squyres, S.W., Arvidson, R.E., Arneson, H.M., Bass, D., Blaney, D., Cabrol, N., Calvin, W., Farmer, J., Farrand, W.H., Goetz, W., Golombek, M., Grant, J.A., Greeley, R., Guinness, E., Hayes, A.G., Hubbard, M.Y.H., Herkenhoff, K.E., Johnson, M.J., Johnson, J.R., Joseph, J., Kinch, K.M., Lemmon, M.T., Li, R., Madsen, M.B., Maki, J.N., Malin, M., McCartney, E., McLennan, S., McSween Jr., H.Y., Ming, D.W., Moersch, J.E., Morris, R.V., Noe Dobra, E.Z., Parker, T.J., Proton, J., Rice Jr., J.W., Seelos, F., Soderblom, J., Soderblom, L.A., Sohl-Dickstein, J.N., Sullivan, R.J., Wolff, M.J. and Wang, A. (2004): Pancam multispectral imaging results from the Spirit Rover at Gusev Crater. *Science*, **305**, 800-806.
- Blake, D., Vaniman, D., Achilles, C., Anderson, R., Bish, D., Bristow, T., Chen, C., Chipera, S., Crisp, J., Des Marais, D., Downs, R.T., Farmer, J., Feldman, S., Fonda, M., Gailhanou, M., Ma, H.H., Ming, D.W., Morris, R.V., Sarrazin, P., Stolper, E., Treiman, A.

- and Yen, A. (2012): Characterization and calibration of the CheMin mineralogical instrument on Mars Science Laboratory. *Space Science Reviews*, **170**, 341–399.
- Boynton, W.V., Ming, D.W., Kounaves, S.P., Young, S.M.M., Arvidson, R.E., Hecht, M.H., Hoffman, J., Niles, P.B., Hamara, D.K., Quinn, R.C., Smith, P.H., Sutter, B., Catling, D.C. and Morris, R.V. (2009): Evidence for calcium carbonate at the Mars Phoenix landing site. *Science*, **325**, 61–64.
- Bradley, W.C., Hutton, J.T. and Twidale, C.R. (1978): Role of salts in development of granitic tafoni, South Australia. *Journal of Geology*, **86**, 647–654.
- Brückner, J., Dreibus, G., Rieder, R. and Wänke, H. (2003): Refined data of Alpha Proton X-ray Spectrometer analyses of soils & rocks at the Mars Pathfinder site: Implications for surface chemistry. *Journal of Geophysical Research*, **108**, E12, 8094.
- Burans, R.G. and Fisher, D.S. (1990): Iron-sulfur mineralogy of Mars: Magmatic evolution and chemical weathering product. *Journal of Geophysical Research*, **95**, B9, 14415–14421.
- Byrne, S., Dundas, C.M., Kennedy, M.R., Mellon, M.T., McEwen, A.S., Cull, S.C., Daubar, I.J., Shean, D.E., Seelos, K.D., Murchie, S.L., Cantor, B.A., Arvidson, R.E., Edgett, K.S., Reufer, A., Thomas, N., Harrison, T.N., Posiolova, L.V. and Seelos, F.P. (2009): Distribution of mid-latitude ground ice on Mars from new impact craters. *Science*, **325**, 1674–1676.
- Campbell, I.B. and Claridge, G.G.C. (1987): *Antarctica: Soils, Weathering Processes, and Environment*. Elsevier.
- Campbell, J.L., Gellert, R., Lee, M., Mallett, C.L., Maxwell, J.A. and O'Meara, J.M. (2008): Quantitative in situ determination of hydration of bright high-sulfate Martian soils. *Journal of Geophysical Research*, **113**, E06S11.
- Carr, M.H. (1982): Periodic climate change on Mars: Review of evidence and effects on distribution of volatiles. *Icarus*, **50**, 129–139.
- Chan, M.A., Beitleir, B., Parry, W.T., Ormö, J. and Komatsu, G. (2004): A possible terrestrial analogue for haematite concretions on Mars. *Nature*, **429**, 731–734.
- Chan, M.A., Yonkee, W.A., Netoff, D.I., Seiler, W.M. and Ford, R.L. (2008): Polygonal cracks in bedrock on Earth and Mars: Implications for weathering. *Icarus*, **194**, 65–71.
- Chapman, R.W. (1980): Salt weathering by sodium chloride in the Saudi Arabian desert. *American Journal of Science*, **280**, 116–129.
- Chevrier, V. and Mathé, P.-E. (2007): Mineralogy and evolution of the surface of Mars: A review. *Planetary and Space Science*, **55**, 289–314.
- Chevrier, V.F., Rochette, P., Mathé, P.-E. and Grauby, O. (2004): Weathering of iron-rich phases in simulated Martian atmospheres. *Geology*, **32**, 1033–1036.
- Chevrier, V.F., Hanley, J. and Altheide, T.S. (2009a): Stability of perchlorate hydrates and their liquid solutions at the Phoenix landing site, Mars. *Geophysical Research Letters*, **36**, L10202.
- Chevrier, V., Hanley, J. and Altheide, T. (2009b): Correction to “Stability of perchlorate hydrates and their liquid solutions at the Phoenix landing site, Mars”. *Geophysical Research Letters*, **36**, L18204.
- Christensen, P.R., Mehall, G.L., Silverman, S.H., Anwar, S., Cannon, G., Gorelick, N., Kheen, R., Tourville, T., Bates, D., Ferry, S., Fortuna, T., Jeffries, J., O'Donnell, W., Peralta, R., Wolverton, T., Blaney, D., Denise, R., Rademacher, J., Morris, R.V. and Squyres, S. (2003): Miniature Thermal Emission Spectrometer for the Mars Exploration Rovers. *Journal of Geophysical Research*, **108**, E12, 8064.
- Clark, B.C. and Baird, A.K. (1979): Is the Martian lithosphere sulfur rich? *Journal of Geophysical Research*, **84**, 8395–8403.
- Clark, B.C. and Van Hart, D.C. (1981): The salts of Mars. *Icarus*, **45**, 370–378.
- Clark, B.C., Baird, A.K., Rose Jr., H.J., Toulmin, P., Christian, R.P., Kelliher, W.C., Castro, A.J., Rowe, C.D., Keil, K. and Huss, G.R. (1977): The Viking X ray fluorescence experiment: Analytical methods and early results. *Journal of Geophysical Research*, **82**, 4577–4594.
- Clark, B.C., Baird, A.K., Weldon, R.J., Tsusaki, D.M., Schnabel, L. and Candelaria, M.P. (1982): Chemical composition of Martian fines. *Journal of Geophysical Research*, **87**, B12, 10059–10067.
- Clark, B.C., Morris, R.V., McLennan, S.M., Gellert, R., Jolliff, B., Knoll, A.H., Squyres, S.W., Lowenstein, T.K., Ming, D.W., Tosca, N.J., Yen, A., Christensen, P.R., Gorevan, S., Brückner, J., Calvin, W., Dreibus, G., Farrand, W., Klingelhoefer, G., Wänke, H., Zipfel, J., Bell, J.F., Grotzinger, J., McSween, H.Y. and Rieder, R. (2005): Chemistry and mineralogy of outcrops at Meridiani Planum. *Earth and Planetary Science Letters*, **240**, 73–94.
- Clarke, J.D.A. (1994): Geomorphology of the Kambalda region, Western Australia. *Australian Journal of Earth Sciences*, **41**, 229–239.
- Cooke, R.U. (1979): Laboratory simulation of salt weathering processes in arid environments. *Earth Surface Processes and Landforms*, **4**, 347–359.
- Dixon, J.C., Thorn, C.E., Darmody, R.G. and Campbell, S.W. (2002): Weathering rinds and rock coatings from an Arctic alpine environment, northern Scandinavia. *Geological Society of America Bulletin*, **114**, 226–238.
- Dorn, R.I. (2003): Boulder weathering and erosion associated with a wildfire, Sierra Ancha Mountains, Arizona. *Geomorphology*, **55**, 155–171.
- Draper, A.L., Adamcik, J.A. and Gibson, E.K. (1964): Comparison of the spectra of Mars and a goethite-

- hematite mixture in the 1 to 2 micron region. *Icarus*, **3**, 63–65.
- Dundas, C.M., Byrne, S., McEwen, A.S., Mellon, M.T., Kennedy, M.R., Daubar, I.J. and Saper, L. (2014): HiRISE observations of new impact craters exposing Martian ground ice. *Journal of Geophysical Research: Planets*, **119**, 109–127.
- Edgett, K.S., Ravine, M.A., Caplinger, M.A., Ghaemi, F.T., Schaffner, J.A., Malin, M.C., Baker, J.M., DiBiase, D.R., Laramie, J., Maki, J.N., Willson, R.G., Bell, J.F., Cameron, J.F., Dietrich, W.E., Edwards, L.J., Hallet, B., Herkenhoff, K.E., Heydari, E., Kah, L.C., Lemmon, M.T., Minitti, M.E., Olson, T.S., Parker, T.J., Rowland, S.K., Schieber, J., Sullivan, R.J., Sumner, D.Y., Thomas, P.C. and Yingst, R.A. (2009): The Mars Science Laboratory (MSL) Mars Hand Lens Imager (MAHLI) flight instrument. *40th Annual Lunar and Planetary Science Conference*, No. 1197.
- Fleischer, I., Schröder, C., Klingelhöfer, G., Zipfel, J., Morris, R.V., Ashley, J.W., Gellert, R., Wehrheim, S. and Ebert, S. (2011): New insights into the mineralogy and weathering of the Meridiani Planum meteorite, Mars. *Meteoritics & Planetary Science*, **46**, 21–34.
- Foley, C.N., Economou, T. and Clayton, R.N. (2003a): Final chemical results from the Mars Pathfinder alpha proton X-ray spectrometer. *Journal of Geophysical Research*, **108**, E12, 8096.
- Foley, C.N., Economou, T.E., Clayton, R.N. and Dietrich W. (2003b): Calibration of the Mars Pathfinder alpha proton X-ray spectrometer. *Journal of Geophysical Research*, **108**, E12, 8095.
- French, H.M. and Guglielmin, M. (2002): Observations on granite weathering phenomena, Mount Keinath, Northern Victoria Land, Antarctica. *Permafrost and Periglacial Processes*, **13**, 231–236.
- Gellert, R., Rieder, R., Anderson, R.C., Brückner, J., Clark, B.C., Dreibus, G., Economou, T., Klingelhöfer, G., Lugmair, G.W., Ming, D.W., Squyres, S.W., d'Uston, C., Wänke, H., Yen, A. and Zipfel, J. (2004): Chemistry of rocks and soils in Gusev Crater from the Alpha Particle X-ray Spectrometer. *Science*, **305**, 829–832.
- Gellert, R., Campbell, J.L., King, P.L., Leshin, L.A., Lugmair, G.W., Spray, J.G., Squyres, S.W. and Yen, A.S. (2009): The Alpha-Particle-X-ray-Spectrometer (APXS) for the Mars Science Laboratory (MSL) Rover Mission. *40th Annual Lunar and Planetary Science Conference*, No. 2364.
- Girard, L., Gruber, S., Weber, S. and Beutel, J. (2013): Environmental controls of frost cracking revealed through in situ acoustic emission measurements in steep bedrock. *Geophysical Research Letters*, **40**, 1748–1753.
- Golden, D.C., Ming, D.W., Morris, R.V. and Mertzman, S.A. (2005): Laboratory-simulated acid-sulfate weathering of basaltic materials: Implications for formation of sulfates at Meridiani Planum and Gusev Crater, Mars. *Journal of Geophysical Research*, **110**, E12S07.
- Golombek, M.P., Cook, R.A., Economou, T., Folkner, W.M., Haldemann, A.F.C., Kallemeyn, P.H., Knudsen, J.M., Manning, R.M., Moore, H.J., Parker, T.J., Rieder, R., Schofield, J.T., Smith, P.H. and Vaughan, R.M. (1997): Overview of the Mars Pathfinder Mission and assessment of landing site predictions. *Science*, **278**, 1743–1748.
- Golombek, M., Grant, J., Kipp, D., Vasavada, A., Kirk, R., Ferguson, R., Bellutta, P., Calef, F., Larsen, K., Katayama, Y., Huertas, A., Beyer, R., Chen, A., Parker, T., Pollard, B., Lee, S., Sun, Y., Hoover, R., Sladek, H., Grotzinger, J., Welch, R., Noe Dobrea, E., Michalski, J. and Watkins, M. (2012): Selection of the Mars Science Laboratory landing site. *Space Science Reviews*, **170**, 641–737.
- Gorevan, S.P., Myrick, T., Davis, K., Chau, J.J., Bartlett, P., Mukherjee, S., Anderson, R., Squyres, S.W., Arvidson, R.E., Madsen, M.B., Bertelsen, P., Goetz, W., Binai, C.S. and Richter, L. (2003): Rock Abrasion Tool: Mars Exploration Rover mission. *Journal of Geophysical Research*, **108**, E12, 8068.
- Goudie, A.S. (1974): Further experimental investigation of rock weathering by salt and other mechanical processes. *Zeitschrift für Geomorphologie N. F. Supplementband*, **21**, 1–12.
- Goudie, A.S. (1986): Laboratory simulation of 'the wick effect' in salt weathering of rock. *Earth Surface Processes and Landforms*, **11**, 275–285.
- Goudie, A.S. (1989): Weathering processes. in *Arid Zone Geomorphology* edited by Thomas, D.S.G., Belhaven Press, 25–39.
- Goudie, A.S. (1993): Salt weathering simulation using a single-immersion technique. *Earth Surface Processes and Landforms*, **18**, 369–376.
- Goudie, A.S. and Day, M.J. (1980): Disintegration of fan sediments in Death Valley, California, by salt weathering. *Physical Geography*, **1**, 126–137.
- Goudie, A.S. and Viles, H.A. (1997): *Salt Weathering Hazards*. John Wiley & Sons.
- Goudie, A.S., Cooke, R. and Evans, I. (1970): Experimental investigation of rock weathering by salts. *Area*, **2**, 42–47.
- Gough, R.V., Chevrier, V.F., Baustian, K.J., Wise, M.E. and Tolbert, M.A. (2011): Laboratory studies of perchlorate phase transitions: Support for metastable aqueous perchlorate solutions on Mars. *Earth and Planetary Science Letters*, **312**, 371–377.
- Greeley, R., Squyres, S.W., Arvidson, R.E., Bartlett, P., Bell, J.F., Blaney, D., Cabrol, N.A., Farmer, J., Farrand, B., Golombek, M.P., Gorevan, S.P., Grant, J.A., Haldemann, A.F.C., Herkenhoff, K.E., Johnson, J., Landis, G., Madsen, M.B., McLennan, S.M., Moersch, J., Rice Jr., J.W., Richter, L., Ruff, S., Sulli-

- van, R.J., Thompson, S.D., Wang, A., Weitz, C.M. Whelley, P. and Athena Science Team (2004): Wind-related processes detected by the Spirit Rover at Gusev Crater, Mars. *Science*, **305**, 810–813.
- Greeley, R., Arvidson, R.E., Barlett, P.W., Blaney, D., Cabrol, N.A., Christensen, P.R., Fergason, R.L., Golombek, M.P., Landis, G.A., Lemmon, M.T., McLennan, S.M., Maki, J.N., Michaels, T., Moersch, J.E., Neakrase, L.D.V., Rafkin, S.C.R., Richter, L., Squyres, S.W., de Souza, P.A., Sullivan, R.J., Thompson, S.D. and Whelley, P.L. (2006): Gusev Crater: Wind-related features and processes observed by the Mars Exploration Rover Spirit. *Journal of Geophysical Research*, **111**, E02S09.
- Guinn, J.R., Garcia, M.D. and Talley, K. (2008): Mission design of the Phoenix Mars Scout mission. *Journal of Geophysical Research*, **113**, E00A26.
- Guinness, E.A., Leff, C.E. and Arvidson, R.E. (1982): Two Mars years of surface changes seen at the Viking landing sites. *Journal of Geophysical Research*, **87**, B12, 10051–10058.
- Hall, K. (1998): Rock temperatures and implications for cold region weathering. II: New data from Rothera, Adelaide Island, Antarctica. *Permafrost and Periglacial Processes*, **9**, 47–55.
- Hall, K. and André, M.-F. (2001): New insights into rock weathering from high-frequency rock temperature data: An Antarctic study of weathering by thermal stress. *Geomorphology*, **41**, 23–35.
- Hall, K. and André, M.-F. (2006): Temperature observations in Antarctic tafoni: implications for weathering, biological colonization, and tafoni formation. *Antarctic Science*, **18**, 377–384.
- Hall, K., Guglielmin, M. and Strini, A. (2008a): Weathering of granite in Antarctica: I. Light penetration into rock and implications for rock weathering and endolithic communities. *Earth Surface Processes and Landforms*, **33**, 295–307.
- Hall, K., Guglielmin, M. and Strini, A. (2008b): Weathering of granite in Antarctica: II. Thermal stress at the grain scale. *Earth Surface Processes and Landforms*, **33**, 475–493.
- Haskin, L.A., Wang, A., Jolliff, B.L., McSween, H.Y., Clark, B.C., Des Marais, D.J., McLennan, S.M., Tosca, N.J., Hurowitz, J.A., Farmer, J.D., Yen, A., Squyres, S.W., Arvidson, R.E., Klingelhöfer, G., Schröder, C., de Souza Jr., P.A., Ming, D.W., Gellert, R., Zipfel, J., Brückner, J., Bell, J.F., Herkenhoff, K., Christensen, P.R., Ruff, S., Blaney, D., Gorevan, S., Cabrol, N.A., Crumpler, L., Grant, J. and Soderblom, L. (2005): Water alteration of rocks and soils on Mars at the Spirit rover site in Gusev Crater. *Nature*, **436**, 66–69.
- Hausrath, E.M. and Brantley, S.L. (2010): Basalt and olivine dissolution under cold, salty, and acidic conditions: What can we learn about recent aqueous weathering on Mars?. *Journal of Geophysical Research*, **115**, E12001.
- Hausrath, E.M., Navarre-Sitchler, A.K., Sak, P.B., Steefel, C.I. and Brantley, S.L. (2008a): Basalt weathering rates on Earth and the duration of liquid water on the plains of Gusev Crater, Mars. *Geology*, **36**, 67–70.
- Hausrath, E.M., Treiman, A.H., Vicenzi, E., Bish, D.L., Blake, D., Sarrazin, P., Hoehler, T., Midtkandal, I., Steele, A. and Brantley, S.L. (2008b): Short- and long-term olivine weathering in Svalbard: Implications for Mars. *Astrobiology*, **8**, 1079–1092.
- Head, J.W., Kreslavsky, M.A. and Marchant, D.R. (2011): Pitted rock surfaces on Mars: A mechanism of formation by transient melting of snow and ice. *Journal of Geophysical Research*, **116**, E09007.
- Hecht, M.H. (2002): Metastability of liquid water on Mars. *Icarus*, **156**, 373–386.
- Hecht, M.H., Kounaves, S.P., Quinn, R.C., West, S.J., Young, S.M.M., Ming, D.W., Catling, D.C., Clark, B.C., Boynton, W.V., Hoffman, J., DeFlores, L.P., Gospodinova, K., Kapit, J. and Smith, P.H. (2009): Detection of perchlorate and the soluble chemistry of martian soil at the Phoenix lander site. *Science*, **325**, 64–67.
- Herkenhoff, K.E., Squyres, S.W., Bell, J.F., Maki, J.N., Arneson, H.M., Bertelsen, P., Brown, D.I., Collins, S.A., Dingizian, A., Elliott, S.T., Goetz, W., Hagerott, E.C., Hayes, A.G., Johnson, M.J., Kirk, R.L., McLennan, S., Morris, R.V., Scherr, L.M., Schwochert, M.A., Shiraishi, L.R., Smith, G.H., Soderblom, L.A., Sohl-Dickstein, J.N. and Wadsworth, M.V. (2003): Athena Microscopic Imager investigation. *Journal of Geophysical Research*, **108**, E12, 8065.
- Herkenhoff, K.E., Squyres, S.W., Arvidson, R., Bass, D. S., Bell, J.F., Bertelsen, P., Ehlmann, B.L., Farrand, W., Gaddis, L., Greeley, R., Grotzinger, J., Hayes, A.G., Hviid, S.F., Johnson, J.R., Jolliff, B., Kinch, K.M., Knoll, A.H., Madsen, M.B., Maki, J.N., McLennan, S.M., McSween, H.Y., Ming, D.W., Rice Jr., J.W., Richter, L., Sims, M., Smith, P.H., Soderblom, L.A., Spanovich, N., Sullivan, R., Thompson, S., Wdowiak, T., Weitz, C. and Whelley, P. (2004): Evidence from Opportunity's Microscopic Imager for water on Meridiani Planum. *Science*, **306**, 1727–1730.
- Hoffman, J.H., Chaney, R.C. and Hammack, H. (2008): Phoenix Mars Mission—The thermal evolved gas analyzer. *Journal of the American Society for Mass Spectrometry*, **19**, 1377–1383.
- Huguenin, R.L., Miller, K.J. and Harwood, W.S. (1979): Frost-weathering on Mars: Experimental evidence for peroxide formation. *Journal of Molecular Evolution*, **14**, 103–132.
- Hurowitz, J.A., McLennan, S.M., Tosca, N.J., Arvidson, R.E., Michalski, J.R., Ming, D.W., Schröder, C. and Squyres, S.W. (2006): In situ and experimental evidence for acidic weathering of rocks and soils on Mars. *Journal of Geophysical Research*, **111**, E02S19.

- Jagoutz, E. (2006): Salt-induced rock fragmentation on Mars: The role of salt in the weathering of Martian rocks. *Advances in Space Research*, **38**, 696–700.
- Jakosky, B.M. and Phillips, R.J. (2001): Mars' volatile and climate history. *Nature*, **412**, 237–244.
- Jones, K.L., Arvidson, R.E., Guinness, E.A., Bragg, S.L., Wall, S.D., Carlston, C.E. and Pidek, D.G. (1979): One Mars year: Viking lander imaging observations. *Science*, **204**, 799–806.
- Keller, H.U., Goetz, W., Hartwig, H., Hviid, S.F., Kramm, R., Markiewicz, W.J., Reynolds, R., Shinohara, C., Smith, P., Tanner, R., Woida, P., Woida, R., Bos, B.J. and Lemmon, M.T. (2008): Phoenix Robotic Arm Camera. *Journal of Geophysical Research*, **113**, E00A17.
- Kieffer, H.H. (1976): Soil and surface temperatures at the Viking landing sites. *Science*, **194**, 1344–1346.
- King, P.L. and McSween Jr., H.Y. (2005): Effects of H₂O, pH, and oxidation state on the stability of Fe minerals on Mars. *Journal of Geophysical Research*, **110**, E12S10.
- Klingelhöfer, G., Morris, R.V., Bernhardt, B., Rodionov, D., de Souza Jr., P.A., Squyres, S.W., Foh, J., Kankleit, E., Bonnes, U., Gellert, R., Schröder, C., Linkin, S., Evlanov, E., Zubkov, B. and Prilutski, O. (2003): Athena MIMOS II Mössbauer spectrometer investigation. *Journal of Geophysical Research*, **108**, E12, 8067.
- 国立天文台編 (2008): 理科年表平成 21 年版. 丸善. [National Astronomical Observatory ed. (2008): *Chronological Scientific Tables of 2009 (Rika Nenpyo)*. Maruzen. (in Japanese) *]
- Kong, W.G., Zheng, M.P., Kong, F.J. and Chen, W.X. (2014): Sulfate-bearing deposits at Dalangtan Playa and their implication for the formation and preservation of martian salts. *American Mineralogist*, **99**, 283–290.
- Kounaves, S.P., Lukow, S.R., Comeau, B.P., Hecht, M.H., Grannan-Feldman, S.M., Manatt, K., West, S.J., Wen, X., Frant, M. and Gillette, T. (2003): Mars Surveyor Program '01 Mars Environmental Compatibility Assessment wet chemistry lab: A sensor array for chemical analysis of the Martian soil. *Journal of Geophysical Research*, **108**, E7, 5077.
- Kounaves, S.P., Hecht, M.H., West, S.J., Morookian, J.-M., Young, S.M.M., Quinn, R., Grunthaner, P., Wen, X., Weilert, M., Cable, C.A., Fisher, A., Gospodina, K., Kapit, J., Stroble, S., Hsu, P.-C., Clark, B.C., Ming, D.W. and Smith, P.H. (2009): The MECA Wet Chemistry Laboratory on the 2007 Phoenix Mars Scout Lander. *Journal of Geophysical Research*, **114**, E00A19.
- Kounaves, S.P., Hecht, M.H., Kapit, J., Gospodina, K., DeFlores, L., Quinn, R.C., Boynton, W.V., Clark, B.C., Catling, D.C., Hredzak, P., Ming, D.W., Moore, Q., Shusterman, J., Stroble, S., West, S.J. and Young, S.M.M. (2010): Wet Chemistry experiments on the 2007 Phoenix Mars Scout Lander mission: Data analysis and results. *Journal of Geophysical Research*, **115**, E00E10.
- 栗山健弘・吉田英一・山本博文・勝田長貴 (2006): 河岸段丘礫の表面風化にみる酸化フロントの形成とその移動速度. *地質学雑誌*, **112**, 136–152. [Kuriyam, K., Yoshida, E., Yamamoto, H. and Katsuta, N. (2006): Redox front formation and its proceeding rate in weathering rind. *Journal of the Geological Society of Japan*, **112**, 136–152. (in Japanese with English abstract)]
- Laity, J.E. and Bridges, N.T. (2009): Ventifacts on Earth and Mars: Analytical, field, and laboratory studies supporting sand abrasion and windward feature development. *Geomorphology*, **105**, 202–217.
- Lemmon, M.T., Smith, P.H., Shinohara, C., Tanner, R., Woida, P., Shaw, A., Hughes, J., Reynolds, R., Woida, R., Penegor, J., Oquest, C., Hviid, S.F., Madsen, M.B., Olsen, M., Leer, K., Drube, L., Morris, R.V. and Britt, D. (2008): The Phoenix Surface Stereo Imager (SSI) investigation. *39th Annual Lunar and Planetary Science Conference*, No. 2156.
- Levy, J.S., Head, J.W. and Marchant, D.R. (2009): Cold and dry processes in the Martian Arctic: Geomorphic observations at the Phoenix landing site and comparisons with terrestrial cold desert landforms. *Geophysical Research Letters*, **36**, L21203.
- Mahaney, W.C., Fairén, A.G., Dohm, J.M. and Krinsley, D.H. (2012): Weathering rinds on clasts: Examples from Earth and Mars as short and long term recorders of paleoenvironment. *Planetary and Space Science*, **73**, 243–253.
- Malin, M.C. (1974): Salt weathering on Mars. *Journal of Geophysical Research*, **79**, 3888–3894.
- Marchant, D.R. and Head, J.W. (2007): Antarctic dry valleys: Microclimate zonation, variable geomorphic processes, and implications for assessing climate change on Mars. *Icarus*, **192**, 187–222.
- Martin, T.Z., Bridges, N.T. and Murphy, J.R. (2003): Near-surface temperatures at proposed Mars Exploration Rover landing sites. *Journal of Geophysical Research*, **108**, E12, 8089.
- Martínez, G.M. and Renno, N.O. (2013): Water and brines on Mars: current evidence and implications for MSL. *Space Science Reviews*, **175**, 29–51.
- Martín-Torres, F.J., Zorzano, M.-P., Valentín-Serrano, P., Harri, A.-M., Genzer, M., Kempainen, O., Rivera-Valentin, E.G., Jun, I., Wray, J., Bo Madsen, M., Goetz, W., McEwen, A.S., Hardgrove, C., Renno, N., Chevrier, V.F., Mischna, M., Navarro-González, R., Martínez-Frías, J., Conrad, P., McConnochie, T., Cockell, C., Berger, G., Vasavada, A.R., Sumner, D. and Vaniman, D. (2015): Transient liquid water and water activity at Gale crater on Mars. *Nature*

- Geoscience*, **8**, 357-361.
- 松倉公憲 (1994): 風化過程におけるロックコントロール—従来の研究の動向と今後の課題—。地形, **15**, 203-222. [Matsukura, Y. (1994): A review of studies on rock control in weathering processes. Transactions. *Japanese Geomorphological Union (Chikei)*, **15**, 203-222. (in Japanese with English abstract)]
- 松倉公憲 (2008): 地形変化の科学. 朝倉書店. [Matsukura, Y. (2008): *The Earth's Changing Surface (Chikeihenka No Kagaku)*. Asakura Publishing Co. (in Japanese)*]
- Matsukura, Y. and Kanai, H. (1988): Salt fretting in the valley cliff of the Asama volcano region, Japan. *Earth Surface Processes and Landforms*, **13**, 85-90.
- Matsukura, Y. and Matsuoka, N. (1991): Rates of tafoni weathering on uplifted shore platforms in Nojima-Zaki, Boso Peninsula, Japan. *Earth Surface Processes and Landforms*, **16**, 51-56.
- Matsukura, Y. and Matsuoka, N. (1996): The effect of rock properties on rates of tafoni growth in coastal environments. *Zeitschrift für Geomorphologie N. F. Supplementband*, **106**, 57-72.
- Matsuoka, N. (2001): Microgelivation versus macrogelivation: Towards bridging the gap between laboratory and field frost weathering. *Permafrost and Periglacial Processes*, **12**, 299-313.
- Matsuoka, N., Thomachot, C.E., Oguchi, C.T., Hatta, T., Abe, M. and Matsuzaki, H. (2006): Quaternary bedrock erosion and landscape evolution in the Sør Rondane Mountains, East Antarctica: Reevaluating rates and processes. *Geomorphology*, **81**, 408-420.
- Maurice, S., Wiens, R.C., Saccoccio, M., Barraclough, B., Gasnault, O., Forni, O., Mangold, N., Baratoux, D., Bender, S., Berger, G., Bernardin, J., Berthé, M., Bridges, N., Blaney, D., Bouyé, M., Caïs, P., Clark, B., Clegg, S., Cousin, A., Cremers, D., Cros, A., DeFlores, L., Derycke, C., Dingler, B., Dromart, G., Dubois, B., Dupieux, M., Durand, E., d'Uston, L., Fabre, C., Faure, B., Gaboriaud, A., Gharsa, T., Herkenhoff, K., Kan, E., Kirkland, L., Kouach, D., Lacour, J.-L., Langevin, Y., Lasue, J., Le Mouélic, S., Lescure, M., Lewin, E., Limonadi, D., Manhès, G., Mauchien, P., McKay, C., Meslin, P.-Y., Michel, Y., Miller, E., Newsom, H.E., Orttner, G., Paillet, A., Parès, L., Parot, Y., Pérez, R., Pinet, P., Poitrasson, F., Quertier, B., Sallé, B., Sotin, C., Sautter, V., Séran, H., Simmonds, J.J., Sirven, J.-B., Stiglich, R., Striebig, N., Thocaven, J.-J., Toplis, M.J. and Vaniman, D. (2012): The ChemCam instrument suite on the Mars Science Laboratory (MSL) Rover: Science objectives and mast unit description. *Space Science Reviews*, **170**, 95-166.
- McBride, E.F. and Picard, M.D. (2000): Origin and development of tafoni in tunnel spring tuff, Crystal Peak, Utah, USA. *Earth Surface Processes and Landforms*, **25**, 869-879.
- McBride, E.F. and Picard, M.D. (2004): Origin of honeycombs and related weathering forms in Oligocene Macigno Sandstone, Tuscan coast near Livorno, Italy. *Earth Surface Processes and Landforms*, **29**, 713-735.
- McGreevy, J.P. (1981): Some perspectives on frost shattering. *Progress in Physical Geography*, **5**, 56-75.
- McLennan, S.M., Bell, J.F., Calvin, W.M., Christensen, P.R., Clark, B.C., de Souza, P.A., Farmer, J., Farrand, W.H., Fike, D.A., Gellert, R., Ghosh, A., Glotch, T.D., Grotzinger, J.P., Hahn, B., Herkenhoff, K.E., Hurowitz, J.A., Johnson, J.R., Johnson, S.S., Jolliff, B., Klingelhöfer, G., Knoll, A.H., Lerner, Z., Malin, M.C., McSween Jr., H.Y., Pocock, J., Ruff, S.W., Soderblom, L.A., Squyres, S.W., Tosca, N.J., Watters, W.A., Wyatt, M.B. and Yen, A. (2005): Provenance and diagenesis of the evaporite-bearing Burns formation, Meridiani Planum, Mars. *Earth and Planetary Science Letters*, **240**, 95-121.
- McSween, H.Y., Arvidson, R.E., Bell, J.F., Blaney, D., Cabrol, N.A., Christensen, P.R., Clark, B.C., Crisp, J.A., Crumpler, L.S., Des Marais, D.J., Farmer, J.D., Gellert, R., Ghosh, A., Gorevan, S., Graff, T., Grant, J., Haskin, L.A., Herkenhoff, K.E., Johnson, J.R., Jolliff, B.L., Klingelhöfer, G., Knudson, A.T., McLennan, S., Milam, K.A., Moersch, J.E., Morris, R.V., Rieder, R., Ruff, S.W. de Souza Jr., P.A., Squyres, S.W., Wänke, H., Wang, A., Wyatt, M.B., Yen, A. and Zipfel, J. (2004): Basaltic rocks analyzed by the Spirit Rover in Gusev Crater. *Science*, **305**, 842-845.
- McSween, H.Y., Wyatt, M.B., Gellert, R., Bell, J.F., Morris, R.V., Herkenhoff, K.E., Crumpler, L.S., Milam, K.A., Stockstill, K.R., Tornabene, L.L., Arvidson, R.E., Bartlett, P., Blaney, D., Cabrol, N.A., Christensen, P.R., Clark, B.C., Crisp, J.A., Des Marais, D.J., Economou, T., Farmer, J.D., Farrand, W., Ghosh, A., Golombek, M., Gorevan, S., Greeley, R., Hamilton, V.E., Johnson, J.R., Jolliff, B.L., Klingelhöfer, G., Knudson, A.T., McLennan, S., Ming, D., Moersch, J.E., Rieder, R., Ruff, S.W., Schröder, C., de Souza Jr., P.A., Squyres, S.W., Wänke, H., Wang, A., Yen, A. and Zipfel, J. (2006): Characterization and petrologic interpretation of olivine-rich basalts at Gusev Crater, Mars. *Journal of Geophysical Research*, **111**, E02S10.
- Ming, D.W., Archer Jr., P.D., Glavin, D.P., Eigenbrode, J.L., Franz, H.B., Sutter, B., Brunner, A.E., Stern, J.C., Freissinet, C., McAdam, A.C., Mahaffy, P.R., Cabane, M., Coll, P., Campbell, J.L., Atreya, S.K., Niles, P.B., Bell III, J.F., Bish, D.L., Brinckerhoff, W.B., Buch, A., Conrad, P.G., Des Marais, D.J., Ehlmann, B.L., Fairén, A.G., Farley, K., Flesch, G.J., Francois, P., Gellert, R., Grant, J.A., Grotzinger, J.P., Gupta, S., Herkenhoff, K.E., Hurowitz, J.A., Leshin, L.A., Lewis, K.W., McLennan, S.M., Miller, K.E., Moersch, J., Morris, R.V., Navarro-González, R.,

- Pavlov, A.A., Perrett, G.M., Pradler, I., Squyres, S.W., Summons, R.E., Steele, A., Stolper, E.M., Sumner, D.Y., Szopa, C., Teinturier, S., Trainer, M.G., Treiman, A.H., Vaniman, D.T., Vasavada, A.R., Webster, C.R., Wray, J.J., Yingst, R.A. and MSL Science Team (2014): Volatile and organic compositions of sedimentary rocks in Yellowknife Bay, Gale crater, Mars. *Science*, **343**, 1245267.
- Mitrofanov, I.G., Litvak, M.L., Varenikov, A.B., Barkmakov, Y.N., Behar, A., Bobrovitsky, Y.I., Bogolubov, E.P., Boynton, W.V., Harshman, K., Kan, E., Kozyrev, A.S., Kuzmin, R.O., Malakhov, A.V., Mokrousov, M.I., Ponomareva, S.N., Ryzhkov, V.I., Sanin, A.B., Smirnov, G.A., Shvetsov, V.N., Timoshenko, G.N., Tomilina, T.M., Tret'yakov, V.I. and Vostrukhin, A.A. (2012): Dynamic Albedo of Neutrons (DAN) experiment onboard NASA's Mars Science Laboratory. *Space Science Reviews*, **170**, 559–582.
- Moore, H.J., Bickler, D.B., Crisp, J.A., Eisen, H.J., Gensler, J.A., Haldemann, A.F.C., Matijevic, J.R., Reid, L.K. and Pavlics, F. (1999): Soil-like deposits observed by Sojourner, the Pathfinder rover. *Journal of Geophysical Research*, **104**, E4, 8729–8746.
- Moores, J.E., Pelletier, J.D. and Smith, P.H. (2008): Crack propagation by differential insolation on desert surface clasts. *Geomorphology*, **102**, 472–481.
- Moroz, V.I. (1964): The infrared spectrum of Mars (λ 1.1–4.1 μ). *Soviet Astronomy*, **8**, 273–281.
- Morris, R.V., Golden, D.C., Bell, J.F., Shelfer, T.D., Scheinost, A.C., Hinman, N.W., Furniss, G., Mertzman, S.A., Bishop, J.L., Ming, D.W., Allen, C.C. and Britt, D.T. (2000): Mineralogy, composition, and alteration of Mars Pathfinder rocks and soils: Evidence from multispectral, elemental, and magnetic data on terrestrial analogue, SNC meteorite, and Pathfinder samples. *Journal of Geophysical Research*, **105**, E1, 1757–1817.
- Morris, R.V., Klingelhöfer, G., Bernhardt, B., Schröder, C., Rodionov, D.S., de Souza Jr., P.A., Yen, A., Gellert, R., Evlanov, E.N., Foh, J., Kankeleit, E., Güttlich, P., Ming, D.W., Renz, F., Wdowiak, T., Squyres, S.W. and Arvidson, R.E. (2004): Mineralogy at Gusev Crater from the Mössbauer spectrometer on the Spirit Rover. *Science*, **305**, 833–836.
- Morris, R.V., Ming, D.W., Graff, T.G., Arvidson, R.E., Bell, J.F., Squyres, S.W., Mertzman, S.A., Gruener, J.E., Golden, D.C., Le, L. and Robinson, G.A. (2005): Hematite spherules in basaltic tephra altered under aqueous, acid-sulfate conditions on Mauna Kea volcano, Hawaii: Possible clues for the occurrence of hematite-rich spherules in the Burns formation at Meridiani Planum, Mars. *Earth and Planetary Science Letters*, **240**, 168–178.
- Morris, R.V., Klingelhöfer, G., Schröder, C., Rodionov, D.S., Yen, A., Ming, D.W., de Souza, P.A., Fleischer, I., Wdowiak, T., Gellert, R., Bernhardt, B., Evlanov, E.N., Zubkov, B., Foh, J., Bonnes, U., Kankeleit, E., Güttlich, P., Renz, F., Squyres, S.W. and Arvidson, R.E. (2006): Mössbauer mineralogy of rock, soil, and dust at Gusev Crater, Mars: Spirit's journey through weakly altered olivine basalt on the plains and pervasively altered basalt in the Columbia Hills. *Journal of Geophysical Research*, **111**, E02S13.
- Mottershead, D.N. (1989): Rates and patterns of bedrock denudation by coastal salt spray weathering: A seven-year record. *Earth Surface Processes and Landforms*, **14**, 383–398.
- Murton, J.B. and Lautridou, J.-P. (2003): Recent advances in the understanding of Quaternary periglacial features of the English Channel coastlands. *Journal of Quaternary Science*, **18**, 301–307.
- Murton, J.B., Peterson, R. and Ozouf, J.-C. (2006): Bedrock fracture by ice segregation in cold regions. *Science*, **314**, 1127–1129.
- Mustard, J.F., Cooper, C.D. and Rifkin, M.K. (2001): Evidence for recent climate change on Mars from the identification of youthful near-surface ground ice. *Nature*, **1128**, 411–414.
- Mustoe, G.E. (1982): The origin of honeycomb weathering. *Geological Society of America Bulletin*, **93**, 108–115.
- Mutch, T.A., Binder, A.B., Huck, F.O., Levinthal, E.C., Liebes Jr., S., Morris, E.C., Patterson, W.R., Pollack, J.B., Sagan, C. and Taylor, G.R. (1976a): The surface of Mars: The view from the Viking 1 lander. *Science*, **193**, 791–801.
- Mutch, T.A., Grenander, S.U., Jones, K.L., Patterson, W., Arvidson, R.E., Guinness, E.A., Avrin, P., Carlston, C.E., Binder, A.B., Sagan, C., Dunham, E.W., Fox, P.L., Pieri, D.C., Huck, F.O., Rowland, C.W., Taylor, G.R., Wall, S.D., Kahn, R., Levinthal, E.C., Liebes, S., Tucker, R.B., Morris, E.C., Pollack, J.B., Saunders, R.S. and Wolf, M.R. (1976b): The surface of Mars: The view from the Viking 2 lander. *Science*, **194**, 1277–1283.
- NASA (2013): Steady Temperatures at Mars' Gale Crater. <http://mars.jpl.nasa.gov/msl/multimedia/images/?ImageID=5206&NewsInfo=59C884BFF2B8E0EFCDD902B94F94BA55AC4A8F9603007ADCCA4F50EBACD6D68CDF99D8DCE3D1DF46C659FEB2EF920BCACFD306DA4114E8DB1FCBCF0365D73902CDE74CC312C9CDD70F13D2C8D527C7B6C7ABFEC5EFD1DED3C882C4150D4A15DF4BD29B4A412F67C93F8FD5C842EABD4EB90E5356805C> [Cited 2014/05/10].
- Oguchi, C.T. (2001): Formation of weathering rinds on andesite. *Earth Surface Processes and Landforms*, **26**, 847–858.
- Ojha, L., McEwen, A., Dundas, C., Byrne, S., Mattson, S., Wray, J., Masse, M. and Schaefer, E. (2014): HiRISE observations of Recurring Slope Lineae (RSL) during southern summer on Mars. *Icarus*,

231, 365–376.

- Parsons, R.L., Head, J.W. and Bell, J.F. (2005): Weathering pits in the Antarctic Dry Valleys: Insolation-induced heating and melting, and applications to Mars. *36th Annual Lunar and Planetary Science Conference*, No. 1138.
- Posey-Dowty, J., Moskowitz, B., Crerar, D., Hargraves, R., Tanenbaum, L. and Dowty, E. (1986): Iron oxide and hydroxide precipitation from ferrous solutions and its relevance to Martian surface mineralogy. *Icarus*, **66**, 105–116.
- Ricker, K.E., Chinn, T.J. and McSaveney, M.J. (1993): A late Quaternary moraine sequence dated by rock weathering rinds, Craigieburn Range, New Zealand. *Canadian Journal of Earth Sciences*, **30**, 1861–1869.
- Rieder, R., Economou, T., Wänke, H., Turkevich, A., Crisp, J., Brückner, J., Dreibus, G. and McSween Jr., H.Y. (1997): The chemical composition of Martian soil and rocks returned by the mobile alpha proton X-ray spectrometer: Preliminary results from the X-ray mode. *Science*, **278**, 1771–1774.
- Rieder, R., Gellert, R., Brückner, J., Klingelhöfer, G., Dreibus, G., Yen, A. and Squyres, S.W. (2003): The new Athena alpha particle X-ray spectrometer for the Mars Exploration Rovers. *Journal of Geophysical Research*, **108**, E12, 8066.
- Rodriguez-Navarro, C. (1998): Evidence of honeycomb weathering on Mars. *Geophysical Research Letters*, **25**, 3249–3252.
- Schwertmann, U. (1985): The effect of pedogenic environments on iron oxide minerals. in *Advances in Soil Science* edited by Stewart, B.A., Springer, **1**, 171–200.
- Selby, M.J. and Wilson, A.T. (1971): The origin of the labyrinth, Wright Valley, Antarctica. *Geological Society of America Bulletin*, **82**, 471–476.
- Shakesby, R.A. and Doerr, S.H. (2006): Wildfire as a hydrological and geomorphological agent. *Earth-Science Reviews*, **74**, 269–307.
- Sharonov, V.V. (1961): A lithological interpretation of the photometric and colorimetric studies of Mars. *Soviet Astronomy*, **5**, 199–202.
- Shirley, D. and Matijevic, J. (1995): Mars Pathfinder Microrover. *Autonomous Robots*, **2**, 283–289.
- Smith, P.H., Bell, J.F., Bridges, N.T., Britt, D.T., Gaddis, L., Greeley, R., Keller, H.U., Herkenhoff, K.E., Jaumann, R., Johnson, J.R., Kirk, R.L., Lemmon, M., Maki, J.N., Malin, M.C., Murchie, S.L., Oberst, J., Parker, T.J., Reid, R.J., Sablotny, R., Soderblom, L.A., Stoker, C., Sullivan, R., Thomas, N., Tomasko, M.G., Ward, W. and Wegryn, E. (1997): Results from the Mars Pathfinder Camera. *Science*, **278**, 1758–1765.
- Smith, P.H., Tamppari, L., Arvidson, R.E., Bass, D., Blaney, D., Boynton, W., Carswell, A., Catling, D., Clark, B., Duck, T., DeJong, E., Fisher, D., Goetz, W., Gunnlaugsson, P., Hecht, M., Hipkin, V., Hoffman, J., Hviid, S., Keller, H., Kounaves, S., Lange, C.F., Lemmon, M., Madsen, M., Malin, M., Markiewicz, W., Marshall, J., McKay, C., Mellon, M., Michelangeli, D., Ming, D., Morris, R., Renno, N., Pike, W.T., Staufer, U., Stoker, C., Taylor, P., Whiteway, J., Young, S. and Zent, A. (2008): Introduction to special section on the Phoenix mission: landing site characterization experiments, mission overviews, and expected science. *Journal of Geophysical Research*, **113**, E00A18.
- 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.
- Soffen, G.A. and Young, A.T. (1972): The Viking missions to Mars. *Icarus*, **16**, 1–16.
- Squyres, S.W., Arvidson, R.E., Baumgartner, E.T., Bell, J.F., Christensen, P.R., Gorevan, S., Herkenhoff, K.E., Klingelhöfer, G., Madsen, M.B., Morris, R.V., Rieder, R. and Romero, R.A. (2003): Athena Mars rover science investigation. *Journal of Geophysical Research*, **108**, E12, 8062.
- Squyres, S.W., Grotzinger, J.P., Arvidson, R.E., Bell, J.F., Calvin, W., Christensen, P.R., Clark, B.C., Crisp, J.A., Farrand, W.H., Herkenhoff, K.E., Johnson, J.R., Klingelhöfer, G., Knoll, A.H., McLennan, S.M., McSween Jr., H.Y., Morris, R.V., Rice Jr., J.W., Rieder, R. and Soderblom, L.A. (2004a): In situ evidence for an ancient aqueous environment at Meridiani Planum, Mars. *Science*, **306**, 1709–1714.
- Squyres, S.W., Arvidson, R.E., Bell, J.F., Brückner, J., Cabrol, N.A., Calvin, W., Carr, M.H., Christensen, P.R., Clark, B.C., Crumpler, L., Des Marais, D.J., d'Uston, C., Economou, T., Farmer, J., Farrand, W., Folkner, W., Golombek, M., Gorevan, S., Grant, J.A., Greeley, R., Grotzinger, J., Haskin, L., Herkenhoff, K.E., Hviid, S., Johnson, J., Klingelhöfer, G., Knoll, A., Landis, G., Lemmon, M., Li, R., Madsen, M.B., Malin, M.C., McLennan, S.M., McSween, H.Y., Ming, D.W., Moersch, J., Morris, R.V., Parker, T., Rice, J.W., Richter, L., Rieder, R., Sims, M., Smith, M., Smith, P., Soderblom, L.A., Sullivan, R., Wänke, H., Wdowiak, T., Wolff, M. and Yen, A. (2004b): The Spirit Rover's Athena science investigation at Gusev Crater, Mars. *Science*, **305**, 794–799.
- Squyres, S.W., Arvidson, R.E., Bell, J.F., Brückner, J., Cabrol, N.A., Calvin, W., Carr, M.H., Christensen, P.R., Clark, B.C., Crumpler, L., Des Marais, D.J., d'Uston, C., Economou, T., Farmer, J., Farrand, W.,

- Folkner, W., Golombek, M., Gorevan, S., Grant, J.A., Greeley, R., Grotzinger, J., Haskin, L., Herkenhoff, K.E., Hviid, S., Johnson, J., Klingelhöfer, G., Knoll, A.H., Landis, G., Lemmon, M., Li, R., Madsen, M.B., Malin, M.C., McLennan, S.M., McSween, H.Y., Ming, D.W., Moersch, J., Morris, R.V., Parker, T., Rice Jr., J.W., Richter, L., Rieder, R., Sims, M., Smith, M., Smith, P., Soderblom, L.A., Sullivan, R., Wänke, H., Wdowiak, T., Wolff, M. and Yen, A. (2004c): The Opportunity Rover's Athena science investigation at Meridiani Planum, Mars. *Science*, **306**, 1698-1703.
- Squyres, S.W., Arvidson, R.E., Bollen, D., Bell, J.F., Brückner, J., Cabrol, N.A., Calvin, W.M., Carr, M.H., Christensen, P.R., Clark, B.C., Crumpler, L., Des Marais, D.J., D'Uston, C., Economou, T., Farmer, J., Farrand, W.H., Folkner, W., Gellert, R., Glotch, T.D., Golombek, M., Gorevan, S., Grant, J.A., Greeley, R., Grotzinger, J., Herkenhoff, K.E., Hviid, S., Johnson, J.R., Klingelhöfer, G., Knoll, A.H., Landis, G., Lemmon, M., Li, R., Madsen, M.B., Malin, M.C., McLennan, S.M., McSween, H.Y., Ming, D.W., Moersch, J., Morris, R.V., Parker, T., Rice Jr., J.W., Richter, L., Rieder, R., Schröder, C., Sims, M., Smith, M., Smith, P., Soderblom, L.A., Sullivan, R., Tosca, N.J., Wänke, H., Wdowiak, T., Wolff, M. and Yen, A. (2006): Overview of the Opportunity Mars Exploration Rover mission to Meridiani Planum: Eagle Crater to Purgatory Ripple. *Journal of Geophysical Research*, **111**, E12S12.
- Strini, A., Guglielmin, M. and Hall, K. (2008): Tafoni development in a cryotic environment: An example from Northern Victoria Land, Antarctica. *Earth Surface Processes and Landforms*, **33**, 1502-1519.
- 高橋健一・松倉公憲・鈴木隆介 (1993): 海水飛沫帯における砂岩の侵蝕速度—日南海岸・青島の弥生橋橋脚の侵蝕形状—。地形, **14**, 143-164. [Takahashi, K., Matsukura, Y. and Suzuki, T. (1993): Rate of erosion of sandstone in the coastal spray zone. *Transactions, Japanese Geomorphological Union (Chikei)*, **14**, 143-164. (in Japanese with English abstract)]
- Tardy, Y. and Nahon, D. (1985): Geochemistry of laterites, stability of Al-goethite, Al-hematite, and Fe³⁺-kaolinite in bauxites and ferricretes: An approach to the mechanism of concretion formation. *American Journal of Science*, **285**, 865-903.
- Tosca, N.J., McLennan, S.M., Lindsley, D.H. and Schoonen, M.A.A. (2004): Acid-sulfate weathering of synthetic Martian basalt: The acid fog model revisited. *Journal of Geophysical Research*, **109**, E05003.
- Valix, M., Usai, F. and Malik, R. (2001): Fungal bio-leaching of low grade laterite ores. *Minerals Engineering*, **14**, 197-203.
- Viles, H.A. and Goudie, A.S. (2007): Rapid salt weathering in the coastal Namib desert: Implications for landscape development. *Geomorphology*, **85**, 49-62.
- Viles, H., Ehlmann, B., Wilson, C.F., Cebula, T., Page, M. and Bourke, M. (2010): Simulating weathering of basalt on Mars and Earth by thermal cycling. *Geophysical Research Letters*, **37**, L18201.
- Wall, S.D. (1981): Analysis of condensates formed at the Viking 2 lander site: The first winter. *Icarus*, **47**, 173-183.
- Wiens, R.C., Maurice, S., Barraclough, B., Saccoccio, M., Barkley, W.C., Bell, J.F., Bender, S., Bernardin, J., Blaney, D., Blank, J., Bouyé, M., Bridges, N., Bultman, N., Caïs, P., Clanton, R.C., Clark, B., Clegg, S., Cousin, A., Cremers, D., Cros, A., DeFlores, L., Delapp, D., Dingler, R., D'Uston, C., Dyar, M.D., Elliott, T., Enemark, D., Fabre, C., Flores, M., Forni, O., Gasnault, O., Hale, T., Hays, C., Herkenhoff, K., Kan, E., Kirkland, L., Kouach, D., Landis, D., Langevin, Y., Lanza, N., LaRocca, F., Lasue, J., Latino, J., Limonadi, D., Lindensmith, C., Little, C., Mangold, N., Manhes, G., Mauchien, P., McKay, C., Miller, E., Mooney, J., Morris, R.V., Morrison, L., Nelson, T., Newsom, H., Ollila, A., Ott, M., Pares, L., Perez, R., Poitrasson, F., Provost, C., Reiter, J.W., Roberts, T., Romero, F., Sautter, V., Salazar, S., Simmonds, J.J., Stiglich, R., Storms, S., Striebig, N., Thocaven, J.-J., Trujillo, T., Ulibarri, M., Vaniman, D., Warner, N., Waterbury, R., Whitaker, R., Witt, J. and Wong-Swanson, B. (2012): The ChemCam instrument suite on the Mars Science Laboratory (MSL) rover: Body unit and combined system tests. *Space Science Reviews*, **170**, 167-227.
- Yen, A.S., Gellert, R., Schröder, C., Morris, R.V., Bell, J.F., Knudson, A.T., Clark, B.C., Ming, D.W., Crisp, J.A., Arvidson, R.E., Blaney, D., Brückner, J., Christensen, P.R., Des Marais, D.J., de Souza Jr., P.A., Economou, T.E., Ghosh, A., Hahn, B.C., Herkenhoff, K.E., Haskin, L.A., Hurowitz, J.A., Joliff, B.L., Johnson, J.R., Klingelhöfer, G., Madsen, M.B., McLennan, S.M., McSween, H.Y., Richter, L., Rieder, R., Rodionov, D., Soderblom, L., Squyres, S.W., Tosca, N.J., Wang, A., Wyatt, M. and Zipfel, J. (2005): An integrated view of the chemistry and mineralogy of martian soils. *Nature*, **436**, 49-54.
- Yong, C. and Wang, C.-Y. (1980): Thermally induced acoustic emission in westerly granite. *Geophysical Research Letters*, **7**, 1089-1092.
- Zorzano, M.-P., Mateo-Martí, E., Prieto-Ballesteros, O., Osuna, S. and Renno, N. (2009): Stability of liquid saline water on present day Mars. *Geophysical Research Letters*, **36**, L20201.

* Title etc. translated by M.S.