

近年の火星隕石研究・火星探査から 得られた新しい火星の描像

臼 井 寛 裕*

1. はじめに

火星は隕石試料の存在する唯一の地球型惑星である だけでなく、これまで最も多くの探査が行なわれてき た惑星である。近年(特に2000年以降),火星隕石コ レクションの爆発的な増加及び数多くの火星探査に よって,火星に関する我々の知見は飛躍的に向上し た。火星隕石試料を用いた研究では、実験室における 詳細な岩石記載・化学分析により高精度の宇宙化学的 情報が得られる反面、火星上での産状の不明瞭な隕石 試料から得られた情報が地質学的・地球化学的に多様 な惑星である火星をどれだけ代表しているかという問 題を常に伴う。一方、リモートセンシングに頼らざる を得ない火星探査では、得られる科学データに限りが あるだけでなく、実験室とは全く異なる環境・条件で の分析を強いられる為、探査データの取り扱いに注意 を要する。本総説では、相補的な2つの研究手法(隕 石学および惑星探査)から得られた最新の研究に基づ き、火星隕石や火星地殻・マントル・コアに関する基 本情報について述べた後(2~4章),火星化学リザ バーの起源・進化及び表層環境との相互作用に関する 最新の火星像について議論する(5~6章)。

2. 火星隕石

2011年7月現在,99個の火星隕石が確認されてお り,その大半(89個)は南極及びサハラ砂漠を中心 に1990年以降に発見されたものである(Meteoritical Bulletin Database)。火星隕石は岩石学的特徴によ り,シャーゴッタイト (Shergottite, 玄武岩質火山 岩中及び輝石カンラン石集積岩),ナクライト (Nakhlite,単斜輝石集積岩),シャシナイト (Chassignite,カンラン石集積岩)の3種類と,ALH 84001 (斜方輝石集積岩)に分類される。前者はその頭文字 を組み合わせて,SNC 隕石と呼ばれてきた。これら 火星隕石 (SNC 及び ALH 84001)はすべて火成岩で あり,堆積岩を起源とする火星隕石は確認されていな い。火星隕石の岩石学・地球化学的記載の詳細に関し ては以下を参照 (McSween, 1994; McSween and Treiman, 1998)。

SNC 隕石の特徴として,(1)他の隕石(コンドラ イトなど)に比べ非常に若い結晶化年代(1.7~13億 年^{ib2})を示すこと,(2)酸化的な環境での火成作用で 形成されたと考えられること,(3)強い衝撃圧力 (>20 GPa)を受けていること,(4)火成作用及び その後の水質変成作用でできたと考えられる多様な含 水鉱物を含むこと,が挙げられる(e.g., McSween, 1994; Nyquist *et al.*, 2001)。このような岩石学・年 代学的特徴より,SNC 隕石が比較的大きな母天体, つまり火星を起源としているのではないかという提 案がなされてきた(Jones, 1986; McSween *et al.*, 1979)。SNC 隕石の火星起源説が広く受け入れられ るようになったのは,シャーゴッタイト(EETA

注2: それぞれのシャーゴッタイトに関し,Sm-Nd,Lu-Hf系 及びU-Pb,Rb-Sr系において調和的に若い結晶化年代 を与えている一方で,Pb-Pbアイソクロン年代法では約 45億年という古い火成作用の年代が提案されている (Bouvier et al., 2005, 2008, 2010)。しかし,この45億 年のPb-Pbアイソクロンは地球上での汚染による ミキシングラインを反映しているとも考えられている (Gaffney et al., 2007)。

^{*} アメリカ航空宇宙局ジョンソン宇宙センター,月惑 星研究センター

Mail code KR, 2101 Nasa Parkway, Houston, TX 77058,

⁽²⁰¹¹年5月31日受付, 2011年7月19日受理)

注1:厳密には玄武岩質ではなく、一般にアルミニウムに枯渇 しコマチアイト的である(3章)。

79001)の衝撃メルト中に閉じ込められたガス組成が バイキング探査機により分析された火星大気組成と希 ガス・窒素・炭素に関し,非常に良い一致を示したこ とによる (Becker and Pepin, 1984; Bogard and Johnson, 1983)。SNC 隕石と火星との関係について の詳細は以下の文献を参照されたい (Bogard *et al.*, 2001; McSween, 1994; Treiman *et al.*, 2000)。

一方, ALH 84001は火星隕石中で唯一古い結晶化 年代(41億年)年代を示す(Lapen et al., 2010)。ま た,二次的な球粒状炭酸塩鉱物と共に,芳香族化合物 や走磁性バクテリアにより形成されるものと似た形状

(鎖状構造)の磁鉄鉱が確認された(McKay et al., 1996)。これらは火星生命の痕跡であると主張する研 究グループがある一方,地球上での混染あるいは無機 的な形成プロセスを反映しているとの主張もなされて おり,未だに論争が続いている(詳細は以下を参照さ れたい:Thomas-Keprta et al., 2009)。

3. 火星地殻と火星隕石の関係

火星地殻は年代・組成・地形学的に明瞭な二分性を 持ち,(1)年代の古く(ノアキアン,~3.7-4.5 Ga)

(Hartmann and Neukum, 2001), 玄武岩質な岩石 で覆われている南半球の南部高地(地殻の厚さ約60 km)と、(2)比較的年代が若く(ヘスペリアン、~3 -3.7 Ga),変質した玄武岩堆積物^{注3}で覆われている と考えられる北半球の北部低地(地殻の厚さ約30 km) に分けられる (e.g., McSween et al., 2003)。地 殻二分性の成因については、外因性(例えばジャイア ントインパクト説)及び内因性(例えばマントル対 流)の両者が提案されいる(詳細は Geophysical Research Letters 特集号を参照されたい, Watters and McGovern, 2006)。また、半球規模での二分性地殻に 加え、北部低地よりさらに年代の若く(アマゾニア ン、<~3 Ga)、大規模なプリューム活動によって形 成されたと考えられられるエリシウム火山及び複数の 楯状火山からなるタルシス高地(地殻の厚さ約>100 km) などが存在する。

火星地殻組成は、周回機(例えば Mars Odyssey) からのリモートセンシングデータ (GRS: Gamma-Ray Spectrometer * TES: Thermal Emission Spectrometer) 及び着陸機 (例えば, MER: Mars Exploration Rover) でのその場分析データ (APXS: Alpha Particle X-Ray Spectrometer や Mini-TES) を基に 推定され、ソレアイト質玄武岩組成が支配的であると 考えられている (Fig. 1a) (McSween et al., 2009)。 また、限定的ではあるがアルカリ火山岩や珪長質火成 岩なども報告されている (Christensen et al., 2005; McSween et al., 2006a; Usui et al., 2008a)。1990年 代までの火星探査 (例えば, Mars Pathfinder や Mars Global SurveyorのTES データ)では,斜長石成分 に富む安山岩質地殻の存在も示唆されたが、現在では このような SiO₂や Al₂O₃に富むような化学組成は、岩 石表面を覆う風化土壌や変成・変質作用の影響による ものであると考えられている(Hurowitz et al., 2006; Wyatt and McSween, 2002)。これら二次的作用の火 山岩組成データへの影響の解析には、MER に装備さ れている研磨機(RAT: Rock Abrasion Tool)が大き な役割を果たした(Squyres et al., 2004)。

近年の火星探査によって,火星隕石は火星地殻を 代表していないという事が明らかとなった (e.g., McSween et al., 2009)。例えば、典型的な火星地殻 がソレアイト質玄武岩組成を有するのに対し、一般に 火星隕石はアルミニウムに枯渇しておりコマチアイト 的な組成を有する(Fig. 1b)(ただし、両者とも地球 のソレアイト,コマチアイトに比べて鉄に富む)。ま た、火星隕石を供給したと考えられる地質体すら発見 されていない (Hamilton et al., 2003; Lang et al., 2009)。このことは、火星隕石 (SNC)の結晶化年代 (<1.3 Ga)が火星地殻のクレーター年代(>3 Ga) よりも著しく若いということと調和的である。タルシ ス高地及びエリシウム火山のような若い火山地質体か ら火星隕石が供給された可能性があるが、これらの地 域は厚いダストに地表面が覆われている為、これを裏 付けるようなデータ(例えば熱赤外スペクトラム)は 得られていないのが現状である (e.g., McSween et al., 2003)。以上,火星隕石がある特異な火星地質体に由 来しているという事実は、「火星隕石試料から得られ た知見を火星の起源・進化の議論に応用する際には注 意が必要である」という事を示している。

注3: 広域的な地殻表層物質の化学組成は, Mars Global Surveyor に搭載された熱赤外分光計(TES)の分光データ を個々の標準鉱物分光データを使い逆重畳することによ り得られた。使用する標準鉱物の組み合わせにより北部 低地の堆積物は安山岩組成を示すという結果も得られて いるが(Bandfield *et al.*, 2000; Hamilton *et al.*, 2001), 変質玄武岩組成であるとの見方が広く受け入れられてい る(Wyatt *et al.*, 2001; Wyatt and McSween, 2002)。



Fig. 1 (a) Total alkalis versus silica diagram used for classification of volcanic rocks. Gusev RAT-ground and RAT-brushed compositions for the same rocks are connected by tie-lines. Analyses of Gusev rocks and soils, Martian meteorites, and global GRS data (calculated on a volatile-free basis) indicate a crust dominated by basalts. TES-derived data and possibly the Mars Pathfinder rock composition may reflect alteration. (b) Mg/Si versus Al/Si diagram previously thought to discriminate between Mars and Earth rocks, as Martian meteorites are depleted in Al relative to terrestrial rocks. Gusev and GRS data do not show the Al depletion seen in the Martian meteorites. Modified after McSween *et al.* (2009).

4. 火星マントル・コアの推定

火星マントル物質試料を直接手にしていない我々 は,隕石・探査データを基に火星マントル化学組成の 推定を行なってきた(Lodders and Fegley, 1997; Sanloup *et al.*, 1999; Wänke and Dreibus, 1988)。本 総 論 で は,現在広く採用されている Wänke と Dreibus らによるモデルを紹介したい(以後,DW モ デル)(Dreibus and Wänke, 1985, 1987; Wänke and Dreibus, 1988, 1994)。

Wänke and Dreibus (1988) では, SNC 隕石の元 素相関関係を用いて火星マントル・コア組成の推定を 行なった。DW モデルによると,火星マントルは地球 マントルに比べ,揮発性元素(例えばナトリウム)及 び親鉄元素(例えばタングステン)に富み,親銅元素 (例えば銅)に枯渇するという特徴が認められる。こ のような地球化学的特徴は,初期火星形成時(集積・ コア形成)における環境が酸化的で硫黄などの揮発性 成分に富んでいたことを示唆すると考えられている (詳細は,Halliday et al., 2001)。しかしながら,DW モデルに限らず,すべてのモデルは現在では火星地殻 を代表していないと考えられている火星隕石の地球化 学的特徴(酸素同位体など)を調和的に説明するべく 構築されていることに注意する必要がある(3章)。

また,DWモデルによると,火星重量の約22%が コアとして存在すると考えられ,慣性モーメントなど の地球物理データも比較的良く説明されている。しか し,コアサイズは溶け込む軽元素存在度に強く依存 し,大きな不確実性(直径1,300~1,700 km)をもっ て推定されている(Stevevenson, 2001)。この値は, スピネル-ポストスピネル遷移層境界の深さ(約23 GPa)に相当し,火星における下部マントルの有無に 重要な制約を与える為,コアサイズの正確な見積もり が望まれる。

5. 火星化学リザバー

5.1 火星隕石からの制約

火星の初期集積・分別過程及び化学リザバー進化 は、主に火星隕石を用いた宇宙地球化学研究に基づき 議論されてきた。SNC 隕石には短寿命消滅核種起源 の同位体異常(¹⁴²Nd や¹⁸²W)が認められ(Fig. 2a), これは火星の集積直後(~4.5 Ga)に地殻・マント ル・コアの分別が行なわれていたことを示唆している (e.g., Borg *et al.*, 1997; Debaille *et al.*, 2007; Halli-



Fig. 2 Correlation between Nd, W, and Os isotopic anomalies in Martian meteorites. ¹⁴²Nd and ¹⁸²W are the decay products of short-lived radionuclides that partition into the crust and core, respectively. Initial ¹⁸⁷Os/¹⁸⁸Os ratios, expressed as γ Os (percent deviation from chondrites at a time of crystallization), increase by the slow decay of ¹⁸⁷Re, which should also reflect core differentiation. These correlations indicate early differentiation and chemical isolation of crust, mantle, and core, with minimal subsequent mixing of these reservoirs. Modified after McSween (2007).

day et al., 2001; Kleine et al., 2002)。例えば,¹⁸²Hf -¹⁸²W システマティクスを用いた年代法により,太陽 系形成 (CAI 形成年代 [4567 Ma])から約20 Myr 以内に火星コアが形成されたことが示唆されている (Klein et al., 2009)。また,¹⁴²Nd 及び¹⁸²W の同位体 異常は¹⁸⁷Re-¹⁸⁷Os 同位体システマティクスと良い相関 を示すことから,コアの分離と地殻形成はほぼ同時期 に行なわれたと考えられている(Brandon et al., 2000)(Fig. 2b)。¹⁴⁶Sm-¹⁴²Nd 及び¹⁴⁷Sm-¹⁴³Nd 系 を 用 い,シャーゴッタイトリザバーの形成年代として4.53 Ga が与えられている(Borg *et al.*, 1997; Debaille *et al.*, 2007)。このような火星形成初期の大規模な分別 はマグマオーシャンの存在を支持する証拠の一つと考 えられている。

火星隕石に複数の同位体システマティクス(Re-Os, Sm-Nd, Lu-Hf, Rb-Sr系など)を適用するこ とで,火星には最低3つの化学リザバーが存在し,そ れらは火星形成初期(~4.5 Ga)に形成されたことが 明らかとなっている(Borg *et al.*, 1997; Brandon *et al.*, 2000; Debaille *et al.*, 2007; Lapen *et al.*, 2010)。1 つはナクライト及びシャシナイトのソースとなるリザ バー(NC リザバー, ε Ndⁱ⁼⁴=~+20)であり,残り の2つはシャーゴッタイトのソースで,それぞれ地球 化学的に明瞭な特徴を示す二つのリザバーからなる

(Enriched shergottite: ES; Depleted shergottite: DS)。また, ALH 84001は ES リザバーと同様のソー スからもたらされたのではないかと考えられている (Lapen *et al.*, 2010)。

シャーゴッタイトは火星隕石の中でも試料数が多く 岩石学的・地球化学的多様性に富んでいるだけでな く,集積岩であるナクライト・シャシナイト・ALH 84001とは違いマグマ組成を比較的良く保持してい る試料が存在する (e.g., McSween, 1994; McSween, 2006; Treiman, 2005)。その為,シャーゴッタイトリ ザバー (ES 及び DS)の解析を基に,火星の地殻・ マントルの分別・形成に関する多くの議論がなされて きた (e.g., Barrat *et al.*, 2002; Blinova and Herd, 2009; Borg and Draper, 2003; Debaille *et al.*, 2008; Lapen *et al.*, 2010; Sarbadhikaria *et al.*, 2009; Symes *et al.*, 2008; Treiman, 2003; Usui *et al.*, 2010; Wadhwa, 2001)。

ES リザバーは液相濃集元素に富み,地球化学的に エンリッチ(例えば εNd=~-10)した特徴を示す (Fig. 3a)。一方,DS リザバーは地球化学的にディ プリートした特徴を示す(εNd=~+50)。ES 及び DS はソースマグマ中での酸素分圧とも非常に良い相 関をもち,ES は DS に比べより酸化的な環境下での 火成作用により形成されたと考えられる(Fig. 3b)。 シャーゴッタイトにはすべての地球化学的指標(例え ば Nd,Hf 同位体組成,液相濃集元素濃度)に関し ES と DS の中間的な化学的特徴を持つグループ(inter-



Fig. 3 (a) Initial ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr- ε^{143} Nd and (b) (D_{Ev}/D_{Gd})_{aug}- ε^{143} Nd plots of shergottites illustrating three distinct geochemical source regions; depleted, intermediate, and enriched. (D_{Ev}/D_{Gd})_{Augite} is a ratio of distribution coefficients of Eu and Gd between melt and augite, which reflects the oxygen fugacity of the magmas. Modified after Symes *et al.* (2008) and Wadhwa (2001) for (a) and (b), respectively.

注4: ε¹⁴³Nd = [(¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd)_{sample}/(¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd)_{CHUR} - 1] × 10⁴。ここで CHUR は Chondrite Uniform Reservoir で あり,アイソクロン法により得られた結晶化年代時にお ける CHUR からの差異を示す。 mediate shergottite: IS) も存在し,これらは ES と DS リザバーの混合で説明されている。液相濃集元素 に枯渇した DS ソースはマグマオーシャンの際に形成 された集積物を起源とすると考えられている。一方, ES ソースは (1) 初期火星地殻を起源とする説 (e.g., Herd *et al.*, 2002; Sarbadhikaria *et al.*, 2009; Wadhwa, 2001) と, (2) マグマオーシャンの際の分 化残液を起源とする説 (e.g., Borg and Draper, 2003; Debaille *et al.*, 2008; Symes *et al.*, 2008) の, 2つの 相反する仮説が提案されており,未だに議論がなされ ている。例えば,前者は ES が酸化的であることを比 較的良く説明できる一方,後者はシャーゴッタイト (ES 及び DS) のコンドライト的な Os 同位体組成を より調和的に説明できる。

5.2 火星探査からの制約

3章では火星隕石が火星地殻を代表していないこと

を示した。本章では,リモートセンシングの主成分元 素組成データを基に,火星隕石とは異なる火星地殻の ソースリザバーについて議論する。

火星隕石の最も顕著な特徴の一つはアルミニウムの 枯渇であり,超コンドライト的な CaO/Al₂O₃比として 表現される。例えば,最も始原的で初生メルト組成を 保持すると考えられているシャーゴッタイト

(Yamato 980459)の CaO/Al₂O₃比はコンドライト (~0.8, Anders and Grevesse, 1989)と比較し,明 らかに高い値 (1.3)を示す (Fig. 4) (Mikouchi *et al.*, 2004; Shirai and Ebihara, 2004; Usui *et al.*, 2008b)。CaO/Al₂O₃比は低圧でのマントルカンラン岩 の溶融や玄武岩マグマの初期結晶分化作用 (例えばカ ンラン石の分別)では著しく大きくは変化しない為, マグマソースの議論に用いられてきた。例えば,コン ドライト的な CaO/Al₂O₃比を持つ火星 (DW)マント



Fig. 4 Al₂O₃ versus CaO/Al₂O₃ (wt.%) diagram showing compositions of Mars mantle liquid compositions with various degrees of partial melting at 15 (△) and 50 (●) kbar. The 15 kbar and 50 kbar data are from Bertka and Holloway (1994) and Agee and Draper (2004), respectively. Shown also are the compositions of the most primitive olivine-phyric shergot-tite Yamato (Y) 980459 (Shirai and Ebihara, 2004) and Gusev basalt (McSween *et al.*, 2006 b). The DW-mantle value is from Wänke and Dreibus (1988). The chondritic value is shown as yellow (Anders and Grevesse, 1989). Modified after Agee and Draper (2004).

ルの低圧(15 kbar)での分化液はコンドライト的な 値を示している。一方、CaO/Al₂O₃比はアルミナスな 高圧相であるガーネットあるいはメージャライトの安 定領域におけるマントル溶融によって大きく変化する ことが知られている(Walter, 1998)。Agee and Draper(2004)はコンドライト的 CaO/Al₂O₃比を持 つ仮想火星マントルの高圧(50 kbar)での分化液が 超コンドライト的な CaO/Al₂O₃比を持つこと示し, シャーゴッタイトマグマソースが高圧下(例えばマグ マオーシャンプロセス)で形成された可能性を示し た。

シャーゴッタイトとは対照的に、ソレアイト的な組 成を有する火星地殻はコンドライト的 CaO/Al₂O₃比を 有する。例えば、グセフ(Gusev)クレーターより報 告された最も始原的であり初生メルト組成を比較的反 映していると考えられているカンラン石玄武岩はコン ドライトと同様のCaO/Al₂O₃比(~0.8)を持つ (Fig. 4) (McSween et al., 2006b;Monders et al., 2007)。この結果は、火星隕石のリザバー(超コンド ライト的CaO/Al₂O₃)とは明らかに異なる化学リザ バー(コンドライト的 CaO/Al₂O₃)が初期火星マント ルに最低1つは存在していた可能性を示唆している。 Elkins-Tanton (2003; 2005) は岩石溶融実験結果に 基づいた数値計算により、そのような CaO/Al₂O₃に関 して不均質マントルソースがマグマオーシャンプロセ スによって形成され得る可能性を示した。ソレアイト 的な玄武岩地殻が火星において支配的であることを考 えると (McSween et al., 2009), 火星隕石とは異な るコンドライト的 CaO/Al₂O₃比を持つ化学リザバーが 火星マントルを代表している可能性が示唆される。

一方,シャーゴッタイトに認められる超コンドライ ト的 CaO/Al₂O₃比は,ガーネットの安定領域でマント ル溶融を起こすような巨大プリュームの存在によって も説明可能である(Agee and Draper, 2004)。この場 合,コンドライト的 CaO/Al₂O₃比を持つ比較的未分化 なソースマントルの溶融により超コンドライト的 CaO/Al₂O₃比を持つシャーゴッタイトマグマを形成す ることが可能である。その為,上記の様に CaO/Al₂O₃ 比に関し不均質なマントルソースを仮定する必要が無 くなる。実際,Lu-Hf 及び Sm-Nd 同位体システマ ティクスを用いた研究により,シャーゴッタイトソー スマントルはガーネットの安定領域(~25-47 kbar)で溶融を開始している可能性が示唆されてい る(Debaille *et al.*, 2008)。このメルト発生圧力条件 は断熱減圧溶融を仮定したマントル対流モデルによっ て提案されているそれと調和的であるが(Kiefer, 2003; Kiefer and Li, 2009; Li and Kiefer, 2007),相 平衡岩石溶融実験によって推定された始原的シャー ゴッタイトの溶融圧力条件(約12 kbar)とは明らか に異なる(Musselwhite *et al.*, 2006)。

6.火星内部進化と表層環境との相互作用: 揮発性成分からの制約

近年の火星探査(MER, MGS など)により、かつ て火星表層に液体水が存在したことが明らかとなった (e.g., Baker, 2006; Malin and Edgett, 2003)。液体 水の存在により,火星は現在の姿とは全く異なる温暖 湿潤な表層環境であったことが示唆されているが、液 体としての表層水の起源・存在規模・期間に関しては 一定の見解が得られているわけではない。表層水の元 となる揮発性元素は主に火星集積時およびその後の火 成活動による脱ガスを通じて惑星表面に放出されたも のであると考えられている。一方、それら揮発性成分 の起源を火星集積後に衝突した揮発性成分に富む彗星 や小惑星に求める Late veneer 仮説も提唱されている (e.g., Chyba, 1987)。しかし、Late veneer 仮説では 火星隕石に認められる多くの化学的特徴(強親鉄元素 濃度・同位体組成など)を調和的に説明することが困 難であることも同時に示唆されている (e.g., Drake, 2005)。本章では火星気候の変遷及び生命の存在条件 と密接な係わりを持つ揮発性成分に関する研究を紹介 し、火星内部進化と表層環境との相互作用に関して議 論していく。

6.1 火星マントル・マグマ中の水—1:Wet vs. Dry Mars

水(H₂O)は最も重要な揮発性成分であり表層水の 主成分でもある。火星マントル・マグマ中の水の存在 度及びその脱ガス過程に関しては,火星隕石を用いた 研究により推定されてきたが,その推定値に大きな隔 たりがある。例えば,カンラン石及び輝石中の含水鉱 物包有物(角閃石・黒雲母など)から推定したマグマ 中の含水量は100 ppm 程度から2 wt%⁴⁵⁵と,その推定 値に100倍以上の開きがある(Filiberto and Treiman,

注5:1%を超える角閃石の含水量は,EPMAによって得られ た主成分元素組成を基にストイキオメトリー計算から求 めたものである。二次イオン質量計による,H(あるい は OH)の直接測定によって求められた H₂O 濃度は最大 でも0.7 wt%(多くは<0.2 wt%)である。

2009a; McCubbin et al., 2010; McSween and Harvey, 1993; Mysen et al., 1998; Watson et al., 1994)。この 違いは分析手法の違いだけによるのではなく、一般的 に結晶分化作用を強く受けた火星隕石から含水量を推 定する際の不確定性によるものである。このようなマ グマ含水量に関する不確定性により,マントル中の含 水量推定はより困難なものとなっており、その推定値 はマグマ含水量と同様、100倍を超える違いが認めら れる (1-250 ppm, McCubbin et al., 2010; Mysen et al., 1998; Wänke and Dreibus, 1994)。一方, Sm-Nd 同位体システマティクスを含む多くの地球化学的研究 により、シャーゴッタイトのDSソースマントル (5.1 章) は最低1回以上のメルトエクストラクションを経 験していることが示唆されている (e.g., Borg et al., 1997; Debaille et al., 2007, 2008)。つまり, 不適合元 素である水素は DS シャーゴッタイトソースには枯渇 しており、シャーゴッタイトを含む SNC 隕石ソース マントルは比較的"ドライ"であると考えられる。

一方,年代的にも組成的にも火星地殻を代表してい ないSNC隕石のソースマントル(3章・5.2章)がド ライであることは,必ずしも火星マントル自体がドラ イであることを意味しない。実際,グセフクレーター では多くの火山岩(カンラン石玄武岩・アルカリ火山 岩)に発泡現象を経験したと考えられる気孔が認めら れるだけでなく(McSween et al., 2006a, b),爆発的 な火山活動によって噴出したと思われる角礫化したア ルカリ岩及び火山弾も多数報告されている(Squyres et al., 2007)。これらの脱ガス現象が水蒸気を伴うも のか,他の揮発性成分を伴うものかは定かではない が,グセフ玄武岩の初生マグマが多量の揮発性成分を 含有していたことは間違いないであろう。

6.2 火星マントル・マグマ中の水-2: Primordial D/H

脱ガスによって表層にもたらされた水蒸気の一部は 水・氷及び含水鉱物として表層に保持されるが,火星 の場合その多くは宇宙空間へと散逸していく。大気の 散逸は揮発性元素の同位体分別を引き起こし,その効 果は最も大きな相対質量差を持つ重水素/水素比(D /H)に顕著に現れる。結果,現在の火星大気は地球 の約5~6倍の D/H 比を有するに至る(Karlsson et al., 1992; Owen et al., 1988)(Fig. 5)。この火星大気 散逸過程の定量的理解には,火星の初生 D/H 比を正 確に求める必要があるが,以下で示すように信頼性の 高い値が得られていないのが現状である。

火星隕石中の含水鉱物(例えば燐灰石)やガラスは 一般に重水素に富み(δD:-150‰から+4,600‰), その同位体組成レンジは地球の値(-480‰から+ 130‰)を遥かにしのぐ (Fig. 5) (Boctor *et al.*, 2003; Eiler et al., 2002; Greenwood et al., 2008; Hoef, 2004; Leshin, 2000; Leshin et al., 1996; Watson et al., 1994)。このような大きな水素同位体比バリエーショ ンは、重水素に富む成分と枯渇した成分の2成分混合 の結果として解釈される。前者は火星大気と一部交換 反応している可能性のある地殻流体を起源とし (<4,600‰, Greenwood et al., 2008), 後者は火星 マントル(つまり初生 D/H 比に近い値。例えば900 ±250‰, Leshin, 2000)を起源とすると考えられて いる。後者のマントルに由来した軽い同位体比を持つ 端成分の D/H 比は火星表層成分(~4,000‰)と地球 値(~±0‰)との中間的な値を示す。その為,地球 上での汚染(分析ブランクも含む)の影響を定量的に 評価することが困難であり(Boctor et al., 2003; Greenwood et al., 2008), 火星マントル端成分の正確 な決定には至っていない。

6.3 温暖化ガス:CO₂

二酸化炭素は最も効果的な温暖化ガスの1つであ り、火星表層に定常的に液体水を保持しうる為には、 数気圧程度の二酸化炭素分圧が必要であると考えられ ている(Jakosky and Phillips, 2001)ⁱⁱⁱ。この値は現 在の火星の二酸化炭素分圧(*P*_{co2}=6 mbar)の約500 ~1,000倍に相当する。炭素同位体比(¹³C/¹²C)の分 別から予想される宇宙空間への二酸化炭素大気の 散逸は多くとも90%程度と見積もられているため

(Jakosky and Phillips, 2001),過去に存在した二酸 化炭素大気の一部は火星表層付近に炭酸塩などの形と して存在することが期待されてきた。これまで,過去 の二酸化炭素に富んだ厚い大気を定量的に説明しうる ほどの有力な炭素リザバーは確認されてこなかったが

(e.g., Bandfield, 2002; Barabash *et al.*, 2007), 2010年, 基盤岩あるいは露頭スケールでの炭酸塩岩 が地表面から一部露出する形で相次いで報告され, そ のような炭素リザバーが地下に存在している可能性が 示唆されている (Michalski and Niles, 2010; Morris *et al.*, 2010)。

注6:二酸化炭素分圧がある一定以上になると昇華し二酸化炭 素の雲ができる為,二酸化炭素のみで液体水を保持でき るほどの温暖化効果を生じることが困難であるという説 も有力である (e.g., Kasting, 1991)。



Fig. 5 Hydrogen isotopic compositions of terrestrial water (Hoef, 2004) and Martian water reservoirs (Boctor *et al.*, 2003; Gillet *et al.*, 2002; Greenwood *et al.*, 2008; Leshin, 2000; Leshin *et al.*, 1996; Sugiura and Hoshino, 2000; Watson *et al.*, 1994). The δ D composition of the Martian mantle (rectangle with broken lines, $900 \pm 250\%$) is taken from Leshin (2000) that performed *in situ* ion microprobe analyses of apatite grains in the geochemically depleted basaltic shergottite QUE 94201 -note that the depleted shergottites can have sampled only one mantle source (see section 5.1). δ D shows the per-mil deviation from SMOW (Standard Mean Ocean Water).

探査機 Phoenix による炭素同位体分析の結果によ ると、火山活動による二酸化炭素の放出はごく最近ま で続いていたと考えられている(Niles *et al.*, 2010)。Hirschmann and Withers(2008)の熱力学 計算によると、シャーゴッタイトから推定される火星 マントル酸素分圧($\text{Log}[fO_2] = ~IW$ から IW+1, ここで IW は Iron(Fe) - wüstite(FeO) buffer)は還 元的すぎ、十分な温室効果を得られるほどの二酸化炭 素を火成活動により放出できないことが示唆されてい る。一方、Usui *et al.*(2008a)は、グセフクレータ のアルカリ火山岩の解析結果を元に、火星マントルは 炭酸塩メルトを発生しうる程度に酸化的($\text{Log}[fO_2]$ = ~IW+3程度)であることを指摘した。

6.4 酸性火山ガス:ハロゲン・硫黄

火星のレゴリスはハロゲン元素や硫黄がパーセント オーダーで濃集しており,強い酸性度を示す (e.g., Ming *et al.*, 2006)。このような元素の濃集はリン酸 塩鉱物 (例えばメリライト (merrillite)) や硫化鉄鉱 物 (例えばピロータイト (pyrrhotite)) などをソー スとして火星隕石にも普遍的に認められる

(McSween and Treiman 1998)。ハロゲン元素や硫 黄はその強い酸性度により岩石の風化や水質変質作用 を促進させる役割を果たす。また、近年の岩石実験に より、それら元素が火成作用にも大きな影響を与える ことが明らかとなった(Filiberto and Treiman, 2009b; Hurowitz et al., 2005; Righter et al., 2009). Righter et al. (2009) は、シャーゴッタイトメルト がレゴリスに濃集している硫黄濃度を十分説明できる ほど高い硫黄溶解度(>4,000 ppm)を持つことを示 した。また、Filiberto and Treiman (2009b) は H_2O に加え塩素が重要な揮発性成分としてグセフ玄武岩の 形成に影響を及ぼしている可能性を示した。ハロゲン 元素の火成作用に与える影響に関しては、数は限られ ているが火星隕石の化学分析研究からも議論され始め ている (Filiberto and Treiman, 2009a; McCubbin and Nekvasil, 2008; McCubbin et al., 2010).

7. おわりに

物質科学としての側面が強い惑星科学では,実際に 現場に行き観察・分析・試料採集を行なうことのでき る惑星探査の果たす役割が非常に大きい。幸い我々は 火星隕石試料より火星に関する高精度の科学情報を得 てきた。しかし,それら隕石から得られた情報は必ず しも火星を代表していないということは,本稿で示し た通りである。今後も新しい火星隕石の発見や分析技 術の進歩によって,火星隕石より新たな知見が得られ るであろう。一方,サンプルリターンを含む火星探査 は我々の火星に関する知識を質・量共に飛躍的に増大 させるだけでなく,科学的ブレークスルーを生む可能 性がある。これまで欧米を中心に進められてきた火星 探査に加え,現在プロジェクト化が進められている日 本初の複合火星探査計画 (MELOS: Mars Exploration with Lander-Orbiter Synergy) に特に期待した い。

謝 辞

高橋嘉夫編集長(広島大学)には本総説を執筆する 機会を与えて頂きました。三浦弥生編集委員(東京大 学)ならびに査読者の三河内岳准教授(東京大学)か らは大変有意義な助言・ご指摘を数多く頂きました。 この総説は2011年1月に東京工業大学で行なったセミ ナーを元に執筆したものである。セミナーの機会を与 えて下さった岩森光教授(東京工業大学),セミナー に参加し多くの有益な議論をして下さった東工大岩森 研究室・横山研究室の皆様に感謝いたします。また, Harry McSween 教授 (テネシー州立大), John Jones 博士 (ジョンソン宇宙センター (JSC), NASA)をはじめ、テネシー州立大・JSC・Lunar Planetary Institute・千葉工業大学惑星探査研究セン ターの関係者の皆様には日頃から火星研究に関する 様々なアドバイス・サポートを受けており、この場を 借りて感謝の意を述べたいと思います。著者は NASA Postdoctoral Program 及び NASA Mars Fundamental Research Program (NNX11AF 57G) より援助 を受けている。

引用文献

- Agee, C. B. and Draper, D. S. (2004) Experimental constraints on the origin of Martian meteorites and the composition of the Martian mantle. *Earth and Planetary Science Letters*, **224**, 415–429.
- Anders, E. and Grevesse, N. (1989) Abundances of the elements: Meteoritic and solar. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 53, 197–214.
- Baker, V. R. (2006) Geomorphological Evidence for Water on

Mars. *Elements*, **2**, 139–143.

- Bandfield, J. L. (2002) Global mineral distributions on Mars. Journal of Geophysical Research-Planets, 107, DOI: 10.1029/2001 JE001510.
- Bandfield, J. L., Hamilton, V. E. and Christensen, P. R. (2000) A Global View of Martian Surface Compositions from MGS-TES. Science, 287, 1626–1630.
- Barabash, S., Fedorv, A., Lundin, R. and Sauvaud, J. A. (2007) Martian atmospheric erosion rates. *Nature*, **315**, 501–503.
- Barrat, J. A., Jambon, A., Bohn, M., Gillet, P., Sautter, V., Gopel, C., Lesourd, M. and Keller, F. (2002) Petrology and chemistry of the picritic shergottite North West Africa 1068 (NWA 1068). *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 66, 3505–3518.
- Becker, R. H. and Pepin, R. O. (1984) The case for a martian origin of the shergottites: nitrogen and noble gases in EETA 79001. *Earth and Planetary Science Letters*, 69, 225–242.
- Bertka, C. M. and Holloway, J. R. (1994) Anhydrous partial melting of an iron-rich mantle II: primary melt compositions at 15 kbar. *Contributions to Mineralogy and Petrol*ogy, **115**, 323–338.
- Blinova, A. and Herd, C. D. K. (2009) Experimental study of polybaric REE partitioning between olivine, pyroxene and melt of the Yamato 980459 composition: Insights into the petrogenesis of depleted shergottites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **73**, 3471–3492.
- Boctor, N. Z., Alexander, C. M. O. D., Wang, J. and Hauri, E. (2003) The sources of water in Martian meteorites: clues from hydrogen isotopes. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 67, 3971–3989.
- Bogard, D. D., Clayton, R. N., Marti, K., Owen, T. and Turner, C. (2001) Martian volatiles: Isotopic composition, origin, and evolution. In: *Chronology and Evolution* of Mars (eds. Kallenbach, R., Geiss, J. and Hartman, W. K.), Kluwer Academic Publishers, 425–458.
- Bogard, D. D. and Johnson, P. (1983) Martian gases in an Antarctic meteorite? *Science*, **221**, 651–654.
- Borg, L. E. and Draper, D. S. (2003) A petrogenetic model for the origin and compositional variation of the Martian basaltic meteorites. *Meteoritics & Planetary Science*, 38, 1713–1731.
- Borg, L. E., Nyquist, L. E., Taylor, L. A., Wiesmann, H. and Shih, C. -Y. (1997) Constraints on Martian differentiation processes from Rb-Sr and Sm-Nd isotopic analyses of the basaltic shergottite QUE 94201. Geochimica et Cosmochimica Acta, 61, 4915–4931.
- Bouvier, A., Blichert-Toft, J. and Albarede, F. (2010) Martian meteorite chronology and the evolution of the interior of Mars. *Earth and Planetary Science Letters*, **280**, 285– 295.
- Bouvier, A., Blichert-Toft, J., Vervoort, J. D. and Albarede, F. (2005) The age of SNC meteorites and the antiquity of

the Martian surface. *Earth and Planetary Science Letters*, **240**, 221–233.

- Bouvier, A., Blichert-Toft, J., Vervoort, J. D., Gillet, P. and Albarede, F. (2008) The case for old basaltic shergottites. *Earth and Planetary Science Letters*, **266**, 105–124.
- Brandon, A. D., Walker, R. J., Morgan, J. W. and Goles, G. G. (2000) Re-Os isotopic evidence for early differentiation of the Martian mantle. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64, 4083–4095.
- Christensen, P. R., McSween, Jr. H. Y., Bandfield, J. L., Ruff, S. W., Rogers, A. D., Hamilton, V. E., Gorelick, N., Wyatt, M. B., Jakosky, B. M., Kieffer, H. H., Malin, M. C. and Moersch, J. E. (2005) Evidence for magmatic evolution and diversity on Mars from infrared observation. *Nature*, **436**, 504–508.
- Chyba, C. F. (1987) The Cometary contribution to the oceans of primitive Earth. *Nature*, **330**, 632–635.
- Debaille, V., Brandon, A. D., Yin, Q. Z. and Jacobsen, B. (2007) Coupled 142 Nd-143 Nd evidence for a protracted magma ocean in Mars. *Nature*, **450**, 525–528.
- Debaille, V., Yin, Q. -Z., Brandon, A. D. and Jacobsen, B. (2008) Martian mantle mineralogy investigated by the ¹⁷⁶Lu-¹⁷⁶Hf and ¹⁴⁷Sm-¹⁴³Nd systematics of shergottites. *Earth and Planetary Science Letters*, **269**, 186–199.
- Drake, M. J. (2005) Origin of water in the terrestrial planets. Meteoritics & Planetary Science, 40, 519–527.
- Dreibus, G. and Wänke, H. (1985) Mars, a volatile-rich planet. *Meteoritics*, **20**, 367–381.
- Dreibus, G. and Wänke, H. (1987) Volatiles on Earth and Mars: A comparison. *Icarus*, **71**, 225–240.
- Eiler, J. M., Kitchen, N., Leshin, L. and Strausberg, M. (2002) Hosts of hydrogen in Allan Hills 84001: Evidence for hydrous martian salts in the oldest martian meteorite? *Meteoritics & Planetary Science*, **37**, 395–405.
- Elkins-Tanton, L. T., Parmentier, E. M. and Hess, P. C. (2003) Magma ocean fractional crystallization and cumulate overturn in terrestrial planets: Implications for Mars. *Meteoritics & Planetary Science*, **38**, 1753–1771.
- Elkins-Tanton, L. T., Hess, P. C. and Parmentier, E. M. (2005) Possible formation of ancient crust on Mars through magma ocean processes. *Journal of Geophysical Research*, **110**, DOI: 10.1029/2005 JE002480.
- Filiberto, J. and Treiman, A. H. (2009a) Martian magmas contained abundant chlorine, but little water. *Geology*, 37, 1087–1090.
- Filiberto, J. and Treiman, A. H. (2009b) The effect of chlorine on the liquidus of basalt: First results and implications for basalt genesis on Mars and Earth. *Chemical Geology*, 263, 60–68.
- Gaffney, A. M., Borg, L. E. and Connelly, J. A. D. (2007) Uranium-Lead isotope systematics of Mars inferred from the basaltic shergottite QUE 94210. Geochimica et Cosmochimica Acta, 71, 5016–5031.
- Gillet, P., Barrat, J. A., Deloule, E., Wadhwa, M., Jambon, A.,

Sautter, V., Devouard, B., Neuville, D., Benzerara, K. and Lesourd, M. (2002) Aqueous alteration in the Northwest Africa 817 (NWA 817) Martian meteorite. *Earth and Planetary Science Letters*, **203**, 431–444.

- Greenwood, J. P., Itoh, S., Sakamoto, N., Vicenzi, E. and Yurimoto, H. (2008) Hydrogen isotope evidence for loss of water from Mars through time. *Geophysical Research Letters*, **35**, DOI: 10.1029/2007 GL032721.
- Halliday, A. N., Wänke, H., Birck, J. -L. and Clayton, R. N. (2001) The accretion, composition and early differentiation of Mars. Space Science Reviews, 96, 197–230.
- Hamilton, V. E., Wyatt, M. B., McSween, H. Y. and Christensen, P. R. (2001) Analysis of terrestrial and Martian volcanic compositions using thermal emission spectroscopy - 2. Application to Martian surface spectra from the Mars Global Surveyor Thermal Emission Spectrometer. Journal of Geophysical Research-Planets, 106, 14733-14746.
- Hamilton, V. E., Christensen, P. R., McSween, H. Y. and Bandfield, J. L. (2003) Searching for the source regions of martian meteorites using MGS TES: Integrating martian meteorites into the global distribution of igneous materials on Mars. *Meteoritics & Planetary Science*, 38, 871–885.
- Hartmann, W. K. and Neukum, G. (2001) Cratering chronology and the evolution of Mars. Space Science Reviews, 96, 165–194.
- Herd, C. D. K., Borg, L. E., Jones, J. and Papike, J. J. (2002) Oxygen fugacity and geochemical variations in the Martian basalts: Implications for Martian basalt petrogenesis and the oxidation state of the upper mantle of Mars. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **66**, 2025–2036.
- Hirschmann, M. M. and Withers, A. C. (2008) Ventilation of CO₂ from a reduced mantle and consequences for the early Martian greenhouse. *Earth and Planetary Science Letters*, 270, 147–155.
- Hoefs, J. (2004) Stable Isotope Goechemistry. Springer, pp. 244.
- Hurowitz, J. A., McLennan, S. M., Lindsley, D. H. and Schoonen, M. A. A. (2005) Experimental epithermal alteration of synthetic Los Angeles meteorite: Implications for the origin of Martian soils and identification of hydrothermal sites on Mars. Journal of Geophysical Research-Planets, 110.
- Hurowitz, J. A., McLennan, S. M., Tosca, N. J., Arvidson, R. E., Michalski, J. R., Ming, D. W., Schroder, 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**, E02 S19, DOI: 10.129/ 2005 JE002515.
- Jakosky, B. M. and Phillips, R. J. (2001) Mars' volatile and climate history. *Nature*, **412**, 237–244.
- Jones, J. H. (1986) A discussion of isotopic systematics and mineral zoning in the shergottites: Evidence for a 180

m.y. igneous crystallization age. *Geochimica et Cosmo*chimica Acta, **50**, 969–977.

- Karlsson, H., Clayton, R., Gibson, E., Jr. and Mayeda, T. (1992) Water in SNC meteorites: evidence for a martian hydrosphere. *Science*, 255, 1409–1411.
- Kasting, J. F. (1991) CO_2 condensation and the climate of early Mars. *Icarus*, **94**, 1–13.
- Kiefer, W. S. (2003) Melting in the martian mantle: Shergottite formation and implications for present-day mantle convection on Mars. *Meteoritics & Planetary Science*, 38, 1815–1832.
- Kiefer, W. S. and Li, Q. (2009) Mantle convection controls the observed lateral variations in lithospheric thickness on present-day Mars. *Geophysical Research. Letters*, **36**, L 18203.
- Kleine, T., Munker, C., Mezger, K. and Palme, H. (2002). Rapid accretion and early core formation on asteroids and the terrestrial planets from Hf-W chronometry. *Nature*, **418**, 952–955.
- Kleine, T., Touboul, M., Bourdon, B., Nimmo, F., Mezger, K., Palme, H., Jacobsen, S. B., Yin, Q. -Z. and Halliday, A. N. (2009) Hf-W chronology of the accretion and early evolution of asteroids and terrestrial planets. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **73**, 5150–5188.
- Lang, N. P., Tornabene, L. L., McSween Jr, H. Y. and Christensen, P. R. (2009) Tharsis-sourced relatively dust -free lavas and their possible relationship to Martian meteorites. *Journal of Volcanology and Geothermal Re*search, 185, 103-115.
- Lapen, T. J., Righter, M., Brandon, A. D., Debaille, V., Beard, B. L., Shafer, J. T. and Peslier, A. H. (2010) A younger age for ALH 84001 and its geochemical link to shergottite sources in Mars. Science, 328, 347–351.
- Leshin, L. A., Epstein, S. and Stolper, E. M. (1996) Hydrogen isotope geochemistry of SNC meteorites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **60**, 2635–2650.
- Leshin, L. A. (2000) Insights into martian water reservoirs from analyses of martian meteorite QUE 94201. Geophysical Research Letters, 27, 2017–2020.
- Li, Q. and Kiefer, W. S. (2007) Mantle convection and magma production on present-day Mars: Effects of temperaturedependent rheology. *Geophysical Research. Letters*, 34, L 16203.
- Lodders, K. and Fegley, B. (1997) An oxygen isotope model for the composition of Mars. *Icarus*, **126**, 373–394.
- Malin, M. C. and Edgett, K. S. (2003) Evidence for persistent flow and aqueous sedimentation on early Mars. *Science*, **302**, 1931–1934.
- McCubbin, F. M. and Nekvasil, H. (2008) Maskelynite-hosted apatite in the Chassigny meteorite: Insights into latestage magmatic volatile evolution in martian magmas. *American Mineralogist*, **93**, 676–684.
- McCubbin, F. M., Smirnov, A., Nekvasil, H., Wang, J., Hauri, E. and Lindsley, D. H. (2010) Hydrous magmatism on

Mars: A source of water for the surface and subsurface during the Amazonian. *Earth and Planetary Science Letters*, **292**, 132–138.

- McKay, D. S., Gibson, E. K., Thomas-Keprta, K. L., Vali, H., Romanek, C. S., Clemett, S. J., Chillier, X. D. F., Maechling, C. R. and Zare, R. N. (1996) Search for past life on Mars: possible relic biogenic activity in Martian meteorite ALH 84001. *Science*, **273**, 924–930.
- McSween, H. Y. (1994) What we have learned about Mars from SNC meteorites. *Meteoritics*, **29**, 757–779.
- McSween, H. Y. (2007) Mars. In: *Meteorites, Comets, and Planets* (eds. Holland, H. D. and Turekian, K. K.), Treatise on Geochemistry, vol. 1, Elsevier-Pergamon, 1–27.
- McSween, H. Y. and Harvey, R. P. (1993) Outgassed water on Mars - constraints from melt inclusions in SNC meteorites. Science, 259, 1890–1892.
- McSween, H. Y. and Treiman, A. H. (1998) Martian meteorites. In: *Planetary Materials* (ed. Papike, J. J.), *Reviews in Mineralogy*, vol. 36, Mineralogical Society of America, Chap. 6.
- McSween, H. Y., Taylor, L. A. and Stolper, E. M. (1979) Allan Hills 77005 - new meteorite type found in Antarctica. *Science*, 204, 1201–1203.
- McSween, H. Y., Grove, T. L. and Wyatt, M. B. (2003) Constraints on the composition and petrogenesis of the Martian crust. *Journal of Geophysical Research*, **108**, doi: 10.1029/2003 JE002175.
- McSween, H. Y., Ruff, S. W., Morris, R. V., Bell III, J. F., Herkenhoff, K., Gellert, R., Stockstill, K. R., Tornabene, L. L., Squyres, S. W., Crisp, J. A., Christensen, P. R., McCoy, T. J., Mittlefehldt, D. W. and Schmidt, M. (2006a) Alkaline volcanic rocks from the Columbia Hills, Gusev crater, Mars. *Journal of Geophysical Research*, **111**, E09 S91, DOI: 10.1029/2006 JE002698.
- McSween, H. Y., Wyatt, M. B., Gellert, R., Bell III, J. F., Morris, R. V., Herkenhoff, K. E., Crumpler, L. S., Milam, K. A., Stockstill, K. R., Tornabene, L. L., Arvidson, R. E., Bartlett, D., 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., Joliff, B. L., Klingelhofer, G., Knudson, A. T., McLennan, S., Ming, D. W., Moersch, J. E., Rieder, R., Ruff, S. W., Schroder, C., de Souza, Jr. P. A., Squyres, S. W., Wänke, H., Wang, A., Yen, A. and Zipfel, J. (2006b) Characterization and petrologic interpretation of olivine-rich basalts at Gusev Crater, Mars. Journal of Geophysical Research, 111, E02 S10, doi: 10.1029/ 2005 JE002477.
- McSween, H. Y., Taylor, G. J. and Wyatt, M. B. (2009) Elemental composition of the Martian crust. Science, 324, 736–739.
- Meteoritical Bulletin Database (2011.7.1) http://www.lpi. usra.edu/meteor/metbull.php

- Michalski, J. R. and Niles, P. B. (2010) Deep crustal carbonate rocks exposed by meteor impact on Mars. Nature Geoscience, 3, 751–755.
- Mikouchi, T., Koizumi, E., McKay, G., Monkawa, A., Ueda, Y., Chokai, J. and Miyamoto, M. (2004) Yamato 980459: Mineralogy and petrology of a new shergottite-related rock from Antarctica. *Antarctic Meteorite Research*, 17, 13-34.
- Ming, D. W., Mittlefehldt, D. W., Morris, R. V., Golden, D. C., Gellert, R., Yen, A., Clark, B. C., Squyres, S. W., Farrand, W. H., Ruff, S. W., Arvidson, R. E., Klingelhofer, G., McSween, H. Y. J., Rodionov, D. S., Schroder, C., de Souza Jr, P. A. and Wang, A. (2006) Geochemical and mineralogical indicators for aqueous processes in the Columbia Hills of Gusev crater, Mars. *Journal of Geophysical Research*, **111**, E02 S12, DOI: 10.1029/2005 JE002560.
- Monders, A. G., Medard, E. and Grove, T. L. (2007) Phase equilibrium investigations of the Adirondack class basalts from the Gusev plains, Gusev crater, Mars. *Meteoritics & Planetary Science*, 42, 131–148.
- Morris, R. V., Ruff, S. W., Gellert, R., Ming, D. W., Arvidson, R. E., Clark, B. C., Golden, D. C., Siebach, K., Klingelhofer, G., Schroder, C., Fleischer, I., Yen, A. S. and Squyres, S. W. (2010) Identification of carbonaterich outcrops on Mars by the Spirit Rover. *Science*, DOI: 10.1126/science.1189667.
- Musselwhite, D. S., Dalton, H. A., Kiefer, W. S. and Treiman, A. H. (2006) Experimental petrology of the basaltic shergottite Yamato-980459: Implications for the thermal structure of the Martian mantle. *Meteoritics & Planetary Science*, 41, 1271–1290.
- Mysen, B. O., Virgo, D., Popp, R. K. and Bertka, C. M. (1998) The role of H₂O in Martian magmatic systems. *American Mineralogist*, **83**, 942–946.
- Niles, P. B., Boynton, W. V., Hoffman, J. H., Ming, D. W. and Hamara, D. (2010) Stable isotope measurements of martian atmospheric CO₂ at the Phoenix Landing Site. *Science*, **329**, 1334–1337.
- Nyquist, L. E., Bogard, D. D., Shih, C. -Y., Greshake, A., Stoffler, D. and Eugster, O. (2001) Age and geologic histories of Martian meteorites. *Space Science Reviews*, 96, 105–164.
- Owen, T., Maillard, J. P., de Bergh, C. and Lutz, B. L. (1988) Deuterium on Mars: the abundance of HDO and the value of D/H. *Science*, **240**, 1767–1770.
- Righter, K., Pando, K. and Danielson, L. R. (2009) Experimental evidence for sulfur-rich martian magmas: Implications for volcanism and surficial sulfur sources. *Earth* and Planetary Science Letters, 288, 235–243.
- Sanloup, C., Jambon, A. and Gillet, P. (1999) A simple chondritic model of Mars. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, **112**, 43–54.
- Sarbadhikaria, A. B., Day, J. M. D., Liu, Y., Rumble, D. and

Taylor, L. A. (2009) Petrogenesis of olivine-phyric shergottite Larkman Nunatak 06319: Implications for enriched components in martian basalts. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **73**, 2190–2214.

- Shirai, N. and Ebihara, M. (2004) Chemical characteristics of a Martian meteorite, Yamato 980459. Antarctic Meteorite Research, 17, 55–67.
- Squyres, S. W., Aharonson, O., Clark, B. C., Cohen, B. A., Crumpler, L., de Souza, P. A., Farrand, W. H., Gellert, R., Grant, J., Grotzinger, J. P., Haldemann, A. F. C., Johnson, J. R., Klingelhofer, G., Lewis, K. W., Li, R., McCoy, T., McEwen, A. S., McSween, H. Y., Ming, D. W., Moore, J. M., Morris, R. V., Parker, T. J., Rice, J. W., Ruff, S., Schmidt, M., Schroder, C., Soderblom, L. A. and Yen, A. (2007) Pyroclastic activity at home plate in Gusev Crater, Mars. Science, **316**, 738–742.
- Squyres, S. W., Arvidson, R. E., Bell, J. F., Bruckner, 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., Klingelhofer, 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. (2004) The Spirit Rover's Athena Science Investigation at Gusev Crater, Mars. Science, **305**, 794–799.
- Stevevenson, D. J. (2001) Mars' core and magmatism. *Nature*, 412, 214–219.
- Sugiura, N. and Hoshino, H. (2000) Hydrogen-isotopic compositions in Allan Hills 84001 and the evolution of the martian atmosphere. *Meteoritics & Planetary Science*, 35, 373–380.
- Symes, S. J. K., Borg, L. E., Shearer, C. K. and Irving, A. J. (2008) The age of the martian meteorite Northwest Africa 1195 and the differentiation history of the shergottites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **72**, 1696–1710.
- Thomas-Keprta, K. L., Clemett, S. J., McKay, D. S., Gibson, E. K. and Wentworth, S. J. (2009) Origins of magnetite nanocrystals in Martian meteorite ALH 84001. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **73**, 6631–6677.
- Treiman, A. H. (2003) Chemical compositions of Martian basalts (shergottites): Some inferences on basalt formation, mantle metasomatism, and differentiation in Mars. *Meteoritics & Planetary Science*, **38**, 1849–1864.
- Treiman, A. H. (2005) The nakhlite meteorites: Augite-rich igneous rocks from Mars. Chemie der Erde Geochemistry, 65, 203–270.
- Treiman, A. H., Gleason, J. D. and Bogard, D. D. (2000) The SNC meteorites are from Mars. *Planetary and Space*

Science, 48, 1213-1230.

- Usui, T., McSween, H. Y., Jr. and Clark, B. C., III (2008a) Petrogenesis of high-phosphorous Wishstone Class rocks in Gusev Crater, Mars. Journal of Geophysical Research-Planets, 113, E12 S44.
- Usui, T., McSween, H. Y., Jr. and Floss, C. (2008b) Petrogenesis of olivine-phyric shergottite Yamato 980459, revisited. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **72**, 1711–1730.
- Usui, T., Sanborn, M., Wadhwa, M. and McSween, H. Y. Jr. (2010) Petrology and trace element geochemistry of Robert Massif 04261 and 04262 meteorites, the first examples of geochemically enriched lherzolitic shergottites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **74**, 7283–7306.
- Wadhwa, M. (2001) Redox state of Mars' upper mantle and crust from Eu anomalies in shergottite. Science, 291, 1527–1530.
- Walter, M. (1998) Melting of garnet peridotite and the origin of komatiite and depleted lithosphere. *Journal of Petrol*ogy, **39**, 29–60.
- Wänke, H. and Dreibus, G. (1988) Chemical composition and accretion history of terrestrial planets. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, A325, 545–

557.

- Wänke, H. and Dreibus, G. (1994) Chemistry and accretion history of Mars. Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series a-Mathematical Physical and Engineering Sciences, 349, 285–293.
- Watson, L. L., Hutcheon, I. D., Epstein, S. and Stolper, E. (1994) Water on Mars: Clues from deuterium/hydrogen and water contents of hydrous phases in SNC meteorites. Science, 265, 86-90.
- Watters, T. R. and McGovern, P. J. (2006) Introduction to special section: The Hemispheric Dichotomy of Mars. *Geophysical Research Letters*, **33**, DOI: 10.1029/2006 GL025755.
- Wyatt, M. B., Hamilton, V. E., McSween, H. Y., Christensen, P. R. and Taylor, L. A. (2001) Analysis of terrestrial and Martian volcanic compositions using thermal emission spectroscopy: 1. Determination of mineralogy, chemistry, and classification strategies. *Journal of Geophysical Research-Planets*, **106**, 14711–14732.
- Wyatt, M. B. and McSween, H. Y. (2002) Spectral evidence for weathered basalt as an alternative to andesite in the northern lowlands of Mars. *Nature*, 417, 263–266.

New views of Mars: Reviews of recent Mars explorations and meteorites studies

Tomohiro USUI*

* Johnson Space Center, NASA, and Lunar and Planetary Institute Mail code KR, 2101 Nasa Parkway, Houston, TX 77058

Recent Mars exploration missions have revealed that Martian meteorites do not represent typical Noachian/Hesperian (>3 Ga) basaltic crusts. Martian meteorites (young igneous rocks, typically <1.3 Ga except for ALH 84001) are distinctly depleted in aluminum relative to the old Martian crust. Numbers of petrologic and geochemical studies suggest that the Martian meteorites should have sampled geochemical source reservoirs formed by deep Martian magma ocean processes in the earliest history of Mars (~4.5 Ga). These meteorite source reservoirs probably would not represent geochemical source reservoir(s) of the typical old Martian basaltic crusts.

Mars exploration missions have also revealed that Mars was once warm enough to maintain persistent liquid water on its surface. Such a warm and wet environment implies an effective greenhouse gas (CO_2 and/or other volatiles) that was dominantly supplied by early Martian magmatism. Recent findings of carbonate outcrops and bedrocks buried in the Martian crust may account for the early, thick CO_2 -rich atmosphere. Furthermore, the enrichment of some volatile elements (e.g., halogens and sulfur), which would have dissolved in surface water, could have influenced water chemistry (e.g., acidity) and, thus likely played a significant role in weathering and aqueous alteration processes on the surface of early Mars.

Key words: Martian meteorite, Mars exploration mission, Geochemical source reservoir, Martian differentiation, Martian climate, Volatile element