

火星現象論：火星表層環境の進化

地球流体電脳倶楽部

1997 年 1 月 28 日

目次

1	地質学的な証拠	2
2	同位体比を用いた H ₂ O 量の見積もり	4
3	大気散逸の機構	6
4	参考文献	8

Abstract

火星表層環境の進化を概観する.

1 地質学的な証拠

過去に大きな環境変動があったとされる地質学的証拠として、以下のようなものがあげられている (Carr, 1996).

- バレーネットワーク
 - バレーネットワークはその形態から河川の跡ではないかと考えられている (「火星現象論: 火星の表面地形」参照). 現在の気候下では大気からの降水, 地上での流水はすぐに凍結してしまう (赤道の日中の平均気温は -60°C). また軌道傾斜角変化による氷の融解では十分な水を供給することはできない (「火星現象論: 火星の気候変動」参照). よってバレーが流水によって形成されたなら, かつて温暖な気候が存在していたことが必要となる.
- 浸食速度の変化
 - 高地のクレーターは直径 70km 程度のクレーターはほとんどが削平衡に達している. これに対し, 直径 20km 以下の小さいクレーターの数が大きいものに比べ不相応に少ない. Hartmann (1973) はこのような地形ができた原因は, 隕石重爆撃期を境にした侵食速度の変化であるとしている. すなわち, 隕石重爆撃期では侵食速度が大きく, 小さなクレーターはほとんど残らない. 隕石重爆撃が終って侵食速度が低下すると小さなクレーターも残るようになり, 現在見られるような分布になった, としている.
 - Baker and Partridge (1986) は Noachian に形成されたバレーの侵食状態が異なることから, 侵食速度の変化を主張している.
 - どちらも Noachian とそれ以後の時代との間で侵食速度が変化したことを主張している. 侵食速度の大きな変化, は表層環境に何らかの変動があったことを示唆する.
- 風成堆積物
 - 地表のあちこちに浸食・風化によって生じたような堆積物が観察される. 最も有名なのは Medusae Fossae (赤道付近, 140°W - 240°W). Noachian 以後では侵食速度がずっと低くなるので, これらの堆積物は浸食・風化がよく働いた火星史上の比較的早い時期に生成されたと考えられる.
- 氷河の跡
 - Hellas と Argyre の周辺に, 氷河によって形成されるものによく似た地形が存在する. これより Kargel and Strom (1992) は火星にも氷河が形

成された時期があった, と主張している. もしこれが事実ならば, 降水をもたらすような大気環境が必要になる.

これらの表層環境の大きな変化は隕石重爆撃期の終り頃によく見られる.

以上の証拠からかつて火星には温暖な気候が存在したと考えられる. 温暖な気候が存在するためには温室効果が十分効くような濃い大気が必要ではない. そのため火星にはかつて濃い大気が存在したと考えられる. このような濃い大気の主成分としては CO_2 が考えられている. しかし, まだ次のようなことはわかっておらず, 今後の問題である (Leovy,1979).

- 現在の火星の表層にはどれくらいの CO_2 と H_2O が存在しているのか?
- 過去の火星にはどれくらいの CO_2 と液体の H_2O が存在したのか?
- 昔存在したと考えられる CO_2 と H_2O はどこにいったのか?

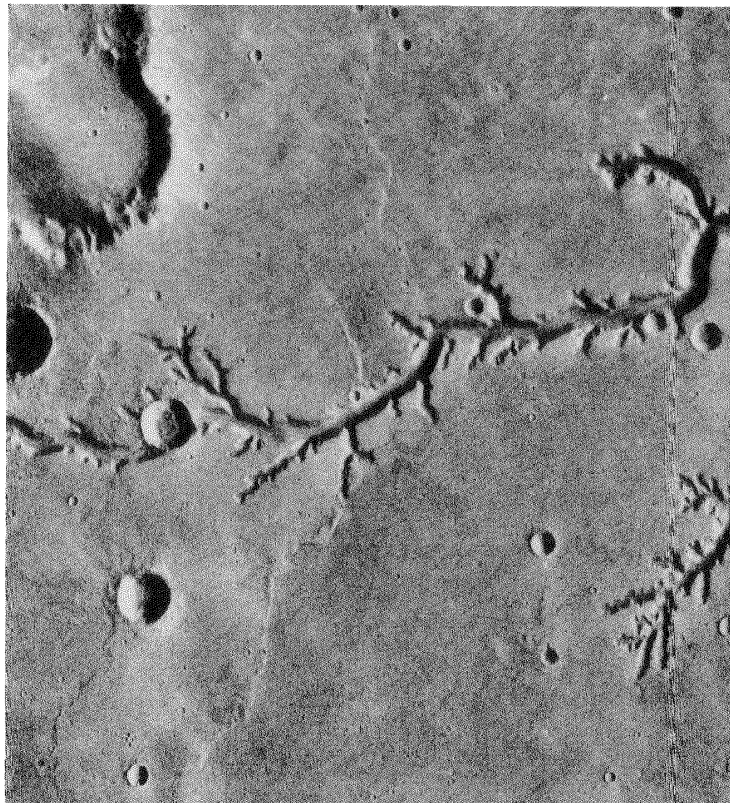


図1 バレーネットワーク (Carr, 1996, 図 4-8). 写真の横幅は 80km.

2 同位体比を用いた H₂O 量の見積もり

同位体比を用いて過去に存在した H₂O の量が見積もられている。N₂, Ar, D/H 比がよく用いられる。

Ar と N₂

スケーリングを用いて H₂O 量が見積もられている。

- Anders and Owen (1977):
³⁶Ar を用いたスケーリング。地球と火星で H₂O/³⁶Ar は変わらないと仮定した。その結果、H₂O は全球に深さ 10m に相当する量が存在するとした。同様に 100mb の CO₂ 量を見積もった。
- Pollack and Black (1979):
N₂ を用いたスケーリング。地球と火星の間で材料物質の (非希ガス/希ガス) 比は変化してもよいが、非希ガス元素の間での存在度比は変わらないと仮定した。また、大気中の ¹⁵N₂/¹⁴N₂ 比が地球の 1.62 倍 (McElroy et al., 1977) であることから、光化学過程と Sputtering¹ によって N が散逸する効果を補正した。

これより火星の材料物質における ¹⁴N₂/³⁶Ar は地球の 40 倍であるという結論を得た。これに地球の N₂/H₂O 比をあてはめて、H₂O は全球で 6 ~ 160m の深さに相当する量が存在するとした。

これらの見積もりには、SNC 隕石からの情報やその他の大気散逸過程が含まれていないこと、揮発性元素間の存在度比に普遍性を仮定したことに問題がある。

脱ガス率²も見積もられている。しかし、H₂O の絶対脱ガス量はわからない。

- Scambos and Jakosky (1990):
SNC 隕石から推定された全 K 量 (235-300ppm) と過去のマグマの噴出量の推定値 (Tanaka et al., 1988; Greeley, 1897) を基に、⁴⁰Ar と非放射壊変起源ガスの脱ガス率を計算した。これより ⁴⁰Ar は 0.012-0.040, 非放射壊変起源ガスは 0.17-0.112 を得た。
- Jakosky et al. (1994):
大気上層での Supttering による ⁴⁰Ar の散逸効果を考慮して、脱ガス率を計算した。このとき ⁴⁰Ar の脱ガス率は ≤0.2, 非放射壊変起源ガスの脱ガス率は ≤0.4 .

¹3 大気散逸の機構参照。

²火星史を通じて作られた量に対する大気に放出された量の割合

D と H

観測から「火星の水素は重い」ことがわかっている.

- Owen et al. (1988): Bjoraker et al. (1989):
「火星大気の水素は重い」ことを発見した. 地球上からの赤外線分光観測から, 火星の $D/H_{\text{atm}} = 8.1 \pm 0.3 \times 10^{-4}$ を得た. これは地球の 5.2 倍にあたる. よって大気から H が選択的に散逸したことが示唆される.
- Watson et al. (1994):
「火星地殻の水素も重い」ことを発見した. SNC 隕石中のマグマと変成起源含水鉱物の分析から, 火星地殻の D/H は地球の水と同程度の値から, 火星大気と同程度の値の間に分散していることがわかった. これは地球と同程度の D/H 比を持つマントル中の H₂O と, 現火星大気と同程度の D/H 比を持つ表層の H₂O との混合で説明できる. よって大気と地殻中の H₂O は高い交換率をもつことと, 表層の D/H の分別は SNC の固化年代である 13 億年前には現在と同程度進んでいたことを示唆する.

この結果から H₂O 量が見積もられている.

- Yung et al. (1988):
拡散分離と光化学過程による現在の H, D の散逸率, 分別因子³ を推定した. 得られた値は散逸率が H: 1.6×10^8 , D: 9.3×10^3 (単位は $\text{atoms cm}^{-2}\text{sec}^{-1}$), 分別因子が 0.32 である.
この散逸率が 45 億年持続したとすると, 観測される D/H 比まで分別が進むためには初期の火星には全球で深さ 3.6m 相当の大気と交換可能な H₂O が存在し, 現在までに 0.2m 相当まで減少すればよいことになる.
- Jakosky (1990):
自転軸の傾きが大きな時期には大気中の水蒸気濃度は増加するので, より多量の散逸が起こるはずだ, として初期の H₂O 量を見積もった. そして初期に全球で深さ 70m 相当の H₂O が存在し, 現在までに 4m 相当まで減少すればよいとした. これは Yung et al.(1988) の推定値の 20 倍である.
- Donahue (1995):
13 億年前にできたと推定される隕石中の D/H 比と現在の大気中の値がほとんど変わらないことから, 表層の H₂O 量を推定した. 散逸のパラメータは Yung et al.(1988) の値を用いた. これより 13 億年前には全球で深さ 25m 相当の交換可能な H₂O, 45 億年前には 280m 相当の H₂O が存在するとした. これらは最低量であり, もっと多く存在していてもかまわない.

³H に対する D の逃げやすさを示す. 分別因子が 0.32 とは「D は H の 0.32 倍だけ逃げる」ことを意味する.

H の散逸がどのような進化をたどったかには、連続的に散逸したとする考え (斉一論: Jakosky and Jone, 1995) と、過去の温暖な時代に湿潤な大気から多く散逸され、分別の大部分はそのとき進行したとする考え (初期大規模散逸: Owen et al., 1988) がある。斉一論には、1) 現在の寒冷な環境では大気と地殻中の H_2O の交換は進行しにくい、2) 残存 H_2O (Jakosky, 1990) 量が少なすぎる、という問題がある。

3 大気散逸の機構

火星は重力が地球と比べ小さく大気も薄いため、大気の様々な散逸過程が大気と表層環境の進化に重要な役割を果たす。

Hydrodynamic escape 大気上層の H_2 が EUV(遠紫外線) に加熱され、熱的に流出する。このとき流速が十分大きいと、他の重い分子や原子をひきずって散逸する。

Pepin (1991) は Xe の分別をこの効果で説明している。このとき必要な EUV フラックスは現在の $10^2 \sim 10^3$ 倍。太陽質量程度の若い星はこの程度の EUV を放出していることが、観測から知られている (減衰の時定数は 9000 万年)。

Impact erosion 小天体の高速度衝突で生じた高温の蒸気流に、大気を取り込まれて散逸する。大気成分の分別は直接は起こらないが、凝結の効果を考えてと表層全体で揮発性元素の分別が起こり得る。

Melosh and Vikery (1989) は必要な衝突速度として、衝突体が岩石質であれば 14.3km/sec 、氷天体であれば 11.1km/sec を求めた。

Jeans escape Maxwell 速度分布の高速成分が散逸する。H, D, He まで有効に働く。分別には外気圏 (exosphere) での軽原子、原子の重力による選択的な濃集が反映している。

Dissociation recombination 分子イオンが電子と再結合して、高速の中性原子へ解離して散逸する。例えば $\text{N}_2^+ + e^- \rightarrow 2\text{N}$, $\text{O}_2^+ + e^- \rightarrow 2\text{O}$ など。もともとの電離は太陽紫外線に規定される。反応自体は光化学過程の一つ。

Ion pick-up Sputtering イオンが太陽風磁場に巻き付いて加速される (Ion pick-up)。そのまま散逸することもあるが、巻き付き運動の結果外気圏に再衝突し、周囲の粒子に運動量を渡して散逸させる (Sputtering) こともある。太陽風粒子 (p^+), He イオンの直接 Sputtering は効果が薄い。火星は磁場が弱いので、太陽風が深く侵入できることが重要である。

Luhmann et al. (1992) は最近 35 億年の Sputtering による散逸量を見積もった。それによると C は 120mb 相当、O は H_2O に換算して全球を深さ 30m で覆う量が散逸している。

また Jakosky et al. (1995) では $^{36}\text{Ar}/^{38}\text{Ar}$, $^{22}\text{Ne}/^{20}\text{Ne}$ の分別は Sputtering だけで十分説明できるとしている. むしろ分別が効率良く進みすぎるので, 内部からの連続脱ガスによる希釈が必要であるといっている.

4 参考文献

- Anders, E. and Owen, T., 1977: Mars and Earth: Origin and abundance of volatiles, *Science*, **198**, 453-465.
- Baker, V.R. and Partridge, J.B., 1986: Small martian valleys: Pristine and degraded morphology, *J. Geophys. Res.*, **91**, 3561-3572.
- Bjoraker, G.L., Mumma, M.J. and Larson, H.P., 1989: The Value of D/H in the Martian atmosphere: Measurement of HDO and H₂O using the Kuiper Airbone Observatory, Proc.4th Int.Conf.on Mars, Tucson,Jan,10-13,1989,pp.69-70.
- Carr, M.H., 1987: Water on Mars, *Nature*, **326**, 30-35.
- Carr, M.H., 1996: *Water on Mars*, Oxford Univ.Press, 229pp.
- Donahue, 1995:
- Hartmann, W.K., 1973: Martian cratering 4: Mariner 9 initial analysis of cratering chronology, *J. Geophys. Res.*, **79**, 4096-4116.
- Jakosky, B.M., 1990: Mars atmospheric D/H: Consistent with polar volatile theory? *J. Geophys. Res.*, **95**, 1475-1480.
- Jakosky, J.M. and Jones, 1995:
- Jakosky, B.M., Pepin, R.O., Johnson, R.E. and Fox, J.L., 1994: Mars atmospheric loss and isotopic fractionation by solar wind induced sputtering and photochemical escape, *Icarus*, **111**, 271-288.
- Jakosky, B.M., Henderson, B.G. and Mellon, M.T., 1995: Chaotic obliquity and the nature of the martian climate, *J. Geophys. Res.* (in press)
- Kargel, J.S. and Strom, R.G., 1992: Ancient glaciation on Mars, *Geology*, **20**, 3-7.
- Leovy, C.B., 1979: Martian Meteorology, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.*, **17**, 387-413.
- Luhmann, J.G., Russell, C.T., Brace, L.H. and Vaisberg, O.L., 1992: The intrinsic magnetic field and solar-wind interactions of Mars, *Mars* (Kieffer, H.H. et al., eds.), University of Arizona Press, Tucson, pp.1090-1134.

- Melosh, H.J. and Vikery, A.M., 1989: Impact erosion of the primordial atmosphere of Mars. *Nature*, **338**, 487-489.
- Nier, A.O. and McElroy, M.B., 1977: Composition and structure of Mars' upper atmosphere: Results from neutral mass spectrometers on Viking 1 and 2, *J. Geophys. Res.*, **82**, 4341-4349.
- Owen, T., Maillard, J.P., DeBergh, C. and Lutz, B.L., 1988: Deuterium on Mars: The abundance of HDO and the value of D/H, *Science*, **240**, 1767-1770.
- Pepin, R.O., 1991: Evolution of atmosphere volatiles, *Icarus*, **92**, 2-79.
- Pollack, J.B. and Black, D.C., 1979: Implications of the gas compositional measurements of Pioneer Venus for the origin of planetary atmospheres, *Science*, **205**, 56-59.
- Scambos, T.A. and Jakosky, B.M., 1990: An outgassing release factor for non-radiogenic volatiles on Mars, *J. Geophys. Res.*, **95**, 14779-14787.
- Watson, L.L., Hutcheon, I.D., Epstein, S. and Stolper, E.M., 1994: Water on Mars: Clues from deuterium/hydrogen and water contents of hydrous phase in SNC meteorites, *Science*, **265**, 86-90.
- Yung, Y.L., Wen, J., Pinto, J.P., Allen, M., Pierce, K.K., and Paulsen, S., 198: HDO in the martian atmosphere: Implications for the abundance of crustal water, *Icarus*, **76**, 146-159.

謝辞

本稿は 1989 年から 1993 年に東京大学地球惑星物理学科で行われていた、流体理論セミナーでのセミナーノートがもとになっている。原作版は石渡正樹による「火星現象論」(89/05/19)であり、林祥介によって地球流体電脳倶楽部版「火星現象論」として書き直された(1996/06/23)。その後小高正嗣によって加筆修正された(1997/01/28)。構成とデバッグに協力してくれたセミナー参加者のすべてにも感謝しなければならない。

本資源は著作者の諸権利に抵触しない(迷惑をかけない)限りにおいて自由に利用していただいて構わない。なお、利用する際には今一度自ら内容を確認することを願う(無保証無責任原則)。

本資源に含まれる元資源提供者(図等の版元等を含む)からは、直接的な形でのWEB上での著作権または使用許諾を得ていない場合があるが、勝手ながら、「未来の教育」のための実験という学術目的であることをご理解いただけるものと信じ、学術

標準の引用手順を守ることで諸手続きを略させていただいている。本資源の利用者には、この点を理解の上、注意して扱っていただけるようお願いする。万一、不都合のある場合には

`dcstaff@gfd-dennou.org`

まで連絡していただければ幸いである。