

火星大気の HDO/H₂O 循環：観測とシミュレーションによるアプローチ

黒田剛史(東北大理), 佐川英夫(NICT), 笠井康子(NICT), 笠羽康正(東北大理)

1 火星大気における HDO/H₂O 比検出の意義

現在の火星地表面には液体の水は存在しないと考えられているが、これまでの火星周回船や着陸船による観測では、過去の火星地表面に液体の水が潤沢に存在した証拠を示す地形がいくつも発見されている[Seibert and Kargel, 2001; Okubo and McEwen, 2007; McEwen et al., 2007; Squyres et al., 2009]. この水のうち多くは太陽風により宇宙空間に散逸したと考えられる一方で、北極氷床および地下水(地下氷)としてかなりの量の水が現在の火星に存在することも知られている. 地下水(氷)は地表から 1m 以内の深さのところに広範囲に存在し[Malin and Edgett, 2000; Feldman et al., 2004], 北半球中緯度域のクレーターからそれが地表に噴き出している様子も観測されている[Byrne et al., 2009]. このような短期および長期的な水の動きを探る上で重要な指標となりうるのが、火星大気中および氷床の HDO/H₂O 比(以下「水(氷)の D/H 比」と称す)を測定することによる水の起源の推定である.

HDO(水分子中の水素原子が1つ重水素に置き換わっているものはH₂Oよりも蒸気圧が低いため、宇宙空間に散逸しにくく、また氷の中にとどまりやすい. そのため大気中の氷雲など、大気と氷の間で水蒸気交換が活発に行われている領域の水や水の D/H 比は次第に高くなると考えられる. 一方で年代の古い氷床や地下水(氷)における HDO の割合は氷雲よりも低いままで保たれていると考えられ、両者の D/H 比を比較することで水の散逸の様子を可視化することができる.

さらに水の D/H 比の測定は、その空間・時間変化を詳しく見ることにより水循環における物理プロセスを可視化するツールとして利用可能である(地球大気での適用例として Frankenberg et al. [2009]など). よって火星において同様の試みを行うことで、現在の火星環境における水循環の様子、特に地表～大気間の水蒸気の入りを求めるための手掛かりとなることが期待される.

表層過程から大気散逸に至るまでの火星大気における水の動きの模式図を図 1 に示す. 我々は観測とシミュレーションから、同位体比を目印にこのような水の動きを追いかけていきたいと考えている.

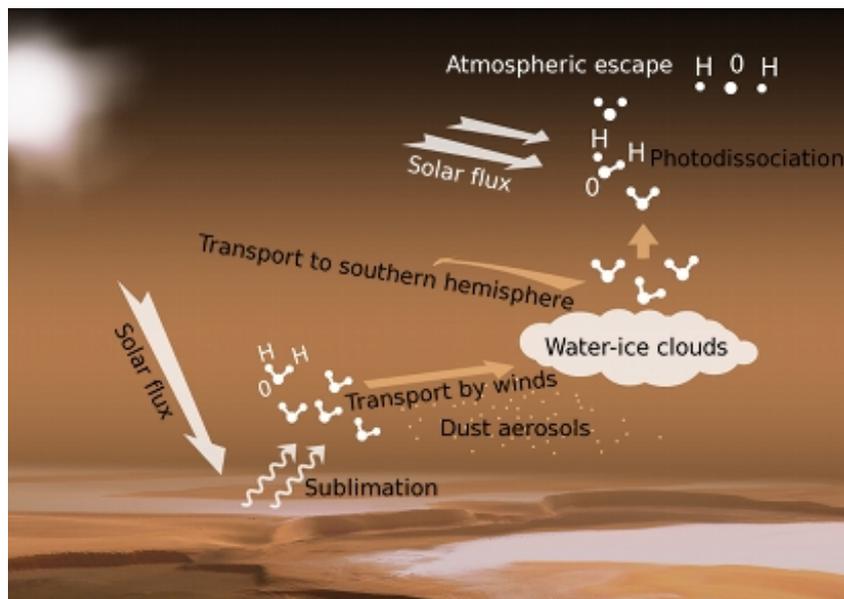


図 1：火星大気における水の動きの模式図[ESA/AOES Medialab, 2011].

2 火星 HDO/H₂O 比分布の観測とシミュレーションの現状

観測によるHDOおよび水のD/H比の測定は、現状では火星周回軌道からの観測例はなく、地上望遠鏡および地球近傍のハーシェル宇宙望遠鏡からの観測が行われているのみである。火星大気中のD/H比は、全球平均で地球海洋の平均値(SMOW)¹の4~7倍程度の値が示されている[Owen et al., 1988; Krasnopolsky et al., 1997; Hartogh, personal communication]。またH₂OおよびHDOの昼面カラム積算量から算出された水のD/H比は、SMOWの2~8倍と非常に大きな空間変化があることが示唆されている[Villanueva et al., 2008]。また水のD/H比の鉛直分布については観測例が存在しない。

HDO 循環の3次元シミュレーションは、Montmessin et al. [2005]による火星大気大循環モデル(MGCM)を用いたものが知られている。彼らによる水のD/H比の計算結果は、低~中緯度域の値は最新の観測結果[Novak et al., 2011]と定性的に整合する(図2)。しかし観測では乾燥するほど水のD/H比が高くなる傾向を示す結果も報告されており[Fisher et al., 2008]、これは冬の極域など水蒸気量が小さくなる場所で水のD/H比が著しく減少するシミュレーション結果とは逆の傾向を示している(図3)。このことは大きな空間分布の存在と合わせて謎とされている点であり、その解明には地下水(氷)のD/H比分布、大気~表層間の水の交換過程、散逸の効果などについてのより詳しい知見が必要と考えられる。そのためのより詳しい観測とシミュレーション研究が今後期待される。

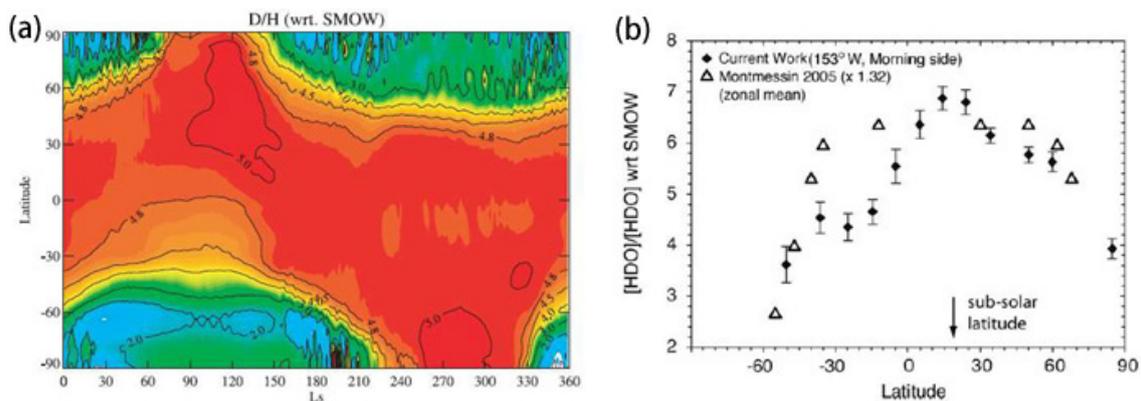


図2:(a)シミュレーションによる水のD/H比の季節-緯度変化[Montmessin et al., 2005], (b)北半球秋季(Ls=50°)における水のD/H比緯度分布について観測とシミュレーションの定性的比較[Novak et al., 2011]。

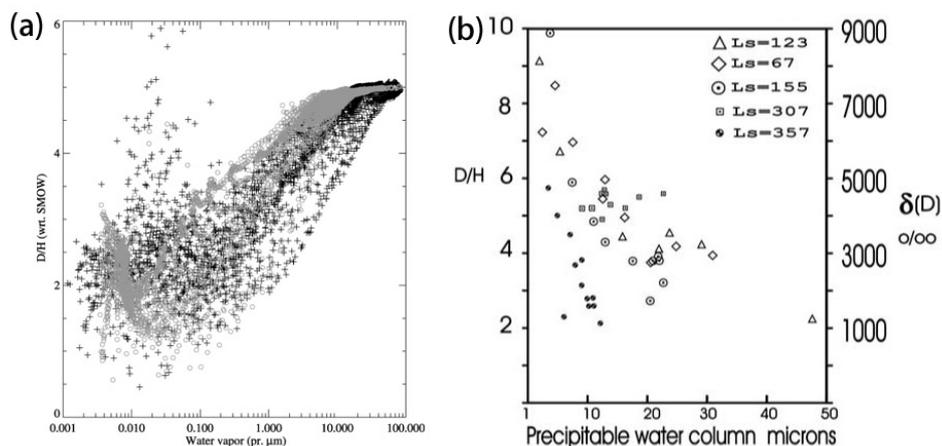


図3:(a)シミュレーションによる水蒸気量(横軸)と水のD/H比(縦軸)の相関[Montmessin et al., 2005]。灰色の円は南半球, 黒色の十字は北半球の値。(b)Mumma et al. [2003]の観測による同様の相関[Fisher et al., 2008]。

¹ D原子/H原子の比で $\sim 1.56 \times 10^{-4}$ (HDO/H₂O比では $\sim 3.12 \times 10^{-4}$)。

3 FIRE/MELOS による HDO/H₂O 比の観測計画

火星の水循環および大気散逸について現在の状態を理解するためにも、水の D/H 比の空間・時間変化を詳しく測定することが必要で、今後は特に火星周回船からの観測が期待される。2016 年に打ち上げ予定の ExoMars Trace Gas Orbiter (EMTGO) は H₂O と HDO に感度のある測器を搭載予定で、これによって大気中の水の D/H 比分布について多くのデータが得られることが期待される。

それに続き、2020 年代初頭の打ち上げに向けて検討を行っている日本の火星探査機・MELOS 気象オービタでは、水の D/H 比観測に感度があるサブミリ波サウンダ FIRE (Far Infra-Red Experiment) の搭載を予定している。MELOS 気象オービタはダスト気象学の解明を主目的としているが、その中でサブミリ波サウンダはダストに対してほとんど感度がないことを逆手に取り、温度・物質組成などの「場」をダスト濃度に左右されずに、ダストを透かして観測することで、これらのダストストームによる影響を捉えることができる。FIRE/MELOS では 550-620GHz 帯を用いて、水蒸気やその同位体比、その他微量気体の 3 次元分布を観測する予定である。図 4 にこの周波数帯における Nadir および Limb の観測スペクトルのシミュレーション結果を掲載する。H₂O と HDO の両方のスペクトルがこの周波数帯に存在するため、H₂O と HDO の量を同時に観測することで大気中の水の D/H 比をより正確に求めることが可能である。またこれまでの地上観測や EMTGO で予定されている赤外観測よりも、ダストの影響を受けない分より正確なりとりべが可能である。さらに FIRE では地表面温度に加え地表～地下の物性も観測可能で、EMTGO 搭載の測器では検出が難しい地表～大気間の水の出入りを捉えることも目標としている。

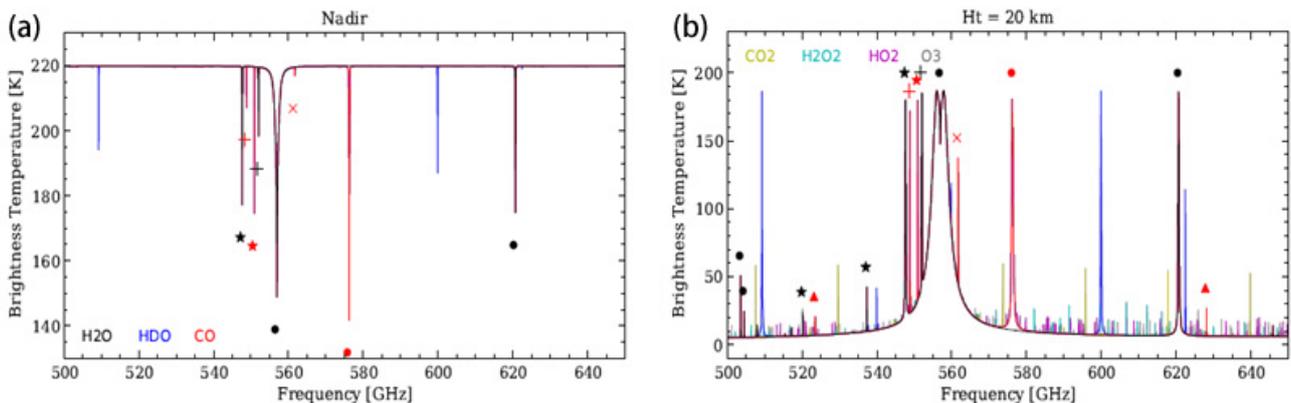


図 4: FIRE の(a)Nadir 観測, (b)Limb 観測(tangential height=20km)にて観測が期待されるスペクトルのシミュレーション結果[Kasai et al., 2012]. それぞれ黒が H₂O, 青が HDO の吸収線を示す。

4 DRAMATIC MGCM による HDO/H₂O 比のシミュレーション

データ同化シミュレーションによって FIRE および先行観測により得られるデータの詳細な解釈を行うことを視野に入れ、我々は火星大気大循環モデル DRAMATIC MGCM² を用いた HDO を含む水循環シミュレーションに着手した。DRAMATIC MGCM は東京大学気候システム研究センター(現・大気海洋研究所気候システム研究系)などで開発された MIROC モデル[K-1 model developers, 2004] をベースとしており、これまでに火星の物理パラメータ(惑星半径・大気組成・軌道要素など)、地表面パラメータ(地形・アルベド・熱慣性)、ダストと二酸化炭素の放射効果[以上 Kuroda et al., 2005], それに加えて水(H₂O)循環、水と二酸化炭素の氷雲・極冠形成[黒田ら, 2010] などが先立って導入されている。また表層の力学・熱力学・水蒸気フラックスの計算にあたり、Heavens et al. [2008] の地表面粗度パラメータを定性的に与えている。

² DRAMATIC = Dynamics, RAdiation, MAterial Transport and InteraCtions between them, 旧名称 CCSR/NIES(/FRCGC) MGCM.

HDOはMontmessin et al. [2005]にならい、従来の水循環スキームの中で水蒸気・氷雲および地表面氷のH₂Oに混ぜて導入し、相変化の際に水蒸気中と氷中のD/H比の比(α)を以下のように大気温度(T)の関数として与える(Merlivat and Nief [1967]の式³)。

$$\alpha = \frac{(\text{HDO}/\text{H}_2\text{O})_{\text{ice}}}{(\text{HDO}/\text{H}_2\text{O})_{\text{vap}}} = \exp\left(\frac{16289}{T^2} - 9.45 \times 10^{-2}\right) \quad (1)$$

なお α の値は $T=160\text{K}$, 180K , 200K の時それぞれ1.72, 1.50, 1.37となる。

Montmessin et al. [2005]では大気中の水蒸気の凝結に伴うD/H比の取り扱いとして2種類のケースを想定している。1つはRapid isotopic Homogenization case (RH)で、氷雲のように雲粒内のHDO分子の拡散性が十分大きい場合に適用でき、各グリッド/層において水蒸気中と氷雲中のD/H比の比が常に(1)式の α に維持される。もう1つはRayleigh Distillation case (RD)で、雲粒内のHDO分子が拡散しない氷雲を想定し、凝結して生じる氷雲中のD/H比と凝結前の水蒸気の総量におけるD/H比の比を α とするものである。理論的には火星に存在するような氷雲では雲粒内のHDO分子の拡散効果は無視できるほど小さいものではないとされているため、本研究の計算結果ではRHを想定している⁴。また地表面氷が昇華して水蒸気になる過程においては、本研究では発生する水蒸気中のD/H比は元の地表面氷のその $1/\alpha$ となるように与えている。

等温静止状態(200K)、大気中の水蒸気・氷雲なし、北極域 80°N 以北に大気中に無限に水を供給できる氷極冠(D/H比はKrasnopolsky et al. [1997]の観測から火星の全球平均値とされるSMOWの5.6倍)を設定した初期条件から12火星年分の計算を行い、その間についての水蒸気(H₂O)のカラム積算量およびそのD/H比の計算結果を図5に示す。ダスト濃度の季節・緯度変化はMars Climate Databaseの旧バージョンにおける”MGS scenario” [Lewis et al., 2001]に基づいている。

モデル結果は12火星年分の計算では定常状態に達せず、北極の永久氷極冠から水蒸気が供給され続けている。D/H比も5~6火星年目をピークとして減少傾向にある。Montmessin et al. [2005]では本研究と同様の初期条件から定常状態に達するまで15火星年分の計算を要しており、よってさらに数火星年分のスピナップが必要と考えられるが、それは将来計画とする。また12火星年目の計算結果について、北半球夏至($L_s=90^\circ$)における水蒸気および氷雲中のHDO量、また水蒸気のD/H分布についての緯度-高度分布を図6に示す。ここまでのところの水蒸気のD/H比の季節-緯度分布、および経度平均した緯度-高度分布はMontmessin et al. [2005]の結果と定性的に整合する。

5 まとめ

火星大気におけるHDO/H₂O比測定の意義に基づいた、その観測計画およびMGCMによるシミュレーションについて現状の検討状況および進捗状況を記した。現状では実際の観測データの特徴をシミュレーションによる理論研究によってうまく説明できていない部分もあり、その解決のためにもより詳しい観測とシミュレーション研究の改良の両方を行っていく必要がある。DRAMATIC MGCMでは今後氷雲形成における過飽和の効果、光化学過程、大気~表層間の水の交換、大気粒子散逸過程などの導入を予定しており、これら様々な要素が火星の水同位体比分布に与える影響を理論的に検証するとともに、今後

³ この式は-40°C~0°C についての実験結果より導出されたもので、火星大気環境はほとんどの場合でこの範囲よりも低温だが、とりあえずはこの式を低温側に外挿できるものと仮定して使用する。

⁴ Montmessin et al. [2005]はRHとRDの計算結果を比較して、特にCO₂極冠が縮退する春季の極域においてHDO量に差が出るものの(RHの方が最大60%程度多くなる)、定性的な季節および緯度変化について大きな差はないと述べている。

の EMTGO や FIRE/MELOS による詳細な水同位体比観測に期待し、火星の気候変動解明に向けたアプローチへとつなげていきたいと考えている。

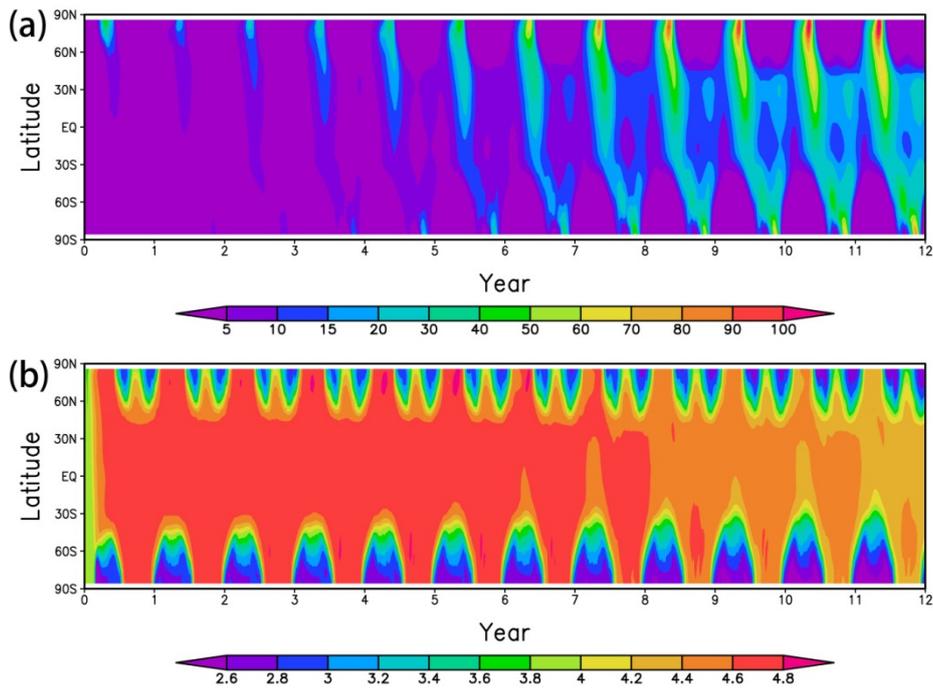


図 5 : DRAMATIC MGCM による(a)水蒸気(H₂O)の経度平均カラム積算量[pr.µm], および(b)水蒸気の D/H 比[×SMOW]の計算結果. それぞれ等温静止状態から 12 火星年後までの時間変化を示す.

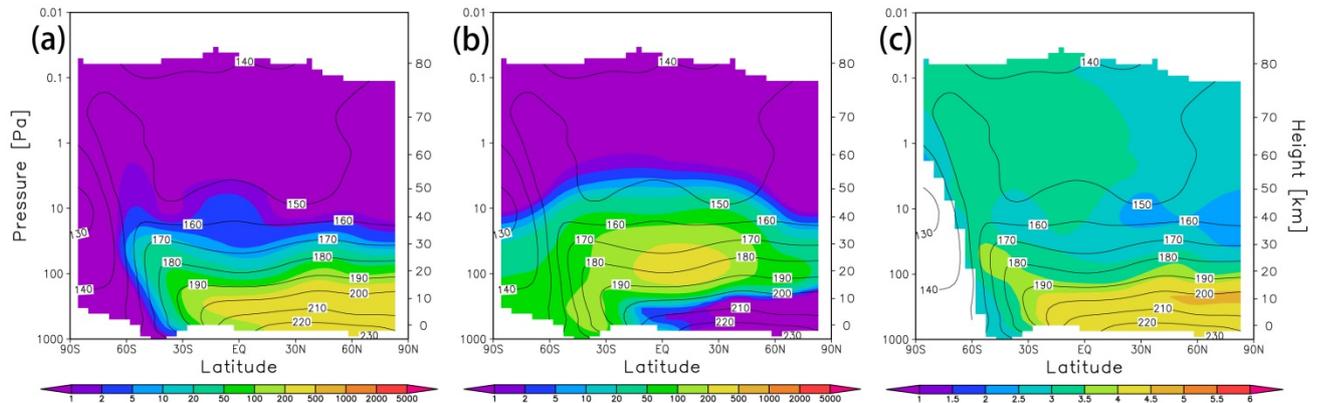


図 6: DRAMATIC MGCM による, 等温静止状態から 12 火星年目の $L_s=90^\circ$ (北半球夏至)における経度平均(a)HDO 水蒸気量[ppb of mass], (b)HDO 氷雲量[ppm of mass], (c)水蒸気の D/H 比[×SMOW]の計算結果. 各プロット内の黒コンターは温度[K]を示す.

参考文献

Byrne, S., C.M. Dundas, M.R. Kennedy, M.T. Mellon, A.S. McEwen, S.C. Cull, I.J. Daubar, D.E. Shean, K.D. Seelos, S.L. Murchie, B.A. Cantor, R.E. Arvidson, K.S. Edgett, A.Reufer, N. Thomas, T.N. Harrison, L.V. Posiolova, and F.P. Seelos (2009), Distribution of Mid-Latitude Ground Ice on Mars from New Impact Craters, *Science*, *325*, 1674-1676.

Feldman, W.C., T.H. Prettyman, S. Maurice, J.J. Plaut, D.L. Bish, D.T. Vaniman, M.T. Mellon, A.E. Metzger, S.W. Squyres, S. Karunatillake, W.V. Boynton, R.C. Elphic, H.O. Funsten, D.J. Lawrence, and R.L. Tokar (2004), Global distribution of near-surface hydrogen on Mars, *J. Geophys. Res.*, *109*, E09006, doi:10.1029/2003JE002160.

Fisher, D., R. Novak, and M. J. Mumma (2008), D/H ratio during the northern polar summer and what the Phoenix mission might measure, *J. Geophys. Res.*, *113*, E00A15, doi:10.1029/2007JE002972.

Frankenberg, C., K. Yoshimura, T. Warneke, I. Aben, A. Butz, N. Deutscher, D. Griffith, F. Hase, J. Notholt, M. Schneider, H. Schrijver, and T. Röckmann (2009), Dynamic Processes Governing Lower-Tropospheric HDO/H₂O Ratios as Observed from Space and Ground, *Science*, *325*, 1374-1377.

- Heavens, N.G., M.I. Richardson, and A.D. Toigo (2008), Two aerodynamic roughness maps derived from Mars Orbiter Laser Altimeter (MOLA) data and their effects on boundary layer properties in a Mars general circulation model, *J. Geophys. Res.*, *113*, E02014, doi:10.1029/2007JE002991.
- K-1 Model Developers (2004), K-1 coupled GCM (MIROC) description, *K-1 Tech. Rep.*, *1*, Univ. of Tokyo, 1-34. <http://www.ccsr.u-tokyo.ac.jp/kyosei/hasumi/MIROC/tech-repo.pdf>
- Kasai, Y., H. Sagawa, T. Kuroda, T. Manabe, S. Ochiai, K. Kikuchi, T. Nishibori, P. Baron, J. Mendrok, P. Hartogh, D. Murtagh, J. Urban, F. von Schéele, and U. Frisk (2012), Overview of the Martian atmospheric submillimetre sounder FIRE, *Planet. Spa. Sci.*, *63-64*, 62–82.
- Krasnopolsky, V.A., G.L. Bjoraker, M.J. Mumma, and D.E. Jennings (1997), High-resolution spectroscopy of Mars at 3.7 and 8 μm : A sensitive search for H_2O_2 , H_2CO , HCl , and CH_4 , and detection of HDO, *J. Geophys. Res.*, *102*, 6525-6534.
- Kuroda, T., N. Hashimoto, D. Sakai and M. Takahashi (2005), Simulation of the Martian Atmosphere Using a CCSR/NIES AGCM, *J. Meteor. Soc. Japan*, *83*, 1-19.
- 黒田剛史, Paul Hartogh, 笠井康子, 佐川英夫, 青山友貴奈, 酒井大輔, 高橋正明 (2010), 火星大気における水循環: 観測とシミュレーションの現状と将来計画, 第24回大気圏シンポジウム講演集, 宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究本部. http://www.isas.ac.jp/j/researchers/symp/2010/image/0218_proc/7-4.pdf
- Lewis, S.R., M. Collins, and F. Forget (2001), Mars Climate Database V3.0 Detailed Design Document, European Space Agency Technical Report. http://www-mars.lmd.jussieu.fr/mars/esadoc/lmd/wp7/detailed_design.pdf
- Malin, M.C., and K.S. Edgett (2000), Evidence for Recent Groundwater Seepage and Surface Runoff on Mars, *Science*, *288*, 2330-2335.
- Merlivat, L., and G. Nief (1967), Merlivat, L., and G. Nief (1967), Fractionnement isotopique lors des changements d'état solide-vapeur et liquide-vapeur de l'eau a des températures inférieures a 0°C , *Tellus*, *19*, 122– 127.
- McEwen, A.S., C.J. Hansen, W.A. Delamere, E.M. Eliason, K.E. Herkenhoff, L. Keszthelyi, V.C. Gulick, R.L. Kirk, M.T. Mellon, J.A. Grant, N. Thomas, C.M. Weitz, S.W. Squyres, N.T. Bridges, S.L. Murchie, F. Seelos, K. Seelos, C.H. Okubo, M.P. Milazzo, L.L. Tornabene, W.L. Jaeger, S. Byrne, P.S. Russell, J.L. Griffes, S. Martínez-Alonso, A. Davatzes, F.C. Chuang, B.J. Thomson, K.E. Fishbaugh, C.M. Dundas, K.J. Kolb, M.E. Banks, and J.J. Wray (2007), A Closer Look at Water-Related Geologic Activity on Mars, *Science*, *317*, 1706-1709.
- Montmessin, F., T. Fouchet, and F. Forget (2005), Modeling the annual cycle of HDO in the Martian atmosphere, *J. Geophys. Res.*, *110*, E03006, doi:10.1029/2004JE002357.
- Mumma, M.J., R.E. Novak, M.A. DiSanti, B. Bonev, N. Dello Russo, and K. Magee-Sauer (2003), Seasonal mapping of HDO and H_2O , in Sixth International Conference on Mars Atmosphere, Abstract 3186, Jet Propul. Lab., Pasadena, Calif.
- Novak, R.E., M.J. Mumma, and G.L. Villanueva (2011), Measurement of the isotopic signatures of water on Mars; Implications for studying methane, *Planet. Spa.Sci.*, *59*, 163-168.
- Okubo, C.H., and A.S. McEwen (2007), Fracture-Controlled Paleo-Fluid Flow in Candor Chasma, Mars, *Science*, *315*, 983-985.
- Owen, T., J.P. Mailland, C. de Bergh, and B.L. Lutz (1988), Deuterium on Mars: The Abundance of HDO and the Value of D/H, *Science*, *240*, 1767-1770.
- Seibert, N.M., and J.S. Kargel (2001), Small-Scale Martian Polygonal Terrain: Implications for Liquid Surface Water, *Geophys. Res. Lett.*, *28*, 899-902.
- Squyres, S.W., A.H. Knoll, R.E. Arvidson, J.W. Ashley, J.F. Bell III, W.M. Calvin, P.R. Christensen, B.C. Clark, B.A. Cohen, P.A. de Souza Jr., L. Edgar, W.H. Farrand, I. Fleischer, R. Gellert, M.P. Golombek, J. Grant, J. Grotzinger, A. Hayes, K.E. Herkenhoff, J.R. Johnson, B. Jolliff, G. Klingelhöfer, A. Knudson, R. Li, T.J. McCoy, S.M. McLennan, D.W. Ming, D.W. Mittlefehldt, R.V. Morris, J.W. Rice Jr., C. Schröder, R. J. Sullivan, A. Yen, R.A. Yingst (2009), Exploration of Victoria Crater by the Mars Rover Opportunity, *Science*, *324*, 1058-1061.
- Villanueva, G.L., M.J. Mumma, R.E. Novak, T. Hewagama, B.P. Bonev, and M.D. DiSanti (2008), Mapping the D/H of water on Mars using high-resolution spectroscopy, Abstract 9101, Mars Atmosphere: Modeling and Observations Workshop, Williamsburg, VA. <http://www.lpi.usra.edu/meetings/modeling2008/pdf/9101.pdf>