

火星気象と水循環

今村剛・佐藤毅彦・上野宗孝・鈴木睦・黒田剛史（宇宙航空研究開発機構）、
笠井康子（情報通信研究機構）、佐川英夫（マックスプランク研究所）、高橋幸弘（東北大学）
高橋芳幸（神戸大学）、はしもとじょーじ（岡山大学）、火星気象衛星検討チーム

1. 変貌する火星のイメージ

地球に比べれば(絶対湿度では)はるかに乾燥し、砂漠のような地表を吹き抜ける火星の大気は、その第一印象に反して水循環と深く関わっている。火星大気中の水蒸気の量は緯度や季節によって大きく変動することが知られているが、これは極冠やレゴリスなどに不均一に分布する水のリザーバー(氷や吸着水)と大気との間で水が出入りすることを反映すると考えられている[1]。表層の水は高緯度地方に運ばれて凍りつき、中・低緯度の地表面には安定に存在しないはずなので、大気の緯度方向の循環は中・低緯度の水蒸気量を大きく変化させうる。この場合、大気循環は平均水蒸気量に影響し、ひいては宇宙空間への水の散逸にも関わることになる。水蒸気はまた、太陽紫外線で光分解されることで様々な水酸化ラジカルを生み出し、光化学を駆動する[2]。大気主成分である二酸化炭素が紫外線にさらされると一酸化炭素と酸素に変換されるが、それを二酸化炭素に戻して大気を安定化するのにこのような光化学が効いていると考えられている。表層の酸化状態にも影響を与えているだろう。

近年の火星探査によって、火星の固体部分における水の存在形態のイメージも変わってきた。Mars Express の赤外分光や地下レーダー探査により極冠の大部分がドライアイスではなく水の氷であることがわかり[3]、Mars Odyssey の中性子分光により高緯度帯の地下に大量の水が(おそらく凍土として)存在することも判明した[4]。さながら凍りついた水惑星とでも言うべきである。凍土の分布は同じ緯度帯においても地理的な不均一が大きく、また本来は氷が不安定なはずの中・低緯度にも凍土(あるいは吸着水・水和鉱物)が分布する地域がある。Mars Reconnaissance Orbiter の地下レーダーは中緯度帯でいくつもの氷河が堆積層に埋もれていることを見出した[5]。これらの観測事実は、自転傾斜角や軌道要素が十万~百万年の時間スケールで変動することを考えると[6]、固体部分が現在の気候との平衡状態に完全には達しておらず、湿度や温度が現在と異なっていた時代の履歴をとどめていること、そして大気力学に起因する気候の地域性が固体部分に影響していることを示唆する[7]。Mars Global Surveyor の可視撮像により、ごく最近にも局所的に水が溢れ出る現象があったことが示唆されているが[8]、このことは火星の固体部分が少なくとも部分的には活動的であり、水の存在形態が固体状態に限らないことを意味する。観測される水蒸気の変動にはそのような地下の活動も反映されているかもしれない。

2. 次なる火星環境探査

このような現代の火星環境像から導かれる次なる火星環境探査は、火星気候が長期的にどのようなバランスにあり、水の存在形態や大気中の水蒸気量がどのようにして決まるのかを、全球的

な水蒸気の振る舞いから探るといふものである。大気とレゴリス・極冠間の水蒸気の入出力とその地域性、傾圧波・ハドレー循環・局地擾乱による水蒸気の輸送、高・低緯度間あるいは南北半球間の正味水蒸気輸送による地下水の再配置、などを具体的な研究課題とする。凍土分布の長期変動に伴う1年あたりの水の移動量は大気中の水蒸気総量と同程度という予想もあり、水蒸気輸送による水の移動は1年のサイクルの中で閉じていない可能性がある[9]。このような水循環のメカニズムを解明するために、風速場や大気温度場や大気ダストの挙動を同時に観測して大気力学を解明していく必要があることは、言うまでもない。大気ダストの量はどのように決まるのか、子午面循環の構造はどう決まるのか、大ダストストームをトリガーするものは何なのかなど、解決すべき課題は多い。ダストは氷晶雲の凝結核となり、放射場の変化や氷晶の沈降を介して水循環と相互作用していることも考えられる。

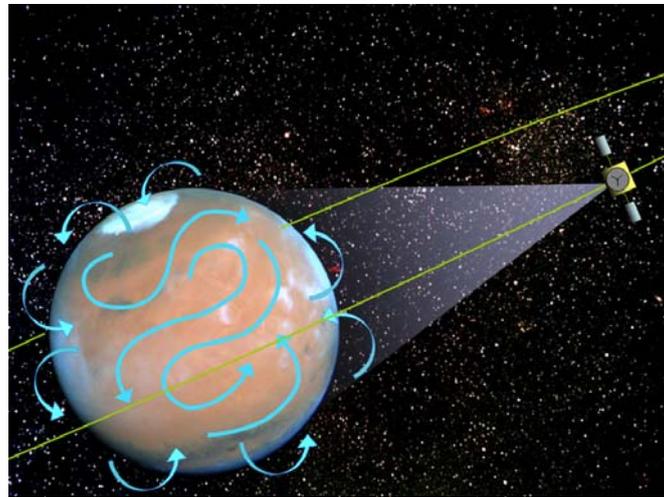


図1 火星表層の水循環や大気力学を調べる火星気象衛星のイメージ。(火星画像は NASA 提供)

研究対象が全球規模の現象であるため、周回機からの遠隔観測が威力を発揮する。候補となる軌道は、近火点高度が数百 km、遠火点高度が数万 km の楕円軌道である。このような軌道上の高高度からの高解像度全球観測により、水蒸気をはじめ雲・ダスト・気温の連続マッピングを行い、大気・地殻間の水循環とその力学メカニズムを調べる(図 1)。これまでの火星探査でも Mars Global Surveyor の赤外放射計を筆頭に様々な大気観測が行われたが[10]、広範囲を同時に見渡す連続的なマッピングは行われておらず、それゆえに火星表面に数十~千 km の規模で広がった現象の時間変化を追うことはできなかった。初の精細な水蒸気マッピングにより、季節進行に伴って水蒸気が火星表面のどこで湧き出し、大気中の波動や渦によってどのように長距離輸送され、どこに吸い込まれていくのかといったことが手に取るようにわかるだろう。10 km スケールの雲塊やダスト塊の運動を追跡して得られる初の全球風速データは、地球型惑星の気象学の詳細な比較論に道を拓き、また様々な未知の気象現象の発見をもたらすにちがいない。これは 2010 年に打ち上げられる金星気象衛星 PLANET-C による濃密大気の研究と対をなすものである[11]。観測装置としては、赤外~紫外の 2 次元検出器とフィルター分光による PLANET-C の撮像装置を基礎に置きつつも、水蒸気の吸収線と地表鉱物の分光特性を区別するために細かな分光情報を得る

必要もあることから[12]，回折格子や音響光学素子によるスペクトル取得機能を組み込むことを検討している．なお，地上や軌道上の望遠鏡は，観測波長や観測時期について相補的なデータをもたらさるものの，上記のシナリオで必要となる空間分解能と波長分解能を両立することは現実的でない．

3. 新たな観測装置

上に述べた高解像度の分光撮像と並ぶもう一つの柱は，サブミリ波サウンダー(分光器)により水蒸気や CO，水酸化ラジカル($\text{HO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}_2$)などの大気組成，同位体比($\text{HDO}/\text{H}_2\text{O}$ 比)，気温の3次元分布を同時にとらえることである．高高度から広範囲を見渡せるときには水平分布をマッピングし，近火点付近ではリム観測により高度分布をとらえる．リム観測では輝線のドップラー計測による風速導出も行う． $\text{HO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}_2 \cdot \text{CO}$ の同時観測は CO から CO_2 への酸化による大気安定化システムや CH_4 消失への知見を与える． $\text{HDO}/\text{H}_2\text{O}$ 比は水の相変化の履歴を反映するとともに，場所により異なるかもしれないリザーバーの $\text{HDO}/\text{H}_2\text{O}$ 比も引き継ぐであろう．リザーバーの $\text{HDO}/\text{H}_2\text{O}$ 比は，それが形成された年代や過程を制約する．火星大気の $\text{HDO}/\text{H}_2\text{O}$ 比は場所や季節により大きく変化することが地上観測から報告されており[13]，近傍での詳細なマッピングが豊かな科学を拓くことを予感させる．ハドレー循環の上側および下側の流れの水蒸気濃度がわかれば，南北間の正味輸送量の評価が可能となる．上層大気の水蒸気濃度と $\text{HDO}/\text{H}_2\text{O}$ 比の計測は，水の散逸効率や同位体分別効果の参考情報となる．観測装置は，成層圏大気化学の研究を目的とする国際宇宙ステーション搭載超伝導サブミリ波サウンダ SMILES(2009年9月打ち上げ予定)[14,15]などの実績をベースに，ドイツ Max-Planck 研究所など海外チームとの協力のもとに開発する予定である．

これら周回機からの観測と並行して，周回機では観測困難な地面近くの乱流や水蒸気輸送を着陸機搭載の気象測器で観測することも考えられる．大気ダストの浮遊に寄与しているかもしれない鉛直電場の計測や，ダスト嵐にともなって発生するかもしれない雷放電を電磁場計測によりとらえることも意義が大きい[16]．大気電気観測データは地球以外の惑星ではほとんど得られておらず，実現すれば新たな研究分野の創出につながるだろう．

4. おわりに

この火星気象観測構想は，PLANET-C で経験を蓄積してきた惑星気象探査グループと地球観測で経験を積んだサブミリ波観測グループが団結し，満を持して提案するものである．必要な技術はほぼ手中にある．あとは，この構想を世界に先駆けて実行に移し，火星の水循環に関する今後の研究を我々がリードしていきたいと考えている．

参考文献

- [1] Jakosky, B. M., and Haberle, R. M., 1992, in Mars (Univ. Arizona Press), 969.
- [2] Clancy, R. T., and Nair, H., 1996, J. Geophys. Res. 101, 12785

- [3] Bibring, J. P., et al., 2004, *Nature* 428, 630.
- [4] Feldman, W. C., et al., 2004, *J. Geophys. Res.* 109, E09006, doi:10.1029/2003JE002160.
- [5] Holt, J. W., et al., 2008, *Science* 322, 1235.
- [6] Ward, W. R., 1992, in *Mars* (Univ. Arizona Press), 298.
- [7] Feldman, W. C., 2005, *J. Geophys. Res.* 110, E11009, doi:10.1029/2005JE002452.
- [8] Malin, M. C., and Edgett, K. S., 2000, *Science* 288, 2330.
- [9] Schorghofer, N., and Aharonson, O., 2005, *J. Geophys. Res.* 110, E05003, doi:10.1029/2004JE002350.
- [10] Smith, M. D., 2004, *Icarus* 167, 148.
- [11] Nakamura, M., et al., 2007, *Planet. Space Sci.* 55, 1831.
- [12] Melchiorri, R., et al., 2007, *Planet. Space Sci.* 55, 333.
- [13] Fisher, D., et al., 2008, *J. Geophys. Res.* 113, E00A15, doi:10.1029/2007JE002972.
- [14] Inatani, J., et al., 2000, *Proc. SPIE* 4152, 243.
- [15] Kasai, Y. J., et al., 2006, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 44(3), 676.
- [16] Cummer, S. A., and Farrell, W. M., 1999, *J. Geophys. Res.* 104, 14149.