

1. はじめに～水蒸気観測の狙い

火星の表面では限られた場所や季節を除いて水は液体では存在できないが、様々な形で地表にとらえられた氷と大気中の水蒸気との間での相変化が起こり、このことが表層の水の循環をもたらしている。火星の地表面や地下における水の分布は、岩石の風化や鉱物組成、ひいては生命の存在可能性にも関わる問題である。また大気と地表の間の水の交換は、地表面の空隙率などの物理状態や、水のリザーバーの分布、気候変動に伴う氷の再配置、地下の火成活動の情報を有する。大気中の水蒸気量がどのように決まるのかという問題は、大気から宇宙空間へ水が失われる効率がどう決まるかという問題に直結する。

これらの観点から、大気中の水蒸気輸送が様々な時間・空間スケールでどのように表層の水循環に関わっているかを知ることが、火星気候システムとその変動性を理解するための重要課題である。しかしこれまでのところ広範囲の水蒸気分布を高い時間・空間分解能でモニターし続けるような観測は行われておらず、そのために理解が滞っている。MELOS 気象オービターの水蒸気観測はここに突破口を開こうとするものである。

2. 火星の水循環

近年の観測で明らかにされた火星の水の挙動とそこから導かれる問題意識を以下に述べる。

2.1 水蒸気の季節変化

大気中の水蒸気は春～夏期の極域で顕著に増加し（図 1）、一部は低緯度にも運ばれるらしい。南北半球間の輸送については、1 年間の積分で正味の水の移動があるかどうか、そもそも赤道を越える水蒸気の移動がどの程度起こるのかといった積年の問題が解かれていない。赤道を越えるハドレー循環とそこでの水の相変化が鍵を握ると考えられている。夏期極域で増える水蒸気の多くは極冠から供給されると思われるが、周辺の土壌の空隙にとらえられた氷や地表の霜も寄与していると予想される。

夏期に増加する水蒸気量は南半球に比べて北半球で遙かに多い。このこと自体は、火星の軌道離心率が大きいことと、標高が南北半球で大きく異なることによる気候の南北非対称から説明されている。しかし少ないながら南半球に水が保持されていることの説明は容易でない。多くの数値モデルでは、人為的に南極冠に残存 CO₂ 氷を置くことによって南極冠に H₂O 氷を保持する。

夏期も消えない残存 CO₂ 極冠が南極にあることは、エネルギーバランスモデルからは説明しがたいこととされており、それを裏付けるように、この残存 CO₂ 極冠が年々縮小していることがわかっていく。この縮小の時間スケール（100 年のオーダーらしい）は 10 万年スケールの自転傾斜角変化や 2 万年周期の近日点移動よりも遙かに短く、火星気候に未知の変動が内在することを示唆している。

CO₂ 極冠の縮退は、CO₂ 氷に混じっている、あるいはその下にある水氷の再配置を引き起こしているはずである。夏期に南極冠から水蒸気がどのように発生し、どのように他の地域に運び去られるのかをとらえることにより、南極冠が大気とどのようなエネルギーバランスにあるのか、手がかりが得られるかもしれない。どの程度の水蒸気が夏期の残存極冠から発生しているかはわかっていないが、仮に厚さ 1m の水氷が残存南極冠の下にあり、これが 1000 年で失われるときの水蒸気発生量を南緯 80° 以南に分布させると、100 pr- μ m ものコラム量となる。

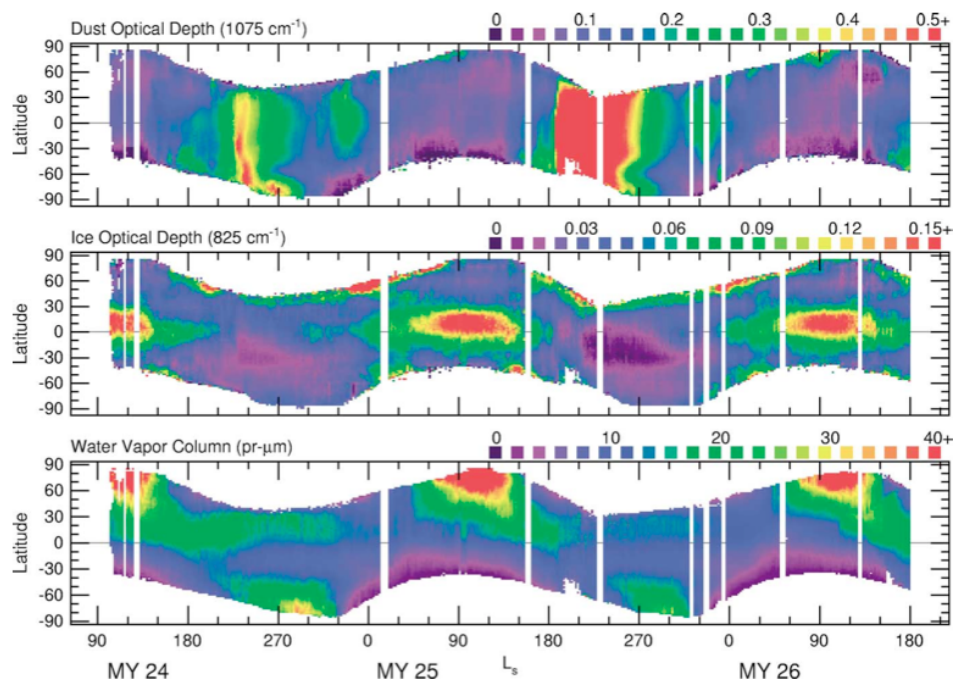


図1 MGS/TESによるダスト、雲、水蒸気の緯度分布の季節/年変動
(Smith et al., Icarus 167 (2004) 148–165)

2.2 水蒸気の微細構造

火星の大気と地表間の水交換において、どれほど細かなスケールまで本質的と言えるだろうか。ひとつの手がかりが Mars Express 搭載 OMEGA により与えられた。OMEGA は鉱物組成のマッピングを主目的とする可視・近赤外分光撮像装置であるが、最近になって $2.6\mu\text{m}$ の水蒸気吸収帯を用いた水蒸気のマッピングの結果が報告されている。衛星直下を見る狭視野の観測であるために個々のデータは細長い短冊状であり、広範囲の同時マッピングや同一地域の時間変化の追跡はできないが、個々の短冊の中には驚くべき微細構造が映し出されている (図 2)。また、軌道が交差する極域では、10 日間程度のデータの重ね合わせにより極冠周辺の水蒸気分布が得られている。南極周辺の観測結果からは、微細な構造が朝方に多く午後には一様化する傾向があること、蛇状の水蒸気分布がよく見られておりこれらは地表のアルベドの境界に沿う傾向があること、などが報告されている (図 3)。

地球の水蒸気画像においてこのような微細構造があまり見られないのはなぜだろうか。同じ極域でも、バックグラウンドの可降水量が地球では mm のオーダー、火星では μm のオーダーであり、これはおそらく気温の違いを反映している。一方、地表温度の日変化に伴う水蒸気の凝結・蒸発量は太陽から地表にもたらされるエネルギー量で制限されると予想され、これは 1 桁も変わらない。このため、地球に比べて火星のほうがバックグラウンドに対する日変化量が相対的に遙かに大きく、日変化サイクルの中で生じる細かい構造が卓越しやすいと思われる。地球では見たくとも見ることができない、地表と大気の水蒸気交換の素過程を、火星では軌道上からつぶさに観察することができるのかもしれない。

これら水蒸気の微細構造は数 km かそれ以下の空間スケールまで存在するようである。これらの構造に伴うコラム量の振幅はこの時期この緯度帯の平均的な水蒸気コラム量に匹敵する。つまり大局的な水蒸気の挙動を実際に担っているのがこういったスケールの現象であると言えるかもしれない。しかしそれに関わらず、これらの特徴の物理的解釈はほとんどなされていない。サンプリングの制限から、微細構造が地質単位の不均一に由来するのか、メソスケールの大気運動の帰結なのか、どこか別の場所で作られた構造が流されてきたのか、区別する手立てがない。OMEGA はただ、新たな問題を提起したと言うべきである。

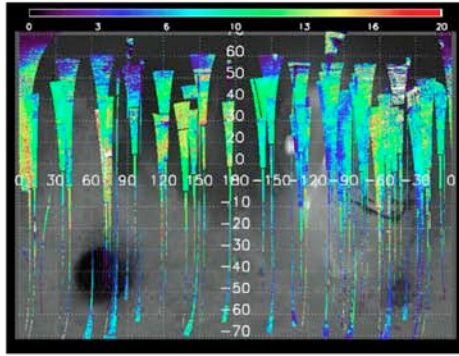


Fig. 6. A map of the H₂O column density for Ls = 330-40° (orbits 6-520), as a function of latitude and longitude.

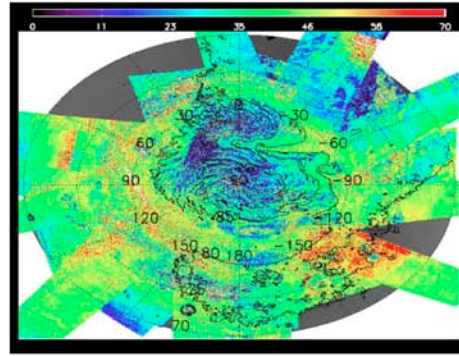


Fig. 9. H₂O column density at high northern latitudes for Ls = 106-110°. The maximum column density is 70 pr-μm.

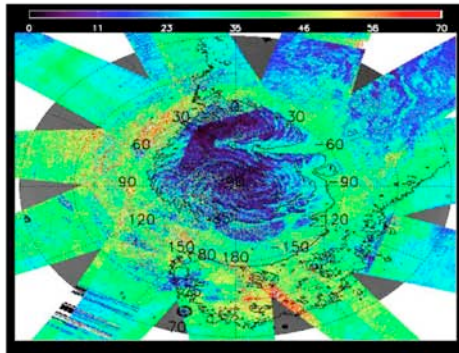


Fig. 7. H₂O column density at high northern latitudes for Ls = 93-100°. The maximum column density is 70 pr-μm.

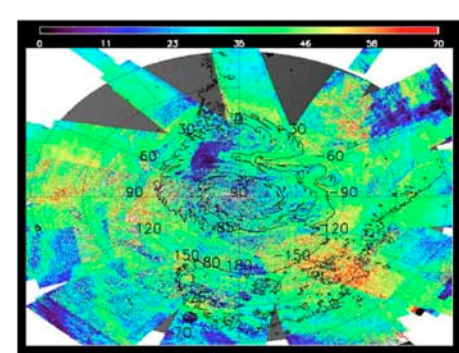


Fig. 10. H₂O column density at high northern latitudes for Ls = 111-115°. The maximum column density is 70 pr-μm.

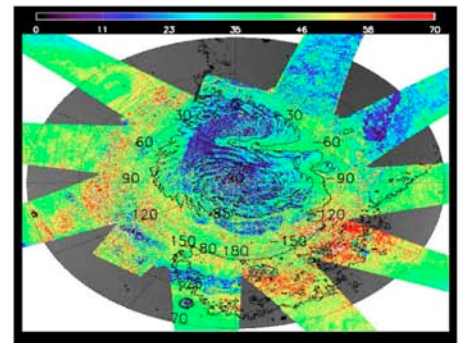


Fig. 8. H₂O column density at high northern latitudes for Ls = 101-105°. The maximum column density is 70 pr-μm.

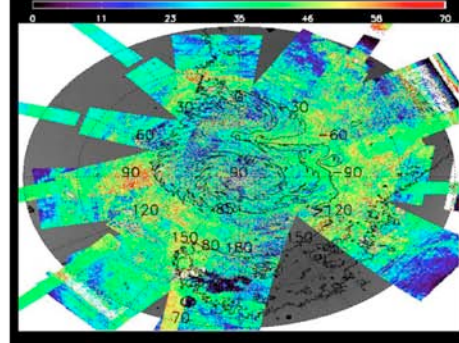


Fig. 11. H₂O column density at high northern latitudes for Ls = 116-120°. The maximum column density is 70 pr-μm.

図2 MEX/OMEGAによる水蒸気マッピングの例 (Melchiorri et al., PSS 55 (2007) 333-342)

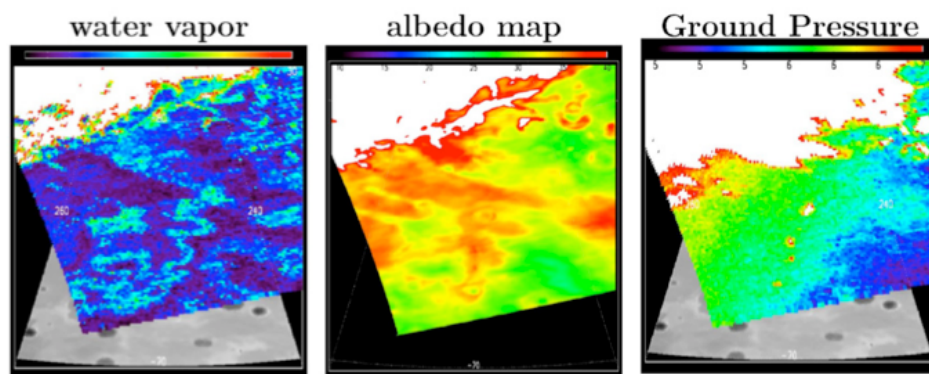


図3 OMEGAによる南極周辺の水蒸気マッピングと同時に得られたアルベドと地表気圧 (Melchiorri et al., Icarus 201 (2009) 102-112)

2.3 地下水の分布

Mars Odyssey の中性子分光により、高緯度帯を中心に地下に大量の水が、おそらく凍土として存在することが判ってきている（図 4）。その大局的な緯度分布は大気中の水蒸気との平衡状態で説明できるとされている。しかし凍土の分布には、従来の理論モデルには含まれない東西の不均一や、現在の気候のもとでは氷が不安定と考えられてきた低緯度における相当量の存在が見られる。これらが現在の気候における局地気象の影響で説明できるのか、あるいは現在と異なる気候のもとに作られたものが徐々に変化しながらも保持されているのかという問題は解決していない。後者の場合、自転傾斜角の大きな時代には極域の温度が上がるため全球的に湿度が高く、低緯度まで氷床が発達していた、というのが一つのシナリオである。水蒸気がこれら凍土地帯で顕著に多いのかどうか、そこにどのように運び込まれるのか、地表温度の日サイクル・季節サイクルが地下水をどの程度不安定化するのかといった情報が、これら地下水の分布を理解する鍵となるだろう。

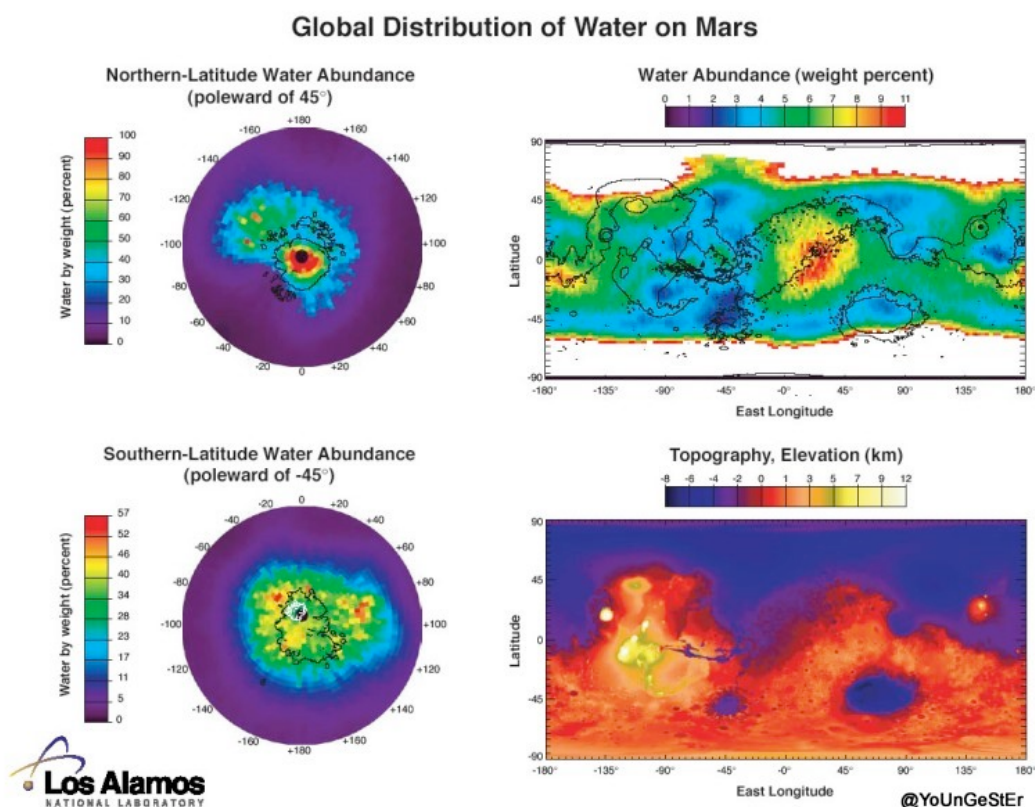


図 4 Mars Odyssey 中性子分光による地下水分布
(<http://www.astrobio.net/pressrelease/377/martian-water-water-everywhere>)

2.4 新しい浸食地形

南半球の中高緯度にはガリーと呼ばれる浸食地形が多く見つかり、その中には現在の気候のもとに作られたと考えて差し支えない比較的新しいものも含まれる（図 5）。これらの成因として、地下水の供給や埋もれていた氷河の融解などが候補に挙げられている。いずれにせよ、これらは大気と緩く相互作用する不安定な凍土の存在を示唆している。そのような水のリザーバーは他にも多く存在し、水の湧出に至るものはごく一部であることが考えられる。高解像度の水蒸気データがあれば、そのような隠されたリザーバーの分布を水蒸気の挙動から検出できる可能性がある。

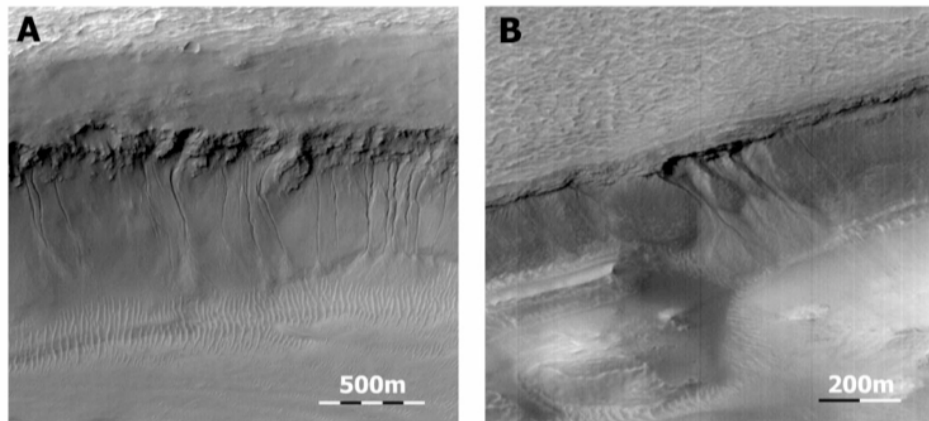


図5 ガリーと呼ばれる浸食地形 (Mellon and Phillips, JGR 106, 1–15, 2001)

3. 観測提案

3.1 考え方

近年の火星探査により火星の地質の多様性を示すデータは飛躍的に増え、このことが上記のような氷の存在形態に関する新たな謎を提起している。その一方で、大気側の水つまり水蒸気に関する情報は OMEGA の先駆的試みを除いて空間分解能が圧倒的に劣っており、そのために水輸送を担う個々の気象プロセスを解き明かすというアプローチはなされなかった。水蒸気輸送は本質的に 3 次元的存在であるが、水蒸気の 3 次元分布をとらえるデータもほとんど存在しない。このような水蒸気観測データの欠落が水循環の理解を妨げてきたと考えられる。これまでの火星水蒸気観測の多くは極軌道の低高度衛星からのリモートセンシングによるものであり、そのためサンプリングが東西方向にまばらであることが問題である。2016年に予定される ESA と NASA による Trace Gas Orbiter も、低軌道衛星であることから同じ制約がある。

今後の火星水循環研究では次の観測を実現するリモートセンシング周回機が必要であると考えられる。

- ・ グローバルかつそこそこ高解像度の連続的な水蒸気マッピング
- ・ 地表と相互作用する境界層と長距離輸送を担う自由対流圏を分離する 3 次元観測
- ・ 水蒸気の挙動を解読するための同時取得気象データ

高解像度の水蒸気観測が必須となるのは、微細構造が卓越すると考えられる境界層であり、とくに水蒸気の昇華の空間構造を見るために最低限日照側をカバーする必要がある。

3.2 観測装置と観測戦略

上述の水循環研究のために以下の観測装置の組み合わせを提案する。

- ・ 水蒸気の水平分布と地表の霜や氷を太陽散乱光の分光によってとらえる近赤外分光撮像
- ・ 水蒸気と同位体比 (D/H 比) と気温の 3 次元分布を熱放射分光によってとらえるサブミリ波サウンダー
- ・ 地表温度と大気温度を高解像度でマッピングする中間赤外カメラ
- ・ 雲やダストのマッピングと雲追跡風ベクトル取得のための可視カメラ
- ・ 気温の鉛直分布を高い鉛直分解能でとらえる電波掩蔽

近赤外分光撮像では OMEGA による水蒸気定量に用いられた $2.6\mu\text{m}$ 帯水蒸気吸収 (図 6) を中心に近赤外域を広くカバーし、水蒸気コラム量、CO₂ コラム量 (地表気圧)、H₂O 氷、CO₂ 氷を同時に観測できるようにする。

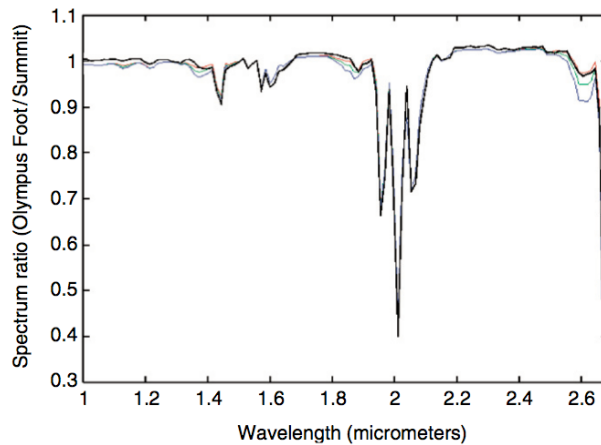


図 6 OMEGA による火星の近赤外スペクトルとシミュレーションとの比較。赤・緑・青の線が分離している部分が水蒸気吸収帯で、それぞれ水蒸気混合比を 150, 300, 600 ppm として計算したもの。(Melchiorri et al., PSS 55 (2007) 333–342)

近赤外分光撮像とサブミリ波サウンダーは水蒸気観測にとって相補的である。境界層（厚さ数キロとされる）は少なくとも数キロの水平解像度で分解する必要がある、近赤外分光撮像ではそれが可能であるが、一方で高度分解は難しい。サブミリ波サウンダーは高度分解が可能であるが、アンテナの大きさやサンプリングにかかる時間の制約から水平解像度は低くなる。そこで一つの方法として、近赤外分光撮像による高水平解像度の鉛直コラム量からサブミリ波サウンダーによる自由対流圏成分を差し引き、高解像度で境界層成分を得ることを提案する。自由対流圏での水蒸気分布はおそらく境界層での分布よりも滑らかであり、低解像度のものを差し引くことが許容されるだろう。サブミリ波サウンダーはまた、水の相変化に伴って大きく変化すると考えられる大気中の水蒸気の D/H 比の情報をもたらし、大気と地表間の水交換過程を制約する。

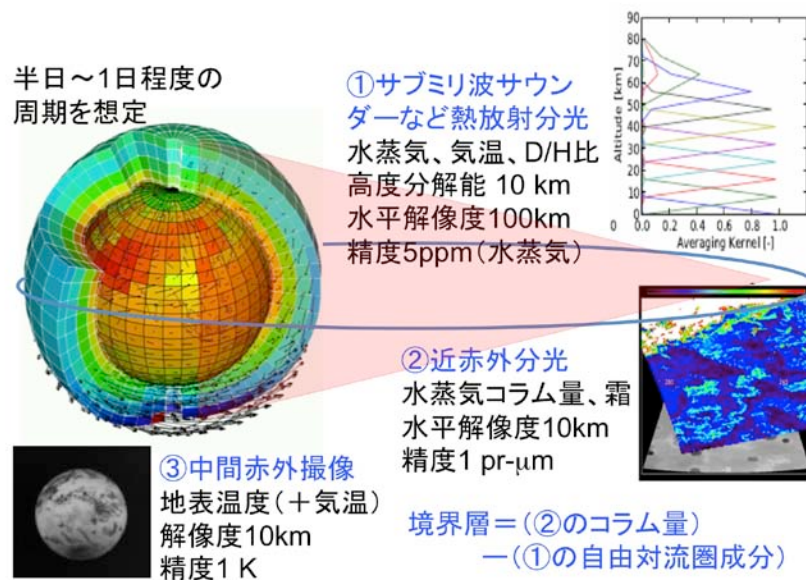


図 7 3次元火星大気観測のイメージ

これらを火星周回長楕円軌道上の遠火点側で、広域を視野に入れながら継続的に運用し、グローバルな 3 次元水蒸気・気象データセットを構築する（図 7）。また近火点側ではリム視の観測により、ハドレー循環に伴う水蒸気輸送の高度分布を精密にとらえる。リム観測の場所は軌道によって

限定されるが、それが低緯度の場合、春や秋には赤道域の低高度を起源とする大気を、夏や冬には夏半球の低高度を起源とする大気を調べることになる。このようなデータセットを用いて、水蒸気の湧き出し・輸送・地面への消失を個々の気象プロセスと結びつけて解釈するというアプローチを世界に先駆けて実現し、極冠・土壌の空隙・霜といった水のリザーバーがそれぞれ水蒸気の日変化や季節サイクルにおいてどのような役割を担っているのか、南北半球間などの広域の水の移動がどう決まっているのかといった問題に答える。

水蒸気の微細構造の連続観測は大気-地表間の水交換を鮮明に映し出すだろう。たとえば、朝から午後にかけての水蒸気の微細構造の発達と一様化というサイクル（図 8）から、春～夏期の日々の水蒸気の湧き出しを読み取れるかもしれない。ここで Mars Global Surveyor や Mars Odyssey による熱放射観測から求められた熱慣性分布と比較することにより、砂礫や岩盤といった物理状態の違いと水のリザーバー機能の関係について、初めて実証的な研究が可能となるだろう。ダストに覆い隠されて他の手段では見いだされていない水のリザーバーが発見されることも期待できる。OMEGA がとらえた朝側の蛇状の水蒸気分布はそのようなものであるかもしれない。水蒸気観測と通じて、火星の地質構造の多様性の新たな側面に光を当てることができるだろう。

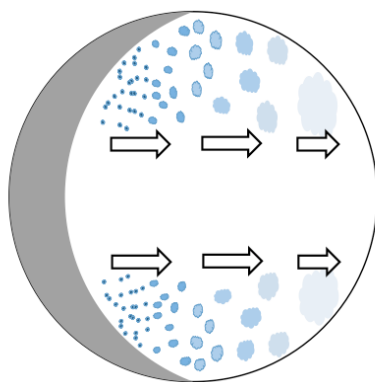


図 8 朝方から午後にかけての水蒸気の空間構造の変化の予想

3.3 大気運動のトレーサーとしての水蒸気

水蒸気の混合比は平均的には低高度ほど高いと考えられ、またその化学的寿命は多くの気象プロセスよりも長いため、水蒸気の水平分布は鉛直流の分布を強く反映することが期待される。このことを利用して、水蒸気をトレーサーとして利用する大気力学の研究が可能となる。

水蒸気の水平微細構造の日変化には境界層内の鉛直対流や局地循環が強く反映されると期待される。たとえば図 9 のように、上昇流の場所で水蒸気コラム量が大きくなることが考えられる。朝方に境界層内の対流細胞に起因する微細構造が現れ、それらが午後にかけて一様化し霧散していく—そのような観察から対流の空間構造、持続時間、水平拡散などの情報を読み取り、地表温度や大気温度の情報と合わせて解説する。

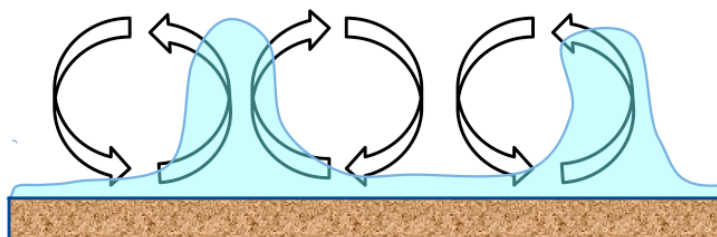


図 9 境界層の対流による水蒸気の輸送

より大きなスケールでは移動性高・低気圧やハドレー循環に伴う鉛直流を反映した水蒸気コラム量の変動が見られるだろう（図 10）。たとえば前線の波打ち、発達、閉塞、といった傾圧波のライフサイクルを読み取れるかもしれない。極域と低緯度との間の水蒸気交換は傾圧波に伴う南北移流によって決まることも考えられ、このような研究は水循環の理解にも直結する。

細かな水蒸気のパターンを追跡することにより晴天域も含め全球的に風速ベクトル分布が得られることにも期待する。ダストや雲の追跡では全球をカバーすることは難しい。火星ではこれまでのところ風速データがほとんど得られておらず、数値シミュレーションをもとにした大気大循環のイメージがどれほど正しいのか確証がない。水蒸気追跡風は火星気象学を変えるインパクトを持つ可能性がある。

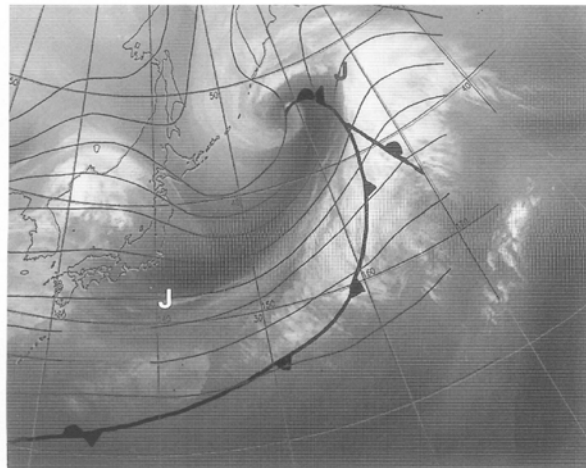


図 10 地球の水蒸気画像