

火星大気オービター計画

佐藤毅彦、鈴木睦、今村剛 (JAXA/ISAS)、上野宗孝 (東京大・教養)

イントロダクション: 「火星」とその気象

火星は、その大きさ(半径)では地球の半分程度であり、地球とほぼ同じ大きさを持ち「双子惑星」と称される金星に比べれば、違いの著しい惑星であるように思われる。しかしその一方、自転周期が地球のそれと近い(対恒星 24 時間 37 分)、自転軸の傾きが似ている(25°)など類似点も多くあり、また古くから生命存在の可能性が研究されるなど「地球に似た惑星」のイメージを有してきた。望遠鏡で見られた「神秘の」運河模様はその人工性を否定されたが、代わって、過去に水が流れてきたと考えられる「峡谷」地形が存在するなど、今ではより現実的な生命探しが続けられている。地球・金星・火星はまさに三兄弟と呼ぶにふさわしい存在である(図1)。



図1: 地球型惑星の三兄弟。左から金星、地球、火星。画像中の大きさは、実際の比率になっている。

これら三つの惑星には、各々、独自の気象現象が展開している。地球は、その温度・圧力が水の三重点(液相・固相・気相で存在できる点)に近く、水のもつ大きな潜熱が重要な役割を担う、まさに「水惑星の」気象が展開している。金星は、固体部分は遅い自転(しかも地球・火星とは逆向き)をもちながら、大気は固体地面の60倍の速さで巡る「超回転」を特徴とする。この「暴風型」気象は、同じくゆっくりした自転周期のタイタン(土星の衛星)にも共通の現象であるが、そのメカニズムはまだ解き明かされていない。本稿の主題である火星気象については、次章以降で詳細を述べよう。

地球・金星・火星の三兄弟にまったく異なる気象が存在する、これは天然の博物館であり、偉大

な実験室であると言えよう。金星と火星に織り成す気象現象を観測し、地球のそれと合わせ、それらの間の共通点・相違点を理解する「比較惑星気象学」は、我々がもっている地球大気の力学についての理解をより根源的な部分で深めるものとなる。我々は PLANET-C (2010 年夏に打ち上げ)により金星大気の「超回転」をはじめとするさまざまな大気運動を観測し、地球のそれと同列に論じられる惑星気象学の開拓を目指している。本稿で述べる火星大気オービター計画も、その延長線上に位置するものである。地球・金星・火星というパラメータの異なる三つのケースを理解することで、地球型惑星の気象学を「完成」させることができよう。

ここで、火星気象の特徴について簡単に述べよう。火星には海洋がないから、それだけ大気力学は地球の場合より単純化することができる。その一方で、地球大気にとっては(通常は)無視できるさまざまな事象が、火星大気の振る舞いを複雑なものとしている。代表的なものは、火星の公転

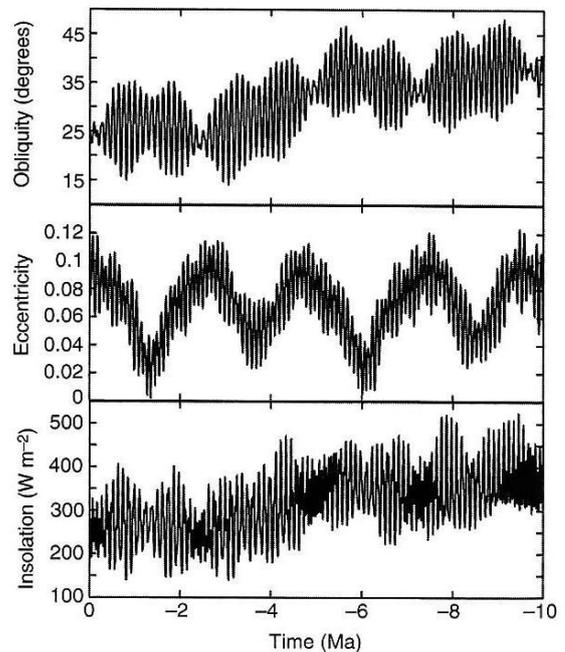


図2: 火星の自転軸傾き(上段)、軌道扁平率(中段)、太陽エネルギー入射量(下段)の長期変動シミュレーション。現在が左端で、右へ行くほど過去を表わす。(Laskar *et al.*, 2002)

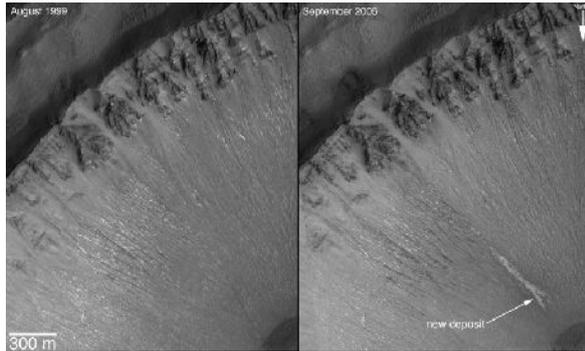


図 3 : MGS 搭載 MOC が捉えた火星面の変化。6 年後に撮影された画像 (右) に、白い条が新しく現われている。ダストのなだれという解釈もあり得るが、水が流れ出した痕跡という解釈する研究者が多い。(MOC image MOC2-1619, NASA/JPL/MSSS)

軌道がもつ大きな扁平率であろう。火星の近日点距離は 1.381AU、遠日点距離は 1.666AU で、これにより太陽から受け取るエネルギー量が年間を通じて 1.45 倍と、地球の場合よりも大きく変化することになる。また近日点が南半球の「真夏」に近い(軌道上で 20° 手前)ことも、その気象の振幅の拡大に一役買っているといえる。自転軸の傾きが安定していないことも、長期にわたっては気候変動をもたらす(地球の場合は、惑星に比して異常に大きな衛星である「月」を従えていることで、自転軸が安定化されているのである)。軌道扁平率や自転軸の長期変動モデルによれば、現在は軌道扁平率は大きい時期、自転軸は比較的安定している時期に当たるとされる(図 2; Laskar *et al.*, 2002)。火星に特有で、頻発する大小の砂嵐は、上層大気に対しては太陽エネルギーの吸収と再放射過程により大気を温め、下層大気に対しては、地表へ達する太陽エネルギーを遮ることから、それを冷やす効果をもたらす。火星大気循環の駆動源はもちろん太陽エネルギー(図 2 最下段)であるが、それに次いで、大気と季節極冠の間で昇華・凝結過程を通じてやり取りされる CO₂ と H₂O のサイクルが大きな影響をもつ (James *et al.*, 1992; Jakosky and Haberle, 1992)。

変貌する火星のイメージ：凍りついた水惑星

上で述べたように、火星大気の世界構造はダストの分布(地面から巻き上げられ、大気中を浮遊する)に大きな影響を受ける。その大砂嵐は火星全球を覆うほどの規模に発達し、乾燥した惑星ゆ

えの特徴的な現象として古くから観測されてきた。実際、火星大気中に存在するすべての水蒸気(これらは高山周辺や、明け方のリムなどで白雲となり、観測される)が凝結して地面に降り注いだとしても、わずか 0.01mm の降水量にしかならない。

このような「乾燥した惑星」のイメージはしかし、近年の探査機の活躍により一変してきた。すなわち、火星はその地下に大量の水を有し、また古くからドライアイスと信じられてきた極冠はその大部分が実は水の氷であることも判明してきた。さらに、探査機から得られた同一地域の画像(図 3: 6 年隔てている)に新しく水の流れた痕跡が発見されるなど、火星は「凍りついた水惑星」というその新しい素顔を見せてきたのである。極冠やその周囲の堆積物中の水は、全球に広げた場合 30m の水深になると言われるが、それでも火星の至るところに見られる流水由来の地形を説明する(水深 400m が必要とされる; Carr, 1996)には足りない。大部分の水は、全球にわたる「地下氷床」として貯蔵されていると、現在では考えられている。この仮説は、はじめ地形の観察から提唱されたが、Odyssey 搭載 GRS 装置の中性子分光により、地表直下(数 m 程度)については、その直接の証拠が得られるようになった(図 4; Boynton *et al.*, 2002; Feldman *et al.*, 2002, 2004a; Mitrofanov *et al.*, 2002)。宇宙線が火星地面に降り注ぐことで、そこに中性子が発生する。このとき中性子のエネルギー範囲により水素および CO₂ に吸収される強度が異なることを利用して、地表付近の H₂O (正確には「水に等価な水素量」)分布マップを描くことができるのである (Feldman *et al.*, 2002, 2004a)。

得られたマップ(図 4)には、およそ ±60° より高緯度の極域に豊富な水があることが示されている。高緯度地域では、地面からの水の蒸発とその反対の凍結とがバランスできる地面含水量の大きいことがモデルから予測され (Mellon *et al.*, 2004)、それと矛盾しない結果となっている。また、観測される「永久凍土」地形とも一致している。赤道付近に二ヶ所(一つはアラビア、もう一つはエリシウム～タルシス境界の南に位置する高地)、含水量 8% と高い値を示す地域がある。これらの成因は、含水鉱物によるものか、あるいは過去の大気との相互作用により得た氷の残存物であると考えられる。GRS は火星地面のうち地表近いただか数 m について H₂O 情報を与えたに

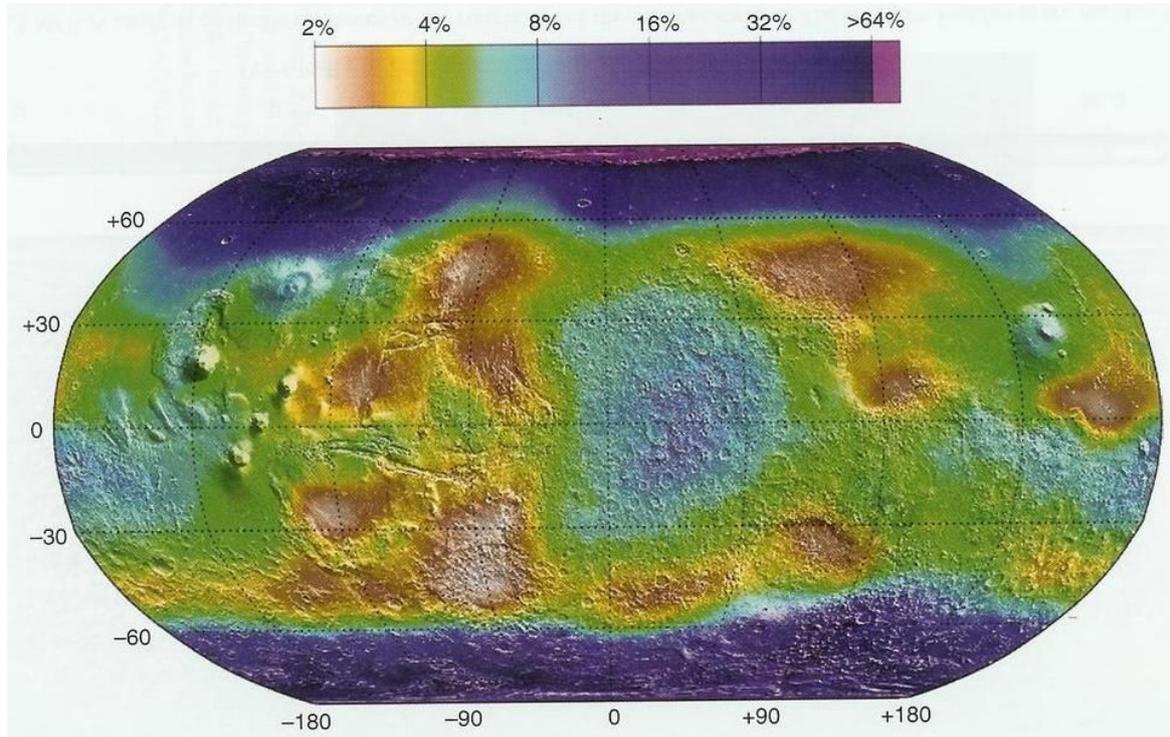


図 4 : Odyssey 搭載 GRS の中性子分光観測による火星地表面の H₂O 分布。実際に観測されるのは水素による中性子吸収であるため、Water Equivalent Hydrogen と呼ばれる量（おおむね水の分布を示すと考えられている）である。±60° より極側で多量の水がある他、赤道付近にも 8% 程度の水を有する領域が見られる。これらが大気と平衡状態にあるのか、あるいは変遷する途中の姿を見ているのかは明らかになっていない。(NASA/MO-GRS/Los Alamos National Laboratory)

過ぎないが、モデルおよびインパクトクレータ周囲に見られる流水由来地形の形態学によれば氷を含む揮発物質の層は、極冠で～6.5 km、赤道付近でも～2.5 km の深さにおよぶと考えられている (Clifford, 1993)。

こうした火星のイメージの変貌（それはすなわち、我々の火星に対する理解の深化を意味する）は、新しい科学課題をもたらした。つまり、火星に「存在する」多量の水がその季節進行の中でどのように大気中に出てきて、輸送され、そしてどこに沈んでゆくのか、といった「水循環」の問題である。さらに、この水循環は 1 火星年で元に戻るのか戻らないのか、戻らないのだとしたら水の配置は過去～現在～未来にかけて、どのように変化してゆくのかという、惑星にとってそして生命にとって極めて本質的な問題を投げかける。

火星気象学への期待：動く水を追う

本稿の冒頭では火星気象学を、地球・金星のそ

れと合わせた「比較惑星気象学」という見地から位置づけた。しかしそれだけではなく、上記「水循環」の問題に取り組むために、火星気象学の理解は欠かせないものである。惑星全球にわたる気圧・温度・風速・湿度という「状態」分布とその時間変化を調べ、それをモデルにより説明してゆくの気象学である。これはまさに、水の出入りや輸送過程をとらえることになり、そのモデル化は究極的には、過去や未来の火星の姿を見せてくれることを意味する。

これまでの探査により、水が液体として短時間（37～70 火星日）であっても存在することのできる場所が 5 ヶ所知られている：アマゾニス、アラビア、エリシウム赤道から北緯 30° の範囲、およびヘラス、アルジレの衝突痕である (Haberle *et al.*, 2001)。しかし、これらの領域に実際に液体の水が存在するかどうかは未確認である。上で示した地表付近 H₂O 分布（GRS による中性子分光観測）とこれら地域との間には弱い相関しかないからである。一方、着陸機および探査車により明らかになった火星土の含む多量の塩分は、短期間で

あっても液体の水が存在したことを示唆している。火星の「今の」水循環の理解は、そうした過去の姿も明らかにしてくれるであろう。

火星の季節変化に伴う水の移動は、春・夏半球で季節極冠が昇華し H_2O 水蒸気を大気中に供給、それが赤道を越えて秋・冬半球に輸送され反対の極冠域で取り込まれることを大きな駆動源としている (Jakosky and Haberle, 1992; Houben *et al.*, 1997; Richardson and Wilson, 2002; ただし、その「流れ」の全貌は、後述するように捉えられないことがない)。大気中の水蒸気量は、緯度および季節によりファクター2 程度の変動を示す。極冠の融解に伴い春・夏半球で水蒸気が豊富となり、秋・冬半球では水蒸気が少なくなるというアンバランスが生じるが、レゴリスに水蒸気が吸着されたり解放されたりする作用により、いくぶんか緩和されると言われる。全球にわたる水蒸気分布の追跡によりレゴリスの水蒸気吸着の強度（つまりその表面の性質）も調べることができよう。

水は「閉じた」惑星内で再配置されるだけではない。高高度へ運ばれた水蒸気の一部は光解離を経て宇宙空間へ散逸、永久に失われてゆくであろう（あるいはその逆に、小さなスノーボールや彗星の衝突により供給されることもあるだろう）。この散逸レートを知るためには、大気の鉛直運動（ハドレイ循環セルなどによる）がどのように発達しているかといった三次元構造の知識が必要である。

提案：これまでと違う、火星気象学のためのミッション

そのような重要な火星気象学に対してしかし、我々が現在もっている知識は極めて限定的である。その大きな理由は、これまでの探査機の目的およびその軌道にある。これまでは主として生命や地質学への興味から「火星により近く」接近し、低高度の極軌道（太陽同期）から火星を精査しようというミッションが大半であった。一例として、火星の大気構造を観測した Mars Global Surveyor (MGS) も、ローカルタイム 2 時と 14 時に固定された極軌道を周回しながら衛星直下点を観測（つまり子午線方向へのスキャン）した。そして経度方向へは、火星自身の自転を利用し約 30° 間隔で全球をカバーしたのである。これにより惑星規模の構造は捉えられたものの、空間規模 2000km（赤

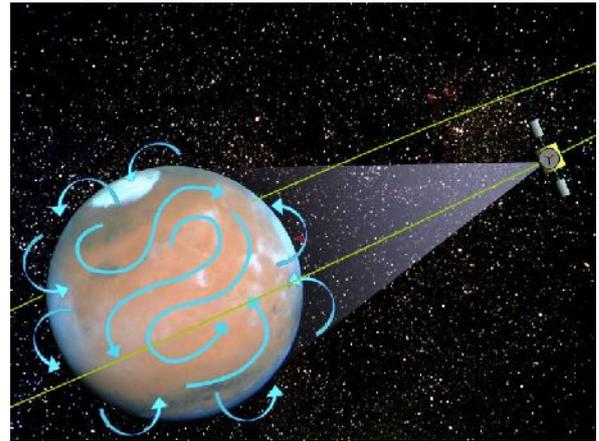


図 5：火星大気オービター。赤道面に近い長楕円軌道から、火星気象を連続的にモニターし、水循環の解明と比較惑星気象学の確立を目指す。

道での経度 30° 幅に相当) 以下の現象は見ることはできなかった。地球における温帯低気圧を思い浮かべれば、そのような重要な現象を逃していることは明らかである。もちろん、上で述べた「水循環」という重要問題に取り組むためには分解能が不足している。

水を含めた物質の移動を追跡するために、風速場を高い精度で知ることは不可欠であるが、火星においては風速測定そのものがなされたことがない。もちろんいくつかの着陸点で、その場の温度・圧力・風速などは計測されている。しかし、全球にわたる物質の移動を知るためにはカバレッジが不足しているし、そもそも地面に近い接地境界層における風は上空のそれとは異なっている。これら数点の（それも、決してその場の風を代表しているとはいえない）観測から、全球にわたる大気の三次元運動の構造を推し量るのには無理が多い。風速場と同様のことは、温度場についても言うことができる。ローカルタイムに固定された太陽同期極軌道からの観測では、 50°C にもおよぶ日較差をもつ火星の温度変化をその最大と最小付近で捉えることしかできない。例えば、地面の熱慣性が小さな地域は「熱大陸」と呼ばれ、そこでの大きな日較差が大気循環に大きな影響を及ぼすと考えられているものの、その実際の様子は捉えられていないのである。

以上のことを総合すると、新しいミッションの形が明確に見えてくる。科学目標は「水循環」と「比較惑星気象学」を柱とし、ミッションの形態はローカルタイムに固定されず、全球にわたる気

象要素（風速・温度・圧力・水蒸気量など）を連続的に捉えるリモートセンシング・オービターである。風速は画像中の雲などを追跡し測定し、温度は熱赤外線輝度の測定から得られる。水蒸気量は H_2O 吸収帯の撮像により得られ、圧力は電波掩蔽やサブミリ波領域での観測により測定することができる。こうした観測機能をもった衛星複数機を完全静止軌道（火星中心から6火星半径）の経度方向に配置し、地球の静止気象衛星ネットワークと同じものを組むことができれば、最大の成果が得られることは間違いない。実現性を考慮すればしかし、これを1機で行うことが現実解であろうし、鉛直方向に分解能をもった大気運動の三次元構造観測を行うためには、静止軌道の内側へ入り、惑星本体に接近してくる時間も必要と考えられる。したがって、金星に対する PLANET-C のような長楕円軌道（赤道面付近）を描き、遠火点付近では火星の自転に同期し、近火点を経て再び遠火点に戻ってきたときには、異なる位相の火星面を観測できるような軌道が好ましい（図5）。遠火点付近では静止気象衛星的な観測を行い、火星に近づいている間はリムを走査し、風速を含む大気の鉛直構造観測を行う。

これはまさに PLANET-C の火星版であり（同じ惑星気象学を科学目標とするのだから、ある意味で当然と言えるが）、観測装置も PLANET-C のものに小改良を加えることで実現できるものがほとんどである。仮に名称を PLANET-D として、その搭載機器の基本ラインナップは、

- ・ 風速やダストの測定：IR1 カメラをベースに、青色波長では雲、赤色波長ではダストをとらえ、それらの追跡により風速場を導出する。
- ・ 水蒸気分布の測定：IR2 カメラをベースに、波長 $2.6 \mu m$ の水蒸気吸収帯を捉える。
- ・ 温度場の測定：LIR カメラをベースに、 $8 \sim 12 \mu m$ の窓領域で地表面温度を測定する。また、 $12 \sim 14 \mu m$ の CO_2 吸収帯では大気温度を計測する。
- ・ 大気の鉛直構造の測定：USO（超高安定度発信器）を搭載、サブミリ波サウンダーも検討している。

といったものを考えている。これらが科学目標にとって最適であり、電力および熱環境への対応も PLANET-C 本体の手直しで済むのであれば（そ

して、我々はそう信じているが）、PLANET-D ミッションは極めて速やかに実施することが可能である。2016年1月のウインドーでの打ち上げ（火星到着は約1年後）は、2018年の火星大接近時に地上からのさまざまな観測と連携が可能であり、惑星大気研究コミュニティにとっても PLANET-C に続く「自前のデータ」が長い空白期間を置かずに得られることとなり、その持続的活性化の効果は大きなものがあると期待される。

国際的な状況：米国の Mars Science Orbiter (MSO)

火星気象の重要性に気づき、それを中心に据えたミッションを考えているのは、もちろん我々だけではない。米国では NASA/GSFC の Michael Smith をリーダーとし Mars Science Orbiter (MSO) という「大気ミッション」が提案されていて、いまのところやはり2016年打ち上げを目指している。赤外とサブミリを含む多彩な分光器群、広視野および高解像度カメラを搭載する充実したミッションで、我々の構想とダブる部分も少なくない。しかし、決定的な違いは、MSO は極軌道（それもほぼ一定高度）を想定している、ということである。つまり、MGS で捉えられなかった構造は MSO でもやはり得られない。MSO/Science Definition Team Report (Dec. 15, 2007) では、次のように書かれている。

The MSO orbit, which would be high-inclination, essentially limits the longitudinal resolution of the wind measurements. At an altitude of ~ 300 km this means that there are about 13 orbits per sol which limits the longitude resolution ~ 30 . For large-scale circulations, this is not a primary limitation because of the fact that the major components of the general circulation are much closer to planetary scale than on Earth.

つまり、こと大循環に限ればこの軌道（経度方向分解能）でも問題ないと言っているわけだが、水循環や砂嵐の発達、さまざまなスケールの大気波動や擾乱を考えたとき、やはり「気象学」のレベルには届かないと言わなければならないであろう。実際、地球シミュレータを用いた数値計算では中小規模擾乱が時間発展する様子が見られており、それと比較しながら現象の本質に迫ることのできないデータは不十分である。我々が独自の、そして気象の解明に最適化されたミッションを実施する

ことの意義は揺るがないのである。

とはいえ、極軌道の MSO と赤道軌道の PLANET-D が同時に、そして相補的に火星気象をモニターすることは好ましく、積極的な連携を考えてゆくべきであろう。世界に誇ることのできるユニークな火星探査を、ぜひ我々の手で実現したい。

参考文献

- Boynton, W. V., *et al.*, “Distribution of hydrogen in the near surface of Mars; evidence for subsurface ice deposits” *Science*, **297**, 81-85, 2002.
- Carr, M. H., “Water on Mars”, Oxford University Press, New York, 1996.
- Clifford, S. M., “A model for the hydrologic and climatic behavior of water on Mars” *JGR*, **98**, 10973-11016, 1993.
- Feldman, W. C., *et al.*, “Global distribution of neutrons from Mars: results from Mars Odyssey” *Science*, **297**, 75-78, 2002.
- Feldman, W.C., *et al.*, “Global distribution of near-surface hydrogen on Mars” *JGR*, **109**, E09006, doi:10.1029/2004GL020181, 2004a.
- Haberle, R. M., *et al.*, “On the possibility of liquid water on present-day Mars” *JGR*, **106**, 23317-23326, 2001.
- Houben, H., *et al.*, “Modeling the martian seasonal water cycle” *JGR*, **82**, 4659-4662, 1997.
- Jakosky, B. M., and Haberle, R. M., “The seasonal behavior of water on Mars” In *Mars* (eds., Kieffer, H. H., *et al.*), University of Arizona Press, Tucson, AZ, pp.969-1016, 1992.
- James, P. B., *et al.*, “The seasonal cycle of carbon dioxide on Mars” In *Mars* (eds., Kieffer, H. H., *et al.*), University of Arizona Press, Tucson, AZ, pp.934-968, 1992.
- Laskar, J., *et al.*, “Orbital forcing of the martian polar layered deposits” *Nature*, **419**, 375-377, 2002.
- Mellon, M. T., *et al.*, “The presence and stability of ground ice in the southern hemisphere of Mars” *Icarus*, **169**, 324-340, 2004.
- Mitrofanov, I., *et al.*, “Maps of subsurface hydrogen from the high energy neutron detector, Mars Odyssey” *Science*, **297**, 78-81, 2002.
- Richardson, M. I., and Wilson, R. J., “Investigation of the nature and stability of the martian seasonal water cycle with a general circulation model” *JGR*, **107**, 5031, doi:10.1029/2001JE001536, 2002.
- “Report of the NASA Science Definition Team for the Mars Science Orbiter (MSO)”, December 15, 2007.