

宇宙測地学的手法による火星回転変動計測

原田雄司¹, 岩田隆浩², 石原吉明¹, 浅利一善¹, 荒木博志¹, 菊池冬彦¹, 佐々木晶¹, 鶴田誠逸¹
野田寛大¹, 花田英夫¹, ホーセンスサンダー¹, 松本晃治¹, 青山雄一³, 今村剛², 大久保修平⁴
大坪俊通⁵, 河野裕介¹, 高野忠⁶, 竹内央², 古屋正人⁷, 日置幸介⁷, 松尾功二⁷

¹ 国立天文台, ² 宇宙科学研究本部, ³ 国立極地研究所, ⁴ 東京大学, ⁵ 一橋大学, ⁶ 日本大学, ⁷ 北海道大学

(2010 年 3 月 26 日)

現在, 日本国内において火星複合探査計画が検討されている. そして探査機に搭載される観測機器の候補の一つとして, 我々は宇宙測地計測を目的とする測器を提案している. その中でも特に重要な観測項目は火星回転である. 即ち, 火星表面の着陸機の位置を電波航法に基づき精密決定する事によって火星の回転変動の計測を試みる. それによって火星システムに対する我々の知見は更に深まるであろう. 本稿では, その科学的意義・現状・課題等について概観する.

1. はじめに

我々は一般に, 太陽系の惑星・衛星等に対する測地学的計測を通じて, その天体のシステムの過去・現在・未来の振る舞いを知る為の手掛かりを得る事が出来る. 例えば外部(大気)・表層(海洋・氷床)・内部(地殻・マントル・外核・内核)を構成する各々のサブシステムについてより良く理解する事が出来る(これ以降の文中において“表層”という言葉には大気も含まれているとする). 天体の回転変動(向き・速さ)の計測もその一つである. 従って回転変動計測は, 地球以外の天体の探査でも重要な観測項目の一つである.

それは火星探査においても例外ではない. むしろ火星は, 我々の地球と類似のサブシステムを有しながら, それでいて地球と全く異なる様相を呈しており, 比較惑星学的・惑星システム科学的に大変興味深い天体である. 勿論, 回転変動のような地球物理学的側面から見ても非常に面白い(例えば Dehant *et al.* 2004).

2. これまでの状況

ここで火星回転変動計測に関する国内外の状況について簡単に触れる.

2.1 国外の状況

今までに遂行された火星回転変動計測の例として, NASA の Viking (1975 年打ち上げ) 及び Mars Pathfinder (1996 年打ち上げ) を利用した電波計測(ドップラー・レンジング)が挙げられる. これらの着陸機の地上局に対する相対位置の精密決定により, 火星回転変動, 特に歳差・自転速度変動が計測された(Viking の場合については Yoder and Standish 1997, Mars Pathfinder の場合については Folkner *et al.* 1997b). これらの計測は確かに火星の内部・表層のサブシステムに対して或る程度の制約を与えた. 例えば歳差の計測に基づく慣性能率, 延いては内部密度構造の理解もその一つである.

しかしこれらの計測精度には限界があった為, 必ずしも火星システムの情報を十分には引き出せず, 幾つかの課題も依然として残された. 歳差・自転速度変動に関しては, いずれも火星の内部サブシステムの状態や表層サブシステムの長期的(気候学的)・短期的(気象学的)変動を詳細に制約出来る程の精度ではなかった. そして章動・極運動のパラメーターに至っては, 精度が事前の予

想(Folkner *et al.* 1997a を参照の事)より悪くて決定すら出来ておらず, 明示的な解析結果としては現時点で未報告である.

一方, これまでに提案された火星回転変動計測の例として, ESA の Mars NetLander, 或いはその後続の ExoMars を利用した電波計測が挙げられる. より具体的にはベルギー王立天文台を中心とする測地学者達によって提案されており, 前者は NetLander Ionosphere and Geodesy Experiment (略して NEIGE, 例えば Barriot *et al.* 2001, Dehant *et al.* 2004), 後者は Lander Radioscience (略して LaRa, 例えば Dehant *et al.* 2009a) と称される計画であった. これらの計画も基本的には NASA と同様, 探査機に搭載される電波源を用いたドップラー計測によって着陸機の位置を追跡して, 火星回転変動を調べるという主旨であった. 但しこれらの計画において期待されていた精度は Viking や Mars Pathfinder の頃と比べて格段に高く, 少なくとも一桁程度は上回る. そしてその精度の実現可能性は, いずれも観測シミュレーションによって既に示されていた(例えば NEIGE については Yseboodt *et al.* 2003, LaRa については Dehant *et al.* 2009a).

しかし大変残念な事に, 彼等の提案はどちらも実現に至らなかった. Mars NetLander においては, 探査計画全体が既に取り消されている. ExoMars においても, 結局は生命探査・地質探査等を主目的とする測器群(Pasteur Payload)のみとなり, 物理探査を主目的とする測器群(Humboldt Payload)は搭載されない事が確定となった. LaRa も後者の一部であった. そこでベルギーの研究グループは, 自分達の観測機器を他の欧米の火星探査機, 特に 2020 年頃に打ち上げられる計画の MarsNext に搭載させる事を考えている(Dehant *et al.* 2009b を参照の事).

2.2 国内の状況

こうした既存の探査, 及び将来の探査計画を踏まえた上で, 我々のグループでは現在, 次のような観測を提案している所である. 概念的には欧米, 特にベルギーの研究グループの考え方と共通する要素としてドップラー計測を踏襲し, 地上局一周回機, 地上局-着陸機, 周回機-着陸機という三つのリンクを利用して着陸機の位置を追跡する(Dehant *et al.* 2009a を参照の事). そして複数の着陸機の位置情報に基づいて, 地球の測地における地球姿勢パラメーターに相当する火星回転のパラメーターを

求める (Yseboodt *et al.* 2003 を参照の事)。

一方、この提案において新たに取り入れたいと考えている手法がある。現在、周回機-着陸機のリンクに関しては 4-way ドップラー計測 (例えば岩田他, 2009) の技術を利用する事が検討されている。この計測における 4-way 回線はコヒーレントである為、独立した 2-way 回線と比べて計測精度の向上が期待される。4-way リンクによる精密軌道決定は日本の月探査計画 Selenological and Engineering Explorer (SELENE) における主衛星「かぐや」・リレー衛星「おきな」によって既に実証されている (その成果については例えば Namiki *et al.* 2009, Ishihara *et al.* 2009, Matsumoto *et al.* in press)。周回機-着陸機のリンクは回転変動を高精度化する上で極めて重要であり (Dehant *et al.* 2009a), ここに我が国が誇る独自の宇宙測地技術を応用しようという訳である。それに加えて、既存の VLBI 計測を応用した逆 VLBI 計測 (例えば河野他, 1999) という新しい技術による精密位置決定も検討されている。逆 VLBI は従来の VLBI と異なり、遠方の天体においても高い感度を持つという利点がある。こちらも独自性・新規性の高い技術である。それらの宇宙測地学的手法によって、上記のベルギーのグループが想定していた精度をも上回る計測精度を目指す。

ここで紹介した火星回転変動計測は、日本国内で計画されている火星複合探査 Mars Exploration with Lander-Orbiter Synergy (MELOS) の一環として提案されている。より厳密に言えば、MELOS を構成する周回機 (気象オービター・大気散逸オービター)・着陸機 (A 案・B 案・C 案) の提案の一つである着陸機 B 案、即ち複数の固定着陸機による地球物理学的手法を主体とする観測項目 (例えば地震学・測地学・地球電磁気学・地球熱学等) に含まれている。尚、MELOS 自体は未だプロジェクトとして認められていないが、その検討の為のワーキンググループは JAXA (正確には ISAS 及び JSpEC の双方) の下、鋭意活動中である。勿論、ワーキンググループのメンバーは JAXA に限らず複数の大学・研究機関の人員によって構成されている。

所で仮に前述の MarsNext に対して遅れを取った場合、果たして新たな成果を出す事は出来るのであろうか。少なくとも内部サブシステム、特に核の大きさの制約という観点において大きな成果を出すのは難しくなるかもしれない。この点に関して当初の目論見では、本観測機器を MELOS (の初号機?) に搭載すれば MarsNext よりも先に同種の計測を行なう事が出来る筈であった。元々の打ち上げの時期は 2018 年頃の計画だったからである。しかしながらつい最近、諸般の事情により打ち上げの期日を先送りとする判断が下された為、必ずしも先を越せるとは限らなくなった。但し打ち上げの時期や継続運用の期間によっては、MarsNext との国際共同観測が実現する可能性もある。この場合、火星全体として着陸機の数が多くなるので回転変動の更なる高精度化が期待される。勿論、これらは今後の国外の動向にも強く依存する。一方、表層サブシステムの制約という観点においては事情がやや異なる。火星の表層環境は地球と同様、短い時間スケールで時々刻々と変化している。よって後で観測を行なったとしても前の観測とは違った情報が得られるので、新たに成果を出せる可能性もある。

3. 回転変動計測による表層環境変動への制約

以下、火星回転変動計測によって得られるであろう火星表層環境変動に対する制約について触れる。一口に惑

星回転と言っても幾つかの様式が存在するが、ここでは特に歳差・自転速度変動について述べる。

尚、それ以外の様式として章動・極運動も挙げられるが、いずれも詳細は割愛する。極運動については、励起源が自転速度変動とよく似ており、従って手に入る情報も重複が多い。よってそちらを参照されたい。章動については、むしろ内部構造を制約する上で非常に重要なモードである。特に流体核共鳴の検出による核半径の制約は最大の目玉である (例えば Dehant *et al.* 2000a, b, Van Hoolst *et al.* 2000a, b, Van Hoolst and Dehant 2002, Zharkov *et al.* 2009, Molodensky *et al.* 2009)。更に潮汐変形 (例えば Van Hoolst *et al.* 2003, Yoder *et al.* 2003, Konopliv *et al.* 2006) の情報と組み合わせれば、もしかしたら内核の有無さえも明らかになるかもしれない (例えば Defraigne *et al.* 2003, Dehant *et al.* 2003)。しかしここでは“大気圏”という本シンポジウムの主題を鑑みて、そのモードの重要性には立ち入らない。又、同様の理由で歳差と内部構造の関連性についても省略する (Bills and Rubincam 1995, Sohl and Spohn 1997, Bills and James 1999, Sohl *et al.* 2005 を参照の事)。

3.1 歳差による気候学的制約

現在の火星の歳差における自転軸傾斜角を正確に計測する事は、実は過去の自転軸傾斜角の変動を知る上でも重要である。それは取りも直さず、火星の気候変動を知る上でも重要である事を意味する。例えば火星の極域に存在する極冠 (更には高緯度地域を中心に広く分布していると考えられる地下の水) の消長は、地球の氷床と同様、自転軸傾斜角の周期的変動に支配されている。しかしそのような気候学的変化は地球に比べて遥かに大きいと考えられている。何故なら火星の自転軸傾斜角変動は地球と違ってカオス的だからである。

地球の場合、過去およそ 2 千万年前までの自転軸傾斜角は 22.1~24.5 度という狭い範囲に落ち着いていたが (例えば Laskar *et al.* 1993a, b), 火星の場合、同じく 2 千万年前までの自転軸傾斜角は 10~40 度という広い範囲に及んでいたと考えられている (例えば Laskar and Robutel 1993, Touma and Wisdom 1993)。このような大きな差異は主に大きな衛星の有無に起因する (例えば Laskar *et al.* 1993b)。地球の自転は月の潮汐トルクによって安定化し、それによって地球の歳差の周期は約 8.1 万年から約 2.6 万年へと短くなっている。その結果、歳差による自転軸の変化は公転軸の変化よりもずっと速くなっている。それに対して火星では、フォボス・ダイモスという小さな衛星は従えているが、地球の月に匹敵するような巨大な衛星は存在しない。よってその歳差の固有周期は火星自体の力学的性質のみによってほぼ決まり (約 17 万年)、かつその周期は天体力学的摂動による軌道傾斜角変動の周期と近接している。そして永年的な共鳴の影響によって自転軸傾斜角変動は増幅される。

このカオス的自転軸傾斜角変動によって太陽からの日射は大きく変化する (Laskar *et al.* 2004)。この変化を過去に遡って正確に復元するには、現在の自転軸の状態も正確に掌握しなければならない。つまり歳差の計測は、火星のカオス的自転軸傾斜角変動の復元、更に言えば火星の気候変動・地史等を理解する為の手掛かりにもなる (Laskar *et al.* 2002)。典型的な例として、極域層状堆積物の縞々模様はカオス的自転軸傾斜角変動の地質学的状況証拠と考えられており (例えば Milkovich and Head 2005)、こうした観測事実との比較に耐え得る、より正確な自転軸傾斜角変動の見積もりも可能となろう。

3.2 自転速度変動による気象学的制約

火星の自転速度変動、即ち「一日の長さの変化」を正確に計測する事は、実は火星の短期的な表層環境変動を知る上でも重要である。何故なら自転速度は表層環境の季節変化に伴って僅かに加速・減速するからである。地球の場合は、回転・重力等の測地学的信号と大気・海洋・陸水等の物理的挙動の相互関係が既に知られている。火星の場合も、海洋は存在しないけれども大気・極冠の振る舞いに応じて同様の現象が励起されるであろう。

自転速度変動のメカニズムは大きく二つに分けられる（例えば Yoder and Standish 1997, Folkner *et al.* 1997b, Defraigne *et al.* 2000）。その一つは大気圏・雪氷圏等の質量再分配による慣性能率テンソルの時間変化、もう一つは風の応力を媒介とした大気・マントル間の角運動量交換である。前者・後者はそれぞれ回転の支配方程式における物質項・運動項に相当する。これら二つの効果を分離する為には回転・重力の両方の時間変化を同時計測すれば良い。と言うのは、前者の荷重の影響は重力変化を伴うが（例えば Yoder *et al.* 2003, Konopliv *et al.* 2006）、後者の風の影響は重力変化を伴わないからである。更に前者における雪氷圏の寄与は、Mars Global Surveyor（1997 年打ち上げ）におけるレーザー高度計 Mars Orbiter Laser Altimeter（MOLA）や Mars Odyssey（2001 年打ち上げ）における中性子検出器 High Energy Neutron Detector（HEND）のような測器によって分離可能かもしれない（Karatekin *et al.* 2006 を参照の事）。

これらのような測地学的視点から表層環境を理解する事は気象学的にも有意義であると考えられる。例えば火星の大気・極冠における揮発成分（主に水・二酸化炭素）の物質循環（昇華・凝結）、火星大気大循環（例えば Hourdin *et al.* 1995, Forget *et al.* 1998）における風の物理的挙動、等を理解する上で有用かもしれない。これらの物理過程はいずれも自転速度に影響を及ぼすからである。

しかも大気・極冠等の表面荷重や風の応力の全球的な場を直接観測するのは、着陸機・周回機のいずれを利用しても決して容易ではない。先ず着陸機の場合、気象観測の機器を搭載すれば温度場・圧力場・速度場等のその場計測が可能である。これが最も直接的な手段であろう。実際、既に Viking による気象観測が行なわれている。しかしこのような直接観測から得られる情報は、着陸機の近傍の局地的な気象条件に限られる（Hourdin *et al.* 1993 を参照の事）。大気下層の境界層内では地面の影響が強い為、その風の振る舞いは大気上層の自由対流圏と大きく異なっている。従って大局的な気象現象を理解する上ではやや不向きである。次に周回機の場合、リモートセンシングによる広範囲の観測が可能である。しかしリモートセンシングでは、赤外放射に基づく温度場の計測は別として、圧力場・速度場の計測は困難である（ただ MELOS の気象オービターでは風速の計測を試みる為の測器が提案されているが）。又、カメラ・レーザー高度計等による極冠の広さ・厚さの計測は可能であるが、極冠の密度には多成分・多孔質に由来する不確実性があるので（Matsuo and Heki 2009 を参照の事）、直ちに物質輸送に関する情報へ結び付くとは限らない。

それに対して測地学的観測、特に自転速度変動計測の観点から独立な制約を与えられる可能性がある。既述のように、自転速度変動は表層サブシステムの慣性能率テンソル・角運動量に関する情報が含まれている。しかも回転においては、それらの情報が時空間的に平均化されて見えている事になる。よって全球的な大気の振動、極冠

の消長、風系の強弱（例えば偏西風の角運動量の変化）、等の影響が反映されると考えられる。

所で揮発成分の他にもう一つ、火星の気象を特徴付ける因子としてダストの存在が挙げられる。実は大気中のダスト含有量も自転速度変動に若干影響すると考えられている。火星大気におけるダストストームの強弱によって大気・マントル間で交換される角運動量が変化するためである。それに伴う自転速度変動の振幅の違いは、少なくとも NEIGE の計測精度を前提とすれば検出可能であると期待されていた（Van den Acker *et al.* 2002）。

以上のように、気象観測のみならず火星回転の調査も踏まえれば、火星大気のより深い理解に結び付くと考えられる。勿論、このような探索を行なう為には、着陸機による測地観測と周回機による気象観測のシナジーが強く望まれる。同時観測に基づくシステム科学的アプローチは複合探索によって初めて達成される。MELOS はそのようなアプローチを可能とする貴重な機会になると期待される。

4. これからの課題

今後、回転変動計測（或いは測地学的観測）が複合探索の一翼を担う上で解決すべき課題は幾つかある。理学的・工学的側面の各々の検討課題について以下の通りである。

4.1 理学的課題

理学的側面としては、本提案の実現可能性に関するフィージビリティスタディが最優先である。と言っても火星の測地探索のフィージビリティについては、理論・観測のいずれにおいてもベルギー・フランス等を主体とする研究グループによる詳細な考察が既に行なわれている。しかし我々も先行研究の検討結果を追試して、その再現性・妥当性等を確認しておく必要はある。例えば与えられた計測の感度に対する回転の精度はどれぐらいか、そして与えられた回転の精度に対する内部構造パラメータの確度はどれぐらいか、等について再検討しなければならない。この内の前者は厳密に言えば搭載機器の性能や運用計画の立案に依存するので、それらと並行して検討する事になるであろう。

同時に、複合探索における様々なシナジーの成立性の検討も進めていく。MELOS の複合探索の特長の一つは、その名の通り、複数の観測機器間のシナジーである。単に測地探索（回転・重力・形状）だけで閉じた議論に止まらず、測地観測と他の物理観測（例えば地震・電磁気）のシナジー、或いは着陸機と周回機（例えば気象・大気散逸）のシナジーが考えられる。更には国際共同観測の可能性を踏まえて、国外の潜在的なカウンターパート（例えばジェット推進研究所・ベルギー王立天文台等）との交渉も重要度を増すであろう。

4.2 工学的課題

工学的側面としては、当面の所、回線の成立性の検討が挙げられる。特に 4-way ドップラー計測における周回機・着陸機のリンクについては送信機が大電力、若しくはアンテナが高利得でなければならない。本観測機器では、電力・重量・構造等の制限の中で高利得を達成すべく、位相配列アンテナの使用が想定されている。この点は SELENE の 4-way ドップラー計測と異なる（「おきな」では平面アンテナを使用）。位相配列アンテナは通信衛星等で実績があるが、ここでは更に軽量・小型のアンテナを設計・試作・試験する必要がある。又、使用する電波の周波数帯域は X 帯であるが、通信系においても同一

の帯域を利用するなら、それらの回線の統合も検討の余地がある。

5. おわりに

本稿では、火星の測地探査の一環である火星回転変動計測の内、主に表層環境変動に関係した側面について概観した。本観測は日本の火星複合探査計画 MELOS における着陸機の一部として提案されている。前述のように、着陸機の構成としては A 案（主にローバーによる地質探査）・B 案（主にランダーネットワークによる物理探査）・C 案（主にサンプルリターン）の三案が提案されており、測地探査は B 案に含まれている。この内、実際に MELOS（の初号機？）の着陸機として採用されるのは一案のみであるので、そこに B 案（そしてその一部である測地探査）が残るとは限らない。或いは打ち上げの先送りに付随する計画の見直しに伴って、そもそも A・B・C 案という三案の範疇や各案を構成する機器群について再編成されるかもしれない。

いずれにせよ、もし本提案が最終的に MELOS の観測機器の一つとして選択され、そして火星の回転が十分な精度で計測されたならば、MELOS 全体の大目標である“赤い火星”の理解、即ち内部・表層を含む火星のシステムの変動を理解する為の新たな手掛かりが得られるであろう。

References

- Barriot, J. P., *et al.*, The netlander ionosphere and geodesy experiment, *Adv. Space Res.*, **28**, 1237-1249, 2001.
- Bills, B. G., and T. S. James, Moments of inertia and rotational stability of Mars: Lithospheric support of subhydrostatic rotational flattening, *J. Geophys. Res.*, **104**, 9081-9096, 1999.
- Bills, B. G., and D. P. Rubincam, Constraints on density models from radial moments: applications to Earth, Moon, and Mars, *J. Geophys. Res.*, **100**, 1995.
- Defraigne, P., *et al.*, Mars rotation variations induced by atmosphere and ice caps, *J. Geophys. Res.*, **105**, 24563-24570, 2000.
- Defraigne, P., *et al.*, Mars nutation resonance due to Free Inner Core Nutation, *J. Geophys. Res.*, **108**, doi:10.1029/2003JE002145, 2003.
- Dehant, V., *et al.*, Computation of Mars' transfer functions for nutations, tides and surface loading, *Phys. Earth Planet. In.*, **117**, 385-395, 2000a.
- Dehant, V., *et al.*, Comparison between the nutations of the planet Mars and the nutations of the Earth, *Surv. Geophys.*, **21**, 89-110, 2000b.
- Dehant, V., *et al.*, Can a solid inner core of Mars be detected from observations of polar motion and nutation of Mars?, *J. Geophys. Res.*, **108**, doi:10.1029/2003JE002140, 2003.
- Dehant, V., *et al.*, Network science, NetLander: A european mission to study the planet Mars, *Planet. Space Sci.*, **52**, 977-985, 2004.
- Dehant, V., *et al.*, Lander radioscience for obtaining the rotation and orientation of Mars, *Planet. Space Sci.*, **57**, 1050-1067, 2009a.
- Dehant, V., *et al.*, Rotation and internal dynamics of Mars from future geodesy experiments, *Proceedings of the Journées 2008 Systèmes de référence spatio-temporels*, 135-136, 2009b.
- Folkner, W. M., *et al.*, Mars dynamics from Earth-based tracking of the Mars Pathfinder lander, *J. Geophys. Res.*, **102**, 4057-4064, 1997a.
- Folkner, W. M., *et al.*, Interior structure and seasonal mass redistribution of Mars from radio tracking of Mars Pathfinder, *Science*, **278**, 1749-1752, 1997b.
- Forget, F., *et al.*, CO₂ Snowfall on Mars: Simulation with a General Circulation Model, *Icarus*, **131**, 302-316, 1998.
- Hourdin, F., *et al.*, Meteorological variability and the annual surface pressure cycle on Mars, *J Atmos Sci*, **50**, 3625-3640, 1993.
- Hourdin, F., *et al.*, The sensitivity of the Martian surface pressure and atmospheric mass budget to various parameters: A comparison between numerical simulations and Viking observations, *J. Geophys. Res.*, **100**, 5501-5523, 1995.
- Ishihara, Y., *et al.*, Crustal thickness of the Moon: Implications for farside basin structures, *Geophys. Res. Lett.*, **36**, doi:10.1029/2009GL039708, 2009.
- 岩田隆浩他, かぐや (SELENE) による測月ミッションの概要と, 子衛星おきな・おうな (Rstar・Vstar) の開発ならびに軌道上特性, 測地学会誌, **55**, 135-150, 2009.
- Karatekin, Ö., *et al.*, The effects of seasonal mass redistribution and interior structure on Length-of-Day variations of Mars, *Adv. Space Res.*, **38**, 739-744, 2006.
- 河野宣之他, 惑星測地のための逆 VLBI 法, 測地学会誌, **45**, 181-203, 1999.
- Konopliv, A. S., *et al.*, A global solution for the Mars static and seasonal gravity, Mars orientation, Phobos and Deimos masses, and Mars ephemeris, *Icarus*, **182**, 23-50, 2006.
- Laskar, J., and P. Robutel, The chaotic obliquity of the planets, *Nature*, **361**, 608-612, 1993.
- Laskar, J., *et al.*, Orbital, precessional, and insolation quantities for the Earth from -20 Myr to +10 Myr, *Astron. Astrophys.*, **270**, 522-533, 1993a.
- Laskar, J., *et al.*, Stabilization of the Earth's obliquity by the Moon, *Nature*, **361**, 615-617, 1993b.
- Laskar, J., *et al.*, Orbital forcing of the martian polar layered deposits, *Nature*, **419**, 375-377, 2002.
- Laskar, J., *et al.*, Long term evolution and chaotic diffusion of the insolation quantities of Mars, *Icarus*, **170**, 343-364, 2004.
- Matsumoto *et al.*, An improved lunar gravity field model from SELENE and historical tracking data: revealing the farside gravity features, *J. Geophys. Res.*, doi:10.1029/2009JE003499, in press.
- Matsuo, K., and K. Heki, Seasonal and inter-annual changes of volume density of martian CO₂ snow from time-variable elevation and gravity, *Icarus*, **202**, 90-94, 2009.
- Milkovich, S. M., and J. W. Head III, North polar cap of Mars: Polar layered deposit characterization and identification of a fundamental climate signal, *J. Geophys. Res.*, **110**, doi:10.1029/2004JE002349, 2005.
- Molodensky, S. M., *et al.*, On models of Mars' interior and amplitudes of forced nutations. 2. The effects of liquid core and mantle elasticity, *Phys. Earth Planet. In.*, **172**, 335-344, 2009.
- Namiki, N., *et al.*, Farside gravity field of the moon from four-way Doppler measurements of SELENE (Kaguya), *Science*, **323**, 900-905, 2009.
- Sohl, F., and T. Spohn, The interior structure of Mars: Implications from SNC meteorites, *J. Geophys. Res.*, **102**, 1613-1635, 1997.
- Sohl, F., *et al.*, Geophysical constraints on the composition and structure of the Martian interior, *J. Geophys. Res.*, **110**, doi:10.1029/2005JE002520, 2005.
- Touma, J., and J. Wisdom, The chaotic obliquity of mars, *Science*, **259**, 1294-1297, 1993.
- Van den Acker, E., *et al.*, Influence of the seasonal winds and the CO₂ mass exchange between atmosphere and polar caps on Mars' rotation, *J. Geophys. Res.*, **107**, doi:10.1029/2000JE001539, 2002.
- Van Hoolst, T., and V. Dehant, Influence of triaxiality and second-order terms in flattenings on the rotation of terrestrial planets I. Formalism and rotational normal modes, *Phys. Earth Planet. In.*, **134**, 17-33, 2002.
- Van Hoolst, T., *et al.*, Chandler wobble and Free Core Nutation for Mars, *Planet. Space Sci.*, **48**, 1145-1151, 2000a.
- Van Hoolst, T., *et al.*, Sensitivity of the Free Core Nutation and the Chandler Wobble to changes in the interior structure of Mars, *Phys. Earth Planet. In.*, **117**, 397-405, 2000b.
- Van Hoolst, T., *et al.*, Tidally induced surface displacements, external potential variations, and gravity variations on Mars, *Icarus*, **161**, 281-296, 2003.
- Yoder, C. F., and E. M. Standish, Martian precession and rotation from Viking lander range data, *J. Geophys. Res.*, **102**, 4065-4080, 1997.
- Yoder, C. F., *et al.*, Fluid core size of Mars from detection of the solar tide, *Science*, **300**, 299-303, 2003.
- Yseboodt, M., *et al.*, Analytical modeling of the Doppler tracking between a lander and a mars orbiter in terms of rotational dynamics, *J. Geophys. Res.*, **108**, 12-11, 2003.
- Zharkov, V. N., *et al.*, On models of Mars' interior and amplitudes of forced nutations. 1. The effects of deviation of Mars from its equilibrium state on the flattening of the core-mantle boundary, *Phys. Earth Planet. In.*, **172**, 324-334, 2009.