

火星の真の極移動に伴う地殻変動について

菅原 守・日置 幸介

北海道大学理学院自然史科学専攻

(2008年9月8日受付, 2008年10月27日改訂, 2008年10月28日受理)

Crustal Deformation of Mars Associated with the True Polar Wander

Mamoru Sugawara and Kosuke Heki

Dept. Natural History Sciences, Hokkaido University,

N10 W8, Kita-ku, Sapporo, Hokkaido 060-0810, Japan

(Received September 8, 2008; Revised October 27, 2008; Accepted October 28, 2008)

Abstract

Large scale true polar wander episodes are considered to have occurred several times in Mars. Because they accompany relocation of the Martian equatorial bulge, milli-strain level horizontal extension/compression is expected to have occurred as well as kilometer scale vertical crustal movements. Here we pick up one of such episodes reported by Perron *et al.* (2007), and try to compare the expected strikes of faults with those observed in satellite images. Wrinkle ridges seem to have preferred orientations aligned with the meridian connecting the present and ancient poles, which suggests that some of those may reflect the crustal stress imposed by this true polar wander episode.

1. はじめに

火星は、平坦な低地である北部と起伏の激しい高地の南部に二分され、赤道地域にある火山性のタルシス台地（以後タルシスと呼ぶ）や、ヘラス盆地に代表される大規模な衝突盆地など特徴的な地形が分布する。北部低地は大衝突盆地である可能性が最近示唆された (*e.g.* Kiefer, 2008)。1990年代以降に火星を訪れた複数の探査機は、重力や地形等の火星の測地学的な側面を次々に明らかにしてきた (*e.g.* Zuber *et al.*, 2000)。

北部低地にはかつて海が存在していた可能性があり、火星の南北半球の境界付近を数千 km にわたって走る海岸線の痕跡が衛星写真から複数発見されている (*e.g.* Parker *et al.*, 1993)。しかし1999年に米国によって打ち上げられた Mars Global Surveyor (MGS) に搭載されていたレーザー高度計 Mars Orbiter Laser Altimeter (MOLA) は、これら「海岸線」の現在の標高が数

km の振幅で上下していることを示した(e.g. Carr and Head, 2003). 海岸線は等ポテンシャル面上にあり, 本来水平でなくてはならない. したがって起伏の存在はこれらの地形を海岸線の痕跡と考える仮説の反証となっていた.

近年 Perron *et al.* (2007)は, 海岸線形成後に生じた真の極移動(True Polar Wander, TPW)に伴う火星全体の大規模な地殻変動によってこの程度の標高変化が生じることを示した. さらに, かつて水平であった海岸線が真の極移動に伴う地殻変動で現在の起伏を獲得したと仮定し, それらの起伏を最も良く説明する過去の極位置を Arabia 海岸線および Deuteronilus 海岸線のそれぞれについて推定した. なお極運動の原因となった質量再配分事件についてはいくつかの可能性は挙げているものの Perron *et al.* (2007)は特定していない. 本研究では, 真の極移動に伴って火星のリソスフェアに生じる応力と断層運動に焦点を当てる. これらの応力を Melosh (1980) の理論式を用いて算出し, それによる火星リソスフェア中の水平歪テンソルと断層の種類・走向を推定する. また衛星写真で観測された火星表面の線状構造の走向分布との比較を試みる.

2. 真の極移動に伴う応力と歪

自転する天体は遠心力によって赤道部分が張り出し (赤道バルジ), 全球の重力場や地形のモデルではそれに対応する次数 2 位数 0 の球関数(P_{20})成分がしばしば卓越する. 極の移動は赤道バルジの移動をもたらすが (Figure 1 a,b), 移動前後の変化分は次数 2 位数 1 の球関数(P_{21})で表される. 年周極運動やチャンドラー極運動は時間スケールが短く振幅も小さい. そのような極運動に伴う遠心力ポテンシャル変化による天体変形は, 日周潮汐等と同様二次の tesseral な変形として潮汐ラブ数を用いて計算できる.

真の極移動のように移動量が多い場合, 極移動前後の異なる座標軸における P_{20} 成分の差は, その中間の座標系における P_{21} 成分に等しくなる (Figure 1 c). また真の極移動は地質学的な時間スケールの現象であるため, マントル全体の弾性変形を仮定する潮汐変形と違って火星深部の流動を考慮する必要が生じる. Melosh (1980)は真の極移動によって, 流体でできた天体を覆う薄いリソスフェア中に生じる応力を求め, 地域によって生じる断層の違い等を議論した. 本研究では, Arabia 海岸線から推定された古極位置 (40N, 334E) (Perron *et al.*, 2007) から現在の位置へ極移動が起こったと仮定し, Melosh (1980)に倣って火星リソスフェア内の水平応力テンソルを計算した. なお Arabia 海岸線の生成年代は約 40 億年前とされており, 極移動はそれ以降と思われるが不確定性は大きい. なおこの古極位置がタルシスからほぼ 90 度離れている (Figure 2 左) のは, 真の極移動が生じた当時既にタルシスはアイソスタシー補償されていない大きな地表荷重として存在していたことを示唆する (慣性モーメント最大となる慣性主軸はタルシスから 90 度離れたところに位置する, すなわち極移動前後を通じてタルシスは赤道地域に位置する).

次に, 剛性率を 100 GPa, ポアソン比を 0.25 と仮定して, 応力テンソルを歪みテンソルに変換した. 面積歪みを Figure 2 に濃淡で示す. その大きさは 10^{-3} の桁であり, 一般的なリソ

スフェア岩石の弾性変形の範囲 (10^{-5} 程度以下) を超えている (坪井, 1967). なお剛性率を大きめに仮定しているため, 実際の歪みはさらに大きいであろう. 従って真の極運動は様々な塑性変形, 特に大規模な断層運動を伴ったことが想像される. 白っぽい部分は伸張を, 黒っぽい部分は圧縮を示すが, それぞれ新たに赤道バルジの生じる地域, かつて赤道バルジがあった地域に相当する. Figure 2 の白い線は圧縮主軸, 黒は伸張主軸を示し, その長さが歪みの大きさに対応している. この図では見づらいが, 最も伸張 (圧縮) が卓越する地域での圧縮 (伸張) 主軸の長さはほぼゼロである.

3. 線状構造の分布

Figure 2 の歪パターンから形成されるだろう断層の走向を Figure 3 に示す. 水平主歪みのうち一方の絶対値が他方に比べて有意に大きいとき (ここでは 1.3 倍以上とした) に正断層 (絶対値の大きな歪みが伸張) 又は逆断層 (同じく圧縮) が出来るとし, 両方の主歪みの符号が逆で絶対値が拮抗している場合に横ずれ断層ができると考えた. 図は走向のみを示しており, 直線の長さは特に意味がない. 昔の極のあった経度に沿って南北走向の断層が卓越するが, これは Figure 2 の伸張域 (白っぽい地域) の正断層と圧縮域 (黒っぽい地域) の逆断層がいずれも南北走向となるためである. 一方極の軌跡から 90 度離れた地域では二つの共役な走向を持つ横ずれ断層が発達するが, 断層崖を形成しないため縦ずれ断層に比較して線状構造をあまり残さないかもしれない.

これらを実際の火星表面の線状構造と比較してみよう. 月や火星には *wrinkle ridge* と呼ばれる「しわ」状の地形が知られており, 圧縮応力場で形成された逆断層に伴う断層崖状のものと考えられている (e.g. Montési and Zuber, 2003). 1970 年代の火星探査機 Viking の衛星写真から *wrinkle ridge* が中低緯度地域で広く分布することが確認されている. Chicarro *et al.* (1985) は, それらの走向分布を全球的に調べた. 衝突盆地の影響による局地的な応力場を反映しているものを注意深く取り除くと, 残りの分布はかなり系統的であり (南北走向を示すものが多い), 火星に全球的な応力場が存在したことを示唆する. Watters (1993) は, 火星では冷却に伴う圧縮応力場が全球的に卓越し, それに地域的な応力場が加味されて *wrinkle ridge* の系統的な走向分布が生じると考えた. 特に西半球の応力場パターンはタルシスの荷重を原因とする同心円状のものが主であるとした. Mars Global Surveyor の画像から Head *et al* (2002) は高緯度地域にも系統的な走向分布を持つ *wrinkle ridge* 群を見出し (Figure 3b のヒストグラム), 既に知られていた中低緯度のものと合わせてタルシスを中心とする同心円状の *wrinkle ridge* の一部であるとした

Figure 3 で影をつけた部分は, Chicarro *et al.* (1985) の Figure 16 で南北に走る *wrinkle ridge* が卓越するように見える部分である. 零度の子午線西側およびその反対側でこれらの構造が卓越しているが, それらは本研究で仮定した極移動軌跡の経度 (334E) に良く一致する. なお低緯度地域 (Figure 2 の白っぽい地域) で予測されるのは南北走向の「正断層」であり *wrinkle ridge* とは相容れないが, これについては最後に議論する. 一方, 横ずれ断層が予測

される、極移動軌跡から 90 度離れた領域で *wrinkle ridge* の走向の系統性が薄いことも調和的である。こうした *wrinkle ridge* の走向は、既に指摘されているようにタルシスを中心とした同心円状である。しかし真の極移動の軌跡も荷重の影響でタルシスから 90 度離れており、期待される断層走向もその経度に沿って火星を一周するものである。つまりタルシスの荷重と真の極移動が予測する断層走向は似ており識別が難しい。言い換えると、現在知られている火星表面の *wrinkle ridge* の走向の系統性はタルシス荷重によるものと考えても極移動に伴うものと考えても矛盾しないように思われる。

ゆるやかなカーブを描く *wrinkle ridge* は圧縮応力場で形成されると考えられ、伸張場で生じる直線的な地溝とは一線を画する。しかし、典型的な *wrinkle ridge* の他にマリナー溪谷の南やタルシス台地の南西の高地では直線性が高い蒲鉾型(*hog-back*)の地形の盛り上がり分布しており、Chicarro *et al.*(1985)はそれらが伸張応力場で生じた貫入岩帯である可能性を示唆している。伸張応力場における岩脈の走向は正断層の走向に一致する。Chicarro *et al.* (1985) による南北走向の *ridge* の低緯度地域のものが部分的に伸張場における地形であれば、それらは真の極移動を起源とする可能性が高い。

謝辞

査読者である国立天文台の松本晃治博士に多くの適切なコメントをいただいた。

参考文献

- Carr, M. H. and J. W. Head III (2003): Oceans on Mars: An assessment of the observational evidence and possible fate, *J. Geophys. Res.*, **108**, 5042, doi:10.1029/2002JE001963.
- Chicarro, A. F., P. H. Schultz, and P. Masson (1985): Global and regional ridge patterns on Mars, *Icarus*, **63**, 153-174.
- Head III, J. W., M. A. Kreslavsky, and S. Pratt (2002): Northern lowlands of Mars: Evidence for widespread volcanic flooding and tectonic deformation in the Hesperian Period, *J. Geophys. Res.*, **107**, E15003, doi:10.1029/2000JE001445.
- Kiefer, W. S (2008): Forming the martian great divide, *Nature*, **453**, 1191-1192.
- Melosh, H. J. (1980): Tectonic patterns on a reoriented planet: Mars, *Icarus*, **44**, 745-751.
- Montési, L. G. J. and M. T. Zuber (2003): Clues to the lithospheric structure of Mars from *wrinkle ridge* sets and localization instability, *J. Geophys. Res.*, **108**, E65048, doi:10.1029/2002JE001974.
- Parker, T. J., D. S. Gorsline, R. S. Saunders, D. C. Pieri, and D. M. Schneeberger (1993): Coastal geomorphology of the Martian northern plains, *J. Geophys. Res.*, **98**, 11061-11078.
- Perron, J. T., J. X. Mitrovica, M. Manga, I. Matsuyama, and M. A. Richards (2007): Evidence for an ancient martian ocean in the topography of deformed shorelines, *Nature*, **447**, 840-843.
- 坪井忠二 (1967) : 新・地震の話, 岩波書店, 211p.
- Watters, T. R. (1993): Compressional tectonism on Mars, *J. Geophys. Res.*, **98**, 17049-17060.

Zuber, M. T., S. C. Solomon, R. J. Phillips, D. E. Smith, G. L. Tyler, O. Aharonson, G. Balmino, W. B. Banerdt, J. W. Head, C. L. Johnson, F. G. Lemoine, P. J. McGovern, G. A. Neumann, D. D. Rowlands, and S. Zhong (2000): Internal structure and early thermal evolution of Mars from Mars Global Surveyor topography and gravity, *Science*, **287**,1788-1793.

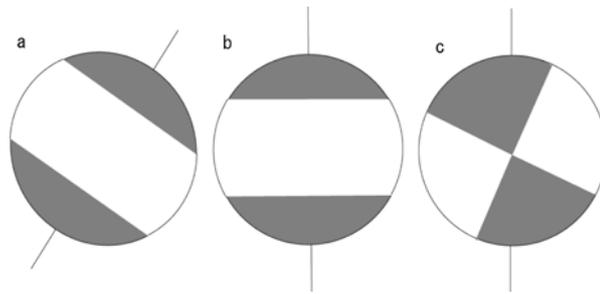


Fig.1 Distribution of the crustal dilatation (gray: contraction, white: expansion) by true polar wander (TPW) (c) is expressed as the difference of those by the centrifugal forces with the rotation axes before (a) and after (b) the TPW.

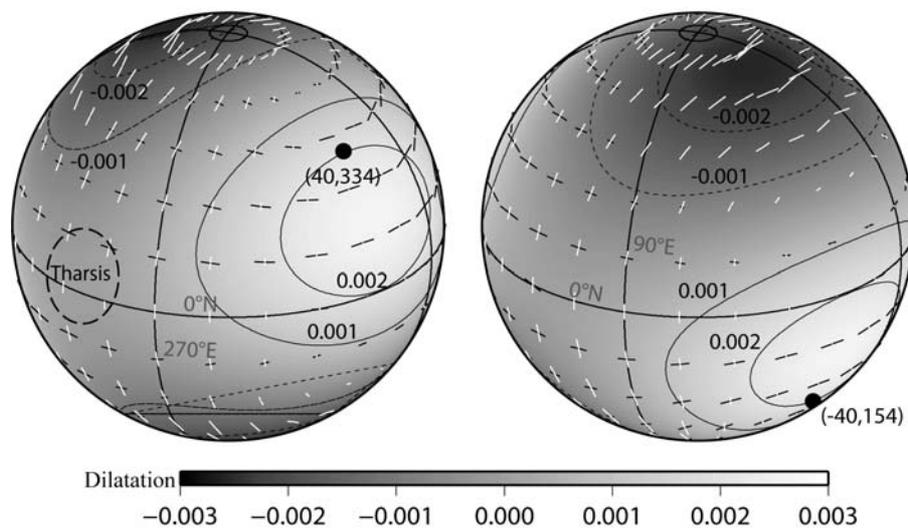


Fig.2 Global pattern of dilatation and principal axes of horizontal strain tensor. The dark and bright colors indicate contraction and dilatation, respectively, and the contour interval is 0.001 (1 milli-strain). Short black and white lines indicate the principal axes of horizontal extension and compression, respectively. The black circle at (40N, 334E) indicates the position of the Arabia paleo-pole suggested by Perron *et al.* (2007). Approximate position of the central part of the Tharsis Rise is shown in the left panel.

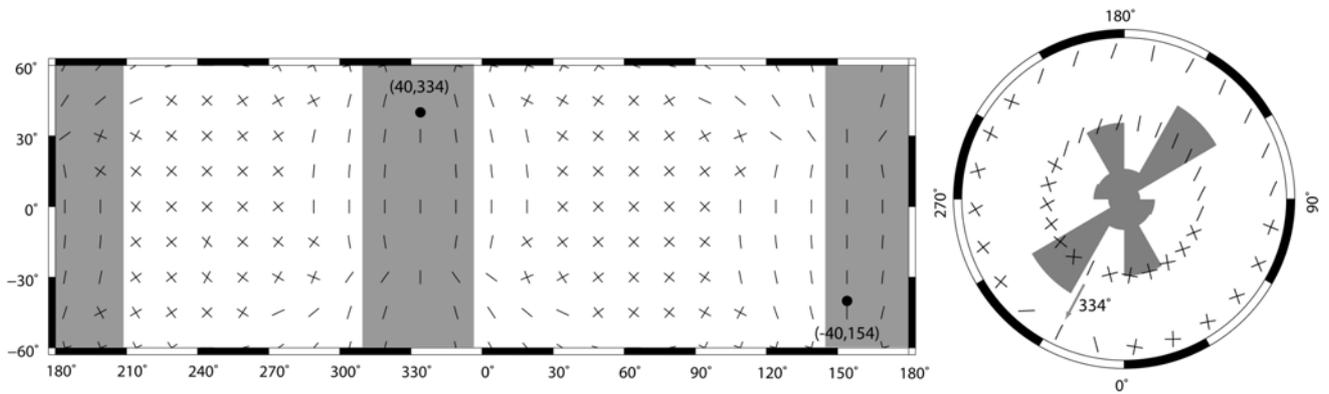


Fig.3 Global pattern of fault strikes associated with the crustal strain induced by the TPW in middle and low latitude regions (a) and in the north polar region (latitude 60N-90N) (b). The black circle in (a) indicates the Arabia paleo-pole. In the shaded area, north-south striking wrinkle ridges are dominant (Chicarro *et al.*, 1985). In (b), directional histogram of wrinkle ridges in the northern lowlands (Head *et al.*, 2002) is shown.