Mars Global Surveyorによる火星の測地学的研究

宇宙測地学研究室4年　松尾功二

Hokkaido University SPACE GEODESY

はじめに

Mars Global Surveyor搭載のMars Orbiter Laser Altimeter(MOLA)による地表高度データと、ドップラー観測による重力データから火星の全球的な構造の解析が可能となった。火星は平坦な北半球の低地、起伏の多い南半球の高地という二分性に加え、太陽系で最も高いオリンポス火山、巨大な衝突盆地のヘラス平原、極域で形成する極冠など、非常に特徴的な地形を持つ惑星である。本研究では、MOLAによる地形データ(gtm090aaモデル)とドップラー観測による重力データ(jgm95i0モデル)を用いて、火星の特徴的な地形の地下構造と構成密度について解析を行う。また、MOLAによって測定されたCO_2の積雪による地表高度の季節変化(Smith et al.[2001])を用いて、積雪に伴う火星の重力場の季節的変化の検出と雪の密度の推定を試みる。

1. 火星の地形図とフリーエア重力異常図

高度データ(gtm090aaモデル)と重力データ(jgm95i0モデル)はPlanetary Data System (PDS) Geoscience Node (http://pds-geosciences.wustl.edu/)にて球面調和関数の係数として公開されている。Heiskanen and Moritz[1967]; Kaura[1966]より、以下のように展開する。

$$h(\phi,\lambda) = R\sum_{n=0}^{n_{max}}\sum_{m=0}^{n}\left[\bar{A}_{nm}\cos m\lambda + \bar{B}_{nm}\sin m\lambda\right]\bar{P}_{nm}(\sin\phi)$$

$$Free\text{-}air(\phi,\lambda) = \frac{GM_{earth}}{R^2}\sum_{n=2}^{n_{max}}(n+1)\sum_{m=0}^{n}\left[\bar{C}_{nm}\cos m\lambda + \bar{S}_{nm}\sin m\lambda\right]\bar{P}_{nm}(\sin\phi)$$

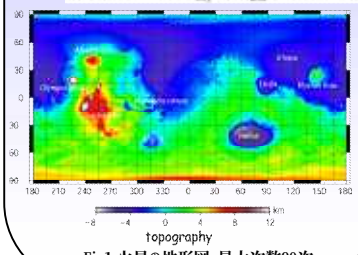


Fig1.火星の地形図. 最大次数90次

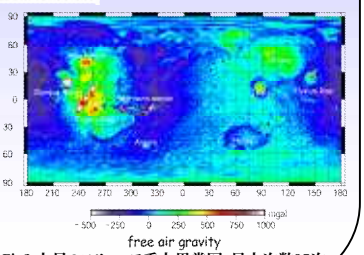


Fig2.火星のフリーエア重力異常図. 最大次数95次

2. 見かけの山体密度からみるアイソスタシー

ドップラー観測で得られたフリーエア重力異常から山体の見かけの質量を求め、レーザー高度計で観測された地形高度データから山体の体積を求め、それらの比から山体の見かけの密度を求める。見かけの密度はアイソスタシーの指標にもなり、見かけの密度が小さいほどアイソスタシーの達成度が高いと言える。Table1によると、オリンポス山が最も山体密度が大きく、アイソスタシーの達成度が低いことがわかる。

$$M_{mass} = \frac{1}{2\pi G}\int Free\text{-}air(\phi,\lambda)R^2 d\phi d\lambda$$

$$V_{mass} = \int h(\phi,\lambda)R^2 d\phi d\lambda$$

Table1.見かけの山体質量と体積とそれらの比(密度)

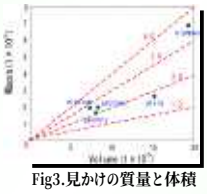


Fig3.見かけの質量と体積

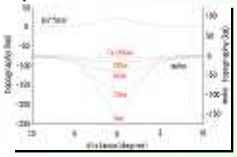
3. オリンポス火山とヘラス平原のリソスフェア厚の推定

リソスフェアが存在する場合の地形とモホ面の起伏の関係を定量的に議論する。Sugano and Heki[2005]に倣ってオリンポス火山とヘラス平原を回転対称の仮想的な地形と仮定し、その球関数の係数を求め、Turcotte et al. [1981]による弾性球殻のIsostatic Compensation Modelを適用してモホ面の起伏を求める。

$$(W'A_{nm}, W'B_{nm}) = -\frac{r_0}{\Delta\rho\, g_0}\left[\bar{T}_{nm}, \bar{B}_{nm}\right]$$

$$g_0 = \frac{Dn^2(n+1)^2}{R^2\Delta\rho g_0} + \frac{ET_e}{R^2\Delta\rho g_0}$$

$$D = \frac{ET_e^3}{12(1-\nu^2)}$$



リソスフェアが薄いほどアイソスタシーの達成度が高いことがわかる。つまり、アイソスタシーの達成度が低いオリンポス山でリソスフェアは厚く、アイソスタシーの達成度が高いヘラス平原でリソスフェアは薄い。続いて、Fig.4の仮想地形上の各リソスフェアごとの重力と観測値とを比較することで最も適当なリソスフェア厚を推定する。

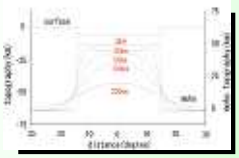


Fig4.仮想地形と各リソスフェア厚ごとのモホの形状

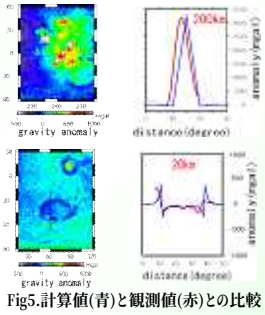


Fig5.計算値(青)と観測値(赤)との比較

$$g' = 2\pi G h + G\int\frac{\Delta\rho}{r_0}\cos\psi\, dV_1$$

Fig5より、オリンポス火山ではリソスフェア厚は200km、ヘラス平原では20kmくらいが適当であると考えられる。つまり、オリンポス火山はリソスフェア厚200kmの状態で形成し、ヘラス平原は20kmの状態でアイソスタシーの補償が起こったことを意味する。Heki [2007]によると、地球型惑星では冷却とともにリソスフェア厚は少しずつ増加する。従って、オリンポス火山は比較的最近に出来たもので、ヘラス平原は火星の熱流量が多かった初期の段階で形成したものではないかと考えられる。

4. 火星の積雪の季節変化に伴う重力の季節的変化

MOLAによる火星の1年以上にわたる地形高度観測によって、積雪の深さの季節変化の測定が可能となった。積雪は冬で最も多く、最大1.5mの積雪が見られる。積雪の変化に応じて極冠は拡大と縮小を繰り返す。今回、積雪の深さから重力項、J_2項とJ_3項を計算し、ドップラー観測によって得られたJ_2項とJ_3項を比較する。そして、平方二乗平均(RMS)を用いて最も妥当だと考えられる雪の密度とその季節変化の推定を行う。

4-1. MOLAによる積雪の深さの観測とその解析

解析に用いる積雪の深さはSmith et al.[2001]より引用する。このデータは1999年2月28日から2001年5月25日まで(火星の1年以上)に行われた地表高度の季節変化に、profile analysisを適用させたものである。Profile analysisとは、各緯度ごとの積雪の深さの平均を取ったもので、これにより経度に依存しないzonalな解析を行うことが出来る。この積雪の深さに以下の式を適用して積雪量を計算する。

$$M_s = \int\bar{\rho}_s H_s(\phi)dS = \int_0^{\pi}\int_0^{2\pi}\bar{\rho}_s H_s(\phi)R^2\sin\phi d\phi d\lambda$$

$$= 2\pi\int_0^{\pi}\bar{\rho}_s H_s(\phi)R^2\sin\phi d\phi$$

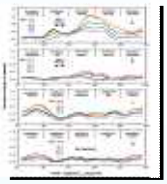


Fig6.積雪の深さの季節変化. Smith et al.[2001]より引用

Fig7.北半球(左)と南半球(右)の極冠. 赤い線が残留極冠、青い線が層状地形. Smith et al.[2001]より引用

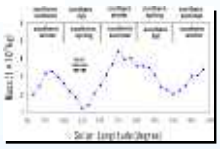


Fig8.積雪量の季節変化. ただし雪の密度を1000kg/m3とする

4-2. MOLAから導いたJ項とドップラー観測から得たJ項との比較

積雪量から重力項のJ_2とJ_3を以下の式から求める。そして、ドップラー観測から求めたJ項(konopliv et al.[2006]から引用)との比較する。

$$J_2 = -C_{20} = \frac{1}{2M_{earth}R^2}\int(2z^2 - x^2 + y^2)dM_s$$

$$J_3 = -C_{30} = \frac{1}{2M_{earth}R^3}\int z(2z^2 - 3x^2 + y^2)dM_s$$

Fig9. J_2項~J_5項を表わす重力場

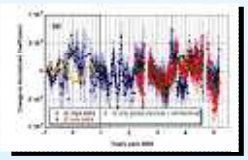


Fig10. J_2項の比較

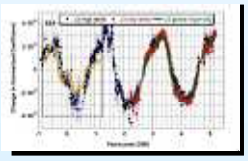


Fig11. J_3項の比較

J_3項はよく相関しているが、J_2項はあまり相関が見られない。これはMGSが極軌道を取っていることによる観測精度の低下に起因する。MOLAから導いたJ項と実測値とのずれの原因として、profile analysisで60°以下の領域をcut offしたことによる積雪量の過小評価が考えられる。これにより、北半球で2.5%、南半球で8.1%の積雪量を過小評価したと考えられる(Smith et al.[2001])。また、仮定した雪の密度(1000kg/m3)を一定として考慮したことも要因の1つではないだろうか。

4-3. 火星の雪の密度と密度の季節変化の推定

地球の雪は、積雪加重や気圧によって圧密を起こす。火星の雪も同様な現象が起きていると考え、火星の雪の密度の季節変化の検出を試みる。本研究では、圧密による雪の密度の時間変化は、時間経過に伴い準線形的に起こっているものと仮定し、初期値を新雪の密度とみなす。その評価として、計算値と実測値間の平方二乗平均(RMS)を求める。

$$\rho_0 = \rho_0 + \frac{\partial\rho}{\partial t}\frac{(t - t_0)}{T}$$

ρ_0：新雪の密度
t：時間
T：360°
t_0：積雪が始まる時間

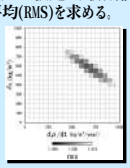


Fig12.各数値ごとのRMS

新雪の密度が600kg/m³、変化率が650kg/m³/yearで最も小さいRMSが得られた。このときのRMSは、密度一定とした場合のRMSの最小値よりも小さく、より妥当性が高いと言える。密度の年平均は約900kg/m³で、一定と考えた場合(1030kg/m³)よりもわずかに小さいが、概ね同じである。

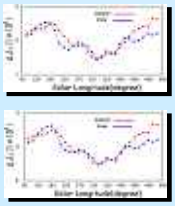


Fig13. 密度一定(1030kg/m³)(上)と季節変化を考慮した場合(下)の比較

考察

MGSのMOLAによる地形データとドップラー観測による重力データから、火星の重力と地形の相関について測地学的な解析を行った。オリンポス火山はアイソスタシーの達成度が低く、リソスフェア厚が200kmにも及ぶ。一方ヘラス平原ではアイソスタシーの達成度が高く、リソスフェア厚が20kmほどであることがわかった。この結果より、火山の形成は比較的新しく、衝突盆地は古いことがわかる。続いて、MOLAによる積雪の深さの季節変化とドップラー観測による重力項の時間変化から積雪に伴う重力について解析を行った。この結果から、J_2項の変化はよく一致し、新雪の密度が600kg/m³で、650kg/m³/yearで時間変化すると、より適合性が高くなることがわかった。

参考文献

・Heki,K., Sugano, T. (2004): Isostasy of the Moon from high-resolution gravity and topography. GRL 31, L24703, doi:10.1029/2004GL022059.
・Konopliv, A.S., Yoder,C.F., Standish, E.M, Dah-Ning Yuan, Sjogren, W.L. (2006): A Global Solution for the Mars static and seasonal gravity, Mars orientation, Phobos and Deimos masses, and Mars ephemeris. Icarus 182, 23-50.
・Smith, D.E., Zuber, M.T., Neumann, G.A. (2001): Seasonal Variation of Snow Depth on Mars. Science Vol.294, 2141-2146.
・Zuber M.T. et al. (2000): Internal Structure and Early Thermal Evolution of Mars from Mars Global Surveyor Topography and Gravity. Science Vol.287, 1788-1793.