

重力測定による富士山の重量と内部構造

駒澤正夫¹⁾

富士山をはじめ愛鷹山、箱根火山などの火山は基盤の浅くなっている高重力異常域に存在することが広域重力場の解析からわかった。重力残差については、富士山山頂を中心とした直径10kmほどの大きな高残差域がみられるが、さらにその中には岩脈の集合体を示すものと思われる直径1km程度の小さな高重力域がいくつか見いだされた。山体全体の平均密度は、 2.3g/cm^3 ほどになるが、山頂部での表層密度は 2.2g/cm^3 より小さくなり岩石の隙間が多いことを示している。重力基盤を求めることにより富士山の体積が 500km^3 と推定されたことにより、重量は1兆1,500億トンと算出された。

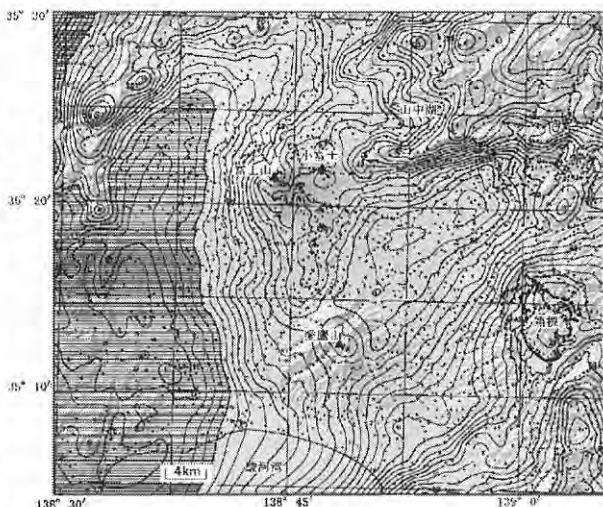
1. 測定と重力異常

富士山の重力調査の例としては、Yokoyama and Tajima (1960) のウォルドン重力計による調査結果があり、彼らは山体密度を 2.63g/cm^3 と結論づけている。また、富士山の直下で地殻が山体の加重に見合うようなアイソスタシーの凹みを重力異常は示していないともしている。また、アイソスタシーについては凹んでいても重力異常に表れるほどの構造異常は示さないという研究 (Tanaka and Satomura, 1995) もある。

産業技術総合研究所では、富士山の山体構造把握のため重力調査を行ってきた。裾野部は広域調査の一環として数多くの調査がなされたが、山体部の調査は1981年に主として登山道沿いで実施したものが精度の点で利用可能のものであった。最近になって、ディファレンシャルGPSの利用が容易になり、1999~2002年に中腹部から山頂部で新たに調査を行った。登山道の未整備な中腹部(お中道を含む)とお中道から山頂部への北-西側斜面において200点ほどの追加調査を

実施した。お中道を含め登山道以外には踏破可能な場所や危険度がはっきりしなかったため2002年の測定では山岳ガイドの補助を受けて測定可能な場所を選定した。特に、大沢崩れを含む北-西側斜面は富士山内部の構造をはっきりさせるためには、重要な測定となった。重力計についても、ラコスト重力計に加え、新たにコンパクトで軽量なゼロ・レングス・スプリング社製のプリス重力計を導入して測定の効率化を図った。測位は、標高も含めディファレンシャルGPSにより数10cm以内の精度で行い充分な精度の重力異常分布を得るようにした。

表層の平均密度(仮定密度)を 2.3g/cm^3 とした広域重力図(ブーゲー異常)を第1図に示す。第1図を見ると、富士山が基盤構造の高まり上に存在し、それも基盤構造の高まりの縁に存在しているこ



第1図 富士山の重力異常(ブーゲー異常)。地形の密度は 2.3g/cm^3 を仮定、コンター間隔は 2.5mGal で、 10mGal 毎に太線で値を表示、負値に横線の陰を付けて表示。H: 重力異常値極大域、L: 重力異常値極小域、+ : 重力測定点。背景のレリーフは地形。

1) 産総研 地球科学情報研究部門

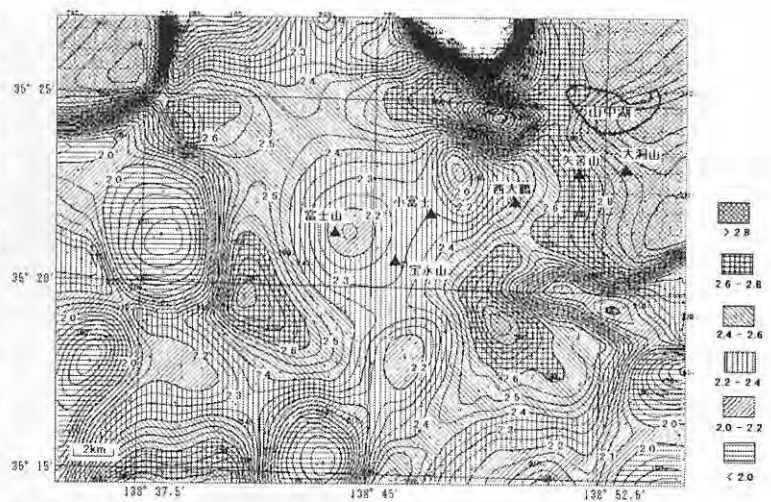
キーワード: 富士山の重量, 重力残差図, 平均密度, 重力基盤, 宝永山, 側火山

とがわかる。大抵の火山は周囲にくらべ基盤が浅くなっているところに存在しており、富士山もその例外ではないことがわかった。愛鷹火山や箱根火山も同様に高重力異常になっており、基盤の浅いところに存在していることがわかる。実際に、富士山山頂より山中湖南方にいたる高重力異常については、その東方延長の丹沢山塊で石英閃緑岩-花崗岩の基盤岩の露出がみられることから、基盤が浅い一連の構造を示している。また、この高重力異常については山頂に近づにしたがいコンターが滑らかになっており、徐々に火山噴出物が厚みを

増し基盤の形状の詳細がわかりづらくなっていることを示している。山頂東方の小富士などはこの高重力異常域にあるが、これは溶岩の噴出源となった岩脈の存在も示している可能性もある。本研究の調査でより鮮明になったものとして、山頂より南南東の愛鷹火山の方向に伸びる高重力異常帯の存在がある。これは基盤が浅くなっているだけでなく溶岩を噴出した岩脈の痕跡・根を表していると推定される。つまり、この方向は地質的にも宝永山をはじめ多くの側火山や割れ目が分布する方向に近く、重力異常をうまく説明できるからである。また、上記の岩脈状高重力帯の山頂をはさんで反対側にあたる山頂から北北西に伸びる方向にも側火山が存在する(津屋, 1971)とされており、高重力異常の存在が予想されたため山頂部から北-西側斜面の調査を行った。しかし、予想に反し特段の高重力異常は検出されず、密度的には大きな岩脈が多数存在するような構造は見えてこなかった。北西側の側火山群は、単性のものが分散して存在するために岩脈の密集がないのかもしれない。

2. 表層密度解析

次に、富士山周辺の密度推定の結果を示す。方法は、「上方接続残差分散比較法(Comparison of Variance of Upward Residual: CVUR法)」(Komazawa, 1995)というもので、地形がつくる密度構造は起



第2図 表層の推定密度分布。推定は上方接続残差比較(CVUR)法による。コンター間隔は $0.05\text{g}/\text{cm}^3$ で、 $0.1\text{g}/\text{cm}^3$ 毎に太線で値を表示。

伏をもつので重力効果として最も短波長の成分が発生することを利用して、ブーゲー補正と地形補正に使う密度(假定密度)が、地形を作っている表層密度に一致すれば、第1層目は密度的に透明になって地形に対応する短波長の重力成分は消失するので、假定密度と表層密度が一致した場合、短波長成分の比率が最も少なくなる。ここでは短波長成分だけを取り出すようなフィルターを施した重力残差の分散量(ランダム性)を計算し、その分散量を一番小さくする密度が最適な表層密度となる。

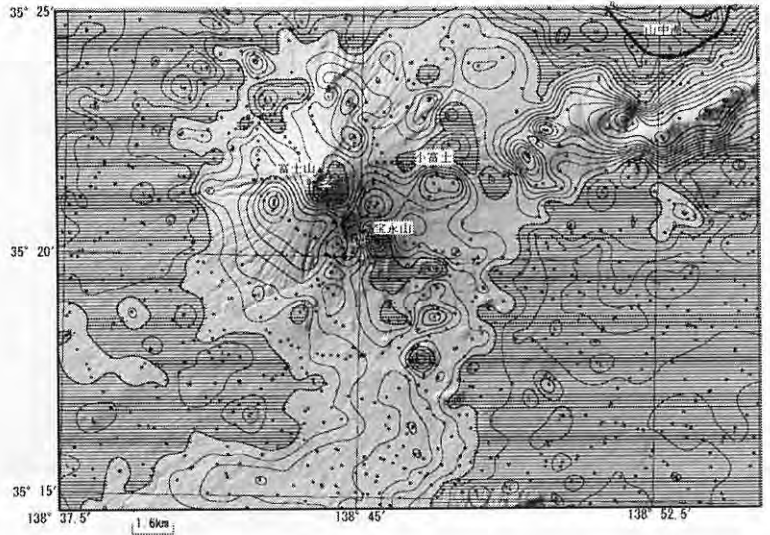
解析の結果、富士山全体の平均密度として、 $2.27\text{g}/\text{cm}^3$ という結果を得た。この値は、火山の表層(深度数100m程度まで)の平均密度としては普通のものである(例えば、Komazawa, 1995)。一方、サンプリング半径を小さくし、位置を少しずつずらしてスキャンさせれば、面的な密度分布が得られる。そうして得られた結果を第2図に示す。第2図は、125mの上方接続残差に対し、4kmのサンプリング半径で解析した例であり、極く表層の密度を示していると考えられる。解析結果によれば、山頂付近は密度が $2.0\text{g}/\text{cm}^3$ くらいしかないが、すそ野の方では大きくなって $2.4\text{g}/\text{cm}^3$ くらいになる。以上の結果は、山体が密度的には極めて不均質な構造を持っていることを示している。

重力残差図

山体構造を抽出するフィルター処理の結果を以

下に示す、第1図に示した広域重力図は、広域の傾向面や数km以上の深い構造が原因の重力異常を含むので、比較的深度の浅い地質構造は見えにくい。また、極く表層の密度の不均質性は、広域重力図では抽出することは困難である。ここでは、深部構造による重力異常を上方接続フィルターによるものと考えて分離し、地表下数kmより浅い構造の重力異常を抽出する。具体的には、ここでは上方接続500mのものを広域トレンドとして重力異常から差し引きを重力残差図とした。結果を第3図に示す。假定密度は、第1図と同じ 2.3g/cm^3 で、負値に横線の陰を付けて表示した。

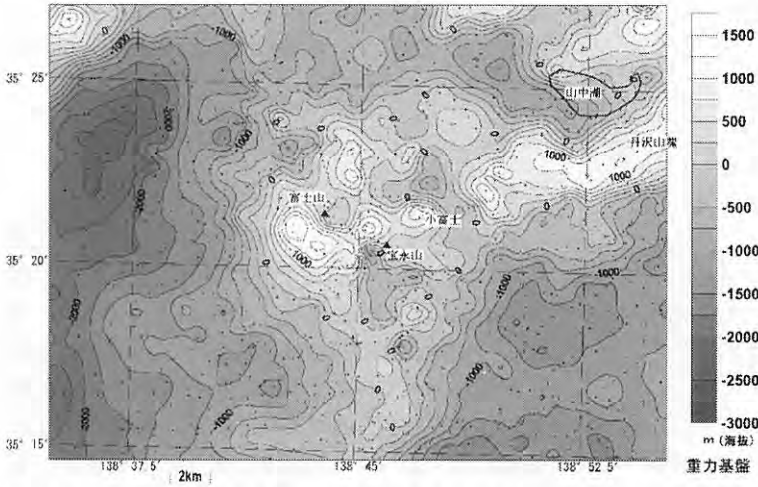
第3図の重力残差図では、山中湖南方の明神峠から三国山、大洞山、矢筈山を経て、西大鶴(大根山)にいたる尾根は明瞭な高重力残差が示され、高密度の第三紀基盤が露出していることに対応している。この高重力残差は、富士山東斜面中腹の旧馬返の標高1,500m付近を西端とし、西側の南南東-北北西方向に伸びる帯状の低重力残差域に画されていることから、第三紀基盤はこの付近から深度を増しているか、溝状の落ち込みが存在することが考えられる。小富士から西の山頂を含む広範な高重力残差域は、第三紀基盤が周辺部より盛り上がっていると考えられるが、火山の芯とも言うべき岩脈の集中や溶岩の本源物質(溶結マグマなど)の存在を示しているのかもしれない。直径10kmほどのこの高重力残差域の中にはいくつかの直径1km程度の小さな高重力域が見られ、各々が岩脈の痕跡を示すものと思われる。そのいくつかを上げれば、山頂部西方、小富士、宝永山南方域などであり、いずれも地形的には明らかな溶岩の噴出源となっていたところである。この小さな高重力異常域の表層密度は密度解析の結果からは周辺部と大きな差があるとは思われないので、最上部が地表下数100m程度のごく浅い岩脈状の高密度体が高重力異常を示す原因となっていると想定できる。



第3図 重力残差(浅部の構造を示している)。背景のレリーフは地形。假定密度は 2.3g/cm^3 、コンター間隔は 0.5mGal で、 2mGal 毎に太線で値を表示。負値に横線の陰を付けて表示。H: 重力残差極大域, L: 重力残差極小域, O: 重力測定点。

3. 重力基盤構造

解析の方法としては、基盤の起伏から計算される重力異常が観測重力値に収束するように基盤形状を徐々に修正させて最終的に最適解を求める逐次近似法を用いた。計算には、假定密度 2.3g/cm^3 のブーゲー重力異常と、地形標高値の各々250mメッシュデータを用意した。また、解析対象の深度である数km程度の構造より半オーダー以上深い構造による広域傾向面的な重力異常は、2kmの上方接続フィルターで除去した。さらに、局所的な異常や誤データが作るノイズ成分は、125mの上方接続フィルターで除去した。以上のバンドパスフィルターの操作がなされたものが第3図に示した重力残差で、先第三系基盤の起伏や火山地域での高密度溶岩や岩脈の集積した構造から生成されていると考えられるものである。地下構造を低密度の被覆層と高密度の基盤の均質2層にモデル化して計算した。基盤の密度は花崗岩や先第三系基盤の平均的な密度と考えられる 2.65g/cm^3 という値を採用した。被覆層、つまり、新しい堆積層や火砕堆積物の密度値としては $2.0\sim 2.3\text{g/cm}^3$ が考えられる(火山性堆積物の領域が広いので 2.3g/cm^3 を想定)が、本解析では一律に密度差を 0.35g/cm^3 とした。適



第4図 富士山周辺の重力基盤. 富士山は東北東から山頂に向かって伸びる基盤の盛り上がり域にあることがわかる. 基盤は標高表示.

当な試錘データがないので露出基盤をコントロール点とした, 重力基盤を250m間隔の等高度線で示し, 各深度階を段階表示した(第4図). なお, 重力基盤の数値は標高値である. また, 地形と重力基盤を合わせた俯瞰図を第5図に示した. 富士山の下には丹沢から伸びてきた基盤があるなど, 起伏に富んでいることが判りやすく表現されている.

重力基盤の主な特徴は, 以下の通りである.

(1) 富士山は, 山中湖南方付近から東北東-西南西に伸びる基盤の地塁状の盛り上がり域にあり,

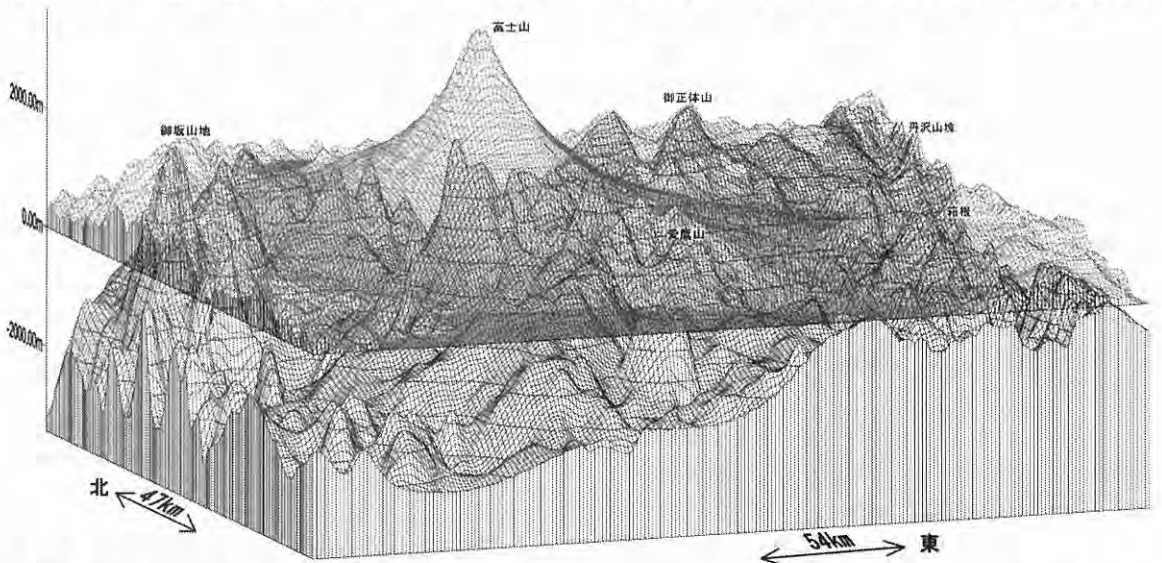
基盤の尾根部の標高は山頂に向かって高くなっている. 深度については, 山体を覆う被覆層が厚くなるため大きくなる.

(2) 上記の地塁状の盛り上がりについては, 富士山東斜面, 五合目の小富士付近で一旦分断しているように見える. 東側については, 丹沢山塊でみられる石英閃緑岩-花崗岩と同質のものと考えられるが, 西側については, 富士火山の形成段階の初期に生成された高密度溶岩が密集してブロック状の構造を作っている可能性もある.

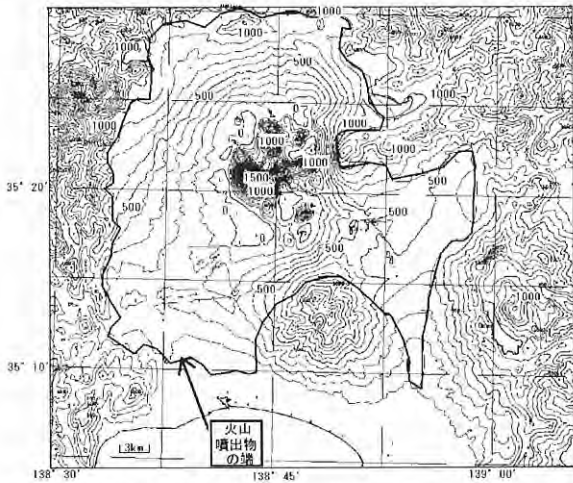
(3) 富士山山頂から南南東の愛鷹山方向に基盤の高まりがみられ火

山活動がこの線上で活発であったことを示すか, マグマの生成・上昇に伴い基盤が隆起した痕跡と考えられる. この線上には, 江戸時代中期に山腹噴火を起こした宝永火山も位置している.

(4) 富士山の西側は, 急激な基盤の落ち込みが見られるが, 急激に側火山などの火山活動が見られなくなる. 磐梯山から猪苗代湖に向かう急激な重力基盤の落ち込み域でも同様な例がみられる. これらは, 火山地域の基盤構造が, マグマの貫入などの火山活動の結果を反映していることを示して



第5図 地形と重力から計算した基盤の俯瞰図. 富士山の下には丹沢から伸びてきた基盤があるなど, 起伏に富んでいることがわかる.



第6図 富士火山噴出物の下限の推定(標高表示), 火山噴出物の分布域の端で深度を0mとし, 富士山の下重力基盤が標高0mのところに向かって比例的に深度を増すモデル, 富士山の領域外は, 現在の地表面になっている。

いる可能性がある。

4. 富士山の重量

富士山の山体の平均密度として約 $2.3\text{g}/\text{cm}^3$ という結果が得られた。重量を求めるには体積を知れば推定できる。問題として残っているのは、地質図などから富士火山の噴出物の面的な分布範囲はわかっているが、深度情報がないため3次元的な富士火山噴出物の領域がわからないことである。過去においては、長径 25km 、短径 18km の標高 $1,000\text{m}$ 以上の楕円錐体領域 450km^3 を富士山の体積としていたこともあるが、今回は、算出された重力基盤を用いて体積の推定を行った。富士山の溶岩や噴出物の分布域(津屋, 1971)を面的な富士山の範囲とした。深度情報については、重力基盤を富士山体の下限とした。つまり、重力基盤を丹沢方面から伸びてきた地質の基盤と同じものと考えた。下面の算出の詳細として、津屋による火山噴出物の分布域の端で地表からの深度を 0m とし、富士山に向かって標高 0m の重力基盤に比例的に深度を増すモデルを考えた(第6図)。そのモデルと地表面との差を求めることによって得られる体積は、約 500km^3 となって、単純な楕円錐体モデルよりやや

大きくなる結果が得られた。平均密度と得られた体積から、富士山の重量は、 1 兆 $1,500$ 億トンと算出された。

5. おわりに

富士山の重力調査・解析結果について述べてきたが、本調査により、地下に伏在する岩脈や古い山体の抽出にある程度有効であることが示された。さらに、地質情報と併せれば活動履歴の解明にも役立つと思われる。また、単に火山の山体内部の密度構造に限らず広域的な場を解明するのに有効で、基盤の浅くなっている部分に富士山、愛鷹山、箱根などの火山が生成したことが示された。山体全体の平均密度を得るのにも、平坦な地形では精度が落ちるなどの課題があるが、ある程度は有効で、岩石試料の密度の測定結果を併せると溶岩と火砕物との比率も推定できる可能性もある。表層密度マッピングによる地盤の密度・空隙率の推定から災害予測にも利用するなどの今後の課題も検討したい。また、富士山の密度構造を求めた副産物として、富士山の重量を推定することもできた。

謝辞: 本研究は、鉄道建設・運輸施設整備支援機構(旧:運輸施設整備事業団)基礎研究制度による「大都市における火山灰災害の影響予測評価に関する研究」の一環として行われた。本調査に際し、気象庁富士山測候所の方々には、重力計への電力供給など数々の便宜を頂いた。以上、記して感謝いたします。

文 献

- Komazawa, M. (1995): Gravimetric analysis of Aso Volcano and its interpretation, *J. Geod. Soc. Japan*, 41, 17-45.
 Tanaka, T. and Satomura, M. (1995): Reconsideration on the Isostasy of Mt. Fuji, *Journal of the Geodetic Society of Japan*, 41, 251-262.
 津屋弘達(1971): 富士山の地形・地質。富士山総合学術調査報告書。富士急行株式会社, 1-149.
 Yokoyama, I. and Tajima, H. (1960): A gravity survey of Volcano Fuji, Japan by means of a Worden gravimeter, *Geofisica pura e appl.*, 45, 3-14.

KOMAZAWA Masao (2003): The weight and the internal structure of Mt. Fuji by gravity measurement.

<受付: 2003年9月10日>