

草津白根山頂域における精密重力探査

牧野雅彦¹・渡辺史郎¹・住田達哉¹・小川康雄²

1：産業技術総合研究所 深部地質環境研究センター -

2：東京工業大学 火山流体研究センター -

Microgravity Survey in the vicinity of the Kusatsu - Shirane Summit

Masahiko Makino¹, Shiro Watanabe¹, Tatsuya Sumita¹, Yasuo Ogawa²

1: Geological Survey of Japan, AIST

2: Tokyo Institute of Technology

1．はじめに

活動的火山の長期的活動を調査研究するためには、活動域周辺の詳細で正確な地殻構造について把握することが必要である。特に、地下深部からのマグマの上昇過程、火山体の重力不安定性、地下水流動系等の解明およびその周辺域への影響評価のためには地殻の不均質密度構造は重要な情報となる。本報告書では草津白根火山の山頂付近で実施した精密重力探査によるブ-ゲ-異常図を示し、重力解析から推定される陥没構造と火山活動の関係について述べる。

2．山頂付近の地形・地質の概要

草津白根火山の山頂には白根(2,160m)、逢ノ峰(2,109.9m)、本白根(2,171m)の3つの火砕丘が存在する。Fig.1に火山地質図(宇都ほか,1983)を示す。これらの火砕丘は東側および南側に向けて緩やかに傾斜した基盤の上に位置し、火砕丘の北西側では基盤岩類が地表に露出している。早川・由井(1989)によれば草津白根火山の噴火ステージは大きく3つの噴火期に区分される。第1噴火期は100万年~200万年前、第2噴火期は約80万年前に始まった。第2噴火期に続く第2休止期は10年以上の時間が継続したらしい。その長い休止期の後で、14,000年前に始まった第3噴火期で3つの火砕丘が山頂域に形成され、それに伴って新期溶岩が流下した。平兵衛池溶岩(Hb)と白根火砕丘(S)は14,000年前に、香草溶岩(Kg)は7,000年前に、殺生溶岩(SS)と振子沢溶岩(Fr)は3,000年前に噴出した。現在も水蒸気爆発が頻発し、活動的な火山である。

3．精密重力探査の概要

3.1 重力測定

重力測定にはLaCoste & Rombergの重力計(D-205, G-304)を使用した。探査中の仮重力基点として国土地理院が設置した水準点GPS07(多田ほか,1996)等を用い、その絶対重力値は日本重力基準網1975と前川ほか(1996)による重力精密測定の成果に準拠して設定した(表1)。重力測定は基点で最初に重力測定を行い、測点に移動して基点との相対的重力値を測定した後、

再び基点に戻って測定する閉塞測定を行った。この閉塞測定によりドリフト補正を行った。2001年から2003年の期間で、山頂周囲の233地点において新規に重力測定を行った。既存の重力データ（地質調査所，1975：地質調査所，1976：駒澤ほか，2000）は本探査地域において当初41点だったが、精査した結果36点が利用できると判断した。

以上の269地点における重力測定値から各種の補正計算をする手順は地質調査所重力補正手順SPECG1988（地質調査所重力探査グループ，1989）に従い，測定近傍の地形補正には村田ほか（1996）の方法で国土地理院の数値地図50mメッシュ標高データを用いて計算した。

表1：探査に使用した重力基点（緯経度は東京測地系）

| 基点名称 | 緯度 | 経度 | 高度 | 重力値 |
|--------|-------------|--------------|------------|-----------------|
| GPS07 | 36° 37.868' | 138° 33.502' | 1779.843 m | 979479.017 mgal |
| DANBEI | 36° 37.090' | 138° 36.351' | 1149.933 m | 979608.652 mgal |

3.2 GPS 測量

重力測定した地点の緯度，経度，高度はすべてGPS高速静止測量を用いて求めた。使用した受信機はTrimbleの4000ssiと4600LSの2台である。受信基点として国土地理院が草津町に設置した電子基準点(960591)を利用した。各地点での観測時間は20分から40分である。GPS測量による高度に関する精度は数cmから十数cmの誤差を含むことがある。誤差による重力異常の影響は，0.1mの高度差で高度補正の項 δg_h は次式で計算すると，

$$\delta g_h = (0.3086 - 0.04193\rho)\Delta h \approx (0.3086 - 0.04193 \times 2.6) \times 0.1 = 0.01996 \text{ mgal}$$

と見積もることができる。ここで，密度を 2.6g/cm^3 と置いた。この程度の誤差であれば，0.1mgalコンタの詳細な重力図を作成するには十分である。

4. 結果

4.1 密度推定

重力測定値から密度を推定するF-H相関法（もしくはG-H相関法）には幾つかの手法が提唱されている[Rikitake et al.(1965)，Fukao et al.(1981)，高倉・花岡(1988)，森林(1990)，村田(1990)，牧野・遠藤(1999)]。

地殻浅部の密度は広域的傾向面を考慮したF-H相関法(牧野・遠藤，1999)によって求める。広域的な傾向面を多項式による曲面 $f(x, y | s)$ で表現する。sは曲面を表すための係数である。観測点 $P(x, y, h)$ における局所的ブ-ゲ-異常 Δg を次式によって表す。

$$\Delta g = g_{obs} - \gamma + \beta h - 2\pi G\rho h + \rho T + C_a - f(x, y | s) \quad (1)$$

ここで， g_{obs} ：観測重力値， γ ：正規重力値， h ：測定点標高， β ：フリ-エア勾配， G ：万有

引力定数, ρ : ブ - ゲ - 補正密度, T : 単位密度あたりの地形補正值, C_a : 大気補正值と水圏

地形補正值を含めた項である。(1)式で $F = g_{obs} - \gamma + \beta h + C_a$, $H = 2\pi Gh - T$ として,

$$F = \rho H + f(x, y | s) + \Delta g \quad (2)$$

である。(2)式でフリ - エア異常 F と標高関数 H の相関から密度 ρ が推定されるので $F - H$ 相関法と言われる。

さて, 傾向面を3次多項式で表す。

$$f(x, y | s) = \sum_{k=1}^4 \sum_{l=1}^4 s_{4(k-1)+l} x^{4-k} y^{4-l} \quad (3)$$

(3)式の16個の係数と密度 ρ は N 個の測定値についての最小二乗問題として

$$\sum_{i=1}^N [F_i - \rho H_i - f(x_i, y_i | s)]^2 \rightarrow \min \quad (4)$$

の解として求めることができる。

$\Delta F = F - f(x, y | s)$ と置けば(4)式は

$$\sum_{i=1}^N [\Delta F_i - \rho H_i]^2 \rightarrow \min \quad (5)$$

という簡単な形をとる。

Fig.2 は草津白根山頂付近の重力デ - タの $F - H$ 相関関係を示したものである。Fig.2(a)は従来の $F - H$ 相関法と同じで傾向面を考慮しないものである。推定された密度は 2.56g/cm^3 で, 相関係数は 0.986 である。 F と H の分布に多少のバラツキがある原因のひとつは, 東に向かって傾斜している広域的な重力分布の影響である。Fig.2(b)は式(4)を用いて求められた傾向面のパラメータから補正された $F - H$ 相関関係を示す。推定された密度は 2.29g/cm^3 で, 相関係数は 0.998 と高い。火山地質構造との対比を調べるには, 後者の密度値を使用することにする。

4.2 重力異常

Fig.3 に密度 2.29g/cm^3 で計算した草津白根山頂のブ - ゲ - 異常図を示す。Fig.3 において横手山付近で重力異常は最も高い値 (5 mgal) で, 青葉山付近で最も低い値 (-8 mgal) を示す。重力異常のコンタ - 線は草津白根山の北西にある山田峠付近で屈曲している。つまり, 横手山, 渋峠付近のコンタ - 線は東西方向であるが, 山田峠付近でその向きを南北方向に大きく変えている。このような大局的な重力異常は基盤の傾きによるものと考えられる。草津白根山付近の詳細な重力異常は, 円形に近くやや東西に伸びた楕円型の低重力異常を明瞭に示す。その低重力の一番低い地点は水釜溶岩円頂丘の南東側急斜面にある。この低重力異常の南東側には白根隠し山の尾根に対応して高重力異常が伸びて分布している。

火砕丘の逢ヶ峰, 本白根付近には白根火砕丘で見られるような大きな低重力異常は存在しないが, 重力の傾斜勾配は比較的緩やかである。火砕丘列の東側, つまり青葉山から富貴原ノ池にか

けて、重力異常の傾斜勾配は大きくなる。

Fig.4 に傾向面を取り除いた局地重力異常図を示す。パラメータは(4)式を用いて求めた。Fig.3 のブ-ゲ-異常と比べると、低重力異常の中心が水釜溶岩円頂丘の直下に位置していることが顕著である。この低重力の範囲内に北東から水釜、湯釜、涸釜がちょうど分布している。また、この低重力異常の東側と西側は重力の高まりがあり、南北方向に伸びる形態を示す。西側の高重力異常は Fig.1 の第三紀安山岩類(T)にちょうど対応する。東側の高重力異常は横手山溶岩類や青葉溶など比較的年代が古い岩体に対応する。

この低重力異常の境界はそれほど明確ではないが、水平規模は東西に約 2km、南北に約 1.5km のである。境界が不鮮明な原因は恐らく構造境界が地表面と低角で交わっているためと考えられる。もし垂直あるいは急崖状の境界であれば稠密なコンタ-線が描かれるはずである。また、西側境界は湯釜から白根山の間を通る。白根火砕丘の内部構造は均質な密度構造でないことを示す。Fig.4 の白根山の最高峰付近は高重力異常の張り出しを示しており、その地下にやや密度の高い構造があるということがわかる。早川(1983)の地質図によれば白根火砕丘の西端斜面に旧期溶岩が分布しており、これが白根火砕丘の基底を形成していると考えられる。

芳ヶ平、本白根付近にも弱い低重力異常が存在するが、重力測点数が少ないので今後増やす必要がある。また、渋峠から芳ヶ平へ下りる途中のダマシ平付近に小さな低重力異常が存在する。

4.3 構造解析

Fig.4 で得られた水釜付近の直径約 2km の低重力異常の構造解析を目的とする。

前々節において草津白根山頂付近の平均密度を F-H 相関から 2.29g/cm^3 と見積もったが、この値をもって基盤を構成する岩石密度 ρ_2 とみなす。次に、低重力異常を構成する表層密度 ρ_1 を見積もる必要がある。水釜溶岩円頂丘を中心とした緯度 $36^\circ 38' - 39'$ 、経度 $138^\circ 31.8' - 33.2'$ の範囲の実測重力データ 112 点を用いて、F-H 相関より推定された密度は 2.03g/cm^3 で相関係数は 0.997 であった。Fig.2(c)に相関関係を示す。見積もられた密度値は火山地域における表層密度としては平均的な値であるので、この値 2.03g/cm^3 を妥当と判断して表層密度 ρ_1 とみなす。構造解析に必要な密度差 $\Delta\rho$ は $\Delta\rho = \rho_2 - \rho_1$ より 0.26g/cm^3 となる。

Fig.4 の局地重力異常から緯度 $36^\circ 38.5'$ に沿って東西断面(経度 $138^\circ 31' - 34'$)を切り出したのが Fig.5(a)である。局地重力異常の最大値は 0.657mgal 、最小値は -1.216mgal である。その差は 1.873mgal である。東西断面に沿った地形を Fig.5(b)に示す。地形断面図で $x=1\text{km}$ のところを志賀草津道路が走り、 $x=2\text{km}$ で湯釜の北火口壁、 $x=2.3\text{km}$ 付近で水釜溶岩円頂丘近傍、 $x=2.75\text{km}$ 付近が芳ヶ平へ抜ける遊歩道、 $x=3.9\text{km}$ 付近が小右衛門ノ滝近傍の香草温泉に相当する。地形断面図を見てわかるように、非常に急峻な地形をしているので重力異常から直接構造を求める逆解析は難しい。そこで、Talwani et al. (1959)の方法を用いて順解析を行う。順解析では表層の上面を地形データで与え、表層の底面を構造モデルの可変パラメータとし、計算値と観測値を比較した差を判断してモデルを修正し、最適なモデルに近づける。その計算結果を Fig.5 に示す。

構造の概略をまとめると、

(1) 地表から深いところまでの最大は水釜溶岩円頂丘東麓で深度約 285m である。その標高値

は約 1.7km である。基盤はその東に向かって緩やかに高くなり $x=3.2\text{km}$ 付近で標高値は約 1.8km となり、そのピ - クより東側では表層の厚みが徐々に増していく。

(2) 白根火砕丘の西斜面の表層は非常に薄く、ほとんど基盤が露出している状態に近いことがわかる。この構造は早川(1983)の白根火砕丘の西側に分布する旧期溶岩と矛盾するものではない。したがって、重力構造解析の結果から、Fig.1 の地質図(宇都ほか, 1983)で白根火砕丘の西斜面の記載を修正する必要があると考える。

(3) 白根火砕丘の東側半分は西側半分と異なり、低密度な火山噴出物で構成されている。

(4) 湯釜、水釜の底は急激に深くなる基盤斜面の上に載っている。

(5) 水釜溶岩円頂丘はその周囲と同じ密度で構成されている。いわゆる芯構造は密度的には無い。

5. 考察

5.1 火山性地震・微動との比較

草津白根山を中心とする局所的な負の重力異常は長い間認められてこなかった(田島ほか, 1977; 田島ほか 1978)。しかし、精度の高い重力データを集中的に増やすことによって、草津白根山頂域に負の局地重力異常が顕著に現れた。この陥没構造と他の観測データとの比較を試みる。

草津白根山に設置された地震観測網により、火山性地震や火山性微動が水釜溶岩円頂丘直下の深さ 1km 以浅で起きていることが分かっている(井田ほか, 1990)。及川ほか(1993)は震源域近傍に稠密な地震観測網を設置し、火山性地震・微動の高品質な波形データを得た。Nakano et al. (2003)は波形データからの詳細な震源解析で震源位置を水釜溶岩円頂丘の数百 m 範囲内に分布することを求め、山頂直下 300m にほぼ水平なクラック内の熱水活動による急激な蒸気の排出メカニズムを提唱した。精密重力探査から得られた局地重力異常(Fig.4)の低重力異常の中心は Nakano et al. (2003)が求めた震源位置とほぼ一致するものである。重力構造解析から得られた陥没構造の深さも震源の深さとほぼ一致する。また、2003 年集中総合観測では人工地震探査に併せて白根山頂部付近で臨時観測が行われ、1 週間で観測された 30 個の火山性地震の震源が湯釜・水釜の直下 500m 以浅に集中していることが報告されている(堀ほか, 2004)。

5.2 全磁力変化との比較

気象庁地磁気観測所による全磁力観測で 1990~1991 年の火山性地震が活発な時期に -15.4nT の全磁力変化が検出された(手塚ほか, 1993)。磁気解析の結果、水釜周辺の地下数百mで大規模な熱消磁が発生したと考えられている。球体モデルによる熱消磁の計算結果は、水釜直下約 700m に $5.6 \times 10^7 \text{A/m}^2$ が求められた。磁化強度を 1.0A/m とすると、半径 240m の球である。熱消磁した位置は局地重力異常の中心とほぼ同じである。もしも、水釜溶岩円頂丘の低重力異常をつくる構造モデルを同様な球体モデルと仮定すると、その中心深度は 844m となって、密度差を 0.26g/cm^3 にすると半径が 572m と計算される。重力異常も磁気異常も、球体モデルを仮定すると深めに深度が推定される。熱消磁モデルを薄い構造に変えると深度は浅く推定されるはずである。

5.3 火山熱水系との比較

重力構造解析で基盤の断面構造を求めた (Fig.5). 一般に密度が小さい岩石は空隙率が高く、透水性も高いと考えられる。断面構造で密度の小さい表層は透水性が高く、その下の基盤は不透水層を形成することを意味する。白根山頂の降水は地下に浸透し、地下水は急傾斜な基盤上面に沿って水釜溶岩円頂丘の直下の陥没構造に集められる。つまり、重力基盤構造は地表から浸透した地下水を集水し、貯留することが可能な構造をしている。MT 探査による比抵抗構造(Nurhasan et al., 2003), 湯釜から東山麓まで深さ 500m 以浅で低比抵抗帯が広がるが、湯釜の西側に低比抵抗が存在しないといこと矛盾しない。重力基盤構造は、大場ほか(2000)の熱水系モデルで提唱されている構造に近いものであると言える。陥没構造の中心にある火道を通して火山性流体が上昇し、貯留層において天水起源の地下水と混合する。密度の軽い火山ガスは基盤境界に沿って上昇していく。山頂北側の噴気帯は負の局地重力異常の傾斜部に沿って分布している。一方、密度の重い熱水は東方に向かって移動し、基盤の高まりを乗り越えて溢れ出すはずである。マグマ起源物質を多く含むとされる香草温泉はこうして湧出したものである可能性が高い。

6. 結論

草津白根山頂付近における精密重力探査から、水釜溶岩円頂丘を中心とした直径約 2km の陥没構造を検出することができた。F - H 相関関係から推定された密度は 2.29g/cm^3 で、水釜付近の表層の密度は 2.03g/cm^3 であった。傾向面を除去した局地重力異常から、白根火砕丘は西側に基盤の盛り上がり、東側に陥没構造を持つ不均質な内部構造が明らかになった。この陥没構造は火山性地震・微動、全磁力変化で観測された熱消磁、火山熱水系と密接な関係にあることが分かった。

謝辞

探査にあたって東京工業大学草津白根火山観測所の平林順一教授、大場 武助教授ならびに関係者の方々にはいろいろと便宜をはかっていただいたことに感謝いたします。また GPS データ処理には国土地理院の電子基準点データを利用させていただきました。

引用文献

- 地質調査所(1975)全国地熱基礎調査報告書, No.14, 白根南部, 153 - 164 .
- 地質調査所(1976)全国地熱基礎調査報告書, No.26, 白根北部, 121 - 135 .
- 地質調査所重力探査グループ(1989)地質調査所重力補正手順 SPEC1988 について, 地調月報, 40, 601 - 611 .
- Fukao, Y., A. Yamamoto and K. Nozaki (1981) A method of density determination for gravity correction, J. Phys. Earth, 29, 163 - 166 .
- 早川由紀夫(1983)草津白根火山の地質. 地質学雑誌, 89, 511 - 525 .
- 早川由紀夫・由井将雄(1989)草津白根火山の噴火史, 第四紀研究, 28, 1 - 17 .
- 堀 美緒・河野祐希・松島 健・清水 洋・鬼澤 真也・平林順一・野上建治・草津白根集中観測 人工地震探査グループ 筒井智樹(2004)草津白根火山における火山性地震の震源分布. 地球惑星科学関連学会, 2004 合同大会 .
- 井田喜明・長田昇・沢田宗久・小山悦郎・鍵山恒臣(1989)草津白根山における常設地震観測と 1989

- 年 1 月 6 日の小噴火．震研彙報，**64**，325 - 345 ．
- 駒澤正夫・広島俊夫・石原文実・村田泰章・山崎俊嗣・上嶋正人・牧野雅彦・森尻理恵・志知龍一・岸本清行・木川栄一・三品正明(2000) 地質調査所重力測定データファイル，日本重力 CD-ROM, 数値地質図 P - 2，地質調査所 ．
- 前川徳光・植木貞人・渡辺秀文・大久保修平・沢田宗久(1996)草津白根山・浅間山の重力精密測定．第 3 回草津白根山の集中総合観測報告書，45 - 52 ．
- 牧野雅彦・遠藤秀典 (1999) 鹿児島県出水市針原川土石流地域の重力探査．物理探査，**52**，153 - 160 ．
- 森林成生(1990)Variable Density 補正の新しい方法．物理探査，**43**，97 - 106 ．
- 村田泰章(1990)ABIC 最小化法による ρ - γ - 密度の推定．地震，第 2 輯，**43**，327 - 339 ．
- 村田泰章・牧野雅彦・遠藤秀典・渡辺和明・渡辺史郎・卜部厚志(1996)神戸市・芦屋市・西宮市における精密重力探査(1) - 重力異常と伏在断層 - ，地調月報，**47**，109 - 132 ．
- Nakano M . , Kumagai H . , Chouet B . A . (2003) Source mechanism of long - period events at Kusatsu - Shirane Volcano , Japan , inferred from waveform inversion of the effective excitation functions . Jour . Volcanol . Geotherm . Res . , **122** , 149 - 164 ．
- Nurhasan , Y . , Ogawa Y . , Ujihara N . and Tank S . B . (2004) Audio Magnetotelluric survey at Kusatsu Shirane volcano . Japan Earth Planetary Science Joint Meeting ．
- 及川 純・井田喜明・行田紀也・辻 浩・山本圭吾・藤田英輔・羽生 毅・山岡耕春・奥田 隆・金島 聡(1993)草津白根山における火山性地震・微動の稠密観測．第 3 回草津白根山の集中総合観測報告書，13 - 26 ．
- 大場 武・平林順一・野上建治(2000)草津白根火山の熱水系．温泉科学，**49**，163 - 175 ．
- Rikitake , T . , Tajima , H . , Izutuya , S . , Hagiwara , Y . , Kawasa , K . and Sasai , Y . (1965) Gravimetric and geomagnetic studies of Onikobe area , Bull . Earthq . Res . Inst . , **43** , 241 - 267 ．
- 多田 堯・中川勝登・根本盛行・平井英明・佐野伸明・真野宏邦・田中和之(1996)草津白根山における火山変動測量観測点の設置．第 3 回草津白根山の集中総合観測報告書，31 - 36 ．
- 田島広一・下鶴大輔・横山 泉(1977)浅間・草津白根山周辺の重力測定．火山，**22**，161 - 172 ．
- 田島広一・下鶴大輔・大島弘光・横山 泉(1978)浅間・草津白根山周辺の重力異常と重力精密測定．震研彙報，**53**，509 - 522 ．
- 高倉伸一・花岡尚之(1988) G - H 関係とそこから推定される密度の持つ意味．物理探査，**41**，316 - 328 ．
- Talwani, M . , Worzel, J . and Landisman, M . (1959) Rapid gravity computations for two - dimensional bodies with application to the Mendocino Submarine Fracture Zone . J . Geophys . Res . , **64**, 49 - 59 ．
- 手塚雅美・山崎 明・仲谷 清・中島新三郎・小嶋美津子(1993)草津白根山における全磁力観測．第 3 回草津白根山の集中総合観測報告書，53 - 59 ．
- 宇都浩三・早川由紀夫・荒牧重雄・小坂丈予 (1983)「草津白根火山地質図」，火山地質図 3，地質調査所 ．

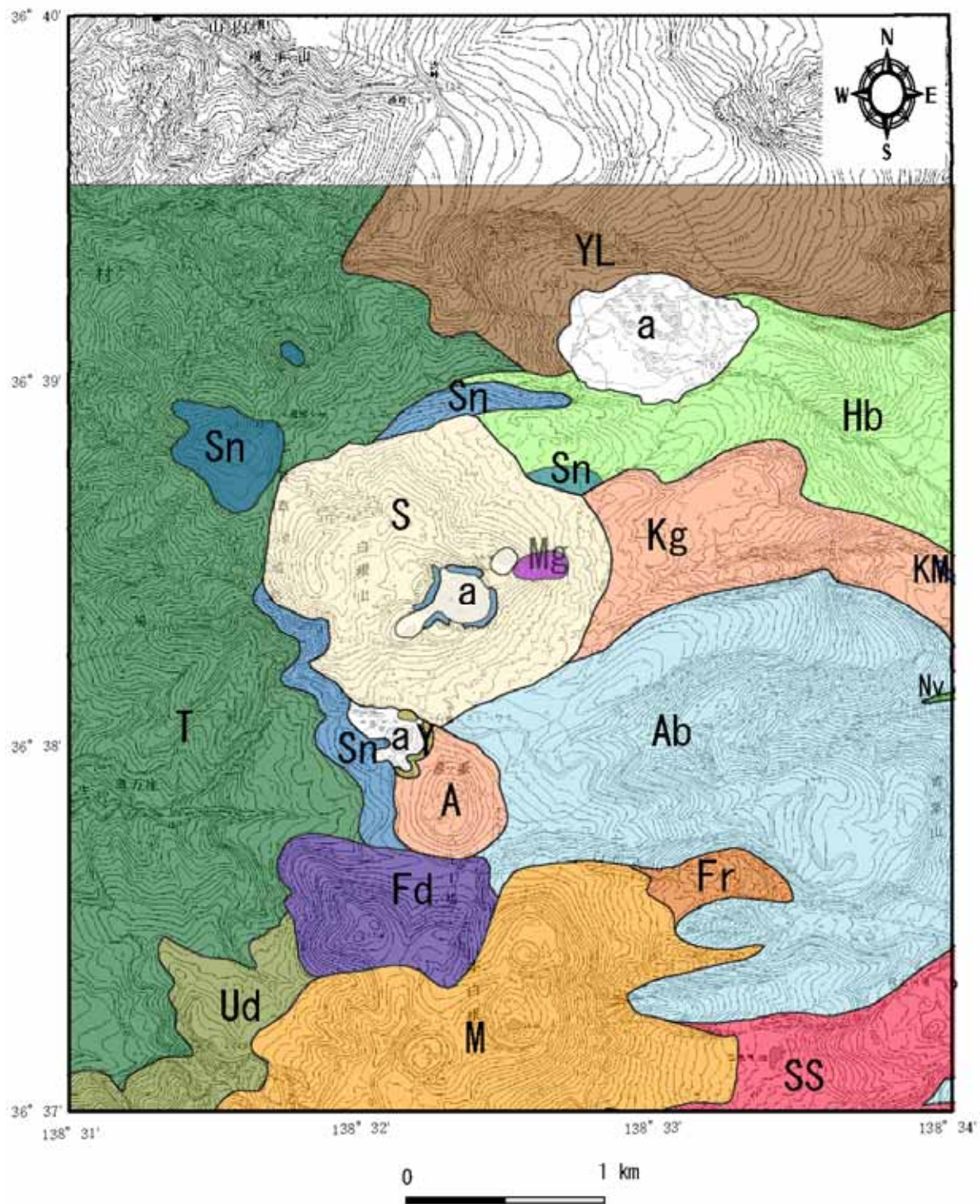
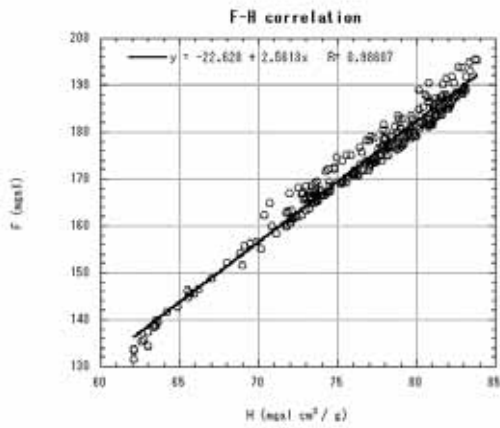
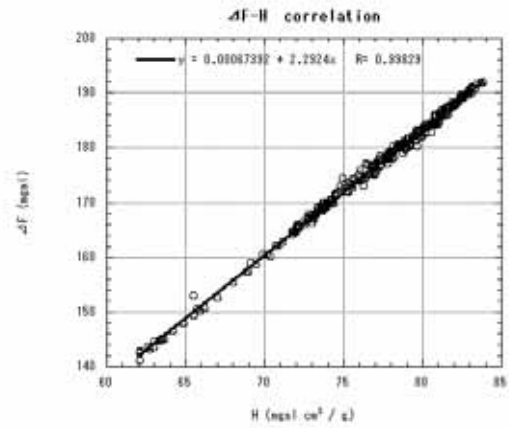


Fig.1 草津白根山頂域の地質図（宇都ほか，1983）

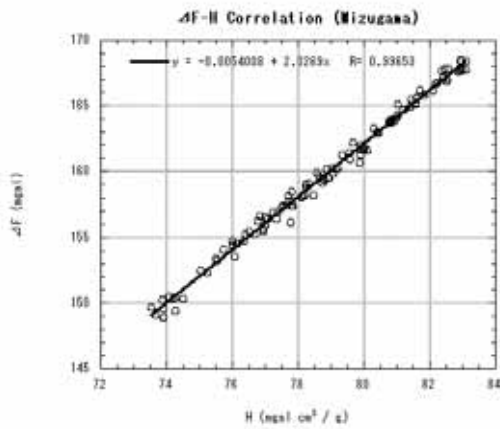
a：沖積層，KM：香草泥流，S：白根火砕丘，A：逢ノ峰火砕丘，M：本白根火砕丘，Y：弓池火口堆積物，Mg：水釜溶岩円頂丘，SS：殺生溶岩，Fr：振子沢溶岩，Kg：香草溶岩，NV：入道沢火砕流，Fd：双子山溶岩円頂丘，Sn：白根溶岩，Hb：平兵衛池溶岩，Ab：青葉溶岩，Ud：独活ヶ沢溶岩，YL：横手山溶岩類，T：第三紀安山岩類



(a)



(b)



(c)

Fig.2 F - H相関関係 . (a)は草津白根山頂域の全重力データ 269 点のF - H相関関係で、推定された密度は 2.56g/cm^3 、相関係数は 0.986 . (b)は (a)と同じ 269 点のデータを用い、傾向面を考慮した F - H相関関係で、推定された密度は 2.29g/cm^3 、相関係数は 0.998 . (c)は水釜溶岩円頂丘周辺の 112 点のデータを用いた F - H相関関係で、推定された密度は 2.03g/cm^3 で相関係数は 0.997 である .

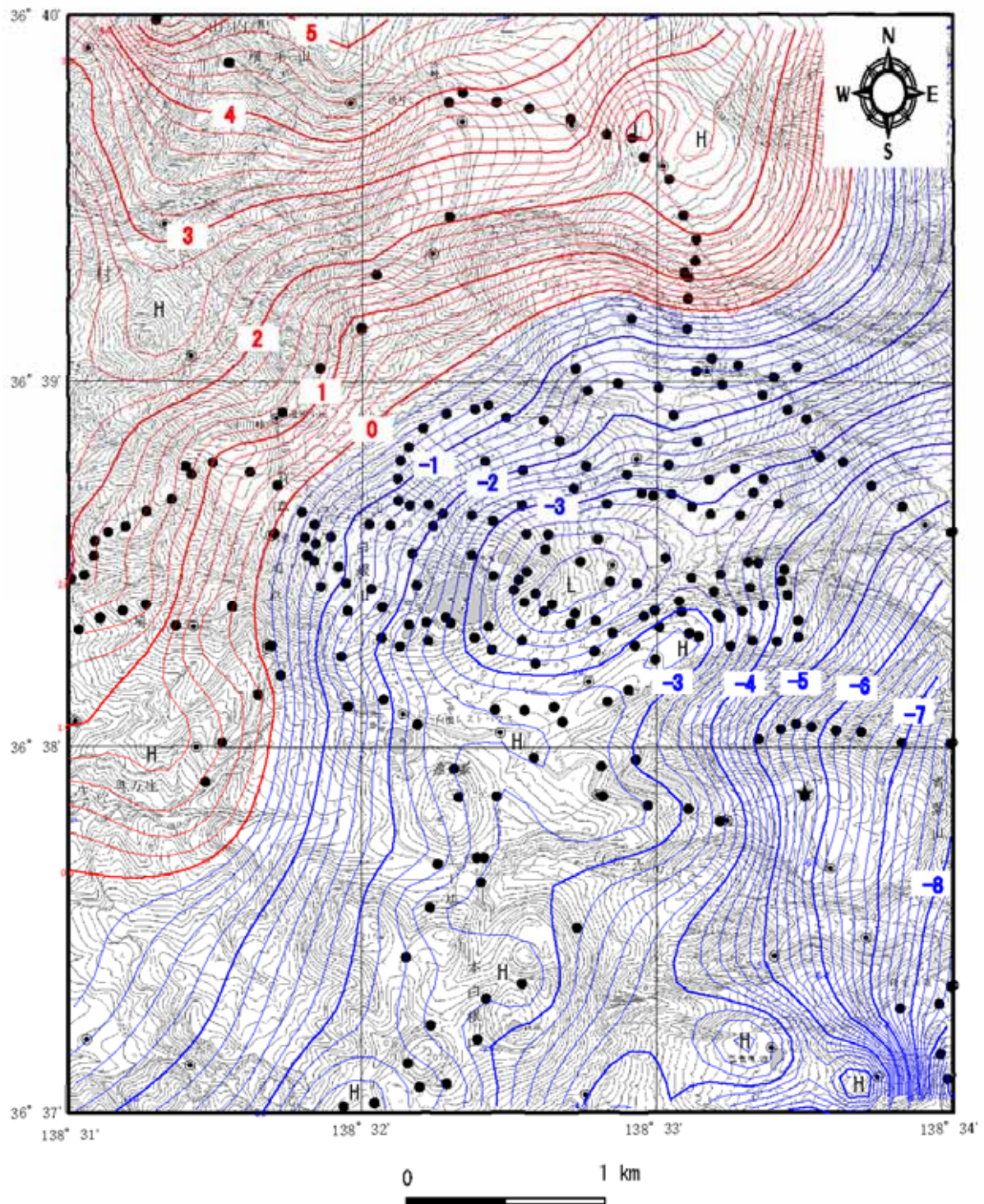


Fig.3 草津白根火山のブ - ゲ - 異常図 密度 2.29 g/cm^3 で、重力コンタ - 間隔は 0.2 mgal である . 基図に国土地理院 2 万 5 千分の 1 地形図「上野草津」を使用 . はGPSを利用した新規の重力測点 , は既存の重力測点である . 青葉山西方の は重力基点 (GPS 0 7) . 重力デ - タ総数は 269 点 .

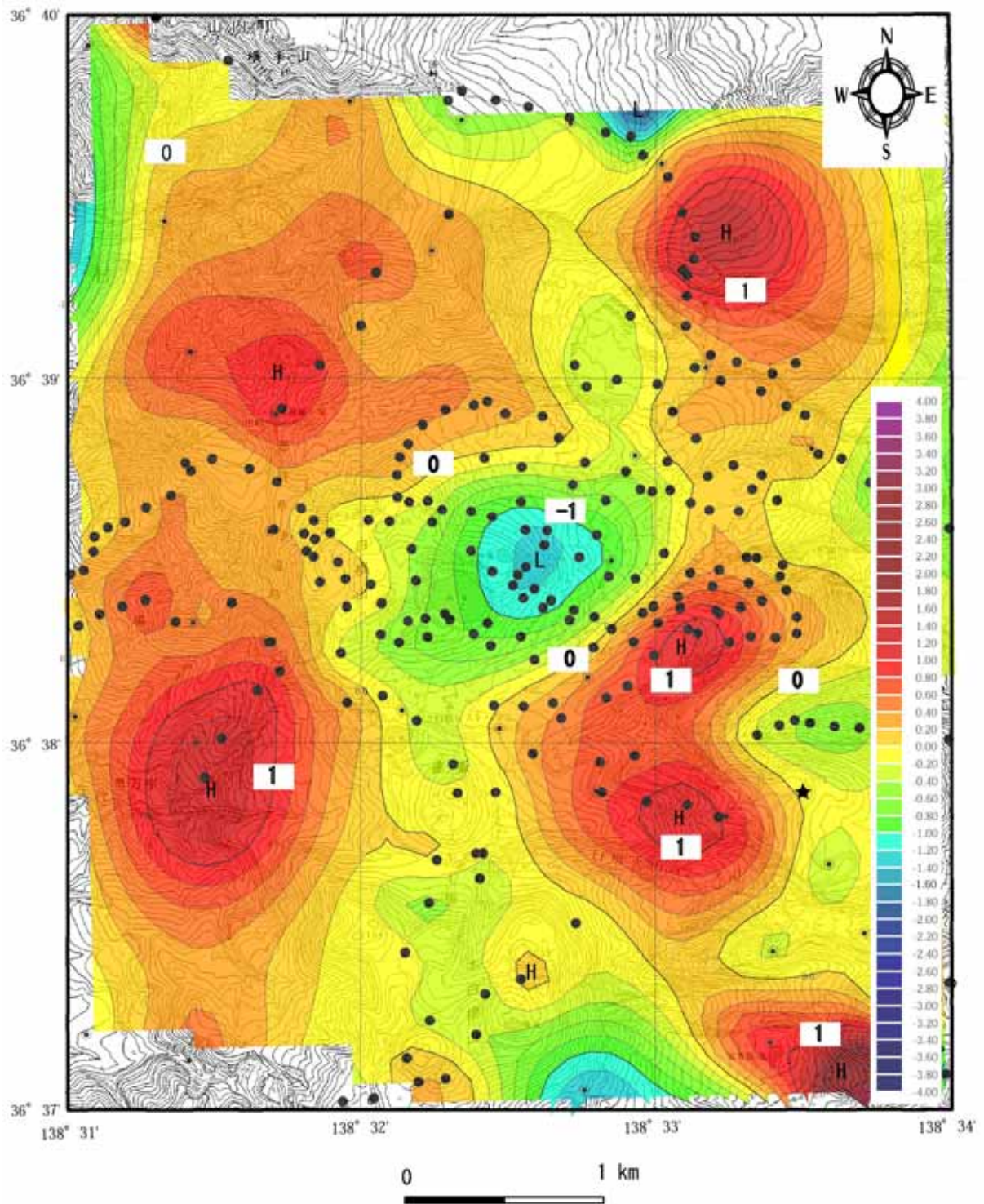
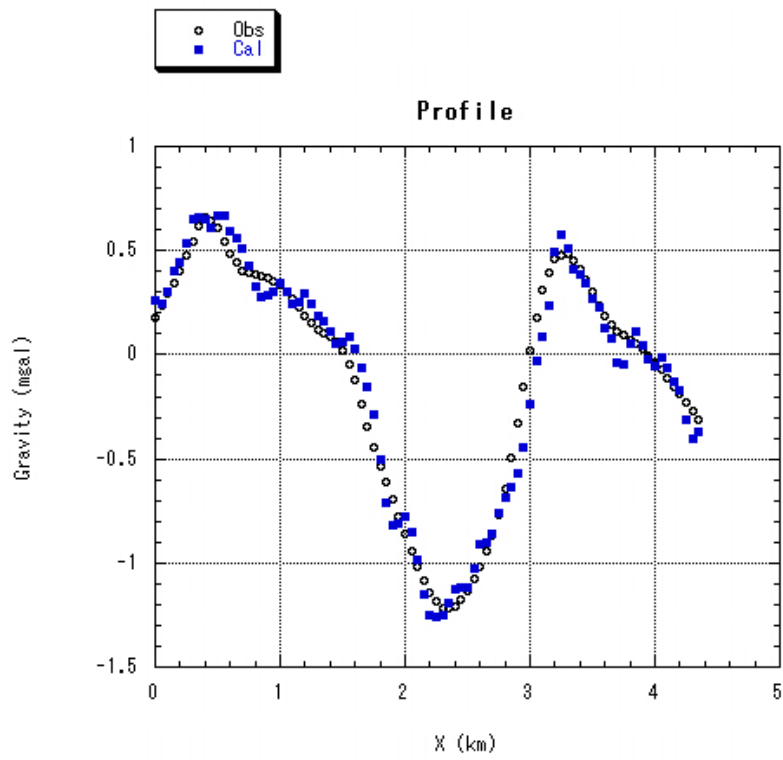
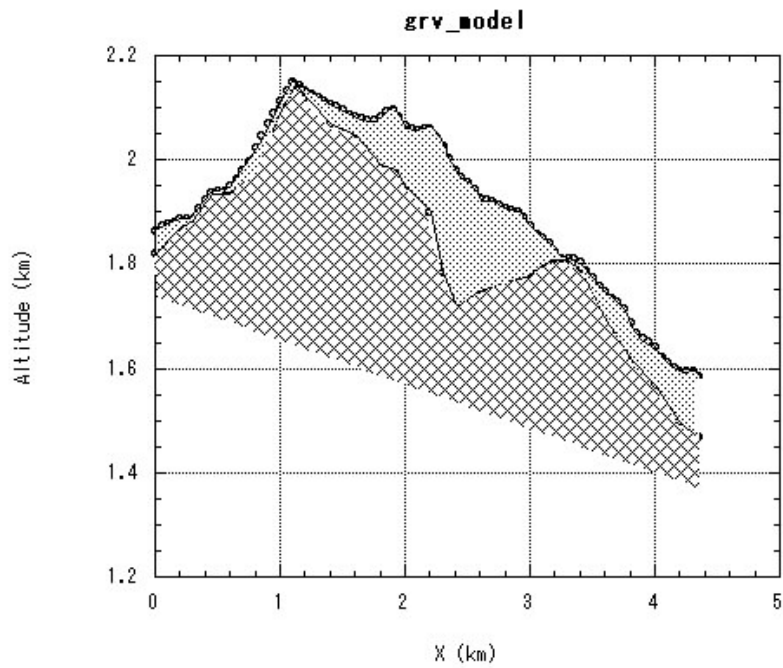


Fig.4 草津白根火山の局地重力異常図．Fig.3 のブ - ゲ - 異常から傾向面を除去したもの．密度は 2.29 g/cm^3 で，局地重力コンタ - は 0.2 mgal である．



(a)



(b)

Fig.5 草津白根山頂域における二次元二層構造解析の結果。(a) 局地重力異常とモデル計算値。(b) 重力基盤構造モデル。第一層と第2層の密度差は 0.26 g/cm^3 と仮定して計算した。