

豊肥地熱地域の磁氣的構造

浦井 稔* 宮崎 芳徳** 津 宏治*

URAI, M., MIYAZAKI, Y. and TSU, H. (1989) Magnetic structure of the Hohi geothermal area, Kyushu, Japan. *Bull. Geol. Surv. Japan*, vol. 40(11), p.589-600.

Abstract : Aeromagnetic data of the Hohi geothermal area are characterized by high amplitude anomalies caused by the volcanoes such as Mt. Kuju, Mt. Waita and Mt. Yufu. As the results of magnetic susceptibility measurement of sampled rocks, it is found that pre-Tertiary basement rocks which have low magnetic susceptibility are covered with Tertiary to Quaternary volcanic rocks which have high magnetic susceptibility. These evidences imply that the most of magnetic anomalies are caused by these volcanic rocks which are mainly distributed in the near surface.

Theoretical aeromagnetic anomalies are calculated from a three dimensional magnetic model which has flat bottom with uniform magnetic susceptibility, and then a correlation coefficient map and an apparent susceptibility map are produced from the observed aeromagnetic data and the theoretical data. The result indicates that the greater part of the Hohi geothermal area provides high correlation coefficients with reasonable apparent susceptibility.

For the area which has low correlation coefficients or unreasonable apparent susceptibility, the best fit bottom profile is estimated from a magnetic model which has uniform magnetic susceptibility. In these studies, it is found that the non magnetic bodies seem to be upheaved under Mt. Kuju and Mt. Waita, and they seem to be subsided at southwest of Mt. Haneyama.

1. はじめに

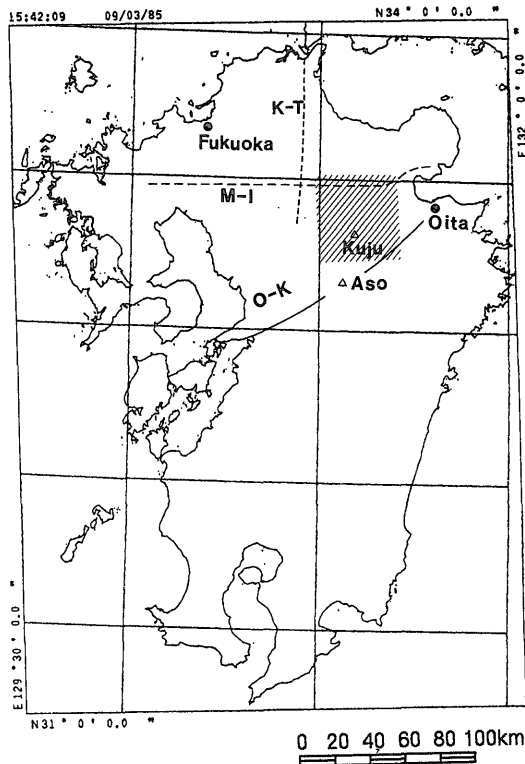
九州中北部九重火山群北麓、涌蓋山を中心とする豊肥地熱地域は、新第三紀および第四紀の火山岩類に広く覆われている。同地域は現在でも久住山、鶴見岳等で活発な火山活動が見られ、別府、湯布院等の温泉が広く分布している。同地域は地熱エネルギー賦存ポテンシャルの高い地域の一つとして知られ、サンシャインプロジェクトの一つである「大規模深部地熱発電所環境保全実証調査」によって大規模な地熱調査が行われ、詳しい地質構造が明らかにされつつある(長谷, 1985)。

九州中北部において、先第三紀基盤岩は松山-伊万里線、大分-熊本線、小倉-田川断層帯の南方延長線の3本の直線で囲まれる地域の外側(第1図)に分布し、その内側では陥没し、陥没とともに溶岩を主体とする多量の火山岩類を噴出し、これらが陥没部分を埋積したと考えられている(鎌田, 1985 a, 1985 b)。先第三紀基盤岩は花崗岩類や結晶片岩等から構成され、その帯磁率は低い(10^{-4} emu/cm³程度)。一方、新第三紀・第四紀の火

山岩類は主に安山岩から構成され、その帯磁率は高く、残留磁化方向としては現在の地球磁場方向が卓越している(浦井・津, 1986)。これは、豊肥地熱地域の空中磁気異常(通産省, 1979)が久住山・涌蓋山・由布岳等の火山に対応する大振幅の異常に特徴づけられていることから見て取れる。

これらの事実は、豊肥地熱地域の磁氣的構造が広域的近似として帯磁率の高い層の下部に帯磁率の低い層が分布する二層構造モデルで表すことが出来ることを示唆するものである。さらに同地域においては、両者の帯磁率比が10以上であること(浦井・津, 1986)、帯磁率の低い岩体により深部に存在することは、下部層が磁気異常にあたえる影響を無視し地表付近の火山岩類だけで観測磁気異常を説明できることを意味する。このようないわゆる地形効果を確認するため、第1図に示す地域を対象として、地球磁場方向に一樣に磁化された岩体が地表から一定面の間に存在すると仮定した三次元磁気構造モデルを用いて磁気異常観測高度面における理論磁気異常値を計算した。この理論磁気異常値と観測空中磁気異常値から相関係数および帯磁率を計算することによって空中

* 地殻物理部 ** 地殻熱部



第1図 豊肥地熱地域の位置 斜線の部分が解析地域。解析地域の大きさは40km×40km。M-I:松山-伊万里線, O-K:大分-熊本線, K-T:小倉-田川断層帯。

磁気異常における地形効果を解析した。

この結果、豊肥地熱地域の空中磁気異常を地形効果だけで説明できる地域と地形効果だけで説明できない地域に分けることができた。

地形効果だけで説明できない磁気異常については、さらに磁性岩体の底面が未知であるとした二次元磁気構造モデル解析により磁性岩体の底面形状を推定することで、同地域の磁気的構造の特徴と地質構造との関連を考察した。

2. 豊肥地熱地域の空中磁気探査

豊肥地熱地域の空中磁気探査は1978年から1979年にかけて地熱構造に直接的に関係する火成岩類を磁性岩体として把握することを目的として行われた(通産省, 1979)。探査は豊肥地熱地域のほぼ全域を対象に行われ、特に、涌蓋山を中心とする南北15km, 東西20kmの地域は精査地域として測線間隔を密にして探査が行われた。空中磁気探査の様子は以下の通りである。

飛行高度 標高2000m (6600ft A. S. L.)

日変化観測地点 大分県大分郡湯布院町塚原温泉
 測線方向及び方向 主測線 南北方向 1000m 間隔 (精査地域においては500m 間隔)
 交差測線 東西方向 5000m 間隔
 使用磁力計 Geometrics 社製G 804型プロトン磁力計

本報告の解析地域における空中磁気異常図(IGRF 残差)を第2図に示す。同地域の地形(第3図)と比較すると、中央部に久住山・涌蓋山・大船山に対応する比較的短波長・大振幅の異常が見られ、西北部には万年山に対応する長波長の異常が見られる。東北部には由布岳に対応する短波長の異常が見られる。

3. 地形効果解析

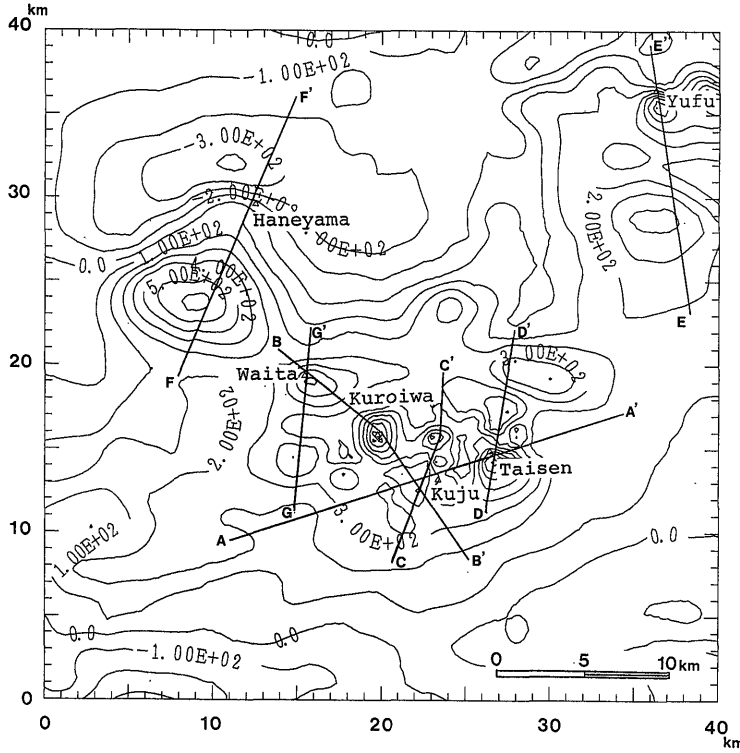
豊肥地熱地域の空中磁気異常におよぼす地形効果を解析するために、一様に帯磁した岩体が地表から一定の深度に存在するモデルから三次元的理論磁気異常値を計算し、観測磁気異常値との相関係数を求める BLAKELY and GRAUCH (1983)の方法を適用した。

まず、国土地理院から発行されている国土数値情報の標高データ(緯度・経度座標上で約250m格子)を地図座標上で250m格子のデータに補間し、標高ファイルを作成した。次に、BHATTACHARYYA (1964)の式を使用して、標高ファイルから標高2000mにおける理論磁気異常値を解析地域の250m格子上のすべての点について計算した。この時、帯磁率は後述の帯磁率計算が簡単になるよう 1.0×10^{-3} emu/cm³とし、磁性岩体の底面は豊肥地熱地域が2-3kmの厚さの火山性堆積物で覆われているとの重力基盤解析結果(駒澤・鎌田, 1985)から標高-3000mと仮定した。仮定した帯磁率の大きさは理論磁気異常値に定数倍の変化をあたえ磁性岩体の下底面深度は理論磁気異常値に一定値を加算することになるが、後述の相関係数や推定帯磁率の値には影響をあたえない。計算された理論磁気異常図(第4図)では、観測磁気異常図(第2図)と同様に、涌蓋山・久住山・万年山等に対応する磁気異常が見られる。

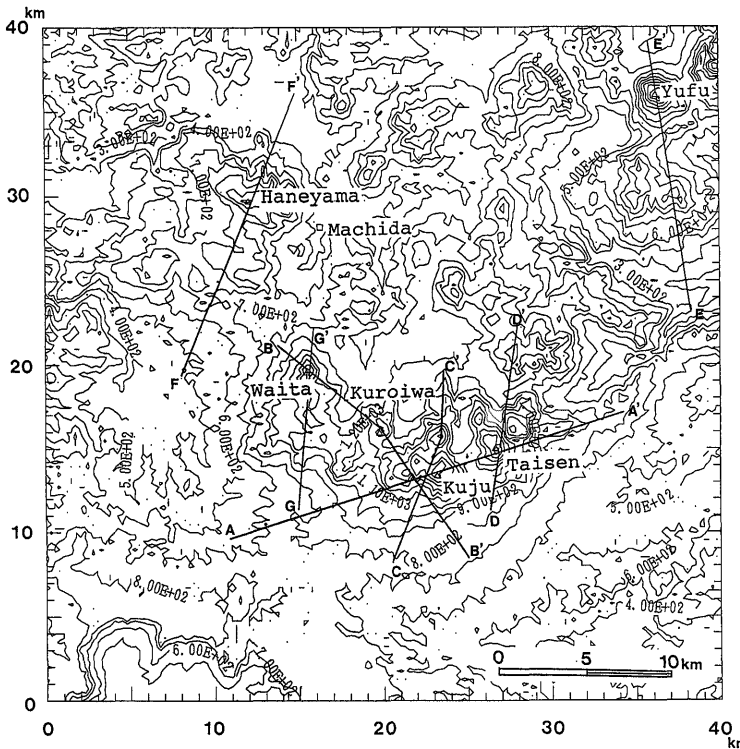
次に、各格子点の近傍で観測磁気異常値と理論磁気異常値との相関係数を計算した。各格子点での観測磁気異常値を O_{ij} 、理論磁気異常値を A_{ij} とすれば、各格子点での相関係数 r_{pq} は以下の式によって定義される。

$$r_{pq} = \frac{\sum_{ij} O_{ij} A_{ij}}{\sqrt{\sum_{ij} O_{ij}^2} \sqrt{\sum_{ij} A_{ij}^2}} \quad (1)$$

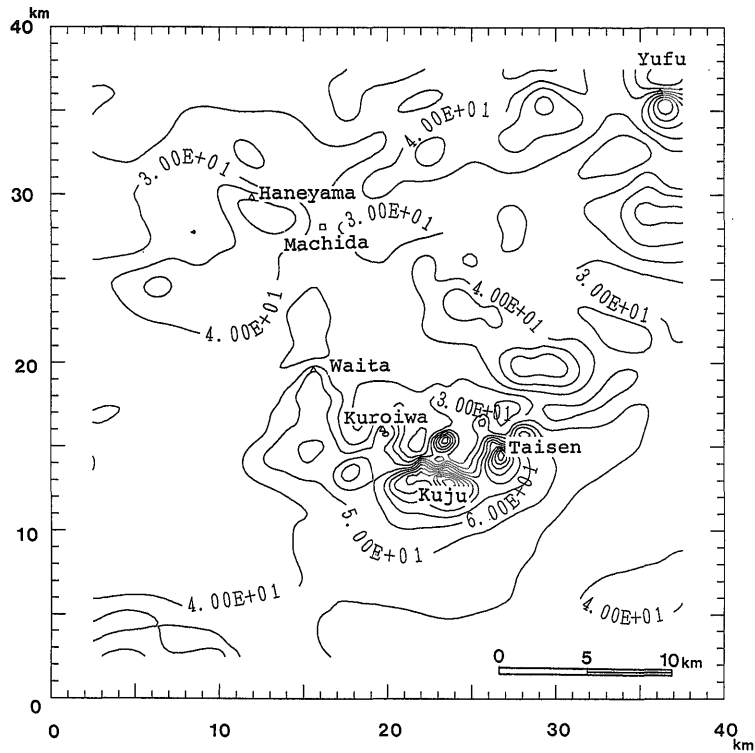
豊肥地熱地域の磁氣的構造 (浦井 ほか)



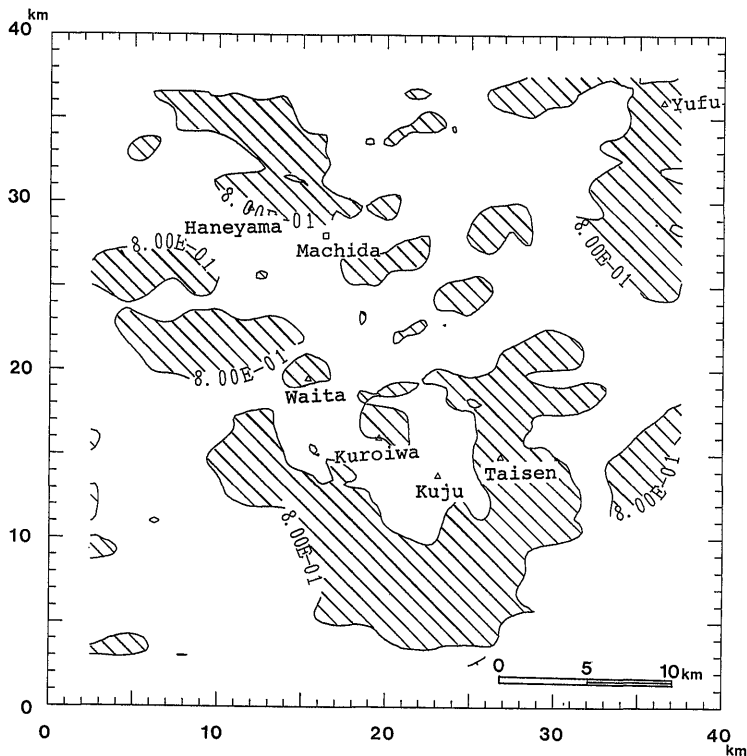
第2図 観測磁気異常図 標高 2000 m における IGRF 残差図, コンター間隔 100 nT. A-A'-G-G'は二次元解析 (第7図-第11図) の位置. 図の原点は東経 131°, 北緯 32°58'. 図法は UTM.



第3図 解析地域の標高 コンター間隔 100 m. A-A'-G-G'は二次元解析 (第7図-第11図) の位置. 図の原点および図法は第2図に同じ.



第4図 理論磁気異常図 帯磁率 $1.0 \times 10^{-3} \text{ emu/cm}^2$ の磁性岩体が地表から-3000 m まで満たされているモデルから計算した。コンター間隔 100 nT。図の原点および図法は第2図に同じ。



第5図 観測磁気異常と理論磁気異常の相関 ウインドサイズは $2 \text{ km} \times 2 \text{ km}$ 。斜線の部分は相関係数が 0.8 以上。図の原点および図法は第2図に同じ。

ここで

$$\sum_{ij} = \sum_{i=p-(m-1)/2}^{p+(m-1)/2} \sum_{j=q-(n-1)/2}^{q+(n-1)/2}$$

$$O_{ij} = o_{ij} - \frac{1}{nm} \sum_{ij} o_{ij}$$

$$A_{ij} = a_{ij} - \frac{1}{nm} \sum_{ij} a_{ij}$$

であり、 m 、 n は i 方向及び j 方向のウインドサイズである。

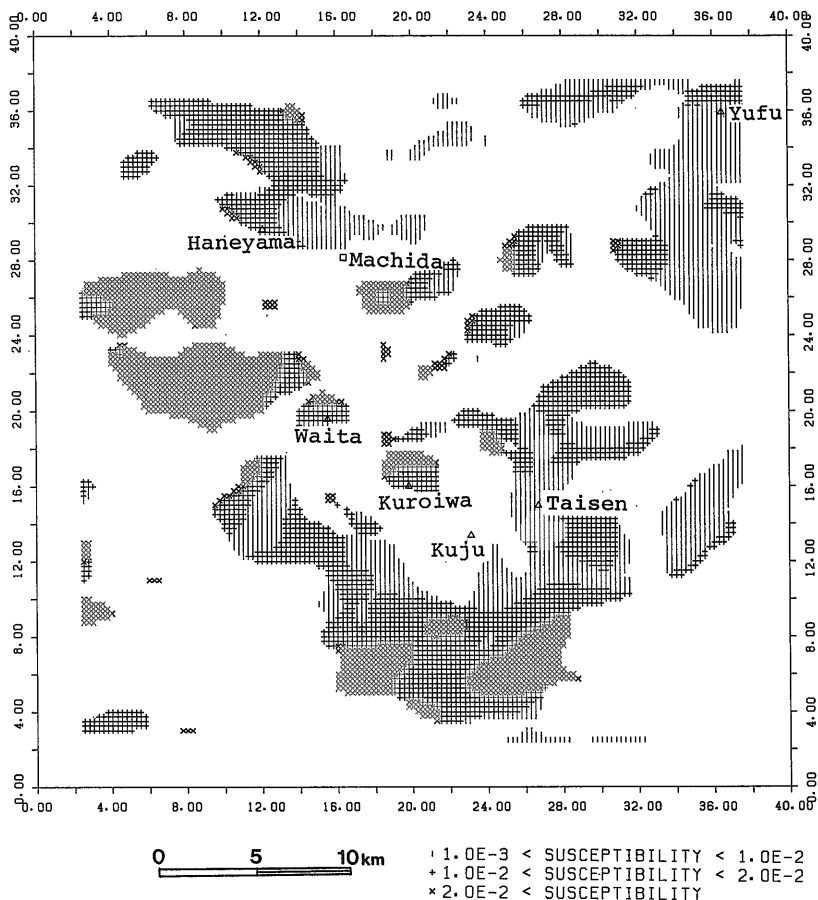
観測磁気異常の波長が 2 km-5 km 程度であることから、ウインドサイズを 2 km×2 km-5 km×5 km に変化させて相関係数を計算したが、相関係数の分布パターンはあまり変化しない。第 5 図は、ウインドサイズを 2 km×2 km として計算した相関係数が高い地域をハッチで示したものである。相関係数が高い地域の外側では、相関係数が負になることも多い。これは、岩石が逆帯磁

していることを示すのではなく、比較的平坦な地形においては、理論磁気異常は長波長成分が卓越しているのに対して、観測磁気異常は岩石磁性の不均一による磁気異常等による短波長成分を含んでおり、相関係数を計算する範囲を約 2 km×2 km としたために、相関係数がこの短波長成分に支配されていると考えられる。したがって、地形に特徴のある山岳部に限って相関係数を考察した。

涌蓋山・大船山・由布岳の付近は相関係数が高い地域となっている。また、久住山をとりかこむように相関係数の高い地域が分布するが、久住山自身は相関係数が低い。万年山付近では相関係数の高い所と低い所が混在している。

観測磁気異常と理論磁気異常の相関が高い地域では、各々の標準偏差の比から帯磁率の分布を推定することができる。各格子点での帯磁率を s_{pq} とすれば

$$s_{pq} = \frac{D_{pq}}{C_{pq}} S_0 \quad (2)$$



第 6 図 推定される帯磁率分布 凡例の単位は emu/cm³. 図の原点および図法は第 2 図に同じ。

ここで

$$D_{pa} = \sqrt{\sum_{ij} O_{ij}^2}$$

$$C_{pa} = \sqrt{\sum_{ij} A_{ij}^2}$$

であり、 s_0 は理論磁気異常を計算した時の仮定帯磁率である。第6図は上記の方法から得られた推定帯磁率分布である。大船山・由布岳付近の帯磁率は $1.0 \times 10^{-3} - 1.0 \times 10^{-2}$ emu/cm³ であり、新第三紀・第四紀火山岩類の帯磁率 $1.58 \times 10^{-3} - 1.94 \times 10^{-3}$ emu/cm³ (浦井・津, 1986) に残留磁化を考慮したものと矛盾しないが、涌蓋山の西から万年山の南西にかけての推定帯磁率は 2.0×10^{-2} emu/cm³ より大きく、帯磁率の実測値と矛盾すると考えられる。

これらの結果をまとめると、大船山・由布岳については、相関係数が高く帯磁率が実測値と矛盾しないことから観測磁気異常を地形効果で説明できるが、久住山・涌蓋山・万年山については、相関係数が低いか推定帯磁率が実測値と矛盾することから観測磁気異常を地形効果だけでは説明できないと考えられる。

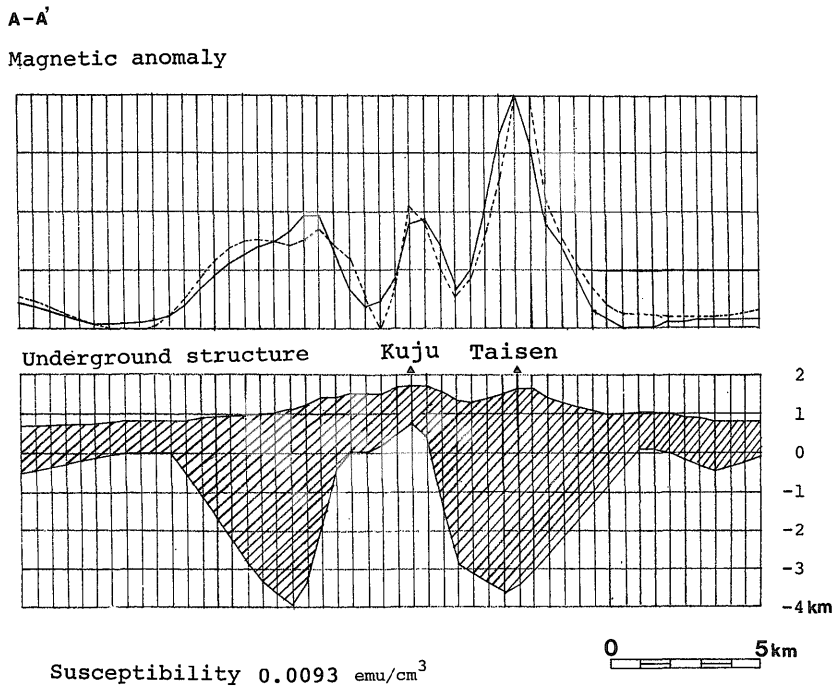
4. 二次元磁気構造モデル解析

地形効果解析では、観測磁気異常を地形効果だけで説

明できる地域と地形効果だけでは説明できない地域に分けることができた。ここでは、豊肥地熱地域を久住山ブロック、大船山ブロック、由布岳ブロック、万年山ブロックおよび涌蓋山ブロックの5つに分割し、磁性岩体の底面形状を未知として観測磁気異常を最も良く説明する磁性岩体の底面形状を解析した。現状では、磁性岩体の形状を三次元的に解析する方法が確立されていないため、磁性岩体の形状を津・小川 (1973) の方法を用いて二次元的に解析することとした。豊肥地熱地域の地形は複雑であるために、二次元解析を行うにあたって、測線の選び方によって解析結果が異なることが考えられる。このため、二次元解析の測線を地形および磁気異常の尾根にそうよう選び、測線の選び方による解析結果の差異を軽減することに努めた。第2図および第3図に二次元解析の位置を示す。

4.1 久住山ブロック

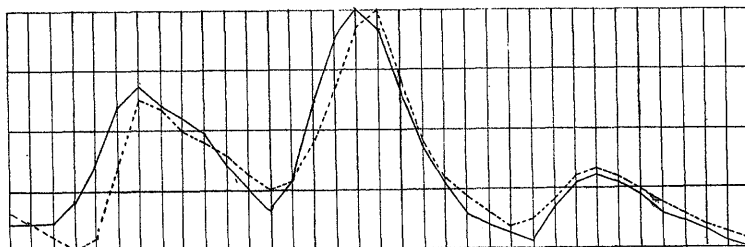
久住山付近の観測磁気異常は久住山山頂付近で下に凸となり、地形効果だけでは説明できない。二次元解析の結果、A-A', C-C'断面において久住山直下で磁性岩体の底面が浅くなっていることが示される(第7図)。B-B'断面については、黒岩山直下に厚い磁性岩体が推定され、一方久住山から南に分布する磁性岩体の底面が浅く解析されているが、観測磁気異常と地形から見て、黒岩山が



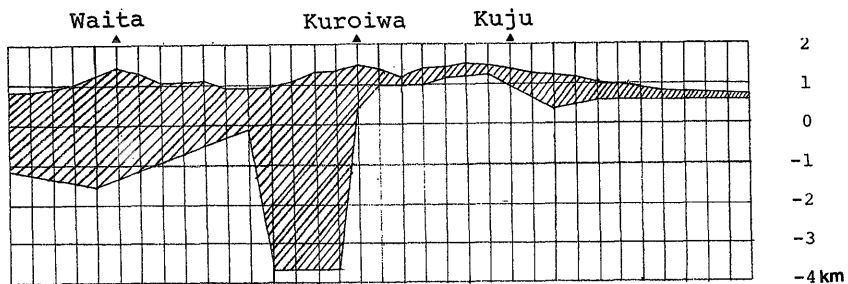
第7図 久住山付近の二次元解析 実線は観測磁気異常値、点線は斜線部分を一樣な磁性岩体として計算した理論磁気異常値。位置は第2図・第3図に示す。

B-B'

Magnetic anomaly



Underground structure

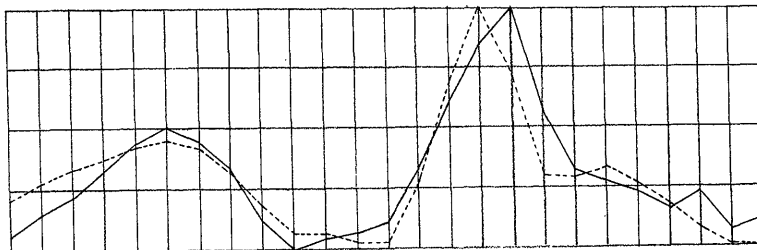


Susceptibility 0.0065 emu/cm^3

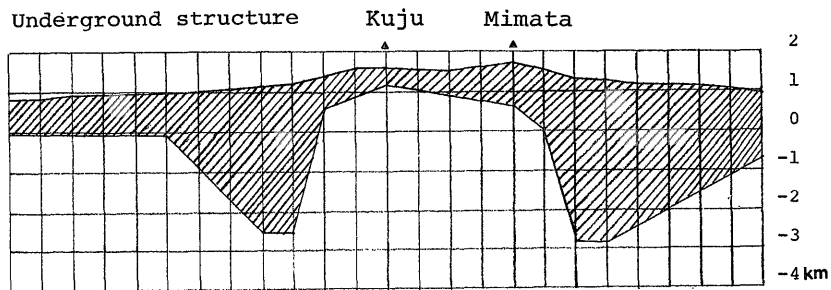
0 5km

C-C'

Magnetic anomaly



Underground structure



Susceptibility 0.0052 emu/cm^3

0 3km

第7図 つづき

磁性の大きな岩体から構成されているために、久住山から南に分布する磁性岩体の底面が実際以上に浅く解析されたものと考えられる。二次元解析から得られた帯磁率は $5.2 \times 10^{-3} - 9.3 \times 10^{-3} \text{ emu/cm}^3$ である。

4.2 大船山ブロックおよび由布岳ブロック

大船山ブロックおよび由布岳ブロックは地形効果だけで観測磁気異常をほぼ説明することが可能な地域である。二次元解析においても、D-D'測線およびE-E'測線について同様の結果が得られた(第8図, 第9図)。推定される帯磁率はそれぞれ 8.0×10^{-3} , $6.9 \times 10^{-3} \text{ emu/cm}^3$ である。

4.3 万年山ブロック

万年山付近、特に南では、観測磁気異常は地形との相関がほとんどなく、波長 10 km 程度、振幅 1000 nT におよぶ長波長・大振幅異常であり、豊肥地熱地域においては特異である。二次元解析の結果、万年山南西に幅 6 km 程度厚さ 4 km 程度の磁性岩体が推定され、磁性岩体の帯磁率は $1.2 \times 10^{-2} \text{ emu/cm}^3$ と推定される(第10図)。

4.4 涌蓋山ブロック

二次元解析の結果、涌蓋山の北側では磁性岩体底面の深度が深く、南側では浅いことが推定される(第11図)。推定される帯磁率は $6.2 \times 10^{-3} \text{ emu/cm}^3$ である。

4.5 二次元解析から得られた帯磁率

二次元解析から得られた各ブロックの帯磁率は $5.2 \times 10^{-3} - 9.3 \times 10^{-3} \text{ emu/cm}^3$ の範囲にあり、万年山南西部では $12.0 \times 10^{-3} \text{ emu/cm}^3$ である。豊肥地域の岩石磁気特性測定結果(浦井・津, 1986)によれば、新第三紀・第四紀の火山岩類の平均帯磁率は $1.58 \times 10^{-3} - 1.94 \times 10^{-3} \text{ emu/cm}^3$ であり、二次元解析で得られた推定帯磁率はこれに比較して大きい。これは、豊肥地熱地域の残留磁化の方向が現在の地球磁場方向と一致するものが多いため、見かけ帯磁率が大きくなっているためと考えられる。豊肥地域の岩石磁気特性測定結果(浦井・津, 1986)を参考にして、ある岩体の帯磁率が $1.5 \times 10^{-3} - 2.0 \times 10^{-3} \text{ emu/cm}^3$ でありケニヒスベルグ比が 2.0-5.0 であると仮定し、さらに残留磁化方向が現在の地球磁場の方向と一致すると仮定した場合、この岩体の見かけ帯磁率は、 $4.5 \times 10^{-3} - 12.0 \times 10^{-3} \text{ emu/cm}^3$ となる。したがって、二次元解析から得られた推定帯磁率はほぼ妥当な値と考えられる。以上のことから、二次元解析から得られた磁気的構造は、残留磁化の強度が強くその残留磁化方向が現在の地球磁場方向に揃っている岩体と、残留磁化強度が弱い岩体または残留磁化方向が不揃いな岩体とを区別して示したものであると考えられる。前者は、新第三紀・

第四紀火山岩類からなる岩体に、磁性の弱い後者は先第三紀基盤岩や新第三紀・第四紀火山岩類の中の破碎帯や変質帯などに対応していると推定される。

豊肥地熱地域における残留磁化の研究は主に古地磁気学的観点から進められているために、磁気異常に大きな影響を与えると考えられる九重火山群等については残留磁化測定が行われていない。また、涌蓋山周辺の涌蓋山溶岩については、いくつかの測定が行われたが、涌蓋山溶岩全体について一定の残留磁化方向を得ることはできなかった(須藤, 1985 a, 1985 b)。今後、詳しい測定によってこれらの残留磁化方向および強度を決定する必要がある。

5. 考察

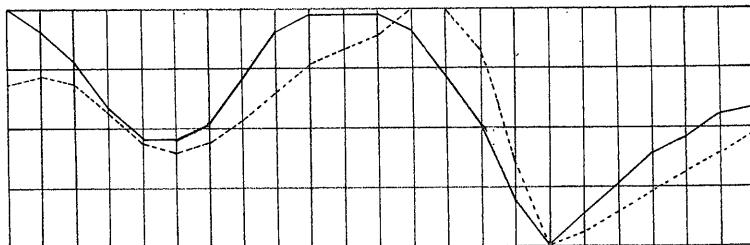
岩石磁気特性は岩石の種類によって変化するだけでなく、岩石の破碎や変質によっても変化する。一方、岩石密度も岩石の種類や岩石の破碎および変質によって変化する。 $\Delta\rho = 0.3 \text{ g/cm}^3$ として得られた豊肥地域の重力基盤構造(駒澤・鎌田, 1985)によれば、久住山から涌蓋山南側の重力基盤標高は、周辺より 2-3 km 程度隆起しており、一方、万年山南西部地域では 1 km 程度陥没している。また、町田南東および庄内付近に火山性陥没が、久住山南部に非火山性陥没が存在するとしている。

本研究の二次元磁気構造モデル解析から、久住山から涌蓋山南部にかける地域では非磁性岩体が浅部に推定される。また、この久住山から涌蓋山南部にかけての非磁性岩体を東から南にかけて取り囲むように存在する地形効果で説明可能な領域がある。この領域は、二次元磁気構造モデル解析でも磁性岩体底面が周辺より深いと推定される。これらの非磁性岩体が示す凹凸の構造は、第12図に示すように重力基盤の隆起・陥没の傾向とほぼ一致していることから、基本的に先第三紀基盤岩の隆起・陥没に対応するものと考えられる。その陥没部には、それらを引き起こした時代以降、周辺から供給された火山岩類が堆積していったものと考えられる。実際、非磁性岩体が浅部に推定される付近のボーリングでは標高-500 m 程度に先第三紀基盤岩が見い出され、その周辺では新第三紀・第四紀火山岩類が厚く堆積していることが確認されている(玉生, 1985; 鎌田, 1985 b)。ただし、非磁性岩体として磁氣的に捉えられている部分の一部は破碎や変質による見かけ帯磁率の低下によるものもあると考えられる。

万年山南西部の二次元磁気モデル解析では、磁性岩体底面が深く推定され、その周囲の浅い磁性岩体底面から区別される(第12図)。一方万年山北東部には、重力の

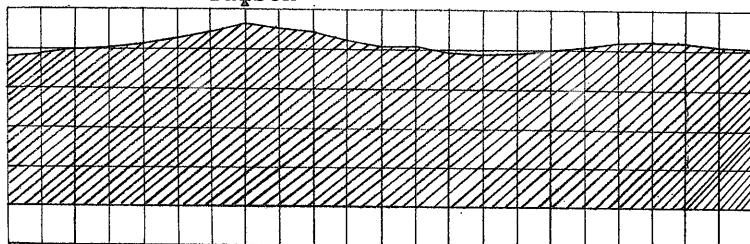
D-D'

Magnetic anomaly



Underground structure

Taisei



2
1
0
-1
-2
-3
-4 km

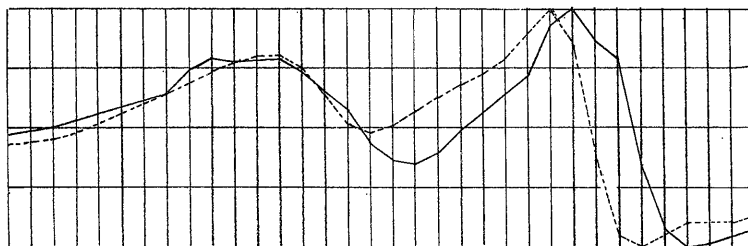
Susceptibility 0.008 emu/cm^3



第8図 大船山付近の二次元解析 実線は観測磁気異常値, 点線は斜線部分を一様な磁性岩体として計算した理論磁気異常値. 位置は第2図・第3図に示す.

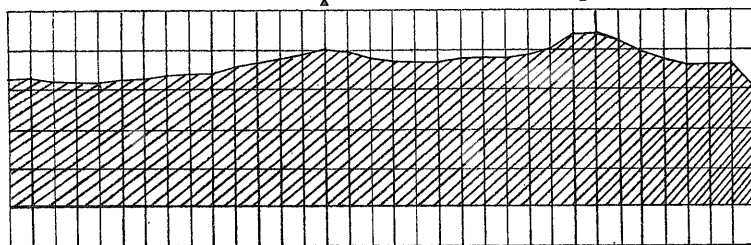
E-E'

Magnetic anomaly



Underground structure Amagoi

Yufu



2
1
0
-1
-2
-3
-4 km

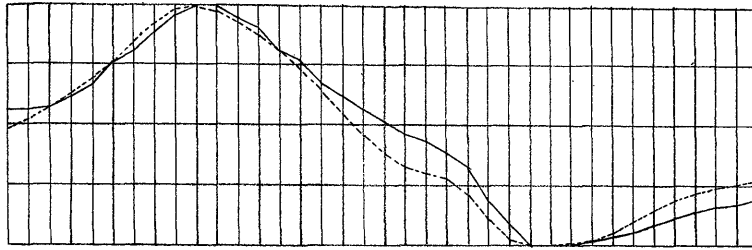
Susceptibility 0.0069 emu/cm^3



第9図 由布岳付近の二次元解析 実線は観測磁気異常値, 点線は斜線部分を一様な磁性岩体として計算した理論磁気異常値. 位置は第2図・第3図に示す.

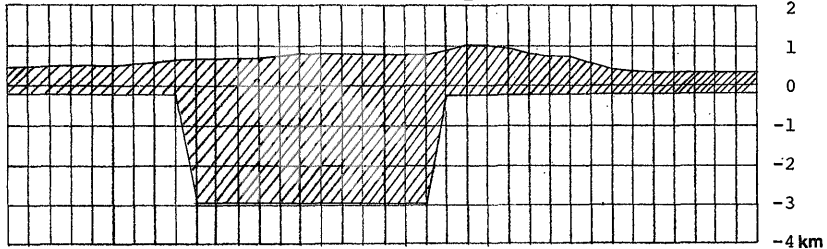
F-F'

Magnetic anomaly



Underground structure

Haneyama

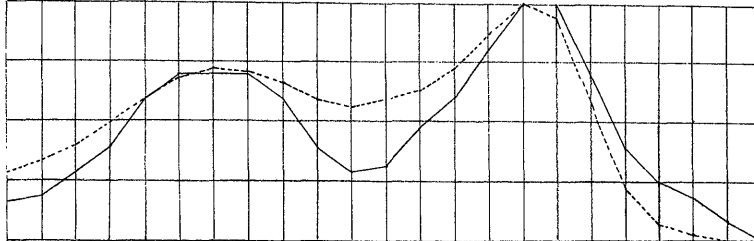


Susceptibility 0.012 emu/cm^3

第10図 万年山付近の二次元解析 実線は観測磁気異常値, 点線は斜線部分を一樣な磁性岩体として計算した理論磁気異常値, 位置は第2図・第3図に示す.

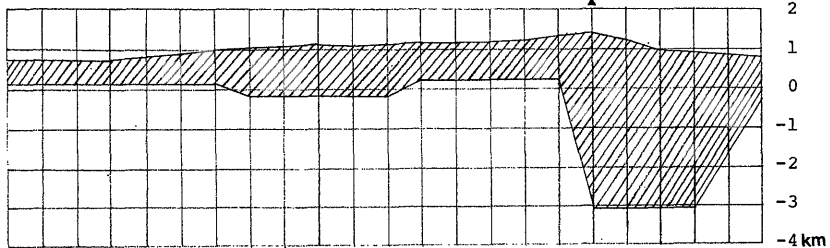
G-G'

Magnetic anomaly



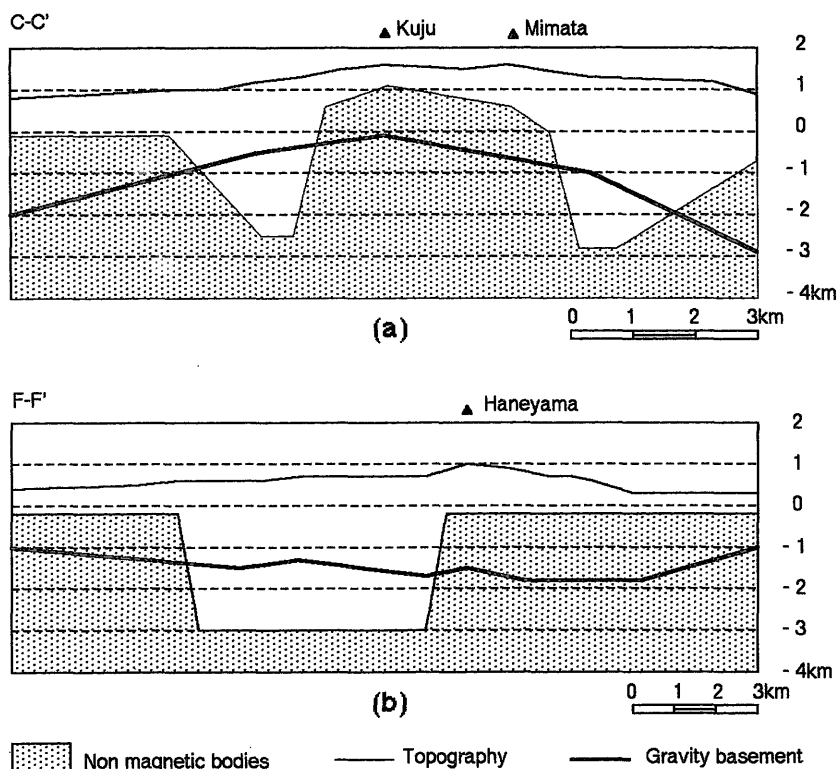
Underground structure

Waiba



Susceptibility 0.0062 emu/cm^3

第11図 涌蓋山付近の二次元解析 実線は観測磁気異常値, 点線は斜線部分を一樣な磁性岩体として計算した理論磁気異常値, 位置は第2図・第3図に示す.



第 12 図 磁氣的構造と重力基盤 (a) 久住山付近の断面 (C-C') (b) 万年山付近の断面 (F-F') 位置は第 2 図・第 3 図に示す。重力基盤標高は駒澤・鎌田 (1985) を使用した。

小さな負異常あるいは重力基盤のくぼみに相当するような磁性岩体は認められない。また、ここは全体として地形効果では磁気異常の説明がつかない地域である。さらに観測された磁気異常図にも見て取れるように、長波長の磁気異常で特徴づけられている。これらの事から、万年山南西部において先第三紀基盤岩の陥没が推定されるとともに、そこでの貫入岩体の存在の可能性も考えられる。

重力基盤に見て取れる町田南東部および庄内付近の陥没は磁気異常、あるいは二次元磁気構造モデルでは明瞭には認められない。仮に町田南東部の重力基盤陥没部分に磁性岩体 (南北 10 km, 東西 10 km, 厚さ 3 km, 見かけ帯磁率 $5.0 \times 10^{-3} \text{ emu/cm}^3$) が存在するとし、標高 2000 m での磁気異常を計算すると、磁気異常の振幅は 500 nT 程度である。この程度の磁気異常は観測精度的に十分検知可能と考えられるが、実際にはこのような磁気異常は観測されていない。これは、町田南東部および庄内付近の陥没部を埋積した岩石が破碎や変質等によって見かけ帯磁率が減少し先第三紀基盤岩との磁気特性コン

トラストが低くなったため、あるいは密度に較べて水平方向の磁気特性変化が顕著でないためと考えられる。

6. おわりに

空中磁気異常から豊肥地熱地域の磁氣的構造を求めた。同地域の磁気異常は地形効果で説明できる地域と地形効果だけでは説明できない地域に分けることができる。地形効果で説明できない地域は久住山・涌蓋山および万年山周辺であった。これらの地域について二次元磁気構造モデル解析を行った結果、久住山・涌蓋山周辺では非磁性岩体が隆起しており、万年山南西部では非磁性岩体が陥没していることが推定された。これらの非磁性岩体の隆起・陥没は先第三紀基盤岩の隆起・陥没に関連するものと考えられ、破碎や変質による見かけ帯磁率の低下の結果である可能性もある。

空中磁気異常から磁氣的構造を求めるうえで、岩石磁気特性データが必要不可欠である。豊肥地熱地域の岩石磁気特性のうち、帯磁率の分布についてはかなり詳しく調査されているが、残留磁化の分布については詳しく調

査されていない。今後、詳しい測定によってこれらの残留磁化特性を決定する必要がある。

謝辞 本研究を進めるにあたり、元地質調査所物理探査部長(現総合地質調査株式会社)小野吉彦氏ならびに地質調査所小川克郎博士・須藤 茂氏には有益な御助言・御指導をいただきました。著者一同、厚く感謝申し上げます。

本研究を行うにあたっては国土情報整備事業の一環として建設省国土地理院において作成された標高に関する国土数値情報を使用しました。

文 献

- BHATTACHARYYA, B. K. (1964) Magnetic anomalies due to prism-shaped bodies with arbitrary polarization. *Geophysics*, vol. 29, p. 517-531.
- BLAKELY, R. J. and GRAUCH, V. J. S. (1983) Magnetic models of crystalline terrane: Accounting for the effect of topography. *Geophysics*, vol. 48, p. 1551-1557.
- 長谷紘和・小川克郎・金原啓司 (1985) 豊肥地熱地域における研究と成果の概要. 地調報告, no. 264, p. 11-30.
- 豊肥地熱地域地質図編集グループ (1982) 10万分の1 豊肥地熱地域地質図及び同説明書. 地質調査所, 23 p.
- 鎌田浩毅 (1985 a) 九州中北部における火山活動の推移と地質構造. 地調報告, no. 264, p. 31-64.
- (1985 b) 熊本県宮原西方の火山岩類の層序と噴出年代—九州中北部の火山活動の時代と分布—. 地質雑, vol. 91, p. 289-303.
- 駒澤正夫・鎌田浩毅 (1985) 豊肥地域の重力基盤構造. 地調報告, no. 264, p. 303-334.
- 須藤 茂 (1985 a) 豊肥地熱地域の K-Ar 年代と古地磁気. 地調月報, vol. 36, p. 119-136.
- (1985 b) 豊肥地熱地域の火山岩の K-Ar 年代と古地磁気—その2—. 地調報告, vol. 264, p. 85-112.
- 玉生志郎 (1985) 豊肥地熱地域の層序と地質構造—主に坑井データに基づいて—. 地調報告, no. 264, p. 113-142.
- 津 宏治・小川克郎 (1973) 3次元角柱による磁気異常の自動解析. 物理探査, vol. 26, p. 91-107.
- 通商産業省 (1979) 昭和53年度大規模深部地熱発電所環境保全実証調査報告書 豊肥地域空中磁気探査. 46 p.
- 浦井 稔・津 宏治 (1986) 豊肥地域の岩石磁気特性. 昭和59・60年度サンシャイン計画研究開発成果中間報告書 国土地熱資源評価技術に関する研究, 地質調査所, p. 177-225.

(受付: 1989年3月28日; 受理: 1989年7月24日)