

岩石磁気と磁気探査

大熊茂雄¹⁾・金谷 弘¹⁾

1. はじめに

岩石の磁気に関する基礎的な物性研究は、岩石磁気学と呼ばれ、この応用として、過去の地球磁場（地磁気）の変動を調べる古地磁気学がある。一方、地球磁場に関する研究の物理探査での応用として、磁気探査がある。

磁気探査とは、地下を構成する岩石の磁氣的性質の差異を検出し、これから地下構造を推定する物理探査手法である。磁気探査は、初期は鉄鉱床の直接探査に始まり、現在では一般的地質構造調査や、地熱探査などにも応用されている。

岩石磁気データは、古地磁気学のみならず、磁気探査にとっても重要なデータである。ただし、両者において取り扱う岩石磁気データや対象とする岩石が異なる。例えば、前者では残留磁化のみを問題とし、後者では誘導磁化と残留磁化の双方を問題とするといった相違がある。また、対象とする残留磁化も前者は1次磁化であるのに対し、後者は2次磁化を含めた最終的な残留磁化である。さらに、前者は火山岩や堆積岩を研究対象とするのに対し、後者は岩石一般である。最近、古地磁気学の研究により、比較的多くの岩石磁気データが測定されるようになった。しかし、前述の理由により、磁気探査で扱う岩石磁気データとしては不十分である。また、磁気探査に関わる従来の岩石磁気の測定では、磁化率の測定が主であり残留磁化の測定数は少ない。今後、磁気探査でも扱える岩石磁気データの、地道な測定と蓄積が必要である。

このような観点から、今回北上山地花崗岩類の残留磁化および磁化率の測定を地域全体にわたり行った。また、測定結果の磁気異常図への適応性の検討を試みた。以上の結果について述べる。

2. 残留磁化と誘導磁化

我々は、日常音楽や名画を当然のこととしてミュージックテープやビデオテープに記録し、これらを再生し楽しんでいる。生活の中で何気なく行っているこれらのことは、音や画を磁気情報に変え残留磁化という形で磁気テープに保存しその恩恵を受けているわけである。この残留磁化を持つことのできる物質は、強磁性体と呼ばれ、鉄・ニッケル・コバルトなどの金属や合金、そしてその酸化物などである。

馬蹄形磁石や棒磁石などの永久磁石が釘（軟鉄）を吸いつけるのは、永久磁石が作る磁場中での強磁性体の挙動である。一方、ピクニックや山登りでコンパス（方位磁石）を使って南北方向を知ることは、地球磁場中での微小磁石の挙動である。また、富士山麓の青木ヶ原でコンパスが南北方向を指さずに迷い出られなくなった話は、比較的強い磁化を持つ青木ヶ原溶岩の生ずる磁場が地球磁場に大きな影響を与えている結果に他ならない。

これらの事柄は、地球は1つの磁石として磁場を形成し、岩石もまた含まれる強磁性鉱物により磁石としての性質や釘としての性質を示していることを意味している。

さて岩石の持つ残留磁化は、磁気テープや永久磁石の磁化に比べると千分の1から100万分の1と非常に弱いものであるため、これらを正確に測る多くの努力がなされてきた。この結果、岩石中で残留磁化を保存できる強磁性鉱物は、通常常温で強磁性を示すチタノマグネタイト・マグネタイトやピロータイトであることが分かっている。また、ヘマタイトは磁化がマグネタイトの200分の1程度しかないが、残留磁化を背負うことが知られている。イルメナイトは強磁性鉱物であるが、キュリー一点がマイナスのため常温では強磁性を示さず残留磁化も誘導磁化も示さない。

1) 地質調査所 地殻物理学

キーワード：岩石磁気, 帯磁率, 磁化率, 残留磁化, 磁気異常, 北上山地, 花崗岩類

前述のチタノマグネタイトやピロタイトは、磁石そのものの性質を示すほかに釘としての性質も示す。通常磁石は、異極どうしは引っ張り合い、同極どうしは反発する。釘は磁石にくっつくが、釘どうしではくっつかない。岩石中に含まれる強磁性鉱物の磁石としての性質が「残留磁化」であり、釘としての性質が「磁化率（帯磁率）」である。

火成岩がその冷却過程で最初に獲得する1次磁化と、冷却後に加わった2次的な磁化を合わせて「自然残留磁化」と呼んでいる。1次磁化としての古地磁気は、過去の地球磁場の変動を記録している化石である。20万年に1回ぐらいの割合で起こっている地球磁場の逆転は、海洋底の岩石に磁気的な縞状模様を残し、これは海洋底拡大説を支える大きな根拠となっている。2次的に加わった磁化は地電流の変化や雷などいくつかの要因が考えられるが、古地磁気学の研究には不要な残留磁化であり、交流消磁や熱消磁等の方法でクリーニングするのが普通である。

一方、「磁化率」(k)は、岩石に含まれる強磁性鉱物の量によって決まる定数で、磁化率による磁化の強さ、すなわち誘導磁化(J)は、外部から加わる磁場の強さ(H)に比例する。つまり、

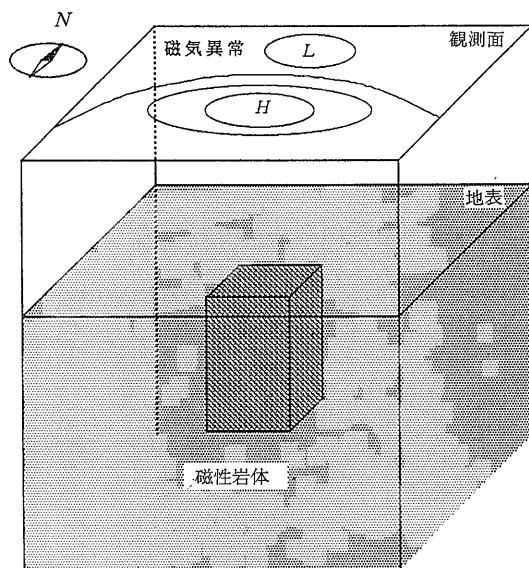
$$J = kH$$

と表せる。磁化率は、外部磁場が小さければ強磁性鉱物の形状や粒形にも関係する指数である。

1次磁化としての古地磁気はそれ自体が一つの磁石であり、岩石に固定されたときの方向を向いている。一方、岩石の誘導磁化の方向は、現在の地球磁場と同じ方向を示す。すなわち、南極・北極（磁極）では、地表に対して垂直であり、赤道付近では水平である。東北日本では、ほぼ偏角 $7.5^\circ W$ 、伏角 53° の方向を向いている。当然地球磁場が0になれば、これらの誘導磁化はなくなり、地球磁場が変動すれば誘導磁化はそれに対応して変動する。地球上で岩石を磁気的にみた場合、岩石から生じる磁化は、残留磁化と誘導磁化のベクトル和としての大きさを示す。たとえば、残留磁化の大きさと誘導磁化の大きさが同じで方向も同じであればその和は2倍、方向が逆であれば0、直角であれば $\sqrt{2}$ 倍の大きさとなる。つまり、方向が逆の場合岩石は見かけ上磁化をまったく示さないことになる。

3. 磁気探査

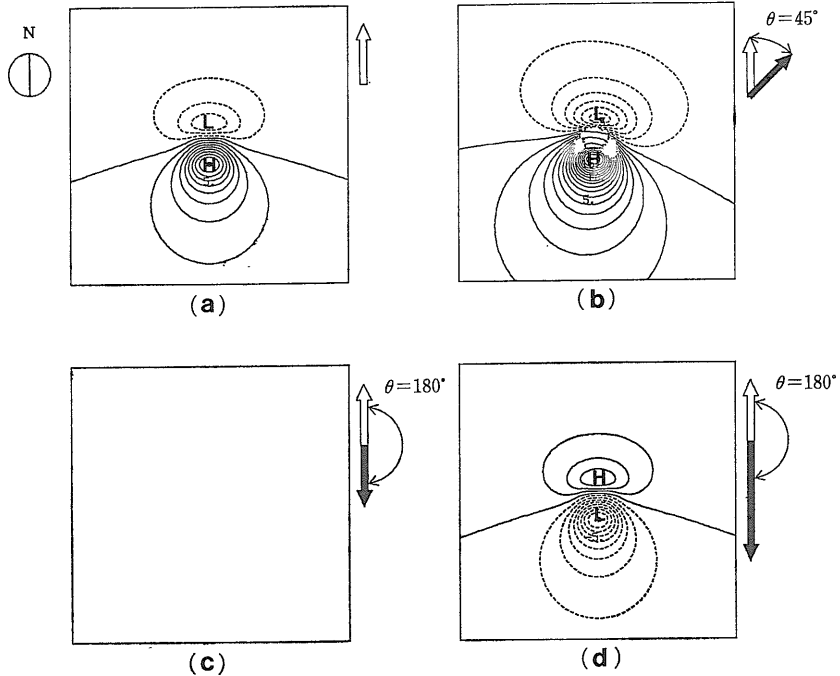
物理探査の中に、地下を構成する岩石の磁気的性質の差異を検出し、これから地下構造を推定する「磁気探査」がある。磁気探査では、多くの場合「全磁力」と呼



第1図 磁性岩体による磁気異常（模式図）。

日本付近で、直方体の磁性岩体が地下に存在し、これによる全磁力異常を一定高度面で観測した場合、 H 、 L はそれぞれ高磁気異常および低磁気異常を示す（以下同様）。

ばれる地球磁場の強さ（スカラー量）の空間的な変化を測定する。つまり、地上、海上、空中および宇宙などにおいて場所を変えて地球磁場の強さの測定を行うわけである。磁気探査では、通常地球磁場の強さの空間的な変化のみを問題とする。しかし、地球磁場の強さは、1日周期で時間の経過に伴っても変化するので、不必要な日変化成分は測定データから除かれる。地球磁場の日変化は、電離層に流れる電流が主な原因と考えられている。測定データはさらに種々の補正が施され、最終的に「磁気異常図」の形で表現される。「磁気異常」とは、そのデータが基準の磁力値（標準磁場）に比べて高いか低いかを表すものである。標準磁場としては、最近では、IGRF（International Geomagnetic Reference Field：国際標準地球磁場）がよく用いられる。IGRFは、全地球規模の標準磁場で、世界的な磁気観測結果を10次の球関数展開式で近似したものであり、地球磁場の経年変化も考慮されている（IAGA, 1985）。観測全磁力異常から、IGRFを差し引いたものを、「IGRF 残差磁気異常」と呼ぶが、この磁気異常は、主に地殻および上部マントルを構成する岩石の磁気的不均一性に起因するものと考えられている。簡単のために、以後特にことわらない限り、磁気異常を全磁力異常あるいはIGRF 残差磁気異常の意味で用いることにする。ここで、磁気異常を模式的に示してみよう。地下を構成する岩石の磁気的性質に不均質な部



第2図 残留磁化の磁気異常への影響.

第1図のような状況で、磁性岩体による全磁力異常が、その磁化の組合せによってどのように変わるかを示す。

実線および破線のコンターは、それぞれ正および負の値を示す。

- (a) $|I| > 0, |R| = 0$
- (b) $|R| = |I|, \theta = 45^\circ$
- (c) $|R| = |I|, \theta = 180^\circ$

(d) $|R| = 2|I|, \theta = 180^\circ$

ただし、

I : 観測面 (水平面) に投影した誘導磁化ベクトル (白の矢印)

R : 観測面に投影した残留磁化ベクトル (黒の矢印)

θ : I と R との角度

磁性体の構造は、第1図のように観測面の中央部直下に直方体モデルを考える。

分があると、この影響を受けて地球磁場の強さが局所的に変化し、磁気異常となって表われる (第1図)。この磁気異常から、逆に地下の磁氣的構造や磁化の分布を推定することができる。

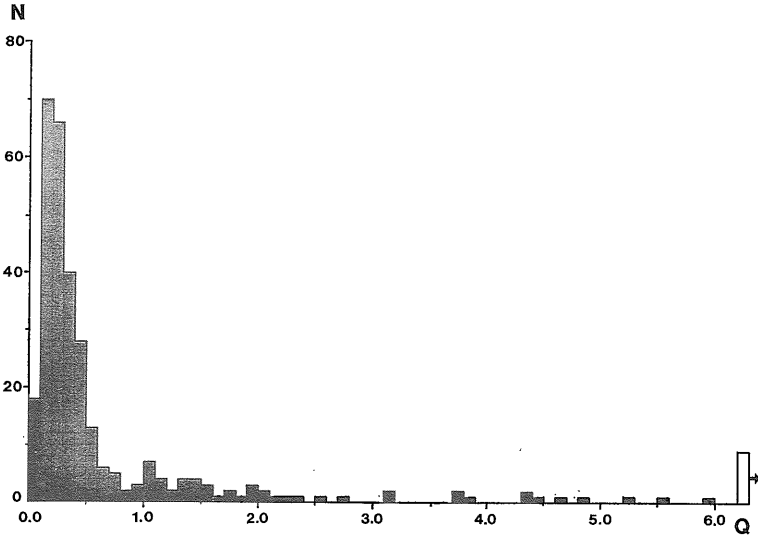
さて、岩石の持つ磁氣的性質の違いを利用して行う磁気探査は、残留磁化と誘導磁化の方向、大きさに関わる問題であり磁気異常の解析にはこれらを充分に考慮する必要がある。磁化率測定は、比較的単純に行えるため測定例も多いが、残留磁化の測定は手法が発達した今日でもある程度の労力を必要とするため両者が揃っている例はあまり多くない。岩石の残留磁化 (R) と現在の地球磁場による誘導磁化 (J) の比

$$Q = R/J$$

を Q 比または Königsberger 比と呼びこれを指数として用いることがある。 Q 比は、通常火山岩では大きく、堆積岩・変成岩では小さいという事実は、よく知られている。しかしこれらを系統的に測った例はあまり見当たらない。このため本稿では、4章で北上山地花崗岩類の Q 比

について観察することにする。

火成岩類が生成されるとき、マグマの冷却過程で強磁性鉱物が晶出しそのキュリー一点を通過する段階で残留磁化を獲得する。この残留磁化は、優れた安定性を持つことが知られている。その後他の原因で獲得される2次磁化も残留磁化であり、これらを加えたものが最終的な残留磁化となる。磁気探査で取り扱う磁化は、この最終的な残留磁化と地球磁場による誘導磁化との和の大きさや方向である。これらの岩石磁気データは、磁気異常の解析・解釈において重要である。たとえば、磁気異常をもたらす岩体の構造や磁化率が同じでも、残留磁化の有無や方向が異なるだけで、観測される磁気異常の形が変わってくる (第2図)。岩体による誘導磁化ベクトルと残留磁化ベクトルとが斜交する場合は、磁気異常の形が歪んでくる。また、誘導磁化ベクトルと残留磁化ベクトルの大きさが等しく、その方向が正反対だと磁気異常は表われない。さらに、残留磁化ベクトルの大きさが誘導磁化ベクトルの2倍で、方向が反対だと正と負が反対



第3図
北上山地花崗岩類のQ比頻度分布.
横軸：Q比，縦軸：個数.

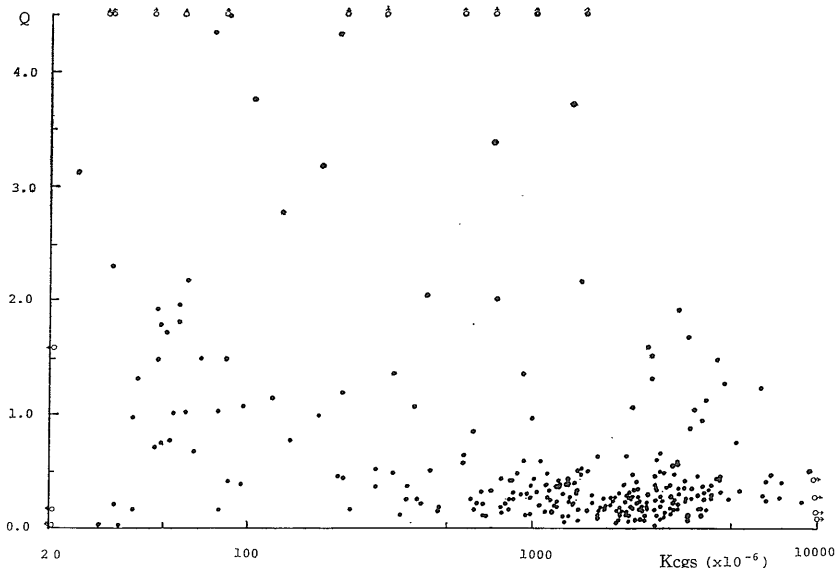
の磁気異常になる。

4. 北上山地花崗岩類のQ比とその特徴

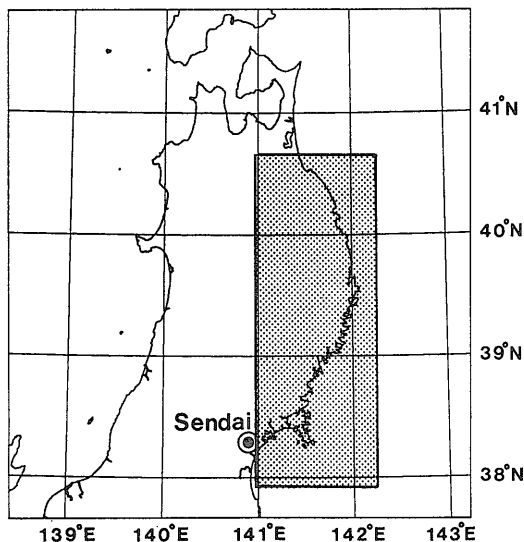
北上山地花崗岩類は中・古生層中に貫入し、その貫入時期は白亜紀後期と考えられる。これら花崗岩類は、はんれい岩から花崗岩までの広範囲の岩質を含み、北上山地全域に分布し、その露出面積は全体の25%にも達する。しかし、特に大規模な分布岩はなく、最大の露出面積を持つ遠野岩体は620km²程度である。また北上山地

は、北西-南東方向に走る早池峯構造帯を境として北部・南部に分けられる。地質学的には、北上山地白亜紀花崗岩類を北部・南部に2分し前者を4グループ、後者を2グループに分類している。これらの花崗岩類の大半は量比が石英>カリ長石のカルクアルカリ岩系に分類される。ただし、北部北上山地西縁の一部に量比がカリ長石>石英の一戸岩体・日の神子岩体・姫神岩体が存在する。

今回、北上山地全域より310個の試料を選び、残留磁化および磁化率の測定を行った。試料は、1インチ径、



第4図 北上山地花崗岩類の体積磁化率とQ比との関係.
横軸：体積磁化率(対数表示)，縦軸：Q比.



第5図 北上地域位置図。

影をつけた部分が、第6図の磁気異常図の範囲を示す。

1インチ厚の円柱状に整形したものの複数個を用い、測定の結果、個々の測定値の平均値を求めた。残留磁化の測定は、スピナー磁力計、磁化率の測定は通常の磁化率計を使用し、結果をCGS単位で表示した。

これらの結果を概観すると次のようである。

(1) Q比の分布(第3図)を見ると、その変化範囲は0.1-10程度であるが、0.2-0.4に多くの試料が分布している。1を越えるものの割合は、おおよそ全体の20%に達する。

(2) 磁化率の変化に対するQ比の変化(第4図)を見ると k cgs (体積磁化率) が $1500 (\times 10^{-6})$ 以下では、比較的Q比も高いものも存在するが、それ以上では

急激に減少している。磁化率の変化範囲は、20-10000と数百倍の違いが見られるが、主たる変化範囲は800-5000に見られる。

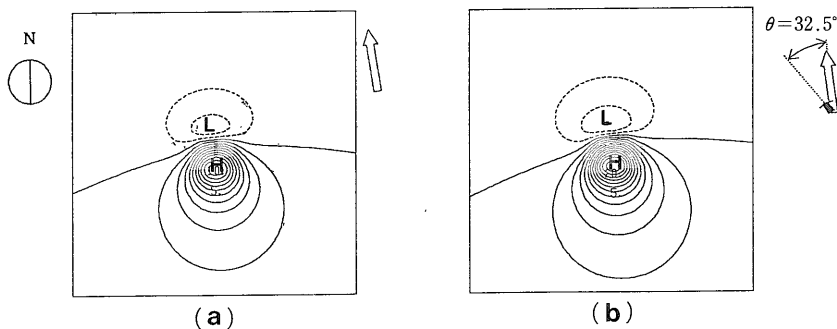
(3) 磁化率が高くかつQ比も大きい試料はいくつかの岩体に見られる。岩体としてこの傾向を示すものはカルクアルカリ岩系の一部小岩体およびカリ長石>石英系岩体に多くみられる。これは、岩石に含まれる強磁性鉱物の粒度、形状、ラメラーなど磁区構造に起因するものと思われる。

5. 磁気異常

それでは、北上地域(第5図)の磁気異常を見てみよう。ここに示したのは、新エネルギー総合開発機構(新エネルギー・産業技術総合開発機構の前身)による「IGRF残差空中磁気異常図」である(第6図)。このデータは、航空機に磁力計を搭載し、空中において磁気探査を行って得られたものである。なお、磁気異常図の作成面の海拔高度は、8,000フィート(約2,438m)である。

さて、北上地域で顕著なのは、磁気異常と花崗岩体の分布がほぼ1対1に対応することである。これは、4章で測定した北上山地花崗岩類の磁化率の高さからみても調和的な結果である。

さらに、定方位サンプルの残留磁化測定によると、北上山地花崗岩類の残留磁化ベクトルは、 $35^{\circ}W \sim 61^{\circ}W$ 程度であることが分かっている(Kawai et al., 1971)。すなわち、北上地域の地球磁場の偏角は約 $7.5^{\circ}W$ なので、残留磁化ベクトルの偏角の平均値を約 $40^{\circ}W$ とすれば、残留磁化ベクトルは現在の地球磁場方向より西に約 32.5° 傾いていることになる。以上より、北上山地花崗岩体の残留磁化による、磁気異常への影響を模式的に示してみ



第7図 北上山地花崗岩体による磁気異常(模式図)。

(a) 誘導磁化のみ存在。地球磁場の伏角： 53.5° ，偏角： $7.5^{\circ}W$

(b) (a)に加えて残留磁化が存在。

地球磁場の伏角： 53.5° ，偏角： $7.5^{\circ}W$

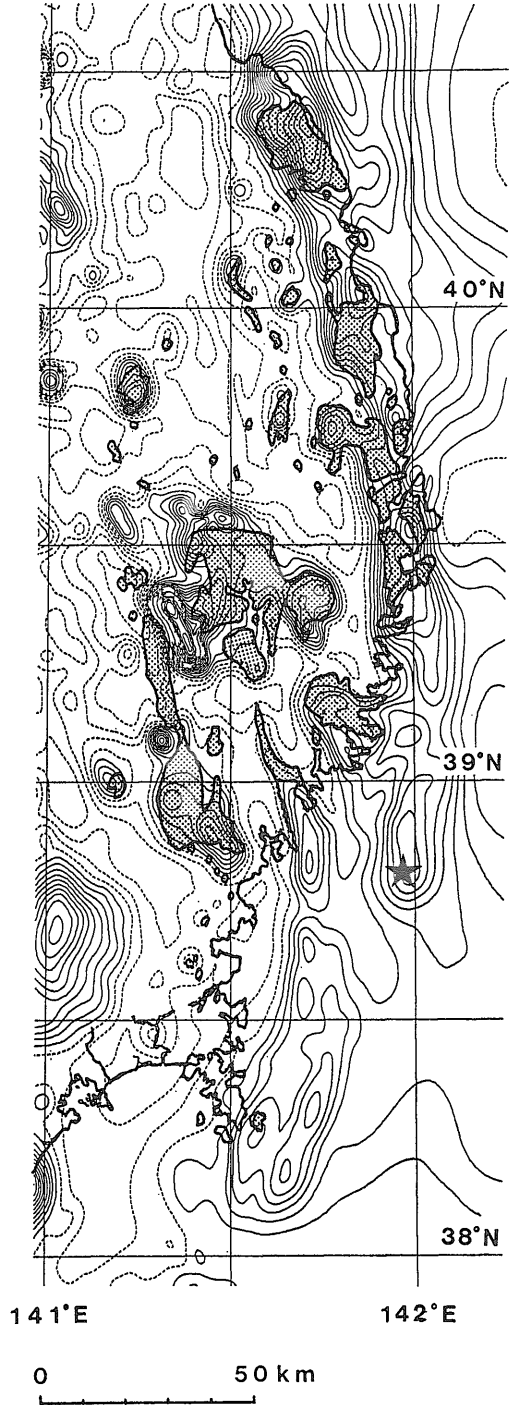
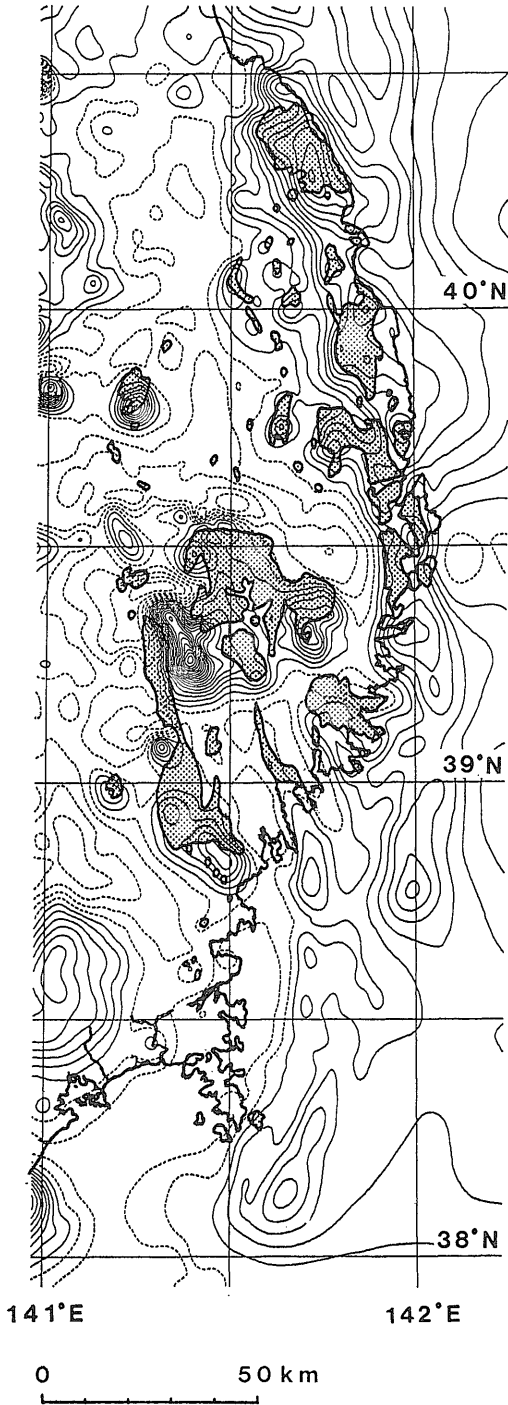
残留磁化ベクトルの伏角： 53.5°

残留磁化ベクトルの偏角： $40.0^{\circ}W$ ，Q比：0.2

誘導磁化ベクトルの偏角と残留磁化ベクトル

の偏角との角度(θ)： 32.5°

その他は、第2図と同様。



第6図 北上地域 IGRF 残差空中磁気異常図と花崗岩体分布.
 コンター間隔: 50nT. 実線および破線のコンターは、
 それぞれ正および負の値を示す. 影を付けた部分は花
 崗岩体を示す. 新エネルギー総合開発機構(1982)を加
 筆修正. 花崗岩体分布は、100万分の1地質図(山田ほ
 か、1982)による.

第8図 北上地域極磁気異常図と花崗岩体分布.
 黒の星印は、基礎試錐の位置を示す. その他は、第6
 図と同様.

よう(第7図)。誘導磁化に加えて、残留磁化が存在する場合としない場合とでは、磁気異常に著しい相違はない。すなわち、北上山地花崗岩体による磁気異常は、誘導磁化が卓越し、残留磁化の影響は小さいことになる。したがって、この地域の花崗岩体による磁気異常の解析・解釈に当たっては、残留磁化の影響はほとんど無視してよい。

ここで、北上地域の「極磁力異常図」を見てみる(第8図)。「極磁力異常」とは、全磁力異常を磁極付近での値に変換したもので、1個の磁性岩体に対応して1個の磁気異常の目玉がその直上に観測されることが特徴である。この図を用いると、磁気異常と磁性岩体との空間的な対応がよりつけ易くなる。

ところで、全磁力異常から極磁力異常への変換に当たっては、磁化ベクトルの方向が分からなければならないが、通常は未知であることが多いので、現在の地球磁場方向と仮定して行う。したがって、磁化ベクトルが地球磁場方向と大幅に異なる場合は、極磁力異常図を見るときに、注意が必要となる。ただし、北上地域の場合は、前述のように残留磁化の影響が無視できるので、このまま見ることができる。極磁力異常図(第8図)を参照すると、全磁力異常の場合(第6図)と異なり、花崗岩体のほぼ直上に極磁力異常の目玉(高磁気異常)が分布することが分かる。特に、太平洋沿岸部では花崗岩体との分布とよく一致している。この付近では、極磁力異常の高まりが海域へも延長することから、これらの海域でも花崗岩体が海底下に分布することが推定される。事実、国の基礎試錐「気仙沼沖」の結果(天然ガス鉱業会・大陸棚石油開発協会, 1986)によると、気仙沼東方沖35kmの地点において掘削を行った結果、深度1,843mで花崗岩に到達している。

6. おわりに

前章のように、磁気異常の解析によって地下の磁性岩体の調査さらには地下構造の推定が可能となる。この際、岩石磁気データが非常に重要になってくる。しかし、残念なことにわが国において物理探査のための岩石磁気の測定データはけっして多いとはいえない。また、せつかく測定されても、磁化率および残留磁化のどちらかが含まれていないことがある。さらに、同じ名前の岩石でも、その磁氣的性質はサンプリングされた地域によって大きく変わるものと思われる。このような物性値とこれを応用する物理探査との関係は、その他の物理探査手法においても当てはまると考えられる。物理探査がより精密な構造の推定あるいは推定の正確さを求められるなら、今後は、地道ながら岩石物性の研究をさらに進める必要があるだろう。

引用文献

- IAGA DIVISION I WORKING GROUP 1 (1985) International Geomagnetic Reference Field Revision 1985. J. Geomag. Geoelectr., vol. 37, p.1157-1163.
- Kawai, N., Nakajima, T., and Hirooka, K. (1971) The Evolution of the Island Arc of Japan and the Formation of Granites in the Circum-Pacific Belt. J. Geomag. Geoelectr., vol. 23, No. 3, 4, p. 267-293.
- 新エネルギー総合開発機構 (1982) 昭和56年度全国地熱資源総合調査報告書キューリー一点法調査(九州及び東北).
- 天然ガス鉱業会・大陸棚石油開発協会 (1986) 日本における最近の石油探鉱. 281p.
- 山田直利・寺岡易司・秦 光男ほか編 (1982) 100万分の1地質図. 日本地質アトラス, p. 3-19, 22-25. 地質調査所.

OKUMA Shigeo and KANAYA Hiroshi: Rock magnetism and magnetic survey.

<受付: 1990年1月16日>