

磁気探査入門講座



日本物理探査(株)技術顧問  
産業技術総合研究所客員研究員  
中塚 正

4. 探査の実際

最後に、磁気探査がどんな対象・局面で有効に活用されているかについて、見ていくことにします。とはいっても、数ある分野のすべてを網羅することは、紙面の上でも私の能力の上でもできないので、その一端を紹介するということでご理解いただきたいと思います。

物理探査では一般に、どこでデータを取得するかによって技術的な要件が異なり、また期待される成果も異なってくる場合が多いので、常識的によく分類に用いられる地上・海上・空中の区分に従いますが、土木分野のごく浅部の人工物をターゲットとする調査については、節を分けて記すことにします。

4.1 地上磁気探査

磁力計を人が持ち運んで移動しつつ多点で磁場測定を行うものですが、広域的な調査では測点間は車で移動することもあります。しかし、車は磁気ノイズのもとになるため、測定精度の点から車で移動しながらの測定は一般に困難です。測点間隔は調査対象物の深度・大きさ(すなわち取得したい磁気異常の波長)に応じて決めることとなりますが、より短波長の磁気異常や人工物のノイズ分が卓越する場合には、それを正しく除去できる手立てが必要になるので、効率的な調査の妨げになります。大局的な地質構造を対象にする場合などでは、測点を人工ノイズや局所異常のない(なさそうな)所に選んで設定することが有効な場合もあるでしょう。

地上磁気探査では、持ち運びが容易で操作も簡単な携帯型プロトン磁力計がよく用いられます。プロトン磁力計の発明以前は、1成分磁力計で主に鉛直成分測定が行われました。これは、鉛直以外の方向成分を正しく測定するには測定器の方位を正しく設定する必要があり、効率的な測定が難しいのに対し、鉛直成分は錘を下げれば正しい向きを設定できたからです。それでも静止しないと測定はでき

ません。プロトン磁力計ならセンサーの向きに注意を払う程度で、移動しながらでも測定が可能になりました。また、プロトン磁力計の測定周期は数秒程度が一般的ですが、プロトン磁力計の一変種であるオーバーハウザ効果磁力計や光ポンピング磁力計では、より迅速にあるいは連続的により高分解能の調査に対応できます。

調査のターゲットとしては、期待される磁気異常が測点配置にマッチするものであれば何でも良いわけですが、ここでは、プロトン磁力計を用いた考古学的調査と小規模地質構造調査の例を見てみましょう。

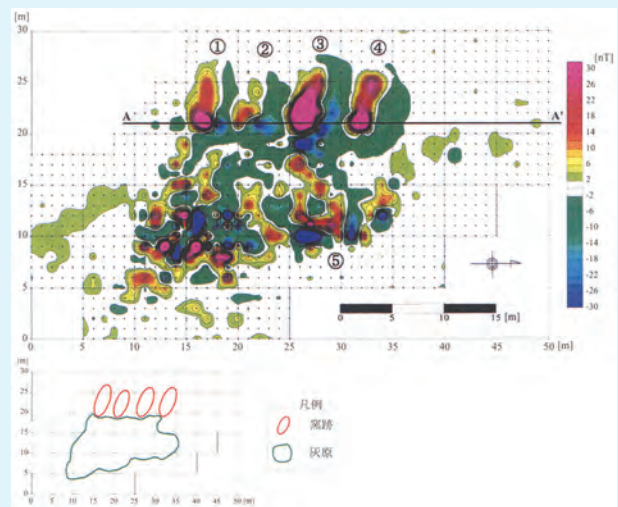


図12 窯跡の考古学磁気探査結果 (高瀬・峠,2001)

図12は、高瀬・峠(2001)による窯跡の考古学調査の結果です。土器が焼かれた窯は、焼成のために床や壁が熱残留磁気を獲得して明瞭な磁気異常を生じている場合が多く、発掘調査の前段の非破壊調査として用いられます。また、考古学調査としては、磁性を持つ埋蔵物の位置を探索する磁気探査も行われています。

Scollar *et al.*(1986)は、高密度の磁気異常データをリモセン画像データのように扱ってフィルタ技術を駆使し、現在は埋積されて平らになったクサンテン(ドイツ)の古代ローマ遺跡の発掘調査地で遺構のマッピング(図13)を行っていま



図13 クサンテン(ドイツ)の古代ローマ遺跡における遺構の磁気異常マッピング (Scollar *et al.*, 1986)

す。原著では、磁気異常のソースについてふれていませんが、遺構の造成に使われた石材の磁性によるものか、古い遺構の地層と後から埋積した地層との磁気的コントラストによるかのいずれかなのでしょう。

牧野ほか(1997)は、火山の火道にあたる火山岩頸が浸食から残されたと考えられている西宮市甲山で山頂から放射状の測線で磁気探査を行い、リング状の特徴的な磁気異常パターン(図14)を捉え、火道境界部の磁気構造の特徴を見出しています。

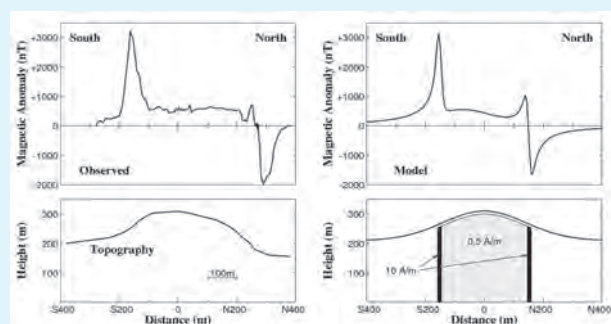


図14 西宮市甲山の磁気異常プロファイルと構造モデル(牧野ほか, 1997)

## 4.2 海上磁気探査

水域では、地上のようにハンマーとクリノメータを主役とする地質調査を効果的に行うのが困難なため、各種物理探査の活躍の場になってきました。中でも、単チャンネル音波探査～多チャンネル反射法さらに3次元反射法と発展した地震探査の活躍に大きなものがあります。そうした大規模な探査は、本格的な海洋調査船を用いて行う場合が多く、調査航海をフルに活用するため、重力・磁気データも同時に取得するのが一般的に行われてきました。

海上では、磁力計センサーの姿勢を保持することが陸上以上に難しいため、プロトン磁力計の利用による全磁力測定が常識化し、船体の磁気ノイズを避けるためにセンサーを船尾から離して曳航する方法がとられます。しかし一方、ベクトル量である磁場の3成分を船上測定する技術(Isezaki, 1986)も開発され、測線調査では航跡に交差する方向の磁気異常変化が把握できないという弱点を克服する解析法(Seama *et al.*, 1993)が実用化されています(図15)。

海上磁気探査のデータは色々な場で活用されていますが、中でも最大の注目を集めたのは、プレートテクトニクスの証拠となったVine and Matthews(1963)による海洋底の地磁気縞状異常の発見でしょう。その一端は図15にも見えています。海上磁気探査から少しそれますが、地表から人工衛星に至る磁場測定データを総集して作った世界の全磁力異常分布EMAG2をGoogleマップ上で表示できるWebサイトが、

[http://ngdc.noaa.gov/geomag/data/Google\\_Maps/EMAG2/](http://ngdc.noaa.gov/geomag/data/Google_Maps/EMAG2/)

にあります。地磁気縞状異常の状況その他が如実に表現さ

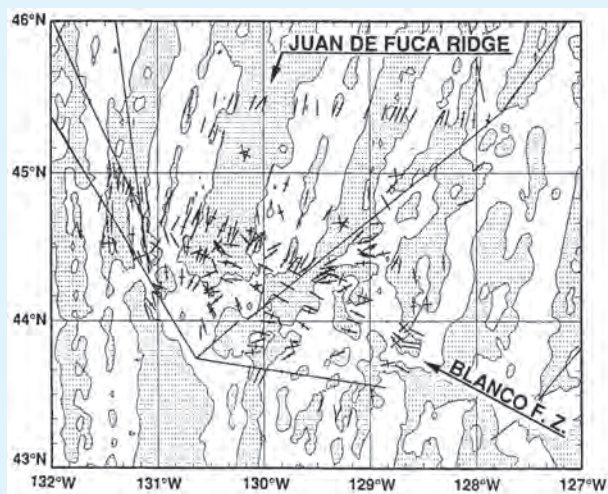


図15 ファンデフカ海嶺の全磁力異常分布と3成分磁気異常から求めた磁気境界の走向(Seama *et al.*, 1993)

れています。興味ある方は是非ご覧下さい。

最近の海上磁気探査では、より高分解能の調査が課題となる中で、水深が深いところでの海面からの調査には限界があり、よりソースに近づいた探査、すなわち深海曳航式の磁力測定(Sayanagi *et al.*, 1994)や自律航行海中ロボットAUVによる深海底磁気探査(Honsho *et al.*, 2010; 図16)も実用化されています。

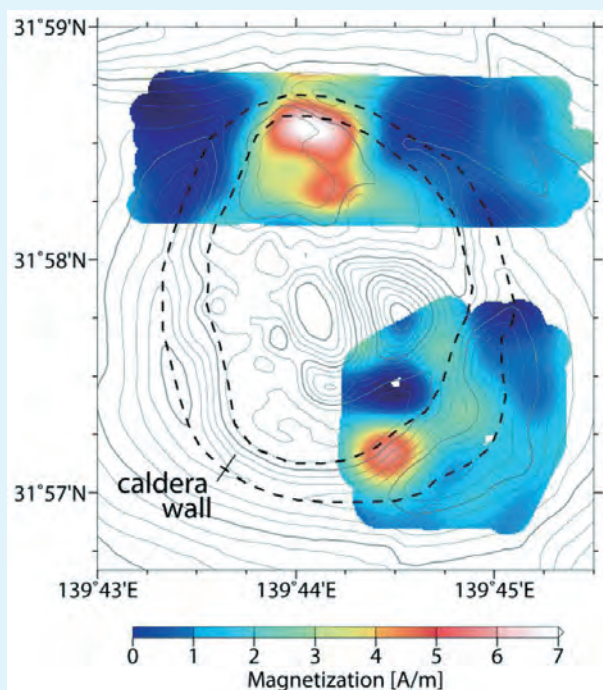


図16 AUVによる深海底磁気探査から求められたベヨネズ海丘カルデラの磁化強度(Honsho *et al.*, 2010)

## 4.3 空中磁気探査

空中磁気探査では、広大な地域の調査が、陸上・水上の別なく、人跡未踏のジャングルであっても、迅速に行える特

長があります。同時に、地表付近の局所的な人工あるいは表層地質のノイズソースから適度に離れて探査を行うことができます。水域や地形の穏やかな平野・準平原の地域では固定翼の飛行機で調査可能ですが、山岳地で希望の飛行高度が凹凸に富む場合は、ヘリコプターが用いられます。

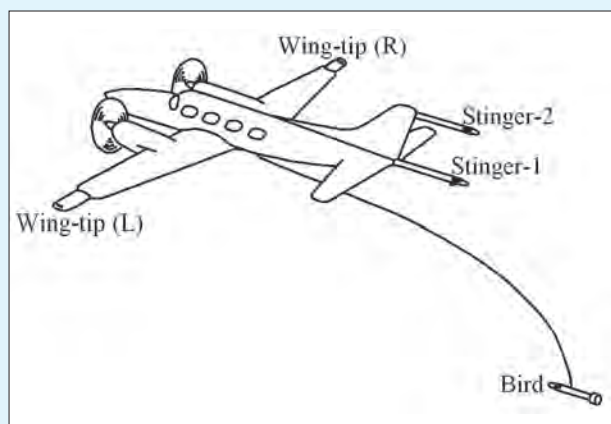


図17 飛行機への磁力センサーの各種装備方式

飛行機への磁力計センサーの設置方法(図17)としては、バードと呼ぶ非磁性の容器に収納して曳航する方法もありますが、バード曳航時の速度の制約や安全性の危惧のため、今日では機体の尾部または翼端に設けられた突起部(スティンガー)にセンサーを収納する方式が一般的です。ヘリコプター利用の場合では、大きなバード形式の装置を利用する空中電磁探査と同時に測定するシステムが実用化されてきたこともあり、バード方式の測定が多く行われていますが、ヘリコプターのスキッド(そり)部分から伸ばしたスティンガーにセ

ンサーを設置する方法(図18)も実用化され、飛行区域の制約などの面でより自由な飛行が可能となっています。なお、スティンガー方式の測定では、機体が発する磁気の影響を避けきれないので、取得データへの影響を除去するための機体磁気補償の仕組みが用意されます。



図18 磁力計用スティンガーを装備したヘリコプター

過去の調査事例としては、極めて多くが知られていますが、全般的には金属資源や石油・天然ガスの基礎調査の位置づけで行われたものが大半を占めます。日本でも、この連載の第1回の「表紙の図」に示したように、石油・天然ガスと地熱資源の基礎調査で国土を覆う規模のデータが取得されています。それらは、広域調査の範疇に属するものが主体ですが、ほかに旧金属鉱業事業団MMAJ(現JOGMEC)などで金属資源探査の目的でより精密な探査が行われました。その後は技術の発展とともに、火山の構造や活動状況把握の目

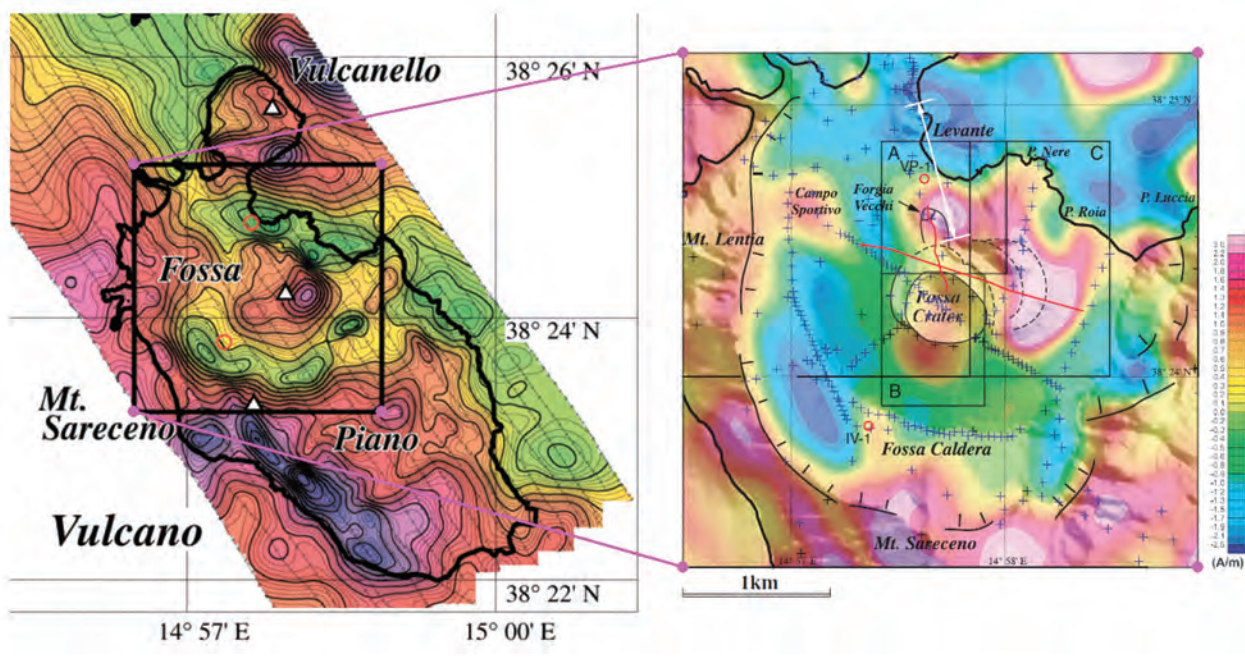


図19 イタリアVulcano火山の高分解能探査結果(全磁力異常)とその磁化強度マッピング解析結果(Okuma et al., 2006)

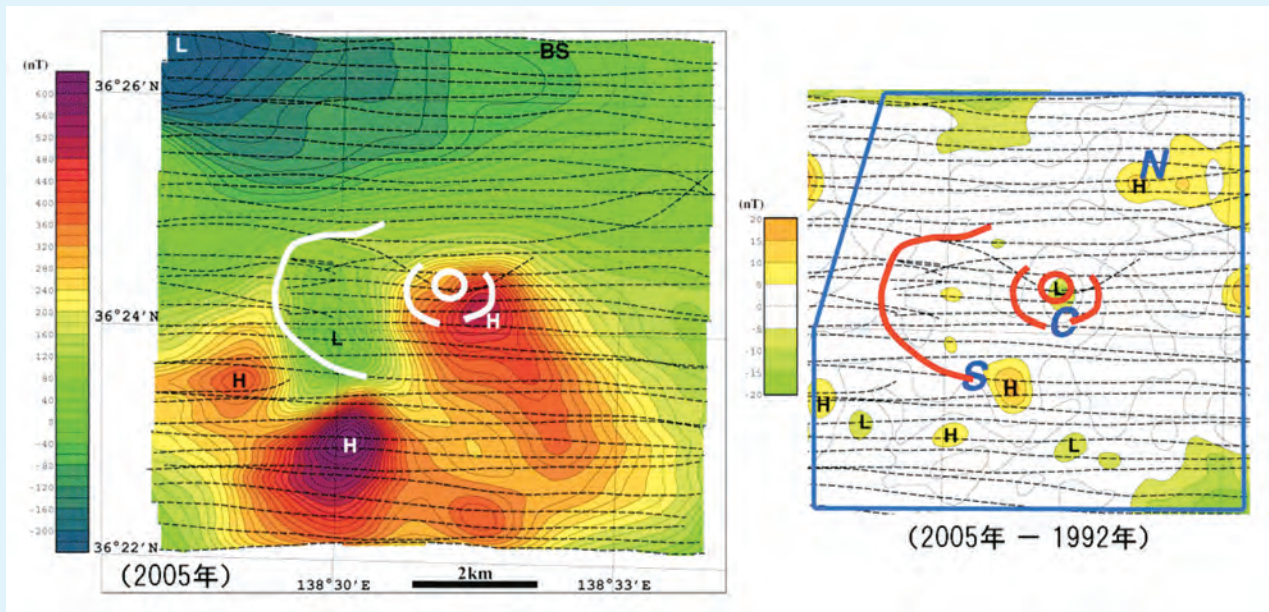


図20 浅間火山2004年噴火後の全磁力異常分布(2005年)と1992年調査データとの対比による磁気異常変化抽出結果 (Nakatsuka et al., 2009)

的で限られた地域を対象に、高分解能探査が行われています。現状では、地震や活断層関連では、特徴的な磁気異常が期待できない場合が多いため、事例が少ないのが実情です。

実例を二つだけ示します。図19は、イタリアVulcano火山の高分解能探査とその磁気構造解析の結果(Okuma et al., 2006)を示しており、過去の噴火口のマグマ活動状況特徴づける地下構造を得ています。図20は、浅間火山2004年噴火に関連して、その翌2005年に行った調査データと、既存の1992年データと対比してその間の僅かな磁気異常変化を、調査飛行の測線位置・高度の差を考慮に入れた拡張交点コントロール手法によって抽出した結果(Nakatsuka et al., 2009)を示しており、活動中火口での熱消磁と古い溶岩の磁化の進行を示唆する結果を得ています。

**4.4 埋没鉄類磁気探査**

埋没鉄類磁気探査の技術は、戦後復興の危険物探査すなわち埋没不発爆弾・機雷・砲弾等を発見するために、開発されてきました。近年は、都市部の地下工事の増加を背景にして、探査対象物が危険物だけでなく、埋設管や鋼矢板・各種基礎杭などの埋設物にも適用されるようになってきました。

それらの探査の対象となるのは概ね市街地であり、鉄道からの漏洩電流・既存の構造物や大小の廃棄物など人工ノイズの卓越する場合が多くそれらとの正しい弁別が必須である点と、安全の確保が第一であるため正確な個別ソースの評価が欠かせない点が、技術的要件になります。

その対象である鉄類は強磁性体であり、地層・岩石の磁性とは違った特性を持っています。強磁性体では磁性体の形状に応じた消磁力が働き、多くの場合磁性体の長手方向に磁化

が生じます。その長手方向の両端付近に磁極ができるわけです。一方、人工ノイズに対抗するためにはソースに近づいて測定することが、最大の武器となりますが、ソース磁性体の大きさに対する測定距離が大きい状況の測定となり、正負の磁極のうちより近い側の影響を大きく受けます。そのような環境の下で、実際の探査では、探査深度(距離)を高々2~3mに設定して、誘導コイル型磁気傾度計や一軸差動フラックスゲート磁力計による連続測定が行われます。



図21 埋没鉄類探査の地上水平探査

典型的な探査スタイルとしては、陸上水平探査(図21)と表土除去してそれを繰返す経層探査、削孔垂直探査(図22)、海上水平探査(図23)などがあります。データ解析では、異常点について各測線データからソース距離が求まるので複数測線からの距離が与えられると深度が求まります(図24)。ま

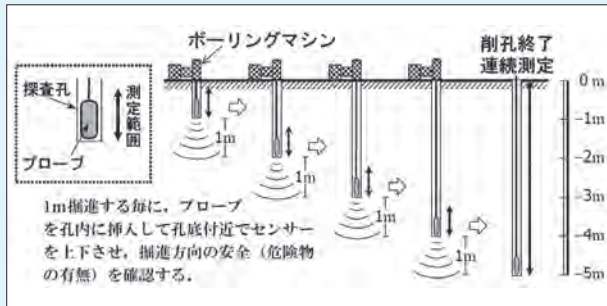


図22 不発弾探査の削孔と安全確認手順

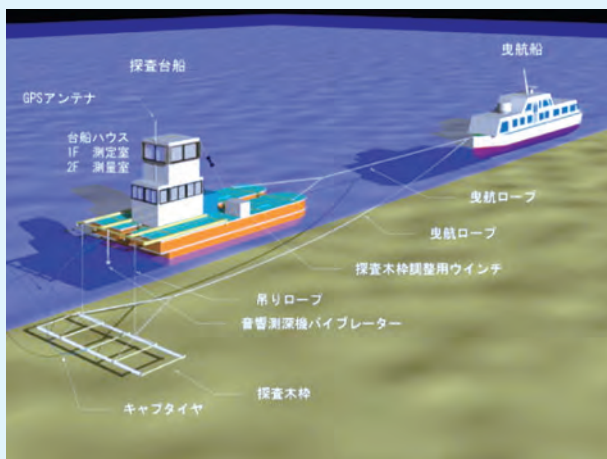


図23 曳航方式による海上水平磁気探査(日本物理探査(株) Webページより)

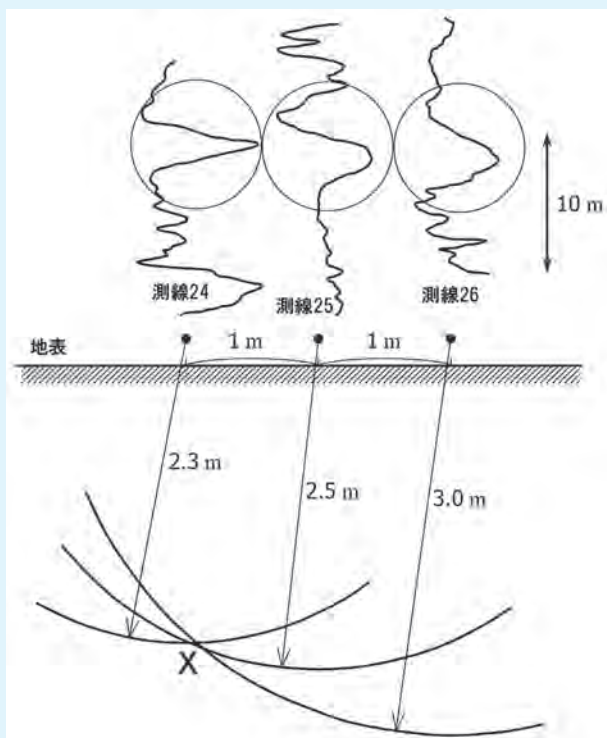


図24 不発弾磁気探査データの例

た、統合したデータに逆解析手法を適用することも可能です。ソース深度(位置)が求めれば、測定データからソースの磁気量(またはモーメント)が求まり、過去の事例研究や模擬ソースの測定実験のデータと合わせて、ソース(例えば不発爆弾)の種別が一定の精度で判定できることになります。

## 5. おわりに

以上でこの「磁気探査入門講座」の解説を終ります。入門講座と言いながら、磁気探査のなるべく全体像を知ってもらう方向で書き進めたため、概念的な説明で終りにした点ばかりが目立ってしまいました。また、原稿を書き進める中では、短いスペースの中で本質点を要領よく伝えることが如何に大変かということ、改めて感じた次第です。拙い解説の記事に目を通して頂いた読者の皆さんに、深くお礼申し上げます。

### 参考文献

- Honsho, C., T. Ura, K. Tamaki, K. Nagahashi, H. Shibasaki, and Y. Hosoi (2010) Deep-sea magnetic survey using autonomous underwater vehicle r2D4 on Bayonnaise knoll caldera. *Butsuri-Tansa*, 63, 427-435.
- Isezaki, N. (1986) A new shipboard three-component magnetometer. *Geophysics*, 51, 1992-1998.
- 牧野雅彦・大熊茂雄・森尻理恵・中塚 正 (1997) 西宮市甲山の磁気構造. *火山*, 42, 213-222.
- Nakatsuka, T., M. Utsugi, S. Okuma, Y. Tanaka, and T. Hashimoto (2009) Detection of aeromagnetic anomaly change associated with volcanic activity: An application of the generalized mis-tie control method. *Tectonophysics*, 478, 3-18.
- Okuma, S., T. Nakatsuka, M. Komazawa, M. Sugihara, S. Nakano, R. Furukawa, and R. Supper (2006) Shallow subsurface structure of the Vulcano-Lipari volcanic complex, Italy, constrained by helicopter-borne aeromagnetic surveys. *Explor. Geophys.*, 37, 129-138. *Butsuri-Tansa*, 59, 129-138; *Mulli-Tansa*, 9, 129-138.
- Sayanagi, K., A. Oshida, M. Watanabe, and K. Tamaki (1994) New self-contained deep-towed proton magnetometer system. *J. Geomag. Geoelectr.*, 46, 631-642.
- Scollar, I, B. Weidner, and K. Segeth (1986) Display of archaeological magnetic data. *Geophysics*, 51, 623-633.
- Seama, N., Y. Nogi, and N. Isezaki (1993) A new method for precise determination of the position and strike of magnetic boundaries using vector data of the geomagnetic anomaly field. *Geophys. J. Int.*, 113, 155-164.
- 高瀬尚人・峠美穂 (2001) 磁気探査の震跡調査への適用性について. *応用地質技術年報*, no.21, 115-122.
- Vine, F. J., and D. H. Matthews (1963) Magnetic anomalies over oceanic ridges. *Nature*, 199, 947-949.

次の「わかりやすい物理探査」のテーマは、微動探査(4回シリーズ)です。