

高密度空中磁気探査と解析技術の進歩

中塚 正・大熊 茂雄 (地質調査所)

High-resolution Aeromagnetic Survey, Interpreting Magnetic Data
and Imaging Subsurface Structure

Tadashi NAKATSUKA and Shigeo OKUMA (Geological Survey of Japan)

1. はじめに

日本における磁気探査の歴史では、探査の視点のうすい明治時代以前を除いて、大正から昭和初期の直接探査の時代が第1世代と考えられる。磁針の振れを利用した磁力計で磁鉄鉱床の調査が行われ、磁気探査の有効性の実証の時期であった。その後昭和30年代までの第2世代は、いわば地上磁気測量の時代であり、地域的な磁気異常分布が議論されるようになるが、系統的な調査の測点間隔は数10kmと粗く、地下構造に関する特に有用な情報とはなり得なかった。空中磁気探査技術の開発が進む昭和40年代以降が第3世代と位置づけられる。

地質調査所で空中磁気探査の研究に本格的に着手したのが1964(昭和39)年である。それ以後、電子技術の進歩を背景として空中磁気探査とその解析の技術開発を行いつつ、1969年からは日本周辺大陸棚の石油・天然ガス資源の賦存評価のための調査が進められ、日本列島と大陸斜面海域を含むその周辺海域の調査が、1989年まで続けられた(中塚, 1990)。この20年間は技術革新の時代であり、探査に用いられた機材にも多大の変遷があるが、プロトン磁力計による磁場測定精度と比べて、相対的に劣る位置計測(および航空機の誘導)の精度向上と、コンピュータ利用技術の適用の歴史であった。

この第3世代の探査技術によって、磁気探査が直接探査にとどまらず、地下構造解明の有力な一手段として認識されるようになった。さらにその後は、精密な磁場と位置の計測をさらにすすめて、低高度・高密度の測線配置による高分解能空中磁気探査の適用の研究がすすめられており、第4世代の磁気探査技術を目指している。

表題にある「高密度空中磁気探査」の用語は、表現としてあまり当を得たものといえないが、この高密度の測線配置による空中磁気探査を象徴的に言い表した造語である。第3世代の空中磁気探査では、数kmの測線間隔で広大な区域の調査を迅速に行えることの意義が大きかったが、そこから得られる磁気異常は、大局

的な地質構造の議論には適するが、個々の地質構造・現象の議論を深める上では不十分であった。そこで当面の高密度空中磁気探査では、100mオーダーの測線間隔で、従ってそれに見合った低高度での測定を意図している。

このような高密度空中磁気探査は、国土に広大な平地を有するカナダやオーストラリアで早くから手がけられてきており、それらの地域では磁気異常分布図を描くのみで地質構造との対比が容易に読み取れる状況もあった。しかし日本では、地形・地質状況を大きく異にしており、独自の技術的視点を持つことも必要である。

本講演では、地質調査所での調査例を中心に、高密度空中磁気探査の適用状況を示すとともに、高い空間分解能の磁気異常データにふさわしい解析法の例として磁化強度マッピング技法とその技術の進展について述べ、さらに近年の磁気異常解析技術の動向についても触れることとする。

2. 高密度空中磁気探査

地質調査所での高密度空中磁気探査の研究は、1990(平成2)年にスタートした工業技術院特別研究「精密地下構造評価のための高密度空中磁気探査技術の研究」に始まる。5年計画のこの研究では、火山地域・グリーンタフ地域・断裂系構造地域をフィールドにして、高密度探査に必要な各種の計測技術(および航空機の誘導技術)の開発と、それに適合したデータ処理・地下構造解析の技法開発をすすめて、各種の地質状況下での高密度空中磁気探査の有効性を検証することが目標であった。

高密度の測線配置に対しては、位置計測の精密化が大きな課題であり、その初年にはマイクロ波を利用した測位システムの実用化(森尻ほか, 1992)を図ったが、その後はGPSの普及と精度向上が著しく、今日ではほとんどの探査において、GPSで十分な位置計測が行える状況となっている。

各フィールドでの成果の概略を次に述べる。

火山地域のフィールドである浅間地域においては、噴火活動の歴史を経て数多くの山体の構造が知られているが、ヘリコプター探査による精密磁気異常分布はその状況をよく反映し、山体を構成する各活動ユニットに対応した溶岩との対比が可能であること、またより新しい噴火活動の火山灰等によって覆われた溶岩流の分布範囲が解析できることが示された。

グリーンタフ地域のフィールドである由利原地域では、既存データでは知られていなかった短波長磁気異常の存在を検出し、鳥海火山からの岩屑なだれ堆積物の寄与であることを明らかにした。さらに、それら浅部構造の影響をモデリング手法で除去した磁気異常から、基盤のより精密な起伏構造が解析された (Okuma et al., 1995)。

断層系構造地域のフィールドである丹那地域では、磁気異常が地形の起伏の影響を大きく受け断層構造そのものが地形にも現れており、地形自体の影響と断層構造の影響とを分離することが困難であったが、精密地形補正と後述の磁化強度マッピング技法による解析から、左横ずれ断層の応力場に対応した断層破碎帯の発達域を解明した (Nakatsuka, 1995)。

海外での高密度空中磁気探査の成果は、論文の形で公表されたものは未だあまり多くないが、例えばアメリカ Portland で高密度探査によって初めて活断層の所在位置が明らかにされた例 (US Magnetic Anomaly Task Group, 1995; Blakely et al., 1995) や、モンタナ州の New Madrid 地震帯の構造と精密磁気異常分布とが顕著な相関を見せる例 (Hildenbrand et al., 1995) が報告されている。

3. 磁化強度マッピング

高密度空中磁気探査から得られる高い空間分解能の磁気異常からは、その原因となる地下構造の空間的な分布状況の詳細な把握が期待でき、その典型的な解析手法として磁化強度マッピングがある。

地表もしくは地下の仮想的な境界面以深の磁化分布が磁気異常のソースとなっているモデルを考え、観測磁気異常からその磁化強度の分布を逆解析の手法で求めることを、磁化強度マッピングという。磁化の方向については、現在の地球磁場方向に一致すると仮定する 경우가多く、見掛磁化率マッピングとも呼ばれる。

Silvia and Hohmann (1984) は、平坦な面の下の帯磁率分布を、コレスキー分解を用いた逆行列計算で求める解析法を提案した。この手法では、構造モデルとして上面が水平で下面が無限深の鉛直四角柱モデルを

仮定し、全磁気異常そのものでなく極磁力変換したものを解析対象としている。従って、磁化方向も鉛直と考えることになるので、モデルの上面の平面上に現れる磁荷 (磁極) 分布を解析することと等価になる。この磁化強度の分布は、線形最小自乗法により離散点で計算される。彼らの提示した例では、 15×15 個の観測データを説明する 15×15 個のソース磁化を求めるために、 125×125 の大きさのマトリクスを使っているが、現実の探査データの解析では、 $1 \text{ 万} \times 1 \text{ 万}$ 程度の大きさのマトリクスが必要となる。そのため、この手法をそのまま用いて解析を行うことは実用的でない。

一方、Misener et al. (1984) は、構造モデルの上面深度の変化を許し、下方接続した極磁力異常データから磁化強度 (見掛帯磁率) を求める解析法を提示した。ソースの影響を周辺の限られた範囲で代表させてモデルの修正量をきめる漸近解法を採用しており、実用的な広さの領域の解析が行える。しかし、極磁力異常の下方接続を行うため、観測に含まれるノイズ分の短波長成分が増幅され、かえって S/N 比を悪くする傾向がある。

そこで、Okuma et al. (1994) は、全磁気異常から直接モデルの磁化分布を求める解析法を提示した。通常のモデルは、上面に起伏があり下面は一定深度にとるが、事前情報として別な設定も可能である。この場合、磁気異常とモデルの磁化分布が線形関係にあるので、連立一次方程式を解くことに他ならないが、未知数の個数が極めて大きく、これを最急降下法を使った反復改良計算によって解いている。伊豆大島周辺の精密な空中磁気異常データに、この解析法を適用して求めた磁化強度分布は、NW-SE方向に島を縦断する幅3 km程度の地域に卓越する高磁化強度域で特徴づけられる。この方向はこの地域の広域的な応力場の方向に一致し、その広がりにはカルデラ形成期および後カルデラ期の割れ目と、それに沿って分布するスパターランプート・溶岩流および噴石丘に対応する。また、中央火山丘三原山付近や島の東海岸沿いの古い火山体である岡田・行者窟・筆島の各火山に対応して高磁化強度域または低磁化強度域が見られ、それぞれの山体を形成した溶岩の磁性を反映している。

さらに Nakatsuka (1995) は、共役勾配法 (CG法) を用いることによって解の収束を早めるとともに、未知数の個数が観測データ数を上回る場合にも、解自体のノルムが最小という形の有意な結果が得られることを示し、解析範囲の外側にも仮想的にソースを置くことでソース範囲の打ち切りによる影響を軽減できるこ

とを明らかにした。丹那地域の磁気異常データに、この方法を適用した結果、ほぼ南北方向に延びる丹那断層を中心として磁化強度が4象限型の分布を示すことを明らかにし、左横ずれの断層運動による圧縮応力の卓越する北東側と南西側で、破碎帯の発達による磁化強度の低下がもたらされたものと解釈した。

4. 近年の解析技術の動向

1970年代には、主として2次元の地下構造を仮定した磁気異常プロファイルの解析法に発展があった。2次元シートモデル(ごく薄い半無限ダイク構造)の理論磁気異常の特性を利用して、複数の構造を分離するワーナー分解 Werner deconvolution (Hartman et al., 1971) や ソースの形状(構造指数)に応じた磁気異常の減衰パターンからソースの深度を見積るオイラー分解 Euler deconvolution (Thompson, 1982) などの解析法が発表された。Nabighian (1972) は、ポテンシャル場の数学的考察をもとに、磁気異常分布の水平勾配と鉛直勾配とがヒルベルト変換の関係で結ばれることを示し、その勾配を複素数で表現したもの(analytic signal と呼ばれる)を用いて、地質境界の位置と深さを求める方法を提示した。この手法を用いて、プロファイルに沿った複雑な地質境界の鉛直断面を線形アルゴリズムで求める解析法(Ogawa, 1977)も開発された。

これらの方法の長所は、多数の地下構造の影響が重畳したデータから個々の構造を試行錯誤的な収束演算によらずに分離できる点にある。しかし、現実の探査データではすべての構造に直交するプロファイルをとることは不可能であり、解析の前提である2次元仮定が成立しないという問題も持っていた。そのため、その後の解析法の発展は、より現実に近い3次元構造を扱う方向に向かうことになる。

Reid et al. (1990) は、オイラー分解の方法を3次

元構造に拡張して磁気異常の面的分布に適用し、地質境界のマッピングとその深度の見積りを行っている。Analytic signalを用いる方法は、Nabighian (1984) によって3次元に拡張した理論が提示されて以後、それを発展させた3次元磁気構造解析の論文が数多く発表されてきている。例えば、Roest et al. (1992) は解析から得られた深度の分布の特徴から地質構造を議論し、Hsu et al. (1996) や Debeglia and Corpel (1997) は、Analytic signal の鉛直方向への微分量を用いて地質境界の位置を正しく求める方法を議論している。さらに、Thurston and Smith (1997) は、局所的波数という概念を導入して解析結果をイメージ表現するとともに、地質境界の位置・深度・境界の傾斜・磁化コントラストを解析し表示する方法を示した。

これらの方法はいずれも、地質境界に着目したものであり、境界以外では一様な磁化を仮定している。また、3次元構造といっても、局所的には走向が明確な2次元構造で近似されており、その近似が崩れるところでは正しい解析結果が得られない。一方、地下構造を本質的に3次元構造として取り扱う試みも始まっている。前記の磁化強度マッピングにおける地下構造モデルを深度方向にも細かく区分して、各セルの磁化を逆解析の手法で求めようとするものである。

磁気異常の3次元逆解析においては、一般に解の一意性に欠けることとなるため、なんらかの制約条件を課す必要がある。Li and Oldenburg (1996) は、既知情報等から参照モデルを設定し、それに対するズレがなるべく小さく、そのズレ自体が滑らかになるように制約を設定し、Pilkington (1997) も、事前情報がほとんどない想定の下で、モデルの滑らかさを基準とした制約を与えている。磁気異常の3次元逆解析の研究は、まだ始まったばかりであり、とくに深さ方向の解能向上についての検討が、今後の課題であろう。

Blakely, R. J., R. E. Wells, T. S. Yelin, I. P. Madin, and M. H. Beeson (1995) Tectonic setting of the Portland-Vancouver area, Oregon and Washington: Constraints from low-altitude aeromagnetic data. *GSA Bull.*, vol. 107, 1051-1062.

Debeglia, N., and J. Corpel (1997) Automatic 3-D interpretation of potential field data using analytic signal derivatives. *Geophysics*, vol. 62, 87-96.

Hartman, R. R., D. J. Teskey, and J. L. Friedberg (1971) A system for rapid digital aeromagnetic interpretation. *Geophysics*, vol. 36, 891-918.

Hildenbrand, T. G., E. S. Schweig, R. D. Catchings, V. E. Langenheim, W. D. Mooney, T. L. Pratt, and W. D. Stanley (1995) Crustal geophysics gives insight into New Madrid Seismic Zone. *Eos, Trans. AGU*, vol. 76, 65-69.

- Hsu, S.-K., J.-C. Sibuet, and C.-T. Shyu (1996) High-resolution detection of geologic boundaries from potential-field anomalies: An enhanced analytic signal technique. Geophysics, vol. 61, 373-386.
- Li, Y., and D.W. Oldenburg (1996) 3-D inversion of magnetic data. Geophysics, vol. 61, 394-408.
- Misener, D.J., F.S. Grant, and P. Walker (1984) Variable depth, space-domain magnetic susceptibility mapping. 54th SEG meeting, Expanded abstracts, 237-239.
- 森尻理恵・大熊茂雄・牧野雅彦・中塚 正 (1992) 秋田県由利原地域での高密度空中磁気探査—MRSによる位置標定の評価—。 物理探査, vol. 45, 96-104.
- Nabighian, M.N. (1972) The analytic signal of two-dimensional magnetic bodies with polygonal cross-section: Its properties and use for automated anomaly interpretation. Geophysics, vol. 37, 507-517.
- Nabighian, M.N. (1984) Toward a three-dimensional automatic interpretation of potential field data via generalized Hilbert transforms: Fundamental relations. Geophysics, vol. 49, 780-786.
- 中塚 正 (1990) 地質調査所における空中磁気探査の歴史と将来. 地質ニュース, no. 428, 14-19.
- Nakatsuka, T. (1995) Minimum norm inversion of magnetic anomalies with application to aeromagnetic data in the Tanna area, Central Japan. J. Geomag. Geoelectr., vol. 47, 295-311.
- Ogawa, K. (1977) A computer interpretation method for profiles of total intensity magnetic fields using a linear technique. Butsuri-Tanko (Geophys. Explor.), vol. 30, 218-228.
- Okuma, S., M. Makino, and T. Nakatsuka (1994) Magnetization intensity mapping in and around Izu-Oshima Volcano, Japan. J. Geomag. Geoelectr., vol. 46, 541-556.
- Okuma, S., R. Morijiri, M. Makino, and T. Nakatsuka (1995) Evaluation of a high-resolution aeromagnetic survey in a volcanic region — The case of Yurihara Area, Northeast Japan. Butsuri-Tansa (Geophys. Explor.), vol. 48, 316-332.
- Pilkington, M. (1997) 3-D magnetic imaging using conjugate gradients. Geophysics, vol. 62, 1132-1142.
- Reid, A.B., J.M. Allsop, H. Granser, A.J. Millett, and I.W. Somerton (1990) : Magnetic interpretation in three dimensions using Euler deconvolution. Geophysics, vol. 55, 80-91.
- Roest, W.R., J. Verhoef, and M. Pilkington (1992) Magnetic interpretation using the 3-D analytic signal. Geophysics, vol. 57, 116-125.
- Silvia, J, and G. Hohmann (1984) Airborne magnetic susceptibility mapping, Explor. Geophys., vol. 15, 1-13.
- Thompson, D.T. (1982) A new technique for making computer-assisted depth estimates from magnetic data. Geophysics, vol. 47, 31-37.
- Thurston, J.B., and R.S. Smith (1997) Automatic conversion of magnetic data to depth, dip, and susceptibility contrast using the SPI(TM) method. Geophysics, vol. 62, 807-813.
- US Magnetic Anomaly Task Group (1995) Task group plans upgrade of the U.S. Magnetic-Anomaly database. Eos, Trans. AGU, vol. 76, 137-140.