



SYMPOSIUM

物理探査法—技術と応用—/8

磁気探査法の計測技術

中 塚 正

なかつか ただし
工業技術院地質調査所物理探査部

磁気探査はプロトン磁力計の発明によって広く普及し、プレートテクトニクスから石油天然ガス資源評価の基礎調査や活断層の調査まで、更には不発爆弾などの土木調査に至るまで広範な分野に応用されるに至っている。磁気探査の測定から有意義な結果を導くには得ようとする磁気異常に対して、入り込んでくるノイズをいかに抑え、誤差をいかに補正するかが1つの鍵となる。

1. はじめに

磁気探査においては場所の違いによる磁場強度の変化を測定する。このため、磁場の時間的な変化は磁気探査にとってはノイズであり、これを除去するため、一般的には磁場の定点観測を行ない移動観測との差をとって場所的な変化を抽出する。

地磁気の測定に対しては、「磁気測量」という語と「磁気探査」という語が Geomagnetic Survey の意味で用いられる。ここではこれらの語の定義を与える意図はないが、通常、「磁気測量」が測地学的な意味を持ち永年変化をも測定の対象とするのに対して、「磁気探査」は地殻構造を解明する1手段としての側面を専ら念頭においていると考えてよいだろう。従って「磁気探査」においては探査の目的があり、その目的に見合った磁気異常の検出を行なうのに適切な測点の配置が選ばれ、測定に含まれる不要な成分は除去される。

磁気異常が地下構造と密接に関連することは古くから知られ、磁気探査の歴史も古い。しかし、磁気探査が広く普及するに至ったのはプロトン磁力計の発明に負うところが大きい。磁場はベクトル量であり、その場は一般に3成分によって表現されるが、全成分を精度良く測定することは多大の労力を必要とする。古くは鉛直成分のみを測定する方式も用いられたが、プロトン磁力計の出現により全磁力を非常に精度良く且つ簡便に測定できるようになった。今日では、単に磁気探査と言えば全磁力測定を意味するまでになっている。

2. 地上磁気探査

地上での磁気探査においては、今日では一般に携帯用の小型プロトン磁力計が使用される。測定分解能1 nT のものが大半を占め、測定値がデジタル表示さ

原稿受理：1984年11月14日（編集部）.....

れて、これを観測者が野帳に記録する方式のものが多く、近年では、測定分解能 0.1 nT のものや測定値が測点番号・時刻と共に内部記録され後刻に読み出せるタイプのもの、測定と並行してプロファイルカーブの描けるもの等も出現している。

地質構造を対象とする地上磁気探査では、数 $10 \sim 100 \text{ m}$ の測定間隔が選ばれる。しかし、各測点での磁力センサーの対地高はせいぜい 5 m 程度であるので、測定値は測点付近の局所的な不均一性の影響を受けることとなる。実際、 $2 \sim 3 \text{ m}$ 離れた位置との磁力値差が数 10 nT となることは珍しくない。このため、こうした短波長異常をノイズとみた時の測定精度の見積もりとその平滑化による除去のため、1 測点当り数カ所の測定を行なう。磁気探査では一般に定点観測も行ない、経時変化分の補正を行なうが、短波長ノイズが卓越する場合には十分高振幅の磁気異常のみを問題にし、定点観測を省略する場合もある。

地上磁気探査では、こうした地質的ノイズの他に人工的ノイズに対する警戒が必要である。

1) 人工構造物

鉄を含む建造物および埋設鉄管などは地質的ノイズと同等のノイズ源となる。地表の建造物は外見から容易に判断できるが、特定するのが困難な地下埋設物に対しては、測点の分散多点化により平滑化してその影響を除去せざるを得ない。

2) 直流電車の漏洩電流

国鉄の直流電化区間と私鉄電車の軌道近くでは、給電施設（変電所）からの電流の帰線（レール）が実質的に至る所で接地されているため、電車の走行に対応して地下に電流が流れ、磁場測定が乱される。その大きさは、給電施設付近や列車近接時の軌道近くでは数 100 nT にも達する。

3) 高圧送電線

商用電力の送電線の電流による影響は交流磁場のため、プロトン磁力計の計測時間内の平均値としては小さく特に問題とならないが、送電線の近傍では交流磁場がプロトンの歳差を介さず直接にセンサーコイルに誘導され、その信号がある程度以上になると回路を飽和させるため測定そのものが不可能になる。経験的には、通常の電灯線からは 20 m 程度、高圧送電線から



図 1 地上磁気探査の測定風景。

は $100 \sim 200 \text{ m}$ 程度以上離れた位置で測定するのが無難である。

4) その他

電話線には間歇的に直流が流されるため、その近傍では磁場測定が乱される。また、直流電源を扱う工場の周辺でも漏洩電流が問題となる。その他、言うまでもなくクレーン・ブルドーザ・トラック等の車両の影響にも注意が必要である。

以上のような人工ノイズの評価・除去のためには、測定の分散多点化と共に各測定点での多数回の測定が必要となる。以上では主に地質構造を対象とする磁気探査について述べたが、土木の分野では主として不発爆弾や埋設鉄管の位置決定のために磁気探査が実施されている。この分野では探査の対象深度が浅く対象物の信号のみを着実に検出することが目的となるため、測点間隔が $1 \sim 2 \text{ m}$ 以下でごく狭い範囲の探査が行なわれる。また、磁力計もプロトン磁力計に限らずフラックスゲート型など種々の形式のものが使用され、各種のグラジオメータ（傾度計）が多用される。

3. 海上磁気探査

多くの海洋調査船には、地震探査装置・採泥器・コアサンプラー・測深機・船上重力計などと共にプロトン磁力計が装備される。船上磁力計はデータ収録の一元化のため、船上重力計・航法装置などと共に船上コンピュータに接続されるのが通例である。

磁力計センサーは、船体磁気の影響を避けるためフィッシュと呼ばれる耐水容器に封入されて、船尾から数 100 m の距離を保って曳航される。使用される磁力計の分解能は $0.1 \sim 1 \text{ nT}$ で、数秒～数 10 秒の周期で測定を行なうのが一般的である。

海上磁気探査では、磁場測定と共に船位の精度良い

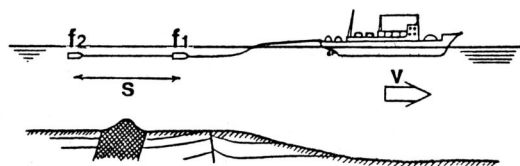


図 2 海上磁気探査における傾度測定の様式図。

決定が重要である。このため、各種の双曲線航法・円航法の電波測量装置が用いられ、近年では測位精度の非常に優れた人工衛星測位システム (NNSS) と組み合わせて用いられるようになっていく。

磁気探査では一般に定点観測による経時変化磁場補正を行なうと前に述べたが、海上探査においてはそれがあてはまらない場合が多い。探査海域が陸域から遠く離れていたり非常に広い範囲の探査を行なうなどのため、地上定点と船上との間で磁場の経時変化が同じとはみなせないためである。この場合、単一センサーの磁場測定では経時変化分をノイズとみなしてその補正を行わず、より大振幅の磁気異常のみを解析して議論することになる。この弱点を補うためには、2 個のセンサーを利用して航跡に沿った磁場の傾度を測定するグラジオメータがしばしば利用される。

グラジオメータによる実際の測定では、 $s=200\text{m}$ 程度の間隔 (例えば船尾から 300m と 500m) で 2 個のセンサーを曳航する。この 2 個のセンサーにおける測定値 f_1, f_2 に含まれる経時変化分はほとんど同じとみなせるので、両者間の差 $\Delta f = f_1 - f_2$ を有効とし、

$$f(t) = \int v \cdot \frac{\Delta f(t)}{s} dt \quad (v \text{ は船速})$$

によって磁力値 f を求める。ここに積分定数として基準点での磁力値を定めることになるが、非常に長い測線の観測では複数点で既知の磁力値に合致するように必要な補正を行なうこともある。また、多くの交差する測線群のある場合には後述の交点コントロールの手法の適用も考えられる。

4. 空中磁気探査

空中磁気探査においてもプロトン磁力計が多用されるが、航空機の使用により広い範囲の磁場観測が迅速に行なわれると同時に、磁力計の測定周期は地上・海上の場合と違って高速化が要求される。プロトンを含む液体として水を用いると緩和時間が長く適当でなく、



図 3 日本の磁気探査用航空機 (Cesna 404 型)。

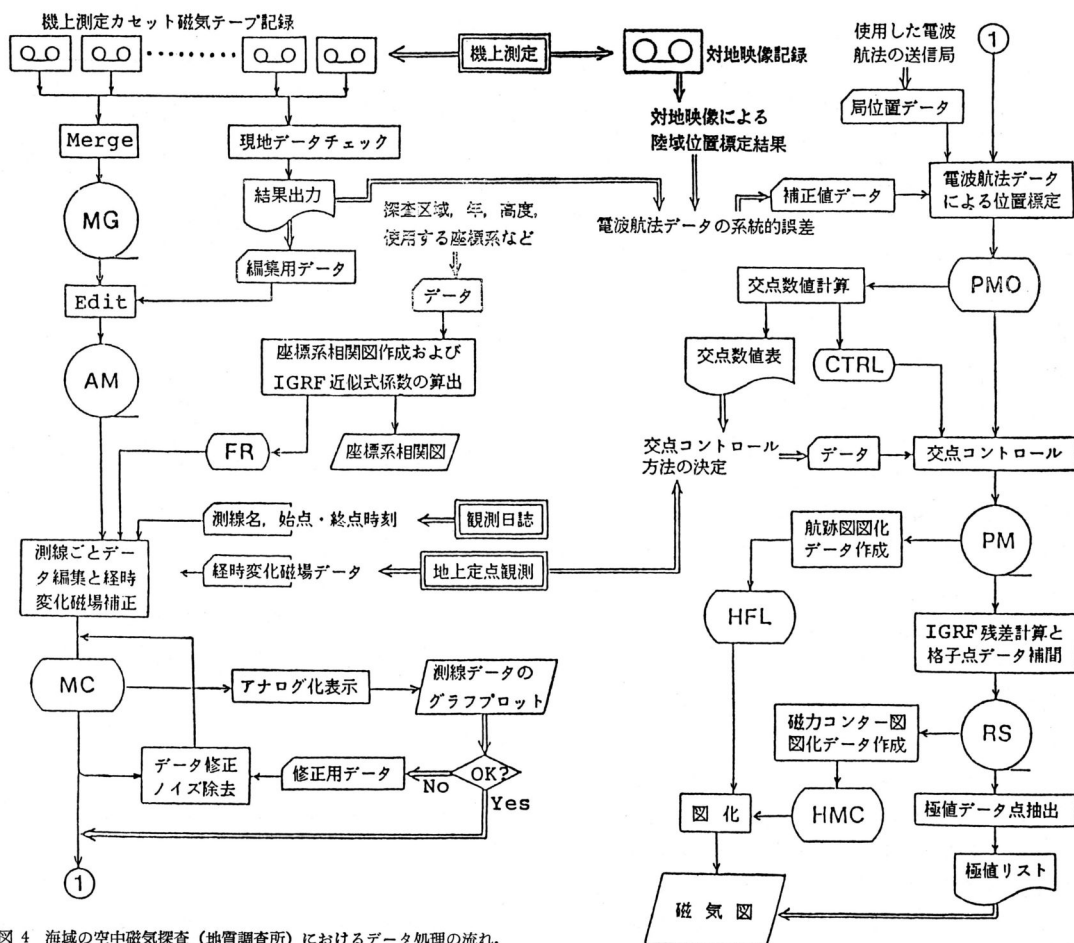
航空機用としては緩和時間のより短いケロシン等が用いられ、計測回路にも各種の工夫がなされる。通常約 1 秒周期 (最小では 0.2 秒位まで実用化されている) で 0.1 nT 程度の分解能の測定が行なわれる。

空中磁気探査では、船の場合と同様に航空機の精度良い位置決定が重要である。今日では位置決定に、

- ①対地写真(ビデオ)カメラによる対地映像位置標定,
- ②ドップラーレーダから得られる速度信号を積分して得られる相対位置標定,
- ③電波航法 (双曲線航法または円航法) の装置による電波測量位置標定,

の 3 者の組み合わせを用い、それぞれの特長を活用している。実際には、陸域探査では絶対精度に優れる対地映像を利用し対地映像標定の作業を軽減するため、ドップラーレーダのデータなどで標定点間を補完する。また海域探査では、電波測量データを主体としつつも、それに含まれる系統的な誤差を陸域での対地映像位置標定によって補正し精度の向上を計る。なお NNSS は、精度の良い測位データが数時間に 1 回程度しか得られないので航空機の位置決定には適当でない。

航空機による磁場測定においても機体磁気の影響を取り除く必要がある。船によるフィッシュの曳航と同等な方法としてバードの曳航があるが、バード曳航時の飛行速度の制約や安全性の危惧などのため、今日では機体の尾部または翼端に設けられた突起部 (スティンガーと呼ぶ) にセンサーを収納する。この場合には、機体磁気の影響を打ち消すための装備が必要となる。機体磁気の影響は機体の姿勢に依存し、これを打ち消すために種々の方法がとられる。よく用いられる方法としては、機体磁気の永久磁気成分はセンサー近くに置かれた 3 軸コイルに一定電流を流すことにより、誘



導磁気成分はセンサー近くの適切な位置に、パーマロイ等の高透磁率物質を固定することにより補償する。他の方法としては、誘導磁気成分をも3軸コイルに流す電流の制御によって補償するものや補正に必要な機体姿勢の情報をも記録しておき、データ処理の過程で補正を加えるものなどがある。

海上および空中での磁気探査においては、地上磁気探査に比して人工的ノイズの影響が少ない。海域では、人工構造物・直流電車等の影響を考慮する必要がほとんどなく、陸域の空中探査においても人工的構造の規模が一般に地質構造の規模に比して小さいため、飛行高度を適当に高くすることにより、それらの影響を小さくすることができる。

一方、海域の探査での誤差要因としては、磁力計の計測誤差は一般に小さく次のものが主要となる。

- ①位置標定誤差（測定誤差と標定作業に伴う誤差を含む）。
- ②磁場の経時変化が探査海域と地上定点との間で一致しないため、経時変化補正に生ずる誤差。
- ③船体磁気または機体磁気の影響の残留分およびその変動。

これらの誤差要因が作成される磁気異常図に影響するのを最小限にとどめるため、交点コントロールと呼ばれる処理を行なう。交点コントロールについては次節で述べる。

5. 空中磁気探査データの処理

磁気探査の測定データから磁気異常図の作成に至るデータ処理の過程には、多くの単純作業の繰り返しが必要となる。地上磁気探査の場合を除き、その作業量

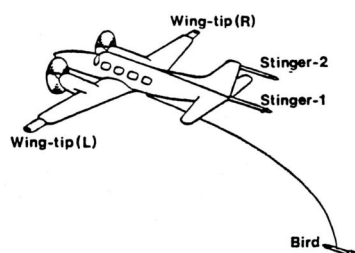


図5 航空機への磁力センサーの各種装備方式の模式図。

は膨大となりコンピュータを利用した自動処理が効果的である。ここではその1例として、地質調査所で海域の空中磁気探査に用いられているデータ処理ソフトウェアでの処理の流れを示す（図4）。

機上測定から得られた記録（電波測量データを含む）は、現地でのデータチェック結果を参照しつつ不良データの除去・修正を行なって1本の磁気テープに編集される。次に測線毎のデータ抽出と定点観測データによる経時変化磁場補正を行なう。ここで、位置標定に使用する航法データと磁力値データの内容を検査し、必要があればデータ修正・ノイズ除去の処理を行なう。さらに、航法データから経緯度もしくは適当な座標系での位置を計算する処理（位置標定）を行なう。航法データは一般に各種の系統的誤差を含むので、陸域飛行時の対地映像標定結果と比較され、その誤差の補正が行なわれる。

以上の処理により位置座標と磁力値が対応したデータファイルが作成され、このデータは交点コントロールの処理を経た後、標準磁場の除去と格子点データへの変換が行なわれ磁気異常図に図化される。

交点コントロールとは、2組の平行測線群（主測線と交差測線）の交点において両磁力値が一致するように必要な補正を加えることである。理想的には交点での両磁力値は一致するはずであるが、現実には前節に挙げた誤差要因のために差を生ずる。単一の交点磁力値差からその原因を決定することはできないが、多数の交点磁力値の傾向と各データの精度の見積もりからは差を生じた原因を推定することができる。その結果、いずれか一方（または双方）の測線の磁力値または位置座標のデータを修正することにより、より妥当性の高い磁気異常図を描くことができる。

交点コントロールにおいて、以前は航法データの精度が相対的に劣っていたため交点で磁力値が一致する

ように測線位置を移動し、マグネティックコントロールと呼ばれていた。近年では航法データの精度も向上し、地上定点と探査区域との間の経時変化磁場の相違に起因すると見られる場合も多くなっている。

6. 磁場測定に関する近年の動向

プロトン磁力計の実用化以後は測定技術の特に顕著な発展は見られないが、近年の動きとしてはオーバハウザ効果磁力計の進歩とグラジオメータの空中磁気探査への活用が挙げられる。

オーバハウザ効果磁力計はプロトン磁力計の一変種とみることができ、強磁場の印加なしにプロトンの歳差信号を取り出すことができる。その原理の解説は文献^[1]に譲る。オーバハウザ効果の磁力計への応用は特に新しくはなく、1965年にはSud Aviation社により実用化されていたが、近年、GEM Systems社のHrvoicらは、オーバハウザ効果を引出すのに特に優れた添加化合物（特許）を開発し、それを使用して超低消費電力で高感度の磁力計を開発している。オーバハウザ効果磁力計では、低消費電力に加えてプロトンの歳差信号が連続的で減衰のない形で得られる点に特長があり、従ってより高分解能の測定が行なえる。

グラジオメータの特徴は、経時変化磁場補正を必要としない点とセンサーに近い位置（浅所）の構造により敏感であることである。グラジオメータでは、どの方向の傾度を検出するかによってVertical・Longitudinal・Transverseの3種類が考えられる。海上磁気探査でLongitudinal Gradiometerがよく利用されることは既に述べたが、Vertical GradiometerとTransverse Gradiometerでは、1センサー測定からは直接得られない情報が取得される。

カナダ地質調査所では、カナダが局所的な経時変化磁場の卓越する磁気的高緯度地方に位置することもある。古くから航空機用グラジオメータの開発を進めVertical Gradiometerを実用化してきた。その技術は民間に移転され商業ベースの探査システムが開発されている。このシステムは、2本のスティンガーに光ポンピング型の磁力センサーを収納し、約2mの距離で傾度を測定する。その結果は鉛直微分磁気図の形にまとめられる。

一方、EG & G Geo Metrics 社では、プロトン磁力計のセンサーを航空機の両翼端に置き、2台（または尾部スティングラーを含めて3台）の磁力計を同期して動作させることにより、Tranverse Gradiometer（または Horizontal Vector Gradiometer）を構成するシステムを開発している。このシステムの特徴は、通常の1センサーの機能に加え横方向の傾度をも測定する点にあり、磁気図（微分図でない通常の残差異常図）を描くために両データが活用される。従って、得られる磁気異常図の分解能が測線本数の増加なしに向上できることになる。磁気傾度の測定においては、2センサー間の距離をあまり大きくとることができないため個々のセンサーでより高精度の測定が要求される。機体磁気の影響は、双方のセンサーに対して補償すべきことには言うに及ばず、本質的にセンサーに近い位置のノイズ源である点からも高精度の補償が必要となろう。

7. おわりに

ここでは紙面の制約もあって、磁気探査の測定技術のアウトラインを述べるにとどまった。一般に測定技術に関する文献は極めて少ないが、空中磁気探査に関するより詳細な解説は参考文献^[2~5]にあるので参照されたい。また近年、人工衛星による磁気測量も行なわれるようになってきているが、測定高度の関係でグローバルな規模での地殻構造解析までが限度のようである。

磁気探査のデータ取得の分野では、他の多くの分野でも見られるようにマイクロプロセッサ技術をはじめ最新エレクトロニクス技術の適用が進んでいる。磁力計には自己診断機能が組込まれ、データ収録装置にはエラー回復機能が備わり、対地写真はビデオレコーダに置換され、収録データ内容の検査や品質管理がフィールドで行なわれるといった形での技術の進歩には著しいものがあることを付言しておきたい。

参考文献

- [1] Hrvoic, I.: 地磁気測定のためのオーバーハウザー効果プロトン磁力計（笹井洋一、訳・解説）、月刊地球、6、424~428（1984）。
- [2] 中塚 正：空中磁気探査のシステム化について（I）—ハードウェアシステム—、地調月報、35、341~364（1984）。
- [3] 中塚 正：地質調査所の空中磁気探査システムの現況について、物理探鉱、37、268~278（1984）。
- [4] 小川克郎：空中磁気探査の装置、物理探鉱、23、291~300（1970）。
- [5] 陶山淳治：空中磁気探査、最近における物理探鉱の進歩、物理探鉱技術協会、127~140（1968）。



SYMPOSIUM

物理探査法—技術と応用—/9

電磁法の一般

吉 川 治 男

よしかわ はるを
同和工営(株)資源事業本部 部長