

## 埋没鉄類探査を目的としたフラックスゲート磁力計システムの開発

中塚 正<sup>1)</sup>・鶴川 英明<sup>2)</sup>・浦野 草平<sup>2)</sup>・高橋 正容<sup>2)</sup>・吉田 武志<sup>3)</sup>

- 1) 技術顧問
- 2) 機械開発部
- 3) 技術本部

## 1. はじめに

埋没鉄類磁気探査の概要については、さきに物理探査学会の情報誌「物理探査ニュース」にも紹介しました(中塚, 2013)。我が国では、戦後復興に向けて不発爆弾をはじめとする危険物探査を契機に発展してきました。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いきます。近日、基礎杭設置にあたりデータ偽装のあった問題が話題になっていますが、そうした問題の実情を正しく把握するために、適用できる技術の一つでもありましょう。

探査の対象は市街地である場合が多く、直流電車軌道からの漏洩電流・既存構造物や廃棄物の存在・大型車両などの走行といったノイズ環境のもとで、対象物の精度良い探索・評価が求められています。

技術的には、火山や地質構造の調査と異なり、対象が強磁性体であるという特色があります。埋没鉄類には磁性体の形状に応じて消磁力が働き、その長手方向の両端付近に正負の磁極を生ずるモデルを想定して解析されます。つまり、磁荷分布を1次のモーメントまで評価するわけです。

実際の探査での測定作業では、地表測線またはボーリング孔に沿った連続測定が行われます。先に述べたように都市域でのノイズ環境に打ち勝って正しい探査結果を得るためには、異常ソースに近づいて計測を行うことが必要になります。磁極のソースによる磁気異常は、よく知られているように磁気モーメントを想定すれば、距離の3乗に反比例して減衰します。距離が2倍になればその信号が1桁近く減衰するわけです。また、測線調査を行っている間に磁場が時間変化すると、その分だけ異常体の影響を判定する上で不確定を生むこととなります。これは、とくに都市部で多い直流電車の漏洩電流の影響が大きく、相当離れた位置を大型車両等が移動する場合でも問題になります。

というわけで、とくに都市域での磁場計測においては、磁力計の種別にかかわらず、2台の測定器を一定距離(1~2m程度以下)離して同時測定

の差分を記録する傾度測定が行われます。これは、地質的な対象の磁気探査で行われる定点地磁気観測を用いた日変化補正の考え方と似ていますが、2台の測定器のうちその一方に大きく影響を及ぼす種類の環境ノイズが問題となり、埋没鉄類探査では、2台の測定器を1本のツールに固定して傾度(差分)測定の間をとるのが一般的です。そのとき、2台の測定器はともに異常体ソースの影響を受けることとなり、ソースまでの距離に応じて実態に適合した解析手順をとる必要があります。

さて、弊社では探査に用いる磁力計として伝統的に誘導コイル型磁気傾度計を多用してきました。これは主として耐ノイズ環境の性能が評価されたためと思われませんが、面的な調査においても測線データ(プロファイル)に対して異常パターンの認定(異常物直近で測定値がベースライン=0を横切る)とその図学的解析法を用いた個別異常ソースのパラメータ推定を行うこととなります。測定データの意味を理解する上で直接的でないため、素人判りしやすくありません。調査の遂行において、測定データの意味するところを発注者が正しく理解することは、危険の可能性をばらむために作業を追加するなどの判断をする上では極めて重要です。この点で、鉛直差動フラックスゲート磁力計によるマッピングでは、測定データから直接的に異常値の平面分布が導かれ、カラー段彩図として表示するなど見た目にも説得力のある結果が得られる利点があります。(誘導コイル傾度計のデータを、「単コイル変換」と呼んでいる数値処理によりマッピングに適したデータに変換する方法も開発していますが、生のデータではなく、移動速度一定などの仮定が必要となるなどの弱点はあります。)

そのような背景もあって、弊社でも1990年代から差動フラックスゲート磁力計の開発をすすめ、調査への実用化を行ってきました。誘導コイル型磁気傾度計は、測定原理が単純でセンサ部構造および電子回路も単純であるため、測定装置としての精度低下や不安定を招く要因が少ないという利点がありました。差動フラックスゲート磁力計では、そうした精度低下や故障への対応が必要となり、測定装置の改良や検査・調整方法の向上を

図などの開発を進めています。

本稿では、差動フラックスゲート磁力計システムの開発に関する取組みの中から、近年の開発で遭遇したいくつかの技術的視点について述べてみたいと思います。

### 2. 埋没鉄類探査に用いる磁力計

地球磁場の変化を測定する磁力計として、様々の種類が知られている。測定分解能の高さだけに注目すると、全磁力を測定する光ポンピング磁力計やプロトン磁力計（オーバハウザ磁力計はその一種）が高性能であるが、価格の面を差し置いても、両者とも地表・地中では磁気傾度の影響で正常に動作できないことが多い。とくに危険物探査では、プロトン磁力計は磁気地雷を作動させてしまう恐れがある。また、超高感度で知られる超伝導磁力計（SQUID：超伝導量子干渉計）は、価格面・小型軽量の面で野外測定の実現が困難な状況にある。

それらの磁力計を除くと、1nTレベルの精度で磁場の連続測定に適するものとしては、フラックスゲート磁力計と磁気インピーダンス磁力計（MIセンサ）が利用可能であろう。埋没鉄類探査に用いる磁力計としては、先に述べたノイズ環境の問題から、0.1nT以下のような高感度は一般に必要とは言えない。むしろ、目指す計測を安定かつ的確に制御できるシステムを組み上げることが重要である。

そこで、すでに開発経験を持つフラックスゲート磁力計によるシステムの改良・再構築を目指して開発を進めた。

### 3. フラックスゲート磁力計の動作原理

フラックスゲート磁力計は、磁化飽和特性を有する磁性材料を磁心に用いたコイルに交流電流を流し、磁心に生ずる磁束変化の特性を利用する。外部磁場がない状態で正弦波電流を流すと、磁心の飽和特性のために、磁束変化波形は図1実線のように、正弦波をクリッピングした（正負に均等な）矩形波に近い波形になる。ここでコイル軸方向に磁場が存在する場合を考えると、クリッピングの発生するタイミングがずれるため、図1破線のように磁束変化波形は正側と負側で不均等な形となる。正負均等な矩形波は、基本周波数と奇数次の高調波成分からなるが、不均等の矩形波は偶数次の高調波成分を含むので、2次高調波成分を計測することによりコイル軸方向の磁場強度を知ることができる（中塚ほか、1999）。

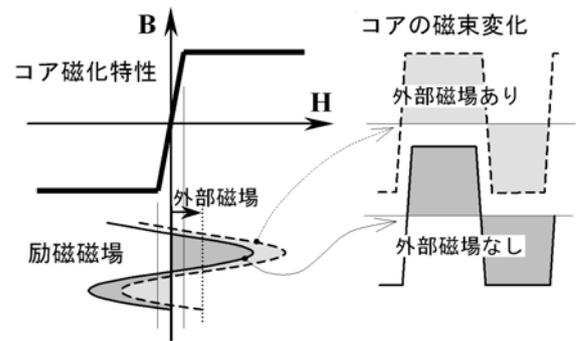


図1 フラックスゲート磁力計の原理(1次コイルの役割)

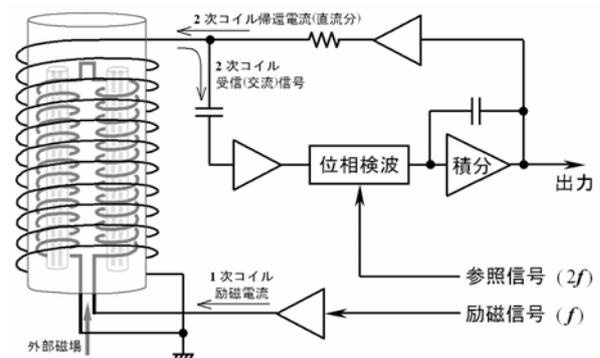


図2 実用フラックスゲート磁力計の回路ブロック図

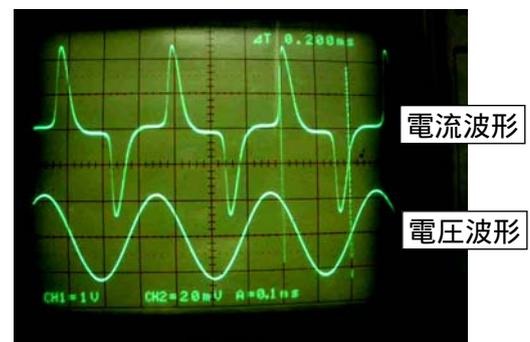


図3 現実の1次コイル電流波形

その原理を用いて設計したフラックスゲート磁力計の回路構成例が図2である。外部から加わった軸方向の磁場の効果を励磁(1次)信号の倍周波数の位相検波で検出し、積分器を通して外部磁場を打ち消すように2次コイルに帰還電流を流す。この帰還電流が外部磁場をちょうど打ち消す状態になれば、位相検波出力=積分器入力=0となり、積分回路の出力を保持する。このサーボ機構により、積分器の出力は2次コイルへの帰還電流に比例し、外部磁場の変動に追従することになる。

しかし、以上の説明は原理説明のための理想論である。図1では励磁磁場を正弦波で示しており、そのためには1次コイルに正弦波電流を流す必要があるが、磁性材料の磁心に巻かれた1次コイル

で電流を制御するのは現実的でなく、実際には1次コイルに正弦波電圧をかけている。実際に1次コイルに流れる電流を計測したオシロスコープ画面を図3に示す。画面下段は1次コイルへの供給電圧(±約1.25V)を示し、上段が実際の電流波形である。電圧の正弦波形は、上向ゼロクロスから1/4周期進んだところで+のピーク、3/4周期進んだところで-のピークを迎えるが、この例の電流波形では電圧波形に対し概ね3/8および7/8周期のところプラスおよびマイナスのピークを示している。位相に遅れを生ずることは、インダクタンスをもつコイルに交流電圧をかけた場合の一般的な特性であるが、インダクタンスが一定値の単純なコイルの場合と違って、この場合、電流波形が正弦波形から大きくずれたものになっている。これは、この1サイクルの間に1次コイル磁心の磁束が正弦波的不是な変化をしたことを示しており、図1で矩形波的变化をすることを考えたことに符合する。

つまり、概略的には図3の電流波形が+ / - に大きく振れる位置で、図1の磁束変化の - から + / + から - への移行が行われていると読みとれる。

#### 4. 探査に用いるツールへの設置と軸合せ調整

##### 4.1 軸合せ調整の重要性

探査においては、前記のように傾度測定を用いるため、そのツールは一般に筒状をしており、ツールの両端付近に2つのセンサを配置して両センサの差分測定を行う。そのセンサは特定方向の成分測定を行うものであり、両センサの計測軸を正確に合わせしておく必要がある。

長さ(距離)を合わせるのであれば、1m長で0.1mm未満の誤差で合わせれば、1万分の1の精度が確保できる。軸方向の1万分の1精度とは、方向を $10^{-4}$  radian (= 20秒角) 未満の誤差に押さえることを意味する。

例えば、日本付近を想定して地球磁場の磁北方向成分と鉛直成分がともに3万nT程度と考え、感度(ゲイン)が十分正確に調整されているセンサを用いて鉛直磁場を3nTの精度で測定しようとしたとき、そのセンサ軸が磁北方向(またはその反対方向)へ傾くことを許容される角度範囲は、角度20秒以内である。

角度誤差が20秒以内とは、長さが10cm程度のセンサユニットをツールに固定する際に、一端を完全に固定できたとして、他端を長手方向と直交する2方向に対して、 $10\mu\text{m}$ 以下の誤差範囲内で、しかも2方向同時に調整・固定することを意味し、大きな困難を克服する必要がある。

ここで上に『両センサの計測軸を正確に合わせ...』と書いたのは、2つのセンサが1つのツール内にきちり固定された傾度計で、両センサ相互の軸方向が正しく調整されたものであれば、大局的な地球磁場によるツールの揺れ角の影響は両センサ間でキャンセルされ、探査対象の異常場を表現する差分出力には現れないからである。一方、傾度測定でない例えば3軸単体磁力計を用いた探査を行おうとしても、磁力計の姿勢をこの精度で維持して移動測定を行うことは全く不可能である。3軸単体磁力計は、精度・調整の観点からして2重に非現実的であることが、先の議論から容易に理解される。

なお、正確に軸合せされたツールが揺れ動いたときに探査対象の異常に対する応答については、(鉛直成分計測の場合)対象物が測定位置直下にある場合に誤差が小さく、横方向に離れるに従って誤差を生みやすくなるが、最悪でも対象物方向(伏角)が揺れ角の分だけ異なったことによる効果に等しく、とくに大きな揺れでない限り、探査結果に大きな影響は与えない。

従来型の差動フラックスゲート磁力計では、機械的な軸合せの仕組みを用いて細心の調整を行った後に、揺れによる誤差が大きくなりやすい方位をツールごとに計測してマーキングを施し、実地調査にあたっては、ツールの移動方法に応じて揺れの発生しやすい方向があるので、その方向を避けてツール回転角を設定する操作を行っている。

しかし、この調整作業は、作業場所の磁気環境の影響を受け作業自体がメカニカルな調整の試行錯誤になるのに加えて、調整状況が経年的に変化する状況も見られる。そこで現在開発中のフラックスゲートセンサでは、調整の方法を根本的に見直し、交差磁場を補助センサで計測して、その出力を用いた電氣的調整を行う技術開発を行っている。

##### 4.2 交差磁場センサによる電氣的調整法

この電氣的調整法とは、主フラックスゲートセンサの計測軸が、目的の軸方向からある誤差をもつ状況のとき、その軸をメカニカルに調整するのではなく、目的軸に交差する2軸方向の磁場を補助センサで計測し、その微小割合をもとの測定量に加減することにより、等価的に目的の軸方向の計測値に変換するものである。

今、磁場の目的計測軸方向成分を $Z$ 、それに直交する2軸方向成分を $X, Y$ とし、主センサ・交差軸補助センサが微小な方向の誤差のため、 $Z_m, X_m, Y_m$ で表されるとすると、微小量 $\alpha, \beta, \gamma$ と $\cos(\text{微小角})=1$ の近似[微小量の2次の項を無視するこ

とに相当] を用いて,

$$\begin{pmatrix} X_m \\ Y_m \\ Z_m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & \alpha_1 & \alpha_2 \\ \beta_2 & 1 & \beta_1 \\ \gamma_1 & \gamma_2 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}$$

と一般的に表現され, これよりZは,

$$Z = \frac{(1 - \alpha_1\beta_2)Z_m - (\gamma_1 - \beta_2\gamma_2)X_m - (\gamma_2 - \alpha_1\gamma_1)Y_m}{(1 - \alpha_1\beta_2 - \gamma_1\alpha_2 - \beta_1\gamma_2 + \alpha_1\beta_1\gamma_1 + \alpha_2\beta_2\gamma_2)}$$

微小量の2次以上の項を除けば,

$$Z = Z_m - \gamma_1 X_m - \gamma_2 Y_m$$

となる. すなわち,  $Z_m$  に  $X_m, Y_m$  による適切な補正を加えればよい.

傾度測定ツールにおいては, 2つの主センサのそれぞれに対して, この補正を行うことが必要であり, 原理的には交差軸補助センサが4つ必要になる. しかし, 実際の測定において主センサごとに別の補助センサが必要になるのは, とくに大きな異常場が存在する場合であり, その場合には交差軸補助センサによる補正の有無が探査結果に殆ど影響を与えないと考えられる.

交差軸補助センサを2つだけ使用して, 2つの主センサの補正を行うためには, 図4のような回路で実現できる. 傾度出力を得るために, この回路の後に差分の演算回路が必要となる.

ハードウェアによる信号演算によらずに, デジタルデータ収録の後に, 表示・解析の処理の一環としてその演算を行うことも可能であるが, 現地作業でのデータの品質管理の意味で補正処理結果がリアルタイムで確認できることが有利であろう.

#### 4.3 センサのツール内設置の前後の各種調整

上記の軸合せ調整は, センサのツール内への実装を行ってはじめて作業が可能となる. 一方, センサの磁力計としての感度の調整(キャリブレーション)も重要であり, 基本的な感度(ゲイン)はセンサ本体と制御回路の組で決まるものである. その後, ツール内へ実装に付随して微妙な特性の変化がないとは言えず, その分は実装後の微調整が可能ないように設計している. ツール内には, センサ1次コイル磁心を除き磁性材料を一切使用しないが, 制御回路に流れる電流の低周波~直流分がつくるわずかな磁場と構成材料がもつ弱い常磁性の影響で, 2つのセンサが影響を受ける可能性が残るためである.

各センサ感度の微調節とともに重要なファクターとして, 2つのセンサの感度を揃えることが必須である. 先に軸合せ調整の重要性でもふれたように, 探査の移動測定においてツール系が地球磁場に対する若干の揺れを排除することは, 事実

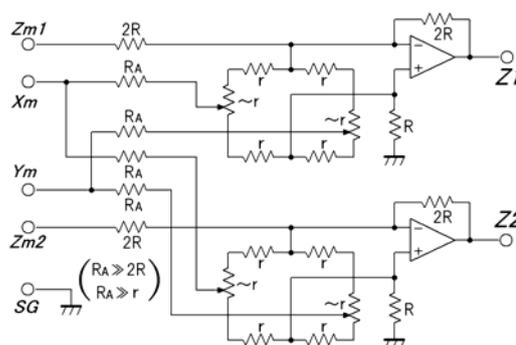


図4 補助センサによる電氣的軸合せの回路

上不可能であり, 個別のセンサはその揺れに対応した軸方向成分の変動を検知し, 両センサの変化の差分を傾度測定の出力としている. そのとき, 両センサの軸合せが正確に行われていても, もし両センサに感度の差があれば, ツールの傾斜状況を示す変動パターンが差分出力に混入することとなる.

従って, 差動フラックスゲート磁力計システムの各種調整作業の手順としては, 1) 各センサ単体の基本ゲイン調整を行った後に, 各センサのツールへの実装を行い, 両センサに対する 2) 電氣的軸合せ調整と, 3) ゲインバランス微調整を行うこととなる.

### 5. フラックスゲートセンサの各種調整の方法

#### 5.1 各センサ単体の基本ゲイン調整

実探査から得られるデータを解析して, 想定される異常体の評価を行うには, 定量的な裏づけのあるデータを取得しておくことが重要である. 現実には, 異常体の特性により出現する磁気異常はその大きさが10倍・100倍とオーダーで変化することが珍しくないため, センサのゲインが1割異なっても結果に及ぼす影響がほとんどない場合もある. しかし, 何かの必要があって追加調査や, 経年的な変動を調べるために, 過去のデータの詳細を定量的に見直すこともあり得る. そのときに, 過去の取得データの定量的な信頼性が劣ると, 正しい結論を導けない恐れもある. 計測器が正しくキャリブレーションされていることは, 計測器としての信頼性の指標として重要な一項目である.

このゲイン調整は, 本質的にセンサ自体と制御回路の組に特有なものであり, センサをツール内に設置する前に調整する. 但し, ツール内への実装に付随して微妙な特性の変化がないとは言えず, その分は実装後のゲインバランス調整の一環で微調整が可能ないように設計している. 現状では, ツール内への実装の後には基本ゲイン調整が行えない構成になっており, 後記のように「ゲイン

「バランス微調整」では、微調整を効果的にするため、調整可能範囲を狭く（1%未満に）取っているため、最悪でもバランス調整を含めてその範囲内に収まるレベルへの調整を終えておく必要がある。

センサの基本ゲイン調整は、外部からの磁気擾乱がシールドされた場で、既知強度の適切な直流磁場にセンサを置いて調整を行えば申し分ないが、とくに市街地ではその実現は困難である。実際には、ヘルムホルツコイルで1Hz以下の交流磁場を発生させ、ヘルムホルツコイル中心に設置したセンサからの出力をロックインアンプ（NF回路設計ブロック，2009）に入力し、発生磁場の周波数と同期した成分の振幅を計測して、調整作業を行っている（図5）。

ここで、ヘルムホルツコイルで生成する磁場は、給電回路のモニタ電流値に対応した正しい強度になっていることを、定期的に標準磁力計で検定してあることが前提となるが、都内の弊社開発室の環境でも、直近道路を通過する車両の影響と直流電車の漏洩電流と思しき変動等がない時間帯を選べば、0.1%前後の精度の調整が行える。

ここで重要なことは、ヘルムホルツコイルといえども生成される磁場の一様性は完全ではないので、調整すべきセンサをコイルの中心位置にその機能軸方向を合わせて、慎重に設置することが重要である。参考として、ヘルムホルツコイル（ウィキペディア，2014）の理論特性を付録に掲げている。また、磁場の一様性をより向上したければ、ヘルムホルツコイルのサイズをより大きくするか、アレイ化したより複雑な構成のコイルシステム（例えば、マクスウェルコイル（Wikipedia，2015））の導入も考えられる。

## 5.2 電気的軸合せ調整

埋没鉄類探査を目的とした差動フラックスゲート磁力計において、その両センサの計測軸を精密に合致させることの重要性と、それを補助センサによる交差磁場測定を用いて電気的に調整する方法の概要についてはすでに述べた。

この電気的軸合せ調整を、現実に各種ノイズの状況が理想的でない環境においても実行できるよう、実用性のある方法を検討した。その方法には別の見地からは、同等の性能やもっと効果的な方法があるかも知れないが、我々が検討・実践してきた一つの方法を紹介する。なお、ここでは、長手方向のツール軸が、主センサの意図した計測軸に一致し、2つのセンサがこの軸の両端付近に設置されているものを想定している。

センサの軸合せをするということは、その軸ズレ状況を把握することが主要な課題であり、2つ

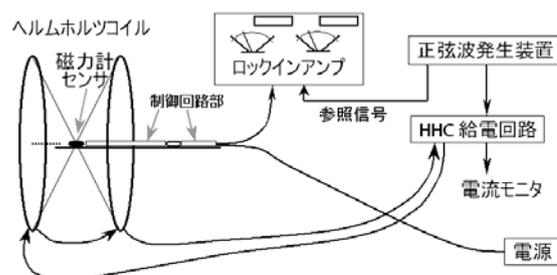


図5 ヘルムホルツコイルを用いた交流磁場による磁気センサの基本ゲイン調整

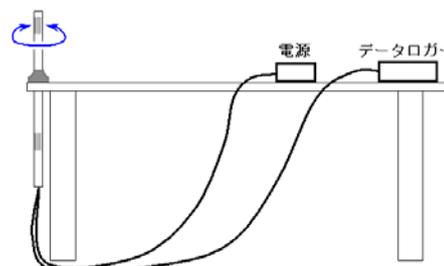


図6 ツール内2センサーの軸ズレ計測作業

のセンサを含むツールの範囲に一樣な磁場をかける必要がある。ツールのサイズは一般に長さ1m前後となり、人工的な磁場で実現するのはきわめて困難と言える。例えば、ヘルムホルツコイルで一様とみなせる範囲が1mにするにはコイル半径が数10mでも足りない。また、両センサ位置に絞って同等の磁場を発生させようとして2つの装置を用意しても、その設置位置・傾斜等を一般に1万分の1未満の誤差範囲内に厳密に調整することは、至難の技となる。そこで、人工磁場は大きな軸ズレの概略調整に利用し、最終調整は、ローカルな磁気異常や人工ノイズが十分小さい条件で天然の地球磁場を用いることとした。

図6は、この軸ズレ計測の作業の概観を示している。計測を行いながら鉛直に保持したツールを軸周りに360度回転させ、続いて360度逆回転させる方法をとっている。幸いにして日本付近では地球磁場の伏角が45度前後の適度な水平成分があるので、360度回転の間にツール軸に直交する磁場が軸の周りを1周することになる。各センサ2回目の回転が逆回転なのは、作業の繰り返しによって接続ケーブルの捩れが蓄積しないためである。鉛直軸周りの回転は、軸の振れによる再現性不良を起こしにくいと考えて採用しているが、場合によっては軸方向への移動が抑制できる状態で水平台などを用いることも可能であろう。

ここに、複数回の回転が重要な意味を持つ。もし、2回の回転で計測波形が異なることがあれば、ツール軸の振れがあってその状態が2回で同期していなかった場合も考えられるが、この作業場所のノイズ環境（直流電車からの漏洩電流などの問

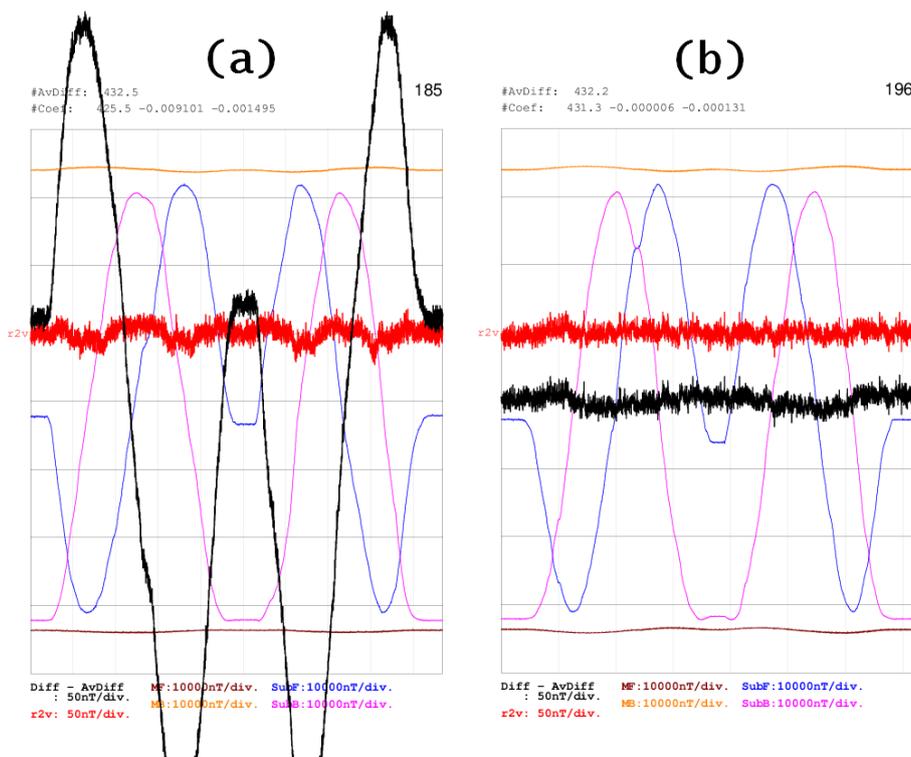


図7 電気的軸合せ作業における軸ズレ検出データ例  
(a) 初期状態 と (b) 調整が進んだ段階

題)で磁場が時間的に変動した可能性もある。何度かの繰返しで安定した波形が計測される状況になれば、信頼に値する結果と見てよい。

図7は、そのような計測データを整理したものの2例である。左 (a) は、調整作業の開始時の計測結果 (横軸は時間、前半に正回転・後半に逆回転) であり、図の差分出力を示す黒線が大きく変動している。同図には2つの交差磁場計測の補助センサのデータが青と紫で示されており (縦スケールは200倍異なる)、この場合では、青のグラフに相当する成分を反転したものが黒波形に大きく混入している状況を示している。従って、この段階では、補助センサ青の出力が差分出力に加算されるように、電気的調整を行うことになる。そのような調整を何度か繰返して調整がある程度進んだ状態が、右 (b) である。差分出力の黒グラフが先と比べて大きく改善されたことが見て取れる。ここに、(a) (b) とも赤で示したグラフは、それぞれのデータに関し、青・紫の補助センサ成分による加減を最適にできたときに予定される差分出力を数値化したもの (最小二乗法) のグラフを示しており、回転動作でツール軸の振れを生じたり、作業中に磁場ノイズ環境が変化した場合には、平坦ではないグラフが表示されることとなる。なお、この右図 (b) の作業の際には、たまたま回転動作がスムーズでなく、青と紫のカーブにゆがみを生じているが、この作業による判定には影響していない。

### 5.3 2つのセンサ間のゲインバランス微調整

前節の電気的軸合せ調整作業で、ツールを同じ位置でその軸周りにのみ回転させているのには、わけがある。前章で述べたように、センサの感度 (ゲイン) を精密に合わせることが容易ではなく、その段階ではゲイン調整が不完全なためである。その状態でツール軸を揺らす形の運動を行うと、地球磁場に対する角度が変動し、前記のように単純な作業手順では調整作業が機能しなくなる。

つまり、前節の調整では、2つの主センサの感度の微妙な差 (ゲインバランス) が差分出力のオフセット分として現われ、アナログ電子回路が宿命的にもつオフセット特性との切り分けが困難である。しかし、このゲインバランスが調整されていない状態では、現実の移動測定では避けきれないツールの揺れ (地球磁場に対する角度の変動) により、差分出力が大きく乱されることになる。

このゲインバランスの微調節に必要なデータを取得するためには、先に触れたように人工磁場を発生する方法では限界があり、静的な地球磁場の中でツールの向き (地球磁場に対する角度) を変動させつつ、つまり大きく揺らしながらデータを取得する。このとき、前の軸合わせ調整が完璧に行われていれば、差分出力に現われる変動は、ゲインバランスのズレの分だけになる筈であるが、現実には軸合わせ調整の残留分が、取得データに影響する。

現状としては、軸合せズレの影響をなるべく小さい状態でゲインバランスのズレの影響が大きくなるようなツールの揺らし方として、「北上往復テスト」(図8)と称する運動を取り入れている。それは、腕を伸ばした手でツールを保持して水平北向きと鉛直上向きの間で何回か往復させる動作で、それをツールの軸周り回転角が180度異なる状態で2動作行う。これによって、補助センサによる軸ズレ調整効果が正逆のものを加算して、その影響がなるべく相殺されるように配慮した。

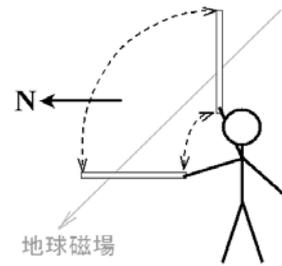


図 8 ゲインバランス微調整作業におけるゲイン差検出のための「北上往復テスト」

図9は、そのような計測データを整理したものの2例である。左 (a) は、この調整作業の開始時の計測結果 (横軸は時間、前半と後半で軸周り回転角が約180度異なる) であり、図の差分出力を示す黒グラフの変動の主要な部分が、茶色のグラフで示された一方のセンサFのデータ (他方センサBは感知軸が反転しているので、その橙色グラフを上下反転したものに相当する) と同相で変化している。従って、この段階では、センサFのゲインがセンサBのゲインを上回っていることを示している。この状態に対するゲインバランス微調整を何度か繰返した後に得られた同様の結果が、右 (b) である。差分出力の黒グラフの変動が大きく改善されたとは言えないが、(b) の左半と右半で茶色のグラフとの位相関係が反転したことがわかる。数値データの上でも (a) で 0.17%程度あったゲインバランスのズレに相当する量が、(b)

では 0.002%程度まで低下しており、少なくとも左半と右半との平均で見れば、ゲインバランスのズレは 0 に近づいたと言えるであろう。なお、(a) (b) とともに赤で示したグラフは、それぞれのデータに関し、前節と同様の処理によって、ゲインバランス調整を最適にできたときに予定される差分出力のグラフを示している。とくに、(b) で黒と赤のグラフがよく似る状況は、ゲインバランス調整が十分良く調整されたことを示すと考えられ、軸合わせ調整の残留分と、上記のような調整では手に負えないアナログ回路の非線形特性成分が残っているものと考えられる。

#### 6. おわりに

上の議論では述べなかったが、軸合せ調整でもゲインバランス調整でも、2つのセンサのどちらかを調整するかの自由度がある。現状のリアルタイ

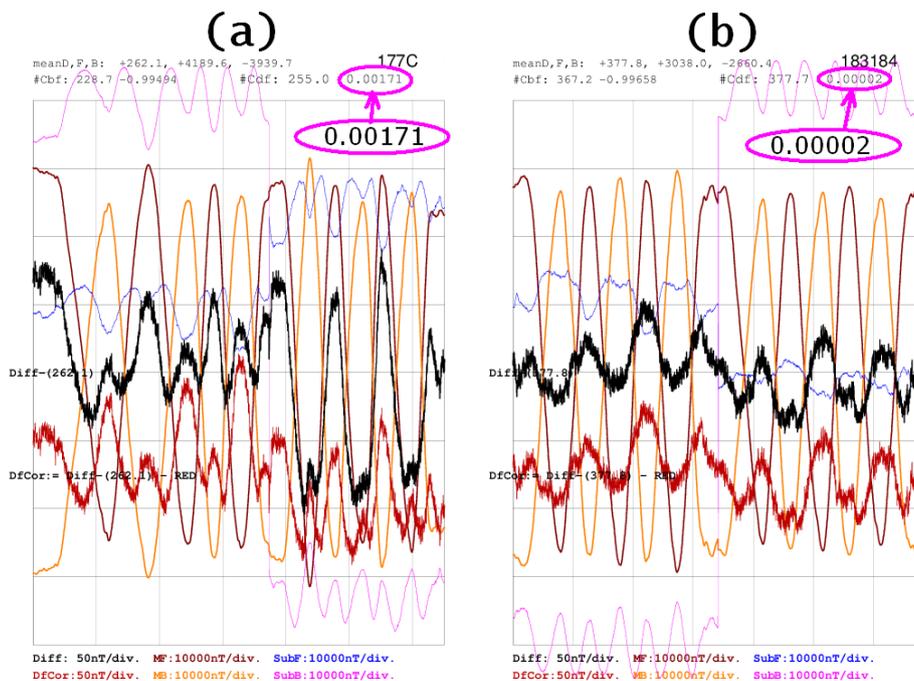


図 9 ゲインバランス微調整作業におけるゲイン差検出データ例(a) 初期状態 と (b) 調整が進んだ段階

調整作業では、データ収録画面でどちら側を調整すべきかを判断できる状況を実現していないため任意の側のセンサの調整を行っているが、軸合せ調整の方は収録データの簡単な処理でその指標を出力できるので、改善を図りたいと考えている。しかし、ゲインバランス調整の方は、磁場の絶対値を必要な精度で測定する光ポンピング磁力計などを利用した高度な計測環境と、ツール軸をその全磁力方向に合わせる負担の大きい作業が予想され、困難であろう。そこまでのことをせずとも、ゲイン（感度）そのものを0.1%レベルに調整できれば、数100nTの振幅を有する磁気異常を1nT未満の誤差で計測できるので、都市域における環境ノイズに比して十分な性能と言える。

ここまで、ツール内に設置した2つのフラックスゲートセンサの軸合せ調整と両センサのゲインバランス調整の方法について述べたが、両者を純粹に分離して調整できる状況にはなっておらず、両者の調整を交互に行き誤差を収束させていくことが必要な状況である。また、現状のゲインバランス調整方法は、再現性をみる上で必ずしも十分な方法ではなく、より良い操作方法あるいは補助装置の導入を考えたい。

また、軸合せ調整とゲインバランス調整は、本質的には別の要因で必要だが、原理的に分離して調整を行えるのが望ましい。現状では、ゲインバランスの影響のみを簡便に抽出する方法のアイデアがないのが実情であるが、今後の研究開発の課題としたい。

#### [付録] ヘルムホルツコイル内部の磁場精度 (理論値)

ヘルムホルツコイルによる人工磁場を利用して磁力計のキャリブレーション等を行う際には、コイル内の磁場の一様性がどの範囲でどの程度確保されているかを正しく理解しておく必要がある。ここでは、理想的なヘルムホルツコイル内の磁場がどのような分布を示すかを計算し、資料として残しておく。

ヘルムホルツコイルとは、等しい半径  $a$  の円形コイルを同一中心軸上にその半径  $a$  分だけ隔て置き、同一の電流  $I$  を同じ向きに流すようにした装置であり、その中央位置付近に一様な磁場が形成されることが知られている。中心点での磁場は、

$$H_c = \left(\frac{4}{5}\right)^{\frac{3}{2}} \frac{I}{a}$$

である。

単独の円形コイルによって作られる磁場は、軸方向磁場  $H_z$  とラジアル方向磁場  $H_r$  で表現され、Smythe (1950) によれば、コイル面からの距離を  $z$ 、中心軸からの距離を  $r$  とすると、第1種と第2種の完全楕円積分  $K(k)$  と  $E(k)$  を用いて、

$$H_z(z, r) = \frac{I}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{(a+r)^2 + z^2}} \left[ K(k) + \frac{a^2 - r^2 - z^2}{(a-r)^2 + z^2} E(k) \right]$$

$$H_r(z, r) = \frac{I}{2\pi} \frac{z}{r\sqrt{(a+r)^2 + z^2}} \left[ -K(k) + \frac{a^2 + r^2 + z^2}{(a-r)^2 + z^2} E(k) \right]$$

$$k = 2\sqrt{\frac{ar}{(a+r)^2 + z^2}}$$

である。一対のヘルムホルツコイルの場合に求めたい磁場は、軸方向成分  $[H_z(z, r) + H_z(z, a, r)]$  とラジアル方向成分  $[H_r(z, r) + H_r(z, a, r)]$  となり、完全楕円積分  $K(k)$  と  $E(k)$  は、

$$K(k) = \frac{\pi}{2} \sum_{n=0}^{\infty} \left( \frac{(2n-1)!!}{(2n)!!} \right)^2 k^{2n}$$

$$E(k) = \frac{\pi}{2} \sum_{n=0}^{\infty} \left( \frac{(2n-1)!!}{(2n)!!} \right)^2 \frac{k^{2n}}{1-2n}$$

で計算できる (ウィキペディア, 2015) ので、必要精度に応じて総和演算を打ち切れればよい。

計算結果を、軸方向磁場  $H_z$ ・ラジアル方向磁場  $H_r$  とともに、中心点での磁場  $H_c$  に対する割合で、(軸まわりに円筒対称なので) 軸を含む断面について図 A に示す。

#### 参考文献

- 1) 中塚 正, 2013, 分かり易い物理探査 磁気探査 (4). 物理探査ニュース, no.18, 1-5.
- 2) 中塚 正, 大熊茂雄, 牧野雅彦, 石原丈実, 小谷 廣, 1999, 磁気探査. 物理探査ハンドブック, 手法編, 473-518.
- 3) NF回路設計ブロック, 2009, 雑音に埋もれた信号の測定 ~ ロックインアンプを用いた微小信号の測定. [http://www.nfcorp.co.jp/techinfo/keisoku/noise/li\\_genril.html](http://www.nfcorp.co.jp/techinfo/keisoku/noise/li_genril.html)
- 4) Smythe, W. R., 1950, *Static and dynamic electricity*, 2nd ed. McGraw-Hill, New York, 616p.
- 5) ウィキペディア, 2014, ヘルムホルツコイル. <https://ja.wikipedia.org/wiki/ヘルムホルツコイル>
- 6) ウィキペディア, 2015, 楕円積分. <https://ja.wikipedia.org/wiki/楕円積分>
- 7) Wikipedia, 2015, Maxwell coil. [https://en.wikipedia.org/wiki/Maxwell\\_coil](https://en.wikipedia.org/wiki/Maxwell_coil)

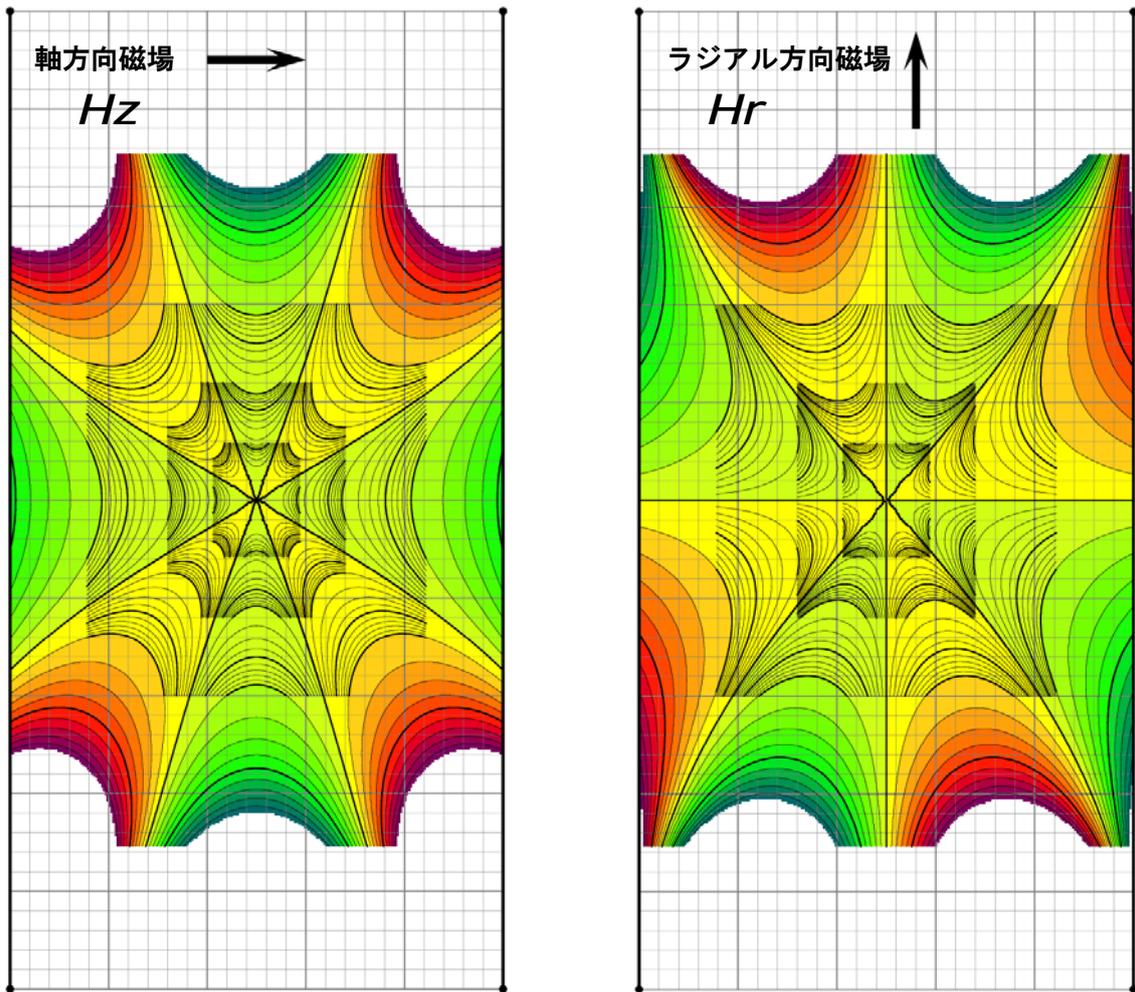


図 A ヘルムホルツコイル内の磁場の一様性からのズレ (理論値)

段彩の色は、黄緑～緑が負の値，黄～赤が正の値を示し， $H_z$  については中心位置での磁場強度  $H_c$  からのずれを表示している．線画コンターは，中心位置に近づくほどその間隔を細かくしてあり， $H_c$  を 10000nT としたとき，外側から 100nT 間隔・10nT 間隔・1nT 間隔・0.1nT 間隔となっている．中心位置から大きく外れる位置と，差が 1000nT 以上の部分は作図を省略し白くなっている．

両側の黒線は，正面から眺めた各コイルの位置をイメージしてある．直径 50cm のヘルムホルツコイルに  $H_c=10000\text{nT}$  となる電流を流したときの磁場を，1mm 間隔のメッシュ上で計算した．