

報 文

TDEM 法における高精度磁場計測装置の開発

北九州職業訓練短期大学校 下泉 政志

Development of High Accurate Magnetometer
in the TDEM Method
Masashi Shimoizumi

要 約 物理探査法の一つである TDEM 法（時間領域電磁法）における磁場計測装置として、フラックスゲート磁力計を取り上げ、センサー部並びに、駆動回路・検出回路の再設計を行う事により、その諸特性、特に周波数特性、及び、S/N 特性を改善する事ができた。これにより、人工源を用いた電磁探査で地下 5 Km 程度までの電氣的構造の高精度な探査が可能となった。これは、センサー材の高性能化と共に、アナログ IC の特性向上に負うところが多い。

I はじめに

地球が巨大な磁石であることは紀元前から知られており、有意な観測が開始されてからでも 400 年近くが経過しているが、近年の電子・情報技術の急速な進展による測定機器の改善、高速コンピュータを用いたデータ処理法の進展などにより、観測データから抽出できる情報が質、量ともに飛躍的に増大し、地球科学における磁場観測の重要性は増してきている。

ところで、磁場測定一般から見た場合における地球磁場（地磁気）観測の最も大きな特徴は、測定対象磁場が微弱なことである。通常、実験室内でいう磁場値は 10^{-2} T 以上であるが、地表面における磁場（地球主磁場）は、最も大きな磁極においても約 $6 \cdot 10^4$ nT ($1 \text{ nT} = 10^{-9} \text{ T}$) に過ぎず、惑星間磁場では数 nT となる。さらに、地磁気脈動と呼ばれる磁気圏起源の磁場変動では、 $1 \sim 10^{-3}$ nT という極微小な値であり、この様子を図 1 に示す。このような弱磁場測定機器（磁力計）には、図 1 の第三段目に示すようなものがあるが、今回われわれは、フラックスゲート磁力計（Fluxgate Magnetometer : 以降、FG と略す）を

研究対象とした。

FG は 1930 年代に考案され、当初は航空機用、あるいは潜水艦探知用として使用されることが多かったが、現在では陸上や航空機、船舶で使われているばかりでなく、人工衛星に搭載されて月や惑星の磁場測定に用いられるなど幅広い応用面をもっている磁力計である。特に、地球物理学では、その指向性から数分以上の自然磁場変動のベクトル測定に広く用いられていたが、NASA（米国航空宇宙局）などで衛星搭載用 FG の研究開発の結果、より短周期（数秒）の地磁気脈動の観測にまで用いることができるようになっている。また、物理探査分野においては、人工磁場源を用いた探査法が注目されており、地下数 Km までの地下電氣構造を推定する事が可能な CSMT 法（Controlled Source Magneto-Telluric method）は、鉱物、石油、地熱資源探査のみならず、最近では土木建設方面等への応用も始められている。さらに最近では、これらの成果を受けて、それより原理的に可探深度の大きな TDEM 法も研究されている。

TDEM 法（Time-domain electromagnetic method : 時間領域電磁法）とは、地表面上に設置したグランディング・ワイヤループなどに直流電流を流し、その電流を急激に遮断した時に流れる誘導電流

が作る二次電磁場の時間変化を測定する事により、地下電気構造を推定するという手法である。誘導電流は時間と共に地下深く浸透するので、この電流が作る二次電磁場の時間変化には、地下の浅部から深部までの情報が含まれ、この時間変化が長く測定できれば、より深部の情報を得ることができる。しかし、現実には信号強度は次第に弱くなり、可能な探査深度は主に、測定機器の検出限界、及び、ダイナミック・レンジに依存する。TDEM 法に従来用いられていた微分特性を持つ誘導型磁力計では、このダイナミック・レンジの問題を克服する事が出来ず、DC 特性の良い FG を用いることが考えられたが、従来使用されている FG では、検出限界レベル、及び周波数特性の面で実用的なものとは言えなかった。そこで、われわれは、FG のセンサー部の再設計、及び検出回路の再設計を行う事により、検出精度及び周波数特性を向上させた。試作した磁力計は、室内実験だけでなく、実際の TDEM 測定も行い、その実用性を実証した。

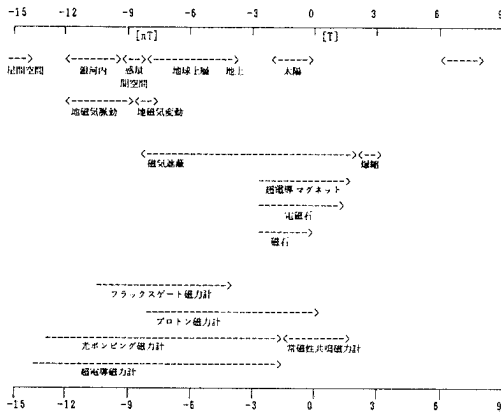


図1 磁場範囲

- 第一段：自然界における種々の磁場
 第二段：人工磁場
 第二段：磁力計の動作範囲
 (付添りn: log₁₀(磁場強度) [Tesla])

II 磁場測定系

図2にFGの基本ブロック・ダイアグラムを示す。同図において、外部磁場 $H_{EX}(t)$ の方向とFGの磁気軸とのなす角度を θ とすると、センサーへの入力磁場 $H(t)$ は、

$$H(t) = H_{EX}(t) \cdot \cos \theta$$

となる。ここで、外部磁場 $H_{EX}(t)$ は、静磁場部 H_{EXC} と変動磁場 $h_{EX}(t)$ とに分解でき、それに対応して $H(t)$ も H_C と $h(t)$ とに分解できる。

$$H_{EX}(t) = H_{EXC} + h_{EX}(t)$$

$$H(t) = H_C + h(t)$$

図2を回路解析の為に書き換えると、図3のようになり、これから以下の関係が得られる。

$$H_C = V_C \cdot [F_V / R_C]$$

$$h(t) = v(t) \cdot [1 / S_s A + F_V / R_s]$$

$$\approx v(t) \cdot [F_V / R_s]$$

通常、FGでは定電圧 V_C により静磁場 H_C をセンサー内部で相殺(補償)し、時間変動分 $h(t)$ のみを検出する。負帰還を用いることにより、機器感度 S [mV/nT] は回路利得 A 、センサー感度 S_s に無関係に二次コイル定数 F_V と帰還抵抗 R_s の比によって設定することができる。

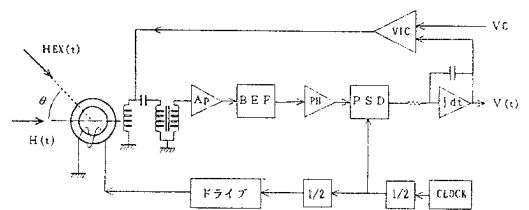


図2 FG 基本ブロック・ダイアグラム

- $H_{EX}(t)$: 外部磁場
 $H(t)$: 外部磁場のFG磁気軸成分
 V_C : 主磁場打消し直流電圧
 $V(t)$: 出力電圧
 CLOCK : 水晶発振回路
 A_p : プリ・アンプ
 BEF : 帯域除去フィルタ
 PH : 移相回路
 PSD : 同期検波回路
 f_dT : 積分回路
 VIC : 定電流回路

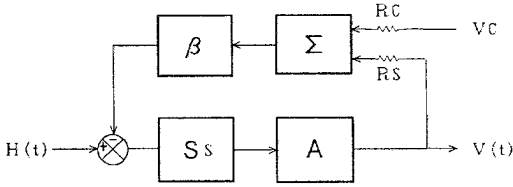


図3 FG ブロックダイアグラム

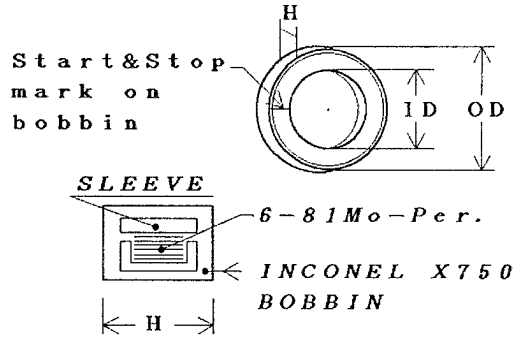


図4 リングコア外形

SC1000C-JC-2239-C (Infinetics社)

ID=1,000 inches

OD=1,013 inches

H=0.113 inches

III センサー部

フラックスゲート磁力計のセンサーとは、高透磁率磁性材料でできたコアに励磁用の一次コイルと検出用の二次コイルを巻いたものをいう。センサの構成にはいろいろな工夫がなされているが⁽¹⁾、最近では、雑音やドリフトなどの特性面からリングコアを用いる事が一般的である。これは、2本1組の同じ特性を持った棒状コアをたわめて輪にしたものと等価であり⁽²⁾、その動作解析は多くの手法が発表されている⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾。

われわれが使用したリングコアはInfinetics社(米)の型番S1000C31-JC-2239-Cであり、外形を図4に示す。これは6-81モリブテン・パーマロイテープ(0.0625インチ幅、0.0005インチ厚)を直径1インチのInconel X-750のボビンに7層巻いたもので、磁歪が最小の磁性材質のテープをパーマロイと同じ熱膨張係数のステンレスに巻き取って熱処理している為、コア自体に起因する雑音やオフセットに関しては、現在入手可能なものでは最高水準のものである⁽³⁾⁽⁴⁾。

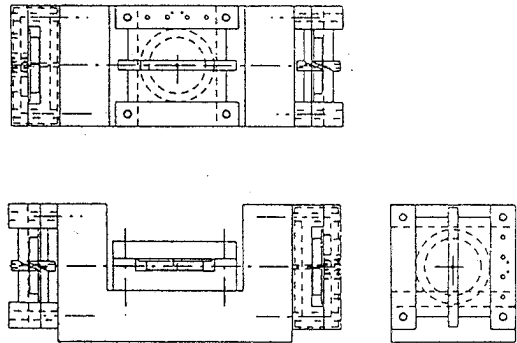


図5 センサー・ブロック外形

リングコアの場合、一次コイルとはコアに直接巻いたトロイダルコイルを、二次コイルとはそれを内部に含む形のソレノイダルコイルを指す。一次コイルは、0.25mmφのポリウレタン線を約200回巻き、二次コイルは同じ線を約800回巻いている。二次コイルは信号検出だけでなく、負帰還、及び、主磁場打ち消しをも兼ねているのでそのコイル定数 F_p は、これらのことを考慮して設計する必要があるが、試作したものは約 $7.3\text{nT}/\mu\text{A}$ である。

センサー部の外形を図5に示す。センサー・ブロック材料として、線膨張率が $9.4 \times 10^{-6} \text{cm}/^\circ\text{C}$ のマコール⁽⁴⁾ や、 $3.8 \times 10^{-5} \text{cm}/^\circ\text{C}$ のベスペル材(カーボン40%)⁽⁶⁾⁽⁷⁾ が使用されているが、われわれは入手が容易で安価なデルリンアセタール樹脂(デルリン)を用いた。デルリンは、ホルムアルデヒドの重合により製造された熱可塑性ポリマーで、その線膨張係数は $8.1 \times 10^{-5} \text{cm}/^\circ\text{C}$ である。

磁力計の絶対値精度は、磁場3成分を検出するセンサーの3軸直交度に大きく依存し、これは主に、センサーブロックの加工精度、電気的及び機械的取付精度により決定される。特に、地球主磁場の $10^{-5} \sim 10^{-8}$ という微弱磁場変動を、その主磁場内で測定する際には、上記事項は大きな誤差となる。つまり、通常、地球主磁場を打ち消して測定するが、3成分の軸の直交精度が悪いと相互干渉が現われ、その量は主磁場の大きさが30,000nTで、他の成分軸の直交性がそれに対して $1/60^\circ$ ズレている場合、約9nTとなる。これは観測時に H_c の一部とみなされる静的なものであるが、動的な相互干渉も問題になり、これは磁力計の検出精度に影響する。例えば、0.01nTまで問題にする場合には、通常の磁場変動範囲(日本のような磁気的中緯度地域では、最大100nT程度)に対して 10^{-1} 、直交性のズレ角度にすると20秒程度以下の直交性を確保する必要がある。

しかし、FGはその機構上、センサーの機械軸と電気軸が必ずしも一致しない為、機械加工のみで20秒までの方向軸精度を出すことは不可能に近く、又、非常に軸の揃った校正コイルシステムを用いても、 $0.1^\circ \approx 10^{-3}$ 以下まで合わせ込むのは容易ではないと言われている⁽⁶⁾⁽⁷⁾。従って、現実的な方法としては、あ

る程度まで (10^{-2} 以下) 合わせ込んでおき、軸からの角度ずれを校正時点で検出し、データ処理時点で計算で補正するのが現時点では得策と考えられている。われわれはこれらの検定を気象庁柿岡地磁気観測所内の比較校正室に設置された大型ヘルムホルツ・コイルで行った。尚、この校正コイルの直交精度は 10^{-3} 程度である。直交性の検定は、水平度を 0.1° 程度に設定し、方位調整を行った後、校正コイルの1軸方向に10nT程度の交流磁場を作成し、それに直交する成分の出力が最小になるようにセンサー台を回転させることにより行った。その結果、無調整で 10^{-4} 程度であった。TDEM法における磁力計としては、観測環境などから判断してこの値は実用に耐えるものであり、センサー固定の微調整は行わなかった。この値以上の設定は秒精度の回転台などの機器が必要であり、今後の課題の一つである。

IV 電子回路

磁力計の電気的性能は、外部磁場変動に対する応答特性、出力のS/N特性、出力の絶対精度及びオフセット精度特性、出力の線形特性及び、長期安定性(ドリフト特性)によって評価される。このうち、長期安定度は、 $1.0\text{nT}/^\circ\text{C}/\text{年}$ が目標値であるが、TDEM測定では、1地点での観測時間がせいぜい2~3時間であること及び、この測定のためにはかなりの時間を要することから、今回はこの評価は行っていない。

周波数特性、及びS/N特性は、今回の最大重要事項であり、目標値は、それぞれ、カットオフ周波数100Hzのバターワース型、0.01nT以下であり、出力の絶対精度及びオフセット精度は 10^{-4} 、出力線形特性は 10^{-4} を目標値とした。

上記事項以外に、バッテリー電源での動作を可能とする為に機器の低消費電力化も課題であった。通常、重量など携帯性から6Ah程度のバッテリーが用いられており、これで12時間程度動作するには、消費電流は0.5A以下である事が要求されるが、作成した回路の定常的な消費電流は0.40Aであり、現時点ではほぼ満足できるものである。

電子回路は、「ドライブ回路」、「フィードバック回路」、「キャンセル回路」、「TDEM回路」の4ユニットからなり、以下にその概要、及び、改良点のポイントを記す。

1 ドライブ回路

周波数 f_0 の励磁電流でセンサー・コアを十分飽和させる回路であり、コアを励磁する手法としては、『パルスドライブ法』を用いている。この手法の利点はパルスのコアを飽和させるため、少ない平均電流で非常に大きな飽和電流をコアに流すことができる⁽⁴⁾という事である。この事は、回路構成の簡単化、低消費電力化を可能とするだけでなく、コアに起因する磁気ノイズの低減にも有用である⁽⁶⁾。励磁周波数を12.5kHzにすることにより、パルス電流のピーク値は約400mAとなったが、これはセンサーに対して 1.27×10^3 A/m (コアの保磁力の約30倍)の磁場をパルスの(パルス幅約 10μ S)印加していることになる。

2 フィードバック回路

二次コイルに誘導された電圧信号から、励磁周波数の第2次高調波成分 $2f_0$ を取り出し、ドライブ回路からの参照信号を用いて、同期検波を行なった後、積分し、低周波成分を100%二次コイルに戻す事により、外部磁場変動 $h(t)$ に比例した電圧 $v(t)$ を出力する負帰還増幅回路である。

この回路では、入力段に特殊コアを使用したトランスを、ACアンプには低ノイズ、低ドリフトのオペアンプを使用し、第2次高調波成分のみを取り出すための帯域除去フィルタ(BEF)は受動素子LCを用い、位相検波をアナログスイッチで構成することにより、低消費電力化を図った。定電流回路には、 $1\text{ppm}/^\circ\text{C}$ の温度特性を持つ超抵抗(Vishay社)と超低ドリフトのオペアンプを用いた。使用している巻線の温度係数は約 $4000\text{ppm}/^\circ\text{C}$ であるので、打ち消し磁場を作成する為に定電流回路はなくてはならないものであり、又、その安定性は機器の性能を左右するものであ

る。そこで、バイラテラル形式のものを使い、二次コイル巻棒材(デルリン)の熱膨張率をも考慮して回路定数を設定した。

周波数特性はBEF部、積分部などの回路パラメータを変化させることにより遮断周波数100Hzの1次低域通過型特性を実現した(図6)。

総合感度は磁力計設置時の容易さから $10\text{mV}/\text{nT}$ typ.と設定した。従って、磁力計のダイナミックレンジは、回路の電源電圧が、 $\pm 15\text{V}$ であるのではほぼ $\pm 1,500\text{nT}$ となる。

3 キャンセル回路

主磁場 H_0 を補償するための定電圧 V_0 を発生させる機能を持つ回路である。この電圧の安定性がオフセット特性を決定する為、基準電圧源には $1\text{ppm}/^\circ\text{C}$, $20\text{ppm}/1,000\text{hrs}$ の特性を持つLM399Hを、可変部分には $1\text{ppm}/^\circ\text{C}$ の温度特性、 $5\text{ppm}/\text{year}$ の長期安定度を持つ超抵抗と超低ドリフト($0.1\mu\text{V}/^\circ\text{C}$, $0.2\mu\text{V}/\text{month}$)のオペアンプAD707CNを用いた。操作性を考慮し、打ち消し量の設定は、フロント・パネルのサム・ロータリ・スイッチで行うように設計しており、 100nT 単位の打ち消し磁場値を直読することができる。

4 TDEM回路

フィードバック回路の出力を増幅し、測定レンジ内におさめる為のオフセット電圧を発生させる回路である。フィードバック回路の出力感度は、 $10\text{mV}/\text{nT}$ であるが、TDEM測定時には数 $100\text{mV}/\text{nT}$ 以上の感度が必要となるので、フィードバック回路の出力を、 $0.35\mu\text{V}$ (帯域幅 $0.1\sim 10\text{Hz}$)のノイズ特性をもつAD707CNにより増幅することによりこの高感度を実現した。また、信号強度の変化に対応する為、総合感度は可変(0dB [$10\text{mV}/\text{nT}$] \sim 40dB [$1,000\text{mV}/\text{nT}$])である。

5 総合特性

試作したフラックスゲート磁力計の性能評価事項を表1に示す。

表1 FG 総合特性

Dynamic range	1,500 nT
Sensitivity	10 mV/nT typ. 33 mV/nT 100 mV/nT 333 mV/nT 1000 mV/nT
Measurable Field Range	0 - 69,000 nT
Band width	100 Hz
Noise (0-100Hz)	<0.01 nT
Linearity Error	< 10 ⁻³
Power Consumption	4.8W

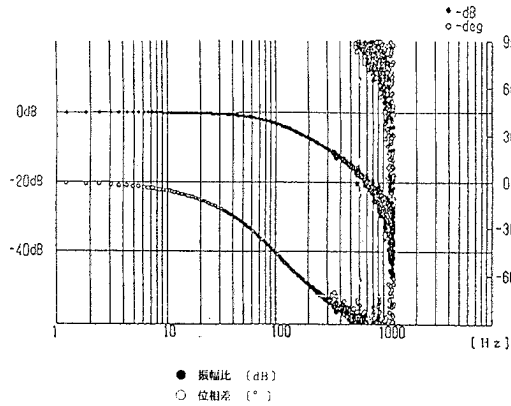
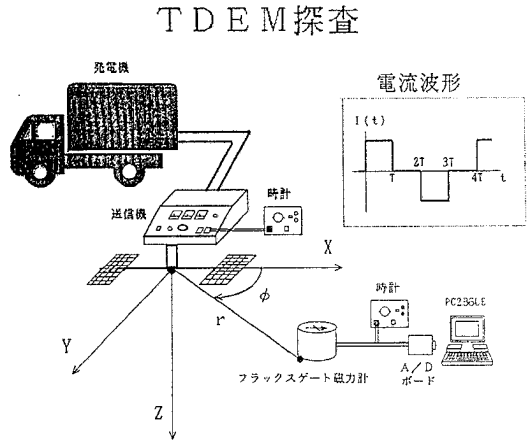


図6 FGの周波数特性

V TDEM 測定例

ここでは、試験評価の終了したFGを実際にTDEM測定に適用した結果について述べる。



(装置仕様)

送信機	最大電力、電圧、電流	試電時間
JCR-201T	80kW 800V 100A	1, 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128秒 可変
発電機	最大電力、電圧、周波数	
	120kW 500V 50-60Hz	
時計	精度: 1 0-8 sec/day	
受信機	磁力計	A/D変換
JCR-201R	77kHz-1 12bit (1.22mV/LSB)	コンバータ
送信ケーブル	1422mm2, 0.8Ω/km	2km長
接地電極	15mmφ, 50, 100mm長	200本 食塩 100kg

図7 TDEM 調査システム構成

波形であり、これらのデータと一次磁場値から検出限界レベルは0.01nT程度以下であることが、また、同図 (a)から小信号に対する応答速度が10ms程度であることが確認できる。

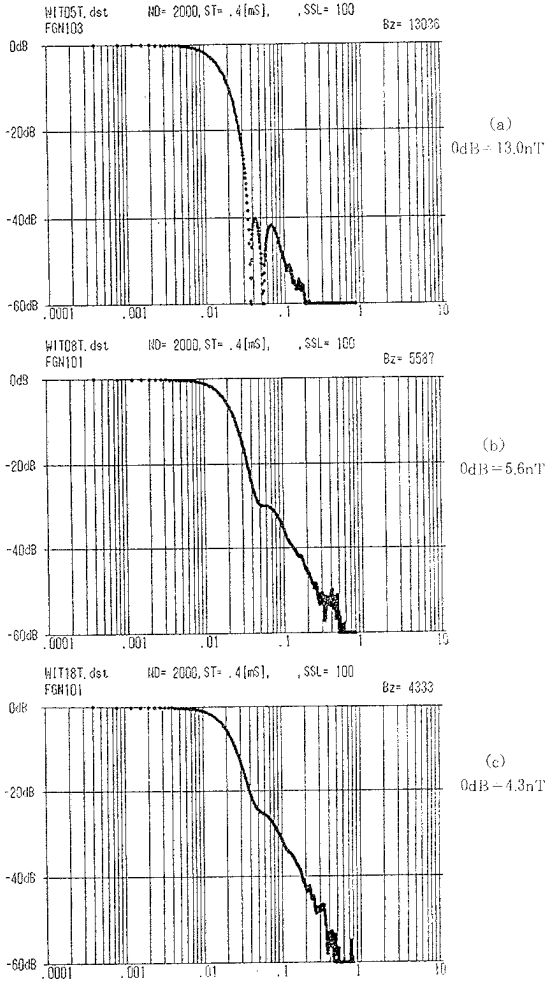


図8 TDEMデータ例

TDEM 探査システムは、図7に示すものであり、通常 540Vで32A程度の電流を電流ダイポールに流し、電流波形のうち、電流遮断時 ($T < t < 2T$, $3T < t < 4T$) のみ磁場を測定する。尚、測定時には送信電流のON/OFFと同期をとって時間領域でのスタッキングを行い、S/N比の向上を図っている。スタッキング100回のデータ例を図8に示す。同図(a),(b),(c)は電流ダイポールからの距離がそれぞれ約500m,1500m,2500mの地点 ($\phi = 90^\circ$) で測定された鉛直磁場成分の

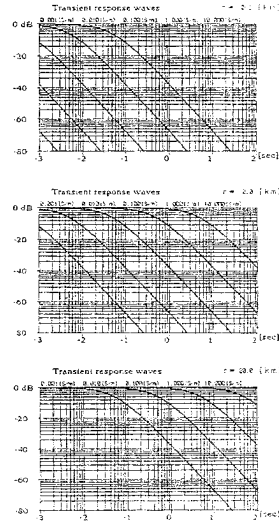


図9 磁場鉛直成分の過度応答波形 (計算値)
一次磁場値で正規化し、伝導度をパラメータとした場合の過度波形。横軸時間目盛は対数である。

図9は、大地を電気伝導度 σ の半無限均質媒質と考えたときの送受信距離 r 、 $\phi = 90^\circ$ の地点における応答波形を地球内部電気伝導度の取り得る範囲 $10^{-3} \sim 10^1$ [S/m]についてシュミレートしたものである。これから近すぎる場合 ($r \leq 200m$) には、時間変化が急激すぎて磁力計の特性に関する情報しかデータに含まれず、また、 σ が小さいほど磁場は急激に減衰し、その減衰は r が小さいほど早いことが分かる。従って、TDEM 測定をわれわれのFGで行う場合には、1km程度以上の送受信距離に測定点を設置することが機器の過渡応答の点から望ましいことが分かる。また、60dB以上のダイナミック・レンジで測定するために必要な一次磁場強度の点からも数km領域での探査が望ましい。

図10には、CSMT法により得られたデータとTDEM法により得られたデータを用いてジョイント・イ

ンバージョンを行った結果を示す⁹⁾。図8にも見られるように多くの地点においては、1秒程度で検出限界レベルにまで減衰するため、周波数領域における解析もこの周波数(1Hz)までしか出来ないが、同図に見られるように、5km程度までの構造を推定することができた。

以上より、探査領域に制限はあるものの現時点で地下5km程度までの探査が今回開発したFGを用いることにより可能になった。

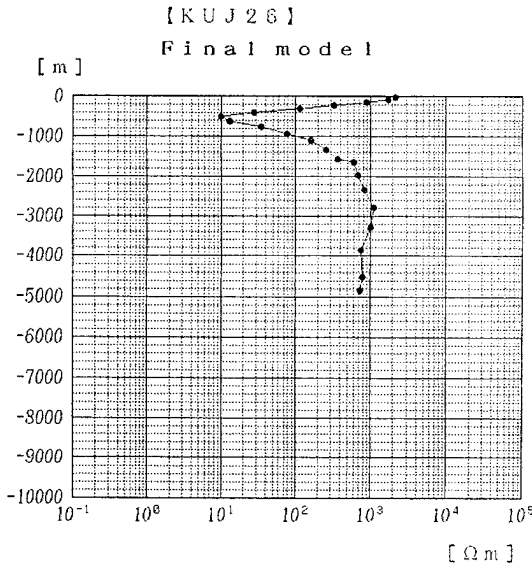


図10 解析結果例

VI おわりに

今回、われわれはTDEM法における高精度磁場検出機器としてフラックスゲート磁力計を用いるために、その設計を行い、試作段階を経て、実用段階にまで到達する事が出来た。

TDEM法のデータ解析においては、現在の所、磁場3成分のうち鉛直成分のみを用いている。これは、TDEM法自体が日本で行われはじめて日が浅く、又、磁場検出器としてFGを用いた観測も始まったばかりであるという事もあり、将来は他の2成分も解析結

果の信頼性を向上させる為に用いられるであろう。

ただ、TDEM法では原理的に磁場1成分だけで地球内部の電気的構造を推定する事ができること、及び、実際の観測データにおいても多くの観測点において鉛直成分のS/Nが他成分よりも良いことを考慮すれば、高密度多点観測への対応の一方策として、鉛直1成分だけからなるFGを用いる事があげられよう。

一方、フラックスゲート磁力計自体の今後の課題としては、検出限界向上の可能性に関する研究と共に、温度変化による機器特性の測定・改良等があげられる。

本研究は、主に、日本地殻調査株式会社からの平成元年度受託研究費を用いて行った。

TDEM測定に於いては、電力中央研究所物理探査部の楠健一朗、鈴木浩一、藤光康宏氏ら、日本地殻調査株式会社の城森明、川崎逸男氏ら、九州大学工学部資源工学科 茂木透博士らを始めとする多くの方々の御好意、御協力を得る事により実現した。

又、センサー部作成に当たっては、佐世保技能開発センターの藤瀬晴嗣氏に、電子回路作成に当たっては、千葉電子研究所の東義則氏に、多大な援助、助言を頂き、当短大乗富一雄校長には数々の助言、協力を頂いた。

ここに、深く感謝いたします。

(注)

- (1) F. Primdahl: IEEE Trans. Magn., MAG-6, pp.376-382(1970)
- (2) W. A. Geyger: AIEE Trans., vol.81, pp.65-73(1965)
- (3) D. I. Gordon and R. E. Brown: IEEE Trans. Magn., MAG-8, pp.76-82(1972)
- (4) M. H. Acuna: IEEE Trans. Magnetics, Mag-10, 3, 519(1974)
- (5) S. V. Marshall: IEEE Trans. Magn., Vol. MAG-3, pp.459-463(1967)
- (6) 福島直、齊藤尚生 編: 「磁場精密測定」

(1981,1982)

(7) 齊藤尚生 編：「磁力計の開発と応用」

(1983)

(8) D. C. Scouten : IEEE Trans. Magn.,
vol. MAG-8, June (1972)

(9) 下泉政志他：地球電磁気・地球惑星圏学
会

第90回講演予稿集、C32-03 (1991)