

TDEM法用フラックスゲート磁力計の開発

北九州職業訓練短期大学校	下泉 政志
九州大学 工学部	茂木 透
電力中央研究所	鈴木 浩一
日本地殻調査	城森 明

Development of TDEM Instrument using Fluxgate magnetometer

Masashi SHIMOIZUMI¹⁾, Tohru MOGI²⁾, Koichi SUZUKI³⁾ and Akira JYOMORI⁴⁾

- 1) Kitakyushu Polytechnic College
- 2) Faculty of Engineering, Kyushu University
- 3) Central Research Institute of Electric Power Industry
- 4) Japan Crust Research Co.

1. はじめに

地殻上部電気構造を推定するために、様々な探査手法が考案されているが、精密な構造を推定するために、周波数分解能を上げる事は重要な項目であり、近年、CSMT法を始めとする人工源を用いた電磁探査が盛んになってきた一因にこの事があげられよう。現在、CSMT法によって、数kHz～数Hzまでは、精査が可能となっている¹⁾²⁾が、数Hz以下は人工源では送信パワー、及び、near field効果などの点で問題がある。従来、この帯域では、第1図に示した自然現象を用いる事が主であるが、いわゆる「現象」と呼ばれ、その特性が詳しく研究されている地磁気脈動などは、観測効率だけから考えると最適とはいえない。そこで、高感度の検出器と高分解能のA/D変換器、及び、ソフトウェアにより、通常、「ノイズ」と呼ばれ、研究対象となっていない信号を使った探査も行われている³⁾。

一方、「TDEM法 (Time Domain ElectroMagnetic method)」と呼ばれる人工源を用いた時間領域の電磁探査法は、原理的に深部探査に適したものであり、現在注目されている手法である。このTDEM法の原理に関しては、昨年のCAシンポジウムにおいて、三井金属資源開発の斉藤氏により紹介されている⁴⁾ので参照されたい。我々は、CSMT法とTDEM法の組み合わせにより、地殻の浅部から深部(10km程度)までを高精度に探査する事を最終目標としている。ここでは、主に、3回(段階)のフィールド実験により実用レベルに達した探査装置(磁力計)、及び、得られたデータに関して報告する。

2. TDEM法における磁場信号

人工源の構成としては、グランディング・ワイヤを用いる方法 (electric dipole source) とループを用いる方法 (magnetic dipole source) とがあるが、我々は前者の構成 (第2図) を用いている。一次磁場強度は流電電流 I と電極間隔 $\downarrow dx$ 、及び送受信間の位置 r 、 ϕ に依存する^{5) 6)} が、我々は電流電極の接地方法を工夫することにより、接地抵抗を10数 Ω にまで低減し、通常540Vで最大32A程度の電流を流している。第3図には、流電電流をパラメータ ($I = 1, 10, 32, 100$ A) とし、一次磁場強度の計算値 ($\downarrow dx = 2\text{km}$, $\phi = 90^\circ$) を実線で、実測値を黒丸で示している。第1図の自然磁場信号 (これはTDEM法ではスタッキング処理により除去する事が困難なノイズ成分となる) 強度から考えて1nT程度以上の磁場強度であれば、良好なS/N状態及び、60dB以上のダイナミック・レンジ (分解能1pTの場合) で観測する事が出来るが、この為には流電電流が32Aの場合、送受信間隔 r は3km以内であることが望ましいことになる。第4図に、大地を半無限均質媒質 (電気伝導度 σ) と考えた時、送受信間隔 r 、 $\phi = 90^\circ$ の地点における過渡応答波形を、 $\sigma = 10^{-3}, 10^{-2}, 10^{-1}, 10^0, 10^1$ S/mについて描いており、同図 (a)、(b)、(c) はそれぞれ $r = 0.2, 2.0, 20\text{km}$ の場合を示している。第4図 (a) の左から3波形 ($\sigma \leq 10^{-1}$ S/m) より、近すぎる場合 ($r < 200\text{m}$) には、時間変化が急激すぎて、データには磁力計の特性 (ステップ・レスポンス) に関する情報しか含まれないことが分かる。また第4図から、大地の伝導度 σ が小さいほど地表での磁場は急激に減衰し (電流遮断後の誘導電流の拡散速度が速い)、その減衰時間は送信器に近いほど短いことがわかる。

我々が作成したフラックスゲート磁力計の場合、その周波数特性 (一次形、 $f_c = 100\text{Hz}$) より小信号に対する応答時間は10ms程度である。従って、高比抵抗 ($1/\sigma \geq 10^3 \Omega\text{m}$) な層が地表から厚く存在するような場合には、送受信間隔として数km以上とらなければこの層の存在は検出できないであろう。実際にはソース敷設の点からも、より遠距離にせざるを得ない状況も起こり得るので、テストフィールドでは r を最大10kmまでとっている。

3. TDEM法における磁力計

TDEM法では大地の過渡応答波形を測定するが、深部情報を得るためには、過渡波形の裾の部分 (いわゆる、late time) を高精度に測定する必要がある。そこで、我々はDCまで周波数帯域の延びているフラックスゲート磁力計を採用した。誘導型磁力計も中心誘導法 (Central-Loop TEM method) に用いられている⁷⁾ が、これは主に地殻浅部 ($< 1\text{km}$) 向きであり、我々も第1回目のテストフィールドで併用したが、以降は深部探査という目的から、フラックスゲート磁力計のみを用いている。ところで、入力過渡波形を精度よく忠実に測定する為には、従来のフラックスゲート磁力計を高感度化・広帯域化する必要があり、第1表に示す仕様のものを開発した⁸⁾。使用したリングコア・センサーは Infinitic社の型番S1000C 31-JC-2239-Cであり (第5図)、これはコア自体に起因する雑音やオフセットに関して現在入手可能なものでは最高水準のものであり、このコアの特性により磁力計の性能向上が可能

であったと考えられる。フラックスゲート磁力計の検出部の構成図を第6図に、周波数特性を第7図に示す。データ解析時にはこれを用いて機器特性補正 (deconvolution) を行っている。

尚、TDEM法では、原理的に電磁場1成分だけで比抵抗構造を推定する事が可能であるが、フラックスゲート磁力計の場合、センサー部がコンパクトであるので3成分測定を行い、情報量を増やしている。

4. TDEM法実験

第8図に第一回目のテストフィールドである秋田県雄勝郡雄勝町秋の宮で得られたデータを示す。これは送受信器間隔が1.5kmの位置で、 $I = 24A$, $\int dx = 2.5km$, $\phi \approx 45^\circ$ の条件で得られたものであり、上図は磁場3成分を縦横ともリニア・スケールで、下図は鉛直成分のみをログスケールで表示したものである。同下図において、-40dB付近がシステムの検出限界であり、過渡現象は約60mSで終了しているように見える。ただ、100mSから1秒付近までの部分がノイズによるものかどうかは、スタッキング回数の不足などから結論できない。磁場水平2成分も測定しているが、鉛直成分に比べ、水平成分にはスタッキングにより除去することがむずかしいノイズ (自然磁場変動が主) が混入する可能性が高く、また、測点の位置による一次磁場強度の変化などにより、解析可能なデータを得ることが少なく、第8図のデータは非常に良好なものである。

第9図は大分県九重町の久住山周辺で行った第三回目のテストフィールドの測点分布図であり、第10図に測点23 ($r=4.1km$)、26 ($r=5.3km$)で得られた磁場鉛直成分のデータを示す。この場合も検出限界は-40dBであり、この地域ではこの例のように数秒程度までの過渡波形が得られている。なお、桜島で多くみられた16秒でも減衰が終了しない例も久住では数点得られており、火山地下の電気構造を反映していると考えている⁹⁾¹⁰⁾。

尚、第10図のスタッキングしたデータから数pT程度までは使用できると判断している。我々が今回使用したA/D変換器は12ビットであり、信号源の極性を考慮しても60dB以上のダイナミック・レンジがあるが、4km程度以上離れた地点では高々40dBしか使用しておらず、より近距離での測定が望ましい。もちろん、A/D変換器を14,16ビットにし、さらに近距離で測定することはS/Nの点からも望ましいが、その際、磁力計の応答速度、スルーレートなども考慮する必要がある。以上の事項だけでなく、TDEMデータ解析上からもアレー観測が望ましく、本年夏に久住地域で予定されている観測においてはこの方式が計画されている。

5. まとめ

TDEM観測データから、数pT程度が今回作成した磁力計のノイズレベルであると判断できる。ただ、瀬戸正弘氏から御指摘頂いたように、より精密なノイズ特性の測定も今後行う必要があると考えている。周波数帯域に関しては、回路的にはさらに広帯域にすることは可

能であるが、それに従いノイズも増加するので、データ解析の面から最適な値が得られないかと思っている。

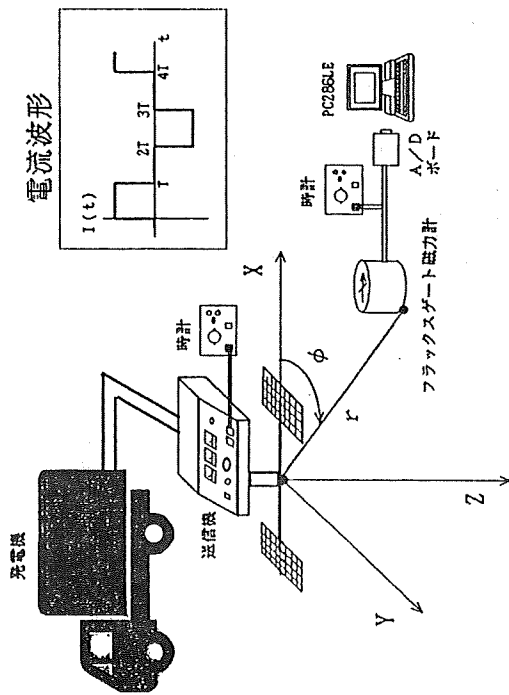
久住、桜島地域でのTDEM観測のプリリミナリーな解析結果⁹⁾¹⁰⁾によると、CSMTとTDEMとの1Dジョイント・インバージョンの結果、最大5~6km程度までの構造が得られている。最終目標の10kmには達していないが、TDEM観測測点の選定、解析手法の改良などにより不可能ではない考えている。以上より、なお課題は多いが、TDEM法による深部探査の第一段階は終わり、第二段階に入ったと考えている。

磁力計の検定の際には、地磁気観測所の山本哲也氏を始めとする観測所の多くの方々のお世話になった。TDEM測定は、電力中央研究所物理探査部の楠健一郎、藤光康宏氏、吉沢技研の又吉盛次氏を始めとする多くの方々のご協力により実現した。また、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、乗富一雄北九州職業訓練短期大学校長には数々の助言、協力を頂いた。ここに深く感謝致します。

参考文献

- 1) 内田 利弘 CSAMT法の基礎と適用、CA研究会論文集、1-17、1989
- 2) 茂木 透 他 複素位相検波方式CSMT探査装置の開発、物理探査、43、164-169、1990
- 3) 小川 康雄 他 広帯域・実時間処理MT法とそれを用いた磐梯山周辺の地殻構造調査、CA研究会論文集、18-24、1989
- 4) 斉藤 章 TDEM法による比抵抗探査 CA研究会論文集、105-112、1990
- 5) A.A.Kaufman, G.V.Keller, Frequency and transient soundings, Elsevier Science Publishing Company Inc., 1983
- 6) S.H.Ward and G.W. Hohmann, Electromagnetic theory for Geophysical Applications, Electromagnetic Methods in Applied Geophysics, SEG, 1987
- 7) 光畑 祐司 他 仙岩地域澄川地区におけるTEM法調査、第84回物理探査学会講演論文集、1991春季大会、265-270
- 8) 下泉 政志 他 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紀要、43-54、1991
- 9) 茂木 透 他 CSMT法、TDEM法による九重火山の比抵抗構造、第84回物理探査学会講演論文集、1991春季大会、277-280
- 10) 西村 進 他 桜島火山でのCSAMTおよびTDEM探査、第84回物理探査学会講演論文集、1991春季大会、281-284

TDEM探査

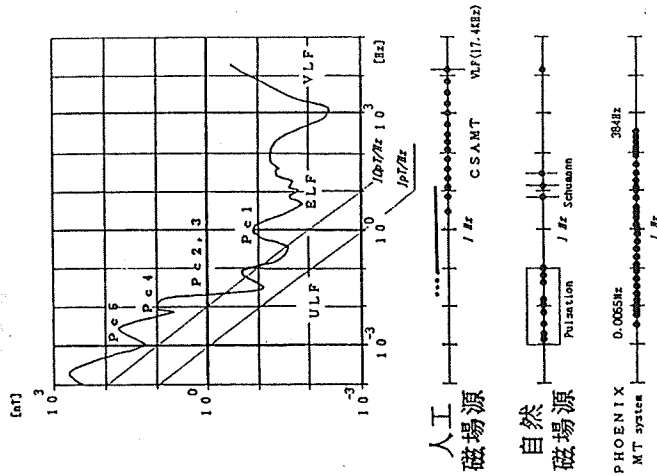


【装置仕様】

送信機	最大電力、電圧、電流	流電時間
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: 10 ⁻⁸ sec/day	
受信機	磁力計	A/D変換
JCR-201R	72bit (1.22mV/LSB)	16bit CPU (10MHz)
送信ケーブル	1V/2mΩ, 0.8Ω/km	2km 共
接地電圧	15mAφ, 50, 100mA 200本	変置 100%

第2図 TDEM探査システム構成図

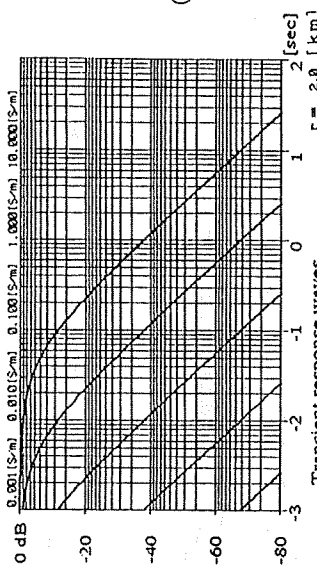
流電流波形には休止波を用い、流電時間Tは8種類用意している。送受信間の同期は高精度の時計(10⁻⁸ sec/day)により行っている。



第1図 自然磁場変動スペクトラムと探査周波数

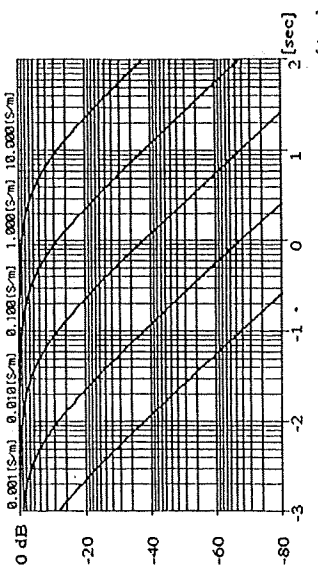
スペクトラム下の、「人工磁場源」にはCS.A.M.Tでの解析周波数を、「自然磁場源」にはELF帯及びULF帯の信号周波数を、最下段には小川ら(1989)が使用したシステムでの解析周波数を黒丸(●)で示す。我々の最終目標は数Hzから0.1~0.01Hzの周波数帯域をTDEM法でカバーする事である。

Transient response waves $r = 0.2$ [km]



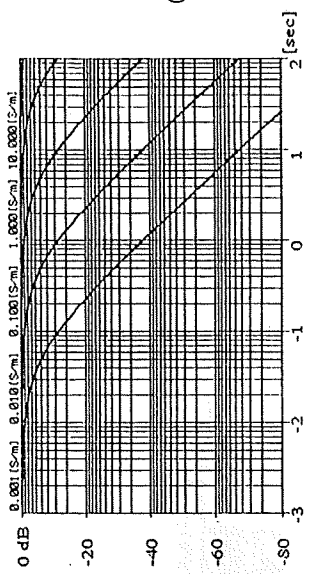
(4-a)

Transient response waves $r = 2.0$ [km]



(4-b)

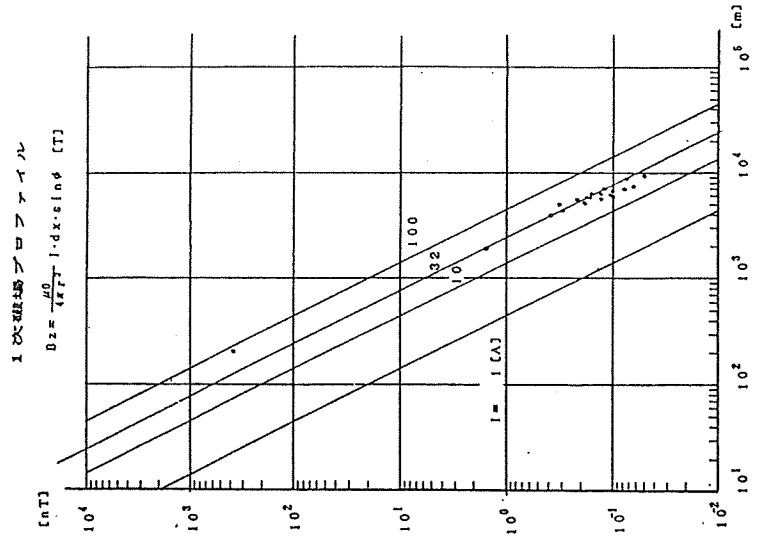
Transient response waves $r = 20.0$ [km]



(4-c)

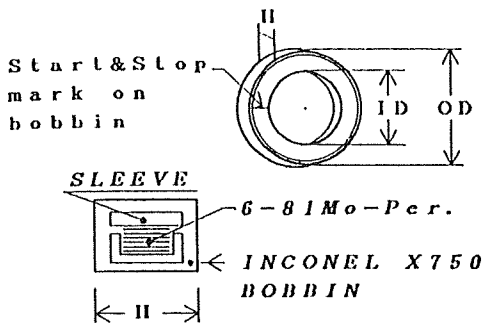
第4図 磁場鉛直成分の過渡応答波形

一次磁場値で正規化し、伝導度 σ をパラメータとした場合の過渡波形。横軸時間目盛は $\log t$ 。



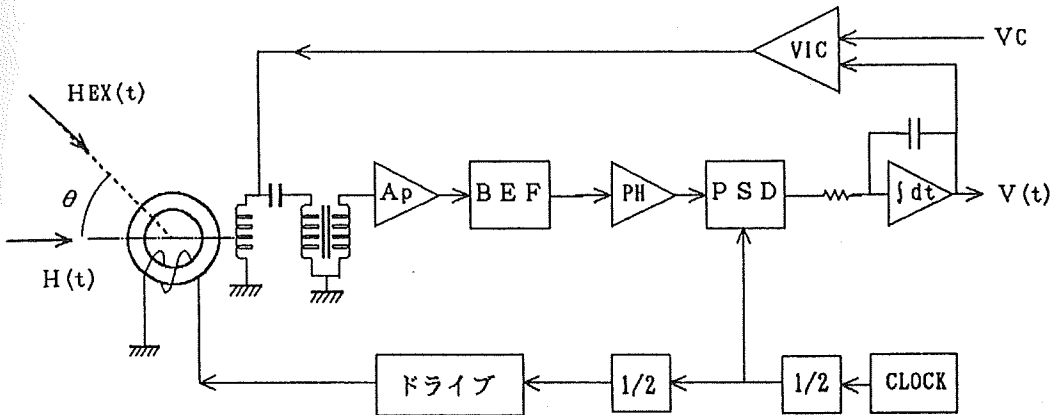
第3図 一次磁場強度分布

電極間隔 2kmにおける送信バイポーラによる一次鉛直磁場強度の計算値を流電流 I をパラメータ (1.10, 32, 100 A) として実線で表示している。図中黒丸は実測値を示す。



第5図 リングコア外形

SC1000C31-JC-2239-C (Infinitics 社)
 ID= 1.000 inches
 OD= 1.013 inches
 H = 0.113 inches

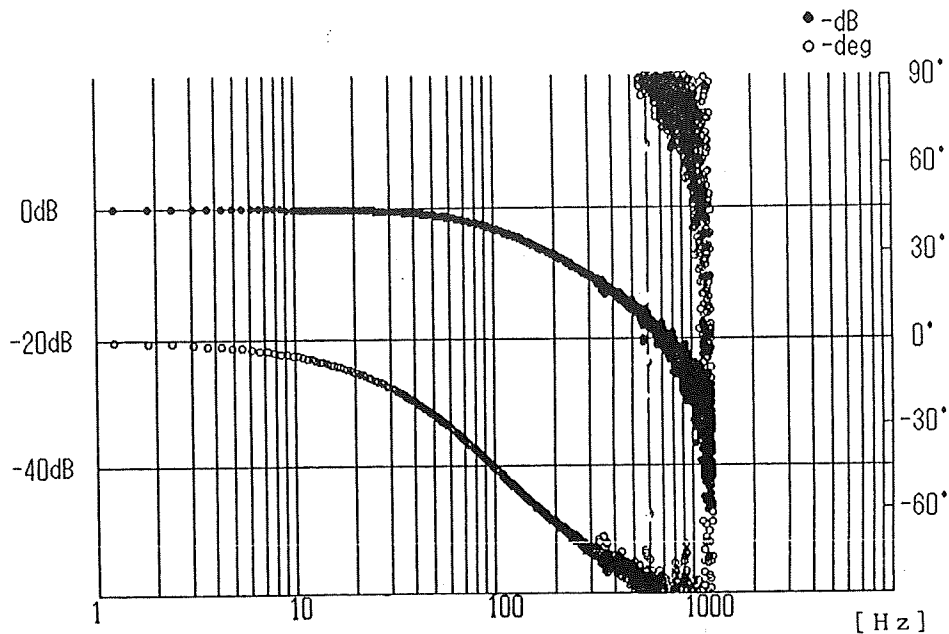


第6図 フラックスゲート磁力計の検出負帰還増幅器 構成図

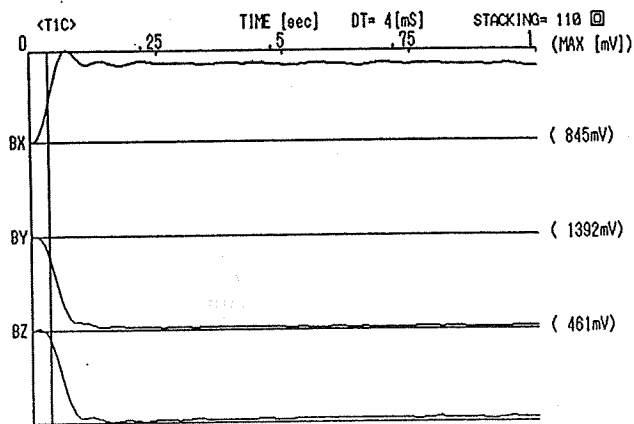
HEX(t) : 外部磁場
 H(t) : 外部磁場のFG磁気軸成分
 VC : 主磁場打ち消し直流電圧
 V(t) : 磁場変動に比例した出力電圧
 CLOCK : 50KHz 出力水晶発振回路
 Ap : プリ・アンプ
 BEF : 帯域除去フィルタ (12.5, 37.5KHz)
 PH : 移相回路
 PSD : 同期検波回路
 ∫ dt : 積分回路
 VIC : 定電流回路

1. 測定範囲	x : 0 ~ 70.000 [nT], y : ±10.000 [nT], z : -70.000 ~ 0 ~ +70.000 [nT] ... (南北半球対応)
2. 感度	5段 切替 0 dB : ±1500 nT max. 10 mV/nT 10 dB : ± 500 33 20 dB : ± 150 100 30 dB : ± 50 333 40 dB : ± 15 1000
3. 周波数帯域	DC ~ 100 Hz (第7図参照)
4. S/N特性	< 10 [pT]
5. 線形 特性	< 10 ⁻²
6. 消費電力	4.8 W = 12 V × 0.4 A

表1. フラックスゲート磁力計仕様

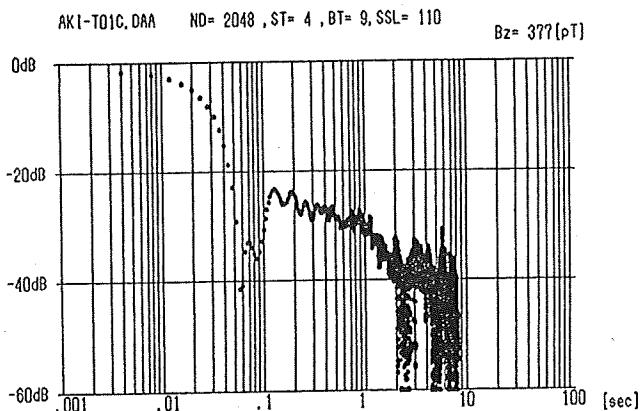


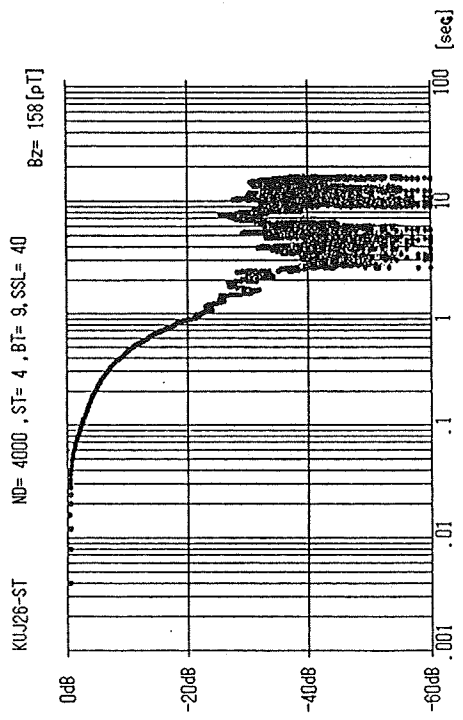
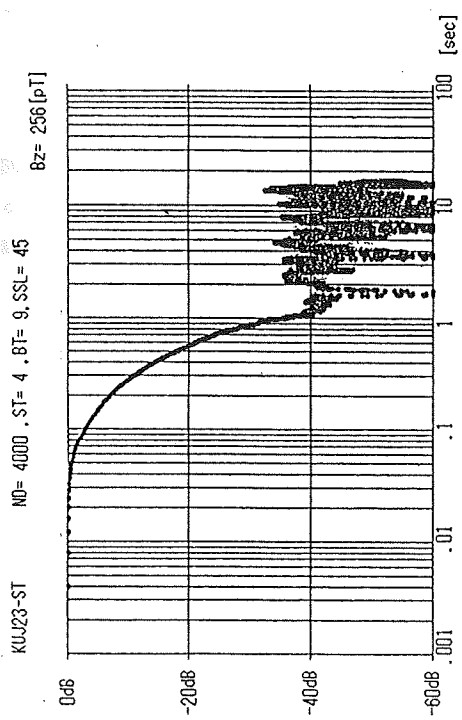
第7図 フラックスゲート磁力計の周波数特性



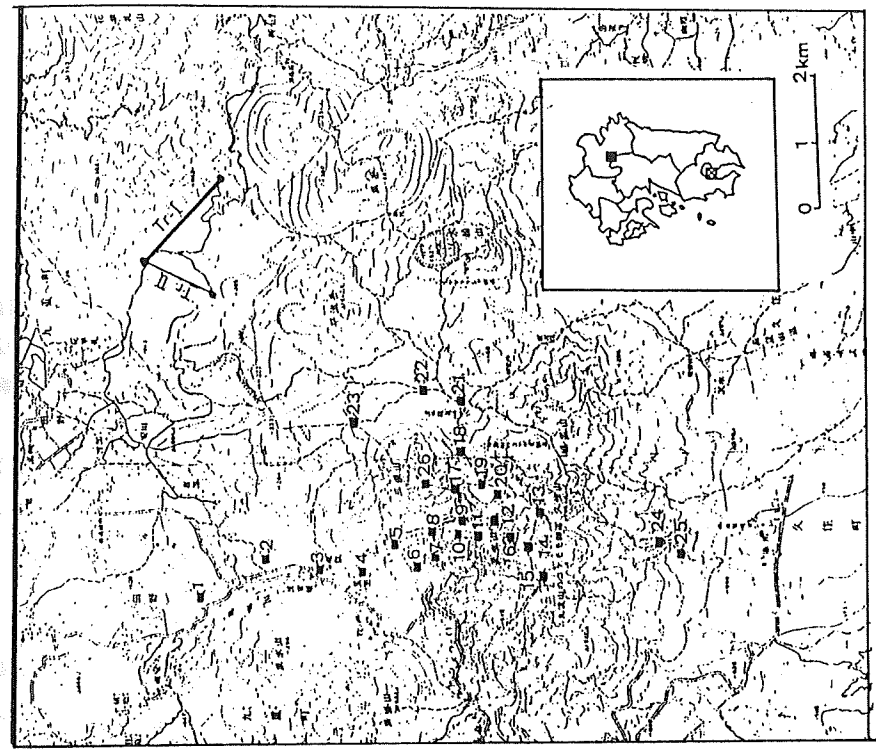
第8図 秋の宮におけるデータ例

送信電流 24A, 電極間隔 2.5Km における
 $r = 1.5\text{Km}$, $\phi = 45^\circ$ の地点でのデータ
 上図は縦横軸ともリニア・スケールで、
 下図は対数スケールで描いている。





第10図 久住におけるデータ例



第9図 久住におけるTDEM測点分布図