

東濃電磁アクロスシステムの開発および試験観測

中島崇裕, 國友孝洋, 長尾大道, 熊澤峰夫, 茂田直孝 (核燃料サイクル開発機構 東濃地科学センター)

Development of EM-ACROSS and its field test in Tono area

Takahiro Nakajima, Takahiro Kunitomo, Hiromichi Nagao, Mineo Kumazawa, and Naotaka Shigeta

(Tono Geoscience Center, Japan Nuclear Cycle Development Institute)

1. はじめに

我々は、地下構造の精密な探査と、その状態のモニタリングのためにアクロス (ACROSS: Accurately Controlled Routinely Operated Signal System) を開発している。この手法の特徴は、振幅および位相を精密に制御した信号を繰り返し送信し、同時にその信号を受信することにより、送受信点間の伝達関数を直接観測する。この観測された伝達関数を解析することにより、地下を反射や屈折してきた信号に分解し地下の構造を推定する。さらにこの手法では常時送受信を行うため、伝達関数の S/N の向上と地下状態のモニタリングが可能である (熊澤ら, 2000)。この地下を伝播する信号として、弾性波と電磁波が考えられるが (小川・熊澤, 1996)、本研究では電磁波による地下モニタリング手法開拓の目的で長期変動モニタリングのための実験を開始したので、観測体制の紹介と、プレリミナリーな観測結果について報告する。

2. 観測システム

観測サイトは、岐阜県土岐市の東濃鉦山を中心とした地域で (第 1 図)、送受信点の同期のためにそれぞれの地点で高精度の GPS 時計 (TrueTime XL-DC) を利用している。またこのサイトでは、平行して地震波を用いたアクロスの送受信観測を行っている (Kunitomo *et al.*, 1998)。

2.1 送信システム

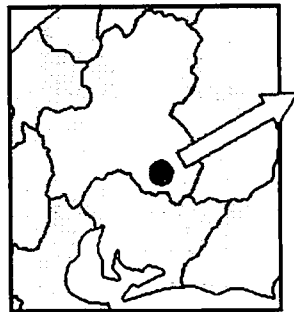
電磁波送信には、接地電極間に電流を流す方法を用いた。東濃鉦山敷地内に 100m 間隔に 3 点の接地電極を設置した (中島ら, 2000)。電極を 3 点としたのは、ダイポールの向きによる電磁波伝播の様子の違いを観測するためである。送信の基準となる信号は、GPS 同期したファンクション・ジェネレータより、任意波形として作成することができる。その信号を電流制御 (入力信号に比例した電流を出力) のパワーアンプで増幅し、電極間に電流を流す。送信信号には、中島ら (2000) で行っていた単純な切り替え方式ではなく、高調波成分が他の観測の障害にならないようにサイン波の重ね合わせで作成した波形を採用した。投入した電流と各電極間の電圧は、後の伝達関数を求める際に用いるのと、降雨などによる変動をとらえるためモニタする。それらは GPS に同期したタイミングで記録する。

アンプ性能: 最大印加電圧 200V, 最大電流 10A, 最大周波数 10 kHz

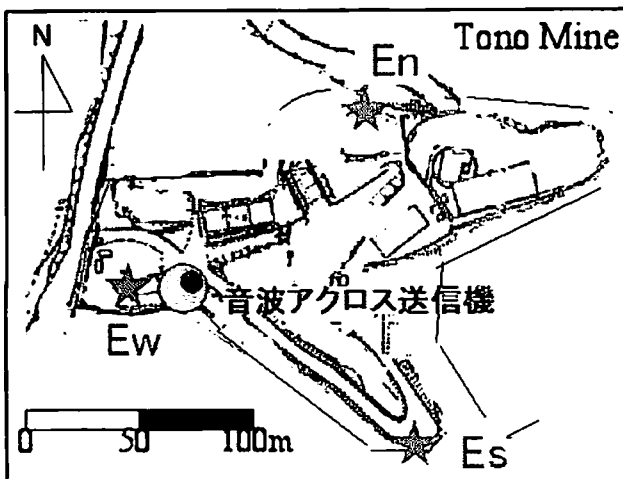
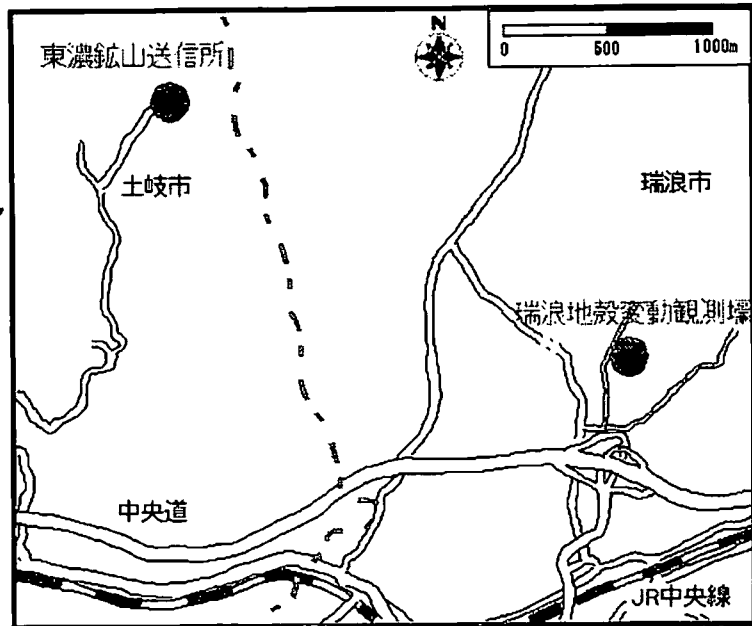
記録計: チャンネル数最大 16, サンプリング周波数 1kHz (最速 10kHz), A/D ビット数 16

2.2 受信システム

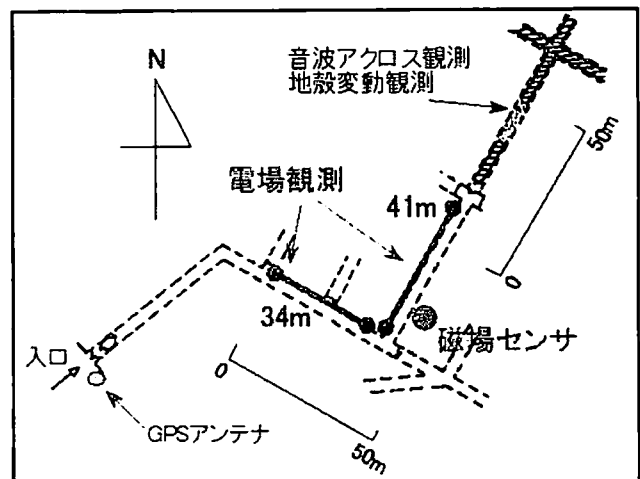
受信点は、送信点から 2.4km 離れた名古屋大学瑞浪地殻変動観測壕の中にあり、磁場 3 成分と電場 2 成分の観測を行っている。磁場観測には、Bartington 社製の MAG-03 Fluxgate3 成分センサを用いた。電場は、銅棒電極を地面に埋め込み、その電極間の電位差を測定することにより測定した。記録計は送信点モニタ用機器と同等のものを用いた。サンプリング周波数は 1kHz にした。



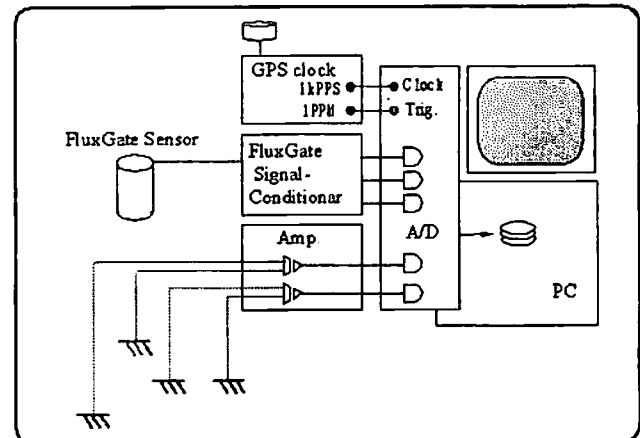
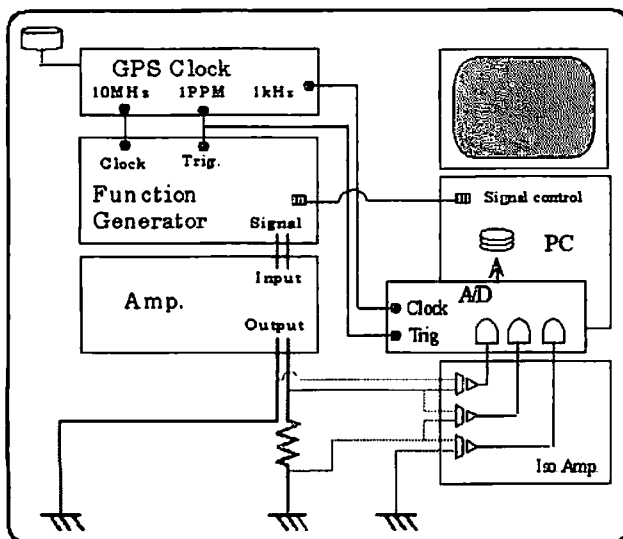
第1図. 実験サイト.



第2図. 送信点及び送信機器の概要.



第3図. 受信点および受信機器の概要.

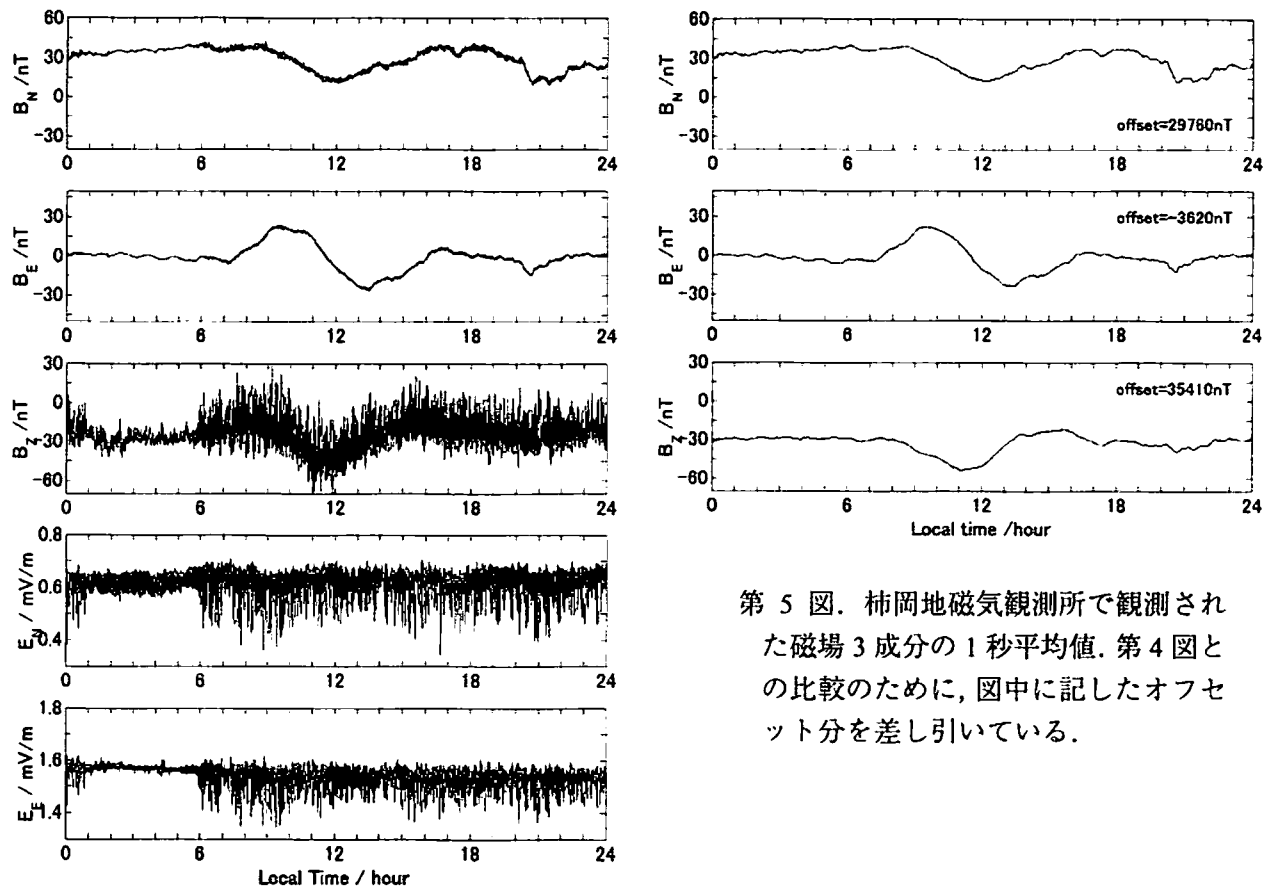


3. 観測結果

3.1 電磁場観測

瑞浪観測場で観測された典型的な電磁場の時間変動を第4図に示す。1日の大まかな変動を見るために1秒平均値を示している。日本標準時で午前1時から6時までの間に電磁場ノイズが小さいことが分かる。これは電車などの人工的なノイズがこの期間には少ないためである。磁場のZ成分や電場成分では、特に午前6時から翌午前1時までの間に人工的なノイズの影響が大きい。しかし、長尾ら(2002)が示すように、このノイズが大きく有効ではないとされている時間帯の観測も、SNをかせぐのに用いることができる。

また、この磁場観測の妥当性を検証するために、柿岡地磁気観測所のデータと比較した(第5図)。二つの観測点では地理的距離やノイズ環境が異なるので、変動が完全に一致することはないが、柿岡で見られる変動の特徴は瑞浪の観測においても現れている。例えばSq変動の幅や、人工ノイズの少ない成分(NとE)における細かい変動の合致など、規模が大きいと思われる変動は瑞浪の観測でも捉えられている。



第5図. 柿岡地磁気観測所で観測された磁場3成分の1秒平均値. 第4図との比較のために、図中に記したオフセット分を差し引いている。

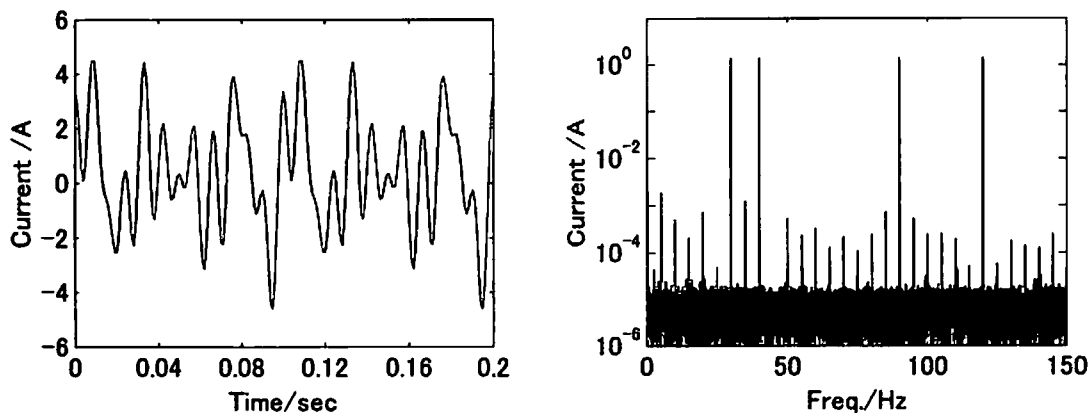
第4図. 瑞浪地殻変動観測場内で観測された電磁場(磁場3成分, 電場2成分). 図は2002年12月14日(JST)の一日間の記録の1秒平均値である. 磁場のDC成分はオフセットとして取り除き, 相対変化のみを記録している。

3.2 同時送受信試験

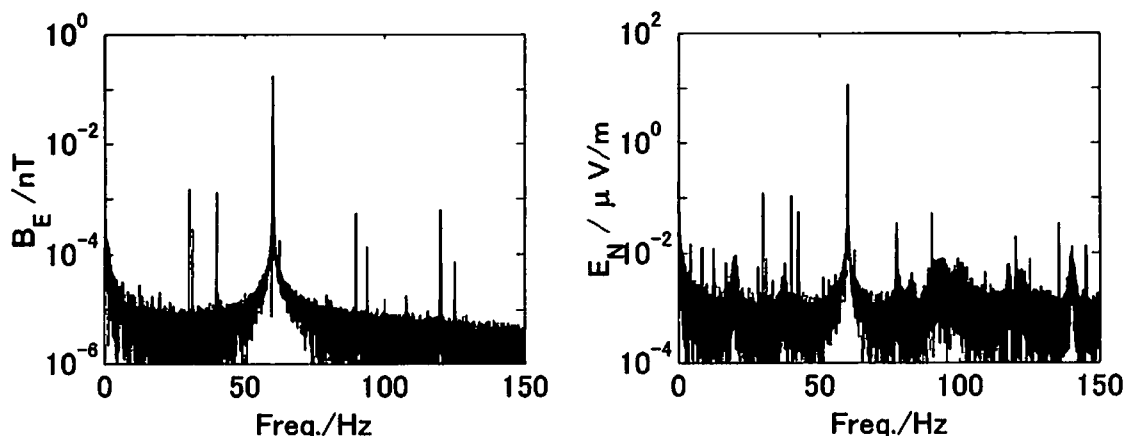
この送受信システムを用いて、大まかな信号伝播の様子を見るための同時送受信試験を行った。本報告で示すのは、2003年1月20日から1月27日の期間の送受信結果である。送信電極は第2図のEnとEw電極を用いた。

送信信号としては、横山ら(2000a)が示したように、位相をランダムにした複数の周波数の正弦波を重ね合わせ、合成信号の振幅をなるべく小さくした。本研究では手始めとして、30Hz, 40Hz, 90Hz, 120Hzの正弦波を足し合わせた信号を用いた。各周波数成分の振幅は全て等しくし、正時における位相はそれぞれ π , $\pi/2$, $\pi/2$, $3\pi/2$ にした。この送信信号の時系列とスペクトルを第6図に示す。送信システムの機器特性のため、送信信号は0.2秒周期(5Hz)の信号を基本信号として出力しており、それに起因する5Hzおきのピークがスペクトルにおいて見られる。しかし、これらの信号の大きさは作成した信号の大きさと比較して3桁以上小さい。また送信信号周辺のスペクトルでは5桁以上のS/Nがあり、非常によい精度で信号発信が実現できていることが分かる。

この信号を瑞浪観測壕で受信した結果を第7図に示す。観測期間中の全ての磁場・電場観測結果を、100秒の時間区間に切り取りスタックした。この図から分かるように、4つの周波数の送信信号が確認できていることがわかる。そのS/Nは168時間のスタックにより数十程度になった。



第6図. 連続送受信実験に用いた送信信号。左側が時系列、右側がそのスペクトルを示す。



第7図. 瑞浪観測壕内で観測された磁場東向き成分(B_E)と電場北向き成分(E_N). 168時間のスタッキング後の結果を示している。60Hzのピークは商用電源のノイズであり、位相揺らぎのため幅と裾野が見られる

4. 考察

4.1 信号伝播速度

前節で示した同時送受信実験結果から，送受信点間の伝達関数 $H(\omega)$ を求める．

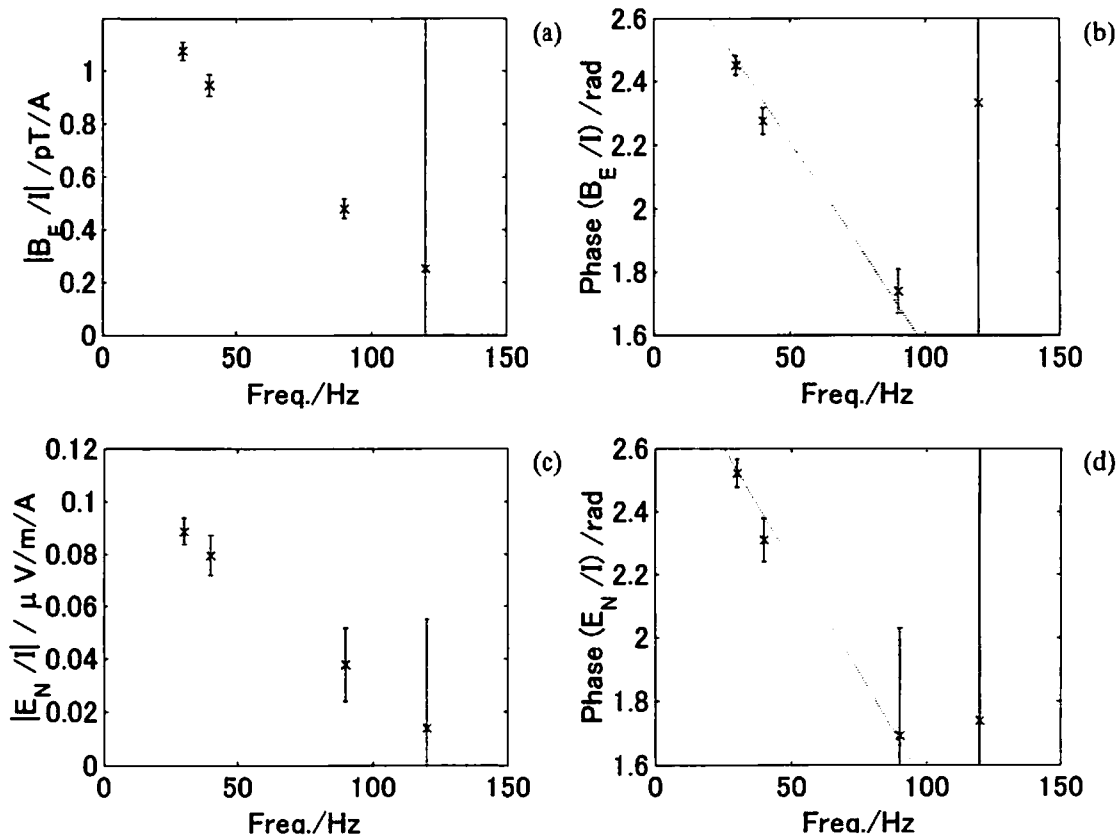
$$H(\omega) = R(\omega)/S(\omega).$$

送信信号 $S(\omega)$ としては電流を用い，受信信号 $R(\omega)$ は磁場・電場の 5 成分のうち，一例として，磁場東向き成分 (B_E) と電場北向き成分 (E_N) の場合を示す．伝達関数の単位は，磁場の場合 [T/A]，電場の場合 [(V/m)/A] になる．式中の ω には送信した 4 つの周波数を用いる．全観測期間中のデータを用いて求めた伝達関数の振幅と位相を第 8 図に示す．ノイズレベルの推定は受信信号周辺のスペクトルの二乗平均平方根で与えている．120Hz の信号成分の値は他の周波数成分の傾向と異なっているように見えるが，第 7 図の観測結果からも分かるように，60Hz の高調波の影響があるためと思われる．

この得られた伝達関数がどの領域であるかを確認しておく．ダイポールからの電磁放射において

$$kr = r\omega\sqrt{\mu(\epsilon + \sigma/i\omega)} = 1,$$

の式で近地場と遠地場の境界が求まる (例えば Jackson, 1998)．東濃地域の典型的な物性である，電気伝導度 0.01S/m，比誘電率 4，透磁率は真空の場合と同じとして，探査周波数が 30Hz の場合にはこの境界は 650m となり，今回得た伝達関数は遠地場であることが予想される．磁場・電場のどちらの受信信号においても伝達関数の位相特性の傾きがほぼ等しいことからこの予想は正しいと思われる．

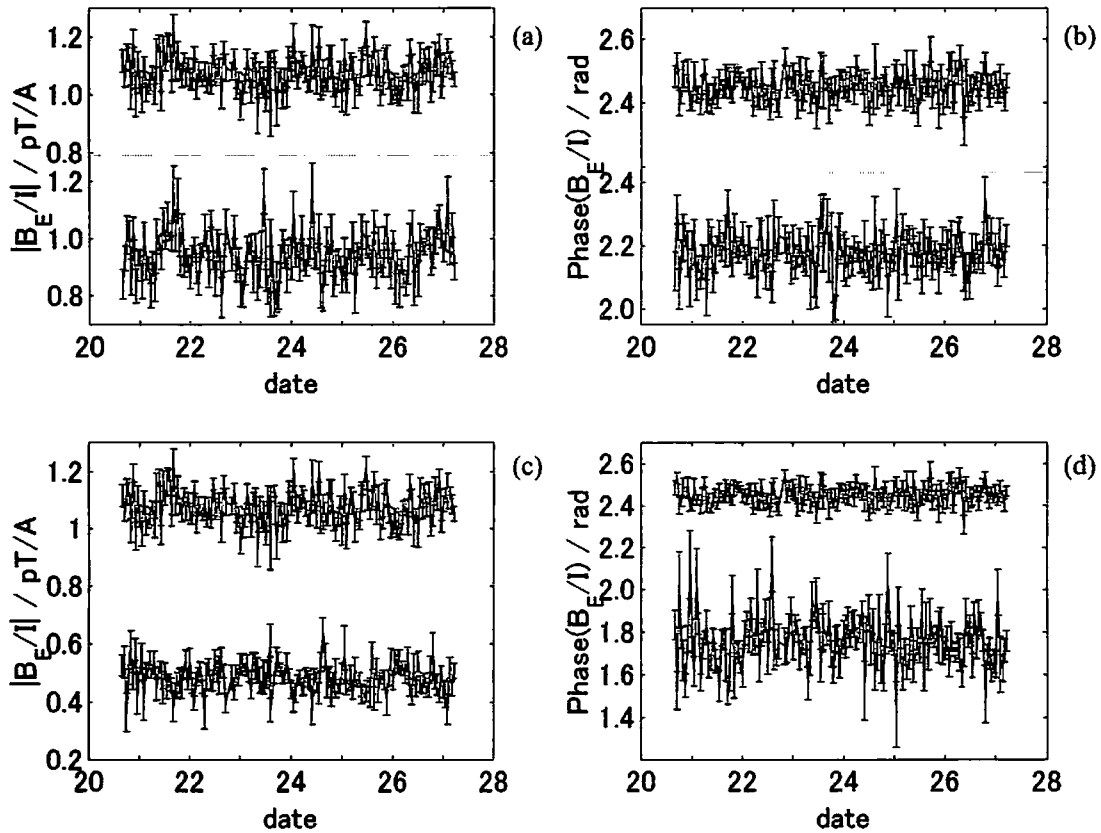


第 8 図．観測で得られた伝達関数の周波数依存性．(a),(b)が磁場の東向き成分から得られた結果で，(c),(d)が電場の北向き成分から得られた結果．また，それぞれ左側が振幅，右側が位相の周波数依存性を示している．

この伝達関数を解析することによって地下の情報が得られる (詳細は Yokoyama *et al.*, 2002). ここでは走時解析を簡便な方法で行う. 伝達関数の位相の 30Hz から 90Hz の間の周波数依存性より, 磁場・電場の場合ともにほぼ $1\text{rad}/80\text{Hz}$ という数値が読み取れる. これより, この周波数範囲の波群の伝播時間が約 2msec となり, 送受信点間の距離が 2.4km という事より, 波の伝播速度が $1.2\text{m}/\mu\text{sec}$ と求まった. これは一様空間の電磁波伝播速度と比較すると (例えば佐藤, 1998), 一般的な地下の比抵抗での数値: 約 10mS/m と同等であることがわかる. ただし, 40Hz から 90Hz までの間に緩やかに傾きが異なっている可能性もあるので, より多くの周波数で探査する必要がある.

4.2 時間変動について

伝達関数の時間変動を見るために, 1時間スタックごとの伝達関数を示した. 第9図に磁場東向き成分の時間変動を示す. 図のように誤差範囲が示されているので, 時間変動の評価とその信頼性が確認できる. 30Hz と 40Hz の伝達関数については振幅・位相ともに変化が似ている. 一方, 90Hz の信号は, 例えば 21 日の午後や 26 日の未明など, 低周波数での信号とは異なった変動をしており, むしろ逆センスの変化をしているように見える. これは地下の電気伝導度の増加など, 伝達関数の全体的な特性が変化した場合の現象のように予想できる. ただし, 今回の結果ではまだ, この違いが有意であるか判断ができない. しかし, 伝播信号の周波数ごとの変動把握や, より大局的な周波数依存性を調べることででき得ることが示された.



第9図. 伝達関数の時間変動 (磁場東向き成分). (a),(b)は 30Hz と 40Hz の信号の比較. (c),(d)は 30Hz と 90Hz の信号の比較. 左側が伝達関数の振幅, 右側が位相である. それぞれ図の上側の線が 30Hz の信号の変動を表す.

5. まとめ

電磁アクロスの送受信システムを東濃地域に設置した。そのシステムの連続送受信実験により、高い精度の伝達関数を求めることが例証された。長尾ら(2002)が示した重みつきスタッキングを用いることにより、より高いS/Nの伝達関数を求めることが可能であろう。また、得られた伝達関数から、走時解析、および時間変動をみることも可能であることが示された。

今後この観測システムを用いてより多くの観測をする予定である。地下構造探査の目的には、より多くの周波数で観測する必要がある。観測によって得られた伝達関数から、地下を伝播する信号のレイに分割する解析手法が構築されつつあり(横山ら, 2000b; Hasada *et al.*, 2001), 詳しい地下構造推定が行えると期待される。送信電極の組み合わせや受信成分による違いなども考慮した解析を行う予定である。また時間変動についても、事例を重ねていくことにより、その有意性や原因追求が必要である。

謝辞：本研究を行うにあたり、名古屋大学地震火山観測センターおよび東濃地震科学研究所のご協力をいただき、瑞浪地殻変動観測壕内での電磁場観測を行うことができた。関係された方々にお礼を申し上げます。

文献

- Hasada, Y., H. Kumagai, and M. Kumazawa, Autoregressive modeling of transfer functions in frequency domain to determine complex travel times, *Earth Planets Space*, **53**, 3-11, 2001.
- Jackson, J.D., *Classical Electrodynamics (3rd edition)*, pp808, 1998.
- 熊澤峰夫, 國友孝洋, 横山由紀子, 中島崇裕, 鶴我佳代子, アクロス：理論と技術開発, 及び将来展望. 核燃料サイクル開発機構技報, **9**, 115-129, 2000.
- Kunitomo, T., K. Yamaoka, S. Inoue, N. Ikeda, S. Watanabe, M. Kumazawa, Micro-hertz control technology of frequency-modulated rotary type transmitter to radiate a set of plural sinusoids with a 20 tonf in amplitude, *Abstracts of International Workshop on Frontiers in monitoring science and technology for earthquake environments*, AP1-2, 1998.
- 長尾大道, 中島崇裕, 熊澤峰夫, 國友孝洋, 観測時刻によってノイズレベルが異なる場合の最適スタッキング方法 - 電磁アクロスのテスト観測データを例にして -, CA 研究会論文集, 2002.
- 中島崇裕, 國友孝洋, 熊澤峰夫, 横山由紀子, 電磁アクロスの開発と送信実験, 地震研究所彙報, **75**, 413-428, 2000.
- 小川克郎, 熊澤峰夫, 音波と電磁波のアクロスによる地殻内の水と応力と物理状態の常時リモートセンシングへむけて, 日本地震学会講演予稿集 1996 年度秋季大会, **45**, 1996.
- 佐藤源之, 地中レーダ, 物理探査ハンドブック手法編 第7章, p401-421, 1998.
- 横山由紀子, 熊澤峰夫, 國友孝洋, 中島崇裕, 精密に制御された電磁波を用いた3次元精密構造探査のためのデジタル信号波形の設計, 地震研究所彙報, **75**, 375-392, 2000a.
- 横山由紀子, 熊澤峰夫, 中島崇裕, 射線モデルと自己回帰型のモデルを組み合わせた電磁場伝達関数の分解方法 - 水平成層構造の場合 -, 地震研究所彙報, **75**, 393-411, 2000b.
- Yokoyama, Y., M. Kumazawa, and T. Nakajima, Transfer function measured by electromagnetic sounding with an accurately controlled signal, *Earth Planets Space*, **54**, 459-472, 2002.