

電磁アクロスの開発と送信実験

中島崇裕・國友孝洋・熊澤峰夫・横山由紀子

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

Takahiro NAKAJIMA, Takahiro KUNITOMO, Mineo KUMAZAWA, and Yukiko YOKOYAMA

Tono Geoscience Center, Japan Nuclear Cycle Development Institute

Abstract

A new electromagnetic sounding method called EM-ACROSS is proposed by Ogawa and Kumazawa [1996]. The characteristic feature of this approach is the use of accurately controlled electromagnetic waves to determine the accurate transfer function between source signal and observed signal. Upon developing the hardware system of EM-ACROSS, the first field test was carried out in the Tono area. The transmitting test and trial observations with a rectangular wave signal from current dipole showed that the system worked well up to 100 Hz. Data stacking represented the reduction of the observation noise as accurately as theoretically expected. With stacking for eight hours, signals were detected up to 30 Hz at a distance of 3 km. Whereas the results obtained so far are preliminary, the ACROSS approach is thought to have potential for underground exploration and monitoring.

Key words: electromagnetic sounding, synchronization, ACROSS, monitoring

1. はじめに

アクロス (ACROSS, Accurately Controlled Routinely Operated Signal System) は、精密制御された弾性波や電磁波を用いて地下の構造とその時間変動を調べるための物理探査法である。この方法では、周期的な弾性波や電磁波を地下に向けて定常的に放射する。そしてその信号を観測することにより波の速度と減衰についての情報をとりだし、それらから地下物性を求める [Kumazawa, 1998]。このように精密に制御された送信信号を用いて定常的な観測を行うことにより次の3つの利点を得る [横山他, 2000]。1) 伝達関数を測定値として取り扱える。2) 高い S/N 比のデータを取得できる。3) 構造・物性の時間変化の観測ができる。我々はこれらの特徴を生かした地下監視システムとしての確立を目指している。

アクロスのうち、弾性波を用いる地震波アクロスについては先行して研究が進められており、安定した人工震源が既に開発されている [Kunitomo *et al.*, 1998]。また 20 tonne-force 級のアクロス震源を用いると 100 km 以遠の観測点まで信号が確認できるなどの実績が上がっている [國友, 2000]。

一方、電磁波を用いて地下の電氣的構造を求める電磁アクロスは、小川・熊澤 [1996]

によりその概念が提案された。その探査手法の原理と TDEM 法など既存の電磁探査法との関係は、横山他 [2000] にまとめられている。しかし電磁アクロスのハードウェアシステムの開発と試験はされておらず、このため実用上の問題点の整理と解決がなされていなかった。そこで我々はこの問題点を解決するとともに、地震波アクロス用に開発された技術の一部を応用して電磁アクロスの開発を行った。そしてアクロスが目指す精密制御した電磁波の送信と精密同期の受信を可能にした。また精密制御の効果が理論どおりに現れることを確かめた。

本論文の 2 節では開発した電磁アクロスシステムについて説明する。さらに 3 節では東濃地域で行った送信実験の結果を示す。最後に 4 節では送信実験によって得られた送信点からの距離依存性についての考察と、試験装置として開発した機器による探査範囲の限界について考察する。

2. 電磁アクロスシステム

電磁アクロスでは、「電磁場の振動が伝播する現象」[長倉他, 1998] である電磁波全般を扱うことを考えた電磁探査法である。アクロスシステムには次の 4 つの条件が必要である。1) 送受信装置がお互いに同期していること。2) 送信信号が精密に制御されていること。3) 受信点信号を高い S/N 比で検出すること。4) その信号情報を適切に記録すること。本節ではこれらの条件を満たすべく開発された手法や技術について説明する。

全体の電磁アクロスシステムは、電磁波送信のための制御装置、地中に電磁波を放射する機器、受信信号センサー、そして受信信号の記録装置からなる。以下では地震波アクロスで先行して開発した技術を利用できる 100 Hz 以下の周波数での電磁アクロスシステムの個々の装置について説明する。

2.1 送信制御装置

送受信点の同期のために GPS (Global Positioning System) 時計を用いる。GPS 時計を用いると地球上のどこでも UTC (Universal Time Coordinated) に対して常時 1μ 秒以内の精度で同期をとることができる。Yamaoka *et al.*[1998] は、このことを利用し地震波アクロスのために GPS 時計を利用した精密同期のための技術を開発した。電磁アクロスでも同じように UTC に同期した 10 MPPS (Mega Pulse Per Second) を出力させることのできる GPS 時計を用いる。この 10 MPPS の信号をファンクションジェネレータのタイムベースとして使い、より正確でしかも安定した制御信号をデジタル信号として発生させる装置を確立した。本研究のテストでは簡単のために、一定周波数の矩形波信号を用いた。そしてこの時刻が正確な矩形波を、信号に応じたスイッチング装置に入力した。この装置は安定化直流電圧を交流に変換するものである [Nakajima *et al.*, 1998]。安定化直流電源にはバッテリーチャージャーにつないだ 12 V \times 4 個の直列のバッテリーを用いており、最大出力は電圧 48 V、電流 5 A である。このスイッチング装置によりファンクションジェネレータからの矩形波信号を増幅し、次の電磁波放射機器へと供給する。

2.2 電磁波放射機器: 送信電極

地中電磁波の送信には、接地電極間に電流を流す電流ダイポールを用いた。送信電極は東濃鉾山敷地内に間隔をできるだけ広く取るように 3 点設置した (図 1)。その 3 点は辺長およそ 100 m の 3 角形の頂点に位置する。西側の W 電極は試錘孔のケーシング (鉄製、孔

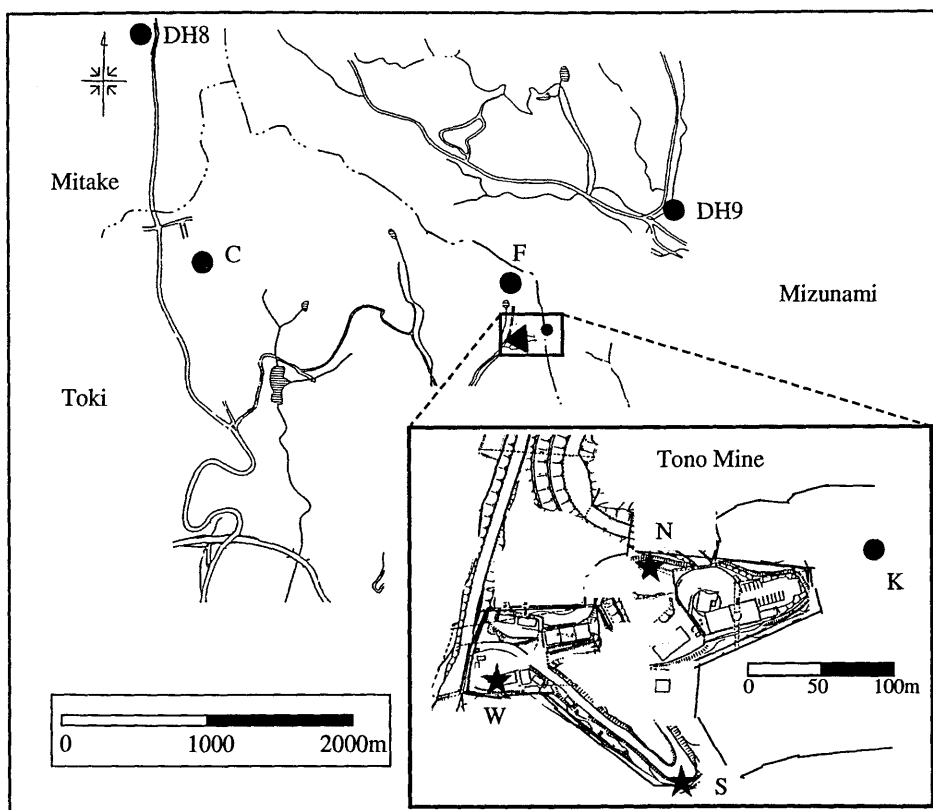


Fig. 1. Location of grounded electrodes for current dipoles and receiving points. The stars in the figures to the lower right are the positions of transmitting electrodes in Tono Mine, Gifu Prefecture. The solid circles are the observation sites.

径 100 mm, 地表から地下 6 m の間に位置する) を用いた。北と南の N, S 電極には直径 20 mm, 長さ 1.2 m のステンレス棒を接地抵抗低減剤と混ぜながら 1.5 m 間隔に 8 本ずつ打ち込み, できるだけ接地抵抗をさげるようにした。

設置した送信電極の接地インピーダンスの周波数特性を図 2 に示す。接地インピーダンス測定は, 標準的な方法 [例えば川瀬, 1993] に従って, 目標電極と他の一点との間の電流, および残りの一点との間の電圧を測定して求めた。周波数特性の測定には NF 回路設計ブロック製の Frequency Response Analyzer (NF 5090) を用いた。ステンレス棒を用いた電極 (N と S 電極) の接地インピーダンスは測定範囲の 0.1 Hz ~ 2 kHz の周波数範囲内で 19 Ω から 28 Ω であった。また 1 Hz よりも低い周波数ではインピーダンスが増加し位相が進んでいる。これは印可電圧に対し応答電圧が遅れて現れる強制分極の効果が低周波数ほど大きく現れたためと解釈でき, Van Voorhis *et al.* [1973] が報告したのと同様な現象が電極近傍で発生したことがわかる。ケーシングを利用した電極 (W) では 0.1 Hz ~ 2 kHz の測定周波数内でインピーダンスが 5 Ω 程度と一定していた。またすべての測定結果において, 高い周波数で位相が遅れている。これはインダクタンスの効果が現れているこ

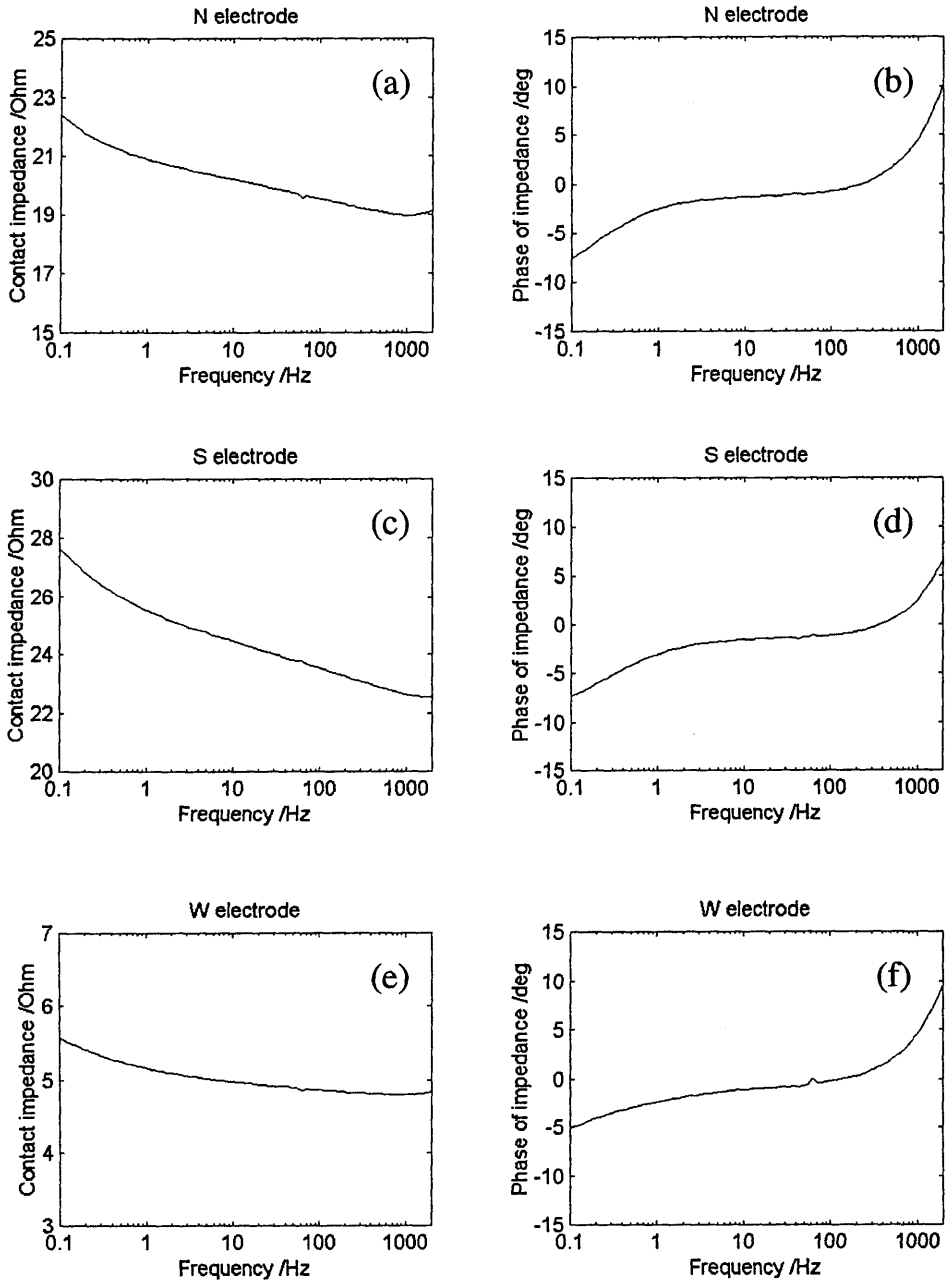


Fig. 2. Contact impedance of the transmitting dipoles. The results for N, S, and W electrodes are shown in (a) and (b), (c) and (d), and (e) and (f), respectively. The figures to the left (a), (c), (e) show the apparent impedance, and those to the right (b), (d), (f) show the phase of the contact impedance.

とを示しており、電極を結んでいるケーブルなどが原因であると考えられる。

実際に電磁波送信を行うための電流ダイポールを作った場合には、これらの接地インピーダンスの和と、途中の媒質によるインピーダンスを合わせたものが送信の負荷となる。この負荷の周波数依存性のために送信信号が歪むことがある。また時間と共に変化する可能性がある。そこで送信信号をモニターするために送信ダイポールの電極間電圧と電流を記録する。

2.3 受信信号センサー: 受信電極

電磁波受信方法としては、電場計測と磁場計測の両方が考えられるが、今回の実験においては観測に適した磁場センサーが利用できなかったため、電場観測から始めることとした。受信センサーには接地電極を用い、電極間の電位差で受信信号を測定した。その接地電極として、銅・硫酸銅電極か銅棒電極を用いる。実際の観測ではこの受信電極のセンサーとしての周波数特性やノイズ特性も問題となるはずであるが、現時点ではこの測定は未着手である。受信電極の特性は観測点ごとに異なると思われるので、次の段階では観測点の周波数特性評価も行いたいと考えている。

2.4 受信信号の記録装置

記録方式として、熊澤他 [1995] は、総メモリを増やさずに、信号の離散スペクトル成分の振幅・位相情報と観測ノイズによる誤差評価情報を記録する時間区間蓄積型記録計 (TS-Stacker) を提案した。この記録計では、ある時間区間 T のデータを時間軸上でスタッキングしていき、スタッキング結果のみを記録していく。このスタッキングにより、指定した時間区間の中に整数 n 個の波が入る。周波数 n/T の信号は加算され、その合計振幅はスタッキング時間に比例して増加する。一方ランダムノイズはスタッキング時間の平方根に比例して増加する。その結果、長さ T のデータ量で、 n/T の周波数成分だけを T の平方根に比例した S/N 比で記録する。

周波数が低い領域の電磁アクロスの受信に、地震波アクロスと共通の記録計を用いることができる。山岡他 [1997] は、白山工業の DATAMARK LS8000SH を時間区間蓄積型記録計として動作するファームウェアを開発した。本研究では、この臨時観測のために開発された TS-Stacker を用いて受信信号を記録した。この記録計は、スタック時間区間の記録開始毎にサンプリングクロックの時刻校正がなされ、UTC に対して同期がとられている。本実験では、時間区間を 200 秒としたため、200 秒ごとに時刻校正が行われており、この短い時間区間では記録開始時からの時刻のずれは問題にならないと考えられる。また、3次バタワース型のローパスフィルタが記録計に内蔵されており、カットオフ周波数を設定できるようになっている。

3. 送受信実験

前節で説明した送受信システムを用いた実験を行った。送信システムは岐阜県土岐市に位置する東濃鉱山敷地内に設置した (図1)。送信点では、0.5 Hz 周期の矩形波電圧をダイポール型に配置した送信電極間に印可することで電磁波を発生させた。図1に示した3点の電極のうち N と W 電極を用いた場合の結果を以下に示す。

受信地点は、図1に示した5点である。これらの場所は、核燃料サイクル開発機構・東濃地科学センターの試錘孔用地 (DH8, DH9, F) と管理区域 (K) および東濃地科学セン

Table 1. Observation sites.

Name	distance from the source(m)	type of electrode	distance between electrodes(m)*	low pass filter	high pass filter	stacking period of time (s)
K	200	copper rod	13	none	none	200 (200x1)
F	420	copper rod	15	none	none	200 (200x1)
DH9	1400	copper rod	23 (N-S) 17 (E-W)	30Hz	none	2000 (200x100)
C	2200	copper sulfate =copper	40	30Hz	30mHz	29000 (200x145)
DH8	3200	copper rod	23	30Hz	none	20800 (200x104)

*: the distances of North-South and West-East electrodes are the same except for DH9 site.

ター内 (C) である。各観測点では東西・南北方向の 2 成分の電位差を測定した。受信信号は 200 Hz でサンプリングし、200 秒ごとにデータのスタッキングを行った。観測点 DH9, C, DH8 では周波数 100 Hz 以上のノイズが大きかったので、記録計内蔵のローパスフィルタ (30 Hz) を用いた。また自然電位が大きかった地点 C では、記録計の入力側にコンデンサを挿入し DC 成分を除去した。このコンデンサーによる遮断周波数は 30 mHz である。これらのフィルタの周波数特性はあらかじめ測定しておき、データ収録後に補正を行う。表 1 にフィルタ、電極種、電極間隔の状況をまとめた。

3.1 送信信号

まず、送信信号が設定した通りに出力されているかを調べた。図 3 に示したよう送信モニターに記録した電流と電圧はちょうど正秒で符号を変えており、周波数が 0.5 Hz であることが確認できる。電圧の波形がほぼ正確な矩形波をしているのに対し、電流の波形はやや歪んでおり、右肩下がりになっている。これは電極付近の分極の効果で、図 2 に示したように接地インピーダンスが低周波数側で大きくなっていることに依る。これらの送信信号のスペクトルを図 3 (c), (d) に示す。電圧は矩形波で、電流も矩形波に近い波形であるので、基本周波数 0.5 Hz の他に奇数次高調波 1.5 Hz, 2.5 Hz, 3.5 Hz, … が現れる。基本波と高調波以外の周波数成分はノイズによるものであるが、送信電圧・電流共にノイズの平均的レベルは基本周波数での信号レベルよりも 5 桁程度低い。このことから送信信号にはほとんどノイズが含まれていないことがわかる。さらに、基本周波数周辺のスペクトルを拡大してみると (図 3 (e), (f)), 0.5 Hz 成分が卓越し、3 桁の間その包絡線は広がらない。このことにより送信信号のエネルギーが周辺の周波数成分へほとんど漏れていないことがわかる。これで当面必要な精密制御送信は実現できていることが確認できた。

3.2 受信信号

受信点のうち、送信点から 200 m 離れた観測点 K と 420 m 離れた観測点 F の受信電場成分についてまず検討する。図 4 (a), (b) および図 5 (a), (b) に示した電場の南北成分と東西成分の時系列では 0.5 Hz の矩形波信号が明瞭にわかる。矩形波の中が塗りつぶされているのはノイズが重なっているためであり、このほとんどは 60 Hz の商用電源によるものである。この受信信号のスペクトルを表わすのに、ノイズレベルがフーリエ変換をほど

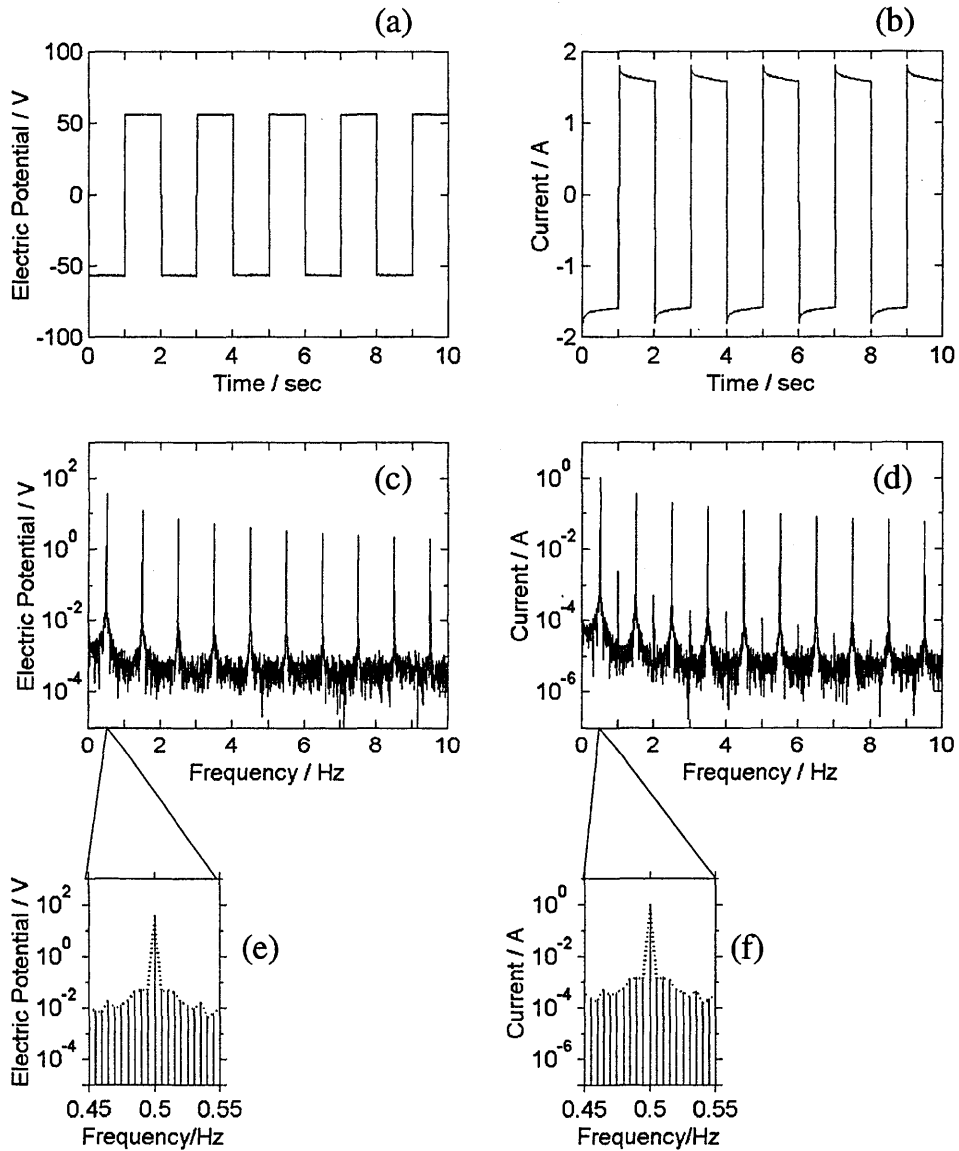


Fig. 3. Applied potential and driving current between N and W electrodes. The temporal variation (a), (b) and their spectrum (c), (d) are shown. (e) and (f) are expanded views of the spectrum around 0.5 Hz.

こす時系列データの時間幅に依存しないように、振幅スペクトル密度を用いた。図4 (e), (f) および図5 (e), (f) は 200 秒の生データから求めた振幅スペクトル密度である。これらの図では 0.5 Hz の成分とその高調波成分もはっきりと現れている。これらの成分付近での包絡線は鋭く、時計のずれによるエネルギーのもれがないことがわかる。つまり、受信装置の同期精度が良いことが確認できる。また、観測点 F の方が観測点 K に比べて送信点

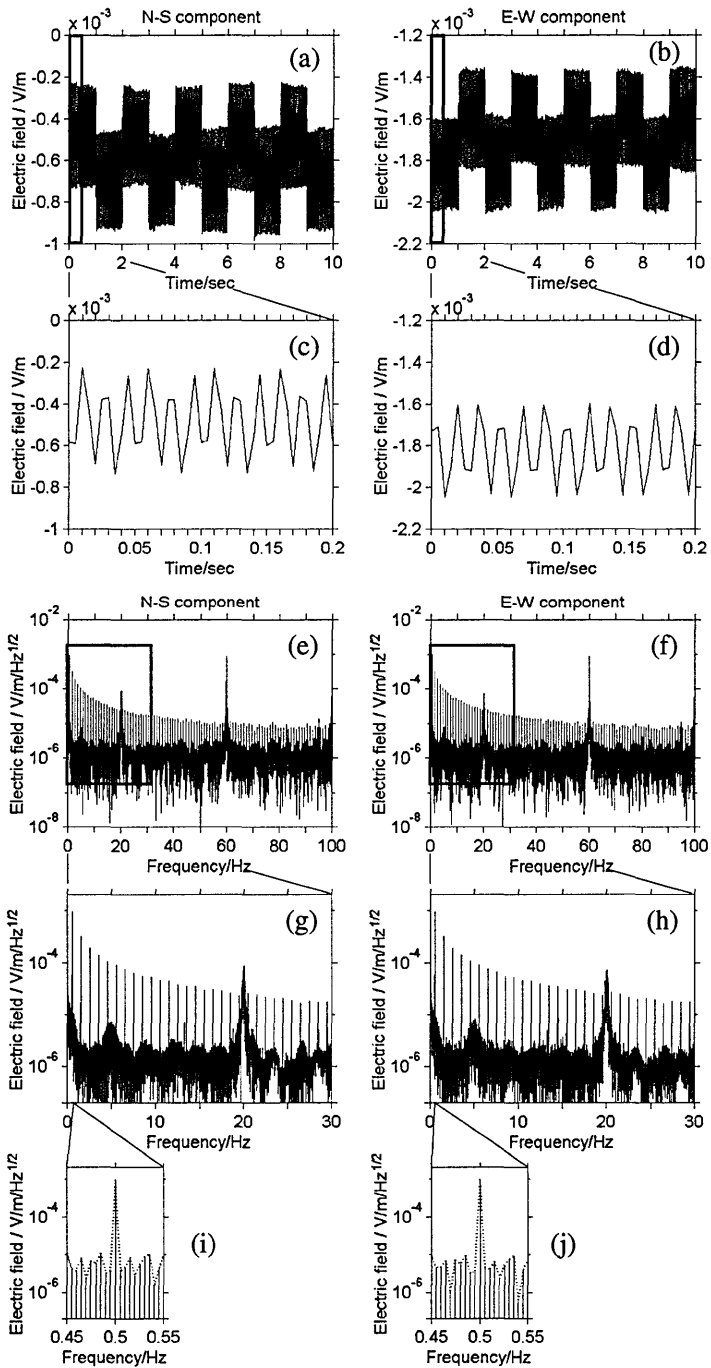


Fig. 4. Received electric field at site K (see Fig. 1). The figures to the left show the North-South component, and those to the right show the East-West component. The upper four figures (a), (b), (c), (d) are temporal variation, and the lower six figures show their spectra calculated from 200 seconds of data.

電磁アクロスの開発と送信実験

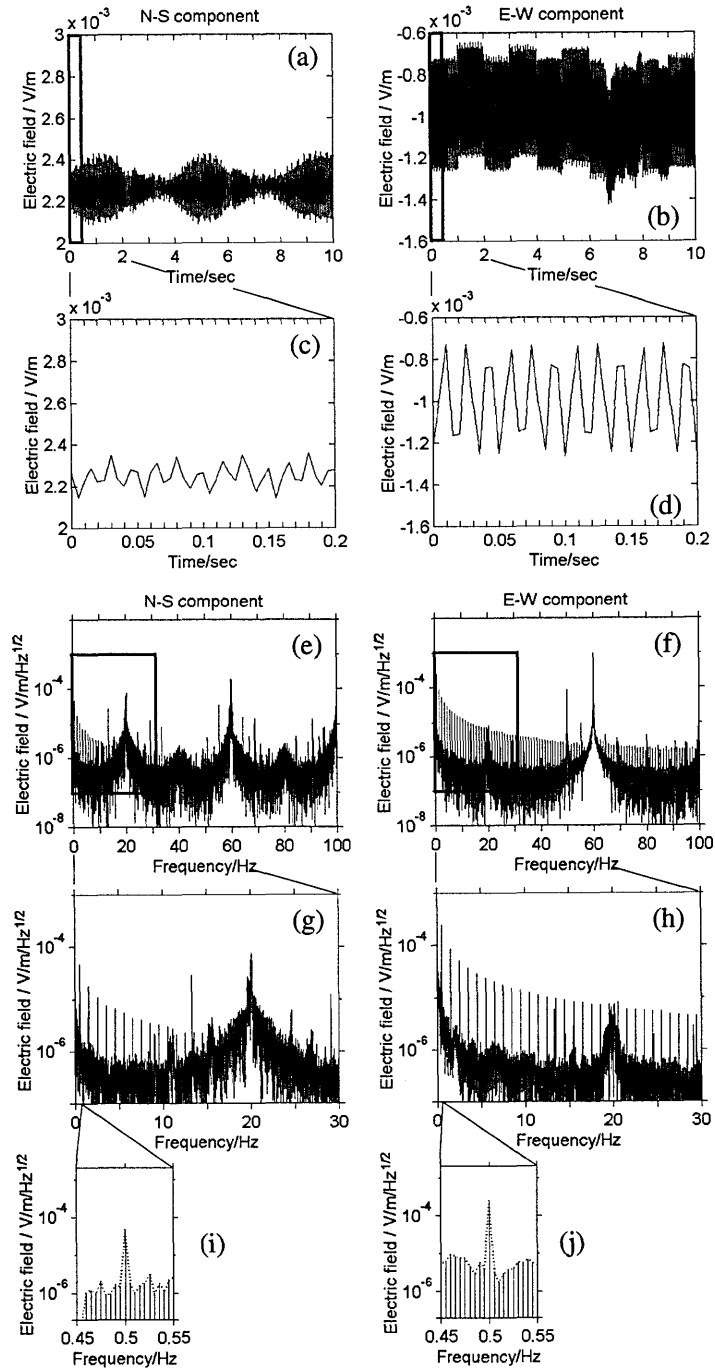


Fig. 5. Received electric field at site F (see Fig. 1). The arrangement of the figures is the same as in Fig. 4.

からの距離が遠いので、信号の振幅が減少していることもわかる。図 5 (g) では、図 4 (g) と比べても 1 桁以上信号が小さいことがわかり、20 Hz 以上ではノイズと重なり信号が判別できなくなっている。

次に、送信点から 1 km 以上離れた観測点における受信信号について検討する。図 6, 7, 8 はそれぞれ、観測点 DH9, C, DH8 の電場を表わしている。これらの図の (a), (b) は南北成分と東西成分の電場の時系列をあらわしているが、0.5 Hz の信号は確認できない。また図の (c), (d) に示されている 200 秒分のデータの振幅スペクトル密度でもほとんど信号が判別できない。これらの点でのノイズレベルは観測点 K, F と比べてほとんど変わらないので、送信点からの距離が大きいと信号振幅が減少したと考えられる。そこで、微少な信号を抽出するためにスタッキングを行った。表 1 にまとめられたように各観測点で 200 秒間のデータを 100 回以上スタックした。観測点間の比較のために、データスタック後にスタッキング回数で除した結果のスペクトルを図 6, 7, 8 の (e), (f) に示した。スタック後のスペクトルには 200 秒間のデータのスペクトルには認められなかった信号が認められる。これはスタック後の平均操作によりノイズのパワーを減じることができたためである。

理論上は、ランダムノイズの振幅スペクトル密度はスタッキング時間の平方根に反比例する。このことを確かめるために、スタッキング時間とスペクトルの振幅との関係を観測点 C のデータで調べた。結果を図 9 に示す。信号の振幅については基本周波数 0.5 Hz と奇数次高調波成分 1.5 Hz, 2.5 Hz を示してある。またノイズについては、これらの周波数成分周辺 10 成分の平均を示した。信号成分の振幅はスタッキング回数が少ない間はある程度変動するが、スタック回数が多くなるにつれ一定値に落ち着く。一方、ノイズの振幅は、変動をしながら時間とともに減少し、この勾配は対数グラフ上で $-1/2$ から $-1/3$ になる。このようにスタッキングの効果は、信号・ノイズの両方に関してほぼ理論どおりに現れることが確認できた。

4. 信号振幅の距離依存性

各観測点での受信信号が送信点からの距離に応じてどのように変わっているかを調べた。前節では信号とノイズのパワーの比較を行うために電場の振幅スペクトル密度 $V/m/\sqrt{Hz}$ の次元で比較を行ったが、この節では信号そのものを比較するため電場 V/m の次元で比較する。振幅スペクトル密度からスペクトル振幅へ変換するには、スペクトル領域の周波数間隔の平方根を掛ければよい。今回のテストでは 200 秒の時間区間をとっているため、図 4~8 の縦軸を $\sqrt{1/200} \approx 0.071$ 倍したものが電場の次元の信号振幅となる。

またこの実験では電流ダイポールを用いているので、電場の強さは距離の他にダイポール軸との方位角に依存する。そこで同じ条件にするために補正を行う。送信源を水平電流ダイポールと仮定した場合の一様大地上での電場は次式のようなになる (例えば Ward and Hohmann, 1987)。

$$E_s(s, \phi) = 2CF(s) \cos \phi, \quad E_\phi(s, \phi) = CF(s) \sin \phi \quad (1)$$

ただし上式ではダイポールからの距離を s 、ダイポール軸からの角度を ϕ 、ダイポールモーメントに依存する定数を C 、距離にのみ依存する部分をまとめて $F(s)$ で表わしてある。これより電場の絶対値は、

電磁アクロスの開発と送信実験

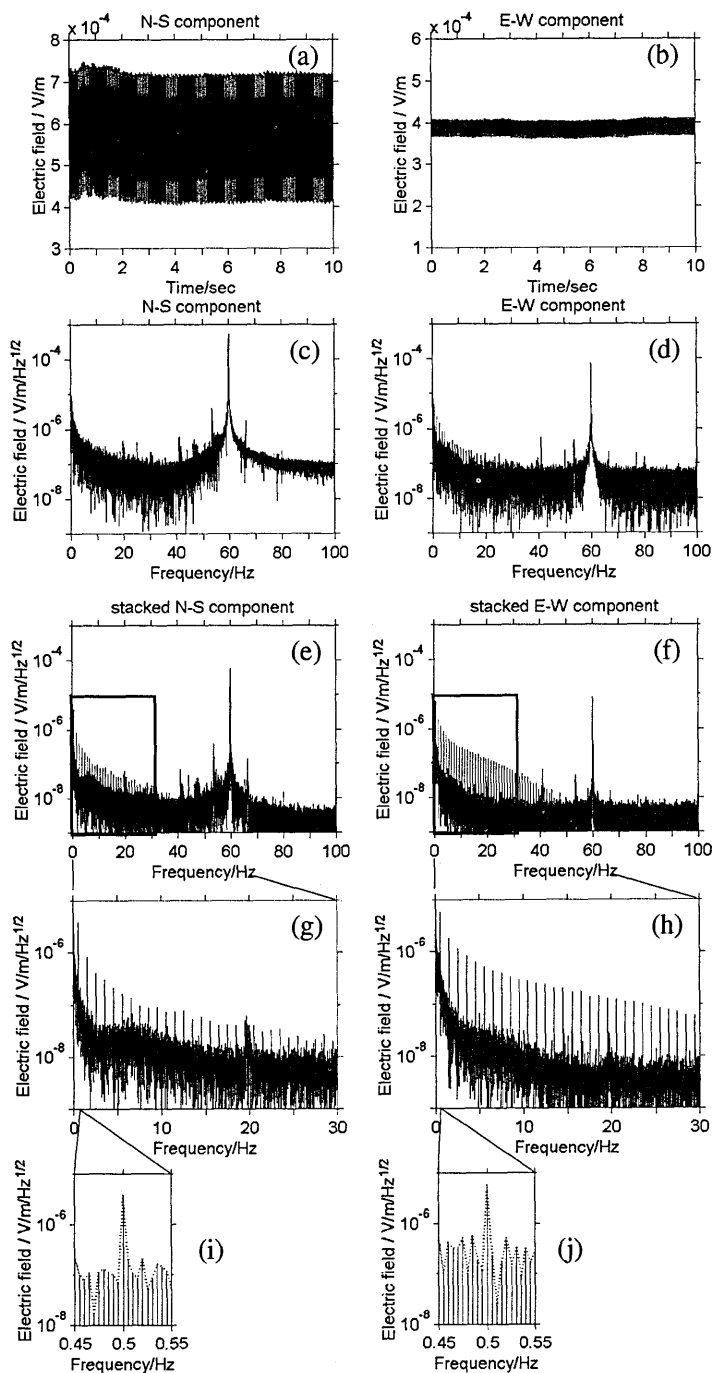


Fig. 6. Received electric field at site DH9 (see Fig. 1). The figures to the left show the North-South component, and those to the right show the East-West component. (a) and (b) show temporal variation, and (c) and (d) their spectra calculated from 200 seconds of data. The spectra stacked for 100 times are shown in (e), (f), (g), (h), (i), and (j).

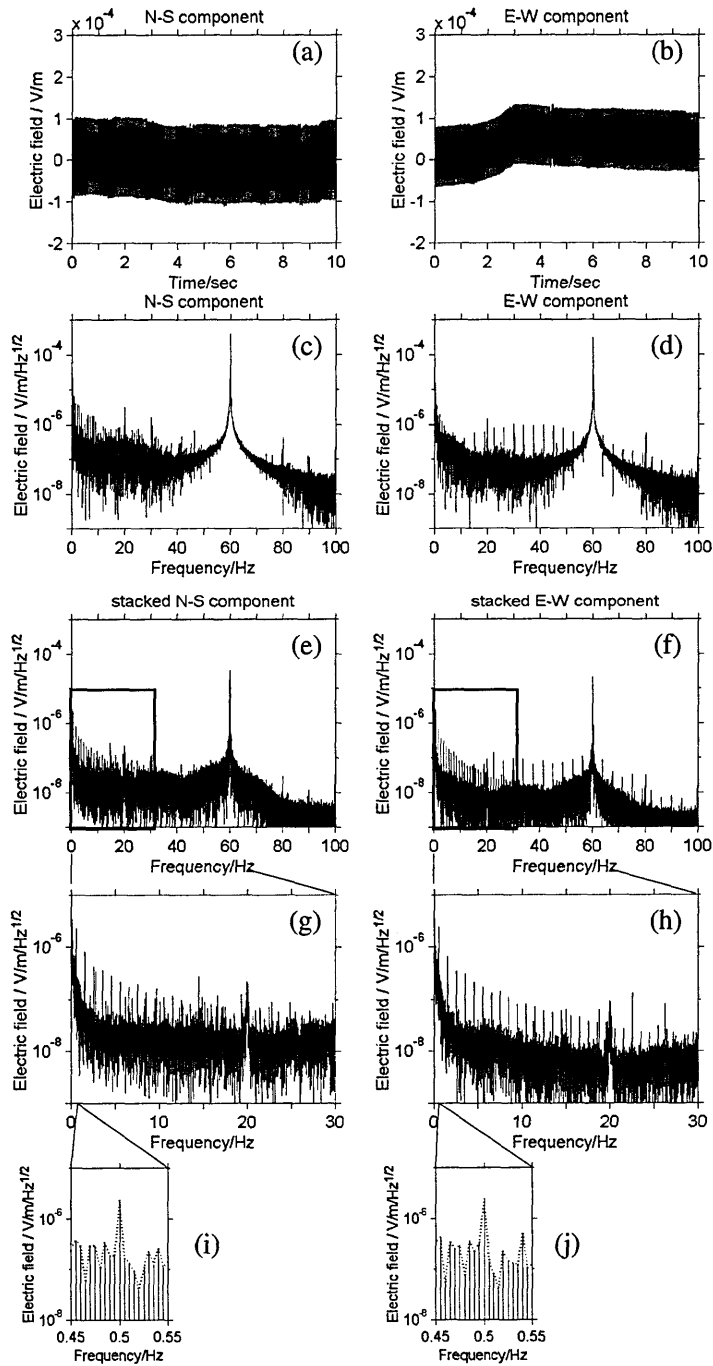


Fig. 7. Received electric field at site C (see Fig. 1). The arrangement of the figures is the same as in Fig. 4. The data were stacked in 145 time segments of the 200 seconds.

電磁アクロスの開発と送信実験

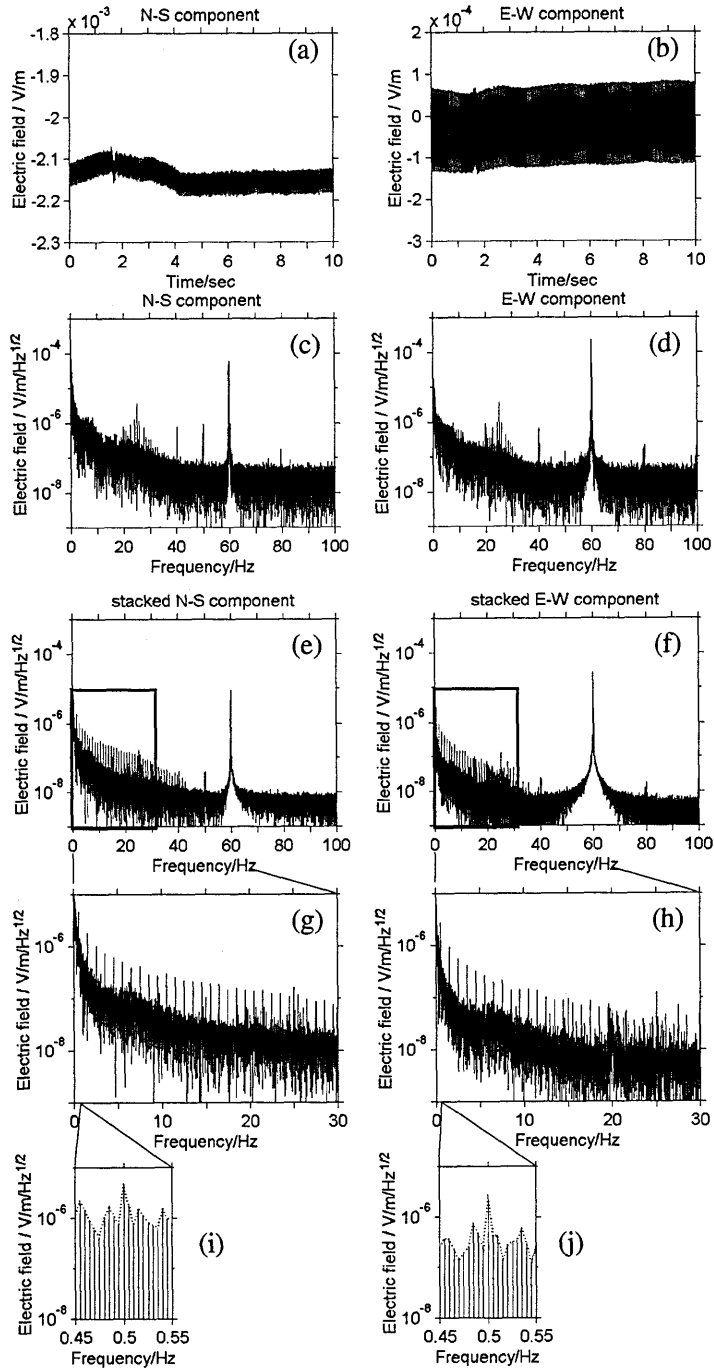


Fig. 8. Received electric field at site DH8 (see Fig. 1). The arrangement of the figures is the same as in Fig. 4. The data were stacked in 104 time segments of the 200 seconds.

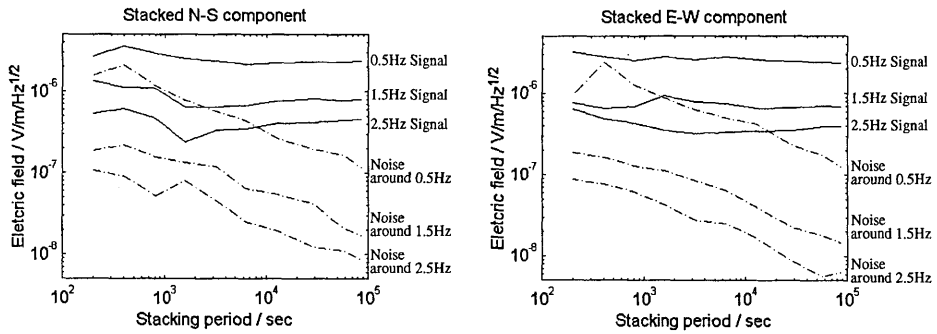


Fig. 9. The signal amplitude against the stacked period. Solid lines are the signal components expected to be constant after stacking, and broken lines are the noise, which is supposed to decrease with a slope $-1/2$.

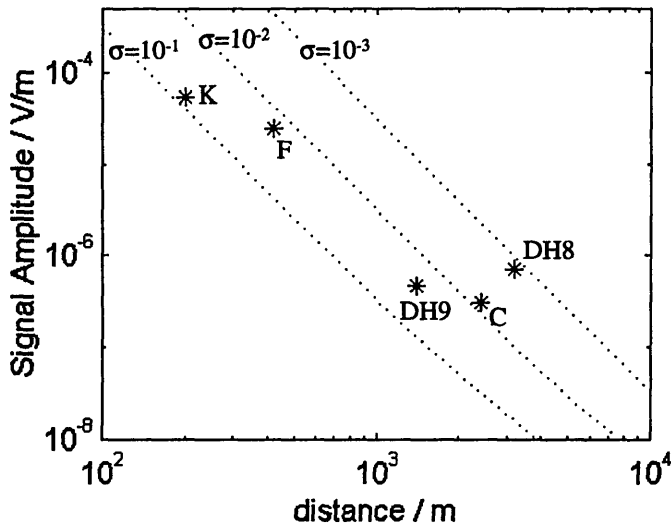


Fig. 10. Signal amplitude against the distance between source and receivers. The 0.5 Hz signals are used for the data, which are reduced to $\phi=90^\circ$ using the relation (2). The broken lines are calculated from the uniform ground model with the $\sigma=10^{-1}, 10^{-2}$ and 10^{-3} , and relative dielectric constant is equal to 5.

$$|E| = CF(s) \sqrt{1+3 \cos^2 \phi} \quad (2)$$

で表わされる。ただし、式 (1) のように表わされるのは、低周波数で距離が近い地点 ($s < 1/k$: k は地下媒質中での電磁波の波数) においてのみであり、今回の実験ではこの仮定の範囲内にある。

今回観測された 0.5 Hz の電場を、(2) 式を用いて、 $\phi=90^\circ$ における電場強度に直すと図 10 のようになる。また比誘電率が 5、電気伝導度が $\sigma=10^{-1} \sim 10^{-3}$ S/m の場合の一様大地上での電場の距離依存性も理論計算より求めた。このパラメータを用いた計算ではいずれの観測点も振幅が距離に対し -3 乗の依存性をもつニアフィールドの領域に入る。しかし

観測された電場は理論線よりも緩い勾配で分布する。電場観測では電極近傍からローカルな地下構造までの不均質性の効果を受けるので、まだ理論値との相違を問題にする段階にはない。しかしあえて一様構造として観測値に -3 乗の勾配をあてはめると電気伝導度は $\sigma=10^{-2}$ S/mと求められる。

電気伝導度を 10^{-2} S/mと仮定すると、今回用いた装置で信号が届く距離を推定できる。ノイズレベルは観測点Cの値を用い、 3×10^{-7} V/m/ $\sqrt{\text{Hz}}$ であると仮定する。この環境ノイズの状態では200秒間の観測を400回(8×10^4 秒 ≈ 22.2 時間)行い、これらのデータをスタック後、スタッキング回数で除すると、理想的にはノイズレベルが 1.5×10^{-8} V/m/ $\sqrt{\text{Hz}}$ まで減少する。これは電場の次元では $1.5 \times 10^{-8} \times \sqrt{1/200} \approx 1 \times 10^{-9}$ V/mに相当する。一方、観測期間中の定常送信による信号は、観測結果の振幅がノイズレベルより一桁大きければ判別可能と仮定する。こうして信号振幅が 10^{-8} V/mになる距離を図10より求めると8kmとなる。つまり送信点より8km遠方で信号が識別できることになる。今回の実験では送信電流は2A以下であったが、もっと大きな送信電流を使えば、さらに遠方まで、短い観測時間で信号の識別ができることになる。

ただし、この距離は直達波を識別できる距離であり、地下で反射した信号はさらに小さいことが予想される。このため反射波の届く距離は上で見積もった距離よりも小さくなると考えられる。

5. まとめ

電磁アクロスの送受信を行うシステムを構築し、東濃鉱山周辺で送受信実験を行った。今回開発したシステムでは、2Aの電流を100m離れた接地電極間に流すことができ、これにより電磁波を発生させた。送信システムは電磁波の周波数と位相を正確に制御し、かつ接地抵抗と送信信号をともにモニターできるように作成した。受信システムは地震波アクロスで開発したGPS同期のTS-Stackerを受信用接地ダイポールに接続した。この送受信システムの試験の結果、EM-ACROSSとしての基本的要件を満たすものであることが確認できた。また、精密な信号制御と受信同期を実現させたことにより、スタッキングによるS/N比の向上がほぼ理論どおりであることが確認できた。今回の実験場所のようにJR中央本線から3km程度しか離れていなくてバックグラウンドノイズが大きいところでも、精密制御された信号を用いることとスタッキングにより信号が確認できた。この結果を半無限一様媒質中の信号伝播の理論と比べることにより、計測期間を1日程度とすれば約8km遠方までの受信が可能であると推定された。

今回の観測システムの一部は地震波アクロス用に開発された機器の一部を使用したため、0.5Hzから100Hzの周波数範囲で実験を行った。探査に用いる周波数を広げるには新たな機器開発が必要である。特に地殻表層では数kHzから数10kHzの周波数における電磁波は、拡散が卓越する領域と波動が卓越する領域の中間の伝播現象を示すと予測されている。従来の探査ではこの周波数領域を使用していなかったので、この周波数範囲での探査は地下の新たな情報をもたらすと考えられる。

この様に完全に同期し、安定した送受信機器が開発できたことにより、小川・熊澤[1996]で提案された伝播してきた電磁波の位相と振幅の周波数特性を正確に観測できる体制が実現できた。本研究で開発した精密制御の技術はより完成度の高い探査システムへと

発展させていくための重要な一歩である。将来的には地震波アクロスと相補的な探査を行い、地下モニタとしての手法を確立したいと考えている。

謝 辞

本稿は『平成 11 年度東京大学地震研究所共同利用・研究集会（課題番号: 1999-W-06）「地球電磁気学的イメージングから地殻内の流体相について何がわかるか」』において発表し、議論された成果をさらに発展させてまとめました。

文 献

- 川瀬太郎, 1993, 「接地技術と接地システム」, 140 頁, オーム社, 東京.
- 熊澤峰夫・山岡耕春・武井康子・大島宏之・立石 博, 1995, 狭帯域多チャンネルスペクトル観測記録装置としての時間区間蓄積記録装置-TS stacker, 地球惑星科学関連学会 1995 年合同大会講演予稿集, F 31-13.
- KUMAZAWA, M., 1998, A new light and new eye to look into the solid Earth and a potential monitoring methodology of geodynamic states -Introduction to ACROSS-, *Abstracts of international workshop on frontiers in monitoring science and technology for earthquake environments*, A 1.
- KUNITOMO, T., K. YAMAOKA, S. INOUE, N. IKEDA, S. WATANABE, M. KUMAZAWA, 1998, 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*, AP 1-2.
- 國友孝洋, 2000, 東濃音波アクロスシステムの開発成果とその総合レビュー, 平成 12 年度研究開発課題評価（中間評価）報告書-評価課題「陸域地下構造フロンティア研究」, 核燃料サイクル開発機構.
- 長倉三郎・井口洋夫・江沢 洋・岩村 秀・佐藤文隆・久保亮五編集, 1998, 「岩波理化学辞典 第 5 版」, 1854 頁, 岩波書店, 東京.
- NAKAJIMA, T., M. KUMAZAWA, T. KUNITOMO, and K. TSURUGA, 1998, Current approach and the preliminary results on the EM ACROSS utilizing the diffusional transmission of electromagnetic signals in the MT range, *Abstracts of international workshop on frontiers in monitoring science and technology for earthquake environments*, AP 2-41.
- 小川克郎・熊澤峰夫, 1996, 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的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, P 45.
- VAN VOORHIS, G.D., P.H. NELSON, and T.L. DRAKE, 1973, Complex resistivity spectra of porphyry copper mineralization, *Geophysics*, **38**, 49-60.
- WARD, S.H. and G.W. HOHMANN, 1987, Electromagnetic theory for geophysical applications, in *Electromagnetic methods in applied geophysics Vol. 1*, edited by M.N. Nabighian, pp. 131-312, Society of exploration geophysicists, Oklahoma.
- 山岡耕春・小林和典・國友孝洋・熊澤峰夫・安藤 浩・岩崎 慎, 1997, DATAMARK LS8000SH を用いた ACROSS 時間区間蓄積型記録装置, 日本地震学会講演予稿集 1997 年度秋季大会, p 59.
- YAMAOKA, K., T. KUNITOMO, K. ISHHARA, Y. HASADA, K. MIYAKAWA, N. IKEDA, M. YAMADA, and M. KUMAZAWA, 1998, The first successful experiment of remote synchronization of ACROSS system using GPS clock, *Abstracts of international workshop on frontiers in monitoring science and technology for earthquake environments*, AP 1-10.
- 横山由紀子・熊澤峰夫・國友孝洋・中島崇裕, 2000, 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**, 378-392.

(Received August 7, 2000)

(Accepted December 1, 2000)