

電磁アクロス長距離送受信実証実験

中島崇裕^{1,2)}・長尾大道^{1,3)}・佐柳敬造²⁾・野田洋一⁴⁾・長尾年恭²⁾・
熊澤峰夫^{1,5)}・羽佐田葉子^{1,2)}

A Trial Observation of the EM-ACROSS Signal for the Long-Distance Transmission

Takahiro Nakajima^{1,2)}, Hiromichi Nagao^{1,3)}, Keizo Sayanagi²⁾, Yoichi Noda⁴⁾,
Toshiyasu Nagao²⁾, Mineo Kumazawa^{1,5)} and Yoko Hasada^{1,2)}

Abstract

Observation test is successfully made on the EM-ACROSS signals transmitted through the Earth's crust over the distance up to 50 km. We transmitted a set of three sine waves around 1 Hz from the grounded wire source with the dipole moment $4 \text{ A} \times 150 \text{ m}$. The amplitude level of signals at the distance of $\sim 50 \text{ km}$ was in the order of 0.01 pT , 10^{-3} lower than the average level of environmental electromagnetic noise at the observation sites. The signal-to-noise ratio of the observations reaches up to 6 by means of the optimized stacking of the raw observation data for the ~ 50 days. The results of this trial observation have provided us with a substantial milestone towards the routine methodology for the active monitoring of the underground states in the research works for the prediction of earthquake generation and volcanic activities.

はじめに

アクロスは精密な定常サイン波信号が雑音に最も強

く (robust), 限られた周波数範囲内の有限個のサイン波が持つ位相情報が, パルスのイベントの伝播時間決定に有用であることを活用した地下監視観測手法とし

-
- 1) 日本原子力研究開発機構 東濃地科学センター 〒509-5102 土岐市泉町定林寺959-31
Tono Geoscience Center, Japan Atomic Energy Agency, 959-31 Jorinji, Izumicho, Toki, Gifu 509-5102, Japan
 - 2) 東海大学海洋研究所 〒424-8610 静岡市清水区折戸3-20-1
Institute of Oceanic Research and Development, Tokai University, 3-20-1 Orido, Shimizu-ku, Shizuoka 424-8610, Japan
 - 3) 海洋研究開発機構 地球内部変動研究センター 〒236-0001 横浜市金沢区昭和町3173-25
Institute for Research on Earth Evolution, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 3173-25 Showa-cho, Kanazawa-ku, Yokohama 236-0001, Japan
 - 4) 特定非営利活動法人 リアルタイム地震情報利用協議会 〒160-0004 新宿区四谷2-14-4
Real-time Earthquake Information Consortium, 2-14-4 Yotsuya, Shinjuku-ku, Tokyo 160-0004, Japan
 - 5) 静岡大学理学部 〒422-8529 静岡市駿河区大谷836
Faculty of Science, Shizuoka University, 836 Ohya, Suruga-ku, Shizuoka 422-8529, Japan
- (2006年9月19日受付 / 2007年1月23日受理)

て提案された(熊澤・武井, 1994; 武井他, 1994). 当初この手法は弾性波への適用を想定していたが, 電磁拡散波への適用とその有用性も提唱され(小川・熊澤, 1996), さらに線形力学系の入出力特性(伝達関数)の汎用的計測方法であることが示され(熊澤他, 2000), 広く ACROSS (Accurately Controlled Routinely Operated Signal System のアクロニム)と呼ばれることになった.

これまで弾性波アクロスについては, 偏心錘の回転によりシングルフォースを発生させる装置を開発し(國友・熊澤, 2004), その信号は 100 km 以上まで届くことが確認されている(吉田他, 2004). 一方, 電磁拡散波の観測的研究では, 送信パワーの不足や地下での信号減衰が大きいことなどのため, これまで数 km 程度の観測にとどまっていた(中島他, 2000).

本論文では, 地震発生や火山活動など地下の H_2O が関係した現象の能動的常時監視の技術確保と実用という目標に向けて, 電磁拡散波を用いる電磁アクロスの遠距離送信試験を行った結果を報告する.

観測システムの概要

送信システム

使用した電磁波送信装置は, 核燃料サイクル開発機構(現日本原子力研究開発機構)において研究・開発され, 東濃鉱山敷地内に設置してある(Fig. 1; 中島他, 2004; Nakajima *et al.*, 2004). この装置では, GPS 時計に精密同期したファンクション・ジェネレータを用いて作成した送信信号を, パワーアンプ(最大出力電圧 200 V, 最大電流 10 A, 出力周波数 DC~10 kHz)を介してダイポールアンテナに供給する. アンテナには, 一辺 150 m の三角形の頂点に設置した 3 個の接地電極(W, N, S と呼ぶ)のうち特定の 2 個をダイポールとして用い, 電極の組み合わせで, 独立な 2 成分の電磁波を励起する.

受信システム

受信は送信点からそれぞれ 36 km と 50 km 離れた

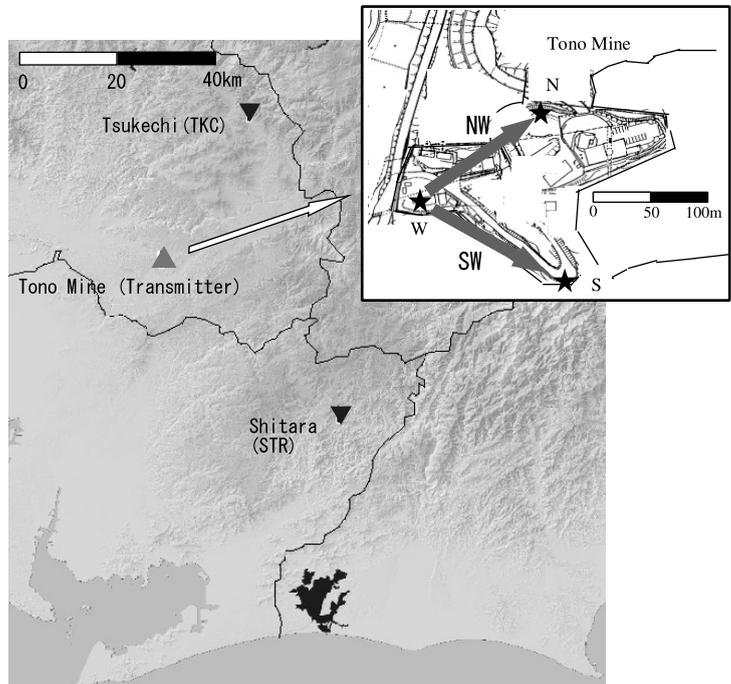


Fig. 1 Location of transmitter site at Tono (triangle) and two observation sites at Tsukechi (36 km) and Shitara (50 km) (reverse triangle). The two arrows in inlet show the layout of two electric dipoles; NW and SW (arrow), using three electrodes grounded at Tono Mine.

付知と設楽で行う(Fig. 1). これらの観測点では, 地震発生に伴う電磁場変動観測のために東海大学によって 3 成分 Fluxgate 磁力計(テラテクニカ社 RF-725)が既に設置してある. この磁力計は GPS 時計と常時同期したタイミングで記録をとれるように開発され, アクロス信号の観測にそのまま適用できる. 性能としては, 分解能 0.01 nT, A/D ビット数 24, サンプルング周波数(最高) 128 Hz である.

送受信試験

期待する受信信号の事前評価

観測に先立ち, 受信できる信号レベルなどの事前評価を理論的に行った. 簡単のために, 空気と大地の 2 層構造の地表面上の電流ダイポールからの電磁波の放射を考える. 代表的な観測量として鉛直磁場 B_z を次の式(物理探査学会, 1998)で評価する.

$$B_z = -\frac{\mu_0 I \ell}{2\pi k_1^2 r^4} [3 - (3 + 3ik_1 r - k_1^2 r^2) e^{-ik_1 r}]$$

ここで、 $k_1^2 = -i\omega\mu_1(\sigma_1 + i\omega\epsilon_1)$ は、大地を伝播する電磁波の波数の2乗、 σ_1, ϵ_1 は大地の電気伝導度、誘電率、 μ_0, μ_1 は空中および大地の透磁率、 r はダイポールからの距離、 I は電流、 l はダイポールの長さ、 ϕ はダイポール軸からの方位角を表す。この式を使い、大地の電気伝導度 0.01 S/m (比抵抗 100 Ω m)、ダイポールモーメントを 4×150 Am とした場合の B_z の振幅の周波数・距離依存性を Fig. 2 に示す。

図から分かるように、近地場領域では振幅は周波数に依存せず、遠地場領域では高周波になるほど振幅は小さくなる。実際の観測では、低周波数になると地球磁場の変動成分によってノイズスペクトルが上昇することが予想されるので、本研究の観測では 1 Hz 周辺の信号で送受信試験を行うことにした。この場合、数 10 km の距離にある受信点における信号振幅は 0.001~0.01 pT のオーダーであることが見積もられる。

信号の設計

アクロスの信号は複数の周波数の正弦波を重ね合わせたものである。アクロス観測の妨害となる整数周波数雑音 (各種機器が原因) を回避した 1 Hz 周辺の複数の正弦波の周波数として、 $0.3125 \times N$ ($N=3, 4, 5$) = [0.9375, 1.2500, 1.5625] Hz の3つを採用することにした。

この3つの正弦波の時間領域での合成波形の最大振幅が小さい値になるように位相を調整した。Fig. 3 に実際に SW 電極間に流した信号波形と電流振幅スペクトルを示す。装置の非線形

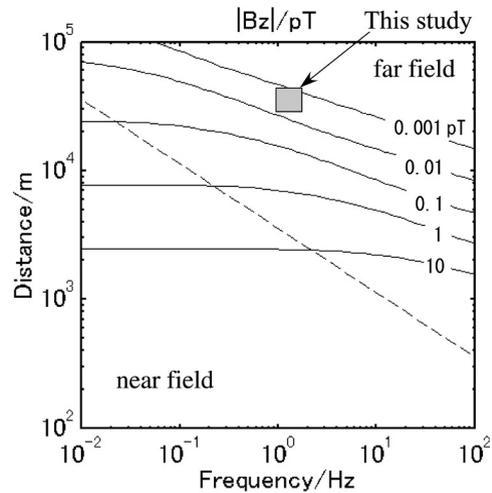


Fig. 2 The estimated signal amplitude of the magnetic field as a function of frequency and distance from the current dipole of 600 Am. The contour values show the magnetic field strength in the unit of pT calculated by the following physical parameters : electrical conductivity is 0.01 S/m, relative dielectric permittivity is 4, and magnetic permeability is equal to that of vacuum, and the direction is $\phi=90$ degree (See text for detail). The broken line is the boundary separating the near field regime at lower left and far field regime at upper right. Rectangle shows the condition in the present observation work.

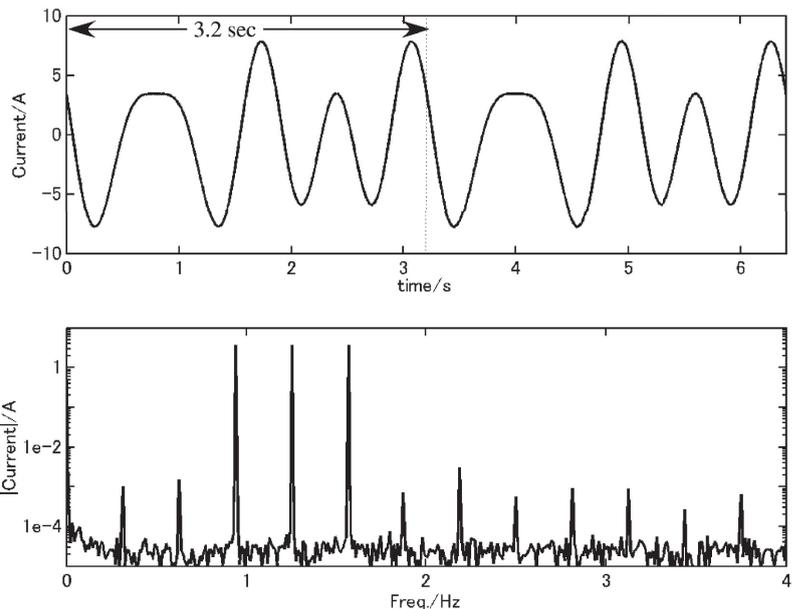


Fig. 3 Transmitting signal. Upper part shows the wave form of source current, which is the accurate repetition of a time unit of 3.2 sec. Lower panel shows its spectrum showing a designed set of three spectral lines at 0.9375, 1.2500 & 1.5625 Hz (integer multiple of 0.3125 Hz). The amplitude of each of three sinusoids is 3.7 A. The other small spectral lines are smaller in magnitude than designed ones by 10^{-3} . They have originated from the small nonlinearity of hardware of transmitter.

特性に起因する高調波などを含むが、送信信号周波数周辺のノイズレベルと比べると、信号は5桁以上のS/Nがある。

連続送受信試験

東濃鉦山の送信所においては、信号増幅器の出力電流・出力電圧を連続記録して、送信信号を常時監視している。本研究の観測のための連続送信の実績は次のとおりである。

NW 電極間送信 (N54E 方向)

期間：2004/11/30 18:00～2005/1/17 14:00

平均送信電流値：4.4 A

SW 電極間送信 (N109E 方向)

期間：2005/1/17 15:00～2005/3/14 24:00

平均送信電流値：3.7 A

この期間に、付知・設楽の両観測点では 32 Hz サンプリングで磁場連続観測を行った。

結 果

まず、受信データの処理について述べる。受信時系列データを信号周期3.2秒の整数倍数の48秒を単位とする時間区間に分けて、それぞれの時系列データをフーリエ変換してスペクトルを求める。これらを成分ごとに逐次スタック(平均)することにより、長時間平

均値を求める。スタックの方法には、長尾ほか(2004)と Nagao *et al.* (2004) で導入された最適重み付きスタッキング法を用いる。この方法を用いることにより、昼夜のノイズレベルの変化に関わらず、S/Nを最大にする結果を得ることができる。

この方法で得たスタッキング時間と信号周波数における振幅とノイズレベルの推移を Fig. 4 に示す。ノイズレベルは、各成分から ± 0.05 Hz の範囲の平均パワーの平方根(正規分布の場合の標準偏差に相当)で与える(Nagao *et al.*, 2004)。ノイズレベルの推定値はスタッキング時間の平方根にほぼ逆比例して小さくなっていき、信号振幅の不確かさを標準偏差で与える。観測開始当初のノイズレベルは信号振幅より高いため、送信周波数における振幅はほとんど雑音で決まっているが、スタッキング時間の増加とともに送信信号成分の値も下がっていき、あるスタッキング時間からほぼ一定値、すなわち、送受信した信号の振幅に落ち着くようになる。こうして、約50日の観測とデータの逐次スタッキングの結果、例えば付知の Bz 成分では $S/N \sim 6$ が得られた。

約50日間(48日)の N54E 方向送信時のスタッキングによって得られた観測スペクトルを Fig. 5 (a, b) に示す。N54E 方向送信の結果は、付知・設楽両方の観

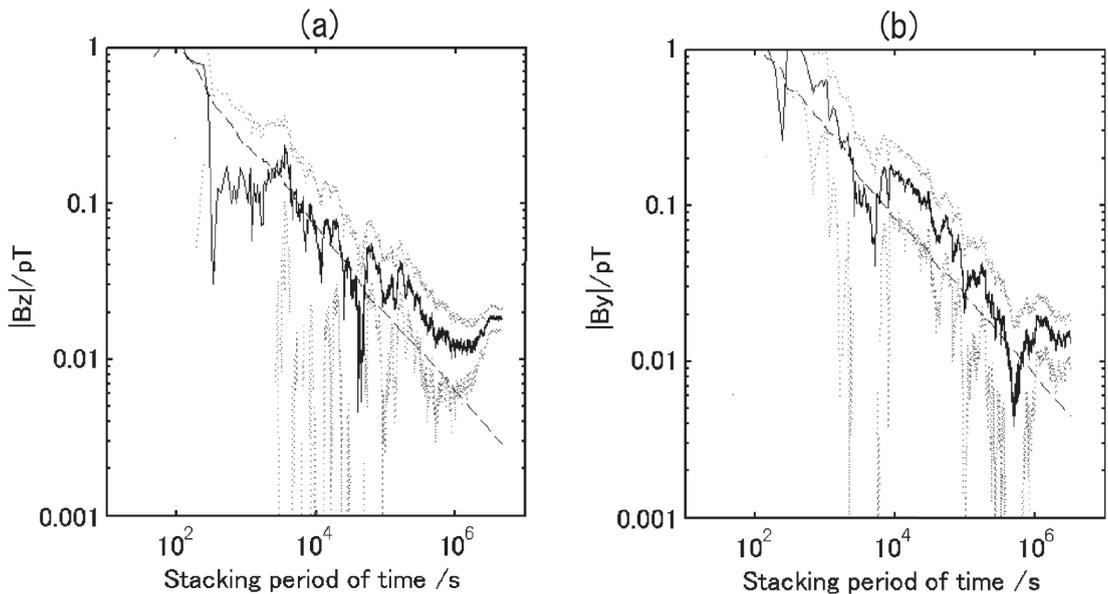


Fig. 4 Variation of the observed signal and noise levels with stacking period of time. (a) Bz at Tsukechi (b) By at Shitara both at 1.25 Hz excited by the SW dipole. The solid lines show the amplitude at 1.25 Hz, where signal is expected to exist. The broken lines are the observed level of noise at the observation site. A couple of dotted lines represent the confidence limits of the observed signal data at the frequency of signal.

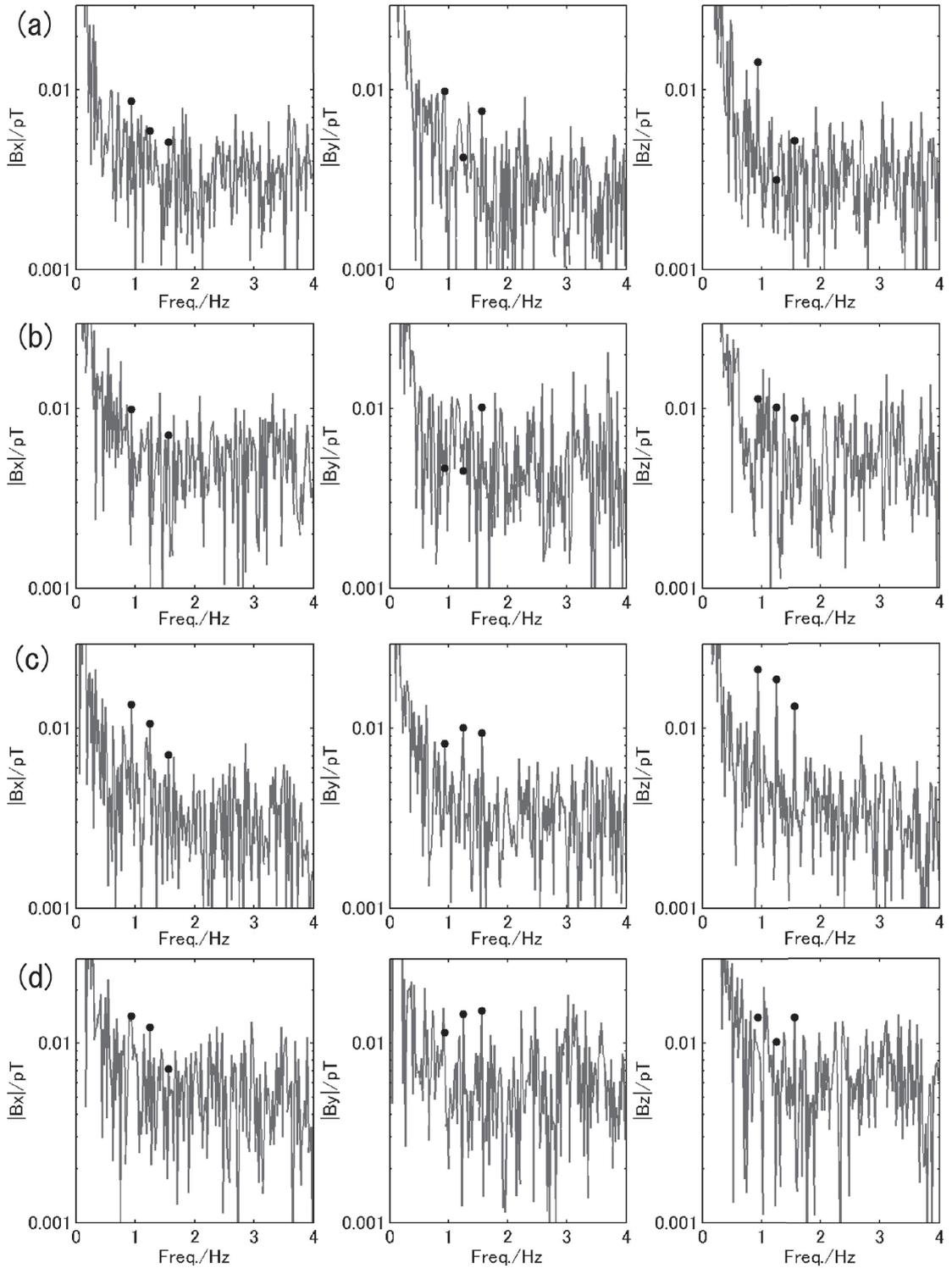


Fig. 5 Amplitude spectrum of observed magnetic field after weighted stacking of the data for 48 days by N54E excitation (a, b) and for 56 days by N109E excitation (c, d). They are the results of Tsukechi (a, c) and Shitara (b, d). The left/middle/right columns show the Bx/By/Bz (north/east/down) components. The dots in the figures show the amplitude of signal components.

測点とも、送信周波数における信号振幅がスタッキング後のノイズレベルと同程度であるから、送信信号は確認できていない。しかし、Fig. 5 (c, d) で示す N109E 方向送信では、同じ程度の期間 (56 日) の観測によって、送信信号の伝播を確認できている。設楽における S/N では、高い成分 (Y: 東西) もあるが、概して低い。Fig. 5 のスペクトルで見られるように、特に 1 Hz 以下の低周波数領域では、環境雑音のレベル

が高く、適切な対応を要すると考えられる。このように、今回信号を確認できなかった ($S/N < 2$) 成分では、観測期間の不足が原因であり、もっと長期の観測か送信信号レベルの向上によって、送信信号を確認でき、またより高い S/N を得られると考えられる。

考 察

受信信号のレベル、精度と伝達関数

観測で得られた受信信号と送信信号のスペクトル比をとると、送受信点間の電磁伝達関数を誤差評価付きで得ることができる。一例として、N109E 方向送信の場合の 1.25 Hz 信号の振幅と伝達関数を Table 1 にまとめた。得られた信号の振幅は、Fig. 2 で見積もった値の範囲 0.001~0.01 pT にある。この値自体も、磁場センサーの分解能の 0.01 nT よりも小さい。このように従来は扱えなかった微弱な信号でも、本研究のよ

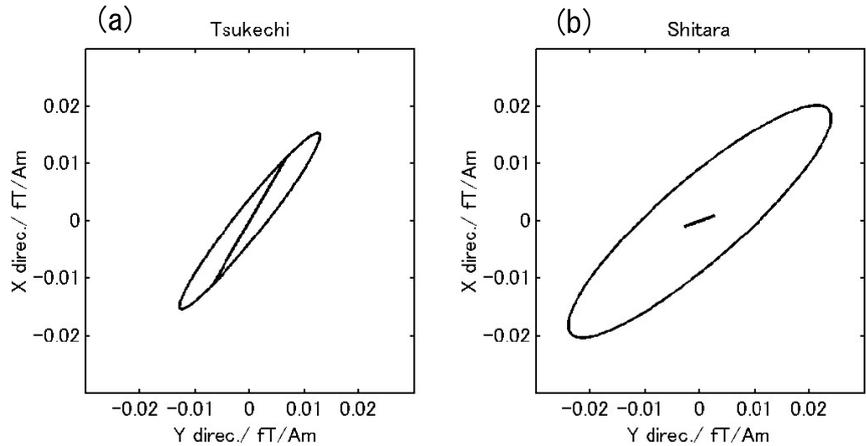


Fig. 6 The locus of the horizontal components of transfer function in unit of fT/Am at 1.25 Hz determined by the N109E excitation. Each panel shows (a) Tsukechi and (b) Shitara. The ellipsoids are the observed result, to be compared with the straight lines expected for the isotropic and homogeneous half ground with the conductivity 0.05 S/m.

うに安定した送受信技術と適切なスタッキングによって、伝達関数を観測的に決定できることを実証できた。

地殻の異方性と不均質

今回の送受信試験で、東濃鉦山の N54E 方向の送信の場合には、信号は判別できなかったが、N109E 方向の送信の場合には、付知・設楽両観測点ともに伝播してきた信号受信を確認できるという結果を得た。このことから、電気ダイポールが N54E 方向より N109E 方向の場合に送受信効率が高くなる構造が存在すると考えられる。

それを確かめるために、N109E 方向送信時の観測データ (Table 1) と、均質大地の場合の応答の方向性を比べた。この比較の際に、均質大地の電気伝導度は、付知での水平成分の値の振幅に合わせ、0.05 S/m とした。Fig. 6 には、観測された 1.25 Hz 信号の水平 2 成分の振幅軌跡 (1 周期分) を均質大地で予想されるも

Table 1 The stacked results of 1.25 Hz components in the case of SW excitation.

site	component	Observed field		Transfer Function	
		$ B /pT$	S/N	$ B/I\ell /(pT/Am)$	Phase ($B/I\ell$)/rad
Tsukechi	North	0.0086	5.4	$(15.4 \pm 2.8) \times 10^{-6}$	0.43 ± 0.18
	East	0.0072	2.7	$(12.9 \pm 4.8) \times 10^{-6}$	0.17 ± 0.35
	Down	0.0185	6.3	$(32.6 \pm 5.2) \times 10^{-6}$	-0.80 ± 0.16
Shitara	North	0.0113	2.8	$(20.3 \pm 7.2) \times 10^{-6}$	-0.51 ± 0.34
	East	0.0134	3.0	$(24.0 \pm 8.0) \times 10^{-6}$	-0.98 ± 0.32
	Down	0.0102	2.0	$(18.2 \pm 9.2) \times 10^{-6}$	-0.77 ± 0.46

のと比較した。N109E 方向送信時における水平成分の軌跡の卓越方向は、均質大地の場合から少しずれた方向であることが分かる。しかも、設楽観測点の軌跡は、均質大地で予想される値よりも有意に大きい。設楽観測点は、送信ダイポール N109E 方向の延長から約 20 度ずれているのに対し、付知観測点は、ほぼ直行する方向にあるので、N109E 方向の伝播信号が大きい。このような現象は地下の N109E 方向に沿った異方性構造によって作られると考えられる。送信点近傍 (送信点から 1 km 以内) の観測においてもこのような不均質・異方性について報告されている (Nakajima *et al.*, 2007)。今回得られた方向依存性には、送信点付近の影響もあると考えられるが、付知・設楽の両観測点とも振幅が大きい方向が NE-SW であり、もっと広域の中部日本の大局的構造を反映したものだと仮説が立てられる。特に、この方向はこの地域におけるテクトニックな圧縮主応力軸方向 (= 地殻内に存在するであろうマイクロクラックの向き) と直交していることは特記に値する。これらを検証し、応力場変化と異方性の関係を解明するためには、より密な観測点における長期連続観測が必要である。

ま と め

中部地域において、電磁アクロスの信号が 50 km の距離でも観測できることを実証し、かつ地殻活動の能動的監視観測に必要な条件をいくつか明らかにすることができた。観測結果を具体的に言えば、次のとおりである。1 Hz 程度の周波数帯域において、600 Am の電流ダイポールからの送信信号は 50 km の距離で 0.001~0.01 pT 程度の大きさしかなく、 $5\text{pT}/\sqrt{\text{Hz}}$ 程度の電磁的環境雑音に埋もれている。しかし、50 日程度継続して得るデータのスタッキングによって、 $S/N \sim 6$ で捕捉確認ができた。これはアクロス信号の設計と制御と同期、およびデータのスタッキング法の成果である。

電磁雑音のレベルが高い日本列島で高い S/N のデータ取得には、(1) 受信における環境雑音の効果をいかに抑制するか、(2) 送信信号のレベルをいかに高くするか、その両方の技術と具体化が当面の最大課題である。特に地殻深部の情報を得るためには、低周波数の信号を用いる必要があるが、この領域では地球磁場変動成分も観測雑音に寄与する。その抑制には、柿岡などの精密観測データを活用する手法の開拓が必要

である。

この観測によって、受信信号の振幅が送信電流ダイポール軸の方向に著しく依存することが明らかになった。この原因は地下構造の不均質性・異方性にあり、かつ、その時間変動のモニタリングが地殻応力の変動監視に有用であると予想される。地殻中の電磁波伝播の的確な把握とその時間変動の実用的監視観測のためには、データ解析に自由度を減らすことが不可欠である。したがって、観測量の周波数依存性と空間分布のデータ取得するアレイ観測技術の組織的確保が次の最重要研究課題であると結論する。

謝 辞

付知における観測では、岐阜県中津川市付知総合事務所の関係各位に格別のご配慮を頂いた。また、斉藤好美氏には観測場所を快く提供して頂いた。設楽における観測では、伊藤進氏のご好意により観測場所を提供して頂いた。付知および設楽観測点の磁力計の設置時には、千葉大学の原田誠博士、付知観測点の磁力計の撤収時には、中部大学の井筒潤博士、東海大学の神谷親征氏および今枝儀人氏に協力して頂いた。データ通信・収録に関しては、中部大学の井筒潤博士、東海大学の川畑広紀上級技術員および川上貴之氏に協力して頂いた。また、匿名の査読者の方より有益なコメントを頂いた。以上の方々に、記して感謝の意を表します。

引用文献

- 物理探査学会 (1998) 物理探査ハンドブック. 第 5-7 章. 物理探査学会, 239-429.
- 熊澤峰夫・武井康子 (1994) 精密制御音波放射による能動的地下構造常時モニター手法の研究, その 1 目的と原理. 日本地震学会講演予稿集 1994 年度秋季大会, 158.
- 熊澤峰夫・國友孝洋・横山由紀子・中島崇裕・鶴我佳代子 (2000) 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.
- 國友孝洋・熊澤峰夫 (2004) 弾性波アクロスによるアクティブ・モニタリングー弾性波アクロスの開発と東濃鉱山からの連続送信一. 月刊地球, 号外 No. 47, 26-33.
- 長尾大道・中島崇裕・熊澤峰夫・國友孝洋 (2004) 最適重みつきスタッキング法による最大 SN 比を持つ

- アクロス伝達関数の取得. 月刊地球, 号外 No. 47, 53-60.
- Nagao, H., T. Nakajima, M. Kumazawa, and T. Kunitomo (2004) Optimum weighted stacking method for acquisition of the ACROSS transfer functions having the maximum signal-to-noise ratio. *Proceedings of the "1st International Workshop on Active Monitoring in the Solid Earth Geophysics (IWAM04)"*, Task Group for Active Monitoring, Mizunami, Japan, 266-270.
- 中島崇裕・國友孝洋・熊澤峰夫・横山由紀子 (2000) 電磁アクロスの開発と送信実験. 地震研究所彙報, 75, 413-428.
- 中島崇裕・國友孝洋・長尾大道・熊澤峰夫・茂田直孝 (2004) 拡散を考えるような電磁場の場合の電磁アクロスの試験観測. 月刊地球, 号外 No. 47, 179-184.
- Nakajima, T., T. Kunitomo, H. Nagao, M. Kumazawa, and N. Shigeta (2004) Long-term operation of the EM-ACROSS and derived transfer function in the diffusion field region. *Proceedings of the "1st International Workshop on Active Monitoring in the Solid Earth Geophysics (IWAM04)"*, Task Group for Active Monitoring, Mizunami, Japan, 148-151.
- Nakajima, T., T. Kunitomo, H. Nagao, M. Kumazawa, and N. Shigeta (2007) Development of an observation system to monitor the underground state using electromagnetic fields : Field tests of the EM-ACROSS in the diffusion field region, in preparation.
- 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.
- 武井康子・熊澤峰夫・鈴木和司 (1994) 精密制御音波放射による能動的地下構造常時モニター手法の研究, その2 精密制御回転震源設計試作とその評価. 日本地震学会講演予稿集 1994年度秋季大会, 159.
- 吉田康宏・上野寛・松岡英俊・石川有三・國友孝洋・熊澤峰夫 (2004) 気象庁・Hi-net 観測点で受信した東濃弾性波アクロス信号の特性. 月刊地球, 号外 No. 47, 124-131.