

電磁アクロスシステムによる連続試験観測

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)

Long Time Operation of the EM-ACROSS at Tono Test Site

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

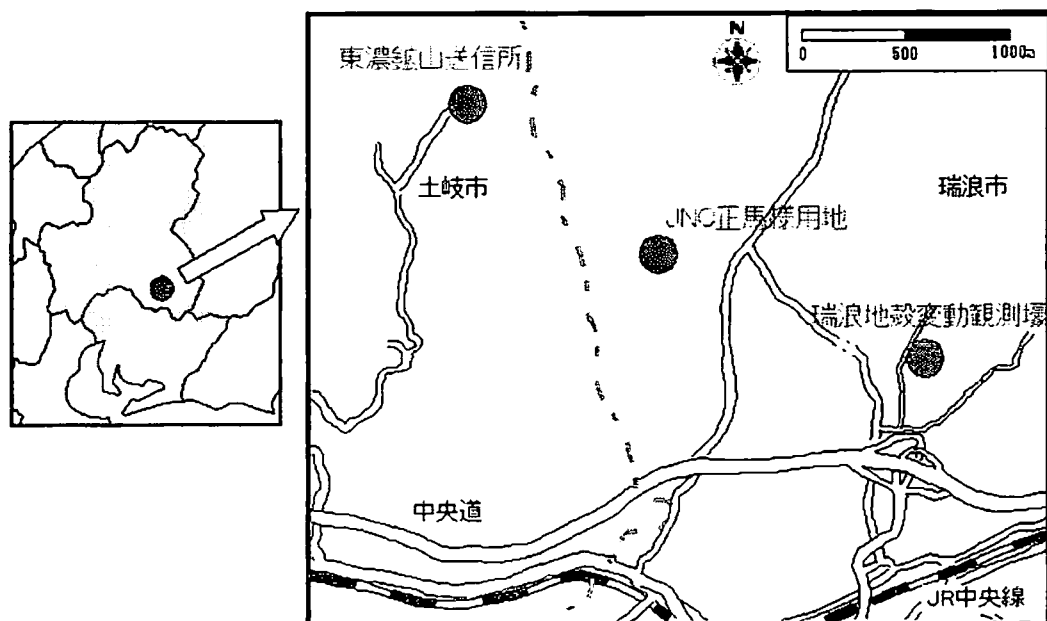
(Tono Geoscience Center, Japan Nuclear Cycle Development Institute)

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、その信号を同期して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。この伝達関数の逆解析により地下の構造を推定する。さらにこの手法では伝達関数の SN の向上のために、高精度の信号を常時送受信するため、地下状態のモニタリングも可能である (熊澤ら, 2000)。この信号として弾性波と電磁波が考えられるが (小川・熊澤, 1996)、本研究では低周波数の電磁拡散波による地下モニタリング手法開発の目的の一環として、長期変動観測実験を行ったので、その結果の例を報告する。

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。この送受信システムの詳細については中島ら(2000)、および中島ら(2003) に報告したので、ここでは要点のみを示す。



第 1 図. 実験サイト. 東濃鉦山送信所からの信号を、JNC 正馬様用地と瑞浪地殻変動観測場
で受信を行った。

[送信システム]

- ・ 接地電極による電流ダイポール送信からの電磁波送信（ダイポール長：100m，ダイポールの方向：N54E，およびN115E）。
- ・ GPS同期したファンクション・ジェネレータより任意波形を，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送信。
- ・ 電流と各電極間の電圧は，送信信号決定とモニタのために記録する。（サンプリング周波数 1kHz，A/D 分解能 16 ビット，GPS に 100ns 以内で同期したタイミングで記録）

[受信システム]

- ・ 電場観測：鉛・塩化鉛電極使用のダイポール(電極間間隔 33m)による東西・南北方向の水平 2 成分。
 - ・ 磁場観測：Bartington 社製の MAG-03 Fluxgate3 成分センサによる磁場 3 成分。
 - ・ GPS に同期したタイミングで磁場・電場を記録（サンプリング周波数 1kHz，分解能 16 ビット）。
- なお，センサ・アンプ類については装置の周波数特性の補正も行っている。

今回の報告では，2003 年の報告に比べ，より近傍に受信点を設置し（第 1 図：JNC 正馬様用地），そこで 1 年以上に亘り連続送受信試験を行った結果を報告する。

3. 連続送受信試験

3.1 送信信号の設計について，

送信信号は複数の周波数の正弦波を重ね合わせることによって作成した。送信周波数としては，ある周波数帯域での詳細な情報を取り出す目的と，広い周波数帯域の特徴を捉えるという目的を同時に満たすように，以下の周波数（Hz）を選択した。

帯域 1： 35.0, 37.5, 40.0

帯域 2： 125.0, 127.5, 130.0, 132.5, 135.0

帯域 3： 362.5, 365.0, 367.5, 370.0, 372.5

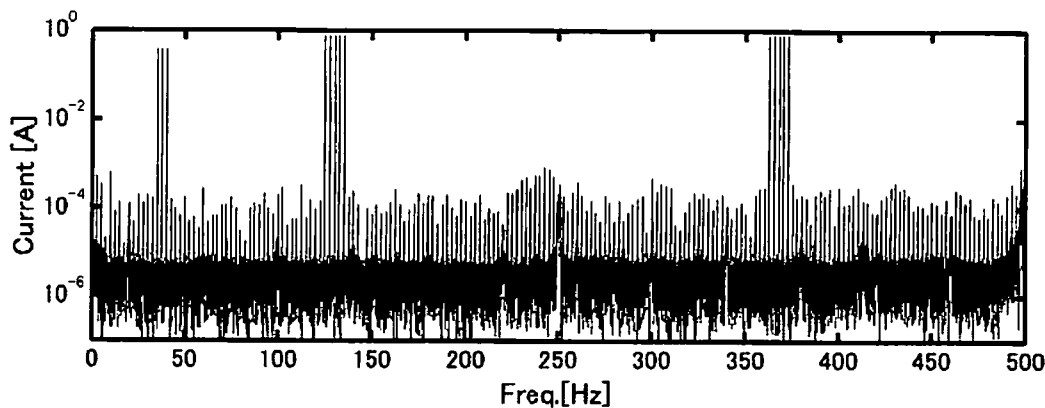
この 3 つの周波数帯は電磁波の分散性を考慮し，帯域 1 対帯域 2 はおおよそ 3 倍，帯域 1 対帯域 3 はおおよそ 9 倍となるようにした。なお，各信号の周波数はそれぞれの高調波と重ならないようにした。各帯域の相対振幅は高周波数での減衰を考慮し 1：2：2 にした。この信号を時系列として表現する際に，横山ら(2000a)が示したように，初期位相をランダムにした複数の周波数の正弦波を重ね合わせ，合成信号の振幅をなるべく小さくした。

この信号を用いて実際に送信電極に流した電流のスペクトルを第 2 図に示す。送信システムの機器特性のため，送信信号は 0.4 秒周期 (2.5Hz) の信号を基本信号として出力しており，それに起因する 2.5Hz おきのピークが見られる。しかし，これらの周波数成分の大きさは目的の信号の大きさと比較して 4 桁程度小さい。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。

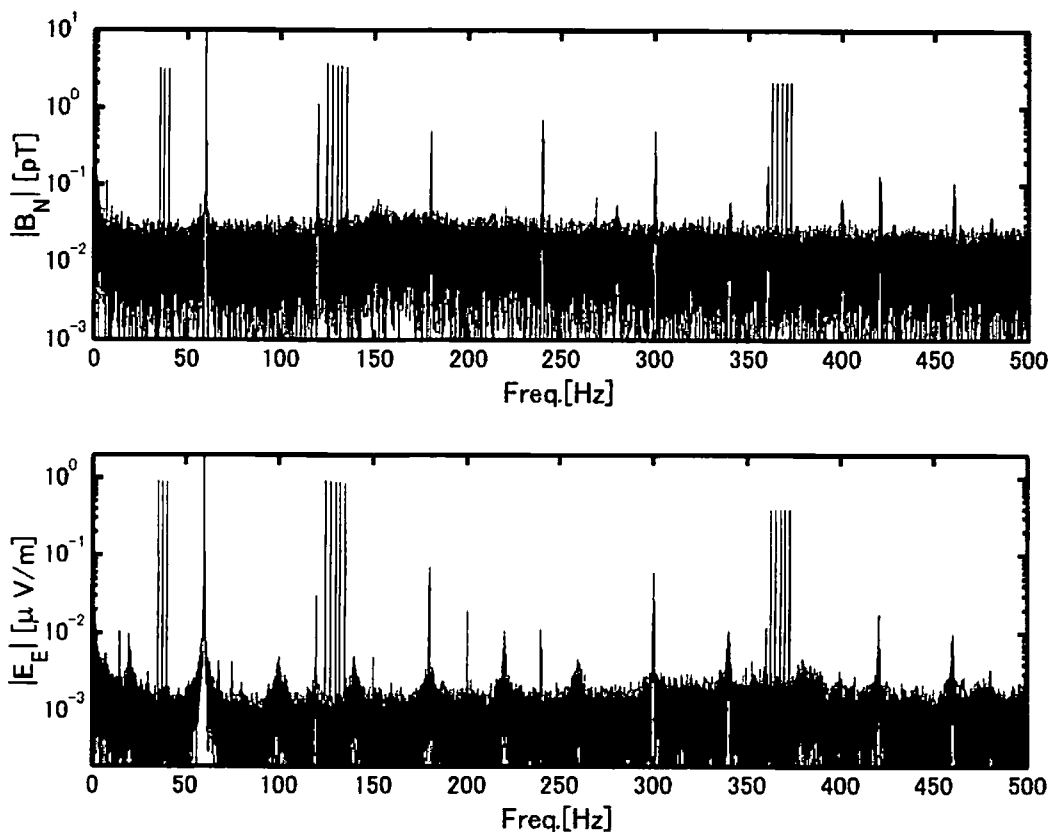
3.2 送受信試験

この送信信号を，送信点から 700m 離れたサイクル機構の正馬様用地内で観測した。観測期間中の全

での磁場・電場観測結果を、100秒の時間区間に切り取り、最適重み付スタッキングを行った（長尾ら；2003）。この方法は突発的なノイズや昼夜のノイズレベルの違いに関わらず、S/Nを最大にする。結果を第3図に示す。この図から分かるように、電場・磁場観測のどちらでも13個の周波数の送信信号が確認できる。成分によって異なるが181時間（ほぼ7.5日）のスタッキングにより2~3桁のS/Nが得られている。なお、60Hzとその高調波は、商用電源からのハムノイズである。



第2図. 連続送受信実験に用いた送信信号スペクトル. その周波数は35.0, 37.5, 40.0, 125.0, 127.5, 130.0, 132.5, 135, 362.5, 365.0, 367.5, 370.0, 372.5Hzである.



第3図. 正馬様用地内で観測された磁場北向き成分(B_N)と電場東向き成分(E_E). 181時間のスタッキング後の結果を示している. 60Hz およびその高調波のピークは商用電源に起因するノイズである.

4. 観測された伝達関数の特徴

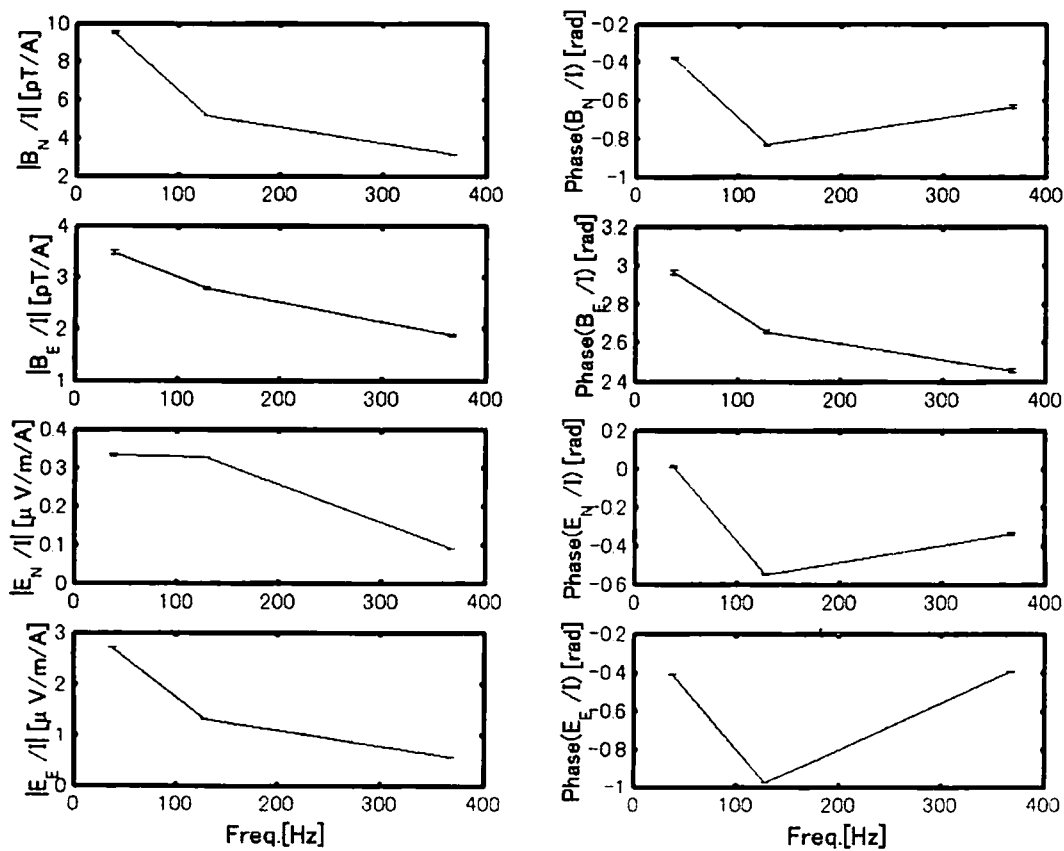
前節で示した送受信実験結果から、送受信点間の伝達関数 $H(\omega) = R(\omega)/S(\omega)$ を求める。送信信号 $S(\omega)$ としては電流を、受信信号 $R(\omega)$ は磁場・電場の各方向成分を用いた。従って伝達関数の単位は磁場の場合 [T/A]、電場の場合 [(V/m)/A] になる。伝達関数は電流ダイポールと観測点間を電磁波が伝播してきた媒質の構造と物性を周波数依存性として表している（例えば Jackson, 1998）。

4.1 各周波数帯の平均の伝達関数

3.2 節で得られたスタッキング後の伝達関数を各観測量、各周波数帯にわけ第4図に示す。図では観測された期間の平均値とその誤差範囲を示している。高周波数ほど減衰が大きいことはどの成分でも共通であるが、位相の変化は成分によって異なる。成分による特徴の違いは、次の要因による。

- 1) 送信ダイポールベクトルと受信信号ベクトルの間の幾何学的関係（テンソル成分）の違いと物理量の違い。
- 2) 波動伝播の近地場固有の特性と遠地場の重畳。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, 比透磁率 1 とした場合、今回の探査領域では $|kr| < 1$ の近地場にある。
- 3) 媒質の電気物性の不均質。

前の2者については、理論的な理解と解析ができるはずである。その理解の前提のもとに、主に最後の3) がわれわれに必要な情報を高い精度で提供している。

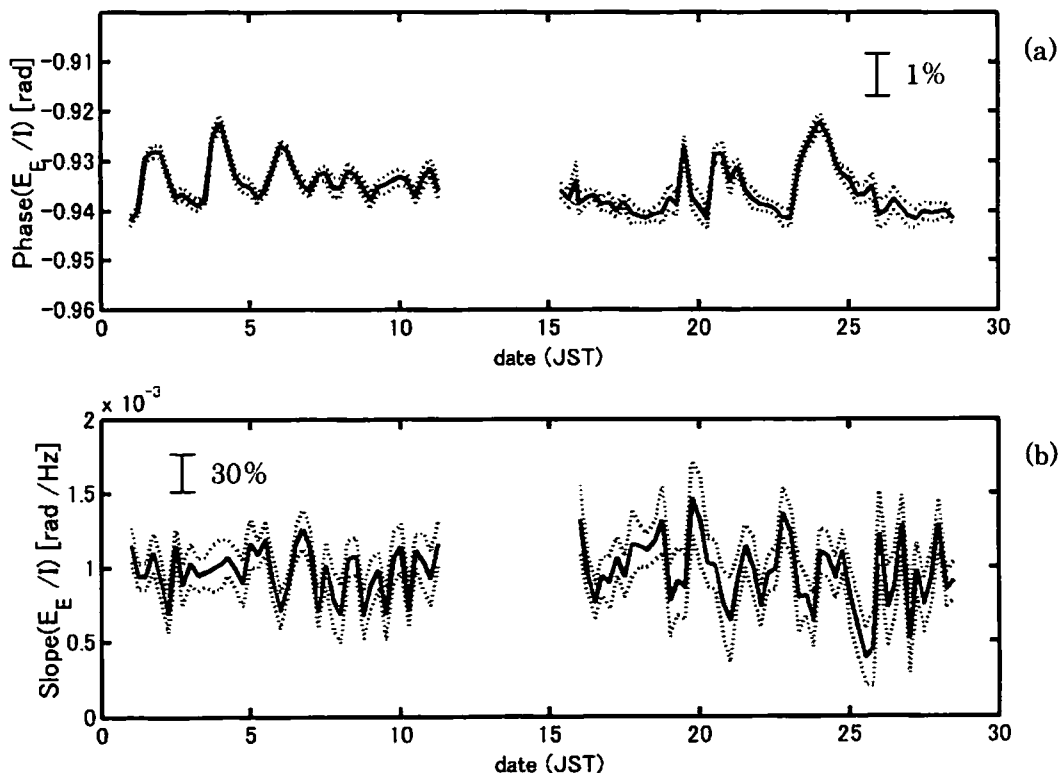


第4図. 観測された伝達関数. 左側が振幅, 右側が位相を表している. 各周波数帯の値に誤差範囲も示しているが, 電場観測ではグラフでは見分けがつかないほど誤差は小さい。

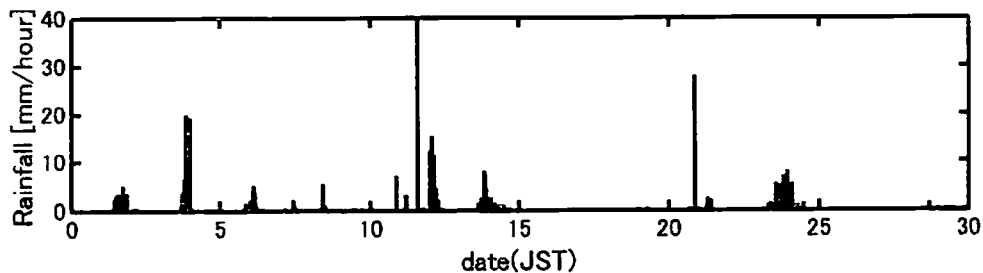
4.2 時間変動について

伝達関数の時間変動を見るために、2時間スタックごとの伝達関数を求め、1ヶ月間に亘る変動を調べた。一例として、観測期間2003年7月中の周波数帯域2（中心周波数130Hz）の E_E の5つの周波数成分の位相（各データのS/Nは約2桁）について調べた。この周波数帯域の時間変動として、5つの周波数成分の平均と、その帯域での位相の周波数依存の勾配を第5図に示す。この勾配は信号伝播速度に関係する。図で11日から16日の間、および29日以降は、落雷による停電のため観測が途切れた。

降雨など地表近傍における電気物性を支配する要因との関係を見ると、第6図に示すように、降雨によって、位相おくれが%の程度減少する傾向が見える（第5図,a）。一方、信号伝播速度の指標である位相の周波数依存性（第5図,b）には降雨との相関は見えない。これは差分をとっているため誤差も大きく確定的なことはいえないが、第5図の(a),(b)では別の時間変動の情報をもっているであろう。



第5図. 2003年7月に観測された周波数帯域2（中心周波数130Hz）の電場東向き成分の位相の時間変動. 5つの周波数成分での平均(a)と位相の周波数依存の勾配 (b). 11日から16日の間、および29日以降は、落雷のため停電した。



第6図. 2003年7月中の観測区域での時間雨量。

5. まとめ

東濃地域に設置した電磁アクロスの送受信システムの連続送受信実験により、誤差評価付の伝達関数を求めることが例証された。探査として興味のある周波数帯域に送信信号の周波数を設定することにより、その帯域での精度の良い伝達関数の連続取得の具体例を示した。また1ヶ月程度の同一送信信号の連続観測により、伝達関数の平均位相において1%程度の有意な時間変動を抽出することができ、降雨との相関があることが見出された。

今後の課題は、この観測システムの性能向上および試験観測を通して、地下構造推定と、時間変動の原因を追求することである。地下構造推定については、現在のサイトに固有の問題と、我々が一番興味のある地下深部までの観測的理解を得る問題に分けられる。

今回試験観測を行った東濃鉦山周辺は、試錐により地下1km程度まで構造が詳しく調べられている。地下100m付近に堆積岩と花崗岩の間の不整合構造を現在のシステムで推定し、手法の評価をすることが当面の目標となる。実際の構造推定のためには探査に適した周波数帯があるため、その帯域で密に観測する方が効率的であり、現在のシステムはその要求に合っている。限られた周波数帯域の伝達関数から地下を伝播する信号のレイパスに分離する解析手法は、横山ら, 2000b, Hasada *et al.*, 2001 で開発されていて、それが適用できる。ただし、今回得られた伝達関数はダイポール放射における近地場の領域であるため、近地場での解析手法が必要である。

より深い地下の観測のためには、送信信号のレベルを上げ、減衰の小さいより低い周波数を用いて、テンソル伝達関数の全成分を広い地域で多数の観測点で取得する観測システムを構築することが必要である。低周波数信号では近地場の空間領域が拡大し、観測は近地場で行うことが常道になる必然性がある。このように近地場の解析手法確立が、解析面の大きな課題である。

また時間変動については、観測誤差付でデータを取得することが現在可能になった。今回の結果のように降雨による時間変動が観測できても、それはわれわれが狙う深部物性の時間変化検出への雑音として働くことになるが、この結果は降雨の雑音効果を、回避する方法、あるいは補正する方法の研究が重要課題であることを臨場感をもって明示したと言える。特にこのサイトでは、並行して地震波を用いたアクロスの送受信観測 (Kunitomo *et al.*, 1998) を行っているため、その結果との比較も行いながら深部の時間変動観測の方法を追求していくことが必要であろう。

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 2003 年論文集, 140-147, 2003.
- 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.
- 中島崇裕, 國友孝洋, 長尾大道, 熊澤峰夫, 茂田直孝, 東濃電磁アクロスシステムの開発と試験観測, CA 研究会 2003 年論文集, 133-139, 2003.
- 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.
- 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.