

MT法におけるファーリモートリファレンス法の有効性

高倉伸一
(地質調査所)

Validity of Far Remote Reference Method in Magnetotellurics

Shinichi Takakura
(Geological Survey of Japan)

1. はじめに

MT法は微弱な自然電磁場をシグナルとしていることから、ノイズの影響を受けやすい。そのため、ノイズレベルが高い地域での適用には困難が伴う。国内ではMT法はこれまで地熱探査に適用されることが多かったが、この理由の一つとして、地熱地域の多くが比較的ノイズレベルが低い北海道、東北および九州地方の山岳部にあることがあげられる。しかし、最近では石油探鉱や地震予知などの分野にもMT法の適用が試みられるようになり、ノイズレベルが高い平野部での調査も増えてきている。測定機器の進歩やデータ処理法の発展によりノイズ処理の技術は急速に向上しているものの、広域に影響を及ぼす強いノイズに汚染されている地域では、なかなか良好な品質のデータが取得できないのが現状である。

そのような広域ノイズの除去に対し、高倉ほか(1994a)は遠方(ここでは少なくとも100km以上の距離)のリファレンス点を用いるファーリモートリファレンス法を提案し、新潟県東頸城地域の実験調査においてその有効性を示した。その後、ファーリモートリファレンス法はいくつもの調査で効果を上げ(たとえば、内田・光畑, 1994; 高倉ほか, 1994b, 1994c)、その有効性は多くの人に認められつつある。

しかし、その一方で、リファレンス点を離すと自然電磁場の相関が悪くなるので、ファーリモートリファレンス法はデータをかえって悪くすると考えている人も多い。そして、遠距離のリファレンス点を用いたためにデータの品質が悪くなっている事例もいくつか見受けられる。しかし、筆者が見る限り、その原因の多くはリファレンス点におけるノイズ環境の悪さや測定時間の不足によるものと考えられ、ファーリモートリファレンス法の有効性を否定するものではないと思われる。

そこで、本報告では、ファーリモートリファレンス法の有効性について再検討する。まず、リモートリファレンス法の原理をもとに、ノイズがMT法のインピーダンスの推定に与える影響について検討する。次に、リファレンス点を離すことにより自然電磁場の相関が多少悪くなくても、実用上の問題は少ないことを述べる。また、ファーリモートリファレンス法の適用に当たっては、長時間測定やノイズ環境を考慮したりリファレンス点の選定が必要であることを述べる。最後に高倉(1994a)の実験データを再検討し、ファーリモートリファレンス法の有効性について考察する。

なお、ファーリモートリファレンス法を適用して求めた新潟県東頸城および上越地域の比抵抗構造については、高倉ほか(1994c, 1994d)にあるのでここでは割愛する。

2. ファーリモートリファレンス法

2.1 リモートリファレンス法におけるノイズの影響

MT法における電場Eと磁場Hの間には、

$$\begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} H_x \\ H_y \end{pmatrix} \quad (1)$$

の関係式が成立する。ここで、Zはインピーダンスと呼ばれる、地下構造の比抵抗や2次元・3次元性などの情報をもつテンソル量である。2つ以上の独立の信号がある場合、AとBを参照信号とすると、各インピーダンスは、

$$\begin{aligned} Z_{xx} &= (\langle E_x A^* \rangle \langle H_y B^* \rangle - \langle E_x B^* \rangle \langle H_y A^* \rangle) / D \\ Z_{xy} &= (\langle E_x B^* \rangle \langle H_x A^* \rangle - \langle E_x A^* \rangle \langle H_x B^* \rangle) / D \\ Z_{yx} &= (\langle E_y A^* \rangle \langle H_y B^* \rangle - \langle E_y B^* \rangle \langle H_y A^* \rangle) / D \\ Z_{yy} &= (\langle E_y B^* \rangle \langle H_x A^* \rangle - \langle E_y A^* \rangle \langle H_x B^* \rangle) / D \\ D &= \langle H_x A^* \rangle \langle H_y B^* \rangle - \langle H_x B^* \rangle \langle H_y A^* \rangle \end{aligned} \quad (2)$$

と求まる。ここで、*は共役複素数を表し、 $\langle \rangle$ はクロスパワーの平均推定値を表す。一般にAとBには磁場信号が用いられることが多く、リモートリファレンス処理ではリファレンス点での H_{rx} と H_{ry} が使用される。すなわち、リモートリファレンス法では、測定点の測定成分とリファレンス点の磁場成分とのクロスパワーをとることにより、インピーダンスが求まることがわかる。

インピーダンスの推定に与えるノイズの影響を考慮するため、測定成分を信号成分Sとノイズ成分Nとに分け、測定点(M)で取得される測定成分を $M = S_m + N_m$ とし、リファレンス点(R)で取得される測定成分を $R = S_r + N_r$ とする。このとき、MとRのクロスパワーの推定値は

$$\langle M R^* \rangle = \langle S_m S_r^* \rangle + \langle S_m N_r^* \rangle + \langle N_m S_r^* \rangle + \langle N_m N_r^* \rangle \quad (3)$$

となる。ふつう、信号成分とノイズ成分の間には相関がないので、 $\langle S_m N_r^* \rangle = \langle N_m S_r^* \rangle = 0$ である。したがって、測定点とリファレンス点で測定されるノイズに相関がなくなるまで、すなわち $\langle N_m N_r^* \rangle = 0$ となるまで2点を離せば、ノイズの影響がないMとRのクロスパワーが求まることがわかる。逆に測定点とリファレンス点とが同一のノイズが測定されるような距離であるならば、 $\langle N_m N_r^* \rangle > 0$ となるので、その分だけMとRのクロスパワーがバイアスされる。そのバイアスはインピーダンスにも伝播されるため、それから求まる見掛比抵抗や位相もバイアスされるようになる。

2.2 ファーリモートリファレンス法の有効性

現在、MT法で実用的に用いられているデータ処理法や解析法は最小2乗法(最尤推定法)を基本としているものがほとんどである。これらの方法は、データの誤差が正規分布に従うことを前提としており、バイアスが加わったデータに対して意味はなさない。したがって、現状のデータ処理法や解析法を用いる限り、測定点と同一のノイズが測定されなくなるまでリファレンス点を離すことは必須である。ファーリモートリファレンス法はこの条件を必ず満たす方法である。すなわち、バイアスのないデータを取得することに何よりも重点をおいた方法といえることができる。

従来より、リファレンス点が遠くなるとシグナル成分の相関も失われると、すなわち $\langle S_m S_r^* \rangle = 0$ になると考えられる傾向がある。しかし、MT法のシグナルである地磁気脈動による数Hz以下の電磁波や、数~数10Hzのシューマン共振周波数帯におけ

る雷活動による電磁波は、地球規模で伝搬する。したがって、測定点とリファレンス点とが数100km程度離れていても、取得されるシグナルの相関はある程度は保証されるはずである。逆に相関がほとんどなくなるものは、MT法の本来のシグナルである自然電磁場ではないと考える方が妥当である。

また、(2)式からわかるように、リファレンス点の参照信号はインピーダンスを求める式の分子と分母に均等に乘じているだけであり、インピーダンスの値には実質的には影響しない。したがって、たとえ信号の相関が多少失われても、S/N比が低下するだけであり、インピーダンスがバイアスされることはない。このS/N比の低下については、長時間測定によりデータ（スタッキング）数を増やすことで克服できる。

2.3 ファーリモートリファレンス法の適用法

ファーリモートリファレンス法の適用が必要とされるのは、広域に影響を及ぼす強いノイズに汚染されている地域である。したがって、その適用に当たっては測定時間を従来より長く取る必要がある。なぜなら、 $\langle \rangle = 0$ というのはクロスパワーの平均推定値の期待値が0ということであるので、データ数が十分に多くなければ、(3)式の右辺の第2項以下が0に収束しない可能性が高いからである。とくにノイズのパワーがシグナルのパワーと比較して強い場合は、十分なデータ数が必要となる。なお、強いシグナルを捉えらる確率を増やすという点を考えても、長時間測定は望まれる。

逆にシグナルのパワーがノイズのパワーと比較して強ければ、少ないデータでも $\langle S_m S_r^* \rangle \gg \langle S_m N_r^* \rangle + \langle N_m S_r^* \rangle + \langle N_m N_r^* \rangle$ となるので、短時間の測定でもノイズの影響の少ないデータを取得することが可能となる。したがって、データのS/N比を効率的に向上させるためには、測定点もリファレンス点もノイズの少ない場所を選ぶ必要がある。しかし、限られた調査地域の中でノイズの少ない場所を測定点に選ぶのは現実には難しいので、S/N比が高いデータを取得するためにも、また測定効率を上げるためにも、できるだけノイズの少ない場所をリファレンス点として選定することが望まれる。

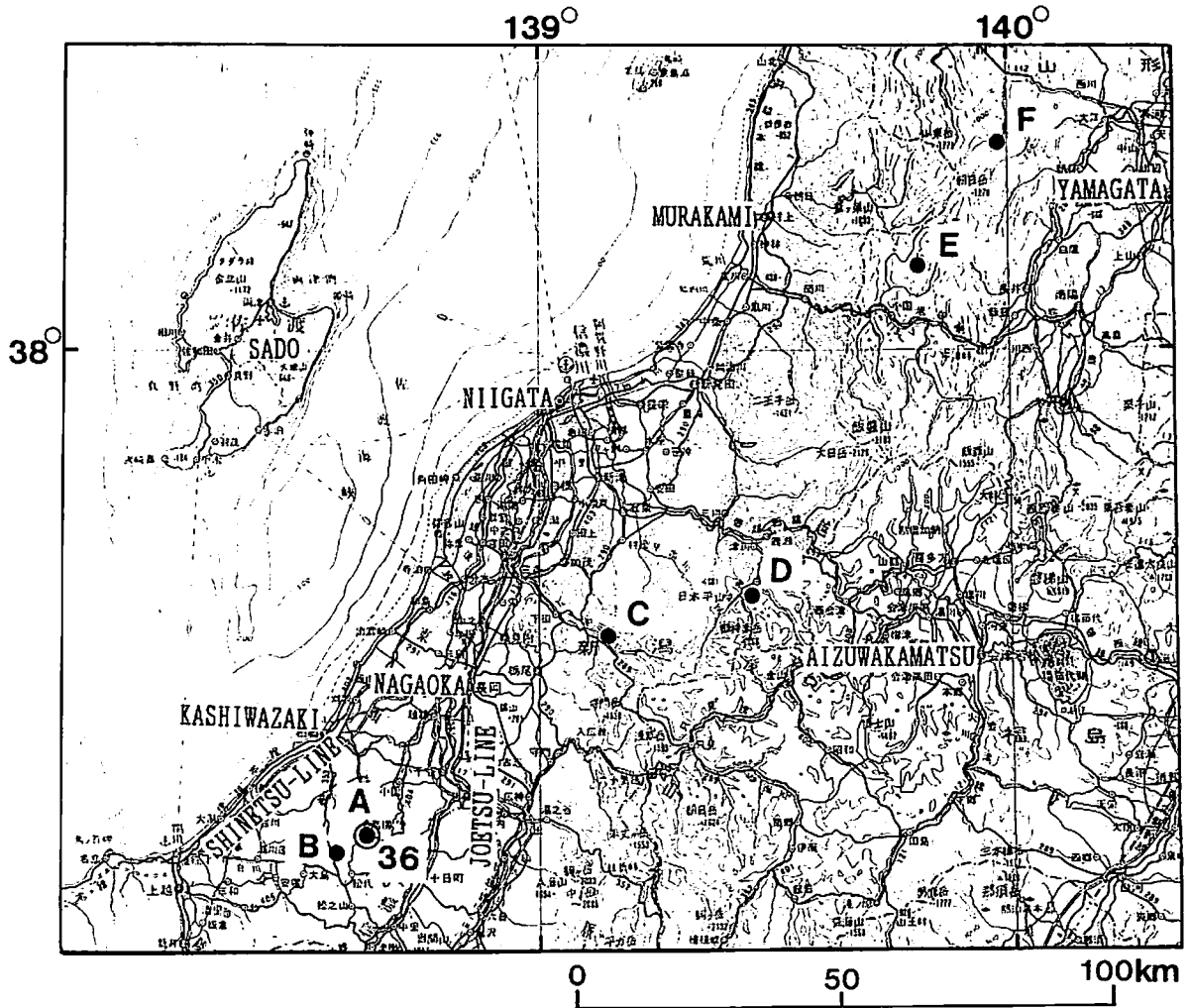
3. 新潟県東頸城地域の実験データに関する考察

3.1 実験の概要

新潟県東頸城地域は柏崎市の南方約20kmの丘陵または山地に位置する（第1図）。本地域内には柏崎原子力発電所からの送電線を除けばノイズ源と認定されるものは比較的少ない。しかし、本地域から約5~20kmの位置にある直流電化された鉄道（JR信越本線およびJR上越線）からの漏洩電流の影響と考えられるノイズのため、MT法のデータがバイアスを受けることが知られている。そこで、高倉ほか(1994a)は、このバイアスの除去のため、リファレンス点をどの程度まで離す必要があるかを実験した。実験では、基礎試錐「東頸城」（掘削長:6004m）の近傍の測点36に対し、6つのリファレンス点を置いた（第1図）。測定点からの距離はそれぞれA:100m、B:6.7km、C:58km、D:85km、E:147km、F:175kmである。各リファレンス点では3日間のデータ取得を行った。

3.2 本地域のノイズとMT法のデータに与える影響

第2図にシングルサイト処理の場合と点Eを用いたリファレンス処理の場合のTEモードの見掛比抵抗と位相を、比抵抗検層データから計算されるMT応答とともに示す。



第1図 新潟県東頸城地域の実験調査位置図

○:基礎試錐「東頸城」(測点36)

●:リファレンス点(A:100m, B:6.7km, C:58km, D:85km, E:147km, F:175km)

シングルサイト処理の結果は、見掛比抵抗は0.1Hz前後で下がった後、それより低周波では45度以上の勾配で急激に上昇し、また位相は0.1Hz前後で急激に0度付近へと下降する。比抵抗検層データから計算されるMT応答と比較すると、低周波で見掛比抵抗と位相がバイアスされているのは明らかである。この見掛比抵抗や位相の周波数変化はMT法の理論上では考えられない異常なものであり、これに従来の解析法を適用することは不可能である。

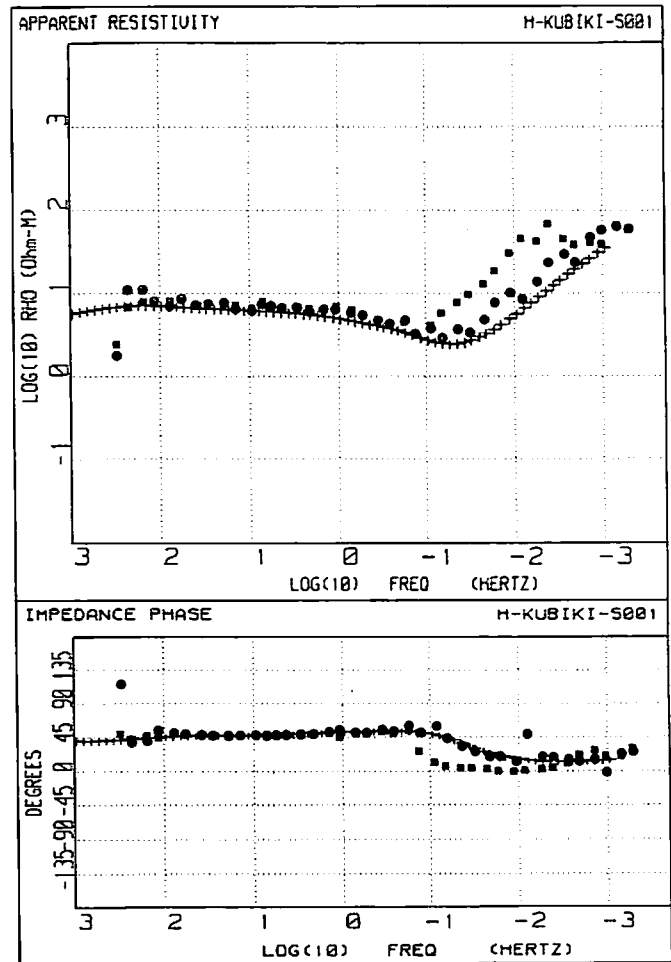
この見掛比抵抗と位相の変化は、CSAMT法におけるニアフィールド領域の見掛比抵抗や位相の変化とよく似ている。したがって、この変化を人工の電磁ノイズの影響と考えると、少なくとも0.01~0.1Hz前後の周波数帯域をもつノイズ源が近傍にあると予想される。ここでは示していないが、電場および磁場の時系列データを見ると、ステップ状に変化を示す異常が認められる。ステップ状の変化には理論上あらゆる周波数帯域が含まれる。したがって、このことからCSAMT法の人工信号源のようなノイズ源の存在が示唆される。ノイズ源の正体については特定できないが、従来から予想されているように直流電車からの漏洩電流である可能性は高い。ただし、比抵抗を約10Ωmと仮定し、電流ダイポールによるCSAMT法の応答計算を行うと、周

波数0.1Hzでニアフィールドを起こすためには、電流ダイポールの位置は少なくとも30km以上の遠方になれば説明がつかない。つまり、ノイズ源は近傍の直流電化された鉄道より遠方にあることになる。ここでは示していないが、本地域では東西約30km、南北約10kmの範囲にわたりデータに同様な異常が現れる。また、本地域の30km南西に位置する新潟県上越地域でも同様な異常が現れる。これらの異常を説明する一つの可能性は、日本海をほぼ東西あるいは北東-南西方向に流れる（漏洩）電流の存在であるが、今のところその検証はできていない。

3.3 リファレンス点までの距離とファ-リモートリファレンス法の効果

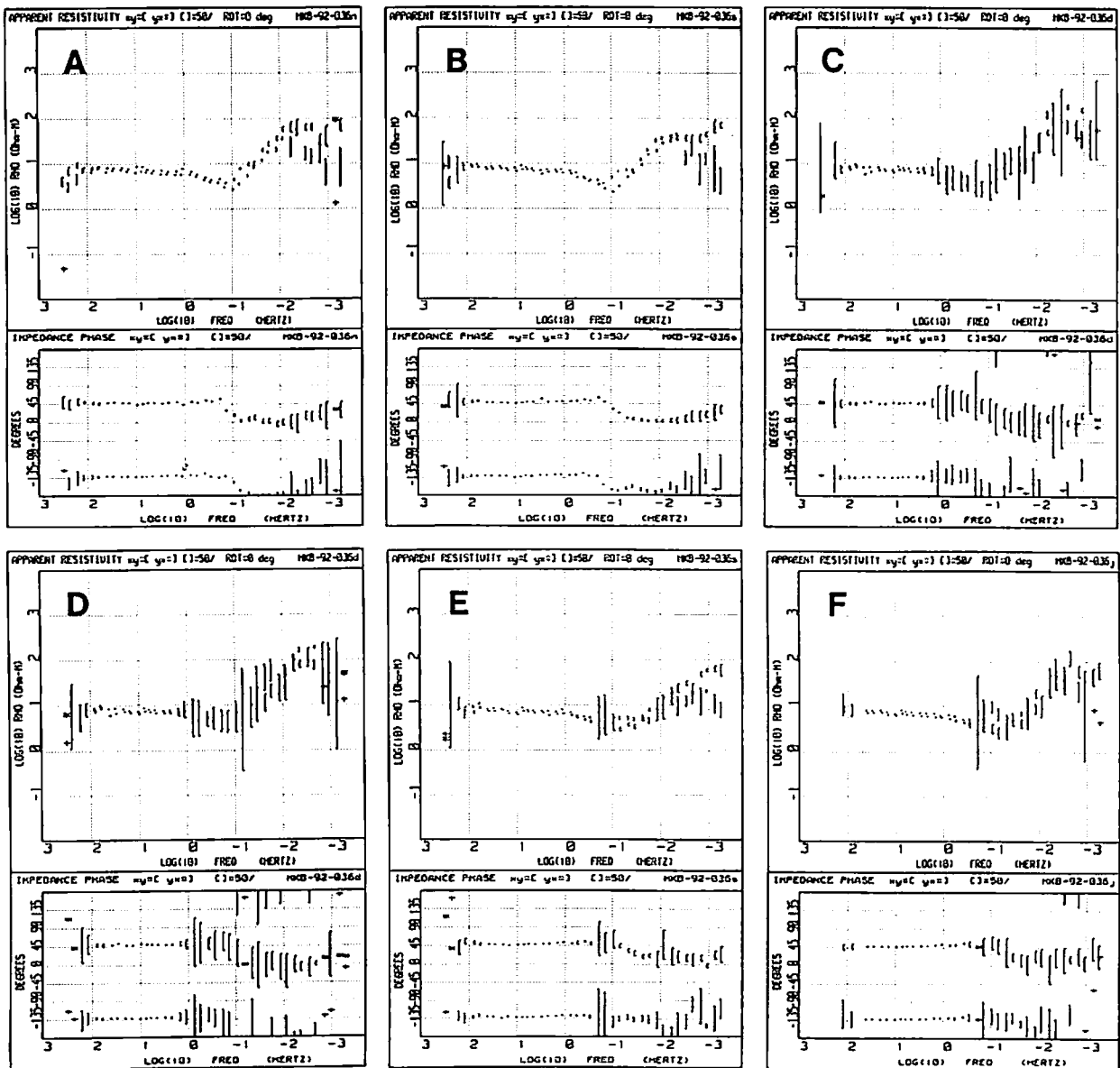
第2図を見ると、測点Eを用いてリファレンス処理をした結果は、見掛比抵抗にスタティックシフトと考えられる差が見られるものの、見掛比抵抗、位相とも比抵抗検層から求めたMT応答にほぼ一致することがわかる。これより、ファ-リモートリファレンス法により、データからバイアスが除去され、大地の真の比抵抗構造を反映したデータの取得が可能になると判断される。

リファレンス点までの距離とファ-リモートリファレンス法の効果の関係を見るため、第3図に各リファレンス点を用いてリファレンス処理した測点36の見掛比抵抗と位相を示す。ここで、各データのエラーバーが示す範囲は、そこに測定値が50%の確率で入る信頼区間を表している。点A、Bを用いた処理結果にはシングルサイト処理結果とほとんど同じ異常が現れており、本地域のノイズは近距離のリモートリファレンス法では除去できないことがわかる。また、点C、Dの処理結果でも、その異常は十分には解消されていない。しかし、点AやBと比較してエラーバーが大きくなっていることは、相関の強いノイズが除去されている反映と考えられるため、リモートリファレンス法の効果は不十分ながら現れていると判断できる。一方、点Eの結果では、第2図に示したように、異常はほとんど解消されている。この結果においてもエラーバーが点AやBの結果より大きいのが、これはノイズに汚染されたデータが除去され、全体のデータ数が減少したからと理解される。最も遠方の点Fでも異常はほとんど解消されているが、エラーバーが大きく、データの品質が十分ではない。これは、リファレンス点のノイズレベルが比較的高か



第2図 基礎試錐「東頸城」近傍の測点36のMT法データ

- :シングルサイト処理
- :点Eによるリファレンス処理
- +:比抵抗検層から計算されるMT応答



第3図 各リファレンス点のデータを用いてリモートリファレンス処理した測点36の見掛け抵抗と位相

ったことから、除去されるデータが点Eより多く、データの数が少なくなったため、S/N比が相対的に低下したからである。このように、リファレンス点のノイズ環境が悪ければ、ファーリモートリファレンス法の効果は低下するので、リファレンス点の選定は重要である。

3.4 ファーリモートリファレンスが有効な周波数帯域

各周波数ごとにファーリモートリファレンス法の効果を比較すると、本地域の場合、周波数0.1~0.01Hz前後でその効果がよく現れていることがわかる。これは、データをバイアスさせるノイズの影響がその周波数帯域で卓越していることを意味している。一方、0.001Hz以下ではバイアスノイズは顕著ではなく、シングルサイト処理とファーリモートリファレンス法を用いた場合の差は小さい。これは、低周波では自然電磁場の強度が強いことから、S/N比が相対的に高くなった結果であろう。これが全ての

地域に適用できるとは限らないが、0.001Hz以下の低周波帯域を対象とする調査では、ファーマトリファレンス法は必要ないのかも知れない。

また、1 Hz以上のデータもリファレンス点がどの位置にあってもほとんど差が見られない。したがって、本地域の場合、高周波のデータに対してはリファレンス点をそれほど遠方に置く必要ないと判断できる。逆にいえば、ことことはリファレンス点を遠く離しても高周波までシグナルの相関は保証されるということの意味している。つまり、リファレンス点を遠距離においても、通常のMT法が対象とする周波数帯域ではデータの品質の低下は起こらないと判断できる。

4. おわりに

ファーマトリファレンス法は、ノイズの多い地域でなんとか解析可能なMT法データを取得しなければならないという必要から生まれた方法である。そのため、現状ではそれを円滑に実施するためのハードウェアやソフトウェアの環境が整っておらず、測定効率、作業量および費用などの面を犠牲にしているところがある。今後、GPSなどを用いた測定機器の同期法、測定データの現地処理あるいはリアルタイム処理のための大容量時系列データの転送法など、ファーマトリファレンス法を実施しやすい環境にするための技術開発が必要である。

参考文献

- 高倉伸一・武田祐啓・松尾公一(1994a):MT法における広域ノイズの影響とファーマトリファレンス法によるその除去,物理探査,47,24-35
- 高倉伸一・志賀信彦・村山隆平(1994b):MT法の国内石油探査への適用(その2)-北海道天北地域および黒松内地域における実験調査結果-,物理探査学会第90回学術講演会講演論文集,527-531
- 高倉伸一・志賀信彦・村山隆平(1994c):MT法の国内石油探査への適用(その3)-新潟県東頸城地域および上越地域における実験調査結果-,物理探査学会第90回学術講演会講演論文集,532-535
- 高倉伸一・志賀信彦(1994d):難地域物理探査技術 電磁探査技術の開発 -MT法の国内石油探査への適用に関する研究-,平成5年度石油開発技術センター年報,物理探査研究室,45-53
- 内田利弘・光畑裕司(1994):宮城県北部地域MT法データのリモトリファレンス処理によるノイズ除去,Conductivity Anomaly 研究会 1994年 論文集,37-46