

# 広帯域MT固定連続観測システムを用いた地殻比抵抗モニタリング

国土地理院測地部 佐藤 秀幸

Monitoring of crustal resistivity variations using a stationary wideband MT measurement system

Hideyuki SATOH

Geodetic Department, Geographical Survey Institute

## 1. はじめに

近年地震波の解析から、地殻中に多くの地震波散乱源あるいはS波反射面が存在することが指摘されている。これらは断層面やその近傍の破碎帯、あるいは地殻中に存在する流体(地下水あるいは溶融体)であると推定されている(例えば、浅野ほか, 1999; Nakajima et al., 2001 など)。断層面近傍に存在する微小な割れ目や破碎帯は、緻密な岩盤の中でも地下水の存在を許し、水を通したり、貯えたりすることを可能にする。このことは断層面近傍には比抵抗の不均質性があることを予想させる。従って、地殻の比抵抗を連続的にモニタリングすれば、地殻内の水の動きが把握でき、地震活動に伴うシグナルの検出ができるものと期待できる。

そこで、地殻の比抵抗をモニタリングするため、広帯域MT (Magnetotelluric) 固定連続観測システムを水沢測地観測所および江刺観測場に設置し、1996年4月から見掛け比抵抗の連続観測を開始した。本報告では、地震活動や地殻変動と関連した比抵抗変化を検出する方法のひとつとして、測定システムの安定性を議論した上で、MT法による地殻比抵抗モニタリングが有用であることを示す。

## 2. 観測

### 2.1 観測場所

測定機器は、水沢測地観測所構内(岩手県水沢市)および江刺観測場構内(岩手県江刺市)に設置し(以下、水沢および江刺と、それぞれ呼ぶことにする)、1996年4月よりデータ取得を開始した(図-1)。観測点は人工的なノイズをできるだけ避ける必要があるため、人里離れた山中に設置することが望ましい。幸い水沢測地観測所および江刺観測場は、従来から全磁力観測や地磁気3成分観測を実施している場所なので、この条件には適している。

### 2.2 データ取得システム

水沢および江刺それぞれの観測点では、磁場3成分(水平2成分と鉛直成分)、電場2成分(水平2成分)の合計5成分データを、320Hz から0.00055Hz(周期1800秒)にわたる帯域で、毎日23時間30分にわたり連続的に計測している。なお観測には、カナダフェニックス社製V5測定システムを基本としたMT固定連続観測装置を採用している(Phoenix Geophysics, 1997)。機器設置当時

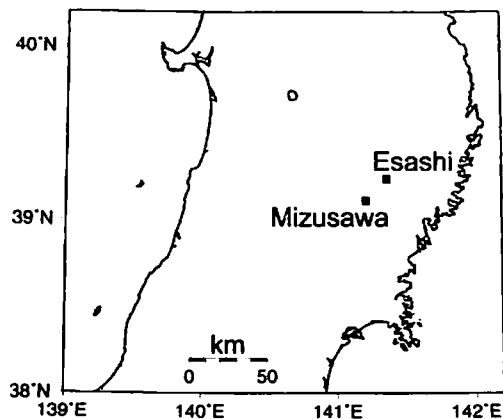


図-1 観測点配置図

図中の Mizusawa は水沢測地観測所を、Esashi は江刺観測場の位置をそれぞれ示している。なお、両観測点は20km 離れている。

		江刺観測場	水沢測地観測所
V5	シリアルナンバー	V5662	V5661
SPV5	シリアルナンバー	B9656	B9655
Hx	磁力計シリアルナンバー	9679	9682
	磁北からの回転角度	0.0 deg.	-35.0 deg.
Hy	磁力計シリアルナンバー	9680	9683
Hz	磁力計シリアルナンバー	9681	9664
Ex	電極間隔	100.0 m	100.0 m
	磁北からの回転角度	0.0 deg.	-35.0 deg.
Ey	電極間隔	100.0 m	100.0 m

表-1 観測機器のシリアルナンバーおよび電極間隔

は、世界で初めての連続観測装置であった。

磁場はインダクション磁力計で測定し、電場はおよそ 100m離れた電極間の電位差から求める。表-1には、測定機器のシリアルナンバー、電極間隔および磁北からの回転角度を記した。電位線は設置場所の土地の制約により、必ずしも磁北方向と、それと直交する方向に埋設できるわけではない。そこで、水沢測地観測所では測定座標系を磁北から西へ35度ずらした方向と、それに直交した方向との2測線において電位差観測を行っている。この角度を、磁北からの回転角度と表記した。そして実際のデータ解析の際には、座標変換により磁北方向で計測した値に換算してデータ処理を進めている。電位電極とインダクションコイルによって検出された信号は、ピット内に埋設されたSPV5に入力され、ここで増幅、バンドパスフィルターによってフィルタリング処理された後、埋設ケーブルを通して、観測所施設内のV5データ取得・処理装置に入力される。V5に入力された信号は、16ビットADで数値変換され、GPS同期の時刻信号によって時系列処理される。そのデータは、V5内部メモリ/データ取得用のPCを介して、外付けハードディスクに記録される。このようにして、水沢測地観測所および江刺観測場においてそれぞれデータの取得をしている。

次にデータ取得システム全体を説明するため、図-2にシステム構成図を示す。江刺で取得した時系列データは、1時間ごとに水沢のデータ処理用メインPCに自動的に電話回線を介して転送される。それと同時に、水沢のデータ取得用PCに収録した時系列データもデータ処理用メインPCに転送される。図-2の es\*\*\*\*.hdr, es\*\*\*\*.tsh, es\*\*\*\*.tsl は江刺の時系列データを、mi\*\*\*\*.hdr, mi\*\*\*\*.tsh, mi\*\*\*\*.tsl は水沢の時系列データを表している。各ファイルの\*\*\*\*には、日付と時刻が記録される。なお、それぞれの観測点における1日分のデータ容量は、約60Mbyteである。

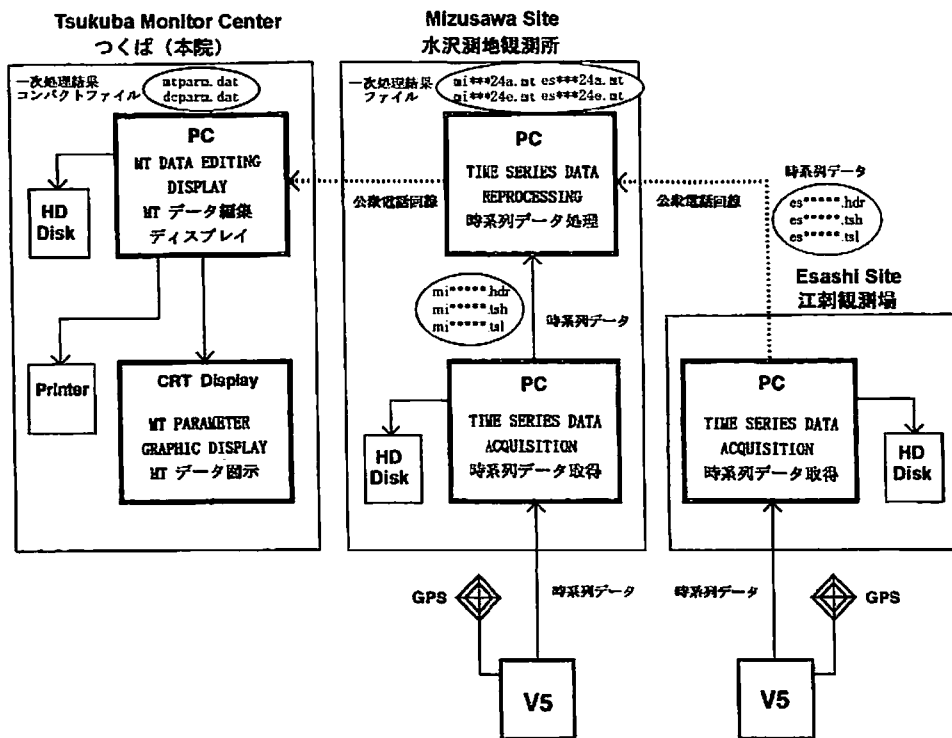


図-2 データ取得システム構成図

GPSによって同期された両観測点の時系列データは、ローカルノイズを除去するため、リモートレファレンス処理を施し、クロスパワーデータとしてファイルに記録する(Goubau et al., 1984)。ここで作成されるファイルは4種類あり、es\*\*\*24a. mt, es\*\*\*24e. mt (江刺の一次処理結果ファイル), mi\*\*\*24a. mt, mi\*\*\*24e. mt (水沢の一次処理結果ファイル)である。それぞれのファイル末尾のaはシングルサイト処理結果、eはリモートレファレンス処理結果を示している。また、各ファイルの\*\*\*には日付が記録される。ファイルの容量は、1日分でそれぞれ600Kbyteである。つくば(本院)では、データ転送のための回線が細いため、一次処理結果ファイル

ルからさらに最低限の情報だけ抜き出したファイル (mtparm.dat, dcparm.dat) のみを吸い上げて、毎日モニターしている。なお、このファイルのデータ容量は、2つ合わせて1日分で1Mbyteである。

### 3. データ処理および結果

#### 3.1 探査曲線の特徴とデータクオリティー

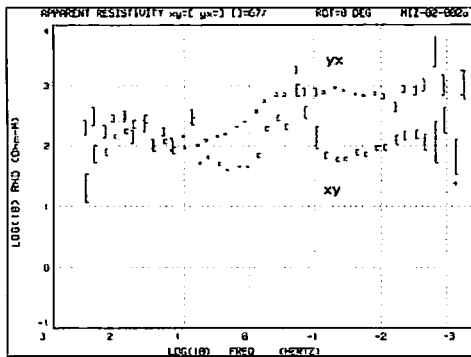
図-3-1にはシングルサイト処理によって得られた、水沢における見掛け比抵抗曲線と位相差曲線を、図-3-2にはリモートレファレンス処理によって得られた、同所の見掛け比抵抗曲線と位相差曲線を示す。両図とも比較的エラーバーの小さな日を選んでプロットしている。見掛け比抵抗曲線に着目すると、水沢で取得されるデータは、普段は0.1Hz-0.001Hz (周期10秒-1000秒)の帯域ではこれよりもさらにクオリティーが落ちる。また定常的に高周波帯、10Hzぐらまではエラーバーが大きい。全体的には、見掛け比抵抗のyx成分はエラーバーが小さいが、xy成分では大きいという特徴がある。ノイズの原因は特定できないが、水沢測地観測所は東北新幹線にかなり近いところに位置するため、これが原因のひとつではないかと考えられる。図-3-1に示した時系列データに対して、観測点近傍のローカルノイズを除去し、データクオリティーを高めるため、江刺の磁場データを使用し、リモートレファレンス処理を施した結果が図-3-2である (Goubau et al., 1984)。リモートレファレンス処理とは、2つの観測点における磁場変動は同一であるという仮定のもとに、互いの磁場データ間での相関を求め、コヒーレントなデータのみシグナルと見なしてインピーダンスを計算するという手法である。図-1に示したように、両観測点は約20kmと比較的近い距離に位置しているため、前述の仮定は成り立つと見なすことができる。図-3-1の10Hzまでの高周波のデータと比較すると、エラーバーがかなり小さくなり、探査曲線もスムーズにつながるようになっている。しかしながら、0.01Hz-0.001Hz (周期100秒-1000秒)の帯域では、ほとんど改善が見られない。このことから、江刺観測場の磁場データを使いリモートレファレンス処理を施しても、もともとノイズレベルの高い水沢のデータに対しては、これ以上改善できないことを意味している。

次に図-4-1には、シングルサイト処理によって得られた、江刺における見掛け比抵抗曲線と位相差曲線を、図-4-2にはリモートレファレンス処理によって得られた、同場の見掛け比抵抗曲線と位相差曲線を示す。これも比較的エラーバーの小さな日を選んでプロットしたものである。江刺の探査曲線は、普段は長周期側 (周期10秒以上) では図-4-1よりもややクオリティーが落ちる。また定常的に、高周波2周波と、1Hzから0.1Hz (周期1秒から10秒) まではエラーバーが少し大きい傾向にある。しかし、全体的に見るときれいなデータが得られている。図-4-1に示した時系列データに対しても、水沢の磁場データを使用し、リモートレファレンス処理を施した。その結果が図-4-2である。図-4-1の1Hz-0.1Hz (周期1秒から10秒)の帯域のデータと比較すると、エラーバーがかなり小さくなっており、さらに探査曲線もスムーズにつながるようになっている。このことから、水沢の磁場データはそれほど高いクオリティーを持っているわけではないが、リモートレファレンス処理には有効であることを示していることがわかる。

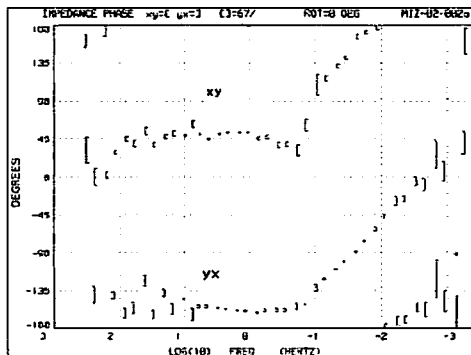
#### 3.2 見掛け比抵抗および位相差の時間変化

3.1節で述べたように、水沢で取得しているデータは、人工ノイズの影響により、リモートレファレンス処理を適用しても、データのクオリティーを向上させることができないことがわかった。そこで、ここでは江刺におけるデータにのみ着目することにする。図-5には、3つの周波数 (7.5Hz, 0.0234Hz, 0.00879Hz) に対する、1997年から2001年までの5年間分の見掛け比抵抗の時間変化をプロットした図を示す。7.5Hzはシューマン共振帯域、0.0234Hzと0.00879HzはPc変動帯域で、それぞれ信号強度が大きい周波数であることから、まずはこの3つの周波数を選んだ。なお、データが途切れているのは、機器トラブルやその他の理由により、欠測しているため処理ができなかった期間である。

各周波数に対する見掛け比抵抗および位相差に共通して、シングルサイト処理の結果よりも、リモートレファレンス処理をした結果の方が、データのばらつきは明らかに小さい。3つの周波数に共通してRho<sub>yx</sub>成分の見掛け比抵抗が1998年に一度減少し、その後は緩やかに増加していく傾向が見られる。一方、xy成分の見掛け比抵抗は1998年に一度減少する傾向は同様であるが、その後はわずかではあるが緩やかに現象しているように見える。しかしながら、図示していないが同期間の位相差にはそれに対応するような変

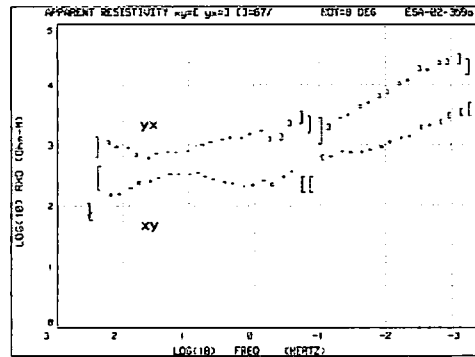


(a) 見掛け比抵抗曲線

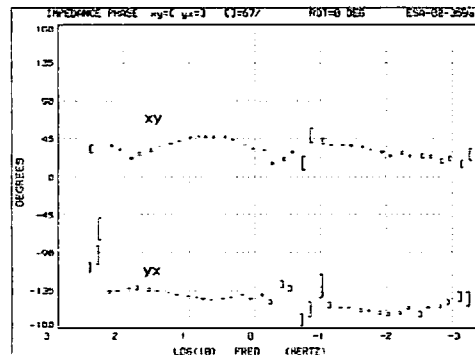


(b) 位相差曲線

図-3-1 シングルサイト処理によって得られた水沢の(a)見掛け比抵抗曲線および(b)位相差曲線

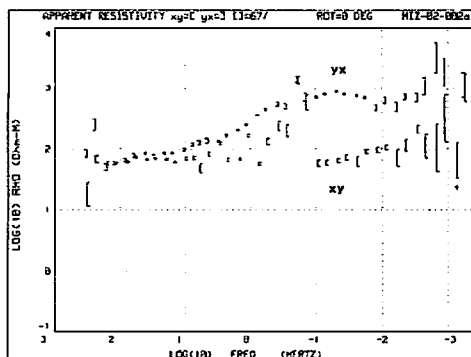


(a) 見掛け比抵抗曲線

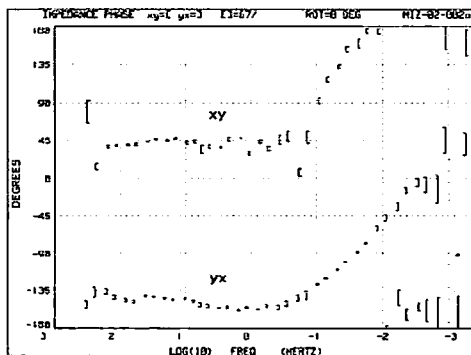


(b) 位相差曲線

図-4-1 シングルサイト処理によって得られた江刺の(a)見掛け比抵抗曲線および(b)位相差曲線

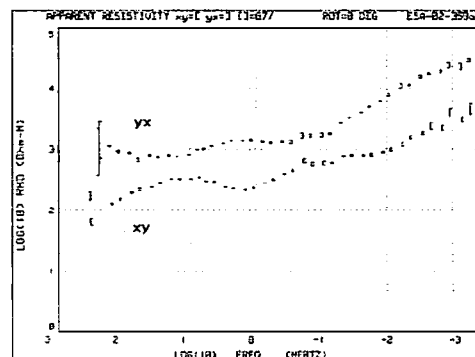


(a) 見掛け比抵抗曲線

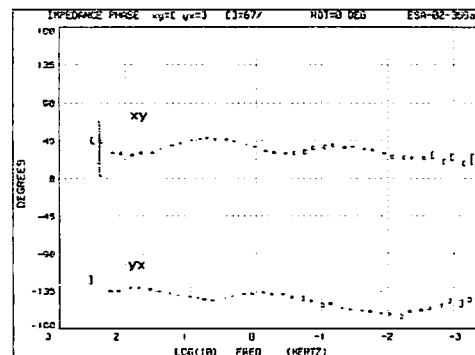


(b) 位相差曲線

図-3-2 リモートレファレンス処理によって得られた(a)見掛け比抵抗曲線および(b)位相差曲線



(a) 見掛け比抵抗曲線



(b) 位相差曲線

図-4-2 リモートレファレンス処理によって得られた(a)見掛け比抵抗曲線および(b)位相差曲線

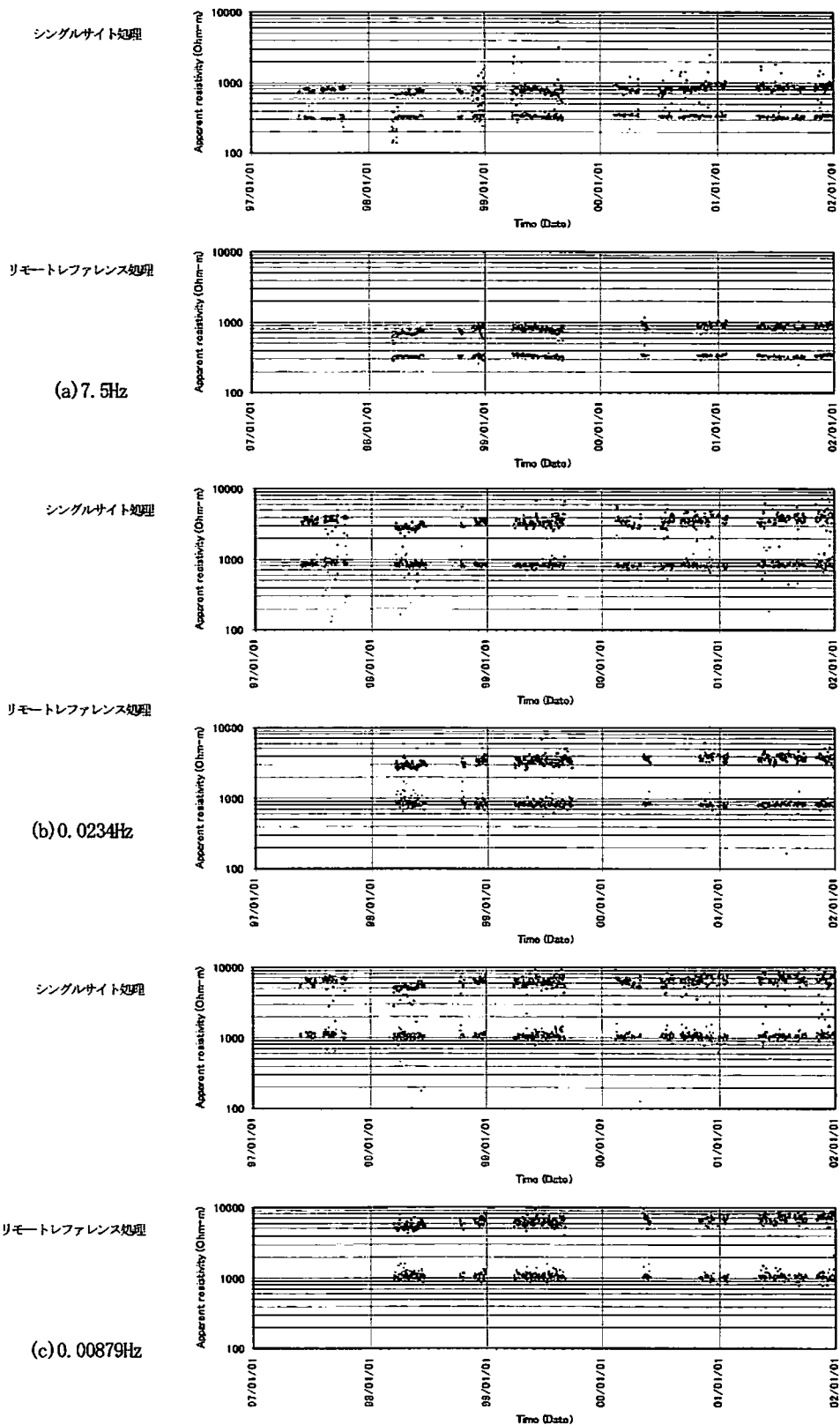


図-5 江刺観測場における見掛け比抵抗の時間変化 (1997年-2001年)  
 図中の薄い丸印はxy成分を、濃い丸印はyx成分を示している。

化は見られない。また、7.5Hzの見掛け比抵抗の時間変化(図-5(a))を見ると、欠測が多くはつきりしたことはいえないが、前述した長周期変動の上に、短周期の年周変化のようなものが重なっているように見える。降水量の変化と対比してみたが、三品(1995)で示されているような、両者の間にはつきりとした相関が認められるわけではなかった。

#### 4. 考察

##### 4.1 見掛け比抵抗の時間変化に伴う変動

前章3.2節で述べた2つの特徴について、ここでは考察を試みることにする。

###### (a) 1998年からの見掛け比抵抗(Rho<sub>yx</sub>成分)の増加

1998年から3つの周波数に共通して、Rho<sub>yx</sub>成分の見掛け比抵抗の増加が見られる。特に周期0.0234Hzでは、顕著である。リモートレファレンス処理をしたとは言え、まだデータのばらつきは大きいですが、この増加傾向は有意であると考えられる。解釈のひとつとして、地下の比抵抗構造が変化したという見方ができる。大地を一様均質100Ω・mと仮定した場合、0.0234Hzの探査深度はおよその目安として深さ30kmである。実際はもっと浅いと考えられるが、この深さはちょうど下部地殻付近に相当する。東北日本弧の前弧側下部地殻は高比抵抗であるという報告があることから、これが太平洋プレートの沈み込みに伴う歪みの蓄積により、さらに増加する傾向を示しているとも考えられる。しかしながら一方、位相には、この増加傾向と対応するような変化が見られていない。位相は変化せず、見掛け比抵抗だけ変化する、すなわちMT法固有の問題である“スタティックシフト”の時間変化を見ているだけに過ぎないかも知れない。つまり、図-4-2(a)の見掛け比抵抗曲線が、曲線の形はそのまま、あるオフセット値を持ちグラフ上で上下方向に動いているという現象である。従って、浅部の不均質構造が時間とともに変化することで、探査曲線全体が上下方向に変化し、この変動を見ているだけかも知れない。しかし、いずれにしても現段階では根拠がないので、これ以上の議論はできない。

###### (b) 7.5Hzの見掛け比抵抗の短周期変動

7.5Hzの見掛け比抵抗の時間変化(図-5(a))には、短周期の年周変化成分のようなものが、顕著に見られる。季節による周期的な年周変化であるかどうかを調べるために、このデータを1年ごとに区切り、5年間分のデータを同じ時間軸上に重ねてプロットしてみた。その結果、一見、周期的な季節変動をしているように見えたが、実は年によって変動の仕方はまちまちであり、不規則なものであった。今のところ原因は特定できていないが、信号源としている電磁波の強度の変動に対応しているのかも知れない。

##### 4.2 地震活動に伴う見掛け比抵抗変化検出の可能性

自然の電磁波を使ったMT観測は、近年測定機器の精度が向上したことに加え、データ解析手法が急速に進歩したことにより、地殻構造を推定する有力な方法になってきた。MT観測から得られる比抵抗は、地殻内の流体すなわち水の分布に対して、極めて敏感な物理量である。従って、内陸地震発生に対し強く関与している地殻内の水の存在を把握するため、地震断層や活断層とその周辺部における構造調査がいくつかの地域でなされるようになってきた(例えば、Ogawa et al., 2001; Mitsuhashi et al., 2001)。その結果、2つの研究例に共通して、(1)地殻中部に顕著な低比抵抗異常が存在すること、(2)地震の震源は、低比抵抗/高比抵抗の境界の特に高比抵抗側に多く分布している、という特徴が見出された。前者は、地震波の低速度域や散乱体の分布なども調和的なことから、水の存在と考えることができる。後者は、地殻内の歪みにより岩石の空隙率が減少するため、地震が高比抵抗側で発生しているという解釈もできる。このように地殻の比抵抗構造を調べることは、水の分布を知ることができるだけでなく、さらに歪みや地震発生場の性質をつかむことができる。

しかしながら、上述した特徴は、ある時間での比抵抗構造から言えることであり、時間変化についての情報は含まれていない。従って、地震活動に対応した比抵抗変化を検出するためには、長期にわたる連続観測が必要である。例えば、Yukutake et al. (1990)は、火山噴火のモニタリングのため、直流電気探査法による比抵抗の繰り返し観測を行っている。火山地域では、現象が地下浅部で起こっていること、地殻の比抵抗とマグマの比抵抗とはコントラストが非常に大きいことから、地表で観測できる変化量も20%-30%と比較的大きい。一方、地震活動のモニタリングを目的にした場合は、現象が地下10km前後と深い場所で起こっているため、地表で観測できる変化量は火山地域での例と比較すると、さらに低くなることが予想される。Fujiwara et al. (1999)は、江刺のMTデータを使った

解析結果から、1996年8月11日に発生したM5.9の地震後の見掛け比抵抗が、発生前のそれと比較して30%減少したという事例を報告した。しかし、この地震発生前後数ヶ月間にわたり機器トラブルで欠測を生じていること、地表で30%の比抵抗変化を検知するには、地下で相当大きな比抵抗構造変化がないと説明ができないことから、この変化については検討の余地が残る。

ここで図-6に、図-5で示した見掛け比抵抗の時間変化を観測開始時点の値を基準として、規格化し割合で表示したグラフを示す。なお、図は(a)7.5Hzを除きすべてリモートレファレンス処理した結果である。データの分散は、7.5Hzで30%、0.0234Hzで50%、0.00879Hzでは40%持つことがわかる。この原因のひとつには、各周波数ともに1日の代表値を求めるにあたり、24時間分の時系列データを使って計算していることが考えられる。このばらつきを低くするためには、夜間値だけを使う、周波数領域での平滑化・スタッキングなどの処理が必要である。定量的な議論はできないが、少なくとも現状の3分の1程度にばらつきを抑えることができれば、地震活動のモニタリングに有用であると考えている。

## 5. 結論

地震活動や地殻変動に関連した比抵抗変化を検出する目的として、水沢測地観測所および江刺観測場に広帯域MT固定連続観測装置を設置し、1996年4月から見掛け比抵抗の連続観測を実施してきた。観測期間中に両観測点周辺において地震活動や大きな地殻変動がなかったため、本来の目的を議論することはできなかった。しかしながら、長期にわたる比抵抗モニタリングにおけるデータの安定性を議論するには、十分なデータが取得されているので、本報告ではこの点について主に考察を試みた。その結果、以下の知見が得られた。

### (1) リモートレファレンス処理の有効性

江刺観測場で取得された時系列データに対して、水沢測地観測所で取得されている磁場データを使ったリモートレファレンス処理は有効である。しかしながら、水沢測地観測所の時系列データに対して、江刺観測場の磁場データを使っても、ほとんど効果はない。

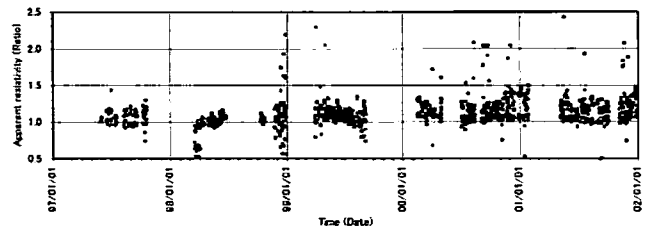
### (2) 見掛け比抵抗値の時間変化

江刺観測場における見掛け比抵抗のデータに着目すると、7.5Hz、0.0234Hz、0.00879Hzの3つの周波数に共通して、yx成分が1998年3月から緩やかに増加する傾向が見られた。xy成分については、7.5Hzおよび0.0234Hzではわずかに減少する傾向が認められるが、0.00879Hzではほとんど変化が見られなかった。また、位相には、これらに対応するような変化は見られなかった。7.5Hzでは長期的な変動の上に、さらに短周期変動が重なって見られた。この原因については現在までのところまだわかっていない。

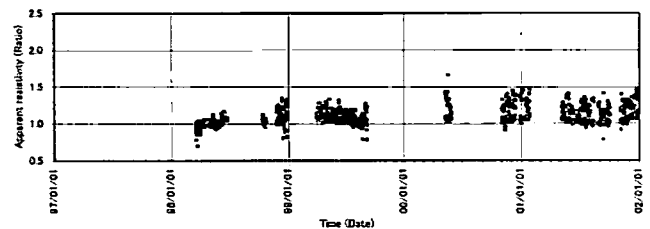
### (3) 見掛け比抵抗の安定性

1998年から2001年までの4年間のリモートレファレンス処理を施した江刺観測場のデータに着目すると、7.5Hzでは30%、0.0234Hzでは50%、0.00879Hzでは40%の分散を示すことがわかった。この原因のひとつには、各周波数ともに1日の代表値を求めるにあたり、24時間分の時系列データを使って計算していることが考えられる。今後、夜間値のみのデータを使った結果で、評価していく必要がある。

### シングルサイト処理

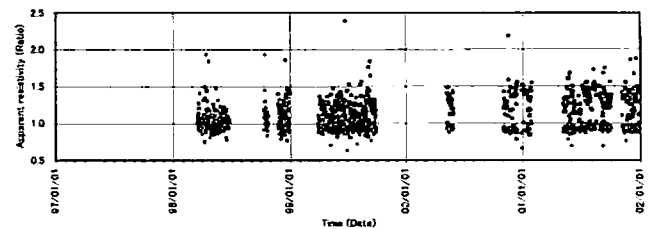


### リモートレファレンス処理



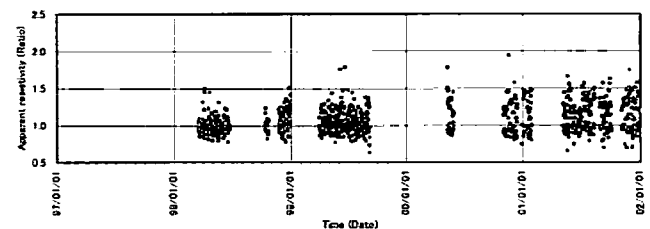
(a) 7.5Hz

### リモートレファレンス処理



(b) 0.0234Hz

### リモートレファレンス処理



(c) 0.00879Hz

図-6 江刺観測場における見掛け比抵抗の時間変化率

(1997年-2001年) 図中の薄い丸印はxy成分を、濃い丸印はyx成分を示している。

平成14年度中に現行のV5測定システムからMTU5測定システムへと機器更新することに伴い、より精度の高いデータ取得が可能になることが期待される。さらに平成15年度には、人工ノイズの影響が大きい水沢測地観測所から、内陸地震発生領域への機器の移設が予定されている。これにより、「地震活動や地殻変動と関連した比抵抗変化を検出する」という本来の研究目的に沿った観測の実現が可能になる。引き続き、MT法による地殻比抵抗モニタリングを行い、データ解析を進めていく予定である。

#### 参考文献

- 浅野陽一・海野徳仁・中村綾子・岡田知己・堀修一郎・河野俊夫・仁田交市・佐藤俊也・長谷川昭・小菅正・長谷見晶子, DATアレ  
イ地震観測による奥羽脊梁山地およびその周辺における地震波散乱体分布の推定, 地震2, 52, 379-394, 1999.
- Fujiwara, S., T.Kadowaki and H.Hamazaki, Monitoring changes of the Earth's electrical resistivity for earthquake and  
crustal activity research, Bull.Geograph. Surv. Inst., 45, 11-18, 1999.
- Goubau, W. M., P. M. Maxton, R. H. Koch and J. Clarke, Noise correlation lengths in remote reference magnetotellurics, Geophysics,  
49, 433-438, 1984.
- 三品正明, ネットワークMTデータに含まれる電車漏洩電流ノイズの振幅変化について, CA研究会1995年論文集, 59-64, 1995.
- Mitsuhata, Y., Y. Ogawa, M. Mishina, T. Kono, T. Yokokura and T. Uchida, Electromagnetic heterogeneity of the seismic region  
of 1962 M6.5 Northern Miyagi Earthquake, northeastern Japan, Geophys. Res. Lett., 28, 4371-4374, 2001.
- Nakajima, J., T. Matsuzawa, A. Hasegawa and D. Zhao, Seismic imaging of arc magma and fluids under the central part of  
northeastern Japan, 341, 1-17, 2001.
- Ogawa, Y., M. Mishina, T. Goto, H. Satoh, N. Oshiman, T. Kasaya, Y. Takahashi, T. Nishitani, S. Sakanaka, M. Uyeshima, Y. Takahashi,  
Y. Honkura and M. Matsushima, Magnetotelluric imaging of fluid in intraplate earthquake zone, NE Japan back arc,  
Geophys. Res. Lett., 28, 3741-3744, 2001.
- Phoenix Geophysics, Stationary MT monitoring system for earthquake research installed for the Geographical Survey Institute,  
Phoenix Tech. Rept., Phoenix Geophysics, Tronto, 1, 1-4, 1997.
- Yukutake, T., T. Yoshino, H. Utada, H. Watanabe, Y. Hamano and T. Shimomura, Changes in the electrical resistivity of the central  
cone, Mihara-yama of Oshima volcano observed by a direct current method, J. Geomag. Geoelectr., 42, 151-168, 1990.