

ULF-MT計を用いた長期電磁場観測

笠谷 貴史^{*1} 山口 覚^{*2} 大志万直人^{*3}
鍵山 恒臣^{*4} 高村 直也^{*5} 大西 信人^{*5}

電磁場観測によって得られる比抵抗(電気伝導度)構造は、流体の存在に敏感な物理パラメータであり、プレート間巨大地震発生の要因を探る上で有用な情報をもたらすことが期待される。しかしながら、海陸境界が強烈な比抵抗構造のコントラストを形成してしまうために、海岸線近傍の観測点ではデータの歪みが問題となる。この影響を取り除くには、海域観測だけではなく陸域観測も実施して、海域と陸域を合わせた解析を行うことが重要となる。本観測では、紀伊半島に置いて海域観測と連携した長期電磁場観測を実施し、その安定性とデータクオリティの検討を行った。記録計や電源に関係する欠測が生じたが、長期にわたって安定した観測を実施することができ、4秒から10000秒までのMTレスポンスを得ることも出来た。また、記録計に関する欠測の原因を究明し、その対策法も検討した。

キーワード：長期電磁場観測, Magneto-Telluric法

Long-term electro-magnetic observation using ULF-MT system

Takafumi KASAYA^{*6} Satoru YAMAGUCHI^{*7} Naoto OSHIMAN^{*8}
Tsuneomi KAGIYAMA^{*9} Naoya TAKAMURA^{*10} Nobuhito ONISHI^{*10}

Resistivity structure is very sensitive to the existence of the fluid and offers the key to an understanding of the occurrence of the large inter-plate earthquake. Because the boundary between land and sea make a strong resistivity contrast, its contrast make serious distortion at the observation site nearby the coastline. To avoid this effect, it is very important to analyze a data set that observed on land and ocean bottom. We carried out the long-term electrical observation on Kii peninsula and on the ocean bottom around the Kumano Basin. We obtained good quality data and MT responses from 4 to 10000 second using the long-term electro-magnetic data on land. However, Some trouble happened at some site. We tried to find the cause of its trouble and improved the electro-magnetmeter.

Keywords : Long-term electro-magnetic observation, Magneto-Telluric method

* 1 海洋科学技術センター深海研究部

* 2 神戸大学理学部

* 3 京都大学防災研究所

* 4 東京大学地震研究所

* 5 有限会社テラテクニカ

* 6 Deep Sea Research Department, Japan Marine Science and Technology Center

* 7 Faculty of Science, Kobe University

* 8 Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

* 9 Earthquake Research Institute, University of Tokyo

* 10 Tierra Tecnica Ltd.

1. 目的と背景

近年の観測技術の発達により、海域における電磁場観測が多く地域で行われる様になった。特に多点観測による構造解析によって、多くの成果が得られつつある。しかしながら、プレート沈み込み帯における観測を実施して構造を得ようとする、沿岸に近い観測点が必要となる。ところが、観測点が高陸境界である沿岸部に近付くほど、海と陸の境界が強烈な比抵抗構造のコントラストとなり、観測データに歪みを生じる。通常、沿岸部に近い陸域観測の解析では、海底地形と海水の比抵抗値を予め与えた上で解析を行うが、海底直下の構造に関しては情報が無い事が多い。そのため、求められた海陸境界付近の構造がどの程度正確に再現されるのか、確かめることは困難である。これは海域の観測でも同様のことが言え、陸域の構造も地形以外は何らかの仮定が必要である。この影響を取り除くには、海域と陸域との連携した観測を対象地域で実施し、海域と陸域のデータを統合した解析を行うことが重要となる。

海域観測の観測期間は、数ヶ月から1年程度と長期間設置することが多く、短くても数週間程度の観測が必要である。また、数10秒から10000秒を超える周期帯のデータを取得する。一方、構造解析を目的とした陸域の観測は、気象庁や国土地理院などの定常観測(佐藤他, 2003など)やNTT公衆電話回線を利用するNetwork-MT観測(Uyeshima, 1990; Uyeshima et al., 2001)を除くと、数日から数週間程度と短く、対象となる周期帯も長周期側で1000秒程度にとどまる。また、測定期間が短い場合、100秒以上の長周期データの質は低くなる事が多い。逆に言えば、長期間のデータを取得することが、シグナルとなる地磁気擾乱を数多く捉え、長周期データの質が向上する可能性が高いことを意味する。MT法による構造探査を目的にすれば必ずしも同時にデータを取得する必要性はないが、ノイズ処理(Gamble et al., 1979, Chave and Thomson, 1989)や他の解析手法への応用を考えた場合、海域と陸域での同時かつ長期間観測を実施することは非常に重要である。さらにこの様な長期間観測は、電場のみを測定するNetwork-MT観測に対して、観測地域内での磁場観測点を提供することにもなり、より精度の良い解析結果が期待される。しかしながら、臨時に設置した観測点で長期にわたる電磁場観測を実施した例は少なく、そのノウハウの蓄積も乏しいのが現状である。また、数Hzの高サンプリングレートで長期にわたり電磁場データを取得した例も少ない。本稿では、機動観測に用いられているULF-MT計を用いた長期観測の詳細とデータの安定性について述べ、観測に伴って生じた欠測の原因とその改善法の検討を行う。

2. ULF-MT観測の概要

観測点は紀伊半島中部～南部の3地点に設置した(図1)。あわせて、陸域観測と連携して実施された海域観測点の位置も示した。海域観測点の設置はKY02-12で行われた。陸域の3観測点は北から清水(SMZ)、迫西川(SNK)、湯の口(YNK)である。陸域観測点の詳細は、表1に示した。数ヶ月程度の電磁場観測を目的とした機材は存在しないため、観測には主にMT法・TDM法を対象とした機動観測で使用されているULF-MT計(U43:テラテクニカ社製、以下U43と呼ぶ)を用いた。このU43は磁力計にフラックスゲート磁力計を用い、磁場測定にコイルを用いるMT計に比べて長周期の磁場変化に対して高感度である。KY02-12で海底に設置した長周期型のOBEMのセンサーと同タイプであるため、OBEMと同等の長周期データの取得が可能となる。U43は磁場3成分と電場2成分を測定できるため、本観測では電場観測も合わせて実施した。U43はHi-modeとLow-modeの2つの測定モードを持つ。Hi-modeは短周期帯を精度良く測定するためにハイパスフィルタ(カットオフ周波数188秒)を通した後のデータに高アンプゲインで測定を行っている。さらに長周期帯を幅広くカバーするため、ローパスフィルタ(カットオフ周波数110Hz)を通した後にデータを記録している。これらの仕様を表2に示す。データのサンプリング周波数は

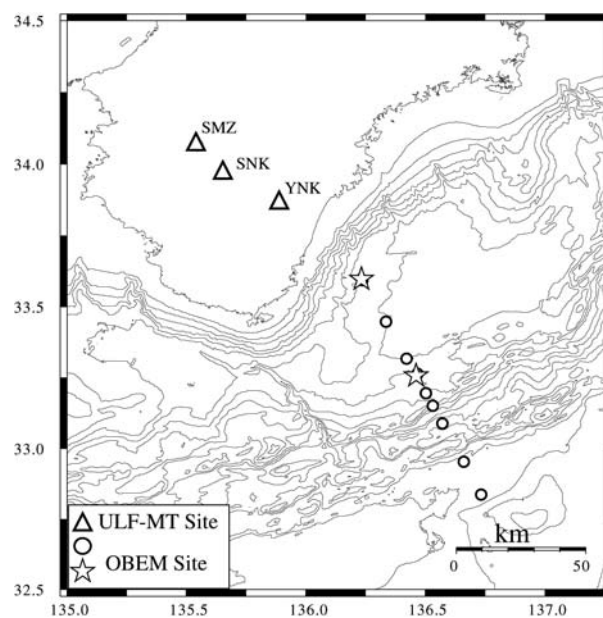


図1 ULF-MT計(U43)とOBEMの配置図

Fig. 1 Locations of ULF-MT and OBEM observation sites

表1 観測点情報

Table1 Observation site information

観測点名	略号	緯度(度)	経度(度)	測定開始日	測定終了日	N-Sスパン長(m)	E-Wスパン長(m)
清水	SMZ	34.06525	135.54510	2002.12.7	2003.5.24	23.1	30.2
迫西川	SNK	33.96599	135.64940	2002.12.7	2003.8.5	30	30
湯の口	YNK	33.86176	135.88997	2002.12.7	2003.2.1	32	30

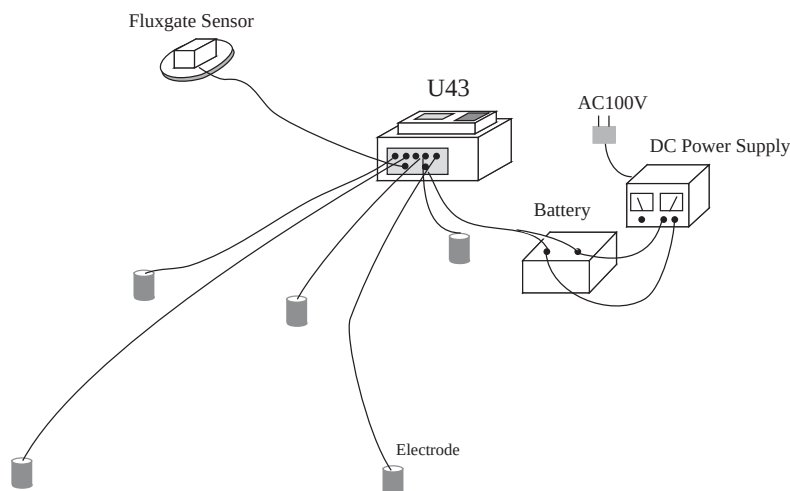


図2 観測点概念図
Fig. 2 Schematic diagram of the Observation site

表2 ULF-MT計 (U43) の仕様
Table2 Technical specification of ULF-MT system (U43)

○磁力計 センサー形式 測定成分 測定範囲 測定周波数 ローパスフィルター ハイパスフィルター	リングコア型フラックスゲート 直交3成分 ±327.68nT ±32.768nT(Hi mode時) DC~110Hz 0.0053Hz~110Hz(Hi mode時) 110Hz 188sec
○地電流測定部 測定成分 測定範囲 測定周波数 ローパスフィルター ハイパスフィルター	2成分 327.68mV 32.768mV(Hi mode時) DC~110Hz 0.0053Hz~110Hz(Hi mode時) 110Hz 188sec
○デジタル変換部 AD変換方式 分解能	16bit 磁場 0.01nT/LSB 0.001nT/LSB(Hi mode時) 地電流 0.01mV/LSB 0.001mV/LSB(Hi mode時)
○記録、制御部 記録媒体 記録間隔 時計制度	PCMCIAフラッシュメモリカード 128,64,32,16,8,4,2,1,0.5,0.25Hz GPS使用時 2μsec



図3 湯の口 (YNK) 観測点に設置されたU43
Fig. 3 Photo of a U43 system at YNK

通常の機動観測では、自動車バッテリーを利用して電源を供給している。しかしながら、数日間程度しかバッテリーが持たないため、長期間にわたって観測を行うには適さない。そこで本観測では、家庭用AC100Vより電源を供給し、定電圧電源とバッテリーを介してU43に接続した(図2, 図3)。観測点の維持のために1月に1回程度の割合でメンテナンスを行った。長期観測を実施するため、獣害や降雨・降雪などの気象現象の影響を受ける可能性が高い。そのため測定用のケーブルは基本的に埋設し、どうしても埋設が不可能な所はスパイラルチューブで覆って保護した。また、測定器本体やバッテリー・定電圧電源はそれぞれプラスチックケースの中に入れ、それをさらにブルーシートでくるむ事で防水対策とした。観測は2002年12月より開始され、終了時期は観測点により異なる。観測期間、電場観測のスパン長等の情報は表1に示した。次に各観測点の詳細を順に述べる。

清水 (SMZ) 観測点は京都大学演習林内に、京都大学フィールド科学教育研究センター・森林ステーション・和歌山研究林の許可を得て設置した。しかし、観測点が演習林管理棟より離れているために、管理棟より直接電源を取ることが出来なかった。そのため、観測点近傍の電柱より電

4Hzで、取得されたデータはフラッシュメモリにバイナリ形式で保存される。今回の測定では384MBのコンパクトフラッシュメモリを用いた。上記の条件で測定すると最大で約55日間の測定が可能である。時計にはGPS時計を用いており、各観測点間で時計の同期を取ることが出来る。

線を引く必要があった。専門的な工事を伴うため、許可申請ならびに降圧トランス・配電盤の設置を電気工事会社に依頼した(図4)。

中央部に位置する迫西川(SNK)観測点は、十津川村教育委員会から許可を得て、現在休校中の迫西川小学校に設置した。電源も小学校のコンセントを利用している。近傍には防災科学技術研究所のHi-netの迫西川観測点や、京



図4 清水観測点配電盤写真

Fig. 4 Electrical panel board at Shimizu observation site

都大学防災研究所のGPS繰り返し観測点もある。京都大学のGPS観測も迫西川小学校に機材を設置している。

最も海岸線に近い湯の口(YNK)観測点は、湯の口温泉宿泊施設横の林内に設置された。また、京都大学防災研究所地殻変動観測室が同じ敷地内にある。センサーを設置したのが緩やかな斜面をもつ林の中であったため、降雨や降雪で生じた水の流れによって、測定用ケーブルの露出が懸念された。そのため測定用ケーブルの埋設には特に注意し、必要な箇所はスパイラルチューブを通して、測定用ケーブルの破損・切断を防止する施策をとった。

3. 観測結果

3つの観測点で同時にデータが収録された期間の水平地磁気2成分の波形記録を図5に示した。示した期間は2003/1/26から1/27の2日間である。図5のデータは、4Hzサンプリングしたデータを10秒値にリサンプリングしたLow modeのデータをプロットしている。各観測点で同期した時系列が得られており、それぞれの記録計が正常にデータを取得していることが分かる。大きな傾向や短周期の磁場変動も、各観測点間で非常によく似た波形を示している。図6に同期間の柿岡地磁気観測所のデータを示した。柿岡地磁気観測所のデータは京都大学地磁気世界資料解析センターのWeb Siteを通して取得した。図6中のHがHxとDがHyに相当する。図5と図6を比較しても、ほぼ同期した相似な変動を記録していることが分かる。次に、得られた時系列からMT応答関数を求めた。精度の高いMT応答関数を得るた

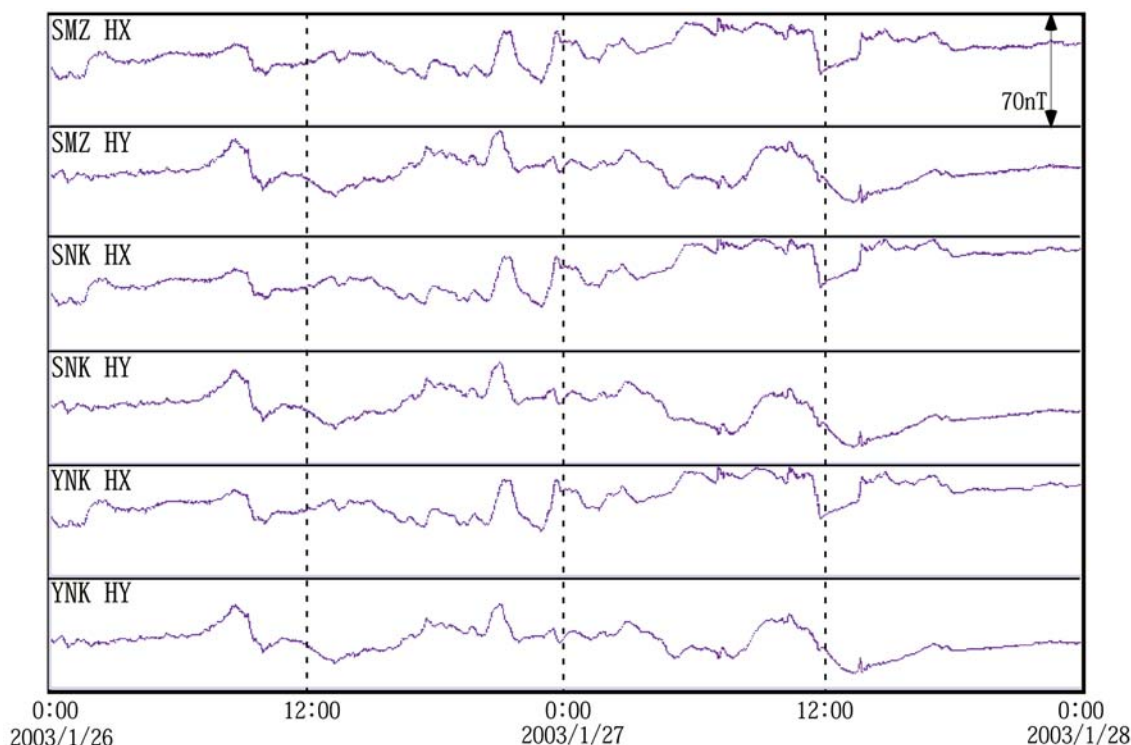


図5 各観測点での波形記録

Fig. 5 Horizontal two-components magnetic fields (HX and HY) obtained at each observation site

めには、信号強度が強くノイズの影響がない時系列のみを解析することが重要である。本研究では、長期間にわたり4Hzサンプリングによる観測を行っているため、多くの地磁気擾乱を捉えることが出来た。データ量が膨大であるので、2つの周期帯に分けて計算を実施した。まず、1000秒より短い周期の応答関数は、次の2段階に分けて解析に使用する区間を決定した。(1) 地磁気の擾乱の度合いを示すKp Indexの値が3以上の期間を抽出、(2) 抽出された時系列から目視でノイズの少ない時間帯の時系列を再抽出する。また、1000秒より長い周期帯の解析には、4Hzサンプリングのデータを10秒値にリサンプリングした後、Kp indexの値が大きい日を出るだけ多く含む時系列(数日から数週間程度)を作成して時系列解析を行った。MT応答関数の算出には、rrrmt ver.8(Chave and Thomson, 1989)を使用した。ただし湯の口(YNK)観測点は、電場データに周期1秒程度の人工的ノイズが定常的に混入していたので、ハイカットフィルタ(カットオフ周期5秒)をかけてから解析を行った。そのため、湯の口(YNK)観測点で得られる応答関数は100秒付近か

らのみである。図7がMT応答関数から計算された見かけ比抵抗と位相曲線である。図7に示したデータは、Groom and Bailey (1989)を用いて求めた2次元構造の走向N60°Eに座標回転を行い、走向に直交する電場を用いたモードをTM-modeとしている。各観測点とも良好な結果が得られており、清水(SMZ)観測点では4秒から10000秒にわたる広い周波数帯域で良好な結果を得ることが出来た。

4. 観測データの欠測事例

観測データは、本体に差したフラッシュメモリカード(もしくはコンパクトフラッシュメモリ+アダプタ)に記録される。事前のテストで384MBのフラッシュメモリが動作する事を確認したが、4Hzのサンプリングでの長期間にわたる観測は初めての試みであり、観測期間内に予期せぬ欠測が生じた。以下に欠測した際の事象をまとめる。

最も頻発したのは、フラッシュメモリへの書き込みが途中で停止する異常である。これまでに報告されている書き込み失敗の事例では、メモリ内に同時に記録されているエ

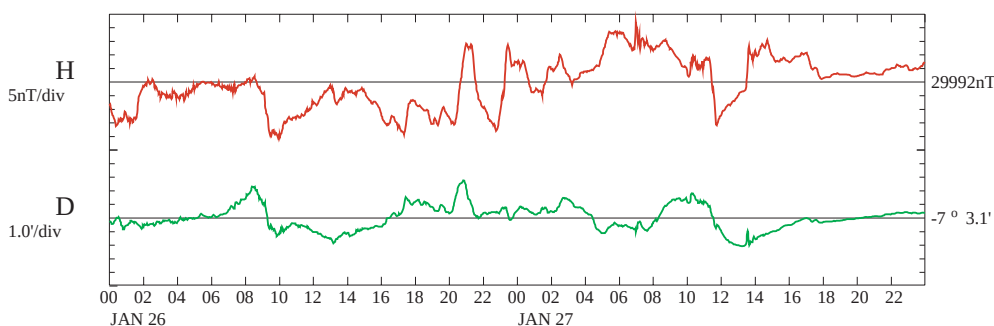


図6 気象庁柿岡地磁気観測所での波形記録。Hが北向き磁場成分、Dが偏角を示す。

Fig. 6 Magnetic fields obtained at Kakioka Magnetic Observatory. "H" indicates the horizontal north component, "D" indicating the declination, respectively.

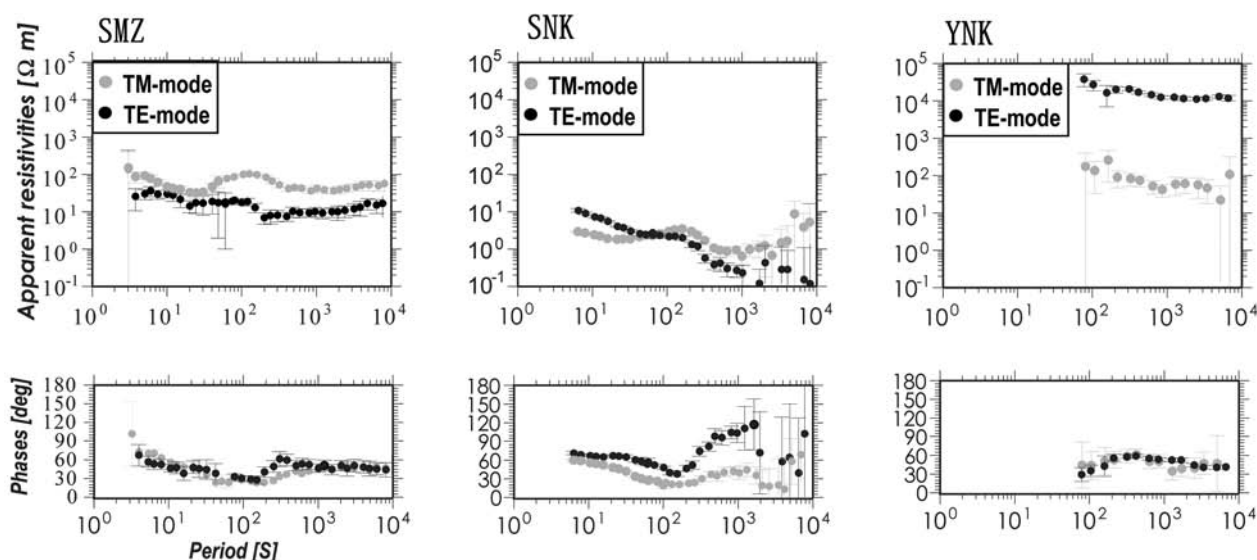


図7 各観測点で算出された見かけ比抵抗と位相曲線

Fig. 7 Apparent resistivity and phase curves calculated at each observation site.

ラーログのファイル(error.log)に記録が残っており、エラーを起した後も測定が継続されている事が多かった。しかしながら、今回のトラブルでは

- 1) エラーログには全く記録が残っていない
- 2) 画面上は記録を続けている表示がでている
- 3) フラッシュメモリへの書き込みのみが停止している

と言う特徴が見られる。特に2), 3)がこれまでに見られない現象で、記録は止まっているのに画面上では記録を続けている事を示す"Record to card"の表示が出ていた。また、日付・時刻・記録開始時に作成されるHeader file(Sファイルと呼ぶ)名は、測定開始時と同じで間違いは無かった。データ取得が停止した時刻直前の波形記録を確認したが、異常な変動などの特別な事象は全く起こっていなかった。つまり、フラッシュメモリへの書き込みが停止した以外はトラブルが全く起きていない事を意味する。これらの事から、現状のプログラムでは対処出来ない何らかのエラーが生じたと考えられる。本観測で使用したのは、すべてが同じ新品のフラッシュメモリである。フラッシュメモリの個体差の可能性も考えられるが、最終的には使用したフラッシュメモリ全てでこの現象が生じた。また、それぞれのフラッシュメモリでの現象の起こり方が系統的ではなく、記録が停止するまでに要した日数も全く一定ではない。フラッシュメモリのセクタサイズが適切で無い場合に、書き込みミスが生じる事が報告されている。しかしながら、今回の測定では最も適当なセクタサイズ(16KB/Cluster)にフォーマットしたものを使用しているので、セクタサイズの影響であるとは考えにくい。また、このセクタサイズでフォーマットした小容量フラッシュメモリ(64MB程度まで)では、今回のような現象は見られていない。

電力供給に関する欠測も生じた。発生したのは湯の口(YNK)観測点と清水(SMZ)観測点で、いずれも1回だけ生じた異常であるが、それぞれの現象は異なる。以下に、それぞれの観測点で生じた異常に関して述べる。

湯の口(YNK)観測点では、記録回収時点で完全にU43が停止し、画面の表示も消えた状態であった。バッテリーは放電しており、回収時の電圧の実測値は6(V)(観測開始時12(V)以上)まで降下していた。定電圧電源からのバッテリーへの電力供給はされていない状態で、電流メーターは0(A)を示していた。完全に定電圧電源から電源供給が遮断された状態であったため、一度コンセントを抜いて保護回路をリセットした。バッテリーを新しいものと交換し、定電圧電源が正しく動作する様に調整を行った。これ以降のデータ回収では、同じ様な定電圧電源遮断による欠測はいずれの観測点でも生じなかった。また、この収録停止によるデータへの影響はなく、記録されたデータは正常であった。

清水(SMZ)観測点では、データ回収時に日付と時刻があり得ない異常な値を示していた。また、U43はSファイルを作った後、一定時間ごとに同じ容量のデータファイル(Dファイルと呼ぶ)を作る仕様となっているが、最後のDファイルの容量が非常に大きくなっていた。つまり、途中で新規のDファイルが作成されなくなり、最後に作成されたDファイルに

データが追加されていたものと考えられる。前節のフラッシュメモリと同様の原因も考えられるが、この事例ではエラーログが作成され"Data Packet header Error!"と記録されていた。機材の故障が懸念されたので、そのままの状態で機材を再度稼働させ、2日後に再度訪れてデータを確認したが、目立った異常は確認されなかった。その後も同じ機材で観測を継続したが、観測終了時まで異常なく稼働した。

5. 議論

本研究によって、既存の機動観測用のULF-MT計を用いて、安定した長期測定が実施可能であることが分かった。観測されたデータから誤差の小さい10000秒までのMTレスポンスを得る事が出来た。しかしながら、長期間にわたる測定であるため、これまでに起こらなかった欠測が生じた。本章ではこれらの原因について検討する。

最初に最も頻発したフラッシュメモリに関する異常を検討する。この事象をまとめると、エラーログにエラーの記録は無く、画面上は記録を継続している様に見えるが、実際の書き込みは停止している、と言うものであった。また、データ取得が停止した前の波形記録から、記録停止前に異常な変動など特別な事象が生じていないことが確認されている。よって、書き込みの部分で生じた現象であると考えることが出来る。U43は、(1)メインCPU、(2)GPS CPU、(3)GPSアンテナ部、(4)カードドライブで構成されており、それぞれが独立に動作している。また、メインCPUは測定したデータをカードドライブにRS232Cで毎秒送信し、その受信したデータをカードドライブが書き込みを行っている。このとき、カード書き込みとRS232Cからの受信のタイミングが重なると受信エラーとなってしまふ。データ受信とカード書き込みの両方を重ならないようにプログラミングされており、小容量フラッシュメモリ(64MB程度まで)では最も適当なセクタサイズ(16KB/Cluster)にフォーマットされていれば問題が発生しなかった。U43が開発された当時、サイズや消費電力を考えると、現在使用されているカードドライブ以外に選択肢はなかった。当時市販されていたフラッシュメモリは10MB程度であった。以上のことを総合的に考察すると、U43で使用されているカードドライブが、現在の大容量384MBのフラッシュメモリに対応しきれていない、と言う可能性が最も高い。今回の観測で使用したフラッシュメモリは、U43も用いられているカードドライブに対応するというメーカーの情報を元に選定し、短期間の測定テストでは問題を生じなかった。しかし、大容量カードを使うとカード書き込みに時間がかかる事があり、何らかの要因で書き込みが遅れ、書き込みと受信のタイミングが偶然一致した時に、測定が停止してしまったものと推測される。また、U43は先に述べた様に各部分が独立して動作しているため、メインCPUがカードドライブの受信エラーによる書き込み停止を検知出来ず、画面上は"Record to card"と記録中である挙動をしていたと考えられる。

近年、機器組み込み用の新しいカードドライブの選択肢が増えているため、カードドライブを換装するのが根本的な



図8 換装したコンパクトフラッシュメモリドライブ

Fig.8 Photo of the converted compact flash memory drive

解決法となる。本観測で使用していたU43の1台に対して、実際にカードドライブの換装を実施した(図8)。換装したドライブはコンパクトフラッシュメモリ専用で、現在容易に入手可能な最大容量である1GBのメモリまで対応している。また制御プログラムも書き換える必要があったため、適宜修正・変更を行い、2003年12月からテスト観測に入る予定である。

次に電力供給に関する欠測の原因を検討する。湯の口(YNK)で生じたU43の停止は、バッテリー電圧は6Vまで降下し、U43本体の電源も完全に落ちた状態であった。定電圧電源は電力供給が止まった状態であった。これらのことから、電灯線からの何らかの異常電流(例えば雷などのサージ電流)によって、定電圧電源の保護回路が働き、電力供給が止まった可能性がある。U43が動作を停止する電圧は、メインCPU/GPS CPUが6.2V、GPSアンテナが8.4V、カードドライブが9.2Vである。よって、定電圧電源からの供給が止まった後も、しばらくはバッテリーに蓄電された電力により数日間は測定が出来ていたが、バッテリー電圧が動作電圧を下回った時点で停止したと考えられる。バッテリー電圧がメインCPUの停止する6.2Vより下回っていることも、この推測を裏付ける。また、電圧降下による収録停止によるデータへの影響はなかったのは、1秒毎にデータファイルをオープンして書き込み、ファイルクローズを行っているためと考えられる。

清水(SMZ)観測点で起きた異常は、電圧降下もしくは雷

などのサージ電流によってGPS CPUの内蔵時計に間違った時刻がセットされた可能性が考えられる。ただし、12時間毎にGPSでの時刻セットが行なわれる仕様のため、一旦異常値を示しても正しく校正されるはずである。これについての原因は不明である。また、プログラム上は一定のファイルサイズになると、次のファイルを作成する仕様となっている。そのため、異常にサイズの大きいファイルが出来ることは無いはずである。ところが、エラーログには"Data Packet header Error!"と記録されていた事から、何らかの異常が発生したことは明らかである。しかしながら、エラーが記録された時刻も異常値であったため、異常発生時刻を調べる事が出来なかった。この異常の原因に関しては、今後も検討していく予定である。

6. まとめ

機動観測用のULF-MT計を利用した長期観測を実施し、安定した観測が行えることを実証した。また、10000秒までの良質なMTレスポンスを得る事が出来た。この事により、新規の機材を製作することなく、既存の機材を組み合わせることで長期観測が安定して行えることを示す事が出来た。この様な観測が行える事で、海域観測と連動した観測を実施する可能性が高まった。よって、海域観測点の磁場参照点として陸域観測点を用いたり、MT法以外の解析手法への応用も期待出来る。

長期観測に伴って幾度かの欠測も生じたが、フラッシュ

メモリに関する欠測は、フラッシュメモリドライブが大容量のフラッシュメモリに対応し切れていない事を明らかにした。また、ドライブを最新のものに換装することで解決される事もわかった。すでに一台のU43のドライブ換装を行っており、テスト観測による実証試験を行う予定である。電源に起因すると思われる欠測は、定電圧電源の検討を行ってサージ電流などの対策を講じる必要がある。しかしながら、現状の観測システムでは、何らかの異常が生じてデータ収録が停止していても、次の回収まで異常があったことを知る事が出来ない。今後は、電圧の異常や記録が停止した場合に、携帯電話や公衆回線などを通して異常を通知する簡便なシステムを開発することも必要である。

謝辞

本観測を行うにあたって、奈良県十津川村教育委員会、三重県紀和町役場および地元関係者の方々には、観測機材の設置などに関して多くの便宜を図って頂いた。京都大学フィールド科学教育研究センター森林ステーション和歌山研究林には、演習林内での観測を快く承諾頂いた。京都大学防災研究所の細枝官には観測点選定の際に多大なる尽力を頂いた。京都大学地磁気世界資料解析センターのWeb Siteを通して、柿岡地磁気観測所のデータを取得した。ここに記して感謝の意を表します。

References

- Chave, A.D. and Thomson, D.J., "Some comments on magnetotelluric response function estimation" J. Geophys. Res., 94, 14215-14225 (1989).
- Gamble, T.D., Goubau, W.M., Clarke, J., "Magnetotellurics with a remote magnetic reference", Geophys, 53-68 (1979).
- Groom, R.W., Bailey, R.C., Decomposition of magnetotelluric impedance tensors in the presence of local three-dimensional galvanic distortion., J. Geophys. Res., 94, 1913-1925 (1989).
- 佐藤秀幸, 湯通堂亨, 門脇俊弘, 石原 操, 藤原 智, "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", 国土地理院時報, 101, 23-32 (2003).
- Uyeshima, M., Application of Network MT method to the study of electrical conductivity structure in the central and eastern part of Hokkaido, Dr. Sc. Thesis, Univ. Tokyo (1990).
- Uyeshima, M., Utada, H., Nishida, Y., Network-MT method and its first results in central and eastern Hokkaido, NE Japan., 146, 1-19 (2001).

(原稿受理: 2003年12月2日)