

濟州島におけるMT法調査 —超長距離リモートリファレンスの適用

内田 利弘¹⁾・Yoonho Song²⁾・Tae Jong Lee²⁾・Seong Kon Lee²⁾・Seong Keun Lim²⁾

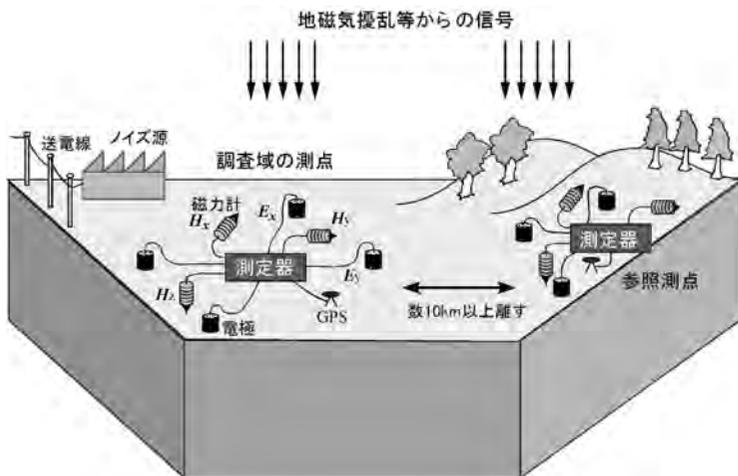
1. はじめに

産業技術総合研究所(産総研)と韓国地質資源研究院(Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, KIGAM)は、物理探査の地熱資源探査・環境評価への適用に関する共同研究を実施している。KIGAMが2004年から濟州島において地熱及び地下水資源に関する地質調査及び物理探査(電磁探査)を行うこととなり、産総研も協力することとなった。

韓国は、国内のほとんどの場所で人工的な電磁ノイズが非常に強く、自然信号を測定する地磁気地電流法(Magnetotelluric法, 略してMT法)で良好なデータを得ることは難しいとされる。MT法は、雷の放電による電磁波や、磁気圏・電離層の電磁気活動など、自然界に存在する電磁場の変動を地表で観測することにより、地下の比抵抗(電気伝導度)の分布を調べる探査法である(例えば、小川, 1990)。MT法の測定では、調査域の人工ノイズが強い場合、リモート・リファレンスという処理によってノイズを除去する

方法が使われる。リモート・リファレンス処理では、調査域から十分離れていて、同じノイズ源の影響を受けない静穏な場所で同時に測定を行い、両地点に共通する信号を優先的に利用することによって、調査地に固有のノイズを除去することができる(第1図)。

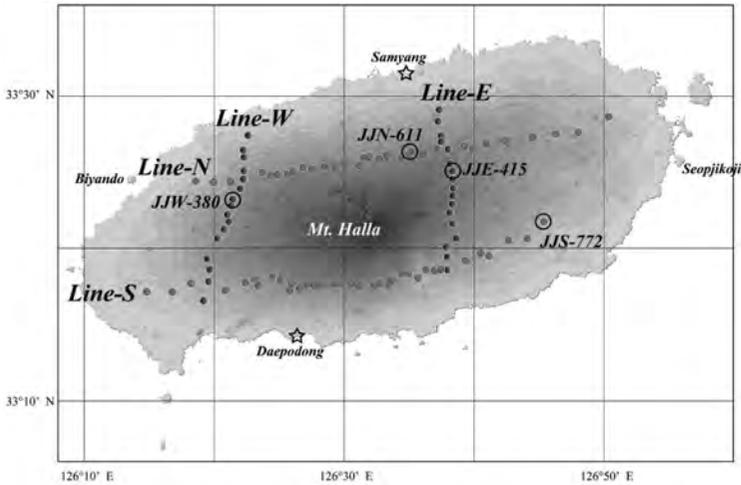
産総研とKIGAMは、2002年および2003年に、韓国南東部に位置するポハン地域において本格的なMT法調査を実施した。当初は韓国内の約60kmおよび200km離れた場所にリモート・リファレンス点を設定してデータ取得を試みたが、両方とも周期10秒前後の周波数帯で調査地と同じ系統のノイズの影響を受けているらしく、リファレンス処理の効果は小さかった。そのため、ノイズ源が完全に異なると思われる日本にリモート・リファレンス点を置くことにした。九州南部のリファレンス点における観測データを用いることによって、ポハン地域のMT法データは品質が向上し、解析に用いることができるレベルにすることができた。この調査が韓国における初めての本格的なMT法調査実施例となった(Uchida *et al.*, 2005; Lee



第1図
MT法の測定配置。調査域の測点のデータのみを用いるシングルサイト処理では、測点近傍の固有のノイズを除去することができない。遠方の静穏な所に参照測点を置き、両者に共通する信号(地磁気擾乱や遠方の雷からの電磁波)を選択的に用いる処理(リファレンス処理)によって調査地に固有のノイズを除去することができる。

1) 産総研 地圏資源環境研究部門
2) 韓国地質資源研究院(KIGAM) 地下水・地熱資源研究部

キーワード: 電磁探査, MT法, AMT法, リモート・リファレンス, 濟州島



第2図

濟州島におけるMT法測点配置。南北方向の2測線は2004年、東西方向の2測線は2005年に調査を実施した。

et al., 2007a).

2004年および2005年に実施した濟州島におけるMT法調査では、濟州島内の測点間でのリファレンス処理に加え、九州南部(大霧地域)および岩手県・宮城県の国土地理院の連続観測点におけるデータを用いるリファレンス処理を行った。本報告では、測定されたデータの状況とリファレンス処理結果について報告する。

2. 濟州島におけるMT法調査

濟州島は朝鮮半島の南に位置する火山島であり、東西約80km、南北約30kmの楕円形状を有している。島の中央に標高1,950mの活火山Halla山がそびえ、島全体で1つの大きな火山体と見られることもできるが、円錐状の小規模な寄生火山が地表で確認できる

だけでも360個以上分布している。Halla山の最近の噴火はAD1007年とされる。MT法調査は火山島の地質構造と地下水・地熱資源の調査を目的として実施された(Lee et al., 2007b)。2004年及び2005年に実施したMT法の測点位置を第2図に示す。Halla山を囲む形で、南北測線2本、東西測線2本を設定した。測点数は99である。各測点で通常の周波数帯のMT法と、高周波数帯の信号を測定するAudiofrequency MT法(AMT法)のデータ取得を行った。MT法は夜間を含んで連続15時間の観測、AMT法は昼間に4時間の観測を行った。ノイズの強い測点については、MT法を2日間測定することとした(写真1~6)。

リモート・リファレンス処理を行うため、九州南部の大霧地区にMT法とAMT法の参照点を設置した。また、2005年の調査では、リファレンス処理の比較のため、国土地理院が岩手県江刺および宮城県涌谷で実



写真1 測定装置(磁場センサー, 電極等)の準備作業。



写真2 測点の準備風景。後方は寄生火山。



写真3 水平成分の磁場センサーの設置.



写真5 測定装置のセットアップ. MT法では夕方から翌朝までの自動測定を行うが, そのためのパラメーター設定を行う.



写真4 鉛直磁場センサーの設置. 溶岩が多く, 十分な深さまで埋めるのに苦労する.



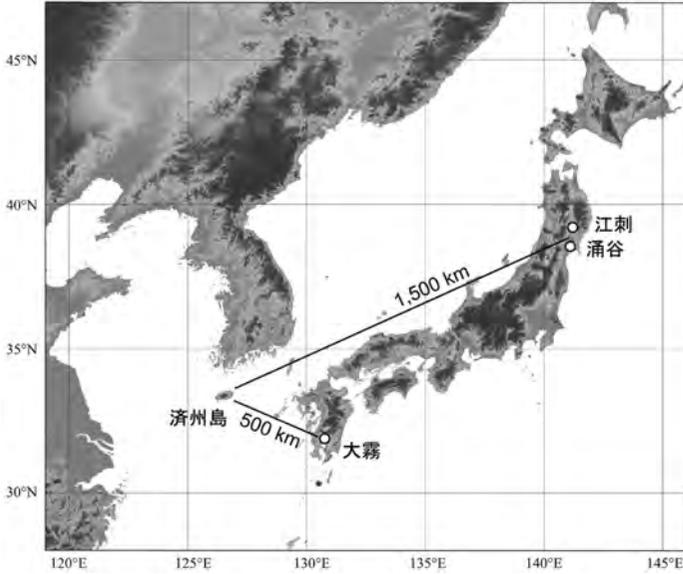
写真6 測定されたデータの回収と品質の確認. 後方は Halla山.

施しているMT法連続観測のデータを利用した. 濟州島から大霧地区および江刺・涌谷までの距離はそれぞれ, 約500km, 約1,500kmである(第3図). 商用電力の周波数は, 韓国および西日本では60Hzであるが, 江刺・涌谷では50Hzである.

濟州島での調査や国土地理院の連続観測には, カナダPhoenix社製のMT法データ取得装置MTU-5システムが用いられた. データ取得の時刻同期はGPSの時刻信号を用いて行われ, 測定時間のスケジュールも共通のものに設定されている. そのため, 非常に離れた場所にリファレンス点を設定しても, 調査地と同じ条件のデータ取得を容易に行うことができる.

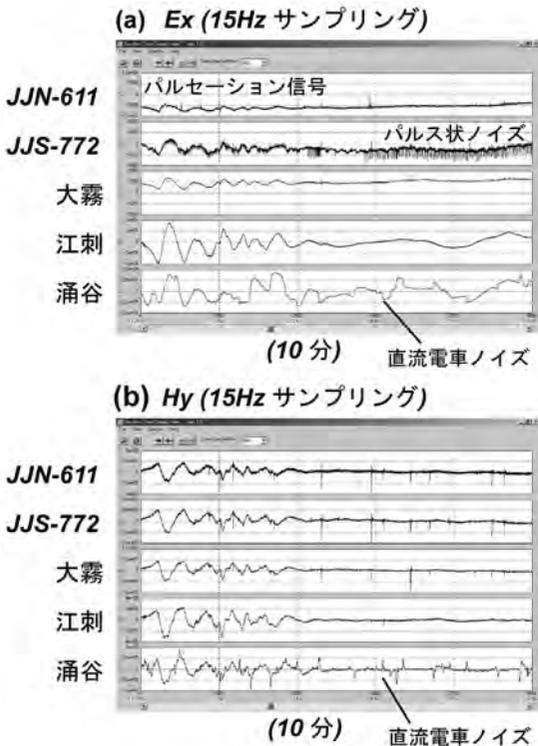
3. 時系列データ

MT法時系列データについて, 典型的な信号やノイズが見られる時間帯のデータ例を第4図および第5図に示す. 2005年9月12日に濟州島の2測点(JJN-611, JJS-772), 大霧, 江刺および涌谷で取得されたものである. 第4図は, 低周波バンド(15Hzサンプリング)の電場 E_x (南北成分)と磁場 H_y (東西成分)を表す. 横軸はフルスケールで10分であるが, 前半の約4分間に磁気圏の活動による顕著なパルセーション信号(周期数十秒)が観測されている. 測点JJS-772の電場には断続的にパルス状のノイズが見られる. 磁場にはそれほどノイズは見えないので, 測点近傍にある電気設備

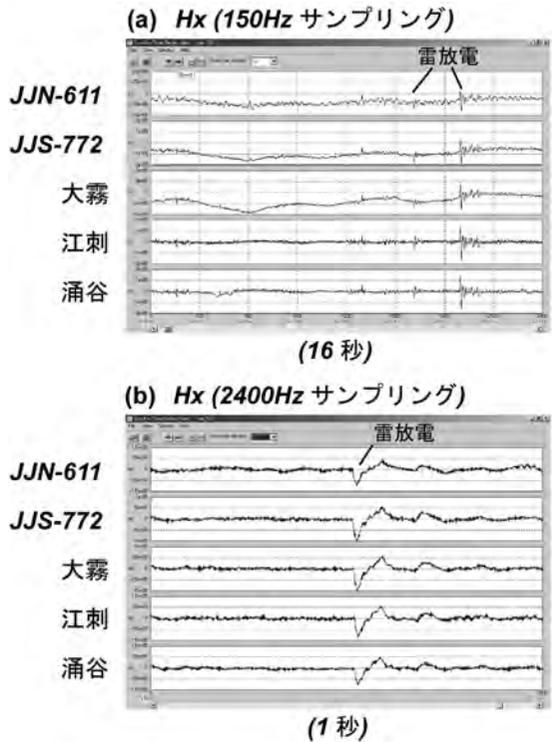


第3図

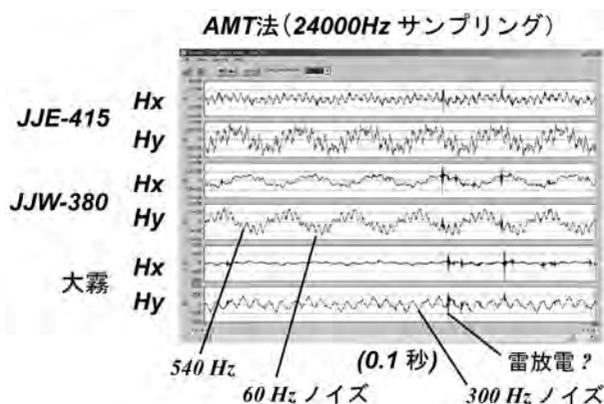
超長距離リファレンスの参照点の位置。九州南部の大霧地区に調査期間中、参照点を設置した。また、国土地理院のMT連続観測点(江刺、涌谷)のデータを利用した。



第4図 MT法の時系列データの例。濟州島の測点JJN-611, JJS-772, 大霧, 江刺, 涌谷における2005年9月12日13時30分(グリニッジ標準時)から10分間のデータ(低周波バンド)。(a) 電場の南北成分, (b) 磁場の東西成分。縦軸はA/D変換カウント値であり、電磁場の強度値ではない。



第5図 MT法の時系列データの例。磁場の南北成分を示す。測点と測定日は第4図と同じ。(a) 9時30分00秒からの16秒間の中周波バンドのデータ, (b) 21時50分00秒から1秒間の高周波バンドのデータ。



第6図 AMT法の時系列データの例。済州島の測点JJE-415, JJW-380, 大霧における2004年9月9日4時50分00秒から0.1秒間の水平磁場データ。

からのパルスの漏洩電流によるものと推測される。同様のパルスノイズは測点JJN-611にも見られるが、その振幅は測点JJS-772より小さい。涌谷観測点は直流電車の線路に比較的近い位置にあり、電車の加速や減速に応じて線路に漏洩する電流が変動することによるノイズが観測されている。電場にはステップ状のノイズが見られ、磁場にはその微分波形であるパルス状のノイズが見られる。図で示された10分間では、大霧と江刺のデータにはそれほど大きなノイズは含まれていない。

第5図はMT法の中周波バンド(150Hzサンプリング)と高周波バンド(2,400Hzサンプリング)の磁場データ(南北成分)である。低周波バンド(15Hzサンプリング)のデータは15時間の連続したデータが記録されるが、中周波・高周波バンドではそれぞれ、16秒および1秒の長さのデータを2分毎に記録することになっている。また、各バンドで異なったデジタルフィルタの設定が行われるので、信号やノイズの波形は異なる。1Hz以上の高周波数帯における信号は雷放電によるものが卓越する。第5図には雷放電によるパル的な信号が数ヶ所に見られ、それらは5つの測点で非常に相関が強い。また、雷放電による電磁波は地表と電離層の間の空間を導波管として伝播するので、第5図では、地球を周回して伝わる波(シューマン共振)の信号を確認することができる。第5図bの雷放電による信号を詳細に見ると、江刺・涌谷観測点に信号が到達する時刻は、済州島や大霧の測点での到達時刻より僅かに遅く、雷が日本より西方で発生したもの

と推測される。

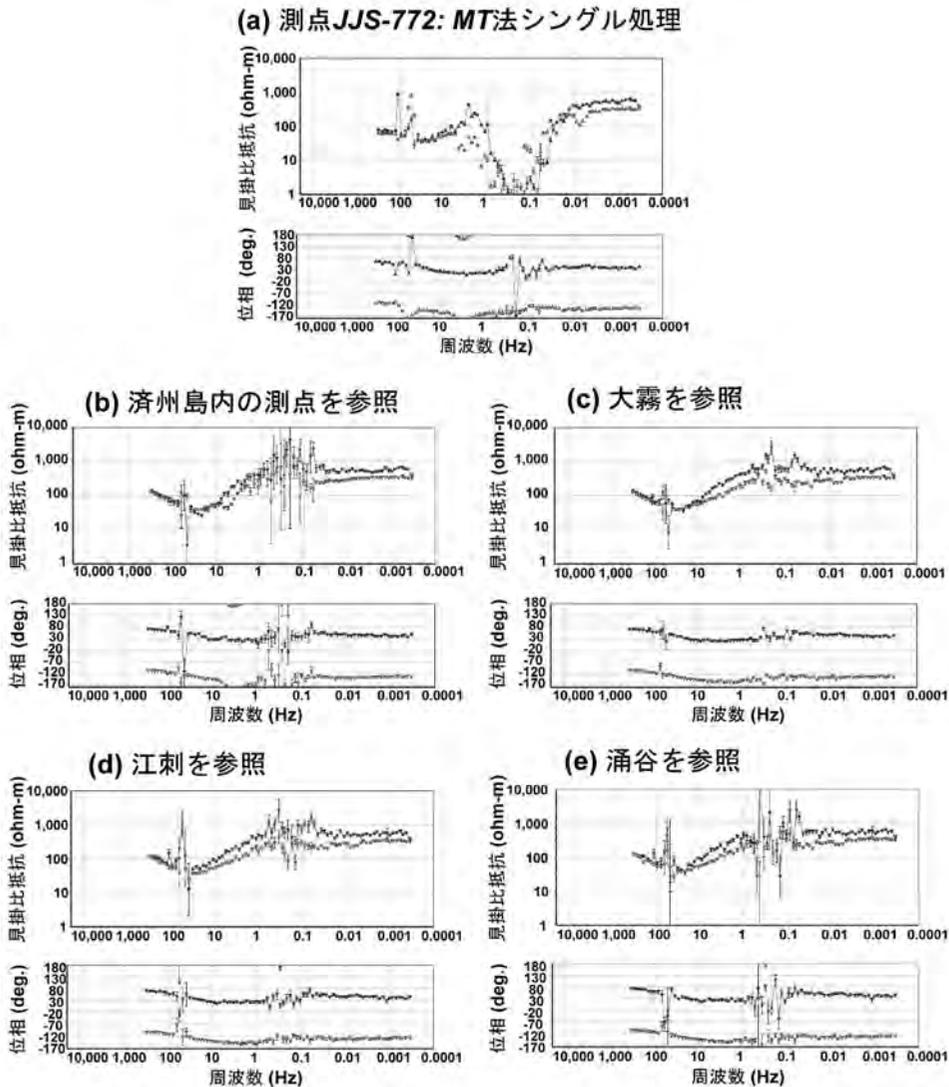
次に、AMT法の高周波バンド(24,000Hzサンプリング)の時系列データの例を第6図に示す。2004年9月9日に済州島の2測点(JJE-415, JJW-380)と大霧で測定した磁場データである。大霧では300Hzの連続的なノイズが見られる。データ取得では60Hzと180Hzのデジタル・ノッチフィルタが用いられるが、それを通過した商用電源の高調波がノイズとして観測されたものと解釈される。それに対し、済州島の2測点のデータには、ノッチフィルタを通過した60Hzノイズのほか、複数の周波数の高調波ノイズが含まれているようである。60Hzノイズの位相は測点JJE-415とJJW-380で異なる。韓国の電力システムが正確な60Hzではなく、周波数あるいは位相に僅かな不安定性を含んでいるものと推測される。第6図には、雷放電あるいはその他の放電によるものと思われる信号が記録されており、済州島と大霧で到達時刻に差があることがわかる。

4. リファレンス処理

4.1 MTデータ

測点JJS-772のMTデータについて、測点JJN-611, 大霧, 江刺, 涌谷のデータを参照してリファレンス処理を行った。得られた見掛比抵抗と位相曲線を第7図に示す。測点JJS-772単独のデータ処理(シングルサイト処理)では、見掛比抵抗は周波数0.1Hz~1Hzの範囲を中心に非常に乱れた値となる(第7図a)。この理由として、電場 E_x の時系列データに連続的なパルス状ノイズが含まれていて、それらを用いて処理を行ったことが大きな原因であると考えられる。

4通りの参照点のどれを用いても、周波数0.1Hz~1Hzの範囲の見掛比抵抗はリファレンス処理によって大幅に改善され、連続した曲線を認識することができるようになった。その中で、大霧を参照した処理が最もスムーズで推定誤差の小さい曲線が得られた。商用周波数である60Hz近傍では、ノッチフィルタを通過したノイズを除去することができず、見掛比抵抗、位相とも乱れた値となっている。測点JJN-611を用いた処理では、0.1Hz~1Hzの範囲の見掛比抵抗には大きな推定誤差が生じている。これは、電場 E_x に見られたと同様のパルス状のノイズが両測点の磁場データにも含まれていて、それらを除去することができ

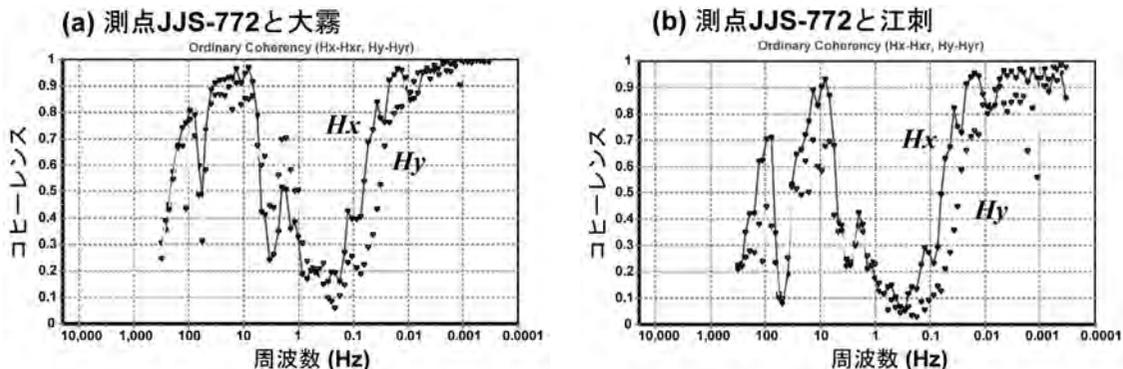


第7図 測点JJS-772におけるMT法リファレンス処理の比較. 見掛比抵抗と位相をプロットした. (a)シングルサイト処理, (b)測点JJN-611を参照, (c)大霧を参照, (d)江刺を参照, (e)涌谷を参照.

なかったものと推測される.

江刺および涌谷は濟州島から1,500kmも離れているが, リモート・リファレンス処理は有効であると判断される. しかし, 涌谷は直流電車のノイズの影響を受けているので, 0.1Hz~1Hzの範囲のデータの改善はそれほど良くない. 江刺を用いた処理結果は大霧より少し品質が劣る. それを比較するために, 測点JJS-772と大霧, 江刺の間の磁場データの相関を調べた(第8図). 磁場データの相関は, 一般的に, シューマ

ン共振の帯域(周波数が数Hzから数十Hz), および, パルセーション信号の帯域(周期が数十秒から数百秒)で高く, それ以外では小さくなる. 江刺と測点JJS-772との相関は, 両者が1,500kmも離れていても, 一般的な値に近い傾向を示していて, リファレンス処理の有効性を支持するが, 大霧との相関に比べて全ての周波数で少し悪いことがわかる. 大霧と江刺のリファレンス処理結果の差はこれによるものと思われる.



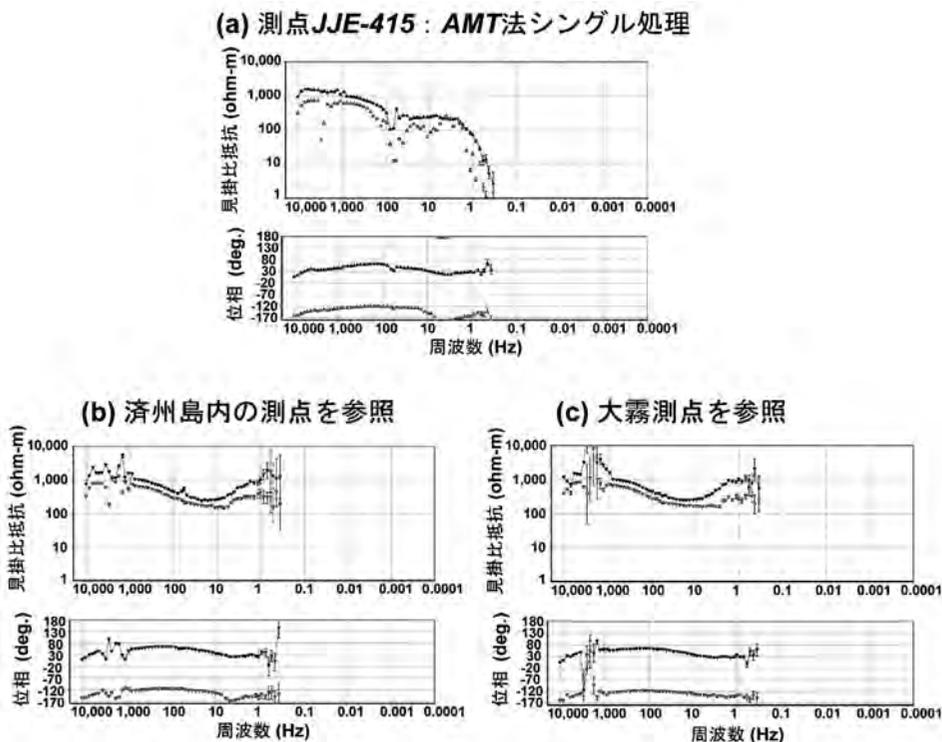
第8図 測点JJS-772と参照点間の磁場成分の相関(コヒーレンス). (a) 大霧, (b) 江刺. 相関が強いほど1に近くなる.

4.2 AMTデータ

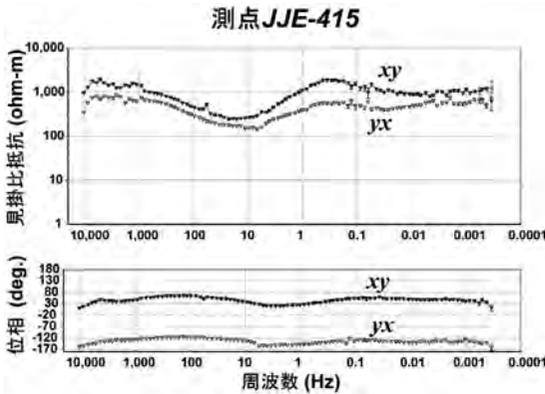
測点JJE-415のAMTデータについて、測点JJW-380および大霧のデータを参照してリファレンス処理した結果を第9図に示す。測点単独の処理では、見掛比抵抗および位相曲線は比較的スムーズであるが、60Hz近傍に擾乱が見られ、また、数Hzより低い周波数では見掛比抵抗が急激に小さくなることわかる。

後者は、AMT用の磁場センサーが低周波数側で感度が小さいことにも依っていると思われる。

AMT法は1Hz以上の高周波数帯を使うので、表皮深度を考慮すると、リファレンスのための参照点はそれほど距離を大きくとらなくてもいいとされる。島の2測点も10km以上離れており、リファレンスには十分である。測点JJW-380と大霧を用いたリファレンス



第9図 測点JJE-415におけるAMT法リファレンス処理の比較. (a) シングルサイト処理, (b) 測点JJW-380を参照, (c) 大霧を参照.



第10図 MTデータとAMTデータを合わせた測点JJE-415の最終的な見掛比抵抗と位相曲線。

処理によって、60Hz近傍や数Hz以下の周波数で処理結果は大幅に改善され、見掛比抵抗はスムーズな曲線となる。詳細に比較すると、1,000Hz以下の周波数では、500km離れた大霧を参照する処理の方がわずかに良い結果となっていることがわかる。1,000Hz以上については、もともとのデータが悪く、両者を比較することができないが、他の測点の状況を見ると、濟州島内の測点を参照する方が良い結果になると判断される。

測点JJE-415のMT法とAMT法のデータを合わせ、処理結果のスペクトルデータのうちの明らかに異常な値を示すセグメントを手作業で除去する作業を行った結果を第10図に示す。参照点として、MT法は大霧、

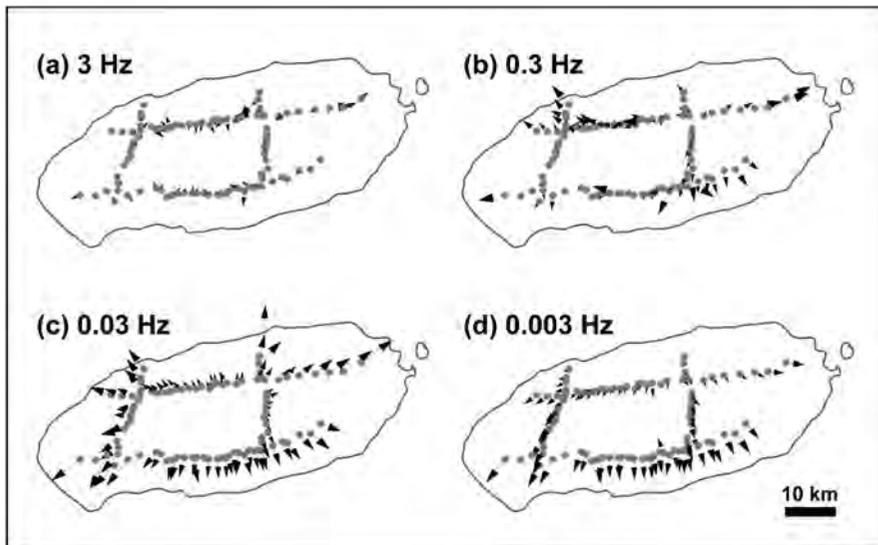
AMT法は測点JJW-380を用いた。60Hz近傍や1,000Hz近傍で少し乱れた値があるが、全体として非常に良好なデータが得られている。

5. 2次元解析

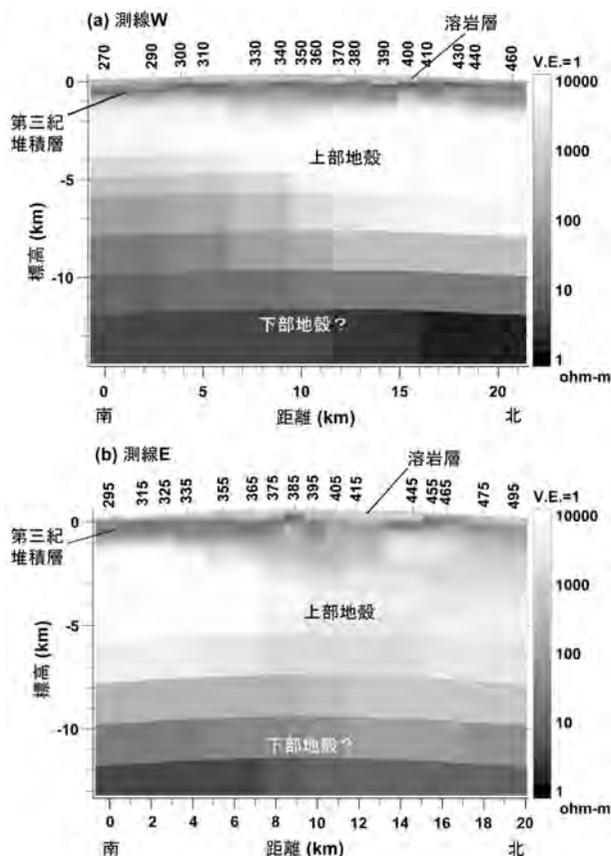
5.1 インダクション・ベクトル

インダクション・ベクトルは、磁場の鉛直成分と水平成分の関係から算出される情報であり、比抵抗構造が水平方向に変化する場所において、低比抵抗がどちらの方向にあるかを示す指標として使われる。ベクトルの大きさは0から1の範囲の値をとり、水平方向の比抵抗変化が急激であるほど大きい値になる。また、高周波数のインダクション・ベクトルはスキンドプスに依じた浅部および測点近傍の比抵抗構造を反映し、低周波数のものは深部および遠方の比抵抗構造も反映する。

4つの周波数のインダクション・ベクトルの分布を第11図に示す。周波数3Hzでは、インダクション・ベクトルはほとんどの測点で小さく、Halla山の方向を向く傾向にある。この周波数では探査深度は小さいので、主に地形の効果によって山体の方向を指すものと思われる。0.3Hzでは、海に近い測点でインダクション・ベクトルが海の方を向くようになる。0.03Hzでは全ての測点で周囲の海の方を向くようになり、0.003Hzでは全ての測点で南の東シナ海の方を向くようになる。0.03Hz近傍のデータを用いた場合、東西方



第11図
インダクション・ベクトルの分布。(a) 3Hz, (b) 0.3Hz, (c) 0.03Hz, (d) 0.003Hz。ベクトルの単位長さは10 kmの距離に対応する。



第12図 2次元インバージョンによって得られた比抵抗構造モデル。(a) 測線Line-W, (b) 測線Line-E. TMモードのデータを使用し, 地形および海水の影響を考慮した解析を実施した。

向, 南北方向のどちらの測線でも, 2次元解析を行った場合に, 外側の海の影響(低比抵抗の海水が存在すること)を受けてしまう可能性のあることがわかる。

5.2 2次元モデル

上述のように, 低周波数のデータに対して, 測線の側方にある海の影響を受けることが考えられるが, 予備的な解析として, 南北測線について2次元解析を行った。解析に用いたデータは, 0.037Hz~780Hzの58周波数のTMモードのデータ(見掛比抵抗, 位相)である。地形および測線の両端の海をモデルに組み込んでいる。

測線Line-Wと測線Line-Eの2次元比抵抗モデルを第12図に示す。両測線のモデルは似通った比抵抗構造を示している。地表には高比抵抗の層があり, これ



写真7 島南部のDaepodong海岸の柱状節理露頭。



写真8 KIGAMの調査クルー。足下は柱状節理露頭, 後方は寄生火山のBiyangdo島(済州島の西部)。

は若い溶岩層に相当し数百mの厚さを有する(写真7~9)。その下には, 厚さ1km程度の低比抵抗層が測線全体にわたって分布し, これは第三紀の堆積岩層に相当する。測線Line-Eを北に延長した海岸部(Samyang海岸)で掘削された坑井によると, 海拔約-90m以深で堆積岩層の存在が確認されており(写真10), 島を形成する火山活動の前には, 海底下の堆積環境にあったことがわかる(KIGAM, 2006)。堆積岩層の下位には, 花崗岩を主体とする上部地殻に相当すると思われる厚い高比抵抗層や, さらに深部には下部地殻に相当する低比抵抗層の存在が推測される。しかし, 深部の比抵抗構造について信頼性の高いモデルを得るには, 海の影響や3次元的な構造を考慮した本格的な3次元解析を待つ必要がある。



写真9 島東部のSeopjikoji海岸の寄生火山の火道跡。



写真10 島北部のSamyang海岸に掘削されたKIGAM調査井のコア。地表から深さ約90mまでは溶岩層、それ以深は堆積層。

6. おわりに

一般的に人工ノイズの強い韓国・濟州島においてMT法およびAMT法の調査を実施した。MT法については、九州南部(大霧)に設置した参照点におけるデータを用いたりモート・リファレンス処理により、ノイズの大部分を除去し、品質の高い測定結果を得ることができた。濟州島内の測点を用いるリファレンス処理では、0.1Hz~1Hz周辺のデータの改善は不十分であり、解析には用いることができなかった。また、今回、濟州島から1,500km離れた江刺、涌谷の国土地理院MT法連続観測点のデータを用いるリファレンス処理が有効であることを確認した。ただし、涌谷観測点は直流電車のノイズの影響を受けており、リファレンスの効果は不十分である。日本国内では、国土地理院の観測点のほか、Phoenix社が東日本と西日本の各一箇所に試験的なMT法連続観測点を設けている。このような連続観測点の継続は国内におけるMT法調査のデータ品質向上に大きく貢献するものと期待される。

AMT法についてもリファレンス処理は不可欠であり、濟州島内で10km程度以上離れた測点を用いるリファレンス処理が効果的であることがわかった。しかし、濟州島から500km離れた大霧を参照点とするリファレンス処理が、1,000Hz以下のデータに対して、島内の測点の相互リファレンスより、やや安定な処理が行えることを確認した。

謝辞：本研究には、国土地理院の江刺、涌谷両観測所のMT法連続観測データを使用させていただいた。また、大霧における参照点データ取得に際して日鉄鉦コンサルタント(株)の協力を得た。ここに記して感謝の意を示します。

参考文献

- Lee, T. J., Song, Y. and Uchida, T. (2007a) : Three-dimensional magnetotelluric surveys for geothermal development in Pohang, Korea, *Mulli-Tamsa*, 10(1), 89-97.
- Lee, T. J., Lee, S. K., Song, Y., Nam, M. J. and Uchida, T. (2007b) : Three-dimensional interpretation of MT data from mid-mountain area of Jeju Island, Korea, *Proceedings of 4th International Symposium on Three-Dimensional Electromagnetics*, 203-206.
- 小川康雄(1990) : MT法による地下構造探査, *地質ニュース*, 428, 48-59.
- Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (2006) : Guidebook for a geologic tour of Jeju Island, 183p.
- Uchida, T., Song, Y., Lee, T. J., Mitsuhashi, Y., Lim, S. K. and Lee, S. K. (2005) : Magnetotelluric survey in extremely noisy environment at the Pohang low-enthalpy geothermal area, Korea, *Proceedings (CD-ROM) of World Geothermal Congress 2005*, Paper 0753, 1-9.

UCHIDA Toshihiro, SONG Yoonho, LEE Tae Jong, LEE Seong Kon and LIM Seong Keun (2008) : MT survey in Jeju Island - Application of extremely long-distance remote reference.

<受付：2008年1月7日>