郷村断層帯における wide-band MT・AMT 観測（序報）

* 三村　明（大阪市立大学・院・理）・山口　覚（大阪市立大学・院・理）・福江 一輝（大阪市立大学・理）・
村上英記（高知大学・理）・加藤茂弘（兵庫県立人と自然の博物館）・上嶋　誠（東京大学・地震研）

1. はじめに

活断層周辺では露頭の観察，トレンチ調査，ボーリング調査などの地質学的な調査が行われている．これによって多くのデータが蓄積されており，活断層に関して多くの知見をもたらしている．一方で，地質学的な調査からは活断層の構造を深さ数百 m ～ km スケールで明らかにすることは困難であるため，電気探査や地震波探査，音波探査など地球物理学的手法が有用である．これらのうち，活断層を対象としては反射法地震波探査や音波探査が広く用いられている．しかし，西南日本に多く分布する横ずれ断層では，一般に傾斜がほぼ鉛直であるため，これらの手法では活断層の構造を明らかにすることは難しい．このような構造に対して，電磁気的な手法である Magnetoterullic 法（MT 法）は有効である．

活断層周辺には断層運動によって岩石中にクラックの生じた領域（ダメージゾーン）が存在し，そこに地下水が浸入することにより低比抵抗領域が生じる．また，この領域の広がりや周囲との比抵抗コントラストは断層の平均変位速度や最新活動時期などを反映している可能性がある（e.g. 山口ほか，2016）．

活断層における MT 調査は跡津川断層（e.g. Goto et al., 2005）や中央構造線（e.g. Ikeda et al., 2013）などで行われているが，それらは主として深部を対象とした調査であるため，地質学的な調査によって得られている地表付近数 cm~ 数百 m スケールの構造や，幅数百 m~1km 程度のダメージゾーン（≒低比抵抗領域）の広がりの違いを議論することは困難である．このような問題を解決するためには，浅部の空間分解能が高い AMT 法が適当であると考えられる．

本研究では最新活動時期など，活動が異なる 3 つの断層が並走する郷村断層帯を調査対象とし，AMT 調査を行った．またそれに加えて活断層の地表から震源域までの連続的な構造の解明のため，wide-band MT 調査も行った．本発表では AMT の解析結果と wide-band MT の観測結果について述べる．

2. 調査地域

◆京都府京丹後市に位置する郷村断層帯（郷西方断層・郷村断層・仲禅寺断層）を調査対象とする．

◆3 つの断層はそれぞれ断層の長さや最新活動時期が異なる断層である．

◆郷村断層帯では山口ほか（2016），三村ほか（2017）で AMT 調査が行われており，地下 1.5km までの比抵抗断面が推定されている（図 2）．

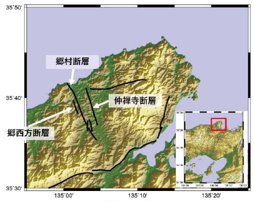


図 1. 郷村断層帯の位置
断層トレースは産業技術総合研究所活断層データベースに基づく

表 1 郷西方断層，郷村断層，仲禅寺断層の特徴

	長さ	累積変位量	最新活動時期	その他
郷西方断層	2.8km[1]	なし[1]		
郷村断層	13km[2]	最大100m前後[3]	1927年[2]	1927年北丹後地震（M7.3）
仲禅寺断層	8km[2]	最大210~240m[3]	1万 2千年前以前[3]	2万年前頃まで活発に活動 最大約200mの河谷の系統的な左横ずれ

1) 岡田・東郷，2000　2) 地震調査委員会，2004　3) 植村，1985　4) 杉山・佃，1994

3. 先行研究

三村ほか（2017）は地下 1.5km までの比抵抗断面が推定している．しかし，仲禅寺断層近傍に観測点がないため，断層近傍の浅部構造が十分に解像されておらず，また低比抵抗領域 C2b が観測点と観測点の間に存在しており，この領域が計算上の虚像である可能性が捨てきれない．

このような問題点を解決するために本研究では AMT の観測点を 2 点追加し，観測を行った．

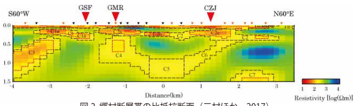


図 2. 郷村断層帯の比抵抗断面（三村ほか，2017）
GSF：郷西方断層，GMR：郷村断層，CZJ：仲禅寺断層の地表トレース位置を表す．
やや低比抵抗な領域（第二四分位数よりも小さい領域）を黒の破線で，非常に低比抵抗な領域（第一四分位数よりも小さい領域）を赤の破線で示す

4. 目的

◆震源域までの比抵抗構造を明らかにし，地表から震源域までの連続的な断層形態を明らかにする．

◆地下 1.5km までの，より正確な比抵抗断面を推定する．

5.　AMT 調査

観測

観測日程　2017/10/30~11/1
使用機器　MTU-5A（PHOENIX GEOPHISICS 社，カナダ）
観測点数　観測点 2 点
　　　　　remote 点 1 点（京丹後市丹後町吉永）
山口ほか（2016），三村ほか（JpGU2017）と同じ測線上で観測

MT 応答関数の算出

SSMT2000（PHOENIX GEOPHISICS）を使用して remote reference 法（Gamble et al., 1978）に従ってデータ解析を行い，各観測点における見かけ比抵抗，位相差を算出した．
これ以降は山口ほか（2016），三村ほか（2017）のデータと合わせて解析を行う．

観測点配置

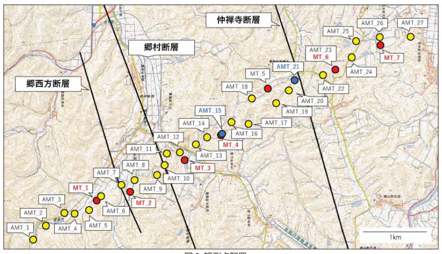
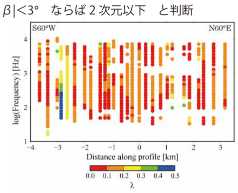


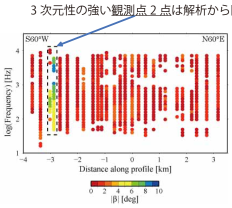
図 3. 観測点配置
青点：本研究の AMT 観測点　赤点：本研究の wide-band MT 観測点
黄点：山口ほか（2016），三村ほか（JpGU2017）の観測点

次元の判定

Phase Tensor 法（Bibby et al., 2005；Caldwell et al., 2004）を使用
λ>0.1　ならば 2 次元以上，
|β|<3°　ならば 2 次元以下　と判断

調査地域周辺の比抵抗構造
2 次元構造
3 次元性の強い観測点 2 点は解析から除外





走向の判定

Phase Tensor（Caldwell et al., 2004）法を使用
より広範の情報を持つ低周波（<100Hz）の α の値と郷村断層帯の一般走向（N30°W）から比抵抗構造の走向を判定

N30°W

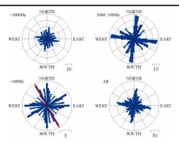


図 6. 周波数帯域ごとの α の分布図

モデル計算

Ogawa and Uchida (1996) のインバージョンコードを使用
計算領域　水平方向：-97.5km~97.0km　鉛直方向：~101.4km
メッシュ数：4796　初期モデル：100Ωm 一様
30 回の反復計算ののち，abic，RMS がともに大きく変化しなくなる 18 回目のモデルを最適モデルとした（RMS=1.38）．

6.wide-band MT 調査

観測

観測日程　2017/11/4~11/27
使用機器　ADU07（metronix geophisics 社，ドイツ）
観測点数　観測点 7 点
　　　　　各観測点で約一週間測定
山口ほか（2016），三村ほか（JpGU2017）と同じ測線上で観測

MT 応答関数の算出

MAPROS（metronix geophisics）を使用して remote reference 法（Gamble et al., 1978）に従って解析を行い各観測点における見かけ比抵抗，位相差を算出した．
remote 点には地熱技術開発の山形県の観測点のデータを用いて解析を行った．
ただし，11/23~11/24 は remote 点のデータが欠損しているため解析していない．

疑似断面

AMT と wide-band MT の見かけ比抵抗と位相差（XY・YX 成分）の疑似断面を図 8 に示す．
以下のようなことが読み取れる．
◆wide-band MT 観測によって得られたデータは AMT 観測によって得られたデータと整合的である．
◆10s よりも長周期側では顕著に低比抵抗かつ位相が高くなっている
⇒北東側の海の影響を受けている？

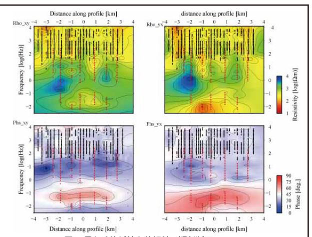
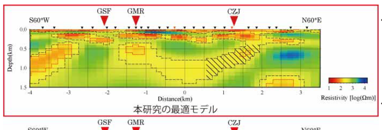
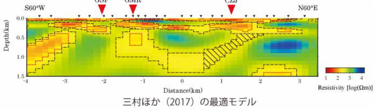


図 8. 見かけ比抵抗と位相差の疑似断面
黒点：AMT の結果　赤点：wide-band MT の結果

最適モデルの比較



本研究の最適モデル



三村ほか（2017）の最適モデル

図 7. 最適モデルの比較
GSF：郷西方断層，GMR：郷村断層，CZJ：仲禅寺断層の地表トレース位置を表す．
やや低比抵抗な領域（第二四分位数よりも小さい領域）を黒の破線で，非常に低比抵抗な領域（第一四分位数よりも小さい領域）を赤の破線で示す．

◆問題視していた観測点と観測点の間の低比抵抗領域は無くならなかった．
↓
虚像ではなく，実際の構造を反映したもの
◆深さ 200m 付近の水平な低比抵抗領域の底面の深さがそろった．
◆仲禅寺断層下の低比抵抗領域（図 7 の斜線部）の幅が広くなった．
ただし
深さ 500m 付近を比較すると郷村断層下の低比抵抗領域の方が幅が広く，比抵抗値が小さいという傾向は変わらない．

7. まとめ

◆三村ほか（JpGU2017）に AMT 観測点を 2 点加えた結果，問題視していた観測点間の低比抵抗領域は虚像ではなく実際の構造を反映したものであると考えられる．
◆wide-band MT 調査を行った結果，AMT の MT 応答関数と整合的な MT 応答関数が得られた．
◆10s 付近よりも長周期側で低い見かけ比抵抗と高い位相差がみられた．これは海の影響を受けたためだと考えられる．

参考文献

Bibby, H. M., T. G. Caldwell, and C. Brown, 2005, Determinable and non-determinable parameters of galvanic distortion in magnetotellurics. Geophys. J. Int., 163, 915-930.
Caldwell, T. G., H. M. Bibby and C. Brown, 2004, The magnetotelluric Phase tensor. Geophys. J. Int., 158, 457-469.
Gamble, T. D., W. M. Goubau, and J. Clarke, 1979, Magnetotellurics with a remote magnetic reference. Geophysics, 44, 53-68.
Goto, T., Wada, Y., Oshiman, N. and Sumino, N., 2005, Resistivity structure of a seismic gap along the Atotsugawa Fault, Japan. Phys. Earth Planet. Inter., 148, 55-72.
Ikeda, M., Kato, S., Nishizaki, N., Ohno, Y., Matsuo,K. and Kishimoto, M., 2013, Magnetotelluric imaging of the Median Tectonic Line in western Shikoku, southwest Japan: Implications of the fault-related low-resistivity zone. Tectonophysics, 601, 78-86.
三村　明・山口　覚・倉光　伸・小堺　航・金　幸隆・村上英記・加藤茂弘，2017，郷村断層（郷西方断層・郷村断層・仲禅寺断層）の地下比抵抗構造，2017 年日本地球惑星科学連合大会，SSS12-16
Ogawa, Y. and T. Uchida, 1996, A two-dimensional magnetotelluric inversion assuming Gaussian static shift. Geophys. J. Int., 126, 69-76.
岡田篤正・東郷正美，2000，近畿の活断層．東京大学出版会，393p.
山口 覚・大内悠平・小田佑介・三島稔明・村上英記・加藤茂弘，2016，Audio-frequency Magnetotelluric 法による郷村断層周辺の地下比抵抗構造．地質学雑誌，122，573-586.

謝辞　本研究は，東京大学地震研究所共同研究の援助をうけました．観測機材は東京大学地震研究所および京都大学大学院理学研究科附属地球熱学研究施設火山研究センターからお借りした．また，地熱技術開発株式会社には山形県の観測データをいただいた．
ここに深く感謝の意を表します．