

## 高密度 CSAMT 法から推定される津軽地方南東部における 断層の新旧を反映する比抵抗構造

小田 佑介, 小鹿 浩太, 坂下 晋 (応用地質株式会社)

### Delineation of the resistivity structure difference between active and fossil faults in the southeast part of the Tsugaru region using High-density CSAMT survey

Yusuke Oda, Kota Koshika, Susumu Sakashita (OYO Corporation)

#### Abstract

It is known that the resistivity around the fault shows low resistivity because of the infiltration of the fluid into fractures and recognized as the Fault zone conductor (FZC). In order to clarify the difference of the resistivity structure between active and fossil faults, we conducted high-density CSAMT survey across the active Aomori-wan west fault (AWF) and the fossil Tsugaru fault in the southeast part of the Tsugaru region. We found a sharp low resistivity zone around the fault plane of AWF and interpreted as FZC of AWF. On the other hand, we found no FZC around Tsugaru fault. This result suggests the possibility that FZC of Tsugaru fault had once existed and eventually disappeared as the porosity declined due to consolidation and cementation as time went on.

#### 1. はじめに

活断層近傍にみられる特徴的な比抵抗構造として、Fault Zone Conductor (FZC) と呼ばれる破砕箇所に浸入した流体によって形成される特徴的な低比抵抗領域の存在がしばしば報告されている (例えば, Unsworth et al., 2000; Ichihara et al., 2010). 近年では FZC と活断層の活動性や成熟度の関係性を明らかにするための研究も進められている. 例えば, 山口ほか (2016) は郷村断層と土万断層の比抵抗構造を対比し, 両活断層近傍の低比抵抗領域の幅や比抵抗値の変化には 1000 年程度の最新活動時期の差よりも累積変位量や平均変位速度の寄与が大きい可能性を示した.

本研究では, 津軽地方南東部に分布する地質断層である津軽断層と活断層である青森湾西断層を対象として高密度 CSAMT 法を実施し, それらの地下比抵抗構造の違いについて考察した.

#### 2. 既往調査

津軽半島の南東部には, 津軽断層と青森湾西断層という 2 本の断層が分布する. 津軽断層は津軽山地の形成に影響を及ぼし, 既に活動を終えた総延長 50km の西側隆起の逆断層である (根本, 2014). その東方には全長 16km の活断層である青森湾西断層が分布する (活断層研究会, 1991).

本調査地域では反射法地震探査 (楮原ほか, 2017) と重力探査 (岡田ほか, 2018) が実施されている (図 1). 反射法地震探査からは, 青森湾西断層の推定地表位置の 2km 西方にその断層面が存在すること, および青森湾西断層と津軽断層によって地層が変形していることが報告されている (図 2-(a)). 反射法地震探査と同一測線上で行われた重力探査では, 反射法地震探査結果に密度値を与えて算出した理論重力値が観測重力値と概ね一致することから, 反射構造に対応する地質が推定された (図 2-(b)).

### 3. 測定

高密度 CSAMT 法は反射法地震探査から推定される青森湾西断層の断層面および山地部に位置する津軽断層の地下構造を高分解能で得ることを目的として、既往の物理探査測線と一部重複する全長 6.1km の測線上に 50m 間隔で設定した計 123 点の受信点で実施した (図 1)。なお、送信は測線の 10.2km 南方に設置した全長 1.6km の送信源から行い、調査地域では TM モードに相当する配置で測定を行った。送信および受信は 0.125~8192Hz の 33 周波数を 1 サイクルとして、1 サイクルあたり 1 時間で行った。

測定には Geometrics 社製の GeodeEM3D を使用した。GeodeEM3D は AMT 法および CSAMT 法に対応した受信機である。測定機のチャンネル構成を電場 6 チャンネルから電場 3 チャンネル・磁場 3 チャンネルまで目的に応じて変更することができ、また測定機の連結による同時測定が可能であるため、多点・高密度な測定を効率良く実施することができる。

### 4. データ解析

測定された電場と磁場からデータ処理ソフト CsamtPro (Geometrics 社製) を用いて MT 応答関数を算出した。青森湾西断層の推定伏在位置付近の受信点で得られた MT 応答関数には、90°を超える位相差がみられた。このような位相差は三次元的な構造の存在を示唆することから、二次元解析から除外した。また、いくつかの地点の 1Hz 以下の周波数帯域ではニアフィールドの影響と考えられる MT 応答関数の急変がみられた。そこで、解析ソフト SCS2D (Zonge 社製) を用いた一次元解析によってファーフィールド下の MT 応答関数を推定し、それらを用いて二次元解析を行った。なお、二次元解析を行うにあたり、受信点の位置を送信源と平行な N78°E-S78°W の直線上に投影した。その際に、受信点位置およびデータの品質を考慮して、測定を行った計 123 地点の内、116 地点における TM モードの MT 応答関数を二次元解析に使用した。

二次元比抵抗断面図を図 2-(c)に示し、比抵抗断面図の特徴を東から順に以下に述べる。距離程 1300m より東では標高-1000m 付近を境に、上位に 50~1000Ωm 程度の高比抵抗領域 R1 が、下位に 30Ωm 以下の低比抵抗領域 C が存在する。この低比抵抗領域 C の上端は、距離程 1500m 付近では標高-200m まで突出した後、緩やかに下降し、距離程 2000m 付近では標高-600m 付近に位置する。そして、ほぼ水平な境界を成した後、距離程 3500m 付近から立ち上がり、距離程 4300m 付近では標高 100m まで上昇する。これより西では浅部を厚さ 300m 程度で比抵抗値 50~80Ωm 程度の中比抵抗領域 M が覆い、その下位に 60~200Ωm の高比抵抗領域 R2 が分布する。

### 5. 地質学的考察

#### 5.1. 比抵抗値と地質

本調査地域の津軽断層より東部では、泥岩と硬質頁岩からなる小泊層を主に泥岩からなる不動滝層が覆い、その上を主に固結度の低い砂岩からなる蟹田層と大釈迦層が覆う (根本, 2014)。一般に、砂岩より泥岩の方が低比抵抗を示すことから、距離程 4200m 地点より東側の浅部の高比抵抗領域 R1 が大釈迦層と蟹田層の砂岩層に、深部の低比抵抗領域 C が砂岩層の下位の不動滝層や小泊層の泥岩層に対応すると考えられる。これは、高比抵抗領域 R1 と低比抵抗領域 C の境界深度が反射法地震探査および重力探査から推定された蟹田層の下端深度と良く一致することからも支持される。また、津軽断層より西部では硬質泥岩・ドレライトからなる馬ノ神山層が分布する

(根本, 2014). 距離程 4300m より西の浅部に分布する中比抵抗領域 **M** は地質分布との対比から馬ノ神山層に対応すると考えられる.

露頭比抵抗値の測定はミニオーム(応用地質(株)製)を用いて同一地層の複数の露頭で実施した. 測定結果を図 3 に示す. 図中の比抵抗値は最大・最小値と平均値を示し, 図中の色枠と矢印はそれぞれ, 各地層と比抵抗領域 **R1**・**C**・**M**・**R2** との対応, および各比抵抗領域の比抵抗値の範囲を示す. 高比抵抗領域 **R1** と中比抵抗領域 **M** の比抵抗値はそれぞれ対応する地層の露頭比抵抗値測定結果と整合的である. とともに泥岩からなる不動滝層と小泊層を比較すると, 不動滝層の方が低比抵抗領域 **C** に近い比抵抗値を示す. さらに, 不動滝層が小泊層の上位であることを考慮すると, 低比抵抗領域 **C** は不動滝層に対応すると考えられる. 低比抵抗領域 **C** の比抵抗値が不動滝層の露頭比抵抗値測定結果より低いことは, 露頭と地中における間隙水飽和度の違い, および地表における天水の浸透に伴う間隙水比抵抗値の上昇によるものと推測される. また, 高比抵抗領域 **R2** の比抵抗値は小泊層および馬ノ神山層の露頭比抵抗値と良い対応を示す. 既往探査で示された津軽断層の断層面が高比抵抗領域 **R2** 内を横断すると考えると, 高比抵抗領域 **R2** には小泊層, 馬ノ神山層およびその下位層が含まれる可能性がある.

## 5.2. 比抵抗値と断層構造

距離程 1500m 付近において低比抵抗領域 **C** が低角度で突出する構造は, その東西における比抵抗境界の分布深度の違いから西側隆起の断層に関連した構造であると推定される. この構造の位置は反射法地震探査および重力探査において青森湾西断層と解釈されている断層面の位置と整合的であることから, この構造は青森湾西断層に関連した **FZC** と考えられる. また, 青森湾西断層を境とする高比抵抗 **R1** と低比抵抗 **C** の境界深度の変化から, その変位量はおよそ 400m と推定される.

距離程 4000m~4500m 付近において, 青森湾西断層の **FZC** と解釈した構造と同様に, 低角度で突出する構造が認められた. この構造は既往探査で示される津軽断層の断層面と直行し, その上面が既往探査結果の不動滝層と整合的であることから, 津軽断層によって上方に変位した不動滝層を反映していると解釈した.

津軽断層近傍に明瞭な **FZC** が存在しないことを検証する為に, 津軽断層に沿う 10Ωm の低比抵抗領域を与えた改変モデルを作成し, 二次元順解析によって算出した理論値を測定値・二次元解析の入力値・解析結果の理論値と比較した. 改変モデルの比抵抗断面図を図 4-(a)に, YM99 地点におけるそれぞれの MT 応答関数を図 4-(b)に示す. 改変モデルから算出した理論値が測定値・二次元解析の入力値・解析結果の理論値から乖離することから, 津軽断層近傍にはこのような低比抵抗領域は存在しないと評価した.

活断層である青森湾西断層では明瞭な **FZC** が認められた一方, 地質断層である津軽断層では認められなかった. この違いを生じた原因として, ①かつては **FZC** が形成されていたが, 現在までに消失した可能性と②そもそも **FZC** が形跡されていなかった可能性のどちらかが考えられる. ここで, 津軽断層と青森湾西断層はともに西側隆起の逆断層であり, 同地域でより小規模な青森湾西断層で **FZC** が認められたことから, 津軽断層でもかつては **FZC** が形成されていた可能性があると推測した. 以上より, 活動の終えた津軽断層ではかつては **FZC** が形成されたものの, 時間の経過とともに圧密・膠結が進行し, 空隙率が低下したために **FZC** が縮小・消失した可能性が考え

られる。活断層と地質断層において FZC の有無が異なることはそれぞれの断層における活動時期の違いを反映する可能性がある。

## 6. まとめ

津軽半島南東部において、地質断層である津軽断層と活断層である青森湾西断層を対象として、高密度 CSAMT 法を実施し、既往の反射法地震探査と重力探査と整合的な二次元比抵抗断面図を得た。調査地域周辺で測定した露頭比抵抗値の傾向から、それぞれの比抵抗領域と対応する地層を推定した。また、既往探査で青森湾西断層の断層面が示されている位置に青森湾西断層の FZC と考えられる低比抵抗領域が認められた。一方、地質断層である津軽断層では FZC は認められなかった。この差異は活断層と地質断層の空隙の状態の違いによるものと推測され、断層の活動時期の違いが反映されている可能性が示された。

## 謝辞

本研究を行うにあたり、東北大学の岡田真介助教、山口大学の楳原京子准教授、千葉大学大学院の宮内崇裕教授、東北大学の今泉俊文名誉教授より多くの助言を頂きました。ここに深く感謝の意を表します。なお、本論の一部の図の作成には The Generic Mapping Tools (Wessel et al., 2013) を利用しました。

## 参考文献

- Ichihara, H., M. Uyeshima, S. Sakanaka, T. Ogawa, M. Mishina, Y. Ogawa, T. Nishitani, Y. Yamaya, A. Watanabe, Y. Morita, R. Yoshimura, Y. Usui, 2011, A fault - zone conductor beneath a compressional inversion zone, northeastern Honshu, Japan, *GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS*, vol.38, 4p.
- 楳原京子・越後智雄・岡田真介・戸田 茂・井上直人・宮内崇裕・今泉俊文・小坂英輝・三輪敦志・坂下 晋・松原由和・阿部恒平・黒澤英樹・松多信尚・石山達也, 2017, 津軽山地東縁における反射法地震探査, *JpGU-AGU Joint Meeting 2017*, ポスター発表 SSS12-P08.
- 活断層研究会, 1991, 新編 日本の活断層, 東京大学出版会, 437p.
- 根本直樹, 2014, 津軽半島における新第三期以降のテクトニクス, *第四紀研究*, 53, 4, p.205-212.
- 岡田真介・小鹿浩太・小田佑介・塚本勇樹・楳原京子・坂下 晋・今泉俊文・宮内崇裕・越後智雄, 2018, 青森湾西岸断層帯を横断する重力探査とその地下構造, 日本地球惑星科学連合 2018 年大会, ポスター発表 SSS08-P05.
- Unsworth, M., P. Bedrosian, M. Eisel, G. Egbert and W. Siripunvaraporn, 2000, Along strike variations in the electrical structure of the San Andreas Fault at Parkfield, California, *GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS*, vol.27, no.18, p. 3021-3024.
- Wessel, P., W. H. F. Smith, R. Scharroo, J. F. Luis, and F. Wobbe, 2013, *Generic Mapping Tools: Improved version released*, *EOS Trans, AGU*, 94, p.409-410.
- 山口 寛・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*, 第 122 巻, 第 11 号, p.573-586.

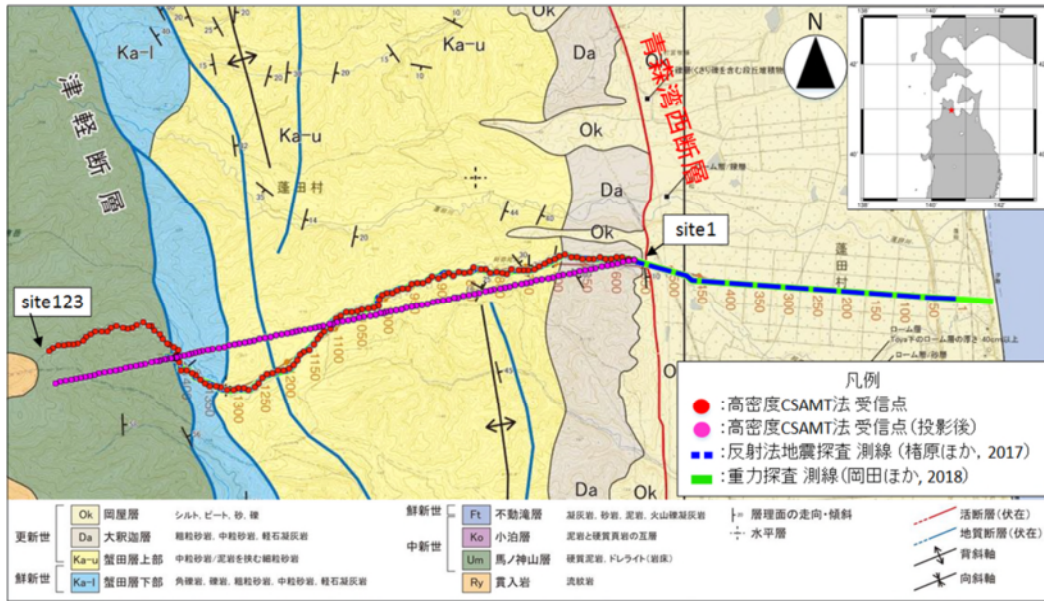


図1 調査地域周辺の探査測線分布図.

Fig.1. Geology and geophysical survey lines in the study area.

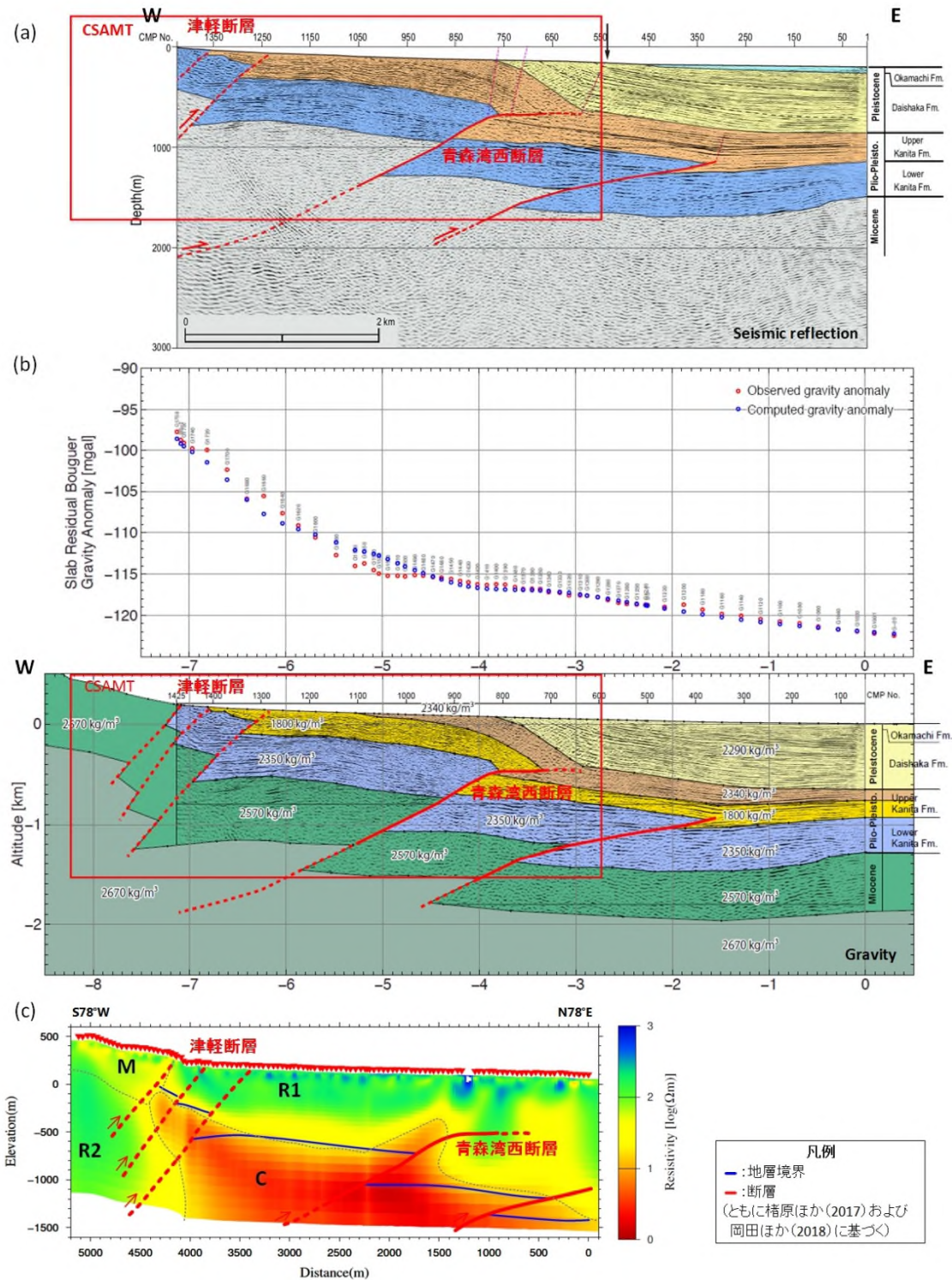


図2 調査地域周辺の物理探査結果.

(a) 反射法地震探査結果図 (楳原ほか, 2017) (b) 重力探査結果図 (岡田ほか, 2018)  
 (上: 測定値と理論値の比較, 下: 密度モデル) (c) 高密度 CSAMT 法比抵抗断面図 (本研究)

Fig.2. Results of geophysical surveys in the study area.

(a) Seismic reflection (Kagohara et al., 2017). (b) Gravity (Okada et al., 2018).

(c) High-density CSAMT (this study).

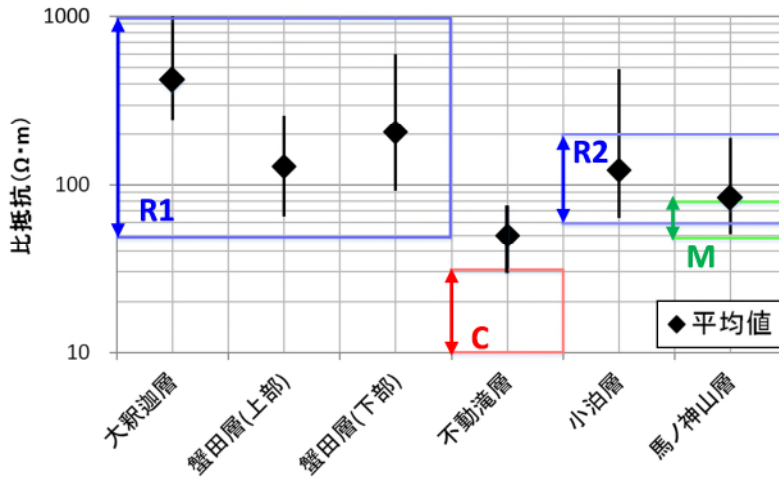


図3 調査地域周辺の露頭比抵抗測定結果と各比抵抗領域の比抵抗値

Fig.3. Resistivity of outcrops in the study area and corresponding resistivity zone.

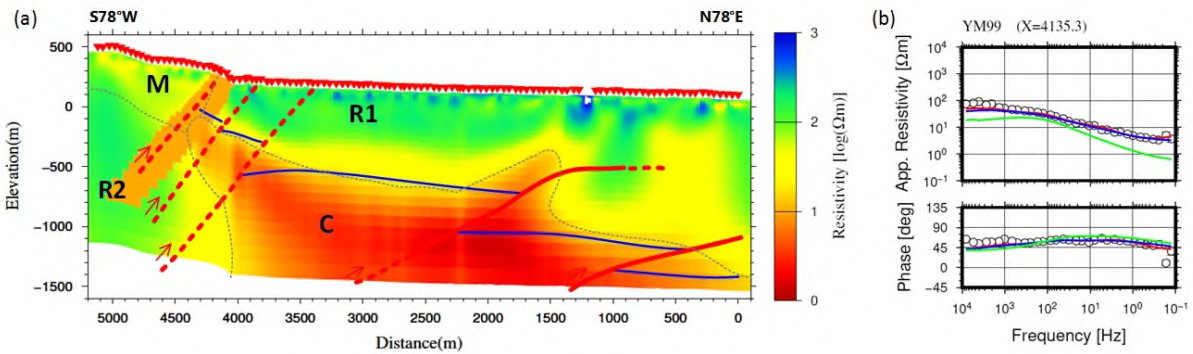


図4 (a) 改変モデル (b) YM99 地点における MT 応答関数の比較.

(○ : 測定値, 赤線 : 二次元解析入力値, 青線 : 二次元解析理論値, 緑線 : 改変モデル理論値)

Fig.4. (a) Modified resistivity model. (b) Comparison of MT responses of YM99 site.

Circle, red line, blue line and green line indicate observed responses, input responses of 2D inversion, calculated responses of our result model and calculated responses of modified model, respectively.