12-4 活断層深部の比抵抗構造と物性 Deep Resistivity Structure of Active Faults and Physical properties

東京工業大学火山流体研究センター

Volcanic Fluid Research Center, Tokyo Institute of Technology

1. はじめに

地殻を構成する岩石の比抵抗は,主として岩石の空隙や鉱物の粒界に存在する流体の存在とその つながりによって決定される.そのため,地殻の比抵抗構造を推定することによって,微量に存在 する地殻内流体を高感度に捉えることができる.本稿では,自然電磁場を用いる電磁探査法(MT法) によって見えてきた"内陸地震地域の流体分布"について,ここ数年の成果を概観する.

2. 内陸地震地域の比抵抗構造

内陸地震地域では,地震発生層は地殻の高比抵抗部に存在し,その下方に非常に顕著な低比抵抗 異常が存在しているということがわかった.この特徴は,東北脊梁(北由利断層・千屋断層・北上 山地西縁断層)¹⁾(第1図),1963年宮城県北部地震地域²⁾(第2図),長町利府断層³⁾,糸魚川静 岡構造線北部⁴⁾⁵⁾(第3図),2007年能登半島地震震源域⁶⁾(第4図),2008年岩手宮城内陸地震⁷⁾ で共通して見出されてきている.

糸魚川静岡構造線北部地域では,地殻中深部の低比抵抗異常の分布する地域が,GPS による面積 ひずみの大きい地域とよく対応することも見出された⁵⁾.長町利府断層では,地表の水平変位の分 布を存在するための断層深部延長が,脊梁直下の下部地殻にある低比抵抗異常に対応することが明 らかにされた³⁾.跡津川断層を含むひずみ集中帯を横断する MT 観測⁸⁾(第5図)においても,地殻 中深部に低比抵抗異常が存在し,その周辺の高比抵抗部で地震が発生していることがわかった.

これらのことから,活断層深部延長における低比抵抗異常体には流体が存在し,そこでは塑性変 形が可能になる一方で,その周辺の高比抵抗部では塑性変形ができずに微小地震が発生するという 図式が考えられる.あるいは,低比抵抗側に存在する流体が高比抵抗側(流体に乏しい領域)に間 歇的に侵入することによって高比抵抗側(地震発生層)の間隙圧を高めて,地震が発生するという 説明もできる¹⁾⁹⁾.

東京工業大学では,海外の長大な横ずれ断層であるトルコ国北アナトリア断層¹⁰⁾¹¹⁾,ニュージー ランド国アルパイン断層¹²⁾,インドネシア国スマトラ断層に関して,比抵抗構造探査を実施している. このうち,ニュージーランド国アルパイン断層について次節で紹介する.

4. ニュージーランド国アルパイン断層周辺の探査

ニュージーランド南島では、長さ 500km にわたる右横ずれ断層であるアルパイン断層が北東 - 南 西方向に島を縦断している(第6図). 南島北部のマルボロ地域では、アルパイン断層に並行する 5つの横ずれ断層が存在しているが、その地域の地質が単純であり、それらが南東側に向けて順 に若くなるので、断層の年代と断層の地下構造との関係を研究するのに都合がよい.マルボロ地域 200km を横断する MT 探査で得られた比抵抗モデルを示す¹²⁾(第7図). 比抵抗構造の特徴は、断 層の成熟度によって異なっている. 南東側の若い断層では、まだ未固結な堆積層の中で破砕するこ とによって、低比抵抗体内部で地震が発生している(第7図および第8図A). ついで、より内陸の 横ずれ断層帯では, 脆性塑性境界の下方に低比抵抗異常がそれぞれ分布している. ここでは, トラッ プされている被圧流体が, 上方に移動して地震を誘発するというモデルで説明することができる(第 7 図および第8図B). 流体を含み変形が容易な下部地殻があり, その上方の地殻で地震が起きてい ると考えることもできる. アルパイン断層のさらに北側の Murchison では, 20 世紀初頭に M7 を超 える逆断層型の内陸地震が発生しているが, そこにはプレート深部から流体が供給され, 鉛直状の 低比抵抗異常として解析されている(第7図). 豊富な流体が存在することによって, 空隙圧が高ま り, 高角の逆断層運動を可能にしたと考えられる(第8図C). この特徴は東北日本でも見出されて いるものと共通する.

5. まとめと展望

ここ数年間の研究から,地震発生場における比抵抗構造研究から以下のことを明らかにすること ができた.(1)内陸地震地域の中深部地殻の比抵抗構造は不均質で,地殻中深部の流体の分布が 不均質であることが示唆される.(2)低比抵抗異常の上面が地震発生層の下面に対応することが多 くの場合に見出されるが,成熟度の低い断層では低比抵抗層内部で地震が発生している.(3)多く の場合,巨大内陸地震の本震が低/高比抵抗境界の高比抵抗側で発生している.(4)地殻中深部の 低比抵抗異常体がひずみ集中に対応している.以上の事柄は,最近発生した内陸地震で普遍的に見 ることができる.特に高角な逆断層で内陸地震が発生するためには,地殻深部から十分な流体の供 給があることが示唆される.

今後,電磁気観測点の面的な配置や,3次元比抵抗構造インバージョンによって3次元的な地殻 内流体の分布が詳細に解き明かされつつある。下部地殻の流体を含む岩石のバルクの比抵抗や,流 体自体の化学組成とその高温高圧下での比抵抗については,組織的な実験が開始されつつあるので それに期待したい.

> (小川康雄) Yasuo Ogawa

参考文献

- Ogawa Y., M. Mishina, T. Goto, H. Satoh, N. Oshiman, T. Kasaya, Y. Takahashi, T. Nisitani, S. Sakanaka, M. Uyeshima, Y. Takahashi, Y. Honkura, and M. Matsushima, 2001, Magnetotelluric imaging of fluids in intraplate earthquakes zones, NE Japan back arc, Geophys. Res. Lett., 28, 3741-3744.
- Mitsuhata, Y., Y. Ogawa Y., M. Mishina, T. Kono, T. Yokokura and T. Uchida, 2001, Electromagnetic heterogeneity of the seismogenic region of 1962 M6.5 Northern Miyagi Earthquake, northeastern Japan, Geophys. Res. Lett., 28, 4371-4374.
- 3)小川康雄・三品正明・本蔵義守,2005.長町利府断層の深部比抵抗構造-地殻変形と地震発生 との関連,月刊地球,号外地球 No.50,71-74.
- 4) Ogawa, Y., S. Takakura, and Y. Honkura, 2002, Resistivity structure across Itoigawa-Shizuoka tectonic line and its implications for concentrated deformation, Earth Planets Space, 54, 1115-1120.
- 5) Ogawa Y. and Y. Honkura, 2004. Mid-crustal electrical conductors and their correlations to seismicity and deformation at Itoigawa-Shizuoka Tectonic Line, Central Japan, Earth Planets Space, 56, 1285-1291
- 6) Yoshimura, R., N. Oshiman, M. Uyeshima, Y. Ogawa, M. Mishina, H. Toh, S. Sakanaka, H. Ichihara, I. Shiozaki, T. Ogawa, T. Miura, S. Koyama, Y. Fujita, K. Nishimura, Y.Takagi, M. Imai, R. Honda, S. Yabe,

S. Nagaoka, M. Tada, and T. Mogi, 2008. Magnetotelluric observations around the focal region of the 2007 Noto Hanto Earthquake (Mj6.9), Central Japan, Earth Planets Space, 60, 117-122.

- 7) Mishina, M., 2009., Distribution of crustal fluids in Northeast Japan as inferred from resistivity surveys, Gondwana Research, 16, 3-4, 563-571.
- 8) Yoshimura, R., N. Oshiman, M. Uyeshima, H. Toh, T. Uto, H. Kanezaki, Y. Mochido, K. Aizawa, Y. Ogawa, T. Nishitani, S. Sakanaka, M. Mishina, H. Satoh, T. Goto, T. Kasaya, S. Yamaguchi, H. Murakami, T. Mogi, Y. Yamaya, M. Harada, I. Shiozaki, Y. Honkura, S. Koyama, S. Nakao, Y. Wada, and Y. Fujita, Magnetotelluric Transect of the Niigata-Kobe Tectonic Zone, Central Japan: A Clear Correlation between Strain Accumulation and Resistivity Structure, Geophys. Res. Lett., Vol. 36, No. 20, L20311, doi.org/10.1029/2009GL040016, 2009.
- 9) Sibson, R.H., Rupturing in overpressured crust during compressional inversion-the case from NE Honshu, Japan, 2009. Tectonophysics, 473, 3-4, 404-416.
- 10) Tank, S. B., Y. Honkura, Y. Ogawa, N. Oshiman, M. K.Tuncer, C. Celik, E. Tolak, and A. M. Isikara, 2003, Resistivity structure in the western part of the fault rupture zone associated with the 1999 Izmit earthquake and its seismogenic implication, Earth Planets Space, 55, 437-442.
- Tank, S.B., Y. Honkura, Y. Ogawa, M. Matsushima, N. Oshiman, M. K. Tuncer, C. Celik, E. Tolak, and A. M. Isikara, 2005. Magnetotelluric imaging of the fault rupture area of the 1999 Izmit (Turkey) earthquake, Phys. Earth Planet. Inter., 150, 213-225.
- 12) Wannamaker, P.E., T.G. Caldwell, G. R. Jiracek, V. Maris, G.J. Hill, Y. Ogawa, H. M. Bibby, S. B. Bennie, and W. Heise, 2009. The fluid and deformation regime of an advancing subduction system; Marlborough, New Zealand, Nature, 460, 733-U90, doi:10.1038/nature08204.



- 第1図 東北地方の脊梁を横断する比抵抗断面¹⁾. 測線は本荘から花巻に至る. 図中の星はS波の散乱体, 白丸は微小地震の震源を表す. 断層のジオメトリは,反射法地震探査及び変動地形学的な推定 による.
- Fig.1 Resistivity model across the Backbone Mountains in Tohoku region¹⁾. The magnetotelluric profile runs from Honjo to Hanamaki. Starts and open circles in the figure denote seismic S-wave reflectors and hypocenters of micro-earthquakes. Geometry of the active faults are drawn based on seismic reflection study and geomorphological interpretations.





Fig.2 Resistivity structure and hypocenter distribution around the 1962 Northern Miyagi earthquake, where X denotes the epicenter location.



- 第3図 糸魚川静岡構造線北部の比抵抗断面図⁴⁾.高比抵抗部に微小地震が発生している.モデルは富 山から大町を通り小諸に至る.低比抵抗層の上方の高比抵抗部で地震が発生している.糸魚川 静岡構造線断層の深部延長に低比抵抗層が存在すると推定された.
- Fig 3 Resistivity structure across the northern part of the Itoigawa-Shizuoka tectonic line. The profile runs from Toyama, through Oomachi, to Komoro. Micro-earthquakes are plotted as dots and they cluster in the high resistivity blocks above the low conductivity blocks. Low resistivity (C3m) is imaged at the deep extension of Itoigawa-Shizuoka tectonic line.



- 第4図 2007年能登半島地震震源域の比抵抗断面⁶⁾.本震および最大余震を星で示す.本震および最 大余震が比抵抗境界にある.
- Fig 4 Resistivity cross section around the focal region of the 2007 Noto Hanto earthquake ⁶⁾. The mainshock and largest aftershocks are located at the resistivity boundaries.



第5図 跡津川断層を含むひずみ集中帯を横断する比抵抗断面⁸⁾.低比抵抗(C2)と高比抵抗(R1) の境界で微小地震が発生する.

Fig. 5 Resistivity cross section of Atotsugawa fault in the Niigata-Kobe strain concentrated zone. Microearthquakes are found at the resistive (R1) and conductive (C2) anomalies.



第6図 ニュージーランド南島北部を横断する MT 測線¹²⁾. Fig 6 Magnetotelluric profile across the northern part of South Island, New Zealand¹²⁾.



- 第7図 ニュージーランド南島北部の2次元比抵抗断面¹²⁾. 白い十字が震源位置を表す. Mu, A/Wr,Aw,Cl,Hp, Wa/PP はそれぞれ断層の位置を表す. 図中のA, B, C における流体の役割については第8図に示す. 低比抵抗体A では未固結の堆積層中で地震が発生する. 横ずれ断層 B では, 断層の深部延長に流体だまりがあり,その上方に地震発生層がある. C では, プレートから大量の流体が供給され, 巨大な高角逆断層が発生しうる.
- Fig.7 Resistivity cross section of northern part of South Island, New Zealand¹²⁾. White plus symbols denote earthquake epicenters. Mu, A/Wr, Aw, Cl, Hp, Wa/PP denote locations of faults. The roles of fluids in the regions A, B and C are shown in Fig.8. In the region A, earthquakes occur in the unconsolidated sediments. In the region B, fluids distribute in the ductile shear zone under the strike slip fault, and earthquakes occur above the conductor. The region C has a huge volume of fluids supplied from the plate and large earthquakes can take place with high angle reverse fault geometry with the help of the high fluid pressure.



第8図 流体の分布形態と地震発生の関連¹²⁾. Fig.8 Distribution of fluids in relation to earthquake generaton¹²⁾