## (7) 東京工業大学理学院

### 1. はじめに

東京工業大学理学院(2016年度の学内組織改革により火山流体研究センターは理学院の組織となった)では、 電磁気探査と地震波解析により、内陸地殻および沈み込 む海洋プレートの不均質構造、地震活動の理解に向けた 研究を行ってきた.ここでは、この10年間の主な成果 を報告する.

#### 2. 電磁気観測による三次元比抵抗構造

地震発生場の流体分布を明らかにすることは重要であ る.このためには、流体の存在とその繋がりに敏感な物 理量である比抵抗分布を解明することが有利であり、電 磁気観測による比抵抗構造探査が有用である.これまで の電磁気観測では、測線状に観測点を配置して2次元 断面解析を行うことがなされてきたが、ここ10年間で、 観測点を面的に配置して3次元比抵抗構造解析を行うこ とができるようになった.東京工業大学では、地形を含 めた3次元比抵抗構造解析プログラムを開発した<sup>1-3)</sup>.

### 2.1 地殻・最上部マントルの比抵抗構造

火山体深部から浅部に至る流体分布が3次元的に解 明された(例えば図1)<sup>4-9)</sup>.火山体深部から内陸地震震 源への流体の移送経路も明らかになった<sup>4,10)</sup>.

東北地方の広域的な3次元比抵抗構造モデリングから 脊梁山地に沿ったモホ面から下部地殻に至る低比抵抗分 布<sup>11)</sup>やマントルウェッジ内の比抵抗分布が3次元的に明 らかになった<sup>12)</sup>.



## 図 1 鳴子火山 (N) を横切る地殻比抵抗断面<sup>4)</sup>. 比抵抗スケー ルは対数 (ohmm).

北アナトリア断層についてはこれまで Izmit 地震震源 域で比抵抗構造探査を実施してきたが、さらにその西方 の延長であるマルマラ海で海底電磁気観測を実施した. マルマラ海東部の海域での2次元断面解析から、断層 直下の深部延長に流体たまりと思われる低比抵抗異常体 を特定した<sup>13)</sup>.

## 2.2 プレート境界の流体分布とプレート間カップリング

New Zealand 北島北東部のヒクランギ沈み込み帯で、 稠密な MT 観測を行い、プレート上面の比抵抗分布と GNSS 観測から求められる面積ひずみとの対応が見出し た(図 2)<sup>14,15)</sup>. さらにプレートのカップリング強度が南 から北に向かって徐々に弱まる北島東中央部で稠密な観 測を行い、プレート上面の比抵抗が面積ひずみ速度と同 じく、北に向かって小さくなることを明らかにした<sup>16)</sup>.



図2 ニュージーランドヒクランギ沈み込み帯のプレート面上の 流体分布とプレートカップリング<sup>15)</sup>.

#### 3. 地震時の電磁気現象

北アナトリア断層で 1999 年に発生した Izmit 地震に ついて,偶然にもアレイ状の観測点で電磁場観測データ が取得されていた.そのデータを解析した結果,地震発 生前後で比抵抗変動が見出された<sup>17)</sup>.

また地震時には、地球磁場中で地殻が運動するために 起電力が生じることを地震ダイナモ効果として提唱し、 観測データを説明できるモデルを提案した<sup>18,19)</sup>.

# 4. 地震波観測による地殻・上部マントルの不均質構造4.1 新潟 - 神戸ひずみ集中帯に沿う減衰構造

日本列島の顕著なひずみ集中帯である新潟 - 神戸ひず み集中帯を含む中部日本の地殻・最上部マントルの3次 元 P 波減衰構造を推定した<sup>20)</sup>. その結果,新潟 - 神戸 ひずみ集中帯に沿った下部地殻は高減衰を示し,その広 がりは地震波低速度異常域の広がりとほぼ一致すること が明らかになった.また,沈み込むフィリピン海スラブ は低減衰域として明瞭にイメージングされた.ひずみ集 中帯下の下部地殻で減衰が大きいという観測事実は,地 表のひずみ集中は下部地殻における弾性・非弾性不均質 構造と密接に関係していることを強く示唆している.

#### 4.2 深部低周波地震発生モデルの提案

西南日本の深部低周波発生域に沿う約 1000 km にわ たる領域において地震波速度・減衰・異方性構造を推定 した結果,低周波地震発生域と非発生域(関東・伊豆・ 紀伊水道・九州)ではプレート境界直上の構造が大きく 異なることが明らかになった<sup>21)</sup>.低周波地震発生域の上 盤側では地震波速度・減衰は標準的であり異方性は弱い のに対し,低周波地震非発生域では上盤側の地震波速 度は遅く,減衰・異方性が大きい.この特徴は低周波地 震発生域直上のマントルウエッジは低速度・高減衰を示 すとした従来の研究とは逆のセンスである.得られた結 果にもとづき,水が上盤側にほとんど放出されず,プレー ト境界の間隙水圧上昇に寄与する領域で低周波地震が 多く発生するというモデルを提案した(図3).



図3 (a) 低周波地震発生域と(b) 非発生域における水移動の 模式図.

## 4.3 スロースリップに伴う水の放出

茨城県南西部のフィリピン海プレート上部境界面およ びその直上で発生している地震の解析から、プレート境 界では繰り返し地震の活動が約1年周期で活発化するこ と、その活動と同期してプレート境界直上の地震波の減 衰特性が大きくなること、さらにそれから数ヶ月遅れて 浅い地震活動が活発化することが明らかになった<sup>22)</sup>.繰 り返し地震の活発化は、約1年周期で発生するプレー ト境界でのゆっくりすべりが原因であり、ゆっくりすべ りに伴ってプレート境界の水が上盤に排出されることで 地震波の減衰が大きくなり、また数ヶ月かけて浅部に上 昇した水が上盤プレート内で地震を誘発すると考える と、地震活動および減衰構造の時空間変化を説明できる (図 4).



図 4 (a) ゆっくりすべり発生時と(b) ゆっくりすべり終了後の解釈図.

## 5. まとめ

最近10年間の研究により,内陸地震,地殻変形,プレート境界カップリングへの水の寄与やスロースリップに伴う流体の移動,断層や火山体下の地殻・マントルウエッジにおける流体分布をなどに関して新しい知見を得ることができた.今後も地震発生モデルの高度化に資する研究を進めていく予定である.

(小川 康雄・中島 淳一)

#### 参考文献

- Usui, Y., 2015. 3-D inversion of magnetotelluric data using unstructured tetrahedral elements: applicability to data affected by topography, Geophys. J. Int., 202, 828–849.
- Usui, Y., Y. Ogawa, K. Aizawa, W. Kanda, T. Hashimoto, T. Koyama, Y. Yamaya, T. Kagiyama, 2017. Three-dimensional resistivity structure of Asama Volcano revealed by data-space magnetotelluric inversion using unstructured tetrahedral elements, Geophys. J. Int., 208, 1359–1372.
- Usui, Y., T. Kasaya, Y. Ogawa, H. Iwamoto, 2018. Marine magnetotelluric inversion with an unstructured tetrahedral mesh, Geophys. J. Int., 214, 952-974.
- Ogawa, Y., M. Ichiki, W. Kanda, M. Mishina, K. Asamori, 2014. Three-dimensional magnetotelluric imaging of crustal fluids and seismicity around Naruko volcano, NE Japan, Earth Planets, Space, 66:158.
- 5) Hill, G.J., H.M. Bibby, Y. Ogawa, E.L. Wallin, S.L. Bennie, T.G. Caldwell, H. Keys, E.A. Bertrand, W. Heise, 2015. Structure of the Tongariro Volcanic system: Insights from magnetotelluric imaging, Earth Planet. Sci. Lett., 432, 115–125.
- 6) Seki, K., W. Kanda, Y. Ogawa, T. Tanbo, T. Kobayashi, Y. Hino, H. Hase, 2015. Imaging the hydrothermal system beneath the Jigokudani valley, Tateyama volcano, Japan: implications for structures controlling repeated phreatic eruptions from an audio-frequency magnetotelluric survey, Earth Planets Space, 67:6.
- 7) Seki, K., W. Kanda, T. Tanbo, T. Ohba, Y. Ogawa, S. Takakura, K. Nogami, M. Ushioda, A. Suzuki, Z. Saito, Y. Matsunaga, 2016. Resistivity structure and geochemistry of the Jigokudani Valley hydrothermal system, Mt Tateyama, Japan, J. Volcanol. Geotherm.

Res., 325, 15-26.

- Aizawa, K., H. Sumino, M. Uyeshima, Y. Yamaya, H. Hase, H.A. Takahashi, M. Takahashi, K. Kazahaya, M. Ohno, T. Rung-Arunwan, Y. Ogawa, 2016. Gas pathways and remotely triggered earthquakes beneath Mt. Fuji, Japan, Geology, 44, 127–130.
- 9) Yoshimura, R., Y. Ogawa, Y. Yukutake, W. Kanda, S. Komori, H. Hase, T. Goto, R. Honda, M. Harada, T. Yamazaki, M. Kakmo, S. Kawasaki, T. Higa, T. Suzuki, Y. Yasuda, M. Tani, Y. Usui, 2018. Resistivity characterization of Hakone volcano, Central Japan, by three-dimensional magnetotelluric inversion, Earth Planets Space, 70:668.
- 10) Ichihara, H., S. Sakanaka, M. Mishina, M. Uyeshima, T. Nishitani, Y. Ogawa, Y. Yamaya, T. Mogi, K. Amita, T. Miura, 2014. A 3-D electrical resistivity model beneath the focal zone of the 2008 Iwate-Miyagi Nairiku earthquake (M 7.2), Earth Planets, Space, 66:50.
- Kanda, W., Ogawa, Y., 2014. Three-dimensional electromagnetic imaging of fluids and melts beneath the NE Japan arc revisited by using geomagnetic transfer function data, Earth Planets, Space, 66:39.
- 12) Ichiki, M., Y. Ogawa, T. Kaida, T. Koyama, M. Uyeshima, T. Demachi, S. Hirahara, Y. Honkura, W. Kanda, T. Kono, M. Matsushima, T. Nakayama, S. Suzuki, H. Toh, 2015. Electrical image of subduction zone beneath northeastern Japan, J. Geophys. Res., 120, 7937–7965.
- 13) Kaya, T., T. Kasaya, S. B. Tank, Y. Ogawa, M. K. Tuncer, N. Oshiman, Y. Honkura, M. Matsushima, 2013. Electrical characterization of the North Anatolian Fault zone in the Marmara Sea, Turkey by ocean Bottom electromagnetic method, Geophys. J. Int., 193, 664–677.
- Heise, W., Caldwell, T. G., Bertrand, E. A., Hill, G. J., Bennie, S. L., Ogawa, Y., 2013. Changes in electrical

resistivity track changes in tectonic plate coupling, Geophys. Res. Lett., 40, 5029–5033.

- 15) Heise, W., T. G. Caldwell, S. Bannister, E.A. Bertrand, Y. Ogawa, S.L. Bennie, H. Ichihara, 2017. Mapping subduction interface coupling using magnetotellurics: Hikurangi margin, New Zealand, Geophys. Res. Lett., 44, 9261–9266.
- 16) Heise, W., Y. Ogawa, E.A. Bertrand, T.G. Caldwell, R. Yoshimura, H. Ichihara, S.L. Bennie, K. Seki, Z. Saito, Y. Matsunaga, A. Suzuki, T. Kishita, Y. Kinoshita, 2019. Electrical resistivity imaging of the inter-plate coupling transition at the Hikurangi subduction margin, New Zealand, Earth Planet. Sci. Lett., 524, 115710.
- 17) Honkura, Y., Oshiman, N., Matsushima, M., Baris, S., Tunçer, M. K., Tank, S. B., Çelik, C., Çiftgi, E. T.,b 2013. Rapid changes in the electrical state of the 1999 Izmit earthquake rupture zone, Nature Communications, 4, 3116.
- 18) Honkura, Y., Y. Ogawa, M. Matsushima, S. Nagaoka, N. Ujihara, and T. Yamawaki, 2009. A model for observed circular polarized electric fields coincident with the passage of large seismic waves, J. Geophys. Res., 114, B10103.
- Matsushima, M., Y. Honkura, M. Kuriki, Y. Ogawa, 2013. Circularly polarized electric fields associated with seismic waves generated by blasting, Geophys. J. Int., 194, 200–211.
- 20) Nakajima, J., and T. Matsuzawa, 2017. Anelastic properties beneath the Niigata-Kobe Tectonic Zone, Japan, Earth Planets Space, 69:33.
- Nakajima, J., and A. Hasegawa, 2016. Tremor activity inhibited by well-drained conditions above a megathrust, Nature Communications, 7, 13863.
- 22) Nakajima, J., and N. Uchida, 2018. Repeated drainage from megathrusts during episodic slow slip, Nature Geoscience, 11, 351–356.