



プレート境界型地震監視計画

豊橋沖海底ケーブルを用いた能動・受動的 海底電磁気モニタリング

後藤 忠徳¹⁾ 笠谷 貴史¹⁾
木下 正高¹⁾ 荒木英一郎¹⁾
川口 勝義¹⁾ 浅川 賢一¹⁾
横引 貴史¹⁾ 原田 誠²⁾
中島 崇裕²⁾ 長尾 大道¹⁾
佐柳 敬造²⁾

Active and passive seafloor electromagnetic monitoring using off-Toyohashi Submarine cables

Tada-nori Goto • Takafumi Kasaya •
Masataka Kinoshita • Eiichiro Araki •
Katsuyoshi Kawaguchi • Kenichi Asakawa •
Takashi Yokobiki • Makoto Harada • Takahiro
Nakajima • Hiromichi Nagao • Keizo Sayanagi

1) 海洋研究開発機構, 2) 東海大学海洋研究所

巨大地震発生において、地殻内流体の役割に注目が集まっている。例えば電磁気探査の結果から、断層固着域付近には地殻内流体が少ないようである。より詳細な議論のために、東海地震想定震源域に位置する豊橋沖海底ケーブルを用いた海底地震・電磁気モニタリングが開始されつつある。

1. はじめに

断層帯内の間隙水圧が高い場合、低い剪断応力でも断層は滑り始める^[1]。巨大地震発生においても、地殻内流体は重要な役割を果たしていると考えられている。事実、三陸沖での反射法地震探査では、プレート境界からの反射波の振幅は、微小地震活動の高い地域よりも低い地域で大きいと報告されている^[2]。反射波の強弱はプレート境界での流体の有無によって説明できるため、流体の存在と地震発生の関連が示唆される（流体が多い=微小地震すら発生しない安定すべり域）。ただし他の要因でも反射波の強弱を説明できるため、流体分布に敏感な他の地球物理学的探査やモニタリングが必要である。

近年、陸上や海底での電磁気探査は地震発生帯周辺の流体分布を解明しつつある^[3]。地震発生帯周辺の温度圧力条件では、岩石の電気伝導度は流体の存在に大きく依存しており、この性質が電磁気探査の結果と地殻内流体の分布の結び付けを可能としている。そこで本稿では、紀伊半島沖（熊野灘）で近年実施された海底電磁気探査の結果を簡単に紹介すると共に、東海地震想定震源域に位置する海底ケーブルを用いた地震発生帯での能動的・受動的な海底地震・電磁気モニタリング計画と、その中心となる海底観測所「東海スキャナー」について紹介する。

2. 1944年東南海地震周辺の地殻電気伝導度構造

紀伊半島熊野灘および南海トラフで発生した1944年東南海地震（M7.9）は沈み込み帯で発生する巨大地震の典型例である。この地震の高速破壊域を横切るようにして、2002～2004年にかけて陸

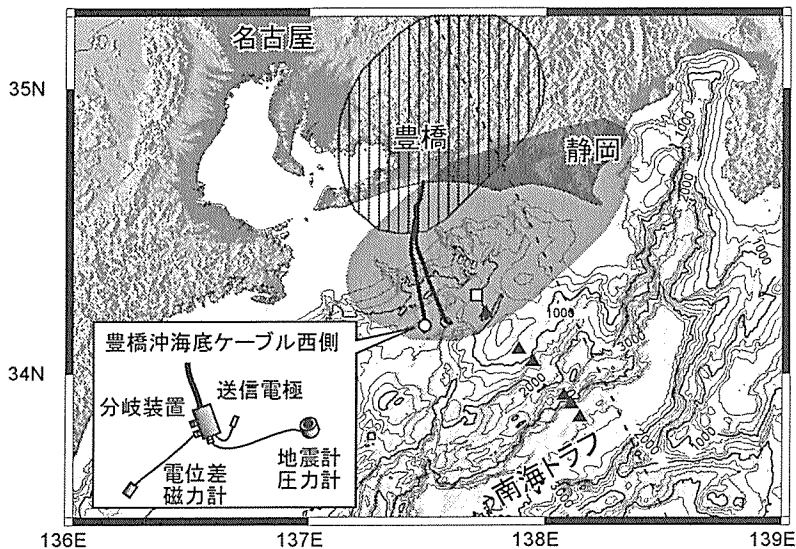


図1 豊橋沖海底ケーブルの位置(太線)。プレート間の固着域(灰色)とゆっくりすべり(縦線)^[10]を横切っている。地球電場観測装置(□)およびOBEM・OBE(△)の設置点も記した。破線は反射法地震探査の測線^[11]。

地および海底で電磁気探査が実施された。海底電磁気データについては、MT法に基づく解析およびインバージョンが行われており、フィリピン海プレートの海洋地殻は沈み込みを始める前から高い電気伝導度を示すこと、この海洋地殻は沈み込むに従って低電気伝導度を示すこと(深さ10kmで約1桁低くなる)、低電気伝導度になる部分が1944年東南海地震の破壊域の上限に概ね一致することが示された^[4]。一方、海域と陸域の電磁気データの統合解析の結果、フィリピン海プレートは深さ30km付近まで沈み込んだところで再び高電気伝導度(0.1S/m程度)を示すこと、その部位は1944年東南海地震の高速破壊域の下限に概ね一致することが示された^[5]。これらの観測結果を言い換えれば、この地震の高速破壊域はそれより浅部や深部よりも低い伝導度を示すと考えられる。断層固着域と電気伝導度構造の関係については、跡津川断層^[6]、北アナトリア断層^[7]、サンアンドレアス断層^[8]などで同様の報告がなされており、巨大地震発生域(あるいは断層固着域)と電気伝導度や流体分布との一般的な関係が示唆される。

3. 海底ケーブルを用いた海域巨大地震発生帯のモニタリング

以上のように、電磁気探査は断層固着域周辺の

流体量の低さを示唆しているが、巨大地震発生時に流体がどのような役割をするか(例えば、断層固着域へ高圧間隙水が流入し、断層強度を下げるのかどうか?)については、情報を与えてはいない。地殻内流体の役割を明らかにする一つの方法として、断層固着域およびその周辺での地震・電磁気・地殻変動・水温および地中温度などを連続モニターすることが挙げられる。

そこで我々は東海地震想定震源域において、ケーブル型長期海底観測所「東海スキャナー(Tokai Submarine Cabled Network observatories for Nowcast of Earthquake Recurrences)」を構築しつつある(図1)。豊橋~静岡沖は、中部日本の地殻と沈み込むフィリピン海プレートの地殻と間のプレート境界が固着していると考えられており^[9]、さらに豊橋の直下では一転、プレート境界はゆっくりと滑っているようである^[10](ただしつい最近、そのすべりは停止した)。そのようなプレート境界のすべりは固着域へ応力集中を引き起こしうる。従って、すべり域と固着域の境目は次の東海地震の初期破壊域になる可能性を持っている。豊橋沖海底ケーブル(図1)は、元々はJIH(Japan Internet Highway: 日本列島を環状に取り巻く大容量光海底ケーブル)の一部としてKDDにより設置された。しかし地絡障害を起こしたため、豊橋沖

ケーブルのみは通信用としての役割を終え、科学的利用のために2006年にKDDIよりJAMSTECへ譲渡された。豊橋沖ケーブルは、前述のすべり域から固着域に渡って横断して敷設されており、沈み込むプレート境界およびその周辺の状況をモニターするには最適のファシリティである。

東海スキャナーは能動的および受動的なモニタリングの双方で利用される。能動的手法としては、プレート境界周辺の電気伝導度変化(=流体移動の指標)を検出すべく、人工電流電磁探査を用いたモニタリングが計画されている。送信信号としては海底観測所への給電電流変動を利用する。すなわち豊橋沖西ケーブルそのものが長さ約50kmの送信ダイポールとなる。人工信号の受信ダイポールとしては、豊橋沖東ケーブルを利用する。東ケーブルには、沖合約5kmの地点で前述した地絡が発生しているが、この地絡点を電極とみなし、ダイポール長約5kmでの海底電位差観測が可能である。東海大学では2004年より豊橋沖東ケーブルを用いた電位差観測を行っており、現在も継続中である。さらに、東京大学地震研究所で開発された地球電場観測装置も人工信号の受信機として利用する。地球電場観測装置は海底ケーブルには接続されないものの、数年間の海底電場変動を連続記録可能である。地球電場観測装置は2007年1月に、JAMSTECのROV「ハイパードルフィン」によって海底に設置された(図1)。このときの電場計測用ダイポールの長さは300mである。数値計算に基づけば、プレート境界付近に厚さ1kmの高電気伝導度の層が現れれば、人工信号の受信データ1日分から求められる見掛け比抵抗値は観測誤差よりも大きく変化すると考えられる。従って、海底ケーブルは地殻内流体の能動的モニタリングに対して有用なツールであるといえる。

一方、受動的な地殻活動モニタリングのために、我々は地震計・圧力計・電位差磁力計・地中温度計などの様々な観測装置を豊橋沖西ケーブルに接続した。豊橋沖西ケーブル先端には水中着脱が可能なROVコネクターを5つ備えた分岐装置が2007年3月に接続予定であり^[12]、観測装置は

2007年4月に分岐装置へ水中接続される。これらの観測装置は、沖合での微小地震やゆっくりすべり、海底面の上下動、地下水移動に伴う熱輸送、応力変化による地磁気変化、流体圧変化に伴う自然電位変化などに敏感である。このような多項目センサーパッケージは、地震発生に関する海底諸現象の信号とノイズの分離に効果的であり、地震発生の瞬間やその前後の過程を詳細に議論する際に役立つ。

4. 東海沖における海底電磁気探査

長い海底ケーブルを用いた地殻活動モニタリングの問題として、低い空間分解能が挙げられる。そこで我々はモニタリングに先立って、自己浮上式海底電位差磁力計(OBEM)を用いた海底電磁気探査を行った。地殻構造を高分解能で知るために、我々は新たに小型の短期型OBEMを開発した(図2)。このOBEMは3成分フラックスゲート型磁力計と水平2成分の電位差計を備えており、OBSと共通の切離機構を備えている。OBEMの特徴は4本の長い腕(2m/本)である。回収時の浮上速度を速め、海面からの回収作業を容易にするために、4本の腕はOBEM離底後に折りたたまれるようになっている^[13]。これにより、相当数のOBEMをアレイとして展開することが可能となった。

東海沖における海底電磁気探査は2007年1月に実施された。3台のOBEMと3台のOBE(海底電位差計:図2のうち、磁力計を搭載していないバージョン)がJAMSTEC海洋調査船「なつしま」NT07-01航海で設置された(図1)。これらの装置は2007年2月に全台回収された。海底で記録された自然の電磁場変動に対してMT法を適用することで、熊野灘^[5]と同様に地震発生帯周辺の地殻電気伝導度構造が明らかになるとと思われる。このようなOBEM調査は地殻構造の「スナップショット」を与えてくれるに過ぎないが、豊橋沖ケーブルを用いた海底での電磁気モニタリングから得られる電気伝導度異常変化が、概ね地下のどの辺りで起きているかを議論する際に助けとなる。さら

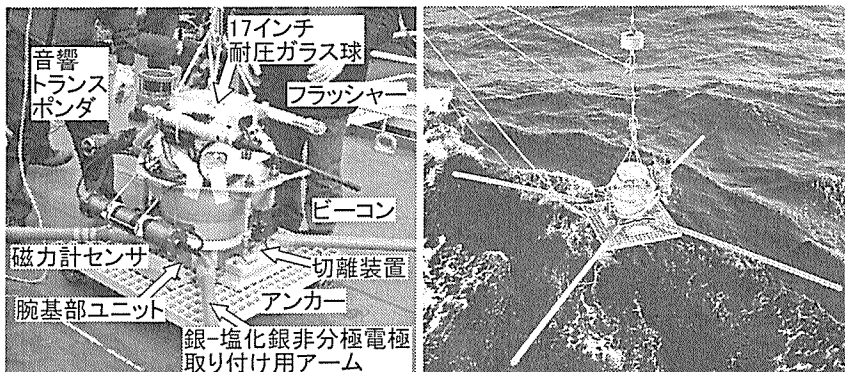


図2 短期型海底電位差磁力計 (OBEM), NT07-01 航海での投入時。

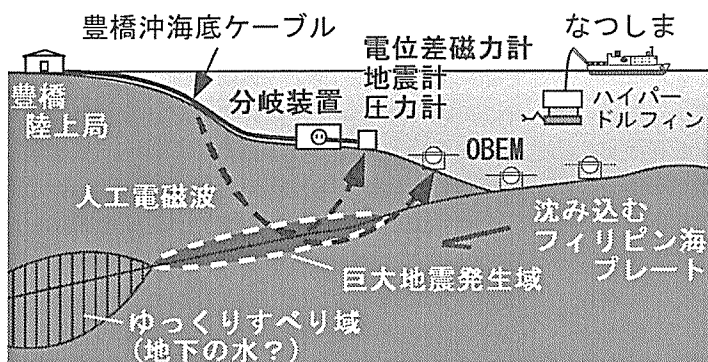


図3 東海スカナーと機動観測の連携のコンセプト。

に OBEM の観測期間は 3 ヶ月ではあるが、海底ケーブルからの人工信号を受信することはできる。このような海底ケーブル観測所「東海スカナー」と機動観測のコンビネーションは地震発生帯のモニタリングに対して効果的であろう (図 3)。

5. 東海スカナーの経緯と今後

最後に、東海スカナーの経緯と今後の予定を簡潔にまとめる。

- 2004 年 1 月：豊橋沖海底ケーブルが通信用途から引退
- 2004 年 10 月：豊橋沖東ケーブルを用いた電位差観測開始 (東海大学)
- 2006 年 6 月：豊橋沖ケーブルが KDDI から JAMSTEC へ譲渡
- 2006 年 12 月：分岐装置、地震計・圧力計、電位差磁力計を開発。水槽試験 (図 4)
- 2007 年 1 月：短期型 OBEM などを 6 台設置。地球電場観測装置 1 台を ROV で設置。また ROV

により分岐装置や観測装置設置予定箇所である豊橋沖西ケーブル先端付近の海底を観察

- 2007 年 2 月：OBEM など 6 台を回収
- 2007 年 3 月：分岐装置を豊橋沖西ケーブル先端に接続し、海底に設置 (予定)
- 2007 年 4 月：地震計・圧力計、電位差磁力計などを分岐装置へ接続 (予定)、東海スカナー完成、モニタリング開始。OBEM など 3 台を設置し、自然および人工電磁場を受信。1 月に設置した地球電場観測装置を回収・再設置。地球電場観測装置をもう 1 台、新たに設置。
- 2007 年 7 月：OBEM など 3 台を回収 (予定)

東海スカナーは最新テクノロジーを駆使した地震調査のフロンティア的観測所である。それゆえ、東海地震の予知は東海スカナー単体では難しいかもしれない。例えば、人工信号を用いた電磁場モニタリングにより何らかの異常変化が検出されるとしても、地殻内の異常の深さや場所を正しく見積もるためには、短期型 OBEM を臨時展開す

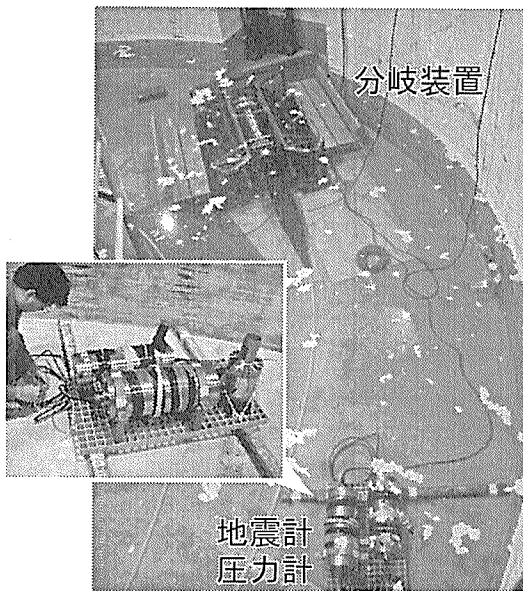


図4 分岐装置と観測装置の水槽内での接続試験。

るなどの追加観測が必要であろう。また人工電流受信機である地球電場観測装置はケーブルには接続されていない。しかし、巨大地震発生のその時や前後にどのような海底諸現象が現れるのかは、未だほとんど理解されていない。東海スキャナーのような多項目観測による能動的・受動的地球モニタリングは、このような未知の海底現象に対する（小さいがまぶしい）スポットライトとなる。我々の地球物理学的モニタリングが地震予知に対して効果的なツールであると証明されたとき、もっと多くの「スポットライト」が海底ケーブルに取り付けられていくことを期待する。

謝辞：静岡大学の笠原順三氏、藤井直之氏、熊沢峰夫氏、東海大学の長尾年恭氏、マリン・エコ・テックの白崎勇一氏には本計画立ち上げ時にご尽力頂き、また多くの助言を頂いた。東京大学の歌田久司氏からは地球電場観測装置をお借りした。調査船「なつしま」の船長および乗組員にはOBEMの投入・回収を頂いた。ROVハイパードルフィン運航チームには海底観察および地球電場観測装置を設置頂いた。日本海洋事業の観測支援員

にはOBEMの運用にご助力頂いた。本計画はJAMSTEC横断研究開発促進アワードおよび科学研究費補助金により支援された。

参考文献

- [1] Blanpied, M. L., D. A. Lockner and J. D. Byerlee (1992) : An earthquake mechanism based on rapid scaling of faults, *Nature*, 358, 574-576.
- [2] Fujie, G., J. Kasahara, R. Hino, T. Sato, M. Shinohara and K. Suyehiro (2002) : A significant relation between seismic activities and reflection intensities in the Japan Trench region, *Geophys. Res. Lett.*, 29, 7, 10. 1029/20.
- [3] Unsworth, M. J., M. Eisel, G. D. Egbert, W. Siripunavaporn, P. A. Bedrosian (2000) : Along-strike variations in the structure of the San Andreas Fault at Parkfield, California, *Geophys. Res. Lett.*, 27, 3021-3024.
- [4] 後藤忠徳・笠谷貴史・三ヶ田均・木下正高・末廣潔・木村俊則・芦田譲・渡辺俊樹・山根一修 (2003) : 電磁気学的な流体の分布と移動の解明 - 南海トラフを例として -, *物理探査*, 56, 439-451.
- [5] Kasaya, T., T. Goto, H. Mikada, K. Baba, K. Suyehiro and H. Utada (2005) : Resistivity image of the Philippine Sea Plate around the 1944 Tonankai earthquake deduced by Marine and Land MT surveys, *Earth Planets and Space*, 57, 209-213.
- [6] Goto, T., Y. Wada, N. Oshiman and N. Sumitomo (2005) : Resistivity structure of a seismic gap along the Atotsugawa Fault, Japan, *Phys. Earth. Planet. Int.*, 148, 55-72.
- [7] Oshiman, N., Yoshimura, R., Kasaya, T., Honkura, Y., Matsushima, M., Bari, S., Celik, C., Tuncer, M. K., Isikara A. M. (2002) : Deep resistivity structure around the fault associated with the 1999 Kocaeli earthquake, Turkey. In : Fujinawa, Y., Yoshida, A. (Eds.) *Seismotectonics at the Convergent*. Terra Science Publishing Company, Tokyo, pp. 293-303.
- [8] Unsworth, M. J., Egbert, G. D., Booker, J. R. (1999) : High resolution electromagnetic imaging of the San Andreas Fault in Central California. *J. Geophys. Res.*, 104, 1131.
- [9] Sagiya, T. (1999) : Interplate coupling in the Tokai District, Central Japan, deduced from continuous GPS data, *Geophys. Res. Lett.*, 26, 2315-2318.
- [10] Ohta, Y., F. Kimata and T. Sagiya (2004) : Reexamination of the interplate coupling in the Tokai region, central Japan, based on the GPS data in 1997-2002, *Geophys. Res. Lett.*, 31, L24604, doi:10.1029/2004GL021404.
- [11] Kodaira, S., T. Hidaka, A. Kato, J-O. Park, T. Iwasaki and Y. Kaneda (2004) : High pore fluid pressure may cause silent slip in the Nankai Trough, *Science*, 304, 1295-1298.
- [12] 浅川賢一・横引貴史・後藤忠徳・荒木英一郎・木下正高 (2007) : 通信用光海底ケーブルを再利用した豊橋沖観測システムの概要, *月刊地球* (本号), 523-527.
- [13] 笠谷貴史・後藤忠徳・高木亮 (2006) : 海洋における地殻構造探査のための電磁場観測技術とその動向, *物理探査*, 50, 585-594.

