談 話 室

地下の姿を追い求めて

後藤忠徳*

For explorations of the underground world by Tadanori GOTO

はじめに

平成20年10月に、京都大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻地殻工学講座ジオフィジクス分野の准教授に着任いたしました。どうぞよろしくお願い申し上げます。専門分野は物理探査学・地球電磁気学・海底物理学です。特に電磁探査を用いて、光の届かない地下を"照らしだし"、防災対策・資源探査・地下水調査等に役立てるべく研究・開発を進めています。本稿では私自身の研究内容である電磁探査について紹介させて頂くとともに、電磁探査の将来像についても若干触れさせて頂きます。

地下に魅せられて

本稿を書くにあたり、私自身が地下探査や地球科学に 初めて興味を持ったのはいつのことだったか、改めて考 えてみました…がハッキリとしません. よく覚えている のは小学校の頃、プラネタリウムを見た後に星座早見板 を自作してしまったことです(今もモノづくりは好きで すが、この頃の名残かもしれません). 初めは星に興味 があり、加えて高校生の頃には物理の法則が面白かった ので、大学では天文などを学びたいと思っておりました が、いつしか地球が興味の対象になりました。その理由 は「自分の星なのだから、調べたこと・分かったことを 自分の目で確かめられるだろう」でしたが、実はその 当時は「プレートテクトニクス」ブームで、ヒマラヤ山 脈の形成や日本列島の折れ曲がりなどを扱った TV 番 組・雑誌の影響が大きかったようです。結果として、地 殻変動の激しい地域などを物理法則を利用して調査し, 地球の成り立ちや人間と地球の関わり合いを考えたいと

思うようになり、神戸大学理学部へ入学、そこで電磁探査と出会い、同大学院を経て京都大学大学院理学研究科へと進学いたしました.

陸上での電磁探査と活断層

さて電磁探査のお話に戻りますが、1980年代になり、電磁探査法の一つである地磁気地電流法(Magnetotelluric法: MT法)が日本や世界で盛んに行われるようになっていました。MT法の特徴は、自然の電磁場を用いるため安価であることと、電気探査に比べて容易に大深度探査ができることです。特に日本では活断層調査の面で注目が集まっていました。岩石の比抵抗は含水率が高いほど低くなることが知られており、室内実験からは水を含む岩石は破壊しやすいことが分かっていましたので、地震発生過程の理解や予測を目的とした活断層の電磁探査が1980年代終わりには盛んになりつつありました。

私自身も大学院修士課程・博士課程を通じて、いくつかの活断層周辺で地下比抵抗構造調査を行い、その結果、地震発生過程に関連すると思われる地下構造を検出することができました。一例として、岐阜・富山県境を東西に走る横ずれ断層である跡津川断層周辺での探査結果をご紹介します(Goto et al., 2005)。この断層はユニークで、断層の西端部や東端部では断層沿いに多くの微小地震が発生するのですが、断層中央部では地震活動が極端に低く、その理由は分かっていませんでした。そこで跡津川断層の西端部・中央部をそれぞれ横切る2測線沿いにMT探査を行って、同じ活断層を横切る2つの地殻比抵抗断面を比較してみると(図1)、両者がかなり異なることが分かりました。これらは地震波速度構造ともよく対応していますので(図1の白い点線)、MT探査によるこの断面図は信頼性が高いと言えます。

^{*}京都大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻

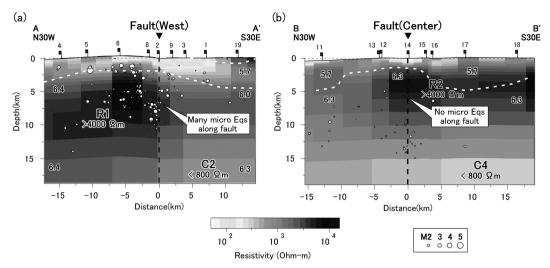


図1 跡津川断層の西端部(a; 地震多)・中央部(b; 地震少)をそれぞれ横切る地殻比抵抗構造断面(Goto et al., 2005)。 旗=観測点,黒点線=跡津川断層,白丸=震源,白点線および数字=地震波速度構造.

跡津川断層の断面図をよく見ると, 地震活動の盛んな 西端部(図1(a))と、盛んではない中央部(図1(b))で は地震活動に対応した違いが認められます. 例えば図 1(a) の断層直下(黒点線) やその周辺の地下 0~3 km 程度に低比抵抗帯が認められますが、図 1(b) ではあま り認められません. これらは、地震活動の高い跡津川断 層西端部沿いには主断層やそれに平行な小断層の破砕帯 が発達しており、そこには間隙水(地下流体)が多く含 まれていることを示唆しています. また深さ3~10km に注目すると、図1(a)では断層の北側にのみ高比抵抗ブ ロックが認められますが (R1), 図 1(b) では断層をまた ぐようにして高比抵抗ブロック (R2) が認められてお り、R2内部では地震はほとんど起きていません. この ような高比抵抗ブロックは地下流体をあまり含んでおら ず、おそらくは高剛性ブロックであると考えられます. これらを総合すると, 跡津川断層の中央部では高比抵 抗・高剛性ブロック (R2) が断層運動を妨げていて, そのために断層沿いの微小地震活動も低いままであり、 地表付近の断層破砕帯も発達していないのではないか, と解釈することができます。 ただし地表の断層トレース は明瞭ですので、断層中央部もいずれはすべり、おそら くは大きめの地震を起こすであろうと予測されます.

活断層に伴う巨大地震の際に、地震波エネルギーを放出する高速破壊すべりを起こす部分は「アスペリティ」と呼ばれており、アスペリティは断層面上のいつも決まった場所に固定されてできるのではないか?という仮説が地震の観測結果から近年提案されています。 つまり、大地震を起こす活断層の場所は普段は小さな地震やすべりをあまり起こさず、大地震の時に一気に滑るのではな

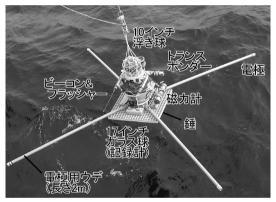


図2 自己浮上式海底電位差磁力計 (OBEM). 調査船 から海中へ投入直前の様子.

いか?というわけです.上記の活断層を横切る電磁探査の結果からは,活断層を横切る高比抵抗ブロックと,アスペリティ形成との関連性が示唆されます.

海底での電磁探査とプレート境界断層

陸上での MT 探査の成功と並行して、海底での電磁探査も進歩を遂げています。1970年頃にアメリカで海底磁力計や海底電位差計を用いた海底電磁気観測が開始されたのを契機として、海に囲まれた日本でも1980年頃から海底電位差磁力計(OBEM)を用いた海底電磁観測が開始されています。開発当初は大型であった OBEMも、いまでは小型化・高性能化が進みました(例えばKasaya and Goto, 2009;図2)。現在日本では計30台程度、アメリカでは計50~100台程度の OBEM が研究目的で使用されており、電磁探査による海底下の地殻~

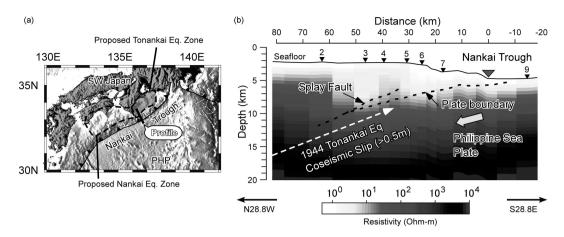


図3 南海トラフ沈み込み帯(a) における地殼比抵抗構造断面(b;木村ほか,2005).(b) 中の黒点線は主な地震 波反射面,白点線は高速破壊域を示す.▼は海底観測点.

マントル構造調査が盛んにおこなわれています.

海底電磁探査の結果の一例として、前任地の海洋研究開発機構時代に行った、南海トラフ沈み込み帯における海洋 MT 探査の例を紹介します(木村ほか、2005). 西南日本沖合の南海トラフではフィリピン海プレートが沈み込んでおり、東南海地震・南海地震などを引き起こしてきましたし、今後も同様の巨大地震発生が予測されています(図 3(a)). そこでアスペリティ周辺の地殻構造を調査するために、1944年に東南海地震(M 7.9)の高速破壊すべり域の上(図 3(a))に OBEM など計11台を海底へ設置して、2週間〜半年間の海底電磁場データを取得し、地下比抵抗構造を求めました。

海洋 MT 探査の結果、南海トラフ沈み込み帯におい ても、巨大地震時の高速すべり域の周辺は、相対的に高 い比抵抗を示すことが分かりました. 解析された地下比 抵抗構造を図3(b)に示しました.図中には、ほぼ同測 線での反射法地震探査によって得られた、主な地下不連 続面も示しています. これを見ると, 地下深くに行くに 従って比抵抗が増加している様子が分かります。特にフ ィリピン海プレート上部は,沈み込む前は1Ωm 程度の 低い値を示しますが、地下へ沈み込むに従って徐々に高 くなり、地下 10 km に達する頃には数 10Ωm まで上昇 します. そしてこれよりも比抵抗が高い地下深部側に, 1944年の東南海地震の高速破壊すべりの領域は存在して います. すなわち陸上の活断層と同様に、海底下のプレ ート境界断層でも,巨大地震のアスペリティは高比抵抗 なブロックを横切っていることが示されました. 地温を 考慮すれば、南海トラフの例でも比抵抗構造は含水率の 大小を反映していますので、地殼内の流体の量と地殼の 剛性や巨大地震発生には関連性があると考えられます. 同様の成果は、東海沖や三陸沖などの海域でも得られつ つあります.

ただし未解決の問題は山積です。例えば、断層破砕帯は一般に数 10 m 以下の狭い幅を持ち、その強度は周辺の地殻と比べると極端に弱いようです。このような断層のすべり強度に対して、上記の例のように断層周辺に広く分布する高比抵抗ブロックがどのように関与するのかは分かっていません。また定性的には高比抵抗がアスペリティに相当するようですが、いくら以上の値であればアスペリティ形成に関与しうるのか、その定量化はできていません。このような地下構造、地下流体、地震・地殻変動の三者の関係を定量的に議論するためには、電磁探査事例を増やすだけではなく、岩石や地殻変形の数値シミュレーションを用いた地下構造の定量的解釈が有効だと考えています。このような議論は、地すべり等の自然災害予防や堤防等構造物の堅牢性チェックといった土木技術への適用も可能かと思います。

海底電磁探査による資源探査

近年は海底油田・ガス田の開発・生産が盛んであり、これらの事前調査や生産開始後の時間変化検出を目的とした海上・海底物理探査が行われています。特に石油・ガス・メタンハイドレートなどは通常の海底堆積物に比べると比抵抗が高いため、2000年以降は海底電磁探査に世界の注目が集まっています。ただし、前章で紹介した海洋 MT 探査は自然の電磁場信号を用いており探査深度が深いのがメリットですが、逆に海底下数 km という浅いところの調査には不向きです。そこで人工電流源を用いた海底電磁探査が近年盛んにおこなわれています。

その一例として,日本海上越沖のメタンハイドレート 分布域における海底電気探査の結果をご紹介します

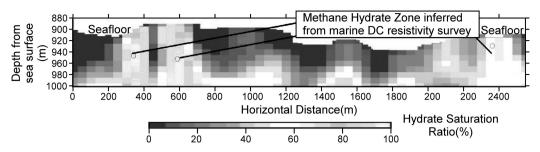


図4 日本海上越沖における海底下メタンハイドレート分布(後藤ほか,2009より).海底電気探査による推定値.

(Goto et al., 2008; 後藤ほか, 2009). この海域では、海底下のメタンハイドレートの一部が海底面に露出していることが知られていましたが、その海底下の分布形態については明らかではありませんでした。そこでメタンハイドレート探査のために、人工電流送受信装置および送受信電極を取り付けた長さ 160 m のケーブルから成る、深海曳航式の海底電気探査システムを新たに開発しました。上越沖において、海底近傍でこのシステムを曳航して海底電気探査を実施したところ、海底の随所で 0.6Ω m を超える高い見掛け比抵抗が得られました。この値は通常の堆積物では説明できないため、含水率が低く比抵抗が高い物質が海底下に存在することが示唆されました。

海底電気探査によって得られた見掛比抵抗に基づい て, 地下比抵抗構造をモデル化し, さらに間隙中のメタ ンハイドレートが見掛けの間隙率を低下させて比抵抗を 変化させていると仮定して、アーチーの式に基づいて海 底下のメタンハイドレート飽和率を求めました。 その結 果、高比抵抗でメタンハイドレート飽和率が高いと推定 される地域が海底下に広がっていることが分かりました (図4). 特に, 水平位置 600 m 付近と 2400 m 付近では, 高比抵抗・高飽和率の地域が海底直下まで伸びていま す、実際にこれらの地域では、海底のカメラ映像や堆積 物サンプリングによって海底面や海底直下にメタンハイ ドレートが存在することが確認されています. 従って, 海底下の高比抵抗体の間隙中にはメタンハイドレートが 存在しているとした仮定は妥当であり、海底電気探査を 用いたメタンハイドレート分布のイメージングに成功し たと考えられます.

このような人工電流源を用いた海底電磁探査による海底下の資源調査の事例は今後ますます増えると予想されます。ただし探査手法についてはより高度化がなされねばなりません。例えば電磁探査単体では、シャープな地層境界をイメージすることは困難であるため、地震波探査との統合解析を行い、層中(地震波反射面間)の比抵抗をより精度よく求める技術が必要です。このような探

査技術の高度化と並行して、メタンハイドレート以外の 資源探査ターゲット (石油・天然ガス・熱水金属鉱床) へ向けての適用について技術開発を行っていく予定で す。

おわりに

本稿では、陸上や海底での電磁探査と、それによって 明らかとなった活断層や巨大地震発生帯の姿、あるいは 海底下メタンハイドレートの詳細分布について紹介しま した. その結果, 地下流体を媒介として, 比抵抗構造か ら地震発生帯の理解や資源量評価を行うことが可能であ ることが示されました. 言い換えれば、地震発生や資源 賦存層形成が地下流体と深い関わり合いを持つようで す、従って、今後は地下流体の分布だけでなく、移動に 関する情報取得が重要です。 例えば、地下流体の移動解 明には地下構造のモニタリング技術の開発は欠かせませ ん. モニタリング技術は、油ガス層の生産段階や CO。 の地中処分などでも必要な技術であり世界的にも注目さ れています. また地下の水理学的物性をよりよく知るた めに、地震波・電磁場など複数の物理探査の統合解析技 術の開発が必要です. 当ジオフィジクス分野は、海陸問 わず様々な物理探査法に挑戦を続けてきた研究室ですの で、このようなモニタリングや統合解析の新技術はまさ にこの研究室から生まれうると確信しておりますし、そ のために努力いたしたいと思っています. 当研究室のみ ならず、京都大学大学院工学研究科のスタッフ・学生の 皆様は非常に明るく積極的であり、教育・研究活動を通 じて共に諸問題を解き明かすことができるのは大変楽し みです. さらにご卒業された諸先輩方からも厳しいご指 導・ご意見を頂けることも喜びです。 皆さまのお力添え に負けぬよう邁進させていただき、かつて魅了された地 下の姿をこれからも追い求め、石油・天然ガス・メタン ハイドレート・海底熱水鉱床・地震・活断層・地下水な ど人間社会と密接なこれらのターゲットの様子を明らか にしていきたいと考えております。今後ともどうかよろ しくお願いいたします.

謝辞

本稿中の研究成果は,筆者が京都大学防災研究所地震 予知センター,海洋研究開発機構などに在籍時に実施し たものであり,多くの関係研究者・職員の方々のご協力 によっております。また文中の南海トラフの研究成果は, 京都大学ジオフィジクス分野との共同研究(当時)によ るものです。改めて御礼申し上げます。

参考文献

- Goto, T., Y. Wada, N. Oshiman and N. Sumitomo, Resistivity structure of a seismic gap along the Atotsugawa Fault, Japan, Phys. Earth. Planet. Int., 148, 55-72, 2005.
- Goto, T., T. Kasaya, H. Machiyama, R. Takagi, R. Matsumoto, Y. Okuda, M. Satoh, T. Watanabe, N. Seama, H. Mikada, Y. Sanada

- and M. Kinoshita, Marine deep-towed DC resistivity survey in a methane hydrate area, Japan Sea, Exploration Geophysics, 39, 52-59; Butsuri-Tansa, 61, 52-59; Mulli-Tamsa, 11, 52-59, 2008.
- 後藤忠徳・桜井紀旭・高木亮・笠谷貴史,海底電磁 探査による海底下メタンハイドレートの検出,地 学雑誌,投稿中,2009.
- Kasaya, T. and T. Goto, A small ocean bottom electromagnetometer and ocean bottom electrometer system with an arm-folding mechanism, Exploration Geophysics 40, 41-48; Butsuri-Tansa, 62, 41-48; Mulli-Tamsa, 12, 41-48, 2009.
- 木村俊則・芦田讓・後藤忠徳・笠谷貴史・三ヶ田 均・真田佳典・渡辺俊樹・山根一修, 南海トラフ 沈みこみ帯の地殼比抵抗構造, 物理探査, 58, 251-262, 2005.