

令和 3 年 6 月 21 日現在

機関番号：82641

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18K03768

研究課題名（和文）横ずれ活断層の極浅部三次元地下構造可視化に対する地中レーダ探査の適用

研究課題名（英文）Application of ground penetrating radar survey to visualization of 3-dimensional near-surface structure of strike-slip active faults

研究代表者

木村 治夫（Kimura, Haruo）

一般財団法人電力中央研究所・地球工学研究所・主任研究員

研究者番号：00723652

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：北伊豆断層帯丹那断層の田代地点、布田川断層帯布田川断層の堂園地点、中央構造線活断層系池田断層の山口地点で、三次元地下構造を明らかにするための地中レーダ探査を実施した。これにより、各地点において断層による横ずれ変形を示す埋没地形の分布を可視化できた。また、上記断層帯の他地点や、それ以外の活断層を対象とした二次元地中レーダ探査の結果とも比較し、横ずれ活断層の極浅部三次元地下構造可視化に対する地中レーダ探査の有効性について検討した。その結果、分解能の限界や測線設定の問題（地質や周辺的人工物の影響）などの制約はあるが、およそ1mを超える横ずれ変形の検出には本手法を適用可能であることがわかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

活断層調査では断層変位の検出は基本的な調査項目となる。とくに横ずれ変位の詳細な解明のためには三次元トレンチ掘削調査が有効である。しかし、土地利用が集約的で都市化の進んだ我が国では、三次元トレンチに要する広い用地の確保には困難が伴い、掘削調査を補完できる効果的な地下探査法の確立が望まれている。本研究では、地中レーダ探査を横ずれ断層直下の地下構造探査に適用した。その結果、横ずれ変形を受けた埋没地形の分布を可視化し、横ずれ変位量の検出に成功した。一方、分解能や探査地点の地質・ノイズ状況等の制約も存在した。今後、こうした制約を踏まえた上で手法の利活用と、制約を克服するための手法の高度化が望まれる。

研究成果の概要（英文）： We conducted ground penetrating radar surveys to reveal the 3-dimensional near-surface structure at Tashiro site on the Tanna fault in the Kita-Izu fault zone, Dozon site on the Futagawa fault in the Futagawa fault zone, and Yamaguchi site on the Ikeda fault in the Median Tectonic Line active fault system. The distribution of buried channels showing strike-slip displacement caused by the active faults was obtained at each site. We also compared the results with the results of 2-dimensional ground penetrating radar profiling at other survey sites, and we discussed the effectiveness of the ground penetrating radar survey for visualizing the 3-dimensional near-surface structure of strike-slip active faults. As a result, it was found that this method can be applied to the detection of strike-slip deformation exceeding about 1 m, although there are some conditions such as the limitation of the resolution and the influence of geology and artifacts near the survey site.

研究分野：構造地質学，物理探査学

キーワード：活断層 アクティブテクトニクス 物理探査 極浅部地下構造 地中レーダ 北伊豆断層帯 布田川断層帯 中央構造線活断層系

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

## 1. 研究開始当初の背景

一般的に横ずれ活断層の調査では、尾根や谷の屈曲等といった横ずれ変位地形の存在から断層の地表位置が明らかになることが多い。その後さらにトレンチ掘削調査によって地下の断層の実体を観察・試料採取し、横ずれ活断層の諸性状を明らかにする。その際、横ずれ変位のより詳細な解明のためには三次元トレンチ調査が有効で (Hall et al, 1999), 我が国でも横ずれ断層の三次元トレンチ調査で大きな成果があがっている (近藤ほか, 2003)。ただし、都市化の進んだ我が国では、三次元トレンチ調査に必要な広い調査用地の確保は困難なことが多い。その場合、掘削調査に加えて地中レーダ探査の補完的な実施によって用地の制約をある程度は克服できる。また、トレンチ掘削前には、地下構造の予察的な把握のためのボーリング掘削や物理探査が一般的であり、分解能・探査深度・費用・簡便性の点から地中レーダ探査はこれに非常に適した物理探査法のひとつである。しかし、トレンチ調査を用いた我が国の活断層研究が世界的レベルにあるのに対し、活断層研究への地中レーダ探査の適用について我が国は大きな遅れをとっているのが現状である。

ただし、地中レーダ探査の理論・技術そのものは我が国においても工学的には十分に構築されている (物理探査学会, 2016) ことから、これをとくに活断層研究の分野に適用する際に必要なノウハウの確立と公知化に注力することが重要である。また、我が国において地中レーダ探査手法の導入が遅れている大きな理由のひとつとして、日本の複雑な地層・断層の構造や都市化による多くの人工構造物・電磁波ノイズの影響もあり、そうした環境下での探査断面と地下の活断層形状や断層運動に伴って変形した地層形状との対応に関する網羅的で定量的な研究を拡充する必要がある。こうした研究は海外でも精力的に行われてきているが、むしろ、土地利用が集約的で調査用地の制約の大きい我が国においてこそ、その恩恵はより大きく、重要かつ急務であると考える。

## 2. 研究の目的

本研究では、分解能・探査深度・費用の点で活断層研究に最も有効な地下探査法のひとつと考えられる地中レーダ探査を、我が国の活断層研究、とりわけ、三次元的調査による横ずれ活断層研究に本格的に導入するための研究を行う。とくに、データ取得・処理・解釈の方法をより活断層調査に特化させることを目指す。また、有効な探査パラメタの検討を目的として、明瞭な縦ずれ成分を含む活断層の二次元探査も、横ずれ断層を対象とした三次元探査にあわせて行う。くわえて、地中レーダ探査断面と実際の地質との対応関係を検討するために、本研究で取得する新規データだけでなく、過去に国内で取得された地中レーダ探査データも収集・整理し、データ処理・探査断面解釈を行う。

## 3. 研究の方法

本研究では、中部地方の北伊豆断層帯 (1930 年北伊豆地震の際に地表変位出現)、九州の布田川断層帯 (2016 年熊本地震の際に地表変位出現)、四国の中央構造線活断層系を調査対象の横ずれ活断層帯とした。これらの対象活断層帯で、変動地形学的調査・地質情報の収集を行った上で、探査測線候補近傍のノイズ状況や電磁波の媒質としての地盤特性も考慮して探査地点を選定した。

選定された次の 3 地点で、三次元地下構造を把握するための地中レーダ探査を実施した。

- ・北伊豆断層帯丹那断層田代地点 (静岡県田方郡函南町)
- ・布田川断層帯布田川断層堂園地点 (熊本県上益城郡益城町)
- ・中央構造線活断層系池田断層山口地点 (徳島県三好郡東みよし町)

また、上記地点選定のための先行調査、あるいは補完情報取得のための追加調査として、上記の 3 地点に加えて、下記の 9 地点で二次元地下断面を得るための地中レーダ探査を実施した。

- ・北伊豆断層帯丹那断層軽井沢地点 (静岡県田方郡函南町)、同断層帯丹那断層下畑地点 (静岡県伊豆の国市)、同断層帯の南方に位置する早霧湖断層群戸倉野地点 (静岡県伊豆市)、姫之湯断層姫之湯地点 (静岡県伊豆市)
- ・布田川断層帯布田川断層の北方を並走する 2016 年地表地震断層の寺中地点および寺中西方地点 (熊本県上益城郡益城町)、同断層帯北甘木断層井寺古墳東方地点 (熊本県上益城郡嘉島町)
- ・中央構造線活断層系岡村断層中萩地点 (愛媛県新居浜市)、同断層系畑野断層津根地点 (愛媛県四国中央市)

探査データ取得にあたっては製品化されたシステム (カナダ Sensors & Software 社の pulseEKKO PRO システム) を用いた。二次元探査は一定のアンテナ間隔を保って等間隔でスキャン点を線状に移動させていくプロファイル測定 (物理探査学会, 2016) によって行った。三次元探査でのスキャン点は等間隔グリッド配置あるいは多数の平行ライン配置とした。また、地中電磁波速度推定を目的とした共通中間点データアンサンブルを取得するためにワイドアングル測定 (物理探査学会, 2016) も各探査地点ごとに複数箇所で行った。探査データの処理は市販さ

れている地中レーダ探査データ処理ソフトウェア（韓国地質資源研究院開発の RADPRO Ver.3）あるいは反射法地震探査データ処理ソフトウェア（米国 Parallel Geoscience Corporation 製の SPW Ver.2）を用いて行った。各地点で得られた地中レーダ探査の結果について、構造地質学的・古地震学的・堆積学的検討も加えた解釈を行って、活断層および断層によって変形を受けた地下構造を可視化して断層変位量などの活断層の諸性状を求めるとともに、探査パラメタの有効性に関して考察した。

#### 4. 研究成果

##### (1) 北伊豆断層帯

1930年北伊豆地震時に地表変位を生じた北伊豆断層帯丹那断層（伊原・石井, 1932; 地震調査研究推進本部地震調査委員会, 2005）の田代地点を対象として三次元地下構造を明らかにするための探査を実施した。また、同地点において過去に取得したデータも利用してデータ処理を行った。それにより、南北走向の断層を横切る南北40m・東西20mの範囲で深度5m程度までの三次元地下構造を示す地中レーダ探査結果が得られた。そこでは、深度1m付近で北傾斜する特徴的な構造と、深度4m前後でチャンネル構造を示すと考えられる構造が認められた。これらの構造の水平分布はそれぞれ、左横ずれ変形を示す分布形状となった。また、深度4m前後のチャンネル構造の方が深度1m付近の構造よりも有意に大きい横ずれ変位を呈しており、横ずれ変位の累積が確認できた。

また、上述した丹那断層の軽井沢地点および下畑地点、1930年北伊豆地震時に丹那断層と共に地表変位を生じた姫之湯断層の姫之湯地点、および、姫之湯断層に並走するが1930年地震時には地表変位を生じた報告の無い早霧湖断層群b断層（地震調査研究推進本部地震調査委員会, 2005）の戸倉野地点で、二次元地下断面を得るための地中レーダ探査を実施した。さらにこのうちの戸倉野地点では、地中レーダ探査で得られた断面と既存ボーリングで得られた地下地質との対応をより詳細に検討するために、既存ボーリングコアから堆積物試料を採取し、火山灰測定を行った。その結果、深度5m程度までの地下構造を示す地中レーダ探査断面が得られた。とくに、早霧湖断層群b断層においては地中レーダ探査とボーリングの結果との良い対応が見られ、両者を総合すると、早霧湖断層群b断層は1930年地震では動いていないものの、最新活動時期は1万年前以降であるということがわかった。

##### (2) 布田川断層帯

2016年熊本地震時に地表変位を生じた布田川断層帯布田川断層（Shirahama et al., 2016）の堂園地点を対象として三次元地下構造を明らかにするための探査を実施した。本探査は断層と平行な22本と断層と直行する3本の測線群によって構成され、各測線で最大深度2~3m程度までの地下構造を示す地中レーダ探査断面が得られた。これらのうち、断層に平行な測線群の内の多くでは、埋没チャンネルを示すと考えられる構造がいくつか見られ、それらの分布位置が断層を境にして右横ずれを呈していることがわかった。ただし、各断面において複数のチャンネル構造が見られ、それらの断面間の対比にはさらなる検討が必要であるため、横ずれ変位量を求めるのは今後の課題となる。

##### (3) 中央構造線活断層系

全長約444km、平均変位速度は最大で9mm/yr程度という、断層長・活動度ともに我が国最大級である中央構造線活断層系（地震調査研究推進本部地震調査委員会, 2017）のうち、四国の池田断層山口地点において地中レーダ探査を実施した。東西走向の断層を横切る南北30m・東西20mの範囲で深度5m程度までの三次元地下構造を示す地中レーダ探査結果が得られた。また、この範囲を中心として測線長約30mの東西測線4本、測線長約65mの南北測線1本によって、二次元地下断面を取得し、より広範囲の地下構造を把握した。その結果、複数の埋没流路跡の存在が明らかになった。この埋没流路跡の三次元モデルを作成したところ、約3~4mの右横ずれを示す屈曲変形および約0.5mの上下変位が見られた。

##### (4) 他の内陸活断層における研究成果

上記の横ずれ断層帯における地中レーダ探査と並行し、データ取得仕様やデータ処理法・適用パラメタ選択などを含めた探査手法の有用性検討のために、とくに縦ずれ断層を対象とした新規探査を実施、あるいは既取得データの再処理および結果断面の再解釈を行った。主な対象断層は、2014年長野県北部の地震の地表地震断層である神城断層（Okada et al., 2015）、2011年福島県浜通りの地震の地表地震断層である井戸沢断層（Toda and Tsutsumi, 2013）、長崎県島原半島の千々石断層、大分県別府地域の朝見川断層などであり、各測線で探査結果とボーリング調査・トレンチ調査結果の比較も行った。このうちとくに、正断層である井戸沢断層、千々石断層、朝見川断層での地中レーダ探査結果は、掘削によって得られた実際の地下の地層の分布深度・形状と良い対応が見られた。

##### (5) 総合的な検討

上記の成果を総合して、横ずれ活断層の極浅部三次元地下構造可視化に対する地中レーダ探査の有効性について検討した。その結果、メートルオーダーの横ずれ変形の検出は十分に可能で

あり，三次元トレンチ掘削調査が不可能な地点における横ずれ活断層の調査手法として極めて有効であることが確認できた．一方で，1 m 未満の横ずれ変位量の検出や変位量の違いの分離は，理論的な分解能ではこれを可能とする探査機材とデータ取得パラメータを用いても達成することはできなかったため，こうした探査分解能の低下を見越した測線・仕様設計が必要となる．また，三次元探査は二次元探査に比べて測線設定の自由度が制限されることから，探査可能深度についても同探査地点で先行実施した二次元探査よりも浅い領域のみに留まる傾向があった．以上，横ずれ活断層の地下構造探査には，このような制限を踏まえた上で本手法を適用可能であることがわかった．

#### <引用文献>

- 物理探査学会 編，2016，物理探査ハンドブック 増補改訂版，物理探査学会，1045p.
- Hall, N.T., Wright, R.H., Clahan, K.B., 1999, Paleoseismic studies of the San Francisco Peninsula segment of the San Andreas fault zone near Woodside, California, *Journal of Geophysical Research*, 104, 23,215–23,236.
- 伊原敬之助, 石井清彦, 1932, 北伊豆震災地調査報文, 地質調査報告, 112, 111p.
- 地震調査研究推進本部地震調査委員会, 2005, 北伊豆断層帯の評価. 地震調査研究推進本部, 28p.
- 地震調査研究推進本部地震調査委員会, 2017, 中央構造線断層帯(金剛山地東縁 - 由布院)の長期評価 (第二版), 地震調査研究推進本部, 162p.
- 近藤久雄, 遠田晋次, 今泉俊文, 堤 浩之, 杉下一郎, 中田 高, 奥村晃史, 島崎邦彦, 高田圭太, 池田哲哉, 原口 強, 2003, 丹那断層の過去 3,000 年間の活動履歴と単位変位量 田代地区における 3D トレンチ・Geoslicer 調査 , 地震 第 2 輯, 55, 407–424.
- Okada, S., Ishimura, D., Niwa, Y., Toda, S., 2015, The First Surface-rupturing earthquake in 20 years on a HERP active fault is not characteristic: the 2014  $M_w$  6.2 Nagano event along the northern Itoigawa–Shizuoka tectonic line, *Seismological Research Letters*, 86, 1287–1300.
- Shirahama, Y., Yoshimi, M., Awata, Y., Maruyama, T., Azuma, T., Miyashita, Y., Mori, H., Imanishi, K., Takeda, N., Ochi, T., Otsubo, M., Asahina, D., Miyakawa, A., 2016, Characteristics of the surface ruptures associated with the 2016 Kumamoto earthquake sequence, central Kyushu, Japan, *Earth Planets and Space*, 68, 191, 12p.
- Toda, S., Tsutsumi, H., 2013, Simultaneous reactivation of two, subparallel, inland normal faults during the  $M_w$  6.6 11 April 2011 Iwaki earthquake triggered by the  $M_w$  9.0 Tohoku-oki, Japan, Earthquake, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 103, 1584–1602.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 3件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Haruo Kimura, Toshimichi Nakanishi, Kota Katsuki, Wan Hong, Hisanori Matsuyama, Keiji Takemura	4. 巻 503
2. 論文標題 Holocene activity of the Asamigawa fault detected from sediment cores and a ground-penetrating radar cross-section in the Beppu area, southwestern Japan	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Quaternary International	6. 最初と最後の頁 87～96
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.quaint.2018.09.005	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 中西利典, 木村治夫, 松山尚典, Wan Hong, 堀川義之, 越後智雄, 北田奈緒子, 竹村恵二	4. 巻 58
2. 論文標題 群列ボーリング調査と地中レーダ探査による伏在活断層の活動履歴の検討 - 大分平野西部の府内断層の例 -	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 第四紀研究	6. 最初と最後の頁 163～173
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.4116/jaqua.58.163	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 中西利典, 奥野 充, 山崎圭二, Wan Hong, 藤田奈津子, 中村俊夫, 堀川義之, 佐藤鋭一, 木村治夫, 堤浩之	4. 巻 5
2. 論文標題 島原半島北部の唐比低地における湿地堆積物の形成過程	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 名古屋大学 年代測定研究	6. 最初と最後の頁 38～43
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件/うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Kimura, H., Nakanishi, T., Yukawa, M., Hosoya, T., Sung, K.S., Hong, W.
2. 発表標題 Holocene activity of the Sagiriko fault detected from sediment cores and a ground penetrating radar profiling, Izu Peninsula, central Japan
3. 学会等名 8th East Asia Accelerator Mass Spectrometry Symposium（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kimura, H., Tsutsumi, H., Taniguchi, K.
2. 発表標題 Near-surface structure revealed by ground penetrating radar profiling across an inland active fault ruptured one month after the 2011 Tohoku-oki earthquake, southern Fukushima, NE Japan
3. 学会等名 European Geoscience Union General Assembly 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 木村治夫, 稲荷絢音, 堤 浩之, 谷口 薫, 郡谷順英
2. 発表標題 田代盆地における中レーダ探査によって得られた北伊豆断層帯丹那の極浅部左横ずれ変形構造
3. 学会等名 日本活断層学会 2020年度秋季学術大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Patria, A., Tsutsumi, H., Kimura, H.
2. 発表標題 Ground Penetrating Radar Profiling Across the Ikeda Fault of the Median Tectonic Line, Japan
3. 学会等名 18th annual meeting of Asia Oceania Geosciences Society (AOGS2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 木村治夫, 中西利典, 堤浩之, 稲荷絢音, 谷口 薫
2. 発表標題 埋没した断層変位地形の検出への地中レーダー探査の適用
3. 学会等名 日本第四紀学会 リモートシンポジウム 陸域アーカイブから読む環境変遷と巨大災害：防災・減災に向けて
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	堤 浩之 (Tsutsumi Hiroyuki) (60284428)	同志社大学・理工学部・教授  (34310)	
研究分担者	中西 利典 (Nakanishi Toshimichi) (10462582)	ふじのくに地球環境史ミュージアム・学芸課・准教授  (83811)	

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	湯川 芽依 (Yukawa Mei)	一般財団法人電力中央研究所・地球工学研究所・派遣職員  (82641)	
研究協力者	P a t r i a A d i (Patria Adi)	同志社大学・理工学部・大学院生  (34310)	
研究協力者	西岡 大地 (Nishioka Daichi)	同志社大学・理工学部・学部生  (34310)	
研究協力者	稲荷 絢音 (Inari Ayane)	同志社大学・理工学部・学部生  (34310)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	北出 皓主  (Kitade Hiroyoshi)	同志社大学・理工学部・学部生  (34310)	
研究協力者	谷口 薫  (Taniguchi Kaoru)	株式会社 パスコ	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関		
韓国	Carbon Analysis Lab Co., Ltd.	Korea Inst. Geosci. Mineral Resources	