

## 山口県岩国断層帯熊毛断層における地中レーダー探査 —トレンチ掘削地点選定のための調査事例—

### Ground penetrating radar profiling across the Kumage fault in the Iwakuni fault zone, SW Japan –A case study for deciding a trench survey location—

宮下由香里<sup>1</sup>・木村治夫<sup>1</sup>・堀川晴央<sup>1</sup>・伊藤順一<sup>2</sup>・牧野雅彦<sup>2</sup>・住田達哉<sup>2</sup>

北尾秀夫<sup>3</sup>・岡崎和彦<sup>3</sup>

Yukari Miyashita<sup>1</sup>, Haruo Kimura<sup>1</sup>, Haruo Horikawa<sup>1</sup>, Jun'ichi Itoh<sup>2</sup>, Masahiko Makino<sup>2</sup>,  
Tatsuya Sumita<sup>2</sup>, Hideo Kitao<sup>3</sup> and Kazuhiko Okazaki<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 活断層・地震研究センター (AIST, Geological Survey of Japan, Active Fault and Earthquake Research Center, yukari-miyashita@aist.go.jp)

<sup>2</sup> 地質情報研究部門 (AIST, GSJ, Institute of Geology and Geoinformation)

<sup>3</sup> 株式会社ダイヤコンサルタント (Dia Consultants Co., Ltd.)

**Abstract:** The NE-SW trending Iwakuni fault zone in the southwestern Japan consists of many right-lateral strike-slip faults. The Kumage fault is distributed in the central area of the fault zone. We carried out ground penetrating radar (GPR) profiling, and obtained two GPR time-sections across the Kumage fault. Sedimentary structures of valley-fill deposits, upper surface of granite and the location of hydrothermally-altered zones or fault gouge zones were interpreted geologically on the basis of the drilling surveys and surface geological mapping nearby the GPR survey lines.

**キーワード:** 活断層, 岩国断層帯, 熊毛断層, 地中レーダー探査, 山口県

**Keywords:** active fault, Iwakuni fault zone, Kumage fault, ground penetrating radar, Yamaguchi prefecture

#### 1. はじめに

岩国断層帯は、広島県大竹市から山口県周南市に分布する長さ約 44 km の右横ずれ断層帯である (地震調査研究推進本部地震調査委員会, 2004)。本断層帯は、北東より順に、大竹、岩国、甘木峠、小畑、熊毛、大河内、栄谷および河内断層から構成される (後藤・中田, 2008 ; 第 1 図)。

宮下ほか (2011, 本報告書) は、断層活動性評価手法開発研究の一環として、花崗岩を母岩とし、1 万年以上の活動間隔を持つ断層から断層破砕物質を採取することを目的として、熊毛断層が分布する岩国市周東町下長野においてボーリング調査とトレンチ調査を実施した。その結果、下長野南断面では、新期の断層活動を示す明瞭な断層面は認められず、熱水変質帯や粘土脈が分布すること、下長野北断面およびトレンチ壁面に現れた断層破砕帯の走向は、地形から推定される熊毛断層の走向と斜交することが明らかとなった。この解釈として、熊毛断層は下長野地点では、1) 雁行状あるいは分岐した形状を呈し、全体として東西方向に連続する、2) 後の熱水変質作用が重複しており判別できない、あるいは存在

しない、の二通りの可能性が挙げられる。この二つの可能性について検証するためには、宮下ほか (2011) の調査地点東側に位置し、熊毛断層が確実に通過すると想定される谷を横断する掘削調査を実施する必要がある。

一方、産総研深部地質環境研究コアでは、基盤岩の断層破砕帯の分布様式と断層ガウジの岩石・鉱物化学的特性に基づいて、活断層の活動性を評価する手法開発研究を行っている (例えば伊藤ほか, 2011) が、その中で同一の調査地点において、トレンチ調査、ボーリング調査、精密重力探査、地中レーダー探査など複数の手法を用いた総合的な活断層調査を進めている。この複合手法を用いた調査の目的は、簡便かつ低費用でトレンチ掘削候補地点選定を含む地下構造を推定すること、そのために各種物理探査手法の有効性を実際の断層帯を対象に確認することにある。

本調査では、下長野地点での新たなトレンチ調査に向けて、各種物理探査手法の有効性を確認することを目的に、2 測線での地中レーダー探査と 1 測線での精密重力測定を行った。あわせて、極浅部の地質状況を把握するため、3 本のボーリング調査と 6

箇所での簡易貫入試験を実施した。本稿では、それらのうち地中レーダー探査とボーリング調査結果について報告する。なお、精密重力探査結果については、住田ほか（2011，本報告書）を参照されたい。

## 2. ボーリング調査

ボーリング調査は、岩国市周東町下長野地点で実施した（第2図）。下長野地点の概要については、宮下ほか（2011）を参照されたい。第3図にボーリングコアの写真と記載を、第6a図に地質断面図を示す。

S22-3-1孔では深度2.65 m，S22-3-2孔では深度3.9 m，S22-3-3孔では深度6.05 mまで谷底堆積物が分布し、それ以深に基盤花崗岩およびアプライトが分布する。S22-3-1孔とS22-3-2孔の谷底堆積物を比較した場合、前者がシルトおよびシルト質砂から構成されるのに対し、後者は粗粒砂、礫混じり砂および砂礫から構成され、両者は明瞭に区別される。S22-3-2孔付近には南側および南東側から流下する小沢由来の堆積物が分布し、他方、S22-3-1孔付近には北東側につづく平坦面構成層が分布していると解釈できる（第2図，第6a図）。周辺の地形状況から、前者が後者を削り込む関係にあると推定されるが、その境界を推定するために、両孔の間で簡易貫入試験を行った。その結果、Nd値，換算N値の類似性から、前述した異なる谷底堆積物の境界は、測線距離10 mから15 mの間に存在すると推定された（第6a図）。S22-3-1孔には花崗岩とアプライトが分布する。これらは、網目状の粘土シームを多く含む変質帯となっている（第3a図）。また、S22-3-3孔の深度7 m～7.2 m付近では、幅数ミリメートルの淡緑色粘土脈が認められた（第3c図）。

## 3. 地中レーダー探査

### 3.1 測線

地中レーダー探査は、岩国市周東町下長野地点の2測線で行った。これらのうち、南側の測線を下長野南測線，ボーリングおよび簡易貫入試験実施測線沿いを下長野北測線と呼ぶ（第2図）。下長野南測線は、下長野トレンチの約50 m南側の小扇状地面上に位置し、現在は畑として利用されている土地脇の平坦な草地である（第4a図）。下長野北測線は、下長野トレンチの約100 m東側に位置する休耕田の畦上とした（第4b図）。

### 3.2 データの取得

地中レーダー探査データ取得の主な仕様を第1表に示す。データ取得は、プロファイル測定法（例えば、物理探査学会，1998）によって行った。本探査で用いた測定システムはGSSI社製のSIR-3000であり、送受信アンテナにはGSSI社製の電磁シールド付き200 MHzアンテナ（Model-5106）を使用した。下長

野地点での電磁波送受信作業は2010年12月15日に行った。測定ではサーベイホイールによってアンテナの移動と電磁波の送受信を同期させ、1 cm間隔のスキャンを行った。また、再現性の確認のために各測線を往復して2回の測定を行った。取得データのサンプリング間隔は0.25 nsec，記録長は256 nsec（1024サンプル），記録データビット長は16 bit，記録ファイルフォーマットはDZT形式である。探査測線の水平位置・標高座標の決定のために、D-GPSおよびハンドレベルを用いて測線に沿って約1 mおきの位置測量を行った。

### 3.3 データ処理

本探査のデータ処理は、GSSI社製の地中レーダー探査データ処理システムRADAN 6.6を用いて行った。データ処理の流れを第2表に示す。各種のフィルター処理や振幅回復・調整処理を行い、各測線について往復走時256 nsecまでの地中レーダー探査時間断面を得た。下長野南測線・同北測線の時間断面図をそれぞれ第5図，第6図に示す。両断面において、データが欠損している、あるいは品質が極端に低下している領域は、測線全域にわたってとくに無い。地層面からの反射波と混同する可能性がある、顕著な側方反射波やシステムノイズ等に由来すると考えられる波形等もとくに認められない。

### 3.4 結果

下長野南測線（測線長約31 m）の探査結果を第5図に、また下長野北測線（測線長約64 m）の探査結果を第6図に示す。下長野南測線の時間断面（第5図）では、往復走時約60 nsecよりも浅い部分では緩く傾斜した反射面群が目立つ。大局的には、測線距離25 m以西の傾斜した反射面は西傾斜を示し、なおかつ、西側に行くほど浅くなる。往復走時約60 nsec以深は比較的反射面群が認められない区間が続くが、往復走時約100 nsec付近では明瞭な反射面群が認められる。この明瞭な反射面群について詳しく見ると、測線距離4 m～7 m，13 m～16 m，19 m～21 m付近では、反射強度が周囲より小さくなっている。

下長野北測線の時間断面（第6図）では、往復走時約30 nsec～70 nsec間に明瞭な反射面群が卓越する。また、往復走時約100 nsec付近にも、局所的に明瞭な反射面が存在する。断面南端～測線距離54 m付近と37 m～40 m前後の部分では深い所まで比較的明瞭な反射面群が見られる。測線距離34 m～44 m付近では往復走時約40 nsec～80 nsec間に連続性のよい反射面が見られ、39 m付近を最深部とする凹型の形状を示す。凹型形状の中央最深部にあたる37 m～41 mの範囲は、上部に比べると反射強度が小さいように見える。また、測線距離14 m付近にも凹型を示す反射面群が認められる。往復走時約30 nsec～70 nsec間の明瞭な反射面群以深では、測線距離9 m

～11 m, 21 m～24 m, 30 m～38 m, 45 m～47 m 付近で、反射強度が周囲より小さくなっている。

#### 4. 地中レーダー探査断面の地質学的解釈

今回の地中レーダー探査では地中電磁波速度の直接測定や共通反射点重合法による速度解析、点反射体利用による速度推定などは行っておらず、地中電磁波速度は未知である。よって、地中レーダー探査断面には深度変換を施していないため、時間断面について地質学的な解釈を行う。ただし、大局的な構造把握のために、おおよその探査深度を推定する。調査地域の地層を構成する物質は、砂、シルト、粘土、土壌および風化花崗岩であり、これらの一般的な比誘電率は、Davis and Annan (1989) によると、湿潤砂 20～30、シルト 5～30、粘土 4～40 であり、Daniels (1996) によると、湿潤砂 10～30、湿潤粘土 15～40、湿潤ローム質土壌 10～20 である。また、地層の比誘電率は地層の含水率に大きく依存し、含水率が高いほど比誘電率は大きくなる関係にある (Topp *et al.*, 1980)。上述したシルトや砂の 5 や 4 などといった比誘電率は極端に乾燥した状態のものである。ここで、上述した比誘電率のうち、湿潤した粘土～砂の比誘電率が下限値 10 の時の地中電磁波速度は約 0.09 m/nsec、同じく上限値 40 の時の地中電磁波速度は約 0.05 m/nsec である。それぞれの場合、往復走時 256 nsec に相当する深度は約 11.5 m 及び 6.4 m となる。これらの値を参考にして、本調査で得た地中レーダー探査断面の下端のおおよその深度 (往復走時 256 nsec) を考えると、地表下深度 7～11 m 程度と推定した。以下では、ボーリング調査により、地中レーダー探査と対応する深度で得られた地下地質情報を参考にして、各探査結果断面の地質学的解釈を行う。

下長野南測線では、往復走時約 60 nsec よりも浅い部分に、緩く傾斜した反射面が複数認められる。また、往復走時約 100 nsec 付近には明瞭な反射面群が連続的に認められる (第 5b, c 図)。本地点でのボーリング調査から推定された断面図において、a から b の区間は、地中レーダー探査測線と若干斜交する (第 2 図) が、地下地質構造の比較が可能と判断した。他方 b から c の区間は、地中レーダー探査測線と大きく斜交する (第 2 図) ため、ここでは議論に含めない。S22-1-1 孔および S22-1-2 孔から、基盤花崗岩の上面深度はおおよそ地表下 4 m と推定される。花崗岩以浅の谷底堆積物は、固結度の低い砂礫主体である (宮下ほか, 2011) ことと、探査深度が 7～11 m 程度と推定されることから、谷底堆積物と基盤花崗岩との物質境界が、往復走時約 100 nsec 付近の明瞭な反射面に相当すると推定した。この推定に基づき、ボーリングコア柱状図と地中レーダー探査断面の深度を対比させた (第 5 図)。現地表面では、地質断面線 b-c とほぼ平行に南東から北西に流下する

小沢が存在する (第 2 図) が、S22-1-1 孔以西がその流路の延長方向に相当する。したがって、往復走時約 60 nsec よりも浅い部分に認められる西傾斜の反射面は、この小沢によって運搬された堆積物が谷を埋積していく過程を見ている可能性がある。また、往復走時約 100 nsec 付近には明瞭な反射面群が認められるが、その中には反射強度が周囲よりも小さいゾーンが存在する。これらのゾーンのうち、測線距離 13 m～16 m 付近は S22-1-1 孔および S22-1-2 孔で確認された粘土を多く含む変質帯の延長部に相当すると考えられる。したがって、基盤花崗岩中の反射強度が小さいゾーンは、変質帯あるいは粘土脈が多いゾーンを示している可能性がある。

下長野北測線では、往復走時約 30 nsec～70 nsec 間に反射強度が大きい反射面群が認められる。この反射面群の上面は比較的平滑であるが、下底は凹凸を示す。この凹凸が基盤花崗岩の上面深度に相当すると仮定して、ボーリングコア柱状図と地中レーダー探査断面の深度を対比させた (第 6 図)。S22-3-2 孔では基盤花崗岩の上位に大礫を含む砂礫層が分布する (第 3b 図)。この砂礫層は層相および分布高度から、下長野トレンチ壁面の 5 層 (宮下ほか, 2011) に対比されると考えられる。測線距離 39 m 付近を最深部とする凹形状の最深部、往復走時約 75 nsec 以深の反射強度が小さい部分は、この砂礫層に相当する可能性がある。また、基盤花崗岩に相当する深度の測線距離 9 m～11 m, 21 m～24 m, 30 m～38 m, 45 m～47 m 付近では、反射強度が周囲よりも小さくなっている。測線距離 10 m の位置で掘削された S22-3-1 孔の基盤岩中には、粘土を多く含む変質帯が認められた。したがって、9 m～11 m の反射強度が小さいゾーンは、変質帯あるいは粘土脈が多いゾーンを示している可能性がある。また、下長野トレンチでは、基盤花崗岩が最終氷期の砂礫 (5 層) に削り込まれてきた谷地形の基部から北側に、断層破碎帯が分布していた (宮下ほか, 2011)。北測線の測線距離 39 m 付近にも埋没谷と思われる地形が存在するが、ここより北側にも反射強度が小さいゾーンが認められる。ボーリングコアで確認された変質帯と反射強度が小さいゾーンが対比されるとすると、ここにも変質帯もしくは断層破碎帯が存在する可能性を指摘できる。

#### 5. まとめ

岩国断層帯熊毛断層について岩国市下長野地点で、2 測線の地中レーダー探査を行い、地表下最大 7～11 m 程度以浅の地中レーダー探査時間断面を得た。明瞭な断層形状をイメージすることはできなかったが、谷埋め堆積物の堆積構造や基盤上面の形状などの浅部地盤構造が明らかとなった。固結度が低い砂礫層と花崗岩との境界 (南測線) ある



いは比較的固結度が高い砂礫層とマサ化した花崗岩との境界（北測線）は、反射面群の強度コントラストとなってイメージングされていると解釈できる。また、基盤岩中の変質帯は反射強度が周囲より小さいゾーンとなって見えている可能性が指摘できる。以上の結果から、地中レーダー探査は極浅部地盤構造の把握に有効であることがわかった。今回は時間断面のみに基づいた議論であったが、今後の地中レーダー探査では、ワイドアングル測定などによって地中電磁波速度を明らかにした上で深度断面を作成し、これとトレンチ調査やボーリング調査等で得られた浅部地質構造とのより正確な比較・検討を行うことによって、探査の精度・信頼度を向上させていくことが望まれる。

**謝辞** ボーリング調査および地中レーダー探査の実施にあたっては、土地所有者をはじめとする岩国市の関係者の皆様に、御理解・御協力をいただいた。地形地質調査と物理学的探査の融合研究については、産総研深部地質研究コアの渡部芳夫代表に、ご議論・ご指導を頂いた。以上の方々に、記して御礼申し上げます。

## 文 献

- 物理探査学会（1998）物理探査ハンドブック，物理探査学会，東京，1336pp.
- Daniels, D. J. (1996) Surface-penetrating radar, The Institute of Electrical Engineers, 300pp.
- Davis, J. L. and Annan, A. P. (1989) Ground-penetrating radar for high-resolution mapping of soil and rock stratigraphy, *Geophys. Prospect.*, 37, 531-551.
- 後藤秀昭・中田 高（2008）1:25,000 都市圏活断層図 岩国断層帯とその周辺「岩国」「下松」解説書，国土地理院技術資料D・1-No.520.
- 伊藤順一・梅田浩司・渡部芳夫・宮下由香里・間中光雄・牧野雅彦・住田達哉・堀川晴央・木村治夫・森川徳敏・石丸恒存・安江健一・丹羽正和・小林健太・亀井淳志・福士圭介（2011）物質科学的手法による低活動性断層の活動度評価手法の開発，日本地質学会第118年学術大会・日本鉱物学会2011年年会合同学術大会講演要旨集（セクションB），167.
- 地震調査研究推進本部地震調査委員会（2004）岩国断層帯の長期評価について．[http://www.jishin.go.jp/main/chousa/04feb\\_iwakuni/index.htm](http://www.jishin.go.jp/main/chousa/04feb_iwakuni/index.htm)
- 宮下由香里・宮脇昌弘・北尾秀夫・岡崎和彦（2011）山口県岩国市下長野における岩国断層帯のトレンチ調査．活断層・古地震研究報告，産業技術総合研究所地質調査総合センター．No.11, p.227-247.
- 住田達哉・牧野雅彦・伊藤順一・宮下由香里（2011）浅層精密重力探査による活断層トレンチ位置決定手法の高精度化—山口県岩国断層帯に対する事例研究—，活断層・古地震研究報告，産業技術総合研究所地質調査総合センター．No. 11, p.259-272
- Topp, G. C., Davis, J. L., and Annan, A. P. (1980) Electromagnetic determination of soil water content: Measurement in coaxial transmission lines, *Water Resource Res.*, 16, 574-582.

（受付:2011年10月31日，受理:2011年11月28日）

第1表. 地中レーダー探査データ取得の主な仕様.  
Table 1. Data acquisition parameters.

Instrument	SIR-3000 (Geophysical Survey Systems Inc.)
Antennae	Model-5106 (Geophysical Survey Systems Inc.)
Frequency	200 MHz
No. of scan points	3140 (Shimonagano south survey line), 6388 (Shimonagano north survey line)
Scan interval	0.01 m
Data format	DZT, 16 bit
No. of traces	3140 (Shimonagano south survey line), 6388 (Shimonagano north survey line)
No. of samples	1024
Sampling interval	0.25 nsec
Recording length	256 nsec

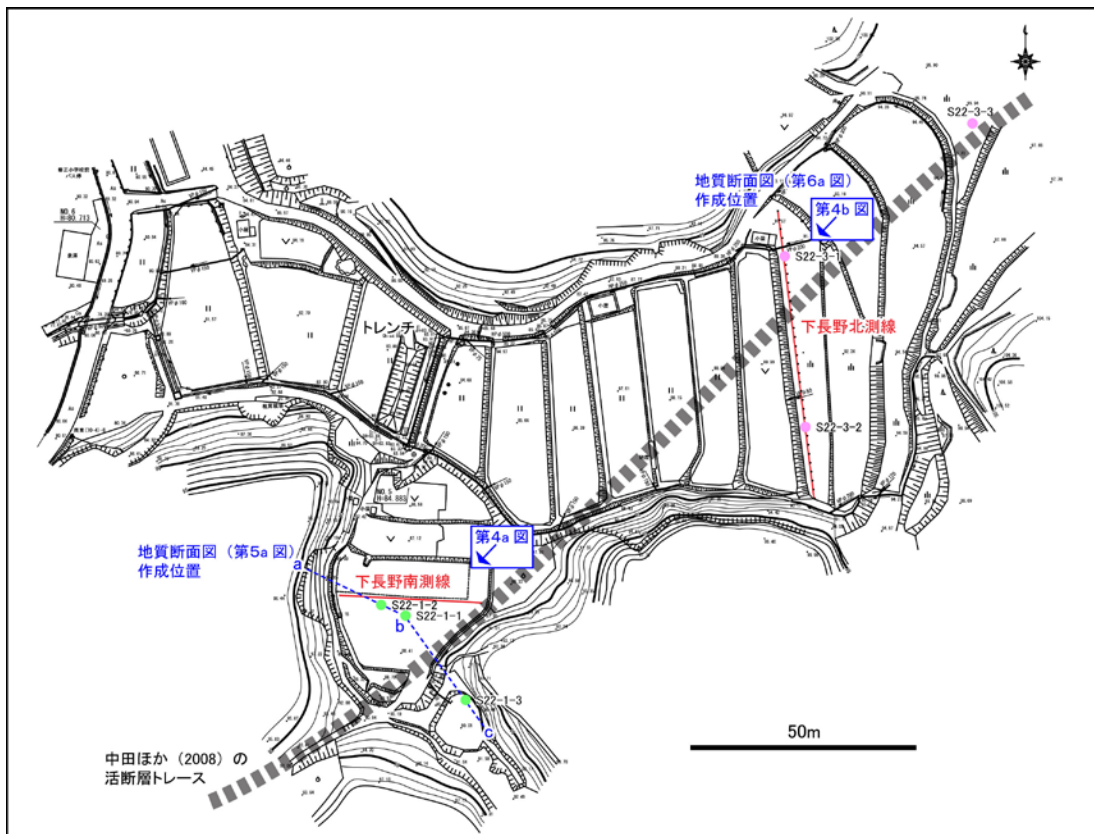
第2表. データ処理の流れ.  
Table 2. Sequence of data processing.

Time-zero correction
Dewow filter
Bandpass filter
Background removal
Gain Recovery
Deconvolution filter
Automatic Gain Control
Bandpass filter



第1図. 岩国断層帯位置図. 断層線は後藤ほか (2008) および中田ほか (2008) による. 基図には, 地質調査総合センターのシームレス地質図を使用した.

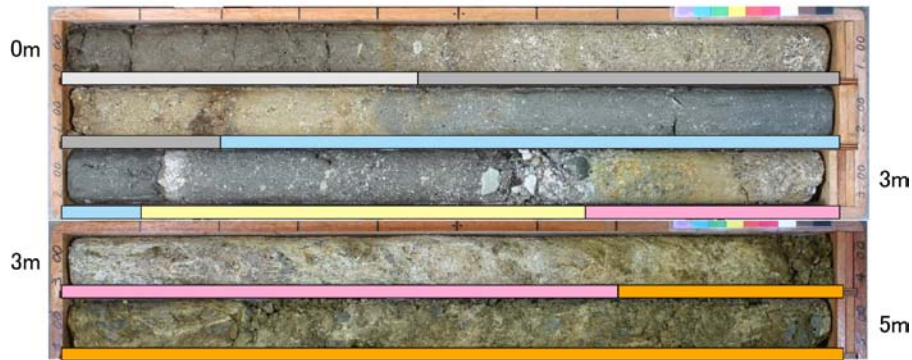
Fig. 1. Distribution map of the Iwakuni fault zone. Fault traces are after Goto *et al.* (2008) and Nakata *et al.* (2008). Based map is the Seamless Digital Geological Map of Japan by Geological Survey of Japan.



第2図. 岩国市周東町下長野調査地点図.

Fig. 2. Location map of six boreholes and a trench excavation surveys at Shimomachi, Iwakuni City.

【S22-3-1孔】 鉛直孔；孔内水位；GL.-0.80m



深度 (GL. -m)	土質・地質	岩相・層相
0.00~0.45	耕作土	シルト混じり砂を主体とする耕作土である。
0.45~1.20	盛土	圃場整備に伴う盛土。マサが主体である。
1.20~2.10	谷底堆積物 (細粒堆積物)	細礫を含む砂質シルト。所々炭化物を含む
2.10~2.65		礫混じりのシルト質砂。炭化物がみられる。
2.65~3.70	風化花崗岩	風化及び変質が著しい。 粘土シームが全体に発達。
3.70~5.00	アプライト	変質が顕著なアプライトである。

第3a図. S22-3-1孔のコア写真と地質記載.

Fig. 3a. Photograph and geology of S22-3-1 borehole core.

【S22-3-2孔】 鉛直孔；孔内水位；GL.-1.10m



深度 (GL. -m)	土質・地質	岩相・層相
0.00~0.30	耕作土	シルト質砂を主体とする耕作土である。
0.30~0.85	盛土	圃場整備に伴う盛土。マサが主体である。
0.85~2.00	谷底堆積物 (粗粒堆積物)	塊状な粗砂主体。上部の1.4m付近までは細礫混じりシルト質砂と砂礫からなる。
2.00~3.35		細礫混じり砂。 2.38m付近、幅3cm程度でややシルト質。
3.35~3.90		砂礫。基質はシルト質砂。礫の最大径はコア長18cm程度。
3.90~5.00		強風化花崗岩

第3b図. S22-3-2孔のコア写真と地質記載.

Fig. 3b. Photograph and geology of S22-3-2 borehole core.

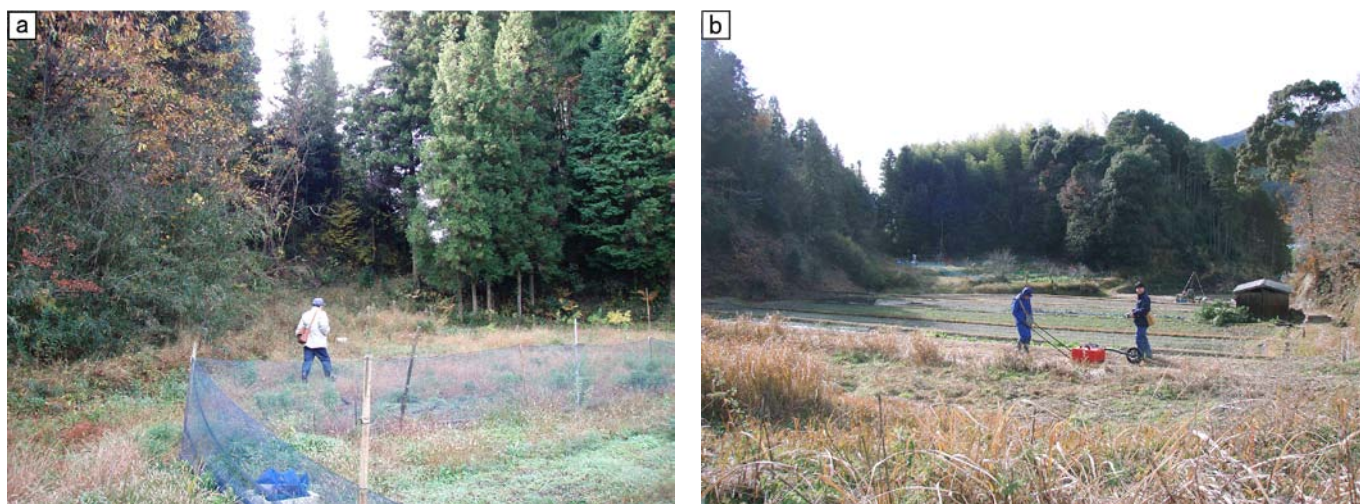


【S22-3-3孔】鉛直孔



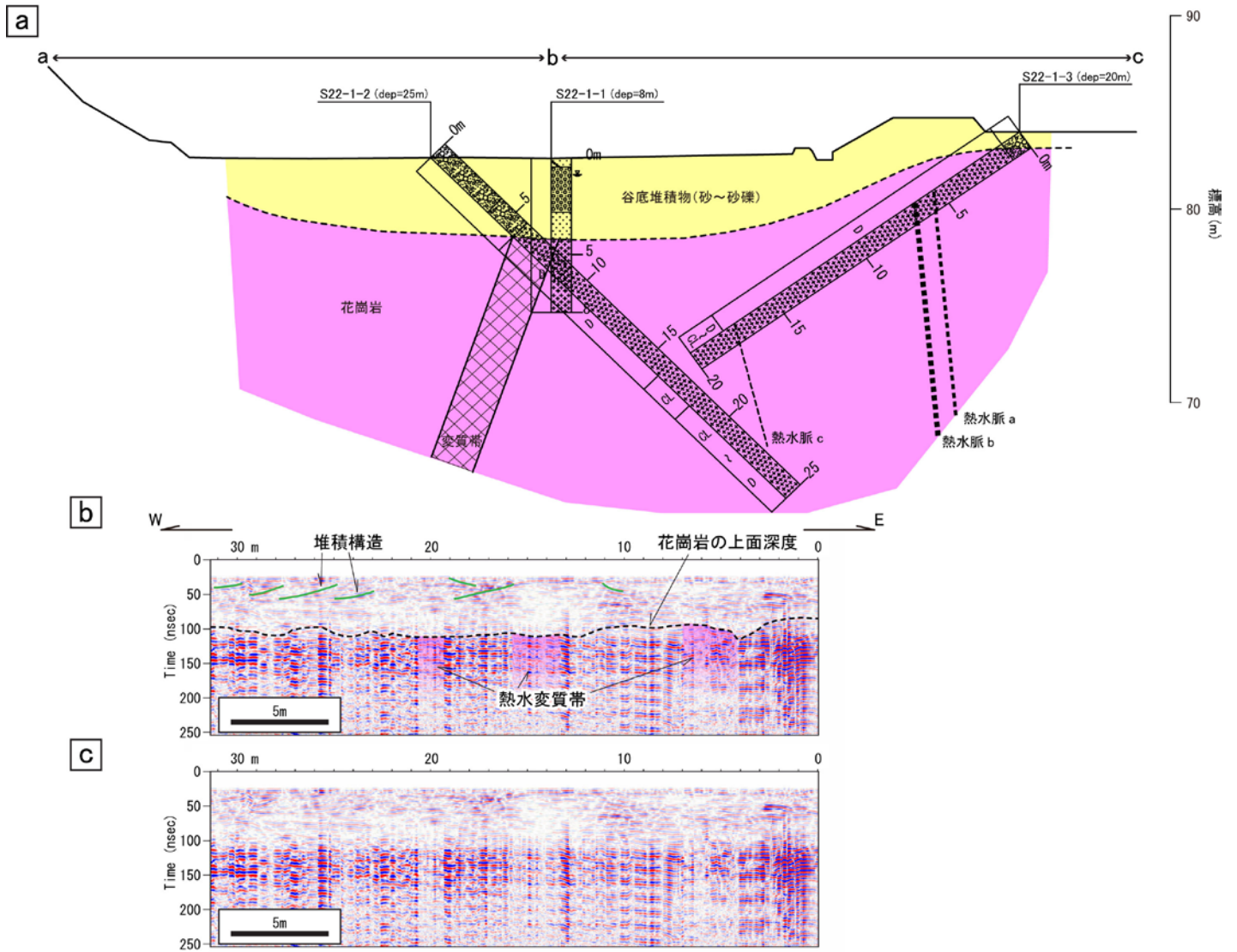
深度 (GL. -m)	土質・地質	岩相・層相
0.00~1.20	盛土	砂質シルト。表層15cmは耕作土。
1.20~2.00		礫混じり粘土。 礫は径0.5~1.0cm程度。粘土はローム質。
2.00~6.05	谷底堆積物 (粗粒堆積物)	砂礫。 径3~10cm程度の亜角~亜円礫。礫種は花崗岩, アブライトなどからなる。基質は粗砂主体で, ややシルト混じりである。
6.05~9.00	強風化花崗岩	強風化花崗岩。風化によるマサ化が著しく, 軟質。

第3c図. S22-3-3孔のコア写真と地質記載.  
Fig. 3c. Photograph and geology of S22-3-3 borehole core.



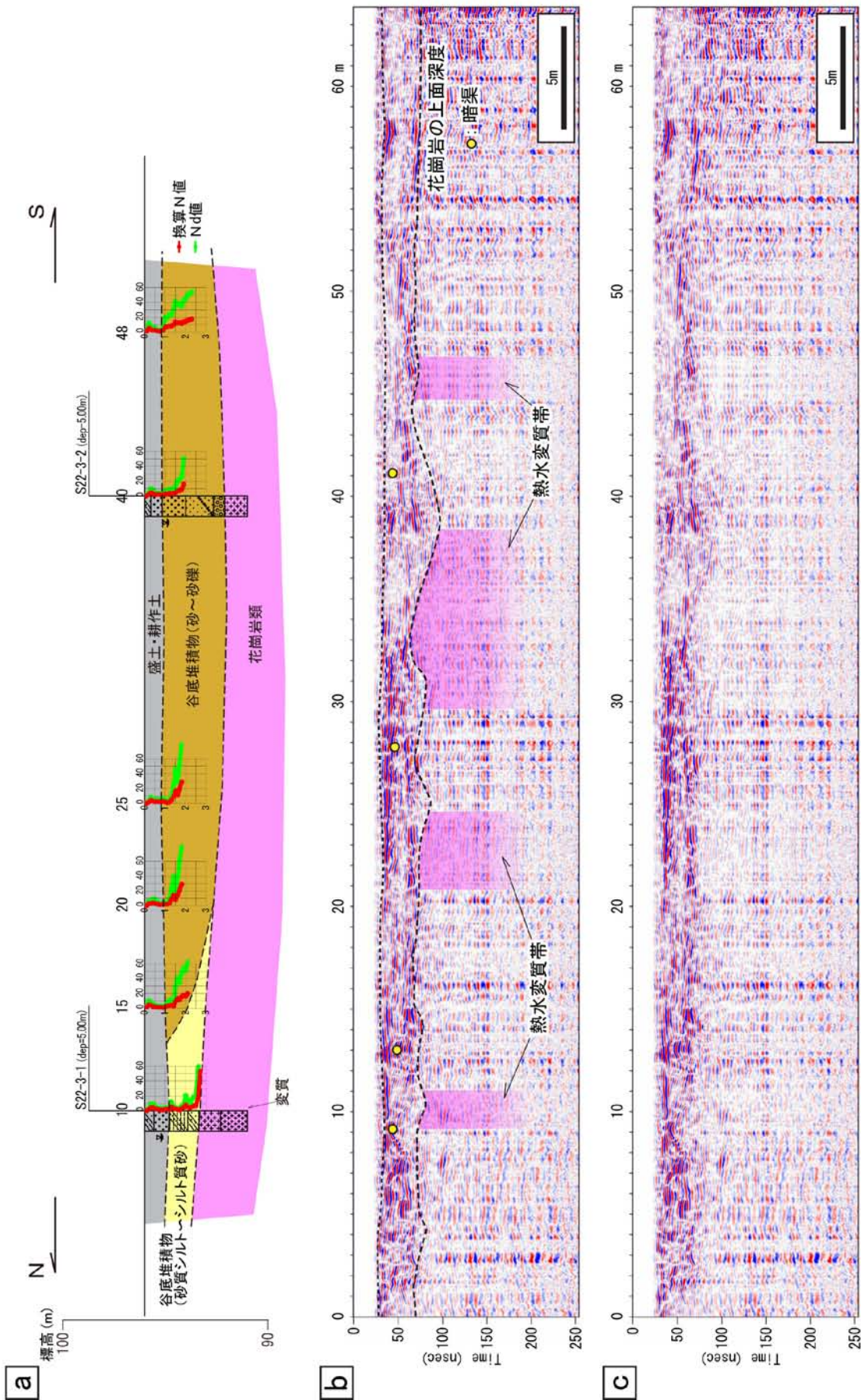
第4図. 地中レーダー探査測線の現況. a: 下長野南測線. b: 下長野北測線.  
Fig. 4. Landscapes of a: Shimonagano south survey line and b: Shimonagano north survey line.





第5図. 下長野南測線の探査結果. a: ボーリングコアから推定される地質断面図(宮下ほか, 2011). b: 地中レーダー時間断面の地質学的解釈. c: 地中レーダー時間断面.

Fig. 5. Results of Shimonagano south survey line. a: geological cross-section b: geological interpretation of the two way time section c: two way time section.



第6図. 下長野北測線探査結果. a: ボーリングコアから推定される地質断面図. b: 地中レーダ一時間断面の地質学的解釈. c: 地中レーダ一時間断面. Fig. 6. Results of Shimonagano north survey line. a: geological cross-section b: geological interpretation of the two way time section c: two way time section.