

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 —

Shallow microgravity survey for determining a precise location of an active fault. — Case studies at the Iwakuni fault zone, Yamaguchi prefecture, SW Japan —

住田達哉¹・牧野雅彦¹・伊藤順一¹・宮下由香里²

Tatsuya Sumita¹, Masahiko Makino¹, Jun'ichi Itoh¹ and Yukari Miyashita²

¹ 地質情報研究部門 (AIST, Geological Survey of Japan, Institute of Geology and Geoinformation, t.sumita@aist.go.jp)

² 活断層・地震研究センター (AIST, GSJ, Active Fault and Earthquake Research Center)

Abstract: A trenching study is a robust method to reveal activities of an active fault. However, fault positioning with an accuracy of a few meters is difficult only by using ordinary geological and topographical evidences especially for unclear faults. Thus, we applied microgravity surveys to precisely locate an active fault. The surveys were conducted at two sites in the Iwakuni fault zone, Yamaguchi prefecture: The Kurumaki site in Kudamatsu city and the Shimonagano site in Iwakuni city are located on the Okawachi fault and the Kumage fault, respectively. Lengths of survey lines were about 40 m and 60 m with measurement intervals of 1 m and 2 m at the Kurumaki and the Shimonagano sites, respectively. Both microgravity anomaly profiles showed short wavelength gravity changes. With additional gravity trend and geological information, we made 2D density models which are likely to reveal shallow fault structures. The microgravity survey is, thus, a potential method to locate an active fault.

キーワード: 浅層精密重力探査, 活断層, トレンチ, 岩国断層帯, 熊毛断層, 大河内断層, 山口県
Keywords: shallow microgravity survey, active fault, trench, Iwakuni fault zone, Kumage fault, Okawachi fault, Yamaguchi prefecture

1. はじめに

1.1 目的

トレンチ調査は、活断層の過去の活動・時期・変位量等を直接観察・直接サンプル採取により行う、活断層調査において非常に有用な調査手法である。当然ながら、活断層を直接調査するためには、調査前に断層の位置を数メートルの精度で把握している必要がある。しかしながら、調査適地の選定において、空中写真判読や地表踏査による地形学的・地質学的手法を用いた活断層位置の推定が困難な場合も多く、その際は、ボーリング調査や地下レーダー探査を位置推定に用いた場合もあった（例えば、下山ほか, 2005；中埜・酒井, 2007；）。また、活断層の精確な位置決定に極浅層反射法を用いる報告もある（松多ほか, 2001）。ボーリング調査は、直接サンプリングによる判断ができる点が有利であるが、労力や費用がかかる手法であり、連続的な地下断面を得る調査としては不向きである。反射法探査は、連続的な地下断面を得やすいという利点はあるものの、調査に比較的労力を要し、費用もかかるため、トレンチ調査の事前調査として汎用的に用いられ難い状況にある。地下レーダー探査は、探査深度がおおよそ5 m

程度で連続的な地下断面を得ることが可能であり、他の手法に比べ手軽に調査しやすいという利点がある。しかしながら、地下構造が成層構造を呈しない場合や電氣的インピーダンスの状況により反射面における電磁波の反射が不十分な場合、電磁波を伝える媒質の散乱や減衰が大きい場合など、必ずしも地質構造を反映した地下断面が得られるわけではない。

重力探査は、簡便で費用のかからない方法である。そのため、測点間隔を密にすることで連続的な地下断面の情報を得ることが可能である。さらに、重力加速度値（重力値）は万有引力の法則を密度分布に従って積分することで計算されるため、構造境界の状態や途中の媒質の状態により、構造（密度分布）の情報が失われるような事がないという利点もある。本報告では、浅層精密重力探査を山口県の岩国断層帯で実施し、得られた実データを用いてトレンチ調査ポイントの選定の有効性について議論する。その際、実用性を意識し、従来から用いられている事前調査手法に重力調査のデータを加味することで得られる知見について紹介する。

1.2 先行研究

精密重力探査の手法・解析の説明および豊富な事

例紹介として野崎 (1997) がある。そのほとんどの事例は、測線長が数百メートルを超え、測点間隔も 5 m 以上のものであるが、遺構 (堰跡) の調査および地盤改良の事例に関しては、1~10 m 程度の測点間隔による浅層精密重力探査の例がある。また、野崎ほか (2005) では、防波堤空洞調査に精密重力探査を適用し、その有効性を実証している。他に、おおよそ 50 m の測線間隔の重力探査により断層周辺の深度 2 km 程度までの密度構造を推定した例として、岩野ほか (2001) がある。

断層構造の位置推定に浅層精密重力探査を利用した先行研究として、塚本ほか (2010) がある。その研究では、花崗岩帯のリニアメントに沿ったマサ化深度が最深になる場所を、浅層精密重力探査、および扇射法地震波探査の二つの物理探査法により特定し、限界揚水量が毎分 70 L の灌漑井を掘り当てることに成功している。浅層精密重力探査のスペックは、測線長が約 40 m、測点間隔 1 m で、一方、扇射法地震波探査は、測線長が約 50 m、測点間隔 50 cm である。両者は、同じ場所で探査が行われ、両方の手法でほぼ同じ形状のマサ化深度プロファイルが得られている。すなわち、重力探査では、約 90 μGal の負の重力異常として、また、扇射法では、約 20 msec の初動到達時間の遅れとしてマサ化深度の変化に起因する異常がとらえられた。

扇射法地震波探査をはじめとする弾性波を使った探査 (屈折法探査、反射法探査) は、探査において、発震装置、受振器アレイの設置が必要で、さらにシグナルの受信および記録の為に弾性波探査装置が必要になるなど、重力探査に比べ探査が大掛かりになるという欠点がある。一方の重力探査では、必要な高額装置は、重力計のみであり、重力測定の実験性を確保するに十分な架台と十分な精度の測地手段さえあれば、より手軽に調査を行えるという利点がある。

その他の物理探査手法として、電気探査、電磁探査、放射能探査などが挙げられる (例えば、物理探査学会, 1998; 物理探査学会標準化検討委員会, 2008) が、塚本ほか (2010) で指摘されるとおり、探査の空間分解能が m オーダー程度に高い探査を実施するためには、適した探査手法の選定、探査条件の設定および探査結果解釈の不確実性の低減など、扱うべき問題が多く、現在においてもそれらの問題が系統的に解決されているとは言いがたい状況である。

1.3 調査地域について

浅層精密重力探査法の活断層トレンチ調査ポイント選定への適用可能性を検討するため、山口県の岩国断層帯の二つの地点において重力探査を実施した。第 1 図に、重力探査サイト周辺の地質およびブーゲー異常図を示す。後藤・中田 (2008) によると、岩国

断層帯は、岩国断層、大竹断層、^{はたきとうげ} 廿木峠断層、^{おばた} 小畑断層からなる北東部と熊毛断層、大河内断層、^{さかえだに} 栄谷断層、河内断層からなる南西部に分けられ、そのほとんどが、北東-南西から東北東-西南西走向の右横ずれ断層である。南西部は、北東部に比べ断層変位地形が不明瞭で、大河内断層は推定活断層とされる。また、地震調査研究推進本部地震調査委員会 (2004) によると、岩国断層帯は、地形的特徴などから、「右横ずれ断層 (北西側隆起の逆断層成分を伴う)」と報告されている。

来巻サイトは大河内断層の南西部に位置し、下長野サイトは熊毛断層の北東部に位置する (第 1 図)。両サイトの地質は、いずれも後期白亜紀の新期領家花崗岩類に属しており、周辺の地質は、より年代の古い花崗岩類、メランジュ付加コンプレックス、変成岩類等からなる。ブーゲー異常図は、下長野サイトの東南東約 10 km 地点を中心とする大きな負の異常を示し、そのおおよその形は、新期領家花崗岩類の分布と一致する。岩石物性値データベース (PROCK; 須田ほか, 1991) によると、この地域の花崗岩密度は 2.50~2.65 g/cm^3 であるのに対し、周辺の変成岩密度は 2.55~3.00 g/cm^3 と系統的に重く、ブーゲー異常図の特徴と調和的である。

2. 探査法

2.1 浅層精密重力探査概要

来巻サイトおよび下長野サイトにおいて、一つずつ重力探査測線を設けた (第 2 図、および第 3 図)。来巻サイトの測線は、測線長 38 m で、測定間隔は 1 m であり、測線の北方約 10 m および約 40 m には、先行して行われた来巻 1 トレンチおよび来巻 3 トレンチの埋め戻し跡がある (産業技術総合研究所, 2010)。また、下長野サイトの測線は、測線長 64 m で、測定間隔は 2 m であり、本重力調査後、重力測線上の 2 点において掘削深度 5 m のオールコアボーリング調査が実施され、重力測線上の 6 点においては探査深度が 2~3 m の簡易貫入試験が行われた (宮下・宮脇ほか, 本報告書; 宮下・木村ほか, 本報告書)。来巻測線および下長野測線ともに、重力探査と同時に地下レーダー探査も行われている (宮下・木村ほか, 本報告書)。

2.2 重力測定

重力測定は、ラコスト重力計 (D205) を用いて行った。調査地は、両サイト共にやや植生のある軟弱地盤であった。このような調査地においては、通常用いる重力計用の三足円盤等の架台では十分に地盤に固定されないため、 μGal オーダーの重力変化を安定的に測定することは非常に困難である。そのため今回は、「軟弱地盤及び不整地用簡易安定台」(特許第 4370423 号) を重力計の架台として用いて、重力計

の地盤設置安定性を確保した。山口県岩国市周東町に仮重力基点を設け、その絶対重力値は、調査地域近辺にある水準点（点コード：10000001697, 10000001706, 10000001710）における国土地理院（<http://www.gsi.go.jp/index.html>）の報告値に準拠するように設定した。重力測定は、仮重力基点を使った通常の閉塞測定（環測定）を行い、重力計のドリフトを補正した。重力測定のおおまかな測定精度を見積もるために、1つの探査測線に対して5点以上の測定ポイントにおいて繰り返し測定を行った。重力測定値から重力計バネのドリフト成分の除去、潮汐補正、機械高補正を施し、観測点における重力値を計算する手順は、地質調査所重力補正標準手順SPECG1988（地質調査所重力探査グループ、1989）に従っている。

塚本ほか（2010）では、浅層精密重力探査の実施場所が収穫後の水田でほぼ水平だったため、観測点の重力値をそのまま用いて議論をすすめることができたが、当探査の特に来巻サイトにおいては約1mの高度差があるため（第2図）、適当な高度補正を施し重力異常を見出す必要があった。通常であれば、フリーエア補正、大気補正、地形補正、ブーゲー補正を施し、ブーゲー異常値（完全ブーゲー異常値）として地下の密度異常を見出せば良い。しかし、SPECG1988は、当探査のような非常に狭い調査範囲でのマイクロガルレベルの議論を想定した解析手順ではないため、注意が必要となった。例えば、測定近傍の地形補正は、通常の場合、村田ほか（1996）の方法で国土地理院の数値地図50mメッシュ（標高）を用いて計算されるが、この手法で来巻サイトについて計算すると、隣り合う観測点の極近傍地形補正值に30 μ Galを超える不連続が見出される等、当探査の目的からすると影響が大きすぎると判断された。そこで、今回の重力解析では、地形補正を施さないブーゲー異常値（単純ブーゲー異常値）を計算し後の議論に用いた。ただし、周辺地形（観測点から20m以内）の影響のみは、解析結果の解釈段階で考察することにした。

2.3 GPS 測量

GPS測量は、Trimble R8受信機3台を用いて行った。3台それぞれの役割は明確で、臨時基準局用、後処理キネマティック移動局用、高速静止測量用として使用した。3台ともにデータ取得間隔は1秒である。来巻測線では、植生と地形により上空視界が十分確保できなかったため、GPS衛星からの電波の受信状況が悪く、後処理キネマティックのみでの測量では、十分な精度が確保されないと判断された。そのため、後処理キネマティック測量を行った観測点は、適当な間隔において高速静止測量も行った。高速静止測量の観測時間は10分以上で、GPS衛星の受信状況を見て、適宜調節した。

解析は、後処理キネマティック測量、高速静止測量とともに、Trimble Total Controlを使用した。解析手順は、以下のとおりである。まず周囲の6つの電子基準点（1038周東、0410錦、0414柳井、0769和木、1040上関、1147徳山A）相互と臨時基準局とで基線解析を行い、網平均を用いて基準局網を構築した。次に、基準局網に高速静止測量の観測データを導入し、基線解析および網平均を行い、高速静止測量点の座標を決定した。最後に、キネマティック測量のデータを導入し、臨時基準局との間で、後処理キネマティックの解析を行った。GPS測量で求められる楕円体高は、国土地理院作成の日本のジオイド2000（GSIGEO2000 Ver.5）で計算されたジオイド高を差し引くことで、標高に変換した。

来巻サイトにおいては、高速静止測量とキネマティック測量の両方の測量を行った観測点のうち、観測点番号1029を除く全ての点において、北距、東距、楕円体高とともに、両者の測量結果に系統的な差が見出された（第4図）。その差の原因は、前述のとおりGPS電波の受信状態が悪いデータであったため、キネマティック測量の解析において整数値バイアスの推定に誤差が生じたものと解釈された。第4図に示されるとおり、これらの誤差は、観測点番号、即ち測線に沿った距離と良好な直線関係にある。そこで、キネマティック測量において系統的な差を持つデータを、この直線関係を用いて高速静止測量の結果と矛盾しないように補正した。GPS電波の受信状況が良好だった下長野サイトでは、このような系統的な差は見出されなかった。GPS測量の誤差のうち、重力データ解析で最も重要になるのは、楕円体高（すなわち標高）の決定精度である。観測時間が10分程度の高速静止測量においては、その高さの精度はおおよそ10cm程度と考えられるが、フリーエア係数を用いて重力値に換算すると、約30 μ Galの誤差となる。

3. 結果と考察

3.1 重力プロファイル

第5図に来巻サイトでの重力探査結果を示す。第5図(a)の縦軸は、観測点重力値から正規重力値を差し引いたもので、観測点番号1028~1035にかけて、重力値の急変域があるが、第2図のカラープロットから読み取れるように、これらの急変域は、比高差約1mの段差地形による標高効果の影響である。赤色四角形のプロットは、同一観測点での再測定を示しており、来巻サイトにおいては、数 μ Galの誤差で重力測定の再現性を確保できた。第5図(b)は、フリーエア異常のプロファイル、第5図(c)は、仮定密度2.0g/cm³の単純ブーゲー異常のプロファイルであり、フリーエア補正およびブーゲー補正により標高効果が取り去られる過程が読み取れる。第5図(a)~(c)

のそれぞれのプロファイルが示すパターンが大きく異なる事から、標高差がある調査地での標高効果の除去は、浅層精密重力探査において非常に重要な補正である事が分かる。第5図(d)は、仮定密度 2.5 g/cm^3 の単純ブーゲー異常のプロファイルであり第5図(c)と比較する事により、仮定密度の効果が読み取れる。仮定密度 0.5 g/cm^3 の差は、プロファイルのパターンにはほとんど影響を与えず、主に左側と右側の重力平坦部の重力差、即ち縦軸の大きさに影響する。仮定密度 2.0 g/cm^3 の時、約 $80 \mu\text{Gal}$ の差が、仮定密度 2.5 g/cm^3 の時は、約 $100 \mu\text{Gal}$ の差へと変化する。花崗岩地域においては、通常仮定密度は、 $2.6 \sim 2.7 \text{ g/cm}^3$ の仮定密度を用いて、ブーゲー異常図を作成することが多いが(例えば、原山ほか、2000)、本研究の場合は、標高差約 1 m の地表面付近を構成する地質は、花崗岩そのものでなく、その上部を覆う密度の軽い地質である。このことから、仮定密度 2.0 g/cm^3 のプロファイル(第5図(c))を精密重力探査で得られた重力異常プロファイルとして採用し、以後の議論に用いることとする。第6図が、下長野サイトの結果であるが、標高差のほとんどない平坦な場所での探査であったため、標高効果の影響が小さく、フリーエア補正および単純ブーゲー補正を施しても、第6図(a)~(d)のパターンは、ほとんど変化しなかった。第6図(a)の赤色四角形のプロットは、再測定データを示すが、最大で $70 \mu\text{Gal}$ 程度の差(観測点番号 2000 番において)が見出された。再測定において数 $10 \mu\text{Gal}$ を超える重力差が観測される事は、重力探査においては珍しくなく、テアと呼ばれる重力計に起因する測定の跳びと考えられる。2 m の観測点間隔で、隣りあう観測点に比べ1点のみで数 $10 \mu\text{Gal}$ を超える重力差がある時、それを密度モデルで説明するためには、深度 1 m 以浅に密度差 1.0 g/cm^3 を超える密度異常を想定する必要がある、それは現実的にありそうなモデルではないため、テアを持つデータか否かの判断に使える。特に今回の解析では、具体的にテアを持つと思われるデータを個別に検討して除去する事をしないが、隣り合う重力値との連続性を念頭に入れながら、以降の議論を行う事とする。

3.2 断層に起因する重力異常の認定

浅層精密重力探査結果から、断層運動に起因する重力異常を見出す為には、より深部または、遠方の重力異常に起因する長波長成分(トレンド)を差し引きつつ、浅層の密度異常に起因する短波長の異常を抽出する作業が必要になる(野崎, 1997)。今回は、トレンドの傾向を見出す為、山口地域重力図(森尻ほか, 2006)および広島地域重力図(佐藤ほか, 2007)の二つの重力基本図を利用した(第1図のコンターライン)。

重力基本図で使用される仮定密度 2.3 g/cm^3 を用い

て今回のデータのブーゲー異常値(地形補正を含む完全ブーゲー異常値)を計算すると、来巻サイトで $-1.3 \sim -1.2 \text{ mGal}$ 程度、下長野サイトで $-21.7 \sim -21.5 \text{ mGal}$ 程度となる。来巻サイトについては、重力基本図の重力コンターと調和的な値であり、さらに 2 km 以内のサイト周辺での重力基本図で使用した観測点が4点ほどあり、重力基本図のコンターを今回の重力データのトレンドとして用いて差支えが無いと判断された。第2図に示される通り、来巻サイトの測線は、西北西-東南東方向に伸びており、重力基本図でみる来巻サイト周辺のコンター(第1図)とほぼ並行することから、重力異常のトレンドは、ほとんど無いものとして扱った。一方の下長野サイトでは、重力基本図の重力コンターよりもやや大きな重力異常値を示し、さらに重力基本図で使用した観測点は、下長野サイト 2 km 以内では、サイトの北西方向にのみ偏って分布していた。この事から、下長野サイト周辺の重力トレンドは、重力基本図の重力コンターのみでは推定できないと判断された。そこで重力 CD-ROM の公開データ(産業技術総合研究所地質調査総合センター, 2004; 金属工業事業団, 2004)および今回のデータを用いて新たにサイト周辺の重力異常のトレンドを検討したところ、下長野サイトにおいても測線に沿った重力トレンドの大きさは小さいと判断された。

2次元断層構造による重力異常のモデル計算(狐崎, 2001)によると、水平な地表面から断層面がなす角(断層傾斜角)が $30^\circ \sim 150^\circ$ の場合、水平方向の重力変化域の長さは、密度異常の深さ Δh の2倍程度になる。 $45^\circ \sim 135^\circ$ の幅広い断層傾斜角に対して、2次元断層構造と対応する重力プロファイルを示したのが第7図である。2次元断層構造としての明らかな違いが、重力プロファイルをあまり変化させていない事を示しているため、今回は、断層傾斜角が 90° の断層構造を使って重力パターンの説明を試みる

第8図(a)に、第5図(c)と同様、来巻サイトにおける単純ブーゲー異常値(仮定密度 2.0 g/cm^3)のプロファイルを示す。前述の通り、来巻サイトの重力測線沿いには、トレンドはほとんど無いと推定されるため、この重力異常のプロファイルは、比較的浅い地下の密度構造を反映するものとみなしてよい。観測点番号 1019~1027 の約 8 m で約 $80 \mu\text{Gal}$ の重力急変域が見出された。観測点番号が若い方が西北西側であり、西北西側に高密度構造が推定される事になる。この事は、地震調査研究推進本部地震調査委員会(2004)による北西側隆起の報告と調和的である。

2次元断層構造(第8図(b))による重力異常の振幅 Δg_m は、密度異常域の密度差を $\Delta \rho$ とし、万有引力定数を G とすると、 $\Delta g_m = 2\pi G \Delta \rho \Delta h$ となる。また、表層に厚み Δh_0 の密度が均質な被覆層がある場合は、 $\Delta g_m = 2\pi G \Delta \rho (\Delta h - \Delta h_0)$ となる。第8図(a)に見られ

る約 8 m にわたる重力急変域を説明するためには、 $\Delta h = 4 \text{ m}$ 程度と推定される。80 μGal の重力異常を説明する地下密度構造の密度差は、被覆層が無いと仮定すると、 $\Delta\rho = 0.6 \text{ g/cm}^3$ 程度 (第 8 図モデル 1) で、被覆層の厚みが $\Delta h_0 = 2 \text{ m}$ の場合、 $\Delta\rho = 1.2 \text{ g/cm}^3$ 程度となる (モデル 2)。モデル 1 に比べモデル 2 の方が密度差を持つ構造が相対的に深部に分布するため、重力プロファイルは、モデル 2 がやや長波長成分を持つ。それらの細部を詰めるためには他の地質学的情報や物理探査の情報が必要となる。産業技術総合研究所 (2010) によると、来巻 1 トレンチの南端部の深さ約 1 m に小断層が確認されている。第 2 図で谷の走る方向を考慮すると重力測線の観測点番号 1018 付近が小断層に対応する位置となり、第 8 図 (a) の重力急変域の西端と良い一致を示している。しかし、この小断層は、上盤と下盤が同一岩種のため、この断層のみで重力異常プロファイルの説明する事は困難である。よって、より東南東側 (観測点番号の大きい側) に規模の大きな断層がある可能性が高く、見つかった小断層は、その副次的な断層である可能性もある。第 7 図に見られるような断層傾斜角の違いを考慮すると、重力急変域である観測点番号 1019~1027 をカバーする範囲でのトレンチ掘削が有効であると考えられる。

第 9 図 (a) に、第 6 図 (c) と同様、下長野サイトにおける単純ブーゲー異常値 (仮定密度 2.0 g/cm^3) のプロファイルを示す。観測点番号 2052~2064 に見られる重力値の低下は、第 3 図に見られるとおり、重力測線のすぐ南側にある地形の高まり (傾斜角約 40°) に起因するものと推察される。傾斜角 40° の地形に対する観測点から半径 20 m 以内の周辺地形補正值 (広島ほか, 1978) は、傾斜開始地点から 3 m で 40 μGal 、5 m 地点で 23 μGal 、10 m 地点で 4 μGal 、15 m 地点で 0 μGal である。これらの数字は半径 20 m 以遠の地形を考慮に入れると実際に施すべき地形補正值の最小値であることから、上記の推察と矛盾しない。断層構造に由来すると思われる重力プロファイルの特徴としては、観測点番号 2040 付近から 2020 付近にかけての重力異常値の落ち込みである。この結果は、地震調査研究推進本部地震調査委員会 (2004) による北西側隆起の報告と一見矛盾している。

宮下・木村ほか (本報告書) によると、下長野サイトの重力測線沿いにおいて、花崗岩の上端深度は、観測点番号 2010 (ng-10) で 2.65 m に対して、観測点番号 2040 (ng-40) では 3.90 m と報告されており (第 9 図 (b))、やはり重力プロファイルの特徴とは逆センスである。一方、表層地質に関しては、観測点番号 2010 (ng-10) の谷底堆積物は、その南側 (観測点番号 2040 (ng-40)) よりも古いと推定されている。また、観測点番号 2010 (ng-10) の簡易貫入試験の N 値は、盛土と谷底堆積物で同程度であり、谷底堆積物の N 値は、その南側のデータより小さい。(宮下・木村ほ

か、本報告書)。これらのボーリング調査および簡易貫入試験の結果から、主断層位置を推定する事は困難である。

次に、上記のボーリング調査および簡易貫入試験のデータを統合して、下長野サイトの密度構造モデルを構築し (第 9 図 (c))、重力異常値のモデル計算を行った (第 9 図 (a))。モデルの単純化のために、簡易貫入試験の結果から、盛土と黄色で示される北側の谷底堆積物の密度を同じものとし、緑色で示される南側の谷底堆積物を盛土と花崗岩類の中間的な密度とした。観測点番号 2014 と 2028 の間には、矩形の低密度構造を設定した。これは、断層破碎帯のうち表層付近の低密度な部分もしくは断層に沿ってマサ化深度が深くなっている部分を想定している。その低密度構造の密度は、モデルの単純化のために南側の谷底堆積物と同じものとした。密度の実際の値は、フォワード計算で数回のトライアルアンドエラーを繰り返して決定した。第 9 図 (a) に示される通り、比較的単純な密度モデルで、観測値のプロファイルの説明する事が可能であった。つまり、前述の北西側隆起の断層構造と重力プロファイルの矛盾点は、北西側の谷底堆積物の密度が低い事を考慮に入れることで解消される事が判明した。断層に起因すると考えられる低密度構造の範囲は、ボーリング調査や簡易貫入試験では、得られなかった新たな知見である。また、重力プロファイルから想定される断層に起因する構造の範囲 (14 m) は、十分に現実的な範囲にトレンチ掘削の場所を絞り込んでいる。

広く知られる通り、重力から推定される構造の空間スケールと密度には、トレードオフの関係があり、今回の密度モデル (第 9 図 (c)) は、観測結果を満足する唯一の解ではない。たとえば、観測点番号 2014 と 2028 の間に設定した低密度構造の下限の深さを変化させても、それぞれの層の密度の値を変化させることでモデルの重力プロファイルを観測に合わせることが可能である。しかしながら、今回のモデルより浅く設定すると、盛土の密度が 1.0 g/cm^3 を下回る結果になり、物性的にはありそうもないモデルとなり、逆に深く設定すると、長周期の成分を持つ事になり、観測点番号 2040 よりも南側でフィッティングが悪くなる傾向にある。これらの問題は、ボーリングコアの密度測定によって、密度モデルに制約を与えることができる。即ち、重力探査以外の各種のデータを精査・利用することで、トレンチ調査ポイントをより狭い範囲に絞ることが可能となる。

4. まとめと今後の改善点

来巻サイトおよび下長野サイトにおいて、浅層精密重力探査および密度構造解析を行った。その結果、トレンチ調査の掘削ポイント選定等、活断層位置の推定に有効である可能性が高いことが示された。有

効性を高めるためには、野崎（1997）に指摘されるように重力測線内の重力異常の長波長成分（トレンド）を確定させることが重要である。来巻・下長野、両サイトともほとんどトレンドが無いと予想される地点であったため詳述しなかったが、多くの場合はトレンドに応じて、構造の空間位置や密度差の値も変化すると考えられるため、注意を要する。トレンドを確定することで得られた短波長の重力変化は、活断層の予想水平位置をより狭い範囲に絞ることのみならず、2次元密度モデルの構築を通じて、深さ方向に関する情報を得るために役立つ。本論文では、重力基本図を用いてトレンドの推定を行ったが、周辺1 km程度以内で追加の重力探査を実施することにより、効率的に密度構造モデルの信頼性を高めることができると考えられる。今回は、密度構造モデルを通じて断層構造を議論したが、確度の高いトレンドの情報がある場合には、単に重力急変域のみに注目する事で、簡便に活断層位置を推定する事が可能である。しかし、他の地質学的調査や物理探査結果の情報を取り入れながら定量的に解釈を進めるためには、密度構造モデルの構築が必要となる。さらに、確度の高い活断層位置の推定のためには、並行する複数の測線で浅層精密重力探査を実施する事も一つの方法と考えられる。

当探査では、測地手法としてGPS測量を用いたが、相対的な高さの精度として、約10 cmの誤差は、重力値換算で30 μGal 程度となり、浅層精密重力探査を含むマイクログラビティ探査にはGPS測量ではやや能力不足である。実際に図5(a)と図5(b)を比べると、観測点番号1000~1020にかけて、フリーエア補正を施すことで重力プロファイルの滑らかさが失われている。浅層精密重力探査に適した測量法としては、測定現場に複数の測地基準点を設け、その絶対座標をGPS測量で求め、測地基準点との相対的な観測点位置は、トータルステーションを用いて測地する「ハイブリット測量」が考えられる。当探査では、重力測定担当1名（牧野）、GPS測量担当2名（住田・伊藤）の人員で、両方のサイトそれぞれで約6時間ずつを費やして、探査を完了することができた。両方のサイト共に、重力測定よりGPS測量の方に時間を要したことから、トータルステーションの利用は、測地精度を高めるだけでなく、測地時間の短縮にもつながり、調査の時間効率を高める利点がある。

今回の重力データの解析は、地形補正の方法に十分な精度がなかったため、地形補正を施さずに解析を進めた。現在の地形補正で用いられる50 mメッシュのDEMは、将来的により細かいメッシュのものに置き換わっていき、それを用いることが、 μGal オーダーの重力探査で必要な地形補正の精度を確保する事になると予想される。つなぎの技術として、周辺の地形だけでも、短時間で簡易的に測量し、地形補正に反映するノウハウを構築できれば、浅層精

密重力探査による地下構造推定の確度を高めることにつながると思われる。

浅層精密重力探査を活断層位置の推定に利用する事は、従来の地質学・地形学的手法に取って代わるものではなく、従来の手法で詰め切れない部分を補完する位置づけである事を忘れてはならない。重力探査測線の設定そのものは言うに及ばず、重力異常図を説明するためのモデル構築に有益な密度を始めとする各種物性の情報および地下深部の層序等の情報は、依然として従来の地質学的・地形学的手法に頼らざるをえない現実がある（今回は、宮下および伊藤が担当）。また、それらの情報が解釈のミスリードを減らし、モデルの確度を高め、ひいてはあらゆる効率性を高める。即ち、分野や手法を超えた緊密な情報交換が、目標達成のためには非常に重要である。

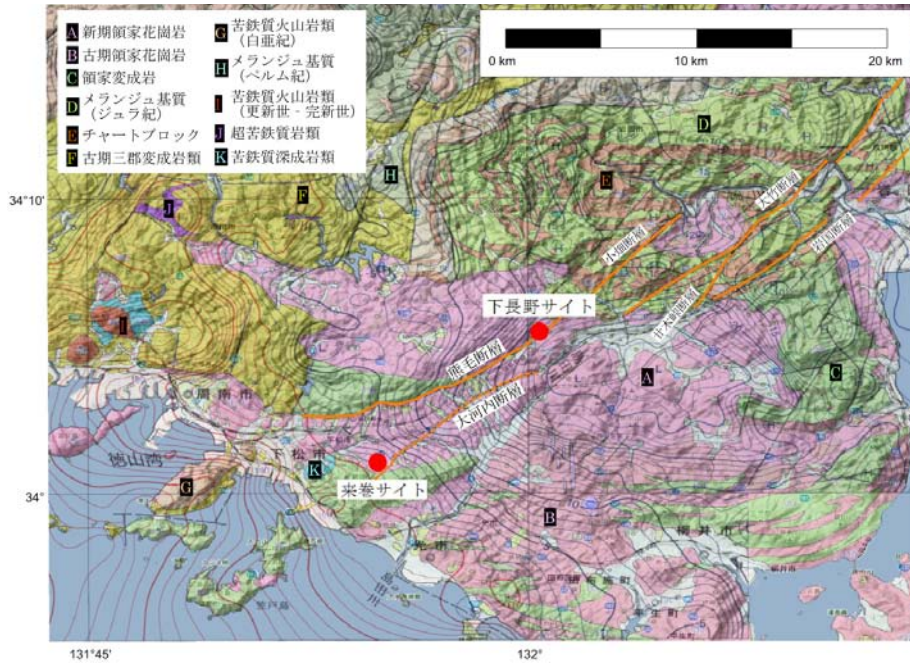
謝辞 本論文をまとめるにあたって、産業技術総合研究所の村田泰章氏、名和一成氏、横倉隆伸氏、中塚正氏、加野直巳氏、木村治夫氏、岡田真介氏に有益なコメントを頂いた。また、現地調査では、産業技術総合研究所の堀川晴央氏、木村治夫氏、株式会社ダイヤコンサルタントの岡崎和彦氏、北尾秀夫氏、宮脇昌弘氏、および土地所有者をはじめとする現地の方々には多くのご協力を頂いた。産業技術総合研究所の渡部芳夫氏には、地形地質学と地球物理探査の融合研究の道筋を開いて頂いた。産業技術総合研究所の高橋美江氏には、GPS解析のオペレーションをして頂いた。査読者である産業技術総合研究所の桑原保人氏からは多くの有益なコメントを頂きました。ここに記して、感謝いたします。

文 献

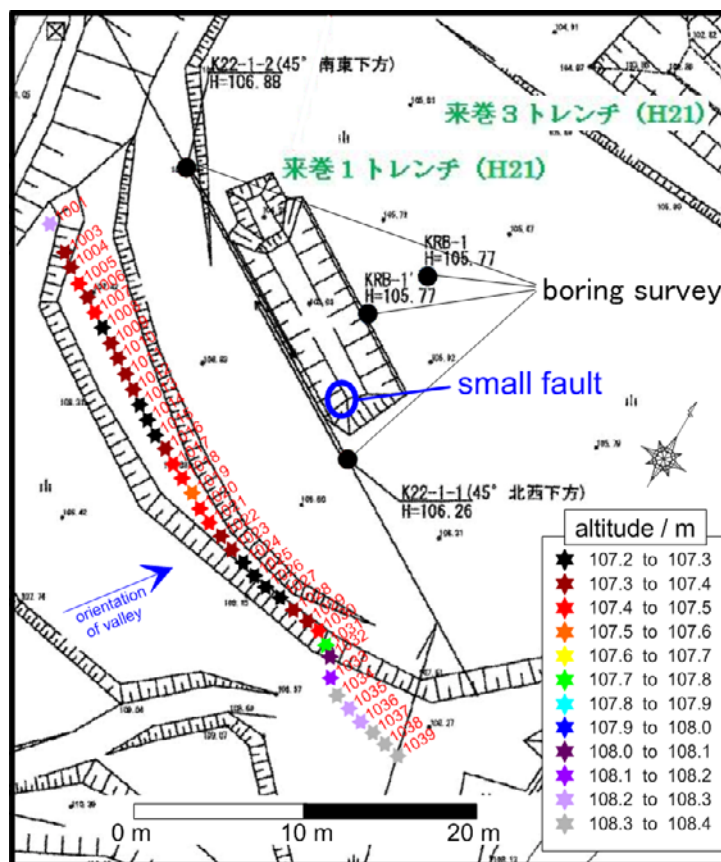
- 物理探査学会（1998）物理探査ハンドブック．物理探査学会，1336p.
- 物理探査学会標準化検討委員会（2008）新版 物理探査適用の手引きー土木物理探査マニュアル．物理探査学会，539p.
- 地質調査所重力探査グループ（1989）地質調査所重力補正標準手順SPECG1988について．地質調査所月報，第40巻，第11号，p.601-611.
- 後藤秀昭・中田 高（2008）1:25,000 都市圏活断層図 岩国断層帯とその周辺「岩国」「下松」解説書，国土地理院技術資料D・1-No.520.
- 原山 智・高橋 浩・中野 俊・荻谷愛彦・駒澤正夫（2000）立山地域の地質．地域地質研究報告（5万分の1地質図幅），地質調査所，218 p.
- 広島俊男・須田芳朗・丹治耕吉（1978）グラフィックディスプレイ装置を用いた重力周辺地形補正の計算について．物理探査，第31巻，第5号，p.313-323.

- 岩野祥子・福田洋一・石山達也 (2001) 1次元重力探査による断層周辺の密度構造推定—檜原断層および麓村断層について—。地学雑誌, 第110巻, 第1号, 44-57.
- 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/index.html (http://www.jishin.go.jp/main/chousa/04feb_iwakuni/index.htm)
- 金属工業事業団 (2004) 金属鉱業事業団重力測定値データファイル, 日本重力CD-ROM第2版, 数値地質図 P-2, 産業技術総合研究所地質調査総合センター。
- 狐崎長琅 (2001) 応用地球物理学の基礎。古今書院, 297p.
- 松多信尚・今泉俊文・Thomas Pratt・Robert Williams・佐藤比呂志・蔵下英司・加藤直子・荻野スミ子・森屋 洋・阿部真郎 (2001) 極浅層反射法地震探査による千屋断層 (一丈木) の地下断面。活断層研究, 第20巻, 40-45.
- 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.
- 宮下由香里・木村治夫・堀川晴央・伊藤順一・牧野雅彦・住田達哉・北尾秀夫・岡崎和彦 (2011) 山口県岩国断層帯における地中レーダー探査—岩国市周東町下長野における調査事例—。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.249-258.
- 森尻理恵・佐藤秀幸・名和一成・広島俊男・村田泰章・牧野雅彦・駒澤正夫・上嶋正人・石原丈実・岸本清行・大熊茂雄・小室裕明・大野一郎・志知龍一 (2006) 山口地域重力図 (ブーゲー異常)。重力図, no.24, 産業技術総合研究所 地質調査総合センター
- 村田泰章・牧野雅彦・遠藤秀典・渡辺和明・渡辺史郎・卜部厚志 (1996) 神戸市・芦屋市・西宮市における精密重力探査 (1) —重力異常と伏在断層—。地質調査所月報, 第47巻, 第2/3号, p.109-132.
- 中埜貴元・酒井英男 (2007) 阿寺断層系中北部における極浅層構造のレーダ探査による研究。活断層研究, 第27号, 191-200.
- 野崎京三 (1997) マイクログラビティ探査の現状とその利用。応用地質技術年報, No.19, 35-60.
- 野崎京三・三石 晋・佐野正佳 (2005) 防波堤空洞調査法としてのシンクロナイズド・マイクログラビティ探査の適用—特に観測孔データによるキャリブレーション結果—。応用地質技術年報, No.25, 21-33.
- 産業技術総合研究所 (2010) 平成21年度変動地形に基づく伏在断層評価手法の高度化報告書, 52-108.
- 産業技術総合研究所地質調査総合センター (2004) 日本重力CD-ROM第2版, 数値地質図P-2, 産業技術総合研究所地質調査総合センター。
- 産業技術総合研究所地質調査総合センター (編) (2010) 20万分の1日本シームレス地質図データベース (2010年11月11日版)。産業技術総合研究所研究情報公開データベースDB084, 産業技術総合研究所地質調査総合センター。
- 佐藤秀幸・広島俊男・森尻理恵・村田泰章・名和一成・牧野雅彦・駒澤正夫・上嶋正人・石原丈実・岸本清行・大熊茂雄・西村敬一・小室裕明・大野一郎・志知龍一 (2007) 広島地域重力図 (ブーゲー異常)。重力図, no.25, 産業技術総合研究所地質調査総合センター。
- 下山正一・磯 望・松田時彦・市原季彦・千田 昇・岡村 眞・茂木 透・鈴木貞臣・落合英俊・長沢新一・今西 肇・川畑史子・矢ヶ部秀美・樗木政昭・松浦一樹 (2005) 警固断層, 薬院地区 (福岡市) でのトレンチ調査報告。活断層研究, 第25巻, 117-128.
- 須田芳朗・村田泰章・菊地恒夫・花岡尚之 (1991) 岩石物性値データベース (PROCK), 地質調査所研究資料集, no.155, 231p.
- 塚本 齊・牧野雅彦・住田達哉・渡邊史郎 (2010) 物理探査・検層に基づく花崗岩体中の「水みち」の調査法。日本水文科学会誌, 第39巻, 第4号, 103-116.

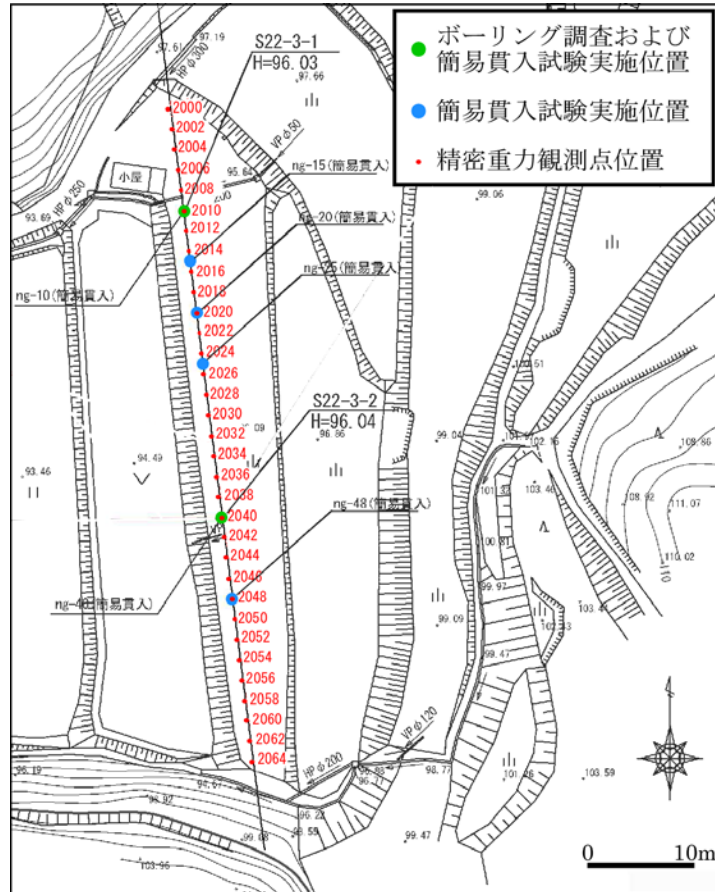
(受付: 2011年11月8日, 受理: 2011年11月25日)



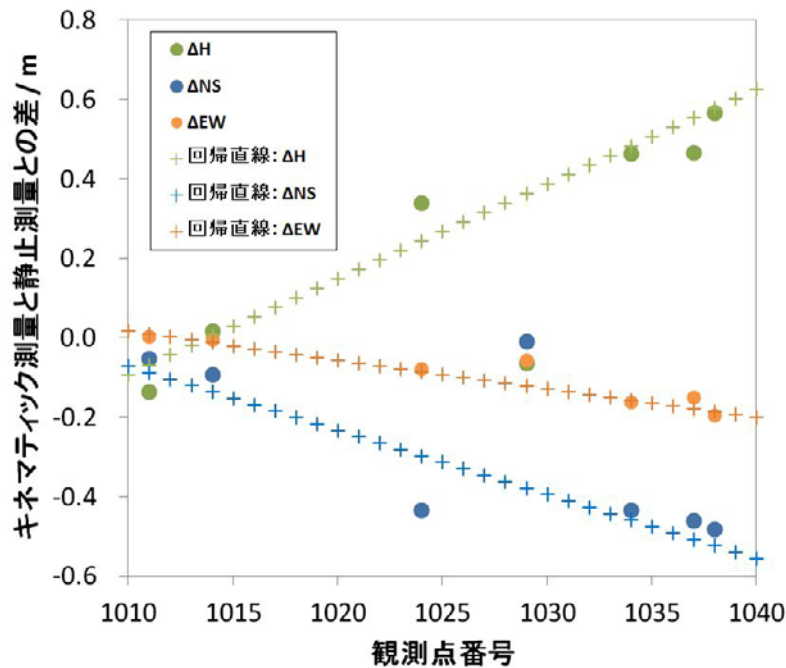
第1図. 調査地域の周辺地質とブーゲー異常図 (仮定密度: 2.3 g/cm^3). 重力コンターのコンター間隔は, 1 mGal . 産業技術総合研究所地質調査総合センター (編) (2010), 森尻ほか (2006), 佐藤ほか (2007) を利用して作成.
 Fig. 1. Geological map and Bouguer anomaly map around the surveyed sites. Interval between gravity contours is 1 mGal . Geological map : Seamless Digital Geological Map of Japan by Geological Survey of Japan. Bouguer anomaly map: Morijiri *et al.* (2006) and Sato *et al.* (2007).



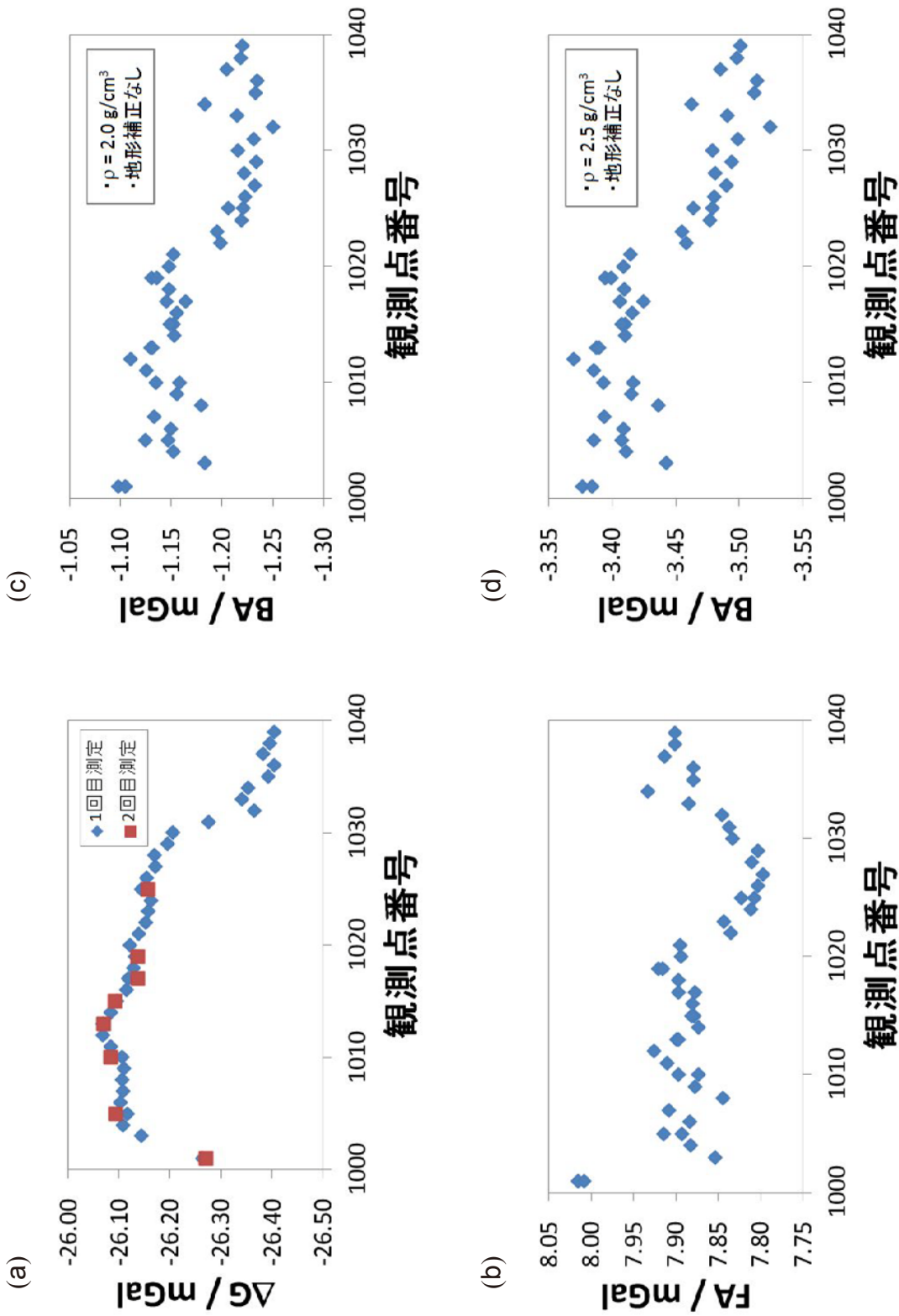
第2図. 来巻サイトの調査地点図. 段彩色プロットは, 重力探査測線の位置および標高. 産業技術総合研究所 (2010) に加筆.
 Fig. 2. Location map of gravity survey points and two trenches at Kurumaki site. Gradationally color plots show gravity survey points and its altitudes. After AIST (2010).



第3図. 下長野サイトの調査地点図. 赤色の2000番台で記されるポイント列が重力探査測線. 宮下・木村(本報告書)に加筆.
 Fig. 3. Location map of gravity survey points, six boreholes and a trench at Shimonagano site. Red points labeled in the 2000s denote gravity survey points. The base map is from Miyashita *et al.* (this volume).

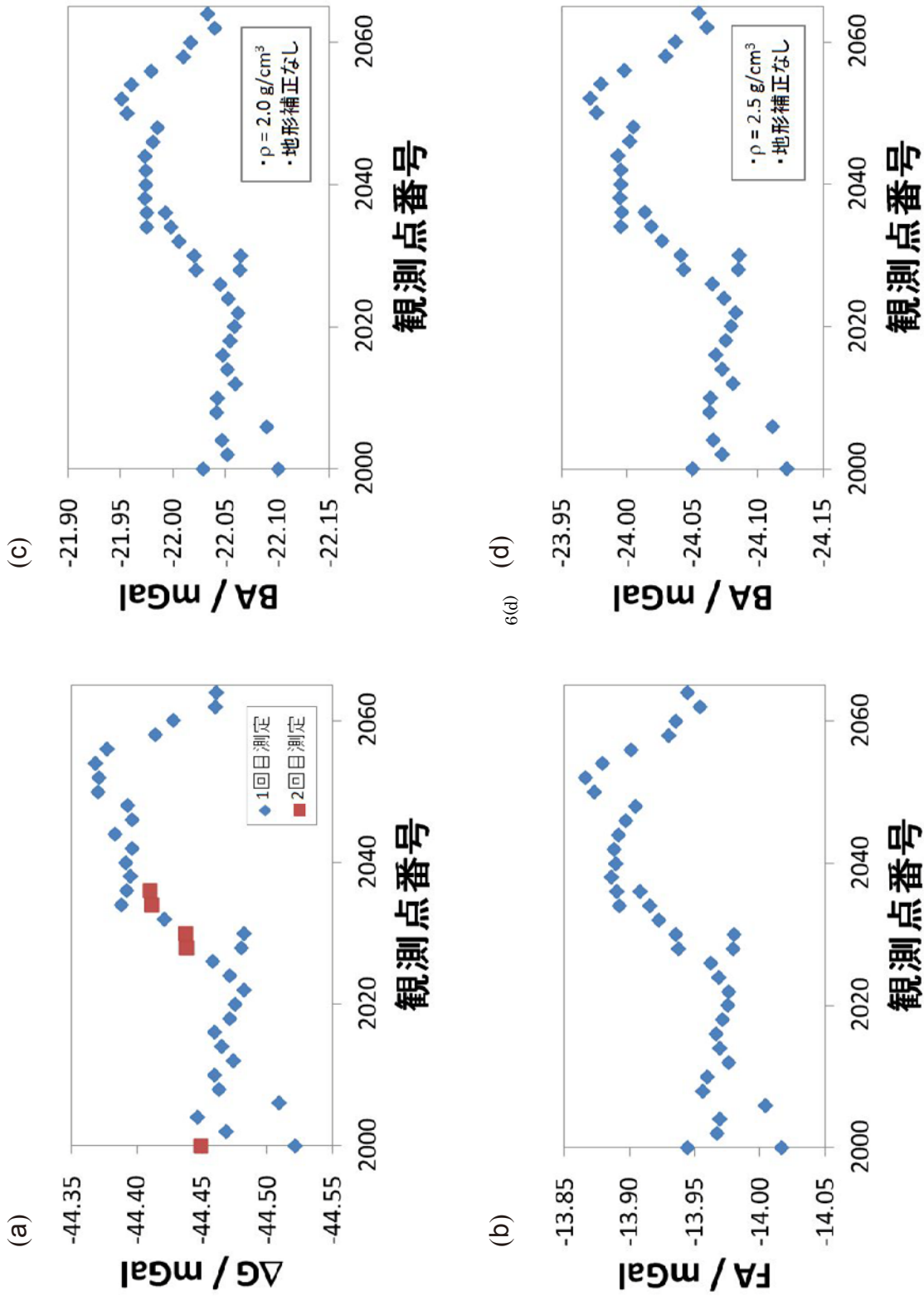


第4図. 来巻サイトにおけるGPSのキネマティック測量と高速静止測量の差. 観測点番号の下二桁は、測線に沿った距離 (m) に相当する.
 Fig. 4. Differences between kinematic method and fast-static method in the GPS survey at the Kurumaki site. Last two digits of the observation point number in the horizontal axis correspond to the distance (m) along the survey line.

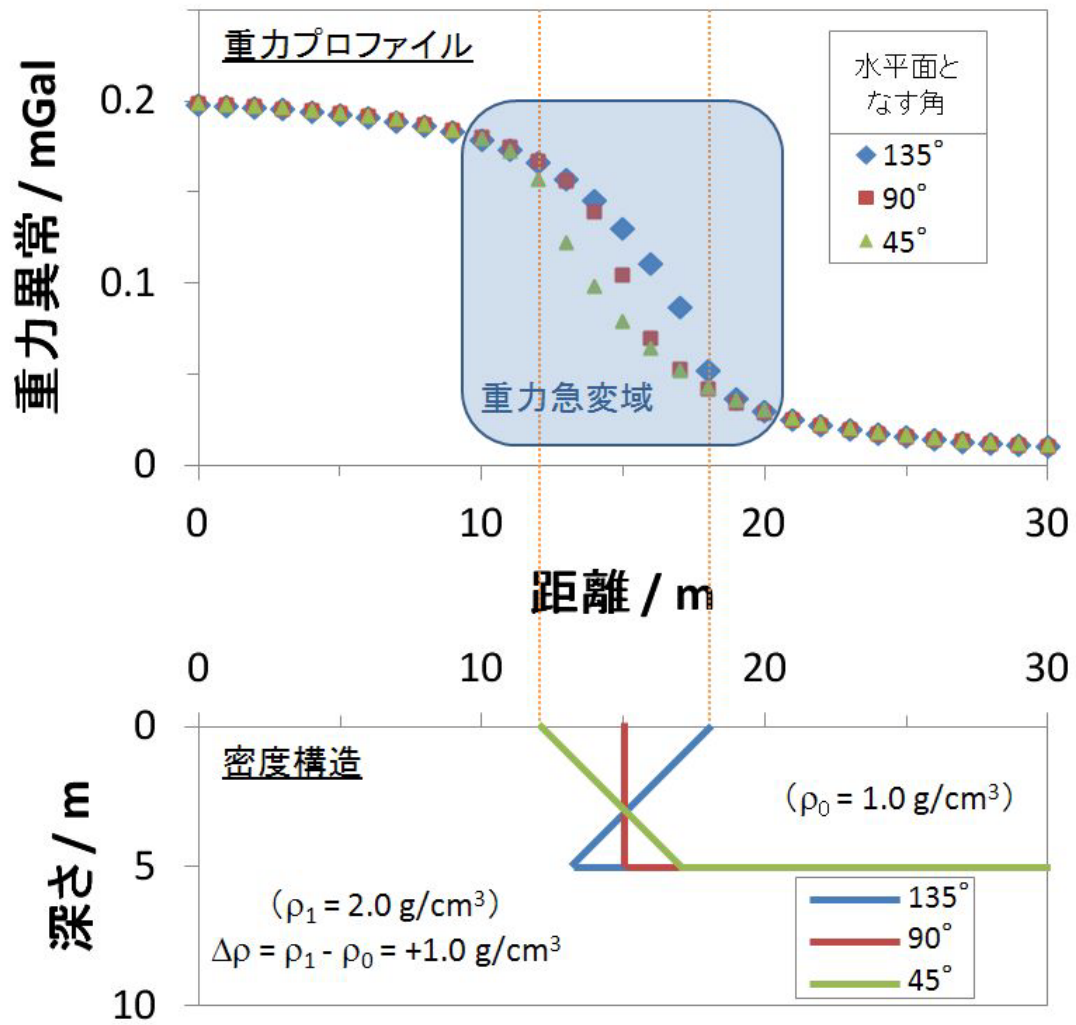


第5図. 来巻サイトにおける浅層精密重力探査結果. 観測点番号の下二桁は, 測線に沿った距離 (m) に相当する. (a) 重力観測値 - 正規重力値. (b) フリーエア異常値. (c) 単純ブーゲー異常値 (仮定密度 2.0 g/cm^3). (d) 単純ブーゲー異常値 (仮定密度 2.5 g/cm^3).

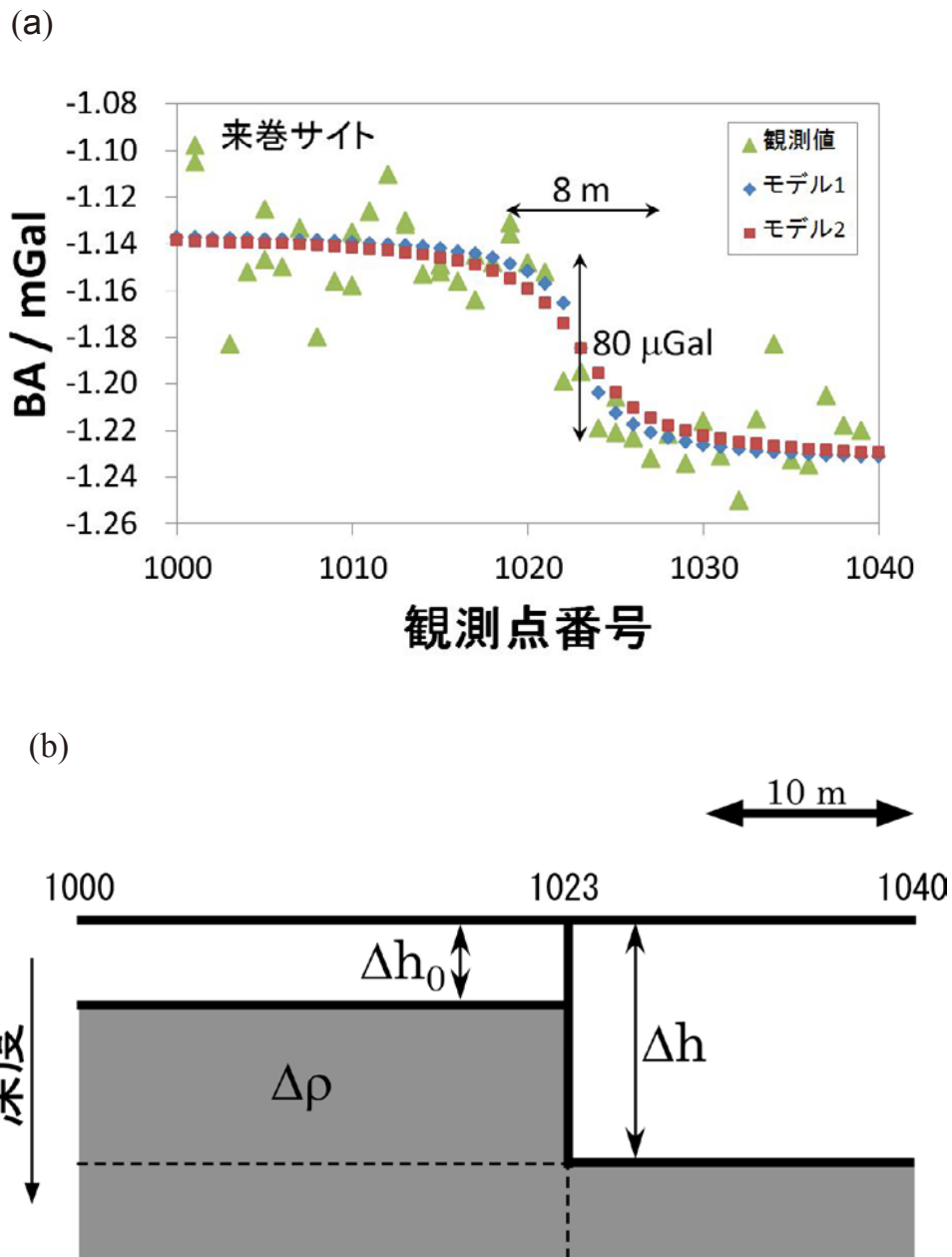
Fig. 5. Results of the shallow microgravity survey at the Kurumaki site. Last two digits of the observation point number in the horizontal axis correspond to the distance (m) along the survey line. (a) Difference between observed and normal gravities. (b) Free-air anomaly. (c) Bouguer anomaly using an assumed density: 2.0 g/cm^3 without terrane correction. (d) Same as in the fig. (c) except an assumed density of 2.5 g/cm^3 .



第6図. 下長野サイトにおける浅層精密重力探査結果. 観測点番号の下二桁は, 測線に沿った距離 (m) に相当する. (a) 重力観測値—正規重力値. (b) フリーエア異常値. (c) 単純ブーゲー異常値 (仮定密度 2.0 g/cm^3). (d) 単純ブーゲー異常値 (仮定密度 2.5 g/cm^3). Last two digits of the observation point number in the horizontal axis correspond to the distance (m) along the survey line. (a) Difference between observed and normal gravities. (b) Free-air anomaly. (c) Bouguer anomaly using an assumed density: 2.0 g/cm^3 without terrane correction. (d) Same as in the fig. (c) except an assumed density of 2.5 g/cm^3 .

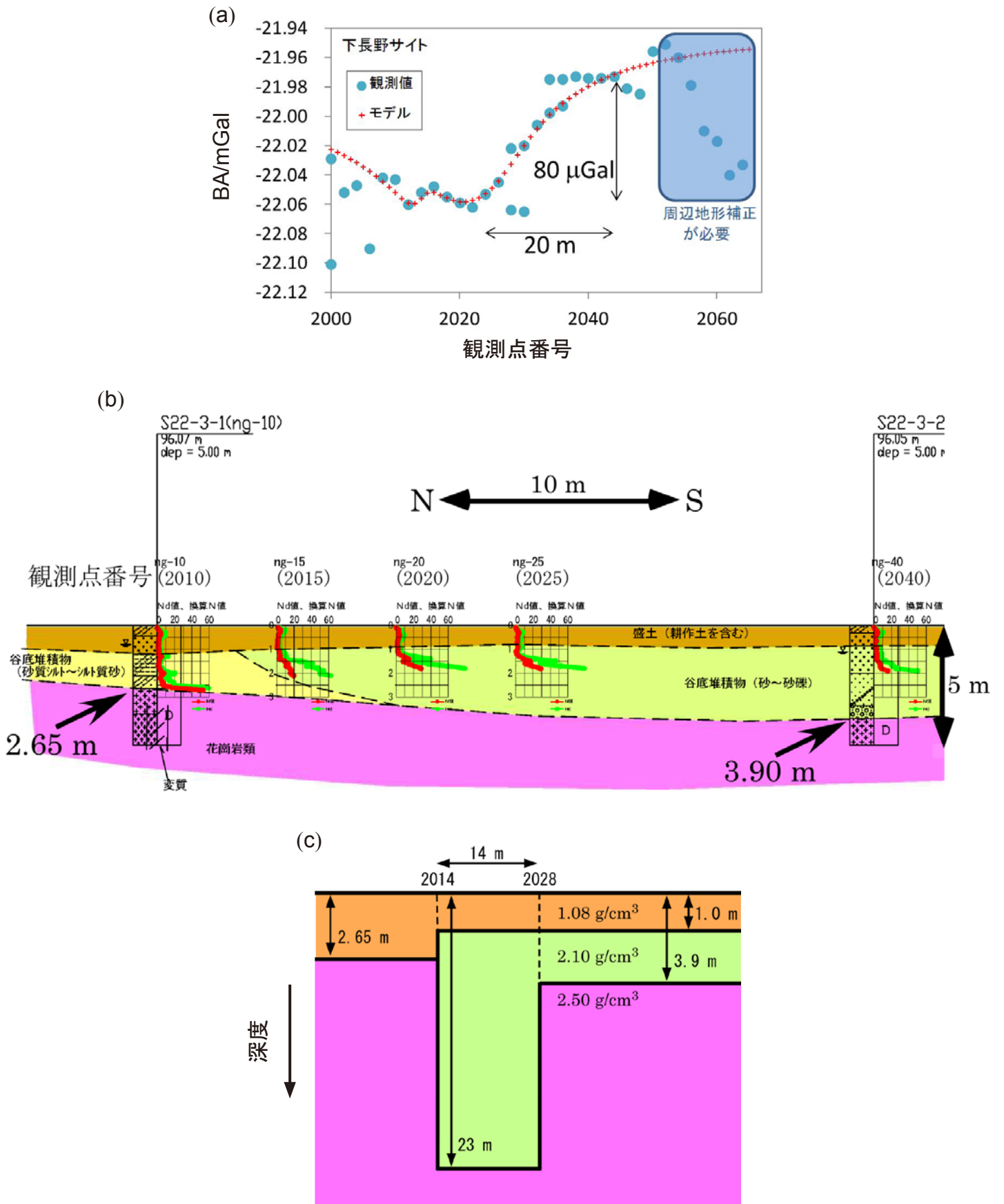


第7図. 2次元断層構造モデルによって計算された重力異常プロファイル.
 Fig. 7. Calculated gravity anomaly profiles to the 2D fault models.



第8図. 来巻サイトの重力異常プロファイル(a)と密度構造モデル(b). 観測点番号の下二桁は、測線に沿った距離(m)に相当する. 2次元断層構造モデルの断層位置は1023, 断層傾斜角は90°. モデル1: $\Delta h_0 = 0$ m, $\Delta h = 4$ m, $\Delta\rho = 0.6$ g/cm³. モデル2: $\Delta h_0 = 2$ m, $\Delta h = 4$ m, $\Delta\rho = 1.2$ g/cm³.

Fig. 8. Gravity anomaly profile (a) and a density structure model (b) at the Kurumaki site. Last two digits of the observation point number in the horizontal axis correspond to the distance (m) along the survey line. In the 2D fault model, the fault is positioned at 1023 with a fault dip angle of 90°. Model 1: $\Delta h_0 = 0$ m, $\Delta h = 4$ m, $\Delta\rho = 0.6$ g/cm³. Model 2: $\Delta h_0 = 2$ m, $\Delta h = 4$ m, $\Delta\rho = 1.2$ g/cm³.



第9図. 下長野サイトの重力異常プロファイル (a), 地質断面図 (b), および密度構造モデル (c). 観測点番号の下二桁は、測線に沿った距離 (m) に相当する. 地質断面図は、宮下・木村ほか (本報告書) に加筆.
 Fig. 9. Gravity anomaly profile (a), a geological profile (b) and a density structure model (c) at the Shimonagano site. Last two digits of the observation point number in the horizontal axis correspond to the distance (m) along the survey line. The geological profile is modified from Miyashita *et al.* (this volume).