

3. 1. 2 重力探査に基づく地下構造調査

(1) 業務の内容

(a) 業務題目 重力探査に基づく地下構造調査

(b) 担当者

所属機関	役職	氏名
国立大学法人金沢大学 理工研究域地球社会基盤学系	教授	平松 良浩
国立大学法人金沢大学 理工研究域地球社会基盤学系	博士研究員	澤田 明宏
国立研究開発法人産業技術総合研究所 地質情報研究部門	主任研究員	宮川 歩夢
国立大学法人金沢大学大学院自然科学研究科	修士課程	杉井 天音
国立大学法人金沢大学大学院自然科学研究科	修士課程	福岡 光輝
国立大学法人金沢大学大学院自然科学研究科	修士課程	陣出 湧也
国立大学法人金沢大学大学院自然科学研究科	修士課程	高野 彩香

(c) 業務の目的

森本・富樫断層帯及び周辺断層帯との近傍部において、既往の重力探査データを踏まえて、重力探査を高密度・稠密に実施し、地下の断層構造の変化や構造の連続性を調査する。平野縁辺部の堆積層構造情報を得て、強震動予測のための地下構造モデル構築に活用する。

(d) 3ヵ年の年次実施業務の要約

1) 令和4年度：

既往重力データを収集・精査した上で、森本・富樫断層帯周辺において重力測定を実施し、重力異常図を作成し、断層近傍の断層姿勢や周囲の活断層帯との関係を拘束するための資料化を進めると共に次年度の森本・富樫断層帯を横切る地震波探査測線に沿った二次元密度構造解析のための重力測定点配置についても検討した。

2) 令和5年度：

令和4年度に引き続き、森本・富樫断層帯周辺における重力探査の継続と、地下構造調査を継続した。サブテーマ1. 1の地震波探査測線を含む森本・富樫断層帯の走向と直交する測線での調査を行い、重力探査に基づくモデルの信頼性向上を図った。

3) 令和6年度：

令和4年度及び令和5年度の調査に引き続き、森本・富樫断層帯周辺における重力測定点を増強する。森本・富樫断層帯の北側、南側延長部の形状や周辺断層帯との関係に関する知見を得る。

(2) 令和 5 年度の成果

(a) 業務の要約

1) 森本・富樫断層帯周辺における重力探査

令和 4 年度に引き続き、森本・富樫断層帯の周辺域において、既往重力データ分布に基づき新規重力測定点配置を検討し、既往重力データの少ない地域を主として 460 点の新規重力データを得た。

2) 3 次元重力インバージョン解析による密度構造の推定

金沢平野周辺で得られた重力異常分布から、対象地域の地下構造を異なる密度からなる 2 層構造と仮定の下、3 次元重力インバージョン解析を行い、2 層の境界震度分布を推定した。また、森本・富樫断層帯に直交する複数の測線において、断層近傍での重力異常値の変化と境界深度の変化の比較を行った。

3) 2 次元タルワニ法による密度構造の検討

サブテーマ 1. 1 により令和 4 年度に実施された反射法地震探査測線である犀川－医王山測線の解釈深度断面から 2 次元密度構造を作成し、2 次元タルワニ法解析による計算重力異常値と犀川－医王山測線沿いの観測重力異常値の比較から、測線での 2 次元密度構造について検討を行った。

4) Scintrex CG-3M 型重力計の精度の検定

一等重力点金沢の重力値と大きく異なる重力値が得られる山形、新潟、紀伊半島、中国地方及び南九州の一等重力点にて重力測定を実施し、重力値の差の比較から本研究で用いる Scintrex CG-3M 型重力計の測定精度に問題がないこと及び令和 6 年能登半島地震によって本研究の遂行に支障を与えるような一等重力点金沢の重力値の変化は無いことを確認した。

(b) 業務の実施方法

本年度の業務項目は、下記の 4 項目とした。

1) 森本・富樫断層帯周辺における重力探査

2) 3 次元重力インバージョン解析による密度構造の推定

3) 2 次元タルワニ法による密度構造の検討

4) Scintrex CG-3M 型重力計の精度検定

各項目の実施方法は以下の通りである。詳しくは次節「(c)業務の成果」で述べる。

1)では、令和 4 年度に引き続き、森本・富樫断層帯周辺における既往重力データ分布に基づき、新規重力測定点配置を検討し、既往重力データの少ない森本断層西側の平野部、富樫断層西側の平野部及び東側の丘陵部にて重力測定を実施する。

2)では、金沢平野周辺で得られた重力異常分布から、2 層構造を仮定し、初期平均境界深度及び 2 層の密度差の複数の組み合わせにおいて、3 次元重力インバージョン解析を行い、2 層の境界震度分布の推定を行う。

3)では、サブテーマ 1. 1 の令和 4 年度反射法地震探査測線である犀川－医王山測線に沿う断面において、2 次元密度構造を作成し、2 次元タルワニ法解析による計算重力値と観測重力値の比較により、2 次元密度構造の検討を行う。

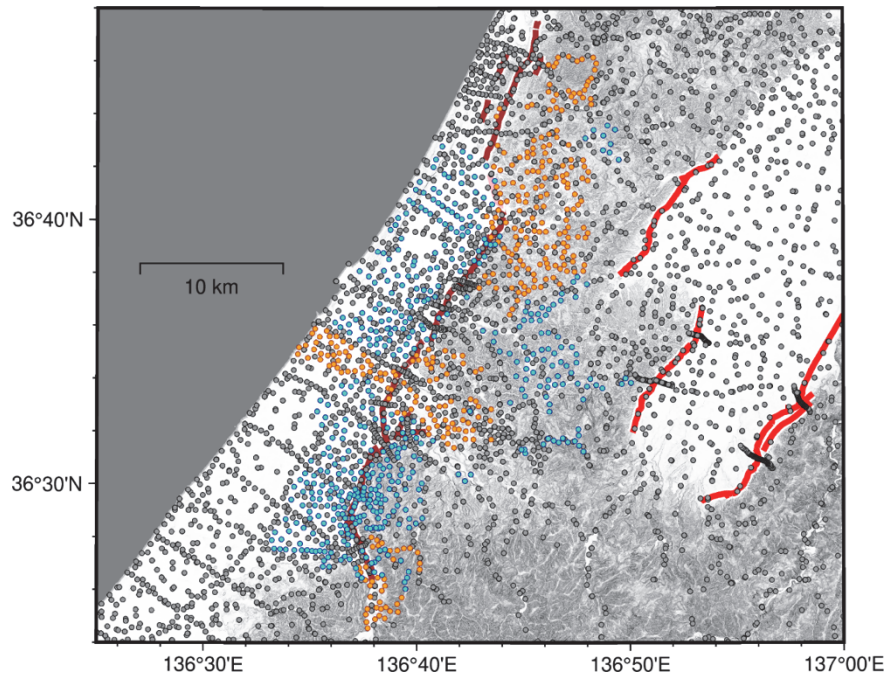


図1 森本・富樫断層帯周辺の令和4年度の調査における重力測定点（オレンジ丸）、令和5年度の調査における新規重力測定点（青丸）と既往重力測定点（黒丸）の分布。

4)では、本調査で用いる Scintrex CG-3M型重力計が令和6年能登半島地震後に以前と大きく異なる測定値を出力したことを踏まえ、測定精度の確認を目的として山形、新潟、紀伊半島、中国地方及び南九州の一等重力点にて重力測定を実施し、重力値の差の比較から測定精度の検定を行なう。また、この検定結果を用い、一等重力点金沢における重力値が令和6年能登半島地震によって本研究の遂行に支障を与えるような変化が無いことを確認する。

(c) 業務の成果

1) 森本・富樫断層帯周辺における重力探査

i) 測定点配置の検討

令和4年度調査による測定点を含めた既往重力測定点分布（本多・他，2012、国土地理院，2002、産業技術総合研究所地質調査総合センター，2013、Yamamoto *et al.*，2011、Shichi and Yamamoto，2001）に基づき、森本・富樫断層帯周辺で既往重力測定点が少ない地域を本調査の重力測定候補地域として検討し、令和5年度調査における新規重力測定は、森本断層西側の平野部、富樫断層西側の平野部及び東側の丘陵部にて重点的に実施した。

新規重力測定点の配置については、令和4年度調査と同様に車による現地へのアクセスを考慮した上で、計画段階では地図上で約500 m 間隔（東西20秒、南北16秒間隔）の格子線を設定し、可能な限り格子毎に1点の重力測定点が分布するよう試みた。また、現地においては計画段階の重力測定地点を参考にして、安全な測定が行えること、GNSS電波が受信可能なこと、地面の強度や傾斜がScintrex CG-3M型重力計の設置に適していることを確認し、重力測定点を決定した。図1に森本・富樫断層帯周辺における令和5年度調査

での新規重力測定点及び既往重力測定点の分布を示す。

重力測定は、令和4年度と同様に測定点の位置決定にRTK 測量を用いた。金沢大学の敷地内に設置された基準点のアンテナの位相中心の座標は、経度 136.7091463 度、緯度 36.5449163 度、標高 151.94 m であった。

ii) 重力測定手順

重力測定における作業手順は以下の通りである。

- ・重力測定候補地で重力測定点を決定し、重力計の設置を行う。
- ・重力計の隣（約 0.4 m の距離）に GNSS アンテナの二脚を設置する。
- ・重力計の設置後に重力測定を行う。1 回の重力測定には約 140 秒を必要とする。
- ・GNSS 受信機を操作し RTK 測量を行う。通常、RTK 測量は 30 秒未満で終了する。測量結果をフィールドノートに記載する。
- ・フィールドノートに重力測定点周辺の地形や構造物のスケッチ、重力測定結果などを記載する。
- ・重力測定点および周辺地形の写真撮影を行う。
- ・重力測定終了後に重力測定時間、重力測定結果および GNSS アンテナと重力計との高度差をフィールドノートに記載し、その後 2 回目の重力測定を行う。
- ・2 回目の重力測定終了後に重力測定時間および結果をフィールドノートに記載する。重力測定結果の 1 回目と 2 回目との差の絶対値が 0.01 mGal 未満ならばこの重力測定点での重力測定を終了し、撤収する。また、差の絶対値が 0.01 mGal 以上ならば引き続き 3 回目の重力測定を行う。
- ・3 回目の重力測定結果を 1 回目および 2 回目の重力測定結果と比較し、3 回の重力測定で十分な結果が得られなかった場合には 4 回目以降の測定を実施する。
- ・重力計及び GNSS アンテナを撤収する。

iii) 重力値算出に関わる各種の補正

重力測定によって得られた重力値に対して、重力測定の時間、緯度、経度、標高、機器高の各パラメータを用いて、重力計の経時変化に伴うドリフト補正、大気圧補正、潮汐補正の各補正処理を行った重力値を計算する。さらに、その重力値からフリーエア補正、ブーゲー補正および地形補正の各補正処理を行うことにより、ブーゲー異常値を算出する。ドリフト補正については、1 日の測定業務の開始時および終了時に金沢大学敷地内の一等重力点金沢にて重力測定を行い、潮汐補正および大気圧補正後の重力値の開始時と終了時の間での変化量から、重力測定値の単位時間あたりの経時変化量としてのドリフト値を計算する。このドリフト値から、当日行った各重力測定値についてそれぞれの測定時間に対応するドリフト補正値を計算し、補正を行う。大気圧補正は、測定点の標高から $0.87-0.965 \times 10^{-4} \times \text{標高 (m)}$ (mGal) で計算する。潮汐補正は Longman (1959) に示されるアルゴリズムにより計算を行う。フリーエア補正の補正値としては $0.3086 \times \text{標高 (m)}$ (mGal) を用いる。

iv) ブーゲー補正と地形補正に用いる補正密度

ブーゲー補正及び地形補正には、本多・河野(2005)で示される計算手法に基づき、地形

データとして 10 m DEM（国土地理院，2014）を用いて補正値を計算する。本調査で用いる補正密度は 2300 kg/m^3 である。この値は安山岩起源の堆積岩の密度に近く対象地域周辺の地質構造に適していると考えられる。産業技術総合研究所地質調査総合センターによる金沢地域重力図（ブーゲー異常）の説明書（村田・他，2018）では補正密度として 2350 kg/m^3 、重力図では補正密度として 2300 kg/m^3 の値が用いられており、本調査で用いる 2300 kg/m^3 の補正密度は妥当であると考えられる。

上記の補正値を用いて、ブーゲー異常値（ $\Delta g_0''$ ）は以下のように計算される。

$$\Delta g_0'' = g - \gamma + d + G_T + \beta h - 2\pi G \rho h + T_c + C_A$$

ここで、 $\Delta g_0''$ ：ブーゲー異常値（mGal）、 g ：観測重力値（mGal）、 γ ：正規重力値（mGal）、 d ：ドリフト補正値（mGal）、 G_T ：潮汐補正値（mGal）、 h ：標高(m)、 βh ：フリーエア補正値（mGal）、 G ：万有引力定数、 $2\pi G \rho h$ ：ブーゲー補正値（mGal）、 T_c ：地形補正値（mGal）、 C_A ：大気圧補正値、である。

v) 令和 5 年度調査結果を反映した森本・富樫断層帯周辺における重力異常

令和 5 年度調査によって得られた重力値を含むブーゲー異常分布から対象地域外にわたる重力異常の長波長成分を取り除くために、平面トレンド成分を推定し、それを除去する。この処理により、森本・富樫断層帯やその周辺の浅部の地質構造に起因する重力異常分布をより強調して表現することができる。図 2 左上に本研究で得られた新規重力測定点での重力値を含むブーゲー異常図、図 2 右上に平面トレンド成分、図 2 左下に平面トレンド成分を取り除いた重力異常図を示す。本調査地域では大局的には北側で高重力異常、南東側で低重力異常であるため、北西から南東方向へと重力異常値が低下するような平面トレンドが推定され（図 2 右上）、結果的に北側と南側で高重力異常、中央部で低重力異常となる（図 2 左下）。図 2 左下に示す重力異常から既往データについて同じ処理を行い作成した重力異常を差し引いた差分量を図 2 右下に示す。重力測定点の場所により重力値の増減は異なるが、平野部など既往測定データが付近に存在していた地域では、差分量は概ね $\pm 2 \text{ mGal}$ 以下であり、既往測定データが存在しないためにこれまで補間計算で重力異常図が作成されていた丘陵部で大きな差分量が見られる。

vi) 森本・富樫断層帯周辺の地形と地質の概要

図 2 左下に示す重力異常図は地下の密度構造を反映し、一般的に重力異常図は地質構造と良い対応を示す。図 3 に森本・富樫断層帯周辺の地質図と地形図を示す。石川県の地質分布は鮎野(1993)に詳しくまとめられており、それに基づき森本・富樫断層帯周辺に分布する地層や岩石について形成年代が新しいとされる順に以下に記す。森本・富樫断層帯の西側に位置する金沢平野には、後期更新世から完新世にかけての堆積物が分布する。さらに西方の海岸沿いには内灘砂丘に相当する砂丘堆積物が分布する。森本・富樫断層帯の東側は丘陵地形である。金沢市の東方には中期更新世に形成された火山岩類が分布し、50～60 万年前の溶岩ドームとそれを取りまく火砕岩により構成される。金沢市の北東部には中期更新世の堆積岩類が広く分布し、内湾成ないし淡水湖成の堆積物からなり、金沢平野および海岸砂丘の地下などに分布する。丘陵縁部と平野の地下および金沢以北津幡以南の丘陵部には浅海で堆積した細粒・中粒の均質な砂層からなる前期更新世の堆積岩類が分布す

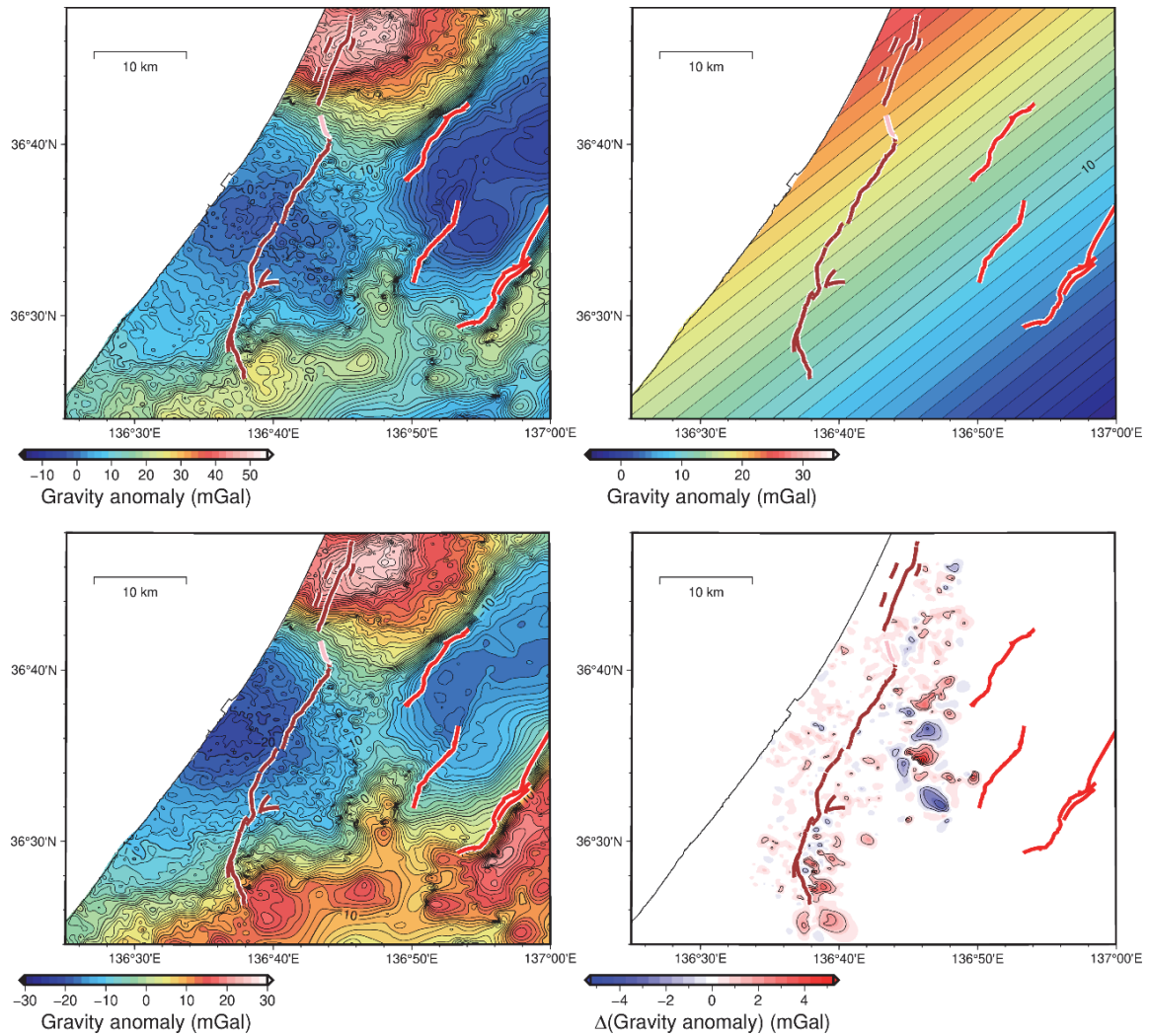


図2 (左上) 森本・富樫断層帯周辺における本研究で得られた重力値を含むブーゲー異常図。(右上) 平面トレンド成分の分布。(左下) 平面トレンド成分を取り除いた重力異常図。(右下) 本研究による重力値を含む重力異常分布と既往重力データに基づく重力異常分布の差。コンター線の間隔は1 mGal である。

る。金沢北部から津幡までの丘陵地及び宝達山南部、また金沢市の南部及び医王山にかけて前期～中期中新世の堆積岩類が分布する。石川県南部の医王山地域から鶴来の西の山地にかけて、前期～中期中新世の珪長質火山岩類として分類される流紋岩質の角礫凝灰岩、軽石凝灰岩、細粒凝灰岩などからなる厚い地層が分布する。その下位には、前期～中期中新世の苦鉄質火山岩類が分布する(山田・高橋, 2021)。宝達山付近では、先新生代の基盤岩類として、船津花崗岩類が分布する。

vii) 森本・富樫断層帯周辺における重力異常の特徴

図4に地質図と重ね合わせた重力異常図を示す。本調査地域北側の高重力異常は宝達山周辺に分布し、この地域で地表に露出する密度の大きい花崗岩によりこの高重力異常が生じていることが分かる。邑知淵断層帯南部に属する活断層はこの高重力異常域に位置する。

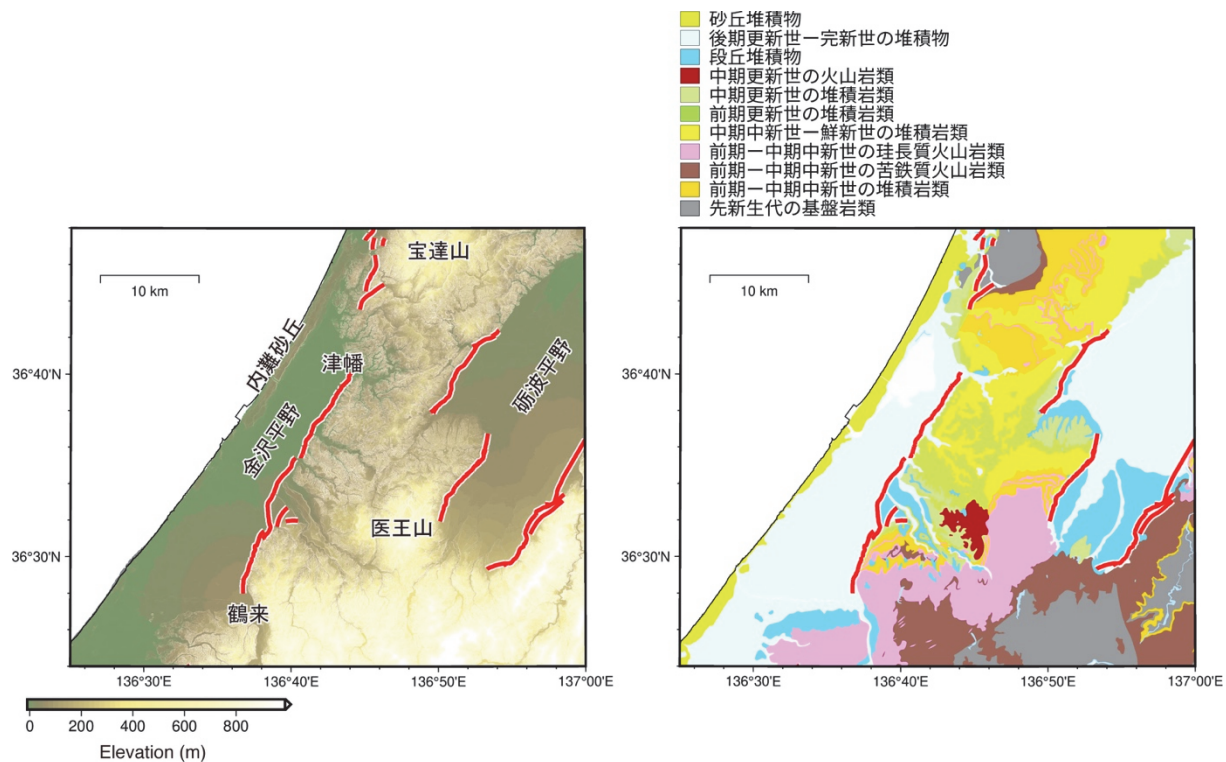


図3 森本・富樫断層帯周辺の地形図と地質図。地形は国土地理院数値標高モデルに基づく。地質図は20万分の1日本シームレス地質図（産業技術総合研究所地質調査総合センター（編），2015）を改変。

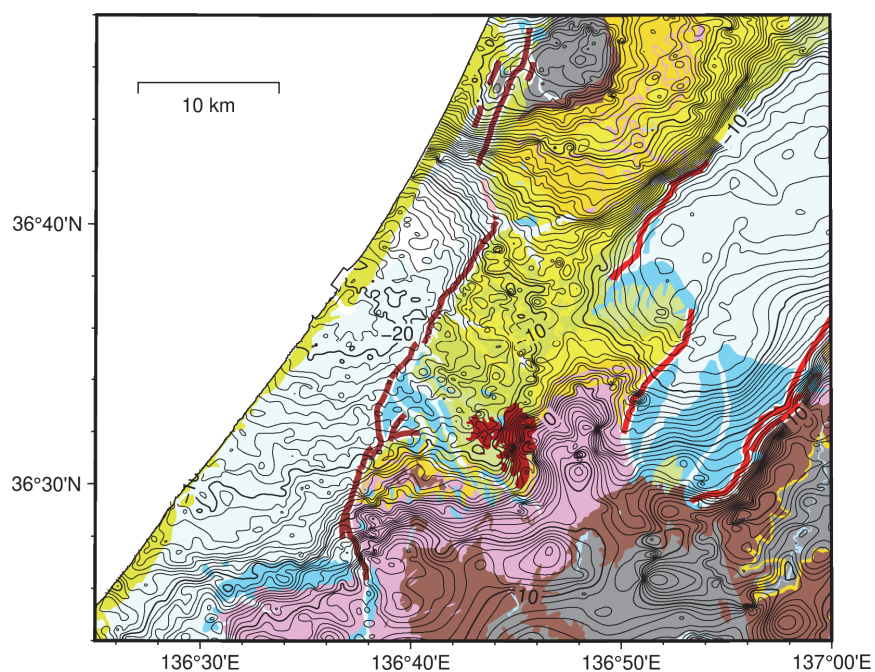


図4 地質図と重ね合わせた重力異常図。コンター線の間隔は1 mGalである。地質図の判例は図3と同じである。

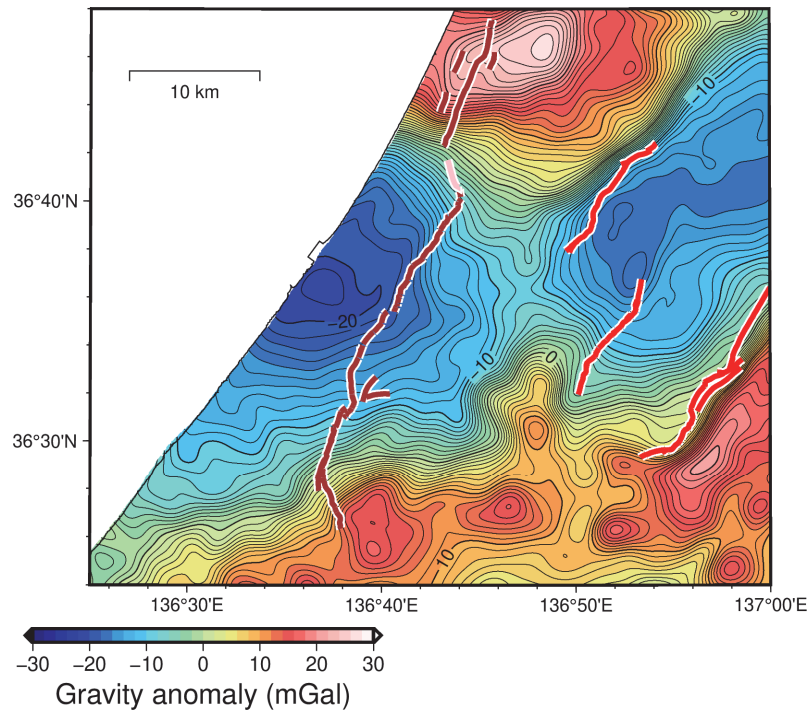


図5 遮断波長 4 km のフィルター処理後の重力異常図。コンター線の間隔 1 mGal である。

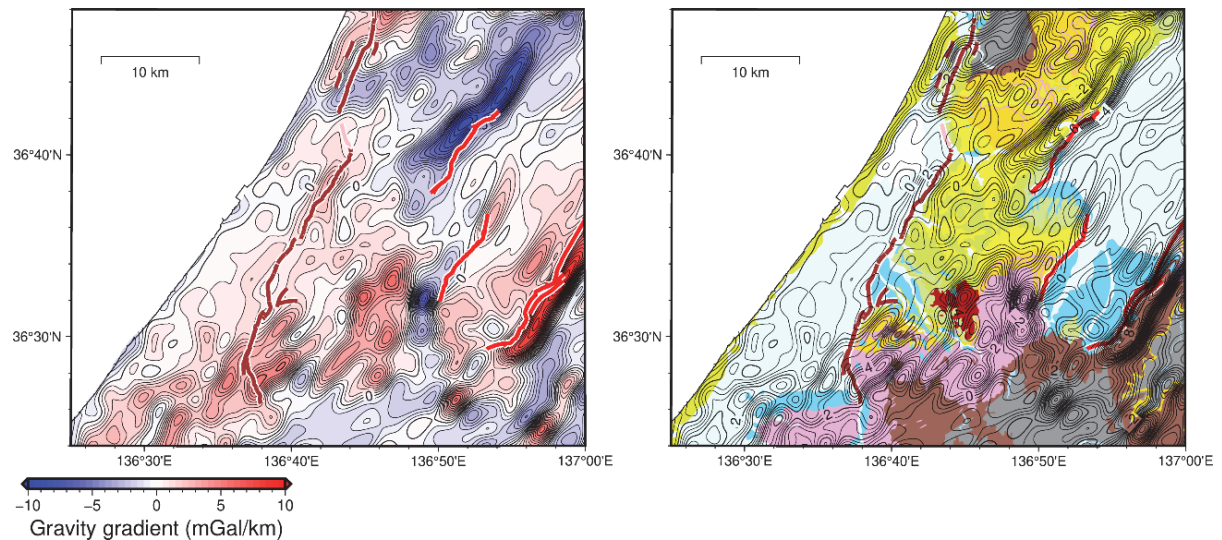


図6 (左) 遮断波長 4 km のフィルター処理後の重力異常の森本・富樫断層帯の傾斜方向の勾配。(右) 地質図と重ね合わせた遮断波長 4 km のフィルター処理後の重力異常の森本・富樫断層帯の傾斜方向の勾配。コンター線の間隔は 0.5 mGal/km である。地質図の判例は図3と同じである。

本調査地域南側の高重力異常は概ね東西方向に延びる密度の大きい火山岩の分布域に対応している、また、金沢平野及び砺波平野付近に分布する低重力異常域はこれらの平野に分布する密度の小さい堆積層から成る堆積盆の構造を反映していると考えられる。金沢平野の南東縁に位置する森本・富樫断層帯は、金沢平野付近の低重力異常域に区画されるよう

に位置しており、断層帯を境とするような重力異常の変化は明瞭ではない。一方、砺波平野と山地・丘陵地の境界に位置する石動断層や高清水断層付近では断層の走向方向に平行に重力異常のコンター線が密になっており、重力異常値が急変していることが分かる。図2左下に示す重力異常に遮断波長4 kmのフィルター処理（重力異常の高周波数成分、すなわち短波長成分を除去）を施した重力異常図を図5に示す。この処理によって周囲の重力測定点での重力値と大きく異なる重力値を示す重力測定点の影響を軽減することができる。図2左下で見られた森本・富樫断層帯周辺の重力異常の特徴は図5においてより明瞭に見ることができる。本調査地域の活断層は全て逆断層であり、一般的に逆断層では、基盤で生じる鉛直方向の変位により、断層の走向と直交方向（傾斜方向）に下盤側から上盤側に向けて重力異常の値が大きくなるため、断層付近で重力異常の勾配の絶対値が大きくなる。したがって、断層構造に起因する重力異常の特徴を抽出するためには重力異常の勾配を計算し、図示することが有効である。

図6に森本・富樫断層帯の走向に直交する方向（傾斜方向）としてN120° E方向の重力異常の勾配図及びそれを地質図に重ね合わせた図を示す。森本断層に沿って、断層の中央部を最大値として勾配値がやや大きくなっていることが分かる。これは地下の断層構造を反映している可能性がある。野町断層に関しては、断層位置より平野側に張り出すように勾配値がやや大きくなる領域が断層に概ね平行に分布する。富樫断層については、勾配値の大きな領域と斜交するように断層が延び、この勾配値の大きな領域は地質構造によるものであり、結果として地下の断層構造が重力異常の特徴として表れにくくなっていると考えられる。

図7は森本・富樫断層帯の走向方向と平行なN30° E方向の重力異常の勾配図とそれを地質図に重ね合わせた図である。断層の走向方向に構造境界が存在すると、これらの図に

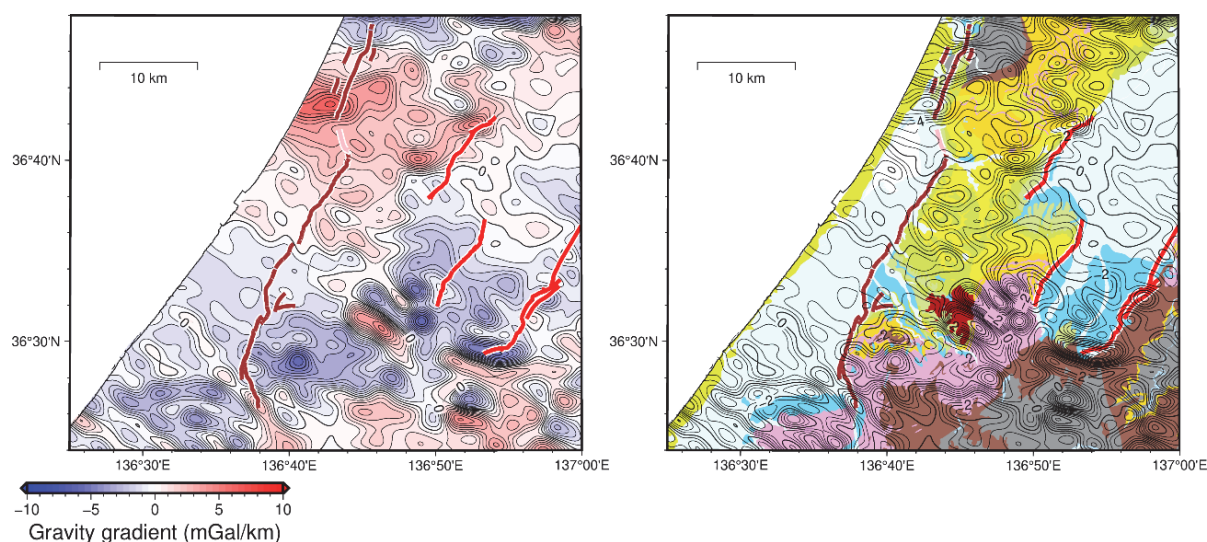


図7 (左) 遮断波長4 kmのフィルター処理後の重力異常の森本・富樫断層帯の走向と平行方向の勾配。(右) 地質図と重ね合わせた遮断波長4 kmのフィルター処理後の重力異常の森本・富樫断層帯の走向と平行方向の勾配。コンター線の間隔は0.5 mGal/kmである。地質図の判例は図3と同じである。

において勾配の絶対値が大きな領域として表れる。森本断層の北端と邑知潟断層帯南端の間で勾配値が大きな領域が分布し、これは森本断層と邑知潟断層帯の地下の断層構造が連続しないことを反映している可能性が現時点では考えられる。砺波平野の法林寺断層の南端や高清水断層の南端部は勾配値の大きな負の値の領域で区画されている。この領域は地質構造が変化する領域でもあり、断層構造が地質構造に規制され、これらの断層の南端がより南側に延びないことを反映している可能性がある。一方、石動断層は南端、北端ともに勾配値の大きな領域に区画されることはなく、南端、北端共に地下の断層構造が延長する可能性が考えられる。これは図6における勾配値の大きな負の値の領域が石動断層の走向方向に延びることと整合的である。

図8は図5に示す重力異常の水平一次勾配の分布図とそれを地質図に重ね合わせた図である。基盤で鉛直変位を伴う断層構造があれば、地表の断層トレースに沿うように水平一次勾配の大きな値の領域として表れる。森本断層ではややその傾向が見られるが、野町断層及び富樫断層ではそのような傾向は明瞭ではない。これは法林寺断層や邑知潟断層帯南部でも同様であり、森本・富樫断層帯や法林寺断層、邑知潟断層帯南部は鉛直方向の基盤変位が乏しい活断層であることを示している可能性が考えられる。一方、石動断層や高清水断層は走向方向に水平一次勾配の大きな値の領域が延びており、鉛直方向の基盤変位が大きい活断層であると考えられる。

現時点での重力異常の特徴からは上記の可能性が考えられるが、次年度以降に実施する重力測定により得られる新規重力データを追加した重力異常分布や他のサブテーマの調査結果と比較して、今後さらに検討する必要がある。

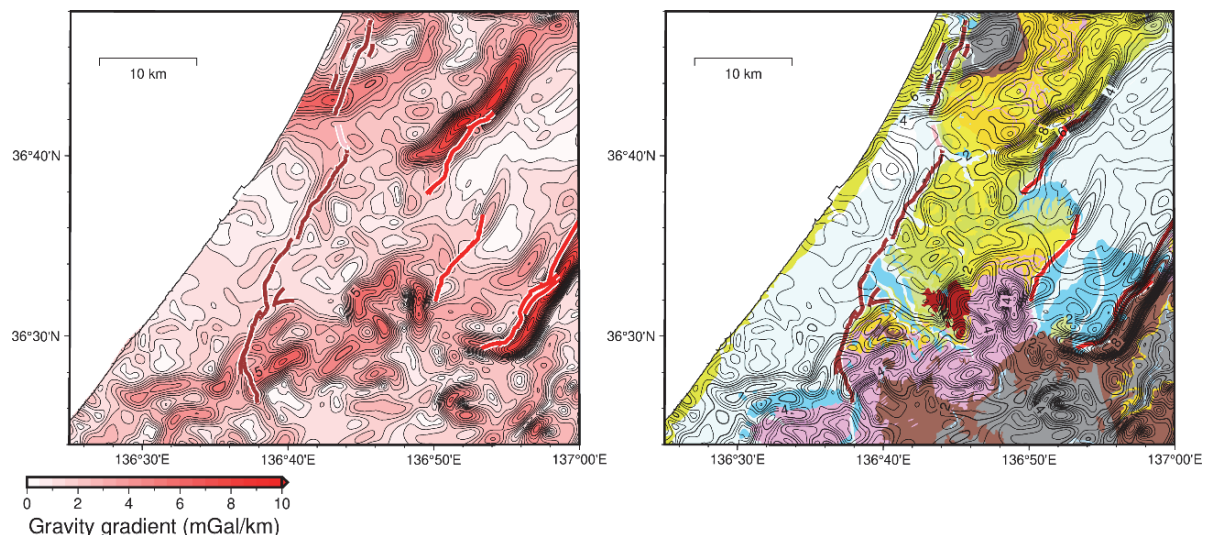


図8 (左) 遮断波長 4 km のフィルター処理後の重力異常の水平一次勾配。コンター線の間隔は 0.5 mGal/km である。(右) 地質図と重ね合わせた遮断波長 4 km のフィルター処理後の重力異常の水平一次勾配。コンター線の間隔は 0.5 mGal/km である。地質図の判例は図3と同じである。

2) 3次元重力インバージョン解析による密度構造の推定

i) 3次元重力インバージョン解析について

ここで使用する3次元重力インバージョン解析とは、初期パラメータとして与えられる厚さと仮定された密度をもつ角柱の集合からなるモデルについて、観測される重力異常分布を再現できるようにそれぞれの角柱の厚さを反復計算によって変更し、観測重力異常分布と角柱モデルから計算される重力異常分布の残差の二乗和を収束させるように、上位堆積層と下位堆積層・基盤のような2つの密度からなる3次元密度構造モデルを推定するものである。ここで角柱の厚さは2層からなる密度構造の境界深度に相当する。本報告書では、Rama Rao *et al.* (1999)によるプログラムコード Grav3din を用いて3次元インバージョン解析を行うことにより、森本・富樫断層帯周辺を対象地域として上位堆積層と下位堆積層・基盤との境界深度の推定を行う。

ii) 解析手法

解析範囲は、平面直角座標系（VII系）上でX（北方向に正）：22000 ～ 106000、Y（東方向に正）：-74000 ～ 6000 とする。密度構造モデルで上層に相当する角柱の大きさはX方向、Y方向それぞれ2 km とし、角柱の数はX方向、Y方向にそれぞれ43個、合計で1849個となる。但し、解析範囲の端の角柱はインバージョン解析において初期厚さで一定とされるため、境界付近の解析結果は議論の対象としない。

このインバージョン解析では初期パラメータとして、2層の境界深度を設定する。上位層の厚さ、すなわち境界深度に相当する角柱の厚さは、250 m、500 m 及び 750 m の3パターンを試行する。また、上位層に相当する角柱と下位層に相当する領域との密度差を固定値として設定し、インバージョン解析を行う。

iii) 解析結果

解析結果の例として、初期境界深度を500 m、密度差を600 kg/m³と設定したときの解析結果を図9に示す。600 kg/m³の密度差は、上位堆積層としての中新世以降から第四紀にかけての堆積物の密度である1900 kg/m³と下位堆積層・基盤岩としての中新世以前の堆積岩や火山岩類と基盤岩を合わせた密度である2500 kg/m³の密度差に相当する。

観測重力異常分布（図9右下）と図9左上に示される境界深度分布から計算される理論重力異常分布（図9右上）との差を示す差分図（図9左下）を見ると、3次元重力インバージョン解析によって得られる結果は森本・富樫断層帯の周辺地域や平野部において観測重力異常分布を良く再現することが分かる。一方、観測重力異常と理論重力異常の差が大きい領域は、境界深度がほとんど0 mであり、これは地質分布として下位層が地表に達していることを意味する。地質図（図4）と比較すると、この領域は、宝達山や高清水断層東の先新生代基盤岩類に相当することが分かる。

図9の結果に対して、座標系変換と補間処理を行い、断層線を追加した境界深度分布と理論重力異常分布を図10に示す。この初期境界深度と密度差による結果では、推定された境界深度の等深線は森本断層に沿っており、西側で深く東側で浅い。一方、富樫断層周辺では等深線は断層の走向にあまり沿っておらず、富樫断層の断層変位による基盤深度の変化が小さいことを反映していると考えられる。

推定される境界深度の初期値依存性を確認するため、初期境界深度を 250 m、500 m 及び 750 m に設定した場合の結果を図 11 に示す。初期境界深度が深くなるにつれ、推定された境界深度分布も全体的に深くなる傾向があり、宝達山付近での境界深度 0 m の領域の

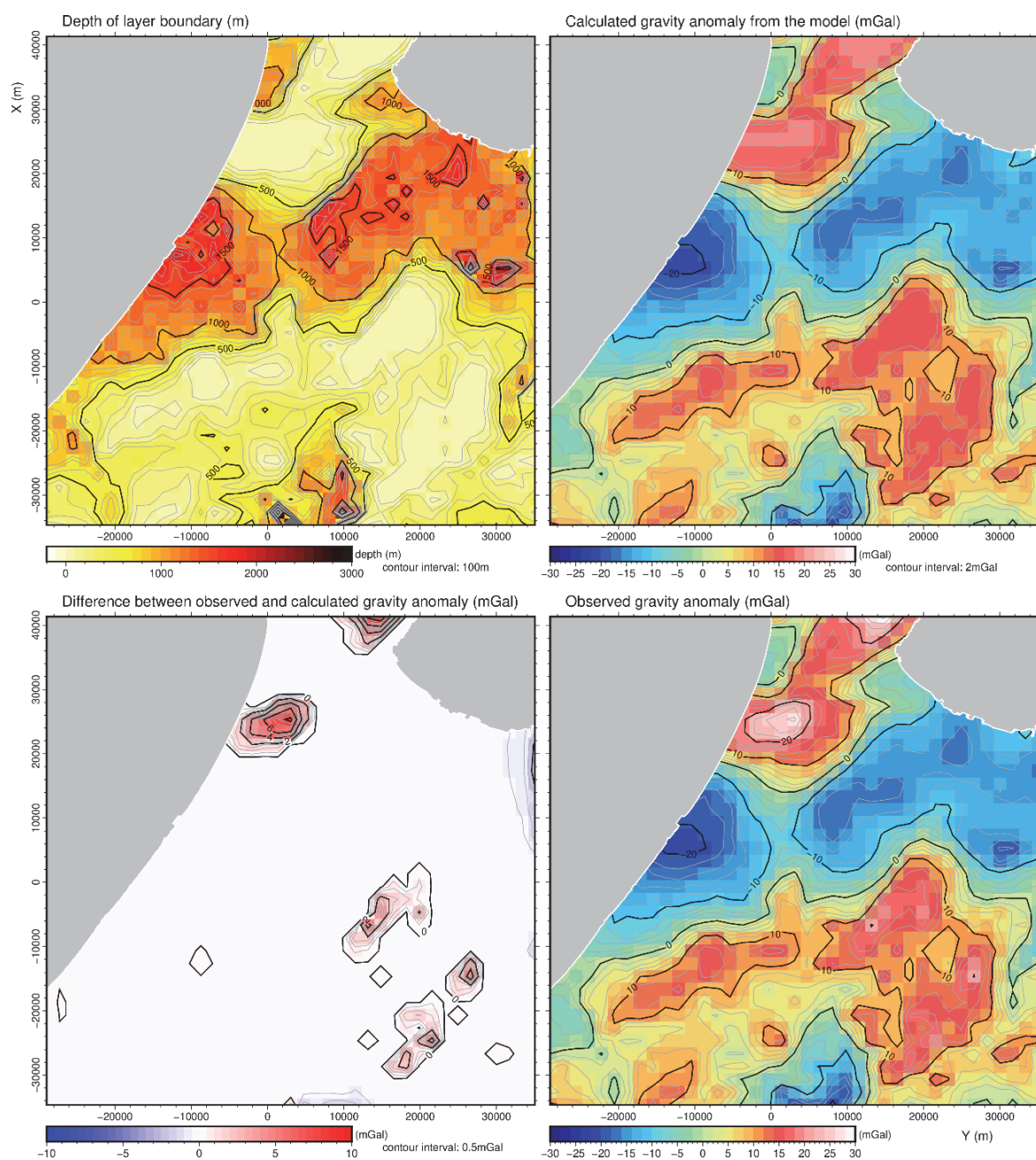


図9 (左上) 初期パラメータの境界深度を 500 m、密度差を 600 kg/m^3 と設定した場合の 3 次元重力インバージョン解析から推定された境界深度分布。コンター線の間隔は 100 m である。(右上) 3 次元重力インバージョン解析により得られた密度構造から計算される理論重力異常分布。コンター線の間隔は 2 mGal である。(左下) 理論重力異常分布と観測重力異常分布との差。コンター線の間隔は 0.5 mGal である。(右下) 3 次元重力インバージョン解析に用いる観測重力異常分布。コンター線の間隔は 2 mGal/km である。

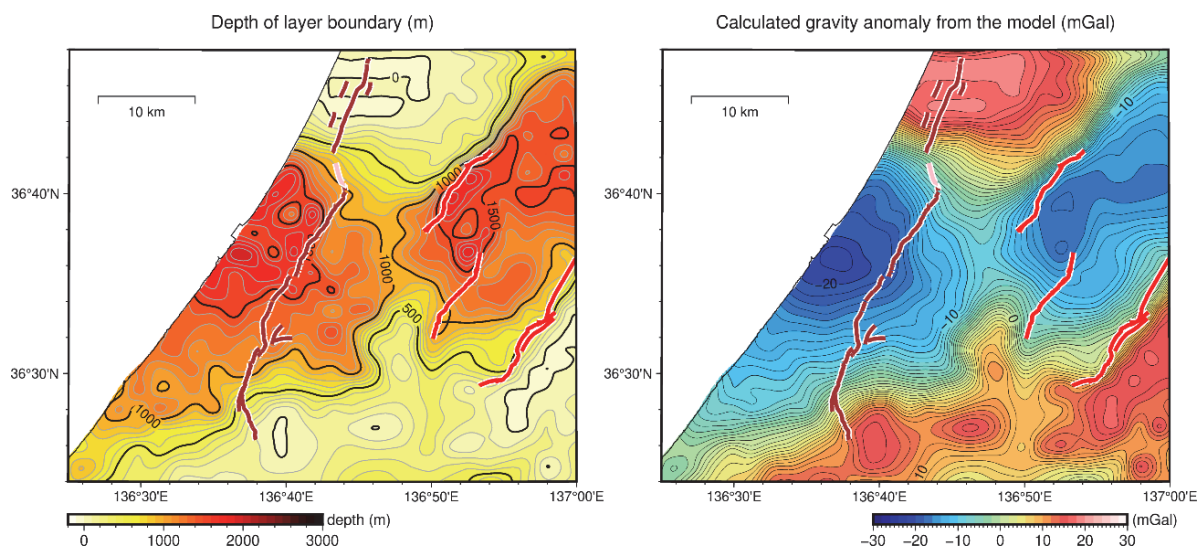


図 10 (左) 初期境界深度を 500 m、密度差を 600 kg/m^3 と設定した際の 3 次元重力インバージョン解析による境界深度分布。コンター線の間隔は 100 m である。(右) 3 次元重力インバージョン解析による境界深度分布から計算される理論重力異常分布。コンター線の間隔は 1 mGal である。

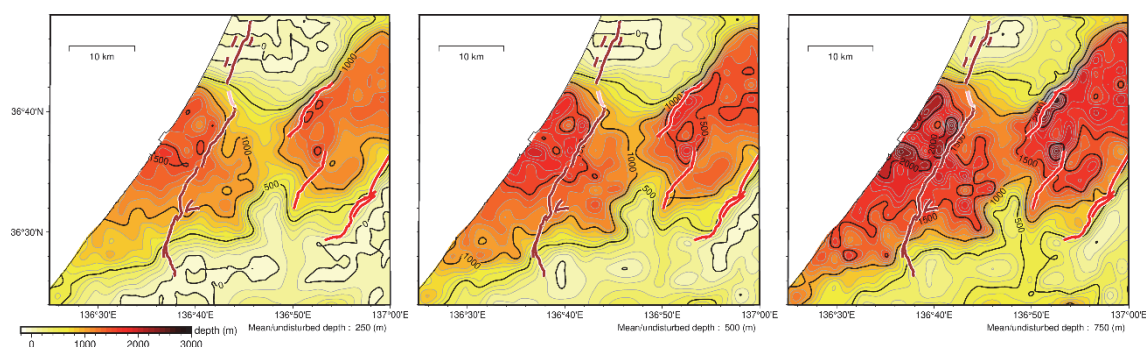


図 11 異なる初期境界深度による 3 次元重力インバージョン解析により得られた境界深度分布。初期境界深度は、(左) 250 m、(中) 500 m、(右) 750 m であり、密度差は全て 600 kg/m^3 である。コンター線の間隔は 100 m である。

範囲も変化する。宝達山付近での 0 m の等深線は、地質図に示される花崗岩が地表に露出する範囲と対応するべきであり、初期境界深度や密度差を拘束するための指標として利用可能と考えられる。図 10 では、初期境界深度が 250 m では境界深度が 0 m の領域と宝達山付近の地質図があまり一致しない。それに対して初期境界深度が 500 m 及び 750 m は比較的境界深度 0 m の領域と地質図との対応が良い。

同様に、密度差をそれぞれ 500 kg/m^3 から 800 kg/m^3 まで 100 kg/m^3 間隔で変化させた場合の境界深度分布を図 12 に示す。2 層の密度差が小さくなるにつれて、推定される境界深度は深くなる。今後、既往ボーリング調査による密度測定結果等を参照し、適切な密度値を設定する必要がある。

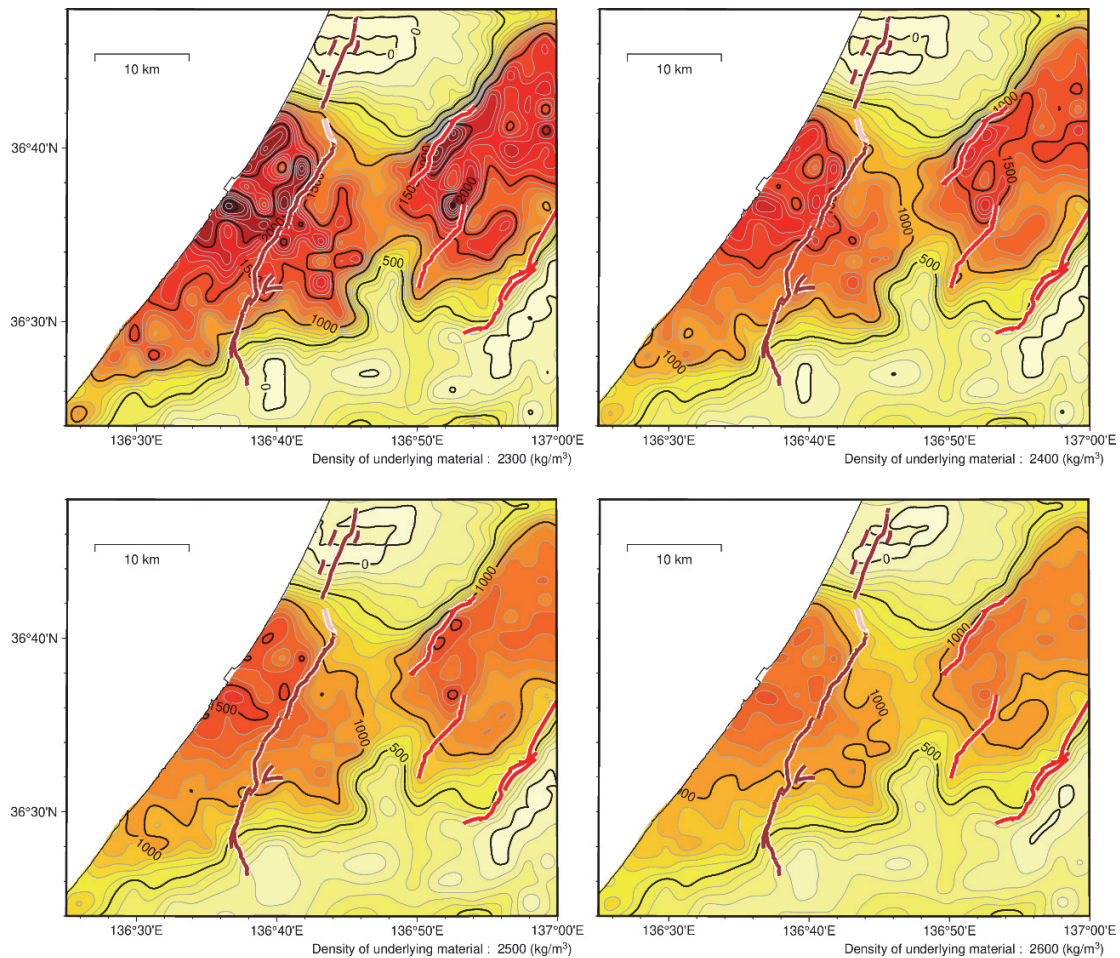


図 12 密度差を変化させた場合の 3 次元重力インバージョン解析による境界深度分布。初期境界深度は、(左上) 500 kg/m³、(右上) 600 kg/m³、(左下) 700 kg/m³、(右下) 800 kg/m³である。コンター線の間隔は 100 m である。

iv) 測線沿いの重力異常と境界深度

森本・富樫断層帯と直交する重力探査測線において、測線沿いの観測重力異常値と初期境界深度を 500 m、密度差を 600 kg/m³と設定した場合での 3 次元重力インバージョン解析から推定された境界深度分布による理論重力異常値と比較する。重力探査測線位置は、令和 4 年度報告書で予定した 6 測線に 1 測線を追加し、A から G までの 7 測線を設定した (図 13)。それぞれの測線の中心線から幅 1 km の範囲の重力異常値と測線の中心線での 3 次元重力インバージョン解析による境界深度と計算重力異常値を図 14 から図 17 に示す。

測線 A は森本断層より北に位置し、宝達丘陵西端にみられる断層に直交する。重力異常値は森本断層周辺とは逆に西側でやや高い値を示す。重力異常分布は宝達山を中心とする高重力異常域の影響が大きく、断層に関連する重力異常値の変化は明瞭ではない (図 14)。

測線 B は令和 4 年度成果報告書 Chap3-1-1 で報告された、森本断層の北部延長部分の断層に直交する。重力異常値の等値線の間隔がほぼ一定にみられる地域であり (図 5)、断層近辺での重力異常値の顕著な変化は見られず (図 14)、基盤における断層変異が小さいことを反映している可能性がある。

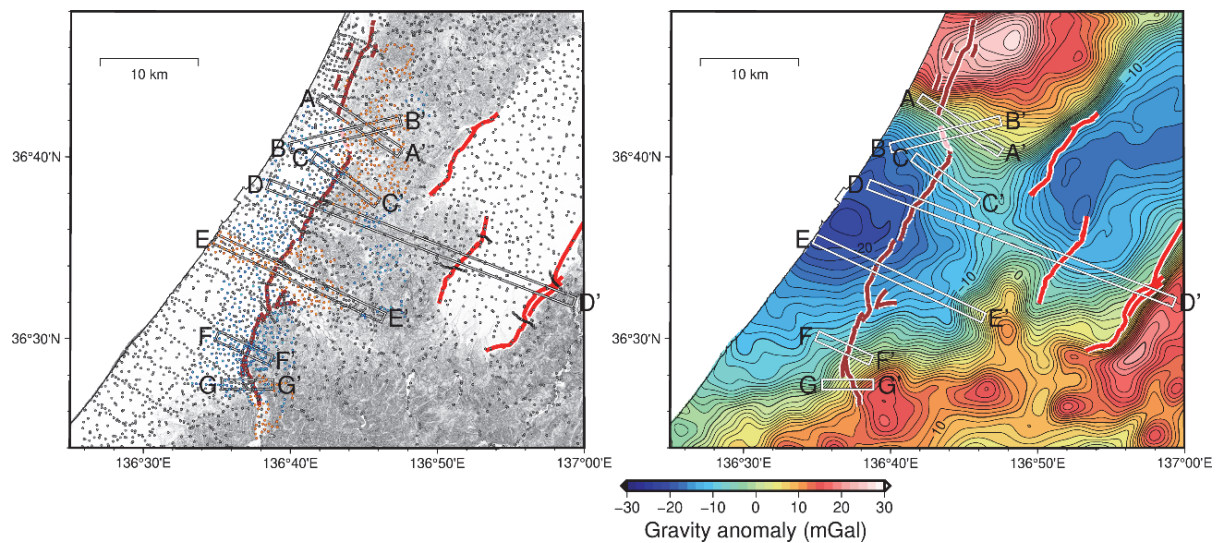


図 13 (左) 重力探査測線位置 (白枠) と重力測定点分布。(右) 重力探査測線位置 (白枠) と遮断波長 4 km のフィルター処理後の重力異常図。コンター線の間隔は 1 mGal である。

測線 C は森本断層に直交し、森本断層北部に位置する。図 5 の重力異常値等値線は断層と斜交しているが、南東の丘陵部や北西の平野部と比較して、断層付近での重力異常値の変化量が大きい。森本断層周辺 2 km の範囲で約 300 m の境界深度の変化を示している (図 15)。

測線 D は森本断層に直交し、森本断層中央部に位置する。また、令和 5 年度深部構造探査測線と近接する。森本断層周辺では、断層周辺 4 km の範囲で約 8 mGal の重力異常値の変化が見られ、断層近辺で境界深度が約 500 m の変化を示す (図 16)。

測線 E は野町断層に直交し、野町断層中央部に位置する。令和 4 年度深部構造探査測線と近接し、後述する 2 次元タルワニ法解析測線に一致する。図 5 に示される重力異常値の変化は断層の両側で緩やかであり、断層近辺での急激な変化は見られない (図 15)。

測線 F は富樫断層に直交し、富樫断層中央部に位置する。図 5 の重力異常等値線では平野部で重力異常変化が小さく断層近辺から丘陵部で変化量が大きくなっている。断層近辺での顕著な重力異常値の変化は確認できないが、断層の北西約 1.5 km から境界深度が南東方向へ向けて浅くなっている (図 17)。

測線 G は富樫断層に直行し、富樫断層南端部に位置する。測線の範囲では西から東にかけて重力異常値が常になくなっており、断層近辺での重力異常値の顕著な変化は見られない。境界深度は西で深く東で浅くなっており、基盤での断層変位が小さい可能性が考えられる (図 17)。

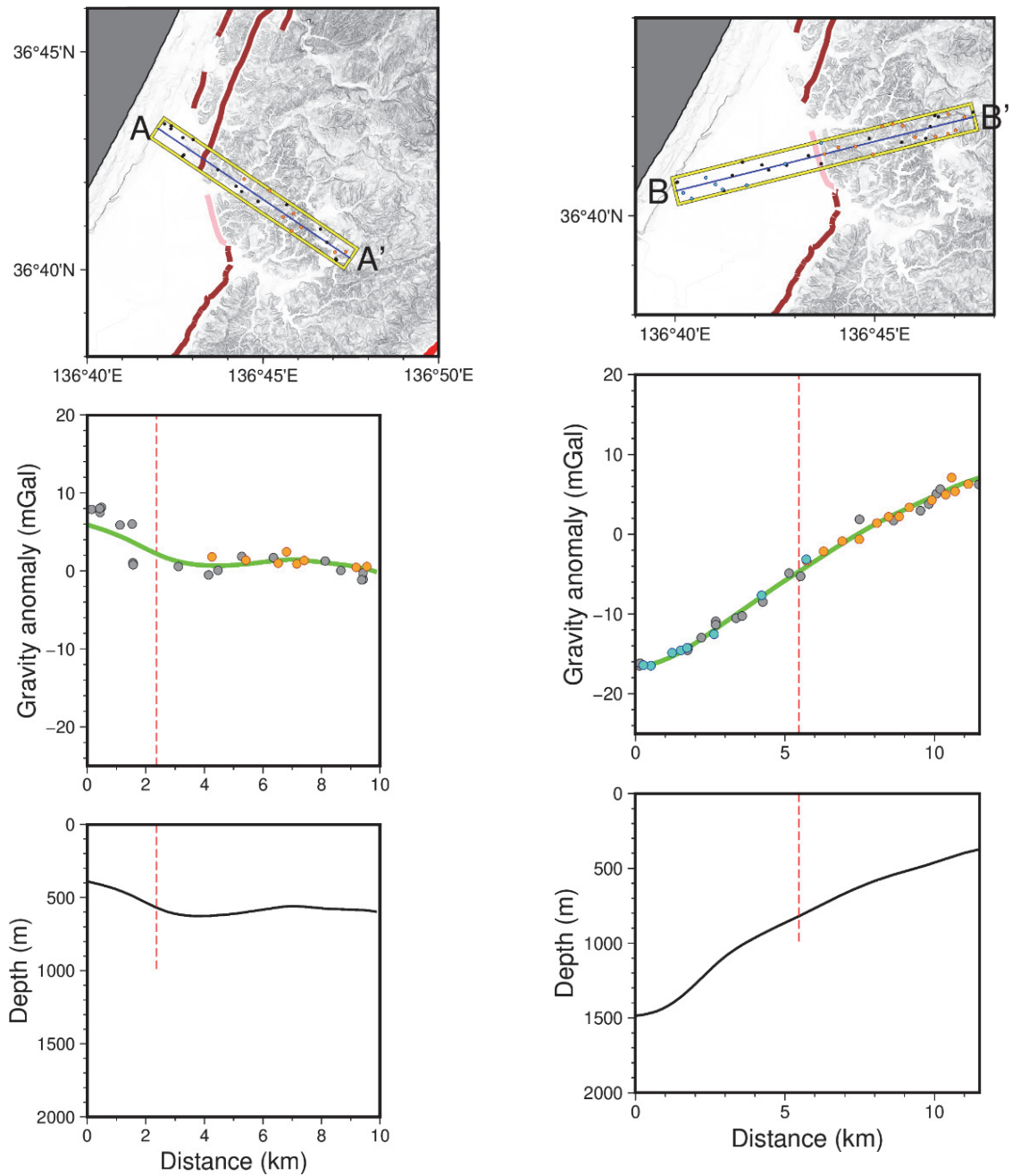


図 14 (上) 重力探査測線の位置。青線は測線位置、黄枠は中図でプロットされる重力測定点が含まれる範囲 (幅 1 km)、灰点は既往重力測定点、オレンジ点は令和 4 年度重力測定点、青点は令和 5 年度重力測定点の位置、茶・桃線は断層位置を示す。(中) 重力探査測線沿いの平面トレンド成分を取り除いた重力異常値。灰・オレンジ・青点は上図の重力測定点における重力異常値、緑線は遮断波長 4 km のフィルター処理後の重力異常値 (図 5)、赤線は地表で想定される断層位置。(下) 図 10 の 3 次元重力インバージョン解析による境界深度。

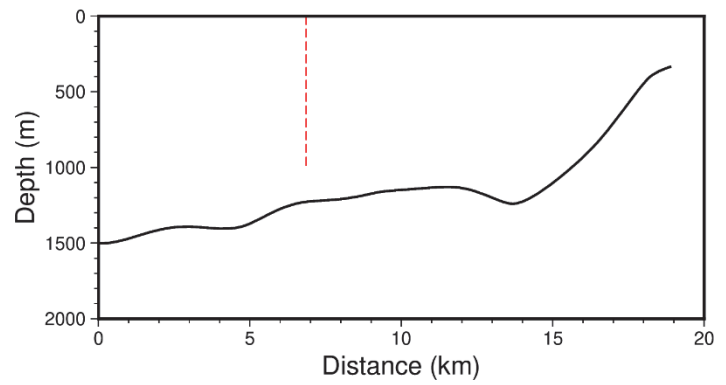
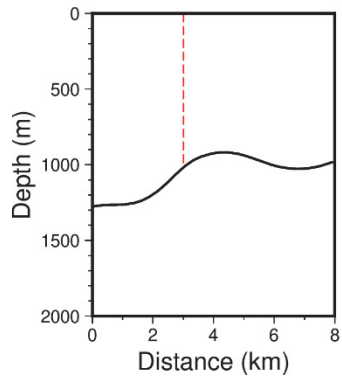
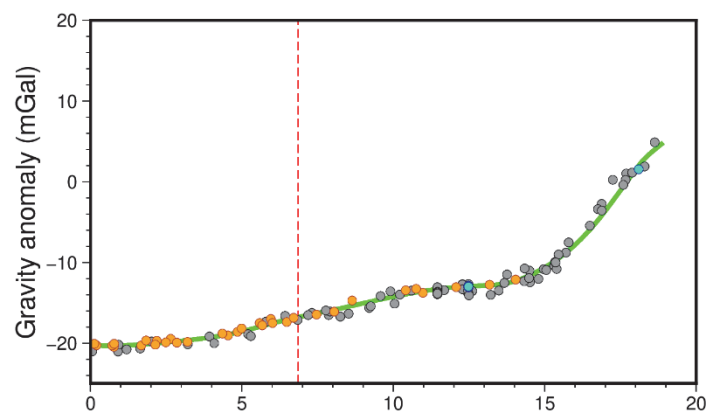
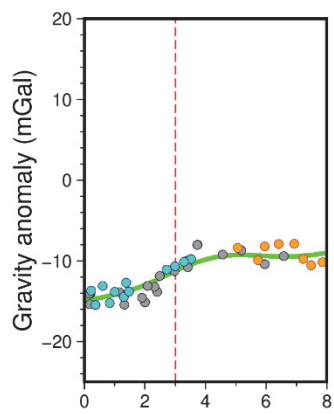
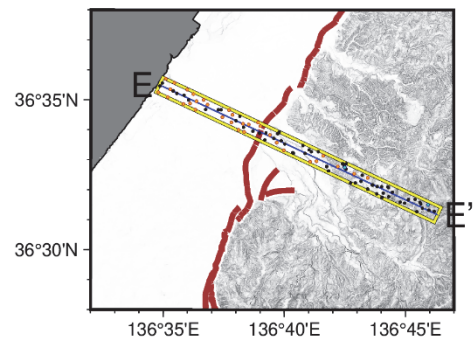
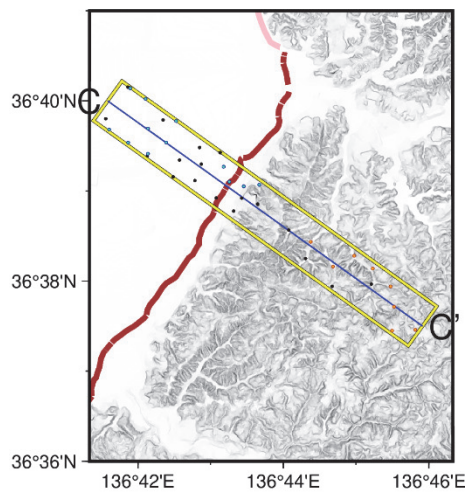


図 15 図の説明は図 14 と同じである。

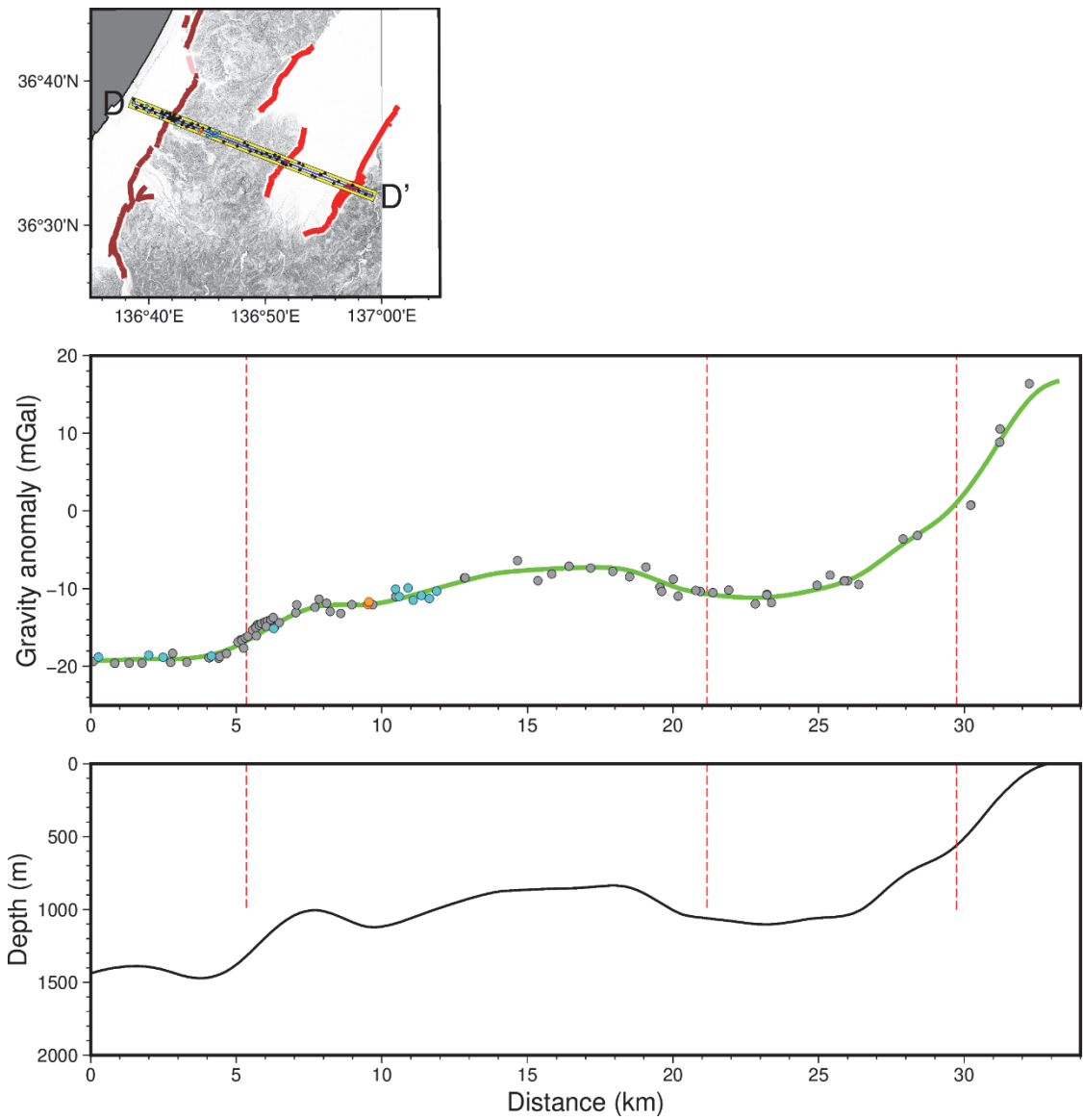


図 16 図の説明は図 14 と同じである。

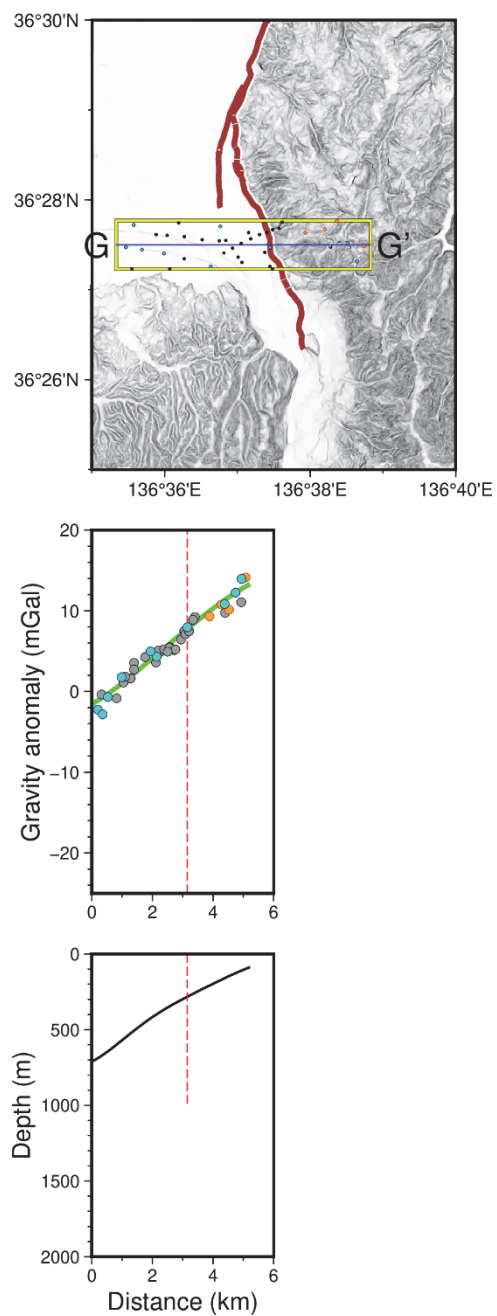
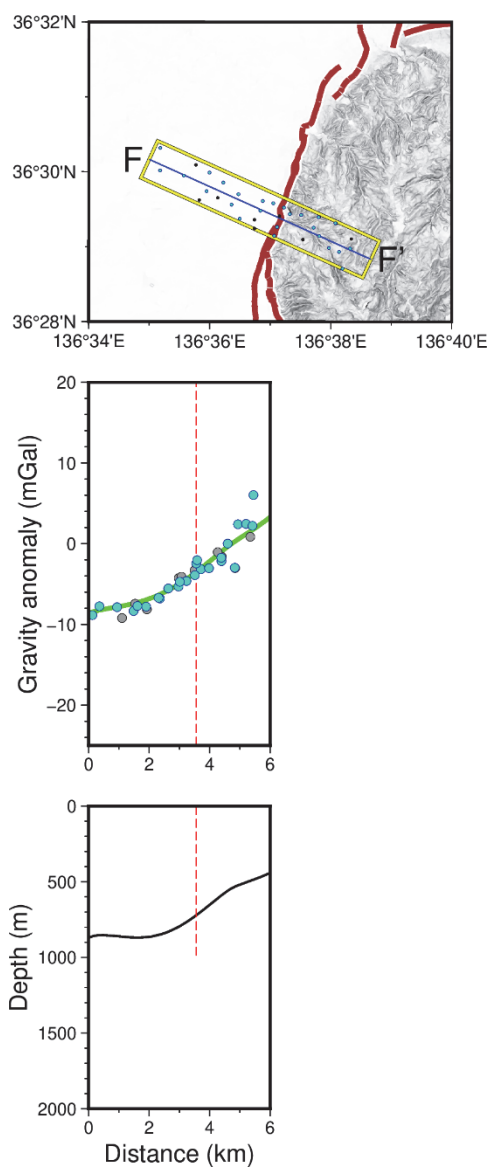


図 17 図の説明は図 14 と同じである。

3) 2次元タルワニ法による密度構造の検討

i) 2次元タルワニ法解析について

2次元断面における多層モデル解析手法の一つとして、2次元タルワニ法がある (Talwani *et al.*, 1959)。設定される2次元断面の奥行方向の構造は一定であるとの仮定の下、断面上の多角形で作られる2次元密度構造による重力変化を計算することができる。2次元タルワニ法の詳細については、物理探査ハンドブック (物理探査学会、1998) を参照されたい。

ii) 解析手法

解析に用いるソフトウェアは、The Generic Mapping Tools (Wessel *et al.*, 2019) のパッケージに含まれる talwani2d である。

解析対象断面は、反射法地震探査測線である犀川 - 医王山測線の解釈深度断面 (令和4年度成果報告書 Chap3-1-1) (図18) である。この断面は深部構造探査により、卯辰山層 + 上部更新統 + 完新統からなる第1層、大桑層 + 高窪層からなる第2層、中 - 下部中新統堆積岩類からなる第3層、医王山層 + 岩稲層からなる第4層について下面地層境界深度が推定されている。2次元タルワニ法解析に用いる初期密度構造モデルとして、図18に示される地層境界深度から作成した5層で構成されるモデルを用いる。断面の北西方向を負の方向、南東方向を正の方向とし、断面方向の距離の0mは野町断層の地表推定位置とした。また、境界条件として断面北西端では得られている地層境界深度が遠方 (約100 km) まで延伸すると仮定した。また断面南東端では、第4層 (医王山層 + 岩稲層に相当) と第5層 (下位層) との境界深度が地表から深さ 500 m までの厚さで遠方まで延伸すると仮定した。観測重力値として、断面上における遮断波長4 kmのフィルター処理後の重力異常 (図5) を用いる。密度構造モデルは4層の堆積層と基盤部で構成する。

iii) 検討結果

図18に示される各地層境界についての解釈深度を密度構造として2次元タルワニ法解析を行った結果を図19に示す。ここで2次元タルワニ法解析による重力異常値を北西側の観測重力異常値と適合させるために、第1層から第3層までの密度を 1900 kg/m^3 、第4層の密度を 2000 kg/m^3 、第5層の密度を 2500 kg/m^3 と設定した。この密度構造モデルは、断面方向の距離約3 kmから第4層と第5層との境界深度が浅くなることから、2次元タルワニ法解析による重力異常値も断面方向の距離約3 kmから大きくなっており、緩やかに増加する観測重力値の傾向から乖離する結果となった。3次元重力インバージョン解析の結果では、2層の境界深度が深さ約1500 mから約500 mへと浅くなり始める変化は断面方向距離約7 kmである。これは、断面方向距離約3 kmより南東側の密度構造モデルは第4層と第5層の境界深度が浅すぎることを示す。

南東部の2次元タルワニ法解析による計算重力異常値と観測重力異常値との乖離を修正するためには、各層の設定密度の変更やそれぞれの境界深度の変更、または両者の組み合わせが必要となる。例として第4層と第5層との境界深度を3次元重力インバージョン解析による境界深度の指定結果に近い形状に変更させた結果を図20に示す。なお。この2次元密度構造モデルでは第1層の密度を 1800 kg/m^3 、第3層の密度を 2000 kg/m^3 に変更して

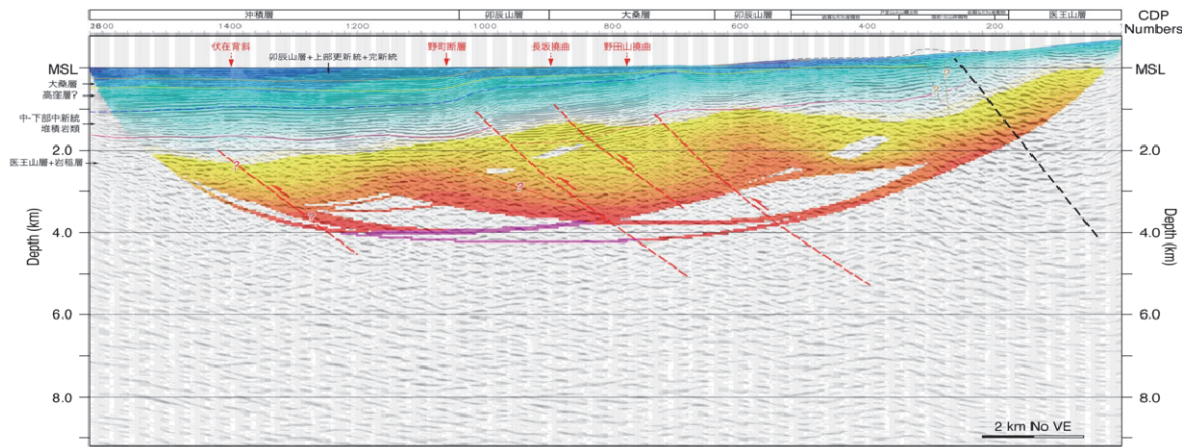


図 72 犀川－医王山測線の解釈深度断面(重合前時間マイグレーション深度断面図)。
速度構造を重ね合わせ表示。

図 18 犀川－医王山測線の解釈深度断面（令和 4 年度成果報告書 Chap3-1-1 から引用）。

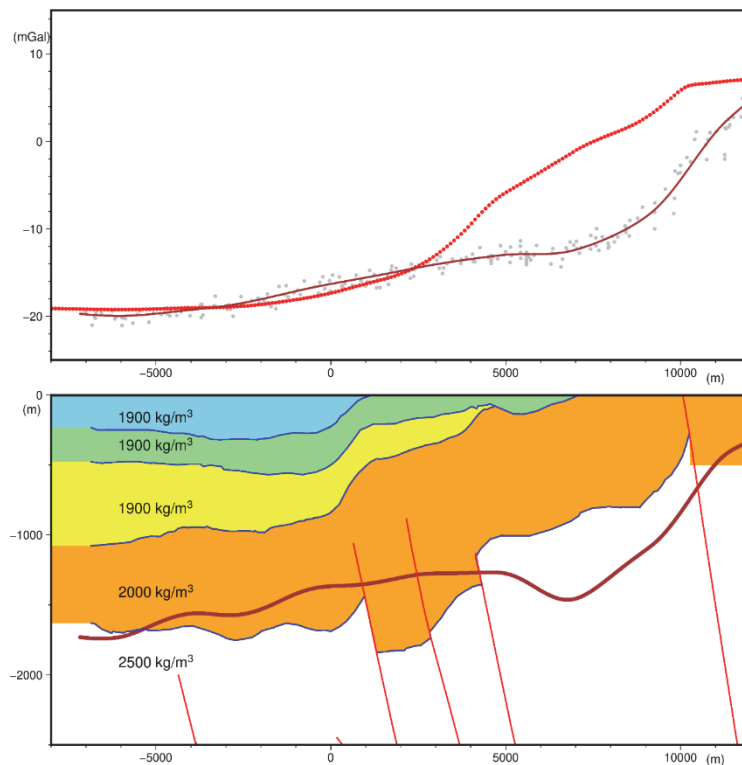


図 19 犀川－医王山測線の 2 次元タルワニ法解析結果。横軸の 0 m は野町断層の地表推定位置を示す。(上図) 茶線は図 5 の遮断波長 4 km のフィルター処理後の重力異常分布、灰点は断面から両端 1 km 範囲内の観測点における平面トレンドを取り除いた重力異常値、赤線は下図の密度構造モデルから得られる 2 次元タルワニ法解析結果。(下図) 青線は密度構造境界、各層はそれぞれ青、緑、黄、オレンジ、各層の密度は図中に表示、白色の領域、赤線は図 18 による推定断層、茶線は図 10 の 3 次元重力インバージョン解析結果から得られる 2 層の境界深度をそれぞれ示す。

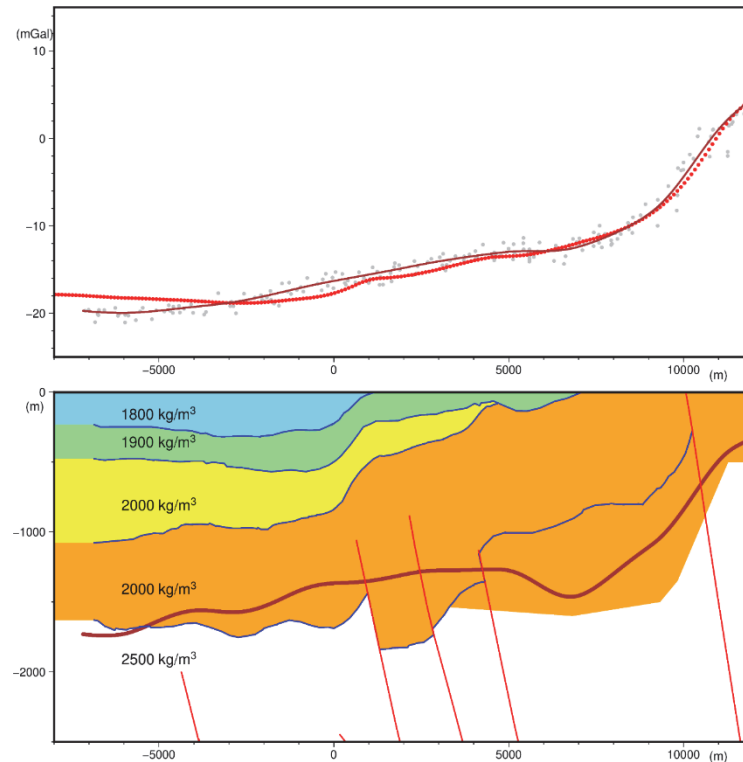


図 20 犀川 - 医王山測線の 2 次元タルワニ法解析結果。図の説明は図 19 と同じである。

いる。図 20 に示す結果は、第 4 層の厚さが解釈深度断面で示されているものより厚い、あるいは第 5 層中に低密度岩体が多く含まれる可能性を示唆する。

また、北西側の 2 次元タルワニ法解析結果についても、計算重力異常値と観測重力異常値との乖離を各層の設定密度やそれぞれの境界深度の変更により小さくすることは可能である。しかし、これらの修正は自由度が高いため、唯一的な 2 次元密度構造を重力異常値のデータのみからは導くことが困難である。したがって、他のデータや他のサブテーマの解析結果を参考にして、密度構造モデルの自由度を減らすことが来年度の課題である。

4) Scintrex CG-3M 型重力計の精度の検定

2024 年 1 月 1 日の令和 6 年能登半島地震により、金沢大学の重力計の保管部屋で棚から落下した荷物が重力計を直撃する被害があった。その後実施した重力計の動作テストにおいて、保管部屋での読み取り値は、2023 年 12 月 18 日は 5349.085 (mGal) であったのに対し、2024 年 1 月 25 日では 5386.098 (mGal) と約 37 mGal の重力値の差を示した。この差は通常では観測されない数値である。その原因として、

1. 荷物落下による衝撃のため機械的な不具合が生じた。
2. この 2 回の測定の間年に年をまたいでおり、Scintrex CG-3M 型重力計が内蔵する時間処理のソフトウェアに誤作動が生じた。
3. 金沢大学周辺の地下で令和 6 年能登半島地震を原因とする密度構造の大きな変動があった。

の 3 つが考えられる。この内、3 の密度構造の変化は、重力値の変化が大きすぎるため考

えにくい。一方、2のソフトウェアの誤作動はこれまでの重力計の運用でも確認されており、今回もソフトウェアの誤作動による可能性が高いと考えられるが、1の機械的な原因による可能性も否定できない。

そのため、金沢大学所有の Scintrex CG-3M 型重力計の動作確認及び精度検定を目的として、既知の重力値が公開されている複数の一等重力点（国土地理院，2023）と一等重力点金沢との重力値の差の測定を臨時に実施した。測定を実施した一等重力点は、一等重力点金沢の重力値と大きく異なる重力値が得られる山形、新潟、紀伊半島、中国地方及び南九州の 26 点の一等重力点である（図 21）。

重力測定は令和 6 年 2 月 3 日から 3 月 14 日にかけて実施した。結果として、一等重力点金沢と検定に用いた一等重力点との重力値の差と、2 点間の正確な重力差と金沢大学所有の Scintrex CG-3M 型重力計による測定重力差とのずれ、とをプロットしたグラフを図 22 に示す。

金沢大学所有の Scintrex CG-3M 型重力計については、これまでも測定される重力値の大きさに比例するずれが確認されており、この重力計が示す 1 mGal の差に 2.2261×10^{-3} の係数をかけた値を補正值として加えた値を使用している。図 22 による検定結果は、今回検定で得られた赤点がこれまでの一等重力点で測定された値で判明しているずれとほぼ同じ値を示していることが判明した。今回の検定結果を追加して得られた補正係数は、 $(2.3089 \pm 0.0279) \times 10^{-3}$ となる。

結果として、金沢大学所有の Scintrex CG-3M 型重力計は正常に動作することが判明した。また、今回の検定により、令和 6 年能登半島地震の前後で一等重力点金沢にて顕著な重力値の変動は見られないことも確認された。

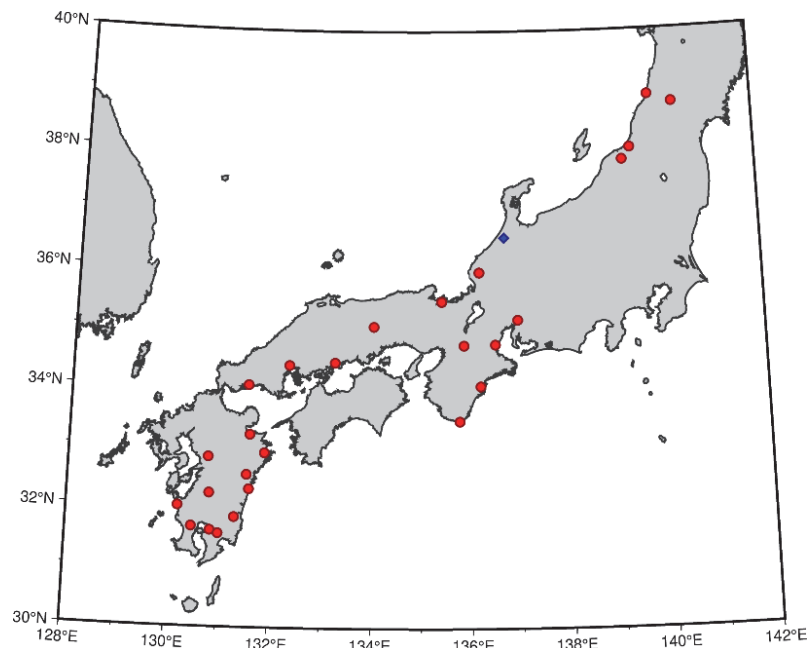


図 21 重力計検定に使用した測定点の分布図。赤点：重力計検定に使用した一等重力点。青点：一等重力点（金沢）。

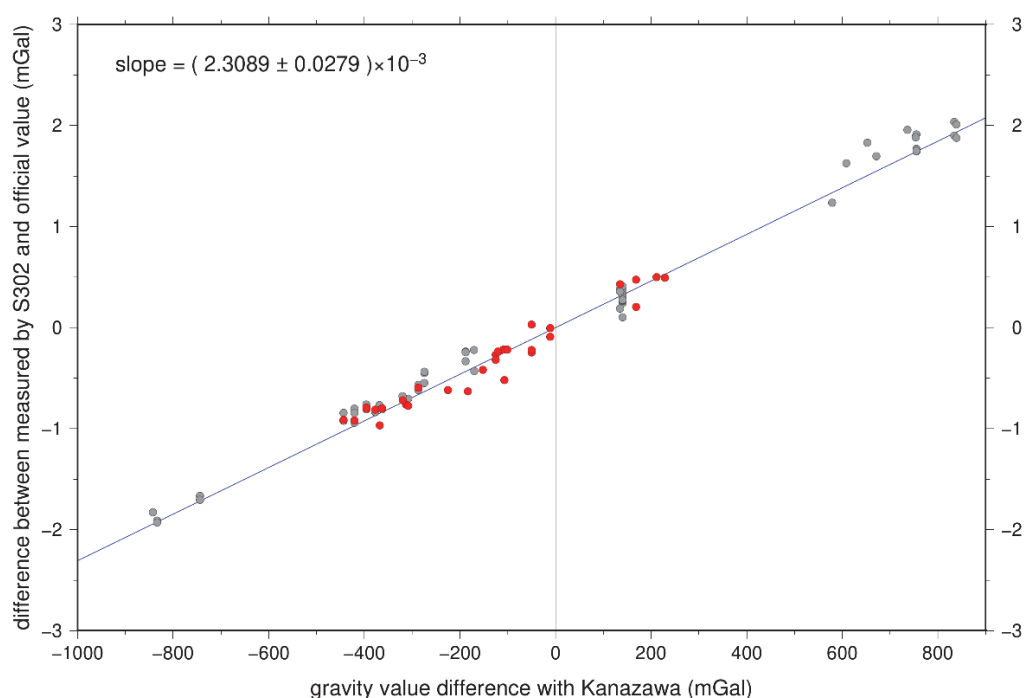


図 22 重力計検定測定の結果。赤点は令和 5 年度に検定を行った測定値、灰点は既存一等重力点測定値、青線は一等重力点金沢での測定値を原点として最小二乗法により得られた回帰直線を示す。横軸：一等重力点金沢と検定に用いた一等重力点との重力値の差、縦軸：2 点間の正確な重力差と金沢大学所有の Scintrex CG-3 M 型重力計による測定重力差との差。

(d) 結論ならびに今後の課題

令和 4 年度に引き続き、森本・富樫断層帯周辺で重力測定を行い、460 点の新規測定データを追加した。これらの新規重力データを加えた重力異常図及びその勾配図を作成し、森本・富樫断層帯及び周辺の活断層に関する重力異常の特徴を抽出した。森本・富樫断層帯は全体としては重力異常では断層構造の特徴が明瞭ではないが、堆積盆の構造を示す低重力異常域に断層帯が区画されている。森本・富樫断層帯の傾斜方向の重力異常の勾配からは森本断層及び野町断層については断層構造に起因する可能性のある重力異常が見られるが、富樫断層では不明瞭であった。断層周辺での重力異常の特徴が不明瞭であることは、基盤における鉛直方向の断層変位が小さい可能性を示唆する。

また、令和 4 年度調査で明らかとなった既往重力測定点の標高値の問題に対して、周囲の重力測定点が追加され、周辺測定点での重力値との比較検証を行えるようになりつつあり、標高値の差が大きな既往重力測定点の標高値について、令和 6 年度に検証を行う。

得られた重力異常分布から、森本・富樫断層帯周辺地域において 3 次元重力インバージョン解析を行い、2 層構造を仮定した場合の 2 層の境界深度分布の推定を行った。複数例のパラメータ設定に対して、解析を行った結果、観測重力異常分布を説明する境界深度分布が得られた。3 次元重力インバージョン解析については、令和 6 年度も引き続き、解析に用いるパラメータ設定の検討を行い、より正確な地下構造モデルの形成に努める。また、

令和4年度に行われた反射法地震探査測線である犀川－医王山測線で2次元タルワニ法解析を行い、報告された解釈深度断面構造に基づき単純な仮定の下で作成した2次元密度構造では観測重力異常値の説明に困難があることを確認した。令和6年度は、反射法探査結果を参照しつつ、2次元タルワニ法解析に用いるパラメータ等の修正により、より正確な2次元密度構造モデルの作成に努める。

令和6年能登半島地震により、金沢大学所有のScintrex CG-3M型重力計による重力測定精度が悪化した懸念が生じたため、山形、新潟、紀伊半島、中国地方、南九州の一等重力点での重力測定を実施した。その結果、本調査で使用する重力計の測定精度に問題がないことを確認した。令和6年度も引き続き、重力計の測定精度の検定を行う。

(e) 引用文献

物理探査学会，物理探査ハンドブック，物理探査学会，462pp，1998.

本多亮・河野芳輝，日本列島周辺の海陸統合50Mメッシュ地形データの作成とそれを用いた海陸重力地形補正，測地学会誌，51，33-44，2005.

本多亮・澤田明宏・古瀬慶博・工藤 健・田中俊行・平松良浩，金沢大学重力データベースの公表，測地学会誌，58(4)，153-160，2012.

紘野義夫（編），石川県地質誌，新版・石川県地質図（10万分の1）説明書，石川県・北陸地質研究所，1993.

国土地理院，重力データ検索

(http://vldb.gsi.go.jp/sokuchi/gravity/grv_search/gravity.pl)，2002.（2002年9月1日閲覧）.

国土地理院，基盤地図情報数値標高モデル10mメッシュ（標高）(<https://fgd.gsi.go.jp/download/menu.php>)，2014.（2014年7月16日閲覧）.

国土地理院，基準点成果等閲覧サービス(<https://sokuseikagisl.gsi.go.jp/top.html>)，2023.（2023年2月6日閲覧）

Longman I. M., Formulas for Computing the Tidal Accelerations Due to the Moon and the Sun, J. Geophys. Res., 64(12), 2351-2355, 1959.

村田泰章・宮川歩夢・駒澤正夫・名和一成・大熊茂雄・上嶋正人・西村清和・岸本清行・宮崎光旗・志知龍一・本多亮・澤田明宏，金沢地域重力図（ブーゲー異常）. 重力図，No. 33，産業技術総合研究所地質調査総合センター，2018.

Rama Rao, P., Swamy, K.V. and Radhakrishna Murthy, I.V., Inversion of gravity anomalies of three-dimensional density interfaces, Computers and Geosciences, 25, 887-896, 1999.

産業技術総合研究所地質調査総合センター（編），日本重力データベースDVD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，2013.

産業技術総合研究所地質調査総合センター（編），20万分の1日本シームレス地質図，2015年5月29日版，産業技術総合研究所地質調査総合センター，2015.

Shichi, R. and A. Yamamoto (Representatives of the Gravity Research Group in Southwest Japan), Gravity Database of Southwest Japan (CD-ROM), Bull. Nagoya University Museum, Special Rept., No.9, 2001.

- Talwani, M., Wozel, J. and Landisman, M., Rapid computation for two dimensional Bodies with application to Mendocino Submarine Fracture Zone, J. Geophysical Res., 64, 49-59, 1959.
- 山田来樹・高橋俊郎, 北陸地方における日本海拡大期火成活動の時空変遷: 漸新世～中期中新世火山岩類の層序, 年代, 岩石学的特徴, 地質学雑誌, 127(9), 507-525, 2021.
- Yamamoto, A., R. Shichi and T. Kudo, Gravity Database of Japan (CD-ROM), Earth Watch Safety Net Research Center, Chubu University, Special Publication, No.1, 2011.
- Wessel, P., Luis, J. F., Uieda, L., Scharroo, R., Wobbe, F., Smith, W. H. F., and Tian, D., The Generic Mapping Tools version 6. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 20, 5556-5564. <https://doi.org/10.1029/2019GC008515>, 2019.