

### 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<br>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<br>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<br>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  | 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 |
| 国立大学法人金沢大学理工学域                | 学部生   | 勝村 拓紀 |
| 国立大学法人金沢大学理工学域                | 学部生   | 佐藤 光樹 |

(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2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した。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た。

## (2) 令和6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5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295点の新規重力データを得た。

#### 2) 森本・富樫断層帯周辺における既往重力データの検証

令和4年度から実施した森本・富樫断層帯周辺での稠密な重力探査の結果、DEMデータや隣接する重力データとの比較により、測定精度が低いと考えられる既往重力データが抽出可能となり、それらの測定点での重力測定の再実施または測定値の除去処理を行った。

#### 3) 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、異なる密度からなる2層構造を仮定した3次元重力インバージョン解析を行い、2層の境界深度分布を推定した。

#### 4) 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一医王山測線の解釈深度断面及び令和5年度に実施された反射法地震探査測線である内灘一南砺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各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。さらに、森本・富樫断層帯に直交する複数測線での2次元タルワニ法解析によって、断層近傍での重力異常値の変化と密度境界深度の変化の比較を行った。

#### 5) 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北海道、新潟及び富士山の一等重力点または絶対重力測定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5項目とした。

- 1) 森本・富樫断層帯周辺における既往重力データの精査
- 2) 森本・富樫断層帯周辺における重力探査
- 3) 3次元重力インバージョン解析による密度構造の推定
- 4) 2次元タルワニ法解析による密度構造の検討
- 5) Scintrex CG-3M型重力計の精度検定

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

1)では、既往重力データに令和4年度からの業務により得られた新規重力データを加えた稠密な重力データを構築し、DEMデータや隣接する重力データとの比較により、既往重力データに含まれる測定精度が低いと考えられる重力データを抽出し、それらの測定点での再重力測定または測定値の除去を行う。

2)では、令和4～5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富樫断層西側の平野部、森本断層東側の丘陵部から砺波平野にかけての領域にて重力測定を実施する。

3)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層の境界深度分布の推定を行う。

4)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及び令和5年度反射法地震探査測線である内灘－南砺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との比較により、2次元密度構造の検討を行う。また、反射法地震探査測線以外の森本・富樫断層帯に直交する測線を5本設定し、各測線において2次元タルワニ法解析を実施し、2次元密度構造を検討する。

5)では、本調査で用いる Scintrex CG-3M 型重力計の測定精度の確認を目的として北海道及び富士山の一等重力点または絶対重力測定実施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。

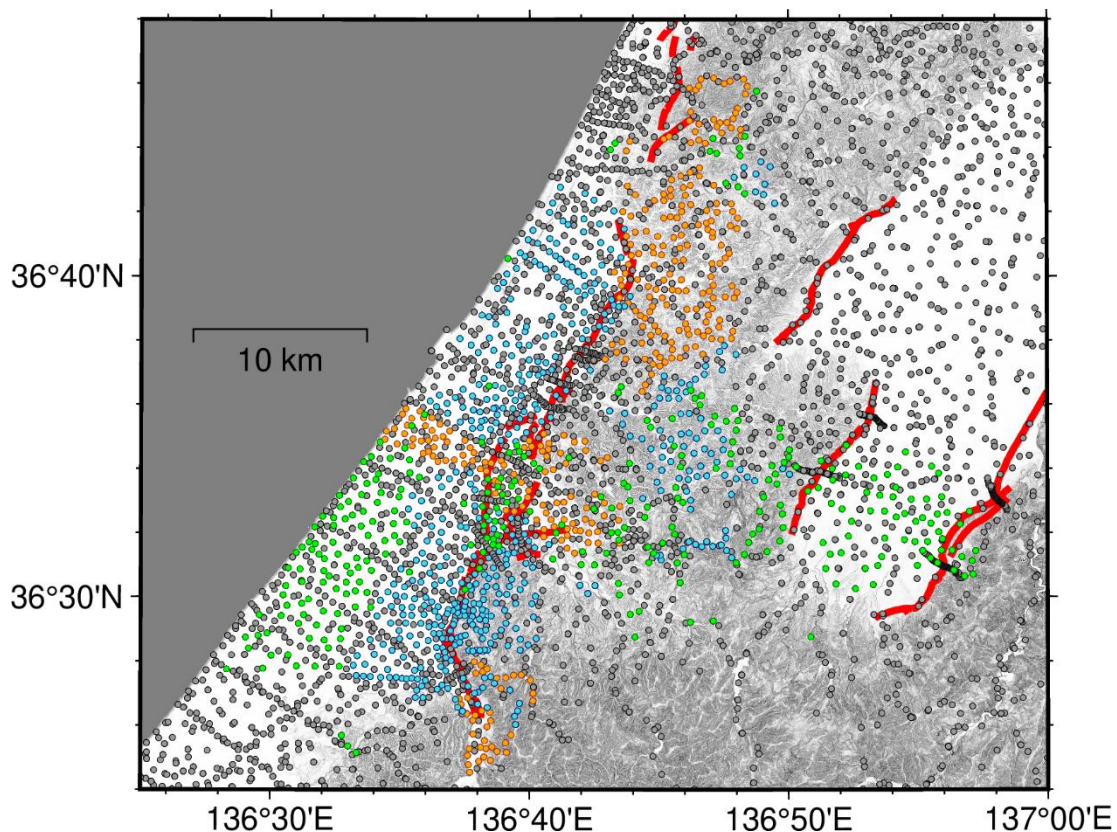


図1 森本・富樫断層帯周辺の令和4年度の調査における重力測定点（オレンジ丸）、令和5年度の調査における新規重力測定点（青丸）、令和6年度の調査における新規重力測定点（緑丸）、既往重力測定点（灰丸）、赤線は活断層の地表トレース位置（森本・富樫断層帯についてはサブテーマ1.1より引用、以下の図も同様）を示す。

(c) 業務の成果

1) 森本・富樫断層帯周辺における既往重力データの精査

i) 既往重力データに含まれる誤重力データについて

解析に使用する重力データとしては、令和4年度から令和6年度にかけて測定を行った重力データ（図1）の他に、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）を合わせて用いる。しかし、これらの既往重力データはGNSS 利用可能となる以前に測定されたものも多く、それらの一部には地図からの位置情報の判読誤り、コンピュータへの入力ミスによる誤り、重力計を用いた測定時の数値読み取りの誤り及び記載誤り等の可能性がある。これらの誤りは、該当測定点の周辺に精度の良い重力データが存在すれば、重力値の不自然な差として抽出可能であるが、これまでは測定点分布が疎であったために、そのような重力データが局所的な地質構造による真の値か、誤重力データかの識別が困難であった。

ii) 精査手順

重力データには測定点の位置情報および重力値が含まれる。重力値は位置情報によって補正された値であるため、位置情報の正確さが誤重力データを抽出する上で重要になる。測定の多くが道路上にて行われることから、位置情報の緯度と経度で示される点が地図上にて道路上ではなく、アクセス困難な場所にある場合、その測定点の緯度と経度の情報は誤りである可能性が高く、その重力データも誤データである可能性が高い。また、位置情報の標高値は、DEM データとの数値的な差分が可能であり、誤重力データの自動抽出が可能である。

誤重力データ抽出の作業手順は以下のとおりである（図2）。

- ・令和4年度サブテーマ1.1で作成された0.5 m グリッドのDEMの標高値と重力データに記載された標高値とを比較し、それらの差が5 m 以上である点を抽出する。

- ・抽出された重力データの測定点について、測定点の周囲1.5 km 程度の範囲でのブーゲー異常分布図、対象測定点が存在しない場合のブーゲー異常分布図、道路境界線が描かれた地形図を作成する。

- ・地形図から、重力測定に適した場所に測定点が位置するか否かを調べ、水平位置を確認する。不適切な場所に測定点が位置する場合は、水平位置情報が誤っている可能性が高いと判断し、該当する重力データを誤重力データとして除去対象とする。

- ・0.5 m グリッドのDEMの他に基盤地図情報数値標高モデル10 m メッシュ及び5 m メッシュ（国土地理院）、地形図を参照し、0.5 m グリッドのDEMの標高値の確度を確認する。重力測定後に行われた工事等による地形改変も考慮した上で、重力データに記載されている標高値が誤っている可能性が高いと判断できる場合は、該当する重力データを誤重力データとして除去対象とする。

- ・上で作成された3種類のブーゲー異常分布図を比較する。地下密度構造の変化による重力異常変化は大きくないと仮定した上で、対象測定点の重力データのみによりブーゲー異常の急変が生じている場合には、周囲の重力データが誤重力データである可能性も考慮しつつチェックをした上で、対象重力データが誤っている可能性が高いと判断されるな

らば、その重力データを誤重力データとして除去対象とする。

・上記のチェックによっても誤重力データであるかの判断がつかない重力データについては、再重力測定が容易な場所であれば再測定候補点とし、後日再測定を行う。一方、再重力測定が難しい場所（多くは現在通行不可となっている林道上である）の場合は、重力データを除去しない。再測定候補点とした測定点については、再測定された重力データを使用し、再測定を行うことができなかった場合には既往重力データを引き続き使用した。

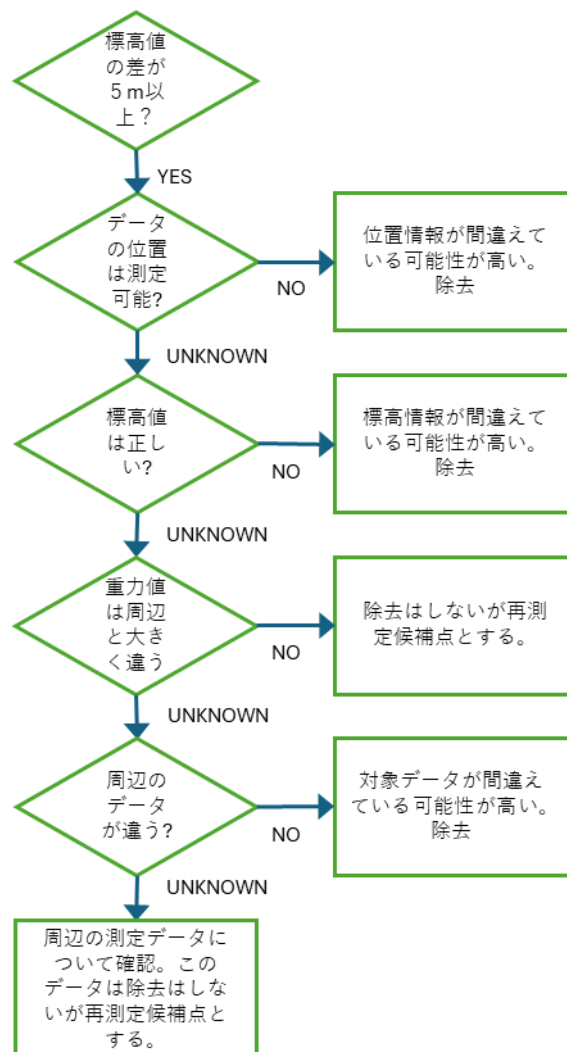


図2 誤重力データ抽出及び除去手順のフローチャート

iii) 既往重力測定点精査による結果

上記 ii) の手順により、誤重力データとして除去した重力データは 248 点である。また、除去とあわせて再測定を行った重力データは 76 点である（その他令和 5 年度に 6 点の再測定点がある）。除去した重力データの測定点及び再測定を行った重力データの分布を図 3 に示す。また、令和 5 年度までの誤重力データ除去前の重力異常分布図と誤重力データ除去後の重力異常分布図をそれぞれ図 4 に示す。誤重力データ除去により重力異常分布図が滑らかになったことが分かる。

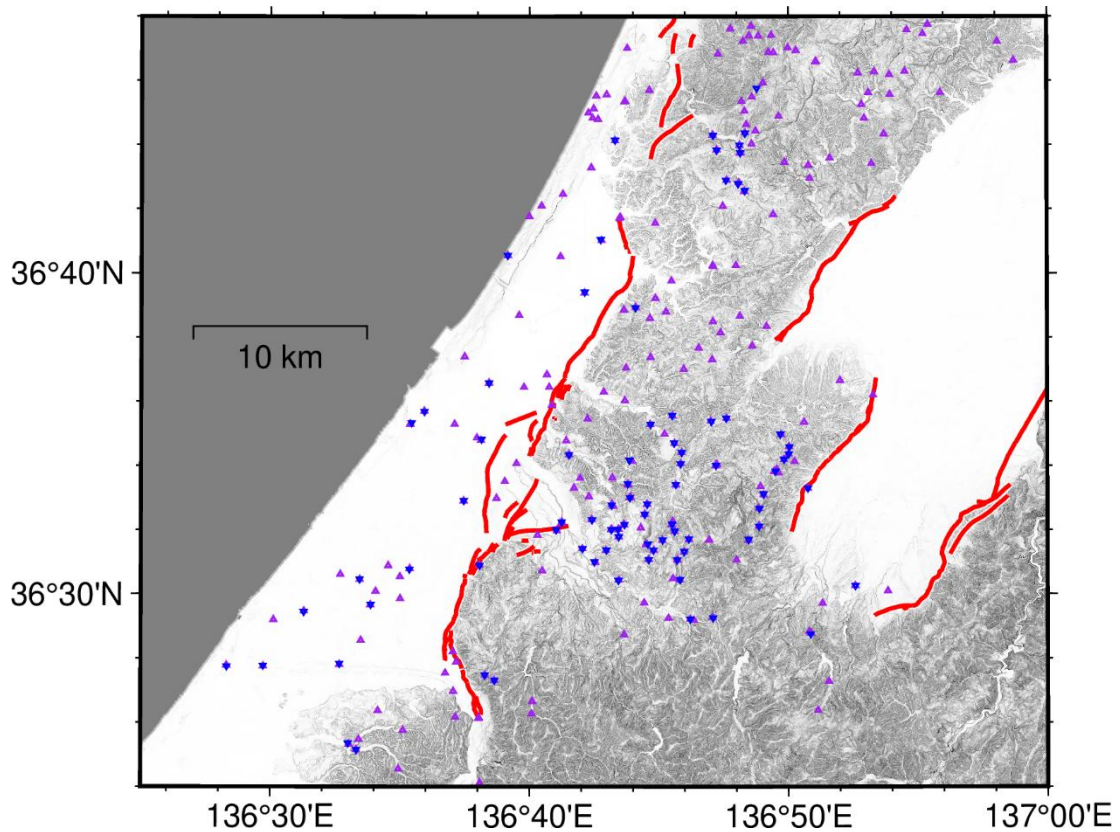


図 3 森本・富樫断層帯周辺の誤重力データと判断し除去対象とした測定点（紫三角）及び再測定点（青逆三角）の分布。赤線は活断層の地表トレース位置を示す。

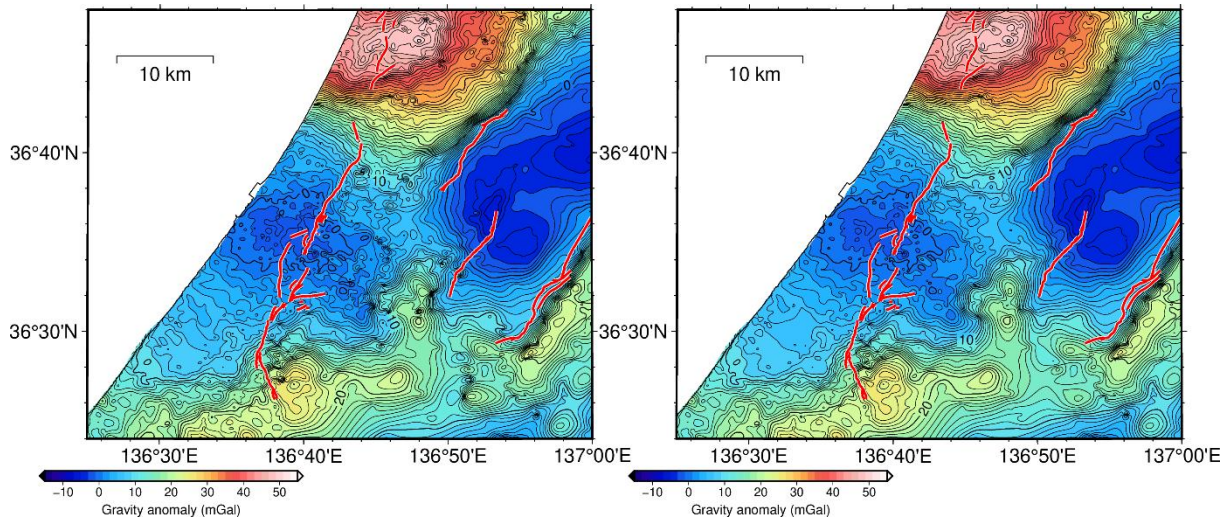


図4 (左) 令和5年度までの重力データで作成したブーゲー異常分布図。(右) 左図から誤重力データを除去した重力データを用いて作成したブーゲー異常分布図。それぞれブーゲー補正密度は  $2300 \text{ kg/m}^3$ 、コンター線の間隔は  $1 \text{ mGal}$  である。赤線は活断層の地表トレース位置を示す。

## 2) 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年度および令和5年度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6年度調査における新規重力測定は、富樫断層西側の平野部（主に白山市から川北町にかけて）、及び森本断層東側の丘陵部から砺波平野（主にサブテーマ1.1による内灘－南砺地震波探査測線周辺）にて重点的に実施した。また、1)で行った森本・富樫断層帯周辺における既往重力データの精査により重力データの精度が疑わしい測定点について再測定を合わせて実施した。

新規重力測定点の配置については、令和4～5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6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年度および令和5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  $151.94 \text{ m}$  であった。また、RTK測量が行えない観測点では位置決定にGNSSによるStatic測量を行った。

#### ii) 重力測定手順

重力測定における作業手順は以下のとおりである。

- ・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、ブーゲー補正及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及び終了時に金沢大学敷地内の一等重点金沢にて重力測定を行い、潮汐補正及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值を計算し、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值としては  $0.3086 \times \text{標高(m)}$  (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) を用いて補正值を計算する。本調査で用いる補正密度は  $2300 \text{ kg/m}^3$  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<sup>3</sup>、重力図では補正密度として 2300 kg/m<sup>3</sup> の値が用いられており、本調査で用いる 2300 kg/m<sup>3</sup> の補正密度は妥当であると考えられる。

上記の補正值を用いて、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)、 $\gamma$  : 正規重力値 (mGal)、 $d$  : ドリフト補正值 (mGal)、 $G_T$  : 潮汐補正值 (mGal)、 $h$  : 標高 (m)、 $\beta h$  : フリーエア補正值 (mGal)、 $G$  : 万有引力定数、 $2\pi G \rho h$  : ブーゲー補正值 (mGal)、 $T_c$  : 地形補正值 (mGal)、 $C_A$  : 大気圧補正值、である。

#### v) 令和 6 年度における重力測定結果

令和 6 年度の重力測定によって、新規に 295 点の重力データが得られた。この中には 1) にて実施された既往重力データの精査によって行われた再測定点として 76 点が含まれる。これらの測定点での測定結果を追加して作成された重力異常分布について、1) の結果と合わせて作成する。

#### vi) 令和 6 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 6 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 5 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 5 右上に平面トレンド成分、図 5 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 5 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 5 左下）。図 5 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 5 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、平野部など既往データが付近に存在していた地域では、差分量は概ね ± 2 mGal 以下であり、既往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。

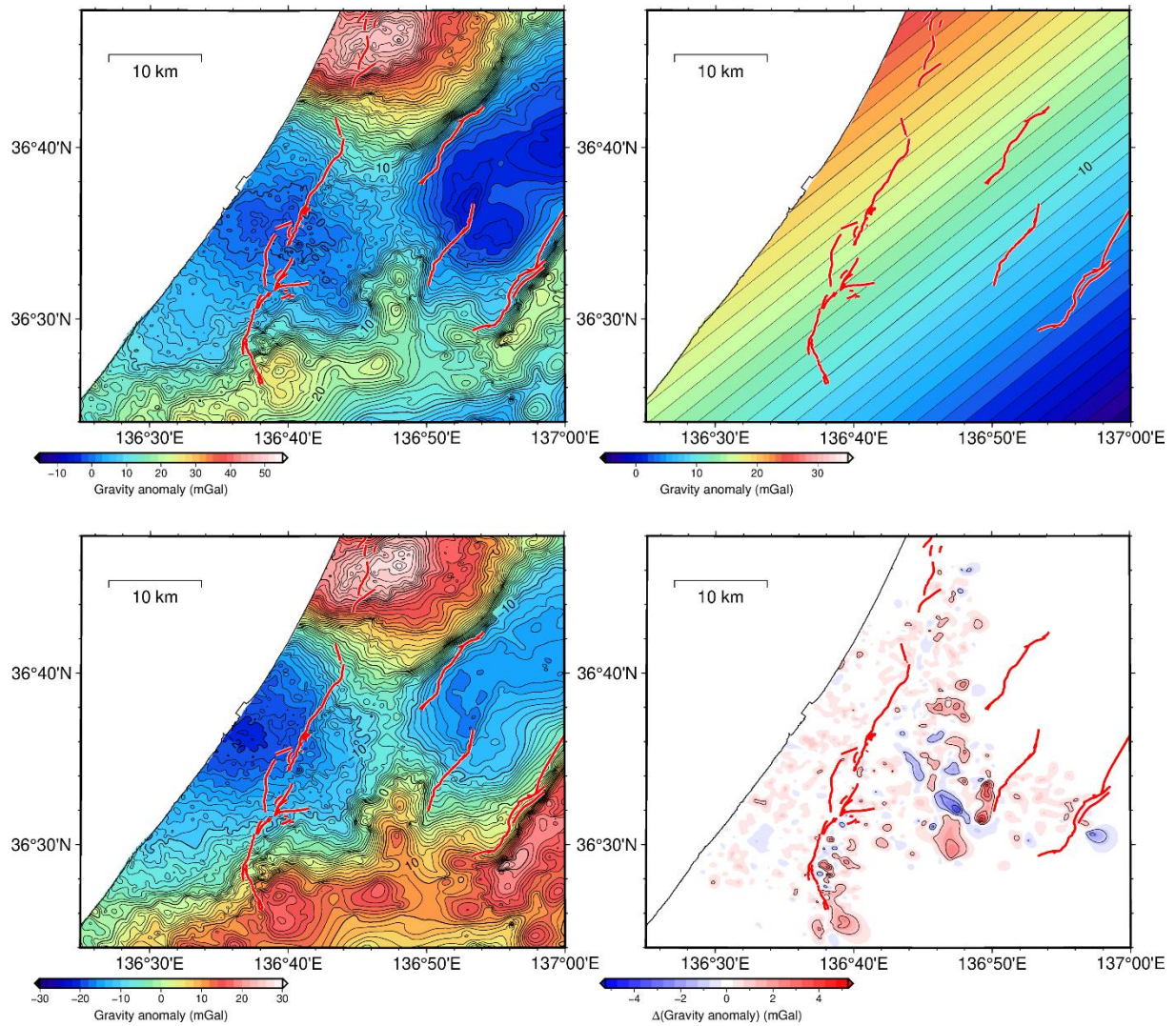


図5 (左上) 森本・富樫断層帯周辺における本研究で得られた重力値を含むブーゲー異常図。(右上) 平面トレンド成分の分布。(左下) 平面トレンド成分を取り除いた重力異常図。(右下) 本研究による重力値を含む重力異常分布と既往重力データに基づく重力異常分布の差。コンター線の間隔は1 mGal である。赤線は活断層の地表トレース位置を示す。

vii) 森本・富樫断層帯周辺の地形と地質の概要

図5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6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。

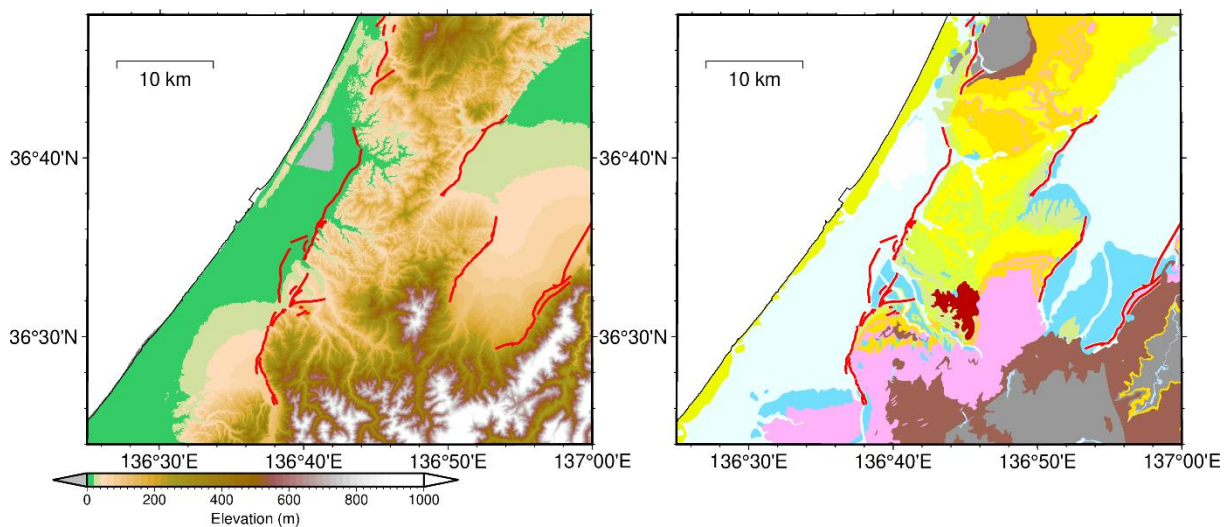


図6 森本・富樫断層帯周辺の地形図と地質図。地形は国土地理院数値標高モデルに基づく。地質図は20万分の1日本シームレス地質図(産業技術総合研究所地質調査総合センター(編), 2015)を改変。赤線は活断層の地表トレス位置を示す。

- 後期更新世～完新世の堆積物
- 砂丘堆積物
- 後期更新世の低位段丘堆積物
- 後期更新世の中位段丘堆積物
- 中期更新世の高位段丘堆積物
- 中期更新世の火山岩類
- 中期更新世の堆積岩類
- 前期更新世の堆積岩類
- 後期中新世～鮮新世の堆積岩類
- 中期～後期中新世の堆積岩類
- 前期～中期中新世の珪長質火山岩類
- 前期～中期中新世の苦鉄質火山岩類
- 前期～中期中新世の堆積岩類
- 先新生代の基盤岩類

viii) 森本・富樫断層帯周辺における重力異常の特徴

図7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。邑知瀉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。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5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8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7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8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。

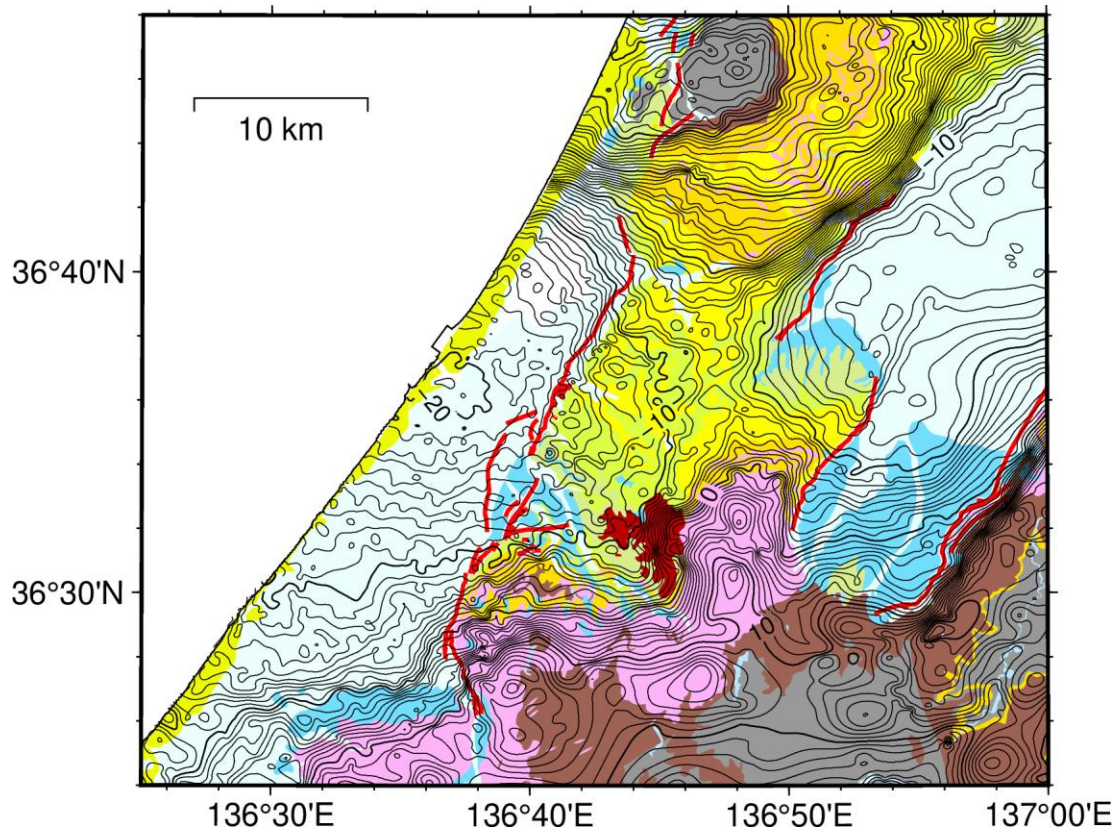


図7 地質図と重ね合わせた平面トレンド成分を取り除いた重力異常図。コンター線の間隔は1mGalである。地質図の凡例は図6と同じである。赤線は活断層の地表トレース位置を示す。

図9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。

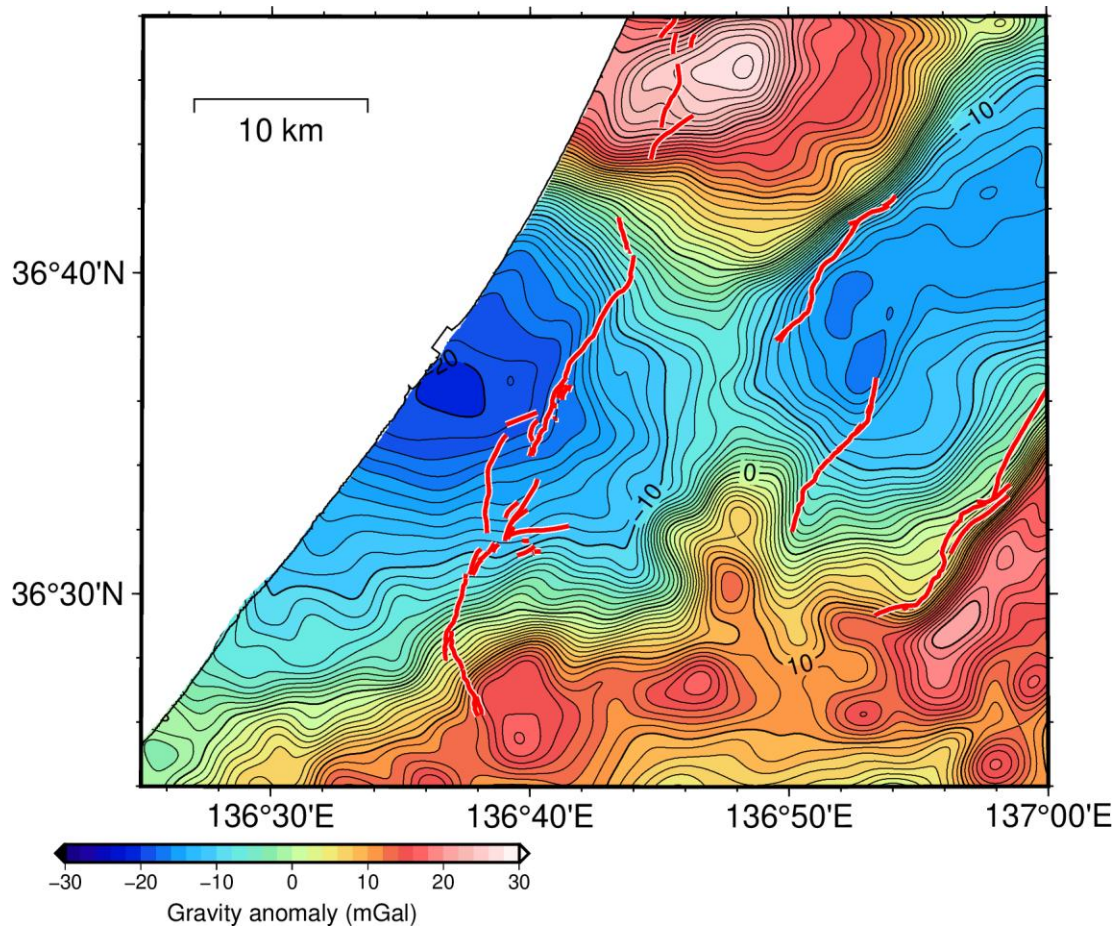


図8 遮断波長 4 km のフィルター処理後の重力異常図。コンター線の間隔 1 mGal である。赤線は活断層の地表トレース位置を示す。

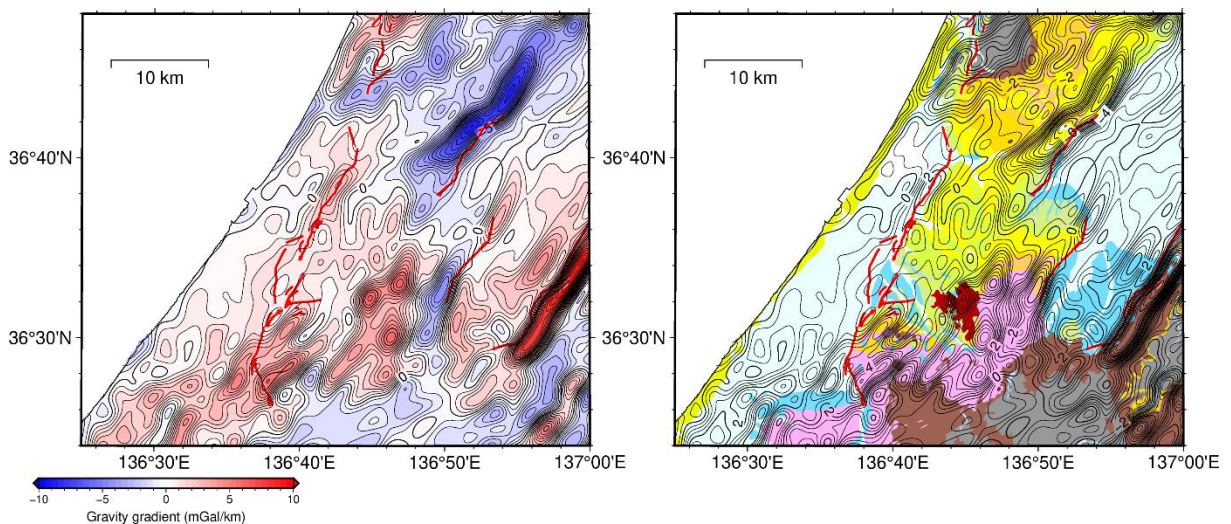


図9 (左) 遮断波長 4 km のフィルター処理後の重力異常の森本・富樫断層帯の傾斜方向の勾配。(右) 地質図と重ね合わせた遮断波長 4 km のフィルター処理後の重力異常の森本・富樫断層帯の傾斜方向の勾配。コンター線の間隔は 0.5 mGal/km である。地質図の凡例は図6と同じである。赤線は活断層の地表トレース位置を示す。

図 10 は森本・富樫断層帯の走向方向と平行な  $N30^{\circ} E$  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、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と考えられる。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 9 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。

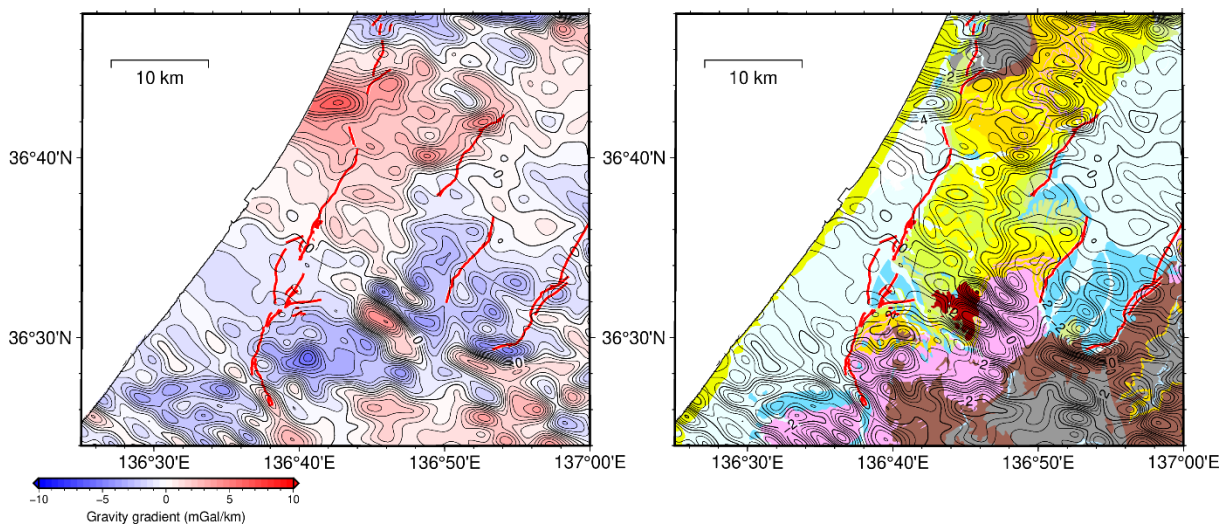


図 10 (左) 遮断波長 4 km のフィルター処理後の重力異常の森本・富樫断層帯の走向方向の勾配。(右) 地質図と重ね合わせた遮断波長 4 km のフィルター処理後の重力異常の森本・富樫断層帯の走向方向の勾配。コンター線の間隔は 0.5 mGal/km である。地質図の凡例は図 6 と同じである。赤線は活断層の地表トレース位置を示す。

図 11 は図 8 に示す重力異常の水平一次微分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微分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微分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断層構造を持つと考えられる。

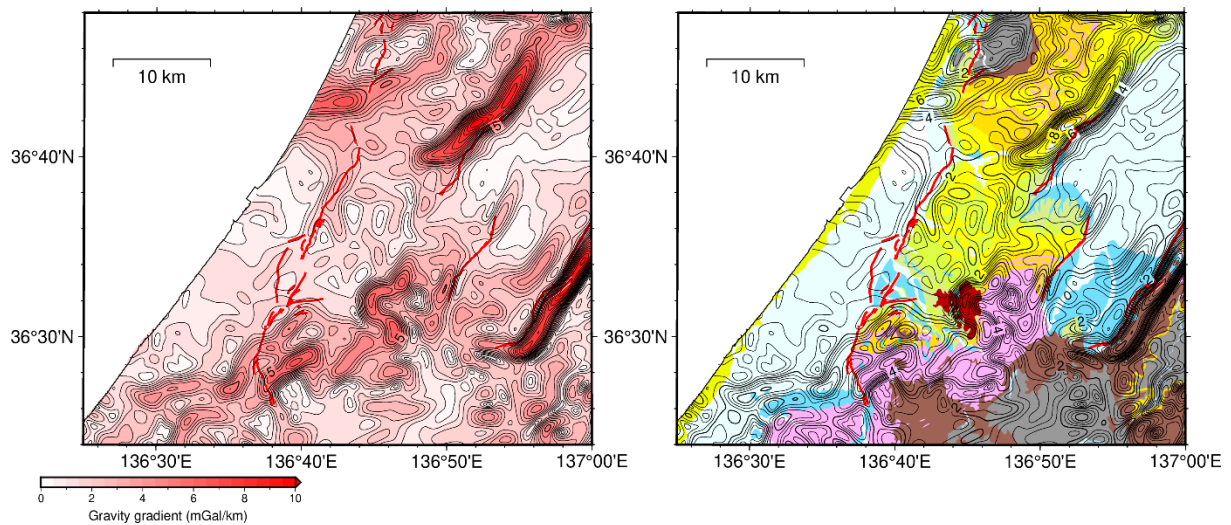


図 11 (左) 遮断波長 4 km のフィルター処理後の重力異常の水平一次微分。コンター線の間隔は 0.5 mGal/km である。(右) 地質図と重ね合わせた遮断波長 4 km のフィルター処理後の重力異常の水平一次微分。コンター線の間隔は 0.5 mGal/km である。地質図の凡例は図 6 と同じである。赤線は活断層の地表トレース位置を示す。

### 3) 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、単位は m) : 22000 ~ 106000 (m)、Y (東方向に正、単位は m) : -74000 ~ 10000 (m) 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 から 2000 m まで 250 m 間隔で試行する。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 250 m、密度差を  $500 \text{ kg/m}^3$  と設定したときの解析結果を図 12 に示す。 $500 \text{ kg/m}^3$  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  $1800 \text{ kg/m}^3$  とその下位に存在すると推定される医王山層を想定した珪長質火山岩類の密度に相当する  $2300 \text{ kg/m}^3$  との密度差に相当し、医王山層などに相当する前期中新統及び下位の基盤岩などの形状については平坦であると仮定している。

観測重力異常分布 (図 12 右下) と図 12 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 12 右上) との差を示す差分図 (図 12 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、観測重力異常値と理論重力異常値の差が大きい領域は、境界深度が概ね 0 m であり、これは下位層が地表に達していると解釈することができる。地質図 (図 6) 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し、3次元重力インバージョン解析で下位層が地表に達する結果と整合的であることが分かる。

図 12 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 13 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。

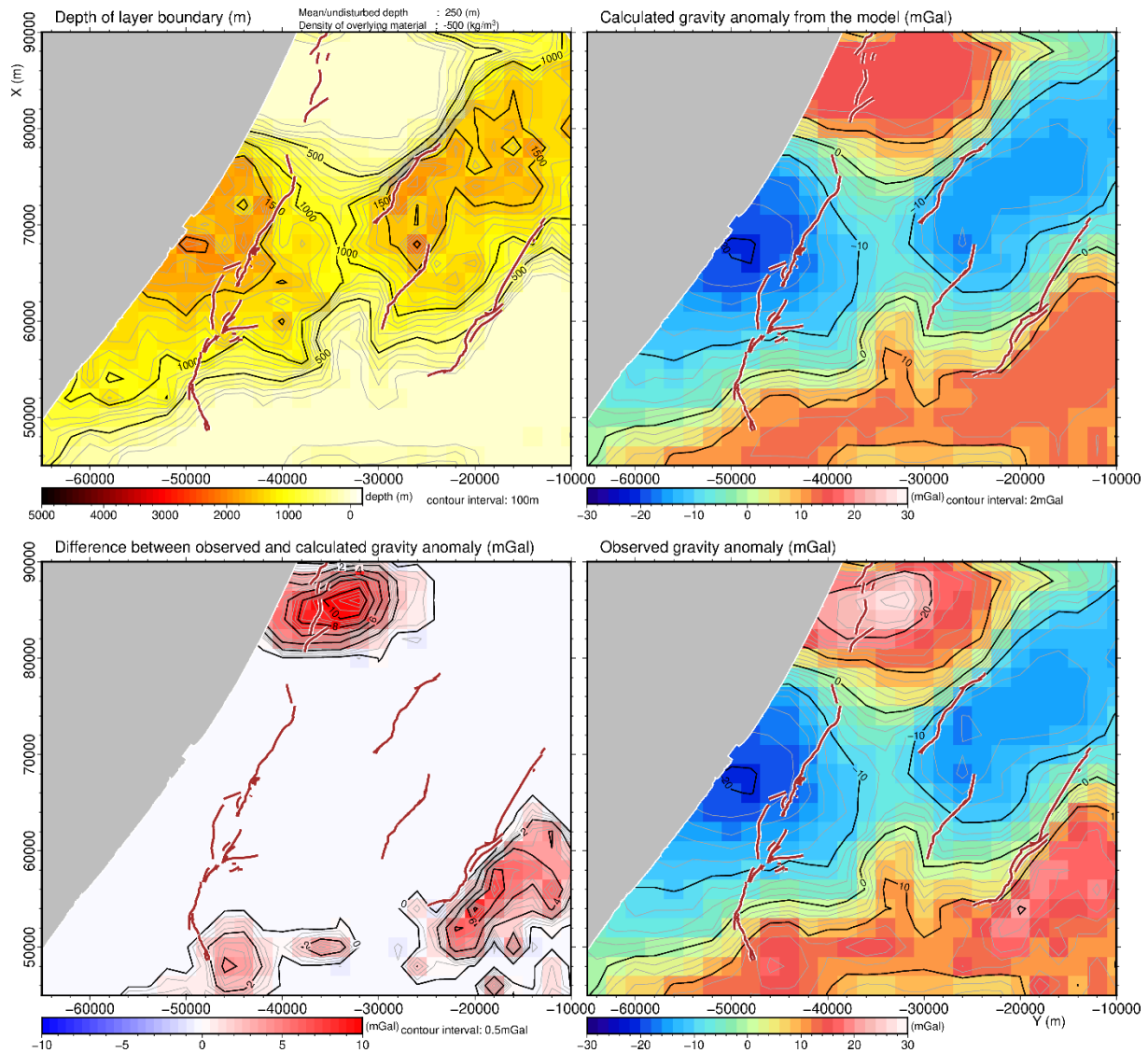


図 12 (左上) 初期パラメータの境界深度を 250 m、密度差を 500 kg/m<sup>3</sup> と設定した場合の 3次元重力インバージョン解析から推定された境界深度分布。コンター線の間隔は 100 m である。(右上) 3次元重力インバージョン解析により得られた密度構造から計算される理論重力異常分布。コンター線の間隔は 2 mGal である。(左下) 理論重力異常分布と観測重力異常分布との差。コンター線の間隔は 0.5 mGal である。(右下) 3次元重力インバージョン解析に用いる観測重力異常分布。コンター線の間隔は 2 mGal である。赤線は活断層の地表トレース位置を示す。

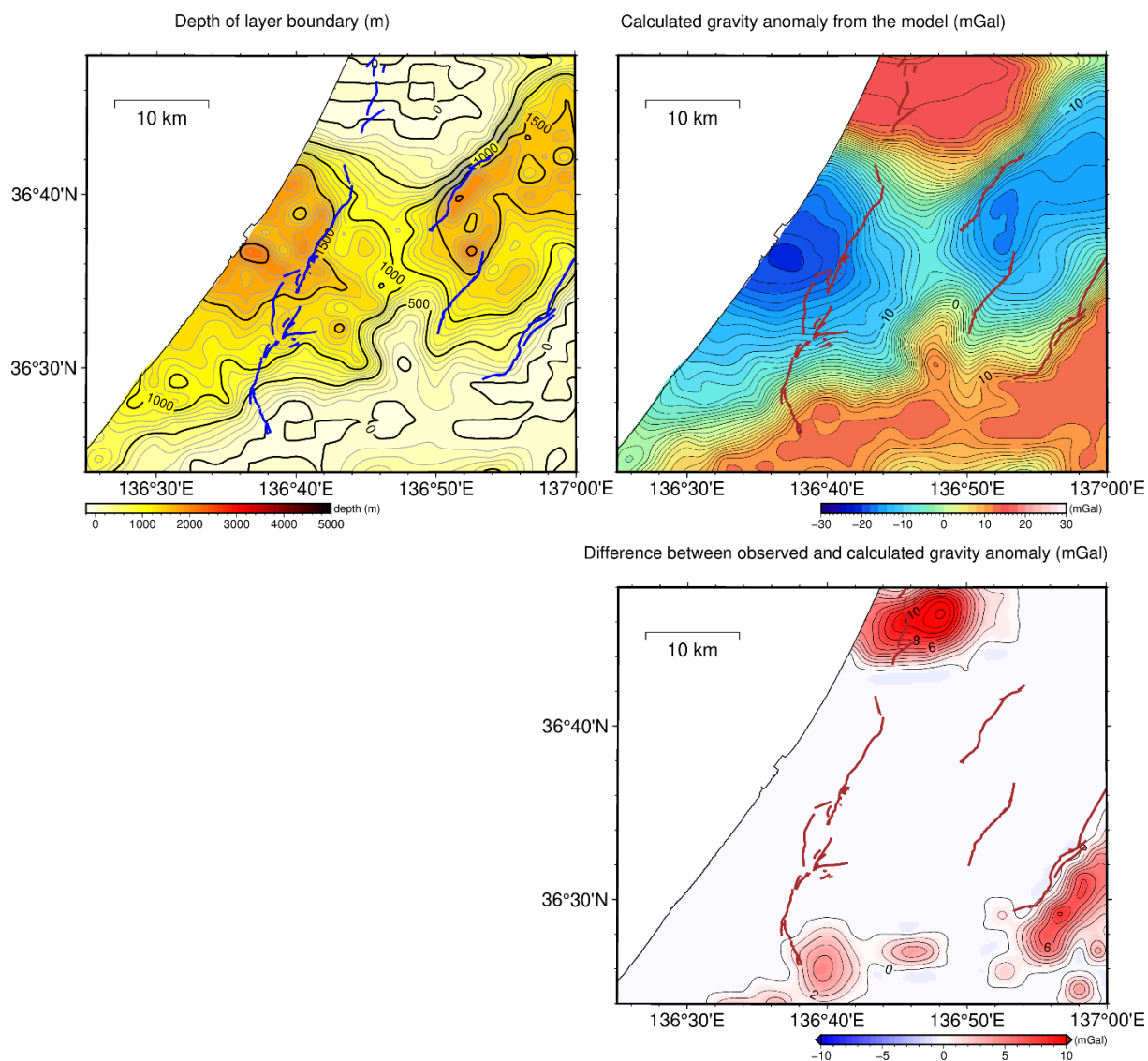


図 13 (左上) 初期境界深度を 250 m、密度差を 500 kg/m<sup>3</sup> と設定した際の 3次元重力インバージョン解析による境界深度分布。コンター線の間隔は 100 m である。(右上) 3次元重力インバージョン解析による境界深度分布から計算される理論重力異常分布。(右下) 観測重力異常分布と理論重力異常分布との差。コンター線の間隔は 1 mGal である。青線または赤線は活断層の地表トレース位置を示す。

推定される境界深度の初期値依存性を確認するため、図 13 で示した結果の初期パラメータを変更し初期境界深度を 250 m、500 m、750 m 及び 1000 m に設定した場合の結果を図 14 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 の領域の範囲も変化する。宝達山付近での 0 m の等深線は、花崗岩基盤岩より上位の層の上面深度を対象としてインバージョン結果と比較する際は、地質図における花崗岩露出範囲より広めに考える必要がある。図 13 では、初期境界深度が 750 m では境界深度が 0 m の領域と宝達山付近の花崗岩分布範囲が比較的良く一致するため、750 m や 1000 m の初期境界深度はやや不適切であると考えら

れる。また、サブテーマ1. 1による地震波探査結果と比較するならば、医王山層上面深度としては2000 mより浅いと考えられるため、初期深度500 mにおける3次元インバージョン解析結果で金沢平野の境界深度が2000 m以深である結果はやや深すぎるため、初期境界深度は250 mとしたときの3次元インバージョン解析結果が適切と考えられる。

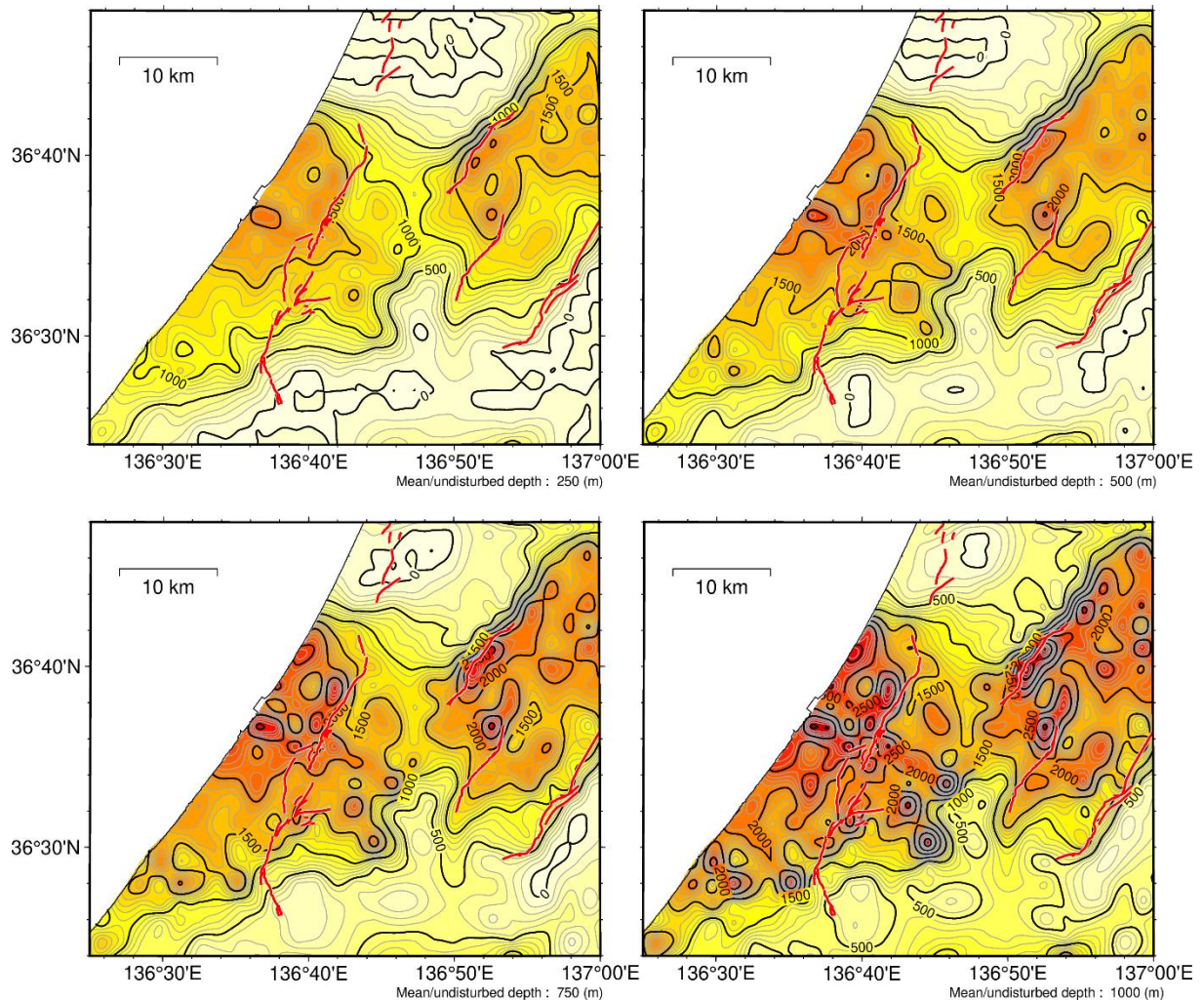


図 14 異なる初期境界深度による3次元重力インバージョン解析により得られた境界深度分布。初期境界深度は、(左上) 250 m、(右上) 500 m、(左下) 750 m、(右下) 1000 mであり、密度差は全て  $500 \text{ kg/m}^3$  である。コンター線の間隔は 100 m である。赤線は活断層の地表トレース位置を示す。

同様に、密度差をそれぞれ  $400 \text{ kg/m}^3$  から  $600 \text{ kg/m}^3$  まで  $100 \text{ kg/m}^3$  間隔で変化させた場合の境界深度分布を図 15 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。このことから、森本・富樫断層帯周辺や金沢平野について医王山層などに相当する前期中新統およびその下位層の上面を境界とした単純な 2 層構造を仮定する場合には、これら 2 層の密度差として  $500 \text{ kg/m}^3$  程度とするのが適切と考えられる。

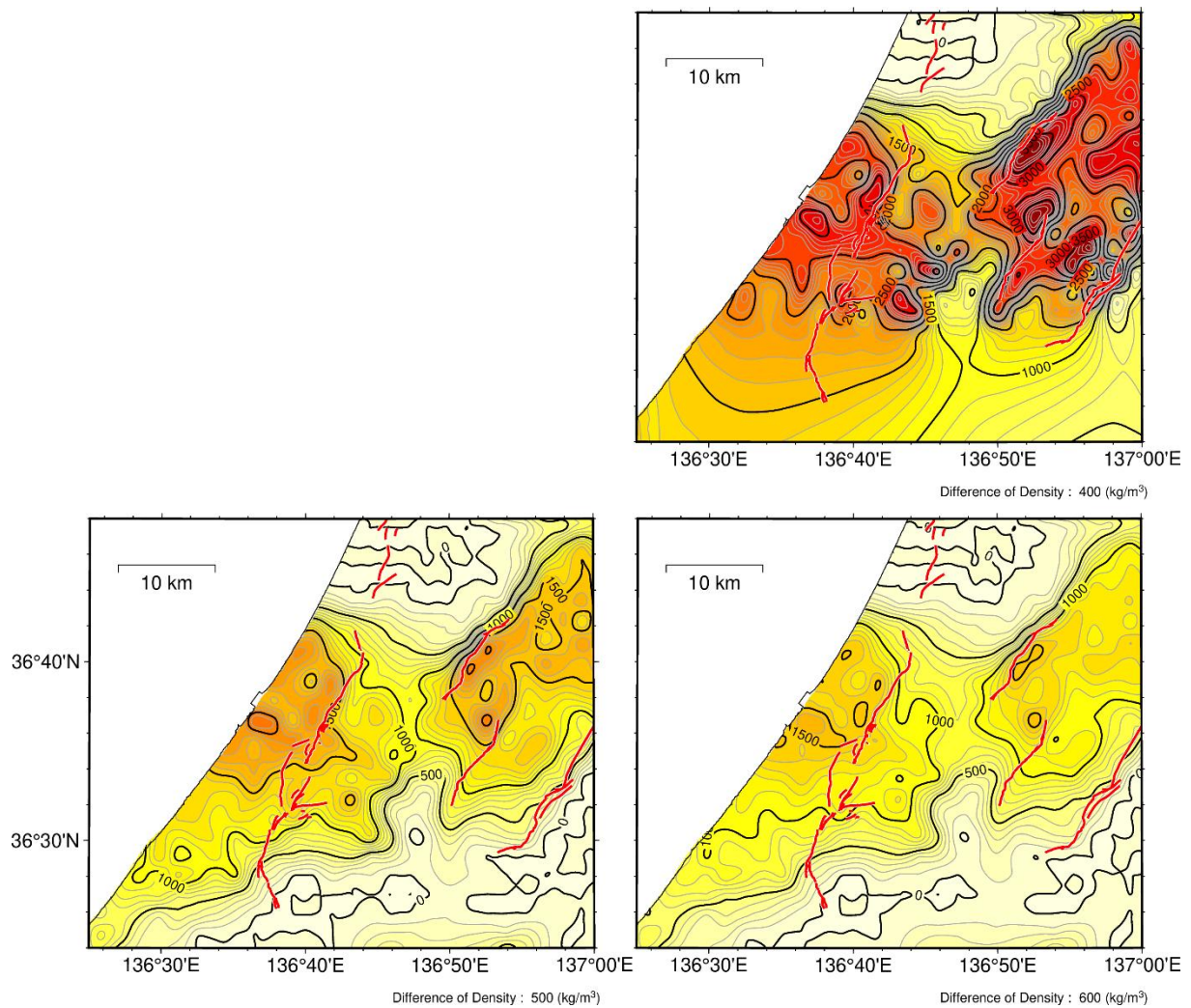


図 15 密度差を変化させた場合の 3 次元重力インバージョン解析による境界深度分布。初期境界深度は、(右上)  $400 \text{ kg/m}^3$ 、(左下)  $500 \text{ kg/m}^3$ 、(右下)  $600 \text{ kg/m}^3$  である。コンター線の間隔は  $100 \text{ m}$  である。赤線は活断層の地表トレース位置を示す。

森本・富樫断層帯周辺の3次元密度構造として、サブテーマ3.2で用いられる地盤構造モデルがある。この地盤構造モデルは37層から成り、各層について境界の下面深度と密度が与えられているため、重力異常値を計算することができる。重力値の計算は、各層の密度構造が基盤密度  $2650 \text{ kg/m}^3$  との密度差による重力値を計算し、金沢平野付近でトレンド処理後の観測重力値に近い値となるように計算結果に一定値 (+28 mGal) を加算する。この地盤構造モデルから計算される重力異常分布を図16に示す。計算重力異常分布と観測重力異常分布は、金沢平野付近で値が近くなるように調整しているため、砺波平野や丘陵地では差が大きくなるが金沢平野では整合的であり、金沢平野下の地盤構造モデルが重力異常の観点から妥当であることを示している。この地盤構造モデルは標高0mより上の構造は含まれないため、丘陵地など標高の高い地域では地質構造による影響が大きく、重力値の差異が大きくなりやすい傾向がある。

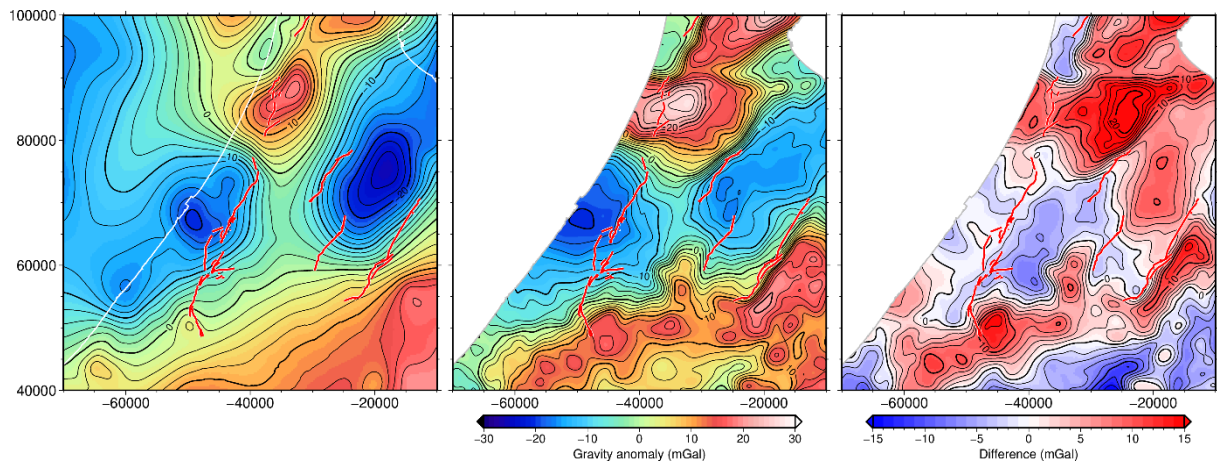


図16 (左) 強震動計算に用いる地盤構造モデルから得られる密度値から計算される重力異常分布。(中) 遮断波長4 kmのフィルター処理後の重力異常図。(右) 観測重力異常分布と計算重力異常分布との差。コンター線の間隔は2 mGalである。赤線は活断層の地表トレース位置を示す。

#### 4) 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として、The Generic Mapping Tools (Wessel et al., 2019) のパッケージに含まれる talwani2d を用いる。

##### iii) 犀川—医王山測線についての解析

ここでは解析対象断面として、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 (石山・他, 2023) (図17) を扱う。

犀川—医王山測線については、平松・他 (2024) の計算手法から、標高0mについて地形補正密度と各密度構造との密度計算方法について不備があったために修正し、再解析を行った。この断面は深部構造探査により、卯辰山層、上部更新統及び完新統からなる第1層、大桑層からなる第2層、高窪層と想定される第3層、中—下部中新統堆積岩類からなる第4層、それ以深として医王山層及び岩稻層からなる第5層について下面地層境界深度が推定されている。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 (東郷・他, 1998) とした。また、境界条件として断面北西端では、そこで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 (中—下部中新統堆積岩類に相当) と第5層 (医王山層、岩稻層及び下位層) 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8) を用いる。密度構造モデルは4層の堆積層と医王山層+岩稻層および下位層に相当する基盤部とで構成する。

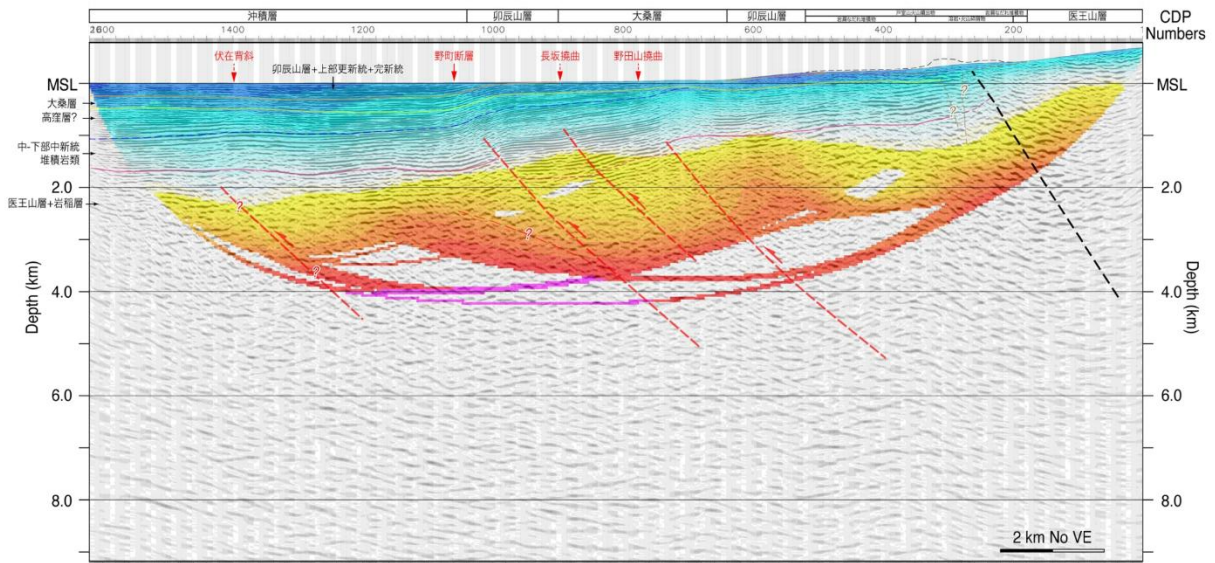


図 72 犀川—医王山測線の解釈深度断面(重合前時間マイグレーション深度断面図)。速度構造を重ね合わせ表示。

図 17 犀川—医王山測線の解釈深度断面 (石山・他, 2023)。赤破線、黒破線は推定断層を示す。

#### iv) 犀川—医王山測線についての解析結果

図 17 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。2 次元タルワニ法解析を行う測線の重力異常分布と位置を図 18 に、2 次元タルワニ法解析結果および解析に用いた犀川—医王山測線の解釈深度断面から作成した密度構造を図 19 に示す。図 18 は森本断層の走向方向が縦軸となるように回転処理 (反時計まわりに  $31^\circ$ ) を行っており、図 19 の横軸と合わせてある。また図 18 の縦軸は犀川—医王山測線で 2 次元タルワニ法解析を行う測線を 0 としている。横軸は犀川—医王山測線が野町断層地表推定位置 (東郷・他, 1998) と交差する位置を 0 とした。図 19 では、各密度構造について、卯辰山層、上部更新統及び完新統からなる第 1 層を水色、大桑層からなる第 2 層を緑色、高窪層と想定される第 3 層を黄色、中—下部中新統堆積岩類からなる第 4 層をオレンジ色、それ以深として医王山層、岩稲層及び下位層からなる第 5 層として白色で示す。

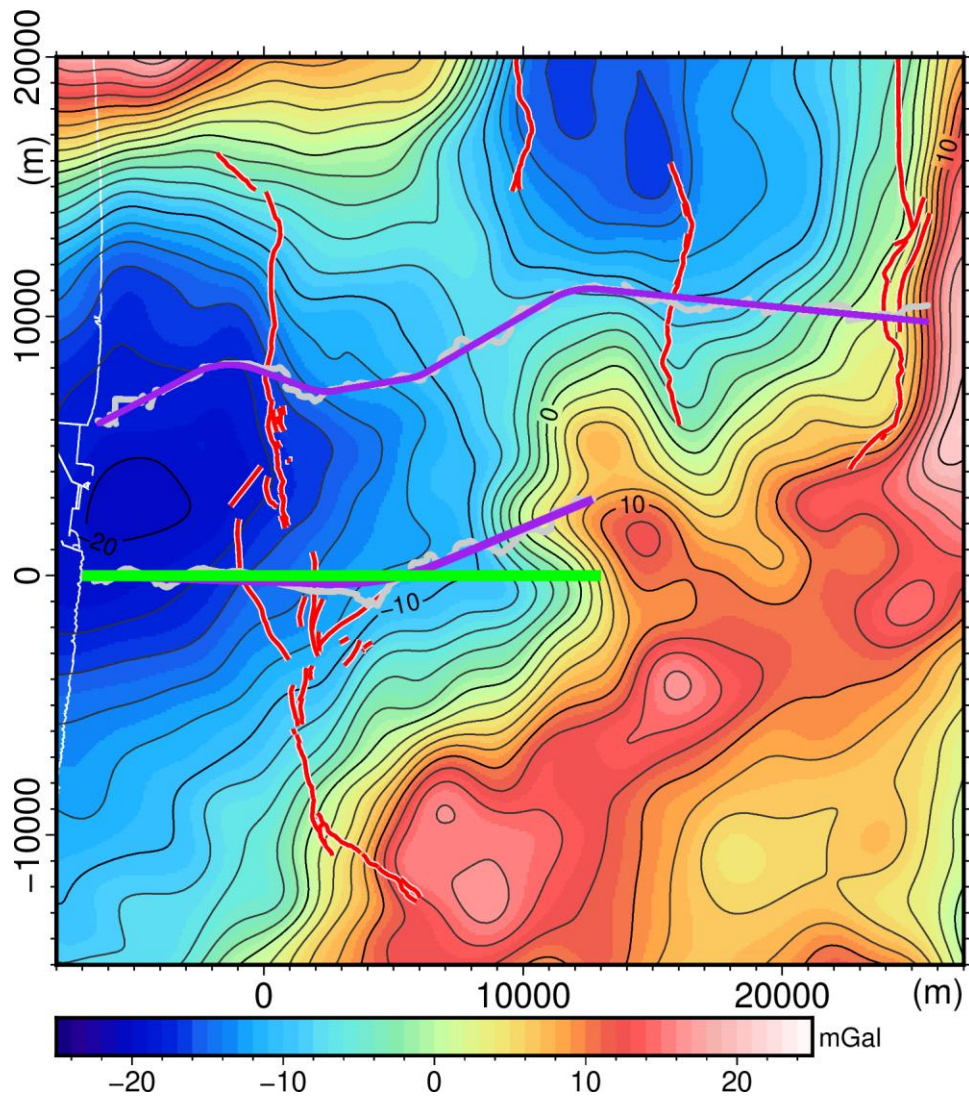


図 18 地震波探査測線および2次元タルワニ法解析測線位置。背景は遮断波長 4 km のフィルター処理後の重力異常図。紫線は地震波探査測線の内灘—南砺測線（上）と犀川—医王山測線（下）、緑線は犀川—医王山測線の2次元タルワニ法解析測線、赤線は活断層の地表トレース位置を示す。

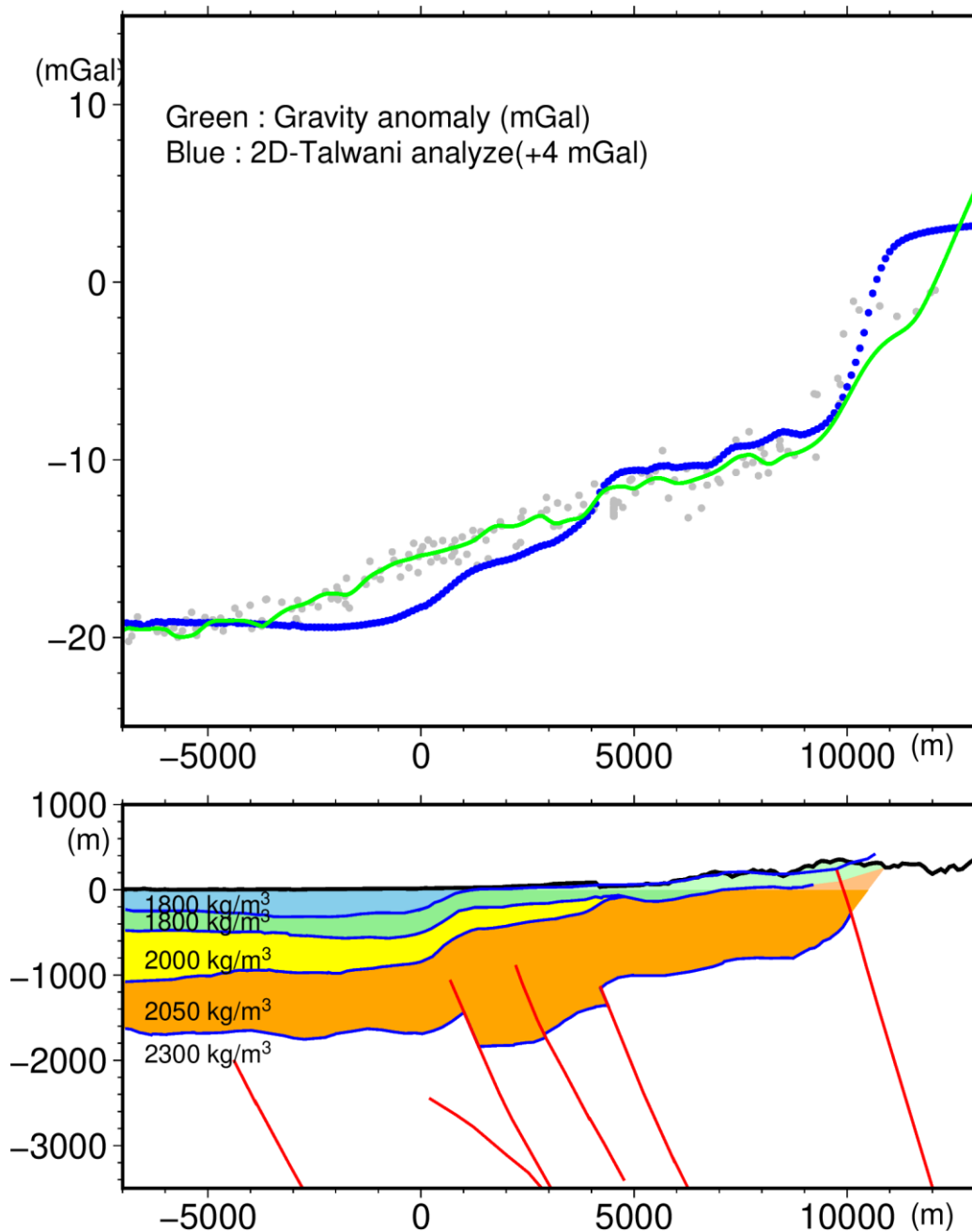


図 19 犀川—医王山測線の 2 次元タルワニ法解析結果。横軸の 0 m は図 18 の横軸の 0 m と同じ。(上図) 緑線は図 18 の遮断波長 4 km のフィルター処理後の重力異常分布、灰点は断面から両端 1 km 範囲内の観測点における平面トレンドを取り除いた重力異常値、青線は下図の密度構造モデルから得られる 2 次元タルワニ法解析による計算重力値。(下図) 青線は密度構造境界、各層はそれぞれ青、緑、黄、オレンジで着色され、各層の密度は図中に表示されている。白色の領域は医王山層、岩稻層及び下位層からなる第 5 層に相当する。赤線は図 17 に表示の断層を示す。

ここで2次元タルワニ法解析による計算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層および第2層の密度を  $1800 \text{ kg/m}^3$ 、第3層の密度を  $2000 \text{ kg/m}^3$ 、第4層の密度を  $2050 \text{ kg/m}^3$ 、第5層の密度を  $2300 \text{ kg/m}^3$  と設定した。

密度決定について、第2層に相当する大桑層については、伊藤・他(1994)では基礎試錐「金沢沖」で金沢平野周辺では大桑層に相当する氷見層上部についてボーリングデータから測定しており、見かけ密度が  $1600 \text{ kg/m}^3$  程度であるとしているほか、陸上でのボーリングデータ(北陸地盤情報)から、金沢市大桑の試料では密度  $1909 \text{ kg/m}^3$ 、金沢市山王からの試料では密度  $1850 \text{ kg/m}^3$  とされている。第3層に相当する高窪層については、伊藤・他(1994)では基礎試錐「金沢沖」で金沢平野周辺では高窪層に相当する音川層についてボーリングデータから測定しており、見かけ密度を  $1900 \text{ kg/m}^3$  としている。また地震調査研究推進本部では、砺波平野断層帯・呉羽山断層帯の地震を想定した強震動評価にて音川層について  $V_p=2.3\text{km/s}$ 、 $V_s=750\text{m/s}$  としており、これは密度に換算すると  $2100 \text{ kg/m}^3$  程度と考えられる。第5層に相当する医王山層について、伊藤・他(1994)では基礎試錐「金沢沖」で医王山層についてはボーリングデータが得られていないが、黒瀬谷層の下位に位置する基盤として  $2300 \text{ kg/m}^3$  と想定している。

第1層に相当する卯辰山層、上部更新統及び完新統については、犀川—医王山測線の解釈深度断面における野町断層付近での地下構造と観測重力異常値の変化量の小ささから、第2層との密度差がほとんどないと考えられることができる。したがって、第1層の密度を第2層と同じ値に設定した。同様に、第4層に相当する中・下部中新統堆積岩類については、ボーリング結果による適した密度情報が見つからなかったが、第3層と大きく異なる密度では観測重力異常値の変化パターンを説明できなかつたため、観測重力異常値を説明可能な  $2050 \text{ kg/m}^3$  と設定した。

図19に示される密度構造モデルは、野町断層から両端に4km程度離れたあたりで計算重力値を観測重力値と合わせた場合に断層付近で4mGal程度ずれる結果となる。野町断層に想定される第1層から第3層の深度変化(図の水平方向0~1km)では密度構造の変化によりタルワニ解析の計算重力値は3mGal程度変化するが、観測重力値はそれほど大きな変化を示さない。第1層から第4層にかけての  $1800\sim 2050 \text{ kg/m}^3$  と  $250 \text{ kg/m}^3$  の仮定密度の差を設定しているが、この差をより小さくすれば断層付近の重力変化を合わせることができると考えられる。

#### v) 内灘—南砺測線についての解析

ここでは解析対象断面として、反射法地震探査測線である内灘—南砺測線の解釈深度断面(石山・他, 2024)(図20)について解析を行う。

この断面は深部構造探査により、大桑層、埴生層、下部更新統及び完新統からなる第1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、岩稻層及び下位層からなる第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20に示される地層境界深度から作成した4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、断面方向の横軸は森本断層地表推定位置(東郷・他, 1998)と交差する位置を0とした。また、境界条件として断面北西端で得られている地層境界深度が遠方(約100km)まで

延伸すると仮定した。また断面南東端では、第4層（医王山層及び岩稲層に相当）が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8）を用いる。密度構造モデルは3層の堆積層とより下位層に相当する第4層で構成する。

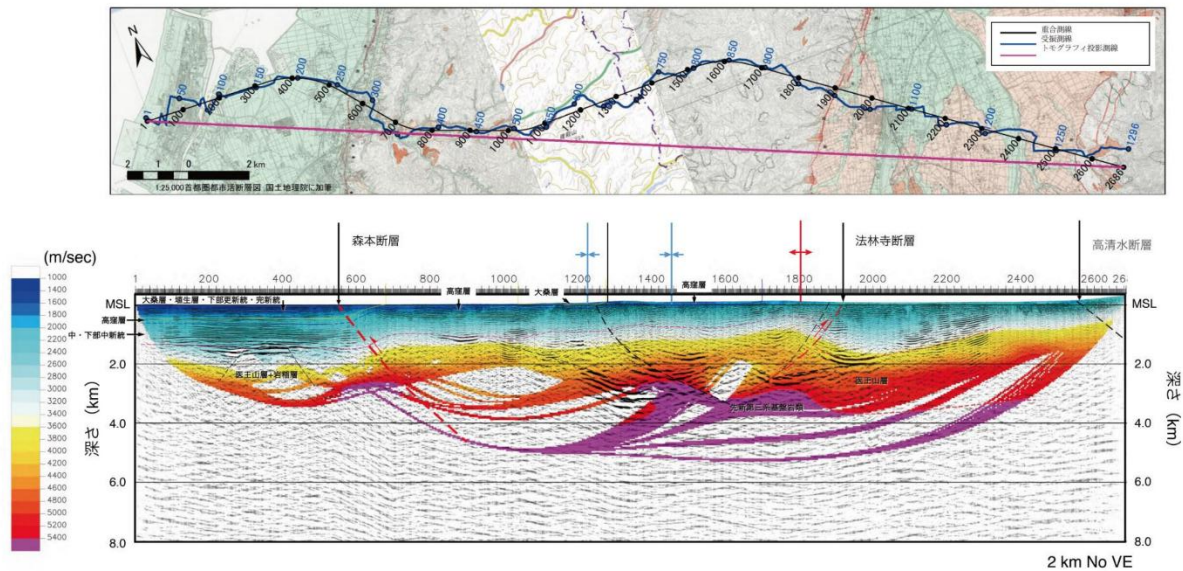


図 104 内灘—南砺測線の解釈深度断面(重合前時間マイグレーション深度断面図)。

図 20 内灘—南砺測線の解釈深度断面（石山・他，2024）。赤破線、黒破線は推定断層を示す。

#### vi) 内灘—南砺測線についての解析結果

図 20 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。2次元タルワニ法解析を行う測線の重力異常分布と位置を図 21 に、2次元タルワニ法解析結果および解析に用いた犀川—医王山測線の解釈深度断面から作成した密度構造を図 22 に示す。図 21 は iv) の犀川—医王山測線と同じく森本断層の走向方向が縦軸となるように回転処理（反時計まわりに  $31^\circ$ ）を行っており、縦軸+7.815 km で内灘—南砺測線と森本断層が交差することからこの位置で内灘—南砺測線の2次元タルワニ法解析測線を設定した。内灘—南砺測線は森本断層に対して直交していないため、解析を行う測線は特に内灘—南砺測線の西部に相当する。また、図 22 の横軸の数値は図 21 の横軸と一致している。

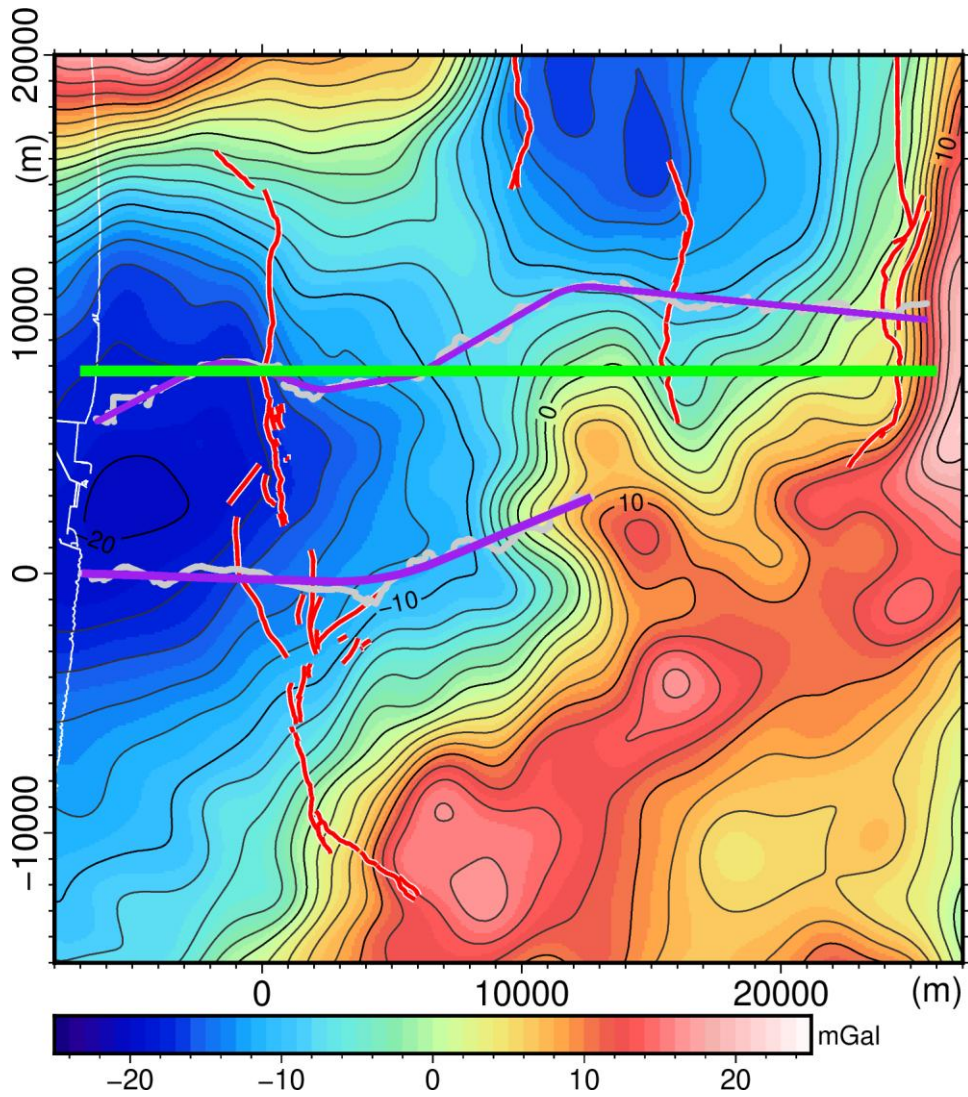


図 21 地震波探査測線および2次元タルワニ法解析測線位置。背景は遮断波長4 km のフィルター処理後の重力異常図。紫線は地震波探査測線の内灘—南砺測線（上）と犀川—医王山測線（下）、緑線は内灘—南砺測線（西部）の2次元タルワニ法解析測線、赤線は活断層の地表トレース位置を示す。

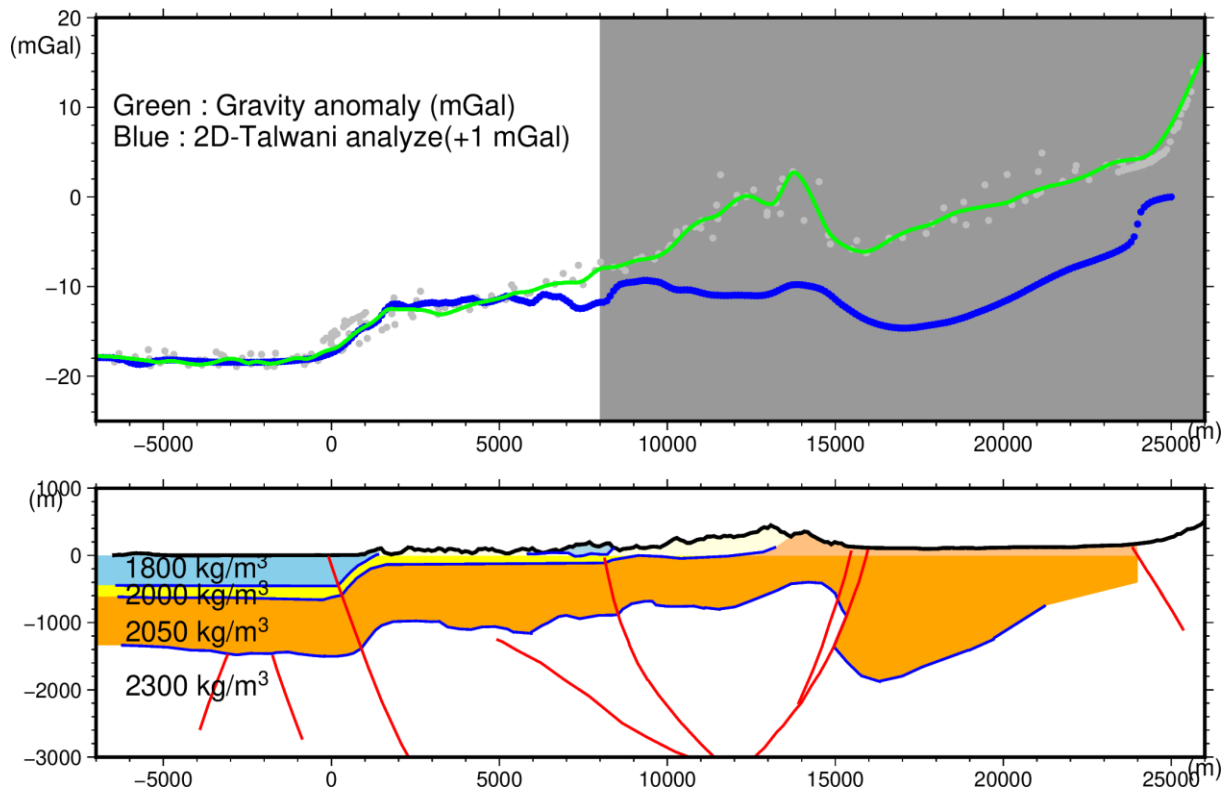


図 22 内灘—南砺測線（西部）の 2 次元タルワニ法解析結果。横軸の 0 m は図 21 の横軸の 0 m と同じ。（上図）緑線は図 21 の遮断波長 4 km のフィルター処理後の重力異常分布、灰点は断面から両端 1 km 範囲内の観測点における平面トレンドを取り除いた重力異常値、青線は下図の密度構造モデルから得られる 2 次元タルワニ法解析による計算重力値。（下図）青線は密度構造境界、各層はそれぞれ青、緑、黄、オレンジで着色され、各層の密度は図中に表示されている。白色の領域は医王山層、岩稻層及び下位層からなる第 4 層に相当する。赤線は図 20 に表示の断層を示す。

ここで 2 次元タルワニ法解析による計算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 層の密度を 1800 kg/m<sup>3</sup>、第 2 層の密度を 2000 kg/m<sup>3</sup>、第 3 層の密度を 2050 kg/m<sup>3</sup>、第 4 層の密度を 2300 kg/m<sup>3</sup> と設定した。これは iv) の犀川—医王山測線で第 1 層と第 2 層（大桑層）を同一の層として扱う以外は同じ設定である。

2 次元タルワニ法解析による計算重力異常値は森本断層付近（図の水平方向 -7 ~ 5 km の範囲）で観測重力異常値と良く一致する結果を示す。これは地震波探査結果で得られた地下の層構造に基づく密度構造及び各層の密度値が適切であることを意味する。一方、断層から離れた範囲（図の水平方向 5 km より南東の範囲）では計算重力異常値と観測重力異常値との乖離が見られる。これは地震波探査で推定した地下構造測線の位置が 2 次元タルワニ法解析測線より北東にずれているためであり、観測重力を参照する測線の位置を図 23 のように森本断層の走向方向に 2.5 km 北西側に移動して設定すると、この内灘—南砺測線（東部）についての 2 次元タルワニ法解析結果による計算重力異常値は図 24 のように法林寺断層周辺の観測重力異常値の変化に概ね一致する結果を示す。同様に曲がった地

震波探査測線に沿って観測重力異常値をサンプリングし（図 25）、森本断層と直交する方向に投影した結果を図 26 に示す。森本断層の南東側（図の水平方向 0～3 km の範囲）で観測重力異常値の勾配が 2 次元タルワニ法解析による計算重力異常値の勾配より小さくなる。その理由として、この範囲で地震波探査測線が森本断層に直交しておらず、地震波探査測線が森本断層から南東方向へ向かうにつれて森本断層全域でみられる宝達山側で高く南側で低い走向方向の重力異常変化を反映した結果であることが考えられる。

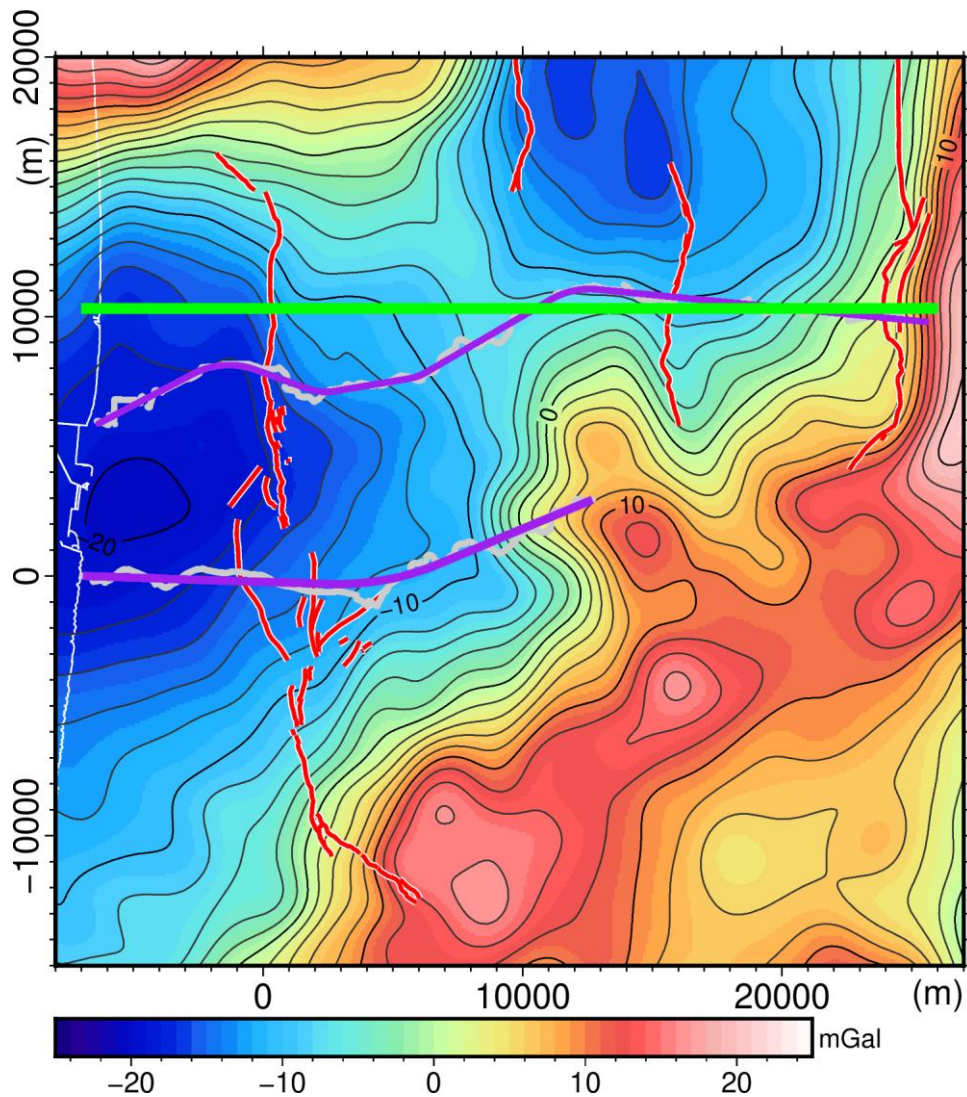


図 23 地震波探査測線および 2 次元タルワニ法解析測線位置。背景は遮断波長 4 km のフィルター処理後の重力異常図。紫線は地震波探査測線の内灘—南砺測線（上）と犀川—医王山測線（下）、緑線は内灘—南砺測線（東部）の 2 次元タルワニ法解析測線であり、図 21 に示される解析測線から走向方向へ 2.5 km 移動させている。赤線は活断層の地表トレース位置を示す。

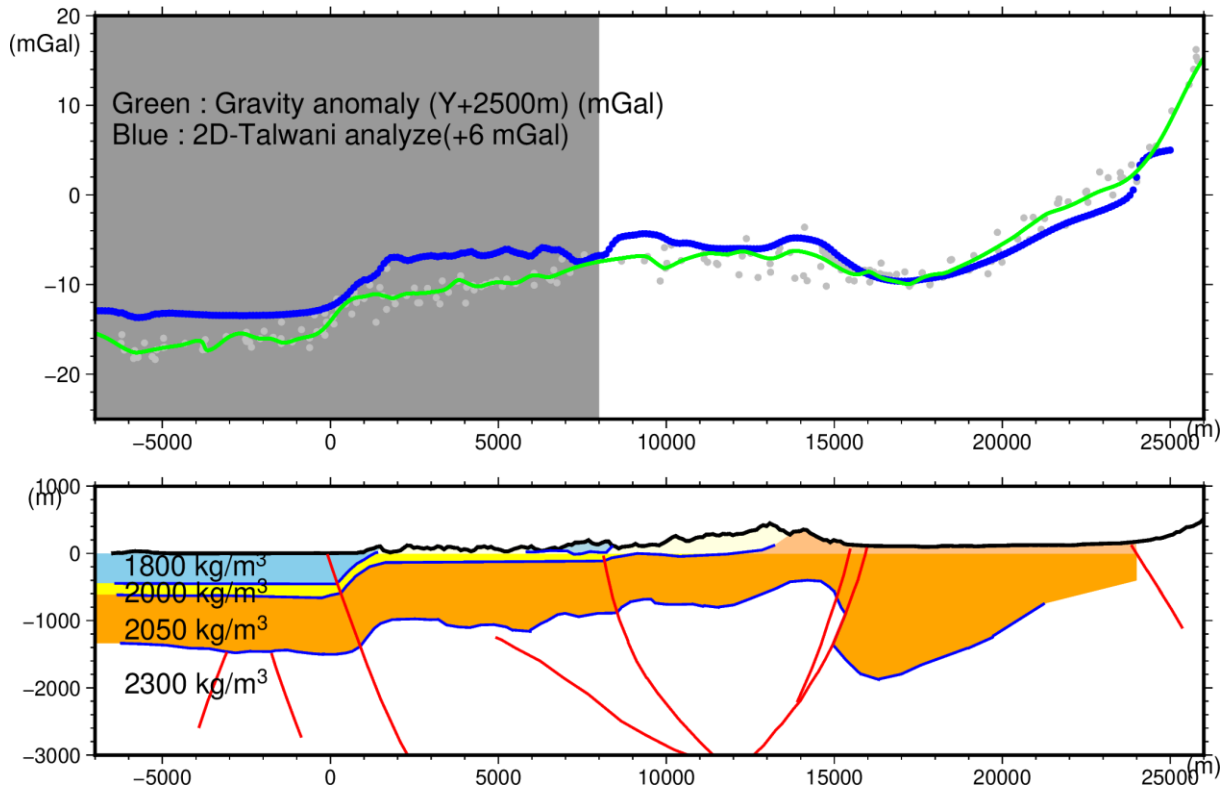


図 24 内灘—南砺測線（東部）について、図 22 の解析測線から走向方向へ 2.5 km 移動させた測線における 2 次元タルワニ法解析結果。横軸の 0 m は図 23 の横軸の 0 m と同じ。（上図）緑線は図 23 の遮断波長 4 km のフィルター処理後の重力異常分布、灰点は断面から両端 1 km 範囲内の観測点における平面トレンドを取り除いた重力異常値、青線は下図の密度構造モデルから得られる 2 次元タルワニ法解析による計算重力値。（下図）青線は密度構造境界、各層はそれぞれ青、緑、黄、オレンジで着色され、各層の密度は図中に表示されている。白色の領域は医王山層、岩稻層及び下位層からなる第 4 層に相当する。赤線は図 20 に表示の断層を示す。

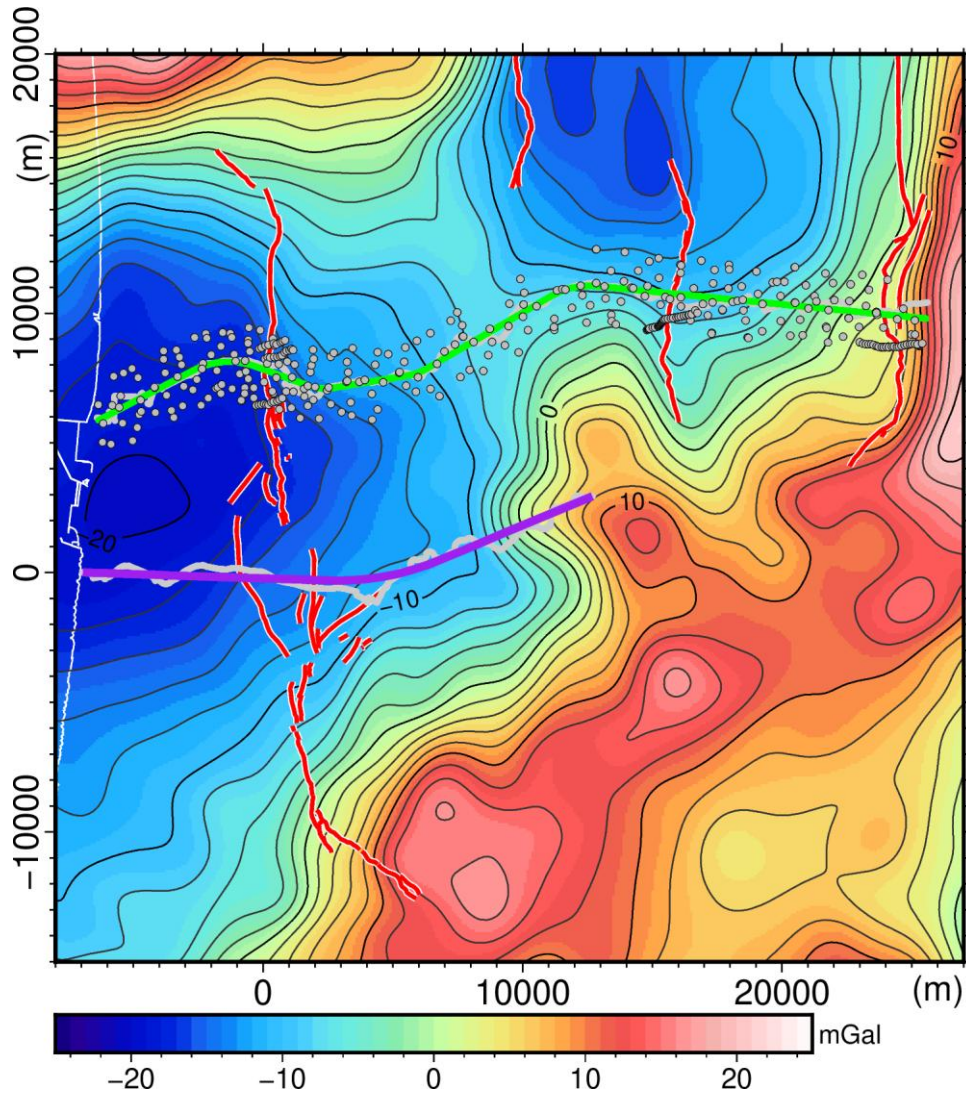


図 25 地震波探査測線および2次元タルワニ法解析測線位置。背景は遮断波長4 km のフィルター処理後の重力異常図。紫線は地震波探査測線の犀川—医王山測線、緑線は地震波探査測線の内灘—南砺測線、灰点は内灘—南砺測線から1.5 km 以内の重力測定点分布、赤線は活断層の地表トレス位置を示す。

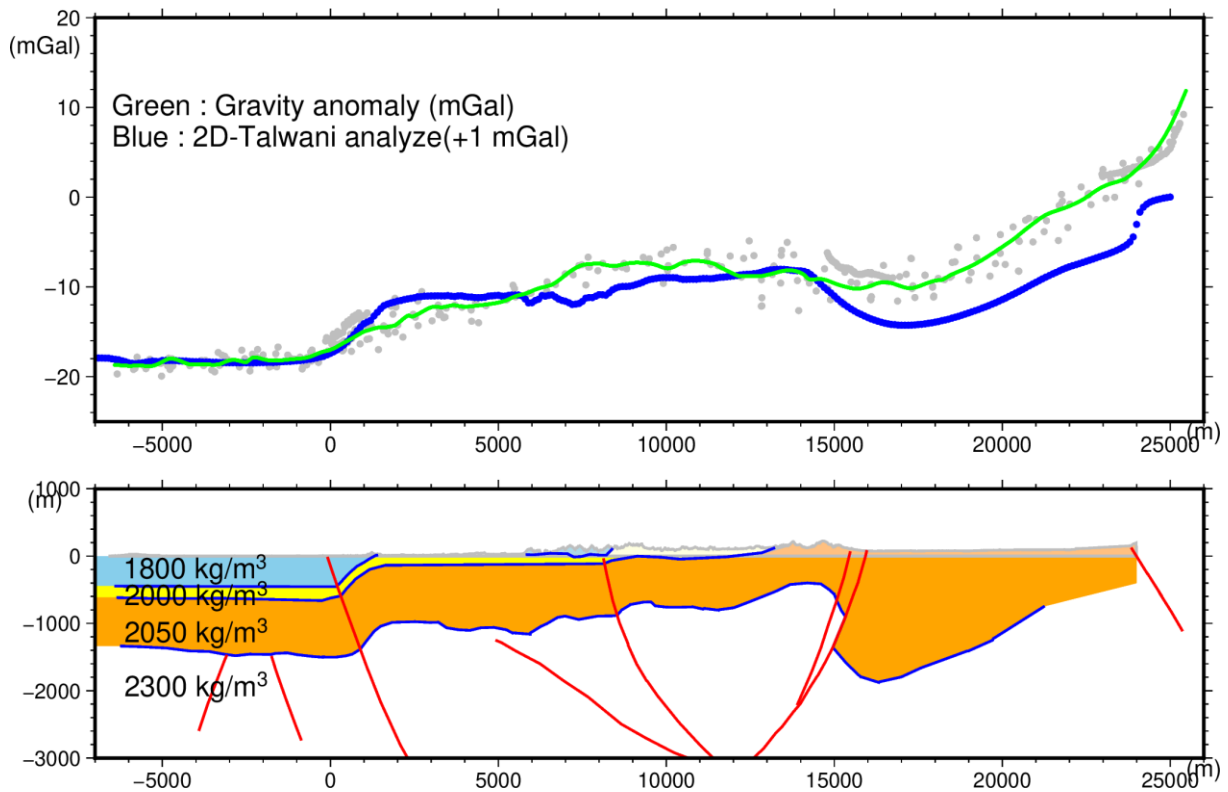


図 26 内灘—南砺測線について、地震波探査測線周辺の重力分布を参照した 2 次元タルワニ法解析結果。横軸の 0 m は図 25 の横軸の 0 m と同じ。(上図) 緑線は図 23 の遮断波長 4 km のフィルター処理後の重力異常分布、灰点は断面から両端 1.5 km 範囲内の観測点における平面トレンドを取り除いた重力異常値、青線は下図の密度構造モデルから得られる 2 次元タルワニ法解析による計算重力値。(下図) 青線は密度構造境界、各層はそれぞれ青、緑、黄、オレンジで着色され、各層の密度は図中に表示されている。白色の領域は医王山層、岩稲層及び下位層からなる第 4 層に相当する。赤線は図 20 に表示の断層を示す。

vii) 森本・富樫断層帯に直交する測線での 2 次元タルワニ法解析

上で対象とした 2 つの地震波探査測線沿いで実施した 2 次元タルワニ法解析を森本・富樫断層帯全域について実施した。新規測線として、iv) の犀川—医王山測線と同じく森本断層の走向方向が縦軸となるように回転処理 (反時計まわりに  $31^\circ$ ) を行った座標系において、犀川—医王山測線を中心として森本断層の走向方向に 4 km 間隔に断層に直交する方向に設定する。富樫断層の走向は森本断層の走向から反時計回りに約 10 度の方向を向くことから、富樫断層の走向方向を北から反時計まわりに  $21^\circ$  とし、新規測線を富樫断層の走向方向に直交するように 4 km 間隔で設定した。森本断層の走向方向の +7.815 km の位置には vi) の内灘—南砺測線が存在するため、森本断層の走向方向 8 km の測線は内灘—南砺測線を使用する。新規に 5 本の測線を設定し、既存の 2 本とあわせて北東から A~G 測線とし、測線 B は vi) の内灘—南砺測線に、測線 D は iv) の犀川—医王山測線である。2 次元タルワニ法解析実施測線の位置を図 27 に示す。

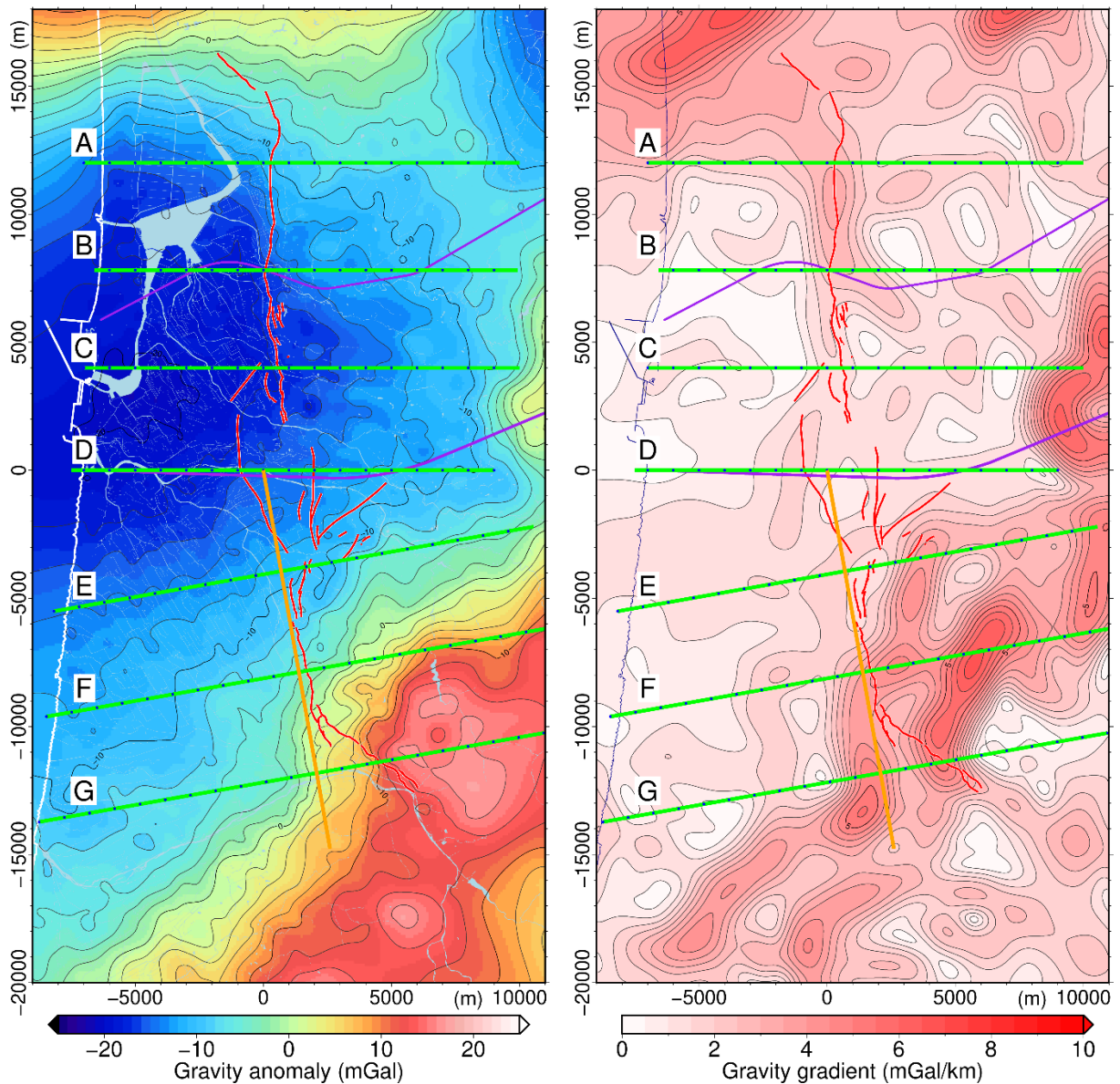


図 27 森本・富樫断層帯を横切る 2 次元タルワニ法解析測線の位置。紫線は地震波探査測線の内灘—南砺測線（上）と犀川—医王山測線（下）、緑線は 2 次元タルワニ法解析測線、赤線は活断層の地表トレース位置、オレンジ線は測線 E~G における横軸の 0 m の位置を示す。（左）遮断波長 4 km のフィルター処理後の重力異常分布。（右）水平一次微分分布。

2 次元タルワニ法解析は vi) の内灘—南砺測線における解析と同様に密度構造を 4 層で構成し、それぞれの密度についても iv) および vi) と同じ密度値を用いた。地質図から得られる表層地質および隣接する測線の密度構造を参照し、隣接する密度構造間で大きな差異が生じないように密度構造を作成することとした。断層付近の重力変化について 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を合わせることを優先し、南東部

の丘陵部分での第4層より下位の密度構造により計算重力値と観測重力値が合わない範囲についてはここでの解析では考慮しないこととした。

viii) 森本・富樫断層帯に直交する測線での2次元タルワニ法解析の結果  
vii) で設定した各測線について2次元タルワニ法解析結果について記す。

測線Aは森本断層の北部、犀川一医王山測線から12 km北東側に位置する。観測重力異常値は森本断層を横切る約1 kmの範囲で約4 mGalの局所的な変化を示す。測線Aについて2次元タルワニ法解析により推定される地下密度構造と計算重力異常値及び観測重力異常値を図28に示す。推定される地下密度構造は測線Bの内灘一南砺測線と類似し、森本断層付近で地層の勾配や深度変化を設定することで観測重力異常値と合う結果が得られる。測線A沿いでは森本断層は断層から離れた丘陵部について大桑層と高窪層との境界がほぼ水平に近いことが地質図から推定され、平野部での観測重力異常値の変化も小さいことから、密度構造の変化は断層近辺のみであると推定される。測線Aは測線Bと同様の地下密度構造をもつことから、森本断層に沿って同様の地下密度構造が連続的に続いていると推定される。

測線Bは森本断層の中央部を横切り、内灘一南砺測線に相当する。測線は内灘一南砺測線と都市圏活断層図(東郷・他, 1998)による森本断層推定位置との交点を通り、犀川一医王山測線から7.815 km北東側に位置する。測線Bについて2次元タルワニ法解析により推定される地下密度構造と計算重力異常値及び観測重力異常値を図28に示す。解析結果はvi)に記したように、2次元タルワニ法解析による計算重力異常値は観測重力異常値と良く一致し、地震波探査結果で得られた地下の層構造に基づく密度構造及び各層の密度値が適切であることを意味する。測線沿いの平野部で観測重力異常値の変化がほぼ見られないことから、地下密度構造はほぼ水平かつ層厚もほぼ一定で各層が堆積していると考えられる。

測線Cは森本断層の南部、犀川一医王山測線から4 km北東側に位置する。測線C, Dについて2次元タルワニ法解析により推定される地下密度構造と計算重力異常値及び観測重力異常値を図29に示す。測線C沿いでは森本断層近辺での観測重力異常値の局所的な変化は測線AやBと比べて小さい。また、平地では重力変化がほとんど見られず丘陵部ではほぼ一定の観測重力異常値の水平勾配を示すことから、測線Cの地下密度構造は測線Bの地下密度構造と大きく異なるものではないが、測線Dの犀川一医王山測線の地下密度構造に近いと推定される。丘陵部の地下密度構造としては大桑層から上位にかけての堆積層が傾斜を伴って広がると推定されるが、高窪層についてはこれより南では対象地域における地質図(1:200000 地質図幅金沢)(鹿野・他, 1999)に表れないことや利用可能なボーリング結果がないことから測線C沿いにおける地下での高窪層の存在に関する情報が得られないため、測線B及びDを参考に第2層の形状を設定した。断層近辺での局所的な観測重力異常値の変化量の小ささから、断層運動により生じる地層の褶曲に伴う鉛直変位量は森本断層の中部(測線B)や北部(測線A)と比較して小さいと推定され、2次元密度構造での褶曲構造は測線Dの構造と類似している。

測線Dは野町断層を横切るように設定され、犀川一医王山測線とほぼ重なる。iv)で示したように地震波探査によって得られた地下密度構造では測線沿いの観測重力異常値の変

化を説明できないが、iv)での第4層と第5層との境界深度を変更することによって観測重力異常値に近い計算重力異常値を示す2次元密度構造を作成した。測線沿いの観測重力異常分布は野町断層の地表推定位置両端約5kmの範囲で8mGal程度と緩やかに変化する。この観測重力異常値の変化を作る2次元密度構造として、第3層の厚さを図29に示すようにやや薄くする、つまり構造変更範囲の密度をより大きくすることで計算重力異常値と観測重力異常値との差を小さくすることができる。

測線Eは野町断層と富樫断層の境界部分を横切る測線であり、犀川—医王山測線から富樫断層の走向方向へ4km南南西側に位置する。測線Eについて2次元タルワニ法解析により推定される地下密度構造と計算重力異常値及び観測重力異常値を図30に示す。測線Eでは観測重力異常値の水平勾配が最大となる向きが北北西方向であり、野町断層の傾斜方向と大きく異なる。また、地質図において卯辰山層から下位層にかけて北西方向へ大きく傾斜した分布を示している(地質調査所, 1959)。そのため、地下構造が測線に沿った2次元構造とする2次元タルワニ法の仮定が成り立たないことに留意する必要がある。測線沿いの観測重力異常値の分布として、地質図にて大桑層と中・下部中新統堆積層との境界付近(横軸2~3km付近)で比較的大きな観測重力異常値の水平勾配が見られるが、地表での地質境界として地質図を参考にした図30に示される地下密度構造では海側に約1kmずれた位置で計算重力異常値の水平勾配が大きくなる。断層近傍から海側にかけては観測重力異常の変化が緩やかであることから、地下密度構造についても断層付近での地層の褶曲に伴う鉛直変位量は小さいと考えられ、測線A~Dの構造とは異なる可能性が考えられる。

測線Fは富樫断層の中央部を横切る測線であり、犀川—医王山測線から8km南南西側に位置する。測線F,Gについて2次元タルワニ法解析により推定される地下密度構造と計算重力異常値及び観測重力異常値を図31に示す。測線F上の地質分布は、丘陵部で中・下部中新統堆積層が大きな勾配を示しており、平野部は手取川扇状地堆積物が分布する。地下密度構造は平野部において扇状地堆積物と中・下部中新統堆積層との層厚の比率は明確ではないが、図31に示されるように平野部において中・下部中新統堆積層が海に近づくにつれて厚くなるとともに、丘陵部にて地質図でみられる範囲で中・下部中新統堆積層が富樫断層近辺で傾斜して存在する地下密度構造を仮定すると、2次元タルワニ法による計算重力異常値と観測重力異常値が断層付近ではほぼ一致する。この断層付近での傾斜構造は測線Eの地下密度構造と類似する。また富樫断層から丘陵方向へ約4kmより離れた範囲では観測重力異常値が計算重力異常値よりかなり大きくなるが、地質図に示される医王山層より下位のより高密度の安山岩—デイサイト質溶岩・火砕岩やより下位の基盤岩などが浅い領域に存在する影響であると考えられる。

測線Gは富樫断層の南端付近に位置する測線であり、犀川—医王山測線から12km南西側に位置する。測線G沿いでは、富樫断層の地表推定位置は東の丘陵に沿って曲がっており、図27(左)の観測重力異常値及び図27(右)の水平一次微分分布図の分布は、富樫断層地表推定位置とそこから約3km丘陵側の2ヶ所で大きな水平勾配を示す。これら2つの大きな水平勾配について、図27(右)の水平一次微分の分布図で測線Fから連続して伸びる水平一次微分値の大きな帯は西側の水平勾配が大きな部分につながっている。このことから、測線Fで推定される中・下部中新統堆積層が傾斜する領域は、測線G沿いで

は図 31 に示されるように地表推定断層位置より 2 km 程度西側で扇状地堆積物の下に存在すると推定される。また、東側の観測重力異常値の水平勾配が大きい原因として、医王山層より下位のより高密度の安山岩—デイサイト質溶岩・火砕岩やより下位の基盤岩などが浅い領域に存在するためと考えられる。

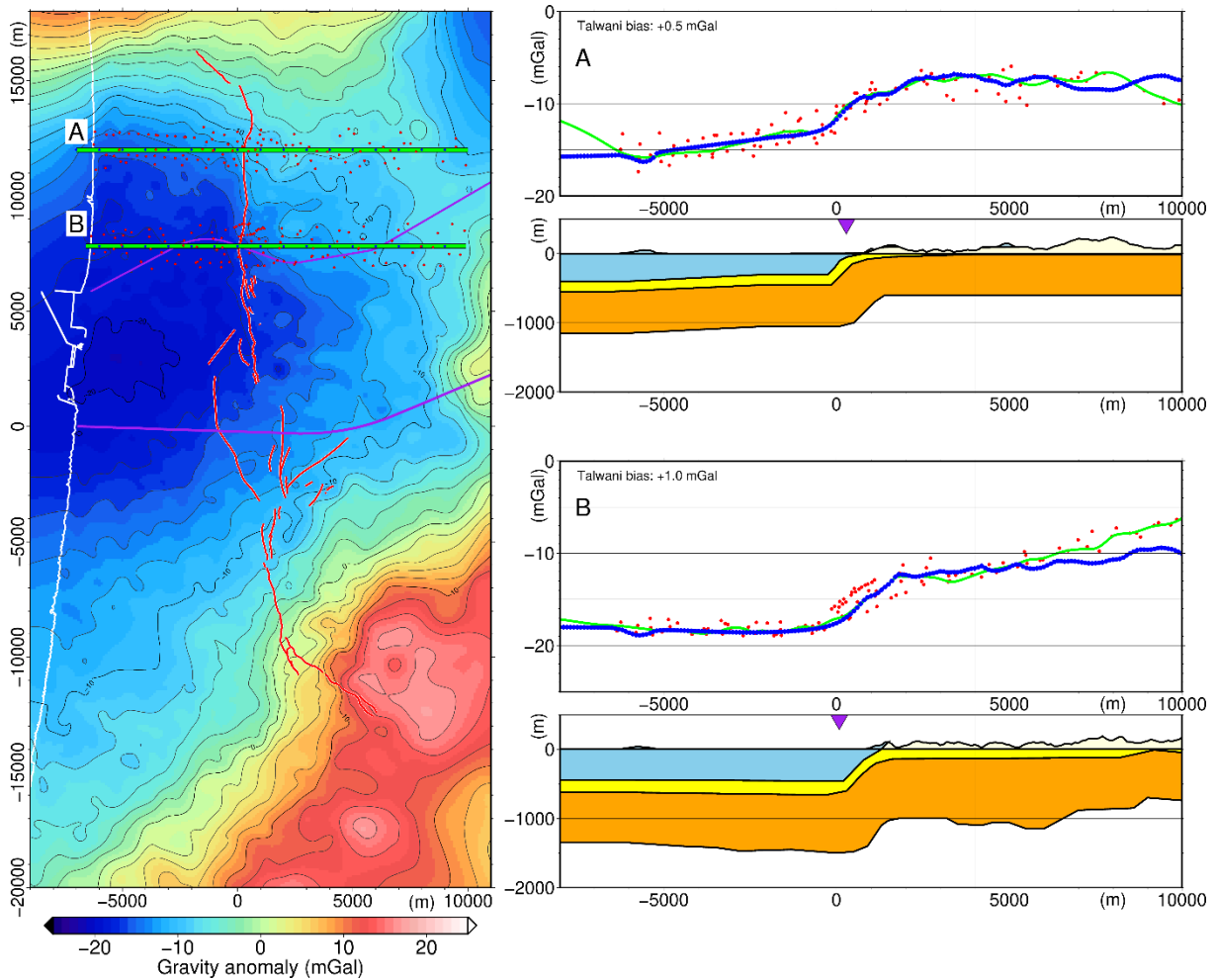


図 28 森本・富樫断層帯を横切る 2 次元タルワニ法解析測線 A, B の解析結果。(左) 遮断波長 4 km のフィルター処理後の重力異常分布。紫線は地震波探査測線の内灘—南砺測線（上）と犀川—医王山測線（下）、緑線は 2 次元タルワニ法解析測線 A, B、赤線は活断層の地表トレス位置をそれぞれ示す。(右上) 測線 A における 2 次元タルワニ法解析結果。(右下) 測線 B における 2 次元タルワニ法解析結果。それぞれ、(上) 緑線：遮断波長 4 km のフィルター処理後の重力異常分布、青線：2 次元タルワニ法解析による計算重力値、赤点：測線沿いの測定点における重力値、(下) 2 次元タルワニ法解析に用いた地下密度構造断面図。水色、黄色、オレンジ色、白色はそれぞれ第 1 層から第 4 層の領域、紫三角は地表活断層推定位置を示す。

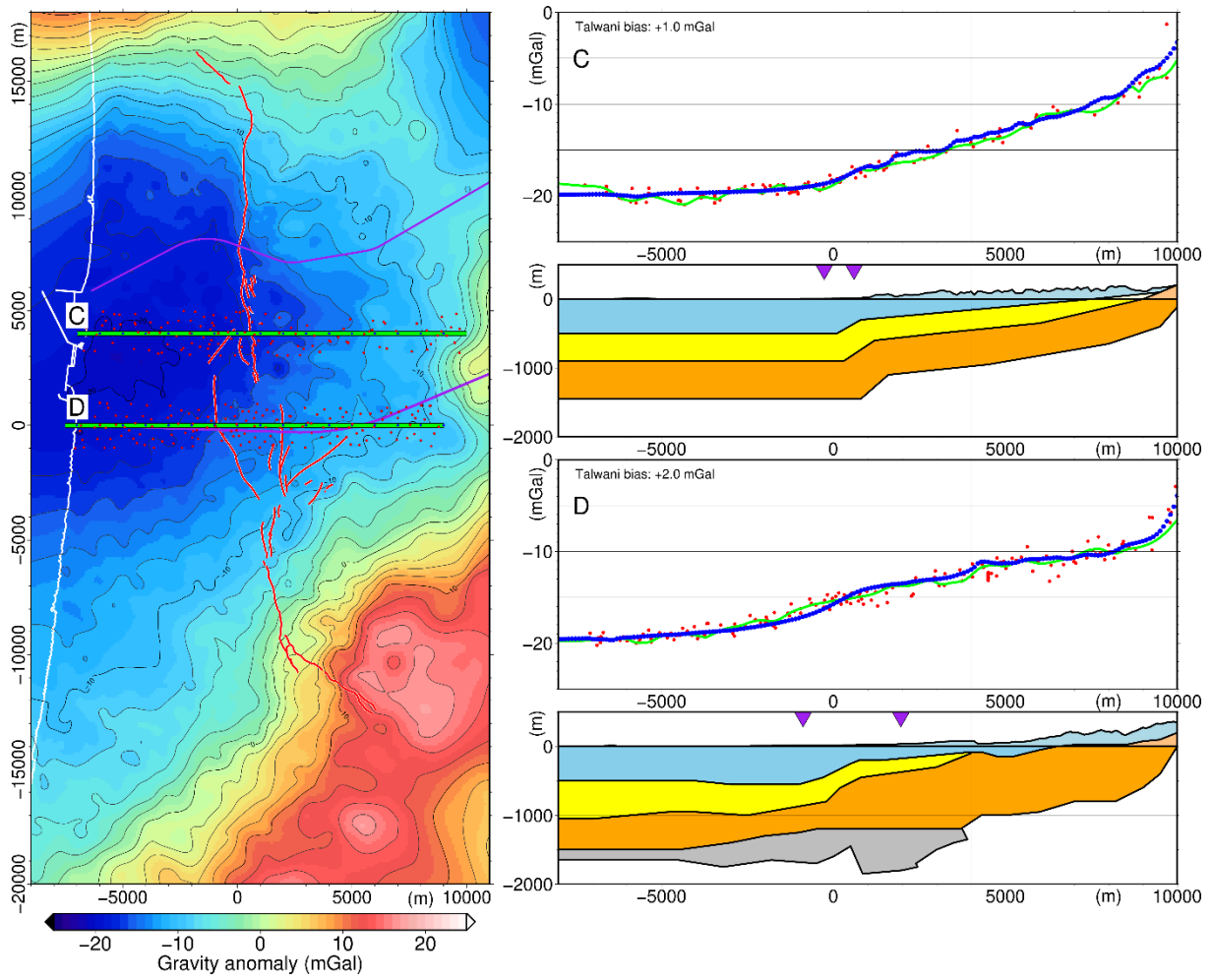


図 29 森本・富樫断層帯を横切る 2 次元タルワニ法解析測線 C, D の解析結果。  
 測線 D における下図灰色は犀川—医王山測線の解釈深度断面（石山・他，2023）から  
 第 4 層への形状変更部分を示す。その他の詳細は図 28 と同じ。

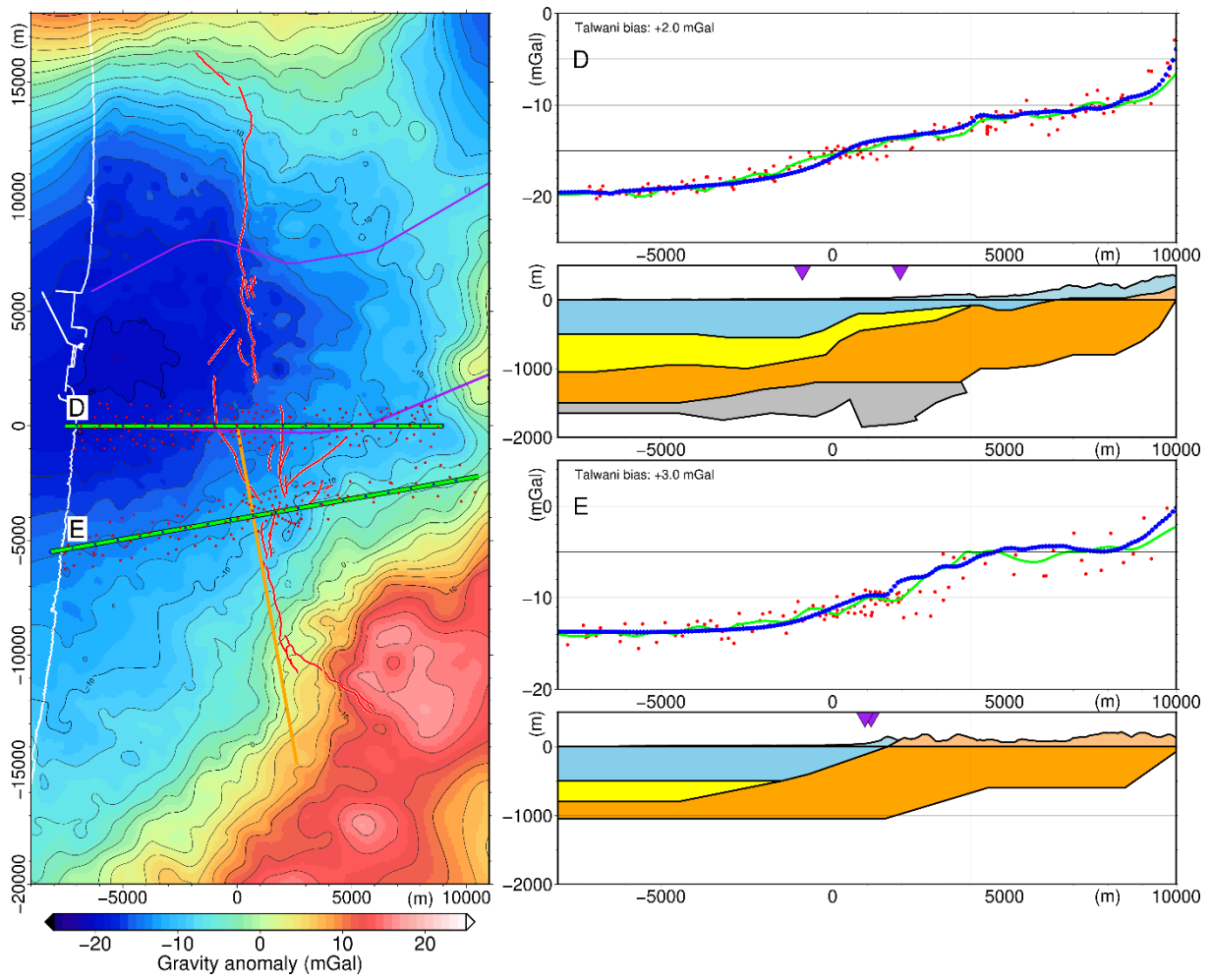


図 30 森本・富樫断層帯を横切る 2 次元タルワニ法解析測線 D, E の解析結果。  
 左図におけるオレンジ線は測線 E~G における横軸 0 の位置を示す。その他の詳細は図 29 と同じ。

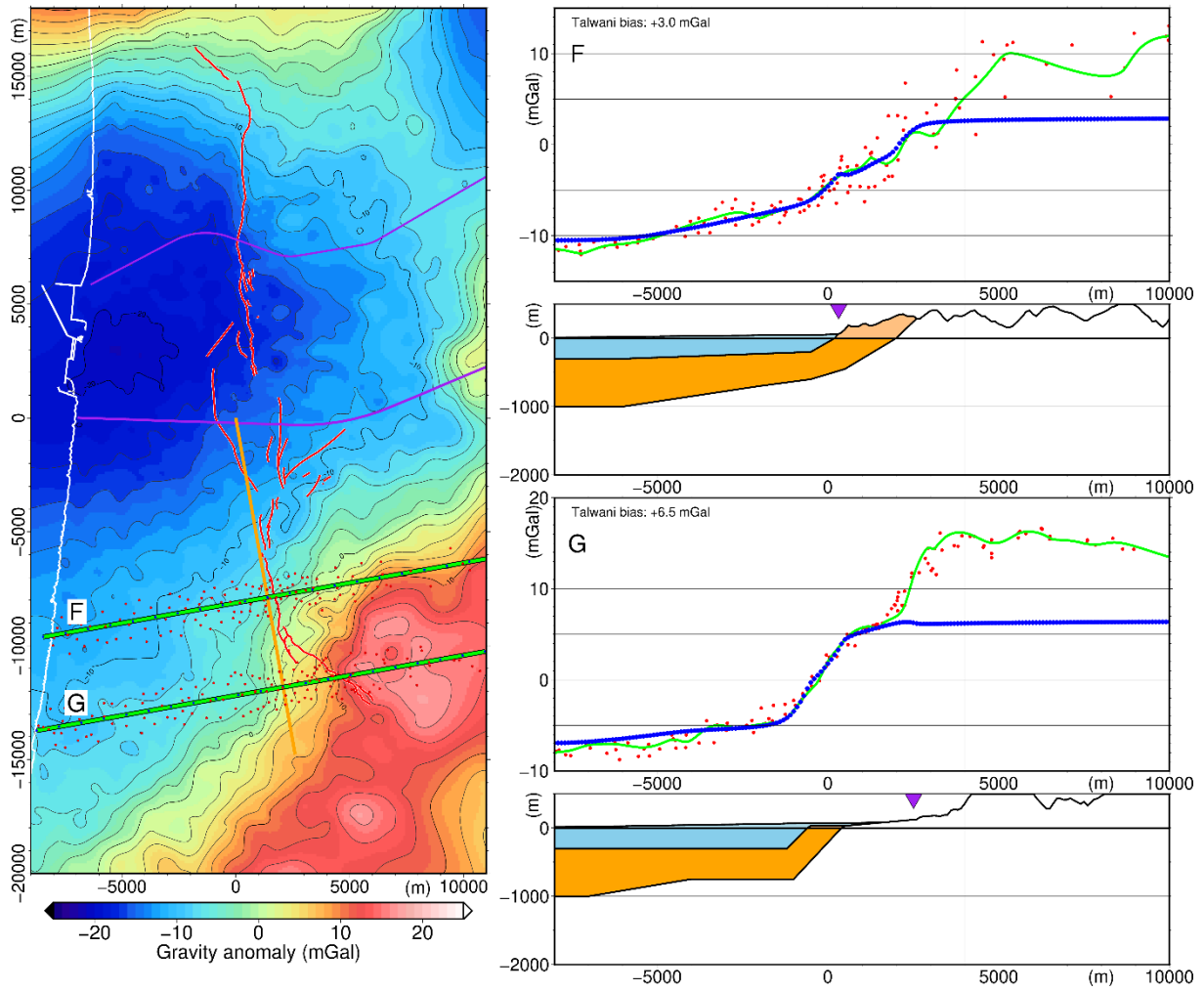


図 31 森本・富樫断層帯を横切る 2 次元タルワニ法解析測線 F, G の解析結果。  
 詳細は図 30 と同じ。

#### 5) Scintrex CG-3M 型重力計の精度の検定

金沢大学が所有し今回の測定に使用する Scintrex CG-3M 型重力計(S/N:9507302)には、重力値の大きさに依存して測定重力値が線形的に変化するバイアスがみられる。そのため、重力測定点での正確な重力値を得るためには、重力測定精度の検定を実施し、それから得られる補正係数が必要となる。そのため、令和5年度にひきつづき金沢大学所有の Scintrex CG-3M 型重力計(S302)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北海道および新潟に設置された8点の一等重力点である。加えて、山梨県富士山科学研究所周辺の3点で実施された絶対重力測定結果と比較を行うことで精密な重力計検定測定を実施した。それぞれの測定点分布を図32に示す。

北海道および新潟での重力測定は令和6年5月15日から5月21日にかけて実施した。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33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  $2.2261 \times 10^{-3}$  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33に示される検定結果は、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。今回の検定結果を追加して得られた補正係数は、 $(2.357 \pm 0.0274) \times 10^{-3}$  となる。昨年度までの検定結果にて得られていた補正係数は  $(2.3089 \pm 0.0279) \times 10^{-3}$  であり、補正係数に大きな違いはみられなかった。

山梨県富士山科学研究所周辺の3点では、山梨県富士山科学研究所(MFRI)を起点とし、富士山5合目測定点(SL5ST)および都留文化大学測定点(Tsuru Univ.)にて各2回、測定時間は1時間以上で測定を実施した。絶対重力測定結果と金沢大学所有重力計による測定値との比較の際には、金沢大学所有重力計の読み取り値にドリフト補正、潮汐補正、絶対重力計による測定標高との標高差による鉛直勾配成分の補正を行った値を用いた(図34)。絶対重力計の結果に対する金沢大学所有重力計の出力値のずれは1 mGal あたり  $2.466 \times 10^{-3}$  mGal の差が含まれることが示された。この結果は上記の1等重力点での検定測定結果による補正係数  $(2.357 \pm 0.0274) \times 10^{-3}$  とほぼ同じ値であった。また、金沢大学所有重力計の補正係数として使用している1 mGal あたり  $2.2261 \times 10^{-3}$  の値からの変更を必要としないとする結果となった。

したがって、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確認された。

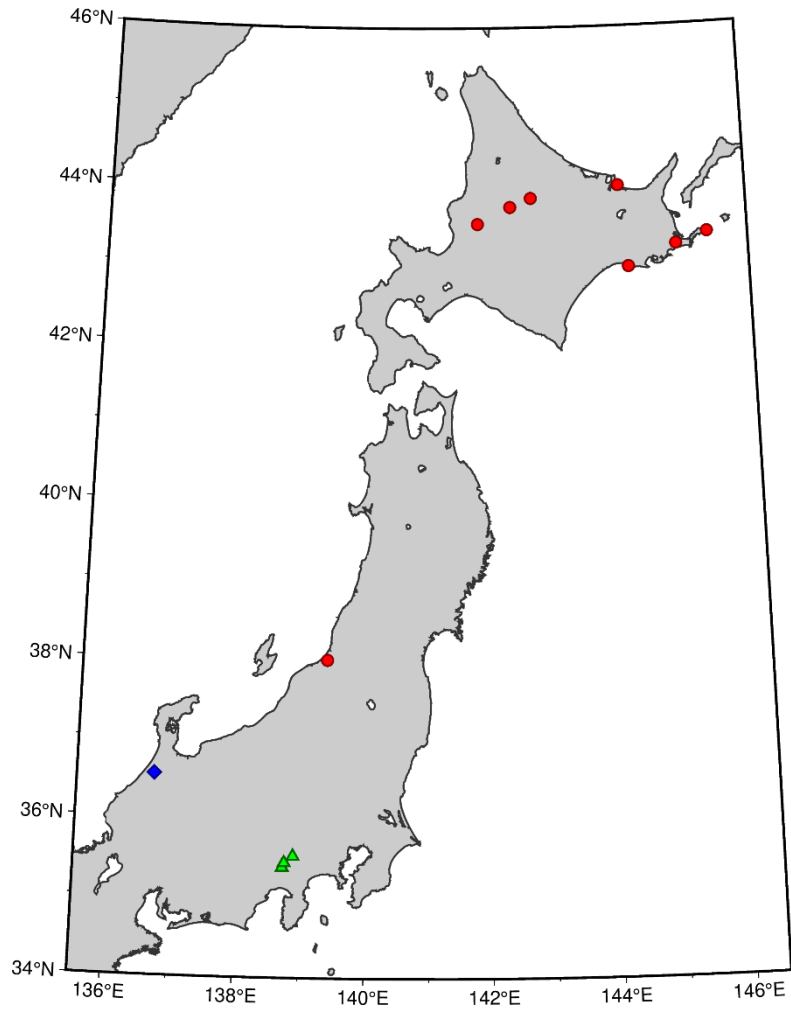


図 32 重力計検定測定を行った観測点。赤点：重力計検定に使用した一等重力点、青点：一等重力点（金沢）、緑点：絶対重力測定結果と比較を行った測定点。

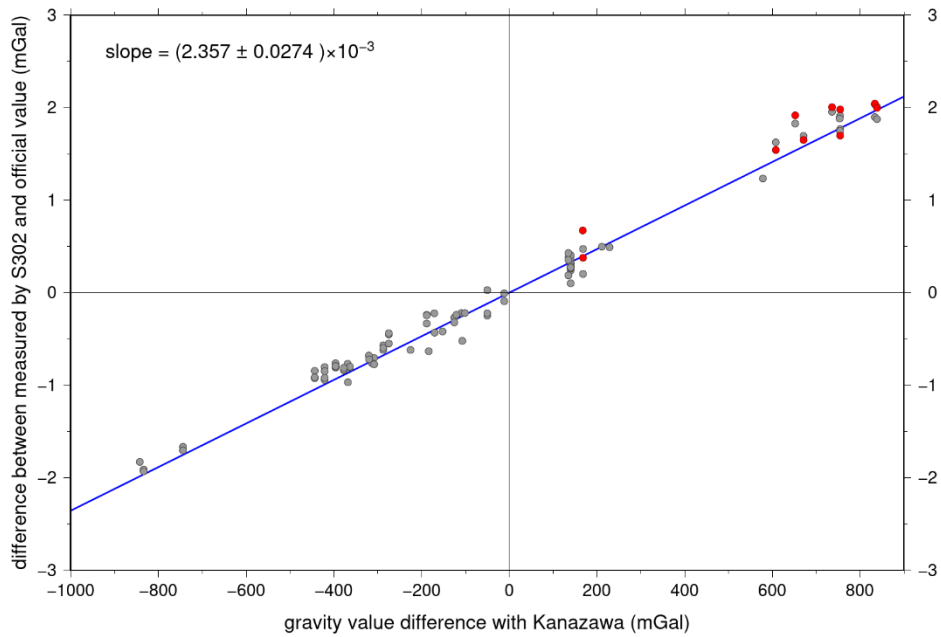


図 33 重力計検定測定の結果。赤点は令和 6 年度に検定を行った測定値、灰点は既存一等重力点測定値、青線は一等重力点金沢での測定値を原点として最小二乗法により得られた回帰直線を示す。横軸：一等重力点金沢と検定に用いた一等重力点との重力値の差、縦軸：2 点間の正確な重力差と金沢大学所有の Scintrex CG-3M 型重力計による測定重力差との差。

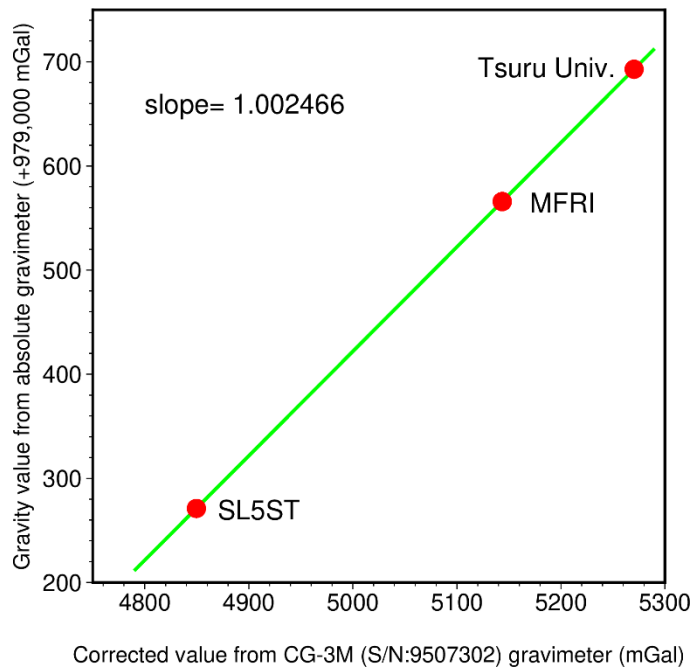


図 34 富士山検定ラインにおける金沢大学が所有する Scintrex CG-3M 型重力計による測定重力値と絶対重力計による測定重力値との比較。MFRI は山梨県富士山科学研究所の基準点（基準重力点富士吉田）、SL5ST は富士山五合目の測定点、Tsuru Univ. は都留文化大学測定点における測定結果を示す。

### (c) 結論

令和5年度に引き続き、森本・富樫断層帯周辺で重力測定を行い、295点の新規重力データを追加した。また、既存データの精査を行い、誤りが含まれると推測される重力データ248点について除去を行い、そのうち76点について同一地点にて再重力測定を行い、重力データを得た。これらの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、重力異常図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。また、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。さらに勾配図の特徴から、森本・富樫断層帯の断層構造は邑知潟断層帯の断層構造と連続しないと考えられる。

観測重力異常分布に基づき森本・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。複数例の初期深度分布及び密度差に対して解析を行った結果、反射法地震探査と概ね整合的であり、観測重力異常分布を説明する境界深度分布が得られた。

また、令和4年度実施の反射法地震探査測線である犀川－医王山測線及び令和5年度実施の内灘－南砺測線にて2次元タルワニ法解析を行った。内灘－南砺測線では、反射法地震探査結果に基づく2次元密度構造により測線沿いの観測重力異常値を概ね説明可能であり、反射法地震探査から推定された層構造は重力異常の観点から妥当であることを確認した。犀川－医王山測線では、観測重力異常値を説明するために最深部の層境界において反射法地震探査結果に基づく2次元密度構造の修正が必要であったが、堆積層の層構造は妥当であることが確認できた。これらの結果を参照し、反射法地震探査測線以外の森本・富樫断層帯の直交する5測線においても2次元タルワニ法解析を行い、森本断層及び野町断層は類似の密度構造が連続するが、富樫断層は異なる構造を示す可能性を持つことが分かった。

金沢大学所有の Scintrex CG-3M 型重力計による重力測定精度の検定を目的として、北海道、新潟の一等重力点での重力測定を実施するとともに、富士山周辺の絶対重力測定点においての検定測定を行った。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。

(d) 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.
- 平松良浩・澤田明宏・宮川歩夢・杉井天音・福岡光輝・陣出湧也・高野彩香，3. 1. 2 重力探査に基づく地下構造調査，文部科学省研究開発局・国立大学法人京都大学防災研究所，森本・富樫断層帯の重点的な調査観測 令和5年度報告書，102-127，2024.
- 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.
- 石山達也・他11名，3. 1. 1 活断層の詳細位置・形状・活動性解明のための調査，文部科学省研究開発局・国立大学法人京都大学防災研究所，森本・富樫断層帯の重点的な調査観測 令和4年度報告書，6-65，2023.
- 石山達也・他11名，3. 1. 1 活断層の詳細位置・形状・活動性解明のための調査，文部科学省研究開発局・国立大学法人京都大学防災研究所，森本・富樫断層帯の重点的な調査観測 令和5年度報告書，6-101，2024.
- 伊藤康人・山下透・檀原徹・長崎康彦・渡辺真人・荒戸裕之，基礎試錐「金沢沖」の中新世火山岩類について一背弧海盆拡大期の火成活動一，石油技術協会誌，59，6，509-518，1994.
- 鹿野和彦・原山智・山本博文・竹内誠・宇都浩三・駒澤正夫・広島俊男・須藤定久，20万分の1地質図幅「金沢」，地質調査書，1999.
- 紺野義夫（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](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 10 m 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，基盤地図情報数値標高モデル 5 m 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., K.V. Swamy and I.V. Radhakrishna Murthy, 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，5万分の1地質図幅「金沢」，1959.

- 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., J. Wozel and M. Landisman, Rapid computation for two dimensional Bodies with application to Mendocino Submarine Fracture Zone, J. Geophysical Res., 64, 49-59, 1959.
- 東郷正美・池田安隆・今泉俊文・澤祥， 1:25000 都市圏活断層図「金沢」， 国土地理院， 1998.
- 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., J.F. Luis, L. Uieda, R. Scharroo, F. Wobbe, W.H.F. Smith and D. Tian, The Generic Mapping Tools version 6. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 20, 5556-5564. <https://doi.org/10.1029/2019GC008515>, 2019.
- 地質調査所， 5 万分の 1 地質図幅「金沢」， 1959.

### (3) 令和4～6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

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1071点の新規重力データを得た。

##### 2) 森本・富樫断層帯周辺における既往重力データの検証

1)にて実施した森本・富樫断層帯周辺での稠密な重力探査の結果、DEMデータや隣接する重力データとの比較により、測定精度が低いと考えられる既往重力データが抽出可能となり、それらの測定点での重力測定の再実施または測定値の除去処理を行った。

##### 3) 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、異なる密度からなる2層構造を仮定した3次元重力インバージョン解析を行い、2層の境界深度分布を推定した。

##### 4) 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5年度に実施された反射法地震探査測線である内灘－南砺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内灘－南砺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。さらに、森本・富樫断層帯に直交する複数測線での2次元タルワニ法解析によって、断層近傍での重力異常値の変化と密度境界深度の変化の比較を行った。

##### 5) 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一等重力点または絶対重力測定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、および令和6年能登半島地震が森本・富樫断層帯周辺にて重力値の影響がみられないことを確認した。

#### (b) 業務の実施方法

業務項目は、下記の5項目とした。

##### 1) 森本・富樫断層帯周辺における既往重力データの精査

##### 2) 森本・富樫断層帯周辺における重力探査

##### 3) 3次元重力インバージョン解析による密度構造の推定

##### 4) 2次元タルワニ法解析による密度構造の検討

##### 5) Scintrex CG-3M型重力計の精度検定

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

1)では、既往重力データに令和4年度からの業務により得られた新規重力データを加えた稠密な重力データを構築し、DEMデータや隣接する重力データとの比較により、既往重力データに含まれる測定精度が低いと考えられる重力データを抽出し、それらの測定点での再重力測定または測定値の除去を行う。

2)では、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、河北潟から手取川にかけての金沢平野、森本・富樫断層帯沿いの丘陵部について既往重力データが少ない地域にて重力測定を実施する。あわせてサブテーマ 1. 1 にて行われた地震波探査測線周辺にて重力測定を実施する。

3) 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 層の境界深度分布の推定を行う。

4) では、サブテーマ 1. 1 の反射法地震探査測線である犀川—医王山測線および内灘—南砺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との比較により、2 次元密度構造の検討を行う。また、反射法地震探査測線以外の森本・富樫断層帯に直交する測線を 5 本設定し、各測線において 2 次元タルワニ法解析を実施し、2 次元密度構造を検討する。

5) では、本調査で用いる Scintrex CG-3M 型重力計の測定精度の確認を目的として北海道及び富士山の一等重力点または絶対重力測定実施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。

#### (c) 業務の成果

##### 1) 森本・富樫断層帯周辺における既往重力データの精査

###### i) 既往重力データに含まれる誤重力データについて

解析に使用する重力データとしては、令和 4 年度から令和 6 年度にかけて観測を行ったデータ（図 35）の他に、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）を合わせて用いる。しかし、これらの既往重力データは GNSS 利用可能以前に測定されたものも多く、それらの一部には地図からの位置情報の判読誤り、コンピュータへの入力ミスによる誤り、重力計を用いた測定時の数値読み取りの誤り及び記載ミス等の可能性がある。これらの誤りは、該当測定点の周辺に精度の良い重力データが存在すれば、重力値の不自然な差として抽出可能であるが、これまでは測定点分布が疎であったために、そのような重力データが局所的な地質構造による真の値か、誤重力データかの識別が困難であった。

###### ii) 精査手順

重力データには測定点の位置情報および重力値が含まれる。重力値は位置情報によって補正された値であるため、位置情報の正確さが誤重力データを抽出する上で重要になる。測定の多くが道路上にて行われることから、位置情報の緯度と経度で示される点が地図上にて道路上ではなく、アクセス困難な場所にある場合、その測定点の緯度と経度の情報は誤りである可能性が高く、その重力データも誤データである可能性が高い。また、位置情報の標高値は、DEM データとの数値的な差分が可能であり、誤重力データの自動抽出が可能である。

誤重力データ抽出の作業手順は以下のとおりである（図 36）。

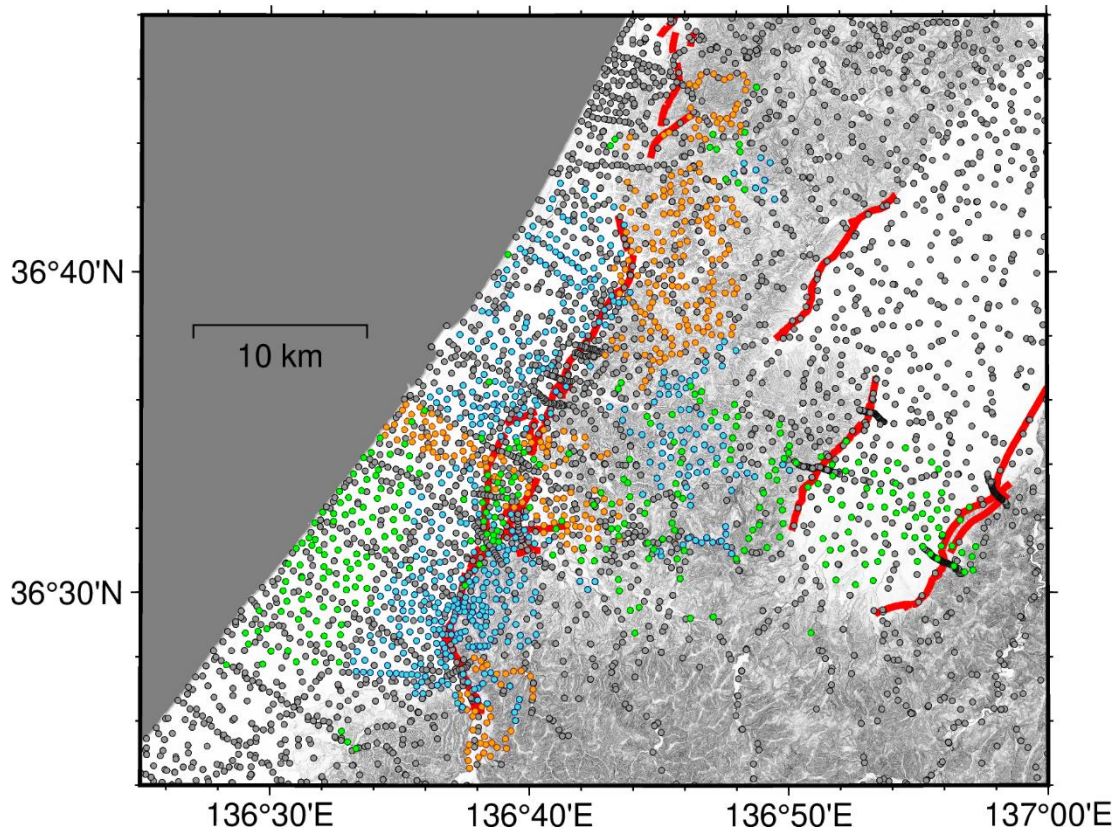


図 35 森本・富樫断層帯周辺の令和 4 年度の調査における重力測定点（オレンジ丸）、令和 5 年度の調査における新規重力測定点（青丸）、令和 6 年度の調査における新規重力測定点（緑丸）、既往重力測定点（灰丸）、赤線は活断層の地表トレース位置を示す。

- ・令和 4 年度サブテーマ 1. 1 で作成された 0.5 m グリッドの DEM の標高値と重力データに記載された標高値とを比較し、それらの差が 5 m 以上である点を抽出する。
- ・抽出された重力データの測定点について、測定点の周囲 1.5 km 程度の範囲でのブーゲー異常分布図、対象測定点が存在しない場合のブーゲー異常分布図、道路境界線が描かれた地形図を作成する。
- ・地形図から、重力測定に適した場所に測定点が位置するか否かを調べ、水平位置を確認する。不適切な場所に測定点が位置する場合は、水平位置情報が誤っている可能性が高いと判断し、該当する重力データを誤重力データとして除去対象とする。
- ・0.5 m グリッドの DEM の他に基盤地図情報数値標高モデル 10 m メッシュ及び 5 m メッシュ（国土地理院）、地形図を参照し、0.5 m グリッドの DEM の標高値の確度を確認する。重力測定後に行われた工事等による地形改変も考慮した上で、重力データに記載されている標高値が誤っている可能性が高いと判断できる場合は、該当する重力データを誤重力データとして除去対象とする。
- ・上で作成された 3 種類のブーゲー異常分布図を比較する。地下密度構造の変化による重力異常変化は大きくないと仮定した上で、対象測定点の重力データのみによりブーゲー異常の急変が生じている場合には、周囲の重力データが誤重力データである可能性も考

慮しつつチェックをした上で、対象重力データが誤っている可能性が高いと判断されるならば、その重力データを誤重力データとして除去対象とする。

・上記のチェックによっても誤重力データであるかの判断がつかない重力データについては、再重力測定が容易な場所であれば再測定候補点とし、後日再測定を行う。一方、再重力測定が難しい場所（多くは現在通行不可となっている林道である）の場合は、重力データを除去しない。再測定候補点とした測定点については、再測定された重力データを使用し、再測定を行うことができなかった場合には重力データをそのまま使用した。

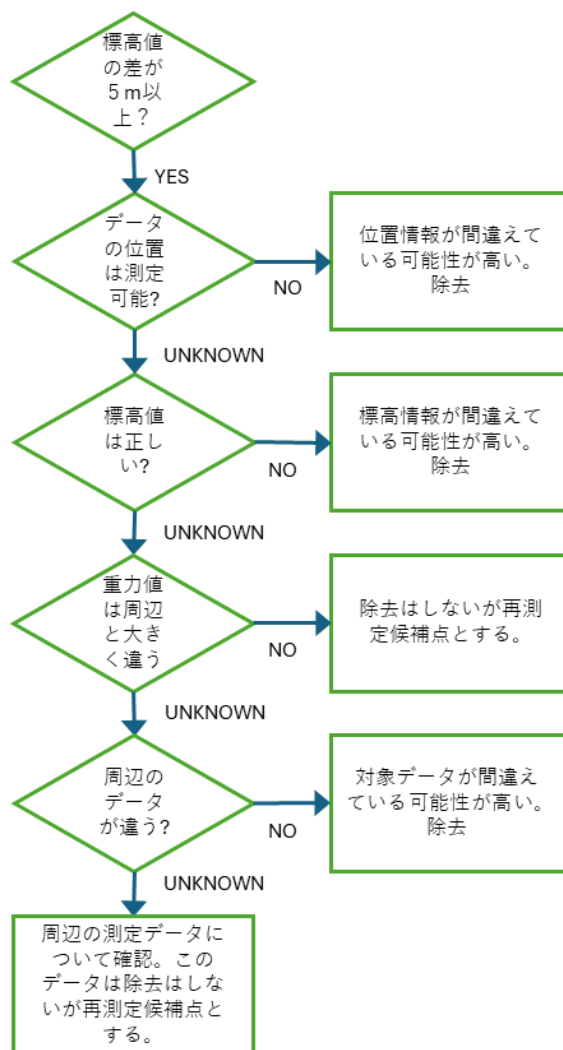


図 36 誤重力データ抽出及び除去手順のフローチャート

### iii) 既往重力測定点精査による結果

上記 ii) の手順により、誤重力データとして除去した重力データは 248 点である。また、除去とあわせて再測定を行った重力データは 82 点である。除去した重力データの測定点及び再測定を行った重力データの分布を図 37 に示す。また、多くの再重力測定業務以前である令和 5 年度までの誤重力データ除去前の重力異常分布図と誤重力データ除去後の重力異常分布図をそれぞれ図 38 に示す。誤重力データ除去により重力異常分布図が滑らかになったことが分かる。

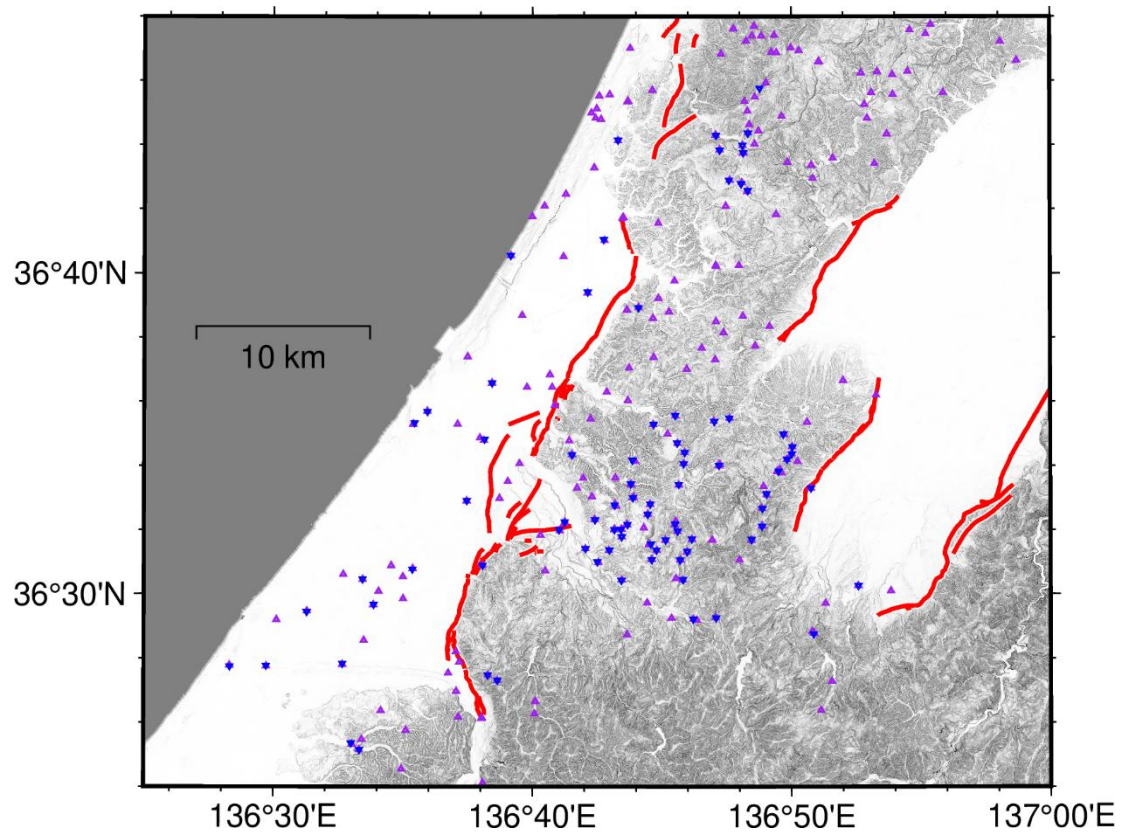


図 37 森本・富樫断層帯周辺の誤重力データと判断し除去対象とした測定点（紫三角）及び再測定点（青逆三角）の分布。赤線は活断層の地表トレース位置（森本・富樫断層帯についてはサブテーマ 1. 1 より引用、以下の図も同様）を示す。

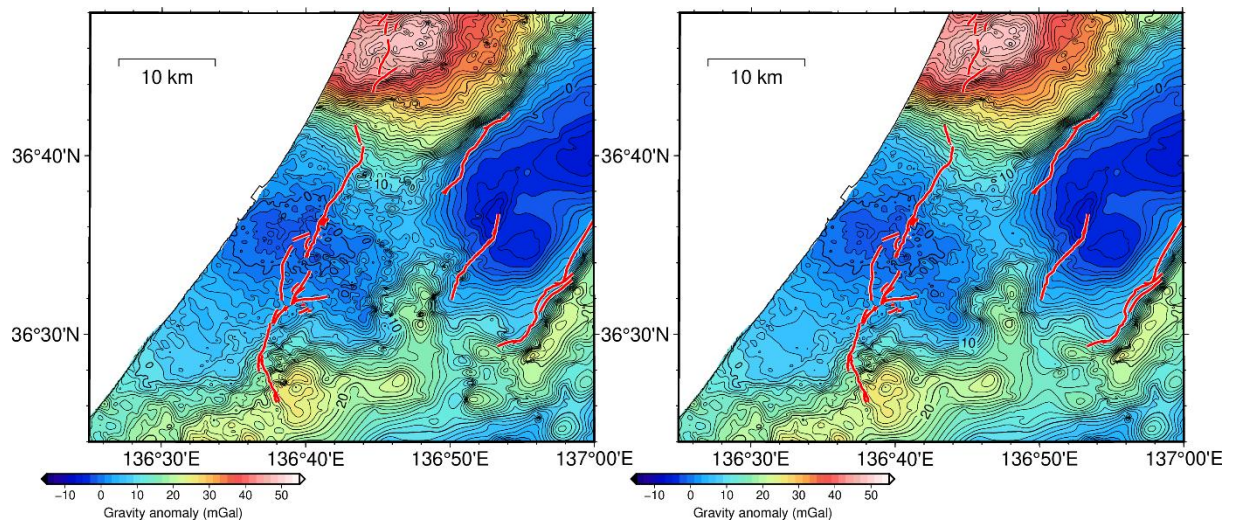


図 38（左）令和 5 年度までの重力データで作成したブーゲー異常分布図。（右）左図から誤重力データを除去した重力データを用いて作成したブーゲー異常分布図。それぞれブーゲー補正密度は  $2300\text{kg/m}^3$ 、コンター線の間隔は  $1\text{mGal}$  である。赤線は活断層の地表トレース位置を示す。

## 2) 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

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4年度調査における新規重力測定として、森本断層北端部周辺、富樫断層南端部周辺、野町断層中央部周辺について重点的に実施した。また、令和5年度調査では、新規重力測定を森本断層西側の平野部、富樫断層西側の平野部および東側丘陵部にて重点的に実施し、令和6年度調査における新規重力測定は、富樫断層西側の平野部（主に白山市から川北町にかけて）、及び森本断層東側の丘陵部から砺波平野（主にサブテーマ1.1による内灘－南砺地震波探査測線周辺）にて重点的に実施した。また、1)で行った森本・富樫断層帯周辺における既往重力データの精査により重力データの精度が疑わしい測定点について再測定を合わせて実施した。

新規重力測定点の配置については、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35に森本・富樫断層帯周辺における年度毎の新規重力測定点及び既往重力測定点の分布を示す。

重力測定にて位置情報を決定するために、通信電波状態が可能な場合にはRTK測量を用いた。RTK測量では、2023年1月までは基線長解析を行うためのRTK基準点として三脚および1.955 m 高のポールを用いて金沢大学の敷地内に設置した。基準点のアンテナの位相中心の座標は、経度136.7063008度、緯度36.5424222度、標高155.00 mであった。また、2023年2月以降は金沢大学の敷地内の固定された石碑上のマウントにGNSSアンテナを設置した。石碑上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。これらのRTK基準点の位置を図39に示す。

RTK測量導入前およびRTK測量が行えない観測点では、位置決定にGNSSによるStatic測量を行った。基線長解析の基準点として国土地理院が運用する電子基準点「内灘」、「福光」または「鳥越」の観測結果を参照した。

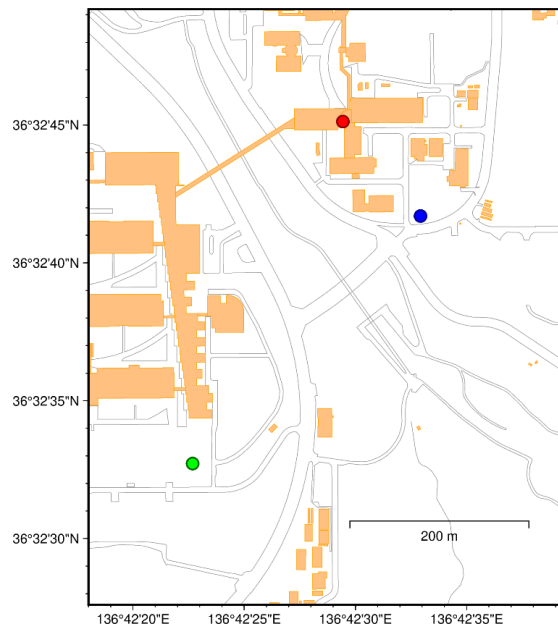


図 39 金沢大学敷地内における RTK 基準点の位置。赤丸は一等重力点金沢、緑丸は 2023 年 1 月まで、青丸は 2023 年 2 月以降の RTK 基準点を示す。

#### ii) 重力測定手順

重力測定における作業手順は以下のとおりである。

- ・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、ブーゲー補正及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及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、潮汐補正及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值を計算し、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值としては  $0.3086 \times \text{標高(m)}$  (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) を用いて補正值を計算する。本調査で用いる補正密度は  $2300 \text{ kg/m}^3$  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  $2350 \text{ kg/m}^3$ 、重力図では補正密度として  $2300 \text{ kg/m}^3$  の値が用いられており、本調査で用いる  $2300 \text{ kg/m}^3$  の補正密度は妥当であると考えられる。

上記の補正值を用いて、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)、 $\gamma$  : 正規重力値 (mGal)、 $d$  : ドリフト補正值 (mGal)、 $G_T$  : 潮汐補正值 (mGal)、 $h$  : 標高(m)、 $\beta h$  : フリーエア補正值 (mGal)、 $G$  : 万有引力定数、 $2\pi G \rho h$  : ブーゲー補正值 (mGal)、 $T_c$  : 地形補正值 (mGal)、 $C_A$  : 大気圧補正值、である。

### v) 重力測定結果

令和4年度から令和6年度までの重力測定によって、新規に1071点の重力測定データが得られた。ここで、令和4年度において319点、令和5年度において457点、令和6年度においては295点の新規重力測定データが得られた。この中には1)にて実施された既往重力データの精査によって行われた再測定点として82点が含まれる。これらの測定結果によって作成された重力異常分布について、1)の結果と合わせて作成する。

### vi) 森本・富樫断層帯周辺における重力異常

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

40 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 40 右上に平面トレンド成分、図 40 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 40 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 40 左下）。図 40 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 40 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±2 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。

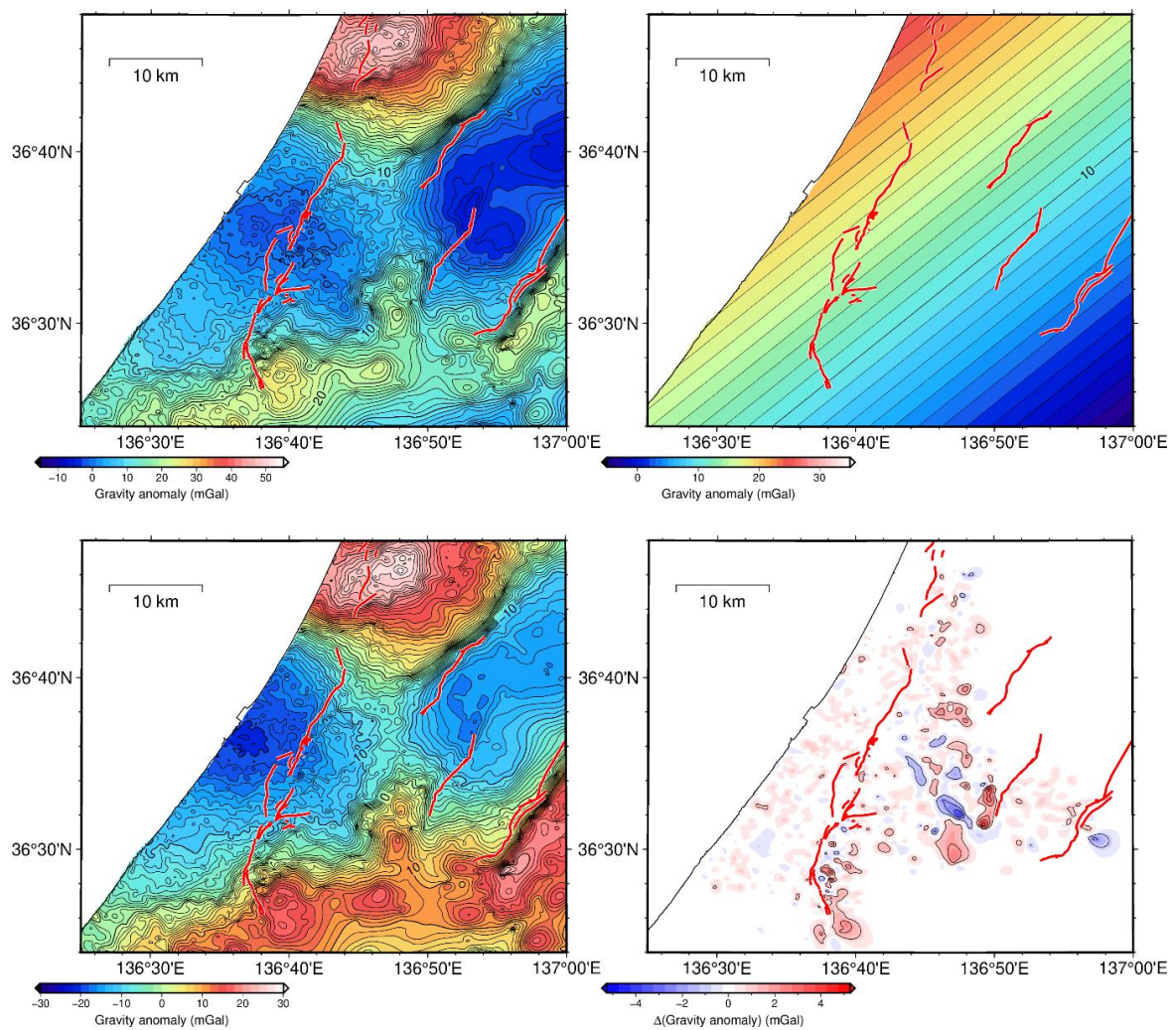
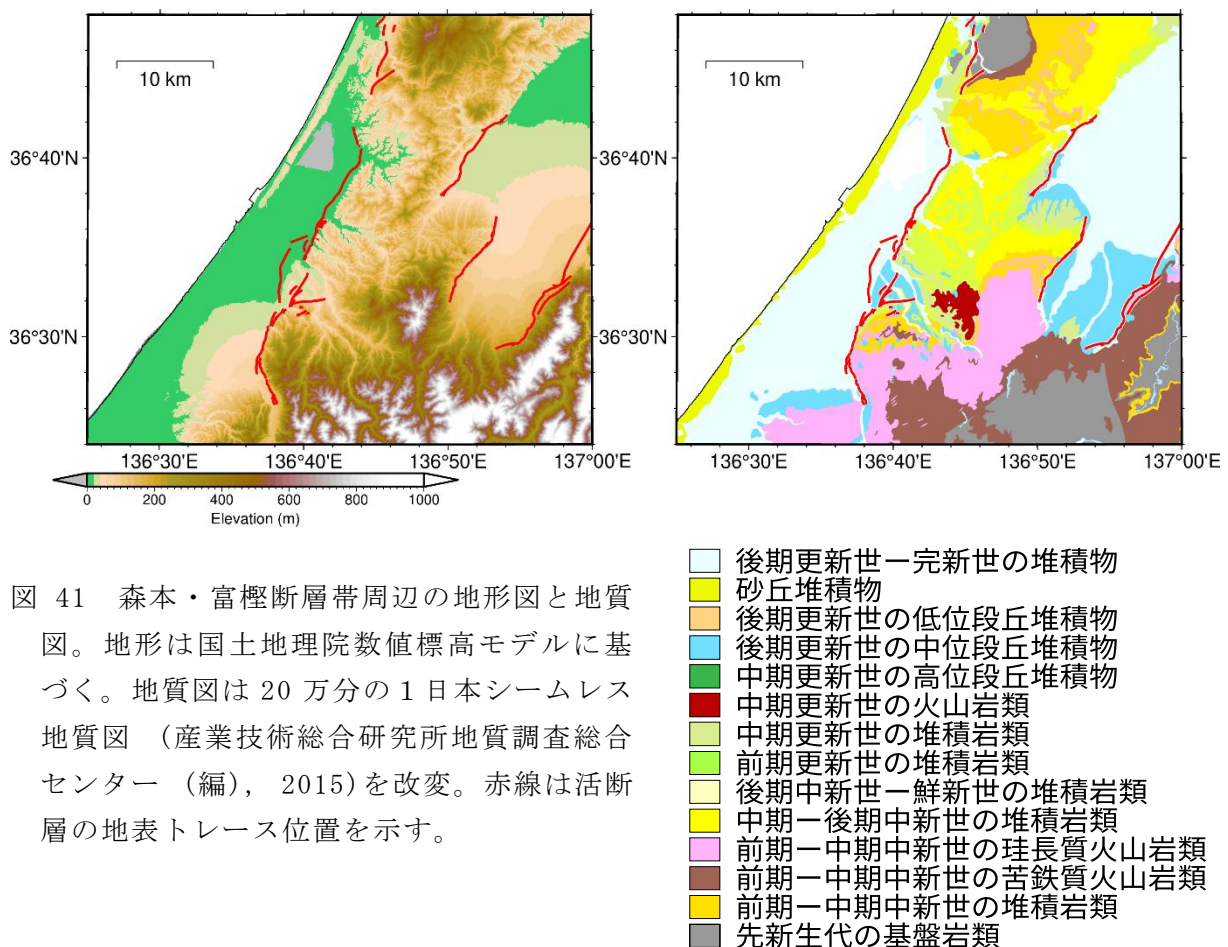


図 40 (左上) 森本・富樫断層帯周辺における本研究で得られた重力値を含むブーゲー異常図。(右上) 平面トレンド成分の分布。(左下) 平面トレンド成分を取り除いた重力異常図。(右下) 本研究による重力値を含む重力異常分布と既往重力データに基づく重力異常分布の差。コンター線の間隔は1 mGal である。赤線は活断層の地表トレース位置を示す。

vii) 森本・富樫断層帯周辺の地形と地質の概要

図 40 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 41 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粕野(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。



viii) 森本・富樫断層帯周辺における重力異常の特徴

図 42 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。邑知潟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。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 40 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 43 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 40 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 43 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

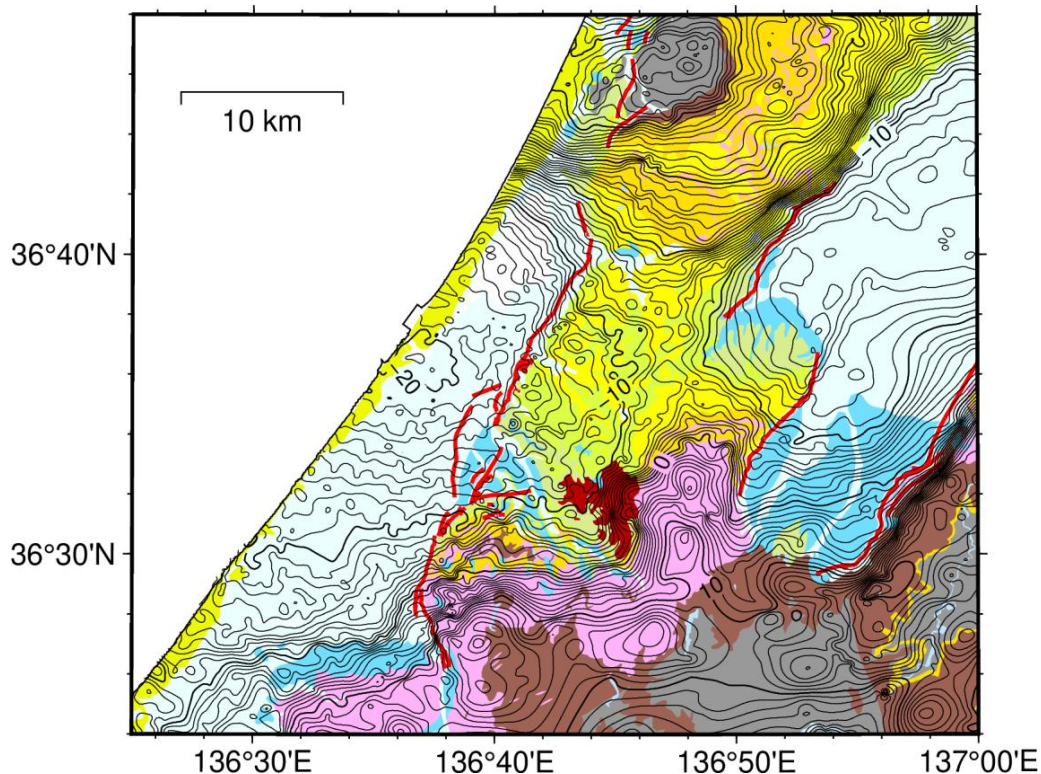


図 42 地質図と重ね合わせた平面トレンド成分を取り除いた重力異常図。コンター線の間隔は 1 mGal である。地質図の凡例は図 41 と同じである。赤線は活断層の地表トレース位置を示す。

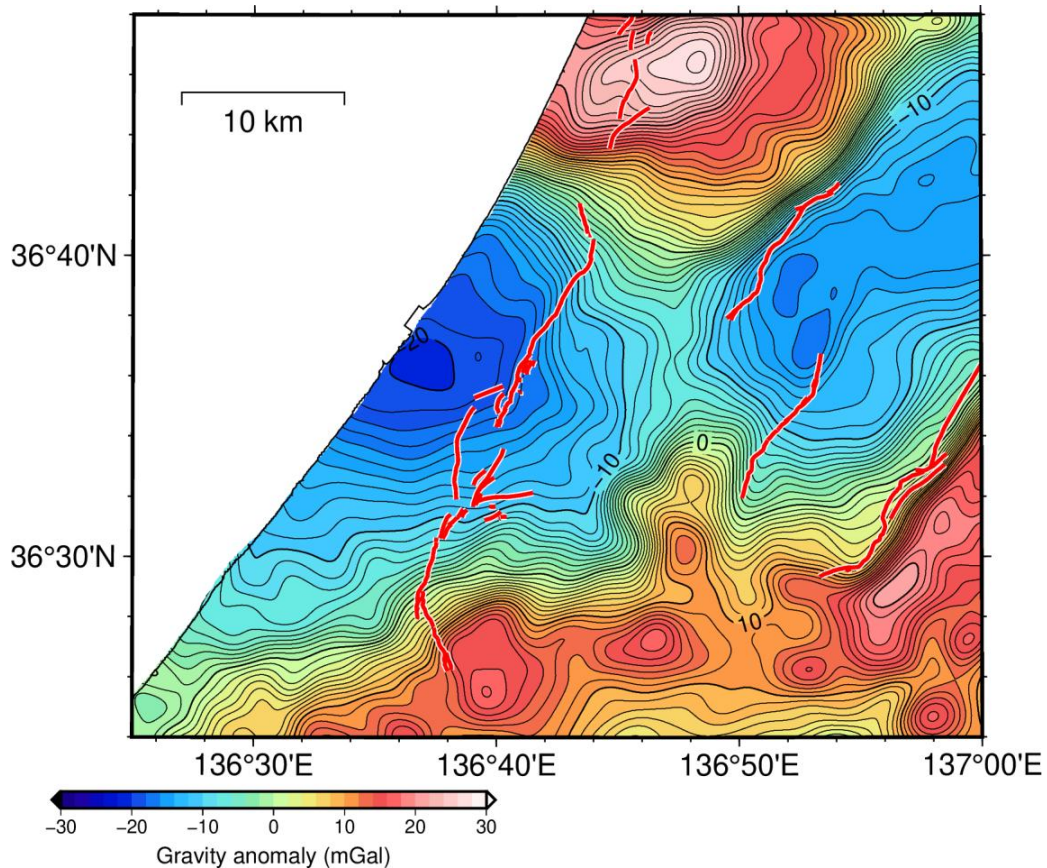


図 43 遮断波長 4 km のフィルター処理後の重力異常図。コンター線の間隔 1 mGal である。赤線は活断層の地表トレース位置を示す。

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 44 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。

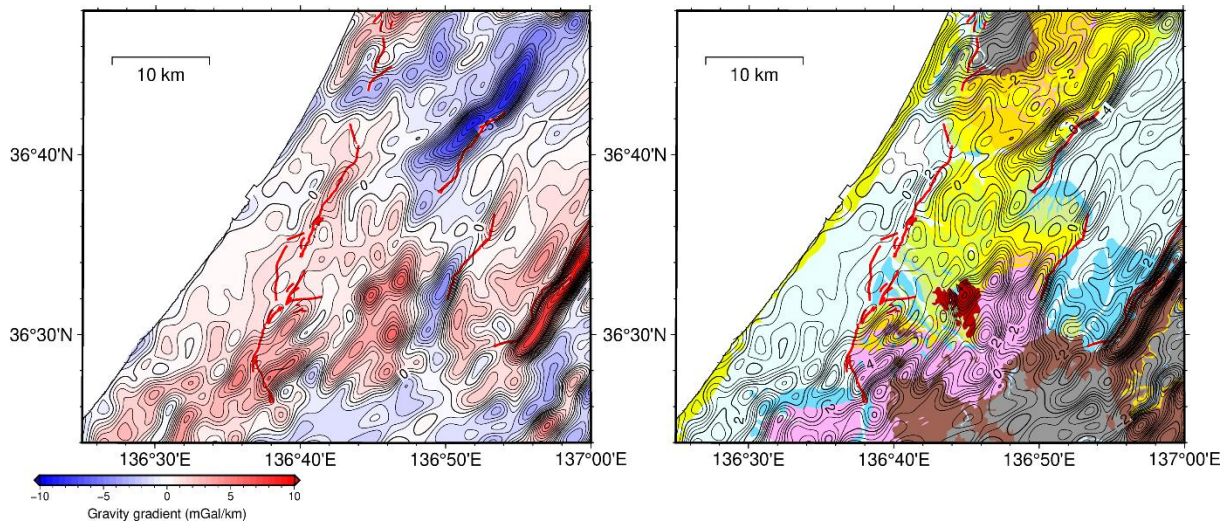


図 44 (左) 遮断波長 4 km のフィルター処理後の重力異常の森本・富樫断層帯の傾斜方向の勾配。(右) 地質図と重ね合わせた遮断波長 4 km のフィルター処理後の重力異常の森本・富樫断層帯の傾斜方向の勾配。コンター線の間隔は 0.5 mGal/km である。地質図の凡例は図 41 と同じである。赤線は活断層の地表トレース位置を示す。

図 45 は森本・富樫断層帯の走向方向と平行な  $N30^{\circ} E$  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、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と考えられる。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 44 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 46 は図 43 に示す重力異常の水平一次微分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微分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微分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。

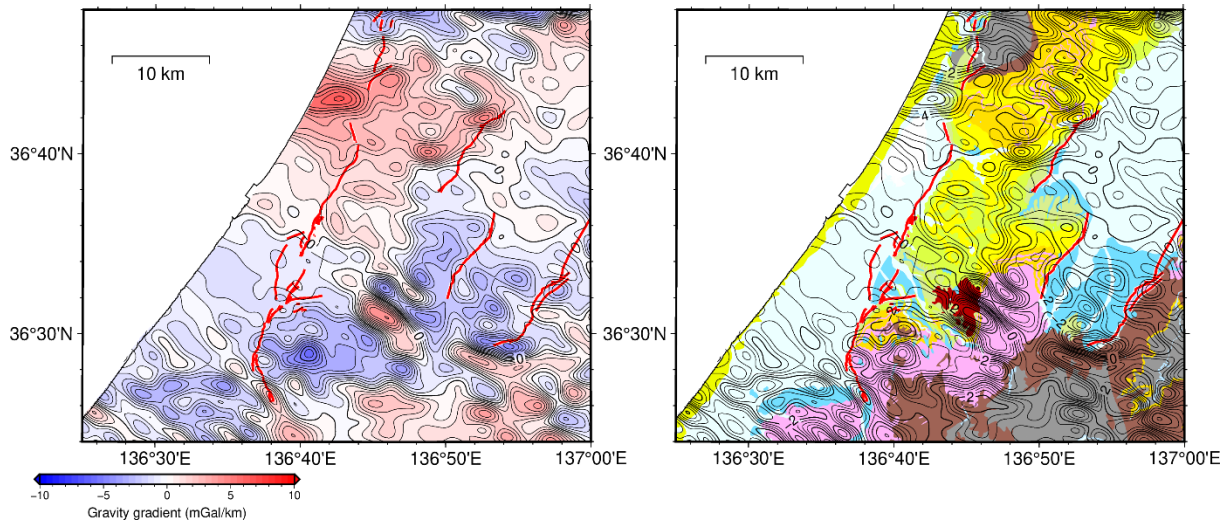


図 45 (左) 遮断波長 4 km のフィルター処理後の重力異常の森本・富樫断層帯の走向方向の勾配。(右) 地質図と重ね合わせた遮断波長 4 km のフィルター処理後の重力異常の森本・富樫断層帯の走向方向の勾配。コンター線の間隔は 0.5 mGal/km である。地質図の凡例は図 41 と同じである。赤線は活断層の地表トレース位置を示す。

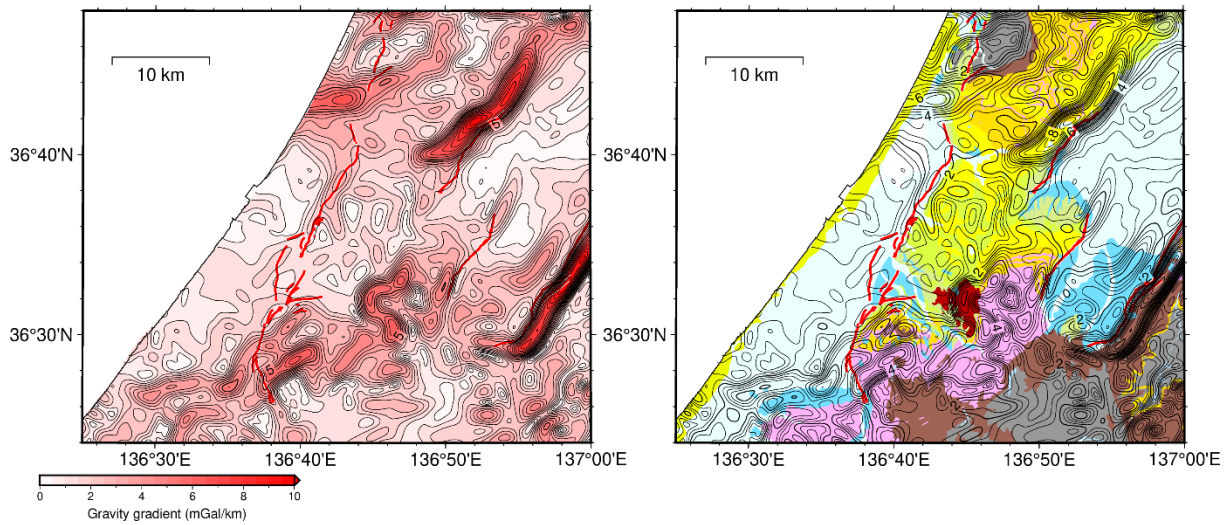


図 46 (左) 遮断波長 4 km のフィルター処理後の重力異常の水平一次微分。コンター線の間隔は 0.5 mGal/km である。(右) 地質図と重ね合わせた遮断波長 4 km のフィルター処理後の重力異常の水平一次微分。コンター線の間隔は 0.5 mGal/km である。地質図の凡例は図 41 と同じである。赤線は活断層の地表トレース位置を示す。

### 3) 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、単位は m) : 22000 ~ 106000、Y (東方向に正、単位は m) : -74000 ~ 10000 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 から 2000 m まで 250 m 間隔で試行する。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 250 m、密度差を  $500 \text{ kg/m}^3$  と設定したときの解析結果を図 47 に示す。 $500 \text{ kg/m}^3$  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  $1800 \text{ kg/m}^3$  とその下位に存在すると推定される医王山層を想定した珪長質火山岩類の密度に相当する  $2300 \text{ kg/m}^3$  との密度差に相当し、医王山層などに相当する前期中新統及び下位の基盤岩などの形状については平坦であると仮定している。

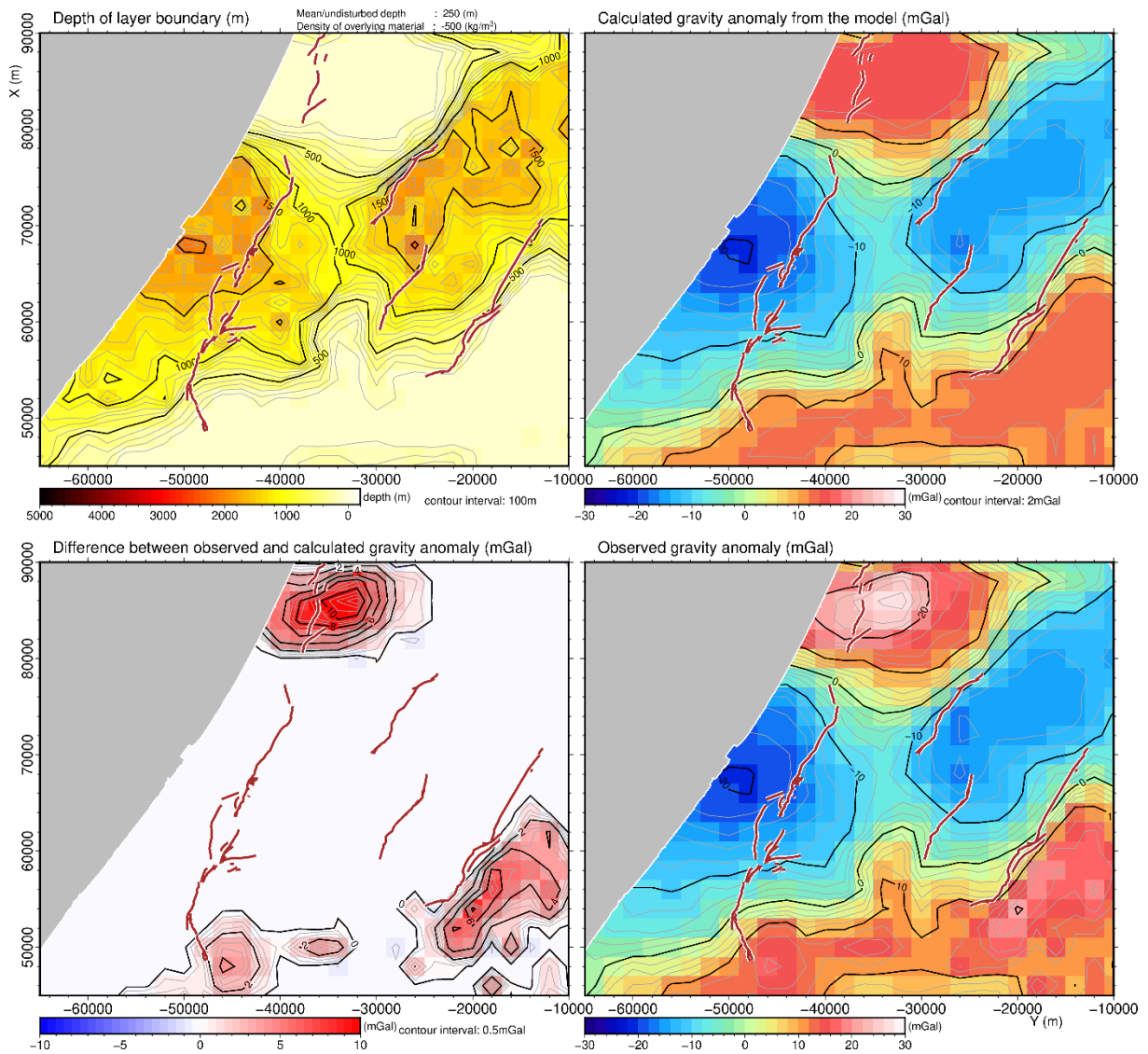


図 47 (左上) 初期パラメータの境界深度を 250 m、密度差を 500 kg/m<sup>3</sup> と設定した場合の 3 次元重力インバージョン解析から推定された境界深度分布。コンター線の間隔は 100 m である。(右上) 3 次元重力インバージョン解析により得られた密度構造から計算される理論重力異常分布。コンター線の間隔は 2 mGal である。(左下) 理論重力異常分布と観測重力異常分布との差。コンター線の間隔は 0.5 mGal である。(右下) 3 次元重力インバージョン解析に用いる観測重力異常分布。コンター線の間隔は 2 mGal である。赤線は活断層の地表トレース位置を示す。

観測重力異常分布（図 47 右下）と図 47 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 47 右上）との差を示す差分図（図 47 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、観測重力異常値と理論重力異常値の差が大きい領域は、境界深度が概ね 0m であり、これは下位層が地表に達していると解釈することができる。地質図（図 41）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し、3次元重力インバージョン解析で下位層が地表に達する結果と整合的であることが分かる。

図 47 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 48 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、図 48 で示した結果の初期パラメータを変更し初期境界深度を 250 m、500 m、750 m 及び 1000 m に設定した場合の結果を図 49 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 0m の領域の範囲も変化する。宝達山付近での 0m 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、花崗岩基盤岩より上位の医王山層上面深度を対象としてインバージョン結果と比較する際は、地質図における花崗岩露出範囲より広めに考える必要がある。図 48 では、初期境界深度が 750 m では境界深度が 0m の領域と宝達山付近の花崗岩分布範囲が比較的良く一致するため、750 m や 1000 m の初期境界深度はやや不適切であると考えられる。また、サブテーマ 1. 1 による地震波探査結果と比較するならば、医王山層上面深度としては 2000 m より浅いと考えられるため、初期深度 500 m における 3次元インバージョン解析結果で金沢平野の境界深度が 2000 m 以深である結果はやや深すぎるため、初期境界深度は 250 m としたときの 3次元インバージョン解析結果が適切と考えられる。

同様に、密度差をそれぞれ  $400 \text{ kg/m}^3$  から  $600 \text{ kg/m}^3$  まで  $100 \text{ kg/m}^3$  間隔で変化させた場合の境界深度分布を図 50 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。このことから、森本・富樫断層帯周辺や金沢平野について医王山層などに相当する前期中新統およびその下位層の上面を境界とした単純な 2層構造を仮定する場合には、これら 2層の密度差として  $500 \text{ kg/m}^3$  程度とするのが適切と考えられる。

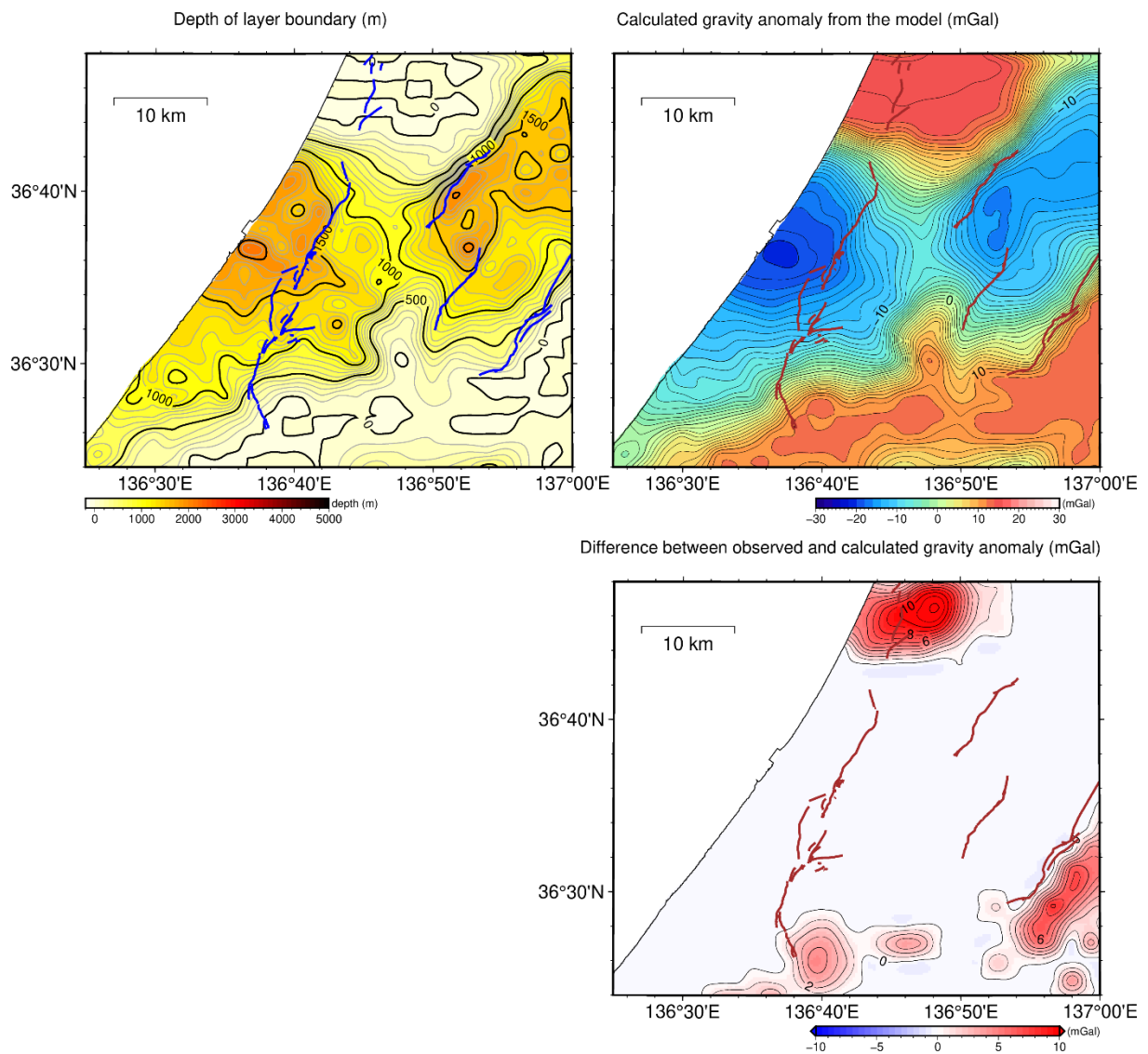


図 48 (左上) 初期境界深度を 250 m、密度差を  $500 \text{ kg/m}^3$  と設定した際の 3 次元重力インバージョン解析による境界深度分布。コンター線の間隔は 100 m である。(右上) 3 次元重力インバージョン解析による境界深度分布から計算される理論重力異常分布。(右下) 観測重力異常分布と理論重力異常分布との差。コンター線の間隔は 1 mGal である。青線または赤線は活断層の地表トレース位置を示す。

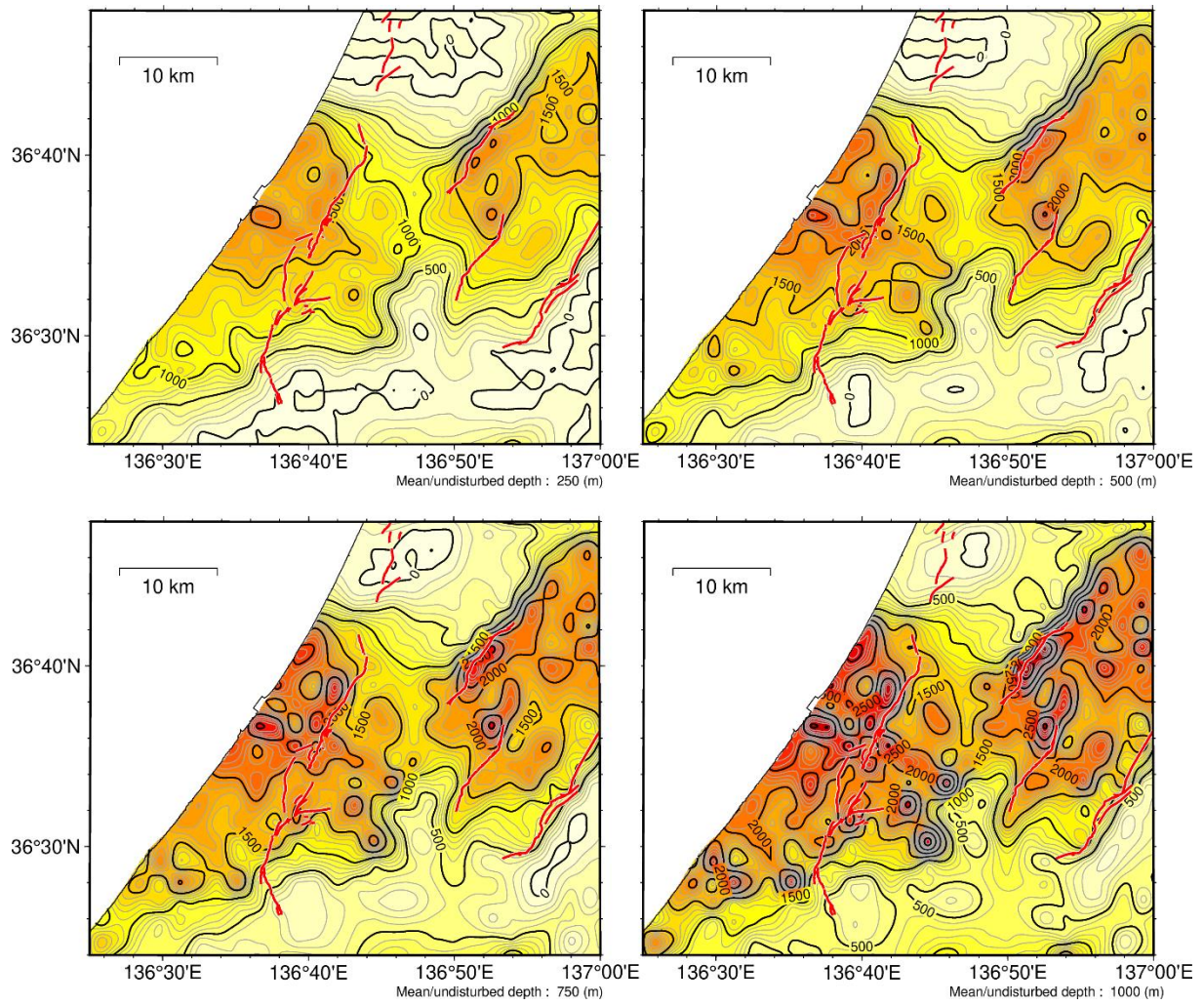


図 49 異なる初期境界深度による 3 次元重力インバージョン解析により得られた境界深度分布。初期境界深度は、(左上) 250 m、(右上) 500 m、(左下) 750 m、(右下) 1000 m であり、密度差は全て  $500 \text{ kg/m}^3$  である。コンター線の間隔は 100 m である。赤線は活断層の地表トレース位置を示す。

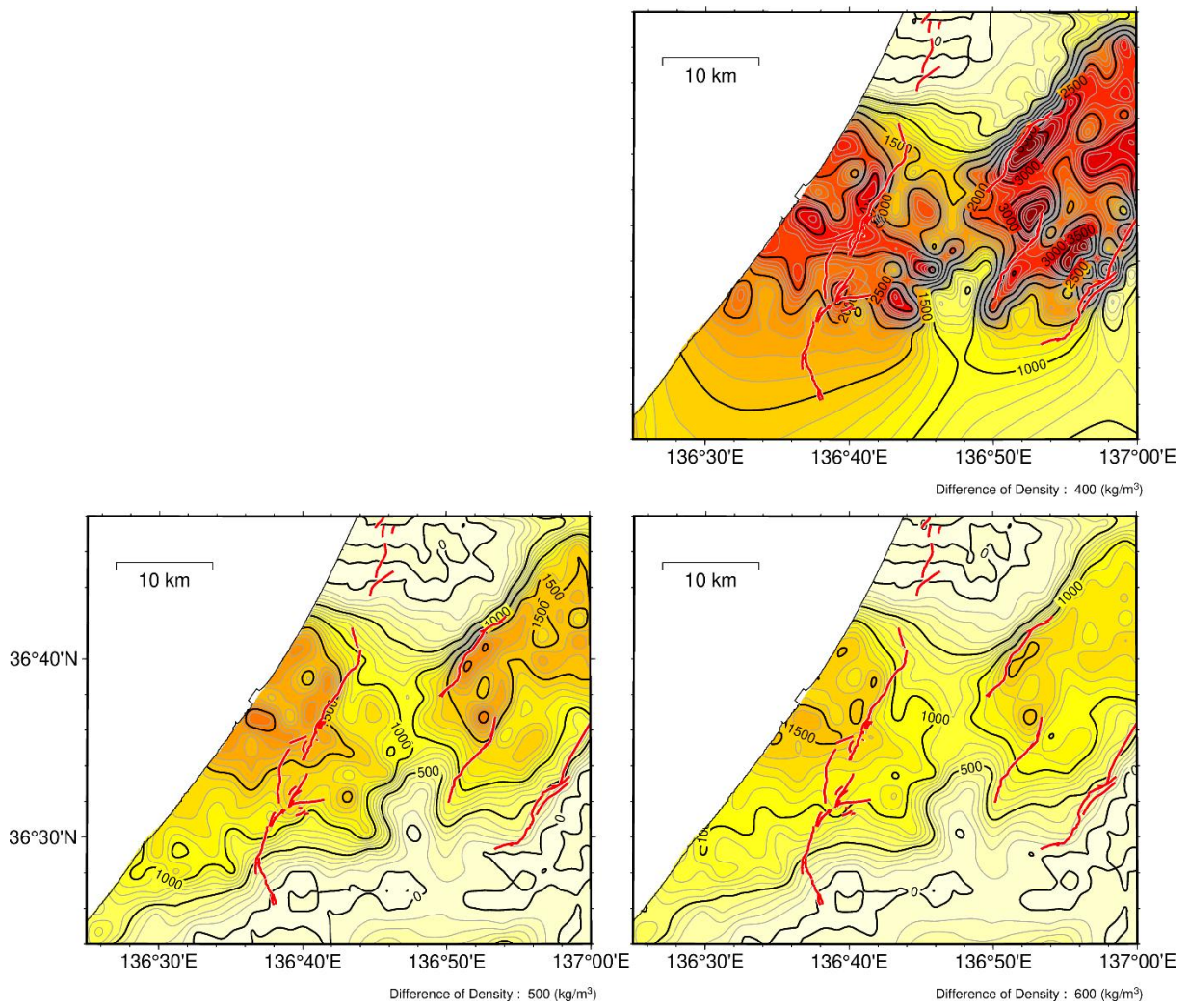


図 50 密度差を変化させた場合の 3 次元重力インバージョン解析による境界深度分布。初期境界深度は、(右上) 400 kg/m<sup>3</sup>、(左下) 500 kg/m<sup>3</sup>、(右下) 600 kg/m<sup>3</sup>である。コンター線の間隔は 100 m である。赤線は活断層の地表トレース位置を示す。

森本・富樫断層帯周辺の3次元密度構造として、サブテーマ3.2で用いられる地盤構造モデルがある。この地盤構造モデルは37層から成り、各層について境界の下面深度と密度が与えられているため、重力異常値を計算することができる。重力値の計算は、各層の密度構造が基盤密度  $2650 \text{ kg/m}^3$  との密度差による重力値を計算し、金沢平野付近でトレンド処理後の観測重力値に近い値となるように計算結果に一定値 (+28 mGal) を加算する。この地盤構造モデルから計算される重力異常分布を図51に示す。計算重力異常分布と観測重力異常分布は、金沢平野付近で値が近くなるように調整しているため、砺波平野や丘陵地では差が大きくなるが金沢平野では整合的であり、金沢平野下の地盤構造モデルが重力異常の観点から妥当であることを示している。この地盤構造モデルは標高0mより上の構造は含まれないため、丘陵地など標高の高い地域では地質構造による影響が大きく、重力値の差異が大きくなりやすい傾向がある。

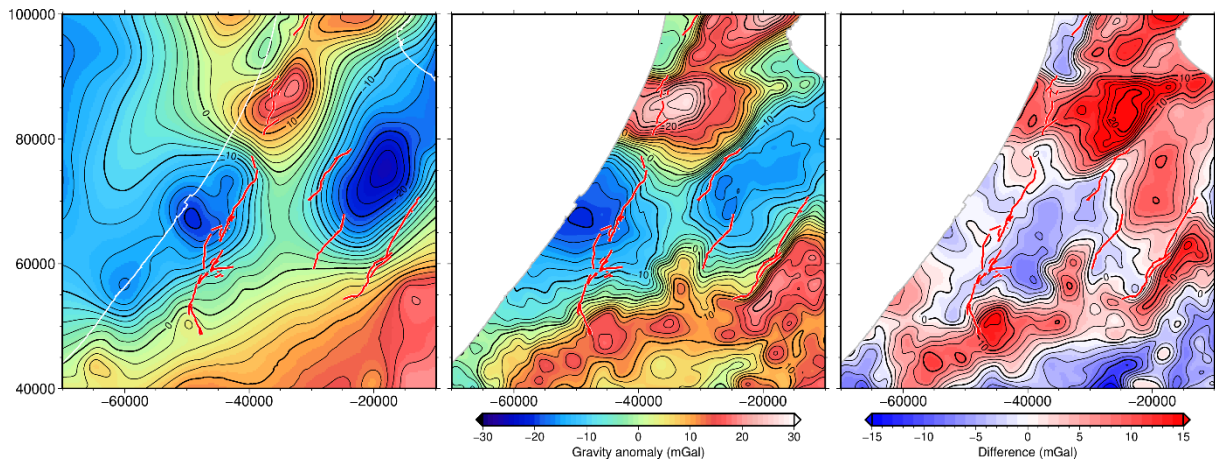


図 51 (左) 強震動計算に用いる地盤構造モデルから得られる密度値から計算される重力異常分布。(中) 遮断波長4 km のフィルター処理後の重力異常図。(右) 観測重力異常分布と計算重力異常分布との差。コンター線の間隔は2 mGal である。赤線は活断層の地表トレース位置を示す。

#### 4) 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として、The Generic Mapping Tools (Wessel et al., 2019) のパッケージに含まれる talwani2d を用いる。

##### iii) 犀川—医王山測線についての解析

ここでは解析対象断面として、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 (石山・他, 2023) (図 52) を扱う。

この断面は深部構造探査により、卯辰山層、上部更新統及び完新統からなる第1層、大桑層からなる第2層、高窪層と想定される第3層、中—下部中新統堆積岩類からなる第4層、それ以深として医王山層及び岩稲層からなる第5層について下面地層境界深度が推定されている。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0 m は野町断層の地表推定位置 (東郷・他, 1998) とした。また、境界条件として断面北西端では、そこで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 (中—下部中新統堆積岩類に相当) と第5層 (医王山層、岩稲層及び下位層) 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 43) を用いる。密度構造モデルは4層の堆積層と医王山層、岩稲層及び下位層に相当する基盤部とで構成する。

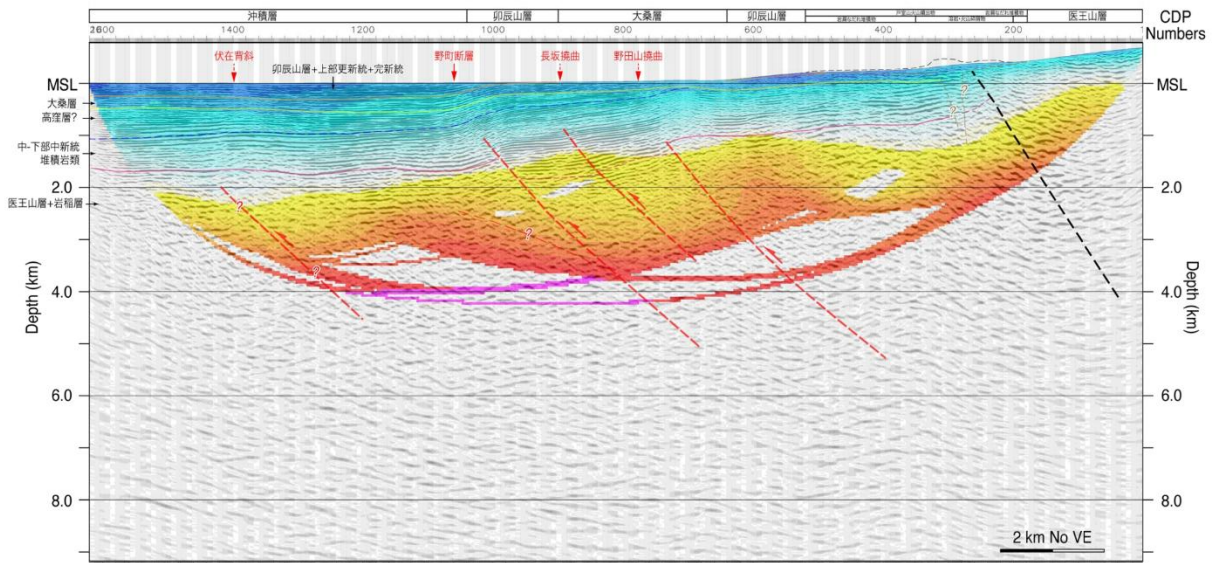


図 72 犀川—医王山測線の解釈深度断面(重合前時間マイグレーション深度断面図)。  
速度構造を重ね合わせ表示。

図 52 犀川—医王山測線の解釈深度断面（石山・他，2023）。赤破線、黒破線は推定断層を示す。

#### iv) 犀川—医王山測線についての解析結果

図 52 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。2 次元タルワニ法解析を行う測線の重力異常分布と位置を図 53 に、2 次元タルワニ法解析結果および解析に用いた犀川—医王山測線の解釈深度断面から作成した密度構造を図 54 に示す。図 53 は森本断層の走向方向が縦軸となるように回転処理（反時計まわりに  $31^\circ$ ）を行っており、図 54 の横軸と合わせてある。また図 53 の縦軸は犀川—医王山測線で 2 次元タルワニ法解析を行う測線を 0 としている。横軸は犀川—医王山測線が野町断層地表推定位置（東郷・他，1998）と交差する位置を 0 とした。図 54 では、各密度構造について、卯辰山層、上部更新統及び完新統からなる第 1 層を水色、大桑層からなる第 2 層を緑色、高窪層と想定される第 3 層を黄色、中—下部中新統堆積岩類からなる第 4 層をオレンジ色、それ以深として医王山層、岩稲層及び下位層からなる第 5 層として白色で示す。

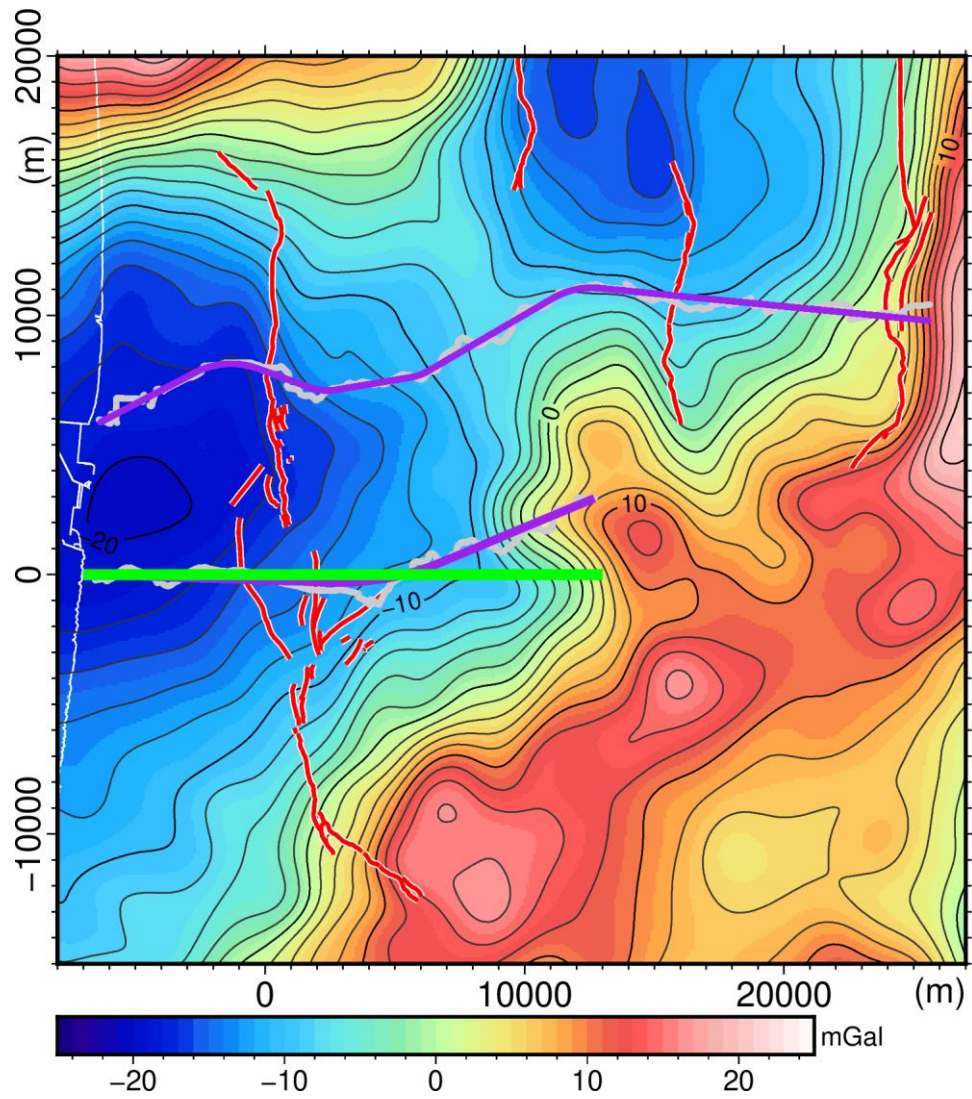


図 53 地震波探査測線および2次元タルワニ法解析測線位置。背景は遮断波長4 km のフィルター処理後の重力異常図。紫線は地震波探査測線の内灘—南砺測線（上）と犀川—医王山測線（下）、緑線は犀川—医王山測線の2次元タルワニ法解析測線、赤線は活断層の地表トレース位置を示す。

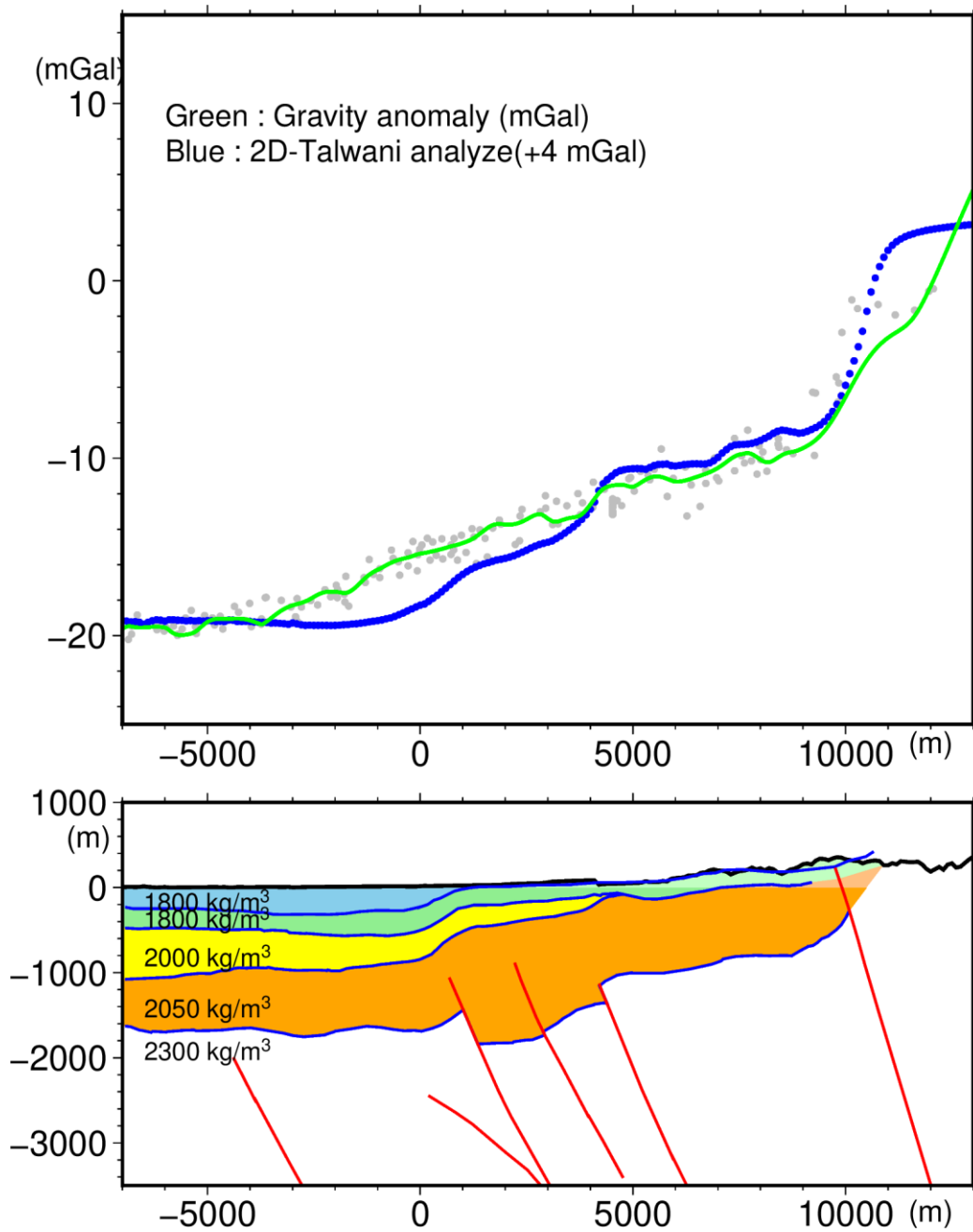


図 54 犀川—医王山測線の 2 次元タルワニ法解析結果。横軸の 0 m は図 53 の横軸の 0 m と同じ。(上図) 緑線は図 53 の遮断波長 4 km のフィルター処理後の重力異常分布、灰点は断面から両端 1 km 範囲内の観測点における平面トレンドを取り除いた重力異常値、青線は下図の密度構造モデルから得られる 2 次元タルワニ法解析による計算重力値。(下図) 青線は密度構造境界、各層はそれぞれ青、緑、黄、オレンジで着色され、各層の密度は図中に表示されている。白色の領域は医王山層、岩稻層及び下位層からなる第 5 層に相当する。赤線は図 52 に表示の断層を示す。

ここで2次元タルワニ法解析による計算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層および第2層の密度を  $1800 \text{ kg/m}^3$ 、第3層の密度を  $2000 \text{ kg/m}^3$ 、第4層の密度を  $2050 \text{ kg/m}^3$ 、第5層の密度を  $2300 \text{ kg/m}^3$  と設定した。

密度決定について、第2層に相当する大桑層については、伊藤・他(1994)では基礎試錐「金沢沖」で金沢平野周辺では大桑層に相当する氷見層上部についてボーリングデータから測定しており、見かけ密度が  $1600 \text{ kg/m}^3$  程度であるとしているほか、陸上でのボーリングデータ(北陸地盤情報)から、金沢市大桑の試料では密度  $1909 \text{ kg/m}^3$ 、金沢市山王からの試料では密度  $1850 \text{ kg/m}^3$  とされている。第3層に相当する高窪層については、伊藤・他(1994)では基礎試錐「金沢沖」で金沢平野周辺では高窪層に相当する音川層についてボーリングデータから測定しており、見かけ密度を  $1900 \text{ kg/m}^3$  としている。また地震調査研究推進本部では、砺波平野断層帯・呉羽山断層帯の地震を想定した強震動評価にて音川層について  $V_p=2.3 \text{ km/s}$ 、 $V_s=750 \text{ m/s}$  としており、これは密度に換算すると  $2100 \text{ kg/m}^3$  程度と考えられる。第5層に相当する医王山層について、伊藤・他(1994)では基礎試錐「金沢沖」で医王山層についてはボーリングデータが得られていないが、黒瀬谷層の下位に位置する基盤として  $2300 \text{ kg/m}^3$  と想定している

第1層に相当する卯辰山層、上部更新統及び完新統については、犀川—医王山測線の解釈深度断面における野町断層付近での地下構造と観測重力異常値の変化量の小ささから、第2層との密度差がほとんどないと考えられることができる。したがって、第1層の密度を第2層と同じ値に設定した。同様に、第4層に相当する中・下部中新統堆積岩類については、ボーリング結果による適した密度情報が見つからなかったが、第3層と大きく異なる密度では観測重力異常値の変化パターンを説明できなかつたため、観測重力異常値を説明可能な  $2050 \text{ kg/m}^3$  と設定した。

図54に示される密度構造モデルは、野町断層から両端に4km程度離れたあたりで計算重力値を観測重力値と合わせた場合に断層付近で4mGal程度ずれる結果となる。野町断層に想定される第1層から第3層の深度変化(図の水平方向0~1km)では密度構造の変化によりタルワニ解析の計算重力値は3mGal程度変化するが、観測重力値はそれほど大きな変化を示さない。第1層から第4層にかけての  $1800\sim 2050 \text{ kg/m}^3$  と  $250 \text{ kg/m}^3$  の仮定密度の差を設定しているが、この差をより小さくすれば断層付近の重力変化を合わせることができると考えられる。

#### v) 内灘—南砺測線についての解析

ここでは解析対象断面として、反射法地震探査測線である内灘—南砺測線の解釈深度断面(石山・他, 2024)(図55)について解析を行う。

この断面は深部構造探査により、大桑層、埴生層、下部更新統及び完新統からなる第1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、岩稻層及び下位層からなる第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55に示される地層境界深度から作成した4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、断面方向の横軸は森本断層地表推定位置(東郷・他, 1998)と交差する位置を0とした。また、境界条件として断面北西端で得られている地層境界深度が遠方(約100km)まで

延伸すると仮定した。また断面南東端では、第4層（医王山層及び岩稲層に相当）が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 43）を用いる。密度構造モデルは3層の堆積層とより下位層に相当する第4層で構成する。

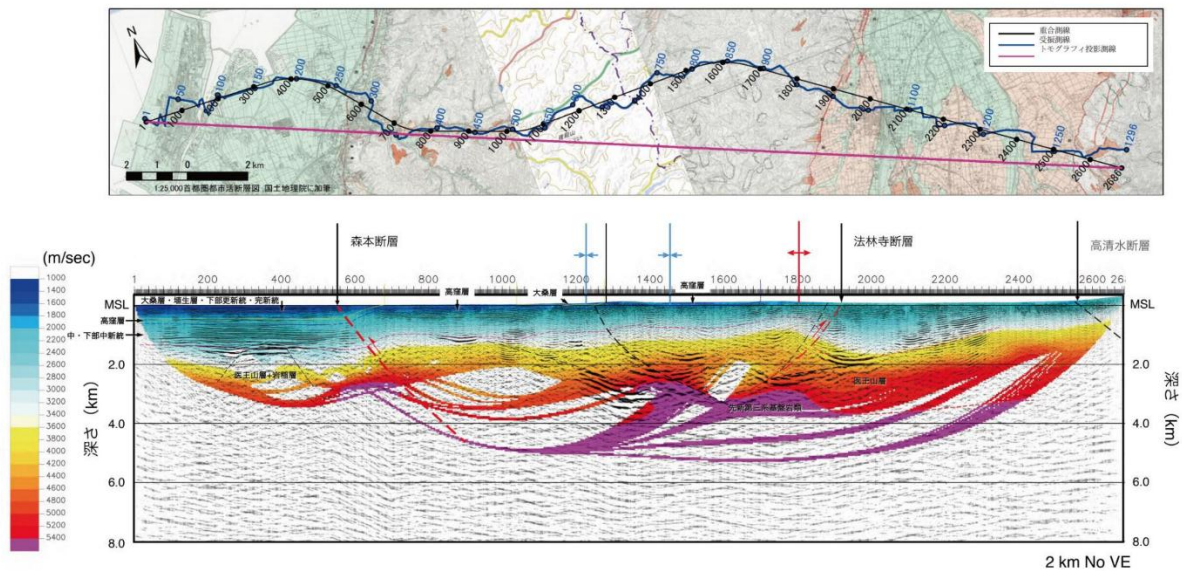


図 104 内灘—南砺測線の解釈深度断面(重合前時間マイグレーション深度断面図)。

図 55 内灘—南砺測線の解釈深度断面（石山・他，2024）。赤破線、黒破線は推定断層を示す。

#### vi) 内灘—南砺測線についての解析結果

図 55 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。2次元タルワニ法解析を行う測線の重力異常分布と位置を図 56 に、2次元タルワニ法解析結果および解析に用いた犀川—医王山測線の解釈深度断面から作成した密度構造を図 57 に示す。図 56 は iv) の犀川—医王山測線と同じく森本断層の走向方向が縦軸となるように回転処理（反時計まわりに  $31^\circ$ ）を行っており、縦軸+7.815 km で内灘—南砺測線と森本断層が交差することからこの位置で内灘—南砺測線の2次元タルワニ法解析測線を設定した。内灘—南砺測線は森本断層に対して直交していないため、解析を行う測線は特に内灘—南砺測線の西部に相当する。また、図 57 の横軸の数値は図 56 の横軸と一致している。

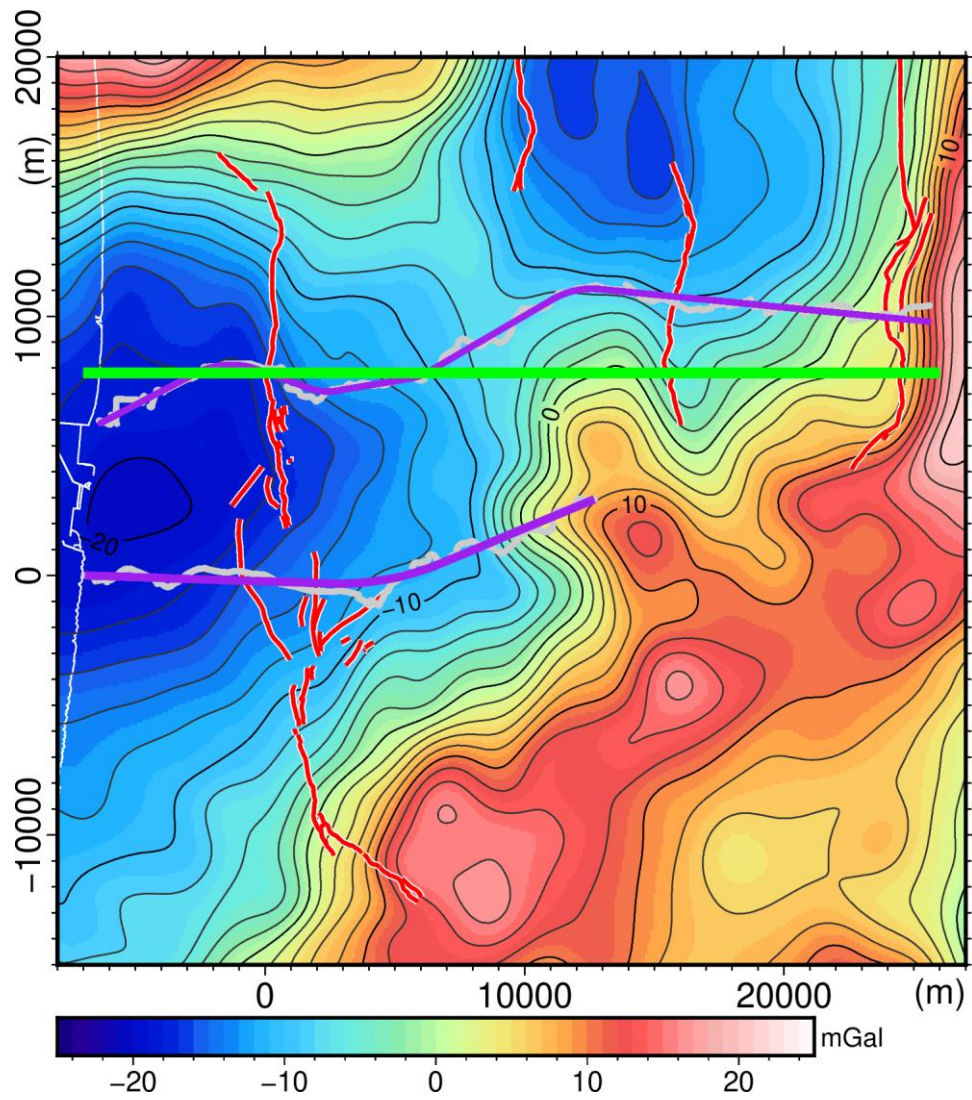


図 56 地震波探査測線および2次元タルワニ法解析測線位置。背景は遮断波長4 km のフィルター処理後の重力異常図。紫線は地震波探査測線の内灘—南砺測線（上）と犀川—医王山測線（下）、緑線は内灘—南砺測線（西部）の2次元タルワニ法解析測線、赤線は活断層の地表トレース位置を示す。

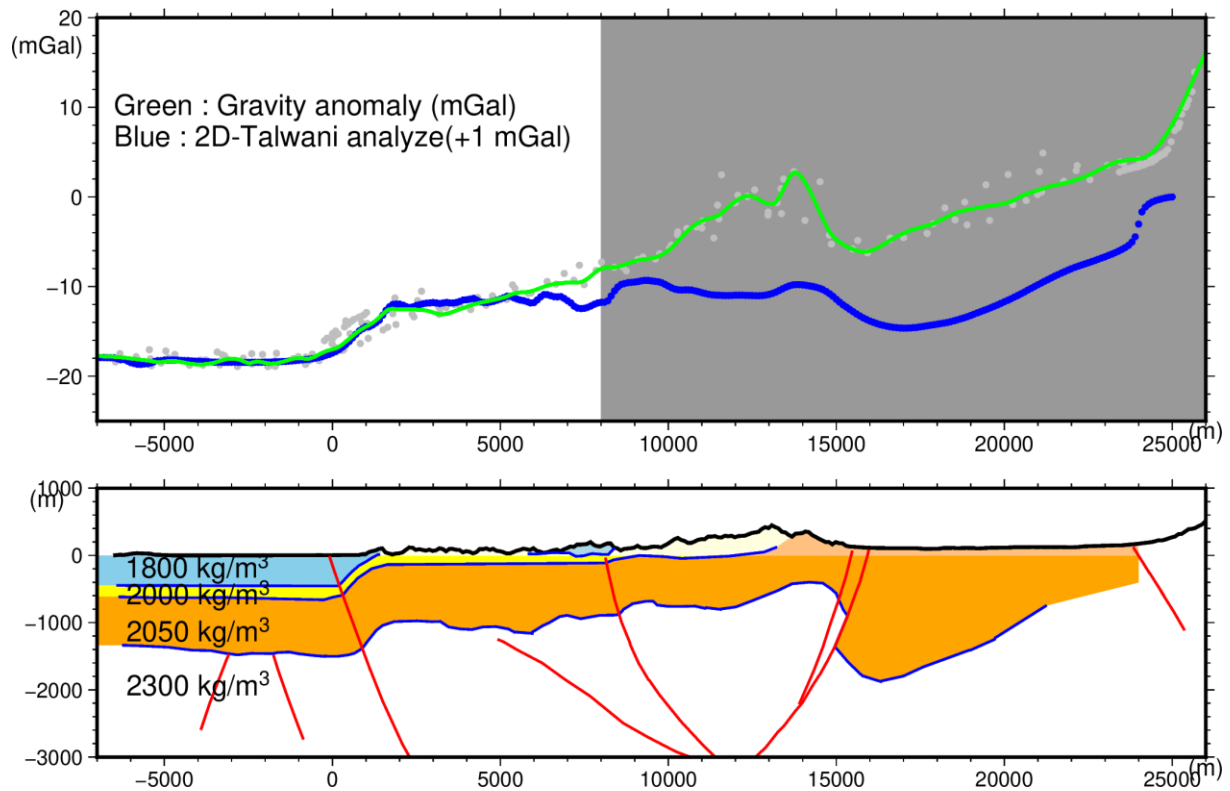


図 57 内灘—南砺測線（西部）の 2 次元タルワニ法解析結果。横軸の 0 m は図 56 の横軸の 0 m と同じ。（上図）緑線は図 56 の遮断波長 4 km のフィルター処理後の重力異常分布、灰点は断面から両端 1 km 範囲内の観測点における平面トレンドを取り除いた重力異常値、青線は下図の密度構造モデルから得られる 2 次元タルワニ法解析による計算重力値。（下図）青線は密度構造境界、各層はそれぞれ青、緑、黄、オレンジで着色され、各層の密度は図中に表示されている。白色の領域は医王山層、岩稻層及び下位層からなる第 4 層に相当する。赤線は図 55 に表示の断層を示す。

ここで 2 次元タルワニ法解析による計算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 層の密度を  $1800 \text{ kg/m}^3$ 、第 2 層の密度を  $2000 \text{ kg/m}^3$ 、第 3 層の密度を  $2050 \text{ kg/m}^3$ 、第 4 層の密度を  $2300 \text{ kg/m}^3$  と設定した。これは iv) の犀川—医王山測線で第 1 層と第 2 層（大桑層）を同一の層として扱う以外は同じ設定である。

2 次元タルワニ法解析による計算重力異常値は森本断層付近（図の水平方向  $-7 \sim 5 \text{ km}$  の範囲）で観測重力異常値と良く一致する結果を示す。これは地震波探査結果で得られた地下の層構造に基づく密度構造及び各層の密度値が適切であることを意味する。一方、断層から離れた範囲（図の水平方向  $5 \text{ km}$  より南東の範囲）では計算重力異常値と観測重力異常値との乖離が見られる。これは地震波探査で推定した地下構造測線の位置が 2 次元タルワニ法解析測線より北東にずれているためであり、観測重力を参照する測線の位置を図 58 のように森本断層の走向方向に  $2.5 \text{ km}$  北西側に移動して設定すると、この内灘—南砺測線（東部）についての 2 次元タルワニ法解析結果による計算重力異常値は図 59 のように法林寺断層周辺の観測重力異常値の変化に概ね一致する結果を示す。同様に曲がった地

震波探査測線に沿って観測重力異常値をサンプリングし（図 60）、森本断層と直交する方向に投影した結果を図 61 に示す。森本断層の南東側（図の水平方向 0～3 km の範囲）で観測重力異常値の勾配が 2 次元タルワニ法解析による計算重力異常値の勾配より小さくなる。その理由として、この範囲で地震波探査測線が森本断層に直交しておらず、地震波探査測線が森本断層から南東方向へ向かうにつれて森本断層全域でみられる宝達山側で高く南側で低い走向方向の重力異常変化を反映した結果であることが考えられる。

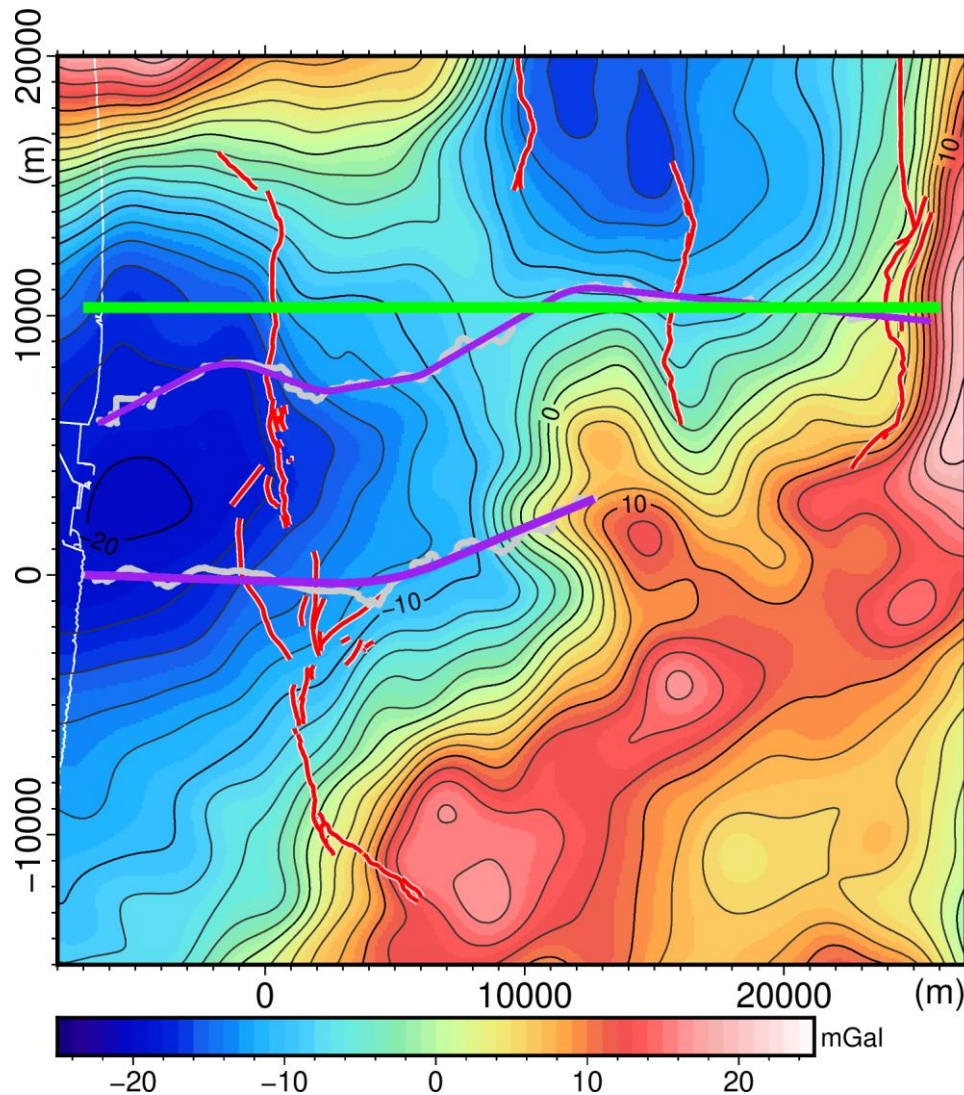


図 58 地震波探査測線および 2 次元タルワニ法解析測線位置。背景は遮断波長 4 km のフィルター処理後の重力異常図。紫線は地震波探査測線の内灘—南砺測線（上）と犀川—医王山測線（下）、緑線は内灘—南砺測線（東部）の 2 次元タルワニ法解析測線であり、図 56 に示される解析測線から走向方向へ 2.5 km 移動させている。赤線は活断層の地表トレース位置を示す。

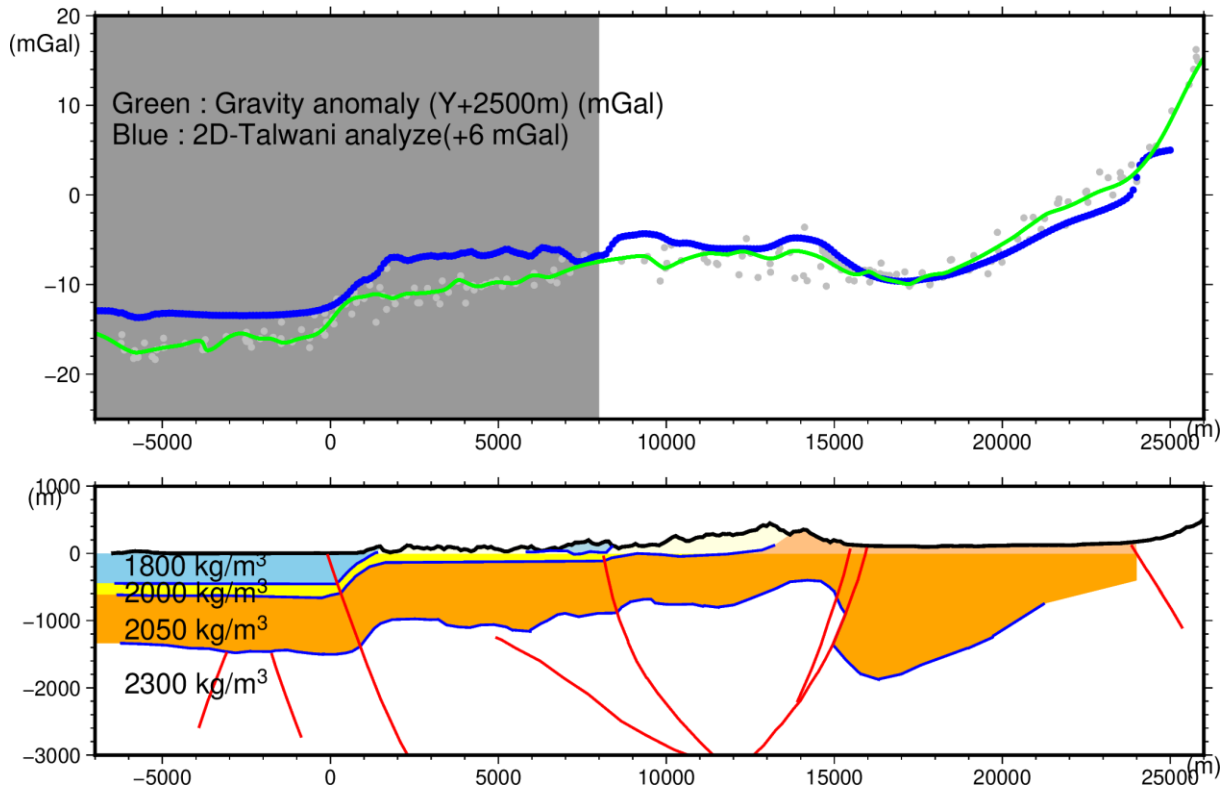


図 59 内灘—南砺測線（東部）について、図 57 の解析測線から走向方向へ 2.5 km 移動させた測線における 2 次元タルワニ法解析結果。横軸の 0 m は図 58 の横軸の 0 m と同じ。（上図）緑線は図 58 の遮断波長 4 km のフィルター処理後の重力異常分布、灰点は断面から両端 1 km 範囲内の観測点における平面トレンドを取り除いた重力異常値、青線は下図の密度構造モデルから得られる 2 次元タルワニ法解析による計算重力値。（下図）青線は密度構造境界、各層はそれぞれ青、緑、黄、オレンジで着色され、各層の密度は図中に表示されている。白色の領域は医王山層、岩稻層及び下位層からなる第 4 層に相当する。赤線は図 55 に表示の断層を示す。

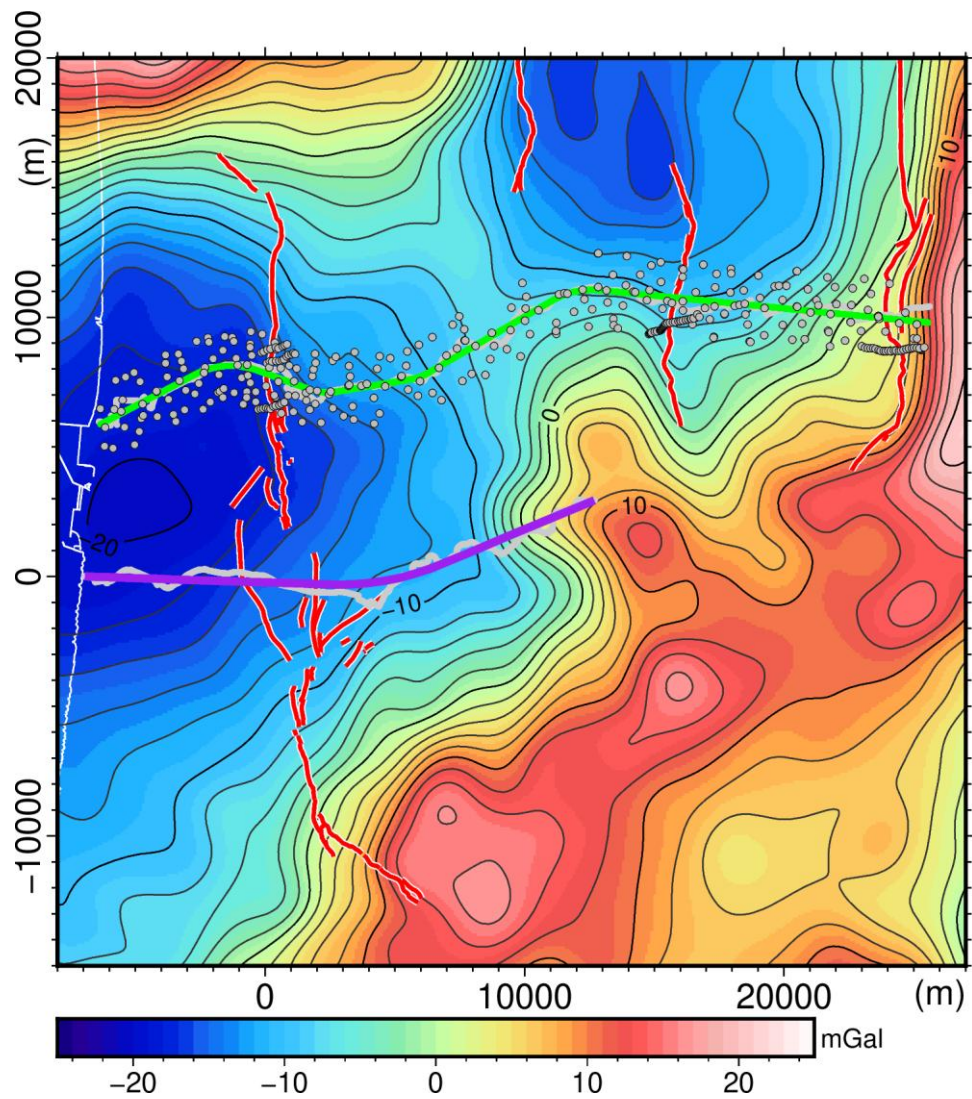


図 60 地震波探査測線および2次元タルワニ法解析測線位置。背景は遮断波長4 km のフィルター処理後の重力異常図。紫線は地震波探査測線の犀川—医王山測線、緑線は地震波探査測線の内灘—南砺測線、灰点は内灘—南砺測線から1.5 km 以内の重力測定点分布、赤線は活断層の地表トレース位置を示す。

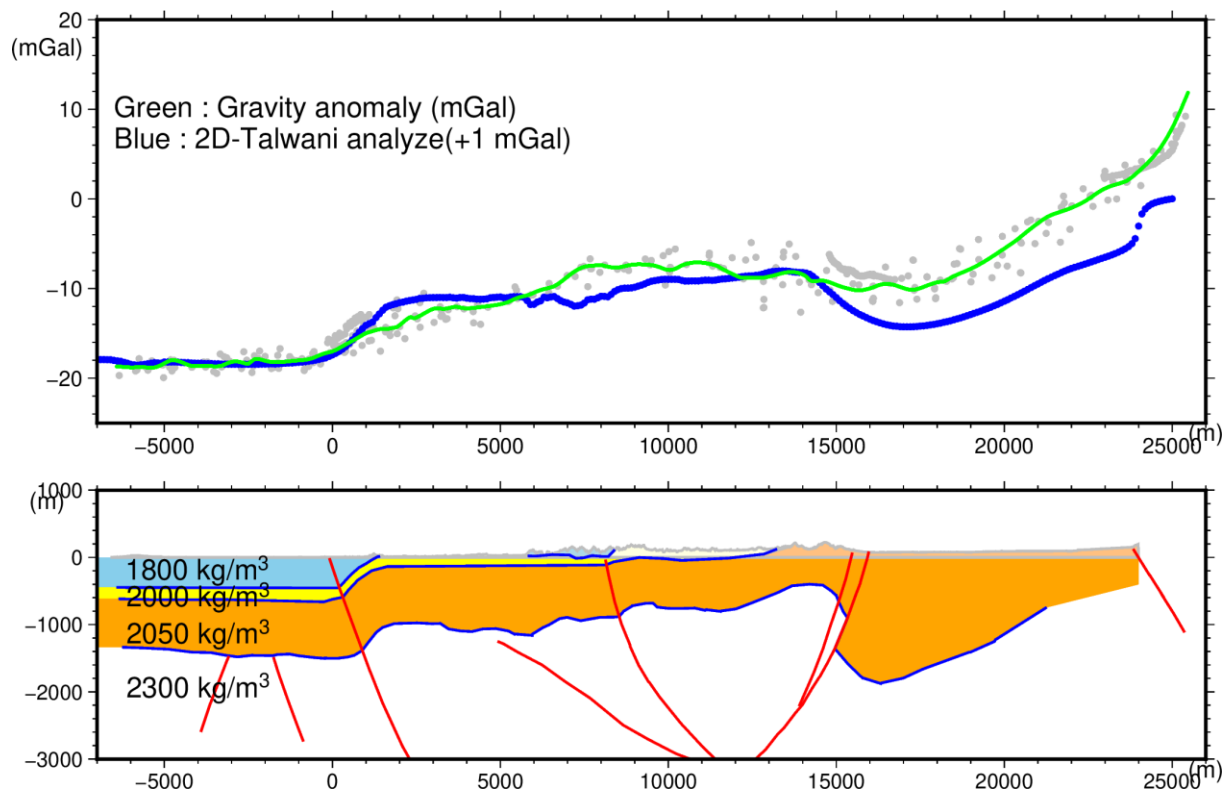


図 61 内灘—南砺測線について、地震波探査測線周辺の重力分布を参照した 2 次元タルワニ法解析結果。横軸の 0 m は図 60 の横軸の 0 m と同じ。(上図) 緑線は図 60 の遮断波長 4 km のフィルター処理後の重力異常分布、灰点は断面から両端 1.5 km 範囲内の観測点における平面トレンドを取り除いた重力異常値、青線は下図の密度構造モデルから得られる 2 次元タルワニ法解析による計算重力値。(下図) 青線は密度構造境界、各層はそれぞれ青、緑、黄、オレンジで着色され、各層の密度は図中に表示されている。白色の領域は医王山層、岩稻層及び下位層からなる第 4 層に相当する。赤線は図 55 に表示の断層を示す。

vii) 森本・富樫断層帯に直交する測線での 2 次元タルワニ法解析

上で対象とした 2 つの地震波探査測線沿いで実施した 2 次元タルワニ法解析を森本・富樫断層帯全域について実施した。新規測線として、iv) の犀川—医王山測線と同じく森本断層の走向方向が縦軸となるように回転処理 (反時計まわりに 31°) を行った座標系において、犀川—医王山測線を中心として森本断層の走向方向に 4 km 間隔に断層に直交する方向に設定する。富樫断層の走向は森本断層の走向から反時計回りに約 10 度の方向を向くことから、富樫断層の走向方向を北から反時計まわりに 21° とし、新規測線を富樫断層の走向方向に直交するように 4 km 間隔で設定した。森本断層の走向方向の +7.815 km の位置には vi) の内灘—南砺測線が存在するため、森本断層の走向方向 8 km の測線は内灘—南砺測線を使用する。新規に 5 本の測線を設定し、既存の 2 本とあわせて北東から A~G 測線とし、測線 B は vi) の内灘—南砺測線に、測線 D は iv) の犀川—医王山測線である。2 次元タルワニ法解析実施測線の位置を図 62 に示す。

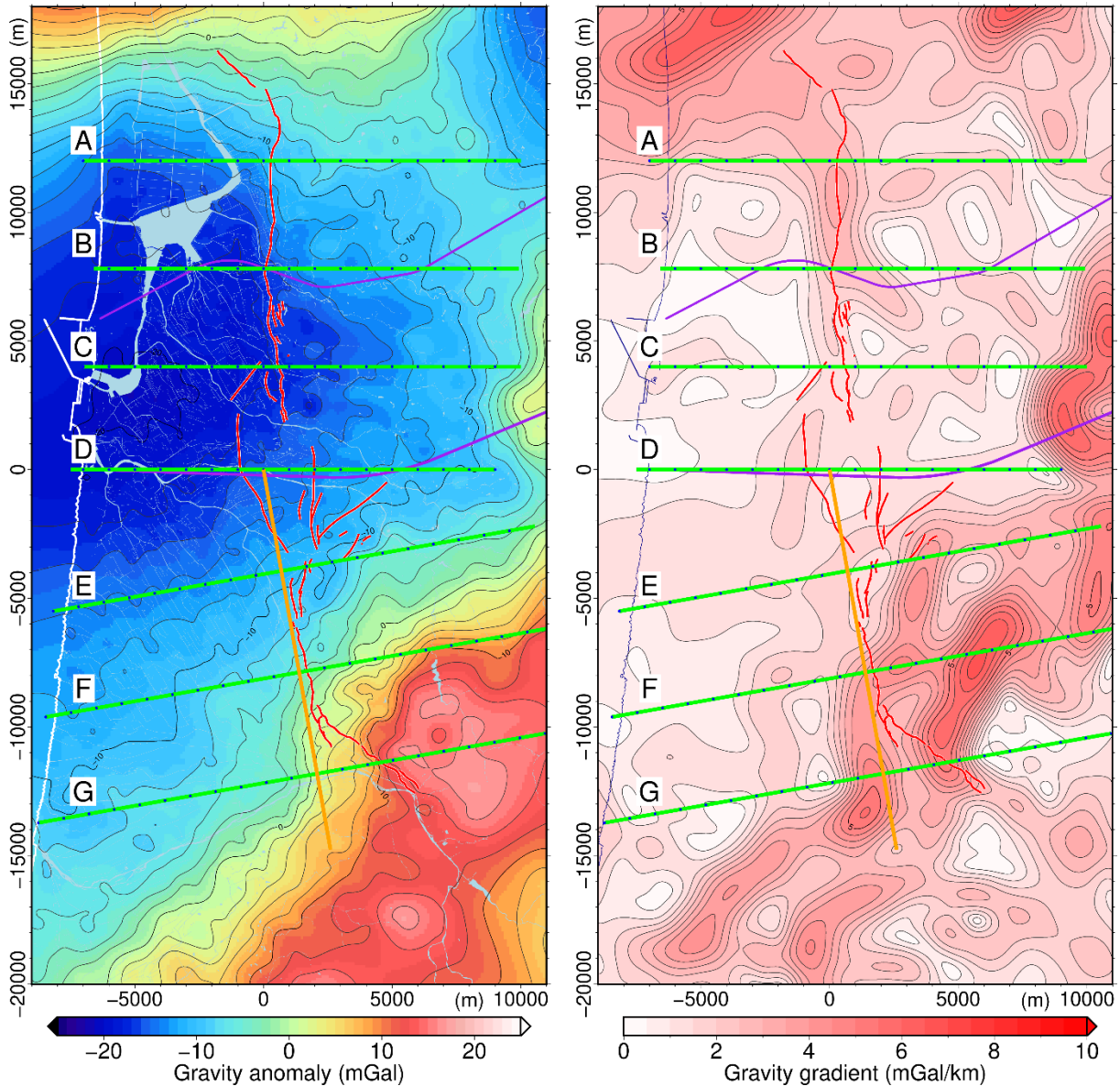


図 62 森本・富樫断層帯を横切る 2 次元タルワニ法解析測線の位置。紫線は地震波探査測線の内灘一南砺測線（上）と犀川一医王山測線（下）、緑線は 2 次元タルワニ法解析測線、赤線は活断層の地表トレース位置、オレンジ線は測線 E~G における横軸の 0 m の位置をそれぞれ示す。（左）遮断波長 4 km のフィルター処理後の重力異常分布。（右）水平一次微分分布。

2 次元タルワニ法解析は vi) の内灘一南砺測線における解析と同様に密度構造を 4 層で構成し、それぞれの密度についても iv) および vi) と同じ密度値を用いた。地質図から得られる表層地質および隣接する測線の密度構造を参照し、隣接する密度構造間で大きな差異が生じないように密度構造を作成することとした。断層付近の重力変化について 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を合わせることを優先し、南東部の丘陵部分での第 4 層より下位の密度構造により計算重力値と観測重力値が合わない範囲

についてはここでの解析では考慮しないこととした。

viii) 森本・富樫断層帯に直交する測線での 2 次元タルワニ法解析の結果

vii) で設定した各測線について 2 次元タルワニ法解析結果について記す。

測線 A は森本断層の北部、犀川一医王山測線から 12 km 北東側に位置する。観測重力異常値は森本断層を横切る約 1 km の範囲で約 4 mGal の局所的な変化を示す。測線 A について 2 次元タルワニ法解析により推定される地下密度構造と計算重力異常値及び観測重力異常値を図 63 に示す。推定される地下密度構造は測線 B の内灘—南砺測線と類似し、森本断層付近で地層の勾配や深度変化を設定することで観測重力異常値と合う結果が得られる。測線 A 沿いでは森本断層は断層から離れた丘陵部について大桑層と高窪層との境界がほぼ水平に近いことが地質図から推定され、平野部での観測重力異常値の変化も小さいことから、密度構造の変化は断層近辺のみであると推定される。測線 A は測線 B と同様の地下密度構造をもつことから、森本断層に沿って同様の地下密度構造が連続的に続いていると推定される。

測線 B は森本断層の中央部を横切り、内灘—南砺測線に相当する。測線は内灘—南砺測線と都市圏活断層図（東郷・他，1998）による森本断層推定位置との交点を通り、犀川—医王山測線から 7.815 km 北東側に位置する。測線 B について 2 次元タルワニ法解析により推定される地下密度構造と計算重力異常値及び観測重力異常値を図 63 に示す。解析結果は vi) に記したように、2 次元タルワニ法解析による計算重力異常値は観測重力異常値と良く一致し、地震波探査結果で得られた地下の層構造に基づく密度構造及び各層の密度値が適切であることを意味する。測線沿いの平野部で観測重力異常値の変化がほぼ見られないことから、地下密度構造はほぼ水平かつ層厚もほぼ一定で各層が堆積していると考えられる。

測線 C は森本断層の南部、犀川—医王山測線から 4 km 北東側に位置する。測線 C, D について 2 次元タルワニ法解析により推定される地下密度構造と計算重力異常値及び観測重力異常値を図 64 に示す。測線 C 沿いでは森本断層近辺での観測重力異常値の局所的な変化は測線 A や B と比べて小さい。また、平地では重力変化がほとんど見られず丘陵部ではほぼ一定の観測重力異常値の水平勾配を示すことから、測線 C の地下密度構造は測線 B の地下密度構造と大きく異なるものではないが、測線 D の犀川—医王山測線の地下密度構造に近いと推定される。丘陵部の地下密度構造としては大桑層から上位にかけての堆積層が傾斜を伴って広がると推定されるが、高窪層についてはこれより南では対象地域における地質図（1:200000 地質図幅金沢）（鹿野・他，1999）に表れないことや利用可能なボーリング結果がないことから測線 C 沿いにおける地下での高窪層の存在に関する情報が得られないため、測線 B 及び D を参考に第 2 層の形状を設定した。断層近辺での局所的な観測重力異常値の変化量の小ささから、断層運動により生じる地層の褶曲に伴う鉛直変位量は森本断層の中部（測線 B）や北部（測線 A）と比較して小さいと推定され、2 次元密度構造での褶曲構造は測線 D の構造と類似している。

測線 D は野町断層を横切るように設定され、犀川—医王山測線とほぼ重なる。iv) で示したように地震波探査によって得られた地下密度構造では測線沿いの観測重力異常値の変化を説明できないが、iv) での第 4 層と第 5 層との境界深度を変更することによって観測

重力異常値に近い計算重力異常値を示す2次元密度構造を作成した。測線沿いの観測重力異常分布は野町断層の地表推定位置両端約5kmの範囲で8mGal程度と緩やかに変化する。この観測重力異常値の変化を作る2次元密度構造として、第3層の厚さを図64に示すようにやや薄くする、つまり構造変更範囲の密度をより大きくすることで計算重力異常値と観測重力異常値との差を小さくすることができる。

測線Eは野町断層と富樫断層の境界部分を横切る測線であり、犀川一医王山測線から富樫断層の走向方向へ4km南南西側に位置する。測線Eについて2次元タルワニ法解析により推定される地下密度構造と計算重力異常値及び観測重力異常値を図65に示す。測線Eでは観測重力異常値の水平勾配が最大となる向きが北北西方向であり、野町断層の傾斜方向と大きく異なる。また、地質図において卯辰山層から下位層にかけて北西方向へ大きく傾斜した分布を示している(地質調査所, 1959)。そのため、地下構造が測線に沿った2次元構造とする2次元タルワニ法の仮定が成り立たないことに留意する必要がある。測線沿いの観測重力異常値の分布として、地質図にて大桑層と中・下部中新統堆積層との境界付近(横軸2~3km付近)で比較的大きな観測重力異常値の水平勾配が見られるが、地表での地質境界として地質図を参考にした図65に示される地下密度構造では海側に約1kmずれた位置で計算重力異常値の水平勾配が大きくなる。断層近傍から海側にかけては観測重力異常の変化が緩やかであることから、地下密度構造についても断層付近での地層の褶曲に伴う鉛直変位量は小さいと考えられ、測線A~Dの構造とは異なる可能性が考えられる。

測線Fは富樫断層の中央部を横切る測線であり、犀川一医王山測線から8km南南西側に位置する。測線F,Gについて2次元タルワニ法解析により推定される地下密度構造と計算重力異常値及び観測重力異常値を図66に示す。測線F上の地質分布は、丘陵部で中・下部中新統堆積層が大きな勾配を示しており、平野部は手取川扇状地堆積物が分布する。地下密度構造は平野部において扇状地堆積物と中・下部中新統堆積層との層厚の比率は明確ではないが、図66に示されるように平野部において中・下部中新統堆積層が海に近づくにつれて厚くなるとともに、丘陵部にて地質図でみられる範囲で中・下部中新統堆積層が富樫断層近辺で傾斜して存在する地下密度構造を仮定すると、2次元タルワニ法による計算重力異常値と観測重力異常値が断層付近ではほぼ一致する。この断層付近での傾斜構造は測線Eの地下密度構造と類似する。また富樫断層から丘陵方向へ約4kmより離れた範囲では観測重力異常値が計算重力異常値よりかなり大きくなるが、地質図に示される医王山層より下位のより高密度の安山岩—デイサイト質溶岩・火砕岩やより下位の基盤岩などが浅い領域に存在する影響であると考えられる。

測線Gは富樫断層の南端付近に位置する測線であり、犀川一医王山測線から12km南西側に位置する。測線G沿いでは、富樫断層の地表推定位置は東の丘陵に沿って曲がっており、図62(左)の観測重力異常値及び図62(右)の水平一次微分分布図の分布は、富樫断層地表推定位置とそこから約3km丘陵側の2ヶ所で大きな水平勾配を示す。これら2つの大きな水平勾配について、図62(右)の水平一次微分の分布図で測線Fから連続して伸びる水平一次微分値の大きな帯は西側の水平勾配が大きな部分につながっている。このことから、測線Fで推定される中・下部中新統堆積層が傾斜する領域は、測線G沿いでは図66に示されるように地表推定断層位置より2km程度西側で扇状地堆積物の下に存在

すると推定される。また、東側の観測重力異常値の水平勾配が大きい原因として、医王山層より下位のより高密度の安山岩—デイサイト質溶岩・火砕岩やより下位の基盤岩などが浅い領域に存在するためと考えられる。

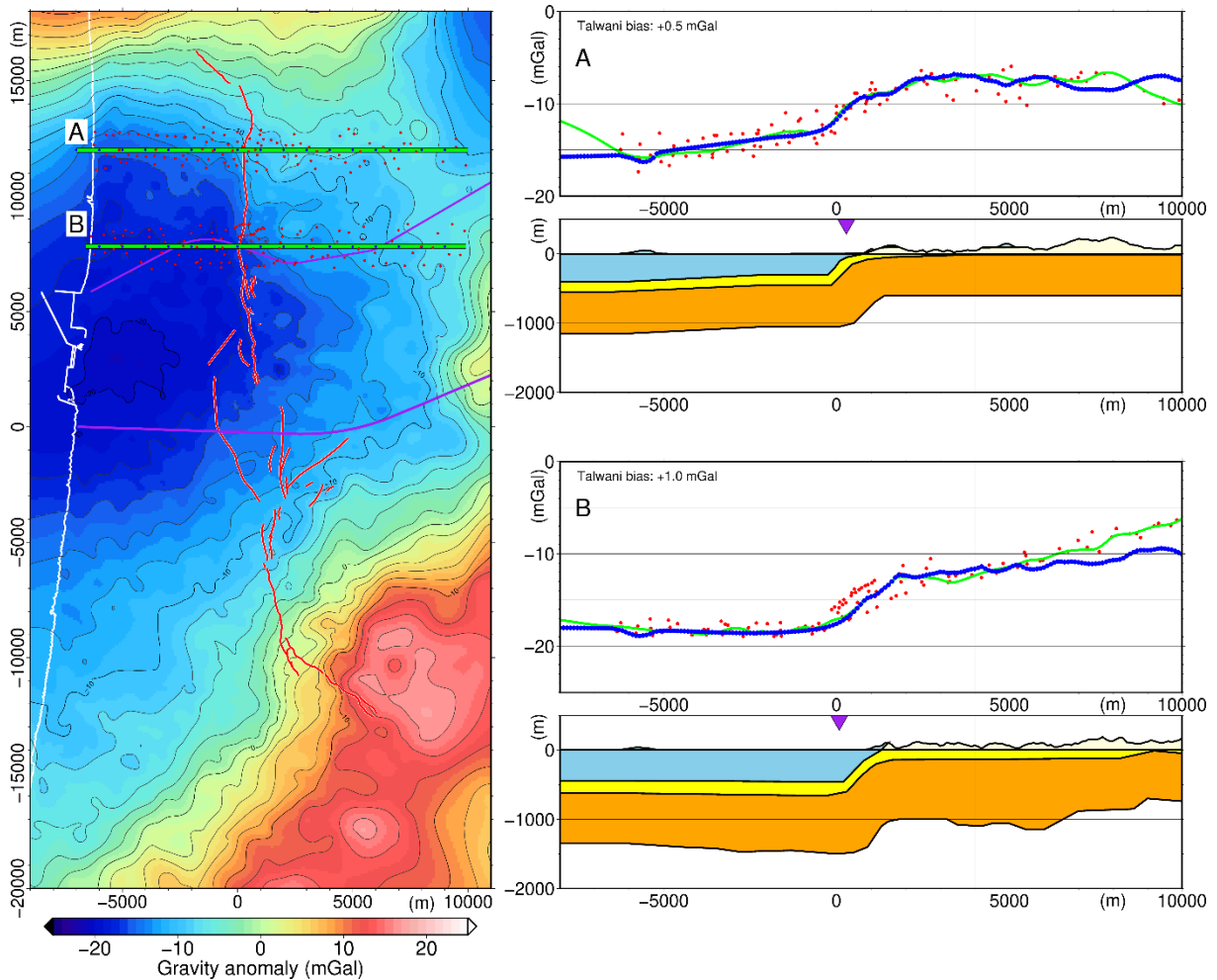


図 63 森本・富樫断層帯を横切る 2 次元タルワニ法解析測線 A, B の解析結果。(左) 遮断波長 4 km のフィルター処理後の重力異常分布。紫線は地震波探査測線の内灘—南砺測線（上）と犀川—医王山測線（下）、緑線は 2 次元タルワニ法解析測線 A, B、赤線は活断層の地表トレース位置を示す。(右上) 測線 A における 2 次元タルワニ法解析結果。(右下) 測線 B における 2 次元タルワニ法解析結果。それぞれ、(上) 緑線：遮断波長 4 km のフィルター処理後の重力異常分布、青線：2 次元タルワニ法解析による計算重力値、赤点：測線沿いの測定点における重力値、(下) 2 次元タルワニ法解析に用いた地下密度構造断面図。水色、黄色、オレンジ色、白色はそれぞれ第 1 層から第 4 層の領域、紫三角は地表活断層推定位置を示す。

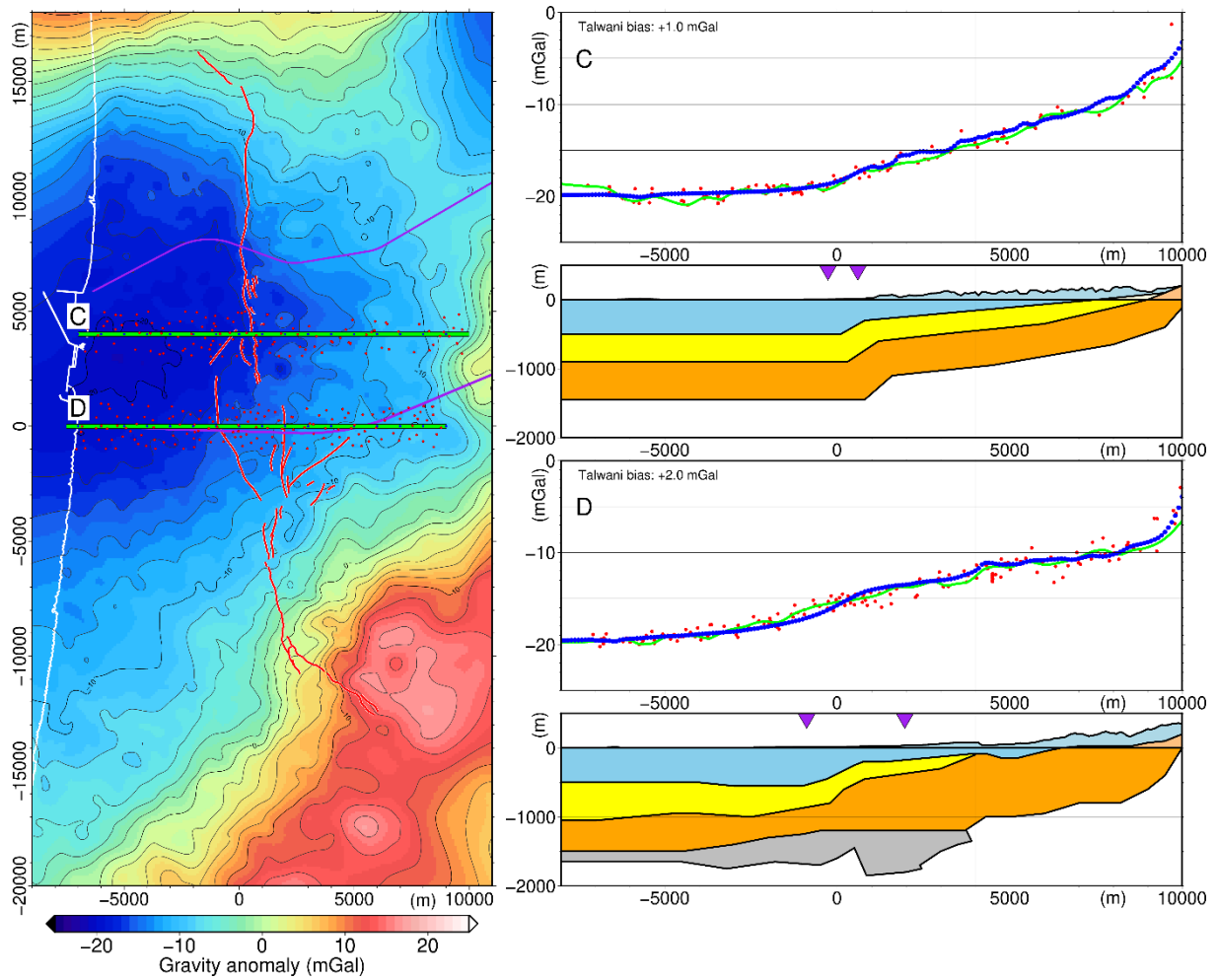


図 64 森本・富樫断層帯を横切る 2 次元タルワニ法解析測線 C, D の解析結果。  
 測線 D における下図灰色は犀川—医王山測線の解釈深度断面（石山・他， 2023）から  
 第 4 層への形状変更部分を示す。その他の詳細は図 63 と同じ。

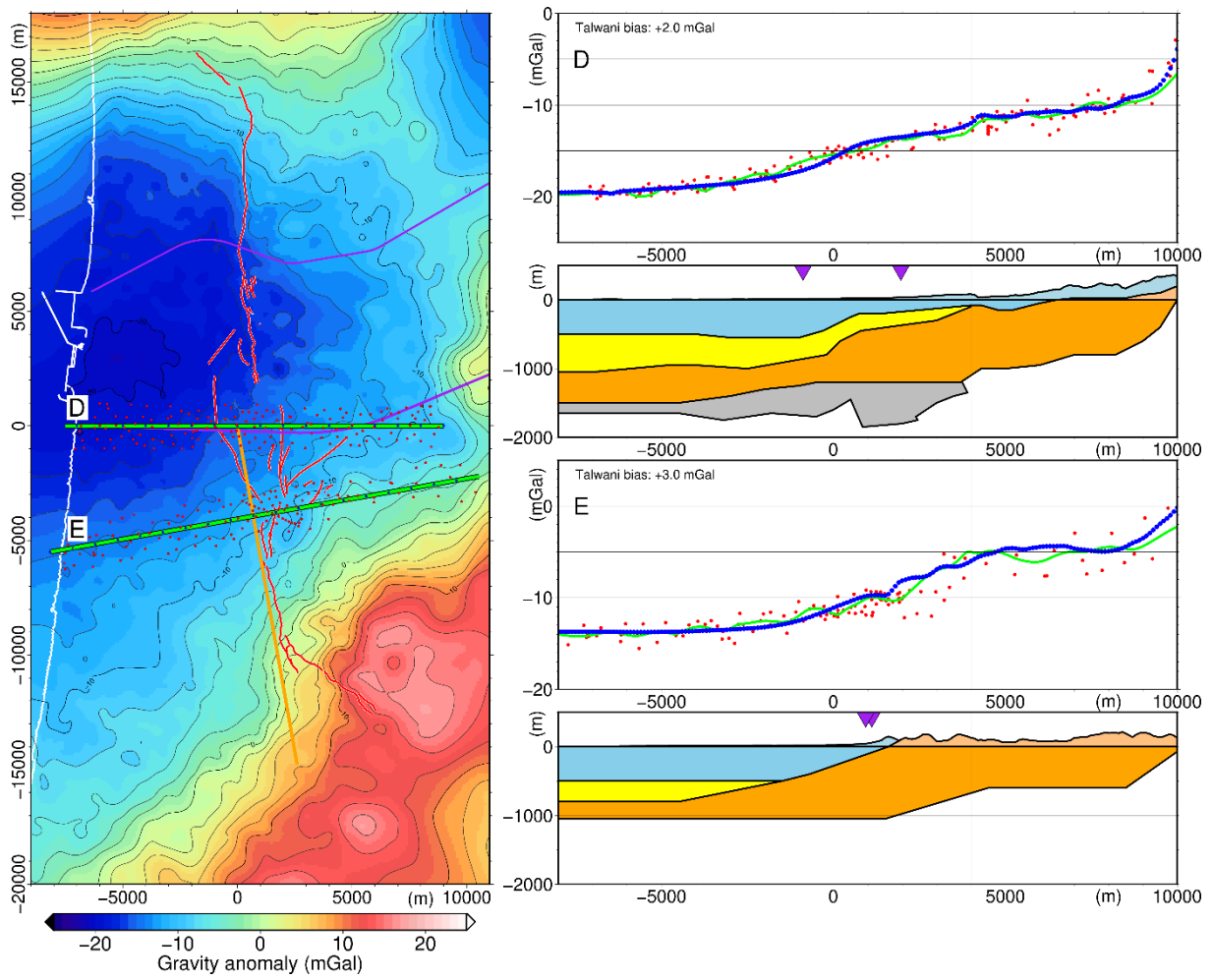


図 65 森本・富樫断層帯を横切る 2 次元タルワニ法解析測線 D, E の解析結果。  
 左図におけるオレンジ線は測線 E~G における横軸 0 の位置を示す。その他の詳細は図  
 64 と同じ。

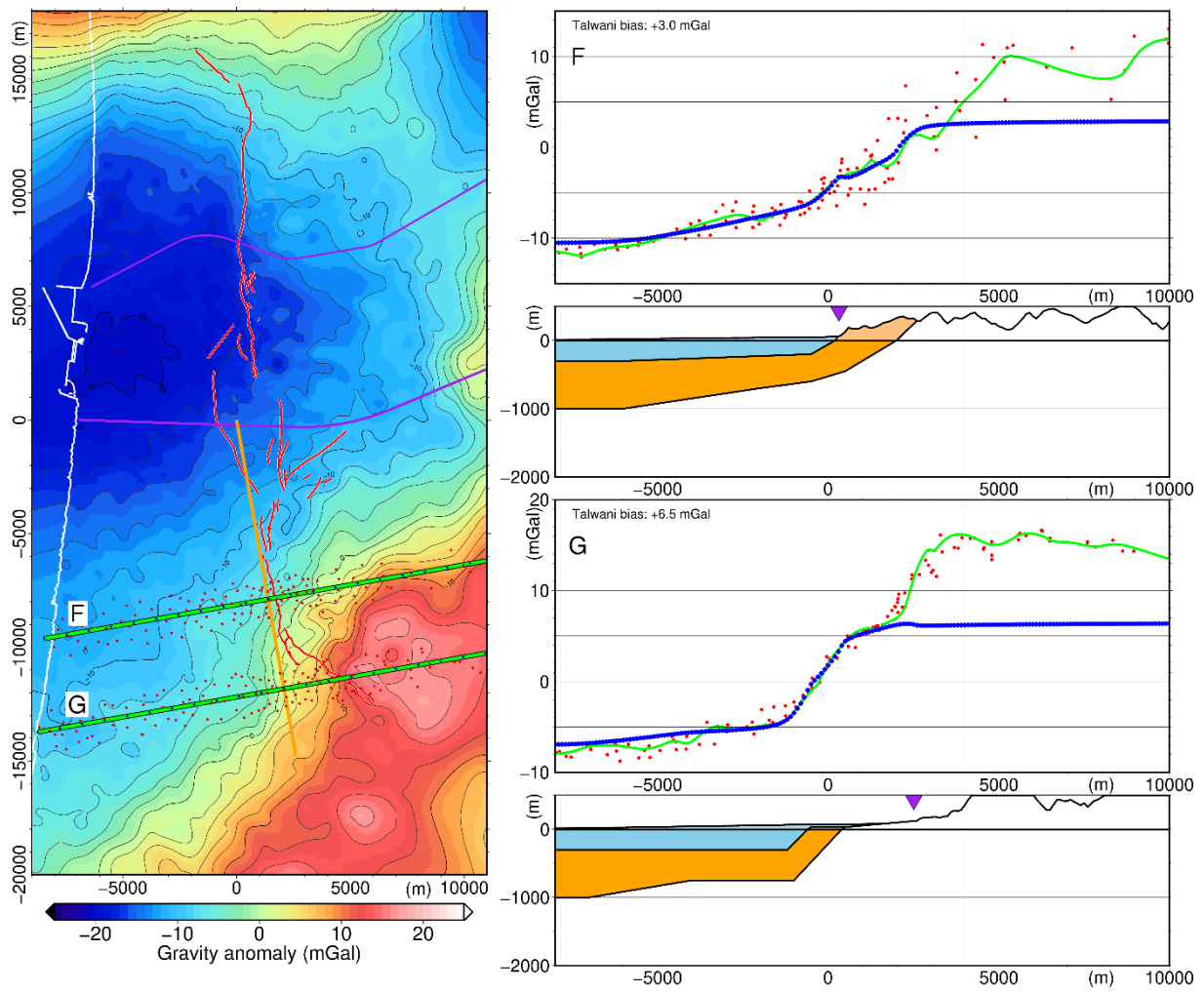


図 66 森本・富樫断層帯を横切る 2 次元タルワニ法解析測線 F, G の解析結果。  
 詳細は図 65 と同じ。

#### 5) Scintrex CG-3M型重力計の精度の検定

金沢大学が所有し今回の測定に使用する Scintrex CG-3M型重力計(S/N:9507302)には、重力値の大きさに依存して測定重力値が線形的に変化するバイアスがみられる。そのため、重力測定点での正確な重力値を得るためには、重力測定精度の検定を実施し、それから得られる補正係数が必要となる。また、2024年1月1日に発生した令和6年能登半島地震により、金沢大学内の重力計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。その際実施した重力計の動作テストにおいて、保管部屋で測定を行った際の重力計からの読み取り値は、2023年12月18日には5349.085 (mGal)であったのに対し、2024年1月25日では5386.098 (mGal)と同一地点で約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った。その原因として、

- ・荷物落下による衝撃のため機械的な不具合が生じた。
- ・この2回の動作テストによる測定の間年にまたいでおり、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。
- ・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つがあるが、このうち密度構造の変化は重力値の変化が大きすぎるため可能性として考えにくい。一方、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、今回の事象もこの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、機械的な原因による可能性も否定できない。

これらのことから、金沢大学所有の Scintrex CG-3M型重力計(S302)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実施した。測定を実施した点は、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一等重力点であり、令和4年度に北海道、新潟、南九州の計19点、令和5年度に山形、新潟、紀伊半島、中国地方および南九州の計26点、令和6年度に北海道、新潟で計8点の測定を行った。加えて、山梨県富士山科学研究所周辺の3点で実施された絶対重力測定結果と比較を行うことで精密な重力計検定測定を実施した。それぞれの測定点分布を図67に示す。

各地の一等重力点で行った検定測定の結果として、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68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 $2.2261 \times 10^{-3}$ 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68に示される検定結果は、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。今回の検定結果を追加して得られた補正係数は、 $(2.357 \pm 0.0274) \times 10^{-3}$ となり、補正係数に大きな違いはみられなかった。

山梨県富士山科学研究所周辺の検定測定では、令和4年度に今西・他(2022)による絶対重力計測定地点である山梨県富士山科学研究所(MFRI)と富士山5合目測定点(SL5ST)との重力差を測定する検定を行った。また、令和6年度には絶対重力計による正確な重力値の再測定とほぼ同時期に金沢大学所有の重力計による検定測定が実施できた。令和6年度

の検定測定では、山梨県富士山科学研究所(MFRI)を起点とし、富士山5合目測定点(SL5ST)および都留文化大学測定点(Tsuru Univ.)にて各2回、測定時間は1時間以上で測定を実施した。絶対重力測定結果と金沢大学所有重力計による測定値との比較の際には、金沢大学所有重力計の読み取り値にドリフト補正、潮汐補正、絶対重力計による測定標高との標高差による鉛直勾配成分の補正を行った値を用いた(図69)。令和4年度の検定結果では、絶対重力計の結果に対する金沢大学所有重力計の出力値のずれは1 mGal あたり  $2.789 \times 10^{-3}$  mGal の差が含まれることが示され、また令和6年度の検定測定では、絶対重力計の結果に対する金沢大学所有重力計の出力値のずれとして1 mGal あたり  $2.466 \times 10^{-3}$  mGal の差が含まれることが示された。これらの結果は上記の1等重力点での検定測定結果による補正係数  $(2.357 \pm 0.0274) \times 10^{-3}$  とほぼ同じ値であった。また、金沢大学所有重力計の補正係数として使用している1 mGal あたり  $2.2261 \times 10^{-3}$  の値からの変更を必要としないとする結果となった。

したがって、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確認された。

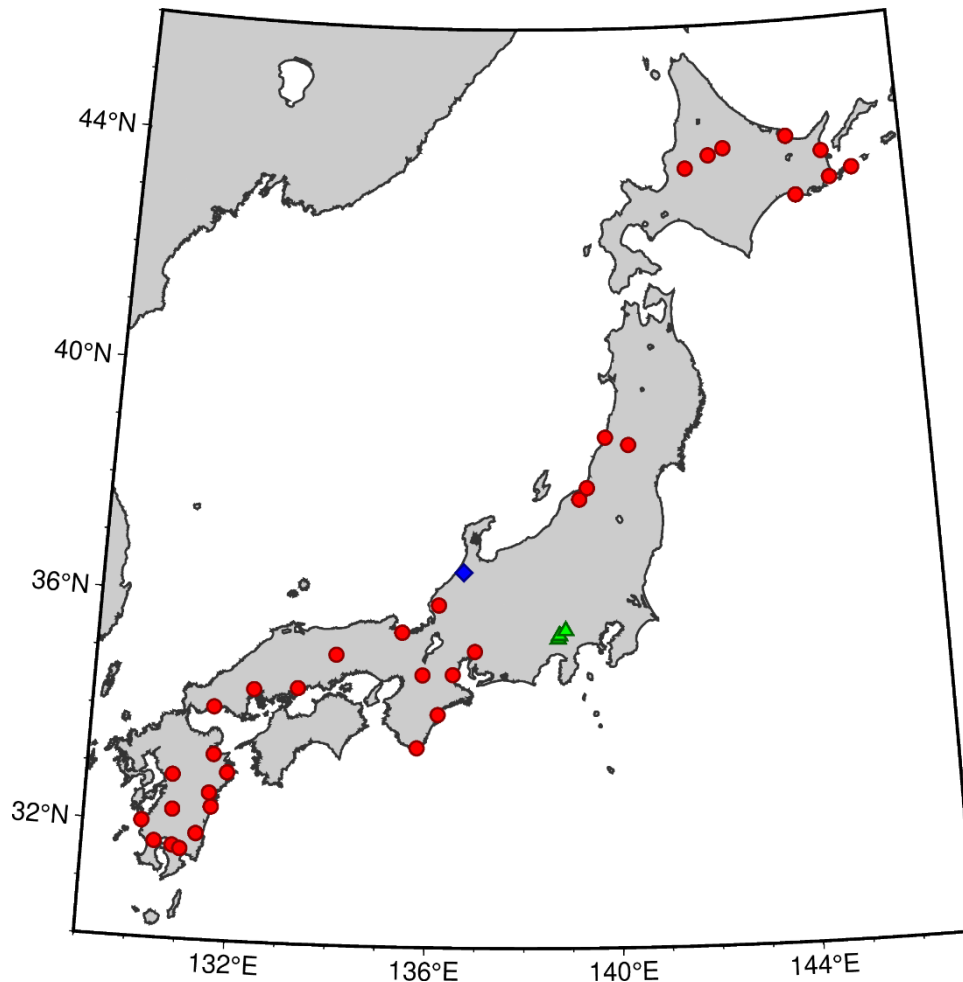


図 67 重力計検定測定を行った観測点。赤点：重力計検定に使用した一等重力点、青点：一等重力点（金沢）、緑点：絶対重力測定結果と比較を行った測定点。

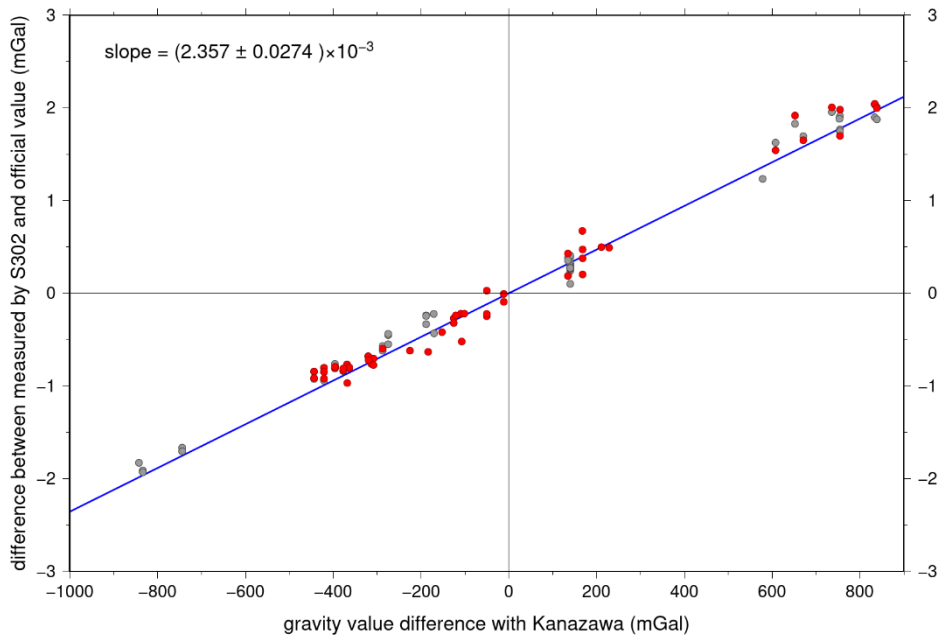


図 68 重力計検定測定の結果。赤点は令和 4～6 年度に検定を行った測定値、灰点は既存一等重力点測定値、青線は一等重力点金沢での測定値を原点として最小二乗法により得られた回帰直線を示す。横軸：一等重力点金沢と検定に用いた一等重力点との重力値の差、縦軸：2 点間の正確な重力差と金沢大学所有の Scintrex CG-3M 型重力計による測定重力差との差。

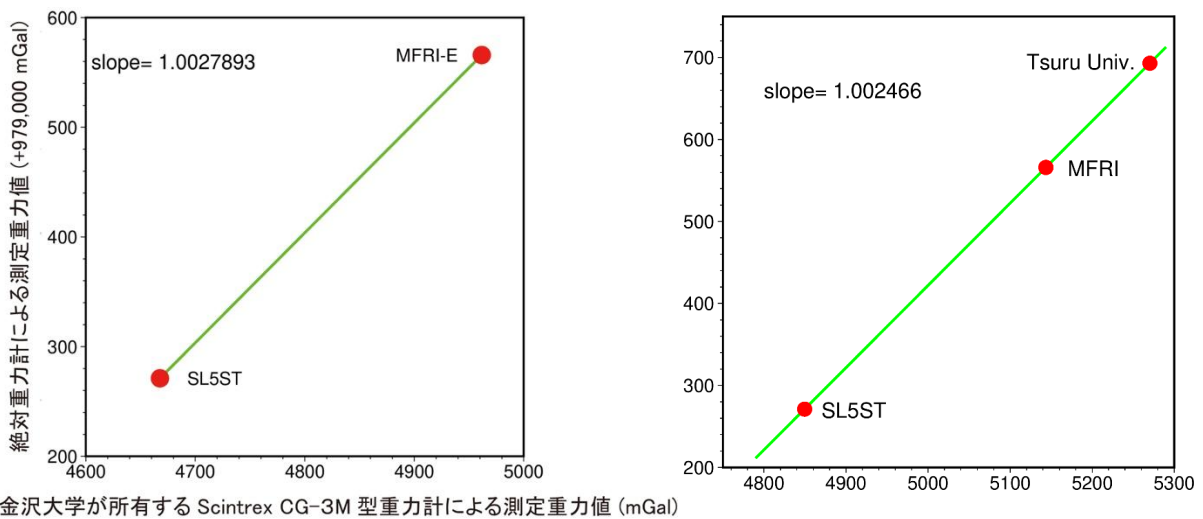


図 69 富士山検定ラインにおける金沢大学が所有する Scintrex CG-3M 型重力計による測定重力値と絶対重力計による測定重力値との比較。MFRI は山梨県富士山科学研究所の基準点（基準重力点富士吉田）、SL5ST は富士山五合目の測定点、Tsuru Univ. は都留文化大学測定点における測定結果を示す。（左）令和 4 年度検定測定結果、（右）令和 6 年度検定測定結果。

(c) 結論ならびに今後の課題

森本・富樫断層帯周辺で重力測定を行い、1071点の新規重力データを追加した。また、既存データの精査を行い、誤りが含まれると推測される重力データ248点について除去を行い、そのうち82点について同一地点にて再重力測定を行い、重力データを得た。これらの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、重力異常図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。また、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、富樫断層帯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。さらに勾配図の特徴から、森本・富樫断層帯の断層構造は邑知潟断層帯の断層構造と連続しないことが考えられる。GNSS導入以前の重力データには標高値が誤っているものが含まれている可能性があり、重力異常の勾配はそのような誤重力データの影響を大きく受ける。勾配を用いた断層構造の特徴抽出の際には誤重力データを可能な限り除去する必要がある。

観測重力異常分布に基づき森本・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。複数例の初期深度分布及び密度差に対して解析を行った結果、反射法地震探査結果と概ね整合的であり、観測重力異常分布を説明する境界深度分布が得られた。

また、令和4年度実施の反射法地震探査測線である犀川－医王山測線及び令和5年度実施の内灘－南砺測線にて2次元タルワニ法解析を行った。内灘－南砺測線では、反射法地震探査結果に基づく2次元密度構造により測線沿いの観測重力異常値を概ね説明可能であり、反射法地震探査から推定された層構造は重力異常の観点から妥当であることを確認した。犀川－医王山測線では、観測重力異常値を説明するために最深部の層境界において反射法地震探査結果に基づく2次元密度構造の修正が必要であったが、堆積層の層構造は妥当であることが確認できた。これらの結果を参照し、反射法地震探査測線以外の森本・富樫断層帯の直交する5測線においても2次元タルワニ法解析を行い、森本断層及び野町断層は類似の密度構造が連続するが、富樫断層は異なる構造を示す可能性を持つことが分かった。さらなる精度向上のためには、基盤深度に達する大深度のボーリングデータの実測値に基づく密度値の設定と拘束条件になり得る境界深度値が必要となる。

金沢大学所有のScintrex CG-3M型重力計による重力測定精度の検定を目的として、金沢と大きく違う重力値を示す一等重力点での重力測定を実施するとともに、富士山周辺の絶対重力測定点においての検定測定を行った。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。

稠密かつ高精度な重力測定データを用いた重力異常図の作成は、活断層の断層構造を面的に推定する上で有効である。本業務では平野部では約500mの格子に重力測定点が1点含まれるように重力測定を実施したが、山間部では道路の制約等により均質な重力測定点分布を得ることが難しい。山間部での均質な重力測定データを得るためには、今後の高精度な空中重力測定方法の開発等が望まれる。

(d) 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.
- 今西祐一・西山竜一・本多亮, 富士山における 2 台の FG5 による絶対重力測定(2022 年 9 月) — 相対重力計検定ラインの構築および FG5 の器差検定 —, 地震研究所彙報, 97, 1-11 2022.
- 石山達也・他 11 名, 3. 1. 1 活断層の詳細位置・形状・活動性解明のための調査, 文部科学省研究開発局・国立大学法人京都大学防災研究所, 森本・富樫断層帯の重点的な調査観測 令和 4 年度報告書, 6-65, 2023.
- 石山達也・他 11 名, 3. 1. 1 活断層の詳細位置・形状・活動性解明のための調査, 文部科学省研究開発局・国立大学法人京都大学防災研究所, 森本・富樫断層帯の重点的な調査観測 令和 5 年度報告書, 6-101, 2024.
- 伊藤康人・山下透・檀原徹・長崎康彦・渡辺真人・荒戸裕之, 基礎試錐「金沢沖」の中新世界火山岩類について—背弧海盆拡大期の火成活動—, 石油技術協会誌, 59, 6, 509-518, 1994.
- 鹿野和彦・原山智・山本博文・竹内誠・宇都浩三・駒澤正夫・広島俊男・須藤定久, 20 万分の 1 地質図幅「金沢」, 地質調査書, 1999.
- 粕野義夫 (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](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 10 m 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, 基盤地図情報数値標高モデル 5 m 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., K.V. Swamy and I.V. Radhakrishna Murthy, 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, 5 万分の 1 地質図幅「金沢」, 1959.

- 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., J. Wozel and M. Landisman, Rapid computation for two dimensional Bodies with application to Mendocino Submarine Fracture Zone, J. Geophysical Res., 64, 49-59, 1959.
- 東郷正美・池田安隆・今泉俊文・澤祥，1:25000 都市圏活断層図「金沢」，国土地理院，1998.
- 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., J.F. Luis, L. Uieda, R. Scharroo, F. Wobbe, W.H.F. Smith and D. Tian, The Generic Mapping Tools version 6. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 20, 5556-5564. <https://doi.org/10.1029/2019GC008515>, 2019.
- 地質調査所，5 万分の 1 地質図幅「金沢」，1959.