

令和 4 年 6 月 13 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2021

課題番号：17K01325

研究課題名（和文）重力偏差テンソルを用いた実用的な断層傾斜角推定手法の研究開発

研究課題名（英文）Study on a practical fault dip estimation method using a gravity gradient tensor

研究代表者

楠本 成寿（Kusumoto, Shigekazu）

京都大学・理学研究科・教授

研究者番号：50338761

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、重力異常の水平勾配と偏差テンソルの最大固有値の組み合わせにより、正断層と逆断層の判別ができることを示した。この判別情報を用いることで正断層の断層傾斜角推定には重力偏差テンソルの最大固有ベクトルを、逆断層の傾斜角推定には同テンソルの最小固有ベクトルを用いる。重力偏差テンソルを用いて推定された断層傾斜角の深さ方向の信頼度を定量的に評価する指標や手法の開発の基礎的事項として、原因層の疑似深度と重力偏差の各6成分のパワースペクトルの関係を導いた。また、重力異常のパワースペクトルから原因層の疑似深度を自動的に推定するアルゴリズムを提案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

断層やカルデラ壁といった構造境界の傾斜角は、それらの形成メカニズムを議論するうえで重要な役割を果たすだけでなく、ハザードマップ作成時にも重要な役割を果たす。特に断層傾斜角は、地震時の被害状況予測に不可欠な強震動シミュレーションで重要な意味をもつ。しかしながら、大規模地震波探査といった高額な探査手法は別として、実際の断層傾斜角の見積もりでは、既存の探査・解析手法では難しい。このようなことを考えた場合、重力偏差テンソルの固有値、固有ベクトルを用いた断層タイプの判定と断層傾斜角推定の自動化は、地球科学やその周辺分野および応用分野に及ぼす意義は大きい。

研究成果の概要（英文）：This study showed that fault type of an arbitrary buried fault could be determined by the combination of the horizontal gradient of the gravity anomaly and the maximum eigenvalue of the gravity gradient tensor. After determining the fault type, we can estimate the fault dip for a normal fault by the maximum eigenvector of the gravity gradient tensor and the dip for a reverse fault by the minimum eigenvector of the tensor, respectively. As fundamental indicators or development of a technique for quantitatively evaluating the depth direction reliability of the fault dip estimated by the gravity gradient tensor, the relationships between the pseudo-depth of the causative layer and the power spectrum of each of the six components of the gravity gradient tensor due to the layer were derived. In addition, we suggested an algorithm estimating the pseudo-depth of the causal layer from the power spectrum of gravity anomaly automatically.

研究分野：テクトニクス・物理探査

キーワード：断層傾斜角 重力偏差テンソル 伏在断層 活断層

1. 研究開始当初の背景

断層やカルデラ壁といった構造境界の傾斜角は、それらの形成メカニズムを議論するうえで重要な役割を果たす。断層の傾斜角は、地震時の被害状況に大きな差異を生じさせるため、断層運動時に備えたハザードマップの作成では重要なパラメータである。

構造境界の傾斜角を知るためには、地質調査のほか、地震波探査や重力探査といった物理探査が有効である。重力探査は、比較的 low コストで実施できるため、構造探査としてよく採用され、データベースなども整備されている。しかし、重力異常の基礎式である万有引力の法則から分かるように、重力探査で得られる重力異常は、距離と質量の2変数関数である。そのため、重力異常から地下構造を精度良く推定するためには、結局、地震波探査による地下構造の形状、あるいは高価なボーリングにより得られる密度情報のどちらかが必要となり、重力異常単独で正確な地下構造の推定は困難である。しかしながら、この困難を克服する努力は続けられている。

近年、重力偏差テンソルの固有ベクトルを用いて重力異常の原因構造の傾斜角を推定する手法が提案されてきている。Beiki and Pedersen (2010)は、ダイクのような構造に起因する重力偏差テンソルの最大固有ベクトルが重力異常の原因体の方を向くことを示した。楠本(2015)は、基盤は高密度の物体柱の集合体からなると見做し、Beiki and Pedersen (2010)と Beiki (2013)のアイデアを断層傾斜角推定に応用した。

楠本(2015)はこの手法を別府湾周辺に適用したところ、地震波探査により推定されている断層傾斜角と調和的な結果を与えることが示された。また熊本地震の震源断層付近にこの手法を適用したところ、GNSSにより観測された地殻変動を説明する断層モデルの傾斜角と調和的な傾斜角を与えたことも報告されている(Kusumoto, 2016)。一方で、重力偏差テンソルの最大固有ベクトルを用いた断層傾斜角推定手法は、正断層の傾斜角推定には有用であるが、逆断層の傾斜角推定では最小固有ベクトルを用いるべきであることが示唆されている(Kusumoto, 2017)。正断層と逆断層のいずれが分布するのかという地質学的な先験情報が存在する場合、その情報に基づいて適切な固有ベクトルを用いて断層傾斜角を推定できる。しかしながら伏在断層等、先験情報が無い場合、何らかの方法により最大と最小のどちらの固有ベクトルを用いるかを選択する必要がある。そこで以下の「研究の目的」に掲げる目標を設定し、研究を行った。

2. 研究の目的

重力偏差テンソルを用いた実用的な断層傾斜角推定手法の研究と開発を行う。実用的な断層傾斜角推定手法とは、(1)重力異常、あるいは重力偏差テンソルの異常源となる断層が、正断層か逆断層であるかを自動的に判断し、偏差テンソルの最大あるいは最小固有ベクトルから断層傾斜角を推定すること、(2)さらにその傾斜角が対象とする断層のどのくらいの深さの情報であるか、その信頼度を定量的に評価できることである。断層傾斜角は、地震被害想定を策定する際に行われる様々な数値シミュレーションで要求される重要なパラメータである。本研究では、既存の重力データベースや重力偏差データベースを用いて安価で短時間に断層タイプも判断して断層傾斜角を推定する手法の研究・開発を行う。

3. 研究の方法

本研究は、既存の重力異常データベース(駒澤, 2013)および重力偏差データベース(石油天然ガス・金属鉱物資源機構, 2014)を用いて行われた。重力偏差が直接計測されていない地域の解析では、重力異常データベースから重力偏差データを得た。重力異常から重力偏差への変換は、Mickus and Hinojosa (2001)により示されたフーリエ変換法により行われた。

4. 研究成果

本研究では、(1)他の物理探査や地質学的知見を借りずに、重力異常や重力偏差テンソルデータから、断層タイプ(正断層あるいは逆断層)を自動判別し、重力偏差テンソルの適切な固有ベクトル(最大固有ベクトルあるいは最小固有ベクトル)を用いて断層傾斜角を推定する手法の開発と、(2)推定された断層傾斜角の深さ方向の信頼度を定量的に評価する指標や手法の開発に取り組んだ。

まず(1)について以下の成果を得た。

重力偏差テンソルを用いた断層傾斜角推定では、正断層の断層傾斜角推定には重力偏差テンソルの最大固有ベクトルが、逆断層の傾斜角推定には同テンソルの最小固有ベクトルが適切である。断層が地表に露出している場合や先行研究により断層タイプが判別されている場合、その情報を基に推定に適し

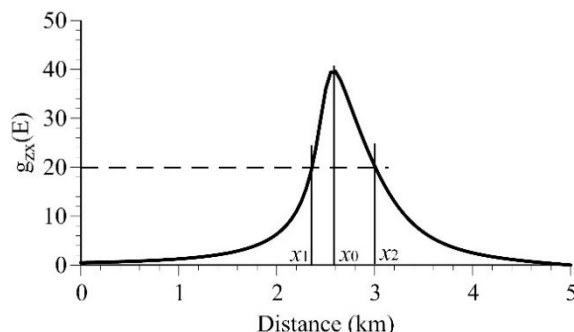


図1. 断層タイプの判定基準モデル

た固有ベクトルを用いることができる。しかしながら伏在断層の場合、断層タイプを何らかの方法により推定してやる必要がある。本研究では、断層構造に起因する重力異常の水平勾配についてある閾値を設定し（例えば、閾値として 20 E[エトベス]を設定。図 1. 縦軸が重力異常の水平勾配の値）、重力異常の水平勾配が閾値を超えた位置からピーク値を取る地点までの距離 ($|x1 - x0|$, 図 1) とピーク値から閾値を下回る位置までの距離 ($|x0 - x2|$, 図 1) の両者の大小と、最大固有ベクトルの傾斜角を関係づけることで断層タイプの判別ができることを示した。

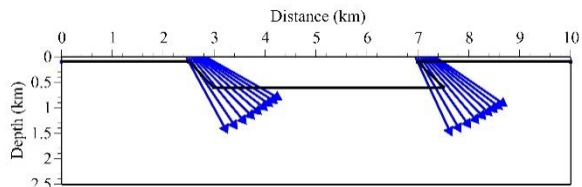


図 2. 逆断層が並走するモデル。本手法により逆断層であることを判別し、重力偏差テンソルの最小固有ベクトルを用いて断層傾斜角を推定した。

単純な正断層モデル、単純な逆断層モデル、逆断層が向き合った構造、正断層が向き合った構造、現実的ではないが正断層と逆断層が並走するモデルで数値実験を行ったところ、誤ることなく断層タイプを判定し、重力偏差テンソルの最適な固有ベクトルを用いて断層傾斜角を推定することができた。図 2 は、逆断層が並走するモデルの重力異常、重力偏差テンソルデータに対して本手法を適用して推定された断層傾斜角のベクトル表示である。逆断層が並走していることを判別し、重力偏差テンソルの最小固有ベクトルを用いて断層傾斜角が推定された。

断層傾斜角や断層形状を推定する方法は、本研究で採用した重力偏差テンソルの固有ベクトルを用いるもの以外にもある。オイラー・デコンボリューション（例えば、Zhang et al., 2000）などが著名である。これらの手法を用いる場合、断層構造に起因する重力異常あるいは重力偏差データの急変部を抽出し、その原因としての断層傾斜角を推定する。この急変部の抽出には、本研究でも採用した重力異常の水平勾配がよく採用されてきたが、実際の断層位置からずれた位置にピークをもつことも知られている。そこで断層構造に起因する重力異常の急変部を断層位置から出来るだけずれずに抽出できる新たな手法を模索した。その結果、重力異常の鉛直勾配 g_{zz} の水平勾配をとると断層直上にシャープなピークが立ち、断層位置を正確に指示することが分かった（図 3）。

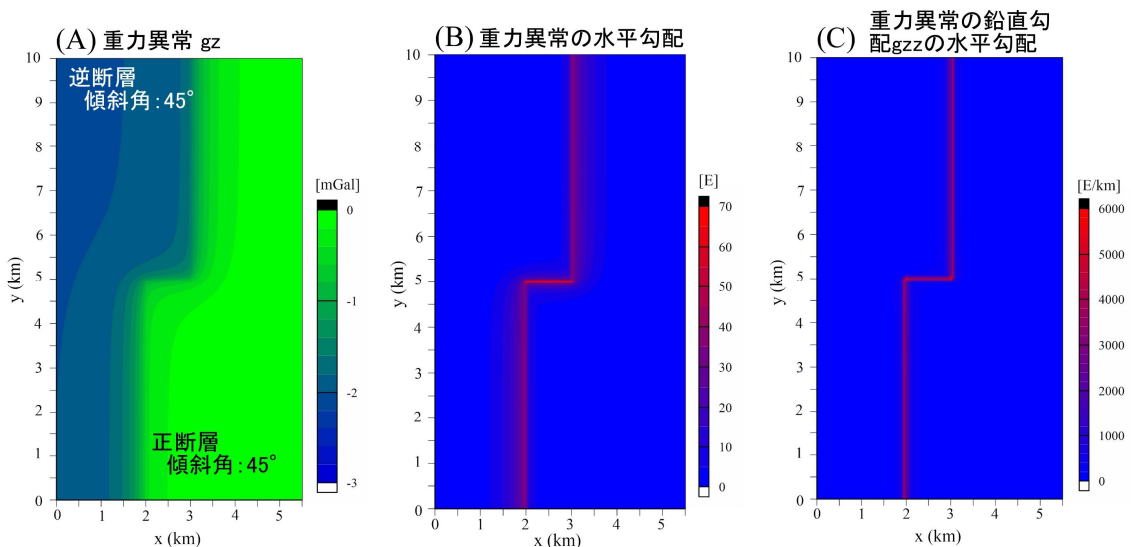


図 3. 断層位置の検出。(A) 断層傾斜角 45° の正断層と逆断層が作る重力異常。(B) (A)の水平勾配（重力異常の水平勾配）(C) 重力異常の鉛直勾配 g_{zz} の水平勾配。

これにより、これまで重力異常急変部推定にずれを伴っていた問題に、問題解決の糸口が示された。またこの手法により、断層位置がこれまでよりも正確に推定できるようになることから、断層傾斜角推定に大きな進展が期待されるようになった。一方で、記述の断層タイプの判別にそのまま使うことが出来ないことも判明し、活用方法に今後の課題が残った。

様々な地域の重力異常や重力偏差テンソルデータに本解析手法を適用したところ、断層の走向が急変する場所では必ずしも地質学的情報と整合的な結果を得られない場合も分かった。これはオイラー・デコンボリューション等の伝統的は手法にもみられる現象であり、今後の問題解決に向けた重要な課題である。

(2)について、すなわち推定された断層傾斜角の深さ方向の信頼度を定量的に評価する指標や手法の開発で重要となるフィルタリング手法についての研究では、以下の成果を得た。

重力異常や重力偏差の原因となる地下構造（層：レイヤー）の深度とパワースペクトルの関係を、重力偏差テンソル6成分について導いた。重力偏差テンソルは対称テンソルであるため、独立な成分は上三角あるいは下三角の6成分である。その結果、水平成層構造であるにも拘らず得られるパワースペクトルは g_{zz} 以外の成分全てに方向依存性のあることが判明した（図 4）。

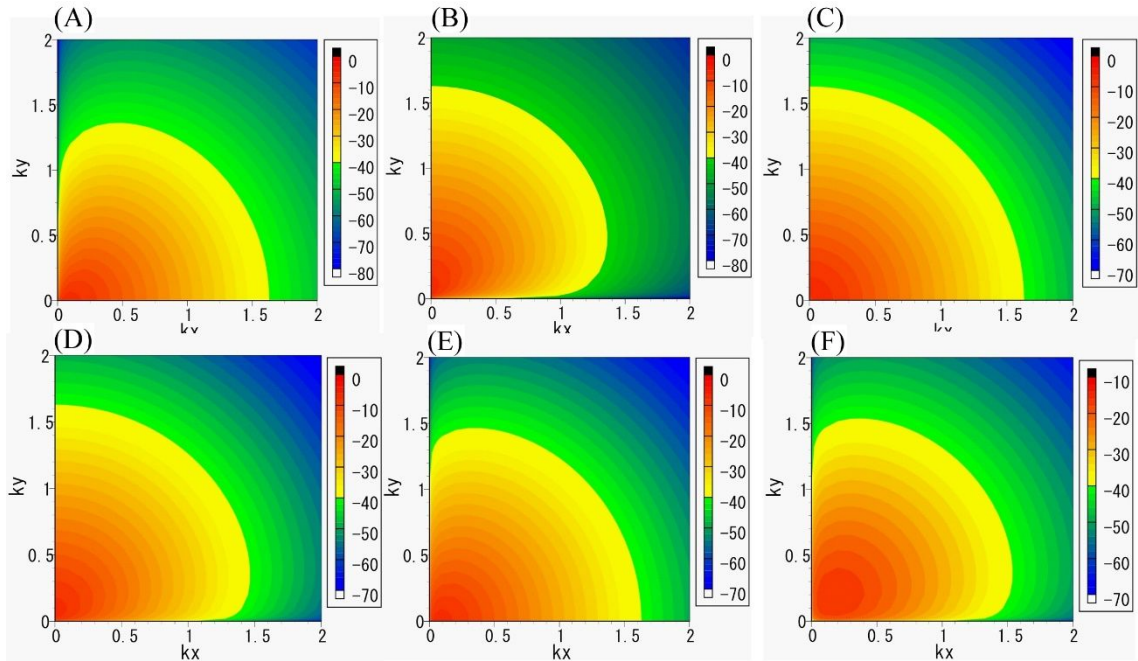


図4. 重力偏差テンソルの各6成分についてのパワースペクトル。(A) g_{xx} 成分 (B) g_{yy} 成分 (C) g_{zz} 成分 (D) g_{zy} 成分 (E) g_{zx} 成分 (F) g_{xy} 成分

フィルタリングでは、この特性を残したフィルタ操作を行う必要があるため、重み関数の選定について多くの試行錯誤を行った。最終的には、対称なウィンド関数を適用することで適切なフィルタ操作が可能であることが明らかとなった。

また、これまで手動で実施されてきた重力異常や重力偏差テンソルの g_{zz} 成分のパワースペクトルを用いた原因層の疑似深度推定を自動化するアルゴリズムを考案した。これは決定係数を指標として、原因層の疑似深度を与える回帰直線とそれを適用する波数帯の双方を自動的に推定するものである。推定は最深層から浅部層に対応する回帰直線とそれらの有効波数帯を順次推定していく。図5は山形県庄内盆地の重力異常に対する解析結果である。概ね良好な結果を得ている。なお推定には、基本的に L_2 ノルムを最小にする最小二乗法を用いるが、異常データに対するロバスト性を確保できる L_1 ノルムを最小化する方法でも問題なく用いることが出来ることが示された。

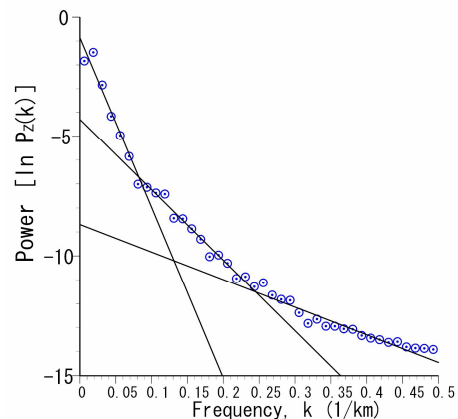


図5. 山形県庄内盆地の重力異常パワースペクトルより疑似深度を推定

[引用文献]

- Beiki, M. (2013): TSVD analysis of Euler deconvolution to improve estimating magnetic source parameters: an example from the Asele area, Sweden, *Jour. Appl. Geophys.*, 90, 82-91.
- Beiki, M., and Pedersen, L. B. (2010): Eigenvector analysis of gravity gradient tensor to locate geologic bodies, *Geophysics*, 75, I37-I49.
- 駒澤正夫 (2013): 日本重力異常グリッドデータ, 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, つくば.
- 楠本成寿. (2015): 重力勾配テンソルの固有ベクトルを用いた断層あるいは構造境界の傾斜角の推定, *物理探査*, 68, 277-287.
- Kusumoto, S., (2016): Dip distribution of Oita-Kumamoto Tectonic Line located in central Kyushu, Japan, estimated by eigenvectors of gravity gradient tensor, *Earth, Planets and Space*, 68:153. DOI 10.1186/s40623-016-0529-7.
- Kusumoto, S., (2017): Eigenvector of gravity gradient tensor for estimating fault dips considering fault type, *Progress in Earth and Planetary Science* (2017) 4:15. DOI 10.1186/s40645-017-0130-0
- Mickus, K. L., and Hinojosa, J. H. (2001): The complete gravity gradient tensor derived from the vertical component of gravity: a Fourier transform technique, *Jour. Appl. Geophys.*, 46, 159-174.
- 石油天然ガス・金属鉱物資源機構 (2014): 平成 24 年度 地熱資源ポテンシャル調査のための空中物理探査報告書.

Zhang, C., Mushayandevu, M. F., Reid, A. B., Fairhead, J. D., and Odegrad, M. E. (2000): Euler deconvolution of gravity tensor gradient data, *Geophysics*, 65, 512-520.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 楠本成寿	4. 巻 72
2. 論文標題 モデル形状の仮定を伴わない鉛直変位の力源推定手法	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 物理探査	6. 最初と最後の頁 1 - 7
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Kusumoto Shigekazu	4. 巻 4
2. 論文標題 Eigenvector of gravity gradient tensor for estimating fault dips considering fault type	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Progress in Earth and Planetary Science	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1186/s40645-017-0130-0	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Kusumoto Shigekazu, Takemura Keiji, Itoh Yasuto	4. 巻 -
2. 論文標題 Inconsistent Structure and Motion of the Eastern Median Tectonic Line, Southwest Japan, during the Quaternary	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Evolutionary Models of Convergent Margins - Origin of Their Diversity	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.5772/67964	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 楠本成寿, 高橋秀徳, 東中基倫, 早川裕弐	4. 巻 74
2. 論文標題 プーゲー異常を用いた浅部間隙率分布の推定	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 物理探査	6. 最初と最後の頁 30-35
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Shigekazu Kusumoto and Motonori Higashinaka
2. 発表標題 Relationships between power spectrum of each component of gravity gradient tensor and subsurface structure
3. 学会等名 Japan Geoscience Union (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Shigekazu Kusumoto and Yoshihiro Hiramatsu
2. 発表標題 Estimation of lateral fault location by means of gravity gradient tensor
3. 学会等名 Japan Geoscience Union (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Shigekazu Kusumoto
2. 発表標題 Fault dip estimation based on gravity gradient tensor on a profile
3. 学会等名 Japan Geoscience Union (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 楠本成寿, 茂木透
2. 発表標題 空中重力偏差法データの地熱資源探査への有効活用に向けた既存研究のレビュー
3. 学会等名 日本地熱学会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 楠本成寿, 東中基倫
2. 発表標題 重力異常や重力偏差(gzz)のパワースペクトルから原因層の平均深度を与える回帰曲線の自動推定手法
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------