

令和 6 年 6 月 2 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20K05399

研究課題名（和文）重力異常や重力偏差データを用いた間隙率分布の推定手法についての研究

研究課題名（英文）Study on estimation of porosity distribution using gravity anomaly or gravity gradient data

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） 1,800,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、重力探査により、間隙率分布を推定する手法とそれを効率よく実施するための最適フィルタの開発を行った。間隙率を介した岩盤の密度構造と重力異常の理論的關係を示し、弥陀ヶ原火山地獄谷（富山県）で観測された重力異常に適用した。その結果、火山性ガスや水に起因する低密度域は、周辺の母岩より0.06-0.35程度大きな間隙率になることが示され、これらは現実的な範囲にあることが確認された。また浅部密度構造に起因する重力異常を客観的に抽出する最適フィルタの設計手法として、自由度調整済決定係数を指標として、重力異常のパワースペクトルから原因層の平均境界深度と周波数帯を自動で推定する手法を開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

地熱や石油・天然ガス等の資源の開発では、間隙率分布を知ることが重要である。間隙に水やガスなど低密度物質が充填された場合、間隙率の高い岩体は間隙率の低い岩体よりも低密度になる。金属鉱床のように高密度物質が充填された場合、高間隙率岩体は周囲より高密度になる。密度分布の抽出には、重力偏差を含めた広い意味での重力探査が有用であるが、重力異常を間隙率に変換して評価する手法は見当たらず、またそのためのフィルタ設計も多くない。重力異常や重力偏差データを間隙率に変換・考察する手法開発と最適フィルタ設計を行った本研究は、資源開発や地球科学・工学に一石を投じ、それらの発展に寄与できたのではないかと考えている。

研究成果の概要（英文）：In this study, we developed a method to estimate porosity distribution by gravity survey and an optimal filter to carry out the technique efficiently. We showed a theoretical relationship between the density structure of rock mass and gravity anomaly via porosity and applied it to the gravity anomaly observed at Jigokudani, Midagahara Volcano (Toyama Prefecture). As a result, it was shown that the low-density area caused by volcanic gas and water has a porosity of about 0.06-0.35 higher than the surrounding host rock, and it was confirmed that they are in the realistic range. In addition, we developed a method to automatically estimate the mean boundary depth and frequency band of the causative layer from the power spectrum of gravity anomaly using the degree of freedom-adjusted coefficient of determination as an index to design an optimal filter to extract gravity anomaly caused by shallow density structure objectively.

研究分野：固体地球物理学

キーワード：間隙率 プーゲー異常 地下浅部 密度構造 間隙比 スペクトル解析 フィルタ 平均境界面深度

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

土や砂には多数の間隙がある。一見密な岩石でも同様であり、砂や土と大きく変わらない値をもつこともある。地熱や石油・天然ガス、その他各種資源の開発では、この間隙率の分布を知ることが重要である。間隙に水や空気、ガスなど低密度物質が充填された場合、間隙率の高い岩体は間隙率の低い岩体よりも低密度になる。金属鉱床のように高密度物質が充填された場合、高間隙率岩体は周囲より高密度になる。

密度分布の抽出には、重力偏差を含めた広い意味での重力探査が有用であり、本格的な資源探査を行う候補地選定の概査用としてよく用いられてきた。重力探査において一般に想定されてきた地下構造は、媒質中に密度の異なる物質がはっきり分かれて存在するモデルであった。これに対し、本研究では、地下構造を間隙率の高低と間隙に充填される物質により考察する。間隙に充填された物質がある程度分かっているならば、重力異常の原因は間隙率の高低そのものになる。

2. 研究の目的

重力偏差を含めた広い意味での重力探査により間隙率分布を直接推定する手法の開発と、解析を効果的に実施するための最適フィルタの設計を目指すことが本研究の目的である。間隙率の推定は、これまで室内実験や電気探査により行われ、それほど大きくない規模での推定と議論であった。本研究では広範囲を覆う重力探査データから間隙率の推定を行うため、地熱や金属鉱床調査等、間隙率分布の情報を広範囲で必要とする分野の発展に寄与できる。

3. 研究の方法

本研究では、まず、地表で観測される重力異常あるいは重力偏差データから原因体(領域)と周辺媒質との密度差($\Delta\rho$)を逆解析により推定する。その後、予め分かっている $\delta\rho$ 、間隙に入る流体と周辺媒質との密度差を用いて、推定された $\Delta\rho$ を間隙率に変換した。重力探査にも地下の密度構造を推定する手法は数多く存在するが、本研究では、地下を格子で表現し、重力異常や重力偏差データを説明するよう各格子に密度差 $\Delta\rho$ を割振る手法を採用した。なお、この手法には、重力異常や重力偏差データから特定深度の構造に起因する波長のシグナルを抽出することが必要となる。このシグナルの抽出には、重力異常や重力偏差のパワースペクトルを用いた。これは伝統的な方法であるが、これまで手動で行われてきたシグナル抽出を、自由度調整済決定係数を指標とした自動抽出手法を提案した。

4. 研究成果

2020年度は、間隙率を介した岩盤の密度構造と重力異常の理論的關係について以下の3つのモデルに対する解を求めた。

- (1) 母岩とターゲット(重力異常の原因となっている物体)の構成物質が同じで、間隙に入る物質と母岩の密度差が重力異常の原因となっているモデル
- (2) 母岩とターゲットはそれぞれ異なる間隙率をもつが、両者の構成物質と間隙に入る物質は同じであるモデル
- (3) 母岩とターゲットはそれぞれ異なる間隙率をもち、両者の構成物質と間隙に入る物質も異なるモデル

また、自由度調整済決定係数を指標として、重力異常のパワースペクトルから原因層の平均境界面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手法を開発した。解析では、まず全波数帯のデータを初期データとして設定し、最深層に対応する回帰直線を

推定する。高い波数側から順次データを減らしながら回帰直線の推定と自由度調整済決定係数を計算し、自由度調整済決定係数が最も高い回帰直線を最適回帰直線とする。その後、同じ手法を残りのデータ(高波数側)に適用し、その次に深い平均境界面深度を与える回帰直線を推定する。これを繰り返すことで、原因層の数とその平均境界面深度を与える回帰直線、さらにその適用波数帯が自動的に決定される。数値テストの結果、ノイズが小さいとき、本手法は最小二乗法(L_2 ノルム最小化)によっても正確なモデルパラメータを推定することが出来た。しかしながらノイズが大きくなった場合、最小二乗法よりロバストな L_1 ノルム最小化により推定される回帰直線の方が良い結果を与えることが明らかになった。富山平野(富山県)と庄内平野(山形県)の重力異常に本手法を適用したところ、実フィールドのデータには数値テストほど大きなノイズを含むことが少ないためか、最小二乗法でも適切な回帰直線を推定することが出来た。

2021 年度は、昨年度導いた間隙率を介した岩盤の密度構造と重力異常の理論的關係のうち、(1) 母岩とターゲット(重力異常の原因となっている物体)の構成物質が同じで間隙に入る物質と母岩の密度差が重力異常の原因となっているモデルを実フィールドデータに適用した。モデルを適用したフィールドは、富山県に位置する弥陀ヶ原火山地獄谷であり、低重力異常域である。解析ではまず重力異常を説明する地下の密度構造を逆解析により推定した。密度構造の間隙率分布への変換では、地表で観察される湧水や噴気の程度から推定された低密度領域が水によるものかガスによるものかを予想し、密度構造を間隙率分布に変換した。得られた間隙率分布は、低重力域では周辺の母岩より 0.06 - 0.35 程度大きくなっていることが示された。地熱地帯での既存の坑井データに基づく有効間隙率分布や密度 - 間隙率の關係と比較を行ったところ、本手法で推定された間隙率は現実的な範囲にあることが示された。なお、この地域では 2016 年より水準測量を実施しており、2020 年までに最大約 5cm を超える沈降域と約 2cm の隆起域の存在が観測されている。本年度はこの地盤変動の力源推定もを行い、高間隙率領域にクラック状力源を仮定することで観測された地盤変動が説明されることが判明した。

重力異常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直線とその有効周波数帯の双方を自動的に推定する手法は、その有効性を確かめるために、豊肥火山地域の重力異常データに適用された。この地域では、同じ解析が手動により行われている。先行研究とほぼ同じ領域の重力異常データに対して解析を行ったところ、手法の違いによると思われる差異が生じた。すなわち、解析を手動で行うか完全自動で行うかということによる差異であり、それは意外と大きいことが判明した。

2022 年度は、2020 年度から懸案となっていた間隙内に入る流体の気液比を考慮したモデルの構築を行い、重力異常として現れる密度構造と気液比の理論的關係を導いた。間隙流体は、液体と気体から構成されている。これまでは間隙流体の密度を一括して扱っていたが、実際の間隙率を見積もる際には、間隙流体を気体と仮定するか液体と仮定するかで結果に大きな差異が生じる。一方で、間隙流体は気液混合流体として扱うのが普通である。そこで液体と気体の割合を用いて間隙流体の密度を表現し、重力異常として現れる密度構造と気液比の理論的關係を導いた。気体の密度は水の 1000 分の 1 程度であることを考慮すると、間隙率と気液比を考慮した密度の關係が単純な形で表現された。

重力異常の基礎となる万有引力の法則から分かるように、異常源が深部にあるとき、そのシグナルを地表でとらえられない可能性がある。フィルタを施して深部情報を取り出せてもそのシグナルは長波長で振幅も小さい。深部異常源による長波長小振幅のシグナル強度を増幅させるため、異常源近く、すなわち測定点より低い仮想的な位置に重力異常を移動させる(引き直す)ことの可能性と有意性について数値実験による議論を行った。重力異常を測定点より低い位置

に引き直す手法に下方接続がある。同様の処理を行う計算手法と理論に、ポアンカレ - プレイリダクションがある。しかしながら、いずれも基本的に地表面からジオイド(平均海面)上、或はその間の任意の深さという小さな接続深度への引き直しを念頭とした計算手法と理論である。接続深度すなわち測定点と引き直したい深度の距離が大きいつき、下方接続では短波長成分が異常に増幅され、構造解析に使えない重力異常を得ることが明らかになった。これは解が収束しないことを意味しており、大きな接続深度に対する下方接続は問題のある手法であることが明らかにされた。

2023 年度は前年度の二つ目の研究結果を受け、フィルタで分離された深部構造に起因する長波長重力異常のシグナル強化についての理論的研究を行った。大深度への重力異常値の引き直しに下方接続を単純に用いることができないことから、本研究では重力異常の基本的なところに立ち戻り、地球の全質量を用いない正規重力とその鉛直勾配を用いた重力補正法と、この補正によって得られる新しい重力異常を提案した。また、従来の重力異常と新しい重力異常の関係を明らかにした。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

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 ブ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 -

1. 著者名 Hotta Kohe, Kusumoto Shigekazu, Takahashi Hidenori, Hayakawa Yuichi S.	4. 巻 74
2. 論文標題 Deformation source revealed from leveling survey in Jigokudani valley, Tateyama volcano, Japan	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Earth, Planets and Space	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/s40623-022-01593-7	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 -

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

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2021年大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 楠本成寿
2. 発表標題 重力異常や重力偏差を用いた間隙率分布の推定手法
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2023年大会
4. 発表年 2023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
---------	---------