

高精度重力計による地下構造探査技術の開発

DEVELOPMENT OF A METHOD FOR EXPLORING GEOLOGICAL STRUCTURE USING A HIGH PRECISION GRAVIMETER

今野正雄*・野村誠紀**・佐々木健夫***・大角恒雄*
Masao KONNO, Seiki NOMURA, Takeo SASAKI and Tsuneo OOSUMI

Micro gravity survey is a technique for detecting minute changes in gravity based on variation in below ground density. This technique is considered to have potential for investigating underground features that are accompanied by a density change, such as rock cavities, buried waste, shallow geological strata and faults. We developed a procedure for measurement, data processing, and analysis using a high accuracy gravimeter. We applied the method to the structural investigation of an active fault and an existing earth dam. For the fault, the gravity change associated with the distance of the vertical gap was identified. For the dam, the gravity change between the dam wall and original topography was identified. However, the structural analysis is based on an assumed quantitative relationship between density and structure, and any given stratum may be subject to spatial variations in density. Therefore, the presumed density of discrete structures affects the precision of the delineation of the structure.

Key Words : micro gravity survey, density, cavity detection, active fault survey, shallow structure

1. はじめに

近年、地下空洞に起因する地表陥没や埋設廃棄物による地質汚染などが社会的問題となっており、堆積低地における浅部地下構造を効果的に把握する技術の重要性が増している。これらを対象とする物理探査技術として、従来からの主要な手法である弾性波探査・電気探査とともに、地下レーダー・表面波探査・電磁誘導法・マイクロ・グラビティ探査法・極浅層反射法などの開発・適用が進められている。

この中でもマイクロ・グラビティ探査法は、従来から垂炭採掘跡・防空壕などの地下空洞調査¹⁾で利用されてきた重力探査を、計測面で高精度化した手法であり、空洞以外にも基盤形状など浅部地下構造探査における有用な技術になるものと考えられる。今回、高精度重力計を用いた地下構造探査技術を開発し、断層・盛土構造物の調査に対する適用事例を得たので紹介する。

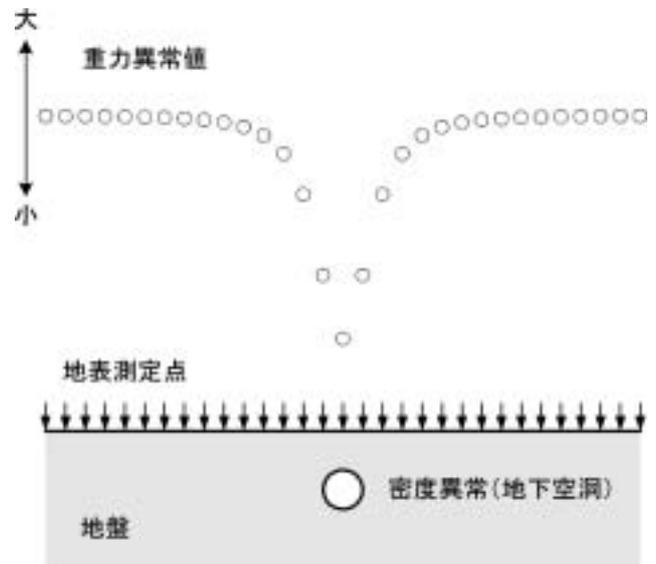


図-1 重力探査の原理

2. 高精度重力計による地下構造探査

(1) 探査の原理

重力探査とは、地上に設置した測定点において重力値を測定して、地下の密度構造を推定する調査法である(図-1)。重力は①ニュートンの万有引力則に基づく物質間引力と、②地球自転に伴う遠心力の合力であるが、前者の理由により重力値の大小は地下物質の密度の大小に対応する。

(2) 高精度重力計CG-3M型

本研究で使用した重力計はカナダ国シントレクス社製CG-3M型である。本機はスプリング式重力計の一種であり、重錘を吊るした熔融水晶製バネの伸びがフックの法則により張力(重力)に比例する性質を利用する(図-2)。

* 中央研究所 総合技術開発部
** 新潟支店 北陸事務所
*** 技術企画室

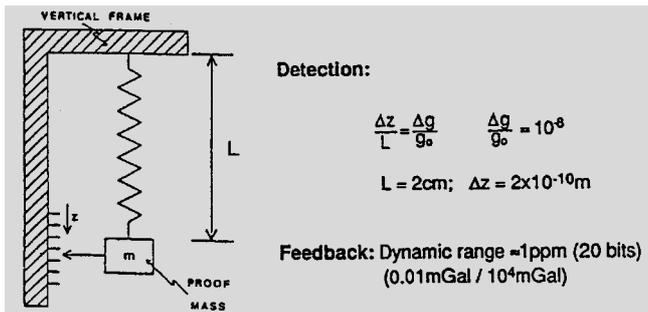


図-2 重力計CG-3M型の原理²⁾

重力値の読み取り分解能は $1\mu\text{gal}(=1.0\times 10^{-6}\text{gal})$ であり、内臓プログラムによる毎秒約1回のサンプリングおよびスタッキング処理により、測定精度 $5\mu\text{gal}$ の高精度な重力測定が可能である。また本機の大きさは幅 $240\text{mm}\times$ 奥行 $310\text{mm}\times$ 高さ 320mm 、重量は 11.4kg と小型軽量であり、野外調査用として可搬性に優れている(図-3)。内蔵電源は充電式小型バッテリー($12\text{V}7.2\text{Ah}$)であり、野外作業一日相当の動作が可能である。なお心臓部であるセンサー本体を恒温槽で保護する構造のため、調査プロジェクトの期間中は常時電源供給が必要である。



図-3 重力計CG-3M型の外観

(3) マイクロ・グラビティ探査

探査の対象となる局所的な地下密度構造変化に対する重力値変化を重力異常と呼ぶ。一般に地下密度構造の変化程度・規模の大小と、重力異常の大小は対応する(図-4)。

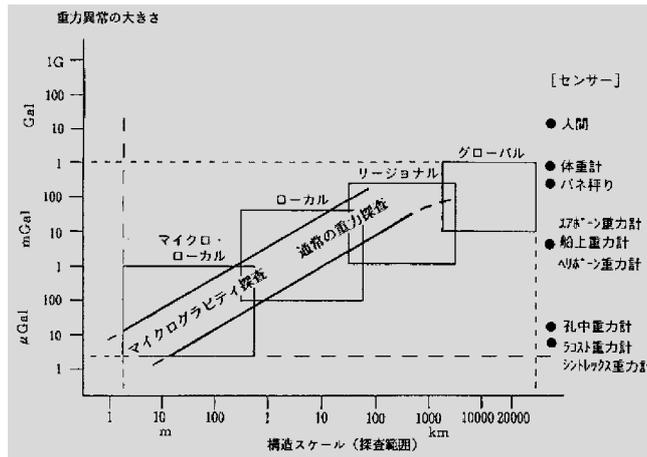


図-4 地下構造のスケールと重力異常の大きさ³⁾

従来の重力探査は、石油・地熱資源探査における、たとえば堆積盆における石油を胚胎する背斜構造調査、あるいは新期の火山噴出物で被覆された地域における深部基盤断裂構造調査など、深さ数kmに及ぶ大規模構造把握を目的とした利用が多かった。これらの場合の重力異常の大きさは経験的に数mgal以上である。

一方、土木地質分野での利用では、防空壕・廃坑などの地下空洞調査、あるいは堆積低地の基盤形状調査など、深さ数m~数十m程度の相対的に小規模構造が対象となる。それに起因する重力異常は、前者よりも小さく数十 μgal 程度となる場合があり、計測分解能に対する要求はより厳しい。

このような土木地質調査を目的とする、マイクロガル・オーダーの計測分解能が必要とされる重力探査を、従来の重力探査と区別してマイクロ・グラビティ探査、あるいは微小重力探査と呼ぶ。マイクロ・グラビティ探査はCG-3M型などの高精度重力計の実用化により可能となったものである。

(4) 適用対象

マイクロ・グラビティ探査は、地下の密度構造変化を伴う次のような対象に適用できる。

- (a) 防空壕・廃坑などの地下空洞調査(低密度構造)
- (b) 鉱滓・廃コンクリートなどの埋設廃棄物調査(高密度構造)
- (c) 洪積層・沖積層境界などの浅部基盤形状調査
- (d) 縦ずれ変位を伴う断層調査

なお想定される地下構造の密度差・大きさ・深度により重力異常のオーダーは変化する。したがって、実際の適用に際しては既往資料から概略的な重力異常の予測計算を行い、検出限界を事前に検討する必要がある(図-5)。

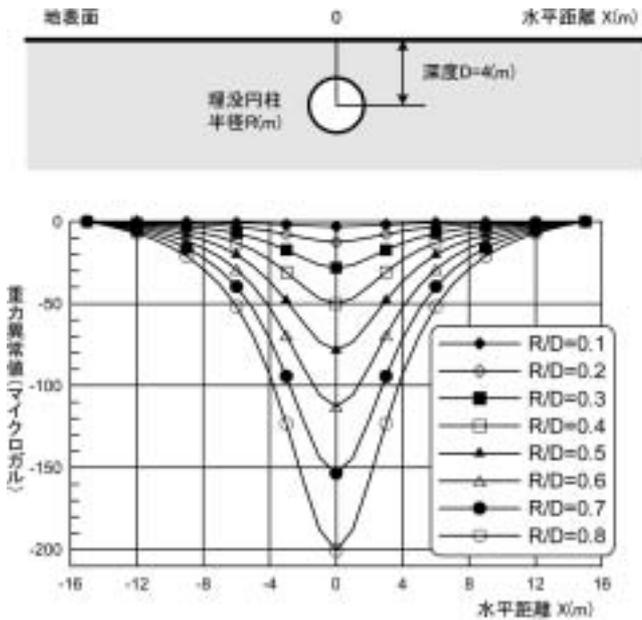


図-5 地下構造モデルに対する重力異常検討例

3. 現地調査法

(1) 概要

現地計測は測定点に重力計を設置して行う(図-6)。弾性波探査や電気探査のように測線上に計測用ケーブルを展開する、あるいは火薬を使用する必要がないため、機材が少なく現地作業も簡便であり、少人数で実施可能である。



図-6 重力測定状況

(2) 測定点

周辺微地形の引力による影響を避けるため土手・崖の傍を避ける必要があり、測定点はなるべく平坦かつ安定な箇所設ける。

なお測点位置は、標高は数mm以下、水平位置は数m以内

で決定する必要がある。この理由は、地表付近の重力値は鉛直方向に約 $300 \mu \text{ gal/m}$ 、南北方向に約 $0.8 \mu \text{ gal/m}$ (中緯度地域: $31^\circ \sim 45^\circ$)の勾配を有するため、数十 $\mu \text{ gal}$ 以下の重力異常を対象とするマイクロ・グラビティ探査では測点位置の誤差も無視できないためである。

(3) 測定手順

測定は60回サンプリングおよびスタッキング処理により1データを取得して、3データを連続取得して再現性を確認する。データとして観測重力値、測定時刻、計器設置高を記録する。

重力計センサー本体がスプリングであり、機器動揺はデータに悪影響を与えるので、測定中は地盤振動が極力小さいことが望ましい。なお、1測定当たりの所要時間は約1分半程度であるので、車両通行などの不定期な雑振動は測定開始のタイミングを調整することで対応が可能である。

4. 重力データの処理手順

データ処理自体は、従来の重力探査と同様に、測定点の重力値の計算、地下密度構造の不均質のみに起因する重力異常の計算の順に実施する(図-7)。

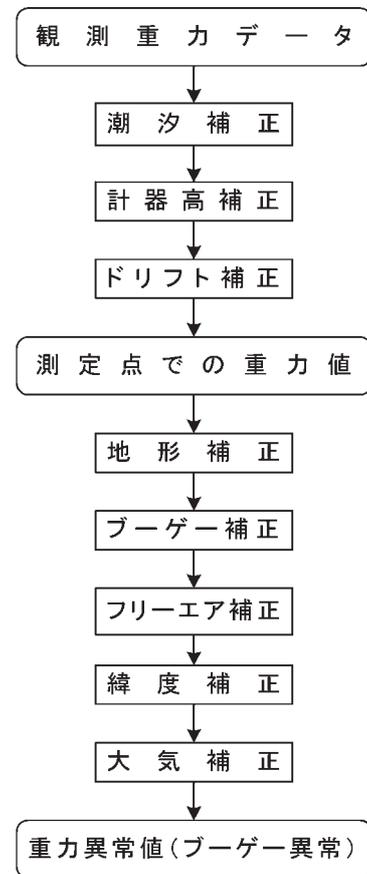


図-7 重力データ処理の流れ

(1) 測定点の重力値の計算

観測重力値には、地球外天体（太陽・月）の引力効果と、各測定点での測定条件の相違（計器高、ドリフト）に起因する重力変化が含まれている。そこで、これらを除去して測定点固有の重力値を決定する。

$$g = G + \Delta G_T + \Delta G_M + V_d \quad (1)$$

ここで、 g ：重力値、 G ：観測重力値、 ΔG_T ：潮汐補正、 ΔG_M ：計器高補正、 V_d ：ドリフト補正、である。

1) 潮汐補正

太陽・月の引力効果が潮汐現象の原因であることは知られている。観測重力値にもこの引力が直接的に影響するため、潮汐項を理論計算により評価・除去する(図-8)。

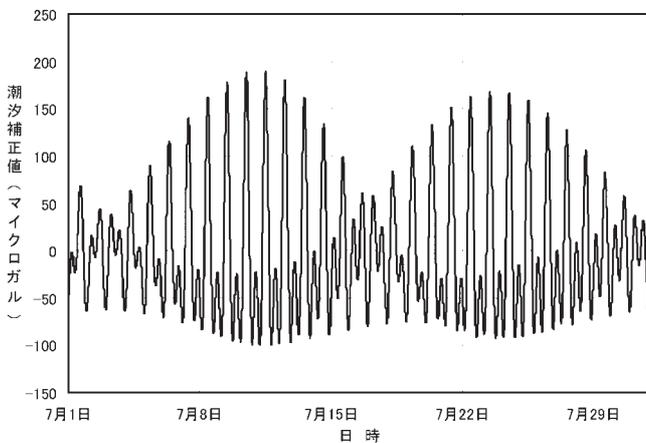


図-8 太陽・月の引力による重力変化(地球潮汐)

2) 計器高補正

地表付近の重力は鉛直勾配(308.6 μ gal/m、下方正)を有する。測定点と機器センサー位置には高度差があるので、鉛直勾配を考慮して測定点上の重力値に補正する。

3) ドリフト補正

センサー材料のクリープ効果により、観測値は時間とともに単調増加する。一定時間後に同一測定点で観測を行う閉環測定により、ドリフト量を評価・除去する。なお本補正は潮汐補正・計器高補正実施後のデータに対して行う。

(2) 重力異常(ブーゲー異常)の計算

標高と水平位置が異なる測定点での重力値には、地形の起伏や重力鉛直勾配などの影響が含まれ、そのままでは地下構造の評価は困難である。そこで、地下密度構造が均質ならば値が一定となる仮想的な共通基準水平面上での重力値に換算して、地下の不均質に起因する重力変化のみを抽出する。この仮想的な基準水平面上での換算重力値をブーゲー異常と呼ぶ(図-9)。なお本探査法を地下構造探査に利

用する場合、ブーゲー異常を重力異常と呼ぶことが多く、本報告でも以降、重力異常と表記することにする。

$$g_B = g + \Delta g_t + \Delta g_B + \Delta g_F + \Delta g_L + \Delta g_A \quad (2)$$

ここで、 g_B ：ブーゲー異常、 Δg_t ：地形補正、 Δg_B ：ブーゲー補正、 Δg_F ：フリーエア補正、 Δg_L ：緯度補正、 Δg_A ：大気補正、である。

1) 地形補正

測定点周辺の地形起伏による引力効果を補正する。

2) ブーゲー補正

測定点と基準水平面との間にある物質の引力を補正する。

3) フリーエア補正

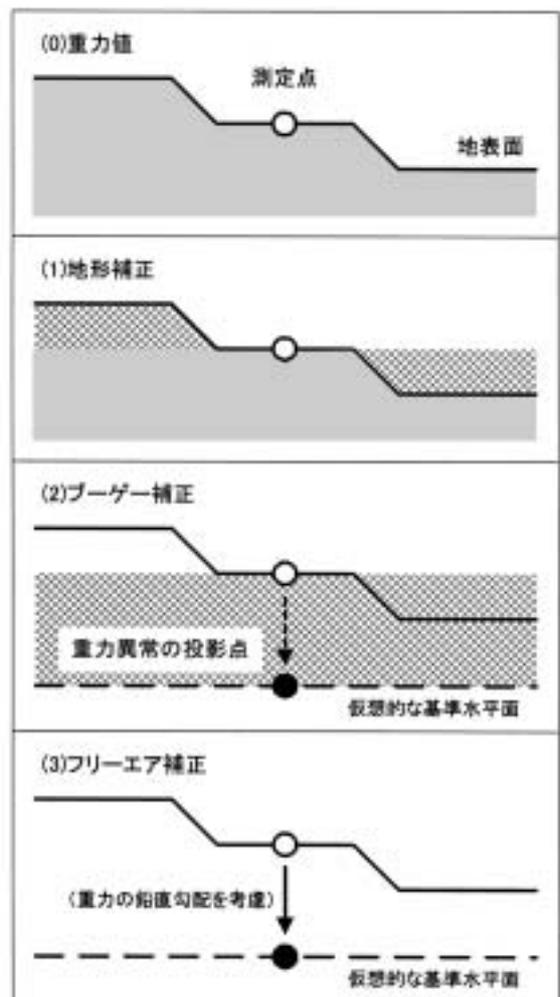
測定点と基準水平面との高度差による重力差を補正する。

4) 緯度補正

測定点の緯度の違いによる重力差を補正する。

5) 大気補正

大気の質量による引力を補正する。



(注)緯度補正・大気補正については省略した。

図-9 重力異常の補正項目の説明

5. 地下構造解析法

重力異常の相対的傾向は地下密度変化に対応するため、重力異常分布から地下構造の定性的な解釈を行うことが可能である。しかし、密度構造の逆解析により具体的に構造を可視化ができれば、他の調査情報との対比が容易になるなど利点があることは明らかである。

2次元または3次元の密度モデルに対する重力値の計算方法は確立している。本研究では、モデル計算と逆解析アルゴリズムを組み合わせ、重力異常値から2次元地下構造を推定するプログラムを開発した。

(1) タルワニ法によるモデル重力計算

座標原点における水平多角形柱(2次元)による重力は次式で与えられる⁴⁾(図-10)。

$$g = 2G\rho \sum_{i=1}^n F_F(x_i, z_i, x_{i+1}, z_{i+1}) \quad (3)$$

$$F_F(x_i, z_i, x_{i+1}, z_{i+1}) = \frac{1}{2} \frac{x_i z_{i+1} - x_{i+1} z_i}{(x_{i+1} - x_i)^2 + (z_{i+1} - z_i)^2} \left\{ (x_{i+1} - x_i) \left(\tan^{-1} \frac{x_{i+1}}{z_{i+1}} - \tan^{-1} \frac{x_i}{z_i} \right) + \frac{z_{i+1} - z_i}{2} \log \frac{x_{i+1}^2 + z_{i+1}^2}{x_i^2 + z_i^2} \right\} \quad (4)$$

ここで、g：水平多角柱による重力値、G：万有引力定数、ρ：密度、n：角柱の頂点数である。また $x_{n+1} = x_1, z_{n+1} = z_1$ 、である。

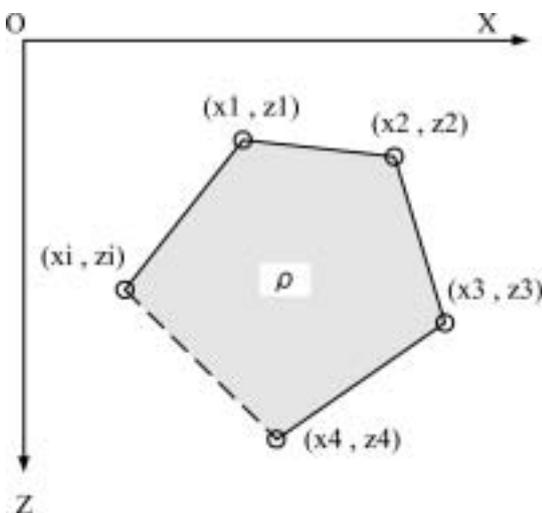


図-10 重力計算のための水平多角形柱モデル

複数の多角柱を用いることにより、地下の密度分布構造(2次元)を表現できる。

(2) 平滑化制約付最小自乗法による逆解析

逆解析では、地下構造モデルから重力異常の理論応答を計算して、実測値との残差が最小となるようにモデルの修正を行う。特殊な場合を除き、モデルと重力異常の関係は非線形であるため、最適モデルは一度の計算では求められず、修正は反復的に実施する(図-11)。

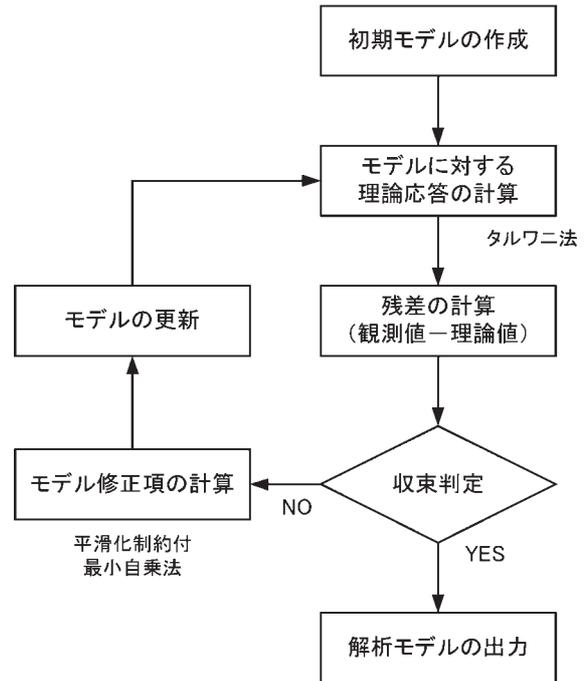


図-11 逆解析の流れ

非線形問題の最適化手法としてはマルカート法があるが、実測値に含まれる誤差の影響により、解析モデルに異常な物性値が現れる、あるいは物性値分布が振動するなどの欠点が生じる場合がある。

ジオトモグラフィなどの逆解析が対象とする弾性波速度・比抵抗などの分布パラメータは、地層・風化・変質の境界、断層などの地質的不連続面を除き、空間的に急変することは少ない。したがって隣接範囲のパラメータ変化が小さいとする平滑化制約条件を与えることが、合理的な解析モデルを得るために有効である⁵⁾。

上記の考え方に従い、平滑化制約条件を付した非線形最小自乗法による逆解析プログラムを開発した。本法による第i回目の逐次モデル修正量は次式で与えられる。

$$\Delta m_i = \left((WA_i)^T WA + \alpha C^T C \right)^{-1} (WA)^T W d_i \quad (5)$$

ここで、W：測定値の重み行列、Ai：(第i回目の)重力値の密度に関する偏微分行列、α：平滑化の重み係数、C：平滑化係数行列、Δmi：(第i回目の)モデル修正量ベクトル、

d_i : (第*i*回目の)重力異常の残差、である。

モデル解析の例を以下に示す。ここでは地層の密度は既知として、2層構造における地層境界深度を未知パラメータとした。ここで平滑化制約条件は相隣の境界深度の変化が小さいものとした。低重力異常データからの逆解析により、基盤の凹形状を良好に再現する解析モデルが得られた(図-12)。

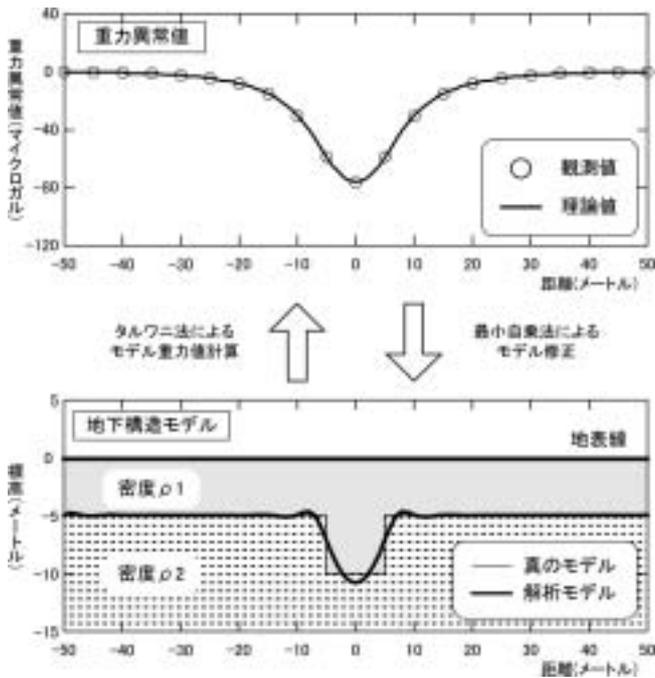


図-12 逆解析の例

6. 調査事例

(1) 活断層調査

活断層調査では、空中写真判読・地表踏査による地形解析が断層の位置・規模の把握の主要な手法として活用されている。しかし、断層変位後に新しい堆積物で覆われた伏在部では断層の把握に限界があり、(浅層)反射法地震探査・比抵抗2次元探査・マイクロ・グラビティ探査などの物理探査による位置情報の補完が断層の連続性追跡やトレンチ箇所を選定に有用である。特に断層変位により上・下盤で基盤深度が異なり、断層面を境として密度構造が急変する場合に、マイクロ・グラビティ探査は有効と考えられる。

跡津川断層は富山県と岐阜県の県境付近を東北東-西南西に走る延長約60km、確実度Iランク、活動度A級とされる活断層である⁶⁾。真川露頭は断層東端部の常願寺川上流の真川沿いで発見された断層露頭である(図-13)。図中左側は基盤の花崗閃緑岩、右側は基盤の上に形成された段丘礫層と湖成堆積物である。基盤である花崗閃緑岩は、断層を挟み約50mの落差を有する。



図-13 真川露頭(富山県現地看板より)

基盤の花崗閃緑岩は、これらの被覆層より高密度と想定される。そこで断層を挟んだ基盤深度変化の検出を目的として、露頭近傍の尾根部でマイクロ・グラビティ探査を実施した。ここで測線の起点側は基盤が浅く、終点側では深くなるのが既知である。

重力異常は距離程60m付近を境界として、起点側(左側)で急激に高くなり、終点側(右側)では変化が乏しくなる傾向を示す(図-14)。地形・ブーゲー補正の際の仮定密度により相対的な重力異常値は若干変化するが、大局的な傾向は変化しない。基盤深度が浅い左側で重力異常は明瞭に大きく、地質構造とおおむね調和的な結果が得られたと判断した。

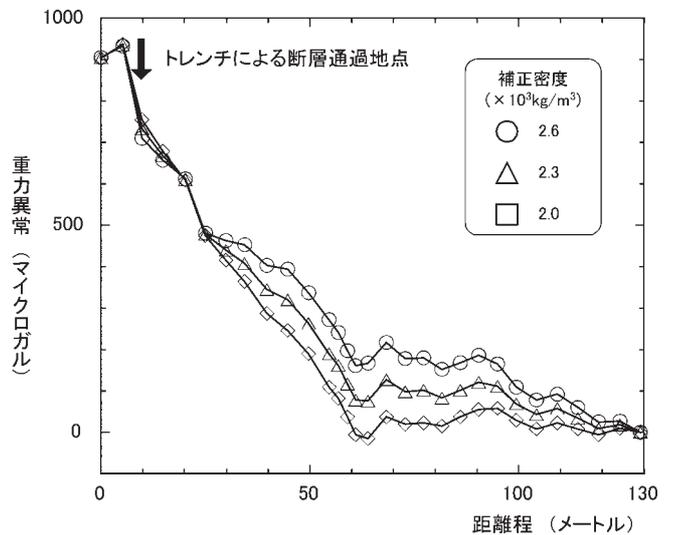


図-14 断層における重力異常

(2) 盛土構造物調査

老朽化した盛土構造物の診断では、盛土材料の性状とともに、施工時期が古く当時の資料が残されていないなどの理由により、基盤形状の調査が必要となる場合がある。このような場合、ボーリング調査は確実だが点情報であるた

め、ボーリングを空間的に補完する効率的な調査法が効果的であり、現在は高密度電気探査法や表面波探査法が利用されている。ここで盛土材料と基礎地盤が密度差を有するならば、基盤深度の変化傾向は重力異常として把握が可能であり、マイクロ・グラビティ探査も有用な調査法であると考えられる。

長野県の戸隠水源は大正時代に建設されたアースダムであり、基礎岩盤は第四紀更新世の火山砕屑物である。十数年前より下流側斜面・法尻付近で湧水が認められ、堤体から漏水の可能性が懸念されたため、ボーリング調査および電気探査(比抵抗映像法)を主体とする堤体調査が実施された。今回、ダム軸に並行する電気探査測線において、マイクロ・グラビティ探査実験を実施した。

重力異常では顕著な低重力異常が数箇所認められた(図-15)。

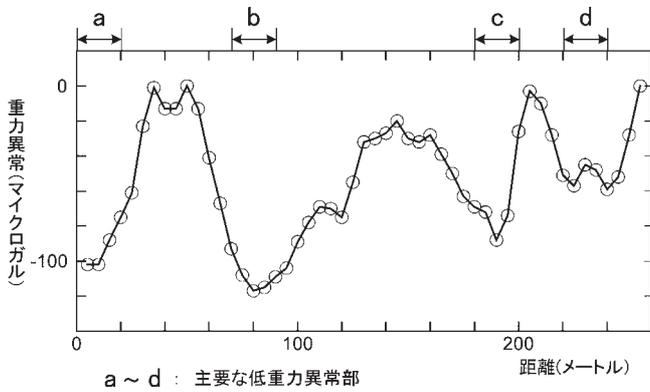


図-15 アースダム上の重力異常分布

一般に盛土構造物上における低重力異常は、基盤凹形状、あるいは盛土・基盤の密度低下・空洞などが想定されるので、健全度評価上は要注意である。低重力異常と基盤の凹形状(旧地形図による沢地形)・湧水地点などとの対応は次の通りである(図-16)。

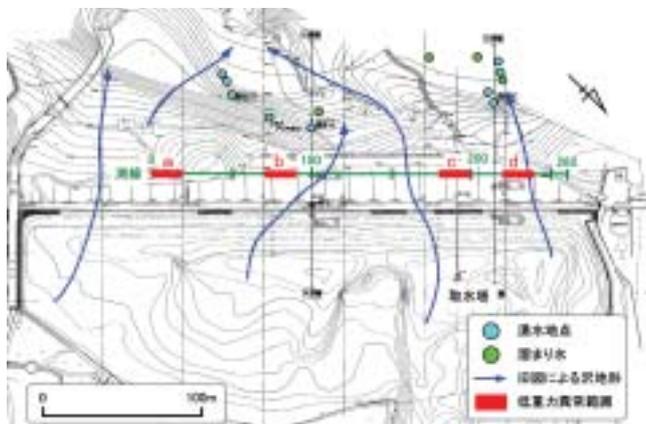


図-16 重力異常と地形・湧水地点の対比

- ① 基盤凹部(旧沢地形)に相当する(異常d)。
- ② 地下空洞(取水塔トンネル)に対応する(異常c)。
- ③ 湧水地点の上流側に位置する(異常b,d)。
- ④ 基盤傾斜部(旧沢地形の斜面部)に相当する(異常a)。

①・④は低重力異常が旧沢地形に対応し、基礎掘削による影響が若干あると想定されるが、基礎地盤形状を反映したと考えられる。②は地下空洞調査への有効性を示すものである。また③は盛土・基礎地盤の透水性に関係した密度変化を示唆するものとして注目される。

さらに重力異常の定量的解釈を行うために、2層構造を仮定した密度構造解析を実施した。解析では密度・基盤深度のいずれかを固定する必要があるが、ここでは密度一定(盛土: $1.7t/m^3$ 、基礎地盤: $2.0t/m^3$ 、密度差: $0.3t/m^3$)を仮定して、基盤深度を変数として扱った(図-17)。

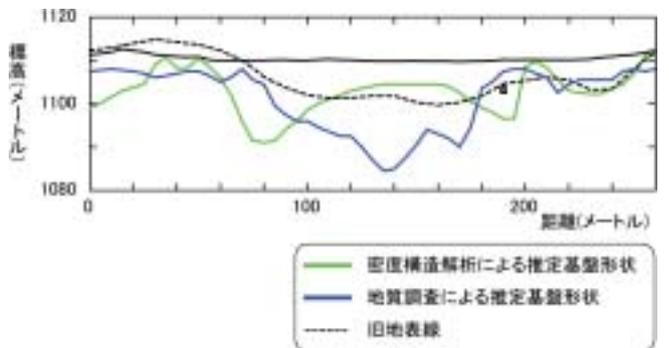


図-17 推定基盤形状の比較

密度構造解析による基盤形状は、地質調査による推定基盤と必ずしも調和しない傾向を示した。この理由として、今回は盛土・基礎地盤の密度を一定として解析したが、実際には密度値自体が空間的に変化した可能性が考えられた。たとえば距離100~180mでは圧密が進み、盛土の密度が仮定よりも高い、あるいは基盤と密度的に一体化しているならば、見かけ上は密度による基盤が浅部に上昇するケースが生じる。また距離80m付近の凹形状は、盛土密度が仮定より低く、解析結果が深度方向に強調されたケースが想定される。このように地盤密度が空間的に変化する場合には、土質試験などデータを反映して、適切な密度分布を仮定した解析モデルを作成する必要がある。

7. 今後の課題

今後は、前述の各種調査対象(地下空洞、埋設廃棄物、浅部基盤、断層)への適用を増やして、対象ごとの本手法の探査能力と検出限界について検討を進める。特に、密度構造解析の精度を改善するため、必要なデータ、および取得方法、解析モデルへの反映方法について検討する。

また、本探査法は面的に測定点を展開することが容易であるので、2次元探査を拡張して、3次元探査の可能性についても検討を進める。

謝辞：本研究を進めるにあたり、国土交通省北陸地方整備局立山砂防工事事務所、長野市水道局には、フィールドの使用に際して快諾頂きました。現地計測・データ処理作業では総合技術開発部地盤耐震グループ、小原大輔技師、海東陽子技師に協力いただいた。なお実験フィールドでの測定準備作業はサン地質株式会社に委託した。ここに記して関係各位に謝意を表します。

参考文献

- 1) 日本充てん協会：空洞調査マニュアル補遺、2002
- 2) H. O. Seigel：A Guide To High Precision Land Gravimeter Surveys, pp. 100, 1995
- 3) 物理探査学会：物理探査適用の手引き、pp.152、2000
- 4) 物理探査学会：図解物理探査、pp.188、1988
- 5) 佐々木裕：比抵抗2次元インバージョンの改良、物理探査、Vol.41、pp.111-115、1988
- 6) 野村誠紀・黒澤範一・渡部文人・右近則男：跡津川断層東端部のトレンチ調査結果、日本地質学会学術講演会論文集、2002