

# マイクログラビティ探査の現状とその利用

野崎 京三

## The Latest Microgravity Survey and its Applications

Kyozo Nozaki

### Abstract

The precision of modern gravimeters, such as Scintrex CG-3M and LaCoste & Romberg meters, is considered to be a few  $\mu$ Gals. Gravity surveys have so far been conducted in a variety of geophysical survey applications for large scale subsurface investigations, such as exploration for resources as petroleum, minerals, and so on. In this sort of gravity survey, let's say an ordinary gravity survey, all of the field planning and data processing are based on the gravity measurements of the order of 1 mGal or 0.1 mGal. On the other hand, as the precision(or resolution) of the gravimeter has increased, microgravity survey, which is based on  $\mu$ Gal-order gravity measurements, has come to be used in various engineering fields with diverse needs. In this paper, the author shows the differences between the microgravity survey and the ordinary gravity survey, presenting some typical examples for detecting stalactite caves, shallow subsurface structures down to about 10m deep, remains, very shallow density anomalies in deformed sedimentary layers, etc., and proposes that microgravity survey method should be utilized more particularly in the field of civil engineering.

### 要 旨

ラコスト重力計やシントレックス重力計に代表される陸上型重力計の測定精度は、再現性で数 $\mu$ Galと考えてよい。このように最近では、重力計の精度や安定性・操作性が向上し、それに応じてニーズも多様化してきたことから、 $\mu$ Galオーダーの重力探査（マイクログラビティ探査）が実施されるようになってきた。一方、重力探査の多くは、通常、1 mGalのオーダー以上の大きさの重力異常を扱っており、重力計のこの2桁ないし3桁の精度的ゆとりが必ずしも十分に活用されているとはいえない現状にある。本報では、1 mGalのオーダー以下の大きさの重力異常を問題とするマイクログラビティ探査を今後、特に土木工学分野などにおいてより積極的に活用してゆくことを提案する。

そのためにまず、マイクログラビティ探査の概要を、これまでの通常の重力探査との対比において説明する。次に、その中で特に重要な役割を演じるフィルター処理について、その実際をフーリエ解析の手法に基づいて述べ、さらに、そのようなフィルター処理の結果得られた重力異常（マイクログラビティ異常）によって検出可能な構造スケールとして1 mオーダーのものが期待できることについて考察する。最後に、数10m以浅の活構造調査・10数m以浅の極浅部地質構造調査・構造スケール数mの遺構調査などの実例を紹介することによって、マイクログラビティ探査の有効性と特徴を実証的に示す。

キーワード：マイクログラビティ探査, 重力異常, 密度構造異常, 重力分布の相似性, フーリエスペクトル, フィルター処理, 検出可能な構造スケール

## 1 はじめに

もし重力が地球上から無くなれば、人類は歩くことも横になることもできないばかりか、地震、火山噴火、台風、地滑り、落石、火砕流、洪水、地盤沈下といった重力の作用の下に起こっているあらゆる地学的現象や災害も起こらなくなるであろう。あるいは、これとは逆に、熱力学的バランスを失った地球はほとんど瞬時にして内部エネルギーを放出し、爆発的に崩壊することになるかも知れない。いずれにせよその結果として、地質工学、地球科学といった学問や技術などの対象そのものが無くなり、それらの必要性や概念すら消え失せ、人類は、生き残ったとしても、完全に為す術を失ってしまうであろう。しかし、良きにつけ悪きにつけ、重力は世界中に充満している。普段はほとんど意識されることもないほど当たり前である反面、必要欠くべからざる存在の例えとして「空気のような存在」という言葉があるが、あるいは、「重力のような存在」という方がより適切かも知れない。

このように、あまりにも馴染み深いはずの重力は、ニュートンの万有引力と地球の自転による遠心力との合力である。この重力（正確には、重力加速度）は、地表付近の標準値として $980\text{Gal}$  ( $=980 \times 10^{-2}\text{m/s}^2$ ) 前後の値をとり、上下および南北に1m移動すれば、それぞれ、約 $300\mu\text{Gal}$ および $1\mu\text{Gal}$ 弱の割合で減少したり増加したりする。重力探査は、実測の重力から正規重力と称する標準的な重力などを除去した「重力異常」と呼ばれる重力の分布を地表付近で詳しく調べることにより、地下の密度構造（正確には、密度構造異常）を推定する一つの物理探査手法である。ここで、「密度構造異常」とは、基準となるある水平成層構造からの実際の地下構造の密度のずれのことである。

重力探査は従来、地球物理や資源探査などで大規模な地下構造探査手法の一つとして利用されている（例えば、Tsuboi et al. (1953), Hagiwara (1967), 加藤 (1980)）。これら通常の重力探査では、 $1\text{mGal}$ あるいは $0.1\text{mGal}$ のオーダーの測定を目的として全ての調査計画・測定作業・データ処理などが行なわれている。これに対して最近では、重力計の測定精度・安定性が向上し、また、シントレックス重力計の登場によって操作性が飛躍的に向上し、それに応じてニーズも多様化してきたことから、 $\mu\text{Gal}$ オーダーの重力探査「マイクログラビティ探査」が土木分野などで実施されるようになってきた。重要構造物の建設が予定されているサイトでの浅部基盤調査、あるいは、廃坑・路面下の空洞などのよう

な社会的に問題となる地下の空洞調査といった工学分野への適用がそれである（例えば、Arzi (1975), Fajkiewicz (1976), 飯田 (1983), Fajkiewicz (1983), Butler (1984), Lyness (1985), 千葉 (1986), 野崎・加藤 (1988), 大下・野崎 (1997)など）。

本報では、マイクログラビティ探査の概要を通常の重力探査との対比において説明し、その特徴や有効性を探査事例を通じて実証的に示す。

なお、マイクログラビティ探査（microgravity survey）は、日本語に訳すれば「微重力探査」、あるいは、「高精度重力探査」とでもいうことになるが、以下では、扱かう重力の大きさが従来に比べてマイクロであるのに加え、調査対象の構造スケールも通常の重力探査のものに比べてマイクロであるという2つの意味を含めて「マイクログラビティ探査」をそのまま用いることにする。

## 2 マイクログラビティ探査の概要

### 2.1 通常の重力探査とマイクログラビティ探査

図-1に、重力異常分布と地下構造との関係を示す。もし下方に金属鉱床のような相対的に高密度の物質が分布していればその個所で高重力異常となり、逆に空洞のような物質の欠損している個所や緩み域のような低密度域が分布していればその個所で低重力異常となる。重力探査で用いるもっとも基本的な性質は、このように非常

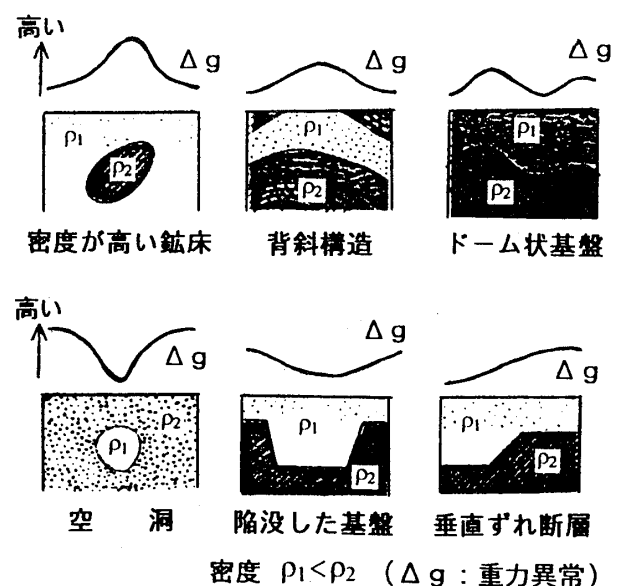


図-1 重力異常分布と地下構造

Fig.1 Gravity anomaly distribution and subsurface structures.

に単純であり、説明するまでもないことではあるが、もう一つ基本的な重力の性質として、「(電場・磁場などと異なり) 重力は如何なる方法でもって遮蔽することができない」というものがある。言い換えれば、重力には、深い構造から浅い構造まですべての密度構造に起因する成分が必ず重ね合わさって含まれていることになる。

図-2に、この状況を単純化した深い基盤の上位堆積層中に浅い空洞がある場合の重力異常分布を示す。

一般に、深い密度構造異常ほど長波長成分の重力異常として現われるため、浅い構造を対象とするマイクログラビティ探査においてはフィルター処理によってトレンド成分や相対的に波長の長い長波長成分をカットして地下構造を推定する必要がある。逆に、深い構造を対象とする通常の重力探査においては短波長成分をカットして地下構造を推定することになるが、短波長成分は一般には振幅が小さいため、必ずしもフィルター処理を施さなくても重力異常分布の本質的な特徴を把握できる場合が多い。このことは、短波長成分、したがって、一般に振幅が小さい重力異常を扱うマイクログラビティ探査においてフィルター処理が不可欠であることと裏腹の関係にある。ただし当然のことではあるが、例えば沖積層が広く分布している場合のように、浅い個所に広範に分布しているような地質構造を対象とする場合には、波長の長い成分として重力異常が現われることに注意を払う必要

単に重力測定の精度や扱う構造スケールだけにあるのではなく、後者のマイクログラビティ探査では、得られた重力異常分布に適切なフィルター処理を施すことが不可欠である点も本質的に重要である。

重力探査、または、重力全般に関わる教科書として、坪井(1979)、加藤(1987)、萩原(1978)などがある。

### 2・2 重力測定

重力測定に用いる重力計には、絶対重力計と相対重力計の2種類がある。

絶対重力計は、物体を自由落下させるなどの方法により、重力の絶対値を測定する器械であり、一方、相対重力計は、スプリングの伸縮を検出することなどにより2点間の重力差を測定する器械である。

重力探査は、重力異常分布から地下の密度構造異常を推定するのが目的であるから、重力の絶対値を知る必要は必ずしもない(重力の絶対値を知るためには、最新のものとして、日本重力基準網1996に関する Yamaguchi et al. (1997)、Nakai et al. (1997)を参照されたい)。現在の重力探査においては、測定精度と可搬性などの理由により、専らシントレックス重力計やラコスト重力計のようなスプリング式重力計(相対重力計、以下では、単に重力計と呼ぶことにする)が用いられている。重力計には、通常、検出部のスプリングの劣化などに起因して測定値が時間と共に単調に変化(通常は増加)する「ドリフト」と呼ばれる現象が伴う。

測定方法としては、通常は、重力測定の基準点を出発して測定点1, 2, 3,... とまわり、再び基準点に戻る「閉環測定法」が採用される。このように基準点で2度測定を行なう理由は、上記のドリフトを評価して補正するためである。その閉塞時間は、通常、2時間から4時間が目安である。特に精度を要する場合には、ドリフトをより正確に把握するために、閉塞時間を短くする、場合によっては、測定点を1, 2, 3,..., 3, 2, 1と往復する「往復測定法」などを採用する。

#### (1) 最近の重力計

写真-1に、現在のところ最も優れた重力計と考えられるシントレックス重力計とラコスト重力計の外観を示す。

ラコスト重力計の重力検出機構は、ユーイング型の長周期上下動地震計とはほぼ同等であり、おもりの釣り合い状態をわざと不安定にし無定位化を図ることによってメカニカルに器械分解能を上げている(無定位型重力計, LaCoste (1934), LaCoste (1935), 志知 (1985)などを参照)。これに対してシントレックス重力計の検出機

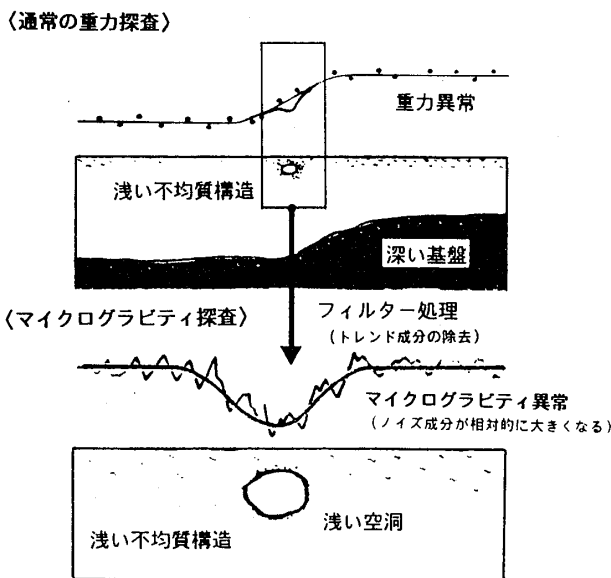
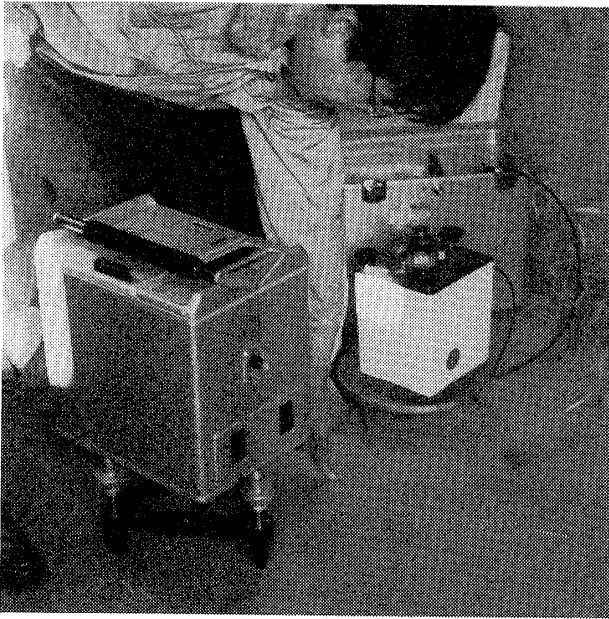


図-2 重力異常分布の概念図  
Fig.2 Concept of gravity anomaly distribution.

がある。

通常の重力探査とマイクログラビティ探査との違いは、



左：シントレックス重力計(CG-3M型) 右：ラコスト重力計(D型)

写真-1 シントレックス重力計とラコスト重力計

Photo.1 Scintrex gravimeter and LaCoste & Romberg gravimeter.

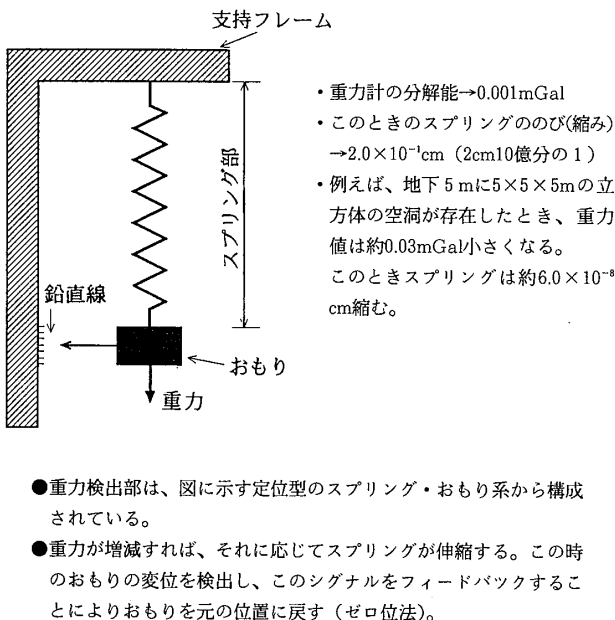


図-3 重力計の測定原理（シントレックス重力計）

Fig.3 Gravity responsive system (Scintrex gravimeter).

構は、図-3に示すように、スプリングとおもりからなる単純なバネ秤り（定位型重力計）であるが、 $1 \mu\text{Gal}$ の器械分解能をもたせるためには $2 \times 10^{-9}\text{cm}$ のおもりの上下動（変位）を検出する必要があり、そのためにマ

イクロプロセッサによって温度や傾斜などに対する極めて精密な制御がなされている（Hugill (1988), Seigel et al. (1993)）。

重力計全般については、例えば、Chapin (1998)などを参照されたい。

## (2) 測定精度

マイクログラビティ探査は、現在のところ、すべて陸上で実施されているとって過言ではないので、ここでは陸上型重力計の測定精度について述べる。

一口に「精度」と言っても、精度には、確度 (accuracy, 2点間の重力差の絶対値の正確さ)、再現性 (repeatability, 繰り返し測定の一貫の程度)、上述の器械分解能 (resolution, 測定値の最小単位) など種々の評価基準がある。

いわゆる測定精度は、再現性で、シントレックス重力計もラコスト重力計も数 $\mu\text{Gal}$ と考えてよい。

確度については、重力値が十分正確に分っている重力計検定線での検定によって、各重力計毎にスプリング定数を決定しなければならない。通常は、誤差が $1 \times 10^{-4}$ のオーダー以下となるように重力計の検定と調整がなされている。器械分解能については、シントレックス重力計の場合、デジタルデータとしてCG-3型 $5 \mu\text{Gal}$ 、CG-3M型 $1 \mu\text{Gal}$ である。ラコスト重力計の場合、読み取りの最小目盛がG型 $10 \mu\text{Gal}$ 、D型 $1 \mu\text{Gal}$ であるが、最近のサーボ制御機能を備えたものは、双方とも $1 \mu\text{Gal}$ である。

## 2・3 データ処理

図-4に、重力データ処理の流れを示す。

その手順は、以下の3つのステップに大別される：

- 1) 野外で得られた重力測定データから各測定点での重力値を求め、
- 2) その重力値に種々の補正を施し重力異常値（ブーゲー異常値）を求める。さらに、これらランダムに分布した測定点毎の重力異常値を補間によって等間隔にグリッドデータ化する。
- 3) この重力異常分布を、ここでは、フーリエ解析の手法を用いたスペクトルの分析・フィルター処理などによってトレンド成分・シグナル成分・ノイズ成分などの各成分に分離する。地下密度構造（密度構造異常）の推定は、シグナル成分を用いて行なう。

1)の重力値を求めるステップについては、これ以上の説明は不要かもしれないが、典型的なマイクログラビティ探査の場合のように $1 \mu\text{Gal}$ に近い精度で重力測定を行なう必要がある場合には、計器高補正において、局

所的な重力鉛直勾配異常に対する補正が必要となること  
がある(野崎ほか(1993))。例えば三脚などを用いてこ  
れを実測することによって、少なくとも通常用いられて  
いる鉛直勾配 $0.3086\text{mGal/m}$ から有意にはずれていな  
いことを確認しておくなどの配慮が必要であろう。

なお、重力鉛直勾配異常とは、通常使われている中緯  
度地方での正規重力場の鉛直勾配 $0.3086\text{mGal/m}$ から  
の実際の重力鉛直勾配のずれのことである。

2)の重力異常値を求める際の各種補正は、標高と水  
平位置の異なる各重力測定点での重力値に地形起伏や重  
力鉛直勾配の影響などの補正を施し、ある共通の基準水  
準面上(等ポテンシャル面上)での重力値に更正するこ

とに相当する。このようにして得られた基準水準面上で  
の重力異常値の分布は、もし地下に密度構造異常がなけ  
れば一定の値をとることになる(これをここでは「基準  
水準面(または、等ポテンシャル面)の等重力面化」と  
呼ぶことにする)。しかし、実際の地下構造には一般に、  
空洞、緩み、基盤の起伏などの密度構造異常があるため、  
基準水準面の等重力面化を行なっても、これらの影響が  
重力異常分布中に高/低重力異常として検出されること  
になる。重力探査の目的は、この重力異常分布から地下  
の密度構造異常を推定することであることを思い起こし  
ておこう。

なお、以上に述べた重力異常は「リアル・ブーゲー異  
常」と呼ばれているものであるが(Tsuboi(1964),  
Tsuboi(1965)),これを求めるには、重力鉛直勾配異  
常(通常使われている $0.3086\text{mGal/m}$ からのずれ)に  
対する補正を施す必要がある。一方、この補正を施さな  
い場合には、厳密には各測定点の重力値をある共通の基  
準水準面に更正したことになっておらず、「現点ブーゲー  
異常」と呼んで区別している(Tsuboi(1964), Tsuboi  
(1965))。地形が平坦な場合には、両者を区別しなく  
てもとくに問題は生じないが、マイクログラビティ探査や  
急峻な山岳地域を含む通常の重力探査においては、重力  
鉛直勾配異常に対する補正が無視できない場合がある。

3)のフィルター処理については、前述したように、  
マイクログラビティ探査にとって特に重要な過程である  
ので、次章でやや詳しく述べることにする。

### 3 解析手法

#### 3.1 期待される重力異常

図-5に、マイクログラビティ探査で取り扱う重力異  
常の目安として、いろいろな規模の空洞モデルによる重  
力異常分布を示す。

空洞上面の深度が各々等しい場合(今の場合は深度 $10\text{m}$ )、当然のことではあるが、空洞の規模が大きくなる  
につれて重力異常の大きさも大きくなる。また、重力異  
常の現われる範囲は、概ね、空洞の中心深度の5倍程度  
であることが分る。例えば、空洞の規模(辺長)が $5\text{m}$   
の場合には重力異常の大きさは約 $60\mu\text{Gal}$ であり、重力  
異常の現われる範囲は約 $60\text{m}$ ( $\approx 12.5\text{m} \times 5$ )である。  
一方、重力測定精度は、前述したように数 $\mu\text{Gal}$ が目  
安としてあるが、実際には、地盤振動などによるノイズ  
が加わるため、検出可能な重力異常の大きさは現場状況  
によって大きく変わる。一応の目安として、空洞の上面  
深度が空洞の規模(辺長または直径)の2倍程度よりも

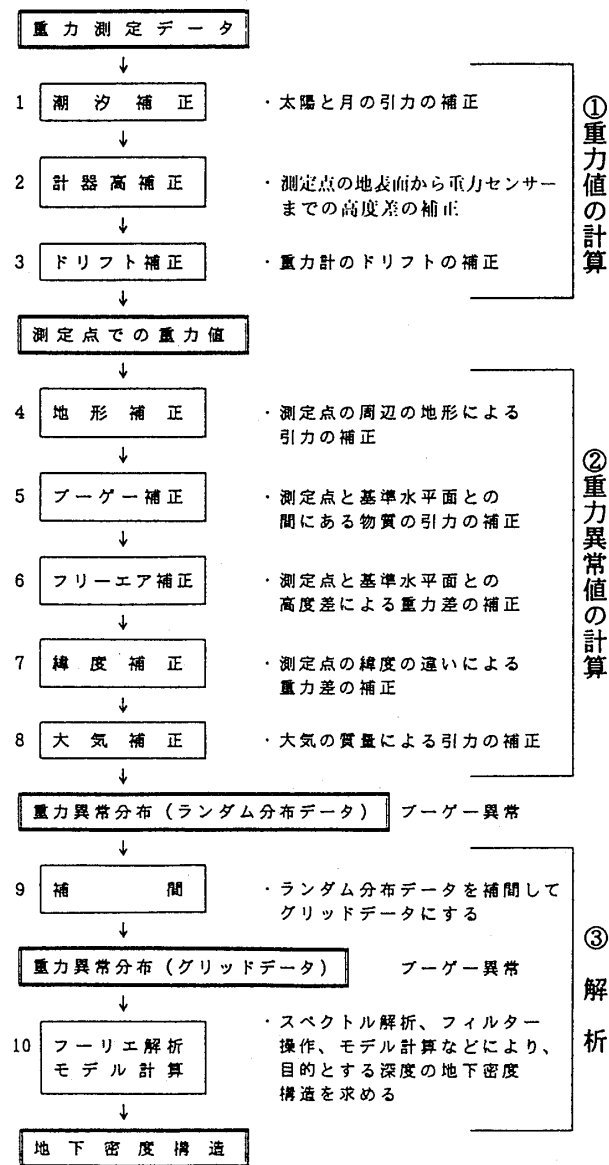


図-4 重力データ処理の流れ  
Fig.4 Flowchart of gravity data processing.

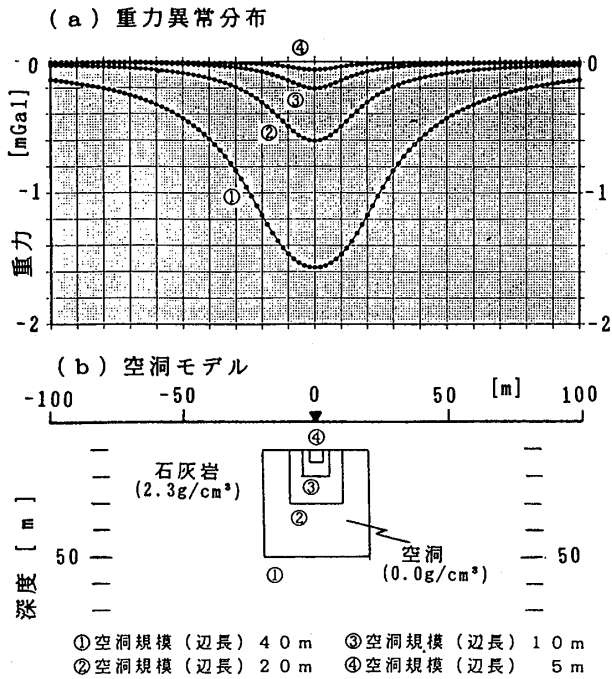


図-5 空洞モデルによる重力異常分布  
Fig. 5 Gravity anomalies due to cave models.

浅ければ重力異常として検出が可能であるといえよう。また、そのためには、重力異常の現われる範囲の中になくとも5点程度の重力測定点を配置する必要がある。なお、ここで示した例は、構造スケールを具体的に与えたモデルについてのものであるが、このモデル構造と重力異常分布との対応関係は、後述の重力分布の相似性(4・1節)によって、座標のスケール変換だけで任意の構造スケールのものに汎用的に利用できる。

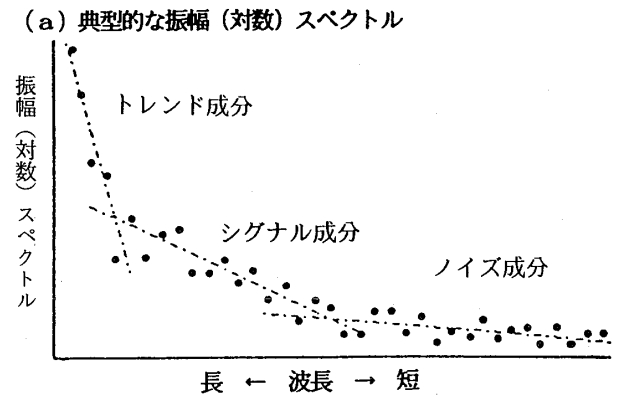
### 3・2 重力異常の検出

#### (1) フィルター処理

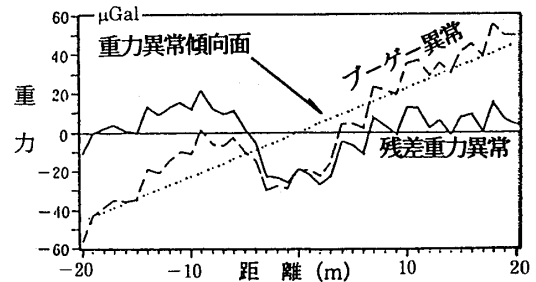
重力異常を検出するためのフィルター処理(解析)は、マイクログラビティ探査にとって特に重要な過程である。加藤(1987)は、このデータ処理について、フーリエ解析に基づく2次元フィルターの理論として体系的にまとめているので、詳細については同書を参照されたい。重力異常の検出には、まず、図-6(a)に示すような元の重力異常分布(ブーゲー異常分布)のスペクトルの分析を行ない、各スペクトル成分をトレンド成分・シグナル成分・ノイズ成分などにグループ分けする。トレンド成分は、探査深度よりも深い地下構造などに起因する波長の長い成分であり、逆に、ノイズ成分は、測定誤差や地表付近の不均質な構造などに起因する波長の短い成分である。重力異常の検出は、元のフーリエスペクトルからトレンド成分やノイズ成分をフィルター処理によって除

去し、目的とするシグナル成分を抽出することに相当する。図-6(b)の重力異常傾向面の除去はトレンド成分を除去することに対応し、その残差重力異常分布から波長の短いノイズ成分を除去することによって、図-6(c)のフィルター処理後の重力異常分布が得られる。

このようなフィルター処理を施すことによってはじめ、元の重力異常分布では必ずしも明瞭ではなかった地下浅部の密度構造異常(空洞等)による重力異常が抽出される。さらに、このフィルター処理後の重力異常分布をもとに、後述する下方接続処理や微分処理などを施すことにより、必要に応じて解析の分解能力を高めること



#### (b) 重力異常傾向の除去



#### (c) フィルター処理後の重力異常分布

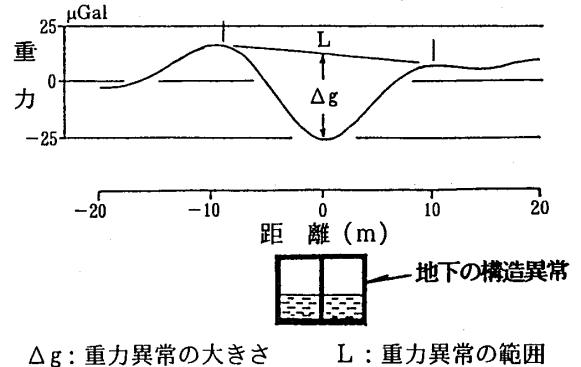


図-6 重力異常の検出  
Fig. 6 Detection of microgravity anomalies.

もできる。地下構造の推定は、これらフィルター処理後のシグナル成分重力分布に基づいて、モデル計算の結果や他の手法による調査結果などとも合わせて行なう。

重力分布は、以上のような1次元データばかりではなく、むしろ通常は水平座標 $x, y$ で定義された2次元データである。以下に2次元データのフィルター処理例を示す前に、その数学的側面の要点について触れることにする。

物質の外部の空間では、重力はラプラスの方程式を満たす。今、重力分布を $g(x, y, z)$ とすると、ラプラスの方程式

$$(\partial^2 g / \partial x^2 + \partial^2 g / \partial y^2 + \partial^2 g / \partial z^2) = 0$$

の $x, y, z$ 座標系 ( $z$ :鉛直方向の座標)での一般解は、 $a_{mn}, b_{mn}, c_{mn}, d_{mn}$ をフーリエ係数として、

$$g(x, y, z) = \sum_m \sum_n [a_{mn} \cos(mx) \cos(ny) + b_{mn} \sin(mx) \cos(ny) + c_{mn} \cos(mx) \sin(ny) + d_{mn} \sin(mx) \sin(ny)] \exp[-p_{mn}(z-z_0)]$$

の形をしている。ここで、 $m, n$ は波数、 $z_0$ は、ある特定の基準水準面の標高(通常は0m)である。 $p_{mn}$ は合成波数と呼ばれ、 $p_{mn} = (m^2 + n^2)^{1/2}$ で定義される。

$g(x, y, z)$ は、上式から容易に分かるように、例えば、 $z = z_0$ で境界条件(重力異常分布)を与えれば2次元フーリエ係数 $a_{mn}, b_{mn}, c_{mn}, d_{mn}$ が具体的に決まる。したがって、任意の位置 $x, y, z$ で任意の方向に、何回でも微分積分ができ、また、任意の高さ(水準面)での重力異常分布の計算(上方接続, 下方接続)や鉛直微分などいろいろなフィルター操作ができることが分かる。

その波数スペクトル $G_{mn}$ は、

$$G_{mn} = [(a_{mn} - d_{mn}) + i(b_{mn} + c_{mn})] \exp[-p_{mn}(z-z_0)],$$

振幅スペクトル $|G_{mn}|$ は、

$$|G_{mn}| = [(a_{mn} - d_{mn})^2 + (b_{mn} + c_{mn})^2]^{1/2} \exp[-p_{mn}(z-z_0)]$$

で与えられる。 $z$ は、いまの場合定数である。

図-7(a)に、以上の関係式を用いて描いた2次元フーリエスペクトル(振幅(対数)スペクトル)の例を示す。なお、重力分布のような空間データの場合には、解析範囲の境界付近でのGibbsの現象を避けることなどのために、通常はcosine展開を行う。cosine展開では、位相スペクトルは0または $\pi$ のどちらかであり対応するフーリエ係数の符号が変わるだけであるので、振幅スペクトルのみを考慮すれば十分である。

最適フィルター特性の選定は、2次元フーリエスペクトルが方向 $x, y$ によらず等方的であるとみなせることを確認した上で、図-7(b)に示した合成波数-振幅(対数)スペクトル図を描き、そのスペクトルの分布状況(特に、スペクトル分布の包絡線の勾配)を分析して行う。ここからは、前述した1次元データの場合(図-6)と同様な考え方で最適のフィルター特性を選定する。 $S/N$ 比が1に近く、シグナル成分とノイズ成分との境界(カット・オフ波数/カット・オフ波長の位置)が不明瞭な場合には、ノイズ・アナリシスの方法によって最適フィルター特性を決めることができる場合がある(加藤・野崎(1988), 野崎・加藤(1988))。

図-8は、このようにして得られたフィルター処理後の重力分布の例である。元の重力異常分布から、相対的に波長が非常に長いトレンド成分と非常に短いノイズ成分が除去され、目的とするシグナル成分が抽出されている様子が一目瞭然であろう。この際、ノイズ成分の大きさによってノイズレベルの評価ができることにも注意しておこう。

なお、フーリエ級数展開は、直交関数展開の一種であるから、フィルター処理によって各波長成分に位相ずれが生じないこと、および、各波長成分/各波数成分は各々が元の重力異常分布の最小2乗法による近似解になっていること、ならびに、トレンド成分・シグナル成分・ノイズ成分の各成分をたし合わせれば厳密に元の重力異常分布に一致することは、フーリエ解析に基づくフィルター処理の利点としていうまでもないことである。

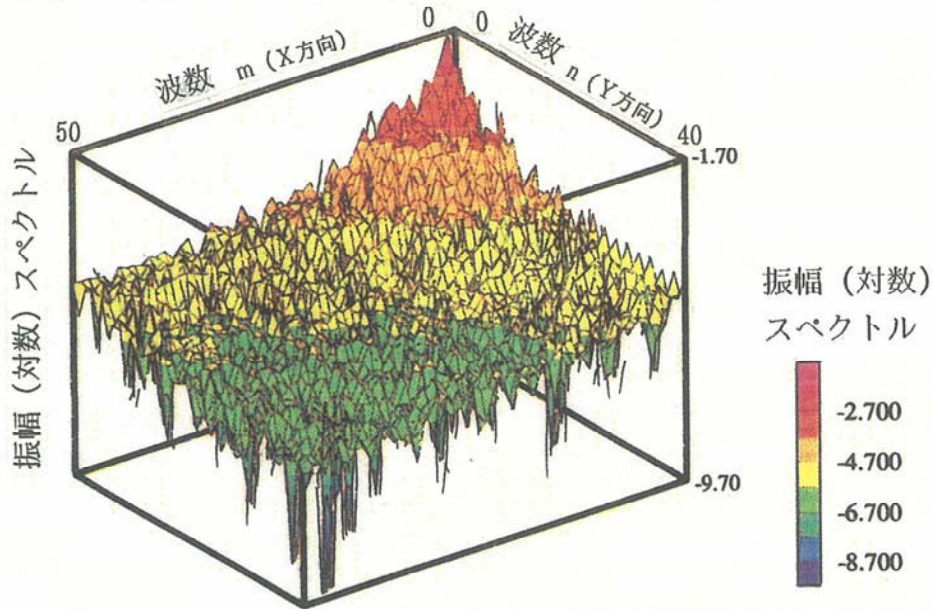
## (2) 分解能力の向上

1次元データの場合と同様に、重力分布の分解能力を向上させてより細かな地下構造に起因する重力の成分(短波長成分)を強調するための方法として、例えば、図-9に示した鉛直微分や下方接続などがある。

両者の違いを、細かな文字で書かれた文献を読む場合に例えていえば、前者(鉛直微分)は、目の位置を変えずに虫眼鏡で文字を拡大することに相当し、後者(下方接続)は、虫眼鏡を用いずに目を直接近づけることによって文字を識別することに相当する。したがって、いずれ

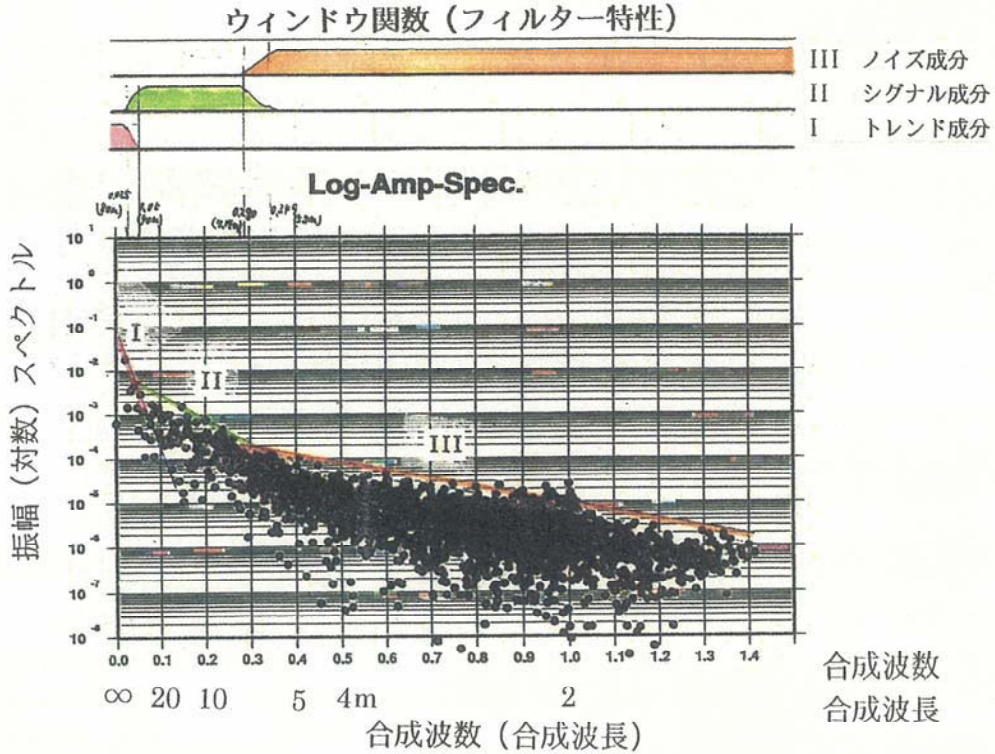


(a) 2次元フーリエスペクトル



重力異常分布のフーリエスペクトルである。  
(cosine 展開)

(b) 合成波数-スペクトル図



・合成波数は、1対1波長あたりの波数で表示している。この例の1対1波長は2mである。

図-7 最適フィルター特性の選定

Fig.7 Determination of the optimum filter characteristics.



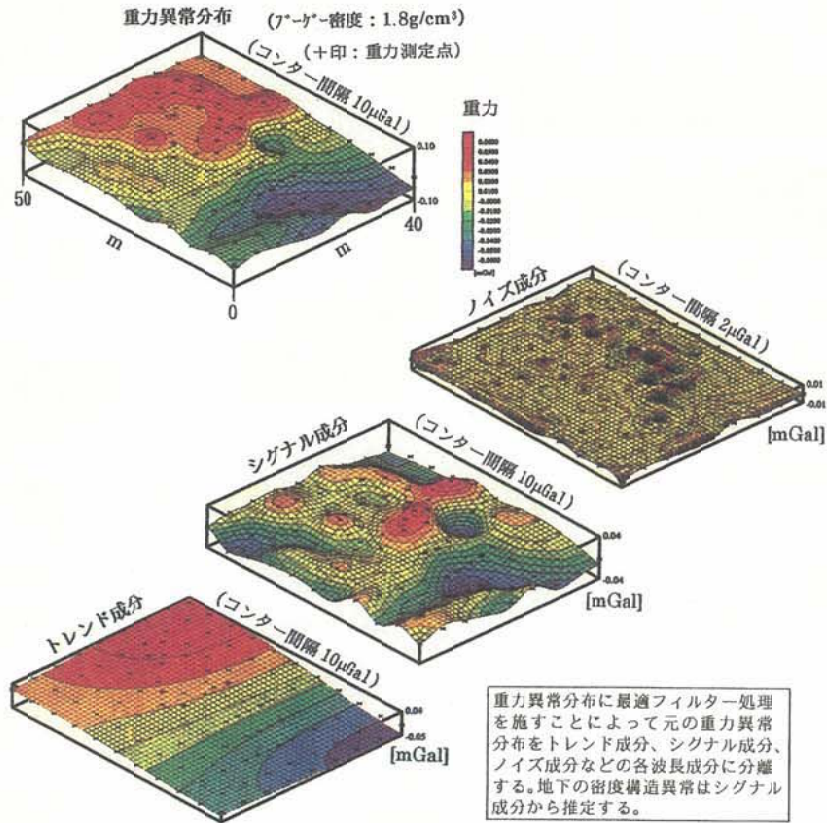
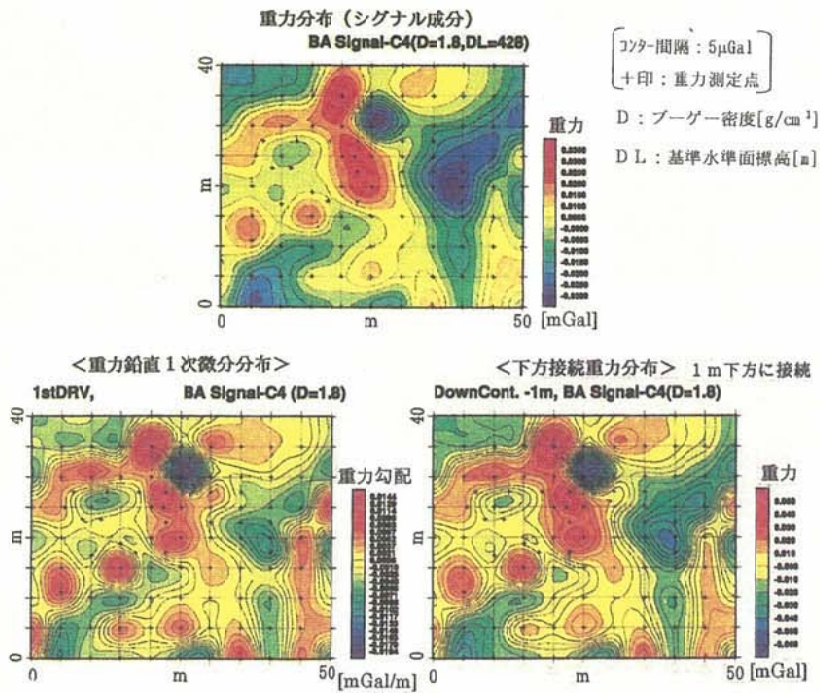


図-8 フィルター処理後の重力分布  
Fig.8 Gravity distributions after filter processing.



重力分布の分解能力を向上させて、細かな地下構造に起因する重力の成分 (短波長成分) を強調するための方法としては、例えば、①鉛直1次微分/鉛直2次微分や②下方接続などがある。両者とも、元の重力分布から計算によって求めることができる。

図-9 重力分布の分解能力の向上  
Fig.9 Enhancement of resolution of gravity distribution.

の場合にも、より浅い地下構造に対応するより波長の短い成分が強調されて見えてくることになる。

#### 4 マイクログラビティ異常によって検出可能な構造スケール

前章では、フーリエ解析の手法に基づくフィルター処理によって、対象となる地下の密度構造異常に起因する重力異常を如何に検出するかについて、その概要を示した。それでは、その密度構造異常のスケールはどの程度のもので可能なのであろうか？ 本章では、この点について考察する。

通常の重力探査結果が空間スケールで10km程度以上の規模の地質構造と非常によく対応を示すことは、これまでの多数の研究者による精力的な研究と労力によって実証されてきた事実である。その反面、数 $\mu$ Galという陸上型重力計の測定精度（または、測定分解能）を地下構造調査にフルに活用する観点からは、必ずしも十分な努力が払われてきたとはいえないのが実状であろう。例えば、断層の極近傍における数10m～数m以浅の密度変化や沖積層と洪積層との境界面形状といった極浅部の構造調査への重力探査（マイクログラビティ探査）の適用性を検討することは、今後、より積極的になされるべき試みのひとつであるといえよう。

そこで以下に、重力計の精度（数 $\mu$ Gal）をフルに生かせばどの程度の空間スケールの密度構造異常を重力異常として検出することが可能か、という問題について若干の考察を行なう。

##### 4・1 重力分布の相似性

重力異常と密度構造異常との関係式を無次元化し、その相似性を利用して吟味するのが本来であるが、ここでは、ごく簡単な現象論的考察（野崎ほか（1996））に留めておくことにする。

今、調査範囲の代表的長さのオーダーをL、その範囲に現われる卓越した波長の重力異常の大きさを $\Delta g$ とすると、経験則として、両者の間に概ね

$$L : 1000\text{km}, 100\text{km}, 10\text{km}$$

$$\Delta g : 100\text{mGal}, 10\text{mGal}, 1\text{mGal}$$

の対応関係があることが知られている。このことは、重力異常をもたらす地下構造を考えるとよく理解できる。この対応関係は、経験的に $\Delta g \leq 1\text{mGal}$ においても成り立つと推定される。何故なら、簡単な次元解析的考察により、密度差が一定ならば、

$$\Delta g \propto L$$

という関係があり、この対応関係（ここでは、重力分布の相似性、と呼ぶことにする）はスケールの絶対値によらないからである（図-10参照）。

重力分布の相似性を言葉で表わすと以下のようなになる。

重力分布の相似性（定義）：密度差が一定とする場合、地下構造が幾何学的に相似ならば、重力分布も幾何学的に相似となる（逆は必ずしも真ならず）。

ここで、「密度差が一定」という仮定は、構造スケールがグローバルな場合（10<sup>4</sup>kmのオーダー）から路面下の空洞／緩みの場合（1mのオーダー）までおおよそ7桁にわたり変化するのに対し、密度差の方は、マントル・コア境界や石灰岩中の鍾乳洞のような場合（高々数g/cm<sup>3</sup>）を最大に、多くの場合は0.1g/cm<sup>3</sup>のオーダーであることを考慮すれば、概ね妥当であるとみなしてよいであろう。

##### 4・2 構造スケールと重力異常の大きさ

上述の重力分布の相似性より、

$$\Delta g : 1\mu\text{Gal} \text{ に対して } L : 10\text{m}$$

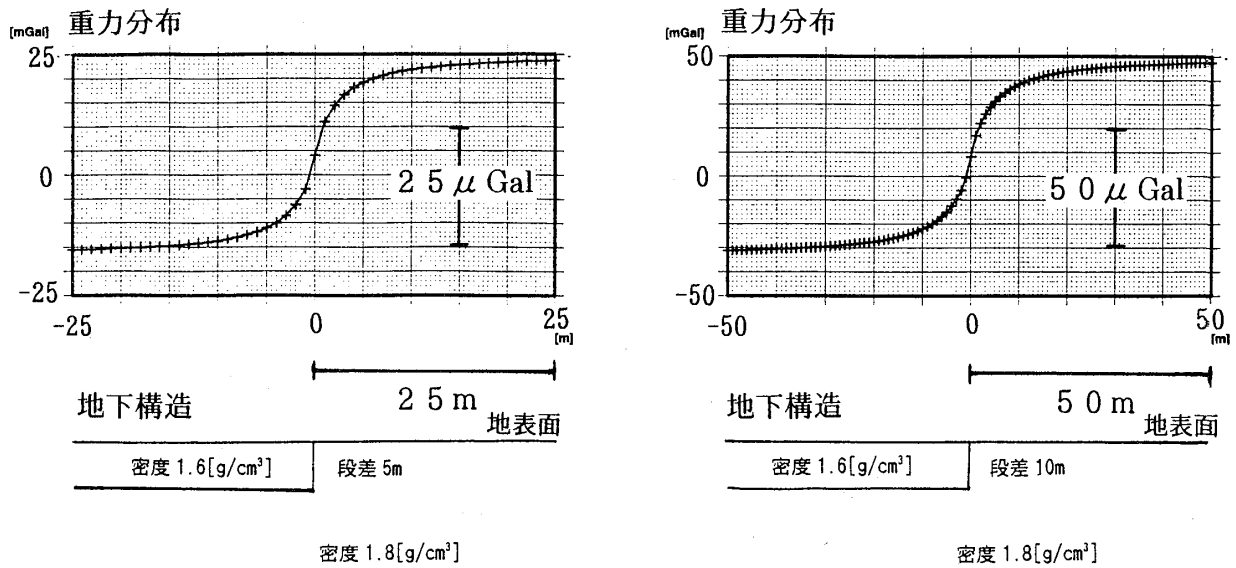
と推定される。また、経験的に、Lに対する探査深度のスケールのオーダーDは、

$$D \approx L/10$$

であることが知られているから、数 $\mu$ Gal（重力計の測定精度）で検出可能な構造スケールとして、数m程度のものが期待される。

以上より、ラコスト重力計やシントレックス重力計に代表される陸上型重力計（測定精度：数 $\mu$ Gal）で測定して得られた重力異常（マイクログラビティ異常）によって検出可能な構造スケールは、1mのオーダーであるといえよう。それに伴い、マイクログラビティ探査によってこのようなスケールの密度構造異常に起因する重力異常を有意に検出するためには、測定点間隔は1m前後であることが必要である（3・1節を参照）。

以上を要約して、構造スケールと重力異常の大きさとの関係を図-11に示す。両者の関係は、図中に示した2本の直線で挟まれた帯状の範囲に沿ってほぼ直線的な関係にあるといえる。マイクログラビティ探査の対象は、構造スケール、あるいは、探査範囲の拡がりで数mから数km程度まで、重力異常の大きさで数 $\mu$ Galから数mGal程度までというのが一つの目安となろう。同図にお



**重力分布の相似性：** 地下構造が幾何学的に相似ならば重力分布も幾何学的に相似となる。  
 (ただし、密度差は一定とする)

上のモデル計算結果からも明らかのように、左側の図は右側の図に対して、構造スケールが2分の1、縮尺が地下構造・重力分布とも2倍になっている。したがって、左右の重力分布図は合同となる(厳密に重ねることができる)。

図-10 重力分布の相似性  
 Fig.10 An example of similarity law of gravity distribution.

いて、少し余談ではあるが、人間の加速度計としての分解能は高々数Galといわれている。

5 探査対象

前章では、マイクロ重力探査の対象となりうる構造スケールについて考察した。ここでは、もう少し具体的な対象としてどういうものがあるかについて、これまでの実績に基づいて考えてみる。

重力探査の利用法としては、重力の空間変化(重力異常分布)を利用して地下の密度構造異常を推定するものと、重力の経時変化を利用して地下の物質移動の状況を推定するものとの2つに大別される。

表-1に、重力探査の適用範囲を要約して示す。

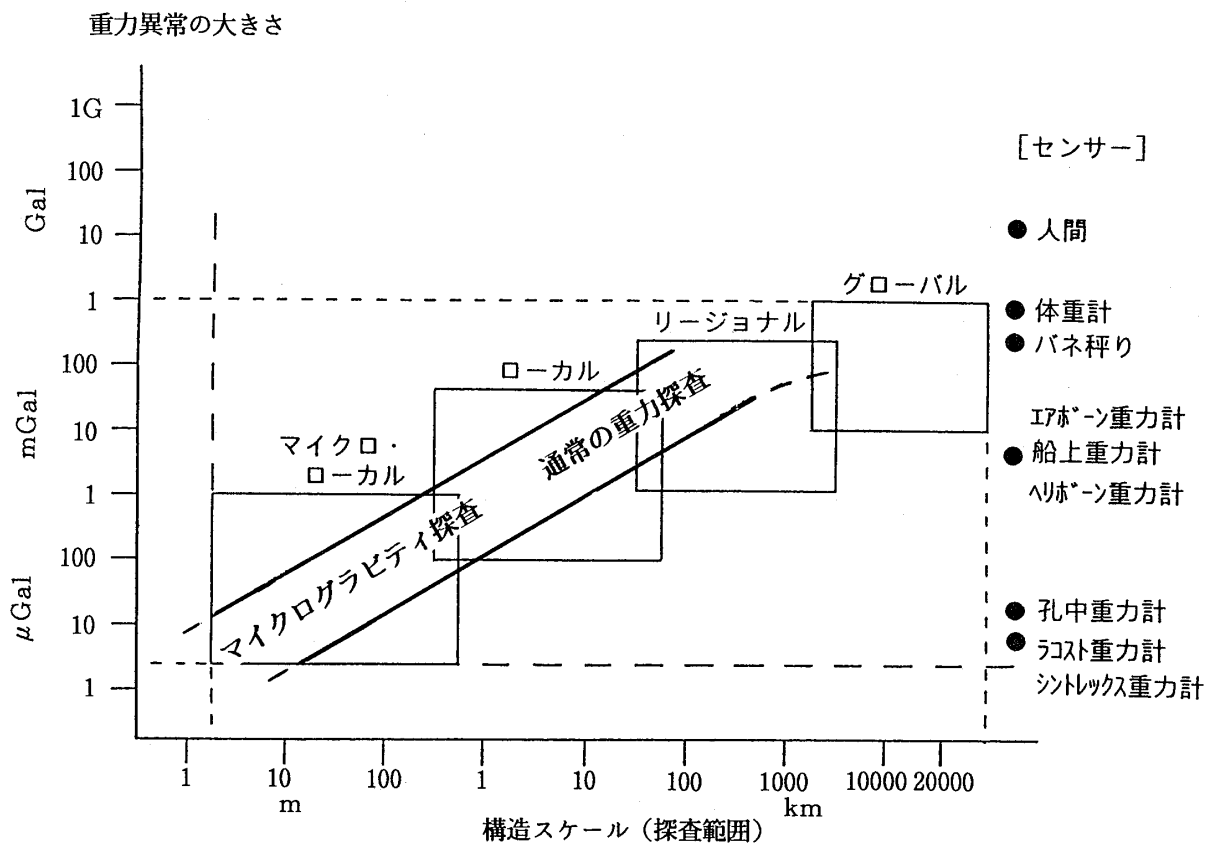
5・1 構造異常の検出

マイクロ重力探査の対象としては、

- 1) 断層(特に、市街地などでの活断層調査)
- 2) 地質構造(洪積層沖積層境界、埋没谷など)
- 3) 孤立した構造異常(空洞、緩み、遺跡など)

の3つでほとんどすべてが尽くされるといえる。しかし、大切なことは、これらの探査対象を各関連分野のニーズや探査目的に結びつけてマイクロ重力探査をうまく利用することであろう。そのためには、以下のような長所、短所を考慮した上で、他の調査手法との組み合わせによる複合調査が重要である：

- (長所)・面的な調査に適しており、広範な調査が比較的手軽にできる。
- ・市街地での調査が可能であり、交通振動、電気的磁気的ノイズ、用地問題等による制約を比較的受けにくい。
- ・調査対象となりうる構造スケールのレンジが広く、深い大規模構造から浅部の構造異常まで探査可能である。
- ・重力計と作業員1名~3名で探査ができ、機動性に優れている。
- (短所)・地下構造の分解能が反射法地震探査や電気探査などに比べてやや劣る。
- ・重力異常分布だけからは、地下の密度構造異常が一意的には決まらない。



シントレックス重力計やラコスト重力計の測定精度は、再現性で数  $\mu\text{Gal}$  である。上図より、マイクログラビティ異常によって検出可能な構造スケールは、概ね、1 m のオーダーであることが期待される。

図-11 構造スケールと重力異常の大きさ

Fig.11 Relation between the structure scale and the amplitude of gravity anomalies.

## 5・2 経時変化の検出

時間変化を捉えるという意味で比較的最近利用されている調査として、

1) 地盤改良効果の判定 (グラウト, 締め固め前後) などが挙げられる。ただし, 調査内容としては, 施工前後に各1回ずつ構造調査を実施して両者を比較するものである。その他, 地下での質量の移動に伴う重力変化を捉えるという観点から、

2) 地熱開発 (地熱循環水のモニター等) 例えば, 石戸ほか (1992), 江原ほか (1994)

3) 火山噴火予知 (マグマの移動, 地殻変動のモニター等) 例えば, Rymer (1995)

などが, 定点での連続観測, および, 繰り返し測定として実施されている。

## 6 探査事例

前章では, マイクログラビティ探査の対象について, 地下の密度構造異常の検出, および, 重力の経時変化の検出の2つの観点からその現状を説明した。本章では, これらの探査対象について, 具体的な探査事例を紹介することにより, マイクログラビティ探査の有効性/適用性を実証的に示すことにする。

### 6・1 断層調査

ここでは, 通常の重力探査 (広域重力探査) からマイクログラビティ探査までの実例3題を断層調査を例にとって紹介することによってフィルター処理の重要性も合わせて示す。

表-1 重力探査の適用範囲  
Table 1 Applications of gravity survey.

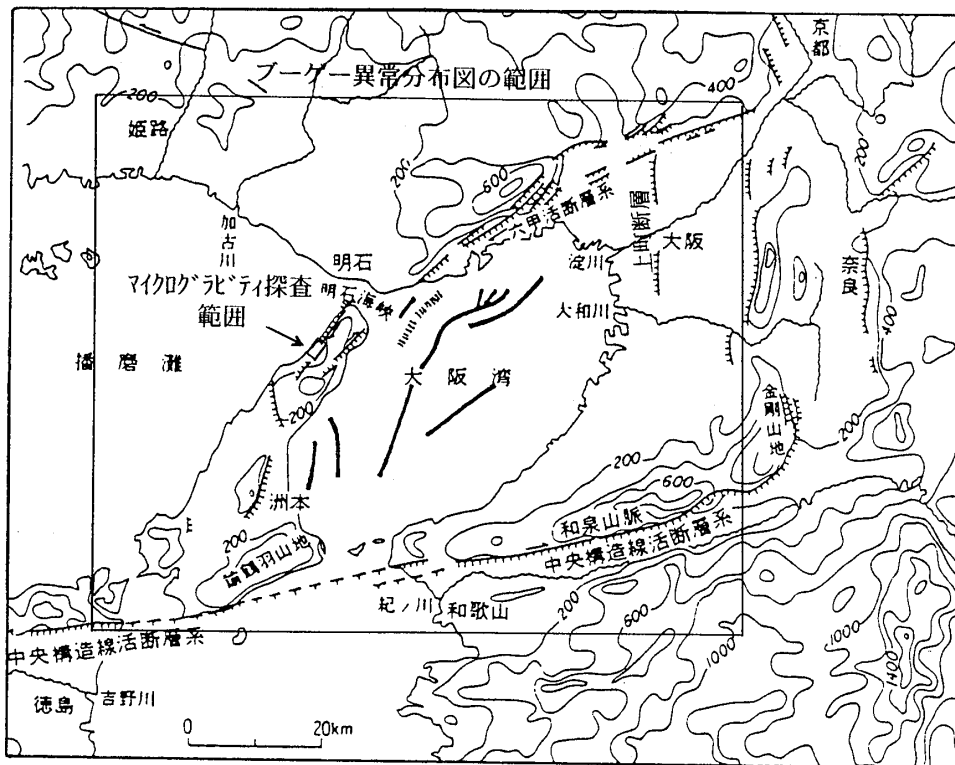
	対象及びその概念図	関連分野ニーズ	重力異常の大きさ
通常の重力探査	<p>大規模な構造調査 ・ 基盤構造調査</p> <p>・ 断層等を含む地下構造調査</p> <p>1 km オーダー</p>	放射性廃棄物処分 温泉 地熱エネルギー 地震防災 (重力基盤) 地震予知 (重力異常分布) 等	数 mGal 以上
マイクログラビティ探査	<p>浅部の小規模な構造の調査 ・ 浅部基盤構造調査</p> <p>・ 断層・破碎帯の調査</p> <p>・ 空洞・埋設物調査</p>	<p>〈構造異常の検出〉</p> 土木調査分野 ダム トンネル 都市基盤 原発サイト 遺跡・埋設物 斜面切盛の旧地形 廃坑 等	標高差1mに対する補正 約 300 $\mu$ gal 重力潮汐 200 $\mu$ gal 程度 繰り返し測定における標準偏差 数 $\mu$ gal
		<p>〈経時変化〉</p> (重力変化の検出) グラウト効果 地盤改良効果 火山噴火予知 地震予知 その他	測定方法、データ処理、解析方法の工夫 数 mGal 以下 一般には 数 $\mu$ Gal ~ 数 100 $\mu$ Gal 重力計の計測精度の限界 (器械分解能 1 $\mu$ Gal)

(1) 広域探査例

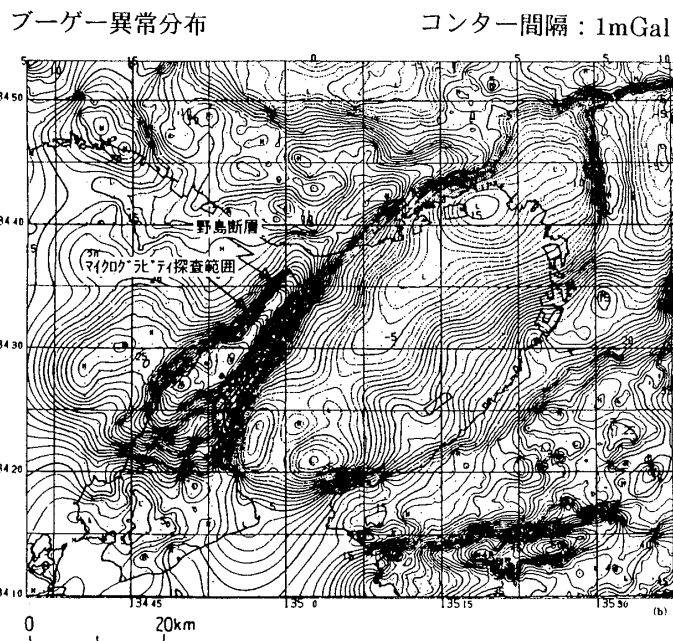
図-12に、野島断層周辺の広域重力異常分布の例を示す(駒澤ほか(1996))。

大阪湾を中心とする約100km四方の範囲におけるコンター間隔1 mGalのブーゲー異常分布図中には、数10

mGalの振幅で高/低重力異常域が分布しており、特に、図中に見られる重力急変帯(コンターの密な部分)は、六甲活断層系、有馬高槻構造線、上町断層、あるいは、和泉山脈の南側を通る中央構造線との顕著な対応関係が認められる。また、淡路島においては、その北西側、お



大阪湾周辺の活断層（岡田，1995による）  
 水野ほか（1990）に中央構造線部分を追加し，海上保安庁水路部が探査した大阪湾内の海底活断層を記入した。



大阪湾周辺のブーゲー異常分布（ブーゲー密度： $2.5\text{g}/\text{cm}^3$ ）  
 駒澤他（1996）に，野鳥断層とマイクログラビティ探査範囲を記入した。

図-12 野鳥断層周辺の広域重力異常分布  
 Fig.12 An example of regional gravity anomaly distribution around the Nojima Fault.



および、南東側を限る南西-北東方向の非常に顕著な重力急変帯が存在し、淡路島北部において両者はそれぞれ野島断層、および、楠本断層へと連続し、さらに、北東の六甲活断層系へとつながっている。全体として、大阪湾を取り囲む形で、主要な活断層と重力急変帯とが非常によく対応していることが分る。また、大阪湾内においては、海底活断層によって両側を限られる低重力異常帯が顕著にみとめられる。

一方、もう少し狭い範囲の空間スケールではどうであろうか。例として、図-12中に示したマイクロ重力探査範囲(数km四方)について見てみると、重力異常値(ブーゲー異常値)は、北西の瀬戸内海(播磨灘)に向けて、約10mGal/kmの勾配で急激にはあるがトレンドとして単調に減少しているだけであり、この範囲の地下構造を議論するにはまったく不十分である。そこで、次節にこの範囲において実施したマイクロ重力探査の例を示す。

#### (2) マイクロ重力探査例(やや広域探査例)

この例は、1995年1月17日未明に発生した兵庫県南部地震によって生じた地震断層が堆積層を切断する形で平野部に現われている野島断層南西端部1500m×2700mの範囲(小倉地区~富島地区)において実施したマイクロ重力探査の例である(野崎ほか(1996))。地形補正は、上記の探査範囲を中心とする4km×5.7kmの範囲において、25m間隔の地形グリッドデータを用いて行なった。得られたブーゲー異常分布(ブーゲー密度:2.4g/cm<sup>3</sup>)は、図-13(A)に示すように、瀬戸内海側に向けて約10mGal/kmの勾配で急激に減少している。この勾配は、当然のことながら、前述の広域探査のもの(図-12)とよく一致している。

データ処理としては、図-13(A)に示すように、まず得られたブーゲー異常分布からトレンド成分を除去して残差重力分布を求め、この残差重力分布にフーリエスペクトルの分析に基づくフィルター処理等を施し、長波長成分・短波長成分・ノイズ成分に分離した。その結果、以下のことが明らかとなった(図-13(B)):

1) 波長約800mから3000mの長波長成分としての、探査範囲全体の重力基盤(花崗岩の上面相当)の形状(図-13(B)(a))。

この長波長成分では、重力急変帯の走向と分岐断層(花崗岩と大阪層群または神戸層群との地質境界)の走向とが非常に一致を示している反面、地震断層と船底型をした重力コンターの谷筋とは斜交していることが認められる。重力異常の大きさは、±1.5mGal程度である。

2) 波長約200mから800mの短波長成分としての、浅部(基盤の上位層中)の密度構造を反映していると考えられる高/低重力異常の縞模様パターン(図-13(B)(b))。

この縞模様パターンの走向と地震断層および分岐断層の走向とが非常に一致している。重力異常の大きさは、±200μGal程度である。

地質学的には、1)は主に深度数100mと推定される花崗岩の基盤構造に対応し、2)の地震断層沿い、および、分岐断層沿いの高/低重力異常帯は、200m程度以浅といった浅部の堆積層(神戸/大阪層群)中に発達している変形構造、および、花崗岩と堆積層との地質境界にそれぞれ対応するものと考えられる。

特に、今回適用したフィルター処理で明らかとなった地震断層沿いの高重力異常帯は、花崗岩基盤の上位に伏在すると推定されている神戸層群の背斜構造(あるいは、その上位の大阪層群も含めた背斜構造)の存在を示唆するものである。1)に述べた斜交性と合わせて、これらの結果は、マイクロ重力探査によって、堆積層の分布している地域(平野部)における基盤構造、および、断層運動などの造構造運動で生じたその上位堆積層中の変形構造等に起因する密度構造異常を、それぞれ1mGal、および、100μGalのオーダーの大きさの重力異常として検出することが十分可能であることを示している。

#### (3) マイクロ重力探査例

この例は、重力探査の空間分解能をさらに上げることにより極浅部構造の検出可能性を評価するために、前節で述べた探査範囲(野島断層南西端部)に出現した地震断層を横断する70m×180mの範囲を特に選定して実施したマイクロ重力探査の例である(測定点間隔5m~20m)。調査範囲については、図-13(A)の短波長成分重力分布図の中に示した。

その結果、図-14に示すように、コンター間隔10μGalの重力分布図中に、地震断層の走向と並行する顕著な重力急変帯が幅50m程度の範囲において存在することが明らかとなった。この事実は、深度数10m以浅(大阪層群の中)において、地震断層を横切る方向に密度構造が顕著に変化していること(あるいは、断層露頭と並行する軸を持つ背斜構造が地表付近の大阪層群にも及んでいること)を強く示唆している。

以上の3つの例は、通常の重力探査における100km四方といった広域の構造調査のみならず、マイクロ重力探査によって、数km四方の範囲における堆積層の分布している地域での基盤構造、および、その上位堆

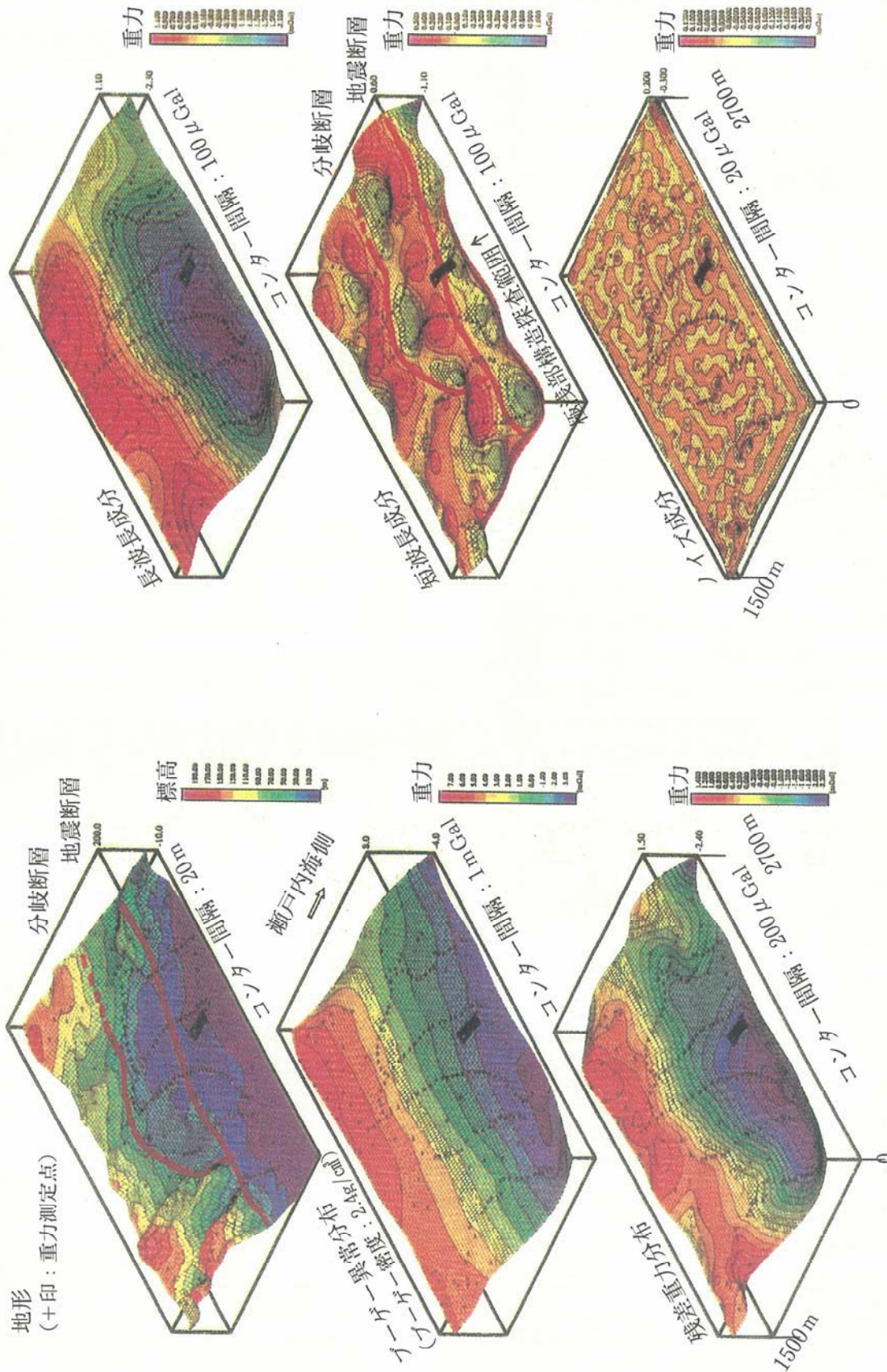


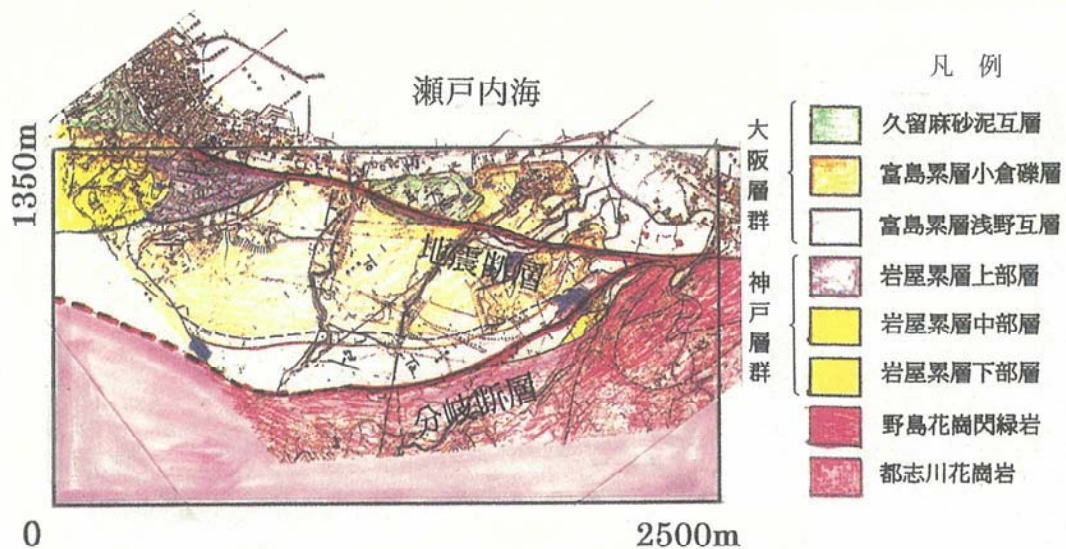
図-13 野鳥断層における浅部構造調査

(A) フィルター処理の流れ

Fig.13 An example of shallow subsurface investigation around the Nojima Fault.

(A) Filter processings.





小倉地区周辺の表層地質

(地質調査所発行の5万分の1地質図幅から作成。応用地質(1995)より引用)

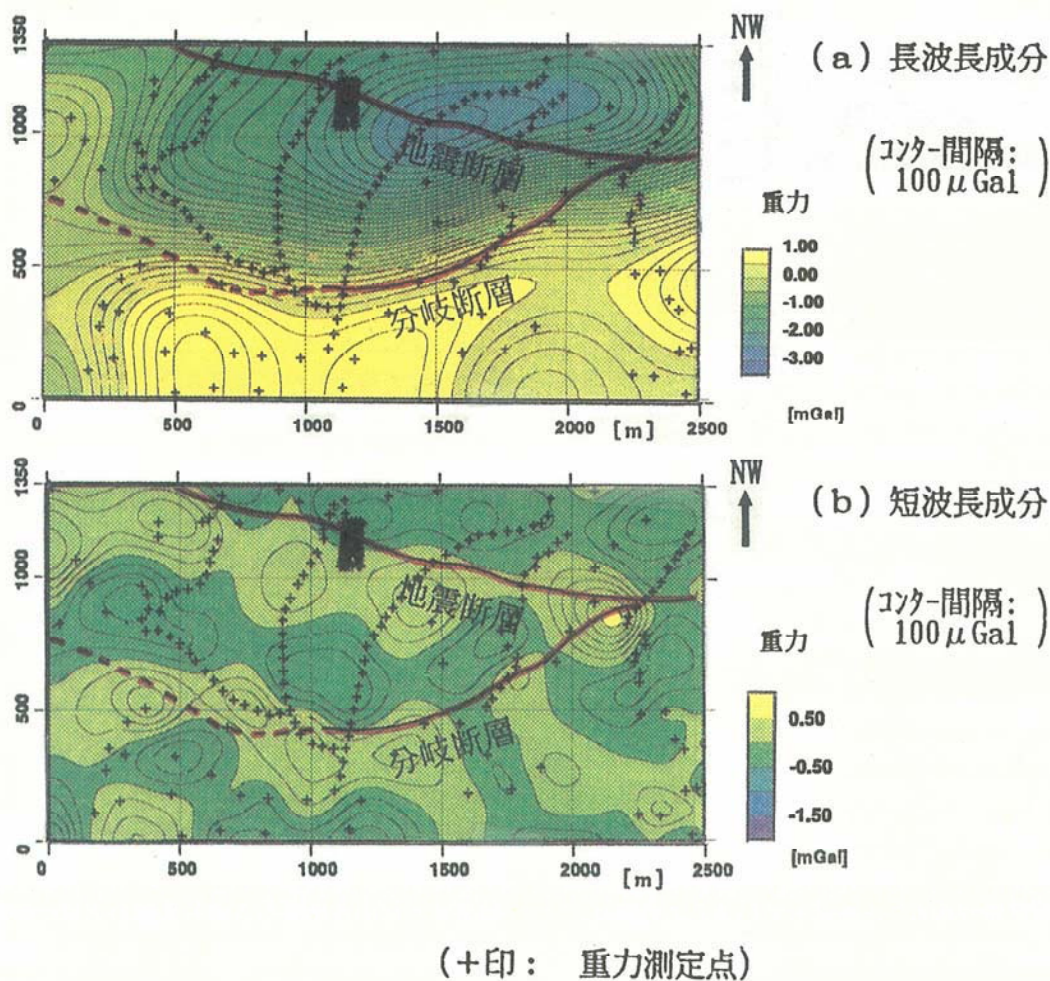
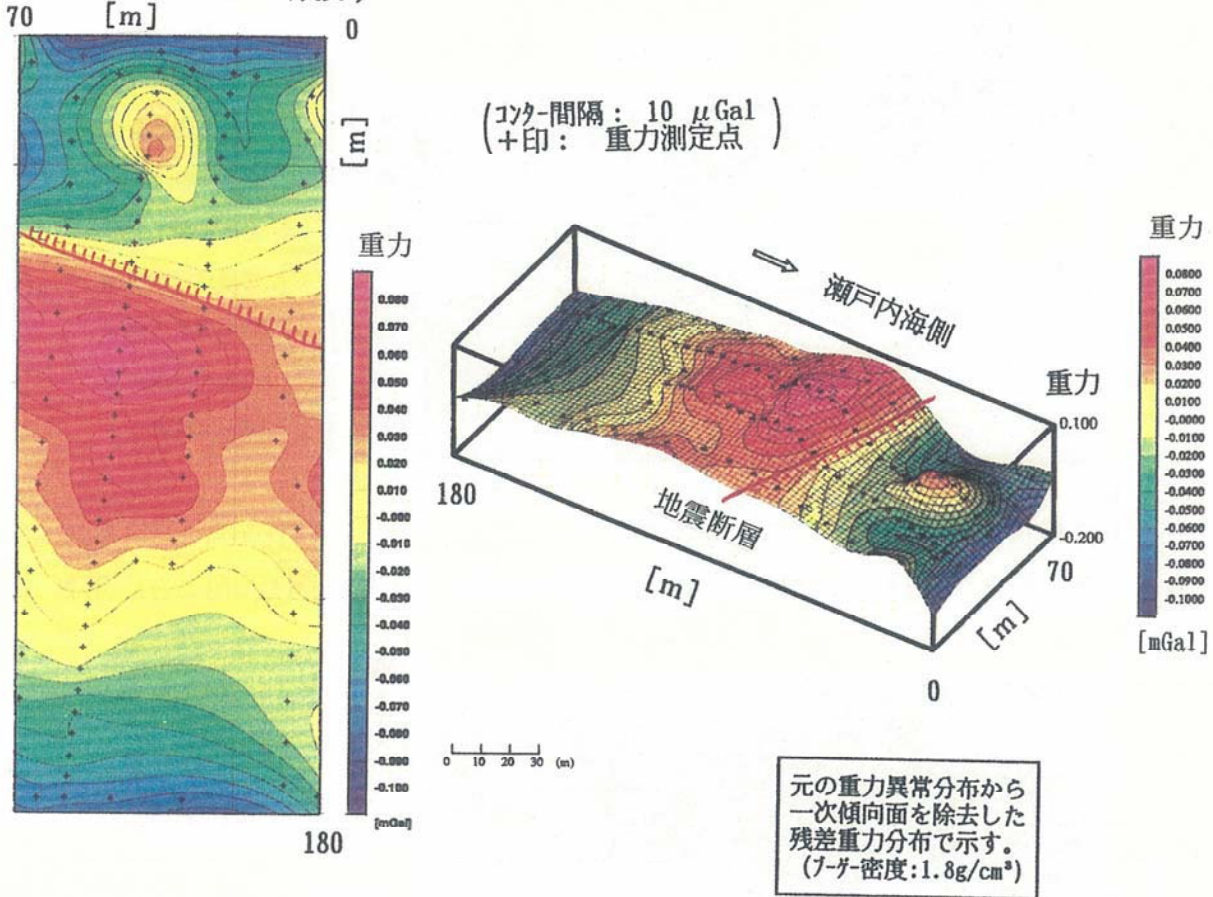


図-13 野島断層における浅部構造調査  
(B) フィルター処理結果

Fig. 13 An example of shallow subsurface investigation around the Nojima Fault.  
(B) Results of filter processings.



重力分布 (シグナル成分)



コンター間隔 10 $\mu$ Gal の重力分布図中に、地震断層の走行と並行するシャープな重力急変帯が、幅 50 m 程度の範囲において存在することが明らかとなった。この事実は、深度数 10 m 以浅 (大阪層群の中) において、地震断層を横切る方向に密度構造が顕著に変化していること (あるいは、断層露頭と並行する軸を持つ背斜構造が地表付近の大阪層群にも及んでいること) を強く示唆している。

図-14 野鳥断層露頭近傍における極浅部構造調査  
 Fig.14 An example of very shallow subsurface investigations crossing over the outcrop of the Nojima Fault.

積層中の密度構造異常を、それぞれ、1mGalオーダー、および、100 $\mu$ Galオーダーの大きさの重力異常によって推定することに加え、数 $\mu$ Galに近い大きさの重力異常を目的的に検出することにより、比較的新しい断層運動と密接に関係している極浅部の地下密度構造異常を推定することが可能であることを示している。この際に、重要な役割を果たすのがフィルター処理であることは言うまでもない。

以下の各節では、以上に述べたフィルター処理の有効性と重要性を踏まえた上で、マイクログラビティ探査の他の調査事例を示す。

6・2 地質構造調査

(1) 浅部地質構造調査

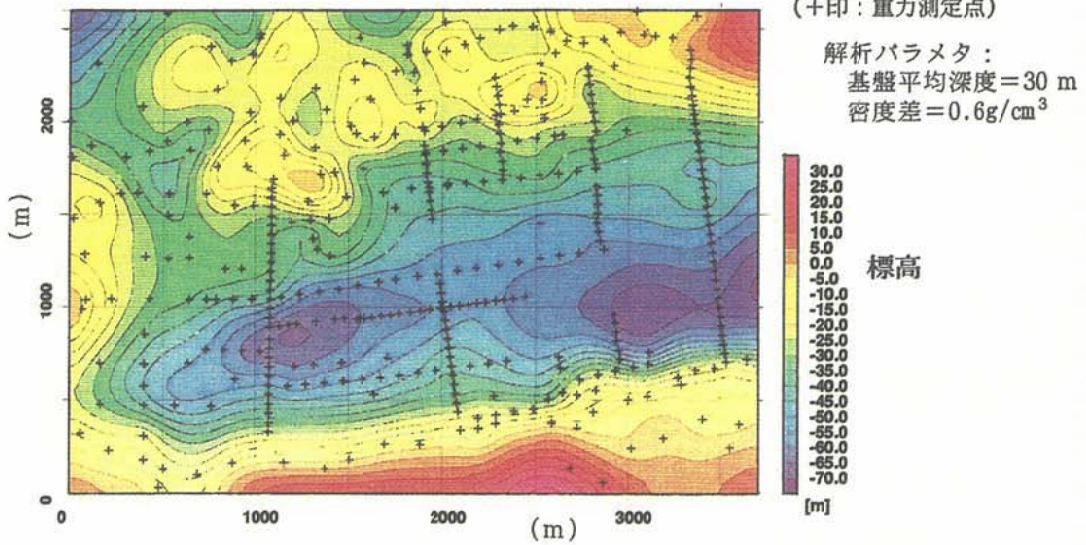
図-15に示す例は、塩田跡地の再利用を目的として実施した浅部の基盤調査のものである。地質の概要は、花崗岩または中古生層から成る基盤の上に洪積層と沖積層が数10mの厚さで堆積している。調査範囲3700m $\times$ 2600mからいえば、マイクログラビティ探査と通常の重力探査との境界にあたる (図-11参照)。

周辺を山地で囲まれた湾状の地形を呈する調査地は、かつて塩田として利用されていた非常に平坦な地形であ

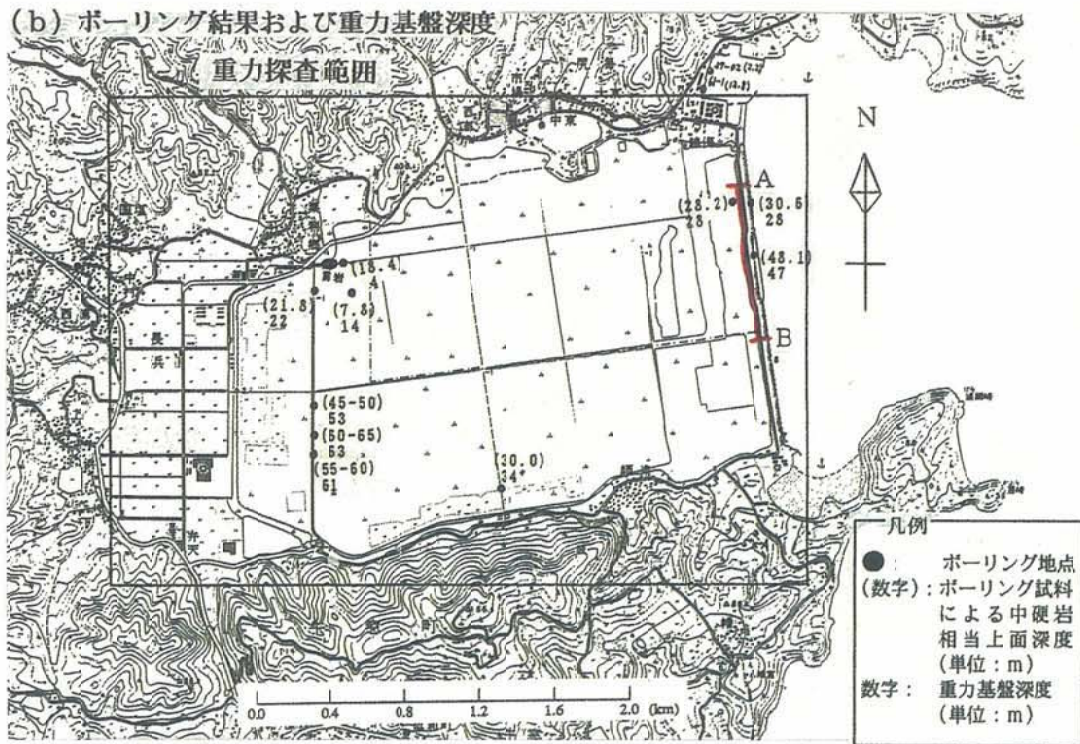


(a) 重力基盤図 (2層モデル解析)

(コンター間隔: 5 m)



(b) ボーリング結果および重力基盤深度



(c) 地質断面図および重力基盤

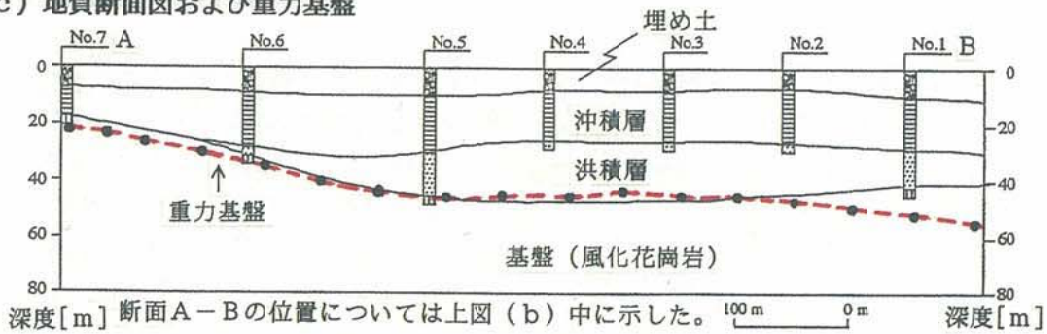


図-15 浅部基盤調査例

Fig. 15 An example of shallow gravity basement survey.

る。重力探査の結果求めた重力基盤図(図-15(a))と地形(図-15(b))とを見比べてみると、地形は平坦であるが、基盤構造としては深度60m~70mの基盤の谷筋が埋没谷として顕著に認められる。この谷筋は、地形的に平坦な塩田跡地のセンターラインよりも南部に偏っているが、これらは、ボーリング調査結果ともよく対応している。また、湾部から派生している小さな入り江跡などに対応した重力基盤の凹凸も現地形とよく整合しており、湾全体の大局的な基盤構造をよく反映しているといえよう。図-15(c)に、地質断面図と求めた重力基盤とを比較して示す(断面の区間は、同図(b)の中に示した区間A-Bである)。

#### (2) 極浅部地質構造調査

次の例として、マイクログラビティ探査を深度数mから十数mの極浅部基盤調査に適用した例を紹介する(大下・野崎(1997))。

調査地は、1985年に開催された筑波科学万博の跡地(現在、応用地質つくば技術開発センター敷地)であり、現在はパビリオンは撤去され、埋め土等によって整地されている。その洪積台地上の300m×200mの範囲においてマイクログラビティ探査を実施した結果、図-16(a)に示す重力異常分布(フィルター処理後)が得られた。10 $\mu$ Galのコンター間隔で描かれたこの重力異常分布を見ても、破線で囲んだ部分に、周囲に比べて20 $\mu$ Gal~50 $\mu$ Gal低い明瞭な低重力異常域がみられる。この低重力異常域は、P波反射法探査結果の距離程40m~100mの区間の深度20m程度以浅に見られる落差10m弱の反射面の落ち込みと非常によく対応している。一方、既往資料((財)国際科学技術博覧会協会(1986))により、筑波万博開催当時のパビリオンの配置図と得られた重力異常分布図とを重ね合わせてみると、上記の明瞭な低重力異常は、調査地内にあった唯一の地下1階の建物の位置とまさしく一致していることが判った(b)を参照)。反射法探査の断面に見られる落差10m弱の落ち込みは、パビリオン建設時の切り土面を捉えたものであり、上記の低重力異常域は、整地に伴って施工された埋め土を反映したものと考えられる。その他、反射法測線の中央部にみられる高重力異常の位置は、反射法探査の断面において反射面が1m~2m程度浅くなっている区間とよく一致している。

なお、重力異常分布図において、建物と記した個所にみられる低重力異常は、重力補正として、建物に対する補正を施していないことによるものである。

### 6・3 孤立した構造異常調査

#### (1) 空洞調査

図-17は、石灰岩が広範に分布している地域で実施したマイクログラビティ探査の例であり、鍾乳洞などの空洞や多孔質域の存在による地下水脈の分布状況の把握やドリネ・ウバーレなどによって生じる地盤の陥没対策を目的とするものである。

マイクログラビティ探査の結果、1400m×1200mの調査範囲において得られた重力異常分布中に、大きさが300 $\mu$ Galを越える顕著な低重力異常個所が認められる。これらのうち、図中に示した2個所において空洞が確認されている。その他の低重力異常個所、あるいは、それらをつなぐ低重力の谷筋においても、地下に空洞や多孔質域などの低密度域が分布していると推定される。

空洞や緩み域が低重力異常として検出されるのに対し、高重力異常として密度構造異常が検出される例を次に示す。

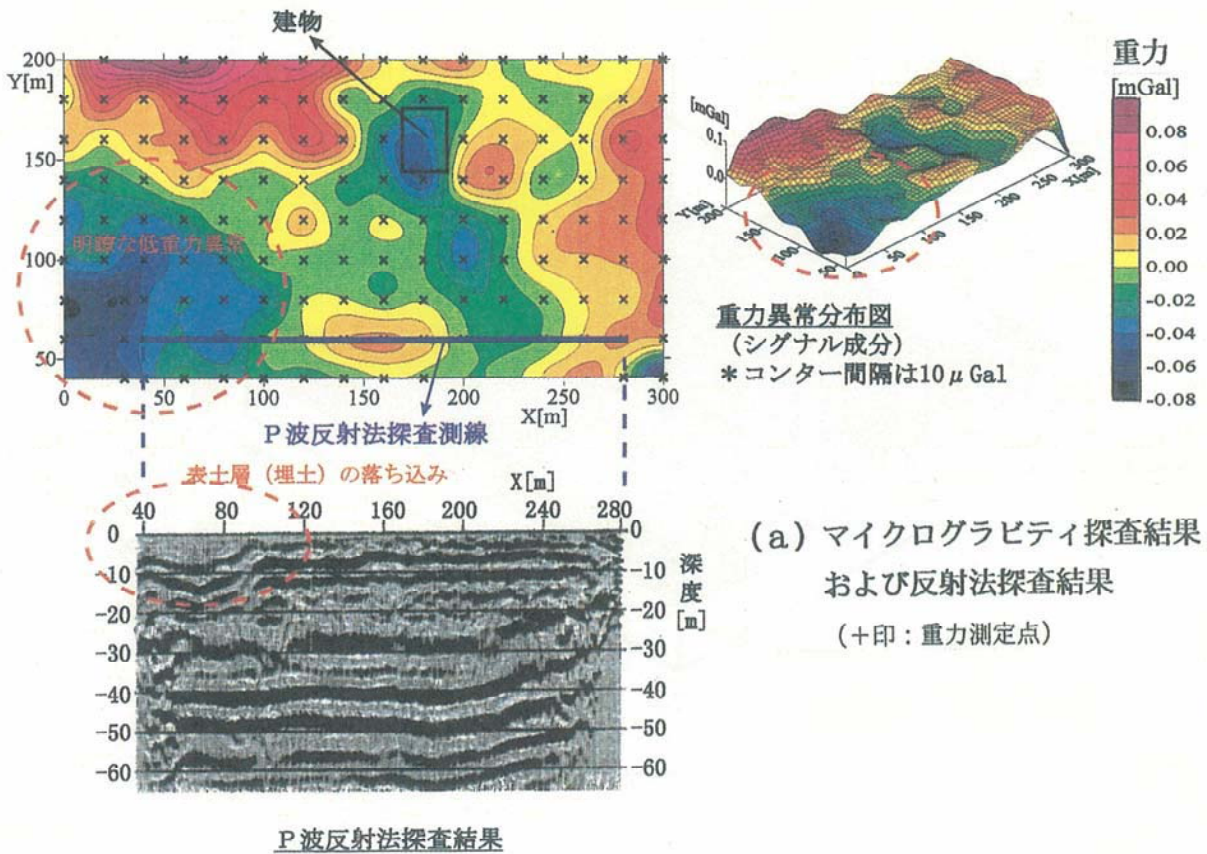
#### (2) 遺構(堰跡)調査

図-18の遺構調査例は、江戸時代の宝暦治水で流量調節のために長良川中流域に築堤された洗堰(あらいぜき)、喰違堰(くいちがいぜき)といった埋没遺跡の分布状況を把握するために実施した例である。詳細については、軽部(1997)を参照されたい。これらの堰は、(e)洗堰跡発掘調査状況からもわかるように、堰の表面は、直径20cm~30cmの玉石で石組されている。

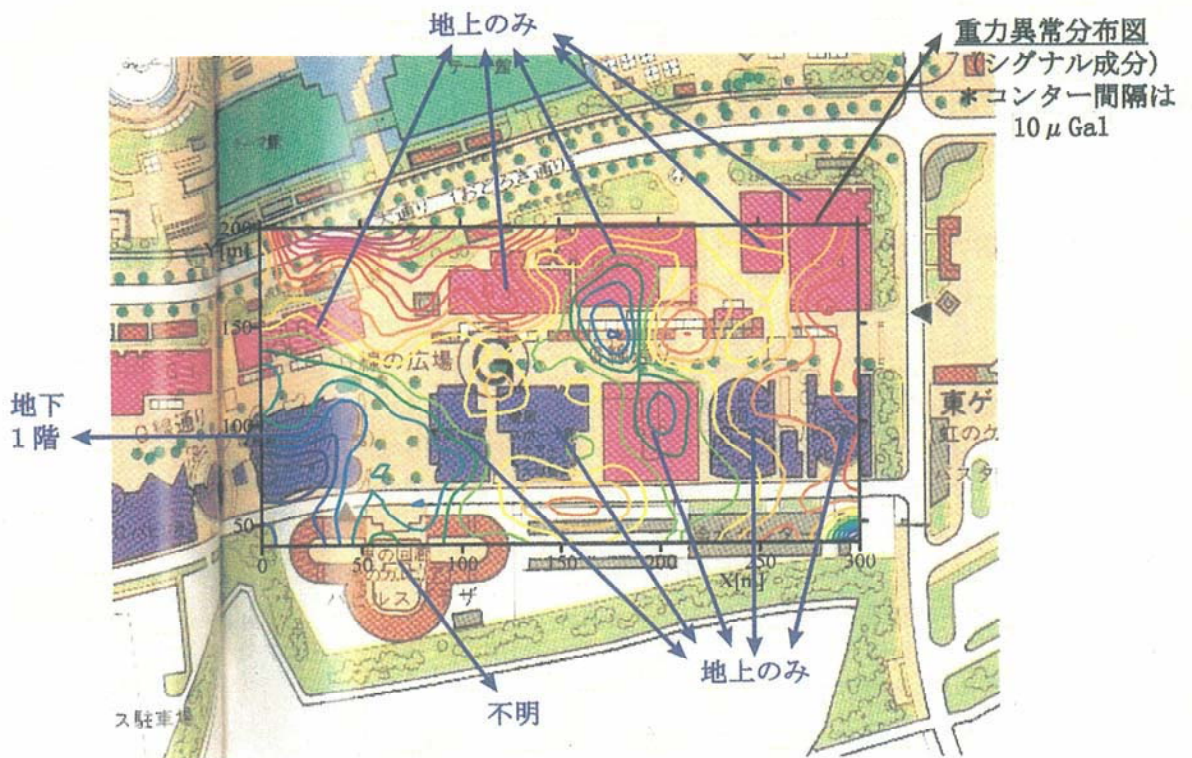
この洗堰跡の発掘個所付近において、地中1m~2m程度の深度に残存していることが想定されている洗堰と喰違堰を横断する方向に測線状のマイクログラビティ探査を実施した結果、(c)に示すように、40 $\mu$ Gal~60 $\mu$ Gal、および、約20 $\mu$ Galの大きさの高重力異常が、それぞれ洗堰、および、喰違堰の埋没が予想される個所として検出された。この結果は、同じ測線で実施した(a)地下レーダー探査の結果に認められる顕著な反射面、ならびに、(b)比抵抗映像法の結果に見られる高比抵抗域と非常によく対応を示している。さらに、洗堰跡に対応していると考えられる高重力異常を境界付近に含む60m×50mの範囲において面的なマイクログラビティ探査を実施した結果、(d)に示すように、コンター間隔5 $\mu$ Galのフィルター処理後の重力分布中に、洗堰跡の面的な分布状況を示していると考えられる顕著な高重力異常域が検出されていることが判る。測定点間隔は、2.5m~10mである。

この例では、構造スケールとして数mから数10mと考えられる探査対象に対し、数10 $\mu$ Galの大きさの重力異





(b) バビリオンの配置と重力異常分布

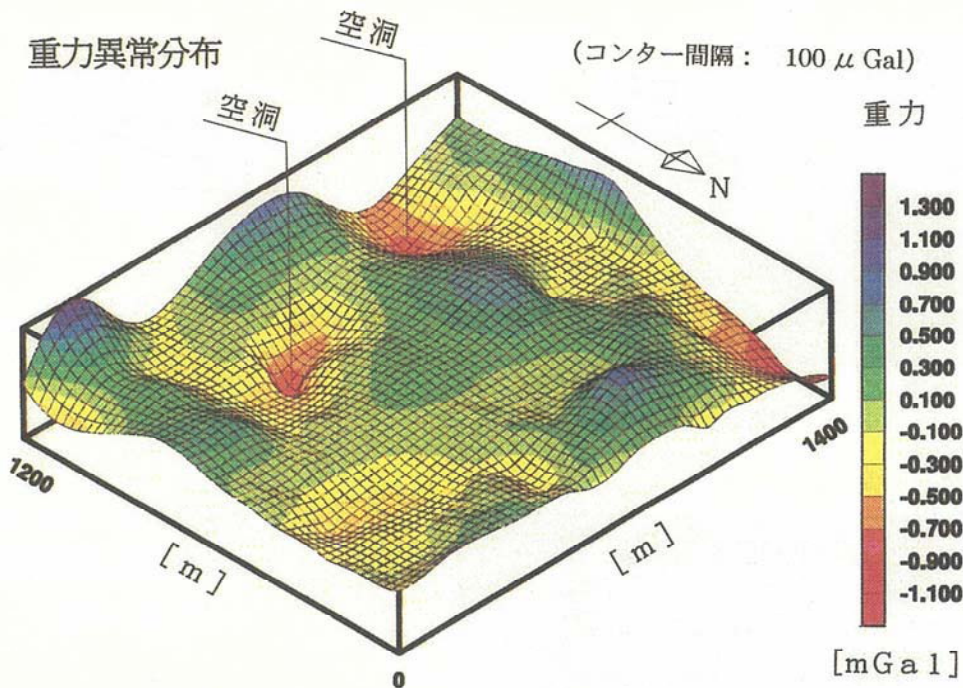


「国際科学技術博覧会公式記録」(財団法人 国際科学技術博覧会協会、1986年発行)より引用、加筆

図-16 極浅部基盤調査例

Fig. 16 An example of very shallow gravity basement survey.





マイクログラビティ探査の結果、顕著な低重力異常箇所のうち、2箇所において空洞が確認されている。その他の低重力異常箇所あるいはそれらを結ぶ低重力の谷筋においても、地下に空洞や緩み域/多孔質域(低密度域)が分布していると推定される。

図-17 空洞緩み調査例

Fig.17 Detection of caves by gravity anomaly distribution.

常が検出された。また、今回のように、異なる探査手法を組み合わせて実施することによって、各々の探査結果の信憑性を相補的に高めることの重要性はあらためて繰り返すまでもないであろう。

#### 6・4 重力の経時変化の検出

盛り土地盤においては、造成してから時間が経過するにつれ、地下水の影響などによって空洞や緩み域がしばしば発達し、地盤が陥没したり変状を来したりする。ここでは、陥没を起こした高さ約4mの盛り土地盤において、グラウト注入による地盤改良効果の判定にマイクログラビティ探査を適用した結果を紹介する。調査範囲は、陥没地点を含む40m×25mの矩形領域である(測定点間隔: 1m~10m)。

図-19の(a)および(b)にグラウト注入前後の重力異常分布(フィルター処理後の短波長成分)を示す。コンター間隔は5μGalであるが、両者を比較してみても容易に気付く差異として、

- 1) グラウト注入前の重力異常分布中において、陥没地点の極近傍に見られた同心円状のコンターを呈す

る約20μGalの大きさの顕著な低重力異常は、グラウト注入後にはほとんど認められなくなっていること

- 2) 重力異常分布図中のコンターの本数が、グラウト注入後では、注入前に比べて減少していることの2点が挙げられる。これらの探査結果は、(c)および(d)に模式的に示したように、顕著な低重力異常の原因であったと考えられる特に悪化している箇所(空洞など)が、グラウト注入によって充てんされ、また、その周辺部の緩み域の密度も相対的に増加し、その結果として、調査範囲全体の密度が均質化したことを示している。

#### 7 あとがき

以上に、マイクログラビティ探査の概要、ならびに、その現状と有効性を、探査事例を通じて実証的に示した。マイクログラビティ探査の実施は、現在のところ専ら陸上に限られているが、これはひとえに重力測定の精度とコストパフォーマンスの制約のためである。まずは、マイクログラビティ探査の陸域での適用事例を蓄積してゆくことが今後の最重要課題であろう。一般に、市街地・都市部での浅



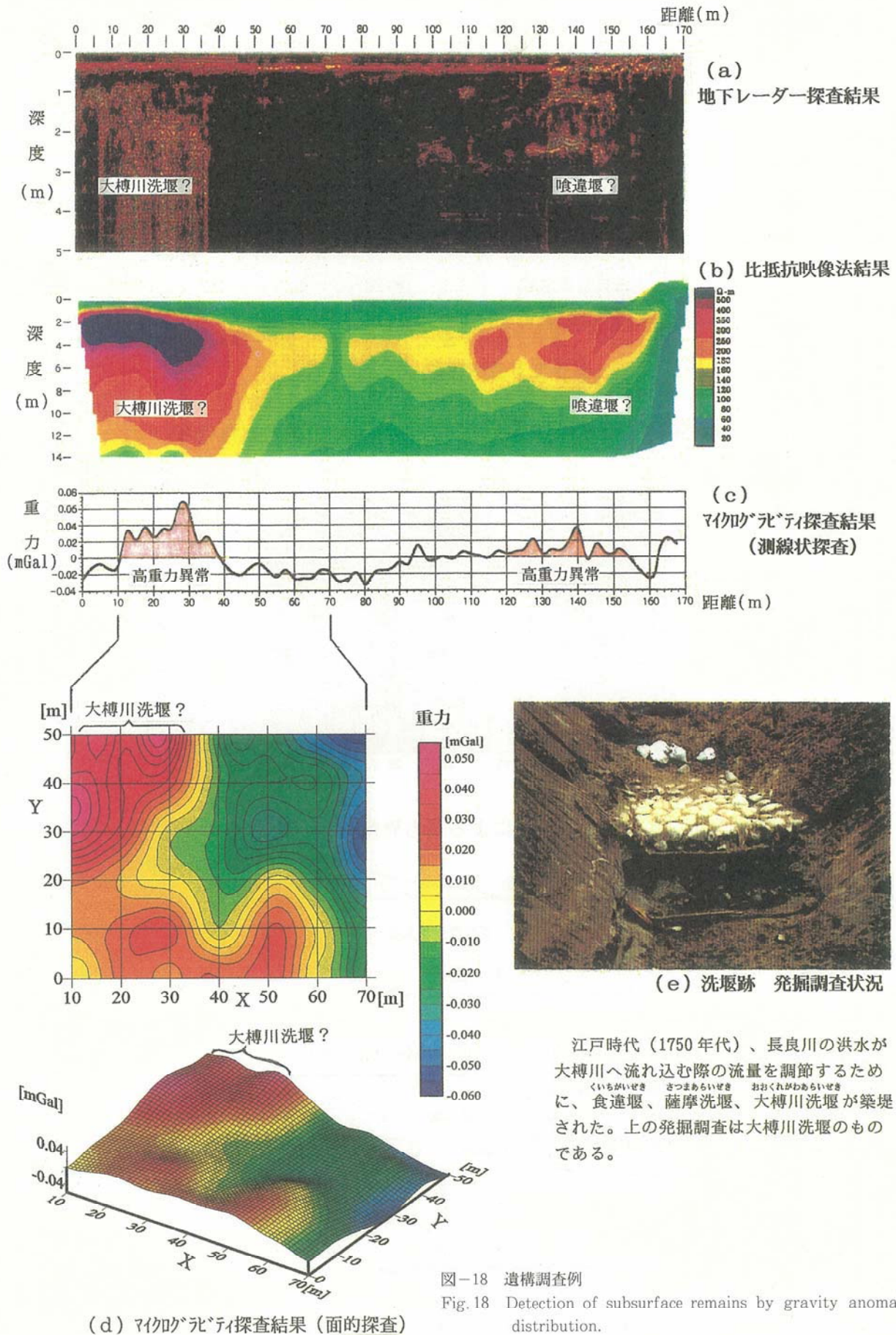


図-18 遺構調査例  
Fig. 18 Detection of subsurface remains by gravity anomaly distribution.

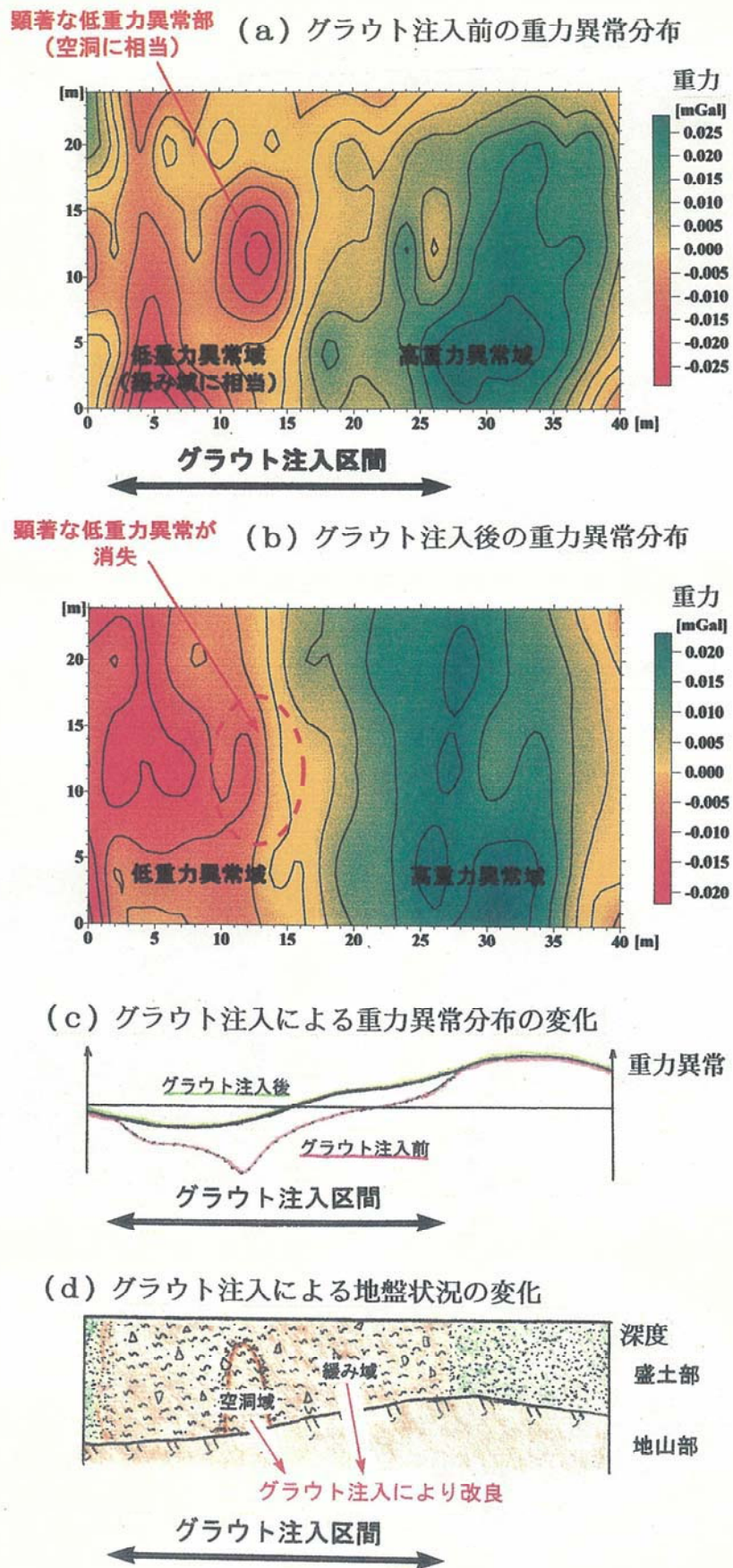


図-19 地盤改良効果の判定例

Fig.19 Evaluation of soil improvement using gravity anomaly charges.



部構造調査では、交通振動、電氣的磁氣的ノイズ、用地問題などによって調査の制約を受ける場合が多いが、マイクログラビティ探査（重力探査）はそのような制約を比較的受けにくい調査手法の一つである。この点マイクログラビティ探査は、土木分野などからのニーズに応え得る可能性を秘めた調査手法であるといえよう。また今後の課題として、測量にGPSなどの最新の技術を導入することも調査のトータルパフォーマンスを高める上で不可欠であろう。さらには、重力センサーそのものやデータ処理方法などハード・ソフト両面における諸問題を実用上の問題として解決してゆくことにより、マイクログラビティ探査の適用範囲を陸域のみから、例えば浅海域や地中にも拡張してゆくことができるであろう。

土木分野／工学分野への適用を目指したマイクログラビティ探査は、現在のところ、必ずしも調査手法の一つとして市民権を得ている訳ではない。今後、本報文が、斯界におけるマイクログラビティ探査（重力探査）の利用の活性化をはかる上で一助となることを願う次第である。

#### 謝 辞

本報文の作成にあたり、建設省木曾川下流工事事務所、および、岐阜県輪之内町からは、洗堰・喰違堰の遺構調査に関する資料を御提供戴き、また、錦海塩業株式会社からは、塩田跡地での基盤調査に関する資料を御提供戴きました。ここに記し、厚く御礼申し上げます。

最後になりましたが、故加藤元彦先生には、応用地質株式会社に重力部門が発足した初期の期間、1987年から1992年にかけて、弊社技術顧問として重力探査の御指導を戴きましたことに対し、先生のご教示を乞うた者の一人として、深く感謝の意を捧げるとともにご冥福をお祈り申し上げます。

#### 参 考 文 献

- 1) Tsuboi, C., A. Jitsukawa, H. Tajima, and A. Okada (1953): Gravity along the lines of precise levels throughout Japan by means of a Worden gravimeter, Part I, Shikoku District, Bull. Earthq. Res. Inst., Univ. Tokyo, Suppl. 4, I, pp.1-45.
- 2) Hagiwara, Y. (1967): Analyses of gravity values in Japan, Bull. Earthq. Res. Inst., Vol.45, pp.1091-1228.
- 3) 加藤元彦 (1980): 重力・磁力分布と地下構造ならびにその発達史, 石油開発技術センター研究報告, 第12号.
- 4) Arzi, A., A. (1975): Microgravimetry for engineering applications, Geophys. Prosp., Vol.23, No.3, pp.408-425.
- 5) Fajkiewicz, Z. (1976): Gravity vertical gradient measurements for the detection of small geologic and anthropogenic forms, Geophysics, Vol.41, No.5, pp.1016-1030.
- 6) 飯田汲事 (1983): 亜炭採掘古洞の重力探査, 充てん, 第5・6号, pp.5-14.
- 7) Fajkiewicz, Z. (1983): Rock-burst forecasting and genetic research in coalmines by microgravity method, Geophys. Prosp., Vol.31, pp.748-765.
- 8) Butler, D. (1984): Microgravimetric and gravity gradient techniques for detection of subsurface cavities, Geophysics, Vol.49, pp.1084-1096.
- 9) Lyness, D. (1985): The gravimetric detection of mining subsidence, Geophys. Prosp., Vol.33, pp.567-576.
- 10) 千葉昭彦 (1986): 地下空洞の重力探査実施について, 充てん, 第12号, pp.19-29.
- 11) 野崎京三・加藤元彦 (1988): ボックスカルバート上におけるマイクロ重力探査, 応用地質年報, No. 10.
- 12) 大下賢一・野崎京三 (1997): マイクログラビティ探査の極浅部基盤調査への適用実験, 物理探査学会第97回学術講演会論文集, pp.255-259.
- 13) 坪井忠二 (1979): 重力 (第2版), 岩波全書, pp. 274.
- 14) 加藤元彦 (1987): 2次元フィルターの理論と重力・磁力分布の解析, ラテイス社, pp.262.
- 15) 萩原幸男 (1978): 地球重力論, 共立全書, pp. 242.
- 16) Yamaguchi, K., K. Nitta, H. Yamamoto, K. Mtsuo, M. Machida, M. Murakami, M. Ishihara, S. Nakai, R. Shiti and A. Yamamoto (1997): The Establishment of the Japan Gravity Standardization Net 1996, IAG Symposia, Vol. 117, Segawa et al. (eds.), Gravity, Geoid and Marine Geodesy, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1997, pp.241-248.

- 17) Nakai, S., K. Yamaguchi, K. Nitta, H. Yamamoto, K. Matsuo, M. Machida, M. Murakami, M. Ishihara, R. Shichi and A. Yamamoto (1997) : Data Processing for the Japan Gravity Standardization Net 1996, IAG Symposia, Vol.117, Segawa et al. (eds.), Gravity, Geoid and Marine Geodesy, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1997, pp. 228-233.
- 18) LaCoste, L.J.B. (1934) : A new type long period siesmograph, Physics, Vol.5, pp.178-180.
- 19) LaCoste, L.J.B. (1935) : A simplification in the condition for the zero-length-spring seismograph, BSSA, Vol.25, pp.176-179.
- 20) 志知龍一 (1985) : 重力計の原理と特性および調整法, 名古屋大学理学部附属地震予知観測地域センター, pp.60.
- 21) Hugill, A.L. (1988) : The new Scintrex CG-3 automated gravity meter : Description and test results, Expanded abstract, ASEG Conference, February, 1988.
- 22) Seigel, H.O., I. Brcic and P. Mistry (1993) : The CG-3M, A high precision, microgal resolution, land gravimeter, with world wide range, Scintrex Limited, pp.1-18.
- 23) Chapin, D. (1998) : Gravity instruments : Past, present, future, The Leading Edge, January, 1998, pp.100-112.
- 24) 野崎京三・林 宏一・梶原 透・海津 優・秋山忠之 (1993) : マイクロガル重力測定における局所的重力鉛直勾配異常の重要性, 地球惑星科学関連学会1993年合同大会予稿集, p.82.
- 25) Tsuboi, C. (1964) : Derivation of real Bouguer anomalies from gravity values observed at various elevations, J. Geod. Soc. Japan, Vol. 10, pp.94-100.
- 26) Tsuboi, C. (1965) : Calculation of Bouguer anomalies with due regard to the anomaly in the vertical gravity gradient, Japan Acad. Proc., Vol. 41, pp.386-391.
- 27) 加藤元彦・野崎京三 (1988) : マイクログラビティ探査 (その1) — その誤差評価の一方法 —, 物理探査学会第79回学術講演会論文集, pp.279-281.
- 28) 野崎京三・加藤元彦 (1988) : マイクログラビティ探査 (その2) — その実例と問題点 —, 物理探査学会第79回学術講演会論文集, pp.282-287
- 29) 駒澤正夫・太田陽一・渋谷昭栄・熊井 基・村上 稔 (1996) : 大阪湾の海底重力調査とその構造, 物理探査, 第49巻, 第6号, pp.459-473.
- 30) 岡田篤正 (1995) : 六甲-淡路島活断層系と兵庫県南部地震, 第40巻, 第4号, pp.86-97.
- 31) 野崎京三・高橋 亨・山根 誠 (1996) : マイクログラビティ異常によって検出可能な構造スケール, 地球惑星科学関連学会1996年合同大会予稿集, p.611.
- 32) 水野清秀・服部 仁・寒川 旭・高橋 浩 (1990) : 明石地域の地質, 地域地質研究報告 (5万分の1地質図幅), 地質調査所.
- 33) 応用地質株式会社 (1995) : 活断層調査への物理探査法の適用性研究(1) — 野島断層における現場実験 —, 応用地質株式会社, pp.60.
- 34) 野崎京三・高橋 亨・山根 誠 (1996) : 断層運動に伴う堆積層の変形構造の検出 — 野島断層でのマイクログラビティ探査 —, 地球惑星科学関連学会1996年合同大会予稿集, p.611.
- 35) 財団法人 国際科学技術博覧会協会 (1986) : 国際科学技術博覧会公式記録, 1986年発行.
- 36) 石戸経士・杉原光彦・菊地恒夫 (1992) : 地熱レザバーモニタリング, 物理探査, 第45巻, 第6号, pp. 522-534.
- 37) 江原幸雄・本山達也・赤坂千寿・古谷茂継・後藤弘樹・本松利郎 (1994) : 重力変動観測による地熱貯留層モニタリングの試み (その1) 滝上地域における一斉噴気還元試験に伴う重力変動, 日本地熱学会誌, 第16巻, 第3号, pp.343-363.
- 38) Rymer, H. (1995) : Microgravity monitoring, Monitoring active volcanoes, -Strategies, procedures and techniques -, Edited by McGuire, B., C. Kilburn, and C. Murray, UCL Press Limited, A. University College London, pp.217-247.
- 39) 軽部文雄 (1997) : 国土の開発と遺跡保存のための物理探査, 物理探査, 第50巻, 第6号, pp.555-577.