

物理探査学会基礎講座テキスト

重力探査

村田泰章
地質調査所

目次

1. はじめに	1
2. 重力探査の基礎	1
3. 重力計の種類	3
3.1 ラコスト G 型重力計	3
3.2 ラコスト D 型重力計	4
3.3 シントレックス重力計(CG-3)	4
3.4 海底重力計	5
3.5 船上重力計	5
3.6 超伝導重力計	6
3.7 絶対重力計	6
4. 重力測定	6
4.1 現地調査の前準備	6
4.2 現地測定	7
4.3 絶対重力値の計算	9
5. 重力異常	10
5.1 正規重力	10
5.2 フリーエア―補正	11
5.3 ブーゲー補正	11
5.4 地形補正	11
5.5 大気補正	11
5.6 グリッドデータ化	12
6. 重力異常の解析方法と実例	12
6.1 ブーゲー異常のフィルター処理	12
6.2 断面構造解析	14
6.3 3次元構造解析	15
6.4 地殻表層密度の推定	15
7. 参考文献	16

1. はじめに

地球の重力を測定する目的は当初、地球の形状を知ることであった。しかし、現在では人工衛星の軌道から地球の形状が正確に求められるようになり、重力測定はもっぱら地下構造の解明を目的として実施されている。日本においては、陸上ですでに数十万点にも上る重力測定が実施され、その結果、精密な重力異常図やジオイドマップが作成されてきた。

現在行われている重力探査の対象は、以前の石油・鉱床・地熱等の地下資源から、地震予知や防災を目的とした活断層や浅部地下構造に移ってきている。他の物理探査手法が大掛かりであったり人工建造物のノイズの影響を強く受けるのに対し、重力探査は一人でも探査ができるほど簡便で、人工建造物のノイズを受けにくいという特徴を持つことから、特に大都市部において重力探査の有効性が見直されてきている。

重力探査における最近の技術革新には、自動重力計（シントレックス）が開発されたことと、GPSの普及が挙げられる。自動重力計は、コンピュータを内蔵しているため、簡便な操作で個人差のない測定が可能で、後処理も容易である。GPSの普及は、重力探査において重力測定以上に労力のかかる位置測量を非常に容易にした。また、解析面でも最新の統計手法を導入して、重力データからこれまでノイズとして埋もれていた情報を生かし、密度など重力探査ならではの地下情報も得られるようになってきた。

2. 重力探査の基礎

重力とは、地球上の単位質量に働く力すなわち加速度であり、地表におけるおおよその値は、 980cm/s^2 である。重力は地球の引力と遠心力からなるが、赤道上では、引力が約 981.4cm/s^2 、遠心力が 3.4cm/s^2 程度である。通常、重力の単位は、ガリレオ・ガリレイの名から Gal（ガル）をとって、

$1\text{cm/s}^2 = 1\text{Gal} = 1,000\text{mGal}$ （ミリガル） $= 1,000,000\mu\text{Gal}$ （マイクロガル） $= 10^9\text{nGal}$ （ナノガル）と表現する。この重力を用いて、どうして地下構造の探査が可能なのか、以下に説明する。

万有引力の法則では、2つの質量 m_1 と m_2 の間に働く引力の大きさは

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2} \quad (1)$$

で与えられる。ここで、 G は万有引力定数 ($6.673 \times 10^{-11}\text{m}^3\text{kg}^{-1}\text{s}^{-2}$)、 r は2質点間の距離である。

今、図1に示すように、距離 r のところに周り Δm だけ質量の異なる物質が存在すると仮定する。点 P において、 Δm に起因する微小重力 Δg は、次式で与えられる。

$$\Delta g = G \frac{\Delta m}{r^2} \sin \phi \quad (2)$$

ここで、 $\sin \phi$ を乗じて微小重力を Δm の引力の鉛直成分としている理由は、“鉛直方向が重力の方向”だからである。

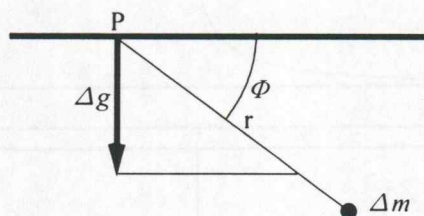


図1 微小質量による重力

Δm の物質が点（実際にはあり得ない）ではなくて、ある領域に分布しているとすれば、点 P における重力は、(2)式をその領域において積分する必要がある。実際の地下構造を想定して、数値計算を行ってみる。

(1) 地下空洞

地下 30m から 60m にかけて、縦・横がそれぞれ 30m の空洞が存在する場合を考える。周りの岩石の密度を 2g/cm^3 とすると、空洞の直上では、図 2 に示すように、空洞のないところに比べて最大約 $176 \mu\text{Gal}$ だけ重力が小さく、空洞から遠ざかるにしたがって重力への影響も小さくなる。

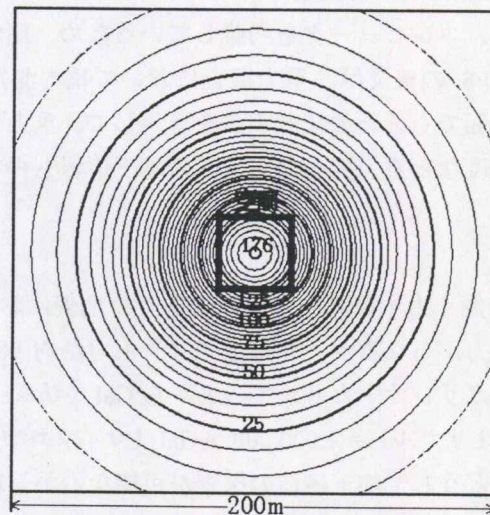


図 2 空洞による重力への影響。空洞の縦・横・高さ・天盤の厚さは、すべて 30m。コンター間隔は $5 \mu\text{Gal}$ 。

(2) 断層

断層によって基盤が垂直に 500m 落ち込み、落ち込んだ部分に基盤よりも 0.4g/cm^3 密度の軽い被覆層があると仮定する(図 3)。被覆層の部分の重力異常は、基盤が露出している部分に比べて約 8mGal 小さく、断層の上で急激に変化する。

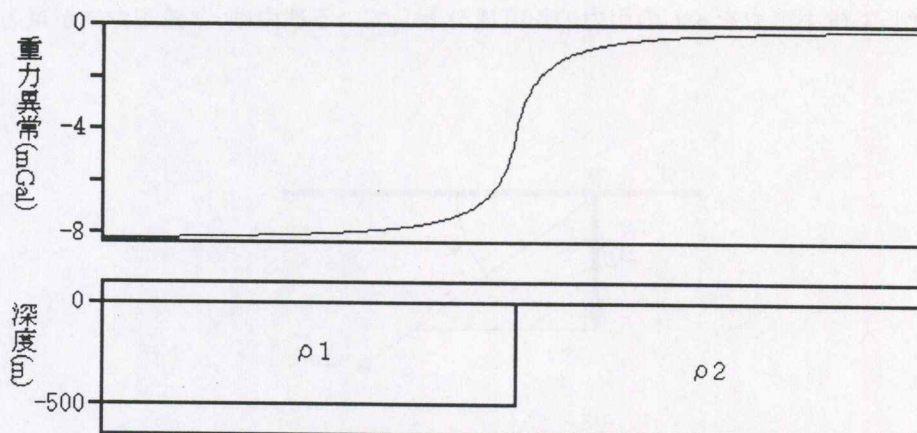


図 3 断層モデルによる重力異常。 ρ_1 は ρ_2 よりも 0.4g/cm^3 密度が小さいと仮定。

以上の2つのシミュレーションから分かるように、重力の大きさを $10 \mu\text{Gal}$ 程度の精度で測定できる重力計があれば、重力によって地下構造の探査を行うことが可能であることが分かる。

3. 重力計の種類

次に、現在使用されている主な重力計を紹介する。

3.1 ラコスト G 型重力計

スプリングの先に質量 m の錘をつけたとき、スプリングはフックの法則により

$$s = kmg \quad (3)$$

だけ伸びる。ここで、 k はスプリングの弾性定数で、 km をスケール定数という。スケール定数は重力計一台ごとに異なるが、複数の重力既知点での測定により求めておけば、スプリングの伸び s を測定することによって重力値を求めることができる。このようにスプリングを用いた重力計をスプリング式と呼ぶ。ただし、(3)式を直接使用したのでは、必要な精度・感度を得ることが非常に難しいために、ゼロ長スプリングという特殊な構造を用いた重力計がラコスト G 型重力計である(図4)。この重力計の測定レンジは $7,000\text{mGal}$ で、分解能は $10 \mu\text{Gal}$ である。

スプリング式重力計は、スケール定数が系時変化(ドリフト)することから、重力既知点と未知点間の重力値の差を測定する相対重力測定に用いられる。

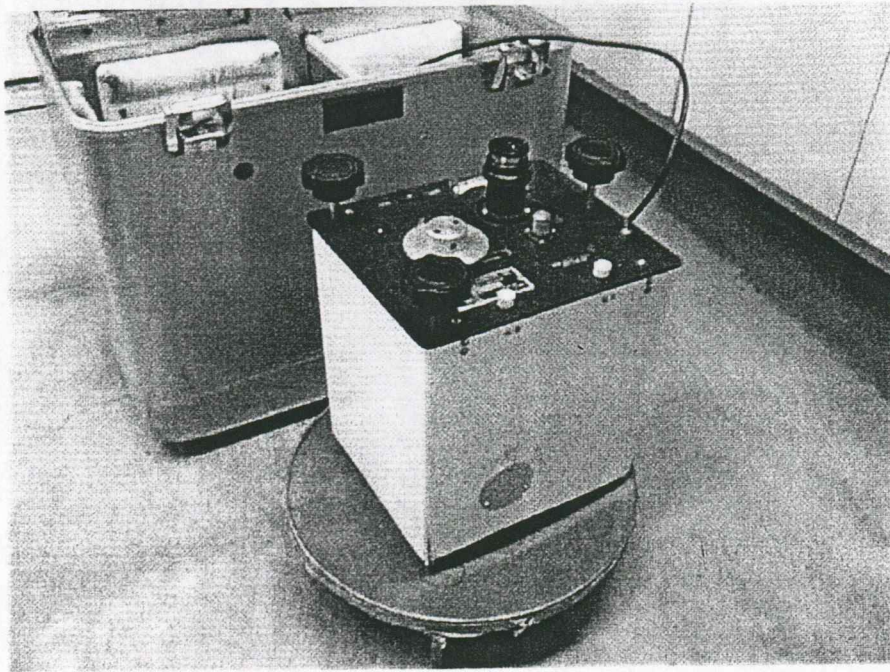


図4 ラコスト G 型重力計

この重力計の使用方法は、次の通りである。

- (1) 重力計三脚を設置する。
- (2) 重力計を三脚の上に載せる。
- (3) 重力計の照明スイッチを入れる。
- (4) レベルを水平に合わせる。

- (5) クランプをはずす。
- (6) ダイヤルを回して、アイピースの中のクロスヘアを平衡位置に合わせる。
- (7) ダイヤル値を読み取る。
- (8) 再びダイヤルを回して、クロスヘアを一度平衡位置からずらしてから、(7)で呼んだダイヤル値に戻して、クロスヘアが平衡位置に戻ることを確認する。戻らなければ、(6)からやり直す。
- (9) クランプをして、照明を消す。
- (10) 測点番号とダイヤル値、器械高（標高点から重力計の上面までの高さ）を野帳に記入する。
- (11) 重力計をケースに戻す。

3.2 ラコスト D 型重力計

G 型重力計と原理は同じであるが、測定レンジを 200mGal と絞ることによって、分解能を 1 μ Gal と高めた重力計である。調査地域の重力分布を予め予測して、調査の前に測定レンジを設定する必要がある。

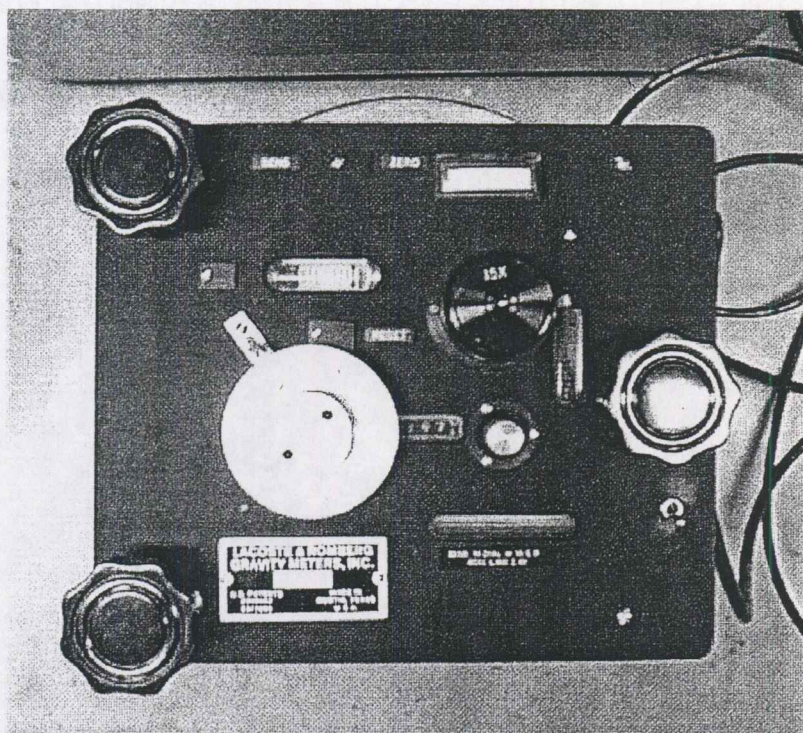


図5 ラコスト D 型重力計

3.3 シントレックス重力計 (CG-3)

スプリング式重力計の一つであるが、(3)式を直接使用する定位型と呼ばれる重力計で、カナダのシントレックス社が 1987 年にリリースした(図 6)。スプリングの伸びを可変容量センサーで検出して、錘の位置を一定に保つように電圧をかけ、その電圧から重力値を求めめる。この測定を 1 秒に 1 回ずつ設定した回数だけ繰り返して、その平均値を採用する。これら一連の処理は、内蔵の CPU により自動的に処理され、測定条件とともにメモリーに蓄えられる。測定レンジは約 7,000mGal で、分解能は 1 μ Gal である。

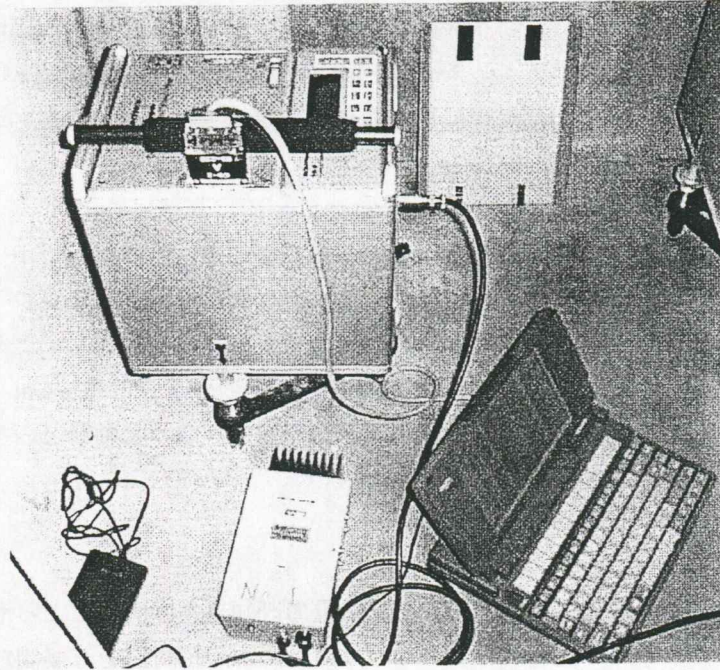


図6 シントレックス重力計 (CG-3M)

この重力計は、連続観測用のサイクリングモードと移動観測用のフィールドモードを持つ。サイクリングモードでは、サンプリング時間 (2 ~ 99999 秒) と測定間隔 (同左) を設定すれば、自動的に連続測定を行い、結果を内蔵メモリーに蓄積する。フィールドモードでは、サンプリング時間 (通常、120 から 180 秒程度) のみを調査の前に指定した後、以下の手順で測定を行う (通常 5 分程度)。

- (1) 重力計三脚を設置する。
- (2) 重力計を三脚の上に載せる。
- (3) アナログの X、Y メータで、レベルを水平に大体合わせる。
- (4) 電源スイッチを入れる。
- (5) 測点番号を入力する。
- (6) 測定スタートスイッチを押す。
- (7) 傾きがデジタルで表示されるので、± 5 秒角以内にレベルを微調整する。
- (8) 再度スタートキーを押すと数秒待った後、測定を開始する。
- (9) 測定が終了したら、測点番号、重力値、器械高を野帳に記入する。

3.4 海底重力計

陸上用の重力計と同じスプリング式であるが、レベル調整やクランプ操作、ダイヤル読み取り等の操作を船上から遠隔操作ができるようにして、耐圧容器に入れた重力計。船上よりケーブルで海底に着底させ測定を行う。精度は 0.01mGal と次の船上重力計に比べて高いが、深度が限られるので、主に湾部や湖の重力測定に用いられる。

3.5 船上重力計

船を航行させながら船上で重力の測定を行う重力計。スプリング式のラコスト船上重力計、弦の振動を

利用した東京大学海洋研究所の TSSG が代表的で、船のローリングや上下方向の動揺の影響を取り除くために、ジャイロスコープやローパスフィルター等を用いている。また、移動しながら重力を測定するため、移動の方位と速度を記録しておき、測定後に遠心力の補正（エトベス補正）が必要となる。

3.6 超伝導重力計

液体ヘリウムで冷却して超伝導状態にしたニオブニウム製の球を直流磁場の中に置くと、マイスナー効果で球が浮上する力と重力が釣り合う高さで静止する。その高さを静電容量プレートで検出し、フィードバックすることで重力を測定する。直流磁場も超伝導コイルで発生させるために、温度変化等の影響を受けない非常に安定な重力計を作成することができ、ドリフトの大きさは数 μGal / 年程度である。1nGal 程度の分解能があるが、全体に大きく持ち運びができないので、潮汐変動などの重力値の時間変化を測定する目的に使用される。

3.7 絶対重力計

これまで挙げた重力計はすべて相対重力計であり、重力既知点での測定によってスケール定数等を求める必要がある。重力既知点の重力値を決定するためには、重力の絶対値を直接測定する絶対重力計が必要である。絶対重力計の原理は、真空中で物体を落下させたときの時間と距離を精密に測定して重力値を求めるものである。自由落下式と投げ上げ式の 2 種類の絶対重力計があるが、現在では自由落下式の絶対重力計が主流で、国立天文台や国土地理院、東京大学地震研究所、工業技術院計量研究所などの機関が絶対重力測定を行っている。

4. 重力測定

ここでは、実際の重力測定の方法について説明する。

4.1 現地調査の前準備

現地調査に入る前には、調査地域の地形図や地質図を予め用意し、調査計画を決定する必要がある。

4.1.1 地形図・地質図の用意

調査地域の 1/25,000、1/50,000、1/200,000 の地形図や地質図、空中写真などを用意する。調査によっては 1/5,000 など、より大縮尺の地図が必要になる場合があるが、現地の役場などでなければ手に入らないので、現地調査の初日に入手する。

地形図を見ながら、測点をどの程度（範囲、点数、間隔）配置するか検討し、あわせて測点位置・標高の測量方法を決定する。

4.1.2 重力既知点の調査

相対重力計を用いた重力探査では、重力既知点との比較測定により新たに測定する点の絶対重力値を決定する。日本においては、国際重力基準網 1971 に基づく日本重力基準網 1975（国土地理院、1976）により、全国で 122 点の重力基準点および 1 等重力点が設置されているので、その中から現地に近い点を重力基点として選び、現地調査の前に場所の確認等しておく。

4.1.3 宿等の予約

宿泊先と必要ならレンタカー等の予約を行う。宿泊先は、調査地域の中央付近で交通の便の良いところ

を選定する。調査地域が広い場合には、複数の宿泊先を用意した方が効率が良い。

4.1.4 重力計・GPS等の機材の用意

現地調査に必要な機材は、重力計関係が重力計、重力計用三脚(皿)、バッテリー(必ず予備も用意する)、充電器、測点の位置を決定するために、GPS、オートレベル、スタッフ等が挙げられる。その他、野帳、メジャー、地形図、方位磁石、パソコン(シントレックス重力計やGPSのデータ吸い上げ用)等が必要である。重力測定班と測量班に分かれる場合などには、携帯電話が便利である。

4.2 現地測定

次に現地での調査の方法について説明する。

4.2.1 仮基点の設置

4.1.2 で述べた重力基点まで度々通うのは手間と時間がかかるので、宿泊先の玄関、軒先などに仮基点を設置して、仮基点の絶対重力値を重力基点との間の往復測定により決定する。

4.2.2 測点の設置

水準測量が必要な場合には、最初に金属鋸やマーキングスプレー等によって測点を配置する。測点の位置を選ぶ際には、①地形の影響をなるべくさけるために崖などから離れる、②測定中の安全を確保する、③通行の邪魔にならないようする、の3点を考慮する。

4.2.3 重力の測定

相対重力計では、バネの経年変化などによる重力値の時間変動(ドリフト)があるため、ドリフトの補正を行う必要がある。重力値がどれだけドリフトしたかを見積もるのは、調査の最初と最後に同じ場所(基点)で測定を行い、両測定値を比較すれば良い。通常は、ドリフトは直線的に変化すると仮定して、調査前後の測定値の差を時間に応じて比例配分する。このように基点から出発して、重力未知点の測定後、同じ基点に戻ってドリフトを補正する方法を閉塞測定という。閉塞をする時間は通常は一日であるが、ドリフトを精密に補正する場合には半日程度で閉塞する場合もあるし、山岳地帯の重力測定では数日かけて閉塞することもある。

重力の測定は、①基点(あるいは仮基点)での測定(閉塞開始)、②車・徒歩など移動距離に応じた手段による測点への移動、③重力の測定、④基点での重力測定(閉塞終了)、で行われる。②③は必要な測点数分繰り返すことになるが、車での移動が必要な広域調査では一日20点前後、20m程度の測点間隔の場合で一日50点前後が目安である。

4.2.4 位置・標高の測量

実際の現地調査では、重力の測定と同等以上に測点の位置・標高の測量が大きなウェイトを占める。各測点の重力測定値は、読み間違いをしなければそう大きく変動することはない。それに対して、測点の標高値の1mの誤差は、重力値に約0.2mGalの誤差を発生させてしまう。探査対象の規模に応じて測点の標高値の決定方法を選ぶ必要がある。

(1) 地形図の標高点を使う方法

2万5千分の1地形図等に記載されている三角点、水準点、独立標高点を用いる。これらの標高点が少ない場合には、測点の標高を地形等高線から読み取る場合もある。重力値の精度が1mGal程度になるの

で、大きな地質構造の解析のための重力探査時に使用する。

(2) GPS を用いる方法

単独測位と相対測位に分けることができ、さらに相対測位はトランスロケーションと干渉測位に分けることができる（日本測地学会編、1991）。

単独測位は、GPS 衛星から送られてくる C/A コードまたは P コードから衛星と測点間の疑似距離を求め、やはり衛星から送られてくる軌道情報と合わせて、測点の位置 (x,y,z) と受信機の時計の誤差を求めるものである。パラメータが4つあるので、最低4つの衛星からの電波を受信する必要がある。単独測位は1秒程度と短い測定時間で測定できるが、位置精度は100m程度と悪いため重力探査の測点の位置としては使用できない。ただし、目標の測点への移動時のナビゲーションには有効である。

トランスロケーション法は、GPS の単独測位で発生する系統誤差を排除するために、基点と移動局で同時に単独測位を実施し、両者のデータを一緒に解析することにより系統誤差を打ち消して位置精度を向上させたものである。この方法では、1m程度の誤差（重力値で0.2mGal程度）で位置を決定できる。

干渉測位は、GPS 衛星からの搬送波の位相を測定して衛星と測点の距離を計算し、測点の位置を決定する。この方法もトランスロケーション法と同様に基点を必要とし、基点と移動局で搬送波の位相を一定時間記憶した後、両方のデータを合わせて解析することにより解が得られる。研究目的であれば、基点として国土地理院が日本全国を約25km間隔でカバーしている電子基準点の情報を申請して使うことができる。干渉測位では、搬送波の波長がL1帯で約19cm(1.6GHz)であることから、数cm程度の精度で測点位置を決定することができる。ただし、受信できる衛星の数にもよるが、測定時間が数分から20分と長いのが欠点である。



図7 干渉測位中のGPS装置

4.2.5 測定データの整理

重力測定データの必須要素は、各測点についての測点番号、測定日時、緯度、経度、標高、重力計読み取り値、器械高、標高の決定方法の7項目と、調査全体の関する情報として、観測地域、観測者、重力計のシリアル番号、基点の位置・絶対重力値、重力値の変換定数（後述）等の情報が挙げられる。これらのファイルを一つのファイルに整理して、管理することが望ましい。

4.3 絶対重力値の計算

各点の絶対重力値 (g_{obs}) は、重力計の読み取り値 (R)、測定時間 (T)、測点緯経度・標高 (ϕ, λ, h)、器械高 (d) の測定データから、次の手順によって計算する。

4.3.1 読み取り値の換算

ラコスト重力計の場合、まず最初に、重力計読み取り値 (R) を次式によって重力値 (g_r) に変換する必要がある。

$$g_r = a + b \times (R - R_0) \quad (4)$$

ここで、 R_0 、 a 、 b は各重力計に固有な定数で、読み取り値のバンドごとに決定されている。定数の例を表1に示す。

表1 重力計の換算定数表の例

読み取り値 (R) のバンド	R_0	a	b
3000.0 ~ 3100.0	3000.0	3157.300	1.05247
3100.0 ~ 3200.0	3100.0	3262.550	1.05248
3200.0 ~ 3300.0	3200.0	3367.800	1.05248

例えば、読み取り値を 3123.54 とすると、

$$\begin{aligned} g_r &= 3262.550 + 1.05248 \times (3123.54 - 3100.0) \\ &= 3287.325 \text{ mGal} \end{aligned} \quad (5)$$

となる。シントレックス重力計は、内蔵のコンピュータでこのような換算を行っている。

4.3.2 潮汐補正

地表で観測する重力値は、太陽および月の影響を受け、約±0.1mGal程度の振幅で潮汐変動をする。潮汐補正値を算出するためには、測定時における測点 (ϕ, λ, h) と太陽および月の位置関係を求める必要があるが、重力探査用に十分な精度のプログラムが中井 (1979) によって公表されている。潮汐補正に必要な時刻の精度は、潮汐変動が大きくても 1 μ Gal/分程度であることから、通常は分単位で十分である。

4.3.3 器械高補正

水準点が地面の下にいたり、三角点の標石が地面より飛び出したりしているために、各測点で重力計を標高点から同じ高さに設置することは難しい。その高さの違いの補正を器械高補正という。ここでいう器械高とは、水準点の標盤や三角点の標石などの標高点から重力計の上面までの高さで、重力測定時に測定しておく。器械高を d とすると器械高補正値 C_h は、

$$C_h = 0.3086 \times d \text{ mGal} \quad (6)$$

によって得られる。

4.3.4 ドリフト補正

基点での朝と夕方での測定重力値に潮汐補正と器械高補正を施してもなお、両者の値は僅かに異なる。この残差を重力計の系時変化（ドリフト）と見なして行う補正をドリフト補正という。ドリフトの大きさはラコスト重力計の場合、0.1mGal/日を越えることはまずないので、ドリフトが 0.1mGal 以上となった場合には、重力計に何らかの異常が生じたと考えてその日の測点については再測を行った方がよい。

ドリフトは時間に応じて直線的に変化したと考えるので、基点における閉塞開始時の測定時間と測定値を T_1 、 g_1 、閉塞終了時の測定時間と測定値を T_2 、 g_2 とすると、任意の時間 T ($T_1 < T < T_2$) におけるドリフト補正值 C_d は、

$$C_d = (g_2 - g_1) \times (T - T_1) / (T_2 - T_1) \quad (7)$$

となる。

4.3.5 基点の絶対重力値の加算

最後に、各補正を施した各測点の観測値から基点の観測値を差し引いて（各測点と基点との相対重力値）、基点の絶対重力値を加算すれば、各測点の絶対重力値が得られる。

5. 重力異常

重力測定によって得られた各点の絶対重力値には、地球の標準的な重力（正規重力）や測点個々の高さや周囲の地形の影響が含まれており、そのままでは解析に用いることはできない。そこで、観測重力値より、地下構造が均質だとしたときの理論重力値を差し引き、地下構造の不均質に起因する重力異常を計算する必要がある。以下の計算式によって計算される重力異常をブーゲー異常 (g_B) という。

$$g_B = g_{obs} - \gamma + \beta h - 2\pi G \rho h + \rho T + C_A \quad (8)$$

ここで、 g_{obs} : 観測重力値、 γ : 正規重力、 βh : フリーエアー補正值、 $-2\pi G \rho h$; ブーゲー補正值、 ρT : 地形補正值、 C_A : 大気補正值である。

5.1 正規重力

地球は完全な球ではなくて楕円体をしており、また自転による遠心力も働くために、両極では赤道に比べて、重力の大きさが約 5.2Gal ほど大きい。東京付近では、北へ 1km 移動すると重力は約 0.77mGal 小さくなるので、測点の緯度の違いによる差を補正する必要がある。地球を完全で均一な回転楕円体と仮定すると、その表面の重力（正規重力： γ ）は、次の正規重力式で与えられる。

$$\gamma = \frac{a\gamma_a \cos^2\phi + b\gamma_b \sin^2\phi}{\sqrt{a^2 \cos^2\phi + b^2 \sin^2\phi}} \quad (9)$$

ここで、 ϕ は測点の緯度である。また、この計算に必要な、 a (赤道半径)、 b (短軸半径)、 γ_a (赤道上における正規重力)、 γ_b (極点における正規重力) 等のパラメータは、人工衛星の軌道を計算することによって求められ、地球物理学連合 (IUGG) の総会で測地基準系として公表されている（「現代測地学」編集委員会編、1994）。測地基準系は新たなデータが得られた時点で改訂されるが、勧告された年をとって測地基準系 1967 や測地基準系 1980 と呼ぶ。測地基準系 1967 のパラメータを用いれば、正規重力は次の近似式によって計算できる。

$$\gamma_{1967} = 978031.85 (1 + 0.005278895 \sin^2\phi + 0.000023462 \sin^4\phi) \quad (10)$$

現在では、最新の測地基準系 1980 に基づいた近似式

$$Y_{1980} = 978032.67715 (1 + 0.0052790414 \sin^2\phi + 0.0000232718 \sin^4\phi + 0.0000001262 \sin^6\phi + 0.0000000007 \sin^8\phi) \quad (11)$$

によって、正規重力を計算している。

5.2 フリーエア補正

重力測点が高いところであれば、地球の中心から遠ざかることになり重力値は小さくなる。このような測点の高低を補正する必要がある。地表付近での重力の鉛直勾配 β は、0.3086mGal/m であるから、測点の標高を h とすると、フリーエア補正值は、

$$\beta h = 0.3086h \quad (12)$$

で求められる。

5.3 ブーゲー補正

ブーゲー補正と次の地形補正は、海水準面より上にある地殻物質による影響を取り去るための補正である。地殻物質の補正を、地形が平坦としたときのブーゲー補正と地形の凹凸のみを補正する地形補正とに分けて補正するのは、昔は計算機の能力が低かったために地形の凹凸を補正することが難しく、ブーゲー補正のみで地形補正を省略することが多かったという歴史的な経緯による。地殻物質を厚さが h で仮定密度が ρ の無限平板と仮定すると、ブーゲー補正值は次式で計算できる。

$$-2\pi G\rho h = -0.0419\rho h \quad (13)$$

地球の曲率による遠方の落ち込みを考慮する場合、補正範囲が半径 60km 程度であれば、次の近似式で実用上十分な補正值が得られる(地質調査所重力探査グループ、1989)。

$$-2\pi G\rho \left\{ h \left(1 - \frac{h}{2S} \right) + \left(\frac{h}{R} \right) \left(\frac{S}{2} - h \right) \right\} \quad (14)$$

ここで、 S :補正の半径、 R :地球の平均曲率半径である。 S は次の地形補正の範囲と一致させる必要がある。

この補正と次の地形補正で重要なのは、最適な仮定密度 ρ を選択するということである。この仮定密度の推定方法については、6.4 章で詳しく説明する。

5.4 地形補正

測点の周囲 (60km 程度) の地形の凹凸を補正する。国土地理院の国土数値情報による 250m メッシュデータや、最近公表された 50m メッシュデータ、さらに詳細な地形補正が必要な場合は、周囲 20m 程度の範囲の地形スケッチからデジタル地形モデル(DTM)を作成して、角柱モデルの理論重力式などにより単位密度あたりの補正量(T)を求め、仮定密度 ρ を乗じて地形補正值とする。

5.5 大気補正

5.1 で述べた正規重力値は、大気の質量も楕円体内部に押し込められているとして計算される。そのため、測点より外側に存在する大気の補正が必要である。この補正值 C_a は、

$$C_a = 0.87 - 0.0965 \times 10^{-3} \times h \quad (15)$$

で得られる。

5.6 グリッドデータ化

重力の測定は点で行われるが、重力異常を定性的に解釈したり重力異常から地下構造を解析する場合など、重力異常を面として求めたい場合が多い。例えば、現地調査から各測点のブーゲー異常値の計算までの過程におけるエラー、例えば測点位置の誤認や数値の入力ミスなどを見つけるには、面データの表現手法であるコンター図を書いてみればよい。コンター図でエラーの点は、単独の目玉として現れる。

面データは通常、等間隔のメッシュ（格子）データとして表現される。メッシュデータを作成するには、測点と測点の間を何らかの方法で補間して、メッシュ上のブーゲー異常値を求める必要がある。この方法には、測点データにスプライン曲面を当てはめる方法や局所的に多項式曲面を当てはめる方法がある。どの方法が優れているとはいえないが、用いる方法によってコンター図のパターンが若干異なるので注意を要する。

重力測定データから、ブーゲー異常値の計算、面データの作成、さらにコンター図の作図によるバグデータの除去までが、重力探査の最低限の仕様である。コンター図を地質図等と比較検討して、定性的に地下密度構造を推定する場合には、このコンター図で十分な場合も多いからである。

6. 重力異常の解析方法と実例

6.1 ブーゲー異常のフィルター処理

重力測定データから作成されたブーゲー異常図のみでは、目的とする構造がよく読み取れないことが多い。そのため、ブーゲー異常図に様々なフィルター処理を施して、ブーゲー異常図に含まれる情報の抽出を行う。フィルターには様々なものがあるが、代表的なフィルターを以下に紹介する。

6.1.1 水平勾配

ブーゲー異常が例えば、水平方向 1km の間でどの程度変化するのかを調べ、断層の位置を推定するような場合に用いられる。断層が地表付近にあれば、断層の位置を水平勾配の最も大きい箇所として推定することができる。グリッドデータから計算する場合のブーゲー異常の水平勾配（方向性なしの場合）は、次式で定義できる。

$$g_h'(i, j) = \left[\left(\frac{g(i+1, j) - g(i, j)}{s_1} \right)^2 + \left(\frac{g(i, j+1) - g(i, j)}{s_2} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (16)$$

ここで、 s_1 、 s_2 はそれぞれ x、y 方向のグリッド間隔である。

6.1.2 鉛直 2 次微分

地下に空洞や断層がある場合、その縁の直上でブーゲー異常の鉛直 2 次微分が零になることが知られている。重力の鉛直微分を直接測定することは難しいが、鉛直 2 次微分の場合、次のように二つの水平微分の和として計算することができる。

$$g_v''(i, j) = \frac{1}{s_1^2} \{2g(i, j) - g(i-1, j) - g(i+1, j)\} + \frac{1}{s_2^2} \{2g(i, j) - g(i, j-1) - g(i, j+1)\} \quad (17)$$

鉛直 2 次微分はローカット・フィルターの一種であり、ノイズの影響を非常に受けやすいため適用が難しいが、高精度の測点が近距離で多数ある場合には適用が可能である。

6.1.3 多項式による傾向面除去

ブーゲー異常の大局的なトレンド（傾向面）を、次のような多項式で近似する方法である。

$$\bar{g}(x, y) = a + bx + cy + dx^2y \quad (18)$$

多項式の係数 a 、 b 、 c 、 d は最小二乗法により決定する。多項式の次数は 2 次程度までとし、あまり高次の多項式は使用しない。また、このようにして推定した傾向面を除去した重力図を残差重力図といい、後述する地下構造解析に使用する。

6.1.4 フーリエ級数による方法

ブーゲー異常を 2 次元フーリエ級数により、

$$g_B = \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} (A_{mn} \cos m\omega_1 x \cos n\omega_2 y + B_{mn} \cos m\omega_1 x \sin n\omega_2 y + C_{mn} \sin m\omega_1 x \cos n\omega_2 y + D_{mn} \sin m\omega_1 x \sin n\omega_2 y) \quad (19)$$

と表現し、フーリエ係数 A_{mn} 、 B_{mn} 、 C_{mn} 、 D_{mn} をグリッドデータから求めた上で、ローパス、ハイパス、バンドパスなどのフィルター処理を行う方法である。カットオフ周波数などを自由に変えることができるが、解析範囲の周辺部でフィッティングが悪くなったり、全体に傾いている場合などへの適用には注意を要する。

6.1.5 フィルター処理の実例

図 8 は、栃木県宇都宮市の大谷石採掘後の空洞上で行った重力探査(広島ほか、1989)の結果得られたブーゲー異常図である。測点の数は約 700 で、標高は水準測量によって決定した。調査に要した日数は、約 30 日である。図 9 は、空洞の輪郭を抽出するために行った鉛直 2 次微分図であるが、予想される空洞の輪郭(中央付近の実線)にほぼ沿うように、鉛直 2 次微分の零値線が通っていることが分かる。

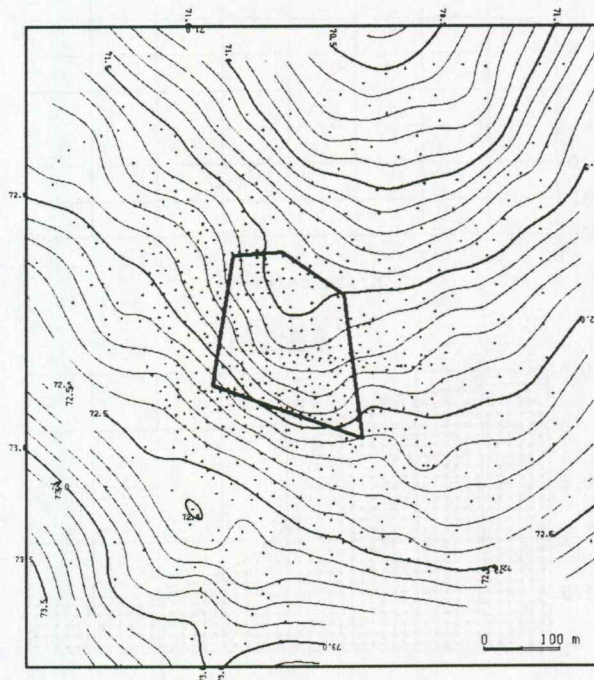


図 8 大谷石採掘地域のブーゲー異常。
コンター間隔は、0.1mGal。

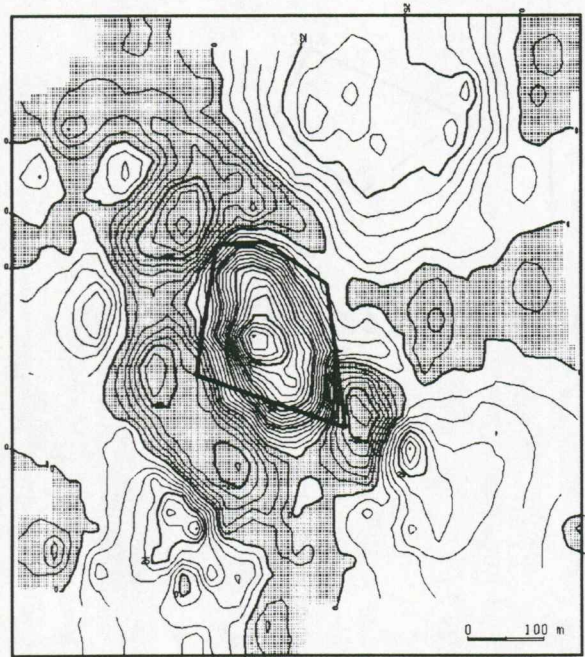


図 9 ブーゲー異常の鉛直 2 次微分図。
陰の部分は鉛直 2 次微分が負の部分。

6.2 断面構造解析

重力探査で得られたブーゲー異常図や残差重力図から、断層など一定方向に延びるような構造の断面を解析する。無限に長い構造の断面を、図 10 に示すように多角形 $[X_1, Z_1, \dots, X_N, Z_N]$ で表現する。多角形内の密度が周囲と $\Delta \rho$ だけ異なるとすると、点 P における重力異常 Δg は、

$$\Delta g = 2G\Delta\rho \sum_{i=1}^N V_i \quad (20)$$

で計算することができる (Talwani *etc.*, 1959)。ここで、

$$V_i = a_i \sin\phi_i \cos\phi_i \left[\theta_i - \theta_{i-1} + \tan\phi_i \log \frac{\cos\theta_i (\tan\theta_i - \tan\phi_i)}{\cos\theta_{i+1} (\tan\theta_{i+1} - \tan\phi_i)} \right],$$

$$a_i = x_{i+1} + z_{i+1} \frac{x_{i+1} - x_i}{z_i - z_{i+1}}, \quad \theta_i = \tan^{-1} \frac{z_i}{x_i}, \quad \theta_{i+1} = \tan^{-1} \frac{z_{i+1}}{x_{i+1}}, \quad \phi_i = \tan^{-1} \frac{z_{i+1} - z_i}{x_{i+1} - x_i}$$

である。実際の解析手順は、①反射法地震探査の結果などを参考に、地下構造モデルを多角形で作成する、②地下構造モデルによる理論重力異常を計算する、③理論重力異常と観測重力異常を比較する、④地下構造モデルを修正し②へ戻る、というステップを理論重力異常と観測重力異常が十分に一致するまで繰り返す。

上で述べた方法では、人間がモデルを修正していく必要があるが、2層構造のように単純な構造が仮定できる場合にはモデルを解析的に解く方法もある (牧野ほか, 1996)。図 11 は、牧野ほか(1996)によって解析された神戸地域の断面構造である。

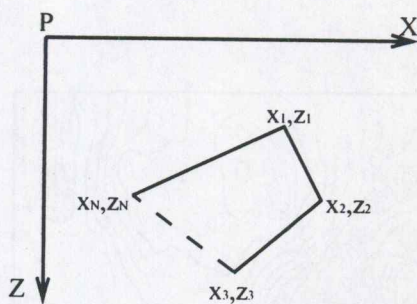


図 10 2次元構造による重力異常の計算

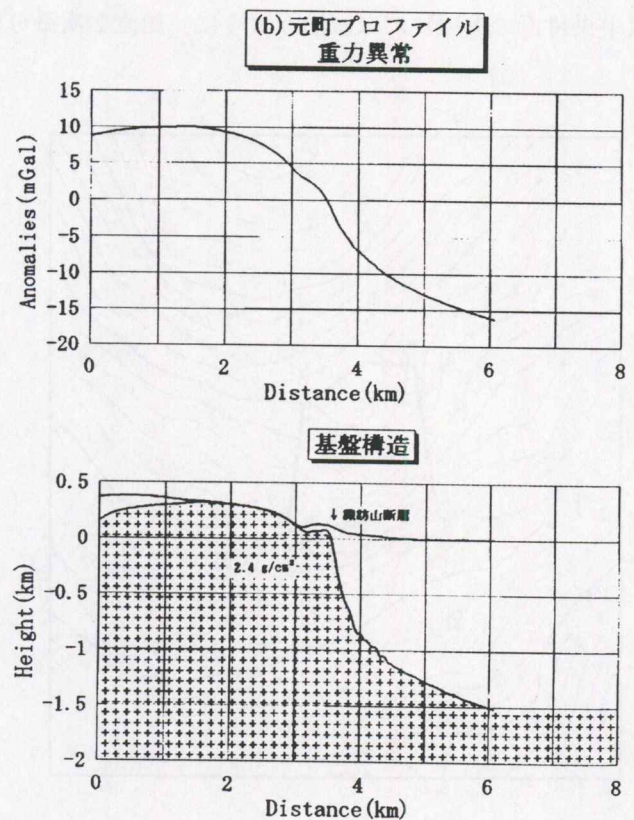


図 11 重力データより解析した神戸地域の断面構造

6.3 3次元構造解析

ブーゲー異常から地下の3次元構造を解析するものであるが、モデルの自由度が大きいため複雑なモデルでは解析できない。そのため、地下構造を基盤とその上の被覆層の2層構造と仮定して、2層間の境界の深度分布を求める場合がほとんどである。解析の方法は、①断面構造解析を複数行って、ブロック図として組み立てる、②基盤を角柱で近似し、角柱の高さをイテレーションにより求める、③フーリエ級数法（萩原、1978）などの方法がある。

6.4 地殻表層密度の推定

地殻表層部の岩石の平均密度を推定するという事は、先に述べたブーゲー補正・地形補正を精密を行うという点以外に、得られた密度から被覆された地下地質を推定したり、断面・基盤構造解析の際のモデルの密度値が得られるなどの意義がある。代表的な地殻表層密度の推定方法を次に紹介する。

6.4.1 岩石サンプリングによる実測法

岩石の密度を推定する直接的な方法は、調査地域の岩石をサンプリングして、実験室で密度を実測する方法である。図12に各種の岩石の密度の実測値（強制湿潤密度）を示す。この方法により推定した地殻表層密度は、岩石が実際にフィールドにあるときの空隙率や含水率が正確に求められないことから、重力の補正や解析用として使うには問題がある。そのため、以下のように重力データから地殻表層密度を推定する方法が考えられてきた。

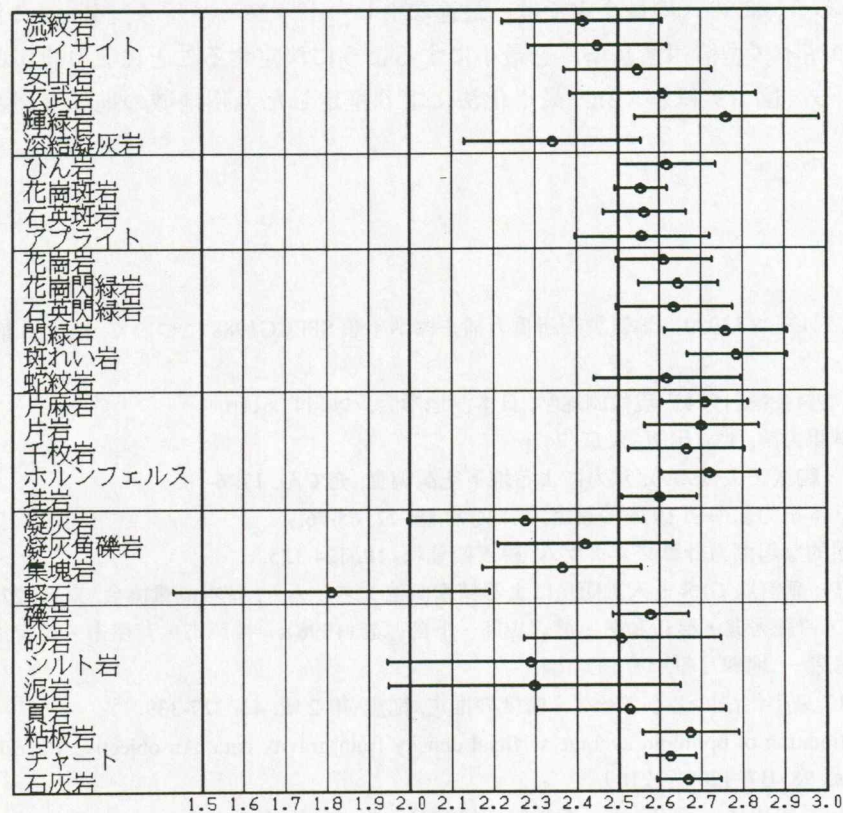


図12 各種岩石の強制湿潤密度の実測値（村田ほか(1998)により作成）。

単位は g/cm^3 で、バーの長さは標準偏差 ($\pm 1\sigma$) を示す。

6.4.2 F-H 相関法

まず、 $F = g_{obs} - \gamma + \beta h + C_A$ 、 $H = 2\pi Gh - T$ 、と置くと、(8)式から

$$F = \rho H + g_B \quad (21)$$

を得る。ここで今、真のブーゲー異常を” 平均値 \bar{g}_B の平面” と仮定すると、 N 個の重力データ $[F_1, \dots, F_N]$ 、 $[H_1, \dots, H_N]$ から、次の最小二乗問題の解として地殻表層密度 ρ を推定することができる。 \bar{g}_B は ρ と同時に求めることができる。

$$\sum_{i=1}^N [F_i - \rho H_i - \bar{g}_B]^2 \Rightarrow \min \quad (22)$$

6.4.3 ABIC 最小化法

F-H 相関法では、真のブーゲー異常を平面と仮定するため、ブーゲー異常と地形に相関関係があると、推定誤差が大きくなる。そこで、真のブーゲー異常を” 観測値に当てはめた滑らかな曲面” と仮定することにより、ブーゲー異常と地形の相関の影響を排除する方法が ABIC 最小化法 (村田、1990) である。この方法では、ブーゲー異常を表す曲面関数を $f(x, y)$ とすると、

$$\sum_{i=1}^N [F_i - \rho H_i - f(x_i, y_i)]^2 + \sum_{k=1}^2 \omega_k \iint \|\Delta^k f\|^2 dx dy \Rightarrow \min \quad (23)$$

の最小化によって、地殻表層密度 ρ と曲面関数 f を同時に推定する。最小化関数に曲面の 1 階および 2 階微分の二乗の全域に渡る積分値を加えているのは、当てはめの残差と曲面の滑らかさの間のトレードオフを調整するためである。この式の最小化では、最適なトレードオフ・パラメータ ω_k の決定が問題となるが、ABIC (赤池のベイズ型情報量基準) を最小にするように決定することにより自動的かつ客観的に決定することができる。図 13 は、ABIC 最小化法により推定した九州地域の地殻表層密度分布図である (Murata、1993)。

7. 参考文献

- 地質調査所重力探査グループ(1989): 地質調査所重力補正標準手順 SPEC1988 について, 地質調査所月報, 40, 601-611.
- 「現代測地学」編集委員会編(1994): 現代測地学, 日本測地学会, つくば, 611p.
- 萩原幸男(1978): 地球重力論, 共立出版, 東京, 242p.
- 広島俊男・村田泰章・駒沢正夫(1989): 重力による地下空洞調査, 充てん, 17, 6-18.
- 国土地理院(1976): 日本重力基準網 1975 の設定, 測地学会誌, 22, 65-76.
- 中井新二(1979): 実用的な起潮力計算プログラム, 緯度観彙報, 18, 124-135.
- 日本測地学会編(1991): 新訂版 GPS - 人工衛星による精密測位システム -, 日本測量協会, 東京, 272p.
- 牧野雅彦・村田泰章・遠藤秀典・渡辺和明・渡辺史郎・ト部厚志(1996): 神戸市・芦屋市・西宮市における精密重力探査(2)-基盤構造-, 地調月報, 47, 133-164.
- 村田泰章(1990): ABIC 最小化法によるブーゲー密度の推定, 地震 第 2 輯, 43, 327-339.
- Murata, Y.(1993): Estimation of optimum average surficial density from gravity data: An objective Bayesian approach, Jour. Geophys. Res., 98, B7, 12097-12109.
- 村田泰章・花岡尚之・長谷川功・須田芳朗・菊地恒夫(1998): 岩石物性値のインターネット・データベース, 物理探査, 51, 77-82.
- Talwani, M., Worzel, J. L. and Landisman, M. (1959): Rapid gravity computations for two-dimensional bodies with application to the Mendocino submarine fracture zone, Jour. Geophys. Res., 64, no.1, 49-59.

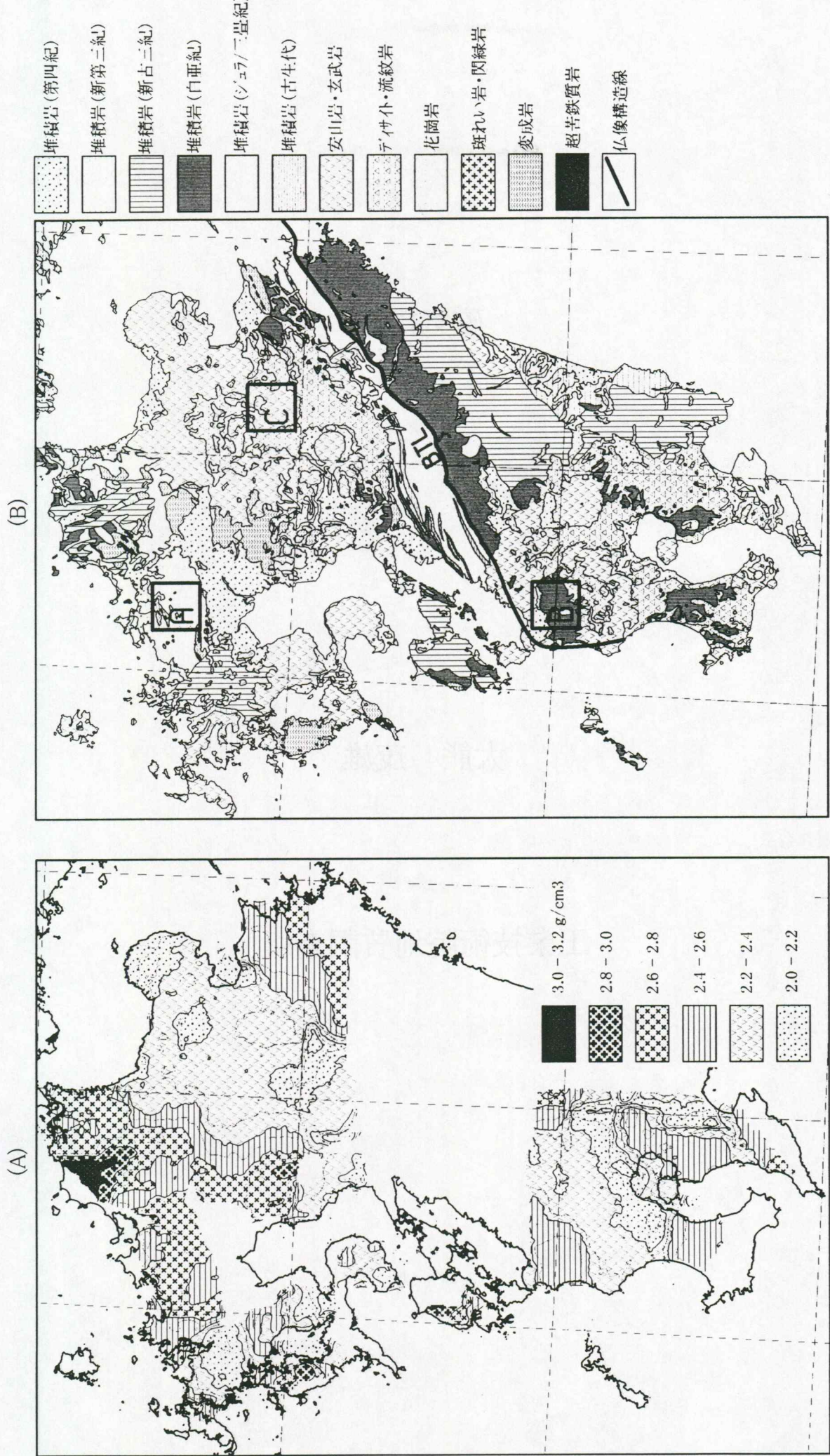


図13 重力データによって推定した九州地域の地殻表層密度(A)と同地域の地質図(B)