総 論

日本の重力探査事情—地下構造とのかかわり*

駒 澤 正 夫**

(Received October 26, 2002 ; accepted January 10, 2003)

Gravity exploration of Japan—Underground
structure by gravity analysis

Masao Komazawa

Abstract: This article introduces the gravity methods for petroleum explorations. Gravitational methods are based on the sensitive measurement at the surface of small variations in the gravitational field, but the measurement technology of land gravimeter has already established. In the present, the new trends of gravity measurement are coming. Gravity measurements by ship and airplane are possible. Therefore, Bouguer anomaly map of Japan map was compiled from about 350,000 land gravity data, about 1,000,000 ship-borne gravity data and altimeter data from satellite in area where observation data are sparse, and the gravity basement of Japan was obtained from these data.

New technology, which is capable of accurately measuring the full gravity gradient tensor, has only recently become available in the exploration geophysics domain from military research projects (e.g. the Bell Geospace gradiometer). Gravity gradiometry data have superior characteristics to traditional gravity measurements. The components of the gravity gradient tensor hold much more information about the subsurface than do traditional potential field measurements. Such gravity data can constrain geology in areas where seismic interpretation is difficult, such as sub-basalt and sub-salt. These data are capable of resolving shallow structures, such as the limbs of salt domes, far more accurately than can seismic surveys.

Key words: salt dome, gravity basement, shipborne gravity, airborne gravity, Bouguer anomalies, gravity gradiometer.

1. はじめに

本稿は、平成14年度の石油技術協会で企画されたシンポジウム「物理探査の探鉱開発への貢献—過去・現在・未来」のうちの重力探査についての講演をまとめたもの

* 平成14年 5月29日、平成14年度石油技術協会春季講演会地質・探鉱部門シンポジウム「物理探査の探鉱開発への貢献—過去・現在・未来—」にて講演 This paper was presented at the 2002 JAPT Geology and Exploration Symposium "Contribution of geophysical prospecting to exploration and development—past, present, and future—" held in Akita, Japan, May 29, 2002.

** 産業技術総合研究所地球科学情報研究部門 National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

である。なお、重力探査での直接的な成功例が地震探査などに比べると圧倒的に少なく、著者自身も石油探鉱に従事していないためレビュー的な記載となっている。

内容として探査の最新情報と今後の動向にも簡単に触れる。最近の測定技術の成果として船上重力測定データが集積しており、陸域データとのコンパイルを行った日本列島周辺の重力異常も作成されており、それを紹介する。また、重力異常から得られた構造が堆積盆の定量的評価に資することを述べる。今後の技術動向として、空中重力測定や重力偏差測定にも触れる。

2. 重力探査の過去から現在（日本および世界）

重力探査の石油探査への適用は、重力異常そのものを

測定する方法からではなく、重力勾配（重力の水平一次微分もしくは鉛直一次微分）を測定し地下構造を探ることから始まった。具体的にはハンガリーの物理学者エトベスの考案によるトーション・バランス（重力偏差計）というものが使われ、その装置で石油とかかわりが大きい岩塩ドームが実際に検出できるかを試みた。キノコ状の形をした岩塩ドームは、時として1キロメートル（0.6マイル）以上の厚さを持ち、その岩塩ドームの側面に膨大な量の石油や天然ガスがしばしば埋蔵されていることがあるからである。岩塩ドームは必ずしも地表面には表れないので発見が難しいことになる。しかしながら、岩塩は大抵の岩石に比べれば密度が小さいので、周りに比べれば弱い引力しか生じないことになる。重力の低い異常域の伸びが地下の岩塩ドームの概略を示すことになる。実際には、トーション・バランスの観測では重力が減少していく変化量が観測される。

1924年にアメラダ石油会社の地質学者は歴史的な最初の発見をした。つまり、エトベスのトーション・バランスで重力勾配を測定することで地下に埋没した岩塩ドームを発見したのである。そして、多くの発見が短期間に続いた。地質学者は重力偏差計をさらに複雑な地下構造の地質図作成に組み込んだ。現在のヒューストン市の地質構造（岩塩ドームの発達によって生じた堆積岩の傾斜構造や、断層によって切られた堆積岩の構造）は、トーション・バランス装置の結果から作られた地質図に起源を持つ。1935年までには、石油探鉱においては重力勾配

の測定によって地下探査をすることがルーチン化するようになったといわれている。Fig.1に1917年にドイツ・ハノーバーでトーション・バランスを使って行われた例を示す（ベル，1998）。重力勾配の測定結果は周辺の岩盤より低密度の岩塩の分布を示している。岩塩ドームが形成されることで、周囲の堆積層に変形が生じ石油や天然ガスが岩塩ドームの周辺に集まってくる（ハッチを付けた部分）。

こうした初期の成功にもかかわらず、重力値そのものを測定するスプリング式の重力計が開発されたため偏差計の全盛期は短かった。理由は、短波長成分が卓越する重力勾配を測る重力偏差計はノイズに弱いのにに対し、重力計は近くの障害物に対し鈍感であった（言い換えるとノイズに強い）。さらに、重力計による測定には樹木の伐採やテントを設置する必要もなかった。重力勾配を用いる調査件数は、調査結果が地質学者には理解しにくかったことから1940年代になると急に減ってしまった（石油探査に従事する地質学者は、1930年代には初期の重力計を使うようになっていたと言われる）。大抵の地質学者は、不可解な矢印が花びら状に連なった重力勾配図（ベクトル図）より重力値そのものが直接コンターで表された重力図（等重力線図）の方が直感的に理解しやすかった。重力の大きさの直接表示を好んだことと、重力測定の簡単さも相まって、重力勾配法を用いようという機運は急激に薄れてしまった。日本でも、石油探鉱を中心に、1950年以前には重力偏差計を用いた調査が行われたが、測定能率としては1日当たり数点程度で、短期間に概査を行うには不向きなため有効な利用はなされなかった。1949年（昭和24年）にはNorth American 重力計、続いて1951年（昭和26年）にはWordon 重力計がアメリカから輸入され、重力偏差計は利用されなくなってしまった。その理由は重力偏差計に比べ重力計は可搬性に優れていることのほか、1日に測定できる測点数が平坦地ならば重力偏差計の10倍以上ということがあげられる。重力計が導入されると併行して重力データ処理法と地下構造推定のモデル計算法の研究も進められた。今日では陸上の石油探鉱に関する限り、重力探査法は実用的にはほぼ完成したといつてよい。

日本での石油探鉱を目的とした重力調査は、主として石油資源開発株式会社と帝国石油株式会社によってなされ日本の平野部の大部分が調査された。両社を合わせた測点数は、13万点に達し日本における重力測定点数の3分の1になる。

陸上の重力探査についての現状をまとめると、ハード面の原理や精度といった点については、ほぼ40年前に確立しており、基本的な点では目立った技術革新が最近で

Fig.1 Result of Etovos's torsion balance (Bell, 1998). Survey was carried out in the area of salt dome, Hanover, Germany. Hatched area is oil content layer.

はあるとは言えない。しかし、利用技術という点では改良が進んだ。1つには、バネの動きを静電容量の変化として電気的な外部出力として取り出すことである。ラコスト重力計では外部出力端子にガルバノメータを接続すれば目視測定に比べ有効桁を多くとることができるし、アナログ-デジタル変換してコンピュータ処理をしてノイズ除去をすることも可能で、モニタリング等に利用されている。シントレックス重力計やブリス重力計では、外部出力装置と計算機を重力計に組み込んだ一体型になっており、フィルタ演算が自動的になされ測定に個人差の入る余地を排除している。

3. 最近の重力探査の成果

3.1 陸上重力測定データの集積

最近の日本での重力探査の成果として高精度の重力図の作成が上げられる。産業技術総合研究所では、旧地質調査所時代から独自の重力調査データに加え、長年にわたって石油開発会社や金属鉱山会社などの民間企業を含む各機関の協力を得て探査データを蓄積し、重力データベースを構築してきた。データとしては、陸域の約40万点、海域の約100万点以上の測定データをデジタル化し、測点密度、精度とも世界的に見ても第一級のものである。Fig. 2 に測点図を示す。一部の山岳域を除いて重力測定がなされていることを示している。それらデータの

Fig. 2 Gravity measurement points of Japan. The number of land and marine of gravity stations are about 400,000 and about 1 million, respectively.

うち地質調査所、金属鉱業事業団、新エネルギー・産業技術総合開発機構の3機関の生データ（緯経度、標高、重力値、地形補正值など）である重力測定データベースは、すでに公表されており自由に利用できる（地質調査所, 2000）。なお、名古屋大学でも大学を中心とした重力測定データベースを構築しており近々公表される予定なので両者のデータを利用すればほぼ日本列島を1平方キロメートル当たり1点以上の高密度のデータとなる。

3.2 船上重力測定データの精度向上

船上重力計は、航行しながら連続的にデータを取得し、動揺による加速度は平滑フィルタで除去するというものである。海底重力計に比べれば精度は及ばないが広範囲を短期間で調査できることから海域調査の主流となった。船上重力計としては、東大海洋研では自力開発による友田式船上重力計（TSSG）が、地質調査所ではLaCoste & Romberg 社製船上重力計が、海上保安庁水路部や海洋科学技術センターではBodenserwerk 社製の船上重力計が各々使われている。

船上重力データの測定精度は1mGal（ミリガル）程度と考えられているが、その他にも移動する船舶はエトベス効果（地球の中心に対して移動する船舶が生ずる遠心力）や位置の誤差などのため、1mGalのコンター間隔での表示は困難である場合が多い。しかし、最近の調査はGPSの利用で測位精度が向上し、交点での誤差も1mGal程度での編集が可能になった。

3.3 陸・海域データのコンパイル

陸・海域データのコンパイルの成果として100万の1日本列島の重力図が3枚組のセットで刊行され（駒澤ほか, 1999）、日本重力CD-ROMも出版された（地質調査所, 2000）。日本列島の広域重力場を精緻に提示しており大規模な構造の把握に有効である。なお、CD-ROMの内容としては、①1/100万の日本列島の重力図を描画するのに用いた1kmのグリッドデータベース、②地質調査所、金属鉱業事業団、新エネルギー・産業技術総合開発機構の3機関の生データ（緯経度、標高、重力値、地形補正值など）である重力測定データベース、③重力異常図、地質図とのオーバーレイなどの図化データが収納されたイメージデータベース、から構成される。特に、地質図上に重力データが表示できるので地質構造を直感的に把握するのに役立つ。また、海域の重力データは従来よく用いられていたフリーエア異常ではなく地形補正を施したブーゲー異常を採用したので海底より下の地下構造が見られるようになっている。Fig. 3 に秋田地域を例として日本重力CD-ROMに収録した画像データを示す。当然、測点密度が高いエリアでは測定生データを用いて格子間隔を小さくして独自に精密な重力

(a)

(c)

Fig. 3 Sample of Japanese gravity CD-ROM (Geological Survey of Japan, 2000). Akita area is adapted as the example. (a) Bouguer anomalies of Japan. (b) Bouguer anomalies of Tohoku district. (c) Bouguer anomalies around Akita prefecture.

(b)

図を描くことも可能である。

4. 重力解析と石油貯留構造

4.1 重力解析の概要例

石油の貯留層構造を反射法地震探査のように高精度で直接的に重力探査結果から得ることは難しいため重力探査結果は構造の概略を把握することに重点を置くことになる。重力異常を説明する構造は無数にあるため、何らかの方法で構造を設定しモデリングを行い重力異常が無理なく説明できる構造を試行錯誤で探っていくことになる。初期構造として地表で見られる地質構造や反射法地

震探査で得られた速度構造を与えることもできる。国内の反射法地震探査は二次元でデータが取得される場合が多いが、そのデータをコントロールとして重力データから三次元的な構造を概査的に描き出すことができ、石油探鉱では重力データが最も大きく貢献するものと考えられる。

石油の貯留構造として既に触れているように海外の例では岩塩ドームがある。つまり、きのこ状の低密度の岩塩ドームが形成されることにより堆積層が背斜構造と同じような擾乱を受けて石油や天然ガスが岩塩ドームの周辺に集まってくるというモデルである。具体的な岩塩ドームの重力異常のパターンは、Nettleton (1976) に参照できる。低密度の岩塩ドーム構造が円形の低重力異常を形成していることが分かる。参考資料として Fig. 4 に典型的な岩塩ドームのモデル計算を示す。しかし、日本の場合は岩塩ドーム自体の構造は稀で円形の低重力異常を探すという方法は有効ではない。日本では背斜構造に関連づけられる高重力異常を検出し、詳細な構造は反射法地震探査に委ねるという利用法にならざるを得ない。ただ重力異常が示す高異常は、基盤構造の変位を表していることが多く石油貯留層そのものの背斜構造を反映していないことに注意を払う必要がある (Fig. 5) (物理探査学会, 1989)。

地質構造によっては反射法地震探査が有効でない場合に、重力データの解析結果から石油貯留層の背斜構造を描き出すこともある。具体的な例としては、高速度の蒸

Fig. 4 Gravity anomalies of salt dome. The low anomalies are matched as the region of low-density salt dome.

Fig. 5 Schematic concept of high gravity anomaly (Society of Exploration Geophysicists of Japan, 1989). This model shows that high anomaly is inferred from deep basement uplift, not anticline.

発岩が浅部を覆っている場合があげられる。こうした地質構造では、浅部の高速度・高密度の蒸発岩で多くの弾性波エネルギーが地表へ反射し深部へ透過する弾性波エネルギーが少なく蒸発岩層より深部の石油貯留層をうまくとらえることができなかった。一方、重力解析では、構造の分かっている高速度層に高密度構造を当てはめ、重力効果を剥ぎ取って蒸発岩で覆われた下部層の構造を推定した。その後、試掘を行い石油兆候を確認したとの

ことである (大塚・小川, 1977)。

4.2 日本の重力基盤深度の算出

現在、日本の数 km 程度の地殻構造を調べる方法としては、試錐データからの推定や弾性波探査等を用いるのが精制的にも優れ、複雑な構造にも対応できる点で理想である。しかし、全国を均一なレベルで構造を見るのにはデータが不足、もしくは偏在している。一方、全国でほぼ均一にデータがそろっている重力データを用いて

単純な仮定から重力基盤を求めることができる。それを地質的あるいは音響的な基盤深度に対応させることにより、ある程度精度についての検討もできる。

ここでは、重力基盤を以下のように定義した。花崗岩等の深成岩類の露頭は全て基盤とする。一部の堆積岩についても、先新第三系、さらに固結が進んでいると考えられる最下部中新統の一部も基盤に含めた。火山岩につ

いては、計算過程では基盤としなかった。

計算には、仮定密度 2.67 g/cm^3 のブーゲー重力異常と、地形標高値（海域では船上重力データのため海面高）の各々 1 km メッシュデータを用意する。また、解析対象の深度である数 km 程度の構造より半オーダー以上深い構造による広域傾向面の重力異常は、 10 km の上方接続フィルターで求めた。さらに、局所的な異常

Fig. 6 Gravity basement of Japan. The density contrast between basement and sedimentary layer is assumed to be 0.5 g/cm^3 . Contour interval is 250 m and the value is height above sea level in meter.

や誤データが作るノイズ成分は、250m の上方接続フィルターで除去した。上方接続フィルターとは観測点(面)をさらに上方に持っていった場合の重力異常を求めるフィルターで、一種のローパスフィルターであり、異なる高さの上方接続フィルターを組み合わせると性質の良いバンドパスフィルターを設計することもできる。以上のフィルター操作から広域傾向面を除去したものが残差重力異常で、先新第三系基盤の起伏による構造から生成されていると考えられるものである。

解析の方法としては、仮定した基盤の起伏から計算される重力異常値が観測重力値に収束するように基盤形状を徐々に修正させて最終的に最適解を求める逐次近似法を用いた(駒澤, 1984)。地下構造を被覆層と基盤の均質2層にモデル化した。基盤の密度は地殻の基盤を構成

する花崗岩や先第三紀基盤の平均的な密度と考えられる 2.67 g/cm^3 という値を採用した。被覆層、つまり、新しい堆積層や火砕堆積物の密度値としては $2.0 \sim 2.3 \text{ g/cm}^3$ (平均値としては 2.2 g/cm^3 程度) が考えられるので、本解析では一律に密度差を 0.5 g/cm^3 とした。また、露出基盤をコントロール点とし、また、両端に露出基盤がない所では、必要に応じ、試錘データをコントロール点としている。

この均質二層モデルは、密度が大きい層が小さい層の下にあることが前提となっており、実際の構造が多重構造となっているなど、モデルと異なる場合には、実際の基盤深度も異なってくることになる。また、今回使用した重力データは1km という格子間隔であるため、断層などの急激な構造変化やローカルな地質異常を拾い上

空中重力測定

船上重力測定を2000ftの値に変換

Fig. 7 Example of airborne gravimetry of Japan (Segawa *et al.*, 2002). Survey area is Suruga Bay. The result of airborne resembles that of shipborne.

げているとは言えないので、得られた構造は全体に平滑化されていると考えておくのが妥当なところであろう。したがって、今回の算出結果をそのまま実際の地質基盤の深さに当てはめる場合、大きな誤差を含んでいる場合があることに注意しなければならない。日本の重力基盤を Fig. 6 に示す。石油の貯留層と関連を持つ堆積盆の概略の形状が分かる。

5. 最近の技術動向と今後の展開

5.1 空中重力測定

空中重力測定は、航行しながら連続的にデータを取得し、動揺による加速度は平滑フィルタで除去するなど船上重力測定技術と共通点が多い。ただし、空中重力測定は、位置の誤差のほかに測定精度を左右するエトベス効果が飛行速度の大きさのため極めて大きい。また、飛行高度の誤差（1メートルあたり 0.3 mGal）もそのまま重力異常値の精度に関わるため、5 mGal の精度を得るのが限界といわれ、10年くらい前までは未開地の概査以外は行われなかった。今日では、DGPS の登場で測位精度が向上したため測定値の誤差が 1 mGal 程度に抑えられるまでになったといわれる。調査には、動揺による鉛直加速度の除去が比較的簡単にできること、広域調査が比較的容易なためヘリコプターでなく低速度で巡航させた固定翼の航空機が使用されることが多い。

日本での空中重力測定の需要は、陸域の精密測定に加え船上重力データの蓄積も多いためあまり大きいとは言

えない。しかし、船上重力測定は数千トンクラスの調査船で行われるため沿岸部や水深が浅いところでは調査が行われていない。調査データが存在しない海陸接合部は、地震活動とかかわりのある構造線の延長域であったり、石油胚胎層のある堆積盆が存在する地域であって極めて重要な地域である。空中重力測定は、船上重力計や陸上重力計では測定できない海岸線付近や沼地、湖などの陸水域、難地形域の広域調査に活路が見いだせる可能性がある。Fig. 7 に駿河湾で行われたヘリコプターによる空中重力調査の例を示すが、広域調査では十分実用の域に達しているのが分かる（瀬川ほか、2002）。

5.2 重力偏差測定

最近、過去の遺物と考えられていた重力偏差計が現代のハイテク技術と結びついて物理探査に利用されている（Bell, 1998）。現代の重力偏差計は、もともとは潜水艦の航法機器として開発されたもので、捻ればかり（エトベスのトーションバランス）を用いず 6 対の電子制御タイプの加速度計（重力計といってもよい）より構成されている。当然、2 個の加速度計の距離が無視できるほど小さければその差は重力勾配を反映することになる。重力センサーの機械的なドリフトは、3 つの回転台を使ってセンサーの組み合わせを換えることでドリフトをキャンセルするようになっている。重力勾配は地下構造をより詳細に描き出すことができるので、従来の重力調査に大きな改良がはかられる可能性を秘めている。また、重力はスカラー量の 1 個の値のみであるのに対し、重力勾

重力図 重力図は、石油や天然ガスがある場所を絞り込むのに役だっている。ここに示す重力図は、1995年にミシシッピデルタの沖合（左上の地図の赤い矩形の地域）で行われた調査の結果である。左の図は重力偏差の Gzz 成分

の測定が地下の岩塩ドームの形状を描きだしていることを示している。右の図は同一地域の重力測定の結果である。この図では岩塩ドームの形がおぼろげに見えるにすぎない。

Fig. 8 Example of gravity gradiometry (Bell, 1998). The survey was carried out in the Gulf of Mexico.

配は9個のテンソル量(鉛直, 東西, 南北の重力3成分が各々3方向に変化しているものを表す)で表されるため, 重力データの宿命である構造解析の任意性が軽減す

る。しかし短所として局所異常に敏感なことがあるので, 実際の利用としては, ある程度対象物から距離が確保できる航空機や船舶に搭載しての測定が最も有効と考えられる。航空機や船舶での不規則な動揺は重力に対しては相当のノイズを生じさせるが, 2つのセンサーとの差をとるディファレンシャル測定は自動的にその種のノイズは除去されることになるので好都合である。Fig. 8にメキシコ湾で行われた重力偏差計による調査の例を示す(Bell, 1998; ベル, 1998)。重力図では不鮮明な岩塩ドームの低重力異常が, 重力偏差計による調査では岩塩ドームの領域が鮮明に現れているのが分かる。

5.3 アルチメトリー

重力異常とジオイドには密接な関係がある。ジオイドは重力場に規制される無数にある等ポテンシャル面のうち海水準(湖面でも等ポテンシャル面を形成する)に一致するものをいう。重力の方向は等ポテンシャル面に対して垂直方向になり, 等ポテンシャル面に沿う方向には力が加わらないのでジオイド面上の水は動かず海面を形成することになる。もっともここで海水準といったのは近似的にという意味で, 実際には波浪, 海流, 潮流といったものが存在するので海水準は厳密な等ポテンシャル面とは多少ずれる。重力は, ジオイド面における重力ポテンシャルをジオイド面に対して垂直方向(鉛直線)に微分したもので定義される。当然, 重力場が分かれば, それを鉛直方向(楕円体の垂直線とは一致しない)に積分すればジオイドの形状を求めることもできる。

アルチメトリーとは, 衛星高度計とでも訳せられるもので, 衛星からマイクロ波を照射し反射してくる波から海面のレベルを精密に決定したもの, もしくはその技術をいう。海面を精密に測る方法は衛星だけでなくキネマティックGPS法によっても海面あるいは湖面の形状を決めることができるので局所的な重力場が求められる可能性があるが, それはアイデア, 実用の両面からも面白い試みと言える。Fig. 9にキネマティックGPSにより求めた鹿児島湾の重力異常の例を示す(Sugihara and Komazawa, 1996)。

6. まとめ

海域の重力調査の分野では従来, 船上重力計と海底重力計の測定がなされただけであったが, 深海曳航型の重力計の開発について言及する。深海域での船上重力測定では, 重力異常を発生させるソースからの距離が遠くなるため短波長の異常は減衰してしまう。一方, 海底重力計では1点ごとに着底させて測定する必要がある, あまり効率的とは言えないし, 実際の着底深度も200m程

Fig. 9 Gravity anomalies inferred from kinematic GPS (Sugihara and Komazawa, 1996). The survey was carried out in Kagoshima Bay.

度が限界であった。Zumberge *et al.* (1997) は海域での重力場の精密化を目指して深海曳航式重力計を開発した。これは、LaCoste & Romberg 船上重力計を改造し、2つの耐圧容器（各々経 56 cm）の中に納め、後方にセンサーとそれを載せる水平安定台、前方にそれらを制御するコンピュータを配置し、船上から同軸ケーブルをとおして電流の供給と監視が行えるようにしたものである。1~2ノットの速度で海底から 100 m 程度上方を曳航することになるが、よい結果を得るためには、船のピッチング等の影響を最小限にして動揺の少ない安定な曳航を実現する必要がある。Zumberge *et al.* (1997) は曳航深度 935 m での数回のテストの結果 0.2~0.4 mGal の精度が得られたとしている。

今回は、石油探査に直接筆者が携わっているわけではないため、具体的な経験例を示せなかったのは残念であったが、いくつかのレビューにより石油探鉱にかかわる重力探査の実情がある程度は示せたと思われる。特に、重力偏差計を用いた空中重力探査は今後の探鉱に利用される可能性が高いと考えられる。日本でも独自技術により空中重力計が開発されたことにより、探鉱経費の問題が解決されるという条件付きではあるが、今後の展開が期待される。重力探査は石油探鉱でも広域を短期間にカバーできるという点では、空中磁気探査と同様重要な役割を担うことは明らかである。

また、重力測定にかかわる技術ではないが、高精度に重力場を決めるという点では、GPS の利用が大きく貢献している。ここ数年の間にディファレンシャル GPS の機器は安価に入手できるようになり、精度も従来の測地用のものに迫っており、今後の重力探査ではセットでの使用は必然の成り行きとなると考えられる。

謝 辞

本論文の執筆に際し、石油探鉱の専門の見地から石油資源開発株式会社技術研究所の高井克己氏、国際石油開

発株式会社の塚田邦治氏には有益なコメントや情報をいただき、ここに謝意を表します。また、本編をまとめるにあたっては、シンポジウム「物理探査の探鉱開発への貢献—過去・現在・未来」の世話人代表である帝国石油株式会社の清水俊秀氏にはなみなみならぬお世話をいただき、ここに謝意を表します。

引 用 文 献

- Bell, E.R., 1998: Gravity Gradiometry. *Scientific American*, June 1998, 56-61.
- ベル, E. ロビン, 1998: 地下を探る新しい重力計測法 (和訳版). 日経サイエンス, 1998年9月号, 92-98.
- 物理探査学会, 1989: 図解物理探査. 物理探査学会, 239 pp.
- 地質調査所, 2000: 日本重力 CD-ROM. 数値地質図, P-2, 地質調査所.
- 駒澤正夫, 1984: 北鹿地域の定量的重力解析について. 物理探査, 37, 123-134.
- 駒澤正夫・広島俊男・石原丈実・村田泰章・山崎俊嗣・上嶋正人・牧野雅彦・森尻理恵・志知龍一・岸本清行・木川栄一, 1999: 100万分の1 日本重力図 (ブーゲー異常). 地質調査所.
- Nettleton, L.L., 1976: *Gravity and Magnetism in Oil Prospecting*, McGraw-Hill, New York, 452 pp.
- 大塚俊道・小川克郎, 1977: 地震・重力データによるエジプト・West Bakr 地域の構造解析 Phase I, 石油開発技術センター研究報告, No. 6, 21-54.
- 瀬川爾郎・E.J. ジョセフ・楠本成寿・石原丈実・駒澤正夫・長谷川博・関崎征一・高田和典・中山英二・里村幹夫・佐久間貞臣, 2002: ヘリコプター重力測定—開発研究 (1998~2000) のまとめ. 東海大学海洋研究所報告, No. 23, 1-16.
- Sugihara, M. and Komazawa, M., 1996: A kinematic GPS survey at the Northern Part of Kagoshima Bay, Japan. *International Association of Geodesy Symposia*, 115, 217-221.
- Zumberge, M.A., Ridgeway, J.R. and Hildebrand, J. A., 1997: A towed marine gravity meter for near-bottom surveys. *Geophysics*, 62, 1386-1393.