

I-3 重磁力探査における3次元解析

中 塚 正
(物理探査部)

1. はじめに

重磁力探査においては、古くから、面的な探査が行われ、地下構造の平面的な広がりと深さについて考察がすすめられており、3次元構造の探査の性格をもってきた。また、重磁力探査は、地下構造の物性との対応が明確であるとともに、ポテンシャル論によって数学的に取扱えることから、理論的にも早くから確立した探査手法であり、測定技術の進歩とともに大きく発展してきた。しかし、その探査結果から地下構造を求めるための逆解析においては、解の唯一性の欠如と言うポテンシャル場の弱点による難問が待ち構えている。

従って、探査結果の解釈のためには、他の様々な地下構造の情報を多様な形で取入れることが必要であり、いくつもの仮定が介在することとなる。その際の結果からは、何がしか客観性が失われることは避けられず、そこに導入される仮定をいかに妥当なものとするかが重要である。この点での研究は、さらに進められる必要があり、解釈を進める上では常に課題であろう。

一方、重磁力探査から生み出される重力異常図・磁気異常図は客観データであり、地球物理基本図として、それを見る人毎に、それぞれの立場での地下構造の3次元的イメージングに多大の貢献をしている。すなわち、そのデータは広く地球科学関係者の財産であり、問題意識の所在に応じて観点をかえて見つめ直すことができる。そして、その財産が価値を発揮できるためにも、正しく標準化された質の良好なデータが蓄積される必要があろう。

2. 重磁力探査の基礎

2.1 重力異常と全磁力異常

重力探査は、地層・岩石の密度のコントラストが地下に存在することによって生ずる重力の変化を検出しようとするものであり、重力強度の場所的变化を測定する。地上における重力は鉛直下方に向かうベクトルであるが、変化の原因となっている異常体による重力効果(引力)は、これと一般に斜交するため、重力の方向をも僅かに変化させる。しかし、その量(方向変化)は無視できる程度に小さいので、異常体による引力の下向分力のみが、重力の強度変化(重力異常)として捉えられる。

同様に磁力探査は、地層・岩石の磁化強度のコントラストが地下に存在することによって生ずる磁場の変化を検出しようとするものであり、磁場強度の場所的变化を測定する。地球磁場は重力と異なり、磁気緯度に応じた伏角をもつ方向を向くが、異常体のつくる磁場ベクトルは、やはり一般にこれと斜交し、磁場の方向を変化させる。異常体による磁場に比べて地球磁場（大局的磁場）が十分強いとき、その方向変化が無視でき、異常体による磁場の地球磁場方向の分力のみが、全磁力の変化（全磁力異常）として捉えられる。

ここでは、磁場・重力の強さ（絶対値）についてのみ言及したが、いずれもベクトル量であり、その方向をも測定の対象とし、それをもって地下情報の手がかりとすることも原理的には可能である。現に、プロトン磁力計の発明以前の磁場測定は、特定方向の成分または方向の測定が主体であり、地下探査の目的には、主として鉛直成分が測定されていた。しかし、プロトン磁力計の出現によって、全磁力を非常に精度良くかつ簡便に測定できるようになったため、今日の磁気探査では専ら全磁力測定が行われる。一方、重力の方向を測定するには、天測を行わねばならず、多大の労力が必要となる。そのため、効率よい地下探査には適さない。従って、重力探査においては、古くから絶対値測定のみが行われている。

2.2 ポテンシャル場の性質

静磁場・重力場はポテンシャルから導かれることは良く知られているが、限られた区域の地下構造を明らかにする物理探査においては、さらに独特のポテンシャル論の応用が導入される。

大局的な磁場・重力は、磁場で言えば地球の核内に流れる電流によるもの、重力で言えば均質な密度分布の回転楕円体で表現される地球の引力と自転による遠心力で代表され、限られた区域内では一定とみなすことができる。このような大局的な成分と、それ以外の異常体に起因する成分について考えると、重力異常・磁気異常は次のように定式化できる。

	(重力)	(磁力)	
測定ベクトル :	$G = G_R + G_A$	$H = H_R + H_A$	(1)
大局的な場 :	$G_R = G_R \cdot z$	$H_R = H_R \cdot e$	(2)
異常値 :	$G_A = G - G_R$ $\quad \quad \quad \approx G_A \cdot z$	$H_A = H - H_R$ $\quad \quad \quad \approx H_A \cdot e$	(3)

ここに、サフィックスRは大局的な場 (Regional Field), サフィックスAは異常場 (Anomalous Field) を示し、 z は鉛直下方に向かう単位ベクトル, e は大局的磁場方向に向かう単位ベクトルである。

ポテンシャル論は、 G, H ($G_R \cdot G_A \cdot H_R \cdot H_A$ も同様) がポテンシャル ϕ , ψ を用いて、

$$G = -\text{grad} \phi, \quad H = -\text{grad} \psi \quad (4)$$

で表されることを示しており、

$$\text{rot } G = 0, \quad \text{rot } H = 0 \quad (5)$$

が至る所で成立する。また、ソース（原因となるもの）のない、すなわち重力で言えば質量、磁力で言えば磁化のない自由空間（大気中も近似的にあてはまる）では、 $\Delta \phi = 0$, $\Delta \psi = 0$ （ Δ はラプラス演算子）であり、

$$\text{div } G = 0, \quad \text{div } H = 0 \quad (6)$$

が成り立つ。従って、自由空間では、

$$\Delta G = 0, \quad \Delta H = 0 \quad (7)$$

であるので、 G , H の各成分は、例えばフーリエ級数展開あるいは球関数展開で表現することができる。

以上は一般のポテンシャル論であるが、物理探査において問題となるのは、前掲の $G_A \cdot H_A$ なる量であり、一般のベクトル（またはその1成分）ではない。ところが（3）の近似式が成立する限りにおいては、 $G_A \cdot H_A$ は $G_A \cdot H_A$ の1方向成分であり、

$$\Delta G_A = 0, \quad \Delta H_A = 0 \quad (8)$$

が成り立つこととなる。すなわち、異常場が大局的な場に比して十分小さいという条件の下に、スカラー量としての重力異常・全磁力異常も、ラプラス方程式を満足し、ポテンシャル場の一般論が適用できる。

2.3 ポテンシャル場と3次元測定

ポテンシャル場においては、ソースのない領域において、上方接続（Upward Continuation）、下方接続（Downward Continuation）と呼ぶ数学的处理が行える。ある測定面での場が与えられると、ソースを横切らない範囲でこの面を移動した任意の位置での場が決定できるというものであり、ソースに近づくとき下方接続、ソースから遠ざかるとき上方接続と呼ばれる。このことは、ある高度で重力（全磁力）異常が測定されたとき、地表よりも上のあらゆる位置での重力（全磁力）異常が計算で与えられること、すなわち、測定自体は2次元で十分であり、高度をかえた3次元的な測定は無意味であることを意味する。

しかし、この議論が成立するためには次の前提がある。

- ① 測定面が全てのソースを包含する閉曲面であること、より現実的にはソースのある領域の一方の側でソースの領域の大きさに比して十分広い範囲の面であること。
- ② その面のあらゆる点で測定されていること、より現実的には場の変化を正しく反映できる程度に十分密であること。
- ③ その測定において測定誤差が全くなく、無限の分解能を有すること、より現実的には解析処理にあたって必要な精度に見合った十分な精度と分解能を有すること。

実際の探査においては、これらのうちいずれをとってみても、完璧に実現することは不可能である。

従って、高度をかえた3次元的な測定も無意味ではなく、それぞれの地下構

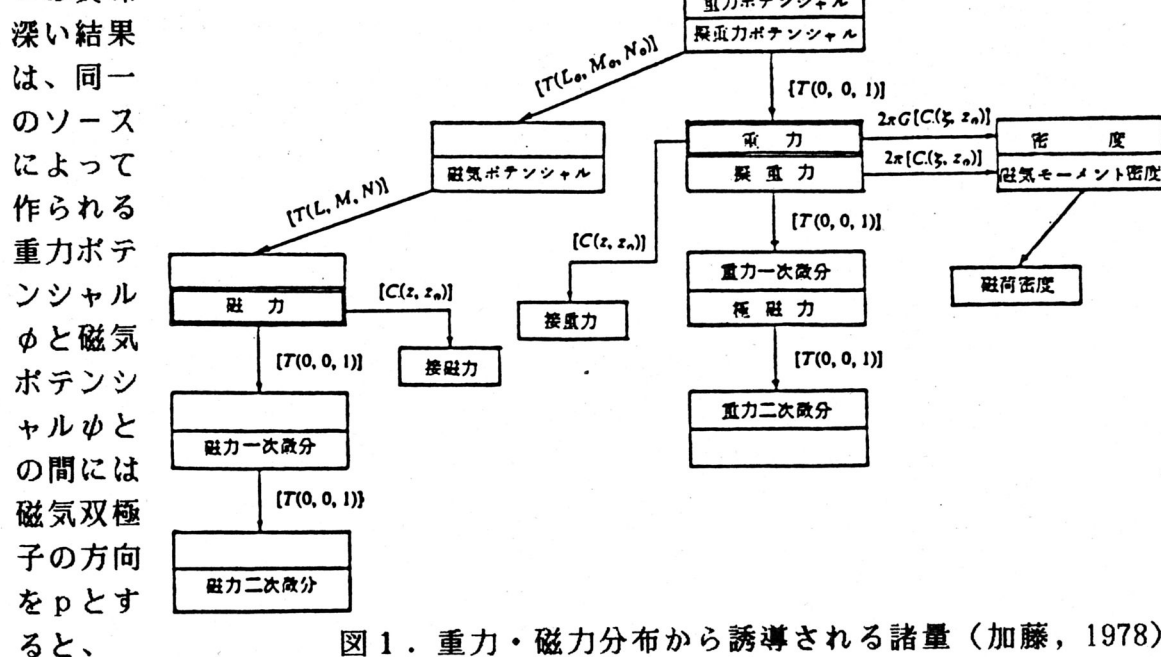
造の検出能力に対する特性に応じて使い分けるのが適切な方法であるといえる。また、上方接続等の処理も、3条件に照らして問題のない範囲で適用する必要がある。

3. 重磁力探査データの3次元構造解析

3.1 重力異常と全磁力異常の特性

重力異常には地層・岩石の密度が関与するが、密度の変化幅は大きくなく、高々2倍程度以内の範囲に入る。一方、磁気異常に関与する地層・岩石の磁化強度は、1万倍以上までの変化幅をもつ。そして、重力探査・磁気探査はこれら密度・磁化強度に比例した変化を捉えるものである。従って、磁気異常では磁化強度の大きいものが存在する場合には、その近くの磁化強度の小さいものの存在はほとんど隠されるが、重力異常においては密度の差が存在するかぎり全ての分布が概ね対等な形で検出される。別な見方をすると、磁気探査では地形の凹凸の効果は地表に磁性の強いものが存在するときのみ影響し、磁性の強いものの形・分布を決定するうえでは、地形の効果は余り考慮する必要がないが、重力探査では地表面が密度コントラストの最大の境界を示しており、その効果を除くことが地下情報抽出の上で最重要課題である。

密度と磁化強度のもう1つの相違点は、前者がスカラーであるのに対して、後者がベクトルであることである。物理的には密度（質量密度）に対応する量として磁荷密度を考えると、両者は全く同一に理論化されるが、現実には単独の磁荷は存在せず、磁気双極子としてのみ実在する。この事実から導かれる1つの興味



$$c\psi = p \cdot \text{grad}\phi \quad (\equiv d\phi/dp) \quad (c \text{ は定数}) \quad (9)$$

なる関係が存在することである。この様な関係は加藤(1978)がよくまとめており、図1に示す通りである。この関係に注目すれば、ソースが同一であるという仮定の下では重力異常から磁気異常が計算できること、また別の面からみれば、単一の解析手法の中で双方の物性を取入れた地下構造の解析が行えることが示されている。また、磁気異常は重力異常に比べて微分回数が1回多いことも示されており、同一形状のソースによる異常値の距離に対する減衰は、磁気異常の場合の方が大きい。

3.2 重磁力異常の解析法

前にも述べたように、重力異常・磁気異常からそのソースである地下構造を一意的に求めることはできないので、地下構造解析の為には、地下構造に何らかの制約条件を与えることが必要である。その条件の与え方は個々の解析によって様々であるが、地下構造を数学的取扱のできる形にモデル化し、さらに必

表1. 各種の重磁力異常解析法

●局所異常解析法

- ①特性点法 (ペーターの方法, ストレートスロープ法, インフレクションタンジェントインターセクション法, モーの方法, etc.)
- ②標準曲線カタログによる曲線照合
(傾斜ダイク, ステップ, プリズムモデル, etc.)
- ③理論異常計算による曲線照合
(多角柱モデル [タルワニの方法],
傾斜ダイク, プリズム, 球モデル, etc.)
- ④コンピュータによる理論異常計算を用いた(半自動)会話型曲線照合
(傾斜ダイク, プリズムモデル, etc.)
- ⑤非線形最小自乗法を用いたコンピュータ曲線照合法による自動逆解析
(プリズム, 傾斜ダイクモデル, 複数点ダイポールモデル)
- ⑥その他

●広域異常解析法

- ①周波数領域での異常体の平均上面/下面深度解析
Spector and Grant (1970), Bhattacharyya and Leu (1975), etc.
- ②層構造モデルによる境界面深度逆解析
Tomoda and Aki (1955), 駒沢 (1980), etc.
- ③積分変換を利用した2次元構造自動モデリング
Nabighian (1972), Ogawa (1977), etc.
- ④構造のブロック化近似による境界面逆解析
Cordell and Henderson (1968), Green (1975), etc.
- ⑤その他

要に応じて他種の物理探査結果やボーリング資料に基づく制約条件を課する。

換言すれば、測定された異常は有限個のデータからなっており、地下構造も有限個のパラメータによって記述されるように、地下構造のモデルを設定する。このとき、パラメータ数はデータ数よりも多くてはならず、データには多少なりとも誤差が含まれるので、通常データ数よりもかなり少ない数のパラメータを最小自乗法的に決定する。

重磁力異常の解析法は、古くから研究され、時代とともに変遷しつつ新しい解析法が考案されてきている。それらを概括すると、表1の通りである。

解析の手法としては、電子計算機の十分に普及しない時代には、特性点法やモデル異常カタログによる曲線照合が用いられたが、今日では、コンピュータによる曲線照合や、構造モデルによるインバージョンが多用されている。それらの各方法には、また、表領域と呼ばれる実空間での取扱と、何らかの積分変換を施した裏領域（フーリエ変換による周波数領域の使用が多い）での取扱とがあり、それぞれの特色をもっている。

しかし、いずれの場合においても地下構造のモデリングが前提にあり、そのモデルパラメータと異常との関係を直接・間接に導きだし、実際の異常との関係を調べることによってパラメータが決定される。

3.3 3次元モデリング

2次元分布として与えられた重磁力異常の解析は、特殊な例を除くと一般に3次元構造を問題にすることになるが、2次元構造近似で解析作業が行われることも珍しくはない。その意図するところは、地下構造が一般に走向をもつ場合が多く、それに沿って異常分布が測定面上で1次元である点に注目して解析を進めるものである。この方法の利点は、全般的には多様な構造が、局所的には容易にモデル化できる点にある。同様に局所的な取扱は、走向が明確でない場合でも、いわゆる独立異常としての解析として多用される。見方をかえると、局所2次元構造解析は、局所3次元構造解析における1つの特殊例と考えてもよい。

一方、3次元モデリングにおいては、全般的な構造の傾向を解明することも重要な課題となる。局所異常の解析結果をつなぎ合せた結果としての全般的構造の解釈（例えば空中磁気探査結果による磁気基盤深度解析）も、広い意味では3次元モデリングに相当するが、ここでは地下構造と異常分布とがより直接的に結びついた形での解析を想定する。

そのような全般的な構造の議論のためには、層構造モデルが多く用いられる。すなわち、各層内においては物性が一様であるとの仮定の下に、その境界面の深さのみが可変（未定）であるというモデルである。ここに地層の物性の水平的な変動をも組み入れることは、一般的ではない。それは、構造パラメータが深さ分布のみで十分多い上に、さらにパラメータを増すことが、解の一意性のなさとの関係で、解析の困難を来すからである。ただし、既知の情報として構

造をより規制する形で水平的な物性変化を取入れることは行われ、より現実
に即した解析結果が期待できる。

4. 3次元逆解析技術の現状と動向

4.1 構造モデルによる重磁力異常

重力異常・磁気異常の一般式は、(3)式と次式によって表現される。

$$\phi = -\oint k(\rho/r) dv \quad (10)$$

$$\psi = -\oint \mathbf{J} \cdot \text{grad}(1/r) dv \quad (11)$$

ここに、 k は万有引力定数、 ρ は質量密度、 $\mathbf{J}$ は磁化強度である。これらを用いて、各種形状の異常は計算でき、簡単な形状(3次元モデルとしては、プリズム、円柱、球モデル等)では解析的表現が得られる。また、複雑な形状の場合においても、単純モデルの組合せによるか、積分を数値的に実行することによって求められる。従って、重磁力探査におけるいわゆるForward問題は難しくない。

4.2 局所異常の自動逆解析

局所異常の逆解析(いわゆるInverse問題)は、一般に表領域で行われ、通常、非線形最小自乗法による曲線照合が用いられる。その理論展開は次の通りとなる。

- ① 地下構造モデルを設定し、モデルパラメータを選択する。
- ② そのモデルによる異常の解析的表現または数値計算手順を決定する。
- ③ モデル異常の解析的表現のパラメータでの偏微分を、解析的もしくは数値的に求める手順をきめる。すなわち、モデル計算結果が各パラメータの変化でいかなる挙動を示すかを数学的にもしくは数値的に表す。
- ④ あるモデルが与えられたとき、そのモデルによる異常の計算値と実測値の比較を行い、その差の二乗和が最小となることが期待されるモデルパラメータの決定方法を、③を用いて手順化する。

以上によって解析手順が確立されるので、実測データと初期パラメータを与えることにより、地下構造パラメータが逐次近似的に得られることになる。ここで用いられる最小自乗法は、一般に非線形にならざるをえず、手順の③-④では強制的に線形化が図られるので、正しい解を得るには、モデルパラメータを徐々にかえて繰り返す必要がある。

このような逆解析は、2次元ダイクモデル等のパラメータ数の少ないものへの適用から始まって、今日ではかなりの数のパラメータをもつ構造にまで適用されるようになってきた。しかし、非線形最小自乗法は必ず最適解を与えとは限らないという弱点ももっており、ポテンシャル場の解の一意性の欠如とも

関連して、パラメータの選び方によっては解が不安定になることに留意が必要である。このため、逆に、地下構造モデルをより吟味してパラメータの数を減らすことも、重要な検討課題となっている。

いずれにしても、表領域の非線形最小自乗法による自動曲線照合法は、解析の概念的な手段としては定着した技術となっており、今後も、モデル設定や数値処理の方法等に改善・改良が加えられていくことになるだろう。

4.3 層構造モデルの逆解析

層構造モデルのモデルパラメータは非常に多く、単純なモデリングを行うと、2層構造でもデータ点数を超えるパラメータ数になる。従って、3層構造以上のモデリングは特殊な場合を除いて行われたい。また、パラメータ数が多いことは、最小自乗法の適用が難しいことを示しており、2次元構造（パラメータ数は 10^2 程度）はともかく、3次元構造（パラメータ数が 10^4 程度）となるともはや実用にならない。このために、層構造モデルに対しては単純な最小自乗法にはよらない逆解析の方法が研究されている。

その1つは、地下構造を可逆的な積分変換の数式で表現し、それによる異常分布を解析的に求める方法である。このとき、実測データとして異常分布が与えられると、逆積分変換によって地下構造が求まる。実際の適用としては、地下の基準深度に凝集面を考え、全てのソースがその面上にあるという仮定の下にその異常体分布をフーリエ級数で表現して逆解析を行っている。

他の方法は、ポテンシャルの重ね合せが可能である点に注目し、ポテンシャル場が距離とともに減衰することを逆に用いて、直接的に異常体を逐次近似的に推定するものである。この方法は、正の質量しか存在しない重力についてのみ有効な方法であるが、磁力に関しても、3.1節に述べた関係よりいわゆる擬重力異常に変換することによって同様の解析が行える。

層構造モデルの逆解析は、磁気的な構造が現実には層構造的でないことが原因として、主として重力異常にのみ適用されているが、磁気異常の解析でも局所異常解析と結びつけた形での大局的構造解明のための手法として発展されるべきであろう。

4.4 その他の3次元構造解析

前節までの数学的な意味でのInversionの他にも、種々の3次元的な地下構造解析がある。炭化水素資源評価のための磁気基盤深度解析はその1つの例であるが、近年では、重力探査の高精度測定に基づく空洞の形状調査や、地下熱構造評価のための磁気異常のキュリー等温面解析が注目された。

キュリー等温面解析は、本質的には1次元構造解析（水平方向の変化には注目しない）の手法であるが、同様の解析結果の水平的変動を捉えるものである。これは、電気探査の垂直探査を位置を移動しつつ実施する水平垂直探査と似て

おり、本来的には1次元解析結果を単純につなぐのではなく、2次元3次元モデリングへと発展すべき性格をもっている。

このように、ニーズに応じて種々の解析が進められ、解析法の多様化が進みつつある。すなわち、物理探査データの解析法が、原理を追究する理学に留まらず、様々なニーズに対応する技術としての展開がますます進展している。

5. おわりに

今日までの重磁力探査の解析は、重力ならば2層構造モデルによる基盤深度分布解析、磁力ならば局所異常の逆解析による局所モデリングが中心となり、その他の解析は、試験的・単発的あるいは純理論的で終わっている場合が多い。しかし、重力異常図・磁気異常図が与えてくれる地下構造の3次元的印象には、時にはおぼろげではあっても、もっと奥深いものがある。その奥深さを、3次元的な地下構造モデリングとその定式化によって、より鮮明な形で表現する解析技術のさらなる発展が期待される。