

相異なる高さにおいて観測された磁力値から 磁気異常の三次元分布を求めること(2)

中塚 正・牧野 雅彦・大熊 茂雄 (産総研)

Derivation of geomagnetic anomaly distribution from the observation at various elevations

T. Nakatsuka, M. Makino and S. Okuma (Geological Survey of Japan, AIST)

We are developing a total system of helicopter-borne magnetic survey, from the measuring equipment and data processing to the data reduction procedure and interpretation. The survey flights by helicopters are usually made along the topographic surface within some allowance, and especially in case of high-resolution survey the altitudes of observation are often too variable to be regarded as a smooth surface. The reduction programs for such data were developed using the method of equivalent sources taking surrounding sources into account, and three-dimensional random point data were directly inverted. Though the problem is generally underdetermined, the method of conjugate gradients (CG) can afford the minimum norm solution. There is freedom to select harmonic function combining magnetic anomaly with the source. When the upward continuation function operator is selected, the source is magnetic anomaly itself. If we select the magnetic dipole distribution in the direction of ambient magnetic field as source, we can easily derive the reduction-to-pole anomalies by rotating the direction of magnetic dipoles to vertical.

1. はじめに

近年、空中磁気探査技術は高分解能化が目指され、測線間隔は狭く、調査の飛行高度は低くなってきた。また、それに応じてヘリコプターにより地形の起伏に沿った飛行が行われるようになった。

従来の空中磁気データ処理解析の体系は、高度一定の平面での格子点データを前提として成り立っているものが多く、平面上のランダム点データから Minimum Curvature (Briggs, 1974) の方法などの補間によって格子点データが作成された。曲面上の分布データから別の面上の分布を求めるリダクションについては、ポテンシャル場理論に基づいた検討が古くから議論されているが、曲面上のランダム点観測の場合には、補間法にも問題がある。

ここでは、同名のタイトルで牧野ほか [1993] が発表した内容を発展させ、ヘリコプター磁気探査で普通に起こりうる3次元ランダム点での測定に対応するように開発したデータ処理プログラムについて、モデルデータを用いて行った動作確認について報告する。

2. 任意曲面間の接続操作

ある曲面で観測された磁気異常を別の任意の面にリダクションする安定な方法として、等価ソースを考慮する方法が多く議論されてきており (Dampney, 1969; Nakatsuka, 1981; Hansen and Miyazaki, 1984; Cordell, 1992 など)、これらを総括しつつ牧野ほか(1993)は、等価ソースと磁気異常とを結び調和関数には制約がないことを示し、上方接続操作関数

$$W(x, y, z; \xi, \eta, \zeta) = \frac{- (z - \zeta)}{2\pi [(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2 + (z - \zeta)^2]^{3/2}} \quad (1)$$

を用いて、位置 p_i における観測量 F の分布から

$$F(p_i) = \sum_k W(p_i, s_k) E(s_k) \quad (2)$$

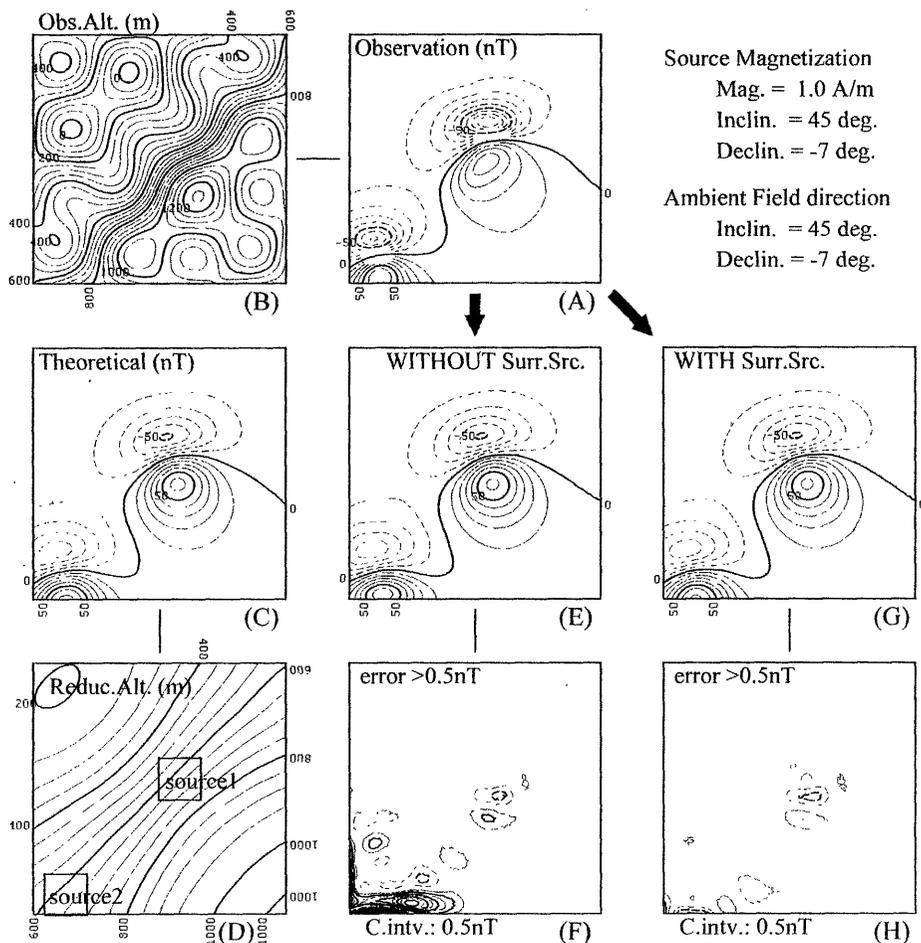
を満たす E の分布(磁気異常の元をもつ)を逆解析で求め等価アノマリと呼んだ。この E から、

$$G(q_i) = \sum_k W(q_i, s_k) E(s_k) \quad (3)$$

により、任意位置 q_i での磁気異常分布が得られる。牧野ほか(1993)は、この方法を格子点データに適用し、良好な結果が得られることを示した。

3. エッジ効果とノルム最小化解析

一般に、有限範囲のデータ分布を取り扱う場合には、データの打ち切りによるエッジ効果が問題となるが、Nakatsuka(1995)は、磁化強度マッピングにおいて周辺ソースまで考慮することにより、エッジ効果の少ない結果を得た。その場合、一般に求めるべき未知数が観測データ数よりも多い不定問題に帰着されるが、逆解析に共役勾配法(CG法)を用いることにより、不定解の中でノルム最小のものに到達できる。このノルム最小の性質は、妥当な初期モデルから出発すれば、その初期モデルに最も近い解を与えることとなり、本質的にユニーク解が存在しないという弱点をもつポテンシャル場の解析におい



第1図 等価アノマリ利用リダクションにおける周辺ソースの有無の効果. 理論モデルが B の観測面につくる磁気異常 A を観測値とみなし、高度面 D へのリダクションを行った結果が、周辺ソース有るとき E、なしのとき G となり理論値 C に対する誤差が F, H である. 周辺ソースの存在を仮定することによりエッジ効果の少ない結果が得られることがわかる.

て、適切な選択であると言える.

この周辺ソースを考慮してエッジ効果を抑制したノルム最小解を求める方法は、前節のリダクション操作の逆解析においても活用できる.

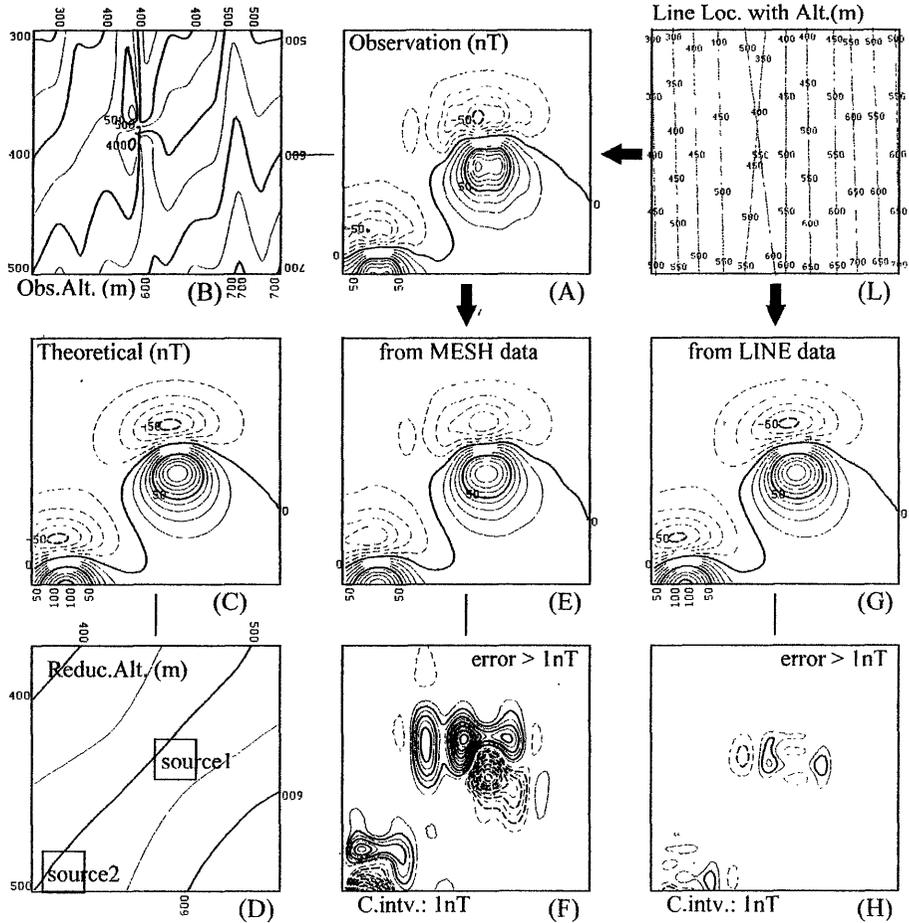
第1図は、理論モデル場を観測量とみなした解析について、周辺ソースを考慮した場合としない場合を比較したものである. ソースが解析領域の縁辺部に近づくとき、両者に有意な差が現われることがわかる.

4. 格子データを經由しない等価アノマリ解析

従来のデータ処理では、測線上の不規則点データに対してグリiddingを行い、格子データに対してリダクション処理を行っていた. しかし、測線間隔の狭いヘリコプター探査では、隣接する測線が異なる高度で非常に近接したり、極端な場合には交差することもあり、格子

データ作成の段階で誤差を生む可能性がある. これへの対策としては、グリiddingを経ることなく、測線データをランダム点データの集合とみなして、直接等価アノマリ分布を求めることが考えられる. ここでも未知数が観測データ数よりも多い不定問題があるが、CG法によればノルム最小の解に到達できる.

第2図は、交差した主測線を含む不規則な高度の測線分布を想定して、理論モデル場のつくる磁気異常を解析した例である. 測線データから Smith and Wessel (1990)の方法で高度と観測磁気異常の格子データを生成してから解析を行った場合と、測線データから等価アノマリを直接求めた場合の比較であり、格子データを經由すると有意ではない測線の間の値に拘束される結果となっている.



第2図 リダクション前グリッド化の悪影響。理論モデルをLの測線で観測したものとし、これを Smith and Wesell (1990) の方法でグリッド化した異常分布 A と高度 B を用いて高度面 D へリダクションした結果が E、もとの測線データからリダクションした結果が G となり、理論値 C に対する誤差が F, H である。

5. 磁化方向付き等価ソース解析による極磁力の計算

ヘリコプター探査などのように起伏のある調査飛行のデータは、水平面データへ変換する場合には最大標高に合わせざるを得ず、地表付近のソースから遠ざかりすぎて適当でないことが多い。一般的には、滑らかな曲面へのリダクションを行って基本データとし、各種解析に用いる。その際、曲面上のデータは従来平面データに適用されてきた2重フーリエによる(裏領域での)極磁力変換などのフィルター操作が厳密には行えない。

しかし、等価ソースの考え方をを用いると、観測を正確に再現する磁化方位をもった等価ソースが一旦求めれば、その磁化方向を鉛直方向に回転させるだけで、極磁力異常分布が求められる。

そこで、等価ソースとして、仮定するソース面上に磁化をおき、固定(一般に外部磁場方向と同じ)の磁化方向をもつとする。この等価ソースによる磁気異常分布の表

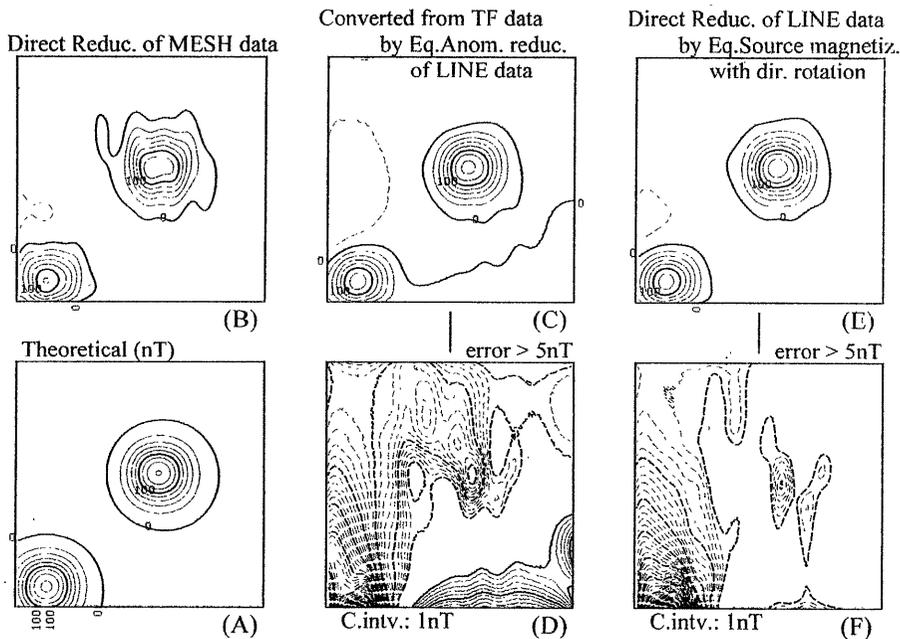
現式は、積分を離散化すると点ダイポールの磁気異常計算に帰着され、2節で用いた上方接続操作関数(1)のかわりに、

$$W(x, y, z; \xi, \eta, \zeta) = W'(x - \xi, y - \eta, z - \zeta) \\ W'(x, y, z) = (V/R^5) [c_x(2x^2 - y^2 - z^2) + c_y(2y^2 - z^2 - x^2) \\ + c_z(2z^2 - x^2 - y^2) + 6c_{xy}xy + 6c_{yz}yz + 6c_{zx}zx]$$

を用いる。ここに、

$$R = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}, \quad c_i = e_i p_i \quad [i = x, y, z] \\ c_{ij} = (e_i p_j + e_j p_i) / 2 \quad [(i, j) = (x, y), (y, z), (z, x)] \\ (p_x, p_y, p_z), (e_x, e_y, e_z) \text{ は磁化, 外部磁場の方向余弦}$$

である。Vは任意の値でよいが、離散化したソースの体積と考えると、前と同じ(2)式でEの元が磁化(A/m単位)となる。実際の外部磁場・磁化の方向を与えて(2)式の逆解析からEの分布を求めたのち、 $p_x = p_y = e_x = e_y = 0$,



第3図 極磁力異常の計算方法の違いによる比較。第2図と同じデータを用いている。格子データに変換したもものから等価磁化分布を求めて計算する方法ではBのように、測線の高度変化が結果に影響する。第2図(E)を平面データとみなして2重フーリエ変換を用いて極磁力変換したものがC、測線データから等価磁化分布を求めて磁化方向を下向きに回転させる計算方法の結果がEであり、理論モデルAに対する誤差がD、Fである。限定されたデータから厳密値を求めるのは困難があるが、等価磁化を用いた方法Eが最良の選択である。

$p_z = e_z = 1$ と置きなおして(3)式の計算により極磁力異常が求められる。

第3図は、等価ソース利用による極磁力異常の復元能力の確認を行った結果である。測線データから格子データを経ることなく等価ソースを求め、その磁化方向の回転によって極磁力へ変換するのが最良である。

6. まとめ

山岳地のヘリコプター磁気探査の場合には、高度変化に富む観測データの処理が重要である。等価ソース・等価アノマリを利用した任意曲面間のデータリダクション手法についてモデルスタディによる検討を行い、以下の結果を得た。

- 1) データ処理範囲の外側にも等価ソースの存在を仮定することにより、エッジ効果の軽減が図れる。
- 2) 観測データから等価ソースを導く上で、格子データへの補間を行うのは時に有害であり、測線データから等価ソースを直接導くのがよい。
- 3) 極磁力分布は、磁化方向を考慮した等価ソースの磁化方向の回転で計算できる。
- 4) 逆解析での不定解の問題は、共役勾配法によるノルム最小解で妥当な結果が得られる。

文献

- Briggs, I. C. [1974] Machine contouring using minimum curvature. *Geophysics*, **39**, 39-48.
- Cordell, L. [1992] A scattered equivalent-source method for interpolation and gridding of potential-field data in three dimensions. *Geophysics*, **57**, 629-636.
- Dampney, C. N. G. [1969] The equivalent source technique. *Geophysics*, **34**, 39-53.
- Hansen, R. O. and Y. Miyazaki [1984] Continuation of potential fields between arbitrary surfaces. *Geophysics*, **49**, 787-795.
- 牧野雅彦・中塚 正・森尻理恵・大久保泰邦・大熊茂雄・本蔵義守 [1993] 相異なる高さにおいて観測された磁力値から磁気異常の三次元分布を求めること。物理探査学会第88回学術講演会論文集, 502-507.
- Nakatsuka, T. [1981] Reduction of magnetic anomalies to and from an arbitrary surface. *Butsuri-Tankō (Geophys. Explor.)*, vol.34, 332-340.
- Nakatsuka, T. [1995] Minimum norm inversion of magnetic anomalies with application to aeromagnetic data in the Tanna area, Central Japan. *J. Geomag. Geoelectr.*, vol. 47, 295-311.
- Smith, H. H. F. and P. Wessel [1990] Gridding with continuous curvature splines in tension. *Geophysics*, **55**, 293-305.
- 坪井忠二 [1964] 相異なる高さにおいて観測された重力値からジオイド上における Bouguer 異常を求めること。測地学会誌, **10**, 94-100.