

高度変化に富む磁気探査データの “交点” コントロール処理とその応用

中塚 正・大熊 茂雄 (産総研)

Crossover analysis for the data of aeromagnetic survey with varying elevations, and its application to extracting magnetic anomaly change

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

Abstract: We have been developing a software system for helicopter-borne magnetic survey in use of equivalent source technique. As one of the functions of this system, we are investigating the process of generalized mis-tie control. In helicopter survey of mountainous area, even at the intersection of horizontal trajectories of traverse and tie lines, the altitudes of both lines differ considerably in practice. This means that the conventional crossover analysis cannot be applied. As the accuracy of position fix nowadays is quite good by the use of GPS, only the magnetic level shifts between lines are considered. The algorithm of estimating the magnetic level shifts was developed as an extension of the equivalent source analysis of survey line data. There is another application of this technique, in detecting the magnetic anomaly change by repeated surveys. Repeated aeromagnetic survey over active volcano is one of promising ways of examining volcanic activity. However, the track lines of different surveys cannot be the same, and the inspection to the repeatability and the spatial alias effect of magnetic anomaly pattern is quite important to acquire valid information of the activity. Then it was proven that the spatial alias effect could be mitigated by using our method of generalized mis-tie control.

1. はじめに

産総研地質調査総合センターでは、ヘリコプター利用による山岳地域の磁気探査システムの開発を行ってきており、新システムの概要、そのセンサーに対する機体磁気補償法の理論的考察と適用例については、すでに報告した [中塚・大熊, 2003, 2004, 2005b]。また、データ処理解析の面でも、一般に地形の起伏に沿った飛行が行われるヘリコプター探査では、高分解能化とともに、新しい処理体系が必要となり、等価ソースを用いたリダクション法の開発を行い、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データ処理プログラムの体系を開発した [中塚ほか, 2004; 中塚・大熊, 2005a]。

この高度変化に富む探査のデータ処理においては、各種検討の結果から、以下の結論を得た [中塚・大熊, 2005a; Nakatsuka and Okuma, 2006]。

- 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こと、
- 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こと、
- 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こと、
- 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こと

今回の発表では、昨年秋 [中塚・大熊, 2005a] に続き、このソフトウェア体系の機能拡張の一つである“交点”コントロール処理と、その応用として、時期を隔てた繰返し探査による磁気異常変化の抽出について述べる。

2. ヘリコプター探査における交点コントロール

高度変化に富むヘリコプター磁気探査では、交差測線を設定しても、航跡図上での交点といえども現実的に高度が一致しない。そのため、“交点”での磁力値が一致すべきものとは言えず、ヘリコプター磁気探査では、交差測線データによる交点コントロールを正しく行うことが難しい。従って、主測線に沿う方向ヘコンターがひずむなどの異常なパターンが見えたときに、交差測線データを参照して、主測線データの当否を判定するなどの利用に留まっているのが現状である。しかし、予期せぬ誤差要因の混入を防ぎ、より妥当な磁気異常分布を取得するためには、主測線と高度で相違のある交差測線データの有効利用をはかるデータ処理の開発が望まれる。

今口では位置決定精度がGPSにより極めて向上しているため、通常は、交差測線データの利用で未知の磁力値誤差を補正することになる。

高度変化に富む探査データのリダクション処理では、測線データから等価ソース分布を求める多次元1次方程式系の不定問題を、CG法によるノルム最小解として解いているが、測線に沿った磁力値誤差が存在する条件下

では、その未知誤差をもパラメータに取り入れて解析的に最適解を求める方法が考えられる。このとき、(1) 測線ごとに一定のレベル誤差、(2) 測線ごとに線形に変化するレベル誤差、(3) 各交点に独立なレベル誤差(交点間は線形に変化)のいずれを考えた場合にも、誤差パラメータの配列に対して、観測磁力値は等価ソースに対すると同様に線形の関係が保たれる。すなわち、等価ソース解析で、観測 F がソースパラメータ S と幾何係数マトリクス A から、

$$\begin{pmatrix} F \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A \end{pmatrix} \begin{pmatrix} S \end{pmatrix} \quad \left[F_x = \sum_i A_{ix} S_i \right]$$

で与えられるのに対し、誤差パラメータ E とその観測値への寄与係数 B が付加されると、

$$\begin{pmatrix} F \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A \mid B \end{pmatrix} \begin{pmatrix} S \\ E \end{pmatrix} \quad \left[F_x = \sum_i A_{ix} S_i + \sum_j B_{jx} E_j \right]$$

で与えられる(誤差パラメータ全体の直流分は不定となるので、その総和が0の制約を与えてもよいが、もともと不定問題のノルム最小解を求めているので、必須条件ではない)。従って、数学的には等価ソース解析にこのパラメータを組み入れて、全く同じ解法(CG法)を適用できる。

3. モデルデータへの適用

理論磁気異常にかなり極端なレベル誤差を加えたモデルデータに対して、上記 (1),(2),(3) の誤差許容条件で解析した結果を Fig. 1 に示す(昨年秋とほぼ同じなので説明を省略)。条件(1)の D1 では見事にレベル誤差修正が行えているが、条件(2),(3)の D2,D3 はこれと異なる。D2 はエリア全体のリニアトレンドが除去された形になっており、D3 では本来の磁気異常のうち交点格子の線形補間で表現できる成分が取り除かれたものに相当している。これは、そのような誤差パラメータ分布を許容した解析を行ったのであるから当然の帰結とも言え、レベル誤差を含まないモデルデータに同じ処理を行った結果(条件(2)で C2)ともよく符合する。すなわち、条件(2),(3) のレベル誤差の評価は、本来の磁気異常成分を測線データのレベル誤差に押しつける形の副作用を生じている。

ところが、このノルム最小化解析では、次元の異なるソースパラメータ S と誤差パラメータ E を同等に扱っているという問題が存在する。ノルム最小とは言え、そのノルムのとり方によって求まる解が違って来る訳で、先程の例は結果的に観測データをなるべく誤差パラメータで説明しようとするものであった。そこで、ソースパラメータ S と誤差パラメータ E に対する係数マトリクスの値が概ね同等となるようにスケーリングを行って再解析した。すなわち、 $S_i = S_i / \alpha$ とおいて、

$$\begin{pmatrix} F \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A/\alpha \mid B \end{pmatrix} \begin{pmatrix} S' \\ E \end{pmatrix} \quad \left[F_x = \sum_i (A_{ix}/\alpha) S'_i + \sum_j B_{jx} E_j \right]$$

の形に変形し、 B_{jx} の最大値が1であるので (A_{ix}/α) の最大値も1となるように α の値を選び、その S' と E に対する方程式系に CG 法を適用した。結果は Fig. 2 のとおりで、条件(2),(3) の下でも実アノマリの主要な部分を復元できており、とくに(2)の場合には実フィールドデータへの適用性が十分ありそうである。また、(3)の場合でも、主測線と交差測線の両方にレベル誤差が評価されるので、両者の差から例えば火山活動による磁気異常変化を抽出できる可能性がある。

4. 交点コントロール手法による磁気異常変化抽出

そこで、Fig. 1 の南北測線データを初回の調査データとみなし、追加ソース source3 (磁化強度は負)を加えて同じ本数の東西測線を設定したデータを第2回の調査データと仮定する。この両データから、前記(3)の条件を若干変更し、東西測線についてのみ交点レベル誤差が存在する条件で、交点コントロール機能付き等価ソース解析を行った。結果を Fig. 3 に示す。 L は測線位置とその高度、 H は共通リダクション面高度と仮定したソースの位置を示す。source1~source3 による H 面での理論磁気異常が A 、source3 を含まないものが B で、両者の差(つまり求めたい磁気異常変化)は M である。得られた結果は C に示したとおりとなった。(12×12)個の交点位置のデータのみで構成されているため若干の歪みは避けられないが、 M のパターンをほぼ再現できている。ちなみに、交点コントロール機能を付加しない等価ソース解析による H 面へのリダクションを行ってみると、東西測線データから E 、南北測線データから F が得られ、その差 D は大きく乱れた結果を示す。この原因は、主に空間エリアシングの問題と想定される。

D の結果が大きく乱れる原因が空間エリアシングであれば、測線密度を高めることによって解消できる筈なので、確認のために、測線間隔を約半分にして同様の処理を行い、 D のパターンが格段に改善されることを確認できている。

5. 拡張“交点”コントロールの実データへの適用

前記の(2)の条件下での“交点”コントロールの実用性を確かめるため、実フィールドデータへの適用を試みた。コールドロン構造のある設楽(人峠)地区の試験探査データのうち、機体磁気補償を行っていないデータに対して“交点”コントロール処理を行い、機体磁気ノイズ効果の主要部の除去に成功した(詳細は紙面の都合で割愛する)。

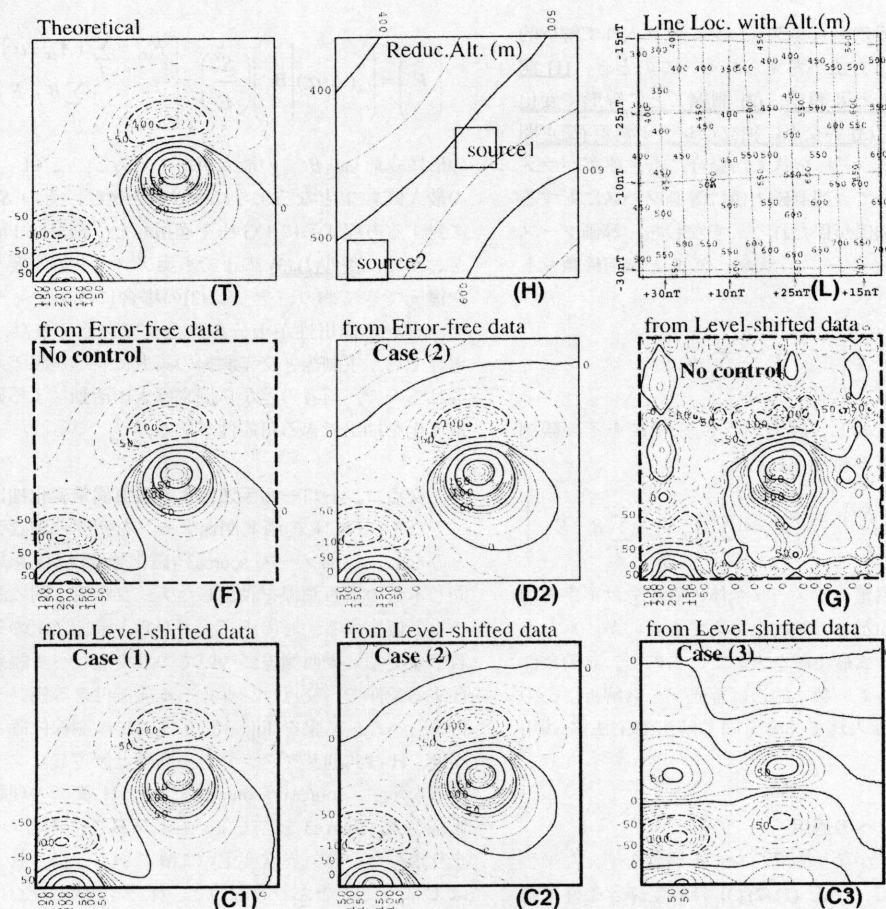


Fig. 1. Synthetic model example of reduction by the method of expanded mis-tie control without pre-conditioning for unknown parameters. 16 lines in **L** (with the altitude values written in) were assumed to be the survey lines, on which synthetic anomalies were calculated, but magnetic values of 8 lines were shifted by the amount as written in. **T** is the theoretical anomaly on the smooth observation surface **H** caused by the source model (shown in **H**). If the reduction process without mis-tie control is applied, the result shall be as in **G**, although error-free data would give correct result as in **F**. **C1**, **C2** and **C3** are the results from the reduction with mis-tie control, for three cases under the condition of (1) line-by-line level shift only, (2) linear variation in each line, and (3) variable at each crossover points (linear change between adjacent points), respectively. **C1** almost completely recovers the theoretical pattern, but **C2** and **C3** do not. This is reasonable from each condition, that is, linear trend is eliminated in the condition (2), which is also shown in **D2** from error-free data, and the condition (3) diminishes the pattern of polyhedral surface represented by crossover points.

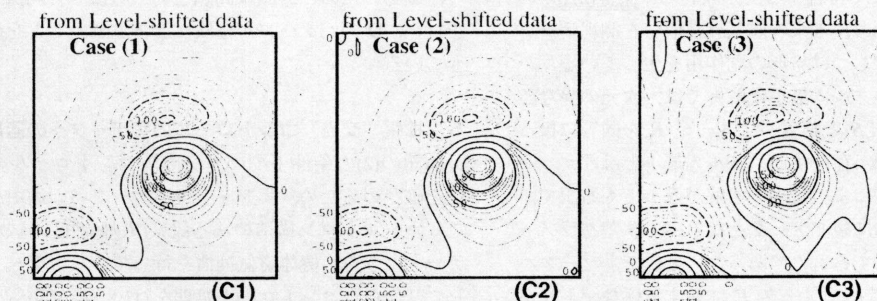


Fig. 2. Result of three cases of reduction by the method of expanded mis-tie control with pre-conditioning for unknown parameters, applied to the same synthetic model example as in Fig. 1.

文 献

中塚 正・大熊茂雄 [2003] スティンガー式ヘリボン磁気探査システムの開発. 物理探査学会第 108 回学術講演会講演論文集, 23-26.

中塚 正・大熊茂雄 [2004] ヘリコプター磁気探査におけるスティンガー内磁気センサーの機体磁気補償. 物理探査学会第 110 回学術講演会講演論文集, 318-321.

中塚 正・牧野雅彦・大熊茂雄 [2004] 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). 物理探査学会第 111 回学術講演会講演論文集, 187-190.

中塚 正・大熊茂雄 [2005a] ヘリコプター磁気探査におけるデータ処理解析システム. 物理探査学会第 113 回学術講演会講演論文集, 239-242.

中塚 正・大熊茂雄 [2005b] スティンガー式ヘリボン磁気探査システムの開発とその磁気センサーに対する機体磁気補償. 物理探査, 58, 451-459.

Nakatsuka, T. and S. Okuma [2006] Reduction of geomagnetic anomaly observations from helicopter surveys at varying elevations. *Explor. Geophys.* 37 / *Butsuri-Tansa* 59 / *Multi-Tansa* 9, 121-128.

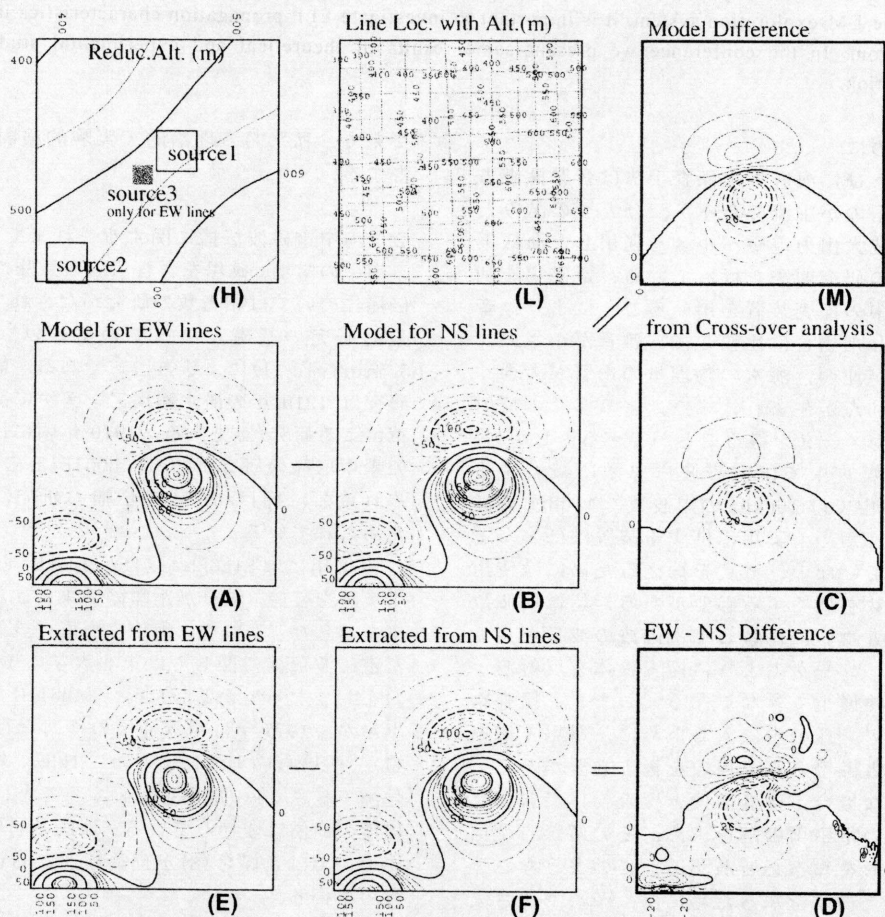


Fig. 3. Test of extracting the magnetic anomaly change by the method of expanded mis-tie control, applied to the synthetic model example. 12 NS lines and 12 EW lines in **L** (with the altitude values are written in) were assumed to be the two surveys at different epoch. The source model is given in **H**, where a negative source3 is present only for EW lines. **A** and **B** are the synthetic anomalies on the smooth surface **H** for the source of EW lines and NS lines, respectively, and the theoretical difference between the two (**A**-**B**) is shown as **M**. From the result of expanded crossover analysis, the magnetic anomaly change was estimated as **C**, which is a pretty good approximation to the ideal pattern **M**. On the other hand, the simple reductions to the common surface **H** were calculated from EW lines as **E**, and from NS lines as **F**. Although the difference **D** between **E** and **F** is another estimate of the magnetic anomaly change, **D** is contaminated with noises probably because of spatial alias effect.