

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

中塚 正・大熊 茂雄 (産総研)

Data processing system for helicopter-borne aeromagnetic survey

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

Abstract: In case of helicopter-borne magnetic survey in mountainous region, the correct processing of data with variable altitudes is important. We developed a software system for this purpose, as was reported at the last fall conference, in use of equivalent source technique. This system, consisting of a number of individual programs of various functions, was implemented on a Linux PC server connected with LAN to a Windows PC providing user interface. This configuration can be re-constructed easily with note/laptop PC's for the on-site processing. As one of extensional 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 mis-tie 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.

1. はじめに

産総研地質調査総合センターでは、各種目的での調査に利用可能なスティンガー式ヘリボーン磁気探査システムの開発を行ってきており、新システムの概要については一昨年春に [中塚・大熊, 2003], そのスティンガー内センサーに対する機体磁気補償の方法とその理論的考察については昨年春に [中塚・大熊, 2004] 述べた。また、それらをまとめて実地調査での適用例を含めて「物理探査」誌 [中塚・大熊, 2005] に報告した。

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、補間法にも考慮が必要である。

このリダクション法については、以前に牧野ほか [1993] が等価ソースを用いる方法の検討を行っており、その内容を発展させ、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データ処理プログラムを開発している。昨年秋に中塚ほか [2004] は、任意曲面間の接続操作において、モデルデータを用いて行った各種検討の結果として、

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、

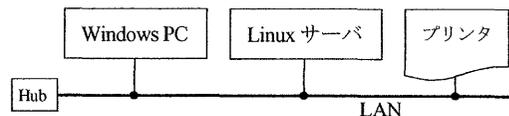
4) 逆解析での不定解の問題は、共役勾配法によるノルム最小解で妥当な結果が得られること

を明らかにした。また、それをまとめて実地調査での適用例を含めて日豪韓 SEG 共同出版誌 2006 に投稿 [Nakatsuka and Okuma, 2005 submitted] した。

今回の発表は、これらのヘリコプター磁気探査データの処理・解析のソフトウェア体系の概要を紹介するとともに、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」の検討状況について述べる。

2. データ処理解析システムの構成と利用環境

データ処理解析のソフトウェアは、従来からの開発環境を踏襲しているため、C 言語で開発した各種ライブラリ [中塚, 2003] を利用しつつ、ごく一部を除いて FORTRAN 言語で作成している。ハードウェア構成は、Linux PC をサーバとし、LAN を介して Windows PC と接続している (下図)。Linux 上では、C と FORTRAN のコンパイル・実行以外に、Web サーバ (Apache)、FTP サーバ、Samba (Windows 系ファイル共有サービス) 等を利用しており、Samba の機能でデータファイルはあたかも自 PC 内にある如く扱えて重宝である。



このシステム構成は、探査の現地に携行するシステムでは、ノート PC・ラップトップ PC・ノートプリンタ等で容易に再構成できる。

各ソフトウェアは、入出力で標準化を図っており、処理実行の処理パラメータの値を含むロギング(記録を残す)の機能を備えている。また、一連の処理を、実行プログラム名と処理パラメータの組の繰返しでプロシジャとして定義し、バッチ処理的に実行できる環境も用意してある。なお、作図出力は PostScript ファイルとなっているので、Russel Lang [http://www.cs.wisc.edu/~ghost/] による Ghostscript, GSview を Windows PC にインストールして用いると、容易に画面上での確認とプリンタへの出力の制御が行える。

3. ソフトウェアの一覧

データ処理解析のソフトウェアは、数多くの個別プログラムの集合体となっている。

空中磁気探査の現地でのデータ確認作業に用いることを意図したプログラムには、次のものがある。

プログラ ム名	機 能
alog2asc	AM データ収録バイナリデータファイルを ASCII 形式ファイルに変換する。
xldam/ xldpn	alog2asc による ASCII 生データから、測線区間の切り出しとリアルタイム/PostNav 処理の GPS 測位データによる位置データ補間およびそれに基づく IGRF 残差計算を行って、DPAM 測線データファイル(◆1)を作成する。
despike	DPAM 測線データの磁力値スパイクを除去する。
dvcorr	DPAM 測線データに対する日変化補正を行う。
ecomp/ fcomp	CompBox 飛行データによる機体磁気補償の処理を CompBox 飛行/調査飛行のデータに対して行う。
ggrid/ ggrids	DPAM 測線データまたは相当データから、Smith and Wessell (1990) の方法で、磁力値格子データのみ/磁力値と標高の格子データを作成する。
pframe	使用図法の座標値関係表示の白地図を出力する。
pitrk	DPAM 測線データから航跡図を図化する。
pchkdv/ pchkmag/ pchkres/ pchkcomp	データ検査用に、定点観測磁力値データ/測線データの全磁力値/測線データの IGRF 残差値/機体磁気補償処理前後の IGRF 残差値をグラフに図化する。
xslin	DPAM 測線データまたは相当データを StdLIN 測線データファイル形式(◆2)に変換する。
xslin2	DPAM 測線データから、2 個/秒にリサンプル・平滑化した StdLIN 測線データファイルを作成する。

◆1 DPAM 測線データ：日付、時刻、緯経度、高度、磁力値、IGRF 残差値、Fluxgate 3 成分値 およびデータ種別のデータが ASCII 形式で入っている。ecomp, fcomp の出力では、さらに機体磁気補償に関する諸量のデータが付加される。(データ種別とは、緯経度、高度の値が RealTimeGPS/PostNav 処理のいずれによるか、

磁力値、IGRF 残差値の日変化補正済/未補正、機体磁気補償済/未補償の別を示す数値パラメータである。)

◆2 StdLIN 測線データ：先頭桁が '&' または '%' の行は測線の開始を示し、第 2~9 桁に 測線名を記述する。個別点データは緯度(分単位)・経度(分単位)・高度(m 単位)・残差磁力値(mT 単位)が、format(f10.4, 1hN, f11.4, 1hE, f8.1, 1hm, f8.1, 2hnT) の形式で入っている。

また、主として現地調査終了後の各種データ解析のためのソフトウェアは、必要に応じて逐次新しいプログラムの開発を行うこととなるが、ルーチ的な利用のために次のプログラムを用意してある。

プログラ ム名	機 能
adjlv	グリッドデータに一定値を加算する。
gadd/gsub	2 組のグリッドデータの加算/減算を行う。
txproj	グリッドデータを別の図法展開座標系に変換(再グリidding)する。
galts	StdLIN 測線データから観測高度を平滑化した面グリッドデータを作成する。
tmcorr	観測空中磁気異常グリッドデータに対して地形効果を見積もり、それを除去する。
emag/ amag, amagc	磁化強度マッピング[指定曲面を上面とする等価ソース(磁化分布)を仮定し、その分布をメッシュ上の観測データに適合させるための逆解析]を行う。
emeq/ ameq, ameqc/ cmeq	等価アノマリによる高度リダクション[指定曲面から一定距離下方の曲面上に等価アノマリを仮定して、その分布をメッシュ上の観測データから逆解析で導き、それによる指定曲面での異常分布を計算する]を行う。
emeqs/ ameqs, ameqc/ cmeqs	等価ソースによる高度リダクション[指定曲面から一定距離下方の曲面上に等価ソース(表面磁化分布)を仮定して、その分布をメッシュ上の観測データから逆解析で導き、それによる指定曲面での異常分布を計算する]を行う。
rpmeqs	得られた等価ソース(表面磁化)の分布から、指定曲面での極磁力異常分布を計算する。
edeq/ adeq, adeqc/ cdeq	等価アノマリによる測線データからの高度リダクション[指定曲面から一定距離下方の曲面上に等価アノマリを仮定して、その分布を StdLIN 測線データから逆解析で導き、それによる指定曲面での異常分布を計算する]を行う。
edeqs/ adeqs, adeqc/ cdeqs	等価ソースによる測線データからの高度リダクション[指定曲面から一定距離下方の曲面上に等価ソース(表面磁化分布)を仮定して、その分布を StdLIN 測線データから逆解析で導き、それによる指定曲面での異常分布を計算する]を行う。
rpdeqs	得られた等価ソース(表面磁化)の分布から、指定曲面での極磁力異常分布を計算する。
plmap/ plmapc	グリッドデータの線画コンター図/カラー段彩つきコンター図を描く。
plmapl/ plmapcl	グリッドデータの線画コンター図/カラー段彩つきコンター図を航跡表示付きで描く。

plmapcs	グリッドデータのカラー段彩陰影図を描く。
job	制御ファイルでの指定に従って、一連のジョブをバッチ処理的に連続実行する。
job1	制御ファイルでの指定に従って、その中の1ジョブステップのみを実行する。
その他	sel, seldb, altx, govlay, gojoin, gmerge, gtrf, leccorr, aaptdp, galtf, plmapg, shade, xplmap, xplmapc, igrfcal, utmcal, xycal, cxtw84, cxw84t, xiken, xenik

4. 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せず、その“交点”での磁力値が一致すべきものとは言えない。従って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、主測線に交差する方向に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、主測線と高度で相連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。

今日では位置決定精度がGPSにより極めて向上しているので、交差測線データの利用で未知の磁力値誤差を補正する方法を検討した。

高度変化に富む探査データの処理に関する検討では、測線データから等価ソース分布を求める方法が有効であることを明らかにしたが、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(交点間には線形に変化)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、

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

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の制約も与える)。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。前にも述べたように、逆解析が不定解となる場合にもノルム最小解が得られて好都合である。

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、(1),(2),(3)の誤差許容条件で解析した結果を次ページに示す。

2個のブロック状のソースを考え、想定測線配置 L での理論異常にレベル誤差 (L に記載) を与えたものを観測データとみなし、観測高度を平滑化した曲面 H への磁気異常リダクションを試みる。交点コントロールを行わない場合には、レベル誤差のないデータによる結果は理論磁気異常 T にほぼ等しく A であるが、レベル誤差を与えるとその影響で B のようになる。交点コントロールの実施結果は、(1),(2),(3)の条件に応じてそれぞれ $D1, D2, D3$ となった。 $D1$ では見事にレベル誤差修正が行えているが、 $D2, D3$ はこれと異なる。

$D2$ はエリア全体の大きな傾向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する。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る。また、レベル誤差を含まないモデルデータと同じ処理を行っても、同様の結果(例えば、(2)の条件で $C2$) が得られることもよく符合する。

従って結論的には、(1) 測線ごとに一定のレベル誤差の評価はこの方法で正しく行えるが、(2) 測線ごとに線形に変化するレベル誤差や (3) 交点ごとに独立なレベル誤差を許容する形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ずる。

但し、その場合でも交点ごとに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、両者の差から物理的な意味を抽出できる可能性がある。火山活動に伴う微弱なアノマリ変化を繰返し探査で捉える上では、航跡を完全に一致させることが難しく、空間エリアシングが問題となるが、例えば、初回の稠密な東西測線データと次回の稠密な南北測線データとを、上記(3)の手法で比較検討することが考えられる。

文献

- Briggs, I. C. [1974] Machine contouring using minimum curvature. *Geophysics*, 39, 39-48.
- 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.
- 中塚 正 [2003] 地球物理データの解析処理・図化表現のためのライブラリ。地調研究資料集, no.400, 86p., (CD-ROM 1 枚付)。

中塚 正・大熊茂雄 [2003] スティンガー式ヘリボー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 [2005] スティンガー式ヘリボー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*, (印刷中).

Nakatsuka, T. and S. Okuma [2005] Reduction of geomagnetic anomaly distribution from the helicopter-borne observation at variant elevations. Submitted to *Explor. Geophys.* 37 / *Butsuri-Tansa* 59 / *Multi-Tansa* 9, (to be published in 2006).

Smith, H. H. F. and P. Wessel [1990] Gridding with continuous curvature splines in tension. *Geophysics*, 55, 293-305.

