

スティンガー式ヘリボーン磁気探査における機体磁気補償

中塚 正・大熊 茂雄 (産総研 地球科学情報研究部門)

Compensation of aircraft magnetic field on the nose boom sensor of helicopter-borne magnetic survey system

T. Nakatsuka and S. Okuma

(Geological Survey of Japan, AIST)

1. はじめに

今日の空中磁気探査では、磁場精密測定・精密測位の技術の進展とともに、測線を高密度に配した高分解能探査が主流となってきた。高分解能探査のためには狭い測線間隔に応じた低空飛行が必要である。そのため日本のように地形の起伏に富む地域では、固定翼飛行機での調査には制約が大きく、ヘリコプター利用による調査が不可欠となる。また、磁力計センサーの搭載方法として、バード曳航方式と機体固定のスティンガー方式があるが、日本のように住宅地・道路・鉄道が発達した地域では、バード方式は安全面で問題があり、自在な飛行計画の策定もままならない。従って、スティンガー方式でのヘリコプター利用空中磁気探査システムの構築が望まれた。

国内でヘリコプター利用の本格的なスティンガー方式空中磁気探査をはじめて導入したのは、金属鉱業事業団であり(菱田ほか, 1997)、オーストラリアの会社が所有するシステムを利用したものである。地質調査所(現産総研)でも1998年に、同じシステムを用いて福井平野の調査を実施している(大熊ほか, 1999)。しかしこの体制では、通常は国内にハードウェアが存在せず、火山活動に応じた緊急調査など機動的な調査には不十分な状況であった。また、オーストラリアの会社のシステムが搭載されたヘリコプターは、山岳調査用とは言え、とくに急峻な高山での調査は予定しないものであった。

このような背景のもと、国内での調査に適合した自前のシステムを構築し、各種目的での調査に利用可能ならしめることを目標に、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いる。この新システムの概要については、中塚・大熊(2003)の報告がある。

2. 機体磁気ノイズ

磁力計センサー部としては、カナダ Scintrex 社製 CS-2 セシウム磁力計を、ノーズブーム(スティンガー)(右写真参照)の先端に収容している。この位置のセンサーでは、機体磁気の影響を補正することが必要となるが、能動的な機体磁気補償の措置(中塚ほか, 1976)はとっておらず、そのかわりにブームの中程に3軸 Fluxgate 磁力計(Billingsley Magnetics TFM100G2)を



置き、そのデータを利用して調査飛行の後に補正計算を行う。この3軸 Fluxgate 磁力計のデータは、精密な機体の姿勢 (roll, pitch, yaw) の情報を与えることとなる。

航空機の機体に由来する磁気ノイズとしては、永久磁気成分と誘導磁気成分が主体であり、導体を貫く磁束の変化によって生ずる渦電流の効果もある。しかし、空中磁気探査においては、急激な機体の姿勢変化は避けるようにしているので、一般に永久磁気成分と誘導磁気成分について考慮すれば足りる。永久磁気成分の機体磁気ノイズは、機体に固定した座標系で一定のベクトルであるが、誘導磁気成分は、誘導磁場を発生する磁性体と磁力計センサーとの位置関係により、ある方向の外部磁場 (地球磁場) が加えられたときに別の方向成分のノイズ磁場をも生ずる。

今、機体に固定した直角座標系 (機首方向 h , 右翼方向 s , 下方向 v) を考えると、セシウム磁力計センサーの位置における磁場ベクトル F は、地球磁場を H (全磁力は H) として、

$$F = H + p + AH \quad (p: \text{永久磁気}, AH: \text{誘導磁気})$$

$$\begin{pmatrix} F_h \\ F_s \\ F_v \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} H_h \\ H_s \\ H_v \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} p_h \\ p_s \\ p_v \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} a_{hh} & a_{hs} & a_{hv} \\ a_{sh} & a_{ss} & a_{sv} \\ a_{vh} & a_{vs} & a_{vv} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} H_h \\ H_s \\ H_v \end{pmatrix} \quad (1)$$

で表される。ここで、 p_h, p_s, p_v および $a_{hh}, a_{hs}, a_{hv}, a_{sh}, a_{ss}, a_{sv}, a_{vh}, a_{vs}, a_{vv}$ は定数である。この位置での全磁力 T は、 $(p + AH)$ が H に比べて十分小さいので、次式の形となる。

$$\begin{aligned} T &= \sqrt{F_h^2 + F_s^2 + F_v^2} \approx \sqrt{H^2 + 2H \cdot (p + AH)} \approx H + \frac{H}{H} \cdot (p + AH) \\ &= H + (H_h/H)(p_h + a_{hh}H_h + a_{hs}H_s + a_{hv}H_v) \\ &\quad + (H_s/H)(p_s + a_{sh}H_h + a_{ss}H_s + a_{sv}H_v) \\ &\quad + (H_v/H)(p_v + a_{vh}H_h + a_{vs}H_s + a_{vv}H_v) \\ &= H + \frac{1}{H} \left(\underline{p_h}H_h + \underline{p_s}H_s + \underline{p_v}H_v + \underline{a_{hh}}H_h^2 + \underline{a_{ss}}H_s^2 + \underline{a_{vv}}H_v^2 \right. \\ &\quad \left. + \underline{(a_{hs} + a_{sh})}H_hH_s + \underline{(a_{sv} + a_{vs})}H_sH_v + \underline{(a_{vh} + a_{hv})}H_vH_h \right) \quad (2) \end{aligned}$$

3. 機体磁気補償の方法

3軸 Fluxgate 磁力計の測定より地球磁場ベクトル H (H_h, H_s, H_v) が求めれば、機体磁気補償テスト飛行 (機体を様々な方向に飛行させながら roll, pitch, yaw の機体揺動試験を行う) のデータから (2) 式に対して多くの T と H_h, H_s, H_v の組が与えられることになり、下線の9個のパラメータを決定できる。具体的には、3元2次の回帰分析を行って10個のパラメータ $H, (p_h/H), (p_s/H), (p_v/H), (a_{hh}/H), (a_{ss}/H), (a_{vv}/H), ((a_{hs}+a_{sh})/H), ((a_{sv}+a_{vs})/H), ((a_{vh}+a_{hv})/H)$ を求めると、先頭の H を除く9個のパラメータを用いて、探査飛行時のデータに対する機体磁気補償 (T から H を求める) が行える。

3軸 Fluxgate 磁力計の位置における磁場ベクトル G は、セシウム磁力計センサーの位置の F にも一致せず、その位置への永久磁気効果を q , 誘導磁気効果を BH として、

$$G = H + q + BH$$

$$\begin{pmatrix} G_h \\ G_s \\ G_v \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} H_h \\ H_s \\ H_v \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} q_h \\ q_s \\ q_v \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} b_{hh} & b_{hs} & b_{hv} \\ b_{sh} & b_{ss} & b_{sv} \\ b_{vh} & b_{vs} & b_{vv} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} H_h \\ H_s \\ H_v \end{pmatrix} \quad (3)$$

で表され、 q_h, q_s, q_v および $b_{hh}, b_{hs}, b_{hv}, b_{sh}, b_{ss}, b_{sv}, b_{vh}, b_{vs}, b_{vv}$ は定数である。

$$\left. \begin{aligned} H_h &= G_h - q_h - b_{hh}H_h - b_{hs}H_s - b_{hv}H_v \\ H_s &= G_s - q_s - b_{sh}H_h - b_{ss}H_s - b_{sv}H_v \\ H_v &= G_v - q_v - b_{vh}H_h - b_{vs}H_s - b_{vv}H_v \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

であるので、(4)を(2)に代入し、 \mathbf{H} に比べて $\mathbf{p}, \mathbf{AH}, \mathbf{q}, \mathbf{BH}$ が小さいので、その2次以上の項を無視すると、

$$T = H + \frac{1}{H} \left(\underline{p}_h G_h + \underline{p}_s G_s + \underline{p}_v G_v + \underline{a}_{hh} G_h^2 + \underline{a}_{ss} G_s^2 + \underline{a}_{vv} G_v^2 + (\underline{a}_{hs} + \underline{a}_{sh}) G_h G_s + (\underline{a}_{sv} + \underline{a}_{vs}) G_s G_v + (\underline{a}_{vh} + \underline{a}_{hv}) G_v G_h \right) \quad (5)$$

となり、単に(2)の H_h, H_s, H_v を G_h, G_s, G_v に置きなおしたものとなる。これは、3軸 Fluxgate 磁力計のデータをそのまま機体磁気の影響を受けていない磁場ベクトルの測定とみなして処理しても、下線の9個のパラメータを決定する上で大きな誤差を生じないことを意味する。

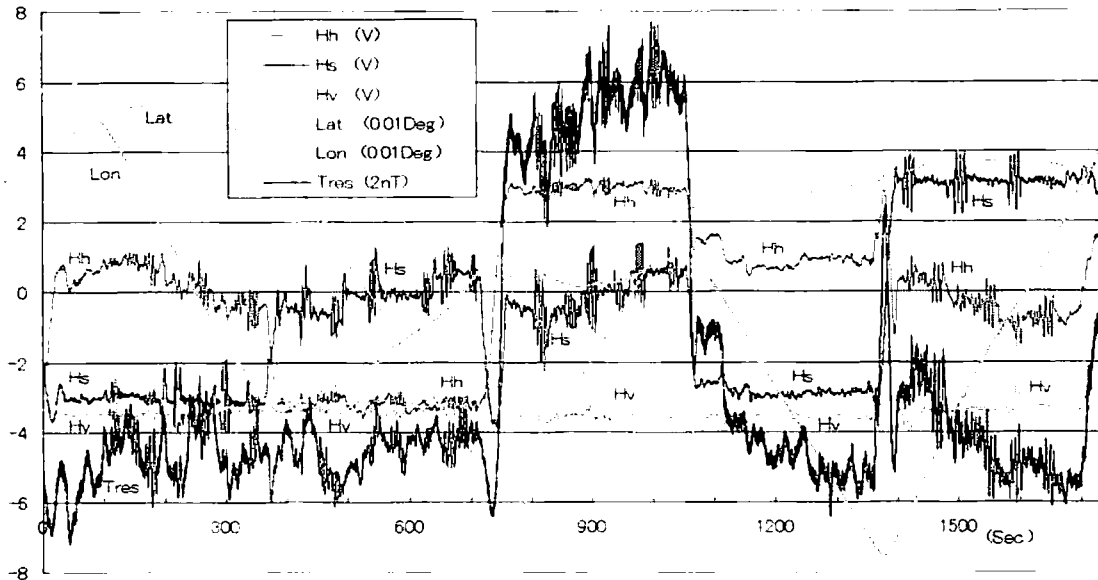
一方、(2), (5)式には H （すなわち機体磁気の影響を受けていない地球磁場の全磁力）が含まれており、9個のパラメータを決定するために用いるデータの中でその値が大きく変化することは好ましくない。とくに $G_h, G_s, G_v, G_h^2, G_s^2, G_v^2, G_h G_s, G_s G_v, G_v G_h$ のいずれかとコヒーレントな変化をする状況があると、パラメータの決定に誤差を生じることとなる。

現実の機体磁気補償テスト飛行は、磁気異常源となる構造からなるべく離れるため海上とし、かつなるべく高度をとった飛行域を設定した。調査飛行測線の4方向に対し、その方位とそれぞれ左右に10度づつ偏斜した方位の合計12方位に向かって飛行しつつ、機体の maneuvering（揺動＝姿勢変化）を行う。今のところ、姿勢変化の範囲は、ローリングは左右15度、ピッチング上下5度、ヨーイング左右10度としている。

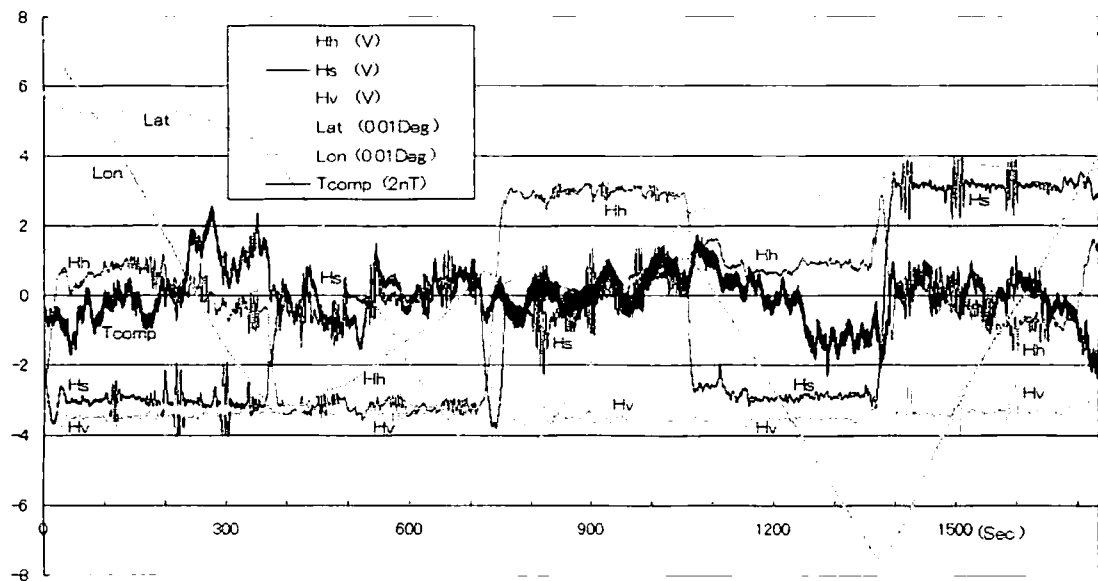
4. 実データへの適用

富士山を含む急峻な高山でも調査できることをめざして、ステインガー式ヘリボーン磁気探査の計測装置を2002年に構築したが、このシステムを用いた検証調査飛行で得られたデータによる機体磁気補償のデータ処理結果を以下に示す。

第1図は、機体磁気補償テストを行っている30分間弱の時間帯のデータ（全データ）を図化したものである。Hh, Hs, Hvはそれぞれ3軸 Fluxgate 磁力計の出力（アナログ電圧をA/D変換）で、V単位の値である。Lat., Lon.は、GPSによる測位データの緯度・経度の値（縦軸の1が0.01度に相当）、Tresは、セシウム磁力計の計測データ（単位nT）から場所の変化に対応する大局的な傾向（緯度・経度の1次式）を除去したもの（縦軸の1が2nTに相当）であり、いずれもその相対変化のみを図示している。時間順に、西・南・北・西・東に飛行したことがわかるが、



第1図 機体磁気補償テスト飛行の生データ



第2図 テスト飛行データの機体磁気補償処理結果 (Tcomp)

それぞれの間には左右に10度ずつ偏針した方位への飛行を含み、2回目の西向き飛行は、南北方向飛行の間に西風で機体が東に流されたのを回復するためである。

Tresの変動幅は約±15nTに及び、とくに北向き飛行において大きな機体磁気ノイズ効果が見られることがわかる。このデータに3元2次の回帰分析を行って回帰係数を求め、同じデータに機体磁気補償処理を行ったものが第2図のTcompである。変動幅は±4nTまで低下し、細かい変動の幅も低下している。この図で緩やかに変動する成分は、機体磁気補償テストを行った海域における実際の磁気異常である可能性が高い。

このテスト飛行から得られる回帰係数を、実調査地域の飛行データに対して適用することにより、機体磁気補償処理を行う。前記のテスト飛行の2日後に行った調査データによる磁気異常分布を第3図に示す。

