

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

中塚 正・大熊 茂雄 (産総研 地球科学情報研究部門)

Passive magnetic compensation for stinger sensor in helicopter-borne magnetic survey
T. Nakatsuka and S. Okuma (Geological Survey of Japan, AIST)

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おり、その背景と新システムの概要については、昨年春に報告した(中塚・大熊, 2003)。

スティンガー式空中磁気探査では、磁場計測において機体磁気の影響が逃れられず、何らかの機体磁気補償措置が必要となる。

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が、能動的な機体磁気補償の措置(中塚ほか, 1976)はとっていない。そのかわりにブームの中段に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。

ここでは、機体磁気補償の方法と実データへの適用例について述べる。

2. 機体磁気ノイズ

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(h:機首方向, s:右横方向, v:下方向)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、 $(p + AH)$ が地球磁場 H に比べて十分小さいので、次式の形となる。

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

すなわち、下線で示した9個のパラメータが機体磁気効果の特徴付ける量となっている。

3. 機体磁気補償の方法

今3軸 Fluxgate 磁力計が地球磁場ベクトル \mathbf{H} (H_h, H_s, H_v) を測定できるとすると、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）により、様々な条件下での T と H_h, H_s, H_v の組のデータを得ることができ、前記の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。ベクトル \mathbf{H} が測定できていれば、その絶対値である H はすでに得られている訳ではあるが、その値の精度を考慮する必要がある。

セシウム磁力計による測定値 T は、45,000~50,000 nT を有効数字6桁程度で測定できるのに対し、3軸 Fluxgate 磁力計による H_h, H_s, H_v の測定は有効数字3桁程度であり、高々数10nT程度の精度しか得られない。ところが、機体磁気効果が数10nTであれば、上記の解析から得られるパラメータ $(p_h/H), (p_s/H), (p_v/H)$ や $(a_{hh}/H), \dots, ((a_{hs}+a_{sh})/H), \dots$ などの値は、 H_h, H_s, H_v や $H_h^2, H_h H_s$ などに乗じた値 [(2)の各項] で高々10nTのオーダーであるので、3軸 Fluxgate 磁力計の測定精度が例え2桁しかなくても、機体磁気効果を0.1 nT オーダーまで見積もることができる。

上では簡単のため、3軸 Fluxgate 磁力計が機体磁気効果を受けていない場合を議論したが、測定精度がそれほど高い必要がないことは、Fluxgate に対して機体磁気効果 (10,000 nT オーダーの成分磁場に対する10 nT オーダーの量) を無視しても構わないことを意味する。その確認の意味で、理論的に考察を加えると、以下のとおりである。

現実の3軸 Fluxgate 磁力計は、機体磁気ノイズの影響下にあり、その位置における磁場ベクトル \mathbf{G} は、セシウム磁力計センサーの位置の \mathbf{F} にも一致せず、その位置への永久磁気効果を \mathbf{q} 、誘導磁気効果を \mathbf{BH}

として、

$$\mathbf{G} = \mathbf{H} + \mathbf{q} + \mathbf{BH}$$

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

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。

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

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、

$$\begin{aligned} T = H + \frac{1}{H} & \left(\underline{p_h} G_h + \underline{p_s} G_s + \underline{p_v} G_v + \underline{a_{hh}} G_h^2 \right. \\ & + \underline{a_{ss}} G_s^2 + \underline{a_{vv}} G_v^2 + \underline{(a_{hs} + a_{sh})} G_h G_s \\ & \left. + \underline{(a_{sv} + a_{vs})} G_s G_v + \underline{(a_{vh} + a_{hv})} G_v G_h \right) \end{aligned} \quad (5)$$

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。また H が $G_h, G_s, G_v, G_h^2, G_s^2, G_v^2, G_h G_s, G_s G_v, G_v G_h$ 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、海上でなるべく高度をとった飛行域を設定する。また、次に示す実データへの適用では、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度ずつ偏針した方位の合計12方位に向かって飛行しつつ、機体の maneuvering (揺動=姿勢変化) を行った。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度である。

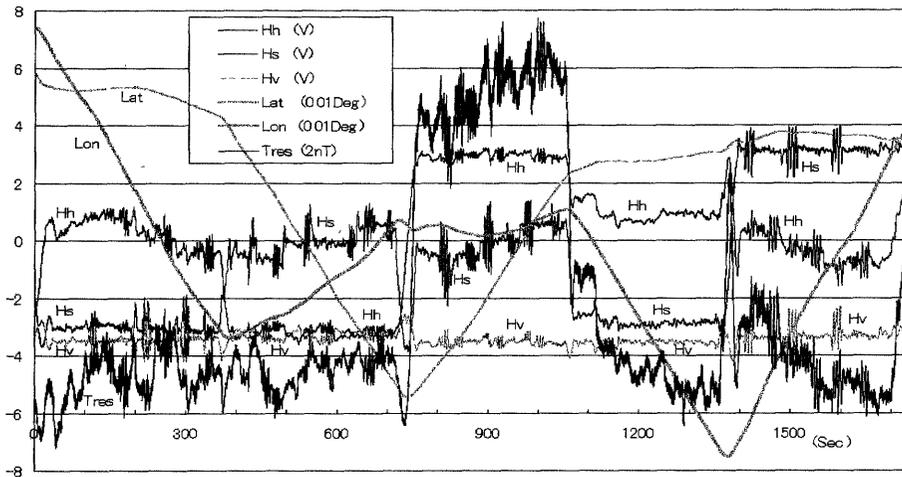
4. 実データへの適用

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、スティンガー式ヘリボ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。

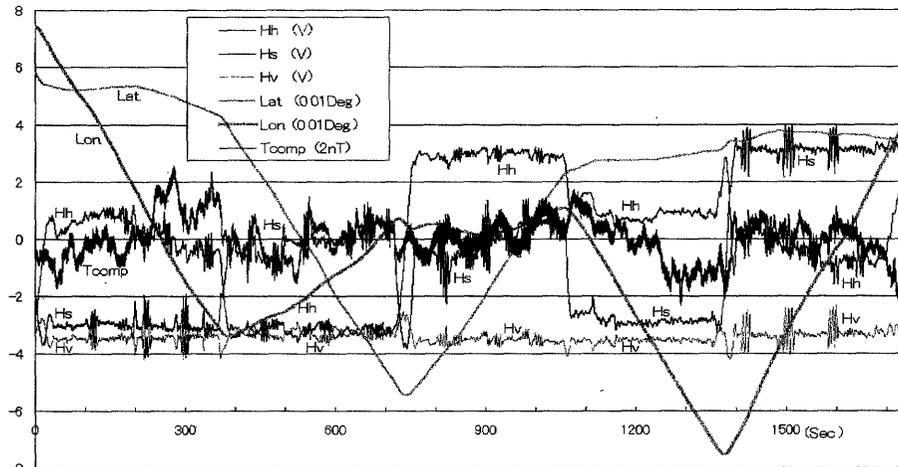
第1図は、機体磁気補償テストを行っている30分間弱の時間帯のデータ（全データ）を図化したものである。Hh, Hs, Hv はそれぞれ3軸 Fluxgate 磁力計の出力（アナログ電圧をA/D変換）で、V単位の値である。Lat, Lon. は、GPSによる測位データの緯度・経度の値（縦軸の1が0.01度に相当）、Tres は、セン

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、それぞれの間に左右に10度ずつ偏航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。

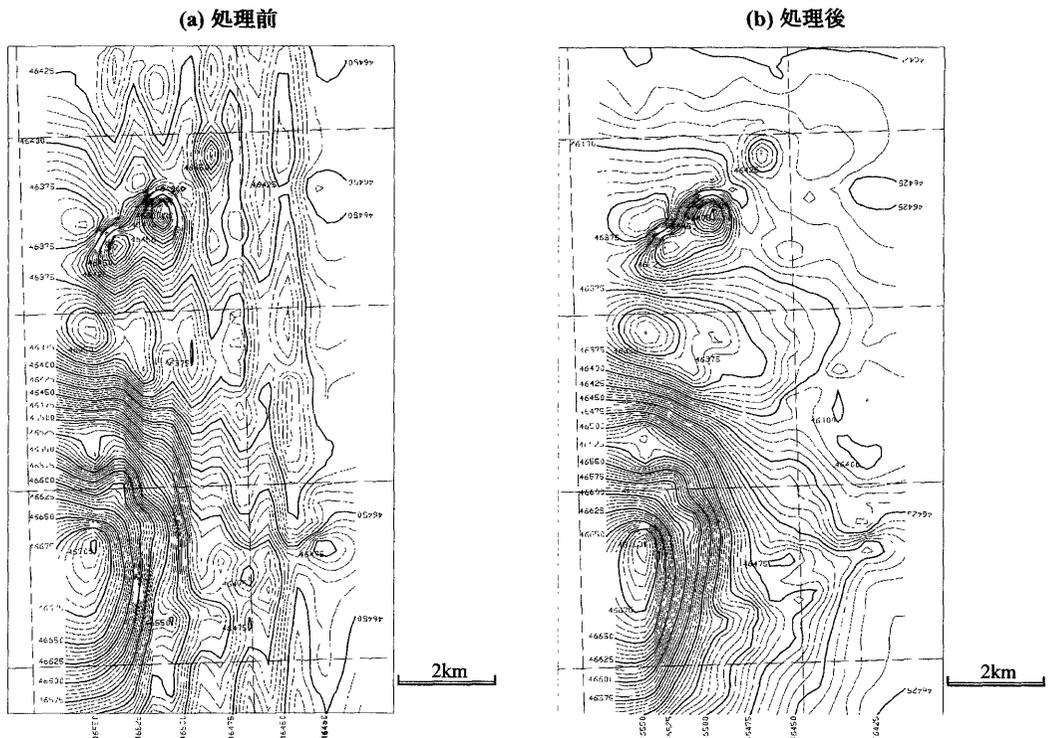
Tres の変動幅は約±15nTに及び、とくに北向き飛行において大きな機体磁気ノイズ効果が見られることがわかる。このデータに3元2次の回帰分析を行って回帰係数を求め、同じデータに機体磁気補償処理を行



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)



第3図 機体磁気補償を施す処理前後の実調査地域の飛行データによる磁気異常分布

ったものが第2図の T_{comp} である。変動幅は ± 4 nT まで低下し、細かな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。

左側(a)の処理前のデータでは、北向き測線と南向き測線との間の機体磁気ノイズ効果の差が顕著に現われ、いわゆる herringbone パターンが生じているが、右側(b)の処理後のデータでは、その影響をほぼ完全

に除去できている。

文献

- 中塚 正・田村芳雄・陶山淳治 [1976] 空中磁気探査における機体磁気補償. *地調月報*, 27, 773-781.
- 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回学術講演会論文集*, 23-26.
- 大熊茂雄・牧野雅彦・中塚 正 [1999] 福井平野における高分解能空中磁気探査. *物理探査学会第100回学術講演会論文集*, 285-289.