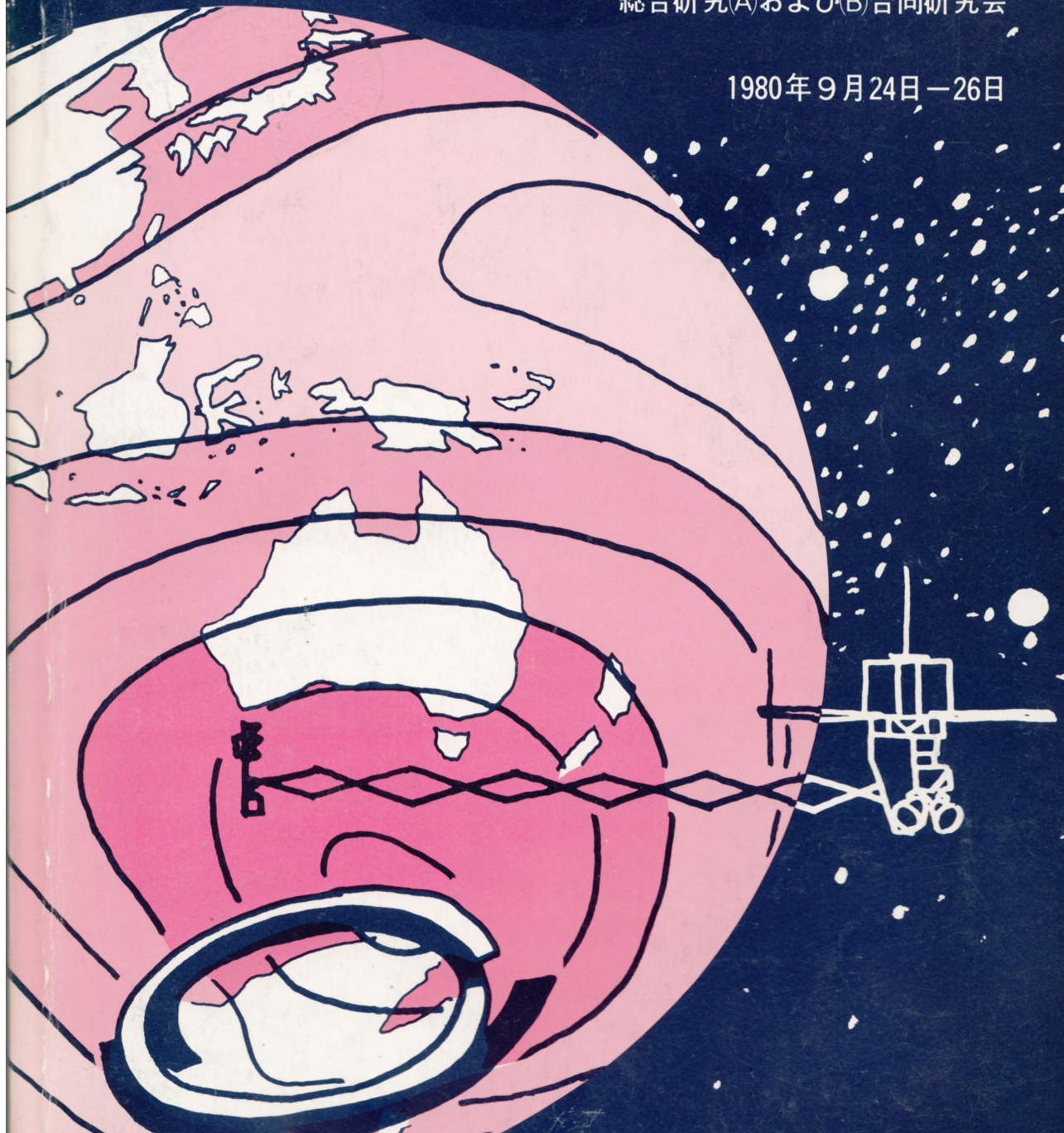


磁 場 精 密 測 定

—技術的問題克服への努力と地球物理学への貢献—

総合研究(A)および(B)合同研究会

1980年9月24日—26日



総合研究(A)「地上・海上・航空磁気測定と人工衛星観測の資料対比による
地球内外の電磁気学的研究」

代表者 福 島 直

総合研究(B)「高精度磁力計の開発とその極微小地球磁場変動観測への応用」

代表者 斎 藤 尚 生

航空機による磁気探査と機体磁気補償

地質調査所 中塚 正・小川克郎・小野吉彦

AEROMAGNETIC SURVEY AND MAGNETIC COMPENSATION OF AIRCRAFT

Tadashi NAKATSUKA, Katsuro OGAWA, Yoshihiko ONO

Geological Survey of Japan
1-3, Higashi-1, Yatabe-machi,
Tsukuba-gun, Ibaraki, 305, JAPAN

Abstract

After the appearance of the proton magnetometer, aeromagnetic survey was much developed and came into wide use. Also in Japan, Geological Survey of Japan has been carrying out the aeromagnetic survey for more than 15 years. During these years, as a result of the developed electronics, equipments for aeromagnetic survey have become smaller, lighter and more resolvable. Furthermore, data reductions and analyses have been automated using computer processing with the help of digital data acquisition systems. This paper introduces the system of the aeromagnetic survey at present in Japan, and describes how the compensation of aircraft magnetic field is done for the improvement of the exploration accuracy.

In the aeromagnetic survey, airborne magnetometer on board detects the magnetic field strength under the variation dependent on both time and position, while the station magnetometer at a fixed point monitors the time-dependent variation of magnetic field. The difference between these two measurements is considered to be the position-dependent variation. On the other hand, various kinds of positioning equipments on board are used to determine the trace of the aircraft. Magnetic field data and position data are combined with reference to time, and reduced to magnetic anomaly maps.

Nowadays, magnetic sensor on board is set in the tail-boom of the aircraft under the consideration of security. And it can be influenced by the aircraft magnetic field. To compensate this influence, three-axis-coil system and permalloy tips are used, and the adjustment for these is made. After such compensation, the directional error of the magnetic field measurement can be reduced to less than 1 nT.

1. はじめに

プロトン磁力計の出現以来、空中磁気探査は長足の発展をみた。これには、機体の姿勢にかかわらず全磁力測定が容易かつ正確に行えるというプロトン磁力計のメリットが最大限に発揮された。地質調査所では10数年来、主として炭化水素資源の賦存評価を中心と

する地下構造探査の目的で日本周辺の空中磁気探査を実施してきている。この間、エレクトロニクスの発展は目ざましく、探査装置も小型軽量化と高精度化が進められ、さらに磁気テープによるデータのデジタル収録と相まってデータ処理解析の自動処理化も進められた。ここでは、磁力計の活用の一分野として、現在の空中磁気探査システムの概要を紹介するとともに、探査精度向上のために実施されている機体磁気補償の実際について述べる。

2. 空中磁気探査

地質調査所では、数多くの20万分の1空中磁気図（参考資料(1)）を出版している。これは、1964年以来の地質調査所による空中磁気探査に基づいて作成されたものであるが、探査システムの性能は年とともに向上がはかられてきており、大まかには新しいもののほど精度がよくなっていると見てよい。

これらの空中磁気探査の原理を第1図に示す。航空機では位置による変化と時間的な変化の両方の影響を受けた磁場強度を測定する。一方、定点観測により磁場の時間的変化をモニタし、これを航空機での測定結果から差引くことにより磁場の位置による変化が検出される。ここでは、探査区域内で磁場の時間的変化が一様で定点観測と一致するとみなしている。一般的には、半島効果・離島効果・CAなどとしてよく知られているように、位置によって磁場の時間的変化が異なるため、この仮定は厳密には正しくなく、誤差要因の1つとなる。しかし、静隠日の磁場変化は主としてSq場によるもので、あまり広くない区域内では一様とみなしても、その誤差は位置による磁場変化（磁気異常）と較べて充分小さくなる。従って、探査飛行は静隠日に行うことが望ましい。

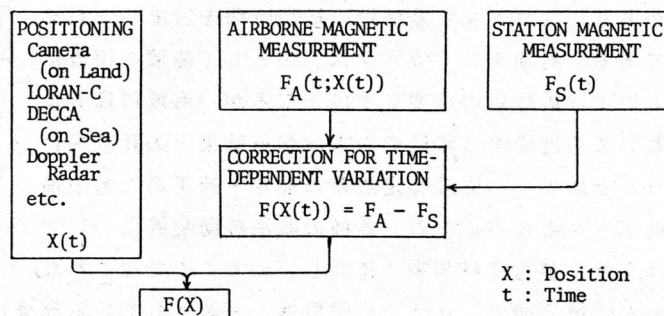


Fig.1 Airborne Geomagnetic Survey

一方、探査精度を左右する要因としては、磁場測定の精度もさることながら、位置標定の精度が重要である。位置標定としては、通常、陸域の探査では対地影像（写真記録またはビデオ記録）が用いられ、海域の探査では種々の電波測量が用いられる。対地影像による位置決定は煩雑な作業を伴うが、かなり正確な位置標定が行える。海域での電波測量には各種の方式があり、それぞれの得失をもっている。中には特に位置決定精度の高い高価な電波測量機器もあるが、経済性との兼ね合いから、現実的には既存の電波を用いる中では比較的精度のよいロランCやデッカが用いられることが多い。なお、船舶の場合と違い人工衛星測量（NNSS）は位置決定周期が長すぎるため有効でない。

空中磁気探査のハードウェアは、前述のように年とともに性能向上のための拡充強化がはかられてきた。その歴史をふりかえることは本論の目的ではないので、ここでは現在の

探査システムの紹介

にとどめる。現在、日本で空中磁気探査に用いられている機上および地上定点での測定システムを、第2図・第3図に示す。また、地質調査所所有の空中磁力計および定点磁力計の仕様と機能ブロック図を第4図・第5図に示す。空中磁力計

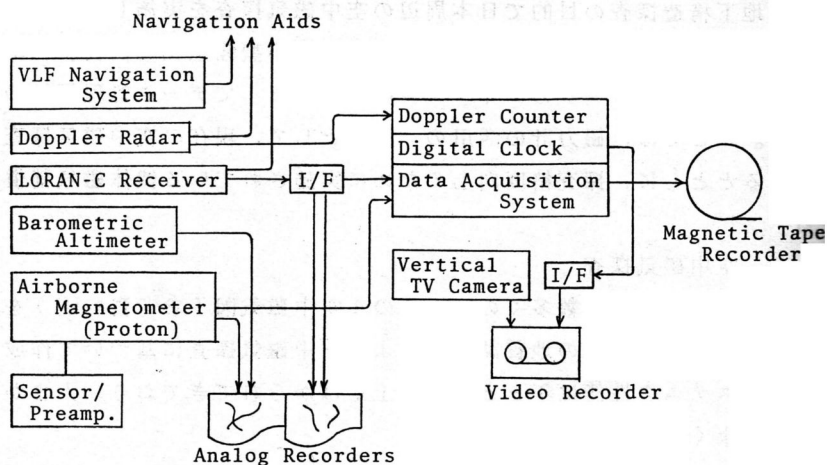


Fig.2 Equipments on Board

としては、特許の関係があって光ポンピング型を使用せずプロトン磁力計を用いているが、そのセンサーには、通常の水ではなくケロシンが封入されている。これは、空中磁力計の性格から測定周期を短くする必要があり、プロトン才差信号の緩和時間を短縮するためである。対地テレビカメラは、主として陸域の探査において位置標定の重要な手段となるが、海域の探査においても近接する陸域での電波測量結果との比較を行うことにより、位置標定誤差の検定・補正のための補助データとなる。なお、各種の航法援助装置については文献（参考資料(8)等）に詳しいのでここではふれな

いが、第2図で「ロランC受信機」と記されている部分は、必要に応じ「デッカ受信機」に置き換えられる。

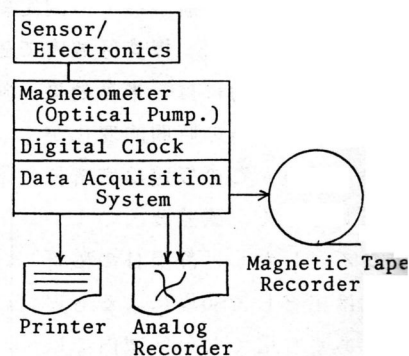


Fig.3 Equipments at the Station

3. 機体磁気ノイズ

空中磁気探査では、航空機の機体磁気等によるノイズ磁場を避けるため、古くは、磁力計センサーをバードと呼ばれる非磁性の容器に収納して、機体から離してケーブルで曳航するバード方式がとられた。一方、センサーを機体から突出したテイルブームの先端に固定するスティンガー方式は、特に安全性の観点から広く採用されるようになった。バード方式ではセンサー（バード）を機体から充分遠ざけることにより（そのための種々のトラブルはあるものの）機体磁気の影響をのがれられるが、スティンガー方式ではその影響が無視できず、これらを何らかの方法で補償することが必要である。

機体磁気ノイズには、次に列挙する如く各種のものが考えられる。

- ① 永久磁気 —— 機体および機体内の磁性体のもつ残留磁気。
- ② 誘導磁気 —— 地球磁場により磁性体に誘導されてできる二次磁場。

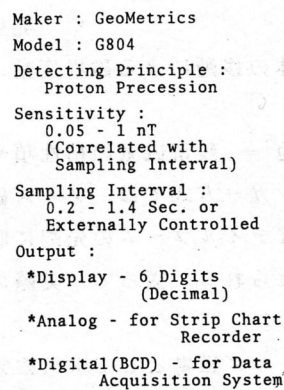
[illegible]

Fig.5 Station Magnetometer

- ③渦電流による磁場——機体の姿勢変化等により、導体を貫く磁束の変化によって導体に誘起される渦電流による磁場。
- ④機体内電流による磁場——機体の電気系統を流れる電流がループを作っている場合に発生する。
- ⑤磁性体の移動による磁場変動——残留磁気や誘導磁気をもったものが機械的に動くことによって発生する磁場変動。
- ⑥その他——残留磁気の粘性項や誘導磁気の異方性・ヒステリシスなど。

スティンガー方式では、ノイズ磁場によるセンサー付近の磁気傾度を小さくするため、センサーはテイルブームの先端に収納されるが、これによって微弱なノイズ磁場の影響からものがれられる。従って、実際の探査飛行では、主として永久磁気と誘導磁気の影響が問題となる。

いま、ノイズ磁場として永久磁気と誘導磁気のみを考えると、機体が水平で機首方位が ϕ のとき、ノイズ磁場が全磁力測定に及ぼす影響 G (方位誤差) は、

$$G = A \cos \phi + A \sin \phi + B \cos 2\phi + B \sin 2\phi + C$$

で表わされ、 $A_1 \cdot A_2$ は主として永久磁気、 $B_1 \cdot B_2$ は主として誘導磁気によるものであり、 C には双方の影響が含まれる(参考資料(3))。

4. 機体磁気補償

機体磁気補償のためには、三軸コイルコンペンセータとパーマロイ片を用いている。三軸コイルコンペンセータは、第6図に示す構成になっており、スティンガーに対して機体に固定した座標系で一定の磁場(ベクトル)を加えることができる。これは、方位誤差の $A_1 \cos \phi + A_2 \sin \phi + C$ の項に対応する。一方、 $B_1 \cos 2\phi + B_2 \sin 2\phi$ の項の補償用にはパーマロイ片を用いる。これは、センサーに対し水平でかつ垂直な方向にある2つの磁性体の誘導磁気互いに打消し合うことを利用するもので、実際の機体では磁性物質は、スティンガーに対して主として機首方向に分布し、左右対称に近いので、パーマロイの配置は第7図のようになる。なお、パーマロイを左右両側におくのはセンサー付近の磁気傾度を小さくするためである。

これらコンペンセータおよびパーマロイの調整には方位誤差を知る必要があり、機体磁気の影響をうけていない基準磁力値データが必要である。地上調整の場合は、機体から充分離れた位置で地磁気日変化等の経

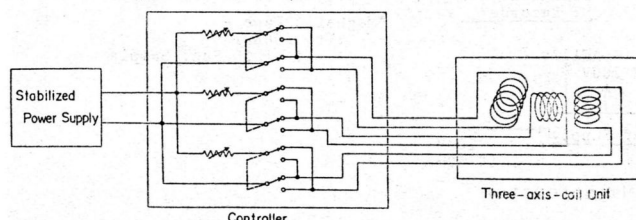


Fig.6 Schematic Diagram of Three-axis-coil System

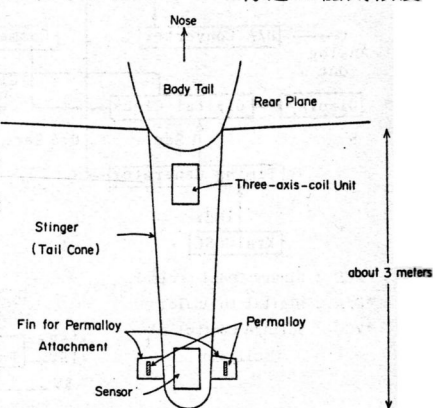


Fig.7 Configuration of Three-axis-coil Unit and Permalloy Tips around the Magnetic Sensor.

時変化をモニタし、機体のない状態で予め測定した磁力値に経時変化分の補正を行って基準値とするが、地表付近は磁気傾度や人工ノイズが大きく充分な精度の得られないことが多い。飛行調整では、大～中型機の場合はバードによる同時測定を行い、これを基準値とすることができる。小型機では、搭載容量等の点で困難があり、通常、クロバ型飛行パターンと呼ばれる固定点上空を4方位で通過して測定する方法がとられる。この場合には、地上定点で経時変化をモニタしてその補正を行う。

こうした機体磁気補償の経過の一例を示したものが第8図・第9図である。これは、YS-11型航空機において、スティンガー・バード併用の方位誤差検出を行った例であり、当初は飛行方向により50nT程度の主として永久磁気による磁気ノイズがあったが、コンペンセータおよびパーマロイ片による補償により、方位誤差が $\pm 0.5\text{nT}$ 程度まで抑えられている。

一方、小型機によるクロバ型飛行の場合には方位誤差の絶対値は得られず、飛行方位の違いによる相対値のみの補償が行われる。すなわち、方位誤差の定数項Cが残ることとなる。このCの補償を行うためには、地上調整によるほかに、東西方向に飛行しつつ機体をローリングさせて磁力値の変化を調べる方法がある。これは、方位誤差のCの項が磁気ノイズの鉛直成分によるものであり、地磁気傾角が $\pm 90^\circ$ でないところでは、機体のローリングに同期した磁力値変化が現われることを利用するものである。このようにして、小型機の場合でも、誤差1nT以下の精度で機体磁気補償が行われている。

5. おわりに

以上のように機上での磁場測定そのものはかなり精度よく行われるようになってきているが、その結果、地下構造に起因する磁気異常を測定する精度を決定する要因としては、地磁気経時変化の地域性の問題が大きくなっている。すなわち、定点観測による経時変化を調査区域内で一様と仮定する点に問題があることになる。これは磁気探査法の根本にかかわるもので簡単な解決は望めないが、地殻構造探査の観点から見れば、絶対値そのものはあま

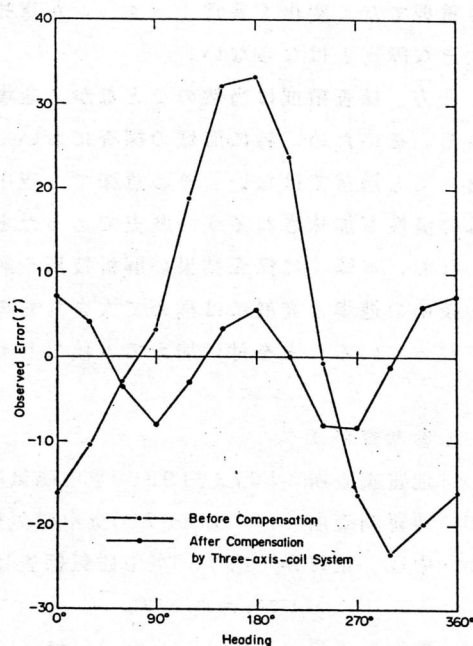


Fig.8 Compensation of the Permanent Magnetic Component by Three-axis-coil System.

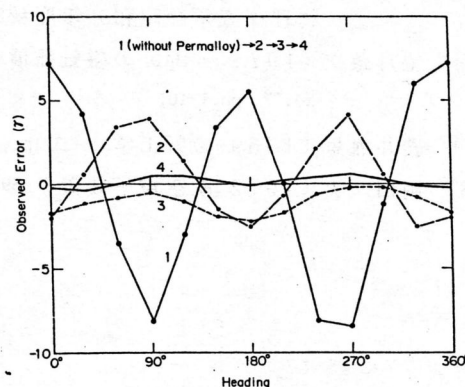


Fig.9 Compensation of the Induced Magnetic Component by Permalloy Tips.

り重要でなく変化（異常）パターンが意味をもつので、磁気嵐などの場合を除き、あまり大きな障害とはならない。

一方、探査精度は当然のことながら磁場測定精度とともに位置決定精度に大きく左右される。そのため、特に海域の探査においては、今や、位置決定精度が探査精度を決めると言っても過言ではない。その意味で、空中磁気探査の歴史は位置標定精度の向上（ここには経済性も加味される）の歴史であったと言える。

なお、本稿では探査結果の解析技術や解釈については全く言及しなかったが、その面での技術の進歩と発展には極めて大きなものがあり、各方面への応用が盛んに行われるようになっていることを付け加えて本稿のしめくくりとする。

（参考資料）

- (1) 地質調査所（1972-1980）空中磁気図 I - XXVII .
- (2) 地質調査所（1978, 1979）空中磁気探査法に関する研究（その1, その2）.
- (3) 中塚 正ほか（1976）空中磁気探査における機体磁気補償, 地質調査所月報, Vol.27, pp.773-781.
- (4) 中塚 正ほか（1973）YS-11(JA8612) の機体磁気補償について, 物理探鉱技術協会昭和48年度春季講演会予稿集 .
- (5) 金子 力ほか（1980）小型機を使用した空中磁気探査における機体磁気補償の一例, 物理探査学会昭和55年度秋季講演会予稿集 .
- (6) 望月謙次（1971）MAD の磁気補償について, 航空術科（海上自衛隊第3術科学校）, No.77, pp.1-10.
- (7) 義井胤景（1969）磁気工学, 371p., 海文堂 .
- (8) 岡田 実（1972）航空電子装置, 394p., 日刊工業新聞社 .