

大気球による日本海溝およびその東方海域における磁場観測*

加藤 愛雄**・瀬戸 正弘†・早坂 孝†
斎藤 尚生††・湯元 清文††

概 要

新しく開発したリングコア磁力計を大気球に搭載し、1979年9月に高感度の磁場観測を実施した。

大気球は、三陸沖464 kmまでの太平洋上を高度約25 kmで38時間飛行した。飛行時間中、磁力計は最後まで正常に動作し、膨大な量の記録を得ることができた。

大気球に吊るしたセンサーは、予想以上に複雑な動揺をしていたことが動スペクトル解析からわかった。これは、今後の大気球も含めた飛行体による磁場観測に対して貴重な資料となるものである。

観測された3成分磁場のうち垂直成分を用い、日本海溝およびその東方域の磁気異常を解析した。その結果、かつて日本海溝東方域は陸塊であったという興味ある事実を見つけることができた。

1. はじめに

大気球により高々度で地球磁場を観測し、標準磁場としてのW. M. S.あるいはIGRFと比較すると、地表付近の小規模な磁気異常に影響されず、地球内部に原因を持つ大規模な磁気異常を知ることができる。

著者等は上述の考えに基づき過去3回、大気球に全磁力測定用のプロトン磁力計と垂直成分測定用のフラックスゲート磁力計を搭載し、地球磁場の観測を行ってきた。感度は両磁力計共10 nTであった。

1977年5月の観測においては、翌年6月に発生した「1978年宮城県沖強震(M7.4)」の震源域上空を、地震発生の前年に大気球が飛行し、全磁力を観測していたことになった。そして全磁力異常から震源域の地下構造を求め、地震との関係について興味深い結果を得ることができた[1]。

* 宇宙研特別事業費による研究論文

** 東海大学航空宇宙学科

† 東北工業大学通信科

†† 東北大学理学部

1972年, 1975年の2回の観測においては, 大気球がほぼ北緯39度線に沿って飛翔し, 東北日本の日本海側から日本海溝に至るまでの大規模な磁氣的地下構造について考察することができた [2], [3].

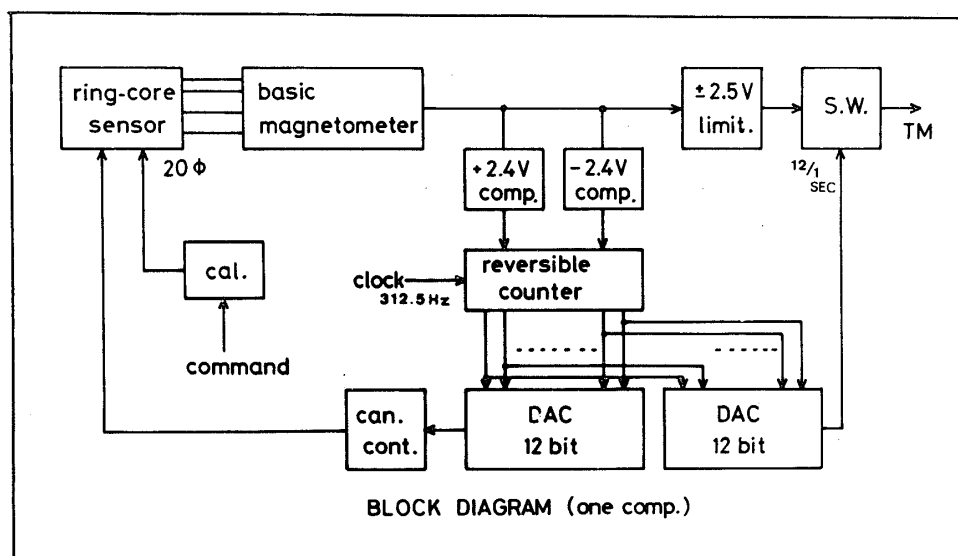
一方, 著者等は人工惑星による惑星間空間磁場測定を当面の目標に置き, 新しく高感度リングコア磁力計の開発を計画的に実行してきた [4], [5], [6]. 第3次計画で地上用の高感度磁力計を製作し, 現在東北大学女川地磁気観測所において, 従来のフラックスゲート磁力計の常識を破る高感度で, 常時安定に地磁気変動を記録している. 第4次計画として, 1979年にリングコア磁力計を大気球に搭載し磁場観測を行った. この観測ではリングコア磁力計の飛翔体搭載用磁力計としての性能試験を第一の目的とし, 時間的, 空間的な地磁気変化異常を生じさせる原因の広がり等を調べる事を第二の目的とした [7].

結果は, 第一の目的は達成された. 第二の目的は大気球に吊るしたセンサーの動揺が予想以上に複雑であったため, 時間的地磁気変動の異常についてはなお時間がかかるが, 空間的磁気異常については解析された.

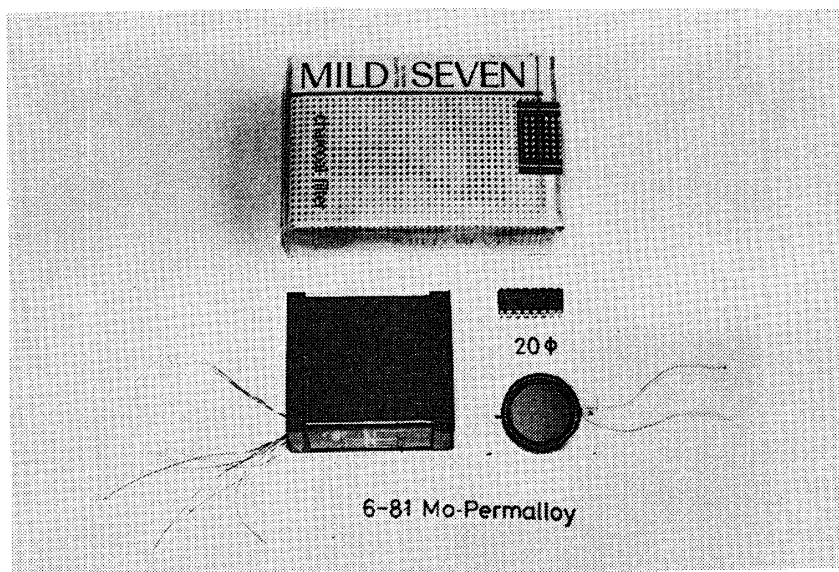
以下, 3節に1979年の大気球による磁場観測記録について, 4節にそれらから得られた大気球の動揺特性について, 5節に垂直成分から求めた磁気異常について記述する.

2. 観測方法

大気球に搭載したリングコア磁力計の1成分のブロックダイアグラムは第1図に示す通りである. 図には励振回路が省略されているが, 励振周波数は2.5 KHzとし, 安定化のため水晶発振器を用いた. 基本の磁力計 (Basic Magnetometer) は目的に関わらずリングコア磁力計に共通のものである. その出力が地上用, 飛翔体用と目的によって種々に処理される. 今回は磁力計全体として, 外部磁場自動打消方式が採用された. 即ち, 磁力計のアナログ出



第1図 リングコア磁力計1成分のブロックダイアグラム, 励振回路は省略した

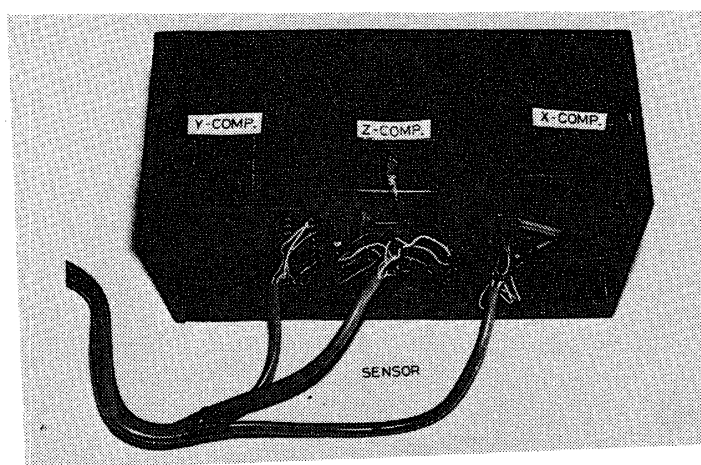


第2図 20φリングコアセンサー

力がダイナミックレンジ ($\pm 2.4 \text{ V}$) を越えた場合、可逆計数器が動作し、一段階約 $\pm 20 \text{ nT}$ の割合で DA コンバーターからセンサーに打消電流が流れ、ダイナミックレンジ内に復帰する。「約」という言葉は後述の様に同じ構成の磁力計を4成分搭載したが成分によりわずかずつ値が異なるため用いる。磁場測定範囲は約 $\pm 39000 \text{ nT}$ 、感度は $50 \text{ nT}/2.5 \text{ V}$ であり、テレメーターされて記録した場合 50 mV/nT となっており、 1 nT は十分に読み取ることができる。

出力方法としては、 $\pm 2.5 \text{ V}$ ($\pm 50 \text{ nT}$) 以内のアナログ出力と、打消磁場量を測定するための DA コンバーター出力 (約 $\pm 39000 \text{ nT}/2.5 \text{ V}$) とを切換えて出力した。

回路には C-MOS IC を多用し消費電力の低減化を行い、フィルター (5 KHz) を IC



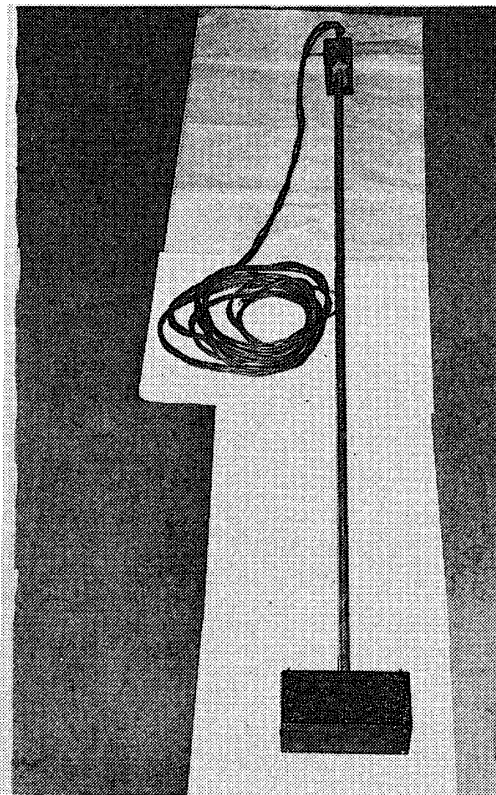
第3図 3成分用リングコア磁力計用センサー

化し、位相検波における温度による変化に注意を払った。回路部分に対し簡単な温度試験（ $-10^{\circ}\text{C}\sim 20^{\circ}\text{C}$ ）をしたところ、位相のずれ、励振周波数、増幅度、DAコンバーター出力等いずれも測定できない程変動は小さかった。

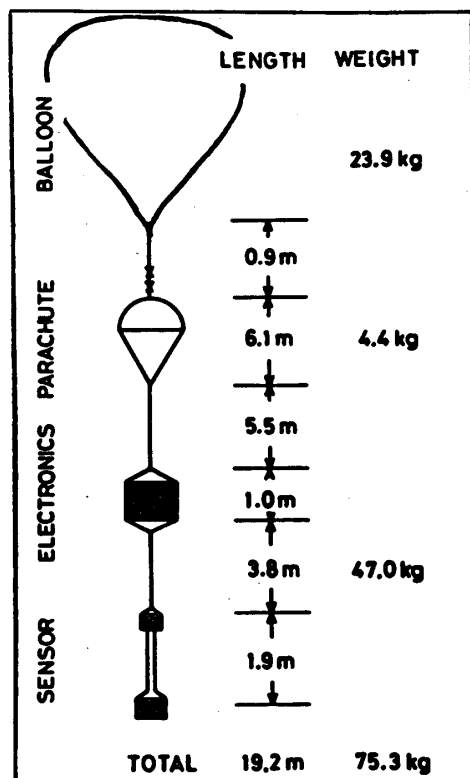
センサーは第2図の様な小型のリングコア（ 20ϕ ，8-61Mo-パーマロイ， 10μ 厚，3mm幅，12層巻）に励振コイルを250回巻き，図の左の様な箱（ $5\times 3.5\times 2\text{cm}$ ）に収めた。箱の外側に1500回の検出コイル，210回の負帰還コイル，打消コイル，校正コイルを巻いた。

以上の様なリングコア磁力計を3成分大気球に搭載し地磁気三成分の観測をした。その際、将来飛翔体に搭載する場合、電気部分からセンサーを離すためのブームが不可欠なので、ブームに対する資料を得ることにした。そこで、ゴンドラの持つ磁気の影響およびセンサー支持棒のたわみの影響等を見るため、更に1成分追加して搭載した。第3図は3成分測定用のセンサーで、第2図のリングコアセンサー3個から成り、全体の大きさは $10\times 20\times 10\text{cm}$ である。大気球に搭載したセンサー全体の図は第4図の通りで、2mのアルミパイプの下端に3成分測定用センサー、上端に垂直成分測定用センサーが付いている。上端と下端のセンサーの間隔は1.9mである。

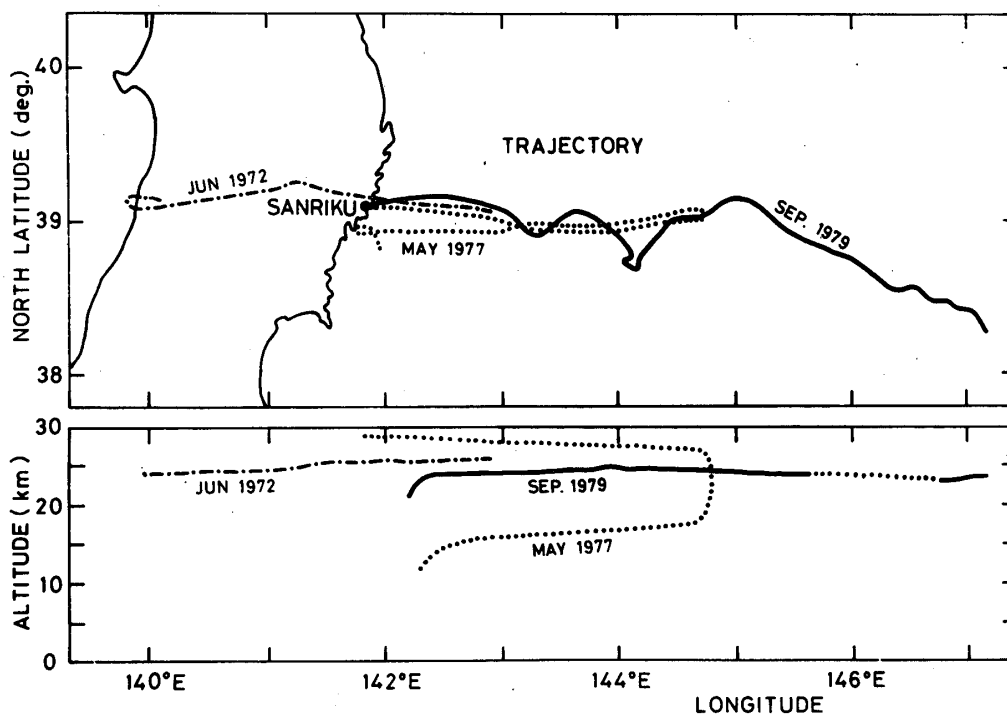
地球磁場観測に使用された大気球（ B_2-34 ）の構成を第5図に示す。従来、ゴンドラから吊るしたセンサーには簡単なジンバル機構を取り付け、大気球の動揺の補償をしていたが、今回はジンバル機構を付けずに吊るした。



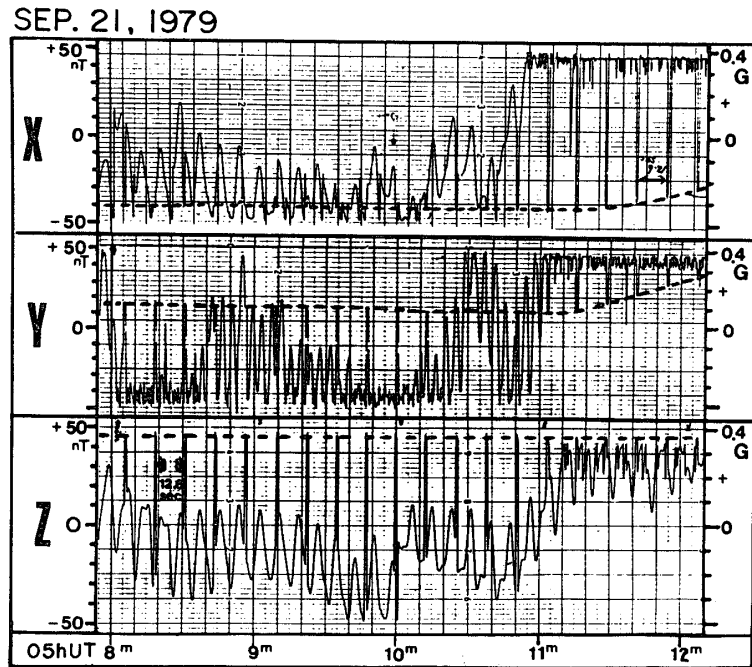
第4図 大気球に搭載したリングコアセンサー全体図



第5図 大気球 (B₂-34) 全体の構成図



第6図 大気球 (B₂-34) の航跡, 高度図. 過去2回の大気球 (B₂-30とB₅-61) の航跡, 高度も記入されている.



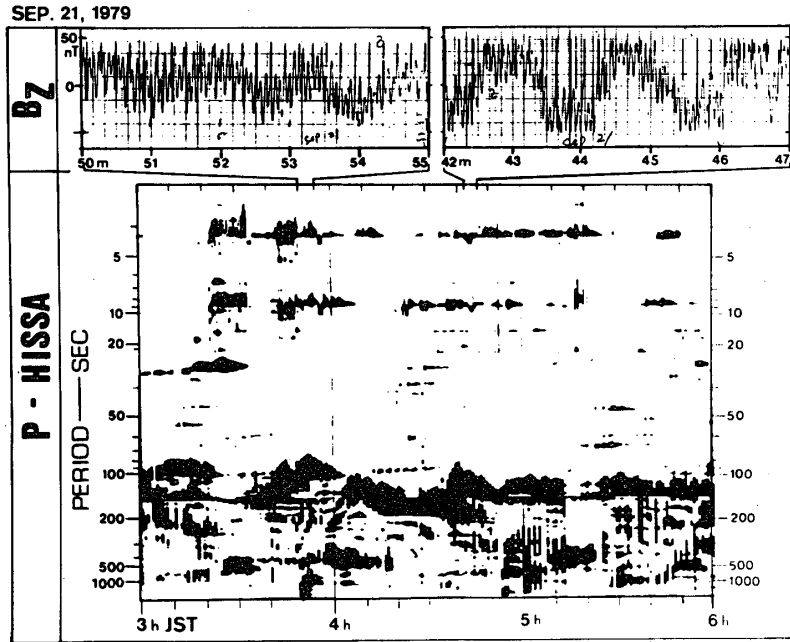
第7図 ペン書き記録例. 太い点線は外部打消磁場の値を示している。0511UT 付近からセンサーが回転し始めたことがわかる。

3. 観測記録

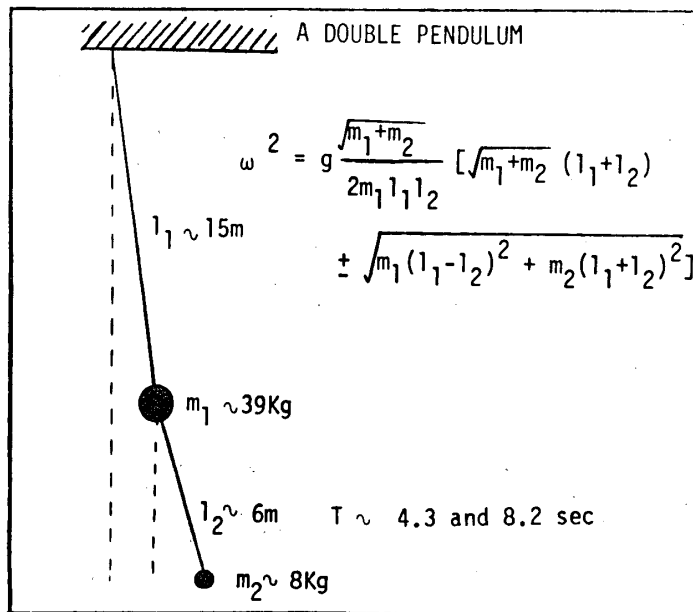
1979年9月20日16時35分(JST), リングコア磁力計を搭載した大気球は三陸大気球観測所から放球された。大気球(B₂-34)の航跡, 高度は観測所の資料によると第6図の通りである。なお, 同図には過去2回のほぼ北緯39度線に沿って飛翔した大気球の航跡, 高度も記入されている。今回の大気球は約95分後に三陸の東約90 kmの太平洋上で24.5 kmの高度に達し, レベルフライトに入った。以後, 東に向かって飛翔し, 9月22日6時20分(JST)にコマンドの限界に達したため, 三陸観測所から464 km東の太平洋上で切り離され観測が終了した。観測時間は37時間45分の長時間となり, その間コマンドによる感度検定も行われ, 磁力計は最後まで正常に動作していたことを確認し第一の目的は達成された。

テレメーター出力はすべて磁気テープに録音すると同時に, モニターとして第7図の記録例に示される様に, ローパスフィルターを通してペン書き記録がされた。図から±50 nT以内のアナログ出力と共に, 12秒に1秒の間隔で外部打消磁場量(太い点線)が出力されていることがわかる。±50 nT付近で, 細かい動きが図の右側に見られる。これは磁力計出力がダイナミックレンジを外れたため自動打消が動作し, ダイナミックレンジ内に復帰させている様子を表わしている。打消しの速度は約20 nT/0.003秒である。図はローパスフィルターを通してあるのでよくわからないが, 余裕を持って大気球の動揺に追従していた事は磁気テープの記録から確かめられている。

前述の様に観測時間が長時間であったため, 得られた記録の量は膨大なものとなった。す



第8図 磁場変動の波形と動スペクトル記録との対応

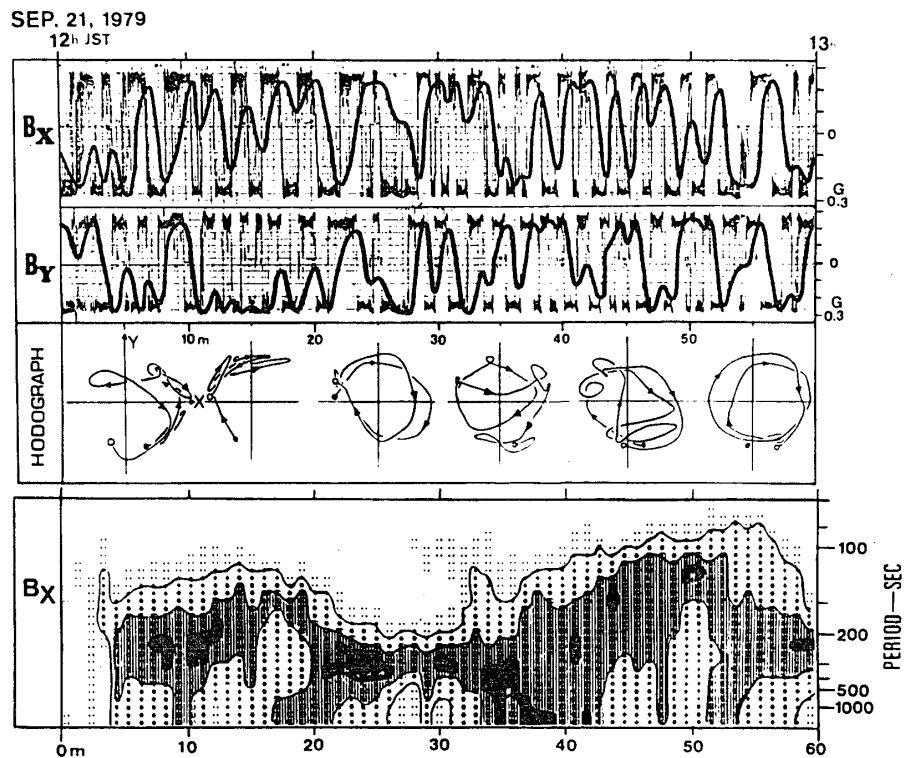


第9図 期待される大気球の二重振動周期

べて解析するのは更に時間がかかるが、ここでは記録の一部を用いて求めた大気球の動揺について、そして日本海溝付近の磁気異常について先ず解析することにした。

4. 大気球の動揺特性

大気球が飛翔中、リングコア磁力計のセンサーがどのような振動あるいは回転をしたのか、その動揺特性についての解析を行った。大量の記録を高速で波動解析できる HISSA [8] 装置を用い、動スペクトル解析を行った結果、主に3帯域 ($T_1 \sim 40$ 秒, $T_2 \sim 80$ 秒, $T_3 \geq 100$ 秒)の変動が観測時間中に発生していることが明らかにされた。実際の変動波形と動スペクトル記録 (Hissagram) との対応のために拡大した B_z 成分の Hissagram を第 8 図に示す。横軸に時刻 (JST), 縦軸に変動周期が示されている。9月21日3時50分～55分と同日4時42分～47分の期間においては、 $T_1 \sim 4.2$ 秒と $T_2 \sim 8.5$ 秒の変動がそれぞれ定常的に発生している。また、長周期の変動は図の前半の時 $T_3 \sim 80$ 秒、後半の時 $T_3 \sim 110$ 秒とその変動周期が時々刻々と変化している。これら $T_1 \sim 4.2$ 秒と $T_2 \sim 8.5$ 秒の比較的定常的な変動は第 9 図の様な大気球の二重振動によるものと考えられる。 m_1 はゴンドラの重さ、 m_2 はセンサーの重さ、そして l_1, l_2 は放球された大気球の構成から推定した長さである。 $m_1 = 39$ kg, $m_2 = 8$ kg, $l_2 = 6$ m の実測値と $l_1 \sim 15$ m の推定値から $T_1 \sim 4.2$ 秒と $T_2 \sim 8.2$ 秒の固有振動が期待され、大気球の短周期振動の観測事実が説明できる。こ



第 10 図 大気球の「ねじれ」「回転」に伴う磁場変動

の二重振子の振れ角 θ は、観測された磁場変動の振幅 $\Delta B \sim \pm 25 \text{ nT}$ から、およそ $\Delta \theta \sim \pm 2^\circ$ であったものと結論される。

次に、長周期帯の変動は「ねじれ」運動によるものと考えられるが、大気球とゴンドラそれにセンサーがそれぞれロープのみで結ばれているので、剛体の場合の単純な式よりはるかに複雑な式で記述されるべきものである。その複雑な「ねじれ」運動の解析の一部を第10図に示す。図の上段は水平2成分 B_x, B_y の外部打消磁場の変化を太線で表わし、中段はそれら2成分のホドグラフを示している。また、ねじれ運動の変動周期を表わす B_x 成分の動スペクトルを下段に示す。ホドグラフはリングコアセンサーの複雑なねじれ運動、回転の運動を表わし、動スペクトルはそのねじれ運動の変動周期を示している。ねじれ運動も変動周期も時々刻々と変化していることから、この複雑なねじれ運動は大気中の乱気流に起因していると推察される。

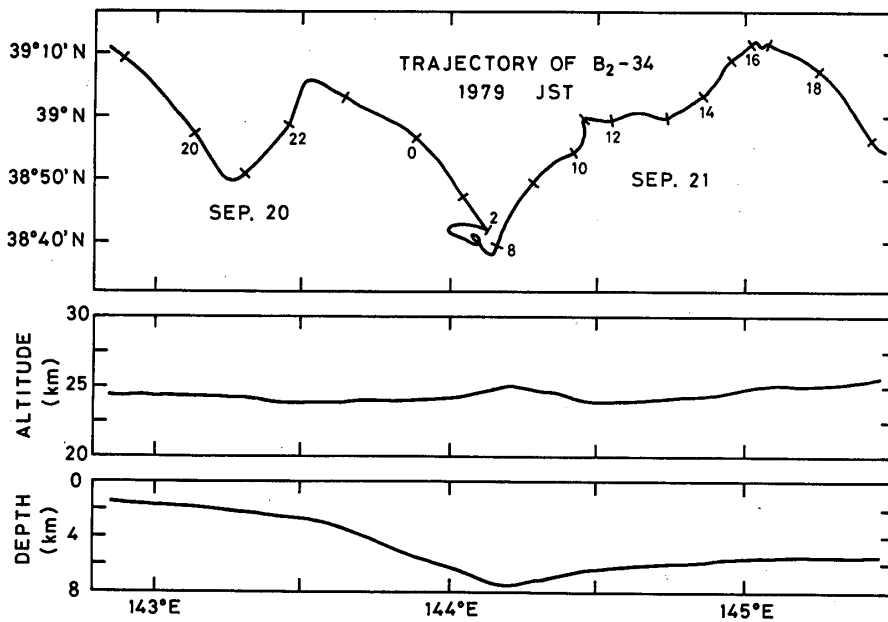
以上、簡単に動揺について記述したが、詳細な点については他の文献 [9] にゆずる。

5. 日本海溝およびその東方海域の磁気異常

第10図に示される様に、観測記録は動揺のため大変複雑なものとなった。しかし、垂直成分に関しては第8図の様に、バラスト投下による激しい揺れ以外、観測時間中比較的読み取り易い記録となっている。従って垂直成分だけをを用い、地域も日本海溝付近に限定して磁気異常について先ず解析した。

解析した地域における大気球の飛翔航跡、高度および海の深さは第11図の通りである。

先ず、9月20日21時より9月21日17時までの垂直成分読録から観測値を読み取った。



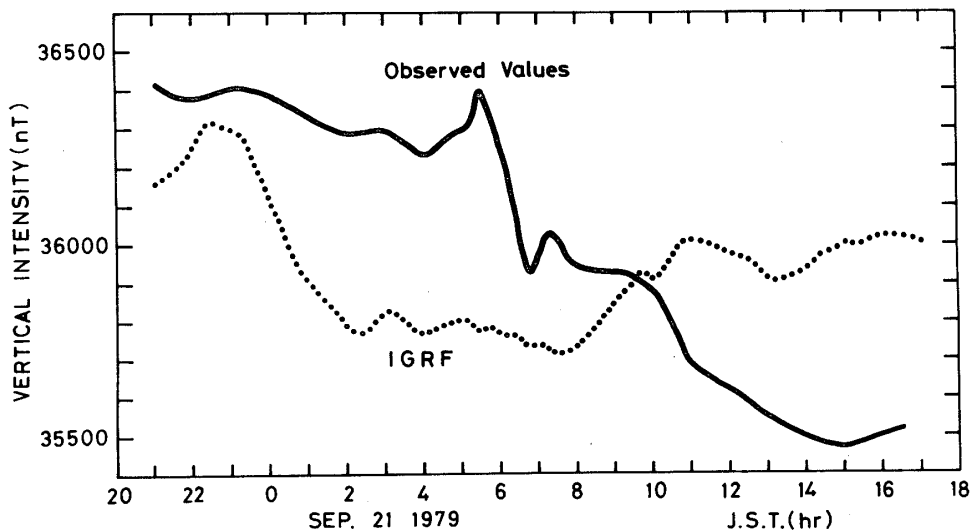
第11図 磁気異常を解析した地域での大気球の航跡、高度および海の深さ

4節で解析したような動揺による変化分を除くため読取値の移動平均を取り、大気球による高度約25 kmでの垂直成分の観測値を第12図の様に求めた。同図には大気球の航跡、高度に沿って求めたIGRFによる計算値も記入されている[10]。

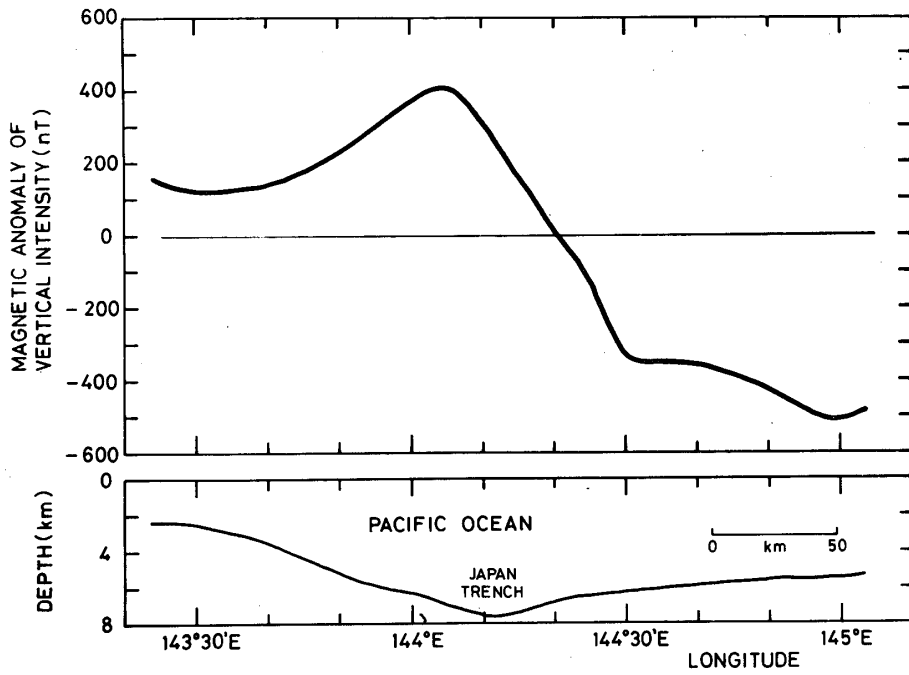
観測値から計算値を差し引いた値は磁気異常の値を表わしている。第11図からわかる様に、滑らかな飛行航跡を描いてないが、磁気異常の値を緯度線に平行な断面に投影して書いたのが第13図である。従って、同図は経度に対してプロットした垂直成分の磁気異常を表わしている。また、観測時間中、観測所に地上用リングコア磁力計を設置して地磁気変動を監視した。その結果、地磁気は平穏であったので、第13図の値は原因を地球内部に持つ地磁気垂直成分異常である。日本海溝を越えた領域で大きな負の異常になることが注目される。

次に、第14図下の様に磁化が垂直成分のみを持つと仮定し二層の磁氣的地下構造を考える。上層と下層が図のような形で接し、それぞれの層の磁化の強さの差(ΔI_2)が 3.8×10^{-3} e.m.u. であるとしてモデル計算[11]すると、第14図上のようになり、観測値と計算値がよく一致している。なお同図において層にわずかな凹みをつけたのは、前回の大気球観測の結果(高度16 km)を参照したためで、高度25 kmではこの程度の凹みによる影響は現われない。第11図に示す様に、大気球の航跡は緯度線に対し曲っている。これを二次元の断面で考えたこと等多小の無理はあるが、第14図下は日本海溝を含む概略的な磁氣的地下構造を示していると思われる。磁氣的性質の差異は、地殻とその下の上部マントルとの間であると考えられるので、この地下構造は地殻構造を示すものと考えてよい。

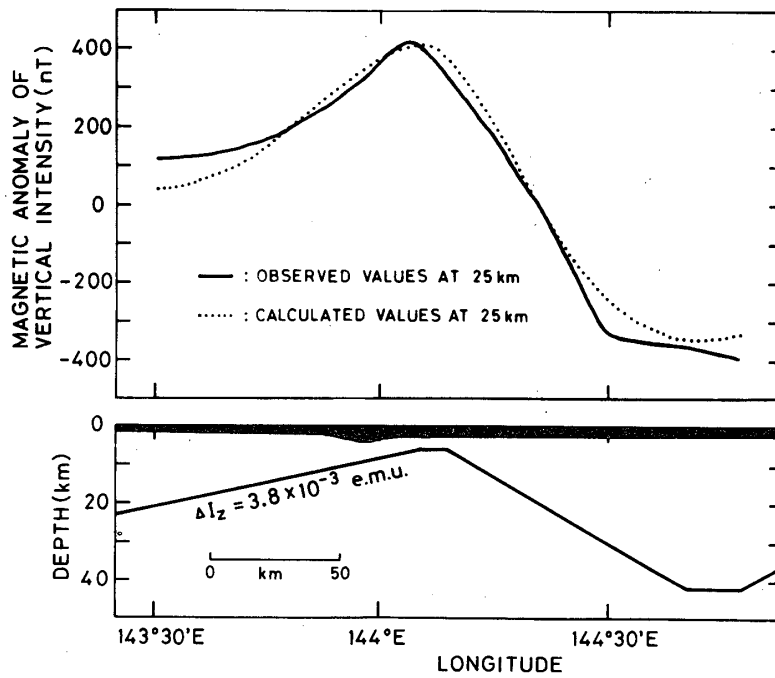
ここで、非常に注目されるのは日本海溝東方で地殻が深く落ち込んでいる事である。即ち、磁気異常が日本海溝東方で著しい負の値を持つ事に対応している。ところで、過去の大気球による観測において、東北日本内陸で地殻の深さが約40 kmとなり磁気異常が負であった結果が出ている。このことから日本海溝東方はかつて陸塊であったと想像することができる。



第12図 大気球による垂直成分観測値とIGRFによる計算値



第13図 横軸を経度にして垂直成分異常値をプロットした図. 下に海の深さも示した



第14図 二層モデルと磁気異常計算値および観測値

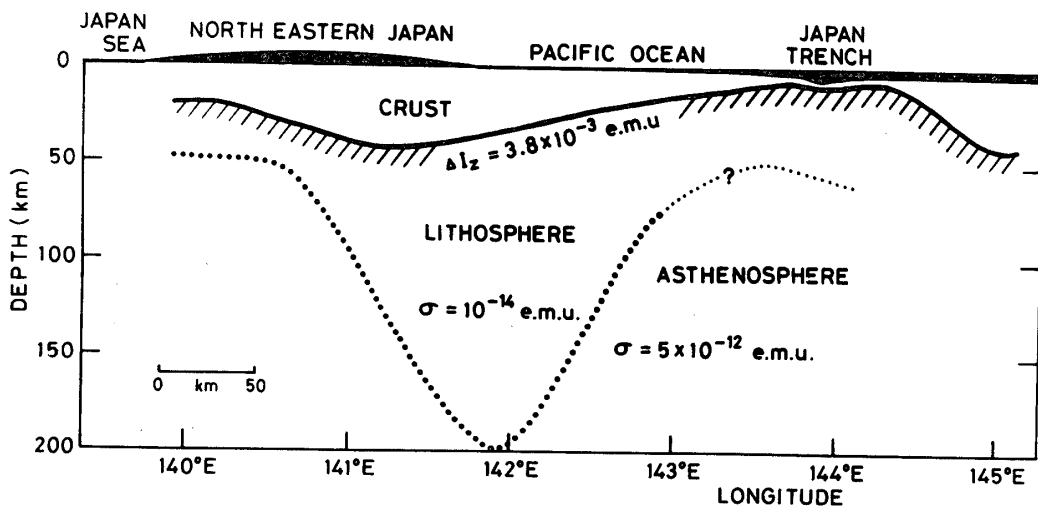
6. むすび

大気球の飛翔時間 37 時間 45 分もの長い間、厳しい環境の中で、新型リングコア磁力計は正常に動作し続け、第一の目的の工学的試験は成功した。第二の目的の地球内部の問題はまだ一部しか達成されていないが、過去 2 回の観測に引き続く磁氣的地下構造について考察できた。

第 15 図は今回の観測を含めて、ほぼ北緯 39 度線に沿った断面での磁氣的地下構造をまとめて示したものである。日本海溝での地殻の凹み、海溝東方でのかつて陸塊であった事を暗示する地殻の構造等は特に注目される。図において太い点線で示した部分は、著者等が地磁気短周期変動の垂直成分と水平成分の比から求めた電氣的地下構造を示す [12]。従って、この図は地下構造の CRUST および LITHOSPHERE ならびにその下部の ASTHENOSPHERE の構造分布を示すものである。日本海溝の東方に関しては興味ある事実がある。日米共同の深海掘さく研究グループが日本海溝で実測して、日本海溝に何か所かの大規模断層がある事、また、ボーリングによる地質構造の調査から日本海溝東方域はかつて（後 OLI-GOCENE 時代）陸地帯で「親潮陸塊」と名付けている事である。これが現在地殻変動で落ち込んで日本海溝を形成したとしている [13]。著者等が全く独立に大気球によって得た結果とよく一致している。第 15 図において、日本海溝付近から LITHOSPHERE が日本島弧の下に深くもぐり込んでいるのは、いわゆるプレートテクトニクスによると考えることもできる。

今回の新型リングコア磁力計を搭載した大気球観測により得られた貴重な知見を基に、今年（1980 年）秋、再度の大気球観測が予定されている。その際の記録解析における留意点を以下に列記する。

- (1) 大気球の揺れ、回転は地磁気変動を解析する上で大きな問題となるので、spin st-



第15図 大気球による垂直成分異常の観測から求めた、ほぼ北緯39度線に沿う断面での地下構造図

abilizer 方式などを用いて不規則な動揺を定常化するか、またはジンバル機構により動揺を補償するかの方法を構じる必要がある。

- (2) 限られたテレメータチャンネル数や周波数応答の中から最大限の情報を得るため、デジタル-アナログ混合出力によるデータ伝送など出力方式の検討をする。
- (3) リングコア磁力計の精度を更に高めるために地磁気三成分のみならず、3成分から求まる全磁力の出力も同時に行ない、各センサーの零オフセットの問題等を解決する必要がある。

以上のうち、今年秋の大気球観測では(1)と(2)を解決する予定で、(3)については更に研究開発を進めている段階である。

最後に、今回の大気球による地磁気観測によって貴重なデータや、今後の飛翔体搭載用としてのリングコア磁力計の資料を取得できたのは、宇宙航空研究所の西村純教授およびその研究室の方々の多大な援助によるもので深く感謝致します。そして搭載したリングコア磁力計および記録の解析に関しては、東北工大の学生諸君の努力によるものが多い。IGRFの計算は、東海大学の遠山文雄助教授の御好意でプログラムを使用させていただいた。併せて感謝する次第である。

1980年5月10日

参 考 文 献

- [1] 加藤愛雄他：東海大学紀要・工学部，1979-1，(1979) 203.
- [2] 加藤愛雄他：宇宙研報告，12 (1976) 589.
- [3] 加藤愛雄他：東海大学紀要・工学部 1976-1 (1976) 157.
- [4] 瀬戸正弘他：宇宙研報告，14 (1978) 1267.
- [5] 瀬戸正弘他：宇宙研報告，14 (1978) 1277.
- [6] 斎藤尚生他：宇宙研報告，15 (1979) 461.
- [7] 瀬戸正弘他：宇宙研報告，15 (1979) 479.
- [8] T. Saito：Rep. Ionos. pace Res. Japan, 30 (1976) 69.
- [9] 加藤愛雄他：大気球シンポジウム，昭和54年度，110-124.
- [10] 遠山文雄他：東海大学紀要・工学部，1977-1 (1977) 241.
- [11] L. J. Peters：Geophysics, 14 (1949) 290.
- [12] Y. Kato et. al.：The Science Rep. of Tohoku Univ. Ser. V Geophys. 21 (1971) 19.
- [13] Geotimes, (1978) 16.