

日本海中部地震域における全磁力磁気異常の
大気球往復観測実験結果*

遠山 文雄**・瀬戸 正弘***・加藤 愛雄†

(1987年5月7日受理)

Results of Geomagnetic Survey with Boomerang Balloons
around the Earthquake Area of the Central Japan Sea

By

Fumio TOHYAMA, Masahiro SETO and Yoshio KATO

Abstract: Measurements of geomagnetic field anomalies are applied to investigate the underground magnetic structure. It's very useful to detect the geomagnetic total intensity by means of proton precession magnetometers that carried by balloons at the altitude of 15-30 km. Twice balloon observations in 1981 and in 1985 with high sensitive magnetometers were carried out at the area of the Central Japan Sea Earthquake which occurred in May, 1983. An underground dislocation model was calculated using the Talwani Method and it was explained that the magnetization of structural magnetic metals had changed between at before and after the Earthquake. That is to say, the value of magnetization had increased from 1.2 times to 2.5 times at the just before of the Earthquake compared with the value at the after. And a tendency was verified that structural magnetic models were aligned toward to Japan Arc and had a east slope.

* 宇宙研特別事業費による研究論文
** 東海大学工学部
*** 東北工業大学
† 東北大学名誉教授

1. はじめに

地球磁場の異常観測は地殻の電磁氣的性質や構造の探査の一手段として、地上測定、船舶測定、航空機測定および人工衛星測定による観測がなされてきた。人工衛星と航空機の中間の高度を飛行する気球による測定も、地下の電磁氣的構造を推察する一方法として1970年以来観測を行ってきた[1][2][3]。特に近年は地震断層構造や日本海構造の観測が注目され、日本海側での観測に比らべて太平洋側の観測に重点が置かれてきた[4]。しかし1983年5月の日本海中部地震の発生で日本海の地殻構造に関する探査や測定が大きく注目され始めた。我々は1981年から日本海側の気球による磁気探査を試みてきたが[6][6]、三陸気球実験場からの放球は日本海側の特定領域探査が容易ではなかった。この地震域の磁気探査を行うため、1985年7月、宇宙科学研究所の気球実験班は日本海沿岸の青森県深浦町に放球場および受信場を仮設し、余震域として注目されている区域での気球実験を行った。搭載した磁力計は高分解能をもつプロトン磁力計および成分測定が可能なフラックスゲート磁力計で、20時間におよぶ観測で良好なデータが得られた。ここでは磁場の全磁力測定を行なったプロトン磁力計の解析結果を1981年の観測と併わせて報告する。

2. 観測装置

プロトン磁力計は磁場の全磁力を検出する。図1に磁力計の構成図を示す。センサはケロシンで満たされたリングコア型の約1000ターンのコイルに2.5秒間の約2Aの直流電流で励磁させ、外部磁界に比例したプロトンの共振周波数の計測を行なって全磁力を検出する。センサには大電流による発熱が原因で破壊されることを防止するための内圧調整弁が取付けられている。スイッチング回路によって得られる周波数信号は同調増幅されるが、

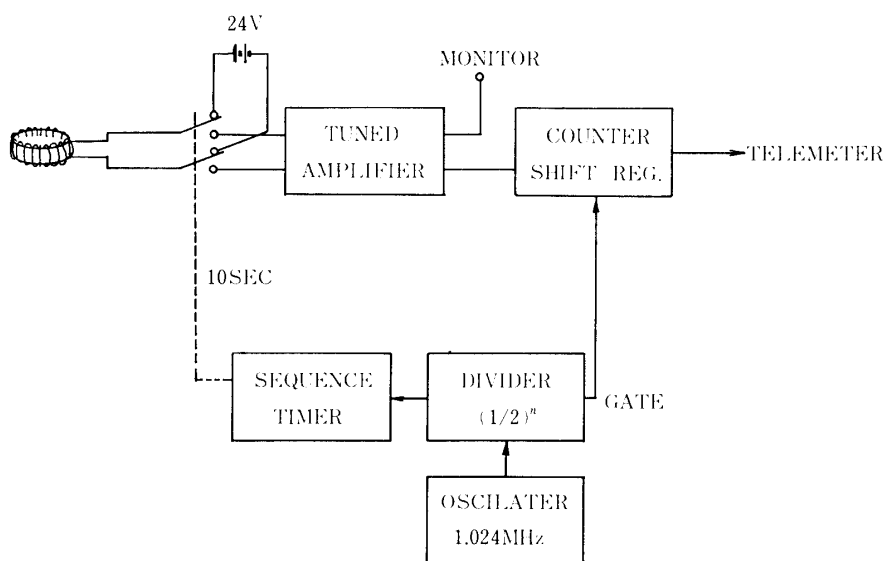


図1 プロトン磁力計の構成図

表1 気球搭載用プロトン磁力計の主な仕様

DYNAMIC RANGE	47000 - 49000 nT
RESOLUTION	0.1 nT
OUTPUT FORMAT	BCD 20 BITS
SAMPLING PERIOD	10 SEC
SIZE ELECTRONICS	206 × 147 × 160 mm ³
SENSOR	165 φ × 170
BATTERY	166 × 175 × 250
WEIGHT ELECTRONICS	2.9kg
SENSOR	7.2
BATTERY	17.3

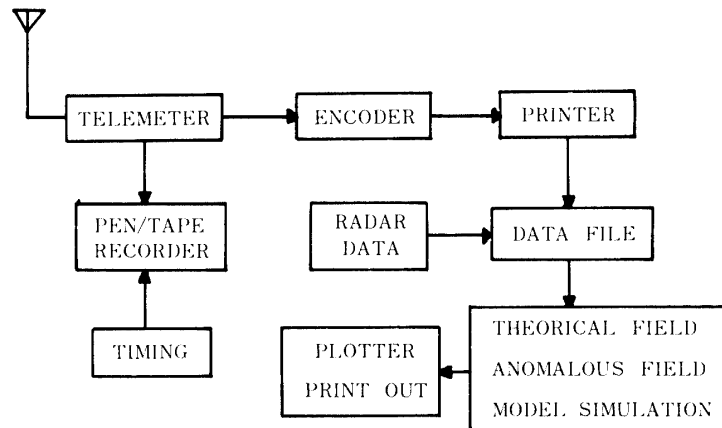


図2 信号の地上処理構成図

フィルタの中心周波数は約 2 KHz で、測定磁場範囲の中心磁界の大きさに相当し、約 0.2 秒のゲートを通して倍されてカウントされる。読み出し回路では磁場の大きさに換算した 5 桁を 20 ビットの BCD コードを作り、FM テレメータで伝送する。表 1 には 1985 年観測に用いた磁力計の主な仕様を示す。1981 年観測に用いた磁力計は気球航跡の違いから測定範囲は 46,000~49,000 nT とし、分解能は 1 nT、測定周期は 20 秒であった。電源は励磁のための大容量(約 80 W)と長時間観測(35 時間)を可能としたため、重量は大きい。図 2 には気球からのテレメータ信号を受信した後の地上処理構成を示す。FM テレメータ信号は復調器を経てテープレコーダおよびペンレコーダに時刻と共に記録され、同時にプロトン磁力計エンコーダによって磁場量を算出してプリントアウトしてモニターしている。これらのデータはオフラインで気球位置と共にパソコンによる解析が行なわれた。気球位置に基づき国際標準磁場モデル(IGRF-80)を用いた球調和関数展開による理論磁場計算と観測値との差を磁気異常値として解析した。図 3 には使用された B₅-123 号機気球の構成

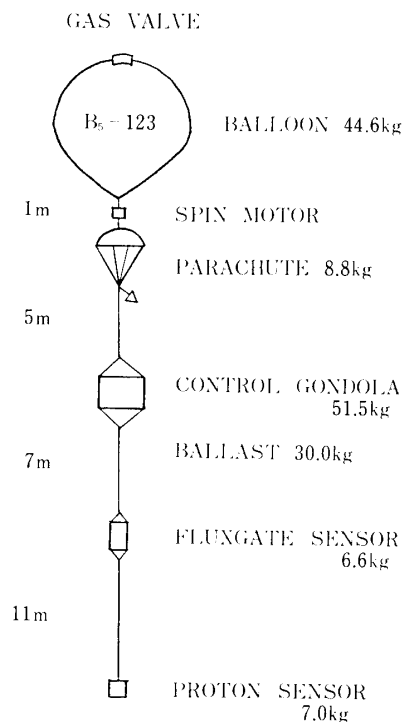


図3 観測気球の構成図

を示す。1981年の実験でもほぼ同様の構成であった。地球磁場の50万分の1の強さである0.1 nT ($1 \text{ nT} = 10^{-5}$ ガウス)という高分解能をもつ磁力計であるために、センサはコントロールゴンドラからロープで18 m下方に吊るされていて、磁気的影響を避けている。このセンサから11 m上方にはフラックスゲート磁力計センサも吊るされている。気球のすぐ下方にはフラックスゲート磁力計の出力補正のための回転モーターが取り付けられていて、毎分1回転を地上コマンドで与えることが出来る。回転によるプロトン磁力計出力への影響は皆無であった。

3. 観測概要

1983年5月26日に発生した日本海中部地震の震源は秋田、青森両県沖約100 Kmの深さ14 Kmと報告され、その後二ヶ月余りの間の余震数は8,000個以上であった。この余震域は北緯 $40^{\circ}00'$ から $41^{\circ}30'$ 、東経 $138^{\circ}40'$ から $139^{\circ}30'$ に集中しており、この区域に気球を飛ばすため、青森県深浦町(北緯 $40^{\circ}36.4'$ 、東経 $139^{\circ}53.2'$)に放球場を仮設して、1985年7月12日午前5時49分、B₅型123号機気球を放球した。図4の上図は1985年観測(実線)と1981年観測(点線)の気球航跡を示し、下図は気球高度を示した。気球は午前8時に高度26 Kmのレベルフライトに入り、ほぼ真西へ飛行した(A航跡)。余震域の南寄りを横断して11時すぎから気球のガスの開弁によって高度を降下させ、約15 Kmの高度で13時頃から東へ戻した(B航跡)。余震域の南端を横切って男鹿半島に近づいた15時頃からバラストを

放出して再び気球を上昇させて西行させた(C航跡)。さらに23時頃から高度を下げて東へ戻した(D航跡)が北成分の風のため南下し、翌日2時8分に実験を終了して気球を切り離れた。ジグザグ状の航跡ではあるが四航跡にわたり良質のデータが得られた。

この実験のおよそ4年前の1981年6月5日午前6時54分、B₅型105号機気球が三陸気球実験場(SBC)から放球された。この観測の航跡は図4のE航跡として、高度は点線で示した。気球はほぼ北緯40度に沿って東北地方を横断し、真西に飛行して秋田沖約300Kmの海上で切り離なされた。打上げから秋田沖150Kmまでは三陸実験場のレーダー追跡が行なわれ、それ以西は鳥海山頂の移動追跡班によるレーダー追跡とデータ取得がなされた。

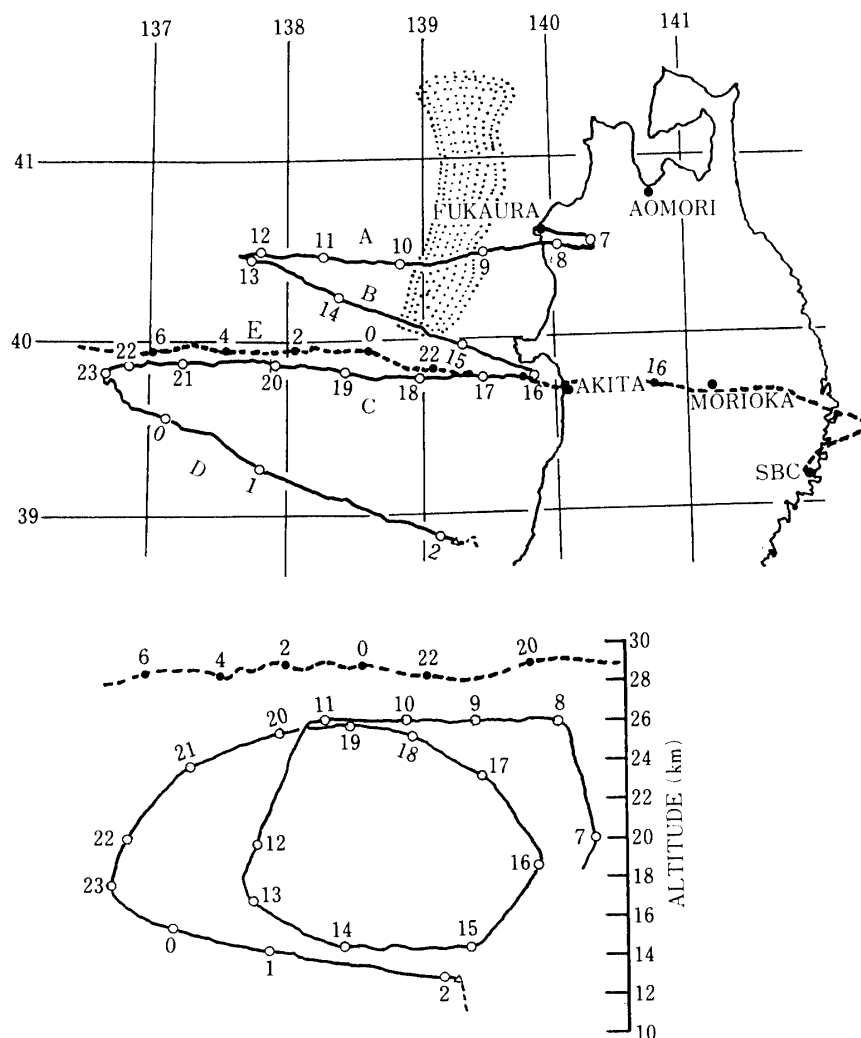


図4 気球の航跡と飛行高度。A～D航跡は1985年実験でE航跡は1981年実験。点の領域は日本海中部地震の余震域。数値は時刻(JST)を示す。

4. 磁気異常値と断層モデルの計算

1985年観測の約7,300ポイントおよび1981年観測の約4,500ポイントの全磁力の測定値と1分間の平均値およびレーダーと搭載された精密気圧計のデータから求まる1分毎の気球位置情報をデータベースとして用いる。1分間に磁力計データは6点得られるが、気球位置が1分毎であることと1分間の気球移動距離は400~800mであり全磁力の変動も大きくないことから1分値を用いた。1分毎の気球位置からIGRF-80磁場モデル係数を用いた理論磁場計算をして測定値と理論値の差を磁気異常値とする。

10秒毎に得られた観測値は図5にその一例を示す様にバラつきも少なく、概ね ± 0.2 nT

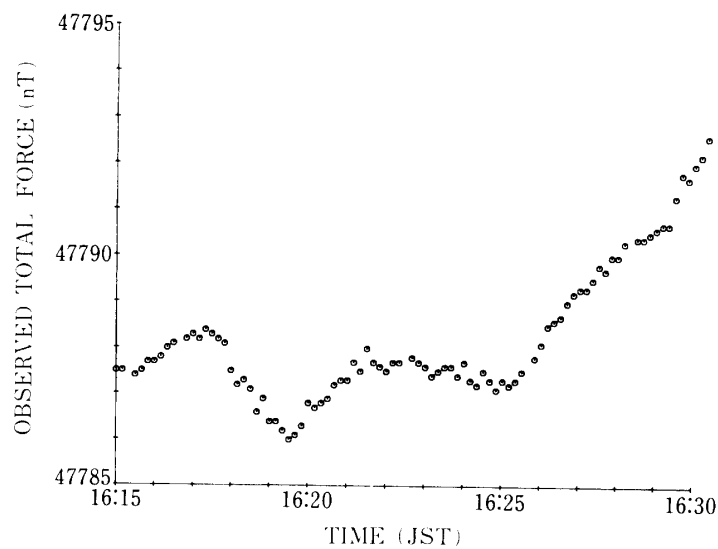


図5 観測データの一部。

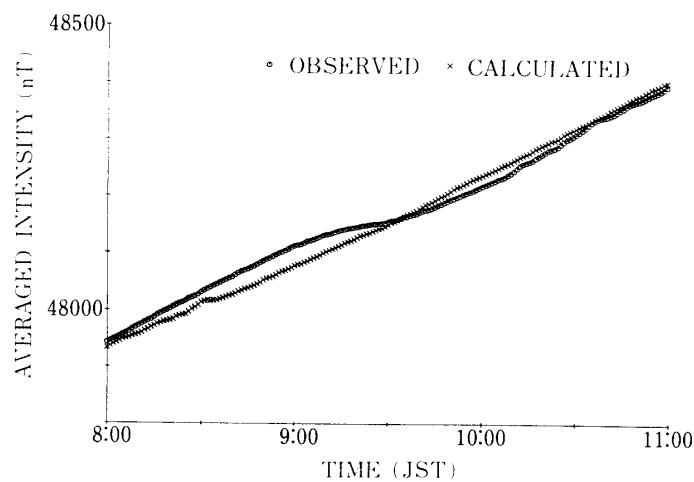


図6 1分平均の観測値と理論計算による磁場量の一部。

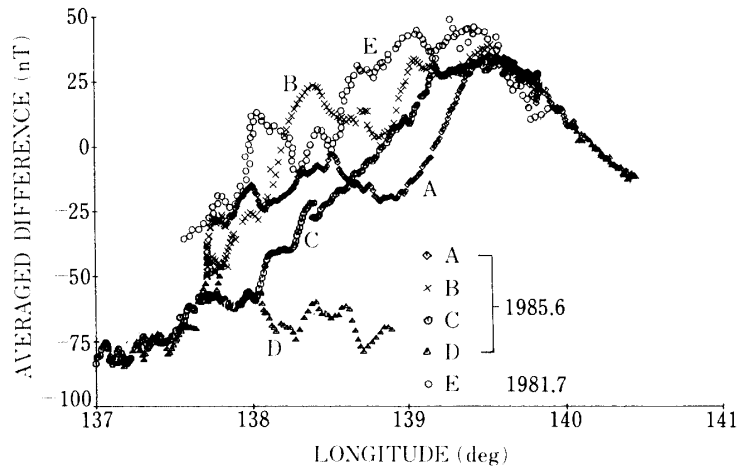


図7 各航跡の磁気異常値.

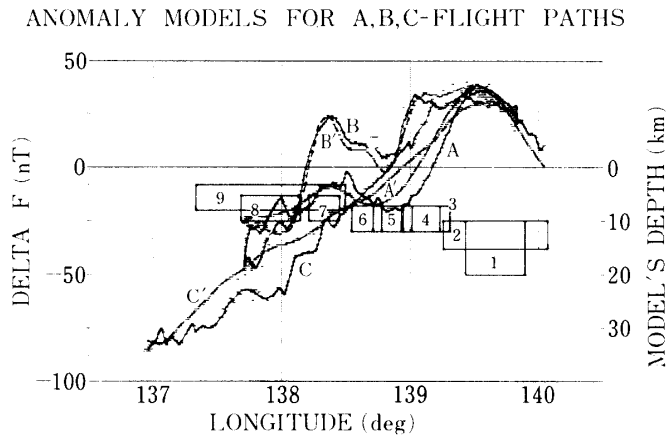


図8 ブロックモデルによる測定値との比較. A, B, Cが各航跡の測定値でA', B', C'がそれぞれに対応するタルワニ法による計算値.

の精度である。図6には1分平均の測定値と理論値との比較の一例を示す。図7は両観測の各航跡での磁気異常値の1分平均を経度に対応してプロットしたものである。もし地下に帯磁した物質がなければ磁気異常値は0と仮定して、地下の帯磁モデルを推定することが出来る。モデル計算の一方法にタルワニ法があり[7]、これを用いて測定量に合うブロックを算出する。この方法は磁化された物質を多角形の薄い層の積み重なったものと近似する数値解法である。地下の磁化体を直方体と簡単化し、気球位置での地球磁場のベクトル、磁化体の位置、寸法、水平面内の傾き、磁化の強さと方向および厚さを薄い層としたときの分割層数を与えれば、その位置に及ぼす磁化体からの異常値を算出できる。一つのブロックモデルを考え、その上空を横切る航跡における磁気異常のプロファイルをプロッ

表2 磁気異常の観測値を説明するブロックモデルの要素。深さは上部面の深さ、方向はブロックの水平面の傾き、磁化率の単位は emu/cc で磁化の方向は伏角 55° 、偏角 -8° としてある。

NO.	LATITUDE	LONGITUDE	DEPTH (km)	THICKNESS (km)	SIZE	DIRECTION	INTENSITY OF MAGNETIZATION
1	40° 40′	139° 40′	10	10	80x40	N 30° E	0.0014
2	39° 55′	139° 40′	10	5	60x70	S 60° E	0.0013
3	40° 50′	139° 10′	7	5	30x25	N 0°	0.0021
4	40° 15′	139° 5′	7	5	30x25	N 0°	0.0023
5	39° 55′	138° 50′	7	5	20x20	N 0°	0.0017
6	40° 15′	138° 40′	7	5	20x20	S 60° E	0.0023
7	40° 20′	138° 20′	5	5	45x20	N 30° E	0.0021
8	40° 10′	137° 55′	5	5	20x40	S 60° E	0.0020
9	39° 45′	137° 55′	3	5	25x100	S 85° E	0.0033

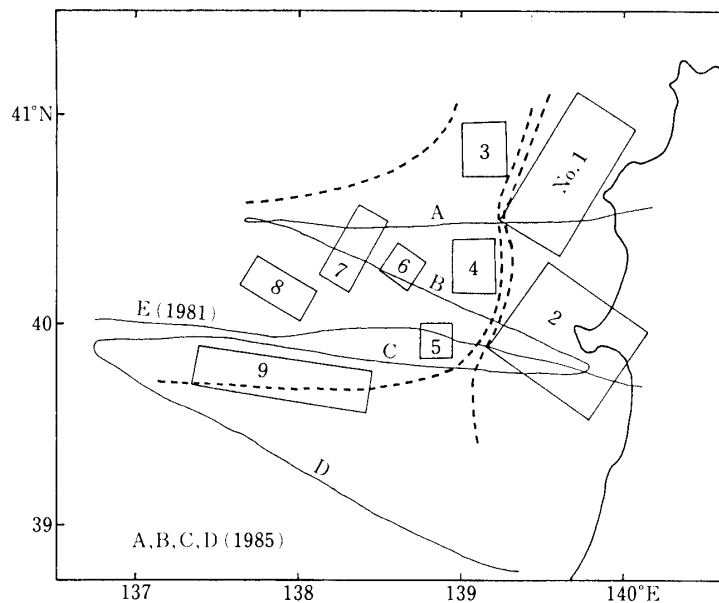


図9 9つのブロックモデルの位置と気球航跡

クの大きさや方向、航跡の高さや位置と方向を変化させ、シミュレーションを行なって特性を把握する。次に航跡 A, B, C はそれぞれ余震域を横断、南端をかすめる、余震域をはずれているといった特徴を持った経路であるので、ブロックモデルを複数個を組み合わせて観測結果に近いものを検討した。厚さ方向は各ブロックとも 10 層に分割し、帯磁の方向はこの付近の地球磁場方向(偏角 -8° 、伏角 55°)とした。その結果 9 個のブロックを仮定して、表 2 に示した大きさ、位置、方向および帯磁の大きさを持つモデルが航跡 A, B, C の

観測値によい一致を示した。その観測値とモデル計算値を図8に示す。航跡Dについては余震域から離れていてデータ数も少なく、気球高度の測定誤差が大きくなったこともあってモデル計算には含めていない。ブロックモデル位置の平面図を航跡と共に図9に示した。

5. 断層モデルと発震機構についての考察

図8, 9に示す様にモデル計算によれば帯磁ブロック(以下BLと略す)のうち, BL 3, 4とBL 1, 2との間には深さが異なり, かつ磁化の大きさが異なっている結果となった。地震観測の研究者等はほぼBL 3, 4に相当した場所に断層モデルを考え, 東側が落ち込んでいる逆断層群であると考えている(図10)[8]。我々の帯磁モデルの結果によってもBL 1, 2とBL 3, 4の間に構造的, 物質的不連続があることが示されたことは極めて注目される。BL 1, 2は深さから考えて地下の上部マントルにあると考えられる。

図11は観測地域付近の海底地形図にブロックモデルを書き入れたもので, BL 9から4および3はいわゆる大和堆(Yarato Rise)から日本海盆(Japan Basin)と大和海盆

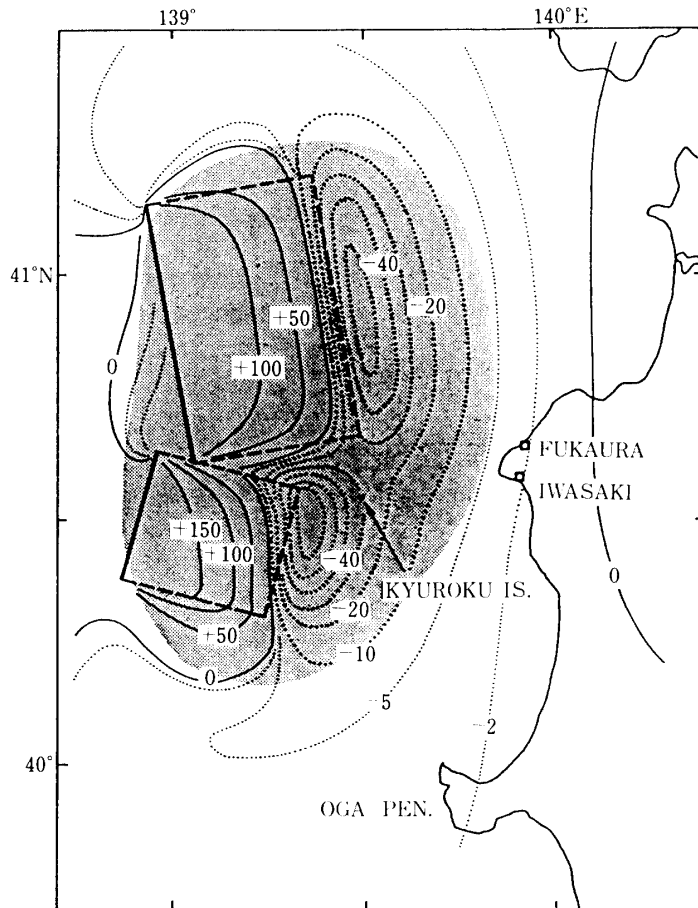


図10 余震域付近の断層モデルによる垂直方向の変位。単位は cm。
(小管他, 1984)

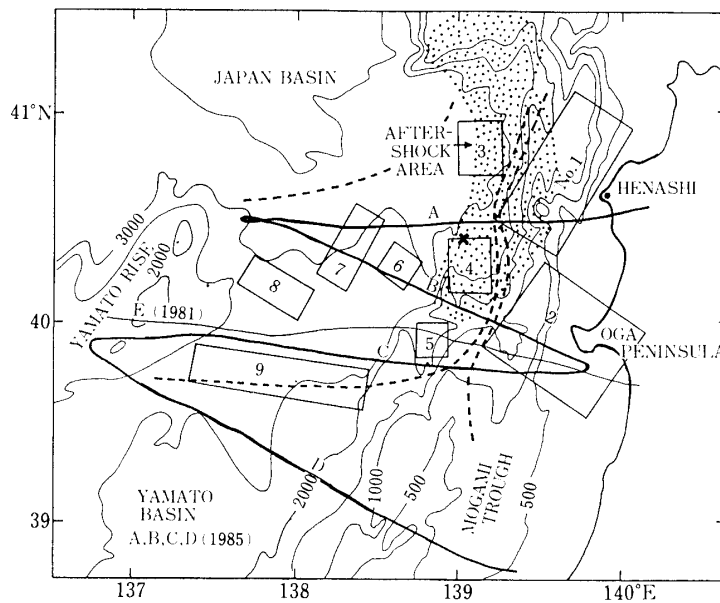


図 11 気球観測地域付近の海底地形とブロックモデル

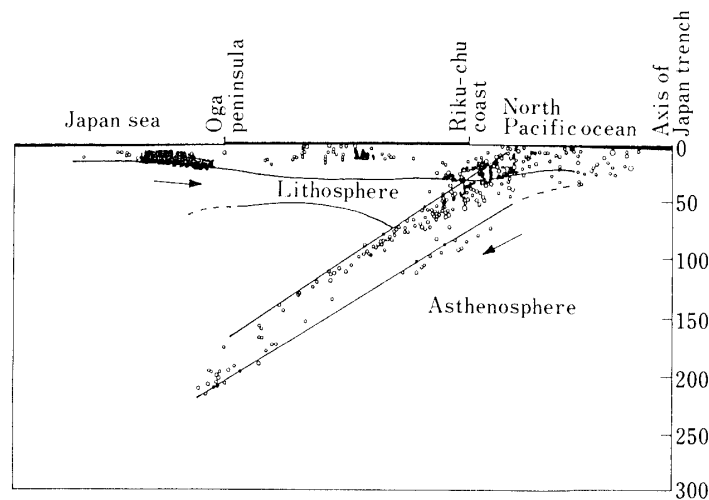


図 12 日本列島の東西方向の地下地震分布図。

(Yamato Basin)の間にはさまれた東方に延びる地域で、その末端では北方にくびれている。BL 9~5 が示す様に東側に行くにつれて深くなっていて、BL 1, 2 に相当する地域でさらに深くなり、この境界に断層を考えるのが良い。このことからユーラシアプレートが大和堆を経て東北地方北部に迫り、日本海中部地震の余震域付近から地下にもぐり込みを始めたものと考えられる。図 12 は東北日本北部を横切って、太平洋側から日本海側までの地下断面図に日本海中部地震発生後の微少地震の分布をプロットしたものである。今回の日

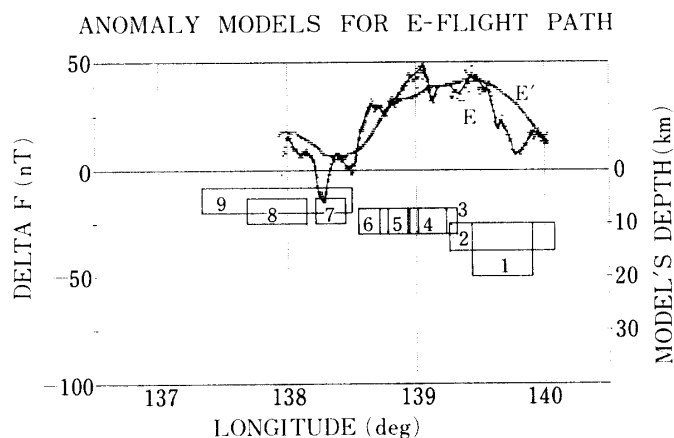


図13 航跡E(1981年実験)による観測値Eとモデルによる計算値E'。ブロックは磁化率を除いて表2と同じ要素で、磁化率はBL 1, 2は1.2倍, BL 3, 4は2.5倍, BL 5, 6は2.0倍, 他は表2と同じ。

本海中部地震の余震が現在もなお続いているのは単に単一地震によるものではなく、プレート動きに関連した地震であると考えられる。

1981年の気球観測によって得られた北緯40度付近の航跡Eの磁気異常値をもとにして、同じ位置、大きさのブロックモデルを仮定して磁化の大きさだけを変えると図13のようになる。BL 1, 2の磁化の大きさは表2のそれぞれの1.2倍, BL 3, 4は2.5倍, BL 5, 6は2.0倍, BL 7から9は表2と同じ値とした場合で、概ね測定値と傾向が合う。地震発生の数年前からすでにこの地域での地殻の上昇運動が認められており、地震発生後に沈下方向に向ったということが研究者によって指摘されているが、このモデルの磁化の大きさの地震前後の増減はこのことを裏づけるものとして注目される。

謝 辞

我々はこれまで大気球による磁場観測を試みてきたが、宇宙科学研究所西村研究室にはその計画から実験まで大変お世話になった。特に1985年7月の地震余震域への往復実験では、三陸観測所からの放球が目的の区域への到達が難かしいため日本海沿岸からの放球を実施していただいた。放球場の選定と調査の結果、青森県深浦町の黄金崎農場に仮放球場と準備室を借用し、設備機材の搬入、設置をはじめ作業性の不便な条件下における放球、受信に至る関係者のお骨折りは大変なものであった。また、搭載機器や気球の準備は5月末に三陸観測所で行なわれ、種々のテストを終えて6月初めの深浦町での放球に備えたが悪天候のため実験できず、結局通算して12日目に放球できたという難産であった。これら一連のお世話をいただいた宇宙科学研究所、西村純教授をはじめとする大気球実験班の方々、観測事業係および三陸大気球観測所と能代ロケット実験場の方々に心より厚く御礼を申し上げる。さらに実験場の快よい提供と便宜を計っていただいた深浦町役場および黄

金崎農場の関係者各位に対し深く感謝する次第である。また、プロトン磁力計の製作や調整に協力いただいた(株)ガウスに対し感謝する。

参 考 文 献

- [1] 加藤愛雄他, 大気球による東北地方の磁場測定, 宇宙航空研究所報告, 第 10 卷, 第 1 号(B), 160-165, 1974
- [2] 加藤愛雄他, 大気球による東北地方および三陸沖 250 Km に至る磁場観測, 宇宙航空研究所報告, 第 12 卷, 第 2 号(B), 589-595, 1976
- [3] 山河仁他, B_s-79 による三陸沖地磁気観測, 宇宙航空研究所報告, 第 14 卷, 第 3 号(B), 985-989, 1978
- [4] 加藤愛雄他, 大気球による三陸沖および日本海構周域の地下構造磁気探査, 物理探鉱, 第 38 卷, 第 3 号, 105-115, 1985
- [5] 遠山文雄他, プロトン磁力計による磁場観測, 大気球シンポジウム, 昭和 56 年度, 235-242, 1981
- [6] 瀬戸正弘他, 大気球高度における東北日本および日本海の磁気異常, Conductivity Anomaly 研究会論文集, 99-107, 1982
- [7] Talwani, M., "Computation with the help of a digital Computer of magnetic anomalies caused by bodies of arbitrary shape" Geophysics, vol. 30, No. 5, 797-817, 1965.
- [8] 小菅正裕他, 1983 年日本海中部地震の余震活動と断層モデル, The Science Report of Hirosaki Univ., vol. 31, No. 1, 1984