物 理 探 査
第45巻 第2号
96-104 頁

BUTSURI-TANSA
Vol. 45 No. 2 (1992)
pp. 96-104

秋田県由利原地域での高密度空中磁気探査
—MRSによる位置標定の評価—

森 尻 理 恵*・大 熊 茂 雄*・牧 野 雅 彦*・中 塚　正*

Dense aeromagnetic survey using Microwave Ranging System (MRS) in Yurihara area, Akita prefecture, Japan. —Errors of MRS positioning and its reduction—

Rie MORIJIRI*, Shigeo OKUMA*, Masahiko MAKINO* and Tadashi NAKATSUKA*

ABSTRACT

An aeromagnetic survey with a flight elevation of 3,000 ft (about 900 m) A. S. L., and flight lines closely spaced at about 300 m was carried out over the Yurihara area in Akita Prefecture in July, 1990. This line spacing was much smaller than the previous surveys. A Microwave Ranging System (MRS) was used as a positioning system instead of the LORAN-C system. The MRS is composed of one master transponder on an aircraft and two remote stations on the ground. An on-board vertical video camera tracked ground landmarks and gave positioning reference data. Under the inspection of data acquiring mechanism, we concluded that the MRS positioning errors of 200 m at a maximum were caused by the possible errors in location of MRS remote stations and the time difference between the MRS data measuring and recording. Both could be estimated from the above data.

A preliminary aeromagnetic anomaly map of the area shows good quality and high resolution. Aeromagnetic anomalies correlate with surface and subsurface magnetic volcanic rocks and shallow subsurface fine structures, such as faults, anticlines, and synclines in magnetic basement.

Key words : aeromagnetic survey, geomagnetic anomaly, MRS positioning, Yurihara

1. はじめに

地質調査所では，1964年より空中磁気探査を行ってきた。近年では，セスナ機にプロトン磁力計を搭載し，位置標定には，対地ビデオカメラとロランC電波による円航法のシステムを用いて（中塚，1984；中塚，1989）南西諸島西方海域等の広域調査（大熊ほか，1991）を実施してきた。

1990年より，従来よりも微細な構造の探査を目的とした，測線を高密度に配した空中磁気探査の研究を開始した。その最初の探査実験として，1990年7月末には秋田県由利原地域（Fig. 1）でセスナ機を使用した探査を行った。位置標定には従来のロランC円航法に代えてMRS（マイクロ波測距装置，Microwave Ranging System）を使用した。

2. 探査概要

探査の仕様と測定機材の概要をTable 1に示す。航空機の予定測線上への誘導は目視とドップラーレーダーによった。航跡標定にはMRSデータを用い，その測位誤差の検討のため対地ビデオ映像記録を使用した。その他の計測装置については，地磁気日変化観測定点にセシウ

1991年6月10日原稿受付；1992年1月16日受理
Manuscript received June 10, 1991; Accepted January 16, 1992

* 地質調査所
〒305つくば市東1-1-3
* Geological Survey of Japan
1-1-3, Higashi, Tsukuba-shi Ibaraki 305

Table 1 Specifications of the aeromagnetic survey in Yurihara area, in July, 1990.

PERIOD	: 1990.7.24 - 1990.8.2
AREA	: Yurihara, Akita Prefecture
AIRCRAFT	: Cesna 404, JA5267
LINE LENGTH	: 1,490km total
LINE DIRECTION	: E-W (traverse line)
AIR BASE	: Akita airport
FLIGHT ALTITUDE	: 3,000ft A.S.L.
NAVIGATION	: Visual flight supported by Doppler radar
POSITIONING	: MRS and vertical video camera
MAGNETIC BASE STATION	: 39° 10′ 02″ N 140° 08′ 03″ E
MRS REMOTE STATIONS	: No.1; 39° 15′ 50.5″ N 140° 12′ 18.2″ E No.2; 39° 21′ 39.8″ N 140° 10′ 02.3″ E
EQUIPMENTS	
on-board	: Proton precession magnetometer, EG&G GeoMetrics G813 Data acquisition system, Marubun 821000, 831000, 832000 MRS, DECCA DDMU520, SENAR SNCS-21 Dopplar radar, SINGER SKK-1000, SKQ-601 Barometic altimeter, Marubun 833000 Vertical video recording system, Nakanihon Air Service BPV-002, etc.
on the ground	: Proton precession magnetometer, EG&G GeoMetrics G856A

ム磁力計にかえて可搬型プロトン磁力計（EG & G Geometrics G856）を設置したほかは，従来より使用されてきたものである。

MRS（商標名はTrisponder）の使用は，1989年9月に伊豆半島東部で行った探査（中塚ほか，1990）に次いで2回目であるが，前回には対地ビデオ装置の時計に不都合があり，MRSデータによる位置標定の精度の十分な検討が行えなかった。

MRSは機上に搭載した主局と陸上の既知点2点に設置した従局のそれぞれの距離をマイクロ波によるパルスの往復時間によってほとんど同時に測定している。1回の測定に要する時間は約1 msで2つの従局までの距離測定を100回繰り返し，その平均値が1秒ごとに出力されるようになっており，公称分解能は0.25 mである。最大測距離は電波見通し範囲内80 kmで，最小測定可能距離は100 mである。公称距離精度は，0.5～20 kmの範囲で，±1.0 m, 20～40 kmでは±1.5 m, 40～80 kmでは±1.5～3.0 mとなっている。

今回の探査では，予定測線のうち数本は天候や時間の制約のため飛行を断念せざるを得なかったが，南北約15 kmの範囲内に東西方向の54本の主測線と，それらに直交する6本の交差測線上で全磁力測定を行った。ただし，測線への航空機の正確な誘導が難しいため，測線分布に粗密を生じてしまい，計画どうり300 m等間隔にはならなかった。

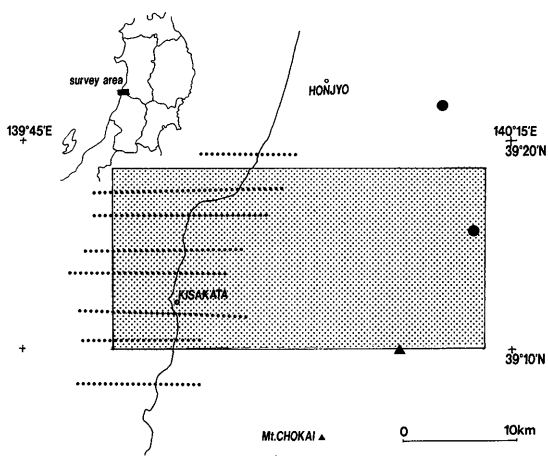

Fig. 1 Location map of the aeromagnetic survey area. Stippled area indicate the area of the present survey. Dotted lines indicate flight lines of previous aeromagnetic survey (GSJ, 1978). ●: MRS remote station location. ▲: Location of temporal ground station for monitoring diurnal variation of geomagnetic field.

しかし，Fig. 1に示した従来の探査測線（地質調査所，

1978）の間隔が約3 kmであるのと比較すれば，既存のデータよりもはるかに高密度のデータを得たことがわかる。

3. 探査結果

Fig. 2は，今回得られた測定値から作成した磁気異常図（IGRF残差）である。各測線上のデータは，種々のコンピューター処理が施され格子間隔50 mのグリッドデータに変換されている。データ処理ソフトウェアは従来より地質調査所で使用しているもの（中塚，1989）を用いたが，探査システムの変更点に対応するように若干の改造を行っている。

データ処理を行う際には，原則として従局2局からのMRS測距データのない測定点は使用していない。ただし，測線の途中にあって一時的にデータが欠落しているがその前後では正常なものに限って，内挿によって距離データを補った部分もある。

また，この磁気異常図ではロランC円航法の時と同様に，主測線と交差測線の交点において磁力値のチェックを行い，必要な補正（交点コントロール）が施されている。交点コントロールでは，主測線と交差測線の多数の交点での，磁力値差と磁気傾度の様子から磁力値もしくは位置座標に修正を加えるが，今回の例では磁力測定の精度は高いと考えられ，ほとんど位置座標のみの修正が行われている。その位置の補正の幅は324点の交点でかなりばらつきはあるが，数十～百m程度となっており，ロランCの時代に比べて約1桁精度があがっている。

通常，測線が隣接しているときに測位誤差や変動磁場補正誤差があると，見かけ上急激な磁気勾配ができ，磁気異常図のコンターは歪む事が多い。この磁気異常図（Fig. 2）をみると，機械的に交点コントロール処理を行っただけなのに，比較的コンター（5 nT間隔）の歪みが少ない。これは，今回の探査における位置標定精度が手作業による細かい補正を行わなくとも，実用上十分であることを示すものと解釈できる。

しかしながら，これはMRSの公称の性能から期待される精度と比べるとはるかに低い。よって次節では，こ

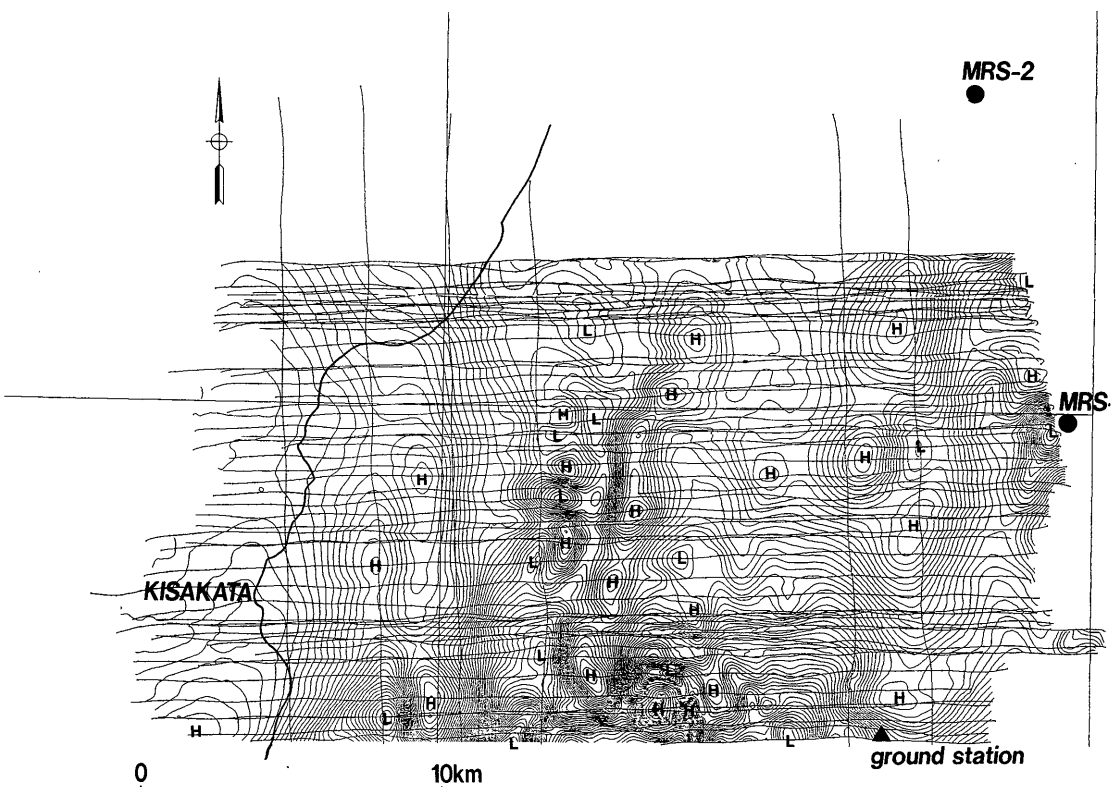

Fig. 2 A preliminary total intensity aeromagnetic anomaly map of Yurihara area. ●: MRS remote station location. ▲: Location of temporal ground station for monitoring diurnal variation of geomagnetic field. Contour interval is 5 nT.

の位置標定誤差の原因について考察する。

4. 位置標定の評価

ここでは，今回の位置標定精度を簡単に評価し，誤差を生じた原因について考察する。

評価する位置標定点は，対地ビデオ映像が明瞭な地形，地物をとらえていて，標定誤差が小さいと考えられ，かつMRSによる距離データが安定に取得されている362点を選び出した。

まず，対地ビデオ映像による標定位置を基準としてMRSによる標定位置との単純な比較を行ったものをFig. 3に示す。

これを見ると南北成分の差は南へ100 m程度の誤差のある点が分布の中心になり，東西成分（主測線方向）は東向き，西向きともに150 m程度の誤差を中心とする2つのピークを持つ分布を示す。ビデオ映像による位置標定精度は概ね25 m以内であると考えられるが，この差はそれよりもはるかに大きい。

次にこの測位誤差の原因を考える。まず第一に，主局と従局との間に高度差がある場合は，MRSの測距は斜距離の測定であり，水平距離に引き直す必要がある。この補正にあっては，各点での実飛行高度（および従局の実高度）を用いる必要があるが，今回の処理では飛行高度は一定（海抜約900 m）とし，従局の高度は地形図から読みとった値を用い，それらはどちらも約400 mであった。この場合の高度ずれの影響は，MRSの主局（飛行機の胴体下部に固定）と従局の水平距離が離れるに従って小さくなる。実際の飛行高度の指定高度からのずれは，気圧高度計の記録をみると高々50 mであり，また従局の高度は10 m以上の誤差はないと考えられる。よって，実際の従局高度と指定飛行高度との差は2従局とも約500 mとなるので，従局から3 km以上離れた点では，高度のずれによる水平距離の見積り誤差は10 m以下になる。前述の位置標定点はすべてその範囲内にある。

次に，主局と従局との位置関係について考える。従局の配置は測距ではなく位置決定の精度（ここでは単に測位精度という）に大きく関わるが，理想的な配置は地形的な制約も大きく現実には難しい。2つの従局へ向かう2直線の交角θが90°から大きく離れると測位精度は低下する。交角θが30°～150°程度となる範囲で測位精度が良好で，その範囲は，今回の従局配置ではFig. 4の影の部分に相当する。この範囲での位置標定点のずれはだいたい2～4 m程度に収まると計算される。また，この範囲には収まっていないFig. 4の点◆でも，$\theta=20°$で測位精度は約6 mとなる。一方，前述の主局と従局の高度差による水平距離の見積り誤差は，従局から離れるに従って小さくなるが，実際の位置標定点について検討すると，最大でも約20 mとなる。従って，総合的な測位精度として，最悪でも30 mの精度は確保されているはずである。

ところが，各位置標定点における対地ビデオ標定との

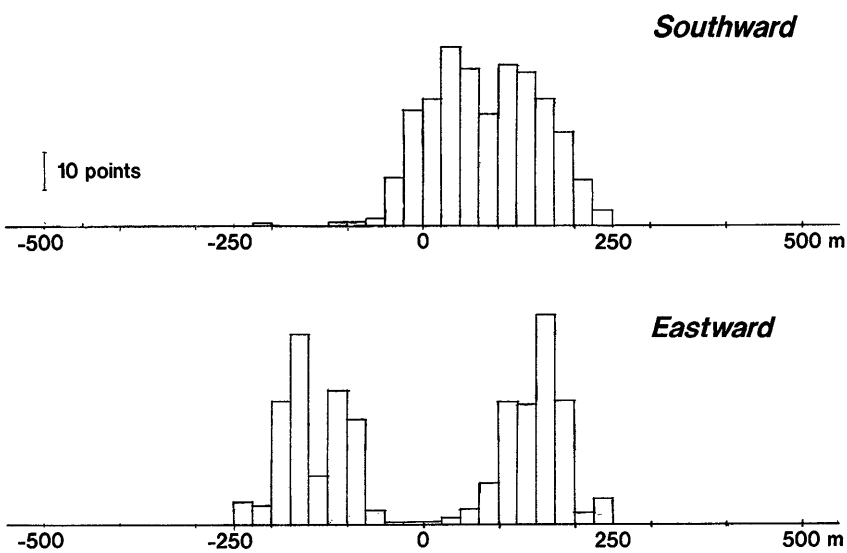

Fig. 3 Histograms of MRS positioning errors referred to vertical video position fixes. The upper half shows North-South component (southward positive), and the lower half shows East-West component (eastward positive).

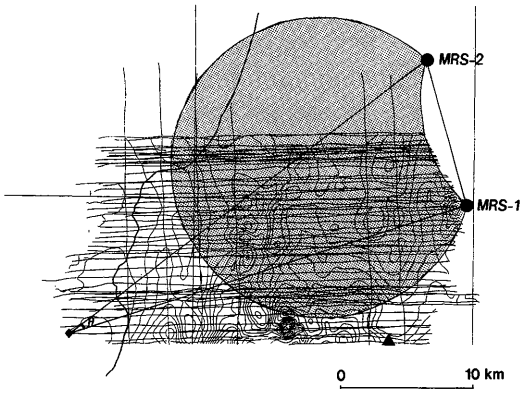

Fig. 4 Configuration of MRS remote stations (●) and the area of relatively high resolution in MRS positioning (stippled area). ▲: Location of ground station for monitoring diurnal variation of geomagnetic field. ◆: a sample observation point.

ずれはこれらの計算値よりもはるかに大きいので，そのほかに大きな原因があると考えられる。

Fig. 5 に 3 本の測線から，7 点ずつ対地ビデオによる標定点（●）からの MRS による標定点のずれ（矢印）の傾向を図示した。ここから，ずれには東西成分と南北成分で異なる傾向があることがわかる。ずれの東西成分は，西向きの測線上では東にずれ，東向きの測線上では西にほぼ同じ大きさのずれを示す。この様子は Fig. 4 の東西成分に 2 つのピークが出現したことに対応する。一方，南北成分は，測線の向きに関係なく南にずれており，さらにそのずれは従局側（東端）から離れるほど大きくなっている。

そこで可能性のある原因としては，(1)対地ビデオと MRS のデータの間に測定時刻のずれが存在すること，(2)MRS の従局の位置情報に誤差のあること，が考えられる。

(1)が原因であるときの位置標定誤差が現れるしくみを Fig. 6 に模式的に示した。現システムでは対地ビデオ映像を記録するビデオレコーダーとその他のデータを記録するデータ収録装置に別個に時計があり，両者は共通の 10 Hz 信号をもとに駆動されるが，飛行開始時の時刻合わせの精度は0.2秒程度である。Fig. 6 で時間は矢印の方向に進んでいるものとする。MRS 自体は時刻の情報を持たずに，1 秒ごとに測定値を出力する。

今，MRS が時刻■に，航空機の位置を計測したとする。このときの測定値は，時刻▲に MRS が距離データとして出力する。この■から▲までの時間は必ずしも明かではないが，1 秒未満になる。そして，データ収録装置が時刻▲に MRS の測位値を受信しても，データ収録は 1 秒ごとに行われるために，テープに記録されるのは時刻◆になる。そのとき，テープに記録される時刻データは“時刻◆”である。すなわち，時刻◆で測定された位置データと見なされる。さらに，ビデオレコーダーの時計とデータ収録装置の時計がわずかにずれているとする。すなわち Fig. 6 において，データ収録装置の時計を基準とすると，“時刻●”においてビデオレコーダ

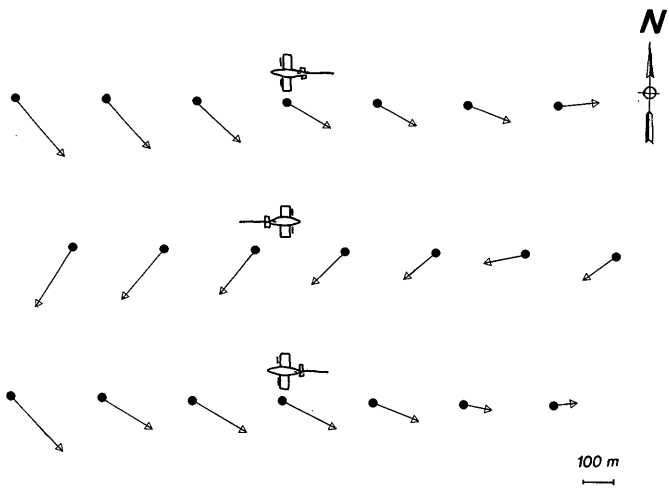

Fig. 5 Schematic diagram of MRS positioning errors referred to vertical video positioning. Each arrow indicates the direction and the magnitude of the difference between MRS and the vertical video position fixes. ●: position fixed by vertical video as the origin.

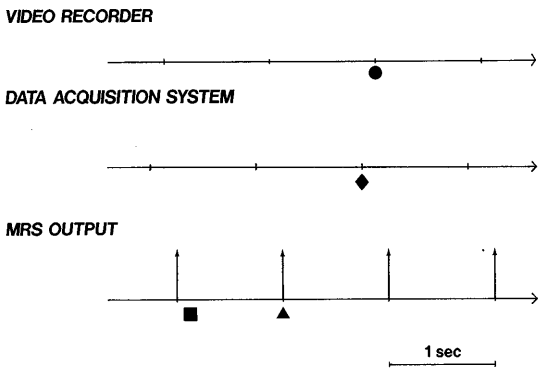

Fig. 6　Possible time sequence of the data acquisition of MRS data and vertical video image. A distance measured by MRS at the time ■, is output and transferred to the data acquisition system at the time ▲. As the data acquisition system is triggered at 1 second intervals, it is recorded as the value at the time of ◆. The vertical video system has separate recording equipment with an independent clock, and the clock data for vertical video may differ by around 0.2 second from the clock of the data acquisition system for MRS. This difference leads the time mismatching of ● against ◆. As a whole, time mismatching between MRS data and vertical video image is defined by the time interval from ■ to ●, which may amount to about 2 seconds at a maximum.

ーの時計は“時刻◆”を示している。つまり，“時刻◆”のデータとして扱われるのは，対地ビデオに関しては“時刻●”の航空機の位置，MRSに関しては“時刻■”の航空機の位置となっている。すなわち，対地ビデオ映像の位置に対して，約2秒前の位置でのMRSの測距データによる標定位置が比較されている可能性がある。航空機は平均して秒速約70 mで移動しているから，結果として測線の向きと反対方向へ約140 mのずれを生じうることになる。

(2)については，簡単のために，従局間の距離は約11.2 kmのまま変わらずに，方位のみずれているとする。例えば，北側の従局の位置は正しいが，南側の従局が実際には東寄りに200 mずれていたとする。これは北側の従局を中心にして南側の従局を1°反時計回りに回転移動させたこととほぼ同じになり，従局2点間の距離を底辺とし，ある位置標定点とで三角形を書いたとき，底辺の中点から40 kmの距離にあるの位置標定点は約750 m南寄りへずれる計算になる。これは対地ビデオとMRSの標定位置の差の南北成分の主な原因と考えられる。

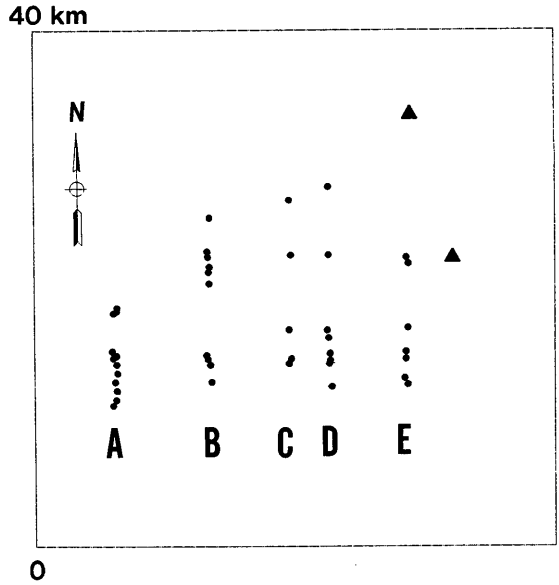

Fig. 7　Distribution of sample points to analyze the causes of the positioning errors. ▲: MRS remote station location.

次にこれらのずれを実際の位置標定点から具体的に見積もってみる。

まず，Fig. 7に示すA, B, C, D, Eの5組の位置標定点群を選び出した。対地ビデオ映像による位置標定は，地上に明瞭な目標物が存在する場所で行うため，位置標定点全体の分布には片寄りがある。よって，サンプルとしてなるべく片寄りがないように，位置標定点が南北方向にほぼ1列に並んでおり，西向き測線のものと東向き測線のものとが比較的均等になるように選び出した。これらの標定点は，実際には2回のフライトによるものが混在している。しかし，個々のフライトのデータのみ使用して別々に見積もるためには，サンプルが片寄り，適切ではない。それゆえに，2回のフライトにわたって対地ビデオとMRSの測定時刻のずれの大きさは一定であったと仮定し，2回分のデータを使って見積りを行った。

この5組の各データについて，東向き測線のものと西向き測線のものに区別し，それぞれについて，標定位置のずれの東西成分の平均値を計算した。その絶対値は5組ともだいたい同じになった。これらの絶対値の平均値を位置標定点全体の補正値とみなした。具体的には，補正値は137 mになったので，MRSデータから求めた位置をそれぞれの標定点について測線の向きに応じて東西に137 mずつ移動させた。

さらに，この補正後のMRS標定位置と対地ビデオ映像の標定位置とのずれの残りは，従局の位置情報の誤差が原因であると考える。

このずれは，東西成分が小さく，従局から離れるほど南向き成分のずれが大きくなっている。しかも，南北に1列に並んでいる位置標定点の組では，南へのずれの大きさはだいたい同じになっている。

ここでは前に考えたように，簡単のために，一方の従局の位置と従局間の距離は正しいものとし，方位のみずれていたとする。Fig. 8において，従局2点の正しい位置は●で示され，位置標定点は▲が正しい位置であるとする。一方の従局が間違って○の位置に与えられると，位置標定点は△となる。すなわち，標定位置のずれベクトル（▲から△）に対応する三角形の回転角δに相当する位置の補正を従局に対して行えば良い。回転角δを求めるために，固定する従局位置から，前記の補正後のMRS標定位置と対地ビデオ標定位置とを見込む角度の計算を，各位置標定点について行い，平均をとった。従局2（北側）を固定する場合の回転角δは0.23°，また，従局1（南側）を固定する場合は0.33°になる。すなわち，従局1の位置がずれていた場合は，そのずれ幅は正しい位置に対して東へ約45 m，北へ約13 mであったと推定され，従局2の位置がずれていた場合は，西へ約65 m，南へ約18 mであったと推定される。ここでの議論はすべて対地ビデオ映像による標定位置は正しいとして行っているが，現実問題として，対地ビデオ標定の精度から考えると，2つの従局の位置情報のどちらに誤りがあったのかの判断は困難である。

逆に東西成分の補正済みの位置標定点に対して，個々に角度δだけ回転移動させると，対地ビデオ標定位置とのずれは概ね20 m程度に収まるために，従局の位置情報の誤差は，従局間の位置関係を単純に回転させるだけでほぼ説明がつく。この求められた従局の位置のずれ幅は，実際に従局を設置したのが新しく切り開かれた道路脇の崖の上であったため，その地点を地形図上で厳密に位置を読みとることが難しいことを考慮すれば，ほぼ現実的な値となっている。

実際問題として，対地ビデオ映像からの標定位置とMRSの距離データから計算される位置のずれは，今回の磁気異常図の作成中に機械的に行った交点コントロールでの位置修正量の範囲に収まっていた。また今回は磁気異常の勾配も比較的小さかったために，交点コントロールの代わりに，この節で推定した補正を行ったとしても，磁気異常図のパターンは大きくは変わらないと思われる。しかし，より正確な磁気異常図を作成するためにはこれらの補正も行うことが望ましい。

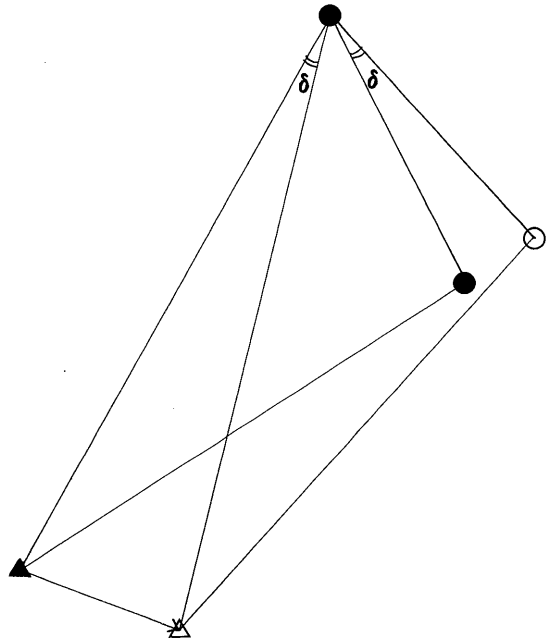

Fig. 8　A diagram explaining the MRS positioning error as a result of the false position data of remote stations. ●: the true positions of MRS remote stations. ▲: the true position of the observation point. ○: the false position of an MRS remote station. △: the position of the observation point calculated from the false position data of MRS remote stations.

5.　磁気異常の概観

ここで簡単に今回得られた磁気異常分布を概観する。なお，定量的な解析は別の機会に譲る。

Fig. 9は大沢（1988）による地質図を簡略化したもので，磁気異常図と見比べると，磁気異常の特徴と地質分布がよく対応する。Fig. 10は，対比しやすいように，おおまかな磁気異常分布（25 nTコンター）に，Fig. 9の地質図に見られる褶曲軸を実線で，断層軸を破線で，象潟岩屑なだれ堆積物（大沢ほか，1988）とよばれる安山岩質の岩塊の分布域に影をつけて書き込んだものである。

これを見ると，象潟岩屑なだれ堆積物とよばれる安山岩質の岩塊に沿って高磁気異常帯は延びていることがわかる。この高磁気異常帯は，象潟岩屑流堆積物が地質図には表れていない地域にもさらに続いているように見える。また，主として南北に延びる向斜軸と背斜軸は低磁気異常と高磁気異常にそれぞれ対応しているように見え

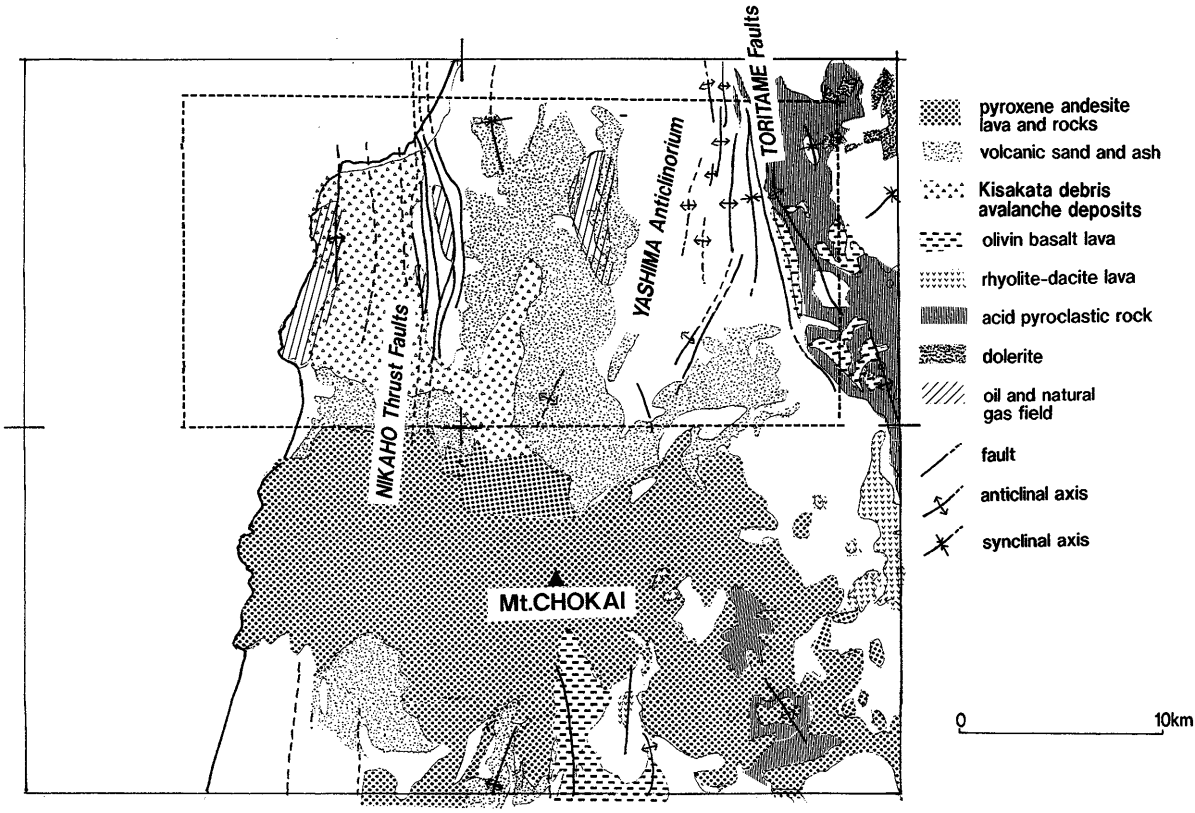

Fig. 9 Simplified geological map around the survey area after Ozawa (1988). Enclosed part with broken lines corresponds to the 1990 aeromagnetic survey area.

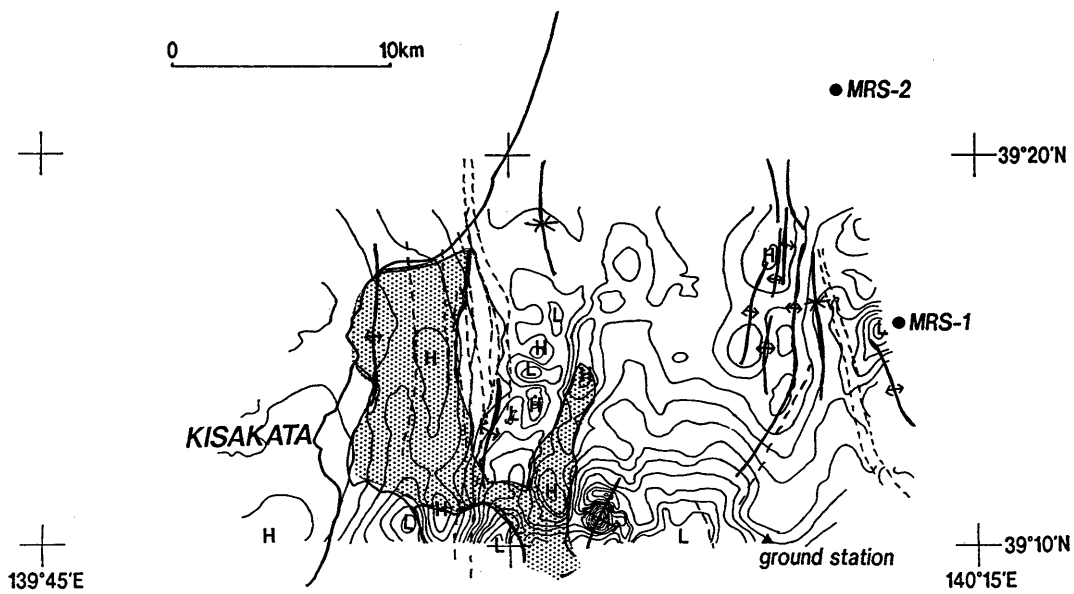

Fig. 10 Simplified aeromagnetic anomaly map overlaid on a part of the simplified geological map (Fig. 9). ●: MRS remote station location. ▲: location of ground station for monitoring diurnal variation of geomagnetic field. Contour interval is 25 nT. Solid lines indicate anticlines or synclines, and broken lines indicate faults. Stippled area indicates Kisakata debris avalanche deposits (after Ozawa et al., 1988).

る。以上のように，短波長の磁気異常分布を調べることによって，地表には現れていない地下の浅部構造を推察できる。

6. おわりに

空中磁気探査において飛行高度（観測面）が低くなれば，それだけ短波長の磁気異常が得られ，微細な地下構造探査に適用できるようになる。今回報告した例からもわかるように，測線を高密度に配した空中磁気探査を行って得られる短波長の磁気異常分布は，局所的な磁性岩体の分布や，断層，褶曲によく対応しており，地下浅部の局所的な構造探査に有効なデータを提供する事ができる。

REID (1980) によれば，データのサンプリングに伴うエイリアシングを避けるためには測線間隔は飛行高度の2倍よりも小さくする必要がある。よって，観測面が低くなるにつれて測線を高密度に配さねばならなくなり，より正確なそして，安定した位置標定システムが必要になる。

今回用いたMRSの問題点としては，位置標定精度が，従局の配置や，データ収録の時間差などが原因で思ったほど高くはなかったことがあげられる。

従局位置の誤差の問題は，仮に従局位置の情報に同じだけ誤差が含まれていたとしても，従局間に十分な距離があれば回転角度が小さくなるので，標定点での誤差は軽減できるはずである。しかしながら，地形上の制約もあり従局の理想的な配置はいつでもできるわけではない。一方，データ収録のタイミングの問題は，MRSのデータ出力とうまく同期をとる，またはMRSの出力に何らかの時刻データが加われば解決すると思われる。

謝 辞

空中磁気探査の現地調査を行うにあたっては宮坂聡氏をはじめとする中日本航空㈱の方々に大変お世話になりました。ここに謝意を表します。

参 考 文 献

大熊茂雄・中塚 正・牧野雅彦・森尻理恵 (1991)：南西諸島西方海域の磁気的構造，物理探査，**44**-4, 202-214.

大沢穠編 (1988)：20万分の1地質図，新庄及び秋田，地質調査所.

――――・片平忠実・中野 俊・土谷信之・粟田泰夫 (1988)：矢島地域の地質，地域地質研究報告（5万分の1地質図幅），地質調査所

地質調査所 (1978)：男鹿半島―酒田海域空中磁気図，空中磁気図シリーズ，**22-2**，地質調査所.

中塚 正 (1984)：空中磁気探査のシステム化について（I）―ハードウェアシステム―，地調月報，**35**, 341-364.

――――(1989)：空中磁気探査のシステム化について（II）―データ処理ソフトウェアシステム―，地調月報，**40**, 99-111.

――――・大熊茂雄・森尻理恵 (1990)：伊豆半島東部における精密空中磁気探査について，CA研究会論文集.

REID, A. B. (1980): Aeromagnetic survey design, *Geophysics*, **45**, 973-976.