

女満別・鹿屋における人工擾乱の検出能力

徳本哲男¹, 室松富二男², 生駒良友³

¹ 地磁気観測所技術課, ² 地磁気観測所網走地磁気観測連絡事務所, ³ 気象庁地震火山部

2012年12月11日受領, 2013年2月5日改訂, 2013年3月4日受理

要 旨

女満別観測施設, 鹿屋観測施設には5台の3成分磁力計(フラックスゲート磁力計), 3台の全磁力計(プロトン磁力計およびオーバーハウザー磁力計)が設置されている。それら磁力計を用いての車両など人工擾乱源の検出能力のシミュレーションを行った。その結果, 概ね人工擾乱源が敷地近辺にまで近づけば検出可能と思われるが, 女満別観測施設では磁力計が全体的に敷地の南側に配置されており北側での人工擾乱の検出力はやや劣り, 鹿屋観測施設では磁力計は敷地北側に幾分偏っていることから南側からの人工擾乱の検出が比較的手薄であることなど, 磁力計の配置に対応して検出範囲に偏りが認められることが分かった。

1. はじめに

平成23年度より女満別観測施設, 鹿屋観測施設には常駐職員は廃止となり, 計測値を柿岡にテレメートして, そこでデータを処理するという運用体制となった。従って, これまでの精度を維持するためには敷地内外で発生するであろう人工擾乱を, 遠隔地にて的確に検出し補正等を行う必要性が高まった。これまでに複数の磁力計計測値から人工擾乱源の位置や磁気モーメントを推定する手法は確立されており既に運用されている(徳本他(2002))。そこで主に車両による人工擾乱を想定し, 現在の磁力計の観測値を用いてどの程度の人工擾乱の検出能力があるのかを調査した。実際に車両を時間と場所を決めて移動させての実験試験, および現状の磁力計配置での人工擾乱の検出シミュレーションを実施したので, その結果について報告する。シミュレーションでは計測値は異常値やノイズはなく0.1nTまで正確に計測されたとしている。また簡単のため人工擾乱源の移動は同一平面に限定するなどの制限があるが, 概略の傾向を知ることは可能であろう。

2. 車両による人工擾乱検出試験

実際に人工擾乱を検出できているかを確認する簡易な方法は, 敷地周辺あるいは敷地内に車両を駐車させて, その時の磁力計計測値から人工擾乱の有無を調べてみることである。女満別観測施設および鹿屋観測施設それぞれで官用車等を用いて計画的に何ヶ所か時間と場所を決めて移動させながら人工擾乱として認識できるか確認した。擾乱量が小さく0.1nTあるいは0.01分以下ではノイズ等との区別が明確でなくなるおそれがあるため, 明瞭な変化がみられたケースだけを対象とした。

2.1 女満別での試験結果

車両とその駐車位置は, ①庁舎玄関前, ジャンボタクシー(西向き), ②正門ゲート構内側, 官用車(南向き), ③西側畑旧町道, 官用車(東南東向き), ④9号宿舎玄関前, ワゴン車(南南西向き), ⑤車庫・整備庫前, 除雪機・運搬車 で試験した。駐車位置は図1に示す。このうち, ②, ⑤では車両等の磁性が小さく, この時刻に対応する人工擾乱変化は見られなかった。結果的にどのケースでも擾乱量は小さかったので各磁力計での異常値量は南半地下室にあるフラックスゲート磁力計(MB162)と

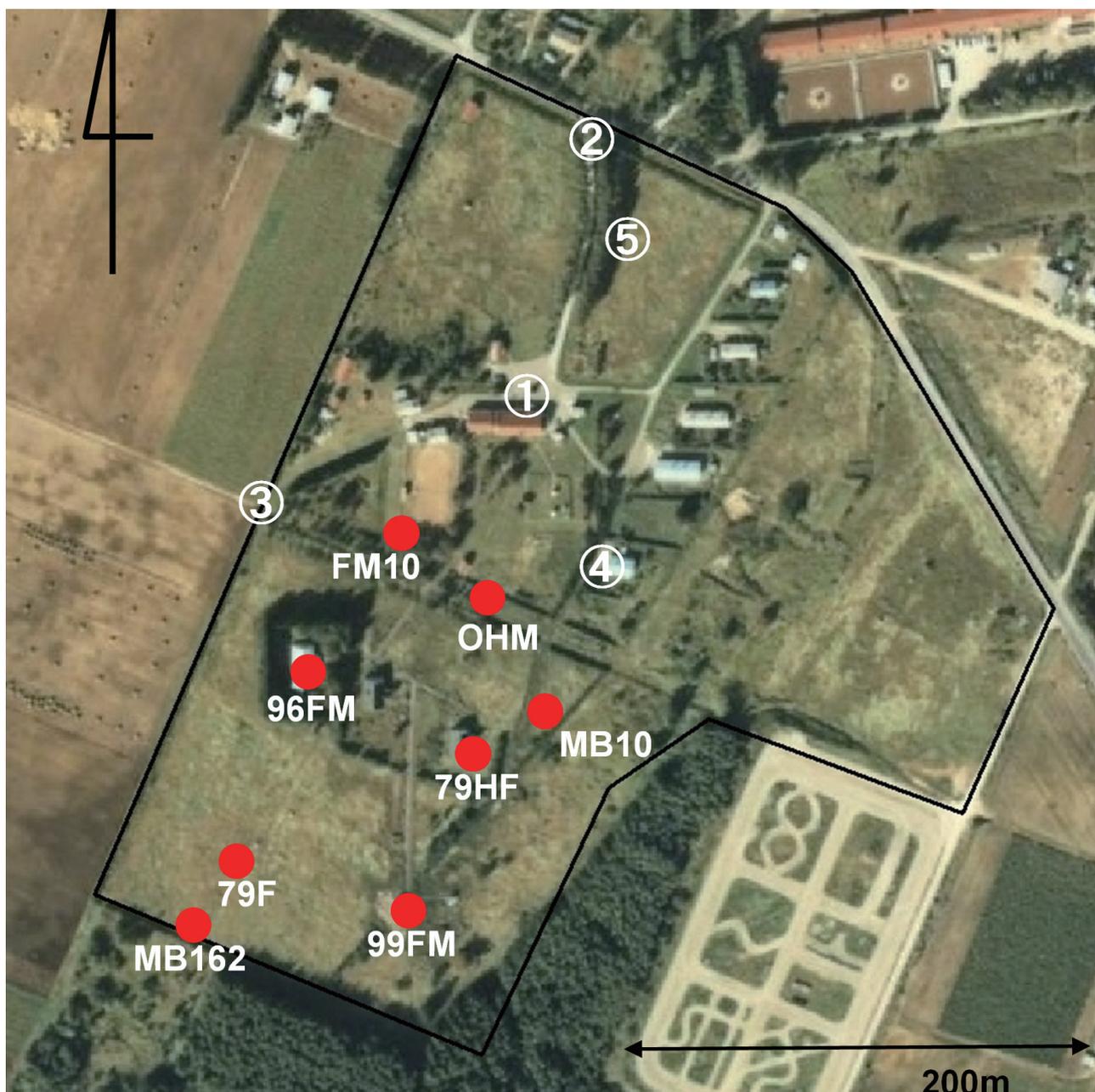


図1 磁力計および試験車両位置(女満別観測施設)

赤丸は磁力計で, FM10, MB10, 96FM, 99FM, MB162 はフラックスゲート磁力計, OHM はオーバーハウザー磁力計, 79HF, 79F はプロトン磁力計である. ①から⑤は試験のため車両を駐車させた場所を, また黒枠は女満別観測施設敷地境界を示す(図2, 5, 7, 9も同様). なお, 図1から図10の背景地図等データは, 国土地理院の電子国土Webシステムから配信されたものである.

比較して算出した. それぞれ①では FM10(-0.30nT , -0.20nT , $+0.030$ 分), OHM(-0.33nT), ③では FM10(-0.10nT , -0.08nT , 0.000 分), 96FM($+0.06\text{nT}$, -0.08nT , 0.000 分), ④では FM10(-0.05nT , -0.08nT , $+0.010$ 分), OHM(-0.79nT)で人工擾乱による変動がみられ, その他の磁力計では人工擾乱を受けなかったとした. 括弧内はフラックスゲート磁力計では順に水平成分(H), 鉛直成分(Z), 偏角(D)を, 全磁力計(ここではオーバーハウザー磁力計(OHM)のみ)は全磁力値(F)の人工擾乱による変化量を示す.

人工擾乱量は小さくても異常量を正しく把握で

きていれば信頼できる結果が得られる. ①, ③, ④のうち, ③は2台のフラックスゲート磁力計で人工擾乱変化が見られたので車両の位置も計算できて実際の位置とほぼ合致する(図2). しかし①と④は人工擾乱を受けたのはフラックスゲート磁力計とOHMで情報としては4成分しかないので車両の位置まで決めることはできない. ④では, この試験のときにたまたまMB10が欠測していたが, 仮に計測されていれば 0.2nT 程度の人工擾乱を受けたと予想され, 車両位置も求められたものと思われる. どのケースでも絶対観測点にまでは影響はなかったと思われる小さな人工擾乱だったが, 概ね正しく

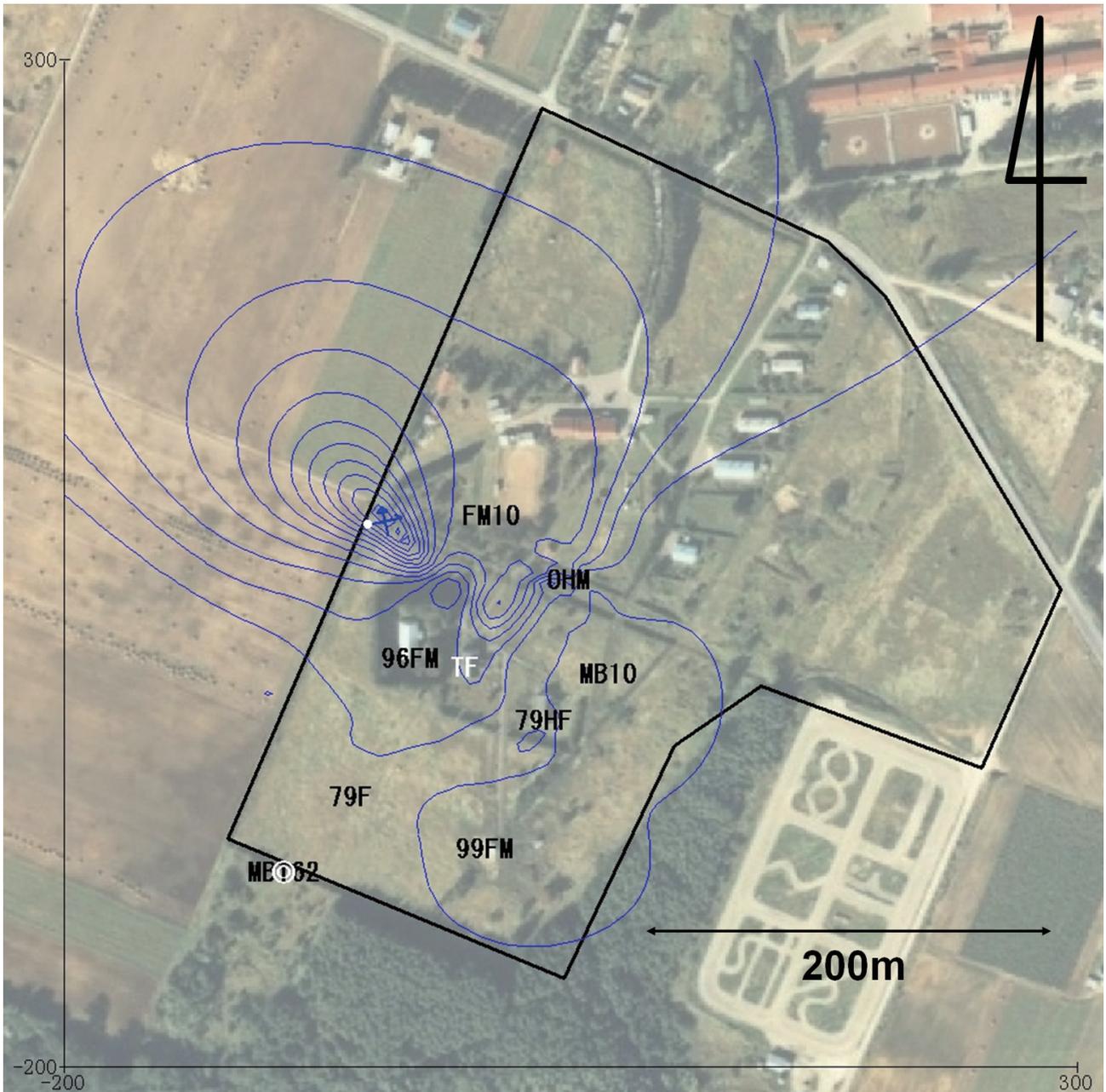


図2 官用車を用いた人工擾乱試験結果(女満別観測施設)

図中の矢印は構内の磁力計測値より求めた官用車の位置と磁気モーメント方向を示す。コンター線は計測値と計算値との差の2乗和(残差)で、これが最小となるポイントが人工擾乱源の位置と推定される。残差の最小地点(敷地西側境界線中央近くの矢印の位置)の周辺のコンター線はやや北西に伸びているがほぼ同心円で、中心点の残差は近辺の残差より十分小さくなっている。このことは求められた磁気モーメント位置の信頼性が高いことを示している。これは図4でも同様である。

試験では図1の③に駐車しており、計算により求めた位置とは約11m、磁気モーメントの水平面での方向には約20度の差異がある。

検出したと評価する。

2.2 鹿屋での試験結果

敷地周囲および敷地内の数地点で官用車を、それぞれ数分程度駐車して測定してみたが、ほとんど磁力計に変化は見られなかった。この結果から官用車の磁化は非常に小さく、100m距離でも0.01nT以下程度の影響量と思われる。

官用車を用いた試験では人工擾乱を受けなかったため、実際の人工擾乱事例をもって検出能力を確認することにする。2011年8月16日04時30分

(UT)頃に敷地西隣にあるJA施設駐車場におかれた車両を例として取り上げる。車両は10分程度で移動していったが、このとき絶対観測中であったため絶対観測にも影響を受け一部オミットして対処したと記事にある。この車両は敷地内にあるモニタリングカメラでも確認されている。95FMを基準として人工擾乱前後の変動量は、FM10(-0.05nT, 0.00nT, +0.025分), MB10(-0.87nT, -0.21nT, -0.296分), MB1(+0.35nT, -0.05nT, +0.013分), OHM(+0.12nT)である。フラックスゲート磁力計3台とオーバーハウザー磁力計1台に異常値が認められ、



図3 磁力計および車両位置(鹿屋観測施設)

赤丸は磁力計で, FM10, MB10, 95FM, MB1, MB2 はフラックスゲート磁力計, OHM はオーバーハウザー磁力計, 80F, 80H はプロトン磁力計である. ①から⑦は試験のため車両を駐車させた場所を, ⑧は隣接する JA 施設駐車場にとめられた車両位置を, また黒枠は鹿屋観測施設敷地境界を示す(図4, 6, 8, 10も同様).

また異常量も十分に有意な大きさがあり, 車両の磁気モーメントおよび位置も精度良く検知できている(図4).

3. シミュレーションによる人工擾乱検知能力の評価

人工擾乱源を磁気モーメントとすると, その位置が分かっている場合は最低3つの計測値があれば磁気モーメントの大きさ(3成分のベクトル)が求まる. 6つの計測値があれば磁気モーメントの大きさと位置を求めることができる. このことから人工擾乱源の磁気モーメントの大きさを適当に設定しておき, それが何処まで近づけば磁気モーメン

トが求められるか, あるいは磁気モーメントの大きさと位置まで求められるかは, 幾つの計測値に異常値が見られるかで判定することができる. つまり3つの計測値に異常値を生じるか, あるいは6つの計測値に異常値が認められるかが, その境目の判定要素として使用できる. ここでは異常値を生じた計測値の成分数(以降, カウント数と呼ぶ)は, 3成分磁力計の場合は1成分でも異常値があればカウント数を3とした. これはある成分で異常値があれば他成分の変動がゼロであっても, 異常値変動のベクトルとしては捉えられていると見なせるからである. 従ってフラックスゲート磁力計にどれか1

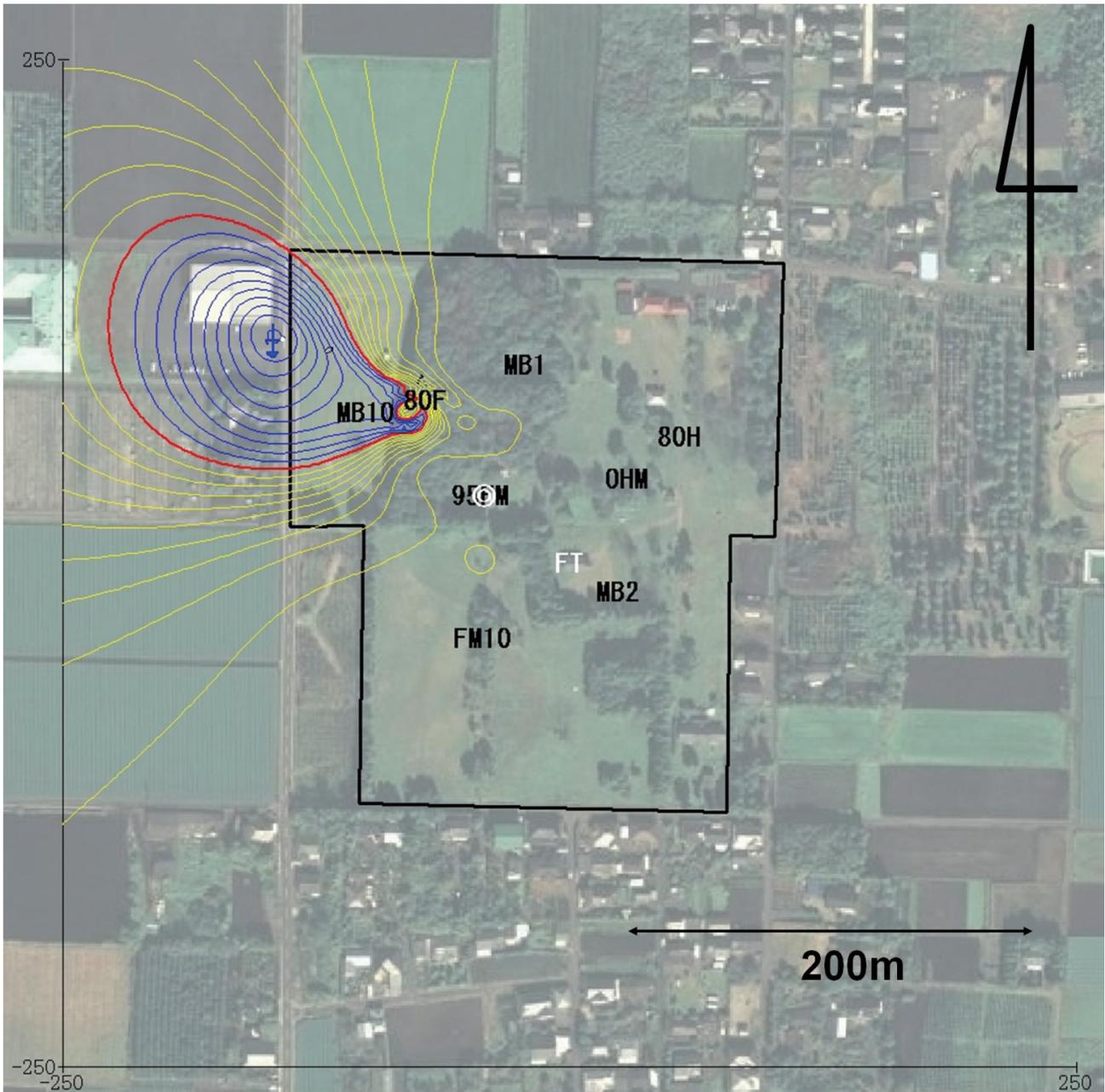


図4 人工擾乱の検出確認試験(鹿屋観測施設)

図中の矢印(敷地北西側境界線近く)は、構内の磁力計計測値より求めた、敷地西に隣接するJA施設内に駐車された車両の位置と磁気モーメント方向を示す。コンター線は計測値と計算値との差の2乗和(残差)である。

成分にでも異常値があればカウント数3, オーバーハウザー磁力計やプロトン磁力計ではカウント数1となる。なお, 異常値量が微小で3成分磁力計で1成分だけに変化がみられるような場合はカウント数3とできる限界ラインであって, 理論上, 磁気モーメントを計算できるとしても, 実際に人工擾乱を解析する際にはノイズ状況等十分に考慮する必要があることに注意されたい。

例として, 前章2.1.女満別の①で実測された車両とほぼ同程度の大きさ, つまり100mの距離で0.3nTを生じる磁気モーメントを持った人工擾乱源を想定して調べてみることにする。これは自家用車クラ

スとしてはやや大きめの設定と思われる(永野・北方(1970);大和田 他(1991);福井・高田(1992))。

3.1 連続観測での検出能力

女満別観測施設, 鹿屋観測施設の磁力計配置から, 人工擾乱源がどこまで近づけばそれを検出できるかを調査した。前述の磁気モーメントの大きさを想定して, それが置かれた場所ごとに0.1nT以上の異常値変動のあるカウント数を計算しコンターを表示する。磁気モーメントの位置が同じでも, その方向によって各磁力計が受ける異常値は違ったものになる。そこで磁気モーメントの全方位につい

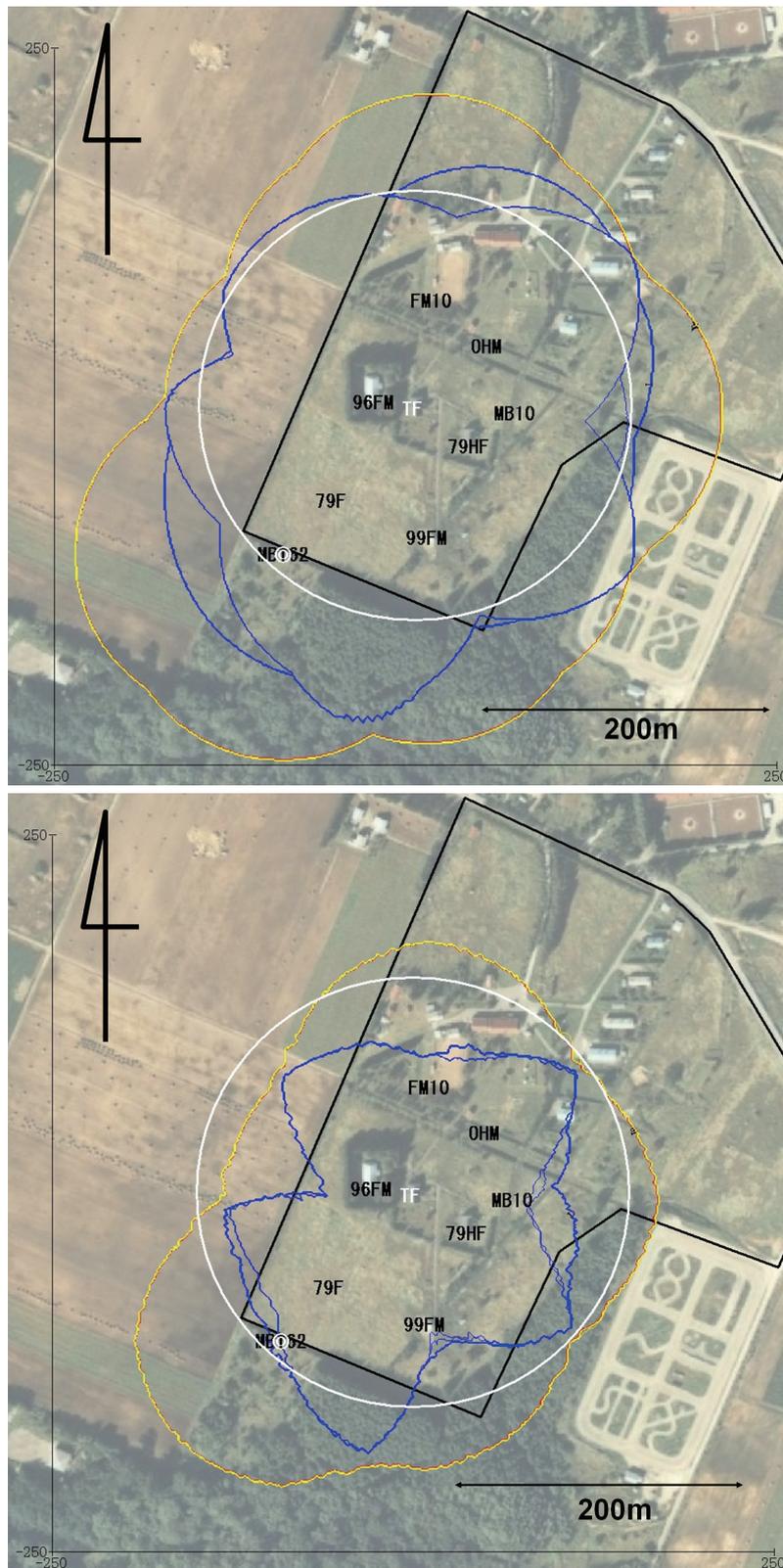


図5 人工擾乱の検知範囲(女満別観測施設)

上図はケースA, 下図はケースBの場合を示す。

コンター線は黄色がカウント数1か2を, 赤はカウント数3, 青はカウント数4から6であることを示す。白線は絶対観測点を中心とした半径150mの円である(図6, 7, 8, 9, 10も同様)。なお, プロット表示の問題で赤のコンター線が見えづらいところもあるが, その場合は最も内側の黄色コンター線がそれに相当する。

て計算し, カウント数が最大となる場合をケースA, 逆に最小となる場合をケースBと記すことにする。ケースAではコンター線のカウント数は磁気モー

メントの向きによってはそれ以下となることもあり得る。ケースBでは磁気モーメントがどの方向であろうと必ずコンター線のカウント数は確保さ

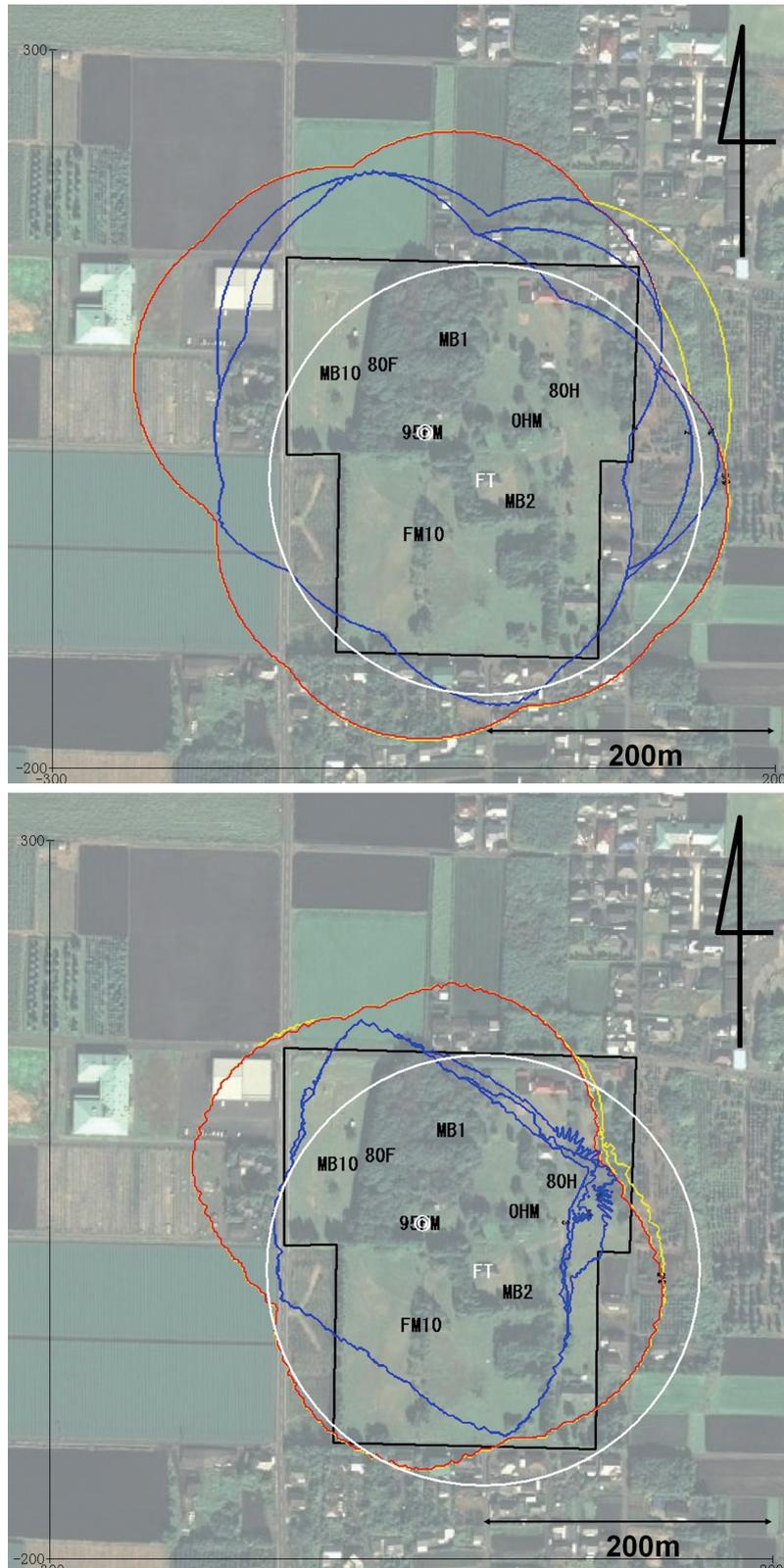


図6 人工擾乱の検知範囲 (鹿屋観測施設)
 上図はケース A, 下図はケース B の場合を示す. コンター線については図 5 と同様である.

れる限界線を示すことになる. 実際にはケース A とケース B の例えばカウント数 3 のコンター線の間の何処かでカウント数 3 となる.

想定した 100m で 0.3nT となる磁気モーメントの

大きさからすると, 0.1nT の人工擾乱を受ける限界線は約 144m となるが, 図 5 ~ 10 には 1 つの目安として半径 150m の円を白線で示した. 円の中心は絶対観測点においている. コンターの黄色線はカウ

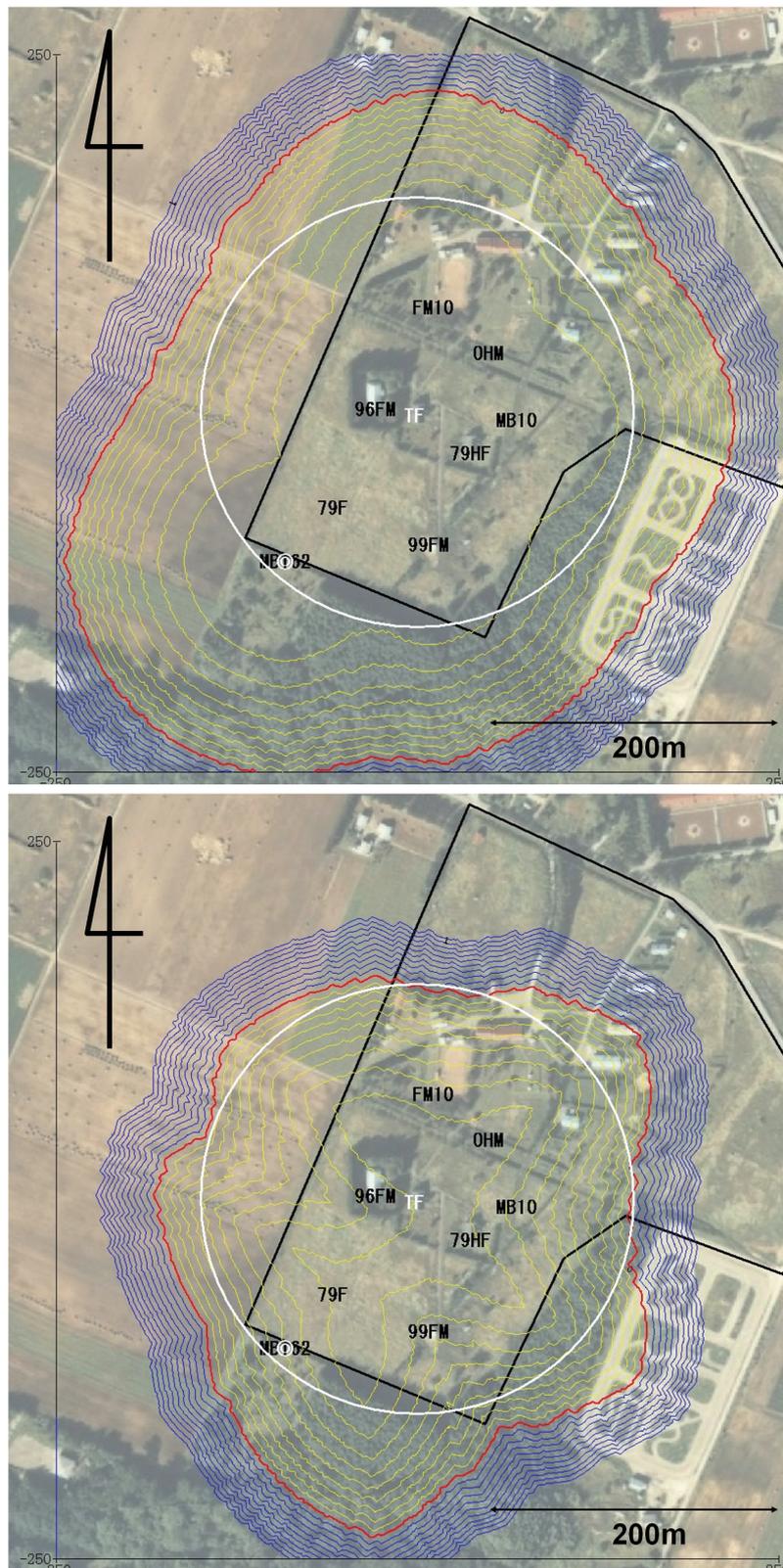


図7 磁気モーメントの大きさによる人工擾乱検知範囲(女満別観測施設)

上図はカウント数3, 下図はカウント数6となる磁気モーメント大きさのコンター図を示す。

黄色のコンター線は0.1nTから0.9nT, 赤線は1.0nT, 青線は1.1nTから2.0nTでコンター間隔は0.1nTである。例えば赤のコンター線では100m離れて1.0nTの磁場を生じる磁気モーメントの大きさの人工擾乱源がその内側にあればカウント数3(上図)あるいは6(下図)となることを示す。

ント数1~2, 赤線は3, 青線は4~6を示す。人工擾乱源が黄色線より内側に来るとどれかの磁力計に異常値を受け, 赤線内では人工擾乱源の位置が

分かっているならば磁気モーメントが求められる。さらに最も内側の青線(カウント数6)より中に入れば人工擾乱源の位置と大きさを求めることができる

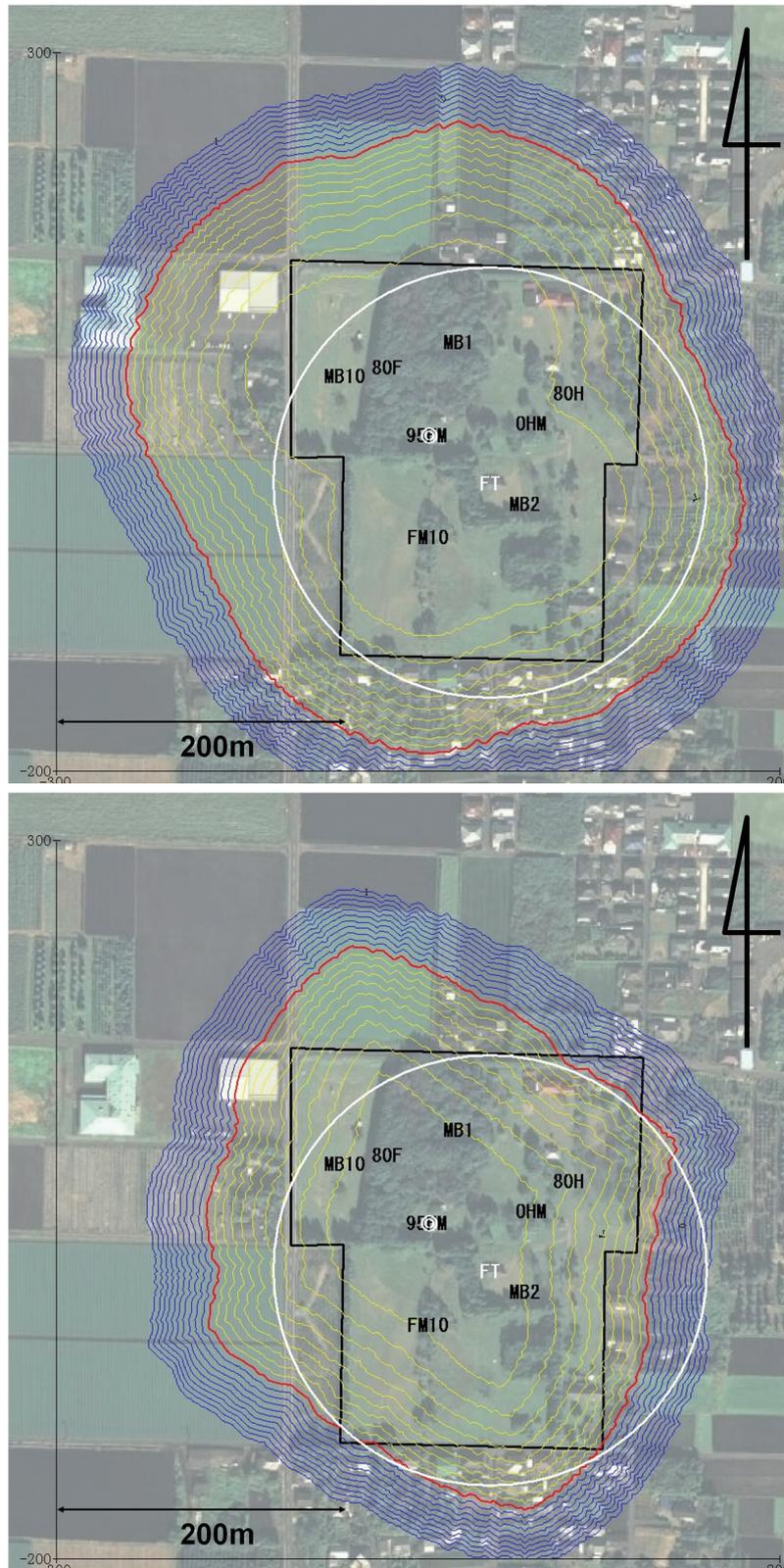


図8 磁気モーメントの大きさによる人工擾乱検知範囲(鹿屋観測施設)
 上図はカウント数3, 下図はカウント数6となる磁気モーメント大きさのコンター図を示す。
 コンター線については図7と同様である。

ようになる。

図5,6を見てみると、特に図5下図の女満別ケースBで顕著だが、カウント数6のコンター線(青)が3成分磁力計付近では内側に凹み、隣接する3

成分磁力計の間では凸になる三角形が目立つ。一方、カウント数3までのコンター線(黄色あるいは赤)では、カウント6のコンター線が凹んだあたりで逆にふくらんでいる。これは、人工擾乱源がどれ

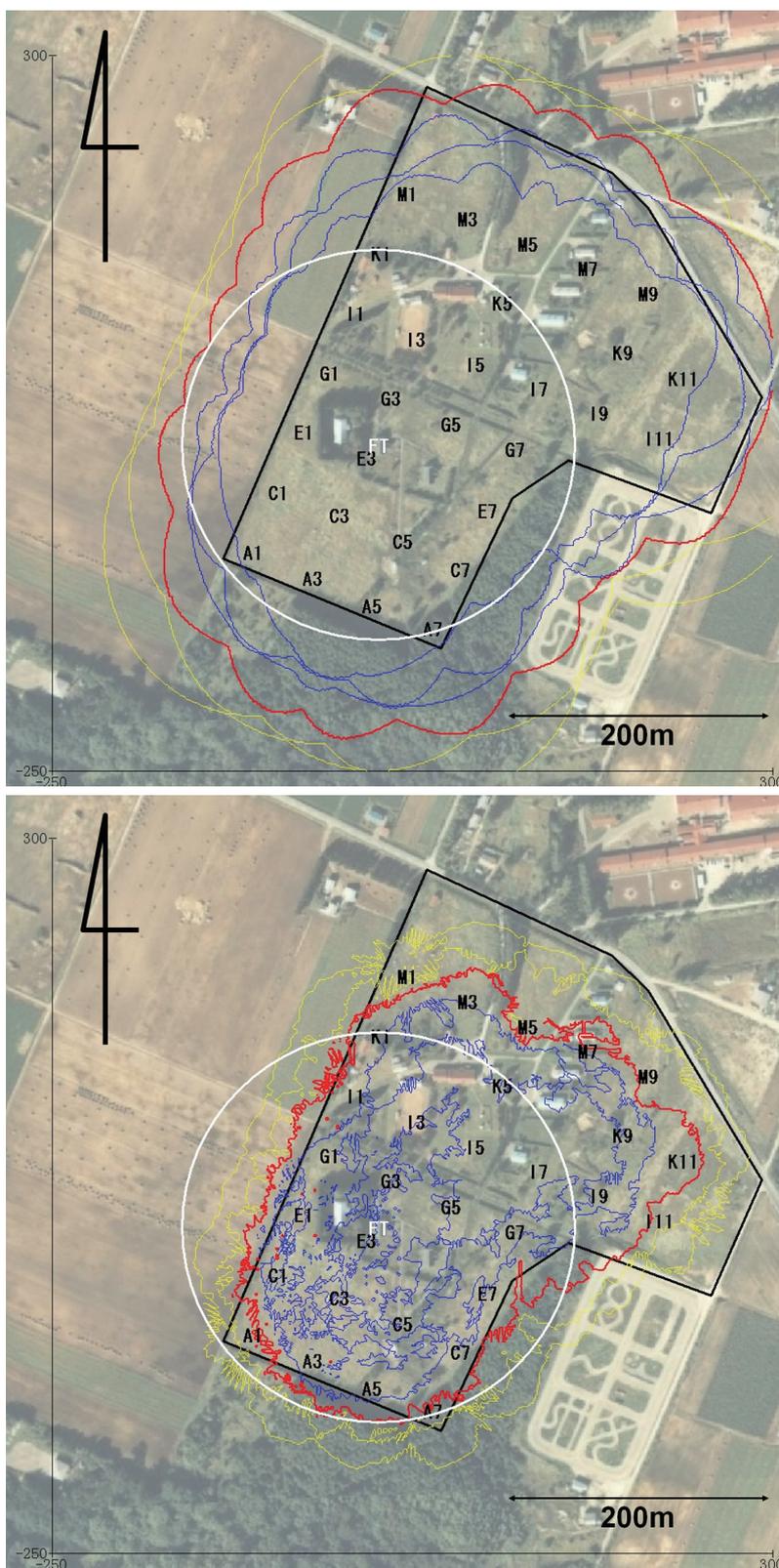


図9 全磁力繰り返し点による人工擾乱検知範囲(女満別観測施設)
 上図はケースAを, 下図はケースBの場合を示す。A1等の番号は繰り返し観測点位置を示す。
 コンター線については図5と同様である。

か3成分磁力計に近づけばそれだけでカウント数3にはなるが, 3成分磁力計に近づきすぎると他の磁力計からは離れることになるのでそれ以上カウント数が増えにくくなるためである。2つの3成分磁

力計の中間あたりが効率よくカウント数を増やせることを示している。

女満別の①(庁舎玄関前での駐車)の結果をあてはめてみると, 車両は庁舎北側にあつて位置を指

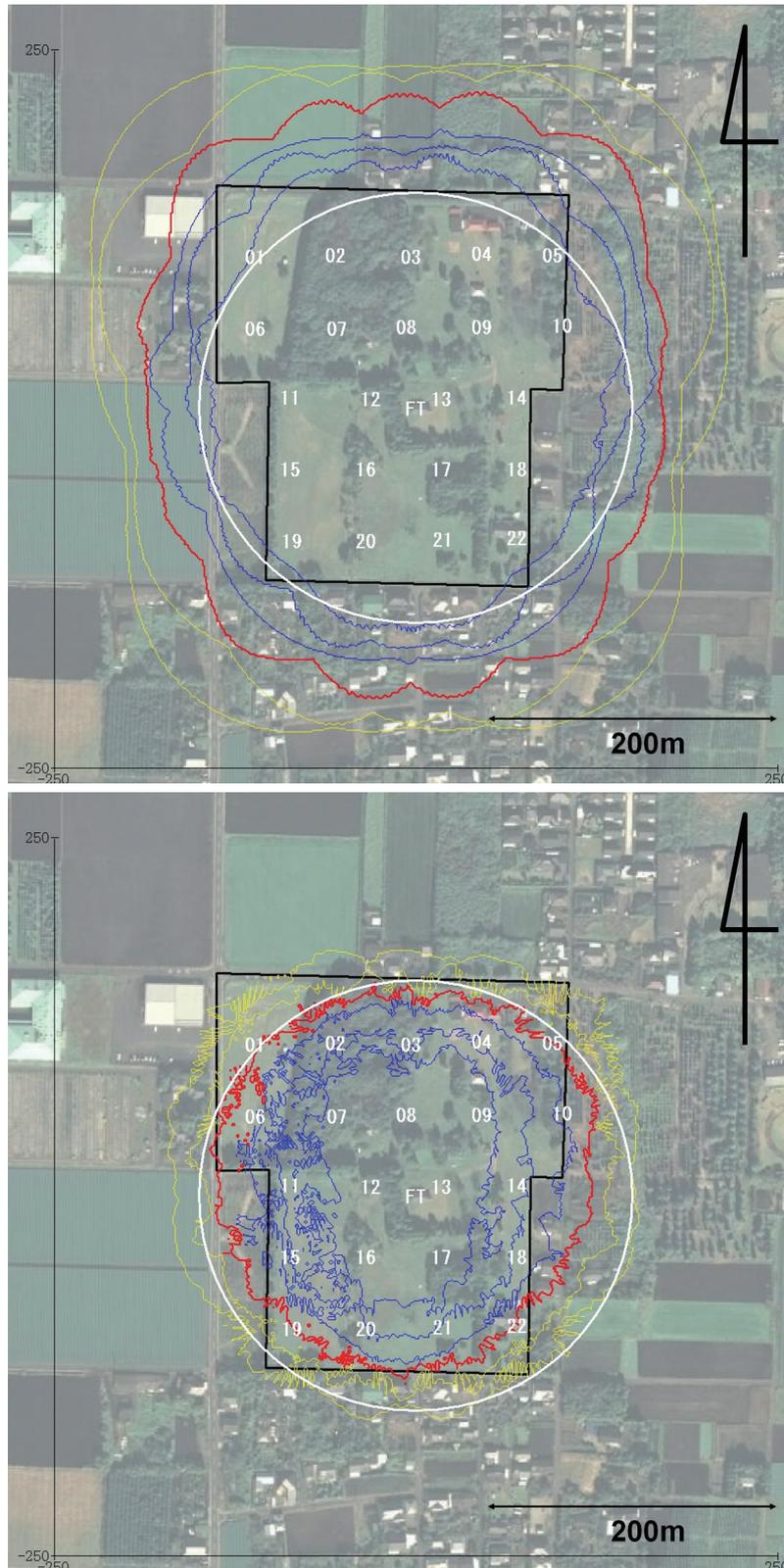


図 10 全磁力線り返し点による人工擾乱検知範囲(鹿屋観測施設)
 上図はケース A を, 下図はケース B の場合を示す. 01 等の番号は線り返し観測点位置を示す.
 コンター線については図 5 と同様である.

定して磁気モーメントを求めれば, 各磁力計の擾乱量をうまく説明できたが, 車両位置を計算で精度良く求めることはできなかった. 車両の駐車位置は, 図 5 上図のケース A ではぎりぎりカウント数

6 のコンター線の内側になるが, 図 5 下図のケース B ではカウント数 6 のコンター線の外側にある. このことから, 車両の向きによっては車両位置も含めて求められた可能性はあったと思われる. ケース B

でもカウント数3のコンター線より内側にあるので、車両がどの向きであっても位置を指定すれば磁気モーメントは正しく求められる保証は得られていたと解釈できる。

図5, 6では磁気モーメントの大きさを固定したが、逆にカウント数3と6となる磁気モーメントの大きさの分布図を図7, 8に示す。これらはすべてケースBの場合である。磁気モーメントの大きさを距離100mで幾らの磁場を与えるかで示しており、黄色線は0.1nTから0.9nT, 赤線は1.0nT, 青線は1.1nTから2.0nT, コンター間隔は0.1nTである。図5, 6の磁気モーメントの大きさは距離100mで0.3nTの擾乱を生じる大きさなので、これは図7, 8では内側から3番目のコンター線に対応する。磁気モーメントが大きくなれば当然、遠くからでも擾乱が及ぶことに対応してコンター線の囲み領域は広がっている。特に女満別のケースBで見られた3成分磁力計近くでのコンター線の凹凸は磁気モーメントが大きくなるにつれてなだらかな曲線に変わっているのがわかる。

全体的に、ここで設定した磁気モーメント(100mで約0.3nT)程度の大きさでは、敷地内の監視ができていれば人工擾乱検知はほぼ可能と思われる。女満別では磁力計がやや南側寄りに配置されているので北側での人工擾乱の検知力は落ちるが、北正面入口までの敷地に距離があるのでそのことが人工擾乱の防止になっていると思われる。鹿屋では絶対観測点は敷地中央にあるが磁力計はやや北側に偏っており南側からの人工擾乱の検知が比較的手

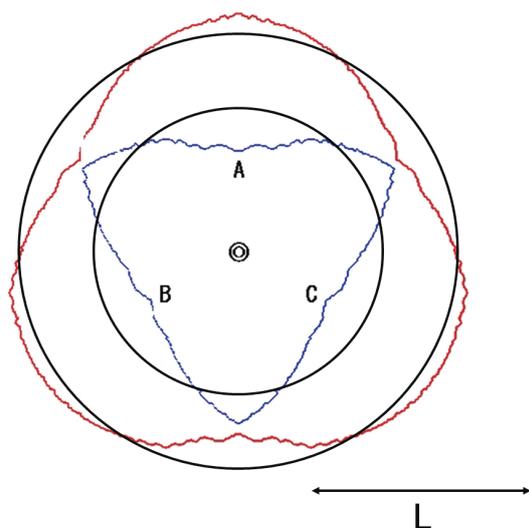


図11 磁力計間距離 αL での人工擾乱検知範囲

A,B,Cは3成分磁力計で、互いに距離 αL で \odot を中心に対称となるように配置している。図中の小円と大円の半径はそれぞれ αL と L である。コンター線の赤はカウント数3, 青は6でケースBの場合である。

薄と見られる。絶対観測点より南東には近くにフラックスゲート磁力計が1台あるだけである。敷地外の南東方向で、白線円内でありながらカウント数3やカウント数6コンター線との間のところは、絶対観測点に影響を受けるが磁力計計測データだけでは大きさや位置が求められないことがあり得る領域であることを示している。

3.2 繰り返し観測での検知能力

女満別観測施設, 鹿屋観測施設では、敷地内のほぼ全域にわたり等間隔で全磁力計繰り返し観測点が設置されている。繰り返し観測のため、即時的な監視には向かないが、同様の方法で人工擾乱の検知範囲, 検知能力を調べてみる。ここでは連続観測しているフラックスゲート磁力計やプロトン磁力計等は含めずに繰り返し点観測点での全磁力値のみを用いた場合の結果を示す。連続観測している磁力計を含めた場合は、図5, 6の結果をたし合わせたものと同じになる。図9, 10の下図ケースBでは細かなヒダのようなコンター線が引かれている。これは全磁力計では3成分磁力計と比べて、計測値への大きさがより磁気モーメントの方向に影響されるためコンター線は複雑になりやすいこと、また磁気モーメントの方向は10度単位で計算しているため、その分の誤差も含まれているため滑らかな曲線でない部分がみられるものと思われる。それでも大まかな傾向は十分に知ることはできると考える。

女満別観測施設, 鹿屋観測施設ともに繰り返し観測点は構内一様にほぼ均等に配置されており、絶対観測点に影響する人工擾乱の検知範囲は概ね敷地内ではカバーされている。ただしケースBでは人工擾乱源が敷地内にあったとしても人工擾乱を受ける全磁力計がカウント6以上となる領域は狭い範囲に限られている。これは先ほど述べたように全磁力計では計測値に影響を与える磁場の方向が地球磁場方向に限られることも要因と考えられる。また、ここでも同じく0.1nT以上の異常値変動を捉えられるとして計算しているが、繰り返し観測では時間スケールが長いので、微小な変動を捉えることは現実的には難しいと思われる。繰り返し観測による人工擾乱検知は車両などの短期変動の人工擾乱よりも建築物等の長期で磁気モーメントの大きなものに適しており、連続観測データを補完する資料として用いるのがよい。

4. まとめ

前章3.1.で設定した条件で確認したように、おおむね敷地周辺での人工擾乱は検知できると思わ

れるが、人工擾乱源の磁気モーメントの大きさと磁力計配置の関係についてもう少し見ておきたい。ここでは磁力計は3成分磁力計のみで0.1nTまで測定でき、磁力計、人工擾乱源ともに同一平面にあり、例えば絶対観測点への人工擾乱を監視している状況を想定してみる。また人工擾乱源の磁気モーメントは距離Lで0.1nTの磁場を生じるものとする。

磁気モーメントが磁力計センサーの方向を向いていれば距離Lまで近づけば異常磁場を検知できるが方向によっては aL まで近づかないと検知できない。ここで a は係数で $\sim 0.6609 (= (2 \cdot 3^{1/2})^{-1/3})$ である。式中の $3^{1/2}$ は磁力計での異常値の大きさが0.1nTでも、その方向がセンサー軸方向から傾いていればその出力は0.1nT未満になることを考慮したものである。この場合、例えば $L \sim 150\text{m}$ なら $aL \sim 100\text{m}$ 程度である。磁力計単体では磁気モーメントの向きによってLから aL の距離に近づく何処かで異常磁場を検出できる。従って2つの磁力計が $2L$ 以上離れていると検知されずに擾乱源に通過されてしまうことになる。2つの磁力計間距離を $2aL$ まで近づけても磁気モーメントの向きをうまく調整していけば検知されずに通過してしまう場合もあり得る。空き缶などの小さな磁性体ではLが短いので、通常磁力計配置では微小磁性体の侵入を捉えられなくなることを示している。

磁力計間の距離を $2aL$ より縮めると両方の磁力計に異常変化が現れ、つまりカウント数6となり磁気モーメントの位置を計算できる領域が次第に拡がり、距離 aL では人工擾乱源が磁力計を結ぶ正三角形の中に入れば必ずカウント数6の領域に入るが、絶対観測点からの距離 aL をすべてカバーできるわけではない(図11)。原理的には絶対観測点のごく近傍に2つの磁力計を配置すれば距離 aL 内で人工擾乱源の位置と磁気モーメント大きさを計算できる領域を確保できることになる。しかし、磁力計間の距離が狭いと2つの磁力計の位置座標も計測値もほとんど同じになるが、分解能(せいぜい位置は0.1m, 計測値は0.1nT程度であろう)以下の違いは量子誤差となり、見かけ上、両者の差異はなくなるため精度の良い解析結果は望めない。また運用上でも例えば雷災などで同時に被災する可能性があるなど現実的ではない。女満別観測施設、鹿屋観測施設での実際の3成分磁力計間の距離を見てみると、70mから120m程度となっている。3章の設定は $L \sim 150\text{m}$ に相当するので、磁力計間距離は $2aL (\sim 200\text{m})$ 以下、むしろ aL に近いぐらいなので人工擾乱源が検知されずに通過されることはないが、例えば絶対観測点から半径Lをすべて

カウント6あるいはカウント3でもカバーできない領域が残ってしまうのは図5,6で示されたとおりである。

磁気モーメントの大きさ、位置を計算するためにはカウント数は3あるいは6以上必要で、図5,6と図9,10を比べて分かるように、その点では全磁力計よりも3成分磁力計が有利である。さらに全磁力計では東西方向に人工擾乱を受けても計測値に反映されにくいという欠点もある。しかし3成分磁力計の観測点の移設や増設は困難である。一方、全磁力計では比較的これらは容易、柔軟に行える。今後、例えば一時的な人工擾乱監視などでは両者の特質を考慮して運用することが重要であろう。

参考文献

- 福井史雄, 高田麻美, 全磁力による自動車の磁性影響試験, 地磁気観測所技術報告, **31**(1,2), 20-24, 1992.
- 永野哲郎, 北方盛徳, 鹿屋における車輛による擾乱磁場について, 地磁気観測所技術報告, **10**(2), 19-29, 1970.
- 大和田毅, 石井美樹, 熊坂信之, 脇野洋一, 池田清, 小池捷春, 自動車等の磁性検査結果, 地磁気観測所技術報告, **30**(3,4), 45-51, 1991.
- 徳本哲男, 中島新三郎, 大川隆志, 星野正史, 地磁気人工擾乱の把握, 地磁気観測所技術報告, **41**(3), 23-31, 2002.

**Detecting artificial magnetic disturbances at
Memambetsu and Kanoya
magnetic observatories**

by

Tetsuo TOKUMOTO¹, Fujio MUROMATSU¹ and Yoshitomo IKOMA²

¹Kakioka Magnetic Observatory

²Seismological and Volcanological Department, Japan Meteorological Agency

Received 11 December 2012; received in revised form 5 February 2013;

accepted 4 March 2013