

2013年の女満別観測施設の庁舎一部解体撤去工事に伴う 恒久的影響量の評価

長町信吾¹, 仰木淳平², 島村哲也², 高橋幸祐³, 藤井郁子⁴

¹地磁気観測所観測課, ²地磁気観測所技術課, ³気象庁地震火山部, ⁴気象大学校

2019年11月15日受領, 2019年12月13日受理, 2020年3月17日刊行

要 旨

2013年8月～10月にかけて女満別観測施設構内にある庁舎の一部解体撤去工事が行われた。撤去されたのは絶対観測点から約130mの距離にある庁舎の一部である。構内に複数配置された3成分磁力計および全磁力環境監視点のデータから擾乱源のモデル化を行い、絶対観測点における工事の影響量を推定した。より信頼度の高い影響量を算出するため、観測値の信頼区間の評価、擾乱源モデルの形状による影響、モデルにより得られた影響量の信頼区間の評価などの調査を行った結果、補正基準を超える擾乱があったと結論された。

1. はじめに

女満別観測施設は1952年より連続的に地磁気観測値を公表している。その60年余りの観測値は安定して精度が高く、IGRFをはじめとする主磁場モデル、国土地理院の磁気図やam指数の算出など、長期安定した観測値が必要な生産物に国内外で利用されている。

地磁気観測は、フラックスゲート磁力計等による連続観測と、月数回程度手動で行われる絶対観測で成り立っており、長期的な地磁気変化の把握には絶対観測が安定して行われることが重要である。もし人工的な原因で恒久的な観測環境の変化が生じた場合、長期的な観測精度の低下を招く恐れがある。そこで当所では、観測精度を維持するために、恒久的な擾乱が発生した場合は絶対観測点での影響を見積もり、HおよびZ成分で $\pm 0.3\text{nT}$ 、D成分で ± 0.03 を超える恒久的な擾乱があったと判断された場合、その擾乱量を補正している。

2013年8月～10月に女満別観測施設の庁舎の一部解体撤去工事が行われ、絶対観測の精度を保証するため絶対観測点での擾乱を評価する必要性が生じた。絶対観測点での影響を見積もるにあたっては、観測施設構内にある複数の連続観測に加えて、構内の全磁力環境監視点(以下、環境監視点と記載)等を利用して全磁力繰り返し観測を適宜行い、得られた観測データから擾乱源をモデル化して、絶対観測点で

の地磁気3成分の擾乱量を求めた。一方で、これまでの全磁力繰り返し観測の経験から全磁力観測値の95%信頼区間の幅が 0.3nT 程度であることがわかっており、かつ、観測結果から絶対観測点への影響がそれほど大きくないことも予想できたことから、十分な信頼度を持って補正基準 0.3nT を評価できる擾乱源モデルが得られたか、慎重に確認する必要がある。本報告では、庁舎の一部解体撤去工事期間中に得られた観測値の精査およびモデル化の詳細を述べ、絶対観測点での影響量について評価する。

2. 庁舎一部解体撤去工事の実施状況

女満別観測施設(図1)の庁舎の一部解体工事は2013年8月22日～10月1日にわたって行われ、庁舎のうち空中電気地電流観測室と浴室(図2)を撤去した。撤去した最大の建造物の空中電気地電流観測室は、 $19.2\text{m} \times 9.0\text{m}$ の平面を持ち(図3)、絶対観測点からの距離は約130mである。

工事は、8月22日の空中電気地電流観測室内に集積された物品の搬出をもって始まり、地電流信号線の経路変更を経て、空中電気地電流観測室・浴室解体撤去、新玄関取り付けを行った。作業日誌から抜粋した主な工事内容を表1に示す。

3. 観測

女満別観測施設構内では5地点の地磁気3成分

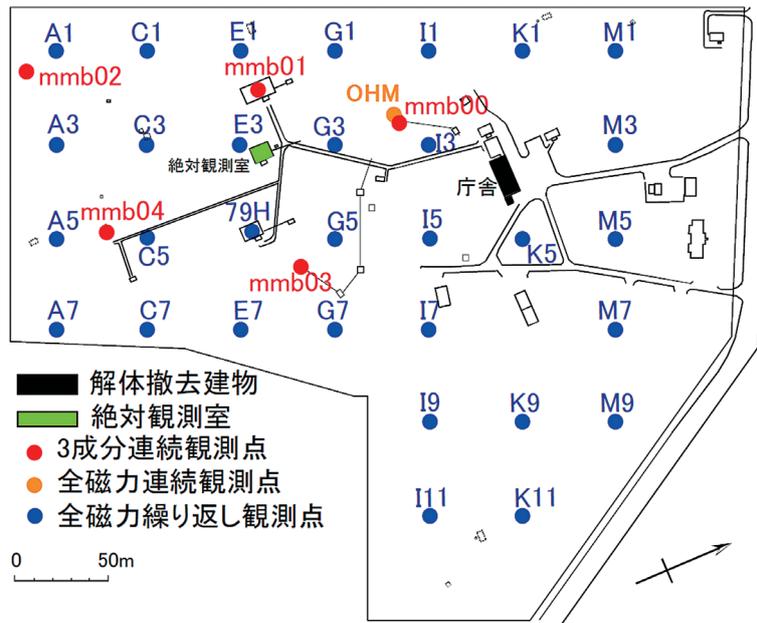


図1 女満別観測施設の庁舎および観測点配置図



図2 南側から見た庁舎群。撤去されたのは空中電気地電流観測室と浴室(図中の青枠)。

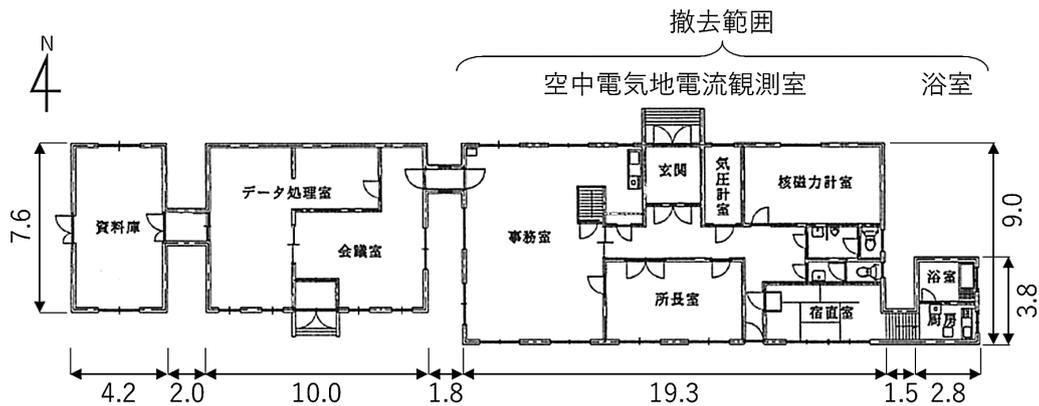


図3 庁舎群平面図(寸法の単位はメートル)

連続観測, 1地点での全磁力連続観測に加え, 50mメッシュで配置されている全磁力環境監視観測点31点において, 月1回の全磁力繰り返し観測を行っている(図1)。工事期間とその前後1カ月間(7月~10月)は, 観測回数を月2回に増やし, 工事の途中

での全磁力分布を記録した。観測実施日は, 7月3日, 19日, 8月6日, 23日, 9月3日, 19日, 10月7日である。一方で, 絶対観測点では観測が行われなかったため, 絶対観測点での影響量はこれらの連続観測点と環境監視観測点での実測値から推測する

表1 解体工事の実施状況。黄色の行は物の出入りが作業日誌に記録された日。解析期間の項目は6章で述べる解析期間に対応している。

2013年	環境監視 観測	絶対 観測	解体工事内容	解析期間
8月6日	○			①
...				
21日		○		
22日			空電室内物品搬出	
23日	○		空電室内物品搬出	②
24日				
25日				
26日			管路工事	
27日			地電流信号線の経路変更、NTT回線・警備用機器移設 (脚立6台・廃棄物収集かご4台持込)	
28日			空電室(天井・壁)及び浴室解体	
29日			空電室(天井・壁)及び浴室解体	
30日			空電室(天井・壁)及び浴室解体、地電流信号線の経路変更	
31日			空電室(天井・壁)及び浴室解体	
9月1日				
2日			脚立、廃棄物収集かご搬出	③
3日	○	○		
4日			上下水道切断	
5日			外部足場設置、空電室(外壁)解体	
6日			足場設置、空電室(外壁)解体、廃材搬出	
7日			空電室(外壁)解体、廃材搬出	
8日				
9日			空電室(基礎部)解体、整地、足場撤去	
10日				
11日				
12日			新玄関取付工事	
13日			新玄関取付工事	
14日			新玄関取付工事	
15日			新玄関取付工事	
16日			新玄関取付工事	
17日			新玄関取付工事	
18日		○		
19日	○			
...				
10月7日	○			

※表中では空中電気地電流観測室を空電室と略記した。

必要がある。

各観測点では、10秒間隔で5回程度の測定を行い平均を求めている。図4に、8月6日の値を基準とした、8月23日、9月3日、9月19日における各全磁力環境監視観測点での全磁力値を示す。全般的に、工事が進捗するに従い、全磁力差は累積して大きくなっているが、解体した庁舎に最も近いK5観測点で数10nT、2番目に近いI3観測点で数nTに達する

以外は、1nT未満の振幅の観測点がほとんどであった。絶対観測点に近いE3観測点での観測値は、8月23日～9月19日では0.0～0.2nTであった。

全磁力変化の分布は、特に工事の最初のころは明瞭な正と負の領域が見えるわけではなく、庁舎から離れた敷地の端の観測点で振幅が大きいなど、工事の影響以外の原因を示唆する部分もある。

3成分連続観測点については、庁舎から最も遠い

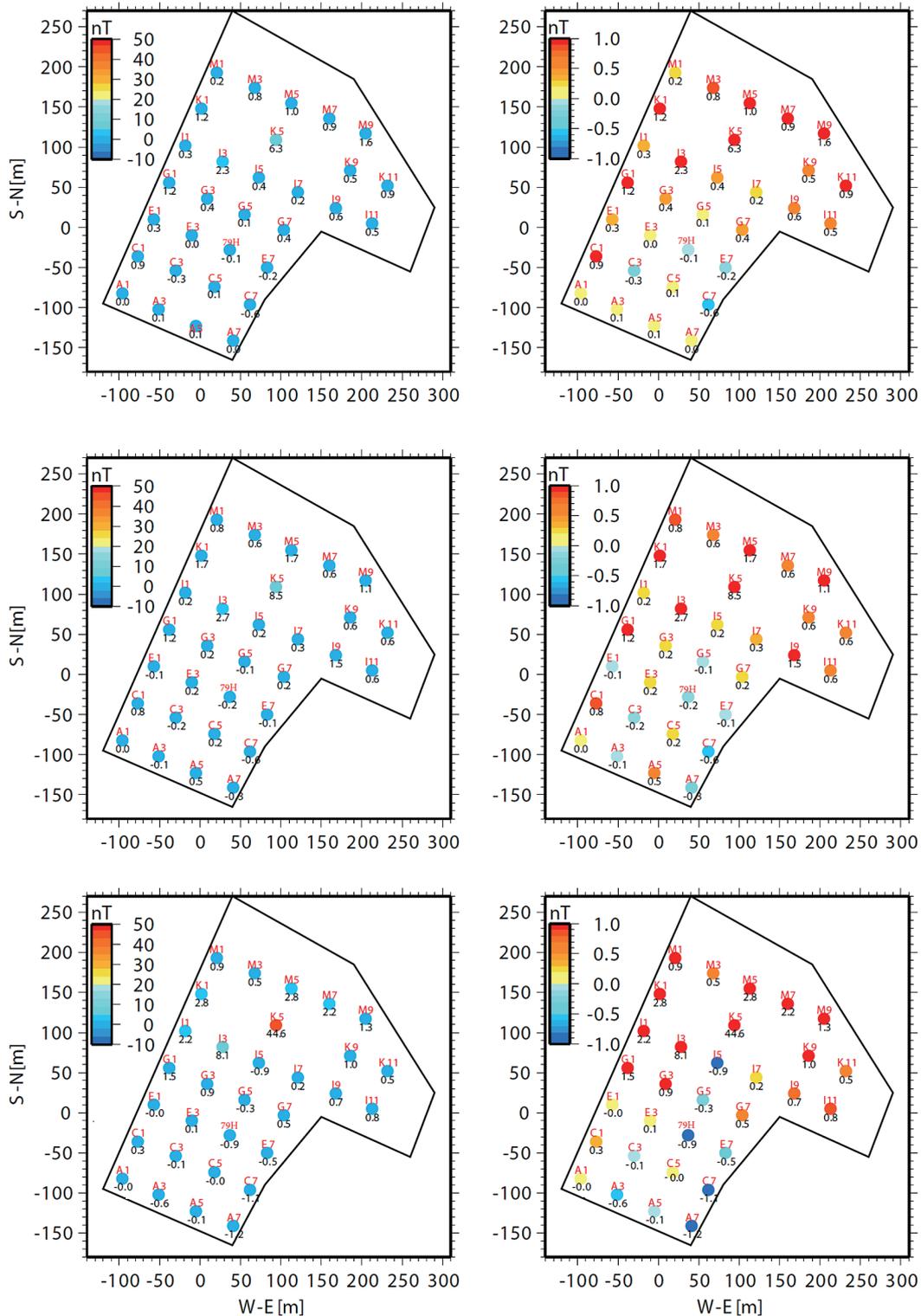


図4 環境監視観測点における工事前の全磁力値と工事中及び工事後の全磁力値の差。上段：8/6と8/23の差，中段：8/6と9/3の差，下段：8/6と9/19の差。左列は-10～50nTの範囲で観測値を色分け表示したもの，右列は-1.0～1.0nTの範囲を拡大したもの。赤字は観測地点名，黒字は差分の値を示す。

mmb02での3成分値を基準とした，2013年8月17日～10月7日の夜間毎日平均値(15:00～17:59(UT)の毎秒値の平均)を図5に示す。各成分とも絶対観測を反映していないため，基線値の変動は補正されておらず，期間を通じて緩やかな時間変動が見られ

る。その中で，空中電気地電流観測室の外壁と基礎部の撤去が行われた9月5～7日には，工事現場に近いmmb00で1nTを超える変化があることがわかる。

全磁力，地磁気3成分ともに大きな振幅の変化を

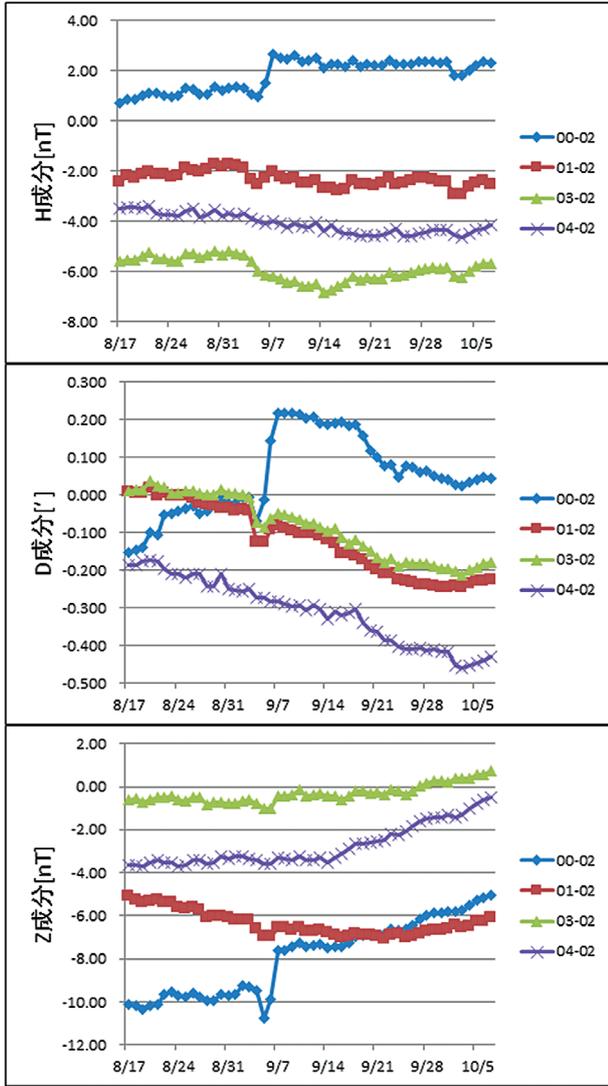


図5 2013年8月17日～10月7日の女満別観測施設構内での夜間毎日平均値。上から順にH, D, Z成分。各成分とも、15:00-17:59(UT)で、mmb00, mmb01, mmb03, mmb04観測点での毎秒値とmmb02観測点での毎秒値の差を平均した。

示す観測点が少ないのは、(1)観測点配置が庁舎の近傍で疎になっており、大きな変化が期待できる場所で観測していない、(2)庁舎から離れると影響量は急速に小さくなる、の2つの理由があると考えられる。(2)より解体庁舎のモーメントは比較的小さいことが予想され、130m離れた絶対観測点付近での観測値も小さいが、補正基準レベル(0.3nT)で影響の有無を判断するには、観測値の信頼区間を考慮して、(1)から懸念される擾乱源の推定精度について検討した上で、精密なモデリングを行う必要があると考えられる。

4. データ処理

前章で慎重な解析が必要であることが示唆されたので、観測値について確度をあげるため、不要な変

化除去と各データの信頼区間の確定を行う。

4.1 全磁力環境監視点データ

環境監視点では10秒間隔で5回程度の全磁力測定を行っている。環境監視観測中の地磁気日変化の影響を取り除くため、全磁力連続観測点での同時刻の観測値との差をとった上で平均し、絶対観測点と全磁力連続観測点との地点差を加えることで、絶対観測点を基準とした全磁力値としている。

全磁力値の95%信頼区間を計算することを考える。一般に、 n 個の観測値 x_i ($i=1, \dots, n$)から求められた平均値 \bar{x} の95%信頼区間の幅 ε は、

$$\varepsilon = \frac{t \times \sigma}{\sqrt{n-1}}$$

で求まる。ここで、 σ は x_i の標本標準偏差、 t は自由度 $n-1$ の信頼係数95%に対応するT分布の値である。

ある環境監視点での i 回目の観測値を F_i 、総計測数を n 、 i 回目の観測と同時刻の全磁力連続観測点での観測値を f_i とすると、環境監視点と全磁力連続観測点の全磁力差 d の推定値は標本平均 \bar{d} 、すなわち、

$$\bar{d} = \sum_{i=1}^n (F_i - f_i) / n$$

となる。 \bar{d} に、絶対観測点と全磁力連続観測点の地点差 Δ を加え、

$$D = \bar{d} + \Delta$$

全磁力値 D を得る。 Δ は繰り返し観測ごとにあらかじめ測定して決定しておく量で、同時刻に計測した、絶対観測点での全磁力 f'_j と全磁力観測点での全磁力 f_j から

$$\Delta = \sum_{j=1}^m (f'_j - f_j) / m$$

と定義されている。 m は使用した総データ数で、通常、80個程度である。

全磁力値 D の場合は、 $m \gg n$ のため(\bar{d} の標準偏差 $s \gg (\Delta$ の標準偏差 s_0)となっているので、 Δ を定数と考えて、自由度は変わらず、ばらつきだけ加わったとみなし、95%信頼区間の幅を、

$$e = \frac{t \times \sqrt{s^2 + s_0^2}}{\sqrt{n-1}}$$

のように計算した。もし、 \bar{d} と Δ がどちらも変数と

考えるなら,

$$e = t \times \sqrt{\frac{s^2}{n-1} + \frac{s_0^2}{m-1}}$$

となる. t 値および標本標準偏差はエクセルの T.INV.2T (0.05, $n-1$) および STDEV.P 関数を用いて計算した (エクセルの STDEV.P 関数は

$$s = \sqrt{\sum_{i=1}^n (d_i - \bar{d})^2 / n} \text{ だが, 本来は不変推定値}$$

$$s' = \sqrt{\sum_{i=1}^n (d_i - \bar{d})^2 / (n-1)} \text{ のほうが望ましい).}$$

環境監視点31観測点で算出された95%信頼区間の幅 e は, 概ね0.1~0.3nT程度であった. 図6に, 環境監視点31点での全磁力値 D を示す. 95%信頼区間をエラーバーで表現した.

次に, 全磁力値 D から, 明らかに工事と関係な

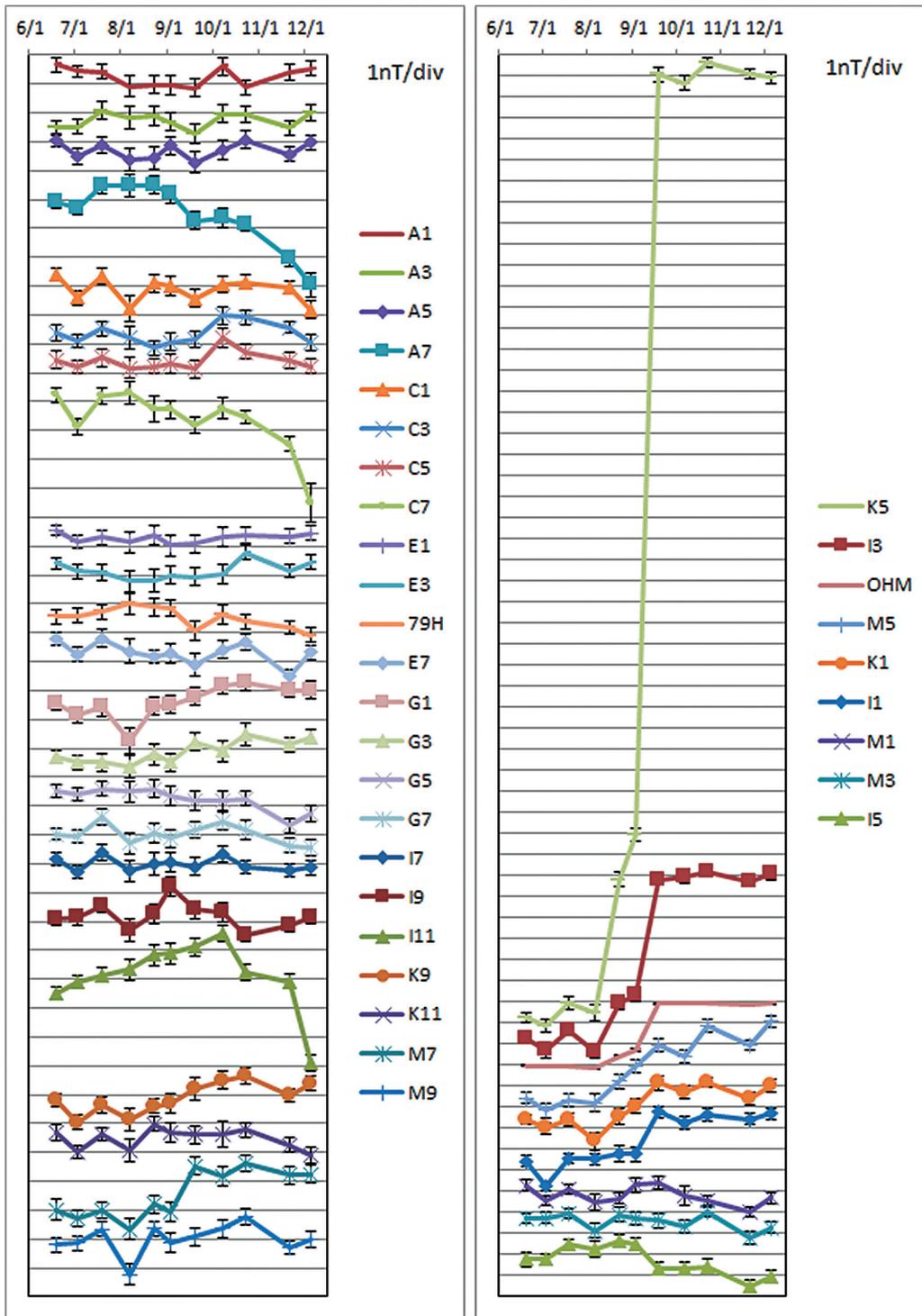


図6 2013年6月から12月までの環境監視点における全磁力値 (絶対観測点を基準) の時系列変化. エラーバーは95%信頼区間.

表2 各地点の計算期間

観測点	計算期間	備考
A1~A7,C1~C7	2010~2012年	
E1~E7,G1,G5,G7, I1~I11,M1,M7,M9	2010~2011年	2012年は異常値多数のため不使用。
G3,79H,M3,M5	2011年	2010年はデータが少ないため不使用。 2012年は異常値多数のため不使用。
K1~K11	2011年	2010年と2011年の間に階段状変化がある。 2012年は異常値多数のため不使用。

い変化を除去することを考える。

環境監視点での全磁力観測は通常でも4月から11月の季節においては1カ月に1回の頻度で定期的に行われているため、過去のデータの蓄積がある。数年間の時系列データからわずかに年周変化していることが観察できたので、年周変化の除去を行った。年周変化算出の際に使用した全磁力データは、2010年から2012年の3年分の繰り返し観測値である。ただし、観測点によっては、異常値も混入しているため、3年よりも短い期間で算出している。各点での算出に使った期間を表2に示す。

年周変化を周期365.25日の正弦波と仮定し、以下の手順で除去した。

- 計算期間のデータを直線近似して永年変化を計算する(図7上)。計算期間が1年間のみの場合は平均値を計算する。明瞭なギャップのある年や観測日数の少ない年は計算から除く。計算にはエクセルの線形近似の機能を使った。
- 元データから(a)で計算した永年変化(計算期間が1年間のみの場合は平均値)を除去する(図7中)。
- 最小自乗法を用いて年周変化の最適解を計算する(図7下)。
- (c)で得られた年周変化を2013年まで外挿し、2010年~2013年の元データから年周変化を除去する(図7下)。

年周変化を除去した全磁力値を図8に示す。推定された年周変化の振幅は、各環境監視点により異なり、0.1~2.2nT程度であった。図6と図8を比較すると、変化の振幅が小さくなっていることがわかる。なお、年周変化の除去に伴う誤差は小さいとみなして見積もらなかったため、図8のエラーバーは年周変化除去前の95%信頼区間である。そのため、エラーバーは下限値となる。

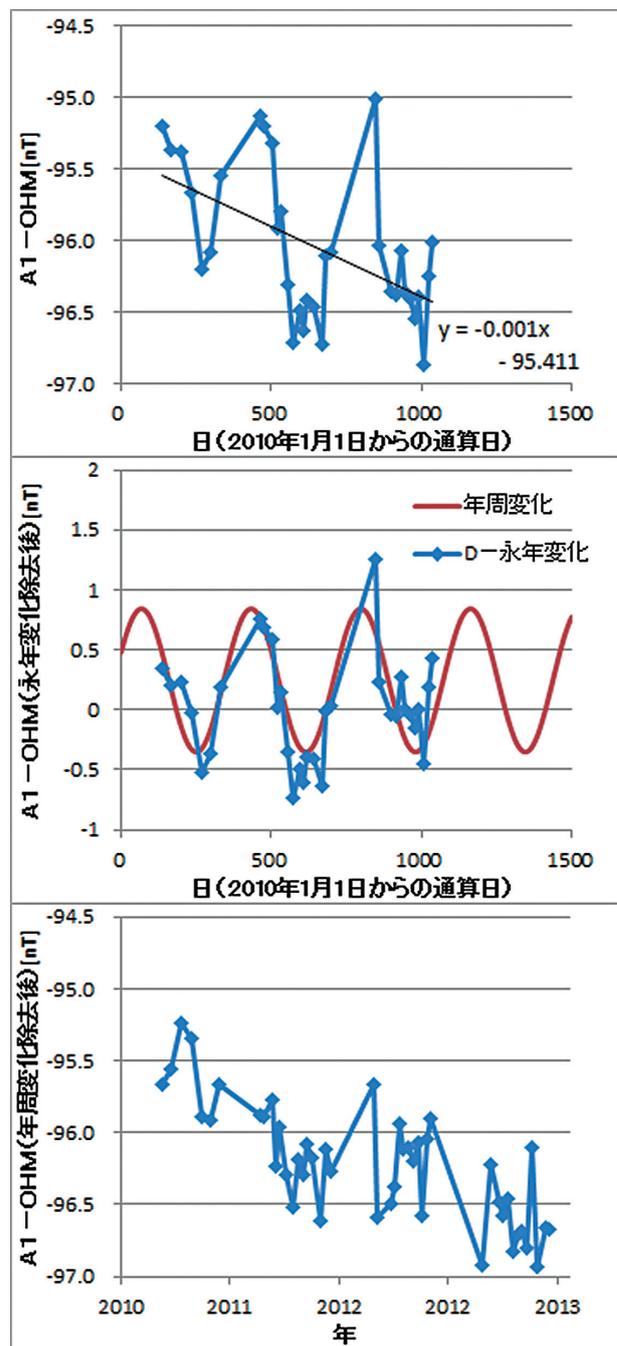


図7 A1観測点における年周変化除去過程

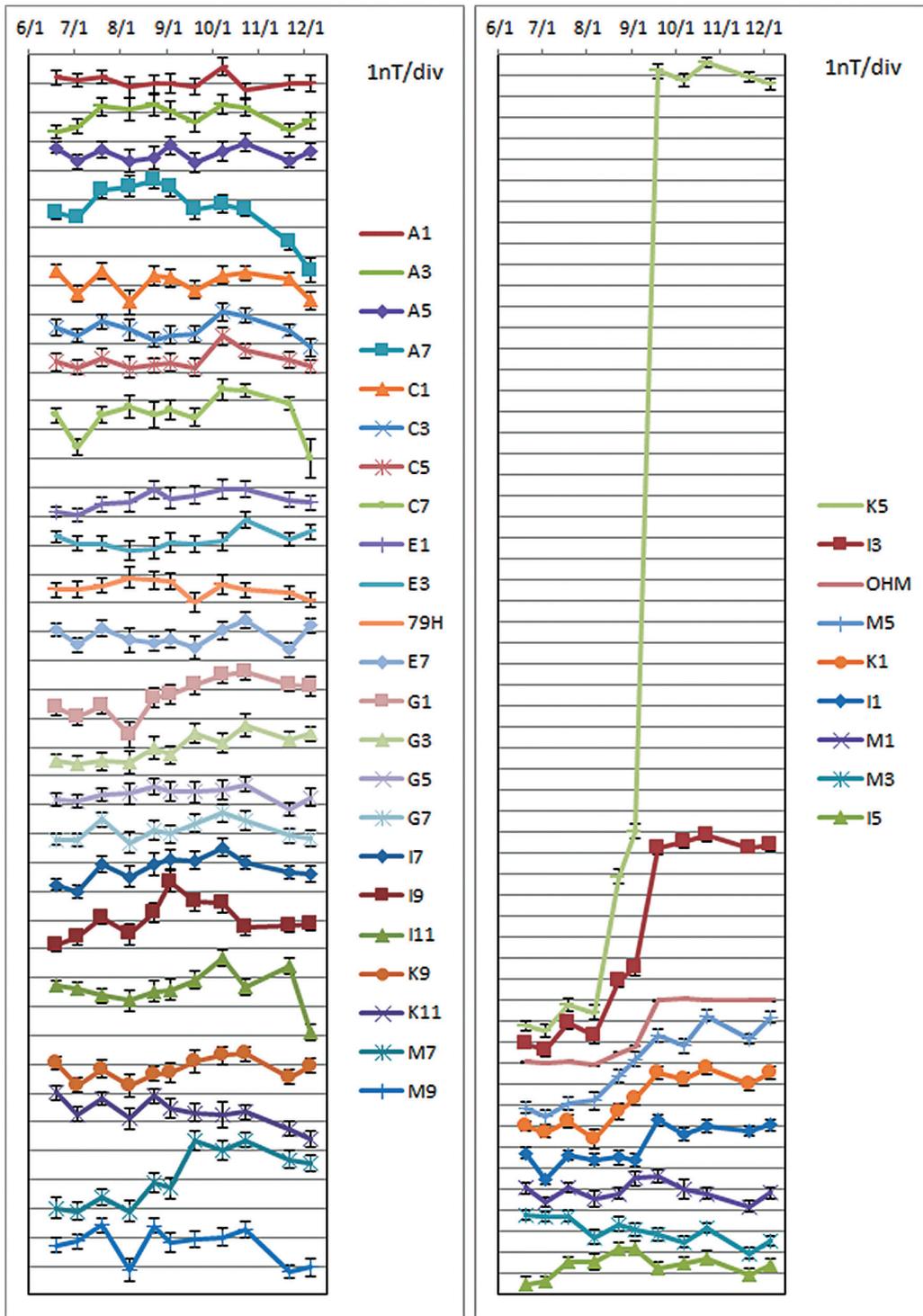


図8 2013年6月から12月までの環境監視点における全磁力値から年周変化を除去したもの(絶対観測点を基準)。エラーバーは図6と同じ値。

4.2 3成分連続観測点データ

フラックスゲート磁力計で計測した地磁気データには温度ドリフト等のゆっくりとした変化が含まれており、工事開始前と数日後の工事終了後のデータを単純比較しても、工事とドリフトの影響が区別できない。そこで、毎日の夜間値の差に注目して、ドリフトの影響を排除することを考えた(図9)。

まず、構内にあるフラックスゲート磁力計4

台(mmb00, mmb01, mmb03, mmb04)の各成分について、15:00~17:59(UT)の毎秒値と同時刻にmmb02で計測した毎秒値との差を計算し、平均して毎日の夜間値差を求めた。例として表3にmmb04とmmb02との差を示す。ここで使用するデータ数は10800個と多いため、夜間値差の標準偏差が非常に小さくなり95%信頼区間の幅も小さくなる。このことはmmb00, mmb01, mmb03において

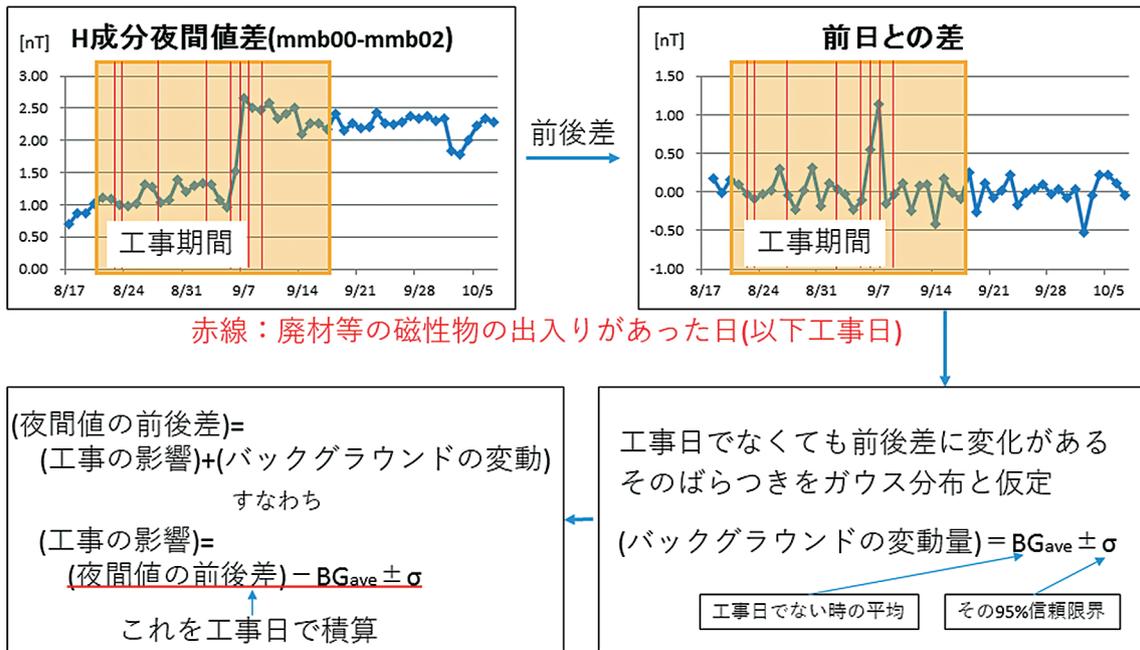


図9 工事による地磁気3成分への影響量計算の流れ

表3 2013年9月4日～9日における mmb04と mmb02の夜間値差の95%信頼区間

	H(nT)	Z(nT)	D(′)
9月4日	-3.87 ± 5.91E-4	-3.41 ± 6.12E-4	-0.232 ± 1.00E-4
5日	-3.98 ± 6.14E-4	-3.61 ± 5.97E-4	-0.233 ± 8.44E-5
6日	-4.07 ± 8.97E-4	-3.59 ± 6.23E-4	-0.242 ± 8.36E-5
7日	-3.99 ± 7.05E-4	-3.29 ± 6.08E-4	-0.242 ± 9.53E-5
8日	-4.10 ± 6.99E-4	-3.35 ± 6.72E-4	-0.250 ± 9.63E-5
9日	-4.22 ± 7.68E-4	-3.41 ± 6.23E-4	-0.255 ± 9.45E-5

表4 地磁気H, D, Z成分のバックグラウンド変動平均値の95%信頼区間 (mmb02基準)

	mmb00	mmb01	mmb03	mmb04
H成分(nT)	0.01 ± 0.07	0.01 ± 0.07	0.04 ± 0.05	0.02 ± 0.05
Z成分(nT)	0.08 ± 0.04	0.02 ± 0.04	0.04 ± 0.04	0.10 ± 0.05
D成分(′)	-0.004 ± 0.007	-0.003 ± 0.003	-0.002 ± 0.004	-0.005 ± 0.005

も同様であるので、以後はここで計算される95%信頼区間は無視する。

次に、夜間値差について、前日との差を計算し、1日分の変化を求めた。1日分の変化を見ると工事の有無にかかわらず変動しているが、温度ドリフトは1日ではほとんど変わらないと考えられるので、別の原因によるものが主である。そこで、工事がなかった日の1日分の変化がランダムに変動すると仮定して、これをバックグラウンドの変動と考え、平均値と標準偏差を求めた(表4)。平均値計算に

用いたのは、工事の影響のない8/17～8/21および9/19～10/7の計24個の夜間値である。1日分の変化から平均値を除去すれば、ゆるやかなドリフトなどの定常的な変化が除かれ、ランダムな変化だけになる。

工事の影響量は、平均値を除いた1日分の変化を用いて推定した。作業日誌に物の出入りがあったと記録された日(表1の黄色)から、工事を以下の3つの期間に分けた。

(A) 8/22, 23の不用品搬出

表5 各期間での工事による変化の推定 (mmb02基準)

H 成分(nT)				
	mmb00	mmb01	mmb03	mmb04
(A) 8/22,23	-0.14 ± 0.10	-0.14 ± 0.10	-0.31 ± 0.07	-0.38 ± 0.06
(B) 8/27~9/2	-0.03 ± 0.10	-0.16 ± 0.10	-0.17 ± 0.07	-0.08 ± 0.06
(C) 9/5~9/9	+1.49 ± 0.14	+0.11 ± 0.14	-0.90 ± 0.11	-0.32 ± 0.09
(A)+(B)	-0.17 ± 0.14	-0.30 ± 0.14	-0.48 ± 0.11	-0.47 ± 0.09
(B)+(C)	+1.46 ± 0.17	-0.06 ± 0.17	-1.08 ± 0.13	-0.41 ± 0.11
(A)+(B)+(C)	+1.32 ± 0.19	-0.20 ± 0.20	-1.38 ± 0.15	-0.79 ± 0.13
Z 成分(nT)				
	mmb00	mmb01	mmb03	mmb04
(A) 8/22,23	+0.42 ± 0.06	-0.18 ± 0.06	-0.02 ± 0.06	-0.37 ± 0.06
(B) 8/27~9/2	+0.02 ± 0.06	-0.12 ± 0.06	-0.02 ± 0.06	-0.25 ± 0.06
(C) 9/5~9/9	+1.78 ± 0.08	-0.08 ± 0.09	+0.21 ± 0.09	-0.37 ± 0.09
(A)+(B)	+0.44 ± 0.08	-0.29 ± 0.09	-0.05 ± 0.09	-0.61 ± 0.09
(B)+(C)	+1.80 ± 0.10	-0.20 ± 0.11	+0.18 ± 0.11	-0.61 ± 0.11
(A)+(B)+(C)	+2.22 ± 0.12	-0.38 ± 0.13	+0.15 ± 0.13	-0.98 ± 0.13
D 成分(′)				
	mmb00	mmb01	mmb03	mmb04
(A) 8/22,23	+0.067 ± 0.010	+0.006 ± 0.005	-0.016 ± 0.006	-0.023 ± 0.007
(B) 8/27~9/2	+0.005 ± 0.010	-0.006 ± 0.005	-0.007 ± 0.006	+0.004 ± 0.007
(C) 9/5~9/9	+0.305 ± 0.014	+0.049 ± 0.006	+0.024 ± 0.009	+0.005 ± 0.010
(A)+(B)	+0.071 ± 0.014	0.000 ± 0.006	-0.023 ± 0.009	-0.020 ± 0.010
(B)+(C)	+0.310 ± 0.018	+0.043 ± 0.008	+0.016 ± 0.011	+0.009 ± 0.013
(A)+(B)+(C)	+0.376 ± 0.020	+0.049 ± 0.009	0.000 ± 0.013	-0.015 ± 0.015

(B) 8/27~9/2の内部解体, 浴室解体

(C) 9/5~9/9の外壁解体

それぞれの期間の中に含まれる, 表1で黄色に色づけされた日の変動量を積算し, 工事の影響による変化とした. 工事の影響量の95%信頼区間の幅は, バックグラウンド変化の積算によるとして計算した. 各期間における, 工事による磁場変化の推定値を表5に示す.

表5をみると, 95%信頼区間の幅は補正基準に比べて十分小さくなっており, 信頼性の高い推定値が得られたように見えるが, 庁舎から遠い観測点での値のほうが近傍の点より変化の振幅が有意に大きいなど, 説明しづらい特徴がある. 評価できていない誤差要因があるのか, 夜間値差の前後差から工事の影響を推定する方法に欠点があるのか, 現時点ではよくわからないが, 表5の数値はかなり楽観的な見積もりであることが強く示唆される.

5. モデル化の準備

前章で確定した磁場観測値から, 庁舎解体工事によって生じた磁場をモデル化するにあたり, まずはモデルの要件を調査する. 調べたのは, 擾乱源の形状の影響と観測点網の擾乱源に対する推定能力(以下感度という), の2点である.

5.1 擾乱源の形状の影響

磁性体を作る磁場を考えると, 観測点が磁性体から十分に離れると, 磁性体の形状を識別できなくなり, 磁性体の持つ総磁気モーメントに等しい磁気双極子を磁性体の重心においた場合と同一に扱える.

今回の磁場観測点網と解体された庁舎の位置関係を見ると(図1), 庁舎の大きさが20m程度, 環境監視点の間隔が50mであり, 庁舎の近くの観測点は庁舎の規模に比べて十分離れているとはいいがたい. 一方で, 庁舎の近傍では観測点密度が低かったという事実もあり, 観測点での磁場が擾乱源の形状

をどの程度反映しているのか確認して、適切な擾乱源モデルの形状を決めたほうがよい。

そこで、庁舎が、1点の磁気双極子、一様に磁化した直方体、中が空洞で壁が一様に磁化した直方体、の3通りに近似できる場合を想定し、それぞれの場合に観測施設敷地内での磁場を計算し、空間分布の特徴を調べた。

まず磁気双極子の場合の磁気モーメントを、9月3日～9月19日に観測された磁場変化分布から *mydist* (徳本他, 2002) によって推定された値を使用することとした。その磁気モーメント (単位: Am^2) は、東西成分を M_x 、南北成分を M_y 及び鉛直成分を M_z として、 $(M_x, M_y, M_z) = (1.31\text{E} + 2, 6.17\text{E} + 3, 6.16\text{E} + 3)$ であった。直方体の場合は、庁舎の図面 (図3) をもとに東西19.2m、南北9.0m、高さ4mの形状とし (図10)、一様に磁化していると仮定して、総モーメントが双極子モーメントと等しくなるように磁化を決定した。中が空洞の箱型直方体の場合は、直方体の内部に逆向きの磁化を持つ一回り小さい直方体を重ねることで、壁の厚さ30cmの箱を再現した。壁が持つ総磁気モーメントは、双極子と等しい。

磁気双極子モーメントの位置は、絶対観測点を原点とし東を X 軸の正方向とした右手系の座標で、 $(65.7\text{m}, 108.5\text{m}, -1.2\text{m})$ とした。これは *mydist* の推定値に基づいており、実際の庁舎の中心位置と概ね一致している。直方体と箱については、重心が双極子の位置になるようにした。

上述の3つの場合について、絶対観測点の高さ ($Z = 0$) での地磁気 H , D , Z , F 成分を計算した。

図11に直方体の場合を示す。直方体近傍で大きな振幅を示すが、直方体から離れるにつれ、緩やかで小さい変化になる。 H , D , F 成分では正の変化の領域と負の変化の領域が存在し、 Z 成分では正の領域だけがある。

双極子と箱型の場合も、大局的には直方体と類似の空間分布を示す。直方体の作る磁場との差を計算し、直方体の場合とどのような違いがあるかを見ることにした (図12, 13)。双極子の場合、概ね半径70m以内の範囲で0.1nTの差、概ね半径30m以内で1nTの差がでた。実際に観測した成分で0.1nTあるいは0.01'の差があるとされたのは、庁舎に最も近い K5観測点の F 成分 (8.14nT) と *mmb00* 観測点の D 成分 (0.011') のみであった。絶対観測点まで離れると、その差は0.001nTのオーダーとなる。

H , D , F 成分の差の空間パターンからは、双極子と直方体では正または負の領域の大きさがわずかに異なっており、正負の領域の境目となる変化ゼロ

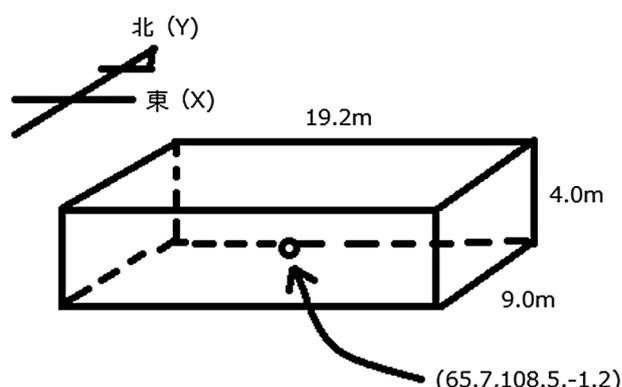


図10 直方体イメージ

の線の位置に違いがあることが示唆される。 Z 成分の場合は、双極子と直方体で値の極性には違いがない。前章でみたように、3成分観測で推定された擾乱量の Z 成分は *mmb00* 以外は負の値であったので、双極子あるいは直方体の擾乱源から推測される擾乱量と極性が異なっている。擾乱源がここに想定したものとかけ離れている可能性よりは、擾乱量見積りのエラーが大きい可能性のほうが高いように思われる。

箱型の場合は、直方体型と0.1nT以上の差が出たのは庁舎のごく近傍に限られ、最も大きな振幅を示したのは K5観測点での約1 nTである (図13)。中が空洞か否かは、今回の観測からは区別できないと考えられる。

直方体と双極子が観測から区別できるかを考える。*mmb00* の D 成分で0.01'の差は観測で検出するのは難しいと思われるが、K5観測点の F 成分で約8nTの差は観測値の約10%程度であり十分検出可能であろう。つまり、直方体か双極子かの違いを反映している観測は、実質的に K5観測点の F 成分のみとなる。

しかしながら、図12～13でわかるように、K5観測点近傍では磁場の勾配がきつく、他の観測点の近傍では勾配が緩やかになっていることから、磁性体の位置を少し動かすだけで他の観測点にほとんど影響を与えずに K5観測点での F 成分の値を数 nT 変化させることも可能であろうと予想される。したがって、全観測点で似たような値を示す擾乱源は、直方体、双極子のどちらでも得られる可能性がある。

また、直方体と双極子でゼロ値の位置がわずかに違うと考えられるが、観測点の位置からして、その差を検出するのは難しいであろう。

以上の結果から、今回の観測には擾乱源の形状の影響が含まれる可能性があるが、観測点配置の問題から、それを解像できるかどうか明確ではない。かといって、擾乱源の形状を双極子だけにしてしまう

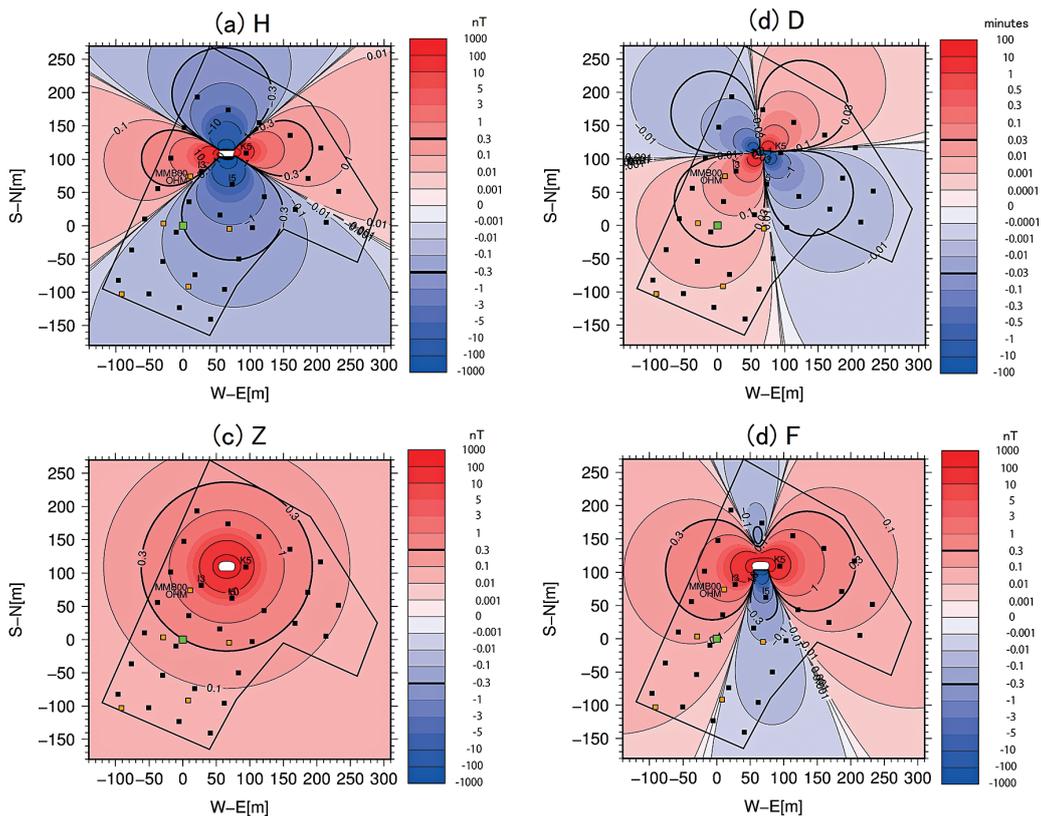


図11 庁舎位置に置いた、一様に磁化した直方体を作る磁場
 (a) H成分 (nT), (b) D成分 (′), (c) Z成分 (nT), (d) F成分 (nT) の空間分布。

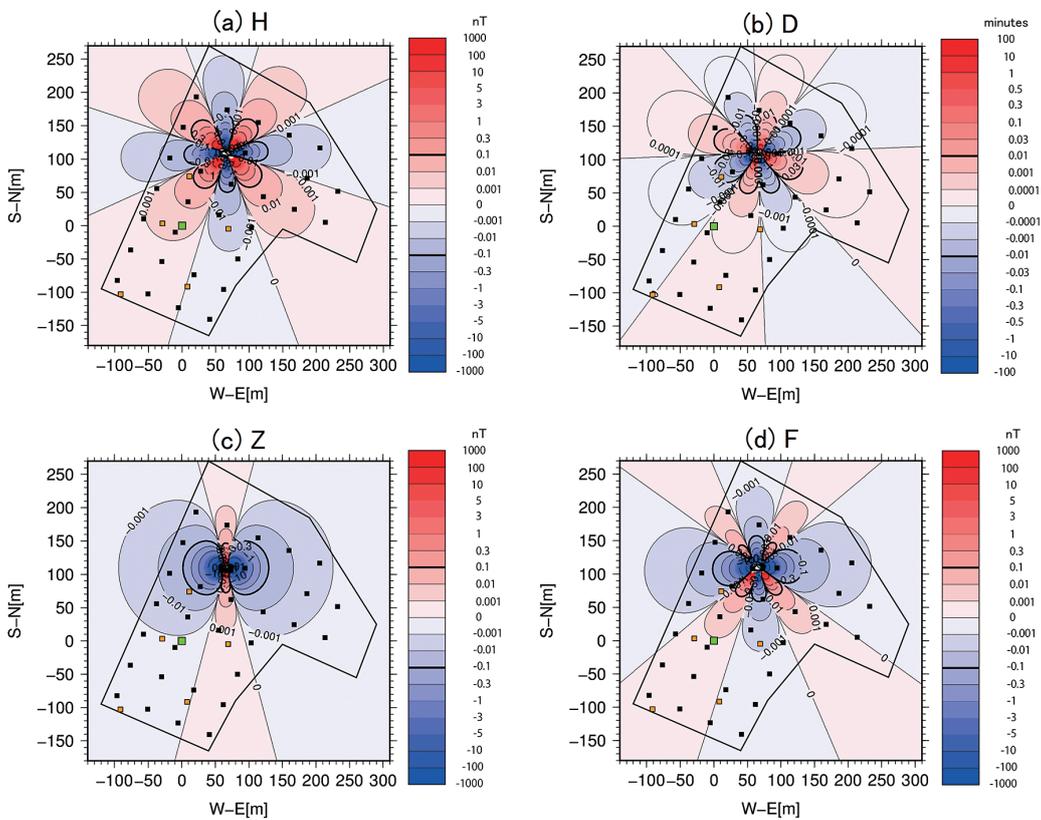


図12 庁舎位置に置いた、磁気双極子と一様に磁化した直方体を作る磁場の差
 (a) H成分 (nT), (b) D成分 (′), (c) Z成分 (nT), (d) F成分 (nT) の空間分布。

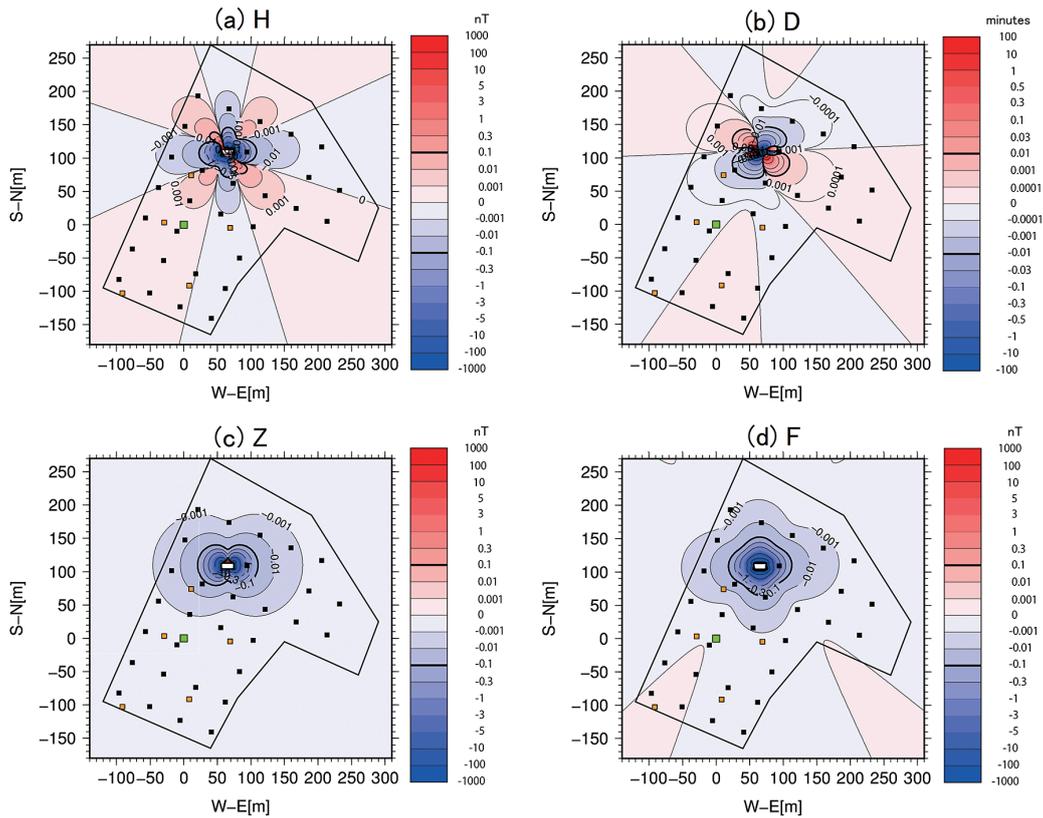


図13 庁舎位置に置いた、中が空洞の直方体と一様に磁化した直方体を作る磁場の差
(a) H成分 (nT), (b) D成分 (′), (c) Z成分 (nT), (d) F成分 (nT) の空間分布。

と、磁気モーメントや位置の推定にわずかなずれが生じて、絶対観測点での振幅がしきい値 (0.3nTあるいは0.01′) を越えているかどうかの判断に影響する恐れもある。そのため、擾乱源の形状については直方体と双極子の両方の場合を解析することにする。

5.2 観測網から検知できる磁気モーメント

前節での議論から、特徴的な磁場分布を示す領域に観測点が足りず、擾乱源を解像できるか明確でなかったため、今回の観測点網で既知の擾乱源を推定できるかを試した。

手順は以下の通り、庁舎位置に適切な磁気モーメントを持った双極子あるいは直方体を置き擾乱源とする (図14中のA)。直方体は図10に示された形状を持つ。環境監視点と3成分観測点に擾乱源が作る全磁力と地磁気3成分の変化をそれぞれ計算する。全磁力変化の計算には、2012年の年平均値 (F: 49714nT, D: -8.81°, I: 58.27°) を敷地全体で一定値の背景磁場として使用した。観測誤差として平均0、標準偏差0.3の乱数を発生させ、各点の磁場に加えて疑似データセットとする。疑似データセットに対し、擾乱源の位置とモーメントを逆解析する。

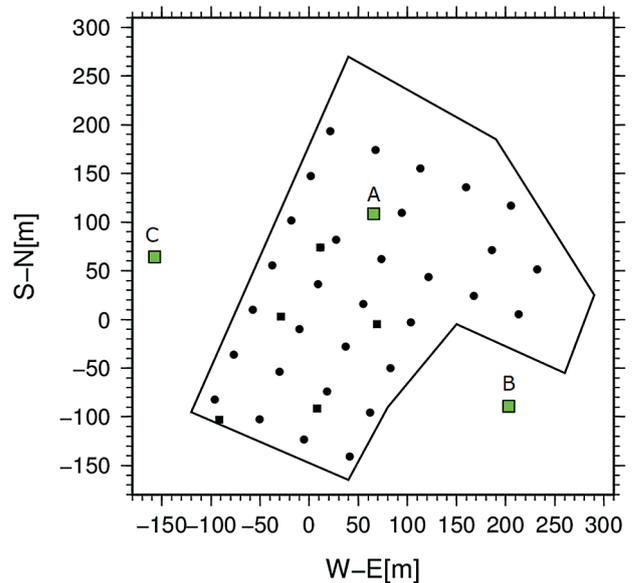


図14 テスト擾乱源位置 (緑の四角)

逆解析は、双極子の場合は `mydist`、直方体の場合には自作のグリッドサーチソフトを用いた。

表6に磁気双極子の場合の逆解析結果を示す。擾乱源の位置と磁気モーメントも示してある。残差は、`mydist` が出力する残差自乗和であるため、一般には観測点数が多い場合のほうが大きくなることに注

意する必要がある。逆解析に用いたデータは、(a) 全観測点の全成分、(b) 全観測点の F 成分と擾乱源に近い 3 観測点 (mmb00, mmb01, mmb03) の 3 成分、(c) 全観測点の F 成分と mmb00 の 3 成分、(d) 全観測点の F 成分、の 4 通りである。mydist は、求めたパラメーターの信頼区間を出力しないので、全観測点の全成分の場合のみジャックナイフ法 (付録) を手動で適用して信頼区間を計算した。また、F 成分のみの場合は、ばらつき具合の参考にするため、乱数を変えて 4 種類の疑似データセットを作り、4 通りの解を求めた。

表 6 を見ると、すべての場合について解は全成分の信頼区間内におさまっている。モーメントの信頼区間の幅は 20% 程度、位置の信頼区間の幅は Z 成分を除いて 5% 程度で、実際に置いた擾乱源のパラメーターを範囲に含んでいる。モーメントのばらつきが比較的大きいが、残差は誤差と成分数から考えると大きくないので、モーメントの値が変わっても

磁場の値には大差がない観測点が多数ある、言い換えると、モーメントに対する感度はあまり高くないということだろう。ばらつきからすると、F 成分だけの場合でも、著しく推定が悪くなるわけではないように思われる。

次に直方体の場合を調べた結果を表 7 に示す。直方体の重心を双極子の位置に置き、総磁気モーメントを双極子と同じにした。F 成分のみの場合を 3 通り計算したところ、双極子の場合と類似した結果が得られたので、3 成分観測を用いた場合は省略した。

比較のため、敷地外に適当な磁気モーメントを置いた場合について調べた。擾乱源は、敷地東側 (図 14 中の B)、または西側 (図 14 中の C) にあり、双極子または直方体とし、擾乱源の形は既知とした。それぞれの結果を表 8 および表 9 に示す。

東側に擾乱源がある場合においては (表 8)、双極子・直方体の双方で、残差自乗和は庁舎位置の場

表 6 A 地点においた擾乱源 (双極子) が観測点に作る磁場から、mydist より擾乱源の位置と磁気モーメントを逆解析した結果。(a) ~ (d) は本文中の説明に対応。

モデル名		X (m)	Y (m)	Z (m)	M _x (Am ²)	M _y (Am ²)	M _z (Am ²)	残差 (nT ²)
与えた初期値		65.7	108.5	-1.2	4.73E+3	5.90E+3	3.09E+3	
(a)	全成分	66.4 ±3.4	108.5 ±3.8	-1.6 ±2.9	5.06E+3 ±1.22E+3	5.58E+3 ±1.35E+3	3.24E+3 ±1.14E+3	1.21
(b)	F+mmb00 +mmb01 +mmb03	66.4	108.5	-1.5	5.10E+3	5.59E+3	3.23E+3	0.94
(c)	F+mmb00	66.4	108.5	-1.6	5.07E+3	5.59E+3	3.25E+3	0.85
(d)	F(1 回目)	66.3	108.6	-2.0	4.70E+3	5.53E+3	3.36E+3	0.66
	F(2 回目)	66.9	108.1	-2.0	5.01E+3	5.22E+3	3.22E+3	0.70
	F(3 回目)	65.5	108.3	-0.1	5.79E+3	6.35E+3	2.82E+3	0.68
	F(4 回目)	65.4	108.0	-1.2	4.81E+3	6.06E+3	3.02E+3	0.77

表 7 A 地点においた擾乱源 (直方体) が観測点に作る磁場から、擾乱源の位置と磁気モーメントを逆解析した結果。(d) は本文中の説明に対応。

モデル名		X(m)	Y(m)	Z(m)	M _x (Am ²)	M _y (Am ²)	M _z (Am ²)	残差 (nT ²)
与えた初期値		65.7	108.5	-1.2	4.73E+3	5.90E+3	3.09E+3	
(d)	F(1 回目)	67.4	108.9	-2.3	4.50E+3	4.96E+3	3.60E+3	0.55
	F(2 回目)	66.5	108.5	-1.4	4.85E+3	5.55E+3	3.22E+3	0.88
	F(3 回目)	65.1	108.9	-1.2	4.27E+3	6.14E+3	3.16E+3	0.81

合とたいして変わらないが、位置、磁気モーメントの値ともに大きくばらついており、95%信頼区間に真の値を含むか不明である。ZとM_x(東西成分)の再現性が特に悪いように思われる。成分の種類や数で違いがあるかどうかは、試行数が不足しており、明確ではない。西側の場合については(表9)、基本的には表8と同傾向だが、M_x以外の成分もM_xよりも真の値から離れることがあるなど、ばらつき、再現性ともによくないと思われる。

以上より、敷地外に擾乱源がある場合には、真の解とは位置・磁気モーメントが異なっているが、観測点全体にとっては等価な磁場分布を生じる解を示しているものと思われる。位置や磁気モーメントを真に近づけたい場合は、拘束条件を増やす必要があ

るだろう。

庁舎位置と敷地外に置いた擾乱源による試験から、理想的な観測値であれば、擾乱源が敷地内にある場合は、擾乱源の形状にかかわらず位置・磁気モーメントともエラーバーの範囲内で回復できそうであることがわかった。つまり、今回の観測点網は擾乱源に対する感度を持っており、観測値から擾乱源のパラメーターを推定できる可能性がある。

6. モデル化

前章の結果を受け、観測値から擾乱源と絶対観測点での擾乱量を推定する。擾乱源の形に影響されている可能性を否定できないことと、擾乱源の形が既知であれば擾乱源の位置とモーメントがエラーバー

表8 B地点においた擾乱源(双極子または直方体)が観測点に作る磁場から、擾乱源の位置と磁気モーメントを逆解析した結果。(a)～(d)は本文中の説明に対応。

モデル名		X(m)	Y(m)	Z(m)	M _x (Am ²)	M _y (Am ²)	M _z (Am ²)	残差 (nT ²)
与えた初期値		203.0	-89.0	2.5	-2.90E+4	-6.17E+4	-4.65E+4	
双極子	(a) 全成分	206.0	-88.7	5.2	-2.33E+4	-6.05E+4	-4.77E+4	1.29
	(b) F+mmb00 +mmb01 +mmb03	205.0	-86.3	7.6	-2.11E+3	-5.59E+4	-4.65E+4	1.05
	(c) F+mmb00	207.7	-88.0	-3.9	-2.01E+4	-6.37E+4	-4.45E+4	0.90
	(d) F(1回目) F(2回目)	208.4 215.5	-87.7 -80.9	-6.3 -17.8	-1.89E+4 -1.31E+3	-6.52E+4 -7.10E+4	-4.40E+4 -3.97E+4	0.89 0.83
直方体	(d) F(1回目)	199.9	-87.0	2.3	-2.89E+4	-5.67E+4	-4.55E+4	0.93
	F(2回目)	205.3	-85.5	-10.9	-2.24E+4	-7.05E+4	-3.68E+4	0.73
	F(3回目)	201.1	-83.8	14.4	-2.27E+4	-5.19E+4	-4.78E+4	0.97

表9 C地点においた擾乱源(双極子または直方体)が観測点に作る磁場から、擾乱源の位置と磁気モーメントを逆解析した結果。(a)～(d)は本文中の説明に対応。

モデル名		X(m)	Y(m)	Z(m)	M _x (Am ²)	M _y (Am ²)	M _z (Am ²)	残差 (nT ²)
与えた初期値		-157.3	64.2	1.7	5.29E+4	-6.33E+4	-2.58E+4	
双極子	(a) 全成分	-154.3	61.0	4.0	4.75E+4	-5.66E+4	-3.16E+4	1.17
	(b) F+mmb00 +mmb01 +mmb03	-150.2	55.4	4.8	4.55E+4	-4.23E+4	-2.75E+4	0.90
	(c) F+mmb00	-143.8	53.7	11.9	3.99E+4	-3.81E+4	-3.22E+4	0.59
	(d) F(1回目) F(2回目)	-141.4 -166.7	62.0 51.5	15.9 -10.8	3.52E+4 6.64E+4	-5.51E+4 -4.20E+4	-4.04E+4 -1.17E+4	0.49 0.66
直方体	(d) F	-168.9	83.5	-28.9	3.32E+4	-9.76E+4	-7.34E+4	0.80

の範囲内で推定できるということであったので、擾乱源は双極子の場合と直方体の場合の2通りを考えた。直方体は、図10に示した形状である。

擾乱源の位置とモーメントは以下で定義する①, ②, ③, ①+②, ②+③および①+②+③の期間に観測されたデータを使用して推定した(表1参照)。利用したデータは、第4章で求めた、mmb02基準の3成分値(mmb00, mmb01, mmb03, mmb04の計4観測点)と絶対観測点基準の全磁力環境監視点(A1~M9, 79Hの計31点)および全磁力連続観測点の全磁力値の合計36点44成分になる。

① 8月22日~23日にフラックスゲート磁力計で観測された磁場3成分変化量および8月6日と8月23日の環境監視観測から得られた全磁力変化量(表1にある不用品搬出による磁場変化に対応)。

② 8月27日~9月2日にフラックスゲート磁力計で観測された磁場3成分変化量および8月23日と9月3日の環境監視観測から得られた全磁力変化量(表1にある内部解体, 浴室解体による磁場変化に対応)。

③ 9月5日~9月9日にフラックスゲート磁力計で観測された磁場3成分変化量および9月3日と9月19日の環境監視観測から得られた全磁力変化量(表1にある外壁解体による磁場変化に対応)。

①+② 8月22日~23日および8月27日~9月2日にフラックスゲート磁力計で観測された磁場3成分変化量の積算値と8月6日と9月3日の環境監視観測から得られた全磁力変化量。

②+③ 8月27日~9月2日および9月5日~9月9日にフラックスゲート磁力計で観測された磁場3成分変化量の積算値と8月23日と9月19日の環境監視観測から得られた全磁力変化量。

①+②+③ 8月22日~23日, 8月27日~9月2日および9月5日~9月9日にフラックスゲート磁力計で観測された磁場3成分変化量の積算値と8月6日と9月19日の環境監視観測から得られた全磁力変化量。

擾乱源の位置とモーメントの推定には、双極子・直方体の双方に対して、前章でも用いたグリッドサーチによる最小自乗法を用いた。全磁力変化の計算に用いた敷地全体で一定値の背景磁場も、前章と同じ2012年の年平均値(F: 49714nT, D: -8.81°, I: 58.27°)である。95%信頼区間の幅はジャックナイフ法を用いて算出し、残差は以下に定義するRMSに換算した。RMSは、 i 番目の観測値, モデルによる計算値, 標準偏差をそれぞれ Ho_i , He_i , σ_i とすると

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_i \left(\frac{Ho_i - He_i}{\sigma_i} \right)^2}$$

である。 N は総データ数である。理想的なフィッティングであればRMSは1, 観測誤差までモデルに取り込んでしまうと1未満, 観測誤差以上に取りこぼすと1より大きくなる。RMSの性質は観測点数や標準偏差によらないので、フィッティングの良し悪しを判断する一般的な基準としてよく利用される。

表10に推定された擾乱源の位置とRMS, 表11に磁気モーメントの値を示す。③の期間が含まれていない場合の双極子モデルの計算結果をみると、95%信頼区間の幅が大きく信頼できる解が得られないと思われるので(図15)、直方体モデルの計算は省略した。

RMSの値を見ると、②は比較的良好に観測値を説明しているが、他の期間は残差が大きく、説明できていない観測値がある。単独の期間よりも、複数期

表10 推定された擾乱源の位置とRMS

推定期間	擾乱源の形状	擾乱源位置(m)			RMS
		X(東+)	Y(北+)	Z(上+)	
①	双極子	69.5 ± 90.7	101.0 ± 150.2	0.1 ± 192.2	1.99
②		138.1 ± 637.1	88.2 ± 813.4	11.0 ± 253.7	1.17
③		67.3 ± 11.4	107.1 ± 11.9	3.2 ± 16.6	1.44
③	直方体	66.2 ± 8.8	107.0 ± 15.8	3.3 ± 15.8	1.42
①+②	双極子	67.9 ± 49.5	127.8 ± 200.2	1.6 ± 199.0	2.20
②+③		68.0 ± 12.9	104.9 ± 23.3	2.8 ± 17.1	1.70
②+③	直方体	64.9 ± 6.4	110.0 ± 14.2	2.1 ± 13.4	1.68
①+②+③	双極子	67.6 ± 11.2	104.6 ± 21.3	2.2 ± 14.1	2.50
①+②+③	直方体	64.3 ± 13.0	111.0 ± 35.9	1.6 ± 13.4	2.53

間を足し合わせた場合のほうが、フィッティングは悪いように思われる。②は図15でわかるように、ほとんど決まっていない解であることを考えると、残差の分布がランダムでなく、何らかの傾向があることが示唆される。

図16に①、②、③の期間の残差分布を示す。②は万遍なく分布し、①は庁舎近傍に大きな残差が残り、③は庁舎近傍と敷地の端に大きな残差が残る。

2番目にRMSが小さい③を見ると、双極子でも直方体でも庁舎に近い位置に擾乱源が決まっている。図16ではK5での残差がほぼ0になっており、最も振幅が大きいK5での観測値を説明するようにモデルが選ばれていることがわかる。観測値の振幅

がごく少数の観測点だけで大きい場合に最小自乗法を適用するとよくみられる現象で、全体の残差を小さくするのに最適の選択ということであろう。観測点分布の不均一さを重みに換算するなど、なんらかの拘束条件を入れれば、K5への集中を和らげられる可能性はある。また、残差分布から、敷地の端の全磁力と3成分が説明できていないことがわかるが、これらの観測点は第4章でも見たように誤差が大きい可能性があり、RMSを不当に押し上げたことが示唆される。M3で大きな残差が出ているが、この観測点では周囲と極性が異なっていることが期待されるのに対し、観測値はそうならないことに起因していると考えられる。極性が異なる観測点

表11 推定された磁気モーメント

推定期間	擾乱源の形状	磁気モーメント(Am ²)		
		Mx(東+)	My(北+)	Mz(上+)
①	双極子	-6.93E+2 ± 9.47E+3	-8.20E+2 ± 1.51E+4	1.33E+3 ± 2.12E+4
②		1.96E+3 ± 1.22E+4	8.83E+2 ± 9.55E+3	7.86E+2 ± 7.86E+3
③		2.02E+2 ± 2.40E+3	-6.78E+3 ± 3.45E+3	4.73E+3 ± 2.79E+3
③	直方体	3.77E+2 ± 3.49E+3	-6.49E+3 ± 3.51E+3	4.31E+3 ± 2.56E+3
①+②	双極子	4.72E+2 ± 1.03E+4	-2.28E+3 ± 2.45E+4	3.64E+3 ± 3.01E+4
②+③		-7.44E+1 ± 4.35E+3	-6.96E+3 ± 2.93E+3	5.14E+3 ± 3.72E+3
②+③	直方体	1.08E+3 ± 3.22E+3	-6.81E+3 ± 2.67E+3	5.32E+3 ± 3.26E+3
①+②+③	双極子	-7.85E+2 ± 5.47E+3	-7.81E+3 ± 4.78E+3	6.84E+3 ± 5.56E+3
①+②+③	直方体	1.13E+3 ± 8.67E+3	-7.70E+3 ± 4.24E+3	7.35E+3 ± 7.06E+3

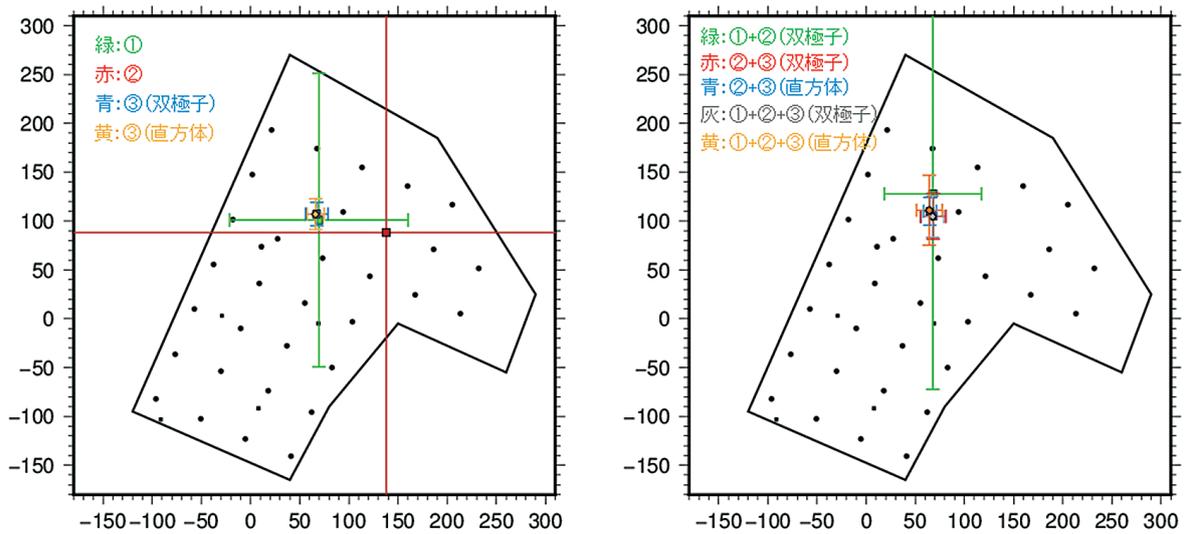


図15 推定された擾乱源のXY平面上での位置
 (左) ① (緑の四角), ② (赤の四角), ③ (青の四角と黄の四角), (右) ①+② (緑の四角), ②+③ (赤の四角), ①+②+③ (青の四角と黄の四角) の期間で得られた擾乱源の位置と95%信頼区間の幅をエラーバーとして示す。黒丸は観測点。③については直方体(黄), 双極子(青)でほぼ重なっている。②+③, ①+②+③の期間は、期間ではなく双極子が直方体かで場所が分かれる。

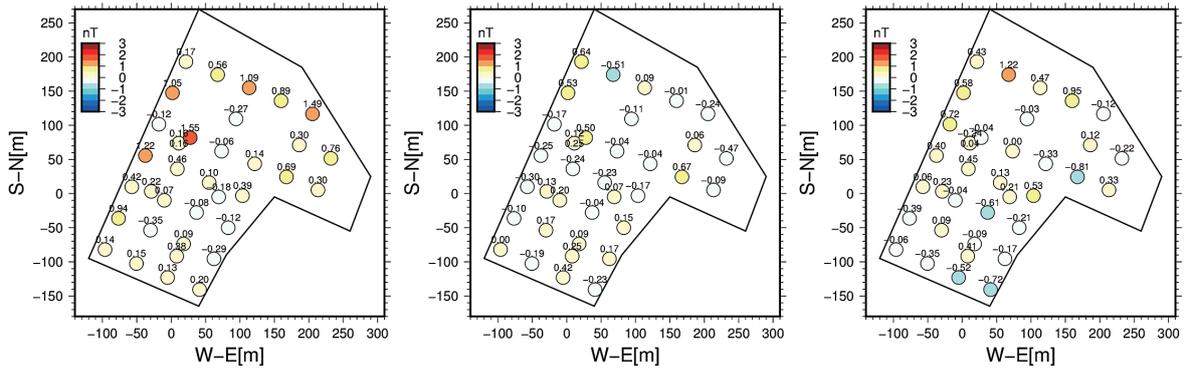


図16 残差分布 (左: ①8/6~8/23, 中央: ②8/23~9/3, 右: ③9/3~9/19)

表12 絶対観測点における推定擾乱量

推定期間	擾乱源の形状	推定擾乱量				
		H(nT)	Z(nT)	D(′)	I(′)	F(nT)
①	双極子	-0.09 ± 0.57	0.07 ± 0.52	0.010 ± 0.037	0.008 ± 0.038	0.02 ± 0.73
②		-0.06 ± 0.44	0.02 ± 0.64	0.004 ± 0.043	0.004 ± 0.034	-0.01 ± 0.76
③		-0.28 ± 0.15	0.25 ± 0.10	0.065 ± 0.026	0.026 ± 0.010	0.07 ± 0.10
③	直方体	-0.27 ± 0.17	0.24 ± 0.08	0.063 ± 0.025	0.025 ± 0.010	0.06 ± 0.10
①+②	双極子	-0.06 ± 0.96	0.12 ± 0.87	0.014 ± 0.044	0.008 ± 0.064	0.07 ± 1.23
②+③		-0.31 ± 0.21	0.28 ± 0.10	0.070 ± 0.032	0.028 ± 0.013	0.08 ± 0.12
②+③	直方体	-0.25 ± 0.20	0.27 ± 0.10	0.063 ± 0.024	0.025 ± 0.012	0.09 ± 0.13
①+②+③	双極子	-0.40 ± 0.28	0.37 ± 0.18	0.080 ± 0.039	0.037 ± 0.018	0.11 ± 0.21
①+②+③	直方体	-0.30 ± 0.47	0.36 ± 0.16	0.070 ± 0.047	0.031 ± 0.028	0.15 ± 0.32

が正確に検出できると擾乱源推定の強い拘束条件になるのだが、今回の場合、庁舎近傍の観測点すべてを十分に満足する単純な擾乱源モデルがないということであろう。

最も観測値の振幅が大きい③のフィッティングで敷地端の観測値に誤差が多く含まれていることが示唆されたことを踏まえて、観測値の振幅が小さい①と②について考えると、①の庁舎近傍だけに大きな残差があるのは適当でなく、②では誤差も含めてモデル化してしまったことになり、解が信頼できないことが再び示唆される。①では、残差に比べて観測値のほうが小さい観測点が多いことも不自然である。

複数期間を足し合わせた場合の解では、双極子でも直方体でも RMS が大きい。双極子の場合には③の解とほぼ同じ位置になり、直方体の場合は少し離れたところに決まる。①+②+③よりも②+③のほうが誤差が小さいことからしても、①、②の期間の工事による擾乱がうまく求まっていないために、誤差が膨らんでしまうのであろう。

③を含む期間の磁気モーメントについてみると、大きさが $|My| > |Mz| \gg |Mx|$ であることは共通している。Mx は 0 を含む範囲に分布しているため正負が定まらないが、いずれにせよ振幅が小さいため実害がない、言い換えると、観測値から区別できないものと思われる。観測値の大部分を占める全磁力が Mx に鈍感であることが関係していると思われるが、前章での感度試験で理想的なデータであれば磁気モーメントが求まることが示されていることを考えると、3成分をはじめとする観測値の精度が悪いことが主な原因と推測される。最も信用できるとされる③の期間の磁気モーメントは、双極子でも直方体でも大差はなく、背景磁場より伏角が浅い。

表10, 11に示された擾乱源が絶対観測点に作る磁場を計算し、表12に示した。95%信頼区間の幅をエラーバーとして示しているが、これは、delete-one サンプルの擾乱源が絶対観測点に作った磁場からジャックナイフ法(付録参照)と同様に計算したものである。ただし、擾乱源推定に用いたグリッドサーチプログラムでは、絶対観測点における伏角の擾乱

量を計算しなかったため、他の成分の推定量から伏角の推定量を求めた。H成分およびZ成分の推定擾乱量をそれぞれ δH および δZ とすると、伏角の推定擾乱量 δI は

$$\delta I(\delta H, \delta Z) = \tan^{-1} \left(\frac{\bar{Z} + \delta Z}{\bar{H} + \delta H} \right) - \tan^{-1} \left(\frac{\bar{Z}}{\bar{H}} \right)$$

となる（ただし、 \bar{H} および \bar{Z} はそれぞれ背景磁場のH成分およびZ成分である）。

また、 δH および δZ の推定誤差を $\sigma(\delta H)$ および $\sigma(\delta Z)$ とすると、 δI の誤差 $\sigma(\delta I)$ は誤差伝播則

$$\sigma(\delta I) = \sqrt{\left(\frac{\partial(\delta I)}{\partial(\delta H)} \cdot \sigma(\delta H) \right)^2 + \left(\frac{\partial(\delta I)}{\partial(\delta Z)} \cdot \sigma(\delta Z) \right)^2}$$

から求められる。 $\sigma(\delta H)$ および $\sigma(\delta Z)$ を表12に示されているHおよびZ成分の推定擾乱量に対する95%信頼区間の幅とする。

これまでの検討で③以外は不確定性が高いと思われるので、③について磁場の擾乱量を見ると、95%信頼区間の幅は各成分で補正基準よりも小さいので、擾乱量が0であっても補正基準を上回ると判定される状況は免れた。また、磁気モーメントの値にあまり精度がなくても磁場擾乱量は補正基準以下の精度で求まっていることになり、振幅が小さいことに加えて、擾乱源に対する感度があまり高くないということであろう。

7. 評価

前章までの解析と検討で、③9/3~9/19の期間では信頼できる擾乱源が求まったが、他の期間の擾乱源は信頼性が低いことがわかった。

③9/3~9/19の期間の絶対観測点での磁場擾乱の値を見ると、全磁力以外のすべての成分で補正基準を含む範囲に分布しており、偏角については中心値も補正基準を超えている。この期間については、補正基準をわずかに超える擾乱があったと判断する。95%信頼区間の幅の大きさは補正基準を下回っているので、エラー見積もりだけで補正基準を超えたわけではない。ただし、積み重ねてきた手順は95%信頼区間の幅を小さめにする方向の操作であったことを考慮すると、得られた95%信頼区間の幅は下限値と考えるべきであろう。また、③9/3~9/19の期間であっても、擾乱源の形状が双極子か直方体か明確に判定できず、磁気モーメントの推定精度はあまりよくない。

他の期間については、基本的には擾乱量が小さかったと考えられるが、複数の期間を合わせることで累積した擾乱量が補正基準を上回る可能性は否定

できないので、複合期間の解析も行ったが、それぞれの期間の観測値の誤差が大きすぎて信頼できる推定値を得られなかった。原因を考察すると、

- ・ 擾乱源の近傍に観測点が少なく、データからの拘束力が弱い。
 - ・ 3成分観測での擾乱量の見積もり方法が、全磁力に比べて誤差が大きい。
- などが挙げられる。解析面で改善の余地があるとなれば、誤差が大きいデータの重みを下げたり（あるいは除いたり）、観測点分布の不均一性を考慮するなどの、条件を追加した最小自乗法を適用することなどが考えられる。

8. まとめ

女満別観測施設で行われた庁舎の一部解体撤去工事で絶対観測点に生じた擾乱について、観測値をモデル化して推定した。

影響量が補正基準に比べてあまり大きくないことが観測値から推定できたため、補正基準を超えているかどうかの判定のために慎重なデータ処理を行い、①8/6~8/23、②8/23~9/3、③9/3~9/19の3期間について工事による擾乱量を推定した。全磁力・3成分観測ともに推定した値の95%信頼区間の幅の見積もりは小さく、精度よく検出できているように思われたが、分布をみると擾乱源から離れた敷地の端で大きな変動があるなど、95%信頼区間の幅で評価できていない誤差が存在することが示唆された。これは、観測値から擾乱量を検出する手法の精度があまり高くなく、つまり、想定していない種類の変動が有意に存在していることを示している。

次に、観測された擾乱量を最もよく説明する擾乱源を最小自乗法によって推定した。その結果、最も観測値の振幅が大きい③9/3~9/19の期間についてのみ、信頼できる擾乱源が推定できた。擾乱が累積して補正基準を超えることも想定して、3期間を組み合わせた場合も解析してみたが、不確実な解しか得られなかった。今回の観測には観測点分布が擾乱源近傍で少ないという問題があり、理想的な観測データに対しては形状を含めて擾乱源を推定できることは確かめたが、さまざまな誤差を含む観測データに対しては擾乱源の形状は解像できず、磁気モーメントの東西方向成分は振幅が小さいことしか確定できなかった。

③9/3~9/19の期間の擾乱源が絶対観測点に作る磁場を求めたところ、全磁力を除く全成分で補正基準を信頼区間中に含む値が得られた。したがって、③9/3~9/19の期間では、補正基準を上回る擾乱が生じたと考えられる。③9/3~9/19の期間以外では

信頼に足る推定値が得られず擾乱源を特定できなかった。

以上から、今回の庁舎解体による絶対観測点への恒久的な影響量として

D: +0.06', I: +0.02', F: +0.1nT, H: -0.3nT, Z: +0.2nT
を補正することとした¹。

今回の事例では、擾乱源近傍の観測点が少なかったこと、絶対観測点での実測値がなかったことなどが、擾乱量推定を困難にする要因となった。今後同様の擾乱が起こった場合には、擾乱源の近傍では観測点密度を高める、絶対観測点で連続観測を行う等の対応が必要と考える。また、全磁力に比べて3成分の擾乱量の見積もり手法は誤差が大きいので、何らかの改善方法を考案することが今後の課題と考える。

謝辞

一部の図の作成には Generic Mapping Tools (Wessel and Smith, 1998) を使用しました。

参考文献

- 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 (2), 23-31, 2002
- Wessel, P., Smith, W.H.F., New, improved version of the Generic Mapping Tools Released, EOS, 79, 579, 1998.
- Zhou, X-H., Obuchowski, NA., McClish, DK., Statistical Methods in Diagnostic Medicine, 2nd Ed., Wiley ser. Prob. Stat., New York, 592 pp., 2011 (DOI: 10.1002/9780470906514.refs).

付録 ジャックナイフ法

ジャックナイフ法は、観測値から得られたパラメーターの標準偏差を推定する手法の一種である。詳細は Zhou et al., (2011) 等の文献を参照のこと。ここでは、計算手順を簡単に示す。

N 個の観測値 x_i ($i=1, \dots, N$) から、なんらかの操作によってパラメーター a が推定されたとする。(例えば、磁場観測値から最小自乗法によって磁気モーメントを推定する場合、 x_i は磁場観測値で、 a は磁気モーメントのある成分と考えればよい。) a の標準偏差 σ を求めたい。

ジャックナイフ法では、 N 個の観測値から1個を除いたデータセットを作る。この操作は delete-one とよばれている。 i 番目のデータ x_i を除いたデータセットから、 N 個のデータのとくと同じ操作で求めたパラメーターの値を a_i とする。除くデータを順番に変えていくと、 N 通りのデータセットから N 通りの a_i ($i=1, \dots, N$) を得ることができる。 a_i の標本標準偏差 $\hat{\sigma}$ は、

$$\hat{\sigma} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (a_i - \bar{a})^2}{N-1}} \quad \text{where } \bar{a} = \sum_{i=1}^N a_i$$

のように求められる。 $\hat{\sigma}$ を a の標準偏差 σ 推定値とする。

¹ 伏角 I については、表12では0.025'であるが、小数第4位まででは0.0246'となるため、小数第2位までの補正量としては0.02'となる。

Evaluation of the influence of a facility removed from the Memambetsu Magnetic Observatory site on geomagnetic field measurements in 2013

by

**Shingo NAGAMACHI¹, Junpei OOGI¹, Tetsuya SHIMAMURA¹,
Kosuke TAKAHASHI² and Ikuko FUJII³**

**¹Kakioka Magnetic Observatory, ²Japan Meteorological Agency,
³Meteorological College**

Received 15 November 2019; accepted 13 December 2019; published 17 March 2020

Abstract

We removed an unnecessary facility from the Memambetsu Magnetic Observatory site from August to October 2013. This facility was located at a distance about 130 m from the absolute observation point. To evaluate the amount of artificial magnetic field caused by the facility that we removed, we simulated the artificial magnetic field at the absolute observation point from the data of several 3-component magnetometers and the results of magnetic surveys from around the observatory. To attain an increased level of confidence for the simulation, we considered both the confidence interval of the observation data and the shape of the facility, and we evaluated the confidence interval of the result of the simulation. From the simulation results, we conclude that the influence of the removed facility at the absolute observation point exceeded the ± 0.3 nT correction criterion.