

# 地磁気測定の手法（方位磁針，比電荷測定器）の報告

佐藤昌也 一関工業高等専門学校，安藤賢 弘前大学

「電子の比電荷測定器 EM-30N（島津理化）」のヘルムホルツコイルと方位磁針を用いて地磁気の水平成分の測定を試みた（コンパス法と呼ぶ）。次に，別法（ $\Delta I$  法と呼ぶ）として同 EM-30N で，加速電圧および電子軌道の半径を一定にして，コイルの中心軸が南北方向の両方向でコイル電流を測定し，その差から地磁気の水平成分を測定した。コンパス法では 1~2%， $\Delta I$  法では 4~6% の精度で地磁気を測定することが可能と分かった。

キーワード 電子の比電荷，地磁気測定，方位磁針，ヘルムホルツコイル

## 1 電子の比電荷測定装置

本稿は，電子の比電荷測定装置を用いて地磁気を求めることを目的とする（ここで言う「地磁気」とは，地磁気以外によるものも含めた「環境磁場」を指す。また特に断りのない限り，その水平成分を扱う）。それにあたって，まず電子の比電荷測定装置の概要を述べる。

ここで扱う測定装置はローレンツ力による電子の円運動を利用したものである。一定の磁場内で電子に磁場と垂直な初速度を与えると，電子はローレンツ力によって円運動を行う。図 1 において円運動の半径  $r$  は，磁場の大きさ  $B$ （向きは紙面裏から前），電子の加速電圧  $V$ ，電子の比電荷  $e/m$  によって決まる。非相対論的近似を適用すると，

$$\frac{e}{m} = \frac{2V}{B^2 r^2} \quad (1)$$

によって電子の比電荷  $e/m$  を求めることができる。

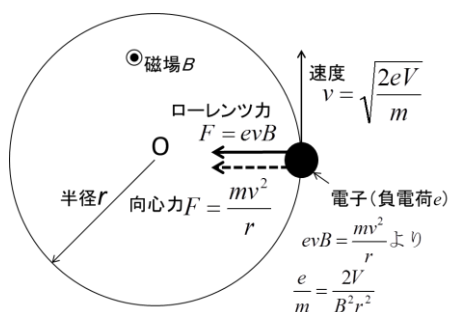


図 1 ローレンツ力による電子の円運動  
(ローレンツ力は実線，向心力は破線)

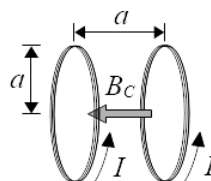


図 2 ヘルムホルツコイル

測定装置は主に，電子銃を内蔵した管球と，一定の磁場を発生させるヘルムホルツコイルからなる。管球はヘリウムや水素が減圧されて（ヘリウムの場合は  $10^{-3}$  Pa オーダー）封入されており，電子によってそれらの気体が蛍光を発するため，電子の軌道を目視で確認することができる。またヘルムホルツコイルとは，半径  $a$  と巻数  $N$  が等しい 2 つの円形のコイルを，軸が同じになるように  $a$  だけ離して平行に並べたものである（図 2）。2 つのコイルに向きと大きさが等しい電流  $I$  を流すと，その内部の十分に広い範囲でほぼ均一な磁場が得られる。生じる磁場  $B_C$  はコイルの軸方向を向き，電流  $I$  に比例する。 $a$  と  $N$  によって決まる比例定数  $k$  を用いると，その大きさは

$$B_C = k \cdot I \quad (2)$$

と表される。

本稿では比電荷測定装置として島津理化製の比電荷測定器 EM-30N ( $k = 7.79 \times 10^{-4}$  T/A) を用いる。

## 2 方位磁針を用いた地磁気測定

### 2.1 理論と方法

方位磁針が地磁気の南北方向（以下の議論は、すべて地磁気の方位である）を指している時、それに直交する外部磁場を加えると磁針の向きが変わる。磁針が南北方向から45度振れたとき、地磁気の水平成分と外部磁場の大きさが等しいので、外部磁場の大きさがわかれば、地磁気の水平成分を推定できる。

より一般的には、図3に示すように、ある一定の大きさの地磁気の水平成分  $B_e$  に対して、外部から直交する磁場  $B_c$  を与えると、方位磁針の向きは南北方向から  $\theta$  だけ振れる。 $B_c$  と  $\theta$  との関係は下記の一次式で表わされる。

$$B_c = B_e \cdot \tan \theta \quad (3)$$

$B_c$  と  $\theta$  を測定し、傾き  $B_e$  を求めることで、地磁気の水平成分の大きさを推定する。

今回は図4のように、電子の比電荷測定器内の管球ホルダーの両端に、メンディングテープを橋渡しし、その上に簡易的に方位磁針を置いた。これによって、方位磁針をコイルの中央に容易に置くことができた。また、測定中に動いてしまわないよう、方位磁針の裏面に両面テープを貼り、メンディングテープに貼り付け固定した。

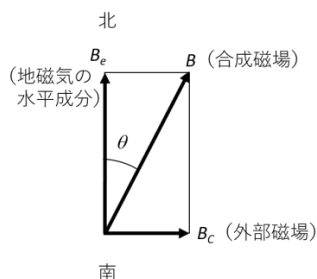


図3 磁場のベクトル図



図4 電子の比電荷測定器内への方位磁針の設置方法

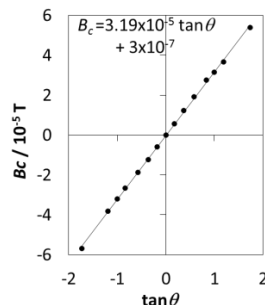


図5 一関高専におけるコンパス法による地磁気測定の結果

### 2.2 結果と考察

一関高専物理実験室において、佐藤が測定した結果を図5に示す。方位磁針の振れ角  $\theta$  は0度から $\pm 60$ 度までの10度毎に $\pm 45$ 度で測定した。近似曲線の切片は小さく、装置の方位調整がうまくいっているのがわかる。近似曲線の傾きから、地磁気の水平成分として  $B_e = (3.19 \pm 0.02) \times 10^{-5} \text{ T}$  の結果が得られた。

## 3 比電荷測定から求める方法「 $\Delta I$ 法」

### 3.1 理論と方法

式(1)の  $B$  として、コイル磁場  $B_c$  の他に地磁気  $B_e$  と残留磁場  $B_r$  (装置内部の強磁性体によって生じる)を考える。コイルの中心軸が南北方向に一致する場合、図6に示したように、地磁気  $B_e$  はコイル磁場  $B_c$  ならびに残留磁場  $B_r$  と平行（もしくは反平行）となる。それぞれの向きにおいて電子の比電荷の測定を行う。装置が南向き（コイル磁場の向きで装置の向きを表す）のときと北向きのときで、 $V$  と  $r$  が同じになるようなコイル電流を測定し、それぞれの測定値を  $I_1$ ,  $I_2$  とする。式(1), 式(2)と、図6の磁場の向きを考慮することで、

$$\frac{e}{m} = \frac{2V}{(kI_1 + B_r - B_e)^2 r^2} \quad (4)$$

$$\frac{e}{m} = \frac{2V}{(kI_2 + B_r + B_e)^2 r^2} \quad (5)$$

の2式を得る。式(4), 式(5)を連立して  $B_e$  について解くと、

$$B_e = \frac{k}{2} (I_1 - I_2) = \frac{k}{2} \Delta I \quad (6)$$

となり、 $I_1$ と $I_2$ の差 $\Delta I$ から $B_e$ を求められる。

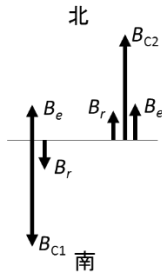


図 6 コイル磁場  $B_C$  と残留磁場  $B_r$ ,  
地磁気  $B_e$  の向き

電子の比電荷の測定においては、主に 2 つの系統誤差が測定値に影響するとの報告がある[1]。一方は電子銃に印加した電圧と実効的に電子を加速する電圧の違い、もう一方は装置内の残留磁場や地磁気存在である。

$\Delta I$ 法では対になる測定において  $V$  を同一にしているため、電圧  $V$  の系統誤差の影響は打ち消される。また残留磁場  $B_r$  も、式(6)を得る過程で打ち消されている（ただし磁気ヒステリシスなどの影響で  $B_r$  に差があると、それは誤差の要因となる）。さらに  $r$  を揃えているため、ヘルムホルツコイルによる磁場の不均一性の影響も受けない。

表 1  $\Delta I$  法による地磁気測定の結果

$V$ [V]	南向き	北向き	$\Delta I =  I_1 - I_2 $ [A]
	$I_1$ [A]	$I_2$ [A]	
140	0.960	0.870	0.090
160	1.085	1.005	0.080
180	1.180	1.095	0.085
200	1.260	1.170	0.090
220	1.330	1.250	0.080
240	1.395	1.310	0.085
260	1.460	1.370	0.090
280	1.525	1.440	0.085
平均			$0.0856 \pm 0.0014$
地磁気 $B_e = 7.8 \times 10^{-4} \Delta I / 2$			$(3.34 \pm 0.06) \times 10^{-5} \text{ T}$

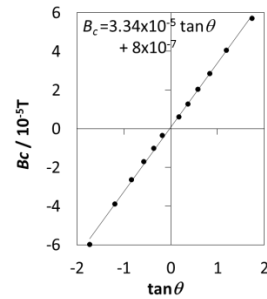


図 7 弘前大学におけるコンパス法による  
地磁気測定の結果

### 3.2 結果と考察

弘前大学理工学部 1 号館の基礎物理学実験室において、安藤が  $\Delta I$  法による測定を行った。電子軌道の半径  $r$  を 4.70 cm に設定し、その合わせ込みは装置付属の尺度を使って目視で行った。また電圧  $V$  やコイル電流  $I$  の測定には、可動コイル型の電圧計、電流計を使用した。

測定結果を表 1 に示す。地磁気の大きさは  $(3.34 \pm 0.06) \times 10^{-5} \text{ T}$  と得られた。この値は、国土地理院の磁気図[2]による弘前周辺の地磁気の水平分力  $2.8 \times 10^{-5} \text{ T}$  より有意に大きい。同じ場所におけるコンパス法による測定で同程度の  $(3.34 \pm 0.04) \times 10^{-5} \text{ T}$  という値を得た（図 7）ことから、測定地点においては実際に  $(3.3 \sim 3.4) \times 10^{-5} \text{ T}$  の水平磁場が存在すると考えられる。

地磁気図による値と違いが生じたのは、建物内での地磁気の乱れに起因すると考えた。それを確認するため、同じ部屋の 3 地点で測定を行った。部屋内での測定地点の位置関係を図 8 に示す。この部屋は鉄筋コンクリート（RC）造 4 階建ての 4 階にある。図の右方が北であり、各測定地点間は 10 m ほど離れている。

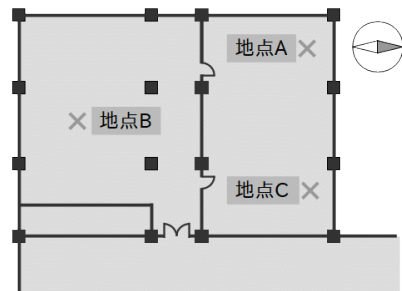


図 8 測定地点間の位置関係

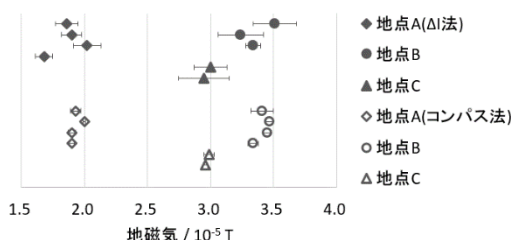


図 9 両方法による測定結果

測定結果を図 9 に示す。測定地点間の違いが同一地点での ( $\Delta I$  法とコンパス法を合わせた) 各測定間の違いを凌駕していることがわかる。この結果は、建物内での場所によって磁場の大きさが  $10^{-5}$  T のオーダーで異なることを支持している (特に鉄筋コンクリート製の建造物内において地磁気が乱れることはよく知られている。例えば回転コイル法により実験室内の地磁気分布を測定した先行研究において、実験室内の地磁気の乱れの存在が報告されている (図 10) [3])。

さらに図 9 からは、各方法の測定精度についても見積もることができる。コンパス法では 1~2 %,  $\Delta I$  法では 4~6 % の精度で地磁気の値が得られると推定される。 $\Delta I$  法の精度が相対的に低いのは、電子の軌道を所定の半径に合わせ込む精度が影響しているものと考えられる。

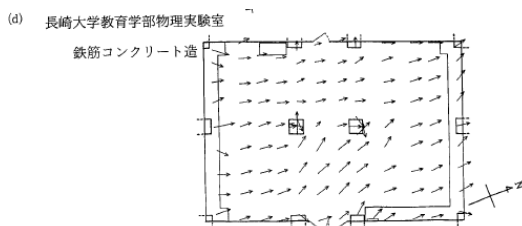


図 10 長崎大学教育学部物理実験室内における地磁気の方向と大きさ[3]

(長崎大学教育学部から許諾を得て転載)

## 4 まとめ

佐藤が方位磁針を用いて地磁気を測定した手法「コンパス法」を、安藤が自身で考案した比電荷測定器による方法「 $\Delta I$  法」で検証した。その測定結果からは、いずれの手法も同程度に正確な (accurate) 測定値を得られると考えられる。ただし  $k$  の値が系統誤差を含めば、それは直接  $B_e$  に影響する。また測定精度 (precision) は、一般にコンパス法が  $\Delta I$  法に勝り、コンパス法で 1~2 %,  $\Delta I$  法で 4~6 % の精度で測定できると推定される。

本稿は、日本物理教育学会東北支部第 32 回物理教育研究大会 (2017 年 11 月、東北大学) で口頭発表した内容に、加筆、修正を加えたものである。

## 参考文献

- 1) 内藤勝之・鈴木昭弘 Journal of the Faculty of Textile Science and Technology, Shinshu University. Series F, Physics and mathematics 3 1-16(1981) 「大学課程での物理学実験教育における電子の比電荷の測定について」  
URI: <http://jairo.nii.ac.jp/0028/00004988>
- 2) 国土交通省国土地理院 磁気図 (水平分力) 2015.0 年値  
URI: <http://www.gsi.go.jp/common/000148087.pdf>
- 3) 富山哲之・山本和佳・近藤貴子・谷本光穂 長崎大学教育学部教科教育学研究報告 7(1984), pp.47-54 「回転コイル法による地磁気の測定と実験室内の地磁気の乱れ」  
URI: <http://jairo.nii.ac.jp/0013/00023463>