

32. 電磁式地震計の磁気回路について

地震研究所 嶋 悦 三

(昭和 35 年 6 月 28 日発表—昭和 35 年 9 月 30 日受理)

1. Introduction.

前報告¹⁾において著者は電磁式地震計の電圧感度を簡単に調べる方法を述べた。この報告のなかでわれわれは、地震計の四定数として、質量、ダンピングの係数、もどす力および電圧感度があり、もしこのなかの一つがわかっているれば、他の三つは電氣的測定で決定できるということを述べた。このなかの電圧感度、つまり force factor $A^2)$ は、力学系から電気系への変換に必要な量であり、この大きさは coil の導線部分の有効長を l 、磁束密度を B とすれば、 $A \equiv Bl$ で与えられる。従つて電圧感度を大にするためには、 B または l を大きくすればよいことがわかるが、あるきまつた大きさの磁石が与えられた場合には、 A を大きくするために、その磁束をもつとも有効に使い B を大きくするようにならなければならない。

このように電磁式地震計を設計するさいには、その磁気回路の設計が重要部分を占めることはよく知られている。ところで、磁気回路では電気回路の場合に対応して、電流を flux に、起電力を起磁力に置き換えて考えれば、電気回路の場合と全く同様に取り扱うことができるはずである。しかしながら、磁気回路の設計は電気回路と違って簡単にはいかない。なぜならば、電気回路においては、導体と絶縁物との固有抵抗の差が非常に大きく、電流が電気回路外にもれることが殆んどないと見てよいのであるが、磁気回路にあつては、磁気抵抗体として、絶縁物と同じ非磁性体を用いるのであるから、導体と絶縁物との permeability の比は $10^3 \sim 10^4$ 程度であり、従つて leakage が相当に大きいと考えられる。このように磁気回路は leakage を考えに入れて設計せねばならないが、一般に正確な計算は非常に複雑であり、殆んど不可能であるといつても過言ではない。ゆえに、磁気回路設計の上手下手は、この leakage flux をいかにうまく近似計算するかによつてきまつてしまうのである。今まで、これらの困難のために、磁気回路の設計には、何度も設計して始めて得られる経験をもとにならなければ、よい地震計は設計できないとさえいわれていたのである。しかしながら、地震学者の立場から考えれば、地震計はあくまで研究するための一つ的手段として用いられるものである以上、自分の研究に一番都合のよいものをつくらなければならないことはいうまでもない。従つて、さて設計しようというさいに、試作をいくつもするという事は、時間的にも、また経済上からいつても無駄であるといわねばならない。

1) E. SHIMA, *Bull. Earthq. Res. Inst.*, **38** (1960), 29-39.

2) K. TAZIME, *Zisin*, **6** (1953), 43-44; **7** (1954), 96-115.

磁気回路の近似計算をする方法として有力なものは、現在のところ磁界描画法および仮定磁路法の二つが考えられる。ところで、磁気回路にあつては、その磁気抵抗を求めるよりもその逆数である permeance を求める方が便利なが多い。よつて今後回路の計算をする場合には、permeance を主として用いることにする。さて磁界描画法というのは、pole piece 間の等磁位線および磁力線を、これらにより分割される各小区劃の permeance が等しいように画き、それらの直列、並列回路としての空間の全 permeance を求めるのである。ゆえに、正確に線を描けば、非常に正確な結果が得られる。しかしながら、この方法の最大の欠点は、線を描くこと自体が非常に面倒であるということである。それに較べると、仮定磁路法は、磁路を仮定して、その合成 permeance を求めるやり方で、前者に較べればはるかに簡単である。工業用の電磁石には既にこの方法により設計されたものがあるが³⁾、地震計用磁石にこの方法を応用して設計したという例は聞かない。従つてこの方法をわれわれの場合に適用して計算を行なつて見たものと、実測を較べ、適用性を調べて置くのは無駄ではないと考える。

2. 磁気回路設計に必要な理論⁴⁾

磁気回路各部の permeance を P_i とすれば、各部の leakage flux は、全起磁力を U とすれば、 UP_i できまる。われわれが使い得る磁束は、Fig. 1 の 1 の部分の per-

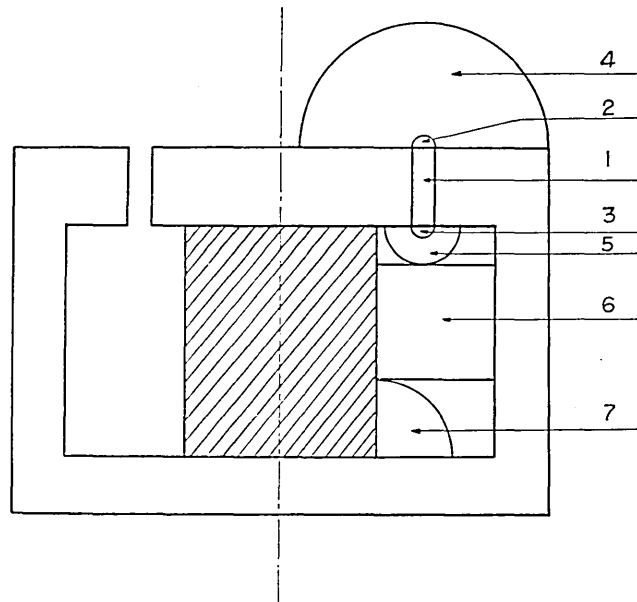


Fig. 1.

3) H. C. ROTERS, *Electromagnetic Device*. (John & Sons. Inc. N. Y., 1941.). M. I. T., 磁気回路と変圧器 (上巻) (日本放送協会 昭和 25 年)

4) R. M. BOZORTH, *Ferromagnetism* (D. Van Nostrand Co. 1951.). T. ASADA, *Zisin*, 7 (1954), 116-135.

meance を P_1 とすれば, UP_1 である. 磁石の出し得る total flux は $U\sum_{i=1}^n P_i$ であるから, 漏洩係数を $\nu = \text{total flux} / \text{useful flux} = U\sum_{i=1}^n P_i / UP_1$ と定義すれば, ν が小さいほどよい設計であるといえる.

磁石の断面積を S , 磁束密度を B , 空隙部の断面積を S_g , 磁束密度を B_g とすれば,

$$BS = \nu B_g S_g \quad (1)$$

が成立する. 空隙に必要な起磁力は, $B_g l_g / \mu_0$ であり, この起磁力は磁石の消磁起磁力とつりあわなければならないから,

$$\frac{B_g l_g}{\mu_0} = HL \quad (2)$$

ここに μ_0 は空気中の permeability, l_g は空隙の長さ, L は磁石の有効長である.

勿論式 (2) は厳密には成立しない. なぜならば, 空隙において出入する flux がどこでも pole face に直角とは限らないという事実があるからである. 従つて実際には l_g は僅かばかり大きくなる. しかしここでは簡単のため, l_g に対する補正はいらないものとする. ゆえに磁石の容積 V は, (1) (2) 式より

$$V = SL = \frac{\nu B_g^2 S_g}{\mu_0 BH} l_g \quad (3)$$

従つてよく知られているように, 磁石の容積は BH が最大になるような点で動作させれば, 最も少なくすむということがわかる. また, (3) 式は, 磁石の供給し得る全エネルギー BHV が空隙部分に蓄えられる全磁気エネルギーの ν 倍であることを示しているのである⁵⁾. また,

$$\frac{B}{H} = \mu_0 \frac{\nu S_g L}{S l_g} = \frac{\nu L}{S} P_1 \quad (4)$$

(4) 式の左辺は, 与えられた磁石の消磁曲線から, BH_{\max} の条件によつてきまつてしまう. また例えば, 磁石として MK5 を, pole piece として純鉄を使用するとすれば, 純鉄が飽和しないようにするためにその断面積が磁石のその半分より小さくすることはできない. また, BH_{\max} の点では近似的に

$$\frac{B}{H} = \frac{B_r}{H_c} \quad (5)$$

が成立する. ただし B_r , H_c は, それぞれ消磁曲線において, 消磁起磁力 0 の場合の残留磁気誘導, 残留磁気誘導 0 の場合の消磁起磁力である. (1) (2) 式より

$$S = \nu \frac{B_g}{B} S_g, \quad L = \frac{B_g}{\mu_0 H} l_g \quad (6)$$

5) $\frac{B_g^2 S_g l_g}{\mu_0} = \frac{B_g^2}{\mu_0} V_g = B_g H_g V_g$. V_g は空隙部の体積である.

となり、この式から逆に S をきめることができる。また、容積最小の条件で磁石を設計する場合には、(5) (6) 式より、

$$S = \nu B_g S_g \sqrt{\frac{H_c}{B_r (BH)_{\max}}}, \quad L = \frac{B_g l_g}{\mu_0} \sqrt{\frac{B_r}{H_c (BH)_{\max}}} \quad (7)$$

となる⁶⁾。これらの式には ν がはいつているので、地震計の磁気回路の場合 ν がどの位になるものかを、このさい調べて置く必要がある。

3. 磁気回路部分の Permeance

ここで、moving-coil type seismometer 用の磁気回路を設計することを考えよう。まず一番能率のよい円筒型にすることは当然として、内磁型にするか外磁型にするかをきめなければならない。磁石鋼は表面積が広ければ広いほど leakage flux の量も多いと考えられるから、同じ容積の磁石であれば、内磁型を採用した方が有効である。従つてわれわれの場合も、内磁型の磁石を作ることを考える。

内磁型の磁石を Fig. 1 に示すものとし、斜線をほどこした部分を磁鋼、何もないとこ

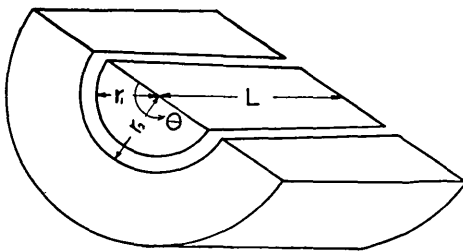


Fig. 2.

ろを純鉄とすれば、円弧で等磁位線を近似することにより、磁界はおおよそ7ヶの部分に分けられる。これらの各部について permeance を計算し、それらの直列、並列回路として permeance の合計をもとめれば、これと磁鋼の消磁曲線から、この磁石の特性が与えられる。われわれはまず磁界の7ヶの部分について、それぞれ permeance を計算して行こう。

i) P_1

Permeance P_1 は、Fig. 2 の pole pieces の長さをここでは L_1 、空気中の permeability を μ_0 とすれば、

$$P_1 = \frac{\mu_0}{\int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{L_1 r \theta}} = \frac{2\pi L_1 \mu_0}{\log \frac{r_2}{r_1}} \quad (\because \theta = 2\pi) \quad (8)$$

で与えられる。gap の巾を l_g とすれば、(8) 式は書きなおせて、

$$P_1 = \frac{2\pi L_1 \mu_0}{\log \left(1 + \frac{r_2 - r_1}{r_1}\right)} = \frac{2\pi L_1 \mu_0}{\log(1 + l_g/r_1)} \quad (9)$$

となる。

6) A. J. HORNFECK and R. F. EDGAR, *Trans. Amer. Inst. Elec. Engrs.*, **59** (1940), 1017.

l_g が r_1 に較べて小さい時には、分母を展開し l_g/r_1 の二乗の項までをとることにすれば、

$$\begin{aligned} \frac{2\pi L_1 \mu_0}{\log\left(1 + \frac{l_g}{r_1}\right)} &\doteq \frac{2\pi L_1 \mu_0}{\frac{l_g}{r_1} - \left(\frac{l_g}{r_1}\right)^2 / 2} \\ &= \frac{2\pi \mu_0 L_1}{\frac{l_g}{r_1} \left(1 - \frac{l_g}{2r_1}\right)} \\ &\doteq \frac{2\pi \mu_0 L_1}{\frac{l_g}{r_1}} \left(1 + \frac{l_g}{2r_1}\right) \\ &= \pi \mu_0 L_1 \left(\frac{r_2 + r_1}{r_2 - r_1}\right) \end{aligned} \tag{10}$$

Table 1

$\frac{r_2}{r_1}$	1.05	1.10	1.15	1.20	1.25	1.30	1.35	1.40	1.45	1.50	1.55	1.60
$\log \frac{r_2}{r_1}$	0.0488	0.0953	0.1398	0.1823	0.2231	0.2624	0.3001	0.3365	0.3716	0.4055	0.4383	0.4700
$2\left(\frac{r_2 - r_1}{r_2 + r_1}\right)$	0.0488	0.0952	0.1395	0.1818	0.2222	0.2609	0.2979	0.3333	0.3674	0.4000	0.4314	0.4615
Diff.	0.0000	0.0001	0.0003	0.0005	0.0009	0.0015	0.0022	0.0032	0.0042	0.0055	0.0069	0.0085
Error %	0.00	0.10	0.21	0.27	0.40	0.57	0.73	0.95	1.30	1.36	1.57	1.85

となる。参考のために、 r_2/r_1 が 1.05~1.60 の場合について $\log(r_2/r_1)$ と $2[(r_2 - r_1)/(r_2 + r_1)]$ がどのくらい違うかを計算したものが Table 1 に掲げている。これによると、 r_2/r_1 が 1.60 の時でも誤差は 2% にしかならないことがわかる。われわれの場合 r_2/r_1 が 1.30 をこえることは珍らしいと考えられるから、(10) の最後の式で計算すれば充分である。

ii) P_2, P_3

Fig. 3 において、AB 間の permeance を求める問題に帰着する。AB 間の permeance は、全体積を AB 間の平均長で割った平均断面積と、平均長を用いて近似的に求めることにする。AB 間の平均長は Fig. 3 を参照すれば、

$$\frac{4}{\pi} \int_0^{\pi/2} \frac{a\theta}{\sin \theta} d\theta = \frac{4a}{\pi} \left[\theta + \frac{\theta^3}{3 \cdot 3!} + \frac{7\theta^5}{15 \cdot 5!} + \frac{31\theta^7}{21 \cdot 7!} + \dots \right]_0^{\pi/2} \doteq 2.33a \tag{11}$$

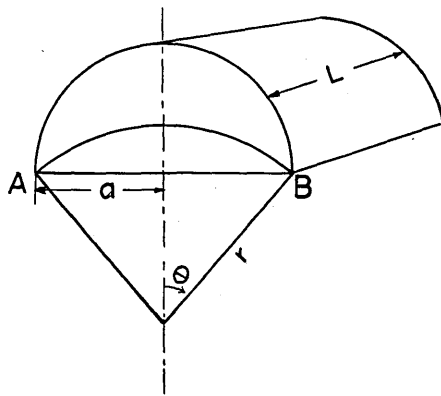


Fig. 3.

全体積は $(\pi/2)a^2L_2$. ゆえに平均断面積はこれを (11) で割った $(\pi/2)a^2L_2/2.33a \doteq 0.67aL_2$ となる. ゆえに permeance P_2, P_3 は,

$$\left. \begin{array}{l} P_2 \\ P_3 \end{array} \right\} \doteq \frac{0.67aL_2\mu_0}{2.33a} \doteq 0.288\mu_0L_2 \quad (12)$$

となる. ここで面白いことは, (12) 式が gap の巾 $2a$ に無関係となることである. ここで L_2 を gap の中間にとれば, $L_2 \doteq \pi(r_1+r_2)$ となるから (12) 式は,

$$\left. \begin{array}{l} P_2 \\ P_3 \end{array} \right\} \doteq 0.904\mu_0(r_1+r_2) \quad (13)$$

と書くことができる. ただし r_1, r_2 は Fig. 2 に示すように, pole piece の内側および外側の半径である.

iii) P_4, P_5

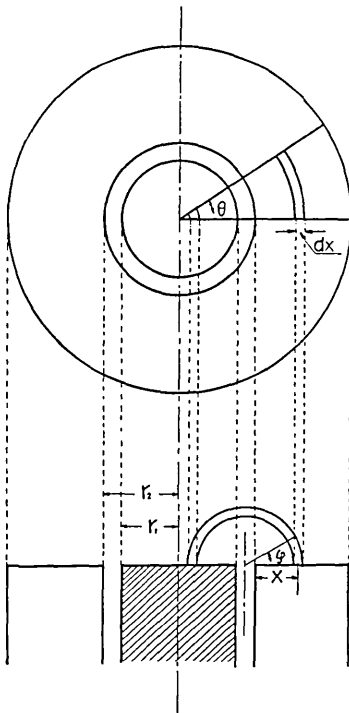


Fig. 4.

Fig. 4 において gap から半径方向に x だけはなれた内側の pole piece 上の小区割

$$\left[\frac{r_1+r_2}{2} - \left(\frac{r_2-r_1}{2} + x \right) \right] d\theta dx \quad (14)$$

から出た flux は, 反対側の pole piece 上で gap から x だけ離れた,

$$\left[\frac{r_1+r_2}{2} + \left(\frac{r_2-r_1}{2} + x \right) \right] d\theta dx \quad (15)$$

なる面積の小区割にはいり込む. 従つて, この path の任意の点における面積は,

$$\left[\frac{r_1+r_2}{2} + \left(\frac{r_2-r_1}{2} + x \right) \cos \varphi \right] d\theta dx \quad (16)$$

で与えられる. ゆえに平均断面積は,

$$\begin{aligned} \frac{1}{\pi} \int_0^\pi \left[\frac{r_1+r_2}{2} + \left(\frac{r_2-r_1}{2} + x \right) \cos \varphi \right] d\theta dx d\varphi \\ = \frac{r_1+r_2}{2} d\theta dx \quad (17) \end{aligned}$$

となるから, permeance P_4, P_5 は

$$\left. \begin{array}{l} P_4 \\ P_5 \end{array} \right\} = \frac{\mu_0}{\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^R \frac{r_1+r_2}{x + \frac{r_2-r_1}{2}} d\theta dx$$

$$\begin{aligned}
 &= \mu_0 \frac{r_1 + r_2}{2\pi} \left[\log \left(x + \frac{r_2 - r_1}{2} \right) \right]_0^R \int_0^{2\pi} d\theta \\
 &= \mu_0 (r_1 + r_2) \log \left(1 + \frac{2R}{r_2 - r_1} \right) \quad (18)
 \end{aligned}$$

となる。ここに R は磁石の形によつてきまる値である。 P_4 に関しては、 R として air gap の内側から centre pole piece の中心まで、または air gap の外側から、磁石枠外側までをとる。一般に、この二つの場合、 R は等しくない場合が多いのではないかと考えられる。こういう場合は、その短い方を取り、magnetic path が交わらないように注意する必要がある。その場合、われわれのように円弧による magnetic path の近似をすると、磁石の一部分からは、flux が出ないことになるが、この flux は実際にははすくなくと考えられるから無視しても大した問題は起らない。次に P_5 に関しては、

$$\pi \left(R + \frac{r_2 - r_1}{2} \right) = D \quad (19)$$

によつてきめられるものである。ここに D は、永久磁石と磁石枠内側との距離である。つまり P_5 のような場合、magnetic path がこれによつてきまる R より大となれば、永久磁石表面からの leakage flux は、円弧の path をとらず直接磁石枠にはいり込むからである。

iv) P_6

i) の場合と全く同様に考えればよい。ただし、この場合違っていることは、i) では flux の出て行く pole piece が等磁位であるから問題がないが、今度の場合は、永久磁石が場所によつて磁位が異なるためにその補正を入れなければならないということである。磁石全体の長さを L とするとき、 x の点における起磁力は全体の起磁力の x/L 倍となる。ゆえにその点における permeance の効果は i) の場合と同様にして行なつた計算結果の x/L 倍となる。従つて、Fig. 5 のように ab 区間の永久磁石と磁石枠との間の permeance の効果は $(b+a)/2L$ 倍となる。ゆえに、

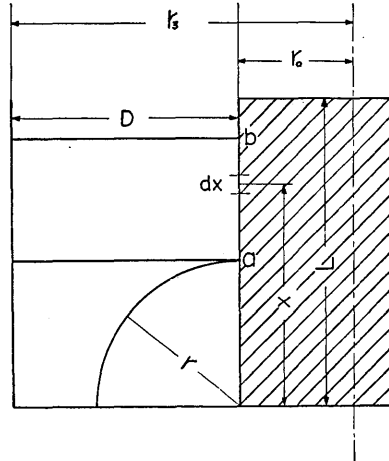


Fig. 5.

$$P_6 = \frac{2\pi(b-a)}{\log \left(1 + \frac{D}{r_0} \right)} \frac{(b+a)}{2L} \mu_0 = \frac{\pi(b^2 - a^2)}{L \log \left(1 + \frac{D}{r_0} \right)} \mu_0 \quad (20)$$

となる。

v) P_7

Fig. 5 において、 b の点は、iii) において述べたようにしてきまるが、 a の点は、

$D=\pi a/2$ を満足するように選らぶのである。Fig. 6 において、 x の点で dx なる巾のところについて permeance を考えて見る。path 上の任意の点 P における断面積は、 $2\pi(r_0+x \cos \theta)dx$ で与えられる。従つて平均断面積は、

$$2\pi(r_0+x \overline{\cos \theta})dx, \text{ 但し } \overline{\cos \theta} = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi/2} \cos \theta d\theta = \frac{2}{\pi} \quad (21)$$

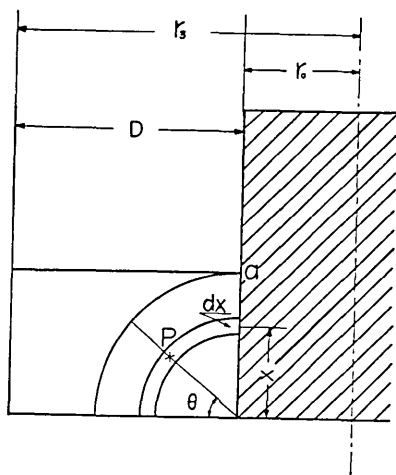


Fig. 6.

となる。ゆえに x の点における磁位は全体の x/L になることを考えに入れると、

$$dP_r = \frac{2\pi\mu_0\left(r_0 + \frac{2}{\pi}x\right)}{\frac{\pi}{2}x} \cdot \frac{x}{L} dx \quad (22)$$

$$\begin{aligned} \therefore P_r &= 4\mu_0 \int_0^{ar_0 + \frac{2}{\pi}x} \frac{x}{L} dx \\ &= \frac{4\mu_0}{L} \left(r_0 a + \frac{a^2}{\pi} \right) \quad (23) \end{aligned}$$

となる。

以上考えてきた他に、例えば pole piece に使う純鉄それ自体がそのすべての点で等磁位では有り得ないから、ここにも leakage flux を考え

なければならない。しかしながらこれらの leakage flux は、前に調べた 7 つの部分からの leakage flux に較べれば、一般に小さいものであるから、この程度の議論の場合には無視しても差しつかえない。

4. 設計の実例

実際の場合、地中地震計⁷⁾を例にとつて、計算と実測がどの位合うかを調べてみることにする。

地中地震計の場合には、磁石は MK5⁸⁾($\phi=2.0$ cm, $L=1.5$ cm) を使用した。なお、磁気回路に関する他の部分の寸法は Table 2 に掲げてある。(Fig. 1 参照) 表中 h は pole piece の長さである。

Table 2.

r_0	r_1	r_2	r_3	h	a	b
cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm
1.0	1.2	1.4	1.6	0.4	0.38	1.31

7) H. KAWASUMI, E. SHIMA and M. SIBANO, *Annual Meeting of the Seismological Society of Japan* (April, 1955).

8) MK 磁石は三菱鋼材から売られている。MK5 は三島博士の発明品 (1931 年) を研究改良したものであり、その化学成分は、Ni: 13.5%, Co: 24%, Al: 9%, Cu: 3%, Fe: 50.5% である。

よつて、 P_1 は、cgs-emu では $\mu_0=1$ であるから、 μ_0 をとれば、(10) 式より

$$P_1 = \pi h \frac{r_2 + r_1}{r_2 - r_1} = 16.33,$$

(13) 式より

$$P_2 = P_3 = 0.904(r_1 + r_2) = 2.35,$$

(18) 式より

$$P_4 = (r_1 + r_2) \log \left(1 + \frac{2R}{r_2 - r_1} \right) = 4.67, \quad (R = 0.5 \text{ cm})$$

$$P_5 = (r_1 + r_2) \log \left(1 + \frac{2R'}{r_2 - r_1} \right) = 1.67, \quad (R' = 0.09 \text{ cm})$$

(20) 式より

$$P_6 = \frac{\pi(b^2 - a^2)}{L \log \frac{r_3}{r_0}} = 7.00,$$

(23) 式より

$$P_7 = \frac{4}{L} \left(r_0 a + \frac{a^2}{\pi} \right) = 1.14,$$

となる。

$$\therefore \nu = \frac{\sum P_i}{P_1} = 2.17$$

(4) 式より

$$\frac{B}{H} = \frac{\nu S_g L}{S l_g} = \frac{\nu S_g L}{S(r_2 - r_1)} = 17.0$$

MK5 の demagnetization curve で $B/H=17.0$ の点をさがすと、 $B=10100$ gauss, $H=595$ oersteds であることがわかる。MK5 の demagnetization curve および、 BH -curve は Fig. 7 に示してある。ただし製品には±数%のばらつきがあるので⁹⁾、平均のものを掲げてある。ゆえに平均的に見て useful flux = $B_g S_g = BS/\nu \doteq 14,500$ (maxwells)

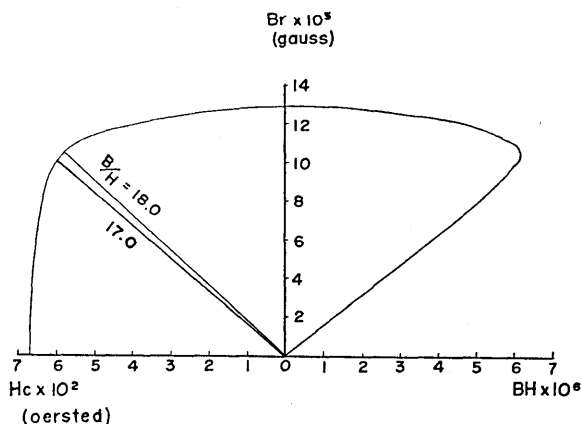


Fig. 7. (三菱鋼材のパンプレットに依る)

9) 例えば三菱鋼材のパンプレットによれば、MK5 についての仕様は、 $B_r=12,000\sim 13,500$ gauss, $H_c=620\sim 720$ oersteds となつている。

$$\therefore B_g = \frac{BS}{\nu S_g} = \frac{\text{useful flux}}{S_g} \doteq 4400 \text{ (gausses)}$$

となる。地中地震計 8 コの磁石について、flux meter による実測例では、useful flux が、14,500~16,500 maxwells になった。この結果は前にものべたように製品のばらつきを考に入れれば、計算例と非常によくあつて居る。ところで flux meter で磁束をはかる場合、今までのように bobbin の一カ所だけに線を巻いた search coil を使うと、空隙部以外の leakage flux を一緒にはかつてしまうおそれがある。これをさけるため bobbin の 2 カ所におのおの反対向きに同じ回数だけ巻いた search coil を使つた。これによれば、不要の flux による meter の揺れは meter 上では打ち消されてしまうから、空隙部のみの磁束をはかるのには便利である。すなわち search coil が、最初には、それぞれ Fig. 1 で permeance の区分をした時の 1 と 2 の部分の最下点にあり、これから search coil を動かすように工夫すればよいわけである。

5. Discussions

Fig. 7 で見ると、 BH_{\max} の点では $B/H \doteq 18$ であるから、この場合に磁石の容積が最小になる。言い換えれば、与えられた容積の磁石鋼で最高の能率をあげるためには、 BH_{\max} の点で使用するように磁気回路を設計せねばならないということである。この意味では、磁気回路に関する限り、本例の設計は必ずしもよいとはいえない。ここで、もう一度 (4) 式を見直してみよう。(4) 式から、

$$\nu \frac{S_g}{l_g} = \frac{B}{H} \cdot \frac{S}{L} \quad (4')$$

この式の右辺は、磁石鋼が与えられれば、すべてわかつてしまう。そしてこの式は右辺が、設計した磁気回路の全 permeance に等しいことを示している。 $S_g/l_g = P_1$ であるが、この値が変化すれば、 ν は当然変化する量である。これをすこし調べて見る。Fig. 1 において、 h の長さだけを変化することにすれば、 $P_2 \sim P_7$ の permeances は変化しない。よつて ν の変化は、 S_g を小にすれば ν は大となる。また S_g を大にすれば ν は小さくなる。その有様を示したのが Table 3 である。これを見るとわかるように、

Table 3

h (cm)	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50	0.55
P_1	12.24	14.28	16.33	18.37	20.40	22.44
ΣP	31.42	33.46	35.51	37.55	39.58	41.62
ν	2.57	2.34	2.17	2.04	1.94	1.86
B/H	15.0	16.0	17.0	17.9	18.9	19.9

$h=0.45$ cm の附近で $B/H=18$ となる。この点では、Fig. 7 から、 $B=10,400$ gaussses,

$H=580$ oersteds となる。ゆえに非常にうまく設計すれば空隙を通る useful flux = $BS/\nu=16,000$ maxwells にすることも可能であると考えられる。本例では、磁石そのものの重量および大きさに制限をうけていたために、すこしの損を承知の上で使用しているのである。

純鉄の磁路は、途中でくびれる、つまり断面積が小さくなる点があつては困る。むしろ磁路の途中ではふくらんでおり、pole piece のところで、磁束をあつめるようになっていたことがのぞましい¹⁰⁾。これは、磁性材料の形が回転楕円体に近くなると、内部は均一に磁化され、磁石各部の負担が一樣になるが、そうでない形の時には、負担の重いところと軽いところできてしまうためと考えられる。更に主磁束に直角方向の磁石の各部の断面積を考えると、純鉄の部分は磁石鋼の部分の半分以下にすることはできない。これは純鉄の磁気飽和特性から考えても明白である。また純鉄の磁路の部分もなるべく短かくした方がよいことはいうまでもない。しかしさればといつて、磁石鋼と純鉄の磁石棒とをあまり近づけすぎても、ここでの leakage flux が多くなつて困ることになる。したがつてこのことは、前述の条件を考えに入れて適当なところで妥協するより仕方がない。この部分における permeance は、(9) 式を使つて大ざつばにみつめれば、一般の場合 $r_2/r_1=1.2$ 位、またはそれ以下であろうから、磁石鋼の有効長が、pole piece の厚さの 5 倍の時には、 $r_3/r_0=1.5$ 、4 倍の時には、 $r_3/r_0=1.4$ 位にすれば、 P_1 におけると同程度またはそれ以下の permeance におさえることができるということがわかる。

前節で述べたように、 ν は内磁型の場合には、割合簡単に 2 ぐらいにすることができる。しかしながら、外磁型の場合には、leakage flux のでる表面がもう一つふえるのであるから。上記の計算法で近似計算することはできないであろう。しかし、内磁型の磁石を設計する場合にも、もし容積に制限が加えられないのであれば、 $\nu=2.5\sim 3.0$ だと考えて、多めの磁石鋼を使用する方が安全である。

特に強力な外部起磁力が作用するような場所で磁石を使用する場合には、磁石の動作点を安定化するために、knock down して置く必要がある。ここに knock down というのは、磁石にある程度の交流起磁力を与えて磁石の動作点を安定化することをいうのである。knock down をすると、する前に較べて磁束値は当然減少するから、この意味でも磁石鋼を多目にとつて置くことは必要といえる。

6. Summary

地震計用磁石を設計するにあたり、その磁気回路からの leakage flux を評価するために、円弧の leakage path を仮定して、近似計算を行つた。この方法を、地中地震計 8 コの磁石に適用した結果、良く合うことがたしかめられた。なお、一例ではあるが、 $\phi=40$ mm, $L=30$ mm の MK5 を使用した磁石についても計算結果は良く合っている。この計算において純鉄の部分は、たとえば電気回路でいえば、earth 線と同様に見做し、この部分はどこでも等磁位であり、純鉄同士の間には leakage はないものと仮定してい

10) 例えば、川口寅之輔 新磁石鋼 産業図書株式会社版 昭和 23 年。

る。このことは、永久磁石そのものが、現在それ程均一の特性の揃つたものが得られない現状からみれば、(メーカーのパンフレットによれば、個々の磁石については平均の demagnetization-curve から、数%以上のばらつきがみられる。)この程度のあらい議論でも差支えはないようである。また純鉄の磁路は、途中でくびれるようなこと、いい換えれば、断面積が磁路の途中で小さくなつていくというようなことは、なるべく避けなければならない。このようなことをすると無益な leakage flux を生ずるおそれがあるからである。強磁性材料についていえば、むしろ真中あたりがふくらんでおり、pole piece の附近で、磁束をあつめるために断面積が小さくなつていくものの方が能率は良いようである。更に、純鉄の部分は、いかなる場合においても、その断面積が永久磁石のその半分以上にはならないようにしなければならない。このことは、純鉄の磁気飽和特性から考えても明白である。

本報告においては、内磁型の磁石のみを取り扱い、外磁型のものについては、触れなかつた。しかし磁性材料というものは、その表面における不均一性その他の理由により、その表面積に正比例して leakage flux がふえるのであるから、なるべくならば、内磁型の磁石を設計した方がとくである。本報告において述べた近似計算により、内磁型の磁石の場合には $\mu \approx 2$ ぐらいにすることは可能であることがわかつた。しかし外磁型の磁石の場合には、上に述べた理由により、恐らくこの方法では取り扱かうことはできないであらう。

この報告が、将来地震計を設計する人に、少しでも役に立てば幸いである。

本研究にあたり、河角広教授には多大な御援助と御指導を賜つた。ここに厚く御礼を申上げる。また、厄介な図表の作成を手伝われた松本憲明氏にも謝意を表したい。

32. Note on the Magnetic Circuit of the Moving-coil Type Seismometer.

By Etsuzo SHIMA,
Earthquake Research Institute.

It is aimed in this paper to contribute to the design of a highly sensitive seismometer. We know that the voltage sensitivity A is a product of B and l , where B is the flux density of the air gap of the magnet used and l is the effective length of the conductor. So we can easily obtain the desired aim by providing the seismometer with a powerful magnet of high flux density in its air gap. Thus the design of the magnetic circuit is one of the most important items at the present time.

It is well known that analyses of magnetic circuits and electrical circuits can be similarly reached, if we consider the analogous relations between them. Namely, magnetomotive forces, magnetic fluxes and magnetic resistances are analogous to electro-motive forces, electric currents and electric resistances respectively. In the case of the electrical circuit, the difference in the resistivity of the conductor and the insulator is so large that no current will leak out of the circuit. In the case of the magnetic circuit, on the con-

trary, the ratio of the permeability between the conductor and the insulator is found to be as low as 10^3-10^4 , so we have to consider the effect of the leakage flux. This is, notably one of the reasons why the design of the magnetic circuit is somewhat complicated as compared with that of the electrical circuit. The behaviour of the leakage flux is, in fact, so complex that the accurate evaluation of the leakage flux is almost impossible. So we are compelled to estimate the leakage flux by assuming an approximate magnetic path. At present, two approximate methods are in a practical way used for this purpose. The first method is more accurate though it is rather involved. In this method, first we draw the lines of magnetic force and of equi-magnetic potential so that the permeances, *that is* the reciprocal of the magnetic resistances, of the part bound by these lines are equal; and second we evaluate the total permeance of whole space considering that these permeances of the elementary portions are each connected with the other three dimensionally. The weak point of this method is in the troublesome calculation of the permeances of the circuit. On the contrary, the second method is more practical and easier than the above mentioned method. In this method, we assume that the shape of the path of the magnetic flux can be approximated by a circular path. Then the total permeance of the circuit is evaluated easily bearing in mind that the each part of the circuit is connected in series or parallel with the others.

We have felt it necessary, in our study of the theoretical and experimental approach to the design of an electro-magnetic seismograph, to know whether the above-mentioned simplified assumption can be used in the analysis of the magnetic circuit of the actual seismometer or not, because, no relevant study of the magnetic circuit used in ordinary seismometers is known to the writer. And so the main purpose of this paper is to check this method, and to investigate how to achieve a large useful flux.

In section 2, is given a brief review of the theory pertinent to a design for a magnetic circuit. Special considerations were given to obtaining optimum working point of the magnet with a minimum volume of magnetic material.

In section 3, an example is set out taking a model circuit as shown in Fig. 1. For convenience we divide the magnetic circuit into seven parts. We could verify in some actual circuits, that the total permeances can be calculated by the combinations of the above-mentioned seven parts, while in others some slight modifications to the path are necessary.

In section 4, we examined the magnetic circuits of eight bore-hole-seismometers, and found strong agreement between the values calculated by the second method and the direct measurements of the useful fluxes.

We may therefore conclude that, the second approximate method can be used safely in analysing the magnetic circuits of the seismometers.
