

動電型制振器について*

樋口長太郎** 小野崎誠一***

On the Electro-dynamic Damper

T. Higuti

Meteorological Research Institute

and

S. Onozaki

Seismological Section, C. M. I. O.

The authors carried out an experimental research to replace the conventional air damper of the Wiechert's 200 kg horizontal seismograph by an electro-dynamic damper, and obtained a satisfactory result.

The reactive force is generated when a ring-shaped conductor fixed to the pendulum of seismograph moves in the circular and radial magnetic field due to a permanent magnet.

In order to get critical damping when the natural period of pendulum is 5 seconds, MK-5 magnet of 6 cm in diameter and of 4 cm in length is employed as a magnetic source, and a copper ring of 4 cm in diameter and of 4 gr, as a conductor. The advantages of the new type lie on the larger damping force by the smaller conductor fixed to the pendulum, and also on much easier adjustment.

§ 1. まえがき

Wiechert 式地震計の空気制振器はとりあつかいが大変面倒なため地震計の機能を充分生かすのに困難を感じている。これを改善する目的で、うず電流式制振器に変える企てが二、三の人々によって試みられたようであるが、まだ実現していない。このうず電流式のものには現在の永久磁石なら可能であるが、導体をアルミニウムレバーにとりつけるとすると、その力学的均衡がそこなわれるおそれがある。

ここに述べようとする動電型制振器は、これらの困難と欠点を除く目的で研究試作したものである。

§ 2. 動電型制振器の動作原理

この制振器の動作は可動線輪型電気機械変成器の原理によるものである。Fig.1 のように永久磁石1および磁極2でつくられる輪状の空隙静磁界3に地震計の重錘に固定されている導環4がY-Y'方向に運動すると、それに誘起する起電力によって電流が生じ磁界から電磁力をうける。この

* Received Nov. 24, 1953.

** 気象研究所地震研究室, *** 中央気象台地震課

力を制振力に利用するのである。

空隙の磁束密度を B_a (単位はすべて C. G. S. 電磁単位を採用する), 導環の周長を l , その振動速度を \dot{x} とすると, それに誘起される起電力 e は $-B_a l \dot{x}$, B_a および l はいずれも定数であるから $B_a l = A$ とおき

$$e = -A \dot{x} \quad (1)$$

また, 導環を流れる電流を i , そのときの電気インピーダンスを Z とすると導環がうける反力は $B_a l i$ であるから

$$A i = \frac{A^2}{Z} \dot{x} \quad (2)$$

この式の Z について, 導環の電気抵抗を R , インダクタンスを L , また, 振動は正弦的でその角速度を ω とすれば, $j = \sqrt{-1}$ として

$$Z = R + j\omega L \quad (3)$$

導環の形状は Fig. 2 のように平均直径を D , 直径方向の厚さを t , 幅を w とし材質の固有電気抵抗を ρ とすると, 電気抵抗およびインダクタンスは

$$R = \rho \frac{\pi D}{tw}$$

$$L = 2\pi D \left(2.303 \log_{10} \frac{18D}{t+w} - 2 \right)^{1.1}$$

ゆえに, インダクティブリアクタンスと抵抗との比は

$$\frac{\omega L}{R} = \frac{2tw \left(2.303 \log_{10} \frac{18D}{t+w} - 2 \right)}{\rho} \omega \quad (4)$$

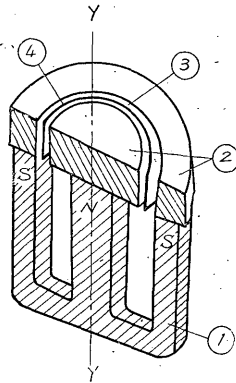
制振力のたてまえから e と i とが同相であることが要求されるから, (4) 式の値は 0 であることが理想である。実際には導環の寸法を適当に定めれば $\omega = 100$, 材料は ρ の小さい銅を用いてもこの比を 1.0×10^{-2} 程度にすることができる。そうすれば,

$$Z \approx R \quad (5)$$

とおき, 制振力が振子の速度に比例すると考えてさしつかえない。

したがって, 制振係数 f と制振器の電磁的特性との関係を

$$f = \frac{A^2}{R} \quad (6)$$



1 : Permanent magnet
2 : Pole piece
3 : Air gap
4 : Conductor ring

Fig. 1

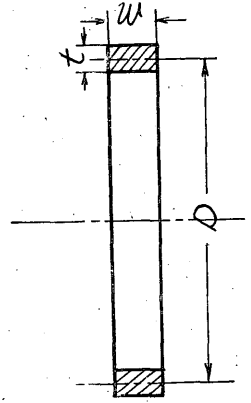


Fig. 2

① 高谷道弘：高周波測定器及測定法，電試調，No. 12 (1929)

として表わすことができる。

§ 3. 導環と磁源について

導環と磁源の質量，形状などは一般に地震計の性能および構造から制限をうける。導環の密度を d ，質量を m とし，(6)式をかきかえると，

$$f = \frac{m}{d\rho} B_a^2 \quad (7)$$

となる。この式の右辺の分母 $d\rho$ は材質に固有のものであるから，導環の質量が制限をうける場合には，この $d\rho$ の値の小さな材質を採用するほうが有利である。

つぎに，磁源についての考察を行うため，導環の体積を v_c とし (7)式をかきかえると

$$f = \frac{B_a^2 v_c}{\rho} \quad (8)$$

となる。この式の右辺の分子 $B_a^2 v_c$ なる量は導環の体積中にたくわえられる磁気エネルギーに相当するものである。

導環と磁源とを対としてその合理的設計の条件は両者の磁気抵抗値を等しくするにある。²⁾ いま空隙の磁気抵抗を R_c ，永久磁石内部の見掛けの磁気抵抗を R_o とし，Fig. 3 のように空隙の長さ，導環の厚さおよび磁極と導環との間隙をそれぞれ δ ， t ， $\delta_c/2$ ，磁極の幅を a ，また，導環の幅 w は便宜上 $w=a$ とすると，

$$\begin{aligned} \text{空隙の面積} & -S=al \\ \text{空隙の幅} & \delta=\delta_c+t \end{aligned}$$

となるから，空隙の磁束密度 B_a は

$$B_a = \frac{1}{S} \frac{F}{R_o + R_c} = \frac{F}{SR_o + \delta_c + t} \quad (9)$$

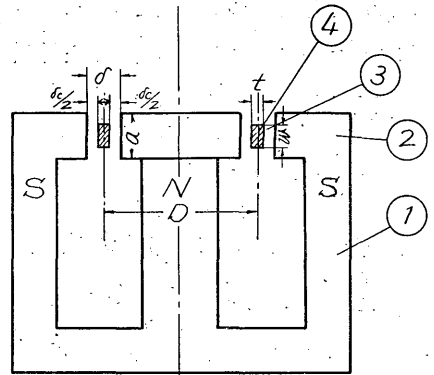
ここに， F ：磁石の見掛けの起磁力

なお，継鉄および磁極を構成する材料の透磁率は永久磁石および空隙のそれに比し格段に大きいから，それらの呈する磁気抵抗は無視できるものとする。

導環の体積は $v_c=St$ であるから

$$B_a v_c = \left(\frac{F}{SR_o + \delta_c + t} \right)^2 St \quad (10)$$

この式の値を最大にする t の値は



1 : Permanent magnet
2 : Pole piece
3 : Air gap
4 : Conductor

Fig. 3

²⁾ 樋口：大森式地震計の改良第1報，験震時報，18 (1953) 33~40

$$t = SR_0 + \delta_c$$

である。この式の両辺を S で除して

$$R_t = R_0 + R_s \quad (11)$$

ここに, R_t : 導環の磁気抵抗

R_s : 空隙中の導環が占めない空間の磁気抵抗

この(11)式は導環の端面において磁気抵抗のマッチングを要求するものである。

つぎに, R_s を R_0 と R_t に関係づけるため

$$\alpha_1 = \frac{St}{S\delta_c} = \frac{t}{t + \delta_c}$$

とにおいて

$$t - \delta_c = \frac{2\alpha_1 - 1}{\alpha_1} t$$

$$\alpha_2 = \frac{2\alpha_1 - 1}{\alpha_1} \quad (12)$$

として

$$t - \delta_c = \alpha_2 t$$

この式の両辺を S で除すと $R_t - R_s = \alpha_2 R_t$

(11)式から $R_0 = \alpha_2 R_t$ (13)

とかくことができる。

ここに, α_1 は導環の空隙体積を占める割合 α_1 によって定まるものであるが, この α_2 が負でないためには α_1 の値が $1/2$ 以下であってはならない。これは磁気抵抗のマッチングの条件から定まるもので, $1/2$ 以下ではマッチングしない。また, α_1 は 1 以上にはなり得ないから, α_1, α_2 について $1/2 < \alpha_1 < 1, 0 < \alpha_2 < 1$ なることがいえる。

以上述べた磁気抵抗のマッチングの条件のもとに永久磁石の大きさを求めると, (9), (11)式から磁気回路の全抵抗は $2R_t$ であるから

$$B_a = \frac{1}{S} \cdot \frac{F}{2R_t} = \frac{F}{2t} = \frac{H_m l_m}{2t}$$

ここに, H_m : 磁石の見掛けの単位長当りの起磁力

l_m : 磁石の長さ

この式から磁石の所要長さ l_m を求めると,

$$l_m = \frac{2B_a t}{H_m} \quad (14)$$

また, 磁石の断面積 S_m は $R_0 = l_m / \mu_m S_m$ なる関係から

$$S_m = \frac{2}{\alpha_2} \frac{B_a S}{\mu_m H_m} \quad (15)$$

ここに, μ_m : 磁石の見掛けの透磁率

磁石の体積 v_m は

$$v_m = S_m I_m = \frac{4}{\alpha_2} \frac{B_a^2 v_c}{\mu_m H_m^2} \quad (16)$$

あるいは

$$B_a^2 v_c = \alpha_2 / 4 \mu_m H_m^2 v_m \quad (17)$$

となる。

ここに、(16)式は α_2 を一定とすれば導環中にたくわえるべき所要磁気エネルギー量に対して材質に関する定数 $\mu_m H_m^2$ である永久磁石の最小体積を与えるものであり、また、(17)式は永久磁石の体積 v_m に対する導環中にたくわえられるべきエネルギー量の最大を与えるものである。

この場合、制振係数 f と永久磁石の性能定数およびその体積との関係は(18)、(16)式から

$$f = \frac{\alpha_2}{4\rho} \mu_m H_m^2 v_m \quad (18)$$

となる。

永久磁石の大きさを求めるにあたっては、その性能定数 μ_m 、 H_m の値を知る必要がある。これらはいずれも材質、形状によって異なる性質のものであるから実測にまたなければならぬ。しかし、一般には閉磁気回路で実測したものであるとして製造業者が発表している減磁曲線を利用している（その一例は Fig. 4）。すなわち、減磁曲線上の残留磁束と保磁力との積が最大になる H_a 、 B_a を採用して

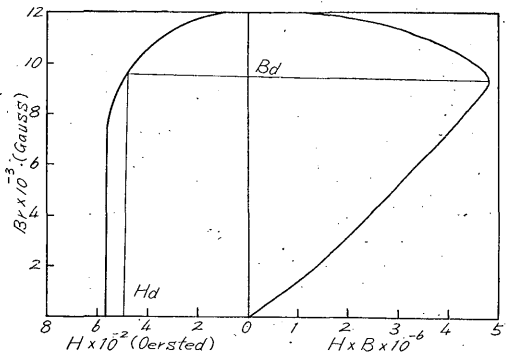
$$I_m = K_1 \frac{B_a t}{H_a}, \quad S_m = K_2 \frac{B_a S}{B_a} \quad (19)$$

なる関係式から求めている。ここに、係数 K_1 、 K_2 は磁石の材質、形状および空隙の状態により定まるもので、磁鋼が NKS-1、形状が円柱または円筒で、ラジオ用拡声器の磁源とした場合には $K_1 = 1.35$ 、 $K_2 = 1.5 \sim 10$ と発表³⁾ されている。

つぎに、 $\alpha_1 < 1/2$ 、すなわち、磁気抵抗のマッチング条件が成立しない場合の永久磁石の大きさは(19)式における t を δ におきかえて

$$I_m = K_1 \frac{B_a \delta}{H_a}, \quad S_m = K_2 \frac{B_a S}{B_a} \quad (19)'$$

なる式から求める。



MK-5 Demagnetization Curve and Energy Product Curve.

Fig. 4.

³⁾ Markus and Zeluff : Electronics for Engineers, (1945) p. 197

§ 4. 制振器の試作

Wiechert 式水平動地震計 (200kg) 用のものを、導環はアルミニウムレバーの先端に、磁源は従来空気制振器のあった場所に、いずれも特に改造を施さずしてとりつけられるように設計した。

振子の固有周期 $T_0 = 5 \text{ sec}$ 、制振度は限界制振とし、振子の質量を制振器の中心線上に引き直した値 m_M は $2.46 \times 10^3 \text{ gr.}$ となるから⁴⁾、所要制振係数 f の値は

$$f = \frac{4\pi}{T_0} m_m = 6.22 \times 10^3$$

となる。なお、導環の質量は m_M に比較してきわめて小さいから無視することにした。導環の質量および形状は、アルミニウムレバーの具備すべき力学的条件から、できるだけ小さくしなければならない。それを考慮に入れ質量 $m = 4 \text{ gr}$ 、平均直径 $D = 4 \text{ cm}$ 、直径方向の厚さ $t = 0.1 \text{ cm}$ とし、材質は銅 (密度 $d = 8.93$ 、固有電気抵抗 $\rho = 1.72 \times 10^9$) とすると幅 w は 0.356 cm となる。これらの値によって $\omega L/R$ の値を求めると、 $\omega = 100$ として(4)式から

$$\frac{\omega L}{R} = \frac{2 \times 0.1 \times 0.356 (2.303 \log_{10} \frac{72}{0.456} - 2) \times 10^3}{1.72 \times 10^9} = 1.27 \times 10^{-2}$$

となるから、起電力と電流とは同位相であると見なしても差支えない。さらに、制振が空気の流体摩擦抵抗によっても行われることを考えれば、上記の値もより小さくなるはずである。

つぎに、空隙の所要磁束密度は(7)式から

$$B_a = \left(\frac{6.22 \times 15.4 \times 10^9}{4} \right)^{1/2} = 4900$$

となる。

この磁源の設計について地震計の構造から制限される条件は、導環がアルミニウムレバーの支軸を中心とする回転運動をすることと、導環の空隙における位置調整が容易に行われるようにとのことから、 δ_c の値をできるだけ大きくする必要がある。一方、導環の質量は、前述のように、できるだけ小さくしなければならない。さらに、導環の運動に際しそれをつらぬく磁束の密度を常に一定にするためには磁極の幅 a は導環の幅 w にその最大全振幅の値を加えたものより小であってはならない。これらの事情を考えると、 $\alpha_1 > 1/2$ とすることは不可能となるので、永久磁石の大きさは(19)'式から求めることになる。すなわち、 $B_a = 4900$ 、 $\delta = 0.3 \text{ cm}$ 、 $a = 1.3 \text{ cm}$ 空隙の平均直径は導環のそれに等しく 4 cm とし、磁鋼は MK-5、直径 6 cm 、長さ 4 cm の円柱形標準型を用いることにした。この磁鋼の減磁およびエネルギー積曲線は Fig. 4 に示してある。着磁は完成後に行い差動法で測定した空隙の全磁束数の平均は $74,000$ マックスウェルで、これを面積 $S = 16.3$ で除すと $B_a = 4540$ になって予定の値にならなかった。これは継鉄の有効断面積および磁石と継鉄との間隙をいずれも素材の都合で小さく設計したことがおもな原因であると考えられる。

⁴⁾ 本間正作：ウィーヘルト式地震計の常数間の関係，驗震時報，14 No. 1 (1950)

§ 5. 実験とその結果

この試作制振器を中央氣象台地震計室備えつけの Wiechert 式水平動地震計にとりつけて性能試験を行った。とりつけた状態は Fig. 5 に示してある。従来の空気制振器とちがって、それ自身は復元力をもたないから、始めに振子の周期を所定の 5 sec. に調節しておく。とりつけ、調整の方法は非常に簡単であるので、その所要時間は十数分であった。

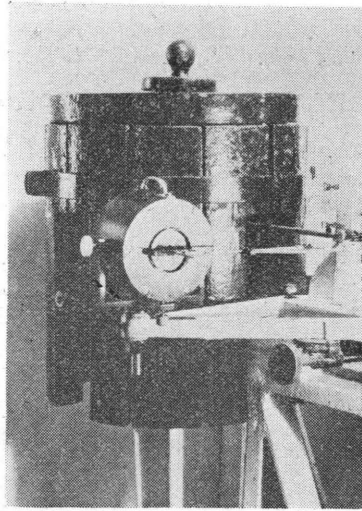


Fig. 5

振子の自己振動を記象させたものは Fig. 6 のとおりで限界制振の状態になっている。なお、この場合導環の幅 w は 0.3cm とした。

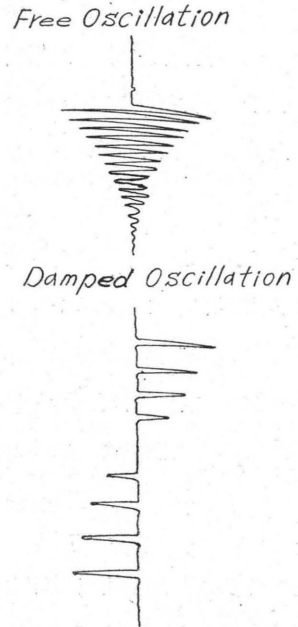


Fig. 6

§ 6 むすび

地震計の性能を高めるためにはその構造がとりあつかいの容易であるようなものであることがおもな条件の一つである。このことはルーチン観測用のものについて特に重要である。動電型制振器の性能と、とりあつかいの容易さが従来の空気制振器にくらべて格段にすぐれていることはいままでの説明で了解されたことと思う。また、磁源に MK-5 鋼を用いてあるから、なんらの手当を施すことなくして少なくとも 10 年間は満足な状態を保つことができる。

この研究は広野地震研究室長指導のもとに行い、和達合長、井上地震課長から終始御べん達を、地震課職員から種々の便宜をうけた。また、この種の研究に不可欠であり困難を感じる器材の試作については気象研究所工作係馬場技官始め関係職員の熱心な協力にあずかった。この稿をおえるにあたり以上の方々に厚くお礼を申し上げます。