

第十一章 機械的振動の測定器械

200. 振動計の種類及び性質^{1) 2) 3) 4) 5) 6)}

振動計の種類 先づ測定さるべきものはすべて機械的の振動であるとする。しかし之を測定する方法に到つては必しも機械的とは限らない。即ち普通の地震計の如く機械的方法によるものの外、光學的方法、電氣的方法等によるものがある。殊に近來ラヂオが發達した爲に多くの振動測定が益。この方法に置き換へられ、又、今迄測ることのできなかつたものがこれによつて容易に達せられるやうになつた。

機械的方法を以て振動を測定することだけ考へても、之を數多くのものに分類することができる。即ち測定機械の慣性力を利用する方法、固體の弾性を應用する方法、流體の性質を應用する方法其他がある。

慣性を利用するものには水平振子即ち Milne 式、大森式、Mainka 式等の地震計、倒立振子即ち Wiechert の地震計の如きもの、水平の腕をばねでぶら下げた上下動振子即ち Wiechert や Galitzin などの上下動地震計等である。之等は何れも慣性質量をできるだけ大きくして固有週期をのばし、できることならこの重錘を空間に止めておきたいといふ努力に外ならない。しかし實際はやはり重錘が動くのであ

1) R. Ehlert, "Zusammenstellung, Erläuterung und kritische Beurteilung der wichtigsten Seismometer, mit besonderer Berücksichtigung ihrer praktischen Verwendbarkeit," *Gerl. Beitr. z. Geophys.* 3 (1898), 350-475.

2) W. Schlüter, "Schwingungsart und Weg der Erdbabenwellen," *Gerl. Beitr. z. Geophys.*, 5 (1908), 314-359, 401-468.

3) G. W. Walker, *Modern Seismology* (London, 1918).

4) C. Mainka, "Instrumente für die Beobachtung von Erschütterungen," *ZS. f. tech. Phys.*, 3 (1922), 145-152, 241-249.

5) 中村左衛門太郎, "地震計に就て," 日本學術協會報告, 4 (1923), 317-326.

6) 田丸卓郎, Sindô (東京, 1912).

る。それにしてもその記録が振動物の動きを常に一定の割合に書きさへすればよい譯であり、多くの地震計はその意味に於てかなり成功してゐるといひ得るのである。

弾性を利用するものは多くは加速度計として用ひられ、振動物の加速度が測定器械の弾性に作用するやうになつてゐる。

振動計が振動現象の變位を測定するに用ひるか、加速度を觀測する爲に應用するかによつてその振動計の用ひ方が非常に異つてゐる。變位と加速度とは振動の重要な事柄であるから、この二つの振動計がどこ迄も發達すべきである。然るに變位に用ひる振動計は前にも述べたやうにできることならば重錘を空間に止めておきたい位であるから、その器械の固有振動週期はできるだけ長くすべきである。之に反して加速度計は器械の變位は振動物の變位と同じであつて、唯その器械に傳はる應力即ち加速力が正直に出ればよいのであるから、固有振動週期はできるだけ短い方がよい。普通の場合に加速度計の比較變位を極端に小さくしないのは多少の變位を残して記録に利用する爲である。以上の外、振動の速度を取る地震計がある。Galitzin が電氣的の装置によつて速度を直ちに記録するやうにしたものの如きはその例である。

振動計の缺點 さて振動計は何れにしても廣い意味での振子である。若しさうであるとすれば振子には種々の缺點がある。即ち完全なる中性の安定状態にあり得ずして一定の固有週期を有し、従て共振の現象があつたり、任意の外力によつてその固有の振動を誘起したりする。第二に加速度計として用ひるときに適當の大きさの比較變位がなければ運動の記録を取ることができぬ。第三に接觸的摩擦によつて運動が止まることがあり得る。この三つの缺點の中で共振に對しては制振器 (damper) を取付けて防ぐことができる。即ち之によつて共振の附近の振幅を共振でない所の振幅程度に少くすることができるのである。それについては後の理論で説明する。しかしその爲に振動の位相遅れや制振器の dragging action によつて慣性質量が靜止の位置から移動するといふやうな見掛け上の缺點が現はれる。

制振器 制振器の制振作用は空氣による場合や、油等の液體を用ひる場合、磁石を用ひる場合等がある。空氣の場合には地震計の振動部の一端がピストン式になつてをり、之が空氣室の中で振動する際、空氣はこのピストン型のもとの空氣室の壁との間の狭い隙間を通してピストンの前後の密閉された空間へ出入する。この爲に大なる流體的摩擦を生ずるものである。油等の場合にはその大なる粘性の摩擦作用を利用するのであつてこのやうな特別の工夫を要しない。magnetic damper では振動部の一部が良導體になつてをり、之が磁石の間で振動する爲にこの導體の中に誘導電流を生じ、その結果運動が制限される。かうして共振の如き缺陷と取除くことができるのである。

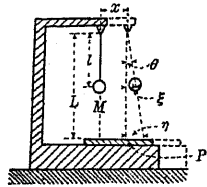
記録装置 記録を取るには大抵の場合圓筒が用ひられる。之を廻す爲に時計を用ひる場合とモートル等を用ひることとある。前者は振動が非常にのろい場合や地震計の如く長時間用ひるに適し、後者は加速度計の如く速い振動や構造物の驗測の如く短時間用の測定に適當してゐる。又時計にしても普通の時計仕掛のものもあるし、錘をぶら下げてその落下速度を風切り、圓錐振子其他で調整するものもある。圓筒上への記録は針によつて smoked paper の上に書かせたり、インキをつけたペンを用ひて白紙の上に描かせたり、又場合によつては光を用ひてフィルムやプロマイド紙の上に記録させてもよく、これによつて機械的の摩擦を少くすることができる。場合によつては Galitzin の方法の如く振子が強い磁場を切つてその爲に振子の角速度に比例する電流がコイル中に流れ、之を電線によつて自記電流計に導けば寫眞的に記録を取ることが出来る。

201. 振動計に共通な數理的理論¹⁾²⁾³⁾⁴⁾⁵⁾

地震計の理論 地震計や其他の振動計が廣い意味での振子であるとすれば、そこには振子の振動の簡單なる理論が存在する。茲に改めてその數理を列記す

- 1) H. Steuding, *Messung mechanischer Schwingungen* (Berlin, 1923).
- 2) E. Wiechert, "Theorie der automatischen Seismographen," *Abhandl. Gött. Akad.*, 2, 1 (1903).
- 3) B. Galitzin, *Vorlesungen über Seismometrie* (Leipzig & Berlin, 1914).
- 4) C. Mainka, in Prey, Mainka, Tams, *Einführung in die Geophysik* (Berlin, 1922).
- 5) B. Gutenberg, *Handb. d. Geophys.*, 4 (1930), Lief. 2.

程ではないけれども、屢、同じ事が必要であるから、簡單なる説明を掲げておくことにする。



第 167 圖

左圖の如く振動計の振動體が質量 M なる振子によつて代表されるものとする。土地又は器械の乗つてゐる臺が x だけ變位を生じ、その爲に振子は空間に對して $x + \xi$ だけ變位を生じたものとする。この場合に運動方程式が次の如く書かれる：

$$Mg\xi + Ml \frac{d^2(x + \xi)}{dt^2} = 0. \quad (1)$$

今、外界の變位が

$$x = c \sin pt \quad (2)$$

で表されるとすれば、(1)の解は

$$\xi = A \sin \left(\sqrt{\frac{g}{l}} t + \varphi \right) + \frac{p^2}{\frac{g}{l} - p^2} c \sin pt \quad (3)$$

となる。この右邊の第一項は固有振動であり、第二項は強制振動の項である。長週期の地震計の場合の如く g/l が非常に小なる場合には、上式は

$$\xi = A \sin \left(\sqrt{\frac{g}{l}} t + \varphi \right) - c \sin pt \quad (4)$$

となり、又固有振動が起るにも非常に時間がかかるから、上式の右邊の第一項が大して影響を與へぬやうにすることもできる。斯る場合には $\xi = -x$ となり振子は空間の一點に靜止する傾向を取るものである。

普通の場合に地震計を無限の長週期に保つことは不可能なものであり、又固有振動の項がいつまでも動かぬかどうかも疑問である。それで制振作用のある場合を考へておいてそれを實際に應用する方が安心である。減衰力のある振動式を書いて見ると次の如くなる。 $\frac{g}{l}$ は一般の場合には n_0^2 と書いてよい。 $(n_0 = 2\pi/T_0, T_0$ は減衰力のないときの固有振動週期)

$$\frac{d^2\xi}{dt^2} + 2k \frac{d\xi}{dt} + n_0^2 \xi = -\frac{d^2x}{dt^2}, \quad (5)$$

茲に $2k$ は減衰の係數である。この式の解は $n_0^2 - k^2 > 0$ の場合には次の如く書かれる：

$$\xi = Ae^{-kt} \sin(nt + \varphi) + \frac{p^2 c}{\sqrt{(n_0^2 - p^2)^2 + 4k^2 p^2}} \sin \left(pt + \alpha - \tan^{-1} \frac{2kp}{n_0^2 - p^2} \right), \quad (6)$$

但し A, φ は常數、 $n^2 = n_0^2 - k^2$ である。又外界の振動は

$$x = c \sin(pt + \alpha) \quad (7)$$

で表されるものとする。damping の弱いときには $4k^2 p^2$ は $(n_0^2 - p^2)^2$ に比して極めて小なることが多く、又、長週期の場合には n_0^2 は p^2 に比して小である。それで自由振動の方のみは速かに減衰して、重錘の相對變位 ξ が結局は $-c \sin(pt + \alpha)$ となり、重錘が空間に止まる可能性があるのである。即ち制振作用が弱さへあれば、長週期の地震計といへども制振器を入れた方が、ないときよりも好都合であると思ふ。

しかしながら制振力を餘り強くして共振が防げる程度になると、(6)の右邊の第二項の分母が p によつて異なる値を取り、外力の週期によつて振幅の割合が違つて來るといふやうなことが起るのである。但し特別に工夫すれば一定に近くすることもできぬこともない。要するに調和振動の場合に制振器の特徴を最もよく發揮させるといふことは、誘起された固有振動を打消すことであつて、共振の振幅を思ふがまゝに小さくすることではないと考へられる。

倍率 前頁の圖を考へるに、振子の運動の記録が便宜上振動計の臺の所にある P なる板の上に於て振子の絲の延長上に作られるものと假定する。その記録の振幅は振子の實際の振幅よりも、圖に示すが如く擴大されるものである。 P なる板面上の相對的の變位を η とすれば、式(6)と圖とから直ちに η の値が次の如くなる：

$$\eta = A \frac{L}{l} e^{-kt} \sin(nt + \varphi) + \frac{\frac{L}{l} T_0^2}{\sqrt{(T^2 - T_0^2)^2 + \frac{k^2 T_0^4 T^2}{\pi^2}}} c \sin \left(pt + \alpha - \tan^{-1} \frac{2kp}{n_0^2 - p^2} \right) \quad (8)$$

茲に T_0 は振子の減衰性のないときの固有振動週期、 T は強制振動週期である。上式の位相角中の n_0, p は便宜上から其儘としておいた。若し減衰力が大ならば、この式の右邊の第一項は間もなく消えてなくなり強制振動の項のみが残る。 η 極大/ c 。

即ち

$$\frac{\frac{L}{l} T_0^2}{\sqrt{(T^2 - T_0^2)^2 + \frac{k^2 T_0^4 T^2}{\pi^2}}}$$

は記録上の大きさと土地の動きとの比であるから、之を倍率 (magnification) といふ。

特に $T \rightarrow T_0$ の如く共振に近い場合を考へると

$$\frac{\eta_{\text{最大}}}{c} = \frac{\pi L}{k T_0 l} = \frac{\pi L}{k T l}$$

となる。この場合には倍率が k 及び振動週期 T_0 に逆比例し、 L/l に比例することがわかる。即ち共振に近い所では固有週期及び減衰力が大なる程倍率が小さくなり、 P 板面の位置が遠い所にある程倍率が大なることを示すものである。

T が極めて長いときには

$$\frac{\eta_{\text{最大}}}{c} = \left(\frac{T_0}{T}\right)^2 \frac{L}{l},$$

となるものである。

T が非常に短いときには

$$\frac{\eta_{\text{最大}}}{c} = \frac{L}{l}.$$

之は振動週期が入らず、 L と l の如き幾何學的の長さの比となることを示す。この倍率を描針倍率 (indicator magnification, index magnification), 又は針先倍率といひ、普通地震計の倍率といふときには、之を指してをるのである。後にわかるやうに、減衰性が強く且つ $n_0^2 - p^2 > 0$ の如き普通の場合には、式 (8) から

$$\frac{\frac{T_0^2}{L}}{\sqrt{(T^2 - T_0^2)^2 + \frac{k^2 T_0^4 T^2}{\pi^2}}}$$

の如き一般的の倍率を實際に考へなければならぬ。此倍率を力學的倍率 (dynamical magnification) といふこともある。尙、上式に於て L/l なる描針倍率を除ける残りの因數を力學的倍率の因數と名づけることもある。倍率は地震動の週期によつて異なるけれども、極めて短週期の地震動に對しては描針倍率だけでわかるも

のである。

次に $n_0^2 - k^2 = 0$ の如き場合には前と同様にして

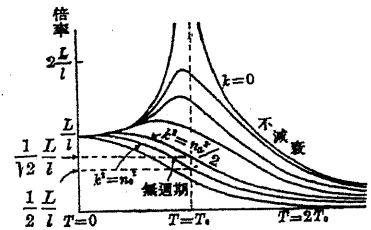
$$\eta = e^{-kt}(At+B) + \frac{\frac{L}{l} T_0^2}{T^2 + T_0^2} c \sin\left(pt + \alpha - \tan^{-1} \frac{2kp}{n_0^2 - p^2}\right) \quad (9)$$

となり、 $n_0^2 - k^2 < 0$ の如き場合には

$$\eta = Ae^{-(k + \sqrt{k^2 - n_0^2})t} + Be^{-(k - \sqrt{k^2 - n_0^2})t} + \frac{\frac{L}{l} T_0^2 c}{\sqrt{(T^2 - T_0^2)^2 + \frac{k^2 T_0^4 T^2}{\pi^2}}} \sin\left(pt + \alpha - \tan^{-1} \frac{2kp}{n_0^2 - p^2}\right) \quad (10)$$

となる。之等に相當する倍率も前と同様にして書くことができる。茲に注意すべきことは、以上述べた所の倍率は便宜上から單に單一振子の場合の例を取つたのであるが、種々の機構のもとにある地震計でも同様にして倍率が出せることである。即ち支點から記録點までの距離 L と支點から重錘までの距離 l との比が幾何學的に出る倍率であり、且つ之を描針倍率としてよい。又この間に數段の幾何學的の擴大装置があるときに各々對する倍率の相乘積が地震計の倍率になる。之等の場合にも極めて短週期の地震に對する倍率が描針倍率である。以上の委しい議論は Wiechert¹⁾ の論文や和達博士²⁾ の書にも出てゐる。

減衰性及び地震週期による倍率の變化を圖に示して見ると右の如くなる。之等は何れも $T=0$ に於て描針倍率の値を取り、又 $T \rightarrow \infty$ になると倍率が零となる。 $T=T_0$ に於ては減衰がなければ倍率が無限大となる



第 168 圖

¹⁾ E. Wiechert, "Theorie der automatischen Seismographen," *Abhandl. Gött. Akad.*, 2, 1 (1903).

²⁾ 和達清夫, 地震観測法, 岩波講座 (物理學及化學).

ことを示してゐる。kが適當の値を保ちさへすれば倍率がTの變りに對して著しく變ることはない。k²=n₀²/2の如き場合には倍率の極大はT=0の所に起り、T=T₀の所で倍率は $\frac{L}{\sqrt{2}l}$ となる。又k²=n₀²即ち無週期振動に變る所ではT=T₀に於ける倍率は $\frac{L}{2l}$ になつしましふ。之等の事から、減衰性をむやみに大きくしても、それは適當の倍率を保つことに對しては無意味であつて、k²がn₀²/2とn₀²との間位にあれば充分なことがわかる。

減衰性がある爲の位相の遅れは

$$\tan^{-1} \frac{2kp}{n_0^2 - p^2} = \tan^{-1} \frac{kT_0^2 T}{\pi(T^2 - T_0^2)} \tag{11}$$

となる。

實際の地震計は以上のものの如く簡單ではなく、もつと多くの自由度が存在してゐる。その一般的理論はやはり Wiechert¹⁾ の論文に出てゐる。

加速度計の感度 以上の理論は變位そのものを表す振動計であつたけれども、加速度を表すやうな振動計では(7)の代りにその時間的第二次微分係數

$$\ddot{x} = -p^2 c \sin(pt + \alpha) \tag{12}$$

を見るのが目的である。従て(6)の右邊の第二項分子は位相の遅れを除外すれば加速度に比例するものを與へることになる。

式(6)の右邊の第二項の極大値即ち振幅に相當する部分を取つて見ると

$$\frac{p^2 c}{\sqrt{\left(1 - \frac{T_0^2}{T^2}\right)^2 - 4 \frac{k^2 T_0^2}{n_0^2 T^2}}} \frac{1}{n_0^2}$$

となる。但しn₀=2π/T₀である。それで今この式のp²cの係數となるべきものを種々のk²/n₀²及T/T₀に對して示して見ると次圖の如くなる。²⁾ 石本博士はこの値を加速度計の感度と稱した。蓋し測定すべきものを量的に表すことからつけられた名稱であると思ふ。この曲線からk/n₀が1/2乃至1/4位の所ではT=T₀でも

¹⁾ E. Wiechert, 前掲。

²⁾ 石本巳四雄, 高橋龍太郎, “自動車, 汽車の振動測定を目的とする加速度計,” 地震研究所彙報, 7(1929) 571-585.

殆ど一定の係數を與へることがわかる。即ち記録の振幅が殆ど常に加速度に比例することを示すものである。但し如何なる場合でもT/T₀<1位の所では加速度計が餘り役に立たぬこともわかる。

固體摩擦その他の影響 上の理論では固體に速度に比例する減衰力がある場合を考へたのであるけれども、地震計には種々の部分に速度に無關係な摩擦 (friction) の存在も考へられる。その場合には式(5)に於てrなる摩擦力を重ねて考へ、次の如き式が作られる:

$$\frac{d^2\xi}{dt^2} + 2k\frac{d\xi}{dt} \pm r + n_0^2\xi = -\frac{d^2x}{dt^2}, \tag{13}$$

但し±rの上下の符號は夫々 $\frac{d\xi}{dt}$ が正の値を取るか負の値を取るかに従て用ひるものとする。この式を解くには

$$\frac{d^2}{dt^2} \left(\xi \pm \frac{r}{n_0} \right) + 2k \frac{d}{dt} \left(\xi \pm \frac{r}{n_0} \right) + n_0^2 \left(\xi \pm \frac{r}{n_0} \right) = -\frac{d^2x}{dt^2} \tag{14}$$

と書き直し、更に $\xi + \frac{r}{n_0} = \xi'$ と置けば、その解は

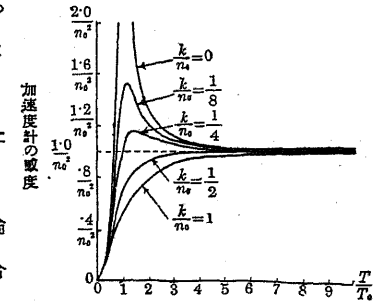
$$\xi = \mp \frac{r}{n_0} + A e^{-kt} \sin(nt + \varphi) + \frac{p^2 c}{\sqrt{(n_0^2 - p^2)^2 + 4k^2 p^2}} \sin\left(pt + \alpha - \tan^{-1} \frac{2kp}{n_0^2 - p^2}\right) \tag{15}$$

となるから、この振動式は $\frac{d\xi}{dt}$ が正のときには $\xi = -\frac{r}{n_0}$ を平衡の位置としての減衰振動の形となり、 $\frac{d\xi}{dt}$ が負のときには $\xi = +\frac{r}{n_0}$ を平衡位置と考へた場合の減衰振動を與へることとなる。尙、この摩擦rはできるだけ小さくしなければ地震記録の比較研究が一層むづかしくなるものである。

樋口理學士³⁾は地震計に固體摩擦の働く場合、殊に大森式地震計の腕にそのヤ

¹⁾ 樋口盛一, “On the Forced Vibration of an Elastic Rod,” 東北理科報告, 20 (1931), 399-432.

²⁾ 樋口盛一, “Omori's Horizontal Pendulum Seismograph at the Time of an Earthquake,” 東北理科報告, 20 (1931), 764-781.



第 169 圖

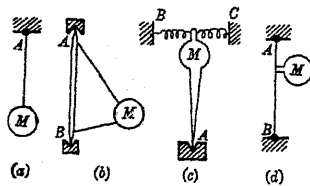
うな性質のあるときの影響を力學的に解いた。即ち粘性がある爲に位相の遅れや振幅の縮小等のことを考慮に入れたものと思はれる。しかし實際問題としてはそれ程重要ではないと思ふ。

地震計の Specification 實際の地震計を比較する場合にその判別に用ひられるものは減衰力のないとき固有週期 T_0 , 有效振子の長さ l , 描針の長さ L , 描針倍率 L/l , 減衰比, 固體摩擦の割合, 重錘の重量其他である。

202. 主要なる地震計の構造型式

地震計の設計に於て前節の數理上から明かな部分は何れも注意すべきである。この外, 實際問題として多くの注意すべき點がある。根本的に注意すべきことは變位地震計では固有週期をできるだけ長く, 加速度地震計ではできるだけ短くすること, 速度に関係しない摩擦はできるだけ小さくすること, 速度に比例する減衰力は速度に入れること, 記録の針やペンは振動計の質量に比してできるだけ軽くすることなどである。又, 實際上の問題としては強い振動や取扱方によつて壊れぬこと, 種々の物理的事情例へば風熱, 濕氣等によつて影響されぬこと, 種類によつては携帯できること, 容易に取扱ひ得ること, 地震計の備付方其他種々の事がある。

先づ水平動地震計の主な型は下圖に示すがごとく大體四種に分つことができ



第 170 圖 水平動地震計の型。

る。(a) は單一振子, (b) は水平振子即ち扇型, (c) は逆振子 (inverted pendulum), (d) は振り振子 (torsion pendulum) である。

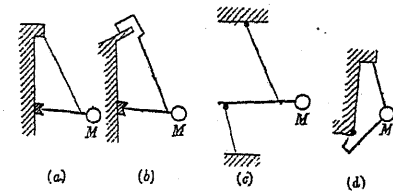
この中で單一振子型はその固有振動週期が容易に長くできぬものであるから餘り用ひられぬけれども, 多少の長所もあるのであつて,

Wiechert の 17 噸のもの, de Quervein-Picard の 20 噸のものなどは多少の長所をもつてゐる。東京帝國大學地震研究所に備付の長さ 13.5 米の如きものも振子の研究上に多少の参考となる。

1) de Quervein, *Jahresber. d. Schweiz. Erdbebedienstes*, 1922-24.

次に, 水平振子式の水平動地震計は前圖に示すやうに扇型のものであつて, 一つの重錘を略垂直な軸の周圍に同轉し得るやうにしたものである。Zöllner, Hecker, Mainka, 大森, Bosch, Galitzin, Wiechert, 今村等の地震計に於てこの方針が用ひられてゐる。この中にも亦種々の變つた型があり, 大森¹⁾²⁾³⁾, Bosch, Milne⁴⁾, Mainka⁵⁾⁶⁾の如きは下圖 (a) に示すが如く, 一本の支棒 (strut) (又は同效果のもの) と一本の絲とによつて支へるやうな方針を用ひ, M の大きさは大型のものでは 100 疋乃至 2000 疋もある。E. v. Rebeur Paschwitz 及びそれを改良した O. Hecker 型, Ewing⁷⁾ の地震計, 大森式水平微動計⁸⁾⁹⁾¹⁰⁾などは下圖 (b) に示してあるやうにすべて剛なる骨で支へてあり, M の重量は 100 瓦もない位である。

又, Zöllner 型振子は (c) に示すが如く二本の絲で上下から吊し, 之によつて極めて長週期の固有振動が得られる。之は 1863 年 Zöllner が發明した吊し方であるが Galitzin¹¹⁾ によつてよく應用されたものである。



第 171 圖 水平振子型水平動地震計の型。

1) 大森房吉, "Results of the Horizontal Pendulum Observations of Earthquakes. July, 1898 to Dec., 1899, Tokyo," 震災豫防調査會歐文報告, 第 5 號 (1901), 1-82.

2) 大森房吉, "A Duplex Horizontal Pendulum Apparatus," 震災豫防調査會歐文報告, 第 18 號 (1904), 1-3.

3) 大森房吉, "Long Period Horizontal Pendulum," 震災豫防調査會歐文紀要, 1 (1907), 192-193

4) J. Milne, "Modern Forms of Pendulum Seismometers," *Trans. Seism. Soc., Japan*, 12 (1887), 23-28; "The Gray-Milne Seismograph," 同上, 12 (1887), 33-48.

5) C. Mainka, in Prey, Mainka, Tams, *Einführung in die Geophysik* (Berlin, 1922).

6) C. Mainka, "Das bifilare Kegelpendel," *Phys. ZS.*, 13 (1912), 1206-1212.

7) J. A. Ewing, "On a New Seismograph for Horizontal Motion," *Trans. Seism. Soc., Japan*, 2 (1880) 45-49.

8) 大森房吉, "A Horizontal Pendulum Tromometer," 震. 調. 歐. 報, 第 12 號 (1903) 1-7.

9) 大森房吉, "A Horizontal Tremor Recorder," 震災豫防調査會歐文報告, 第 18 號 (1904), 5-12.

10) 大森房吉, "Horizontal Tremor Recorder," 震災豫防調査會歐文紀要, 1 (1907), 191.

11) B Galitzin, *Vorlesungen über Seismometrie* (Leipzig & Berlin, 1914).

次に逆振り子型水平動地震計としては Wiechert¹⁾ のものが有名であつて、委しい事は後に説明するけれども大體は逆さに置かれた振子が、ばねによつて安定を保つてゐるのである。單一振り子や水平振り子は重力を復原力として用ひ、逆振り子では重力と弾性とを用ひて安定を保ち且つ固有週期を長くしてある。

弾性のみを以て復原力を與へてゐる地震計は餘り多くはない。弾性にしても棒や板の屈曲を用ひても、振りを用ひてもよいが、Anderson 及 Wood²⁾ の振り地震計は垂直に張られた針金の中央にその重心の外れた錘があり、水平の震動によつて針金に振りを與へるものである。石本博士³⁾ は重錘の頸に當る棒又は板の屈曲を用ひる加速度地震計を發明し、又高橋理學士⁴⁾ と共に弾性體の直接の伸縮による加速度計も作つた。同博士⁵⁾ は尙弾性と流體の毛細管現象を併用せる加速度計を設計したこともある。末廣博士⁶⁾ も亦その地震波分解器に於て弾性體の屈曲抵抗をも多少利用された。

上下動の地震計は次圖に示す如く、(a) 錘をばねで吊して上下に振動する Wiechert の地震計の如きものや、(b) 腕の一端に錘があり、この腕の途中をばねで吊し又腕の他端は重錘のモーメントによつて下向きに支持されてゐる Ewing⁷⁾ の地震計や又は多少の工夫を用ひた de Quervain-Picard⁸⁾ の上下動地震計の如きもの、(c)

1) E. Wiechert, "Ein astatiches Pendel hoher Empfindlichkeit zur mechanischen Registrierung von Erdbeben," *Gerl. Beitr. z. Geophys.*, 6 (1904), 435-450.

2) J. A. Anderson & H. O. Wood, "A Torsion Seismometer," *Bull. Seism. Soc. Amer.*, 15 (1925), 1; *Journ. Opt. Soc. Amer. & Rev. Sci. Instr.*, 8 (1924), 815-822.

3) 石本巳四雄, "Etude préliminaire sur l'accélération des séismes," 地震研究所彙報, 9 (1931), 159-167; "Un sismographe accélérométrique et ses enregistrements," 地震研究所彙報, 9 (1931), 316-332; "Caractéristiques des ondes séismiques d'après enregistrements accélérométriques," 地震研究所彙報, 9 (1931), 473-484.

4) 石本巳四雄, 高橋龍太郎, "自動車, 汽車の振動測定を目的とする加速度計(第一部水平動測定)," 地研研究所彙報, 7 (1929), 571-586.

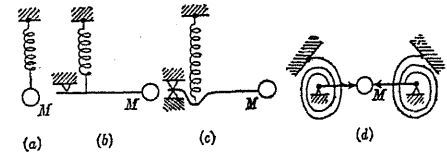
5) 石本巳四雄, "Un accéléromètre capillaire," 地震研究所彙報, 3 (1927), 87-103.

6) 末廣恭二, "地震波分解器及其記録," 地震研究所彙報, 1 (1926), 59-64.

7) J. A. Ewing, "A Seismometer for Vertical Motion," *Trans. Seism. Soc., Japan*, 3 (1881), 140-142.

8) de Quervain, *Jahresber. d. Schweiz. Erdbebendienstes*, 1922-24.

その腕を適當に曲げ腕の中心より低い所からばねを吊した Wiechert¹⁾ や Galitzin²⁾ の上下動地震計の如きもの、(d) 吊りばねの代りに spiral spring を用ひて錘を兩方から支へ且つ之に適當な調整を加へた田中館博士³⁾ の



第 172 圖 上下動地震計の型。

上下動地震計, 其他 Milne の特別な考案などがある。

203. 單一振り子, 逆立振り子を用ひる水平動地震計

單一振り子を地震計として用ひることは1700年代から盛んに應用されて來たが、科學的に初めて用ひられたのは Ewing⁴⁾ が 1879 年に我國で作つたものであらう。而して之を同轉する圓板上の圓弧に沿うて水平の兩方向の運動を記録せしめたのである。尙、この振り子を別に下からも上向きに支へた duplex form は T. Gray⁵⁾ 其他によつて考案された。

Vicentini⁶⁾ の地震計は單一振り子に近い水平振り子であつて重錘を吊り、その下部から記録装置を出してゐる。重錘の重さは 50, 100, 400 匁等がある。この 400 匁ものは固有週期 6.5 秒, 倍率 160 倍である。伊太利には同様なものに Agamenone 振り子型地震計がある。地震研究所にある單一振り子は錘 200 匁, 長さ 13.5 米, 固有週期 6.8 秒である。

Wiechert⁷⁾ は 17 噸の單一振り子を作つた。固有週期は 1.5 秒, 倍率は 2 200 倍である。その報告は 1906 年 Göttingen の記念論文に出てゐる。

1) E. Wiechert, "Seismische Untersuchungen," *ZS. f. Geophys.*, 1 (1924-25), 14-20, 134.

2) B. Galitzin, *Vorlesungen über Seismometrie* (Leipzig & Berlin, 1914).

3) 田中館愛橋, "Vertical Motion Seismometer," 震災豫防調査會論文報告, 7 (1902), 1-4.

4) J. A. Ewing, "A New Form of Pendulum Seismograph," *Trans. Seism. Soc., Japan*, 1 (1880), 38-43.

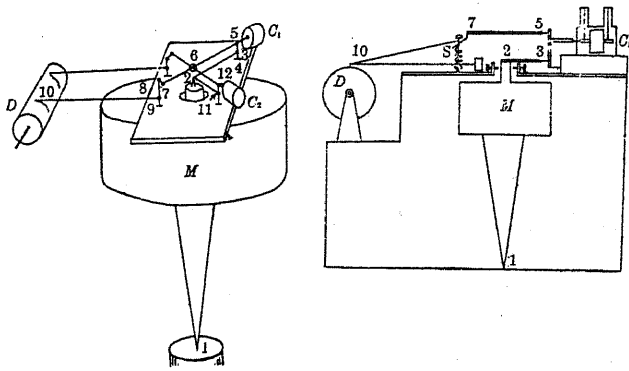
5) T. Gray, "On a Method of Compensating a Pendulum so as to make it Astatic," *Trans. Seism. Soc., Japan*, 3 (1881), 145-147.

6) B. Gutenberg, *Handb. d. Geophys.*, 4 (1930), Lief. 2.

de Quervein 及 Picard¹⁾ の 21 噸の萬能地震計は 20 600 斤の錘を單一振子的に吊り、吊線の途中にばねを入れて上下動に對する振動を觀測できる様にし、水平動は本來の振子の性質を用ひるのである。振子を支へる壁體の高さは約 5 米もある。de Quervein 及 Picard²⁾ のものとして携帯用の萬能地震計もある。

Strassburg の 19 噸の地震計³⁾ は Wiechert の單一振子に多少の改良を加へたものである。

Wiechert の 1 000 斤の astatic の地震計⁴⁾ は逆立式であつて Göttingen の Bartels で作られ、固有週期 12 秒、倍率 200 倍である。構造は下圖の如く M なる重錘が逆立となつて (1) に支へられてゐる。地震動によつて (2) が水平に動くときに、互に直角に置かれてゐる棒 (2, 3) 及 (2, 11) を夫々の方向へ押ししたり引いたりする。此兩成分の一方だけ考へると、(2, 3) なる棒の運動によつて (3, 5) なる柱は (4) の周圍に角變位を



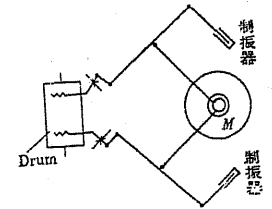
第 173 圖 Wiechert の逆立地震計

1) de Quervein, 前掲。

2) E. Rothé et J. Lacoste, "Séismographe de 19 tonnes de la station de Strassbourg," Publ. Bureau Centr. Séism. Int., Série A, fasc. 4 (1927), 44.

3) E. Wiechert, "Ein astaticsches Pendel hoher Empfindlichkeit zur mechanischen Registrierung von Erdbeben," Gerl. Beitr. z. Geophys., 6 (1904), 435-450.

なし、(5, 7) なる棒をその方向に押ししたり引いたりする。従て (7, 8) なる横杆によつて (8, 9) なる柱は垂直軸の周りに回轉運動をなし、従て (9, 10) なる boom に角變位を與へ D なる圓筒の上に記録を作るのである。尚 (8, 9) なる柱の周圍には S なるばねがあつて M なる重錘の運動に復原力を與へてゐる。又、C は制振器であつて之は空氣制振器 (air damper) として働き、ピストン様のものが往復運動をなすにつれて空氣が一方の空窩から他方の空窩へ移るときに減衰作用を及ぼすのである。



第 174 圖 Wiechert の小型逆立地震計平面圖

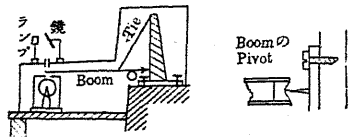
Wiechert の小型の astatic の地震計は同様に逆立式であつて、Göttingen の Spindler & Hoyer で作られ、80 斤から 200 斤位である。固有週期は 8 秒、倍率は 40 乃至 160 倍、横杆の用ひ方及び制振器の置き場所を右圖の如くにしてゐる。

以上の外、逆振子としては Marvin の 600 斤のものがある。倍率は 100 倍乃至 150 倍であり、構造は Wiechert のものに近い。

204. 各種の水平振子式水平動地震計及び振動計

Milne 其他の地震計 Milne の地震計の大體の型は既に述べておいたが、振子の boom は約一米位のアルミニウム棒であつて、その一端が瑪瑙の皿になつてをり鐵の柱にねぢ込んだ鋼のピボットに接してゐる。この boom の錘のある所より少し先の方から鋼製の吊線が取付けられ、この吊線の上端は鐵柱の上端に達し之によつて boom を吊つてゐる。錘は約一吨位であつて boom に直接には取付けられず、鋼のピボットによつて boom にぶら下つてゐる。震動を記録する爲に boom の先端に水平なアルミニウム板をつけ、この板に boom に平行なるスリットが切つてある。然るに之より上の方にこのスリットに直角なる方向を有する固定スリットがあり、又下には圓筒に巻きつけたプロマイド紙があるので上方から送られた光は點となつてこの印畫紙の上に印されるのである。圓筒は時計で廻され四時間に一回轉する。印畫紙の速度は一時間 250 耗位であり、従て一分に 4 耗位進む事になる。又、軸には深い螺線があり、圓筒は一回轉に 6 耗位横に動く。故に印畫紙は一日

か二日間位使へる譯である。又一時間毎に光は振り時計によつてとぎれるので正確なる時間の記録ができ、圓筒の不規則なる回轉から逃れることができる。Milneの地震計の固有振動週期は15秒又はそれ以上あり、之から単一振子の場合の振子の長さを換算して見ると $l=56$ 米にもなる。記録装置から描針倍率は7倍であるから、之から計算すると $L=400$ 米になる。感度を $L/206000$ 耗毎秒角で定義するとき、この場合の感度が2といふ事になる。



第175圖 Milne式水平振り地震計。

しかし結局 booms は二つを平行に置き、一つの圓筒上に記録させる必要がある。別のことではあるが、今村博士¹⁾は Milne の地震計から空気の微振による影響を去除く考案をされたことがある。

Milne-Shaw²⁾の地震計は Milne の地震計を改良せるものであるが特に注意すべき事は boom の中央に左右各、二個宛の wolfram-steel の magnets があり、boom から出てゐる板がこれ等の magnets の間を振動する爲に damp されるのである。其他記録の擴大装置もあり、倍率を150倍から250倍にすることができる。寫真を用ひることは Milne の場合と同様である。

大森式の種々の水平振り 大森式水平振り水平動地震計³⁾は大體に於て Milne 式に似てゐる。しかし大さが之よりも大きく錘は普通のもので10斤乃至15斤ある。錘から出してゐる吊線はその上端まで1米位ある。その構造を次に示す。記録する爲の腕はその次の圖に示す様に、錘から先の方に出てゐる棒の先端に溝型 (channel) の金具があり、之に紡錘状の鋼の柱がはまり、この柱が第二の同様な金具

Milne 式に限らず、地震計は一般に二つの直角なる方向の地動を測定する爲に水平の一対を必要とし、之を互に直角に据ゑる。

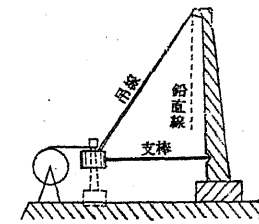
しかし結局 booms は二つを平行に置き、

1) 今村明恒, "On a Method of Suppressing Air Tremors Occurring in Milne H. P. Seismographs," 震災豫防調査會歐文紀要, 1 (1907), 158-160.

2) J. J. Shaw, "The Milne-Shaw Seismograph," *Publ. Bureau Centr. Seism. Int.*, A, 4 (1927), 3.

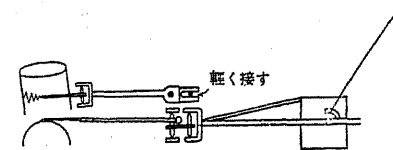
3) 大森房吉, "Results of the Horizontal Pendulum Observations of Earthquakes, July 1898 to Dec. 1898, Tokyo," 震災豫防調査會歐文報告, 第5號 (1901), 1-32.

の柱から出てゐる fork 型のもの間に滑かに入つてゐる。初めの柱が錘の振動に従て fork の間を多少滑りながら左右に振れると共に第二の柱が回轉運動をなし、従てこの第二の柱と金具から外の方へ出てゐる棒の先が大きく左右に動くのである。尚、この棒の端には復た溝型の金具があり、水平の軸を持つ柱があつて、これにアルミニウム等の針がつけてあるから、記録が軽く且つ確實に行くのである。錘を吊る針金の upper end を臺に取付ける所には二本のねぢがあつて、前後左右に動くやうにしてある。これによつて吊線の上端と支へ棒の支點とが一つの鉛直線から外れるやうにできる。吊線の上端が前へ出る程固有週期が短くなる。



第176圖 大森式水平振り地震計。

大森式の地震計はその初期に於て既に改良を加へられ、duplex 型¹⁾のものが作られた。即ち錘の下部に垂直の棒が土臺から立てられて錘の底面で軽く接してゐる。之によつて初めの型の支へ棒に來る壓力が減じ得るのである。



第177圖 大森式水平振子の記録装置。

考案された時の錘は10斤位であり、固有週期は30秒位が普通であつた。

大森式の水平微動計²⁾は tie piece を針金にせず前の水平振り型地震計の型を出した圖の(b)に示せるが如く支持されてゐるのが普通であつて、錘は15斤から30斤位までのものがある。而して記録は實動の70倍から200倍までである。

大森式長週期地震計³⁾は初め固有週期3分位までになり得るやうに設計されたものであつて、錘は50斤、吊線の針金の高さは2.5米から3米にも及んでゐる。構

1) 大森房吉, "A Duplex Horizontal Pendulum Apparatus," 震災豫防調査會歐文報告, 第18號 (1904), 1-3.

2) 大森房吉, "A Horizontal Tremor Recorder," 震災豫防調査會歐文報告, 第18號 (1904), 5-12.

3) 大森房吉, "Horizontal Tremor Recorder," 震災豫防調査會歐文紀要, 1 (1907), 191.

4) 大森房吉, "Long Period Horizontal Pendulum," 震災豫防調査會歐文紀要, 1 (1907), 192-193.

造は最初の大森式水平振子と同じである。しかし実際の週期は 135 秒位にしかならなかつた。

大森式の強震計は建築物等の振動計としても用ひられ、Ewing の bracket 型に似てをり、錘は 2 匁位、固有週期は 3 秒乃至 4 秒位である。又、狭い場所にまとめる爲に吊柱に對して錘と反對側に記録のペンがある。

Ewing 型の地震計 この型は主として bracket 型を指すやうである。bracket 型は 1878 年 W. S. Chaplin が考案し、T. Gray によつて實用的なものとなり、Ewing に於て殆ど完全なものとなつたのである。しかし一般の水平振子も大抵 Ewing 型であるといふ事ができる。Ewing は 1880 年頃我國に來て地震計の研究をも盛んに行つたのであるが、それ等の多くの研究は Milne や Gray などの地震計の研究等と共にその頃東京にあつた地震學會の報告¹⁾に屢々出てゐる。Ewing は前にも述べたやうに圓筒の代りに圓板中に水平、上下の記録を取る装置をも作つた。

今村式の種々の水平振子 大森式地震計には種々の缺點がある。それをここに列挙する事は避けるが、今村博士は Ewing 型や Milne 型の水平振子から二三種の改良された地震計を考案した。その第一は大正十四年に作られた十五年式簡單微動計²⁾であつて、大體は Milne を改良せる Ewing 式であるが、錘は 7 匁、固有週期 7 秒、倍率は 50 倍である。特に變つてゐるのは、前頁に示した圖にある大森式地震計の記録装置の fork の一指を磁石を以て作り、垂直の細い柱はこの一本に絶えず接觸させ摩擦が非常に少なくなつてゐることである。又、記録紙の速さが一分間に 60 耗もある。而して記録し得る地動は 0.001 耗から 1.0 耗といふ非常に高低の範圍に涉つてゐる。那須理學士は之に反して寧ろ高倍率の微動計を設計した³⁾。これと同様な装置を有する倍率 2 倍及び倍率 1/2 の二種の今村式強震計もある。次に今村博士⁴⁾は長週期地震計を考案した。大森博士の長週期地震計は實際には大した長

¹⁾ *Transaction Seism. Soc., Japan*, 1 (1880)。

²⁾ 今村明恒, “地動計測整備の一般,” 地震研究所彙報, 1 (1926), 7-25.

³⁾ 那須信治, “最近製作せる高倍率微動計に就いて,” 地震, 3 (1931), 167-174.

⁴⁾ 今村明恒, “地動計測整備の一般,” 地震研究所彙報, 1 (1926), 7-25.

週期にならなかつたのであるが、今村博士¹⁾は初め固有週期 210 秒のものを作ることに成功した。安定の考から初めは 140 秒位にして用ひた。その構造は大森博士のものと大して變つてをらぬが、たゞ strut の根本の所に調整の工夫をなし、以て思ふまゝの長週期が得られるやうにしたのである。この工夫の結果後に固有週期を 3 分半にすることができた。錘の質量は初めは 10 匁であり、後には 20 匁となつた。

今村博士の地震計測器の考案については巧妙なるものが多く、地震計の外に地震と共に器械や drum 等を動かすべき starter²⁾や前に出た Milne 地震計の空氣の微振を防ぐ工夫などがある。上下動地震計の考案については後に述べる。

末廣博士の研究 Ewing や Paschwitz の水平振子は重錘と支點を含む面の方向に振動が來ると振子が外の振動の二倍の週期をもつ振動を始め、且つこれが不安定になるものである。末廣博士は之を數學的及び實驗的に初めて發見し³⁾、且つ之を防禦する爲に右圖の如く同じ型の地震計を逆向きに並列し、以てよい結果を得られたのである⁴⁾。

Bosch の地震計 Bosch の水平振子水平動地震計中大森式は大體に於て大森式を真似て作つたものである。普通の大森式のもの通りであるが中には air damper 又は oil damper をつけたり、吊線の上端の金具に別の工夫があつたり、振子に取付けてある鏡に光をあてて寫真的に記録する事などに改良をなしたものもある。Bosch 製の大森式地震計には重錘が 100 匁のものや 25 匁のものもある。

Mainka の Kegelpendel Mainka⁵⁾の二本吊式 Kegelpendel も大體の方

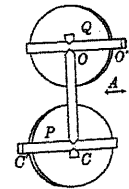
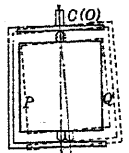
¹⁾ 今村明恒, “A Long Period Horizontal Pendulum,” 帝國學士院紀事, 2 (1926), 489-491; “Further Note on Seismic Observations with Long Period Horizontal Pendulums,” 帝國學士院紀事, 4 (1928), 367-370.

²⁾ 今村明恒, “A Mechanical Starter,” 震災豫防調査會歐文報告, 第 7 號 (1902), 25-26.

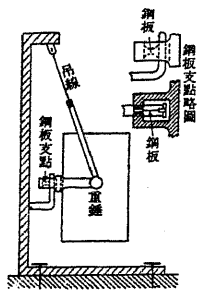
³⁾ 末廣恭二, “On the Instability of Seismometers,” 帝國學士院紀事, 3 (1927), 148-148.

⁴⁾ 末廣恭二, “A Device for Preventing the Instability of Horizontal Seismometers,” 帝國學士院紀事, 4 (1928), 597-599.

⁵⁾ C. Mainka, “Das bifilare Kegelpendel,” *Phys. ZS.*, 13 (1912), 1206-1212.



第 178 圖



第179圖 Mainka
の或る地震計。

の地震計の兩方向の components を互に直角にならべた模様は全く機械といふ感じを與へる。

岸上式微動計 岸上式簡單微動計¹⁾は携帶用として作成されたものであつて Ewing の bracket 式水平振子に於て上部の吊り方は引掛り式にせず鋼板片を以て直接に固定枠に結び、この板に張力がかかるやうにする。又、下部の吊り方も同様に鋼板を以て張力になるやうな向きに結んである。圓筒は煤を塗るやうにし、長さ25.5種、直徑18種、1分間に5.6種進む。錘は5瓦、固有週期3.5~5秒、倍率40倍である。圓筒を廻す爲に同期モートルを用ひ、電極は20個あり、電流を50サイクルとして1秒に5回轉する。之を齒車装置によつて圓筒へ導くのである。多少方針は違ふけれども末廣博士も同様に船舶用の振動計を製作された。これには上下動もついてゐる。

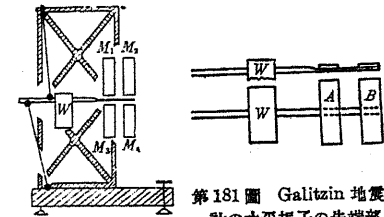
那須氏其他の設計 Ewing 式による強震計は前記諸氏の外に那須理學士の數回に渉る改良研究がある。水平式は殆ど架構構造物に近い装置であるが未だ完全なる實用成績は出てをらぬ。同氏は又上下動の強震計を Galitzin 式を以て作つた。このやうな強震計があれば、大なる地震の時に普通起るやうな故障がなく、從て強震の完全な記録が得られる譯である。

¹⁾ 岸上冬彦, "A Portable Horizontal Pendulum Seismometer," 地震研究所彙報, 10 (1932), 188-191.

Zöllner (1862) の吊り方は地震計としてよりも石本博士¹⁾の傾斜計として一層有名であるから、こゝには説明を省略し、委しくは同博士の傾斜計の論文を参照すべきである。

Rebeur-Paschwitz の水平振子は元來、重力上の問題を目的として作られたものであるが、その構造が寧ろ Ewing の bracket 型に屬してをり、之を地震計に應用する場合も既に示したやうに非常に多くあり、其他 Ehlert, Hecker 等によつても應用されてゐる。Hecker の地震計は重錘は60乃至200瓦、固有週期は10乃至15秒もある。

Galitzin 其他の水平振子 Galitzin の水平振子は數年來 London 及び Cambridge の Cambridge Instrument Co. に於て製作されてゐる。その大體の構造は右に示すやうな Zöllner の suspension であつて、錘 W より外に A なる箱と B なる



第180圖 Galitzin
水平振子地震計。

第181圖 Galitzin 地震
計の水平振子の先端部。

る鋼板とがある。A の中には四つのコイルがあり、水平振子が左右に振れるときにその上下にある M_1, M_2 なる馬蹄形磁石の爲に電流が起る。之が水平の棒に沿うて置いてある電線に傳はり棒の後部から更に galvanometer に導かれる。この galvanometer にある鏡と光源からの光とによつて振動の速度が寫眞的に圓筒上に記録されるのである。次に上圖にある B の銅板には上下にある M_3, M_4 なる馬蹄形磁石の爲に振動と共に電流の誘導が起され、從て水平振子は速度に比例する抵抗を受ける。即ちこれが制振器 (damper) となるのである。普通の水平振子は週期が12秒乃至25秒、倍率は1000倍以上である。又、この機械全體の重さは78瓦、高さは70種位である。

Galitzin の水平振子地震計は後に Wilip²⁾によつて改造され、Zöllner の吊り

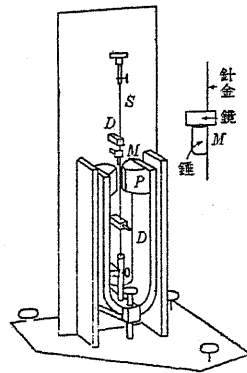
¹⁾ 石本巳四雄, 地震研究所彙報の數卷。

²⁾ J. Wilip, "Über die Anwendung der galvanometrischen Registriermethode in seismischen Gebieten," *Gerl. Beitr. z. Geophys.*, 19 (1928), 153-164.

方をやめて弾性的に直し、振動週期は2秒から30秒まで変化できるやうになつた。この外に尙二三の改良點がある。

205. 彈性其他を用ひる水平動地震計及び振動計

Anderson 及 Wood の地震計 彈性のみを以て復原力を與へてゐる地震計がある。彈性にしても棒の屈曲によるものもあり、又、振りを應用するものもある。Anderson 及 Wood¹⁾ の振り地震計は上下に引張つてある針金 S の中央部に心が外れて單に固定せる小圓壘形の錘 M があり、これに水平の震力が働くと、圓壘質量の端にある鏡に振れを生ずるのである。而してこの針金を挟んで磁石の極 P があり、之が制振器となつてゐるのである。又、針金の上下から三分の一位の所に夫々針金の横振動を減衰せしめるための油の制振器 D がある。固有週期は1秒前後である。光線を鏡に反射させて感光紙に取るのであつて、倍率は約 2000 倍である。



第182圖 Anderson 及 Wood の振り地震計

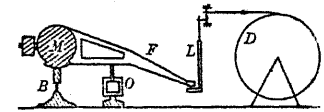
針金は wolfram であり、直徑 0.02 耗、長さ 16 種位、偏心質量は鏡ともて 0.7 互位しかない。この機械は遠地地震の加速度計として用ひるとき極めて正確な結果を與へる。又、その鋭敏性は微震の觀測にも適當してゐるやうに思はれる。

石本式加速度地震計 石本博士²⁾ は彈性板の屈曲抵抗を應用して加速度地震計を設計した。次圖に於て M なる圓壘形の錘が地震力を受けてその頸部にある B なる金屬製彈性板の屈曲抵抗を受けて左右に振動する。棒 F 及び適當の横杆 L を經て同期電動機で廻される所の圓筒 D の油煙紙上に記録を與へる。F の途中に油の制振器 O があつて加速度計として適當なる調整が與へられる。その一種では錘の質量は 13 耗位、そ

1) J. A. Anderson & H. O. Wood, "A Torsion Seismometer," Bull. Seism. Soc. Amer., 15 (1925), 1; Journ. Opt. Soc. Amer. & Rev. Sci. Instr. 8 (1929), 815-822.

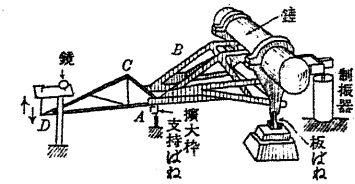
2) 石本巳四雄, "Etude préliminaire sur l'accélération des séismes," 地震研究所彙報, 9 (1931), 159-167; "Un sismographe accélérométrique et. .," 地震研究所彙報, 9 (1931), 316-332.

の變位は横杆によつて 213 倍に擴大される。固有振動週期は初め 0.15 秒であり、後に 0.1 秒位まで縮められた。初めの設計では 1.20 gal の加速度が 1 耗に記録された。この地震計は所謂感度はそれ程よくもないが各地震毎に非常に stable に記録を與へること、大小の地震に對して常によく働き、且つ取扱が便利なために、地震測定用としては極めて適當なものと考へられる。この加速計によつて普通の地震計では出て來ない點、即ち振幅が小なる割合に振動の消長の多いもの、換言すれば大なる加速度の部分がよく觀測できたのである。



第183圖 石本式加速度地震計

Mintrop の地震計 石本博士のと稍似た型式は Mintrop の地震計にも採用されてゐる。³⁾ 但しこれは光を用ひて記録を取り、又、固有週期が 0.69~1.04 秒もある。重錘の頭の板ばねは同じであるが、B なる棒は A 點の上下運動を更に擴大する爲に A に於て十字板を以て C なる棒に聯結し、十字板から極めて僅かに錘に近い所で C なる棒は A の下部にある支持ばねの頂點を軸として同轉運動をなす。從て D の上下動が非常に大きくなり、之が鏡を傾斜させて光學的に取る倍率が 1780 から 11300 倍にも及び得るのである。



第184圖 Mintrop 式地震計

石本末廣、高橋等の加速度計、其他 石本式加速度地震計の前身ともいふべきものは石本博士及び高橋理學士兩氏⁴⁾ の自動車用の加速度計である。前記の彈性板にゴムを用ひ、且つ屈曲に働かすのでなく、その伸縮を直ちに應用したものである。質量は 15.2 耗、倍率は 50 倍であるが、固有週期は 0.03 秒といふ小なる値を

1) L. Mintrop, "Über die Ausbreitung der von den Massendrücken einer Grossgasmaschine erzeugten Bodenschwignngen," Gött. Diss., 1911, 1-33.

2) B. Galitzin, Vorlesungen über Seismometrie (Leipzig & Berlin, 1914).

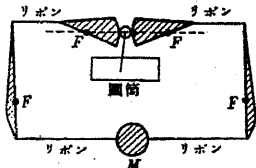
3) 石本巳四雄、高橋龍太郎, "自動車、汽車の振動測定を目的とする加速度計、(第一部水平動測定)," 地震研究所彙報, 7 (1929), 571-586.

有してゐる。

石本博士は又以前に毛細管加速度計¹⁾を考へた。これはゴムを屈曲に用ひ、それについてゐる錘が地震力を受けて振動する。之等及び金屬壁に囲まれた水槽中の液體が容積の變化を受けてそれに連る毛細管中に出入する。この出入を觀測すればよいのである。材料試験機の standardising に水銀の容積變化を用ひると似てゐるが、たゞ之を動力學的にしたものと見てもよい譯である。この装置はゴム等を使用しなければならぬ爲に今は餘り用ひられぬやうである。

末廣博士は石本博士²⁾と共に水銀の入つてゐる幅の廣い U 型微動計を以前に設計して建物の振動週期などを測定されたことがある。

田丸式加速度地震計 田丸博士³⁾は昔から力學的方針による加速度計を研究されてゐたが、未だ一般には使用されてをらぬ。しかし非常に短い固有週期が得られる點で面白いと思ふ。大體下圖の如き装置になつてをり、M の左右の振動



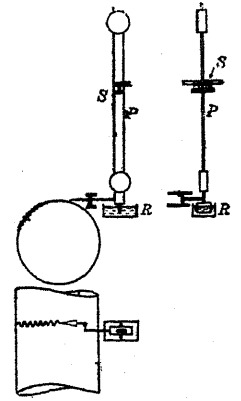
第 185 圖 田丸式加速度地震計。

が圓筒に傳はるのである。M の質量を夫々 7 疋, 36 疋, 580 疋, 4375 疋とすれば固有週期は夫々 1/10, 1/15, 1/30, 1/50 秒となるのである。即ち少しの固有週期變化に對して質量の増加が甚しい。實際には 40 疋と 5000 疋とが應用された。

末廣式地震波分解器 末廣博士⁴⁾は地震動の種々の週期を有する調和成分を出す爲に地震波分解器を作つた。frequency meter の reed に代るべき次圖の如き複振子を用ひた。全體として振子の數は 13 個であつて、夫々の週期は 0.22, 0.30, 0.40, 0.50, 0.70, 0.80, 0.89, 1.00, 1.20, 1.39, 1.62, 1.81 秒となつてゐる。錘は上下にあつて複振子をなし、又地震のときに振子が飛出さぬやうに knife edge は用ひずに S なる銅のリボンを用ひ

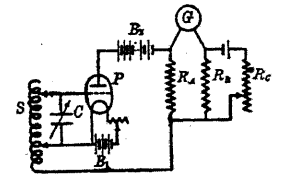
1) 石本巳四雄, "Un accéléromètre capillaire," 地震研究所彙報, 2 (1927), 87-103.
2) 末廣恭二, 石本巳四雄, Proc. 3rd Pan-Pacific Congress (Tokyo, 1926).
3) 田丸卓郎, "An Acceleration Seismometer," 帝國學士院紀事, 3 (1927), 35-40.
4) 末廣恭二, "地震波分解器及其記録," 地震研究所彙報, 1 (1926), 59-64.

てゐる。故にこの地震計の復原力は大體は重力であるけれども、このリボンの彈性にも極めて僅か與つてゐるのである。のみならず短週期の振子には全く彈性的復原力が働いてゐる。尙、下部には油の制振器があつて振子のどれかが共振に近づいたときにこれが多少大なる振幅になるやうになつてゐるから、極く一致せる共振にならなくてもその途中のあらゆる地震の週期に對して、この器械が有效に働いて呉れるものである。



第 186 圖 末廣式地震波分解器。

小幡式真空管加速度計 小幡博士¹⁾は真空管を用ひて土地の微動及び加速度を測定することを試みた。重錘の慣性力が condenser C を押してその capacity を變化させるときに真空管を通る anode current に變化を與へ、之が Einthoven の string galvanometer G に現はれるのである。anode current は R_A, R_B, R_C なる抵抗により potentiometer の方法によつて平衡させるのである。Duckert²⁾ は 1925 年頃同じやうな方法を地震の問題に應用した。



第 187 圖 小幡式加速度測定装置

波江野式ラヂオ地震計 波江野理學士³⁾はその優れたラヂオの知識とその専門の地震學とを兼ね用ひて極めて面白いラヂオ地震計を考案し、屢々改良して遂に非常に便利なものにまで完成した。その粗立は地震計振子と發振器が一箱に入つてをり、又別に發振器、アンプリフィルター、オッシロ

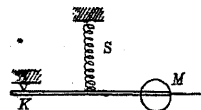
1) 小幡重一, "The Application of a Generating Valve Circuit to the Measurement of Pulsatory Oscillations, Microtremors and Tiltings," 數學物理學會記事, [3], 9 (1927), 1-15; "An Electrical Device for the Direct Recording of Acceleration," 同上, 83-88.
2) P. Duckert, "Seismophon und neuer Seismograph, zwei Erschütterungsmesser," Zs. f. Instrumentenkunde, 46 (1926), 71-73.
3) 波江野清蔵, "ラヂオ地震計," 地震, 2 (1930), 435-444; "The Radio-Seismograph," 天文地球物理學彙報, 8 (1931), 39-50.

グラフが集まつて一箱をなし、前者を測定場所に設置するのである。この二つの箱は有線でもラヂオ波でも連絡できる。地震計振子の週期は一例として水平の方が1.5秒上下の方が0.1秒、又器械の倍率は水平が2000倍、上下が3000倍もある。オッシュロググラフは二本吊りであつて固有週期1/500秒の動コイルである。6ボルト、5アンペヤの通る600回のコイル二個よりなる電磁場を持つ。この地震計は爆破作業の観測の如き極めて短位相差及び小振幅の電動を測定するに適してゐるのである。

Galitzin 加速度計 Galitzin¹⁾は重錘の壓力によるピエゾ電氣の變化を應用する加速度計を考へた。即ち、水晶を二板の金屬板の間に挟んで壓力をかけると金屬板上に壓力に比例する荷電が起ることを利用するのであつて、GalitzinはEdelmannのSaitengalvanometerを用ひ寫眞に取ることによつて目的を達したのである。同様な方法はWood²⁾によつて實用化された。

206. 上下動地震計

Gray-Ewing-今村上下動振子 上下動の地震計で最も古く、且つ合理的なものはGray³⁾及Ewingの上下動地震計⁴⁾である。左圖に於て水平の棒又は棒がばねSによつて吊られその一側には重錘Mがあり、他側はknife edge Kによつて下向きに支へられてゐる。この方法は我國に於て種々の場合に應用され、今村十五年式簡單微動計⁵⁾では逆向きknife edge Kの代



第188圖 Ewing式
上下動地震計。

1) B Galitzin, "Apparatus for the Direct Determination of Accelerations," *Proc. Roy. Soc., London*, 95 (1919), 492-507.

2) H. O. Wood, "On a Piezo-electrical Accelerograph," *Bull. Seism. Soc., America*, 11 (1921), 15-53.

3) T. Gray, "On a Seismograph for registering Vertical Motion," *Trans. Seism. Soc., Japan*, 3 (1881), 137-139.

4) J. A. Ewing, "A Seismometer for Vertical Motion," *Trans. Seism. Soc., Japan*, 3 (1881), 140-142.

5) 今村明恒, "地動計測整備の一般," 地震研究所彙報, 1 (1926), 7-25

りに右圖の如く十字板ばねを用ひてあり、其他種々の點で改良が加へられてゐる。重錘は7匁固有週期は7秒、倍率は28倍である。今村博士の上下動強震計も大體同じ方法が用ひられてゐる。之等の地震計によつて古い地震計の缺點がよく取除かれた。

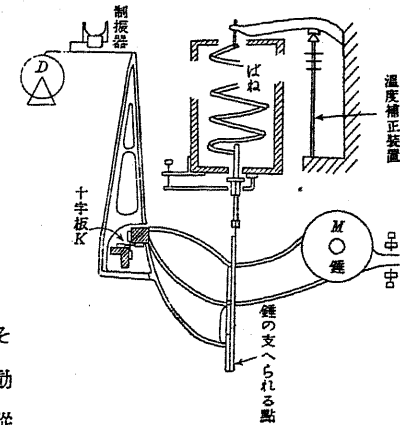


第189圖

Wiechert 其他の上下動地震計 Wiechertは1800匁の簡単な上下動地震計を作つた。之は單に重錘を二列に分れた8本のばねで上方から吊つてあるに過ぎない。而して之に油の制振器や温度のための補正装置其他の注意を加へた點がある。固有週期は5秒、倍率は200倍である。

Wiechert 式の小型の上下動地震計は上のやり方とは異なり、Ewing式や今村式又はGalitzin式等に少し宛似た方法を採用してゐる。knife edgeにあたる所は十字板を用ひ、錘は160匁位である。固有週期は4秒、倍率は80倍位である。

de Quervein及Picard¹⁾の21噸及びその携帯用、Strassbourg²⁾の19噸等の水平動地震計は上下の方向へばねで吊つてあり、従て上下動の地震計ともなつてゐる。従て之等は萬能地震計であるといふ事ができる。



第190圖 Wiechert 小型上下動
地震計。

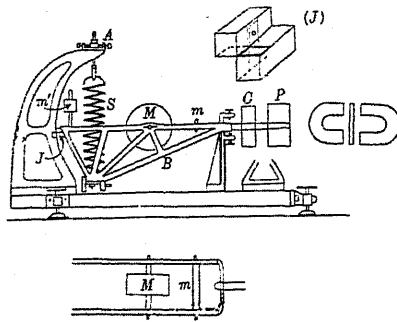
Galitzin 其他の上下動地震計 Galitzinの上下動地震計³⁾はDorpatのMasing及Cambridge器械の會社で作られる。95種×26種の鑄鐵の臺の上に乘

1) de Quervein, 前掲。

2) E. Rothé et J. Lacoste, 前掲。

3) B. Galitzin, "Sur une nouveau type de sismographe pour la composante verticale," *C.R.*, 150 (1910), 1727-1731.

り、高さ約 55 種の棒の上端 A からばね S の上端を支へ、ばねの下端は水平の棒 B の下端を吊つてゐる。S なるばねは太さ 0.6 種、巻き直径は 8 種、巻き数は 10、上端の金具は A の所で上下向きのねぢと水平方向のねぢとによつてばねの多少の高さと水平



第 191 圖 Galitzin 上下動地震計。

の位置とを加減することができる。ばねの下端は B 棒の下端の板と結合し、その結び方は上端と大體同じである。ばねは重錘の力によつて延びてゐるとき $57\frac{1}{2}$ 種を支へてをり、ばねの中央部の高さが重錘の平均の高さと一致してゐる。重錘 M を支へてゐる棒は平行せる二重の眞鍮金物製であつて、その上邊にある溝に沿ひ且つ棒の長さの方向に M を多少移動せしめることができる。小なる重錘 m も同様に移すことができ、僅かの補正をなさしめる。又、棒の根元にある垂直の棒に沿うては小質量 m' を上下に動かして棒全体の重錘組織の重心の位置を棒の根元の支への點 J と同じ高さにするやうに加減ができ、以て水平方向の震力によつて棒に傾斜運動の起るのを防いでゐる。支への點 J には互に直角に交叉せる蝶番、即ち十字板があることは今村式の場合と同じである。次に棒の延長上にはコイル C と銅板 P とがあり、その各兩側に馬蹄形磁石が一組宛合計四個の磁石が置いてある。即ち、棒の振動に伴つてコイルにはその速度に比例する電流が起るから、之をガルベに導いて記録を取ることができ、銅板には渦電流が起り、速度に比例する制振作用をなす。之等の作用は水平動振子の場合と同じである。この器械の固有週期は 12~13 秒、倍率は 1000 倍以上である。之等の倍率は常に制振器の働かぬ場合を意味することは言ふまでもない。又、Galitzin の器械では常に振動の速度が観測されるのであつて、この點は變位地震計と加速度地震計との中間に相當するものであることがわかる。

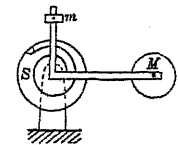
Galitzin の上下動地震計を改良せるものや模倣せるものに Wilip の器械や Navarro-Neumann の報告にあるものなどがある。那須理學士は Galitzin 式の記

録を機械的にやる事に成功し、且つ 50 種の錘を用ひて固有週期 32~28 秒を得た。¹⁾

又、最近には Benioff²⁾ が telephone receiver の原理を應用して Galitzin の地震計を大分改良せる上下動地震計を作つた。固有週期は 0.5 秒、錘は 100 種である。

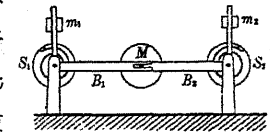
上下動地震計の一つの困難な點はばねが温度によつて非常に鋭敏に伸縮することである。その爲には材料を変更したり、恒温装置の必要がある。

田中館式上下動地震計 田中館博士³⁾ は下圖に示すが如く S なるばねによつて重錘 M を吊り、上下動の爲の偶力に對して安定を保たせることを考へた。且つ neutral の安定を得る爲に m なる質量を上げ下げするのである。しかしこの儘では上下動の或る一方向の振動に對して不安定であり、



第 192 圖

又左右方向の水平動や土地の傾斜によつてその位置が擾亂される。これ等を防ぐ爲に右圖の示すやうにばね S_1, S_2 及び小質量 m_1, m_2 を M の兩側に附し、且つ水平の棒は B_1, B_2 として M の軸の所で一方は軸に joint させ、他の一方は slot にしてつないだ。これによつて M なる重錘は自由に上下運動ができる。 S_1, S_2 がある爲に



第 193 圖 田中館式上下動地震計。

上下動が兩方共に安定であり、又、 m_1, m_2 のある爲に左右の水平動や土地の傾斜作用があつても偶力が互に打消すことになるのである。この地震計によつて上下動の振幅 3~6 種までも測定することができる。

207. 地震計の記録装置

地震計の記録装置の方法には機械的、光學的、galvanometer による方法、oscillograph 的にやる方法などがある。

機械的のもので最も大切な點は變位傳達方法と擴大機構とである。これ等は個々の場合に夫々説明はしてあるが、要點は横杆、U 型金具、溝型金具等の適當なる

1) 今村明恒, "地動計測整備の一般," 地震研究所集報, 1 (1926), 7-25.

2) H. Benioff, "A New Vertical Seismograph," Bull. Seism. Soc., America, 22 (1932), 155-169.

3) 田中館愛橋, "Vertical Motion Seismometer," 震災豫防調査會歐文報告, 7 (1902), 1-4.

應用にある。又場合によつて磁性の棒を U 型金具の代りに用ひることもできる譯である。ヘンの所は摩擦を少くする爲に溝型金具を用ひてそれから先の部分の重さの數割のみが紙面を壓する様にし、且つこの部分の材料はアルミウム、麥藁、ガラスの薄片等を用ひてできるだけ軽くする必要がある。さうかといつて餘り軽くすると煤煙紙の上に跡が残らない。多くの人の研究によると少くも 0.2~0.3 厘の壓力が必要であるといはれてゐる。圓筒は眞鍮やアルミウムが普通であるが木製も屢々用ひられる。圓筒を回轉させる方法は大別して三種となる。即ちばね時計を用ひる方法、回轉軸に錘をぶら下げその速度を调速装置で加減する方法及び同期モートルを用ひる方法である。錘を下げる時の调速装置は風切り、圓錐振子、摩擦调速器、電磁的方法等に分れる。ばね時計の方法は數分の一秒を争ふ地震計には餘り適當でない。しかし數秒の程度には正確である。同期電動機の方は電源が常に變化すると、野外で用ひられないから困る。しかし石本¹⁾、岸上²⁾の兩氏は同期電動機を用ひて震動の形を見る事に成功した。あらゆる點から考へると摩擦调速器のある錘の方法が最もよいやうである。圓筒の直徑、巻き紙の質、煤の定着液其他について地震観測所毎に特殊の考案方法があるけれども何れも説明を省いておく。又紙の走る速度は近來の地震計では一分間に 10 耗乃至 60 厘位になつてゐる。地震計の上に時間を記録するには、電磁石によつて別に備へつけたペンを一定毎に横に引張つて刻みをつけてもよいが、今日の地震計で多く採用されてゐる方法は所謂、吸上の方法であつて、時計の一定時例へば一分毎に磁石を挟んでゐる電流の circuit を close することである。その結果、曲線狀の針金が引きつけられ、從てその上にまたがつてゐるペンが持ち上げられて地震記録の線がその時だけ中斷されるのである。記録装置が溫度によつて非常に影響される點は豫め注意しておかねばならぬ。

次に光を用ひて記録する方法は餘りにもよくわかり切つてはゐるが、少し注意したいことは、フィルムや感光紙に光をあてて線を描くと摩擦こそないけれども、煤

1) 石本巳四雄, "Etude préliminaire sur l'accélération..." 前掲。

2) 岸上冬彦, "記録用圓筒の回轉を一様にする一考察," 地震, 2 (1930), 487-493.

の紙に機械的に描くよりも鋭く出て來ないこと、光の場合には地震の振動速度によつて線の明暗の違ひが起ることその他暗箱の装置、仕事の手數、經費等種々の難點のあることである。光のあて方は説明するまでもないが、光源からの光をスリットを通過させてからレンズを通し、振動體の所にある鏡から反射させ、之を暗箱にある cylindrical lens を通過させて中の圓筒上にあてればよい譯である。この方法は Rebeur-Paschwitz が 1889 年以來重力測定に用ひたものである。…また、Milne は 1894 年以來、その地震計に於て極めて簡単な方法を應用して來た。即ち前にも述べた様に光源からの光を傾斜鏡から反射させ、之を暗箱のスリットを通して圓筒にあてるのである。但しこのスリットの眞上に之に直角のスリットが地震計の記録ペンに當る所にあつて振動するから、光は點線となつて圓筒上にうつり、之が地震動の曲線を描くのである。しかし Milne-Shaw のものになると普通の如くレンズをつけたり、又、振動體に鏡をつける所の擴大方法を考へてゐる。光や機械的方法を適當に結合して倍率を幾らでも大きくする事もできる。Wiechert の如きは 1906 年既に水平動地震計に對して 50 000 倍を得、1922 年には上下動地震計に對して 2 000 000 倍を得てゐる。³⁾ 尙、光の線を鋭く出すには鏡の距離、cylindrical lens の開き角、スリットを通る光の加減等の調整によつて適當な所まではなし得る。光で記録する場合に時間を記録するには光のあたり方を一定時に打切れるやうにする方法が多く採用されてゐる。

Galvanometer によつて記録する方法は 1903 年 Galitzin が始めたのであつて、委しい事はその地震計の所に擧げておいた。又、oscillographic に記録する装置も既に述べてあるし、又、近來は各種の多くの實驗に用ひられてゐるから省略する。

終りに附加へたい事は Schuler⁴⁾ が一般の振動記録の零の線を誤差論的根據から出す方法を與へた事や、坪井助教授⁵⁾ が地震計の振動記録から土地の永久的移

3) E. Wiechert, "Seismische Untersuchungen," *ZS. f. Geophys.*, 1 (1924-05), 14-30.

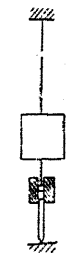
4) Max Schuler, "Die Berechnung der Gleichgewichtslage von gemessenen Schwingungen auf Grund der Fehlertheorie," *ZAMM*, 12 (1932), 152-156.

5) 坪井忠二, "On the Possibility of Finding the Permanent Crust Dislocation caused by an Earthquake by Means of its Seismogram," 帝國學士院紀事, 7 (1931), 371-374.

動を算定する方針を示した事などである。

208. 地震計の Astasierung 及 Damping に就て

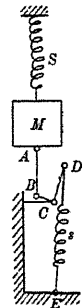
Astasierung 變位地震計はその週期をできるだけ長くして理想的には棒を空間に於て一定位置を占めさせたいのである。斯様に週期をできるだけ長く殆ど無週期に近くすることを Astasierung といふ。水平動の単一振子についてはその振子の長さをできるだけ長くして週期を長くする事が試みられたが大して大きくすることができなかつた。しかし水平振子になると週期がいくらでも長くすることができ、大森博士¹⁾は原則として135秒のもの考へ、今村博士²⁾は3分半の長週期地震計を考案、實際に作成した。



第194圖 Ewingの複振子。

水平動地震計中垂直振子の場合Ewing³⁾が1882年既に複振子の形を採用し、其後MilneやKnottも之を改良して用ひてゐる。Wiechertの逆振子も既に述べたやうに立派なAstasierungを用ひた。

水平振子型地震計はそれ自身でAstasierungが行はれてゐるのである。何れの地震計も長週期にすることができるところから見ても明かであらう。今村式長週期地震計はその極めて巧妙な場合を與へてゐるのである。



第195圖 E. Wiechert 及 de Quervein の Astasierung の方法。

上下動地震計にも種々のAstasierungが行はれ、Grayの上下動地震計にEwingの考案になるAstasierungが施されたことや、Wiechertの1300疋や、de Quervein 21噸及び同氏の可搬式地震計に於ける巧妙なるAstasierungが有名なものである。左圖に於てMは重錘、Sは上下動のばね、BC、CDはCが一定位置にあり且つCで互に直角を保つ横杆である。又sは常に張力の状態にあるばねであつてMの静止の位置

¹⁾ 大森房吉, "Long Period Horizontal Pendulum," 震災豫防調査會歐文紀要, 1 (1907), 192-193.

²⁾ 今村明恒, "A Long Period Horizontal Pendulum," 帝國學士院紀事, 2 (1923), 489-491; "Further Note on Seismic Observations with Long Period Horizontal Pendulums," 帝國學士院紀事, 4 (1923), 367-370.

³⁾ J. A. Ewing, "Seismological Notes," *Trans. Seism. Soc., Japan*, 5 (1882), 89-93.

ではDEなる線は鉛直であり、且つC點を通過する。今Mが振動してもち上るときはDEは圖の如き位置を取るからsがCの周圍にモーメントを與へMを益、上にもち上げる傾向を取り、同様にMが下るときには益、之を下げる性質を取る。即ちMの運動の週期を長くしてAstasierungを與へるのである。

Damping 地震計にdampingが必要であり、且つその方法に空氣、液體、電磁の三種類のある事は便宜上本章の初めに擧げておいたから、こゝでは委しい説明を省略する。空氣damperはWiechertによつてその水平及び上下動の地震計に用ひられ、又、mainkaは種々のair damperを作つてそれを地震計に應用した。Hecker¹⁾も電氣のcondenser型のair damperを製作した。

流體のdamperは1907年Mainkaによつて初めて用ひられ、以後多くの地震計に應用されたことは既知の事柄である。

magnetic damperがGalitzinによつて考案され、後にMilne-ShawやAnderson及Wood其他によつて種々の形で用ひられてゐることも個々の場合に説明してゐるから委しい事を省略しておく。

地震計に摩擦抵抗が働いて振動を減衰せしめる事は昔から問題になつてゐる。中村博士²⁾は地震計の場合に之を適當に處置する方法を考へた。

209. 工學用振動計

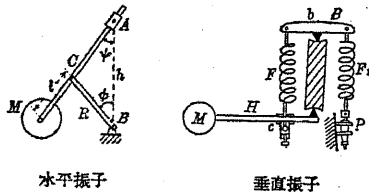
工業上の機械や構造物の振動を測定する爲に地震計をその儘應用することは種々の點に於て難點がある。加速度が大なる爲に普通の地震計では破損し易い上に、ばねの部分振動してその慣性力が影響する爲に地震計その儘の方針では不完全なものになることや、強制振動週期が規則的な爲に普通の振動計では共振に陥り易いこと、又常に携帯に便利でなければならぬことなども注意すべき事柄である。しかし一定の週期を有する強制振動が多いといふことは同時に普通の地震計のや

¹⁾ O. Hecker, "Einrichtung für eine variable Dämpfung des Horizontalpendels," *ZS. f. Instrumentenkunde*, 27 (1907), 6-7.

²⁾ 中村左衛門太郎, "An Approximate Solution of the True Motion of the Ground from a Record of a Pendulum Seismometer Subject to Friction at its Recording Point," 帝國學士院紀事, 8 (1932), 155-158; "一定の摩擦が働く場合に於ける地震記録," 地震, 4 (1932), 332-348.

うな初動に對する器械上の用心が比較的におろそかでもよいといふ點や、又實際上の用途から振動振幅が地震計程厳密に現はれなくてもよいことなどは、便利な點である。それにしても之等の事柄も出來得るならば地震計のやうに正確であるに越したことはない。

地震計式振動計 土地の部分的振動を測定する爲に製作された携帯用振動計は主として地震研究家によつてをり、例へば Mainka¹⁾、大森博士²⁾の強震計、大森博士の船車振動計、Mintrop³⁾の器械などがある。Mintropの振動計は石本博士の加速度計にも多少似た形をなしてをり、重錘の頸部に當るばね板が復原力を與へる。記録は寫眞的に行はれ、重錘の固有振動週期は0.69~1.04秒、倍率は1780~11300倍である。液體のdamperがあつて減衰率は3.4である。このほかに Grumnach⁴⁾、Sauer⁵⁾、石本及び高橋式⁷⁾などの地震計的振動計がある。



水平振子

垂直振子

第196圖 Schlickのpallograph.

SchlickのPallograph 以上のものから獨立して Schlickは船體振動測定用として Schlickの pallograph⁸⁾を作つた。此 pallographは水平動振子と垂直動振子とがならべてあり、夫々左圖の如き構造をなしてゐる。水平動振子はA,Bを支持點とする一種の重力複振子であつてMなる圓錘形の錘はその兩端に於て圖に

1) C. Mainka, "Instrumente für die Beobachtung von Erschütterungen," ZS. f. tech. Phys., 3 (1922), 145-152, 241-249.

2) 大森房吉, "On the Vibration of Reinforced Concrete Chimneys," 震災豫防調査會論文紀要 (1918).

3) L. Mintrop, 前掲.

4) B. Galitzin, Vorlesungen über Seismometrie (Leipzig & Berlin, 1914).

5) H. Steuding, Messung mechanischer Schwingungen (Berlin, 1928).

7) 石本巳四雄、高橋龍太郎, "自動車、汽車の振動測定を目的とする加速度計(第一部水平動測定)," 地震研究所集報, 7 (1929), 571-586.

8) O. Schlick, "Vibrationserscheinungen der Dampfer," ZVDI, 49 (1905), 1501-4, 1561-6.

9) O. Schlick, "On Apparatus for Measuring and Registering the Vibrations of Steamers," TINA, 84 (1893), 167-177, 117; "On the Vibrations of Steamers," TINA, (1884).

示せるが如き棒の棒で支へられてゐる。A,Bは支持點であつてC點はピンになつてをり、h,l,Rなる長さは一定であるから、ACなる棒はAに於けるソケットの中で多少動き得る様になつてゐる。又、Aなるソケット自身も上下に動き得るやうになつてゐる。この水平動振子の固有振動週期は Hort¹⁾の計算によれば

$$T=2\pi\sqrt{\frac{H}{g}e^{\frac{h}{H}^2}}$$

である。茲に $H=h+l-R$, ϕ_1 は $t=0$ に於ける ϕ の値である。振幅が小なるときには

$$T=2\pi\sqrt{\frac{H}{g}}=2\pi\sqrt{\frac{h+l-R}{g}}$$

となる。固有振動週期は秒の程度である。

上下の振子は Ewing 式の上下動地震計と大體同じであるが、ばねFの上端はBに連結してF₁なる別のばねと釣合つてゐる。Pを加減してMの腕Hを水平に保つことができる。cなる點は桿杆Hに沿うて左右に移すこともできる。F₁なるばねの有効長を調整することによつて固有振動数が毎分20から200位までに變更することができる。

Schlickのpallographには時計仕掛けによつて紙を送る装置と電磁的に時間を書入れる仕掛けとがある。²⁾ 尙、Sperryのpallographも Schlickのものと同じやうな形を持つてゐる事を附加しておく。Schlick式の器械は大して面白いとも思はれないが工學上餘り有名であるから、多少委しく説明しておいた。

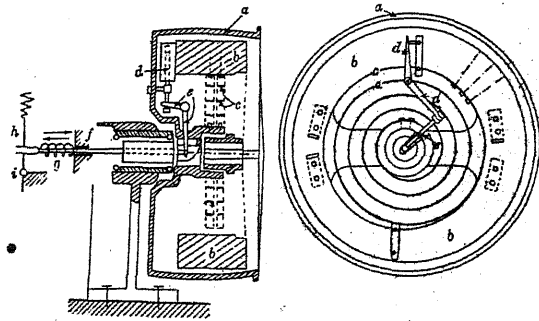
GeigerのTorsigraph及Vibrograph Geigerのtorsigraph³⁾は純粹の振動計でなく、車軸の靜力的及び振動的捩れを記録する器械である。次圖に於てaは帶狀板であつて計測すべき車軸から伸縮のない調帯を導いて之に巻きつけて同

1) W. Hort, Technische Schwingungslehre (Berlin, 1922), 82.

2) "The Sperry Pallograph," Engineering, 101 (1916), 205-206.

3) J. Geiger, "Der Torsigraph, ein neues Instrument zur Untersuchung von Wellen," ZVDI, 60 (1916), 811-816, 861-865.

4) J. Geiger, Mechanische Schwingungen und ihre Messung (Berlin, 1927).



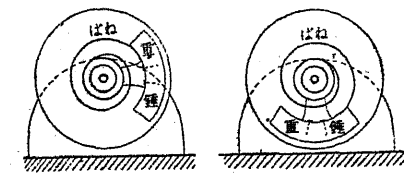
第 187 圖 Geiger の torsigraph.¹⁾

轉せしめるのである。この中に b なる振動輪があつて、その軸の方向及び位置は a の軸と一致してをる。しかし a と b との同轉角は位相が違ふやうになつてゐる。a の軸部に近い所から時計の巻ばね c を以て b に聯結されてをり、b の同轉はその質量の爲に大體均速度であるのに、a には測定すべき車軸の速度變化がそのまま傳はるのである。茲に a と b との間に絶えず角の位相差の變化が現はれる。之を互に聯結された二組の V 型槓杆 d 及 e によつて變化を f 軸の方向へ傳へ、この f から更に記録紙上のペンへ傳へられるのである。d なる V 型槓杆は振動輪と帶狀板の速度の差によつて、車軸に近い枝に於て半徑の方向の運動をなし、從て角點を帶狀板の一部に支へられてゐる e なる V 型槓杆は、車軸から遠い方の一端に於ては半徑方向へ、近い方の端は車軸の軸方向の運動をなして f に押し引きを與へるのである。g なるばねは f を e の方向へ壓す作用をなし、h なるペンは f の先端の U 型金物から成る支點の周圍に動き、紙の上にインキの記録を作る。急な振動に對しては h が架構的構造を以て軽くしてある。b なる振動輪の固有振動週期はその同轉の週期よりも遙かに長くなければならぬ。この外、器械には時計仕掛けの紙巻きと、時間記録の爲の電磁装置とが附いてゐる。

Geiger の vibrograph²⁾³⁾ はその torsigraph を少しく改良したものであつて、

1) J. Geiger, *Mechanische Schwingungen und ihre Messung* (Berlin, 1927).
 2) J. Geiger, "Untersuchungen von Schwingungen an Turbodynamos mit Hilfe des Vibrographen," *ZVDI*, 66 (1922), 437-440.
 3) W. Lehmann, "Der Vibrograph," *Schiffbau*, 25 (1923), 107-117.
 4) J. Geiger, "Messgeräte und Verfahren zur Untersuchung mechanischer Schwingungsvorgänge," *Proc. 1-int. Congr. Appl. Mech.* (Delft, 1924), 359-362.

torsigraph の振動輪の約 4/5 の部分を取除いて下圖の如く扇形の部分を殘し、且つ外側の帶狀板を單獨に切り離して器械の cover となしておけばよいのである。巻ばねをその中軸が扇形をなす振動輪に結びつけておくことは torsigraph の通りであり、又記録紙への傳へ方も變りがない。この振動計は重錘が彈性的に支持されてゐるから、上圖の如く扇形部を水平に出して上下動を測定することもできるし、垂直に下げて水平動を測定することもできる。又、重錘を斜の方向へ出しても振動検測に用ひられる。今、下圖の如く鉛直線に對して β なる角が靜力的平衡位置とし、軸から重錘の重心 G までの距離を h とし、外の振動力の爲に OG に對して直角方向に x だけ變位があつて重錘が平衡の角から更に α だけ角變位をなしたとする。今 O のまはりの重錘の質量慣性モーメントを J 、錘の質量を M 、固體其他の摩擦力を R 、粘性抵抗の係数を Jb 、巻ばねが單位角だけ廻る爲の彈力係数を c とすれば、次の方程式が作られる：⁴⁾



鉛直動振子 水平動振子
 第 188 圖 Geiger の vibrograph.

今、 $J/Mh = \lambda$ と書けば、固有振動週期は

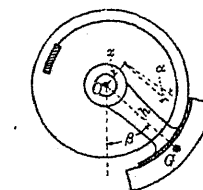
$$J \frac{d^2 \alpha}{dt^2} + c \alpha + Mgh \alpha \cos \beta + 2Jb \frac{d\alpha}{dt} = -Mh \frac{d^2 x}{dt^2} \pm R.$$

今、 $J/Mh = \lambda$ と書けば、固有振動週期は

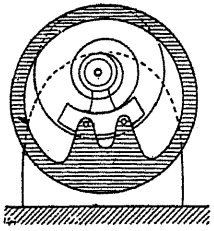
$$T_0 = 2\pi \sqrt{\frac{1}{\frac{c}{J} + \frac{g \cos \beta}{\lambda}}}$$

となる。從て鉛直動振子の場合には $\cos \beta = 0$ であるから $T_0 = 2\pi \sqrt{\frac{J}{c}}$ となる。一般に Geiger の振動計は固有週期が 1/5 乃至 0.001 秒の間になつてをり加速度計として適當してゐる。尙、重錘は 1 疋であり、倍率は 24 倍が普通である。

4) J. Geiger, "Zur Theorie des Vibrographen," *Werft Reederei Hafen*, (1924), Ht. 11.



第 189 圖 Geiger の vibrograph の振子.



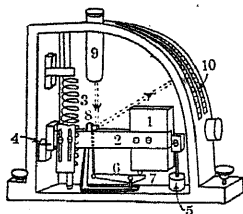
第200圖 附加輪を有する Geiger の vibrograph.

Geiger の vibrograph の固有週期を寧ろ長くする爲に左圖の影線のある部分の如き附加輪を重錘に添附することがある。これによつて固有週期を1秒前後まで長くすることができる。

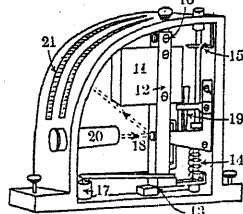
Geiger はその vibrograph の calibration をなす爲に特別に考案された振動臺を設計した。¹⁾

Carl Schenck の振動計 Darmstadt にある Carl

Schenck の工場で作られた振動計は地震計の普通の上下動振子と Wiechert の astatic の水平動振子を應用して巧に考案されたものであつて、倍率は外部の振動週期0.30秒~0.0012秒に對して70~400倍、固有振動週期は1.5秒である。上下動振子は1が重錘、2が槓杆、3がばね、4が十字ばね、5が制振器、6は槓杆であつて、7で押されて8なる鏡に回轉運動を起す。9が乾電池からの光源であつて鏡に當つた



上下動振子



水平動振子

第201圖 Carl Schenck の振動計.

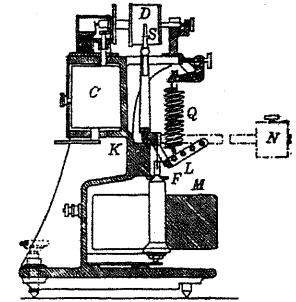
光が10なる目盛圓弧の上へ映るのである。外枠の両面には各、蓋がある。次に水平動振子では11が重錘であつて、12は13に十字ばねのある槓杆、14は安定ばねであり、又17は制振器である。鏡18は上下動の場合と同じやうに槓杆組織19によつて回轉し、20なる光源からの光を目盛圓弧21に反射する。この場合にも乾電池と外枠の蓋がある。而してこの器械は一成分をとると全重量にして10疋程ある。

Maihak の振動計 Hamburg の Maihak の工場で作られる振動計²⁾は大森式水平振子の吊線を伸縮できるやうにしたものであつて、一つの器械で同時に上下動と水平動とを測定できるものである。固有週期は1秒乃至4秒、倍率は5~30倍

¹⁾ H. Steuding, *Messung mechanischer Schwingungen* (Berlin, 1928)

位しかない。

Cambridge の振動計 Cambridge の一つの上下動の振動計は下圖に示すが如く M なる重錘 (16磅) が F なる柱を通し金屬性の薄片で上の鋼のブロックに支へられてゐる。K はそのブロックのピボットであり、Q はこのブロックの lever を支へるばねである。重錘は K なるピボットと Q なるばね及び底部にある水平の薄板ばねによつて支へられてゐることになる。Q の上部は臺に、下部は四つの穴の何れかにさし込んで振動の固有週期が變更できる。ブロックの上には腕が出てゐる。D なる圓筒面にある可動性のセルロイドのフィルムに記録される。C は圓筒を廻すための時計装置であり、尙、圓筒の内部には別の時計で動く計時用マグネットがある。N は激しい振動のときに附加へ



第202圖 Cambridge の振動計.

て用ひる質量である。フィルムの速度は毎秒4~20耗である。固有振動週期は2.0~1.0秒であり、又、この器械によつて10⁻¹種までの振動を測定することができる。Cambridge にはこの外に加速度計³⁾として二枚の平行に置かれた薄板の先端に一つの重錘をつけ、外からの振動によつてこの重錘が動くのである。記録紙は毎秒3乃至20耗も動き、振動の制振には電磁式が用ひられてゐる。固有振動數0.025秒である。製作者の名を取つて之を Collins の加速度計といふ。このやうにばね式の加速度計は飛行機の機體の加速度計^{3b)}として屢、用ひられてゐる。即ち重錘を兩方から彈性梁で支へ、その振動を取る方法である。

其他の振動計 末廣博士及石本博士は、後までは餘り應用されなかつたやうであるが、幅の廣いU管内に水銀を入れたものを作つて週期の長い一振動計とし、

¹⁾ *The Engineer*, 132 (1925), 52.

²⁾ H. Wendroth u. G. Wollé, "Aufbau und Eigenschaften des DVL-Beschleunigungsschreibers YV," *ZFM*, 17 (1926), 532-534.

³⁾ J. v. Köppen u. W. Hübner, "Beschleunigungs-Messungen an Flugzeugen," *ZFM*, 17 (1926), 534-537.

之を建物の振動測定器として用ひられ、¹⁾印刷物としては遂に發表されなかつたが、地震計の方針による船舶振動計を製作して實際の問題に應用された。²⁾ このやうな器械はやはり多くの人が用ひてくれなければ、その缺點も見出されず改良の餘地もなくなるものである。

振動計の倍率や感度を問題にせぬ場合には、種々の變位乃至加速度の振動計がある。Kelvin Bottomley & Baird 工場の Fullarton の vibrometer³⁾ では一端固定、他端自由なる棒の固定點を種々變化させて共振の時の棒の長さを測ることによつて振動數を見ることができる。横田博士⁴⁾ の振動計は種々の固有振動數を有する棒状體を frequency meter の如くならべておいて、同様に共振のものを取るのである。又、Hall⁵⁾ は大森式水平振子と三つの巻きばねでぶら下げた上下動振子とを用ひて建物の振動を測定し、Mallock⁶⁾ は板に或る装置を施したものを振動體として用ひた。Liebowitz⁷⁾ は Ewing 型上下動振子の boom の支點をピンにし、鉛直ばねの支點を boom よりも高くし、重錘も同時にこの點へ持つて來たやうなものを上下動振子として設計して自動車の振動を測定した。Hechler⁸⁾ は扉型水平振子を用ひた。この外、Ambronn⁹⁾ のばね付の鑛業用地震計や Jones¹⁰⁾ の週期 0.23 秒、倍率 8~9 倍の人爲地震測定器などもある。

¹⁾ 末廣恭二、石本巳四雄、三菱造船會社研究所報告 (1925); 其他前掲。

²⁾ 末廣恭二、地震研究所談話會講演。

³⁾ "The Vibrometer," *Engineer*, 118 (1914), 50.

⁴⁾ 横田成年, "Vibration of Steamers," 東京帝國大學工學部紀要, 4 (1910), 1-24; 其他。

⁵⁾ E. E. Hall, "Vibrations of Buildings..." *Electr. World*, 60 (1912), 200; *Engineering News*, 68 (1912), 198.

⁶⁾ A. Mallock, "Vibration Amplitude Indicator," *Power*, 54 (1921), 635.

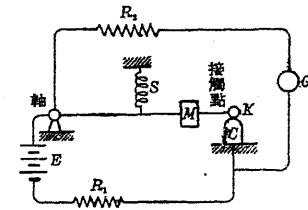
⁷⁾ B. Liebowitz, "The Measurement of Vehicle Vibrations," *Journ. Soc. Autom. Eng.*, 6 (1920), 17-25.

⁸⁾ F. G. Hechler, "Balancing Machines," *Journ. Amer. Soc. Nav. Eng.*, 31 (1919), 405-419.

⁹⁾ R. Ambronn, "Der kleine Erschütterungsmesser der Prospektion G. m. b. H.," *ZS. f. tech. Phys.*, 8 (1927), 160-161.

¹⁰⁾ J. H. Jones & D. T. Jones, "A Portable Seismograph for Recording Artificial Earthquakes," *Journ. Sci. Instr.*, 9 (1932), 8-16.

工學上に用ひられる純粹の加速度計も非常に多くの種類がある。Galitzin¹⁾ のピエソ電氣を用ひる方法等は既に述べてある。Grumnach²⁾, Kijlstra³⁾, Zahm⁴⁾, Langer⁵⁾ のもの等はいづれも有名である。最近には Pionier vibrograph⁶⁾ などがある。Langer の加速度計は重錘を弧形の板を以て支へた上下動の振動計であつて Kijlstra のものと共に汽車の振動を測定し、Zahm は飛行機の衝撃性振動に用ひたのである。Grumnach の振動計では支持された棒の接觸點が一定以上の加速度によつて離れたときにその點を通る電流に變化が起り、それを Saiten-galvanometer によつて測定するのである。



第 203 圖 Grumnach の振動計。

210. 電氣的、音響學的及び光學的振動測定法

音響の振動數、強さ其他を測定する方法は近來非常に進歩し、從來の機械的振動の測定法と殆ど比較にならぬ程發達してゐる。之等のことは小幡博士其他の有益なる著書に期待する所が多く、茲にあまり述べる必要はないけれども、その中には直接機械的振動の測定に役に立つものもあるから、其等の名稱だけでも擧げておきたいと思ふ。

音叉を用ひて振動體の振動と一緒に記録紙に書かせることは昔からわかり切つてゐる。これも光學的に音叉の先端に置かれた鏡に光源からレンズ、スリット等

¹⁾ B. Galitzin, "An Apparatus for the Direct Determination of Accelerations," *Proc. Roy. Soc., London*, 95 (1919), 492-507.

²⁾ v. Leo Grumnach, "Über neue Methoden und Apparate zur Messung von Erdschütterungen kleiner Periode," *Ann. Phys.*, 30 (1909), 551-973.

³⁾ Kijlstra, "Vorrichtungen zur Untersuchung des Laufes von Eisenbahnfahrzeugen," *ZVDI*, 64 (1920), 93-94.

⁴⁾ A. F. Zahm, "Development of an Aeroplane Shock Recorder," *Journ. Franklin Inst.*, 188 (1919), 237-244.

⁵⁾ P. Langer, "Aufgaben der Forschung in Kraftfahrwesen," *ZVDI*, 70 (1926), 145-148.

⁶⁾ "Der Pionier Vibrograph, ein Schwingungsmesser für Flugzeuge," *ZVDI*, 76 (1932), 420.

を通して来た光をあてて反射せしめ、圓筒上に記録させることもできる。又、回轉鏡に flame の光をあててその像を作り、振動數の測定用とする方法もあり、之を改良せるやり方もある。stroboscopic に振動數を取る方法や、音響器械の resonance の方法、Kundt's tube 式の方法、電氣的方法殊に交流の振動數をその儘取る方法、其他種々の方法がある。

振動の振幅を測定する爲に、種々の光學的方法や、Rayleigh's disc の方法又は音の壓力を測る方法を、音響の強さでなく振動體の振動振幅を測ることに變更させることはそれ程困難でないかも知れぬけれども、今日では無線の研究が非常によく進歩した爲に microphone や熱電子管を用ひて微振動の測定をする方が有効である。このことに関しては地震計の所で既に一部分説明しておいた。電氣的といふ程でもないが oscillograph を用ひて振動振幅を測定することはよく知られたことである。又、ピエゾ電氣が振動測定に用ひられることも前に述べた通りである。

主として電氣的方法によつて振動を測定することは小幡博士や波江野理學士の外に Langer¹⁾ や Thoma²⁾ 等の加速度測定法がある。やはり振子の振動によつて capacity が變化するのを利用するのである。

以上は何れも直接には質量の慣性、即ち力學に關係のないものが多く、委しく述べると非常に複雑になる。之等については小幡博士その他の著書を参照すべきである。

1) P. Langer, "Stossmessungen," *Verh. 3-int. Kongr. f. tech. Mech.*, 3 (Stockholm, 1930), 311-315.

2) H. Thoma, "Elektrische Messung mechanischer Schwingungen," *Verh. 3-int. Kongr. f. tech. Mech.*, 3 (Stockholm, 1930), 289-293.