

## 58. 車輛, 航空機用加速度計の製作

地震研究所 萩原 尊禮

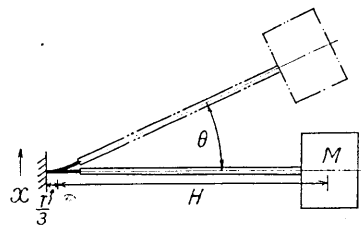
(昭和12年9月21日發表—昭和12年9月21日受理)

**緒言** 自動車, 汽車, 飛行機等の交通機關の運行中に於ける機體の振動及び動搖を測定することは, 其の操縦法, 機體構造, 原動機, 路面, 軌道, 或は氣流等の研究に資するところが多い. 此の種の目的に使用せられる振動計は本質的には地震計と何等の相違は無いのであるが, 目的上其の構造は小型輕量にて且携帶操作に簡便を必要とするため技術的には種々困難な問題を作ふ. 此の場合に於ても一般の地震計の場合と同じく被測定物の變位の記録を目的とするものと, 加速度の記録を目的とするものとに大別出来るが, 車輛, 航空機等の如き場合に於ては其の加速度を測定することが最も有意味である.

本文に報告する加速度計は曾て石本教授に由り製作せられた上下成分加速度計を基礎として, 更に改造を加へて加速度の上下, 前後, 左右の3成分を同一記録紙上に記録せしむる様になしたのであつて, 航空機に使用し得るため特に小型輕量の點に留意した.

従來の振動計は振子の制振装置を欠くものが多いが, 之は定常状態に於ける振動を測定するには差支へないが, 週期或は振幅が刻々に變化する場合に於ては振子の自己振動の發生に由つて正確な記録を與へることは出来ぬ. 振子の制振装置は空氣の粘性を利用するものが溫度に由る影響も少く調節も簡單であるが, 加速度計に於ける如く短週期の振子の場合に於ては製作上困難とされて居たが, 最近地震計の製作技術が進むに連れて斯様な短週期の振子の空氣制振装置も製作が可能となり, 此處に報告する加速度計に於ても空氣制振装置を附することが出来た.

設計に着手するに當つて豫めの方針として振子の週期は0.05秒, 感度は記録紙上1cmの振れが重力加速度  $g$  (980 gal) (gal は加速度の c.g.s. unit) に相當すること, 記録装置にはインク式を採用すること等を定めた.



第 1 圖

**設計** 今、振子を支持して居る盤が振子の軸及び廻轉軸に直角な方向に運動する場合を考へるに、盤の變位を  $x$ 、振子の廻轉角を  $\theta$ 、振子の重心と廻轉軸との距離を  $H$ 、振子の質量を  $M$ 、振子の廻轉能率を  $I$ 、 $t$  を時間とするときは、斯様な場合は振子の重心に  $-M \frac{d^2x}{dt^2}$  なる力が働いたと同一結果になるから運動方程式は次の如くなる。但し  $\theta$  は小い量とし、便宜上重力の存在は無視する

$$I \frac{d^2\theta}{dt^2} + \lambda \frac{d\theta}{dt} + k\theta = -MH \frac{d^2x}{dt^2} \quad (1)$$

或は

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} + 2\varepsilon \frac{d\theta}{dt} + n^2\theta = -\frac{MH}{I} \frac{d^2x}{dt^2} \quad (2)$$

此處に  $2\varepsilon = \lambda/I$ 、 $n^2 = k/I$  である。(1) に於ける  $k\theta$  は振子の復元力であつて第1圖の如く振子が板バネを以て支へられるときは、此の板バネの弾性により與へられるのであつて、板バネの長さを  $r$  とするときは板バネの支點より  $r/3$  の距離にある點が振子の廻轉軸に相當する。振動計に於ては振子の運動を槓桿により何倍かに擴大して記録せしむる必要があるが、描針の變位に對する振子の重心の變位即ち幾何倍率を  $V_G$  とし、描針の變位を  $a$  とすれば  $a = V_G H \theta$  であるから (2) 式より

$$\frac{d^2a}{dt^2} + 2\varepsilon \frac{da}{dt} + n^2a = -\frac{MH^2 V_G}{I} \frac{d^2x}{dt^2} \quad (3)$$

今、簡單のため盤が  $x = x_m \sin pt$  で表される正弦運動を行ふものとすれば (2) 式の解は

$$a = e^{-\varepsilon t} (C_1 \cos n_1 \sqrt{1-h^2}t + C_2 \sin n_1 \sqrt{1-h^2}t) + \frac{MH^2 V_G}{I} \cdot \frac{1}{n^2} \cdot \frac{1}{\sqrt{\left(1-\frac{1}{u^2}\right)^2 + 4h^2 \frac{1}{u^2}}} \cdot x_m p^2 \sin(pt - \delta) \quad (4)$$

$$\tan \delta = \frac{2hu}{u^2 - 1} \quad (5)$$

但し  $u = \frac{n}{p} = \frac{T_p}{T_n}$ 、 $h = \frac{\varepsilon}{n}$ 、 $T_n$  及び  $T_p$  は夫々振子及び盤の振動週期である。(4)

式の右邊の第1項は振子の自由振動、第2項は振子の強制振動を示す。 $C_1$  及び  $C_2$  は初期條件に由り決定せられる常數であるが、第1項は  $e^{-\varepsilon t}$  の項に由り時間と共に減少し第2項のみ残り定常の状態に達する。今、盤の振動週期に比較して振子の週期

が充分小である場合を考えると、 $n \gg p$  即ち  $u \gg 1$  であるから、

$$a \approx \frac{MH^2 V_G}{In^2} \cdot x_m p^2 \sin pt = \frac{MH^2 V_G}{I} \cdot \frac{T_n^2}{4\pi^2} \cdot x_m p^2 \sin pt = -\frac{MH^2 V_G}{I} \cdot \frac{T_n^2}{4\pi^2} \cdot \frac{d^2 x}{dt^2}$$

即ち斯様な条件の下に於ては振子の廻轉角  $\theta$  は盤の加速度に比例することになる。

此の場合の感度は  $\frac{V_G MH^2 T_n^2}{4\pi^2 I}$  である。而して  $1/\sqrt{\left(1 - \frac{1}{u^2}\right)^2 + 4h^2 \frac{1}{u^2}}$  は  $u$  が 1 に對し

て充分大で無い場合の感度の變化を示すものであるが、第 2 圖に示す如く適當な制振

を與へられた振子に於ては振子の週期に比較して盤の振動週期が少しく大であれば感度

は略一定と見做される。即ち適當に減衰

を與へられた振子は自己の振動週期より大

なる週期を有する振動に對しては加速度計

としての條件を滿すことが出来る。今回採用

した振子の週期は 0.050 秒であるから、

上述の理論から約 0.05 秒より大なる適期

の振動に對して加速度計として使用すること

が出来ると云へる。理想的な加速度計として

は振子の週期を限り無く小とす可きで

あるが、斯様なことは實際問題としては不可能であり、假令如何に小なる週期に對し

ても感度の一定である理想的な加速計が存在したと假定しても、週期の小なる振動は

變位振幅は小であつても加速度は大となるから、極めて小週期の振動が優越して記録

せられ比較的週期の大きい振動は隠蔽される結果。我々の目的とする振動の記録が得

られるかは疑問である。即ち實際的にはある値より小なる週期を有する振動に對して

感度の遞下する方が寧ろ有利の場合が多い。只問題は斯様な限界を何處に取るかと云

ふことであり、之は目的に由り差異があるが、此處に目的とする振動計に於ては 0.05

秒程度より小なる週期に對して感度が遞下しても實際上不都合は起らないと思はれる

のである。

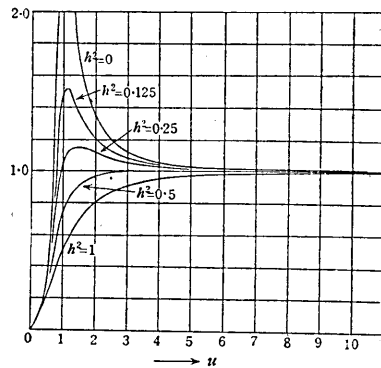
次に横杆に由り振子の運動を擴大する場合は横杆の慣性が増加することを考慮する

必要がある。現在の場合の如く、可及的小質量の振子を用ひ而もインク式を採用する

以上横杆は相當堅牢なものを使用せざるを得ないので此の現象は無視することは出来ない。

今 1 箇の横杆に由り擴大し此の横杆の優腕の先端に描針を附する場合を考へる

に横杆の慣性能率を  $J_1$ 、優腕の長さを  $l_1$ 、劣腕の長さを  $l_2$ 、横杆の廻轉角を  $\theta_1$  とし



第 2 圖 縱軸  $1/\sqrt{\left(1 - \frac{1}{u^2}\right)^2 + 4h^2 \frac{1}{u^2}}$

槓杆の劣腕と振子の接觸點は振子廻轉軸より  $L_0$  の點にありとすれば、斯様な振動系の運動方程式は (1) 式の代りに次の様に書くことが出来る。

$$I \frac{d^2\theta}{dt^2} + \lambda \frac{d\theta}{dt} + k\theta = -FL_0 - MH \frac{d^2x}{dt^2}$$

$$I_1 \frac{d^2\theta}{dt^2} = FL_1$$

$$L_0\theta = l_1\theta_1$$

此處に  $F$  は振子と槓杆の接觸部に働く力である。上式から  $\theta_1$  及び  $F$  を消去すれば

$$I' \frac{d^2\theta}{dt^2} + \lambda \frac{d\theta}{dt} + k\theta = -MH \frac{d^2x}{dt^2}$$

$$I' = I + I_1 \frac{L_0^2}{l_1^2}$$

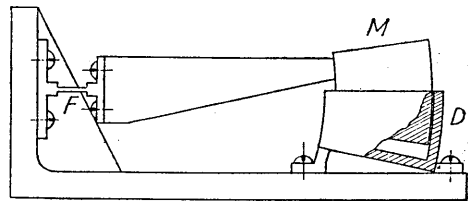
即ち振子の慣性は見かけ上増大する。振子の週期  $T_n'$  は  $T_n' = 2\pi\sqrt{\frac{I'}{k}}$  で與へられるから振子の慣性の増加は見かけ上振子の週期を増大する。此の場合加速度計としての感度は増減しない。何故なれば感度は先に示した通り  $\frac{V_G MH^2 T_n'^2}{4\pi I} = \frac{V_G MH^2}{k}$  であつて  $I$  には無關係な量であるからである。即ち加速度計の場合に於ては振子の慣性能率の見かけ上の増加に由つて感度は直接變化しないが、振子の週期が増大する結果として感度の一定である領域が減少する。

次に問題となることはペン先と記録紙との間の固體摩擦である。固體摩擦のある場合の振子の運動方程式は

$$I \frac{d^2\theta}{dt^2} + \lambda \frac{d\theta}{dt} + k\theta \pm \rho V_G H = -MH \frac{d^2x}{dt^2}$$

此處に  $\rho$  はペン先に働く固體摩擦である。(  $\theta > 0$  のときは正符號,  $\theta < 0$  のときは負符號) 従つて  $\rho V_G \geq M \left| \frac{d^2x}{dt^2} \right|$  のときは振子は運動することは出来ない。即ち振動計の盤が運動しても描針は動き出し得ない。即ち或る値より小なる加速度は記録し得ないこととなる。此の現象を避けるため振子の質量  $M$  を適當に大とすることが必要となる。

併、今回製作した振子は第3圖に示す如き型態を有し、紙面に並行な平面に由る重錘の断面は廻轉軸の部



第 3 圖

分を中心とする半径に由り畫かれた扇狀を成し、一端は微小の間隔を有する壁の中に

挿入され空気制振装置を形成して居る。樽の底には小孔を穿ち此處より空気の一部を漏洩せしめ、コックに由り小孔の大きを加減して制振力を適當の値に調節する。重錘の質量は 1 kg, 振子の週期 0.050 sec, 廻轉軸より重錘の重心に至る距離 ( $H$ ) は 10 cm であり, 空気制振装置のコックを閉鎖するときは極限制振 ( $h=1$ ) の状態になすことが出来る。次に感度を記録紙上の 1 cm が 1000 gal に相當する如くなすには幾何倍率  $V_G$  を幾何になすべきかと云ふに,

$$\frac{V_G MH^2 T_n^2}{4\pi I} = \frac{1}{1000}$$

なる如く  $V_G$  を定めれば良い。従つて此の式に  $MH^2 = I$ ,  $T_n = 0.05$  を代入すれば  $V_G = 16$  が得られる。即ち斯様な振子に於ては幾何倍率を約 16 とすれば感度を 1 cm per 1000 gal とすることが出来る。記録用ペンとしては第 3 圖に見る如きものを採用した廻轉軸の部分に圓壙狀のタンクを有し此處から細い管を通してペン先にインクを供給する。ペン先は簡単に取り外し出来る様になつて居る。此の記録用ペンは次の様な要素を有する。

$$L_1 = 10 \text{ cm}$$

$$l_1 = 0.62 \text{ cm}$$

慣性能率  $I_1$  は實驗に由り 150 *c.g.s.* と求められた。今  $I_0 = H$ ,  $I = MH^2$  として此の慣性の振子に及ぼす影響を調べて見ると  $M = 1000 \text{ g}$ ,  $H = 10 \text{ cm}$  であるから

$$I = 1000 \times 10^2 = 10^5 \text{ c.g.s.}$$

而して

$$I' = I + I_1 \frac{I_0^2}{l_1^2} = 1.39 \times 10^5 \text{ c.g.s.}$$

即ち振子の見かけの慣性能率は約 39% 増加し、従つて見かけ上の週期は 0.058 秒となる。目的上振子の質量に制限があるので此の程度の影響は止むを得ない。將來は更に慣性能率の小なる記録用ペンを製作すべく考究中であるが現在は之を採用とすることとした。

次にペン先の固體摩擦として實驗に由り右表の如き値が求められた。何れもペン先を記録に差支へない程度に極めて軽く接觸せしめた場合である。現在の場合  $V_G = 16$  であるから記録紙としてオイルペーパーを使用した時

記録紙	固體摩擦( $\rho$ )
オイルペーパー	98 dyne
トレーシングペーパー	470 dyne

$$\frac{\rho V_G}{M} = \frac{98 \times 16}{10^5} = 1.6$$

即ち 1.6 gal (gal は加速度の *c.g.s. unit*) 以下の加速度は記録し得ないことになる。

現在の場合に於ては記録紙上 0.1 mm の振れは 10 gal であつて、10 gal 以上の加速度が測定されれば良いと見られるから此の程度の固體摩擦は無視出来る。固體摩擦は此の他、横杆の廻轉軸、横杆と振りとの聯結點にも生ずるが之等はペン先の固體摩擦に比較しては省略し得る程度に小さい。

次に考慮せらるべきは被測定物の廻轉運動（或は傾斜運動）の影響である。此の加速度計は盤に垂直及平行の方向の加速度の測定を目的として居るのであるが、此處に採用せる如き振子は廻轉運動の影響を受ける筈である。盤の傾斜は、見かけ上、盤に對して垂直及び水平方向の重力を變化せしむる結果、描針は之に相當して振れるが、之は實際其の方向にそれだけの加速度が實在したと見做さるべきであるから忠實に記録せられて差支へないものである。只、問題とすべきは廻轉の角加速度である。即ち廻轉の角加速度は振子に振れを與へ従つて描針を動かす結果、若し其の量が大であれば記録を困亂せしめることとなる。然し實際問題としては角變位は大であつても角加速度の大である場合は稀れであつて、一般の測定に於て角加速度の存在を問題とする場合は極めて少いと思はれる。<sup>2)</sup>

**構造** 第 4.5 及び 7 圖は加速度計の外観を示し第 6 圖は内部の構造を示す。先に第 3 圖に示した如き振子が主體であつて、斯様な同型の振子 3 箇が夫々上下、前後、左右の 3 成分の加速度計振子としての役割をなす如く適當の向きに配置せられて居る。外形の寸法は 17 cm × 23 cm × 19 cm であつて之に携帯用の把手を附してある。特殊の部分を除いては成るべく輕金屬を使用し、全體の重量は 15 kg である。圖に於て P は記録ペンであつて先にも述べた様に廻轉軸の箇所に圓筒狀のタンク T を有し、此處から優腕に附した細管を通してペン先にインクを供給する。ペン先は口徑 0.1 mm



第 7 圖

の金屬であつて、優腕の細管とはセルロイド製の管に由り聯結せられて居るから簡単に取外すことが出来る。S は微動螺子であつて、之に由りペン先を上下せしめ適當の壓力で紙面と接觸せしめる。記録紙は時計装置に由り R より L に送られる。L は寫

2) 振子の軸を廻轉軸とする角加速度が存在する場合、振子の運動方程式は次の如く書くことが出来る。

$$I \frac{d^2\theta}{dt^2} + \lambda \frac{d\theta}{dt} + k\theta = -I \frac{d^2i}{dt^2}$$

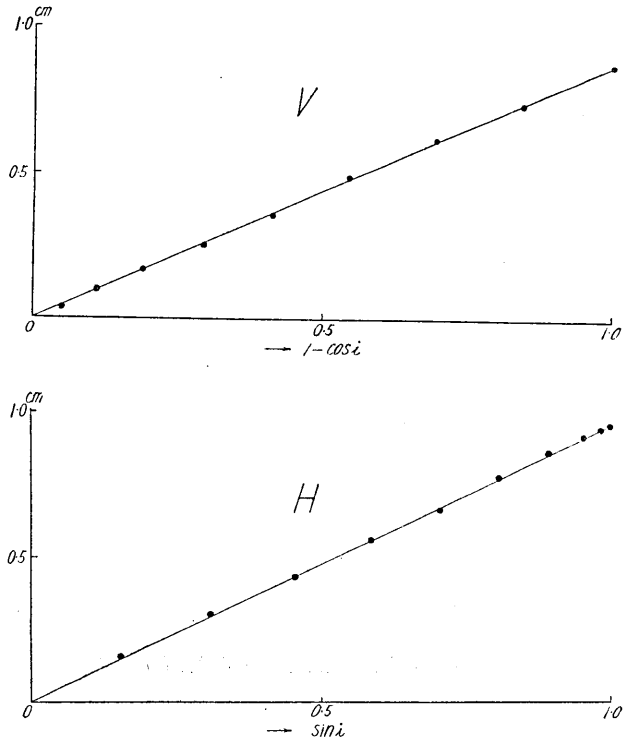
此處に  $i$  は廻轉角である。

眞には取外されて居るが自働巻取装置を附することが出来る。記録紙の速度は毎秒 5 mm 乃至 20 mm に調節出来る。A は記録紙の進行速度を知るための刻時用ペンであり、電接時計 C に由り乾電池 F を電源とする電流を断続して電磁石を動作せしめ記録紙上に凹凸の線を記入する。B は合圖用のペンであつて同じく電磁石に由り動作し必要に応じて押ボタン K を以て記録紙上に合圖を記入する。D は空氣制振装置の調節用螺子であつて之に由り振子を適当な減衰状態に置く。運搬に際しては特に振子をクランプする必要はなく、螺子 S に由りペン先を記録紙から離して置けば良い。

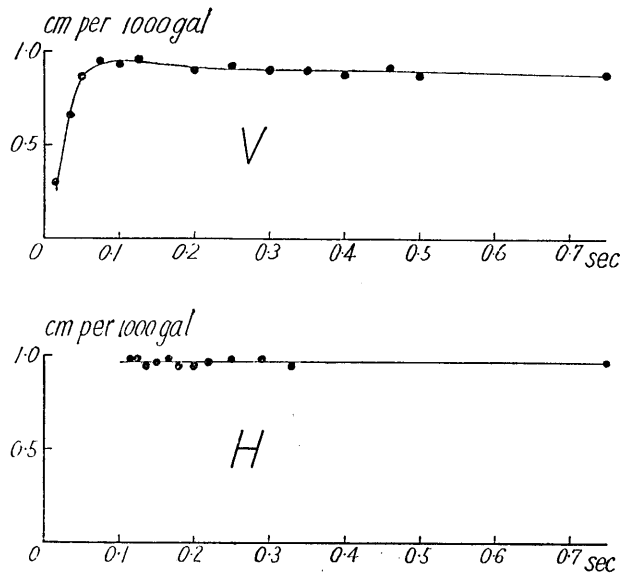
**感度試験** “statical” の感度試験は加速度計を平な盤上に戴せ、之を傾斜せしむることに由り簡單に行ふことが出来る。即ち盤の傾きの角を  $i$  とすれば、見かけ上、上下方向には  $g(1 - \cos i)$ 、水平方向には  $g \sin i$  の一定加速度が働いたと同一結果になる ( $g$  は重力加速度)。斯様にして求められた感度は上下成分は 1 g に對する振れ 0.90 cm、水平成分は 1 g に對して夫々 1.0 cm 及び 9.8 cm である。(第 8 圖)。“dynamical” の感度試験は振動臺に由り行つた。其結果は第 9 圖に示される通りであつて、振子の自己振動週期 0.05 秒より大なる振動に對しては略々一定の感度を示し理論と良く一致して居る。

**實地試験** 實地試験として次に示す如き測定を行つたが何れも良好な結果を得ることが出来た。測定の結果に對する詳しい論議は本文の目的でないので此處では省略する。

- a) 人が加速度計を抱へてコンクリートの床上を歩行した場合 (第 10 圖)。
- b) 自動車の床面の振動及動搖 (第 11 圖) 使用車はナツシュであつて後部座席の前方の床上に器械を置いた。週期小なる振動はエンジンに由る床の振動である。圖に示す記録は補裝道路上を進行した後停車した場合である。
- c) エレベーターの床面の加速度 (第 12 圖) 三菱銀行 (三菱電機製) 16 人乗りエレベーターの床面に加速度計を設置した場合であつて、自動停止の場合と急停止の場合を示す。特定の場所を通過するとき小週期の振動が現はれることがある。
- d) 橋梁の振動 (第 13 圖) 荒川新橋の型鐵橋の中央部の路面上に器械を設置した。圖は積荷満載の走行トラックに由る振動である。振動週期が比較的大であるため人體には著しく感じたが加速度は小である。
- e) 飛行機の機體振動及び動搖 旅客機 (スーパーユニバーサル、客席 6) の後部客席の前方の床上に加速度計を置き東京より大阪に至る間測定を行つた。小週期の振動はエンジンに由る振動である。振動及び動搖は車輪が地上から離れると同時に急激に減小する。高空を飛行して居る間は動搖は全く無く、振動も比較的小であつた。

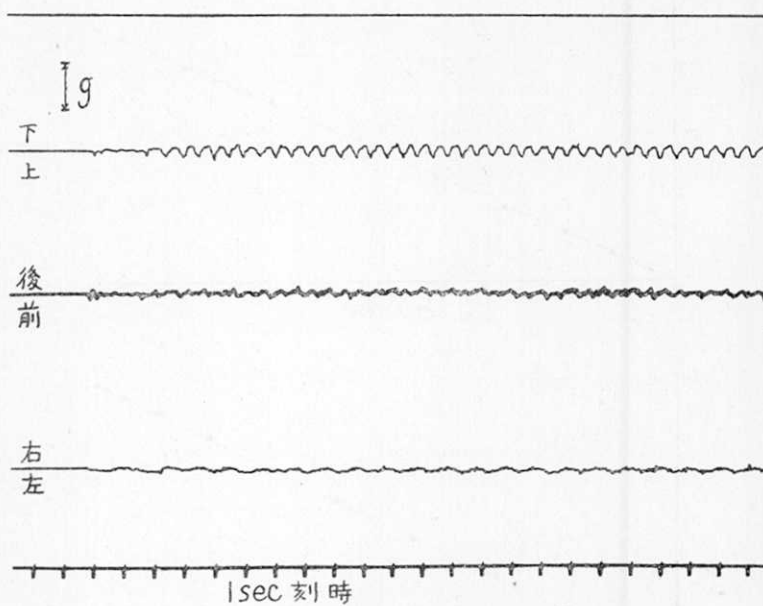


第 8 圖 縦軸 ペン先の振れの量， $i$  臺の傾斜角。

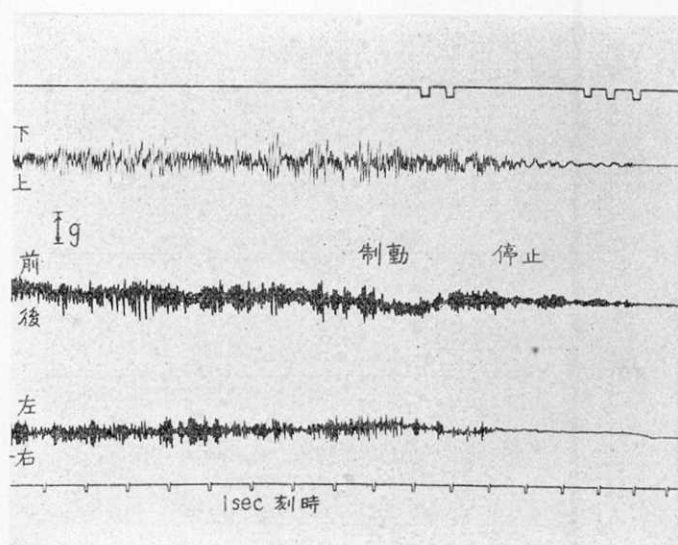


第 9 圖 縦軸 感度，横軸 振動臺の振動週期。

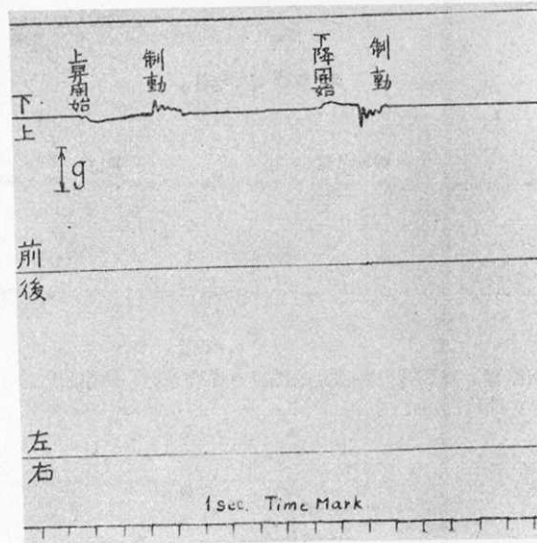
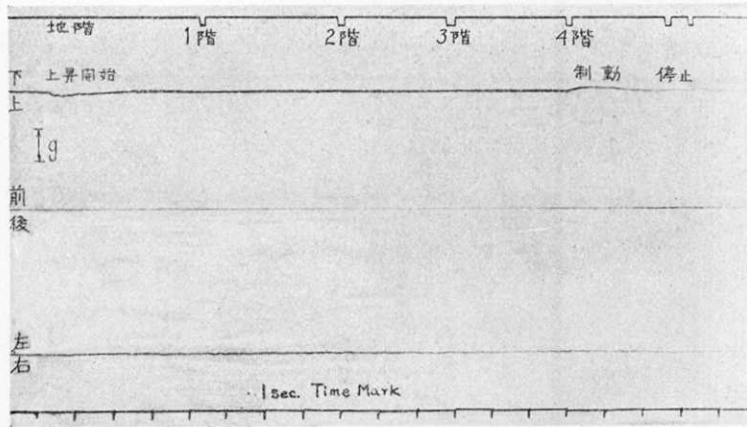




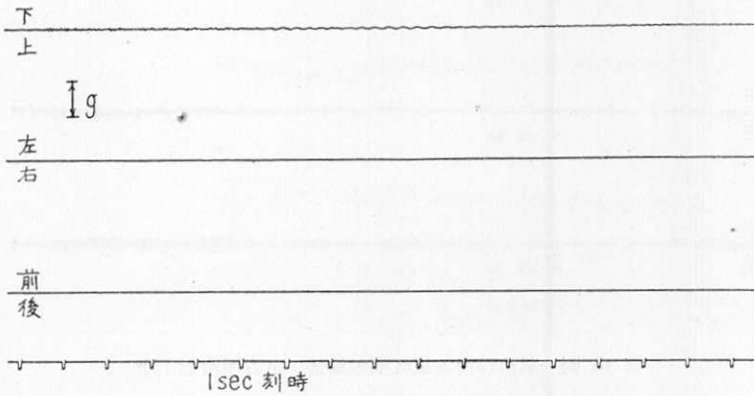
第 10 圖 人が加速度計を抱へて歩行した場合



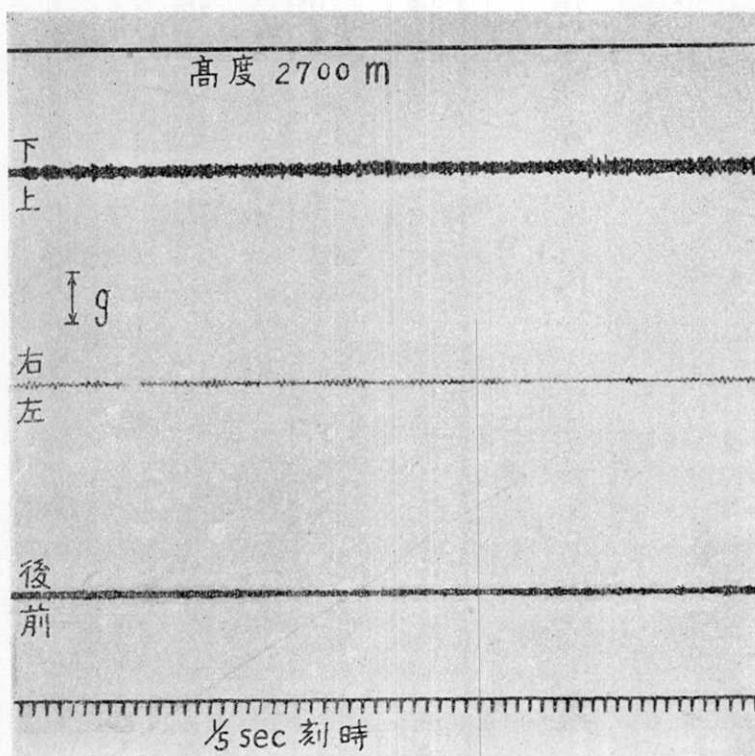
第 11 圖 走行自動車の振動



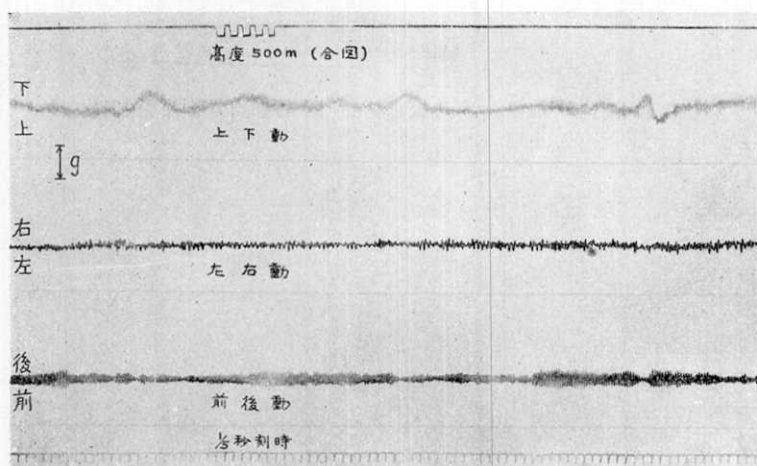
第 12 圖 エレベーターの加速度 上圖 緩制動，下圖 急制動



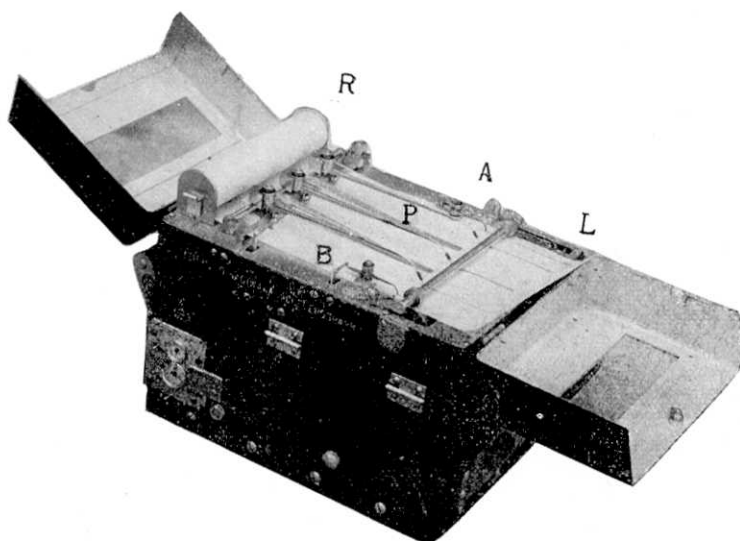
第 13 圖 走行トラックに由る橋梁の振動



第 14 圖 旅客機の振動（動搖無き場合の例）沼津附近海上

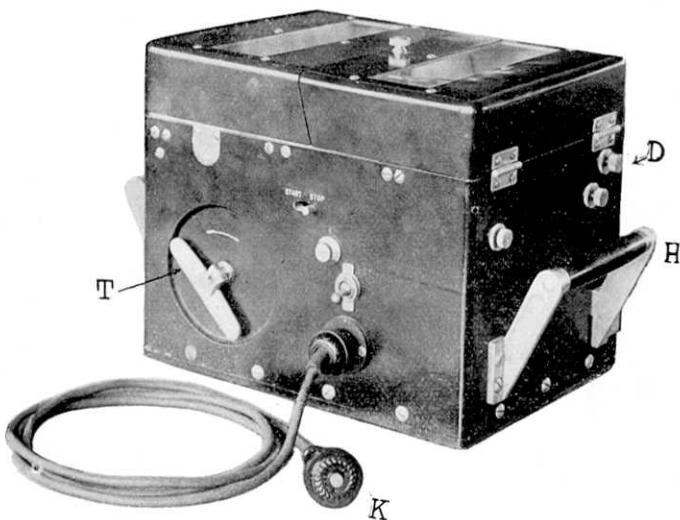


第 15 圖 氣流に由る旅客機の動搖 名古屋附近上空

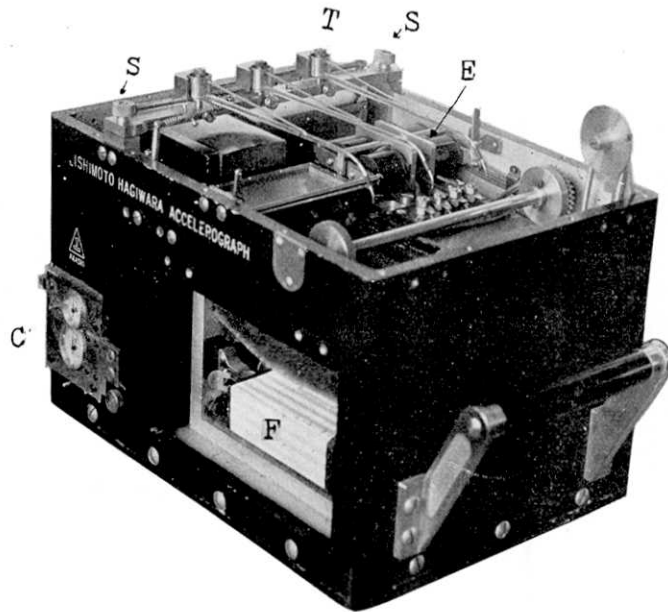


第 4 圖 R 記錄紙, P 記錄用<math>\sim</math>, A 刻時用<math>\sim</math>, B 合圖用<math>\sim</math>.

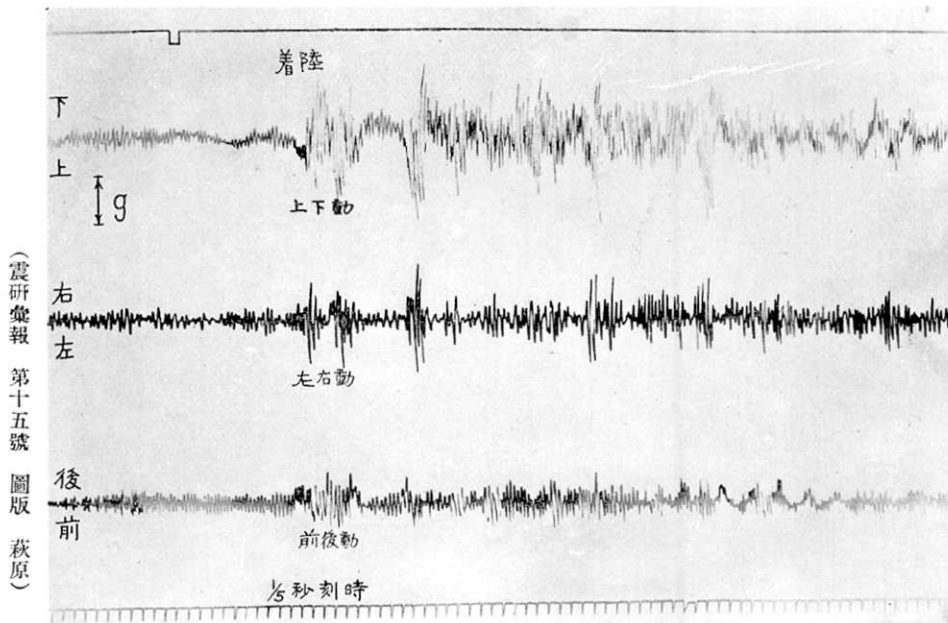
(震研彙報  
第十五號  
圖版  
萩原)



第 5 圖 D 減衰器調節用螺子, T 起動機卷螺子, H 把手, K 合圖用押扣鈕.



第 6 圖 内部構造を示す. S 微動螺子 (ペンの上下位置を調節す),  
T タンク, E 刻時及合圖用電磁石, C 刻時用電接時計, F 乾電池.



(震研彙報 第十五號 圖版 萩原)

第 16 圖 旅客機の着陸時に於ける振動及び動搖 名古屋飛行場.

(第 14 圖). 比較的低空を飛行する際は上下の動揺が存在した(第 15 圖). 第 16 圖は着陸時に於ける記録である. 車輪が地に觸れてより振動及び動揺が増大する. 上下方向の最大加速度を生ずる時は車輪が地に觸れた瞬間とは限らない.

終りに臨み終始激勵の辭を賜つた石本教授に對し厚く感謝の意を表し, 又製作に當つて種々援助の勞を惜まなかつた久田理學士に深く感謝する次第である. 尙, 實地試験に際して便宜を與へられた關係官廳會社の各位に對しても此處に深く感謝の辭を呈する.

58. *An Accelerograph for Measuring the Shaking  
Railroads of Trains, Automobiles, Airoplanes, etc..*

By Takahiro HAGIWARA,

Earthquake Research Institute.

An Accelerograph for measuring the three components, vertical and horizontal, of the shaking of railroad trains, automobiles, airoplanes, etc., was constructed. The elements of the instrument are as follows.

Mass of pendulum	1 kg.
Period of pendulum	0.05 sec.
Geometrical magnification	16
Sensibility	1 cm on the record corresponds to acceleration g.
Damping of pendulum	Critical (air damper).
Dimension of instrument	17 cm × 23 cm × 19 cm.
Total weight of instrument	15 kg.