

# 1 トン 長 周 期 地 震 計

鷺坂清信<sup>\*</sup>，本間正作<sup>\*</sup>，矢崎敬三<sup>\*\*</sup>，  
長宗留男<sup>\*</sup>，山岸登<sup>\*</sup>

## は し が き

この地震計の紹介を、もと中央気象台の地震課におつて立案や設計に當つていた人々によつてすることになつたので、下記のように分担して記述した。この説明は多少詳細にしてあるので、もしもその概要をつかもうとする読者は「測候時報、18巻、14号(1951)327—329」を読んで頂きたい。またこの地震計の名称は通例1トン地震計で通つているがウィヘルト式水平動地震計なども外国では1トンの重錘を使用しているものが多い。また1トン長周期地震計、中央気象台式1トン地震計あるいわ二本吊1トン地震計などとも呼ばれている。一般に名称はよくその特長を表わして短かい方がよい。長周期であることはこの地震計の著しい特長であるから將來この名称が確定する場合に長周期地震計ということはこの名称の主たる部分として残ることを希望する。結局、中央気象台式長周期地震計と呼ぶのがよいと思うが、標題にあえて1トン長周期地震計と記したのは現在1トン地震計で通つているからである。

本論文の内容は次の5章に分けて記述してある。

第1章	1トン長周期地震計の構造並びにその設計製作について	矢崎敬三
第2章	1トン長周期地震計の各部分の構造とその調節について	長宗留男
第3章	1トン地震計の理論	本間正作
第4章	地震記象	山岸登
第5章	1トン長周期地震計に関する二、三の事項	鷺坂清信

## 第1章 1トン長周期地震計の構造並びにその設計

### 製作について

矢崎敬三

この地震計の原理、構造、性能については既に別項に紹介されている通りであるが、從來測器について設計上の詳細、改造の経緯等にふれて居る紹介というのは殆ど見られないので、設計製作の實際に當つた多くの方々に代りここになるべく別項と重複しないよう、この地震計の設計調整の経緯を追つて、測器設計の一端に資しようとするものである。

\* 地震観測所

\*\* 気象測器工場

## 報 時 震 験

この地震計の設計は昭和22年秋計画され、当時測器課在職の藏田正典技官によつて着手されたが、その後昭和23年秋気象測器工場に移され、当時設計課長の岡順次技官を中心とし、本体関係（重錘、第1槓杆、上下懸索部、軸心装置、振れ止め部）を岡技官担当、記録装置を岡田敏夫技官担当、第二槓杆部、刻時部を筆者担当で本格的な設計にとりかかり、約9ヶ月で約490部品、500余枚の設計製図を終り、この間昭和24年1月より設計に平行して気象測器工場、気象研究所測器工場で製作を始め、約1年2ヶ月、昭和25年3月に部品全部の完成を見た。そこで気象研究所観測塔内に地震観測所壕内のもと同じコンクリート柱を立てて仮組立し、約2ヶ月に亘つて調整を行い同7月末その中一成分を地震観測所に輸送設置し、8月末から常時観測を始め、更に第2槓杆の改造を行つて、本年（昭和26年）5月他の一成分を送つて、両成分での観測が始まつた。

まづ設計の仕様として与えられた諸元は、

20cmを隔てて平行に立てられた50cm角、高さ200cmのコンクリート柱の間にツェルナー吊りで吊る。

基本倍率100倍、80～120倍の間の変化が出来るようにする。

重錘の重さ 1,000 kg

周期 30秒、（60秒以上を目標とした）{以下第1図（寫眞）参照}

C部支点はナイフエッジにする事、上3mm、下1mm、左右各5mmの変位を与える事。

E部は前後に最大80mm移動出来る事。下の吊り線は1070mm～1090mmを変化する事。

ダンパーは磁気ダンパーとし、極限減衰の調節が出来るようにする事。

記録装置 1分の長さ30mm、一日切換、

で、重錘、支点等の予定された位置は第1図中に示されている通りで、幾何倍率として

$$\frac{225}{45} \times \frac{420}{21} = 5 \times 20 = 100$$

（第1槓杆） （第2槓杆）

を挟んで、第2槓杆の劣腕の長さの加減で84～118倍の倍率の変化が出来る様にした。

以下各部について述べる事にする。

### 1) 本体（第1、第2、第3図参照）

本体は主として重錘部、第1槓杆部、上下懸索部に分かれる。重錘は一部分にI型鋼またがるよう切欠を持つた直径620mm、厚さ20mmの鑄鉄円板22枚と煉瓦重錘8ヶで、その総量約1,000kgを三本のボルトで締めて一塊としている。重錘自体が1tonであるから、第一槓杆、上下懸索部はそれに相応する強度を持たねばならないわけで、この部分の主要な各所についてはそれぞれ強度計算の後寸法を決める必要があつた。

第1図のごとく定められた重錘, 支点の位置から上下吊線に働く張力を求め, それぞれ1.6ton, 0.6tonと得られた。なお重錘と第1横杆の I beam とを含めた慣性能率は

$$I_1 = 2.7 \times 10^6 \text{ kg-cm}^2$$

と得られた。

従来ツェルナー吊り並びに水平振子地震計では吊線にはピアノ線が用いられて居るので, この場合も上記張力に耐えられる最小径の鋼線で吊すものとしてどれ程の周期が得られるかと計算して見たところ, JES 金属 3522 に従い最も大きい抗張力を持つ線材を用いるものと見込んで, 用いるべき線径は上部吊線に 5mm (安全率 2, 抗張力 165 kg/mm<sup>2</sup>), 下部吊線に 2.72 mm (安全率 2, 抗張力 200 kg/mm<sup>2</sup>) となる。

廻転軸の傾斜角  $i=0$  の時, ツェルナー吊り振子の周期は

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{I}{\frac{\pi r_1^4 G}{2L_1} \cos \theta_1 + \frac{\pi r_2^4 G}{2L_2} \cos \theta_2}}$$

であるから,

$$G = 8.0 \times 10^{11} \text{ gr-cm}^2$$

$$L_1 = 101 \text{ cm}, \quad L_2 = 109 \text{ cm}$$

$$\cos \theta_1 = \frac{100}{101}, \quad \cos \theta_2 = \frac{100}{109}$$

を入れて

$$T = 48.5 \text{ sec.}$$

となり, 目標の周期90秒を得るためには鋼線は使い得ない事が判つたので, これに代るべきものとしてワイヤーロープを用いることとし, 早くからワイヤーロープの研究を行つておられた当時鉄道技術研究所第二部長池田正二技官をわずらわして計算を請い, 更に製作は帝国産業株式会社の西岡多三郎技師長の御盡力を願うこととした。その諸元は次の通りで, このロープを用いて周期128秒が見込まれた。

	撚線数	直 径 mm	素 線 径 mm	pitch 角	抗 張 力 kg/mm <sup>2</sup>	備 考
上部吊線	37	7.35	1.05	77°6'	157	継線なし, 撚方は右撚り, 芯上中下撚全部に油着け
下部吊線	19	5.29	1.05	78°20'	157	

設計の始めに推定した慣性モーメントは  $I_1 = 2.7 \times 10^6 \text{ kg-cm}^2$  であつたが, 設計の終りに各  
部品の重量と, その分布から, 本体の重量は約 1,100kg, 重心位置は傾斜角  $i = 0$  とした場合の

廻転軸位置から測つて45.3cm, 下へ2.3cm, 慣性モーメントは  $3.7 \times 10^6 \text{ kg-cm}^2$  と概算された。ワイヤーロープは前記会社で製作して鉄道技術研究所において試験の後, 気象研究所観測塔に仮組立して吊した結果では, 第1横杆のみで優に90秒の周期を記録し, 地震観測所に設置した後は更に目標通り120秒余の長い周期を得ることが出来た。再び吊線の張力を求めて見ると上の吊線に1.8ton, 下の吊線に0.8tonとなつた。従つて上の吊線に働く引張応力は  $56.2 \text{ kg/mm}^2$  であるから, 安全率は2.8位に取れていることになる。因みに一般機械の安全率は鋼につき静荷重の場合においてさえ3位であるが, 強度と周期, 機械摩擦等とかねあいを計らねばならない地震計のような場合においては安全率を極めて低くとらねばならないのは止むを得ないことであろう。

上部支点の上下の移動には頭部の大きなねぢを, 下部支点の前後移動には横に長いねぢ棒を用いているがワイヤーロープに次いで大きな力のかかるのは上下支点のナイフェッチ及びこれらのねぢ部である。しかしこれらは大きさについては余り制限されないので, 強度については充分安全率がとられている。たとえばナイフェッチにかかる荷重は  $18 \text{ kg/mm}$  で材料試験機などに用いられているナイフェッチに比べると, 荷重ははるかに小さい。なおナイフェッチの形状, 材質, 熱処理については竹中二郎博士の研究<sup>(1)</sup>を参考にした。

懸索部へのワイヤーロープの取付はエレベーターを吊すワイヤーロープの取付と同じで, 第2, 3図のごとく, テーパー  $\frac{1}{4}$  を持つた金具の中にロープを通じ, 中でロープを素線にほどいて開き熔融合金を流し込んで止めてある。この場合埋込み部の長さを見合つてテーパーは適当に考慮しなければならない。

## 2) 第2横杆部

この地震計は本体が前述のように大きな慣性モーメントを持つて居るので, 第2横杆の慣性モーメントが全体の周期, 基本倍率に及ぼす影響は小さいものとして, それよりもむしろ廻転軸受けにかかる荷重を小さくし, ここの機械的摩擦を小さくするよう出来るだけ軽いものにする事とした。形としてはウーヘルト水平動地震計のアルミ翼を背中合せに2枚連ねたかつこうで重量約240gr, 実験で確めた慣性モーメントは  $I_2 = 2.2 \times 10^4 \text{ gr-cm}^2$  で, 直径0.02mm, 長さ約300mmの燐青銅線2本で上から吊して, ピボット受けには極く僅かな荷重しかかからぬように試みたが, この吊糸の復元力のために固有周期12秒を持ち, これを第1横杆に連結した結果では, 更に後述の連結スプリングの影響もあつたりして, 第1横杆のみでは90秒以上もの周期が得られるのに, 総合周期としては15秒位にしかならないとゆうことになつた。

それで第2横杆は全面的に改造して, マインカ水平動地震計の第3横杆のようなアルミ管の粹組

(1) 竹中二郎: 材料試験機に使われる支え足の研究, 機械学会誌

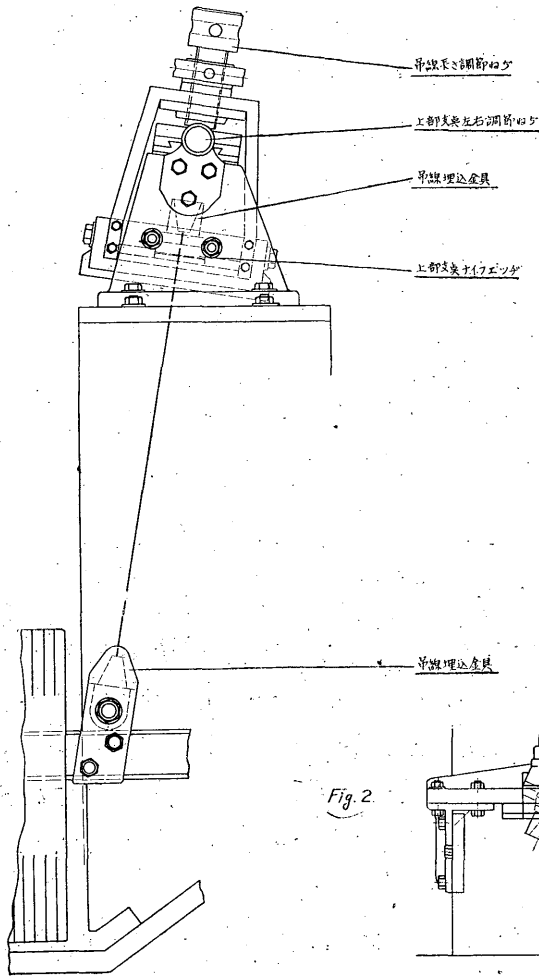


Fig. 2

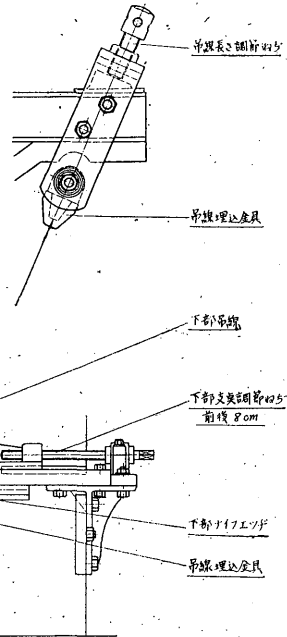


Fig. 3

として、重量は先のもので約2割、46grとし、復元力の原因となつた吊線を取除いた。これを用いて得られた周期も理論で期待されるものよりも小さいものしか得られなかつた。

### 3) 連結部 (第4図参照)

本体と拡大部との横杆の連結部については、昭和26年春の地震学会で発表された鷺坂清信氏の論文があり、やや重複するが、この部分の逐次の改良について簡単に述べる事にする。

最初の案では第1、第2両横杆を長さ300mm、径3mmの鋼製ピボット軸で結び、ピボット軸に止めたカラーに取付けた蔓巻ばねの他端をそれぞれ第1、第2横杆につなぎ、両横杆が離れないように引張つて置くことにした。この地震計で記録しようとするのは遠地震が主であるから、弱震に相当する加速度 $\{32\text{gal}$ 迄、両横杆の運動が一体であるようにばねの強さを調節した。しかしこの

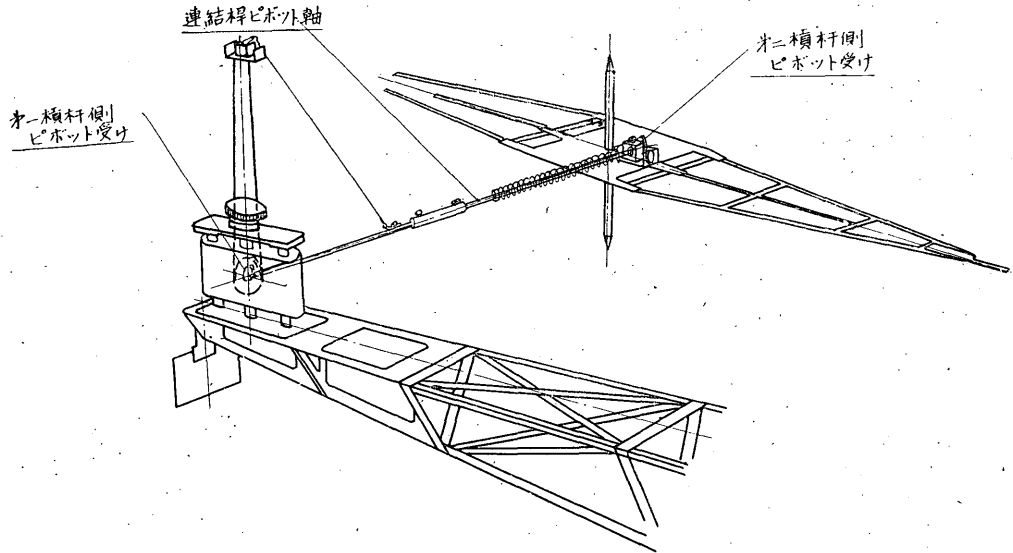


Fig. 4

案ではスプリングの端を両横杆側で押しねちで止めたため、振子の運動中にばねの直線部の撓み変形によつて生ずる復元力が周期に影響を与えることがわかつた。種々検討した結果、第1横杆側は蔓巻ばねを止め、1種の水平振子の吊り方を採用し、これではばねの復元力を消し、かつピボット受けに作用する水平分力が丁度蔓巻ばねによる圧力と同じになるようにし、第2横杆側はばねの先端をフックにし、これを押しねちに引掛けるようにし、ここもばねの復元力を消すようにした。この改造は終始調整に協力された気象研究所測器工場の山路勤技官に負うものである。

更に地震観測所では驚坂氏の論文に紹介されているようにばねを短かくつめ、その両端と両横杆を絹糸でつないだが、これではばねの復元力ばかりでなく、フックとねちとの間の摩擦もなくなつた。

#### 4) 記録部

記録部分は煤書き、周速 30 mm/min、軸方向の送りピッチ 5mm、1日1回の取換えの仕様で、構造はガリッテン地震計の記録装置と同様に、同一の起動機でドラムの廻転を与えると同時に送りをも与えるようにしてあるが、ドラムは直径 240 mm、長さ 360 mm でガリッテン地震計のドラムの約 1 倍半位の大きさになり、重量もそれ相応に増えているので、廻転、送りのトルクも大きく、動力を与える 2 枚のゼンマイにかかる負担も相当無理であり、かつドラムの廻転が摩擦駆動なので、煤をかける時にドラムの摩擦車についた煤が、駆動車との間で研磨材のように働き、スリップし勝ちとなつているので、記録装置は起動、駆動両面において今後改造の必要があるであろう。刻時は軟鉄の描針先を電磁石で吸い上げる方式で直接記録にマークを入れるようになつている。

1 トン長周期地震計——鷺坂, 本間, 矢崎, 長宗, 山岸

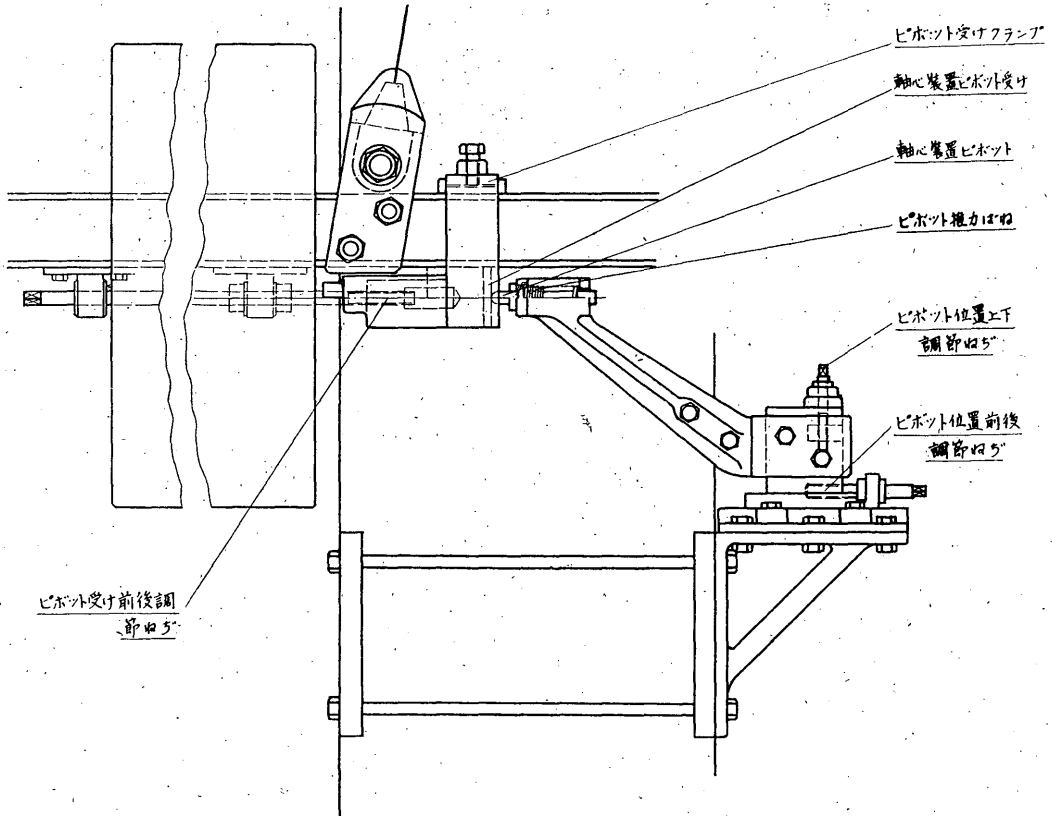


Fig. 5

受けとの接点が丁度コンクリート柱にかくれて正しく廻転軸上にあるか否か、位置を確めることが

5) 軸心装置 (第5図参照)

ウェルナー式の吊り方は機械的摩擦を生ずる部分が少ないので、その点長周期地震計として有利であるが、その反面自由度が多いので、完全に一成分のみを記録させるためには、この自由度を消さねばならない。ガリッチン地震計ではこの自由度を消すため振り腕にピボット受けをつけ、架台に取付けたピボットを丁度廻転軸線上でこれにあてるようにしてある。この方法は振子の運動が Static に近い場合には略々自由度を消しているかに見えるが、厳密には重錘が後へ動こうとする運動は抑えられるが、前へは自由に動き得るのであるから完全ではない。この欠点を除くために、この地震計では、架台に取付けたピボットと蔓巻ばねで押し、このピボットを廻転軸よりやや前に進め第1横杆につけた受けがこれを押し戻すことによつて、ピボットと受けとの間に静止状態においても常に圧力が働いているようにして、弱震程度の加速度が第1横杆の軸方向に働いても、振子はこの方向の自由度を抑えられるようにしてある。この装置は組立てて取付けてしまうとピボットと

出来ず、計算によつて調節するしかない等、まだ検討すべき点が残されている。

以上主要な各部についてその概略を述べたのであるが、この地震計は終戦後気象台で設計製作したものの中、色々な点で最大のものであり、かつ新しいものであつたので未だ幾多改造すべき点が残されているが、これらは今後数を増して作られる時に、検討附加されることになるはずである。

終りにこの地震計の背骨ともゆうべきワイヤーロープの設計を指導された当時鉄道技術研究所の池田正二博士、その実際に当られ終始御盡力下さつた同研究所上野勳技官、少量の試作ロープにもかかわらず、その製作を引受けて下さつた帝国産業株式会社、殊に西岡多三郎技師長に対し厚く御礼を述べる次第である。

## 第 2 章 1 トン長周期地震計の各部の構造と

### その調節について

長 宗 留 男

この地震計の総体的の構造は前章第 1 図 (寫眞頁) に示す通りであり、各主要部分についてもそれぞれ前章第 2~5 項に示されているがこの章では各部分毎に大凡の構造について説明を加えることにする。

#### 1) 支 柱

20cm の距離をへだてた鉄筋コンクリートの 2 本の角柱で高さ約 230cm、断面積  $50 \times 50 \text{cm}^2$ 、この柱の間に重錘の吊線の支点を固定し、重錘の振れ止め及び「軸心装置<sup>(1)</sup>」が取付けられている。

#### 2) 第 1 横杆及び重錘 (前章第 1 図参照)

重錘の支杆となる部分は高さ約 157cm の I 型の鋼材 beam でワイヤーロープの各一端はこの beam に固定される。第 1 横杆はこの I 型 beam を基にして断面がほぼ三角の槽状組棒として作られている (前章第 4 図の手前はこの組棒の先端部)。重錘はこの I 型 beam に鑄鉄円板の切欠を上からはめ込み、切込みには同質の煉瓦型の角柱をつめこんで空隙をなくするようにしてある。

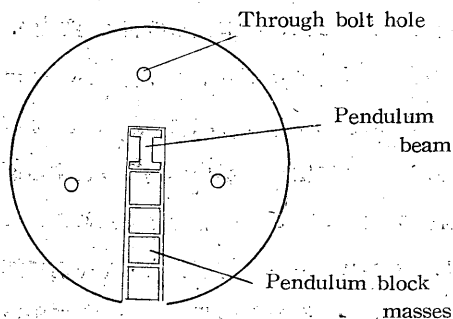


Fig. 1

#### 3) ワイヤーロープの支点

ワイヤーロープの支点のうち各一端は I 型 beam に取付けられる (前章図面参照) この地震計では全体が大型であり、吊線として比較的太いワイヤーロープが使用してあるため、普通の Zollner 吊り地震計のように重錘支杆より直接に吊線で吊すことが困難であるので前章第 2, 3 図に示すような細工をしてある。この支点のうち、上の吊り線の支点は (前章第 2 図) 固定

(1) 部分的用語は前章の用法によることにした。



されるが、下の線の支点は（同第3図）「吊線長さ調節ねち」によつて下端のナイフエッジと支柱との相対的の距離を多少変えることが出来、後述の上端の支点の操作とあいまつて支柱の水平度を調節する。

水平振子においては、重錘の釣合いの位置及び周期を調節するために廻転軸の左右及び前後の方向を決める必要があるが、この地震計では、左右の方向を決めるためには上端の支点を、前後の方向（鉛直線との傾き）を決めるには下端の支点によつて行われる。次に上下両端部の構造について説明しよう。

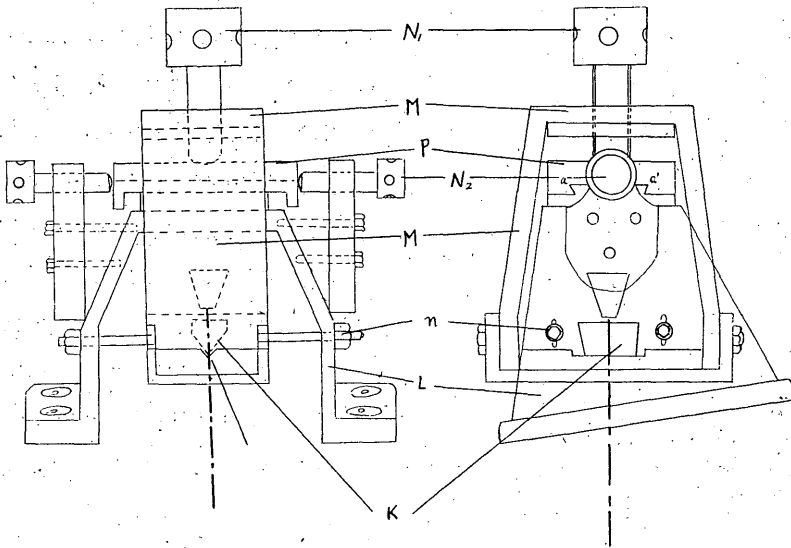


Fig. 2

- |   |  |
|---|--|
| L : Pendulum upper suspender frame                | N : Pendulum adjusting screw (inclination) |
| N <sub>2</sub> : Upper suspender adjusting screws | n : Carrier clamping nuts                  |
| M : Knife edge carrier                            | K : Knife edge                             |

(a) 上端の支点

第2図にこの部分を示す（前章の第2図），台枠Lは2本のコンクリートの柱にまたがつてその上面に回転してある。この台枠の上部の a a' の部分に板Pが差し込んであり、Pは「支点左右調節ねち」N<sub>2</sub>によつて重錘に対して左右にスライドし適当な位置において台枠に固定される。この台枠に「ナイフエッジ支え枠」MがまたがつておりMは「吊線長さ調節ねち」N<sub>1</sub>の先端において板Pに支えられる。Mの下部にナイフエッジの受けがとりつけてあり吊線の上部の支点になる。

「支え枠」M従つてナイフエッジは「支点左右調節ねち」によつて左右に、また「吊線長さ調節ね

ち」によつて吊線の方向に上下に移動することが出来る。なお「固定用ねち」 $n$ は調節した状態において $M$ を台枠 $L$ に固定する。ただしナイフエッジの左右の微小な調節はこの「固定ねち」 $n$ のしめ工合が影響する。

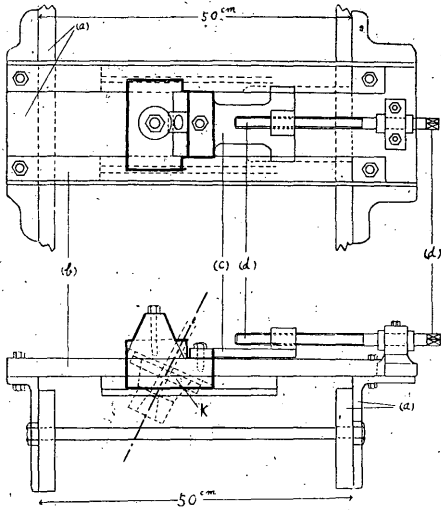


Fig. 3

- a : Pendulum lower suspender pier
- d : Lower suspender girder
- c : Lower suspender rest
- d : Rest adjusting screw
- K : Knife edge

(b) 下端の支点

下端の支点においては、支点（ナイフエッジ）を前後に移動して廻転軸と鉛直線との傾斜角を変化させる装置になっている。第3図にこの部分の大体の構造を示す。太線で輪郭した部分がナイフエッジ及びその受けの部分で可動部分である。台（a）をコンクリート柱の前後にボルトでしめつけて固定してある。これに二本の鋼材（b）を渡して固定しこれによつて可動部分を支える。可動部は誘導板（c）によつて「前後移動ねち」（b）に連絡する。従つて「移動ねち」（b）の廻転は下端の支点であるナイフエッジを鋼材（b）に沿つて前後する。

以上主として上下両端の支点の操作によつて重錘支杆の方向及び周期を決定することが出来る。

4) 軸心装置及び重錘振れ止め

「軸心装置」は前章第5図に示されている通りである。「ピボット受け」はI beamの下方に取付けられこれは、「ピボット受け前後調節ねち」（このねちの頭は重錘の前部に出ている）によつてbeamに平行に相対的に前後する。

ピボットは支柱に固定されており、「前後調節ねち」、「左右調節ねち」（この図面では紙面の向う側になる）及び「上下調節ねち」によつて、丁度重心線上において「受け」と接触するように調節する。なお各ねちによる可動距離は前後、左右、上下それぞれ約25mmである。重錘振れ止めはコンクリート支柱の前部重錘の下方に取付けてある。（第4図）

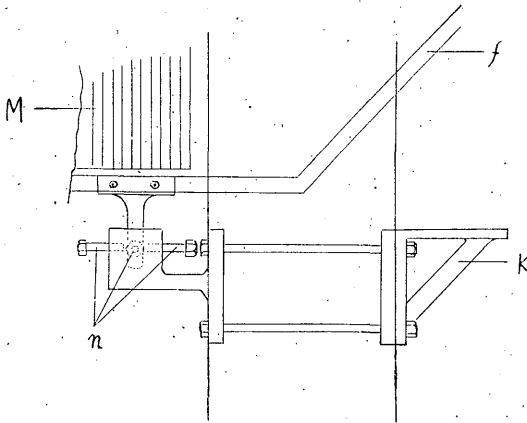


Fig. 4

M : Pendulum principal masses  
 K : Rotating axes keeper brackets  
 f : Pendulum frame  
 n : Clamp screws

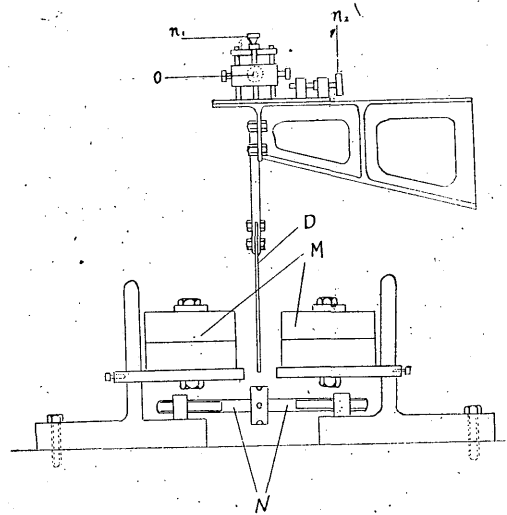


Fig. 5

$n_1$  : Pivot bearing adjusting screws (vertical)  
 $n_2$  : " (traverse)  
 o : Pivot bearing  
 M : Damping magnet  
 N : Magnet unit adjuster

### 5) 制振器

制振作用は磁気制振で第1 槓杆の先端に下方に向つて取付けられた銅板によつて行い、磁場は二対又は三対の馬蹄型磁石によつてあたえられ、容易に臨界制振まで調節しうる。磁極間調節用ねぢ N には左右互に逆のねぢが切つてあり磁石の間隔を調節する。

### 6) 拡大装置及び記録装置

第1 槓杆の先端において連絡杆によつて第2 槓杆と連絡する。(前節第4 図)

現在使用している第2 槓杆は細いアルミ管の枠組で出来ている。記録装置はガリッチン式地震計のものと同類であり、記象にはイブシ紙を使用する。

## 第3章 1 トン地震計の理論 本間正作

### § 1. はしがき

1 トン地震計の理論と言つても、この地震計が Zöllner 吊りの水平振子と拡大用槓杆との系として組み立っている以上、この種の地震計に通用しているふつうの理論をあてはめる以外別に新しい力学上の性質があるとは思われない。しかるにこの地震計では拡大用槓杆を連結した時得られる自

由振動周期が、一般に行われている公式から予想されるものより短いと言う重大な事実があるから、公式の適用しうる条件と事実との違いを見出して、それにもとずいて新しい理論を立てることが期待されるが、拡大用楯杆及びこれと振子との連結子については、まだ事実の観察に不充分な点があり有効な理論は導き難い<sup>(1)</sup>。

以上のような次第で最も必要な理論は未成功であるのは残念であるが、ここでは振子主体（第一楯杆）の理論に従つてこの地震計の数量的性質を吟味することにした。ただし Zöllner 振子のような多自由度振子について詳解したのを見当らなかつたので<sup>(2)</sup>、途中の計算は除外するにしても、ある程度記述が錯雑するのはまぬかれがたい<sup>(3)</sup>。

## § 2. 静止状態における振子の形状に関する記号

第 1 図で  $OX$  は水平軸、 $OZ$  は鉛直軸で空間に固定されている。 $OY$  は図にないがもう一つの水平軸である。これに対し  $x$  軸は振子の中心軸で静止釣合の時、ちょうど  $O$  点を通り  $XZ$  面内にあるとする。 $y$  軸、 $z$  軸、も振子に固定し静止釣合で  $y$  と  $Y$  は一致する。 $C$  は振子全体の重心で  $XZ$  面内に來ているとし、この振子は台枠に固定した 2 点  $P, Q$  から、それぞれ長さ  $r_1, r_2$  のロープで吊られ

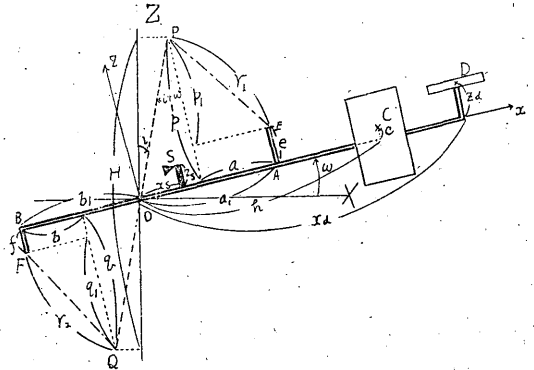


Fig. 1

ておりその振子端を  $E, F$  とする。 $S$  は地震計の台枠に固定したピボットで、振子の  $X$  軸方向の振動を防止すると共に振子が  $S$  点で  $Y$  方向にすべるのも妨げている。（廻転軸受けと仮称する。）実際の 1 トン地震計では  $S$  はかなり丸味のある半円頂であり振子側の受けが凹筒凹レンズのような形であるから、半円の中心があたかもピボットの先端に相当する<sup>(4)</sup>。その他  $a, b, a_1, b_1, p, q, p_1, q_1, H, e, f, c, j_1, j_2, h, x_s, z_s, x_a, z_a$ , 等長さを示す量、 $i, w$  という角を示す量は第 1 図に示すものである。

振子の中心軸  $x$  を適当に定めると、実測から  $a_1 + b_1, e, f, H, x_a + b_1$  (または  $x_a - a_1$ ),  $z_s, z_a$  及び  $r_1, r_2$  などは確定する。このような巨大な振子では重心  $C$  の位置を確定するのが困難であるが、もし計算などで相当の推定が可能なら  $h + b_1$  (または  $h - a_1$ ),  $c$  もまた確定したものととなる。

- (1) 実際上の概念的解説には鷺坂氏の議論がある。鷺坂清信；地震計用振子と増倍率用楯杆との連絡について（1951年 5 月 地震学会講演会にて講演）
- (2) 本間正作；地震計の運動方程式，験震時報 14 卷 1 号（1950）24—31 に極く一般的振子の議論がある。なお竹内均；多自由度の振子の運動勢力について，なる講演が 1944 年 3 月地震研究所談話会で読まれたが未印刷。
- (3) 詳しい点は別に発表の予定。
- (4) Galitzin 地震計では鋭いピボットが振子についた平面受けに当るようになつている。

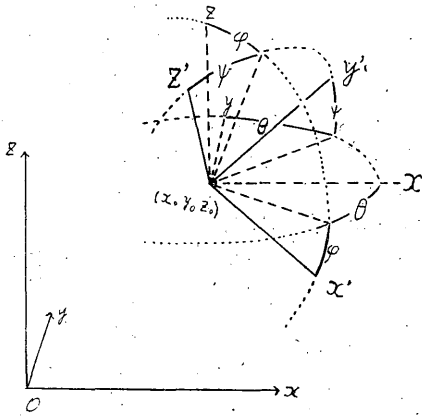


Fig. 2

§ 3. 振子の運動の基本式

振子はその2点 E, F が台に固定した2定点 P, Q より一定距離  $r_1, r_2$  があると云う条件から S の廻転軸承けを除いた場合に4個の自由度を持つ。この4個として静止の時の O 点に当る振子上の点 ( $x=0, y=0, z=0$ ) の Y 方向への変位  $y_0$ , 及び  $x, y, z$  軸のまわりの右廻りの廻転角  $\psi, \phi, \theta$  をとる。(正確に云えば Euler の角である。第2図)

振子が勝手に微小な運動をした時振子上の一点  $x=\xi, y=\eta, z=\zeta$  の変位の  $x, y, z$  成分は

$$\left. \begin{aligned} u_x &= x_0 + \eta\theta + \zeta\phi \\ u_y &= y_0 - \xi\theta - \zeta\psi \\ u_z &= z_0 - \xi\phi + \eta\psi \end{aligned} \right\} \quad (3.1)$$

でここに  $x_0, z_0$  は元來, 原点 O にあつた点の  $x, z$  方向の変位で, これももちろん  $y_0, \theta, \phi, \psi$  で表わせて

$$x_0 = \alpha_1\phi + \frac{1}{2}\alpha_2y_0^2 + \frac{1}{2}\alpha_3\theta^2 + \frac{1}{2}\alpha_4\phi^2 + \frac{1}{2}\alpha_5\psi^2 + \alpha_6y_0\theta + \alpha_7y_0\psi + \alpha_8\theta\psi \quad (3.2)$$

$$z_0 = \beta_1\phi + \frac{1}{2}\beta_2y_0^2 + \frac{1}{2}\beta_3\theta^2 + \frac{1}{2}\beta_4\phi^2 + \frac{1}{2}\beta_5\psi^2 + \beta_6y_0\theta + \beta_7y_0\psi + \beta_8\theta\psi \quad (3.3)$$

となる。(3.2), (3.3) で変数の三乗の量は捨ててある。(3.2) (3.3) の  $(\alpha), (\beta)$  は次のような値で以下の議論で重要な役割りをする。

$$\left. \begin{aligned} \alpha_1 &= \frac{1}{\Delta} \left\{ apq_1 + bq_1p_1 + p_1q_1(j_1 + j_2) \right\} \\ \alpha_2 &= -\frac{1}{\Delta} (p_1 + q_1) \\ \alpha_3 &= \frac{1}{\Delta} (a_1q_1j_1 + b_1p_1j_2) \\ \alpha_4 &= \frac{1}{\Delta} \left\{ \frac{q_1r_1^2}{a^2} (\beta_1 - a_1)^2 + \frac{p_1r_2^2}{b^2} (\beta_1 + b_1)^2 - (aa_1q_1 + bb_1p_1) + p_1q_1(e+f) \right\} \\ \alpha_5 &= \frac{1}{\Delta} (p_1q_1e + q_1p_1f) \\ \alpha_6 &= 1 + \frac{1}{\Delta} (p_1j_2 + q_1j_1) \\ \alpha_7 &= \frac{1}{\Delta} (f p_1 - e q_1) \\ \alpha_8 &= \frac{1}{\Delta} (e q_1 j_1 + f p_1 j_2) \end{aligned} \right\} \quad (3.4)$$

$$\begin{aligned}
 \beta_1 &= \frac{1}{\Delta} \left\{ ab(p+q) + j_1 b p_1 + j_2 a q_1 \right\} \\
 \beta_2 &= \frac{1}{\Delta} (a+b) \\
 \beta_3 &= \frac{1}{\Delta} \left\{ a_1 b j_1 + a b_1 j_2 \right\} = \frac{1}{\Delta} \left\{ ab(j_1 + j_2) + b j_1^2 + a j_2^2 \right\} \\
 \beta_4 &= \frac{1}{\Delta} \left\{ \frac{b r_1^2}{a^2} (\beta_1 - a_1)^2 + \frac{a r_2^2}{b^2} (\beta_1 + b_1)^2 - ab(a_1 + b_1) + e b p_1 + f a q_1 \right\} \\
 \beta_5 &= \frac{1}{\Delta} (e b p + f a q) \\
 \beta_6 &= \frac{1}{\Delta} (a j_2 - b j_1) \\
 \beta_7 &= \frac{1}{\Delta} (a e - b e) \\
 \beta_8 &= \frac{1}{\Delta} (e b j_1 + f a j_2)
 \end{aligned} \tag{3.5}$$

ただし

$$\Delta = b p_1 - a q_1 \tag{3.6}$$

次に振子の全質量を  $M$ 、重心  $C$  を通り  $x, y, z$  軸に平行な軸に関する慣性能率を  $M k_1^2, M k_2^2, M k_3^2$ 、 $y$  軸に関する慣性乗積を  $M v^2$  とする。またロープの両端を互に単位角ねぢるに要するモーメントを、上下のロープについて  $S_1, S_2$  とし<sup>(5)</sup>、

$$s_1 = \frac{S_1}{M g r_1^2}, \quad s_2 = \frac{S_2}{M g r_2^2} \tag{3.7}$$

とおくと運動方程式は運動が小さいと見た上で

$$\begin{aligned}
 \ddot{y}_0 - h \ddot{\theta} - c \dot{\psi} + 2 \varepsilon_y (\dot{y}_0 - x_a \dot{\theta} - z_a \dot{\psi}) + g \left\{ (\alpha_2 y_0 + \alpha_6 \theta + \alpha_7 \psi) \sin \omega + (\beta_2 y_0 + \beta_6 \theta + \beta_7 \psi) \cos \omega \right\} \\
 = - \ddot{y} + \frac{N}{M} (\alpha_2 y_0 + \alpha_6 \theta + \alpha_7 \psi) + \frac{F}{M}, \tag{3.8}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 - h \ddot{y}_0 + (h^2 + k_3^2) \ddot{\theta} + (h c - v^2) \dot{\psi} - 2 \varepsilon_y x_a \dot{y}_0 + 2 (\varepsilon_x y_a^2 + \varepsilon_y x_a^2) \dot{\theta} + 2 \varepsilon_x y_a (\alpha_1 + z_a) \dot{\varphi} + 2 \varepsilon_y x_a z_a \dot{\psi} \\
 + g \left[ \left\{ \alpha_6 y_0 + (\alpha_3 - h) \theta + (\alpha_8 - c) \psi \right\} \sin \omega + (\beta_6 y_0 + \beta_3 \theta + \beta_8 \psi) \cos \omega + (s_1 p_1^2 + s_2 q_1^2) \theta \right. \\
 \left. + (s_1 a p_1 + s_2 b q_1) \psi \right] = h \ddot{y} + \frac{N}{M} \left\{ \alpha_6 y_0 + (\alpha_3 - x_s) \theta + (\alpha_8 - z_s) \psi \right\} - \frac{F}{M} (x_s + z_s \varphi), \tag{3.9}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 - c \ddot{y}_0 + (h c - v^2) \ddot{\theta} + (c^2 + k_1^2) \dot{\psi} - 2 \varepsilon_y z_a \dot{y}_0 + 2 \varepsilon_y x_a z_a \dot{\theta} + 2 \varepsilon_x y_a (\beta_1 - x_a) \dot{\varphi} + 2 (\varepsilon_y z_a^2 + \varepsilon_x y_a^2) \dot{\psi} \\
 + g \left[ \left\{ \alpha_7 y_0 + (\alpha_8 - c) \theta + \alpha_5 \psi \right\} \sin \omega + \left\{ \beta_7 y_0 + \beta_8 \theta + (\beta_5 - c) \psi \right\} \cos \omega + (s_1 a p_1 + s_2 b q_1) \theta \right. \\
 \left. + (s_1 a^2 + s_2 b^2) \psi \right] = c \ddot{y} + \frac{N}{M} \left\{ \alpha_7 y_0 + (\alpha_8 - z_s) \theta + \alpha_5 \psi \right\} - \frac{F}{M} z_s, \tag{3.10}
 \end{aligned}$$

(5)  $S_1, S_2$  については矢崎技官の報告 (本誌) 参照。

$$\begin{aligned} & \left\{ (h-\beta_1)^2 + (\alpha_1+c)^2 + k_2^2 \right\} \ddot{\varphi} + 2\varepsilon_x y_d (\alpha_1+z_d) \dot{\theta} + 2 \left\{ \varepsilon_x (\alpha_1+z_d)^2 + \varepsilon_z (\beta_1-x_d)^2 \right\} \dot{\varphi} \\ & + 2\varepsilon_z y_d (\beta_1-x_d) \dot{\psi} + g \left[ \left\{ (\alpha_1+c) + (\alpha_4-h) \varphi \right\} \sin \omega - \left\{ (h-\beta_1) - (\beta_4-c) \varphi \right\} \cos \omega \right] \\ & = -(\alpha_1+c) \ddot{x} + (h-\beta_1) \ddot{z} + \frac{N}{M} \left\{ (\alpha_1+z_s) + (\alpha_4-x_s) \varphi \right\} - \frac{F}{M} z_s \theta, \end{aligned} \quad (3.11)$$

となる。ここに  $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$  は振子にとり付けた制振器部分が  $x, y, z$  方向に動いた場合に、この方向の速度成分に比例する減衰力の速度係数であり、 $\ddot{x}, \ddot{y}, \ddot{z}$  は地動加速度の  $x, y, z$  成分、 $N, F$  は S 点で振子が受ける抗力の  $x, y$  成分である。S 点で  $z$  方向にも運動が制限されると、ロープが伸びるか何かしない限り運動が出来なくなる。従つて  $z$  方向には自由にすべるとしなればならず、この方向の抗力は生じない。(実際に  $z$  方向の変位は小さい。)

i 廻転軸受け S が取付けていない時は

$$N = F = 0 \quad (3.12)$$

ii S が取付けてあれば (3.1) によりこの点が  $x$  及び  $y$  方向に運動しない条件

$$y_0 = x_s \theta + z_s \psi \quad (3.13)$$

$$\varphi = O(\theta^2) \quad (3.14)$$

を付け加うべきである。

#### § 4. 釣合の条件

(3.8)~(3.11) で座標成分、その時間微分係数及び地動成分を総て 0 とおくと静止釣合の式は

$$\frac{F_0}{M} = 0 \quad (4.1)$$

$$(\alpha_1+c) \sin \omega - (h-\beta_1) \cos \omega = \frac{N_0}{Mg} (\alpha_1+z_s) \quad (4.2)$$

で与えられる。ここに  $N_0, F_0$  は静止釣合における  $N, F$  の値である。

(4.2) を一般的に解くには目の手で数値的に逐次近似するより仕方がないが、幸い地震計としては

$$\omega \approx 0, \quad \frac{N_0}{Mg} \approx 0 \quad (4.3)$$

が成り立つ。 $\frac{N_0}{Mg}$  を大きくすると S 点で摩擦抗抵を増す結果となり Zöllner 吊りの長所を失うからこれは最小限度に止める必要がある。

(4.3) が満されるなら、第一近似として  $\omega=0, \frac{N_0}{Mg}=0$  において

$$h-\beta_1=0 \quad (4.4)$$

となる。更に  $i$  も小さいから  $i=0$  従つて  $j_1=j_2=0$  として (3.5) より  $\beta_1$  を書きかえると

$$aq_1(h_0+b_1)-bp_1(h-a_1)+ab(e+f)=0$$

となる。今重心 C の位置がほぼ正確に知れておるなら  $h-a_1$ ,  $h+b_1$ , 及び  $a+b=a_1+b_1$  ( $\because i=0$ ) が既知であるから更に  $p_1$ ,  $q_1$  も既知とすれば  $a$ ,  $b$  を解くことが出来る。これは 2 組の根があるが、ロープの張力が正である条件を入れると 1 組は無駄になり

$$\left. \begin{aligned} a &= \frac{1}{2(e+f)} \left\{ (h+b_1)q_1 + (h-a_1)p_1 + (e+f)(a_1+b_1) - \sqrt{D} \right\} \\ b &= \frac{1}{2(e+f)} \left\{ -(h+b_1)q_1 - (h-a_1)p_1 + (e+f)(a_1+b_1) + \sqrt{D} \right\} \end{aligned} \right\} \quad (4.5)$$

ただし

$$\begin{aligned} D &= \left\{ (h+b_1)q_1 + (h-a_1)p_1 \right\}^2 + (e+f)^2 (a_1+b_1)^2 \\ &\quad + 2(e+f)(a_1+b_1) \left\{ (h+b_1)q_1 - (h-a_1)p_1 \right\} \end{aligned} \quad (4.6)$$

この第一近似値を使い、(4.2) の更に精密な解を求めることが出来る。前述の如く  $h-a_1$ ,  $h+b_1$  (従つて  $a_1+b_1$ ),  $e$ ,  $f$ ,  $c$ ,  $z_s$  などは既定の値と見て更に幾何学的恒等式

$$\left. \begin{aligned} r_1 &= \sqrt{a^2 + p_1^2}, \quad r_2 = \sqrt{b^2 + q_1^2}, \\ H &= \frac{(p+q) \cos i}{\cos(i+\omega)} a_1 = a + p \operatorname{tg}(i+\omega), \quad b_1 = b + q \operatorname{tg}(i+\omega) \end{aligned} \right\} \quad (4.7)$$

などを用いると、任意の釣合状態から

$$\Re_1 \delta r_1 + \Re_2 \delta r_2 + \Im \delta i + \mathfrak{B} \delta \omega - \mathfrak{H} \delta H + \Re \delta \left( \frac{N}{Mg} \right) = 0 \quad (4.8)$$

を満すように  $r_1$ ,  $r_2$ ,  $i$ ,  $\omega$ ,  $H$ ,  $N$  を変化させた場合にも矢張り釣合は保たれることが分る。ここで

$$\left. \begin{aligned} \Re_1 &= \frac{r_1}{\Delta} \left[ (h+b_1)(ab+q_1^2) + (h+a_1)(p_1q_1+b^2) + (e+f)(b-a)q_1 \right], \\ \Re_2 &= \frac{r_2}{\Delta} \left[ (h+b_1)(p_1q_1+a^2) + (h-a_1)(ab+p_1^2) + (e+f)(b-a)p_1 \right], \\ \Im &= \frac{H}{\Delta} \left[ (h+b_1)(p_1q_1+a^2)b + (h-a_1)(p_1q_1+b^2)a + (e+f)(b^2p_1-a^2q_1) \right], \\ \mathfrak{H} &= \frac{1}{\Delta} \left[ (h+b_1)(ab+q_1^2)p_1 + (h-a_1)(ab+p_1^2)q_1 + (e+f)(b-a)p_1q_1 \right], \\ \Re &= eaq_1 + fbp_1 + (a_1+b_1)p_1q_1 + \Delta z_s, \\ \mathfrak{B} &= \Im - \Re + \Delta(c-z_s), \end{aligned} \right\} \quad (4.9)$$

この公式を  $i=0$ ,  $\omega=0$ ,  $N=0$  の場合の解にあてはめると、このような条件と少し違う場合の釣合条件が定まるのである。この場合次の諸公式で色々の量の変化が求まる<sup>(6)</sup>。これは参考のため公式だけあけておく。

(6) 同じようにして (4.3) で  $\omega = \frac{\pi}{2}$  から出発すると Wood-Anderson の Torsion Seismograph の釣合公式が求まる。



$$\left. \begin{aligned}
 \delta p_1 &= \frac{1}{\Delta} \left\{ br_1 \delta r_1 + ar_2 \delta r_2 + abH \delta(i+\omega) - aq_1 \delta H \right\} \\
 \delta q_1 &= \frac{-1}{\Delta} \left\{ br_1 \delta r_1 + ar_2 \delta r_2 + abH \delta(i+\omega) - bp_1 \delta H \right\} \\
 \delta a &= \frac{1}{a} (r_1 \delta r_1 - p_1 \delta p_1) \\
 \delta b &= \frac{1}{b} (r_2 \delta r_2 - q_1 \delta q_1) \\
 \delta a_1 &= \delta a + p \delta(i+\omega) \\
 \delta b_1 &= \delta b + q \delta(i+\omega) \\
 \delta h &= \delta a_1 = -\delta b_1
 \end{aligned} \right\} \quad (4.10)$$

§ 5. 1 トン地震計の釣合い

1 トン地震計の設計図により各部の基本的寸法を第 3 図の如く假定した。(単位 cm) 実際とは多少喰違ひがあるかも知れないが, 重心 C の位置を重錘の中心に在るといふような假定を余儀なくしたり, 直実を正しく寫し得ぬ点も少くないから余り細い事は問題に出来ない。

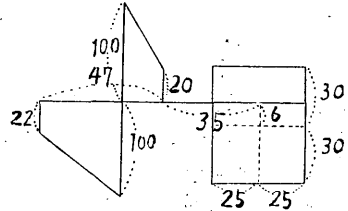


Fig. 3

これより

$$\left. \begin{aligned}
 h + b_1 &= 82, & h - a_1 &= 35 \\
 p = q &= 100, & e &= 20, & f &= 22 \\
 & & p_1 &= 80, & q_1 &= 78 \\
 c &= -6
 \end{aligned} \right\} \quad (5.1)$$

となるから (4.5), (4.7) などから

$$\left. \begin{aligned}
 a &= 12.3555 \quad 7076 \\
 b &= 34.6444 \quad 2924
 \end{aligned} \right\} \quad (5.2)$$

$$\left. \begin{aligned}
 r_1 &= 80.9485 \quad 0294 \\
 r_2 &= 85.3477 \quad 3856
 \end{aligned} \right\} \quad (5.3)$$

それから (3.4), (3.5) により  $(\alpha)$ ,  $(\beta)$  などがすべて第一近似的に求まる。(第 1 表)  $\alpha_3, \alpha_8, \beta_3, \beta_6, \beta_8$  は第一近似値が 0 であるから第二近似値を求めてある。これは  $i$  の変化に対してだけあらわれる。中で  $\alpha_3, \alpha_8$  は余り必要でないから第二近似値も載せていない。また (4.9) により

第 1 表

1 トン地震計の基本数値表  
単位: cm \* 假定値

量名	数	値
$e^*$	20	
$f^*$	22	
$c^*$	- 6	
$a$	12.3556	
$b$	34.6444	
$a_1$	12.3556	
$b_1$	34.6444	
$h$	47.3556	
$p^*$	100	
$q^*$	100	
$p_1$	80	
$q_1$	78	
$r_1$	80.9485	
$r_2$	85.3477	
$\Delta$	1807.82	
$\alpha_1$	206.6184	
$\alpha_2$	0.0873	981
$\alpha_3$	0	
$\alpha_4$	Omitted	
$\alpha_5$	183.6466	
$\alpha_6$	1	
$\alpha_7$	0.1106	305
$\alpha_8$	0	
$\beta_1$	47.3556	
$\beta_2$	0.0259	982
$\beta_3$	(47.3556 $i$ )	
$\beta_4$	1317.81	
$\beta_5$	53.3632	
$\beta_6$	(-1.2329 $14i$ )	
$\beta_7$	- 0.2329	14
$\beta_8$	(53.3632 $i$ )	

$$\left. \begin{aligned} \mathfrak{S} &= 275 \quad 5885.032 \\ \mathfrak{B} &= 239 \quad 3203.065 \\ \mathfrak{D} &= 3 \quad 7172.4568 \quad 7^5 \\ \mathfrak{R} &= 37 \quad 3528.8858 \quad 5+1807.8198 \quad 20z_s \end{aligned} \right\} (5.4)$$

となる。1 トン地震計では  $r_1, r_2$  は変え得ないから  $\mathfrak{R}_1, \mathfrak{R}_2$  は省略してある。

### § 6. 廻転軸承けを移動させて所与の法圧の下に振子を釣合わせる方法

廻転軸承けの釣合時法圧  $N_0$  を適当に与えておくとも  $\frac{N_0}{M}$  より小さい地動加速度が  $x$  方向に与えられても、振子が  $x$  方向に縦振れをする ( $\varphi$  振動を起す) のを防止出来る。一方  $N_0$  を余り大きくすると振子の運動の固体摩擦を増すから不利である。そこで  $N_0$  を必要な範囲で最小限に与える方法を考えねばならぬ。

初め振子は  $i \approx 0, \omega \approx 0, N_0 = 0$  の状態で適当に調節し、次に S 点のピボットを  $x$  方向に移動すると  $N$  を適当に与え得る。

(4.8) で  $\delta r_1 = \delta r_2 = \delta i = \delta H = 0$  とおくと

$$\mathfrak{B}\delta\omega + \mathfrak{R} \frac{N}{Mg} = 0$$

( $\frac{N}{Mg}$  は初め 0 であつたから  $\delta \frac{N}{Mg} = \frac{N}{Mg}$  になる。)

$$\therefore \delta\omega = - \frac{\mathfrak{R}}{\mathfrak{B}} \frac{N}{Mg}$$

しかるに  $\delta\omega = -\delta\varphi$  であり (第 1 図), (3.1) と (3.2) によりこのような  $\omega$  の変化に対する S 点の変位は

$$\left. \begin{aligned} \left[ V_x \right]_s &= \alpha_1 \delta\varphi + z_s \delta\varphi = (\alpha_1 + z_s) \frac{\mathfrak{R}}{\mathfrak{B}} \frac{N}{Mg}, \\ \left[ V_z \right]_s &= \beta_1 \delta\varphi - x_s \delta\varphi = (\beta_1 - x_s) \frac{\mathfrak{R}}{\mathfrak{B}} \frac{N}{Mg}, \end{aligned} \right\} (6.1)$$

そして

$$\delta\varphi = - \frac{\mathfrak{R}}{\mathfrak{B}} \frac{N}{Mg} \quad (6.2)$$

一般に  $x_s, z_s$  は余り大きくないからこれらの値の大略は  $x_s = 0, z_s = 0$  として求めても差しつかえない。そうすると上の数値を用いて、

$$\left. \begin{aligned} \left[ V_x \right]_s &= 32.25 \frac{N}{Mg}, & \left[ V_z \right]_s &= 7.39 \frac{N}{Mg} \\ \delta\omega &= - 0.1561 \frac{N}{Mg} \end{aligned} \right\} (6.3)$$

となる。たとえば  $N$  を 10 kg 重に与えたいなら,  $\frac{N}{Mg} = 0.01$  であるから, 振子の初めの状態として,  $\omega$  を 0.001561 ラジアンにしておく。次に S 点のピボットの受け (振子についている) を廻転軸 PQ より左側 (第 1 図) に 0.32 cm の所まで後退させておく。それから台についている S のピボットを  $x$  方向に前進させ, 受けに接触してから更に 0.32 cm 押しやると, 振子は水平に釣合い, かつその時 S 点が丁度廻転軸 PQ 上に来て 10 kg 重の法圧を持つことになる。初め  $\omega$  に 0.001561 ラジアンを与えておくと言うのは測定が面倒になる。横杆の先端の拡大用横杆への連結子附近と廻転軸 PQ の距離を  $L$  とするとこの点の  $z$  方向の変位は

$$\left[ V_z \right]_L = \beta_1 \delta \varphi - L \delta \varphi = -(\beta_1 - L) \delta \omega$$

であるから,  $L$  に設計図の寸法 216 cm を代入して  $\left[ V_z \right]_L = -0.263$  cm となる。すなわち始め横杆の先端附近を水平の場合より 0.26 cm 高くなるように釣合せて, 次に S を上のように前進させれば最後の状態で振子が正しく水平に釣合う。(ただしこの水平と言うことは實際上特に必要ではない。)

ここで一応注意しなければならないのは, 上の操作中に S 点でピボットとその受けの間に (6.3) の  $\left[ V_z \right]_s$  のようなスリップを生ずることで, このスリップが円滑に行われないとわずかながら不都合を生ずる。

このようにして所与の  $N_0$  を与えることは出来たが, その上更に固有周期が希望の値になつていなければならない。それはどうするかを知るためには自由振動について調べなければならない。

### § 7. 廻転軸受け S をとりはずした時の自由振動

この時は (3.8)~(3.11) で  $N=F=0$  であり, また自由振動だから  $\varepsilon_x = \varepsilon_y = \varepsilon_z$  であるから  $y_0, \theta, \psi$  の式と  $\varphi$  の式とが全く分離する。すなわち前の 3 つについては

$$\left. \begin{aligned} A_{11} \ddot{y}_0 + A_{12} \ddot{\theta} + A_{13} \ddot{\psi} + P_{11} y_0 + P_{12} \theta + P_{13} \psi &= 0 \\ A_{21} \ddot{y}_0 + A_{22} \ddot{\theta} + A_{23} \ddot{\psi} + P_{21} y_0 + P_{22} \theta + P_{23} \psi &= 0 \\ A_{31} \ddot{y}_0 + A_{32} \ddot{\theta} + A_{33} \ddot{\psi} + P_{31} y_0 + P_{32} \theta + P_{33} \psi &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (7.1)$$

となる。ここに

$$\left. \begin{aligned} A_{11} &= 1, & A_{22} &= h^2 + k_3^2, & A_{33} &= c^2 + k_1^2, \\ A_{12} &= A_{21} = -h, & A_{23} &= A_{32} = hc - v^2, & A_{31} &= A_{13} = -c \end{aligned} \right\} \quad (7.2)$$

$$\left. \begin{aligned} P_{11} &= g (\beta_2 \cos \omega + \alpha_2 \sin \omega), & P_{22} &= g \{ \beta_3 \cos \omega + (\alpha_3 - h) \sin \omega + s_1 p_1^2 + s_2 q_1^2 \}, \\ P_{33} &= g \{ (\beta_5 - c) \cos \omega + \alpha_5 \sin \omega + s_1 \alpha^2 + \beta_2 b^2 \} \\ P_{12} &= P_{21} = g (\beta_6 \cos \omega + \alpha_6 \sin \omega), & P_{23} &= P_{32} = g \{ \beta_8 \cos \omega + \alpha_8 - c \} \sin \omega + s_1 a p_1 + s_2 b q_1, \\ P_{31} &= P_{13} = g (\beta_7 \cos \omega + \alpha_7 \sin \omega) \end{aligned} \right\} \quad (7.3)$$

$\varphi$  の式は釣合条件 (4.2) を参照して

$$\{ (h-\beta_1)^2 + (\alpha_1+c)^2 + k_2^2 \} \ddot{\varphi} + g \{ (\alpha_4-h) \sin \omega + (\beta_4-c) \cos \omega \} \varphi = 0 \quad (7.4)$$

となる。

まず (7.1) を調べるため

$$(y_0, \theta, \psi) = (Y, \Theta, \Psi) e^{i\tau t} \quad (7.9)$$

とおいて代入すると、 $\tau$  を求める式とその  $\tau$  に対する  $Y, \Theta, \Psi$  の比を求める式が次のように導かれる。

$$\begin{aligned} & \{ A_{11}(A_{22}A_{33} - A_{23}^2) + A_{31}(A_{12}A_{23} - A_{31}A_{22}) + A_{12}(A_{23}A_{31} - A_{12}A_{33}) \} \tau^6 \\ & - \{ P_{11}(A_{22}A_{33} - A_{23}^2) + 2P_{31}(A_{12}A_{23} - A_{31}A_{22}) + P_{33}(A_{11}A_{22} - A_{12}^2) \\ & + P_{22}(A_{33}A_{11} - A_{31}^2) + 2P_{23}(A_{31}A_{12} - A_{23}A_{11}) + 2P_{12}(A_{23}A_{31} - A_{12}A_{33}) \} \tau^4 \\ & + \{ (P_{33}P_{11} - P_{31}^2)A_{22} \\ & + (P_{11}P_{22} - P_{12}^2)A_{33} + (P_{22}P_{33} - P_{23}^2)A_{11} + 2(P_{31}P_{12} - P_{11}P_{23})A_{23} + 2(P_{23}P_{13} - P_{33}P_{12})A_{12} \\ & + 2(P_{12}P_{23} - P_{22}P_{31})A_{31} \} \tau^2 \\ & - \{ P_{22}(P_{33}P_{11} - P_{31}^2) \\ & + 2P_{12}P_{23}P_{31} - P_{11}P_{23}^2 - P_{23}P_{12}^2 \} = 0 \end{aligned} \quad (7.6)$$

$$\begin{array}{c} Y \\ \left[ \begin{array}{cc} P_{22} - A_{22}\tau^2 & P_{23} - A_{23}\tau^2 \\ P_{23} - A_{23}\tau^2 & P_{33} - A_{33}\tau^2 \end{array} \right] \\ \Theta \\ \left[ \begin{array}{cc} P_{23} - A_{23}\tau^2 & P_{12} - A_{12}\tau^2 \\ P_{33} - A_{33}\tau^2 & P_{31} - A_{31}\tau^2 \end{array} \right] \\ \Psi \\ \left[ \begin{array}{cc} P_{12} - A_{12}\tau^2 & P_{22} - A_{22}\tau^2 \\ P_{31} - A_{31}\tau^2 & P_{23} - A_{23}\tau^2 \end{array} \right] \end{array} \quad (7.7)$$

$i$  が非常に小さい値とすれば第 1 表、あるいは (3.4), (3.5) から分るように

有 限 量  $\alpha_2, \alpha_5, \alpha_6, \alpha_7, \beta_2, \beta_5, \beta_7$

微 小 量  $\alpha_3, \alpha_8, \beta_3, \beta_6, \beta_8$

であるから  $\omega$  や  $s_1, s_2$  も  $i$  と同程度に小さいと見ると

有 限 量  $P_{11}, P_{13}, P_{33}$

微 小 量  $P_{12}, P_{22}, P_{23}$

となる。従つて (7.6) の  $\tau^4, \tau^2$  の係数で第一行目の値が有限なのに、残りの項が微小量になる絶対項は第一行目が微小量で残りの項は 2 次の微小量となる。それ故各係数で残りの項の部を捨てると、 $\tau^2$  の値は近似的に次のように求まる。

$$\tau_1^2 \approx \frac{P_{22}}{A_{22}} \quad (7.8)$$

$$\begin{aligned} & \{ A_{11}(A_{22}A_{33}-A_{23}^2)+A_{31}(A_{12}A_{23}-A_{31}A_{22})+A_{12}(A_{23}A_{31}-A_{12}A_{33}) \} \tau_m^4 \\ & - \{ P_{11}(A_{22}A_{33}-A_{23}^2)+2P_{31}(A_{12}A_{23}-A_{31}A_{22})+P_{33}(A_{11}A_{22}-A_{12}^2) \} \tau_m^2 \\ & - (P_{33}P_{11}-P_{31}^2)A_{22} \div 0 \quad (m=2, 3) \end{aligned} \quad (7.9)$$

(7.9) は相当面倒であるが, これは

$$\begin{aligned} & \{ (A_{11}A_{22}-A_{12}^2)\tau_m^2-A_{22}P_{11} \} \{ A_{33}\tau_m^2-P_{33} \} \\ & = (A_{11}A_{23}^2-2A_{12}A_{23}A_{13}+A_{13}^2A_{22})\tau_m^4-2 \{ P_{11}A_{23}^2+P_{31}(A_{12}A_{23}-A_{31}A_{22}) \} \tau_m^2 \\ & + P_{31}^2A_{22} \end{aligned} \quad (7.9')$$

と変形される。この右辺に (7.2) を入れると

$$(c^2k_3^2+v^4)\tau_m^4-2 \{ P_{11}(hc-v^2)+P_{31}(hv^2+ck_3^2) \} \tau_m^2+P_{31}^2(h^2+k_3^2)$$

となる。ふつう  $c, v$  は他の長さ  $h, k_1, k_3$  等に比し著しく小さく,  $P_{13}$  は有限と云つても唯今の  
ような場合には (7.3) 及び第 1 表の数字から分かるように大変小さいから (7.9') の右辺は近似的  
に省略しても大過ない。そうすると,

$$\tau_2^2 \div \frac{P_{33}}{A_{33}} \quad \tau_3^2 \div \frac{A_{22}-P_{11}}{A_{11}A_{22}-A_{12}^2} \quad (7.10)$$

なる近似根が得られる。(以下  $\div$  は  $i, \omega$  を小とした時の近似根  $\div$  に対し,  $c, v, e, f$  などを  
小さいとした近似根で精度は若干落ちることを示す。)

(7.8) を (7.7) に代入すると  $\ominus$  の分母は 1 次の微小値であるのに,  $Y, \Psi$  の分母は 2 次の微  
小値になるから, これは主として  $\theta$  方向の振動を示す。 $\tau_2^2$  を (7.7) に入れると  $\Psi$  の分母は 1  
次の微小値で  $Y, \ominus$  の分母は 2 次の微小値であるから, これは主として  $\psi$  方向の振動を示す。

$\tau_3^2$  を (7.7) に代入すると

$$\frac{Y}{-\frac{A_{22}^2P_{11}}{A_{11}A_{22}-A_{12}^2} \left( P_{33} - \frac{A_{22}A_{33}P_{11}}{A_{11}A_{22}-A_{12}^2} \right)} = \frac{\ominus}{\frac{A_{12}A_{22}P_{11}}{A_{11}A_{22}-A_{12}^2} \left( P_{33} - \frac{A_{22}A_{33}P_{11}}{A_{11}A_{22}-A_{12}^2} \right)}$$

で  $\Psi$  の分母は 1 次の微小値となる。故に

$$\frac{Y}{\ominus} = -\frac{A_{22}}{A_{12}} = \frac{h^2+k_3^2}{h} \quad (7.11)$$

(3.1) によるとこの振動では  $x = \frac{h^2+k_3^2}{h}, y=0, z=0$  なる点が運動しないことが分る。すなわち

廻転軸 PQ に対する衝撃の中心点が不動であるような振動である。

(7.8), (7.10) を分かり易く書き直おすと,  $\omega$  が小さいから

$$\tau_1^2 \div g \frac{\beta_{33}-h\omega+s_1p_1^2+s_2q_1^2}{h^2+k_3^2}$$

しかし  $\beta_{33} \div \frac{abHi}{\Delta}$  であり, 一方釣合の式 (4.2) から近似的に  $h \div \beta_1 = \frac{abH}{\Delta}$  であるから

$$\tau_1^2 \doteq g \frac{h(i-\omega) + s_1 p_1^2 + s_2 q_1^2}{h^2 + k_3^2} \quad (7.12)$$

同様に

$$\tau_2^2 \doteq g \frac{\beta_5 - c}{k_1^2} \doteq g \frac{\{(e-c)bp_1 + (f+c)aq_1\} h^2}{a^2 b^2 h^2} \quad (7.13)$$

$$\tau_3^2 \doteq g \frac{h^2 + k_3^2}{k_3^2} \beta_2 \doteq g \frac{(a+b)h(h^2 + k_3^2)}{abHk_3^2} \quad (7.14)$$

次に (7.4) を調べよう。(4.2) から近似的に  $h \doteq \beta_1$  であるから  $\omega$  が小さいなら

$$\{(\alpha_1 + c)^2 + k_3^2\} \varphi + g(\beta_4 - c) \varphi \doteq 0 \quad (7.15)$$

故に

$$\varphi = \Phi e^{i\tau_4 t} \quad (7.16)$$

とおけば

$$\tau_4^2 \doteq g \frac{\beta_4 - c}{(\alpha_1 + c)^2 + k^2} \doteq g \frac{(bp_1 - aq_1) \left\{ \frac{br_1^2}{a^2} (h-a)^2 + \frac{ar_2^2}{b^2} (h+b)^2 - ab(a+b) + (e-c)bp_1 + (f+c)aq_1 \right\}}{\left\{ (q+c)bp_1 + (p-c)aq_1 \right\}^2 (bp_1 - aq_1)^2 k_2^2} \quad (7.17)$$

これはもちろん  $\varphi$  方向の振動、すなわち楕杆の縦振動である。

慣性に関する実際の数値を推定することは非常に困難であるが適当に勘案して

$$\left. \begin{aligned} h^2 + k_3^2 &= h^2 + k_3^2 = 2900 \\ c^2 + k_1^2 &= 450 \\ v^2 &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (7.18)$$

と仮定して上記の  $\tau$  を数量的に吟味すると (第1表参照)

$$\left. \begin{aligned} \tau_1^2 &\doteq \{0.0163 \quad 3(i-\omega) + 2.207 s_1 + 2.098 s_2\} g, \\ \tau_2^2 &\doteq 0.1434 g, & T_2 &\doteq 0.530 \text{ sec.} \\ \tau_3^2 &\doteq 0.1147 g, & T_3 &\doteq 0.593 \text{ sec.} \\ \tau_4^2 &\doteq 0.0311 \quad 5^5 & T_4 &\doteq 1.137 \text{ sec.} \end{aligned} \right\} \quad (7.19)$$

となる。 $\tau_1$  の振動が地震計としての自由振動である。 $s_1, s_2$  に関する推定は難しい。ロープの構造は矢崎技官の報告<sup>(7)</sup>にあるように PE の方は直径 1.05 mm の針金を 37 本を集めて直径 1.05×7 mm のロープにより合わせてあり、QF の方は同じ針金を 19 本集めて、直径 1.05×5 mm のロープにより合わせてある。もし各ロープを一本の針金と見ると (針金の剛性率を  $10^{12}$  程度として)

(7) 本論文、第1章

$$s_1 = 0.000053 \quad s_2 = 0.000012 \quad (7.20)$$

位になり, 直径 1.05 mm の針金が各独立に作用しているを見ると

$$s_1 = 0.0000009 \quad s_2 = 0.0000004 \quad (7.21)$$

位になり, 両方の考えの間には  $s_1$  では約 60:1,  $s_2$  では約 30:1 の開きがあるから, 本当の値はその中間であろうが推定困難である。第2表には  $s_1 = s_2 = 0$  として  $i-\omega$  と固有周期  $T_1 = \frac{2\pi}{\tau_1}$  との数値的關係を示してある。また  $\omega=0$  の場合に  $j_1 = pi = j_2 = qi$  であるから  $j_1, j_2$  と  $T_1$  の関係も示してある。ついでに (7.19) 式に現われる 0.01633 ( $i-\omega$ ) の値も示してある。これによれば  $s_1, s_2$  を最も小さく見積つても (7.19) 式中の  $s_1, s_2$  の項は 0.00003 位になるから  $T_1 >$

第2表  $\theta$  振動の固有周期  
( $s_1 = s_2 = 0$ )

$i-\omega$	$j_1 = j_2$ ( $\omega=0$ )	$T_1$ sec	0.01633 ( $i-\omega$ )
0.0001	0.1	157.1	0.000016
0.0002	0.2	111.1	0.000033
0.0003	0.3	90.7	0.000049
0.0004	0.4	78.5	0.000065
0.0005	0.5	70.2	0.000082
0.0006	0.6	64.1	0.000098
0.0007	0.7	59.4	0.000114
0.0008	0.8	55.5	0.000131
0.0009	0.9	52.35	0.000147
0.0010	1.0	49.7	0.000163
0.0012	1.2	45.35	0.000196
0.0014	1.4	42.0	0.000229
0.0016	1.6	39.3	0.000261
0.0020	2.0	35.1	0.0003265
0.0025	2.5	31.4	0.000408
0.003	3.0	28.7	0.000490
0.004	4.0	24.8	0.000653
0.006	6.0	20.8	0.000980
0.008	8.0	17.6	0.00131
0.010	10.0	15.7	0.00163
0.015	15.0	12.8	0.00245
0.02	20.0	11.11	0.003265
0.03	30.0	9.07	0.00490
0.04	40.0	7.85	0.00653
0.06	60.0	6.41	0.00980

60 秒位ではロープのねぢれの影響が著しく効いおることが分る。

$T_2, T_3$  は何れも 0.5 秒内外で区別しにくいから, この計算には E, F 点におけるロープの折れの影響が入っていないから, 本当の  $T_2$  はもつと小さいかも知れない<sup>(8)</sup>。 $T_4$  はこれらの約 2 倍の周期で, 単振り等長は  $g/\tau_4^2 = 32$  cm であるから, 重錘を長さ  $\rho$  (100 cm) の糸で吊つた単振子の長さとは大変違う。(7.17) の分母で  $k_2^2$  は  $(\alpha_1 + c)^2$  に比し著しく小さいから,  $T_4$  は慣性に関する値には殆んど関係せず各部の寸法だけで大体決るものである。廻転軸受け S をはずして自由振動を行わせ, 第一横杆に直接ペンをつけて記録させると, ペンが長さの

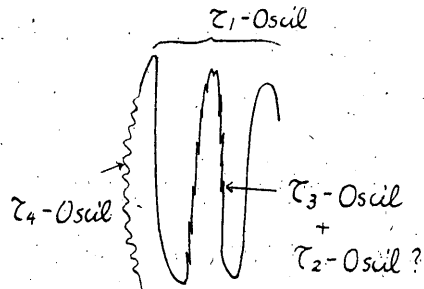


Fig. 4

(8) ロープの P, Q 端はナイフ・エッジになつているからロープが折れない。Galitzin 地震計では両端共固定端になつているから折れる。

方向に小さい凹凸を画くのは  $\varphi$  の振動である。(第4図) しかしペン先は左右にも早い往復振動をまじているのはおそらく  $T_3$  の振動すなわち衝撃の中心あるいは略々重錘の重心のまわりの水平廻転であると考えられる。後者は周期  $T_1$  の測定に妨害になるから、これを少くするには衝撃の中心附近を圧して振子を振らせればよいはずである。更に  $\psi$  振動も防ぐには衝撃の中心を通る鉛直線上で重心と同一水平面内の点を水平に圧せば完全である。これは常識的にも当然な事柄に過ぎない。

§ 8. 廻転軸承けを接触した時の自由振動

こんども  $\varepsilon_x = \varepsilon_y = \varepsilon_z = \theta$  とおく。  $\varphi$  方向の振動は出来ない。

$$N = N_0 + N_1, \quad F = F_0 + F_1 \quad (F_0 = 0) \quad (8.1)$$

とおくと  $N_0, F_0$  は静止時の抗力,  $N_1, F_1$  は運動に伴う抗力の変化であるが、これは座標  $y_0, \theta, \psi$  と同程度の微小量で故、座標の平方を捨てると (3.8)~(3.10) は

$$\left. \begin{aligned} A_{11}y_0 + A_{12}\dot{\theta} + A_{13}\dot{\psi} + P_{11}y_0 + P_{12}\dot{\theta} + P_{13}\dot{\psi} &= \frac{F_1}{M} \\ A_{21}y_0 + A_{22}\dot{\theta} + A_{23}\dot{\psi} + P_{21}y_0 + P_{22}\dot{\theta} + P_{23}\dot{\psi} &= -x_s \frac{F_1}{M} \\ A_{31}y_0 + A_{32}\dot{\theta} + A_{33}\dot{\psi} + P_{31}y_0 + P_{32}\dot{\theta} + P_{33}\dot{\psi} &= -z_s \frac{F_1}{M} \end{aligned} \right\} (8.2)$$

ただし

$$\left. \begin{aligned} A_{11} &= 1, & A_{22} &= h^2 + k_s^2, & A_{33} &= c^2 + k_1^2, \\ A_{12} &= A_{21} = -h, & A_{23} &= A_{32} = hc - v^2, & A_{31} &= A_{13} = -c. \end{aligned} \right\} (8.3)$$

$$\left. \begin{aligned} P_{11} &= g \left\{ \beta_2 \cos \omega + \alpha_2 \sin \omega - \alpha_2 \frac{N_0}{Mg} \right\} \\ P_{22} &= g \left\{ \beta_3 \cos \omega + (\alpha_3 - h) \sin \omega + s_1 p_1^2 + s_2 q_1^2 - (\alpha_3 - x_s) \frac{N_0}{Mg} \right\} \\ P_{33} &= g \left\{ (\beta_5 - c) \cos \omega + \alpha_5 \sin \omega + s_1 a^2 + s_2 b^2 - \alpha_5 \frac{N_0}{Mg} \right\} \\ P_{12} &= P_{21} = g \left\{ \beta_6 \cos \omega + \alpha_6 \sin \omega - \alpha_6 \frac{N_0}{Mg} \right\} \\ P_{23} &= P_{32} = g \left\{ \beta_8 \cos \omega + (\alpha_8 - c) \sin \omega + s_1 a p_1 + s_2 b q_1 - (\alpha_8 - z_s) \frac{N_0}{Mg} \right\} \\ P_{31} &= P_{13} = g \left\{ \beta_7 \cos \omega + \alpha_7 \sin \omega - \alpha_7 \frac{N_0}{Mg} \right\} \end{aligned} \right\} (8.4)$$

となる。  $A$  は前節のと同じであり  $P$  は  $N_0 = 0$  とおくと前節のと一致する。この外に (3.13) の条件

$$y_0 - x_s \dot{\theta} - z_s \dot{\psi} = 0 \quad (8.5)$$



がある。(3.11) は釣合の式 (4.2) を参照して

$$(\alpha_1 + z_s) \frac{N_1}{M} = (\alpha_1 + c) \ddot{x} - (h - \beta_1) \ddot{z}$$

となるが、 $\omega$  が小さいと釣合の関係は  $h - \beta_1 \doteq 0$  であるから、

$$N_1 = M \frac{\alpha_1 + c}{\alpha_1 + z_s} \ddot{x} \quad (8.6)$$

となり、 $N$  の時間的変化が  $x$  方向の地動加速度だけで決ることを示している。 $\alpha_1$  は  $c$ ,  $z_s$  に比し著しく大きいから

$$N_1 \doteq M \ddot{x} \quad (8.6')$$

とおいても大差ない。S 点が離れないためには  $N_0 > |N_1| \doteq M |\ddot{x}|$  のような  $N_0$  を常時与えておく必要がある。今記象振巾 1 cm の地動があるとして、その周期を  $T$  とすると、色々な  $T$  に対して  $N_0$  に指定すべき最小の値は第 3 表のようになる。(ただし地震計の倍率は 100 とし、その固有周期は  $T$  に比し非常に長いとしてある。) 記象振巾が大きければ  $N_0$  はそれに比例して大きくすべきである。この地震計の目的とする遠地地震では  $T$  の小さいものの記象振巾は 1 cm より小さいのが普通であるから  $N_0 = 1$  kg 位にしておけば大抵間に合う。

第 3 表

$T$	$N_0 >$
sec 1	kg weight 10
2	2.5
5	0.4
10	0.1
20	0.025

さて本題に戻り

$$\left. \begin{aligned} y_0 &= Y e^{i\tau t}, & \theta &= \Theta e^{i\tau t}, & \psi &= \Psi e^{i\tau t}, \\ \frac{F_1}{M} &= -\Omega e^{i\tau t} \end{aligned} \right\} \quad (8.7)$$

とおき (8.2), (8.5) に代入すると特性方程式及び振巾比について次の式が出る。

$$\left. \begin{aligned} &\{ (A_{22}A_{33} - A_{23}^2) + 2x_s(A_{12}A_{33} - A_{23}A_{13}) + 2z_s(A_{22}A_{13} - A_{23}A_{12}) + x_s^2(A_{11}A_{33} - A_{13}^2) \\ &\quad + 2x_s z_s(A_{12}A_{13} - A_{11}A_{23}) + z_s^2(A_{11}A_{22} - A_{12}^2) \} \tau^4 \\ &- \{ (A_{22}P_{33} - 2A_{23}P_{23} + A_{33}P_{22}) - 2x_s(A_{23}P_{13} + A_{13}P_{23} - A_{12}P_{33} - A_{33}P_{12}) \\ &\quad - 2z_s(A_{23}P_{12} + A_{12}P_{23} - A_{22}P_{13} - A_{13}P_{22}) + x_s^2(A_{11}A_{33} - 2A_{13}P_{13} + A_{33}P_{11}) \\ &\quad - 2x_s z_s(A_{23}P_{11} + A_{11}P_{23} - A_{13}P_{12} - A_{12}P_{13}) + z_s^2(A_{22}P_{11} - 2A_{12}P_{12} + A_{11}P_{22}) \} \tau^2 \\ &+ \{ (P_{22}P_{33} - P_{23}^2) + 2x_s(P_{12}P_{33} - P_{23}P_{13}) + 2z_s(P_{22}P_{13} - P_{23}P_{12}) + x_s^2(P_{11}P_{33} - P_{13}^2) \\ &\quad + 2x_s z_s(P_{12}P_{13} - P_{11}P_{23}) + z_s^2(P_{11}P_{22} - P_{12}^2) \} = 0 \end{aligned} \right\} \quad (8.8)$$

$$\begin{matrix} Y & & & & & & -\Theta \\ \left[ \begin{array}{ccc} P_{22} - A_{22}\tau^2 & P_{23} - A_{23}\tau^2 & -x_s \\ P_{32} - A_{32}\tau^2 & P_{33} - A_{33}\tau^2 & -z_s \\ -x_s & -z_s & 0 \end{array} \right] & = & \left[ \begin{array}{ccc} P_{23} - A_{23}\tau^2 & -x_s & P_{21} - A_{21}\tau^2 \\ P_{33} - A_{33}\tau^2 & -z_s & P_{31} - A_{31}\tau^2 \\ -z_s & 0 & 1 \end{array} \right] \end{matrix}$$

$$= \begin{array}{c|c} \Psi & -\Omega \\ \hline -x_s & P_{21}-A_{21}\tau^2 & P_{22}-A_{22}\tau^2 & P_{23}-A_{23}\tau^2 \\ -z_s & P_{31}-A_{31}\tau^2 & P_{32}-A_{32}\tau^2 & P_{33}-A_{33}\tau^2 \\ 0 & 1 & -x_s & 1 & -x_s & -z_s \end{array} \quad (8.9)$$

$i, \omega, s_1, s_2, \frac{N_0}{Mg}$  が皆小さいから § 7 に述べたと同じ考え方で

有 限 量  $P_{11}, P_{13}, P_{33}$

微 小 量  $P_{12}, P_{22}, P_{23}$

である。更に実状に即し  $i x_s$  も小さいとする。すなわち  $x_s = O(j)$  とする。そうすると (8.8) は

$$(\mathfrak{A}_0 + \mathfrak{A}_1)\tau^4 - (\mathfrak{B}_0 + \mathfrak{B}_1)\tau^2 + (\mathfrak{C}_1 + \mathfrak{C}_2) = 0 \quad (8.10)$$

とかける。ここに  $\mathfrak{A}_0, \mathfrak{B}_0$  はふつうのオーダーの値,  $\mathfrak{A}_1, \mathfrak{B}_1, \mathfrak{C}_1$  は  $O(i)$  の値,  $\mathfrak{C}_2$  は  $O\{(i)$  等 $\}^2$  の値であつて

$$\mathfrak{A}_0 \equiv A_{22}(A_{33} + 2z_s A_{13} + z_s^2 A_{11}) - (A_{23} + z_s A_{12})^2$$

$$\mathfrak{A}_1 \equiv (\text{省 略})$$

$$\mathfrak{B}_0 \equiv A_{22}(P_{33} + 2z_s P_{13} + z_s^2 P_{11})$$

$$\mathfrak{B}_1 \equiv P_{22}(A_{33} + 2z_s A_{13} + z_s^2 A_{11}) - 2(A_{23} + z_s A_{12})(P_{23} + z_s P_{12}) - 2x_s \{ A_{23}(P_{13} + z_s P_{11}) - A_{12}(P_{33} + z_s P_{13}) \}$$

$$\mathfrak{C}_1 \equiv P_{22}(P_{33} + 2z_s P_{13} + z_s^2 P_{11})$$

$$\mathfrak{C}_2 \equiv -(P_{23} + z_s P_{12})^2$$

$$+ x_s^2 (P_{11} P_{33} - P_{13}^2) - 2x_s \{ P_{23}(P_{13} + z_s P_{11}) - P_{12}(P_{33} + z_s P_{13}) \}$$

(8.11)

(8.10) の根は近似的に

$$\tau_1^2 \div \frac{\mathfrak{C}_1}{\mathfrak{B}_0} = \frac{P_{22}}{A_{22}}$$

$$\tau_2^2 \div \frac{\mathfrak{B}_0}{\mathfrak{A}_0} = \frac{A_{22}(P_{33} + 2z_s P_{13} + z_s^2 P_{11})}{A_{22}(A_{33} + 2z_s A_{13} + z_s^2 A_{11}) - (A_{23} + z_s A_{12})^2}$$

(8.12)

となる。  $\alpha_3 = O(i)$  で  $x_s$  も小さいから (8.4) の  $P_{22}$  の式で  $\frac{N_0}{Mg}$  の項は  $O(i^2)$  となる。故に  $O(i)$  の範囲では  $P_{22}$  は § 7 の  $P_{22}$  と同一になるから  $\tau_1^2$  の近似値は S を接触させても、はずしても変らない。故にその形は (7.12) (7.19) より

$$\tau_1^2 \div g \frac{h(i-\omega) + s_1 p_1^2 + s_2 q_1^2}{h^2 + k_3^2} = \left\{ 0.0163 \ 3(i-\omega) + 2.207 \ s_1 + 2.098 \ s_2 \right\} g \quad (8.13)$$

与えられ、その数値は第 2 表のようになる。

$\tau_2^2$  については  $c, e, f, v$  それに  $z_s$  も他の一般の長に比して小さいから粗い近似を以つてす

れば

$$\tau_2^2 \doteq \frac{P_{33}}{A_{33}}$$

となるが, 有限量のオーダーでは  $P_{33}$  は §7 のものと変りないから結果は前と同じになつて (7.19) により

$$\tau_2^2 \doteq \frac{P_{33}}{A_{33}} = 0.1434 \text{ g}, \quad T_2 \doteq 0.530 \text{ sec} \quad (8.14)$$

となる。もう少し正確に言えば (8.12) の  $z_s$  に色々の値を代入して計算する必要がある。設計図によると  $z_s$  は  $-8 \text{ cm}$  乃至  $-10 \text{ cm}$  位の範囲を變り得る。更に  $i, \omega, s_1, s_2, \frac{N_0}{Mg}$  の影響も求めることにより, もつと精密化することが出来るが, これからの影響はいずれも極く小さく, たとえば (8.14) の  $T_2$  に比し  $i$  に対しては  $-0.3i$  倍  $\frac{N_0}{Mg}$  に対しては  $0.1 \frac{N_0}{Mg}$  倍位の補正が加わるに過ぎない。

次に各振動の性質を調べよう。簡単のため

$$x_s = 0 \quad (8.15)$$

と仮定すると, (8.9) は簡単になつて

$$\begin{aligned} \frac{Y}{z_s(A_{22}\tau^2 - P_{22})} &= \frac{-\Theta}{(A_{23}\tau^2 - P_{23}) + z_s(A_{12}\tau^2 - P_{12})} = \frac{\Psi}{A_{22}\tau^2 - P_{22}} \\ &= \Omega / \{ (A_{22}\tau^2 - P_{22})(A_{13}\tau^2 - P_{13}) - (A_{23}\tau^2 - P_{23})(A_{12}\tau^2 - P_{12}) \\ &\quad + z_s(A_{22}\tau^2 - P_{22})(A_{11}\tau^2 - P_{11}) - z_s(A_{12}\tau^2 - P_{12}) \}, \end{aligned} \quad (8.16)$$

となる。

まず (8.10) により  $\tau_1^2$  をもう少し精密にすると

$$\tau_1^2 = \frac{P_{22}}{A_{22}} - \frac{1}{\mathfrak{B}_0} \left\{ (A_{23} \frac{P_{22}}{A_{22}} - P_{23})^2 + z_s (A_{12} \frac{P_{22}}{A_{22}} - P_{12}) \right\}^2 + O(i^3) \quad (8.17)$$

(8.16) から

$$\frac{Y}{z_s} = \Psi \doteq \frac{-(A_{22}\tau_1^2 - P_{22})}{(A_{23} \frac{P_{22}}{A_{22}} - P_{23}) + z_s (A_{12} \frac{P_{22}}{A_{22}} - P_{12})} \quad \ominus$$

であるから (8.17) を代入して

$$\begin{aligned} \frac{Y}{z_s} &= \Psi \doteq \frac{(A_{23} + zA_{12}) \frac{P_{22}}{A_{22}} - P_{23} + zP_{12}}{P_{33} + 2z_s P_{13} + z_s^2 P_{11}} \quad \ominus \\ &\doteq \frac{1}{g} \left\{ h(c - z_s) - v^2 \right\} \tau_1^2 - (\beta_3 + z_s \beta_6) + (c - z_s)\omega - s_1 a p_1 - s_2 b q_1 \\ &\quad \div (\beta_5 - c) + 2z_s \beta_7 + z_s^2 \beta_2 \quad \ominus \end{aligned} \quad (8.18)$$

また (8.16) より

$$\begin{aligned} \Omega &\doteq (A_{12} \frac{P_{22}}{A_{22}} - P_{12}) \Theta - (P_{13} + z_s P_{11}) \Psi \\ &\doteq - \left[ \left\{ (\beta_6 + \frac{h}{h^2 + k_3^2} \beta_3) + \frac{k_3^2}{h^2 + k_3^2} \omega + \frac{h}{h^2 + k_3^2} (s_1 \rho_1^2 + s_2 q_1^2) - \frac{N_0}{Mg} \right\} \Theta \right. \\ &\quad \left. + (\beta_7 + \beta_2 z_s) \Psi \right] g \end{aligned} \quad (8.19)$$

となる。\$z\_s = -8, -9, -10\$ (cm) に対する \$\frac{\Psi}{\Theta}\$ 及び \$\frac{\Omega}{g\Theta}\$ の式における \$i, \omega, s\_1, s\_2, \frac{N\_0}{Mg}\$ の係数は第4表に示してある。この表によると例えば \$z\_s = -0.9\$ の時

第 4 表

\$z_s\$	\$\frac{\Psi}{\Theta}\$			\$\frac{\Omega}{g\Theta}\$		
	-0.8	-0.9	-1.0	-0.8	-0.9	-1.0
\$i\$ の係数	-0.7322	-0.6974	-0.6620	0.1368	0.1340	0.1333
\$\omega\$ "	0.0079 13	0.0118 74	0.0158 23	-0.2232	-0.2212	-0.2189
\$s_1\$ "	-13.603	-11.784	-9.953	-110.51	-110.01	-109.41
\$s_2\$ "	-43.692	-41.975	-40.217	-118.61	-118.95	-119.17
\$\frac{N_0}{Mg}\$ "	0	0	0	1	1	1

$$\frac{F_1}{N_0} = \Theta \left\{ -0.1340 \frac{i}{(N_0/Mg)} + 0.2212 \frac{\omega}{(N_0/Mg)} + 110.01 \frac{s_1}{(N_0/Mg)} + 118.95 \frac{s_2}{(N_0/Mg)} - 1 \right\}$$

となる。簡単のため \$\omega = 0\$ として \$s\_1, s\_2\$ にはその最大限の値 (7.21) を仮定する。そうすると、 $i < 0.025$  (\$T\_1 > 31.4\$ sec) で

$$\frac{F_1}{N_0} = (4.9 \sim 5.3) \Theta \quad : \quad N_0 = 1 \text{ kg}$$

$$\frac{F}{N_0} = (58.2 \sim 61.6) \Theta \quad : \quad N_0 = 100 \text{ gr}$$

となる。\$\Theta\$ は倍率 100, 記象振巾 5 cm の自由振動の時約 0.001 となるから \$N\_0 = 1\$ kg に対し \$\frac{F\_1}{N\_0} \doteq 0.005\$, \$N\_0 = 0.1\$ kg に対し \$\frac{F\_1}{N\_0} = 0.06\$ 位である。S 点の運動摩擦係数は鋼鉄同志とすると 0.03~0.09 であるから<sup>(9)</sup> \$N\_0 = 0.1\$ kg では自由振動でも S 点が \$y\$ 方向にスリップする限界にある。もつとも実際には \$s\_1, s\_2\$ がもつと小さいと考えられるから、おそらくその心配はあるまい。ただしこれは自由振動の場合であることを注意しなくてはならぬ。

次に \$\tau\_2\$ の方を考えると, (8.16) で \$P\_{22}, P\_{12}, P\_{23}\$ など小さい量を捨てて

$$\begin{aligned} Y &= z_s \Psi \\ \Theta &\doteq - \frac{A_{23} + z_s A_{12}}{A_{22}} \Psi = - \frac{h(c - z_s) - v^2}{h^2 + k_3^2} \Psi \end{aligned} \quad (8.20)$$

となる。\$\Theta\$ における \$\Psi\$ の係数は非常に小さいから主な振動が \$\Psi\$ 方向に起つておることが分かる。

(9) 芝亀吉, 物理常数表. 接触面に油を塗ると摩擦係数が著しく減るから, 之はさけた方がよい。

また (3.1) により振子上の

$$z = z_s + \frac{h(c - z_s) - v^2}{h^2 + k_3^2} \dot{x}, \quad y = 0 \quad (8.21)$$

なる直線上の点は殆んど動いていない事がわかる。すなわち  $\tau^2$  の振動はこの直線を軸に  $\psi$  方向に振動をしているのである。(8.21) の  $x$  の係数は小さいから大体廻転軸受け S を通り楕円に平行な水平線を軸として廻転振動をしているとみてよい。

地動が 0.5 秒位の短周期振動を含む時はこのような振動が励起される可能性がある。しかしこの計算には E, F 2 点におけるロープの Bending を考慮していないから余り正確なことはわからない。

### § 9. 再び釣合状態の調節について

§§ 7-8 により回転軸受け S がつけてあつても離してあつても、水平振子としての自由振動  $\theta$  は他の成分を殆んど混じえず純粋な形で起り得て、その周期  $T_1$  は  $i, \omega, s_1, s_2$  だけで決つて、 $z_s$  や  $N_0$  には殆んど関係のないことが分つた。これは  $N_0$  なる力が仕事をしない力であることから当然である。もしロープの性質  $s_1, s_2$  が確定すれば  $T_1$  は  $i - \omega$  だけで決る。( (7.12), (7.19), (8.13) あるいは第 2 表参照) そこで § 6 に述べた手続きを行う結果、S を接触させる前と後とで周期がどう変わるかと言うに、(6.3) から

$$\delta\omega = - \frac{9\pi}{28} \frac{N_0}{Mg} = -0.1561 \frac{N_0}{Mg} \quad (9.1)$$

であるから第 2 表の  $i - \omega$  の欄が  $0.1561 \frac{N_0}{Mg}$  増した分だけ周期が減ることになる。例えば S をつける前に周期を測つたら 59.4 秒であつたとする。第 2 表によりこの場合  $i - \omega = 0.0007$  である。今 § 6 の手続きで 1 kg 重の法圧になるように S を圧したとすると  $\frac{N_0}{Mg} = 0.001$  であるから  $0.1561 \frac{N_0}{Mg} = 0.0001561$  となり、その時の周期は  $i - \omega = 0.0007 + 0.0001561 = 0.0008561$  に対応して約 53 秒になる。従つて周期が 1 割方減つたことが分かる。

この結果は  $N_0$  そのものが周期を減ずる効果を持つたように間違いやすいが上の解説からもわかるようにそれは見掛上だけのことで、本当の意味は  $\omega$  が変つた影響なのである。 $i$  や  $\omega$  を変えないで所与の法圧  $N_0$  を与える方法も理論上考えられる。この時はもちろん操作の前後で周期に変化がない。この方法は思考上は興味深いが手続きが面倒で実用には供しにくいから解説を省いた。

### § 10. 結 び

議論を完全にするには更に強制振動、倍率などを述べねばならないが、地震計の性能の主要な性質の多くは自由振動に含まれているから強制振動論は総て省略する。自由振動迄についても実際の器械を扱う上に必要と思われる知識だけを主として吟味し、理論的興味ある事項でも省みなかつた点が少なくない。

終りに図版を作つて頂いた地震観測所の関彰技官に感謝する。

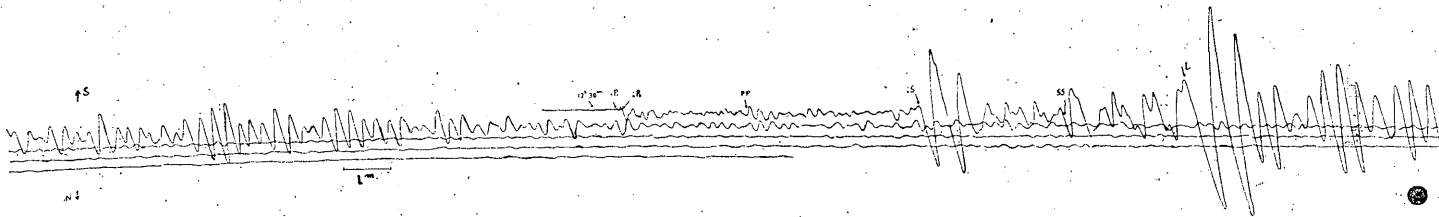


Fig. 1 1950. X. 8 (N~S. Component)

Epicenter : Molucca Is.  $\left\{ \begin{array}{l} \varphi : 4^{\circ} \text{ S} \\ \lambda : 128^{\circ} \text{ E} \end{array} \right.$   $V$   $T_0$   $v$   $\rho/T_0^2$   
 $\Delta$  : 4600 km 104 36. 3.8 0.00245  
 Depth : shallow  $\Delta t = +5.0$

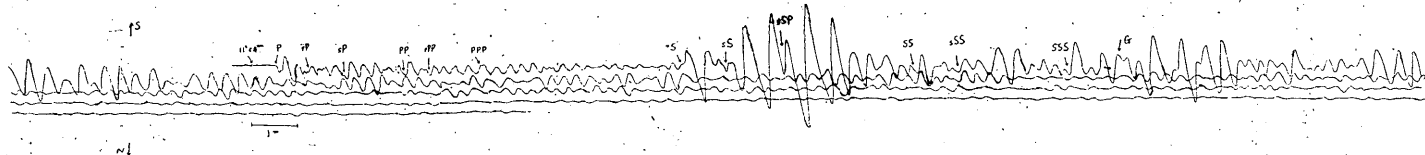


Fig. 2 1950, XII, 14 (N~S Component)

Epicenter : Tonga Is.  $\left\{ \begin{array}{l} \varphi : 19.5^{\circ} \text{ S} \\ \lambda : 176^{\circ} \text{ W} \end{array} \right.$   $V$   $T_0$   $v$   $\rho/T_0^2$   
 $\Delta$  : 7900 km 104 36 3.8 0.00245  
 Depth : about 200 km  $\Delta t = -46.45$

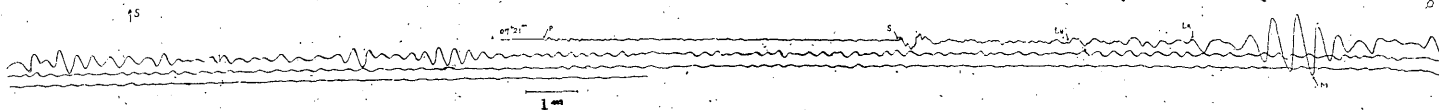


Fig. 3 1951, II, 14 (N~S Component)

Epicentre : Alasuka  $\left\{ \begin{array}{l} \varphi : 67^{\circ} \text{ N} \\ \lambda : 157^{\circ} \text{ W} \end{array} \right.$   $V$   $T_0$   $v$   $\rho/T_0^2$   
 $\Delta$  : 5500 km 104 31 4.1 0.0024  
 Depth : Shallow  $\Delta t = -6.8 \text{ s}$

Reduced Scale 1 : 4

ここにかけた遠地地震の記象は何ずれも震央距離 4500km 以上のものである。倍率は約100倍 (印刷の縮尺約 1/4) であるが自由振動の周期が長い (30秒~40秒) ため全体の記象を通じて同じように約 100 倍に描かれているところに特長があり, 表面波がよく記象され, ラブ波, レーレー波, G 波などの判定にも役立つ場合が多い。位相の判定は主として Gutenberg 及び Richter 両氏の走時表 (Normal Depth 1934 及び 1939 年, Deep Origin 1936 及び 1937 年) によつた。

## 第 5 章 1 トン長周期地震計に関する

### 二三の事項

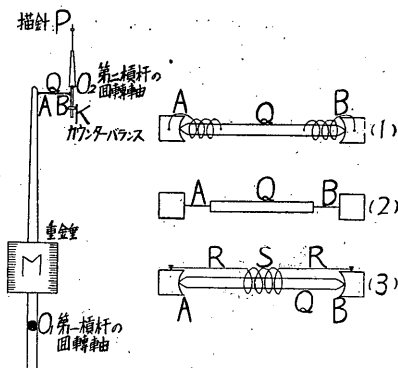
鷺坂清信

(1) この地震計は 1 トンもの大きい重錘を Zöllner づりにしたところに新しい試みがあり, そこに困難さも, 特徴もある。Zöllner づりは長い周期が得やすいものであるが, 重錘が重いワイヤーロープを使用し, その振れによる復元力のため固有周期は 2 分 30 秒をこえることは出来なかつた。実際には第一横杆だけでは 50 秒から 60 秒位の間で使用している。

(2) すすがきのため慣性を大きくする必要があり, 1 トンの重錘を使用した, それでも 40 秒以上の固有周期を出すと復元力が極めて小さくなり各部の摩擦が問題となる。また第一, 第二横杆の連成運動に際して何処かに小さい復元力を生じても固有周期が著しく減少する。復元力を起す主なる部分は二つの横杆の連結子で従来図の (1)(2) に示したような形式が用いられていたがこれを (3) の形にすることによつて殆んど復元力をなくすることが出来た。あるいは大森式のようにマタを使用してはどうかとの意見もある, 試みて見たいと思つている。図 (3) の S はスプリングで R はよぢれのない絹糸を使用した。このことについての詳細は験震時報に別に掲載して頂くことになつている。摩擦を小さくすることについても現在研究中である。

(3) 初めての試みのため製作上非常に苦心があつたが, あとで考えて見れば簡單化して不充分の点がたくさんある。これらは今後の製作の委員会によつて決定されることとここでは述べないが, 著しい一つの欠点は非常に広い場所をとることと松代地震観測所は別として他所では形を小さく整えることが特に望ましい。

(4) この地震計の記象の著しい特長は固有周期が 40 秒もあるため, 種々の周期の波に対して同じ倍率で描かれることである。従つて地面の運動の, それ自身の拡大された姿を全記象を通じて見られることである。もし 2 分, 3 分ものものが出来たら更に興味を増すであろう。



Conector  
Plane Figure of 1 ton Seismograph

1 ton Long Period Seismograph

K. SAGISAKA, S. HONMA, T. NAGAMUNE, N. YAMAGISHI

(*Matsushiro Seismological Observatory*)

and K. YAZAKI (*Meteorological Instrument Plant*)

The outline of Horizontal Long Period Seismograph of CMO Type is as follows.

A mass of 1000 kg is suspended by Zöllner's method between two concrete piers, 50cm square in horizontal section and about 2 meters in height, each being 20cm apart. Suspension is made by a wire rope consisting of 37 or 19 element wires, 1.05 mm in diameter, and the point of suspension can be finely adjusted by a special device. The fundamental magnification is 100 times, and two levers are used for magnification, being connected by pivot-spring method. Period is more than 40 sec., damper is magnetic, recording is made by smoked paper and length of 1 min. on the record is 30 mm.

In this paper, design, process of production, detail of each part and method of adjustment of the seismograph are described. Mathematical theory of the motion of the seismograph is also discussed.

Two horizontal seismographs of this type are installed at the Matsushiro Seismological Observatory and operated for routine observation. Seismograms of distant earthquakes registered by the seismograph are shown in Fig. 1~3, p. 36.