22. *Construction d'un microséismographe mécanique*

par

Mishio ISHIMOTO,

Institut de Recherches sur les Tremblements de terre.

(Lu le 18 fev, 1936—reçu le 20 mars 1936.)

1. Introduction.

Il y a un certain nombre d'appareils qui sont employés pour enregistrer des secousses de petite amplitude: mais on adopte, presque sans exception, le procédé d'enregistrement optique. Nous savons que ce procédé d'enregistrement a beaucoup d'avantages surtout à cause de la facilité d'amplification des secousses. Mais, par ailleurs, nous pouvons énumérer les défauts de ce procédé: 1° nous ne pouvons pas regarder directement l'inscription pendant son observation; 2° largeur de la courbe inscrite est généralement trop grand; 3° nous sommes obligés, en effet, de donner une certaine vitesse au papier photographique enroulé sur un tambour tournant surtout pour distinger les oscillations de petite période: cette méthode d'observation est donc très onéreuse. Basant sur ces considérations, nous avons adopté définitivement le procédé mécanique et construit un microséismographe: appareil qui enregistre les secousses sur un papier recouvert de noir de fumée. Naturellement, il n'est pas nécessaire d'avoir un rapport d'amplification aussi grand que celui de l'amplification optique: c'est parce que le séismographe mécanique inscrit des courbes très fines. Il est possible d'agrandi plusieurs fois par le procédé photographique les secousses inscrites: nous voulons avoir simplement la portion enregistrée des secousses et il n'est pas nécessaire de tenir toujours le séismographe en condition de grande amplification: ce n'est qu'une grande perte de papier photographique. Le défaut du séismographe mécanique en général est le frottement solide au point de contact de la plume sur le papier recouvert de noir de fumée.

Certainement, le frottement solide empêche plus ou moin le déplacement du pendule: mais nous pouvons réduire cette influence avec l'augmentation de la masse du pendule ainsi qu'avec l'emploi d'une plume très légère. Nous discuterons cette condition plus loin.

En tous cas, nous avons r ussi à réaliser un microséismographe

de composante horizontale avec enregistrement mécanique et maintenant il nous sert pour exécuter les observations des secousses séismiques.

2. Dimensions.

Pour construire un séismographe, nous sommes obligés, tout d'abord, de déterminer la masse du pendule ainsi que le rapport d'amplification. Evidemment, il nous semble préférable d'avoir la masse plus grande possible: mais il n'est pas nécessaire d'accroitre cette masse au dela du point où nos buts seront atteints. Nous déterminerons ces deux éléments par des expériences et des calculs.

Quant au rapport d'amplification, il faut connaitre premièrement les valeurs d'inertie qui existent *a priori* dans tout levier, ainsi que les valeurs du frottement solide à la pointe de la plume. Mieux nous réussirons à réduire ces constantes, plus nous pourrons augmenter le rapport d'amplification.

Nous avons employé un pendule inversé pour le pendule principal du séismographe. L'aspect général de ce séismographe est montré schématiquement dans la Fig. 1a et sa photographie dans la Fig. 1b. La

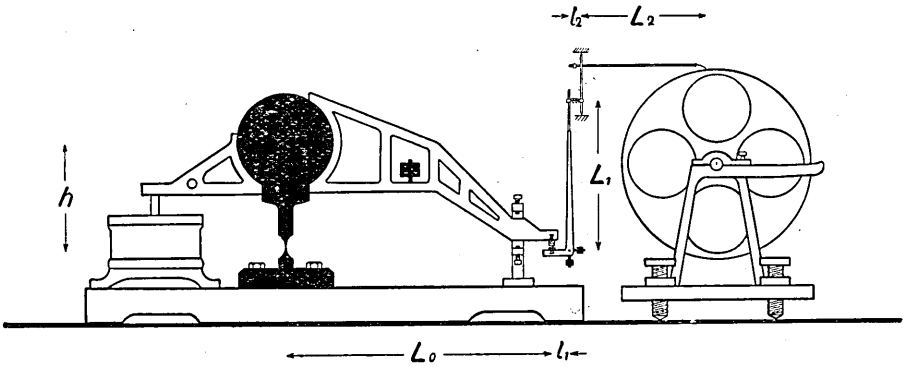

Fig. 1a. Aspect général du microséismographe représenté schématiquement.

masse prend la forme d'un cylindre (longueur 40 cm; diamètre 10 cm.) tenu par deux ressorts laminés d'acier. Nous donnons une certaine période propre d'oscillation en réduisant petit à petit les parties minces des ressorts.

Le déplacement du pendule relativement au sol sera amplifié par deux étages de leviers et, à la fin, la plume attachée à l'extrémité du dernière levier, inscrit les oscillations sur la surface d'un papier recouvert de noir de fumée, enroulé sur un tambour tournant.

Désignons, alors, les constantes des leviers dans le tableau suivant:

	Moment d'inertie	Angle de rotation	Bras sup.	Bras inf.
Pendule	I_0	θ_0	L_0	h
1er levier	I_1	θ_1	L_1	l_1
2me levier	I_2	θ_2	L_2	l_2

où h correspond à la distance entre l'axe de rotation du pendule et son centre de gravité. Désignons encore par F_{01} et F_{12} les forces de réaction existant entre les deux leviers consécutifs. Nous obtenons des conditions telles que les leviers consécutifs en contact entre eux, seront représentés par,

$$L_0\theta_0 = l_1\theta_1,$$
$$L_1\theta_1 = l_2\theta_2,$$
$$\xi = L_2\theta_2,$$

où ξ est le déplacement de la pointe de la plume. Nous pouvons, donc, tirer tout de suite le rapport géométrique d'amplification[1)]

$$\frac{\xi}{h\theta_0} = \frac{L_0L_1L_2}{hl_1l_2}$$

nous aurons aussi les équations de mouvement de ce système comme il suit:

$$\begin{aligned} I_0\ddot{\theta}_0 + 2\varepsilon_0\dot{\theta}_0 + k_0\theta_0 &= -F_{01}L_0 - Mh\ddot{x}, \\ I_1\ddot{\theta}_1 \qquad + k_1\theta_1 &= F_{01}l_1 - F_{12}L_1, \\ I_2\ddot{\theta}_2 \qquad + k_2\theta_2 &= F_{12}l_2. \end{aligned}$$

Ici nous ne considérons aucune force amortissante, surtout dans les deux leviers. En éliminant F_{01}, F_{12} et θ_1, θ_2 de ces équations, nous aurons:

$$I\ddot{\theta}_0 + 2\varepsilon_0\theta_0 + k\theta_0 = -Mh\ddot{x},$$

où

$$I = I_0 + I_1\frac{L_0^2}{l_1^2} + I_2\frac{L_0^2L_1^2}{l_1^2l_2^2},$$

$$k = k_0 + k_1\frac{L_0^2}{l_1^2} + k_2\frac{L_0^2L_1^2}{l_1^2l_2^2},$$

1) Il y a un cas où le mot "amplification géométrique" est employé avec un sens différent; mais ici nous adoptons ce mot comme représentant le rapport d'amplification du levier.

et nous trouvons la période propre de ce système représentée par:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{I}{k}}.$$

Nous voulons avoir I assez petit en comparaison de Mh^2. Si I devient plus grand, le rapport oscillant d'amplification diminuera proportionellement. Voici les constantes obtenues par les expériences:

$$\begin{aligned}
I_0 &= 4{,}63 \times 10^6 \text{ c. g. s.,} \\
I_1 &= 243 \quad '' \\
I_2 &= 1{,}5 \quad '' \\
h &= 11{,}0 \text{ cm,} \quad L_0 = 29{,}3 \text{ cm,} \\
l_1 &= 2{,}0 \quad '' \quad L_1 = 15{,}3 \quad '' \\
l_2 &= 0{,}54 \quad '' \quad L_2 = 10{,}0 \quad '' \\
M &= 33{,}9 \text{ kg.}
\end{aligned}$$

Avec ces constantes, nous pouvons calculer le rapport géométrique d'amplification V_g comme:

$$V_g = \frac{L_0 L_1 L_2}{h l_1 l_2} = 371$$

tandis que la valeur obtenue directement était 374 ce qui s'accorde avec le domaine d'expérience. Nous calculons aussi:

$$\begin{aligned}
Mh^2 &= 4{,}10 \times 10^6 \text{ c.g.s.,} \\
I_0 &= 4{,}63 \times 10^6 \quad '' \\
I_1 \frac{L_0^2}{l_1^2} &= 0{,}0522 \times 10^6 \quad '' \\
I_2 \frac{L_0^2 L_1^2}{l_1^2 l_2^2} &= 0{,}248 \times 10^6 \quad '' \\
\therefore \qquad I &= 4{,}93 \times 10^6 \quad '' .
\end{aligned}$$

Nous aprenons, alors, que $\frac{Mh^2}{I}$ deviend 83% approximativement et le rapport oscillant d'amplification vaut 310 environ.[2)]

3. Etalonnage.

a) *Période propre d'oscillation.*

Nous avons déterminé la période propre d'oscillation du pendule

2) Ces calculs ont déjà faits dans notre mémoire sur la construction d'un séismographe accélérométrique: ce Bulletin: 9 (1931), 316.

seul ainsi que celle du système du pendule avec un puis avec deux leviers. Grâce à ces déterminations, nous avons pu savoir l'effet du moment d'inertie de chaque levier ainsi que l'effet du ressort à boudin qui sert à réunit les leviers consécutifs. Nous avons, en tout cas, mesuré plusieurs périodes en différentes conditions:

Pendule seul	0,99 sec.
Pendule avec le bras	1,00 〃
Pendule, bras et amortisseur	1,006 〃
dito avec le premier levier	1,00 〃
dito avec le deuxième levier	1,00 〃

Naturellement, quand nous ajoutons le levier, la période propre de ce système doit augmenter: mais les réessorts runissant les deux leviers consécutifs donnent des forces restitutives qui au contraire, jouent un rôle pour diminuer la période. Dans les cas que nous avons observés avec notre appareil, ces deux effets se compensent sensiblement. Si nous employons des ressorts impropres, chaque état du système tend à diminuer sa période d'oscillation. Nous sommes obligés, donc, d'apporter beaucoup de soins dans le choix de ces ressorts.

b) *Rapport géométrique d'amplification.*

Pour mesurer le rapport géométrique d'amplification des leviers nous avons employé un micromètre à cadran, dont la plus petite division correspond à un centième de millimètre. Naturellement, nous avons déterminé la relation entre le déplacement du centre de gravité du pendule et la déviation de la plume (ξ) inscrite sur le papier recouvert de noir de fumée: les résultats des mesures sont donnés dans la Fig. 2. Nous obtenons, donc, le rapport géométrique d'amplification comme 374, ce qui concorde bien avec le résultat des calculs déjà décrits.

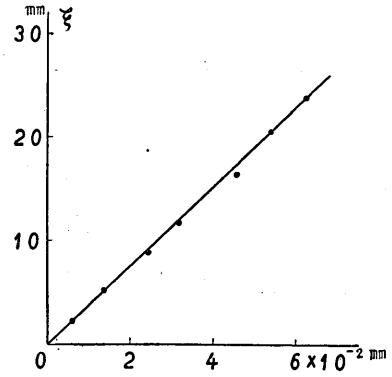

Fig. 2. Relation entre le déplacement du pendule et celui de la pointe de la plume.

c) *Déviation due à l'inclinaison.*

Quand nous inclinons le séismographe, la plume fait une déviation proportionelle à l'importance de l'inclinaison. Ce procédé d'étalonnage nous permet constater la sensibilité de l'appareil sous l'action d'accélération dans la composante horizontale.

Nous avons mesuré l'angle d'inclinaison du séismographe au moyen d'un niveau d'alcool déjà étalonné. La relation entre l'inclinaison (ψ) et le déplacement de la plume (ξ) est montré dans la Fig. 3.

D'un autre côté, nous avons l'équation théorique[3] suivante:

$$\xi = \frac{T'^2}{4\pi^2} \times g\psi \times V_g,$$

où ξ: le déplacement de la pointe de la plume.

T': la période propre du pendule en supposont que la masse est concentrée au centre de gravité.

g: l'accélération due à la gravité.

ψ: l'angle d'inclinaison.

V_g: le rapport géométrique d'amplification.

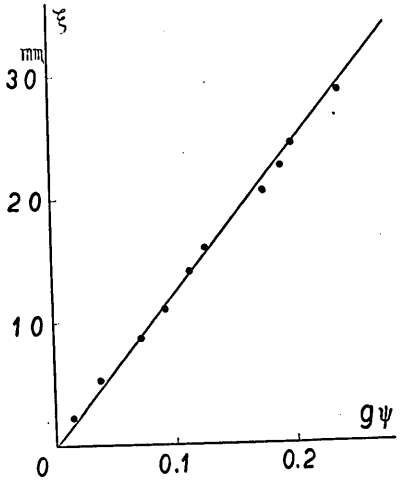

Fig. 3. Relation entre l'angle d'inclinaison et le déplacement de la pointe de la plume.

D'après la Fig. 3, nous tirons la relation que 1 mm de déviation de la plume correspond à $8{,}24 \times 10^{-3}$ gal. Evidemment, ce séismographe joue le rôle d'un accéléromètre, quand la période des secousses s'élève à plus d'une seconde et il a une sensibilité considérable; c'est-à-dire que ce séismographe a une sensibilité 200 fois plus grande que celle du séismographe accélérométrique que nous employons toujours pour observer les secousses séismiques perceptibles par les hommes. Cet ordre de sensibilité nous renseigne surtout sur la limite d'inscription des secousses de séismes éloignés, ainsi que sur les des secousses pulsatoires: c'est parce que leurs périodes d'oscillation sont beaucoup plus grandes que celles du séismographe. Naturellement, nous sommes obligés de tenir comte de l'effet du frottement solide existant à la pointe de la plume qui réduit le mouvement du pendule. Nous discuterons ce frottement plus loin.

d) *Expérience avec un fil de caoutchouc.*

Cette sorte d'expérience est très commode pour étudier l'effet de la force périodique sur le système du pendule. Nous avons attaché une des deux extrémités du fil au pendule et l'autre extrémité à un objet faisant une oscillation d'une amplitude constante et de diverses périodes. L'élongement du fil transmet la force au pendule, comme nous

3) *loc. cit.*

avons déjà appliqué dans le cas d'étalonnage d'un séismographe accélérométrique. Cet étalonnage joue un rôle important pour connaitre les conditions d'un amortisseur. Nous avons exécuté une série d'expériences en variant les degrés d'échappement de l'air, au moyen d'un robinet attaché à l'amortisseur. En tout cas, nous voulons constater l'existence de la résonance, s'il y en a, avec la force oscillante appliquée par intermédiaire du fil de caoutchouc. Les résultats obtenus sont

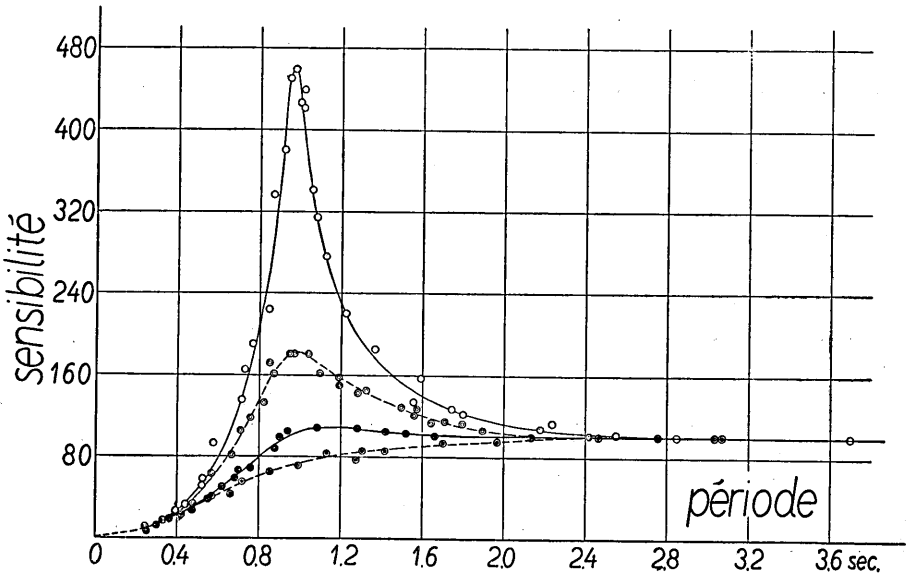

Fig. 4. Résultats obtenus par une série d'expériences avec un fil de caoutchouc.

montrés dans la Fig. 4. Cette sorte d'expérience ne nous donne aucun nouveau fait éclaircissant le système dynamique: mais elle est utilisable pour examiner l'état d'amortissement de ce système et elle est permet de mettre le pendule dans la condition favorable, c'est-à-dire dans celle d'amortissement critique.

Comme le microséismographe possède grande amplification, il nous semble qu'il est presque impossible d'avoir l'étalonnage exécuté sur une plate-forme oscillant artificiellement. Il nous semble, en tout cas, que cette expérience ne sera pas nécessaire tant que nous exécutons les autres étalonnages.

e) *Frottement solide à la pointe de la plume.*

Vraiment le frottement solide à la pointe de la plume, ainsi qu'au pivot de rotation du levier sont inévitables. Mais nous voulons réduire

ce frottement au minimum.

Quand on compare l'effet du frottement solide à la pointe de la plume à celui du frottement au pivot, on constate que le premier est un obstacle plus important au mouvement du pendule. Le frottement solide à la pointe de la plume depend entièrement de la pesanteur de la plume même: nous sommes obligés de la tendre la plus légère possible. D'un autre côté, la plume doit inscrire des secousses un produisant une rigole sur le papier, recouvert de noir de fumée. Naturellement, ce noir de fumée est assez mince pour nous permettre de distingeur la trace des secousses. Notre préoccupation est toujours de ne pas augmenter le frottement solide à la pointe de la plume.

Cette fois-ci, nous avons réussi à faire une plume très légère. Nous devons nous efforcer de distinguer le frottement à la pointe de la plume du frottement aux pivots. La Fig. 5a montre un des exemples de l'inscription d'après l'oscillation propre de pendule: certainement le frottement solide et le frottement liquide y sont confondus. Pour obtenir séparement la valeur de ces deux sortes de frottement, nous sommes obligés de faire l'analyse. Prenons $A_n - A_{n+2}$ de la courbe comme l'ordonnée et A_{n+1} comme l'abscisse.

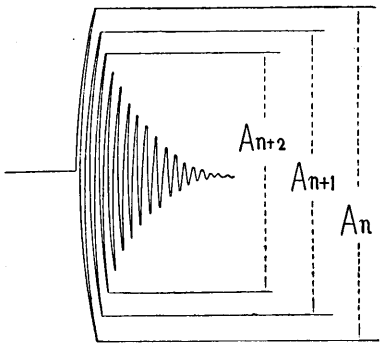

Fig. 5a. Un des exemples de l'oscillation amortissante.

Les points obtenus ainsi seront représentés par une ligne droite: généralement elle ne passe pas à l'origine. Le point d'intersection de cette ligne avec l'axe de l'ordonnée donnera la mesure du frottement solide: désignons cette valeur par y_0.

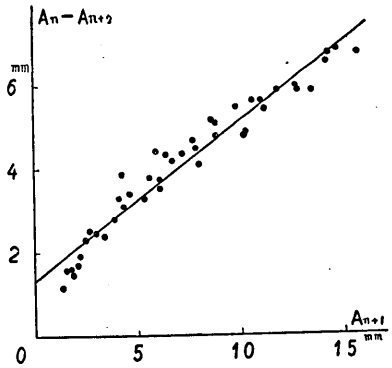

Fig. 5b. Procédé pour savoir la valeur du frottement solide.

L'équation du mouvement d'un pendule avec le frottement solide ainsi qu'avec le frottement liquide sera représentée par

$$\ddot{y} + 2\lambda\dot{y} + n^2(y \pm \rho) = 0 .$$

Pour notre cas, cependant, $\rho = \frac{1}{16} y_0$:

car nous avons pris $A_n - A_{n+2}$ pour l'ordonnée. Pour calculer la force du frottement solide, nous supposons qu'il existe entièrement à la pointe:

nous avons donc

$$F = \frac{n^2 M\rho}{V_g},$$

où F: force à la masse par le frottement solide.

$f = F/V_g$: force à la pointe de la plume.

$V_g = 374$

$n = \frac{2\pi}{T} = 6{,}28$

$M = 33{,}9\,\mathrm{kg}$

$\rho = \frac{0{,}13}{16}\,\mathrm{cm}$

$\therefore\ f = 0{,}078\,\mathrm{dyne}$

Le frottement solide à la pointe de la plume vaut seulement 0,1 dyne qui correspond à un dixième de la valeur que nous avons déterminée l'autre jour.

La condition où le mouvement de la plume se réalise est dans le domaine: $f \times V_g < Ma$, où a représente l'accélération du mouvement du sol.

$$a > 8{,}6 \times 10^{-4}\,\mathrm{gal}.$$

D'un autre côté nous pouvons appliquer cette limite d'accélération à la sensibilité obtenue par l'expérience au moyen de l'inclinaison. Cela nous donne:

$$\rho \times \text{sensibilité} = \frac{1{,}3}{16} \times 8{,}24 \times 10^{-3} = 6{,}7 \times 10^{-4}\,\mathrm{gal}$$

qui donne aucune importance en pratique.

4. Largeur de la courbe inscrite.

Pour avoir l'enregistrement des secousses séismiques en condition bien distincte, nous sommes obligés de discuter la largeur de la courbe inscrite ainsi que la vitesse superficielle du tambour. Quand nous examinons, avec un microscope, la courbe inscrite, nous obtenons généralement 0,01~0,02 mm de largeur; rarement elle arrive à 0,05 mm. Evidement, les courbes sont inscrites au moyen d'une pointe d'acier et ce procédé d'inscription peut être comparé à la trace de courbes avec une canne sur le sol couvert de gélée blanche. Il y a le cas, où l'excès de gélée blanche qu'il faut rejeter hors de la courbe, exagère la courbe même ce qui nous permet de remarquer assez d'irrégularités. Pour obvier à un inconvénient du même genre, il nous semble qu'il n'y aucun

autre moyen que de diminuer l'épaisseur du noir de fumée le plus mince possible.

D'un autre côté, plus nous faisons mince la largeur de la courbe, plus nous pouvons diminuer la vitesse superficielle du tambour. Nous considérons en effet un critérium sur la limite de la vitesse superficielle avec la longuer d'onde d'une courbe sinusoïdale. Supposons que la pointe possède une aire circulaire dont le rayon soit r. Considérons, en suite, le mouvement sinusoïdal de cette pointe. La vitesse superficielle du tambour (v) désigne la longeur d'onde (λ) et nous allons, en effet, étudier la relation entre r et λ. Nous posons, en tout cas, un critérium que la vitesse du tambour ne doit pas être inférieure à

$$r = \frac{\lambda}{4} \text{ où } = \frac{vT}{4}.$$

Cette condition est montrée graphiquement dans la Fig. 6.

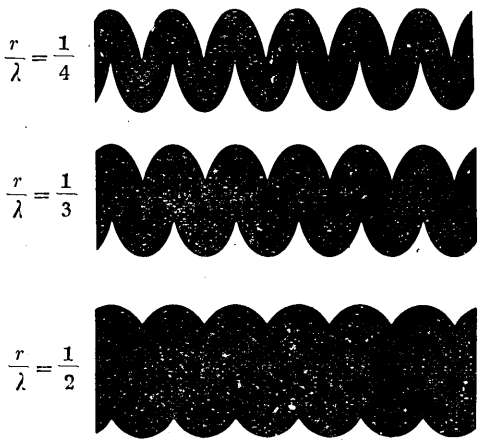

Fig. 6. Critérium entre λ et r.

Quant à la période d'oscillation, nous considérons les secousses séismiques dans la nature. La limite des secousses séismiques observée à Tôkyô est représentée par $T = 0{,}2$ sec. Nous introduisons cette valeur dans l'équation précédente. Nous avons, ainsi, $v = 0{,}2$ mm/sec: cette vitesse correspond à un cinquième de la vitesse que nous employons maintenant.

5. Inscription.

Nous avons installé deux microséismographes de même construction dans une cave de notre institut et réussi à avoir deux inscriptions séparées pour un certain nombre de séismes. Un des exemples obtenus est montré dans la Fig. 7. L'intensité des secousses n'a pas été grande: elles sont arrivées juste au seuil de la perception humaine. D'un coup d'oeil on comprendra que ces paires d'inscriptions ne sont que les mêmes secousses.

Même dans une journée tranquille, ce microséismographe inscrit toujours de petites amplitudes d'oscillation dont la période demeure 0,3 sec. Comme ce type d'oscillation est spécialement perceptible pendant la journée, nous le considérons comme dû à l'influence des camions, voitures, tramways, etc. qui passent dans la rue.

Nous constatons aussi l'existance d'oscillations du type de pulsations, surtout dans les moments de vent: elles ont une période de 8 sec. environ.

Nous nous proposons de rapporter dans les prochaines occasions les autres études que nous aurons pu faire avec cet appareil.

---

22. 器械的記錄を行ふ微動計の製作

地震研究所 石本巳四雄

多くの微動計は寫眞方法により地動の記錄を行ふが，一面に不便の所があるので，此の水平成分微動計は器械的方法により何の程度迄記錄が得られるか研究したものである．而して其の要素は

振子の質量	33·9 kg
擴大裝置	槓桿2段
幾何倍率	371 倍
振動倍率	310 倍（計算）
制振器	ピストン型空氣制振器
自己振動周期	1 秒
針先の固體摩擦	0·08 dyne

なほ感度試驗としては次の5種類のものが行はれた．

a) 各階段における自己振動周期

b) 幾何倍率

c) 傾斜による試驗

d) ゴム糸による試驗

e) 針先其他における固體摩擦の決定

同型の微動計2臺を製作し，同一地震を記錄せしめた所殆ど同一の記象を得た．

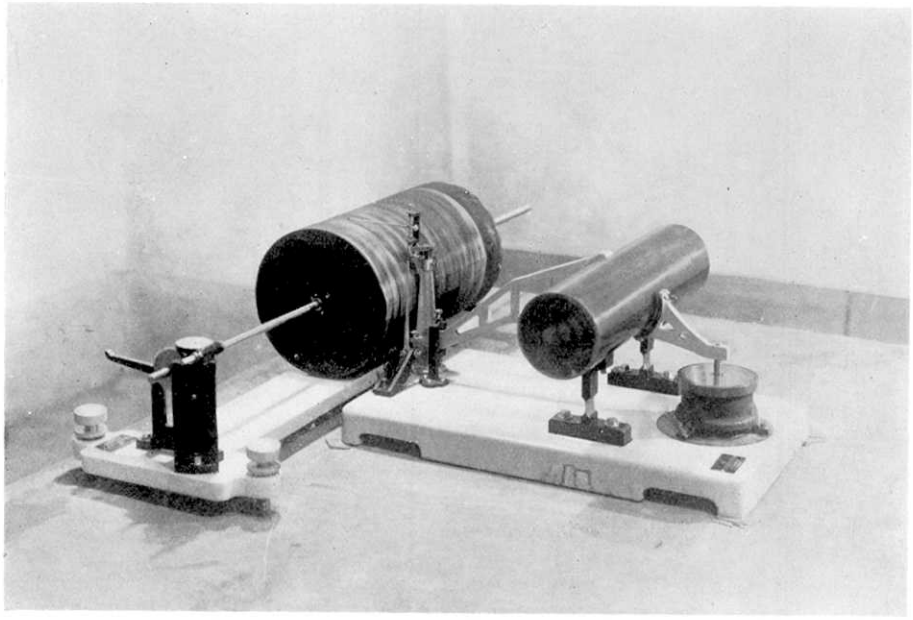

Fig. 1b. Aspect général du microséismographe.

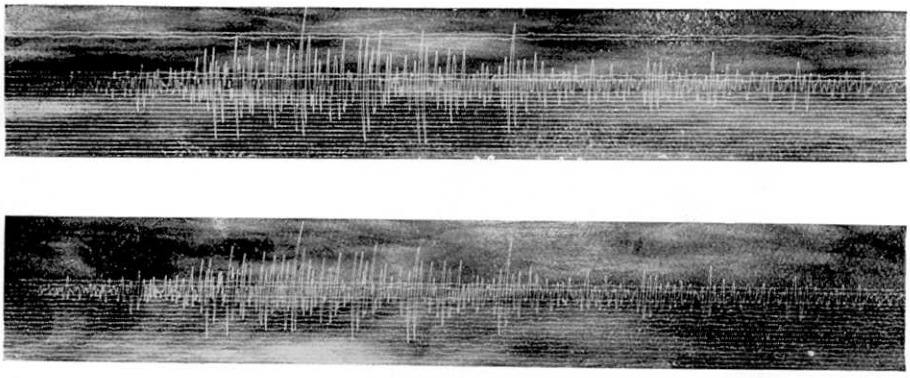

Fig. 7. Mêmes secousses inscrites séparément par deux microséismographes pour le séisme du 11 décembre 1935.

(震研彙報 第十四號 圖版 石本)