



Title	9. 物探用回転成分地震計の試作
Author(s)	田治米, 鏡二; TAZIME, Kyozi; 田, 望 他
Citation	北海道大学地球物理学研究報告, 14, 95-104
Issue Date	1965-09-20
DOI	<a href="https://doi.org/10.14943/gbhu.14.95">https://doi.org/10.14943/gbhu.14.95</a>
Doc URL	<a href="https://hdl.handle.net/2115/13901">https://hdl.handle.net/2115/13901</a>
Type	departmental bulletin paper
File Information	14_p95-104.pdf



## 9. 物採用回転成分地震計の試作

田治米鏡二・田 望

(北海道大学理学部地球物理学教室)

— 昭和40年4月受理 —

### 1. 試作品の説明

自然地震用の回転成分地震計は既に2・3発表されている<sup>1),2),3)</sup>。但し、その殆んどはポータブルではない。又、原理的に云って、数学的な回転成分のみを測定しやすい機構ではない。

今回われわれが試作した地震計の本質的な構造は検流計の構造と全く同じであって、原理的には、純粋な回転成分のみによって起電力を得る。故に、コイルの運動と起電力との間には次の関係を考えればよい。

$$\left. \begin{aligned} K(d^2\theta/dt^2) + D(d\theta/dt) + U\theta &= K(d^2\Omega/dt^2) + GI, \\ I &= E/(R_c + R_{ext}) = -(R_c + R_{ext})^{-1}G(d\theta/dt). \end{aligned} \right\} \quad (1.1)$$

但し、次の如き記号の用い方をしている。

$t$ : 時間	$b$ : 回転軸方向のコイルの枠の長さ
$\Omega$ : 地震計の台の回転角	$N$ : コイルの巻数
$\theta$ : コイル部の回転角	$B$ : 磁束密度
$K$ : コイル部の慣性能率	$R_c$ : コイルの内部抵抗
$D$ : コイルの枠の電磁制振による係数	$R_{ext}$ : コイルの外部抵抗
$U$ : コイル部の単位回転角に対する復元力	$E$ : コイルの起電力
$G = NBab$ : 電圧感度	$I$ : コイルを流れる電流
$a$ : 回転軸に直角な方向のコイルの枠の長さ	

われわれの測定の対称になる周波数は小さいので、コイルの電気回路のインピーダンスは抵抗のみと考えている。

(1.1)の両式から電流  $I$  を消去すると、

$$d^2\theta/dt^2 + K^{-1}\{D + G^2(R_c + R_{ext})^{-1}\}(d\theta/dt) + UK^{-1}\theta = d^2\Omega/dt^2. \quad (1.2)$$

これは普通の電磁式地震計の運動方程式と全く同じ形である。

地動の上下成分又は水平成分の大きさに関しては、その程度は経験的に大体知られてい

1) 坪井忠二・友田好文・尾崎幸男・鈴木弘道； Rotation を描く地震計とその記象，地震学会講演会，1951年5月25日。

2) 萩原幸男； 回転動地震計の試作，地震，11 (1958)，141-144。

3) 渡辺 晃； 回転歪地震計，地震，12 (1959)，162-170。

WATANABE, H.; A Rotational Strain Seismometer, Bull. Dis. Prev. Res. Inst. Kyoto Univ., No. 58 (1962).

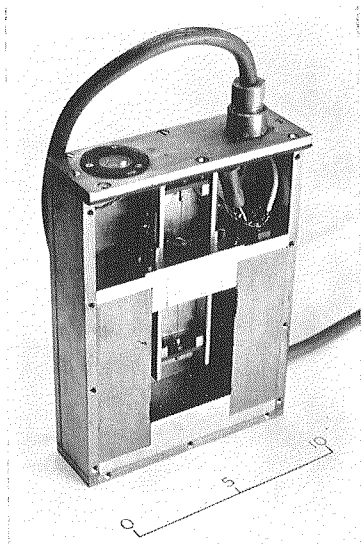
る。然し、地動の回転成分  $\Omega$  の大きさに関する知識は皆無に等しい。故に、測定器側にどの程度の感度を持たせれば、地動の回転成分を測定することができるかが第1の問題である。

そこで、なるべく出力の大きそうな既存の検流計を地震探鉱器の入力につないでテストを行なってみた。地表においた検流計から数 m はなれた地面に、砲丸を約 2 m の高さから自由落下させて、記録をとって見たところ、小振幅ではあるが、地動の回転成分が測定されているらしいことが判った。感度については、この検流計の感度が設計の基準になった。

極めて微小な量の測定なので、計器の固体マサツを避けねばならぬ。その理由で、回転軸をピボットで支えることを止めて、検流計と同じ機構を採用することにした。このために、当然のことながら、コイル部の横振れが問題になる。このことは工作の良否とも密接な関係がある。試作第1号器としては、なるべく注意して作ってみて、その結果、どの程度の横振れがあるかを見ることにした。

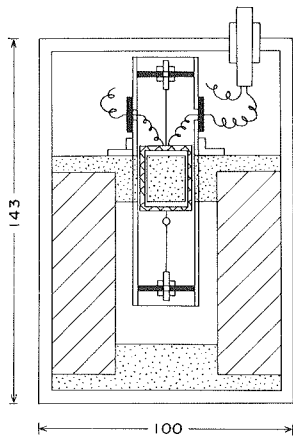
地動の周波数に関しても、地動の大きさと同様で、回転成分の周波数に関するわれわれの知識は皆無に等しい。余り小さい固有周波数では横振れがひどいであろう。普通の物探用地震計の固有周波数は数 cps 乃至数 10 cps である。この2点を考え合せて、試作第1号器の固有周波数は 20 cps を目標にした。

試作第1号器の外側の一部をはずした外観は第1図のとおりである。正面から見た内部機構は第2図に示してある。第3図には特にコイル部のみを拡大して示した。



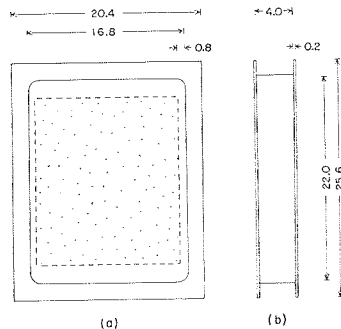
第1図 試作第1号器の外観  
数字の単位 cm

Fig. 1. The outside view of the first test production.  
unit: cm



第2図 内部の機構 単位 mm

Fig. 2. The inner construction of the equipment.  
unit: mm.



第3図 コイル部 単位 mm

Fig. 3. The part including the coil.  
unit: mm

この地震計のコイル部を自由振動させると, damping factor  $h$  は, (1.2) により, 次の如く表現される。

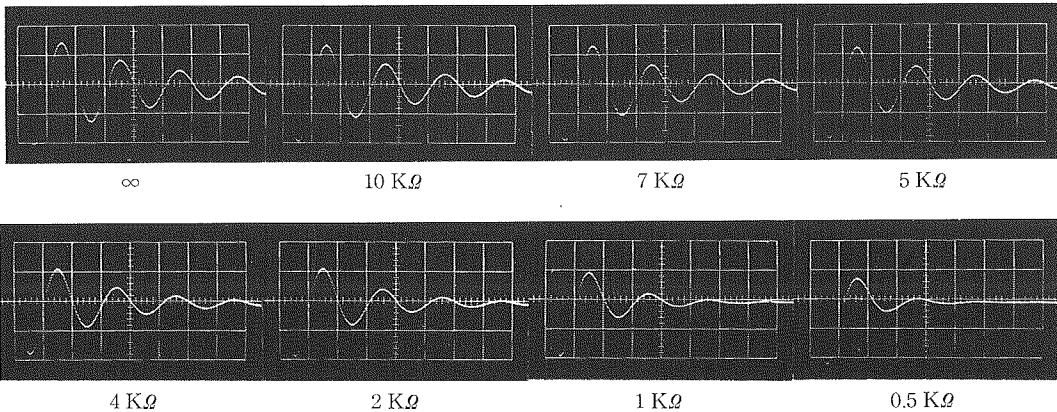
$$h = h_0 + (2K)^{-1}G^2(R_c + R_{ext})^{-1}(2\pi f_{s0})^{-1}. \tag{1.3}$$

但し,

$$h_0 = D/(4\pi f_{s0}K), \quad f_{s0} = (2\pi)^{-1}(U/K)^{\frac{1}{2}}$$

であって,  $h_0$  は銅板で作られたコイルの枠による電磁制振と空気の抵抗による制振に帰因する項であり,  $f_{s0}$  はコイル部の固有振動周波数である。

外部抵抗  $R_{ext}$  の値を種々変えて, 自由振動を記録させると, 第4図に示した波形が得られた。刻時は 20 ms である。



第4図 自由振動の記録 マス目の1辺の長さ 20 ms

Fig. 4. Records of free oscillations for various external resistances.

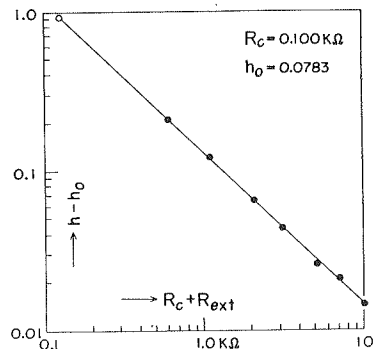
第4図を使って, コイルによる電磁制振の damping factor  $h - h_0$  と回路の電気抵抗  $R_c + R_{ext}$  との関係を求めると, 第5図が得られる。又, この際に,  $f_{s0}$  の値も判る。

一方, コイルに直流電流を通して, コイル部のふれを測定した結果, 次の数値を得た。

$$\theta/I = G/U = 1.78 \times 10^{-2} \text{ radian/mA}. \tag{1.4}$$

(1.2), (1.3), (1.4) 及び第5図から電圧感度  $G$  を知ることができる。

この地震計は E.T.L. PRA 型地震探鉱器と併用するように設計された。PRA 型の入力トランスの1次コイルの電気抵抗は 60.6 Ω, 増幅器動作時の自己感応係数は 9.3 Henry である。従って, 併用した際の地震計の damping



第5図 電気制振と電気抵抗との関係

Fig. 5. The relation between electric damping due to the coil and the electric resistance.

factor  $h$  は、シャントの抵抗を  $215 \Omega$  にすれば、約 0.6 である。

主要部品の設計上の数値を第 1 表に挙げておく。

第 1 表 主要部品の数値  
Table 1. Numerical values for main parts.

名 称	材 量	数 値
永 久 磁 石	MK 5	$24 \times 25 \times 80 \text{ mm}^3$ , 2 個
磁 極 間 隔		$3.6 \times 2 \text{ mm}$
コ イ ル 枠	銅 板	厚さ 0.2 mm
コ イ ル 巻 線	銅 線	直径 0.09 mm, 470 回巻
コ イ ル 吊 線	ピ ア ノ 線	直径 0.30 mm
シャント抵抗		$215 \Omega$

(註) 地震計全体の質量 3.0 kg

製作後でないと、確定されがたい量の設計値及び実測値は第 2 表のごとくになった。

第 2 表 諸定数の設計値と実測値  
Table 2. Numerical values for main constants designed and observed.

名 称	設 計 値	実 測 値
$K$	2	$1.91 \text{ gcm}^2$
$f_{s0}$	20	24.9 cps
$h_0$	0.1	0.0783
$R_c$	120	$101 \Omega$
$B$	$6.3 \times 10^3$	— gauss
$G$	$10 \times 10^{-2}$	$8.30 \times 10^{-2} \text{ volts}/(\text{rad/s})$

この地震計を横に倒して用いれば、水平面内に回転軸を有する回転成分測定用になる。コイル部は極くわずか垂れ下がるが、磁極には触れない。

第 2 表に挙げた定数から期待されるこの地震計の出力と E.T.L. PRA 型地震探鉱器の性能<sup>4)</sup>とを組み合わせると、記録紙上に期待される総合感度の最大値は約  $10^{-4} (\text{rad/s})/\text{mm}$  である。6~7 cps 以上の周波数に対しては、記録紙上の振幅は角速度に比例する。

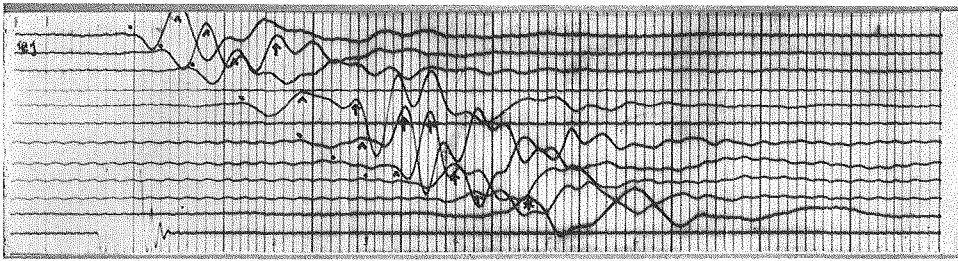
## 2. 野外実験によるテスト

この節で扱う回転成分の回転軸はすべて鉛直方向である。

2.1 第 6 図は 1964 年の夏に新潟県白根市で行なわれた SH 波実験<sup>5)</sup>の記録の 1 つである。記録器は秋田大学所有の E.T.L. PRA 型地震探鉱器が用いられた。trace 1 から 10 迄は 4.5 cps

4) 田治米鏡二；E.T.L. 地震探鉱器 (PRA 型) の性能試験について，秋田大地下資報告，12 (1954)，1-10.

5) 小林直太その他；SH 波の実験，震探実験グループ会報，35 (1964)，11-16.



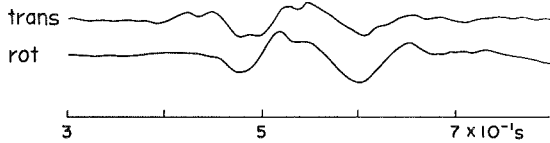
第6図 SH波実験の記録

Fig. 6. A record for SH waves obtained at Shirone city, Niigata prefecture. Trace 11 shows rotation.

の水平動地震計で、transversal成分を記録するように、震源から2m間隔で一直線上に配置された。trace 12は発震時を示している。地中に埋めた板をカケヤで叩いたのである。trace 11がrotation地震計による記録であって、この地震計はtrace 10を記録したtransversal成分地震計と同じ地点に置かれている。traces 4及び6は、地震計のコイルが磁極に触れたために、死んでいる。

回転成分地震計をつないだ増幅器の利得は他のものより約5倍だけ大きくしてあるが、記録上では他と大体同じ大きさの振幅が得られた。又、心配されたコイル部の横振れは、この記録には全然出ていない。試作第1号器の製作は一応成功したものと見られる。

trace 10とtrace 11とは振動の方向が逆であるが、そのことを除外すると、全体の波形は大体一致している。波形の比較を見やすくするために、trace 11の振動方向を逆向きに描き直して、trace 10と並べると第7図が得られる。



第7図 振動方向を逆向きにしたtrace 11とtrace 10との比較

Fig. 7. A comparison of trace 10 with trace 11 reversed.

この図で見ると、大きな山谷は完全に一致していると云ってよい。主な違いは次の2点である。i) trace 10は優勢な波群の来る前に既に動き始めているが、trace 11ではそれに対応する部分の運動は極めて弱い。ii) trace 10では優勢な波群の後には何等の波群も見当らぬ。これに反し、trace 11では後方に、振幅は小さいが長周期の波群が続いている。

第6図に印をつけた山の走時プロットは第8図の如くなる。この図によれば、この実験場ではSH波の減衰が大きいために<sup>5)</sup>、16m以遠ではtransversal成分にも、回転成分にも実体S

5) 前出5)と同じ

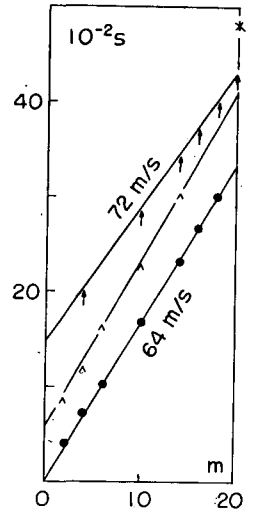
波は測定されていない。第6図に見られる transversal 成分の振幅の大きな波群は LOVE 波であると思われる。若しそうであるとすれば、回転成分に見られる振幅の大きな波群の到着時刻は LOVE 波の到着時刻と一致している。LOVE 波は SH 波のみから合成されるものとすれば、LOVE 波は回転成分を持つことができぬ。上述の2つの事柄からは矛盾した結論が得られやすい。これをどう解釈するかは将来の課題である。

同じ実験場の深さ 2 m の爆破点でダイナマイト 50 grs を爆発させた際に、そこから 20 m はなれた地点で得られた vertical 及び radial 成分の記録と、第6図の trace 11 (rotation) とを第9図に並べて見た。

vertical 成分に見られる振幅の大きな波形は通称 II 群と呼ばれている波群で、その直後の不規則な波形は III 群である。終りの方の規則正しい形の大周期の波形は IV 群である。今迄の小発破実験の経験によれば、II 群は屈折 P 波或いは RAYLEIGH 波的であり、IV 群は半無限媒質表面の RAYLEIGH 波に近い。これらに反し、III 群は S 波的である<sup>6),7)</sup>。

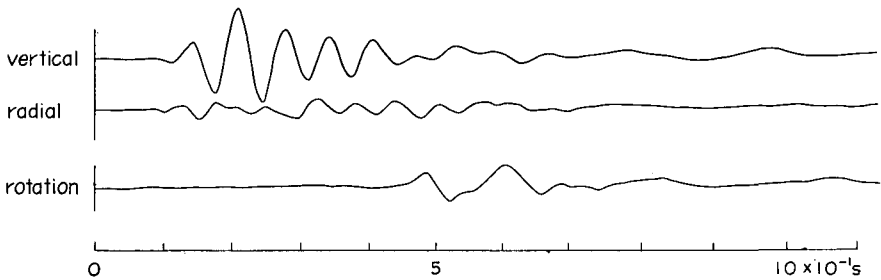
第9図を見ると、回転成分は、丁度 III 群が到着する時刻に、大きくゆれていることが指摘される。

今迄の経験によれば、II 群は transversal 成分を欠き、粒子の運動は波の進行方向を含む鉛直面内で、縦長の楕円である。これに反し、IV 群は transversal 成分をも持ち、粒子の運動は波の進行方向を含む鉛直面内では、円に近くなる。II 群が到着した時刻には、回転成分地震



第8図 記録紙上の山の走時プロット

Fig. 8. Time-distance plots of peaks marked in Fig. 6.



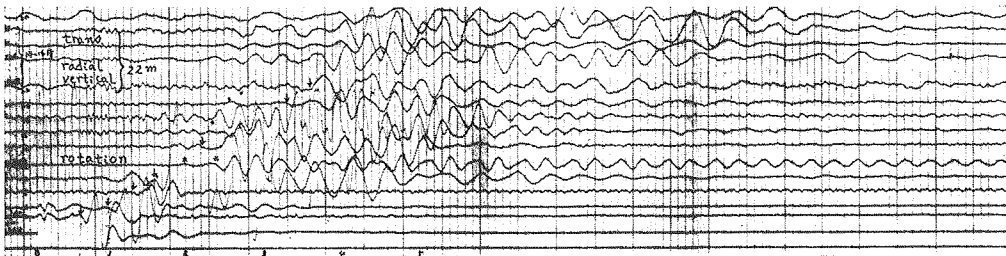
第9図 vertical 及び radial 成分と回転成分との比較

Fig. 9. Comparisons of rotation by hitting a plate with vertical and radial components by a blast.

6) SIMA, H.; On the Surface Waves Generated by Small Explosions. Geophys. Mag. **31** (1963), 457-469, 471-489.  
 7) OKADA, H.; Analyses of Seismic Waves Generated by Small Explosions. J. Fac. Sci. Hokkaido Univ. VII, **1** (1962), 459-485; (1963), 79-89; **2** (1964), 197-237.

計は全く動かず、IV 群の到着する時刻には大周期でゆれていることは、今述べた経験事実と何等かの対応を持っているように思われる。尤も、粒子の運動と rotation なる strain 量とは違う性質の量である。粒子の回転運動が激しくとも、一概には回転成分が大きいとは云えぬ。この間の事情を調べることも今後の課題となろう。

2・2 第 10 図は東京都太田区に在る日本物探 KK 研究所の庭で行なった板叩きによる実験記録である。記録器は、科学博物館所有の E.T.L. M 3 型地震探鉱器が使われた。



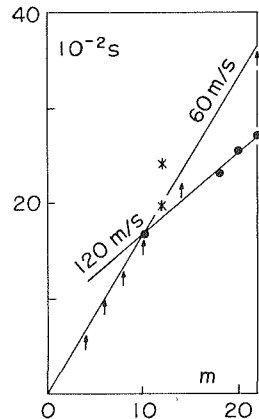
第 10 図 SH 波実験の記録

Fig. 10. A record for SH waves obtained at Ōta-ku, Tokyo. Trace 10 shows rotation.

trace 1 は板からの距離が 24 m の地点に置かれた transversal 成分の記録である。traces 2, 3 は 22 m の地点の transversal, traces 4 及び 5 は夫々同地点の radial 及び vertical 成分である。traces 6~14 は順次 2 m ずつ距離を減じ、trace 10 が回転成分、その他はすべて transversal 成分である。transversal 成分地震計の固有周波数は 20 cps であった。第 10 図に記入した同一印の位相の走時プロットは第 11 図の如くであって、第 8 図におけると同様に、実体 S 波の到着時刻には、回転成分は未だ動いていない。このことを一層はつきり見るために、第 10 図の trace 2 に用いた transversal 成分地震計と trace 10 の回転成分地震計とを入れ換えて、実験を繰返した。震央距離 22 m の地点におかれた回転成分, transversal, radial 及び vertical 成分の記録は、第 12 図に順次上から示してある。今迄の SH 波実験の経験<sup>8)</sup>に反し、この実験場では vertical 成分もかなり優勢なので、ここでは板叩きによって、SH 波以外の波も発生させたものと思われる。この事柄自体も、SH 波実験の課題になりうるが、ここではそれには立ち入らない。

第 6 図に示した回転成分の振動継続時間は、transversal 成分同様、極めて短時間であった。

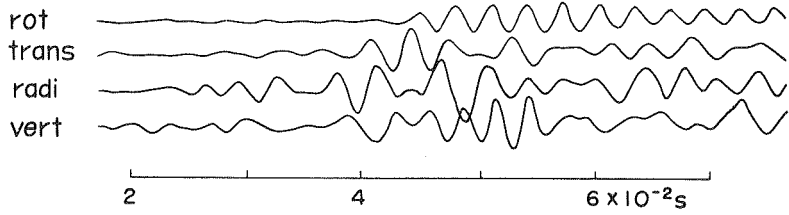
これに反し、第 10 図に示した回転成分は、他成分と比較して



第 11 図 山又は谷の走時プロット

Fig. 11. Time-distance plots of peaks and troughs marked in Fig. 10.

8) 小柳敏郎; SH 波実験資料の整理, 北大地物報告, 12 (1964), 29-41.

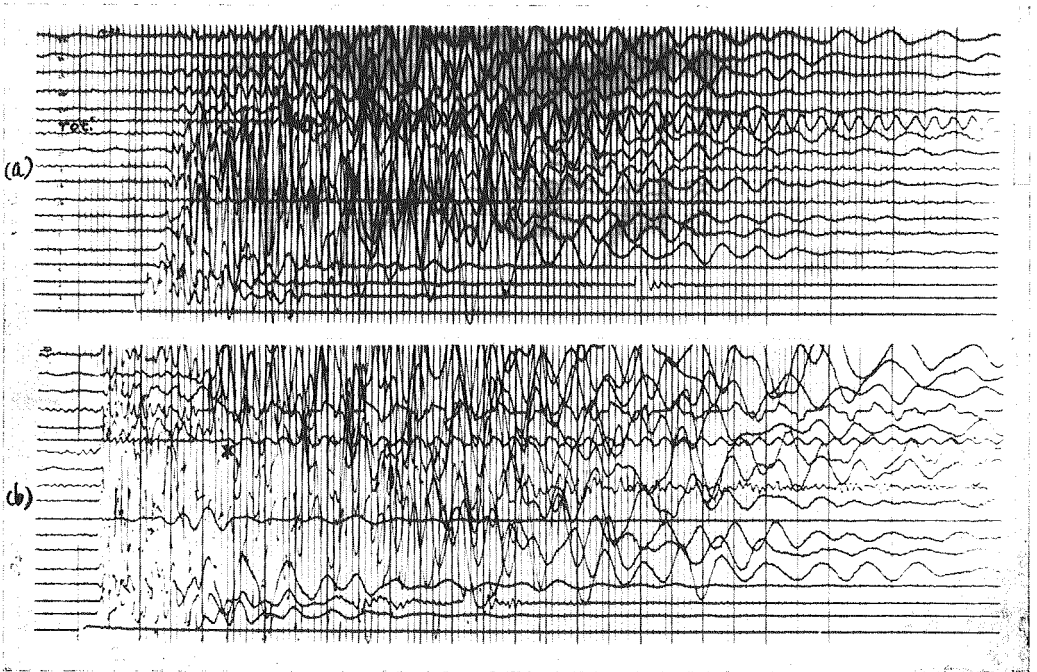


第12図 22 m 地点における諸成分の比較

Fig. 12. Comparisons of various components at a point 22 m far from the source.

も、振動継続時間が異常に長い。この振動の周波数は約 30 cps であつて、第 2 表に挙げた  $f_0$  にも近い。恐らく、これはコイル部の横振れを示すものであつて、試作第 1 号器の欠陥がバクロされたものと思われる。そのために第 10 図及び第 12 図に示した回転成分の波形は余り信用がおけない。

然し、第 12 図において 1 つの著しい事実が見られる。transversal 及び radial 成分が夫々極めて大きくゆれている時間に、回転成分は余り活発でない。粒子の回転運動と rotation なる strain 量との関連を考察する際に、この測定事実も興味ある課題になりうると思われる。然し回転成分の信用のおける波形が得られるように、計器を改良することの方が、目下の先決問題



第13図 発破点の深さ (a) 2 m ダイナマイト 2 g, (b) 4 m ダイナマイト 10 g

Fig. 13. Shot depths were (a) 2 m and (b) 4 m. Trace 6 shows rotation.

である。

第13図は発破をかけた際に得られた記録であって、地震計は震央から2m間隔で一直線上におかれている。trace 6はtrace 2と同じ地点の回転成分であって、他はすべて transversal 成分である。第10図と同様に、第13図にも試作第1号器の横振れの欠陥が現われていて、満足すべき波形ではない。第13(b)図の trace 6 に付けた \* 印は、発破点の深さ4mを考慮すると、120 m/sの走時曲線にのっけていて、この値は第11図の初動の走時に見られた値と一致していることだけを指摘しておきたい。敢えて付言するならば、第13(a)図に見られるごとく、発破の際に得られる回転成分の波形も transversal 成分の波形と似ていると云えるであろう。

### 3. あとがき

以上の実験結果によれば、試作第1号器に対して、次の改良を行なわねばならぬ。1) コイル部の横振れ防止、2) 感度の向上。但し、これらの改良に成功したとしても、S波の初動を明瞭にとらえうるか否かは疑問である。

第9図に見たごとく、初動の直後には、鉛直面内で、粒子の大きな回転運動がある。これに対応して回転成分も大きいかも知れぬ。コイルの回転軸が水平方向である回転成分地震計をも併用してみる必要がある。

結局は回転3成分を測定し、実体波、反射波及び表面波について根本的な研究をせねばならぬ。われわれは既に、その方向に向かって出発しているので、次の機会にその結果を報告したい。

この論文の著者名には、このテーマの発案者と試作器の設計者との名しか挙げていない。実際には、計器の検定及び野外実験等に極めて多くの人々の協力を得ている。筆者等はそれらの方々に感謝すると共に、今後も御支援が続くようお願いする。

## 9. A Test Production of a Rotation Seismometer for Seismic Prospecting

By Kyozi TAZIME and Nozomu DEN

(Department of Geophysics, Faculty of Science, Hokkaido University)

The new equipment has the same construction as that of a galvanometer. A component of rotation of the earth should be purely picked up by it, if the production were ideal. The equipment is so designed that the maximum sensitivity in the total system may reach  $10^{-4}$  (radian/s)/mm on the recording paper.

A few tests have been carried out in fields. In a rice field which had thick soft layers, the rotation seismometer acted well. On a hard ground, however, the action of it was unsatisfactory. The coil would be moved by the other motion than rotation of the earth.

At any rate, the rotation seismometer must be useful for investigations of seismic waves. Several improvements of the present equipment will soon be carried out.