

対称型地震計による地震波観測

赤松 純平・西 正男

ON THE SEISMIC OBSERVATION WITH A SYMMETRICAL THREE-COMPONENTS SEISMOGRAPH SYSTEM

By Junpei AKAMATSU and Masao NISHI

Synopsis

A symmetrical three-components seismograph system with the inclined seismometers is described. The system has matched frequency characteristics in the wide-range from 0.03 Hz to 20 Hz. The linearity and directivity of the observed seismic waves, and identification of the body phases are demonstrated with polarization filtering technique.

1. はじめに

地震波動のデータの解析から地球の構造や震源の問題を論ずる際に、解析の第1段階として、波動場を形成する波の種類がその地震波動的性質に基づいて行われる¹⁾²⁾が、この過程で波の極性の吟味が本質的な役割を果たす³⁾。このような観点からこれまで局所地震の P, S 初動部分の particle motion の性質を調べて、P と SV の見掛け入射角の関係、地質構造による変換波の分離、S 波の polarization 等を議論してきた⁴⁾⁷⁾が、これらの問題を構造モデルや発震機構に結びつけて解決するためには、地震波の3成分観測の方法の再検討に立ち戻る必要が生じている。地震波の極性解析は記録の3成分の総合特性の厳密な一致が不可欠の条件であるが、上下動と水平動2成分の換振器を用いる通常の3成分地震計はその機械的構造の違いのために位相と振幅特性を一致させることが困難であるうえ、観測点における計器の較正が手軽に確実に行えないこともあって、本質的な欠点となっている。このことから傾斜型換振器を用いた対称地震計の優越性が指摘され、対称型地震記録の解析方法と解析装置の研究と開発が行われて大規模な地震探査に多く利用されている⁸⁾⁹⁾。

対称型地震計は換振器の感応方向が水平から約35°傾いた傾斜型換振器を水平面内で120°間隔に開いた方位に3台設置することにより互いに直交する3成分を得る方式の装置であり、全く同じ型の換振器のみを用いるので3成分の特性を一致させることが簡単であるうえ、3台を同一方向に置いて地震波を観測することにより相互の特性の検定が観測と同じ条件でできると言う利点を有する。これにより換振器の固有周期に近い周波数域やより長周期の領域の地震波データの解析において、従来実際上不可能であった相互の精度を吟味することができる。

以上のことから、今回、固有周期1秒の速度型上下動換振器を基にして固有周期1～2秒の傾斜型換振器を試作し、積分器を組み込んだ増幅器¹⁰⁾により広帯域対称型地震計とした。天ヶ瀬地殻変動観測所の地震計室に設置し予備観測を実施して、得られた記録の特徴を polarization filtering technique によって吟味した。ここでは装置の概略と若干の解析結果を報告する。

2. 対称型地震計の概要

はじめに、傾斜した振子が振動計として使える重錘の支持の方法を考える。最も一般的な吊り方をした上下動振子の運動の式が萩原によって与えられている¹¹⁾。水平から角 i 傾いた振子の運動の式は、座標軸を

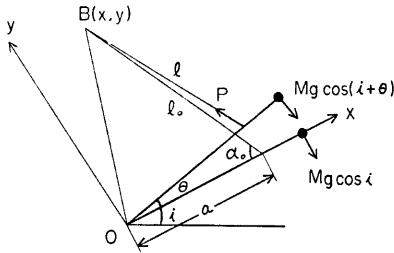


Fig. 1. Co-ordinates for inclined seismometer.

の使用, (2), $\alpha_0=90^\circ$, Gray 型, (3), $\angle B=90^\circ$, 直角法。ここで上下動振子における Gray 型に相当する吊り方を考えると周期 T は Gray 型の $T=2\pi \sqrt{I/\beta a^2}$ の分母に傾斜の影響が入って

$$T=2\pi\sqrt{\frac{I}{\beta a(a-kl_0\tan i)}} \quad (2)$$

分母の kl_0 は静止の位置におけるバネの伸びを表わす量でありバネの固定点の位置 a の値とは反比例の関係にある。従って $a=kl_0 \tan i$ となる a が選択できて T の値を大きくすることが出来る。すなわち, 上下動振子における Ewing 型と同様バネの位置の調整だけで周期を長くすることができる。Ewing 型では θ^2 の項が結構大きく振巾の大きいところでは単振動にならないことがあるがこの場合には θ^2 の係数は 0 であり大振巾でも波形の歪はない。

Fig. 2 および Photo 1 に試作された傾斜型換振器を示す。重錘, バネ, コイルおよび磁石は固有周期 1

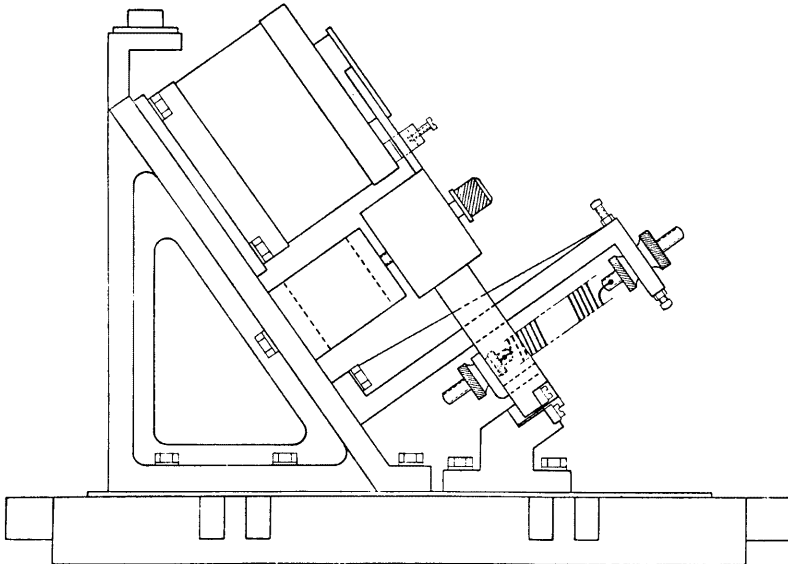


Fig. 2. Inclined seismometer.

Fig. 1 のようにとると, 萩原の式 (32・14) より,

$$I \frac{d^2\theta}{dt^2} = -\beta a \left\{ (1-k) \frac{ay^2}{l_0^2} + k(x-y\tan i) \right\} \theta + \frac{3\beta a^2 y}{2l_0^2} (1-k) \left(x - \frac{ay^2}{l_0^2} \right) \theta^2 + O[\theta^3]. \quad (1)$$

ここに, I は振子の慣性能率, β はバネ定数, k はバネのはじめの長さ l_0 と静止の位置での長さ l との比で与えられる ($k=1-l_0/l$). 振子が単振動をするためには θ^2 の係数は 0 でなければならないが, これは元の式と同じであるので上下動振子の場合と同様 3 通りの方法がある : (1), $k=1$, zero length

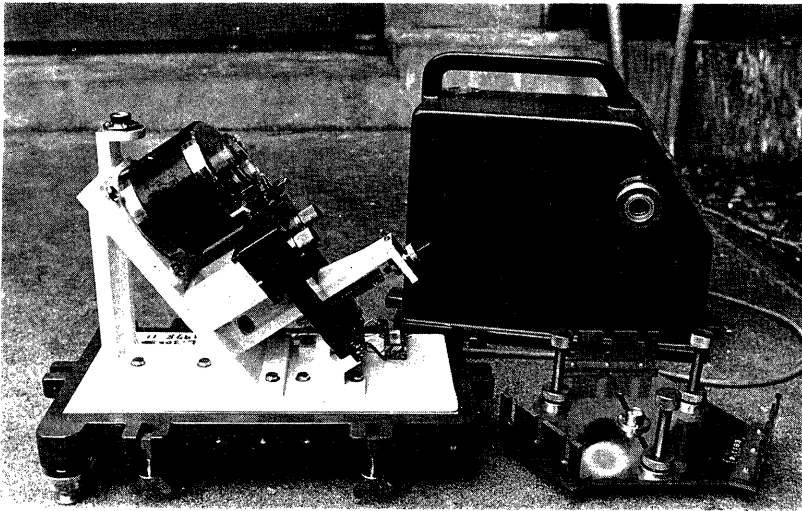


Photo 1 Inclined seismometer.

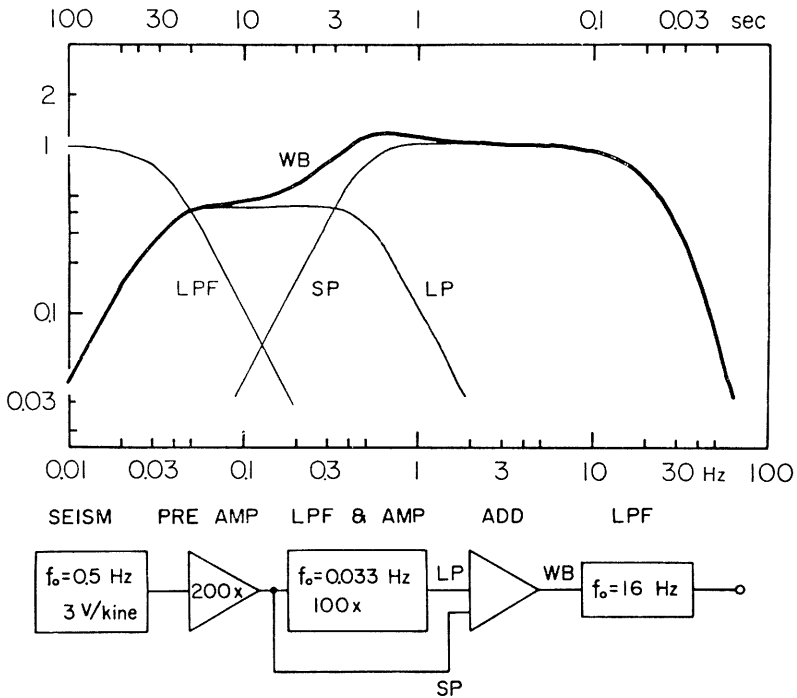


Fig. 3. Frequency characteristics and block diagram of the symmetrical seismograph system.

秒の速度型振動計に使用されているものと同じであるが、支点の十字バネは、重錘の重さが支点到圧縮力として加わるので上下動のものより厚い 0.15mm 厚の板バネを用いている。実験では固有周期を5秒まで出すことができたが調整用ネジの僅かのねじれがバネの歪として残るので周期が2~3秒以上になると周期合せが困難であった。現在周期2秒にして観測に使用している。

Fig. 3 に広帯域化のための回路構成と周波数特性を示す。換振器の出力は前置増巾器で増巾され (SP), cut off frequency が 0.033 Hz の low pass filter を通した後さらに100倍し (LP), 加算回路によって広帯域 (WB) にしてある¹⁰⁾。

換振器は1978年4月に天ヶ瀬観測所の地震計室に3台を同じ方向に向けて設置し12月までの間、相互の特性の違いと安定性について調べた。固有周期は±1%以内のバラつきで3台が一致しており時間的変化は更に小さい。**Fig. 4** は脈動の記録を AD 変換した後 X-Y プロッターに計器補正を加えずに出力したものであるが、装置の相互特性の一致が確かめられる。このように脈動や種々の地震波を観測しその解析から、相互の特性は 0.03 Hz から 20 Hz の広い範囲で±2%以内の違いしかないこと、それ以上の精度が必要なときは、各チャンネルごとの換振器の固有周期、減衰定数、フィルター特性の実測値を用いて解析の段階で計器補正を行うことができることが確認された。

この後、換振器は **Photo 1** にある六角形のゲージに固定する方法で120°間隔に設置され対称型地震計としてテスト観測が実施されている。WB の信号は遅延装置 ($\tau=15.36$ 秒, 8 bits / datum) を通して FM データレコーダにトリガー方式で集録されると共に、モニターとしてペンレコーダに波形が描かれる。この他に LP 成分についても遅延装置 ($\tau=40.96$ 秒) を通して同じデータレコーダに記録している。地震波の検出には3成分を合成して得られる上下動成分を用いている。

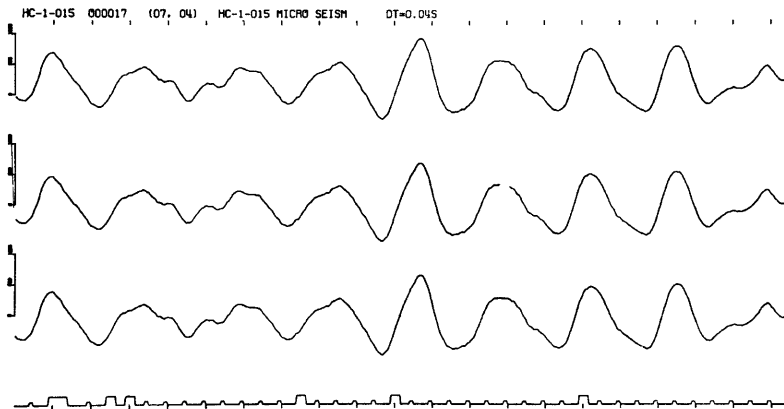


Fig. 4. An example of WB record of micro-seismic with the system. Three inclined seismometers were set in the same direction.

3. 記録例および解析結果

Fig. 5 は釧路沖に発生した浅い地震のデータレコーダからの再生記録である。アナログ波形の目視解析に便利ように加減算回路を用いた座標軸変換器により、vertical, radial, transversal の3成分に変換してある。初動部分に卓越する 1~2 Hz の波から、周期15~20秒の表面波群まで広い周波数範囲にわたって記録されている。図に示されている S は走時表¹²⁾により予測される S 初動の位置であり、SV は V, R 2成分

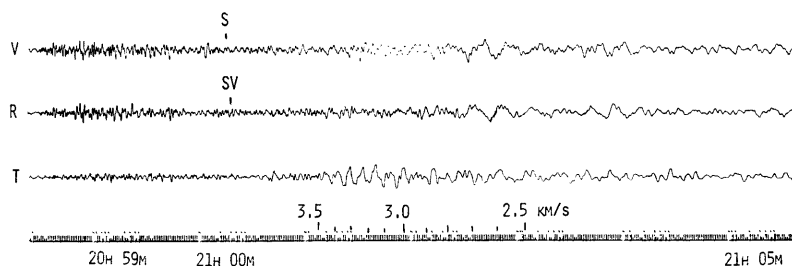


Fig. 5. An example of WB record of the symmetrical seismograph system. Jan. 19, 1979, Off Kushiro, $M=5.4$, $\Delta=1030\text{km}$.

の phase が明瞭に反転して SV 波が識別できる位置である。T 成分では S 初動は明瞭ではない。刻時に重ねて震源からの速度が示されているが、T 成分には周期 6～8 秒で群速度が 3.5～3km/sec の Love 波が、また V, R 成分には周期が 15～20 秒で群速度が 2.8km/sec より小さい Rayleigh 波が良好に記録されている¹³⁾。

換振器は天ヶ瀬の地震計室に設置されているので、通常の 1 秒速度型換振器（上下動 1，水平動 2）による短周期システム⁹⁾の記録と直接比較することができる。Fig. 6 は P-S 時間が 4.2 秒の西方向に震源のある微小地震の例で、天ヶ瀬のシステム（XYZ と記す）のデータと同じ成分に数値変換し並べて X-Y プロッターに出力したものである。XYZ システムは 30 Hz まで周波数特性が平坦であるので、10～15 Hz で卓越している波に高周波成分が重なっているが、対称型地震計装置（SYM）は 20 Hz high cut するので、このチリチリする成分は見られない。また SYM は 1 秒以上の長周期成分をも記録するので脈動によってドリフトしているように見える。このようにそれぞれの装置の周波数特性の違いを反映する特徴的な差異はあるが、5～20 Hz で卓越する波は初動から S coda まで振巾、位相ともよく合っているようである。このことを詳細に検討するために、polarization filtering technique¹⁴⁾を用いて linearity, directivity および body phase の検出について比較した。

linearity は 3 成分の band pass 記録の一定区間（ここでは 2 波長分）のデータからテンソル楕円体を求め、その最大主軸の長さ L_1 と 2 番目の長さ L_2 との比で定義されている ($\rho=1-L_2/L_1$)。Fig. 7 は 5～20 Hz の band pass 記録の初動部分によって求めた主軸方向（見掛け入射角 45°）を P 方向とし、これに直交する SV, SH 方向での処理結果を示したものである。linearity と directivity とは実線が SYM、点線が XYZ によるものであり、最下段の処理結果を示すトレースは上が SYM、下が XYZ である。linearity, directivity とともに初動より前では filtering の際の side lobe の出方が若干異なるために値は大きく異なって

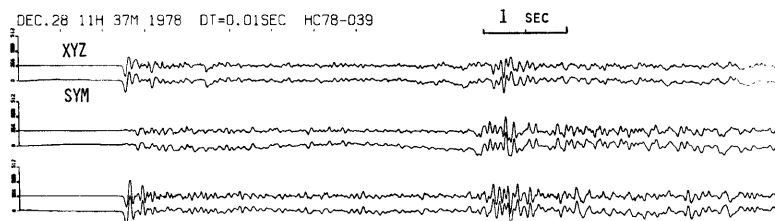


Fig. 6. Direct comparison of seismic signals from local small earthquake observed with the symmetrical system (SYM) and Amagase telemetry recording system (XYZ).

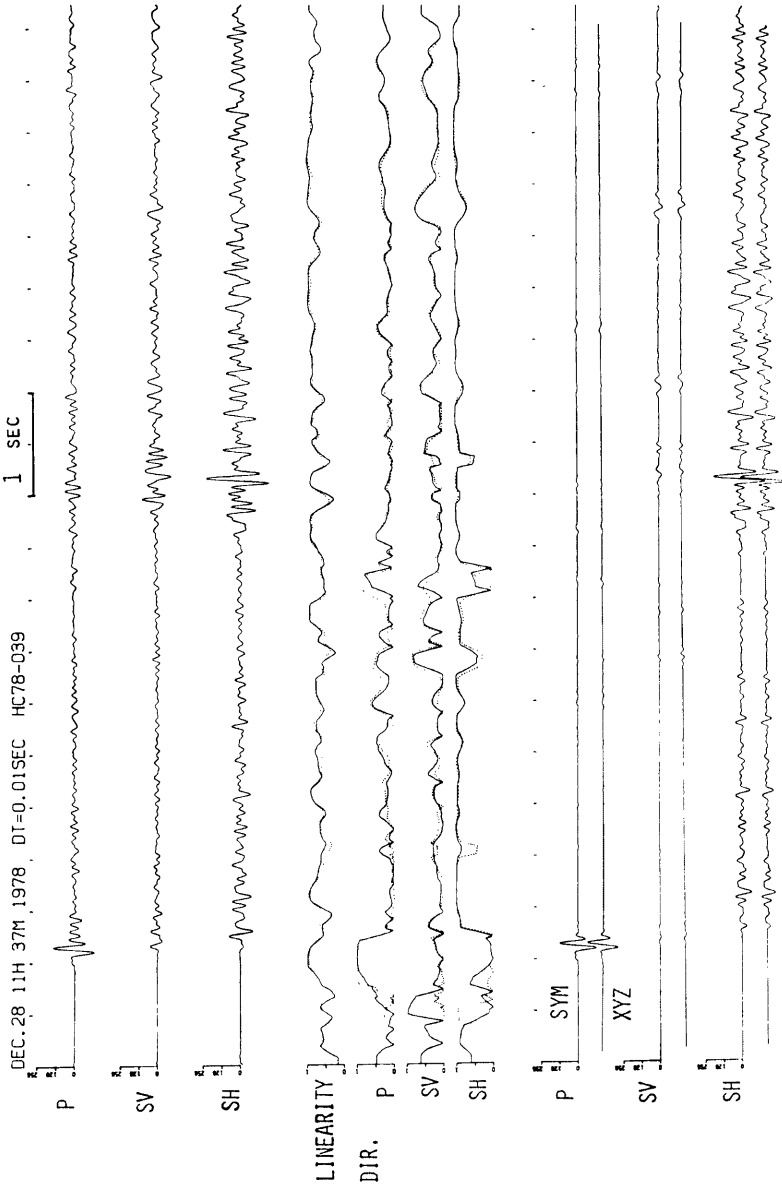


Fig. 7. Comparison of linearity, directivity and detection of body phases of seismic signals shown in Fig. 6 with polarization filtering technique.

いるが、P 初動部分では SYM, XYZ で同じ値を示す。S 波部分についても差異はない。しかしながら P 初動後の later phase につけて見ると、linearity, P 方向への directivity とともに SYM の方が XYZ より若干大きく、初動と同じ方向に polarize する linear な波の性質をより強く示している。このことは最終結果において、SYM では初動後、1.1, 1.5, 2~2.3 秒に P phase を僅かながら検出しているが XYZ ではこの phase は全く消されてしまっている。このように、波形を目視解析によって phase を調べたり、particle motion を描いてその形を吟味するような方法ではどちらの装置の記録を用いても同じ結果に到ると思われる。また、linearity を数値的に吟味する polarization analysis においては、P, S 初動部分の波の性質を議論する上では差異はないが、 coda parts から変換波や反射波を検出する場合などには SYM の方が有効であろう。

4. おわりに

試作された傾斜型換振器の静止の位置の調整はコイルバネを吊っているネジの回転によって行っているの、バネに僅かのねじれが加わって固有周期が不安定になる。また固有周期は傾斜によっても変化する(式(2))。このため、3台の固有周期を一致させるのに手間どることがあった。固有周期1~2秒程度では支障にならないがより長周期の場合に問題になると思われる。長周期や広帯域用として La Coste 吊りにし傾斜や零点の補正装置を組み込んだ換振器が試みられている¹⁵⁾¹⁶⁾。

換振器を3台とも同方向に置くことにより観測状態で装置の総合特性を一致させることが出来ると言うことが3成分観測に非常に有効であることが改めて確認された。移動しながら観測する微動調査など野外の観測、実験には特に有利であろうが、この場合には換振器を小型にしておくことと便利である。

天ヶ瀬短周期観測システムはこれまで水平2成分については付近の採石発破の波の入射方位を用いて相互の特性が観測状態で検定されてきた。今回の対称型地震計の併行観測により上下動をも含めた3成分においても数 Hz 以上の周波数域で相互に同じ特性であることが確認された。

最後に始終御指導下さった吉川宗治教授、貴重な観測データを貸して下さい下さって有益な討議をして下さった古沢保助教授に深く感謝の意を表します。天ヶ瀬地殻変動観測所での観測に際して地殻変動部門の皆様および小林年夫技官の御協力を得た。これらの方々に心からお礼を申し上げます。なおこの研究の費用の一部は文部省科学研究費自然災害特別研究(2) (302525) の補助金による。

参 考 文 献

- 1) Кейлис-Борок, В. И. : Сейсмология и логика, Вычислительная Сейсмология, Выпуск 4, Наука, 1968, pp. 317-350.
- 2) 古沢 保・入倉孝次郎・赤松純平：地震波資料のファイリングと自動処理，京大防災研究所年報第17号 B, 1974, pp. 15-27.
- 3) Алказ, В. Г., Н. И. Онофрасс, А. И. Перельберг : Поляризационный анализ сейсмических колебаний, Кишинев, "Штинница", 1977.
- 4) 古沢 保・赤松純平：局所地震の P~S 間に見られる顕著な phase について，京大防災研究所年報第21号 B-1, 1978, pp. 97-106.
- 5) 赤松純平・古沢 保・入倉孝次郎：天ヶ瀬地殻変動観測所で観測される局所地震の S 波の性質について，京大防災研究所年報第18号 B, 1975, pp. 11-21.
- 6) 赤松純平・古沢 保：局所地震の入射角と震央距離について，京大防災研究所年報第19号 B-1, 1976, pp. 59-67.
- 7) 赤松純平：炭山地震観測室における地震観測，京大防災研究所年報第20号 B-1, 1977, pp. 13-19.
- 8) Гальперин, Е. И., Г. И. Аксенович, Р. М. Гальперина, М. С. Эренбург : Опыт выделения проходящих обменных волн способом полярной корреляции, Изв. АН СССР "Физика

- Земли”, 1975, No. 7, pp. 74-85.
- 9) Гальперин, Е. И. : Поляризационный метод сейсмических исследований, “Недра”, 1977.
 - 10) Burke, M. D., E. R. Kanasewich, J. D. Malinsky and J. F. Montalbetti : A Wide-band Digital Seismograph system, Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 60, 1970, pp. 1417-1426.
 - 11) 萩原尊礼 : 振動測定, 宝文館出版, 1945, pp. 135-142.
 - 12) Ichikawa, M. and E. Mochizuki : Travel Time Tables for Local Earthquakes, Pap. Meteorol. Geophys., 1971, 22, pp. 229-290.
 - 13) Furuzawa, T. : Group Velocities of Surface Waves from Near Earthquakes around Japan, J. Phys. Earth, 1976, 24, pp. 131-147.
 - 14) Montalbetti, J. F. and E. R. Kanasewich : Enhancement of Teleseismic Body Phases with a Polarization Filter, Geophys. J. R. astr. Soc. 1970, 21, pp. 119-129.
 - 15) Melton, B. S. and B. M. Kirkpatrick : The Symmetrical Triaxial Seismometer—Its Design for Application to Long-Period Seismometry, Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 60, 1970 pp. 717-739.
 - 16) Unterreitmeier, E., Ch. Teupser und H. Buder : Der Elektronische Seismograph EDS 1, Gelandes Beitr. Geophysik, 1978, 87-6, pp. 441-454.