



Title	回転成分地震計の試作と感度の検定
Author(s)	森谷, 武男; MORIYA, Takeo; 丸茂, 只直 他
Citation	北海道大学地球物理学研究報告, 61, 99-106
Issue Date	1998-03-20
DOI	https://doi.org/10.14943/gbhu.61.99
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/14262
Type	departmental bulletin paper
File Information	61_p99-106.pdf



回転成分地震計の試作と感度の検定

森谷 武男・丸茂 只直

北海道大学大学院理学研究科

地球惑星科学専攻

(1997年12月8日受理)

Design for Rotation Seismometers and Their Calibration

Takeo MORIYA and Tadanao MARUMO

Division of Earth and Planetary Sciences, Graduate school of Science, Hokkaido University

(Received December 8, 1997)

High sensitivity seismometers for rotational components of ground motion were tentatively designed. Four L22d seismic sensors were set on a circumference of a metal plate. L22d seismic sensors were selected to have almost the same mechanical and electrical characteristics. The radius of the circumference was 11 cm. Output of four sensors were connected to be series to cancel translational movement and to emphasize rotational movement of the ground. Sensitivity of the rotation seismometer were obtained by comparing artificial rotational noise spectrum with that of the gyro-sensor of which sensitivity is calibrated. By this experiment we confirmed that high sensitivity of 335mV/deg/s was obtained. We show translational and rotational seismograms of explosion, earthquakes and traffic noise with absolute amplitudes. The rotation seismometer has wide utilities for S and Love waves observations and will bring large possibilities for seismology and seismic exploration.

I. はじめに

従来の地震計は、並進成分を観測する計器として発達してきた。実際の地震動特にS波やラブ波には回転成分が含まれていると考えられ、(例えば Bouchon and Aki, 1982) これらの波だけを選択的に観測するために回転成分地震計が試作されたことがある(萩原, 1958, 渡辺, 1959, 田治米, 1965)。しかし実際の回転成分はかなり小さく、田治米(1965)の板叩きSH波記録をのぞき信頼できる記録は少なかった。もしも回転成分のセンサーが実用化されるならば、地震探査、建築物の強震動、グローバル観測、惑星観測などあたらしい、S波や回転成分に関する地震学の可能性が見えてくる。実際に震源付近の強震動によって生じた被害に回転運動が原因と考えられるものが発見されたことがある(本谷・北構, 1971)。武尾(1994)、および Takeo and Ito(1996)は震源に近い観測点で回転成分を測定することにより複雑な断層運動を解析可能にすると考えている。一方微動探査法では通常はレイリー波が観測対象となるが、岡田・松島(1989)および松島・岡田(1990)はラブ波をも観測対象にすることで構造探査の精度を向上できることを示した。実際にはレイリー波とラブ波は混在していると

考えられ、これらを分離するために観測には3成分地震計が必要となって、観測作業が煩雑になる。もしも回転成分地震計があれば、観測はレイリー波の観測と同じように簡単になると考えられる。

回転成分測定のためのセンサーは、航空機、ロケットや自動車の運動量検出するという幅広い需要に支持されて発達し、“ジャイロセンサー”(井上, 1992)や“レーザージャイロ”など回転運動から生ずるコリオリ力に感応するセンサー(Henkel, 1993)が市販されるようになった。これは回転成分だけに感応する周期無限大の速度センサーである。感度は地震計としては使うには低いという難点がある。松林他(1996)はジャイロセンサーを地震計として使用する実験を行ったが感度が低いために数メートルの距離範囲でスタッキングを行わなければならなかった。Nigbor(1994)は大規模な爆発による強震動を通常の強震計とジャイロセンサーの震動計で6成分の観測した。ジャイロセンサーが原理的に回転成分だけに感応すること、感度が明記されていることは、これを基準にして新たに作る地震計を校正できる可能性を示している。しかし現在の段階では地動のノイズレベルが観測できるような高感度の回転成分地震計を作ることは、ジャイロセンサーの原理と技術では困難と思われる。現在市販されている最も分解能の高い回転成分センサーは日本航空電子工業社製のJG-201 FAであって、その分解能は 5×10^{-5} deg/sである。そこで著者らは最も簡単に回転成分が測定できる高感度回転成分地震計を試作し、絶対感度の検定といくつかの微小回転成分震動測定を試みた。

II. 回転成分地震計の試作と検定

鉛直軸回転成分地震計としては、4個のL 22 D(水平動)を金属製取り付け台の円周上に、90度の間隔でリング状に固定した。その半径は11 cmで4個のL 22 Dは中心に対して点対称になっている(Fig. 1)。1台の回転成分地震計に使う4個のL 22 Dについては特性がほとんど同じものを使用した。多数のL 22 Dの中から、固有周波数 f_0 と電圧感度の同じものを選択し、さらにスペクトラムアナライザーを用いて地動の微動を長時間測定して平均したスペクトルを求め、偏差が0.3-0.4 db以内になったL 22 Dを組み合わせた。4個の地震計のコイル出力は並進成分が打ち消されるように直列に結線した。水平軸回転成分地震計も同じように製作したが、使用したL 22 Dは上下動2台と、水平動2台である(Fig. 1)。微動のスペクトル比測定から上下動と水平動の特性が同じかどうか検査することはできないので、互いに向き合うL 22 Dは、ノイズ測定による方法で同じ特性を持つ物を選択した。次にこのような方法で組み立てた回転成分地震計の絶対感度を測定するために、感度がわかっているジャイロセンサーと同じ場所で回転震動スペクトルを測定し、感度を推定した。比較のために使った回転センサーは村田製作所製ジャイロスター、ENX-05 A(22.2 mV/deg./s, $f_0 = 8$ Hz)である。回転震動スペクトルはスペクトラムアナライザーを使って測定した。ジャイロスターは地動の微動を観測するほど感度は高くないので、これらをスムーズに回転する台にのせて、著者らがおよそ周期10秒から10 Hzの震動を振り切れないようにランダムに与えた。約5分間ほどこの回転運動のスペクトルを測定して平均し、ジャイロスターと回転成分地震計で測定されたスペクトル比を比較した。この方法により絶対感度を求めることができた。この方法は練習を積むことで、繰り返し測定しても違いは0.3 db以下であることがわかった。この実験の結果、L 22 Dを4個を組み合わせた地震計の回転成分に対する感度は335 mV/deg/sであることがわかった。Fig. 2にはこの測定で得られたスペクトル比と位相差が示されている。約6 Hzからスペクトル比が上昇するのはジャイロスター内部の磁器振動子の固有周波数が8 Hzであるために、これより高い周波数では感度が周波数の二乗に反比例するためである。ここで試作した回転成分地震計は、地動の観点成分に対して2 Hzより高い周波数領域で平坦な特性を持っている。水平軸成分の回転成分地震計についても同様の方法で感度を測定した。ここで使用した4個のL 22 Dの地動速度並進成分に対する電圧感度 G_v は0.42 V/cm/sであり、半径 $R =$

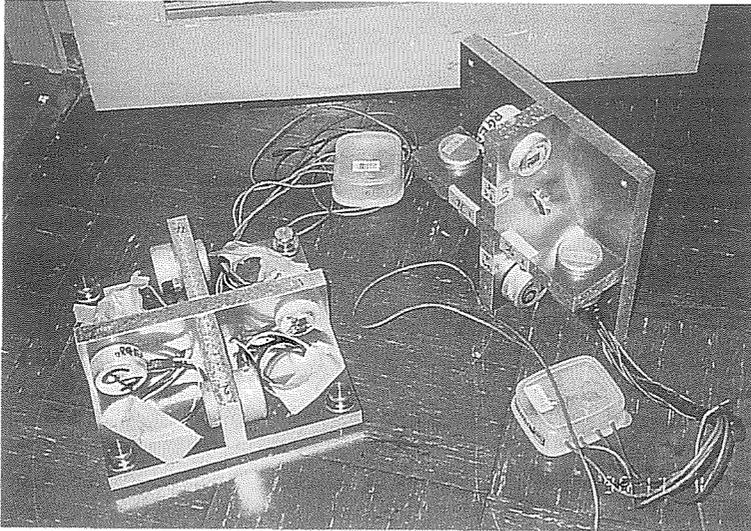


Fig. 1. A photograph of vertical axis rotation seismometer (left), and horizontal axis rotation seismometer (right).

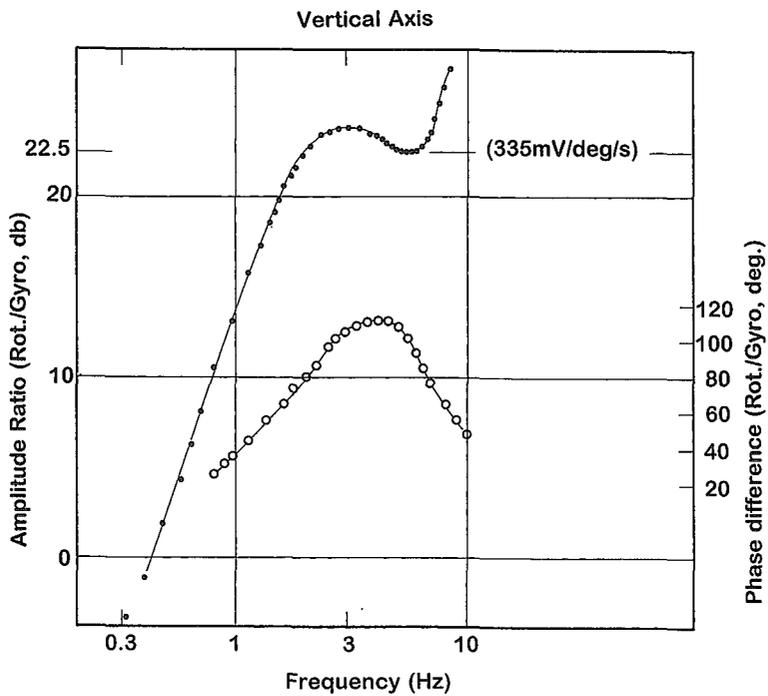


Fig. 2. A comparison of noise spectra of rotation seismometer and gyro-sensor. Amplitude ratio and phase difference are shown. Ascent of amplitude ratio and descent of phase difference from 8 Hz is caused by gyro-sensor of which natural resonance frequency is 8 Hz and this rotation seismometer have a flat velocity response greater than 5 Hz.

11 cm で固定されているために地動速度回転成分に対する感度は、

$$G_{\text{rot}} = 4 \text{ Gv}/\tan^{-1}(1/R) \quad (1)$$

で計算され、

$$G_{\text{rot}} = 372 \text{ (mV/deg/s)}$$

が得られる。実験で得られた値 335 (mV/deg/s) は計算値よりも約 10% 小さい。

III. 観 測 例

1996 年 11 月 14 日九州で行われた人工地震観測 (爆破地震動研究グループ, 1997) の際に S-6 の爆破震動をおよそ 17 km 離れた地点で、水平動並進 2 成分 (Radial 成分と Transverse 成分) および U-D 軸および Transverse 軸回転成分を観測し、記録することができた (Fig.3)。水平動並進 2 成分の最大振幅はほとんど同じでそれぞれ約 $400 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$ であり、U-D 軸回転成分、Transverse 軸成分の最大振幅はそれぞれ $0.56 \mu\text{rad/s}$ 、 $1.0 \mu\text{rad/s}$ という振幅が観測された。また並進成分水平動と回転成分のノイズレベルは $10 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$ および $0.1 \times 10^{-6} \text{ rad/s}$ 程度であった。

Fig. 4 は北海道大学の理学研究科 3 号館の 2 階で、3 月 17 日 18 時 23 分に観測された並進 3 成分および回転 3 成分の地震記象である。震源は観測点から南東約 165 km の浦河沖の深さ 60 km にあった。マグニチュードは 4.7 であった。S 波部分は振り切れたが、並進成分の P 波部分が、U-D 並進成分で約 $40 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ 、N-S 並進成分では $63 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ 、E-W 並進成分では $26 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ 、であったのに対して、N-S 軸回転成分では $200 \mu\text{rad/s}$ 、E-W 軸回転成分では $300 \mu\text{rad/s}$ 、U-D 軸回転成分では $20 \mu\text{rad/s}$ であった。U-D 軸回転成分の P 波部分は振幅は他の成分に比べると非常に小さく初動も不明瞭であるが S 波部分は比較的明瞭である。

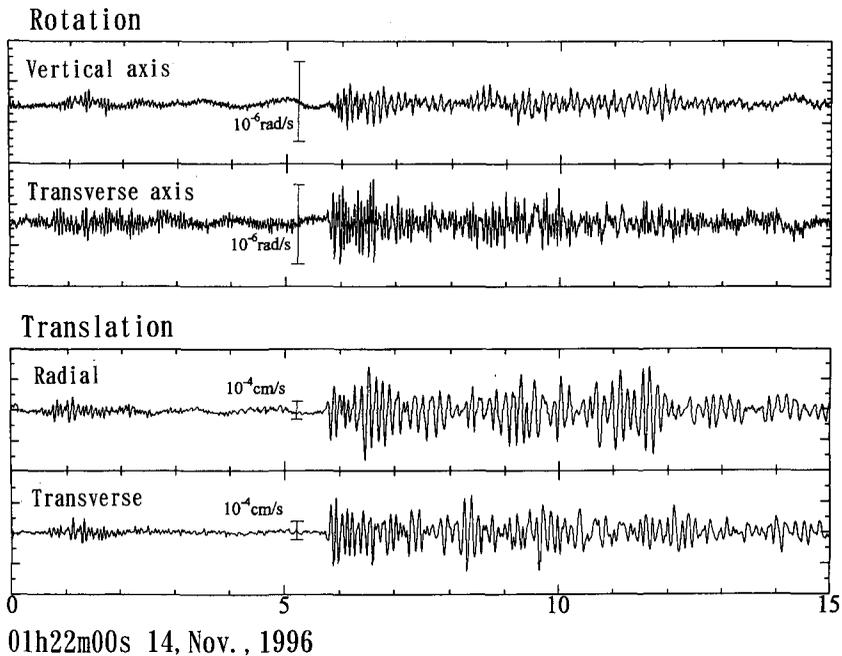


Fig. 3. Seismograms of an explosion by 500 kg of TNT observed at 17 km apart from the origin. Vertical and transverse axes of rotation (upper figure), and radial and transverse components of translational components (lower figure) are shown.

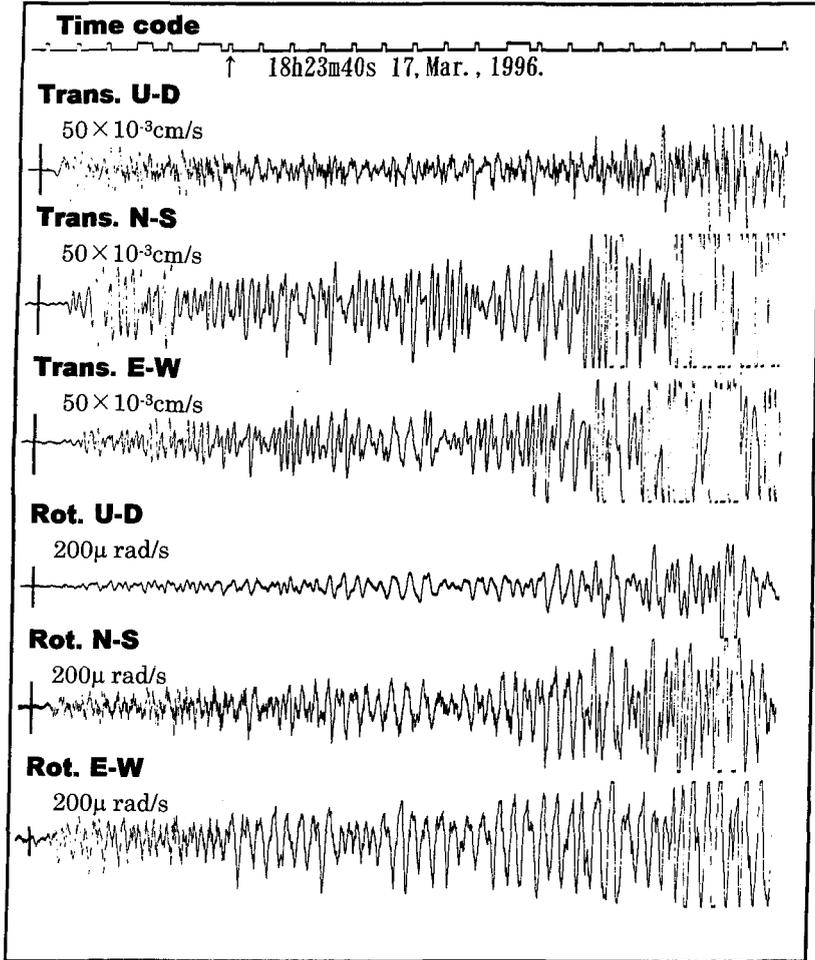


Fig. 4. Six-component seismograms of earthquake (M : 4.6) which occurred off Urakawa, Hokkaido, at the depth of 60 km, on 17, Mar. 1997, observed at Hokkaido university.

Fig. 5は観測点から東南東約155 kmの日高山脈下、124 kmの深さで起こった地震の記象である。マグニチュードは4.4であった。U-D並進成分ではP波が、水平動並進2成分ではS波の到着時間が明瞭でやや深発地震の特徴をよく示している。しかしU-D軸回転成分の記象では、P波の到着時はほとんど読みとることができないがS波の到着は明瞭である。この特徴はFig. 4の浦河沖の地震と同じである。U-D並進成分のP波部分の最大振幅は約 $100 \times 10^{-3} \text{cm/s}$ であり、水平動並進2成分では、 $25 \sim 17 \times 10^{-3} \text{cm/s}$ である。U-D軸回転成分のP波初動部分の最大振幅は約 $27 \mu\text{rad/s}$ である。N-S軸回転成分の同じ部分では $90 \mu\text{rad/s}$ 、E-W軸回転成分では $300 \mu\text{rad/s}$ であり、回転成分ではE-W軸成分の振幅が大きい。S波部分の最大振幅については、E-W並進成分では $57 \times 10^{-3} \text{cm/s}$ 、N-S並進成分でも $57 \times 10^{-3} \text{cm/s}$ 、であって、U-D軸回転成分では $325 \mu\text{rad/s}$ 、N-S軸回転成分では $280 \mu\text{rad/s}$ である。

Fig. 6はFig. 4およびFig. 5と同じ場所で観測した、約20 m離れた道路上をトラックが通った時の震動である。N-S並進成分(最大振幅： $2 \times 10^{-3} \text{cm/s}$)とE-W軸回転成分(最大振幅： $120 \mu\text{rad/s}$)

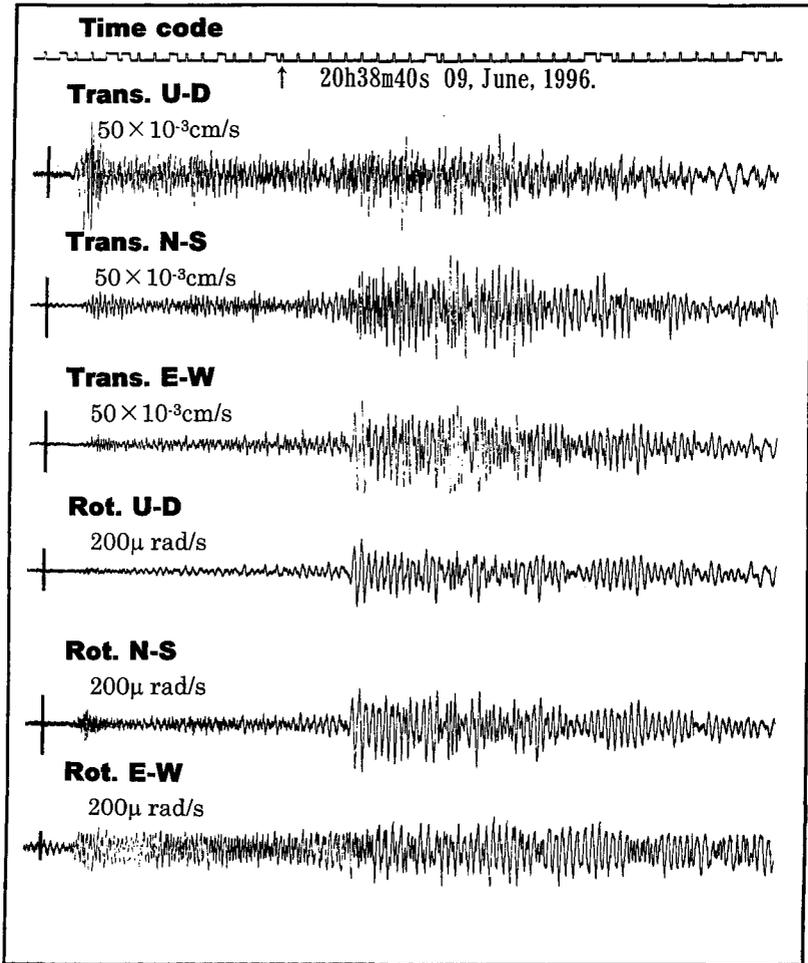


Fig. 5. Six-component seismograms of earthquake (M : 4.4) which occurred beneath the Hidaka mountains, Hokkaido, at the depth of 124 km, on 9, June 1997, observed at Hokkaido university.

s) の波形, E-W 並進成分 (最大振幅 : $120 \mu\text{rad/s}$) と N-S 軸回転成分の波形がそれぞれ似ている。U-D 軸回転成分の振幅はかなり小さく, 他の回転軸成分の振幅の $1/4$ 程度である。この震動は東西軸を持つ南北の震動が卓越している。これは観測場所が東西に細長い 6 階建ての建物であって, E-W 軸回転震動が発生しやすいためであろう。

IV. お わ り に

4 個の通常の電磁式地震計 L 22 D をリング状に組み合わせることにより, 高分解能の回転成分を観測できる地震計を製作し, 地震動やノイズの絶対値を測定した。観測された U-D 軸回転成分の地震波形では, P 波部分の振幅は非常に小さく S 波部分では明瞭であり, また他の回転成分の波形も並進成分とは異なっている。もしも回転成分が存在しないか非常に小さいのならば, 観測された震動はすべて 4 個の L 22 D の不揃いによるリークである。その場合, 回転成分の震幅は並進成分のおよそ -30 ないし -40 db になるはずであるが, 実際に得られた出力電圧を並進成分と比較すると 0 db から -10

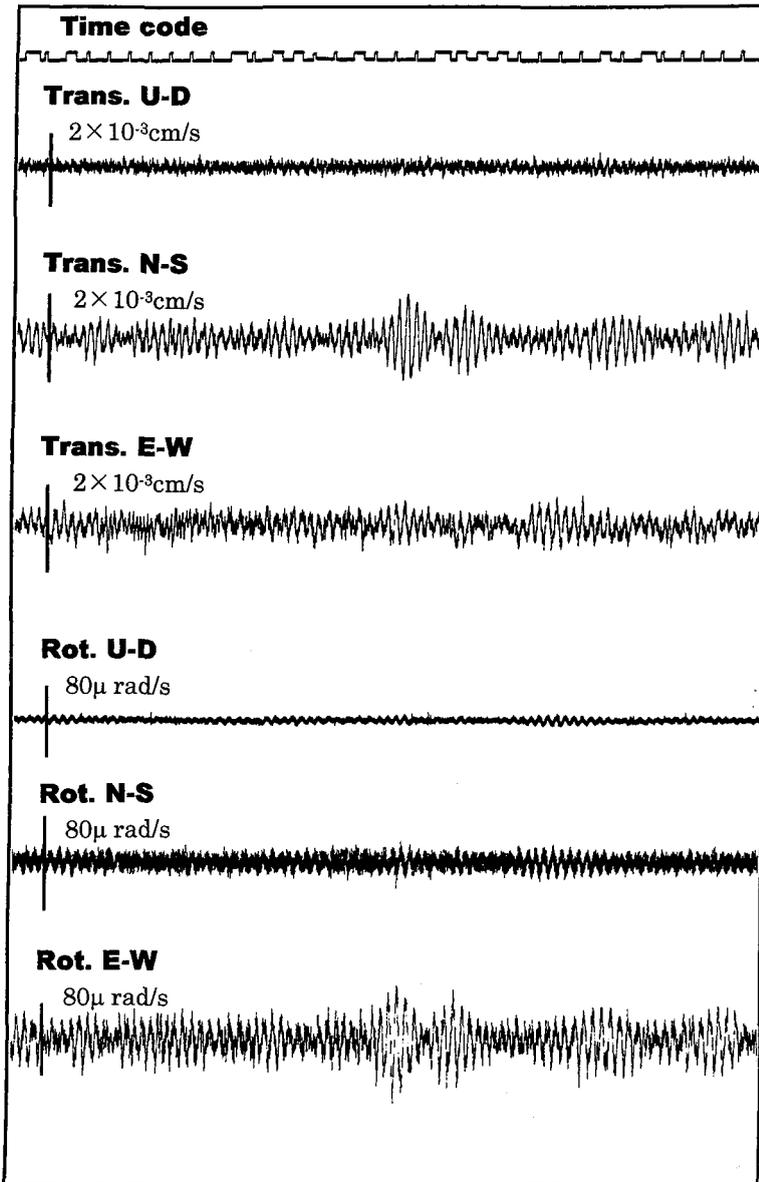


Fig. 6. Six-component seismograms of noises caused by a car running on a road apart from seismometers about 100 m.

db 程度なので、回転成分が存在するのは確かであろう。ここで試作した回転成分地震計のリーク量を並進成分の震動台で測定する必要があるが、実際の震動台には回転成分が含まれている可能性がある。したがって信頼できる回転成分地震計を作るためには、完全に同じ特性のセンサーを使うことと、それを検定するために回転成分のきわめて小さい並進成分震動台、および並進成分のきわめて小さい回転成分震動台が必要である。

今後の課題は、リング状に配列する4個のL22Dの特性をさらにそろえること、長周期化すること、および同じ特性の回転成分地震計の台数を増やすことである。そのためには過制振(過減衰)・積分法(例えば森谷他, 1996)の利用が考えられる。これは地震計に電子回路を付加して地震計の機械的特

性消去し、全体の特性を電子回路で決定するという特徴を持つ。最近の Lennartz 社の LE-3D/5 s 型地震計には過制振を得る方法に負抵抗法が使われ、これによって非常に大きい減衰定数を得ている。この出力に適当な中心周波数 f_0 を持つバンドパスフィルターを介することで、見かけ上、固有周波数を低下させると共に、電子回路部品の管理により多数の製品のばらつきをきわめて少なくしている。

ジャイロセンサーは周期無限大の速度計であって地震学にも広い応用性が考えられる。最近開発された日本航空電子工業社製ファイバーオプティックジャイロは、現在のところ 5×10^{-6} Rad/s の分解能があるので、長周期地震計や強震計として応用できる可能性がある。

謝辞 日本物理探鉱株式会社の松林弘智氏にはジャイロセンサーに関する資料を提供していただいた。本研究で使用した L22D は東京大学地震研究所から借用させていただいた。北大理学部機械工作室の小檜山守男技官、小川正人技官、および加藤尚史技官には装置の一部を製作していただいた。

文 献

- 爆破地震動研究グループ, 1997. 人工地震による 1996 年九州東部地殻構造調査, 1997 年 地球惑星科学関連学会, I 31-P 37.
- Bouchon, M. and K. Aki, 1982. Strain, tilt, and rotation associated with strong ground motion in the vicinity of earthquake fault, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **72**, 1717-1738.
- 萩原幸男, 1958. 回転地震計の試作, *地震II*, **11**, 141-144.
- Henkel, S. L., 1993. Gyro-on-a-Chip acts as Coriolis Sensor, *SENSORS*, May, 6.
- 井上純一, 1992. 圧電振動ジャイロとその応用, *エレクトロニクスライフ*, May, 1992, 109-116.
- 松林弘智・河村茂樹・渡辺文雄・平井征雄・笠原慶一, 1996. 回転地震計の開発, *物理探査学会 第 94 回学術講演会論文集*, **22**, 96-99.
- 松島 健・岡田 広, 1990. 微動探査法(2) - 長周期微動に含まれるラブ波を識別する試み -, *物理探査学会第 82 回(平成 2 年度春期)学術講演会論文集*, 5-8.
- 森谷武男・石川 顕・宮腰 研・岡田 広, 1996. 位相誤差の少ない微動探査の方法, *物理探査*, **49**, 210-217.
- 本谷義信・北構宗夫, 1971. 1970 年 1 月 21 日北海道日高山脈南部地震の調査報告, *北海道大学地球物理学研究報告*, **25**, 141-154.
- Nigbor, R. L., 1994. Six-Degree-of-Freedom Ground-Motion Measurement, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **48**, 5, 1665-1669.
- 岡田 広・松島 健, 1989. 微動探査法(1) - 微動に含まれるラブ波の識別方法とその理論 -, *物理探査学会第 81 回(平成元年度秋期)学術講演会論文集*, 15-18.
- 田治米鏡二・田 望, 1965. 物探用回転成分地震計の試作, *北海道大学地球物理学研究報告* **14**, 95-104.
- 武尾 実, 1994. 地震動回転成分の観測とその活用, *地震学会講演予稿集 1*, B08.
- Takeo, M. and H. M. Ito, 1996. What can be learned from rotational motions excited by earthquakes?, Submitted to *Geophys. J. Int.*
- 渡辺 晃, 1959. 回転歪地震計, *地震II*, **12**, 162-170.