



Title	回転成分地震計の改良と観測された回転成分地震波の性質
Author(s)	森谷, 武男; MORIYA, Takeo; テイセイヤー, ローマン 他
Citation	北海道大学地球物理学研究報告, 69, 1-13
Issue Date	2006-03-15
DOI	https://doi.org/10.14943/gbhu.69.1
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/21496
Type	departmental bulletin paper
File Information	01.pdf



回転成分地震計の改良と観測された回転成分地震波の性質

森谷 武男

北海道大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻

ローマン テイセイヤー

ポーランド科学アカデミー, 地球物理学研究所

(2005年12月14日受理)

Development of Rotation Seismometer and Characteristics of Rotation Seismograms

Takeo MORIYA

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

Roman TEISSEYRE

Institute of Geophysics, Polish Academy of Science

(Received December 14, 2005)

We have developed rotation seismometer using four translation seismic sensors (L22d), which have the same amplitude and phase characteristics. A negative input impedance amplifier and band-pass filter have eliminated mechanical deviations of individual sensor and adjusted to have suitable characteristics. Temporal earthquake observations have executed using translation and rotation sensors, at three places, which have different surface geology. They were Mitsuishi (MUJ), Obihiro (OBI), and Usu volcano (SWZ) in Hokkaido. We demonstrate some seismograms of rotation and translation components. Between maximum amplitudes of rotation (A_r) and translation (A_t), an empirical formula;

$$\text{Log } A_r = p \text{ Log } A_t \quad (1)$$

has been found, and p takes different value for each observing site. We have obtained p value to be 1.39 for MUJ, and 1.29 for OBI, from local earthquakes seismograms. At SWZ, we obtained 0.84 from volcanic swarm type seismograms, which contains some low frequency type.

I. はじめに

回転成分はひずみの3成分である伸縮、回転、振れの内の一つである。通常ひずみ地震計というと伸縮成分のひずみ計を示すことが多いが、これは他の2成分の計測が困難だからでこれら3

成分がそろって初めて完全なひずみ地震計といえる。回転成分に興味を持った地震学者は昔から散見される(萩原幸男, 1958; 渡辺, 1959; 田治米・田, 1965; Nigbor, 1994; 武尾, 1994; Takeo and Ito, 1997; 松林・他, 1996; 森谷・丸茂, 1998; Moriya and Teisseyre, 1999)。強い地震のあとに墓石などが回転していたことや、長大な橋が橋脚から落下していたことなどが目撃されている。このような事実は単に地震動が強いということよりも、それによるひずみが大きかったことを示しているのではないだろうか。近代地震学の発端となった1894年に発生した横浜地震の後に墓石の回転があったことがJohn Millnのスケッチによってわかる(萩原, 1982, Fig.1)。また1970年日高山脈南部地震の際に牧草を発酵させる円筒状のサイロが中ほどで断裂し落下せずに回転したことが報告されている(本谷・北構, 1971)。



Fig. 1. A sketch of rotated tombstone and a lady. This was drawn by J. Milne after strong earthquake, which occurred near Yokohama in 1880 (figure after Hagiwara, 1982).

通常地震計は並進成分のみを記録するが、ひずみ計では狭い空間的な微分を行うので短い距離に置かれた二つのセンサーで観測された量の微小差を計測することになる。この時最も困難な問題として障害になるのは二つの地震計の特性が同じでなければならないということである。地震波によるひずみを観測する場合には必ずしも変位にこだわる必要はなく通常速度計や加速度計でもその性質を理解できると考える。現在、我々が入手できる地震計がどのくらいそろった特性を持っているのか、どのようにすればそれが判るのか、多数の地震計を同じ特性に調整できるか、など難しいが問題ある。また実際の回転成分がどのくらいの絶対値を持つのか興味ある問題である。地震波を並進成分のみならず回転成分をも計測することは色々な種類の地震波動を分離したり、強調することができる可能性がある。森谷・丸茂(1998)は回転成分地震計を試作したが今回はさらに精度を向上させるために改良し観測を行ってきたので、現在までの結果をまとめてみた。

II. 回転成分地震計の設計

回転成分は捩れ成分と似た関係にあり、いま鉛直軸の回転成分を R 、捩れ成分を T とすれば、

$$R=A-B \quad (1)$$

$$T=A+B \quad (2)$$

ここで $A=1/2(\partial u_x/\partial y)$, $B=1/2(\partial u_y/\partial x)$ であってこれらは東西方向および南北方向の空間微分変動量である。 A および B を測定するために二組の特性が同じペアセンサーが必要である。特に位相特性の同一性は重要である。我々はセンサーの振幅と位相特性の同一性を検査する方法を確立し、さらに電子回路で機械的な不一致を軽減させる方法を開発した(森谷・他, 1998)。回転成

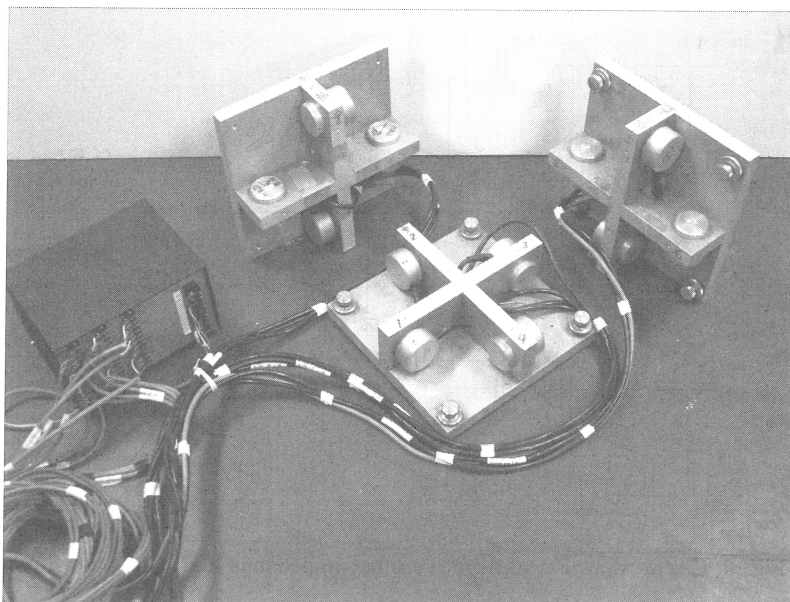


Fig. 2. Photograph of three-axis rotation seismometers.

分 R を得るために4個のセンサーをリング状に配置し、その間隔は約22 cmとした(Fig. 2)。したがって捩れ成分がもし測定可能な大ききがあれば固定しているアルミニウムの剛性率を介して測定されることになる。付加した電子回路には5秒にピークを持つバンドパスフィルターが付けてあるので固有周期は5秒に変換され、やや長周期の微動や地震波も観測可能になるようにした。

III. 地震センサーの選別とイコライザー回路

回転振動センサーとして入手できるセンサーにはジャイロセンサー(井上, 1992; Henkel, 1993)やレーザージャイロがある。これらは航空機や自動車の姿勢制御やナビゲーション用などで感度は低く、また7 Hz以上は感度がさらに低下するので通常地震観測には向いていないが強震動観測(Nigbor, 1994)やキャリブレーションには使える。

現在我々が容易に入手できる地震センサーはL22D(Mark Products Co., Ltd)である。これを多数集めて微動スペクトルを比較しながらほぼ同一特性のセンサーを2個探し出して一組とする。さらにこのようにしてできた複数のペアから同様の検査をおこない、同じ特性のペアを探して2組のペアを選び出す。これらを負入力インピーダンス増幅器(桜井・霜田, 1984)とバンドパスフィルター($f_0=0.2$ Hz)へ接続して過制振・積分法(森谷・他, 1998)を施し、電子回路常数のみが全体の特性を決めるような処理をすることによって、ほとんど同じ特性の地震センサーとなった。Fig. 3はここで用いた電子回路図である。このようにしてできた回転成分地震計は空間的な微分が高精度で行われる。森谷・丸茂(1998)では負入力回路およびバンドパスフィルターを付加していなかったため精度が低いと思われる。Fig. 4は並進成分の実験室における微動記録と

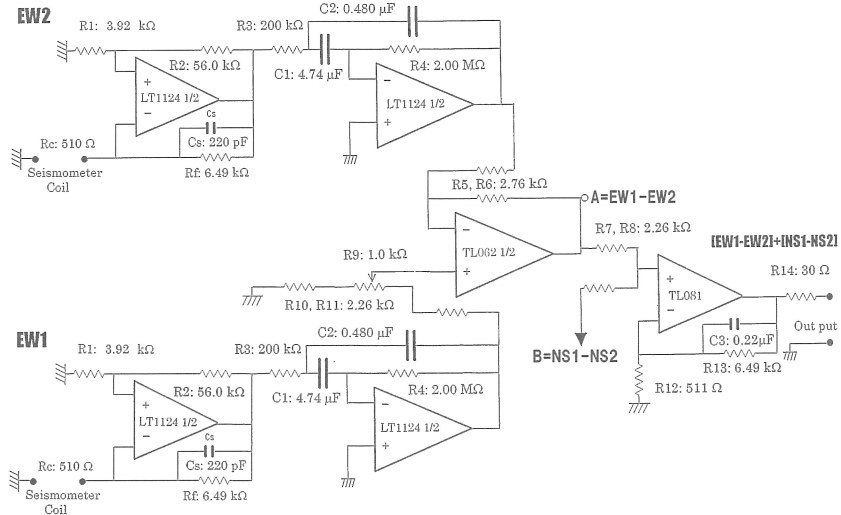


Fig. 3. Circuit diagram of negative input impedance and band-pass filter.

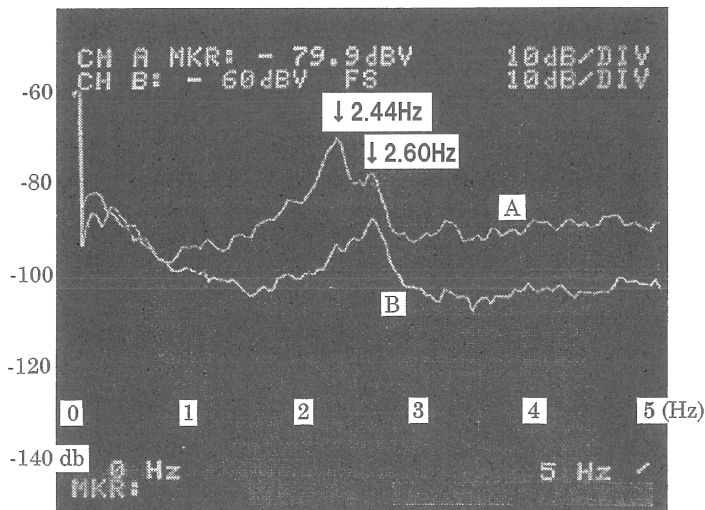


Fig. 4. Spectra of microtremor observed by single EW translation (A) and subtraction (B, amplified 22 db) components by two EW sensors set apart 22 cm.

ペアによる並進成分の打ち消し状態をスペクトラムアナライザーで見たところである。並進成分のスペクトルには 2.44 Hz と 2.60 Hz にピークがあるが前者は建物の並進成分の共振で後者は回転成分の共振であることがわかる。キャリブレーションは森谷・丸茂(1998)と同じ方法で行った。我々の回転成分地震計はジャイロセンサーに比べて 4 Hz で 89.1 db 大きく 300 mV/deg./sec.となった (Fig. 5)。2 台の回転成分地震計による実験室での微動を観測し建物の震動をスペクトラムアナライザーで見ると (Fig. 6), ほとんど同一のスペクトルが得られており信頼性が高いことがわかる。多数の L 22 D から選別して結局完成したのは垂直軸 3 台と水平軸 2 台である。

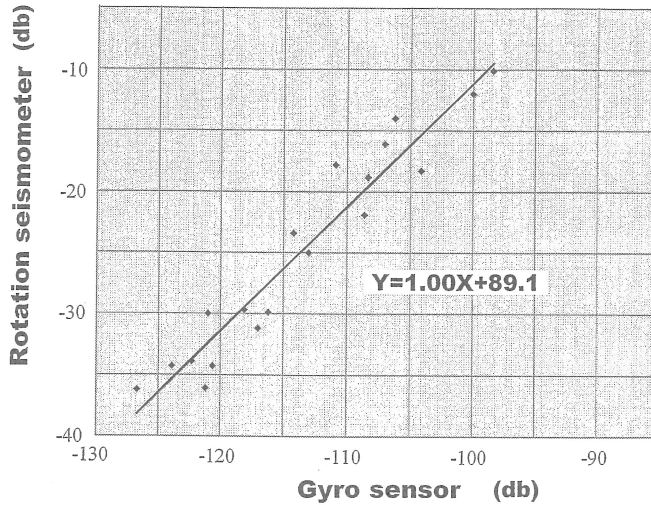


Fig. 5. Calibration of the rotation seismometer by comparison with gyro-sensor.

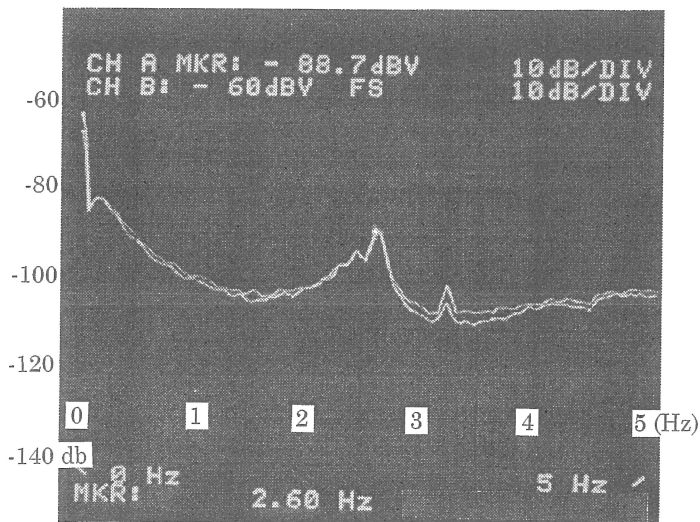


Fig. 6. A comparison of spectra of microtremor observed by two rotation seismometers, showing two instruments have almost the same characteristics. A peak of 2.60 Hz is a rotation resonance frequency of the building.

IV. 北海道内3ヶ所で観測された回転成分と並進成分との関係

改良した回転成分地震計を使って地表の地質が異なる北海道内の日高支庁三石(MUJ), 十勝支庁帯広畜産大学(OBI)および有珠火山山麓(SWZ)の3ヶ所で実際に地震観測を行って性能を確かめた。MUJは日高山脈の西部にあり地殻構造が非常に複雑な場所である(例えばMoriya et al., 1998; Iwasaki et al., 2004)。OBIは厚い堆積層に覆われている十勝平野中央部に位置する(例

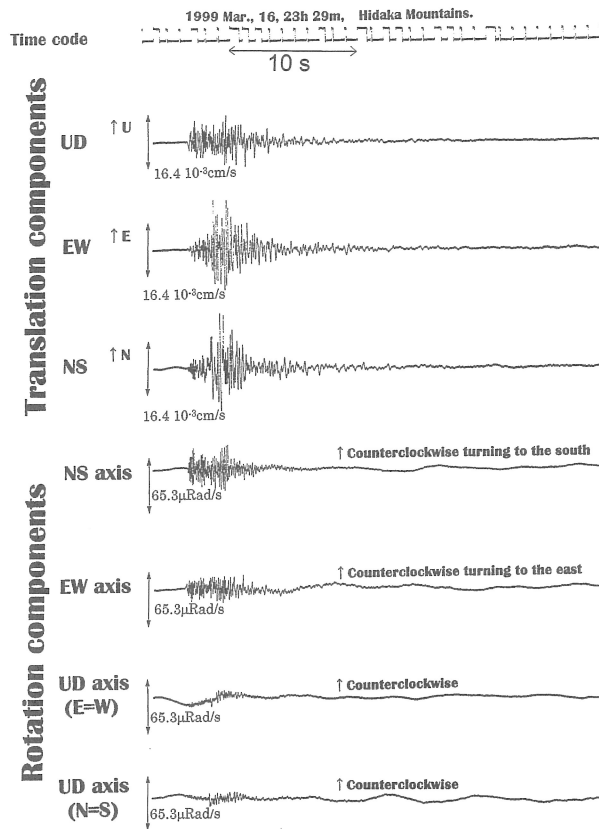


Fig. 7a. Seismograms of earthquake, which occurred in southern Hokkaido, observed by three translation and rotation components seismometers at MUJ.

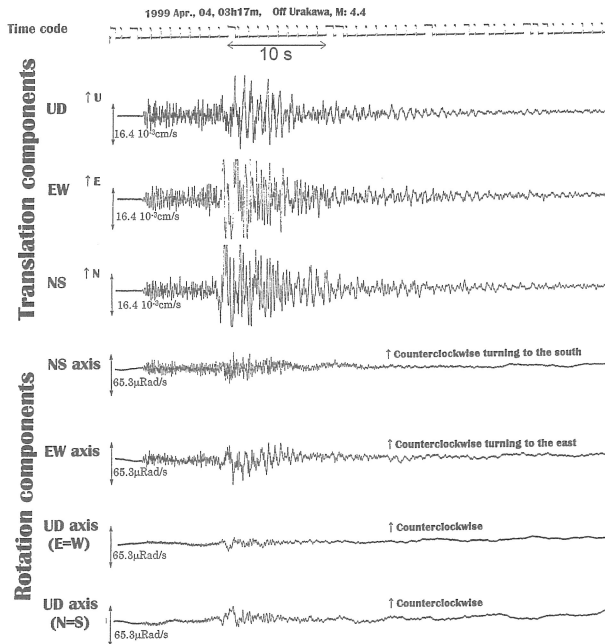


Fig. 7b. Same as Fig. 7a., but for earthquake, which occurred in the south off Hokkaido.

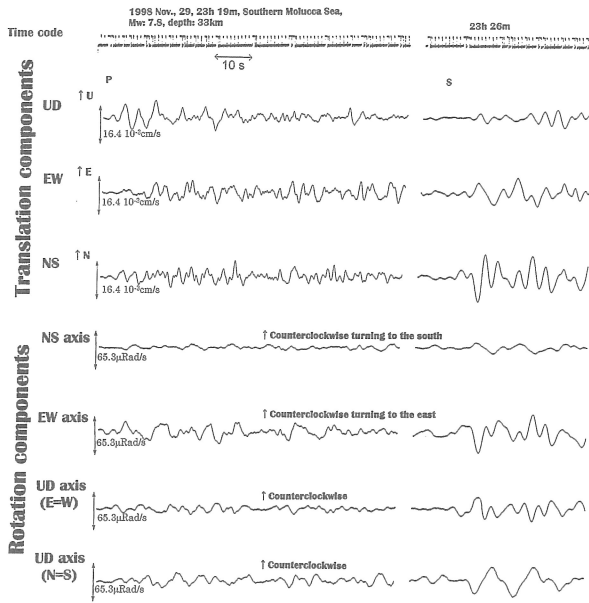


Fig. 7c. Same as Fig. 7a., but for earthquake, which occurred in the Molucca sea.

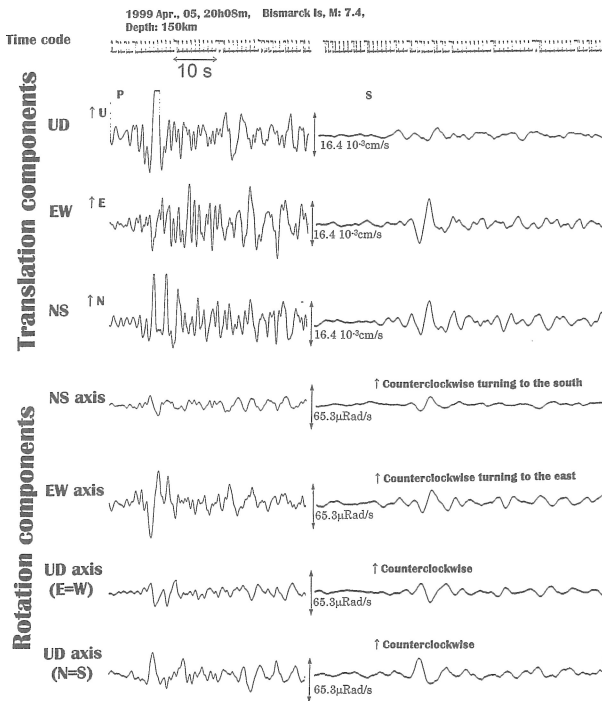


Fig. 7d. Same as Fig. 7a., but for earthquake, which occurred in the Bismarck Is.

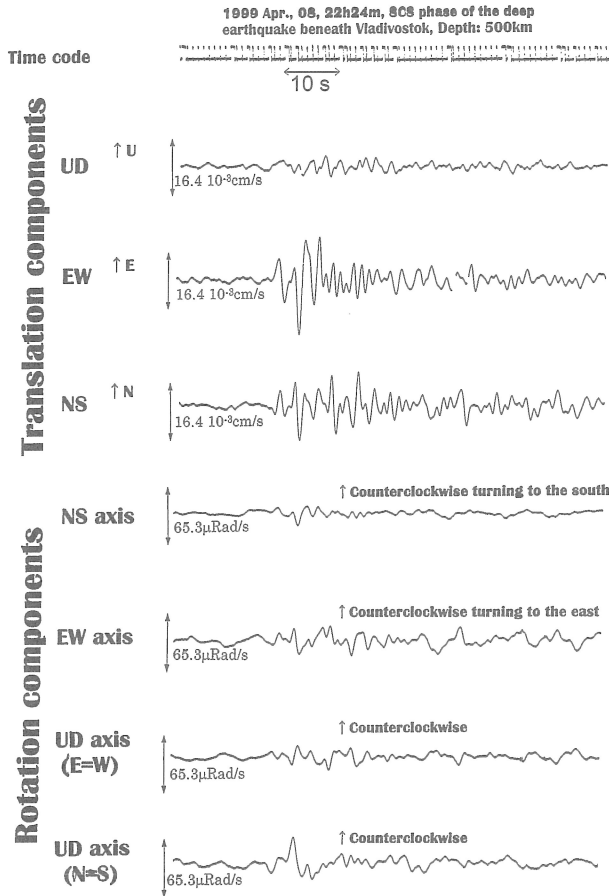


Fig. 7e. Same as Fig. 7a., but for SCS phase of deep earthquake, which occurred beneath Vladivostok.

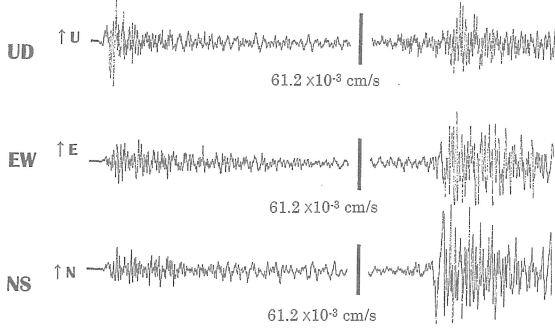
例えば松島・岡田, 1989). また SWZ は有珠火山と昭和新山の噴出物で覆われた山麓にある。Fig. 7a および Fig. 7b は MUJ で観測された、日高山脈南部の地震(M 3.8)と浦河沖の地震(M 4.4)の記象である。Fig. 7c, Fig. 7d および Fig. 7e はおなじ MUJ で観測されたモルッカ海の地震、ビスマルク諸島の地震、およびウラジオストックの深発地震の SCS 波の記象である。この観測点では並進 3 成分と 3 軸の回転成分の地震計を使用した。垂直軸の回転成分は 2 個の東西成分の差と 2 個の南北成分の差を差し引いて得られるが、差し引く前の 2 成分(II の A と B に相当し、Fig. 3 の A と B から信号を取り出す)を独立に記録した。これは両者の和が振れ成分となるため、両者の波形が同じで位相が逆転していれば振れ成分はほとんどないがそうでなければ振れ成分の存在が示唆されることになるからである。少なくとも四つの記録から見限りでは振れ成分は観測されていると考えられる。MUJ の観測例に示したように P 波 S 波共に回転成分は十分な振幅で観測されていることがわかった。Fig. 8 の記象は OBI で観測された千島の地震である。Fig. 9 a は SWZ で観測された 2000 年有珠火山の活動による群発地震の記象である。Fig. 9 b は同じく群発地震中に見られた低周波地震の記象である。Fig. 8 a で示される通常の火山性地震よりも回転成分の振幅は小さいようである。歪は振幅が同じならば地震波の波長が長いほど少ないので長周期

OBIHIRO

Jan. 03, 22h 12m, 2000y.



Translation components



Rotation components

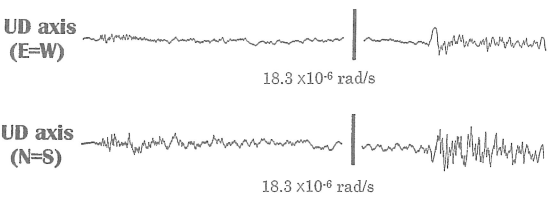


Fig. 8. Same as Fig. 7a., but for earthquake, which occurred in the Kurile islands, observed at OBI.

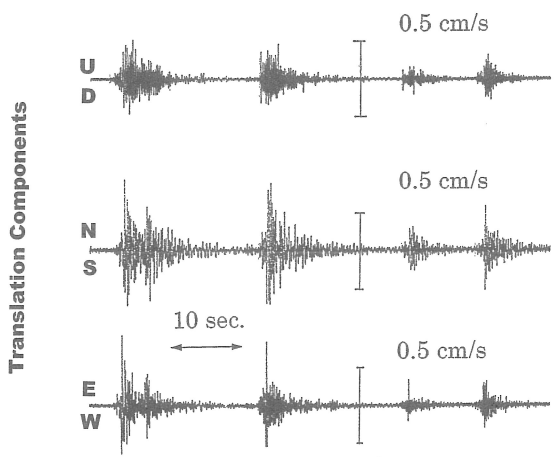


Fig. 9a. Same as Fig. 7a., but for normal type of volcano swarm earthquakes, which occurred beneath Usu volcano, observed at SWZ.

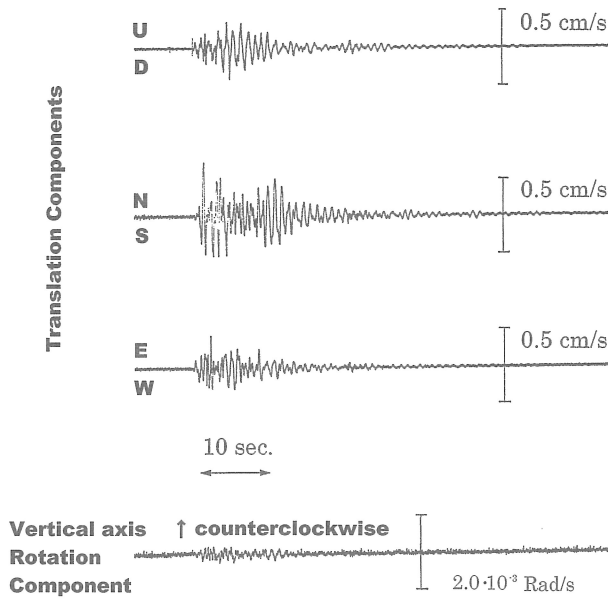


Fig. 9b. Same as Fig. 9a,, but for low-frequency type of volcano earthquake.

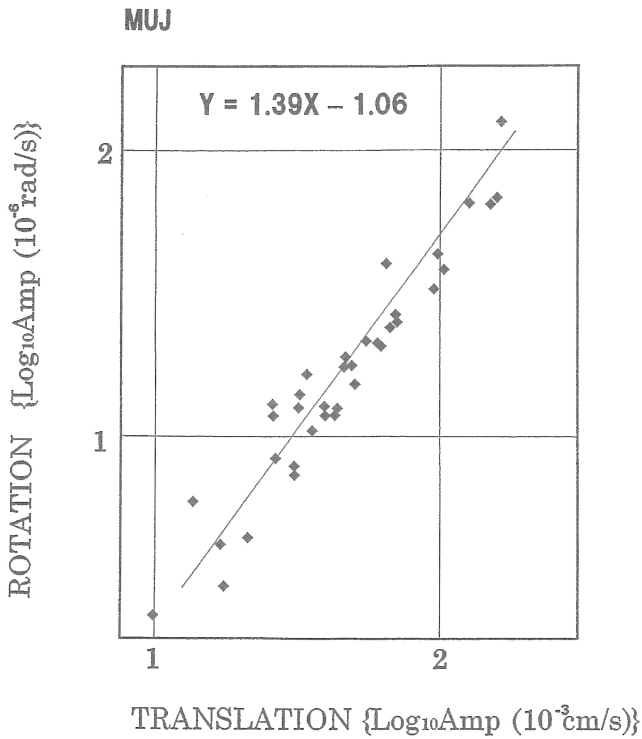


Fig. 10a. Plots of maximum amplitudes of vertical axis rotation component against averaged horizontal translation components of seismograms observed at MUJ.

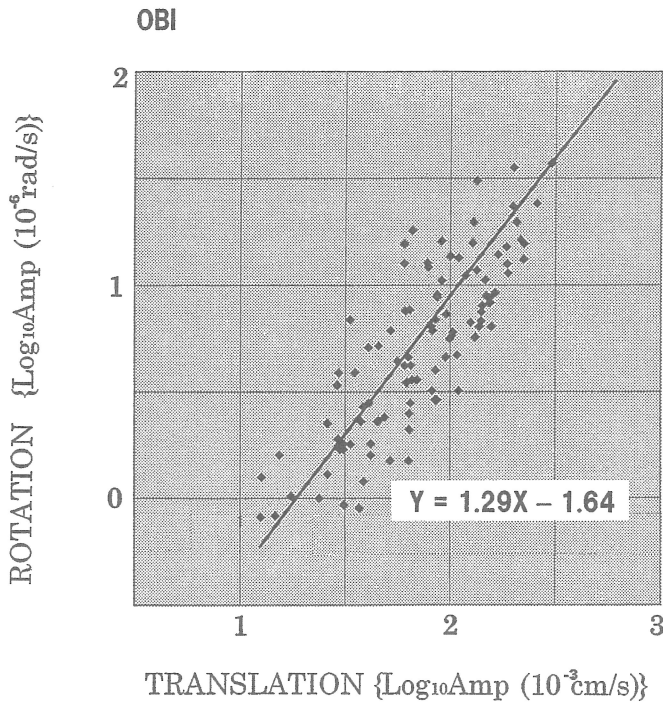


Fig. 10b. Same as Fig. 10a., but for seismograms observed at OBI.

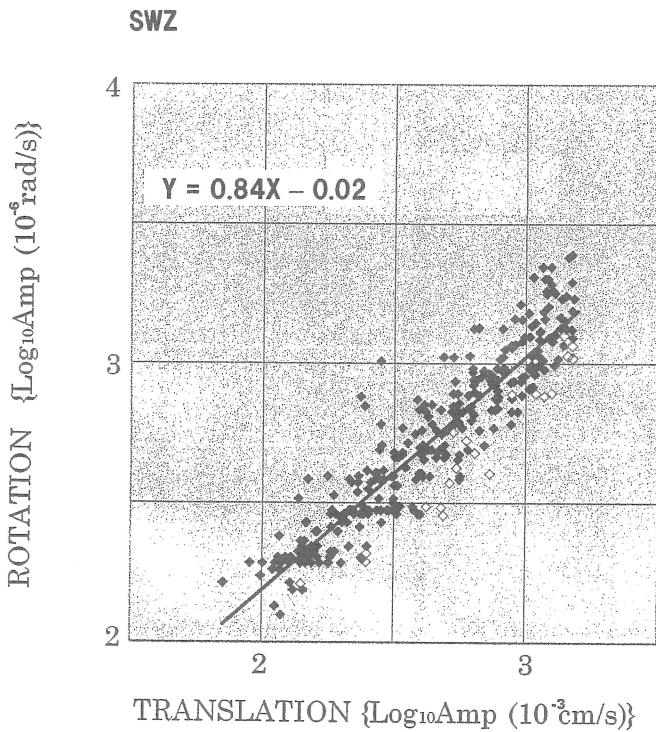


Fig. 10c. Same as Fig. 10a., but for seismograms observed at SWZ. Open squares denote normal type of earthquakes, and closed squares denote low frequency type of earthquakes.

の波動では回転成分の振幅は短周期の地震波よりも小さくなる。大振幅の表面波を持つ地震は観測期間中では観測されなかった。我々が期待したのは歪が大きくなると予想される波長の短い高次の表面波であったが観測されていなかった。次に各観測点で観測された並進成分と回転成分の最大振幅を比較してみる。最大振幅はすべてS波部分であった。Fig. 10 a, 10 b, 10 cには観測された地震の最大振幅がプロットされている。並進成分が $20 \cdot 10^{-8} \text{cm/s}$ のときの回転成分の振幅を3ヶ所で比べると、MUJでは $3 \cdot 10^{-6} \text{rad/s}$ 、OBIでは $1.5 \cdot 10^{-6} \text{rad/s}$ 、SWZでは $30 \cdot 10^{-6} \text{rad/s}$ となった。もしも並進成分の最大振幅 A_t と回転成分の最大振幅 A_r との間に、

$$\text{Log } A_r = p \text{ Log } A_t$$

という関係が成り立つとすれば、 p の値は観測点毎に独立の値が得られることがわかる。MUJでは1.39、OBIでは1.29、SWZでは0.84がそれぞれ得られた。 p が1より大きいことは、より強い地震動が発生した時に回転成分が並進成分よりも増加の割合が大きいことを意味している。震度が6ないし7の強震動時では実際に墓石などの回転が観察されるのでこのような場所では p は大きいのではないかと想像される。SWZでは p が1より小さいが、回転成分の並進成分に対する絶対値は他の2点よりも大きい。これは震源距離が数kmの微小地震であるためであるかもしれない。他の2ヶ所と直接比較はできないかもしれない。

V. 結 論

回転成分地震計を改良し、以前開発した物よりもより信頼性の高い地震動測定機器となった。地震観測の結果では、回転成分の絶対値が観測できた。地震波の伝播中に振幅の変動が大きい場所、例えばMUJのように平野部から山岳地へと構造が急変する場所では歪が増大するはずであって p の値は1.39となったが、OBIのような平野部でも大きな値であった。このことはきわめて局所的な構造が強く影響しているのかもしれない。いずれにせよ地震動が発生している時の歪の大きさは測定可能であること、将来はジャイロセンサーなどと組み合わせた強震計として発展させることが可能であろう。また別の歪成分である捩れ成分も観測できる可能性もあることがわかった。

謝辞 帯広における観測では帯広畜産大学の敷地内を使用させていただいた。昭和新山博物館には昭和新山における観測の際に観測場所をお借りした。当時院生だった松原わかなさん（現在アジア航測株式会社勤務）にはデータの整理を手伝っていただいた。

文 献

- 萩原幸男, 1958. 回転動地震計の試作, 地震II, 11, 141-144.
 萩原尊禮, 1982. 地震学百年, 東京大学出版会, pp. 233.
 Henkel, S, L, 1993. Gyro-on-a-chip acts as Colioli's 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.
- Iwasaki, T., K. Adachi, T. Moriya, H. Miyamachi, T. Matsushima, K. Miyashita, T. Takeda, T. Taira, T. Yamada and K. Ohtake, 2004. Upper and middle crustal deformation of arc-arc collision across Hokkaido, Japan, inferred from seismic refraction/wide-angle reflection experiments, *Tectonophysics*, 388, 59-73.
- 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 廣, 1989. 長周期微動を用いた地下構造の推定-周波数-波数法による位相速度推定に必要な各種パラメータの検討-, 北海道大学地球物理学研究報告, 52, 1-10.
- Moriya, T., H. Okada, T. Matsushima, S. Asano, T. Yoshii and A. Ikami, 1998. Collision Structure in the Upper Crust beneath the Southwestern Foot of the Hidaka Mountains, Hokkaido, Japan, as Derived from Explosion Seismic Observations, *Tectonophysics*, 290, 181-196.
- 森谷武男・丸茂只直, 1998. 回転成分地震計の試作と感度の検定, 北海道大学地球物理学研究報告, 61, 99-106.
- 森谷武男・岡田 廣・渡 颯群・今 義豪・中野 修, 1998. 地震計の周期を長周期化するための負抵抗シャントによる過制振・積分法の評価, 北海道大学地球物理学研究報告, 61, 107-114.
- Moriya, T., and R. Teisseyre, 1999. Discussion on the recording of seismic rotation waves, *ACTA GEO-PHYSICA POLONICA* Vol. XLVII(67), 4, 2-12.
- 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. Seism. Soc. Am.*, 84, 1665-1669.
- 桜井捷海・霜田光一, 1984. 応用エレクトロニクス, 裳華房, pp. 358.
- 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 稔, 1994. 地震動回転成分の観測とその活用, 地震学会講演予講集1, B08.
- Takeo, M., and H. M. Ito, 1997. What can be learned from rotational motion excited by earthquakes?, *Geophys. J. Int.*, 129, 319-329.
- 渡辺 晃, 1959. 回転歪地震計, 地震II, 12, 162-170.