資料

K-NET 観測点の地震計 方位測定 (2): 大分県

九州大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻*
渡邊 篤志・竹中 博士・藤井雄士郎
科学技術庁防災科学技術研究所**
藤原 広行

Seismograph Orientation at K-NET
Observatories (2): Oita Prefecture

Atsushi WATANABE, Hiroshi TAKENAKA
and Yushiro FUJII
Department of Earth and Planetary Sciences,
Graduate School of Sciences, Kyushu
University, Hakozaki 6-10-1,
Fukuoka 812-8581, Japan

Hiroyuki FUJIWARA
National Research Institute for Earth and Disaster
Prevention, Science and Technology Agency,
Tennodai 3-1, Tukuba, Ibaraki
305-0006, Japan
(Received May 17, 2000;
Accepted July 24, 2000)

§1. はじめに

1995年兵庫県南部地震後、科学技術庁防災科学技術研究所は、全国に約25 km間隔で1000点余の強震観測点を展開した。各観測点には広ダイナミック・レンジの加速度型デジタル強震計(K-NET95)が設置されており、最大で20 m/s²まで記録可能である。K-NET(強震ネット)とは、この全国に展開された観測点と、記録を収集・編集する強震センターを軸とし、強震記録をインターネットで発信するシステムである(<http://www.k-net.bosai.go.jp>)。このように均質かつ良質な強震動波形データが大量に得られるようになり、様々な地震学・地震工学的研究や地域防災システムに利用されてきている。

地震発生直後に、防災機関が初動体制を整えるうえで

役立つ計測震度の計算には、3成分のベクトル合成が用いられる(例えば、気象庁, 1996)。このとき地震計の正確な方位情報は必要とされない。一方、震源過程やS波偏角異方性の研究等では地震計の正確な方位情報が必要不可欠である。K-NETデータのように均質かつ良質な波形データを十分に活用するためには地震計の正確な方位を知ることは重要である。そこで、我々はK-NET観測点に設置してある強震計の方位を正確に測定することを試みてきた。1999年7月13日~15日、我々は鹿児島県西部の12点(KGS001~KGS012)を測定した(竹中・他, 1999)。その結果、KGS006(横川)とKGS009(国分)では15°を超える設置方位のずれが明らかになった。この2観測点については、我々の測定結果とともに、それぞれ1999年10月22日と10月20日に地震計自身の方位が修正されている。ただし、この修正日以前のデータについては修正は施されていない。

今回、我々は、新たに大分県の観測点 OIT001~OIT016(設置位置市町村は順に、国見、中津、豊後高田、国東、耶馬溪、院内、杵築、天瀬、湯布院、大分、佐賀関、直入、犬飼、津久見、竹田、佐伯)の16点(Fig. 1 参照)を測定した。本論文では、今回の測定結果

Fig. 1. Map showing locations of K-NET stations (solid triangles) in Oita prefecture where instrument orientation was measured. Solid stars indicate epicenters of events occurring in the Nanyo region (April 3, 1997) and the sea of Suo (January 17, 2000). The epicenters were determined by the Japan Meteorological Agency. The inset shows a study region in relation to Kyushu Island, Japan.

* 〒812-8581 福岡市東区箱崎 6-10-1

** 〒305-0006 茨城県つくば市天王台 3-1

Fig. 2. Test results for checking the measurement accuracy. Horizontal axis shows time (second) from beginning of the measurement. Vertical axis shows measurement value (degree). Dotted line indicates the mean of the measurement values.

について報告する。今回測定した観測点は、周防灘や伊予灘、豊後水道に近く、ここで起きる地震の研究にはこれらの K-NET 観測点の記録は非常に有効だと考えられる。今回我々が測定した地震計の方位の値はこれらの記録を解析するうえで非常に重要な情報と考えられるので、本論文で報告する次第である。なお、今回の大分県での測定に基づき、以下の3点では既に地震計の方位が修正されている。OIT003 (豊後高田, 修正日: 1999 年 12 月 10 日), OIT004 (国東, 修正日: 1999 年 12 月 10 日), OIT007 (杵築, 修正日: 1999 年 12 月 10 日)。ただし、地震計の方位修正以前のデータは未修正のままである。

§2. 測定方法

方位の測定には日本航空電子株式会社製「FOG コンパス・探北ユニット JM7711」を用いた。この測器はファイバ・オプティック・ジャイロ (FOG) を用いて、地球自転を利用することにより真方位を計測する装置である。測器のマニュアルによると、この方位の値は測定開始 10 分後から 10 秒ごとに出力される。センサーの方位測定精度は、測定開始から 30 分経過した場合では 0.2° であるが、10 分程度の探北時間でも 1° 程度の精度を有している。今回の測定では時間的な制約から測定時間を 10~15 分程度と比較的短くとらざるをえなかった。そこで、これが実際に測定結果にどの程度影響を与えるか調べるために、測定期間中に約 40 分間の試験測定を行った。その結果を Fig. 2 に示す。横軸は測定開始からの時間 (秒)、縦軸は測定値である。

実際の現場測定では地震計の方位矢印と方位測器の方

Table 1. Measured instrument orientation.

Station	Measured orientation
OIT001 (Kunimi)	N355.7°E
OIT002 (Nakatsu)	N 5.3°E
OIT003 (Bungotakada)	N190.8°E
OIT004 (Kunisaki)	N199.1°E
OIT005 (Yabakei)	N 11.5°E
OIT006 (Innai)	N355.0°E
OIT007 (Kitsuki)	N315.1°E
OIT008 (Amagase)	N355.0°E
OIT009 (Yufuin)	N335.2°E
OIT010 (Oita)	N337.3°E
OIT011 (Saganoseki)	N349.3°E
OIT012 (Naoiri)	N 6.8°E
OIT013 (Inukai)	N 10.7°E
OIT014 (Tsukumi)	N 17.2°E
OIT015 (Takeda)	N358.5°E
OIT016 (Saiki)	N359.6°E

Fig. 3. Map showing location of stations and epicenter of an event occurring in the Nanyo region of Ehime prefecture on April 3, 1997. The focal mechanism determined by the National Research Institute for Earth and Disaster Prevention (NIED) is also shown. Solid triangles indicate the stations where compressional P-wave first arrivals are expected from the focal mechanism. Open triangles indicate the stations where dilatational P-wave first arrivals are expected from the focal mechanism.

位矢印が平行になるように測器を設置する際の誤差も存在する。これは測定の都度最少に抑えるように努力したが、誤差は $\pm 1^\circ$ 程度だと考えられる。したがって、測定誤差は全体として $\pm 2^\circ$ 以内だと考えられる。これは、地震波形の解析には十分な精度である。

Fig. 4. Horizontal projection of P-wave particle motion (velocity) made correction of instrument misorientation (solid curves) for the event occurring in Nanyo region, in comparison with that without the correction (dotted curves). Duration of particle motion plotted in each figure is 0.25 s from the arrival time of P-wave at each station. Arrow in each figure indicates the radial direction at each station, which points to the station from the epicenter. The scale for the particle velocity is indicated by the scale bar at the right corner of each figure. The length of the arrow is twice of that of the scale bar. Time shown at the head of each panel is the beginning time of the record file at each station, from which *start time* (P-wave onset time) is measured.

§3. 測定結果

測定は1999年12月3日～5日に渡邊、藤井、竹中、藤原が実施した。Table 1に測定結果を示す。測器からの出力は少数第2位まで出力されるが、上記の誤差の程度を考慮して、少数第2位を四捨五入し、少数第1位まで示した。これをみると、OIT003(豊後高田)とOIT004(国東)では地震計の南北がほぼ逆転している。また、OIT007(杵築)では約45°, OIT009(湯布院)では約25°, OIT010(大分)では約23°も地震計の方位が真北からずれており、OIT004(耶馬溪), OIT011(佐賀関), OIT013(犬飼), OIT017(津久見)においても地震計の方位が真北から10°以上ずれている。その他の観測点では真北からのずれは10°未満である。地震計の方位のずれが、今回の測定誤差の範囲内におさまっている観測点もある(OIT015(竹田), OIT016(佐伯))。研究テーマにもよるが、±5°程度の方位誤差であれば、よほど近傍で起きた地震の波形を解析するのではない限り、は

とんど問題にならないであろう。しかし、測定した観測点の半数以上ではこれを上回る方位誤差があり、解析する前に補正を施す必要があるかもしれない。

§4. 議論

各観測点の測定方位の値を検討するために、1997年4月3日に愛媛県南予地方で発生した M_{JMA} 5.0の地震と2000年1月17日に周防灘で発生した M_{JMA} 4.4の地震(震央をFig.1に示す)における記録の、直達P波の水平粒子軌跡と震央方向との関係を見る。なお、2つの地震のうち前者は第1節で述べた3点の地震計の方位修正以前、後者は方位修正後に発生している。Fig.3は1997年4月3日に愛媛県南予地方で発生した地震(以下、南予地震と呼ぶ)の震央および震源メカニズムと各観測点との位置関係を示し、Fig.4は各観測点の直達P波部分の水平粒子軌跡(速度)である。2000年1月17日に周防灘で発生した地震(以下、周防灘地震と呼

ぶ) ついても同様にそれぞれ Fig. 5 と Fig. 6 に示す。Fig. 3 と Fig. 5 の震源は気象庁の値、震源メカニズムは科学技術庁防災科学技術研究所決定 (<http://argent.geo.bosai.go.jp/freesia/event/hypo/joho-j.html>) のも

Fig. 5. Map showing location of stations and epicenter of an event occurring in the sea of Suo on January 17, 2000. The focal mechanism determined by the NIED is also shown. See the caption of Fig. 3 for notation.

のを採用した。黒三角はメカニズムからP波初動が押し、白三角は引きが予想される観測点である。Fig. 4 と Fig. 6 の点線は、地震計の方位の補正を行う前のNS, EW成分を用いて描いた粒子軌跡(速度)であり、実線は地震計の方位の真北からのずれを補正した場合の粒子軌跡である。ただし、Fig. 6 の OIT003, OIT004, OIT007 については Table 1 の値をもとにすでに地震計の方位を修正してあるので、記録から直接得られる粒子軌跡を実線で示し、比較のために仮に方位が修正されなかった場合に、見かけ上観測される粒子軌跡を点線で示した。図中の丸印が始点、三角印が終点である。速度のスケールは各図の右上に示している。矢印は、震央から各観測点の向き(Radial 方向)を示している。矢印の長さは、速度のスケールのちょうど2倍の長さにとっている。これら粒子軌跡は、加速度記録水平2成分を木下(1986)の方法により積分して速度に変換し、直達P波の立上りから0.25秒間(南予地震)または0.2秒間(周防灘地震)の波形を用いて描いた。

Fig. 4 と Fig. 6 をみると、全体的には粒子軌跡の方向はほぼRadial 方向に向いているものが多いが、Radial 方向から稍ずれているものや全く異なる方向を呈しているものもある。このようにP波初動付近の水平粒子軌跡

Fig. 6. Horizontal projection of P-wave particle motion (velocity) for the event occurring in the sea of Suo. See the caption of Fig. 4 for notation.

Fig. 7. Comparison between the waveforms with correction (solid lines) and without correction (gray lines) of instrument misorientation at station OIT004. (a) Three-component acceleration records for the event occurring in Nanyo region; (b) three-component velocity waveforms calculated by integration of the acceleration records (a); (c) three-component displacement waveforms obtained by double integration of the acceleration records (a); (d) three-component acceleration records for the event occurring in the sea of Suo; (e) three-component velocity waveforms calculated by integration of the acceleration records (d); (f) three-component displacement waveforms obtained by double integration of the acceleration records (d). Date and time shown at the head of each panel is the beginning time of the record file of each station, from which the time axis of each trace is measured.

がRadial方向からずれる（または全く異なる）主な原因としては、次の3つが考えられる（竹中・他, 1999）。

[1] 波線経路（パス）または観測点直下において速度構造が水平方向に不均質で、その程度が大きな場合

[2] 観測点が地震の断層面の走行方向にある（P波の節面上に位置する）場合

[3] 観測点が震央に非常に近い場合

[1] の場合には、波線が水平方向にも曲がってしまうために、波線に平行に振動するP波の水平粒子軌跡はRadial方向からずれてしまう。また、[2] の場合には、震源からその観測点の方向にはP波がほとんど励起さ

れない。したがって、その観測点の水平動粒子軌跡は直達P波そのものよりも観測点直下で生じた変換波の寄与がほとんどである可能性が高い。また、このとき初動付近の振幅は小さいので、ノイズの影響を強く受けている可能性もある。最後の[3] の場合には、震源決定の誤差が震源から見た観測点の方位角（すなわちRadial方向）の推定値に及ぼす影響が非常に大きいためである。観測点が震央に近いほど、推定されたRadial方向（角度）の誤差は大きくなる。

[1]～[3] の原因は単独の場合も複数同時に考えられる場合もある。

Fig. 8. Comparison between the waveforms with correction (solid lines) and without correction (gray lines) of instrument misorientation at station OIT007. See the caption of Fig. 7 for (a) to (f).

以上を念頭に置いて、観測点毎にその粒子軌跡について考察をまとめた。

OIT001 (国見): 南予地震, 周防灘地震とも水平粒子軌跡は Radial 方向と一致している。

OIT002 (中津): 南予地震では水平粒子軌跡は Radial 方向と一致している。周防灘地震は記録されていたが, 波形の乱れが著しく直達 P 波の初動が不明瞭なため, 粒子軌跡を掲載していない。

OIT003 (豊後高田): 南予地震は記録されていたが, 波形の乱れが著しく直達 P 波の初動が不明瞭なため, 粒子軌跡を掲載していない。地震計の方位修正後に発生した周防灘地震では水平粒子軌跡は Radial 方向と一致している。

OIT004 (国東): 南予地震では水平粒子軌跡は Radial 方向と一致している。しかし, 周防灘地震では, 地震計の方位を修正した後であるが, 水平粒子軌跡は Radial 方向から若干ずれている。その原因として, 観測点が周防灘地震の P 波節面の近くに位置している

ので, [2] の可能性が最も大きい。

OIT005 (耶馬溪): 南予地震では水平粒子軌跡は Radial 方向から大きくずれている。周防灘地震では水平粒子軌跡は Radial 方向から若干ずれている。その理由として, 南予地震については [1], 周防灘地震については [1] と [2] が考えられる。

OIT006 (院内): 南予地震は記録されていない。周防灘地震では水平粒子軌跡は Radial 方向と一致している。

OIT007 (杵築): 南予地震, 周防灘地震ともに水平粒子軌跡は Radial 方向から若干ずれている。その原因としては [1] が考えられる。

OIT008 (天瀬): 南予地震, 周防灘地震とも記録されていない。

OIT009 (湯布院): 南予地震, 周防灘地震とも水平粒子軌跡は Radial 方向から大きくずれている。その原因としては [1] が考えられる。

OIT010 (大分): 南予地震は波形の乱れが著しく直達 P

Fig. 9. Comparison between the waveforms with correction (solid lines) and without correction (gray lines) of instrument misorientation at station OIT011. See the caption of Fig. 7 for (a) to (f).

波の初動が不明瞭なため、粒子軌跡を掲載していない。周防灘地震は記録されていない。

OIT011 (佐賀関): 南予地震では水平粒子軌跡はRadial方向と一致している。周防灘地震では水平粒子軌跡はRadial方向からずれている。その原因としては[1]が考えられる。

OIT012 (直入): 南予地震では水平粒子軌跡はRadial方向と一致している。周防灘地震は記録されていない。

OIT013 (院内): 南予地震、周防灘地震とも水平粒子軌跡はRadial方向からずれている。その原因としては[1]が考えられる。

OIT014 (津久見): OIT012 (直入) と同様。

OIT015 (竹田): OIT012 (直入) と同様。

OIT016 (佐伯): OIT010 (大分) と同様。

次に、地震計の方位のずれによる波形全体への影響をみるため、地震計がほぼ南北反転していた OIT003 (豊後高田) と西に 44.9° ずれていた OIT007 (杵築) および

西に 10.7° ずれていた OIT011 (佐賀関) での南予地震、周防灘地震の各種波形を Figs. 7~9 に示す。各図の (a), (b), (c) は南予地方の地震の加速度記録、速度波形、変位波形で、(d), (e), (f) は周防灘の地震の加速度記録、速度波形、変位波形である。それぞれ方位補正前の波形をグレー線、補正後の波形を黒の実線で描いてある。ただし、周防灘地震の場合、OIT003 と OIT007 は実線が原記録、点線が仮に地震計の方位修正がなされなかった場合に観測されるであろう波形である。Fig. 7, Fig. 8 をみると、補正の前後で波形全体が大きく変わってしまっている。Fig. 9 では各成分の振幅が若干変化する程度であるが、この差が大きい小さいかという判断は、当然のことながら解析目的や解析手法によって異なる。大事なことは、地震計の南北が逆ということは極めてまれだとしても、記録されたデータにはこのような地震計方位の誤差が含まれている可能性があることを認識して解析を行うことである。

§ 5. 結 論

ファイバ・オプティック・ジャイロを用いて大分県の K-NET 観測点 OIT001~016 (国見, 中津, 豊後高田, 国東, 耶馬溪, 院内, 杵築, 天瀬, 湯布院, 大分, 佐賀関, 直入, 犬飼, 津久見, 佐伯) の地震計の方位を測定した。OIT003 (豊後高田) と OIT004 (国東) では地震計の方位がほぼ逆転していた。OIT005 (耶馬溪), OIT007 (杵築), OIT009 (湯布院), OIT010 (大分), OIT011 (佐賀関), OIT013 (犬飼), OIT014 (津久見) では地震計の方位が真北から 10° 以上ずれていたが, その他の観測点では真北からのずれは 10° 未満であった。

謝 辞

方位測器「FOG コンパス・探北ユニット JM7711」は九州大学島原地震火山観測所のものを使用させていた

だきました。使用に際し, 九州大学島原地震火山観測所の松島 健博士には便宜を図っていただきました。査読者からのコメントは原稿を改善するうえで, たいへん役に立ちました。ここに記して感謝いたします。

文 献

- 木下繁夫, 1986, 格子型フィルターの地震観測への応用, 地震 2, **39**, 1-14.
- 木下繁夫・上原正義・斗沢敏雄・和田安司・小久江洋輔, 1997, K-NET95 型強震計の記録特性, 地震 2, **49**, 467-481.
- 気象庁 (監修), 1996, 震度を知る: 基礎知識とその活用, 238 pp., ぎょうせい, 東京.
- 竹中博士・渡邊篤志・藤原広行・藤井雄士郎・永野一, 1999, K-NET 観測点の地震計方位測定 (1): 鹿児島県西部, 九州大学理学部研究報告地球惑星科学, **20**, 89-98.