



Title	北海道内のKik-net観測点における地表地震計の設置方位の推定
Author(s)	前田, 宜浩; 笹谷, 努; 高井, 伸雄; 清水, 学
Citation	北海道大学地球物理学研究報告, 68, 141-152
Issue Date	2005-03-15
DOI	10.14943/gbhu.68.141
Doc URL	<a href="http://hdl.handle.net/2115/14366">http://hdl.handle.net/2115/14366</a>
Type	bulletin (article)
File Information	68_p141-152.pdf



[Instructions for use](#)

## 北海道内の KiK-net 観測点における地表地震計の設置方位の推定

前田 宜浩・笹谷 努

北海道大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻

高井 伸雄・清水 学

北海道大学大学院工学研究科都市環境工学専攻

(2004年12月24日受理)

### **Azimuth Estimation of KiK-net Surface Seismometers Deployed in Hokkaido, Japan**

Takahiro MAEDA, Tsutomu SASATANI

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

Nobuo TAKAI and Gaku SHIMIZU

Division of Urban Environmental Engineering, Graduate School of Engineering,

Hokkaido University

(Received December 24, 2004)

At the dense strong motion network, KiK-net, not only a surface sensor but also a borehole sensor (at about 100 m depth) are installed. Although the borehole sensor-azimuth has been carefully investigated by National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention (NIED), we estimate the surface sensor-azimuth at KiK-net stations in Hokkaido. First we estimate relative azimuth between surface and borehole sensors by evaluating correlation between surface and borehole long-period waveforms. Next we calculate absolute surface-sensor azimuth taking into account the best fit relative sensor azimuth and the borehole-sensor azimuth. At 100 among total 112 stations, the azimuth errors are less than  $20^\circ$ . However, at 12 stations the azimuth errors are larger than  $20^\circ$ ; one of the stations shows the error of about  $180^\circ$ . Finally we show the effect of the azimuth error on the analysis of S-wave spectral ratios between the surface and borehole records.

### I. はじめに

防災科学技術研究所（以下、防災科研と略す）により日本全国に展開されている基盤強震観測網 (KiK-net) では、深さ 100 m 以深のポアホール底と直上の地表面に設置された加速度型強震計による観測が行われている。イベントトリガー方式で収録された強震記録は、地震発生直後から

防災科研のホームページ上で公開され、広く利用されている。

ボアホール地震計（以下、地中地震計と略す）による観測は地表での観測に比べノイズレベルが低く S/N 比の高いデータが得られるが、その一方で、設置時に地震計の方位の調整が困難なため水平成分に関しては設置方位に誤差が生ずる場合がある。防災科研では、全ての観測点で正確な地震計設置方位が調査されている広帯域地震観測網 (F-net) で記録された遠地地震波形との比較から KiK-net 地中地震計の設置方位を推定し (汐見・他, 2003), 結果をホームページ上で公開している。この情報をもとに地中地震計の方位を補正し、地中と地表の地震波形を比較すれば、長周期成分に関してはほぼ一致した波形になると考えられるが、次に示すように、例外も見られる。

Fig. 2 は、TKCH 07 (豊頃, Fig. 1) で観測された 2003 年 9 月 26 日 6 時 8 分に発生した地震 (マグニチュード 7.1) による加速度波形である。これらの波形をもとに、地震計の設置方位について検討する。まず、設置方位の補正を行う前の水平二成分の地中と地表の加速度波形をそれぞれ比較する (Fig. 2(a)). (NS 1, EW 1) と (NS 2, EW 2) は、それぞれ地中と地表の水平成分で、地震計が正しく設置されている場合にはそれぞれが NS, EW 成分に対応する。(a) の 4 つの波形はいずれも高周波成分が卓越しており、このままでは地中と地表の波形の相関を議論することはできない。防災科研によれば TKCH 07 の地中地震計は北から時計回りに  $4^\circ$  回転して設置されている (Table 2)。そこで、この影響を補正して NS, EW 成分に変換した地中記録と地表記録を比較

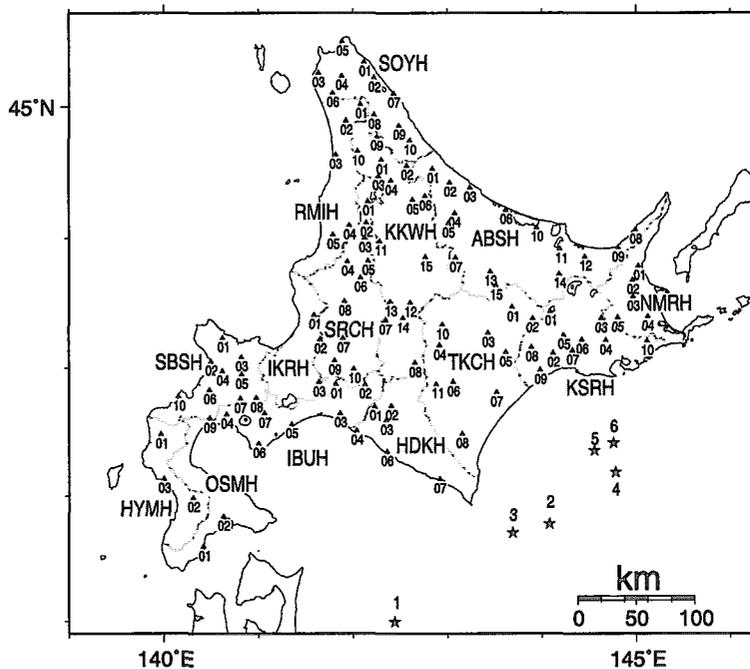
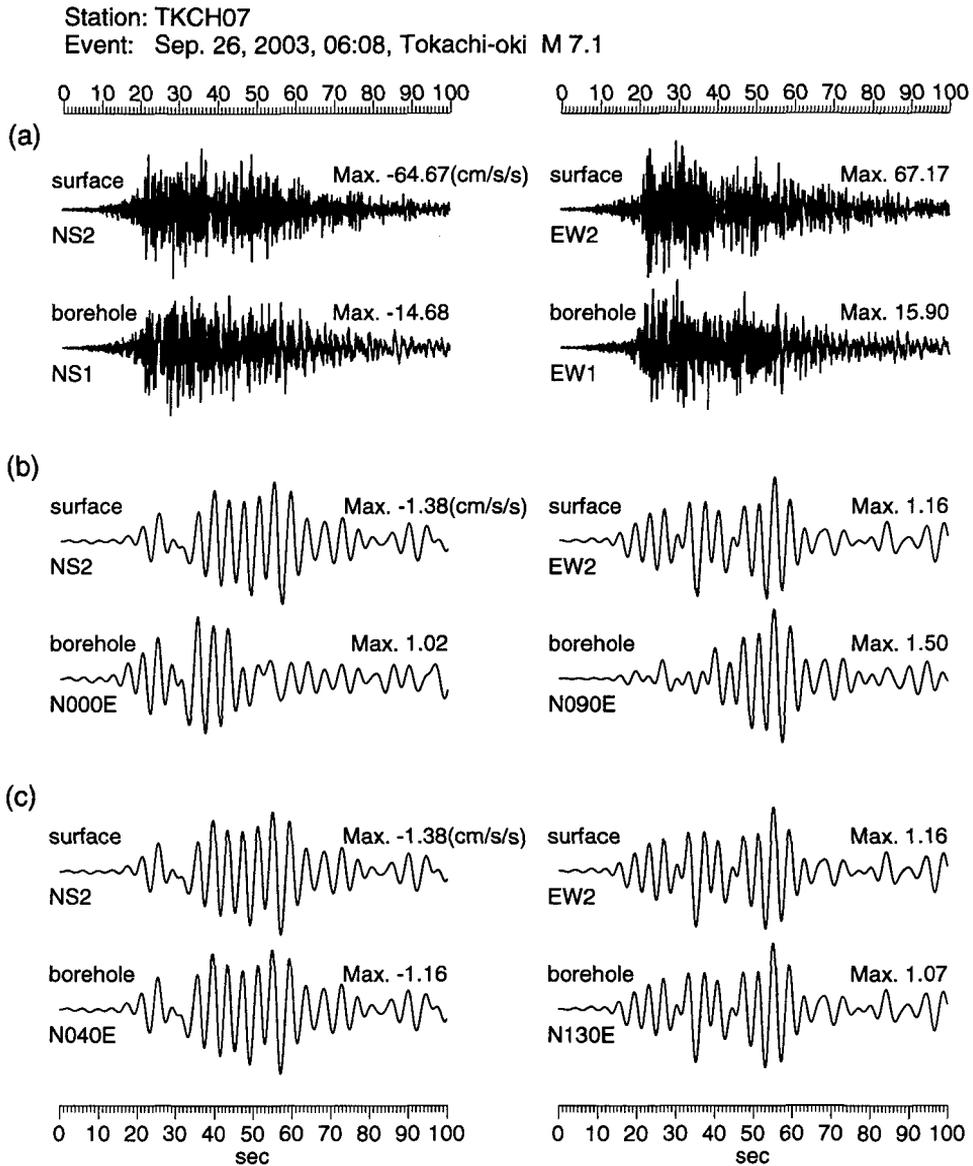


Fig. 1. Location map showing the KiK-net stations (solid triangles) in Hokkaido and epicenters of earthquakes (solid stars) used in estimating the sensor azimuth. The source parameters are given in Table 1. Four capital letters indicate a subprefecture of Hokkaido.



**Fig. 2.** Comparison between acceleration waveforms (horizontal components) obtained by surface and borehole sensors at TKCH07 from the September 26, 2003 (06:08; M7.1) event. (a) Original waveforms. The nominal sensor azimuth perpendicular to each other is given by (NS2, EW2) and (NS1, EW1) for surface and borehole sensors. (b) Band-pass filtered (0.02~0.2Hz) waveforms. The borehole-sensor azimuth is corrected for the known value in Table 2. (c) The same as (b), but the borehole records are rotated by 40°. Note that the correlation between surface and borehole waveforms in (c) is much better than that in (b). It indicates that the surface sensor at TKCH07 rotates clockwise by 40°.

する (Fig. 2(b)). 0.02~0.2 Hz のバンドパスフィルターをかけて長周期成分に注目しているものの、地中と地表の波形の相関は悪い。そこで、地中記録を時計まわりに 40°回転した成分に変換し、(b)と同じ周波数帯域で地表記録と比較する (Fig. 2(c)). 地中記録は 40°回転した成分であるが、地中と地表の波形は(b)の場合よりも明らかに相関が良い。地中地震計の設置深度 (100 m) や速度構造を考慮すると、ここで対象としている周波数帯域では地中と地表の波形はほぼ一致すると考えられることから、防災科研により推定された地中地震計の設置方位が正しいとすると、Fig. 2(c)は TKCH 07 では地表地震計が正確に NS-EW 方向に設置されておらず、時計まわりに約 40°回転していることを示唆している。

加藤・他 (2001), 山添・他 (2002) は、地中と地表の地震動振幅の相関からそれぞれ中国・四国地方と九州地方の KiK-net 観測点の地表地震計に対する地中地震計の設置方位を推定している。その時には防災科研から P 波初動の震動方向から推定された地中地震計の設置方位が公開されており、それらとの比較から地表地震計が真方位からずれて設置されている可能性を指摘している。また、汐見・他 (2003) は、F-net 観測点を基準に推定した地中地震計の設置方位が、加藤・他 (2001) による地表地震計に対する地中地震計の設置方位と大きく異なる地点において、方位磁針により地表地震計の設置方位を計測し、地表地震計が真方位からずれて設置されていることを確認している。そして、そのずれの大きさが加藤・他 (2001) による相対的な設置方位の値と整合することから、地中地震計の設置方位および、地中地震計と地表地震計の設置方位の差から地表地震計の設置方位の概略推定が可能であると指摘している。

本稿では北海道内の KiK-net 観測点 (Fig. 1) を対象として地中地震計と地表地震計の設置方位の差を推定し、防災科研による地中地震計の設置方位を用いて地表地震計の設置方位を求めた結果について報告する。

## II. 方 法

ふたつの地震計で同じ地震を観測した場合、地震計の設置間隔よりも十分に長い波長の地震波を対象とすれば、地震計の設置方位の差と地震波の到達時間差を適切に補正することにより、ほぼ同じ波形が得られると考えられる。いま、地中と地表での水平動記録をそれぞれ  $(x_B, y_B)$ ,  $(x_S, y_S)$  とすると、地震計の設置方位の差 ( $\theta$ : 反時計回りを正) と時間差 ( $\Delta t$ ) を適切に選べば、

$$\begin{pmatrix} x_S(t+\Delta t) \\ y_S(t+\Delta t) \end{pmatrix} \cong \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_B(t) \\ y_B(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_B'(t) \\ y_B'(t) \end{pmatrix}$$

と表される。 $\theta$ は相対的な値であるが、防災科研により推定されている地中地震計の設置方位を基準とすれば、地表地震計の設置方位を推定することができる。 $\Delta t$ と $\theta$ は、 $x_S(t+\Delta t)$ と $x_B'(t)$ ,  $y_S(t+\Delta t)$ と $y_B'(t)$ の相関係数の平均が最大となるようにグリッドサーチにより求める。グリッドサーチは、効率よく推定を行うために三段階で行い、各段階でのパラメータの探索範囲は、

- 1)  $\theta$ :  $\pm 180^\circ$ を 15°間隔,  $\Delta t$ : 0~500 msec を 50 msec 間隔,

- 2) 1) の最適解を中心として,  $\theta: \pm 30^\circ$  を  $5^\circ$  間隔,  $\Delta t \pm 100$  msec を 10 msec 間隔,  
 3) 2) の最適解を中心として,  $\theta: \pm 10^\circ$  を  $1^\circ$  間隔,  $\Delta t: \pm 50$  msec を 5 msec (1 サンプル) 間隔

とした。なお, 地中地震計の上下動成分は正しく鉛直方向に設置されていると仮定する。

### III. データ

震源深さが 50 km 以下で M 6 以上の 6 つのプレート間地震による加速度波形を用いて, 北海道内の全観測点 (112 地点) の地表地震計の設置方位を推定する (Fig. 1, Table 1)。浅い地震では表面波が効果的に励起され, 地中と地表の地震計ではほぼ同位相の相関の良い波形が観測されると考えられる。したがって, 表面波部分を解析区間とするのが理想的ではあるが, データ長の関係もあり本研究では実体波部分も含んだ 60 秒間を解析区間とし, 0.02~0.2 Hz の Butterworth 型のバンドパスフィルター (斎藤, 1972) を施した波形を用いて解析を行った。

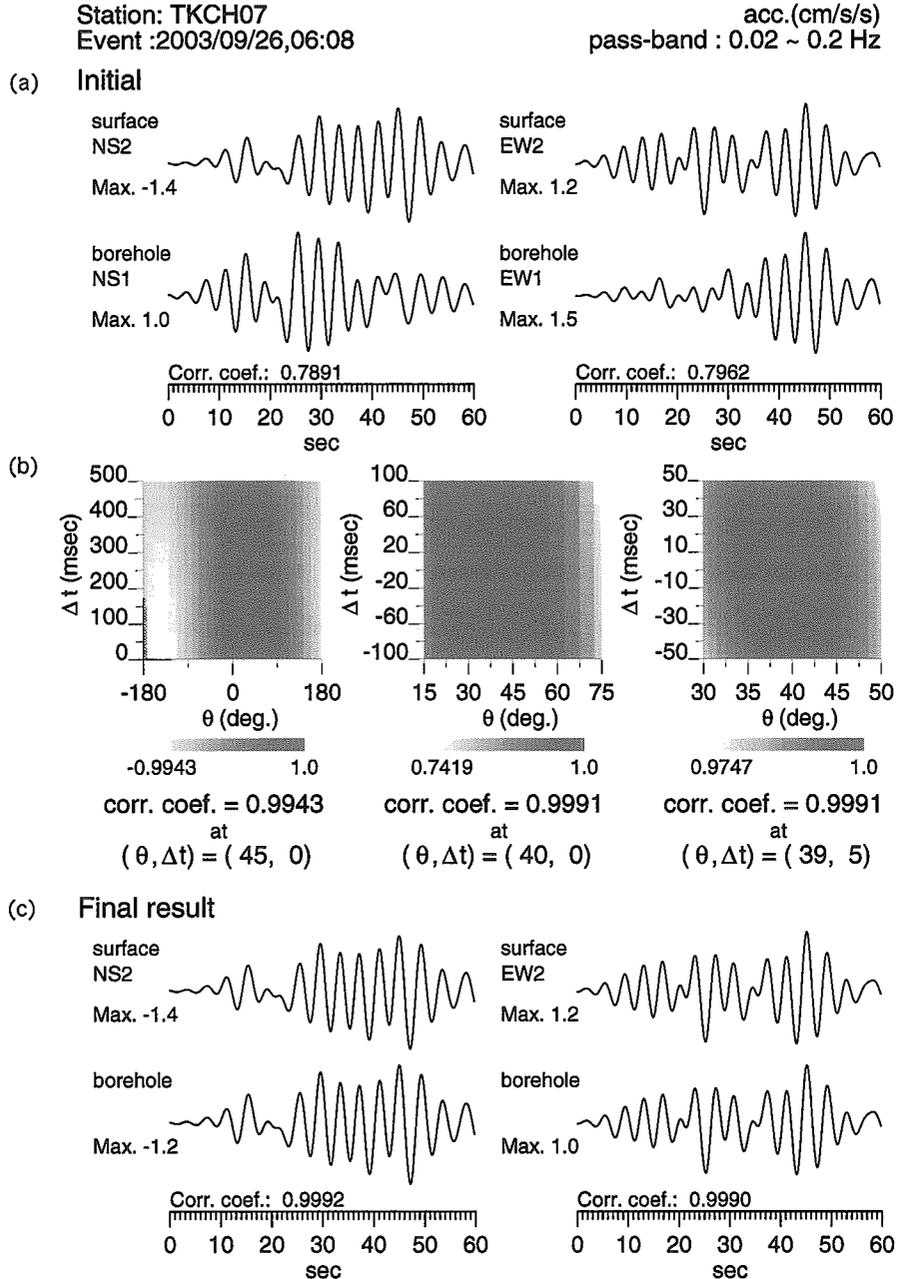
Table 1. Earthquakes used in estimating the sensor azimuth.

No.	origin(JST)		lon.	lat.	depth	M
1	2001/ 8/14	5 : 11 : 24.94	142.440	40.993	38	6.4
2	2003/ 9/26	4 : 50 : 7.42	144.082	41.776	45	8.0
3	2003/ 9/26	6 : 8 : 1.84	143.695	41.707	21	7.1
4	2003/ 9/26	15 : 26 : 58.10	144.780	42.186	27	6.1
5	2003/ 9/29	11 : 36 : 55.06	144.557	42.357	43	6.5
6	2003/12/29	10 : 30 : 55.40	144.760	42.417	39	6.0

### IV. 解析と結果

Fig. 2(a)の記録を用いて行った解析結果を Fig. 3 に示す。方位の補正前には水平二成分の地中と地表の相関係数がいずれも 0.8 以下であるが, 3 段階のグリッドサーチにより, 最終結果では相関係数が 0.99 以上となる  $\Delta t$  と  $\theta$  が推定されている。全観測点について同様の解析を行った結果を Table 2 に示す。複数の地震による結果がある場合にはその平均値をとり, 標準偏差を求めている。また, 水平二成分の相関係数の平均が 0.95 未満となったものは除外している。北海道内には KiK-net 観測点が全部で 112 点あるが, 稼働開始以降に設置方位が変更された地点があるため, 観測時期により結果が異なるものがある。

本研究による設置方位 ( $\theta_r$ ) は, 地表地震計に対する地中地震計の相対的な方位であり, 防災科研による地中地震計の設置方位 ( $\theta_b$ ) を用いて地表地震計の設置方位 ( $\theta_s$ ) を求めることができる。なお, Table 2 に示した方位はいずれも時計回りを正とした値である。現在稼働中の地表地震計については, 真方位から  $10^\circ$  未満のずれが 84 地点,  $10^\circ \sim 20^\circ$  のずれが 16 地点あり,  $20^\circ$  未満のずれが全体の約 89% を占めている。残り 12 地点では地表地震計が真方位から  $20^\circ$  以上ずれて設



**Fig. 3.** (a) Comparison between original waveforms at TKCH07 from the September 26, 2003 (06:08; M7.1) event. All the waveforms are band-pass filtered (0.02~0.2 Hz). Correlation coefficients between surface and borehole waveforms are given. (b) Results of the grid search analysis for relative azimuth ( $\theta$ ) and time-shift ( $\Delta t$ ).  $\theta$  is measured counterclockwise from the surface-sensor azimuth to the borehole-sensor azimuth. Correlation coefficients between the surface and borehole band-pass filtered waveforms are evaluated and averaged for two horizontal components, taking various combination of  $\theta$  and  $\Delta t$  iteratively. Left: Global search for  $-180 \leq \theta(\text{deg.}) \leq 180$  at an interval of  $15^\circ$  and  $0 \leq \Delta t(\text{msec}) \leq 500$  at an interval of 50 msec. Middle: Regional search for  $15 \leq \theta(\text{deg.}) \leq 75$  at an interval of  $5^\circ$  and  $-100 \leq \Delta t(\text{msec}) \leq 100$  at an interval of 10 msec. Right: Local search for  $30 \leq \theta(\text{deg.}) \leq 50$  at an interval of  $1^\circ$  and  $-50 \leq \Delta t(\text{msec}) \leq 50$  at an interval of 1 msec. (c) Comparison between band-pass filtered waveforms at the surface and borehole, the latter of which are obtained by correcting the original waveforms for the best combination of  $\theta$  and  $\Delta t$  in (b).

Table 2. Estimated azimuths of surface sensors.

site code	$\theta_b^{1)}$	N <sup>2)</sup>	$\theta_r^{3)}$		$\Delta t^{4)}$		COR. <sup>5)</sup>	$\theta_s^{6)}$
			AV.	S.D.	AV.	S.D.		
ABSH01	1	6	18.8	0.41	4.2	4.92	0.9975	-17.8
ABSH02	-2	6	61.0	0.63	-2.5	6.12	0.9910	-63.0
ABSH03	5	6	-7.5	0.84	-5.8	10.68	0.9964	12.5
ABSH04	2	6	2.0	1.10	7.5	12.94	0.9912	0.0
ABSH05	3	6	9.2	0.41	2.5	5.24	0.9981	-6.2
ABSH06	4	6	19.0	0.00	1.7	5.16	0.9986	-15.0
ABSH07	4	6	9.8	0.41	2.5	5.24	0.9988	-5.8
ABSH08	-3	6	-11.2	0.41	10.0	8.37	0.9941	8.2
ABSH09	-4	5	-12.8	0.84	1.0	5.48	0.9976	8.8
ABSH10	-5	6	-5.8	0.98	4.2	13.20	0.9954	0.8
ABSH11	-3	6	15.3	0.52	-3.3	4.08	0.9982	-18.3
ABSH12	178	6	178.3	0.52	0.8	2.04	0.9996	-0.3
ABSH13	1	5	-3.0	0.00	1.0	4.18	0.9918	4.0
ABSH14	3	6	23.0	0.00	-1.7	9.31	0.9990	-20.0
ABSH15	2	6	32.8	0.41	5.0	3.16	0.9986	-30.8
HDKH01	1	6	0.8	0.75	-3.3	12.91	0.9984	0.2
HDKH02	2	6	4.2	0.75	0.8	5.85	0.9980	-2.2
HDKH03	0	5	-13.4	0.55	-4.0	10.84	0.9968	13.4
HDKH04	3	6	4.3	0.52	-1.7	6.06	0.9989	-1.3
HDKH05	-3	6	33.2	0.75	4.2	4.92	0.9984	-36.2
HDKH06	-5	6	-8.3	1.03	5.8	10.68	0.9978	3.3
HDKH07	-2	6	-0.8	0.75	-3.3	12.11	0.9979	-1.2
HYMH01	6	4	9.0	0.82	3.8	2.50	0.9980	-3.0
HYMH02	1	4	3.3	0.50	-3.8	6.29	0.9978	-2.3
HYMH03	-1	3	14.3	0.58	3.3	2.89	0.9981	-15.3
IBUH01	1	6	1.5	0.84	-7.5	7.58	0.9988	-0.5
IBUH02	-2	6	-3.2	0.41	7.5	5.24	0.9993	1.2
IBUH03	-3	6	-4.7	0.82	3.3	8.76	0.9895	1.7
IBUH04	0	6	-2.7	0.52	-1.7	4.08	0.9932	2.7
IBUH05	2	6	19.3	0.82	10.0	15.49	0.9964	-17.3
IBUH06	-5	6	-3.7	1.51	13.3	18.07	0.9875	-1.3
IBUH07	1	5	21.2	0.84	-8.0	8.37	0.9852	-20.2
IKRH01	3	6	-8.2	0.75	-1.7	8.16	0.9985	11.2
IKRH02	0	6	-20.0	0.00	3.3	10.33	0.9962	20.0
IKRH03	0	6	-0.3	1.03	23.3	11.25	0.9939	0.3

Note:1) Borehole sensor azimuth (deg) measured clockwise positive from the north estimated by NIED (Nov. 2004).

2) The number of earthquakes used in this study.

3) Relative sensor azimuth (deg) measured clockwise positively from the surface-sensor azimuth to the borehole-sensor azimuth.

4) Time difference (msec).

5) Correlation coefficient of corrected waves.

6) Surface sensor azimuth (deg) measured clockwise positively from the north ( $\theta_s = \theta_b - \theta_r$ ).

Table 2. continued.

site code	$\theta_b^{1)}$	N <sup>2)</sup>	$\theta_r^{3)}$		$\Delta t^{4)}$		COR. <sup>5)</sup>	$\theta_s^{6)}$
			AV.	S.D.	AV.	S.D.		
KKWH01	3	4	4.8	0.50	6.3	6.29	0.9988	-1.8
KKWH02	2	6	-1.8	0.75	3.3	4.08	0.9905	3.8
KKWH03	-3	6	-4.7	0.52	0.8	3.76	0.9989	1.7
KKWH04	3	2	12.5	0.71	-2.5	10.61	0.9990	-9.5
KKWH05	1	1	2.0		5.0		0.9987	-1.0
(~2003/08/02)								
KKWH05		5	83.8	0.45	3.0	5.70	0.9982	-83.8
KKWH06	4	1	-1.0		5.0		0.9931	5.0
(~2003/08/05)								
KKWH06	4	5	-2.2	0.45	3.0	5.70	0.9919	6.2
KKWH07	3	6	-18.8	0.75	7.5	6.12	0.9981	21.8
KKWH08	3	6	-24.0	0.63	-9.2	8.01	0.9978	27.0
KKWH09	-6	6	-4.3	0.82	0.0	5.48	0.9975	-1.7
KKWH10	-7	6	-6.2	0.41	-0.8	13.93	0.9979	-0.8
KKWH11	-5	4	1.8	0.50	1.3	7.50	0.9988	-6.8
KKWH12	-2	6	-8.5	0.84	-3.3	8.76	0.9984	6.5
KKWH13	-5	1	-3.0		0.0		0.9944	-2.0
(~2003/08/21)								
KKWH13	-5	5	-3.8	0.45	-22.0	10.37	0.9961	-1.2
KKWH14	-7	6	-2.0	0.00	0.0	3.16	0.9977	-5.0
KKWH15	-4	6	-171.7	0.52	5.0	8.37	0.9972	167.7
KSRH01	-1	6	-2.7	0.52	-8.3	4.08	0.9982	1.7
KSRH02	-10	6	1.0	0.00	-3.3	7.53	0.9992	-11.0
KSRH03	-42	6	-40.3	0.52	-1.7	2.58	0.9992	-1.7
KSRH04	-3	6	-4.5	0.55	17.5	8.22	0.9957	1.5
KSRH05	0	6	5.5	1.05	3.3	20.66	0.9890	-5.5
KSRH06	-6	6	-8.3	1.86	-13.3	6.83	0.9929	2.3
KSRH07	0	6	-2.5	0.55	10.0	10.49	0.9972	2.5
KSRH08	-1	4	6.8	0.50	6.3	8.54	0.9984	-7.8
KSRH09	2	6	-6.0	0.63	1.7	2.58	0.9996	8.0
KSRH10	-3	5	2.2	0.84	-5.0	13.69	0.9914	-5.2
NMRH01	0	5	-9.8	0.45	-2.0	2.74	0.9997	9.8
NMRH02	-6	6	-5.8	0.75	9.2	2.04	0.9952	-0.2
NMRH03	-4	5	-0.8	1.10	9.0	14.75	0.9838	-3.2
NMRH04	-2	6	4.5	0.84	7.5	15.41	0.9851	-6.5
NMRH05	-3	5	-0.2	0.84	6.0	10.84	0.9897	-2.8
OSMH01	5	5	7.6	0.55	-1.0	4.18	0.9986	-2.6
OSMH02	2	6	7.0	0.63	-8.3	10.33	0.9890	-5.0
RMIH01	2	6	15.2	0.41	0.0	4.47	0.9992	-13.2
RMIH02	3	6	4.8	0.75	1.7	6.83	0.9981	-1.8
RMIH03	4	5	-1.4	0.55	9.0	14.75	0.9971	5.4
RMIH04	0	5	-3.2	0.45	1.0	2.24	0.9989	3.2
RMIH05	-1	5	1.0	0.71	8.0	11.51	0.9973	-2.0

Table 2. continued.

site code	$\theta_b^{1)}$	N <sup>2)</sup>	$\theta_r^{3)}$		$\Delta t^{4)}$		COR. <sup>5)</sup>	$\theta_s^{6)}$
			AV.	S.D.	AV.	S.D.		
SBSH01	5	6	-3.0	0.63	4.2	8.01	0.9933	8.0
SBSH02	-2	6	-2.2	0.75	-10.0	4.47	0.9952	0.2
SBSH03	2	5	6.2	1.10	-2.0	5.70	0.9924	-4.2
SBSH04	2	4	2.3	0.50	-1.3	6.29	0.9979	-0.3
SBSH05	0	4	-2.3	0.50	6.3	6.29	0.9988	2.3
SBSH06	-1	6	-8.8	0.41	-2.5	6.89	0.9989	7.8
SBSH07	2	5	-1.0	0.00	0.0	3.54	0.9962	3.0
SBSH08	-2	5	-4.4	0.55	-5.0	6.12	0.9962	2.4
SBSH09	3	5	-4.2	1.10	1.0	4.18	0.9958	7.2
SBSH10	2	3	7.7	0.58	3.3	5.77	0.9991	-5.7
SOYH01		2	-2.0	0.00	2.5	3.54	0.9993	2.0
SOYH02	-3	6	10.8	0.98	14.2	7.36	0.9914	-13.8
SOYH03	3	2	-9.5	0.71	-2.5	3.54	0.9986	12.5
SOYH04	-2	1	1.0		-10.0		0.9978	-3.0
(~2003/08/24)								
SOYH04	2	2	1.5	0.71	5.0	7.07	0.9986	0.5
SOYH05	6	2	6.0	0.00	2.5	3.54	0.9959	0.0
SOYH06	2	2	11.5	0.71	10.0	0.00	0.9986	-9.5
SOYH07	-1	2	0.0	0.00	5.0	0.00	0.9995	-1.0
SOYH08	1	6	0.8	0.98	4.2	4.92	0.9967	0.2
SOYH09	0	6	0.3	0.52	0.8	6.65	0.9971	-0.3
SOYH10	2	5	11.0	0.00	1.0	4.18	0.9945	-9.0
SRCH01	-2	6	-8.7	0.52	0.0	7.07	0.9990	6.7
SRCH02	-4	5	-10.8	1.30	-2.0	8.37	0.9956	6.8
SRCH03	-5	4	-1.0	0.82	0.0	4.08	0.9978	-4.0
SRCH04	-1	6	-3.0	0.00	-12.5	6.89	0.9983	2.0
SRCH05	6	4	5.0	0.82	3.8	7.50	0.9970	1.0
SRCH06	-106	6	-106.8	0.75	-1.7	7.53	0.9988	0.8
SRCH07	1	6	12.3	1.03	6.7	11.25	0.9957	-11.3
SRCH08	-3	6	-11.3	0.52	9.2	4.92	0.9993	8.3
SRCH09	0	6	-0.8	0.41	0.0	3.16	0.9990	0.8
SRCH10	-1	6	-0.3	0.82	7.5	12.14	0.9973	-0.7
TKCH01	2	6	1.3	0.52	1.7	6.83	0.9971	0.7
TKCH02	3	6	-5.8	0.41	5.0	6.32	0.9987	8.8
TKCH03	1	6	1.3	0.82	0.8	3.76	0.9988	-0.3
TKCH04	3	6	2.2	0.41	0.0	10.49	0.9963	0.8
TKCH05	1	6	-17.5	0.55	5.0	4.47	0.9995	18.5
TKCH06	1	6	-31.7	0.52	5.8	7.36	0.9978	32.7
TKCH07	4	6	-39.0	0.00	2.5	5.24	0.9983	43.0
TKCH08	2	6	-13.0	0.63	5.8	6.65	0.9986	15.0
TKCH10	-3	5	8.4	0.55	-4.0	8.22	0.9984	-11.4

置されており、中でも KKWH 15 では地中地震計がほぼ真方位を向いて設置されているのに対し、地表地震計は時計回りに  $167.7^\circ$  回転して設置されているという結果が得られた。

推定された  $\Delta t$  は  $\pm 25$  msec の範囲内であり、その内の約 80% は 5 msec (1 サンプル) 未満である。地中と地表の地震計ではほぼ同位相の地震波が記録されていることから、解析の対象となっているのが表面波であることを示していると考えられる。

## V. 設置方位のずれの影響について

設置方位のずれを補正することで波形が変化することは Fig. 2 から明らかであるが、ここではスペクトルにどのような影響が現れるかについて検討する。

地中と地表の地震計からなる鉛直アレーの記録を用いて、ボアホールの速度構造や Q 値構造の推定が行われている (例えば、木下・大池, 2002; 野口・笹谷, 2004)。こうした研究では、地中と地表の SH 波のスペクトル比と、一次元多重反射理論により理論的に計算されるスペクトル比が一致するように S 波速度構造と Q 値構造が推定される。その際、地震計の設置方位がずれていれば、正しく SH 波を計算することはできず、その後の解析に悪影響を及ぼす恐れがある。

設置方位の補正によりスペクトル比がどの程度変化するかについて、TKCH 07 と TKCH 08 で得られた 10 地震 (Table 3) の記録から検討する。TKCH 07 と TKCH 08 では、地中地震計はほぼ真方位を向いて設置されているが、地表地震計は、時計回りにそれぞれ推定  $43^\circ$  と  $15^\circ$  回転している。スペクトル比の計算は次のように行う。まず、地表と地中の地震計の設置方位を考慮して radial, transverse 成分に変換する。次に、目視で読み取った S 波の立ち上がりの 1 秒前から 10.24 秒間を 10% の cosine 型テーパで切り出し FFT により各々のフーリエスペクトルを計算する。これらのスペクトルをそれぞれ 0.4 Hz の Parzen ウィンドウにより平滑化し、比をとることで SH 波 (transverse 成分) のスペクトル比 (地表/地中) を求めた。設置方位の補正を行わない場合と行った場合の結果を Fig. 4 に示す。TKCH 07 では補正を行わない場合には地震毎のスペクトル比が大きくばらついているが、補正を行うことにより 4~5 Hz までの高周波数帯までほぼ同じスペクトル比が得られている。また、補正前に比べてスペクトルのピークとトラフが明瞭になっている。一方で、偏向角の小さな TKCH 08 では、補正を行うことにより 1 Hz 付近で

**Table 3.** Earthquakes used in calculation of the spectral ratio.

	origin time(JST)	lon.	lat.	depth	M
2000/10/ 7	8 : 19 : 42.25	142.980	42.309	58	4.4
2000/10/15	20 : 33 : 14.59	143.646	42.582	79	4.0
2000/11/15	23 : 19 : 30.20	144.564	42.768	55	4.5
2000/12/ 3	6 : 12 : 23.40	142.864	42.117	45	3.8
2000/12/ 8	6 : 14 : 44.70	144.442	43.251	131	4.2
2001/ 4/23	9 : 4 : 18.63	143.375	42.462	54	4.3
2001/ 4/27	2 : 48 : 58.20	145.880	43.025	80	5.9
2001/ 5/ 8	6 : 27 : 36.61	143.097	42.332	49	4.6
2001/ 6/21	21 : 54 : 23.32	142.548	42.444	30	4.3

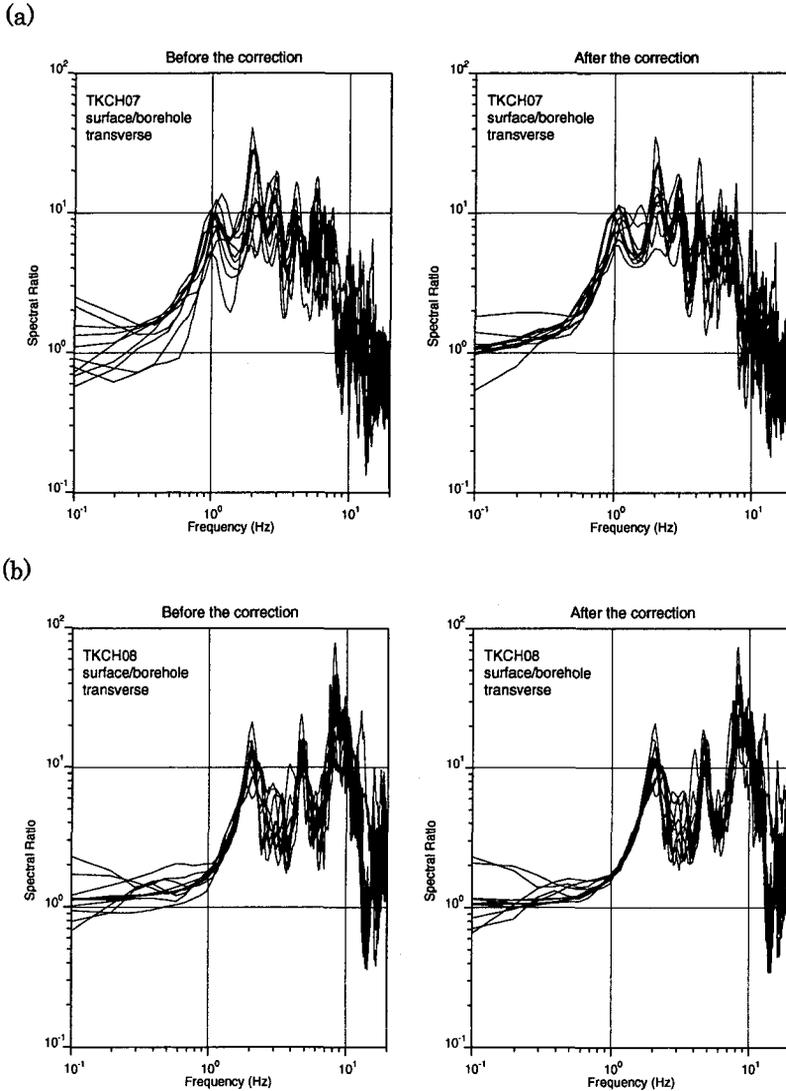


Fig. 4. SH-wave spectral ratios of surface records to borehole records at (a) TKCH07 and at (b) TKCH08 for 10 events in Table 3. Left: Spectral ratios without correction for sensor azimuths, and Right: Spectral ratios with correction for sensor azimuths.

スペクトル比のばらつきがやや小さくなっているものの、TKCH 07ほどの改善はみられない。以上から、設置方位のずれが $20^\circ$ よりも大きい地点では、地震計の設置方位が補正されない限り、ボアホールの速度構造やQ値構造の推定結果に予期されぬ誤差が含まれることが懸念される。

## VI. ま と め

北海道内の KiK-net 地表地震計の設置方位について調べた、全 112 観測点のうち 100 地点では設置方位の真方位からのずれが $20^\circ$ 未満であったが、残り 12 地点では地表地震計が真方位から

20°以上ずれて設置されており,中には180°近く回転して設置されているものもあった.設置方位のずれは,波形のみならずスペクトルを用いた研究においても不要な誤差を生ずる可能性がある.地中と地表での同時観測記録は,強震動に対する地盤の応答を調べる上でも重要なデータであり,それらを有効に使うためにも全観測点を対象とした調査が必要である.また,地表地震計は地中地震計とは違い直接的に設置方位を測定することが可能であり,ジャイロを用いた測定(渡邊・他,2000)等による調査も必要であろう.

**謝辞** 本研究では,防災科学技術研究所のKiK-netの強震記録,気象庁による震源情報を使用しました.記して感謝します.本研究は,平成16年度科学研究費補助金[基盤研究(B)2]「2003年十勝沖地震群による強震動の特性評価とその予測に関する研究(代表:笹谷努)」の一環として行われたものです.

#### 文 献

- 加藤研一・山添正稔・武村雅之,2001.中国・四国地方を対象としたKiK-net地中埋設地震計の設置方位の推定—鳥取県西部地震,芸予地震の強震記録に基づく検討—,地震2,54,421-429.
- 木下繁夫・大池美保,2002.関東地域の堆積層—基盤系におけるS波の減衰特性,地震2,55,19-31.
- 野口科子・笹谷努,2004.KiK-net観測点TKCH08におけるS波速度構造の評価,北海道大学地球物理学研究報告,67,181-195.
- 斎藤正徳,1972.漸化式デジタル・フィルターの自動設計,物理探鉱,31,112-135.
- 汐見勝彦・小原一成・青井真・笠原敬司,2003.Hi-net/KiK-net観測点における地中地震計設置方位の推定,地震2,56,99-110.
- 渡邊篤志・竹中博士・藤井雄士郎・藤原広行,2000.K-NET観測点の地震計方位測定(2):大分県,地震2,53,185-192.
- 山添正稔・加藤研一・武村雅之,2002.九州地方を対象としたKiK-net地中埋設地震計の設置方位の推定—鳥取県西部地震,芸予地震の強震記録に基づく検討—,地震2,55,239-248.