

地震動の長周期成分を用いた首都圏地震観測網（MeSO-net） の設置方位推定

汐見勝彦^{1)*}・佐々木俊二²⁾・酒井慎一³⁾・笠原敬司³⁾・関根秀太郎¹⁾・中川茂樹³⁾・小原一成¹⁾・
平田 直³⁾・棚田俊收⁴⁾

¹⁾ (独)防災科学技術研究所

²⁾ (財)地震予知総合研究振興会

³⁾ 東京大学地震研究所

⁴⁾ 神奈川県温泉地学研究所

Estimation of the Azimuth of MeSO-net Borehole Seismometers Based on Long-period Seismic Ground Motion

Katsuhiko Shiomi^{1)*}, Shunji Sasaki²⁾, Shin'ichi Sakai³⁾, Keiji Kasahara³⁾, Syutaro Sekine¹⁾,
Shigeki Nakagawa³⁾, Kazushige Obara¹⁾, Naoshi Hirata³⁾ and Toshikazu Tanada⁴⁾

¹⁾ National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention

²⁾ Association for the Development of Earthquake Prediction

³⁾ Earthquake Research Institute, University of Tokyo

⁴⁾ Hot Springs Research Institute of Kanagawa Prefecture

Abstract

A remarkable high-density seismograph network, called MeSO-net, is under construction in the Tokyo metropolitan region, central Japan. At the MeSO-net station, a three-component accelerograph is installed at the bottom of a 20-m deep borehole. To analyze horizontal component waveforms observed at a borehole-type seismic station, we first have to know the azimuth of the seismometer. In this study, based on cross-correlation analyses of long wavelength seismograms with a high S/N, we estimate sensor azimuths at MeSO-net stations. As reference stations, we use seismograms observed by NIED F-net broad-band seismographs and Hi-net tiltmeters. At more than 80% of stations, N -components of seismographs are within $\pm 10^\circ$ from magnetic north. We confirm that the sensors at three stations are rotated more than 90° . Although our results agree well with results estimated using P -wave first motion of a local earthquake, there are systematical azimuthal differences between two results at stations distributed in the northern Kanto region. Because the subducting Pacific slab lies beneath the Kanto region, this feature may indicate that the diffracted wave passing through the high-velocity slab was observed as a first pulse at stations located in the northeastern Kanto region.

Key words: MeSO-net, NIED F-net/Hi-net, sensor azimuth, long wavelength seismogram, cross-correlation

1. はじめに

首都圏周辺では、これまで、多くの被害地震に繰り返し見舞われてきた [例えば、地震調査研究推進本部 地震調査委員会 (2004)]. 関東地方直下には、沈み込む太

平洋プレートとフィリピン海プレートが重なり合って存在することが知られており [例えば、Ishida (1992), Nakajima *et al.* (2009)], このことが首都圏周辺で複雑な地震テクトニクスを形成する原因のひとつとなつていい

* e-mail: shiomi@bosai.go.jp (〒305-0006 つくば市天王台 3-1)

る。複雑なプレート構造のもとで発生し得る首都直下地震の全体像を解明するため、2007年度より、首都圏地震観測網（以下、MeSO-net）の構築が進められている〔例えば、平田・他（2009）、笠原・他（2009）〕。首都圏においては、従来から、気象庁や東京大学地震研究所、防災科学技術研究所（以下、防災科研）が高感度（微小）地震計を用いた地震観測を行ってきたが、首都圏は厚い堆積層の上に構成されているだけでなく、人間活動によるノイズレベルも高く、極微小地震の観測を行うには困難な地域として認識されている。このような地域で地震観測を行う場合、地動ノイズの低減を図るため、地中に埋設した地震計を用いて観測を実施することが望まれる〔例えば、浜田・他（1982）、Okada *et al.*（2004）、笠原・他（2009）〕。MeSO-netは、都市部で約5km以下の間隔での稠密な中感度地震観測を行うことを主眼とし、深さ20m程度の観測井の孔底に3成分加速度計を設置している〔笠原・他（2009）〕。最終的に約400観測点からなる予定の高密度地震観測網により得られた地震波形データは、首都圏周辺の地震テクトニクス解明に重要な貢献をするものと期待されている。

観測された地震波形の水平動2成分は、水平動動径方向（radial）成分の合成やS波偏向異方性解析等の震動方向解析に供される。このような解析を行う場合、水平動成分の設置方位に関する情報は必須である。MeSO-netの場合、各観測点の磁北方向に地震計のN成分が向くように設置することとなっている。ただし、孔底設置型地震計の水平動成分の設置方位は、地表設置時のように目視により確認することが困難であるため、観測点周辺の複数の方位で人工的な震動を励起させ、その到来方向の粒子軌跡の解析から水平動成分の設置方位を推定することが多い。しかし、MeSO-netのような都市部を対象とした観測点では、十分なS/Nを有した人工震動を励起させることは困難である。佐藤・片山（1983）や加藤・他（2001）らは、鉛直アレイ観測施設に対して、地表と地中の地震動振幅の相関係数が最大となる方位から地中地震計の設置方位を推定したが、MeSO-net観測点では鉛直アレイを構成しておらず、彼らの解析方法をそのまま適用することは出来ない。佐々木・他（2009）は、2008年7月に岩手県沿岸北部で発生した稍深発地震のP波初動軌跡から推定される到来方向と観測点からみた震央の方位角との差分から、MeSO-net観測点の設置方位推定を試みた。その結果、解析対象とした観測点の半数以上で、地震計N成分がほぼ磁北を向いていることが確認されたが、真北との差が20°を超える観測点も9点存在することが明らかになった。佐々木・他（2009）

の結果は、MeSO-net地中地震計の正確な設置方位を調査することの重要性を示すものである。ただし、佐々木・他（2009）の解析方法を適用する際、震央（震源）位置決定誤差の影響を低減するためには、震央が観測網から十分離れている地震を選択する必要がある。一方、地動ノイズの影響を避けるためには、振幅の大きな入力が必要となる。さらに、地下構造の不均質により地震波が回折している可能性があるため、様々な方位から到来する地震波を用いた解析をすることが望ましい。現実的な問題として、これらの条件を備えた記録を短期間で得ることは難しい。

防災科研では、日本全国におよそ100km間隔で広帯域地震観測点を、20km間隔で孔井型の高感度地震観測点を設置し、地動の連続観測を行っている〔例えば、松本・他（2009）、汐見・他（2009）〕。広帯域地震観測網F-netで使用している広帯域地震計は、全ての観測点で正確な地震計設置方位が測定されている。高感度地震観測網Hi-netの地震計は、MeSO-net同様、観測井の孔底に設置されている。汐見・他（2003）は、Hi-netに併設されている高感度加速度計と周辺のF-net広帯域地震計で同時に記録された遠地地震記録の長周期成分の波形相関解析により、その設置方位を求めた。この相関解析は、設置方位が既知の地震計との相対的な設置方位差を求めるものである。設置方位が不明な地震計に対し、複数の地震計との相関解析を行うことが出来れば、解析に用いた地震数が少くても安定した推定結果が得られることが期待される。

本稿では、汐見・他（2003）がHi-net地震計設置方位推定に用いた解析方法をMeSO-netデータに適用することにより、MeSO-net観測点の設置方位を推定した。また、得られた推定結果と佐々木・他（2009）の結果とを比較し、その差異について議論を行った。

2. データ

地震動の長周期成分の波形相関を用いてMeSO-net地中地震計の設置方位を推定するため、M7.4以上の遠地地震の記録を抽出した。また、震源がMeSO-net観測網から十分に遠く、顕著な表面波を励起した十勝沖の地震（2008年9月11日、Mw6.8）も対象とした。Table 1に解析に使用した地震のリストを示す。

汐見・他（2003）は、防災科研Hi-netの地中地震計設置方位推定にあたって、遠地地震動の100sから200sの周期帯域を使用しているが、MeSO-net観測波形のこの帯域のS/Nは必ずしも良くない〔笠原・他（2009）〕。現在は、F-net広帯域地震計に加えてHi-net高感度加速度

Table 1. Earthquakes used in this study.

ID	Origin Time (JST)	Latitude	Longitude	Depth	Mw	Location
U1	2008/05/12 15:28:01	31.00°N	103.32°E	19 km	7.9	EASTERN SICHUAN, CHINA
U2	2008/11/17 02:02:33	1.27°N	122.09°E	30 km	7.4	MINAHASA, SULAWESI, INDONESIA
U3	2009/01/04 04:43:51	0.41°S	132.88°E	17 km	7.6	NEAR THE NORTH COAST OF PAPUA, INDONESIA
U4	2009/01/16 02:49:39	46.86°N	155.15°E	36 km	7.4	EAST OF THE KURIL ISLANDS
U5	2009/03/20 03:17:41	23.05°S	174.66°W	34 km	7.6	TONGA REGION
U6	2009/07/15 18:22:29	45.76°S	166.56°E	12 km	7.8	OFF WEST COAST OF THE SOUTH ISLAND, N.Z.
U7	2009/09/30 02:48:11	15.51°S	172.03°W	18 km	8.0	SAMOA ISLANDS REGION
U8	2009/09/30 19:16:09	0.73°S	99.86°E	81 km	7.6	SOUTHERN SUMATRA, INDONESIA
U9	2009/10/08 07:03:15	13.05°S	166.19°E	35 km	7.6	VANUATSU
N1	2008/09/11 09:20:45	41.67°N	144.39°E	16 km	6.8	SE OFF TOKACHI

Hypocenter Catalog: U1-U9 ... USGS PDE N1 ... NIED

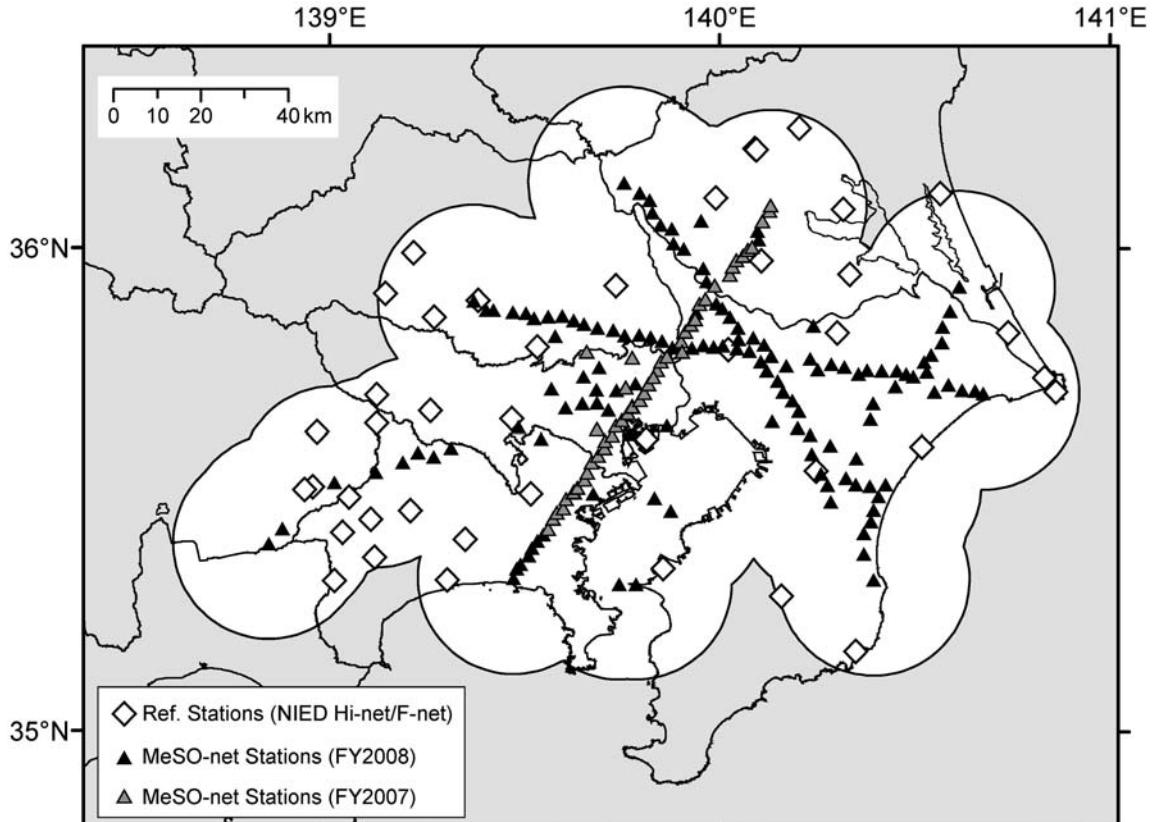


Fig. 1. Distribution of stations used in this study.

Gray and black triangles show the locations of MeSO-net stations installed in FY2007 and FY2008, respectively. Open diamonds represent the locations of NIED Hi-net/F-net stations. Region where the distance from MeSO-net stations is 22 km or more is shaded.

計の設置方位も判明しているため、汐見・他（2003）が Hi-net 地中地震計の設置方位を調査した場合に比べて、基準として使用できる観測点の密度は高い。したがって、汐見・他（2003）よりもやや短周期となる 50 s から 100 s の周期帯域を解析対象とした。この帯域の地震動を用いて設置方位を推定する場合、波形相関を評価する 2 観測点において、25 s 程度以上の周期の波がほぼ相似な波形として収録されていることが望まれる。本解析で

使用する地震動の長周期成分は、S 波あるいは表面波であると考えられる。周期 25 s の波の伝播速度を 3.5 km/s と仮定すると、その波長は 88 km である。以上から、波形相関を評価する 2 観測点間の距離は、その 1/4 に相当する 22 km を上限とした。Fig. 1 に、解析対象とする MeSO-net の観測点分布および基準観測点となる Hi-net および F-net 観測点の位置を示す。また、Table 2 に、基準観測点の諸元を示す。

Table 2. Information on reference stations.

Network	Code	Lat.	Long.	Sensor Az.		Period
				NS	EW	
F-net	N.TSKF	36.21°N	140.09°E	0.0°	90.0°	
	N.SGNF	35.51°N	138.94°E	-5.8°	83.9°	
Hi-net	N.YSTH	36.26°N	140.20°E	-2°	88°	
	N.EDSH	35.95°N	140.33°E	0°	90°	
Hi-net	N.TYOH	36.12°N	140.56°E	5°	95°	
	N.ISGH	36.11°N	139.99°E	-3°	87°	~2009/08/30
				-49°	41°	2009/08/31~
	N.KGRH	36.09°N	140.31°E	2°	92°	
	N.TSKH	36.21°N	140.09°E	2°	92°	
	N.HA2H	35.83°N	140.73°E	-14°	76°	
	N.TBSH	35.98°N	140.11°E	138°	228°	
	N.IWTH	35.93°N	139.73°E	-88°	2°	
	N.HDKH	35.90°N	139.38°E	8°	98°	
	N.TKRH	35.80°N	139.54°E	4°	94°	
	N.NGRH	35.91°N	139.15°E	-7°	83°	
	N.TOIH	36.00°N	139.22°E	-3°	87°	
	N.HHNH	35.86°N	139.27°E	-4°	86°	
	N.SHMH	35.80°N	140.02°E	31°	121°	
	N.CHSH	35.71°N	140.85°E	2°	92°	
	N.CBAH	35.55°N	140.24°E	3°	93°	
	N.YROH	35.29°N	140.15°E	6°	96°	
	N.FUTH	35.34°N	139.86°E	-54°	36°	~2009/07/15
				-6°	84°	2009/07/16~
	N.NRTH	35.83°N	140.30°E	-3°	87°	
	N.CH2H	35.73°N	140.82°E	-1°	89°	
	N.KT2H	35.17°N	140.34°E	4°	94°	
	N.HSNH	35.59°N	140.51°E	34°	124°	
	N.FCHH	35.65°N	139.47°E	-10°	80°	
	N.KOTH	35.61°N	139.81°E	49°	139°	
	N.HOJH	35.67°N	139.27°E	1°	91°	
	N.HH2H	35.70°N	139.13°E	4°	94°	
	N.ASGH	35.32°N	139.02°E	0°	90°	
	N.YMKH	35.49°N	139.06°E	-4°	86°	
	N.KRKH	35.44°N	139.12°E	-5°	85°	
	N.HRTH	35.32°N	139.31°E	-4°	86°	
	N.YKHH	35.50°N	139.52°E	5°	95°	
	N.ATGH	35.40°N	139.35°E	-2°	88°	
	N.FJOH	35.64°N	139.13°E	-3°	87°	
	N.YM2H	35.42°N	139.04°E	-6°	84°	
	N.MTDH	35.37°N	139.13°E	9°	99°	
	N.KIYH	35.46°N	139.21°E	-1°	89°	
	N.OOKH	35.62°N	138.98°E	-3°	87°	
	N.TU2H	35.51°N	138.97°E	-6°	84°	

F-net 広帯域地震計の記録は、地震計特性を補正した後に変位波形に変換し、50 s から 100 s のバターワース型帯域通過フィルタを適用した。Hi-net 高感度加速度計の記録は、周波数領域で 2 回積分することにより変位波形に変換し、同様の帯域通過フィルタを適用した。これらの記録について、既に F-net や Hi-net のホームページで報告されている設置方位情報を用いて、南北 (NS) 成分、東西 (EW) 成分波形を合成した。今後、これらの波形を、基準波形と称する。MeSO-net も、Hi-net 高感度加速度計同様、地動加速度を記録しているため、周波数領域で 2 回積分し、50 s から 100 s の帯域通過フィルタを適用した。こうして求めた MeSO-net 変位波形を、

参照波形と称する。Table 1 に示した地震について、得られた基準波形及び参照波形を目視確認し、S/N が十分でない記録を解析から除外した。2008 年 5 月に発生した中国四川省の地震 (Table 1, U1) 時における N. KOTH 観測点での基準波形、および E. YYIM 観測点での参照波形合成の過程を一例として Fig. 2 に示す。

3. 設置方位推定方法

本稿では、基準波形と参照波形との相互相関解析から、対象観測点の地中地震計 N 成分の設置方位 θ を求める方法 [汐見・他 (2003)] を採用した。ここで、MeSO-net 地中地震計の水平動 2 成分は直交し、 E 成分は N 成

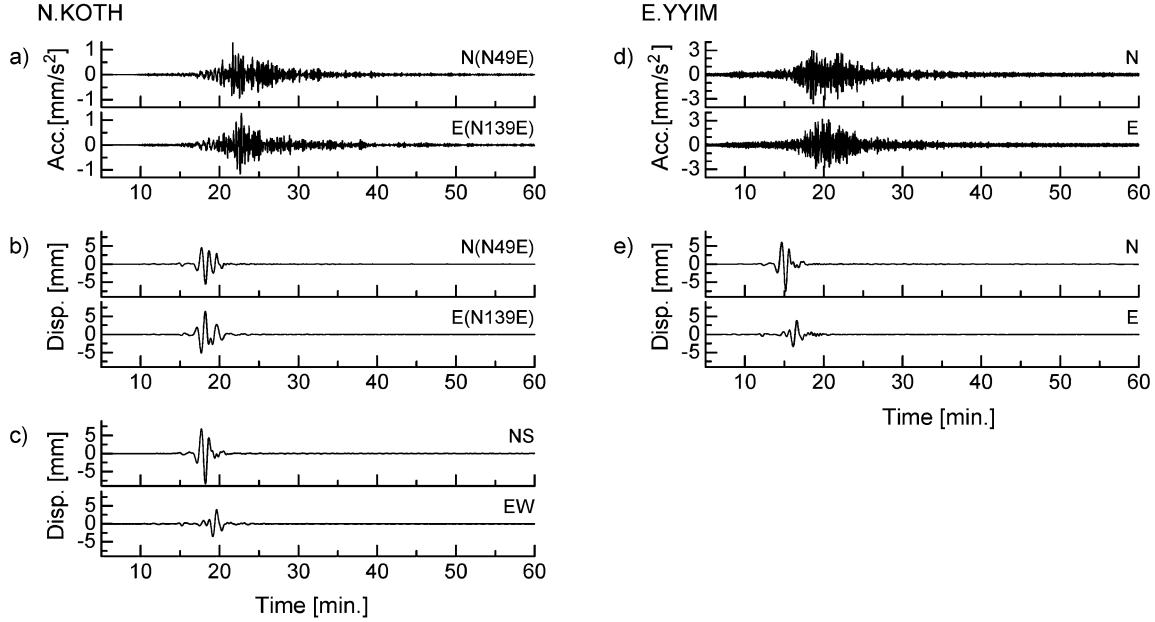


Fig. 2. Examples of observed waveforms of 2008 Eastern Sichuan earthquake (U1 in Table 1).

(a) Accelerograms recorded by a tiltmeter at the N.KOTH station. At this station, *N*- and *E*-components of the tiltmeter are oriented to 49° E, 139° E, respectively. (b) Displacement waveforms integrated from waveforms shown in (a). Band-pass filter from 50 s to 100 s is applied. (c) "NS" and "EW" component displacement waveforms. These waveforms are calculated from a 49° anticlockwise rotation of waveforms shown in (b). (d) Accelerograms recorded at the E.YYIM station. (e) Displacement waveforms calculated using waveforms shown in (d).

分に対して時計まわりに 90° 回転した方位を向いているものとする。また、設置方位 θ は、真北を 0 とし、時計まわり（東向き）に増加する値として定義する。

まず、ある地震 i に対して、参照波形を 1 度刻みで反時計回りに $\varphi = -179^\circ$ から $\varphi = 180^\circ$ まで回転させた波形を合成し、得られた合成波形と基準観測点 j における地震 i の波形（基準波形）との相互相関係数を求めた。この相互相関係数は水平動の成分ごとに求まるが、本解析では、両者の平均値を求め、その最大値を回転角 φ に依存するパラメタ $C_{i,j}(\varphi)$ と定義した。Fig. 3a に、MeSO-net の E. YYIM 観測点と Hi-net の N. TKRH 観測点の記録を用いて $C_{i,j}(\varphi)$ を求めた例を示す。 $C_{i,j}$ の最大値 $A_{i,j}$ は、地震によってばらつきがあるが、 $C_{i,j}$ が最大となる回転角 φ は、どの地震においてもほぼ同じであることが分かる。地中地震計の設置方位 θ は、様々な地震 i や基準観測点 j との間で得られた $C_{i,j}(\varphi)$ の重み付き平均値が最大となる回転角として求める。ここで、平均値を計算する際の重み $w_{i,j}$ は、

$$w_{i,j} = \begin{cases} \max(0.2 \cdot \cos(-d_j \pi / 40) + 0.8, 0.8) \\ \cdot \{(A_{i,j} - 0.65) / 0.35\}^2 & (A_{i,j} > 0.65) \\ 0 & (A_{i,j} \leq 0.65) \end{cases} \quad (1)$$

として与えた。(1)式の 1 つめの中括弧は、観測点間の距離 d_j に関する項であり、二つめの中括弧は、両者の波形の類似性が低い観測点組を排除するための項である。

E. YYIM 観測点では、Fig. 3a に示した N. TKRH 観測点に加え、N. KOTH 観測点との相関解析を行い、計 14 の相関係数分布を求めた。これらの重み付き平均の結果を Fig. 3b に示す。Fig. 3b に示した値は、 -2° で最大となることから、E. YYIM 観測点に設置された地中地震計の *N* 成分は、 N - 2° E ($N358^\circ$ E) を向いていると推定した。

相関係数を求める 2 観測点における震央の方位角の差、すなわち平面波近似からのずれの度合いは、設置方位推定誤差に直結する。MeSO-net から最も近い 2008 年十勝沖の地震 (Table 1, N1) の場合、震央距離は最短で 700 km 程度である。22 km 離れた 2 観測点で十勝沖の地震の震央方位を見た場合、最大 2° の方位角の差が生じる可能性があり、この角度差が解析法上の推定誤差となる。

4. 推定結果

2008 年度までに整備された MeSO-net 178 点を対象に、地中地震計 *N* 成分の設置方位を推定した結果を Table 3 および Fig. 4 に示す。本解析では、10 観測点で十分な S/N を持った記録が得られなかったために、設置

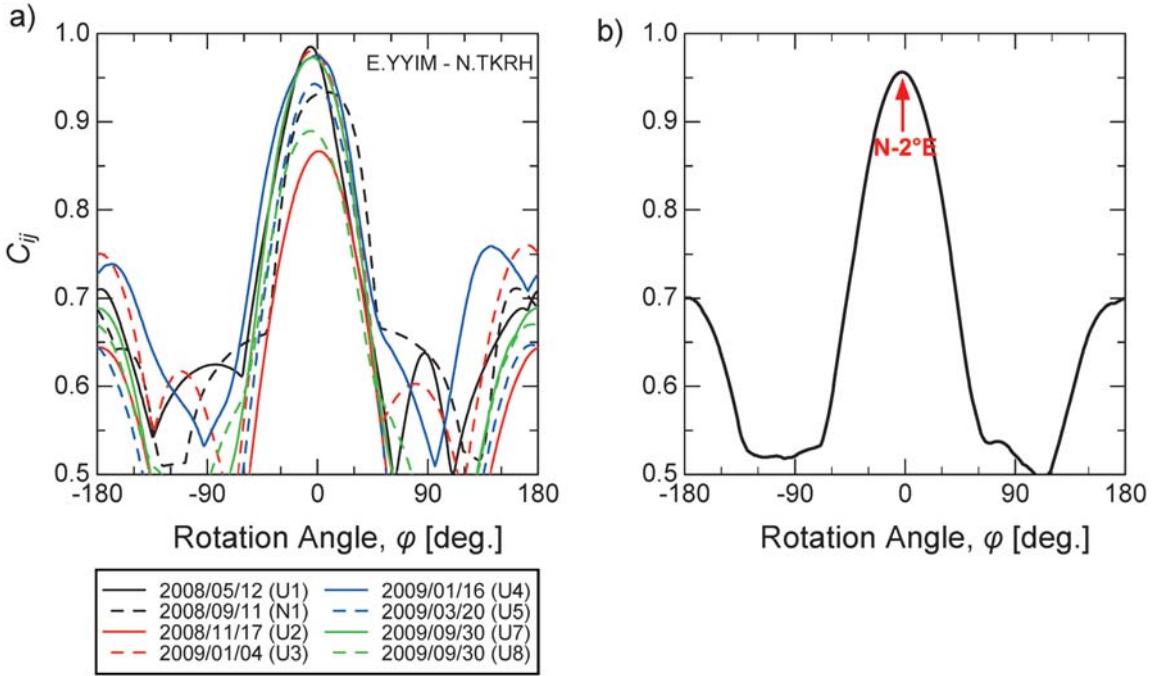


Fig. 3. (a) Maximum cross-correlation coefficients $C_{ij}(\varphi)$ between displacement waveforms observed at E. YYIM and N. TKRH.

Line colors and types are related to earthquakes listed in Table 1.

(b) Averaged cross-correlation coefficients for E. YYIM.

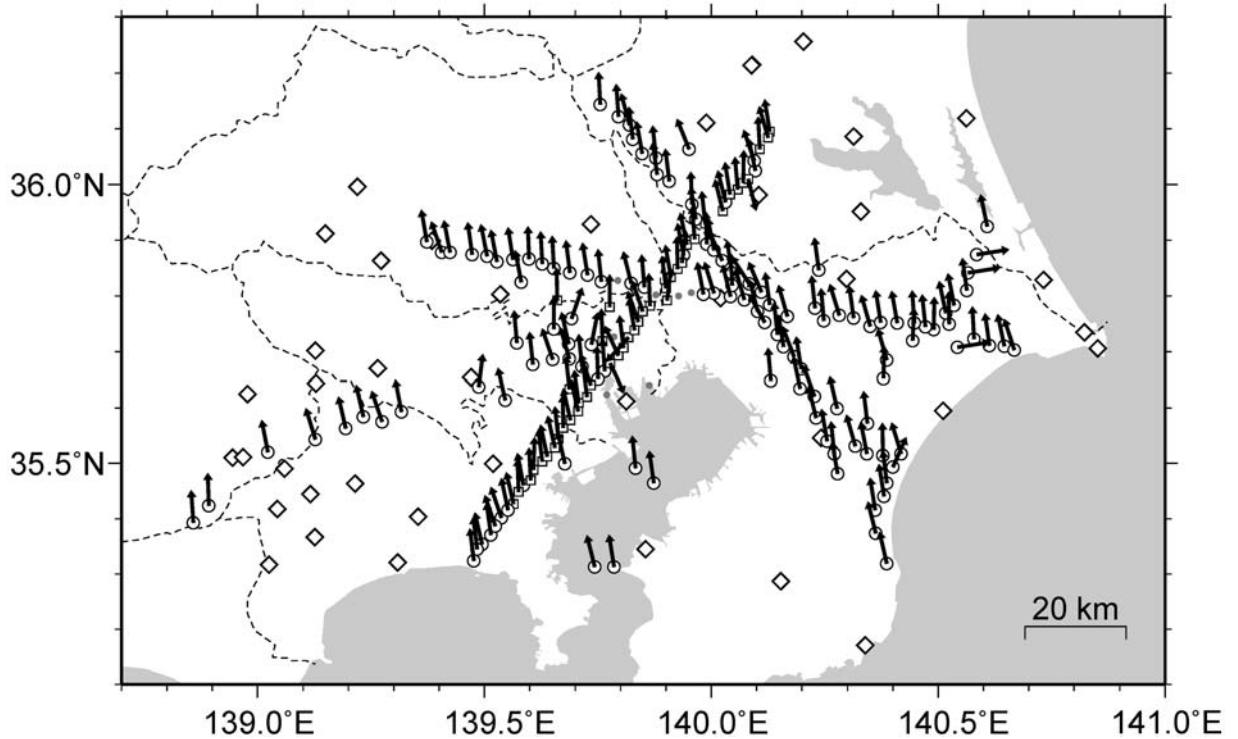


Fig. 4. Estimated azimuths of the MeSO-net borehole sensors.

Each arrow indicates the direction of the N -component of a sensor. Diamonds and circles represent locations of reference stations (NIED Hi-net/F-net) and MeSO-net stations, respectively.

地震動の長周期成分を用いた首都圏地震観測網の設置方位推定

Table 3. Estimated azimuths of MeSO-net borehole sensors.

Code	Az	Err.	N	Sa*	Code	Az	Err.	N	Sa	Code	Az	Err.	N	Sa
E.ABHM	-24°	2°	2		E.MBSM	-7°	2°	7	-12°	E.SR2M	-3°	2°	6	
E.AYHM	-6°	3°	3		E.MD1M	2°	1°	6		E.SRCM	-3°	4°	3	
E.BKKM	-11°	2°	13		E.MDHM		N/A			E.SRIM	-14°	3°	4	
E.DAIM	-3°	2°	8		E.MHKM	-11°	1°	8		E.SRKIM	-9°	2°	6	
E.DGRM	-13°	2°	9		E.MKJM	-138°	2°	8	-146°	E.SRSM	24°	2°	6	
E.DICM	-12°	1°	12		E.MKSM	-6°	1°	16	-5°	E.SRTM	-9°	2°	6	
E.DSCM	-11°	1°	37		E.MNAM	0°	3°	3		E.SSDM	-9°	2°	6	
E.ENZM	-8°	1°	16	-9°	E.MNKM	-16°	2°	5		E.SSHM		N/A		
E.FJSM	-7°	3°	6		E.MNMM	-5°	3°	5		E.SSSM	-15°	4°	3	
E.FKCM	-8°	1°	9		E.MOKM	1°	1°	9		E.SSNM	-20°	3°	4	
E.FKOM	-1°	1°	8		E.MRJM	-9°	3°	6		E.SSPM	-33°	3°	5	
E.FMHM	-9°	2°	8		E.MRTM	-7°	3°	4		E.STHM	-17°	4°	3	
E.FMNM	-11°	2°	9		E.MSKM	-7°	2°	6		E.SYOM	-7°	2°	9	
E.FTPM	-9°	4°	2		E.MSOM	-6°	2°	6		E.SYPM	-14°	4°	3	
E.FUNM	-8°	2°	9		E.MSRM	-9°	2°	9		E.TACM	-6°	2°	6	
E.GHGM	-6°	1°	21	-8°	E.MYHM	-2°	2°	8		E.TAKM	-9°	3°	2	
E.GKSM	-1°	2°	14	-4°	E.MZMM	-2°	1°	15	-6°	E.TBKM	-3°	1°	15	
E.GNZM	-4°	3°	5		E.MZPM	-3°	3°	7	1°	E.TGNM	-8°	2°	9	
E.GSJM	-5°	1°	23	-12°	E.MZUM	-3°	4°	3		E.THCM	-10°	1°	15	
E.HGCM	-6°	4°	3		E.NARM	0°	1°	25	-5°	E.TK2M	-4°	2°	6	
E.HGSM	-2°	1°	15		E.NDOM	-11°	4°	3		E.TKBM	1°	1°	20	-6°
E.HKBM	7°	2°	12	0°	E.NGSM	7°	1°	15	1°	E.TKMM	-19°	3°	5	-22°
E.HNOM	-2°	2°	11	4°	E.NISM	-11°	2°	9		E.TKNM		N/A		
E.HNPM	-12°	1°	17		E.NKGM	-7°	2°	8		E.TKSM	-1°	2°	11	-8°
E.HRGM	-5°	1°	5		E.NKMM	1°	2°	6		E.TKWM	-12°	1°	9	
E.HSDM	-10°	2°	6		E.NKNM	-16°	2°	6		E.TKZM	-16°	1°	50	-24°
E.HSUM	-7°	2°	11	-2°	E.NNGM	-7°	3°	6		E.TNKM	-5°	1°	15	-10°
E.HTTM	-19°	2°	9		E.NNTM	-14°	4°	3		E.TOCM	-10°	4°	3	
E.HYDM	-7°	1°	8		E.NOBM	-13°	2°	6		E.TOKM	-12°	1°	6	
E.HYHM	-9°	3°	4		E.NSJM	-16°	4°	3		E.TSCM	-8°	4°	3	
E.IIDM	-1°	2°	6		E.NSMM		N/A			E.TSRM	-3°	1°	41	-10°
E.IKCM	-13°	3°	6		E.NSUM	-10°	3°	3		E.TTOM	-13°	3°	4	
E.IN3M	-14°	1°	25	-20°	E.OA5M	-13°	3°	3		E.TWDM	19°	4°	3	
E.INAM	-15°	1°	22		E.OACM	-16°	2°	6		E.TYHM	-8°	1°	12	
E.INOM	-6°	3°	6		E.OJCM	-6°	3°	3		E.TYNM	-11°	3°	5	
E.JDJM	2°	1°	13	-3°	E.OKCM	-2°	2°	8		E.TYUM	-17°	2°	4	
E.KBRM	-9°	1°	18	-17°	E.OKDM	-11°	2°	12		E.UHRM	-9°	3°	8	
E.KCBM	-19°	1°	15	-35°	E.OKMK		N/A			E.UNMM	-12°	1°	16	-13°
E.KDKM	-13°	1°	16	-14°	E.OMNM		N/A			E.YGHM	-21°	2°	9	
E.KGKM	-1°	1°	15	-13°	E.OMRM	-13°	1°	16	-17°	E.YKBM	-19°	2°	12	
E.KH2M	-15°	4°	2		E.OYTM	-19°	1°	15	-25°	E.YKKM	-7°	2°	11	-14°
E.KHDM	11°	3°	3		E.RKGM	-6°	2°	5		E.YKSM	-10°	2°	7	-15°
E.KKHM	-2°	3°	5		E.RMSM	-9°	0°	56	-16°	E.YMCK	-11°	1°	9	
E.KKSM	-11°	4°	3		E.RYGM	-25°	3°	4	-23°	E.YMMM	-29°	3°	3	
E.KMHM	-8°	2°	9		E.RYNM	-10°	1°	12	-18°	E.YNCM	-4°	2°	12	
E.KMCM	-13°	1°	16	-18°	E.SBAM	-2°	3°	5		E.YNMM	-14°	6°	1	
E.KMRM	-16°	2°	9		E.SBCM	-7°	4°	3		E.YSOM	-12°	3°	4	
E.KOHM	-11°	2°	11		E.SDMM	-5°	4°	2		E.YSPM	-6°	2°	8	
E.KRCM	-23°	2°	6		E.SECM	-8°	3°	6		E.YSSM	-18°	1°	12	
E.KRPM		N/A			E.SFHM	-13°	4°	3		E.YT2M	-8°	1°	2	
E.KSCM		N/A			E.SGWM	-22°	3°	6		E.YTBM	166°	1°	41	160°
E.KSGM		N/A			E.SIBM	-19°	3°	2		E.YYIM	-2°	2°	14	-8°
E.KSOM	-12°	3°	6		E.SICM	-3°	3°	4		OK.AOCM	-17°	1°	28	
E.KSRM	-19°	1°	12		E.SKHM	-5°	4°	3		OK.AONM	-13°	1°	40	
E.KUDM	-17°	4°	3		E.SKMM	155°	1°	5	153°	OK.HRDM	-13°	1°	19	-8°
E.KUYM	-6°	1°	23	-11°	E.SKPM		N/A			OK.NHMM	-11°	1°	24	
E.KWHM	-12°	1°	15	-19°	E.SMGM	-19°	2°	9		OK.NKYM	-19°	1°	18	
E.KYDM	7°	2°	6		E.SNHM	-7°	1°	18	-6°	OK.TKCM	-13°	1°	24	
E.KZMM	-14°	2°	6		E.SNJM	-10°	7°	1						
E.KZTM	-6°	3°	6		E.SNSM	-16°	1°	9						

*Sa: Sasaki *et al.* (2009)

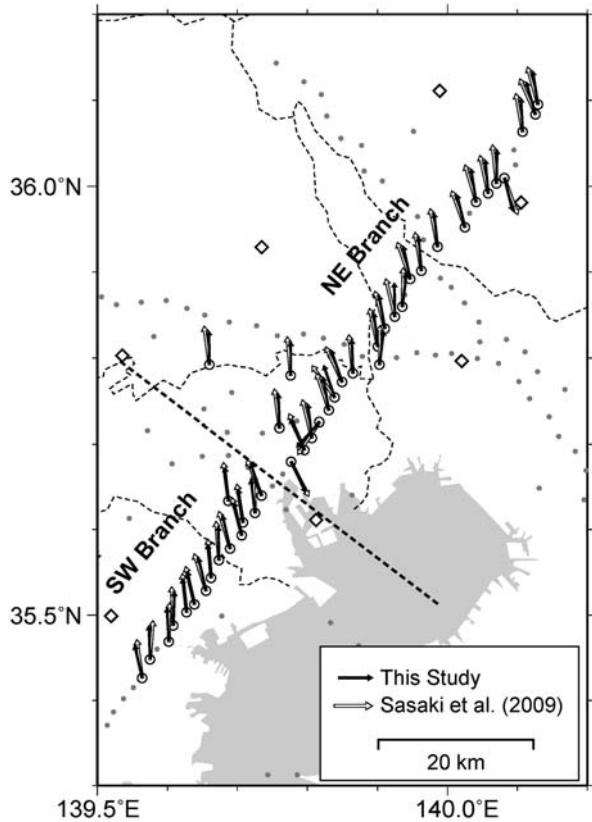


Fig. 5. N -component sensor azimuths of the MeSO-net. Solid and open arrows represent azimuths estimated by this study and by Sasaki *et al.* (2009), respectively.

方位を推定することが出来なかったが、その他の観測点については、安定した結果が求まった。既に述べたとおり、MeSO-net 観測点では、地中地震計の N 成分は、磁北（およそ N-7°E）を向くように設置されている。設置方位を推定した観測点の約 6 割にあたる 97 観測点で、地中地震計の N 成分は、磁北±5°（N-12°E～N-2°E）の範囲に設置されており、8 割以上の観測点が磁北±10°（N-17°E～N3°E）の範囲に含まれる。その一方で、設置方位と磁北との差が 20° を超える点も 7 点（4%）あり、うち 3 点は 90° 以上の差が存在することを確認した。

5. 議論

本章では、まず、佐々木・他（2009）により、本解析とは異なる解析方法およびデータを用いて推定された設置方位と本解析の結果を比較し、両者の差異の特徴について検討する。次に、この差異について、仮説を挙げながら、原因の定性的な検討を行う。

佐々木・他（2009）は、2008 年 7 月 24 日に岩手県沿岸北部で発生した稍深発地震 ($Mj6.8$, 深さ 110 km) 時に、MeSO-net 観測点で収録された P 波初動の振動方向と

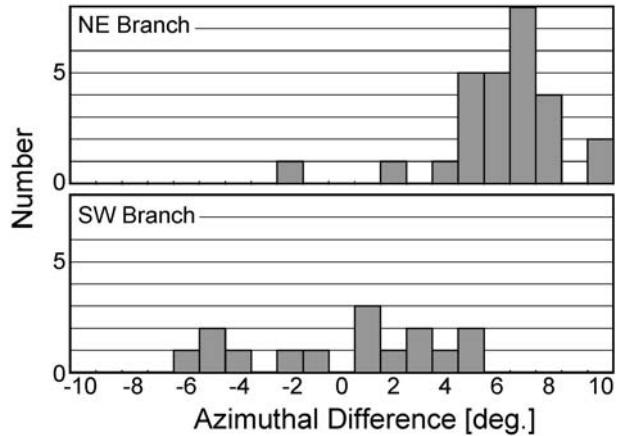


Fig. 6. Distribution of N -component sensor azimuthal differences estimated by this study and Sasaki *et al.* (2009).

震央方位角との比較から、地中地震計の設置方位を調べた。P 波初動の振動方向は、周期 5 s の低域通過フィルタを適用した加速度波形の粒子軌跡の固有値解析に基づき推定された。佐々木・他（2009）が方位を推定した 42 観測点について、その結果を Table 3 に記載するとともに、本解析の結果との比較を Fig. 5 に示す。Fig. 5 から、両者は、おおむね同一の結果を示していることが分かる。しかし、Fig. 5 を注視すると、本解析結果（黒矢印）の方が佐々木・他（2009）の結果（白矢印）よりも時計まわりに回転している観測点が多いことが分かる。この傾向は、特に、北東側に存在する観測点で顕著である。このことを確認するため、佐々木・他（2009）が検討対象とした 42 観測点を Fig. 5 で示した破線で 2 領域に分割し、それぞれの領域で推定された方位角の差の分布を調べた。結果を Fig. 6 に示す。Fig. 6 上段のグラフから、北東部の観測点では、本解析の結果の方が佐々木・他（2009）の結果に対して、7°程度時計まわりに回転しているという系統的な差異が存在することが分かる。これに対し、南西部に位置する 15 観測点では、両者の角度差は±5°程度の間にランダムに分布している（Fig. 6 下段）。

本解析で用いた解析方法は、基準として用いた Hi-net や F-net 地震計の設置方位との相対差を求めたに過ぎない。万一、北東部の観測点のみで使用した基準観測点の設置方位情報に 7°以上の誤差があった場合、観測されたような地域的な差異が発生する可能性は否定出来ない。この可能性を確認するため、Fig. 5 で北東-南西方向に直線上に並ぶ観測点に着目し、近接する MeSO-net 2 観測点 i と k で収録された記録の波形相関から、それぞれの観測点における地中地震計の相対的な設置方位差 $\xi(i,$

地震動の長周期成分を用いた首都圏地震観測網の設置方位推定

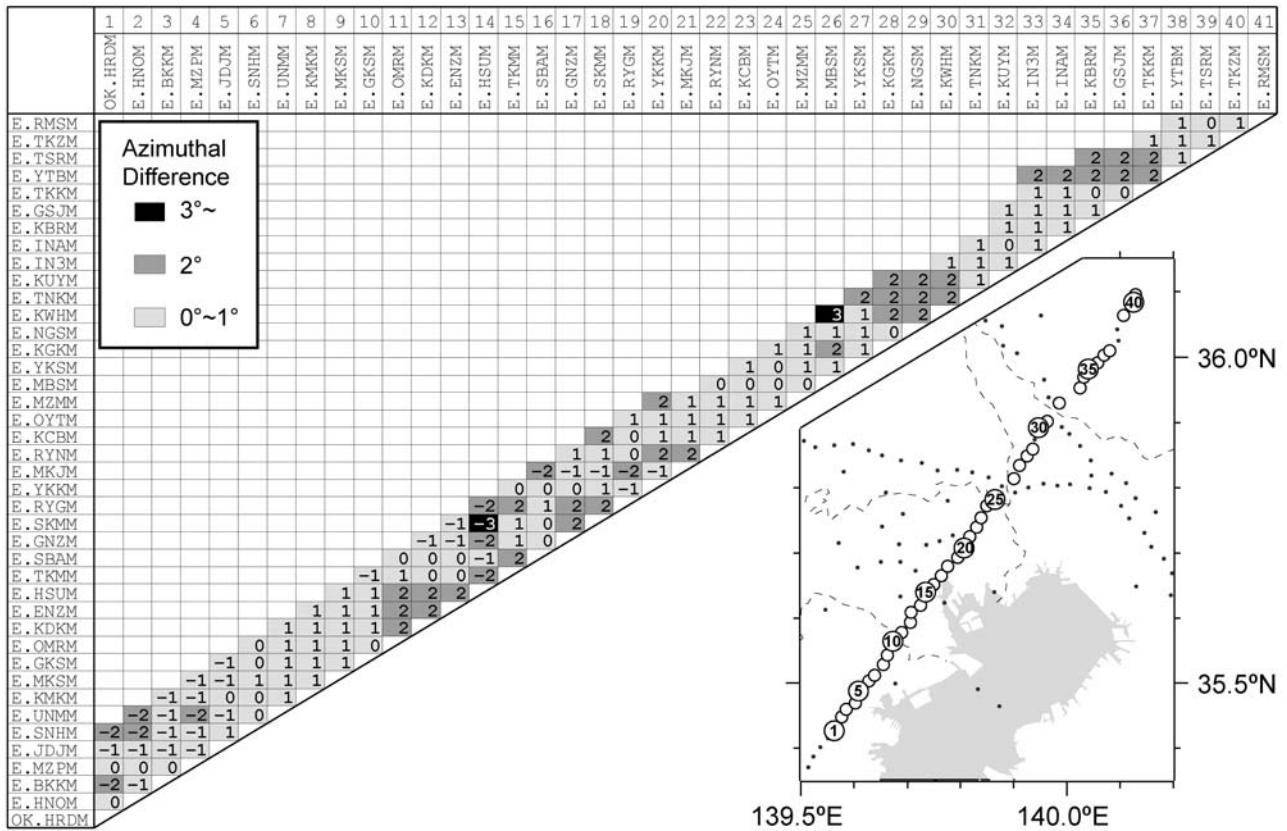


Fig. 7. Relative sensor azimuths differences $\{\xi(i, k) - \zeta(i, k)\}$ between MeSO-net stations within a 10-km interval. Relative sensor azimuths $\xi(i, k)$ are estimated by a cross-correlation analysis between MeSO-net stations i and k . $\zeta(i, k)$ are derived using absolute sensor azimuth at stations i and k estimated in this study (Table 3). Circles on the map show the locations of stations we evaluated.

k) を求めることとした。一方、本解析において推定した設置方位 (Table 3) から計算される MeSO-net 2 点間の設置方位差 $\zeta(i, k)$ を求め、両者の差分 $\xi(i, k) - \zeta(i, k)$ を求めた。結果を Fig. 7 に示す。Fig. 7 右下に示した地図中の白丸が対象とした観測点の位置を表しており、番号は、左上の表中の観測点コードに対応する。波形相関解析は、MeSO-net 2 観測点間の距離が 10 km 以内となる組に限定した。Fig. 7 に示した角度差 $\xi(i, k) - \zeta(i, k)$ の絶対値は、いずれも 3° 以下である。このことは、MeSO-net 観測点間の波形相関から推定される相対的な設置方位の差 $\xi(i, k)$ は、本解析で推定した絶対的な設置方位から推定される設置方位差 $\zeta(i, k)$ を、誤差の範囲で十分説明できることを意味しており、基準観測点の設置方位も十分な精度を有していることを意味する。

以上から、本解析および佐々木・他 (2009) により推定した設置方位の差の地域性は、解析方法や推定誤差に起因する可能性は非常に低い。汐見・他 (2003) は、北海道の日高山脈や釧路湿原周辺の Hi-net 観測点において、近地地震 P 波初動方位から求めた設置方位と遠地地

震表面波の波形相関から求めた設置方位の間に系統的な差異が存在することを示した。その原因として、彼らは、高速度な太平洋スラブが観測点下に存在することにより、P 波初動が回折した可能性を指摘した。関東地方北部下においても、観測点下に太平洋スラブが沈み込んでおり、茨城県南部から都区部周辺でスラブが湾曲していることが知られている (例えば、Ishida, 1992)。岩手県沿岸北部の稍深発地震は、太平洋スラブの二重地震面の下面で発生したスラブ内地震である (例えば、気象庁 地震知情報課, 2009)。したがって、観測網の北東部では、高速なスラブ内を伝播した波が初動として観測点に到達しており、スラブからの距離が一定以上となる南西部では、最短距離を伝播する波が初動となっている可能性がある。Fig. 8 に模式図を示す。簡単のため、地震計の N 成分が真北を向いている状態を考える。観測点からみた震源の方位を α とし、初動は、高速なスラブを回り込んで到達する (破線) とする。このときに初動の軌跡 (灰色の楕円) から推定される主軸の向きを β で表す。Fig. 8a は、 $\alpha < \beta$ の例に相当する。初動軌跡の主軸から

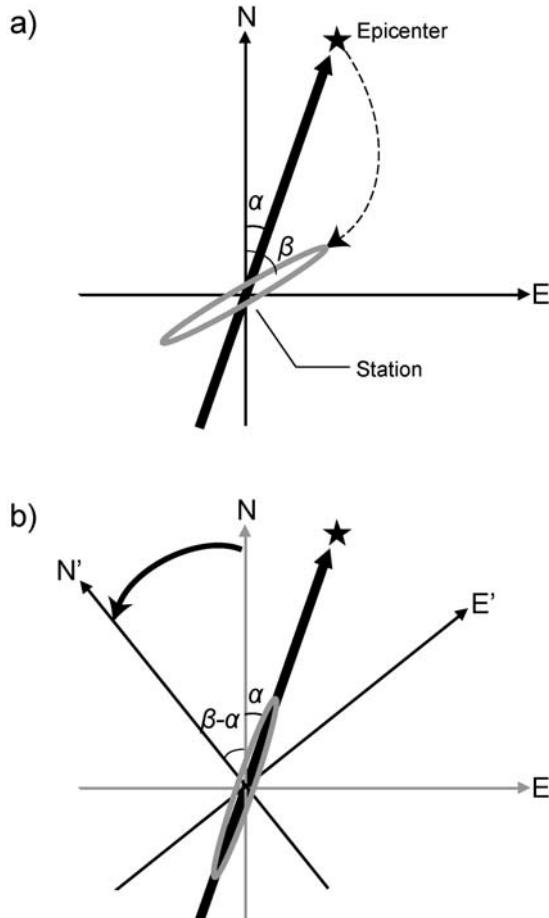


Fig. 8. Schematic illustration of seismic wave diffraction effect on sensor azimuth estimation.

(a) Star, dotted arrow, and thin arrows indicate epicenter, seismic ray pass, and sensor azimuths, respectively. Parameters α , β refer to back azimuth and azimuth of principal axis of P-wave first motion, respectively. Gray ellipse denotes particle motion of P-wave. (b) After rotating the sensor with $(\beta-\alpha)$ anticlockwise (thin arrows) to put the azimuth of the principal axis of P-wave on the backazimuth (thick arrow).

地震計設置方位を推定する場合、灰色の楕円の主軸を太矢印の向きにあうように水平成分を回転させるため、Fig. 8b に示すように、 $N(\alpha-\beta)E$ を地震計 N 成分の設置方位であると推定する。その結果、 $\alpha < \beta$ の場合、P 波初動軌跡を用いて推定した設置方位は、実際よりも逆時計まわりに回転した方位を指す。このことは、北東部の観測点で確認された事象と一致する。

首都圏では、湾曲した太平洋スラブが沈み込んでいることに加え、南関東地域では、太平洋スラブの直上にフィリピン海スラブが存在し、複雑な構成となっている [例えば、Nakajima *et al.* (2009), Uchida *et al.* (2009)]。今回確認した特徴は、MeSO-net で観測される地震波形

の P 波初動軌跡も、首都圏下の複雑な地下構造を解釈する上で、重要な情報を有することを意味している。

6. まとめ

孔底埋設型である MeSO-net 地中地震計の設置方位を、近傍に位置する防災科研 Hi-net および F-net で観測された地震動との相互相関解析に基づき推定した。MeSO-net の地中地震計 N 成分は磁北を向くように設置されている。本解析で設置方位を求めることが出来た観測点の 8 割以上で、 N 成分は磁北から $\pm 10^\circ$ 以内の方向に設置されていた。その一方で、設置方位が 90° 以上異なる観測点も 3 点存在することが確認された。P 波初動の粒子軌跡解析から求められた設置方位 [佐々木・他 (2009)] と本解析の結果を比較すると、観測網の北東部 (茨城県南部から東京都区部) で、両者の推定結果に系統的な違いが存在することが判明した。この違いは、観測点下に沈み込む太平洋スラブの存在に影響されている可能性が高い。このことは、MeSO-net の稠密な観測網が、首都圏下に存在するスラブ形状の推定に有効であることを意味している。

謝 詞

本稿における一部の図の作成には、Wessel and Smith (1998) による GMT を使用しました。また、遠地地震の抽出には、米国地質調査所 (USGS) の PDE 震源カタログを使用しました。ここに記して感謝の意を評します。本稿の取りまとめにあたり、査読者の飯高隆氏および本特集号編集委員の蔵下英司氏の労に対し、深く感謝いたします。

文 献

- 浜田和郎・大竹政和・岡田義光・松村正三・山水史生・佐藤春夫・井元政二郎・立川真理子・大久保 正・山本英二・石田瑞穂・笠原敬司・勝山ヨシ子・高橋 博, 1982, 関東・東海地域地殻活動観測網—国立防災科学技術センター—, 地震 2, 35, 401-426.
 平田 直・酒井慎一・佐藤比呂志・佐竹健治・嶺嶺一起, 2009, 「首都直下地震防災・減災特別プロジェクト」サブプロジェクト①「首都圏周辺でのプレート構造調査、震源断層モデル等の構築等」の概要, 地震研究所彙報, 84, 41-56.
 Ishida, M., 1992, Geometry and relative motion of the Philippine Sea plate and Pacific plate beneath the Kanto-Tokai district, Japan, *J. Geophys. Res.*, 97, 489-513, doi: 10.1029/91JB02567.
 地震調査研究推進本部 地震調査委員会, 2004, 相模トラフ沿いの地震活動の長期評価について, <http://www.jishin.go.jp/main/chousa/04aug_sagami/index.htm>, (参照 2009-10-29).
 笠原敬司・酒井慎一・森田裕一・平田 直・鶴岡 弘・中川茂樹・楠城一嘉・小原一成, 2009, 首都圏地震観測網

地震動の長周期成分を用いた首都圏地震観測網の設置方位推定

- (MeSO-net) の展開, 地震研究所彙報, **84**, 71–88.
- 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.
- 気象庁 地震予知情報課, 2009, 2008 年 7 月 24 日岩手県沿岸北部の地震 (M6.8) について, 地震予知連絡会会報, **81**, 186–195.
- 松本拓己・堀 貞喜・松林弘智, 2009, 広帯域地震観測—防災科研 F-net の 10 年—, 地震, **61 特集号**, S9–S18.
- Nakajima, J., F. Hirose, and A. Hasegawa (2009), Seismotectonics beneath the Tokyo metropolitan area, Japan: Effect of slab-slab contact and overlap on seismicity, *J. Geophys. Res.*, **114**, B08309, doi: 10.1029/2008JB006101.
- Okada, Y., K. Kasahara, S. Hori, K. Obara, S. Sekiguchi, H. Fujiwara, and A. Yamamoto, 2004, Recent progress of seismic observation networks in Japan — Hi-net, F-net, K-NET and KiK-net —, *Earth Planets Space*, **56**, xv–xxviii.
- 佐々木俊二・笠原敬司・酒井慎一・中川茂樹・森田裕一・鶴岡弘・平田 直・汐見勝彦・関根秀太郎・小原一成・棚田俊收, 2009, MeSO-net 観測点におけるボアホール地震計の設置方位の推定, 日本地球惑星科学連合大会予稿集 (CD-ROM), S221-P003.
- 佐藤暢彦・片山恒雄, 1983, 地中地震計埋設方位の推定, 第 17 回地震工学研究発表会講演概要, 土木学会, 115–118.
- 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.
- 汐見勝彦・小原一成・針生義勝・松村 稔, 2009, 防災科研 Hi-net の構築とその成果, 地震, **61 特集号**, S1–S8.
- Uchida, N., A. Hasegawa, J. Nakajima, and T. Matsuzawa (2009), What controls interplate coupling?: Evidence for abrupt change in coupling across a border between two overlying plates in the NE Japan subduction zone, *Earth Planet. Sci. Lett.*, **283**, 111–121, doi: 10.1016/j.epsl.2009.04.003.
- Wessel, P. and W.H.F. Smith, 1998, New improved version of the Generic Mapping Tools released, *EOS Trans. Am. Geophys. Union*, **79**, 579.

(Received October 30, 2009)

(Accepted November 30, 2009)