# エアガン発振記録を用いた東南海海底地震計の設置方位推定

Installation Azimuth of Tonankai OBS Estimated from Air-gun Data

# 林元直樹<sup>1</sup>, 干場充之<sup>1</sup> Naoki HAYASHIMOTO<sup>1</sup> and Mitsuyuki HOSHIBA<sup>1</sup>

(Received May 27, 2014: Accepted June 30, 2014)

**ABSTRACT:** In 2008, the Japan Meteorological Agency (JMA) began operating the Tonankai OBS. In this system, the gimbal mechanism helps keep the seismograph level, but the OBS cannot be installed correctly in the true bearing direction. The installation azimuth of the horizontal components of the Tonankai OBS was measured using only a Remotely Operated Vehicle (ROV). In this study, we estimate the installation azimuth of the Tonankai OBS from particle motion of air-gun signals recorded during the seismic survey period along survey lines KR11-09 and KR12-12. We apply a band-pass filter of 5–20 Hz to the waveforms, calculating the particle motion's direction of arrival using principal component analysis. The arrival direction results are statistically chosen automatically based on three requirements: the seismic wave signal-to-noise (S/N) ratio, the first principal component's contribution ratio, and the distance from shot point to station. The estimated difference from the ROV measurement is about 50 degrees at Tonankai 4, while it is less than about a dozen degrees at others. Rectifying the installation direction enables us to argue the correct polarities of incoming seismic waves.

## 1 はじめに

ケーブル式海底地震計(OBS)は、海域で発生す る地震の前線観測点として重要なツールである.気 象庁では東海地震・東南海地震の観測体制の強化な らびに緊急地震速報・津波予報の迅速化のため、東 海沖から熊野灘にかけてケーブル式常時海底地震観 測システム(東南海 OBS:地震計5点,津波計3点) を整備し,2008年10月より運用を開始した(齋藤 (2007)、気象庁(2008)).東南海 OBSの5地点の 地震計には、短周期速度型地震計と加速度計が3成 分1式ずつ搭載されている.それぞれの地震計はジ ンバルに搭載されているため、センサの水平は保た れているが、OBSは陸上の観測点と異なり、水平動 2 成分の方位が東西および南北に合わせて設置され ていない.

水平動成分を南北成分・東西成分へと変換するためには、センサの設置方位が必要であるが、東南海 OBSの設置方位は、設置時に無人潜水艇(ROV)で 測定された設置方位が存在するのみである.しかし ながら、ROVの測定値には誤差が大きい場合がある ことが指摘されている. 中野・他(2012)は,海洋 研究開発機構(JAMSTEC)が熊野灘に展開している 地震・津波観測監視システム(DONET, Kaneda et al. (2009))の地震計設置方位を地震動波形から推定し, 推定した地震計の設置方位と ROV で得られた方位 との違いは概ね10度程度であり,観測点によっては 最大50度近い差異がみられたことを報告し,観測記 録を用いた設置方位推定の重要性を示した.

上記のように、東南海 OBS の目的の一つは、緊急 地震速報の迅速化である.現在の緊急地震速報の単 独観測点処理では、B-Δ法(Odaka et al. (2003)、束 田・他(2004))により震央距離を、主成分分析法(気 象研究所地震火山研究部(1985))により震央方位を 推定する.OBS に単独観測点処理の震央方位推定手 法を適用する場合には、設置方位の誤差が初期の震 央推定結果に大きく影響することになる.本稿では、 緊急地震速報の単独観測点処理のように、水平動記 録の極性を利用するような解析に東南海 OBS を利 用することができるよう、観測記録を元に東南海 OBS の設置方位を推定した結果について報告する.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> 気象研究所地震津波研究部, Seismology and Tsunami Research Department, Meteorological Research Institute

### 2 手法およびデータ

中野・他(2012)では、(1)遠地地震の陸上観測 記録との相互相関による推定,(2)遠地地震のP波 初動の振動方向を用いた推定,(3) エアガンによる 振動波形を用いた推定の,3 つの手法を DONET の 設置方位推定に用いている.このうち,(1)と(2) については, DONET に設置された広帯域地震計を 用いて,長周期(0.008 Hz~0.1 Hz,あるいは 0.02 Hz ~0.05 Hz)の帯域での波形を利用したものであるが, 東南海 OBS では短周期速度計と加速度計のみが搭 載され、加速度計では長周期ノイズが報告されてい る(林元・干場, 2013) ことから, (1), (2) の方法 は東南海 OBS には不向きである. そこで本研究では, 1Hzよりも短周期側のシグナルを利用する,(3)の エアガン記録を用いた手法と同様の手法で、周辺海 域で実施された海域構造探査(KR11-09, KR12-12, Fig. 1) で得られた波形記録を用いて、東南海 OBS のセンサの設置方位の推定を行うこととした.

エアガンによって発生した水中音波は,海中を疎 密波として伝わる.Fig.2に,東南海1(速度計)に おけるKR11-09の測線KI04での観測記録例を示す. 構造探査には,それらが地表や地中構造境界で反 射・屈折・変換した波(例えば,Fig.2中のa)を用 いて構造を解釈するのに対して,地震計設置方位の 推定には,観測点近傍まで水中を音波として伝播し た水中直達波(Fig.2中のb)そのものの記録を用い る.水中直達波は縦波のみであるので,その振動方 向はRadial成分に卓越し,水中音波の到来した方向 を示すことになる(Fig.3).すなわち,地震計の方 位は地震計に記録された水中直達波の振動方向と, エアガン発振点と観測点の座標から得られる地震波 の到来方向の比較により推定できる.本手法では, 東南海 OBS 周辺で実施された海域構造探査

(KR11-09, KR12-12)の発振時刻および発振座標の データを IFREE/JAMSTEC の「地設構造探査データ ベース」より入手して利用した.海水中の音波速度 を 1500m/s と仮定した場合の水中直達波の理論走時 から,各 OBS で記録された直達波およびその多重反 射波を 5 秒間切り出し,水中直達波の卓越周期であ る 5-20 Hz (Fig. 4)のバンドパスフィルタを適用し て,波形の振動方向を推定した.データはあらかじ め ROV で推定された地震計方位で水平動を仮の方 位へと変換しておき,波形の振動方向が示す方位と,



Fig. 1 Distribution of the OBS and seismic survey lines (KR11-09 and KR12-12). White inverted triangles indicate the location of the Tonankai OBS, and gray triangles depict DONET (JAMSTEC). The dashed black line indicates the Nankai trough axis.

観測点とエアガン発振点の位置から計算される実際 の地震波の到来方向とのずれを検出することで, ROV の測定値と実際の地震計設置方位とのずれを 抽出した.なお,東南海 OBS では,ジンバルにより 水平が保たれており,ケーブルの陸側方向を地震計 のX成分の正の方向として,右手系の配置(Z軸が 鉛直上方に正,Y軸がX軸から反時計回りに90°回 転した方向)となっている.ROVではケーブルの方 向であるX軸の方位を測定している.

水平動波形記録より振動方向を抽出する際,例え ば海域構造探査に用いる自己浮上型 OBS の方位推 定では,Nakamura et al. (1987)のように,観測点直 近でのエアガン記録における水中直達波の水平 X・ Y 成分の振幅比を用いて観測点座標とともに算出さ れることが多い.中野・他 (2012)では,振動方向 の検出のために,水平動波形のパーティクルモーシ ョンを,

$$Y_i(t) = a_i X_i(t) + b_i \tag{1}$$

のように最小二乗法で直線近似し、分布の傾き*a*を 求め、

$$\theta = \tan^{-1}(a) \tag{2}$$



Fig. 2 Waveform (velocity) examples observed at TT10BS during a survey of KI04 (KR11-09): (top) waveform examples, (middle) observed record section, and (bottom) bathymetry data. A reduction velocity of 6 km/s is used for the vertical component travel time (left) and 1.5 km/s for the radial component (right). A band-pass filter of 5–20 Hz is applied.



Fig. 3 Three-component waveforms observed with the TT1OBS velocity seismograph from the shot indicated by the star in Fig. 2 as well as the particle motion for the range indicated by the dotted lines. A band-pass filter of 5–20 Hz is applied to the waveforms.



Frequency (Hz)

Fig. 4 Fourier spectra with the TT1OBS velocity seismograph from the shot indicated by the star in Fig. 2. The black and gray lines indicate the spectra of the horizontal and vertical components, respectively. The unhatched area indicates the frequency band used for this analysis.

として得る手法を用いている.ここで、 $\theta$  は振動 方向と X 軸とのなす角である.ただし、 $\theta$  が 90° に近い場合に正接関数の発散の影響により不安定に なるため、通常は、X 軸と推定方位とのなす角が大 きい場合には、

$$X_i(t) = a_i' Y_i(t) + b_i' \tag{3}$$

として,

$$\theta = 90 - \tan^{-1}(a') \tag{4}$$

により推定される(例えば, 汐見・他, 2012).

ただし、(1)式((3)式)のような回帰分析では、 回帰直線とパーティクルモーションの各座標におい て、目的変数のY軸(X軸)方向での距離が最小と なるように推定されるため、データの相関係数が低 いほど回帰直線が実際の傾きより説明変数のX軸

(Y軸)側に傾いてしまい, θ を過小(過大)に推定することとなる. 例えば, S/N 比や最大振幅がある閾値以上のデータに限定することや,相関係数の高いデータのみを用いることで誤差の影響を軽減することは可能であるが,根本的な解決とはならない. そこで本解析では,振動方向の検出に直線回帰ではなく,主成分分析を用いて推定した第一主成分の方位を検出する手法を用いることとした.

主成分分析による振動方向の検出とは、時刻tにおける 3 成分の振幅値をそれぞれ $wav_1(t)$ , $wav_2(t)$ , $wav_3(t)$ として、

$$\mathbf{f}(t) = (wav_1(t) \quad wav_2(t) \quad wav_3(t))^{\mathrm{T}}$$
(5)

とおくとき、この振動方向を,

$$Z_1(t) = \mathbf{f}^{\mathrm{T}}(t)\mathbf{x}$$
(6)

という変換を考え,

$$\sum \{Z_1(t)\}^2 \to \max \tag{7}$$

となるベクトル X を求めることである (気象研究 所地震火山研究部, 1985). オフセットを除去し, 5–20 Hz のバンドパスフィルタを適用した 3 成分波形記 録  $wav_i(t)$  を元に, 次のように分散・共分散行列を 作成する.

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{bmatrix}$$
(8)

ここで,

(1

$$\sigma_{pq} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^{N} \left[ wav_{p}(k) \times wav_{q}(k) \right]$$

$$\leq p \leq 3, \quad 1 \leq q \leq 3$$
 (9)

である.この行列 A の最大固有値  $\lambda_1$  を推定し, Ax =  $\lambda_1 x$  を満たす固有ベクトル(第一主成分)である x ,

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{e}_{ns} & \boldsymbol{e}_{ew} & \boldsymbol{e}_{ud} \end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$$
(10)

を算出することで,式(7)を満たす固有ベクトル X が 得られ,得られた固有ベクトル X から,

$$\theta = \tan^{-1} \left( e_{ew} / e_{ns} \right) \tag{11}$$

として入射方位を算出した.この主成分分析による 入射方位推定の手順は,緊急地震速報の単独観測点 処理で採用している手法とほぼ同様の手法である. ただし,得られた方位には 180°の任意性が存在す るため,2つの解のうち ROV の測定方位に近い方を 解とした.

また,総ショット数 40,000 回にもおよぶデータから,推定に有効なデータのみを抽出するため,それ ぞれのショットで得られた振動方向のデータを,シ グナルの S/N 比,主成分分析による第一主成分の寄 与率,および観測点と発振点との水平距離の3つの



Fig. 5 Installation azimuth estimated from each particle motion at TT1OBS. (a) Correlation diagram of S/N ratio and azimuth difference, which is the deviation between the installation azimuth estimated from each particle motion and that measured by ROV. In this paper, the azimuth difference is given as (direction measured by ROV) – (direction estimated from particle motion). (b) Correlation diagram of contribution ratio and azimuth difference. (c) Correlation diagram of S/N ratio and contribution ratio. (d) Correlation diagram of contribution ratio and epicentral distance. Black symbols indicate good quality data chosen statistically.





Table 2 Installation azimuth of DONET estimated from the particle motion of air-gun signals and comparison with the results of Nakano et al. (2012). Angles are clockwise from the North.

Station	X (deg)	Nakano et al.,2012	diff.
		X (deg)	
KMA01	132	129	3
KMA02	160	157	3
KMA03	318	316	2
KMA04	312	310	2
KMB05	244	245	-1
KMB06	204	202	2
KMB07	156	155	1
KMB08	165	164	1
KMC09	243	245	-2
KMC10	122	123	-1
KMC11	12	9	3
KMC12	278	282	-4
KMD13	155	154	1
KMD14	352	354	-2
KMD15	352	357	-5
KMD16	211	210	1
KME17	293	291	2
KME18	291	292	-1
KME19	116	116	0
KME20	214	214	0

\* The installation azimuth of KMD15 is estimated only from velocity seismograph, and that of KME18 is estimated only from acceleration seismograph.

Table 1 Installation azimuth of the Tonankai OBS estimated from the particle motion of air-gun signals. "AVERAGE X" indicates the average of installation azimuths estimated from acceleration seismographs and velocity seismographs. Angles are clockwise from the North.

Station	Sensor	X (deg)	S.D.	Ν	AVERAGE	ROV_X
					X (deg)	(deg)
TT10BS	acc.	54	4	5233	54	40
	vel.	54	3	5052	54	40
TT2OBS	acc.	87	4	7067	86	00
	vel.	86	3	6979	80	90
TT3OBS	acc.	83	6	4540	84	90
	vel.	84	4	5087	04	90
TT4OBS	acc.	356	4	8009	356	50
	vel.	356	4	8175	550	50
TT5OBS	acc.	33	5	4162	33	50
	vel.	32	5	4386	33	30

条件によって自動選別して統計処理することで,最 終的な地震計設置方位の推定を行うこととした.こ こで,寄与率とは第一主成分の分散で元の変量の分 散をどの程度説明できるかを示す値であり,

$$\gamma_1 = \lambda_1 / trace \mathbf{A} \tag{12}$$

で定義される(気象研究所地震火山研究部,1985). 寄与率が大きいほど,パーティクルモーションの振動方向を第一主成分のみで代表することができていること,すなわちパーティクルモーションが一方向に卓越していることを示しており,この寄与率で推定方位の確からしさを評価できる点も,主成分分析を用いるメリットの1つであるといえる.

解析には,東南海 OBS に搭載されている速度計と 加速度計の両データを用いた.なお,手法の精度検 証のために, DONET についても同様に設置方位推 定をおこない,中野・他(2012)の結果と比較して 検証した.

### 3 結果

東南海1 観測点(TT1OBS)の加速度計における 各ショットでの推定方位について,実方位との差を, 波形の S/N 比・寄与率・震央距離と比較した例を Fig. 5 に示す. S/N 比は, 方位推定に用いた時間窓と, 理論到達時刻の6秒前から1秒前までの5秒間の時 間窓との、3成分合成波形の分散比より求めた.通 常 S/N 比が良いほど、また寄与率が高いほど推定方 位は安定する.ただし,発振点との距離が近く,変 換波が混在するような場合には、S/N 比が高くても 寄与率が低くなってしまうことがある.また,発振 点が遠すぎるとシグナルが小さい上に特定の入射方 位角にデータが偏ることとなる. そこで, S/N 比が 5.0 以上, 寄与率 75%以上, 震央距離が 5km 以上, 100km 以下となるデータを最終的な方位推定に用い ることとし、すべての観測点にパラメータを変えず、 この3つの条件のみを閾値としてデータ選別を行っ た.

Fig. 6 に東南海 OBS の ROV による測定値と,推 定された方位との差異を示す.推定された東南海 OBS の設置方位は,東南海4(TT4OBS)で ROV の 測定方位から約 50 度のずれがみられたほか,その他 の地点でも数度から 10 数度のずれが検出された (Table 1).推定方位は速度計と加速度計で一致して おり,標準偏差はいずれも 3~5 度程度である.なお, 本手法で得られた DONET の方位は,中野・他(2012) の推定結果と概ね一致している(Table 2).

#### 4 考察

# 4.1 振動方向の方位依存性について

ROVによる測定方位と、各ショットの推定方位と の残差を入射方位角ごとにみると、わずかな方位依 存性が確認できる観測点が存在する.Fig.7に示す ように、DONETのKMA03のように、方位角によら ずほぼ一定な観測点のほか、TT1OBSのように方位 角によって振動方向に系統的なずれが認められる観 測点がある.最終的な推定方位との残差を地図上に プロットすると、観測点を中心として、南西方向に 傾き下がる海底地形の傾きと入射方位角による残差 分布に何らかの関係があるようにみえることから、 海底地形の影響などが推察される.ただし、TT1OBS と KMA03のように近接した観測点でもその程度は 異なる.現象の成因は興味深いが、本論文の目的を







Fig. 8 The velocity waveform at TT5OBS (inverted triangle) for the Mj 5.2 event in August 12, 2011 (star symbol). The solid and dashed lines indicate the arrival time of P and PS converted waves, respectively.

超えることもあり,事例の紹介に留める. なお,方 位依存性が認められる場合も,全体の標準偏差は概 ね5度以内に収まっている.

## 4.2 推定方位の確からしさの検証

エアガン波形の振動方向による方位推定では、推 定値に180度の任意性が生じる.振動方向として得 られる 2 つの方位のうち,設置方位が ROV の測定 方位に近いものを解としたが、検証が必要である. そこで、観測点周辺で発生した地震の波形初動部分 の極性より,推定方位の妥当性を確認した. Fig. 8 は,2011年8月12日に発生した遠州灘の地震(M5.2, 深さ 27km) における東南海 5 (TT5OBS) の速度計 での観測波形の例である.波形には、今回推定した センサ方位で補正をおこなった後, 1-20 Hz のバン ドパスフィルタをかけ、水平動は拡大して示してい る.P波到達後約1.5秒後に,水平動で顕著なPS変 換波が確認できるが、P 波初動部分の上向きを正と する上下動成分と震源から見た観測点の方向を正と する Radial 成分の波形は相似であり、正の相関を持 っていることから,推定した観測点の方位が確から しいことを確認できる.このほか東南海 OBS のすべ ての観測点において,近地地震でのP波初動部分の 極性をもって、推定方位の確からしさを確認するこ とができた.



Fig. 9 Example of application of the Principal Component Analysis (PCA) method used in EEW. (Left) The acceleration waveform at TT50BS for the same event in Fig. 8. (Center) The displacement waveform calculated from the acceleration waveform. A band-pass filter was applied in the range of 1–2 Hz. (Right) The particle motion of displacement waveform for 1.1 seconds after the arrival time of the P wave. The blue open arrow indicates the PCA method results, while the gray arrow indicates real back azimuth.

# 4.3 緊急地震速報の単独観測点処理における方位 推定

Fig.9は, Fig.8と同様の地震の加速度波形を積分 して変位波形とし、1-2Hzのバンドパスフィルタを 適用して、P波到達後から1.1秒の水平動のパーテ ィクルモーションを示したものである.これは、緊 急地震速報の単独観測点処理での方位推定に用いて いる条件と同じである.Fig.8同様、パーティクル モーションは震央方位を指して振動しており、地震 計設置方位を正確に補正することで、OBSにおいて も単独観測点処理で震央方位が推定可能であると考 えられる.東南海 OBSの周辺海域では地震活動度が 低いが、単独観測点処理の OBS への適用可能性につ いては、今後データを蓄積し検討をおこないたい.

# 4.4 主成分分析による推定結果と直線回帰による 推定結果との比較

最後に,直線回帰による推定結果と主成分分析に よる推定結果との違いを確認した.Fig.7と同様の KMA03におけるショット毎の推定方位残差と入射 方位角との関係について,主成分分析による結果と 直線回帰による結果との比較をFig.10に示す.Y軸 が北,X軸が東に正となるように回転しているため, 方位角はY軸から時計回りの角度となる.直線回帰 の結果は,(1)式を適用した結果(Fig.10(c))では方 位角が0°,180°に近づくほど,(3)式を適用した結 果(Fig.10(d))では方位角が90°,270°に近づく ほど振動方向から得られる推定値が確からしい値か ら片方向に外れていることがわかる.このずれは2 章で述べたとおりデータの相関性の程度を反映して おり,最終的な方位推定に採用しなかった灰色で示 すデータで特に顕著である.X軸方向とY軸方向の 振幅比を用いてより確からしい式を選択した結果で も,特に式が切り替わる方位角45°,135°,225°, 315°付近で,式の違いによる系統的なずれが残留し ており(Fig. 10(b)),主成分分析による結果のほう が推定値の標準偏差がやや小さい.この傾向は他の 多くの観測点で確認でき,主成分分析を用いること で方位角によらずより確からしい振動方向の推定が 可能であることを示している.なお,濃い色で示し た確度の高いデータの選別には,主成分分析による 第一主成分の寄与率を用いていることにも注意した い.寄与率を用いることで,データの相関性と推定 方位の確からしさを同時に表現する指標が得られた.

# 5 まとめ

東南海 OBS の地震計設置方位を, 周辺で行われた 海域構造探査のエアガン波形より推定した. 推定さ れた方位は、設置時に ROV で測定された方位と比 較して, 東南海4観測点 (TT4OBS) で 50 度近いず れがみられたほか、その他の地点でも数度から 10 数度のずれが検出され, 地震波形を用いた地震計設 置方位推定の重要さを示す結果となった.また,振 動方向の推定に主成分分析を用いたことで、直線回 帰で生じる推定方位に依存した誤差を抑えることが できたほか、第一主成分の寄与率を方位推定に用い るデータの選別基準として用いることで、どの観測 点でも一定の基準で推定結果の精度を評価すること ができた. 推定した東南海 OBS の設置方位を用いて 補正をおこなうことで, OBS においても緊急地震速 報の単独観測点処理における震央方位推定のような 水平動の振動方向を用いた解析が可能となった.本 稿での推定結果は、既に緊急地震速報の実処理に反 映され,情報の精度改善に貢献している.



Fig. 10 Comparison of azimuth differences between the measurement by ROV and by particle motion at KMA03. (a) Principal Component Analysis (PCA) results. (b) Regression Analysis (RA) results chosen from formulas (1) and (3). (c) RA of formula (1) results. (d) RA of formula (3) results. Black symbols indicate good quality data chosen statistically.

#### 謝辞

査読者である気象庁地震火山部の青木重樹氏には、 本稿を改善する上で大変有益なご助言を頂きました. 本稿では気象庁の東南海 OBS のほか、「地震・津波 観測監視システムに係る観測データ等の相互交換に 関する協定」に基づき、JAMSTEC より気象庁に提 供いただいている DONET の波形データを利用しま した.構造探査のエアガン発振位置座標と発振時刻 (「紀伊半島沖における地震探査および自然地震観 測調査研究(KR11-09)」および「紀伊半島沖〜東海 沖における地震探査および自然地震観測調査研究 (KR12-12)」)は、IFREE/JAMSTEC「地殻構造デー タベース」より入手し利用しました.作図には GMT (Wessel and Smith, 1991)を使用しました.記して 感謝いたします.

### 文献

- 気象研究所地震火山研究部 (1985): 自動検測手法の研 究,気象研究所技術報告, 16, 56-100.
- 気象庁 (2008): 東海・東南海沖に新たに整備した「ケー ブル式常時海底地震観測システム」のデータ運用開始, 気象庁報道発表資料, http://www.jma.go.jp/jma/ press/0809/29b/obs.html, (2014年12月1日現在).
- 齋藤祥司 (2007): 東海沖から熊野灘に新たに整備する ケーブル式海底地震計システムについて,月刊地球, 29(8),516-522.
- 汐見勝彦 (2012): 防災科研 Hi-net 地中地震計設置方位 推定方法の改良,防災科学技術研究所研究報告, 80, 1-20.
- JAMSTEC: 地 殻 構 造 探 査 デ ー タ ベ ー ス , https://www.jamstec.go.jp/jamstec-j/IFREE\_center/index. html, (2014 年 12 月 1 日現在)
- 東田進也,小髙俊一, 芦谷公稔,大竹和生,野坂大輔 (2004): P 波エンベロープ形状を用いた早期地震諸元 推定法,地震 2, 56, 351-361.
- 中野 優, 利根川貴志, 金田義行 (2012): 地震動波形から推定した DONET 地震計の方位, JAMSTEC-R, 15, 77-89.
- 林元直樹,干場充之 (2013): 緊急地震速報における東南 海海底地震計活用のための走時補正・マグニチュード 補正の検討, 験震時報, 76, 69-81.
- Kaneda, Y., K. Kawaguchi, E. Araki, A. Sakuma, H. Matsumoto, T. Nakamura, S. Kamiya, K. Ariyoshi, T.

Baba, M. Ohori, and T. Hori (2009): Dense Ocean floor Network for Earthquakes and Tsunamis (DONET) –Development and Data application for the mega thrust earthquakes around the Nankai trough–, Eos Trans. AGU, 90(52), Fall Meet. Suppl., Abstract S53A-1453.

- Nakamura Y., P. L. Donoho, P. H. Roper, and P. M. McPherson (1987): Large-offset seismic surveying using ocean-bottom seismographs and air guns: Instrumentation and field technique, Geophysics, 52(12), 1601-1611.
- Odaka, T., K. Ashiya, S. Tsukada, S. Sato, K. Ohtake and D. Nozaka (2003): A new method of quickly estimating epicentral distance and magnitude from a single seismic record, Bull. Seism. Soc. Am., 93, 526-532.
- Wessel, P. and W. H. F. Smith (1991): Free software helps map and display data, EOS Trans. AGU, **72**, 441-446.

(編集担当 福満修一郎)