稠密海底地震観測による 2003 年十勝沖地震の余震分布

東京大学地震研究所*	山田 知 朗・篠 原 雅 尚
	金 沢 敏 彦・平 田 直
海洋研究開発機構**	金 田 義 行
北海道大学大学院理学研究科***	高 波 鐵 夫
海洋研究開発機構**	三ヶ田 均・末 廣 潔
東京大学地震研究所*	酒 井 慎 一
海洋研究開発機構**	渡 邊 智 毅
九州大学大学院理学研究院****	植 平 賢 司
北海道大学大学院理学研究科***	村 井 芳 夫
海洋研究開発機構**	高 橋 成 実
東北大学大学院理学研究科*****	西 野 実
東京大学地震研究所*	望 月 公 廣
海洋研究開発機構**	佐 藤 壮・荒木英一郎
東北大学大学院理学研究科*****	日 野 亮 太
気象庁地震火山部*****	宇 平 幸 一
東京大学地震研究所*	塩 原 肇
九州大学大学院理学研究院****	清 水 洋

Aftershock Distribution of the 2003 Tokachi-oki Earthquake Derived from High-dense Network of Ocean Bottom Seismographs

Tomoaki YAMADA, Masanao SHINOHARA, Toshihiko KANAZAWA and Naoshi HIRATA
Earthquake Research Institute, University of Tokyo, Yayoi 1-1-1, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0032, Japan

Yoshiyuki KANEDA

Independent Administrative Institution, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology,
2-15 Natsushima-cho, Yokosuka 237-0061, Japan

Tetsuo TAKANAMI

Institute of Seismology and Volcanology, Hokkaido University, Kita 10 jyo, Nishi 8 chome,
Kita-ku, Sapporo 060-0810, Japan

Hitoshi MIKADA and Kiyoshi SUEHIRO

Independent Administrative Institution, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology,
2-15 Natsushima-cho, Yokosuka 237-0061, Japan

* 〒113-0032 東京都文京区弥生 1-1-1

** 〒237-0061 横須賀市夏島町 2-15

*** 〒060-0810 札幌市北区北 10 条西 8 丁目

**** 〒855-0843 島原市新山 2-5643-29

***** 〒980-8578 仙台市青葉区荒巻字青葉

***** 〒100-8122 東京都千代田区大手町 1-3-4

Shin'ichi SAKAI

Earthquake Research Institute, University of Tokyo, Yayoi 1-1-1, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0032, Japan

Tomoki WATANABE

Independent Administrative Institution, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology,
2-15 Natsushima-cho, Yokosuka 237-0061, Japan

Kenji UEHIRA

Institute of Seismology and Volcanology, Kyushu University,
2-5643-29 Shin'yama, Shimabara 855-0843, Japan

Yoshio MURAI

Institute of Seismology and Volcanology, Hokkaido University, Kita 10 jyo,
Nishi 8 chome, Kita-ku, Sapporo 060-0810, Japan

Narumi TAKAHASHI

Independent Administrative Institution, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology,
2-15 Natsushima-cho, Yokosuka 237-0061, Japan

Minoru NISHINO

Graduate School of Science, Tohoku University, Aoba-ku, Sendai 980-8578, Japan

Kimihiro MOCHIZUKI

Earthquake Research Institute, University of Tokyo, Yayoi 1-1-1, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0032, Japan

Takeshi SATO and Ei'ichiro ARAKI

Independent Administrative Institution, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology,
2-15 Natsushima-cho, Yokosuka 237-0061, Japan

Ryota HINO

Graduate School of Science, Tohoku University, Aoba-ku, Sendai 980-8578, Japan

Kouichi UHIRA

Seismological and Volcanological Department, Japan Meteorological Agency,
Ohtemachi 1-3-4, Chiyoda-ku, Tokyo 100-8122, Japan

Hajime SHIOBARA

Earthquake Research Institute, University of Tokyo, Yayoi 1-1-1, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0032, Japan

Hiroshi SHIMIZU

Institute of Seismology and Volcanology, Kyushu University,
2-5643-29 Shin'yama, Shimabara 855-0843, Japan

(Received April 15, 2004; Accepted September 30, 2004)

The 2003 Tokachi-oki earthquake (M_j 8.0) occurred in the area off the southeastern coast of Hokkaido in northern Japan at 19:50 UTC, 25 September 2003. Five days after the mainshock, we constructed a dense seismic array using pop-up type ocean bottom seismometers (OBSs) to obtain a detailed aftershock distribution. The observation lasted one and half months. We deployed in total 47 OBSs at 38 sites. The observation array covered a $150\text{ km} \times 100\text{ km}$ area, where a high aftershock

activity was estimated from a land seismic network. For accurate determination of aftershock distributions, we deployed OBSs with a spacing of 15 km near the trench in contrast to 20 km in the landward region. Hypocenters were determined by using a three-dimensional velocity structure based on the seismic refraction study. From an epicentral distribution, aftershocks occurred within the small slip region of the mainshock rather than the large slip region. In addition, the epicentral distribution of aftershocks except near the large slip region, is similar to that of the earthquakes occurring before the mainshock. The hypocentral distribution forms a dipping plane toward the land and we infer that this plane shows the upper boundary of the Pacific Plate. The position of the plate boundary estimated by the aftershock distribution is consistent with those estimated by the past seismic surveys.

Key words: The 2003 Tokachi-oki earthquake, Aftershock distribution, Focal depth, Ocean bottom seismometer

§ 1. はじめに

2003 年 9 月 26 日午前 4 時 50 分、十勝沖を震源とする 2003 年（平成 15 年）十勝沖地震 ($M_j 8.0$) が発生した。日本近海で発生した $M 8$ 以上の地震は、1994 年北海道東方沖地震 ($M_j 8.2$) 以来の地震である。2003 年十勝沖地震の付近では、1952 年に $M_j 8.2$ の十勝沖地震が発生しており、Yamanaka and Kikuchi (2003) によれば、2003 年の本震震源域は、この 1952 年十勝沖地震の震源域とほぼ同じで、同一の領域が繰り返すべったものと解釈されている。このようなプレート沈み込み帯における同じ領域の繰り返しすべりの存在は、東北地方において、Igarashi *et al.* (2003) や Yamanaka and Kikuchi (2004) が明らかにしており、プレートの沈み込みに伴い発生する地震を特徴づける重要な事象の一つである。2003 年十勝沖地震は、千島海溝沿いで発生する繰り返しすべりの重要な事例であると考えられる。

一般に大地震の精密な余震分布は、本震の破壊過程や余効的地殻活動を理解する上で、基礎となる情報をもたらす。しかしながら、2003 年十勝沖地震とそれに伴う余震は、主として海域下で発生しているので、陸上を中心に展開されている定常地震観測網のみでは、十分な精度が得られず、特に深さの精度が悪いことが予想される。本震震源域近傍では、海洋研究開発機構 (JAMSTEC) により、1999 年からケーブル式の海底地震総合観測システムが運用されている [Hirata *et al.* (2002)]。この運用開始により、地震検知能力および震源決定精度は、運用以前に比べて格段に向上している。しかし、ケーブル式海底地震計は 3 台のみで、観測点間隔が 30 km 以上離れていることから、余震域全体の震源を精度良く求めるには十分でない。そこで、我々は多点・高密度の海底地震計設置を計画した。一般に余震活動は時間とともに変化するため、本震の震源過程などを知る上では、本震発生後なるべく早い時期に観測を開始することが望ましい。そのため、我々は本震発生の 5 日後から

計 29 地点において、自己浮上式海底地震計による観測を開始した。その後観測点を追加し、延べ 47 台の自己浮上式海底地震計を使用した稠密な海底地震観測を行った。これまでも海域における地震発生後、自己浮上式海底地震計を用いた余震観測が実施され、精密な余震分布が得られている。例えば、Urabe *et al.* (1985) による 1983 年日本海中部地震 ($M_j 7.7$) や、Hino *et al.* (2000) による 1994 年三陸はるか沖地震 ($M_j 7.6$) の研究があるが、今回の地震はマグニチュードが大きく余震域が広いことが予想されたため、より多くの海底地震計を設置したこと、震源の深さ方向の精度をより向上するために観測点間隔を縮めたこと、さらに地震発生直後から観測を開始したことが特徴である。Shinohara *et al.* (2004) は、この稠密観測網の本震震央近傍に設置し、早期に回収した海底地震計 9 台のデータを用いて、本震震源付近の余震が 15–20 km の深さに分布していることを速報した。本稿では、本海底地震観測網の全データを使って 2003 年十勝沖地震震源域全体の震源分布を調べたのでそれを報告する。

§ 2. 観 測

海底地震計の配置を Fig. 1 に示す。地震計の展開にあたっては、本震のメカニズム解が低角逆断層型であり、プレート境界の地震と推定されていた [例えば、Yamanaka and Kikuchi (2003)] ことと、過去に十勝沖で実施された地震波速度構造探査 [Iwasaki *et al.* (1989)] の結果から得られているプレート境界の深さを考慮して、余震の震源を精度良く見積もることができるよう、各海底地震計の間隔は、海溝寄りでは 15 km 程度、陸寄りでは 20 km 程度とした。

観測期間は 2003 年 10 月 1 日から同年 11 月 20 日である。本期間中、地震計の入れ替えや追加などを行ったため、観測点配置は第一期と第二期の二つの期間で異なっている (Fig. 1)。第一期は 10 月 1 日から 10 月 20

Fig. 1. Configuration of the temporary high density seismic networks with bathymetry. Crosses denote OBS locations. Contour intervals of bathymetry are 1000m for solid lines. Left; The first period (Oct. 1-20, 2003). Right; The second period (Oct. 21-Nov. 20, 2003).

日までの期間であり、広帯域型地震計 1 台を含む、自己浮上式海底地震計 29 台による観測を行った。本震発生 3 日後にあたる 9 月 29 日に小名浜港を出港し、翌 30 日夜から現場海域で海底地震計設置作業を開始した。10 月 1 日から順次記録を開始し、翌 2 日未明に、第一期の観測網が完成し、全ての海底地震計で観測を開始した。第一期に設置した海底地震計は、緊急解析 [Shinohara *et al.* (2004)] を行うため、10 月 20 日から 21 日にかけて、本震時にすべりの大きかった領域 [Yamanaka and Kikuchi (2003)] を覆う 10 台について回収を試み、そのうち 9 台を回収した。残り 19 台については、全期間にわたって観測を行い、データを取得した。

第二期の観測は 10 月 21 日から 11 月 20 日までである。第一期から継続して観測を行っている 19 台の海底地震計に加えて、10 月 18 日から 21 日にかけて 18 台の海底地震計の追加設置を行った。このうち 9 台は、本震震源域近傍での観測を継続するため、第一期観測で回収作業を行った海底地震計近傍に設置した。また、第二期観測開始前に、余震域が北東に拡大する傾向が見られたため、残り 9 台は、主として観測網を北東側に拡大するように配置し、計 37 台による機動観測を実施した。

§ 3. 震源決定および余震分布

本観測により得られた海底地震計データから、地震波形速度振幅の短時間 (0.3 秒) 平均と長時間 (60 秒) 平均の比によるイベント検出を行った。次に、WIN システム [卜部・東田 (1992)] を利用して、目視による検出作業を行い、1475 個の地震について、P 波および S 波の

到達時刻の読み取りを行った。このうち、P 波あるいは S 波到達時の読み取り値があわせて 25 個以上あり、さらに 10 観測点以上で P 波と S 波の両方の到達時の読み取り値が得られた地震は 1169 個であった。この手動読み取り値を利用して、震源計算を行った。その際、プレート沈み込みの影響を考慮するため、本観測網を縦断する測線で行われた地震 P 波速度構造探査の結果 [Iwasaki *et al.* (1989)] に基づく速度構造モデルを使用した (Fig. 2)。ただし、この速度構造モデルでは、海溝軸に平行な方向には、速度構造が変わらないとしている。次に、本観測網を完全に覆うように、水平面内の測線方向 135 km、測線直交方向 185 km、鉛直方向深さ 60 km までを走時計算領域に設定し、この領域内の水平および深さ方向共に 500 m 間隔の格子点上に速度を与えて、Podvin and Lecomte (1991) により各海底地震計から各格子点までの走時を 3 次元で計算した。その際、S 波走時は、P 波走時の 1.73 倍とした。次に、プログラム NLL [Lomax *et al.* (2000)] を利用して、八分木を用いた探索により以下のように震源位置を推定した。始めに計算領域を一辺 5 km のセルに分割し、各セルの中心に仮想震源をおいて、グリッドサーチを行う。このうち、単位体積あたりの走時残差がもっとも小さくなるセルについては、各辺を二等分して八つのセルに分割する。これを再帰的に繰り返し、総セル数が一定値を超えたところで計算を終了し、最も走時残差が小さくなるセルの中心を、震源とした。最終的には、震源の誤差に対して十分セルのサイズが小さくなるように、各地震に対して、総セル数が 500,000 個を超えるまで、セルを分割した。また、

Fig. 2. (a) The velocity structure model for the hypocentral determination. Thick line indicates the profile of the seismic prospecting by Iwasaki *et al.* (1989). Contour intervals are 1.6 km/s. Crosses denote OBS. (b) The region for the hypocentral locations. Rectangle indicates the region where travel times were calculated for the location. Thick line indicates the same as (a), and numerals along the line show the distance from the trench axis, in km. Star shows the epicenter of the 2003 Tokachi-oki earthquake by Japan Meteorological Agency (JMA).

震源計算の際には、以下の手順で求めた観測点補正值を導入した。始めは観測点補正值を加えずに、震源計算を行い、次に全地震に対する P 相・S 相の観測点ごとの走時残差平均を補正值として、震源再計算を行う。再び求められた走時残差平均を最初の補正值に加えて、震源再計算を行う。各観測点の走時残差の平均値がいずれも 0.01 s 以下になるまで繰り返し、最終的な値を観測点補正值とした。このようにして震源を決定した中で、水平方向および深さ方向共に標準誤差が 1 km 以内で、かつ走時残差の自乗平均平方根 (RMS) 値が 0.5 秒未満の地震は 793 個であった。これらの震源分布を Fig. 3 に示す。

Fig. 3 の震央分布図によると、震央は一様に分布しているのではなく、いくつかの領域に集中している。まず

本震破壊開始点 (本震震源) 近傍では、東側に余震の集中域が見られるが、北側や南側では目立った活動はみられず、余震活動が必ずしも高くないことがわかる。一方、本震震源から北東 30 km 付近では、余震が集中的に発生している。さらにその北東側にあたる北緯 42 度 10 分、東経 144 度 35 分付近では、周囲に比べて余震活動は極めて低調である。

次に震源の深さ分布を見ると、海溝よりの部分では深さ 12–13 km を中心に分布しているのに対して、観測網の陸よりの部分では最深 47 km に達しており、陸に近づくにつれ徐々に深くなっている。

§ 4. 議 論

遠地実体波を用いて求めた本震のすべり量分布 [Yamanaka and Kikuchi (2003)] と、本観測による余震分布の比較を Fig. 4 に示す。本震時のすべり量が大きなところでは余震が少なく、むしろすべり量の小さな領域や、それらに隣接する東側の領域などに集中しており、大局的には本震時のすべり量とその後の余震活動が、空間的に相補的な関係にあるように見える。このような関係は、過去の多くの地震でも指摘されている [例えば、Hartzell (1989); Hirata *et al.* (1996)]。さらに、周囲に比べて余震活動が極端に少ない北緯 42 度 10 分、東経 144 度 35 分付近は、GPS を用いた解析から、大きな余効変動があったと推定されている領域 [Osawa *et al.* (2004)] と、おおむね一致している。ただし、細かく見ると、本震時のすべり量の大きなところや、余効変動が大きなところにも余震活動の集中域が存在している。したがって、本震時のすべりと余効変動、余震活動のすべての事象が相補的であると断定することはできず、今後より詳細な解析が必要である。

次に本観測により得られた震源分布と気象庁一元化震源の比較を示す (Fig. 5)。比較の対象とした地震の数は、573 個である。両者の震央には場所により系統的な差が認められる。本観測網の陸側から中心部辺りまでは、その差は数 km 程度であるが、もっとも陸から離れた観測網南東側では差が大きい。例えば、本観測による震央が北緯 41 度 50 分、東経 144 度 50 分から 10 km 以内のものをを見ると、震源の水平距離は一元化震源と比較して平均 26 km (標準偏差 4 km)、最大 33 km、震源の深さは平均 24 km (標準偏差 6 km)、最大 32 km ずれている。これらのずれの方向は、一元化震源から見て西北西 (平均 300 度、標準偏差 7 度) であり、おおむね陸寄りに決まっている。このように本観測による震源は、おおむね一元化震源と比較すると陸寄りに決まっており、その傾向は陸から離れるに従い顕著である。特に陸から

Fig. 3. Hypocentral distribution of aftershocks (open circles). Their P and S wave arrival times were read manually. The size of the circle corresponds to the magnitudes determined by JMA. Star shows the epicenter of the 2003 Tokachi-oki earthquake by JMA.

Fig. 4. Comparison of aftershock distribution as shown in Fig. 3 to the fault slip of the mainshock [Yamanaka and Kikuchi (2003)]. Contour with an interval of 1 m show the fault slip during the mainshock determined by Yamanaka and Kikuchi (2003). Star shows the epicenter of the mainshock by JMA.

100 km 程度離れた場所では、十勝沖の一元化震源は、系統的に沖合側に大きくずれているようである。

また、震源の深さは、Shinohara *et al.* (2004) による本震震源近傍の海底地震計を用いた緊急解析の結果と同様に、本観測結果は、一元化震源に比べて差が大きく、対象とした 573 個の地震のうち 88% が 10 km 以上、37% が 20 km 以上、最大で 54 km 浅く求まっている。過去に本海域で行われた海底地震観測の結果 [Hirata *et al.* (1989); Murai *et al.* (2003)] と同様に、本観測海域下においては、海底地震観測により求められる震源の深さは、陸域観測網による震源に比較して、浅くなる傾向がある。

次に本観測で得られた震源と、Iwasaki *et al.* (1989) による P 波速度構造を比較する (Fig. 6)。海溝軸から 100 km くらいまでの範囲では、Iwasaki *et al.* (1989) のプレート境界 (Fig. 6 の破線) に沿って、震源が分布している。これらの地震について、海底地震計の初動極性を用いて、震源メカニズム解を推定すると、おおむね低角逆断層型 (Fig. 7(c) 1~13) を示すことがわかった。これらの地震は、本震と同様に太平洋プレートの沈み込みに伴う、プレート境界型の地震と考えられ、震源分布と P 波速度構造によるプレート境界がよく一致してい

Fig. 5. Comparison of aftershock hypocenters determined by this study (gray circles) to the JMA (star).

Fig. 6. Aftershock distribution projected onto the vertical cross section perpendicular to the trench and P-wave velocity structure by Iwasaki *et al.* (1989). Contour intervals are 1.6 km/s. Dotted line denotes plate boundary by Iwasaki *et al.* (1989).

る。

さらに海溝軸から 100 km 以上離れた陸寄りの領域では、震源の下限付近は陸に向かってより急傾斜に深くなっているように分布している。実験上の制約から、Iwasaki *et al.* (1989) では、深部のプレート境界の推定は困難であるが、本研究で得られた震源分布から推定すると、海溝軸から 100 km 陸寄りの領域付近から、沈み込みの傾斜角が増加していることになる。

一方、Iwasaki *et al.* (1989) によるプレート境界であ

る Fig. 6 の破線より上側においても、多数の震源が分布している。これらの震源メカニズム解は Fig. 7(c) の 15 以降に示すように、横ずれ型などを示しており、プレート境界で発生している地震のメカニズム解とは異なっている。したがって、これらの地震は、プレート境界の上盤側のプレート内部において発生したものであると考えられ、本震に誘発するかたちで上盤側プレート内部における地震活動が活発化したものと思われる。

次に、海溝軸に平行な方向の震源分布の変化を見るた

Fig. 7. (a) Vertical cross sections for four regions labeled as AA', BB', CC' and DD' in (b) with projection of hypocenters of the aftershocks. Open circles denote hypocenters of aftershocks. (b) Region AA', BB', CC' and DD'. Contours are the same as in Fig. 4. (c) Focal mechanism solutions of aftershocks determined from P-wave first motion polarities. Lower hemisphere projection is used. The labeled number at the upper corner corresponds to event number in (a).

め、Fig. 7(a) に領域 A, B, C, D の震源の深さ断面図を示す。これらの深さ断面を見ると、南西部 (D) では、Iwasaki *et al.* (1989) でモデル化されているプレート沈み込み形状と、震源分布の深さ断面の傾斜が、海溝軸から 120 km 陸側の付近においてもおおむね一致している。一方、北東部 (A, B) では、先に指摘したように、震源分布の傾斜角が陸に近づくにつれて、より急になっている。このような震源分布がプレート境界を示していると考え、沈み込むプレートの形状が、本観測海域下において海溝軸と平行方向にも変化していることになる。Nakanishi *et al.* (2004) は、十勝沖の北東に位置する根室半島沖で地震波速度構造探査を行い、Iwasaki *et al.* (1989) と比べて太平洋プレートが急傾斜で沈み込む様子を明らかにしている。このような北東側で傾斜角が急になる構造は、本観測で得られた震源分布の傾きの違いの傾向と一致する。また、十勝沖は日本海溝から千島海溝に海溝軸の走向が急変する場に近く、太平洋プレートの沈み込みの方向自体も大きく変化していると思われる。このような事実は、本観測海域下において太平洋プレートの沈み込みに伴う 3 次元的不均質構造の存在を示唆しており、その大きなスケールの不均質構造は、プレート境界に位置する震源域近傍の微細な不均質構造の解明とあわせて、今後明らかにすべき課題の一つである。

§ 5. 結 論

本震発生 5 日後に、29 台の海底地震計による稠密機動観測を開始し、1.5 カ月間地震観測を行った。この間、のべ 47 台の海底地震計を使用し、46 台からデータを取得した。

この観測データを利用して求めた震央分布は、遠地実体波により求められた本震時のすべり量 [Yamanaka and Kikuchi (2003)] の大きな領域では余震活動が少なく、本震時すべり量の少ない領域や地震前から長期的に見て地震活動度の高いところなどに集中していた。震源の深さは、気象庁一元化震源に比べて、より浅くなる傾向がある。さらに、震央は陸から離れた沖合になるに従い、ずれ幅が大きくなる傾向が認められた。また、メカニズム解などからプレート境界で発生していると考えられる地震の分布は、陸側に向かって深くなる面上に分布しており、その傾斜角は、南西から北東にかけて大きくなっている。このような震源分布は過去に行われた地震波速度構造探査の結果と調和的であり、本観測海域下において沈み込む太平洋プレートの形状が海溝軸に沿って変化していることを示唆している。

謝 辞

海底地震計の設置・回収にあたり、新日本海事(株)「新竜丸」および「新辰丸」、海洋科学技術センター(現・海洋研究開発機構)「なつしま」、函館海洋気象台「高風丸」を使用させていただきました。各船長以下、乗組員の皆様のご協力に感謝いたします。海底機動地震観測の実施に際しては、関係各機関の多数の方々からご協力を賜りました。特に気象庁阿部正雄氏・北海道大学町田祐弥氏・九州大学堀美緒氏・日本海洋事業(株)の方々には、船上作業を含む観測作業を支援していただきました。また、データ整理に際しては、東京大学武田直人氏にご協力を賜りました。本研究を行うにあたり、北海道大学・弘前大学・東北大学・東京大学・名古屋大学・京都大学・高知大学・九州大学・鹿児島大学・独立行政法人防災科学技術研究所・独立行政法人産業技術総合研究所・東京都・静岡県・神奈川県温泉地学研究所・横浜市・独立行政法人海洋研究開発機構および気象庁により提供された地震波形をもとに、気象庁・文部科学省が協力してデータを処理した結果を使用させていただきました。作図に際して、Wessel and Smith (1998) による描画ソフトウェア GMT を使用しました。I. Selwyn Sacks 博士と、査読をしていただいた九州大学大学院の鈴木貞臣教授と匿名の方、および編集委員の京都大学防災研究所の大見士朗博士からは、本論文を改善するうえで有益なコメントをいただきました。

なお本研究は、文部科学省・緊急調査経費、地震予知研究計画経費、文部科学省・科学技術振興調整費緊急研究「2003 年(平成 15 年)十勝沖地震緊急調査研究」などの経費を用いて実施しました。

文 献

- Hartzell, S., 1989, Comparison of seismic waveform inversion results for rupture history of a finite fault: Application to the 1986 North Palm Springs, California, earthquake, *J. Geophys. Res.*, **94**, 7515–7534.
- Hino, R., S. Ito, H. Shiobara, H. Shimamura, T. Sato, T. Kanazawa, J. Kasahara and A. Hasegawa, 2000, Aftershock distribution of the 1994 Sanriku-oki earthquake (M_w 7.7) revealed by ocean bottom seismographic observation, *J. Geophys. Res.*, **105**, 21697–21710.
- Hirata, K., M. Aoyagi, H. Mikada, K. Kawaguchi, Y. Kaiho, R. Iwase, S. Morita, I. Fujisawa, H. Sugioka, K. Mitsuzawa, K. Suyehiro, H. Kinoshita and N. Fujiwara, 2002, Real-time geophysical measurements on the deep seafloor using submarine cable in the southern Kuril subduction zone, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, **27**, 2, 170–181.

- Hirata, N., T. Kanazawa, K. Suyehiro, T. Iwasaki and H. Shimamura, 1989, Observations of microseismicity in the southern Kuril Trench area by arrays of ocean bottom seismometers, *Geophys. J. Int.*, **98**, 55–68.
- Hirata, N., S. Ohmi, S. Sakai, K. Katsumata, S. Matsu-moto, T. Takanami, A. Yamamoto, T. Iidaka, T. Urabe, M. Sekine, T. Ooida, F. Yamazaki, H. Katao, Y. Umeda, M. Nakamura, N. Seto, T. Matsushima, H. Shimizu and Japanese University Group of the Urgent Joint Observation for the 1995 Hyogo-ken Nanbu Earthquake, 1996, Urgent joint observation of aftershocks of the 1995 Hyogo-ken Nanbu earthquake, *J. Phys. Earth*, **44**, 317–328.
- Igarashi T., T. Matsuzawa and A. Hasegawa, 2003, Repeating earthquakes and interplate aseismic slip in the northeastern Japan subduction zone, *J. Geophys. Res.*, **108**, B5, 2249, doi: 10.102/2002JB 001920.
- Iwasaki, T., H. Shiobara, A. Nishizawa, T. Kanazawa, K. Suyehiro, N. Hirata, T. Urabe and H. Shimamura, 1989, A detailed subduction structure in the Kuril trench deduced from ocean bottom seismographic refraction studies, *Tectonophysics*, **165**, 315–336.
- Lomax, A., J. Virieux, P. Volant and C. Berge, 2000, Probabilistic earthquake location in 3D and layered models: Introduction of a Metropolis–Gibbs method and comparison with linear locations, in *Advances in Seismic Event Location*, Thurber, C. H. and N. Rabinowitz (eds.), Kluwer, Amsterdam, 101–134.
- Murai, Y., S. Akiyama, K. Katsumata, T. Takanami, T. Yamashina, T. Watanabe, I. Cho, M. Tanaka, A. Kuwano, N. Wada, H. Shimamura, I. Furuya, D. Zhao and R. Sanda, 2003, Delamination structure imaged in the source area of the 1982 Urakawa-oki earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, **30**, 9, 1490, doi: 10.1029/2002GL016459.
- Nakanishi, A., A. Smith, S. Miura, T. Tsuru, S. Kodaira, K. Obana, N. Takahashi, P. Cummins and Y. Kaneda, 2004, Structural factors controlling the coseismic rupture zone of the 1973 Nemuro-oki earthquake, the southern Kuril Trench seismogenic zone, *J. Geophys. Res.*, **109**, 9, 1490, doi: 10.1029/2003JB002574.
- Ozawa, S., M. Kaidzu, M. Murakami, T. Imakiire and Y. Hatanaka, 2004, Coseismic and postseismic crustal deformation after the Mw 8 Tokachi-oki earthquake in Japan, *Earth Planets Space*, **56**, 675–680.
- Podvin, P. and L. Lecomte, 1991, Finite difference computation of traveltimes in very contrasted velocity models: a massively parallel approach and its associated tools, *Geophys. J. Int.*, **105**, 271–284.
- Shinohara, M., T. Yamada, T. Kanazawa, N. Hirata, Y. Kaneda, T. Takanami, H. Mikada, K. Suyehiro, S. Sakai, T. Watanabe, K. Uehira, Y. Murai, N. Takahashi, M. Nishino, K. Mochizuki, T. Sato, E. Araki, R. Hino, K. Uhira, H. Shiobara and H. Shimizu, 2004, Aftershock observation of the 2003 Tokachi-oki earthquake by using dense ocean bottom seismometer network, *Earth Planets Space*, **56**, 295–300.
- Urabe, T., K. Suyehiro, T. Iwasaki, N. Hirata, T. Kanazawa, A. Nishizawa and H. Shimamura, 1985, Aftershock distribution of the 1983 Japan Sea earthquake as determined from helicopter-dispatched OBS observation, *J. Phys. Earth*, **33**, 133–147.
- ト部 卓・東田進也, 1992, win-微小地震観測網波形観測支援のためのワークステーション・プログラム(強化版), 地震学会講演予稿集, No. 1, C22–P18.
- Wessel, P. and W. H. F. Smith, 1998, New, improved version of the Generic Mapping Tools released, *EOS Trans. Am. Geophys. Union*, **79**, 579.
- Yamanaka, K. and M. Kikuchi, 2003, Source processes of the recurrent Tokachi-oki earthquake on September 26, 2003, inferred from teleseismic body waves, *Earth Planets Space*, **55**, e21–e24.
- Yamanaka, Y. and M. Kikuchi, 2004, Asperity map along the subduction zone in northeastern Japan inferred from regional seismic data, *J. Geophys. Res.*, in press.