



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	2003年十勝沖地震 : 1952年十勝沖地震からの地震活動・前震・本震・余震および誘発地震
Author(s)	高橋, 浩晃; 笠原, 稔
Citation	地震. 2輯, 57(2), 115-130 https://doi.org/10.4294/zisin1948.57.2_115
Issue Date	2004-12-27
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/57962
Type	journal article
File Information	Zisin_57_115-.pdf



2003 年十勝沖地震

——1952 年十勝沖地震からの地震活動・前震・本震・余震
および誘発地震——

北海道大学大学院理学研究科附属地震火山研究観測センター* 高橋 浩晃・笠原 稔

The 2003 Tokachi-oki Earthquake, off Southeastern Hokkaido, Japan

——Seismic Activities from the Former 1952 Tokachi-oki Earthquake,
Foreshock, Mainshock, Aftershocks, and Triggered Earthquakes——

Hiroaki TAKAHASHI and Minoru KASAHARA

Institute of Seismology and Volcanology, Graduate School of Science, Hokkaido University,
N10W8, Kita-ku, Sapporo, Hokkaido 060-0810, Japan

(Received May 12, 2004; Accepted September 13, 2004)

The Tokachi-oki earthquake (M_{JMA} 8.0) occurred on September 26, 2003 (JST) off southeastern Hokkaido, Japan. We investigate the seismic activity before and after the mainshock using hypocenter catalogues produced by Japan Meteorological Agency and Hokkaido University. A decline of seismic activity and a seismic gap in the asperity of the 2003 earthquake had been clearly recognized from the early 1990's to just the mainshock faulting. Similar low seismicity had been observed before the former 1952 Tokachi-oki earthquake (M_{JMA} 8.2). These facts may reflect that the plate boundary fixed loosely has become tight coupling during one seismic cycle. A relatively low seismicity patch during the interseismic phase corresponds to the asperity. This suggests that interseismic seismic activity is strongly controlled by existence of the asperity. The aftershock region of the 2003 earthquake is approximately 160 km by 160 km, which is slightly smaller than that of the 1952 earthquake. This feature is in good agreement with the slip distributions of the 1952 and 2003 earthquakes estimated from tsunami waveform inversions. Large aftershocks are located out of the asperity, which may reflect the stress status in and around the asperity. Remarkable triggered seismic activity has begun just after the mainshock along the volcanic front in the eastern Hokkaido.

Key words: The 2003 Tokachi-oki earthquake, recurrent earthquake, asperity, aftershock activity, triggered earthquakes

§1. はじめに

2003 年 9 月 26 日 4 時 50 分に「平成 15 年（2003 年）十勝沖地震」（気象庁マグニチュード (M) 8.0）が発生した。この地震により、北海道東部の太平洋岸の広範囲で震度 6 弱を観測したほか、津波も発生し、行方不明者 2 名・負傷者 847 名（平成 15 年 12 月 10 日現在）[北海道, 2003]をはじめ、家屋やライフラインの損壊など多大な被害が発生した。

今回の地震は、1952 年十勝沖地震 (M 8.2) とほぼ同じ場所で発生し (Fig. 1), その発生間隔は 51 年であった。震源メカニズム解は、1952 年の地殻変動から求められたもの [笠原 (1975)] と、2003 年の遠地実体波から求められたもの [Yamanaka and Kikuchi (2003)] とともに低角逆断層型となっており (Fig. 1), 沈み込む太平洋プレートと陸側プレートの相対運動によって蓄積された歪を直接解消するような地震であったと考えられる。

この領域の地震発生確率が地震調査委員会 (2003) により算定されており、その値は地震発生前である 2003

* 〒060-0810 札幌市北区北 10 条西 8 丁目

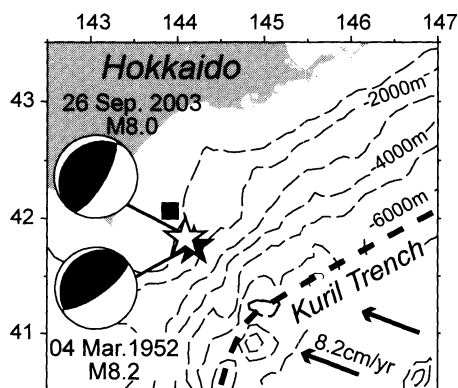


Fig. 1. Map showing the epicenters of the 1952 and the 2003 Tokachi-oki earthquakes. Focal mechanisms are from Kasahara (1975) for the 1952 earthquake and Yamanaka and Kikuchi (2003) for the 2003 earthquake. Arrows indicate the relative plate motion between the Pacific and the North American plates [DeMets *et al.* (1994)]. Black square is the epicenter of the foreshock of the 1952 earthquake.

年3月24日の公表時点で、今後30年以内で60%、今後50年以内で80–90%と高い値となっていた。したがって、2003年十勝沖地震はいわば「想定」されていた地震であったといえよう。本論文では、北海道内の地震観測網により決定されている震源データを用いて、2003年十勝沖地震前後の地震活動の特徴を考察する。また、以下の議論では、特記しない限り気象庁の2004年3月現在の震源カタログおよびマグニチュード(M)を用いる。

§ 2. 2003年十勝沖地震とこれに関連する地震活動

2.1 南千島の地震活動

千島海溝沿いのプレート境界型巨大地震は、一つの地震発生サイクルにおいてお互いの震源域が重ならないように発生していることが知られている[たとえば、宇津(1972)]。Fig. 2には、1952年十勝沖地震発生以降、2003年十勝沖地震発生までの南千島の $M5$ 以上で深さ80 km以浅の震央分布、および、地震調査委員会(2003)によるプレート境界型巨大地震の震源域を示した。南千島では、1952年十勝沖地震を皮切りに、1963年択捉島沖地震($M8.1$)、1968年十勝沖地震($M7.9$)、1969年北海道東方沖地震($M7.8$)、1973年根室半島沖地震($M7.4$)というプレート境界型巨大地震が次々と発生した。この一連の地震で南千島の第一種地震空白域は埋め尽くされ、一つの地震サイクルを終了した。したがって、先の地震サイクルが終了してから30年後に発生した今回の十勝

沖地震は、南千島での次の地震サイクルの始まりの地震としての位置づけを与えることができる。

2.2 2003年十勝沖地震発生に至る地震活動

十勝沖での1952年十勝沖地震以降2003年8月末までの地震活動の特徴については、高橋・笠原(2004)で報告されている。高橋・笠原(2004)は、十勝沖での地震活動度は定常的に低いが、その中でも1990年以降は顕著に地震活動度が低下しており、第二種地震空白域が形成されているとした。

Fig. 3aに、1952年十勝沖地震発生時から2003年十勝沖地震を含む2003年12月31日までのすべての地震の震央を示す。同時に、2003年十勝沖地震の余震分布・アスペリティ[Yamanaka and Kikuchi (2003)]・GPSによる本震および余効すべり分布[Miura *et al.* (2004), Miyazaki *et al.* (2004)]を参考に決めた震源域(以下、「2003年十勝沖地震の震源域」とはここで定義した領域を指す)も示した。Fig. 3bはこの震源域内のMT図を示す。

気象庁震源カタログが始まる1926年から1945年までの20年間に2003年十勝沖地震の震源域で発生した地震の M 別累積頻度分布図を作成すると、この領域では $M5$ 以上の地震に関してこの年代でも検知能力があったことがわかる(Fig. 4)。そこで、1952年十勝沖地震から2003年十勝沖地震に至る地震活動度の変化を見るために、Fig. 3aで示した震源域内の $M5$ 以上の地震数の積算図を示した(Fig. 5a)。1952年地震の余震活動以降ほぼ一定した割合で地震が発生してきたが、1990年代初頭から傾きが緩やかになる、つまり地震活動度が低下し、それが回復しないまま2003年の本震を迎えたことがわかる。また、震源域内の時空間分布からは(Fig. 6)、地震活動の低下が始まったのと同じくして、2003年十勝沖地震の震源域の内部にいわゆる第二種地震空白域が形成されたことがわかる。

1952年十勝沖地震前の地震活動を見るために、同じ条件で1926年から1952年十勝沖地震を含む1952年12月末までの回数積算図を作成した(Fig. 5b)。1952年十勝沖地震の場合にも、本震の7–8年前から地震活動度が低下し、それが回復しないまま本震発生に至っていることがわかる。

このように、2度の十勝沖地震の前に共通して明らかな地震活動度の低下が観測されている。宇津(1968, 1972)や本谷(2000)も1952年十勝沖地震発生以前の地震活動を調べているが、それらでも本震の震源域で地震活動度の低下とともに第二種地震空白域が形成され、その後本震発生に至ったことを指摘している。

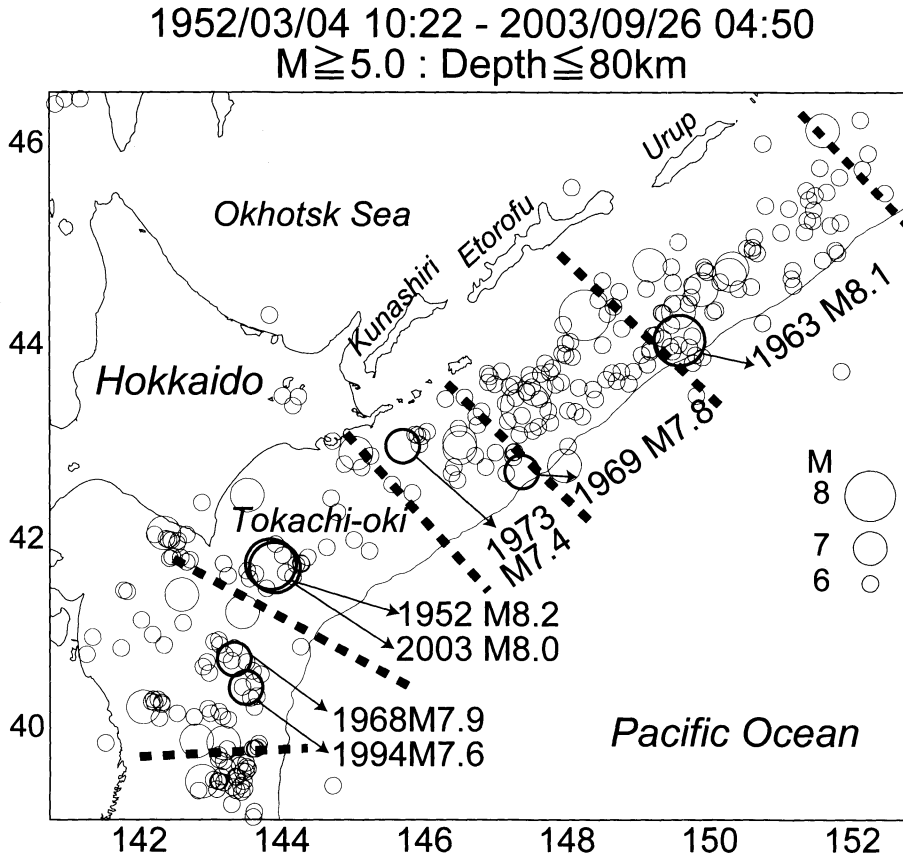


Fig. 2. Seismictiy map in the southern Kuril trench. Major interplate earthquakes (thin circles) and their focal regions divided by dashed lines [The Headquarters for Earthquake Research Promotion (2003)] are shown.

2.3 前震活動

1952 年十勝沖地震の際には、本震の 58 時間前に M 5.7 の前震が 1 個発生している (Fig. 1 の■)。一方、2003 年の地震では、本震の直前 2 カ月間に震源域内で M 5 を超えるような前震は発生していない。 M の下限をはずして地震発生前 2 カ月間の震源域内における地震活動の時空間分布を見た場合にも、顕著な地震活動の活発化や静穏化は見えない (Fig. 7)。したがって、2003 年十勝沖地震の場合には直前の前震活動は観測されなかったと結論できる。

しかし、本震の震央の南東約 40 km の領域で 2001 年 10 月から 2002 年 11 月にかけて群発的な地震活動が発生した。一連の活動中の最大地震は M 4.9 で規模としては大きいものとはいえないが、群をなす傾向が顕著な活動であった。この活動については § 4.5 で議論する。

2.4 本震および余震活動

Fig. 8a は北海道大学によって決定された、2003 年十勝沖地震が発生した 9 月 26 日から 2003 年 12 月 31 日

までの本震およびすべての余震の震央分布である。震源決定方法は、一柳・他 (2004) の手法によっており、釧路沖に設置された独立行政法人海洋研究開発機構 (JAMSTEC) のケーブル式海底地震計 3 点 [Hirata *et al.* (2002)] のデータも用いた。同時に、Yamanaka and Kikuchi (2003) による本震のアスぺリティも示した。余震は約 160 km $\times$ 160 km の領域に発生している。余震活動は、本震の震央から海溝軸に向かって約 50 km の領域で特に活発であり、それよりも海溝軸側および陸に近い領域では活動度が低い。また、アスぺリティの内部では余震活動が低調であり、余震はアスぺリティを避けるように発生している。本震の 1 時間 18 分後に発生した最大余震 (M 7.3) もアスぺリティの外側で起こった。 M 5.5 以上の震央分布を見た場合にこの特徴はより顕著になり (Fig. 8b)、特に大きめの余震はアスぺリティの東外側に集中して発生していることがわかる。

余震活動の時間推移を見るために、Fig. 8a で示した震源域内 (矩形領域) の時空間分布図 (Fig. 9a)、MT 図

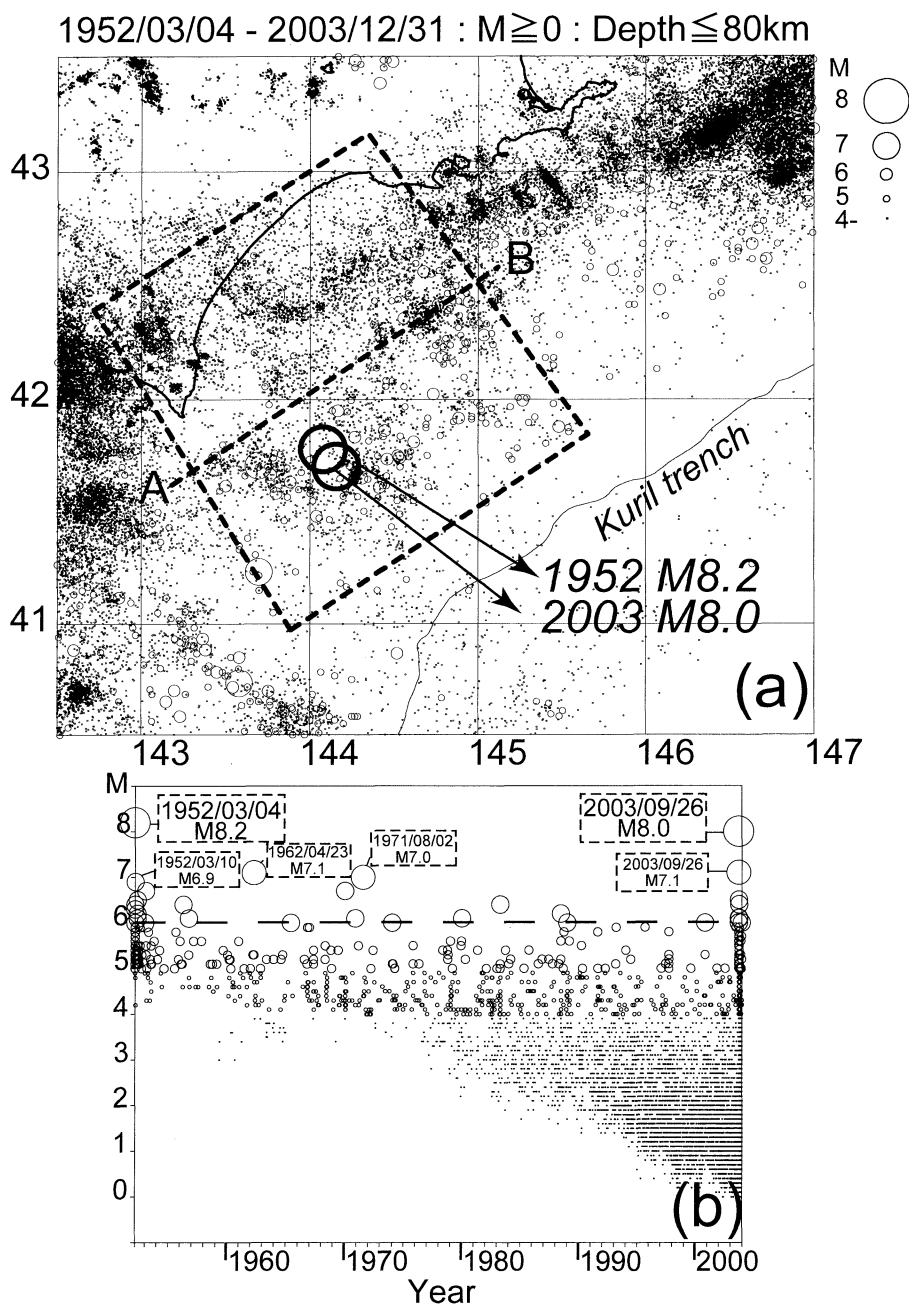


Fig. 3. (a) Seismicity map during one seismic cycle, that is the period from the occurrence of the 1952 earthquake to the end of 2003. A rectangle is the focal region of the 2003 Tokachi-oki earthquake estimated in this study. (b) Magnitude-time distribution in the focal region shown in (a).

(Fig. 9b), 日ごと地震回数および積算地震回数 (Fig. 9c) を示す。地震検知能力の均一性を保つために M は3以上とした。Fig. 9a から、主な余震は震源域の東側の領域に発生していることがわかる。また、アスペリティの東側の領域では、 $M6$ を超えるような余震活動が12月

に入っても散発的に続いている (Fig. 9b)。地震発生回数が多い状態は10月中旬ころまでで落ち着き、その後はほぼ一定の地震発生率となっている (Fig. 9c)。

余震分布の空間的な時系列を見るために、本震後1日間、その後3日間、その後6日間、その後12日間、その

後 24 日間、その後 54 日間のスナップショットを示した (Fig. 10). 余震域が時間とともに広がっていくような傾向は見えておらず、ほとんどの余震は地震後 1 日間に形成された余震域内で発生していることがわかる。また、本震後 1 日間は本震の震央周辺での活動度が高いが、その後 3 日間では、本震後 1 日間に活発だった領域

の東および南側の領域での活動が活発化しており、言い換えると本震後 1 日間に活発だった領域を囲むような形で活動が活発化しているように見える。

§ 3. 誘発地震

大地震の発生に伴って、震源域から離れた場所で地震活動が誘発される現象が数多く報告されている。遠隔地での地震活動を誘発する原因としては、地震波の到着によるダイナミックな応力変化や、本震の断層運動による静的な応力変化などが考えられている [たとえば, Protti *et al.* (1995), Broadsky *et al.* (2000)].

北海道東部の火山フロントに沿う地域では群発地震活動が活発である。特に、十勝支庁北部の丸山火山周辺 [高橋・他 (1996), 高橋・他 (1998)], 雌阿寒岳・阿寒カルデラ周辺 [鈴木・広田 (1973), 北海道大学理学部 (1986), 北海道大学理学研究科 (2002)] や屈斜路・弟子屈地域 [本谷・一柳 (1996)] で顕著である。これらの地域には第 4 紀火山が存在し、マグマ活動との関連が指摘されている地殻深部低周波地震の活動も活発である [高橋・他 (1999)].

今回の十勝沖地震の発生直後から、震源域の北約 100 km にあたる十勝岳から雌阿寒岳を通り屈斜路カルデラに至る火山フロントに沿った領域で浅発地震活動が活発化した (Fig. 11a). この領域での浅い地震の時空間分布

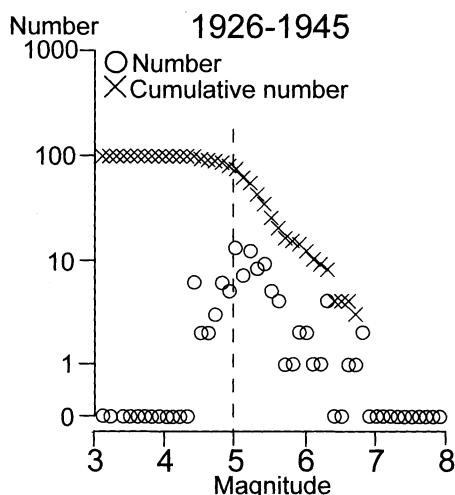


Fig. 4. Magnitude-frequency relation during the period from 1926 to 1945 in the focal region shown in Fig. 3a.

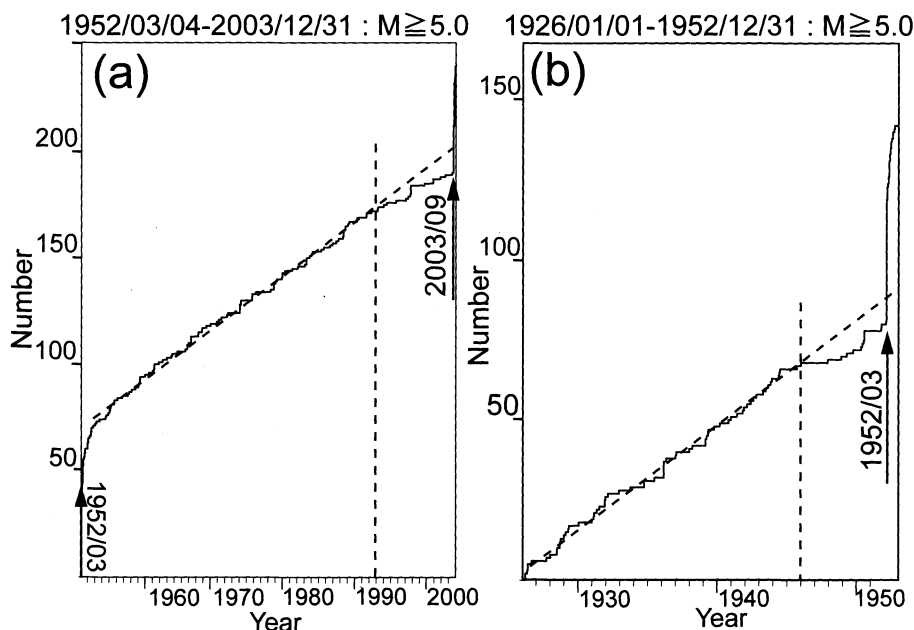


Fig. 5. Cumulative number of earthquakes with magnitude ≥ 5.0 in the focal region shown in Fig. 3a. (a) From the occurrence of the 1952 earthquake to the end of 2003. (b) From 1926 to the end of 1952.

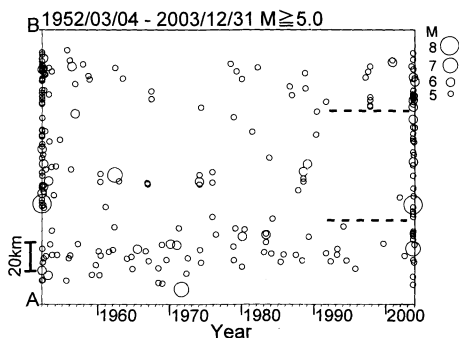


Fig. 6. Space-time distribution of earthquakes along the A-B line in the focal region shown in Fig. 3a, from the occurrence of the 1952 earthquake to the end of 2003.

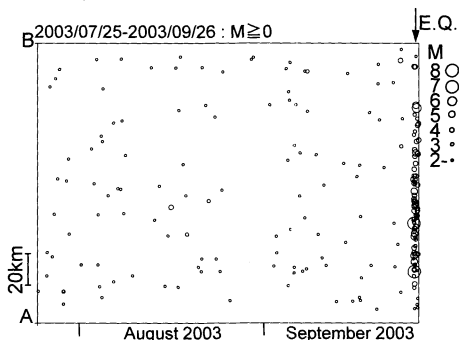


Fig. 7. Space-time distribution of earthquakes along the A-B line in the focal region shown in Fig. 3a during the period from the 2 month before the 2003 mainshock to the day of mainshock.

を Fig. 11b に示したが、今回の誘発地震活動は上に述べたような定常的に地震活動度が高かった場所のほか、今まで顕著な地震活動が見られなかった場所でも発生している。反対に、十勝沖地震の発生によって定常的な地震活動が停止した箇所もある。

阿寒湖畔では、1952 年十勝沖地震の本震発生と同時に鳴動を伴う地震活動が急激に活発になった。地震発生当日の 3 月 4 日は 230 回、5 日は 192 回の地震を伴った鳴動が記録されており [札幌管区気象台 (2000)], 現地の住民によると地震発生後約 34 時間の間ほとんど連続鳴動であったとのことである [中央気象台 (1953)]. しかし、今回の地震に関する誘発地震活動としては、阿

寒湖畔で局所有感をもたらす可能性がある M2 以上の地震発生は 1 回発生しただけであり、1952 年のような鳴動を伴った活発な地震活動はなかった。

誘発地震活動領域と十勝沖地震の余震域の間の領域 (十勝支庁中南部) では、地震活動度の顕著な変化は見られなかった。また、誘発地震活動領域の東部延長にあたる東経 144.5 度以東や、定常的に群発地震活動が活発な渡島半島でも今回の地震に同期するような顕著な地震活動の変化は見られなかった。

§ 4. 議 論

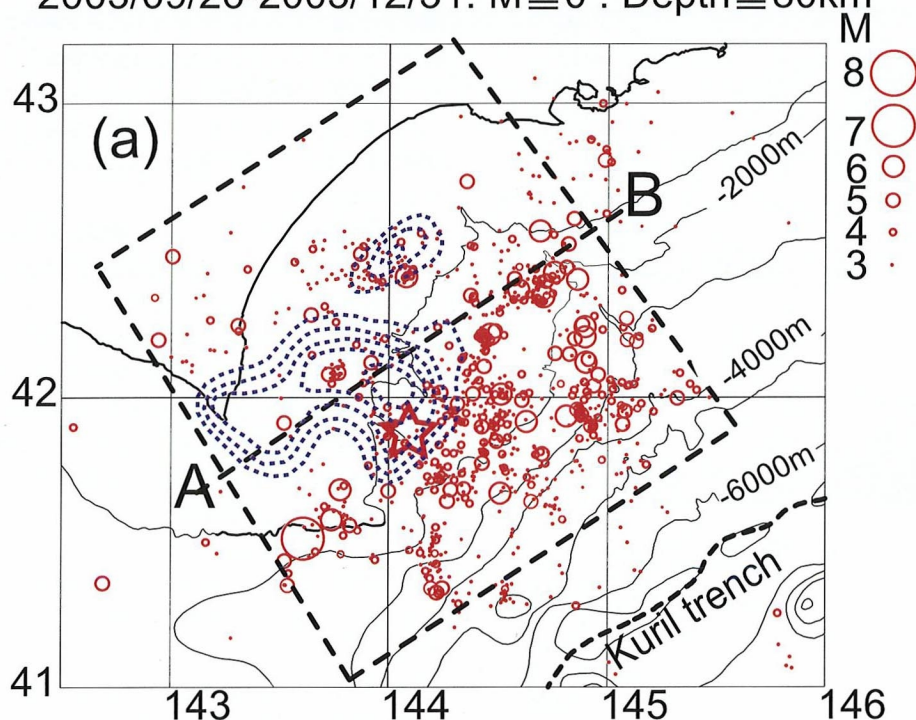
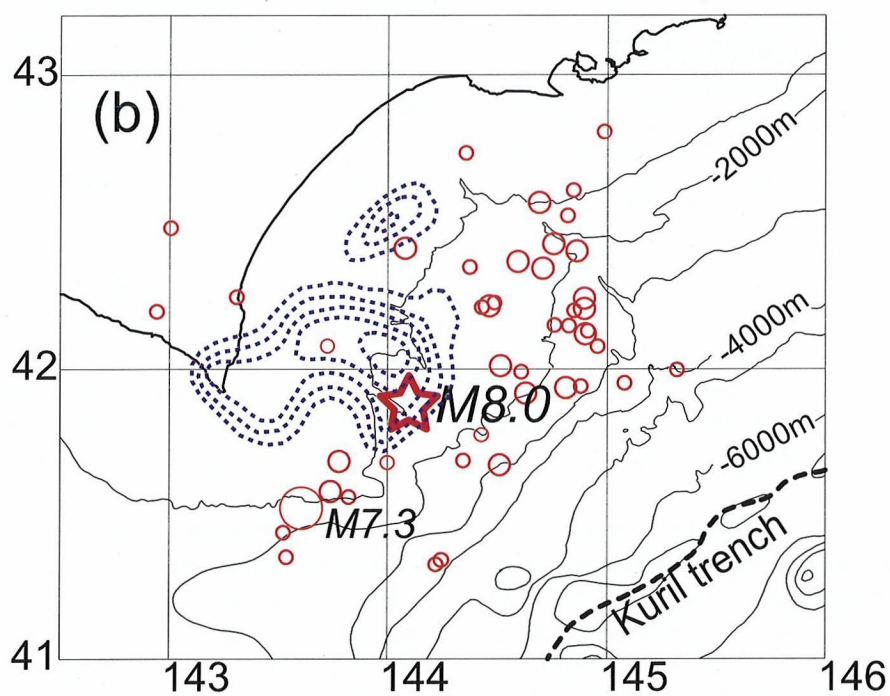
4.1 アスペリティと定常地震活動・余震活動

2003 年十勝地震では、本震のアスペリティが遠地実体波 [Yamanaka and Kikuchi (2003)], 遠地実体波と強震波形 [Yagi (2004)], 強震波形 [Honda *et al.* (2004)], 強震波形と GPS による地殻変動 [Koketsu *et al.* (2004)], GPS による地殻変動 [Miura *et al.* (2004), Ozawa *et al.* (2004)] により求められているが、以下の議論では Yamanaka and Kikuchi (2003) によって求められたアスペリティを用いる。

高橋・笠原 (2004) は、北海道大学の微小地震カタログを用いて十勝沖の地震活動を調べ、十勝沖に顕著に活動度が低い領域があり、そこが将来の十勝沖地震のアスペリティになる可能性を指摘した。また、この領域は山中・菊地 (2001) による 1952 年十勝沖地震のアスペリティともほぼ一致していた。Fig. 12 は、高橋・笠原 (2004) がその中の Fig. 6b で示した定常的な地震活動図に、Yamanaka and Kikuchi (2003) のアスペリティを重ねたものである。これによると、アスペリティは高橋・笠原 (2004) の指摘した地震活動が低い領域とほぼ一致していることがわかる。また、えりも岬南東沖にも定常的に地震活動が低い領域が見られるが、アスペリティはこの領域にも回り込むように達している。これらの観測事実、地震時にモーメントを大きく解放するアスペリティの領域は、非地震時にはカップリング強度が強く、ほとんど地震を発生させないという特性をもっていることを示唆している。

アスペリティの領域は、§ 2.2 で示した 1990 年前半から形成された第二種地震空白域ともほぼ一致する。これは、アスペリティでのカップリング強度がより強まった結果が地震活動の低下として現れたと考えられる。

Fig. 8. Aftershock distribution of the 2003 Tokachi-oki earthquake determined by Hokkaido University from 26 September 2003 to the end of 2003. (a) All earthquakes. A rectangle is the focal region estimated in this study as seen in Fig. 3a. (b) Earthquakes with magnitude ≥ 5.0 . An asperity estimated by Yamanaka and Kikuchi (2003) is also depicted by blue broken lines (1 m interval). A star indicates the epicenter of the mainshock.

2003/09/26-2003/12/31: $M \geq 0$: Depth ≤ 80 km2003/09/26-2003/12/31 : $M \geq 5.5$: Depth ≤ 80 km

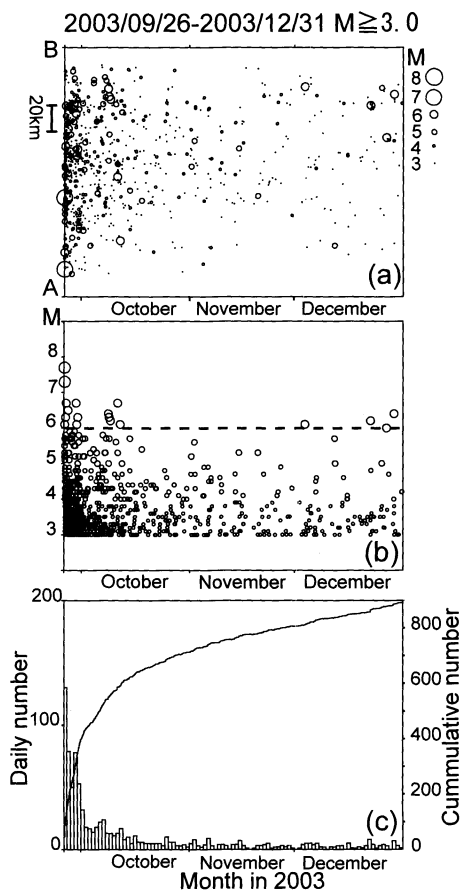


Fig. 9. (a) Space-time distribution of the 2003 aftershocks with magnitude ≥ 3.0 along the A-B line in the focal region shown in Fig. 8 (a), (b) magnitude-time distribution, (c) daily and cumulative number of earthquakes.

これらの観測事実は、プレート境界での地震活動度の時空間的な変化を捉えることにより、アスベリティの場所およびカップリングの状態をある程度推定することができる可能性を示している。1944年東南海地震の震源域でも、アスベリティ内部では周辺部に比べて地震活動度が低いことが明らかにされている [Obana *et al.* (2004)].

ところで、アスベリティの最大すべりを含む領域（北緯 42 度東経 142 度付近）とえりも岬沖の領域との間には、定常的な地震活動が認められる領域がある (Fig. 12 の A 領域)。ここは、アスベリティの中で唯一余震がたまて発生している場所ともなっており、弱いながらも何らかの構造境界として機能している可能性がある。例えば、この領域を境にした東西二つのアスベリティが存在するとすれば、それぞれのアスベリティの大きさは

M7 級となる。Yamanaka and Kikuchi (2004) は、三陸沖では M7 クラスのアスベリティが単独あるいは連動してすべることにより巨大地震が発生しているとした。2003 年十勝沖地震でも二つのアスベリティが連動したと考えることができれば、隣接区域でテクトニックな背景が類似している三陸沖と同様な考え方を導入することが可能となる。

§ 2.2 で述べたように、今回の地震の余震活動は本震のアスベリティの内部では活動度が低くその周辺で活発である (Fig. 8(b))。このようなアスベリティと余震の関係は、1994 年三陸はるか沖地震 (M 7.6) [永井・他 (2001)] をはじめとする三陸沖に発生した大地震でも観測されている [Yamanaka and Kikuchi (2004)]。

4.2 定常地震活動で見られるクラスターと余震分布

高橋・笠原 (2004) は、1952 年十勝沖地震震源域内にクラスター状に地震が集中して発生している領域を 4 つ示している (Fig. 13)。これらのクラスターは、定常的に地震活動が低い矩形領域 (Fig. 12) を囲むように存在しており、それぞれの場所は結果的に 2003 年十勝沖地震のアスベリティの周辺部にあたっていた。

Fig. 13 には、2003 年十勝沖地震の余震と、1952 年十勝沖地震の余震活動がほぼ収まったと考えられる 1954 年以降 2003 年十勝沖地震発生前までの震央も重ねて示してあるが、2003 年地震の余震は定常的に活動がある A から D の領域とよく対応して発生していることがわかる。唯一、図中の N 領域だけが、定常的な地震活動はないにもかかわらず余震の活動度が高い。これらの高い余震活動度を示すクラスターの分布は、Miyazaki *et al.* (2004) によるプレート境界面の余効すべり量が大きい領域ともよい一致度を示している。

定常的に地震活動が認められるクラスター群は、本震のアスベリティのように強く固着している場所ではなく、普段から一定の割合で応力を解放している場所であると考えられる。したがって、これらのクラスターがアスベリティとなる可能性は低い。これらの領域で発生している余震は、本震（アスベリティ部分の急激なすべり）によってもたらされた応力変化により引き起こされたものと考えられる。

4.3 1952 年十勝沖地震との比較

1952 年十勝沖地震の余震に関しては、中央気象台 (1953) による震源、関谷・他 (1974) や鈴木 (1976) による震源再決定などの報告がある。関谷・他 (1974) や鈴木 (1976) は、1952 年十勝沖地震の余震域が 1973 年根室半島沖地震 (M 7.4) の余震域の西縁まで及んでいるとしている。最近、Hamada and Suzuki (2004) は 1952 年十勝沖地震の余震の再決定を行った。それによると、

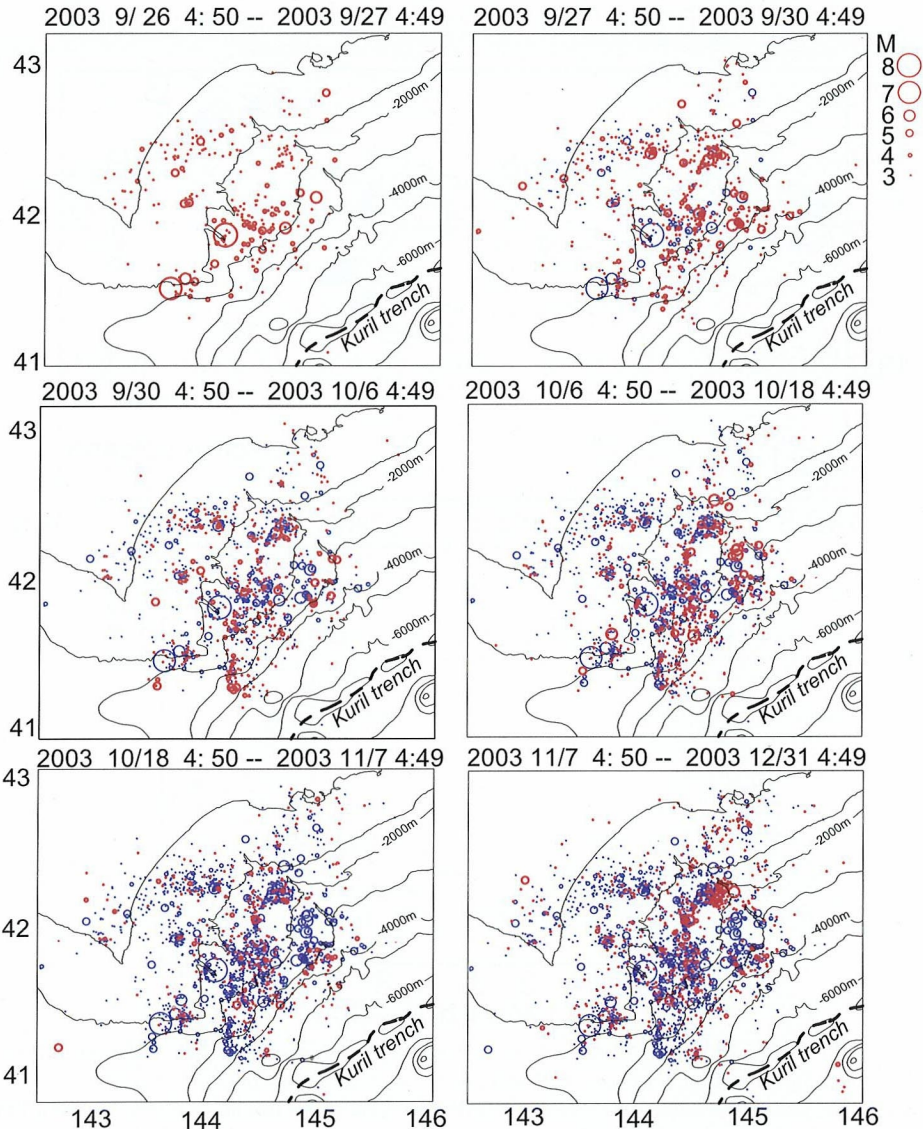


Fig. 10. Snapshots of the aftershock activity. They are the epicenter distributions within 1 day after the mainshock, and the succeeding 3 days, 6 days, 12 days, 24 days, and 54 days, respectively. Red circles show the epicenters during the each time window. Blue circles indicate the epicenters from the mainshock occurrence to just before the each time window.

余震は関谷・他(1974)や鈴木(1976)の余震域よりも西側にかたまった分布で釧路海底谷よりも東側には及んでおらず、2003年十勝沖地震の余震分布と比較して両者がほぼ同じ広がりであるとした。このHamada and Suzuki (2004)の震源は、2004年3月末時点での気象庁の正式な震源となっている。

Fig. 14には、そのデータを用いた1952年および2003年十勝沖地震の地震後1カ月間の $M5.5$ 以上の余震分布、Hirata *et al.* (2003)の津波波形による1952年

十勝沖地震のすべり量分布、Tanioka *et al.* (2004a)の津波波形による2003年十勝沖地震のすべり量分布、およびYamanaka and Kikuchi (2003)によるアスペリティを重ねて示した。1952年と2003年の津波波高分布の比較では[Tanioka *et al.* (2004b)], 145.5度以西では両者はほぼ同じ値を示すものの、それ以东では1952年の方が大きかった。また、津波波形のインバージョンから求められた1952年のすべり域は、2003年に比べてその南東および海溝軸側に広がっており、津波波高分

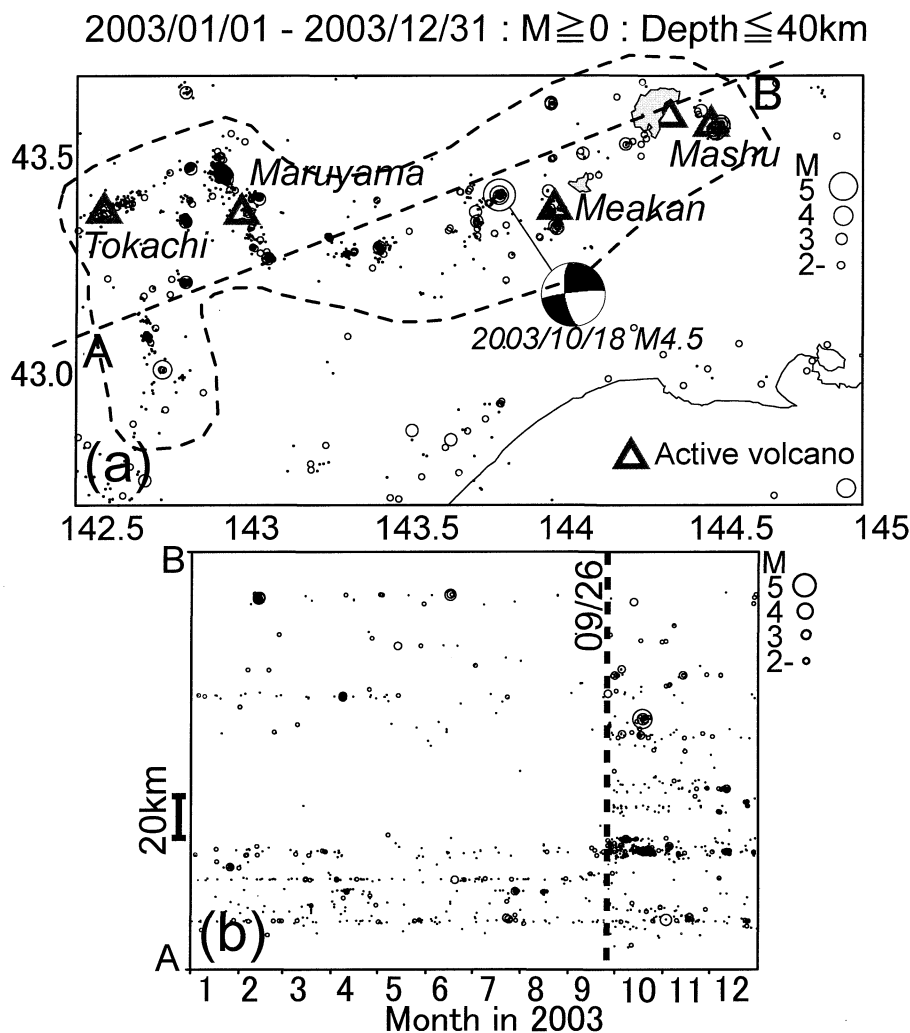


Fig. 11. (a) Distribution of triggered seismic activity along the volcanic front in eastern Hokkaido. A mechanism solution of the largest earthquake by Japan Meteorological Agency is also shown. Triangles are active volcanoes. (b) Space-time distribution of earthquakes along the A-B line in the area enclosed by a broken line in (a). A dotted line represents the time of the 2003 Tokachi-oki earthquake, which has influenced seismicity.

布と調和的な結果となっている。余震分布を見た場合にも、1952年では2003年の余震域の外側の北東域 (Fig. 14のA領域) と南東域 (同じく、B領域) にも活動が認められる。2003年と1952年の余震分布の違いは、津波波形のインバージョンから推定されるすべり分布とも調和的である。2003年のサイスミック・モーメントが 1.0×10^{21} Nm である一方 [Yamanaka and Kikuchi (2003), Tanioka *et al.* (2004a)], 1952年は地震波で 1.7×10^{21} [Kanamori and Anderson (1975)], 津波で 1.87×10^{21} [Hirata *et al.* (2003)] および 2.3×10^{21} Nm [Aida (1978)], 地殻変動で 2.0 – 2.6×10^{21} Nm [笠原

(1975)] と2003年よりも2倍程度大きくなっている。これらのデータも、1952年十勝沖地震の震源域が2003年十勝沖地震に比べてより東側に広がっていた可能性を強く示唆する。

ところで、2003年十勝沖地震の震央は1952年のそれとほぼ同じ場所であった (Fig. 1)。これは、この場所に地震発生を制御するような何らかの構造が存在する可能性を示しているものと考えられる。

4.4 2003年十勝沖地震の震源域と隣接区域との関係

今回の地震は、§3.3の議論から Fig. 2で示された十勝沖の想定震源域の西側3分の2を埋めるような活動

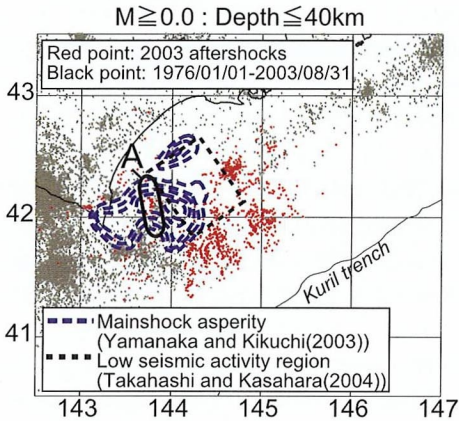


Fig. 12. Interseismic (grey) and aftershock (red) epicenter distribution by Hokkaido University microearthquake hypocenter catalogue from 1976 to the end of 2003. Low seismicity region by Takahashi and Kasahara (2004) is shown by a rectangle. Mainshock asperity by Yamanaka and Kikuchi (2003) is also depicted by blue broken lines.

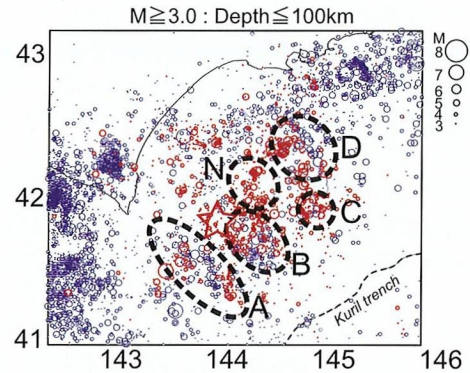


Fig. 13. Earthquake groups enclosed by broken curves during the interseismic phase [Takahashi and Kasahara (2004)]. Aftershocks of the 2003 earthquake are shown by red circles. Blue circles are interseismic epicenters from the beginning of the 1954 to just before the occurrence of the 2003 earthquake. A star indicates the epicenter of the 2003 mainshock.

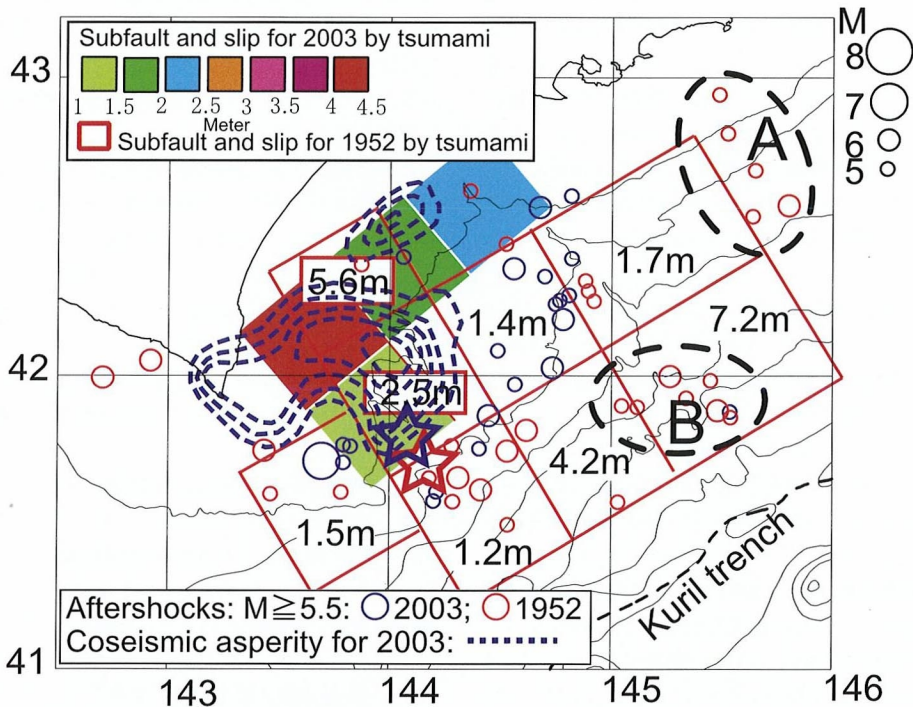


Fig. 14. Aftershocks with magnitude ≥ 5.5 of the 2003 (blue circles) and the 1952 (red circles) earthquakes are shown. Slip distribution of the subfaults by tsunami waveform inversions are also indicated for the 2003 earthquake by color index [Tanioka *et al.* (2004b)] and for the 1952 earthquake by numerical values [Hirata *et al.* (2003)]. The 2003 asperity by Yamanaka and Kikuchi (2003) is depicted by blue broken lines. Stars indicate the epicenters of the 1952 and 2003 mainshocks.

であったと本論文では考える。残された領域については (A) 定常的にプレート間の固着が弱い領域である, (B) 固着度が高い領域である, のいずれであるかで今後の活動が規定される。(A) の場合には, 今後, 被害を及ぼすような地震を発生させる能力はないと考えられる。一方, (B) の場合には (1) 本震後の余効変動で応力を解放する (2) $M7$ 級の地震を単独で発生させる (3) 根室沖と連動して $M8$ 級の地震を発生させる, の三つのパターンが考えられる。

諏訪・他 (2004), Suwa *et al.* (2003), Mazzotti *et al.* (2000) や Ito *et al.* (2000) では, GPS のデータから十勝・根室沖のカップリング率を求めているが, 十勝・根室沖は一律に 100% の固着率となっており, 今回の震源域より東側はむしろ固着がより強固な領域となっている。従って (A) の可能性は低いと考えられる。

今回の地震では, GPS や地殻変動連続観測で顕著な余効地殻変動が観測されている [Takahashi *et al.* (2004), Miyazaki *et al.* (2004), Nakao *et al.* (2004), Ozawa *et al.* (2004)]. Miyazaki *et al.* (2004) の余効地殻変動データを用いたすべりの時間発展モデルによると, 余効すべりは本震アスペリティの東側 50 km 付近までであり, この広がり Fig. 3 で震源域を決めるときの一つの根拠となっている。また, 余効すべりの量は最大でも 0.5m 以下であり, これは本震時のすべり量の 15% 以下である。したがって, 余効すべりによってもアスペリティの東側の領域では蓄積された歪はほとんど解消されていないと考えられ (1) の可能性は低い。結果として, 今後の活動としては (2) か (3) のケースを考える必要があるだろう。

一方, 震源域の西縁に関しては 2003 年地震も 1952 年地震もほぼ同じであり, えりも岬よりも西方には及んでいない。高橋・笠原 (2004) は 1952 年十勝沖地震と 1968 年十勝沖地震との間に, サイスマックギャップがあることを指摘したが, ここは今回の地震でも残されたままである。今後の活動を予測するためには, 高橋・笠原 (2004) にあるような地震学的手法を用いた構造調査が必要な領域である。

4.5 本震震源付近での 2001–2002 年の地震活動

今回の地震では直前の前震活動は観測されなかったが, 本震の震央の南東約 40 km の領域で (Fig. 13 の B 領域にあたる), 2001 年 10 月から 2002 年 11 月にかけて群発的な地震活動があったことを § 2.2 で述べた。この地震群は, 先に述べたように 10 年近く十勝沖の地震活動度が低下している中で発生したため特に注目された。また, 震源の直上に JAMSTEC のケーブル式海底地震計が設置されていたため, 一柳・他 (2003) や一柳・

他 (2004) により詳細な震源の再決定がされ, その活動の特徴が明らかにされている。それらによると, この地震活動はプレート境界面付近で発生しており, メカニズムはほぼ東西に圧縮軸をもつ右横ずれ型であった。また, 一連の活動中の最大地震は $M4.9$ であった。

この活動が 1952 年十勝沖地震の震央のすぐ南東側のプレート境界面付近で発生し, かつ, 地震活動が低調な中で発生した特異な活動であることから, 一柳・他 (2003) はその発生要因をプレート境界での固着状況の変化によるものである可能性を指摘している。今回の十勝沖地震では直前の前震はなかったものの, より長期的に見た場合にはこの活動は一種の前震活動の可能性が高い。今回の十勝沖地震の南側の隣接地域で発生した 1994 年三陸はるか沖地震 ($M7.6$) では, 本震発生 8 か月前から本震震央の海溝軸側ですべりが先行したことが相似地震の解析から明らかにされている [Uchida *et al.* (2004)]. 今回十勝沖で観測された地震群についても相似地震解析を行って, その特性を明らかにすることが必要である。

ところで, 関谷 (1976) は大地震に先行する異常地震活動が発生する期間を経験的に求めている。しかしながら, 今回の地震活動が始まってから本震が発生するまでの時間は $M8.0$ の地震に期待される前兆期間の長さ比べると明らかに短いので, 関谷型の前兆的地震群とは別な現象と考えられる。

この特異な地震活動の発生領域は, 陸から 150 km 近く離れており, 陸上の GPS 観測データからプレートの固着状況の微小な変化を検知することは困難である。従って, 今回の活動を引き起こした原因に関しては現在のところ直接的な結論を出せないが, 将来, 精密な海底地殻変動観測が実施されれば, このような異常な地震活動の発生原因について知見が得られるものと期待される。また, 前述したように相似地震を用いた解析も有効であろう。

この地震活動で発生した地震群の M は最大でも 4.9 と決して大きいものではなかったが, 近年の地震検知能力の大幅な向上により活動の詳細な調査が可能であった。したがって, 今回のような活動の有無を 1952 年十勝沖地震前の震源カタログから議論することは困難である。

4.6 誘発地震活動の地学的意味

北海道東部の火山フロントは, 太平洋プレートの斜め沈み込みによる千島外弧の西進運動に伴う大規模な右横ずれ境界であるとする考えが提示されている [たとえば, Kimura (1986), 橋本・多田 (1986), 多田・木村 (1987), DeMets (1992), 田辺・田部井 (2004)]. 橋本・

多田 (1986) は、森谷 (1986) による浅い地震の震央が北海道東部の火山フロント沿いに並ぶことから、そこがまさに力学的な境界として機能している可能性を指摘した。DeMets (1992) や田辺・田部井 (2004) は地震のスリップベクトルの残差ベクトルから千島外弧の西進運動量を 6–15 mm/yr としている。今回の誘発地震活動も、基本的には森谷 (1986) の震源分布に沿うような東西方向の分布を示している (Fig. 11)。

一連の活動での最大地震 (M 4.5) の気象庁が決めた震源メカニズム解を Fig. 11 に示したが、ほぼ純粋な右横ずれの strike-slip 型を示す。これは、千島外弧の西進運動の考えと調和的である。尾形 (2004) は、誘発地震の震源分布から推定される走向の右横ずれ断層を仮定した場合の CFF 変化量を計算し、誘発地震発生領域で数 kbar の増加を見込んでいる。したがって、今回の誘発地震活動がこの CFF の増加分を直接的な原因としたうえで、千島外弧の横ずれ境界という構造的な弱線を使って結果的に千島外弧を西進させている可能性も考えられる。

一方、今回の地震のスリップベクトル [Yamanaka and Kikuchi (2003)] はプレート相対運動の方向とほぼ一致し [高橋 (2004)], 1952 年以来蓄積されたモーメントがすべて解放されたこと [Yamanaka and Kikuchi (2003)] は、北海道が剛体であるとした場合には千島外弧を西進させるような残差ベクトルが生じていない可能性を示している。高橋 (2004) は、地震間と地震時地殻変動の比較を行い、千島外弧西進の評価をするためには今回の地震による余効的地殻変動や将来発生する根室沖地震の影響を除去する必要性を指摘している。

南千島と同じように斜め沈み込みが起こっている西日本地域では、前弧と背弧の境界が中央構造線という明瞭な活断層帯として認知される。また、それを境にして明瞭な横ずれ成分の変位が GPS 観測から明らかにされている [Tabei *et al.* (2002), Tabei *et al.* (2003)]。しかし、北海道東部の火山フロントでは、千島外弧の西進を示すような右横ずれ成分も活断層の存在は知られていない [中田・今泉 (2002)]。また、 M 6 を超えるような浅い地震も、屈斜路カルデラ内を除いて知られていない。火山フロントは地殻熱流量が高いため [北海道立地下資源調査所 (1995)], 延性的に動いている可能性も考えられる。

このように、今回の誘発地震発生や本震自体が千島外弧西進運動にどのように関与しているかはまだ不明な部分が多い。今回の本震による誘発地震発生領域の歪場は、北北西-南南西に主軸をもつ伸張場であり、これは Fig. 11 で示したメカニズム解とは調和的ではない。したがって、本震によってもたらされた歪場以外にこの場所の地震活動をコントロールする別の要因が存在するこ

とは十分考えられる。火山フロントでの地殻の非剛体性をモデルに組み込むためにも、火山フロントを横断するような GPS 観測測線の設置が望まれる。

§ 5. ま と め

2003 年 9 月 26 日に発生した十勝沖地震の地震発生前および地震発生後の地震活動に関して調査を行った。その結果、本震発生の約 10 年前から地震活動度が低下し、それに伴う第二種地震空白域の形成が認められた。そして、地震活動が回復しないまま本震の発生に至ったことが明らかになった。また、これと同じ現象が 1952 年十勝沖地震の前にも起こっていたことが確認された。これらの観測事実は、次に十勝沖でプレート境界型巨大地震が発生する 10 年程度前から再び地震活動度の低下と第二種地震空白域の形成がなされる可能性が高いことを示唆している。

十勝沖には定常的に地震活動度が低い領域が認められていたが、その領域は本震のアスペリティの部分にほぼ対応していた。また、アスペリティは第二種地震空白域とも対応していた。これは、アスペリティの存在が地震間に観測される地震活動に大きな影響を与えていることを示唆する結果である。

余震活動の中で、大きな余震はアスペリティの内部ではなくその周辺で多く発生した。余震域の広がりなどから推定した 2003 年十勝沖地震の震源域は、1952 年十勝沖地震よりもやや小さい可能性が示された。地震発生直後から北海道東部の火山フロントに沿った領域で顕著な誘発地震活動が発生した。

謝 辞

本研究を行うにあたり、北海道大学大学院理学研究科附属地震火山研究観測センターの本谷義信博士との日頃の議論は大変有意義であった。同センターの地震カタログは岡山宗夫・一柳昌義・高田真秀・山口照寛の各技術職員の維持管理する地震観測網データから作成されている。1966 年の北海道大学理学部附属浦河地震観測所、1976 年の北海道大学理学部附属地震予知観測地域センターの設置以来地震観測に携わられた方々、同時に気象庁で同じように地震観測に関わられた方々の努力により地震カタログが整備され、本論文のような議論が可能となった。ここに敬意を表します。札幌管区気象台地震火山課との月例北海道地震活動検討会での議論から、本研究を進めるうえで重要な知見を提供していただいた。編集委員長の中西一郎氏からは、本論文の執筆を勧めていただいた。川崎一朗氏と匿名査読者からは、本稿を改善するうえで有益なコメントを頂いた。本論文で用いた気

象庁震源カタログは、気象庁が文部科学省と協力して北海道大学、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、横浜市および独立行政法人海洋研究開発機構から提供を受けたデータを処理した結果である。本論文で利用した震源データ作成には、北海道大学・気象庁・独立行政法人海洋研究開発機構の地震波形データを併合して利用した。一部の図の作成には SEIS95 [石川・中村(1997)] を利用した。記して感謝の意を表します。

文 献

- Aida, I., 1978, Reliability of a tsunami source model derived from fault parameters, *J. Phys. Earth*, **26**, 57-73.
- Brodsky, E. E., V. Karakostas and H. Kanamori, 2000, A new observation of dynamically triggered regional seismicity: Earthquake in Greece following the August, 1999 Izmit, Turkey Earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, **27**, 2741-2744.
- 中央気象台, 1953, 昭和27年3月十勝沖地震調査報告, 観震時報, **17**, 1-2号.
- DeMets, C., 1992, Oblique convergence and deformation along the Kuril and Japan trenches, *J. Geophys. Res.*, **97**, 17615-17625.
- DeMets, C., R. G. Gordon, D. F. Argus and S. Stein, 1994, Effect of recent revisions to the geomagnetic reversal time scale on estimate of current plate motion, *Geophys. Res. Lett.*, **21**, 2191-2194.
- Hamada, N. and Y. Suzuki, 2004, Re-examination of aftershocks of the 1952 Tokachi-oki earthquake and a comparison with those of the 2003 Tokachi-oki earthquake, *Earth Planets Space*, **56**, 341-345.
- 橋本 学・多田 堯, 1986, 北海道の水平変動とテクトニクス, *地震*, **2**, 41, 29-38.
- 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, *IEEEJ. Ocean. Eng.*, **27**, 170-181.
- Hirata, K., E. Geist, K. Satake, Y. Tanioka and S. Yamaki, 2003, Slip distribution of the 1952 Tokachi-oki earthquake (*M*8.1) along the Kuril Trench deduced from tsunami waveform inversion, *J. Geophys. Res.*, **108**, 2196, doi:10.1029/2002JB001976.
- 北海道, 2003, 「平成15年十勝沖地震」対策・被害状況(第30報-最終)。
- 北海道大学理学部, 1986, 阿寒・徹別岳付近の双発型地震(1985年6~7月), *地震予知連絡会会報*, **35**, 5-7.
- 北海道大学大学院理学研究科, 2002, 阿寒湖付近の地震活動と北海道東方沖の地震, *地震予知連絡会会報*, **68**, 23-26.
- 北海道立地下資源調査所, 1995, 北海道地温勾配図.
- Honda, R., S. Aoi, N. Morikawa, H. Sekiguchi, T. T. Kunugi and H. Fujiwara, 2004, Ground motion and rupture process of the 2003 Tokachi-oki earthquake obtained from strong motion data of K-NET and KiK-net, *Earth Planets Space*, **56**, 317-322.
- 一柳昌義・高橋浩晃・本谷義信・笠原 稔・三ヶ田均・平田賢治・末廣 潔, 2003, 2001-2002年に発生した十勝沖の特異な地震活動, *北海道大学地球物理研究報告*, **66**, 87-100.
- 一柳昌義・高橋浩晃・笠原 稔・本谷義信・平田賢治・三ヶ田均, 2004, 北海道十勝沖で2001-2002年に発生した地震活動の陸海地震観測網による震源決定, *地震*, **2**, **56**, 529-538.
- 石川有三・中村浩二, 1997, SEIS-PC for Windows95, 地球惑星科学関連学会1997年合同大会予稿集, 78.
- Ito, T., S. Yoshioka and S. Miyazaki, 2000, Interplate coupling in northeast Japan deduced from inversion analysis of GPS data, *Earth Planet. Sci. Lett.*, **176**, 117-130.
- Kanamori, H. and D. Anderson, 1975, Theoretical basis of some empirical relations in seismology, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **101** (65), 1073-1095.
- 笠原稔, 1975, 1952年十勝沖地震の断層モデル, *地震学会講演予稿集*, **2**, 90.
- Kimura, G., 1986, Oblique subduction and collision: Forearc tectonics of the Kuril arc, *Geology*, **14**, 404-407.
- Koketsu, K., K. Hikima, S. Miyazaki and S. Ide, 2004, Joint inversion of strong motion and geodetic data for the source process of the 2003 Tokachi-oki, Hokkaido, earthquake, *Earth Planets Space*, **56**, 329-334.
- Mazzotti, S., X. LePichon, P. Henry, and S. Miyazaki, 2000, Full interseismic locking of the Nankai and Japan-west Kurile subduction zones: An analysis of uniform elastic strain accumulation in Japan constrained by permanent GPS, *J. Geophys. Res.*, **105**, 13159-13177.
- Miura, S., Y. Suwa, A. Hasegawa and T. Nishimura, 2004, The 2003 Tokachi-Oki earthquake—How much has the great event paid back slip debts?, *Geophys. Res. Lett.*, **31**, L05613, doi:10.1029/2003GL019021.
- Miyazaki, S., P. Segall, J. Fukuda and T. Kato, 2004, Space time distribution of afterslip following the 2003 Tokachi-oki earthquake: Implication for variations in fault zone frictional properties, *Geophys. Res. Lett.*, **31**, L06623, doi:10.1029/2003GL019410, 2004.
- 森谷武男, 1986, 浅い地震活動と起震歪力からみた北海道のテクトニクス, *地団研専報*, **31**, 475-485.
- 本谷義信・一柳昌義, 1996, 北海道東部弟子屈地域・アトサヌプリ周辺の地震活動(1926-1955), *北海道大学地球物理学研究報告*, **59**, 211-220.

- 本谷義信, 2000, 1952 年十勝沖地震と 1973 年根室半島沖地震の地震活動空白域の再検討, 北海道大学地球物理学研究報告, **63**, 23-32.
- 永井理子・菊地正幸・山中佳子, 2001, 三陸沖における再来大地震の震源過程の比較研究—1968 年十勝沖地震と 1994 年三陸はるか沖地震の比較—, 地震 2, **54**, 267-280.
- Nakao, S., M. Kasahara, M. Okayama, and M. Ichiyanagi, 2004, Pre-, Co- and Post-seismic crustal deformation of the 2003 Tokachi-oki earthquake obtained by strain and tilt meter, Abstract of Japan Earth and Planetary Science Joint Meeting, d007.
- 中田高・今泉俊文, 2002, 活断層詳細デジタルマップ, 東京大学出版会.
- Obana, K., S. Kodaira and Y. Kaneda, 2004, Microseismicity around rupture area of the 1994 Tonankai earthquake from ocean bottom seismograph observations, Earth Planet. Sci. Lett., **222**, 561-572.
- 尾形良彦, 2004, 2003 年十勝沖地震 ($M8.0$) 前後の北日本における地震活動の特徴について, 地球惑星科学関連合同大会講演予稿集, s045.
- Ozawa, S., M. Kaidzu, M. Murakami, T. Imakiire and Y. Hatanaka, 2004, Coseismic and postseismic crustal deformation after the Mw8 Tokachi-oki earthquake in Japan, Earth Planets Space, **56**, 675-680.
- Protti, M., K. McNally, J. Pacheco, V. Gonzalez, C. Montero, J. Segura, J. Brenes, V. Barboza, E. Malavassi, F. Guendel, G. Simila, D. Rojas, A. Velasco, A. Mata and W. Schillinger, 1995, The March 25, 1990 ($M_W=7.0$, $M_L=6.8$), earthquake at the entrance of the Nicoya Gulf, Costa Rica: Its prior activity, foreshocks, aftershocks, and triggered seismicity, J. Geophys. Res., **100**, 20345-20358.
- 札幌管区気象台, 2000, 北海道の地震活動 (第 2 版).
- 関谷 博・久本壮一・望月英志・小林悦夫・栗原隆治・徳永規一・岸尾政弘, 1974, 1973 年根室半島沖地震と北海道南方海域の巨大地震, 験震時報, **39**, 33-39.
- 関谷 博, 1976, 地震発生前の地震活動と地震予知, 地震 2, **29**, 299-312.
- Suwa, Y., S. Miura, A. Hasegawa, T. Sato and K. Tachibana, 2003, Inter-plate coupling beneath the NE Japan arc inferred from 3 dimensional crustal deformation, Abstract of IUGG 2003 General Assembly, JSG01/08P/D-002.
- 諏訪謡子・三浦 哲・長谷川昭・佐藤俊也・立花憲司, 2004, 東北日本沈み込み帯におけるプレート境界の固着状況, 地震 2, **56**, 471-484.
- 鈴木貞臣・広田知保, 1973, 北海道東部およびその周辺の地震活動 (1)—弟子屈・阿寒地域の浅発地震—, 地震 2, **26**, 77-92.
- 鈴木貞臣, 1976, 1952 年十勝沖地震の震源再決定とその周辺の大地震の余震域について, 地震学会講演予稿集, **1**, 13.
- Tabei, T., M. Hashimoto, S. Miyazaki, K. Hirahara, F. Kimata, T. Matsushima, T. Tanaka, Y. Eguchi, T. Takaya, Y. Hosono, F. Ohya and T. Kato, 2002, Sub-surface structure and faulting of the Median Tectonic Line, southwest Japan inferred from GPS velocity field, Earth Planets Space, **54**, 1065-1070.
- Tabei, T., M. Hashimoto, S. Miyazaki and Y. Ohta, 2003, Present-day deformation across the southwest Japan arc: Oblique subduction of the Philippine Sea plate and lateral slip of the Nankai forearc, Earth Planets Space, **55**, 643-647.
- 多田 堯・木村 学, 1987, 千島弧南西端における衝突現象と地殻変動, 地震 2, **40**, 197-204.
- 高橋浩晃・笠原稔・一柳昌義・本谷義信, 1996, 十勝丸山火山付近での群発地震活動と GPS による地殻変動観測, 北海道大学地球物理学研究報告, **59**, 163-176.
- 高橋浩晃・一柳昌義・笠原 稔, 1998, 北海道丸山火山周辺域での地震および地殻変動の臨時観測 (1995-1997), 北海道大学地球物理学研究報告, **61**, 179-188.
- 高橋浩晃・宮村淳一・郷家幸治, 1999, 北海道で発生した深部低周波地震, 北海道大学地球物理学研究報告, **62**, 25-41.
- Takahashi, H., S. Nakao, N. Okazaki, J. Koyama, T. Sagiya, T. Ito, F. Ohya, K. Sato, Y. Fujita, M. Hashimoto, Y. Hosono, T. Kato, T. Iinuma, J. Fukuda, T. Matsushima, Y. Kohno and M. Kasahara, 2004, GPS observation of the first month of postseismic crustal deformation associated with the 2003 Tokachi-oki earthquake ($M_{JMA}8.0$), off southeastern Hokkaido, Japan, Earth Planets Space, **56**, 377-382.
- 高橋浩晃, 2004, 北海道の地震間および地震時地殻変動の比較—2003 年十勝沖地震による地殻変動—, 北海道大学地球物理学研究報告, **67**, 375-386.
- 高橋浩晃・笠原 稔, 2004, 十勝沖の地震活動—1952 年十勝沖地震以降 51 年間の地震活動の特徴, 地震 2, **56**, 393-404.
- 田辺明広・田部井隆雄, 2004, 千島海溝における太平洋プレートの斜め沈み込みと前弧の横ずれ運動, 地球惑星科学関連合同大会講演予稿集, t054.
- Tanioka, Y., K. Hirata, R. Hino and T. Kanazawa, 2004a, Slip distribution of the 2003 Tokachi-oki earthquake estimated from tsunami waveform inversion, Earth Planets Space, **56**, 373-376.
- Tanioka, Y., Y. Nishimura, K. Hirakawa, F. Imamura, I. Abe, Y. Abe, K. Shindou, H. Matsutomi, T. Takahashi, K. Imai, K. Harada, Y. Namegawa, Y. Hasegawa, Y. Hayashi, F. Nanayama, T. Kamataki, Y. Kawata, Y. Fukasawa, S. Koshimura, Y. Hada, Y. Azumai, K. Hirata, A. Kamikawa, A. Yoshikawa, T. Shiga, M. Kobayashi and S. Masaka, 2004b, Tsunami run-up heights of the 2003 Tokachi-oki earthquake, Earth Planets Space, **56**, 359-365.
- Uchida, N., A. Hasegawa, T. Matsuzawa, and T. Igarashi, 2004, Pre- and post-seismic slow slip on the plate boundary off Sanriku, NE Japan associated with three interplate earthquakes as estimated from small repeating earthquakes data, Tectonophysics, **385**, 1-15.
- 宇津徳治, 1968, 北海道およびその周辺の地震活動, 北海道大学地球物理学研究報告, **20**, 51-76.

- 宇津徳治, 1972, 北海道周辺における大地震の活動と根室南方沖地震について, 地震予知連絡会会報, **7**, 7-13.
- Yagi, Y., 2004, Source rupture process of the 2003 Tokachi-oki earthquake determined by joint inversion of teleseismic body wave and strong motion data, *Earth Planets Space*, **56**, 311-316.
- 山中佳子・菊地正幸, 2001, アスペリティマップー北海道編一, 日本地震学会 2002 年度秋季大会講演予稿集, B52.
- Yamanaka, Y. and M. Kikuchi, 2003, Source process 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.*, **109**, 1307307, doi10.1029/2003JB002683.
- 地震調査委員会, 2003, 千島海溝沿いの地震活動の長期評価, 29 pp.