

4.4 総合解析

4.4.4 地震、地殻変動、津波・被害データによる総合解析

(1) 調査研究の目的と概要

(a) 課題名 津波励起機構の総合研究

(b) 担当者

所属機関	役職	氏名	メールアドレス
東京大学 地震研究所	教授	平田 直	hirata@eri.u-tokyo.ac.jp

(c) 調査研究の目的

サブテーマ1 - 3の調査研究を基に、総合的な解析を加えることにより、震源過程の解明を行い、前回（昭和27年：1952年）の十勝沖地震（M8.2）との類似点、相違点を明らかにし、アスペリティの滑り残しの検証を行うとともに、本調査研究の結果を海溝型地震の長期評価や強い地震動・津波による被害予測の精度向上へと反映させる。

(2) 調査研究の成果

(a) 調査研究の要約

海底地震観測、地殻変動観測、津波・被害調査に成果に基づき総合的に2003年十勝沖地震の震源過程の解明を行った。この結果、本地震は、太平洋プレートと北海道を形成するプレートの境界で発生した地震であることが確かめられた。余震分布よりプレート形状の詳細を検討して、十勝沖で北東-南西方向にプレート形状の変化が認められた。本地震の後には、顕著な余効的滑りがプレート境界で発生した。余効的滑りの発生した領域は、本震時に大きく滑った領域に隣接した周辺部（北東側と、南西側）であった。津波を励起した滑り領域は、本震の滑り領域と調和的であった。2003年の地震と1952年十勝沖地震との比較を行ったところ、津波の波源域に違いが見られた。1952年の津波では、2003年の震源域とほぼ同じ領域の他に、2003年には滑っていない南東側で大きな滑りが発生している。この南東側の領域は、2003年十勝沖地震の余効的滑り領域と一部重なるか、さらに南東側である。

(b) 調査研究の実施方法

本研究の運営委員会等を開催し、各サブテーマの調査研究の成果を収集・整理・統合する。

(c) 調査研究の成果

平成15年9月26日に発生した十勝沖地震（深さ約40km、マグニチュード（M）8.0（気象庁発暫定値））は、平成15年3月に政府の地震調査研究推進本部の発表した「千島海溝沿いの地震活動の長期評価について」においてその発生が想定されていた地震であった（図1）。その発生確率は、2003年1月1日を起点にした30年以内で60%程度であった（地震調査委員会、2003）。

地震調査研究推進本部が設置され、その基で整備された稠密な調査観測体制が整った後、地震調査委員会が長期評価を行った地震としては、想定された地震が実際に発生した最初のケースで

あり、正確な地震像を得る必要があった。特に、本地震は、1952年3月4日に発生した十勝沖地震(M8.2)の震源とほぼ同じところで発生したプレート境界地震であるが、想定された十勝沖地震と比較すると規模がやや小さいこと等から、想定された十勝沖地震の固着域(アスペリティ)の一部が滑り残った可能性も指摘されており、滑り残しによる次の地震の可能性を調査することが必要であった。

そこで、本調査研究においては、十勝沖地震の余震頻度が高い間に所要の調査観測を行い、今回の十勝沖地震の地震(余震を含む)・地殻変動・津波・被害データの総合解析を行い、震源過程の解明を行うことにより、2003年と1952年の十勝沖地震の類似点、相違点を明らかにすること等により、海溝型地震の長期評価や強震動・津波による被害予測の精度向上に資する基礎資料を得ることを目的とした。

本調査研究によって、世界最大規模の海底余震観測が実施され、高精度の余震分布が得られた(図2)。その結果、2003年十勝沖地震の余震が、太平洋プレートと陸側プレート境界付近で発生していることが明らかにされた(図3)。海底地震観測の結果を、陸上観測網によって得られた震源と比較するにより、陸上観測網による震源の深さが深いことが分かった。本震震源付近に発生した余震は、本調査研究の結果によると深さ15-20kmであるが、この地震を陸上の観測網とケーブル式の海底地震計のデータから決めた一元化震源では、40-50kmになる(図4)。ケーブル式海底地震計の近傍では、比較的両者の深さの差は少ない(一元化震源では30km程度、海底地震観測では、20km程度)が、ケーブル式海底地震観測点の空間密度が低い(数が少ない)ことから、ほとんどの一元化震源は実際より20-30km深いことが考えられる。以上のことから、2003年十勝沖地震の本震の深度は20km程度と考えられ、太平洋プレートと陸側プレートとの境界で発生していると考えられる(図4)。この深度は、制御震源を用いた屈折法地震探査(Iwasaki *et al.*, 1989)から求められたプレート上面深度と調和的である。

そこで、余震が太平洋プレート上面付近で発生していると仮定して、この地域の太平洋プレートの上面の位置を推定した(図5)。余震解析領域(図5の平面図)の北東半分(領域A, B)と南西半分(領域C, D)とでは、余震の深さ分布に違いが認められる。領域Dでは、震源決定に仮定したIwasaki *et al.* (1989)の構造から推定される太平洋プレートの上面(図5の断面図の破線)にほぼ沿って余震が発生している。そこで、この領域では、Iwasaki *et al.* (1989)と一致させた。この破線を残りの領域A, B, Cにも示す。領域Cでは、余震は破線に沿った深さか、それより少し深いところに発生している。そこで、余震が密集して発生している部分の上限(浅い限界)にプレート境界があると仮定して赤線を引いた。結果的に、破線と赤線はほぼ重なっている。一方、領域Bでは、余震領域の南東側(海溝側)では、破線より浅い部分にも発生し、北東側(陸側)では、深くなっている。これらを考慮して赤線を引いた。領域Aでも同様の傾向がある。ただし、領域Aでは、観測点の分布から深さの精度がやや悪いことを考慮して、観測網からはずれたところでは、赤の破線として表示している。

これらをまとめて平面図に等深度線として示し、これまでの他の研究結果と比較した(図6)。地震調査推進本部・調査委員会(2003)の示したプレート上面の深度は、本調査研究の結果より10km程度深めに見積もられていることが分かる。陸上観測網の結果をまとめた最新の成果(Katsumata *et al.*, 2003)によると、本調査研究領域の西側半分では、本調査研究の結果となめらかに接続している(図7)。調査領域の東側でプレートの沈み込む角度が高角になる傾向は、北海道の下のプレートの傾斜角の変化と調和的である。プレートの沈み込み角度の変化する位置は、

釧路海底谷より西側で、本震の滑りの大きかった領域の東の縁とほぼ一致している（図8）。

1952年十勝沖地震（M8.2）と今回の十勝沖地震の比較を行った。両地震ともに、十勝沖の太平洋プレートと陸側プレート境界で発生した海溝型地震である。その規模は、1952年十勝沖地震ではM8.2、2003年十勝沖地震ではM8.0であり、今回がやや小さいかほぼ同程度であった。遠地実体波による震源過程の解析結果（Yamanaka and Kikuchi, 2003）によると、今回の地震で、1952年地震で破壊したアスペリティが再び破壊されたと考えられる（図8）。強震記録、津波記録から推定された震源過程によって、観測された震度分布が説明できた。前回の地震と今回の地震の震度分布はおおむね一致していた。今回の地震では、北見地方でやや大きな（5弱）揺れが記録されたことは、震源での破壊伝播方向によるエネルギーの増幅効果（ディレクティビティ効果）によって説明できる。

2003年地震の強震記録、遠地実体波、津波記録、GPSによる測地データによって得られた震源域はほぼ一致している。一方、津波記録によって推定された1952年地震の震源域は、2003年より南東側に広がっている。さらに、1973年根室沖地震の震源域と2003年十勝沖地震の震源域との間に数10kmの隙間があるので、この部分が今回の地震によって滑り残したアスペリティ（固着域）である可能性が指摘されていた。本研究の結果によると、本震で破壊された領域の東側と西側で大規模な余効滑りが発生している。余効滑り領域の東側は、釧路海底谷とほぼ一致しているが、地震調査委員会が長期評価を行った際に示した「十勝沖」の想定震源域の東端までは達していない。余効的滑りの累積規模は地震マグニチュードに換算してMw7.7に及びこれまでの知られている余効滑りの量としては最大である（図9）。

余効的滑りの時間変化を調べた研究（Miyazaki *et al.*, 2004）によれば、本震で大きく滑った場所と、余効的滑りが卓越した領域では、滑り速度と剪断応力の関係に違いが見られた。本震の滑り領域では、滑り弱化の摩擦構成則にしたがい、余効的滑りの卓越した領域では、滑り強化の摩擦構成則にしたがっていると解釈できるという。この解釈が正しければ、本震で滑りが大きかった領域は、地震間では固着していたプレート境界が、地震時に不安定滑り（破壊）を起こし、その周辺の領域では、滑り強化の摩擦構成則に従って安定滑りが発生したと考えることができる。本震で滑りの大きかった領域は、周辺領域が滑ることにより再加重され再び応力が集中するが、安定滑りを起こしていない。これらの解釈は、速度依存摩擦構成則に従う一自由度のパネ・質点系の解析に基づいているが、もし、摩擦構成則を支配するパラメータが時間に依存せず、場所だけによると考えることが出来れば、余効的滑りの発生した領域は、応力が十分集中しても破壊（不安定すべり）を起こさないことを示唆している。この推測が正しければ、2003年十勝沖地震の本震で滑りが小さく、余効的滑りの大きかった領域は、将来も破壊することはないと言える。従って、2003年十勝沖地震の本震の震源域と根室沖地震の震源域の間の領域では、プレート間結合度が低く、大きな地震間ではゆっくりと滑り、大地震後には余効的に滑る領域であると言える。つまり、この領域が今回の地震によってすべり残ったアスペリティとは考えられない。ただし、結合度の弱い領域が、次の根室沖地震の時に付随的に滑る可能性は否定できない（図10）。

(d) 結論ならびに今後の課題

地震調査推進本部が策定した基盤的観測網が整備されて以降始めて発生したM8を超えるプレート境界型地震について、余震・地殻変動・津波の調査観測研究によって、その地震像の詳細が

明らかになった。その結果、2003年十勝沖地震は、1952年十勝沖地震とほぼ同じアスペリティが破壊したと考えられた。しかし、津波の発生については、両者に違いがあり、1952年地震では、2003年には津波の励起源にならなかった南東側（海溝側）の境域で大きな津波を発生させる滑りがあった。その結果、津波の遡上高分布、津波波形に違いが見られた。2003年の地震では、大きな余効的滑りが生じ、このデータはプレート間結合の物理的実体解明に大きく寄与した。余効的滑りの卓越した領域では、安定滑りが卓越する摩擦構成則に支配されているとすれば、そのような領域を推定することによって、大きな地震の起こらない領域をあらかじめ特定できる可能性を示している。今後、同様なデータを蓄積することは、プレート境界の物理特性（摩擦構成則）の理解に役立つので、今後とも強力に進める必要がある。津波を強く励起した滑り分布が2つの地震で異なっていたことは、プレート間結合を支配する摩擦構成測が、厳密には時間変化することを示唆する。空間的に変化しているプレート境界の結合の物理法則が、時間的にも変化するならば、我々の理解していない現象はまだまだあるかもしれない。本調査研究と類似の研究を更に進めることによって、プレート境界で発生する地震の実体に迫る必要はますます増している。とりわけ、海溝近傍の海底で、プレート結合状態をモニターする研究を強力に進める必要がある。

また、我が国においては、他に大規模な海溝型地震が発生する可能性のある地域がいくつかあり、今回の調査結果を他の海溝型地震の調査研究に早急に活かす必要がある。今回の地震により石油タンク等危険物関連施設における災害が発生したことを踏まえ、地表の強い揺れ（強震動）とそれが石油タンク等危険物関連施設等に対して与える影響を、これら施設の耐震設計に早急に反映させる必要がある。さらに、海溝型地震によって生じる津波については、その発生予測が報じられても、当該地域住民の避難行動に生かされなかった実態が明らかにされた。このことの改善方策も、今後の課題として残された。

(e) 引用文献

- Iwasaki, T., H. Shiobara, A. Nishizawa, T. Kanazawa, K. Suyehiro, N. Hirata, T. Urabe and H. Shimamura, A detailed subduction structure in the Kuril trench deduced from ocean bottom seismographic refraction studies, *Tectonophysics*, **165**, 315-336, 1989.
- 勝俣啓・笠原稔・和田直人、稠密地震観測網によって見えてきた太平洋プレート内十勝沖断裂帯, 月刊地球, 24, 7, 499-503, 2002
- Katsumata, K., N. Wada, and M. Kasahara, Newly imaged shape of the deep seismic zone within the subducting Pacific plate beneath the Hokkaido corner, Japan-Kurile arc-arc junction, *J. Geophys. Res.*, **108**(B12), 2565, doi:10.1029/2002JB002175, 2003.
- Miyazaki et al., Space time distribution of afterslip following the 2003 Tokachi-oki earthquake: Implications for variations in fault zone frictional properties, *GRL*, VOL. 31, L06623, doi:10.1029/2003GL019410, 2004
- 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, Aftershock observation of the 2003 Tokachi-oki earthquake by using dense ocean bottom seismometer network, *Earth Planets Space*, **56**, 295-300, 2004.
- Yamanaka, Y., and M. Kikuchi, Source processes of the recurrent Tokachi-oki earthquake on September 26,

2003, inferred from teleseismic body waves, Earth, Planets, and Space, 55, e21-e24, 2003.

山中佳子・菊地正幸、地震学会秋季大会、2002

地震調査研究推進本部・地震調査委員会、[千島海溝沿いの地震活動の長期評価について（平成15年3月24日、平成15年8月14日訂正、平成15年11月12日変更）](#)、2003.

http://www.jishin.go.jp/main/chousa/03mar_chishima/index.htm

(f) 成果の論文発表・口頭発表等

著者	題名	発表先	発表年月日
Coffin, M. and N. Hirata	Large earthquake strikes Hokkaido, Japan	<i>Eos Trans. AGU</i> , 84(42), 442.	2003
平田直	平成15年度(2003年)十勝沖地震に関する緊急調査研究「報告	総合科学技術会議 有識者議員会合	平成16年4月8日
平田直	平成15年科学技術振興調整費:平成15年(2003年)十勝沖地震に関する緊急調査研究	地震調査研究推進本部 地震調査委員会	平成16年4月14日
平田直・金沢敏彦、笠原稔、谷岡勇一郎、2003年十勝沖地震緊急調査研究「グループ	2003年十勝沖地震に関する緊急調査研究	第816回地震研究所談話会	平成16年4月16日
平田直	総論	月刊地球特集「2003年 - 北海道十勝沖地震」	平成16年7月予定

図の説明

- 図1 . 千島海溝沿いの大地震。十勝沖では、1952年にM8.2の地震が発生した。2003年の地震は、想定された領域で発生した。地震調査推進本部のまとめた図に加筆した。
- 図2 . 海底地震観測によって求められた2003年十勝沖地震の余震分布。図中に示した領域A~D内の余震を南西(矢印の方向)から見た北西-南東断面を図2図A~Dに示す。青のコンターは、遠地実体波より求めた本震の滑り分布。コンター間隔1m(Yamanaka & Kikuchi, 2003)。
- 図3 . 海底地震観測によって求められた震源の深さ分布。断面図A~Dは、図2に示した領域A~D内の余震の北西-南東断面を南西(矢印の方向)から見たもの。断面図の青線は、太平洋プレート上面に投影したこの領域のアスペリティーの位置。太平洋プレートの深度は、本研究で推定したもの(図6)を用いた。
- 図4 . 海底地震観測網と陸域観測網から決定された震源との比較。本震5日後から20日間(10月1日-20日)の本震震源付近の拡大図を示した。赤丸印(●):本調査研究によって得られた震源。黒丸印(●)陸上およびケーブル式海底地震計の観測網データを気象庁が一元化処理した震源(一元化震源)。黒星印(*)一元化処理による本震の震源。陸域観測網で決められた震源は海底地震観測によるものより20-30km深い。Shinohara et al. (EPS, 2004)に加筆。
- 図5 . 余震分布から推定された太平洋プレート上面(赤線)。断面図(A~D)に示した余震の範囲を左図の平面図に示した。余震分布は山田・他(2004)による。細い破線は、屈折法制御震源探査(Iwasaki et al., 1989)によって求められた太平洋プレートの上面を示す。探査は、図のDの領域で実施され、震源決定には、この構造が用いられた。断面図AからCには、Dの太平洋プレートの上面位置(破線)を比較の為に示した。C, D領域では、両者の違いは少ないが、A, Bでは、余震分布より求められた位置が、海溝側(南東側)では、より浅く、陸側(北西側)では、より深いことが分かる。
- 図6 . 余震分布から求めた太平洋プレート上面の深度と、従来の研究の比較。赤のコンターが図5より読みとった深度から引いた等深度線。その他の色のコンターは、従来の研究結果。地震調査推進本部のまとめた図(地震調査推進本部、2003)に加筆した。本緊急研究の結果によると、余震域の東西では、プレートの傾斜角に変化がある。西側では、勝俣他(2002)の深度と調和的である。
- 図7 . 陸上の観測網によって求められたプレート上面(Katsumata et al., 2003)に、海底地震観測(本調査研究)によって求められた上面を重ねた図。赤のコンターが図5より読みとった深度から引いた等深度線。余震域の南西半分では両者は一致し、海溝側に延長した面が、本調査研究によって得られた面につながっている。北東半分では、面の計傾斜角が高角になっている。この特徴は、陸上観測によって得られたプレートの深部形状の変化と調査的である。
- 図8 . 2003年地震と1952年地震の比較。Yamanaka and Kikuchi (2003)による。
- 図9 . 本震時の滑り、余効滑り、余震分布の比較。青のコンター:遠地実体波より求めた本震の滑り分布。コンター間隔1m(Yamanaka & Kikuchi, 2003)。赤のコンター:余効滑り(10月2日-11月10日)コンター間隔は0.2m(国土地理院、2004)。色の丸:海底地震観測による震央(カラーは深さを表す)

図10 . 千島海溝沿いの大地震時の滑りと余効滑りの関係。コンターは、山中佳子・菊地正幸（2002）による1968年、2003年十勝沖、1973年根室沖地震の滑り量。コンター間隔は1m。