

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 11 日現在

機関番号：82706

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2011～2014

課題番号：23253005

研究課題名(和文) 海溝域浅部低周波現象の検出と発生過程の解明 - カスカディアにおける海底地震観測 -

研究課題名(英文) Investigation of low-frequency earthquake/tremor in shallow portion of subduction zone: Marine earthquake observation in the Cascadia subduction zone

研究代表者

小平 秀一 (KODAIRA, Shuichi)

独立行政法人海洋研究開発機構・地震津波海域観測研究開発センター・研究開発センター長

研究者番号：80250421

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 39,000,000円

研究成果の概要(和文)：北米・太平洋岸のカスカディア地震発生帯は、南海トラフと同様に比較的若い海洋プレートの沈み込みに伴う巨大地震発生帯であり、M9クラスのプレート間巨大地震が発生したことが知られている。双方の沈み込み帯の比較研究を目的として海底地震計を用いた地震観測をカナダ・バンクーバー島沖の北部カスカディア地震発生帯で実施した。観測の結果、カスカディア地震発生帯浅部の地震活動は、南海トラフに比べても極めて低く、1700年の地震以降プレート間固着が完全に回復している事を示している可能性があるとともに、プレート境界の構造的な不均質性が極めて低いことを示していると考えられる。

研究成果の概要(英文)：Cascadia margin is a seismogenic subduction zone with a history of the repeated occurrence of megathrust earthquakes. The Cascadia subduction zone has many similarities with the Nankai subduction zone. We conducted earthquake observation using ocean bottom seismographs as a comparable study between Cascadia and Nankai subduction seismogenic zones. Our results show that during the observation period most of the offshore seismicity occurred in the subducting plate along the Nootka fault zone. Otherwise seismicity was extremely low, with no earthquakes located along the shallow, seismogenic part of the Cascadia megathrust. The lack of interplate seismicity may indicate complete healing and locking of the megathrust over three centuries after the great earthquake of 1700 and a somewhat lower degree of structure heterogeneity.

研究分野：固体地球惑星物理学

キーワード：地震 津波 カスカディア地震発生帯 低周波地震

1. 研究開始当初の背景

何故、カスカディア地震発生帯か

カナダ西岸・バンクーバー島沖から米国・カリフォルニア北部沖にかけては Juan de Fuca プレートの沈み込みに伴う地震発生帯であり、カスカディア地震発生帯とよばれている(図1)。このカスカディア地震発生帯はプレート年代、温度構造、プレート沈み込み速度、巨大地震・津波発生様式などから、南海トラフ地震発生帯との類似性が指摘され比較研究対象とされてきた(例えば、Hyndman and Wang,1995)。

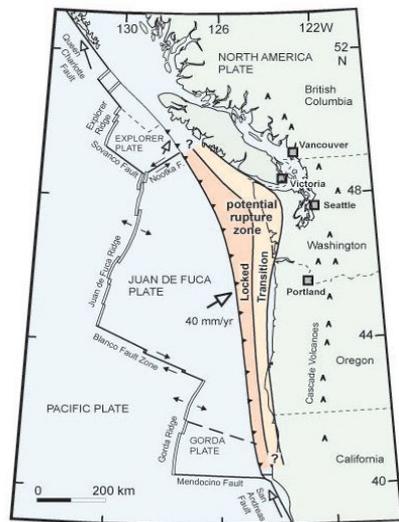


図1 .カスカディア地震発生帯。南海トラフ同様若いプレートが年間4cmで沈み込む Hyndman and Wang, 1995 を修正

その為、南海トラフ地震発生帯で提唱されている地震発生モデルと類似の論理で地震発生モデルを考えることができる。また、南海トラフで観測された諸現象がローカルな現象であるのか、他の沈み込み帯でも普遍的に起きる現象なのかの検証を進める取りかかりとしてはカスカディア地震発生帯が最も適切な領域と考えられる。

更に、本研究は津波発生域の評価の基礎情報ともなり、カナダ西海岸での地震・津波被害軽減に役立つのみならず、1700年のカスカディア地震と同様に太平洋を横断し日本に達する津波波高評価の高精度化に重要な情報を提供する。

南海トラフとカスカディアにおける共通な現象 - 深部の「スローな地震」 -

最近の地震・地殻変動観測網の高密度展開により、南海トラフ地震発生帯深部において、長期的スロースリップ、深部低周波微動、深部低周波地震に代表されるような通常の地震とは異なる、いわゆる「スローな地震」が検知され、それらはプレート間固着域下限付近で発生していることも明らかになってきた。一方、カスカディア地震発生帯において

も、南海トラフ同様の「スローな地震」現象が確認されており、ここでもプレート間固着域下限付近で発生している(例えば、Dragert et al.2001;Obara, 2002; Ozawa et al., 2002, Rogers et al.,2003,Ito et al.,2007)。

このように、「スローな地震」は現象論的にはその時間的・空間的な特徴は明らかになりつつあるが、その発生メカニズムや地震発生帯構造との関係は未解決のままである。一つの解釈としては、地震発生帯深部の不安定滑り域から安定滑り域への遷移帯(条件付安定滑り域)は沈み込んだプレートからの脱水反応等により間隙水圧が高くなり、結果としてプレート間の固着が弱くなり、そのためプレート境界がゆっくりとすべり、即ち「スローな地震」が発生する、という考えが提案されている。

南海トラフで検知され、カスカディアで検知されていない浅部低周波地震・微動

一連の「スローな地震」現象の中で、現在までのところ南海トラフのみで観測されている現象がある。それは地震発生帯上限付近で発生している浅部超低周波地震、低周波微動である。

南海トラフの浅部超低周波地震は陸上に展開された広帯域地震観測網の記録から検知された。それらは紀伊半島沖、室戸岬沖、日向灘など幾つかの限られた領域で発生していることも分かってきた。ただし、観測点が陸域のみであったため、発生源の詳細な位置、深度、プレート境界に対する位置関係などは不明であった (Ito et al.,2007)。

これに対し、研究代表者らのグループは浅部超低周波地震発生域に海底地震計の稠密アレー観測を実施し、地震発生帯上限付近に起きる、浅部低周波微動の検出に成功した。さらに、稠密アレーによりその発生位置の特定も行った。それによると、浅部低周波微動はプレート境界から分岐する分岐断層付近で発生していることが分かった。また、その分岐断層上端には海底において冷湧水が観測されている領域に対応することも明らかにした(Obara and Kodaira, 2009)。以上の結果はプレート固着域上限における条件付き安定領域の同定につながり、またその領域でのプレート滑り現象が断層付近の流体挙動に支配されている可能性を示している。

2. 研究の目的

数値シミュレーション、岩石実験などの結果をもとに、「スローな地震」の発生域は地震発生帯固着域の深部、浅部延長に当たると考えられている。言い換えると、「スローな地震」の発生域を同定することは地震発生帯固着域の上限、下限を決定することになる。このことは海溝型巨大地震破壊域を想定するうえで重要なデータとなる。

また、「スローな地震」の発生域は巨大地震発生時にはその領域まで滑りが広がる可能

性を示している。したがって、浅部における「スローな地震」の発生域を決定することは、巨大地震時の破壊伝搬上限を知ることになり、地震に伴う津波波高予測を精度よく行う上で重要な制約を与える。

カスカディア地震発生帯ではこれまでに、海底地震計アレーを用いた稠密な地震観測は実施されることがなく、超低周波地震、低周波微動はもとより、海底下の微小地震活動すらほとんど把握されていない。研究代表者らは過去数年にわたり、海底地震観測による南海トラフの海底地震活動の研究を進めており、海底下の地震活動が低い南海トラフでの地震活動把握に海底地震観測が極めて有効であることを示してきた。また、上述のように低周波微動の検出には稠密海底地震計アレーが唯一の方法であることを示してきた。

そこで、本研究では、カスカディア地震発生帯において、南海トラフで実施してきた海底地震観測と同等な仕様の観測を実施し、得られるデータにより、浅部低周波地震・微動の検出とその発生メカニズムの解明、それに基づく地震発生帯固着域上限の同定を行うことを目的とする。

3. 研究の方法

フィージビリティ・スタディ(FS)として実施した事前観測

カナダ地質調査所のグループと協力し、本研究のFSとして、カナダ・バンクーバー島沖において、平成22年6月下旬から約3ヵ月間の短期地震観測を行った。観測では南海トラフで浅部低周波微動研究に用いたものと同一の海底地震計(JAMSTEC 所有の短周期海底地震計)35台を用いた。これまでの陸域観測網からは、観測対象域の地震活動は北端部の Nootka Fracture zone での活動以外は確認できていない。その為、本研究ではまずFS観測データに基づく微小地震活動の把握を行う。具体的には、FS全データの読み取り、震源決定を行い、地下構造と震源位置の対応などについて考察を進める。その際、地下構造の情報はカナダ地質調査所等が取得した既存反射法探査記録を用いる。

FS観測データによる「スローな地震」検出と発生位置決定

南海トラフで用いた手法と同等なアプローチでFSデータからの「スローな地震」の検出を進める(Obana and Kodaira, 2009)。即ち、観測記録全体の周波数特性から普通の地震と「スローな地震」を判別し、その後、「スローな地震」波形のエンベロープの相関を取ることによって、各観測点への到達時間差を見積もり、それらの値を用いて発生位置の決定を行う。仮に本観測全期間を通して「スローな地震」が観測領域

で一切発生していなかった場合は「発生しない」という観測事実が地震発生帯浅部の地震断層特性に関して重要な知見もたらすと考え、地震発生帯浅部のプレート固着特性に関する考察を進める。

長期地震観測

本研究の主課題として約十ヵ月以上の長期海底地震観測を実施する。観測網決定は上述のように、FSデータ解析を基に決定する。以下に、主要観測機器、使用船舶をまとめる。

海底地震計(OBS)

- ・JAMSTEC 所有の短周期海底地震計 35台。なお、短周期地震計は平成24年度中に長期観測対応に改修を行う。

- ・OBS本体、および消耗品等は日本からカナダ地質調査所(ビクトリア)まで船便コンテナにて輸送する。

- ・設置前準備、改修後作業等はカナダ地質調査所の整備場を利用する。

使用船舶

カナダ地質調査所の手配する調査船を使用する。FS観測同様、カナダ沿岸警備隊の観測船を想定している。船舶利用申請はカナダ側研究協力者の所掌で行い、設置、回収とも10日程度の航海日数を見積もった。

長期観測データ解析、解釈

本観測のデータ処理・解析を進める。データの初期的処理(時刻校正、所定フォーマットへの変換など)の後、FSデータの解析と同様なアプローチで解析を進める。解析は大きく分けて2段階ある。第一段階は地震活動解析であり、第二段階が「スローな地震」の検出・発生位置決定である。地震活動解析に関しては、必要に応じてカナダ陸上地震観測データと統合して解析を進める。

また、処理解析の進捗に応じて、カナダ側研究協力者と情報交換等を行う。

これら地震活動解析に加え、地震発生場の構造的特徴を抑えるため、観測データを用いた地震波速度構造の解析、および散乱構造・異方性解析を進める。これらは、研究代表者らのグループが日本周辺で実施してきた手法を応用して進める。更に、最終的に研究成果をまとめる段階では、本観測・解析の結果と様々の観測データを統合して地震発生帯上限付近の諸現象の解明を進める。

4. 研究成果

(1) FS観測データによる地震活動

FS観測として2010年7月上旬から9月下旬の期間に、33台の短周期海底地震計を用いてカナダ・バンクーバー島沖のカスカディア地震発生帯で行われた地震観測(図2)データの解析を行った。

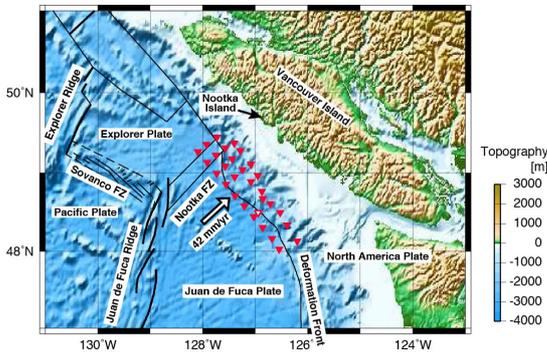


図2：2010年に実施した海底地震計(OBS)観測の観測点配置。●がOBS設置点。○の位置には500-700m間隔で3台のOBSを設置。

解析では、OBSで記録された波形からイベント検出を行い、手動検出を行った後、過去の構造探査の結果を参照した1次元構造で震源決定を行った(Obana et al., 2014)。なお、震源決定の際には堆積層による到達時刻の遅れを補正するため、堆積層下面でP波からS波に変換したと思われる位相と直達P波の到達時間差をもとに堆積層のP波S波速度を仮定して観測点補正を行っている。解析の結果によると、マグニチュード1を超える程度の地震であれば充分観測可能であった(図3)。

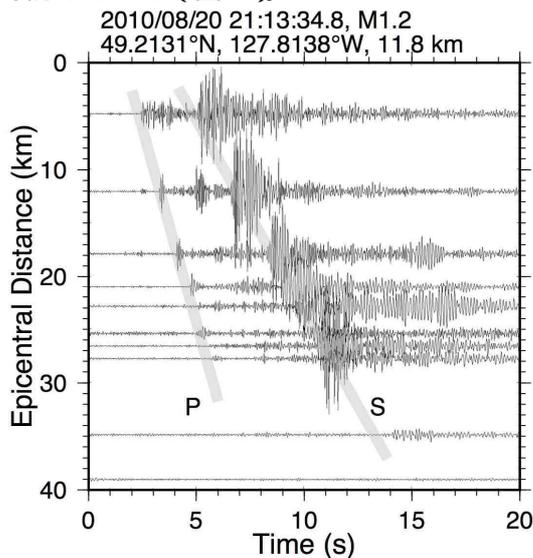


図3：観測された波形(上下動)の例。

観測された地震活動の殆どはNootka Fault Zoneで発生しており、海岸線付近の活動を除けば、それ以外の場所の地震活動は殆ど認められなかった(図4)。Nootka Fault Zoneに沿った活動は、Juan de Fucaプレートの沈み込みに伴って海岸線付近まで続いている。OBSの記録だけで震源決定を行った場合、陸域の定常地震観測に比べて海岸線付近の地震は震源が深く決定されるが、陸上地震観測点の記録と組み合わせ

る事で、沈み込む前から沈み込んだ後まで、Nootka Fault Zoneに沿って連続的に地震が発生している様子が捉えられている。一方、短期間の観測では有るが、Nootka Fault Zoneから離れたカスカディア地震発生帯浅部の微小地震活動は、南海トラフと比べても著しく低い事が示された。このような低い地震活動は、1700年の巨大地震以降、この地域の固着が完全に回復している事とともに、プレート境界の構造不均質が弱く、一様な固着状態になっている事と関連していると考えられる。なお、低周波地震や微動のような「スローな地震」の地震発生帯浅部における活動は、この期間のデータからは確認できなかった。

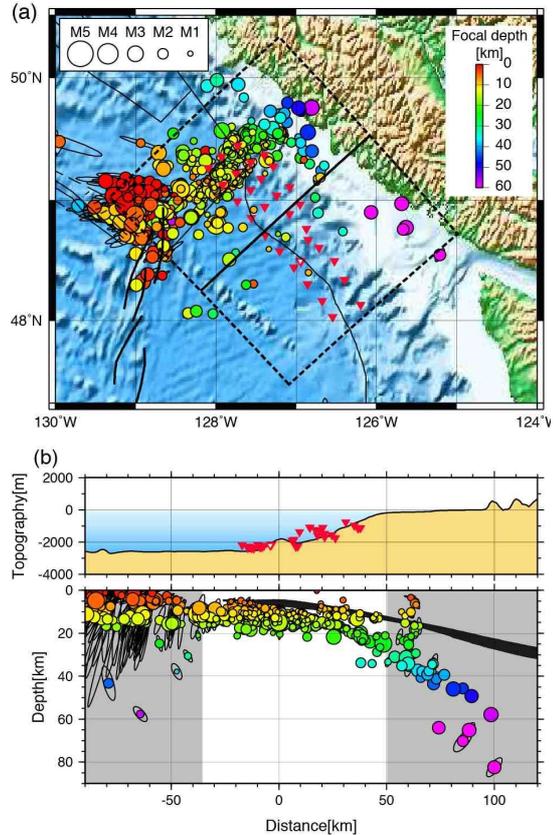


図4：2010年の観測から得られた震源分布。(a)図の黒点線で囲まれた範囲の震源を断面図(b)に示す。

(2) 海底堆積物の異方性構造

FS観測で得られた記録を用いて、水平動成分の方位およびS波速度異方性構造の同時推定を行った。今回の観測で用いたOBSの場合、船上から自由落下によってOBSを設置するため、水平動成分の方位は不明である。一方、異方性構造は応力場や構造の不均質を反映していると考えられるが、異方性の真の方向を知る為には、水平動成分の方位推定が必要不可欠である。今回の解析では、新たに開発された手法を用いて、異方性構造と水平動成分の方位を同時に推定

する事を行った。得られた結果は、Nootka Fault Zoneから離れた場所では、Juan de Fucaプレートの沈み込みを反映していると考えられる北東-南西方向に速い軸をもつ異方性構造が求まった(図5)。

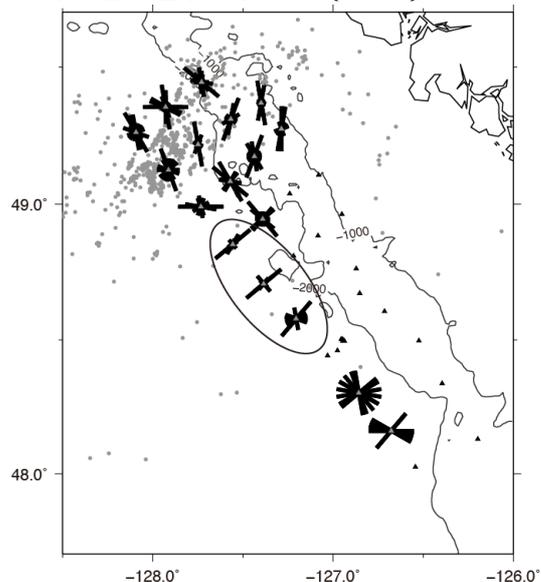


図5：推定された速い軸の分布。

(3) 長期観測による地震活動

FS観測(観測期間約2ヶ月)ではカスカディア地震発生帯において、地震発生帯浅部の地震活動が極めて低いことが示されたが、より長期的な観測によりこの事を検証するとともに、「スローな地震活動」の実態について把握するため、2013年から2014年にかけて、短周期海底地震計35台を用いた地震観測を実施した。OBSによる海域観測と平行して、海域境界域の地震活動の詳細を把握する事を目的に陸上にも臨時地震観測点を設置して観測を行った。解析は、Canadian National Seismograph Network (CNSN)による定常観測で得られている地震カタログをもとにOBSならびに陸上観測点での到達時刻の読み取りを行い、1次元地震波速度構造を用いて震源決定を行った。得られた結果は、FS観測と同様Nootka Fault Zoneに沿った活動が顕著な一方、それ以外の場所では殆ど地震活動が見られない事を示している。なお、観測期間中の2014年4月にMw6.6の横ずれ型の震源を持つ地震が観測網近傍で発生したが、この地震の余震が北西-南東方向に分布している事が示された。また、余震の分布とほぼ平行な地震活動の分布も見られており、沈み込むJuan de FucaプレートとExplorerプレートの境界付近の構造不均質に関連していると思われる。

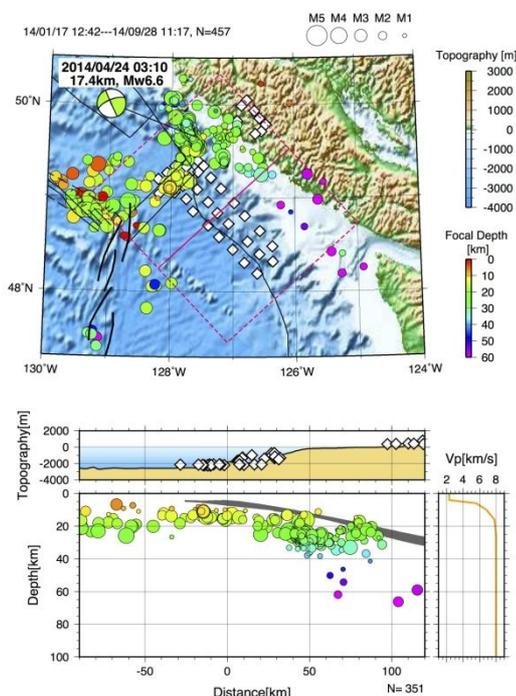


図6：長期観測(2014年1月~2014年9月)で得られた震源分布。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計2件)

- Obana, K., Scherwath, M., Yamanoto, Y., Kodaira, S. et al, Earthquake Activity in Northern Cascadia Subduction zone Off Vancouver Island Revealed by Ocean-Bottom Seismograph Observations. The Bulletin of the Seismological Society of America, 査読有 No.105, 2015, 489-495, DOI:10.1785/0120140095
- Scherwath, M., Spence, G., Obana, K., Kodaira, S. et al, Seafloor seismometers monitor northern Cascadia earthquakes. EOS, Transactions American Geophysical Union, 査読有 Vol.92, 2011, 421-440, DOI: 10.1029/2011E0470001

[学会発表](計6件)

- 尾鼻 浩一郎、小平 秀一、山本 揚二郎 他、SeaJade:カナダ・カスカディア地震発生帯における海底地震観測、Blue Earth 2015、2015年3月20日、東京海洋大学(東京都港区)
- 利根川 貴志 尾鼻 浩一郎、山本 揚二郎、小平 秀一、Ps変換波を用いたカスカディア沈み込み帯における海底堆積物の異方性構造の推定、日本地震学会2014年秋季大会、2014年11月26日、新潟市朱鷺メッセ(新潟県新潟市)
- Obana, K., Kodaira, S., Takahashi, T.,

Wang, K. et al, SeaJade Earthquake Observations in Cascadia Subduction Zone off Vancouver Island, IRIS Amphibious Array Facility Workshop, 2014年10月24日, Snowbird (USA)
Tonegawa, T., Obana, K., Yamamoto, Y., Kodaira, S., Wang, K. et al, Shear wave anisotropy within marine sediments in the Cascadia subduction zone derived from Ps converted waves, IRIS Amphibious Array Facility Workshop, 2014年10月24日, Snowbird (USA)
Heesemann, M., Scherwath, M., Kodaira, S., Obana, K., Yamamoto, Y. et al, Northern Cascadia Seismicity From Ocean Floor Observations - Campaign and Permanent Seismic Experiments, AGU Fall Meeting 2013, 2013年12月10日、San Francisco (USA)
Hutchinson, J.A., Kao, H., Obana, K., Spence, G.D. Seismic Structures Beneath the Deformation Front of the Northern Cascadia Subduction Zone: Preliminary Results from the SeaJade Project, AGU Fall Meeting 2013, 2013年12月10日、San Francisco (USA)

研究者番号：10540859

末次 大輔(SUETSUGU, Daisuke)

独立行政法人海洋研究開発機構・地球内部
ダイナミクス研究分野・分野長

研究者番号：20359178

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小平 秀一(KODAIRA, Shuichi)

独立行政法人海洋研究開発機構・地震津波
海域観測研究開発センター・研究開発セン
ター長

研究者番号：80250421

(2) 連携研究者

尾鼻 浩一郎(OBANA, Koichiro)

独立行政法人海洋研究開発機構・地震津波
海域観測研究開発センター・主任研究員

研究者番号：10359200

高橋 成実(TAKAHASHI, Narumi)

独立行政法人海洋研究開発機構・地震津波
海域観測研究開発センター・研究開発セン
ター長代理

研究者番号：70359131

三浦 誠一(MIURA, Seiichi)

独立行政法人海洋研究開発機構・地震津波
海域観測研究開発センター・グループリー
ダー

研究者番号：00371724

高橋 努(TAKAHASHI, Tsutomu)

独立行政法人海洋研究開発機構・地震津波
海域観測研究開発センター・主任研究員

研究者番号：90435842

山本 楊二郎(YAMAMOTO, Yojiro)

独立行政法人海洋研究開発機構・地震津波
海域観測研究開発センター・研究員