

12 - 3 スロー地震の地球物理学的発生環境：プレート境界周辺構造と流体分布 Geophysical environment for slow earthquakes: Structures around the plate interface and fluid distribution

望月 公廣（東京大学地震研究所）

Kimihiro Mochizuki (Earthquake Research Institute, The University of Tokyo)

2000 年代初めに西南日本の巨大地震断層の深部に沿ってテクトニック微動が発見されてから、世界の沈み込み帯ではスロー地震の活動が次々と見つかり、通常地震からスロー地震まで、プレート境界における断層すべりの多様性が示されてきた。この特徴的時間が広帯域にわたる断層すべりの多様性は、プレート境界面の形状、周辺物質の物理的性質や、流体の分布など、構造・環境的要因を反映した摩擦特性の不均質性に起因すると考えられる。一次的にはプレート境界の深さに沿った多様性の分布を見せるものの、等深方向にも不均質な分布をしており、断層すべりの特徴を決定する構造・環境的要因の詳細は明らかになっていない。この決定要因の解明には、プレートの沈み込み浅部から深部にわたってプレート境界周辺構造を連続的に把握し、断層すべりの特徴およびその時空間変化との対比を通して、これらの相関関係の理解が必要である。科学研究費助成事業・新学術領域研究「スロー地震学」ではその一環として、1946 年昭和南海地震震源域の西端にあたり、多様な断層すべりが発生するとともに、陸域での地震・電磁気観測網の充実している豊後水道周辺域を研究対象領域として、プレート沈み込み浅部から深部にわたるプレート境界周辺構造を把握するため、海域まで含めた地震・電磁気学的調査・観測を実施した。また、ニュージーランド北島沖のヒ克蘭ギ沈み込み帯北部では、ごく浅いプレート境界で多様な断層すべり、特にスロースリップが約 2 年周期の高頻度で発生しており、高解像度の構造の把握を通して、多様な断層すべりの発生メカニズムの解明に向けて、国際協力のもとで研究が進められている。

2019 年 11 月に、四国西部の深部微動発生域上、およびそれに直交するプレートの沈み込みに沿った十字測線で、大規模な人工震源地震波構造調査を実施した。得られた地震波反射断面上には、深さ約 30 km に位置する沈み込むフィリピン海プレートの上面から海洋地殻内に加え、上盤プレート内の島弧モホ面と考えられる構造からの反射波群が確認できる(図 1-C)。その振幅は一樣ではなく、構造境界周辺の不均質性を反映した振幅強度分布を示している。沈み込むフィリピン海プレートの海洋地殻内に明瞭な反射波群が認められる領域は、深部微動の発生領域と良い相関を持ち、またこれまでに求められている地震波速度構造と対比すると、 V_p/V_s 値が大きく領域とも良い一致を示しており、流体が豊富であることを示唆している。また、陸域地震観測網の観測記録を用いたレシーバー関数解析(図 1-B)では、沈み込むフィリピン海プレート内の海洋モホ面が強い振幅で明瞭に確認でき、その上部に平行してプレート境界面も振幅変化をもって認められる¹⁾。フィリピン海プレートの沈み込み構造は地震波構造調査の結果と調和的であり、微動が発生する海洋地殻からの強い反射波群生成域上のプレート境界ではレシーバー関数の振幅は小さく、プレート境界を挟んだ地震波速度のコントラストは小さいと考えられる。これらのことから、深部微動発生域にあたるフィリピン海プレート境界下の海洋地殻では、沈み込みに伴う脱水反応で生成された流体が海洋地殻内に豊富に存在し、それがプレート境界を挟んだ島弧マントルに移動して、マントルを蛇紋岩化している可能性を示している。一方、四国西部に展開したネットワーク MT 陸域電磁気観測からも、深さ約 30 km までのプレート境界周辺域と上盤プレート内の三次元比抵抗構造が明らかにされており

(図 1-2), 深部微動発生域周辺におけるプレート境界を挟んだ低比抵抗領域が認められ, 微動発生域における豊富な流体分布および島弧マンツルの蛇紋岩化を示唆する地震学的調査・観測の結果と調和的である。

一方豊後水道沖合から日向灘にかけての海域では, 2020 年 8 月に宮崎県沖日向灘で実施した人工震源構造調査によって, 浅部微動発生領域においてプレート境界からの振幅の大きい反射波が断続的に見られることを明らかにした(図 1-A)。また, 2016 年から実施している海底電位磁力計を用いた海域電磁気観測では, 1968 年日向灘地震震源域での低比抵抗領域, およびスロースリップ発生域での低比抵抗領域がプレート境界周辺において確認された(図 1-1)。これらの結果は, 浅部微動発生域にあたるプレート境界周辺においても流体が豊富に存在しており, 一方, 通常地震断層では流体量が少ないことを示唆している。

ニュージーランド北島沖のヒ克蘭ギ沈み込み帯では, 海側の太平洋プレートが陸側のオーストラリア・プレート下に年間 4 cm 程度の速さで沈み込んでおり, プレート境界の固着強度分布および島弧のテクトニクスは豊後水道周辺域の西南日本と共通の特徴を有している。太平洋プレートの沈み込みは浅く, スロースリップから微動まで深さ約 12 km 程度までの浅いプレート境界で発生している(図 2)。特にヒ克蘭ギ沈み込み帯北部ではスロースリップが約 2 年周期の高頻度で発生しており, それに伴う断層すべり運動を理解する上で好条件を有する。人工震源地震波構造調査や電磁気構造調査によって, プレート境界周辺の地震学・電磁気学的構造も高解像度で把握が可能であり, スロー地震の発生と構造との対比を行う上で世界的にも最も優れた場所の一つである。

2009 年からヒ克蘭ギ沈み込み帯北部において継続してきた国際共同による海底地震・地殻変動観測によって, 海域から陸域にわたる活発な定常的地震活動に加え, 観測網直下でのスロースリップを捉えることに成功し²⁾, またそれに伴う海域下での浅部微動³⁾や群発的に発生する相似地震⁴⁾を初めて観測した。スロースリップのすべり分布と地震波構造調査から明らかとなっているプレート境界周辺の構造を比較すると, スロースリップのすべりは沈み込む海山の沈み込み前方に位置し, 流体が豊富に存在すると考えられるプレート境界を中心として, 沈み込む海山は避けつつ部分的に海溝軸周辺にまで達することがわかった(図 2)。地震波トモグラフィから, 海山の沈み込み前方には V_p/V_s が高く流体が豊富な海洋地殻が存在していることが⁵⁾, また海洋地殻内における地震活動の震源メカニズムの時空間変化から, スロースリップの発生サイクルと同期した海洋地殻での流体蓄積・放出過程が明らかになっている⁶⁾。スロースリップに伴う微動と群発的相似地震は, スロースリップのすべりが終息する時期から 3~5 週間にわたり, 沈み込む海山の周辺に限って発生することがわかった。このような数週間にわたる一連の多様な断層すべり活動は, 流体の移動が伴っていると考えられる。

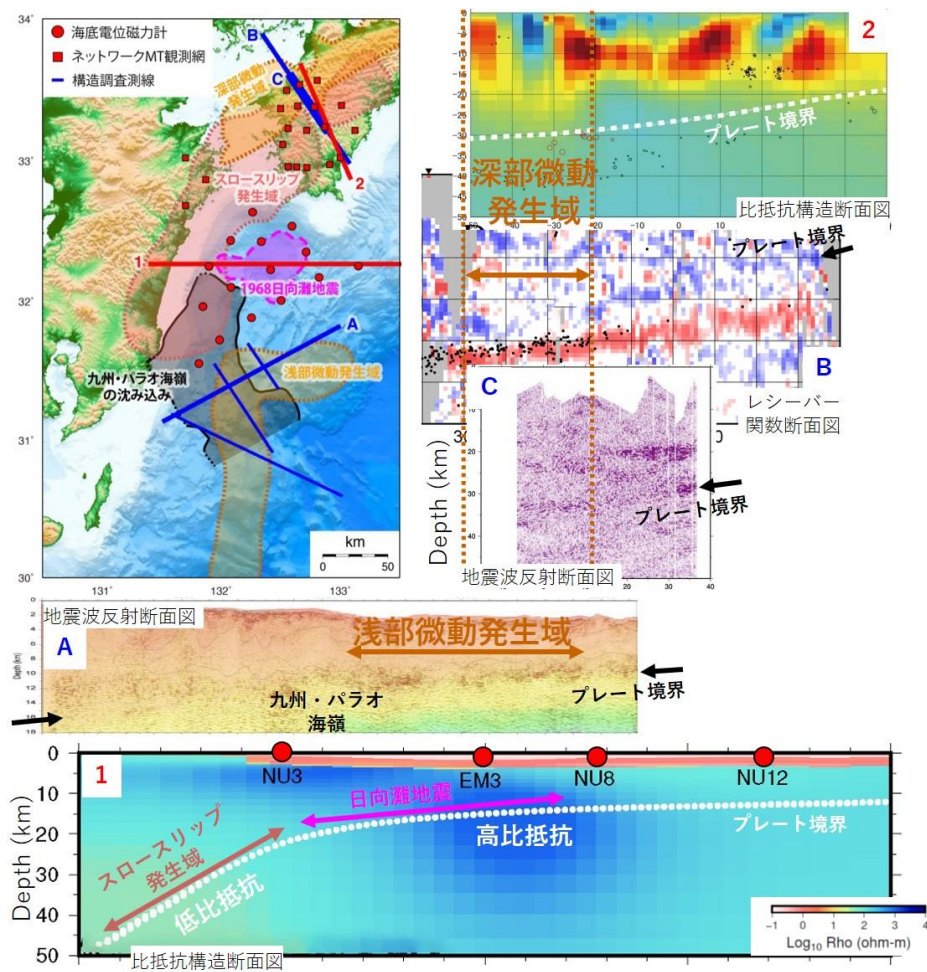
以上, 多様なスロー地震が見られる豊後水道周辺域とヒ克蘭ギ沈み込み帯北部において, 地震学・電磁気学的調査・観測から明らかとなったプレート境界周辺の構造と断層すべりの特徴との関係について述べた。豊後水道周辺では, プレート境界の沈み込み浅部から深部まで, スロー地震の発生領域とプレート境界周辺の流体分布とに良い相関が確認された。またヒ克蘭ギ沈み込み帯北部では, スロースリップ発生サイクルや多様な断層すべりの時空間分布から, 海山のようなプレート境界形状が断層すべりの特徴や分布に影響を及ぼし, また, これらの活動に流体移動が関与している可能性が示されている。今後, こうした調査・観測を継続するとともに, 事例を世界的に増やすことによって, スロー地震の発生メカニズム, さらには通常地震活動との相互作用についての知見が向上することが期待できる。

(著東京大学地震研究所. 望月 公廣)

MOCHIZUKI Kimihiro

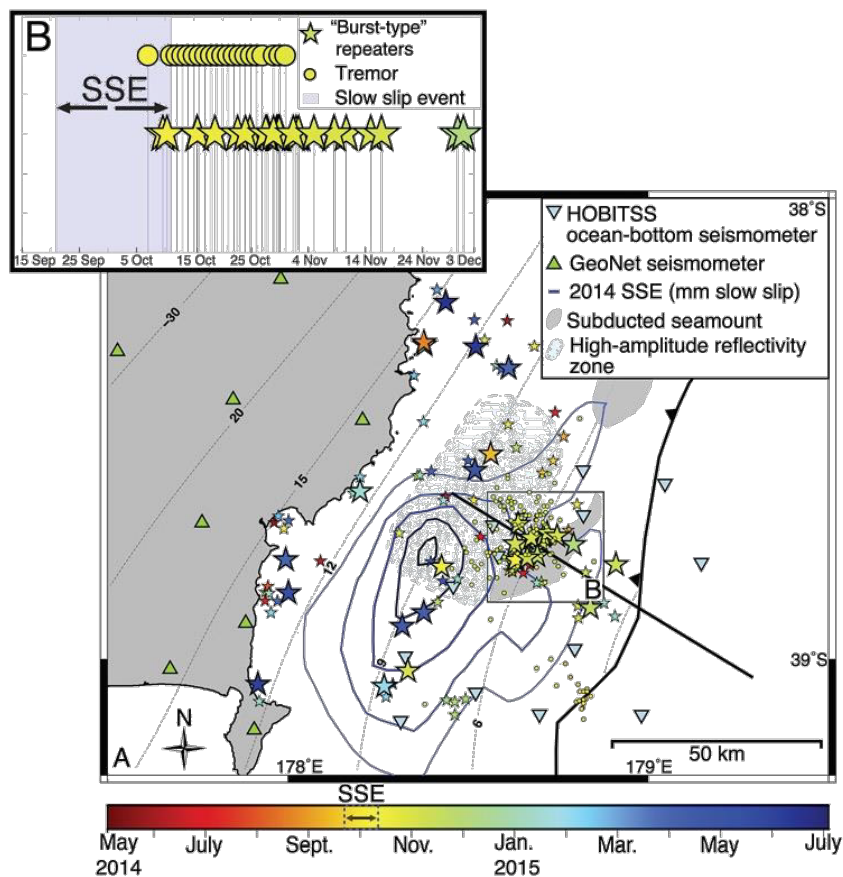
参考文献

- 1) Shiomi et al. (2020), *Geophysical Journal International*, **224**, 151-168. Seismological evidence of a dehydration reaction in the subducting oceanic crust beneath western Shikoku in southwest Japan
- 2) Wallace et al. (2016), *Science*, **352**, 701-704. Slow slip near the trench at the Hikurangi subduction zone, New Zealand
- 3) Todd et al. (2018), *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **123**, 6769-6783. Earthquakes and Tremor Linked to Seamount Subduction During Shallow Slow Slip at the Hikurangi Margin, New Zealand
- 4) Shaddox and Schwartz (2019), *Geology*, **47**, 415-418. Subducted seamount diverts shallow slow slip to the forearc of the northern Hikurangi subduction zone, New Zealand
- 5) Mochizuki et al. (2021), *Earth and Planetary Science Letters*, **563**, DOI: 10.1016/j-epsl.2021.116887. Seismicity and velocity structure in the vicinity of repeating slow slip earthquakes, northern Hikurangi subduction zone, New Zealand
- 6) Warren-Smith et al (2019), *Nature Geoscience*, **12**, 475-481. Episodic stress and fluid pressure cycling in subducting oceanic crust during slow slip



第 1 図 豊後水道周辺から日向灘で実施された地震学（青実線：A ～ C）・電磁気学（赤実線：1, 2）的観測や構造調査で得られたプレート境界周辺までの断面構造と、多様な断層すべり分布。電磁気学的構造（1, 2）では、暖色系が低比抵抗を示す。

Fig. 1 Structure sections down to around the plate interface along profiles obtained by seismic (blue lines: A ~ C) and electromagnetic (red lines: 1, 2) surveys and observations from around the Bungo channel to the Hyuganada regions and distributions of various types of fault slips. Warm colors indicate lower resistivity in the electromagnetic structures.



第 2 図 ヒクランギ沈み込み帯北部におけるプレー境界の深さ(黒実線コンター)と特徴的構造(沈み込む海山: 灰色, 地震波反射強度の強い領域: 水色)および多様な断層すべりの活動. 三角形は陸域, 逆三角形は海域の地震観測点. 青コンターは 2014 年 9 月から 10 月にかけて発生したスロースリップのすべり分布, 丸印はスロースリップに伴うテクトニック微動, 星印は群発的相似地震. 左上図 (B) はスロースリップ, テクトニック微動および群発的相似地震活動の時間分布.

Fig. 2 Plate interface depth contour (black thin lines) and characteristic structures (subducted seamounts: gray regions, and High-amplitude reflectivity zone: light blue region) in the northern Hikurangi subduction margin, and distributions of various types of fault slips. Triangles are onshore seismic stations and inverted triangles are offshore stations. Blues contours show slip distribution during the 2014 slow slip events, circles are tremors and stars are burst-type repeating earthquakes. Let-top figure shows temporal distribution of slow slip event, offshore tremors and burst-type repeating earthquakes.