ハイライト研究：
平成 23 年東北地方太平洋沖地震に関する研究

Research Highlights
Study for the 2011 Tohoku Earthquake

2011 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震は，マグニチュード 9 という，これまで我々が東北沖で発生する地震に対して想定していた規模をはるかに上回り，しかも非地震的にすべると考えられていた海溝軸付近の浅い場所で大きな地震動と巨大津波を励起した．しかし，この巨大地震はもともと高い発生確率を示していた宮城県沖地震の震源域付近で発生したものであり，海域の観測体制がある程度整備されていたのに加え，1995 年の阪神淡路大震災以降，陸域には地震（高感度・広帯域・強震），測地（GNSS）観測網が世界に類を見ないほどの高密度で展開されてきており，これらのデータに基づいて，東北地方太平洋沖地震の発生メカニズムやその後の余震・余効変動，さらには本震発生前の前駆的地殻活動に関する詳細像が明らかになってきた．

地震研究所では，1996 年に東北大学と共同で岩手県釜石市の沖合に全長約 120 km の海底ケーブル式地震・津波観測システムを展開しており，東北地方太平洋沖地震の際には震源域近傍で鋭いパルス波形を含む最大 5 m もの津波を観測した．この観測データは，海溝付近でのとくに大きなすべりを示すものであり，震源過程解析に大きな貢献を果たした．

統合震源モデルとその破壊過程

大震災を引き起こした東北地方太平洋沖地震は，世界で初めて強震と遠地，測地，津波の稠密ネットワークによって観測された超巨大地震である．まずそれぞれのネットワークで得られたデータセットの分解能を見るため，チェッカーボードテストを実行し，いずれのデータセットも限られた分解能しか持っていないことがわかった．この問題を克服するため，Koketsu et al.（2011）は遠地と強震，測地のデータセットに対して 3 重の合同インバージョンを行い，統合震源モデル第 1 版を構築した．次に Yokota et al.（2011）は津波データセットを含めた 4 重の合同インバージョンを行い，統合震源モデル第 1.5 版を決定した．

以上のインバージョンでは，1 次元速度構造に対して計算された 1 次元グリーン関数を用いたが，次に 3 次元速度構造を考慮に入れて統合震源モデル第 2 版を構築した．この実現のため，有限要素法を用いて 3 次元グリーン関数を計算し，それぞれのデータセットに対して独立に個別インバージョンを実行した（図 1 左側）．さらに，強震と測地，津波のデータセットに対して 3 重の合同インバージョンを行い，統合震源モデル第 2 版を得た（図 1 右端）．なお，遠地データセットはチェッカーボードテストにおいて低い分解能しか示さなかったため，インバージョンは遠地データセットを除いて行われた．

統合震源モデル第 2 版では地震モーメントが 4.2×10^{22} Nm となり，これは Mw 9.0 に相当する．このモデルは次のような破壊過程を明らかにした．破壊開始後 40 秒間の小さな破壊ののち，第 1 の主破壊が 2.0 km/s という遅い速度で日本海溝に向かって広がった．その 20 秒後に，第 2 の主破壊が 1.7 km/s というさらに遅い

The 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake (Mw 9.0) occurred on March 11, 2011 along the subducting plate interface near the Japan Trench. The magnitude was much larger than that of the expected largest earthquake in the source region. Moreover, the 2011 Tohoku Earthquake caused significant seismic and tsunami hazards mainly caused by large coseismic slip nearby the trench axis where we had thought as an aseismic slip area. On the other hand, the 2011 Tohoku Earthquake was well recorded by ocean bottom observation instruments deployed around the expected source area of M7-class off Miyagi Earthquake and by inland very dense seismograph and GNSS networks constructed after the 1995 Kobe Earthquake. As a result, the occurrence mechanism of the 2011 Tohoku Earthquake, aftershock and afterslip sequences, and precursory crustal activity have been well resolved.

ERI constructed an ocean bottom cable seismometer and tsunami sensor system with a length of 120 km off Kamaishi, Iwate Prefecture cooperated with Tohoku University in 1996. The tsunami sequence with the maximum height of 5 m recorded at the nearest point from the source region of the 2011 Tohoku Earthquake greatly contributed to the following source process study.

Unified source model and its rupture process

The devastating 2011 Tohoku Earthquake was observed by dense networks of strong motion, teleseismic, geodetic, and tsunami. We performed checkerboard resolution tests for assessing the resolving power of the datasets obtained by the networks. From the results, we found that the individual datasets had only limited resolutions. In order to overcome these limitations, Koketsu et al. (2011) constructed the first version of the unified source model through a triple joint inversion of the teleseismic, strong motion, and geodetic datasets. Yokota et al. (2011) next performed a quadruple joint inversion of all the four datasets to determine the 1.5th version of the unified source model.

Although the above inversions were performed using one-dimensional Green's functions, we constructed the second version of this unified source model inferred taking three-dimensional (3-D) velocity structures into consideration. To achieve this, we calculated the 3-D Green's functions using the finite element method. We first inverted each of the datasets separately (Fig. 1 left), and then performed a triple joint inversion of the strong motion, geodetic, and tsunami datasets for the second version of the unified source model (Fig. 1 rightmost). The teleseismic dataset was excluded, because the checkerboard tests had shown its low resolving power.

The total seismic moment in the second version was calculated to be 4.2×10^{22} Nm, which yielded Mw 9.0. This model revealed that the first rupture expanded at a slow speed of 2.0 km/s to the Japan Trench after small rupture in the initial 40 s. The second rupture began 20 s later at the slowest speed of 1.7 km/s and became dominant with the largest slip of 36 m. The third rupture then played the leading role, propagating southward at a speed of 2.5 km/s. The slow rupture speed and first rupture to the Japan Trench can explain the

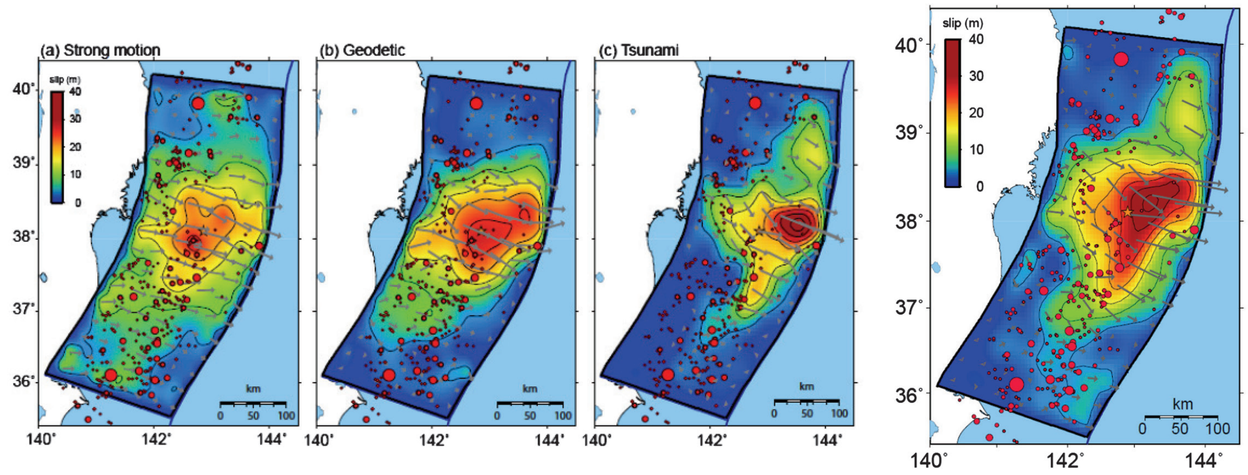


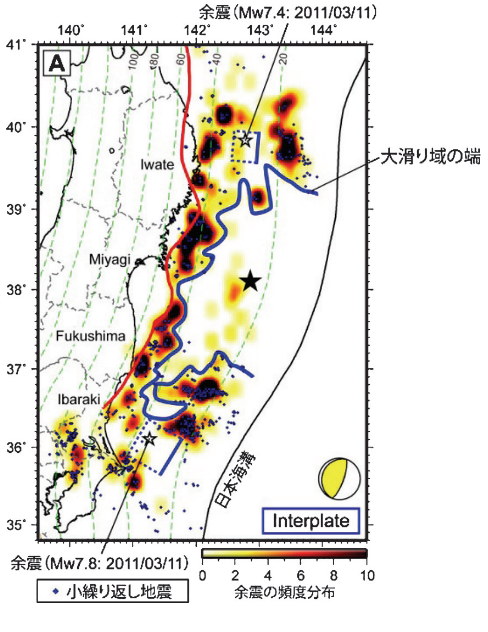
図１　東北地方太平洋沖地震の統合震源モデル第２版のすべり分布（右端）．灰色矢印は小断層ごとのすべりベクトルを，赤丸は余震の分布を表わす．単独インバーションの結果（a：強震，b：測地，c：津波）も左側に併せて示した．

Fig.1 Slip distribution of the second version of the unified source model for the 2011 Tohoku Earthquake (rightmost). Gray arrows represent the slip vectors in each subfault, and red circles indicate the distribution of aftershocks. The results of the separate inversions (a: strong motion, b: geodetic, and c: tsunami) are also shown in the left.

速度で始まり，36 m の最大すべりを伴った卓越した破壊になった．さらにその後，第３の破壊が 2.5 km/s という速度で南に伝播して，中心的な役割を担うようになる．遅い破壊伝播速度や日本海溝に向かった第１の破壊は，この地震による災害の特徴を説明することができる．

余震活動から推定された大すべり域

近年，世界で過去に発生した大きな地震後の余震活動は，大きくすべった領域を避けてその縁辺部に集中するという報告が多数なされている．つまり，余震の発生数が少ない領域は，本震時に大きくすべった領域に対応する可能性がある．そこで，余震分布の特徴と大すべり域の相補関係を東北地方太平洋沖地震の余震活動に適用することで，本震発生時の大すべり域の広がりを推定した（図２）．新たに定義された大すべり域は，先に示した強震・測地・津波データセットによる統合震源モデルと同



features of the disaster by the earthquake.

Regional extent of the large coseismic slip zone delineated by on-fault aftershocks

Numerous investigations worldwide have found evidence that aftershocks which occur on or very near the mainshock rupture plane are actually quite rare in large-slip regions. By applying this spatial correlation between on-fault aftershocks and slip to the aftershock sequence, we delineate the outer edge of the large-slip zone with higher spatial resolution than previous studies using fault source models. The model that we present for the large-slip zone of the 2011 Tohoku Earthquake incorporates the main features of previously proposed fault source models, and also the observed fine-scale heterogeneities of fault slip (Fig. 2). It is important to highlight that the outer edge of this large-slip zone shows a remarkably complex shape. In particular, it is narrow and elongate southward along the ~35 km iso-depth contour of the plate boundary offshore of Fukushima and Ibaraki. This southward elongate slip zone corresponds to down-dip regions that appear to have produced higher relative levels of short-period seismic radiation.

図２　プレート境界型の余震の頻度分布と新たに推定された大すべり域（青色の実線で囲まれた領域）を示す．

Fig.2 Map view of the density recorded throughout the 1-year period immediately following the mainshock and the outer edge of the large-slip zone (blue solid line) as proposed in this study.

様に宮城県沖では海溝軸まで広範囲に広がるとともに，さらに複雑な形状を示した．特徴的な点として，南側の福島県沖・茨城県沖まで伸びる細長い大すべり域の存在が明らかになった．大すべり域の外側では，プレート境界面上のほぼ同じ場所で繰り返し発生する，小繰り返し地震も多数分布していた．この地震は，大すべり域から解放された応力によって励起された余効すべりを示唆している．本解析により高空間分解能で推定された大地震の大すべり域は，隣接地域の大地震発生ポテンシャルの評価において重要な知見となり得るであろう．

地震動・地殻変動・津波連成シミュレーション

東北地方太平洋沖地震は強震動と地盤沈下，そして津波の複合作用が甚大な被害をもたらした．海底における断層域直上での観測はこのような巨大地震の震源像を理解するのにきわめて重要であるが，その記録は地震から津波に到る一連の記録が互いに重なる大変複雑なものである．このような時間スケールの異なる複数の物理現象を統一的に理解することは，地震発生および複合災害の理解の両面から欠かせない．そのため，地震動と地殻変動を記述する運動方程式に重力の影響と海水の運動を加味することにより，従来独立に扱われていた地震波と地殻変動，津波を統一的な方法で計算するシミュレーション手法を開発した（Maeda and Furumura, 2013）．本手法によるシミュレーションは高分解能かつ長経過時間，という大規模な計算を必要とするが，近年供用が開始された世界最大規模の計算能力をもつ「京」コンピュータ上で数千～数万 CPU を用いた並列計算を実現することでこれを克服した．図 3 に東北地方太平洋沖地震の再現シミュレーションのスナップショットを示す．地震動とそれがもたらす海底と海面の隆起・太平洋沿岸の沈降とその後の津波という互いにオーバーラップした一連の現象が統一的に再現されている様子が見て取れる．

Integrated simulation of seismic waves, coseismic deformation and tsunami

The 2011 Tohoku Earthquake caused significant hazards including strong ground motion, ground subsidence, and tsunamis. The ocean-bottom observation above the fault zone brought important information of source rupture process, however, their records are quite complex due to the overlaps of seismic waves, coseismic deformation and tsunamis. To understand for such complex process in detail, a new numerical scheme has been developed to simulate all of these phenomena in a single set of equations of motion by considering gravity and ocean column in traditional seismic ground motion simulation (Maeda and Furumura, 2013). We also developed a massively parallel simulation code to perform the large-scale numerical simulation for such as the Tohoku earthquake on the K-computer, which is one of the fastest computers in the world. Figure 3 shows snapshots of displacement wavefield for the 2011 Tohoku Earthquake (Maeda et al., 2013). A complex process starting from the radiation of seismic waves, generation of coseismic deformation to tsunami propagation, is uniformly reproduced in this simulation.

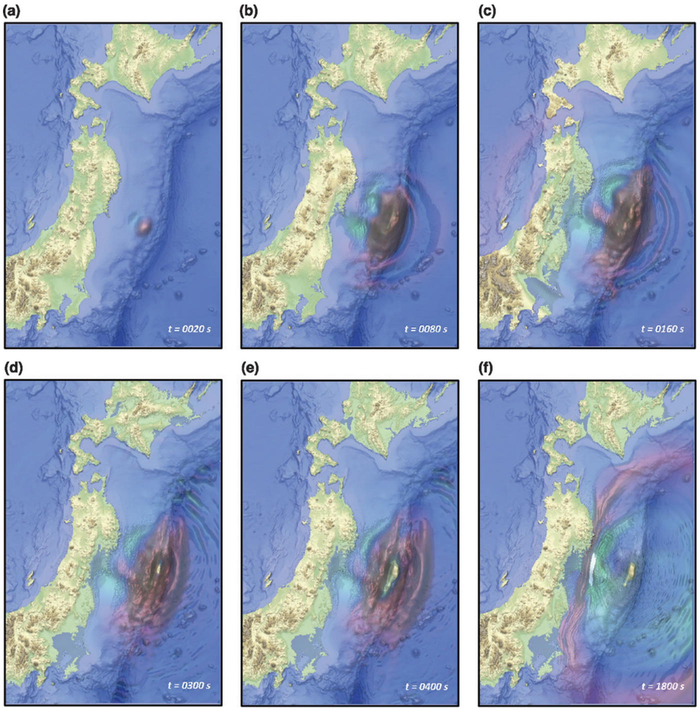


図 3　東北地方太平洋沖地震の地震波・地殻変動・津波の再現シミュレーション（Maeda et al., 2013）．地震発生から 20，80，160，300，400 および 1800 秒後の海面・海底の上下変位を地形変化と赤～青色で示している．

Fig.3 Visualization of displacement wavefield on the ground and sea surfaces at elapsed times of t=20, 80, 160, 300, 400 and 1800 s. Red and green colors show normalized upheaval and subsidence of the sea surface, while the displacement of sea bottom and ground surface is represented by topography height color, respectively (Maeda et al., 2013).

震源域における海底地震計を用いた海域余震観測

東北地方太平洋沖地震の震源域は日本海溝の陸側斜面下に位置しており，この地震の余震活動を正確に把握することは，本震の性質を考える上において重要である．そのため，本震発生直後から 100 台を超える自己浮上式海底地震計を用いた大規模な海底余震観測を実施した（図 4a）．その結果，現時点までに本震後約半年間の高精度余震分布が明らかとなった（図 4b）．余震は観測域全体にわたって，陸に向かって深くなる面を形成しており，これは本震がプレート間地震であることと調和的である．速度構造探査の結果と比較すると，本震時に大き

Seafloor Aftershock Observations Using Ocean Bottom Seismometers

The source region of the 2011 Tohoku Earthquake is positioned below the landward slope of the Japan Trench. To obtain a precise aftershock distribution is important for understanding of mechanism of the earthquake generation. In order to study the aftershock activity of this event, we carried out extensive sea floor aftershock observation using more than 100 ocean bottom seismometers just after the mainshock (Fig. 4a). A precise aftershock distribution for approximately six months in the whole source area is obtained at the present from the observation (Fig. 4b). The aftershocks form a plane

なすべりが推定されたプレート境界付近では，余震活動が低調であった．一方，震源断層上盤である陸側プレート内の地震活動は活発であり，横ずれ型または正断層型の余震が多く観測された．沈み込む太平洋プレート内においても，多くの余震が横ずれ型または正断層型であった．震源域及びその近傍では，本震の発生により，応力場が変化したと考えられる．

dipping landward over the whole area, which is consistent with the result that the mainshock is an interplate earthquake. Comparing seismic velocity structures, there is no aftershock along the plate boundary where a large slip during the mainshock is estimated. Activity of aftershocks in the landward plate in the source region is high and normal fault type and strike-slip type mechanism are dominant. Within the subducting oceanic plate, most of earthquakes have also normal fault type or strike-slip type mechanisms. The stress fields in and around the sources region change as a result of the mainshock.

図 4a　海底余震観測のために観測船上で投入準備中の自己浮上式海底地震計（左）及び海底に投入される長期観測型海底地震計（右）．

Fig.4a Preparation of pop-up type ocean bottom seismometers on the research ship (left) and deployment of a long-term pop-up type ocean bottom seismometer for seafloor aftershock observation (right).

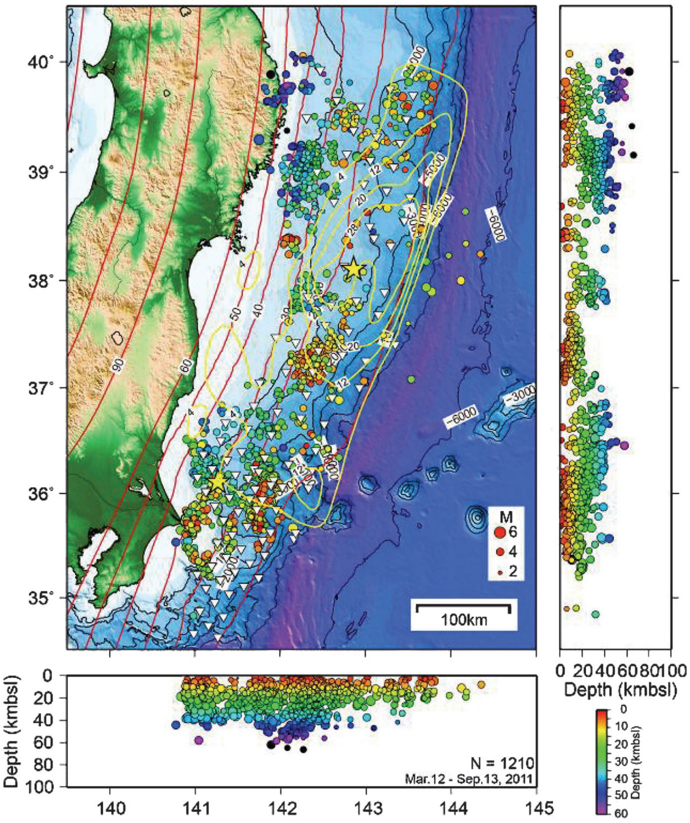


図 4b　海底地震計データを用いた東北地方太平洋沖地震の余震分布（2012 年 3 月 12 日～9 月 13 日）．色付丸が，余震の震源位置を表す．丸の大きさは，マグニチュードに比例している．大きい星と小さい星は，それぞれ本震および最大余震の震央を示す．白逆三角は海底地震計の設置位置．赤色のコンターは，太平洋プレートと陸側プレートの境界の深度を表す．黄色のコンターは，本震時のプレート境界での滑り量を表す．鉛直断面からは，余震が深さ約 60 km まで発生していることがわかる．また，陸に向かって震源の深さが深くなる．

Fig.4b Aftershock distribution (March 12th-September 13th, 2011) by ocean bottom seismometer data with bathymetry. The circles filled with color indicate the hypocenters of aftershocks. The depth of events is color-coded, and diameters of the circles are proportional to magnitudes. Inverted triangles denote positions of ocean bottom seismometers. Large and small stars indicate epicenters of the mainshock and the largest aftershock, respectively. Slip distribution during the mainshock is indicated by yellow contours. Red contours indicate depths of surface of the subducting Pacific plate. In the vertical section, the concentration of the aftershocks in depths shallower than 60 km is clearly recognized. From the west-east vertical cross-section, the aftershocks become deeper to the landward.

本震発生前に見られたゆっくりすべりの伝播

過去に起きた大地震の中には，本震に先立ち中小地震の活動（前震活動）が発生する事例があるが，前震から本震発生に至るプロセスには未解明な部分が多い．今回，東北地方太平洋沖地震前のおよそ１ヶ月間の連続地震記録に対して地震波形の相互相関処理を行うことで，前震活動の詳細な時空間分布を推定した（図 5a）．その結果，本震発生の約１ヶ月前の２月中旬と，約２日前の最大前震 Mw 7.3 の発生後に，本震の破壊開始点へ向かう震源移動現象がほぼ同じ領域で２度起きていたことを明らかにした．それぞれの移動速度は１度目が２～5 km/ 日，２度目は平均約 10 km/ 日であった．この震源移動を伴う前震活動には，プレート境界面上のほぼ同じ場所で繰り返し発生する「小繰り返し地震」が含まれていた．小繰り返し地震は，ゆっくりすべりの指標と考えられており，２度の震源移動は本震の破壊開始点へ向かってゆっくりすべりが伝播したことを意味する．つまり，ゆっくりすべりの伝播が，本震の破壊開始点へ応力の集中を引き起こし，本震の発生を促した可能性がある（図 5b）．巨大地震発生に至るプレート境界でのすべりの挙動（地震の直前過程）に関する知見を深めるうえで，とても重要な成果が得られた．

Propagation of slow slip leading up to the mainshock

Some major earthquakes are preceded by a series of foreshocks leading up to the mainshock, foreshocks, but it is unclear how these foreshocks relate to the nucleation process of the mainshock. On the basis of an earthquake catalog created using a waveform correlation technique, we identified two distinct sequences of foreshocks migrating at rates of 2 to 10 km per day along the trench axis toward the epicenter of the 2011 Tohoku Earthquake (Fig. 5a). The time history of quasi-static slip along the plate interface, based on small repeating earthquakes that were part of the migrating seismicity, suggests that two sequences involved slow-slip transients propagating toward the initial rupture point. The second sequence, which involved large slip rates, may have caused substantial stress loading, prompting the unstable dynamic rupture of the mainshock (Fig. 5b). While not all major earthquakes are preceded by foreshocks, closer examination of the seismic records of other large earthquakes for slow-slip behavior may yield further invaluable clues to the processes by which earthquakes occur.

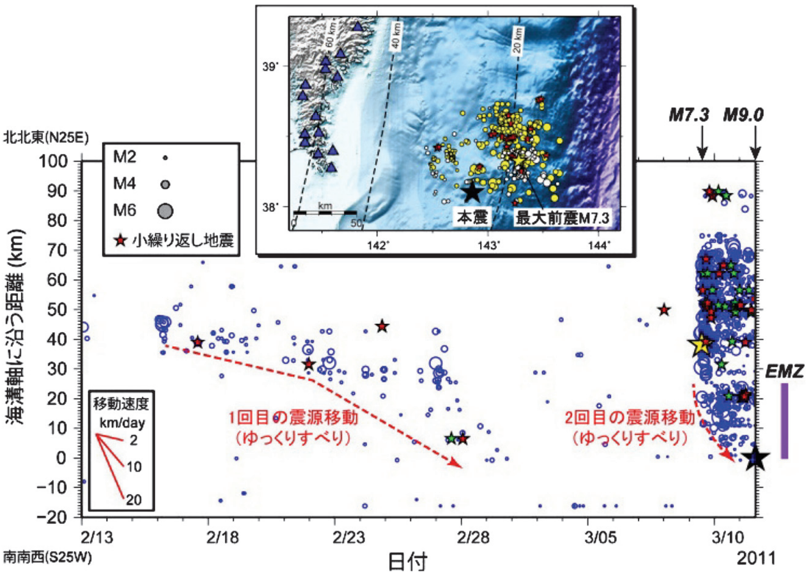


図 5a　検出された前震活動の時空間分布．青色の丸印は震源を表し，その大きさはマグニチュードに比例する．横軸は日付，縦軸は海溝軸に沿う距離を示す．赤い破線は震源移動のフロントの位置を表す．黒色の星印：本震の震源，黄色の星印：最大前震（Mw 7.3）の震源，赤い星印：小繰り返し地震の震源，EMZ：震源の移動現象が見られた領域．

Fig.5a Earthquake migration toward the rupture initiation point of the mainshock. Space-time diagram of all detected events, with earthquake origin locations indicated in terms of the distance along the trench axis (blue circles scaled to magnitude). Red dashed lines, approximate locations of the fronts of earthquake migration; red stars, repeating earthquakes in the JMA catalog; black star, Mw 9.0 mainshock; yellow star, Mw 7.3 largest foreshock.

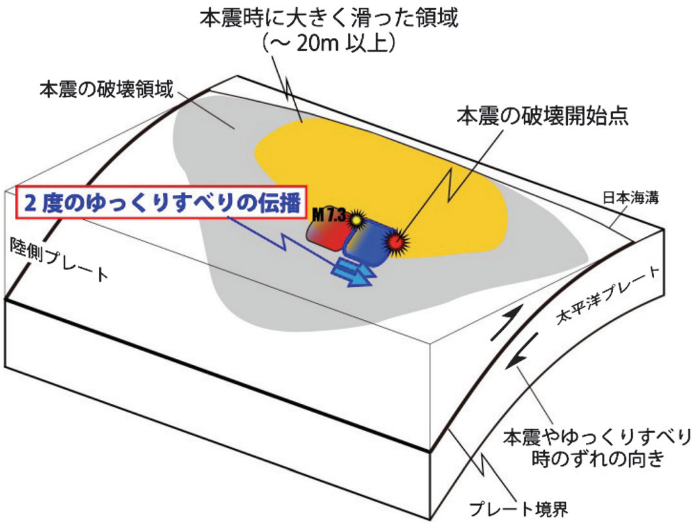


図 5b　本震の破壊開始点へ向かうゆっくりすべりの伝播の概念図．

Fig.5b Schematic figure showing propagation of slow slip events toward the initial rupture point of the mainshock.