

# 強震動予測の高精度化に向けた動力学モデルを用いた断層破壊シミュレーション

## プロジェクト責任者

津田 健一 清水建設株式会社 技術研究所

## 著者

津田 健一<sup>\*1</sup>, 三好 崇之<sup>\*2</sup>, 廣川 雄一<sup>\*2</sup>, 西川 憲明<sup>\*2</sup>, 岩沢 美佐子<sup>\*2</sup>, 浅野 俊幸<sup>\*2</sup>

\* 1 清水建設株式会社技術研究所

\* 2 国立研究開発法人海洋研究開発機構

利用施設：国立研究開発法人海洋研究開発機構 地球シミュレータ

利用期間：平成 27 年 8 月 12 日～平成 28 年 3 月 31 日

## アブストラクト

2011 年東北地方太平洋沖地震 (M9.0) をはじめとするプレート境界巨大地震では、長周期の地震波は断層浅部から、短周期の地震波は断層深部からといった、周期によって励起域が異なる現象が知られている。これらの現象の発生メカニズムを理解するためには、断層にかかる応力や摩擦の状態を初期条件として与え、時々刻々の断層破壊を追うことによって、実現象により近い断層の破壊過程を表現出来る動力学モデルを用いた検討が必須である。そこで本研究では、将来的な地震動予測を行う際の震源のモデル化に資するため、上記の現象を再現し、その発生メカニズムを検討することを目的として、断層破壊の伝播性状を支配する初期応力状態や摩擦特性に関する動力学モデルに基づく基礎的な検討を行った。計算手法は、大規模な並列計算に適しており、地球シミュレータで稼働実績が豊富な三次元スペクトル要素法を用いた。深さ 10km 以浅の臨界すべり量に着目してシミュレーションを実施したところ、臨界すべり量の最終すべりへの影響は小さかったが、臨界すべり量が長いほど断層浅部においてより周期の長い地震動が励起される傾向が認められた。

キーワード：動力学モデル, 断層破壊, スペクトル要素法, すべり弱化則, 臨界すべり量

## 1. はじめに

近年発生した 2011 年東北地方太平洋沖地震 (マグニチュード :M 9.0) や 2004 年スマトラ島沖地震 (M9.2) 等のマグニチュード 9 クラスのプレート境界巨大地震では、長周期の地震波は断層浅部で、短周期の地震波は断層深部で励起されるといった、周期によって励起域が異なる現象が報告<sup>1)</sup>されている (図 -1)。特に東北地方太平洋沖地震では、地震波の励起域が周期によって異なる現象だけでなく、断層面の浅部におけるすべりが数 10m オーダーに達するといった複雑な現象が報告されている。これらの現象の発生メカニズムを把握することは、近い将来発生することが想定されるプレート境界巨大地震の震源のイメージを作る上で非常に重要である。

一方、これまで断層破壊のシミュレーションを行う上で主流となっている運動学モデル<sup>2)</sup>では、どのように断層破壊が進展するかを予め仮定した上でシミュレーションを行うため、上述のような現象の発生メカニズムを把握することは難しい。一方、動力学モデルでは、断層面にかかる力の釣り合いを考慮して断層の破壊現象を表現することから、上述のような現象の発生メカニズムを把握するといった実現象により近い断層破壊のシミュレーションを行うことが可能である。このように、断層破壊の進展を予め仮定しない動力学モデルは、将来起こり

得るプレート境界巨大地震の断層破壊を考える上で非常に重要である。しかしながら、動力学モデルを用いた断層破壊シミュレーションでは、初期条件の設定方法によっては、例えば断層の一部でP波速度よりも超高速で断層破壊が伝播することや、せん断破壊しか存在しない場合でもS波速度よりも破壊伝播速度が速くなってしまいう等、物理的(地震学的)に有り得ない計算結果が出てしまうといった問題点がある。

このような問題に対して Tsuda・他(2015)<sup>3)</sup>では、初期条件の決め方を工夫することで、東北地方太平洋沖地震の深さ方向のすべり量分布の定性的な特性の再現に成功した。一方、より定量的な評価のためには、実際の断層物質を用いた室内実験結果等の観測データをシミュレーションの初期条件に組入れる等、初期条件を実際の断層の状態にどれだけ近づけることが出来るかが課題である。

そこで本研究では、想定されるプレート境界巨大地震の地震動予測を行う際の震源のモデル化に資するため、プレート境界巨大地震で見られた現象の発生メカニズムを理解することを目的として、先ず実際の断層から採取した物質を用いた室内実験結果を組入れて初期条件を設定した。次にその初期条件に基づいて動力学モデルを用いた断層破壊シミュレーションに対して摩擦特性を変更した影響の評価を行った。

## 2. 成果の概要

### 2.1 シミュレーション概要

断層破壊の摩擦構成則として図-2に示されるすべり弱化モデル<sup>4)</sup>を用いる。シミュレーションを行う際には、先ず深さ(h)、媒質の密度( $\rho$ )と重力加速度(g)に依存した上載圧( $\rho gh$ )やプレート運動による力を参考にして断層にかかっている力の釣り合いを考え、直応力( $\sigma^N$ )や初期せん断応力( $\tau$ )を設定する。しかしながら、深さに依存して設定した応力値と実際の観測記録から推定される応力値には非常に大きな乖離がある<sup>5)</sup>。これは、断層の中に含まれる流体(主に水)による空隙水圧によって、実際の断層に掛かる力(特に直応力)が減少するためである。このような空隙水圧のモデル化は、これまで数多くの研究者によって試みられている<sup>5)</sup>ものの、断層破壊シミュレーションの

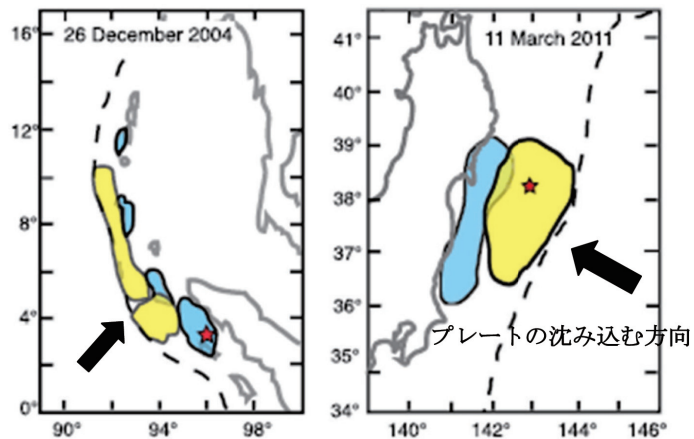


図-1 最近のプレート境界巨大地震(左:2004年スマトラ島沖地震 M 9.2, 右:2011年東北地方太平洋沖地震 M 9.0)で推定された長周期の地震波の励起域(黄色)と短周期の地震波の励起域(青色)の違いの例(Lay・他, 2012<sup>1)</sup>に加筆, 図中の点線は海溝軸の位置)

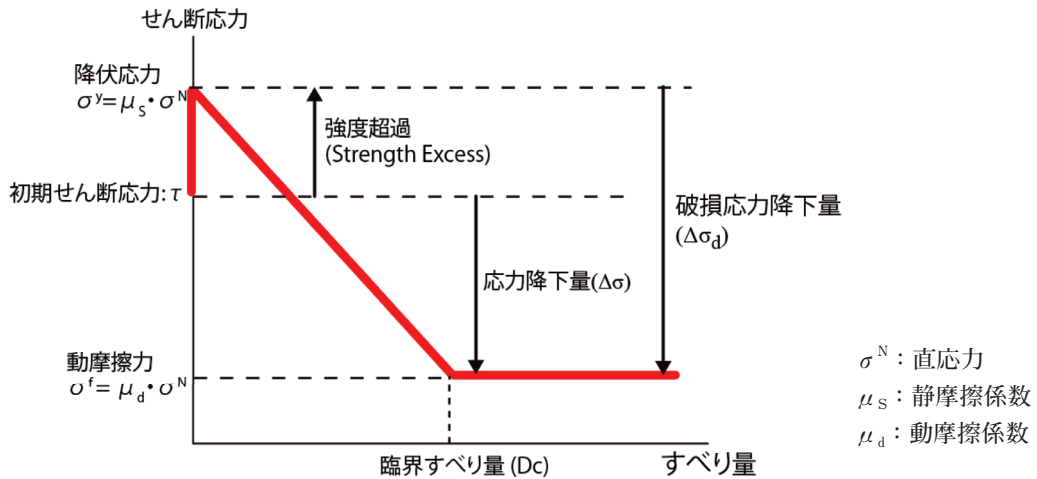


図-2 計算に使用した摩擦構成則 (すべり弱化モデル)<sup>4)</sup>

初期条件の設定に組入れるための有効な方法論は未だ確立されていない。

このような応力に関する初期条件設定の問題点に対し、Tsuda・他 (2015)<sup>3)</sup> では、断層破壊の駆動力である応力降下量 ( $\Delta\sigma$ ) と破損応力降下量 ( $\Delta\sigma_d$ ) の分布を既往の研究成果に基づいて最初に規定し、すべり弱化モデルでの以下の関係式 (図-2) を踏まえて直応力とせん断応力を設定した。

$$\Delta\sigma_d = (\mu_s - \mu_d) \cdot \sigma^N \quad (1)$$

$$\Delta\sigma = \tau - \mu_d \sigma^N \quad (2)$$

そして静摩擦係数と動摩擦係数を仮定した上で初期応力場を導出した。この Tsuda・他 (2015)<sup>3)</sup> による初期条件の設定フローを図-3に示す。

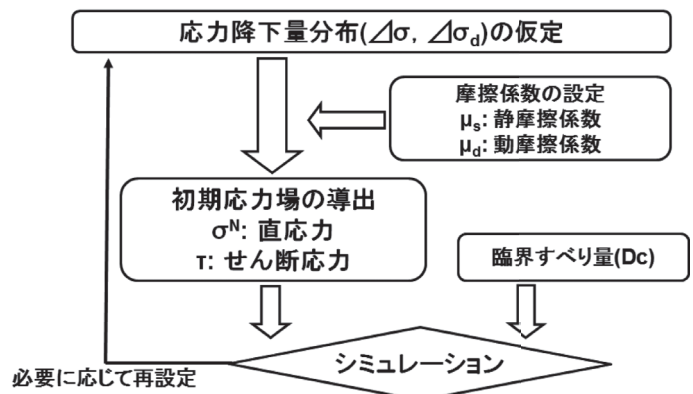


図-3 Tsuda・他 (2015)<sup>3)</sup> によるシミュレーションの初期条件の設定フロー

南海トラフ沿いでは、ここ10年の間にプレート境界まで掘削し、そこで採取された断層物質を用いた室内実験によってプレート境界での摩擦特性を推定する試み<sup>6)</sup>が精力的に行われてきた (図-4(a), (b))。その後、東北地方太平洋沖地震の発生を受け、この地震で大すべりの発生が推定された日本海溝沿いの領域でもプレート境界まで掘削が行われ、採取された断層物質を用いた室内実験<sup>7)</sup>を踏まえた摩擦特性の推定 (図-4(c)) が行われてきた。本研究では、これまで行われてきた室内実験結果のうち、深さ10kmまでの物質の摩擦特性を空隙水圧の影響を踏まえて推定した Hirono・他 (2016)<sup>7)</sup> による結果を用いた。

具体的な室内実験結果の使い方としては、先ず Tsuda・他 (2015)<sup>3)</sup> による応力降下量分布を仮定した。そして10kmまでの深さに対して Hirono・他 (2015)<sup>7)</sup> で推定された静摩擦係数、動摩擦係数を式 (1), (2) に代入して初期応力場 (直応力・せん断応力) を導出した。それより深い領域に関しては、Tsuda・他 (2015)<sup>3)</sup> によるパラメータを設定した。また、臨界すべり量 ( $D_c$ ) についても深さ10kmまでは Hirono・他 (2015)<sup>7)</sup> の結果を、それより深部については Tsuda・他 (2015)<sup>3)</sup> の結果を用いた。

シミュレーションで設定したモデル面上には、Tsuda・他 (2015)<sup>7)</sup> を参考に応力降下量の大きな領域 (固着域)、応力降下量が非常に小さく且つ動的な弱化が発生した領域 (弱化域)、負の応力降下量によって断層破壊が伝播しない特性を持つすべり硬化領域等を設定した。固着域の応力降下量は東北地方太平洋沖地震の断層浅部での大すべりの要因に関する考察を行っている Bletely・他 (2014)<sup>8)</sup> を参考に平均 8MPa とした。計算領域は 600km (Along Strike: 断層の走向方向) x600km (もう一方の水平方向) x100km (深さ方向) とした。設定した各領域のモデル面上での位置関係を図-5 に示す。

断層の傾斜角は、宮城県沖における太平洋プレートの平均的な沈み込み角を参考に 10° とし、断層の形状は平面を仮定した。なお、媒質は均質 (密度  $\rho$  2.76 g/cm<sup>3</sup>, P 波速度 6.3 km/s, S 波速度 3.54 km/s) を用いている。図-6 には、東北地方太平洋沖地震で 60m 以上の大きなすべり量が推定された宮城県沖の海域での地下構造<sup>9)</sup> と、設定したモデルの各領域の深さとの対応関係を示す。破壊開始点から大きなすべりが推定された領域と本モデルでの固着域・弱化域の深さはほぼ対応している。

シミュレーションにおける数値計算手法としては、プレートの沈み込み帯の先端部の低角な逆断層のような構造でも断層形状を組み入れることが出来、かつ計算速度の速い三次元スペクトル要素法<sup>10)</sup> を用いた。また、計算は大規模共有メモリシステム (UV2000) において 120 コアを使用した。断層破壊のシミュレーション時間は 120 秒間とし、1 タイムステップ (0.001 秒) として 1 ケース約 56 時

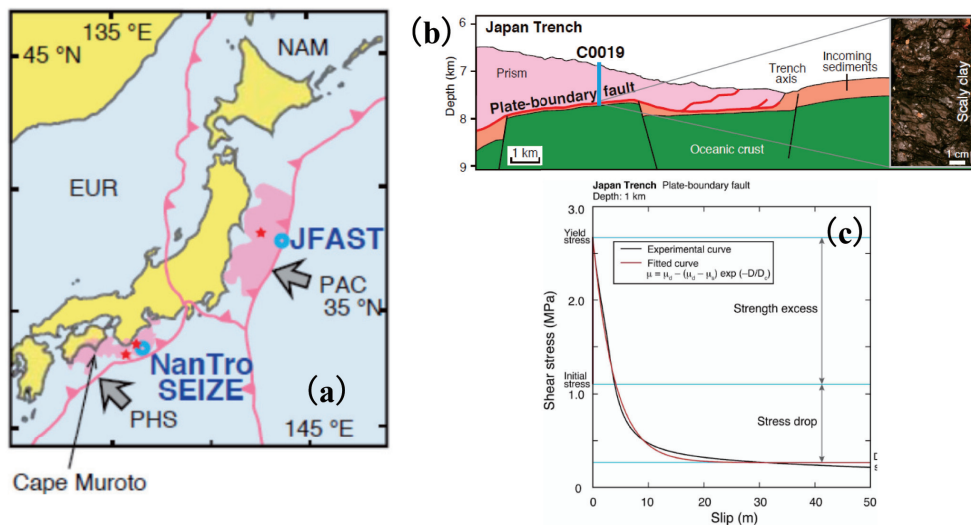


図-4 Hirono・他 (2016)<sup>7)</sup> による室内実験概要

- (a) 掘削が行われ、断層物質が採取された領域 (青丸の地点, Hirono・他, 2016)<sup>7)</sup>
- (b) 日本海溝沿いの掘削が行われた地点 (C0019, (a) の青丸の地点) での地質断面図
- (c) 日本海溝の 1km の深さにおいて仮定したすべり弱化学モデルの曲

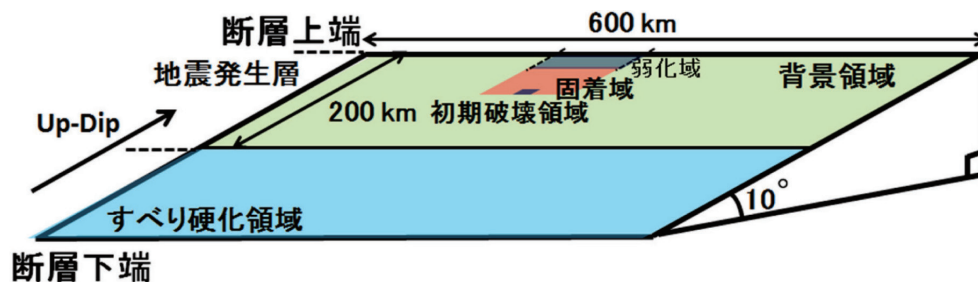


図-5 モデル面上での各領域の位置関係



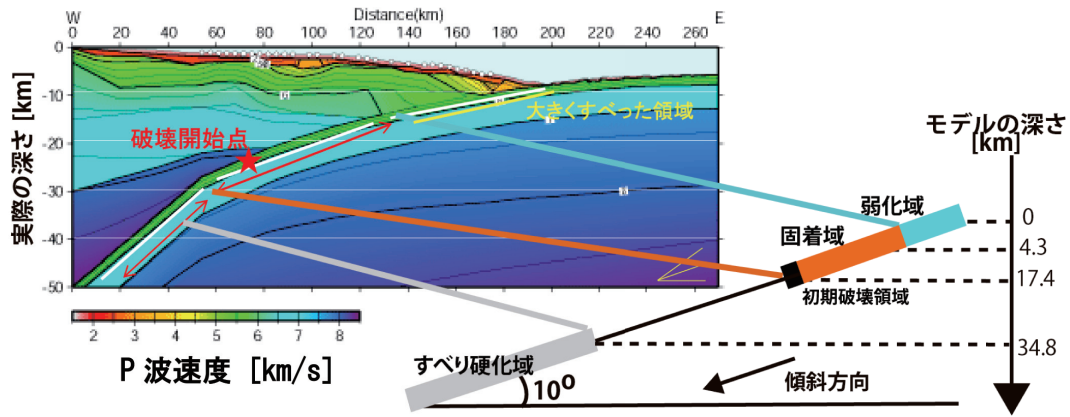


図-6 宮城県沖の地下構造 (P波速度構造)<sup>9)</sup>とモデルの各領域の深さとの対応関係図

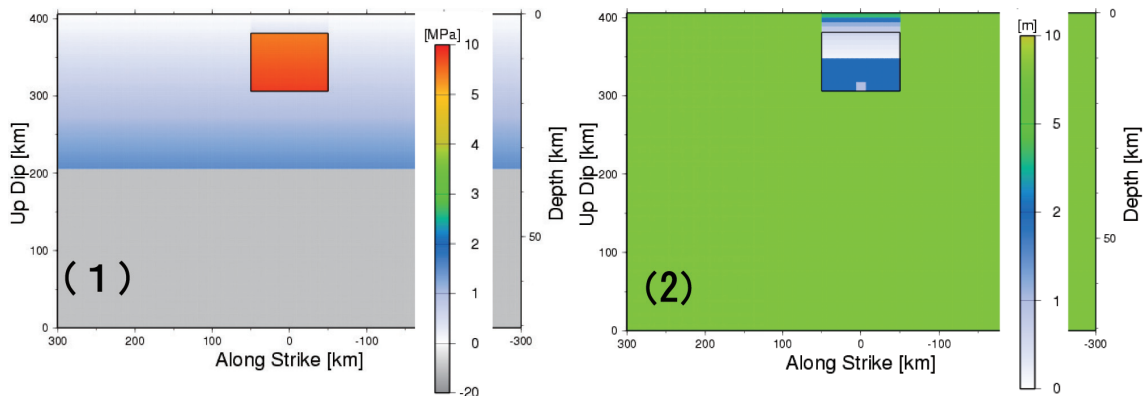


図-7 初期パラメータ分布

(1) 応力降下量 ( $\Delta\sigma$ ) (2) 臨界すべり量 ( $D_c$ )

間の計算時間を要した。図-7には設定した初期条件のうち、応力降下量 ( $\Delta\sigma$ ) と臨界すべり量 ( $D_c$ ) のモデル面上での分布図を示す。本検討では初期設定パラメータのうち、摩擦特性を検討する上で非常に重要な臨界すべり量 ( $D_c$ ) を変更し、その影響に関する検討を行った。

## 2.2 シミュレーション結果

今回の検討では、Hirono・他 (2016)<sup>7)</sup>による断層物質を用いた室内実験結果を用いて設定した深さ10kmまでの領域に対し、津田 (2016)<sup>11)</sup>で用いたHirono・他 (2016)<sup>7)</sup>における $D_c$ を3倍、10倍したモデルを作成してシミュレーションを行った。図-8にはすべり量分布の比較を示す。また、断層で励起される地震波 (=すべり速度時間関数)の深さによる周期特性の変化を比較するため、モデル中央部 ( $X=0$ )における深さ30km以浅でのペーストアップを図-9に示す。図中には代表的な破壊伝播速度の値(青い矢印の傾き)も併せて示す。すべり速度の最初の立ち上がりフェーズに着目すると、深さ約17kmの初期破壊領域から始まった断層破壊は、固着域を通過しつつ地表面に向かって伝播する。そして特に破壊開始後はゆっくりと進展し、地表に近くなるにしたがって徐々に高速に伝播する。これは地表からの反射波によって地表近くでの直応力が低下し、そこでの強度が低下することによって破壊が促進されるためである。

図-8で見られるように、10km以浅の領域における $D_c$ の値を10倍にしてもすべり量分布の特性に違いは殆ど見られない。一方ですべり速度時間関数の形状に関しては、 $D_c$ を長くすることによって

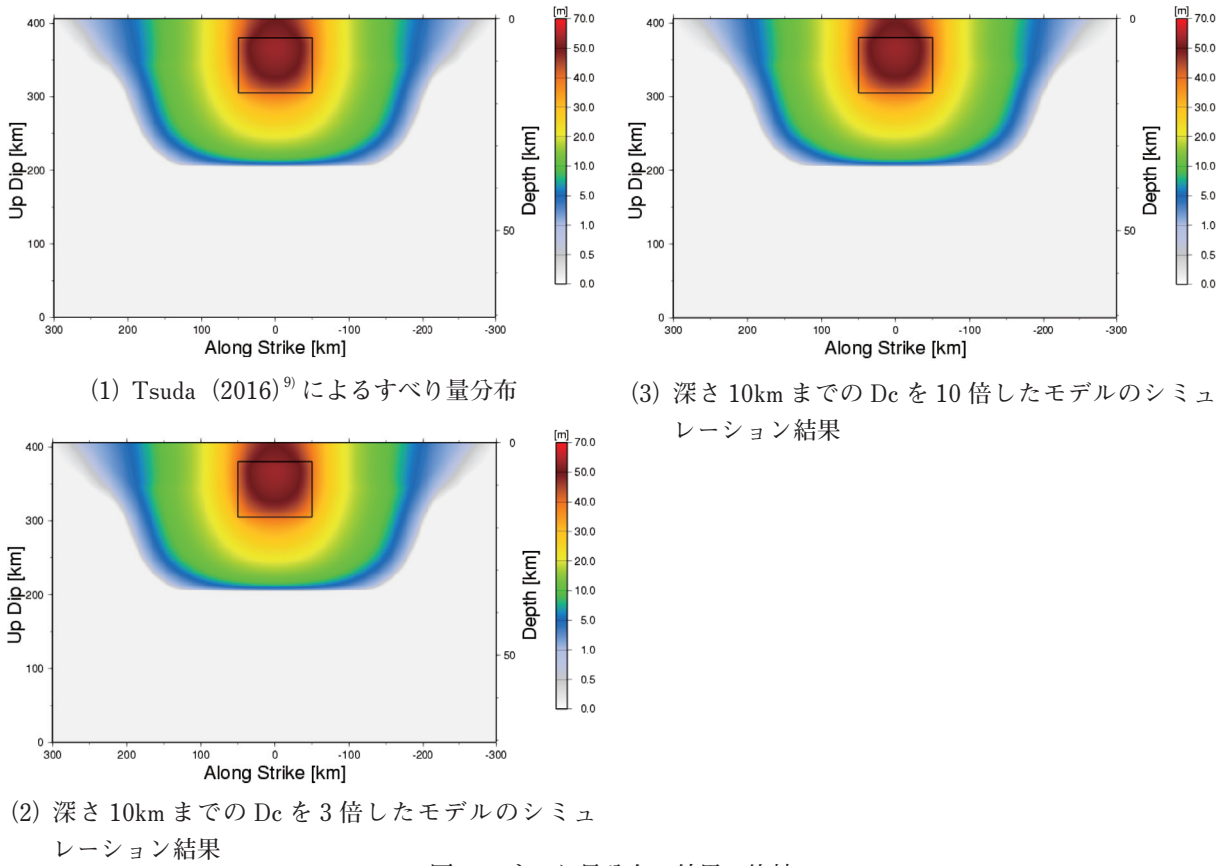


図-8 すべり量分布の結果の比較

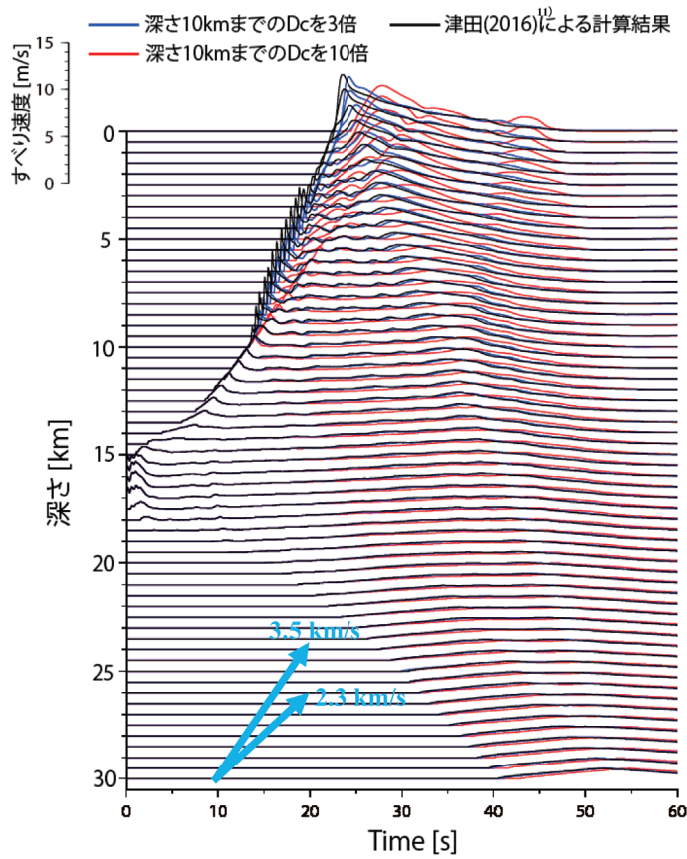


図-9 各モデルでのすべり速度時間関数のペーストアップの比較

立ち上がりが緩やかになり、それに伴い長周期の(= ゆっくりとした)地震動の励起も大きくなって  
いるものと考えられ、東北地方太平洋沖地震の断層浅部で推定された長周期地震波の励起を再現する  
ことが出来たものと考えられる。

### 3. まとめと今後の課題

本研究では、想定されるプレート境界巨大地震の地震動予測を行う際の震源のモデル化に資するた  
め、プレート境界巨大地震で見られた現象の発生メカニズムを理解することを目的として、動力学モ  
デルを用いた断層破壊シミュレーションを行い、摩擦特性(臨界すべり量:  $D_c$ )を変更した場合の断  
層破壊の変化に関する検討を行った。

$D_c$ は摩擦特性を断層運動によって放射されるエネルギーをコントロールする非常に重要なパラメー  
タである<sup>12)</sup>が、今回の計算からは、最終すべり量に与える影響は小さい結果となった。次に断層で励  
起される地震波の深さによる周期特性を検討するため、モデル中央部分におけるすべり速度時間関数  
のペーストアップを比較したところ、 $D_c$ が長いほど断層浅部においてすべり速度時間関数の立ち上  
がりが緩やかになる(=より周期の長い地震動が励起される)傾向が確認された。

今後は、断層浅部での $D_c$ だけでなく応力状態等の初期条件の再吟味を行い、初期条件として設定さ  
れた応力値の妥当性(どのようなメカニズムで応力が蓄積されたか)の検討を行う予定である。また、  
現状のモデルでは考慮していない媒質の不均質性、断層面の三次元的な形状を組入れた断層破壊シミュ  
レーションを行い、動力学モデルの将来的な地震動予測への適用に向けた知見の集積を計りたい。

### 参考文献

- 1) Lay, T., H. Kanamori, C. J. Ammon, K. D. Koper, A. R. Hutko, L. Ye, H. Yue, and T. M. Rushing, Depth-varying rupture properties of subduction zone megathrust faults, *J. Geophys. Res.*, 117, B04311, 2012
- 2) Irikura, K., and H. Miyake, Recipe for predicting strong ground motion from crustal earthquake scenarios, *Pure Appl. Geophys.*, 168, 85-104, 2011
- 3) Tsuda K, Ishii T, Ogawa S, Watanabe T, Uratani H, Iwase S, Ampuero, J-P, Investigation of the Behavior of Shallow Parts of Mega-Thrust Earthquake Faults Based on Dynamic Rupture Simulations, Japan Geoscience Union Meeting 2015, SSS02-P01, 2015
- 4) Ida, Y, Cohesive force across the tip of a longitudinal-shear crack and Griffith's specific surface energy, *Journal of Geophysical Research*, Volume 77, Issue 20, 1972
- 5) Rice., J R, Heating and weakening of faults during earthquake slip, *Journal of Geophysical Research - Solid Earth*, vol. 111, B05311, 2006
- 6) Ujiie, K., Tanaka. H, Saito. T, Tsutsumi. A, Mori.J, J. Kameda, Jun. Brodsky, Emily E. Chester, Frederick M. Eguchi, Nobuhisa., Low Coseismic Shear Stress on the Tohoku-Oki Megathrust Determined from Laboratory Experiments, *Science* 342, 1211, 2013
- 7) Hirono, T., Tsuda K., Tanikawa, W., Ampuero, J-P., Shibazaki, B., Kinoshita, M., and Mori., Tsunamigenic potential of near-trench slip determined from fault-rock samples retrieved from the Japan Trench and the Nankai Trough, *Scientific Reports* in review, 2016

- 8) Bletery, Quentin. Sladen, Anthony. Delouis, Bertrand. Vallée, Martin. Nocquet, Jean Mathieu. Rolland, Lucie. Jiang, Junle : A detailed source model for the Mw9.0 Tohoku - Oki earthquake reconciling geodesy, seismology, and tsunami records, *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 119, 2014
- 9) Seiichi Miura, Shuichi Kodaira, Ayako Nakanishi, Tetsuro Tsuru, Narumi Takahashi, Naoshi Hirata, Yoshiyuki Kaneda, Structural characteristics controlling the seismicity crustal structure of southern Japan Trench fore-arc region, revealed by ocean bottom seismographic data, *Tectonophysics*, V 363, 79–102, 2003
- 10) Galvez P., Ampuero J-P., Dalguer L A., Somala, S. N., and Nissen-Meyer T F., Dynamic earthquake rupture modelled with an unstructured 3-D spectral element method applied to the 2011 M9 Tohoku earthquake *Geophys. J. Int.*, 198 (2), 1222-1240, 2014
- 11) 津田健一, 室内実験の結果を組み入れた動力学モデルを用いた断層破壊シミュレーション, 清水建設技術研究所・所報, 2016
- 12) Kanamori, H., and Brodsky, E. *The Physics of Earthquakes: Reports on Progress in Physics*, v. 67, no. 8, p. 1429-1496, 2004