

室内実験の結果を組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

津田 健一

(技術研究所)

Dynamic Rupture Simulations Constrained by Experimental Data to Understand the Rupture Process of Mega-Thrust Earthquakes

Kenichi Tsuda

動力学モデルを用いた断層破壊シミュレーションにおいて、物理的に妥当なシミュレーション結果を得るためには初期条件の設定が最も重要な要素の一つである。本研究では、著者等が提案している方法(Tsuda・他, 2015)¹⁾に、実際の日本海溝から採取した断層物質を用いた室内実験の結果²⁾を組入れて初期条件を設定した。そして、動力学モデルを用いた断層破壊シミュレーションから、室内実験結果の初期条件への反映方法や実際のプレート境界巨大地震でみられた現象の再現性向上に向けた基礎的な検討を行った。

Setting the initial conditions for the simulation of propagation for the dynamic rupture is one of the most important key factors to get the “physically” reasonable simulation results. In this study, we simulated the dynamic rupture propagation based on the initial conditions that combine the idea of Tsuda *et al.* (2015)¹⁾ which sets the initial condition based on the stress drop distribution and the results of experimental results²⁾ that use the real material grubbed at the plate boundary.

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から、短周期の地震波は断層深部から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³⁾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変化する現象だけでなく、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(例えば⁴⁾)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波速度よりも速い超高速で断層破壊が伝播するような物理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)¹⁾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、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を行い、過去のプレート境界巨大地震で見られた現象の再現を試みた。最後に、シミュレーションの初期条件への室内実験結果の反映方法や過去のプレート境界巨大地震でみられた現象の再現性向上に向けた基礎的な検討を行った。

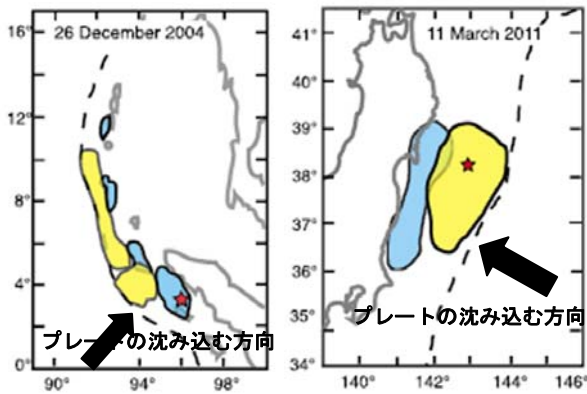


図-1 最近のプレート境界巨大地震(左：2004年スマトラ地震 M 9.2、右：2011年東北地方太平洋沖地震 M 9.0)で推定された長周期の地震波の励起域(黄色)と短周期の地震波の励起域(青色)の違いの例(Lay・他、2012³⁾に加筆、図中の点線は海溝軸の位置)

2. 断層破壊シミュレーション概要

2.1 初期条件の設定方法

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⁵⁾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(ρ)と重力加速度(g)に依存した上載圧($\rho g h$)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(σ^N)や初期せん断応力(τ)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離れがある^{例えは 6)}。これは、媒質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^{例えは 6)}ものの、断層破壊シミュレーションの初期条件の設定に組み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)¹⁾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。

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

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

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)¹⁾による初期条件の設定フローを図-3に示す。

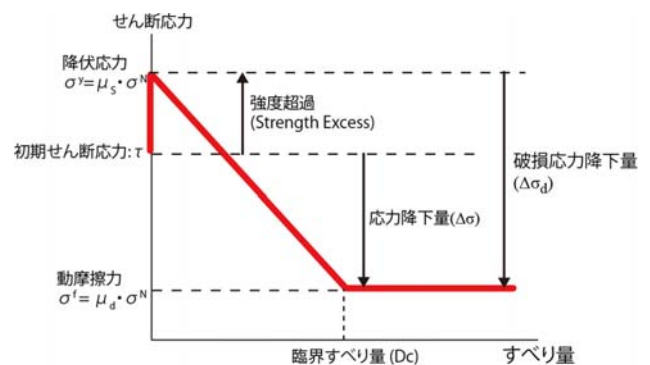


図-2 計算に使用した摩擦構成則(すべり弱化モデル)⁵⁾

σ^N : 直応力

$\Delta\sigma_a$: 破損応力降下量

μ_s : 静摩擦係数

μ_d : 動摩擦係数

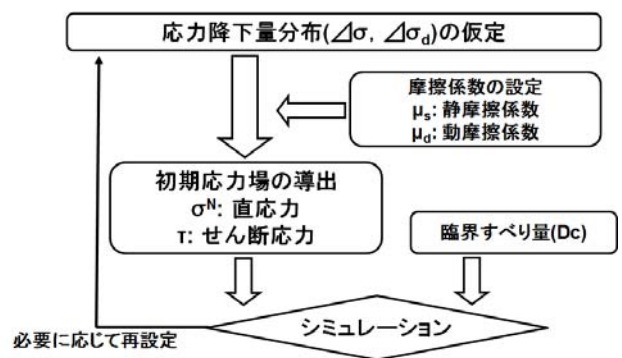


図-3 Tsuda・他(2015)¹⁾によるシミュレーションの初期条件の設定フロー

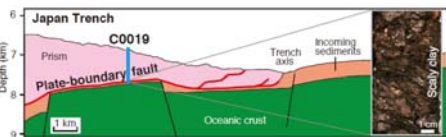
2.2 室内実験結果を反映した初期条件の設定

南海トラフでは、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^{例えは 7)}が精力的に行われてきた(図-4(a)、(b))。その後、2011年の東北地方太平洋地震を受け、この地震で大すべりの発生が推定された領域でもブ

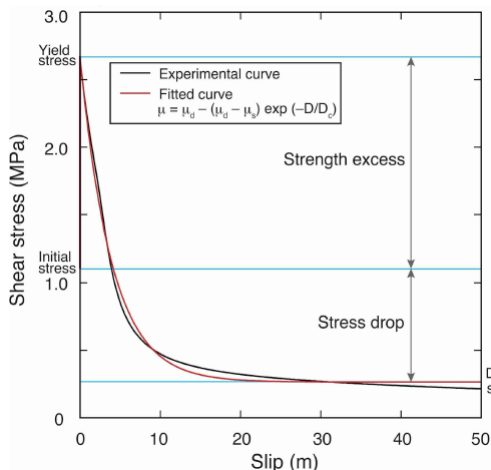
プレート境界まで掘削が行われ、採取された断層物質を用いた室内実験(例えば7)を踏まえた摩擦特性の推定(図-4(c))が行われてきた。本研究では、これまで行われてきた室内実験結果のうち、深さ10kmまでの物質の摩擦特性を空隙水圧の影響を踏まえて推定した Hirono・他(2015)²⁾による結果を用いた。



(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、2015²⁾)



(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モデルの曲線

図-4 Hirono・他(2015)²⁾による室内実験概要

具体的な室内実験結果の使い方としては、先ず Tsuda・他(2015)¹⁾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)²⁾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)¹⁾によるパラメータを設定した。また、臨

界すべり量(Dc)についても深さ10kmまでは Hirono・他(2015)²⁾の結果を、それより深部については Tsuda・他(2015)¹⁾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)¹⁾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)⁸⁾を参考に平均8MPa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 ρ 2.76 g/cm³、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⁹⁾を用いた。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(Dc)のモデル面上での分布図を示す。

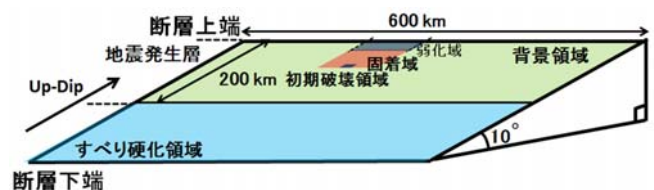


図-5 モデル面上での各領域の位置関係

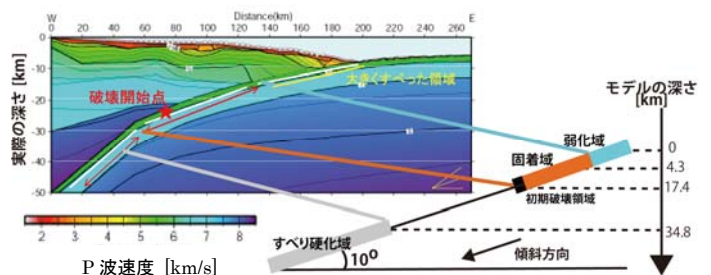


図-6 宮城県沖の地下構造(P波速度構造)とモデルの各領域の深さとの対応関係図

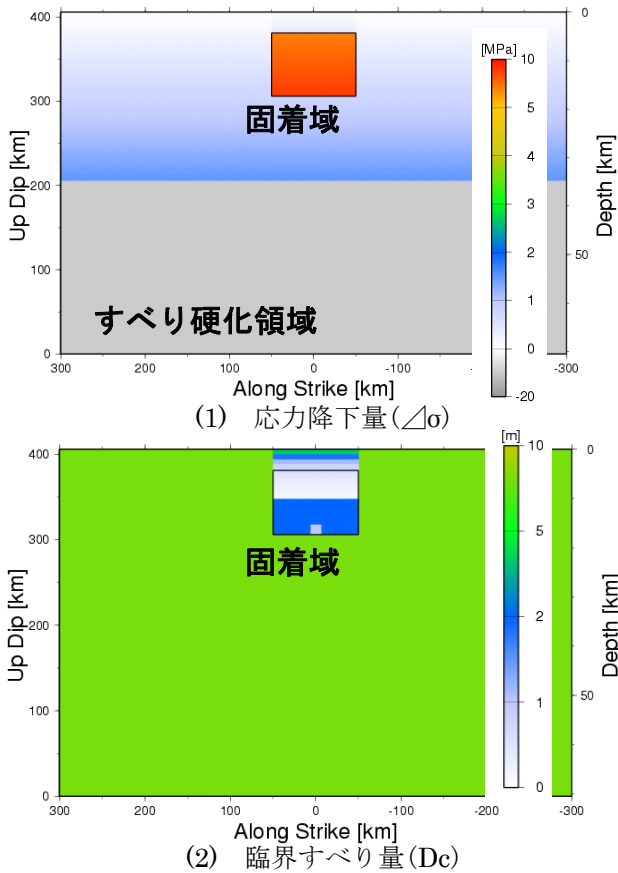


図-7 初期パラメータ分布

3. 断層破壊シミュレーション結果

設定された初期条件を踏まえた断層破壊シミュレーションによる最終すべり量分布を図-8に示す。図中の黒い口はモデル面上での固着域の位置であり、破壊開始点(固着域の中央下端)から浅部にかけて50m以上の大きなすべりが見られる。これは東北地方太平洋沖地震の本震に対して推定されているすべり量分布(例えば8)、10)と調和的な傾向を示している、今回設定したシミュレーションの初期条件が物理的に妥当であることを示している。

次にすべり量の深さ方向の分布特性を検討するため、図-8のモデル中央(図中の青線)におけるすべりの分布の時間進展を抽出した。図-9(1)には破壊開始から5秒毎の破壊の時間進展を示す。なお、グラフの横軸は海溝軸からの距離を示している。モデルの中央付近では、破壊開始後60秒程度ですべり量の増加が殆ど見られなくなり(=破壊の進展が終了)、海溝軸から40km(深さ7km)付近の領域ですべり量が最大となっている。これは、東北地方太平洋沖地震で大すべりが推定された宮城県沖での地震前と地震後の海底地形の変動量の

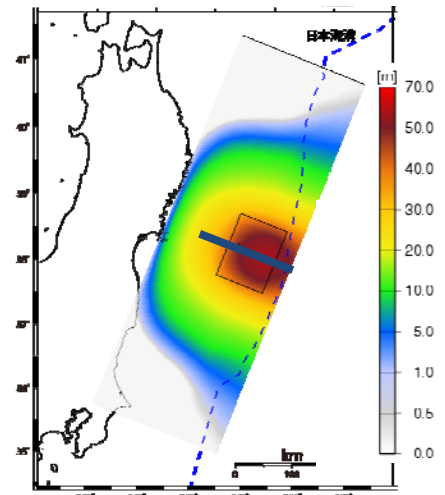
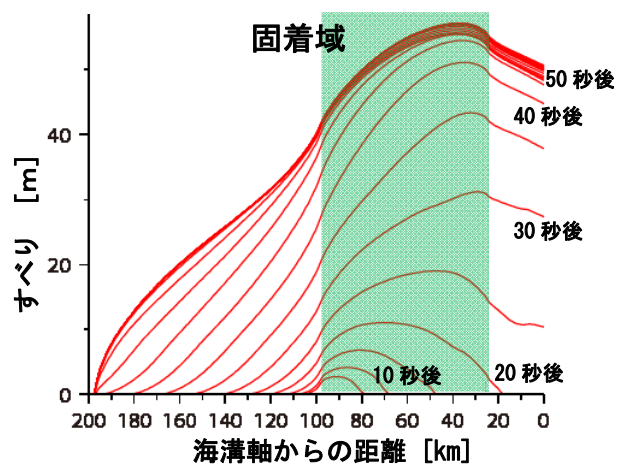
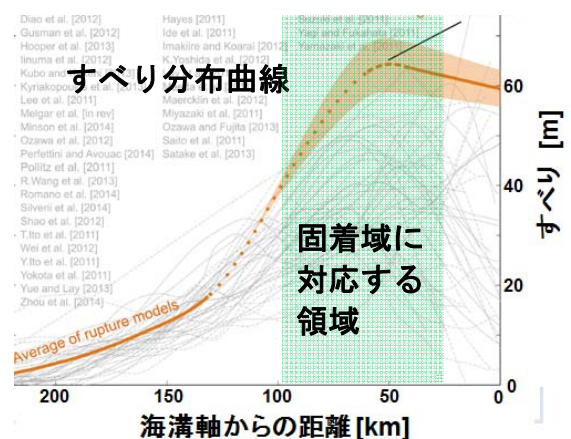


図-8 シミュレーションによる最終すべり量分布
(青線はすべりの時間進展を抽出した位置)



(1) モデル中央におけるすべり量の時間進展
(破壊開始時刻から5秒間隔)



(2) 地震前と地震後の海底地形の変動量の差から推定されたすべりの分布特性(オレンジ色の線、Sun・他、2015)¹¹⁾

図-9 すべりの分布特性の比較

差から推定されたすべりの分布特性の2次元プロファイル(図-9(2))¹¹⁾と調和的な傾向を示している。これは、設定した固着域の応力降下量の値だけでなく、面積や深さ(位置)等の初期条件が妥当であることを示唆している。

次に深さによって地震波の周期の励起域が異なる現象の再現性を検討するため、シミュレーション結果からモデル中央での深さ毎のすべり速度時間関数を抽出した。ペーストアップの結果を図-10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の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。また、深さ方向に伝播する断層破壊は、背景領域での応力降下量が非常に小さいこと+臨界すべり量が長い(8m)ため、殆ど伝播せずに破壊が停止している。

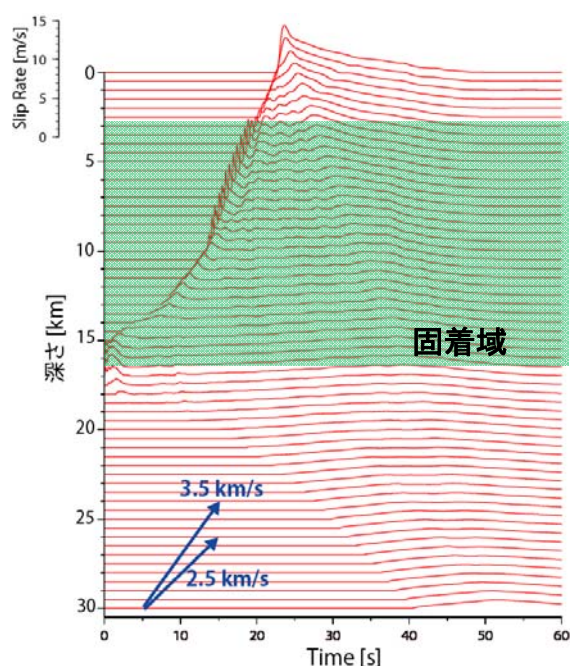


図-10 モデル中央におけるすべり速度時間関数のペーストアップ

また、10kmよりも浅い領域(特に5kmから10kmまでの深さ)では、すべり速度時間関数の立ち上がりが急峻になっている。これは、今回の初期条件として10km以浅の領域で使用した

Hirono・他(2015)²⁾の室内実験結果によるDcの値が、特にこの5km~10kmの深さで0.5m以下と、これまでの研究成果(例えば¹²⁾)と比較して短くなっていることが原因であると考えられる。このような急峻な立ち上がりを示すすべり速度時間関数からは短周期の地震動が励起され易くなり、過去のプレート境界巨大地震で見られた断層浅部領域において短周期の地震波の励起が小さかった現象は再現できていない。

そこで、次節では、臨界すべり量(Dc)が断層破壊に及ぼす影響について考察する。

4. 考察

臨界すべり量(Dc)の断層運動における物理的な意味は、断層運動が定常的なすべりに移行するまでに必要なすべり量であり、すべり弱化モデルにおいては、断層運動によって消費されるエネルギーのバランスをコントロールするパラメータとして非常に重要な意味を持っている。図-11にはすべり弱化モデルにおける断層運動によるエネルギーダイアグラムを示す。ここで

E_F : 摩擦熱として消費される熱エネルギー

E_G : 破壊そのものによって消費されるエネルギー

E_R : 地震波として放射されるエネルギー

である¹²⁾。

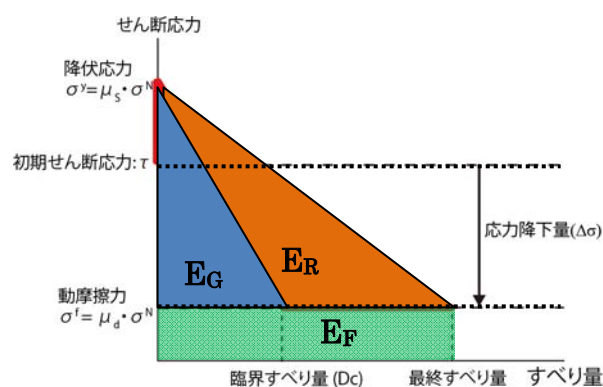


図-11 すべり弱化則でのエネルギーダイアグラム

このダイアグラムに示されるように、Dcが長くなるにつれて破壊そのものに消費されるエネルギー(E_G)が大きくなり、地震波として放射されるエネルギー(E_R)が小さくなる。この E_R の減少によって断層破壊が減速され、最終的に断層破壊が停止する。また、Dcはエネルギーを考慮する上で重要なだけでなく、すべり速度時間関数の形状をコントロールし、地震波励起の周期特性に大きな影響を与えるパラメ

一タでもある。特に、 D_c が長くなるとすべり速度時間関数の立ち上がりが緩やかになるため、ゆっくりとした周期の長い地震波が励起され、逆に D_c が短くなるとすべり速度時間関数の立ち上がりが急になるために周期の短い地震波が励起され易くなる。

本研究で設定した初期条件による D_c (図-7(2)) は、これまでの研究¹⁾で著者等が使用してきた D_c (固着域で 2m) と比較して短い値 (0.5m 以下) になっている。そこで、 D_c が断層破壊に与える影響を考察するため、応力分布はそのまま D_c のみを Tsuda・他 (2015)²⁾ に戻して長くしたモデルを用いたシミュレーションを行った。

シミュレーション結果のモデル中央部でのすべり速度時間関数のペーストアップの比較を図-12 に示す。深さ 10km までの D_c が長くなったことにより、該当する深さでのすべり速度時間関数の立ち上がりが緩やかになっている (短周期の地震動の励起が小さくなっている) 傾向が見られる。一方、すべりに関しては、図-13 のすべりの時間進展の比較に示されるように、 D_c の違いによる影響は殆どなく、 D_c のすべりに与える影響は非常に小さい。これらの結果から、今回は再現できなかった現象の再現の解決方法として、Hirono・他 (2015)²⁾ による D_c の設定を、特に 5km から 10km 近辺の深さで再検討することが考えられる。

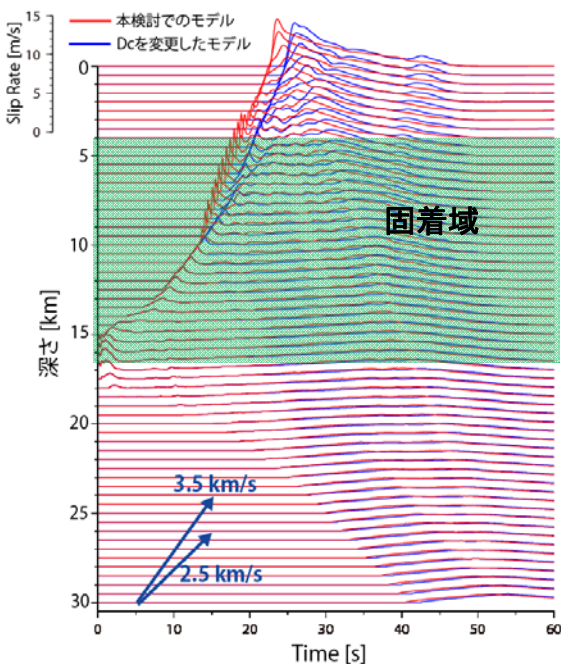


図-12 10km 以浅の D_c を変更したモデルでのすべり速度時間関数のペーストアップ

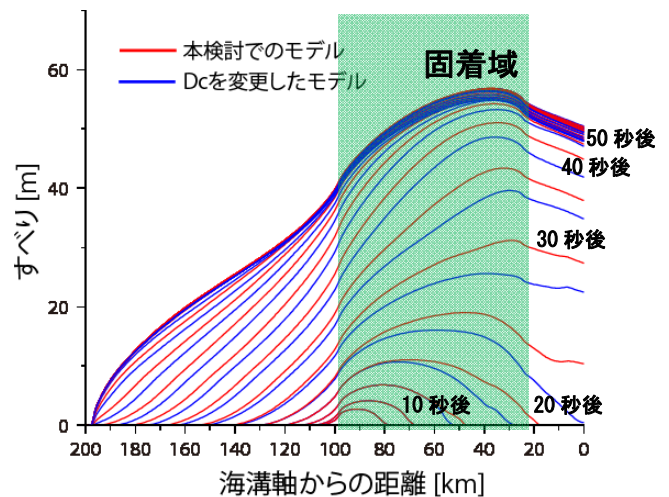


図-13 10km 以浅の D_c を変更したモデルでのすべりの時間進展 (5 秒間隔)

5. まとめ

本研究では、先ず実際の日本海溝のプレート境界で採取された断層物質を用いた室内実験の結果を深さ 10km 以浅の領域に組み入れた初期条件を設定した。次に、日本海溝をイメージした平面断層に基づく動力学モデルを用いた断層破壊のシミュレーションを行った。

シミュレーションでは、東北地方太平洋地震の断層浅部で見られた数 10m オーダーの大すべりが再現された。また、すべりの深さ方向の分布特性に関しても、地震前後の海底地形の変動量の差から推定された結果と調和的であった。

一方、地震波の励起される領域が周期やその深さによって変化する現象を今回のシミュレーションでは再現できなかった。その一つの解決方法として、Hirono・他 (2015)²⁾ による臨界すべり量 (D_c) の設定を、特に 5km-10km 近辺の深さで再検討することが考えられる。

今後は、断層浅部での D_c や応力状態等の初期条件の再吟味を行い、今回の検討では向上が計れなかった特性の再現を試みると共に、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蓄積されたか) の検討を行う予定である。また、今回の計算では考慮しなかった断層の走向方向の応力分布の不均質性や媒質の不均質性、断層面の三次元的な形状を組み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。

謝辞

本研究を進めるにあたり、カリフォルニア工科大 J-P. Ampuero 教授には様々な面でサポート頂きました。記して感謝いたします。また、大崎総合研究所佐藤俊明社長や小川幸雄研究部長、清水建設技術研究所の宮腰淳一地震動G長から頂いたアドバイスは本研究を進める上で非常に有益でした。

<参考文献>

- 1) 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
- 2) Hirono, T., Tsuda K., Tanikawa, W., Ampuero, J-P., Shibazaki, B., Kinoshita, M., and Mori, Near-trench slip potential of megaquakes evaluated from fault properties and conditions, Nature, In Review, 2015
- 3) 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
- 4) Irikura, K., and H. Miyake, Recipe for predicting strong ground motion from crustal earthquake scenarios, Pure Appl. Geophys., 168, 85-104, 2011
- 5) 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
- 6) Rice., J R, Heating and weakening of faults during earthquake slip, Journal of Geophysical Research - Solid Earth, vol. 111, B05311, 2006
- 7) Ujiie, Kohtarō. Tanaka, Hanae. Saito, Tsubasa. Tsutsumi, Akito. Mori, James 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
- 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) 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
- 10) Suzuki, Wataru. Aoi, Shin. Sekiguchi, Haruko. Kunugi, Takashi., Rupture process of the 2011 Tohoku-Oki mega-thrust earthquake (M9.0) inverted from strong-motion data, Geophysical Research Letters, 38, 2011
- 11) SUN, T. , WANG, Kelin., FUJIWARA, T., KODAIRA, S., and Jiangheng H E., Determining slip near trench in the M 9 Tohoku-oki earthquake using bathymetry differences before and after the rupture, Japan Geoscience Union Meeting 2015, SSS02-01, 2015
- 12) Kanamori, H., and Brodsky, E. The Physics of Earthquakes: Reports on Progress in Physics, v. 67, no. 8, p. 1429-1496, 2004.