

動力学モデルの断層近傍の地震動シミュレーションへの適用性の検討

津田 健一

(技術研究所)

Investigation of the Dynamic Rupture Model for the Ground Motion Simulation on the Site Very Close to the Fault

Kenichi Tsuda

2016年熊本地震で観測された特徴的な地震動を始め、断層の破壊特性が支配的な断層近傍での地震動予測を試みる場合、断層破壊の進展を予め仮定しない動力学モデルを用いたアプローチが有効である。本研究では、断層近傍の地震動評価に動力学モデルを適用するための課題を整理することを目的として、動力学モデルを用いたシミュレーション手法と断層破壊の進展のモデル化の現状を整理し、例題として熊本地震をイメージした簡便なモデルを用いた断層破壊シミュレーションを行った。シミュレーションでは、すべり速度時間関数の特徴の深さ依存性や地震動特性等、これまでの観測事例と調和的な結果が得られた。

The application of dynamic rupture model into ground motion simulation on site very close to the fault, where the source process plays an important role, is useful. The objective of this study is to show the future task of the dynamic rupture simulation for the application to the ground motion simulation. We also show the sample results from simple model imaging to the 2016 Kumamoto earthquake as the test case of dynamic rupture simulation. Even we assume very simple features of the models, our simulation results coincide with the previous results including observations.

1. はじめに

2016年4月16日に発生した熊本地震(M_J7.3)の本震では、熊本県益城町や西原村で震度7が観測されるなど、断層の近くでは非常に大きな揺れとなった。特に西原村における観測記録では、周期が3秒程度の内陸地殻内地震から放射される地震動としては比較的周期の長いパルス状の地震波形が見られる等の特徴的な現象が数多く報告されている。この熊本地震に対しては、地震発生以降数多くの研究者によって波形記録を用いた波形インバージョンが行われ、周期2秒以上の長周期帯域を対象としたモデル¹⁾から、周期0.1秒～5秒までの短周期を含む広帯域なモデル²⁾まで、非常に多くの震源モデルが提案され、広域的な地震動評価が広く行われてきた。

上述のモデルを含め、これまでの地震動評価に用いられることの多かった運動学モデルでは、図-1に示す概略図のように、断層破壊がどのように進展するか(すべり速度時間関数: slip velocity の形状)を予め仮定した上で地震動(u)を計算する。このすべり速度時間関数の形状は、過去に発生した地震で

得られた観測記録の分析に基づく研究の蓄積を踏まえて設定されることから、詳細な地震動特性の特徴を再現することが可能である。しかしながら、この運動学モデルでは、地震動計算に予め形状を仮定したすべり速度時間関数を用いるため、西原村のような非常に断層に近い、断層破壊の影響が支配的な断層近傍の地点での地震動評価に適用することは難しい。

これに対して動力学モデルでは、断層にかかる力の釣り合い(物理法則)に則って応力(T)を計算し、それに基づいて断層破壊が進展していく(図-1)ことから、上述のような断層破壊の影響が大きな地点での地震動評価を行うことに適している。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、初期条件の設定に細心の注意を払わないと物理的に起こり得ない現象も起こってしまうといった課題はあるものの、将来起こり得る想定地震による断層の極近傍の地点での地震動評価を試みる上で非常に有効なアプローチである。また、近年の計算機性能の向上や離散化を行う際の定式化を工夫することによって、動力学モデルを用いたシミュレーションを

行う際の計算の有効周期もより短周期側へと拡張されつつある。しかしながら、計算自体は非線形の収束計算を行うため、モデル全体を対象とする地震波の伝播のシミュレーションのためには計算時間やメモリ等の多くのリソースが必要となることが課題である。

そこで本研究では、断層近傍の地震動評価に動力学モデルを適用するための課題を整理することを目的として、動力学モデルを用いたシミュレーション手法と断層破壊の進展のモデル化の現状を整理し、例題として熊本地震をイメージした簡便なモデルを用いた断層破壊シミュレーションを行った。

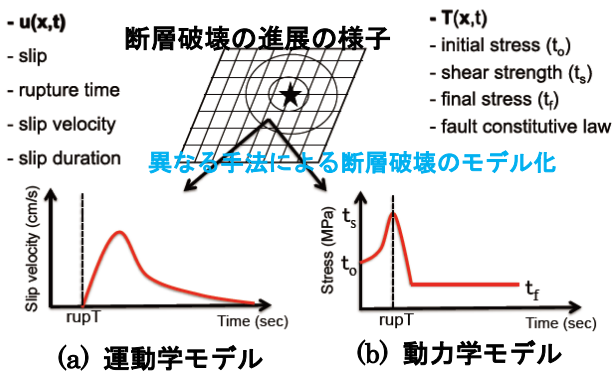


図-1 運動学モデル(a)と動力学モデル(b)の断層破壊のモデル化の違いの概念図

2. シミュレーション手法

2.1 数値計算手法

動力学モデルを用いた断層破壊シミュレーションの計算を実施する場合には、断層の破壊過程のモデル化と地震波の波動伝播過程のモデル化が重要なポイントとなる。その中で、波動伝播のシミュレーションには、従来から有限差分法^{例えは 3)}が広く用いられてきた。この手法では、微分方程式の形で表現されている波動方程式を数値的に解くものであり、高度な計算機性能が必要なく、研究や実務で使用されるパソコン等でも比較的簡単に利用することができる。一方、この有限差分法では、方程式を解く格子点を断層面に平行に設定しているため、プレート間地震など断層面の傾斜角が浅い(低角)な場合には、断層面での格子点の設定が難しくなるといった問題がある。

これに対して有限要素法では、断層面での要素の設定については自由度があるため、断層面のモデル化には制限があまりない。この有限要素法を断層破壊シミュレーションに用いる際の欠点としては、計算機のメモリ等の必要量が有限差分法と比較して多

いという点が挙げられるが、近年、これまで有限要素法で使用されてきた定式化を工夫し、各节点における運動方程式の質量マトリックスを対角化することによって必要なメモリ量を節約できるスペクトル要素法^{例えは 4)}が用いられるようになった。この手法では、計算を周波数領域で行うスペクトル法や擬似スペクトル法のような高精度の計算が可能であるため、地震波動伝播シミュレーション^{例えは 5)}の問題だけでなく、断層近傍を対象とした動力学断層の破壊シミュレーションの分野にも適用されている^{例えは 6)}。図-2にはスペクトル要素法で使用されているメッシュの例を示す。本研究では、地震波動伝播シミュレーション用に開発されたスペクトル要素法のコード^{例えは 4), 5)}に、断層破壊用のソルバーを追加したもの⁸⁾を用いた。

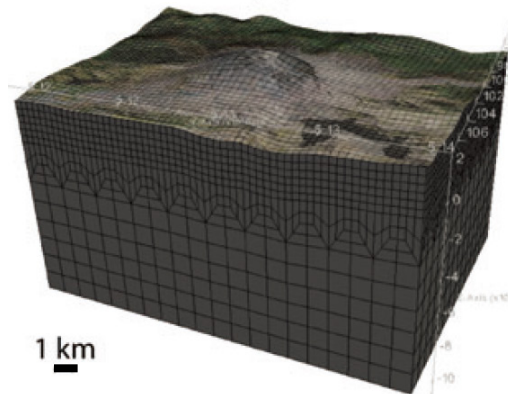
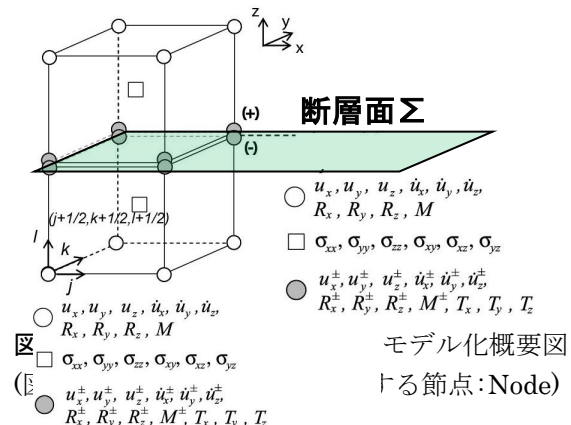


図-2 スペクトル要素法で使用されるメッシュの例(米国 St. Herenz 山をモデル化したもの⁵⁾)

2.2 断層破壊過程のモデル化

動力学モデルを用いた断層の破壊過程のモデル化には、Traction at Split-Node(TSN)法³⁾を用いる。この手法は、断層面上にある1つの节点を、断層面を境として二つに分割し、そこにかかる力の動きをモデル化することによって断層での破壊過程を表現するものである。図-3にはx-y平面上に設定した断層面 Σ の上にある节点の、断層を挟んだ(+側と-側の)面におけるTSN法による分割例を示す。



この断層破壊過程のモデル化のアイディアは、定式化の簡便さから動学的断層破壊シミュレーションの分野で広く用いられている。

3. 断層破壊シミュレーション

3.1 シミュレーションモデルの作成

動力学モデルを用いた断層破壊シミュレーションの例として、120km×140km×45km の計算領域に対して、2016年熊本地震の布田川セグメントをイメージしたモデルを設定した。図-4には計算領域とモデル化した布田川セグメントとの位置関係の概略を示す。断層面上には佐藤²⁾によるモデルを参考に、3つの強震動生成域(SMGA)を設定した。また、破壊のメカニズムとしては、図-4(a)の黄色の領域が右側に動く右横ずれ断層を仮定した。

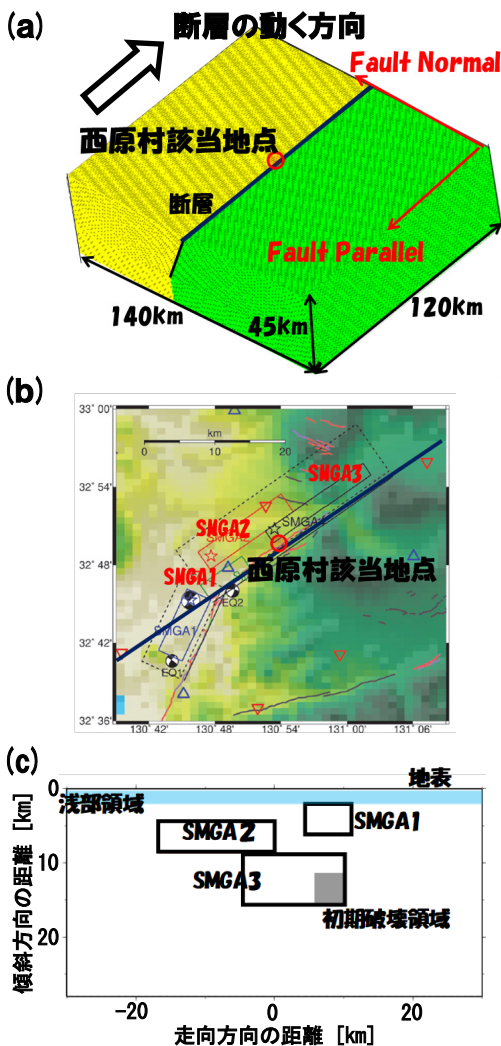


図-4 シミュレーションの計算領域と断層との位置関係(a)、佐藤(2017)²⁾のモデルの布田川セグメントとの対応関係図(b)とモデル上の各領域の位置関係(c)

断層の傾斜角は 65° で断層面の形状は平面とした。モデルの媒質は均質(S波速度、P波速度及び密度はそれぞれ 3.54km/s 、 6.30km/s 、 2760kg/m^3)を用いた。今回作成したモデルに基づく計算の有効周期は0.4秒以上である。また、断層破壊の構成則はすべり弱体化則¹⁰⁾(図-5)を用いた。

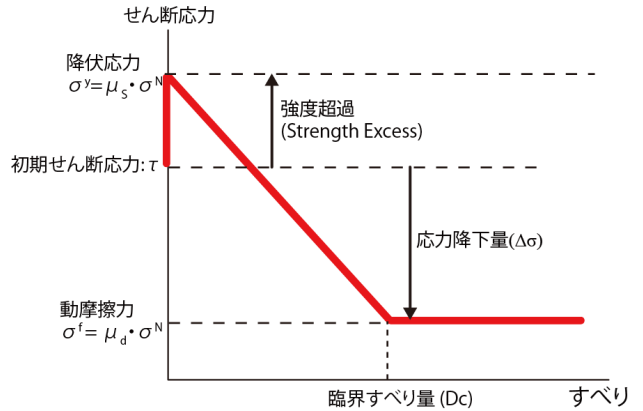


図-5 計算に用いたすべり弱体化則¹⁰⁾

今回の計算で設定した初期パラメータは、Tsuda・他(2017)⁷⁾による設定法を用いた。先ず断層面上での応力降下量($\Delta\sigma$)と破壊伝播速度をコントロールする応力比 S (強度超過: $SE/\Delta\sigma$) を設定し、 SE を計算した。今回は、既往研究⁷⁾を参考に $S=1.0$ とした。また、各 SMGA での具体的な値として、応力降下量は 10MPa (佐藤、2017²⁾)、強度超過は 10MPa とした。なお、この SMGA 以外の領域では応力降下量は 0 と仮定した。また、地表面での自由表面の影響を考慮するため、深さ 2km よりも浅いモデル浅部では、せん断応力と直応力の値が地表に近づくにつれて 0 に漸減するように設定した。

次に静摩擦係数 μ_s 、動摩擦係数 μ_d 、臨界すべり量 Dc については、断層破壊の進展が十分にみられるように $\Delta\sigma$ や SE の値を保持しながら試行錯誤的に設定した。以上の応力パラメータとすべり弱体化の関係(図-5)を踏まえ、初期せん断応力と直応力を計算した。表-1には各領域での初期パラメータを示す。

表-1 各領域で仮定したパラメータ

領域の名前 (サイズ)	Stress Drop [MPa]	Strength Excess [MPa]	Dc [m]
SMGA1 (7.2km × 4.8km)	10	10	0.5
SMGA2 (16.8km × 4.8km)	10	10	0.5
SMGA3 (14.4km × 7.2km)	10	10	0.5
浅部領域	0	深さ依存 (地表で0になるように設定)	2
背景領域	0	8	1

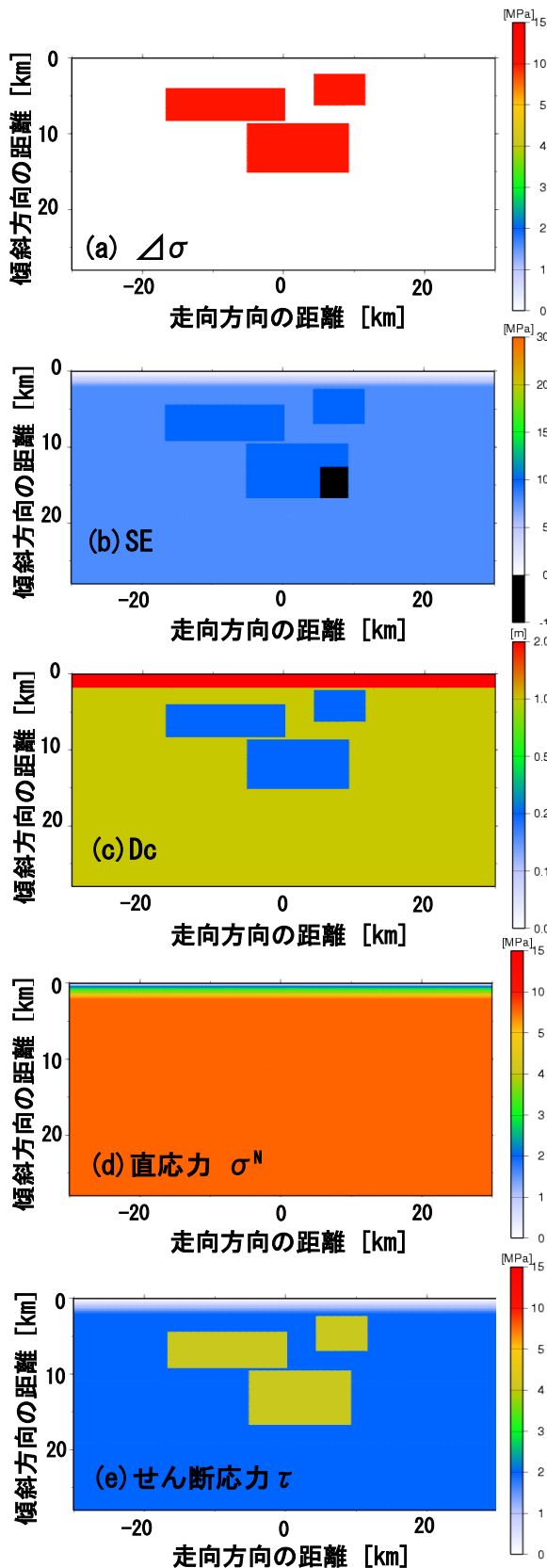


図-6 シミュレーションで設定した初期パラメータ分布

また、図-6には設定した初期パラメータ分布((a) 応力降下量($\Delta\sigma$)、(b)強度超過(SE)、(c)臨界すべり

量(Dc)、(d)直応力(σ^N)、(e)せん断応力(τ)を示す。なお、初期破壊領域は、SMGA3の下端に4km×4kmの広さで設定した。

3.2 シミュレーション結果

まず断層破壊の進展に関する分析を行う。最終すべり分布を図-7(a)に示す。断層面上に3つ設定したSMGAですべりが大きくなっている一方で、断層破壊の進展のための駆動力である応力降下量が0である背景領域にはあまり断層破壊の進展は見られない。シミュレーションによる最大すべりは4.1mで、最終すべりが0.2m以上の領域を断層面と仮定した場合の地震モーメントは 4.0×10^{19} Nm(Mw7.0相当)となった。

図-7(b)にはすべり速度が0.1m/sに到達した時刻と定義した破壊開始時刻のコンター図を示す。SMGA3から始まった断層破壊は先ずSMGA2に伝わる。その後破壊開始6秒程度で残りのSMGA1の破壊が始まると共に、断層中央部(横軸のAlong Strike =0 km)付近で地表面に到達する。今回の計算は断層破壊の進展が理論的に速くなり得る横ずれの破壊メカニズムを仮定したことから、破壊伝播速度が媒質のS波速度を超える(Super Shear)になる可能性も考えられるが、今回のモデルでは、断層浅部の破壊伝播速度(=初期破壊領域からの距離/破壊開始時刻)は2.5km/s前後となる等、実際の熊本地震で報告されている値⁹⁾と矛盾しない。図-7(c)にはモーメントレート関数を示す。6秒付近で見られる振幅の増加は、上述のような、SMGA1とSMGA2へと断層破壊が伝播するタイミングの特徴を示しているものと思われる。

次にすべり速度時間関数を分析する。具体的には断層深部と浅部でのすべり速度時間関数の形状やピークの値の特徴を検討するため、断層面上で深さの異なる地点でのすべり速度時間関数を抽出した。図-8にはSMGA周辺での深さの異なる5地点でのすべり速度時間関数と、そのフーリエスペクトルを示す。断層深部のSMGA周辺の地点であるPoint1、Point3、Point5では、破壊が到達した直後に大きなピークに達し、形状も非常に急峻である。一方で断層浅部のPoint2とPoint4においては、ピークに到達する時間も遅く、その形状も深部と比較して非常に滑らかになっている。また、スペクトルの振幅でも深部の地点(Point1、Point3、Point5)と浅部の地点(Point2、Point4)では、周波数特性の違いが明瞭に異なっている。

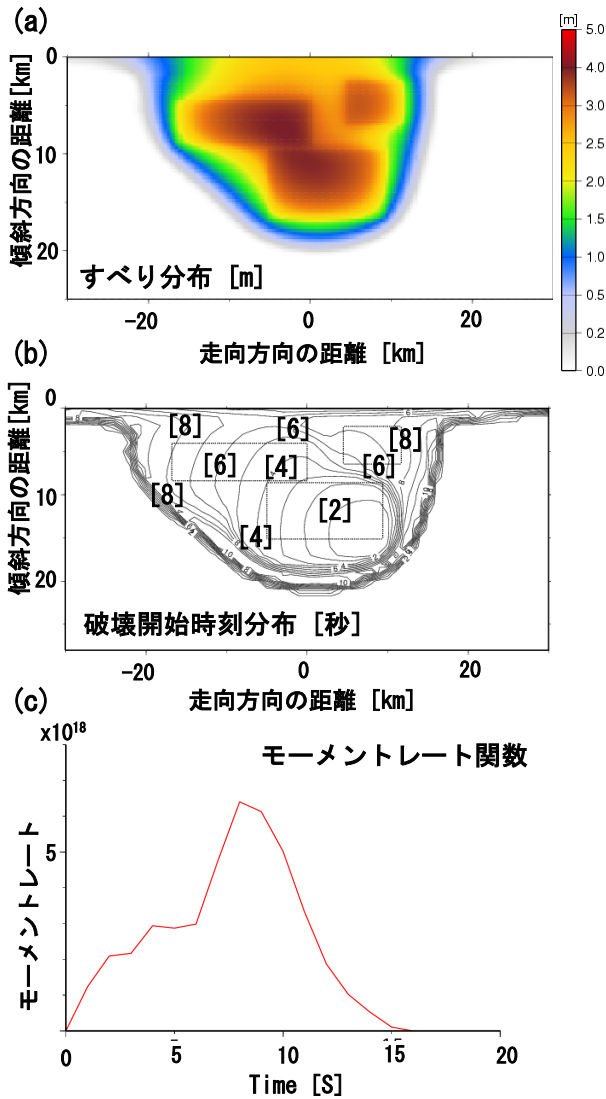


図-7 シミュレーション結果

断層浅部では応力降下量は0であり、応力も地表付近では非常に小さい(図-6)ことから、その近くの地点すべり速度のピーク値が小さくなることは明らかであるものの、プレート境界巨大地震(例えば6.7)と同様に深部では大きなピークと急峻な形状、浅部では滑らかな形状といった明瞭な違いを示している。これらの結果からは、断層破壊の性状そのものが深さ依存性を有していることを示唆しているものと考えられる。

シミュレーションによる断層の破壊特性とすべり速度時間関数の特徴の結果をまとめると、今回作成したモデルを用いた断層破壊シミュレーションでは、初期条件の設定に際してあまり拘束条件を用いなかった。一方で断層の破壊特性としては物理的に尤もらしい結果となった。次に得られた破壊特性を踏まえて地震動計算を行い、動力学モデルに基づく地震動評価を試みた。

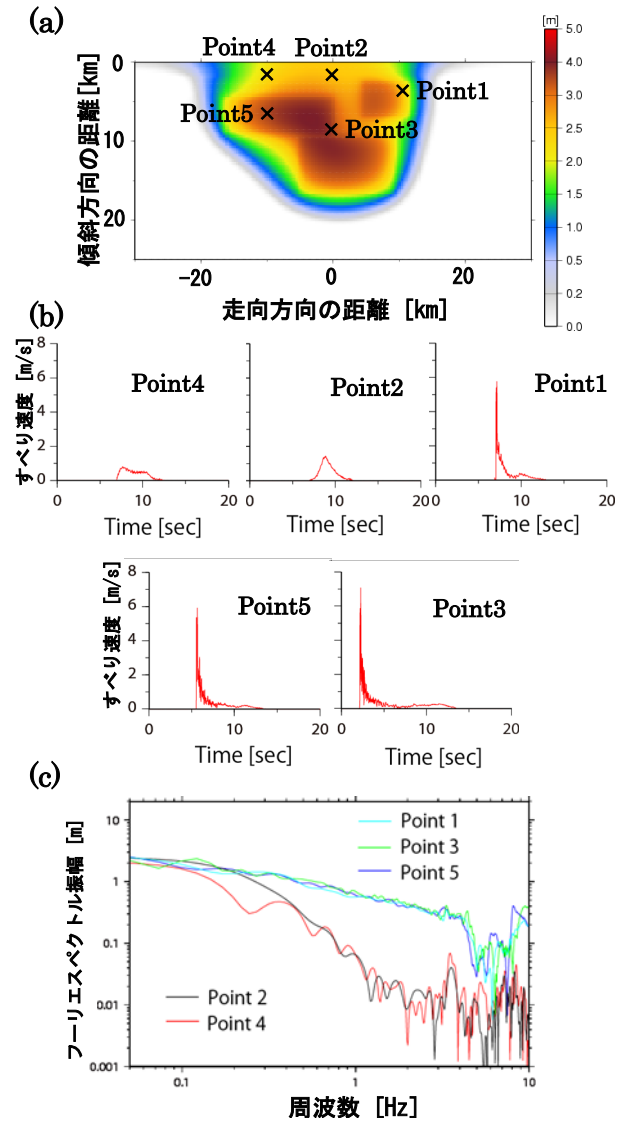


図-8 断層面上の各地点(a)におけるすべり速度時間関数(b)とそのフーリエスペクトル(c)

図-9には今回の計算で仮定した均質媒質(V_s 3.54km/s)の上面相当での最大速度の分布図を示す。なお、最大速度を評価するにあたっては、長周期成分の励起特性を評価するため、周期1秒以上のローパスフィルターを掛けている。

今回のモデルの様な横ずれ断層の場合、断層端部周辺で Fault Normal 成分が大きくなることは解析的にも確認され、その傾向は今回のシミュレーション結果でも再現されている。また、西原村該当地点のような断層の極近傍の地点では、Fault Parallel 成分の値が Fault Normal 成分の値の約2倍になっている。この2成分の大小関係については、実際の西原村での観測記録でも見られた傾向(長周期成分で Fault Parallel 成分が Fault Normal 成分よりも2倍以上大きい)と一致している。

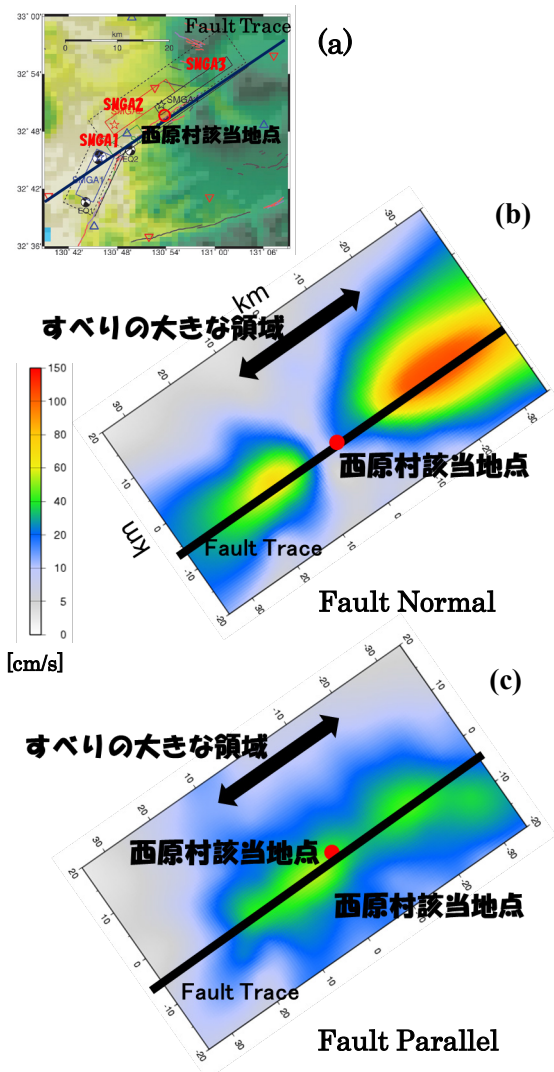


図-9 佐藤(2017)²⁾と本検討モデルでの Fault Trace との位置関係(a)と Fault Normal 成分(b)、Fault Parallel 成分(c)の最大速度分布

4. 地震動シミュレーションの現状と課題

最後に現状での地震動シミュレーション結果の特徴の整理と、将来的に地震動評価に動力学モデルを適用するための課題を整理するため、断層極近傍の西原村該当地点での地震動シミュレーションの結果と実際の西原村における観測記録を比較した。

図-9で示されるS波速度3.54 km/sの層(=地震の上面相当でのシミュレーション結果に対し、工学的基盤層相当媒質に対応した振幅の補正を行った。具体的には今回のシミュレーション結果の振幅 A_0 を以下の式(1)に基づいて工学的基盤相当での振幅 A_1 に補正した。

$$A_1 = (\rho_0 \cdot V_{s0} / \rho_1 \cdot V_{s1})^{0.5} A_0 \quad (1)$$

ここで ρ_0 , V_{s0} は地震基盤相当での媒質値($\rho_0=2760 \text{ kg/m}^3$, $V_{s0}=3.54 \text{ km/s}$)である。 ρ_1 , V_{s1} については、

西原村周辺での微動探査に基づいて推定された地下構造の探査結果¹⁾を参考に、工学的基盤相当の媒質($V_s=500 \text{ m/s}$, 密度= 1900 kg/m^3)を仮定した。シミュレーション結果の振幅を補正した西原村該当地点での計算結果と、西原村での観測記録の比較を図-10に示す。観測記録の時刻については、本震の発震時刻と佐藤(2017)²⁾による各SMGAの発震時刻を参考に補正した。観測記録、シミュレーションとも周期1秒以上のローパスフィルターを掛けている。

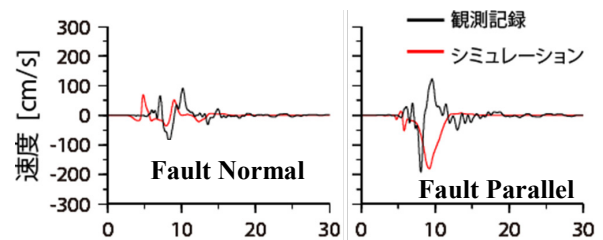


図-10 西原村該当地点での地震動シミュレーション結果

Fault Parallel成分でのシミュレーションの9秒付近でのパルスの最大振幅に関しては、観測記録の8秒付近に見られるパルスの振幅の特徴を再現することが出来ている。一方でシミュレーション結果のパルスの周期については、観測記録のパルスの周期よりも長くなっている。この原因としては、本検討で作成したモデルで用いたSMGAの形状を含めた初期応力分布が、実際の地震で想定される地震前の応力分布と比較して非常に単純であるため、放射される地震動の性状も単純になってしまっているものと考えられる。

上記のような問題の解決を試み、観測記録の定量的な特徴を再現するためには、実際の地震に対して推定されたすべり量に基づいて地震の前後で応力がどう変化したかを推定し、その結果を踏まえた初期応力分布を設定することが有効であると思われる。また、本検討では考慮しなかった断層面の形状が破壊伝播に与える影響についても、将来的に検討が必要である。

5. まとめ

本研究では、断層近傍の地震動評価に動力学モデルを適用するための課題を整理することを目的として、動力学モデルを用いたシミュレーション手法と断層破壊の進展のモデル化の現状を整理し、例題として熊本地震をイメージした簡便なモデルを用いた断層破壊シミュレーションを行った。

断層破壊シミュレーションでは、断層の破壊性状やすべり速度時間関数の特徴の深さ依存性の特徴等、物理的に尤もらしい特徴を再現することが出来た。断層近傍の地点における地震動シミュレーションでは、媒質補正を行った上での最大振幅は観測記録と調和的な結果となった。一方でシミュレーションによるパルス周期については、観測記録に対して長くなっている。これは、今回のモデルで仮定したSMGAの形状に基づく初期応力分布の特徴が非常に単純であったことが原因の一つであると思われる。観測記録の定量的な特徴を再現するためには、より詳細な初期応力分布だけでなく、断層面の形状の影響を含め、より詳細な条件の設定が必要であると思われる。

謝辞

本研究を進めるにあたり、川辺秀憲大阪大学准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。

<参考文献>

- 1) 引間和人：強震波形を用いた 2016 年熊本地震の本震・前震の震源過程解析，日本地震工学会大会・梗概集、2016
- 2) 佐藤智美：強震観測記録に基づく 2016 年熊本地震の広帯域震源特性，日本建築学会構造系論文集，2017
- 3) Dalguer, L.A., and S.M.Day : Staggered-Grid Split-Nodes Method for Spontaneous Rupture Simulation. *J. Geophys. Res.*, 112, B02302, doi:10.1029/2006JB004467, 2007
- 4) Komatitsch, D., and J.Tromp : Introduction to the spectral-element method for 3-D seismic wave propagation, *Geophysical Journal International*, vol.139, pp.806-822, 1999
- 5) Peter,D.,D. Komatitsch, Y. Luo, R. MartinN, Le Goff, E. Casarotti, P.Le Loher, F.Magnoni, Q. Liu, C. Blitz, T. Nissen-Meyer, P.Basini and J.Tromp (2011) Forward and adjoint simulations of seismic wave propagation on fully unstructured hexahedral meshes , *Geophysical Journal International*, vol.186(2), pp.721-739, doi:10.1111/j.1365-246X.2011.05044.x.
- 6) 津田健一, 宮腰淳一, 今任嘉幸, 杉山大祐, 坪井誠司：プレート境界巨大地震を対象とした室内実験結果を踏まえた動力的断層破壊シミュレーション，*日本地震工学会論文集*, Vol 19, No.4, pp.1-12, 2019
- 7) Tsuda, K., Iwase, S., Uratani, H., Ogawa, S., Watanabe, T., Miyakoshi, J. I., and Ampuero, J. P : Dynamic rupture simulations based on the characterized source model of the 2011 Tohoku earthquake. *Pure and Applied Geophysics*, vol.174(9), pp.3357-3368, 2017
- 8) Galvez, P., et al. : Dynamic earthquake rupture modelled with an unstructured 3-D spectral element method applied to the 2011 M9 Tohoku earthquake, *Geophys. J. Int.*, Vol.198 (2), pp.1222-1240, 2014
- 9) Asano K, and T. Iwata ; Source rupture processes of the foreshock and mainshock in the 2016 Kumamoto earthquake sequence estimated from the kinematic waveform inversion of strong motion data, *Earth Planets Space*, 68, 147, doi:10.1186/s40623-016-0519-9, 2016
- 10) Ida, Y. : Cohesive force across the tip of a longitudinal-shear crack and Griffith's specific surface energy, *J. Geophys. Res.*, 77, 3796-3805, 1972
- 11) Chimoto K, H. Yamanaka, S. Tsuno, H. Miyake., and N. Yamada : Estimation of shallow S-wave velocity structure using microtremor array exploration at temporary strong motion observation stations for aftershocks of the 2016 Kumamoto earthquake, *Earth, Planets and Space* 2016 68:206, 2016