

破壊伝播の違いによる横ずれ断層近傍の強震動

香川 敬生¹・吉田 昌平²・野口 竜也³

¹正会員 鳥取大学大学院工学研究科 教授 (〒680-8552 鳥取市湖山町南4-101)

E-mail: kagawa@cv.tottori-u.ac.jp

²学生会員 鳥取大学大学院工学研究科 博士後期課程 (〒680-8552 鳥取市湖山町南4-101)

E-mail: D16T4003B@edu.tottori-u.ac.jp

³正会員 鳥取大学大学院工学研究科 助教 (〒680-8552 鳥取市湖山町南4-101)

E-mail: noguchit@cv.tottori-u.ac.jp

地表地震断層ごく近傍において震動被害が軽微と思われる事例が、2016 年熊本地震など国内外で散見されている。そこで、2016 年熊本地震に代表される鉛直横ずれ断層の破壊をモデル化し、3次元差分法によって震源断層近傍域を含む地震動分布のシミュレーションを実施した。横ずれ断層では、水平方向に破壊が伝播するフォワード・ディレクティビティ効果によって、断層直上付近で断層直交方向のパルス波が卓越することが一般に知られているが、鉛直方向の伝播によって断層近傍において断層平行成分が卓越した地震動が生じる場合もある。このことを検証するため、破壊伝播様式が異なる計算結果を比較し、2016 年熊本地震の地震動を定性的に説明する震源破壊様式を検討した。さらに、その場合の断層直上における地震動を評価し、フォワード・ディレクティビティによって断層直交成分で大きな地震動となる場所、また断層直上の地震動が周辺に比べて著しく小さくなる場所があること、それらの位置関係が実際の地震による観測事例とも整合することを示した。

Key Words: strong ground motion, near fault, strike slip, directivity pulse, 3-D FDM

1. はじめに

1943年鳥取地震、2016年熊本地震など地表地震断層を伴う地震では、断層直近では断層変位による被害を受けた建物は見られるものの、それらの建物の様子からは強震動に起因する被害は小さいと思われる事例が散見される。一般に、2016年熊本地震など横ずれ成分を主体とする地震では、断層延長方向に断層直交成分が卓越するパルス (Forward Directivity Pulse) が見られるため、断層直上付近での地震動が大きいと考えられがちである。しかし、断層破壊の進行方向によっては、断層平行成分が大きくなることも指摘されている¹⁾。

本研究では、断層直近の地震動卓越方向を網羅的に検討した先行研究¹⁾に倣って同様の試算を実施し、特に断層直上およびごく近傍での強震動特性を合理的に評価し、震源断層直上で揺れが小さくなる条件について検討する。地震動の計算には、断層近傍の永久変位も評価できる、互い違い格子 (Staggered-Grid) に非一様格子間隔を採用した3次元差分法^{2,3)}を用い、震源断層が深い場合と浅い場合、およびその組み合わせ、また破壊伝播様式の違いによる影響を検討する。

2. 地震動試算モデル

地震動計算領域として60km×28kmの範囲を設定し、ここに2kmメッシュで計算点を配置する (図-1)。領域内は0.2km間隔の差分格子を設定するとともに、0.5kmの格子間隔を持つ領域で評価対象域を囲み、周囲に吸収境界を設定して境界反射波が領域内に進入しないように配慮している。想定断層は長さ20kmの鉛直右横ずれ断層を基本とし、図-1に示すように計算領域の中心に配置する。計算点の一部は震源断層の直上に設定されている。

震源断層の破壊領域は深浅ふた通りを想定し、図-2に示すように深さ5kmから地表までに浅部を、上端深さを5kmとして幅10kmに深部を鉛直一様すべりとして設置する。地表断層を生じる地震の浅い破壊は応力降下が小さくすべり速度も遅いとされることから⁴⁾、図-2に示すように、表層5kmはそれ以深の地震発生層よりも剛性を小さく設定し、ここにも断層すべりを設定する場合は立ち上がり時間を長くしている。断層すべりは純粋な横ずれ断層とし、浅部断層の地震モーメントは深部の半分と、面積比で設定した。なお本研究では、場所による地震動の相対振幅の違いを主として議論することとする。

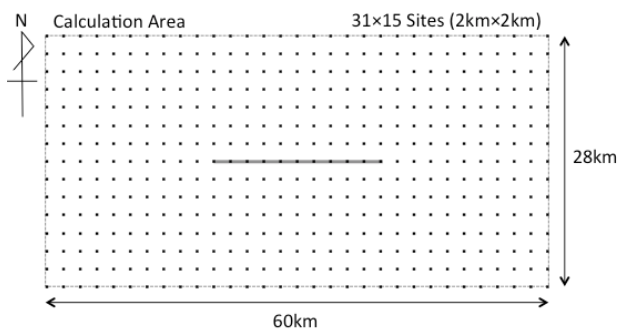


図-1 計算対象領域と計算点の分布

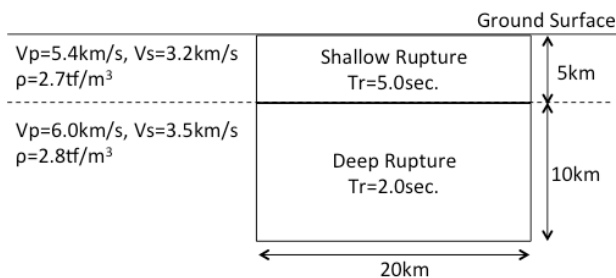


図-2 地下構造モデルと断層面の基本設定

以上の条件で、既往研究¹⁾を参考に、図-3に示す破壊様式を設定した。ケース01は中央下端、03は西端中央の破壊開始点から円弧状の破壊フロントが進行する。ケース02は真下から、04は西側から線上の破壊フロントが平行に進行する設定とした。図には示していないが、参考までに深部断層の中央（深さ7.5km）に点震源を置いた場合をケース00とした。いずれのケースも、破壊伝播速度は2.5km/sとし、震源時間関数はベル型としている。

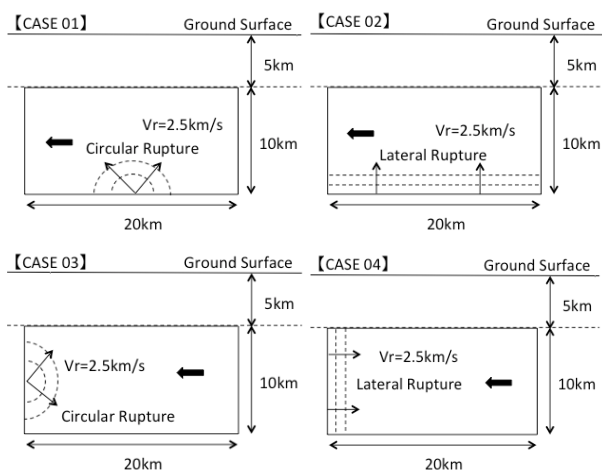


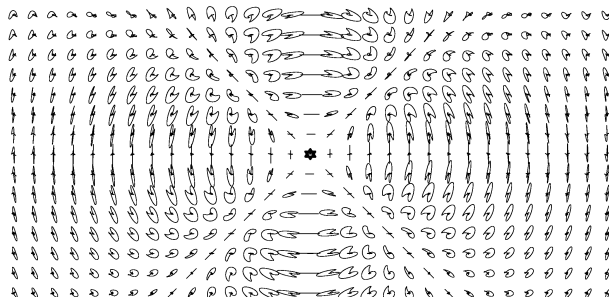
図-3 断層破壊伝播モデルの設定

3. 地震動分布の試算結果

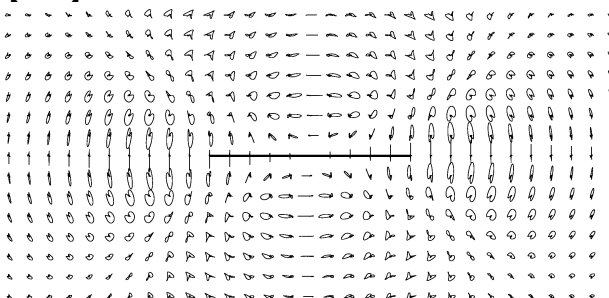
各ケースで得られた地動速度の粒子軌跡を図-4に示す。以下、全図の振幅スケールは共通であり、お互いに比較可能である。点震源としたケース00では、横ずれ断層

による四象限型の振幅および震動卓越方向の分布が明瞭に見られる。断層面が破壊した場合には破壊進行の影響が現れ、平行に破壊が進行する方がその影響が顕著になる傾向が見られる。なお、以下の記述では、図-1左に示したように、分布図の上を北、右を東とする。

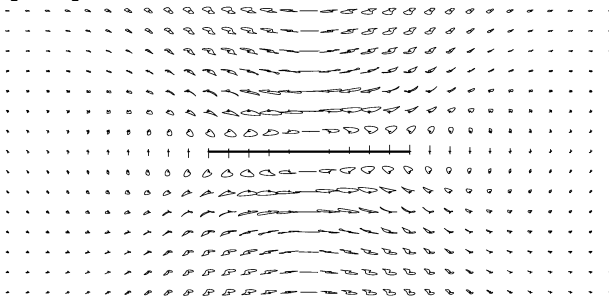
【CASE00】



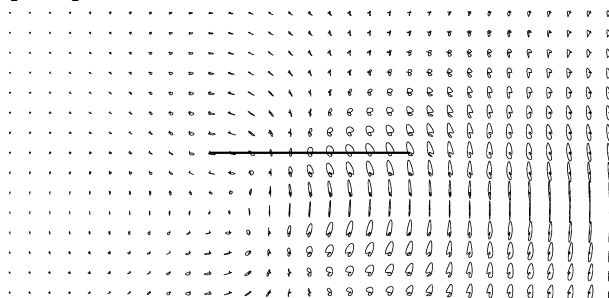
【CASE01】



【CASE02】



【CASE03】



【CASE04】

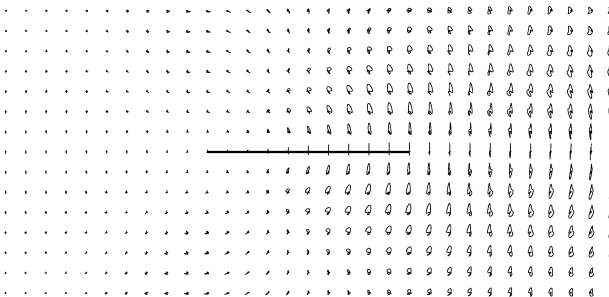


図-4 各ケースによる地動速度粒子軌跡分布

破壊が下から平行に伝播するケース02では、断層の南北方向で断層平行方向の地震動が強調され、断層延長方向での断層直交成分の振幅が抑制されている。一方、破壊が西から東に平行に伝播するケース04では、破壊進行方向の断層東延長方向に断層直交成分の振幅が強調されている。ケース03にも同様に見られるこの現象が、横ずれ断層のフォーワード・ディレクティビティ効果として周知のものであるが、破壊伝播の様式によってはこの方向の地震動が必ずしも強調されるとは限らないことが示唆される。また、いずれの場合も破壊開始点直上付近の地震動振幅が、断層線上であっても小さいことが特徴として見られる。

次に、図-5に示すように、ケース02に浅部の断層を加えたケース02DS、ケース04に浅部を加えたケース04DSを設定した計算を実施した。その結果を図-6に示す。表層部のすべりが無いケースに比べて、断層直近の地震動が大きくなり、断層から離れた地震動が相対的に小さいように見える。しかし、破壊が下から伝播するケース02DSでは、断層直上の地震動は極端に小さい。一方で、破壊が西から東に伝播するケース04DSでは断層直上で断層直交方向に大振幅の地震動が生じている。

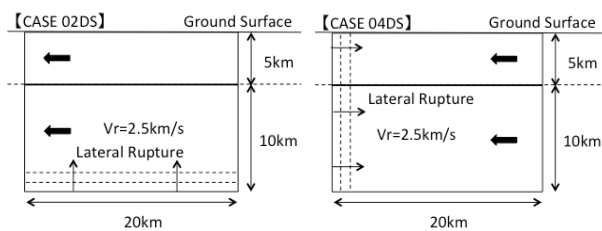


図-5 浅部断層を加えた断層破壊伝播モデルの設定

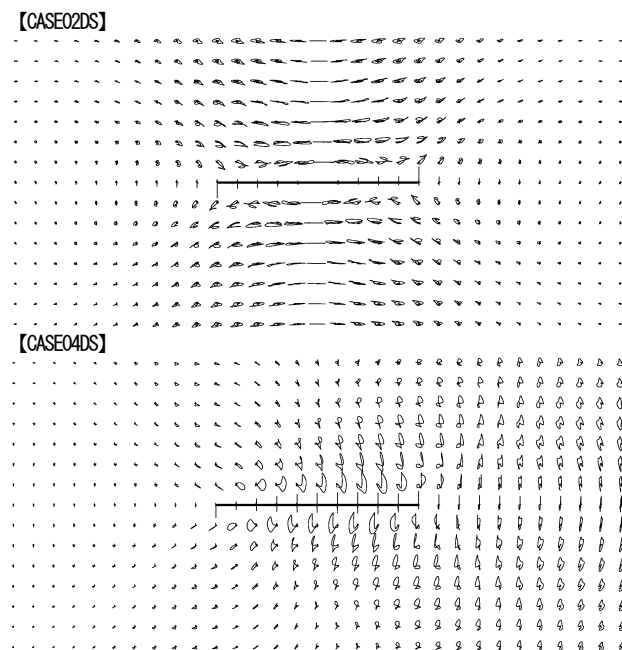


図-6 浅部断層を加えた地動速度粒子軌跡分布

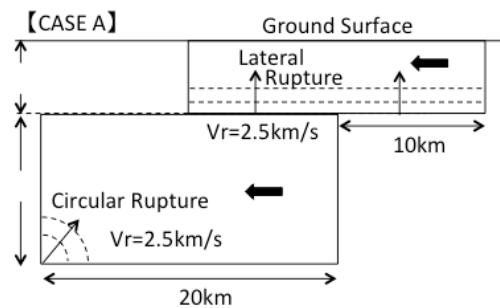


図-7 深部と浅部で破壊伝播様式の異なる断層破壊伝播モデル

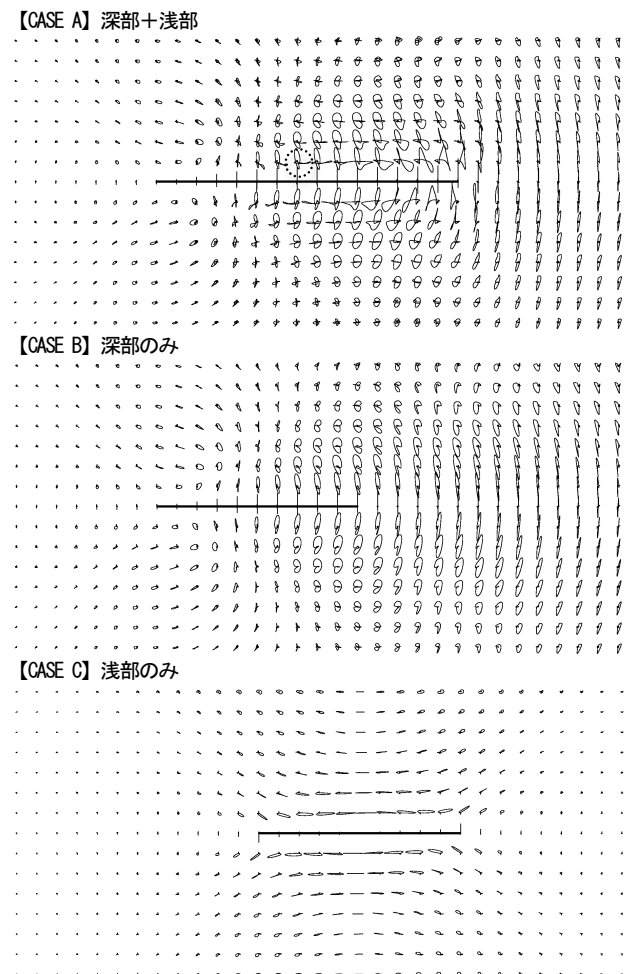


図-8 図-7の設定による地動速度粒子軌跡分布

4. 2016年熊本地震をふまえた考察

2016年熊本地震では、益城町、西原村の震度計で断層平行方向が卓越する地震動が観測された。図-4, 5から、横ずれ断層ごく近傍でこのような地震動となるためには、断層面の破壊が下から伝播することが条件となることが分かる⁵⁾。なお、その場合には断層直上部での地震動は小さくなり、同地震による観測事例⁶⁾とも整合する。一方で、断層東端部に近い南阿蘇村では地表断層を生じた付近で自動車の横転など地震動による被害も生じている。このためには、破壊が西から東へ進行する影響も無視で

きない。そこで、2016年熊本地震を模擬した概略震源破壊モデルとして、図-7のような設定での計算を実施してみた。深部の断層は西側下端から円弧状の破壊フロントが進行し、これが全て破壊した後に浅部断層の深部から水平の破壊フロントが地表に向かって進行する。なお、深部断層の影響のみを考慮したケースをケースB、浅部のみのものをケースCとする。

ケースAでは、破壊開始点となる西側の地震動が小さく、断層直上でもほぼゼロとなっている。断層直上の地震動は東に向かって断層直交成分が大きくなっており、これはケースBに見られる深部断層の破壊進行によるフォワード・ディレクティビティの影響であることが分かる。また、断層近傍では浅部断層の破壊によるケースCで見られる断層平行成分が加わり、複雑な粒子軌跡を示している。ケースCはケース02DSの表層部だけを取り出した設定にあたり、浅い断層破壊は断層近傍に影響が大きいものの、遠方では相対的に地震動の振幅が小さくなることが顕著に見られる。また、断層を挟んで断層平行成分の震動方向が逆向きになるため、断層直上では地震動が極端に小さくなっている。

図-8は地動速度の粒子軌跡を示しているが、ケースAで断層近傍（最短距離2km）にあたる破線の円で囲んだ地点の地動変位の粒子軌跡を図-9に示す。図中の数字は、破壊開始を基準とした計算上の時間を秒単位で示したものである。まず7～9秒の約2秒でほぼ北に変位し、その後11～14秒の約3秒で西に大きく変位していることが分かる。最初の北向きの地動が図-8ケースBの深部破壊によるもの、その後の西向きの大きな地動が同図ケースCの浅部破壊によるものとなっている。浅部の断層破壊によって、東向きの永久変位が生じていることが分かる。このような地動は、2016年熊本地震における益城町宮園、西原村小森の加速度記録を積分して得られた地動変位の粒子軌跡⁷⁾とも整合しており、与えた断層破壊モデルは2016年熊本地震の震源解析結果^{例えは3)}の傾向とも大きくは矛盾しない。

図-8の計算点は2km毎に示しているが、より断層近傍での状況を見るため、断層から0.2km毎の地動変位を図-10に示す。図の最下段は断層線上、最上段には示した地点よりも断層に近付いた断層最短距離1kmの地点にあたる。断層変位の影響により、断層に近づくほど断層平行成分が大きくなるが、断層直上では断層を挟んで変位方向が逆転するため断層平行成分がゼロとなり、西側からの破壊伝播による断層直交成分が目立つようになっている。しかし、断層から離れた断層平行成分に比べるとその振幅は小さい。

2016年熊本地震では、益城町郊外の地表地震断層ごく近傍で断層変位による被害が見られるものの地震動に起因する被害は小さく、地表断層から百m単位で離れると

地震動による被害が大きくなると考えられる事例が報告されているが⁶⁾、その傾向を示した結果とも考えることができよう。さらに、地表断層出現部では堆積層が薄いなどの地盤増幅の影響も作用し、断層変位による被害と地震動による被害の対比を大きくした可能性⁶⁾もあろう。

一方、2016年熊本地震の断層東端付近に位置する南阿蘇村では、地表地震断層の近傍で断層変位以外に地震動に起因する被害も見られている。図-8 ケースAでは、東側の断層端部に向けて深部断層破壊によるフォワード・ディレクティビティの影響が大きくなっており、南阿蘇村の位置が、特に断層直交方向に大きな地震動が生じている領域に対応していたことが推察される。図-8のケースB、Cからも、深部断層の影響は遠方にまで及ぶ一方で、浅部断層の影響は断層近傍に限定されることが示唆され、これらが相互に作用することで上記のような地震動を生じたものと考えられる。

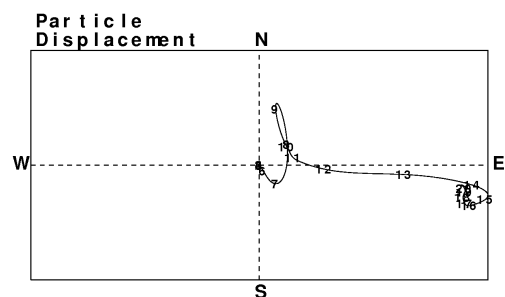


図-9 断層ごく近傍における地動変位粒子軌跡例
(図-8ケースAの破線円地点に対応)

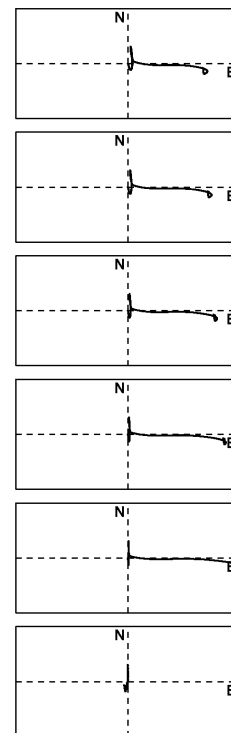


図-10 断層ごく近傍から直上への地動変位粒子軌跡の変化
(上：最短1.0kmから下：直上まで0.2km毎)

5. おわりに

様々な破壊様式で鉛直横ずれ断層が破壊した場合の地震動分布を検討し、2016 年熊本地震本震で生じた地表地震断層ごく近傍において、断層変位による被害に比べて強震動による被害が小さいと思われる現象の説明を試みた。一般に、横ずれ断層の震源近傍では断層直交成分が卓越する強震動が特徴的であるが、2016 年熊本地震本震では断層平行成分が大きい。鉛直下方から破壊が進行する場合にこのような地震動が生じることが示唆されているが、その場合には断層直上で地震動が著しく小さくなる。熊本地震など横ずれ断層地震に見られる断層直上で震動による被害が小さい現象が、このような断層破壊によって生じている可能性が示唆された。

一方、2016 年熊本地震本震では南阿蘇村で地表断層直近で強震動による被害も生じている。これは、深部断層一般的な破壊伝播を想定すれば、断層端部から延長方向に大きなディレクティビティ・パルスが生じることで説明が可能である。

1943 年鳥取地震、1995 年兵庫県南部地震など、地表地震断層直上で震動被害が小さく、やや離れた場所で震動被害が大きくなる現象が、本研究によるシミュレーションによって、ある程度説明できる可能性が示された。ただし、ここでは単純な鉛直横ずれ断層破壊による定性的な解釈に留まっており、より具体的な断層破壊モデルを用いて、地表地震断層ごく近傍における強震動特性の課題に取り組んでいきたい。

謝辞：本研究の一部は、文部科学省科学研究費基盤研究(C)「1943 年鳥取地震鹿野断層端部における断層変位と

強震動が被害に及ぼした影響の分析」(平成 27～29 年度)の助成により実施されました。

参考文献

- 1) Miyatake, T. : Computer simulation of strong ground motion near a fault using dynamic fault rupture modeling: Spatial distribution of the peak ground velocity vectors, *Pure and Applied Geophysics*, 157, pp. 2063-2081, 2000.
- 2) Graves, R.W.: Simulating seismic wave propagation in 3D elastic media using staggered-grid finite differences, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 86, pp. 1091-1107, 1996.
- 3) Pitarka, A. : 3D elastic finite-difference modeling of seismic motion using staggered grids with nonuniform spacing, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 89, pp. 54-68, 1999.
- 4) Kagawa, T., K. Irikura, P. G. Somerville : Difference in ground motion and fault rupture process between the surface and buried rupture earthquake, *Earth Planets and Space*, 56, pp. 3-14, 2004.
- 5) 宮武隆：2016 年熊本地震での益城町の断層平行地動について、日本地震学会 2016 年度秋季大会, S21-P05, 2016.
- 6) 香川敬生, 吉田昌平, 上野太士：2016 年熊本地震で生じた地表地震断層ごく近傍の強震動について、土木学会論文集 A1,73, 2017 (印刷中)。
- 7) 岩田知孝：益城町宮園・西原村小森本震記録の解析, <<http://sms.dpri.kyoto-u.ac.jp/topics/masiki-nishihara0428ver2.pdf>> (2017/08/31 閲覧)。
- 8) Asano, K., 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 and Space*, 68: 147, 2016.

(2017.9.1 受付)

A STUDY ON NEAR SOURCE STRONG MOTIONS OF STRIKE SLIP FAULTS CONSIDERING VARIOUS RUPTURE SCENARIOS

Takao KAGAWA, Shohei YOSHIDA and Tatsuya NOGUCHI

A series of 3-D FDM simulations are demonstrated for studying characteristics of near fault strong ground motions. Several strike slip rupture scenarios are generated to discuss effects of rupture propagation. Forward directivity pulses with large fault normal component are generated at the end of source fault in propagating direction in case of horizontally propagating ruptures. In the case, however, ground motions at rupture starting point on the source fault are very small. In case of vertical propagating ruptures from the bottom of faults, large fault parallel ground motions as same as fault slip direction are generated around the source fault. In the case, ground motions on the fault line are very small. From the simulations, there exist some special cases that lead very small ground motions on the strike slip fault line as observed in several disastrous earthquakes, e.g. the 2016 Kumamoto Earthquake. Further minute study is required to explain the reason of the phenomenon completely.