

震源域近傍強震動の物理学

Physics of Near-Source Strong Ground Motions

*瀨瀬 一起¹

*Kazuki Koketsu¹

1. 東京大学地震研究所

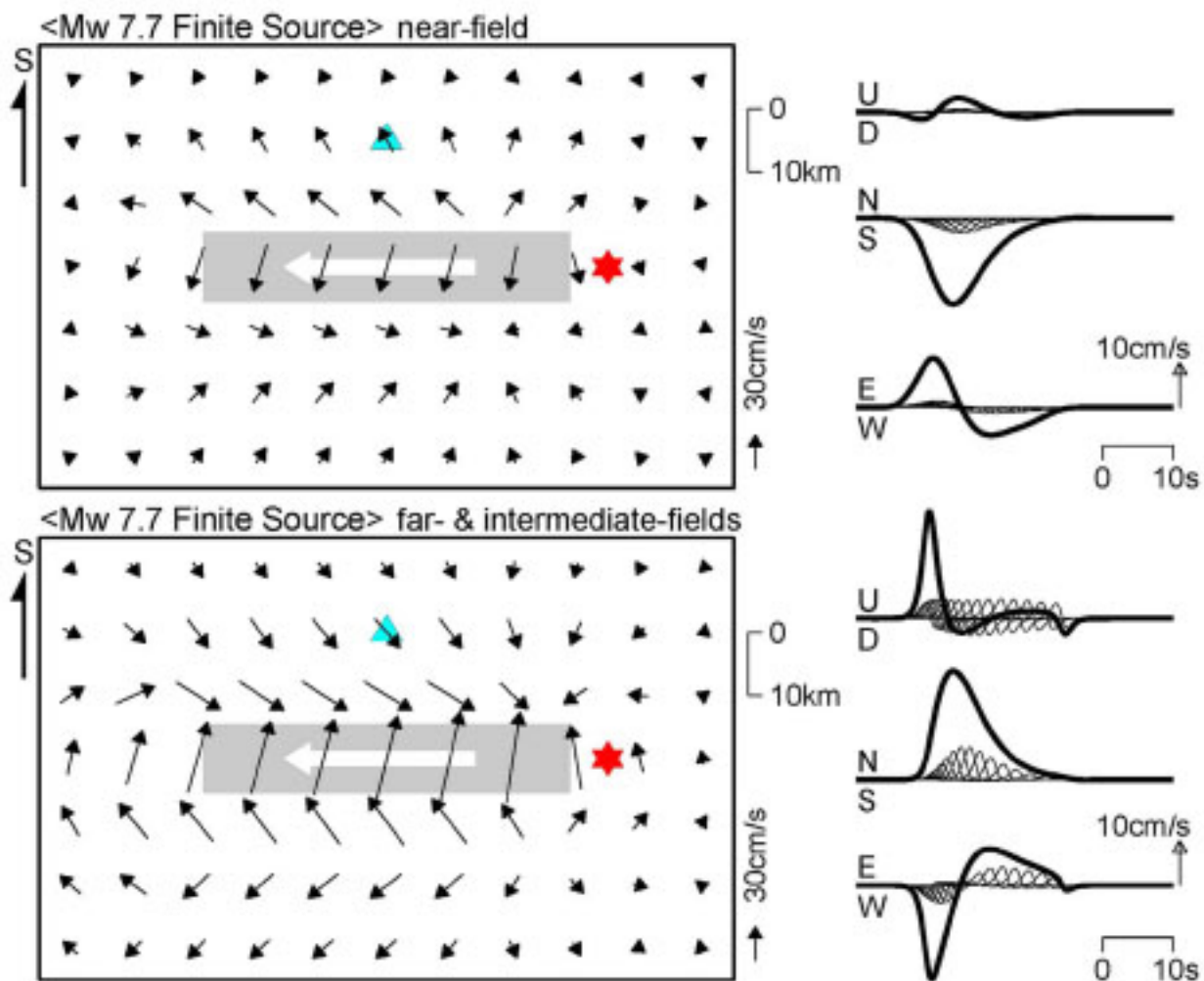
1. Earthquake Research Institute, University of Tokyo

震源域近傍強震動の成因に関しては複数の説が提唱されてきた。中でも長く研究され広く受け入れられているものがディレクティブティ効果である。その物理学は明確で、断層破壊の進展に伴い断層各部から放出される地震動が、進展方向では建設的干渉を起こすことにより強震動となるというメカニズムである。一方、FRINGESTEP効果というものも提唱されているが、その物理学は不明確である。初めて提唱したAbrahamsonの記述の中には「地殻変動の永久変位に伴う地震動によるもの」(Bolt and Abrahamson, 2003)と書かれている。しかし、地殻変動も強震動と同じように地震の断層運動の結果であるから、強震動の原因とはなりえない。また、Hisada (2003)が図らずも示したように、それらは断層運動の結果として計算される地震動に自然に含まれるものである。あえて特別なものとして区別するならば、震源域近傍では貢献の大きい地震動の近地項などに関連しているということはできる。それでも「物理学」となるためには、なぜ近地項などが大きくなって強震動となるのかの原因を提示する必要がある。このほか、断層運動そのものが地震動に現れているからという説明もなされている。これ自体に異存はないが、これは断層運動の結果であるすべての地震動に当てはまることであって、FRINGESTEP効果と同じくなぜ強震動となるのかの説明たりえない。

これまでディレクティブティ効果は、断層破壊が横ずれ断層なら走向方向に、縦ずれ断層なら傾斜方向に伝播するときに、地震動の断層直交成分に現れると考えられてきた。しかし、2015年ゴルカ地震では縦ずれの逆断層で走向方向の破壊伝播にも関わらず大きな長周期パルスが現れた。また、2016年熊本地震では地震動の断層平行成分に大きな長周期パルスが現れた。そのため、FRINGESTEP効果や断層運動説が改めて唱えられているが、われわれの研究(Koketsu et al., 2016; Kobayashi et al., in review)では、どちらの地震でも大きな長周期パルスの主な原因はディレクティブティ効果であることを示した。第一に重要な点は、「大きな」長周期パルスである必要があるということである。建設的干渉はどの方向の破壊伝播でも起こり得るが、その方向に沿って小さな地震動しか放射しない小断層が並んでいたり放射特性が小断層ごとにまちまちであると、大きな長周期パルスにはならない。傾斜角45°程度の通常の逆断層では走向方向が放射パターンの節面に当たってしまうために、走向方向の破壊伝播にはディレクティブティ効果が現れないのである。2015年ゴルカ地震は傾斜角約10°という低角逆断層だったため、走向方向が節面から離れて放射パターンの中心部に近くなりディレクティブティ効果が現れた。第二に重要な点は、震源断層全体の大局的な破壊伝播方向と、断層すべり主要部(いわゆるアスペリティ)付近の破壊伝播方向は一致するとは限らないことである。2016年4月16日熊本地震の大局的な破壊伝播は走向方向であるが、アスペリティ内の破壊伝播は斜め上方向となっていた。上向き主体の伝播の場合、建設的干渉は放射パターンの4象限すべてで起こり、強震動域が大きく広がることはない(Miyatake, 2000)。その結果、強震動域はアスペリティ直上付近に限られ、断層平行方向の強震動も現れた。

ゴルカ地震については、無限媒質の解析解の遠地項+中間項と近地項を比較することで、ディレクティブティ効果とFRINGESTEP効果を比較した(図)。震源域およびその近傍であってもディレクティブティ効果の方がかなり大きい。全般的に地震動の振動方向は似ているが両者の極性は反転している。また、もっとも注目すべきは、右側のカトマンズ相当地点の地震動波形において、小断層ごとの波形(細線)とそれらを加え合わせた波形(実線)を比較すると、遠地項+中間項に比べて近地項は細線が小さいにも関わらず実線は同程度の大きさになっている点である。これは近地項をコントロールしているのも遠地項+中間項と同じように建

設的干渉であることを意味しており，建設的干渉=ディレクティビティ効果と考えれば震源域近傍特有の強震動特性は概ねディレクティビティ効果で支配されているということもできる。



Characteristics of strong ground motion generation areas inferred from fully dynamic multicycle earthquake simulations

Percy Galvez¹, Paul Somerville¹, *Anatoly Petukhin², Ken Miyakoshi², Jean-Paul Ampuero³, Yingdi Luo³

1. AECOM, United States, 2. Geo-Research Institute, Japan, 3. California Institute of Technology, United States

There is vast evidence that the fault regions that generate short-period and long-period wave radiation during a given earthquake can be spatially distinct. The most direct observations of this phenomenon have been obtained for large subduction earthquakes (e.g. 2011 Mw 9.0 Tohoku) for which the high frequency ground motion radiation has been detected in deep regions of seismogenic zones, while long-period ground motion are in shallow regions. In contrast, for moderate-size crustal events (Mw6-7) kinematic finite source models reveal that regions of large final slip (long-period generation areas) and regions of large peak slip velocity (short-period generation areas) spatially coincide. The phenomenon does not appear to be systematic for large Mw8 earthquakes. This feature has important implications on procedures adopted for the prediction of strong ground motion and need detailed study.

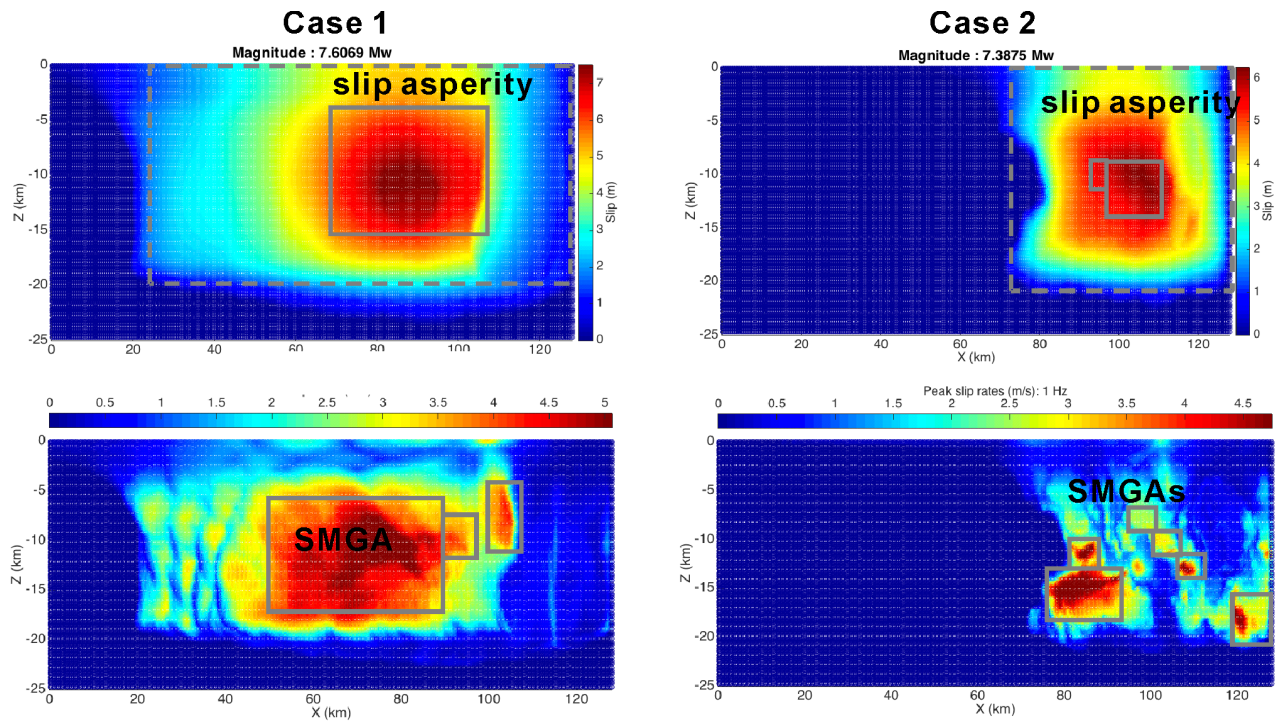
One plausible explanation for the discrepancy between short-period and long-period generation areas is based on the spatial heterogeneity of stress and strength (frictional parameters) along the fault. In fundamental models of earthquake dynamics, high-frequency radiation is generated by abrupt changes of rupture speed. High frequency radiation is also enhanced by short rise time which can be controlled by heterogeneous frictional velocity-weakening.

One fundamental goal of dynamic source modelling has been to design a class of spatial distributions of friction parameters that can be tuned to reproduce the statistical features of past earthquakes. An inherent difficulty in this effort was that stress and strength heterogeneities cannot be prescribed arbitrarily as was done in earlier work. Their inter-dependence must be consistent with a mechanical model of deformation and stress evolution over the longer time scale of the earthquake cycle. Failure to account for such mechanical correlations leaves the modeling framework so unconstrained that virtually any outcome is possible with sufficient tuning. For this reason we have developed the software infrastructure to simulate multiple earthquake cycles with rate-and-state friction, in which we solve consistently for long and short time scales of the earthquake cycle, combining periods of quasi-static and fully dynamic deformation.

With the benefit of the optimized software framework, we run simulations of a M8 vertical strike-slip fault. We associated the slip weakening Dc distribution with different degrees of fault maturity. Large variations of Dc represent immature faults and lower variations of Dc represent mature faults. We impose a lognormal distribution of Dc that correlates in space and defined two fault cases where fault case 1 has lower Dc variability ($\sigma = 0.25$, mature fault) whereas fault case 2 has larger Dc variability ($\sigma = 1.0$, immature fault). We examine the distinct locations of areas of large slip and large slip velocity. The analysis of the discrepancy of short-period and long-period generation areas has been supported by analysis of other dynamic quantities, including rupture speed, rise time and general attributes of band-passed filtered slip velocity time histories. With simulation results at hand (for peak slip and peak slip rate distributions slip see example below) we conclude that asperity area and high slip velocity area tend to be similar for Case 1 (mature faults), but occur in different places for Case 2 (immature faults). We found that high slip rate areas correspond to short rise time and high rupture velocity areas.

Acknowledgement. This study was based on the 2016 research project ‘Improvement for uncertainty of strong ground motion prediction’ by the Nuclear Regulation Authority (NRA), Japan.

Keywords: strong ground motion, multicycle earthquake rupture modelling, fully dynamic simulation



2016年4月1日紀伊半島沖の地震 (M_{JMA} 6.5) の強震動生成域の解析 Analyzing Strong Motion Generation Area of the M_{JMA} 6.5 Earthquake Occurring Offshore the Kii Peninsula on April 1, 2016

*浅野 公之¹

*KimiYuki Asano¹

1. 京都大学防災研究所

1. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

An M_{JMA} 6.5 earthquake occurring along the Nankai trough is thought to be a thrust-event on the plate boundary between the Eurasian and Philippines Sea plates, where future mega-thrust earthquake is expected (e.g., Wallace *et al.*, 2016). Since this type of earthquake with moderate-to-large size is very rare in this region in the last half century, it is a good opportunity to investigate the source characteristics relating to strong motion generation of subduction-zone plate-boundary earthquakes in the Nankai area, southwest Japan.

We collected from near-source strong motion data recorded by accelerometers at cabled sea-floor stations of Dense Oceanfloor Network system for Earthquake and Tsunamis (DONET1) jointly operated by NIED and JAMSTEC. We also collected records from Long Term Borehole Monitoring System (LTBMS) installed within accretionary prism underling the Kumano sedimentary basin at a depth of 904 m below the see floor at site C0002, which is operated by JAMSTEC. In addition to offshore stations, we collected strong motion data from velocity-type strong motion sensors (VSE-355G3) recorded at onshore broadband stations in the Kii peninsula belonging to the F-net of NIED and those recorded at a station in Shionomisaki installed by DPRI, Kyoto University.

Beside the M_{JMA} 6.5 mainshock, there are several M3 class aftershocks on the day of the mainshock. Firstly, we analyzed source spectral ratio between the mainshock and an EGF event to obtain the corner frequencies and the source scaling parameters for both events. We referred to the relocated catalog by Wallace *et al.* (2016) for the hypocenters of the mainshock and aftershocks. Then, we estimated the source parameters of strong motion generation area (SMGA) of this event based on broadband strong motion modeling by the empirical Green' s function method (Irikura, 1986; Miyake *et al.*, 2003) using both offshore and onshore strong motion stations. We will compare the source characteristics of this event with those from subduction-zone plate-boundary earthquakes in northeast Japan to discuss the regional difference in source characteristics in terms of strong motion generation from plate-boundary earthquakes.

Acknowledgements: We used strong motion data from Dense Oceanfloor Network system for Earthquake and Tsunamis (DONET) jointly operated by NIED and JAMSTEC, Long Term Borehole Monitoring System (LTBMS) of JAMSTEC, F-net broadband seismograph network of NIED, and DPRI, Kyoto University.

キーワード : 強震動生成域、プレート境界地震、南海トラフ

Keywords: strong motion generation area, plate-boundary earthquake, Nankai trough

UCSB Method for Broadband Ground Motion Prediction from Heterogeneous Earthquake Ruptures

*Ralph J Archuleta¹, Jorge Crempien^{2,1}

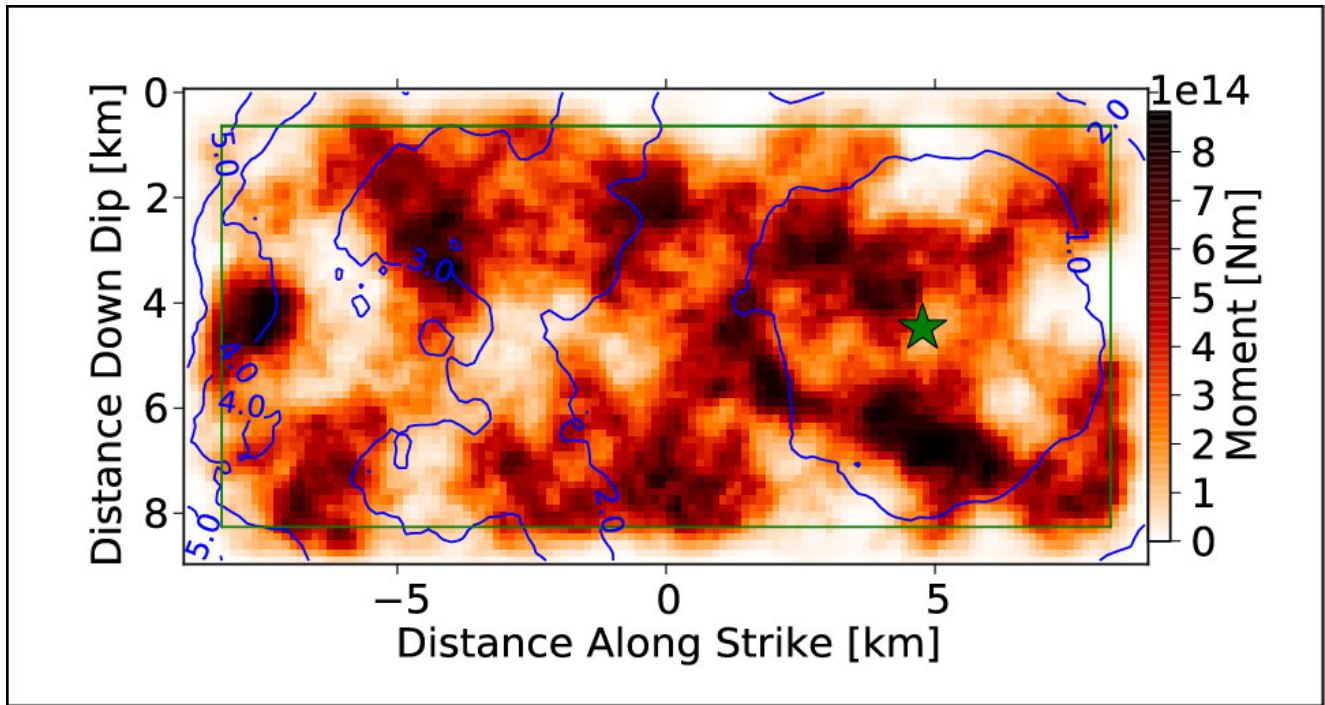
1. University of California Santa Barbara, 2. Pontificia Universidad Católica de Chile

The UCSB method simulates earthquakes as heterogeneous kinematic ruptures to produce synthetic broadband ground motions (0-25Hz) for $M \leq 8$. A Kostrov-like slip-rate function is specified at a dense number of points on a finite fault. Each slip-rate function is specified by the total slip, time to reach the maximum slip-rate (peak-time), the total time of slipping (rise-time), and a rupture time, i.e., the time when the point first begins to slip. The rupture time is related to the local rupture velocity. The slip, peak time, rise time and rupture time are all characterized by their own marginal distribution (one-point statistic), and each parameter is correlated with the other. The heterogeneity of the slip distribution on the fault is determined by filtering white noise with a Von Karman wavenumber power spectrum. The Von Karman spectrum is determined from a correlation length and a spectral decay parameter for length scales shorter than the correlation length. The other kinematic parameters are also heterogeneous with different decay parameters--each functionally related to the decay of the slip. With a fault area and seismic moment (magnitude) the only remaining free parameter is average stress drop. The code will iterate on the kinematic parameters until the moment-rate spectrum of the simulated earthquake is similar to a Brune spectrum, with a low frequency level corresponding to the seismic moment and the corner frequency corresponding to the average stress drop.

We separate wave propagation at 1.0 Hz into low- and high-frequency components. The low-frequency ground motion is propagated using either a 1D or 3D velocity structure. The high-frequency Green's functions are computed for a layer over halfspace. The high-frequency amplitude is modified using the quarter-wavelength method using the detailed 1D velocity model of the velocity structure. The resulting high-frequency Green's functions are then convolved with scattering functions, which are consistent with observed regional coda waves. We then merge the low- and high-frequency ground motion by stitching them in the wavelet domain. It is important to note that in the UCSB method, both the high- and low-frequency ground motion comes from a single source description even if the wave propagation is different.

We have successfully validated our method against well-recorded data produced by earthquakes in different tectonic regions such as California, eastern United States, and Japan. The validation metrics are bias between observed and synthetic acceleration response spectrum and direct comparison with ground motion prediction equations.

Keywords: Ground Motion, Earthquake, Heterogeneous Rupture



Characteristics of Near Fault Strong Ground Motion in the Kathmandu Valley during the 2015 Gorkha Nepal earthquake

*Nobuo TAKAI¹, Michiko Shigefuji², Subeg Bijukchhen¹, Masayoshi Ichiyanagi¹, Tsutomu Sasatani¹

1. Hokkaido University, 2. Kyushu University

On 25 April 2015, a large Mw 7.8 earthquake occurred along the Main Himalayan Thrust fault in central Nepal. The epicenter was near the Gorkha region, 80 km north-west of the Kathmandu Valley, and the rupture propagated eastward from the epicentral region passing through the Kathmandu Valley. We have installed a strong motion array observation (four sites; one rock site and three sedimentary sites) in the Valley, on 20 September 2011, to understand the site effects of the Valley. We discuss the characteristics of near fault strong ground motion in the Kathmandu Valley during the 2015 Gorkha earthquake based on the strong motion records captured by this array.

The horizontal velocities waveforms on sedimentary sites are strongly affected by site amplification due to soft soil deposit and valley response (Takai et al. 2016; Galetzka et al. 2015). The velocity waveforms for the N207E (fault normal direction) and UD components observed at the rock site KTP show the distinguishing velocity pulse ground motions. They show a single-sided velocity pulse with a width of about 6 s, while the N117E (fault parallel direction) component show a double-sided pulse with a period of about 10 s. This N117E pulse is considered to be effect of along-strike directivity (Mavroeidis and Papageorgiou 2003), and the pulse shape was explained by the joint inversion result for rupture process (Kobayashi et al. 2016). The ground velocities at KKN4 obtained from the high-rate (5 Hz sampling) GPS record (Galetzka et al. 2015) have the similar waveforms as observed at KTP, while the amplitudes of the KKN4 velocity pulses are about 1.4 times larger than those of the KTP velocity pulses; KKN4 is a rock site located northwest of the Kathmandu Valley.

The Kathmandu Valley is located at a very close distance (~10 km) to the rupture area and the estimated large slip areas exist near the Valley. Furthermore, the displacement waveforms derived from the velocity pulses for the N207E and UD components at KTP show a monotonic step. These facts demonstrate the observed velocity pulses are effect of a permanent tectonic offset (Mavroeidis and Papageorgiou 2003). If the records are affected by the permanent tectonic offset, the velocity waveforms are similar to the slip-rate functions (Hisada and Bielak 2003). Galetzka et al. (2015) estimated the regularized Yoffe slip-rate time function from the vertical velocity waveform at KKN4 by forward modeling. They also showed that the estimated slip-rate time function well explained the vertical velocity waveforms at two stations in the Kathmandu Valley. We confirmed that the estimated slip-rate time function well explained the vertical velocity waveforms at our four stations. It is interesting to extract the slip-rate time function from the observed records without waveform modeling. We made a trial of extraction of the slip-rate time function based on the low-pass filtered acceleration waveform for vertical component at KTP; the cut-off frequency of the filter is 0.3Hz. The velocity and displacement waveforms obtained by single and double time-integration of the low-pass filtered accelerations show the velocity pulse and the monotonic step, respectively. We also confirmed the Fourier spectral shape at the low-frequency range (0.02-0.3Hz) of our low-pass filtered acceleration waveform is similar to that of the differentiated Yoffe slip-rate time function estimated by Galetzka et al. (2015).

Kamai et al. (2014) developed an empirical parametric model for the fling-step components based on an extensive set of finite-fault simulations. We compare the width of the velocity pulse (about 6 s) observed at KTP with their regression model of the period of the fling-step pulse for the reverse fault. The width of velocity pulse at KTP, is nearly the same as the median value of the regression model by Kamai et al.

(2014). This means that the Gorkha earthquake with Mw 7.8 is normal one with respect to the fling-step motion.

Keywords: Fling-Step, permanent tectonic offset, Site Amplification

Long-period strong ground motions near the source fault of the 2016 Kumamoto earthquake

*Kojiro Irikura¹, Susumu Kurahashi¹

1. Aichi Institute of Technology

Introduction

The 2016 Kumamoto earthquake with Mw 7.0 occurred at 01:25JST on April 16, 2016 along the Futagawa fault zone and the northern part of the Hinagu fault zone. Surface breaks caused by the mainshock were found associated with Futagawa-Hinagu fault system by field surveys. Near-field strong ground motions with high accuracy during the 2016 Mw 7.0 Kumamoto earthquake were recorded by the NIED strong motion network (K-NET and KiK-net) and the JMA and local-government seismic-intensity network. In particular, two stations at Mashiki Town-Hall (MTH) and Nishihara Village-Hall (NVH) were located within 2 km of the surface traces along the Futagawa fault zone. The ground motions of the 2016 Kumamoto earthquake were well simulated using a characterized source model consisting of strong motion generation areas (SMGAs) based on the empirical Green's function (EGF) method except the very-near-field ground motions at MTH and NVH. We attempt to simulate the very-near-field ground motions with fling steps taking long-period generation areas (LMGAs) above the SMGAs into account.

SMGA model for simulating strong ground motions of the 2016 Kumamoto earthquake

Many studies of slip distributions obtained from the waveform inversion of the strong-motion data for this event have so far been published (e.g., Asano and Iwata 2016; Kubo et al. 2016; Yoshida et al. 2016). The rupture area and asperity area were determined based on the slip distributions obtained from the waveform inversions of the strong motion observations. Irikura et al. (2017) found that the relationship between the rupture area and the seismic moment for this event follows the second-stage scaling relation within one standard deviation developed by Irikura and Miyake (2001). Characterized source models with the SMGAs are estimated, based on the slip distribution models of Yoshida et al. (2016) and Kubo et al. (2016). There are found two best-fit source models, both of which show a good agreement between synthetic and observed motions (Irikura et al., 2017). One is Model A with three SMGAs from Yoshida et al. (2016) and the other is Model B with a single SMGA from Kubo et al. (2016). The SMGA of Model B is located around a center of the three SMGAs of Model A. The combined area of three SMGAs of Model A is nearly equal to the area of the single SMGA of Model B. The ratio of the SMGA area to the total rupture area is 0.22–0.24. Then, the stress parameter of each SMGA is about 14 MPa.

Long-period ground motions at very-near surface-fault stations

The ground motions at MTH and NVH show clearly the fling steps as shown in near-field ground motions during the 1992 Landers earthquake (Hisada and Bielak, 2003). The fling effects are dominant in the slip direction only in the vicinity of the surface fault and are negligible for buried faults, because the near-field terms of the Green's functions attenuates rapidly with distance from the fault, r , as the order of $(1/r^2)$. Therefore, the effects might have a strong influence on the ground motions at MTH and NVH, whereas less on those at KMMH16 and KMM006. We estimate the ground motions at MTH and NVH putting a long-period motion generation area (LMGA) between surface fault and the top of the seismogenic zone above the SMGA. We assume a long-period (about 3 s) modified-ramp-functions as slip velocity time functions on the LMGA, because the slip velocity time functions from the inversion results are expressed to be a bell shape near the surface fault, while they are Kostrov-type on deeper SMGAs, as shown in Kubo et al. (2016). The location of the LMGA is put near large slip from the inversion results. The area of the LMGA and the peak velocity of the slip velocity time function were determined through comparison between the synthetic and observed long-period motions. The synthetic ground motions as a sum of

ground motions from the SMGA and those from the LMGA agree well with the observed motions with fling steps.

Keywords: 2016 Kumamoto earthquake, strong ground motion, near-field ground motions, long-period strong ground motions, fling steps

地震波干渉法による有限断層の地震動シミュレーション

Ground Motion Simulation for Finite Faults using the Ambient Seismic Field

*三宅 弘恵¹、Viens Loic²、Denolle Marine²

*Hiroe Miyake¹, Loic Viens², Marine A Denolle²

1. 東京大学大学院情報学環総合防災情報研究センター／地震研究所、2. Department of Earth and Planetary Sciences, Harvard University

1. The University of Tokyo, 2. Department of Earth and Planetary Sciences, Harvard University

After the 2011 Tohoku earthquake, the Japanese government re-evaluated the source regions of potential megathrust earthquakes, leading to new seismic and tsunami hazards that need to be assessed. The long-period ground motions, which may affect tall-buildings and critical structures, need to be carefully simulated. Deterministic numerical simulation of long-period ground motions are currently widely applied for both crustal and subduction earthquakes. However, the period-range is limited between 1 to 20 s and 2 to 20 s for crustal and subduction earthquakes, respectively, due to the accuracy of the velocity structure models. As an alternative approach, ground motion simulation using the ambient seismic field (i.e., seismic interferometry) has been proposed.

Finite fault application is necessary for ground motion simulations of large magnitude earthquakes. Denolle et al. (2014) demonstrated the finite fault application of the ambient seismic field by simulating the ground motions of earthquake scenarios along the San Andreas fault. Simulated ground motions tend to over predict the ground motion obtained with physics-based simulations, indicating a possibility of large ground motion variations. Viens et al. (2016) showed a good agreement between observed and simulated ground motions for the 2008 Iwate-Miyagi earthquake. Surprisingly, the point source assumption shows a similar performance to the finite fault assumption as long as the period range is longer than 4 s. Another alternative is to convolve the source time function of the large earthquake with the Green's functions retrieved with a station located close to the earthquake source. We validate this approach by simulating the long-period ground motions ($T > 4$ s) of the 2007 Chuetsu-oki earthquake. Up to now, these techniques have only been applied to crustal earthquakes. With the recent increase of offshore continuous observation systems, such as the S-net, DONET, and JMA networks, the application can be extended to subduction earthquakes with finite source modeling using offshore-onshore Green's functions. The ambient seismic field has a potential to overcome the current limitation of velocity structure modeling, especially for shallow oceanic soft layers. However, some issues still need to be solved, such as the Green's function amplitude calibration, the earthquake depth limitation, the period range limitation, potential azimuthal variations, and seasonal variation.

キーワード：地震波干渉法、有限断層、地震動シミュレーション

Keywords: seismic interferometry, finite fault, ground motion simulation

動力的断層モデルに基づく地表・地中断層の震源ごく近傍の地震動：逆断層と横ずれ断層の比較検討

Dynamic Rupture Simulation of Near Fault Ground Motions for Surface and Buried Faults: Comparison of Dip Slip and Strike Slip Faults

*加藤 研一¹、大塚 康弘¹、田所 萌似香¹、渡辺 哲史¹、植竹 富一²、引間 和人²

*Kenichi Kato¹, Yasuhiro Ohtsuka¹, Monika Tadokoro¹, Tetsushi Watanabe¹, Tomiichi Uetake², Kazuhito Hikima²

1. 株式会社小堀鐸二研究所、2. 東京電力ホールディングス株式会社

1. Kobori Research Complex Inc., 2. Tokyo Electric Power Company Holdings, Inc,

震源ごく近傍の地震動を考える上で地表付近の破壊は重要であり、地表断層と地中断層のどちらが強震動を強く励起するかは興味深いテーマである。観測事例を比較した検討としてSomerville (BSSA 2003)やKagawa et al. (EPS 2004)が挙げられ、地中断層は地表断層に比べて強震動が大きくなることを指摘している。ただし、こういった検討事例は限られた震源近傍の観測記録に基づかざるを得ないのが現状である。そこでDalguer et al. (BSSA 2008)やPitarka et al. (BSSA 2009)は横ずれ断層を対象とし、動力的断層モデルを用いた理論的検討により、地表断層と地中断層の地震動を多点において比較検討した。地中断層は地表断層に比べて破壊開始点が深く、かつ平均応力降下量が大きいとの前提に立てば、地中断層の強震動は地表断層に比べて大きくなり、Somerville (2003)やKagawa et al. (2004)による観測事実と整合すると指摘している。

以上は横ずれ断層に限定された検討であることから、著者らは逆断層を対象とした動力的断層モデルにより地表・地中断層の強震動を比較した(加藤ほか、地震学会秋季大会 2016)。Dalguer et al. (2008)やPitarka et al. (2009)が対象としていない断層最短距離 $X_{sh} \leq 2\text{km}$ では、地表最大速度の上限レベルは地表断層が地中断層より大きくなり、横ずれ断層とは異なる結果が得られた。ここでDalguer et al. (2008)は断層面積と地震モーメントのスケーリングを満たすような、矩形のアスペリティと背景領域からなる断層パラメータを設定している。一方、Pitarka et al. (2009)は応力降下量などの断層パラメータを一様不均質に設定するなど、モデル化の考え方が異なっている。そこで本検討は、逆断層を対象とした加藤ほか(2016)と同様の断層パラメータを横ずれ断層について設定し、地表・地中断層の震源ごく近傍の地震動を比較すると共に、逆断層の震源ごく近傍の地震動とも比較した。

断層面は半無限均質地盤内に設置し、断層長さ20km、断層幅20km、傾斜角 90° とした。地表断層と地中断層の断層パラメータは、逆断層を対象とした加藤ほか(2016)の条件にそって、地表断層の初期破壊中心深さ H を7.5km、応力降下量 $\Delta\sigma$ を5MPaとした。地中断層は $H=7.5$ および10.0km、 $\Delta\sigma=7.5$ MPaとした。なお深さ3km以浅は $\Delta\sigma$ を線形に変化させ、地表断層の地表の $\Delta\sigma$ は0または-2.5MPaに、地中断層は-20MPaとした。解析は3次元差分法(Kase and Kuge, GJI 2001)を用い、断層面にはすべり弱法の摩擦構成則を適用した。

これらの解析条件の基で自発的な断層破壊を計算すると、地中断層の地震規模は $M_w 6.8$ 、地表断層は $M_w 6.9$ が得られた。断層走向方向の震源ごく近傍($X_{sh} \leq 2\text{km}$)の最大速度を比較すると、フリングステップの影響(例えばHisada and Bielak, BSSA 2003)により地表断層が地中断層よりも大きな速度振幅を示した。一方、断層直交方向の $X_{sh} \leq 2\text{km}$ の最大速度は地中断層が大きくなる傾向があり、特に $\Delta\sigma$ を大きく(7.5MPa)、初期破壊域を深めに設定($H=10.0\text{km}$)した場合は、 $\Delta\sigma$ と破壊伝播効果の相乗効果により大きな速度振幅を示す結果となった。

逆断層を対象とした加藤ほか(2016)による検討のうち、 $X_{sh} \leq 2\text{km}$ の最大速度振幅が特に大きくなるのは下盤側の断層直交方向と上盤側の上下動であった。これらはいずれも地表断層が地中断層に比べて大きい傾向を

示している。

以上、 $X_{sh} \leq 2\text{km}$ に着目したこれまでの検討結果をまとめると、横ずれ断層の断層直交方向の最大速度は地中断層が大きくなるが、それ以外は地表断層が大きくなる傾向が見られた。なお、 $X_{sh} > 2\text{km}$ は横ずれ断層と逆断層の双方において地中断層の最大速度が地表断層より大きくなる傾向を示しており、震源からやや離れた地点の記録の整理に基づくSomerville (2003)やKagawa et al. (2004)の観測事例と整合している。

震源のごく近傍は表層部分のパラメータの設定の仕方に大きく依存する領域であり、今回の条件設定では地表断層が大きくなる結果が得られたが、さらに検討が必要である。本検討で用いた地中断層と地表断層のモデル化の違いについては、今後も観測事実に基づいて整理していきたい。

【謝辞】産業技術総合研究所・加瀬祐子博士、東京理科大学・永野正行教授から貴重なご意見をいただいた。

キーワード：動力学的断層モデル、地表断層、地中断層、震源ごく近傍、地震動

Keywords: Dynamic Rupture Simulation, Surface Fault, Buried Fault, Near Fault, Ground Motions

Characteristics of Near-Fault Ground Motions during the 2016 Kumamoto, Japan, Mainshock

*岩田 知孝¹、浅野 公之¹

*Tomotaka Iwata¹, Kimiyuki Asano¹

1. 京都大学防災研究所

1. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

During the mainshock of the 2016 Kumamoto earthquake, which caused the surface rupture, strong motions (JMA seismic intensity of 7) at Mashiki town and Nishihara village were observed near the surface rupture. We carefully integrated the observed acceleration records to velocities and displacements with correcting the base-line change in acceleration records, which would be caused by the effect of tilting of the seismometer. The corrected observations show large permanent displacements, which include near-fault terms. The amounts of permanent displacements coincide to geodetic observation results. We discuss those ground motion characteristics and compare those with other near-fault ground motion records.

キーワード：震源近傍強震動、2016年熊本地震

Keywords: Near-source ground motions, The 2016 Kumamoto earthquake

2016年熊本地震の特性化震源モデル－震源近傍強震動の事後推定のために

A simplified source model to explain damaging near-source ground motions during the 2016 Kumamoto earthquake

*野津 厚¹、長坂 陽介¹

*Atsushi Nozu¹, Yosuke Nagasaka¹

1. 港湾空港技術研究所

1. Port and Airport Research Institute

本研究では、2016年4月16日1時25分ごろに発生した熊本地震の本震 ($M_j 7.3$) を対象とし、震源周辺で被害の発生した箇所での地震動を推定することなどを目的として特性化震源モデルを作成した。その際、橋梁などに甚大な被害が生じている益城町～南阿蘇村にかけての地域での地震動を適切に再現できる震源モデルとすることを第一の優先事項とした。波形の計算には修正経験的グリーン関数法 (古和田他, 1998; 野津・菅野, 2008; 野津他, 2009) を用いた。詳しい計算条件は以下のサイトに記載されている

(http://www.pari.go.jp/bsh/jbn-kzo/jbn-bsi/taisin/sourcemodel/somodel_2016kumamoto.html)。作成した震源モデルの数値データは上記サイトから入手できる。

この地震の震源域周辺を右上の図に示す。図中の長方形は波形インバージョン (野津・長坂, 2017) で用いた断層面 (長さ40km, 幅20km, 走向 52° , 傾斜角 96°) を地表面に投影したものである。波形インバージョンの結果 (右下の図) によると、気象庁発表の震源 (破壊開始点, 図の★印) よりも15kmほど北東側に特にすべりとすべり速度の大きい領域 (本稿ではアスペリティ3と呼ぶ) が存在していたと考えられる。この地震の際、震源近傍の益城町 (図のKMMH16など) では周期1秒程度の成分の著しく卓越した地震動が観測され、甚大な被害をもたらした。しかしながら、破壊開始点と益城町および上記のアスペリティ3との位置関係から判断すると、益城町での地震動に対して最も支配的となったのがアスペリティ3の破壊であるとは考えにくい。一方、より北東側の地域ではアスペリティ3の破壊の影響が大きかったと考えられる。すなわち、震源付近の地震動は震源断層との位置関係に応じて大きく異なっていたと考えられる。

本検討の対象地域においては、既往の研究 (野津・長尾, 2005) でスペクトルインバージョンによるサイト増幅特性の評価が行われており、今回はこれを用いた。ただし、KMM006については、サイト増幅特性の評価が行われた時期の後に移設されているため、再評価を行ったサイト増幅特性

(http://www.pari.go.jp/bsh/jbn-kzo/jbn-bsi/taisin/research_jpn/research_jpn_2016/jr_48.html) を用いた。また、KMMH16についても、新しいデータに基づいて再評価を行ったサイト増幅特性を用いた。ただし、いずれの場合も新旧のサイト増幅特性には決定的な違いは見られなかった。西原村小森と南阿蘇村河陽では、大阪大学のグループが観測点の近傍で取得した中小地震観測記録に基づいてサイト増幅特性を評価した。

位相特性の評価には、対象地点に対して最も影響を与えたと考えられるアスペリティ (例えばKMM005に対してはアスペリティ3) の近くで発生した中小地震を選択し、その位相特性が本震の位相特性と類似していることを確認した上で用いている。

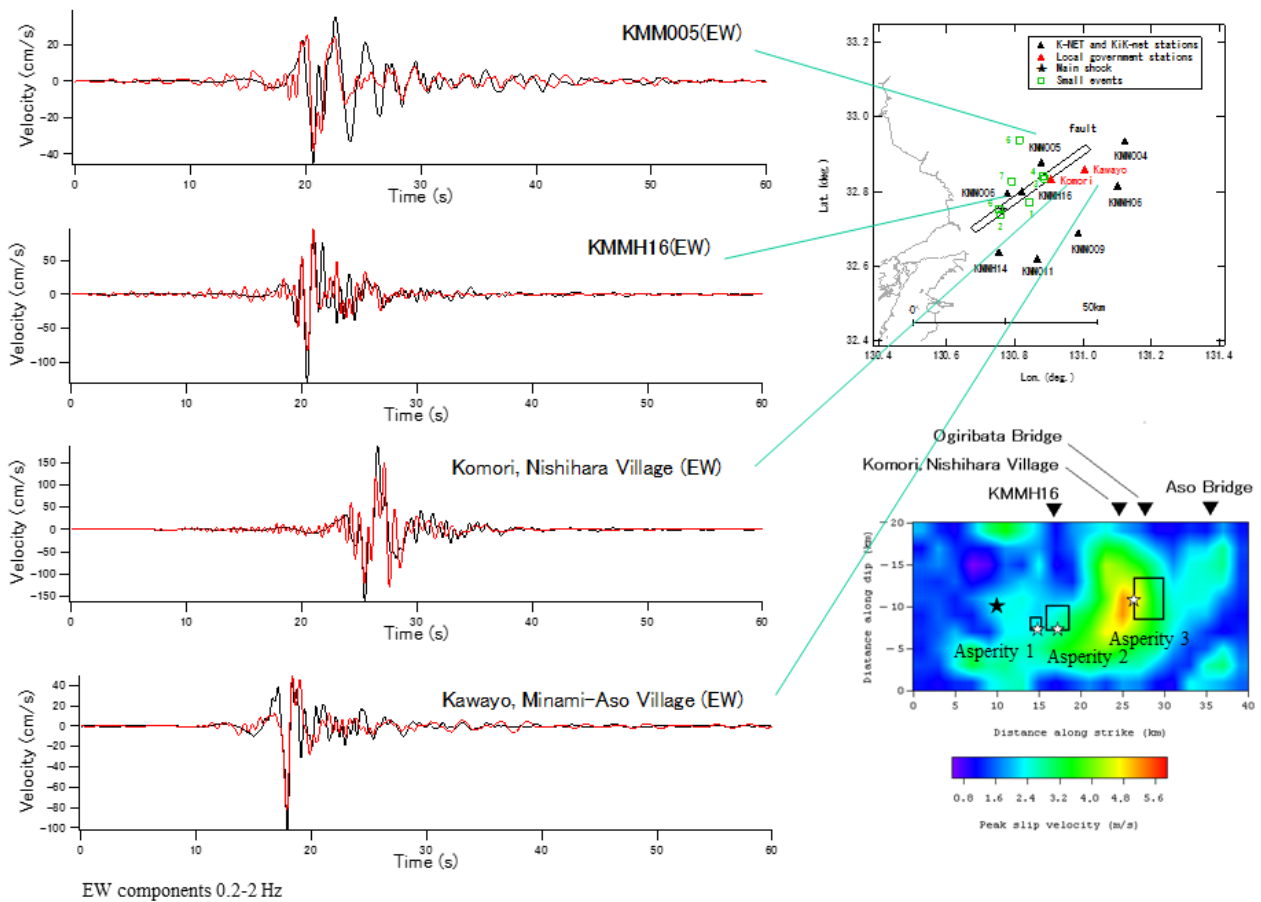
作成した特性化震源モデルを右下の図に示す。アスペリティは、波形インバージョンの結果を参考に、破壊開始点よりも5kmほど北東側にアスペリティ1とアスペリティ2を、破壊開始点よりも15kmほど北東側にアスペリティ3をそれぞれ置いた。各アスペリティの破壊は図に示すアスペリティ毎の破壊開始点 (☆) から同心円状に拡大するものとした。ライズタイムについては、基本的にアスペリティの幅と破壊伝播速度から片岡他 (2003) の式で算定される値としたが、アスペリティ3については、西原村小森での波形の再現性を考慮し、それよりも大きい値とした。なお、 Q_s 値は既往の研究 (加藤, 2001) に基づき $Q_s = 104 \times f^{0.63}$ とした。地震動を計算するにあたり、多重非線形効果を考慮する方法 (野津・盛川, 2003; 野津・菅野, 2008) を用いた。その際必要となるパラメタである二つのパラメタのうち、 ν_1 はサイト増幅特性のピーク周波数と観測スペクトルのピーク周波数とのずれに基づいて設定し、 ν_2 は地震動の振幅、特に後続位相の振幅が妥当なものとな

るように設定した。左の図に各地点での速度波形（0.2-2Hz）の再現結果を示す。KMMH16での周期1s前後のパルスをはじめとして、各地点における速度波形は概ね良好に再現されている。紙数の関係で示していないがフーリエスペクトルの再現性も概ね良好である。

謝辞：本研究では防災科学技術研究所、熊本県、気象庁、大阪大学秦吉弥博士による地震観測記録を用いました。記して謝意を表します。

キーワード：2016年熊本地震、強震動、震源モデル、修正経験的グリーン関数法、サイト増幅特性

Keywords: The 2016 Kumamoto earthquake, strong ground motion, source model, Corrested EGF method, site amplification factor



2016年熊本地震本震時の地表近傍すべりと浅部地盤が震源近傍のパルス性地震動に与える影響

Influence of Surface Rupturing and Shallow Subsurface Structure on Near-Fault Pulse-Type Motions during the 2016 Kumamoto Earthquake

*永野 正行¹、引間 和人²

*Masayuki Nagano¹, Kazuhito Hikima²

1. 東京理科大学、2. 東京電力ホールディングス

1. Tokyo University of Science, 2. Tokyo Electric Power Company

1. はじめに

2016年4月16日深夜に熊本地方で発生したM7.3の地震(以降、熊本地震本震)時には益城町で震度7の揺れを観測した。益城町中心部では、震度計、KiK-net, Hata et al.(2016)により本震時の強震記録が得られた。その特徴は、以下のようにまとめられる。①周期1秒を中心とする大振幅のパルス性地震動が得られた。②神戸・鷹取波を上回る振幅レベルとなっている。③主軸方向が断層平行方向となっている。④わずかな距離差で、振幅の差異が大きい。震源近傍で得られた大振幅パルスの生成要因として、地中断層、地表断層の寄与、深部、浅部地盤での地震動増幅等の影響が指摘されている。これらの影響を定量的に把握することは、震源断層近傍における構造物への入力地震動評価を策定する上で重要となる。本研究では、波形インバージョン解析によって得られた震源断層モデル[引間(2016)]を参照して、益城町中心部における理論地震動を評価し、各種パラメータの影響を評価する。

2. 評価方法、計算モデル

地盤構造は水平成層を仮定し、理論地震動の計算法として薄層法[永野・小山(2011)]を用いる。薄層法では、S波速度が数10m/sの浅部地盤から3km/s以上の地震基盤までの速度変化の大きい地盤構造を対象とした理論地震動評価が可能であり、地表断層を含めた水平成層地盤の地震動評価は理論計算手法のベンチマークテスト[久田・永野・他(2012)]で十分に検証されている。

地盤構造はKiK-net益城(KMMH16)でのPS検層結果を参照した。地震基盤より深部の構造については「長周期地震動予測地図」2012年試作版の全国1次地下構造モデルを参照した。震源断層の破壊過程は引間(2016)の結果(以下、破壊過程モデル)を参照した。破壊過程モデルでは2km×2kmのサブフォルト中心で1点のグリーン関数を評価している。震源近傍の地震動評価に際しては、グリーン関数の評価ポイントが影響する可能性もある。このため図1に示すように、2km×2kmのサブフォルトを10×10分割(0.2kmピッチ)とし、サブフォルト内の破壊伝播効果を考慮した。破壊過程モデルのサブフォルト内点震源で得られたすべり時間関数を、この分割モデルでそのまま利用すると算定される地震動が過小評価される。ここでは、破壊過程モデルのすべり速度関数はそのまま利用し、振幅についてはKMMH16の速度レベルと整合するように、全体を2.5倍に調整した。また破壊過程モデルの検討対象周期は0.05~0.8Hzである。ただし波形計算では、建物被害に影響を与える1秒パルスの重要性を鑑み、外挿とはなるが2Hzまでを評価した。

3. 地表近傍すべりと地盤構造がパルス性地震動に与える影響

本震時に得られたKMMH16の地震動を観測記録と比較した。地表記録で最大速度を生成するパルス位相は十分には再現できていないが、全体的な速度波形の傾向は地表、地中ともに捉えられている。ただし、KMMH16での計算波形の1秒前後の応答スペクトルは、観測記録に比べ過小評価となっている。

震源断層と観測地点の関係による振幅の違いを調べる。先に示したKMMH16と、町役場に近しいTMP1、被害甚大地域にあるTMP3で評価した地震動を比較した。KMMH16→TMP1→TMP3で最大速度やPSVの振幅レベ

ルが大きくなっており、特に1秒弱のPSV振幅はKMMH16とTMP3で1.5倍以上の違いが見られる。

次に浅部の断層破壊がKMMH16地点の地震動評価に与える影響を検討する。破壊過程モデルの最も浅い幅2kmのサブフォールト列を削除したケースをCASE-1、4kmのサブフォールト列を削除したケースをCASE-2とする。オリジナルモデルでの北面の最も浅い破壊点は深さ121m、CASE-1、CASE-2はそれぞれ深さ2053m、3984mである。

浅部の破壊領域がなくなると、最大速度は徐々に小さくなる。一方、1秒弱のPSV振幅は3ケースで大きく変化せず、周期2秒以上の長周期成分が低減する。すなわち、浅部のすべり破壊領域は、周期2秒以上の長周期成分に寄与していることが分かる。この原因の1つとして、浅部の最終すべり量は大きいものの、最大すべり速度が比較的小さくなっていることが挙げられる。

表2のKMMH16の地盤構造で、最小 V_s をNo.12の2.7m/sとし、No.1~11の地層をNo.12に置き換え、表層地盤の影響を取り除いた検討を行った。最大速度は大きく変化しないが、1秒弱のPSV振幅は大きく低減する。

4. まとめ

本震時のKMMH16等の地震動で周期1秒弱の成分が大きくなった原因は、深部のすべり破壊により生成された地震動+表層地盤の増幅による影響が大きく、浅部でのすべり破壊はより長周期の地震動成分の増幅に寄与したものと推定される。

キーワード：2016年熊本地震、震源近傍、パルス性地震動

Keywords: The 2016 Kumamoto earthquake, Near-Fault, Pulse-Type Motions

2016年熊本地震余震観測と微動アレー探査による熊本平野南北測線の地震動特性評価

The ground motion characteristics along a north-south line in the Kumamoto Plain, using earthquake and array microtremor observation data

*是永 将宏¹、津野 靖士¹、岡本 京祐¹、地元 孝輔²、山中 浩明²、山田 伸之³、松島 健⁴

*Masahiro Korenaga¹, Seiji Tsuno¹, Kyosuke Okamoto¹, Kosuke Chimoto², Hiroaki Yamanaka², Nobuyuki Yamada³, Takeshi Matsushima⁴

1. 公益財団法人鉄道総合技術研究所、2. 東京工業大学 環境・社会理工学院、3. 福岡教育大学、4. 九州大学大学院理学研究院附属地震火山観測研究センター

1. Railway Technical Research Institute, 2. Tokyo Institute of Technology, 3. Fukuoka University of Education, 4. Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Science, Kyushu University

筆者らは、平成28年（2016年）熊本地震発生以降、熊本平野における地震動特性を評価することを目的として、熊本平野西部を南北に縦断する測線において地震観測を実施している。本報告では、収録した地震記録から求めた各観測点での地盤増幅特性とともに、地震観測点周辺で実施した微動アレー観測記録によるS波速度構造の推定結果について報告する。

熊本平野南北測線の地震観測では、熊本平野北端部の金峰火山東麓から平野南端部の宇土半島に至る総長約15kmの区間に、300m～2.5km間隔で計15台の地震計を設置した。各観測点には、白山工業製口ガーLS8800とミツトヨ製加速度計JEP-6A3を設置し、地震計からの加速度信号を連続記録として100Hzサンプリングで収録しており、このうち測線北部の2地点では4月16日の本震（Mj7.3）の地震動を記録している。

阿蘇周辺を震源とする地震記録を用いて、基準観測点に対する各観測点のフーリエ振幅スペクトル比を求めることで地盤増幅特性の評価を行なった。基準観測点として、金峰山火山西麓の岩盤サイトである九州大学熊本観測点（KU.KMP1）と、宇土半島の火山岩類上に設置された臨時観測点の記録を用いた。スペクトルの算出にはS波到達から5秒間のデータを用い、0.4Hzのparzen windowによる平滑化を行なっている。その結果、沖積低地の広がる測線中部から南部にかけての観測点においては、全体として1～2Hz付近で大きく増幅される傾向が見られるが、その増幅倍率や3Hz以上の周波数帯域での特性に観測点ごとに違いが見られた。また、測線北端に近い観測点中の数箇所においては、沖積低地内の観測点よりも高い周波数（2～5Hz）にピークが見られる箇所や、増幅倍率が低い箇所もあり、熊本平野南北測線に沿った表層地盤の複雑な変化を示唆している。測線北部の観測点のスペクトル比は、1～3Hz付近でNS成分とEW成分の形状が大きく異なっていることが確認された。基準観測点と熊本平野の堆積層内のいずれか、またはその双方に、何らかの異方性があるものと推察されるが、その成因については今後の検討課題としたい。

次に、熊本平野南北測線の表層地盤による地震動増幅の違いについて検証を行なうために、各地震観測点周辺において微動アレー観測を実施した。上下動加速度計を辺長1.5m～24mの二重三角形とその中心に配置し、サンプリング周波数100Hzで10～20分間の測定を行なった。観測された微動アレー記録を用い、SPAC法によりレイリー波の位相速度を推定した後に、遺伝的アルゴリズム（GA）による逆解析を行なってS波速度構造を求めた。沖積低地内の観測点では、表層にS波速度100m/s程度の低速度層が堆積しており、観測点によってはその厚さが15m以上となっている場合があることが確認された。示したS波速度構造は速報的なものであるが、地震記録による増幅特性の結果とあわせて、熊本平野南北測線における地震動特性について議論を行なう。

キーワード：地震動特性、2016年熊本地震、熊本平野南北測線

Keywords: Ground motion characteristics, 2016 Kumamoto earthquake, North-south line in the Kumamoto Plain