

Overview of the 2016 Kumamoto earthquake

*Naoshi Hirata¹

1. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo

On April 16th, 2016 a devastating earthquake with $M_j=7.3$ occurred in Kumamoto, Kyushu, Japan. The earthquake was associated with prominent foreshocks.

Urgent joint seismic observation of the 2016 Kumamoto earthquake - Seismic activities and their background -

*Hiroshi Shimizu¹, Yoshihisa Iio⁸, Shin'ichi Sakai⁶, Tomomi Okada⁵, Hiroaki Takahashi³, Toshiki Watanabe⁷, Kazuhiko Goto², Takahiro Ohkura⁹, Youichi Asano¹⁰, Takeshi Matsushima¹, Yusuke Yamashita⁸, Manami Nakamoto¹, Masahiro Miyazaki⁸, Satoshi Matsumoto¹, Koki Aizawa¹, Azusa Shito¹, Kazunari Uchida¹, Rintaro Miyamachi¹, Megumi Kamizono¹, Yoshiko Teguri¹, Hiroki Miyamachi², Shigeru Nakao², Hiroshi Yakiwara², Shuichiro Hirano², Mako Ohzono³, Takahiro Shiina³, Takada Masamitsu³, Masayoshi Ichiyanagi³, Teruhiro Yamaguchi³, Okada Kazumi³, Masahiro Kosuga⁴, Ryosuke Azuma⁵, Naoki Uchida⁵, Kentaro Emoto⁵, Yusaku Ohta⁵, Toshiki Kaida⁵, Tomofumi Kozono⁵, Syuichi Suzuki⁵, Ryota Takagi⁵, Tomotsugu Demachi⁵, Hisashi Nakahara⁵, Takashi NAKAYAMA⁵, Satoshi Hirahara⁵, Toru Matsuzawa⁵, Satoshi Miura⁵, Mare Yamamoto⁵, Takaya Iwasaki⁶, Naoshi Hirata⁶, Takashi Iidaka⁶, Eiji Kurashimo⁶, Aitaro Kato⁶, Shigeki Nakagawa⁶, Yoshiko Yamanaka⁷, Takeo Ito⁷, Toshiko Terakawa⁷, Yuta Maeda⁷, Shinichiro Horikawa⁷, Kenjiro Matsuhiro⁷, Takashi Okuda⁷, Hiroshi Katao⁸, Yasuyuki Kano⁸, Tsutomu Miura⁸, Hiroo Tsuda⁸, Tomoya Muramoto⁸, Makoto Okubo¹¹, Tadashi Yamashina¹¹, Tomotake Ueno¹⁰

1.Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Sciences, Kyushu University, 2.Graduate School of Science and Engineering, Kagoshima University, 3.Graduate School of Science, Hokkaido University, 4.Graduate School of Science and Technology, Hirosaki University, 5.Graduate School of Science, Tohoku University, 6.Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 7.Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, 8.Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 9.Graduate School of Science, Kyoto University, 10.National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, 11.Research and Education Faculty, Natural Sciences Cluster, Sciences Unit, Kochi University

Large earthquakes of M6.5 and M7.3 occurred in April, 2016, in the Kumamoto prefecture, Kyushu, Japan. We are carrying out an urgent joint seismic observation by several universities and institutes in Japan in order to investigate the detailed feature of seismic activity of the Kumamoto earthquakes. In this observation, we installed more than sixty temporary seismic stations including eleven online telemetered stations in the inland area of middle Kyushu, which enable us to determine the space-time distribution of hypocenters and focal mechanism solutions.

The hypocenter of the M6.5 earthquake of April 14 locates beneath the northeastern end of the Hinagu fault zone. The aftershocks occurring before the M7.3 of April 16 were mainly aligned along an approximately 20 km long NE-SW trend, which roughly corresponds with the trace of the Futagawa-Hinagu fault zone. The hypocenters of the aftershock region were distributed on a nearly vertical plane at depths of 5 - 15 km, deeper at the central part and shallower at both NE and SW sides. The M6.5 was located near the central part of the aftershock region at a depth of approximately 13 km. The large aftershock of M6.4 occurred at the southwestern part of the aftershock region. The focal mechanism solution of the M6.5 is strike-slip fault type with N-S tension. These suggest the M6.5 earthquake was generated by a right-lateral strike slip of the nearly vertical Hinagu fault. However, both detailed hypocenter distribution and a nodal plane of the focal mechanism solution indicate the strike of the M6.5 fault is oblique to the trace of Hinagu fault.

The hypocenter of the M7.3 earthquake of April 16 locates about 5km WNW of the M6.5, and beneath the Futagawa fault zone. The aftershocks were roughly along the Futagawa-Hinagu fault zone, and induced earthquakes were activated along the Beppu-Shimabara graben. The hypocenters of the aftershock region were distributed at depths of 3 - 17 km dipping NW direction. The hypocenters at

both NE and SW sides of aftershock region are shallower, however, the NE and SW extension of aftershock region become relatively deeper again. The focal mechanism solution of the M7.3 is strike-slip fault type with NW-SE tension, and its nodal planes are not consistent with the trace of both Futagawa and Hinagu fault. These suggest the initial rupture of M7.3 earthquake occurred on the different plane from the main rupture. In the period between M6.5 and M7.3, the migration of seismicity was recognized from the hypocenter of M6.5 to that of M7.3, which may be related with a trigger mechanism of M7.3 earthquake.

The Futagawa-Hinagu fault zone was a seismically active region since the seismic network was established in this area. In June 2000, the M4.8 earthquake occurred at almost the same place of M6.5 of April 14, and the focal mechanism was very similar to that of M6.5. These suggest that the stress level on the fault in this area has been high until the outbreak of the 2016 Kumamoto earthquake.

Acknowledgements:

This work is partly supported by MEXT KAKENHI Grant Number 16H06298, the Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology of Japan under its Earthquake and Volcano Hazards Observation and Research Program, and Earthquake Research Institute, The University of Tokyo under Joint Usage Program.

Keywords: the 2016 Kumamoto Earthquake, urgent joint seismic observation, hypocenter distribution, seismic activity, Futagawa-Hinagu fault

Crustal deformation of the 2016 Kumamoto Earthquake

*Hiroshi Yarai¹, Tomokazu Kobayashi¹, Yu Morishita¹, Satoshi Fujiwara¹, Hiroshi Munekane¹, Yohei Hiyama¹, Satoshi Kawamoto¹, Basara Miyahara¹, SAR Analysis Group¹, GEONET Analysis Group¹

1. Geospatial Information Authority of Japan

Coseismic deformation derived from the 2016 Kumamoto Earthquake was observed by GNSS stations of the permanent GPS Earth Observation Network system (GEONET) and ALOS-2/PALSAR-2 interferometric SAR.

Clear coseismic displacements due to the Kumamoto earthquake were observed by GEONET. NE displacement of 75 cm and subsidence of 20 cm and SW displacement of 97 cm and uplift of 28 cm were detected at sites 0465 and 0701, which are located near the Futagawa fault zone, respectively. We have also successfully detected distributed ground displacements for the Kumamoto Earthquake by applying a SAR interferometry analysis of Advanced Land Observing Satellite 2 (ALOS-2) L-band data. The interferograms suggest that fault motion of the main shock has right-lateral motion on the Futagawa fault and the Hinagu fault.

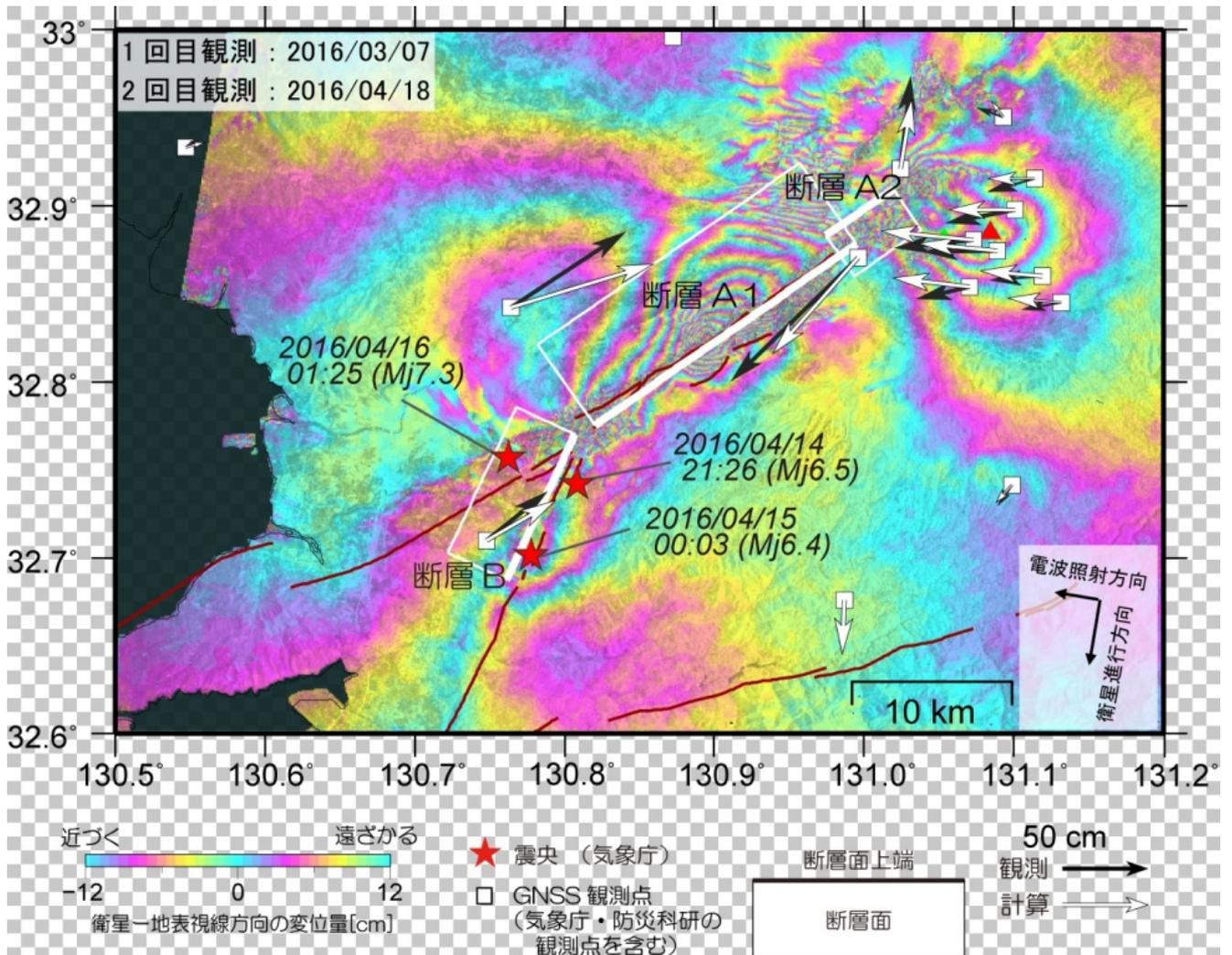
We invert the InSAR results with GNSS data to construct a fault model of the earthquake. A fault model consists of 3 rectangular faults with a uniform slip in an elastic half-space. The fault model shows that: a total major rupture length is about 35 km; a total moment magnitude is 7.07.

Postseismic deformation following the Kumamoto earthquake was detected by GEONET and ALOS-2 InSAR. Postseismic deformation up to 3 cm also has been observed by GEONET, showing a roughly similar deformation pattern to those associated with the mainshock. ALOS-2 interferograms show that subsidence about ~5 cm along the Futagawa fault zone.

Acknowledgements.

The PALSAR-2 data obtained by the ALOS-2 were provided by the Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA) through the Agreement between GSI and JAXA. The ownership of PALSAR-2 data belongs to JAXA.

Keywords: The 2016 Kumamoto Earthquake, crustal deformation, GNSS, SAR



Strain concentration zone based on GNSS data in southwest Japan and its possible application to a long-term forecast of inland earthquakes

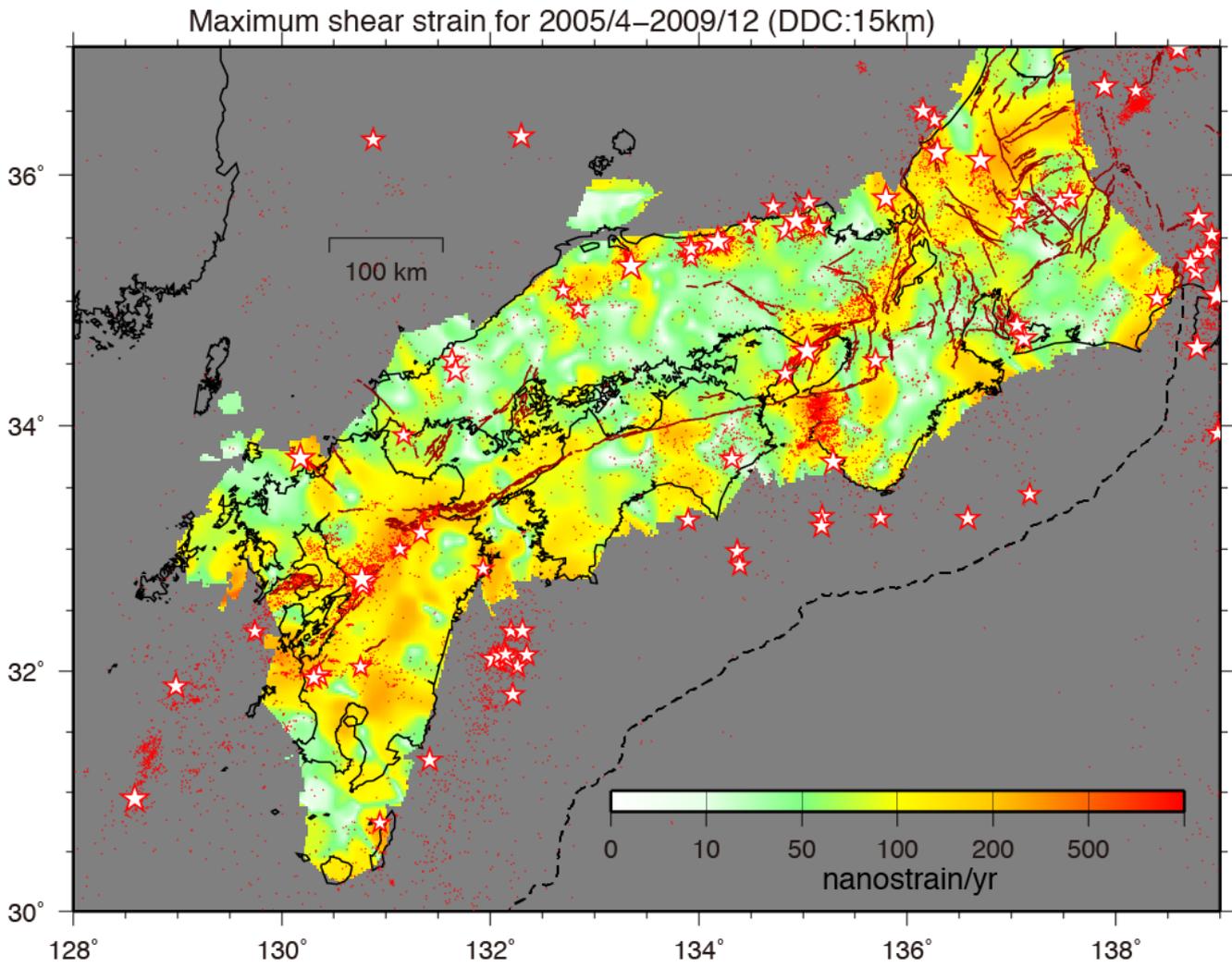
*Takuya NISHIMURA¹

1. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

Two-decades GNSS observations have clarified strain concentration zones including the Niigata-Kobe Tectonic Zone in an inland area of the Japanese Islands. We removed elastic deformation due to interplate coupling along the Nankai Trough from the GNSS velocity data observed from April 2005 to December 2009 and calculated distribution of areal and maximum shear strain rate to clarify strain concentration zones in the inland area. We compared the strain-rate distribution with epicenters of shallow inland large earthquakes with $M \geq 6$.

Most large earthquakes including the 2016 Kumamoto earthquake occur in the area of high rate of the maximum shear strain rate (Figure). Because the geodetically observed strain rate includes both elastic and inelastic strain, the strain rate is not directly related with an occurrence rate of earthquakes. However, the geodetic strain rate is an important data apparently related with earthquakes. It should be used as one of datasets to evaluate a long-term forecasting model of large earthquakes in the Japanese Islands.

Keywords: Strain concentration zone, GNSS, Inland earthquake



Distribution of surface rupture associated the 2016 Kumamoto earthquake and its significance

*Yasuhiro Kumahara¹, Hideaki Goto¹, Takashi Nakata¹, Satoshi Ishiguro², Daisuke Ishimura³, Tatsuya Ishiyama⁴, Shinsuke Okada⁵, Kyoko Kagohara⁶, Shintaro Kashihara⁷, Heitaro Kaneda⁷, Nobuhiko Sugito⁸, Yasuhiro Suzuki⁹, Daishi Takenami¹⁰, Kei Tanaka¹¹, Tomoki Tanaka⁷, Hiroyuki Tsutsumi¹², Shinji Toda⁵, Daisuke Hirouchi¹³, Nobuhisa Matsuta¹⁰, Tomokazu Mita¹⁴, Hikaru Moriki¹⁰, Haruka Yoshida¹⁵, Mitsuhsa Watanabe¹⁶

1.Hiroshima University, 2.Aichi Institute of Technology, 3.Tokyo Metropolitan University, 4.University of Tokyo, 5.Tohoku University, 6.Yamaguchi University, 7.Chiba University, 8.Hosei University, 9.Nagoya University, 10.Okayama University, 11.Japan Map Center, 12.Kyoto University, 13.Shinshu University, 14.Kagoshima University, 15.Fukuoka Prefectural Yame High School, 16.Toyo University

A Mj 6.5 earthquake hit Kumamoto prefecture, central Kyushu, southwest Japan at 21:26 JST on April 14th. 28 hours after, another Mj 7.3 at 01:25 JST on April 16 generated severe shaking in the same region (JMA, 2016). It is well known previously mapped the ~100-km-long active fault called Futagawa-Hinagu fault zone (FHFZ) (Watanabe et al., 1979; RGATK, 1989; Ikeda et al., 2001; Nakata and Imaizumi ed, 2002) runs in the epicentral area, we considered the northeastern portion of the FHFZ could be responsible to two earthquakes and started to do a field reconnaissance along the fault zone after the Mj 6.5 event. According to 3 weeks field survey by our team, we found the 31-km-length successive surface rupture close to the traces of the northeastern portion of the FHFZ and another the 5-km-length rupture on a part of Denokuchi fault and some possible surface ruptures in the epicentral area. The rupture along the FHFZ shows right-lateral strike-slip mainly (~ 2 m in maximum between Dozon in Mashiki city and Nishihara village) with down-thrown to northwest. The rupture on the Denokuchi fault, far from 1 to 2km east of the FHFZ, is normal component with down to northwest. These coseismic ruptures of the Mj 7.3 earthquake represented a characteristic movement of the northeastern portion of the FHFZ. A series of the open cracks with NW-SE-trending were traceable for a distance of 5.4 km from Kengun to Shirakawa River in Kumamoto city. Those features followed on tectonic landform by possible active fault and on the line of the fringe abnormal in InSAR image, and may represent minor surface rupture. The local eyewitness and our observation revealed that the coseismic minor rupture of the Mj 6.5 earthquake prior to the Mj 7.3 earthquake were emerged on the some trace of the rupture of the Mj 7.3 earthquake in Mifune town and South of Mashiki town. Seismic inversion theory by DPRI, Kyoto Univ (2016) showed that the coseismic rupture propagated toward ENE along the strike of the FHFZ, and asperity on surface was recognized 10 km far from the epicenter, where we surveyed the maximum displacement of right lateral strike slip close to Nishihara village. JMA (2016):

<http://www.jma.go.jp/jma/press/1604/16a/201604160330.html> The Research Group for Active Tectonics in Kyushu ed. (1989): Active tectonics in Kyushu, Tokyo University Press. Ikeda et. al., (2001): Active fault map in urban area [Kumamoto]. GSI Nakata and Imaizumi ed. (2002): Digital active fault map of Japan. Tokyo University Press. DPRI, Kyoto Univ. (2016): This work was supported by JSPS KAKENHI Grant Number 16H06298.

Keywords: Surface rupture, 2016 Kumamoto earthquake, Active fault

Strong motion and source processes of the 2016 Kumamoto earthquake sequence

*Shin Aoi¹, Takashi Kunugi¹, Wataru Suzuki¹, Hisahiko Kubo¹, Nobuyuki Morikawa¹, Hiroyuki Fujiwara¹

1.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

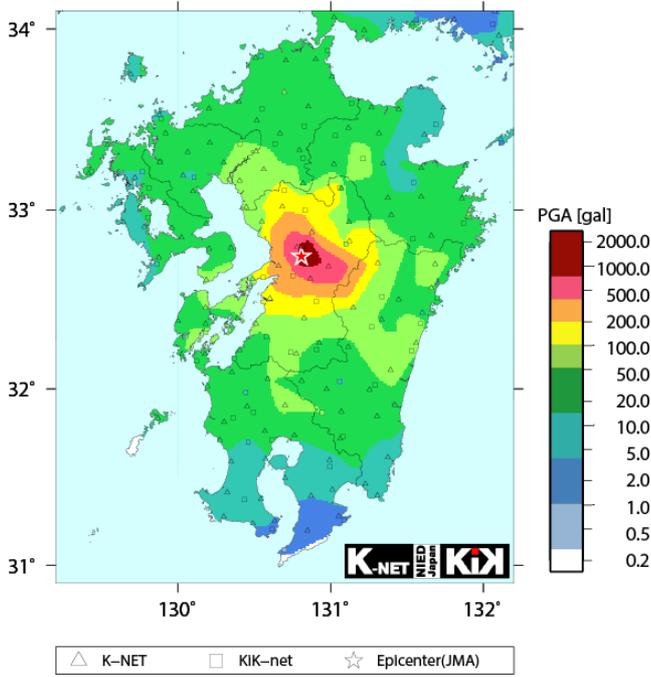
M6.5 (Mw 6.1) and M7.2 (Mw 7.1) earthquakes respectively attacked the Kumamoto region at 21:26 on April 14 and 28 hours later at 1:25 on April 16, 2016. Strong shaking with JMA seismic intensity (INT) 7 were observed for the both earthquakes at the Mashiki town of the Kumamoto prefecture. These earthquakes are considered to rupture mainly the Hinagu fault zone (Takano-Shirahata part) and the Futagawa fault zone (Futagawa part). The Headquarter for Earthquake Research Promotion performed the long-term evaluation of the fault zones with M7-calss potentials, and seismic hazard assessment estimated more than INT 6+. We here call the M6.5 event and the M7.3 event that occurred on the individual fault zones.

KiK-net Mashiki (KMMH16) recorded PGA more than 1000 gal, and ground motions were observed wider area for the 7.3 event than the M6.5 event. PGAs and PGVs of K-NET/KiK-net stations are consistent with the empirical attenuation relationship of Si and Midorikawa (1999). PGVs at longer distance than 200 km attenuate slowly, indicating the effect of Lg wave of western Japan. 5% pSv of the Mashiki town in Kumamoto shows a peak of 1-2 s that exceeds ground motion response of JR Takatori of the 1995 Kobe earthquake and the Kawaguchi town in Niigata of the 2004 Chuetsu earthquake. KiK-net Mashiki that locates 640 m apart from the Mashiki town observed large ground motion with a peak of 1 s. 5% pSv of the Nishihara village in Kumamoto shows 350 cm/s peak at 3-4 s. Ground motions at several stations in Oita exceed the attenuation relationship due to a triggered earthquake by the M7.3 event. PGAs of K-NET Yufuin (OIT009) records 90 gal for the M7.3 event and 723 gal for the near-by triggered event.

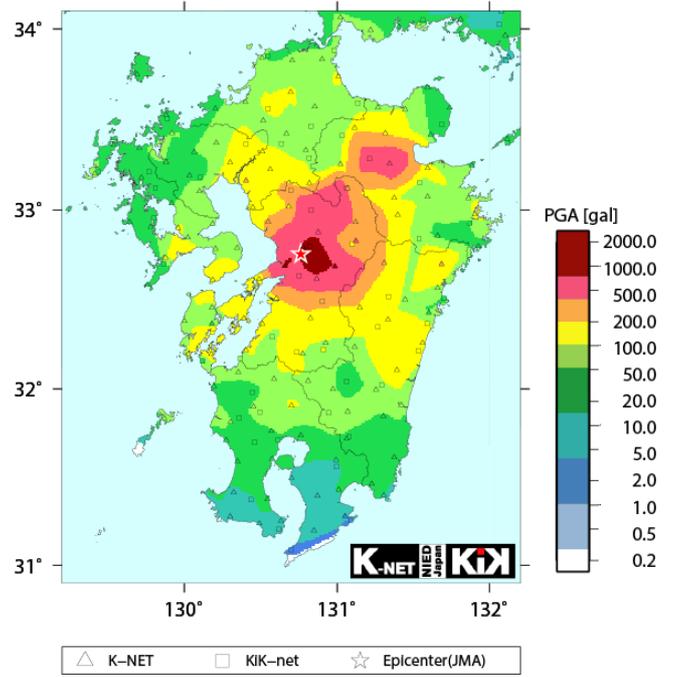
Source processes are analyzed using 16 and 27 K-NET/KiK-net/F-net strong motion stations located within an epicenter distance of 50 km and 100 km for the M6.5 and M7.3 events, respectively. Two pulses are observed at many station for the M6.5 event, and corresponding two slips near the hypocenter with a peak of 0.7 m and at north-northeastern with 0.6 m. As for the M7.3 event, large slip does not inverted for around 5 s after the earthquake initiation, then rupture propagated toward the northeastern shallow part reaching near the caldera of the Aso volcano with large slip with a peak of 4.6 m. The shallow slip is consistent with active fault surveys.

Keywords: the 2016 Kumamoto earthquake, strong motion, source process

2016/04/14-21:26 M6.5



2016/04/16-01:25 M7.3



Rupture process of the 2016 Kumamoto earthquake based on waveform inversion with empirical Green's functions

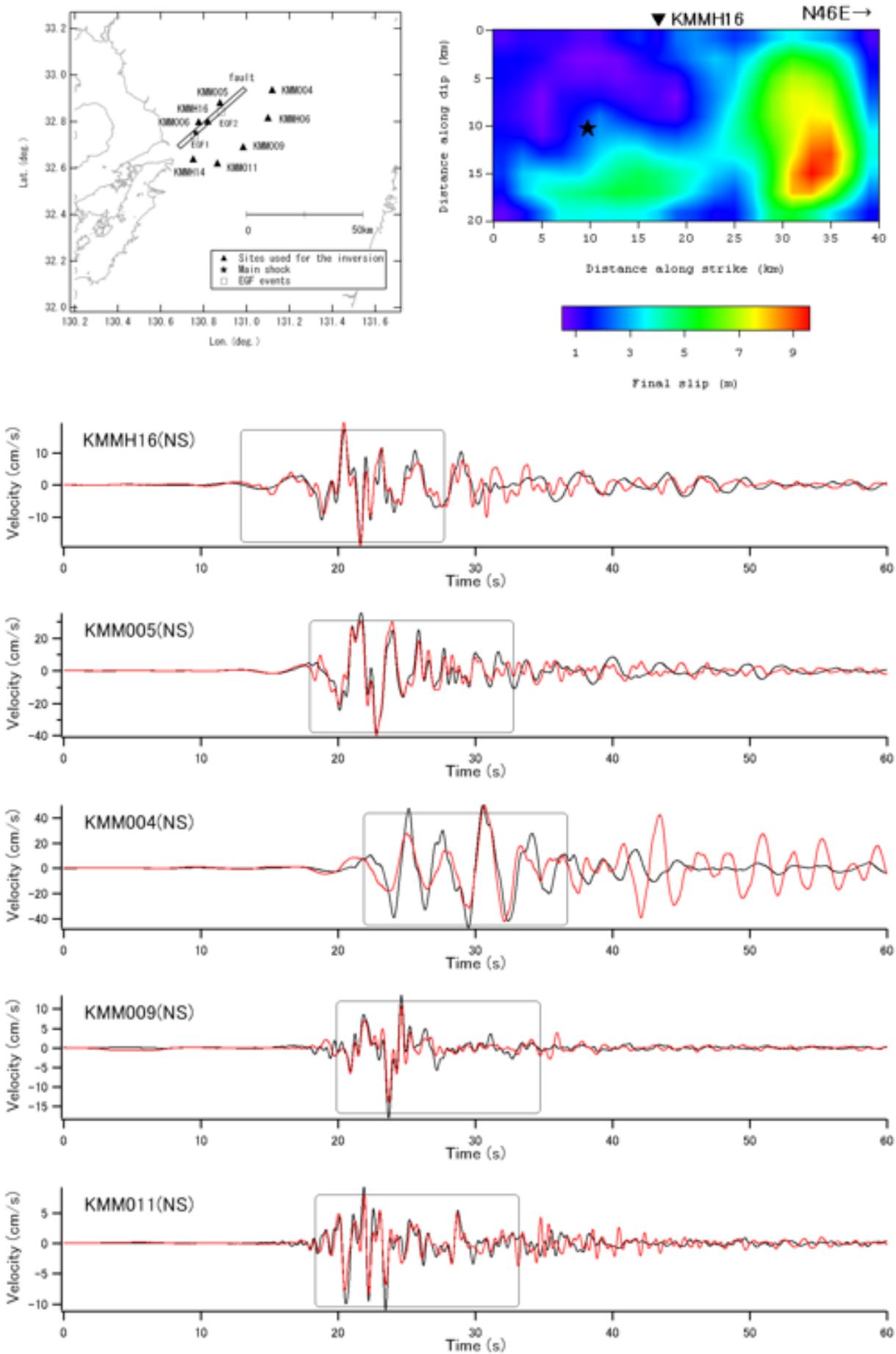
*Atsushi Nozu¹

1. Port and Airport Research Institute

Rupture process of the 2016 Kumamoto earthquake was estimated based on waveform inversion with empirical Green's functions. Records from two small events, namely, the April 15 0:50 event ($M_j=4.2$) and the April 15 15:27 event ($M_j=4.2$) were used as empirical Green's functions. The conventional least-squares linear waveform inversion (Hartzell and Heaton, 1983) was adopted. A fault plane with a dimension of 40 km times 20 km was assumed, whose strike and dip angles were set to be 46 and 96 degrees, respectively. The fault was divided into 20 times 10 fault elements. The rupture front is assumed to start at the JMA hypocentral time and to propagate radially at a constant velocity of 2.5 km/s. The moment rate function at each fault element after passage of the rupture front was assumed to be a convolution of the moment rate function of the small event and an impulse train. The impulse train is composed of 12 impulses at equal time intervals of 0.25 s. The height of each impulse was determined through the inversion. Conventional corrections for the geometrical spreading and time shifts (Irikura, 1983) were applied to the empirical Green's functions to represent arrivals from each fault element. The shear wave velocity in the source region was assumed to be 3.55 km/s. Absolute time information for both the main shock and small event recordings was used.

The result indicates that both slip and slip-velocity were small in the west of the hypocenter. Between the hypocenter and KMMH16 (Mashiki), a large slip and slip-velocity region existed but it was restricted at the deeper part of the fault, indicating that the large amplitude ground motion in Mashiki was not a result of a forward directivity effect. A region of significantly large slip and slip-velocity existed about 20 to 25 km east of the hypocenter.

Keywords: 2016 Kumamoto earthquake , rupture process, empirical Green's function, waveform inversion, strong ground motion



The cause of heavy damage concentration in downtown Mashiki-cho inferred from observed data and field survey

*Hiroshi Kawase¹, Shinichi Matsushima¹, Fumiaki Nagashima², Yintu Bao¹

1.Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 2.Graduate School of Eng., Kyoto University

To understand the cause of the damage during the mainshock of the 2016 Kumamoto earthquake sequence, we carried out field survey from 29 April through May 1, in Mashiki Town, including microtremor observation. We have extracted sufficient information from which we can infer the cause of the heavy damage concentrated in Downtown Mashiki, where strong motions with JMA seismic intensity of 7 were observed.

First the fundamental features of the structural damage in the damage concentrated area (DCA) in Downtown Mashiki were summarized. The damage concentration starts from the west of the National Highway R.443 and extends to the east of the Prefectural Road R.235, about 1.5km to 2km in the east-west direction. In the north-south direction it spreads about plus/minus 300m on both sides of the Prefectural Road R.28. The main features need to report are as follows:

- 1) inside DCA, not only old (and so weak) wooden houses but also new and reinforced houses were damaged;
- 2) there are many old buildings that have successfully survived outside of the heavy damage lines in the east-west (EW) direction;
- 3) the damaged houses look aligned to some lateral extent (50 to 100 m) in EW direction;
- 4) The deformed direction of the collapsed or heavily inclined houses were mostly in EW direction (attached photo). Overturning direction of tombstones were also in EW direction;
- 5) Almost always significant ground deformation, failure, and cracks can be seen in the paved roads crossing the above damage lines.

Next, inside DCA we measured microtremors covering about 700m by 1km with about 100m intervals. Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio of Microtremors (MHVRs) at three selected sites deployed at the northern end, in the center, and at the southern end of DCA were compared. The observed MHVRs share the common peak in the vicinity of 2 to 3Hz, with the level of 4 to 5. This MHVR characteristics suggest that the subsurface structure may have moderate impedance contrast at certain depths but that the differences in MHVRs at these three stations are so small that it is impossible to explain DCA creation by the spatial difference of soil structures below.

Finally by using the observed strong motion records at the Mashiki Town Office and a nonlinear response analysis model, which was calibrated to reproduce observed damage ratios of wooden houses during the 1995 Kobe earthquake, we calculated the estimated damage ratios at the Mashiki Town Office. We found that more damage would have occurred in the EW component than in the NS component. We also found that the calculated damage ratio was only 30% at most. This means that the observed ground motions in DCA were not surprisingly strong to wooden houses.

Based on these survey results, the mainshock hypocenter location, and AIST GSJ information on mapped active faults and InSAR on their web site, we may conclude that DCA in Mashiki was created by the complex interaction of both strong ground motions and crustal deformation associated with the fault movement and subsequent ground failures, rather than the simple strong shaking alone. The

reason for this conjecture is as follows:

- 1) The ground motion there was not strong enough to create such a large damage as had been observed.
- 2) The damage in the fault-parallel direction was dominant, rather than the fault-normal direction which is supposedly stronger.
- 3) The damage lines were continuous in the EW direction only. Ground deformation, failure, and cracks were observed in the roads across these damaged lines.
- 4) Inside of the damage lines some newly-constructed houses were damaged, while outside of the damage lines even old houses could sometimes survive with the minor damage.
- 5) It is not likely to have strong velocity variations beneath DCA.
- 6) The active fault map by GSJ shows a branching fault along the Prefectural Road R.28 (Kiyama fault). The western end of Kijima fault is the eastern end of DCA. This is so because in DCA the fault displacements associated with the earthquake have been distributed in a wide area. Variation of crustal movement in InSAR contours also shows spreading motions there including DCA.
- 7) The mainshock hypocenter seems to be on the far western extension of Kijima fault. We can confirm from the InSAR contours that Kijima fault actually corresponds to the northern end of the crustal deformation there.

Keywords: microtremors, damage in wooden houses, crustal deformation



Characteristics of landslide disaster induced by the 2016 Kumamoto earthquake in and around Minamiaso Village, southwestern Japan

*Yasuo Miyabuchi¹

1.Faculty of Education, Kumamoto University

The Kumamoto earthquake (Mj7.3) on April 16, 2016 triggered numerous landslides in and around Minamiaso Village, the western part of Aso caldera, central Kyushu, southwestern Japan. The landslides were divided into two types: landslides occurring at steep caldera walls and landslides generated on the slopes of the post-caldera central cones of Aso Volcano. Several landslides occurred on slopes steeper than 25° at the northwestern to western caldera walls, which comprise pre-Aso volcanic rocks (lavas and pyroclastics). The largest landslide (ca. 300 m high, 130-200 m wide) occurred on the western caldera wall, and damaged the National Route 57 and the Hohi line of the Japan Railway. Because any clear rupture surface could not be observed, unstable blocks which had been divided by cracks were likely to be collapsed due to the intense earthquake on April 16. At the post-caldera central cones of Aso Volcano, the April 16, 2016 earthquake-induced landslides occurred not only on steep slopes but also on slopes gentler than 10°. They occurred in unconsolidated superficial tephra deposits overlying lavas and agglutinates, and the thickness of the slides usually ranged from 4 to 8 m. The sliding masses traveled long distances (<600 m), comparing to small differences in elevation. The deposits were composed of tephra blocks of a few meters and there was no evidence that they were transported by water. These facts suggest that some landslides mobilized rapidly into debris avalanches, traveling a few hundred meters. The associated debris avalanche resulted in five casualties and severe damages of houses at the foot of Takanoobane lava dome.

The characteristics of the April 16, 2016 earthquake-induced landslides are different from those of rainfall-induced landslides in July 2012, June 2001 and July 1990 at Aso Volcano, and provide important information for preventing or mitigating future landslide disasters in the Aso caldera region.

Keywords: the 2016 Kumamoto earthquake, landslides, debris avalanches, tephra deposits

Problems associated with the active fault assessments and analyses of the destructive 2016 Kumamoto earthquake

*Yasuhiro Suzuki¹, Mitsuhsa Watanabe², Takashi Nakata³

1.Nagoya University, 2.Toyo University, 3.Hiroshima University

The 2016 Kumamoto earthquake occurred with the activity of a known active fault. Although it could be possible that the latest long-term predictions by the Headquarters for Earthquake Research Promotion are correct, there are still unresolved problems regarding 1) the earthquake mechanism itself, 2) the extent of damages caused by strong ground motion, and 3) the emergence of unknown earthquake faults.

The active fault was assessed two times in 2002 and 2013. According to the evaluation in 2002, the faults extending from Aso to the Yatsushiro Sea were regarded as a series of active faults, which were collectively referred to as the Futagawa-Hinagu fault. In contrast, the evaluation in 2013 divided the Futagawa and Hinagu faults into separate systems by taking into account underground geology within the Kumamoto plane. This later assessment concluded that the Futagawa fault extends from Aso toward the Uto Peninsula, and furthermore, that the Hinagu fault extends from Togawa in Mashiki to the Yatsushiro Sea. However, the "Active Fault Map in Urban Area" regards the Futagawa fault as continuing further south of Togawa because the tectonic landforms were smoothly traced. Among the several estimations mentioned above, we should check which one is more appropriate. On the basis of the 2002 evaluation, it is possible to say that the earthquakes on April 14th and 16th occurred continuously along the northeastern part of the Futagawa-Hinagu fault. On the other hand, based on the 2013 evaluation, the two earthquakes appear to have occurred irregularly on different parts of the different faults. According to the 2002 evaluation, the former earthquake on April 14th should be regarded as a "one size smaller earthquake" than the expectations, whereby the possible occurrence of a bigger one was mentioned.

The locality of the Futagawa-Hinagu fault had already been indicated on the large-scale active fault map, and the earthquake faults appeared on the fault line. However, several secondary faults emerged at other places. In particular, an earthquake fault with a total length of 4 km appeared, and it produced extensive damage in the town of Mashiki. We should thus carefully check the reason why this fault was not identified prior to the 2016 earthquakes.

Within the vicinity of the Futagawa fault, severe damage occurred. Especially, in the town of Mashiki where high seismic intensities were recorded on April 14th and 16th, numerous buildings collapsed during the earthquake on April 16th. The "severely damaged zone," which was approximately 1 km in width, trended in the east-west direction. In the village of Minami-Aso, several traces of earthquake faults were discovered, and almost all of the buildings located on these faults collapsed. At least five cars overturned onto their sides in the northward direction. Such phenomenon had not been observed before in Japan. These events are estimated to have been the result of an S wave in the orthogonal direction along strike-slip faults.

There is a need to re-examine the segmentation and groupings of the faults. The 2016 earthquakes indicate that the fault should not be divided if the tectonic landform is smoothly continued. There is also a need to explain why such high seismic intensity of 7 occurred along the Futagawa-Hinagu fault. Although the present theory of strong ground motion postulates that a shallow portion of the crust never generated strong motion, the narrow distribution of damage seems to imply some contribution from breaks at the shallow portion of the crust. In regard to this issue, the distribution of seismic intensity of 7 will need to be officially mapped by the Japan Meteorological Agency. In the field of disaster prevention awareness, it is often heard that strong

earthquakes can happen anywhere, but this could be misleading. It will be necessary to specify the areas where the seismic intensity could reach 7 for disaster prevention. It will also be important to verify the reason why the branch faults could not be identified before the 2016 earthquakes. Needless to say, active fault assessments for regions harboring nuclear power plants require further rigor. Although the Nuclear Regulation Authority may say that they can identify the potential active branch faults prior to the earthquake, it is essential to verify this assessment.

Keywords: Active fault, Earthquake disaster prevention, Earthquake fault, Strong ground motion

平成28年(2016年)熊本地震について

Overview of The 2016 Kumamoto Earthquake

*鎌谷 紀子¹、山田 尚幸¹、石垣 祐三¹、武田 清史¹、黒木 英州¹、高濱 聡¹、森脇 健¹、山本 麦¹、上田 満治¹、山内 崇彦¹、田中 美穂¹、小松 陽子¹、迫田 浩司¹、廣田 伸之¹、菅ノ又 淳一¹、川合 垂紀夫¹、森田 裕貴¹、案浦 理¹、西前 裕司¹、青木 重樹¹、古謝 植之¹、中村 浩二¹、青木 元¹、橋本 徹夫¹

*Noriko Kamaya¹, Naoyuki Yamada¹, Yuzo Ishigaki¹, Kiyoshi Takeda¹, Hidekuni Kuroki¹, Satoshi Takahama¹, Ken Moriwaki¹, Mugi Yamamoto¹, Mitsuharu Ueda¹, Takahiko Yamauchi¹, Miho Tanaka¹, Youko Komatsu¹, Kouji Sakoda¹, Nobuyuki Hirota¹, Jun-ichi Suganomata¹, Akio Kawai¹, Yuki Morita¹, Satoshi Annoura¹, Yuji Nishimae¹, Shigeki Aoki¹, Naoto Koja¹, Koji Nakamura¹, Gen Aoki¹, Tetsuo Hashimoto¹

1. 気象庁地震火山部

1. Japan Meteorological Agency

1 はじめに

2016年4月14日21時26分に熊本県熊本地方の深さ11kmでM6.5の地震(最大震度7)が発生し、その28時間後にM7.3の地震(最大震度7)が発生した。続けて大分県中部でM5.7(参考値)、約1時間半後には熊本県阿蘇地方でM5.9(最大震度5強)の地震が発生するなど、地震活動域は熊本県から大分県にかけての広い範囲にわたり、最大震度5弱以上の地震だけでも18回発生した(2016年5月5日現在)。気象庁は、この一連の地震活動につき「平成28年(2016年)熊本地震」と命名した。

この地震活動は陸域の地殻内で発生したものであり、政府の地震調査研究推進本部地震調査委員会は、熊本県熊本地方で発生した地震について、主に布田川断層帯及び日奈久断層帯の一部区間の活動によるものと評価した。

2 震源分布及び発震機構

震源は、別府-島原地溝帯と呼ばれる領域内の、北東-南西方向の帯状の範囲内に分布している。今回、検測値を用いてDD法により震源計算を行った結果得た震源分布は、主に垂直~北西に傾き下がる断層面があることを示しており、特に布田川断層帯と日奈久断層帯の交点付近では複雑な断層面があることを示唆している。また、DD法による震源計算結果からは、今回の地震活動のうち、大分県中部の地震活動の震源分布は、それ以前の地震活動の震源があまりない場所に分布しているように見える。

初動を用いて算出した発震機構解は、主に南北方向に張力軸を持つ横ずれ断層型であるが、布田川断層帯付近で発生している地震には正断層型も混在している。

3 震源過程解析及びバックプロジェクション解析

国立研究開発法人防災科学技術研究所の強震観測網(K-NET, KiK-net)の近地強震波形を用いた震源過程解析を行った。解析結果は、4月16日のM7.3の地震の滑りは破壊開始点から北東方向に広がり、阿蘇山付近まで及んでいることを示唆している。

また、同じくM7.3の地震について行ったバックプロジェクション解析では、布田川断層帯付近で始まったエネルギー放出は、日奈久断層帯にまで及んでいるように見える。

4 情報発表

気象庁は、4月14日M6.5の地震をはじめとする19個の地震に対し、緊急地震速報(警報)を発表した。

また、長周期地震動階級については、4月14日M6.5の地震では熊本県熊本地方で最大階級3、4月15日00時03分M6.4の地震では熊本県熊本地方で最大階級4、4月16日M7.3の地震では熊本県熊本地方および熊本県阿蘇地方で最大階級4を観測した。階級4を観測したのは、2013年3月の長周期地震動に関する観測情報(試行)の発表開始以来はじめてである。

気象庁は、4月14日21時26分のM6.5(最大震度7)の地震発生を受け余震発生確率を発表したが、その後のM7.3の地震発生及び地震活動域の拡大により、今回の地震活動は単純な本震-余震型ではないことから一連の地

震活動の予測をすることは困難として、その後の余震発生確率の発表は行わず、防災上の観点から、活発な地震活動への備えを呼びかけた。

(謝辞)

本研究には、地方公共団体及び国立研究開発法人防災科学技術研究所(NIED)から提供された震度計観測データの他、大学やNIED等関係機関からの地震観測データを文部科学省と協力して整理したもの及び2016年熊本地震緊急観測グループのオンライン臨時観測点(河原、熊野座)のデータを使用させていただきました。

キーワード：熊本地震、DD法、震源過程解析、バックプロジェクション解析、長周期地震動、地震情報

Keywords: Kumamoto Earthquake, Double-Difference Method, Seismic Source Process Analysis, Source Scanning Algorithm, Long-period Earthquake Ground Motion, Earthquake Information

平成28年(2016年)熊本地震 一詳報一

The 2016 Kumamoto Earthquake -Seismic Activity and Earthquake Information issued by JMA-

*鎌谷 紀子¹、山田 尚幸¹、石垣 祐三¹、武田 清史¹、黒木 英州¹、高濱 聡¹、森脇 健¹、山本 麦¹、上田 満治¹、山内 崇彦¹、田中 美穂¹、小松 陽子¹、迫田 浩司¹、廣田 伸之¹、菅ノ又 淳一¹、川合 垂紀夫¹、森田 裕貴¹、案浦 理¹、西前 裕司¹、青木 重樹¹、古謝 植之¹、中村 浩二¹、青木 元¹、橋本 徹夫¹

*Noriko Kamaya¹, Naoyuki Yamada¹, Yuzo Ishigaki¹, Kiyoshi Takeda¹, Hidekuni Kuroki¹, Satoshi Takahama¹, Ken Moriwaki¹, Mugi Yamamoto¹, Mitsuharu Ueda¹, Takahiko Yamauchi¹, Miho Tanaka¹, Youko Komatsu¹, Kouji Sakoda¹, Nobuyuki Hirota¹, Jun-ichi Suganomata¹, Akio Kawai¹, Yuki Morita¹, Satoshi Annoura¹, Yuji Nishimae¹, Shigeki Aoki¹, Naoto Koja¹, Koji Nakamura¹, Gen Aoki¹, Tetsuo Hashimoto¹

1.気象庁地震火山部

1.Japan Meteorological Agency

2016年4月14日21時26分に熊本県熊本地方の深さ11kmでM6.5の地震(最大震度7)が発生し、その28時間後にM7.3の地震(最大震度7)が発生した。続けて大分県中部でM5.7(参考値)、約1時間半後には熊本県阿蘇地方でM5.9(最大震度5強)の地震が発生するなど、地震活動域は熊本県から大分県にかけての広い範囲にわたり、最大震度5弱以上の地震だけでも18回発生した(2016年5月5日現在)。気象庁は、この一連の地震活動につき「平成28年(2016年)熊本地震」と命名した。

本ポスターでは、熊本県から大分県にかけて活発化した、一連の地震活動に関する気象庁の解析結果の他、気象庁が発表した情報について報告する。

(予稿については別発表「平成28年(2016年)熊本地震について」も参照。)

(謝辞)

本研究には、地方公共団体及び国立研究開発法人防災科学技術研究所(NIED)から提供された震度計観測データの他、大学やNIED等関係機関からの地震観測データを文部科学省と協力して整理したものと及び2016年熊本地震緊急観測グループのオンライン臨時観測点(河原、熊野座)のデータを使用させていただきました。

キーワード: 熊本地震、DD法、震源過程解析、バックプロジェクション解析、長周期地震動、地震情報

Keywords: Kumamoto Earthquake, Double-Difference Method, Seismic Source Process Analysis, Source Scanning Algorithm, Long-period Earthquake Ground Motion, Earthquake Information

2016年熊本地震と地震活動の特徴

The 2016 Kumamoto earthquake M7.3

*石川 有三¹*Yuzo Ishikawa¹

1.国立研究開発法人 産業技術研究所 活断層・火山研究部門

1.The National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

1. はじめに

4月16日01時25分にM7.3の地震が熊本県で起き、最大震度7が2カ所で観測された。これは4月14日21時26分にM6.5、15日00時03分にM6.4の地震が起きた後だった。結果的にこれらM6級の二つの地震は、前震であった。このようなM6級の前震をもつM7級の地震は、非常に珍しく日本付近では1909年房総半島沖の地震（前震M6.7、本震M7.5）しか知られていない。西村(2016)によると世界的にもM6の地震が起きた直後2週間以内にM7が起こった事例は0.3%しかないと示されている。このため、14日と15日の地震が起きた時点で、16日の本震は残念ながら予想されていなかった。

16日の本震後、阿蘇地方と大分県にも地震が起き始めた。これらの地震も含めてそれぞれの地震活動の特徴を明らかにする。

2. 各地震群の特徴

まず、今回の地震活動の大きな特徴は活発な地震活動である。気象庁に地震観測が一元化されて以降（1997年10月）、内陸の地震の余震ではこれまで最多であった2004年中越地震の約1.5倍の数の余震が起きている（約一ヶ月間）。また、本震の震源域周辺だけでなく、飛び離れた阿蘇地方や大分県中部でもM5クラスの地震が起きている。そしてそれぞれの活動の間には、

1975年1月23日M6.1阿蘇地方の地震や1975年4月21日M6.4大分県中部地震の震源域と九重火山を挟んでいる。メカニズムについては、グローバルCMTグループの解で見るとP軸は東西方向に近く、T軸は南北方向に近い横ズレ断層型。南部九州の応力場とは異なり、北部九州の地震と似ている。

b値は、2016/04/14のM6.5の余震（M7.3の直前まで）のb値は、0.74（JMA下限M3.2）とやや小さかったが、2016/04/16の本震M7.3の余震（2日間）のb値も0.85（JMA下限M3.5）と大きくない。しかし、同じ日奈久断層で起きた2000年6月8日M5.0の地震の余震のb値は、0.61（JMA下限M1.4）と小さく、M6.5の余震活動のb値だけからこの活動を前震であると推定するのは無理であった。一方、2016/04/16 03:03 M5.9 阿蘇西側の余震（5日間）のb値は、0.9-1.0（JMA）、2016/04/16 03:55 M5.8 阿蘇東側の余震（5日間）のb値は、0.8（JMA）、2016/04/16 07:11 M5.4 大分県の余震（10日間）のb値は、1.0（JMA下限M2.5）とb値はそれほど大きくない。

3. 今後の可能性と問題

本震の震度分布を見ると東側へだけ遠くまで大きな震度になっている。これは本震の破壊が震源断層面の西端から東へ伝わった影響も考えられるが、地下構造の影響と思われる。このように大きな震幅値の観測点が多かった場合、Mが過大に決まってしまう恐れがある。

火山噴火との関連性については、過去の九州内陸の大地震の直後に火山噴火が起きた例は無い。唯一、1922年12月8日M6.9橘湾の地震の約1カ月後に阿蘇山が噴火した例があるが、過去の地震で震源断層が火山裾野まで達した例はなく、注意しておく必要はある。

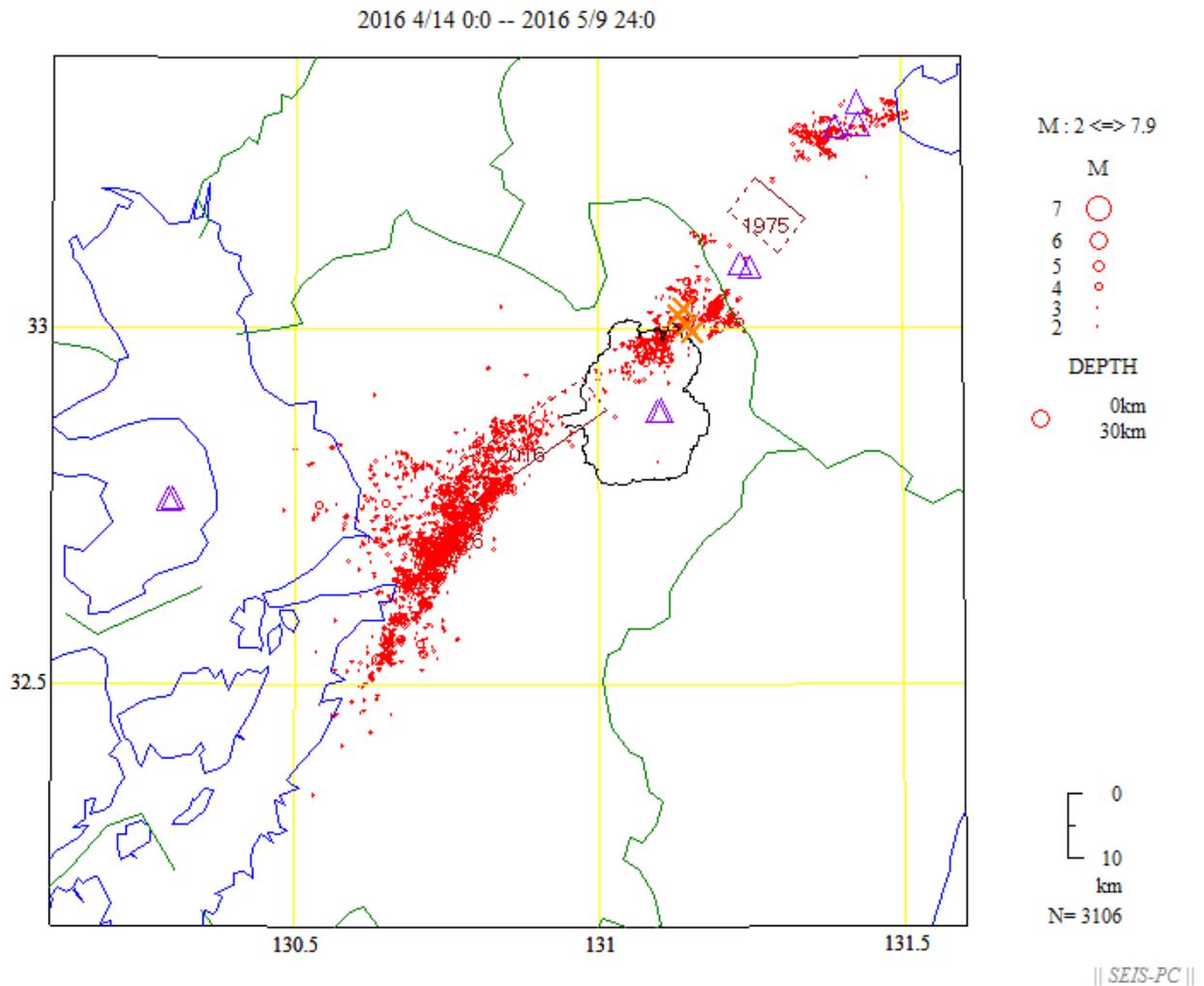
今回の熊本地震は、1995年M7.3兵庫県南部地震に始まり、1997年M6.6山口県北部の地震、2000年M7.3鳥取県西部地震、2005年M7.0福岡県西方沖の地震に続くもので、南海トラフの巨大地震発生前の陸側プレート内での地震活動の活発化の現れと思われる。

今回のように前震活動があった場合、その活動の特徴を早期に解明する必要がある。そのためには、人による信頼度の高い震源情報だけでなく、自動震源データの長期保存と公開が望まれる。

図の説明：4月14日以降の気象庁一元化震源によるM2以上の震源分布。最大前震、本震、1975年大分県中部地震は震源断層モデルと矩形で示した。△は活火山で阿蘇山の外輪山も示した。x印は1975年阿蘇地方の地震の震源でM5以上のもの。

キーワード：熊本地震、b値、火山噴火

Keywords: Kumamoto earthquake, b value, volcanic eruption



2016年熊本地震の活動と発震機構解、応力場（序報）

Focal mechanisms of 2016 Kumamoto earthquake activity and its relation to the stress field (preliminary report)

*松本 聡¹、山下 裕亮²、中元 真美¹、宮崎 真大²、酒井 慎一³、飯尾 能久²、2016年熊本地震 合同地震観測グループ

*Satoshi Matsumoto¹, Yusuke Yamashita², Manami Nakamoto¹, Masahiro Miyazaki², Shin'ichi Sakai³, Yoshihisa Iio², Group for urgent joint seismic observation of the 2016 Kumamoto earthquake

1.九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、2.京都大学防災研究所、3.東京大学地震研究所
1.Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Sciences, Kyushu University, 2.Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 3.Earthquake Research Institute, University of Tokyo

The 2016 Kumamoto earthquake occurred in middle Kyushu Island, Japan where stress field is in strike-slip or normal fault regime. The minimum principal compression stress (s_3), with its near north-south trend, is dominant throughout the entire region. In this study, we determined focal mechanisms related to the seismic activity from first P wave polarity data by urgent seismic observation deployed in the hypocentral area.

Generally, the earthquakes in strike-slip and normal fault types occurred around focal area, indicating maximum principal stress is similar magnitude to moderate one as suggested by the result of stress tensor inversion by Matsumoto et al. (2015). The focal mechanisms show spatial and temporal variation during the activity. The solution for main shock (M7.3) reveals different strike angle from centroid moment tensor solution by F-net (NIED). This suggests the mainshock rupture change its direction to the Futagawa fault.

In addition, the result is indicative of change in stress condition associated with the occurrence of the main shock (M7.3) around Futagawa and Hinagu faults.

Acknowledgement

We also used seismic waveform data at stations operated by Kyushu, Kyoto, Kagoshima Universities, JMA, and NIED. This study was supported by the Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology (MEXT) of Japan, under its Earthquake and Volcano Hazards Observation and Research Program. This work is partly supported by MEXT KAKENHI Grant Number16H06298.

キーワード：熊本地震、発震機構解、応力場

Keywords: 2016Kumamoto earthquake, focal mechanisms, stress field

The significance of seismicity after The 2016 Kumamoto Earthquake sequence
The significance of seismicity after The 2016 Kumamoto Earthquake sequence

*YANO Tomoko Elizabeth¹、松原 誠¹

*Tomoko Elizabeth Yano¹, Makoto MATSUBARA¹

1.防災科学技術研究所

1.National Research Institute of Earth Science and Disaster Resilience

平成28年熊本地震では、4月14日のM6.5の地震に続いて、4月16日にM7.3の大地震が発生し、益城町では2度にわたり震度7を記録した。我々は平成28年熊本地震の一連の地震活動について、波形創刊を用いたDouble-Difference法を適用して震源再決定を行った。

M6.5の地震の直後には日奈久断層帯に沿って活発な余震活動が見られた。その後、M7.3の地震の後には日奈久断層帯に加えて、布田川断層帯に沿った余震活動も観測され、さらに、布田川断層帯の東方延長に当たる阿蘇山の下や大分地域にまで地震活動域が拡大した。M7.3の地震後、布田川断層の北東端と阿蘇山のカルデラとの間の低速度域が厚い領域では、地震活動が極めて低調である。防災科研では2001年から2012年までの深さ40km以浅の内陸の地震について、DD法により再決定した震源カタログであるJUICEカタログを作成している(Yano et al., 2015)。この低速度領域の過去の地震活動度は周囲と同程度であることから、M7.3の地震で活性化しない領域も存在することが分かる。また、この領域はM7.3の地震の際、深さ10km程度まで最大5m程度すべった地震時すべり域(Kubo et al., 2016)と一致する。

JUICEカタログによると、阿蘇山と大分地域の領域では、過去にも鉛直な面や北傾斜の面において地震活動は活発であった。M7.3の地震後は鉛直な面における地震が活発化するとともに、過去の地震が見られなかった北西-南東の面に沿った新たな地震活動も観測されている。

キーワード：熊本地震、地震活動、震源再決定

Keywords: Kumamoto earthquake, Seismicity, Earthquake relocation

2016年4月九州地方の地震の発震機構解における正断層成分

Normal-fault components in the focal mechanisms of earthquakes in April 2016, Kyusyu region, Japan

*竹尾 明子¹

*Akiko Takeo¹

1. 東京大学地震研究所

1. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo

A swarm of earthquakes occurred in Kyushu region, Japan in April 2016. The activity includes two major earthquakes in Kumamoto prefecture with moment magnitudes of Mw6.1 on April 14th and Mw7.1 on April 16th. Many large aftershocks ($M_w > 4$) have been excited at least one month since the first Mw6.1 earthquake. The overall activity might be defined by a foreshocks-mainshock-aftershocks sequence. According to moment tensor catalog by F-net and Hi-net systems operated by National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention (NIED), the three major earthquakes seem to have occurred near the intersection point between the known Hinagu and Futagawa faults with mostly strike-slip focal mechanisms, whereas some portion of aftershocks seem to have occurred at the western extension of the Futagawa fault and northern/southwestern areas out of the Futagawa fault with focal mechanisms including normal-fault components. For revealing the contribution of normal-fault system during this swarm activity, I estimated the centroid moment tensor solutions of the major three earthquakes and large aftershocks ($M_w > 4$) by a grid-search algorithm (Takeo et al. 2010) and their uncertainties by the bootstrap method. The datasets are the records of F-net strong motion velocitymeters for two major earthquakes, and records of F-net broadband seismometers and three broadband seismometers in the southwestern Shikoku island installed by Earthquake Research Institute, the University of Tokyo in 2015. As a result, I obtained both strike-slip and normal-fault reliable solutions for aftershock sequence ($4 < M_w < 6$). The normal-fault solutions often appeared at off fault area of the Futagawa fault. The two major earthquakes had significant non-double couple components, which can be explained by the linear combination of the strike-slip double-couple solutions along the known fault systems and the normal-fault double-couple solutions along the fault systems. The contribution of Hinagu and Futagawa faults is hard to distinguish by the centroid moment tensor analysis because the difference in the strike angles of these fault system is not large enough. On the other hand, the total contribution of normal-fault solutions could be estimated to be about 15% for the Mw6.1 first earthquake and about 30% for the largest Mw7.1 earthquake. These values may be useful for the slip inversion of these earthquakes and for interpreting surface faulting. The total contribution of normal-fault solution will be estimated, which might have contribution for discussing the tectonics of the Beppu-Shimabara graben widely located off north of the Futagawa fault.

キーワード：熊本地震、CMT解析

Keywords: Kumamoto earthquake, Centroid moment tensor analysis

稠密臨時観測データを用いた2016年熊本地震における地震活動の時間発展 (1) 前震から本震にかけて

Time evolution of the 2016 Kumamoto Earthquake I

*宮崎 真大¹、松本 聡²、飯尾 能久¹、山下 裕亮¹、清水 洋²、松島 健²、中元 真美²、内田 和也²、神菌 めぐみ³、2016年熊本地震合同地震観測グループ 2016年熊本地震合同地震観測グループ

*Masahiro Miyazaki¹, Satoshi Matsumoto², Yoshihisa Iio¹, Yusuke Yamashita¹, Hiroshi Shimizu², Takeshi Matsushima², Manami Nakamoto², Kazunari Uchida², Megumi Kamizono³, Group for urgent joint seismic observation of the 2016 Kumamoto earthquake Group for urgent joint seismic observation of the 2016 Kumamoto earthquake

1.京都大学防災研究所、2.九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、3.九州大学大学院理学府地球惑星科学専攻

1.Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 2.Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Sciences, Kyushu University, 3.Department of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Sciences, Kyushu University

2016年4月14日に益城町で震度7を観測する地震が発生した。地震発生直後は、余震域が日奈久断層帯の北東部から布田川断層帯の南西部の領域であったが、16日の気象庁マグニチュード7.3の地震発生以降、布田川断層帯の北東部全体に広がった。また、それに誘発されたと見られる活動が、阿蘇山の北東部や別府市にいたるまで発生し、現在も活発な活動が続いている。

一連の経過から、4月14日の気象庁マグニチュード6.5の地震が前震、4月16日の気象庁マグニチュード7.3の地震が本震と見られているが、両者の関係を明らかにするには、余震活動の時間的な発展の把握が重要である。本発表では、震源域周辺の定常観測点に加え、震源域の直上に位置する臨時観測点データおよび熊本地震に伴って設置された臨時の合同余震観測のデータを使用し、前震から本震までの地震活動の時間発展を詳細に見ることで、両者の関連性について検討する。

解析は、まずMatched Filter法(Gibbons and Ringdal, 2006; Shelly et al., 2007)により、群発する地震によって読み取りが困難な連続波形記録からのイベント検出を行った。次に、テンプレートとしたイベントと検出したイベントとの相関を元に、信頼性の高い検出時刻を含む読み取り値から震源決定を行った。そのため、検出されたイベントは、テンプレートを中心とした周囲に分布している。余震域直上の観測データを使用した結果、断層帯近傍の観測点でしか観測できないような、微小なイベントまで検出出来ていることが確認できた。

断層帯のやや深い部分で発生したテンプレートでの検出数を比較すると、前震から本震にかけての領域で、周辺よりも多数のイベントが検出された。また、本震発生にかけて、南西部では活動度が減少しているのに対し、前震から本震にかけての領域は活動を維持したままであった。このことは、断層帯の深部において、前震の地震活動が本震の断層帯へ影響を及ぼした可能性を示唆していると考えられる。また、前震から本震発生までに起きた地震をテンプレートに用いると、本震発生後で検出個数が減少する傾向が見られた。本震発生後に活発な活動域が布田川断層帯側に移動したためか、本震によって応力場ないしは構造が変化したことにより、テンプレートの検知能力が変化したことが示唆される。

また、Miyazaki et al.(2015)やChao and Obara (2016)で見いだされた、日奈久断層帯南部で発生している非火山性微動についても解析を行った。その結果、規模の大きな地震が発生した後に活動が活発化する傾向が見て取れた。長期的な活動レートは、地震発生前の長期間のレートとあまり変化していないことや浅部での余震活動が比較的低調なことから、影響の規模はあまり大きくないようであるが、今後の活動実態把握のためにモニタリングの拡充をおこなう必要がある。

謝辞

本発表では、九州大学の定常・臨時観測点の他に、気象庁・防災科学研究所の定常観測点および、2016年熊本地震合同地震観測による臨時観測データを使用した。本研究は文部科学省による「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画」の支援を受けた。また、本研究の一部は、科学研究費補助金「2016年熊本地震と関連する活動に関する総合調査」(代表:清水 洋)によって実施された。加えて、東京大学地震研究所共同研究プログラムの援助を受けた。ここに記して感謝する。

Reference

Chao, K., and K. Obara (2016), Triggered tectonic tremor in various types of fault systems of Japan following the 2012 Mw8.6 Sumatra earthquake, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 121, 170-187, doi:10.1002/2015JB012566.

Gibbons, S. J., and F. Ringdal (2006), The detection of low magnitude seismic events using array-based waveform correlation, *Geophysical Journal International*, 165(1), 149-166, doi: 10.1111/j.1365-246X.2006.02865.x.

Miyazaki, M., S. Matsumoto, and H. Shimizu (2015), Triggered tremors beneath the seismogenic zone of an active fault zone, Kyushu, Japan, *Earth Planets Space*, 67, 179, doi:10.1186/s40623-015-0346-4.

Shelly, D. R., S. Ide, and G. C. Beroza (2007), Non-volcanic tremor and low-frequency earthquake swarms, *Nature*, 446(7133), 305-307, doi: 10.1038/nature05666.

キーワード：2016年熊本地震、地震活動、非火山性微動、布田川-日奈久断層帯、震源分布、緊急合同地震観測
Keywords: the 2016 Kumamoto Earthquake, seismic activity, non-volcanic tremor, Futagawa-Hinagu fault zone, hypocenter distribution, urgent joint seismic observation

2016年熊本地震にともなう地震活動の時空間発展:4月14日M6.5地震後の余震域の拡大
Spatio-temporal evolution of seismicity following the 2016 Kumamoto earthquake: Migrations
of early aftershocks following M6.5 earthquake

*加藤 愛太郎¹、福田 淳一¹、中川 茂樹¹

*Aitaro Kato¹, Jun'ichi Fukuda¹, Shigeki Nakagawa¹

1.東京大学地震研究所

1.Earthquake Research Institute, the University of Tokyo

A series of powerful earthquakes and the following aftershocks has struck the Kumamoto area in Kyusyu, Japan, from 14th April, 2016. These powerful earthquakes have caused destructive damages in the central part of Kyusyu. We relocated a bunch of earthquakes associated with the 2016 Kumamoto earthquake (~2700 events), applying a double-differential code to arrival time data set constructed by JMA, and waveform cross-correlation technique. Then, we newly detected numerous earthquakes using these relocated earthquakes as template events, applying a matched filter technique to continuous waveform data recorded at 35 seismic stations in the central Kyusyu area. Most of relocated hypocenters are aligned along nearly vertical planes or north-westward dipping plane. Hypocenters before M7.3 earthquakes were concentrated near surface traces of active faults in northernmost segment of "Hinagu" and a part of "Futagawa". After M7.3 earthquake, they shifted toward northwest ward and aligned gently northwest ward dipping plane. Early aftershocks following M6.5 earthquake clearly expanded along fault strikes during a half day. But, aftershock zone slightly continued to expand perpendicular to fault strikes until the generation of M7.3 earthquake. The M7.3 earthquake has immediately boosted a widespread seismicity along the northeastern extension of the Futagawa fault, as well as the northwestern section of the Hinagu fault.

キーワード：熊本地震、地震活動、余震域の拡大

Keywords: Kumamoto earthquake, Seismicity, Migrations of aftershocks

2016年熊本・大分地震活動:複雑な断層系と火山地域の影響

Effect of complex fault systems and volcanic areas on the 2016 Kumamoto-Oita earthquake sequence

*内出 崇彦¹、堀川 晴央¹、中井 未里¹、松下 レイケン¹、重松 紀生¹、安藤 亮輔^{2,1}、今西 和俊¹

*Takahiko Uchide¹, Haruo Horikawa¹, Misato Nakai¹, Reiken Matsushita¹, Norio Shigematsu¹, Ryosuke Ando^{2,1}, Kazutoshi Imanishi¹

1.産業技術総合研究所 地質調査総合センター 活断層・火山研究部門、2.東京大学 大学院理学系研究科 地球惑星科学専攻

1.Research Institute of Earthquake and Volcano Geology, Geological Survey of Japan, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), 2.Department of Earth and Planetary Science, Graduate School of Science, the University of Tokyo

2016年熊本・大分地震活動は2016年4月14日の夜(日本時間)に始まり、布田川断層帯、日奈久断層帯や火山地帯に及んだ。最初の大地震(イベント #1)は4月14日21時25分に発生したMw 6.2の地震で、その後、15日の0時03分にMw 6.0の地震(イベント #2)が起こった。最大の地震(イベント #3)はMw 7.0で、16日1時25分に発生した。個別の地震の強震動のみならず、長引く大地震、中規模地震によって、住民は苦しめられている。地震活動は、布田川断層帯・日奈久断層帯、阿蘇北部地域、別府・由布院地域と、3つの離れた場所で活発になった。本研究では、以下の問題に取り組んだ。ひとつは、なぜ断層が1つの大地震でなく、3つの別々の大地震で破壊されたのかということである。もうひとつは、なぜ地震活動に空白域が見られるかという問題である。

まず、本地震活動の震源の再決定をhypoDDプログラム(Waldhause and Ellsworth, 2000)を用いて行った。その結果、布田川・日奈久の両断層帯に対応する地下の複雑な断層形状が明らかとなり、北西傾斜の断層とほぼ垂直な断層が見つかった。イベント #1の震源はほぼ垂直な断層に、イベント #2の震源は傾斜した断層にあることがわかった。イベント #3の断層は別の垂直な断層にあり、傾斜した断層とぶつかる場所に近いことがわかった。これは発震機構の初動解にほぼ対応する。おそらく、断層形状が急激に変わるところで破壊伝播が食い止められ、それと同時に次の地震の開始にも寄与しているものと考えられる。これによって、3つの大地震が次々と起こるといった結果になったと考えられる。

布田川断層と阿蘇北部の間の地震活動の空白域(「阿蘇ギャップ」と呼ぶ)はイベント #3によって破壊されたということが、国立研究開発法人 防災科学技術研究所(防災科研)の基盤強震観測網(KiK-net)のデータを用いた断層すべりインバージョン解析によって明らかになった。おそらく、イベント #3によって阿蘇ギャップが、余震が起こる余力もなくなるほど完全に破壊されたためであると考えられる。これは阿蘇山の構造に関連したものであると考えられるが、これ以上の議論のためには、詳しい構造モデルやその結果の断層挙動を調べる必要がある。

由布院では動的誘発地震が発生したことが、防災科研の強震観測網(K-NET)とKiK-netの地震波形データにハイパスフィルタをかけたデータを見ることによってわかった。動的誘発地震はよく火山地帯で発生することが知られている(例えば、Hill et al., 1993)。16 Hzのハイパスフィルタをかけた地震波形の振幅を、近くで発生したMw 5.1の地震(2016年4月16日7時11分)のものとは比較することで、誘発された地震の規模をM 6台半ば程度であると見積もった。これは、合成開口レーダー「だいち2号(ALOS-2)」による干渉画像で見られる変形の長さや、イベント #3が発生した直後に地震活動が活発化した地域の長さとも調和的である。地震の動的誘発によって、由布院と阿蘇北部との間には、結果として空白域が生じたものである。

われわれのデータ解析によって、2016年熊本・大分地震活動の奇妙な振る舞いを引き起こしたメカニズムが明らかになったが、まだ多くの問題が残っている。どのようにして複雑な断層が入ったのか、阿蘇ギャップと阿蘇山との関係といった問題である。この地震によって火山活動がどのような影響を受けるかという点も注目す

べきである。地震や火山による災害の推定を改善するためにも、これらの研究は重要である。

謝辞

本研究では、気象庁一元化処理地震カタログの検測値を使用した。検測値には、気象庁、防災科研、九州大学が運用する地震観測点のデータを含んでいる。また、防災科研の高感度地震観測網 (Hi-net)、KiK-net、K-NETの地震波形データ、F-netのモーメントテンソルカタログを使用した。Global CMTプロジェクトによるモーメントテンソルカタログも使用した。

キーワード：地震学、2016年熊本地震、動的誘発地震、断層すべりインバージョン解析、震源再決定、阿蘇山
Keywords: Seismology, The 2016 Kumamoto earthquake, Dynamic triggering of earthquakes, Slip inversion analysis of earthquake, Hypocenter relocation, Mt. Aso

2016年M7.3熊本地震によって誘発された大分の地震活動

Triggered significant seismicity in Oita following the M7.3 Kumamoto earthquake in 2016

*宮澤 理稔¹

*Masatoshi Miyazawa¹

1.京都大学防災研究所

1.Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

On 16 April 2016, the M7.3 Kumamoto earthquake occurred in Kyushu. At a seismic station in Oita located about 80 km north-eastwards from the hypocenter, large seismic signals from another large earthquake were observed during the passage of seismic waves from the M7.3 event. The event identified in Oita was located by picking P and S wave arrivals using seismograms at K-NET and KiK-net stations. The Oita earthquake occurred about 33 sec after the M7.3 event, the hypocenter located at a depth of about 7 km beneath Yuhuin geothermal region, and its local magnitude was estimated about 6.0. The static and dynamic stress changes at this region from the M7.3 event were on the order of about 1 kPa and 1 MPa, respectively.

キーワード：2016年熊本地震、大分県の誘発地震

Keywords: 2016 Kumamoto earthquake, Triggered seismicity in Oita

Matched Filter Methodによる2016年熊本地震の自動震源決定処理の試み

Matched Filter Method implemented as a semi-automatic hypocenter location system

- Application to the 2016 Kumamoto Earthquake -

*大見 士朗¹*Shiro Ohmi¹

1. 京都大学防災研究所地震防災研究部門

1. Earthquake Hazards Division, Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

§はじめに：

活発な地震活動の初期段階において、震源分布等の情報の把握の重要性はいうまでもないことである。昨今は気象庁(JMA)や防災科学技術研究所(NIED)などによる自動震源決定処理の精度が向上し、それらの情報を参照することで地震活動の推移を把握することも容易になってきた。しかしながら、状況によっては、それらの情報の入手を待つ時間すら惜しい場合もあり、ある程度の自前の震源決定処理を行わざるを得ないこともままある。しかしながら、昨今の観測点数の増加および熟達した検測者の減少により、特に速報的な情報を要する際にはこのような作業が次第に困難となりつつある。このような目的に対応するため、これまで著者はMatched Filter Method (MFM) を用いた自動震源決定処理システムを開発して、飛騨山脈の群発地震に対応するシステムを試験運用している(大見, 2015)。飛騨山脈の場合には、比較的狭い地域を対象としているが、熊本地震の場合には活動開始から数日間で九州を横断するかのごとく震源分布が広がっていくという特異なものであった。このような地震活動の震源決定の自動処理をMFM法で行う方法を検討し試験的に運用してみたので報告する。

§MFMによる自動処理の概要：

本手法では、始めに、MFMで使用するためのテンプレートとなる地震波形を用意する。テンプレート地震は手動検測により震源決定を行い、P波・S波の到着時刻、最大振幅等の情報を波形とともに利用する。ここでは、別途運用中の旧来の自動処理システムの結果を参照しながら、MFMで検知できていない地震活動が発生した際にはその地震活動に適用できる新規のテンプレートを適宜手動で作成する。1時間ごとの準実時間処理において、テンプレート地震の波形と、連続収録された地動波形の相関係数の時系列 $CC(t)$ を計算することにより、イベントの検出を行う。 $CC(t)$ の中で、相関係数がある閾値 min_cce を越えるものについて、同様の波形が出現したと考える。この操作をすべての観測点・成分の波形に対して行った後、すべての $CC(t)$ を合算する。この合算値の標準偏差を求め、合算値を標準偏差と総成分数で割った時系列データをNetwork Correlation Coefficient (NCC)と定義する。NCCが一定の閾値を超えると、イベントが発生したと判断する。ここでは、 min_cce を0.4とし、また、NCCが8.0を超えるとイベントが発生したと判断した。もしも、テンプレート地震と検出されたイベントが全く同じ位置で発生しているのであれば、NCCが最大値を取る時刻と、各 $CC(t)$ が最大値を取る時刻は一致するはずであるが、一般にはそうはならない。これらの時刻の差を、検出されたイベントの各観測点での走時の補正值として使用することで検出されたイベントの走時データを構築する。また、 $CC(t)$ 計算時に、テンプレート地震と連続波形データの振幅比の時系列も保存しており、これを用いて検出されたイベントの最大振幅の近似値を算出し、マグニチュードの算出に使用する。これらの情報を用いて、過去1時間の連続データ中に検出されたイベントの震源決定を個別に行う。

§熊本地震での実装の問題点

MFM法の欠点としては、テンプレート地震を設定していない地域で発生したイベントには、原理上対処できないという点があげられる。飛騨山脈での実装の際には、対象地域が比較的狭く、かつ、地震の発生する地域も限られているため、テンプレート地震を手動で作成するという作業でも地震活動の推移に追いつくことがある程度可能であった。しかしながら、熊本地震の際には、震源の移動範囲が広く、個々のクラスタに対応するテンプレートをすべて手動で作成することは困難を極めた。そのため、今回は、半自動処理とでも呼べる方法で対応を試みた。

§熊本地震の半自動処理の概要

上述のように、個別に手動でテンプレートを設定することは現実的ではないので、テンプレート地震を自動的に生成することを考えた。システム上では旧来のSTA/LTAによりトリガをかける方式の自動処理システムも運用しているため、これらを組み合わせることとした。ここでは、旧来のシステムで比較的高精度に自動震源決定できたイベントをテンプレートとして新たに追加していくことでこれを実現した。ただし、従来どおりのトリガロジックで運用を行うと、テンプレート数が膨大になってしまうため、STA/LTAを大きめに設定し、比較的S/Nがよいイベントだけを検出してテンプレートとすることとした。使用したデータは、大学・NIED・JMA等のリアルタイムデータ流通網で入手可能な九州中部の約80点の短周期高感度地震波形データである。テンプレート地震は、自動処理の結果に基づき1時間ごとに作成され、これにより連続データのスキャンを行う。テンプレート数が時間とともに増加すること、1時間以内に処理を終えることという制約から、テンプレート地震の発生時刻の前24時間と後96時間のみの連続データをスキャンすることとした。それぞれのテンプレートは別途手動で検測を行い、随時、再度のスキャンを行うようにした。

§結果と考察：

ここでは、2016年4月14日21時から4月22日0時までの7日間の結果の概要を述べる。この期間に、約300個のテンプレート地震が作成された。これら300個の手動検測が終了した段階で再度スキャンを実行した結果、震源域に6400個強の地震を検出し、その分布はJMAの再検測震源のそれとも調和的である。しかし、詳細に検討すると問題点も見出される。まず、これまでの飛騨山脈での運用例では、必要と思われる地震は目視で確認してテンプレートとして導入しており、その意味で取りこぼしが少ない。しかしながら、本報告の場合、テンプレートの作成は自動処理結果によっているため、自動処理で検知に失敗したイベントが含まれるクラスは検知できないことになる。特に、M5クラスのイベントが発生した際や、大きめのイベントが連続発生したような場合には従来型の自動処理システムでの取りこぼしや自動処理の失敗が多く、課題であった。また、STA/LTAを大きく設定していることから、Mの小さなイベントではトリガされず、MFM適用後でも小さめの地震の取りこぼしが多い印象がある。本システムでは期間中に6400個強の地震を検出したが、5月12日現在でのJMAの再検測震源リストでは同時期に2700個弱のイベントが震源決定されている。震源分布の特徴的なパターンは概して両方で共通であり、本手法によるデータは速報値としては価値があると考えられる。

キーワード：2016年熊本地震、自動震源決定処理、マッチドフィルター法

Keywords: 2016 Kumamoto Earthquake, automatic hypocenter relocation system, Matched Filter method

2016年4月、熊本地震に先行した地震活動静穏化

Seismic quiescence prior to the 2016 Kumamoto Earthquakes

*長尾 年恭¹、古瀬 慶博¹、井筒 潤²

*Toshiyasu Nagao¹, Nobuhiro Furuse¹, Jun Izutsu²

1.東海大学海洋研究所、2.中部大学国際GISセンター

1.Institute of Oceanic Research and development, Tokai University, 2.International Digital Earth Applied Science research center, Chubu University

東海大学では、空間 (R) ・時間 (T) ・地震の大きさ (M) についての重み付き解析法であるRTMアルゴリズム (Nagao et al., EPS, 2011) を用いて地震活動度解析を行っている。この度、熊本地震に先行した明瞭な地震活動静穏化を抽出したので、ここに報告する。

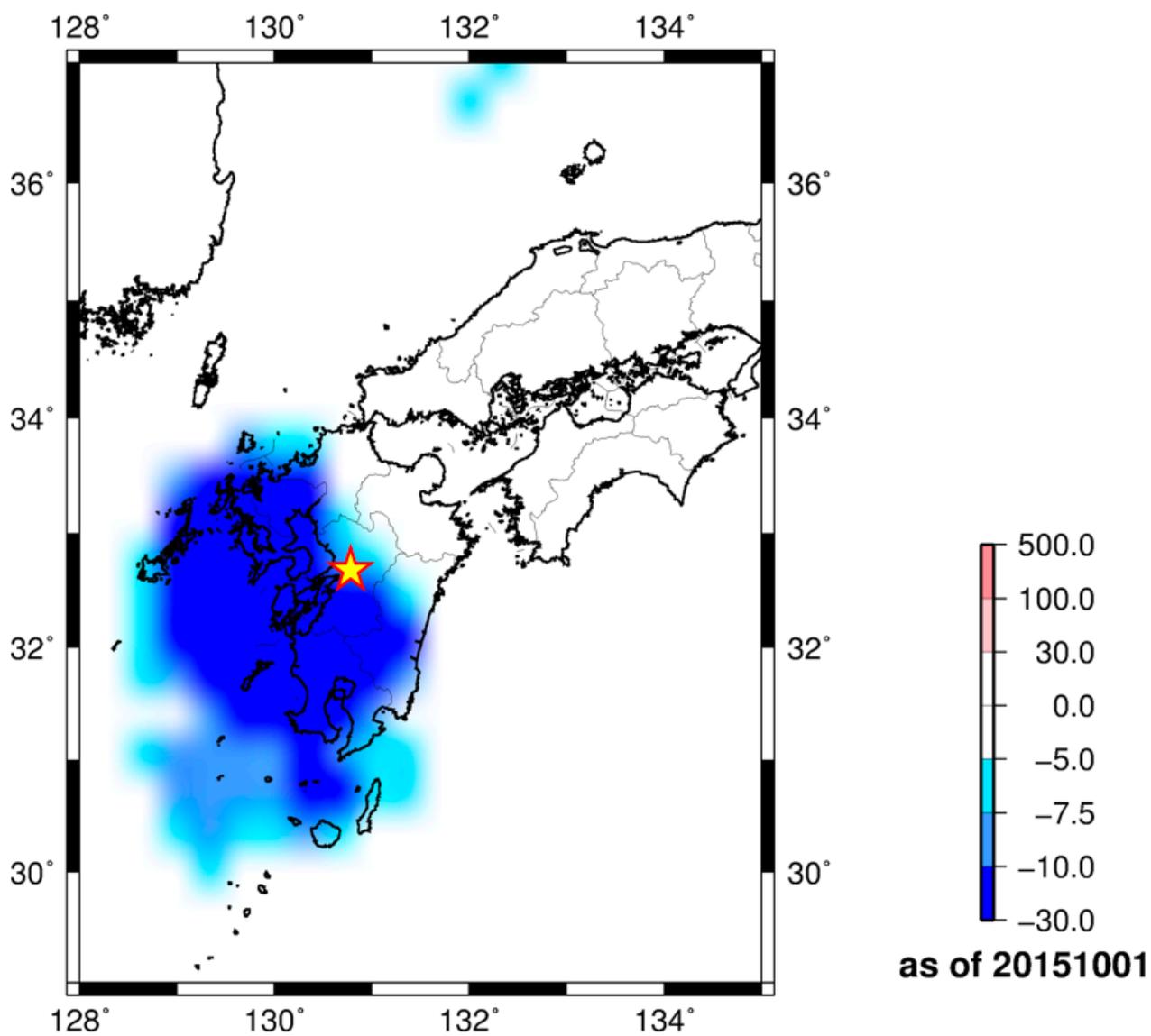
RTMアルゴリズムの特徴は、時間・空間および地震規模について、長期間のバックグラウンドを計算し、差し引くという作業を行っているため、基本的には平常時には3つのパラメータの積 (R×T×M) はほぼゼロとなる事が大きな特徴で、地震活動度の微小な変動を感度良く抽出する事ができる。これまで1995年兵庫県南部地震や、2007年能登半島地震や2008年岩手宮城内陸地震などでも明瞭な静穏化を検出している。また2011年東北地方太平洋沖地震でも震央を中心とした東北地方の広い領域で、2003年~2007年にわたる広域的な静穏化と2009年以降は震央を中心にプレート沈み込み方向に沿った地震活動の活性化の抽出に成功している。

熊本地震では、静穏化は2015年初頭から開始し、2016年3月にはほとんど元の状態に戻っていた。また静穏化の中心は震央付近ではなく、九州西方の海域であり、本震の震央は静穏化領域の端であった。これも過去の経験則と調和的な結果であった。図は静穏化が最も進行していた2015年10月の様子である。

なお本研究は文部科学省による「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画」の一部支援と東海大学海洋研究所プロジェクト研究の一部支援を受けて実施されました。

キーワード：地震活動静穏化、熊本

Keywords: seismic quiescence, Kumamoto



2016年熊本地震に対する b 値時空間変動解析

Temporal and spatial changes in b-value for the 2016 Kumamoto Earthquakes

*小張 剛照¹、韓 鵬¹、服部 克巳¹*Takaaki Kobari¹, Pen Han¹, Kastumi Hattori¹

1. 千葉大学大学院理学研究科

1. Department of Earth Sciences, Graduate School of Science, Chiba University

2016年4月14日午後9時26分、熊本県熊本地方を震源とする深さ11 kmでMj6.5の地震が発生した。これは16日午前1時25分に発生した熊本地方を震源とするMj7.3(本震)の前震と考えられている。今回は2016年4月16日午前1時25分に発生したMj7.3に対し、ゲーテンベルク・リヒター則に基づく b 値解析を用いて、応力場の時空間変動解析をしたことを示す。主な解析内容はb値空間分布と時間変化を解析したことである。使用した地震カタログはJMAの地震カタログ(2010/01/01-2016/4/16)であり、解析に使用する地震は深さ20 kmまでとした。b値空間分布は熊本県を中心に九州地方全体の領域 (E129°-133°, N31°-34.50°) で解析を行った。また、b値空間分布を求めるのにあたり解析地域の地図上をG度で区切り、格子を作る。その格子の中心点から円(半径R km)を考える。円内の地震数がN個以上の時は格子内のb値の計算を行う。ただし、円内の地震数が設定したN個に達しない時マッピングは行わない。本研究で、各パラメータはG=0.05°、R=60 km、N=80、100個に設定した。一方、時間変化はMoving window法(決まった地震数でb値を計算すること)を使用した。Window中の地震数は200,100個としStepはそれぞれ100,50個と設定した。詳細な結果は発表で報告する。

キーワード：地震、b 値

Keywords: Earthquake, b-value

2016年熊本地震における、3つのM6または7クラスの地震に伴う**b**値変化

Change in *b*-values following the three M6 or 7-class earthquakes in the 2016 Kumamoto earthquake sequence

*岩田 貴樹¹

*Takaki Iwata¹

1.常磐大学

1.Tokiwa University

This study investigates whether or not *b*-values of the Gutenberg-Richter law change following the three events (M6.5 on 14 April, M6.4 on 15 April, and M7.3 on 16 April) in the 2016 Kumamoto earthquake sequence. To examine the statistical significance of the change, a Bayesian approach developed and used in Iwata [2008, 2013, GJI; 2016, Pageoph] was applied to the sequence. This approach introduces a statistical model of a magnitude-frequency distribution covering the entire magnitude range proposed by Ogata & Katsura [1993, GJI]. The proposed distribution contains a parameter representing the quality of detection capability of earthquakes. With the aforementioned Bayesian approach, we can estimate a *b*-value with the consideration of the temporal change in the quality of detectability; all observed events are used in the estimation while we discard events of which magnitude is less than a cut-off magnitude in a conventional method to find a *b*-value. This is the advantage of the Bayesian approach to examine the significance of the change in *b*-values.

Data analyzed in this study was taken from the JMA catalog (last accessed on 11 May 2016). A study area was chosen to cover the aftershock area just before the M7.3 event and the epicenter of the M7.3 event, and four periods were considered: from 1 August 2015 to the occurrence of the M6.5 event (Period 0), between the occurrences of the M6.5 and M6.4 events (Period 1), between the occurrences of the M6.4 and M7.3 events (Period 2), and after the M7.3 event (Period 3). For each of the four periods, the *b*-value and temporal change in detection capability (i.e, the parameter of the magnitude-frequency distribution proposed by Ogata & Katsura [1993]) were estimated simultaneously. Cases with the constraint of a common *b*-value over successive periods (e.g., *b*-values of Periods 1, 2, and 3 are the same while the one in Period 0 is different.) were also considered. In total, there were eight cases (models), depending on which periods have a common *b*-value, and the best model was selected from the eight with Akaike's Bayesian Information Criterion (ABIC).

The best model is the case where Periods 0, 1, and 2 have a common *b*-value of 0.736 and only Period 3 has a different value of 0.941; the *b*-value varies at the timing of the M7.3 event whereas it does not change with the M6.5 and M6.4 events. The difference of ABIC values between this model and the one where the *b*-values over the four periods are the same is 7.9, which suggests the statistical significance of the best model. Remarkable increase in the *b*-value following a major/megathrust earthquake has been found [e.g., Tormann et al., 2015, Nature Geoscience]. This increase will correspond to decrease of stress due to a large slip, because it has been suggested that the *b*-value is correlated inversely with stress [e.g., Scholz, 2015, GRL]. From this viewpoint, the result of this study suggests that the high stress in the focal area of the Kumamoto sequence was not decreased by the M6.5 and M6.4 events but the M7.3 event has released it.

キーワード : *b*値、応力、地震検知能力、ベイズ推定、余震系列、グーテンベルグ・リヒター則

Keywords: b-value, stress, detectability of earthquake, Bayesian estimation, aftershock sequence, Gutenberg-Richter law

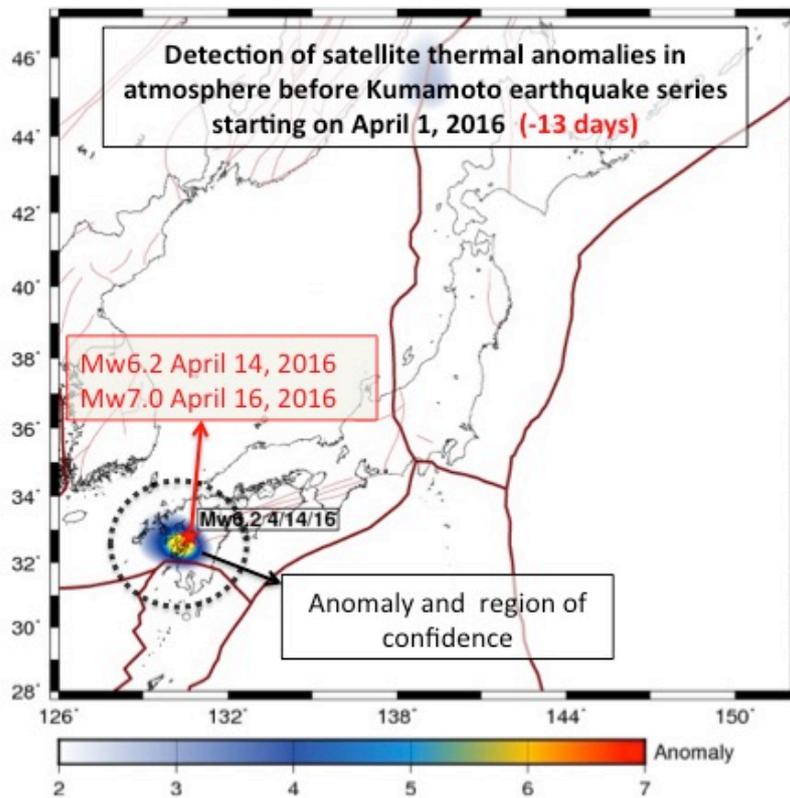
Observation of transient signatures in atmosphere and ionosphere prior to the 2016 Kumamoto earthquake in Japan. Preliminary results.

*Dimitar Ouzounov^{1,5}, Katsumi Hattori^{2,5}, Sergey Pulinetz^{3,5}, Leonid Petrov⁴

1.Center of Excellence in Earth Systems Modeling & Observations (CEESMO) , Schmid College of Science & Technology Chapman University, Orange, California, USA, 2.Chiba University, Yayoi 1-33, Inage, Chiba, 263-8522, Japan, 3.Space Research Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation, 4.Astrogeo Center, Falls Church VA, USA, 5.International Space Science Institute, Beijing, China

The 2016 Kumamoto series of earthquakes started with M6.2 foreshock (12:26 UTC) on April 14, 2016 and continued with M7.0 series of 16:25 UTC on April 15) beneath Kumamoto City on Kyushu Region, Japan. The two earthquakes killed at least 48 people and injured about 3,000 others in total. We prospectively and retrospectively analyzed transient variation of specific physical parameters characterizing the state of the atmosphere and ionosphere several days before the onset of this earthquake, namely: outgoing earth radiation (OLR) on the top the atmosphere), atmospheric chemical potential (ACP) related to the thermodynamic proprieties in the lower atmosphere and for ionosphere the $F2$ -layer critical frequency ($foF2$). On April 1st , 2106 the satellite monitoring over Japan has shown a rapid increase of OLR near Kumamoto epicentral area. The ongoing analysis of satellite radiation revealed another transient anomaly over the epicentral area on April 12 (-3 days before the M7). The retrospective analysis of ACP from satellite assimilation data shows similar patterns of rapid increases on April 11-12 several hours earlier to the satellite transient anomalies. $F2$ -layer critical frequency data from Okinawa/Ogimi Ionosond (26.68°N, 128.15°E) show repeatable pattern of $foF2$ increase in the nighttime of April 13 (36 hours before the foreshock of M6.2 on April 14) and in the early morning hours of April 15 (20 hours before eth M7.0 of April 15th). Our preliminary results show correlation between the appearance of pre-earthquake transients anomalies in atmosphere and ionosphere (with a short time-lag, from hours up to few days) and the occurrence of 2016 Kumamoto, Japan earthquake series.

Keywords: pre-eartqhauke signals, Satelitte thermal anomaly, Ionosond foF2



Dim.ouzounov@gmail.com

グローバルデータに基づく大地震連発性の発生確率－熊本の連続地震発生を受けて－
Probability of successive occurrences of large earthquakes and triggering of volcanic eruptions: in response to 2016 Kumamoto earthquake activity

*西村 太志¹

*Takeshi Nishimura¹

1.東北大学大学院理学研究科地球物理学専攻

1.Department of Geophysics, Graduate School of Science, Tohoku University

2016年熊本地震では、2016年4月14日21時のM6.5の約1日後の16日1時25分にM7.3の地震が発生した。内陸でさらに大きな地震が続けて起きることは珍しく、希な現象が起きたと考えられる。また、余震数が多く大分の別府地域でも地震活動が活発化したことに加え、2015年11月14日に南東部の鹿児島沖でM7.0の地震が発生していること、一連の地震は中央構造線につながる別府島原地溝帯で起きていること、などから、周辺地域での大地震のさらなる発生が懸念されている。また、阿蘇山や九重山など、火山活動の活発化も懸念されている。本研究では、今回の地震活動の特異性や周辺地域への影響を考えるために、世界で観測されている地震のデータをもとに、大地震の連発性と周辺火山への影響を統計的に評価したので、報告する。

地震データは、現在コロンビア大学が管理するCMT解（いわゆる、ハーバードCMT解）を利用した。1976年から2015年までの40年間の浅発地震（深さ70km以浅）のCMT解のマグニチュードとセントロイドの位置データを用いた。また、火山との関係では、NOAAによるGlobal Significant Earthquake Database、Smithsonian InstituteによるGlobal Volcanism Programの火山データベースを利用した。

M6以上の地震（4176個）を検索した結果、M6.0以上の大地震の発生から2週間以内に、その地震より大きな地震が水平距離100km以内に起きる例は、約3%であることがわかった。また、M6クラスからM7クラス以上になる地震は0.3%であった。従って、今回の熊本地震のような例は、世界でも珍しい事象といえる。

さらに、大地震がある地域で発生した場合、周辺で同規模あるいはそれ以上の地震がどの程度発生するかを調べた。M7.0以上の地震について、発生時間からの経過時間Tと震央距離D内で起きた地震を連発地震と考える。T=7, 14, 30, 60, 180, 365, 730 days, D=25, 50, ..., 2000 kmについて、40年間に世界で発生した連発地震の数を調べた。なお、3個以上の地震が連発することも想定し、Dは連発した地震間の距離をもとに微調整した。さらに、連発地震の発生頻度を評価するため、地震の発生位置は固定する一方、時間的にはランダムにしたデータを作成し、連発地震数を調べた（これを通常レベルとする）。その結果、ある大地震が発生した後の数週間は、距離1000km程度までの領域で、連発地震の発生数は通常レベルよりも数倍以上大きくなることがわかった。また、経過時間とともに、発生数が通常レベルに近づき、かつ、領域が小さくなることがわかった。

続いて、大地震による火山活動の活発化を調べるため、大地震の発生からの経過時間と距離による、火山噴火発生数の変化を調べた。データが十分記録されていると考えられるM7.6以上およびVEI（爆発指数）2以上の噴火の1900年から2015年のデータを調べた。その結果、地震からの水平距離から200km程度以内の火山噴火数が増加することが明らかとなった。

以上のように、大地震の発生後の、大地震や火山噴火の発生の確率を経験的に調べることができる。大地震の連発性や火山噴火の誘発例は必ずしも多くはないが、大地震後に起きる活動のシナリオを、火山噴火予測で用いられるような噴火事象系統樹のように、確率を用いて表示することは、地震活動を俯瞰的に理解するために役立てられると考えられる。

キーワード：大地震、火山噴火、連発

Keywords: large earthquake, volcanic eruptions, successive occurrence

2016年熊本地震の予測

Prediction of the 2016 Kumamoto Earthquake

*猿渡 隆夫¹

*Takao Saruwatari¹

1.なし

1.none

1. 予測方法

多くの地震を解析した結果、台風が温帯低気圧になる時や低気圧が発達する時、激しい下降気流が発生し、地面・水面に当たった地点で、数か月後、地震が発生していることが分かった。下降気流が当たった地点では、最大瞬間風速の増加が認められた。また衛星画像では、雲の無い領域として写っていることが分かった。

- 1) 数ヶ月から数年ぶりの最大瞬間風速が記録された地点で地震発生の可能性が高い。
- 2) 地震の大きさは、強風域の幅または雲の無い領域の幅が震源域の幅と一致することから、推測できる。
- 3) 強風日から1週間から7ヶ月後位に地震が発生する。
- 4) 震央近傍の風向が、メカニズム解の軸と一致する。

2. 予測方法の実証

2010年地震学会で予測方法を発表以降、2011東北沖地震など、多くの予測例・解析例があり、この予測方法が実証されたと考えている。

3. 2016年4月7日の発達した低気圧からの地震予測

前線を伴った低気圧が日本海を進み、東北付近を通過して、夜には三陸沖へ。全国的に雨となり、西日本や東日本で南寄りの風が強く吹いた。

熊本県阿蘇山では午前09:53に最大瞬間風速43.9メートル（南南西の風）（2007年以来9年ぶり）が観測された。また、長崎県では、長崎で最大瞬間風速29.3メートル（南風）、雲仙岳で35.2m/s（南西の風）が観測された。4月1位の記録が更新された。

予測方法に基づき、雲仙岳から阿蘇山付近にかけて地震の可能性があると予測された。発生時期は1週間後から7か月後と予測され、7日後に発生した。

4. 2016年熊本地震

4月14日 21時26分 熊本県熊本地方 M6.5

4月16日 01時25分 熊本県熊本地方 M7.3

5. 詳細解析と結論

別表・別図に気象庁の熊本県・大分県の全観測地点の4月7日の最大瞬間風速を示した。赤字は最大瞬間風速が高い地点である。別図の赤枠は、気象庁作成の震央分布図の枠である。阿蘇山の南西から北東にかけて、最大瞬間風速が周辺と比べて高い領域がある。この領域は、別図に示した気象庁作成の震央分布図（赤枠）とほぼ一致している。すなわち、他の多くの地震同様、地震発生前の最大瞬間風速等から、地震の発生場所と地震の大きさを予測することができる。

マントル対流や活断層が地震の原因ではなく、下降気流の強風が地震の原因と考えるべきである。

参考文献

1. <http://www2.jpgu.org/meeting/2011/yokou/MIS036-P85.pdf>
2. http://www2.jpgu.org/meeting/2015/PDF2015/S-CG56_P.pdf

キーワード：地震予測、最大瞬間風速、原子力発電所

Keywords: earthquake prediction, maximum instantaneous wind speed, nuclear power plant

地点	熊本県			地点	大分県		
	最大瞬間				最大瞬間		
	風速	風向	起時		風速	風向	起時
鹿北	18.1	南南東	7:41	国見	9.2	南東	5:19
岱明	16.1	南南西	9:21	中津	14.1	南西	12:16
菊池	17.7	南	7:58	豊後高田	19.1	南東	0:48
南小国	18	南南東	10:16	院内	12.5	西南西	8:09
阿蘇乙姫	29.4	南西	10:21	杵築	12.5	西北西	16:07
阿蘇山	43.9	南西	9:53	日田	18.5	西南西	12:00
熊本	19.5	西	13:35	玖珠	19.7	南南西	7:00
益城	19.5	南西	10:16	湯布院	26.2	南西	9:11
南阿蘇	21.4	西南西	7:50	大分	19.6	南南西	9:54
高森	24.6	西南西	9:37	犬飼	16	南南西	11:21
三角	18.9	南	9:55	竹田	14.8	西	8:55
甲佐	17.9	南	10:26	佐伯	11.6	南南西	9:13
本渡	26.7	南南西	9:58	宇目	9	南東	7:12
松島	19	南	8:54	浦江	15.1	南	5:19
八代	20.9	南南西	8:35				
牛深	20.1	南	8:14				
水俣	13.2	東南東	1:00				
人吉	12.7	西南西	13:23				
上	12.8	西南西	8:54				



2016年熊本地震発生域における緊急合同地震観測 - 臨時地震観測網の構築 -

Urgent joint seismic observation of the 2016 Kumamoto earthquake - Dense seismic observation -

*中元 真美¹、松本 聡¹、松島 健¹、酒井 慎一²、山下 裕亮³、宮崎 真大³、飯尾 能久³、岡田 知己⁴、高橋 浩晃⁵、渡辺 俊樹⁶、後藤 和彦⁷、浅野 陽一⁸、清水 洋¹、2016年熊本地震 合同地震観測グループ

*Manami Nakamoto¹, Satoshi Matsumoto¹, Takeshi Matsushima¹, Shin'ichi Sakai², Yusuke Yamashita³, Masahiro Miyazaki³, Yoshihisa Iio³, Tomomi Okada⁴, Hiroaki Takahashi⁵, Toshiki Watanabe⁶, Kazuhiko Goto⁷, Youichi Asano⁸, Hiroshi Shimizu¹, Group for urgent joint seismic observation of the 2016 Kumamoto earthquake

1.九州大学地震火山観測研究センター、2.東京大学地震研究所、3.京都大学防災研究所、4.東北大学地震・噴火予知研究観測センター、5.北海道大学地震火山研究観測センター、6.名古屋大学地震火山研究センター、7.鹿児島大学南西島弧地震火山観測所、8.防災科学技術研究所

1.Institute of Seismology and Volcanology, Kyushu University, 2.Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 3.Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 4.Research Center for Prediction of Earthquakes and Volcanic Eruptions, Tohoku University, 5.Institute of Seismology and Volcanology, Hokkaido University, 6.Earthquake and Volcano Research Center, Nagoya University, 7.Nansei-Toko Observatory for Earthquakes and Volcanoes, Kagoshima University, 8.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

2016年4月14日21時26分に熊本県でM6.5の地震が発生し、熊本県益城町で震度7、玉名市、西原村、宇城市、熊本市で震度6弱を記録したほか、広い範囲で震度5強から1を記録した。翌々日の4月16日1時25分にはM7.3の地震が発生し、4月28日には震度1以上を観測する地震は1000回を越え広い範囲で今なお活発な地震活動が続いている。2016年熊本地震合同地震観測グループでは4月14日の地震発生後に緊急合同地震観測を実施し、余震発生領域に緊急地震観測網を展開した。5月1日までの期間に37点の地震観測点を設置し、うち10点はテレメータ収録装置を用いリアルタイムでデータを取得している。さらに加えて、日奈久断層帯の中央部に位置する八代市周辺部、布田川断層帯の北東延長に位置する阿蘇北東地域及び両断層帯が交差する領域の西部にそれぞれ10点ずつ現地収録型の地震観測装置を設置した。5月12日時点ではまだ全ての観測点の設置は完了していないが、先に展開した37点と合わせて計67点で地震波形記録が収録される予定である。また、九州大学では2016年熊本地震発生前より別府-島原地溝帯周辺で臨時地震観測を実施している。これらの密な観測データにより今回の地震に伴って布田川・日奈久断層帯で発生した余震の詳細な震源分布や発震機構を求めることができ、2016年熊本地震の発生メカニズムが明らかにされることが期待される。

謝辞

本研究の一部は文部科学省による「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画」の支援及び科学研究費補助金「2016年熊本地震と関連する活動に関する総合調査」(代表:清水 洋)によって実施されました。また、東京大学地震研究所共同研究プログラムの援助を受けました。ここに記して感謝の意を表します。

キーワード：2016年熊本地震、地震観測

Keywords: the 2016 Kumamoto earthquake, seismic observation

緊急合同余震観測データを用いた高精度震源決定結果から推定される2016年熊本地震震源域の断層構造 (序報)

Fault Structure of the 2016 Kumamoto earthquake using relocated aftershocks

*山下 裕亮¹、松本 聡²、中元 真美²、松島 健²、宮崎 真大¹、清水 洋²、飯尾 能久¹、2016年熊本地震 合同地震観測グループ

*Yusuke Yamashita¹, Satoshi Matsumoto², Manami Nakamoto², Takeshi Matsushima², Masahiro Miyazaki¹, Hiroshi Shimizu², Yoshihisa Iio¹, Group for urgent joint seismic observation of the 2016 Kumamoto earthquake

1.京都大学防災研究所地震予知研究センター、2.九州大学地震火山観測研究センター

1.Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 2.Institute of Seismology and Volcanology, Kyushu University

We estimated the fault structure of the 2016 Kumamoto earthquake using relocated aftershocks for 1 week after the Mj 6.5 foreshock (21:26 14 April 2016). Aftershocks relocation was performed using double-difference method [Waldhauser and Ellsworth, 2000]. For analyzing many events, we picked first arrival times of P and S-waves using automatic picking system (Home Seismometer Corporation) applying to the data of temporal seismic observation around the Futagawa-Hinagu Faults by group for urgent joint seismic observation of the 2016 Kumamoto earthquake. The station using relocation were selected within 50 km distance from epicenter. We firstly calculated initial location using HYPOMH [Hirata and Matsu'ura, 1987] with 1-D velocity model (routine analysis in Kyushu University). Then, we applied tomoDD code [Zhang and Thurber, 2003] with 3-D velocity model [Saiga et al, 2011]. Total number of relocated event is approximately 10,000, which is approximately 5 times compared with JMA catalog. Preliminary result shows some complex alignment of aftershocks associated with foreshock, mainshock, and induced earthquakes.

Acknowledgements: This work is partly supported by MEXT KAKENHI Grant Number 16H06298, the Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology of Japan under its Earthquake and Volcano Hazards Observation and Research Program, and Earthquake Research Institute, The University of Tokyo under Joint Usage Program.

キーワード：2016年熊本地震

Keywords: 2016 Kumamoto earthquake

2016年熊本地震震源域を含む九州の3次元地震波速度構造

Three-dimensional seismic velocity structure in Kyushu including the source region of the 2016 Kumamoto earthquake

*志藤 あずさ¹、松本 聡¹、清水 洋¹、2016年 熊本地震合同地震観測グループ

*Azusa Shito¹, Satoshi Matsumoto¹, Hiroshi Shimizu¹, Group for urgent joint seismic observation of the 2016 Kumamoto earthquake

1.九州大学 大学院理学研究院附属 地震火山観測研究センター

1.Institute of Seismology and Volcanology, Kyushu University

The 2016 Kumamoto earthquake is a series of earthquakes, including an earthquake with magnitude of $M_j=7.3$ which occurred on April 16, 2016 beneath Kumamoto City, the preceding earthquake with magnitude of $M_j=6.5$ which occurred on April 14, 2016, and many triggered aftershocks. The two main earthquakes were located along the Futagawa and Hinagu fault zones in the west area of Beppu-Shimabara graben.

The purpose of the study is to reveal detailed crustal structures and its tectonic process of the successive large earthquakes generation. We estimated three-dimensional seismic wave velocities in the crust beneath Kyushu including the source region of the Kumamoto earthquakes by applying double-difference tomography method [Zhang and Thurber, 2003]. The local earthquake data (from January 2000 to July 2013, $m > 2$, depth < 30 km) were collected by the Institute of Seismology and Volcanology (SEVO), Kyushu University. For the tomographic inversion, we used 159,103 P-wave and 115,265 S-wave arrival times from 4,126 local earthquakes. The initial velocity model is the same as the one used for routine earthquake location processing in SEVO, Kyushu University.

We will discuss the relation between the 2016 Kumamoto earthquakes and the tectonic background inferred from the seismic wave velocity structure.

Acknowledgements

This work is partly supported by JSPS KAKENHI Grant Number JP15J40067, MEXT KAKENHI Grant Number 16H06298, MEXT under its Earthquake and Volcano Hazards Observation and Research Program, and Earthquake Research Institute, The University of Tokyo under Joint Usage Program. We thank Dr. Okada and Dr. Nakajima for their constructive comments.

キーワード：2016年熊本地震

Keywords: The 2016 Kumamoto earthquake

九州地方における2016年熊本地震後の地下構造変化

Temporal changes of seismic velocity structure after the 2016 Kumamoto earthquake

*上野 友岳¹、齊藤 竜彦¹、澤崎 郁¹、汐見 勝彦¹*Tomotake Ueno¹, Tatsuhiro Saito¹, Kaoru Sawazaki¹, Katsuhiko Shiomi¹

1.防災科学技術研究所

1.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

大地震発生後に地下の地震波速度構造が変化することが、これまで度々報告されている。2016年4月に発生した熊本地震（最大マグニチュード7.3）についても、これまで同様に震源域周辺で地下構造が変化することが期待される。熊本地震の震源域は、南西側に起震断層とされる布田川断層や日奈久断層があり、北東側は阿蘇山周辺まで至っている。さらに北東側の大分県北部では、誘発されたと考えられる地震が活発化している。このように、火山地域を含め九州を横断するほどの広範囲に地震活動を活発化させた熊本地震の前後で地下の速度構造がどのように変化したのか調べることは、今後の地震・火山活動の推移の物理メカニズムを解明するためにも重要である。そのため、我々は九州全域の防災科研Hi-net観測点を対象に地震波干渉法解析を行い、地震発生後の速度構造変化の分布を調査した。

地震波干渉法に用いる自己相関関数は、1-3 Hzの帯域通過フィルタを通した1時間毎の連続波形から求めた。この際、地震波形などの振幅の大きな信号の影響を抑えるため、全ての振幅値を1bit化した。これらの自己相関関数を1日ごとに求め、基準となる自己相関関数とのラグ時間差をストレッチング法によって最適化し、その時間差を地下の速度構造変化と解釈した。なお、自己相関関数の基準値は2013年の1年間の平均値とした。また、地震前後の速度変化の条件は、ある観測点における地震前1ヶ月の速度変化のばらつきを標準偏差を σ とした時、地震前後の速度変化が 2σ 以上であることとした。ただし、故障やその他の要因で速度変化のばらつきが極端に不安定な観測点は予め除いている。

熊本地震後において、震源域や誘発地震域周辺の観測点では、0.5%以上の顕著な速度低下を示す観測点が複数あった。震源域南西側では益城、三隅、豊野、玉名観測点で0.5-3.0 %程度の速度低下が見られた。ただし、益城観測点の地震後の速度変化は不安定である。また、震源域北東側の阿蘇山周辺に設置されている阿蘇、白水、波野観測点では1.5-6.0 %程度の大きな速度低下が見られた。さらに大分県北部においては、阿蘇火山と大分県北部で発生している群発地震の間にある九重、庄内観測点で0.5-1.0 %程度の速度低下が見られた。一方で、震源域あるいは阿蘇山のすぐ北側にある菊地観測点や小国観測点では明瞭な速度変化が確認出来なかった。

地震前後の速度変化は、本震時の揺れによる表層での速度低下が確認されているが、一方で、Hi-netのようなボアホールに設置されている地震計で得られる速度変化は、表層の速度変化だけではない可能性がある。特に、今回の地震で1%以上もの速度低下を示した観測点は、変形が著しいと考えられる起震断層近傍に設置されているため、静的な歪変化の影響も考えられる。さらに阿蘇山周辺で得られた顕著な速度低下は、火山性堆積物やマグマによって、他の地域とは大きく異なる弾性・非弾性的な媒質の性質をもっていることが考えられる。詳細なメカニズムは不明であるが、これらに起因し強震動や大きな歪みがかかることによる媒質応答（速度低下）も他地域にくらべ異なっているかもしれない。

キーワード：H28年熊本地震、地下構造変化、自己相関関数、Hi-net

Keywords: The 2016 Kumamoto earthquake, temporal changes of seismic velocity structure, Auto Correlation function, Hi-net

Change in stress and seismicity after the 2016 Kumamoto, Japan, earthquake sequence and implication on regional seismic hazard

*Chung-Han Chan¹, Yu-Chih Huang²

1.Earth Observatory of Singapore, Nanyang Technological University, 2.Aso Volcanological Laboratory, Institute of Geothermal Sciences, Kyoto University

We evaluate evolution of stress and seismicity after the 2016 Kumamoto earthquake sequence and assess rupture probability for the neighbouring active faults. Following the Kumamoto earthquakes, including the April 14th M_w 6.1 and the April 16th M_w 7.0 events, consequent aftershocks took place both north-eastward and south-westward along the Futagawa-Hinagu fault system. In addition to the strike-slip mechanism, which is consistent with the behaviour of the Futagawa-Hinagu fault system, some aftershocks with normal mechanisms were observed. Such aftershock patterns in space and mechanism could be associated with coseismic Coulomb stress change on optimally oriented planes (OOPs), determined based on the stress perturbation of an earthquake and prior regional stress. The model shows significant stress increase along the Futagawa-Hinagu fault system and the OOP were favorable to either strike-slip or normal faulting, consistent with observations. In addition to spatial distribution of consequent events, we forecasted their temporal distribution through the modified Omori Law. In comparing with background seismicity rate, this sequence could last for ca. 1 year, similar as the duration of the sequence that follows the 2000 $M5.0$ earthquake took place in this region. To assess regional seismic hazard after the mainshock, we evaluated short-term rate change on neighboring active faults through the rate-and-state friction model. Due to stress enhanced, seismicity rate elevation for more than 4 times is expected on the Takano-Shirahata and Hinagu segments of the Hinagu fault zone. Considering their long-term rupture probability of 6 % in the coming 30 years, the hazard near these segments are further elevated after the Kumamoto earthquakes. Our results provide the basis to rapidly re-assess seismic hazard, which would be beneficial for emergency response regarding victim relocation and building reinforcement.

Keywords: Kumamoto sequence, Coulomb stress change, modified Omori Law, rate-and-state friction model, seismic hazard assessment

2016年熊本地震震源域周辺の応力場

Stress fields in and around the focal area of the 2016 Kumamoto earthquake

*吉田 圭佑¹、長谷川 昭²、齊藤 竜彦¹、浅野 陽一¹、田中 佐千子¹、澤崎 郁¹、浦田 優美¹、福山 英一¹*Keisuke Yoshida¹, Akira Hasegawa², Tatsuhiko Saito¹, Youichi Asano¹, Sachiko Tanaka¹, Kaoru Sawazaki¹, Yumi Urata¹, Eiichi Fukuyama¹1.国立研究行政法人 防災科学技術研究所 観測・予測研究領域 地震・火山防災研究ユニット、2.東北大学
1.National research institute for earth science and disaster prevention, 2.Tohoku University

2016年4月14日21時26分に、熊本県の布田川 - 日奈久断層帯において、M6.5の地震が発生した。更に、その2日後の4月16日の1時25分には、M7.3の地震が発生した。それぞれ、日奈久断層と布田川断層上で大きなすべりを生じたことがGPSや強震動波形記録を用いた推定により明らかになっている。顕著な地震活動の活発化が、東北東-西南西走向の断層帯沿いの広い範囲で見られ、およそ100km東に離れた大分にまで及んでいる。

一連の地震の発生機構の理解のためには、応力・強度の時間発展の理解が不可欠である。そこで、本研究では、震源域周辺の応力・強度について知見を得る目的で、小~中地震のメカニズム解析により、応力方向の空間分布を求め、その時間発展を調べた。

最初に、応力場の詳細な空間変化を調べるために、震源域周辺の地震の震源再決定を行った。まず、1997年以降2016年5月4日までに発生した11,154個の地震について、気象庁一元化カタログおよびHi-netルーチンカタログに記載されたP波・S波走時データを統合し、新たなP波・S波走時のデータセットを作成した。次に、それらのデータセットを用いて、九州大学のルーチン次元速度構造を仮定して、single event location法を用いて初期震源を決めなおした。最後に、それらのデータセットにDouble Difference法 (Waldhauser & Ellsworth, 2000)を適用し、震源再決定を行った。得られた震源分布は、全体としては複雑な様相を呈するものの、個々には、面上に収斂した微細な断層構造を見ることができる。特に、M7.3の本震発生前には、やや西傾斜の鉛直に近い面状の震源の並びが現れ、本震の震源は、その下端に位置する。

次に、震源域で発生した小~中地震 (M \sim 0.1 ~3.5)のメカニズム解の推定を行った。Hi-netルーチンカタログのP波初動極性データを用いて、2001-2015/5/4に発生した地震にHASH program (Hardebeck & Shearer, 2002)を適用した。その結果、解が高精度 (rank A, B)に求まった991個の解が得られた。これに、AQUA Hi-net、F-netにより推定されたモーメントテンソル解を統合して、1104個のメカニズム解データセットを作成した。

得られたデータセットを用いて、応力テンソル・インバージョン法により、応力方向の時間・空間発展を調べた。最初に、全期間を 1) 1997 - 2016/4/14 M6.5の地震、2) 2016/4/14 M6.5 - 4/16 M7.3の本震、3) 2016/4/16 M7.3の本震 - 2016/5/4の3つの期間に分けて、それぞれの期間内で応力方向を調べた。空間分布を求めるために、各メカニズム解の位置を中心にして、周辺5kmに含まれるメカニズム解を近い順に10 - 15個選び出し、それぞれにSlick code (Michael, 1987)を適用した。

1) 2016/4/14 M6.5地震以前の期間に得られた応力方向は、布田川-日奈久断層帯を挟んで異なる特徴を持つ。北側では σ_3 軸が南北に近い北北西-南南東の正断層場が卓越するのに対して、南側では σ_3 軸が北西に近い横ずれ断層場が卓越する。この南北での応力方向の違いは、Matsumoto et al. (2015)による推定結果と一致し、布田川-日奈久を通る断層帯に沿ったブロック境界の横ずれ運動 (e.g. Nishimura & Hashimoto, 2006)により定性的には理解できる。ブロック境界に位置する4/14 M6.5の地震、4/16 M7.3の本震の震源域周辺は北側のグループに属し、 σ_3 軸がほぼ南北方向を向く。

2) 4/14 M6.5地震以降4/16本震までの期間におけるM6.5地震震源域の σ_3 軸方向は、北北西-南南東を向く。すなわち、 σ_3 軸が反時計回りに約13度回転し、南側のグループに属すようになった。95%信頼範囲でみると、この応力軸の回転は有意である。

3) 2016/4/16の本震後、本震の震源域では、 σ_3 軸が反時計回りに回転し北北西-南南東を向くようになり、同様に南側のグループに属すようになった。ただし、95%信頼範囲でみると有意ではない。さらに、本震震源の周辺では、 σ_3 軸の方向が局所的に変化し、北東-南西方向を向く。この北東-南西方向の σ_3 軸は、本震の右横ずれすべりに起因する静的応力変化により定性的には説明可能であり、本震時に形成された可能性がある。これらの

ことは、震源域周辺の偏差応力が非常に小さいことを示唆し、間隙流体等の効果による摩擦強度の低下が、地震発生に密接に関わっている可能性を示す。

キーワード：応力場、摩擦強度、メカニズム解、断層構造、2016年熊本地震

Keywords: stress field, frictional strength, focal mechanism, fault structure, The 2016 Kumamoto earthquake

2016年熊本地震に関連する地震活動と重力異常水平勾配分布

Relationship between Distributions of Shallow Earthquakes and Gradients of Gravity Anomaly Field in and around the Focal Area of the 2016 Kumamoto Earthquake.

*工藤 健¹、山本 明彦²

*Takeshi Kudo¹, Akihiko Yamamoto²

1.中部大学 工学部 共通教育科、2.愛媛大学 大学院 理工学研究科

1.Science and Technology Section, College of Engineering, Chubu University, 2.Graduate School of Science and Engineering, Ehime University

Relationship between distributions of shallow earthquakes and gradients of gravity anomaly field in and around the focal area of the 2016 Kumamoto Earthquake is investigated. In this session, we will present Bouguer anomaly maps, Bouguer anomaly horizontal gradient maps, and some graphs showing relations between gravity anomaly gradients and spatial distributions of hypocenters related to the 2016 Kumamoto Earthquake.

Zones with steep horizontal gradient of gravity anomaly field are presumably caused by faults bounding different density structures in the crust. On the other hand, most shallow earthquakes are supposed to be caused by dislocations at faults in the crust. From both presumptions, it follows that the distribution of epicenters should be overlapped with that of the steep gravity gradient zones. Kudo and Kono (1999) verified the overlap in Southwest Japan.

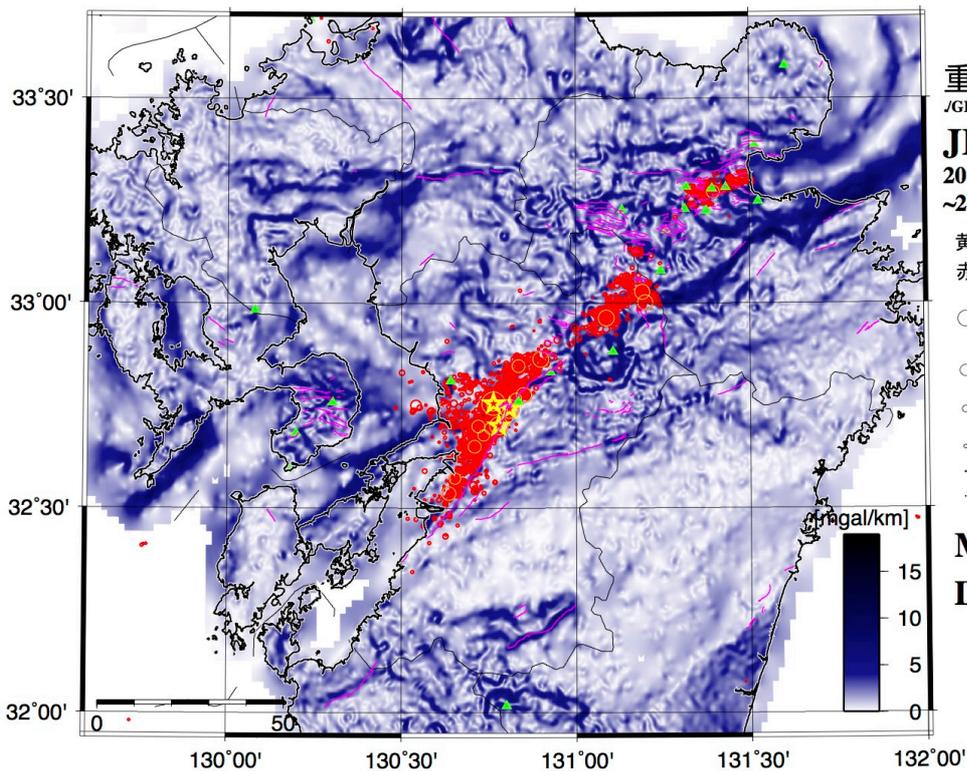
In the case of the 1995 Hyogo-ken Nanbu earthquake, however, very low seismicity along the steep gradient zone of gravity anomaly was followed by the mainshock (Kudo and Kono, 1999). The preliminary report for the case of the 2016 Kumamoto Earthquake will also be presented.

キーワード：2016年熊本地震、重力異常、地震活動

Keywords: 2016 Kumamoto Earthquake, gravity anomaly, seismicity

2016.5.10_KudoLab

Bouguer Anomaly Horizontal Gradient Distribution
 Gridding: 0.0025 deg. mesh. Assumed density: 2.67. Band-pass WL: 2-125 (km).



速報
 2016年熊本地震
 と
 重力異常水平勾配分布
 /GRMapPortr_Kumamoto_EQ_L.ex

JMA
 2016.4.1
 ~2016.5.9

黄○: M5以上暫定
 赤○: M2以上暫定

- :M6
- :M5
- :M4
- :M3
- :M2
- :M1

M_s ≥ 2.0

D ≤ 25.0

黄☆: M6以上暫定
 青☆: M5以上速報(精度よくない)

重力異常により検出した断層構造と2016年熊本地震の余震分布の関係

Relationship between fault structures detected from gravity anomalies and the aftershock distribution of the 2016 Kumamoto earthquake

*松本 なゆた¹、平松 良浩²、澤田 明宏²

*Nayuta Matsumoto¹, Yoshihiro Hiramatsu², Akihiro Sawada²

1.金沢大学大学院自然科学研究科、2.金沢大学理工研究域自然システム学類

1.Graduate School of Natural Science and Technology, Kanazawa University, 2.Institute of Science and Engineering, Kanazawa University

2016年熊本地震では、隣接する2つの断層帯で短期間に連続して規模の大きな前震と本震が発生し、前震は日奈久断層帯、本震は布田川断層帯のそれぞれ一部を震源断層としている。また、本震発生以降は阿蘇地方や大分県の別府-万年山断層帯でも地震活動が活発化しており、これらの断層の連続性や関連性が注目されている。しかし、布田川断層帯の東側延長部には、阿蘇カルデラが分布しており、地形判読による同定は困難である。重力異常による解析は、地下の密度構造を反映しており、地形判読が困難な地域での断層の連続性の判定に有用である。本研究では、熊本-別府地域を対象に重力異常を用いた地下における断層帯の連続性および形態の評価を行い、余震分布との関連性について考察することを目的とする。

使用したデータは金沢大学データ、Yamamoto et al.(2011)、国土地理院(2006)、産総研地質総合センター(2013)、Gravity Research Group in Southwest Japan (2001)である。重力データには通常の補正に加えて、10mDEMによる地形補正(Honda et.al, 2015)、ローパスフィルター処理およびトレンド処理を行った。得られた残差ブーゲ異常から、密度構造境界を水平一次微分、鉛直一次微分、TDX(Cooper and Cowan, 2006)を用いて抽出した。また、断層の運動形態については、2次元構造の傾斜角 β (Beiki, 2013)により検討を行った。水平一次微分、鉛直一次微分およびTDXの結果から、布田川断層帯に沿った北東-南西走向の構造境界が確認でき、その構造境界は阿蘇カルデラ付近を除いた宇土半島先端から別府湾にかけて連続的に分布する。傾斜角 β からは布田川断層帯の構造として正断層構造が推定され、地質・地形学的に推定されている布田川断層帯の変動形態と整合的である。余震分布は、日奈久断層との合流部から阿蘇山の東縁程度までこの構造境界に沿って分布している。阿蘇山より東側では、余震分布の走向が別府-万年山断層帯方向に変化しており、検出された構造境界とは一致しない。

日奈久断層帯の日奈久区間南部では、重力異常に右横ずれ変位の傾向が認められる。断層に沿った構造境界はTDX、鉛直一次微分で検出されるが、布田川断層帯と比べるとやや不明瞭である。一方、布田川断層帯との合流部である高野-白旗区間では、断層に沿った構造境界は検出されない。余震分布は高野-白旗区間に集中しており、南側の比奈久区間では比較的少ない。TDXではこの比奈久区間と高野-白旗区間のセグメント境界付近に北西-南東方向の構造境界が検出されている。また、不変量比 I (Perderson and Rasmussen, 1990)から、TDXで検出された北西-南東方向の構造境界に対応する範囲に3次元的な構造があることが示唆される。地質図から判断すると、この構造境界は変成岩類と堆積層との地質境界に対応し、この地質境界により余震分布域の南端が制約されていると考えられる。

別府-万年山断層帯周辺では火山による同心円状の構造が卓越しており、余震分布に対応する構造境界は確認できなかった。

キーワード：重力異常、余震分布、密度構造境界

Keywords: Gravity Anomaly, Aftershock distribution, Subsurface structural boundary

2016年熊本—九州中部地震活動領域の電気比抵抗構造

Broad-band magnetotelluric data around the focal region of the 2016 Kumamoto-Oita earthquakes

*相澤 広記¹、麻植 久史²、小池 克明³、高倉 伸一⁴、松島 喜雄⁴、畑 真紀⁴、吉永 徹⁵、橋本 武志⁶、宇津木 充⁷、井上 寛之⁷、塩谷 太郎¹³、上嶋 誠⁸、小山 崇夫⁸、神田 径⁹、内田 和也¹、塚島 祐子¹、志藤 あずさ¹、藤田 詩織¹²、若林 翌馬¹²、塚本 果織¹²、松島 健¹、吉村 令慧¹⁰、山崎 健一¹⁰、小松 信太郎¹⁰、田村 慎¹¹、2016年熊本地震 合同地震観測グループ

*Koki Aizawa¹, Hisafumi Asaue², Katsuaki Koike³, Shinichi Takakura⁴, Nobuo Matsushima⁴, Maki Hata⁴, Tohru yoshinaga⁵, Takeshi Hashimoto⁶, Mitsuru Utsugi⁷, Hiroyuki Inoue⁷, Taro Shiotani¹³, Makoto Uyeshima⁸, Takao Koyama⁸, Wataru Kanda⁹, Kazunari Uchida¹, Yuko Tsukashima¹, Azusa Shito¹, Shiori Fujita¹², Asuma Wakabayashi¹², Kaori Tsukamoto¹², Takeshi Matsushima¹, Ryohei Yoshimura¹⁰, Ken'ichi Yamazaki¹⁰, Shintaro Komatsu¹⁰, Makoto Tamura¹¹, The 2016 Kumamoto earthquake research group

1.九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、2.京都大学インフラ先端技術共同研究講座、3.京都大学工学研究科、4.産業技術総合研究所、5.熊本大学工学部、6.北海道大学地震火山研究観測センター、7.京都大学火山研究センター、8.東京大学地震研究所、9.東京工業大学火山流体研究センター、10.京都大学防災研究所、11.北海道立総合研究機構地質研究所、12.九州大学理学府地球惑星科学専攻、13.京都大学理学部地球惑星科学専攻

1.Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Sciences, Kyushu University, 2.Laboratory on Innovative Techniques for Infrastructures, Kyoto University, 3.Graduate School of Engineering and Faculty of Engineering, Kyoto University, 4.National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 5.Kumamoto University, 6.Hokkaido University, 7.Kyoto University, 8.Earthquake Research Institute, University of Tokyo, 9.Volcanic Fluid Research Center, Tokyo Institute of Technology, 10.Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 11.Hokkaido Research Organization, Geological Survey of Hokkaido, 12.Department of Earth and Planetary Sciences, Kyushu University, 13.Division of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Science, Kyoto University

2016年4月14日以降、5月10日現在まで続いている熊本—九州中部地震の震源域周辺では、これまで異なる研究者グループによって、異なる目的のため地下の電気比抵抗構造を推定するため広帯域MT探査が行われてきた。主なものとして日奈久断層、布田川断層と定常地震活動との関連に注目した探査（麻植 他, 2004; 麻植 他, 2007）、阿蘇カルデラのマグマ供給系や熱水系に注目した探査（高倉 他, 2000; Asaue et al., 2006; 畑 他, 2016）、熊本市の地下水の起源に注目した探査（Asaue et al., 2012）、九重山のマグマ供給系や熱水系に注目した探査（塩谷 他, 2015）、大分県中南部の非火山地域の調査（相澤 他, 2015）、別府—万年山断層に注目した探査（相澤 他, 2016）が挙げられる。本発表ではこれら広帯域MT データをコンパイルして得られた結果と地震活動との関連を示す。地下の電気比抵抗構造の大局的な構造を把握するため、平均化したインピーダンス（Rung-Arunwan et al., 2016）による見掛け比抵抗を周波数ごとに示すと0.1秒より長周期側で阿蘇山、九重山、鶴見岳といった活火山周辺は電気を流し易い低比抵抗となっている。震源域の深さ(5~15km)におおよそ対応する、周期10秒、周期100秒の見掛け比抵抗図に、一連の地震活動（2016年4月14日21時26分~4月24日12時40分）の震源を重ねると、今回の地震活動は阿蘇、九重、鶴見岳周辺の低比抵抗領域を避けて、その周辺で発生していることが明らかとなった。これは火山地下がマグマにより高温となり地震を起こしにくくなっていることを反映していると考えられる。最も地震活動が活発な熊本市付近では地震活動は低比抵抗—高比抵抗の境界、高比抵抗領域で発生しているように見え、断層が電気比抵抗の構造境界となっていることを示唆している。

詳細図については

<http://www.sevo.kyushu-u.ac.jp/kumamoto2016/MT2016KumamotoOita.pdf>

謝辞

本研究の遂行にあたり、以下の補助を受けました。

「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画：課題番号2201」

「別府－万年山断層帯（大分平野－由布院断層帯東部）における重点的な調査観測」

「科学研究費補助金「2016年熊本地震と関連する活動に関する総合調査」（代表:清水 洋）」

参考文献

Asaue, H., Koike, K., Yoshinaga, T., and Takakura, S., 2006, Magnetotelluric resistivity modeling for 3D characterization of geothermal reservoirs in the Western side of Mt. Aso, SW Japan: *Journal of Applied Geophysics*, v. 58, p. 296-312.

Asaue, H., Kubo, T., Yoshinaga, T., and Koike, K., 2012, Application of Magnetotelluric (MT) Resistivity to Imaging of Regional Three-Dimensional Geologic Structures and Groundwater Systems: *Natural Resources Research*, v. 21, p. 383-393.

Rung-Arunwan, T., Siripunvaraporn, W., and Utada, H., 2016, On the Berdichevsky average: *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, v. 253, p. 1-4.

相澤広記, 小山崇夫, 志藤あずさ, 若林翌馬, 宮崎真大, 内田和也, 塚島祐子, 塚本果織, 高島奏, 近藤健太郎, 河本洋輝, 藤田詩織, 山本有人, 緒方美季, 上嶋誠, 2016, 別府－万年山断層帯の比抵抗構造: 日本地球惑星科学連合2016年大会, 千葉幕張.

相澤広記, 上嶋誠, 高村直也, 宇津木充, 井上寛之, 塩谷太郎, 内田和也, 塚島祐子, 若林翌馬, 藤田詩織, 松島健, 小山崇夫, 神田径, 吉村令慧, 山崎健一, 小松信太郎, 志藤あずさ, 2015, 地電位差計を用いた大分県中南部の広帯域MT観測: 日本地球惑星科学連合2015年大会, 千葉幕張.

麻植久史, 小池克明, 吉永徹, 高倉伸一, 2007, 布田川-日奈久断層帯の深部比抵抗構造のイメージングと微小地震分布からの考察: *応用地質*, v. 48, p. 180-191.

麻植久史, 小池克明, 高倉伸一, 大見美智人, 2004, MT法による活断層深部の破碎構造解析: *応用地質*, v. 45, p. 60-70.

塩谷太郎, 宇津木充, 相澤広記, 上嶋誠, 小山崇夫, 神田径, 2015, 広帯域MT探査による九重連山周辺の比抵抗構造推定: 日本地球惑星科学連合2015年大会, 千葉幕張.

高倉伸一, 橋本武志, 小池克明, 小川康雄, 2000, MT法による阿蘇カルデラの比抵抗断面: *Conductivity anomaly 研究会論文集*, p. 23-30.

畑真紀, 高倉伸一, 松島喜雄, 橋本武志, 2016, 阿蘇カルデラ直下の地殻構造の3次元電気比抵抗イメージング: 日本地球惑星科学連合2016年大会, 千葉幕張.

キーワード：比抵抗、MTデータ、2016年熊本地震

Keywords: resistivity structure, magnetotelluric data, The 2016 Kumamoto earthquake

2016年熊本地震のテクトニックな背景：西南日本弧と琉球弧の会合点としての九州

The tectonic background of the 2016 Kumamoto Earthquakes across middle Kyushu, the junction of southwest Japan Arc and the Ryukyu Arc

*眞島 英壽¹

*Hidehisa Mashima¹

1. 明治大学黒耀石研究センター

1. Center for Obsidian and Lithic Studies, Meiji University

2016年熊本地震が発生した九州は、西南日本弧と琉球弧の会合点に位置する。このため、2016年熊本地震のテクトニックな背景を理解するには、西南日本弧の要素と琉球弧の要素の両方を考慮する必要がある。本研究では、地震発生前の国土地理院GEONET観測値、マントル浅所地震S波偏向性（清水，1992）および地質構造から、九州のテクトニクスにおける西南日本弧と琉球弧の要素の抽出を行った。

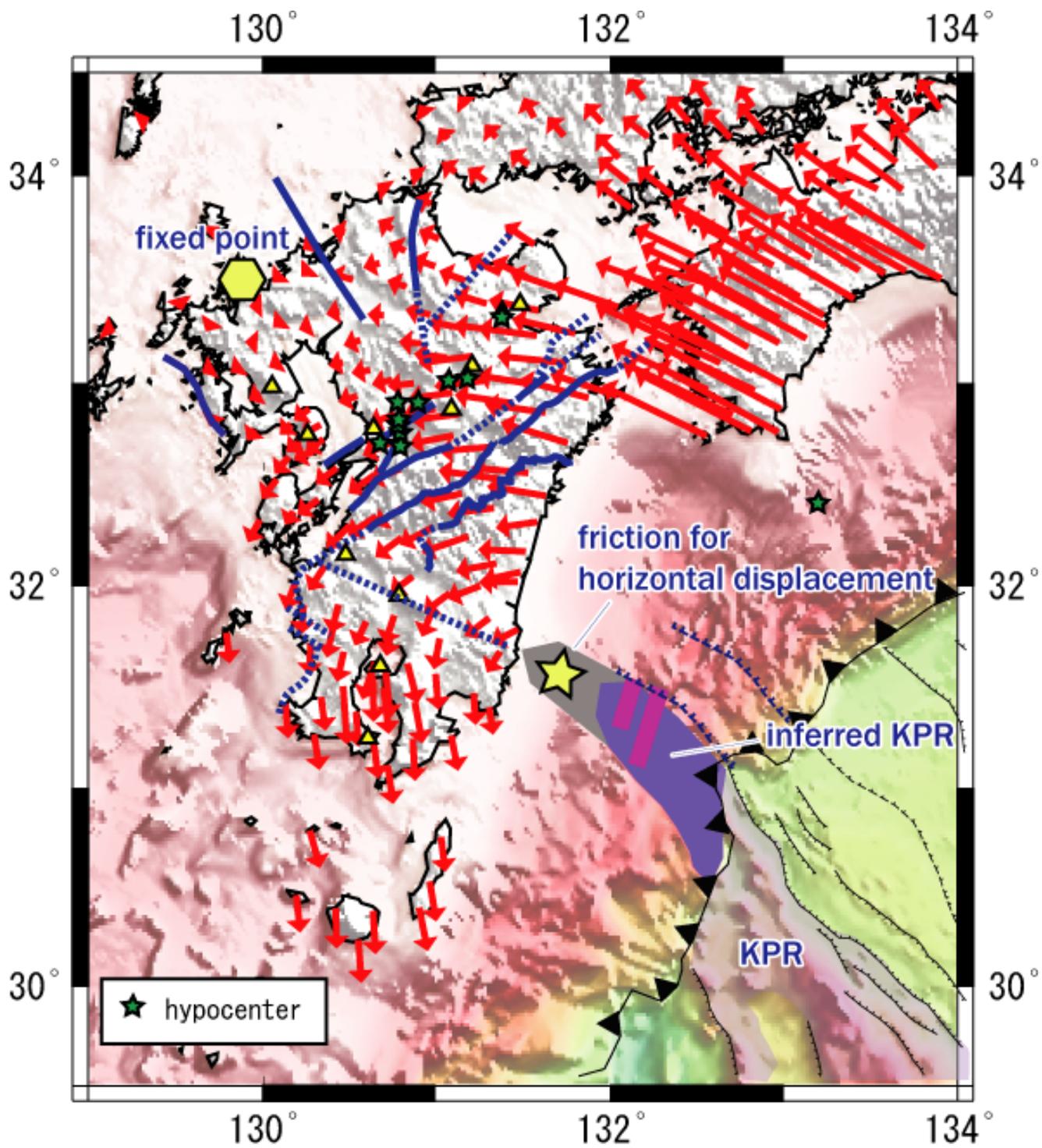
プレート境界から遠く、緩慢な地形を持つ北西九州佐賀玄海を不動点として、九州の水平変位をプロットした。この水平変位図で熊本周辺は西南西方向の相対水平変位を示し、南下する共に南西方向の水平変位へと変化する。この向きは臼杵八代構造線や仏像構造線などで規制される地帯構造の向きと大局的に一致する。この地域のマントル浅所地震S波も、北東南西方向の偏向性を示す（清水，1992）。また、北薩－霧島－日南を通る線で水平変位の向きは大きく変化し、南九州は南向きの変位を示す。北薩では仏像構造線の向きが北東南西方向から南北方向に変化する、いわゆる「北薩の屈曲」（橋本，1962）が認められる。このように、玄海を不動点とした水平変位プロットは九州の地質学および地震学的特徴とよく一致しており、九州のテクトニクスを反映していると考えられる。熊本周辺では震源付近の布田川断層が北東－南西方向であるのに対して、水平変位の向きは西北西であり斜行している。この斜行によって蓄積された横ずれ運動に伴う水平圧縮成分が地震活動の原因の1つと考えられる。

中国四国地方は北西方向の水平変位のみを示し、一方、琉球弧は玄海に対して、南向きの水平変位を示す。従って、九州の水平変位に含まれる南向き成分は琉球弧の要素であると考えられる。北西向きの西南日本弧の変形要素と南向きの琉球弧の変形要素が交差するとともに、地帯構造の向きと変位の向きが斜行することが九州のテクトニクスを複雑にしていると考えられる。

熊本以南の九州は水平変位が反時計回りに変化する。つまり、単純な横ずれテクトニクスではなく、回転テクトニクスと呼ぶべき特徴を示すが、山地と盆地が入り組んだ九州の地形的特徴と調和的である。宮崎日南地方はこの回転の極であり、水平変位も小さい。海底地形（沖野，2015）および地震波探査（Nishizawa et al., 2009）から日南地方沖に九州パラオ海嶺が達していると考えられる。沈み込んだ九州パラオ海嶺が南向き変位への抵抗となって、この回転テクトニクスの原因となっていると考えられる。

キーワード：2016年熊本地震、島弧会合点、西南日本弧、琉球弧、九州－パラオ海嶺、テクトニクス

Keywords: The 2016 Kumamoto Earthquakes, arc junction, The Southwest Japan Arc, The Ryukyu Arc, The Kyushu-Palau Ridge, tectonics



2016年熊本地震に伴う九州南部のせん断帯における地殻変動（序報）

Crustal deformation at the shear zone of the southern part of Kyushu region accompanied with the 2016 Kumamoto earthquake (Preliminary report)

*渡部 豪¹、浅森 浩一¹、梅田 浩司²、雨宮 浩樹¹、野村 勝弘¹、中司 昇¹

*Tsuyoshi Watanabe¹, Koichi Asamori¹, Koji Umeda², Hiroki Amamiya¹, Katsuhiko Nomura¹, Noboru Nakatsuka¹

1.日本原子力研究開発機構 東濃地科学センター、2.弘前大学大学院 理工学研究科

1.Tono Geoscience Center, Japan Atomic Energy Agency, 2.Graduate School of Science and Technology, Hirosaki University

近年のGPS速度場を用いたひずみ速度の推定から、九州地方には、 1.0×10^{-7} /yrオーダーのせん断ひずみ速度の高い領域が2ヶ所存在することが知られている（例えば、Wallace et al., 2009）。1つ目は、伊予灘から有明海に通じる幅60 km、長さ120 kmにおよぶ領域で、その中には、別府-万年山断層帯や布田川断層帯など活断層が存在し、島原-別府地溝帯の北部に相当する。2016年熊本地震もこのせん断ひずみ速度の高い領域の末端部で発生したように見受けられる。2つ目は、北緯32°付近に沿って九州地方を東西に横断する幅30 km、長さ120 kmにおよぶ領域（九州南部のせん断帯）であり、1997年3月と同年5月に発生した鹿児島県北西部地震（それぞれ、M6.6、M6.4）の震源域も含まれるものの、それらの地震活動や高いせん断ひずみ速度に対応する明瞭な活断層の存在は今のところ認められていない。日本原子力研究開発機構では、地殻変動予測技術を開発するために、2つ目の領域を事例としてより詳細な地殻変動の特徴把握とせん断帯の形成過程解明を進めており、同領域に対して直交する南北方向に10地点のGNSS観測網を構築し、2016年2~3月に観測を開始した。この観測開始から約1ヶ月後の4月14日、16日に熊本地方を震源とするM6.5、M7.3の地震が相次いで発生し、震源から約60 km離れた最北端のGNSS観測点でM7.3の地震に伴う南方向へ約6 cmの変位を捉えた。本発表では、10地点のGNSS観測網での予備的な解析結果を示すとともに、国土地理院F3解を用いてひずみ速度の解析を行い、2016年熊本地震による九州地方におけるひずみ速度の時間変化や地震前後のひずみ収支について議論を行う。また、産業技術総合研究所の活断層データベースを用いて推定したひずみ速度（地質学的ひずみ速度）分布もふまえ、同領域における地質学的時間スケールと測地学的時間スケールでのひずみ速度の比較を行い、上部地殻の変形についても議論する。

参考文献

Wallace et al. (2009): Enigmatic, highly active left-lateral shear zone in southwest Japan explained by aseismic ridge collision, *Geology*, vol.37, 2009, pp.143-146.

本報告は、経済産業省資源エネルギー庁委託事業「地層処分技術調査等事業（地質環境長期安定性評価確証技術開発）」の成果の一部である。解析には、国土地理院F3解、産業技術総合研究所の活断層データベース、東京海洋大学の高須知二氏が作成したオープンソースプログラムRTKLIB (ver. 2.4.3) を使用させて頂きました。記して感謝致します。また、2016年熊本地震で被災されました方々に、心からお見舞いを申し上げます。

キーワード：九州南部のせん断帯、ひずみ速度の時空間変化、測地学的ひずみ速度、地質学的ひずみ速度

Keywords: shear zone of the southern part of the Kyushu region, spatiotemporal variation of strain rate, geodetic strain rate, geological strain rate

GEONETによって検出された平成28年熊本地震による地殻変動

Co- and post-seismic displacements due to the 2016 Kumamoto earthquake observed by GEONET

*川元 智司¹、檜山 洋平¹、国土地理院 GEONETグループ¹

*Satoshi Kawamoto¹, Yohei Hiyama¹, GSI GEONET group¹

1.国土交通省国土地理院

1.Geospatial Information Authority of Japan

平成28年（2016年）4月16日1時25分に熊本県でM7.3の地震が発生した。さらにこの地震に先だって4月14日21時26分にM6.5の地震が、4月15日0時3分にM6.4の地震がそれぞれ発生しており、これら一連の地震は、熊本県を中心とした地域に甚大な被害をもたらした。国土地理院では、日本全国に約20km間隔、約1300点からなるGNSS連続観測網（GEONET）による地殻変動の観測を行っている。今回、GEONET観測データを用いて、これらの地震に伴う地殻変動とその余効変動の検出を行ったのでその暫定的な結果を報告する。

国土地理院では、GEONET観測データはセッション長を固定して一定時間毎にルーチン的に実行されるGEONET定常解析（F3解析（24時間解析）、R3解析（24時間解析）、Q3解析（6時間解析））によって解析されている。しかし、今回発生した二つの前震は発生間隔が3時間未満と短く、定常解析ではそれぞれの地震による変動を個別に検出することが不可能であった。そのため、任意のセッション長を設定し手動で解析を行う緊急解析（S3解析）及びGEONETリアルタイム解析（REGARD）による結果も用いて、二つの前震及び本震による地震時の変動を推定した。

これらの解析の結果、4月14日の地震（M6.5）、4月15日の地震（M6.4）、4月16日の地震（M7.3）それぞれに伴い地殻変動が検出された。二つの前震に伴い、日奈久断層帯周辺の電子基準点「城南（1071）」で北東方向に20cmの変動、上下方向に約3cmの沈降が見られた。一方、本震に伴っては九州地方全体の広い範囲で地殻変動が観測され、特に布田川断層帯周辺の電子基準点「熊本（0465）」では北東方向に75cm、上下方向に20cmの沈降が、電子基準点「長陽（0701）」では南西方向に97cmの変動、28cmの隆起が見られた（図）。また、本震発生後約3週間が経過した5月4日現在で、本震の地震時の変動とおおよそ似た傾向の余効変動が観測され、電子基準点「長陽（0701）」では南西方向に約3cmの変動が観測されている。

地震調査委員会では、前震では日奈久断層帯が、本震では布田川断層帯が破壊されたことを報告しており、これは今回GEONETにより観測された結果と整合的である。また、本震の震源は布田川断層帯と日奈久断層帯との境界付近であったことから、断層は東向きに破壊されたと考えられる。さらに、本震では前震よりも上下方向の変動が大きいことから、断層面が前震よりもやや低角に傾斜していることも示唆される。今後は、詳しい断層モデルの推定を行うとともに、余震による地殻変動及び余効変動の監視を続けていく予定である。

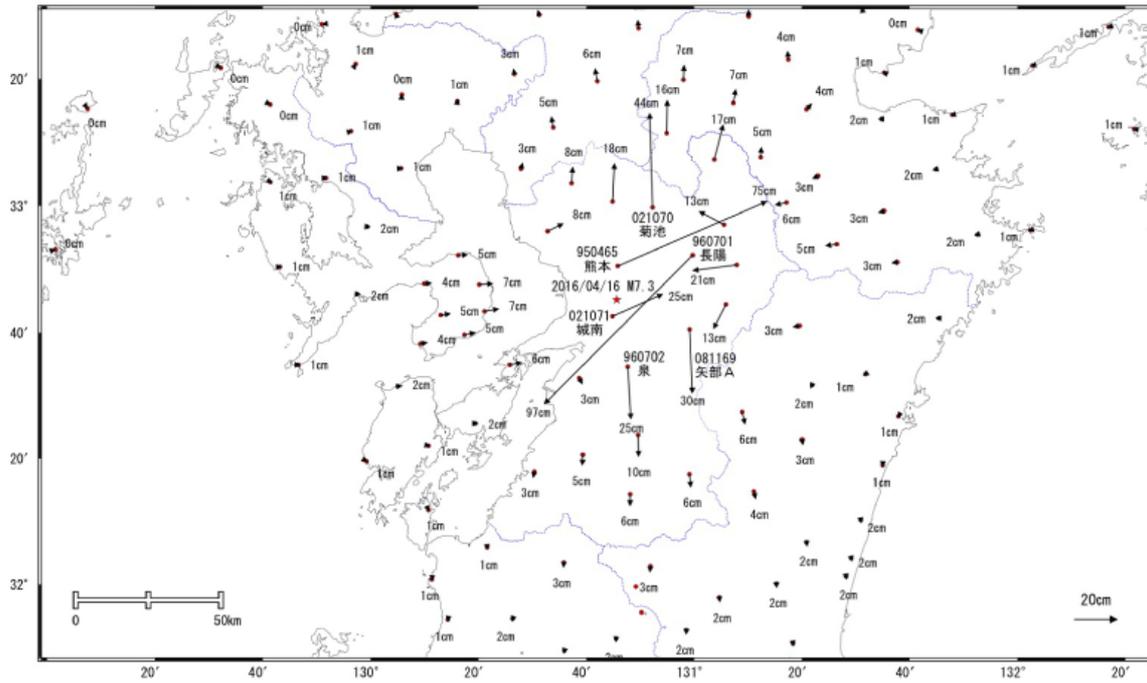
キーワード：平成28年熊本地震、GEONET、地殻変動、キネマティックGNSS解析

Keywords: The 2016 Kumamoto earthquake, GEONET, crustal deformation, Kinematic GNSS analysis

平成28年4月16日の熊本県熊本地方の地震(M7.3) (暫定値) 前後の観測データ (1)
 地殻変動(水平)

【暫定】

基準期間: 2016/04/15 03:00~2016/04/15 23:59 [Q3: 迅速解]
 比較期間: 2016/04/16 02:00~2016/04/16 05:59 [S3: 迅速解]



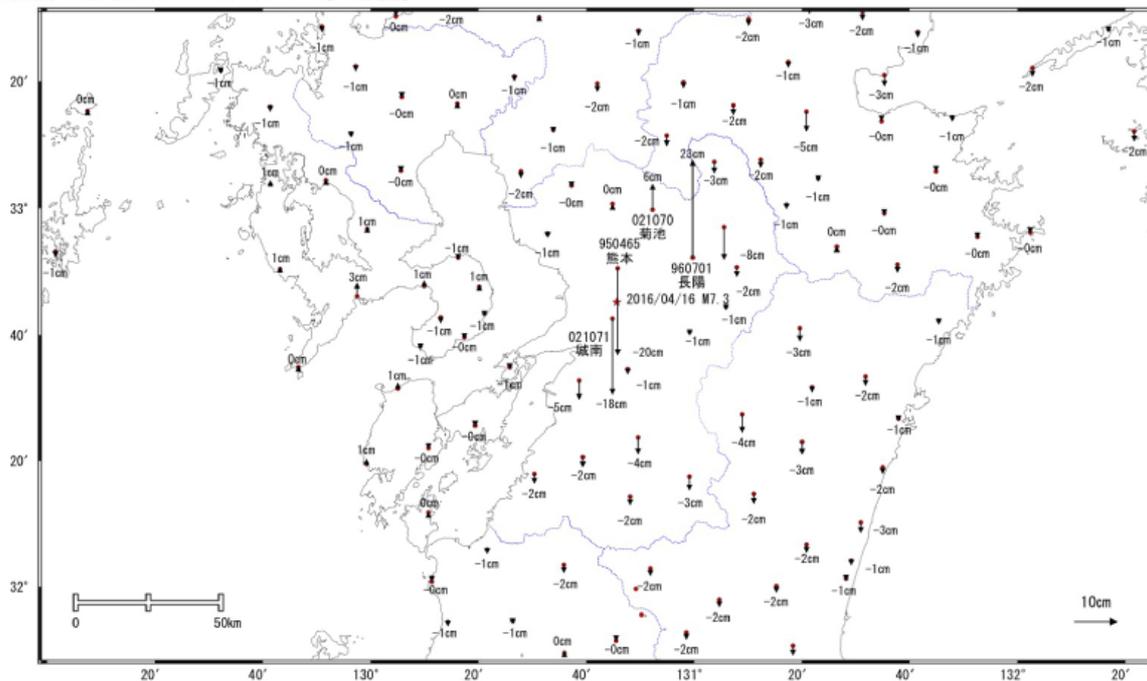
☆ 固定局: 福江 (950462)

国土地理院

平成28年4月16日の熊本県熊本地方の地震(M7.3) (暫定値) 前後の観測データ (2)
 地殻変動(上下)

【暫定】

基準期間: 2016/04/15 03:00~2016/04/15 23:59 [Q3: 迅速解]
 比較期間: 2016/04/16 02:00~2016/04/16 05:59 [S3: 迅速解]



☆ 固定局: 福江 (950462)

国土地理院

地盤情報システムを用いてGEONET点から求めた熊本地震の地殻変動の解析

Analysis of Crustal Deformations of Kumamoto Earthquake Obtained by JISLaD System Using GEONET Observation Data

*島田 誠¹、新出 陽平²、伊藤 広和²、請井 和之²、末野 幹雄³

*Seiichi Shimada¹, Yohei Shinde², Hirokazu Itoh², Kazuyuki Ueki², Mikio Sueno³

1. 東京大学大学院新領域創成科学研究科 株式会社日豊、2. 株式会社日豊、3. 株式会社カルシステム

1. Graduate School of Frontier Sciences, University of Tokyo Nippo Co. Ltd., 2. Nippo Co. Ltd., 3. Cal System Co. Ltd.

1. はじめに

株式会社日豊では、2008年以降毎日GEONET全点の自動解析を行って、日値及び週値の座標値解を蓄積している(島田ほか, 2008, 2009, 2013, 2015)。それらの座標値解を用いて、地盤情報システム(JISLaD)というシステムを開発し、全国のGEONET観測点網の基線長やひずみの変動を監視し始めている(伊藤ほか, 2015; 請井ほか, 2015a, 2015b)。

今回地盤情報システムを用いて、日奈久断層帯の一部で発生した平成28年4月14日21時26分(JST)のM6.5の前震及び、布田川断層帯の一部で発生した4月16日1時25分(JST)のM7.3の地震について地殻変動を算出した。本システムでは、UTCの0時から24時までの24時間のGEONET観測データ(RINEXファイル)を用いて、日値及び週値の座標値解を得ているが、前震と本震との間隔は28時間近くあるものの、UTCでは前震と本震とのあいだで両者の影響を受けない日を取ることができないので、UTCの4月14日13時(4月14日22時JST)から4月15日13時(4月15日22時JST)の24時間のデータを臨時に解析して、前震と本震とのあいだの一日の座標値を得た。

2. 地震時地殻変動

前震前の4月7日から13日の7日間の週値座標値解、上記で得られた前震と本震のあいだの日値座標値解及び本震後の4月16日から22日の7日間の週値座標値解とから、前震と本震の震源周辺のGEONET点の水平・上下変動を得た。

前震時の変動では、日奈久断層帯西側の城南(021071)観測点が北北東に27cmの変動及び5mmの沈降をしている。また、断層帯北方の熊本(950465)観測点が北北西に12cmの変動及び3cmの隆起を示している。一方日奈久断層帯東側では、東北に位置する4観測点が西から西南西に2cmから3cm、断層帯の南方の泉(960702)観測点が南南東に5cmの水平変動を示しているが、上下変動はほとんど見られない。これらの変動は日奈久断層帯北部が右横ずれ変動をしたと考えたときの理論変位と調和的である。

一方本震時の変動では、布田川断層北東端近くの長陽(960701)観測点が南西に99cm変位し25cm隆起している。また、布田川断層南西端の北方に位置する熊本(950465)観測点が東北東に76cm変位し、19cm沈降している。布田川断層南西端の南方に位置する城南(021071)観測点は東北東に28cm変位し、19cm沈降している。また、布田川断層東方の3観測点は西北西から南西に21cmから13cm変位し、最大9cm程度沈降している。その他の布田川断層北方の観測点はおおむね北方への変位を示し、布田川断層南方の観測点は南方への変位を示している。これらの変動は、国土地理院が公開している熊本地震の地震時変動の速報値と概ね一致している。

3. 前震と本震の面積ひずみの分布

前震及び本震において、それぞれ地震断層をまたがないように三角網を作り、面積ひずみを計算した。前震では宇土半島付近で6 μ strain程度の膨張が見られ、熊本北部、中部では2~4 μ strainの収縮がみられた。本震のひずみ分布では阿蘇地域で70 μ strain、熊本市沿岸地域で15 μ strainの膨張がみられた。菊池市、益城町、西原村付近では数10 μ strainの収縮がみられた。前震・本震ともに布田川断層、比奈久断層の右横ずれ断層の変動から期待される面積ひずみ分布と矛盾はしないが、一般の横ずれ断層モデルで計算される面積ひずみをきれいに示しているとはいえない。

4. 考察と結論

熊本地震はM7.3と最近100年間程度に日本列島内陸部で発生した活断層による地震としては最大級の大きさである。特に布田川断層・日奈久断層は九州の内陸中央部に位置しており、周囲をGEONET点で取り囲んでいるにもかかわらず、必ずしも横ずれの断層モデルから期待される地震時変位や面積ひずみのパターンがきれいに観測で示されたとはいえない。これは、この地域のGEONET点の観測点間隔が10km~20km程度と密度が粗いためと考えられる。今後、内陸型の地震の研究にGEONET観測点を活用していくためには、現在の半分程度の観測点間隔となるような観測点密度が最低限必要であると考えられる。

キーワード：GEONET、地震時変位、面積ひずみ変化、JISLaD

Keywords: GEONET network, co-seismic motion, dilatational strain, JISLaD

GNSSによる2016年熊本地震発生後の地殻変動観測

Crustal deformation observation after occurrence of 2016 Kumamoto Earthquake by GNSS

*中尾 茂¹、松島 健²、田部井 隆雄³、山品 匡史⁴、大倉 敬宏⁵、西村 卓也⁶、澁谷 拓郎⁶、寺石 眞弘⁶、伊藤 武男⁷、鷺谷 威⁸、松廣 健二郎⁷、加藤 照之⁹、福田 淳一⁹、渡邊 篤志⁹、三浦 哲¹⁰、太田 雄策¹⁰、出町 知嗣¹⁰、高橋 浩晃¹¹、大園 真子¹¹、山口 照寛¹¹、岡田 和見¹¹

*Shigeru Nakao¹, Takeshi Matsushima², Takao Tabei³, Tadashi Yamashina⁴, Takahiro Ohkura⁵, Takuya NISHIMURA⁶, Takuo Shibutani⁶, Masahiro Teraishi⁶, Takeo Ito⁷, Takeshi Sagiya⁸, Kenjiro Matsuhira⁷, Teruyuki Kato⁹, Jun'ichi Fukuda⁹, Atsushi Watanabe⁹, Satoshi Miura¹⁰, Yusaku Ohta¹⁰, Tomotsugu Demachi¹⁰, Hiroaki Takahashi¹¹, Mako Ohzono¹¹, Teruhiro Yamaguchi¹¹, Okada Kazumi¹¹

1.鹿児島大学大学院理工学研究科地球環境科学専攻、2.九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、3.高知大学理学部応用理学科、4.高知大学理学部附属高知地震観測所、5.京都大学大学院理学研究科附属地球熱学研究施設火山研究センター、6.京都大学防災研究所、7.名古屋大学大学院環境学研究科附属地震火山研究センター、8.名古屋大学減災連携研究センター、9.東京大学地震研究所、10.東北大学大学院理学研究科附属地震・噴火予知研究観測センター、11.北海道大学大学院理学研究院附属地震火山研究観測センター

1.Department of Earth and Environmental Sciences, Graduate School of Science and Engineering, Kagoshima University, 2. Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Sciences, Kyushu University, 3.Department of Applied Science Department, Faculty of Science, Kochi University, 4.Kochi Earthquake Observatory, Faculty of Science, Kochi University, 5.Aso Volcanological Laboratory, Institute for Geothermal Sciences, Graduate School of Science, Kyoto University, 6.Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 7.Earthquake and Volcano Research Center, Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, 8.Disaster Mitigation Research Center, Nagoya University, 9.Earthquake Research Institute, University of Tokyo, 10.Research Center for Prediction of Earthquakes and Volcanic Eruptions, Graduate School of Science, Tohoku University, 11.Institute of Seismology and Volcanology, Graduate School of Science, Hokkaido University

2016年4月14日マグニチュード(M)6.5の地震発生を受けて、翌15日から鹿児島大学と北海道大学が共同でGNSS観測点の設置を開始したが、16日M7.3の地震が発生し、大分県にまで地震活動が広がったことから、各大学間で、余効変動の観測、大分県や阿蘇山周辺での地震活動にともなう地殻変動を観測する目的で、九州大学・京都大学・鹿児島大学によるGNSS観測点および国土地理院GEONET、気象庁常時監視火山GNSS観測点の配置を考慮し、GNSS連続観測点を計21点設置し、4月28日までに観測を開始した。4点はテレメタされているが、他の観測点は現地収録である。ここでは、すでにデータ回収が行われた観測データについて解析結果について述べる。解析は、Bernese GNSS Software Ver. 5.2を用い、CODE解析センターが公表した2016年4月30日までの精密暦、地球回転パラメタを用いて、GEONET、九州大学・京都大学・鹿児島大学によるGNSS観測点のデータとともに解析を行った。また、2016年5月1日から5月7日までは、CODE解析センターが公表した速報暦を用いて解析した。気象庁常時監視火山GNSSデータも提供をうけ、同時に解析した。

日奈久断層西側の観測点では北東方向への変動が、東側観測点では南西方向への変動が観測されているように見える。大分県に設置した観測点では特筆すべき変動は現在のところ観測されていないようにみえる。謝辞：国土地理院GEONET観測点と気象庁常時監視火山GNSS観測点のデータを使用しました。記して感謝いたします。本研究は文部科学省による「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画」の支援を受けました。また、本研究(の一部)は、科学研究費補助金特別研究促進費「2016年熊本地震と関連する活動に関する総合調査」(代表:清水 洋, 課題番号16H06298)によって実施された。

キーワード：GNSS観測、余効変動

Keywords: GNSS observation, post-seismic deformation

GNSS Campaign観測で捉えられた 2016年熊本地震の地殻変動

Co-seismic displacements of the 2016 Kumamoto Earthquake derived from GNSS Campaign measurements

*松島 健¹、手操 佳子¹、中尾 茂²、清水 洋¹、松本 聡¹、中元 真美¹、内田 和也¹

*Takeshi Matsushima¹, Yoshiko Teguri¹, Shigeru Nakao², Hiroshi Shimizu¹, Satoshi Matsumoto¹, Manami Nakamoto¹, Kazunari Uchida¹

1.九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、2.鹿児島大学大学院理工学研究科地球環境科学専攻

1.Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Sciences, Kyushu University, 2.Department of Earth and Environmental Sciences, Graduate School of Science and Engineering, Kagoshima University

1999年10月以降、九州中部の布田川-日奈久断層帯において、地殻浅部の地震活動が活発化していた。特に2000年6月にはマグニチュード4.8の地震が日奈久断層北端部で発生し、周囲で震度5弱を記録した。我々は日奈久断層深部のすべりの有無を明らかにし、断層へのローディングプロセスに関する知見を得るために、宇土市住吉町から美里町早楠の日奈久断層に直交する西北西～東南東方向約30kmの測線上に11カ所の基準点を設定し、2000年からCampaign観測を始めた。基準点では、木製三脚精密三脚を使用してアンテナを固定し、1地点あたり2～3日間のデータを取得した。

直近の測定は2010年2月であったが、2016年熊本地震が発生後、急遽再測定を実施した。観測点に地震の直接の被害は無かったが、一部の観測点(KM04)に地すべりに起因する地割が生じていた。観測期間中にも大きな余震が何度か発生したが、測定後に三脚のずれは最大でも2mmであり、測定誤差の範囲に収まると考え補正はしなかった。

解析はGIPSY-OASIS 6.4による精密単独測位法を用い、精密暦にはJPL最終暦を用いた。連続観測を実施していたMRTK(美里町勸徳小)とGEONET観測点は2016年4月1～5日と4月23～27日のそれぞれ5日間の座標の平均値の差を4月14～16日に発生した熊本地震時の地殻変動とした。また、11点のCampaign観測点は、地震時の地殻変動の他に2010年からの約6年間の分の定常的な地殻変動をそのベクトルに含んでいる、そのため周囲のGEONET観測点で求められた2010年4月上旬～2016年4月上旬の地殻変動ベクトルの平均値がこの地域の定常的な地殻変動であると仮定して、測定ベクトルから差し引くことで、地震時の地殻変動を推定した。

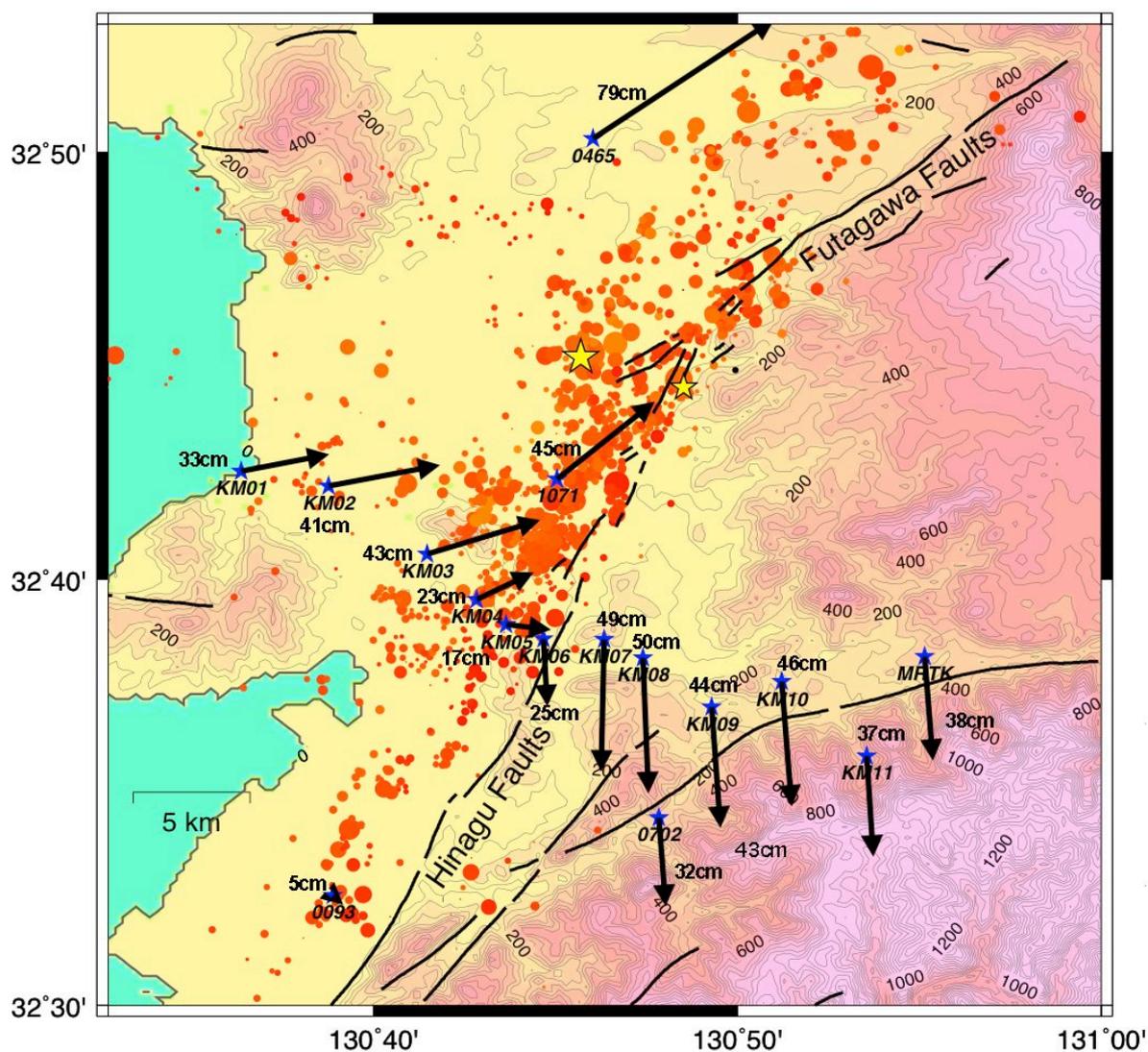
本解析から求められた地震時の地殻変動ベクトルを図に示す。これを見ると、地震による地殻変動が最大50cm観測されているが、日奈久断層近傍では変位量が小さくなることから、地震断層は地表には達していないこと。また断層の食い違いは、測線の北側の日奈久断層北部セグメント内におさまっていること。地下の地震断層は、地表で確認されている活断層のトレースより1～2km程度海側に寄っていることが分かった。また測線の南部の日奈久断層の中部・南部セグメントは今回の活動でまだ大きく動いていないことから、今後の地震活動予測として重要な知見を得ることができた。

謝辞

本研究の一部は、科学研究費補助金「2016年熊本地震と関連する活動に関する総合調査」(代表:清水 洋)によって実施された。また、本研究は文部科学省による「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画」および東京大学地震研究所共同研究プログラムの支援をうけた。ここに記して感謝する。

キーワード：2016年熊本地震、布田川・日奈久断層帯、地殻変動、GNSS

Keywords: The 2016 Kumamoto Earthquake, The Futagawa and Hinagu Fault Zones, Crustal Displacement, GNSS



Campaign観測点 (KM01- KM11)

測定1: 2010年2月 7~12日

測定2: 2016年4月23~27日

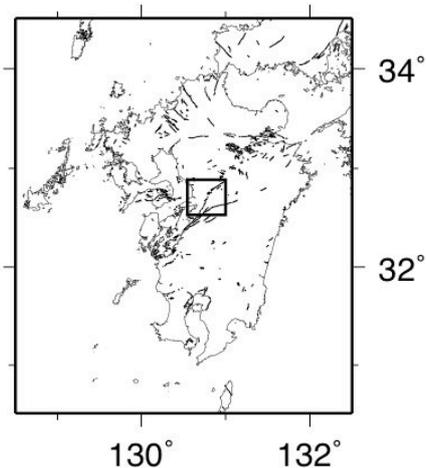
連続観測点 (MRTK) および GEONET

測定1: 2016年4月 1~5日

測定2: 2016年4月23~27日

固定点: IGS点 解析: GIPSY 6.4 暦: JPL Final

Campaign観測点については、2010年2月から2016年4月上旬の間の定常的な地殻変動を周囲のGEONET観測点から推定し、測定値から差引いている。



GEONETデータに基づく2016年熊本地震前後でのひずみの時空間変化

Spatio-temporal strain change around the 2016 Kumamoto earthquakes observed by GEONET data

*大園 真子¹、高橋 浩晃¹*Mako Ohzono¹, Hiroaki Takahashi¹

1.北海道大学大学院理学研究院附属地震火山研究観測センター

1.Institute of Seismology and Volcanology, Graduate School of Science, Hokkaido University

2016年4月14日に発生した熊本を震源とするM_j6.5の地震以降、その周辺では地震活動が活発化し、4月15日にはM_j7.3の地震が発生した。本研究では、国土地理院が設置しているGNSS連続観測網GEONETのデータを用いてM_j6.0以上の地震3つ（4月14日21:26 M_j6.5, 4月15日00:03 M_j6.4, 4月16日01:25 M_j7.3）の前後の時間に区切ってその地震時の地殻変動およびひずみ場を推定した。4月14日および4月15日の地震では、震源域周辺で最大数ppmの日奈久断層帯に沿った右横ずれの断層運動に従ったひずみ分布が推定される。また、4月16日のM_j7.3の地震では、最大100ppm程度の面積ひずみおよび最大40ppm程度の剪断ひずみが震源の北東部で推定された。このM_j7.3の地震時地殻変動を説明する断層モデルを推定するため、国土地理院が推定した暫定的な断層モデル (<http://www.gsi.go.jp/common/000139798.pdf>) を元に半無限均質弾媒質中の矩形断層を仮定して、Matsu'ura and Hasegawa (1987) の手法によるインバージョンを行ったところ、布田川断層帯にほぼ沿ったところで長さ26km、幅10kmの高角(57°)なほぼ右横ずれの断層が推定され、その規模はM_w6.96相当となる。断層モデルは観測値を概ねよく説明するが、この理論値と観測値の残差は震源域近傍で数cmの変位、数ppmのひずみとなる。これは矩形断層で説明しきれない複雑なすべり分布があったことによるものと思われる。また、余震域を拡大させるような遠方でのひずみ異常分布は現在のところ確認できない。

謝辞：本研究は文部科学省による「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画」の支援を受けました。

地溝帯をdislocationで表現した九州中部の地殻変動モデル

A crustal deformation model for central Kyushu with a graben area represented by dislocation

*望月 一磨¹、三井 雄太¹、森上 峻介¹

*Kazuma Mochizuki¹, Yuta Mitsui¹, Shunsuke Morikami¹

1. 静岡大学理学部地球科学科

1. Department of Geosciences, Shizuoka University

2016年熊本地震は、中央構造線の西部延長とも考えられる布田川・日奈久断層帯で発生した。熊本地震の本震(M7級)およびそれに先行したM6級の2つの前震は、上記の断層帯が右横ずれ運動をしたと解釈されている。我々はまず、キネマティックPPP法による30秒ごとのGNSSデータ解析により、このことを追試した。

2016年熊本地震の震源域は、別府-島原地溝帯と呼ばれる南北方向の張力場の領域内でもある。これを反映して、余震(誘発地震)のメカニズムは右横ずれ断層と正断層が入り混じったものとなっている。この地域の地殻変動の力源を考える際には、双方の成分を考慮する必要がある。

本研究では、2000年から2010年にかけてのGNSS時系列データ(F3解)の水平+上下の計3成分を用い、九州中部のGEONET観測点における定常変動速度を推定した。地溝帯の領域では、確かに数mm/yr程度の沈降が観測された。

これを基に、地表活断層をトレースして繋げたブロック境界を設定した。各ブロックの剛体回転に加え、境界部に弾性変形の力源となるdislocationを置いた。このdislocationの変動成分として、明瞭な活断層が見られる領域には横ずれ/縦ずれの成分を与え、そうでない領域には地溝帯を表現するために開口の成分を与えた。後者は、Shimazaki and Zhao (2000)によるプレート衝突域のdislocation表現を援用し、衝突による変動センスの逆がそのまま地溝帯の変動センスになる、と考えて設定したものである。この他、豊後水道から日向灘にかけてのフィリピン海プレートの沈み込み、および、火山下(阿蘇山・九重山・雲仙)のマグマ蓄積による弾性変形もモデルとして考慮した。

これらをまとめたグリーン関数と、上記で推定した定常変動速度から、望月・三井(本大会、SSS32-01)と同様の特異値分解を用いた最小二乗法により、各成分の変動量を逆解析した。投稿時点で、各成分とも安定した解が得られており、布田川・日奈久断層帯近辺での1 cm/yr強のバックスリップや、各火山下での 10^6 m³/yr程度のマグマだまり収縮が推定されている。

キーワード：熊本地震、地殻変動、地溝帯

Keywords: Kumamoto earthquake, Crustal deformation, Graben area

干渉SAR解析と現地調査による2016年熊本地震で活動した断層と火山岩体との関係

Fault activities and their relations to volcanoes in the 2016 Kumamoto earthquake: Insight from InSAR analysis and field observations

*辻 健¹、石塚 師也²、池田 達紀¹、松岡 俊文²

*Takeshi Tsuji¹, Kazuya Ishitsuka², Tatsunori Ikeda¹, Toshifumi Matsuoka²

1.九州大学、2.深田地質研究所

1.Kyushu University, 2.Fukada Geological Institute

衛星データの解析、地表調査、地震データの解析を用いて、2016年熊本地震の断層活動とその断層セグメントの境界の特徴を調べた。衛星データに干渉SAR解析を適用した結果から、一連の断層活動に伴う地表変動を明瞭に知ることができる。その干渉SAR解析の結果をもとに現地調査を実施し、実際の地表変動を確認した。特に阿蘇山周辺にみられた複雑な地表変動に注目した。干渉SAR解析の結果から、九州西部（熊本市～阿蘇山）では北東-南西方向に伸びる直線状の断層システムを確認できるが、局所的な変動に注目すると火山といった地質の不均質性に影響を受けた断層活動や地表変動を確認できる。

4月16日に発生した本震（M7.3）では、阿蘇山より南西側の断層が活動しており、阿蘇山周辺で断層運動が止まったことが分かる。断層運動は右横ずれであるため、断層のエッジの南側にあたる阿蘇山では水平方向への引っ張りの力が働き、北側にある大津町周辺は圧縮の力が働いている。実際に、阿蘇山のカルデラ内部は引張による地表の沈降が明瞭に認められる。特に大きく沈降している地域はマグマ溜まりの位置とも整合的で、引張に伴うマグマ溜まりの変形が関係している可能性がある。このような変動は2011年の東北地方太平洋沖地震でも確認されている。現地調査でも、引張に伴うとみられる巨大な開口亀裂が阿蘇市狩野（カルデラ内部）に見られた。巨大亀裂の開口幅は約1m以上あるものもあり、走向は北東-南西方向で本震の断層と方向が整合的であった。一方で、断層の北側に位置する菊池郡大津町では、本震断層とは異なっていくつかの断層運動が認められた。これらの断層の走向は東西方向で、逆断層運動をしている可能性がある。現地調査では、この大津町でみられた地表変形には横ずれ方向への運動は認められなかった。これらは阿蘇山という火山岩体西部での急激な本震断層の停止とそれに伴って生じる局所的な圧縮の力によって形成されたと考えられる。

本震の約2時間後（4月16日3:55）に阿蘇で発生したマグニチュード5.6の地震では、震源が阿蘇山の北東側へと進展し、九重連山へと達している。干渉SAR解析の結果からも、その直線的な変動を見ることができる。熊本～阿蘇～九重にかけての地震メカニズム（横ずれ断層）と九重～大分にかけての地震メカニズム（正断層）は異なることから、九重連山は地殻に働く応力分布の境界として働いている可能性がある。

これらのことから火山（阿蘇山や九重連山）は、地震のセグメンテーションの境界として働いている可能性がある。これは火山体や火山性堆積物の強度は他の場所とは異なっていることや、断層の摩擦特性に影響を与える地殻温度が火山周辺では異常に高いことに影響している可能性がある。

キーワード：2016年熊本地震の現地調査、干渉SAR、地震と火山

Keywords: Field observations in 2016 Kumamoto earthquake, Interferometric SAR, Earthquake and volcano

PALSAR2による2016年熊本地震に伴う地殻変動の検出と断層モデル:北海道大学宇宙測地学研究室による速報

Detection of crustal deformation signal and fault dislocation model associated with 2016 Kumamoto earthquake: Preliminary report by space geodesy laboratory in Hokkaido university

*姫松 裕志¹、阿部 隆博¹、安田 貴俊²、古屋 正人²

*Yuji Himematsu¹, Takahiro Abe¹, Takatoshi Yasuda², Masato Furuya²

1.北海道大学大学院理学院、2.北海道大学大学院理学研究院

1.Department of Natural History Sciences, Hokkaido University, 2.Department of Earth and Planetary Sciences, Hokkaido University

別府—島原地溝帯に位置する熊本県中部で4月14日(21:26:41.1 JST)にMw 6.2 (Mj 6.5)の地震が発生し、4月15日(00:03:50.6 JST)にMw 6.0 (Mj 6.4)、4月16日(01:25:15.7 JST)にMw 7.0 (Mj 7.3)の地震が続いて発生した(Global CMT project)。いずれの発震機構も右横ずれ型であることがこれまで報告されている。今回の地震は九州地方を北東—南西方向に二分する「別府—島原地溝帯」上に震源が集中していることが明らかにされている。別府—島原地溝帯は大分県別府湾から熊本県八代湾、長崎県島原半島にかけて位置していることが分かっており、地溝帯の西端は沖縄トラフにつながっているとされている。また九重連山や阿蘇山、雲仙普賢岳といった現在でも活動的な火山を有する地熱地帯でもある。地溝帯の成因は九州中部にはたらく右横ずれを伴う南北引張応力場によるPull Apart Basinや、地下からマントルの上昇流による拡大が考えられているが、統一的な見解は確立されていない。

2016年熊本地震を受けて、北海道大学宇宙測地学研究室は共同研究グループ PIXEL (PALSAR interferometry consortium on study our evolving and surface) の共有データを利用してALOS-2/PALSAR-2による画像データの解析を行った。すでに国土地理院は速報として干渉SAR (InSAR) とMAI (Multiple Aperture Interferometry) の結果をホームページ上に掲載している (GSI website)。2つの地震のCMT解と整合する右横ずれの変動パターンや阿蘇山周辺で30cm以上の沈降といった報告がすでにされている。

我々はより強健な地殻変動データを取得するためにピクセルオフセット法(画像相関による変位抽出法)をPALSAR-2の画像データに適用させた。解析の結果、国土地理院がこれまで報告してこなかったような断層近傍における3次元地殻変動が明らかになった。くわえて布田川、日奈久断層帯が地表付近で食い違ったと推測される急峻な変位の不連続も明らかになった。観測された地殻変動を詳細に再現するために三角形要素を用いた非平面断層モデルの構築を試み、その初期モデルも示す。

キーワード：熊本地震、SAR、地殻変動、地溝帯

Keywords: Kumamoto earthquake, Synthetic Aperture Radar, Crustal deformation, Rifting system

熊本地震に伴う広域地表変位分布のSAR差分干渉解析

DInSAR Analysis on regional distribution pattern of surface displacement caused by the 2016 Kumamoto Earthquake

*大沼 巧¹

*TAKUMI ONUMA¹

1. 株式会社地球科学総合研究所

1. JGI, Inc.

衛星SARデータの差分干渉解析により、平成28年熊本地震によって生じた地表変位の広域分布パターンを調査した。解析には、欧州宇宙機関(ESA)のSentinel-1 C-SARのデータを主に用いた。Sentinel-1 C-SARは、波長約6cmのCバンドのSARセンサであり、Interferometric Wide Swathモードと呼ばれる広域観測モードが標準観測モードとなっており、グラウンドレンジ方向5m/画素、アジマス方向20m/画素の空間分解能を有し、250km x 250kmの広域を1シーンでカバーする。日本周辺については、現在までに2回帰(24日)毎に観測が行われており、緊急観測として1回帰でもデータが観測されることがある。従って平成28年熊本地震の様に、熊本県から大分県に亘る広域に及ぶ影響のモニタリングに、最適なデータのの一つである。

本調査では、前震・本震前の4/8と本震後の4/20に昇交(北行)軌道で観測されたペアと、同じく地震前の3/27と地震後の4/20に降交(南行)軌道で観測されたペアの4シーンを主に用いた。各々のペアの差分干渉処理とこれらの組み合わせによる2.5次元解析を実施したのでその結果を報告する。またこれらの他にALOS-2 PALSAR-2データを用いた差分干渉処理としてMulti Aperture Interferometryと呼ばれる処理も行い、Sentinel-1の2.5次元解析による東西方向と上下方向の変位成分に加えて、布田川断層から阿蘇カルデラにかけての地域について衛星飛翔方向の変位分布も解析した。

キーワード：衛星SAR差分干渉、Sentinel-1 C-SARデータ、広域地表変位分布パターン

Keywords: Satellite SAR Differential Interferometry (DInSAR), Sentinel-1 C-SAR data, regional distribution pattern of surface displacement

Sentinel-1衛星干渉SAR解析に基づく2016年4月熊本地震による地表変動と建物被害分布、および多時期のLiDAR DEMデータ解析による地表変位の抽出

Estimation of co-seismic surface displacement and ground deformation associated with the April 2016 Kumamoto Earthquake, based on differential InSAR by Sentinel-1 and differential LiDAR DEM analysis.

*向山 栄¹、本田 謙一¹、浅田 典親¹、佐藤 匠¹

*Sakae Mukoyama¹, Kenichi Honda¹, Norichika Asada¹, Takumi Sato¹

1.国際航業株式会社

1.KOKUSAI KOGYO CO., LTD.

2016年4月に発生した熊本地震による地表変状について、地震前後の衛星干渉SAR解析、および地震前後の航空レーザ計測の地形データによる変動量解析を行った。

Sentinel-1衛星による広域にわたる観測データの解析では、震源付近を中心に広範囲にわたり明瞭な干渉を伴う地表変位が抽出された。変状は島原半島付近に及ぶことが推定され、また大分県の由布山近傍でも震央位置と調和的な干渉縞が認められた。さらに地震前後における干渉度の変化を比較することにより、市街地における建物被害集中域の推定を試みた。

また、阿蘇カルデラ内北部の黒川流域の平地において、2時期レーザデータの解析を行った結果、地盤の側方流動と鉛直変位を伴う明瞭な地表変位が認められた。

キーワード：2016年熊本地震、InSAR、DEM差分解析、航空機レーザ計測、画像マッチング解析

Keywords: the 2016 Kumamoto Earthquake, InSAR, Differential DEM Analysis, LiDAR, Image matching analysis

SAR干渉画像による平成28年熊本地震で生じた小変位の地表断層群の抽出

Groups of Surface Faults with Small Displacement of the 2016 Kumamoto Earthquake Detected by ALOS-2 SAR Interferometry

*藤原 智¹、矢来 博司¹、小林 知勝¹、森下 遊¹、中埜 貴元¹、宮原 伐折羅¹、仲井 博之¹、三浦 優司¹、上芝 晴香¹、攪上 泰亮¹、宇根 寛¹

*Satoshi Fujiwara¹, Hiroshi Yurai¹, Tomokazu Kobayashi¹, Yu Morishita¹, Takayuki Nakano¹, Basara Miyahara¹, Hiroyuki Nakai¹, Yuji Miura¹, Haruka Ueshiba¹, Yasuaki Kakiage¹, Hiroshi Une¹

1.国土交通省 国土地理院

1.GSI of Japan

1. はじめに

平成28年熊本地震では地表の広範囲で地殻変動による変位が生じている。地表変位の大部分は震源断層の断層運動で説明できるものの、地表にはより小さく複雑な変位が数多く現れており、地表に現れた断層（地表断層）の分布とその成因は地震像を明らかにすることに大いに役立つ。これらの中には、連続した亀裂等となっていて震源断層が地表に出現したのではないかと報告されているものもあるほか、震源断層から枝分かれしている副次的な断層や強震動等に誘発されて地質的弱面が地すべりのように動いているものもありうる。しかしながら、地上での観測だけでは網羅的かつ詳細に調査することは困難である。

本報告は人工衛星の干渉SARを用いて地表断層を抽出するものである。干渉SARを利用することで、面的に見落としなく地表の変位量を求め、さらに変位方向、変位量や変位の場所的広がりを解析することができ、これらの地表断層の成因を推定する強力なツールとなる。

2. だいち2号のSAR干渉画像

国土地理院では、JAXAが運用する人工衛星「だいち2号」を用いて、本震を含む期間及び地震後の余効変動のみを含む期間のSAR干渉画像を複数解析し、地表の変位の空間分布を求めている。ここで、複数のSAR干渉画像に現れる細かなリニアメント（線状の変位）を目視で抽出し初期的なマッピングを行った。リニアメントの長さは数百m以上で、数kmにわたるものも多い。リニアメントをはさんだ変位量の差は数cm～10数cm程度であり、また、地表に必ずしも断層断面が露出しているのではなく、撓曲として現れているものが多いため、地上の調査ではまず見つからないものがほとんどである。

本報告では地表の変位がリニアメントとして存在するものを地表断層と呼ぶことにするが、地表断層（地表のずれ）と震源断層（地震動を引き起こす）は必ずしも一致しないことに注意が必要である。

3. 地表断層の特徴

阿蘇の外輪山から、布田川断層帯、日奈久断層帯沿いのみならず熊本市内の水前寺公園付近に至るまで、求められた地表断層は200以上に及び、非常に多くの小変位の地表断層が出現しており（図参照）、以下にその特徴をまとめる。

（1）場所ごとに地表断層の走向や変位形態は類似したものが集中しており、グループ（群）を成している。つまり、場所ごとに同じ原因が動いて同様な地表断層群が現れたことを示唆する。特に外輪山北西部の西北西-東南東の地表断層群（階段状の縦ずれ変位）が数も多く目立つ。

（2）地表断層の走向は、既知の活断層（布田川断層帯等）と平行か共役となり、成因が本地域の応力場に関連している。

（3）位置が既知の活断層と一致するものもあるが、既知のものより遙かに多くを抽出でき、同じ走向をもつ地表断層がほぼ等間隔で平行に数多く並ぶことが多い。

(4) 地表断層による変位はほとんどその断層周囲のみに現れており、地下深くで変位したとは認められず、主たる震源断層との直接のつながりが見られるものは一部である。

(5) 空中写真や現地調査から見いだされた地表の亀裂の場所は、強震動等のため不統一な変位を起こしており、SAR干渉画像上では非干渉になっているものが多い。特に益城町から西原村の既知の布田川断層帯に沿って非干渉域が帯状に連なり、周囲の地殻変動パターンからしてもこの布田川断層帯が震源断層であることは確実である。西原村では帯状の非干渉域の南約2kmに平行した地表断層群が存在し、非干渉域と地表断層群との間にブロック的に複雑で大きな変位が多く見られ、震源断層から副次的な断層が分かれていることが示唆される。

(6) 地震後の余効変動の多くが地表断層群に沿って現れており、本震後にも地表断層群周囲での応力の解放があると推定される。ただし、外輪山周囲の地表断層群には余効変動が見られず、成因の違いが示唆される。

(7) 熊本市内西部の金峰山周辺では第四紀火山が1kmほどにわたって割れるような変位が複数見られた。このほか、リニアメントではないが、平野部で旧河川跡が液状化等で非干渉になった地域や傾斜地での地すべりの発生が抽出できており、地盤災害の把握にも利用できる。

4. まとめ

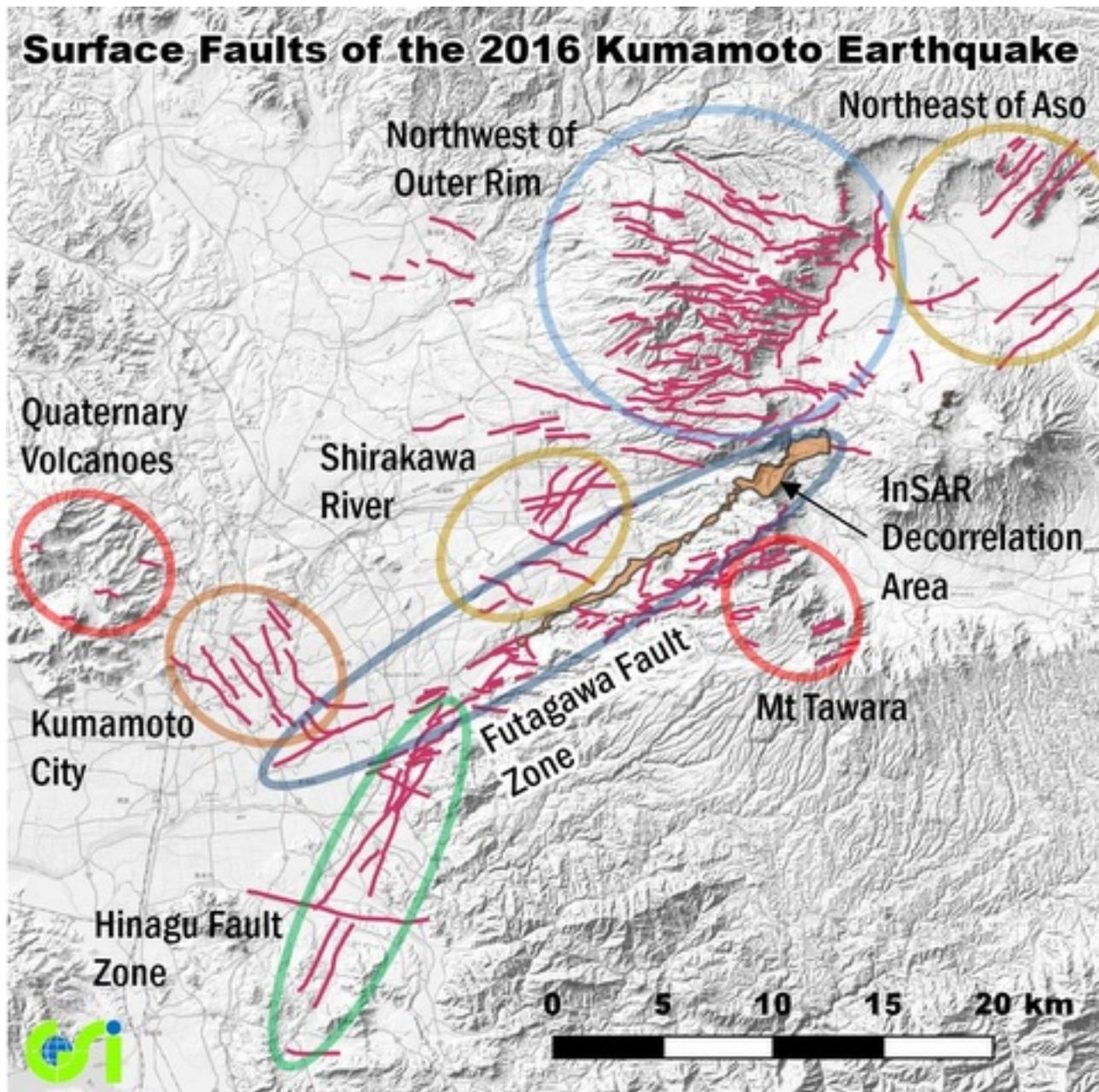
今回見いだされた地表断層群は、本震等を引き起こした震源断層の地表延長としてではなく、地表面近くの応力等の解放のため、既存の弱面としての断層やその周囲がしわのように割れ目となったものが大部分である。また、一部にはブロック的に地すべり状の変位を示しているものもある。

同様の変位は兵庫県南部地震の際にも数多く見られており(参考文献)、地震動の分布や地域ごとの応力過程を考えるのに有力な手がかりとなりうるであろう。

参考文献：藤原他,2000,干渉SARによって得られた地表変位の勾配解析による1995年兵庫県南部地震の地表断層位置推定,地震2,53,127-136.

キーワード：平成28年熊本地震、干渉SAR、断層

Keywords: 2016 Kumamoto earthquake, SAR interferometry, Fault



ALOS-2/PALSAR-2による平成28年（2016年）熊本地震の解析

Analysis of the 2016 Kumamoto earthquakes using ALOS-2/PALSAR-2

*安藤 忍¹、奥山 哲²、勝間田 明男¹、藤田 健一¹、溜淵 功史¹

*Shinobu Ando¹, Okuyama Satoshi², Akio Katsumata¹, Kenichi Fujita¹, Koji Tamaribuchi¹

1.気象研究所 地震津波研究部、2.気象研究所 火山研究部

1.Seismology and Tsunami Research Department, Meteorological Research Institute, 2.Volcanology Research Department, Meteorological Research Institute

2016年4月14日21時26分に、熊本県においてM6.5の地震が発生した。さらに、この地震に引き続いて4月15日0時3分にM6.4の地震、4月16日1時25分にM7.3の地震などが発生した。余震を含めたこれらの地震に伴う地殻変動などについて、陸域観測技術衛星2号「だいち2号（ALOS-2）」により緊急観測されたデータなどを使い解析を行ったので報告する。

差分干渉解析に使用したデータは全部で13ペアあり、このうち4月14日と15日に発生した前震のみ挟むペアが1つ、4月16日の本震のみ挟むペアが2つ、本震後のペアが3つ、残りは前震と本震の両方を挟むペアである。

前震のみを挟むペアでは、南行左観測の差分干渉解析で震源域の南西部で最大約12cmの衛星視線方向伸張、北西部で最大約9cmの衛星視線方向短縮の位相変化が検出された。気象庁の震源過程解析結果を基に計算した干渉縞シミュレーションでは、より低い傾斜角度の方が干渉縞パターンと整合しそうな結果となった。

本震のみを挟むペアでは、大局的には布田川断層帯及び日奈久断層帯に沿って右横ずれ断層を示唆する結果が得られた。断層帯付近では、視線方向によりより複雑な位相変化も見られる。また、本震後のペアでは、布田川断層帯に沿って顕著な余効変動が検出された。

いくつかのペアについては、強度画像や相関画像の解析も試みた。その結果、布田川断層帯に沿って被害地域と考えられる領域の抽出が検出されたので、併せて報告する。

本解析で用いたPALSAR-2データの一部は、国土地理院が中心となって進めている防災利用実証実験（地震WG）に基づいて観測・提供されたものである。また、一部はPIXELで共有しているものであり、宇宙航空研究開発機構（JAXA）と東京大学地震研究所との共同研究契約によりJAXAから提供されたものである。PALSAR-2に関する原初データの所有権はJAXAにある。なお解析には、防災科学技術研究所の小澤拓氏により開発されたRINCを使用させていただいた。なお、干渉画像の処理過程においては、国土地理院発行の数値地図10mメッシュ（標高）を元にしたDEHMを使用し、地図の描画にはGMTを用いた。関係者各位には、ここに記してお礼申し上げます。

キーワード：2016熊本地震、ALOS-2/PALSAR-2、干渉SAR

Keywords: the 2016 Kumamoto earthquake, ALOS-2/PALSAR-2, InSAR

ALOS-2/PALSAR-2データを用いた2016年熊本地震による地表変動の把握と斜面崩壊分布の関わり
Relation between the 2016 Kumamoto earthquake-induced landslide distribution and surface deformation detected by ALOS-2/PALSAR-2 data

*佐藤 浩¹

*Hiroshi, P. Sato¹

1. 日本大学文理学部

1. College of Humanities and Sciences, Nihon University

平成28年（2016年）熊本地震については、2016年4月14日の前震（M6.5）と16日の本震（M7.3）が立て続けに生じたが、本稿では、山地で発生した斜面崩壊に大きな影響を与えたであろうと思われる本震に焦点を当て、地震による地表変動と斜面崩壊の分布の関係を見出そうとした。具体的には、4月15日と4月29日に観測された、SM-1モードのALOS-2/PALSAR-2データのアセンディング（ビーム：U1-4、オフナディア角21.9°）とディセンディング（ビーム：U2-6、オフナディア角29.1°）を用いて、SAR干渉画像を得た。次に、それらを使って2.5次元解析（国土地理院，2016）を行い、東西方向と上下方向の地表変動を把握した。これに千木良・松四（2016）による地震による斜面崩壊分布データを重ね合わせた。その結果、地表変動の著しい範囲と斜面崩壊の分布域が重なることが分かった。

参考文献

国土地理院（2016）：平成28年熊本地震（SAR干渉画像を用いた2.5次元解析）。

<http://www.gsi.go.jp>

千木良雅弘・松四雄騎（2016）：平成28年（2016年）熊本地震による南阿蘇村における斜面変動の発生状況（第2報）。

http://www.slope.dpri.kyoto-u.ac.jp/disaster_reports/2016KumamotoEq/2016KumamotoEq2.html

キーワード：地震、地すべり、斜面、熊本、SAR、PALSAR-2

Keywords: earthquake, landslide, slope, Kumamoto, SAR, PALSAR-2

平成28年熊本地震に伴う地殻変動とその阿蘇山のマグマだまりへの影響

Crustal deformation associated with the 2016 Kumamoto Earthquake and its effect on the magma chamber of Aso volcano

*小澤 拓¹、藤田 英輔¹、上田 英樹¹

*Taku Ozawa¹, Eisuke Fujita¹, Hideki Ueda¹

1. 防災科学技術研究所

1. National Research Institute for Earth Science and Disasters

熊本県において平成28年4月14日にMj6.5の地震（前震）が発生し、さらに4月16日にMj7.3の地震（本震）が発生した。火山活動が活発化傾向にある阿蘇山は、震央の東方近傍に位置しており、その火山活動がこの地震に影響を受ける可能性が懸念される。そこで、本研究においては、SAR干渉法を用いて本地震に伴う地殻変動を検出し、得られた地殻変動から断層モデルの推定を行い、その断層モデルに基づいて、地殻変動が阿蘇山のマグマだまりに与える影響を見積もる。

地殻変動の検出においては、日本の陸域観測技術衛星「だいち2号」のPALSAR-2データを用いた。前震と本震の間の期間においては、南行軌道における左方向視による観測（西上空からの観測）が行われており、地震前に取得されたデータとの干渉ペアを解析したところ、日奈久断層北端部の西側にスラントレンジ短縮と伸長の領域が求まった。このスラントレンジ変化分布は、日奈久断層と同じ走向を持つ断層面における約1mの右横ずれで説明できる。本震発生以降、PALSAR-2による観測は複数の軌道から異なる観測モードで行われており、Mj7.3の本震に関する解析においては6軌道から観測された画像を使用した。すべての干渉画像において、布田川断層に沿ったスラントレンジ変化の不連続がみられた。また、日奈久断層と布田川断層の東延長部においては、スラントレンジ変化の急変帯がみられた。特に、布田川断層の東延長部は、阿蘇カルデラに入った付近でその走向が北東に変化しているようにみえることが特徴の一つである。大まかには、東上空から観測された画像を解析した結果においては、布田川断層の北側でスラントレンジの短縮、南側で伸長の変化が見られ、西上空からの観測画像を解析した結果においては、その逆の変化が見られた。これは断層の右横ずれでおおよそ説明できる。しかし、南行軌道の右方向視による画像（東上空からの観測）を解析した結果においては、西原村付近で断層をまたいでスラントレンジ短縮変化が見られ、これを説明するためにはより複雑な断層メカニズムを考慮する必要がある。これらのスラントレンジ変化分布を説明する断層モデルを求めたところ、布田川断層と日奈久断層の北端部、布田川断層の東端から北東に伸びる断層の右横ずれと、西原村付近の低角の断層の正断層成分を伴う右横ずれで、得られた地殻変動をおおよそ説明することができた。本震発生後に取得されたデータペアの解析においては、断層周辺で局所的な変動がみられたが、火山活動に伴うような地殻変動は見られなかった。防災科学技術研究所の火山観測網（V-net）によっても、本稿提出時点では、阿蘇山の火山活動に顕著な変化は見られていない。

以上の解析で求めた断層モデルを用い、有限要素法により変位場・応力場を計算し、阿蘇山下のマグマだまりへの影響評価を行った。地震・地殻変動による影響は、静的・準静的・動的の3つがあるが、今回は静的の影響のみを考える。阿蘇山では須藤(2006)により草千里の南側深さ6km程度に減圧源があるとされており、マグマだまりの存在が示唆される。また、Abe et al. (2010)では地下15~20kmシルの存在が指摘されている。今回の断層の深さを鑑み、後者よりも前者への影響が顕著であると想定されるため、前者のみを対象として、草千里下6kmに半径3kmの球状マグマだまりを仮定した。周辺地殻はMatsubara et al. (2008)による広域の速度構造とし、マグマだまり領域はヤング率10GPa、ポアソン比0.49とする。断層とマグマだまりの位置関係から、マグマだまりへ影響は複雑なパターンを示すが、特に顕著な特徴として次の点があげられる。1) 阿蘇山のマグマだまりの西側表面部分に南西向き10MPa程度の引張応力がかかる。2) 球状マグマだまりは、東西に引き伸ばされた楕円状に変形する。マグマだまり西側が南西側へ60cm程度の変位、マグマだまり上面から阿蘇山地表付近では10cm程度の沈降となる。

キーワード：熊本地震、阿蘇山、地殻変動、マグマだまり

Keywords: Kumamoto Earthquake, Aso volcano, crustal deformation, Magma chamber

熊本地震によって阿蘇地域に現れた活断層と西南日本の現行テクトニクス

Active fault in Aso area formed at the Kumamoto Earthquake and its relationship with neotectonics in the Southwestern Japan

*大岩根 尚¹

*hisashi Oiwane¹

1.鹿児島県三島村

1.Mishimamura Village, Kagoshima Prefecture

熊本地震に際しカルデラ内の阿蘇市赤水～内牧にかけて地表に現れた断層の性質と分布に関して、予察的な調査を行った。今回の調査では、東北東－西南西方向の正断層に囲まれた、幅 50 m、最大落差 2 m ほどの陥没帯が雁行状に現れたことがわかった。発見できた10ヶ所の陥没帯は、北北東-南南西方向の2本のセグメント上に並び、雁行状に配列している。また、セグメント間をつなぐように、東北東－西南西方向の正断に囲まれた陥没帯が発見された。

2本のセグメントを構成する雁行状の陥没帯と、セグメント間をつなぐ陥没帯の配置は、全体として典型的な右横ズレの変位パターンを示す。これは今回の地震活動によって地表に変位をおこした活断層と解釈することができる。本講演では、今回の断層活動及び西南日本のテクトニックな背景と、沖縄トラフ北端部にまで広がっている地震活動との関連性について議論を試みる。

キーワード：熊本地震、沖縄トラフ、別府島原地溝帯

Keywords: Kumamoto Earthquake, Okinawa Trough, Beepu-Shimabara graben

2016年熊本地震の地表地震断層

Surface Fault Ruptures of the 2016 Kumamoto Earthquake

*後藤 秀昭¹、熊原 康博¹、中田 高¹、石黒 聡²、石村 大輔³、石山 達也⁴、岡田 真介⁵、楮原 京子⁶、柏原 真太郎⁷、金田 平太郎⁷、杉戸 信彦⁸、鈴木 康弘⁹、竹竝 大士¹⁰、田中 圭¹¹、田中 知季⁷、堤 浩之¹²、遠田 晋次⁵、廣内 大助¹³、松多 信尚¹⁰、森木 ひかる¹⁰、吉田 春香¹⁴、渡辺 満久¹⁵

*Hideaki Goto¹, Yasuhiro Kumahara¹, Takashi Nakata¹, Satoshi Ishiguro², Daisuke Ishimura³, Tatsuya Ishiyama⁴, Shinsuke Okada⁵, Kyoko Kagohara⁶, kashihara shintaro⁷, Heitaro Kaneda⁷, Nobuhiko Sugito⁸, Yasuhiro Suzuki⁹, Daishi Takenami¹⁰, Kei Tanaka¹¹, Tomoki Tanaka⁷, Hiroyuki Tsutsumi¹², Shinji Toda⁵, Daisuke Hirouchi¹³, Nobuhisa Matsuta¹⁰, Hikaru Moriki¹⁰, Haruka Yoshida¹⁴, Mitsuhsa Watanabe¹⁵

1.広島大学、2.愛知工業大学、3.首都大学東京、4.東京大学、5.東北大学、6.山口大学、7.千葉大学、8.法政大学、9.名古屋大学、10.岡山大学、11.一般財団法人日本地図センター、12.京都大学、13.信州大学、14.福岡県立八女高等学校、15.東洋大学

1.Hiroshima University, 2.Aichi Institute of Technology, 3.Tokyo Metropolitan University, 4.University of Tokyo, 5.Tohoku University, 6.Yamaguchi University, 7.Chiba University, 8.Hosei University, 9.Nagoya University, 10.Okayama University, 11.Japan Map Center, 12.Kyoto University, 13.Shinshu University, 14.Fukuoka Prefectural Yame High School, 15.Toyo University

調査の目的と経緯

熊本県熊本地方において、2016年4月14日21:26、深さ約10km、M6.5の地震が発生した後、約28時間後の4月16日01:25、近接する地域で深さ約10km、M7.3の地震が発生した(気象庁、2016)。一般に、震源が浅く、規模が大きい(M6.5以上)地震であれば地表地震断層を伴うことが多いため、本グループはM6.5の地震発生翌日から調査を開始した。その後、本震を挟んで現在まで、国内14大学・機関の活断層研究者らが区域を分担して調査を続け、地表地震断層の全体像の解明を目指した。本発表では、これまでの結果に基づき、地表地震断層の分布とその特徴を報告する。

調査の方法は、地表地震断層に沿って踏査を行い、断層変位前の形状が推定できる水路、畑の畦などを変位基準として、断層の水平変位および垂直変位を巻尺やハンドレベルなど簡易測量で求めた。位置の計測はハンディGPSなどを用いた。

地表地震断層の分布と変位様式

本震に伴う地表地震断層の主たるトレースは、既知の活断層である布田川-日奈久断層の北東部(渡辺ほか、1979;九州活構造研究会編、1989;池田ほか、2001;中田・今泉編、2002)に沿って生じたものである。両活断層沿いの地表地震断層は、北東-南西走向、長さ約31km(南端:御船町瀧川地区、北端:南阿蘇村下野地区)である。南部(益城町・御船町)の地表地震断層は、連続性、変位量、走向の違いから、3つ程度のセグメント(御船町高木周辺、益城町島田周辺、益城町砥川周辺より北部)に区分できる。北部(西原村、南阿蘇村)のトレースは、西原村周辺で位置が一部確定していない範囲もあるものの、左ステップしながら概して連続的に発達する。断層変位は、全体を通して右横ずれ変位が卓越し、益城町堂園~西原村にかけて右横ずれ変位が約2mと最も大きくなる。上下変位は概ね北西低下である。益城町福原や三竹では、右横ずれ変位をもつトレースがステップする部分で、北西-南東走向の左横ずれ変位をもつ短いトレースが認められる。

なお、本震に伴う地表地震断層のトレースは、断層変位の累積である変動地形から推定された活断層のトレースとはほぼ一致することから、M7.3の地震をもたらした断層変位は布田川-日奈久断層の北東部の再活動であったといえる。

布田川断層から約1~2km東に位置する出ノ口断層(九州活構造研究会編、1989)沿いでは、西原村宮山から俵山西麓の長さ約5kmにわたり地表地震断層が認められる。主に北西落ちの正断層性の変位が卓越し、最大2mの上下変位である。

その他、短い地表地震断層あるいは地表地震断層の可能性のある地表変形としては以下の通りである。

布田川断層沿いの地表地震断層から約3km北西の、カルデラ内にある阿蘇市的石や内牧では、長さは2km以

上、主に北落ちの上下変位が最大2m近く認められた。ただし、側方流動の可能性もあり、地表地震断層かどうかの検討は今後の課題である。

阿蘇山の中央火口丘の北東側のカルデラ内にあたる阿蘇市宮地周辺では、長さ約2kmの区間で最大上下変位10cm程度、右横ずれ変位約5cmの地震断層が認められた。

熊本市街地の東区健軍から白川までの長さ約5.4kmにわたり、北西-南東走向の活断層によると考えられる地形に沿って開口亀裂が断続的に発達する。微小な断層変位を示す可能性があり、干渉SARの解析（国土地理院、2016）とも調和的である。

これらの内容についてポスターで提示し、他分野の成果と比較、議論を行いたい。

文献

中田・今泉編（2002）『活断層詳細デジタルマップ』

池田ほか（2001）『都市圏活断層図「熊本」』

九州活構造研究会編（1989）『九州の活構造』

渡辺ほか（1979）阿蘇カルデラ西麓の活断層群と側火山の位置について。第四紀研究，18，89-101.

国土地理院（2016）平成28年熊本地震に関する情報

<http://www.gsi.go.jp/BOUSAI/H27-kumamoto-earthquake-index.html>

気象庁（2016）「平成28年（2016年）熊本地震」について（第7報）

<http://www.jma.go.jp/jma/press/1604/16a/201604160330.html>

本発表は、5月12日時点の報告であり、発表までに上記の内容が変更される可能性がある。また本調査に際しては、平成28年度科学研究費補助金（特別研究促進費）「2016年熊本地震と関連する活動に関する総合調査」（課題番号：16H06298，研究代表者：清水洋）および文部科学省による「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画」を使用した。

キーワード：2018年熊本地震、地震断層、活断層

Keywords: 2018 Kumamoto Earthquake, earthquake fault, active fault

2016年熊本地震に伴う地表地震断層

Characteristics of the surface ruptures associated with the 2016 Kumamoto earthquake sequence, Kyushu, southwestern Japan

*白濱 吉起¹、吉見 雅行¹、粟田 泰夫¹、丸山 正¹、吾妻 崇¹、宮下 由香里¹、森 宏¹、今西 和俊¹、武田 直人¹、落 唯史¹、大坪 誠¹、朝比奈 大輔¹、宮川 歩夢¹

*Yoshiki Shirahama¹, Masayuki Yoshimi¹, Yasuo Awata¹, Tadashi Maruyama¹, Takashi AZUMA¹, Yukari Miyashita¹, Hiroshi Mori¹, Kazutoshi Imanishi¹, Naoto Takeda¹, Tadafumi Ochi¹, Makoto Otsubo¹, Daisuke Asahina¹, Ayumu Miyakawa¹

1.国立研究開発法人産業技術総合研究所地質調査総合センター

1.Geological Survey of Japan, AIST

The Kumamoto earthquake sequence that culminated in the Mj 7.3 event on April 16, 2016, produced the *ca.* 30 km long complex surface ruptures having a predominantly dextral with subordinately normal or reverse slip component along the eastern section of the Futagawa fault zone, the northern section of the Hinagu fault zone and previously unmapped faults including those across the Kiyama plain and across the western caldera rim of the Aso volcano, central Kyushu, Japan. Geological Survey of Japan, AIST, carried out urgent field investigation to explore and measure the surficial deformation associated with the Kumamoto earthquake during two weeks since the day of the mainshock. Our intensive field mapping revealed nature of the surface rupture in detail, including location, geometry, temporal growth and slip distribution of the complex ruptures. The remarkable features of the surface faulting were summarized as follows; i) the rupture zone is generally composed of a series of left-stepping *en echelon* array of discontinuous fault trace with various size; ii) the maximum dextral slip of *ca.* 2.2 m was measured at central part of the rupture zone, whose location and amount is consistent with InSAR analysis; iii) large slip (>1 m) occurred on the previously unrecognized fault traces that extend across the alluvial lowland; iv) slip is accommodated by complex rupture style, such as zigzag-shaped ruptures with ESE-trending dextral slip and NW-trending sinistral slip, slip partitioning that resolves oblique slip into dextral component and vertical component on sub-parallel traces, and widely developed grabens; v) accounts by eyewitnesses and repeated measurements show that part of the surface slip along the Hinagu fault has grown not only between the 14 April earthquake (Mj6.5) and mainshock (16 April) but also after the mainshock.

キーワード：2016年熊本地震、布田川断層帯、日奈久断層帯、地表地震断層

Keywords: 2016 Kumamoto earthquake, Futagawa fault zone, Hinagu fault zone, surface rupture

地震断層からみた2016年熊本地震の震源過程

Source process of 2016 Kumamoto earthquake viewed from surface fault rupture

*中田 高¹*Takashi Nakata¹

1. 広島大学名誉教授

1. Professor Emeritus, Hiroshima University

2016年3月16日午前1時25分過ぎに発生した熊本地震の本震の震央は、気象庁によると北緯32度45.2分、東経132度45.7分にあり、南北方向の張力軸を持つ西傾斜の横ずれ型の断層で、震源の深さは12kmとされている。この震央位置は、地表で認められる地震断層の西端部に近いところにあたる。京都大学防災研究所(2016)の解析結果http://sms.dpri.kyoto-u.ac.jp/k-asano/pdf/2016KumamotoEQ_v20160417.pdfなどでは、断層の破壊は破壊開始点から東北東に向かってほぼユニラテラルに伝播したと考えられている。

一方、大学共同調査チーム(熊原他、2016)によって確認された本震に伴って地表に出現した地震断層は、益城町藤堂付近から南と北に向かって分岐あるいは複雑な平面形状を示している。中田他(1998)の断層の平面形状から地震断層の地表での破壊開始点を推定するモデルによると、今回の地震断層の地表での破壊開始点は堂園付近にあり、そこから東北東と西南西にバイラテラルに破壊が伝播したと考えられ、地震波の解析結果とは矛盾しているように思われる。

地表で断層破壊伝播方向を知るには、断層近傍の物体の転倒方向を調べる方法が有効である(宮武、1979)。破壊のDirectivityとS波のRadiationの方向が重なり、右横ずれ断層では断層の破壊伝播方向に向かって左側に大きな揺れが発生するため、物体がその逆の方向に転倒する。今回の地震では、南阿蘇村で数多くの自動車地震断層近傍で南東側に転倒しており、右横ずれ成分を持つ断層の破壊が南西から北東に向かって伝播することと矛盾していない。益城町杉堂にある潮井神社の境内にある記念碑も同様に南東側に転倒しており、ここでも断層破壊は東北東に伝播したと推定される。一方、堂園の南にある辻ヶ峰公園にある慰霊塔や墓石は北西の方向に転倒しており、ここでは地震断層の地表での破壊は西南西に伝播したと推定される。したがって、地表での破壊開始点は、杉堂と辻ヶ峰公園の間にあると考えられる。

上述の京都大学防災研究所(2016)の解析のうち、図7の「すべり時間発展」を丁寧に見ると、最初の破壊から4-6秒後に震源の北10km深さ10kmで発生した大きなずれが8-10秒後に地表に達し、地表ではバイラテラルに破壊が伝播したことを示すようにも見える。地震波の解析では、断層面を1枚と仮定してモデルを構築しているが、実際には地表で観察される地震断層に見られるように走向や傾斜、ずれの性質を異にする複数の断層面が連鎖し破壊伝播しており、今後の震源過程の推定においては、地震断層の位置・形状を参考にすると必要があると思われる。

本調査には平成28年度科学研究費補助金(特別研究促進費)「2016年熊本地震と関連する活動に関する総合調査」(課題番号:16H06298, 研究代表者:清水洋)および平成28年度「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究」課題番号1702「地表地震断層および活断層の地表形状・変位量データにもとづく直下型大地震の規模・頻度予測手法の高度化 -LiDAR等の高解像度DEMを用いた検討」を使用した。

キーワード: 2016熊本地震、地震断層、震源過程

Keywords: 2016 Kumamoto earthquake, surface fault rupture, source process

布田川断層における地震断層露頭の子察的調査結果

A preliminary report on outcrops of the Futagawa fault, which moved with the 2016 Kumamoto earthquakes

*大橋 聖和¹、田村 友識¹

*Kiyokazu Oohashi¹, Tomonori Tamura¹

1.山口大学大学院創成科学研究科

1.Graduate School of Sciences and Technology for Innovation, Yamaguchi University

これまで断層露頭の報告に乏しかった布田川・日奈久断層帯において、平成28年熊本地震後に緊急調査を行った。その結果、今回の地震で活動したと考えられる計3つの断層露頭（上陳、河原、および桑鶴露頭）を布田川断層に沿って発見し、記載を行ったのでここに報告する。

上陳（かみじん）露頭は、水田に地表変状が現れた益城町上陳（右横ずれ1 m程度が2条）と堂園（右横ずれ2 m程度）の中間地点に位置し、人工的な造成面（法面）が断層を境に右横ずれ変位している。2条の断層は南東側に分布する固結した凝灰角礫岩（阿蘇-4火砕流）と北西側に分布する崩積土との境界に位置しており、その境界面は直線的である。走向・傾斜はN66°E, 90°およびN87°E, 87°Nであり、累計90 cm以上の右横ずれ変位が認められる。崩積土中に発達する断層面にはほぼ水平方向で湾曲する非常に柔らかい条線が認められる。本露頭の南西延長部には作業道を2 m右横ずれ変位させる断層が露出しており、走向・傾斜はN59°E, 74°SEである。この断層面にも湾曲した条線が付着しており、すべりの前半に若干の正断層成分、後半に若干の逆断層成分を伴ったことを示す。断層の南東側に分布する阿蘇-4は、水平方向・鉛直方向ともに少なくとも10 m以上は追跡できず、阿蘇-4形成以降に10 m以上の累積変位があったことを示唆する。

河原（かわはら）露頭は布田川左岸斜面および河床に位置しており、左岸斜面には安山岩溶岩（大峰火山）と、スコリアを含む凝灰角礫岩（阿蘇-1～阿蘇-3）との境界が認められる（写真4）。いずれの岩石も、境界から50 m程度離れた地点ではよく固結しているが、境界近傍では軟弱になっている。地震に伴う崩壊、降雨による浸食が著しく、今回の地震で活動したことを示す直接的な証拠は得られていないが、境界面の北東延長部で道路の右横ずれと北盤側の沈降（重力性の可能性あり）が認められており、今回の地震で活動した部分である可能性が高い。左岸斜面より南西側に約50 mの河床には、弱いながらも面構造と線構造が発達する角礫帯が分布しており、走向・傾斜はN90°E, 72°N、線構造は中角で東に沈下する。角礫帯の幅は20 cm以上あり、面構造と線構造を伴うことから、断層角礫であると判断できる。この断層角礫は多少固結性を有することから、今回の地震で活動した部分ではなく、以前に形成されたものであると考えられる。

桑鶴（くわづる）露頭は、西原村小森桑鶴の小河川沿いに位置する。付近では道路および生垣が約50 cm右にずれしており、そこから延びる地割れが露頭の直上にまで連続している。露頭では南東側に固結した凝灰角礫岩（恐らく阿蘇-4）、北西側に弱く固結した崖錐堆積物（層理面はほぼ水平）が分布し、その境界は幅約40 cmにわたって非常に軟弱である。内部には、崖錐堆積物由来の基質中に凝灰角礫岩のブロックが分布し、腐植土の落ち込みも確認できる。これらのことから、この境界は断層であると判断できる。境界面の走向・傾斜はN74°E, 87°N（露頭上部）およびN78°W, 83°N（露頭下部）である。断層より南東側では崖錐堆積物が7.5 m程度上位に位置することから、崖錐堆積物形成以降、最低でも7.5 mの南東隆起の運動があったことが示唆される。

【熊本地震により亡くなられた方々、ご家族の皆様にお悔やみ申し上げますと共に、被災された皆様に心よりお見舞い申し上げます。1日も早い復旧・復興をお祈り申し上げます。】

キーワード：平成28年熊本地震、断層露頭、条線、断層岩

Keywords: The 2016 Kumamoto earthquakes, Fault outcrop, Striation, Fault rocks

平成28年熊本地震の地表地震断層に認められるスリップパーティショニングとその意味
Slip-partitioned surface ruptures for the Mw 7.0 2016 Kumamoto, Japan, earthquake

*遠田 晋次¹、金田 平太郎²、岡田 真介¹、石村 大輔³

*Shinji Toda¹, Heitaro Kaneda², Shinsuke Okada¹, Daisuke Ishimura³

1.東北大学災害科学国際研究所、2.千葉大学大学院理学研究科、3.首都大学東京

1.International Research Institute of Disaster Science, Tohoku University, 2.Graduate School of Science, Chiba University, 3.Tokyo Metropolitan University

平成28年4月16日に発生した熊本地震（M7.3, Mw7.0）では、布田川断層帯と日奈久断層帯の北東部に沿って長さ約30kmの地震断層帯が出現した（熊原ほか，2016，本大会予稿）。地震断層帯は主として右横ずれ断層からなるが、地震断層帯中央部の西原村では、並走するように北西落ちの正断層が分布する。正断層は俵山西麓から日向地区にかけて断続的に約6km以上延びる。個々のセクションは比較的直線的で、共役のantithetic fault（南東落ち）をともなう部分も存在することから、明らかにテクトニックな断層と判断される。横ずれ断層との離隔距離は最大で2kmである。西原村での右横ずれ変位量は約1.5mで、正断層の変位量は約2mで、ほぼ同等の変位量を有する。熊本地震（M7.3）では、余震分布・地震波インバージョン・干渉SAR解析等から震源断層面は北に60°前後で傾斜するとともに、顕著な正断層成分を伴って斜めずれしていることが指摘されている。このことから、地下から地表に向かって断層が分岐し、地表では横ずれ断層と正断層が並走して地下での斜めすべりの横ずれと縦ずれを分担するスリップパーティショニング（slip partitioning）が生じたと推定される。2001年チベットのクンルン断層地震ほか、国外では複数の報告例（例えば、King et al., 2005）があるが、国内で確認されたのは初めてである。布田川断層帯が正断層成分を持つことは、同断層のより東西に向いた走向と別府島原地溝帯の南縁に位置することと整合的である。また、スリップパーティションが顕著な部分では浅部の余震が少なく、余震発生にも影響を与えている可能性がある。縦ずれ断層と横ずれ断層が数km以内に位置する例は、四国～和歌山の中央構造線活断層帯や、琵琶湖西岸断層帯と花折断層帯など国内に複数例がある。今回のスリップパーティションを理解することは、熊本地震の震源過程と表層変位の関係にとどまらず、今後の活断層のグルーピング（起震断層区分）を評価するうえできわめて重要である。

文献：King et al., Slip-partitioned surface breaks for the Mw 7.8 2001 Kokoxili earthquake, China, Bull. Seismol. Soc. Amer., 731-738, 2005; 熊原ほか，2016年熊本地震の地表地震断層の分布とその特徴，本大会講演要旨。

キーワード：活断層、地表地震断層、スリップパーティション

Keywords: active fault, surface rupture, slip partition

平成28年（2016年）熊本地震にともなって出現した地表地震断層

The surface rupture of the 2016 Kumamoto Earthquake Kumamoto prefecture, central Kyusyu, Japan

*郡谷 順英¹、小俣 雅志¹、谷口 薫¹

*Yorihide KOHRIYA¹, Masashi Omata¹, Kaoru Taniguchi¹

1.株式会社パスコ

1.PASCO CORPORATION

2016年4月14日に熊本県にてMj6.5の地震が発生し、さらに16日にはMj7.3の地震が発生した。主として、それに伴って既知の活断層沿いに地表地震断層が出現した。筆者らは、4月15日から18日にかけて地表地震断層のマッピングおよびそれに関する地変の記載を行った。また、地震直後に撮影された航空写真を用いて地表地震断層の連続性を判読した。

地表地震断層は、既知の活断層である布田川断層帯、日奈久断層帯（池田ほか、2001；中田・今泉編、2002）に沿うように出現した。ただし、既知の活断層位置と一致しない部分もあった。我々が確認した地表地震断層の総延長は14km、一般走向は布田川断層帯でNE-SW、日奈久断層帯でNNE-SSWであった。地表変位に関してはおもに右ずれを主体とする。また益城町石川では、布田川断層に沿って生じた地表地震断層と斜交する北西—南東方向に延びる左横ずれを主体とする地表地震断層が出現した。以下、北から南に向かって地表地震断層の詳細を述べる。

・益城町堂園（どうぞん）から砥川にかけて布田川断層に沿って右横ずれの地表地震断層を複数地点で確認した。右横ずれ変位量は堂園において最大約2mであった。現地の間き取りでは16日の地震によって地表地震断層が出現した

・益城町小池から御船町高木を経て御船町滝川にかけて日奈久断層に沿って4km以上にわたって連続する右横ずれ主体の地表地震断層を確認した。右横ずれ変位量は約0.5~1m程度であった。

・嘉島町寺井の嘉島JCT付近では15日の調査でアスファルト舗装路の破損や耕作地の地割れが確認された。16日1時25分に発生したMj7.3の地震後に同箇所を再確認したところ、これらの変位が成長していることが確認された。

・益城町石川では布田川断層に沿って生じた地表地震断層と斜交する北西—南東方向に延びる左横ずれを主体とする地表地震断層が300m以上連続していることを確認した。

・益城町下田から寺迫にかけての県道36号線南側水田に1.5km以上に渡って右横ずれを主体とする地表地震断層を確認した。この地表地震断層は布田川断層の北西500~800m程度の位置に並走する。右横ずれ変位量は0.5~1m程度であった。

引用文献

池田安隆・千田 昇・中田 高・金田平太郎・田力正好・高沢信司（2001）：1:25,000 都市圏活断層図「熊本」。国土地理院技術資料 D・1-No.388。

中田 高・今泉俊文編（2002）：「活断層詳細デジタルマップ」。東京大学出版会。DVD-ROM 2枚・付図1葉・60p。

キーワード：活断層、地表地震断層、平成28年（2016年）熊本地震、布田川断層帯、日奈久断層帯

Keywords: active fault, surface rupture, The 2016 Kumamoto Earthquake, Futagawa fault zone, Hinagu fault zone

2016年M_w 7.1熊本地震により複数本の活断層沿いに出現した地表地震断層の構造特徴Multiple active faults triggered the 2016 M_w 7.1 Kumamoto earthquakes*林 愛明¹、佐津川 貴子¹、王 毛毛¹、Asl Zahra Mohammadi¹、笛田 凌史¹、中島 史樹²*Aiming Lin¹, Takako Satsukawa¹, Maomao Wang¹, Zahra Mohammadi Asl¹, Ryoushi Fueta¹, Fumiki Nakajima²

1.京都大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻地球物理学教室、2.(株)建設技術研究所インターナショナル

1.Department of Geophysics, Graduate School of Science, Kyoto University, 2.CTI Engineering International Co., Ltd.

2016年4月16日、西日本九州において、M_w 7.1 (Mj 7.3) の熊本地震が発生し、九州地方に甚大な被害をもたらした。熊本地震では、4月16日の本震 (M_w 7.1) に関連して、4月14日にM_w 6.2 (Mj 6.5) とM_w 5.5 (Mj 5.7)、そして4月15日にM_w 6.0 (Mj 6.4) と、M>5.5以上の3回の大きな前震が発生した。更に、M>5.0以上の大きな余震が、16日の本震の後わずか6時間のうちに4回発生した (M_w 5.8 (Mj6.0)、2回のM_w 5.6 (Mj5.8) とM_w 5.2 (Mj5.3)、気象庁発表による)。これらの前震および余震は、主に既存の活断層沿いに南西から北東方向へと伝播していく分布を示している。地震断層帯の変形構造の特徴と活断層との関係および阿蘇火山周辺の地震断層と地殻構造の関連性について調査するため、我々のグループは地震の翌日から10日間、震源域周辺で調査を行った。

野外調査と地震データ、更に地震発生前後に撮影された高解像度のGoogle Earth画像解析から、今回の地震に伴い、長さ約40kmにわたる地表地震断層が複数本の既存の活断層と未知の活断層沿いに出現したことが確認された。地表地震断層の南西セグメントにおいては、主に北東-南西走向の布田川-日奈久断層帯に沿った右横ずれ断層であるが、中央-北東セグメントでは、阿蘇カルデラの西側を切る地溝 (graben) 構造を形成した複数本の地表地震断層が未知の活断層沿いに現れたことが新たに発見された。本発表では、今回の調査で新たに発見された活断層と地表地震断層の分布パターンと変位量、および地震断層構造について報告する。

Field investigations, seismic data, and analysis of high-resolution Google earth images acquired before and after the earthquake, reveal that a ~40-km-long surface rupture zone occurred mostly along the NE-SW-striking Hinagu-Futagawa fault zone, with dominantly right-lateral strike-slipping displacement in the central-southwest segment and multiple newly-identified faults in northeast segment that formed a graben structure and crosscut throughout the western side of the Aso caldera. In this presentation, we will report the detail distribution patterns of co-seismic ruptures and offset amounts, and the structural features of the newly found active faults along which the co-seismic surface ruptures occurred.

キーワード：2016年M_w 7.1熊本地震、地表地震断層、日奈久-布田川断層帯、阿蘇カルデラ、地震断層の地溝構造、横ずれ断層

Keywords: 2016 M_w 7.1 Kumamoto earthquake, co-seismic surface rupture, Hinagu-Futagawa Fault Zone, Aso caldera, co-seismic graben, strike-slip fault

2016年熊本地震(Mw 7.0)時に出現した地表地震断層群の分布形態・性状の特徴と形成過程 -X線CTを用いた斜めずれ断層模型実験による予察的検討-

Geometry and kinematics of surface fault ruptures produced by the 2016 Mw 7.0 Kumamoto earthquake: Computerized X-ray tomography analysis of three dimensional fault geometries in basement-induced oblique-slip faulting

*上田 圭一¹、溝口 一生¹、小村 慶太郎¹、田中 姿郎¹、佐々木 俊法¹、相山 光太郎¹、青柳 恭平¹

*Keiichi Ueta¹, Kazuo Mizoguchi¹, Keitaro Komura¹, Shiro Tanaka¹, Toshinori Sasaki¹, Koutarou Aiyama¹, Yasuhira Aoyagi¹

1.電力中央研究所

1. Central Research Institute of Electric Power Industry

2016年4月16日に発生した熊本地震(Mw7.0)では、布田川-日奈久断層沿いに地表地震断層群が出現した。当所では当地表地震断層群の分布状況とそれらの性状を明らかにするため、4月16日より断続的に現地踏査を実施中である。現時点までの調査の結果、特に布田川断層沿いの地表地震断層群には次のような特徴が認められる。

・布田川断層沿いにおいて、右横ずれ変位主体のENE-WSW系の断層群が認められ、様々なスケールで左雁行状配列が卓越する。特に断層間のステップ幅が大きい個所では、左横ずれ変位主体のWNW-ESE系の断層が認められる。

・これらの断層群の南東方、約1.5kmにおいて、正断層変位主体のENE-WSW系の断層群が認められ、様々なスケールでの左雁行状配列が認められるとともに、地溝状の変形形態も認められる。

このような地表地震断層群の出現形態の特徴については、熊原ほか(2016)、遠田ほか(2016)などによって一部、報告されているが、その形成メカニズムを解明するためには、今後の調査・検討が必要と考えられる。筆者らは、初期的な検討として、上記の地表地震断層群の出現形態の特徴を、断層系の発達過程から考察することを目的に、斜めずれ断層模型実験を試行的に実施し、X線CTスキャナを用いて模型地盤内部の断層を可視化した。

布田川断層沿いにおいては、阿蘇火山から噴出した第四系等に厚く覆われていることから、基盤の断層変位に伴う被覆層の変形過程について模型実験による検討を行った。実験装置の土槽は長さ1500mm、幅300mm、高さ120mmで、基盤の断層は、国土地理院(2016)などの震源断層モデルなどを参考に、傾斜角を75°とし、斜めずれ断層変位(右横ずれ変位量/正断層変位量(上下変位量)=2)を与えた。被覆層の模擬材料として東北珪砂8号(平均粒径:0.110mm)を用いて、層厚50mmの密な模型砂地盤を作成した。実験においては地盤表面の断層の発達過程を観察するとともに、医療用X線CTスキャナにより模型地盤内に発達する断層の3次元形態を解析した。その結果、基盤の断層変位量の増大に伴い、次のような断層の発達過程が認められた。

(1) 変位初期の段階において、右横ずれ変位主体の雁行状Riedel shear群が発達する。

(2) 基盤の断層変位量の増大に伴い、Riedel shear群がさらに下盤側へ成長する。Riedel shearは3次元的には螺旋曲面状の形態を示すが、下盤側へ成長した区間では、その走向は基盤の断層と平行になり、正断層変位成分が卓越する。また隣接するRiedel shear間に、左横ずれ変位主体のantithetic Riedel shearが観察された。

(3) 基盤の断層変位量が大きくなると、Riedel shear群が下盤側で連結し、平滑な断層面が形成され変位・変形が集中する。

2016年熊本地震時に出現した地表地震断層群の内、右横ずれ変位主体のENE-WSW系の断層群は、上記の実験で観察されたRiedel shear群に、左横ずれ変位主体のWNW-ESE系の断層はantithetic Riedel shearに、正断層変位主体のENE-WSW系の断層群はRiedel shearが下盤側へ成長した区間に相当する可能性があり、これらの地表地震断層の出現は、当断層系が上記(2)の発達段階にあることを示すと考えられる。

以上の試行的な実験的検討によると、布田川断層においては、阿蘇火山から噴出した第四系等に厚く覆われたことから、基盤の断層変位が被覆層内で分散し、今回の地震時においても地表地震断層群が上記のような複雑な出現形態を示したと考えられる。今後は当断層系の構造を詳細に把握するための現地調査や様々な条件下での実験的検討を行い、当断層群の形成メカニズムの解明に努めたい。

文献：熊原ほか(2016) <http://jsaf.info/jishin/items/docs/20160420164714.pdf>

遠田ほか (2016) <http://irides.tohoku.ac.jp/irides-news/20160425/426>

国土地理院 (2016) <http://www.gsi.go.jp/common/000139798.pdf>

2016年熊本地震による阿蘇カルデラの北部低地に見られる亀裂と地震断層：地上調査と低空撮画像の解析による検討

Discussion on the ground ruptures appeared in alluvial plain in Aso caldera and earthquake fault based on field investigation and low-altitude aerial photogrammetry.

*田中 圭¹、中田 高²、松多 信尚³、楳原 京子⁴、竹竝 大士⁵、隈元 崇³、森木 ひかる⁵

*Kei Tanaka¹, Takashi Nakata², Nobuhisa Matsuta³, Kyoko Kagohara⁴, Daishi Takenami⁵, Takashi Kumamoto³, Hikaru Moriki⁵

1.一般財団法人 日本地図センター、2.広島大学名誉教授、3.岡山大学、4.山口大学、5.岡山大学（院生）

1.Japan Map Center, 2.Prof. Emeritus, Hiroshima Univ., 3.Okayama Univ., 4.Yamaguchi Univ., 5.Graduate Student, Okayama Univ.

2016年熊本地震では、既存の活断層分布図に示された布田川-日奈久断層帯の断層線にほぼ沿う位置の地表変位の他に、国土地理院都市圏活断層図「熊本」（池田ほか、2001）に図示された白旗山北西麓から北東に延びる断層線の北方延長で阿蘇カルデラ内の南阿蘇村南西部域と、益城町下陳から西方へ益城町中心部にかけての区間において、それぞれ沖積低地を変位させる顕著な右横ずれの地表地震断層が新たに出現した（熊原ほか、2016）。さらに、これらとは別な地変として、国土地理院は地震直後に撮影された画像をもとに、豊肥本線市ノ川駅西方の阿蘇西小学校の北から内牧温泉にかけて、西南西-東北東に断続的ではあるがほぼ直線的に連なる顕著な亀裂をマッピングしている（国土地理院：航空写真判読による布田川断層帯周辺の地表の亀裂分布図：<http://www.gsi.go.jp/BOUSAI/H27-kumamoto-earthquake-index.html>）。この地変沿いの干渉SARの解析結果（地理院地図の干渉SARデータ：同URL）を見ると、地変沿いに長さ約5km、幅1~2kmの範囲に短波長の干渉縞が認められる。

これらの亀裂について、現地調査を実施するとともに、亀裂が明瞭な場所においてはドローン（200g未満の小型マルチコプターを含む）および高さ約10mのポールカメラを用いて詳細なオルソ画像を作成し、亀裂に沿った地盤の変位を詳細に検討した。その結果、これらの亀裂は、全体が成因を同じくする一連の地変から成るのではなく、ある区間では旧河道に発生した地盤の側方流動・不同沈下により形成されたと考えられる地変もあれば、一方、別な区間では亀裂に沿って系統的な右横ずれ変位を伴う地変が観察されることから側方流動などとは異なる成因を考える必要もあることが推察された。この成因としては、地震の規模に比してずれの鉛直成分が大き目な値であるという特殊性はあるものの、地震動に伴う単なる表層部の2次的な変形ではなく、その連続性や変位の形態から地下の断層変位に由来するものである可能性が高いと考えられる。

具体的な地変の性状の説明として、まず、内牧温泉付近では、国土地理院の亀裂分布図には示されていない地変として、遊技施設の駐車場およびその周辺で幅100m、長さ150-200mの範囲に、N60~75°Eの走向で右ステップする3条の顕著な亀裂が認められる。西側の一条は、駐車場の北端から用水路を横切り田んぼを50cm以上変位させ、北西の住宅にまで達する東南落ちの変位である。中央の一条は、用水路を挟んで駐車場を変位させて北側に延び、水田と集合住宅を横切ってホテルの建物の近くまで達する。この亀裂に沿う横ずれの量は、水路や駐車場の白線、側溝などが最大数10cm、系統的に右横ずれしている。また、縦ずれ量は、南西側では北西落ちで最大1m弱程度、北東側では南東落ちで最大1m程度であり、横ずれ断層の変位に沿って観察されることの多い螺旋的なずれの形態を示す。東側の一条は、駐車場東側の田んぼより始まり道路や家を通して県道149号線に達し、最大変位は数十センチの北西落ちである。これらの地変の周辺での野外踏査からは、その成因を側方流動と考えた場合に見合う対となる圧縮変形は見られなかった。

次に、阿蘇市狩尾の乙姫川右岸では、N60~75°Eの走向で数条の平行する亀裂に挟まれた幅約80m長さ約300mの地溝状の凹地が認められる。地溝の低地を挟む2状の亀裂に沿って右横ずれが確認できることから、これらの亀裂も地下の断層変位に由来するものと考えられる。さらに、阿蘇西小学校の北方にも、上記と同様な亀裂によって挟まれる幅約50m、長さ500m以上にわたる連続性の良い地溝状の凹地が認められる。亀裂に沿った見かけの上下変位量は2m以上に達する箇所もある。この亀裂に沿っては、不明瞭ながら右横ずれが認められるところもある。この地溝状の亀裂が出現した場所は、周囲より標高がやや高い位置にあり、米軍空中写真で圃場整備前の地形を見ると、旧流路状の地形は支流の扇状地を横切り下流側が高くなっていて、側方流動・不同

沈下がこの地変の直接的な成因とは考えられないことから、地下の断層変位に由来するものである可能性が指摘できる。

これらのことから、阿蘇カルデラ北部低地に出現した亀裂については、地表地震断層として今回の一連の地震活動の断層変位を示すものである可能性があるものと考えて、地震学・測地学データや構造物の被害状況などとあわせて今後さらに精査する必要がある。

本調査には平成28年度科学研究費補助金（特別研究促進費）「2016年熊本地震と関連する活動に関する総合調査」（課題番号：16H06298、研究代表者：清水洋）および平成28年度「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究」課題番号1702「地表地震断層および活断層の地表形状・変位量データにもとづく直下型大地震の規模・頻度予測手法の高度化 -LiDAR 等の高解像度 DEM を用いた検討」を使用した。

キーワード：熊本地震、地震断層、地盤破壊、阿蘇カルデラ

Keywords: Kumamoto Earthquake, surface fault, ground rupture, Aso caldera

「だいち2号」合成開口レーダーによる2016年熊本地震に伴う地表の断裂の検出
Detection of surface ruptures associated with the 2016 Kumamoto earthquake with
ALOS-2/PALSAR-2

*橋本 学¹

*Manabu Hashimoto¹

1.京都大学防災研究所

1.Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

2016年4月14日のMjma6.5の地震発生を受け、宇宙航空研究開発機構は「だいち2号」搭載合成開口レーダー(以下、ALOS-2/PALSAR-2)による緊急観測を実施した。ALOS-2/PALSAR-2は、この地震活動に伴う地表とその変化に関して、高分解能かつ高質の画像を提供してくれている。

地表面の変化を検出する手法は、複数ある。干渉法とオフセット・トラッキングは変位を検出するためによく用いられる。一方、強度画像とコヒーレンスは構造物被害や地滑り、さらには地表断裂などの検出に活用されている。この研究では、干渉画像とそれに伴うコヒーレンス画像をより詳しく見て、特に地表断裂の分布について議論する。

4月16日のMjma7.3の地震を挟む干渉画像には、多くの位相不連続(コヒーレンスは0.6以下)が認められる。一方、この地震を挟まない干渉画像のコヒーレンスは、ほぼ全域で1に近い。これらの不連続は、主として布田川-日奈久断層帯に沿った地域と阿蘇カルデラ外輪山の北西山腹に分布する。前者は、地震時の地表地震断層に関連すると考えられる。コヒーレンス画像には、低コヒーレンス(0.8以下)の複数の帯が認められる。一つは西方にのびる布田川断層沿いのもので、もう一つは日奈久断層の御船セグメントに沿ったものである。両者は益城市中心部付近で合流する。合流点より東側では、東北東に延びて、阿蘇カルデラにまで達している。阿蘇カルデラ内では、東北東走向の帯と東西に延びる群の2つに分かれる。低コヒーレンスの帯は、単純な直線ではなく、短く細い低コヒーレンスの線で構成されている。液状化などの他の要因によりコヒーレンスが低下することもあるので、すべての低コヒーレンスが地表地震断層と見なすことはよろしくない。しかし、その特徴と位置から考えれば、地表地震断層を含んでいると考えるのが合理的である。

阿蘇カルデラ外輪山山腹の不連続は、地震断層の走向から外れて分布しており、東西走向という異なる走向を持つ。いくつかの不連続は、10rad(～19cm)程度の位相時ジャンプを持っており、数百～kmの長さがあるものもある。しかしながら、変動の幅は小さい。したがって、これらの不連続の力源は、浅いものと考えられる。この地域は、火砕流堆積物で覆われており、未固結の物質が強震動により揺らされて、差動的な動きをしたものと推測される。

ALOS-2/PALSAR-2画像は、地震予知連絡会地震SAR解析WG(事務局:国土地理院)を通じて、JAXAより提供されました。ALOS-2/PALSAR-2画像の著作権・所有権は、JAXAにあります。

キーワード: ALOS-2/PALSAR-2、地表変動、コヒーレンス、干渉法、活断層

Keywords: ALOS-2/PALSAR-2, surface deformation, coherence, interferometry, active fault

2016年熊本地震の「前震」に伴う益城町島田・小池～嘉島町井寺付近の地表変形

Surface rupture associated with the 14 April 2016, Mj 6.5 earthquake in the Mashiki and Kashima area, Kumamoto Prefecture, Kyushu, Japan

*杉戸 信彦¹、後藤 秀昭²、熊原 康博³、中田 高⁴、楮原 京子⁵、堤 浩之⁶、松多 信尚⁷、吉田 春香⁸

*Nobuhiko Sugito¹, Hideaki Goto², Yasuhiro Kumahara³, Takashi Nakata⁴, Kyoko Kagohara⁵, Hiroyuki Tsutsumi⁶, Nobuhisa Matsuta⁷, Haruka Yoshida⁸

1.法政大学人間環境学部、2.広島大学大学院文学研究科、3.広島大学大学院教育学研究科、4.広島大学名誉教授、5.山口大学、6.京都大学大学院理学研究科地球物理学教室、7.岡山大学大学院教育学研究科、8.福岡県立八女高等学校

1.Faculty of Humanity and Environment, Hosei University, 2.Graduate School of Letters, Hiroshima University, 3.Graduate School of Education, Hiroshima University, 4.Professor Emeritus, Hiroshima University, 5.Yamaguchi University, 6.Department of Geophysics, Graduate School of Science, Kyoto University, 7.Graduate School of Education, Okayama University, 8.Fukuoka Prefectural Yame High School

2016年熊本地震においては、4月16日の01:25に発生した「本震」（気象庁マグニチュード7.3）に伴って、地震前から知られていた布田川・日奈久断層の北東部にほぼ沿う形で明瞭な地表地震断層が出現した。一方で、本震の約28時間前（14日21:26）に発生した同6.5の「前震」に伴っても、地表地震断層と考えられる地表変形が、布田川・日奈久断層北東部の一部に生じていた。このことは、発表者のひとりである杉戸が上益城郡益城町島田・小池～同嘉島町井寺付近について、前震の翌日（15日）に上空からの観察によって確認した。この地表変形は、同じく15日に現地に入った後藤・熊原・中田・楮原によっても確かめられている。そしてこの地表変形と同じ場所において、本震に伴って変位が生じており、前震に伴う地表変位の生じた場所で、2度の変位が確認、記録された。本震後の調査によって、布田川断層南部に沿う他の地域でも、前震に伴って地表変形が出現し、本震に伴って成長した地点が確認された。本発表では主に島田・小池～井寺付近について、前震および本震に伴う地表変形の分布と出現形態、変位量等の具体的かつ詳細な検討を行う。〔謝辞〕現地調査では多くの方にお世話になった。上空からの観察は朝日新聞社へりによる。国土地理院には地震後に撮影された航空写真を提供いただいた。上記して感謝いたします。なお調査に際しては、JSPS科研費16H06298および文部科学省「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画」の支援を受けた。

キーワード：活断層、変動地形学、古地震学

Keywords: Active fault, Tectonic geomorphology, Paleoseismology

空中写真判読による平成28年（2016年）熊本地震で発生した地表の亀裂分布

Distribution of surface cracks caused by the 2016 Kumamoto Earthquake interpreted from aerial photos

*中埜 貴元¹、宇根 寛¹、関口 辰夫¹、坂井 尚登¹、吉田 一希¹

*Takayuki Nakano¹, Hiroshi Une¹, Tatsuo Sekiguchi¹, Hisato Sakai¹, Kazuki Yoshida¹

1.国土交通省国土地理院

1.GSI of Japan

2016年4月14日及び4月16日に発生した平成28年（2016年）熊本地震では、家屋倒壊や斜面崩壊など、甚大な被害が生じた。4月16日のM7.3の地震では、既知の布田川断層帯および日奈久断層帯に沿って地表地震断層が出現するとともに、南阿蘇村河陽地区周辺ではこれまで認識されていなかった活断層が出現した。

国土地理院は、この地震の被災地を対象に、4月15日から空中写真撮影を実施した。4月16日以降撮影の空中写真では、阿蘇市から御船町にかけて多数の地表の亀裂が確認できたため、それらを判読し、マッピングした。そのうちの一部（4月16日撮影の西原地区の範囲）は、地理院地図で公表済みであるが、本発表では4月16～20日に撮影された空中写真の判読による、より広域の地表の亀裂分布図を掲示する。なお、この亀裂には地表地震断層のほか、斜面の重力性変形や低地の液状化、地震動そのものによる地盤の亀裂等が含まれている。また、道路面の細かな亀裂や斜面崩壊周辺の多数の亀裂については、すべては取得していない。この亀裂の判読作業は、発表者らのほか、国土地理院応用地理部の関係者が実施した。

キーワード：平成28年（2016年）熊本地震、亀裂、地表地震断層、活断層、重力性変形

Keywords: the 2016 Kumamoto Earthquake, crack, surface earthquake fault, active fault, gravity deformation

本震前後の2時期航空レーザ計測差分および空中写真による2016年熊本地震による変状解析（速報）
Deformation analysys of Pre- and post earthquake DATA set of airborne LiDAR 50cm DSM ,
Kumamoto 2016 earthquake.

*千葉 達朗¹、織田 和夫¹、高遠 陶子¹、荒井 健一¹、藤田 浩司¹、船越 和也¹、柏原 佳明¹、小川 直樹¹、ハスバートル¹、附田 園郁¹

*Tatsuro Chiba¹, Kazuo Oda¹, TOKO TAKAYAMA TAKATO¹, Kenichi Arai¹, Koji Fujita¹, Kazuya Funakoshi¹, Yoshiaki Kashiwabara¹, Naoki Ogawa¹, Baator Has¹, sonoka tsukuda¹

1. アジア航測株式会社

1. Asia Air Survey Co., Ltd.

1. はじめに

平成28年（2016年）熊本地震では、4月14日（前震と呼ぶ）と4月16日（本震と呼ぶ）の2回、最大震度7（M 6.5、M 7.3）の地震が続けて発生し、その後もM5～6クラスの地震活動が継続している。また、16日の本震に伴い、阿蘇市から御船町にかけて断続的に地表地震断層が出現した。地表地震断層やその周辺の変状把握はメカニズムの理解や防災対策にとって重要である。このような変動や変位把握手法としてIn-SARは広域の変動を精緻にとらえられるが、断層近傍は変状が大きく不明瞭となりがちである。また、現地調査での変位量の認定は、道路や畔などの既往直線構造がある場合に限られ、地割れやずれをとみなさない撓曲変形の認定は困難である。地震の前後の航空レーザ計測の比較や差分は、これらの断層近傍の詳細変形を明らかにするうえで有効な方法である。これまでもメキシコ(Oskin et al., 2012)や岩手・宮城や福島(Nissen et al., 2014)などで試みられており、大きな成果が得られている。

2. 測定

アジア航測では、2016年熊本地震による地表地震断層やその周辺の変形を解明するために、本震直前（4月15日）と直後（4月23日）の2時期に航空レーザ計測を行い、比較検討をおこなった。データの取得範囲は、嘉島町から西原村までで、取得密度は地震前が1点/m²、発生後は4点/m²である。差分誤差を減らすために、地震後の計測では地震前の計測と同一コース、同一機材/計測システムで、同一のソフトによる処理を行った。得られた点群データから、50cmメッシュのDSMを作成し、赤色立体地図を作製した。さらに、DSMの単純垂直差分と、赤色立体地図による移動判読、ICPIによるベクトル解析、さらに空中写真判読をおこなった。これらの結果をもとに、断層の位置や変形の性質と広がりを推定したので報告する。

3. 差分解析

本震前後の50cmメッシュの数値表層モデル（Digital Surface Model、以下DSM）を用いて標高差分図を作成した。最大の沈降量は、西原町の布田地区で、-2.3mを示した。また、建物の屋根や道路の法面など斜面は水平変位によるみかけの垂直変位を示すことがあり、周辺の水平面での垂直変位を考慮することで水平変位方向やその長さの推定が可能であった。

4. 赤色立体地図と写真判読による水平変位検討

本震後の赤色立体地図の判読および、本震前の赤色立体地図との比較より地表地震断層の抽出を行った。一例として、木山川低地の南北端に沿う2本の右横ずれ断層と、それに斜めに交わる左横ずれ断層を示す（図1）。また、断層から離れた地点の水平変位を検討するために、それぞれの赤色立体地図上で畦の交点等の特徴点を抽出し、本震前後での水平移動方向と量を判読した。また、25cmメッシュのオルソフォトでも比較検討も行った。作成したベクトル図は断片的であったが、断層から離れた地点の動きを推定可能であった。ただし、この判読作業は個人差が避けられないので、客観性に課題があった。

5. ICPIによるベクトル計算

そこで、CCICP(Classification and Combined Iterative Closest Point)手法による、点群データの自動変位

量抽出を試みた。これは指定した点周囲の移動前の点群について移動後の点群から点の周辺分布状況（線状・面状・3次元状）が同じ最近傍点を探索するステップと、これらの対応点の間の剛体変換の算出を繰り返し行い、2つの点群間の移動量を計算するものである。1m²に4点程度の点密度の点群を用いて計算し、断層周辺で垂直移動と平行移動を精度よくとらえることができた。

6.まとめ

2016年熊本地震の表層地震断層の分布域について、断層運動前後の航空レーザ差分解析を行い、精度の良い結果が得られた。最大変化地点では-2.3mに達した。これはInSARによる推定位置と一致しているが、値はより大きい。

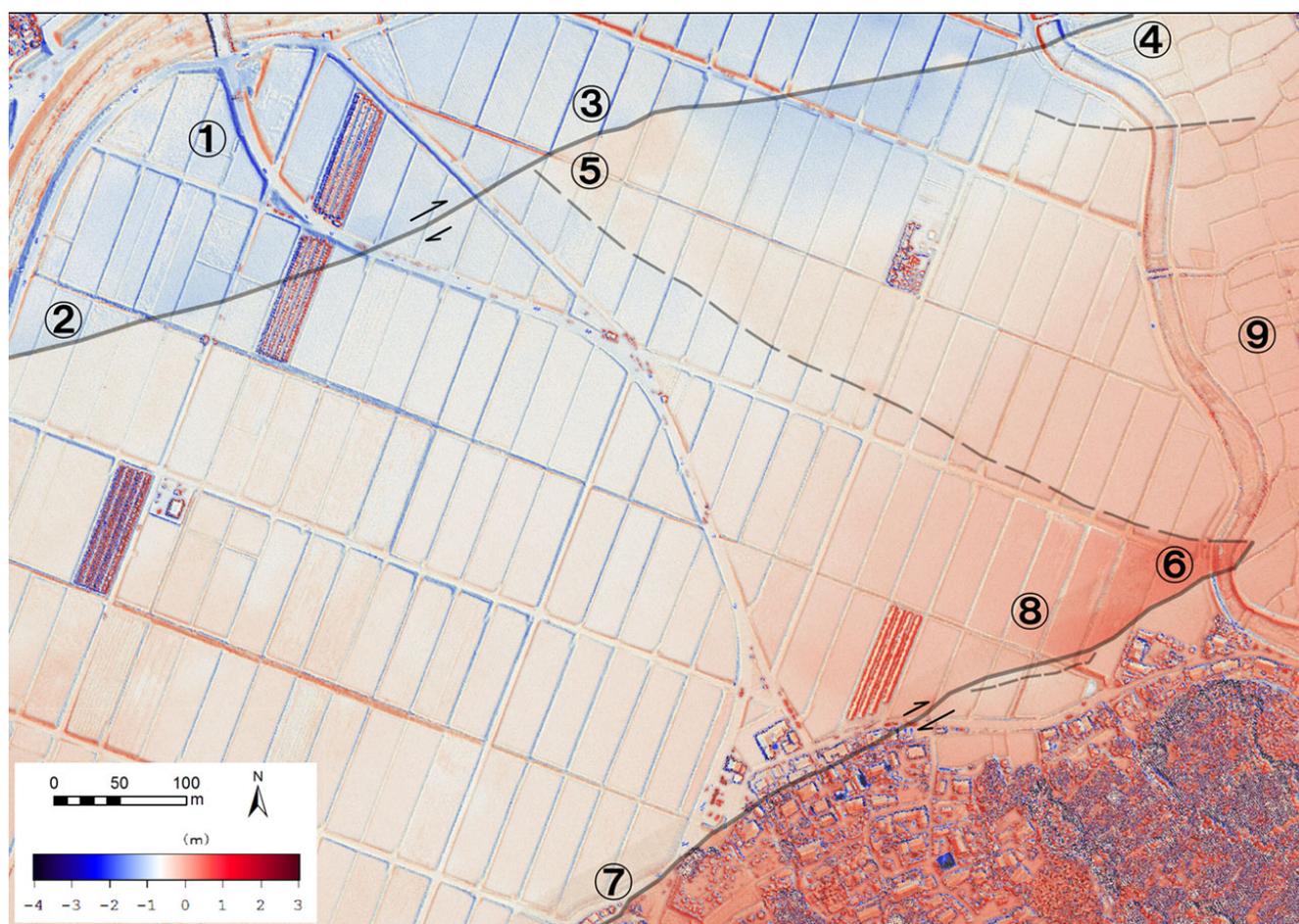
文献

Oskin, M. E., et al. (2012), Near-field deformation from El Mayor-Cucapah earthquake revealed by differential LIDAR, *Sciences*, 335, 702-705

Nissen et al. (2014), Co-seismic fault zone deformation revealed with differential Lidar: examples from Japanese Mw~8 intraplate earthquakes, *Earth and Planetary Science Letters*, 405, 244-256.

キーワード：航空レーザ計測、空中写真、地表地震断層、差分解析

Keywords: Airbone LiDAR, Aerial photograph, earthquake fault, differencing of DEM



平成28年（2016年）熊本地震に伴って発生した地表変位の三次元モデルによる可視化
3D model of the surface deformation associate with the 2016 Kumamoto Earthquake ,Kumamoto
prefecture, central Kyusyu, Japan

*小俣 雅志¹、榊原 庸貴¹、頓田 修一郎¹、郡谷 順英¹、谷口 薫¹

*Masashi Omata¹, Tsuneki Sakakibara¹, Shuuichirou Tonda¹, Yorihide Kohriya¹, Kaoru Taniguchi¹

1.株式会社パスコ

1.PASCO CORPORATION

2016年4月14日21時26分に熊本県を震源とするMj6.5の地震が発生し、4月16日1時25分にはMj7.3の地震が発生した（平成28年（2016年）熊本地震）。これらの地震に伴って布田川断層帯および日奈久断層帯の一部で既往報告による活断層トレース（池田ほか，2001；中田・今泉，2002）に沿うように地表地震断層が出現した。4月15日から18日までの間に地表踏査によって地表地震断層の分布状況を現地確認するとともに、4月15日から22日までの間に航空機による斜め写真撮影によって地表地震断層分布範囲の撮影を行った。これらの調査の結果、既往報告の活断層トレース以外の地点について地表変位を確認したので、その詳細を報告する。なお、現地調査結果の詳細については、郡谷ほか（本学会）を参照されたい。今回の航空機による写真撮影では株式会社パスコ開発のPALS（Portable Aerialphotography and Locator System：携帯型斜め写真撮影システム）を使用した。PALSによる斜め写真では写真撮影と同時にGPSによって撮影位置と被写体位置の座標を取得しながら連続撮影が可能なシステムである。撮影した斜め写真からSfM（Structure from Motion）ソフトウェア（Smart 3D Capture：Acute3D社製）を使用して三次元モデルの生成をおこなった。三次元モデルを作成することによって航空写真の単写真では一方向からしか観察できない現地状況が、様々な角度から確認できるとともに、広範囲の地形状況から地表変位の詳細構造まで自在に拡大縮小しながら観察できる。また、航空機で上空から観察するよりも時間をかけて地表変位について検討ができる。さらに、地表変位の正確な分布位置を明らかに確認することができるので、地表変位の詳細マッピングにも適している。今回の地震に伴う地表地震断層は、多くは既往報告による活断層トレースに沿って出現したものの、一部にこれまで活断層トレースが示されていない地点でも地表変位が確認された。本報告ではこれまで活断層トレースが示されていない地点での地表変位について、その概要を報告する。阿蘇市の石では北東-南西方向の比較的直線性の高い地表変位が複数平行して分布しているのが確認される。これらは正断層的に中心部が凹地状に落ち込んでおり、横ずれ成分はほとんど確認できない。南東縁の変位が最も大きく約2m北西側が相対的に落ち込む。北西側の地表面は南東側に傾動している。周辺には旧河道に起因すると推定される凹地状の落ち込みが認められるが、周辺の旧河道による変位と比較して上下変位量が非常に大きいのが特徴である。現段階でこの変位の成因について現時点では確定的なことは言えず、今後の詳細な調査と検討が必要である。益城町三竹付近の水田では、既往報告による布田川断層の活断層トレース付近に見られる地表変位に加えて、木山川右岸に連続する地表変位が確認された。水田の畔が右横ずれするとともに、地表面には右横ずれを示す明瞭な二次せん断面（R-shear）が認められる。あわせてこれら2条の地表変位の間に、左横ずれを示す変位が連続する。これらの地表変位はその連続性およびその形状から今回の地震に伴って発生した地表地震断層であり、既往報告の布田川断層から東西走向に分岐する派生断層と、その間に分布する共役系の断層であると考えられる。引用文献池田安隆・千田 昇・中田 高・金田平太郎・田力正好・高沢信司（2001）：1:25,000 都市圏活断層図「熊本」。国土地理院技術資料D・1-No.388。中田 高・今泉俊文編（2002）：「活断層詳細デジタルマップ」。東京大学出版会。DVD-ROM 2枚・付図1葉・60p。

キーワード：平成28年（2016年）熊本地震、活断層、三次元モデル、地表地震断層、布田川断層帯・日奈久断層帯、SfM

Keywords: 2016 Kumamoto Earthquake, active fault, 3D model, surface rupture, Futagawa fault zone and Hinagu fault zone, SfM

小型ドローンによる活断層・クラック調査の実用性と問題点

Practical evaluation of small drone's survey for active faults, Kumamoto

*白尾 元理¹、清川 昌一²

*Motomaro Shirao¹, Shoichi Kiyokawa²

1.なし、2.九州大学理学研究院地球惑星科学部門

1.none, 2.Earth and Planetary Science, Kyushu Univ.

今回の熊本地震で表れた活断層は、実用的な小型ドローンが市販されてから日本で最初に表れた活断層といえる。小型ドローンPhantom4を東京から機内持ち込み手荷物として運び、5月1・2日、活断層やそれに付随するクラックの表れた益城町上陣、南阿蘇村黒川で合計108分間の飛行を行った。

Phantom4のカメラは画角が94°、静止画では4000x3000画素、ビデオ動画では3840x2160画素(4K)モードで、高度3~65mから撮影した。飛行中に静止画とビデオ録画の切り替えは煩雑なので、10分程度の飛行では最初から静止画、あるいは4Kビデオ動画のいずれかに決めてから飛行することになる。4Kビデオ動画は、静止画に比べて上下方向の画角が72%に狭められるが、毎秒30フレーム撮像しているので圧倒的に情報量が多く、それから切り出した画像は静止画に比べて見劣りがしない。とくに高度10mからの撮影では1cm程度の分解能があり、短時間に数100mの範囲を調査するには有用である。低空での活断層の走行に沿った4Kビデオ動画は躍動感があり、活断層の広がりや形態がわかりやすく、研究のみならず、教育、広報の目的にも適する。

2015年9月に航空法の一部が改正され、12月10日からはドローンなどの無人航空機に新たな飛行ルールが導入された。今回飛行した上記2地域は、熊本空港に近く、事前に許可申請が必要になる可能性があった。今回はこのことについても触れる。

キーワード：熊本地震、活断層、ドローン、4K、航空法

Keywords: Kumamoto Earthquake, active fault, drone, 4K video, Civil Aeronautics Low

平成28年熊本災害におけるリモートセンシングの事例紹介

Utilization of remote sensing of The 2016 Kumamoto Earthquake

*伊東 明彦¹、作野 裕司²、桑原 祐史³

*Akihiko Ito¹, Yuuji Sakuno², Yuji Kuwahara³

1.宇宙技術開発株式会社、2.広島大学、3.茨城大学

1.Space Engineering Development Co.,Ltd, 2.Hiroshima University, 3.Ibaraki University

リモートセンシングとは、対象を遠隔から測定したり状態を把握するための技術であり、人工衛星や航空機、ドローンを利用した方法がある。リモートセンシングの特徴として、観測手段によって対象範囲は異なるものの、広域を同時に測定することが挙げられ、災害時の状況把握に有用な技術である。本発表では、平成28年熊本災害を対象に、リモートセンシングの観測・分析した事例を紹介し、リモートセンシングの有用性を整理する。

キーワード：衛星、リモートセンシング、ドローン

Keywords: Satellite, Remote Sensing, Drone

平成28年(2016年)熊本地震の震源分布と震源過程について

Hypocenter distribution and source process of the 2016 Kumamoto earthquake

勝間田 明男¹、藤田 健一¹、*溜淵 功史¹、安藤 忍¹Akio Katsumata¹, Kenichi Fujita¹, *Koji Tamaribuchi¹, Shinobu Ando¹

1. 気象庁気象研究所

1. Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency

2016年4月14日21時26分に、熊本県においてM6.5の地震が発生した。更にこの地震に引き続いて4月15日0時3分にM6.4の地震、4月16日1時25分にM7.3の地震などが発生した。余震を含めたこれらの地震の震源分布及び震源過程について調査したので報告する。

4月14日発生したM6.5の震源深さは11kmであり、北北西-南南東に張力軸を持つ横ずれの地震として発生した(気象庁)。4月16日のM7.3の地震が発生するまでの余震分布を波形相関DDにより震源再決定を行うと、4月14日M6.5の震源を含むクラスターは、垂直に近い南東下がり分布をしている。強震観測網(KiK-net)の記録を用いて震源過程解析を行った結果では、震源の北東側に大きな滑りを持つと推定された。震源過程解析は北西下がり断層面を仮定しても行った。その結果では多くの観測点において同等の観測波形と理論波形の一致度ではあったが、震源最近傍の観測点(KMMH16, KMMH14)の波形では南東下がりとした方が一致度は高くなる。仮定する震源断層と観測点が非常に近接しており、仮定する断層面の下がり方向により解が異なるが、南東下がりとする主破壊部分においてある程度の南東落ちの正断層成分を持っていたとみられる。

4月15日M6.4の地震は、震源深さ7kmで4月14日M6.5の地震と似た発震機構を持った地震であった(気象庁)。震源位置は4月14日M6.5の地震の南西の隣接地域にある。震源深さは三次元不均質構造を用いた結果では2kmと余震を含むクラスターの最浅部に決まっており、極浅い震源の地震であった可能性がある。強震観測網(KiK-net)の記録を用いた震源過程解析においてやはり北西下がりと南東下がり両方向を仮定した解析を行ったが、南東下がり断層面の方が地震波形の観測と理論の波形の一致度が高い。また、この地震の震源は波形相関DDにおける南東下がりクラスターの中にある。また、干渉SARの観測結果では、4月14日と15日に発生した地震を併せての結果であるが、北西下がりでもやや低角の方が観測値と理論値が整合的である。震源過程解析の結果では、震源の南東側の極浅い部分においてすべりが大きくなっており、4月14日M6.5の地震とは異なった場所のすべりが大きくなっている。なお、波形相関DDによる震源分布では、4月14日M6.5、4月15日M6.4の地震の南側余震域では、北西下がり震源分布となっている。

4月16日M7.3の地震は震源深さ12kmの南北方向に張力を持つ地震であった(気象庁)。気象庁によるCMT解ではかなりの正断層成分を含んでいる。波形相関DDにおいて、この地震以後に発生した余震は、北西下がり面に沿って分布している。三次元不均質構造の震源決定でも深さ11kmであったが、余震全体の分布としては、三次元速度構造を用いた震源の方が2~3km浅く推定されている。特に震源断層に沿っているとみられるクラスターから北西側に広がっている地震活動の震源は、三次元速度構造を用いた結果では深さ5km未満の極浅い震源分布となっている。また、この地震以降、それまで見られていた南東下がり余震活動はほとんど見られなくなった。震源過程解析では、震源位置よりも北東側にすべりの大きな領域が推定されている。近傍に震源を持つ4月14日M6.5の地震においても北東側にすべりの大きな領域はあるが、4月16日M7.3の地震では、すべりの大きな領域はより北東側に広く広がっているとみられる。干渉SAR解析でも断層による地殻変動が阿蘇山付近まで広く分布している結果が得られている。

一連の活動では、大分県側にまで地震活動が認められる。大分県側の活動においても、複数のクラスターが認められる。

本調査では、国立研究開発法人防災科学技術研究所、北海道大学、弘前大学、東北大学、東京大学、名古屋大学、京都大学、高知大学、九州大学、鹿児島大学、国立研究開発法人産業技術総合研究所、国土地理院、国立研究開発法人海洋研究開発機構、青森県、東京都、静岡県、神奈川県温泉地学研究所及び気象庁のデータを用いている。

キーワード：2016年熊本地震、震源分布、震源過程

Keywords: the 2016 Kumamoto earthquake, hypocenter distribution, source process

強震記録による2016年熊本地震の震源破壊過程

Source Rupture Processes of the 2016 Kumamoto Earthquake Sequence from Strong Motion Data

*浅野 公之¹、岩田 知孝¹*KimiYuki Asano¹, Tomotaka Iwata¹

1.京都大学防災研究所

1.Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

2016年熊本地震と一連の地震活動では、2016年4月14日21時26分に発生したM_j6.5の地震（本稿では最大前震と呼ぶ）の約28時間後の4月16日1時25分にM_j7.3の地震（本稿では本震と呼ぶ）が発生した。本研究では、強震記録を用いて最大前震と本震の震源破壊過程を推定した。マルチタイムウィンドウ線形波形インバージョン法（Hartzell and Heaton, 1983）を用い、強震記録（K-NET、KiK-net、F-net、気象庁）に適用した。時空間の平滑化はSekiguchi et al. (2000)に従い、平滑化の強さと第1タイムウィンドウフロントの伝播速度はABIC最小規準によって決定した。

最大前震については、直後の余震分布及び防災科学技術研究所F-netのモーメントテンソル解の情報から、日奈久断層帯北部に沿ったほぼ鉛直の断層面（走向212度、傾斜89度、長さ14 km、幅13 km）を仮定し、13地点の強震記録から得られた速度波形3成分（0.05-1 Hz）を解析した。深さ11.4 kmの破壊開始点付近にすべりの大きな領域が見られたほか、北東側のやや浅い部分（深さ5 km程度）にもすべりの大きな領域がある。このことが、益城町周辺で高震度が観測された要因の一つであると考えられる。地震モーメントは 2.04×10^{18} Nm (Mw6.1)、平均すべり量0.36 m、最大すべり量1.2 mであり、右横ずれのすべりが主であった。最適な第1タイムウィンドウフロントの伝播速度は2.2 km/sである。

本震については、余震の空間分布や国土地理院による地殻変動の解析から震源断層が北西に傾斜していることが示唆されている。日奈久断層帯に沿って発生している余震も、最大前震の余震はほぼ鉛直の断層面に沿って発生していたのに対し、本震後の余震は北西に傾斜した面に沿って発生しているようにも見える。また、産業技術総合研究所や東北大学など複数の現地調査チームにより、布田川断層帯の益城町から南阿蘇村にかけての区間に加え、日奈久断層帯北部の御船町から益城町にかけての区間で、地表地震断層の出現が報告されている。これらの情報を考慮し、日奈久断層帯北部（走向205度、傾斜72度、長さ14 km、幅18 km）と布田川断層帯（走向235度、傾斜65度、長さ28 km、幅18 km）に沿った2枚の断層面からなるモデルを設定し、15地点の強震記録から得られた速度波形3成分（0.05-0.5 Hz）を解析した。布田川断層帯のすべりは、断層深部から始まり、北東にユニラテラルに伝播しつつ、浅い方向へ広がっていった。最大すべりを伴うサブ断層の深さは約8~10 kmであり、モーメントテンソル解のセントロイドが深めに決まっていることも調和的である。地表に最も近いサブ断層のすべり量は1~3 m程度である。また、日奈久断層帯北端付近の浅部にもやや大きなすべり見られ、地表地震断層の出現に対応していると考えられる。断層面上のすべりのスナップショットと、布田川断層近傍の熊本県震度計観測点（益城町、西原村）の変位波形（インバージョンには使用していない）を比較したところ、観測点近傍の断層がすべる時刻に対応して、同程度の変位が観測されており、推定された破壊過程の妥当性を確認した。地震モーメントは 4.67×10^{19} Nm (Mw7.0)、平均すべり量1.9 m、最大すべり量5.3 mであった。最適な第1タイムウィンドウフロントの伝播速度は2.4 km/sである。

以上のことから、日奈久断層帯北部での前震を伴い、本震時には日奈久断層帯北部から布田川断層帯にかけて、連続的に破壊が伝播したものと考えられる。2002年5月に地震調査委員会より公表された「布田川・日奈久断層帯の評価」では、布田川・日奈久断層帯北東部が一体としてM7.2の地震を起こすとして評価されていた。2013年2月に地域評価に伴って改訂された「布田川断層帯・日奈久断層帯の評価（一部改訂）」では、布田川断層帯と日奈久断層帯は別々の活動をするものとし、布田川断層帯布田川区間がM7.0、日奈久断層帯高野-白旗区間がM6.8の地震を個別に起こすものとして評価され、両者の連動の可能性はなくなっていた。詳細な断層形状については、臨時余震観測の結果を待つ必要はあるが、現時点の解釈では、実際に発生した2016年熊本地震は2002年の活断層評価のシナリオに類似していたといえる。今回の地震の破壊過程や地震活動を詳細に分析し、内陸の活断層で発生する地震の活動区間や地震シナリオの想定に活かす必要がある。

謝辞：国立研究開発法人防災科学技術研究所K-NET、KiK-net、F-net、気象庁、熊本県の強震記録を使用しました。

た。関係の皆様には感謝します。

キーワード：2016年熊本地震、震源破壊過程、強震記録

Keywords: the 2016 Kumamoto earthquake, source rupture process, strong motion data

強震波形記録を用いて推定された平成28年（2016年）熊本地震の震源過程

Source rupture process of the 2016 Kumamoto earthquake derived from strong motion data

*久保 久彦¹、鈴木 亘¹、青井 真¹、関口 春子²*Hisahiko Kubo¹, Wataru Suzuki¹, Shin Aoi¹, Haruko Sekiguchi²

1.国立研究開発法人防災科学技術研究所、2.京都大学防災研究所

1.National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, 2.Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

2016年4月14日21時26分に発生した地震（M 6.5、気象庁）および16日1時25分に発生した地震（M 7.3、気象庁）を含む一連の平成28年（2016年）熊本地震は熊本県・大分県を中心にその地震動による大きな被害を引き起こした。本研究では上述のM 6.5とM 7.3の二つの地震を対象として強震波形記録を用いた震源過程解析を行い、それらの断層破壊過程を調べた。

震源過程解析手法にはマルチタイムウィンドウ線型波形インバージョン法（Olson and Apsel, 1982; Hartzell and Heaton, 1983）に基づく手法を用いた。M 6.5の地震の断層面に関してはF-netのモーメントテンソル逆解析の結果から走向212度、傾斜89度と設定し、走向方向の長さは22km、傾斜方向の幅は12kmとした。M 7.3の地震の断層面には走向方向の長さ56km、傾斜方向の幅24kmの矩形断層を仮定した。M 7.3の地震の断層面の走向はF-netのモーメントテンソル逆解析の結果から226度とし、傾斜は地震後の地震活動の分布及び地表地震断層の分布、InSARやGNSSで捉えられた静的変位を参考に65度とした。それぞれの断層面は2km×2kmの小断層を用いて離散化した。各小断層でのすべり時間関数は、0.8秒幅のスムーズランプ関数を0.4秒ずらして、M 6.5の地震では5個、M 7.3の地震では13個並べることによって表現した。第一タイムウィンドウのトリガー速度は残差の合い具合から、M 6.5の地震では2.4 km/s、M 7.3の地震では2.8km/sとした。破壊開始点の位置に関してはYano et al. (2016)がDD法で再決定した震源位置を参照した。

記録として、M 6.5の地震の解析ではK-NET・KiK-net・F-netの計16観測点での、S波到達1秒前から最大10秒間の速度波形記録（周期1.0–10秒、10 Hzサンプリング）を、M 7.3の地震の解析ではK-NET・KiK-net・F-netの計27観測点での、S波到達1秒前から前震では30秒間の速度波形記録（周期1.0–20秒、5 Hzサンプリング）を用いた。

Green関数は、一次元地下構造モデルを仮定し、離散化波数積分法（Bouchon, 1981）と反射・透過係数行列法（Kennett and Kerry, 1979）により点震源の波形を計算した。地下構造モデルは、藤原・他（2009）による三次元地下構造モデルの各観測点直下の情報を用いて観測点ごとに構築した。KiK-net観測点については速度検層の情報も利用した。また、Green関数の計算時に25個の点震源（走向方向、傾斜方向それぞれ5列）を小断層内に分布させることによって小断層内部の破壊伝播の効果を付加した。

各小断層の各タイムウィンドウでのすべり量を、観測波形と合成波形の差を最小とするように、最小二乗法を用いて求めた。不等式拘束条件をつけた最小二乗法（Lawson and Hanson, 1974）を用いて、各小断層でのすべり方向の変化を、中心すべり角の±45度に収めた。中心すべり角は、それぞれのF-netメカニズム解のすべり角を参照して、M 6.5の地震では-164度、M 7.3の地震では-142度とした。また時空間的に近接するすべりを平滑化する拘束条件（Sekiguchi et al. 2000）を付加した。拘束条件の重みは赤池ベイズ情報量基準（Akaike 1980）に基づいて決定した。

推定されたM 6.5の地震の震源モデルにおける最大すべり量は0.7m、断層面全体での地震モーメントは 1.8×10^{18} Nm (Mw 6.1) である。破壊開始点付近とその北北東の浅い領域に大きなすべりが推定された。各領域の破壊はそれぞれ地震発生から1-3秒後と3-4秒後に生じている。

推定されたM 7.3の地震の震源モデルにおける最大すべり量は4.6m、断層面全体での地震モーメントは 5.3×10^{19} Nm (Mw 7.1) である。すべりの大きい領域は震央の北東10 kmから30 km程度の領域に広がり、阿蘇山付近にまで及ぶ。浅い領域のすべりは地表踏査で確認された地表地震断層と整合的である。また、すべりの大きな領域と地震後の地震活動の領域は相補的である。主たる破壊は地震発生から5-15秒後に生じており、全体の破壊は約20秒で収束する。

キーワード：2016年熊本地震、震源過程、強震動

Keywords: The 2016 Kumamoto earthquake, Source process, Strong ground motion

強震波形による2016年熊本地震の震源過程解析（速報）

Preliminary results of rupture processes of the 2016 Kumamoto Earthquake inferred from strong motion waveform

*引間 和人¹

*Kazuhito Hikima¹

1.東京電力ホールディングス

1.Tokyo Electric Power Company Holdings Inc.

【はじめに】

2016年4月14日21:26のMj6.5の地震にはじまる2016年熊本地震の活動では4月16日1:25のMj7.3を最大の地震（本震）として活発な地震活動が継続しており、いまだに十分な収束を見ない。この間、複数地震で震度6以上を観測するなど、大振幅の地震動が観測されており、また明瞭な地表地震断層も見られている。今回はこれらの地震の震源過程と強震動との関係を明らかにし、今後の強震動予測の精度向上に活用することを目的として、震源インバージョン解析を実施した結果を報告する。但し、地震発生後間もないこともあり、限られた情報に基づいて、速報的に最大前震（4/14）と本震（4/16）を対象に解析を行った暫定的な結果である。今後より詳細な検討を継続する予定である。

【解析データ・手順】

震源過程解析に先立ち、気象庁一元化データの初動読み取りデータを使い、前震・本震・余震を合わせて震源再決定を行った。震源決定はDouble Difference法 [Waldhauser and Ellsworth (2000)] により行い、その際速度構造はJMA2001を使用した。解析対象は熊本～大分で発生した4月14日から3週間分の地震としたが、活発な余震活動のため公開データ数が限られており、投稿時点で検測値が公開されている地震に限定されている。結果として得られた震源諸元は気象庁一元化処理結果から若干浅くなった地震が多いが、本震、最大前震については震源位置が数100m移動した程度であった。以下の解析ではこの解析で得られた震源を使用し、断層面等を設定している。

震源インバージョンはマルチタイムウィンドウ法 [Yoshida et al. (1996), 引間 (2012)] により行った。解析には震源周辺のKiK-net観測記録（15地点程度）を使用し、表層地盤の影響を軽減するため地中記録を対象とした。観測された加速度記録を積分し速度波形として用いた。なお、今後は震源近傍のK-NETの観測記録等も使用する予定である。

グリーン関数は「長周期地震動予測地図2012年試作版」で公開されている速度構造モデルから、各観測点直下の1次元水平成層モデルを抽出し、Kohketsu(1985)により計算した。計算に先立ち、多くの地点で小地震記録を再現するように構造モデルの修正を行った。

【本震の解析】

4/16 1:25の本震の解析では、0.05～0.8Hz のバンドパスフィルタをかけた波形を使用した。震源解析を行う際に仮定する断層面は、F-netのメカニズム解(str:226°、dip:84°)を初期値として設定したが、予備的解析や余震分布を参照し(str:227°、dip:75°)としている。はじめに大きい断層面を設定して解析を行ったところ、震源から北東方向に概ねuni-lateralに伝播する結果が得られた。そのため、40×16km 程度の断層面を主に震源の北東側に設定してすべり分布を求めた。結果として、震源より北東の深部からさらに北東の浅部にかけて大きなすべりが求まった。KiK-net益城付近では浅部でのすべりは相対的に小さい値である。全体としては右横ずれ成分が卓越しているが、すべりが大きな益城町の北東～阿蘇にかけては正断層成分も多く含む。全体の地震モーメントは 4.6×10^{19} Nm (Mw 7.0)程度である。

【最大前震の解析】

4/14 21:26の前震の解析では、0.05～0.5Hz のバンドパスフィルタをかけた波形を使用した。この地震では複数の観測点で5秒程度の間隔で比較的明瞭な2つの波群が見られることから、主要な破壊が2回発生したものと考えられる。暫定的にF-netのメカニズム解を元に断層面を設定しすべり分布を推定したところ、破壊開始点付近で主要なすべりが生じた後、数秒後にやや浅部で破壊が生じた結果が得られた。但し、この結果は不安定であり、今後も解析を継続したい。

【おわりに】

今回の解析は本震および最大前震の震源過程の主要な特徴は捉えていると思われるが、強震動との関連など詳細な検討のためにはさらに検討を要する。特にこの地域は火山地域を含むことから複雑な地下構造を有することが予想され、グリーン関数の計算に必要な地下構造モデルについては十分な検討が必要である。また、震源近傍の観測記録も十分には活用できていないことから、それらの地点の地下構造のモデル化も含めて解析を行う予定である。

キーワード：2016年熊本地震、震源過程、強震動、震源近傍

Keywords: 2016 Kumamoto earthquake, Source process, Strong motion, Near fault

近地強震記録の逆解析による2016年熊本地震の3地震の震源過程

Source Processes of three large events of the 2016 Kumamoto Earthquakes Inferred from Waveform Inversion with Strong-Motion Records

*吉田 邦一¹、宮腰 研¹、染井 一寛¹*Kunikazu Yoshida¹, Ken Miyakoshi¹, Kazuhiro Somei¹

1.一般財団法人 地域 地盤 環境 研究所

1.Geo-Research Institute

■はじめに

熊本県の熊本市から阿蘇山にかけての一带では、2016年4月14日に、Mj6.5の地震を皮切りに、翌15日にMj6.4、さらに16日にはMj7.0の主要な地震と数多くの余震が連続して発生し、それらの地震で2回の震度7を含む強震動により大きな被害が発生した。ここでは、強震記録をもとにこれら3つの地震の震源過程を逆解析で推定した。

■震源過程の解析

3地震の解析で共通している条件を示す。解析には、防災科研K-NET, KiK-net (地中)の加速度記録を用いた。加速度記録には周期1.25-20秒 (0.05-0.8 Hz)のバンドパスフィルターをかけたうえで積分して、速度波形とした。

速度構造モデルには、最表層はPS検層の結果を簡略化したものを、検層より深いところでは観測点直下のJ-SHISによるモデルを、さらにJ-SHISモデルで V_p が5 km/s以上となる深度以深を人工地震探査による結果(安藤・他, 2003)を参照してモデルを作成した。理論グリーン関数は、離散化波数法(Bouchon, 1981)と反射・透過係数行列法(Kennett and Kerry, 1979)により求めた。断層面を空間方向には小断層に分割し、時間方向には0.6秒間隔でパルス幅1.2秒のスムーズランプ関数を複数個並べて、時空間的に離散化して、理論波形を計算した。逆解析にはマルチタイムウィンドウバージョン法(Hartzell and Heaton, 1983)を用いた。断層面の平滑化係数はABIC最小を示す震源モデルのものとした。第1タイムウィンドウ伝播速度 V_{FT} を1.8~2.5 km/sの範囲で震源モデルを求め、残差が極小となったものを最適解とした。

□4/14 21:26に発生した地震(Mj6.5) 断層面は、F-netによるメカニズム解をもとに日奈久断層に沿うように設定し、北端を布田川断層との交点付近に設定した。解析では断層面の大きさを長さ・幅共に14 kmとし、タイムウィンドウを3個設定した。解析で得られた結果は、断層面全体の M_0 は 1.6×10^{18} Nm (Mw 6.1), 最大すべり量が0.8 m, 平均すべり量は0.3 mであった。 V_{FT} は2.0 km/sが最適解を示した。アスペリティが破壊開始点近傍と北端の2か所に求められた。ただし、波形の再現性にはまだ課題があり、特にKiK-net益城観測点の波形が再現できていないことが課題である。

□4/15 00:03の地震(Mj6.4) 断層面は、F-netによるメカニズム解をもとに日奈久断層に沿うように設定し、4/14のMj6.5の地震の南側に設定した。解析では断層面の大きさを長さ12 km, 幅9.6 kmとし、タイムウィンドウを3個設定した。解析で得られた結果は、断層面全体の M_0 は 1.0×10^{18} Nm (Mw 5.9), 最大すべり量が0.9 m, 平均すべり量が0.3 mであった。 V_{FT} は2.0 km/sが最適解を示した。アスペリティが破壊開始点のやや南側に求められた。また、破壊開始点付近に、すべり量は小さいものの、最大モーメントレートのかな領域(HRA; 吉田・他, 2012, 地震学会)が見られた。

□4/16 01:25の地震(Mj7.3) この地震では、破壊開始点として気象庁一元化震源をもとに設定し、走向、傾斜角を断層面上端が布田川断層に沿うように、走向N236°E, 傾斜88°とした。断層面の長さは34 km, 幅は18 kmとし、タイムウィンドウを6個設定した。解析で得られた結果は、断層面全体の M_0 は 3.6×10^{19} Nm (Mw 7.0), 最大すべり量が4.5 m, 平均すべり量は1.8 mであった。 V_{FT} は2.0 km/sが最適解を示した。アスペリティが破壊開始点の東側浅部に求められ、益城町から西原村にかけて多くの地表地震断層が報告された領域に対応する。

■スケールング則

解析した3地震の平均すべり量と地震モーメントを比較すると、ほぼSomerville et al. (1999)のスケールング則に対応する。また、アスペリティの面積とモーメントの比率では、Mj6.5とMj6.4の地震はスケールング則に

対応するが、Mj7.3の地震ではややアスペリティの面積が小さい。

■課題と今後

グリーン関数の精度を小地震を使うなどして改良する必要がある。その後、より確からしい震源モデルを求め、強震動予測のためのパラメータの改良に寄与する予定である。

■謝辞 防災科研K-NET, KiK-netのデータを用いました。本研究は平成28年度原子力施設等防災対策等委託費（地震動評価における不確かさの評価手法の検討）事業による成果の一部である。

キーワード：2016年熊本地震、震源過程、アスペリティ

Keywords: 2016 Kumamoto earthquake, source process, asperity

強震、遠地、測地データのジョイントインバージョンによる2016年熊本地震の震源過程
Rupture processes of the 2016 Kumamoto earthquakes derived from joint inversion of
strong-motion, teleseismic, and geodetic data

*小林 広明¹、瀬瀬 一起¹、三宅 弘恵^{1,2}

*Hiroaki Kobayashi¹, Kazuki Koketsu¹, Hiroe Miyake^{1,2}

1.東京大学地震研究所、2.東京大学情報学環

1.Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2.Interfaculty Initiative in Information Studies, The University of Tokyo

2016年4月14日21時26分(JST)および4月16日1時25分(JST)に発生した $M_{\text{JMA}} 6.5$, $M_{\text{JMA}} 7.3$ の地震では、熊本県益城町や熊本県西原村で震度7が観測され、熊本県を中心に大きな被害をもたらした。特に、4月16日の地震では、熊本県西原村で得られた加速度記録を積分した速度波形が、EW成分が最大で250 cm/s程度の大振幅を持っており、こういった震源近傍の地震動の解釈には震源過程解析を行うことが不可欠である。そこで、強震、遠地、測地データを用いることによって4月16日に発生した $M_{\text{JMA}} 7.3$ についてジョイントインバージョンによる震源過程解析を行った。強震データはK-NET, KiK-netに加え、JMAと地方自治体の震度観測点のデータを使用した。遠地データはIRIS-DMCより入手し、P波部分を使用した。測地データはGEONETで得られたデータを用いた。断層モデルの構築にあたっては、地表地震断層位置、余震分布、SAR解析結果などを考慮に入れると、単純な1枚の平面で表現することが難しいため、日奈久・布田川断層帯の接合部および阿蘇カルデラ内で断層を折り曲げ、3つのセグメントに分割して構築した。解析の結果、破壊は主に震源から北東浅部へ向けて進み、最大滑りは北東浅部の西原村付近で生じていることがわかった。また、破壊の継続時間は約20秒程度であった。得られたモデルは、観測記録を概ね再現できているが、再現性が不十分な記録が幾つかあり、断層モデルや速度構造モデルの調整が必要だと思われる。今後は、4月14日の地震などについても同様にジョイントインバージョンによる震源過程解析を行う予定である。

キーワード：2016年熊本地震、震源過程、ジョイントインバージョン

Keywords: 2016 Kumamoto earthquake, rupture process, joint inversion

経験的グリーン関数を用いた2016年熊本地震の本震及び2つの前震の震源インバージョン解析
Source inversion using empirical Green's functions for the 2016 Kumamoto main shock (M 7.3) and two large foreshocks (M 6.5, M 6.4)

*芝 良昭¹

*Yoshiaki Shiba¹

1. 電力中央研究所

1. Central Research Institute of Electric Power Industry

2016年4月14日21時26分に、熊本県内を震源とするM6.5の内陸地殻内地震が発生し、震源近傍の益城町で震度7を記録した。その後、15日0時3分にほぼ同規模のM6.4の地震が、さらに16日1時25分にはM7.3の地震がそれぞれ発生し、M7.3の地震では益城町と西原村でいずれも震度7を記録している。ここでは、M 7.3の地震を2016年熊本地震の本震、14日に発生したM 6.5の地震を前震1、15日のM 6.4の地震を前震2として、それぞれについてインバージョン解析に基づく断層面上のすべり分布の推定を行った。

それぞれの地震の震央と、その後発生した余震の分布から、前震1と前震2は日奈久断層帯の北部で、本震は布田川断層帯でそれぞれ発生したものと推定される。またF-netのメカニズム解によれば、いずれの地震も断層傾斜角がほぼ鉛直な右横ずれの断層運動であったことを示している。これらの情報および既往の活断層の地表トレースと余震分布の広がりを見ながら、各対象地震の断層面モデルを設定した。なお前震1と前震2の断層面モデルは、結果としてかなりの部分が空間的に重なっている。また本震の走向は、布田川断層のトレースに合わせるために235度を想定した。経験的グリーン関数(EGF)に用いる余震として、前震1, 2に対しては04月15日 01時53分に発生したM 4.8の余震を、本震に対しては4月14日21時42分に発生したM 4.9の余震をそれぞれ用いた。なお本震の解析に用いたEGFは布田川断層ではなく日奈久断層帯で発生した余震であることから、今後、より適切なEGFを適用することが課題となる。解析に用いた観測点は、震源からおおむね50 km以内に位置するK-NET, KiK-net観測点のうち、対象地震とEGFの記録が共に得られた21~24地点である。解析周波数帯は上限を2Hz、下限をEGFのS/N比に基づき0.1Hzまたは0.2Hzとし、水平2成分速度波形のS波部分を対象とした。解析の結果、前震2のすべり分布は断層の南側のみがすべる解となっており、前震1のすべり分布と空間的に相補的な関係になる。また前震1では、震度7を記録した益城町の直下の浅部に一定の断層すべりが認められる。本震では布田川断層沿いの浅部にすべりが認められるとともに、阿蘇外輪山の西部直下にも大きなすべり領域が同定される。また本震断層面上ですべりが最大の領域は、本震発生後24時間の余震分布の空白域に相当する。

キーワード：2016年熊本地震、震源インバージョン、経験的グリーン関数

Keywords: the 2016 Kumamoto earthquake, source inversion, empirical Green's function

経験的グリーン関数法に基づく2016年熊本地震の震源モデルの推定－4月14日 M_{JMA} 6.5の地震と4月16日 M_{JMA} 7.3の地震－

Source models for the 2016 Kumamoto earthquakes of April 14 (M_{JMA} 6.5) and April 16 (M_{JMA} 7.3) estimated by the empirical Green's function method

*染井 一寛¹、宮腰 研¹、吉田 邦一¹、西村 利光¹

*Kazuhiro Somei¹, Ken Miyakoshi¹, Kunikazu Yoshida¹, Toshimitsu Nishimura¹

1.一般財団法人地域地盤環境研究所

1.Geo-Research Institute

熊本県熊本地方の内陸地殻内で発生した2016年4月14日21時26分の M_{JMA} 6.5の地震以降、2016年5月6日現在までに、熊本県熊本地方、阿蘇地方を震央とする地震によって、最大震度6弱以上を観測する地震は7回生じる等、熊本県から大分県にかけて活発な地震活動が続いている。特に、4月14日21時26分の M_{JMA} 6.5の地震（以降、最大前震）と4月16日1時25分の M_{JMA} 7.3の地震（以降、本震）では、いずれも最大震度7を観測した。これらの地震の震源域周辺で得られた強震記録には、それぞれ周期は異なるものの、大きな振幅をもつパルス状の波形が認められる。このような大きな地震動を生成したメカニズムを理解するために、これらの地震の震源像を明らかにする事は重要な課題の1つである。

本研究では、経験的グリーン関数法を用いた広帯域地震動シミュレーション（0.3-10 Hz）によって、2016年熊本地震の最大前震及び本震の強震動生成領域（SMGA; Miyake *et al.*, 2003）からなる震源モデルを推定する。なお、いずれの地震に対しても、できる限り単純なモデルで広帯域の強震動を再現するために、SMGAは正方形で、背景領域からの寄与は無いと仮定した。また、波形合成のための要素地震の重ね合わせ数 N と、本震と要素地震の応力降下量比 C の値は、本震と要素地震のコーナー周波数をSource Spectral Ratio Fitting Method（三宅・他, 1999）によって推定した。本報はPreliminaryな解析として、SMGAの位置やパラメータは、波形インバージョンによる不均質すべりモデルを参考として、水平2成分の観測波形と合成波形のフィットが良いものを試行錯誤的に決定した。

はじめに、最大前震の地震動シミュレーションと震源モデルについて説明する。シミュレーションの対象とした観測点は、熊本県内の国立研究開発法人防災科学技術研究所強震観測網K-NET9点とKiK-net（地中記録）7地点の計16地点である。経験的グリーン関数（要素地震）には、2016年4月15日7時46分（ M_{JMA} 4.4）の余震を用いた。震源近傍の記録で2つのパルス状の波形が観測されていることから、最大前震の震源モデルは2枚のSMGAによって構成されていると仮定した。また、1番目のSMGAは、気象庁一元化震源カタログに基づく震源位置を含む領域に位置すると仮定した。推定の結果、SMGAの面積と応力降下量は、2枚ともに同じで、それぞれ16 km²、13.3 MPaとなり、内陸地殻内地震としては平均的な値となった。SMGAの位置は、1枚目が震源よりも北東側浅部に拡がりを持ち、2枚目のSMGAも1枚目より北東側浅部に求まった。従って、断層の北東側に位置する観測点は、横ずれ断層の破壊伝播が進行する方向にあたり、2枚のSMGAの破壊伝播の前方指向性効果（ディレクティブ効果）が顕著に現れやすいと考えられる。主として断層北東側の観測点（KMM005, KMM006, KMMH16）で認められた大きな振幅を持つ2つのパルス状の波形は、2枚それぞれのSMGAのディレクティブ効果によって再現された。一方で、断層南西側の観測点（KMM008）で確認された1つのパルス波形の再現性は不十分であり、今後の課題である。

次に、本震の地震動シミュレーションと震源モデルについて説明する。対象とした観測点は、最大前震と同じ16地点である。経験的グリーン関数（要素地震）には、2016年4月14日22時7分（ M_{JMA} 5.4）の前震を用いた。本震は1枚のSMGAによって構成されていると仮定した。推定の結果、SMGAは震源よりも北東側に10 kmの浅部に100 km²の大きさで求まった。本震のSMGAは、震源よりも北東側に離れた位置に1枚あることで、対象とした各観測記録の主要動部分は概ね再現が可能であると考えられる。SMGAの応力降下量は19.8 MPaとなり、内陸地殻内地震の平均的な値よりもやや大きめに推定された。最大前震と比較すると、本震は未だシミュレーションによる再現性が不十分な観測点も多く、特に震源近傍の記録の中には振幅が過大評価な地点もあるため、今後、応力降下量を含めたSMGAパラメータや経験的グリーン関数に使用する要素地震を精査し、より再現性の高い震源モデルを検討していきたい。

謝辞：国立研究開発法人防災科学技術研究所強震観測網K-NET, KiK-net, 広帯域地震観測網F-netの強震記録, F-netのCMT解, 及び気象庁一元化震源カタログの震源情報をそれぞれ使用しました。また, 本研究は, 平成28年度原子力施設等防災対策等委託費（地震動評価における不確かさの評価手法の検討）事業による成果の一部である。

キーワード：2016年熊本地震、強震動生成領域、経験的グリーン関数法

Keywords: The 2016 Kumamoto earthquake, Strong motion generation area, Empirical Green's function method

バックプロジェクション法及びKNET/KiKnet記録を用いた2016年4月16日熊本地震の破壊過程
Rupture process of the April 16, 2016 Kumamoto earthquake (Mjma7.3) using Seismic
Back-Projection and K-NET/KiKnet waveforms

*プリード ネルソン¹

*Nelson Pulido¹

1. 防災科学技術研究所

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

I investigated the rupture process of the April 16, 2016 Kumamoto earthquake (Mjma7.3) using a seismic back-projection methodology and K-NET/KiKnet waveforms. The method is based on mapping amplitudes of seismogram envelopes observed around the source region, into a temporal and spatial image of the earthquake rupture (Pulido et al. 2008, Suzuki et al. 2016). The main target of this study is to understand the evolution of the rupture velocity during fault rupture propagation. For this purpose we set a horizontal grid mesh of 32 by 118km covering the regions around the Hinagu and Futagawa fault traces and beyond, as the target region for back-projection. Back-projection is calculated without any constraint on the starting point of rupture or rupture speed. We selected all the KNET/KiKnet stations that recorded the earthquake within 100 km (112 stations). The envelopes of acceleration waveforms used for back-projection were calculated as a vectorial summation of the acceleration waveforms band-pass filtered between 5Hz and 10Hz with their Hilbert transform. They start from the origin time of the earthquake and have a duration of 100 s. Our results are consistent with a fault rupture starting exactly at the Hinet epicenter. The rupture progressed to the SW for approximately 3 s and then to the NE for 7s. The significant grid energy was released in a narrow region of 30km length (rupture zone), along the Futagawa fault. The average rupture velocity for the first 6 sec was very slow (~1.5s) and after 7 sec abruptly increased to a value significantly above the average shear wave velocity. Assuming a continuous rupture propagation this would imply a super shear rupture propagation. Further tests are required to confirm our initial results.

キーワード : 2016 Kumamoto earthquake、back-projection、KNET/KiKnet

Keywords: strong motion, source process, High frequency

2016年熊本地震の動的破壊シミュレーション

Dynamic rupture simulation for the 2016 Kumamoto, Japan, Earthquake

*安藤 亮輔¹、青木 陽介²、内出 崇彦³、今西 和俊³

*Ryosuke Ando¹, Yosuke Aoki², Takahiko Uchide³, Kazutoshi Imanishi³

1.東京大学大学院理学系研究科、2.東京大学地震研究所、3.産業技術総合研究所

1.Graduate School of Science, University of Tokyo, 2.Earthquake Research Institute, University of Tokyo, 3.National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

地震発生は、応力集中が駆動する断層面の破壊現象であるが、地中に埋もれたそれらの幾何学的、物理的パラメータを明らかにするのは一般に容易でないため、現象の背後にある物理過程を明らかにすることには困難を伴う。しかしながら、現在進行中の2016年熊本地震では、その特徴的なテクトニックな条件と稠密観測によって、それが明らかになりつつある。本研究では、熊本地震の一連の動的破壊過程を、物理モデルによって再現した。その結果、破壊過程は、主に広域応力場の影響下にある非平面な断層形状によってコントロールされていることが分かった。また、M7イベントの震源域から北東に50km程度離れた湯布院断層には、M7イベントにより数100kPa程度の動的応力変化が生じており、また、火山地帯特有の浅部での高応力条件も加わって、遠地での動的トリガリング現象が発生したと考えられる。シミュレーション結果は、検証のために、InSAR解析により得られた地殻変動や地震計記録と比較している。なお、本シミュレーションは、新たに開発した高速領域分割・境界積分方程式法（FDPM）を用いてPCクラスタ規模でも可能になった。

キーワード：動的破壊シミュレーション、2016年熊本地震、3次元非平面断層形状

Keywords: Dynamic rupture simulation, 2016 Kumamoto earthquake, 3D Nonplanar fault geometry

スペクトルインバージョン法で求めた前震・本震・余震の震源スペクトルと非線形サイト特性
Source spectra and nonlinear site factors based on the spectral inversion methods

*仲野 健一¹、川瀬 博²

*kenichi Nakano¹, Hiroshi Kawase²

1.株式会社 安藤・間、2.京都大学防災研究所
1.HAZAMA ANDO CORPORATION, 2.DPRI, Kyoto University

2016年4月14日21:25に熊本県熊本地方を震源とする地震(M_{JMA} 6.5)が発生し、その後4月16日1:26には先のものより規模が大きい地震(M_{JMA} 7.3)が発生した(気象庁は総称として平成28年熊本地震としている)。ここでは前者を前震、後者を本震として区別する。これらの余震分布を確認すると、地震調査研究推進本部が長期評価を行った日奈久断層帯の一部と布田川断層帯に領域に集中しており、平成28年熊本地震はこれらの活断層帯が複雑に連動して発生したものと推測される。また、前震と本震で計測震度7が熊本県震度計ネットワークによって計測された益城町や西原村などでは木造住宅を中心とした甚大な被害が発生した。消防庁は、5月11日11:00時点で、人的被害としては死者68名、重症を含む負傷者1,656名、住宅被害としては全壊2,654棟、一部損壊を含む半壊は32,400棟と報告している(第50報: <http://www.fdma.go.jp/bn/2016/detail/943.html>)。

防災科学技術研究所のK-NET・KiK-netでは前震や本震の強震波形が多数の観測地点で観測され、即時公開された。また、気象庁の震度ネットワークで観測された強震波形も公開され、従来に比べてより震源近傍のデータが多く得られており震源インバージョン等に活用されている。現地調査報告によれば、地盤変状に伴う建物被害が多く見受けられるが、基礎に損壊がなくても上部構造が倒壊している建物も少なからず存在している。また、KiK-net益城(KMMH16)等で観測された強震波形が1~2秒震度で7と推定されていること(境有紀: <http://www.kz.tsukuba.ac.jp/~sakai/s1605s.htm>)を勘案すると、地盤変状に加えて強震動(前震と本震および余震)が複合的に作用して建物が倒壊・損壊する等甚大な被害が生じたと推察される。今後、地表面に現れた断層運動に関する調査研究を進めると共に強震動を生成した要因(震源や地盤など)に関する詳細な検討を行い、建物被害調査結果と照らし合わせた上での慎重な議論が必要であると考えられる。建物被害調査については諸学会による調査結果の公開を待つ必要があるが、平成28年熊本地震およびその余震で観測された強震波形は上記のように公開されている。そこで、本研究では公的機関(K-NET、KiK-net)で公開された強震波形を用いて、スペクトルインバージョン解析を実施し、平成28年熊本地震の震源特性やサイト特性に関する知見の蓄積を行う。

インバージョン解析で対象とする地震は、K-NET、KiK-netおよび気象庁で公開されていて、Nakano et al.(2015)の解析条件を満足するものを選定した。主な解析条件は地震モーメント M_0 が $M_j4.5$ 以上、震源距離200km以内、震源深さについては地殻内地震では30km以浅である。また地震発生時刻や震源位置等の震源情報はHi-netの一元化震源データベースから、地震モーメント M_0 はF-netによる解析結果を用いた。解析条件および方法の詳細はNakano et al.(2015)を参照されたい。選定の結果、平成28年熊本地震の前震と本震およびその余震で上記条件に合致するのは2016年4月20時点で25イベントであった。本検討では、Nakano et al.(2015)のデータセットにそれらのイベントを追加する形で解析を実施した。インバージョン解析の結果、コーナー振動数 f_c は前震で0.19Hz、本震で0.06Hzとなった。ここからBruneの応力降下量は前震では約2.2MPa、本震では約1.8MPaと見積もられた。コーナー振動数 f_c を用いて短周期レベルAを算定した結果、地震モーメント M_0 に対して1/3に比例するとされているスケーリング則からみると、前震に比べて本震は若干小さく、壇ほか(2001)等の短周期レベルAの回帰式を前震・本震とも有意に下回る結果が得られた。また、余震の短周期レベルはこれまでの主として中小地震から求められた回帰式の傾向と一致している。同様に、Nakano et al.(2015)で指摘しているように、余震の応力降下量は前震および本震と同等かそれ以下であった。なお、今回分離した震源特性と減衰特性の積で、KiK-net益城などで観測されたフーリエスペクトルを割り込んで推定したサイト特性において前震および本震での強い非線形性が確認できた。

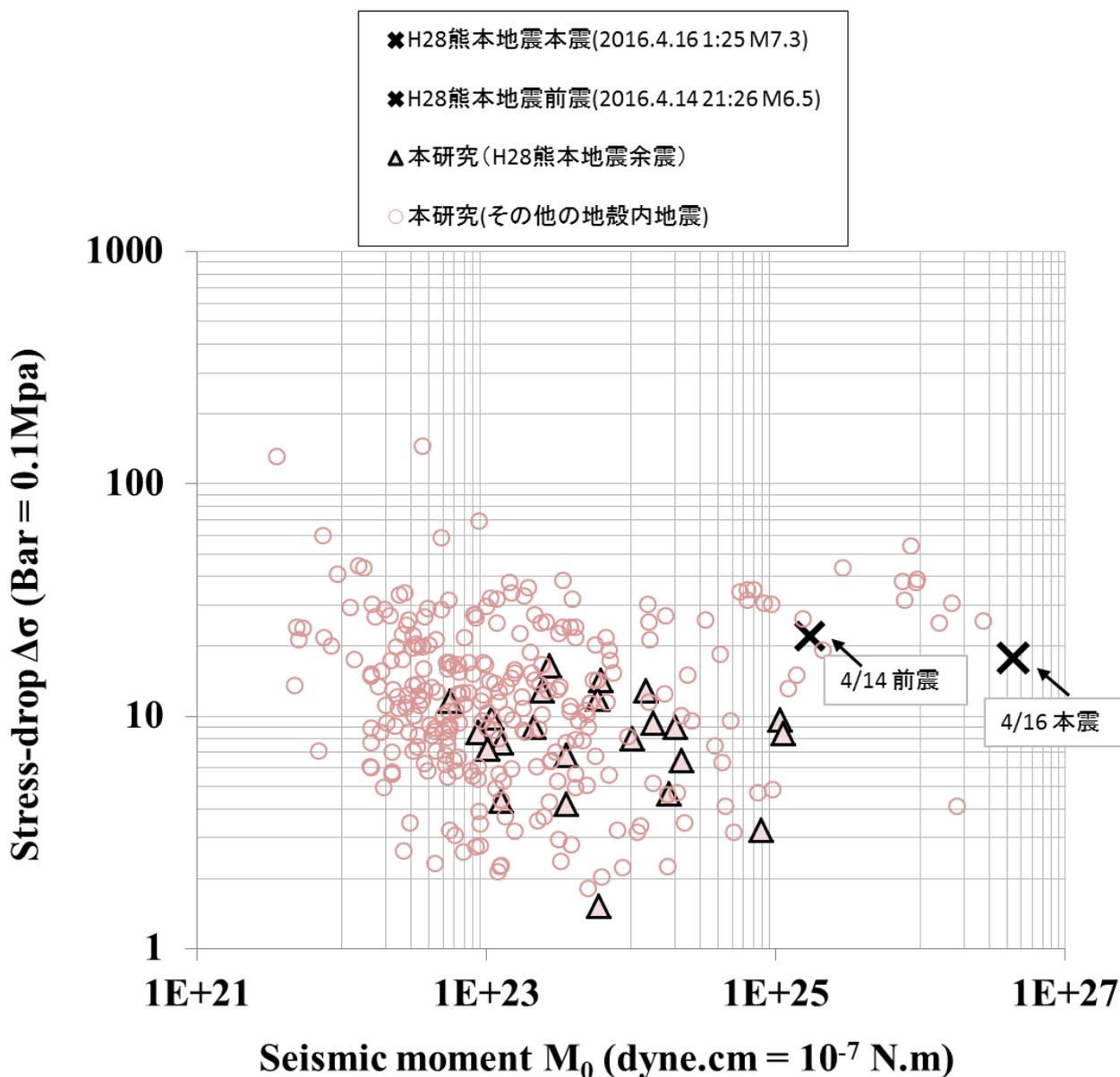
上記の解析結果から、平成28年熊本地震では、震源のスケーリング則について考えれば、決して特異に大きいものではないこと、本震（今回は前震も含む）より余震の応力降下量は同等かそれ以下であること、前震や本震では地盤の非線形性が強く生じていたことがわかった。ただし、本解析においては ω -2モデルを仮定し、200galを超えない強震波形を用いて震源スペクトルを推定していることから、断層面での破壊運動が顕著に反映される震源近傍での強震動を直接的に評価したものではないことに注意されたい。また、本検討はあくまで暫定的なものであり、今後、震源近傍の減衰モデルに関する考察を行うと共に、震源モデルについての詳細な検討やサイト特性の地盤非線形の理論的解釈など、より詳細な検討を進める予定である。

謝辞

防災科学技術研究所(K-NET、KiK-net)や気象庁の震度ネットワークで観測された強震波形を使用させて頂きました。記して感謝の意を表します。

キーワード：スペクトルインバージョン、震源スペクトル、非線形サイト特性

Keywords: Spectral inversion method, Source spectra, Nonlinear site factors



スペクトルインバージョンに基づく熊本地震と前震・余震等の震源・伝播・サイト特性
 Source, path and site effects of the 2016 Kumamoto earthquake, the foreshocks and
 aftershocks using the spectral inversion method

*佐藤 智美¹

*Toshimi Satoh¹

1. 清水建設(株)

1. Shimizu Corporation

1997年～2016年4月19日までに熊本地震周辺で発生した $M_j \geq 4.0$ 、深さ20km以下の地震のうち、F-netのメカニズム解の得られている37地震の強震記録を用いて、スペクトルインバージョンにより震源・伝播・サイト特性の推定を行った。

スペクトルインバージョンの手法、データの選択基準は、佐藤(2010)とほぼ同じである。ただし、K-NET、KiK-net地表のみならず、KiK-net地中、気象庁95型震度計記録も用いている。震源距離60km以下の火山フロント背弧側の観測点における、最大加速度が水平2成分とも 200 cm/s^2 以下の水平成分のS波部が解析対象である。ただし、点震源仮定のため、本震では震源距離30km以下の記録はデータから除いた。また、本震に直後の余震の記録が混在しているOIT009周辺の記録は、最大加速度や距離の制限により除かれている。佐藤(2010)で地盤同定されているSAGH04(東背振)での地盤モデルに基づき、地中での地盤増幅率を地震基盤相当に補正したものを基準として、経験的地盤増幅率を算出した。

Q値は周波数 f を用いて、 $0.5 \sim 10 \text{ Hz}$ で $Q=62f^{0.87}$ でモデル化され、佐藤(2010)が熊本県周辺の中規模地震から推定しているQ値とほぼ一致した。短周期レベルは、観測加速度震源スペクトルを、 w^2 モデルで $0.2 \sim 5 \text{ Hz}$ でフィッティングして推定した。図には、 M_j が大きい横ずれの3つの地震、すなわち、 $M_j 6.5$ の最大前震、 $M_j 6.4$ の前震、本震の M_0 -A関係を、既往の地殻内地震と比較した結果を示す。本震のAは、壇・他(2001)の M_0 -A関係式とほぼ同じで、 $M_j 6.5$ の最大前震は、壇・他(2001)の M_0 -A関係式よりやや大きい。これらの2地震の M_0 -A関係は、既往の横ずれの地震より大きい。佐藤(2010)の逆断層の M_0 -A関係式より小さい。 $M_j 6.4$ の前震は壇・他(2001)の M_0 -A関係より小さく、佐藤(2010)の横ずれ断層の M_0 -A関係式とほぼ同じである。

本研究で対象とした全37地震を、横ずれ、正断層成分を含む横ずれ、正断層に分類して検討したが、 M_0 -A関係に断層タイプ別の違いはほとんどみられなかった。正断層の地震も、福島県浜通りの正断層の地震の M_0 -A関係(佐藤・堤、2012)とほぼ同様であった。規模の小さい地震の方が、Aが $M_0^{1/3}$ に比例するというスケール関係より小さい傾向も、既往の研究(佐藤, 2010; 佐藤・堤, 2012)と同様であった。

本震、最大前震の短周期レベルの考察のため、佐藤(2008)の最大速度の地震動予測式との比較を行った。佐藤(2008)の最大速度の地震動予測式は、新潟から九州までの西日本の地殻内地震の背弧側の観測記録から算出されたものであり、横ずれと逆断層に区別されている。地震動予測式算出には、瀨藤・他(2016、地震研究所HP)の断層モデルを、破壊開始点位置をHi-netから気象庁に修正して平行移動したものをを用いた。なお、本震に直後の余震の記録が混在しているOIT009周辺の記録は除いた。佐藤(2008)の式は、断層最短距離70kmを境に距離減衰特性が変化しており、司・翠川(1999)の式より距離減衰の傾きがやや急であり、観測の距離減衰特性により近い。しかし、震源距離60km程度以下の震源近傍の観測値は、本震($M_w 7.0$)では横ずれ断層の予測式よりやや大きく、最大前震($M_w 6.1$)では予測式より明らかに大きかった。この特徴は、推定され短周期レベルと整合する。

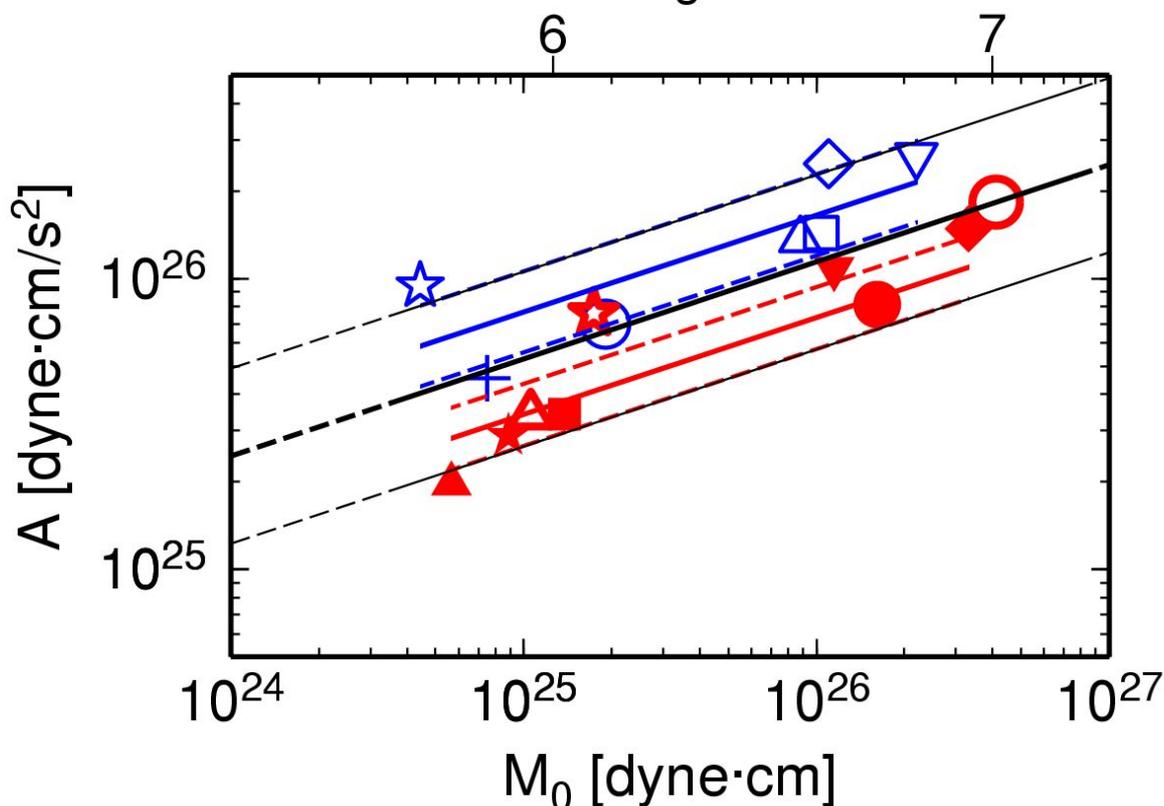
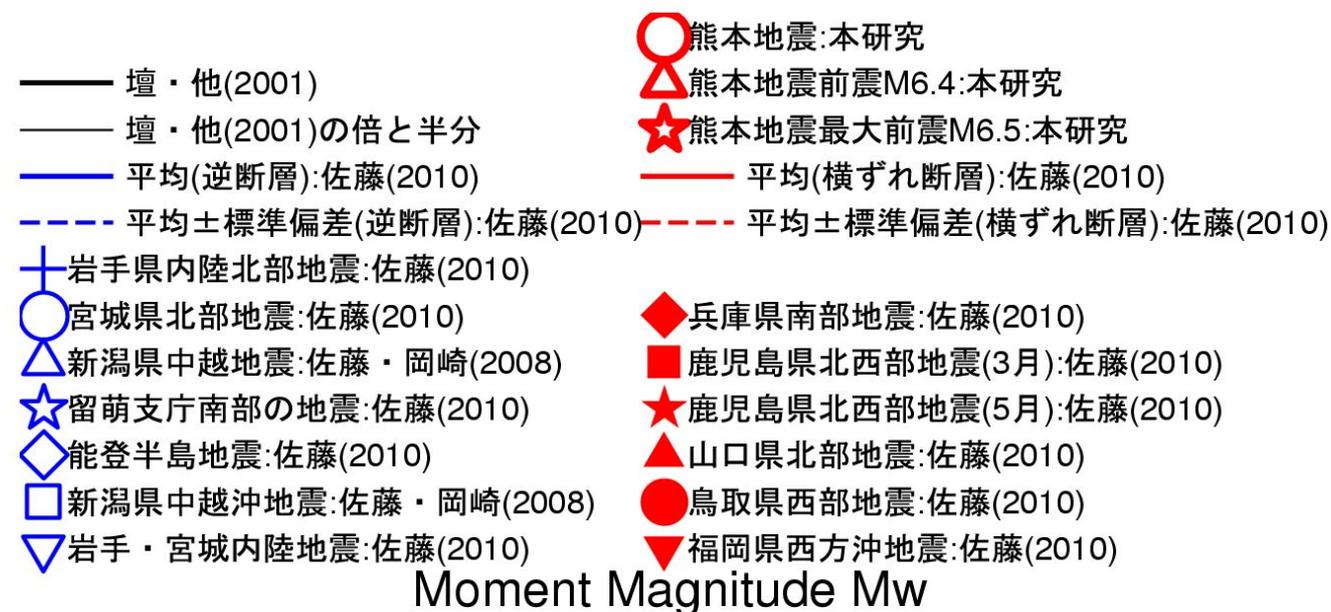
最後に、KMMH16(益城)、KMM006(熊本)、EEB(JMA熊本)での地盤増幅率について考察する。3地点は、東西方向に10kmの範囲内にあるが、計測震度は、本震で、それぞれ、6.4、6.0、6.0、最大前震で6.4、5.9、5.9であった。しかし、3地点での経験的地盤増幅率は、4Hz付近が卓越しており、5Hz以下でほぼ同じであった。地中に対する地表のスペクトル比やH/Vを強震動(本震と最大前震)、弱震動と比較した結果、KMMH16では、KMM006、EEBに比べ、本震と最大前震時の地盤の非線形性の影響が大きいことがわかった。3観測点の経験的地盤増幅率が5Hz以下で同じであることから、震度の違いには、1次元的な深部地盤の影響は小さく、震源の影響と浅部地盤の土質に依存した非線形の違いが寄与した可能性が考えられる。

謝辞：本研究は、科学研究費補助金基盤研究(A)26242034(研究代表者川瀬博教授)による成果である。防災科学

技術研究所のK-NET・KiK-netの強震記録、F-netのメカニズム解と、気象庁の95型震度計の強震記録、一元化震源情報を用いました。記して感謝致します。

キーワード：2016年熊本地震、スペクトルインバージョン、短周期レベル、距離減衰、経験的地盤増幅率、地盤の非線形性

Keywords: The 2016 Kumamoto earthquake, Spectral inversion, Short period spectral level, Attenuation, Empirical amplification factors, Nonlinearity of soil



2016年熊本地震による地震動の距離減衰特性

Attenuation Characteristics of Strong Motions during the 2016 Kumamoto Earthquake

*司 宏俊¹、瀨瀬 一起¹、三宅 弘恵¹、イブラヒム ラミ¹*Hongjun Si¹, Kazuki Koketsu¹, Hiroe Miyake¹, Rami Ibrahim¹

1. 東京大学地震研究所

1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

1. はじめに

2016年熊本地震では、4月14日に M_w 6.2の地震が発生し、続いて4月16日未明にも M_w 7.0の地震が発生した。両地震では震度7が観測された。4月14日の地震は日奈久断層の北部の活動によるもので、4月16日の地震は主に布田川断層帯が動いて起きたとされている。4月14日の地震では益城町、熊本市を中心に被害が報告されているが、4月16日の地震ではその範囲がさらに西原村や南阿蘇村などに拡大して、被害が広範囲に及んでいる。この地震の際に多数の強震記録が得られ、地震被害をもたらす地震動の特性を明らかにする貴重な資料が得られることになった。本稿では、これらの強震記録を用いて、地震動最大値や加速度応答スペクトルの距離減衰特性に関して検討を行い、地震動の特徴を検討することとした。

2. データ

検討に用いた強震記録はK-NET、KiK-netにより観測される強震記録である。用いた地震記録は、4月14日の地震で343記録、4月16日の地震で695記録である。これらの地震記録について、0.1-10Hzで平坦なバンドパスフィルターをかけ、加速度波形を求め、さらに積分して速度波形を求めた。これらの波形からPGA、PGVを求めた。さらにBoore et al. (2006)の手順で加速度応答スペクトル(GMRotI50)を求めた。得られた地震動パラメータについて、それぞれの観測点の地盤特性(V_s30)、J-SHISで公表されている地下構造のデータを用いて $V_s1.5\text{km/s}$ の硬質岩盤上に変換した。また、PGA、PGVは水平2成分の地震動最大加速度のうち、大きい方の値を用いた。震源断層については、瀨瀬・ほか(2016)による震源モデルを用いた。なお、浅野(2016)による震源モデルも確認に用いた。これらの断層モデルとそれに基づいて定義した断層中線により、すべての観測記録について断層最短距離と中線距離を計算した。なお、地震の規模を示す地震のマグニチュードはGlobal CMT Projectによる前震 M_w 6.2、本震 M_w 7.0の値をそれぞれ採用している。

3. 結果とまとめ

本研究では、既往の地震動予測式と4月14日の地震や4月16日の地震による観測記録との比較により、これらの地震による地震動の特性を検討することとした。用いた地震動予測式は、司・ほか(2014)による断層中線距離を用いた加速度応答スペクトルの地震動予測式である。

解析の結果、4月14日の地震や4月16日の地震による地震動はいずれもおおむね地震動予測式と整合するが、以下の特徴もみられる。(1) 4月14日の地震による強震記録は、短周期成分では地震動予測式とおおむね整合し、平均的な地震動の特性を示すが、0.5秒~2秒程度の周期成分では、震源近傍において、地震動予測式による推定値を大きく超える観測点がみられた。これらの観測点には益城町に位置する観測点KiK-net益城(KMMH16)も含まれている。(2) 4月16日の地震について、PGAや0.1秒~0.4秒の短周期成分において、特に中線距離が小さな観測点では、観測記録が地震動予測式による推定値より若干小さいことが確認される。一方、2.5秒より長周期成分では、中線距離で100km以遠の観測点では、観測地震動の強さは地震動予測式による推定値に比べて大きな値になっており、減衰が小さかったことが確認できる。

参考文献：浅野(2016):私信; Boore et al. (2006), BSSA; 瀨瀬・ほか(2016):私信; 司・他(2014), 第14回日本地震工学シンポジウム。

謝辞：本研究においてはK-NET、KiK-netによる観測記録を使用した。記して感謝を申し上げます。

キーワード：2016年熊本地震、距離減衰、GMRotI50

Keywords: The 2016 Kumamoto Earthquake, Attenuation Characteristics, GMRotI50

2016年熊本地震における断層近傍強震動の生成メカニズムの解明

Characterized source model for estimating strong ground motions during 2016 Kumamoto earthquake

*倉橋 奨¹、入倉 孝次郎¹

*Susumu Kurahashi¹, Kojiro Irikura¹

1.愛知工業大学

1.Aichi Institute of Technology

1. はじめに

2016年4月16日1時25分に気象庁マグニチュード7.3 (Mw7.0)の地震が熊本県で発生した。この地震により益城町と西原村で最大震度7を観測し、甚大な建物被害も発生した。益城町および西原村を含めた断層近傍における強震動が複数観測されており、それらを解析することで、本地震の強震動の生成メカニズムが解明できることが期待される。本研究では、広帯域の強震動を説明できる特性化震源モデルの構築を目的としているが、本稿では、強震動記録（対象周波数：0.05-0.5Hz）を用いた震源インバージョン結果について報告する。なお、本発表は速報的なもので、今後などで結果が変わる可能性がある。

2. 強震動記録の震源インバージョンと特性化震源モデル

KiK-net、K-NET、気象庁、地方自治体から提供されている本震記録を用いて、震源インバージョンを行った。対象とした観測点は、この内16観測点である。

解析データは、速度波形とし、対象周波数は0.05-0.5Hzとした。

必要となる理論グリーン関数は、離散化波数法（Bouchone（1981））により計算した。なお、速度構造モデルは、防災科研から提供されているボーリングデータと深部地盤速度構造モデル、深部構造は福山他（1998）の構造モデルを利用し、小地震によるチューニングはしていない。

震源インバージョンの解析方法は、マルチタイムウィンドウ線形波形インバージョン法（Hartzell and Heaton, 1983）に基づき、断層破壊過程を時空間的に離散した。断層面は、長さ46km、幅16km、走向235度、傾斜88度とした。また小断層サイズは2km四方とした。すべり速度関数の基底関数は、ライズタイム1秒のSmoothed ramp functionを0.5秒間隔で6個配置した。すべり方向の変化は、-154度±45度とした。

インバージョンで得られたすべり分布とすべり速度分布を参考にして、強震動記録を説明するための特性化震源モデルを構築する。

3. 解析結果

解析から得られたすべり量分布から、破壊開始点から北東に向かって破壊が進行した傾向がみられる。すべり角はほぼ180度となり、地表地震断層でみられる左横ずれと一致する。すべり量の大きい場所は、益城町や西原村の直下に位置する地表付近および断層の深い部分であった。

観測波形と計算波形の比較として興味深い部分として、益城町では、KiK-net観測点と益城町役場にて観測記録が得られており計算を実施しているが、KiK-net観測点では、NS成分EW成分ともに非常によく観測を満足する結果が得られているものの、益城町役場の観測点では、NS成分の合いはよいが、EW成分はかなり過小評価である。これは、西原村の結果と同様の傾向である。益城町や西原村の役場の観測記録では、フリリングステップが観測されている可能性が指摘されているため、その傾向も視野にいれ分析する予定である。

キーワード：2016熊本地震、強震動、特性化震源モデル

Keywords: 2016 Kumamoto earthquake, strong ground motion, characterized source model

Along-Strike Ground Motion Variation for the 2016 Kumamoto Earthquake Sequence
Along-Strike Ground Motion Variation for the 2016 Kumamoto Earthquake Sequence

*三宅 弘恵¹、地元 孝輔²、山中 浩明²、津野 靖士³、是永 将宏³、山田 伸之⁴、松島 健⁵

*Hiroe Miyake¹, Kosuke Chimoto², Hiroaki Yamanaka², Seiji Tsuno³, Masahiro Korenaga³, Nobuyuki Yamada⁴, Takeshi Matsushima⁵

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.東京工業大学大学院総合理工学研究科、3.鉄道総合技術研究所、4.福岡教育大学、5.九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.The University of Tokyo, 2.Interdisciplinary Graduate School of Science and Engineering, Tokyo institute of Technology, 3.Railway Technical Research Institute, 4.Fukuoka University of Education, 5.Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Science, Kyushu University

2016年熊本地震では、主に横ずれ成分を含む複数の地震が発生し、1995年兵庫県南部地震を契機に全国展開された観測網によって地震動が記録された。特に、4月16日のM7.3の地震では、断層走向に沿って震源起因と考えられる約3秒の卓越周期を有するやや長周期の速度パルスが、KiK-net益城（地中）や熊本県震度計西原村役場、KiK-net阿蘇（地表）などの複数地点で観測されている。速度波形に着目すると、益城町から西原村付近までは断層平行成分が大きい、阿蘇カルデラ内では断層直交成分が大きいことから、前者は、観測点の真横を破壊フロントが通過したことを示唆し、後者は観測地点が破壊進行の先端にあたることを示唆される（例えば、宮武、1999）。本発表では、これらの記録について、断層平行成分と断層直交成分および上下動の特徴を分析する。また、九大熊本観測点（金峰山）やF-netなどの地表岩盤観測点では、やや遠方ながらも断層破壊が横方向から観測されており、パルス幅の精査および短周期成分と長周期成分の到達時刻において良い拘束を与える。一方、M7クラスの内陸地震においては、定常観測点だけでは稠密さが足りず、地震動の空間変動の把握は困難であった。そのため、地震発生直後から断層走向に沿って臨時強震観測が展開されている。これらの臨時点では中小規模の地震の記録が得られており、本発表では、益城町から西原村の断層走向に沿った臨時点（熊本テクノロジーパークおよび西原村鳥子）も含めた特徴を、主に震源位置の方位依存の観点から紹介する。

謝辞：気象庁、熊本県、防災科研K-NET/KiK-net/F-net、九大の観測記録および気象庁一元化震源を使用した。本研究の一部は、科学研究費補助金「2016年熊本地震と関連する活動に関する総合調査」（代表：清水洋）によって実施され、臨時強震観測記録は、東工大を中心とする鉄道総研・東大地震研・福岡教育大の共同研究による。一部の観測点の設置にあたっては、くまもと産業支援財団および東大地震研技術部総合観測室の支援を受けた。

キーワード：2016年熊本地震、強震動、臨時強震観測

Keywords: 2016 Kumamoto earthquake, strong ground motion, temporary strong motion observation

平成28年熊本地震被災域における余震および微動観測の速報

- 益城町における地表断層周辺と地形変化に着目して -

Quick report of aftershock and microtremor observations in disaster area due to the 2016 Kumamoto Earthquake

- From points of view of surface faulting and geographic transition in Mashiki town -

*香川 敬生¹、吉田 昌平¹、上野 太士¹

*Takao Kagawa¹, Shohei Yoshida¹, Hiroshi Ueno¹

1.鳥取大学大学院工学研究科

1.Tottori University Graduate School of Engineering

平成28年熊本地震による益城町の被害を調査し、1) 地表断層直近における断層変位以外の被害が極端に小さいこと、2) 低平地よりも丘陵部の被害が概して大きいこと、の2点に着目し、余震観測および常時微動の単点3成分観測をおこなった。1) に関しては、益城町下陳の地表断層脇で無被害のお宅および木山川北側で倒壊家屋が見られる田原地区の消防団事務所において、両地点における揺れの違いを把握するため余震観測を実施した。また、被害の大きい益城町中央部との比較をおこなうため、地表断層が確認された複数の地点で断層を跨いだ常時微動観測を実施した。また、2) に関しては、益城町役場から木山川支流の南まで、典型的な地形断面に沿うように常時微動観測を実施した。これらの結果を、観測点周辺の被害状況とともに考察する。余震観測場所や一時的な駐車スペースを快くお貸し頂いた、現地の皆様に感謝します。

キーワード：益城町、余震観測、微動観測、地表地震断層、地形変化

Keywords: Mashiki town, Aftershock observation, Microtremor observation, Surface faulting, Geographic transition

2016年熊本地震の余震による強震動の臨時強震観測

Strong motion observation of aftershocks of the 2016 Kumamoto Earthquake at temporary stations

*地元 孝輔¹、山中 浩明¹、津野 靖士²、三宅 弘恵³、山田 伸之⁴

*Kosuke Chimoto¹, Hiroaki Yamanaka¹, Seiji Tsuno², Hiroe Miyake³, Nobuyuki Yamada⁴

1.東京工業大学 環境・社会理工学院、2.鉄道総合技術研究所、3.東京大学大学院情報学環総合防災情報研究センター、4.福岡教育大学

1.Tokyo Institute of Technology, 2.Railway Technical Research Institute, 3.The University of Tokyo, 4.Fukuoka University of Education

平成28年熊本地震では、震度7が観測され、熊本県内では多数の家屋の倒壊や、大規模な土砂崩壊が確認されている。この地震による余震活動は活発であり、震度1以上の揺れは1000回以上観測されていることが気象庁により報告されている。そこで、甚大な被害の原因を明らかにするため、益城町、西原村、熊本市、南阿蘇村などで余震の臨時強震観測を実施している。

2016年4月16日から臨時強震観測点の設置を開始した。益城町内では、震度7を記録した益城町役場、およびKiK-net益城の付近に観測点を設けた。また、家屋被害が目立った県道28号線沿いと県道の南側および県道の北側にも観測点を設置した。さらに、断層直交方向の線状にも敷設した。そのほかには、西原村役場や南阿蘇村の黒川地区の周辺、熊本市の東西方向の線上にも観測点を設けている。使用した機械は、ミツトヨ製加速度計JEP-6A3（感度は10V/Gまたは2V/G）、白山工業製ロガーLS7000XTまたはLS8800である。100Hzサンプリングのオフライン連続観測とし、GPSによる時刻補正を行っている。

これまでのところ、主に益城町内の臨時強震観測点のデータを回収した。それらのなかには、気象庁マグニチュードが5以上の余震、計測震度4程度の記録が含まれている。益城町内での地震動の空間変化は大きいことがわかった。益城町役場では、KiK-net益城よりも振幅が大きい傾向がみられ、県道28号の南側では、益城町役場に比べても最大加速度や最大速度が2倍以上にもなる記録がある。益城町の中央に広がる水田地域や北側の台地では益城町役場に比べて同程度か小さい傾向がみられる。減衰5%応答スペクトルでは、益城町役場や、県道28号沿い、および県道の南側の観測点では、周期およそ0.5秒の成分が卓越する。

今後は、すべての臨時強震観測点のデータの回収および分析を行い、同様に地震動の空間変化について調べる。さらに、各観測点では微動アレイ探査を実施し地盤構造を推定している。地盤条件と観測された地盤震動特性について検討する予定である。

本研究の一部は、科学研究費補助金「2016年熊本地震と関連する活動に関する総合調査」（代表：清水洋）の支援によって実施されたものである。

キーワード：2016年熊本地震、臨時強震観測、余震

Keywords: The 2016 Kumamoto Earthquake, Temporary Strong Motion Observation, Aftershock

2016年熊本地震の余震観測記録を用いた熊本市の地震動特性

Characteristics of earthquake ground motions in the Kumamoto City, using the aftershock observation data of the 2016 Kumamoto Earthquake

*津野 靖士¹、是永 将宏¹、和田 一範¹、坂井 公俊¹

*Seiji Tsuno¹, Masahiro Korenaga¹, Kazunori Wada¹, Kimitoshi Sakai¹

1. 鉄道総合技術研究所

1. Railway Technical Research Institute

2016年4月14日と4月16日に発生した熊本地震では益城町で震度7、熊本市で震度6弱と震度6強を計測し、熊本県全域で大きな地震動が観測された。熊本県北西部に広がる熊本平野は、阿蘇の外輪山西斜面の洪積台地と白川や緑川が形成した沖積低地で構成されており、熊本市では軟弱な堆積層の影響により地震動が大きく増幅されることが示唆される。そこで、熊本市西区の南北測線における地震動特性を評価することを目的に、熊本市に流れる白川の北側～トンネル端の南側である総長6km程度の鉄道沿線6地点で2016年4月15日以降余震観測を実施した。各観測点では、白山工業製ロガーLS8800とミツトヨ製加速度計JEP-6A3(感度：10V/G)を設置し、地震計からの加速度信号を連続記録として収録した。2016年4月15日に2地点、4月16日に4地点の地震計設置を完了し、現在も継続して地震観測を実施している。

6地点で同時に収録された阿蘇周辺を震源とする地震記録では、測線上で波形の様子が異なり、測線の南部は北部と比べて加速度で2倍程度の振幅差が見られている。測線北部の観測点を基準としたスペクトル比から、測線南部は北部と比べて周期0.5秒で約3倍、周期1秒で約2倍の地震動が増幅されることが分かった。測線南部の2地点では、4月16日1時25分に発生した地震(Mj 7.3)を含めて、振幅の小さな地震動から大きな地震動までが収録されている。それら地震動の応答スペクトルは、速度応答0.1cm/s程度の地震動では約0.8秒に、速度応答30cm/s程度の地震動では約1.2秒に卓越周期が現れている。1時25分に発生した地震では周期2.2秒程度に卓越周期が見られており、速度応答で120cm/s程度を観測したデータでは、地盤の非線形性が強く現れていることが推察できる。また、2地点は直線距離にして600m程度しか離れていないにも関わらず、同地震の2地点間の地震記録は周期1～2秒で大きく異なっており、それら2地点間の地震動特性について今後の検討課題としたい。

キーワード：余震観測、2016年熊本地震、熊本市

Keywords: Aftershock observation, 2016 Kumamoto earthquake, Kumamoto City

熊本地震震源域における最大振幅による減衰構造 Attenuation Structure around Kumamoto Region.

*関根 秀太郎¹

*Shutaro Sekine¹

1.地震予知総合研究振興会

1.Association for the Development of Earthquake Prediction (ADEP)

はじめに

減衰構造は、速度構造と違って非弾性的な観点から構造を見ることができると考えられる。そこで本研究では、気象庁一元化震源のカタログの読み取り値を用いた最大振幅からトモグラフィを行うことにより、熊本地震震源域の減衰構造を推定し、特徴をみることにした。

データおよび解析手法

気象庁一元化処理震源（1997年10月から2014年12月）までのMECHデータおよび1994年から1997年10月までの気象庁データのうち、M2.5からM5.5までの震源のデータを使用した。なお、最大振幅データ出現時刻からP波由来によるものとS波由来によるものに分離し、周波数帯域は、最大振幅の出現周期から推定した。また、カタログデータの中には、メカニズムが決定されていないものも存在しているが、押し引きのデータから、メカニズム解を推定し、その解を用いている。水平方向のグリッド間隔は0.25度であり、深さ方向は5 kmから20km毎に切って計算している。

結果

熊本地震の震源域は比較的浅い地震が多かったため、比較的解像度が良い部分で解くことができた。多くの地震はHigh-Qの領域で発生していた。また、九重から由布にかけての地域においてはLow-Qが広がっており、今回の一連の地震活動においても、あまり地震が発生していなかった。

謝辞

本研究では、国立研究開発法人防災科学技術研究所、北海道大学、弘前大学、東北大学、東京大学、名古屋大学、京都大学、高知大学、九州大学、鹿児島大学、気象庁、国立研究開発法人産業技術総合研究所、国土地理院、国立研究開発法人海洋研究開発機構、青森県、東京都、静岡県および神奈川県温泉地質研究所の検測値データを用いました。

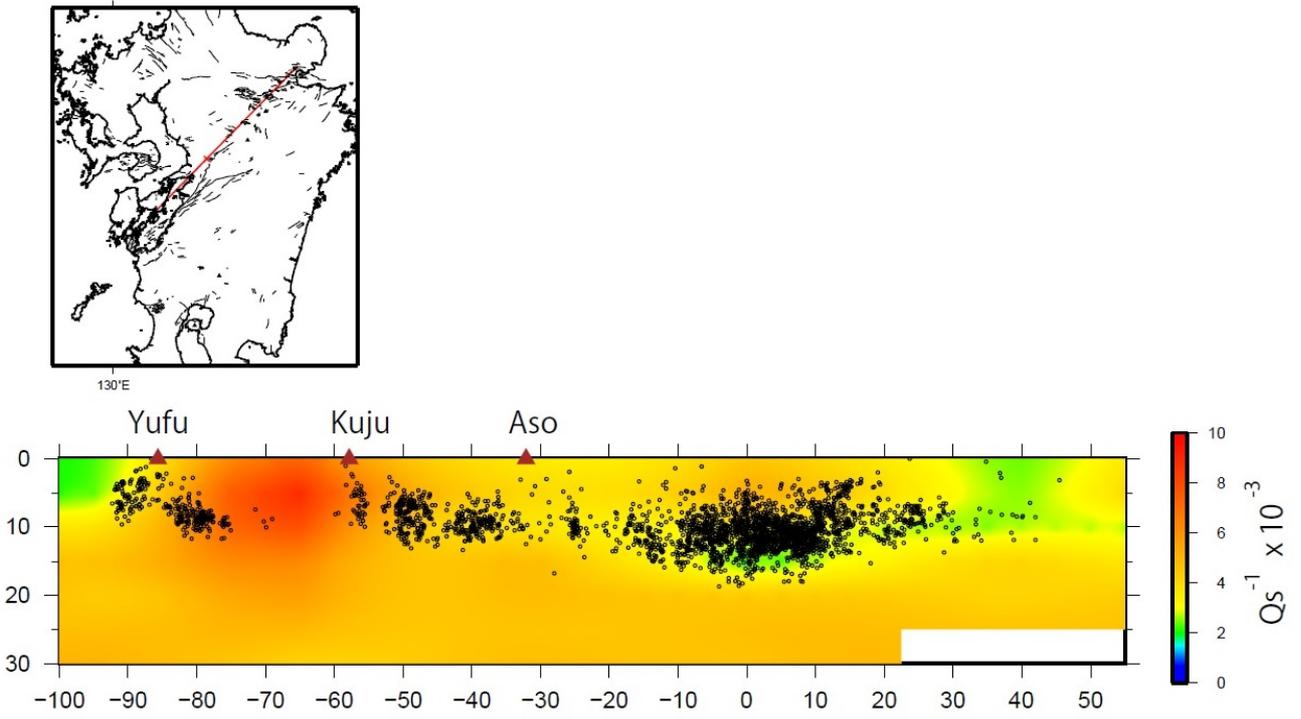
参考文献

S.Sekine (2005): Tomographic Inversion of Ground Motion Amplitudes for the 3-D Attenuation Structure beneath the Japanese Islands, Report of the National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, 68, 137-174

キーワード：減衰構造、Q

Keywords: attenuation structure, Q

130.76481 32.75389 224



熊本地方における強震観測点の地盤特性と地盤構造の同定

Site amplification at strong-motion stations in the Kumamoto prefecture and identification of underground velocity structures at Mashiki

*呉 浩¹、倉橋 奨²、正木 和明¹、入倉 孝次郎¹

*Hao Wu¹, Susumu Kurahashi², Kazuaki Masaki¹, Kojiro Irikura¹

1.愛知工業大学地域防災研究センター、2.愛知工業大学土木学科

1.Disaster Prevention Research Center, Aichi Institute of Technology, 2.Department of Civil Engineering, Aichi Institute of Technology

We made a field survey near ten strong-motion stations to confirm the damage of buildings after the mainshock of the 2016 Kumamoto Earthquake. The JMA seismic intensity was as large as 6-upper at six stations. We measured microtremors at two K-NET stations, three KiK-net stations and five Seismic Intensity Information Network (SIIN) stations. We found that the microtremor H/V of spectral ratios at most of the stations have a predominant period around 1.0 sec. We examined the reliability of PS logging data at three KiK-net stations, i.e., KMMH03, KMMH14 and KMMH16 by comparing the theoretical H/V spectral ratio based on diffuse field approach (Sanchez-Sesma, et al. 2011, GJI) with the observed one. The shape and amplitude of the theoretical H/V spectral ratios around the fundamental predominant period are almost the same as those of the observed counterpart at these three KiK-net stations. It suggests that the PS logging data under these stations are reliable. However, the PS logging data at the KMMH16 station (Mashiki) are not adequate to explain the peak at about 2.5 sec of the observed microtremor H/V spectral ratio.

We attempt to identify the underground velocity structures in the deep layer at KMMH16 station from the microtremor H/V spectral ratio of surface waves based on the diffuse field approach (DFA). The initial underground velocity model in the deep layer is referred to the J-SHIS. We obtain the best underground velocity structures after confirming the good coincidence between the theoretical and observed H/V spectral ratios. The identified underground velocity structures are used to evaluate the transfer functions at KMMH16. We make a comparison of the transfer functions at these three KiK-net stations. We find that the site amplification as large as about 8 at 0.2 sec and 1.0 sec is almost the same at the KMMH03 and KMMH14 stations. The site amplification at the KMMH16 station is as large as 10 from 0.2 sec to 1.0 sec, and as large as 5 from 2.0 sec to 3.0 sec which is affected by the deep layers.

キーワード: site amplification、microtremor H/V spectral ratio、underground velocity structures

Keywords: site amplification, microtremor H/V spectral ratio, underground velocity structures

平成28年熊本地震に対する緊急地震速報：予警報の発表状況の概要と新手法導入後の改善効果について

Earthquake Early Warning for the 2016 Kumamoto earthquakes: on overview of how warnings and forecasts were issued and expected improvements that come from introducing new methods

*小寺 祐貴¹、齋藤 潤²、林元 直樹²、足達 晋平²、森本 雅彦²、西前 裕司²、干場 充之¹

*Yuki Kodera¹, Jun Saitou², Naoki Hayashimoto², Shinpei Adachi², Masahiko Morimoto², Yuji Nishimae², Mitsuyuki Hoshiba¹

1.気象庁気象研究所、2.気象庁地震火山部

1.Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency, 2.Seismology and Volcanology Department, Japan Meteorological Agency

2016年4月14日から30日の期間において、気象庁は九州地方周辺を推定震源とする緊急地震速報（予報）を175回、緊急地震速報（警報）を19回発表した。4月14日21時26分頃に発生した熊本県熊本地方の地震（M6.5・最大震度7）に対しては、地震波検知から約3.8秒後に警報を発表し、4月16日1時25分頃に発生した熊本県熊本地方の地震（M7.3・最大震度7）に対しては、地震波検知から約3.8秒後に警報の第1報を、約8.6秒後に第2報を発表した。4月14日のM6.5の地震に対する警報および4月16日のM7.3の地震に対する警報第2報時点における予想震度のスコア（注）は、それぞれ100.0%および97.4%であった。同期間中には観測震度5弱以上の地震が18回発生したが、全てに対して警報または震度4以上の予報を発表しており、見逃しは発生しなかった。4月16日のM7.3の地震が発生して以降は、地震の発生領域が拡大し、50から100km程度離れた位置で同時多発的に地震が発生する状況となった。2011年の東北地方太平洋沖地震以降、気象庁では、同時多発地震時における検測値のグルーピング処理の改善を行ってきた（例えば、周囲の観測点配置を考慮することで、比較対象とする観測点の範囲を制限する処理を導入した）。しかしながら、今回は非常に近接した距離で同時多発地震が発生したために、複数の地震の検測値を単一の地震として処理し、過大な震度を予想するケースが生じた。同期間中には、同時多発地震の影響により、予想震度のスコアが10%を下回る不適切な警報を4回発表した。

気象庁は、同時多発地震時等における過大予測の対策としてIntegrated Particle Filter (IPF)法を、巨大地震時における過小予測の対策としてPropagation of Local Undamped Motion (PLUM)法を導入する計画である。上記の不適切な警報を発表した4事例に対してIPF法のシミュレーションを実施したところ、3事例では不適切な警報の発表を回避した。また、残りの1事例では、警報の発表は避けられないものの、警報の発表領域が当時よりも小さくなった。4月14日のM6.5の地震および4月16日のM7.3の地震に対してPLUM法のシミュレーションを実施したところ、4月14日のM6.5の地震では2.6~3.6秒、4月16日のM7.3の地震では3.0~4.0秒程度、警報第1報の発表が早まった。これは、PLUM法で活用可能な観測点の数が従来手法に比べて多いことに起因する。

（注）観測または予想震度が4以上であった予報区のうち、予測誤差が±1階級以内であった予報区の割合。

キーワード：緊急地震速報、平成28年（2016年）熊本地震

Keywords: Earthquake Early Warning, the 2016 Kumamoto earthquakes

リアルタイム地震被害推定システム (J-RISQ) による2016年熊本地震の被害推定
Real-time Damage Estimations for the 2016 Kumamoto Earthquakes by J-RISQ

*中村 洋光¹、藤原 広行¹、本間 芳則²

*Hiromitsu Nakamura¹, Hiroyuki Fujiwara¹, Yoshinori Homma²

1.防災科学技術研究所、2.三菱スペース・ソフトウェア

1.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2.Mitsubishi Space Software Corporation

防災科学技術研究所では、戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) の課題「レジリエントな防災・減災機能の強化」において、災害発生直後の初動対応の意思決定支援等に資することを目的として、大地震のような広域にわたる災害が発生した場合でも被害全体をリアルタイムに推定、状況を把握することを可能とするリアルタイム被害推定・状況把握システムの研究開発を実施している (以下、J-RISQと呼ぶ)。J-RISQは、基本的に震源の情報は用いず、K-NETやKiK-net観測点、地方公共団体や気象庁の震度観測点で得られる震度情報から微地形区分や広域地盤モデルによる揺れやすさを考慮した面的な地震動分布を推定し、それを入力とした震度曝露人口の推定や、建物種別や建築年代を属性として持つ建物モデルに複数の被害関数を適用することで建物被害推定を行う。こうして得られるリアルタイム推定情報の一部 (推定震度分布や震度曝露人口等) は、「J-RISQ地震速報」として、概ね震度3以上を観測した地震に対して、地震発生直後よりWEB公開を行っている (<http://www.j-risq.bosai.go.jp/>)。ここでは、最大震度7を観測した2016年4月14日のM6.5の地震 (以下、M6.5地震と呼ぶ) 及び、4月16日に発生したM7.3の地震 (以下、M7.3地震と呼ぶ) における被害の推定状況について報告する。

M6.5地震においては地震発生から約29秒後にJ-RISQは第1報を発信し、約10分間で7報を発信した。第1報では5観測点のデータを用い、震度6弱以上の曝露人口を約7800人と推定した。最終的には、1091観測点の震度データを用い、震度6弱以上の曝露人口が約62万人、震度6強以上の曝露人口が約29万人、建物被害推定結果は全壊棟数が約6千~1万4千棟程度、半壊棟数は約7千~3万3千棟程度であった。建物被害の分布としては、江津湖の東側から益城町宮園地区にかけて長さ7km、幅1km程度の細長い領域に被害が集中する結果であった。

M6.5地震から約28時間後に発生したM7.3地震では、地震発生から約29秒後に第1報を発信し、約11分間で8報を発信した。最終的には、2391観測点のデータを用い、震度6弱以上の曝露人口が約113万人、震度6強以上の曝露人口が約67万人、建物被害推定結果は全壊棟数が約1万6千~3万8千棟程度、半壊棟数は約1万8千~8万8千棟程度であり、被害棟数はM6.5地震の約2.6倍であった。但しこの結果はM6.5地震を含むM7.3地震以前に発生した地震の建物への影響は考慮していないことに注意が必要である。被害の分布としては、M6.5地震と同様の領域に加え、熊本市の東区や中央区等の広い領域で建物被害が多い地域が見られた。現在、実被害の全容は把握されておらず、今後の詳細な被害状況の分析が待たれる。

謝辞

本研究は、総合科学技術・イノベーション会議のSIP (戦略的イノベーション創造プログラム) 「レジリエントな防災・減災機能の強化」 (管理法人: JST) によって実施された。なお、リアルタイム地震被害推定システムで用いている地方自治体及び気象庁の震度データは気象庁より提供して頂いている。

キーワード: 熊本地震、J-RISQ、リアルタイム被害推定

Keywords: Kumamoto earthquake, J-RISQ, real-time damage estimation

2016年熊本地震における前震と本震の益城町の建物被害

Building Damage in the Mashiki-town for the foreshock and mainshock of the 2016 Kumamoto earthquake

*山田 真澄¹、大邑 潤三²、後藤 浩之¹

*Masumi Yamada¹, Junzo Ohmura², Hiroyuki Goto¹

1.京都大学防災研究所、2.佛教大学

1.Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 2.Bukkyo University

The 2016 Kumamoto earthquake caused serious building damages in the near-source regions. The Mashiki-town, about 10km northeast from the epicenter, was located less than 1km from the fault line and subjected to the two strong shakings of level 7 in the JMA seismic intensity scale. The first earthquake (foreshock, Mj6.5) occurred at 21:26, April 14 and the second one (mainshock, Mj7.3) occurred at 1:25, April 16. Since there was only 28 hours interval, it is difficult to classify the damage of two earthquakes.

We analyzed the aerial photos taken by the Geospatial Information Authority of Japan on 15th and 16th of April (<http://www.gsi.go.jp/BOUSAI/H27-kumamoto-earthquake-index.html>). The photos cover the damaged area in Mashiki-town, and two sets of photos taken before and after the mainshock help classifying the damage due to the foreshock and mainshock. We defined the following houses as collapsed building: 1) edge of the building is distorted 2) roof tiles are completely fallen down 3) center line of the roof is tilted 4) debris is observed around the building. We excluded public reinforced concrete structures.

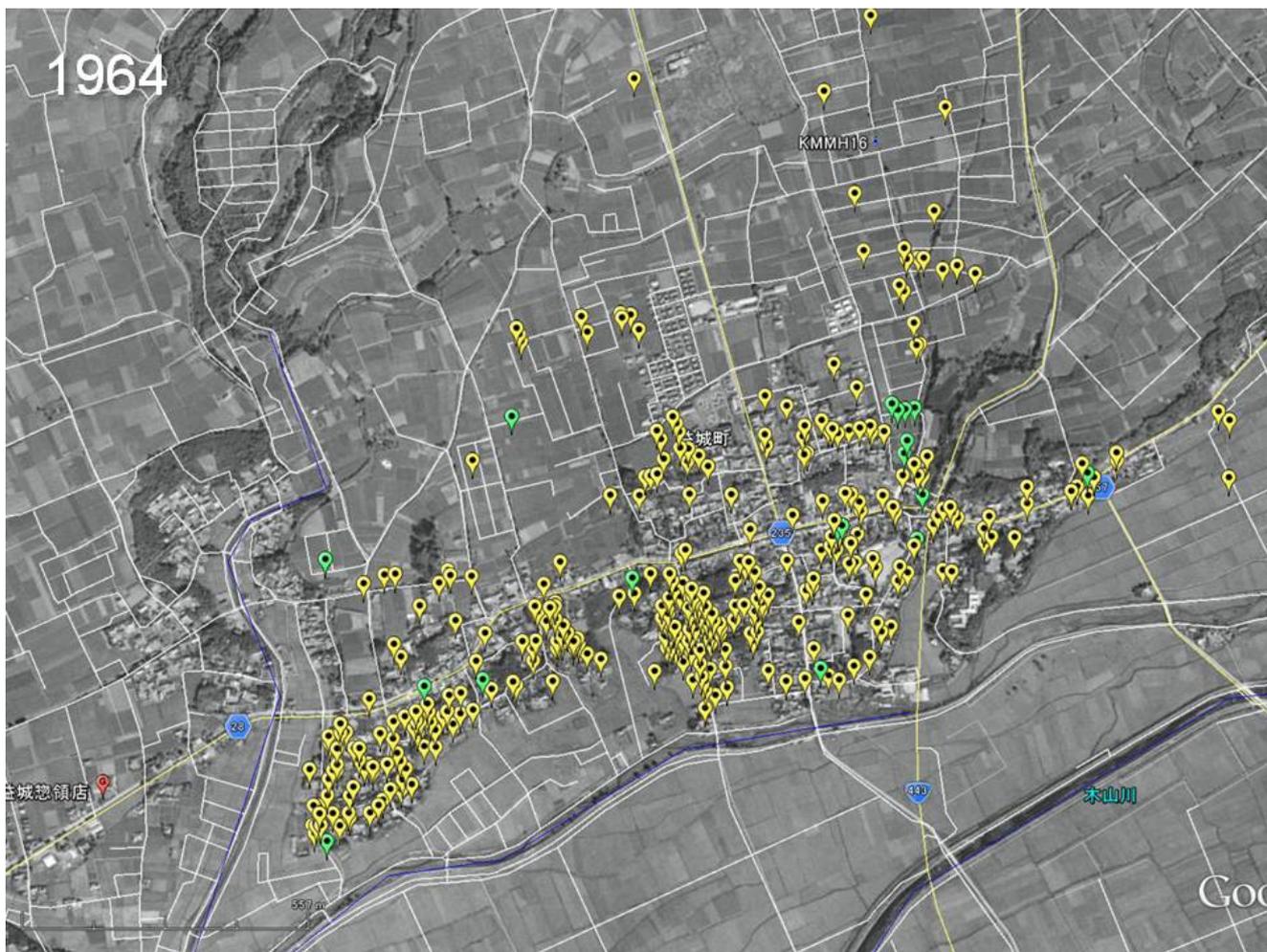
We observed 130 totally collapsed buildings after the foreshock, but the number increased to 350 after the mainshock. The damaged buildings after the foreshock distributed between route 28 and Akitsu river, but the distribution expanded to the north of the route 28 after the mainshock. There are two strong motion stations in the surveyed area (Mashiki LGV and KiK-net KKM16). Both stations recorded seismic intensity 7 for the mainshock, but the damage distribution was very different. 21 buildings were collapsed within 200m of the Mashiki LGV, whereas only 4 building collapsed within 200m of the KiK-net KKM16.

The distribution of the damaged buildings after the mainshock has a good correlation with the distribution of the village 100 years ago. The region around the village was originally floodplain and river terrace of Akitsu river. The village was developed at the edge of the river terrace, and the floodplain was used as a rice field. In 1970s, the village was expanded to the upper river terrace and floodplain. The floodplain is in general considered to be softer soil condition, but for this particular area, damage on the floodplain was much less than that on the river terrace. We need further survey to classify the effect of the subsurface soil structure and seismic performance of the buildings for the better understanding of the damage distribution.

Figure: Damage distribution after the mainshock and aerial photo in 1964.

キーワード：2016年熊本地震、建物被害

Keywords: 2016 Kumamoto Earthquake, Building Damage



2016年熊本地震による益城町市街地での家屋被害の分布と地形・地質特性

Distribution patterns of house damages in the central part of Mashiki Town caused by the 2016 Kumamoto Earthquake: Geological and geomorphological implications

*中澤 努¹、卜部 厚志²、佐藤 善輝¹

*Tutomu Nakazawa¹, Atsushi Urabe², Yoshiki Sato¹

1.産業技術総合研究所地質調査総合センター、2.新潟大学災害・復興科学研究所

1.Geological Survey of Japan, AIST, 2.Research Institute for Natural Hazards and Disaster Recovery, Niigata University

2016年熊本地震では、熊本県益城町周辺を中心に地震動に起因する甚大な家屋被害があった。演者らは、被害が特に深刻とされる益城町市街地において、地震被害と地形・地質特性の関係を検討するため、家屋被害分布調査を実施した。その結果、益城町市街地での被害分布は極めて特徴的であり、それらは地形・地質に密接に関係すると考えられたため、今回その概要を報告する。

調査は、益城町木山地区から広崎地区において、市街地を南北に横切る複数の道路沿いで、卜部ほか

(2008)の調査手法に基づき、家屋一軒ごとに被害区分、家屋構造、地盤変状の有無などを記載することにより実施した。現地調査で得られたデータはGISを用いて整理し、被害分布と地形・地質との関係について検討した。

今回の調査によって、台地を開析する小谷沿いの傾斜地では、厚い盛土の側方移動・崩壊によって家屋が倒壊している箇所が多く認められた。しかし、調査地全域からみると、そのような盛土の側方移動に起因する家屋被害は谷沿い等の傾斜の大きい地域に限定される。また、一般に河川沿いの低地は地盤が悪いとされるが、調査地域の秋津川沿いの低地では、家屋被害はさほど顕著ではなかった。一方で、益城町の市街地の大半は台地縁辺部のなだらかな階段状の緩傾斜地に分布するが、今回の調査で、家屋被害はその緩傾斜地の下半部に集中していることが明らかになった。ここではほとんどのケースで家屋被害の直接の原因となるような地盤変状(側方移動等)は認められない。つまりここでの家屋被害のほとんどは、初生的な地盤特性を反映した、地震の強い揺れによるものと考えられる。

本調査地域の台地は主に阿蘇4火砕流堆積物によって形成されているが(星住ほか, 2004), 既存ボーリングデータに基づけば、表層にはM値が概ね5以下の凝灰質粘土層が比較的厚く分布する。この軟弱な凝灰質粘土層は場所により層厚が大きく変化することが予想されるが、被害甚大地域ではこの粘土層の層厚が厚い、あるいはより軟弱な特性をもつ可能性がある。今後、微動アレイ調査等を実施して、軟弱層の分布形態を明らかにし、緩斜面の形成プロセスを考察したうえで、被害分布と地形・地質との関連を検討していきたい。

卜部厚志ほか(2008) 2007年新潟県中越沖地震による建物被害と地盤災害。新潟大学災害復興学センター年報, 2, 135-163.

星住英夫ほか(2004) 20万分の1地質図幅「熊本」。産総研地質調査総合センター。

キーワード：地震災害、家屋被害、地質セッティング

Keywords: earthquake disaster, house damage, geologic setting

熊本地方の地震による熊本県内の博物館の被害状況

Damages of museums suffered from the 2016 Kumamoto Earthquake

*北村 晃寿¹、池上 直樹²、前田 晴良³、真鍋 真⁴

*Akihisa Kitamura¹, Naoki Ikegami², Haruyoshi Maeda³, Makoto Manabe⁴

1.静岡大学理学部地球科学教室、2.御船町恐竜博物館、3.九州大学総合研究博物館、4.国立科学博物館
1.Institute of Geosciences, Faculty of Science, Shizuoka University, 2.Mifune Dinosaur Museum,
3.The Kyushu University Museum, 4.National Museum of Nature and Science

2016年4月14日に起きた前震と4月16日に起きた本震で、熊本県内の博物館、資料館が被災した。本発表では御船町恐竜博物館の被災状況を報告する。

キーワード：2016年熊本地震、熊本県、博物館、被害状況

Keywords: 2016 Kumamoto Earthquake, Kumamoto prefecture, museums, damages

2016年熊本地震における液状化被害の概況とその分布（速報）

Preliminary report of liquefaction damage and distribution of liquefied sites caused by the 2016 Kumamoto Earthquake

*手代木 功基¹、小山 拓志²、土居 晴洋²

*Koki Teshirogi¹, Takushi Koyama², Haruhiro Doi²

1.総合地球環境学研究所、2.大分大学

1.Research Institute for Humanity and Nature, 2.Oita Univ.

2016年4月14日及び16日に発生した熊本地震によって、熊本市内では液状化現象による被害が発生した。本発表では、熊本市西区と南区の一部地域を対象として、現地調査とGoogle Earth画像の判読から明らかになった被害の概況と分布を報告する。調査地域では、液状化による噴砂の発生が顕著で、ほかに開口亀裂、路面陥没・波状変形といった被害が見受けられた。また一部地域では、液状化が要因と考えられる宅地地盤・舗道・電柱の沈下・傾動が確認された。これらの被害は、旧河道、低い自然堤防帯・後背湿地などの地形面において発生しており、いずれの地域においても局所的な分布傾向を示していた。

キーワード：液状化被害、地形条件、平成28年(2016年)熊本地震、被害分布図

Keywords: Liquefaction damage, Topographic conditions, The 2016 Kumamoto Earthquake, Liquefaction site map

平成28年熊本地震による液状化発生域の分布、被害状況と土地条件

Distribution and land conditions of the liquefied sites caused by the 2016 Kumamoto Earthquake

*青山 雅史¹*Masafumi Aoyama¹

1.群馬大学教育学部

1.Faculty of Education, Gunma University

平成28年熊本地震における液状化発生域を明らかにするため、現地踏査と空中写真判読をおこなった。その結果、熊本平野の白川、緑川、加勢川などの下流域において液状化が発生したことを確認した。本発表では、液状化発生域の分布、被害状況、土地条件などについて、現時点までに得られた情報を示す。なお、地形分類に関する情報は、国土地理院発行治水地形分類図や土地条件図などに基づく。

1) 白川下流域（熊本市南区、西区）

白川下流域においては、自然堤防や旧河道において、多数の地点における液状化の発生を確認した。白川と加勢川に挟まれた領域では、南北にのびる自然堤防上において、噴砂および液状化の影響を受けたとみられる構造物被害（建物の不同沈下、電柱の沈下・傾斜、マンホールの浮き上がり、中層建築物基礎の抜け上がりなど）が多数生じていたことを確認した。それらは自然堤防の中の幅100m程度の帯状の領域に限定して分布していることから、既存の地形分類図には表現されていない旧河道の存在が考えられる。今後、この帯状の液状化発生域に関する土地条件（土地履歴）に関する調査・検討が必要である。

2) 緑川・矢形川下流域、加勢川流域（熊本市南区、嘉島町）

この領域では、旧河道における液状化の発生を複数の領域で確認した。昭和初期の加勢川改修により廃川となり、昭和20年代に埋め立てられた旧河道では、その帯状にのびる領域において噴砂と構造物被害が生じていたことを確認した。矢形川下流域や緑川下流域の旧河道においても、複数の領域において噴砂と構造物被害が生じていたことを確認した。嘉島町の1980年代以降に盛土造成された領域では、多数の地点において噴砂の存在を確認した。

3) 緑川中流域（甲佐町）

この領域においては現地踏査が未実施であるが、複数の領域における噴砂の存在が空中写真判読により確認できる。それらの多くは、過去（多くは1970年代）に存在した砂利採取場が埋め戻された領域（砂利採取場跡地）とほぼ一致する。

キーワード：液状化、旧河道、自然堤防、砂利採取場跡地、土地条件

Keywords: liquefaction, former river channel, natural levee, refilled gravel pit, land condition

平成28年熊本地震による液状化発生地点

*Liquefied sites during the 2016 Kumamoto Earthquake**先名 重樹¹、若松 加寿江²、小澤 京子¹、藤原 広行¹*Shigeki Senna¹, Wakamatsu Kazue², Kyoko Ozawa¹, Hiroyuki Fujiwara¹

1.防災科学技術研究所、2.関東学院大学

1.National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, 2. Kanto Gakuin Univ

1. はじめに

平成28年熊本地震では、4月14日21時26分頃、後に前震となる(M6.5)地震により、益城町で最大震度7が観測された。その後、4月16日1時25分頃の本震(マグニチュード(M)7.3)で最大震度7が観測され、建物倒壊や地盤災害等の大きな被害が生じている。液状化については、前震において液状化発生に関する報道がいくつかあり、その後、本震や余震によっても液状化被害に関する報告がなされた。しかし、今回は前震や余震を含めると、液状化の発生の可能性が予想される震度5強以上の地域は広域であり、学会・各機関においても十分に調べられている状況にはない。そこで、学会や各機関が調査している情報を収集しつつ、液状化発生地点の確認を、平成23年東北地方太平洋沖地震で筆者らが展開した調査手法を用いて実施し、情報を精査したうえでまとめる。本稿では、2016年5月11日時点での液状化調査の結果を報告する。

2. 液状化発生地点の確認と同定

現地調査に先立ち、地理院地図から公表されている地震後の空中写真(4月15日~20日に撮影)およびGoogle Earthの2016年4月16日撮影の画像を用いて予察調査を行った。その後、4月28日から5月1日に現地調査を行った。その結果、前震・本震・余震のいずれかで震度6弱以上が観測された地域の広い範囲で噴砂などの液状化の痕跡と構造物への被害が発生したことがわかった。筆者らが液状化(噴砂)を確認した地点を図1に示す。液状化発生地域は、玉名市、熊本市西区、東区、南区、宇土市、八代市、熊本県嘉島町、御船町、甲佐町、益城町の8市町に及んでいる。図1を見ると、液状化の発生が集中した熊本平野には、多数の水路が網の目状に分布しており、低湿な水郷地帯であることがわかる。

1889年7月28日の熊本地震(M6.3)で液状化が発生した記録がある熊本市東区秋津、1968年4月1日の日向灘地震(M7.5)で液状化の発生が報告されている八代市昭和同仁町(若松, 2011)では、今回の一連の熊本地震でも噴砂等が確認され、再液状化が発生したと推測される。

地理院地図の空中写真やGoogle Earthの地震後の画像には、氷川町、宇城市、阿蘇市、南阿蘇村などでも噴砂が認められることから、これらの地域についても、今後、現地調査による確認を行う予定である。

3. 液状化発生地点の微地形区分

液状化が発生した場所の微地形区分は、島原湾に面した玉名市、熊本市、宇土市、八代市の干拓地や、熊本市南部を流れる白川・緑川およびその支流沿いの三角州、旧河道、後背湿地、自然堤防である。特に、旧河道およびこれに沿った自然堤防や後背湿地には、顕著な噴砂や液状化による側方流動が見られた。川からやや離れた内陸部でも、熊本市南区近見から川尻にかけての地域、南区土河原町から孫代町にかけての地域、南区今町から西区中島町にかけての地域では、細い水路に沿って帯状に連続して液状化が発生していた。これらの地域には明瞭な旧河道は認められないが、水路に沿って連続して自然堤防が発達していることから、古い時代には川が流れており、水路はその名残と推測される。ただし、この地域の最も古い地形図である1901年測量の地形図では既に水田となっており、かなり古い時代の河道と推測される。このような極めて古い時代の旧河道沿いで液状化が発生した理由としては、かつての河道に沿って現在でも水脈があり、地下水位が高かったためではないかと推測されるが、今後、地盤データ等による検証が必要である。

4. まとめ

平成28年熊本地震の前震・本震・余震により、熊本平野を中心とする広い範囲で液状化の発生を確認することができた。今後も引き続き情報収集と現地調査等を行う予定であるが、現時点では以下のことが分かった。1)

液状化は、前震・本震・余震のいずれかで震度6弱以上が観測された島原湾に面した玉名市，熊本市，宇土市，八代市の干拓地や，熊本市南部を流れる白川・緑川およびその支流沿いの三角州，旧河道，後背湿地，自然堤防で多く発生していた。2) 現在の河川から離れたやや内陸部にある水路沿いに帯状に連続して液状化が発生した地域がいくつか認められた。これらの地域は，微地形的特徴から明治以前の古い旧河道である可能性が高い。3) 熊本市東区秋津および八代市昭和同仁町の液状化発生地点では，それぞれ1889年熊本地震と1968年日向灘地震で液状化が発生した記録があり，今回の地震で再液状化したと推測される。

謝辞

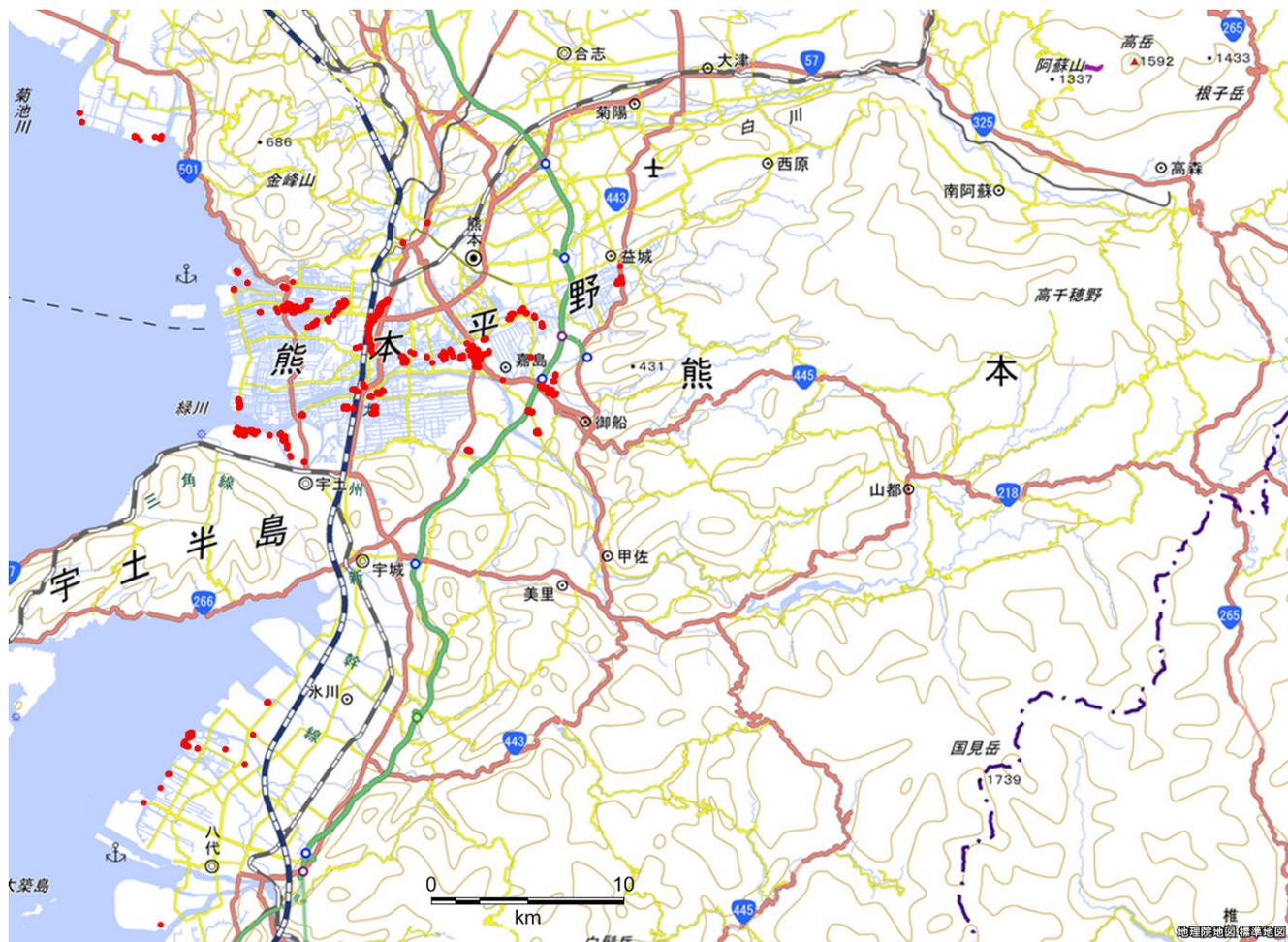
現地調査に先立ち東京電機大学の安田進教授および九州工業大学の永瀬英生教授から液状化発生の情報をご提供頂いた。記して感謝申し上げます。

参考文献

若松加寿江：日本の液状化履歴マップ745-2008，東京大学出版会，2011。

キーワード：液状化、震度、微地形区分

Keywords: liquefaction, seismic intensity, geomorphologic land classification



阿蘇カルデラ内に認められる2016年熊本地震に伴う液状化と噴砂の分布

Distribution of liquefactions and sand volcanoes in Aso Caldera, associated with the 2016 Kumamoto earthquake

*石村 大輔¹、遠田 晋次²

*Daisuke Ishimura¹, Shinji Toda²

1.首都大学東京大学院都市環境科学研究科地理学教室、2.東北大学災害科学国際研究所

1.Department of Geography, Tokyo Metropolitan University, 2.International Research Institute of Disaster Science, Tohoku University

本発表では、2016年熊本地震で生じた阿蘇カルデラ内の液状化と噴砂の分布について報告する。2016年4月16日に発生したM7.3の地震（気象庁，2016）に伴って現れたと考えられる地表地震断層は南阿蘇村の東海大学付近までは確認されたが、その東方延長部のカルデラ内では明らかな地表地震断層は見出されていない。しかし、液状化と噴砂の分布はカルデラ北部の低地部の広い範囲で認められる。一方でカルデラの南部では、液状化と噴砂はほとんど確認されない。この差異の要因を明らかにするために国土地理院によって撮影された空中写真（4月16日撮影）を用いて、写真判読を行った。また、一部ではあるが5月8、10、11日に現地調査も実施した。

結果、カルデラ北部の液状化と噴砂は側方流動を伴うものと伴わないものに大きく分けられる。さらにいくつかの側方流動を伴うものは旧河道に沿って分布している。さらに干渉SAR画像（国土地理院，2016）との比較を行ったところ液状化・噴砂分布との対応が認められた。阿蘇市内牧に認められる同心円状の沈降の南北縁に液状化と噴砂が集中しており、沈降との関連が示唆される。また干渉SAR画像で干渉できていない領域と液状化・噴砂分布の一致や局所的な変形（阿蘇市的石、下田代、広瀬）と側方流動の一致が確認でき、液状化・噴砂と側方流動が干渉SAR画像に現れていると考えられる。

空中写真においてカルデラ北部西方において赤色、それ以外の地点では灰色を呈する噴砂と思われる現象が認められた。現地調査の結果、それぞれの場所で赤褐色を呈する層厚1cmほどの泥と灰色を呈する細粒砂が確認された。特に旧河道沿いでは高さ10~20cmに達する砂火山が確認された。また、調査時点で噴砂からの湧水が認められる地点もあった。

現時点では、液状化と噴砂の分布の要因については十分に検討できていないが、今後は埋没地形、地下地質、地下水位、強震動、断層運動について考慮し検討する予定である。今回の地震に伴う液状化と噴砂に関する研究は、古地震学的研究に利用されている液状化・噴砂痕を解釈する上でも有用な情報になると考えられる。

<謝辞>

現地調査には東北大学災害科学国際研究所の緊急調査費を使用させていただいた。また、写真判読には国土地理院撮影の空中写真を使用させていただいた。この場を借りて御礼申し上げます。

<文献>

国土地理院（2016）平成28年熊本地震に関する情報

<http://www.gsi.go.jp/BOUSAI/H27-kumamoto-earthquake-index.html>

気象庁（2016）「平成28年（2016年）熊本地震」について（第7報）

<http://www.jma.go.jp/jma/press/1604/16a/201604160330.html>

キーワード：2016年熊本地震、液状化、噴砂、側方流動

Keywords: 2016 Kumamoto earthquake, liquefaction, sand volcano, lateral spreading

平成28年（2016年）熊本地震の地震動に伴う間隙水圧／地下水位変化

Co-seismic pore pressure/groundwater level changes associated with the 2016 Kumamoto Earthquake(Mj7.3)

*浅井 康広¹、石井 紘¹、村上 理¹

*Yasuhiro Asai¹, Hiroshi Ishii¹, Osamu Murakami¹

1.公益財団法人 地震予知総合研究振興会 東濃地震科学研究所

1.Tono Research Institute of Earthquake Science, Association for the Depvelopment of Earthquake Prediction

2016年4月16日に発生した平成28年（2016年）熊本地震（Mj7.3）の地震動に伴う間隙水圧／地下水位変化が岐阜県東濃地域（震源距離665km）にある瑞浪超深地層研究所内観測点STG200およびSTG200N、戸狩観測点TGR350において観測された。2016年5月12日0時現在での、4月16日0:00（地震発生前）を基準とした各観測点の間隙水圧変化および水位変化はSTG200NとSTG200では約2.5kPaの水圧上昇、TGR350では約2m水位が上昇している。

講演では観測された間隙水圧／地下水位変化記録の紹介を行い、観測点近傍の水理地質構造を考慮した間隙水圧変化／水位変化の定性的／定量的モデルについての議論を行う。

キーワード：平成28年（2016年）熊本地震（Mj7.3）、地震動に伴う間隙水圧／地下水位変化

Keywords: The 2016 Kumamoto Earthquake (Mj7.3), Co-seismic pore pressure/groundwater level changes

地震断層と益城町市街地と南阿蘇村の「震災の帯」

Earthquake fault and "severely damaged zone" in Mashiki Town and Minami-Aso Village.

*渡辺 満久¹、鈴木 康弘²、中田 高³*Mitsuhsa Watanabe¹, Yasuhiro Suzuki², Takashi Nakata³

1.東洋大学社会学部、2.名古屋大学、3.広島大学

1.Faculty of Sociology, Toyo University, 2.Nagoya University, 3.Hiroshima University

1. はじめに

布田川-日奈久断層の活動により2016年熊本地震が引き起こされ、甚大な被害を生じた。被害がとくに顕著な地域はやや局所的であり、活断層との関係が伺われる。以下、益城町と南阿蘇村の事例を報告し、今後の地震防災に活かすべき教訓として提示したい。

2. 益城町

益城町の市街地では震度7を2度記録したが、4/16の地震時の建物被害が著しかったようである。地震被害が激甚な害域は、南北幅が数100 km程度で、東西に数 km連続する「震災の帯」をなしている。ここでは、耐震性が低くない建物までもが壊滅的な被害を被っていることがある。この「震災の帯」の中には、益城町堂園付近から連続する（布田川断層から分岐する）地震断層が見出されるため、その活動が地震被害の集中に寄与している可能性が非常に高い。

木山川南方の布田川断層沿いにおいても地震断層が出現し、その近傍では壊滅的な被害を受けた家屋が集中している。その被害集中範囲も、地震断層沿いの幅およそ1km程度内に限定される。

このように、地震断層直上の建物は悉く全壊し、近傍においても建物被害が著しい。断層運動による地盤のずれとともに、強震動と地盤破壊による影響が強かったと推定される。

3. 南阿蘇村

阿蘇カルデラ内の南阿蘇村（倒壊した阿蘇大橋周辺）においては、複数の地震断層が併走して現われた。地震断層直上およびその近傍では、ほとんどの建物が倒壊しており、多くの犠牲者を出した。ここでも、断層運動による地盤のずれってしまったことと、断層近傍での震動が強かったことが、被害を拡大させたと考えられる。これらの地震断層は、事前に検出することは非常に困難であると思われる。断層による地盤のずれの現われ方に関して、今後の防災においては非常に貴重な事例となるであろう。

また、この地域においては、少なくとも5台の自動車が北～北西方向へ横倒しとなっていることも確認した。このような現象は、兵庫県南部地震では確認されていない。横ずれ断層にともなう断層直交方向のS波により転倒したと推定される。それは、南阿蘇村に集中する大規模な斜面崩壊の引き金にもなったと思われる。

4. まとめ

活断層の位置は、地震防災上きわめて重要活基礎的な情報であることが再確認された。どのような現象は兵庫県南部地震時に神戸市街地でも確認されていたのであるが、残念ながら活断層の重要性が共有されることはなく、結果的に、兵庫県南部地震の教訓を生かすことにはつながらなかった。今後、活断層の事前認定が防災上極めて重要であることを再認識し、「都市圏活断層図」等を活用することによって、広域的な減災対策を講ずることが必要である。

なお、南阿蘇村の事例は、現段階での活断層認定の限界を示すものである。地震防災を考える上では、既知の活断層周辺において何が起こるのか、慎重に検討してゆく必要がある。

キーワード：活断層、地震断層、地震被害、被害集中

Keywords: Active fault, Earthquake fault, Earthquake disaster, Concentration of damage

2016年4月16日 M_w 7.0熊本地震に伴う地表地震断層の極近傍における地震被害状況について
Investigation on earthquake damage in the Near-Surface-Fault area during the 2016 M_w 7.0
Kumamoto earthquake

*司 宏俊¹、佐々木 哲朗²

*Hongjun Si¹, Tetsuro Sasaki²

1.株式会社サイスマ・リサーチ、2.日本原子力発電株式会社

1.Seismological Research Institute Inc., 2.The Japan Atomic Power Company

2016年4月14日に発生した M_w 6.2熊本地震に続いて、4月16日未明に M_w 7.0の地震が発生した。両地震では最大震度7が観測された。4月14日の地震は日奈久断層の北部の活動によるもので、4月16日の地震は主に布田川断層によって起きたものとされている。4月16日の地震では、地表断層が確認されており、被害も4月14日の地震で被災した益城町、熊本市に加えて、さらに西原村や南阿蘇村など広範囲に及んだ。本研究では、地震被害と地表断層との関係を確認するため、2016年5月6日～8日の間に、これまでの調査で調べられている地表断層の位置をたどりながら、地表断層の新たな痕跡を探して、その周辺の建物被害状況の確認を行った。調査方法は主に建物の概観の目視調査により行った。地表断層は緯度・経度や走向などの位置情報を記録した。調査範囲は主に布田川断層帯に沿って、益城町福原、宮園、下陣、上陣、杉堂、西原村の大切畑ダム周辺、南阿蘇村の河陽地区などを対象とした。本発表では、調査の結果について報告するもので、主に以下のことが確認できた。(1) 益城町に位置する布田川断層帯における調査地点は、被害の最も大きい益城町中心部からやや離れている。(2) 全般的に、地表断層の極近傍では、比較的建築年代が古く、外観上耐震性能が低いと判断される建物に被害が多い傾向が見られた。一方、比較的建築年代が新しく、外観上耐震性能が高いと判断される建物には被害が少ない傾向が見られた。(3) 益城町などにおける地表断層の直上やその極近傍では、比較的建築年代が新しい建物では大きく変形する被害は見られなかった。南阿蘇村の断層直上やその近傍では、比較的建築年代が新しい建物にも大きく変形する被害事例が見られた。今後詳細な調査が必要と考えられる。

キーワード：地表断層、地震被害、熊本地震

Keywords: Surface fault, Damage, Kumamoto earthquake

L-band SAR(PALSAR-2)を用いた、広域データからの建物倒壊域・土砂災害域検出

Trial of detection for damaged urban area and landslide area from wide range of image obtained by L-ban SAR (PALSAR-2)

*渡辺 学¹、米澤 千夏²、潤 園田³、真人 大木⁴、直弥 富井⁴、政信 島田¹

*Manabu Watanabe¹, chinatsu Yonezawa², Jun Sonoda³, Masato Ohki⁴, Naoya Tomii⁴, Masanobu Shimada¹

1.東京電機大学、2.東北大学、3.仙台高等専門学校、4.JAXA

1.Tokyo denki Univ., 2.Tohoku Univ., 3.National Institute of Technology, Sendai College, 4.JAXA

PALSAR-2 (Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar 2), L-band SAR on-board Advanced Land Observing Satellite-2 (ALOS-2), data were used to detect disaster areas caused by the 2016 Kumamoto earthquake.

1. Coherence change technique with coherence filter [1] was used to detect damaged urban areas.

2. Alpha angle [2] and HH-VV coherence [3] change techniques were used to detect landslide areas.

The coherence change technique with coherence filter identifies candidates of severely damaged urban areas located along a fault, which induces the earthquake. The detected damaged areas are Mashiro town, Koyo area in Minamiaso village, which includes Aso campus of Tokai university, Aso Ohashi bridge, and some of landside areas.

Some landslides occurred in a forest area before the disasters were detected by using the alpha angle and HH-VV coherence change techniques. But miss-identification were often observed.

Additional forest mask was produced from the image taken before the disaster, and tested to reduce the miss-identification. It is confirmed that the forest mask works well to reduce the miss-identification of landslide area.

[1] M. Watanabe, R. Natsuaki, H. Nagai, T. Motohka, T. Tadono, M. Ohki, R. B. Thapa, C. Yonezawa, M. Shimada, S. Suzuki, Damaged area detection caused by 2015 Nepal earthquake with coherence difference obtained by PALSAR-2 three observations, JpGU 2015, May 24-28, 2015, Makuhari Messe/Chiba

[2] Pi-SAR-L2 observation of the landslide caused by Typhoon Wipha on Izu Oshima Island, M. Watanabe, R. B. Thapa, M. Shimada, Remote Sensing, 8(4), 282, 2016

[3] M. Shimada, M. Watanabe, N. Kawano, M. Ohki, T. Motooka, W. Wada, Detecting mountainous landslides by SAR polarimetry: A comparative study using Pi-SAR-L2 and X band SARs. Trans. Jpn. Soc. Aeronaut. Space Sci., Aerosp. Technol. Jpn. 2014, 12, 9-15.

キーワード：熊本地震、コヒーレンス、ポーラリメトリ

Keywords: The 2016 Kumamoto earthquake, Coherence, Polarimetry

地球観測衛星による熊本地震の緊急観測対応

Emergency response of earth observation satellites for the Kumamoto earthquake 2016

*永井 裕人¹、夏秋 嶺¹、石原 光則¹、大木 真人¹、田殿 武雄¹、本岡 毅¹、鈴木 新一¹

*Hiroto Nagai¹, Ryo Natsuaki¹, Mitsunori Ishihara¹, Masato Ohki¹, Takeo Tadono¹, Takeshi Motohka¹, Shinichi Suzuki¹

1.国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構

1.Japan Aerospace Exploration Agency

2016年4月16日以降に熊本県を中心に発生した一連の地震について、宇宙航空研究開発機構は陸域観測技術衛星「だいち2号」搭載のLバンド合成開口レーダ（PALSAR-2）による観測を実施し、画像解析を行った。また同時に国外衛星の光学観測画像についても解析を行った。この発表では被害状況把握のために国内関係機関に提供した衛星解析事例の一部を紹介する。

キーワード：熊本地震、PALSAR-2、ALOS-2

Keywords: the Kumamoto earthquake, PALSAR-2, ALOS-2

地震後における地形データ取得の迅速化：熊本県南阿蘇村における斜面崩壊を例に
How quickly can topographic data are acquired after earthquake? A case study for the
landslide in Minami-Aso, Kumamoto, Japa

*早川 裕式¹

*Yuichi S. Hayakawa¹

1.東京大学空間情報科学研究センター

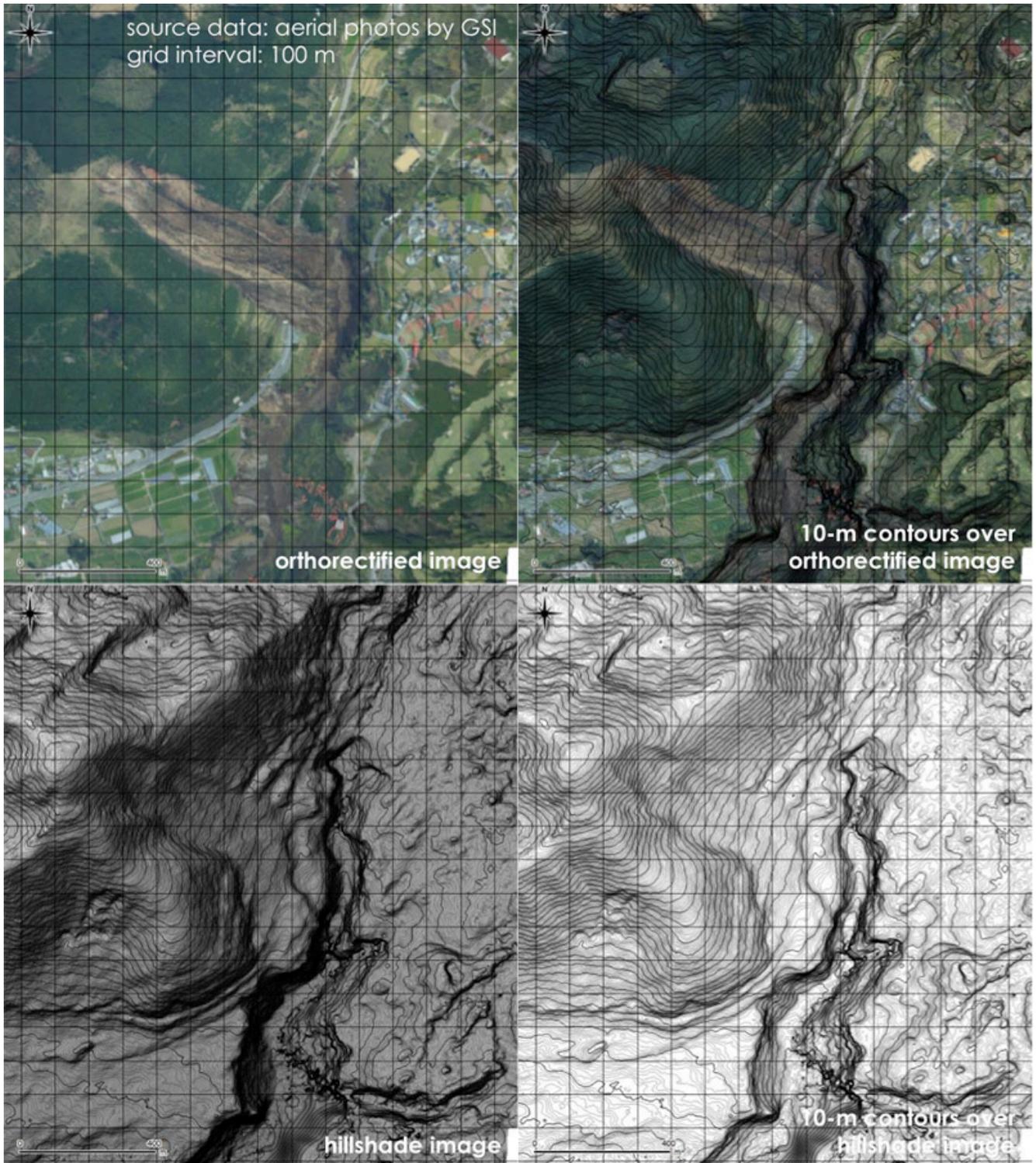
1.Center for Spatial Information Science, The University of Tokyo

大規模な地震により、建物や道路、地形などが大きく変化した領域において、迅速な地形計測は変化箇所の識別のために重要である。地上や空中から撮影された写真や動画は多くの情報を有するが、それら複数の写真や動画をソースとしたSfM多視点ステレオ写真測量により3次元地形データを得ることで、より詳細な情報を得ることができる。ここでは、熊本地震を誘因として南阿蘇で発生した斜面崩壊の迅速な3Dマッピングの事例を示す。有人または無人航空機で撮影された斜め空中写真およびビデオ動画をデータソースとして、これらがオンラインで利用可能になった直後、現場を訪問することなく遠隔地でデータ処理を行い、数十分以内に数メートル程度の精度で地形データを得ることができた。図には国土地理院によって提供された斜め航空写真から生成された地形情報の例を示す。データ処理時には、地上基準点（GCP）の設置に手動での画像からの読み取りが必要とされ、時間を要した。取得データ（地形、陰影起伏およびオルソ画像）は速やかにJPGやアニメーションGIFファイルとしてSNS上で共有され、また、点群・デジタル標高モデル・オルソ画像を含むデータ自体も、オンラインデータ提供システムにより共有した（Hayakawa, 2016）。さらにデータの可視性を高めるため、3次元モデル（点群またはTIN）もオンラインで共有した。これらのデータは、現場での使用には限界があるが、特に遠隔地の人々（例えば学生や海外の研究者）にとって、斜面崩壊の状況を理解するのに少なからず役立つと考えられる。一方、迅速かつ正確な3Dマッピングの有用性を高めるため、このようなデータ処理の速度をさらに向上させるべきであり、またこれらが現場における救助等の目的に使用される場合、デジタルのものだけでなく、印刷された紙地図でも出力されるべきであろう。

Hayakawa, Yuichi (2016), "Topographic data generated from oblique aerial photos in Minami-Aso, Kumamoto, Japan just after the April 2016 earthquake", Mendeley Data, v1. doi:10.17632/sbxkzhy7h6.1

キーワード：SfM多視点ステレオ写真測量、点群、デジタル標高モデル、データ共有、地すべり・斜面崩壊、地形計測

Keywords: structure-from-motion multi-view stereo photogrammetry, point cloud, digital elevation model, data sharing, landslides, topographic mapping



航空機搭載高分解能合成開口レーダー (Pi-SAR2) を用いた熊本地震の被災状況把握
Surveillance of the Damage Inflicted by the Kumamoto Earthquake Using the Airborne X-band SAR System (Pi-SAR2)

*久保田 実¹、浦塚 清峰¹、児島 正一郎¹、上本 純平¹、灘井 章嗣¹、梅原 俊彦¹、松岡 建志¹、小林 達治¹、三森 麻衣子¹

*Minoru Kubota¹, Seiho Uratsuka¹, Syoichiro Kojima¹, Jyunpei Uemoto¹, Akitsugu Nadai¹, Toshihiko Umehara¹, Takeshi Matsuoka¹, Tatsuharu Kobayashi¹, Maiko Mitsumori¹

1. 国立研究開発法人情報通信研究機構

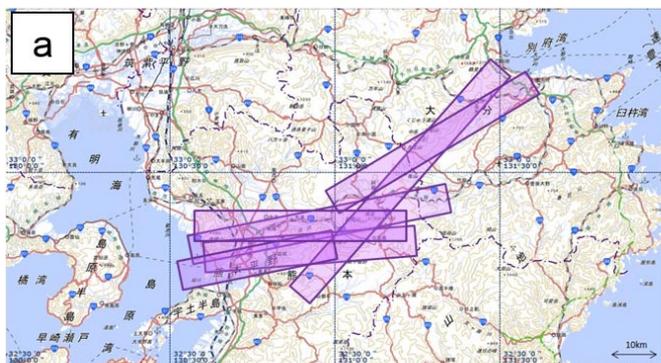
1. National Institute of Information and Communications Technology

国立研究開発法人情報通信研究機構(NICT)では熊本地震の発生を受け、航空機搭載高分解能合成開口レーダー (Pi-SAR2) を用いた被災地の観測を、M7.3の地震が起きた翌日の2016年4月17日に実施した。本観測で得られた画像は迅速な被災状況検討に資するため、観測後直ちに速報として関係機関に送付するとともにNICTのWebサイトで公開している。図1に今回の観測領域 (フライトパス) と観測結果の一例として南阿蘇村阿蘇大橋付近の拡大画像を示す。なお、この領域の観測に要した時間は2時間ほどであった。

航空機搭載SARは悪天候時や夜間でも地上の様子を詳細に且つ広範囲にわたってサーベイできるメリットがあるため、内閣府戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) 「レジリエントな防災・減災機能の強化」においても、航空機SARを活用した迅速な災害状況把握についての、省庁の枠を超えた連携の取り組みがはじまっている。本発表ではPi-SAR2による観測方法と、観測・解析結果を紹介するとともに、このような航空機搭載SARを災害発生時にどのように活用すべきかについて議論したい。

キーワード：熊本地震、合成開口レーダー、SAR

Keywords: Kumamoto Earthquake, synthetic aperture radar, SAR



- a) Pi-SAR2による熊本地震緊急観測
(2016年4月17日)のフライトパス
- b) 南阿蘇村阿蘇大橋付近の観測画像
画像拡大図
- c) 同じ領域の被災前(2015年12月5
日)の観測画像



平成28年（2016年）熊本地震で発生した阿蘇火山中央火口丘群の地形変化：空中写真および3Dモデルを用いた解析

Detection of morphological changes around post-caldera central cones of Aso Volcano caused by the 2016 Kumamoto Earthquake using aerial photos and 3D model

*佐々木 寿¹、平川 泰之¹、山口 和也¹、荒井 健一¹、藤田 浩司¹、成毛 志乃¹、千葉 達朗¹、船越 和也¹

*Hisashi Sasaki¹, Yasuyuki Hirakawa¹, Kazuya Yamaguchi¹, Kenichi Arai¹, Koji Fujita¹, Shino Naruke¹, Tatsuhiro Chiba¹, Kazuya Funakoshi¹

1. アジア航測株式会社

1. Asia Air Survey Co., Ltd.

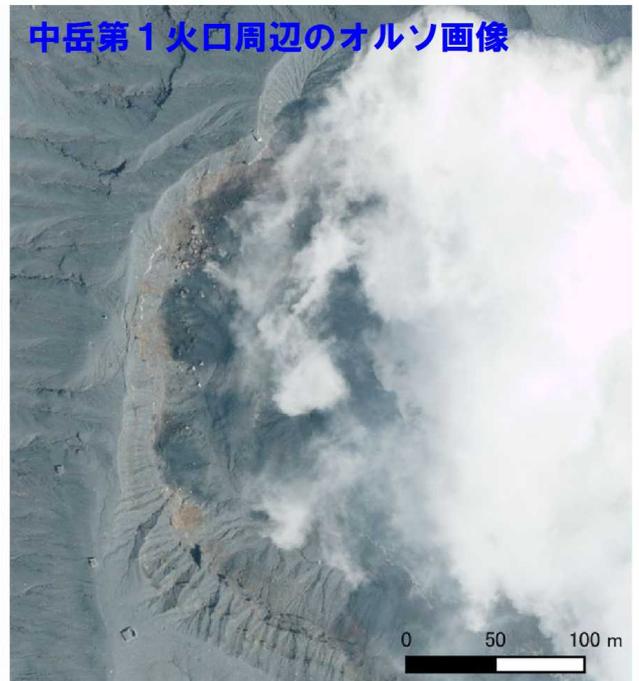
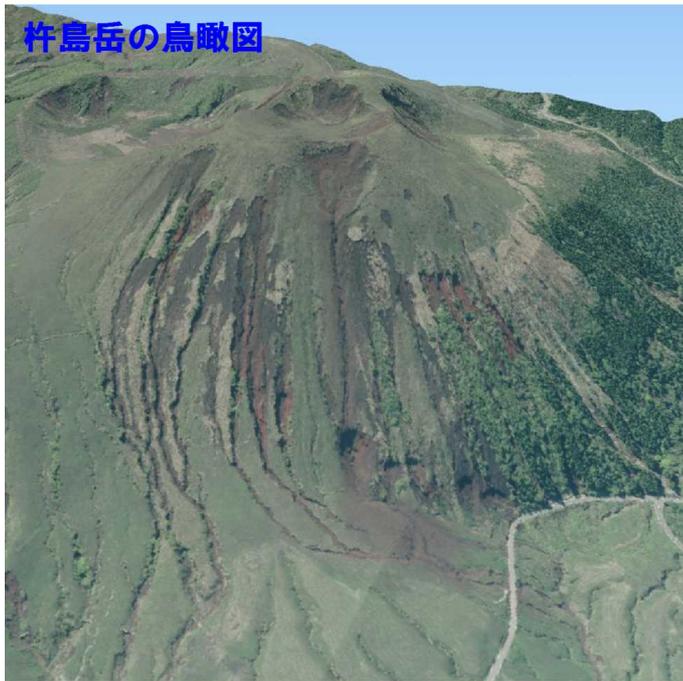
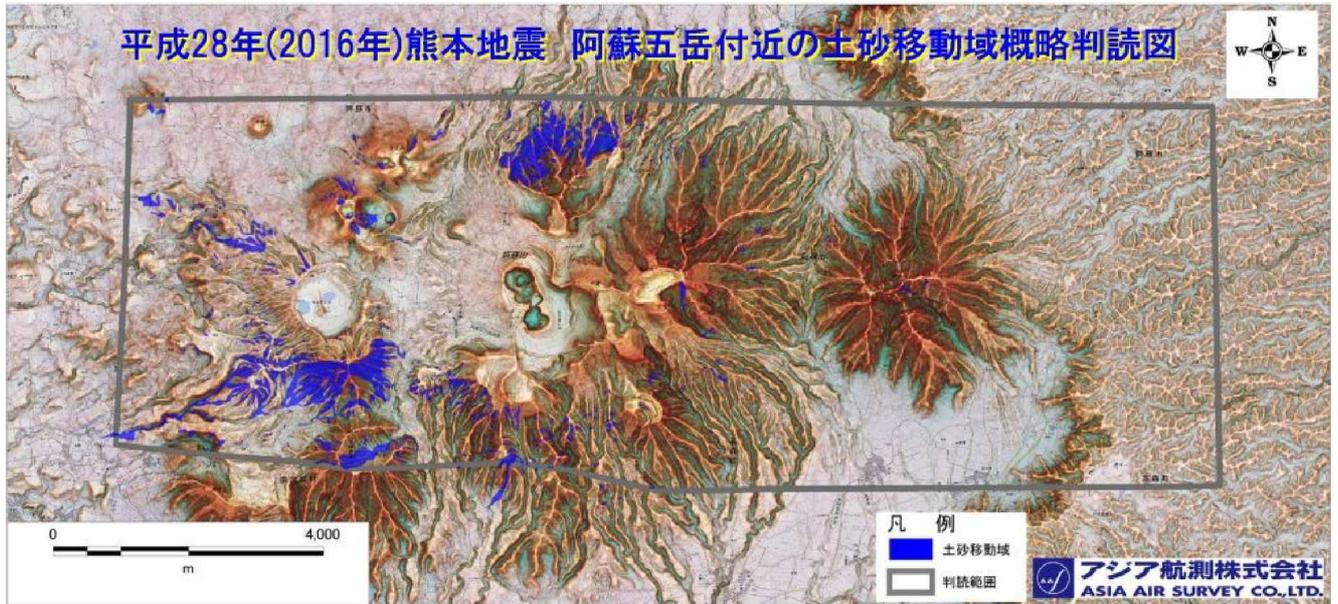
平成28年（2016年）熊本地震では阿蘇火山中央火口丘群周辺にも多数の地形変化が確認されている。アジア航測は阿蘇火山中央火口丘群付近を対象に、噴煙の影響を避けるために高高度から垂直空中写真の自主撮影を行った。撮影は2016年4月29日に実施した。使用したカメラはDMC II e230で、4コース88枚の画像（地上画素寸法は20cm）を撮影した。撮影した空中写真から簡易オルソ画像および簡易3Dモデルを作成し、概略判読を行った。

カルデラ壁などと同様に、阿蘇火山中央火口丘群周辺付近でも崩壊地や地すべり、および斜面上の亀裂が非常に多く発生していることが分かった。烏帽子岳周辺と櫛尾岳北斜面では非常に広範囲に及ぶ土砂移動が発生している。草千里ヶ浜・往生岳・杵島岳・中岳・高岳のそれぞれの周辺斜面でも土砂移動が多発している。杵島岳では山頂付近で発生した崩壊した土砂が斜面を流れ下り、粉体流として挙動したような箇所も見られる。一方、根子岳周辺には地震前から崩壊地が分布しているが、空中写真で見ると、大きく変化していないようである。また、上記以外の範囲にも斜面上には非常に多くの亀裂が認められた。亀裂は土砂移動域の周辺だけでなく、それ以外の斜面にも分布している。

中岳火口は噴気の影響があるため、一部しか判読できなかったが、第1火口の北西側で幅100m程度にわたって崩壊していることが確認できた。火口底の様子は不明であるが、崩壊した土砂が火口底まで到達している可能性がある。上記以外の火口壁でも崩落している箇所が多数存在する。

キーワード：平成28年（2016年）熊本地震、阿蘇火山、空中写真、3Dモデル

Keywords: The 2016 Kumamoto Earthquake, Aso volcano, aerial photo, 3D model



2016年熊本地震における阿蘇地域に発生した地盤災害判読

Interpretation of the Ground Disaster Occurring at Aso Area Caused by the 2016 Kumamoto Earthquake

*本間 哲郎¹、下村 博之¹、本田 健¹、横田 浩¹、小更 亨¹、野田 敦夫¹、本多 泰章¹

*Tetsuro Homma¹, Hiroyuki Shimomura¹, Takeshi Honda¹, Hiroshi Yokota¹, Tooru Kobuke¹, Atsuo Noda¹, Yasuaki Honda¹

1.株式会社パスコ

1.PASCO CORPORATION

【はじめに】

2016年4月14日及び16日に発生した「平成28年（2016年）熊本地震」では、地震動等の影響によって多数の土砂移動現象が発生した。地震発生直後は、斜面崩壊等の発生状況が不明であり、早急に被害の全容を解明する必要があった。株式会社パスコは、地震発生後に空中写真撮影や人工衛星による撮像を早期に実施し、筆者らはそのデータを用いて阿蘇地域で発生した崩壊地等の判読を実施した。また、立野地区の大規模崩壊地については航空レーザ計測を実施し、崩壊土砂量を算出した。

【調査概要】

判読に使用したデータは、阿蘇地域を撮影した斜め写真（4月16日撮影）、垂直写真（4月19日及び4月20日撮影）及び光学衛星（SPOT）画像（4月20日撮影）である。また、立野地区の航空レーザ計測データ（4月16日計測）は、フィルタリング処理により地表面を抽出し、1mメッシュの地形データを作成したものである。

判読範囲は阿蘇カルデラ内及びカルデラ周辺の約550km²であり、判読項目は崩壊地（崩壊範囲、土砂堆積範囲）、亀裂（地震動に伴う直接的なもの、崩壊に伴うもの）、道路寸断箇所とした。崩壊地については、崩壊土砂量を算出した。判読結果はGIS上に整理し、被災判読図を作成したほか、崩壊地の分布と既存の流域界データをオーバーレイすることにより、二次被害が発生する危険性が高いと思われる溪流を抽出した。

なお、当該地域では平成24年7月九州北部豪雨によって発生した崩壊跡地が分布しており、地震発生前の光学衛星（SPOT）画像（2015年10月22日及び11月30日撮影）等を用いて今回の地震により発生した崩壊地のみを抽出した。

【判読結果】

地震に伴って発生した崩壊地は、中央火口丘周辺及び外輪山の西側（立野地区周辺）～北側にかけて多く分布している。特に立野地区周辺や烏帽子岳周辺に比較的規模の大きな崩壊地が集中している。烏帽子岳の西に位置する山王谷川では崩壊土砂が土石流化しており、下流域では土砂氾濫も確認された。流域単位で見ると、山王谷川や烏帽子岳周辺の隣接する流域内で比較的多くの崩壊が発生していることが判明した。

また、航空レーザ計測データ解析により、阿蘇大橋西側斜面で発生した崩壊の規模は平均幅140m、平均長さ350m、崩壊面積47,900m²であり、地震前の地形データとの差分解析によって平均崩壊深約5m、崩壊土砂量は約24万m³であることが明らかとなった。

発生した地盤の亀裂は、益城町付近から北東方向へ連続して分布していることが確認された。阿蘇市赤水から三久保にかけての阿蘇谷西側の水田地では、旧河道沿いと思われる位置に東北東－西南西方向の亀裂が複数確認された。また、崩壊に伴う亀裂は、崩壊地上部及び側方の斜面で円弧状に入っている状況が多く確認された。道路寸断箇所も崩壊地と同様にカルデラ内西部付近に集中している。

【考察】

崩壊は亀裂に沿うように帯状に集中発生しており、亀裂が確認された阿蘇谷西側では外輪山の急斜面で多数確認された。一方、亀裂が確認されていない阿蘇谷東側では、中央火口丘北側斜面で崩壊が確認されたが、外輪山ではほとんど崩壊が確認されなかった。また、今回確認された亀裂のうち南阿蘇村河陽付近のものは、道路や畦畔等に右横ずれを伴うものが認められた。これらの亀裂は布田川断層帯北東端の延長線上に現れた地表地震断層と推定され、布田川断層帯が外輪山内にまで延長している可能性が伺える。河陽地区では緩斜面でも崩壊や地すべりが発生した状況が確認されており、震源断層近傍での強震動による斜面崩壊が推測される。

土石流が確認された山王谷川では崩壊地が広範囲に分布していることから、崩壊土砂が流動化して土石流が発

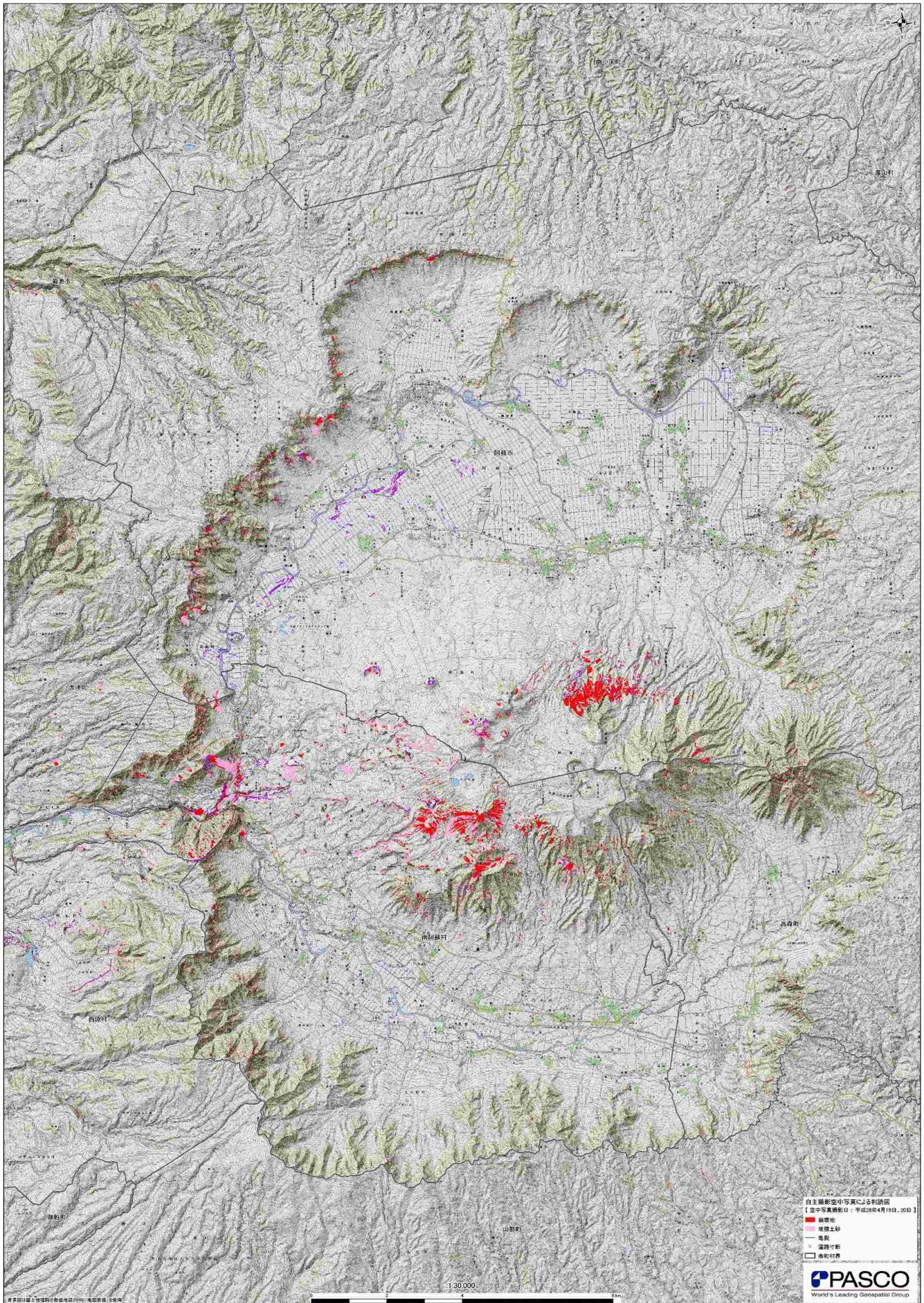
生したと考えられる。隣接溪流においても流域内で比較的多くの崩壊が発生しており、不安定土砂が溪流内に残存していることから、土砂の二次移動による土石流発生が懸念される。

【おわりに】

株式会社パスコでは地震発生翌日の4月15日から空中写真等の撮影活動を実施し、亀裂や崩壊地の場所、建物・道路等の被害状況を判読して、国・県などの関係機関に情報の提供を行い、その一部をホームページに掲載した。今回の熊本地震では、震度6弱以上の地震が4月14日から16日にかけて7回発生し、それに伴い被災状況が変化したことから、航空機による広範囲且つ機動性の高い情報取得は、災害対応において有用であると考え

キーワード：平成28年（2016年）熊本地震、斜面崩壊、航空写真、緊急判読

Keywords: The 2016 Kumamoto Earthquake, Landslide, Aerial photograph, Interpretation



衛星を活用した地震時のダムモニタリングの試行

The study of coseismic dam monitoring with the Satellite data

*三五 大輔¹、福島 芳和¹、吉川 和男¹、清水 祥¹、森田 保成¹、佐藤 弘行²

*DAISUKE SANGO¹, YOSHIKAZU FUKUSHIMA¹, KAZUO YOSHIKAWA¹, SHO SHIMIZU¹, YASUNARI MORITA¹, HIROYUKI SATO²

1.株式会社パスコ、2.国土技術政策総合研究所

1.PASCO, 2.National Institute for Land and Infrastructure Management

4月16日に発生した熊本地震（本震）では、道路や河川堤防に被害が発生した。株式会社パスコでは熊本地震について人工衛星等をつかって地震被害状況の把握を行い、その一環として人工衛星を用いて3基のフィルダムのモニタリングを試行した。

衛星SARの干渉解析を用いた試行では、本震で震度6の分布域に位置するダムについて、地震の影響で天端部が若干沈下した現象をとらえた。一方で、本震で震度4の分布域に位置するダムでは、地震前後で堤体に変化は見られなかった。

また、地震前後の光学衛星画像を用いることで、ダムやダム周辺の状況を素早く把握できた。

本試行の結果から、人工衛星を用いることで地震時に広域に点在するダムのモニタリングが可能となると考えられる。

キーワード：人工衛星、ダム、モニタリング、差分干渉SAR

Keywords: Satellite, Dam, Monitoring, DInSAR

熊本地震の表層斜面崩壊で表れた阿蘇草千里ヶ浜火山噴出物

Volcanic products of Aso Kusasenrigahama as revealed by surface slope collapse

*長谷中 利昭¹、鳥井 真之²、田島 靖久³

*Toshiaki Hasenaka¹, Masayuki Torii², Yasuhisa Tajima³

1.熊本大学大学院自然科学研究科理学専攻地球環境科学講座、2.熊本大学減災型社会システム実践研究教育センター、3.日本工営（株）

1.Department of Earth and Environmental Science, Graduate School of Science and Technology, Kumamoto University, 2.Implementation Research and Education System Center for Reducing Disaster Risk, Kumamoto University, 3.Nippon Koei CO.,LTD.,

熊本地震（2014年4月14日，16日）は益城町，南阿蘇村，西原村など布田川，日奈久断層帯に沿った地域で痛ましい被害を起こした。激しい地震動はまた，阿蘇中央火口丘群，外輪山において著しい数の斜面崩壊を起こした。9万年前の阿蘇-4カルデラ噴火以降，阿蘇中央火口丘群が成長したが，それらの火山の中で3万年前に最大の噴火を起こした草千里ヶ浜火山周辺で，大規模な斜面崩壊によって広く内部構造が見えるようになった。本講演では，新たに得られた露頭情報から草千里ヶ浜火山の噴出物について議論したい。

キーワード：阿蘇火山、熊本地震、草千里ヶ浜火山

Keywords: Aso volcano, Kumamoto earthquakes, Kusasenrigahama volcano

阿蘇外輪山北西部崖部の崩壊と碎屑場をおそった土石流(速報)

Preliminary report of deformation and debris flow effect at North West site Aso caldera cliff after Kumamoto earthquake.

*清川 昌一¹、松木 宏彰²

*Shoichi Kiyokawa¹, Hiroaki Mitsuki²

1.九州大学大学院理学研究院地球惑星部門、2.復建調査設計株式会社

1.Department of Earth and Planetary Sciences Faculty of sciences, Kyuushu University, 2.Fukken Co., Ltd.

九州大学地球惑星科学部門では、学部生の実習として九州横断巡検を行って来ている。西原村に宿泊し、立野溶岩、外輪山北西部の兜岩展望台、通称ラピュタ道路、村本採石場にて巡検を行って来た。今回この巡検地が地震の被害にあったために、地震後に同地域の調査をおこなった。調査は1回目の地震後の4月15日、本震（4月16日）後の4月25日、4月30日、5月1日に踏査・ドローンを使って観察した。

被害状況：外輪山は圧倒的に北西部での崩壊がみられており、ドローン撮影もおこないながら地震後の地質・地形調査をおこなった。

兜岩展望台：展望台の建て屋もつづれ崖に沿って円弧滑りの正断層で全体がずれ落ちている。兜岩は外輪山壁から突出しているが、その出っ張った部分の展望台付近に亀裂が外輪山壁に沿って入っており、外輪山内側に崩れている。ドローンの観察では、外輪山壁から突出している根元の両側部分に、大きな土砂崩れが起こっており、そのずれ部分からの亀裂が展望台亀裂の末端部で見られることより、兜岩全体がずれる可能性が示唆される。

ラピュタ道路：眺めがよくて、ヘアピンカーブが続くこの道沿いも崩壊が著しい。ここは、オレンジ色のアカホヤ層(7300年前)が見られる場所であるが、より露頭がフレッシュになり観察しやすくなっている。

村本採石場：いつも世話になっている採石場であり、外輪山の断面が見られる非常にまれな場所である。ここでは、古い火山の岩体、柱状節理をもつ岩体および湖沼堆積物が見られる。湖沼堆積物は砂岩泥岩互層で、炭化した植物葉などを含んでおり、部分的に真っ黒い泥岩層を作っている。この堆積層は断層で8mほど切られており、崖側が落ちた正断層であった。この断層はカルデラ形成後に湖を伴いながらずれていった痕跡だと思われる。この堆積層は外輪山壁の中間部分(標高570m-650mの崖：カルデラ底赤水地域450m、カルデラ壁最上部は850-950m)に位置する。崩壊は崖の上部で草を持った表土層とともに土石流が起こっており、特に現在採掘していない最も東側はかなり下まで流れ下っていた。

今回の地震で集中的に阿蘇外輪山の北西部分に被害が集中したが、それに伴う土石流の挙動（運動エネルギーを位置エネルギーに変える）が明らかになった。特に、土石流はたまるだけでなく、強い流れのときは低いところから高いところへ上っていくこともあることが改めて認識させられた。

キーワード：熊本地震、土石流、斜面崩壊

Keywords: Kumamoto Earthquake, debris flow, landslide

熊本地震（2016年）による阿蘇山中央火口丘群への影響について

The effects on Aso volcanic edifice by 2016 Kumamoto earthquakes

*田島 靖久¹、鳥井 真之²、長谷中 利昭³*Yasuhisa Tajima¹, Masayuki Torii², Toshiaki Hasenaka³

1.日本工営（株）、2.熊本大学減災型社会システム実践研究教育センター、3.熊本大学大学院自然科学研究科
1.NIPPON KOEI CO.,LTD., 2.IRESC, Kumamoto University, 3.Graduate School of Science and Technology,
Kumamoto University

2016年4月14日（M6.5）、4月16日（M7.3）に発生した熊本地震に伴い、日奈久断層帯、布田川断層帯が活動したとされる（気象庁ホームページ）。布田川断層の北東延長付近の南阿蘇村立野や河陽では、多くの土砂移動に伴い痛ましい被害が生じた。我々は、公開された空撮写真や現地調査から阿蘇山中央火口丘群の西～南西斜面に崩壊が多発していることを確認し、特に烏帽子岳～その南の火山体で著しい数の崩壊が発生していることに注目した。なお、地震時の火山体崩壊は、1984年の長野県西部地震による御岳崩れなど火山災害として重要な現象であり、写真判読、現地調査を行った序報を報告する。

中央火口丘群の火山体の崩壊及び地割れなどの地形変化はgoogle社が2016年4月16日に取得した写真（Google Earth@2016 ZENRIN）を用いて判読を行った。崩壊は、主に山体斜面の尾根や緩斜面に弧状に形成され、崩壊地堆積物が元地形の原形を留めていないものとした。なお、崩壊堆積物は発生地点の標高、傾斜、地質、地下水などの条件によって流走距離が異なると考えられるため抽出していない。また、崩壊頭部の背後に形成された地割れも抽出した。一方、火山体内には、尾根や緩斜面に弧状に形成された地割れでなく、地形の凹凸に関わらず断続する直線性の高い地割れが見られる。これらの地割れは1～1.5 km程続く場合があり、山体深部の構造を反映している可能性が考えられ、構造的な地割れとして抽出した。

判読の結果、立野付近に達したと推定される北東―南西の布田川断層帯（もしくは別の断層）から、東向きに伸びる構造的な地割れが数多く認められた。中央火口丘群山体上の崩壊は、これらの構造的な地割れの南縁（南阿蘇村長野付近）と北縁（阿蘇市赤水～蛇ノ尾付近）の間に集中している。また、地割れの傍において崩壊が発生している場所も認められ、これらの結果は地震に伴う構造運動と崩壊が関係していたと推定される。なお、布田川断層帯が分岐もしくは伸びる北向山の南西斜面では、中央火口丘群に比べて崩壊が少ない。この差異は、中央火口丘群の表層が中岳火口を起源とする火山灰層（層厚4～5 m）に覆われていたことに起因すると考えられる。

次に、阿蘇中央火口丘群内の構造的な地割れは、その連続性から布田川断層帯と傾斜方向が異なる可能性がある点は注目に値する。地割れの北端延長には、米塚火山、蛇ノ尾スコリア丘、中央部の延長には吉岡の噴気、草千里ヶ浜火山があり、火山体構造と密接に関係している可能性が示唆され、両者の関係について考察を深める予定である。

キーワード：阿蘇火山、地形変化、熊本地震

Keywords: Aso volcano, Topographical alterations, Kumamoto earthquakes

1889（明治22）年明治熊本地震の詳細震度分布と震源

Seismic Intensity Distribution of the 1889 Meiji Kumamoto Earthquake and Its Source Location

*武村 雅之¹*Masayuki Takemura¹

1.名古屋大学減災連携研究センター

1. Disaster Mitigation Research Center, Nagoya University

1889（明治22）年熊本地震（M=6.3）は、我が国の地震・地震工学の研究が、ジョン・ミルンに代表されるお雇い外国人教師に先導される時代を終え、日本人の研究者が中心となる時代への転換点に起こった地震である。地震調査は、当時帝国大学（現在の東京大学）理科大学教授の小藤文次郎や1886（明治19）年に日本初の地震学教授となった関谷清景が行っている。関谷は元々肺病を病み、前年の磐梯山噴火の調査で病状がさらに悪化したなかでの調査で、結局、途中で調査を断念せざるをえなくなった。そのような中で、直後にまとめられた主な地震調査の資料は「地学雑誌」（明治22年創刊の第9巻）の小藤文次郎による「熊本地震概察報告」と農商務省技師の金田樽太郎、による「熊本地震調査報告」である。また、1920（大正9）年に今村明恒が「震災予防調査会報告第92号」で被害や震源位置、余震などの情報を詳細にまとめている。

小藤（1889）に掲載された郡市別の死者数を平成の地震と比較すると、明治熊本地震と今回の地震では死者発生場所が大きく異なっていることが分かる。地震規模がほぼ同じ前震と比較しても、明治熊本地震は飽田郡（現在の熊本市西区）で多くの死者が出ているのに対して、今回は益城町で被害が大きい。一方、熊本市（現在の中央区）では、どちらの地震でも死者が出ており、明治の時にも熊本城も大きな被害を出し29カ所の石垣が崩れた。ただし、天守閣は明治熊本地震の前の西南の役で焼失しており、地震の際は存在せず当然被害の記録はない。現在の天守閣は1960（昭和35）年の再建である。

さらに、今村（1920）に掲載された市町村別の被害集計資料から住家の全潰率ならびに全半潰率をもとめ、市町村毎の詳細な震度分布図を作成した。震度は、現在の熊本市の西部、金峰山（西山）周辺で6弱と最も高い。一方平成の地震で被害の大きい益城町の中心部、当時の木山村の震度は5弱である。

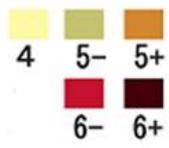
活断層の分布をみると、阿蘇山から南西に延びる布田川断層が益城町付近で日奈久断層を分岐している。明治熊本地震で被害の大きい熊本市西部は分岐点より西側の布田川断層の延長部に近い。今回の前震も本震も震源位置は分岐点に近く、余震分布は前震が主に分岐点より日奈久断層方向へ、本震は分岐点より北東方向の布田川断層へと延びている。詳細震度分布から判断すると明治の地震は、今回の地震とは震源域を異にしており、強いて活断層と対応させようとすれば分岐点より南西側の布田川断層の延長部に対応する可能性がある。本震の余震分布をみると、布田川断層はやや北傾斜であり、そのことを考慮すると金峰山付近で被害が大きことが説明できるかもしれない。

最後に、関谷清景は病魔のために調査は途中で断念せざるを得なかったが、前年の磐梯山噴火の記憶が新しいなかで、金峰山が噴火するのではないかと戦々恐々としていた人々に地震知識の普及を図り、人心の安定に尽くした功績は大きかったと伝えられている。

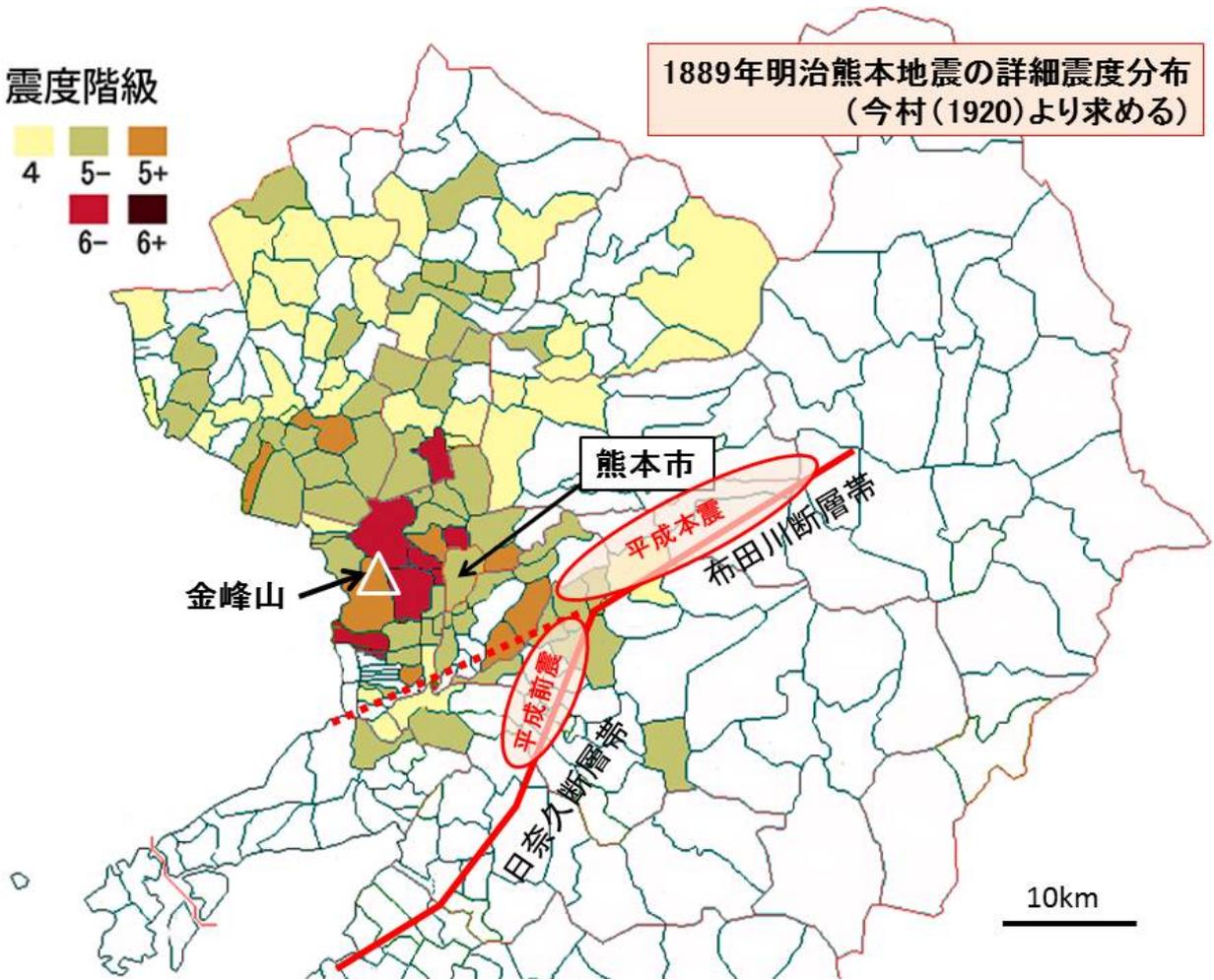
キーワード：明治熊本地震、震度分布、震源域、活断層

Keywords: Meiji Kumamoto Earthquake, Seismic Intensity Distribution, Source Region, Active Fault

震度階級



1889年明治熊本地震の詳細震度分布
(今村(1920)より求める)



明治22年(1889年)熊本地震にまつわる資料

Materials related to the 1889 Meiji Kumamoto earthquake

*室谷 智子¹、有賀 暢迪¹、若林 文高¹、大迫 正弘¹

*Satoko Murotani¹, Nobumichi Ariga¹, Fumitaka Wakabayashi¹, Masahiro Osako¹

1.国立科学博物館 理工学研究部

1.Department of Science and Engineering, National Museum of Nature and Science

明治22年(1889年)7月28日午後11時40分頃、熊本地方で地震が発生し、熊本市内で死者約20名、家屋全壊230棟以上、さらに熊本城の石垣が崩れるなどの被害が発生した。この地震の震源は、熊本市の西部に位置する金峰山で、マグニチュードは6.3と推定され(宇津, 1982, BERI), 地震発生から21日間で292回, 5ヶ月間で566回の余震が観測された(今村, 1920, 震災予防調査会報告)。震源が平成28年(2016年)熊本地震とは少し離れているようであるが、この明治熊本地震への関心は高い。国立科学博物館は、この明治熊本地震に関する資料を所蔵しており、本発表では、それらについて紹介する。

熊本市に今も残る富重写真館の写真師・富重利平は、明治熊本地震の際、被害の様子を撮影しており、熊本城の石垣の崩壊や、熊本城内にあった陸軍第六師団の被害、墓石の転倒状況、城下町での仮小屋の風景など、11枚の写真を掲載した写真帖が国立科学博物館に残されている。写真撮影のポイントは不明であるために完全に同じ場所か分からないが、明治熊本地震で石垣が崩壊した飯田丸や西出丸、平左衛門丸は、平成28年熊本地震でも崩壊している。富重は軍や県の依頼によって写真を撮影する御用写真師でもあり、軍や県、地震学会の依頼で撮影したものかどうかの経緯は不明であるが、熊本へ震災状況の視察にやってきた侍従に県知事からこれらの写真が寄贈されていることから(水島, 1899, 熊本明治震災日記)、県の依頼で撮影したものかもしれない。これらの写真は、日本の地震被害を写した最初の写真と思われる、国立科学博物館ホームページ「国立科学博物館地震資料室」(http://www.kahaku.go.jp/research/db/science_engineering/namazu/index.html)にて公開している。

この地震の際には、帝国大学理科大学(現東京大学理学部)の小藤文次郎や関谷清景、長岡半太郎(当時は大学院生)といった研究者が現地調査を行っている。大きな被害を引き起こした地震の近代的調査としては、この熊本地震がほぼ初めての例となった。地震から11日後の8月8日に現地入りした長岡は、熊本市の西にある金峰山周辺の町村で建物被害や地割れを調べ、ノートや手帳に調査状況や建物被害、地割れ等の被害地点のスケッチを残しており、それらが国立科学博物館に科学者資料として保存されている。

古い地震の被害状況を窺い知ることができる資料としては絵図が有効であるが、国立科学博物館では明治熊本地震の絵図も所蔵している。明治22年7月30日印刷、8月出版と記された「熊本県下大地震の実況」絵図は、家屋が倒壊し、下敷きになっている人々が描かれている。また、被害の状況を記す文章も書かれており、「実に近年稀なる大地震なり」と記されている。

歴史上、熊本地方は何度も大地震に見舞われているが、平成28年熊本地震が起きた際、過去に熊本で大きな地震が起きたとは知らなかったという人が多かったことから、被害を伴う地震が稀であるために、大地震について後世に継承されていなかったと思われる。

キーワード：明治熊本地震、地震被害写真、科学者資料

Keywords: Meiji Kumamoto earthquake, photo collection on the damage by earthquake, archival materials on scientists

一人一人が2016年熊本・大分での一連の地震にて強震動に遭った回数

－学校教育や耐震基準の再考に向け何を明らかにすべきか－

How many times do people feel strong ground motions of the JMA's seismic intensity of 5- or greater by the 2016 Kumamoto Earthquakes?

*根本 泰雄¹、畠山 正恒²、南島 正重³、伊東 明彦⁴

*Hiroo Nemoto¹, Masatsune Hatakeyama², Masashige Minamishima³, Akihiko Ito⁴

1.桜美林大学自然科学系、2.聖光学院中学・高等学校、3.東京都立両国高等学校・附属中学校、4.宇都宮大学教育学部

1.Division of Natural Sciences, J.F.Oberlin University, 2.Seikou Gakuin Secondary School, 3.Tokyo Metropolitan Ryogoku Secondary School, 4.Faculty of Education, Utsunomiya University

熊本・大分にて2016年4月から発生している一連の地震（以降、2016熊本地震と記す）にて、前震－本震－余震型の地震活動が生じている。この2016熊本地震による4月14日の前震以降の16日間を眺めると、震度5弱以上を記録した震度観測点が存在する地震の発生回数は18回であった。視点を変えて一つ一つの震度観測点から見た場合、震度5弱以上を記録した地震は当該期間に何回あったのであろうか。この結果が、今後の地震学へ与える意味、耐震基準の再考へ与える意味、および地震教育、地震防災・減災教育へ与える意味を考えてみたい。

本研究では、気象庁震度速報、気象庁震度データベース、K-NETおよびKiK-netのデータ、小学校の教科「理科」の現行教科書（全教科書：6社から6種類）、中学校の教科「理科」の現行教科書（全教科書：5社から5種類）、高等学校の教科「理科」の科目「科学と人間生活」および科目「地学基礎」それぞれの現行教科書（前者が4社から4種類の全教科書、後者が5社から5種類の全教科書）を用いた。

解析の結果、2016熊本地震にて震度5弱以上の揺れを当該期間でもっとも多く測定した震度観測点は3点あり、その回数は7回であった。これらの観測点は、玉名市天水町（6弱を2回、5強を1回、5弱を4回）、益城町宮園（7を2回、6弱を1回、5強を1回、5弱を3回）、熊本市西区春日（6強を1回、6弱を1回、5強を1回、5弱を4回）である。一方、平成16年（2004年）中越地震にて震度5弱以上の揺れを本震からの16日間でもっとも多く測定した震度観測点は小千谷市城内であり、6強を2回、6弱を2回、5強を7回、5弱を5回であった。ただし、K-NETの小千谷観測点（NIG019）の記録は本震にて震度7相当を示しており（例えば、石井ほか、2007）、小千谷市城内では最大余震でも震度6強であったことから、近傍の軟弱地盤上では震度7が2回続いた可能性も否定できない。

また、地震調査研究推進本部（1998）によるまとめなどを参考に気象庁データベースを用いた調査を行った。その結果、内陸型地震にて前震－本震－余震型となった地震活動で前震がマグニチュード6.4以上であった地震はこれまで記録されていなかったが、今回の前震はマグニチュード6.5であったことから、内陸型地震の地震活動のあり方などを見直す必要性が示唆される観測結果を得たといえる。

学校教育に目を転じると、小学校および中学校「理科」の教科書に前震、本震、余震といった用語は現在記されていない。高等学校の教科書でも、前震に触れているのは「地学基礎」の1社からの1種類だけである。現段階では以上の結果から、次の3つの課題を解決する必要性が浮き彫りになったと考えている。

- （1） 震度7に連続して襲われたのが日本で初めてと本当にいえるのか。
- （2） 内陸型地震にてマグニチュード6.4以上の地震が起きた場合、その後の地震活動として本震－余震型を想定するだけで良いのか。
- （（1）、（2）の結果から、耐震基準の見直しをどうしたら良いのか。）
- （3） 学校教育にて地震活動、特に、前震、本震、余震をどう教える必要があり、強震動に関して何を教える必要があるのか。

本講演では、2016熊本地震から得られた教訓を、地震学、地震工学、地震教育、地震防災・減災教育にどう活かしていくべきか、結果の考察を通して議論を試みたい。

謝辞：

本研究では、気象庁震度速報、気象庁震度データベース、国立研究開発法人 防災科学技術研究所のK-NETおよ

びKiK-netのデータを使用しました。ここに記して深謝します。

参考文献：

石井やよい・後藤浩之・澤田純男，新潟県中越地震の震源インバージョンによる川口町の地震動特性の考察，地震工学論文集，29(0)，153-160，2007.

地震調査研究推進本部，余震の確率評価手法について，1998.

小学校・中学校・高等学校の現行教科書全25冊（小学校6冊，中学校10冊，高等学校4冊+5冊）.

キーワード：平成28年（2016年）熊本地震、震度観測点、震度、理科・地学基礎、前震一本震一余震型、耐震基準

Keywords: The 2016 Kumamoto Earthquakes, Seismic Intensity Observation Station, Seismic Intensity, Rika (Natural Sciences) and Basic Chigaku (Basic Earth Science), Foreshock-Mainshock-Aftershock Type, Standards for Earthquake Resistance

2016熊本地震から浮かび上がる新たな「想定外」生成のしくみ

Mechanism of creation of an "unexpected" arising from 2016 Kumamoto Earthquakes

*林 衛¹*Mamoru HAYASHI¹

1.富山大学人間発達科学部

1.University of TOYAMA

2016年の熊本地震は、(1)近代以降の地震災害の経験、(2)地元の民間研究組織(NPO法人熊本自然災害研究会、第1回研究会は1992年11月27日開催)や地震カタログ、研究書類による知識の発掘と共有、(3)中央政府によるハザードマップ作成などの被害予想・警鐘、(4)熊本県や熊本市、益城町といった地方自治体による耐震化施策の進行の四つの蓄積があった地域で発生した。いわば想定される事態が蓄積にもとづく想定に沿って生じたにもかかわらず、(5)「まさか、熊本では」「前代未聞の「前震」」「余震経験則 通用せず」などと、蓄積されていたはずの内容が「想定外」だと語られている点で特徴的である。

そこで本研究では、防災・減災の実現のため、上記(1)から(4)の蓄積と(5)の「想定外」の語られ方の内容を整理し、惨事伝承の困難性、すなわち、「災害は忘れた時分にくる」(寺田寅彦のことばとされる)原因をリスクコミュニケーションの観点から考察する。

1889明治熊本地震では、1889年7月28日午後11時49分に本震(劇震と表示)、8月3日午前2時18分に最大余震である劇震が再び発生。その間、5日あまりであった。21日間に300回足らず観測された余震分布は、二つの劇震による余震経験則に従った発生パターンを示している。1894年の「余震経験則」を発表した大森房吉ら同時代の地震学者たちも、明治熊本地震の事実を目の当たりにしていたことになる。1889年(明治22年)その年に市政誕生したばかりの熊本が、水害とその5日後が地震災害に襲われた。それを受け翌1890年に熊本にも気象台が開設されている。その翌1891年のM8級内陸直下地震(濃尾地震)を契機に震災予防調査会が設立されることになる。明治熊本地震は、近代の形成期に生じた直下地震であった(表俊一郎・久保寺章:都市直下地震 熊本地震から兵庫県南部地震まで、古今書院(1998))。

1975熊本県北東部の地震では、1月22日13時40分(M5.5)、1月23日23時19分(M6.1)と阿蘇地方での連発(前震→本震型)。3か月後の4月21日には大分県湯布院付近でM6.4の誘発地震が発生。『日本被害地震総覧 599-2012』(東京大学出版会(2013))では、見開きにちょうど三つの地震の震度分布図が並ぶ形で両県での地震被害とともに記録されている。

南隣の鹿児島県で発生した1997年の鹿児島県北西部地震でも、3月26日(M6.5)と5月13日(M6.3)の連発が知られている。

2000年6月8日の9時32分の熊本県熊本地方の地震(深さ10km, M4.8)では、嘉島町、富合町で震度5弱が記録され、熊本市、益城町など熊本県中部で住家一部破損等の被害が発生している(最大規模の余震はM3.9が3回)。

「益城町建築物耐震改修計画」(2012年策定、2016年3月改訂)では、「熊本県には、上述した布田川・日奈久断層帯をはじめとする多くの活断層が県内を縦横断…今後30年の間に地震が発生する確率は0~6%と推定…内閣府の「地震防災マップ作成技術資料」の記載されている「全国どこでも起こりうる直下の地震」(マグニチュード6.9)が益城町で発生した場合には最大震度5強~7となることが予測…福岡県など地震が少ないといわれてきた地域での大規模な地震が発生したことからも、速やかな地震対策の推進が望まれています」との認識のもと、2005度の中央防災会議報告を受け、住宅、特定建築物を2015年度までに90%耐震化する計画がうたわれている。

ところが、連発型の地震発生があたかも珍しいことであるかのように、また、震度7の連続が被害をもたらした事実が震度7単独ならば安全であるかのように語られてしまっている。ここに、事実を直視しようとせず、惨事伝承を忌避しようとする「想定外」生成のしくみがみてとれる。

2016熊本地震の前震→本震の二つの「震度7」が「小分け」されずに一発の「本震」として発生した場合は、現行計測震度では「震度7」1回と記録されるが、住宅倒壊は一気に進んだであろう。「本震」は就寝後の真夜中の発生であった。したがって、震度7「連発」はむしろ「不幸中の幸い」であったという視点も忘れてはならない。誰のため何のために地球惑星科学が存在しているのか改めて問われる、科学コミュニケーションの問題でもある。

キーワード：1889明治熊本地震、前代未聞主義、惨事伝承の困難、地球惑星科学の科学コミュニケーション、リスクコミュニケーション

Keywords: Meiji Kumamoto Earthquake Disaster in 1889, Consider Everything as "Unprecedented", Difficulty to take into consideration the disaster experiences, Science communication for Earth and Planetary Sciences and Society, Risk Communication

1889 Meiji Kumamoto Earth Quakes (From July 28 to August 18)

計	月日																												震動表
	全十八日	全十七日	全十六日	全十五日	全十四日	全十三日	全十二日	全十一日	全十日	全九日	全八日	全七日	全六日	全五日	全四日	全三日	全二日	八月一日	全三十一日	全卅日	全廿九日	七月廿八日	震力	劇					
二																一						午後十一時四十九分	震	稍					
三九				一							一	一		二	三	一	一	一	五	二	三		震	強					
一〇	一	三	五	四	一	四	四	四	四	一	五	三	五	五	一	一	八		六	一	〇	一	震	鳴					
一三	四	三	七	六	四	五	一	二	二	一	六		五	六	九	一	三	七	四	二	一	三	動	合					
二九	五	六	一	一	五	九	五	六	六	二	一	四	一	一	二	三	五	八	一	一	五	七	計	一					

小藤文次郎：熊本地震概察報告，地学雑誌（1889）から
 21日間に292回の「余震」が熊本県庁にて観測された（事務
 繁雑時などの記録漏れもありえる旨の注記あり）。
 7月28日午後11時49分の「本震」（M6.3）から5日後の8月3
 日午前2時18分に、この表で同ランクの「劇震」が発生，余震
 が再び活発化。