

ShakeAlert: Using early warnings for earthquakes along the US West Coast

*Hellweg Margaret¹, Richard Allen¹, Jennifer Strauss¹

1. Berkeley Seismological Lab

In 2016, the ShakeAlert earthquake early warning (EEW) system for the US West Coast progressed from demonstration to production prototype operations. This progress has been funded by the US Geological Survey and the Gordon & Betty Moore Foundation. Earthquake early warning (EEW) is the ability to detect an earthquake quickly and provide a few seconds of warning before destructive shaking starts. Alerts from an EEW system can improve resilience if their recipients have developed plans for responding and act on them. During the demonstration phase, beta-test users from critical industries and institutions in US West Coast states were recruited for the EEW system, to observe the alerts produced, think about actions their organization could take and provide feedback for improving the system. With the advent of the prototype production system, some users are developing and implementing actions - planned responses to an alert that would protect lives and reduce losses. We also continue to test and develop alert delivery mechanisms, procedures and products. Our most effective collaboration has been with the Bay Area Rapid Transit District (BART). Since 2012 the BART system has been using EEW information to automatically slow trains. BART receives alerts via the internet and feeds them into the train operating system. In both the 2014 South Napa (M6) earthquake and a M5 earthquake near The Geysers, CA, the BART operations center received EEW alerts from ShakeAlert and their automatic actions worked as planned. Most recently, PG&E, a northern California gas and electrical power company has begun a pilot project to explore and implement personal and automatic actions to ensure staff safety and improve resilience. Other pilot project participants include additional mass transit organizations and utilities, emergency management offices at various levels of government, school districts, pipeline operators, mass media organizations such as radio and television, and medical centers.

Keywords: Earthquake Early Warning, Seismology, earthquakes and society, rapid earthquake information

Real-Time Risk Reduction Through Early Warning, Earthquake and Volcano Monitoring in Southern California, USA

*Egill Hauksson¹, Jennifer Andrews¹, Rayo Bhadha¹, Ellen Yu¹, Elizabeth Cochran², Valerie Thomas², Robert Clayton¹, Thomas Heaton²

1. Caltech, 2. USGS

More than 20 million people live in southern California, astride the Pacific and North America plate boundary. Caltech and USGS operate the Southern California Seismic Network (SCSN) to provide timely disaster mitigation in the form of early warning, event notification, ShakeMap, and other data products.

The earthquake early warning (EEW) project (ShakeAlert) analyzes SCSN data to identify the P-waves of earthquakes and issue warnings. The ShakeAlert prototype production system has been operating in a test mode for more than a year. Two point source algorithms report rapid earthquake magnitude and location that are received by UserDisplay and cell phone apps operated by pilot users. In the future, finite source algorithms will be added to the system to improve performance for the largest events.

Real-time processing provides accurate magnitudes and hypocenters within two minutes. Within 5 minutes, an accurate ShakeMap of the peak amplitudes of shaking provides a geographical view of potential damaging shaking for emergency responders. In the same time frame, a seismic moment tensor to identify the causative fault and evaluate tsunami hazards is available. In the case of unusual activity, seismologists provide near real-time situational awareness to warn civic authorities of increased hazards levels. We also operate seismic swarm detectors to identify possible onset of volcanic activity, alerting civic authorities.

The SCSN processes data real-time and routinely archives more than 15,000 earthquakes every year; in case of a large sequence, it may archive more than 60,000 events per year. The Southern California Earthquake Data Center (SCEDC) archives the data and facilitates the use of the SCSN data for scientific research, earthquake engineering, and public communication. All 80TB of data produced by the SCSN are freely distributed via the SCEDC; waveform data are made available online within minutes of the occurrence of an earthquake. The magnitude completeness level since 1981 is M1.8, on average, within the SCSN reporting region. The template-matching catalog that is being constructed for the SCSN will have a completeness level of approximately M0.0, as template matching detects 20 to 30 times more events than the regular catalog.

The performance goals of the SCSN are to deliver data for earthquake early warning (EEW) processing within 0.5 sec as well as a continuous stream of data for archiving and future processing. The SCSN records real-time seismic data from more than 500 stations. To capture data on scale, these stations have 24-bit digitizers with a variety of sensors, including strong motion, broadband, and short-period sensors. By using two sensors at each station, the SCSN has the capability of recording data on scale for a magnitude range from < M0 to > M8. To ensure timely data delivery and redundancy in data communications the SCSN uses cell modems, microwave, radio, and satellite links for data communications. We use various tools to monitor the state of health of stations, primarily to detect data latency, and sudden changes in data quality. To ensure data integrity the SCSN uses virtual private networking (VPN) to secure data delivery from remote stations. For data processing we use AQMS and earthworm software, and parametric data are stored in an Oracle database. Metadata are maintained in

the Station Information System Database (SIS), which is a relational database designed to store equipment inventory and produce metadata information in a variety of formats, including dataless SEED and station XML metadata information.

To take advantage of publicly available cloud computing facilities, we have already migrated some of our operations into the Amazon web services cloud (AWS). We plan to distribute products from the AWS and maintain a long-term archive in the AWS Glacier facility. This will significantly reduce the vulnerability of SCSN and SCEDC operations during future earthquakes in southern California.

Keywords: earthquake monitoring, earthquake early warning, seismicity & seismic network, data processing, security & cloud computing, ShakeMap, Reducing risk from natural hazards

An International Platform on Earthquake Early Warning Systems under the aegis of UNESCO

Jair Torres¹, Margherita Fanchiotti¹, *Richard Allen²

1. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, Paris, France, 2. University of California, Berkeley, USA

The Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015-2030 recognizes the need to “substantially increase the availability of, and access to, multi-hazard early warning systems and disaster risk information and assessments to the people by 2030” as one of its global targets (target “g”). While considerable progress has been made in recent decades, early warning systems continue to be less developed for geo-hazards and significant challenges remain in advancing the development of these systems for specific hazards, particularly for sudden onset hazards such as earthquakes. An earthquake early warning system helps in disseminating timely information about potentially catastrophic earthquake hazards to the public, emergency managers and the private sector to provide enough time to implement automatized emergency measures. In recent years, earthquake early warning systems have been developed independently in few countries. Provided that, in many instances, the development of such a system still requires further testing, increased density coverage in seismic observation stations, regional coordination, and further scientific understanding, there is a strong need to enhance the technical and operational capacities required for these systems and to further understand their implications for policy. In an effort to address this gap, in December 2015, UNESCO launched the "International Platform on Earthquake Early Warning Systems". The main objective of the Platform is to assess the current state of the art in the development and implementation of earthquake early warning systems worldwide, and to foster dialogue and international cooperation for capacity building around these systems. Here we will discuss the opportunities and challenges for the establishment of earthquake early warning systems around the world, as well as the aim, objectives and expected contributions of this newly established Platform.

Keywords: Earthquake, Early Warning, Geo-hazards

Testing a real-time GNSS-based earthquake and tsunami early warning system

*Christine J Ruhl¹, Diego Melgar¹, Ronni Grapenthin², Sebastian Riquelme³, Mario Aranha¹, Richard M Allen¹

1. University of California Berkeley, 2. New Mexico Tech, 3. Centro Sismologico Nacional, Universidad de Chile

The goal of GNSS-based earthquake early warning (EEW) is to estimate magnitude, without saturation, and fault finiteness for the largest, most damaging earthquakes. This is especially important for tsunamigenic earthquakes, where slip on a finite fault can be used to guide local tsunami hazard warning in real-time. Because large events ($M > 6.5$) are infrequent, geodetic algorithms are not regularly exercised and tested. It is therefore necessary to assess the performance of such algorithms using synthetic earthquakes and geodetically-recorded earthquakes worldwide. We will discuss the testing and performance of the Geodetic Alarm System (G-larmS) using both real and synthetic earthquake data. G-larmS has been in continuous operation since 2014 using event triggers from the ShakeAlert EEW system and real-time position time series from a triangulated network of GPS stations along the west coast of the United States. G-larmS uses high rate (1 Hz), low latency (< 5 s), accurate positioning (cm level) time series data from a regional GPS network and P-wave event triggers from the ShakeAlert EEW system. It extracts static offsets from real-time GPS time series upon S-wave arrival and performs a least squares inversion on these offsets to determine slip on a finite fault. During its 3 years of operation, G-larmS has only been tested in real-time by the 2014 M6 Napa, California earthquake. We therefore develop a catalog of 1300 Cascadia megathrust scenarios and 4000 individual ruptures on 25 faults in California built from realistic 3D geometries in order to test the system. Synthetic long-period 1Hz displacement waveforms were obtained from a new stochastic kinematic slip distribution generation method (Fakequakes). Waveforms are validated by direct comparison to peak P-wave displacement scaling laws, peak ground displacement GMPEs obtained from high-rate GPS observations of large events worldwide, and NGA-West2 spectral acceleration GMPEs at 10s period. In addition to the synthetic catalog, we also run real-time simulations for the recent M7.6 Melinka, Chile earthquake and the 2011 M9 Tohoku-Oki earthquake. We use the resulting finite fault sources to simulate tsunami hazards and demonstrate the usefulness of geodetic-algorithms for tsunami early warning.

Keywords: Earthquake Early Warning, Tsunami Early Warning

揺れの数値予報：経験的な地震動予測式に対応した距離減衰の導入

Numerical Shake Prediction for Earthquake Early Warning: Introduction of attenuation relation consistent with empirical GMPEs

*干場 充之¹、小木 曾 仁¹

*Mitsuyuki Hoshiba¹, Masashi Ogiso¹

1. 気象研究所

1. Meteorological Research Institute

Hoshiba and Aoki (2015) により提案された“揺れの数値予報”は、新しい地震即時予測の手法であり、従来の震源情報（震源位置とマグニチュード）の即時推定に基づく方法と異なり、震源情報を必要としない。それに代わって、データ同化手法を用いて地震波動場の現状を正確に把握し、その後、波動伝播の物理（波動伝播シミュレーション）を用いて未来の波動場を予測するものである。これは、気象分野の天気の数値予報の考え方に近い。

この揺れの数値予報は、近い未来（つまり、近傍の予測点）の予測に対しては、従来の震源情報に基づく方法よりも精度の高い予測を示したが、遠い未来（遠い予測点）では必ずしもそうではなかった。これは、Hoshiba and Aoki (2015)では、2次元での波動エネルギー（振幅²）の伝播のシミュレーションを用いたためである。波動エネルギーの距離減衰は、2次元では(距離)⁻¹に比例するが、3次元では(距離)⁻²である。多くの経験的な地震動予測式（GMPE）の距離減衰は、この-1と-2乗の間にあることが多く、実際、現在、気象庁が現在緊急地震速報で用いているものは、-1.72乗である。なお、波動エネルギー伝播のシミュレーションを3次元で計算することはそれほど難しくはないものの、問題は、地震観測は地表（つまり、2次元）に限られていることであり、この場合、データ同化を行ったとしても地表付近にしか作用しない。

この2次元と3次元の違いを克服し、(-1)と(-2)の間の任意の距離減衰関係を仮想的に実現するために、距離減衰に新たなパラメータを導入した。これにより、経験的なGMPEと等価な距離減衰関係を与えることが出来る。そして、遠い未来においても精度のよい予測が可能となる。

2004年中越地震や2016年熊本地震などを例に取り、予測結果を示す。

キーワード：地震動予測、緊急地震速報、地震動予測式

Keywords: prediction of seismic ground motion, earthquake early warning, GMPE

Reducing risks from earthquakes: earthquake alert and site-effective action in industries

*Fumiko Tajima¹

1. University of California at Irvine

Expectations for earthquake early warning (EEW) are somewhat replacing that for earthquake prediction in the past. Alerts of strong hits can be delivered from a big network system to areas that may be affected, but only seconds before arrivals. Nonetheless, people in public may overly expect a timely accurate warning, and criticize it when the actual ground motions turn to be different from EEW. There are many algorithm developments that attempt to resolve issues related to accurate prediction of ground-motions using big network operations with a station interval of ~20 km in real-time. However, the spatial resolution covered by a big network is typically on the order of ~10 km while the variation of actual ground motions can be in a much smaller scale. Our exploratory studies have shown short wavelength variation of ground motions recorded by a dense local network (~1.5km) that also depends on the incident azimuths of seismic waves to sites. This situation evokes concerns about EEWs provided by a big network and issues of on-site monitoring systems. In high-tech industries buildings were generally built with a conventional earthquake-resistant design that meets a high standard building code and are supposed to have the strength to avoid structural collapses. In addition they are more concerned about how to protect the contents in the company buildings, expensive equipment and machines from strong ground shaking. Machines may be in operation with high speeds and/or high voltage current etc. that are vulnerable to strong shaking. It may take more than seconds to fully stop the operations after the switches are turned off with an alert. If the machines are damaged, they could leak hazardous chemicals. There are many other issues in addition to EEW to make earthquake safety in industries. I will discuss a case study of site-effective seismic safety configuration at a high-tech company.

Keywords: Earthquake Alert, Site Effective Action

A Rapid Earthquake Detection Algorithm for Earthquake Early Warning: A Bayesian Approach using Single Station Waveforms and Seismicity Forecast

*Lucy Yin¹, Jennifer Andrews¹, Thomas Heaton¹

1. California Institute of Technology

The utility of Earthquake Early Warning (EEW) relies on the robust and rapid classification of near-site earthquake source signals from noise and teleseismic arrivals. We propose a new method to achieve this, which uses the three-component acceleration and velocity waveform data and Epidemic-Type Aftershock Sequence (ETAS) seismicity forecast information in parallel, producing the posterior prediction by combining the predictions from the heterogeneous sources using a Bayesian probabilistic approach. We collected 2,446 three-component strong-motion records for training and testing. The rapid prediction is available as quickly as 0.5 s after the trigger at a single station, achieving a precision of 98% at the first prediction with the classification accuracy increasing with time. The leave-one-out validation method also demonstrates confidence of robust performance for future earthquake signal detections. Our new strategy has shown promising results and the implementation of this methodology could provide significantly faster and more reliable EEW warnings to regions near the earthquake's epicenter where the strongest shaking is observed.

Identification of nonlinear response and estimation of S-wave amplifications at ocean bottom seismograph sites in Sagami Bay area, Japan

*Yadab Prasad Dhakal¹, Shin Aoi¹, Takashi Kunugi¹, Wataru Suzuki¹, Takeshi Kimura¹

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

Deployments of large scale ocean bottom networks that comprise seismometers and pressure gauges (e.g., DONET in the Nankai Trough area, S-net in the Japan Trench area) are expected to contribute to earthquake and tsunami early warnings by prompt detection of earthquakes at subduction zones. The amplification effects of soft sediments at the ocean bottom seismograph (OBS) sites on the overestimation of the displacement-amplitude-based magnitudes have already been discussed (Hayashimoto and Hoshihara 2013; Nakamura et al. 2015). On the other hand, Hayashimoto et al. (2014) analyzed nonlinear site effects at three Off-Kushiro OBS sites which showed that recordings having PGA 100 cm/s^2 or greater display the nonlinear site response. Because the OBS sites are located on soft sediments, the sites may undergo large deformations during major earthquakes causing unpredictable site response. In this paper, we investigated nonlinear site effects and site amplifications at six K-NET OBS sites namely KNG201, KNG202, KNG203, KNG204, KNG205, and KNG206 located in Sagami Bay area of Japan. We employed the method of Wen et al. (2006) to identify the nonlinearity and the equation proposed by Noguchi and Sasatani (2011) to quantify the degree of nonlinearity. The methodologies use horizontal-to-vertical spectral ratios of S-wave recordings to identify and estimate the degree of nonlinearity (DNL). Our results showed that strong-motion recordings having horizontal vector PGA greater than 50 to 150 cm/s^2 , depending on site, display clear signatures of nonlinear site response. For PGAs $> 100 \text{ cm/s}^2$, peak frequencies of strong-motions are found to be shifted between about 20 % and 55% of the peak frequencies of weak-motions in the analyzed data ranges (PGA $\sim 450 \text{ cm/s}^2$). Similarly, the reduction of spectral ratios occurs by about 5 % to 70 % of the weak-motion peak spectral ratios. After identifying the thresholds for nonlinear response, we used the S-wave part of horizontal components having PGAs smaller than the thresholds to estimate amplifications at 0.2 Hz to 20 Hz by spectral inversion method. Our results showed amplification factors of about 10 to 50 at frequencies between 0.2 Hz and 10 Hz. In the case of strong shakings, the amplification factors may be substantially modified by nonlinear response and this effect should be investigated for real time application of the recorded motions. We describe in detail the data, methodology, and results of our study for identification of nonlinear site response at the OBS sites in (Dhakal et al., 2017).

References

- Dhakal YP, Aoi S, Kunugi T, Suzuki W, Kimura T (2017) Assessment of nonlinear site response at the ocean bottom seismograph sites based on S-wave horizontal-to-vertical spectral ratios: a study at the Sagami Bay area K-NET sites in Japan. *Earth, Planets and Space* 69:29, DOI: 10.1186/s40623-017-0615-5.
- Hayashimoto N, Hoshihara M (2013) Examination of travel time correction and magnitude correction of Tonankai ocean bottom seismographs for earthquake early warning. *Quart J Seismol* 76:69-81 (in Japanese with English abstract).
- Hayashimoto N, Nakamura T, Hoshihara M (2014) The characteristics of unusual OBS data exposed to strong shaking and the influence of applying these data to EEW processing: examples of Off-Kushiro OBS, JAMSTEC. AGU Fall Meeting, S33C-4543.
- Nakamura T, Takenaka H, Okamoto T, Ohri M., Tsuboi S (2015) Long-period ocean-bottom motions in the

source areas of large subduction earthquakes. *Sci. Rep.*, 5, 16648.

Noguchi S, Sasatani T (2011) Nonlinear soil response and its effects on strong ground motions during the 2003 Miyagi-Oki intraslab earthquake. *Zisin* 63:165-187 (in Japanese with English abstract).

Wen KL, Chang TM, Lin CM, Chiang HJ (2006) Identification of nonlinear site response using the H/V spectral ratio method. *Terr Atmos Ocean Sci* 17(3):533-546.

Keywords: Nonlinear site response, Ocean bottom seismograph, Site amplification

Automatic Shutdown System in Gas Regulators for Real-Time Seismic Risk Reduction of a Populated City: Bursa, Turkey

*Serif BARIS¹, Suleyman Tunc², Osman Bozkurt³, Gökalp Kaman³, Deniz Caka¹, Berna Tunc¹, Heiko Woith⁴, Birger Lühr⁴

1. Kocaeli University, Engineering Faculty, Department of Geophysics, 2. Sentez Earth and Structural Engineering Corporation, 3. Bursagaz, Bursa Inner city Natural Gas Distribution Commerce and Commitment JSC, 4. GFZ German Research Centre For Geosciences

Bursa is a city located within a region of first grade earthquake risk, and it has occasionally suffered devastating and massive earthquakes for more than 2000 years. After a large disastrous earthquake in Izmit in 1999, many earth scientists are expecting the next large earthquake on the western extension of the Izmit earthquake rupture zone. Bursa is located south of the western end of the 1999 earthquake rupture and there are many active faults in and around Bursa. Bursa has now almost three million inhabitants, many heavy/industrial factories and historical monuments. Most of the people are using natural gas for heating, cooking and production in their buildings. Bursagaz is an inner-city gas distribution company and they are aware of the high seismic risk in Bursa city, so, they want to reduce casualties, fires and explosions in their natural gas district regulators and main pipelines. For these reasons, we have started to install accelerometers inside some of the main gas regulators and set up an algorithm for initiating an automatic gas shutdown system into their network for reducing the seismic risk in the city. We plan to install seismic instrumentation within a four-year-project and each year the seismic network will be growing by installing new accelerometers. We are also testing different algorithms to reduce false alarms aiming at a more secure and robust shutdown system. There are five different active fault lines in and around Bursa city having potential for creating M6.5 or larger earthquakes. Our first aim is to install accelerometers inside the inner city regulators located on and next to the main fault crossing highly populated regions of Bursa city center as a priority. By installing accelerometers very close to the active fault, we can detect PGAs more quickly and effectively. In the first phase of the project, we installed 15 accelerometers in the field and provided data collection and processing algorithm software in Bursagaz central building. All digital data are transferred by using GSM lines to this data center. In the second phase of the project, we installed another 10 accelerometers along the second active fault located in the Bursa city center. The project has not completed yet. During third and fourth project phases, the total number of accelerometers will be reach up to 50 within 2 years. At present, Bursagaz has 163 district regulators working in the city and all these regulators are connected to the company center with online SCADA communication system. Our main idea is to install one accelerometer at the central regulator and controlling at several district regulators in the surrounding to this instrument. Whenever the processing algorithm detects a certain level of acceleration due to a moderate or large earthquake, it will firstly observe PGA values for each single instrument and then calculate PGA values by using attenuation relationships for all regulators to finally compare these values with predefined threshold values. In case of exceedance of a threshold level, a shut-off signal will be send to those district regulators having higher PGA values than their threshold values. The installed algorithm will also calculate and estimate damage information in gas distribution infrastructure and create damage distribution maps very quickly and correctly. This information will be send to Bursagaz Technical and Emergency Response Teams that they could take all necessary actions to mitigate the disaster quickly and effectively. Our second aim is to use

Bursagaz seismic network as a core unit of Bursa City Earthquake Early Warning and Rapid Response System. The project team is going to cooperate with local authorities to integrate their system with the national network and increase the number of accelerometers for having a better station coverage for implementing an early warning and rapid response system for Bursa. To this aim, ArNET seismic network is integrated with Bursagaz network. Thus ArNET data of fifteen online seismic stations will be combined with Bursagaz data in the Bursagaz operation center. The SEISAN and SeisComp data acquisition and automatic location software are already installed and at present local earthquakes are monitored and located automatically. We are still working on the improvement of the system to reduce false alarms and time delays of information about location and magnitudes of earthquakes. Installation procedure of Bursagaz Real-Time Seismic Risk Reduction System, algorithms of automatic shutdown system, integration of seismic monitoring network, recorded events, system response, combination and integration with earthquake early warning and rapid response system will be discussed.

Keywords: seismic risk, early warning and rapid response, shutdown system

A new methodology for Earthquake Early Warning (EEW) by a high-dense seismic network

*Kenji Kanjo¹

1. Takamisawa cybernetics Co. Ltd

Many of current EEW systems issue estimated intensity distribution maps according to empirical attenuation relationships which require information of source parameters and focal distance. These information are determined based on point source model which is not applicable for finite source model of large earthquakes. EEW is essential for the source area of inland earthquakes where heavy damages are expected. In most cases, EEW is issued lately in the source area which described as a "blind zone". Seismic networks, in case of Japan, are deployed for the determination of hypocenter at about 20-30 km interstation distance. That span delays the detection of P-wave arrivals by about 3-4 s. It should be suitable for the real time monitoring of seismic phenomenon that transfer on about 2.7 km/sec of the rupture, 3.5 km/sec of S waves and 6.0 km/sec of P-waves velocities. In this study, we present a new methodology for EEW which uses peak ground acceleration (PGA) estimated from P wave portion, taking advantage of the differential velocity (i.e., ~ 1.73) and the amplitude ratio (i.e., $\sim 1/5$) of P and S-waves. The efficiency of this method suggests the distribution of a high-dense seismic network of 5 km interstation distance, considering a span distance less than that of velocity of P-wave (i.e., 6 km/s). The slowness analysis of P waves tells information of the rupture starting point and its depth. Firstly, peak ground acceleration (PGA) on free surface is estimated from the maximum P-wave amplitude in one-second time step until the arrival of S-wave at the first detected station, and then adjusted to that on the engineering base (PGA_E) by eliminating the site effect. The S wave detection is performed by the amplitude comparison method of the synthesized amplitude of the two horizontal components and the vertical component. Secondly, we estimate PGA_E on far site from a relevant attenuation relationship and adjusted to PGA considering site amplification. Finally, we issue real-time intensity map in every second time step till the declining of PGA. The described method is useful to improve EEW system and also to perform disaster estimation immediately after the occurrence of large event, in order to avoid data extrapolation and the time consuming waveform inversion analysis.

Keywords: EEW, PGA, PGA_E , P estimation, blind zone, real time intensity

強震動P,S 相のPGA比に対する距離減衰式

The Attenuation Relation for Ratio of S- PGA to P-PGA

*藤縄 幸雄¹、野田 洋一²

*Yukio Fujinawa¹, Yoichi Noda²

1. 株式会社ミエルカ防災、2. 有限会社テラテクニカ

1. Mierika Bousai, Ltd., 2. Tierra Tecnica Ltd.

1. 始めに

緊急地震速報の利便性は、予測の早さと精度の高さにかかっている。その目的を達成するため気象庁から発信される緊急地震速報に加えるに、評価点に設置したいわゆるオンサイト地震計データを使う方法が提案・実施されている。我々はP波を使いS波の大きさを予測する方法を追及している。(藤縄ら、2003)。評価点に届いたP波の大きさを計測し、主要動(S波)の強さを、経験的係数(S/P比、 α 係数)を使い予測するものである。評価点での α 係数は、あらかじめ実測値により作成したデータベースを使うこととしているが、新たに任意の評価点での係数 α を求める距離減衰式を作成した。

2. 方法:

評価点での地震動の強さは、伝搬中の減衰と散乱、評価点の非線形効果を含んだ地盤効果などを勘案した距離減衰式によって記述される。放射効果は断層との相対関係で決まるが、従来平均値(S波の場合、0.69)が使われてきた。ここでは、個々のサンプル地震の断層パラメータ(発震機構解、方位角、すべり角、射出角)を使う。任意の方向の地震波(P,S)の大きさは、点震源モデルでは解析的に表されており(Aki and Richards, 2002)、それを使う。係数 α は、S波がゼロになる方向が特異点となるので、除外・平滑化を導入した。減衰効果は幾何減衰、粘性・散乱減衰の効果に分解され、多くの研究成果がある。ここでは川瀬・松尾(2004)の結果を初期値として採用する。サイト効果は線形近似の範囲で地盤増幅率の大きさを表現されるが、ここでは、防災科研の250mメッシュのDBを使う。非線形効果は、藤本・翠川(2006)の結果を使い地盤増幅率、最大速度から算出する。最大速度の算出は、司・翠川(1999)の関係式により求める。このように従来研究成果で得られているパラメータを初期値とし、残差最小の条件で最適パラメータの第2近似を算出する。

その値を使って理論値の第1近似を、地震区(i)の補正值 ν_i を考慮した第2近似、地震区(i)・サイト(j)に対応する補正 ε_{ij} を施した第3近似を求める。

サンプル地震として、首都圏直下型地震と想定されている東京湾北部地震、多摩直下地震、元禄型関東地震、立川断層地震、東海地震に限定し、推定されている破壊域で起きた地震を抽出した。現時点では、マグニチュード(Mw)が4程度、最大で6.5、最小が3.2、全地震データ数は54である。評価点に近いK-NET観測点でのデータをダウンロードし、P、S相の最大加速度、計測震度相当値、卓越周波数、パラメータ(α)及び、発震機構パラメータを使い α 値を算出した。その結果を報告する。

3. 結果

求めた α 係数は、東京湾北部地震(3.7 \pm 1.8)、元禄関東地震(3.5 \pm 1.8)で、デフォルト値(3.4)に近く、立川直下地震では6.0 \pm 1.7でデフォルト値より大きく、東海地震では5.1 \pm 1.1と大きめ、多摩直下地震では2.2 \pm 1.5と小さい結果となった。

要因分析の結果、これまで距離減衰式で無視されてきた放射効果が主要ファクターであることが分かった。さらに、従来の散乱減衰として径方向(評価点と震央を結ぶ方向)の成分だけが考慮されてきたが、横方向の減衰効果を考慮しなければ、観測結果を説明できないことが判明した。その横方向の減衰係数 Q_t をS波のQ値 Q_s の1/nと仮定した。 Q_p に関しては、報告されている結果に相当のばらつきがあることから、 Q_s の1/mとし、n, mを観測と予測の残差が極小となるという条件で求めた。その結果、最適パラメータは、 $Q_{so}=93$, $Q_{po}/Q_{so}=2/3$, S,P波の幾何学的減衰の冪数 $n_s=n_p=0.69$, $Q_t=Q_s/5$ 、という結果となった。

4. 結論

実用化に耐える精度（計測震度の数分の1程度）で α 係数が予測できる距離減衰式を作成できた。任意の評価点での α 値は、震源パラメータ、発震機構、震源との相対位置の入った理論距離減衰式を使い、1次近似値 α_1 がもとまり、さらに破壊域に対する補正項 ν 、破壊域と評価点で決まる補正項 ε を考慮することで、それぞれ、第2近似値 α_2, α_3 がえられる。これにより、P波の強さから主要動の強さをより高い精度で推定できることが分かった。

キーワード：地震早期警報、強震動予測、P,S相のPGA比、距離減衰式、放射影響、2次元減衰

Keywords: Earthquake early Warning, strong motion forecast, Ratio of S- PGA to P-PGA, Attenuation Relation, Radiation Relation, 2D dissipation

高周波地震波を用いた噴火規模の即時推定：噴火微動の震源振幅に基づく噴煙高度の予測式

Realtime estimation of eruption size using high-frequency seismic waves: empirical relations to predict eruption height from the seismic source amplitude of eruption tremor

*森 亜津紗¹、熊谷 博之¹

*Azusa Mori¹, Hiroyuki Kumagai¹

1. 名古屋大学大学院環境学研究科地球環境科学専攻

1. Nagoya University Environmental Studies

噴火時に噴火規模を迅速に把握し、伝達することは、火山周辺の住民や自治体が適切な行動をとるために重要である。噴火規模は噴出量と噴煙高度に基づいて推定されるが、噴火中にこれらを即時的に推定することは難しい。一方、噴火に伴って発生する微動や爆発地震は常時観測ができるが、噴火現象との関係については定量的な理解が進んでいない。そこで我々はこれまでに、即時的な噴火規模の推定法を確立することを目的として、日本などの複数の火山を対象に、噴火微動・爆発地震と噴煙高度の関係を高周波地震波に着目して調べてきた。その結果、最大噴煙高度が、噴火微動では、震源での最大振幅の大きさに相当する量である震源振幅(A_s)のおよそ1/4乗に比例し、またこの関係が噴煙の上昇過程に基づいた噴煙高度モデルと類似していることを明らかにした。これらの結果は、 A_s の値から噴煙高度を推定できる可能性を示唆している。そこで本研究では、 A_s を用いた即時的な噴煙高度の推定の可能性について検討したので、その結果について報告する。

即時的な噴煙高度予測を考えた場合、観測波形の各時刻の振幅から A_s を推定し、最大噴煙高度と A_s のべき乗関係を用いて噴煙高度を推定する必要がある。しかし、最大噴煙高度と A_s のべき乗関係は最大振幅に対してのみ成立するものであり、どの時刻の振幅に対しても常にこのべき乗関係が成立するか確認することが必要となる。そこで、噴煙高度と A_s を時系列で比較した場合の関係性を調べた。比較には、2011年1月26～27日に霧島新燃岳で発生したサブプリニー式噴火の噴煙高度データを用いた。これは気象レーダにより10分間隔で測定されたもので、噴火活動がP1～P3の3つのフェイズに分かれていた。一方、震源振幅についても同様に3つのフェイズに分け、5-10Hzのエンベロープ波形に対して10秒窓で平均振幅を求め、震源距離と非弾性減衰の効果を補正し、時系列化した震源振幅 A_s を推定した。そして噴煙高度データと時間間隔を合わせるために、 A_s について10分毎の最大振幅を求め、10分間隔の時系列データとした。

上記のデータを比較した結果、噴煙高度(H)が6km以上の場合には、噴煙高度と A_s の関係が最大噴煙高度と A_s のべき乗関係に比較的合っていた。一方 H が6km以下の場合では、 A_s と H の関係はべき乗関係では表せず、かつ最大噴煙高度と A_s のべき乗関係から推定される値よりも H の値が小さくなることが分かった。さらに A_s がある値を下回ると、 $H=0$ となるような下限値が存在することが分かった。またこの結果を、トウングラワ火山での最大噴煙高度と A_s の関係と合わせて整理したところ、 A_s と噴煙高度の関係性が、 A_s の値に応じて① A_s が下限値を下回り噴煙が上がらない場合、②対流圏下層まで上昇する場合、③対流圏上層に達する場合の3つに変化することが分かった。そしてこれらの H と A_s の関係を用いて推定した噴煙高度と、実際の噴煙高度の測定値を比較したところ、比較的良く推定値が測定値を再現できた。

噴煙の上昇過程に基づく、これらの噴煙高度と A_s の関係性について以下のように解釈できる。噴煙は火口で与えられた浮力と運動力を原動力として上昇するが、これらの原動力は高度とともに減衰していく。そのため噴煙がさらに上昇し続けるためには、乱流によって周囲の大気を取り込み膨張し、浮力を獲得することが必要となる。このとき大気を取り込み速度は、噴煙の上昇速度に比例する。上昇速度は噴出率によって決まるので、噴出率が大きい場合には、与えられた運動量の影響が減衰しても、噴煙は乱流によって十分な浮力を獲得し、対流圏上層または成層圏まで上昇することができると考えられる。このように浮力のみ依存して噴煙が上昇するとき、プリニー式噴火では、噴煙高度が噴出率の1/4乗に比例するということが理論的に知られてい

る。さらに噴出率が A_s と比例関係にあると考えると、噴煙高度が A_s の1/4乗に比例するべき乗関係が成立する。一方、噴出率が小さい場合には噴煙は効率的に乱流が起こせず、十分な浮力を獲得することができない。よって噴煙は運動量のみを原動力として上昇するため、噴煙高度と A_s の関係がべき乗関係で表せず、さらに噴煙上昇が対流圏下層で止まってしまうと考えられる。このような対流圏上層と下層で噴煙高度と A_s の関係が異なるという考察結果は、上記に示した解析から得られた H と A_s の関係と整合的である。よって、 A_s の値に応じて3つの噴煙高度と A_s の式を使い分ければ、高周波地震波の解析から即時的な噴煙高度の推定が可能であると考えられる。

不均質構造を考慮した「揺れの数値予報」：2016年熊本地震を例に Numerical Shake Prediction incorporating heterogeneous structure: a case for the 2016 Kumamoto Earthquake

*小木曾 仁¹、干場 充之¹、志藤 あずさ²、松本 聡²

*Masashi Ogiso¹, Mitsuyuki Hoshiba¹, Azusa Shito², Satoshi Matsumoto²

1. 気象庁気象研究所、2. 九州大学地震火山観測研究センター

1. Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency, 2. Institute of Seismology and Volcanology, Kyushu University

地震動予測に影響を与えるファクターは、主に震源・伝播経路・観測点近傍の増幅特性(サイト特性)、の3つに大別することができる。これらの影響は、震源情報によらない地震動即時予測手法である「揺れの数値予報」(Hoshiba and Aoki, 2015)ではそれぞれ次のように入り入れられている。

- ・サイト特性は、時系列フィルタ(例えばOgiso et al., 2016)によって補正

- ・震源や伝播経路に由来する地震動の不均質な分布は、観測地震動をデータ同化で適切に内挿することによって、初期値に取り込める

一方、Hoshiba and Aoki (2015)では、初期値から未来の波動場を予測する際に、一様な速度・減衰構造を用いている。予測を行う段階においても、不均質な速度・減衰構造を取り入れれば、地震動の予測精度の向上が見込まれる。本研究では、「揺れの数値予報」スキームにおいて、未来を予測する段階に不均質構造を取り込めるように拡張し、2016年熊本地震を対象に地震動即時予測シミュレーションを行い、不均質構造を取り入れることの効果を検討した。

Hoshiba and Aoki (2015)では、波動伝播は輻射伝達理論に基づいて2次元空間で計算されている。ここで必要な構造パラメータは非弾性減衰・散乱減衰・速度構造の3つである。本研究では、非弾性減衰と散乱減衰はMultiple Time Lapse Window法(MLTWA, Hoshiba, 1993)を用いて、Carcole and Sato (2010)に基づいて推定した。得られた減衰構造は、特に九州地方の活火山や活断層周辺で非弾性減衰や散乱減衰が強いという特徴があった。また、MLTWAを行った際の観測点ごとの見かけ速度を内挿することによって、暫定的な2次元速度分布を推定した。

得られた速度及び減衰構造を用いて、2016年熊本地震の最大地震(Mj7.3)の地震動即時予測シミュレーションを行った。均質媒質を利用した場合に比べ、不均質な減衰・速度構造を考慮することによって震度予測の残差のRMSが10秒後予測の場合で約15%程度改善された。また、20秒後予測の場合には改善の度合いは10秒後予測の場合より高くなった。これらの結果は、「揺れの数値予報」スキームにおいて、より猶予時間の長い予測を行おうとした場合には不均質構造が重要な役割を果たすことが示唆される。

不均質な非弾性及び散乱減衰構造の推定手法にはまだ改良の余地があるが、従来はテクトニクスと関連付けられて議論されてきたMLTWAによって推定された不均質構造は、地震動即時予測にとっても有用な先験情報となりうる。

謝辞

本研究にあたり、防災科研K-NET/KiK-net/Hi-net、及び京都大学、九州大学、気象庁の地震観測ネットワークで観測された波形を使用しました。また、本研究は東京大学地震研究所共同利用プログラムの援助を受けました。

キーワード：地震動即時予測、不均質構造、2016年熊本地震

Keywords: Real time ground motion prediction, Heterogeneous attenuation structure, The 2016 Kumamoto Earthquake

波動場予測手法に基づく緊急地震速報のためのリアルタイムP相識別処理 Real-time P-phase discriminator for earthquake early warning based on wavefield-estimation methods

*小寺 祐貴¹

*Yuki Kodera¹

1. 気象庁気象研究所

1. Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency

M8を超えるような巨大地震発生時の緊急地震速報の予測精度を向上させるために、揺れの数値予報 (Hoshiya and Aoki, 2015) や PLUM法 (小寺・他, 2014) といった、震源推定を介さずに波動場から波動場を直接予測する手法が提案されている。しかしながら、これらの波動場予測手法は、S相による強震動に頼って予測しているのが現状であり、その前に得られるP相の情報を活用できていない。従って、P相の情報を直接予測に活用できれば、より予測の迅速性を高められると期待される。本発表では、V/Hを用いたごく単純なP相検出器を導入し、同検出器とPLUM法とを組み合わせた場合の性能について考察する。

1. P相の識別方法について

地震波の自動フェーズ検知に関する先行研究の多くは、polarityを活用している (例えば Ross and Ben-Zion, 2014)。本研究では、リアルタイム計算の実装が容易な「V/H (加速度の上下動と水平動合成の比)」に着目し、P相の検出を試みる。地震の発生状況によらず「V/H」を連続的に計算し続け、「 $V/H \geq 1.0$ 」を満たしたときに「P相を観測している」と判定する。この単純なP相検出器を、①東北地方太平洋沖地震、②熊本地震M6.5、③熊本地震M7.3の事例へ適用し、有効性を評価した。①～③のいずれにおいても、初動部分のP相は明瞭に見えることが分かった。また、①では破壊開始点近傍のSMGA (Asano and Iwata, 2012) に伴うP相をいくつかの観測点で検出できた (図a)。③では、大分県で発生したM5.7程度の誘発地震によるP相も確認できた (図b)。一方で、理論S波直後に「 $V/H \geq 1.0$ 」を満たす観測点が存在したり、①における福島県沖付近のSMGAのP相が明瞭に検知できなかったりなど、改善の余地があることを示す現象もいくつか見られた。

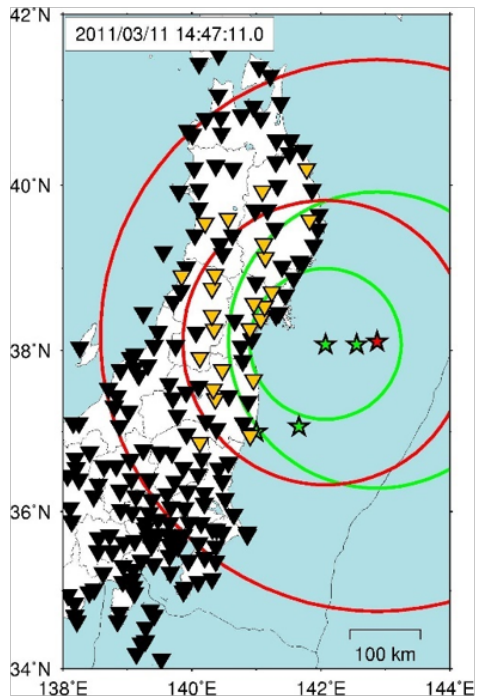
2. PLUM法への適用について

上記の「V/H」によるP相検出器を、PLUM法の予測計算に組み込むことを考える。P相部分の計測震度は、S相部分の計測震度よりも1.0程度小さいことが報告されている (Yamamoto et al., 2008)。この性質をもとにすると、PLUM法の予測計算は次のように修正できる：(1) (観測地点におけるS相の予測) まず、「 $V/H \geq 1.0$ 」である観測点に対して、観測リアルタイム震度に「+1.0」を加える。(2) (PLUM法の通常計算) その後、予測対象点の半径30km以内の観測リアルタイム震度を集め、その最大値を予測値とする。このP相を活用したPLUM法を、①東北地方太平洋沖地震、②熊本地震M6.5、③熊本地震M7.3の事例へ適用した。警報第1報の発表タイミングに注目すると、①では5秒、②および③では1秒の迅速化が見込めることが分かった。また、最終的な震度の予測精度は、①～③いずれも大きな変化はなかった。これは、観測リアルタイム震度を嵩上げしたことによる過大評価の悪影響はそれほど顕著でないことを示している。

キーワード：緊急地震速報、P相識別、PLUM法、揺れの数値予報、SMGA、誘発地震

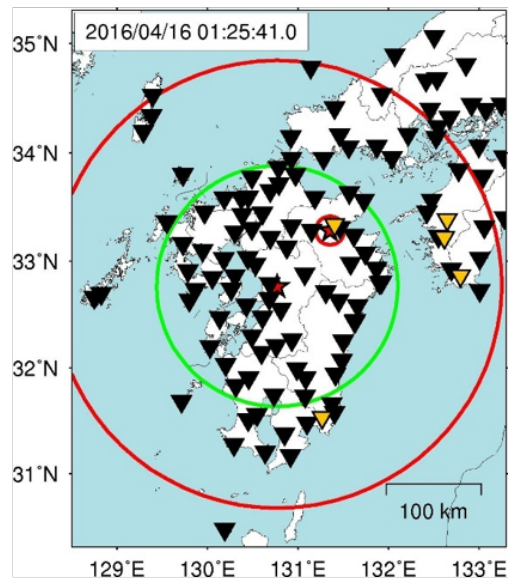
Keywords: earthquake early warning, P-phase discrimination, PLUM method, numerical shake prediction, SMGA, induced earthquake

(a) Tohoku-oki earthquake (Mw 9.0)



- ★ : initial rupture point (JMA hypocenter)
- ★ : SMGA (Asano and Iwata, 2012)
- : theoretical P wave
- : theoretical S wave
- ▼ : station where $V/H \geq 1.0$

(b) Kumamoto earthquake (Mj 7.3)



- ★ : JMA hypocenter
- : theoretical P wave
- : theoretical S wave
- ▼ : station where $V/H \geq 1.0$

Accuracy of real-time GPS/Acoustic measurement using a slackly moored buoy

*今野 美冴¹、木戸 元之^{2,3}、太田 雄策³、高橋 成実^{4,5}、福田 達也⁵、越智 寛⁵、本莊 千枝²、日野 亮太³
 *Misae Imano¹, Motoyuki Kido^{2,3}, Yusaku Ohta³, Narumi Takahashi^{4,5}, Tatsuya Fukuda⁵, Hiroshi Ochi⁵, Chie Honsho², Ryota Hino³

1. 東北大学大学院理学研究科、2. 東北大学災害科学国際研究所、3. 東北大学大学院理学研究科附属地震・火山研究観測予知センター、4. 防災科学研究所、5. 海洋研究開発機構

1. Graduate School of Science, Tohoku University, 2. IRIDeS, Tohoku University, 3. RCPEV, Tohoku University, 4. NIED, 5. JAMSTEC

Coseismic geodetic data near the source region of an offshore large earthquake is crucial for the real-time estimation of its magnitude and source mechanism. GNSS network enables us to obtain onshore geodetic data in real-time. In offshore area, seafloor pressure gauge network (e.g. DONET) provides offshore geodetic data in vertical component. However, offshore geodetic data in horizontal component cannot be obtained in real-time because a seafloor positioning by means of GPS/Acoustic (GPS/A) method is carried out only by a campaign style using a research vessel. For the real-time detection of seafloor crustal movement associated with a large earthquake in subduction zone, we have developed a real-time GPS/A seafloor positioning system using a moored buoy. The buoy is moored by a slack cable which is 1.5 times longer than the water depth against strong current. The seafloor positioning is performed at unpredictable position due to drifting of the buoy, which is generally apart from the array center. This is a unique drawback of buoy observation compared to ship observation because this results in significant systematic positioning error. Therefore, we assess the accuracy of the GPS/A positioning for this ill-conditioned survey.

We have tested the system over a year in Kumano-nada, Nankai Trough and obtained the data for seafloor positioning in real-time as follows. A single acoustic ranging, which consists of continuous 11 pings with 65 sec interval, was carried out once a week and optionally on-demand. This sequence totally amounts to 102 times of ranging during the trial. The buoy position during acoustic ranging was estimated using kinematic PPP technique. The data for seafloor positioning were transmitted to the land station via iridium Short Burst Data service. Due to the low bite rate of the satellite communication, the data were automatically pre-processed and compressed within the buoy. It takes about ten minutes to transmit the compressed data for seafloor positioning after acoustic ranging, while GPS raw data and acoustic waveform data were stored in the buoy logger for technical purpose.

Using the data transmitted in real-time, we can estimate the seafloor array position for each ping. We regard the two standard deviations of the estimated array positions as the accuracy of the GPS/A positioning, because actual movement during the trial is negligible compared to the error. The final accuracy is 0.9/0.7 m in EW/NS component, which is significantly larger than that using a vessel (~0.1 m). During the trial, the buoy is randomly located within a ~4 km radius around the array while a vessel can stay on the above the array center. Apart from the array center, the error propagation of the observation data (e.g. the buoy position, travel time) arises due to uncertainty of the array geometry. Then, we classified the accuracy into two types; the buoy is within or out of the array. The former is 0.3/0.3 m while the one of the latter is 1.0/0.8 m. The seafloor crustal deformation associated with offshore large earthquakes (~M8) on the above of source area is considered to amount to a few meters. For the detection of it, we should improve the accuracy when the buoy is out of the array. There is room for the improvement also by re-determining the array geometry more precisely.

Acknowledgements: This study was supported by JST Cross-ministerial Strategic Innovation Promotion Program (SIP, Reinforcement of resilient function for preventing and mitigating disasters).

キーワード : GPS/音響結合方式、係留ブイ

Keywords: GPS/Acoustic measurement, Moored buoy

電子基準点リアルタイム解析システム（REGARD）による断層モデル即時推定結果

GEONET real-time analysis system for rapid finite fault modeling

*檜山 洋平¹、川元 智司¹、高松 直史¹、佐藤 雄大¹、古屋 智秋¹、阿部 聡¹、太田 雄策²、西村 卓也³

*Yohei Hiyama¹, Satoshi Kawamoto¹, Naofumi Takamatsu¹, Yudai Sato¹, Tomoaki Furuya¹, Satoshi Abe¹, Yusaku Ohta², Takuya NISHIMURA³

1. 国土交通省国土地理院、2. 東北大学大学院理学研究科、3. 京都大学防災研究所

1. Geospatial Information Authority of Japan, 2. Graduate School of Science, Tohoku University, 3. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

国土地理院は全国約1,300ヶ所に設置された電子基準点から構成されるGNSS連続観測網（GEONET）を運用している。GEONETでは、国土地理院（茨城県つくば市）の解析センターにおいて電子基準点で観測された1秒サンプリングのGNSS観測データをリアルタイムで収集し（一部を除く）、解析を行い、その結果を観測データとともに一般に提供している。また、リアルタイムデータは、ネットワークRTKのための補正情報の生成や、リアルタイム解析技術の研究等のために利用されている。

GEONETリアルタイム解析の重要性は平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震（Mw 9.0）の発生により大きく高まった。地震規模がM8を超えるような巨大地震において短周期地震計データから推定された地震規模は飽和することが指摘されている（Ozaki, 2011）。一方で、地震規模は地殻変動量に基づいて推定することもでき、短時間で地震時の地殻変動を得ることが可能なGNSS観測データのリアルタイム解析を用いた地震規模の即時推定技術について、現在大きな期待が寄せられている。

国土地理院では東北大学との共同研究で、GNSS観測データのリアルタイム解析技術、地殻変動検知技術、矩形断層モデル及びすべり分布モデル推定技術等を組み合わせた地震規模即時推定システム（REGARD）を開発した。

REGARDの運用を開始して以降、平成28年（2016年）4月に熊本地震が発生した。4月14日21時26分にM6.5の地震、15日0時03分にM6.4の地震、16日1時25分にM7.3の地震など複数の地震が時間的に近接して発生したが、REGARDの1秒単位のリアルタイム解析により時間分解能が向上したことから、それぞれの地震が地殻変動を伴っていたことが明らかとなった。また、4月16日のM7.3の地震では、REGARDによって電子基準点「長陽」で南西方向に約1m、「熊本」で東北東に約80cmの移動など、非常に大きな地殻変動が観測され、これはGEONETの定常解析の結果と比較して、水平成分は概ね±5cm程度の範囲で一致していた。REGARDの即時推定結果では、地震発生から58秒後に気象庁CMT解のMwと概ね整合するMw6.85が得られ、6分後には布田川断層帯に沿った領域に矩形断層モデルが求まった。

また、2016年10月21日には鳥取県中部でM6.6の地震、11月22日には福島県沖でM7.3の地震が発生した。これらの地震においても地殻変動が観測され、断層モデルが推定されている。しかし、推定された断層モデルは鳥取県中部の場合はやや長大であり、福島県沖の場合は共役な断層であった。いずれの地震でも地殻変動量が小さく適切な断層モデルが推定できなかったものと思われる。

キーワード：GEONET、リアルタイムキネマティックGPS、リアルタイム

Keywords: GEONET, RTK-GPS, real-time

Near-field tsunami forecasting from offshore pressure data in association with the earthquake early warning

Near-field tsunami forecasting from offshore pressure data in association with the earthquake early warning

Horiuchi Akiko¹、Hino Ryota¹、*太田 雄策¹、Tsushima Hiroaki²
Akiko Horiuchi¹, Ryota Hino¹, *Yusaku Ohta¹, Hiroaki Tsushima²

1. Research Center for Prediction of Earthquakes and Volcanic Eruptions, Graduate School of Science, Tohoku University, 2. Meteorological Research Institute

1. Research Center for Prediction of Earthquakes and Volcanic Eruptions, Graduate School of Science, Tohoku University, 2. Meteorological Research Institute

Effective mitigation of tsunami disasters requires tsunami forecasts that are made in real time and the provision of timely evacuation warnings to affected communities. Tsushima et al. (2014) developed tFISH/RAPiD, which is the initial sea surface height distribution estimated from rapidly acquired GNSS data provides robust finite source size information that is incorporated into an offshore tsunami data inversion for reliable tsunami predictions along the near-field coast. In contrast, it is slightly difficult to obtain the reliable initial sea surface height distribution for M7 class earthquakes in the offshore region by RAPiD because of the difficulty of the accurate estimation of small coseismic displacement field compared with more large events.

Based on these backgrounds, we have developed an alternative algorithm that improves near-field tsunami forecasting based on offshore tsunami data after an earthquake by incorporating earthquake early warning (EEW) data. Basic scheme is the same with the tFISH/RAPiD, we estimate the initial sea surface height distribution using the EEW data. We assumed that the single rectangular fault deduced from the scaling law between the earthquake magnitude and the fault dimension.

We retrospectively applied tFISH/EEW to the 2011 Sanriku-Oki earthquake (March 9, 2011, Mw 7.2) based on the actual ocean bottom pressure (OBP) record and EEW information. The predicted results immediately after the earthquake (~2 to 3 min) the arrival times and wave heights of the first tsunami wave along the near-field coast could be predicted more accurately than the estimation based only on offshore tsunami data. After more time, the estimated initial sea surface distribution by the tFISH/EEW had continuously changed, and it was similar to that based on offshore tsunami data alone.

We will discuss more detail characteristic and its ability of the tFISH/EEW algorithm based on the various case studies.

キーワード : Earthquake Early Warning、 Ocean bottom Pressure、 Tsunami early warning
Keywords: Earthquake Early Warning, Ocean bottom Pressure, Tsunami early warning

沖合水圧記録の順解析による津波波源即時推定手法の検討

Rapid estimation of tsunami source information based on forward analysis of real-time data from dense offshore observation network

*山本 直孝¹

*Naotaka YAMAMOTO¹

1. 防災科学技術研究所

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

津波波源の情報は、観測データをインバージョン（逆解析）することで求める手法が一般的に用いられている。津波の即時予測においても、地震波もしくは津波波形のインバージョンにより求めた震源もしくは波源情報に基づいてフォワード計算を行ったりデータベースから適切なシナリオを選んだりすることで、沿岸の津波高や到達時間を予測している。事後の解析においては、津波波源の情報を求めるのに時間的制約がないため、例えばローカルミニマムに陥っていないか等の確認を手動である程度時間をかけて行うことができる。一方で、即時予測においては、沿岸に津波が到達するまでの短時間で逆解析を行う必要があり、誤った解を求めてしまう可能性が高くなる。そこで逆解析を用いずに、地震・津波観測監視システム（DONET）や日本海溝海底地震津波観測網（S-net）等の大規模な海域観測網で得られる沖合の水圧記録を順解析することで津波波源を即時に推定することを試みる。ひとつには、観測された津波の波高分布の重心位置（Tsunami Centroid Location; TCL）を求めることでおおよそ波源の位置を推定出来る可能性があることが分かっている（Yamamoto et al., 2016, EPS）。また、予め計算しておいた津波シナリオと観測データを比較し、相関係数を求めることで津波波源の位置及び形状を推定できる可能性があることが示されている（Yamamoto et al., 2016, GRL）。本発表では、模擬データを用いたこれらの手法の検討に加えて、実際に観測されたデータを用いた検討結果について報告する。

キーワード：即時推定、津波、S-net、DONET

Keywords: Rapid estimation, Tsunami, S-net, DONET

フーリエひずみ解析による地震の即時規模推定

Rapid Earthquake Magnitude Determination with Strain Analysis on Fourier Domain

*大久保 慎人¹、太田 雄策²、板場 智史³

*Makoto OKUBO¹, Yusaku Ohta², Satoshi Itaba³

1. 高知大学 教育研究部自然科学系理学部門、2. 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、3. 産業技術総合研究所 活断層・火山研究部門

1. Natural Science Cluster, Kochi University, 2. Research Center for Prediction of Earthquakes and Volcanic Eruptions, Graduate School of Science, Tohoku University, 3. Geological Survey of Japan, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

Ohta *et al.* (2012) による GNSS を用いた震源断層即時推定の防災への利用が始まっている。自然科学分野の観測記録を、防災へと応用するためには、情報の確度を高めることが重要であり、そのためには多くの、異なる観測量を多角的に利用した解析結果を用いることが重要である。本研究では GNSS と同様に地殻変動を対象とした観測機器であり、より高い周波数帯域まで機器応答が期待できるひずみ計で得られた記録を用い、ひずみ地震動としての波動伝播を対象とした解析を行うことで、地震規模推定の精度向上に寄与する手法の開発を行う。

ひずみ計では GNSS 観測で得られる地表変位ではなく、その空間微分である変形を観測する。複雑な解析を施すことによって地表変位を得る GNSS とは異なり、ひずみ計の原理は単純で、容易に観測周波数帯域を高周波成分まで拡張することができる。その高い周波数帯域まで伸びる応答特性を生かし、巨大地震の震源過程把握のためのひずみ地震動解析が行われている（大久保・他, 2007; JpGU, 大久保, 2007; SSJ）。2004 年以降に設置されたボアホール歪計では機器の故障に対応するため、観測成分に冗長性を持たされている場合もある。一般に、平面歪の解析には同一面内に 3 成分の観測量が必要であるが、水平 4 成分以上を有する観測点を解析対象にすることで、主ひずみ方位、振幅を、観測誤差を含む形で評価できる（大久保, 2005; SSJ）。また、ひずみ変動量は周波数成分ごとに独立であるため、ひずみ解析を周波数領域においても適用することが可能である（Okubo, 2007; SSJ）。周波数領域でのひずみ解析（Fourier Strain Analysis; FSA）では、震源過程解析には含まれて欲しくない超長周期成分の分離や観測点近傍の擾乱の影響評価を行うことができる。ひずみは空間分布であるため、降雨応答や地下水位変化といった観測地点に強く依存する変動に影響を受けるが、これらの影響も遠方での地震の影響と分離が可能である。

本手法では、FSA によって分離した、震源の影響強く含む周波数成分を時系列変動として再合成することで、地震の震源時間関数（モーメント解放の時間発展）を求め、地震規模（スカラーモーメント）の推定に利用する。解析には、産業技術総合研究所のボアホールひずみ計で得られた水平 4 成分記録を利用した。観測記録に FSA 手法を適用し、主ひずみ振幅がナイキスト周波数付近のひずみ振幅の 10 倍、主ひずみ方位推定誤差 5° 以内の基準を設け、震源から放出されたひずみ地震動成分を検出した。分離した最大 50 周波数のひずみ地震動スペクトルから、震源時間関数を合成し、地震のスカラーモーメントを推定した。発表では、複数の地震に対しての適用事例を交え、本手法の有効性について議論する。

本研究は JSPS 科研費 [JP15H03713](#) の助成を受け実施しました。

キーワード：フーリエひずみ解析、地震モーメント、多成分ボアホール歪計

Keywords: Fourier Strain Analysis, Scalar Moment, Multi Components borehole strain meter

GNSSの1秒データを用いたW-phase解析（2016年熊本地震の事例）

W-phase analysis by using high-sampling-rate (1Hz) GNSS data (for the case of the 2016 Kumamoto earthquake)

*宮岡 一樹¹、勝間田 明男¹、上野 寛²、川元 智司³、檜山 洋平³

*Kazuki Miyaoka¹, Akio Katsumata¹, Hiroshi UENO², Satoshi Kawamoto³, Yohei Hiyama³

1. 気象研究所、2. 気象庁、3. 国土地理院

1. Meteorological Research Institute, 2. Japan Meteorological Agency, 3. Geospatial Information Authority of Japan

大地震発生直後の避難の呼びかけなどの初動対応に、その地震のマグニチュード、メカニズム解や断層の広がりなどを即時的に把握することが重要である。特に海域での大地震の場合、メカニズム解によって津波の高さが大きく変わってくる。より適切な津波注警報の発表に必要なメカニズム解の情報を得るため、気象庁では広帯域地震計を用いたW-phase解析を行っている（碓井・山内,2013）。

上野ら（2014）、宮岡ら（2016）は国土地理院が解析を行っている1 HzのGNSSデータを用いたW-phase解析（Kanamori & Rivera, 2008、Duputel et al., 2012）を、2003年十勝沖地震（ M_w 8.26）、2011年太平洋沖地震（ M_w 9.1）およびその最大余震（ M_w 7.9）について試みた（ M_w はいずれもUSGSによる）。震央距離 $1\sim 4^\circ$ （十勝沖、最大余震）ないし $1\sim 6^\circ$ （東北沖）のGNSSデータを用い、CMT解が精度良く求められている。日本国内においてGNSS観測点は広帯域地震計に比べて観測点密度が高く、また速度記録を変位記録に変換するための積分処理を行う必要が無いことなど、GNSSデータを用いることのメリットがある。

M8クラス以上の大地震については概ね、その有用性が確認された（宮岡ら, 2016）ことから、本研究ではこの手法のさらに小さいMの地震への適用を試みた。ここでは一連の2016年熊本地震の中の本震（2016年4月16日01時25分 M_j 7.3）の解析を行った。この解析では、インバージョン解析の他に、グリッドサーチによる、最適なセントロイド時間およびセントロイド（緯度経度）の探索も行った。比較的低い周波数帯（100~300秒）のバンドパスフィルターを施した、近距離（震央距離 3° 以内）のデータを用いて行った解析で、GCMT解とほぼ同様の精度の良い解が得られている。なお、この事例で解析に要した時間は1分半程度で、リアルタイムの場合には、発震時刻から概ね7分以内に解が求められることになる。

発表ではこの他に、2016年11月22日に発生した福島県沖の地震（ M_j 7.4）の解析結果も紹介する。

キーワード：W-phase、GNSS 1Hz データ、熊本地震

Keywords: W-phase, high-sampling-rate GNSS data, Kumamoto earthquake

光ファイバー網とDASテクノロジーを使ったリアルタイム地震観測の可能性

Potential for Real-Time Earthquake Monitoring using Optical Fiber Network and DAS Technology

*木村 恒久¹

*Tsunehisa KIMURA¹

1. シュルンベルジェ

1. Schlumberger

DASテクノロジーは、パイプラインのモニタリングや侵入者を感知するために、2011年頃からは石油・ガス産業で使われている。位相差データを用いる最新の光ファイバーセンシング技術によって、近年、DASシステムを使い、VSPを含む良好なサイズミックデータを記録できるようになったことは、昨年発表で紹介した。我々はこのシステムのことを、‘hDVS’と呼んでいる。

hDVSは、通常用いられるジオフォン等の電気・磁気的なセンサーでなく、光ファイバーを振動計測のセンサーとして使う。実際には、光ファイバーの振動に対するダイナミックストレインを計測しており、シングルモードファイバー、マルチモードファイバーの両者に使うことができ、つなげたファイバーの全長、もしくはパラメータで決めた長さだけをセンサーとして使うことができる。

通常の電気・磁気的なセンサーは、1995年の阪神・淡路大震災以降、日本各地に設置され、2011年の東日本大震災後、その観測網が、海底にも広がっている。この日本における地震観測網は、世界一の密度を誇っている。しかし、通常のセンサーは、点としてのデータしか収集することができなく、しかも設置にかかるコストや、センサーの設置環境の制限により、設置される数と場所に限りがある。また、将来起きるであろう巨大地震により、現状の地震観測網の一部が破壊され、必要とされる時、継続した観測が困難になる可能性があることが指摘されている。

hDVSの場合、既存の、主にデータ通信用の目的で設置してある光ファイバーを、線状の地震波測定用のセンサーとして扱うことができ、センサーの設置コストと設置にかかる時間を低く抑える事ができる。IT革命の一環として、日本国内の陸上を初め、米国、アジア諸国との間に光ファイバー網が張り巡らされている。国際海底光ファイバーケーブルは、地震が起きやすいプレート同士が重なる領域をまたいで設置してあるので、1台のhDVSを用いることによって、プレートの動きを数十kmの広範囲に渡り、リアルタイムに観測することが可能となる。

光ファイバーの200℃またはそれ以上の高温環境下に耐える特性と、13,000気圧に耐える特性により、地震が発生しやすい地層近くに掘られた深い井戸や火山の近くに設置することが可能で、地震発生地点近くで捉えられた地震波を、光の速さで地上局に伝達するリアルタイムモニタリングが可能となる。

このようにhDVSを使えば、現存する観測網に加え、観測点間のデータが得られない場所を主なターゲットとして、地上、海底、地下を網羅した日本の地震活動を光の速さでモニタリングする包括的なネットワークを、時間と費用を大きくかけずに築くことができるであろう。これによって、近未来に起こると予想されている地殻活動由来の大災害から、より多くの人命を救えることを確信している。

キーワード：DAS、hDVS、光ファイバー、地震、サイズミック、リアルタイム観測

Keywords: DAS, hDVS, optical fiber, earthquake, seismic, real-time monitoring

グリーン関数を応用した沖合設置津波計の最適化

Optimization of offshore tsunami meter network using Green function.

*館畑 秀衛¹、早稲田 卓爾^{1,2}

*Hidee Tatehata¹, Takuji Waseda^{1,2}

1. 東京大学海洋アライアンス、2. 東京大学大学院新領域創成学研究科海洋技術環境学専攻

1. UTokyo Ocean Alliance, 2. The University of Tokyo Graduate School of Frontier sciences Department of Ocean Technology, Policy and Environment

現在、津波逆解析（インバージョン）は、津波の初期海面変動を求める理学目的だけでなく、津波防災においても大きな役割を担っている。津波インバージョンのための観測データとしては、沖合設置津波計の有効性が認識されており、観測と解析の主流となっている。一方、意外かもしれないが、日本は世界最大の津波被災国ではない。日本は歴史上何度も津波災害を受けてきたが、それぞれの津波の犠牲者数は数万人程度であって、例えば2004年12月26日スマトラ島沖地震（M9.1）では、最大被害国のインドネシアでは23万人が犠牲数となっており、311津波の約10倍である。しかしインドネシアのGDPは日本の1/5であり、S-netに相当する津波観測システムを独自に整備することは困難と想像される。もしS-netと同等の性能を持つ観測システムが1/5のコストで実現できたなら、多くの津波被災国への貢献が期待できる。津波逆解析を前提とした沖合設置津波計の配置や、設置密度等を客観的に求めた研究は少なく、また津波の観測要素は特殊な場合を除いて高さだけの1成分観測が主流である。グリーン関数を用いる線形インバージョンを前提にし、観測点の配置の客観的な考察方法としては、データ解像度行列などの手法が発表されている。さらに観測要素として津波の高さに流速2成分を加えた3成分観測とし、1観測点当たり得られる情報量を増やして観測点配置を客観的に最適化すれば、全体の観測点数を減じてコストダウンできる可能性がある。本研究では、観測点の有効性を判定する手法の一つであるデータ解像度行列と、高さと流速の3成分観測を想定し、観測時間長を15分間に限定する条件で、311東北津波をターゲットとして事例解析的に考察した。結果は波源真上～波源内の3成分観測、日本海溝から太平洋に向かって拡大した観測点配置が、インバージョンと観測点節約に有効であった。今回は、その結果を紹介する。

キーワード：津波、インバージョン、観測ネットワーク、最適化

Keywords: tsunami, inversion, observation network, optimization

南海トラフ域における津波伝播即時予測システムの開発

Development of semi-real-time tsunami monitoring and calculation system for pressure gauge stations in southwestern Japan

*中村 武史¹、馬場 俊孝²

*Takeshi Nakamura¹, Toshitaka Baba²

1. 国立研究開発法人防災科学技術研究所、2. 国立大学法人徳島大学

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2. Tokushima University

防災科学技術研究所では、日本海溝周辺の深海底に海底観測網S-netを整備中である（植平・他, 2016; 望月・他, 2016）。また、海洋研究開発機構が南海トラフ周辺に整備した海底観測網DONET（Kawaguchi et al., 2011, 2015; Kaneda et al., 2015）が、2016年4月1日に防災科学技術研究所へ移管された。このため、防災科学技術研究所では現在、合計200点以上の海底観測点のデータ管理・運用を行っている。S-net及びDONETのデータの活用により、陸上データのみの場合と比べて、海域で発生した地震・津波に伴うシグナルの検知時間の短縮や検出限界の低減、震源決定をはじめとする各種解析の精度向上が確認されている。

本研究では、大地震発生後に、海底観測網における水圧波形を即時にシミュレーションするシステムを開発した（Nakamura and Baba, 2016）ので報告する。開発したシステムでは、5分毎にGlobal CMT解をチェックし、新規に解が発表された場合、震源及びメカニズム情報を収集する。収集した情報を基に、地殻変動及び津波伝播の並列計算を行う。並列計算を効率的に行うために、コードの最適化を施している他、予め分割した海底地形データの使用、地震の発生位置にあわせた計算領域・グリッドサイズ・タイムステップの可変設定などの仕組みを導入している。入力パラメータとして必要な断層サイズやすべり量は、スケーリング則を用いて値を設定する。計算終了後、DONETでの水圧波形、計算範囲内での地殻変動分布、最大波高分布を出力する。得られた結果は、関係者へメールで送信及び内部ホームページでの表示を行う。一連の計算及び入出力処理は全て自動で行い、Intel Xeon 3.3 GHz CPUによる32コア並列で処理を行った場合、CMT解入手から太平洋全域における津波伝播の計算終了まで20秒程度の処理時間である。

計算にあたっては、単一断層内での均質すべりを仮定したスケーリング則の適用を含め、多くの近似や仮定を行っているため、走時や波形について必ずしも高い精度を保証するものではない。しかし、第一近似としてのシミュレーション結果を用いてデータを見ることで、地震発生に伴う津波の伝播を海底水圧観測データから即時的に同定する際に有効なシステムとなる。実際に、2015年9月16日にチリ中部イヤペルで発生した地震（Mw 8.2）では、津波がDONETに到来する前に波形や波高を計算し、観測データと整合的な計算結果を得ることができた。観測された波高は数 cm程度であり、海洋潮汐や脈動などのシグナルと比べると非常に小さい振幅であるものの、シミュレーション結果を参照することで津波のシグナル同定に役立つことを示した。また、2016年11月13日に九州西方沖で発生した地震（Mw 6.8）では、DONETに到達する津波の予測波高（最大波高0.3 mm）がノイズレベル以下であることをシミュレーションの観点から示した。構築したシステムを活用することで、津波のシグナル検出や到来前の波形予測に役立てることに加え、観測データの解析からシグナル検出が困難であることを定量的に示すことも可能である。

キーワード：津波、DONET、水圧観測、即時解析

Keywords: tsunami, DONET, pressure gauge, early warning

高精度地震波自動読み取りソフトを組み込んだ 手動検測システムの開発

Development of manual picking system of seismic wave correcting accurate automatic pickings

*堀内 茂木¹、佐藤 優子¹、飯尾 能久²

*Shigeki Horiuchi¹, Yoko Sato¹, Yoshihisa Iio²

1. 株式会社ホームサイスマメータ、2. 京都大学防災研究所

1. Home Seismometer Corporation, 2. Disaster Prevention Research Institute Kyoto University

1. Introduction

We have been developing P and S wave automatic arrival time picking system which is accurate compatible with manual picking. This system selects several candidates of arrival times and selects one among them by using many kinds of threshold parameters based on the knowledge of earthquake expert. As a result, it is able to pick 2-3 times of accurate arrival times and determines 2-3 times of hypocenters compared to the catalogue by Japan Meteorological Agency. However, in the case of automatic system, it is difficult to completely eliminate wrong readings. It is required to conduct manual checking for the detailed studies such as the seismic tomography or focal mechanisms using polarity data etc. In this study, we present on a manual picking system which makes picking by correcting automatic readings.

2. Adjustment of picking parameters of automatic system

The automatic processing system can read data with low S/N ratio though accuracy is low. However there are cases in some researches that it is better to read only accurate data. Therefore, firstly, we changed threshold levels defined in the software of automatic picking so that the accuracy or the number of pickings fits to the research purpose. We change the threshold levels so that the number of picking by the automatic system become nearly same with it by the manually picking.

3. Manual arrival time picking system

The present manual picking system reads triggered waveform data and conducts the automatic picking based on the threshold levels mentioned above. Next, it displays waveform data together with picked arrivals for about 10 stations simultaneously. The manual picking is made by searching for erroneous readings of automatic pickings and correcting them. It is possible to select one among waveforms of 1) Raw, 2) High-pass filter, 3) Filter by the AR model in the P wave correction and 1) Raw, 2) High-pass filter, 3) SH component, 4) P and S wave discrimination filter, 5) absolute value of horizontally component in the S wave correction. We added a function to display waveform data of only stations with large arrival time residuals. We also added various functions so that the mouse operation becomes minimum at times of changing time scale and shifting time axis, etc.

4. Results

There is a data set of arrival times picked manually by an experienced seismologist which are used for the training of how to make manual pickings. Using this data set, we changed parameters of the threshold level of automatic picking so that the number of pickings becomes nearly same between the automatic and manually picking. There are 19 events in the data set. The numbers of P and S wave arrival times are 1124 and 936, respectively and 806 polarity data. These values by the automatic were 1193, 1300, and 747, respectively. We compared the difference between P and S wave arrival times picked automatic and arrival times in the data set. We found that more than 90 % of P wave arrival time differences are within 0.025 second, and 90% of S waves within 0.05 sec. The number of polarity read by the two was 663, and 99% of readings are consistent. This result shows that required corrections of automatic pickings is limited to a small number. Because of the introduction of accurate automatic picking software in the

manual picking, a veteran operator can conduct manual picking within about 5 minutes for an event having P and S wave arrivals from about 100 stations.

キーワード：手動検測、自動検測、自動極性読み取り、人間以上に高精度の自動読み取り

Keywords: Manual arrival time pickimng, Automatic arrival time picking, Automatic polarity picking ,
Automatic picking compatible with manual picking

kurtosisを利用したリアルタイムP波検知手法

Improvement of P-wave detection algorithm using kurtosis statistics

*石田 寛史¹、山田 真澄²

*Hirofumi Ishida¹, Masumi Yamada²

1. 京都大学大学院理学研究科、2. 京都大学防災研究所

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

現在の緊急地震速報では、主にSTA/LTA (Allen,1978) を用いてP波検知を行っているが、ノイズに強くロバストな検知方法として、kurtosis(尖度、正規分布からの乖離の程度を表す指標)を用いたP波検知手法が近年提案された (Saragiotis et al, 2002)。

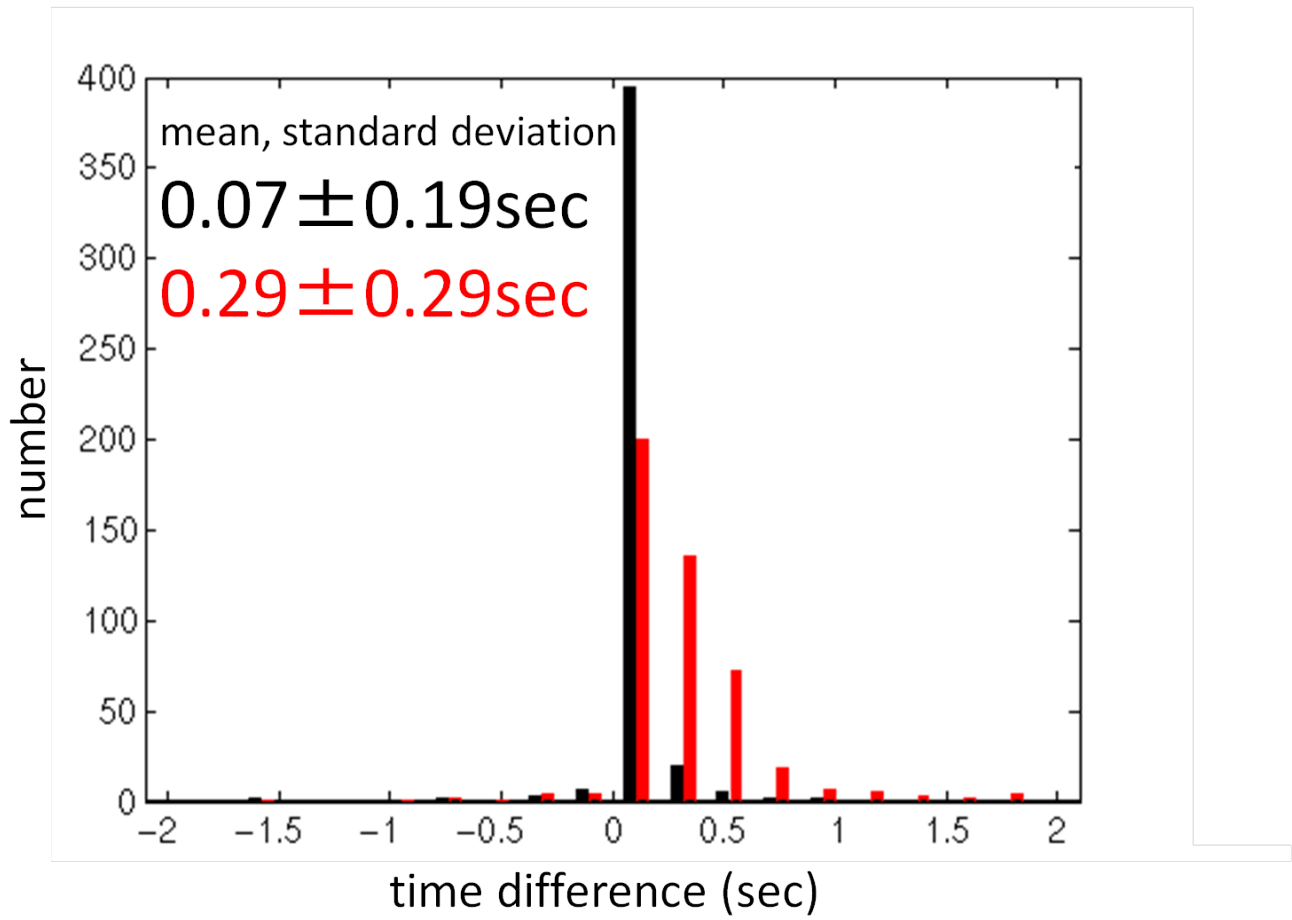
この手法は、これまで地震波のP波検測や低周波微動の検出などに利用されており、データの順次処理に適用するにはアルゴリズムの改良が必要である。そこで本研究では緊急地震速報に利用することを目的として、本手法を改良してデータの順次処理を可能にし、P波の検知性能(検知精度と検知までに要する時間)を検証した。

2011年3月11日~2011年4月16日までの期間に震度5強以上を記録した17の地震の主要動を含む5分間のHi-netおよび気象庁の強震計の連続記録に対して、改良したkurtosis法とSTA/LTA法を用いて、P波検知を行い、その結果を気象庁が手動で決定したP波検測時刻(以後manual pick)と比較した。

その結果、改良したkurtosisを用いた手法は、STA/LTAよりも早く、そして精度よくP波を検知できることが分かった(添付図)。この図に含まれるデータに対して、平均と標準偏差を求めたところ、平均と標準偏差はreal-time kurtosisが 0.08 ± 0.07 秒、STA/LTAが 0.20 ± 0.12 秒となった。このことよりkurtosisを用いて地震波検知する手法を適用すると、従来法よりも早く速報を得ることが可能であることがわかった。

キーワード : kurtosis、P波検知、緊急地震速報

Keywords: kurtosis, P-wave detection, earthquake early warning system



Earthquake Risk Management System Topology of Bursagaz Natural Gas Network, Bursa, Turkey

*Osman Bozkurt¹, Gökalp Kaman¹, Süleyman Tunc², Serif Baris³, Berna Tunc³, Deniz Caka³

1. BURSAGAZ Natural Gas Distribution Company, 2. Sentez Earth and Structural Engineering Corporation, 3. Kocaeli University, Engineering Faculty, Department of Geophysics

Turkey is one of the most frequent earthquake occurred countries in the world. When we look at earthquakes occurred last fifteen year, over 18.000 people has lost their lifes .Especially the cities have high population and big industry areas are a part of 1 st degree earthquake zone. Bursa is one of these cities has a naturel gas network that is vulnerable against earthquakes which causes a grave risk for residential and industrial customers and people live in city.

The seismic safety of gas distribution has been the major project topic of distribution companies in past decades. In case of earthquakes the companies aim to secure their networks and minimize possible effects /potential risks of earthquake such as fire and explosion on the pipeline. Within this context Bursagaz Distribution Company created a pilot project in Bursa city of Turkey. Bursagaz is the one of private gas distribution Company which has Earthquake Risk Management Project in progress and also it is the second largest gas utility company which leads the innovated projects of gas sector in Turkey. After Bursagaz SCADA Project completed in 2012, network control system has been smarter and this was an opportunity to build earthquake Risk Management as well.

In Bursa city if any earthquake occurs, earthquake risk management system that set up Bursagaz network integrated with SCADA System, will evaluate acceleration data and generates earthquake acceleration data for scada. Scada decides what it is going to do with these acceleration data. When the Scada system is triggered with the data, the earthquake scada scenarios will be performed. The necessary valves and gas stations will be closed automatically and therefore gas supply will be stopped in some areas.

In addition when shortly after earthquake is over, exact emergency procederes and scenarios will be performed faster by emergency intervention system and actions will be taken by crews according to their roles. As a result of this, the network will continue safe gas supply with minimum losses and citizens safety will be ensured.

Keywords: Earthquake Risk Management System, Early warning and Rapid Response, SCADA

地域特性を考慮した簡便な避難完了率予測手法の検討

Study on Simple and Easy Estimation Technique of Evacuation Completion Ratio Considering Various Regional Characteristics

*高橋 郁夫¹、中村 洋光¹、藤原 広行¹、時実 良典²、小丸 安史²、若浦 雅嗣²、清水 智²、早川 謙³

*Ikuo Takahashi¹, Hiromitsu Nakamura¹, Hiroyuki Fujiwara¹, Yoshinori TOKIZANE², Yasushi KOMARU², Masatsugu WAKAURA², Satoshi SHIMIZU², Yuzuru HAYAKAWA³

1. 国立研究開発法人 防災科学技術研究所、2. 応用アール・エム・エス株式会社、3. 応用地質株式会社

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, 2. OYO RMS Corporation, 3. OYO Corporation

1. はじめに

内閣府の戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)では適切な初動体制の確立を目的として、地震発生直後に得られるリアルタイム観測データから得られる津波遡上データを用いて広範囲の被害を迅速に予測する手法開発が求められている。

津波による人的被害予測には、地震発生から津波到達までの避難猶予時間で避難場所に到着できない避難未完了者数を精度良く予測することが重要である。このためには、避難猶予時間のほか様々な地域特性を考慮する必要がある。考慮すべき地域特性としては、高橋ほか(2016)において避難意識(避難開始までに要した時間に相当)に加えて避難所等までの距離が挙げられている。

既往の避難未完了者数の予測には、津波避難シミュレーションを用いる手法と、被害想定等で用いられている避難猶予時間と避難完了率の避難完了率曲線を用いる手法が用いられている。前者は様々な地域特性を考慮することが出来る一方で、計算に時間を要するため広範囲での即時的な被害推定には適用しにくい問題がある。後者は広範囲での被害推定に適する一方で、地域特性の反映という観点で問題がある。

そこで、本研究では、地域特性として最も影響の大きな避難意識を数値で表す方法を試みると共に、避難意識や避難距離等の地域特性を考慮できる簡便な避難完了者数の予測方法について検討した。

2. 避難意識のパラメータ化

避難意識は浸水域内の滞留者の避難開始までに要した時間に影響するため避難未完了者数に大きく影響する。既往の手法では「高い・低い」など数段階で避難意識を定義して、避難意識毎に避難猶予時間別の避難未完了率等を定義している。一方で、東北地方太平洋沖地震からの津波避難実態は地域により避難開始のタイミングは多様である。

そこで本研究では、地域別の避難実態調査結果に基づく地震発生からの経過時間毎の避難開始済率(=避難行動を開始している人数/浸水域内の滞留者数)をもとに、地震発生からの経過時間を説明変数とする対数正規分布を仮定した累積分布関数で避難開始済率を表す手法を検討した。更に、累積分布関数のパラメータのうち、 ξ (対数標準偏差)を固定して λ (対数平均)のみで避難開始済率を求める式を作成すると共に、避難試行率の上限や避難手段分担率を累積分布関数のパラメータ λ から推定する手法を作成した。

3. 避難速度の推定

前述のモデル地域(7地域)を対象として、まず東北地方太平洋沖地震津波からの避難を再現するシミュレーションを実施した。その結果、得られた避難完了率は、避難実態調査から推定される避難完了率の範囲内で、妥当性があるものと判断した。次に、避難意識を変化させた津波避難シミュレーションを実施して、避難手段・年齢・発生時刻(昼夜)別の避難移動速度について検討した。ここでの避難速度は広域での被害推定を短時間で実施する目的から、シミュレーションでの避難所要時間を避難所等までの直線距離で除した値で定義した。

全モデル地域の避難速度を検討し、避難手段および年齢から3区分(若壮年徒歩避難者、高齢徒歩避難者、車両避難者)の平均的な避難速度を設定した。

4. 避難未完了者数予測式の作成

浸水域内の滞留者のうち避難に成功する者は、津波到達までに避難を完了する必要がある。津波到達までに避難を完了するためには、津波到達時刻から津波避難を要する時間を差し引いた時刻(避難限界時刻と呼ぶ)までに避難を開始する必要がある、地震発生から避難限界時刻までの時間が避難猶予時間となる。この避難猶予時間に避難を開始する人の割合は前項で検討した避難意識をパラメータとする避難開始済率の累積分布関数を用いることで予測する。具体的には、年齢階層・避難手段別の要避難者数に、避難猶予時間内での避難開始率を乗じて避難完了者数を推定する。

5. 作成した予測式の検証

上記で作成した予測式を、東北地方太平洋沖地震津波からの避難を対象としてモデル地域に適用して避難未完了者数を予測するとともに、津波避難シミュレーション結果との比較を行った。

各モデル地域の避難実態から推定した避難意識を適用して避難未完了者数を予測したところ、シミュレーションによる避難未完了者数とのばらつきが概ね $\pm 50\%$ の範囲で予測することが出来た。一方で、人口が少ない地域や浸水面積が狭い地域では倍半分程度の誤差が生じた。この原因としては、浸水面積が狭い地域では事前に把握できる避難距離と実際の避難距離が食い違い易いことなどが考えられる。

【謝辞】

本研究は、総合科学技術・イノベーション会議の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」（管理人：JST）によって実施された。

【参考文献】

高橋ほか(2016) 簡便な津波避難完了率予測手法のための地域特性の抽出、日本地震工学会年次大会、2016

キーワード：津波、避難、シミュレーション、地域特性、予測式

Keywords: tsunami, evacuation, simulation, regional characteristics, prediction formula

自治体震度計の観測データをリアルタイム表示する試み-鳥取県の事例-
An approach for displaying real time data from seismic intensity meter
maintained by a local government -Case study on Tottori prefecture -

*香川 敬生¹、野口 竜也¹

*Takao Kagawa¹, Tatsuya Noguchi¹

1. 鳥取大学大学院工学研究科

1. Tottori University Graduate School of Engineering

緊急地震速報の高度化，高精度化するには，観測点の密度を高くすることが解決方法のひとつである。その際，現状で最も高密度に配置されている自治体（平成の大合併前の市町村）震度計の活用がまず考えられるべき候補となる。そこで，鳥取県の震度観測ネットワークを対象に1秒パケットで最大加速度およびその時点の震度情報を配信できるようなシステム更新をおこない（前報），その情報を準リアルタイムに表示するシステムを作成した。2016年10月21日に発生した鳥取県中部の地震に対応することは出来なかったが，その後の余震のモニタリングは実施することが出来た。地震観測記録や常時微動観測によるサイト増幅特性の把握を同時に進めており，県内の面的な震度分布を準リアルタイムで，あるいは数秒先を予測することを含めてシステムの構築を続けているので，その現状および課題を紹介したい。

キーワード：自治体、震度計、リアルタイム

Keywords: Local Government, Seismic Intensity Meter, Real Time

A REVISION OF THE CUMULATIVE ABSOLUTE VELOCITY (CAV) THRESHOLD LEVEL VALUES FOR VRANCEA EARTHQUAKES

*Can Zulfikar¹, Hakan Alcik², Alexandru Marmureanu³, Victorin Toader³, Constantin Ionescu³

1. Gebze Technical University, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, 41400, Gebze, Kocaeli, Turkey, 2. Bogazici University, Kandilli Observatory and Earthquake Research Institute, Earthquake Engineering Department, Cengelkoy, 34684, Istanbul, Turkey, 3. National Institute for Earth Physics, P.O. Box MG-2, 76900, Magurele, Ilfov, Romania

Strong earthquakes in the Romanian Vrancea area have caused a high toll of casualties and extensive damage over the last several centuries. With a moment magnitude of 7.4, the last strong Vrancea earthquake on March 4, 1977 caused more than 1500 casualties, the majority of them in Bucharest. Strong earthquakes in the Vrancea zone occur between 60-200 km depth within an almost vertical column. Bucharest Earthquake Early Warning (EEW) system detects earthquakes with a seismic network in the epicentral Vrancea region and issue a warning in Bucharest providing 20-25s warning time.

To enhance EEW capability and to decrease the effects of Vrancea earthquakes on the populated cities for Romania, in particular on Bucharest city, the relationships of the bracketed cumulative absolute velocity window (BCAV-W) approach versus epicentral distance and magnitude for Vrancea region were investigated, in 2013, within the scope of the *Network of European Research Infrastructures for Earthquake Risk Assessment and Mitigation* (NERA) project. With in the context of this study the rational threshold levels related to $M_w=5.4+$ earthquakes were given as 0.28 m/s and 0.34 m/s.

To advance the actual EEW capability further, in this study, the number of previously used data has been increased with few earthquakes $M5+$ and a dataset of about 150 acceleration records which consists of intermediate depth earthquakes with different magnitudes ($4.0M_w6.0$) and with epicentral distances of less than 200 km has been used. BCAV-W approach versus epicentral distance and magnitude for Vrancea region have been reinvestigated.

In conclude, new rational threshold levels related to $M_w=5.6+$ earthquakes have been determined as 0.28 m/s, 0.36 m/s and 0.48 m/s related to 8-second, 12-second and 16-second windows, respectively.

Keywords: Earthquake Early Warning, Cumulative Absolute Velocity