

平成 30 年 6 月 4 日現在

機関番号：82109

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2017

課題番号：25282114

研究課題名(和文) 実時間地震動予測：実況値を反映させる手法の構築

研究課題名(英文) Real-time prediction of earthquake ground motion: Establish of method for incorporation with actual monitoring

研究代表者

干場 充之 (Hoshiba, Mitsuyuki)

気象庁気象研究所・地震津波研究部・室長

研究者番号：60510196

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 11,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、地震動即時予測において、実時間での地震動の予測を目指した。データ同化を取り入れ実況値の把握を強化し、時間発展型に波動伝播を予測し、さらに、周波数依存性をもつ地盤増幅特性を実時間で補正することで、揺れる前に予測を行う新たな手法を開発した。地震動即時予測の研究分野で、揺れの実況値を用いるというこれまでになかった考え方に則り、地震動を実時間で予測することで、揺れの強さの予測の精度向上だけでなく、大きな揺れの時間の予測の改良、を行う技術の開発に結びついた。本研究で開発した手法の考え方の一部は、緊急地震速報に応用されるなど、地震防災/減災に寄与している。

研究成果の概要(英文)： We have aimed at real-time prediction of earthquake ground motion. Applying data assimilation technique for real-time monitor of ground motion distribution, simulation of propagation of seismic waves, and real-time correction of site amplification factors, we have developed innovative method for real-time prediction of ground motion. The new idea of the real-time monitor of ground motion distribution leads to not only precise prediction of ground motion, but also precise prediction of lead-time of the strong ground motion.

Part of the method developed in this project was applied to operation of earthquake early warning, which contributes to earthquake disaster prevention/mitigation.

研究分野：地震学

キーワード：実時間地震動予測 時間発展型 実況把握 波動伝播 地盤震動 データ同化

1. 研究開始当初の背景

地震動即時予測は、地震減災に大きく寄与することが期待され、緊急地震速報の運用が始まっていた。しかし、2011年の東北地方太平洋沖地震（以下、東北地震）では関東地方の震度を過小予測し、また、続発する余震では揺れの予測の精度が低下するという問題が発生した。

従前の即時予測の考え方では、震源位置とマグニチュード(M)を早期に決定し、それに基づき、PGA(最大加速度)、PGV(最大速度)、震度などの揺れの代表値を予測するという考えに基づいている。よって、「いかに早く、震源やM、さらには震源域を推定できるか」に焦点を当てる研究が多かった。しかし、この方法では、(震源とMなどの)数個のパラメータで、複雑な揺れの“平均像”を表すことしかできず、“個々の地点”の地震動予測の精度を上げることが難しい。震源とM(さらには震源域や破壊の方向、など)といった震源情報の早期推定といった従前の方法では、地震動即時予測の精度を上げることに限界がある。東北地震はこの問題をあらわにした。

一方、政府の地震調査研究推進本部が平成24年(2012年)9月に改定した「当面10年間に取り組むべき地震調査研究に関する基本目標」の1つの柱に「地震動即時予測および地震動予測の高度化」が掲げられており、当研究はその方向に沿うものであった。

2. 研究の目的

本研究では、地震動即時予測等において、実時間での地震動波形の予測を目指すものである。データ同化を取り入れ実況値の把握を強化し、時間発展型に波動伝播を予測し、さらに、周波数依存性をもつ地盤増幅特性を実時間で補正することで、揺れる前に波形レベルでの予測を行う新たな手法を開発する。地震動即時予測の研究分野で、揺れの実況値を用いるというこれまでになかった考え方に則り、地震動波形を予測することで、揺れの強さの予測の精度向上だけでなく、大きな揺れの時間の予測の改良、を行う技術を開発することを目的とする。

本研究で目指す地震動即時予測手法は、従来の予測手法の弱点を克服するもので、本研究計画での成果は、緊急地震速報などの地震動即時予測での精度向上と迅速化に貢献でき、地震防災/減災に寄与するものと期待できる。

3. 研究の方法

本研究では、以下の2点について地震動即時予測の精度向上と迅速化に結び付けることを目指した(図1)。

(1) リアルタイムモニタリングを用いた時間発展的な予測手法の構築

リアルタイムでの実況の把握では、天気予報等に用いられている「データ同化」手法を

導入することにより、実況把握能力を向上させる。その実況値から未来の揺れの状態を予測する。その予測では、波動伝播の方程式に準拠させた時間発展型の予測手法を導入する。

(2) 地震動観測点と予測点での周波数ごとの地盤増幅特性の推定とその伝達関数の設計

観測点および予測点での地盤増幅特性を推定する。スペクトルインバージョン法や、スペクトル比法、コーダ波正規化法を用い、地盤増幅の周波数依存性を推定する。さらに、上記で求められた周波数依存性をもつ地盤増幅を、因果律を満たすデジタルフィルターと組み合わせることで、時間軸上の伝達関数として表現する。

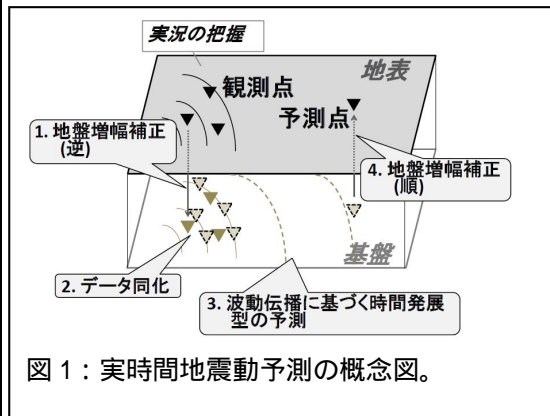


図1: 実時間地震動予測の概念図。

4. 研究成果

(1) リアルタイムモニタリングを用いた時間発展的な予測手法の構築

データ同化手法の取り込み

天気予報等に用いられている「データ同化」手法を導入することで実況値の正確な分布を推定することを行なった。多数の観測点からリアルタイムでデータが送られてくる場合、データ同化手法が極めて有効に機能することを確認した。例えば、2011年の東北地震(M9.0)では4~5個の強震動生成域(SMG)から伝播してくる地震動を、2004年の新潟県中越地震(M6.8)では次々と発生する余震からの地震動を、そして、2016年の熊本地震(2016/4/16のM7.3)ではおよそ37秒後に発生したM6クラスの誘発地震による地震動を、捉えることが容易にできるようになった(図2)。

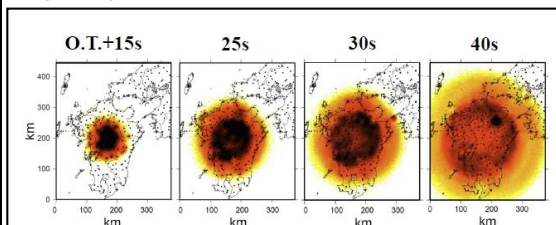


図2: 2016年熊本地震(M7.3)での揺れの実況把握の例。左から、震源時から15、25、30、40秒後の状況を示す。

時間発展型での予測手法の構築

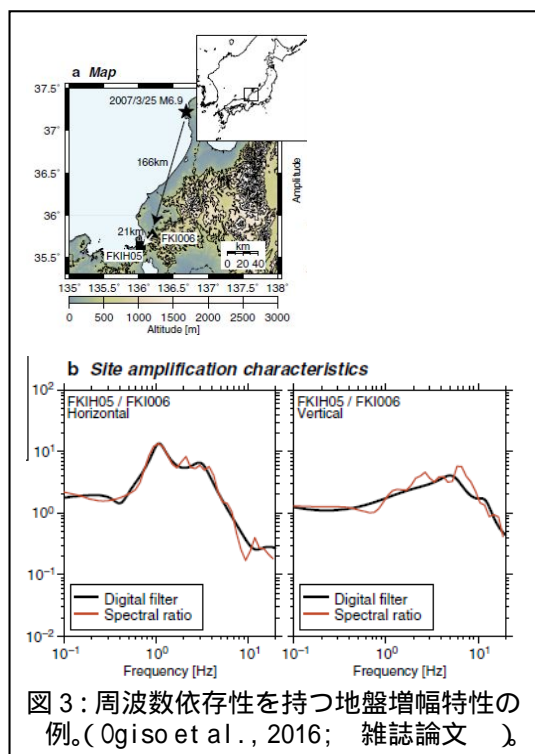
上記のデータ同化手法から得られる実況値の分布を初期値として、波動伝播の物理（波動伝播のシミュレーション）に従い未来の分布を予測する手法を構築した。波動伝播のシミュレーション手法としては、輻射伝達理論を用いた。輻射伝達理論は、波線理論を用いた高周波近似であるが、計算負荷が少ないこと、また、震度は比較的高周波の地震波によるので、良い近似で計算することができる。

未来の地震動分布の予測には、速度構造や減衰構造（散乱強度や吸収強度）の正確な事前推定が重要である。そこで、散乱強度や吸収強度の構造推定を行なった。構造の導入は特に遠い未来の予測に有効であることが分かった。

(2) 地震動観測点と予測点での周波数ごとの地盤増幅特性の推定とその伝達関数の設計

周波数ごとの地盤増幅率の推定

地震波は地盤の状態（硬いか軟らかいか）によって増幅が異なる。精度の良い震度予測には、地盤の増幅特性の把握が鍵となる。この増幅特性には周波数依存性がある。従来の地震動即時予測では、震度の増分等（周波数の依存性のないもの）が考慮されていたが、周波数依存性は十分に考慮されていなかった。揺れの代表値として震度を考えた場合には、おおよそ0.1~20Hzでの増幅率が重要である。この地盤の増幅特性の推定を進めるにあたり、当初、コーダ正規化法による推定を目指したが、1Hz以下を精度よく推定することが難しいことが分かった。そこで、スペクトル比法での推定を行なった。ほぼ全国の観



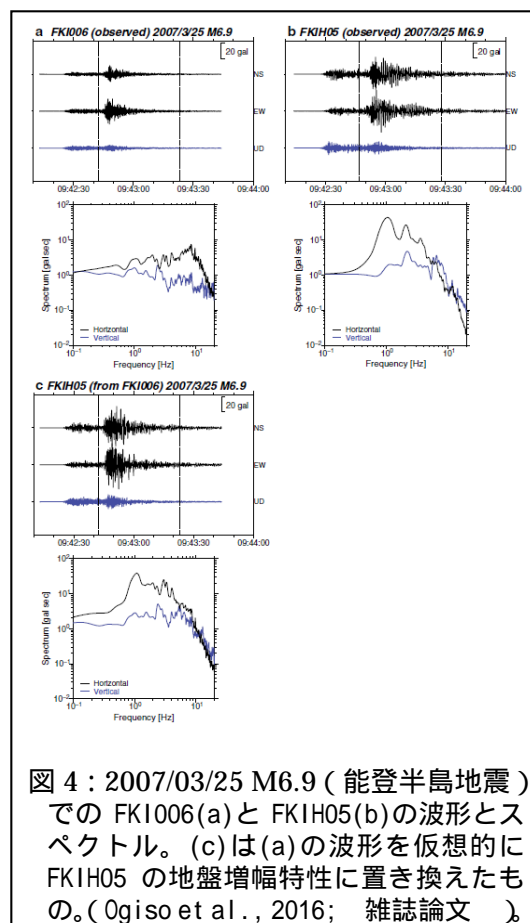
測点で、上記の帯域での周波数依存性をもつ増幅特性を推定した（気象庁検知網と震度計網、防災科研 K-NET と KiK-net の計 2743 観測点）。これにより、特に、周波数依存性の強い観測点での補正を、より正確にできるようになった。

図3には、例として、K-NETのFK1006に対するKiK-netのFKIH05の相対的な地盤増幅特性を示す。特に水平動成分に強い周波数依存性がある。

伝達関数を表す手法の検討

上記で得られた地盤増幅特性を、因果律を満たす時間軸上のフィルターで表現するため、有限個のハイパスフィルターおよびローパスフィルターの組み合わせで、IIRフィルターを用いて表現した。この際に、逆フィルターも可能なように最小位相特性をもつように設計を行った。これにより、周波数依存性をリアルタイムで補正することが可能となった。

図4には、FK1006の波形(a)に、図3で得られた地盤増幅特性に相当するフィルターをかけて、FKIH05の波形を予測したもの(c)を示す。振幅、スペクトル特性ともに実際の観測(b)を良く近似している。



(3) 応用例1

本研究を通して、データ同化手法を用いて揺れの現状把握を行い、それを初期値として

波動伝播の物理（波動伝播のシミュレーション）を行って未来の分布を予測する道筋が構築された。

図5には、2011年の東北地震での例を示す。本手法を用いることによって、東京に向かってくる強い揺れを20秒以上前から把握し、それに応じて、精度の良い予測に結びついていることが分かる。

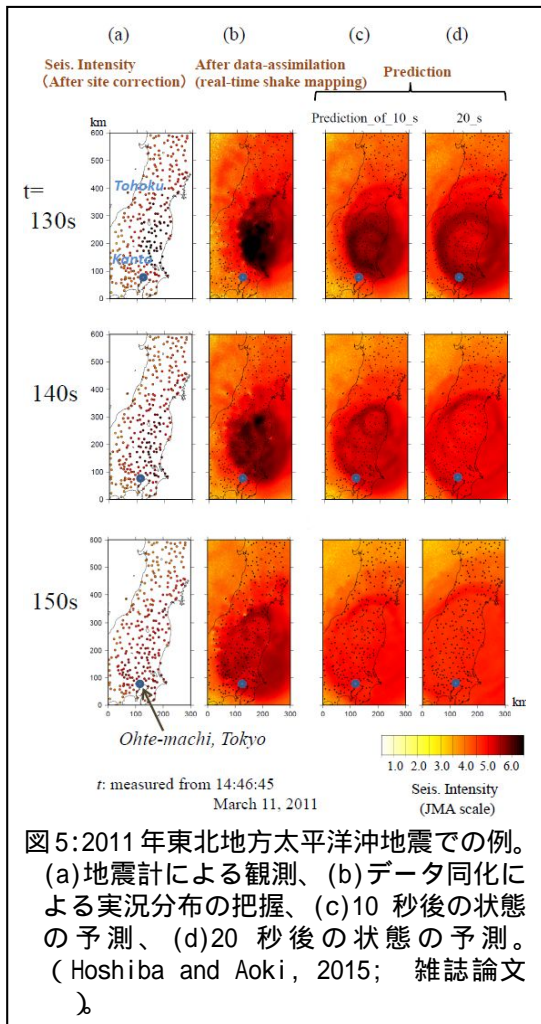


図5:2011年東北地方太平洋沖地震での例。(a)地震計による観測、(b)データ同化による実況分布の把握、(c)10秒後の状態の予測、(d)20秒後の状態の予測。(Hoshiba and Aoki, 2015; 雑誌論文)

(4) 応用例2

本研究を通して開発した手法の考え方を簡易的に適用したものがPLUM法である。(震源位置とMを即時に求めるのではなく)予測点の周囲に実際に強い揺れが観測されれば、間もなくその場所でも強く揺れるだろうと予測するものである。PLUM法は、2018年3月から気象庁の緊急地震速報の運用にも取り入れられている。

図6に東北地震の余震を例に、PLUM法による予測例を示す(震源時から30分間)。余震が続発している間でも精度の良い予測を行っている。

(5) まとめ

従前の即時予測の、震源位置とMを早期に決定する、という考え方ではなく、揺れの分布の実況値を把握し、それを初期値として、

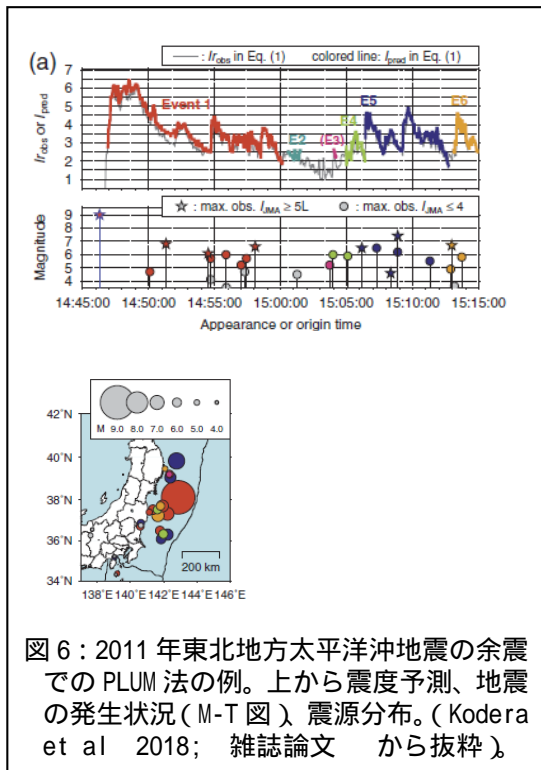


図6:2011年東北地方太平洋沖地震の余震でのPLUM法の例。上から震度予測、地震の発生状況(M-T図)、震源分布。(Kodera et al 2018; 雑誌論文 から抜粋)

波動伝播の物理（波動伝播のシミュレーション）を用いて未来の揺れの分布の未来を予測するという考え方に基づく予測手法を構築した。これにより、揺れの実況値に基づいた予測ができるようになり、精度向上と迅速化に結びつく。

今後の課題としては以下の点が挙げられる。当初は、地震波形そのものの予測を目指したが、輻射伝達理論を使うことに伴い、(波形の山谷の表現が含まれない)包絡線を予測することにとどまっている。また、地盤増幅特性の補正も、振幅については周波数依存性を入れることができたが、位相特性については十分に考慮することができなかった。そして、データ同化に関しては、波動伝播が3次元のなのに対して、地震観測は地表付近に限られること(2次元)の違いを如何に克服するか、等という課題が残されている。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 11件)

Kodera, Y., Yamada, K., Hirano, K., Tamaribuchi, S., Adachi, N., Hayashimoto, M., Morimoto, M., Nakamura, and M. Hoshiba, The Propagation of Local Undamped Motion (PLUM) Method: A Simple and Robust Seismic Wavefield Estimation Approach, Bulletin of the Seismological Society of America, 査読有, 108, 2018, 983-1003.

DOI: 10.1785/0120170085

Kodera, Y., Real-Time Detection of

Rupture Development: Earthquake Early Warning Using P Waves from Growing Ruptures, *Geophysical Research Letters*, 査読有, 45, 2018, 156-165.

DOI: 10.1002/2017GL076118

Ogiso, M., S. Aoki, and M. Hoshiba, Real-time seismic intensity prediction using frequency dependent site amplification factors, *Earth, Planets and Space*, 査読有, 68.83, 2016, 1-15.

DOI: 10.1186/s40623-016-0567-1

Iwata, T., H. Kubo, K. Asano, K. Sato, and S. Aoi, Long-period Ground Motion Characteristics and Simulations in the Osaka Basin during the 2011 Great Tohoku Earthquake, Proc. 5th IASPEI/IAEE Int. Symp. on the Effect of Surface Geology on Seismic Motion, Taipei, paper I101A, 査読無, 1, 2016, 1 - 11.

Tanaka, H., T. Iwata, and K. Asano, Three-dimensional Ground Motion Simulations of Repeated Arrivals at Amagasaki Strong Motion Station, NW of the Osaka Sedimentary Basin, from Local Events, Proc. 5th IASPEI/IAEE Int. Symp. on the Effect of Surface Geology on Seismic Motion, Taipei, paper P101A, 査読無, 1, 2016, 1 - 7.

Oth, A., S. Parolai, C. Cauzzi, I. Iervolino, A. Ansal, M. Bose, K. Goda, T. Heaton, M. Hoshiba and A. Zollo, ECGS & ESC/EAAE Joint Workshop, Earthquake and Induced Multi-Risk Early Warning and Rapid Response, Workshop Report by the Scientific Committee, Workshop Report by the Scientific Committee, Cahiers Bleus, 査読無, 31, 2016, III-VII.

Hayashimoto, N., T. Nakamura, M. Hoshiba, Stability of Ocean Bottom Seismograph data exposed to strong shaking: Efforts for utilizing OBS for Earthquake Early Warning, ECGS & ESC/EAAE Joint Workshop, Earthquake and Induced Multi-Risk Early Warning and Rapid Response, Workshop Report by the Scientific Committee, Cahiers Bleus, 査読無, 31, 2016, 41-49.

Ogiso, M., N. Hayashimoto, and M. Hoshiba, Array Observation of Strong Ground Motion for Real Time Estimation of Current Wavefield, ECGS & ESC/EAAE Joint Workshop, Earthquake and Induced Multi-Risk Early Warning and Rapid Response, Workshop Report by the Scientific Committee, Cahiers Bleus, 査読無, 31, 2016, 75-86.

Kodera, Y., Y. Yamada, S. Adachi, M. Morimoto, Y. Nishimae, and M. Hoshiba, The Eight Years of Earthquake Early

Warning Operation in the Japan Meteorological Agency, ECGS & ESC/EAAE Joint Workshop, Earthquake and Induced Multi-Risk Early Warning and Rapid Response, Workshop Report by the Scientific Committee, Cahiers Bleus, 査読無, 31, 2016, 17-30.

Hoshiba, M. and S. Aoki, Numerical Shake Prediction for Earthquake Early Warning: Data assimilation, Real-Time Shake Mapping, and Simulation of Wave Propagation, Bulletin of the Seismological Society of America, 査読有, 105, 2015, 1324-1338.

DOI: 10.1785/0120140280

Hoshiba, M., Real-time correction of frequency-dependent site amplification factor for application to earthquake early warning, Bulletin of the Seismological Society of America, 査読有, 103, 2013, 3179-3188.

DOI: 10.1785/0120130060

[学会発表](計 36件)

Hoshiba, M. and M. Ogiso, Triggered earthquake during the 2016 Kumamoto earthquake (Mw7.0): Importance of real-time shake monitoring for Earthquake Early Warning, 2017 Annual Meeting, Seismological Society of America, 2017.

Hoshiba, M., and M. Ogiso, Real-time prediction of ground shaking without source information: Data assimilation and simulation of seismic wave propagation for Earthquake Early Warning, IAG-IASPEI Joint Scientific Assembly 2017, 2017.

Hoshiba, M. and M. Ogiso, Real-time prediction of ground shaking without source information: Data assimilation and simulation of seismic wave propagation for Earthquake Early Warning, 11th Joint Meeting U.S.-Japan Natural Resources Panel on Earthquake Research, 2016.

Kodera, Y., J. Saitou, N. Hayashimoto, S. Adachi, M. Morimoto, Y. Nishimae, and M. Hoshiba, Earthquake Early Warning for the 2016 Kumamoto Earthquake: Performance Evaluation of the Current System and the Next-Generation Methods of the Japan Meteorological Agency, 11th Joint Meeting U.S.-Japan Natural Resources Panel on Earthquake Research, 2016.

Hoshiba, M. and Y. Nishimae, Lessons Learned from Eight Years' Experience of Actual Operation, and Future Prospects of JMA Earthquake Early

Warning System, 2015 Fall meeting of American Geophysical Union, 2015.

Hoshiba, M. and S. Aoki, Prediction of ground shaking from shaking itself: Application of numerical shake prediction method for various frequency bands, Seismological Society of America, 2015.

N. Hayashimoto and M. Hoshiba, Examination of the relative site amplification factor of OBS and their real-time correction: examples of Sagami Bay OBS, NIED, 3rd International Conference on Earthquake Early Warning, 2014

M. Ogiso, S. Aoki and M. Hoshiba, Site amplification factors of whole Japan area estimated from spectral ratio of direct S-wave and their application to the real-time prediction of ground motion, The 2014 fall meeting of American Geophysical Union, 2014.

Iwata, T., H. Kubo, K. Asano, K. Sato and S. Aoi, Long-period Ground Motion Simulation in the Osaka Basin during the 2011 Great Tohoku Earthquake, The 2014 fall meeting of American Geophysical Union, 2014.

Aoi, S., T. Kunugi, W. Suzuki, H. Nakamura and H. Fujiwara, Current Status and Future Prospect of K-NET and KiK-net, The 2014 fall meeting of American Geophysical Union, 2014.

H. Nakamura, S. Aoi, T. Kunugi, W. Suzuki, and H. Fujiwara, Prototype of a Real-Time System for Earthquake Damage Estimation in Japan, 3rd International Conference on Earthquake Early Warning, 2014.

S. Aoi, Nationwide Seismograph Network Operated by NIED, 9th Japan-UK Joint Committee on Cooperation in Science and Technology, 2014.

Hayashimoto, N. and M. Hoshiba, Examination of the site amplification factor of OBS and their application to magnitude estimation and ground-motion prediction for EEW, The 2013 fall meeting of American Geophysical Union, 2013.

[図書](計2件)

Hoshiba, M.(分担執筆), Elsevier, "Earthquake hazard, risk and disaster" の第19章, 2014, 505-529.

干場充之, 若山晶彦, 横田崇(分担執筆), 朝倉書店, "災害情報学事典" の第1章の1-4, 8-9.

6. 研究組織

(1)研究代表者

干場 充之 (HOSHIBA, Mitsuyuki)
気象研究所・地震津波研究部・室長 (平成25年度まで 地震火山研究部)
研究者番号: 60510196

(2)研究分担者

岩田 知孝 (IWATA, Tomotaka)
京都大学・防災研究所・教授
研究者番号: 80211762

青井 真 (AOI, Shin)
国立研究開発法人防災科学技術研究所・その他部局・総括主任研究員
研究者番号: 80360379

中村 洋光 (NAKAMURA, Hiromitsu)
国立研究開発法人防災科学技術研究所・その他部局・主任研究員
研究者番号: 60426004

青木 重樹 (AOKI, Shigeki)
気象研究所・地震火山研究部・主任研究員
研究者番号: 10391236
(平成25年度まで)

林元 直樹 (HAYASHIMOTO, Naoki)
気象研究所・地震津波研究部・研究官 (平成25年度まで 地震火山研究部)
研究者番号: 00614059
(平成27年度まで)

小木曾 仁 (OGISO, Masashi)
気象研究所・地震津波研究部・研究官
研究者番号: 40739140
(平成26年度から)

古舘 友通 (FURUDATE, Tomomichi)
気象研究所・地震津波研究部・主任研究官
研究者番号: 50737856
(平成26年度から平成28年度まで)

小寺 祐貴 (KODERA, Yuki)
気象研究所・地震津波研究部・研究官
研究者番号: 80780741
(平成28年度から)
(平成27年度は研究協力者)

(3)連携研究者

なし

(4)研究協力者

小寺 祐貴 (KODERA, Yuki)
(平成27年度: 28年度からは分担者)