

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 23 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26289187

研究課題名(和文) 多点リアルタイム地震観測データを用いた地震防災システムの実用化

研究課題名(英文) Implementation of earthquake disaster prevention system using multi-point real-time earthquake observation data

研究代表者

源 栄 正人 (MOTOSAKA, MASATO)

東北大学・災害科学国際研究所・教授

研究者番号：90281708

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、宮城県を中心に公共建築物等に展開したリアルタイム地震観測網の観測データに基づき、設置建物の構造ヘルスマニタリング(SHM)と早期地震警報(EEW)に基づく即時防災情報の予測モデリングの向上により地震防災システムの実用化に向けた検討を行った。

SHMに関しては、東日本大震災を経験した建物の長期にわたる連続観測データに基づく、大震災時の挙動の分析や被災前後の振動特性の振幅依存性や季節変化に関する新しい知見を得た。EEWに関しては、前線波情報を用いた即時地震動予測法として同化手法やRVMに基づく法の検討を行った。

これらの研究成果を国内外で発表するとともに、地震防災教育で活用した。

研究成果の概要(英文)：This research investigated implementation of earthquake disaster prevention system based on modelling enhancement of real-time disaster prevention information as Structural Health Monitoring (SHM) and Earthquake Early Warning (EEW) using data obtained by the real-time earthquake observation network extended at public buildings in Miyagi-prefecture and surrounding area.

As for SHM, based on the long-term observation data of buildings experienced the 2011 Tohoku earthquake, new findings on dynamic characteristics before, during and after the earthquake have been obtained together with those on amplitude dependency and seasonal change of dynamic characteristics. Regarding EEW, as real-time ground motion prediction method using front-site waveform information, data assimilation technic and RVM have been investigated.

These research results were presented inside and outside Japan and also utilized for earthquake disaster prevention education.

研究分野：地震工学、建築構造学

 キーワード：リアルタイム地震観測 構造ヘルスマニタリング 早期地震警報 リアルタイム地震防災 即時損傷度  
 評価 防災教育 建物の振動特性 システム同定

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 既存地震観測装置：研究代表者らは、建物内に設置した高感度地震観測装置を用いたリアルタイム地震観測網により、構造物のヘルスマonitoring (SHM) や早期地震警報 (EEW) の高精度化に供すべく観測網の展開を行ってきた<sup>1)</sup>。平成25年度までに、100万都市仙台をはじめや内陸部の都市や産業地帯の地震対策に貢献すべく、これらを取り巻くように観測点を配置してきた (25年度までに16点に設置、図1参照)。



図1 リアルタイム地震観測網の展開

(2) リアルタイム地震観測データの利活用：社会的背景として、EEWの高度化のために地震波の伝播経路の波形情報を考慮した即時地震動予測<sup>2)</sup>や建物の揺れの連続観測に基づくSHMの必要性がある。また、東日本大震災を含む多くの観測データの分析<sup>3)</sup>によるモデリング向上も期待できる。EEWとSHMの融合により、将来的に構造物のアクティブ制震技術との架け橋としても期待できる。

## 2. 研究の目的

(1) 多地点観測データを用いた通常時のモニタリングとの地震時のデータ分析と予測：観測ネットの前線観測点と対象観測点の間の伝達特性を分析し、地震発生時に前線観測点の観測記録から対象観測点の地震動予測システムを構築する。

(2) 建物内観測点のリアルタイム観測及び構造物のヘルスマonitoring：構造ヘルスマonitoring機能を有するリアルタイム地震観測システムで得られる建物内の3地点に設置された地震計の観測記録を用いて、通常時の建物の振動特性の日変化、季節変化等を把握するとともに、地震時のシステム同定及び振動特性の振幅依存を分析する。また、地震時に構造物の振動解析モデルとの連動、中小地震による解析モデルの改良、部材変形量の定量的な評価及び損傷の予測機能に結び

つける。

## 3. 研究の方法

(1) データ処理システムの構築：既存のリアルタイム地震観測システムにおける通常時の微動観測データの処理 (通常モード) 及び設定されたレベル以上の観測データが得られた場合の地震観測データの処理 (地震モード) を行うとともに、気象庁からの緊急地震速報と連動するシステムを構築する。

(2) 前線波形情報を用いたリアルタイム地震動予測：地震動予測点 (対象地点) における高精度なリアルタイム地震動予測のために、前線観測点と対象観測点の間の伝達特性の分析と地震データの蓄積による予測システムの逐次改善を行う。震度予測ばかりでなく、建物の揺れの予測に連動するためのスペクトル予測を行う。

(3) 微動観測および地震時観測データの分析とシステム同定：13建物に設置した建物内観測データを用いたシステム同定に基づき、建物の常時微動から中小地震さらに大地震と、振幅依存の振動特性の分析を行う。特に、建物のモデリングの向上に貢献すべく、東日本大震災を経験した建物の本震時の挙動や第震災前後振動特性、構造種別による振幅依存性に着目した分析を行う。

(4) 防災教育へのリアルタイム地震観測データの利活用の検討：各地点のリアルタイム観測データの画面、音声及び緊急地震速報との連動により地震発生過程、伝播経路、地盤による構造物の振動への影響等を直観的に表現し、理解しやすい防災教育への利活用を検討する。

## 4. 研究成果

(1) データ処理・表示システムの構築：通常時のデータ処理として、「建物オンラインヘルスマonitoringシステム」を構築し、各観測点の通常時の波形情報とスペクトル情報を表示するとともに、地

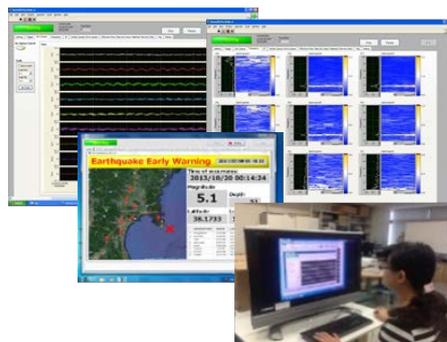


図2 リアルタイム波形情報表示ソフト

震時には緊急地震速報と連動する表示システムを構築するとともに（図2参照）と各観測点の観測情報を月報として、観測された地震それぞれの波形、応答スペクトル、計測震度、最大相関変位や地震前後の固有振動数の変化を整理するシステムを構築した。

(2) 前線波形情報を用いたリアルタイム地震動予測：これまで、前線波形情報を用いた即時地震動予測法としてニューラルネットワークを用いたリアルタイム地震動予測法の検討を実施した経緯があるが、本研究では、より合理的な手法としてRVM（関連ベクトルマシン）を用いて震度予測を行うとともに建物の揺れの予測のためのスペクトル予測法の検討を発展的に行った。また、手法的には粒子法と同じである輻射反射理論に基づくデータ同化手法<sup>3)</sup>を適用したリアルタイム地震動予測手法として震度予測ばかりでなく、スペクトル予測を発展的に行った。

図3に、データ同化手法による以下に現状把握及び地震動予測の解析フローを、図4にスペクトル情報の予測フローを示す。

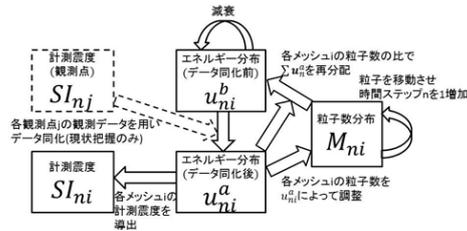


図3 現状把握及び地震動予測の解析フロー



図4 スペクトル情報の予測フロー

(3) 微動観測および地震時観測データの分析：東日本大震災を経験した建物の長期にわたる連続観測データに基づく、大震災時の挙動の分析や被災前後の振動特性の振幅依存性<sup>3)</sup>や季節変化に関する新しい知見を得るとともに、耐震補強に伴う振動特性の変化や、構造種別ごとの分析として、鉄筋コンクリート造・鉄骨造・プレキャストコンクリート(PcaPa)外枠補強建物などの振幅依存性に関する分析を行った。以下に多くの観測データを用いた分析例を示す。

図5は、牡鹿総合支所における長期モニタリング（2007年7月～2016年10月）に

基づく微動レベルの長辺方向の1次固有振動数の変化を示したものであり、3.11大震災における最上階の観測記録（最大加速度853ガル）とともに、3.11の前後については、時間を引き延ばした図、および季節変化に伴う日平均気温も比較のために示している。この図より分かることは、3.11の東日本大震災により固有振動数が約20%低下（剛性低下率が40%）していること、震災後は気温の変化に対する剛性の変化が約13%であり、震災前の変化約6%に比べて大きくなっていること、震災後は気温の増大に伴い、固有振動数も増大（剛性が増大）していることが分かる。震災前の季節変化の変化量は小さいが震災後と逆の傾向を示し、気温の増大と共に固有振動数が減少している。

図6は、牡鹿総合支所における①震災前、②震災後耐震改修前、および③耐震改修後における1次固有振動数の振幅依存性を長辺方向ばかりでなく短辺方向についても示したものである。図中には微動レベルの値を示している。この図より、振幅の増大に伴い固有振動数の低下が顕著であること、震災後は固有振動数が低下しているものの勾配はほぼ同程度であること、および耐震補強による剛性回復に伴い固有振動数の増加と勾配の低下が見取れる。

図7は、構造種別による1次固有振動数の振幅依存性を示したものであり、白石市庁舎（RC造+PcaPa外付けフレーム補強）、大崎市鹿島台庁舎（S造）、および大船渡市庁舎（RC造）における振幅依存性を比較して示したものである。この図より、S造ではRC造に比べて振幅依存性が小さいこと、PcaPa外付けフレーム補強建物では振幅依存性がほとんど見られないことが分かる。

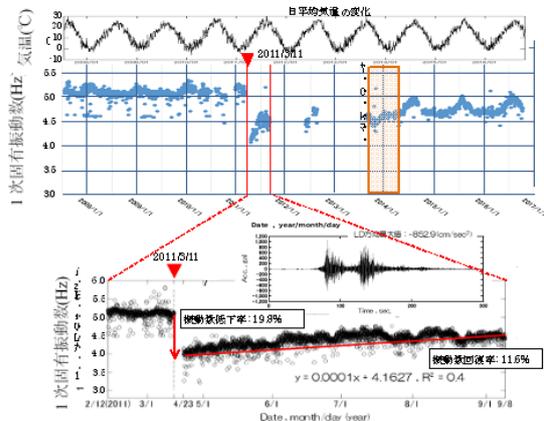


図5 牡鹿総合支所における1次固有振動数の長期モニタリング

(4) 研究成果の発表と利活用：研究成果を論文として纏めるとともに、「地震のリアルタイムモニタリングと情報の利活用」に

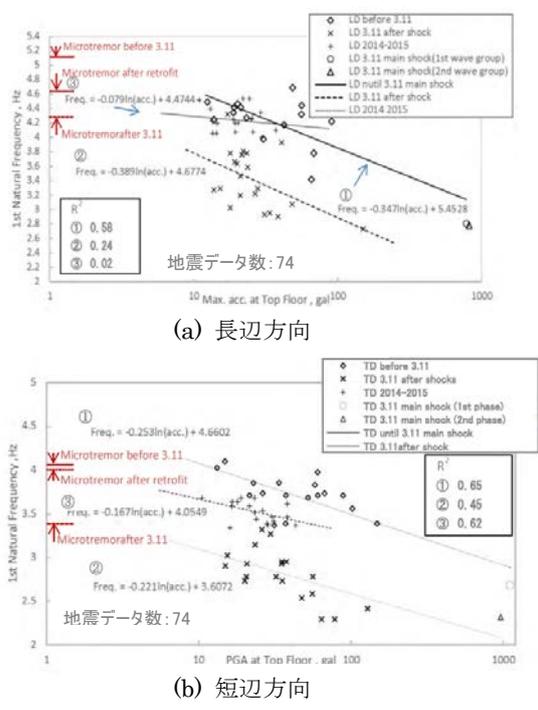


図6 牡鹿総合支所における1次固有振動数の振幅依存性

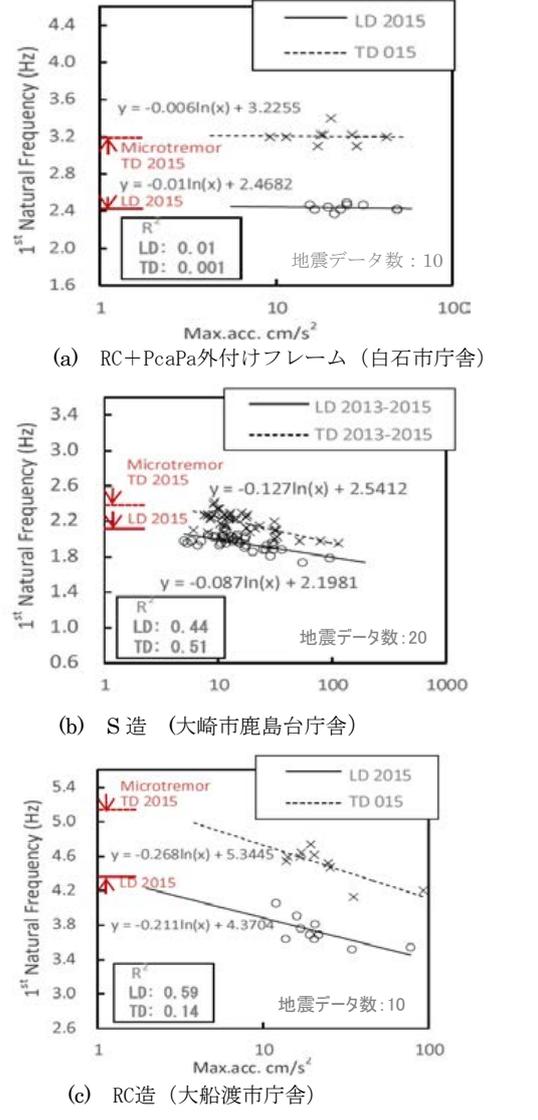


図7 構造種別による1次固有振動数の振幅依存性の違い

関する研究会や世界地震工学会議等国外の研究会や学会で発表した。また、開発してきたリアルタイム地震観測システムの海外展開を行っているモンゴル国ウランバートル市で技術指導を行うとともに、工学系高度教育プログラムの一環として招待講演を行った。

<参考文献>

- 1) 源栄正人他、構造ヘルスマonitoringと緊急地震速報の連動による早期地震情報統合システムの開発、日本建築学会技術報告集、28号、2008年、675-680
- 2) Serdar Kuyuk and Masato Motosaka, Real-time Ground Motion Forecasting Using Front-Site Waveform Data Based on Artificial Neural Network, Journal of Disaster Research, Journal of Disaster Research, 4(4), 2009, 588-594.
- 3) Mitsuyuki Hoshiya, Shigeki Aoki: Numerical Shake Prediction for Earthquake Early Warning: Data Assimilation, Real-Time Shake Mapping, and Simulation of Wave Propagation, BSSA, 105(3), Early Edition, 2015.
- 4) 源栄正人他、東北地方太平洋沖地震における被災建物の振幅依存特性の長期モニタリング、日本地震工学会論文集、12(5)、2012年、117-132
5. 主な発表論文等  
 [雑誌論文] (計5件)
  - ① T. Tsamba, M. Motosaka, S. Ohno, D. Dalai, N. Enebish, B. Batkhoo, Real-time strong motion network with structural health monitoring function in Ulaanbaatar, Proc. 16WCEE, 査読有, 16, 2017年, Paper No. 1401
  - ② M. Motosaka, S. Ohno, K. Mitsuji, X. Wang, T. Hatakeyama, Development of Structural Health Monitoring System Combined with Earthquake Early Warning for Real-time Earthquake Information Navigation, Proc. 16WCEE, 査読有, 16, 2017年, Paper No. 803
  - ③ 館林大輔、源栄正人、同化手法を用いたスペクトル情報の即時予測、東北地域災害研究、査読無、第52巻、2016年、269-274

④ Yincheng Yang and Masato Motosaka, Ground Motion Estimation Using Front-Site Waveform Data Based on RVM for Earthquake Early Warning, Journal of Disaster Research, 査読有, Vol. 10, No. 4, 2015, 667-677

DOI:10.20965/jdr.2015, p0667

⑤ MOTOSAKA Masato, TSAMBA Tsoggerel, YOSHIDA Kazushi, MITSUJI Kazuya, Long-term Monitoring of Amplitude Dependent Dynamic Characteristics of a Building During the 2011 Tohoku Earthquake, Journal of JAEE, 査読有, Vol. 15, No. 3, 2015, 1-16

[学会発表] (計17件)

① Masato Motosaka, Susumu Ohno, Development of Structural Health Monitoring System Combined with Earthquake Early Warning for Real-time Earthquake Information Navigation, The 11th Conference on Theory and Practice of Geotechnical Issues on Buildings and Structures and the Mongolia-Japan Joint Research Seminar on Research on Earthquake Engineering, 2017. 3. 14, モンゴル科学技術大学 (Ulaanbaatar, Mongolia)

② T. Tsamba, M. Motosaka, S. Ohno, D. Dalai, N. Enebish, B. Batkhui, Real-time strong motion network with structural health monitoring function in Ulaanbaatar, 16WCEE, 2017. 1. 11, CasaPidera Convention Center (Santiago, Chile)

③ M. Motosaka, S. Ohno, K. Mitsuji, X. Wang, T. Hatakeyama, Development of Structural Health Monitoring System Combined with Earthquake Early Warning for Real-time Earthquake Information

Navigation, 16WCEE, 2017. 1. 10, CasaPidera Convention Center (Santiago, Chile)

④ 都丸英剛、源栄正人、実観測記録に基づく偏心を有する建物の振幅依存振動特性、東北地域災害研究集会、2016年12月24日、陸前高田コミュニティーホール (岩手県)

⑤ M. Lindler and M. Motosaka, Real-time Ground Motion Prediction Based on Data Assimilation Using Front-site Waveform information for Application to Local Earthquake Early Warning, 研究集会「地震のリアルタイムモニタリングと情報の活用」、2016年11月25日、東京大学地震研究所 (東京)

⑥ 源栄正人、大野晋、王欣、長期モニタリングデータに基づく建物の固有振動特性の季節変化と振幅依存性、研究集会「地震のリアルタイムモニタリングと情報の活用」、2016年11月25日、東京大学地震研究所 (東京)

⑦ 畠山智貴、王欣、大野晋、源栄正人、長期連続観測記録を利用した中低層既存建築物の振動特性評価—構造ヘルスマモニタリングシステムの精度向上に向けた構造別差異の検討—、日本地震工学会大会、2016年9月26日、高知工科大学永国寺キャンパス (高知県)

⑧ 畠山智貴、王欣、大野晋、源栄正人、長期連続観測記録を利用した中低層既存建築物の振動特性評価—東北地方太平洋沖地震による振動特性の変動—、日本地震工学会大会、2016年9月26日、高知工科大学永国寺キャンパス (高知県)

⑨ Y. Yang and M. Motosaka, Real-time Spectrum Estimation Using Front-site Waveform Information Based on RVM for Earthquake Early Warning, 日本建築学会大会、2016年8月25日、福岡大学 (福岡)

⑩ 畠山智貴、源栄正人、王欣、大野晋、連

続観測に基づく実存建物の振動特性評価、  
日本建築学会大会、2016年8月25日、福岡  
大学（福岡）

⑪ 畠山智貴、王欣、大野晋、源栄正人、実  
存建物の振動特性の長期モニタリング、東  
北地域災害研究集会、2016年1月9日、福島  
県杉妻会館（福島）

⑫ 館林大輔、源栄正人、同化手法を用いた  
スペクトルの即時予測、研究集会「ゆれを  
はじめとする個体地球物理的諸現象の監視  
及び予測システム」、2016年1月7日、東大  
地震研究所（東京）

⑬ Masato Motosaka, Development of  
Regional Earthquake Early Warning System  
with Structural Health Monitoring  
Function toward Real-time Earthquake  
Information Navigation, 日本地震工学会  
2015年年次大会, 2015年11月19日, 東大駒  
場キャンパス（東京）

⑭ 都丸英剛、源栄正人、久多良晃平、大加  
速度記録を観測した建物における長期モニ  
タリングデータに基づく振幅依存特性、日  
本建築学会2015年大会、2015年9月5日、東  
海大学（東京）

⑮ Motosaka M., Ohno S., Wang. X.,  
Mitsuji K., Development of Regional  
Earthquake Early Warning System with  
Structural Health Monitoring Function  
toward Real-time Earthquake Information  
Navigation, SSA 2015 Annual Meeting,  
2015.4.21, Pasadena (California, USA)

⑯ 源栄正人、次世代早期地震警報システム  
の展開～予測からナビゲーション、研究集  
会「揺れの即時予測システム：更なる高度  
化と新しい展開」、研究集会「揺れの即時  
予測システム：更なる高度化と新しい展開」、  
2015年1月9日、東京大学地震研究所（東京）

⑰ Yin-Cheng Yang and Masato Motosaka,  
Ground motion estimation using  
front-site waveform data based on sparse

Bayesian model for Earthquake Early  
Warning, The 5th Asia Conference on  
Earthquake Engineering, 2014.10.18,  
Howard International House, Taipei  
(Taiwan)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

源栄 正人 (MOTOSAKA, MASATO)

東北大学・災害科学国際研究所・教授

研究者番号：90281708

### (2) 研究分担者

大野 晋 (OHNO, SUSUMU)

東北大学・災害科学国際研究所・准教授

研究者番号：40361141

三辻 和弥 (MITSUJI, KAZUYA)

山形大学・地域教育文化学部・教授

研究者番号：90292250

王 欣 (WANG, XIN)

東北大学・災害科学国際研究所・助教

研究者番号：90610626