

臨時余震観測記録を用いた東北地方太平洋沖地震における登米市迫町佐沼の地震動推定

福島 康宏¹・山田 真澄²・後藤 浩之²

¹(株)エイト日本技術開発 保全・耐震・防災事業部 (〒164-8601 東京都中野区本町5-33-11)

E-mail:fukushima-ya@ej-hds.co.jp

²京都大学防災研究所助教 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

E-mail:masumi@eqh.dpri.kyoto-u.ac.jp, goto@catfish.dpri.kyoto-u.ac.jp

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震($M_w9.0$)で地震動による道路被害や家屋被害が局所的に大きかった。宮城県登米市迫町佐沼で臨時余震観測を4日間行った。観測された余震記録を用いて、余震観測点と周辺の強震観測点とのサイト増幅特性の相違を考慮し、本震の地震動の推定を行った。その結果、佐沼でも被害の集中していた地域では震度7相当の大きな地震動であった可能性があることがわかった。

Key Words : The 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, Seismic observation, Site effect

1. はじめに

2011年3月11日14時46分頃発生した東北地方太平洋沖地震($M_w9.0$)では、宮城県栗原市築館で震度7を観測した他、宮城県、福島県、茨城県、栃木県の広い範囲で震度6強を観測している¹⁾。

3月27日から4月2日に実施された現地調査によると、宮城県登米市迫町佐沼は周辺地域と比べて道路被害や家屋被害が顕著である²⁾。特に迫川右岸の西佐沼、小金丁地区で家屋被害が集中していた。これら家屋被害が集中している地区に最も近い震度観測点は、約1km北西の登米市役所に隣接する迫総合支所迫保健センター敷地内に設置されており、本震で震度6弱(計測震度5.9)が観測されている。ところが、震度観測点周辺とは被害状況が異なることから、西佐沼や小金丁地区では局所的にこれより大きな地震動を受けたことが推察される。

大地震による被害の原因を評価する上で、当該地点の地震動を精度良く推定することは重要である。特に、隣接した地域で地震動の違いが想定される場合には、地震動のサイト特性を適切に評価することが重要となる。そこで、2011年4月16日から19日にかけて、西佐沼地区において臨時余震観測を実施した。

本研究では、西佐沼地区で得られた余震記録を用いて、同時に得られている周辺の強震観測点での余震記録と比較することにより、余震観測点でのサイト増幅特性を評価する。続いて、周辺の強震観測点での本震記録に対してサイト増幅特性で補正を行う



図-1 登米市迫町佐沼の被害地域

ことによって、西佐沼地区での本震地震動を推定する。

2. 登米市迫町佐沼での被害と臨時余震観測の概要

登米市迫町佐沼での被害地域を図-1に示す。特に家屋被害が顕著であったのは、迫川右岸の西佐沼(登米市迫町佐沼字西佐沼)の佐沼大通り商店街あたりや、小金丁(登米市迫町佐沼字小金丁)地区である



写真-1 小金丁地区の家屋被害



写真-2 錦橋の被害

表-1 余震観測で記録の得られた地震（黄色で着色した3地震をサイト増幅特性評価に使用）

発震時刻	経度 (度)	緯度 (度)	深さ (km)	マグニ チュード	震源域	震源距離 (km)
2011/04/16 22:01:21	142.190	38.734	39.1	3.8	E OFF MIYAGI PREF	94.9
2011/04/16 22:36:38	142.102	39.641	48.4	3.8	E OFF IWATE PREF	140.3
2011/04/16 22:52:23	141.751	38.334	57.4	4.1	E OFF MIYAGI PREF	84.6
2011/04/17 01:01:11	141.885	38.343	63.1	3.8	E OFF MIYAGI PREF	95.1
2011/04/17 01:21:18	141.628	38.681	55.4	3.8	KINKAZAN REGION	66.9
2011/04/17 05:36:48	143.762	36.936	54.0	5.4	FAR E OFF CENTRAL HONSHU	302.8
2011/04/17 05:54:10	141.889	38.640	48.9	4.0	KINKAZAN REGION	77.8
2011/04/17 06:29:39	141.808	38.319	58.0	3.9	E OFF MIYAGI PREF	88.7
2011/04/17 10:37:51	142.370	38.651	38.0	4.8	E OFF MIYAGI PREF	109.0
2011/04/17 11:21:26	141.524	38.274	18.5	3.9	KINKAZAN REGION	57.1
2011/04/17 13:23:58	141.906	38.403	58.7	4.3	E OFF MIYAGI PREF	90.9
2011/04/17 16:06:05	141.972	38.889	49.8	3.9	KINKAZAN REGION	86.7
2011/04/17 21:51:43	140.730	37.066	7.9	4.6	EASTERN FUKUSHIMA PREF	184.7
2011/04/17 23:46:52	140.834	37.094	6.6	4.5	EASTERN FUKUSHIMA PREF	179.8
2011/04/18 00:47:29	141.280	36.997	29.4	4.8	E OFF FUKUSHIMA PREF	190.0
2011/04/18 01:48:01	141.531	37.407	40.5	4.4	E OFF FUKUSHIMA PREF	150.6
2011/04/18 01:56:48	142.233	38.744	38.4	4.1	E OFF MIYAGI PREF	98.1
2011/04/18 02:34:19	142.623	38.040	19.0	4.3	E OFF MIYAGI PREF	145.1
2011/04/18 09:19:21	142.045	38.849	45.7	3.6	KINKAZAN REGION	88.6
2011/04/18 11:08:14	140.659	37.088	8.3	4.2	EASTERN FUKUSHIMA PREF	183.8
2011/04/18 17:02:00	141.242	37.172	29.4	4.4	E OFF FUKUSHIMA PREF	170.7
2011/04/18 19:56:05	141.835	38.520	48.5	4.1	KINKAZAN REGION	76.1
2011/04/18 22:03:21	142.377	40.169	36.8	4.6	NE OFF IWATE PREF	196.8
2011/04/18 23:19:26	141.896	38.320	64.0	3.9	E OFF MIYAGI PREF	97.3
2011/04/19 00:07:56	140.934	37.230	6.9	4.1	EASTERN FUKUSHIMA PREF	163.5
2011/04/19 03:02:35	142.887	39.444	22.8	4.8	E OFF IWATE PREF	170.2
2011/04/19 04:14:27	140.387	39.603	5.6	4.9	SOUTHERN AKITA PREF	123.6
2011/04/19 06:33:51	141.467	36.714	37.4	4.8	E OFF IBARAKI PREF	223.4

(写真-1参照)。また、迫川にかかる錦橋は、右岸側の桁が約40cm上流側に移動し、桁間に段差が生じており、通行できなくなっていた(写真-2参照)。

この地域は、過去にも地震被害を繰り返し受けている。武村は、1900年5月12日の宮城県北部地震($M_j7.0$)、1962年4月30日の宮城県北部地震($M_j6.5$)の被害データを再整理し、詳細な震度分布を評価している³⁾。これによると、佐沼地区では1900年の地震は震度6弱、1962年の地震では5強と評価されている。

また、地元住民の話によると、2003年5月26日に発生した宮城県沖を震源とする地震($M_j7.1$)や、2008年6月14日に発生した岩手・宮城内陸地震($M_j7.2$)などの近年の地震においても、佐沼大通り商店街では

家屋被害が数件ずつ発生していたとのことである。

臨時余震観測は、家屋被害の集中していた西佐沼の佐沼大通り商店街内に、4月16日から19日までの4日間地震計を設置して行った。観測に用いた地震計は、(株)ミットヨのポータブル加速度計GPL-6A3Pである。ある振幅レベルを超えたときに計測を開始するトリガ計測を用いて観測を行った。観測期間内に発生して地震動が記録された地震の諸元を表-1に示す。このうち、黄色に着色した3地震は、防災科学技術研究所KiK-net⁴⁾の田尻観測点(MYGH06)の記録が公開されている地震である。以降、これら3地震の記録を用いてサイト増幅特性の補正を行う。

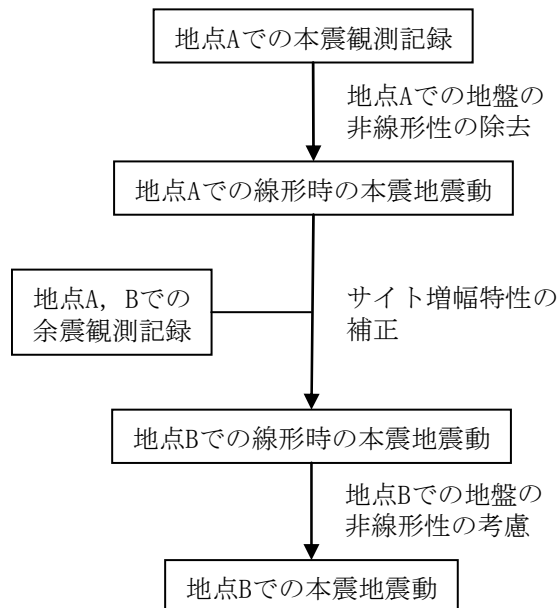


図-2 本検討での本震地震動推定フロー

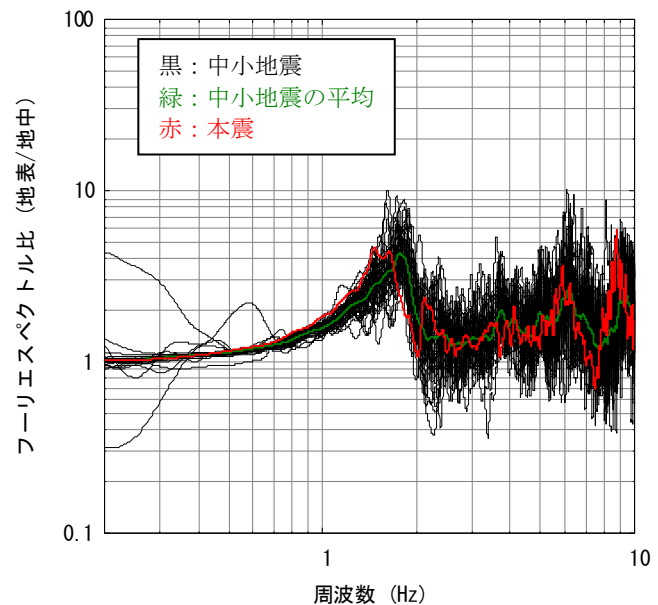


図-3 KiK-net田尻(MYGH06)地点でのフーリエスペクトル比(地表/地中)

3. 地震動推定手法

地震動のサイト特性を考慮して強震波形を地震後に推定する方法は、①経験的グリーン関数法や統計的グリーン関数法などによる断層モデルを用いた強震波形計算に基づく方法⁵⁾、②対象地点とその周辺の強震観測点でのサイト特性の相違などに基づいて、強震観測点での本震記録を補正することによる方法⁶⁾、の大きく2つに分けられる。①に比べて②の方法は、震源特性のパラメータ設定の必要がない分、簡便である。東北地方太平洋沖地震の破壊過程について、いくつか報告が出されている⁷⁾が、未解明な部分も多い状況であると判断して、本検討では、②の方法を用いることとする。

秦ほか⁶⁾によれば、②の方法は「サイト特性置換手法」と呼ばれている。秦ほかの方法では、サイト増幅特性だけでなく、サイト位相特性の補正も行っている。今回は、得られた余震の地震規模が小さく、これらの記録を用いてサイト位相特性の補正を行うと十分な継続時間が再現できない可能性があると考えられることから、本検討ではサイト増幅特性のみ補正する。

本検討で考える問題設定を整理すると、以下のようになる。

- ・条件1：本震記録の得られている地点Aと、本震記録の得られていない地点Bの2地点がある。
 - ・条件2：地点A、Bともに余震記録が得られている。
 - ・問題：地点Aでの本震記録を、余震記録に基づいたサイト増幅特性で補正することにより、地点Bの本震の地震動を推定する。
- ただし、ここでのサイト増幅特性は、余震記録な

ど中小地震記録に基づくものであり、大地震時の地盤の非線形性は考慮されていない。よって、地点Aでの本震記録から地盤の非線形性による影響を除くこと、地点Bで推定された地震動に地盤の非線形性による影響を考慮する必要がある。本検討で用いた地震動推定のフローを図-2に示す。

4. 西佐沼地区における本震の地震動推定

前節で示した方法で、西佐沼地区での本震地震動の推定を行う。ここでは、地点Aを、西佐沼地区より約15km南西のKiK-net田尻(MYGH06)の地表観測点、地点Bを西佐沼地区の余震観測点とする。

(1) MYGH06地点での地盤の非線形性の除去

MYGH06地点では、地表および地中100mでの記録が得られている。地中100mの記録に対する地表の記録のフーリエスペクトル比を図-3に示す。黒色の線は中小地震、赤色の線は本震である。本震のスペクトル比のピーク周波数が中小地震と比べて若干、低周波側にシフトしており、ピーク値も小さくなっている。MYGH06地点は深さ2mで泥岩層が出現する、ほぼ岩盤相当の地盤であるが、本震時には非線形挙動したと考えられる。本研究では、MYGH06地点の地表での本震記録のフーリエスペクトルを、本震の地表/地中のフーリエスペクトル比(図-3の赤色の線)で割り、中小地震の地表/地中のフーリエスペクトル比の平均(図-3の緑色の線)をかけたものを、MYGH06での線形時の本震地震動のフーリエスペクトルとした。

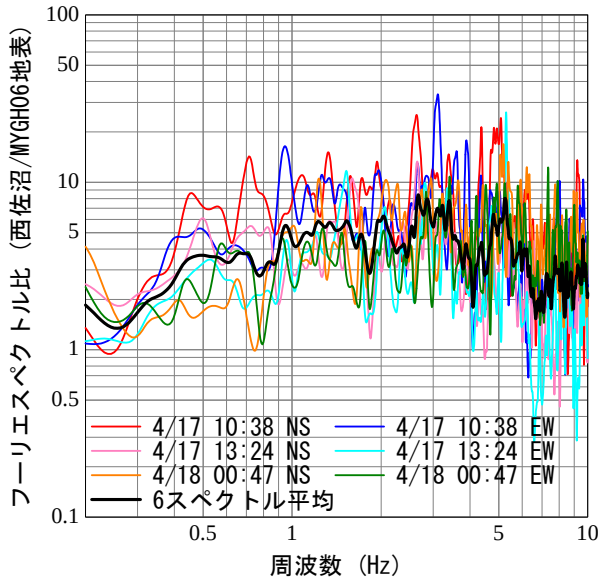


図-4 西佐沼地点/MYGH06地点のフーリエスペクトル比

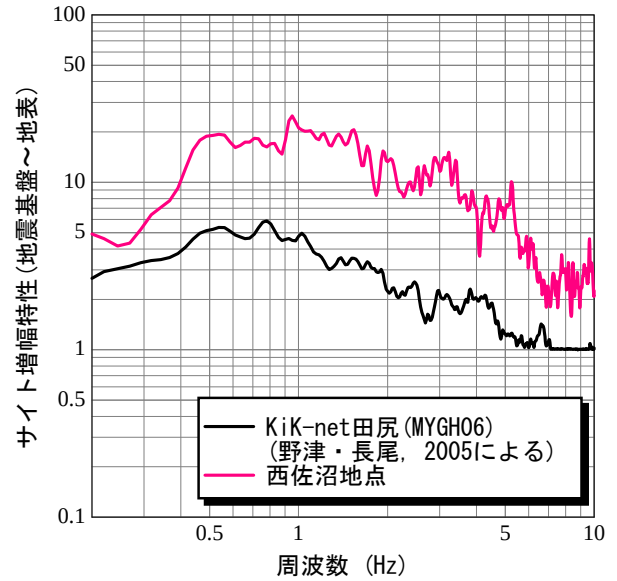


図-5 西佐沼地点のサイト増幅特性(地震基盤～地表)

表-2 西佐沼地点の一次元地盤モデル

層番号	土質	開始深度 (m)	終了深度 (m)	層厚 (m)	S波速度 (m/s)	密度 (g/cm ³)
1	有機質粘土	0.00	3.80	3.80	80	1.60
2	有機質砂・シルト質砂	3.80	6.90	3.10	110	1.70
3	有機質粘土	6.90	8.70	1.80	110	1.65
4	有機質シルト・シルト	8.70	13.80	5.10	150	1.75
5	有機質粘土	13.80	23.40	9.60	150	1.70
6	礫混じり砂	23.40	23.80	0.40	150	1.70
7	砂	23.80	-	-	830	2.00

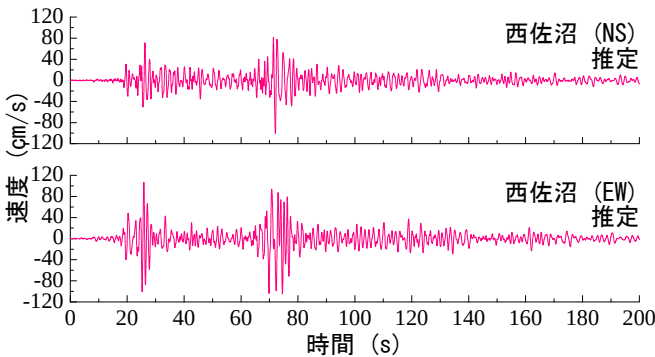


図-6 西佐沼地点での推定本震地震動の速度時刻歴波形 (0.2～2Hz)

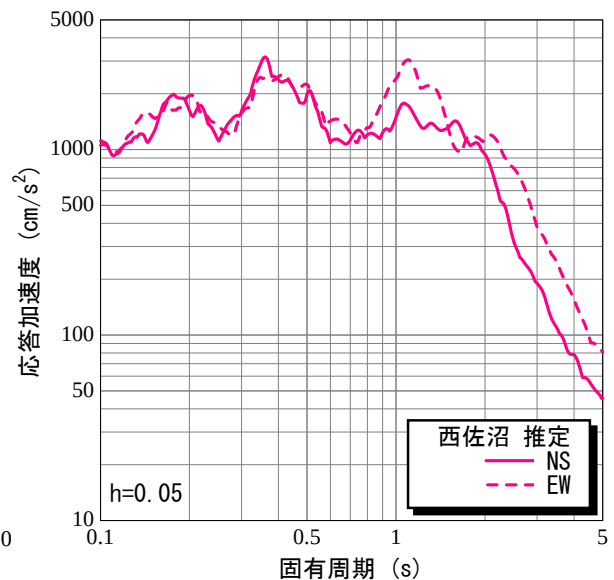


図-7 西佐沼地点での推定本震地震動の加速度応答スペクトル(減衰5%)

(2) 西佐沼地点でのサイト増幅特性の評価

表-1において黄色で着色した3つの余震のフーリエスペクトルについて、MYGH06地点地表に対する西佐沼地点の比をとったものが図-4である。黒色の線で示しているのは、水平成分の計6つのスペクトルの平均である。MYGH06地点の地震基盤から地表の増幅特性は、野津・長尾がスペクトルインバージョンを用いて評価している(図-5の黒色の線)⁸⁾。これに、地点間の平均フーリエスペクトル比(図-4の黒色の線)をかけると、西佐沼地点でのサイト増幅特性が図-5の赤色の線のように求められる。求められたサイト増幅特性は、MYGH06地点のサイト増幅

特性を全周波数帯にわたって上回る。

(3) 西佐沼地点での推定本震地震動

MYGH06地点地表での線形時の本震地震動のフーリエスペクトルを、MYGH06でのサイト増幅特性で割り、西佐沼地点でのサイト増幅特性をかけて逆フーリエ変換することにより、西佐沼地点での線形時の本震地震動が得られる。これを、線形の重複反射法を用いて工学的基盤に引き戻し、非線形性を考慮して、西佐沼地点の地表での本震地震動を求める。ここでは、西佐沼地点に近いボーリング柱状図⁹⁾に基づき、表-2に示す一次元地盤モデルを設定した。

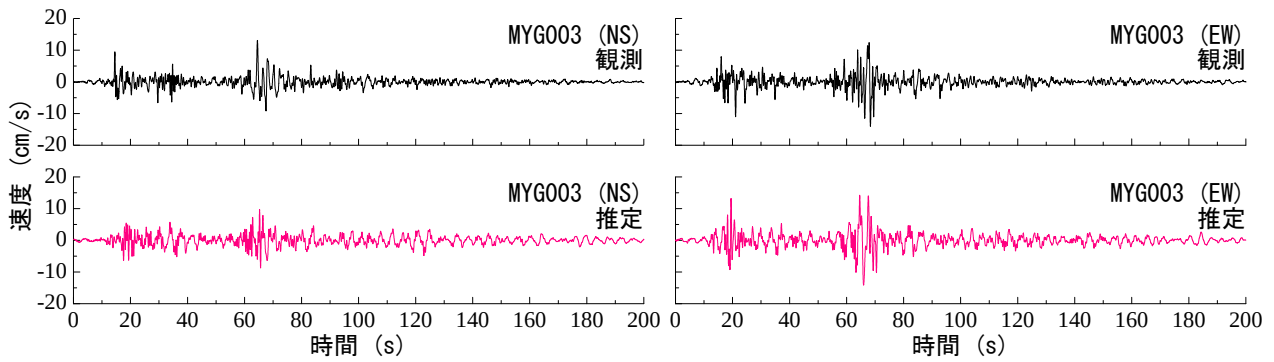


図-8 K-NET東和(MYG003)地点での本震推定地震動と観測記録の速度時刻歴波形(0.2~2Hz)

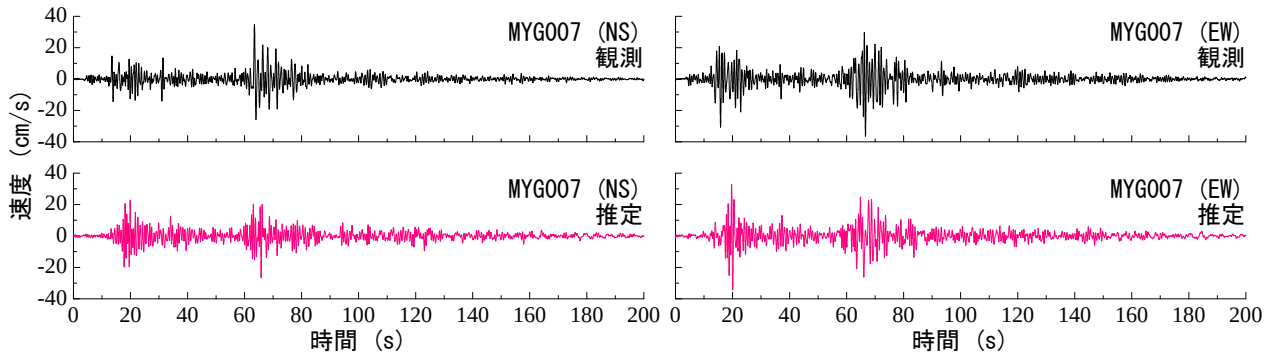


図-9 K-NET豊里(MYG007)地点での本震推定地震動と観測記録の速度時刻歴波形(0.2~2Hz)

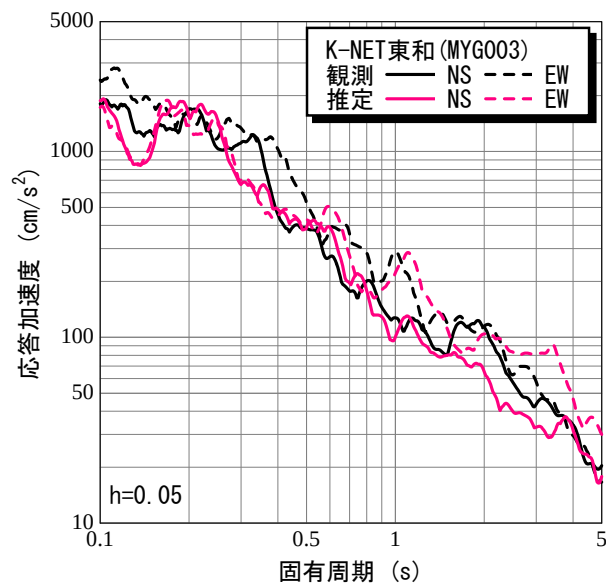


図-10 MYG003地点での推定本震地震動の加速度応答スペクトル(減衰5%)

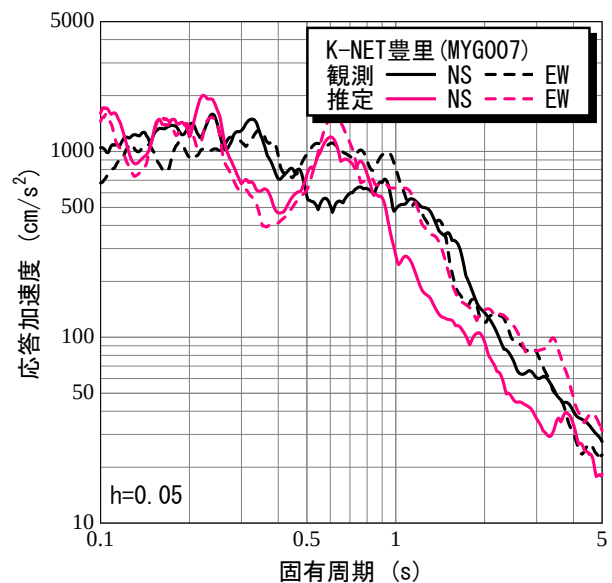


図-11 MYG007地点での推定本震地震動の加速度応答スペクトル(減衰5%)

また、非線形性の考慮には、Suetomi and Yoshidaの等価線形化法¹⁰⁾を適用し、安田・山口の動的変形特性¹¹⁾を用いている。

推定された西佐沼地点での本震地震動の速度波形を図-6に示す。なお、波形の表示には、土木構造物の地震応答計算を行う上で特に重要となることが多い0.2-2Hzのバンドパスフィルタを施している。また、減衰5%の加速度応答スペクトルを図-7に示す。推定された波形から計算される計測震度は6.56(震度7)，SI値は157.8cm/sと大きく、西佐沼地点付近

での被害状況のイメージと整合する地震動が推定された。

5. 手法の検証

前節の西佐沼地区での推定と同じ条件、すなわち同じ3つの余震記録しか得られていないと仮定して、周辺の強震観測点での本震地震動を推定し、本震観測記録と比較をすることにより、本検討の妥当性を

表-3 本震推定地震動と観測記録の地震動指標の比較

観測点	計測震度	SI 値 (cm/s)
K-NET 東和 (MYG003)	5.54	33.55
	5.42	29.28
K-NET 豊里 (MYG007)	5.79	46.34
	5.71	46.93

上段：観測値

下段：推定値

確認する。対象とする観測点は、K-NET東和観測点(MYG003)およびK-NET豊里観測点(MYG007)である。MYG003地点は深さ4mで岩盤が出現する地盤、MYG007地点は軟弱な粘土層、シルト層が表層約10m堆積している地盤である。

本震推定地震動と観測記録の速度波形(0.2～2Hz)の比較を図-8, 9に、加速度応答スペクトル(減衰5%)の比較を図-10, 11に示す。MYG006地点の位相特性を採用しているため、速度波形の細かいフェーズは合っていないが、その最大値は良く再現できている。加速度応答スペクトルについては、本震時に地盤の非線形化の影響が小さかったと考えられるMYG003地点では概ね良好に再現できている。

また、本震推定地震動と観測記録の計測震度、SI値の比較を表-3に示す。地震動指標についても良好に再現されており、余震記録によって、現実的な本震地震動が推定できた考えられる。

6. おわりに

東北地方太平洋沖地震で家屋被害の集中していた宮城県登米市迫町佐沼の西佐沼地区での臨時余震観測記録を用いて、周辺の強震観測点とのサイト増幅特性の差を評価し、西佐沼地区での本震の地震動の推定を行った。その結果、本震で震度7相当の大きな地震動であった可能性があることがわかった。

今後、被害の集中していた西佐沼、小金丁地区と、その周辺地区との地盤条件と地震動の相違について検討する予定である。

また、位相特性を考慮した地震動推定についても今後の課題であると考えている。

謝辞：佐沼大通り商店街の皆様には、余震観測の場を提供いただくなど、多大な協力をいただきました。また、防災科学技術研究所K-NET、KiK-netの強震記録を使用させていただきました。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 気象庁：平成23年3月 地震・火山月報(防災編)，<http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/gaikyo/monthly201103/201103index.html>，2011.
- 2) 後藤浩之：平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震 地震動に関する被害調査報告，<http://www.catfish.dpri.kyoto-u.ac.jp/~goto/eq/20110311/0402report.pdf>，2011.
- 3) 武村雅之：1900年および1962年宮城県北部地震の被害データと震度分布，歴史地震，第20号，pp.201-221，2005.
- 4) 防災科学技術研究所：強震観測網(K-NET，KiK-net)，<http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/>
- 5) たとえば，Kamae, K. and Irikura, K: Source model of the1995 Hyogo-ken Nanbu earthquake and simulation of near-source ground motion, BSSA, Vol.88, pp.400-412, 1998.
- 6) たとえば，秦吉弥，一井康二，丸山喜久，福島康宏，酒井久和，中村晋：位相を考慮したサイト特性置換手法の震源近傍地点での適用 - 2004 年新潟県中越地震における検討 -，構造工学論文集，Vol.57A，pp.340-353，2011.
- 7) たとえば，鈴木亘，青井真，関口春子，功刀卓：強震記録を用いて推定された平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖地震の震源過程，日本地球惑星科学連合2011年大会，MIS036-P43，2011.
- 8) 野津厚，長尾毅：スペクトルインバージョンに基づく全国の港湾等におけるサイト増幅特性，港湾空港技術研究所資料，No.1112，56p，2005.
- 9) 宮城県：宮城県地震地盤図作成調査報告書，257p，1985.
- 10) Suetomi, I. and Yoshida, N.: Damping characteristics of soil deposits during strong ground motions, Proc. 2nd International Symposium on the Effect of Surface Geology on Seismic Motion, Yokosuka, Japan, pp.765-772, 1998.
- 11) 安田進，山口勇：種々の不攪乱土における動的変形特性，第20回土質工学研究発表会講演集，pp.539-542，1985.

Strong Motion Estimation for the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake Based on the Aftershock Observation Recorded at Sanuma District

Yasuhiro FUKUSHIMA, Masumi YAMADA and Hiroyuki GOTO

We conducted four-day aftershock observation at Sanuma, Hasama-cho, Tome city, where roads and houses were subjected to severe damage during the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake. Using these aftershock records, we evaluated the difference of site amplification effects between Sanuma and nearby seismic stations, and estimated strong motion at Sanuma district during the main shock. The seismic intensity during the main shock at Sanuma was estimated as 7 with the JMA intensity scale.