2011年東北地方太平洋沖地震(Mw 9.0)の本震記録と余震記録を用いた 首都圏およびその周辺地域に於ける長周期地震動の特性

津野靖士¹⁾、山中浩明²⁾、翠川三郎³⁾、山本俊六⁴⁾、三浦弘之⁵⁾、酒井慎一⁶⁾、
平田直⁷⁾、笠原敬司⁸⁾、木村尚紀⁹⁾、明田川保¹⁰⁾

1) 正会員 鉄道総合技術研究所、副主任研究員 博士（工学）
e-mail : stsuno@rtri.or.jp

2) 正会員 東京工業大学、教授 工博
e-mail : yamanaka@depe.titech.ac.jp

3) 正会員 東京工業大学、教授 工博
e-mail : smidorik@enveng.titech.ac.jp

4) 正会員 鉄道総合技術研究所、室長 博士（工学）
e-mail : syama@rtri.or.jp

5) 正会員 東京工業大学、助教 博士（工学）
e-mail : hmiura@enveng.titech.ac.jp

6) 東京大学地震研究所、准教授 博士（理学）
e-mail : coco@eri.u-tokyo.ac.jp

7) 東京大学地震研究所、教授 理博
e-mail : hirata@eri.u-tokyo.ac.jp

8) 東京大学地震研究所、教授 理博
e-mail : kkasa@eri.u-tokyo.ac.jp

9) 防災科学技術研究所、主任研究員 博士（理学）
e-mail : kimura@bosai.go.jp

10) 神奈川県温泉地学研究所、研究課長 理博
e-mail : ake@onken.odawara.kanagawa.jp

要 約

2011年東北地方太平洋沖地震の本震と余震の強震記録を用いて、首都圏および周辺地域に於ける周期2秒以上の地震動特性とサイト増幅特性を評価した。約650点の本震記録を用いたPGVとPGAから地震動が首都圏で複雑な分布を示すこと、擬似速度応答スペクトル分布から川崎～品川付近の東京湾沿岸部で周期2秒と3秒の速度応答が極めて大きいことが分かった。地表/地中の速度応答スペクトル比から算出したサイト増幅特性は、周期3秒以上の地震動に対して震源の位置に依存し、首都圏およびその周辺地域では東北地方の地震よりも長野県北部や静岡県東部の地震による地震動が大きく増幅されることが分かった。

キーワード： 2011年東北地方太平洋沖地震、首都圏、地震動、擬似速度応答スペクトル、サイト増幅特性、方位依存性

1. はじめに

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震（Mw 9.0）では岩手県沖から茨城県沖に及ぶ太平洋プレート境界で破壊が進行し^{1) 2)}、震源断層の最南端である茨城県沖から約200km離れた首都圏に於いても、多くの地点で30cm/sの最大速度を超える強い揺れが観測された³⁾。また、長周期地震動が関東平野全域で観測され³⁾、首都圏に於いても固有周期の長い高層建築物などでは大きな地震応答が観測された^{4) 5)}。2011年東北地方太平洋沖地震（Mw 9.0）では、近年の首都直下プロジェクトを通じて首都圏およびその周辺地域に約300の観測点を新設したMeSO-net（Metropolitan Seismic Observation network）^{6) 7)}と、全国に20～30km間隔で等密度に配置されているK-NET⁸⁾やKiK-net、地方自治体が保守・管理しているSK-net⁹⁾を併せて、1000点以上の本震記録が関東平野全域で収録された。また、関東平野では公的な研究機関以外に多くの大学¹⁰⁾や民間の研究所が独自のシステムで強震観測点を保守・管理している。それら多くの機関で収録された地震記録を収集・整理し、関東平野で観測された地震動の空間分布や地震動特性を報告することは、今後の関東平野に於ける地震防災を考える上での基礎資料として非常に重要である。本研究では、2011年東北地方太平洋沖地震（Mw 9.0）の本震記録を整理し、首都圏およびその周辺地域に於ける約650点の観測記録を用いて高密度な地震動の空間分布を求めた。また、東北地方太平洋沖地震は震源の規模がMw 9.0と極めて大きかったため、本震後は東北地方のみならず東日本全域で地震活動が活発化し^{11) 12)}、東北地方と関東平野の周辺地域でMj 6.5程度以上の地震が数多く発生した。そこで、首都圏およびその周辺地域で観測されたそれら中規模以上の地震による長周期地震動について、本震と同様に地震動の空間分布を求め、その特性を検討した。

関東平野を対象とした長周期地震動についての研究は数多く、古くは、工藤・田中¹³⁾、田中・他¹⁴⁾などがあり、東京で観測される周期数秒の地震動が厚い堆積層により増幅された表面波であることが明らかにされた。近年では、複数機関の地震観測網で得られた数百の実記録を用いて、関東平野で観測された長周期地震動の特性を検討した研究事例、例えばKoketsu and Kikuchi¹⁵⁾やMiyake and Koketsu¹⁶⁾がある。Miyake and Koketsu¹⁶⁾では、2004年紀伊半島南東沖地震の際に、大阪平野、濃尾平野では周期5秒の地震動が卓越しているのに対して、関東平野では周期7～10秒の地震動が卓越していることが報告されている。また、東京で観測された長周期地震動の卓越周期は震源の位置に依存することが、座間¹⁷⁾や植竹¹⁸⁾、湯沢・南雲¹⁹⁾により報告されている。本研究に於いても、首都圏およびその周辺地域で観測された長周期地震動の増幅について、震源の位置による影響を検討した。なお、長周期地震動の研究については、座間²⁰⁾、座間²¹⁾に詳しく記述されている。

2. 使用した地震記録

本研究では、首都圏およびその周辺地域に於ける周期2秒以上の地震動特性とサイト増幅特性を評価するために、2011年東北地方太平洋沖地震の本震（Mw 9.0）と震源規模が比較的大きく深さ70km以下の11の余震（Mj 6.4～7.1）による観測記録を使用した。本震の際に首都圏およびその周辺地域で観測された地震動の空間分布を把握するため、本研究の対象とした範囲（図1a）で得られた約650点の地震記録（MeSO-net、K-NET、KiK-net、SK-net、横浜市、気象庁、国土交通省、建築研究所、東京大学地震研究所、東京工業大学、東京電力などで収録されたデータ）を用いた。また、余震については、地震動の空間分布およびサイト増幅特性を把握するために、本研究の対象範囲（図1a）で得られた地震記録（MeSO-net、K-NET、KiK-net、SK-netで収録されたデータ）を用いた。なお、本研究では長周期地震動を対象としているため、記録長が100秒以下の余震記録は使用しなかった。

使用した地震の震央と地震諸元を図1bと表1に各々示す。特に、図1bと表1に示す番号3、4、5、9、11の地震は、本研究の対象とした首都圏に対して震央距離が同程度（おおよそ120～180km）かつ震源の規模が同程度（Mj 6.4～6.7）の余震であり、それら余震の震央と首都圏の方位は、番号9と11の地震の震央が近いことを除けば、程よく分散している。

図1 使用した地震観測点の位置と使用した地震の震央

表1 地震諸元

No.	Date	Latitude(N)	Longitude(E)	Depth(km)	Magnitude	Location
1	2011/03/11/14:46	38.0	142.9	24	Mw 9.0	Off Miyagi Pref.
2	2011/03/11/20:37	39.165	142.622	24	Mj 6.7	Off Iwate Pref.
3	2011/03/12/03:59	36.985	138.597	8	Mj 6.7	Northern Nagano Pref.
4	2011/03/13/10:26	35.8	141.9	10	Mj 6.4	Off Ibaraki Pref.
5	2011/03/15/22:31	35.308	138.713	14	Mj 6.4	Eastern Shizuoka Pref.
6	2011/03/28/07:24	38.389	142.319	31	Mj 6.5	Off Miyagi Pref.
7	2011/04/07/23:32	38.2	141.924	66	Mj 7.1	Off Miyagi Pref.
8	2011/04/11/17:16	36.942	140.675	6	Mj 7.0	Hamadori, Fukushima Pref.
9	2011/04/12/14:07	37.052	140.643	15	Mj 6.4	Hamadori, Fukushima Pref.
10	2011/06/23/06:51	39.944	142.594	36	Mj 6.9	Off Iwate Pref.
11	2011/07/31/03:54	36.902	141.22	57	Mj 6.5	Off Fukushima Pref.
12	2011/08/19/14:36	37.645	141.8	51	Mj 6.5	Off Fukushima Pref.

3. 関東平野に於ける地震動分布

3.1 2011年東北地方太平洋沖地震 (Mw 9.0)

本研究の対象地域 (図1a) に於ける本震の高密度な地震動分布を報告する。地表記録と工学的基盤相当の地中記録 (MeSO-netは地中20mに設置されており⁷⁾、主としてMeSO-netデータを利用) の水平動のベクトル振幅に対する最大速度 (PGV) と最大加速度 (PGA) を図2と図3に各々示す。速度データの算出には、加速度データを積分し、カットオフ周期50秒のハイパス・フィルター処理を行っている。ただし、地中記録は主としてMeSO-netのデータを、地表記録はK-NET、KiK-net、SK-netなどのデータを使用しているため、地表と地中の観測点位置が異なっている (図2、3のaとb)。首都圏およびその周辺地域に於けるPGVの空間分布は、震源断層の最南端である茨城県沖¹⁾²⁾から近い茨城県南部を除けば、地表と地中ともに東京湾沿岸部で大きい傾向が認められる。特に、川崎～品川付近の東京湾沿岸部では地表で50cm/secを超えるPGVが観測されている。また、地表のPGVは地中のPGVと比較してその値が大きく、

工学的基盤以浅の表層地盤による増幅効果の影響が小さくないことを示している。一方で、PGAの空間分布はPGVのそれとは異なり、東京湾沿岸部が大きな値を示すだけでなく、都内中心部と西東京～埼玉県南部付近でも地表で 300cm/sec^2 を超えるPGAが観測されている。また、震源断層から近い茨城県南部では、PGVと同様にPGAに対しても地表で 1000cm/sec^2 を超える大きな値が観測されている。さらに、千葉市沿岸部ではPGVとPGAともに大きな値を観測し、低速度の軟弱な堆積層の存在²²⁾が示唆される。地表のPGVとPGAは地中のそれらに比べて大きく、PGVとPGAを評価するためには工学的基盤以浅の表層地盤による増幅効果の影響が無視できないことを示している。

つぎに、首都圏およびその周辺地域に於ける周期2～12秒の擬似速度応答スペクトル（減衰5%）分布を図4に示す。本研究では、加速度記録から求めたNS成分とEW成分の擬似速度応答スペクトル（減衰5%）の相乗平均を水平動の速度応答スペクトルとした。周期ごとの速度応答スペクトル分布について、PGV分布やPGA分布と同様に、首都圏およびその周辺地域で振幅の消長に富んだ複雑な地震動が観測されている。周期2秒と3秒では川崎～品川付近の東京湾沿岸部の速度応答が 100cm/sec 以上と極めて大きく、これら周期帯域での地震動の寄与がPGVに対しても大きかったことが分かる。また、周期8秒や10秒のより長周期帯域では、東京湾北部の浦安～千葉市や東京湾北東部の市原で速度応答が大きく、それら地域に於ける厚い堆積層の存在^{22), 23), 24)}が指摘される。

図 2 2011 年東北地方太平洋沖地震の観測記録を用いた首都圏およびその周辺地域に於ける PGV 分布

図 3 2011 年東北地方太平洋沖地震の観測記録を用いた首都圏およびその周辺地域に於ける PGA 分布

図4 2011年東北地方太平洋沖地震の観測記録を用いた首都圏およびその周辺地域に於ける減衰5%の擬似速度応答スペクトル分布

3.2 首都圏に対する震央距離が同程度の5つの余震 (Mj 6.4~6.7)

表1と図1bに示した番号3、4、5、9、11の5つの余震に対して、首都圏およびその周辺地域に於ける地震動の空間分布を求めた。首都圏までの震央距離と震源の規模が同程度であるこれら5つの余震記録を用いて、首都圏およびその周辺地域での長周期地震動の特性を比較した。各余震の震央と首都圏の方位は、番号9と11の地震の震央が近いことを除けば、程よく分散している(図1b)ことが分かる。首都圏およびその周辺地域に於ける各地震による周期3秒と5秒、8秒の減衰5%の擬似速度応答スペクトル分布を図5~9に示す。K-NET、KiK-net、SK-netの地表と地中20mに設置されているMeSO-netのデータを使用した。

図5に示した長野県北部地震 (Mj 6.7) の速度応答スペクトル分布では、首都圏の中心部に於いて周期5秒の速度応答が周期3秒と8秒のそれよりも顕著に大きく、他の4つの地震による周期5秒の速度応答と比較しても大きな値を示していることが分かる。しかし、他の4つの地震では、首都圏およびその周辺地域に於ける周期3秒と5秒、8秒の速度応答に明瞭な違いは見られない。地震の規模と首都圏までの震央距離が同程度であるにも関わらず、これら5つの余震による速度応答スペクトル分布では、地震動の振幅が各周期帯で大きく異なる。このことは、これら5つの余震の震源特性や伝播経路特性が異なることを示しており、長周期のサイト増幅特性を適切に評価するためには、各地震に固有な震源特性や伝播経路特性の影響を取り除く必要がある。

図 5 首都圏およびその周辺地域に於ける減衰 5%の擬似速度応答スペクトルの分布（2011 年 3 月 12 日の長野県北部地震、Mj 6.7、深さ 8km：表 1、図 1b の番号 3）

図 6 首都圏およびその周辺地域に於ける減衰 5%の擬似速度応答スペクトルの分布（2011 年 3 月 13 日の茨城県沖地震、Mj 6.4、深さ 10km：表 1、図 1b の番号 4）

図 7 首都圏およびその周辺地域に於ける減衰 5%の擬似速度応答スペクトルの分布（2011 年 3 月 15 日の静岡県東部地震、Mj 6.4、深さ 14km：表 1、図 1b の番号 5）

図8 首都圏およびその周辺地域に於ける減衰5%の擬似速度応答スペクトルの分布（2011年4月12日の福島県浜通り地震、Mj 6.4、深さ15km：表1、図1bの番号9）

図9 首都圏およびその周辺地域に於ける減衰5%の擬似速度応答スペクトルの分布（2011年7月31日の福島県沖地震、Mj 6.5、深さ57km：表1、図1bの番号11）

4. 首都圏およびその周辺地域に於けるサイト増幅特性

4.1 基準点と距離減衰の補正

ここでは、地表の地震動を地震基盤の地震動で除することで震源特性と伝播経路特性を取り除き、首都圏およびその周辺地域でのサイト増幅特性を評価した。首都圏での地震基盤の地震動として、基盤内に地震計が設置されているKiK-netの深層観測井²⁵⁾であるTKYH11（江東）の深度3000m、SITH01（岩槻）の深度3510m、CHBH04（下総）の深度2300mの地中記録を使用した（図1b）。使用した地震は、首都圏に対して震央距離が同程度である5つの余震（表1、図1bの番号 3、4、5、9、11の地震）である。これら余震に対する地震基盤での減衰5%の擬似速度応答スペクトルを図10a-eに各々示す。観測点間の水平距離が約30kmであるにもかかわらず、上記の3観測点で得られた地震動は3秒以上の周期帯域では大きな差が無いことが分かる。したがって、これら3観測点で得られた減衰5%の擬似速度応答スペクトルを平均し、地表面の速度応答スペクトルをその平均化された地震基盤の速度応答スペクトルで除することで、首都圏およびその周辺地域でのサイト増幅特性を求めた。本研究では、地表/地中の減衰5%の擬似速度応答スペクトル比をサイト増幅特性とした。

5つの余震に対する首都圏の地震基盤での平均擬似速度応答スペクトル（5%）を図10fに示す。図10f

より、これらの余震では地震の規模、首都圏までの震央距離が同程度にも関わらず、地震基盤の地震入力が大きく異なることが分かる。また、7秒以上の長周期帯域では茨城県沖地震（Mj 6.4）の地震入力が大きく、0.5秒～4秒の周期帯域では福島県浜通り地震（Mj 6.4）のそれが大きいことが分かる。また、長野県北部地震（Mj 6.7）では1秒以上の周期帯域に於いて平均的に振幅の大きな地震動が観測されている。

上述したサイト増幅特性を算出する際には、以下の手続きで震央距離による距離減衰の補正を行った。本研究で対象とした4秒以上の周期帯域では主として表面波が卓越すると考えられ、TKYH11（江東）、SITH01（岩槻）、CHBH04（下総）の3観測点の重心位置を基準点として、全観測点と各地震による震央距離の平方根を用いて地震動の距離減衰（本研究では、表面波の幾何減衰を考慮）を補正した。また、上述した地震基盤の平均擬似速度応答スペクトル（図10）を算出する際にも、3観測点の重心位置を基準点として距離の補正を行った。ただし、本研究で利用した距離減衰の補正は、盆地生成表面波（盆地端部で実体波が表面波に変換されたもの）²⁶⁾を考慮したものとはなっていない。

図10 地震基盤（TKYH11、SITH01、CHBH04）での減衰5%の擬似速度応答スペクトル。(a), (b), (c), (d), (e)の点線は、各観測点の擬似速度応答スペクトル。実線は、3つの観測点で得られた擬似速度応答スペクトルの平均。(f)は5つの余震による地震基盤の平均擬似速度応答スペクトルの比較

4.2 余震記録を用いたサイト増幅特性

上記手順により震源特性と伝播経路特性を取り除いた首都圏およびその周辺地域のサイト増幅特性について、検討を行った。5つの余震（表1、図1bの番号 3、4、5、9、11の地震）に対して得られた周期3秒と5秒、8秒のサイト増幅特性を図11と12、13に各々示す。図11に示した周期3秒のサイト増幅特性は、静岡県東部地震（Mj 6.4）が他の4つの地震よりも顕著に大きいことが分かる。周期5秒では、静岡県東部地震（Mj 6.4）によるサイト増幅特性がやや大きく、長野県北部地震（Mj 6.7）によるそれはさらに大きい（図12）。周期8秒では、長野県北部地震（Mj 6.7）と茨城県沖地震（Mj 6.4）、静岡県東部地震（Mj 6.4）のサイト増幅特性が他の2つの地震のそれと比較して大きい。首都圏へ入力された地震基盤での地震動は、4秒以上の周期帯域に対して茨城県沖地震（Mj 6.4）が一番大きく、4秒以下の周期帯域に対しては福島県浜通り地震（Mj 6.4）が一番大きい（図10f）。しかし、図11～13に示した各地震によるサイト増幅特性の違いにより、周期5秒の大きな地震応答（図5b）が長野県北部地震（Mj 6.7）で観測され、また周期3秒の大きな地震応答（図7a）が静岡県東部地震（Mj 6.4）で観測されている。

図11 首都圏およびその周辺地域に於ける減衰5%の擬似速度応答スペクトル比の分布 (周期3秒)

図12 首都圏およびその周辺地域に於ける減衰5%の擬似速度応答スペクトル比の分布 (周期5秒)

図13 首都圏およびその周辺地域に於ける減衰5%の擬似速度応答スペクトル比の分布（周期8秒）

5. 首都圏およびその周辺地域に於ける長周期のサイト増幅特性の方位依存性

首都圏およびその周辺地域に於けるサイト増幅特性の方位依存性の確からしさを、観測点に対して方位が異なる地震と方位が同程度の地震によるサイト増幅特性のばらつきを比較することで評価した。具体的には、深層観測井であるTKYH11（江東）とSITH01（岩槻）、CHBH04（下総）の3つの観測点について、首都圏に対して方位が異なる地震（表1、図1bの番号3、4、5、9、11）によるサイト増幅特性のばらつきと震源が東北地方にあり首都圏に対して方位が同程度である地震（表1、図1bの番号1、2、6、7、8、10、12）によるサイト増幅特性のばらつきを比較した。3観測点ともに、地表と地中（地震基盤）に地震計が設置されているため、サイト増幅特性の算出には、各観測点の地表と地中の地震記録を用いた。

図14に、首都圏に対して方位が異なる5つの地震と東北地方で発生した地震によるTKYH11（江東）でのサイト増幅特性を示す。同様に、図15と図16に、SITH01（岩槻）とCHBH04（下総）でのサイト増幅特性を各々示す。首都圏に対して方位が異なる5つの地震によるサイト増幅特性は周期3～8秒でばらつきが大きく、特に長野県北部地震（Mj 6.7）では他の地震と卓越周期が異なり、東北地方で発生した地震と比較してその振幅比はTKYH11（江東）で約5倍も大きい。一方で、東北地方で発生した地震によるサイト増幅特性は周期5～8秒でその振幅比に違いが見られるものの、卓越周期の大きな変化は見られない。また、そのサイト増幅特性のばらつきは、方位が異なる地震の場合と比較して小さい。3観測点ともに、長野県北部地震（Mj 6.7）と静岡県東部地震（Mj 6.4）による周期3～8秒のサイト増幅特性が大きく、図11～13に示した首都圏およびその周辺地域に於けるサイト増幅特性の分布からもそのことが分かる。

以上の結果は、首都圏およびその周辺地域に於ける長周期のサイト増幅特性が震源の方位依存性を有することを示している。一般的には、長周期地震動を適切に評価するためには、工藤²⁷⁾が指摘したように震源の規模と震源の深さ、震源の放射特性、観測点直下の地下構造を把握することが重要である。しかし、本研究結果は、関東平野に於ける長周期地震動を評価するためには、上記要因に加えて、震源と観測点の方位に依存したサイト増幅特性についての理解が重要であることを示している^{17) 18) 19)}。関東平

野に於けるサイト増幅特性の方位依存性については、関東平野に入射した長周期地震動が地下速度構造の水平方向に対する不均質性により増幅効果の影響を受けることで解釈可能であると考える。

図 14 TKYH11（江東）での減衰 5%の擬似速度応答スペクトル比

図 15 SITH01（岩槻）での減衰 5%の擬似速度応答スペクトル比

図 16 CHBH04（下総）での減衰 5%の擬似速度応答スペクトル比

6. 議論

首都圏およびその周辺地域に対して2011年東北地方太平洋沖地震の余震（Mj 6.4～Mj 7.1）による長周

期のサイト増幅特性を調べた結果、地震の発生場所によりそのサイト増幅特性が異なることが分かった。本章では、東北地方太平洋沖地震の本震（ M_w 9.0）の地震記録を用いたサイト増幅特性を4章と同様の手順により求め、余震記録を用いたサイト増幅特性との比較を行った。図17に、本震による首都圏およびその周辺地域の周期3秒と5秒、8秒のサイト増幅特性を示す。本震と東北地方を震源とした2つの余震（福島県浜通り地震 M_j 6.4、福島県沖地震 M_j 6.5）では、本震によるサイト増幅特性は、図11～13d,eの福島県浜通り地震（ M_j 6.4）、福島県沖地震（ M_j 6.5）のサイト増幅特性と類似している。例えば、周期5秒のサイト増幅特性は振幅比で本震（図17b）と余震（図12d,e）ともに首都圏中心部で～5倍程度であり、周期8秒のサイト増幅特性は～10倍程度である（図17cと図13d,e）。周期3秒では、本震と2つの余震の全体としての傾向は似ているものの（図17aと図11d,e）、本震では川崎～品川付近の東京湾沿岸部で非常に大きな振幅比を有している。またSITH01（岩槻）とCHBH04（下総）の2つの観測点に於ける本震によるサイト増幅特性を図15bと図16bに各々示す（TKYH11は本震の地震記録を欠測）。本震によるサイト増幅特性は、2観測点ともに、東北地方で発生した余震によるサイト増幅特性と振幅比が類似していることが分かる。

一方、図4に示したように関東平野で観測された本震の長周期地震動は大きかったものの、特に周期5秒以上の地震動では地震規模（ M_w 9.0）から想定されるほどの大きさを持っていなかった。このことは、静岡方面よりも東北方面に位置する震源に対して首都圏およびその周辺地域の地震動増幅が小さい（図11～16）ことが一つの原因であると考えられる。本研究結果によれば、長野県北部の地震では周期5秒と8秒の地震が首都圏およびその周辺地域でより大きく増幅され（図12aと図13a）、静岡県東部の地震では周期3秒と8秒の地震動がより大きく増幅される（図11cと図13c）。このことは、将来の発生が懸念されている地震規模が大きな想定東海地震（ M_w 8.0～）に対して、2011年東北地方太平洋沖地震（ M_w 9.0）と同程度の首都圏への地震入力を仮定すれば、より大きな長周期の地震動が首都圏およびその周辺地域で観測されることを示唆している。

図 17 首都圏およびその周辺地域に於ける本震の減衰 5%の擬似速度応答スペクトル比の分布

7. 結論

本研究では、2011年東北地方太平洋沖地震（ M_w 9.0）の本震記録と余震記録を用いて、首都圏およびその周辺地域に於ける周期2秒以上の地震動特性とサイト増幅特性を評価した。その結果、本震においては、首都圏およびその周辺地域で観測されたPGVとPGAは振幅の消長に富んだ複雑な分布を示し、減衰5%の擬似速度応答スペクトルでは、川崎～品川付近の東京湾沿岸部で周期2秒と3秒の地震動が特に大きかったことが分かった。また、首都圏までの震央距離と地震の規模が同程度の5つの余震においては、速度応答スペクトル分布の振幅値が大きく異なり、各余震による震源特性と伝播経路特性の違いが観測される地震動に大きく影響を与えていることが分かった。さらに、地震基盤の地震記録により地表面の地震記録を除することで震源特性と伝播経路特性を取り除いたサイト増幅特性については、東北地方の地

震よりも首都圏に対して方位が異なる5つの地震によるサイト増幅特性の方がばらつきが大きかった。首都圏へ入力される周期3秒以上の地震動に対しては、サイト増幅特性が観測点と震源の方位依存性を有することが分かった。特に、周期5秒と8秒では長野県北部地震 (Mj 6.7) によるサイト増幅特性が大きく、周期3秒と8秒では静岡県東部地震 (Mj 6.4) のサイト増幅特性が大きかった。本震による首都圏およびその周辺地域のサイト増幅特性は、首都圏に対して方位が同じである福島県浜通り地震 (Mj 6.4) と福島沖地震 (Mj 6.5) に類似した。上記の結果より、地震規模の大きな想定東海地震に対して、2011年東北地方太平洋沖地震 (Mw 9.0) と同程度の首都圏への地震入力を仮定すれば、東北地方太平洋沖地震よりも大きな長周期の地震動が首都圏およびその周辺地域で観測されることが本解析結果から予想される。

今後は、長周期のサイト増幅特性の方位依存性と地下速度構造の水平方向に対する不均質性との関係調べることで、関東平野のサイト増幅特性をより定量的に評価し、将来の発生が懸念されている想定東海地震による関東平野の長周期地震動を評価あるいは予測することを考えている。

謝 辞

本研究の一部は、津野靖士が東京工業大学に在職中、文部科学省による「首都直下地震防災・減災特別プロジェクト」の支援を受けて行われました。MeSO-net、K-NET、KiK-net、SK-net、横浜市、気象庁、国土交通省、建築研、産総研、港湾空港技術研、東京都港湾局、東大地震研、東工大、千葉大、芝浦工業大、東京電力、鹿島建設、大林組、大成建設、竹中工務店、スターツの合計21機関に於いて観測された地震記録を使用させて頂きました。3名の匿名査読者のコメントは、本論文の改善に大いに役立ちました。図の作成には、GMTを使用しました。記して感謝致します。

参考文献

- 1) Yokota, Y., Koketsu, K., Fujii, Y., Satake, K., Sakai, S., Shinohara, M. and Kanazawa, T. : Joint Inversion of Strong Motion, Teleseismic, Geodetic, and Tsunami Datasets for the Rupture Process of the 2011 Tohoku Earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, 38, 2011, L00G21, doi:10.1029/2011GL050098.
- 2) 鈴木亘、青井真、関口春子、功刀卓：2011年東北地方太平洋沖地震の震源破壊過程、防災科学技術研究所主要災害調査、第48号、2012年、pp.53-62.
- 3) 津野靖士、翠川三郎、山中浩明、三浦弘之、酒井慎一、平田直、笠原敬司、木村尚紀、明田川保：首都圏およびその周辺地域で観測された2011年東北地方太平洋沖地震 (Mw 9.0) の地震動分布、日本地震学会秋季大会講演予稿集、2011年、p.205.
- 4) 翠川三郎、三浦弘之、堀苑子、鹿嶋俊英：2011年東北地方太平洋沖地震における東京の超高層マンションでの揺れに関するアンケート調査、地域安全学会梗概集、第28号、2011年.
- 5) 久保智弘、久田嘉章、相澤幸治、大宮憲司、小泉秀斗：2011年東日本大震災における新宿駅西口・超高層建物のアンケート調査 その1)工学院大学新宿校舎における揺れとアンケート震度調査、日本地震工学会梗概集、2011年、pp.36-37.
- 6) Sakai, S. and Hirata, N. : Distribution of the Metropolitan Seismic Observation Network, *Bull. Earthq. Res. Inst. Univ. Tokyo*, 84, 2009, pp.57-69.
- 7) Kasahara, K., Sakai, S., Morita, Y., Hirata, N., Tsuruoka, H., Nakagawa, S., Nanjo, K. and Obara, K. : Development of the Metropolitan Seismic Observation Network (MeSO-net) for Detection of Mega-Thrust beneath Tokyo Metropolitan Area, *Bull. Earthq. Res. Inst. Univ. Tokyo*, 84, 2009, pp.71-88.
- 8) Kinoshita, S. : Kyoshin net (K-net), *Seism. Res. Letter*, 69, 1998, pp.309-332.
- 9) 鷹野澄、瀨瀬一起、工藤一嘉、古村孝志、山中佳子、卜部卓、土井恵治：首都圏強震動総合ネットワーク SK-net、防災科学技術研究所研究資料、第 264 号、2005 年、pp.119-122.
- 10) 坂上実：地震研究所における強震動観測の変遷と現状、これから、東京大学地震研究所技術研究報告、第 17 号、2011 年、pp.77-94.
- 11) Hirose, F., Miyaoka, K., Hayashimoto, N., Yamazaki, T. and Nakamura, M., : Outline of the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake (Mw 9.0) - Seismicity: Foreshocks, Mainshock, Aftershocks, and Induced Activity -, *EPS*, 63, 2011, pp.513-518.

- 12) Ishibe, T., Shimazaki, K., Satake, K. and Tsuruoka, H. : Change in Seismicity beneath the Tokyo Metropolitan Area due to the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake, EPS, 63, 2011, pp.731-735.
- 13) 工藤一嘉、田中貞二：東京で観測された長周期地震動 — 1974年伊豆半島沖地震の東京における変位記録 —、第4回地盤震動シンポジウム資料集、1976年、pp.49-50.
- 14) 田中貞二、吉沢静代、大沢伴：やや長周期帯域における地震動の特性 — 東京で観測されたM6 以上の地震 —、第5回日本地震工学シンポジウム論文集、1978年、pp.265-272.
- 15) Koketsu, K. and Kikuchi, M. : Propagation of Seismic Ground Motion in the Kanto Basin, Japan, Science, 288(5469), 2000, pp.1237-1239.
- 16) Miyake, H. and Koketsu, K. : Long-Period Ground Motions from a Large Offshore Earthquake:The Case of the 2004 off the Kii Peninsula Earthquake, Japan, EPS, 57, 2005, pp.203-207.
- 17) 座間信作：気象庁1倍強震計記録にみられるやや長周期地震動特性 — その2 東京 —、消防研究所報告、76号、1993年、pp.1-12.
- 18) 植竹富一：広帯域地震観測に基づく東京湾岸のやや長周期地震動特性、第13回日本地震工学シンポジウム論文集、2010年、pp.4157-4164.
- 19) 湯沢豊、南雲秀樹：長周期地震動の揺れ易さ係数の変動幅に影響を与える要因分析とその対策 — 関東平野を対象として —、日本地震工学会大会2011梗概集、2011年、pp.482-483.
- 20) 座間信作：やや長周期の地震動、地震 2、第46号、1993年、pp.329-342.
- 21) 座間信作：長周期地震動、地震 2、第61巻 特集号、2009年、S433-440.
- 22) 山中浩明、山田伸之：強震動評価のための関東平野の3次元S波速度構造モデルの構築、物理探査、59、2006年、pp.549-560.
- 23) Afnimar, K., Koketsu, K. and Nakagawa, K. : Joint Inversion of Refraction and Gravity Data for the Three-Dimensional Topography of a Sediment-Basement Interface, 151, Geophys. J. Int., 2002, pp.243-254.
- 24) Tsuno, S., Yamanaka, H., Miura, H., Midorikawa, S., Sakai, S., Hirata, N., Kasahara, K., Kimura, H. and Aketagawa, T. : Dominant Periods of H/V Spectral Ratios of Coda Waves in the Tokyo Metropolitan Area, using Recent Seismic Networks, 10th SEGJ Int. Symp., 2011, pp.92-95.
- 25) 鈴木宏芳：関東平野の地下地質構造、防災科学技術研究所研究報告、63、2002年.
- 26) 川瀬博：表層地質による地震波の増幅とそのシミュレーション、地震 2、第46号、1993年、pp.171-190.
- 27) 工藤一嘉：長周期地震動について、配管技術、47、11、2005年、pp.4-11.

(受理：2012年4月2日)
(掲載決定：2012年9月18日)

Characteristics of Long-Period Ground Motions in the Tokyo Metropolitan Area and its Vicinity, by Recording Data of the 2011 Off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake (Mw 9.0) and the Aftershocks

TSUNO Seiji ¹⁾, YAMANAKA Hiroaki ²⁾, MIDORIKAWA Saburoh ³⁾,
YAMAMOTO Shunroku ⁴⁾, MIURA Hiroyuki ⁵⁾, SAKAI Shin'ichi ⁶⁾, HIRATA
Naoshi ⁷⁾, KASAHARA Keiji ⁸⁾, KIMURA Hisanori ⁹⁾ and AKETAGAWA
Tamotsu ¹⁰⁾

1) Member, Assistant Senior Researcher, Railway Technical Research Institute, Dr. Eng.

2) Member, Professor, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.

3) Member, Professor, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.

4) Member, Laboratory Head, Railway Technical Research Institute, Dr. Eng.

5) Member, Assistant Professor, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.

6) Associate Professor, Earthquake Research Institute, University of Tokyo, Dr. Sci.

7) Professor, Earthquake Research Institute, University of Tokyo, Dr. Sci.

8) Professor, Earthquake Research Institute, University of Tokyo, Dr. Sci.

9) Senior Researcher, National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, Dr. Sci.

10) Chief Researcher, Hot Springs Research Institute of Kanagawa Prefecture, Dr. Sci.

ABSTRACT

We evaluated the characteristics of earthquake ground motions and site amplification factors for periods more than 2 seconds in the Tokyo Metropolitan Area and its vicinity, by the main shock and aftershocks of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake. The complex distribution of earthquake ground motions by PGV and PGA in the Tokyo Metropolitan Area were shown, using recording data of the main shock observed at seismic stations of about 650. Also, the pseudo velocity responses for periods of 2 and 3 seconds in Kawasaki to Shinagawa were extremely large. Site amplification factors, which were estimated by the ratio of velocity response spectra on surface to those in the seismic bed rock, have the azimuthal dependence to epicenter for periods more than 3 seconds. Long-period ground motions in the Tokyo Metropolitan Area were more largely amplified by earthquakes located in Northern Nagano Pref. and Eastern Shizuoka Pref. than those located in Tohoku Region.

Key Words: 2011 Off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake, Tokyo Metropolitan Area, Earthquake Ground Motions, Pseudo Velocity Response Spectra, Site Amplification Factors, Azimuthal Dependence