



東京湾岸で観測された2016年三重県南東沖地震の長周期地震動

植竹富一¹⁾

1) 正会員 東京電力ホールディングス株式会社、首席研究員、博士（理学）

e-mail : uetake.tomiichi@tepcoco.jp

要 約

2016年三重県南東沖の地震（Mj6.5）による東京湾岸での記録を2009年駿河湾の地震（Mj6.5）の記録と比較した。三重県南東沖の地震の東京湾岸に対する距離は約400kmで駿河湾の地震（同150km程度）に比べて約3倍であるにもかかわらず、周波数0.1Hz程度以下ではフーリエスペクトル震幅は同等である。両地震とも東京湾岸の記録におけるこの周波数付近の地震動は表面波が主体と考えられるが、三重県南東沖の地震では、付加体など震源付近の地下構造の影響で、関東平野入射する長周期表面波自体が大きいと考えられる。

キーワード： 南海トラフ巨大地震、長周期地震動、表面波の励起特性

1. はじめに

南海トラフ沿いの巨大地震発生が日本における切迫した危機として取り上げられている。東京湾岸地域は、南海トラフに直接面してはいないが、長周期の地震波は短周期に比べ遠方まで伝播し¹⁾、関東平野のような深い堆積盆地構造で増幅されることから、南海トラフ沿いの地震による長周期地震動の影響を検討しておくは重要である。東京電力ホールディングスでは、東京湾岸地域の長周期地震動評価に資するため、2005年より東京湾岸に立地する火力発電所を中心に広帯域速度型強震計を設置し観測を継続している²⁾。この観測は、当初から東海・南海地域の巨大地震による地震動を評価する材料となる記録の取得を目的としてきたが、南海トラフ沿いの地震活動は低調で、M6を超えるクラスの地震による記録はほとんど得られていない。2005年の観測開始以来、駿河トラフ・南海トラフ沿いで発生したMj6.5以上の地震は、2009年の駿河湾の地震（Mj6.5）と2016年の三重県南東沖の地震（Mj6.5）の2つだけである。このうち、三重県南東沖の地震は、1944年東南海地震の震源域内で発生しており、東京湾岸の長周期地震動を考える上で、重要な地震と考えられるが、首都圏では無感で強震記録もほとんどないが、2016年の三重県南東沖の地震は、同じ2016年に発生した2016年熊本地震（Mj7.3）、鳥取県中部の地震（Mj6.8）と比べ、マグニチュードが小さいにもかかわらず継続時間が長く、関東地方への入射方向が他の地震より南側（伊豆半島側）であることが指摘されている³⁾。本検討では、2016年三重県南東沖の地震の震央と関東地域で発生した2009年の駿河湾の地震とを比較し、その特徴を報告する。

2. データ

2016年の三重県南東部地震および2009年駿河湾の地震と東京湾岸の広帯域観測地点の位置関係を図1に示す。また、両地震の震源パラメータを表1に示す。東京湾から見て両地震はほぼ同じ方角にあるが、

震源距離は大きく異なっている。東京湾入口の横須賀(YKS)ではそれぞれ373kmと123km、東京湾奥の千葉(CHB)ではそれぞれ424kmと171kmとほぼ3倍である。防災科研のF-net⁴⁾ によれば両地震のメカニズムは、走行は異なるがいずれも逆断層タイプである。ただし、駿河湾の地震はフィリピン海プレート内の地震、三重県南東沖の地震はプレート境界地震である。気象庁マグニチュードは同じ6.5であるが、モーメントマグニチュードは駿河湾の地震の方が大きい。分析に用いるデータは、東京湾岸にある東京電力の観測点における速度型強震計のデータである。東京電力の観測点は、100Hzサンプリングでトリガー観測を実施している。なお、時刻はGPSを用いて校正しており、アレイ観測として利用が可能である。図中TRI、SNGを含む東京湾西側の6点は波動の伝播性状を把握するためにアレイ解析に用いた。

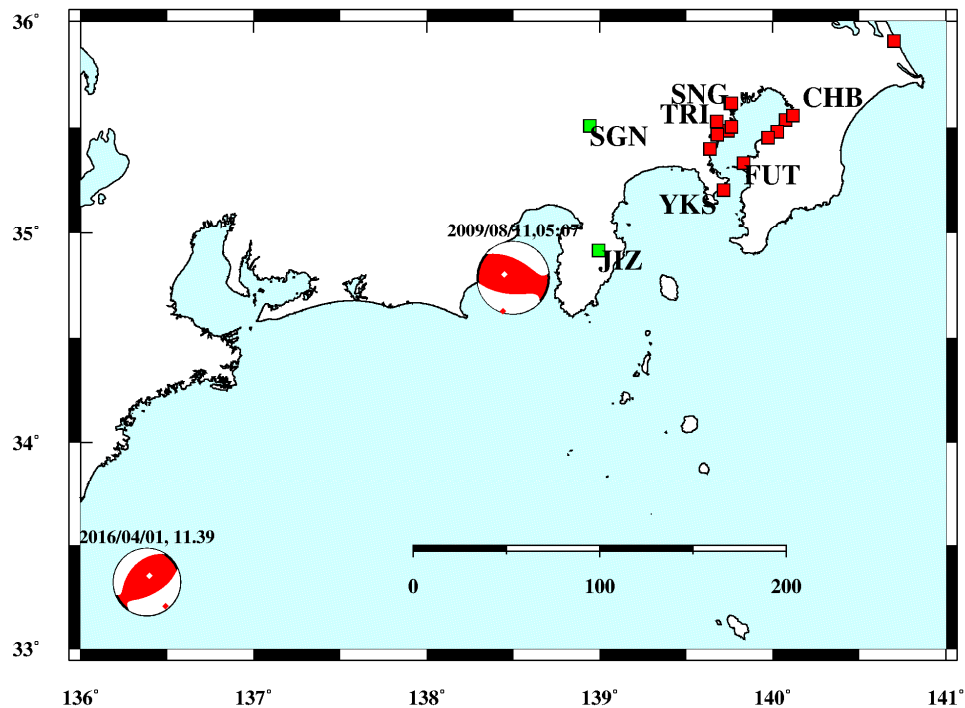


図1 2016年三重県南東沖の地震と2009年駿河湾の震央と東京湾岸の観測点の関係
(赤：東京電力観測点、緑：F-net⁴⁾ 観測点、メカニズム解はF-net⁴⁾ による)

表1 駿河湾の地震と三重県南東沖地震の震源パラメータ
(震源位置およびMjは気象庁⁵⁾、Mwは防災科研F-net⁴⁾ による)

震源時	経度(度)	緯度(度)	深さ(km)	Mj	Mw	地域	震源距離(km)	
							横須賀	千葉
2009年8月11日05時07分	138.4993	34.7862	23.3	6.5	6.2	駿河湾	123	171
2016年4月01日11時39分	136.3832	33.3233	28.7	6.5	5.8	三重県南東沖	373	424

3. 観測記録の比較

2016年三重県南東沖の地震と2009年駿河湾の地震による記録の比較を行う。横須賀(YKS)と千葉(CHB)の観測波形(速度波形)を図2に示す。震源距離の遠い三重県南東沖の地震波形は、全体的に短周期が少な

く振幅も小さいが、YKSに比べると平野の中にあるCHBの方が、振幅が大きく継続時間も長い。短周期の多い駿河湾の地震では、その傾向はより顕著である。観測記録の速度フーリエスペクトルを図3に示す。図1の地図に観測点名を示した5つの観測点である。高周波数では駿河湾の地震が大きい、実体波の幾何減衰やQ値の影響の補正が出来ていないことに加え、駿河湾の地震がプレート内地震であったため、高周波数成分の発生が大きかった可能性もある。周波数0.05~0.2Hzでは差が小さく、距離補正をしなくても同等の振幅である。また、低周波数側では、両地震とも水平動に比べて上下動が小さくなっている。

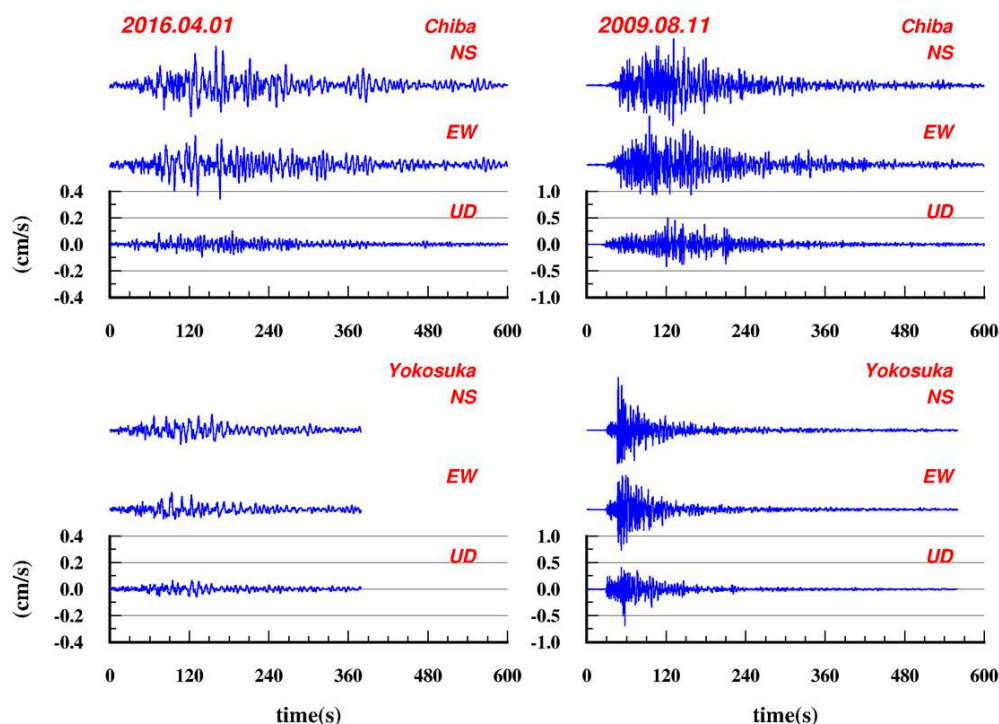


図3 三重県南東沖の地震と駿河湾の地震の波形の比較（YKSおよびCHB）

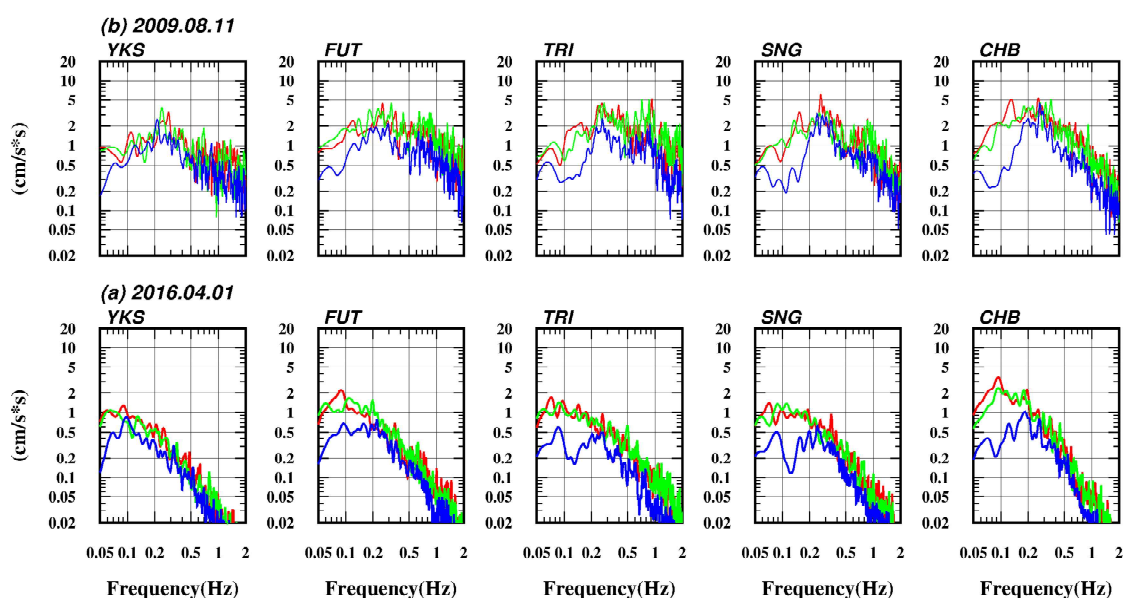


図4 観測記録の速度フーリエスペクトル（下段：三重県南東沖の地震、上段：駿河湾の地震）

4. 距離減衰式を用いた比較

地震規模や震源距離が異なる地震による地震動を比較するためには、基準となる評価式を用いると便利である。ここでは、長周期地震動を評価するため作成された加速度応答スペクトル（減衰5%）の評価式⁶⁾で計算される地震基盤での応答スペクトルと観測された記録から求めた応答スペクトルとの差を求め、三重県南東沖地震と駿河湾の地震を比較する。なお、評価式の作成時には気象庁マグニチュードが6.5以上、深さ60 kmより浅い地震で、震源距離が400 km以内という条件で記録が選択されており、三重県南東沖地震では、SNGとCHBは、距離が400 kmを若干オーバーしている。

観測記録の水平2成分の加速度応答スペクトルをベクトル合成し、評価式で計算される地震基盤相当位置での加速度応答スペクトルとの抽出した残差を図5に示す。短周期側から周期2秒程度までは2地震とも同様な傾向を示すが、それより長周期側では傾向が異なり、駿河湾の地震では振幅が下がっていくが、三重県南東沖の地震で振幅が下がらない。三重県南東部沖の方が大きく、いずれの地点でも周期10秒付近では常用対数で0.5違う結果となっている。基準式のモデルに比べ、三重県南東沖の地震の長周期地震動の励起が大きいことを示していると考えられる。

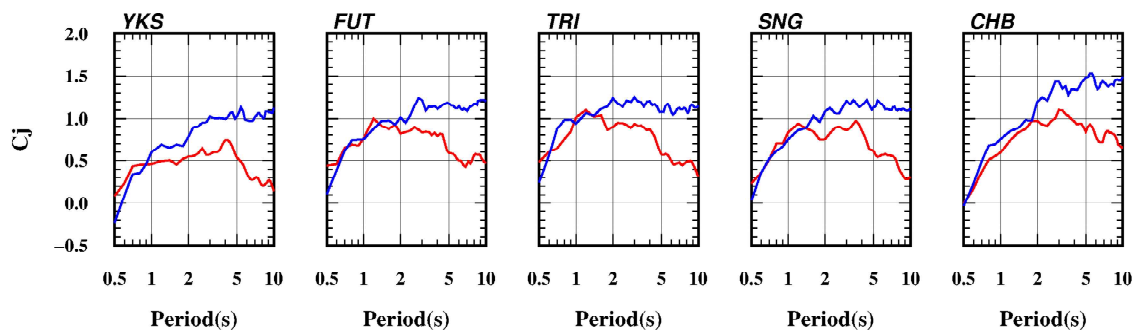


図5 評価式に対する残差（常用対数）（赤：2009年の駿河湾の地震、青：2016年三重県南東沖の地震）

5. 波動の分散性

5.1 マルチフィルター解析

地震波の性状を分析するために両地震の速度波形についてマルチフィルター解析⁷⁾を実施した。図6にYKSとCHBのNS成分の結果を示す。YKSに比べCHBは継続時間が長く、関東平野内で周波数0.1～0.5Hzの後続波が成長している。また、YKS地点の三重県南東沖の地震と駿河湾の地震の解析結果を比較すると駿河湾の地震では周波数0.1Hz未満では群分散性が見られないが、三重県南東沖の地震では分散性が認められる。このことは、三重県南東沖の地震では関東平野に到達する前に表面波が成長していることを示している。また、周波数0.2Hz以上の帯域では、三重県南東沖の地震の振幅を補正しても駿河湾の地震より振幅が小さい。また、駿河湾の地震でも振幅の大きいのは時刻歴波形の振幅の大きな主要動に限られ、後続の振幅は急激に小さくなっている。このことは、距離が近いこともあり実体波が卓越していたと解釈できる。

5.2 アレー解析

既往検討²⁾と同様に、東京湾西岸の6地点を用いてF-K解析⁸⁾を行い、位相速度と到来方向を求めた。図7に三重県南東沖地震のTransverse成分の結果を示す。0.1Hzより低周波数側ではピークも狭く速度もきちんと決まっていると考えられるが、周波数が高くなるとピークが広がったり複数のピークが確認できるが最大ピークを抽出している。図8には解析で求められた位相速度と到来方向を示す。Transverse成分の結果をLove波に、Radial成分の結果をRayleigh波に対応させてある。位相速度の理論値は全国一次地下構造モデル（暫定版）⁹⁾から川崎（KWS）付近の地下構造を抽出して計算したものである。

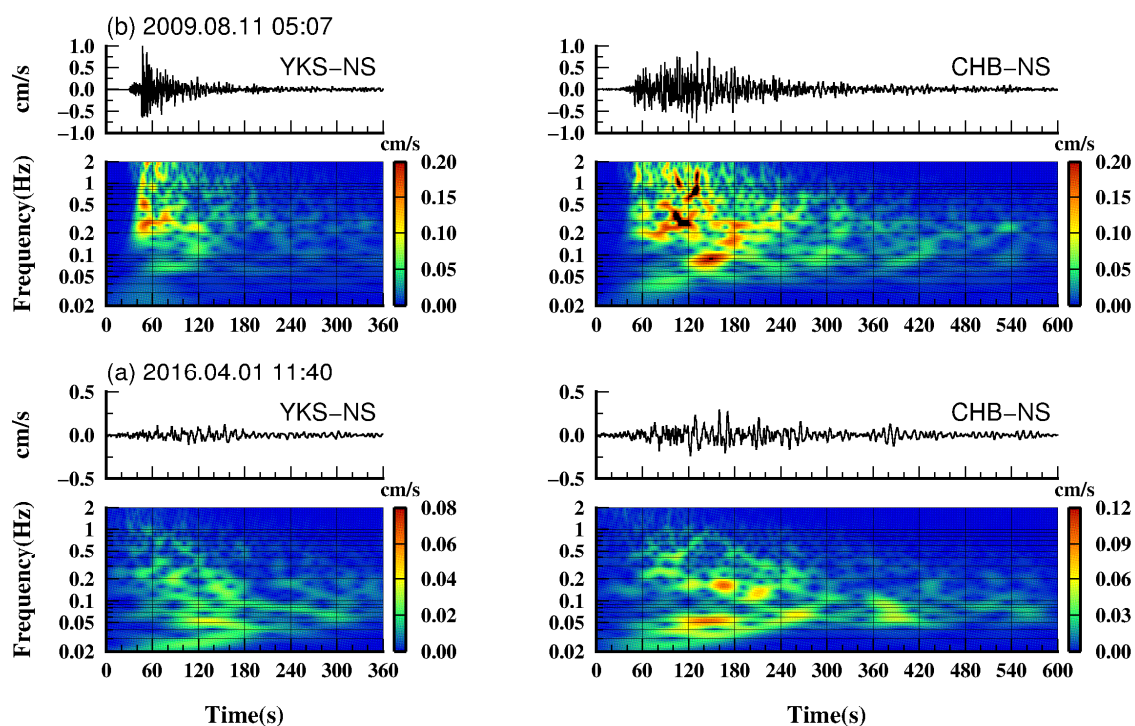


図6 三重県南東沖の地震と駿河湾の地震のマルチフィルター解析結果（YKS、CHBのNS成分）

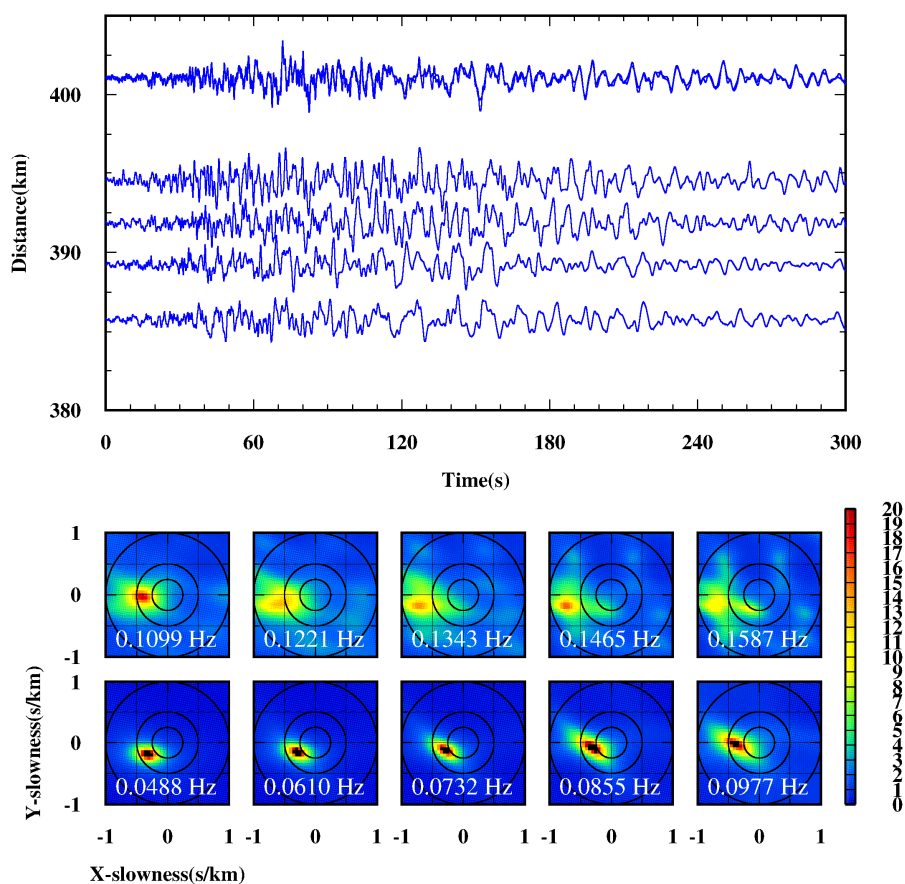


図7 観測波形（Transverse成分）とF-K解析結果

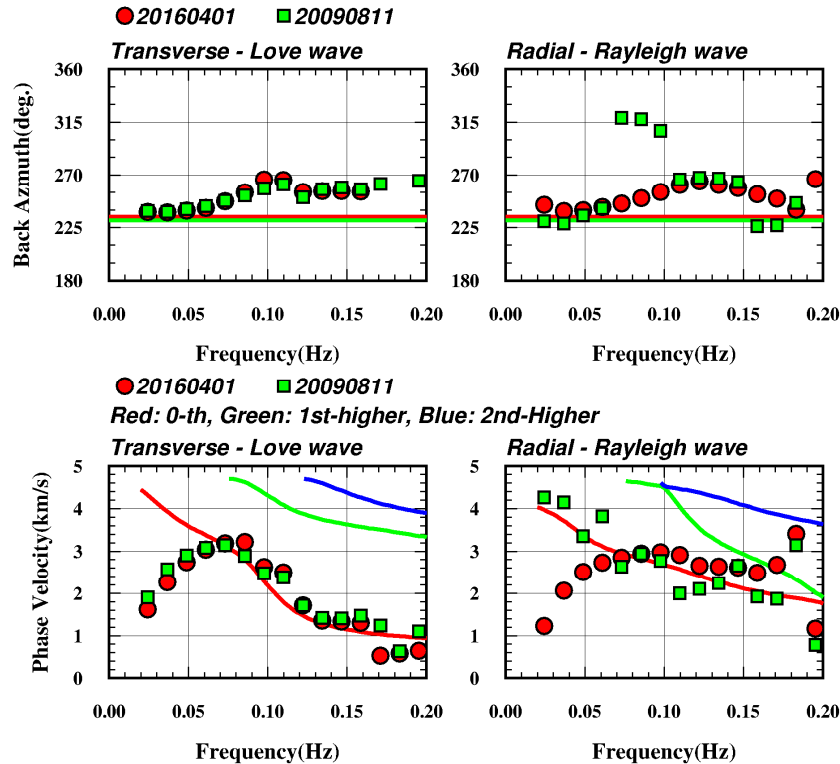


図8 F-K解析で求めた位相速度と到来方向

解析結果と理論値の対応を見ると、Transverse 成分については、三重県南東沖の地震、駿河湾の地震から求めた結果もLove波と対応がよい。到来方向は、低周波数側では震央方向で、徐々に西寄りに変わる。関東平野内の表面波（Love波）の伝播に関して、関東山地は大きな影響を与えている^{10)・11)}が、今回、Transverse成分をLove波と対応つけたことには大きな問題はなさそうである。Radial成分については、三重県南東沖の地震の結果については、理論値との対応が見られ、到来方向もTransverse成分と同様な傾向が見られる。駿河湾の地震については、位相速度について大局的には理論値との対応はよいが、一部周波数帯域では、最大ピークから求めた到来方向が震央方向と90度ずれており、Rayleigh波と対応づけるのは適切でないと考えられる。

6. 議論

図6のマルチフィルター解析の結果を見ると、YKSの三重県南東沖の地震記録では、駿河湾の地震では見られない分散性が確認でき、CHBの記録でも三重県南東沖の地震の方が駿河湾の地震に比べ遅い時間で振幅が大きくなっていた。一方、東京湾西側の観測点のアレー解析結果（図8）からは、平野内の長周期地震動は、どちらの地震においても表面波成分が卓越していることが示唆される。

関東平野西側の山地部に位置するF-NET観測点における速度型強震計記録(NS成分)のマルチフィルター解析結果を示す。駿河湾の地震は継続時間が短く、三重県南東沖の地震では振幅は地裁ものの、継続時間は長く、分散性が見られることがわかる。このことは、三重県南東沖の地震の記録では関東平野への入射波自体に表面波成分が卓越しており、震源付近や伝播経路（南海トラフ）が影響していると考えられる。

三重県南東沖の地震の継続時間については、数値シミュレーションを基に南海トラフの付加体の影響が関係している可能性が指摘されている^{例えは12)}。山本・植竹（2017）¹³⁾は、地震本部の地下構造モデル¹¹⁾を基にした三次元シミュレーションで2016年三重県南東沖地震の観測記録の再現を試みたが、周期7～9秒の継続時間の再現に至らず、付加体モデルの見直しも視野に入れた検討が必要であるとしている。ま

た、表面波の卓越には、震源付近の地下構造が影響する場合もある。uetake(2017)¹⁴⁾は、長野県北部の2つのM6.7の地震による東京湾岸地域の長周期地震動の違いを、震源付近のS波速度構造の違いによる表面波の励起の違いにより、関東平野に入射する地震動が異なるためであることを示した。また、Dhakal et al.(2018)¹⁵⁾は、2016年三重県南東沖地震の周期帯毎の距離減衰性状を、2003年紀伊半島沖地震の同規模の余震と比べ、長周期地震動が大きいという指摘をしており、その原因として震源直上のS波速度の小さな付加体の影響と推測している。三重県南東沖の地震の場合、震源付近、関東への伝播経路の構造ともに付加体の存在する構造であると考えられる。

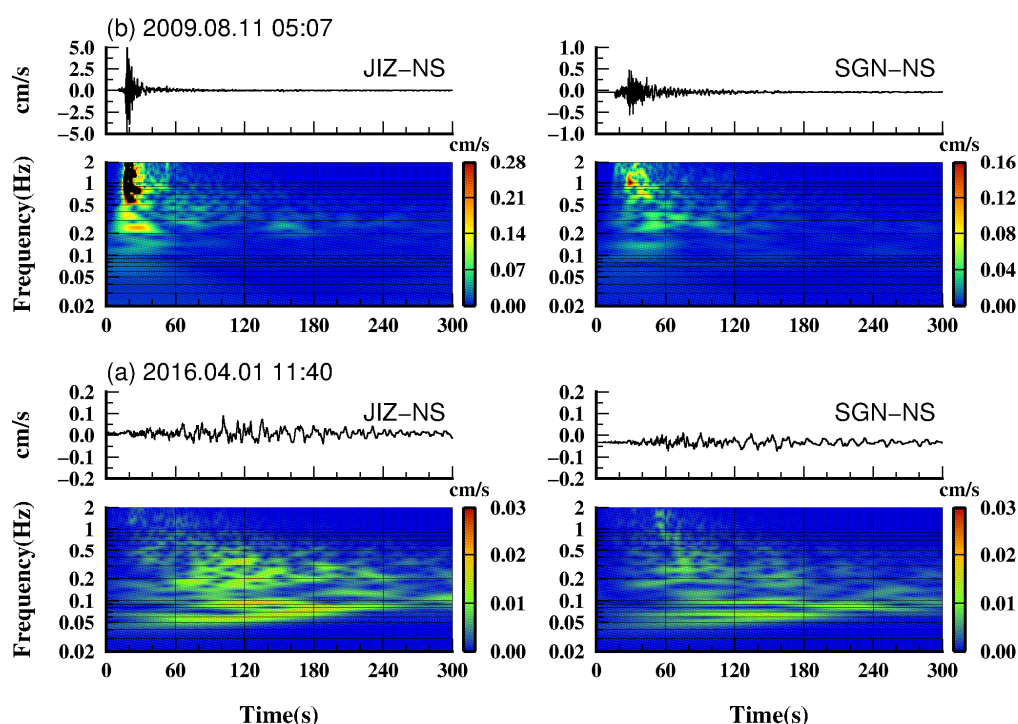


図9 三重県南東沖の地震と駿河湾の地震のマルチフィルター解析結果（JIZ、SGNのNS成分）

7. 終わりに

2016年三重県南東沖の地震により東京湾岸で得られた記録について、同じ南海トラフ沿いで発生した2009年駿河湾の地震で得られた記録と比較し、その特徴を把握した。この2地震は、気象庁マグニチュードは同じ6.5であるが、三重県南東沖地震の東京湾岸に対する距離は、駿河湾の地震に比べ、ほぼ3倍である。それにもかかわらず、東京湾岸の記録における周波数0.1Hz付近の震幅はほぼ等しい。三重県南東沖の地震による地震動は、関東平野へ入射する時点ですでに表面波が卓越している。この要因として、三重県南東沖の震源が南海トラフ沿いの付加体の下で発生し、震源として表面波の卓越が十分であったとともに、波動の伝播経路も付加体の構造であった点が指摘できる。一方、駿河湾地域では付加体も薄く、東側がすぐに伊豆半島となっており、三重県南東沖に比べ長周期の表面波が卓越しにくいと考えられる。

謝 辞

防災科研のF-NETの情報および記録を使用致しました。また、作図にはGMT¹⁶⁾を利用いたしました。記して感謝いたします。

参考文献

- 1) 小山信、鹿嶋俊英：建築構造物での強震記録、第39回地盤震動シンポジウム資料、2011年、pp.57-65。
- 2) 植竹富一：東北地方太平洋沖地震及びその前震・余震で観測された東京湾岸の長周期地震動、日本地震工学会論文集、Vol. 12、No. 5 特集号「2011年東日本大震災」その2、2012、pp. 5_192-5_206。
- 3) 植竹富一：2016年に西日本で発生した大地震による関東地方の長周期地震動、日本地震工学会大会2017梗概集CD-ROM、2017年、P1-7。
- 4) Okada, Y, K. Kasahara, S. Hori, K. Obara, S. Sekiguchi, H. Fujiwara, and A. Yamamoto: Recent progress of seismic observation networks in Japan Hi-net, F-net, K-NET and KiK-net, Earth, Planets and Space, Volume 56, 2004, pp. xv-xxviii.
- 5) 気象庁：地震月報(カタログ編)。 <http://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/bulletin/index.html>。(参照2019年6月28日)
- 6) 佐藤智美、大川出、西川孝夫、佐藤俊明：長周期地震動の経験式の改良と2011 年東北地方太平洋沖地震の長周期シミュレーション、日本地震工学会論文集、第12巻、第4号、2012年、pp.354-373
- 7) Dziewonski, A., S. Bloch and M. Landisman: A technique for the analysis of transient seismic signals, Bull. Seism. Soc. Am., Vol.59, 1969, pp.427-444.
- 8) Capon, J.: High resolution frequency-wavenumber spectrum analysis, Proc. IEEE, 57, 1969, pp.1408-1418.
- 9) Koketsu, K., H. Miyake and H. Suzuki: Japan integrated velocity structure model version 1. In: Proceedings of the 15th world conference on earthquake engineering. Paper no. 1773, 2012.
- 10) Zama, S.: Characteristics of long-period ground motion in Tokyo Bay area, Japan, Proceedings of 10th World Conference on Earthquake Engineering, pp.593-598, 1992.
- 11) Koketsu, K. and M. Kikuchi: Propagation of seismic ground motion in the Kanto basin, Japan, Science, Vol.288, No.19, pp.1237-1239, 2000.
- 12) 郭 雨佳、瀨瀬一起、三宅弘恵：2016年4月1日三重県南東沖の地震(Mj6.5)の長周期地震動に対する南海トラフ付加体の効果、日本地震学会2016年秋季大会予稿集、2016年、S-15-13。
- 13) 山本優、植竹富一：関東平野における2016年4月1日三重県南東沖の地震のシミュレーション、日本建築学会大会学術講演梗概集（中国）2017年8月、pp.175-176。
- 14) Uetake, T.: Effects of subsurface structures of source regions on longperiod ground motions observed in the Tokyo Bay area, Japan. Earth Planets Space, 2017, 69:71. <https://doi.org/10.1186/s40623-017-0655-x>
- 15) Dhakal, Y. P. , W. Suzuki, T. Kimura, N. Morikawa, T. Kunugi and S. Aoi: Evidence of strong long-period ground motions of engineering importance for Nankai Trough plate boundary earthquakes: comparison of ground motions of two moderate-magnitude earthquakes, 2018, 70:189. <https://doi.org/10.1186/s40623-018-0963-9>
- 16) Wessel, P., W. H. F. Smith, R. Scharroo, J. F. Luis, and F. Wobbe: Generic Mapping Tools: Improved version released, EOS Trans. AGU, 94, 2013, pp.409-410.