

強震動から見た 2007 年能登半島地震の特徴

CHARACTERISTICS OF STRONG GROUND MOTIONS DURING THE 2007 NOTO HANTO EARTHQUAKE

野津 厚*1、西川隼人*2

Atsushi NOZU, Hayato NISHIKAWA

Characteristics of strong ground motions observed during the 2007 Noto Hanto earthquake ($M_J=6.9$) were investigated. At two stations in the near-source region, very strong ground motions with PGV over 90 cm/s were observed. The Fourier spectra at K-NET stations were compared with the site amplification factors that had been published before the earthquake. It was confirmed that the overall properties of the observed Fourier spectra were heavily influenced by the site amplification factors, although the peak of the observed Fourier spectra were often located at lower frequencies than those of the site amplification factors, probably due to soil nonlinearity. The Fourier spectral ratio of nearby station pairs clearly indicates the nonlinear behavior of the soil at some stations. The Fourier phase of the ground motion at K-NET Wajima is influenced by the path and/or site effects, rather than the source size.

1. はじめに

2007年3月25日午前9時42分頃、能登半島沖を震源とするマグニチュード6.9の大地震が発生した。この地震では、石川県の輪島市、七尾市、穴水町で震度6強の揺れを観測するなど各地で強い揺れが観測され、また、震源に近い輪島市で1名の方が亡くなるなど、石川県を中心に大きな被害が生じた。この地震は気象庁により平成19年(2007年)能登半島地震と命名された。本稿は、本地震による強震動の特徴について、すでに出されている報告^{例えば¹⁾}も参考にしつつとりまとめたものである。

2. 地震動指標の整理

まず、地震動指標の整理を行う。本地震による震源周辺における強震記録の最大加速度等については福島ら¹⁾により表1のようにまとめられている。この一覧表に基づいて、計測震度相当値、最大速度および最大加速度の空間的な分布を示すと図1~図3のようになる。JMA輪島とK-NET²⁾穴水では90kineを超える非常に強い揺れが観測されている。これらの地点では震度も6強となっている。一方、震源断層の近傍でもK-NET富来やJMA富来ではさほど大きな最大速度は観測されていない。この点については次章においてサイト増幅特性との関係において考察を行う。

3. フーリエスペクトルの特徴

本章では、震源付近で取得された記録のフーリエスペクトルの特徴を見ていく。その前段として、これらの記録を観測した地点におけるサイト増幅特性を見ておくことにする。図4は震源付近のいくつかのK-NET観測点

におけるサイト増幅特性を既往の研究^{3), 4)}に基づいて示したものである。図中の灰色の線は野津・長尾³⁾によるもので、中部地方を中心とする468のK-NET, KiK-net⁵⁾等の観測点で得られたM4.5~M5.9の240地震による5401の記録に対してスペクトルインバージョン⁶⁾を適用することによりサイト増幅特性を算出している。このとき拘束条件としては周波数毎にサイト増幅特性が最小となる観測点(ただし表層付近のS波速度が小さい地点は除く)におけるサイト増幅特性を1としている。図中の黒線は西川・宮島⁴⁾によるもので、福井県、石川県など46のK-NET, KiK-net観測点で得られたM3.6~M6.2の23地震による403の記録に対してスペクトルインバージョンを適用することによりサイト増幅特性を算出している。このとき拘束条件としてKiK-net和泉におけるサイト増幅特性を与えており、KiK-net和泉におけるサイト増幅特性は鶴来の方法⁷⁾により算出している。野津・長尾の解析と西川・宮島の解析は全く独立に、互いの結果を知ることなく実施されている。しかし、多くの地点で両者の解析結果は非常に良く一致しており興味深い。この結果に基づいてK-NET観測点でのサイト増幅特性をまとめておくと、まず、低周波側(0.2-0.3Hz)でのサイト増幅特性が大きいのは輪島と羽咋である。従ってこれらの地点では地震動の低周波成分を増幅させるような深い構造が存在しているものと推察される。能都、穴水、富来、七尾では、低周波側での増幅率はさほどでもないが、高周波側でそれぞれピークを有している。ピーク的位置は七尾が1Hz付近、穴水が1.5Hz付近、能都が3Hz付近、富来が7Hz付近である。すなわちK-NET富来は低周波側での増幅率が小さい地点に該当しており、震源

*1 港湾空港技術研究所

*2 舞鶴工業高等専門学校

Port and Airport Research Institute

Maizuru National College of Technology

表1 震源周辺における強震記録の最大加速度など（福島他¹⁾より）

観測点 コード	観測点名称	経度(°)	緯度(°)	PGA(Gal)	PGV(kine)	計測震度
ISK001	K-NET大谷	137.1794	37.4969	179.3	15.6	4.82
ISK002	K-NET正院	137.2908	37.4413	175.1	29.5	5.14
ISK003	K-NET輪島	136.9113	37.3889	546.3	43.9	5.53
ISK004	K-NET能都	137.1500	37.3050	665.6	25.0	5.55
ISK005	K-NET穴水	136.9069	37.2277	896.1	103.4	6.33
ISK006	K-NET富来	136.6927	37.1572	933.7	59.4	5.93
ISK007	K-NET七尾	136.9711	37.0397	217.9	34.8	5.28
ISK008	K-NET羽咋	136.7813	36.8888	407.5	23.9	4.94
TYM002	K-NET氷見	136.9777	36.8630	172.9	20.6	4.87
ISKH01	KiK-net珠州	137.2875	37.5236	360.1	23.3	5.07
ISKH02	KiK-net柳田	137.0442	37.3617	366.5	35.2	5.48
535	JMA七尾	136.9717	37.0300	258.2	35.9	5.35
914	JMA富来	136.7283	37.1417	513.7	55.2	5.65
915	JMA能都	137.1533	37.3033	261.1	52.1	5.67
CCB	JMA羽咋	136.7817	36.9250	226.4	16.4	4.53
E10	JMA輪島	136.8983	37.3900	472.2	98.6	6.14

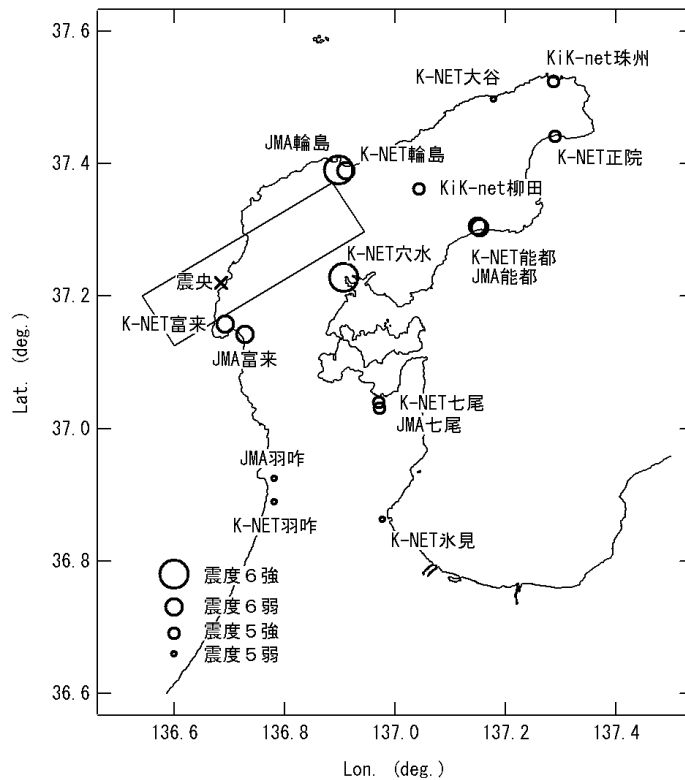


図1 震源周辺における計測震度の分布

断層の近傍に位置しているにも関わらず本震時にさほど大きな最大速度が観測されなかったのはそのためであると考えられる。

さて図5には今回の記録のフーリエスペクトル（水平2成分のベクトル和をとりバンド幅0.05HzのParzen ウィンドウを適用したもの、フーリエスペクトルの算定方法は以下同様とする）を示している。比較のためサイト増

幅特性³⁾も示しているが、全般的に観測されたフーリエスペクトルの形状はサイト増幅特性の形状と非常に類似していることがわかる。すなわち観測された記録の特性はサイト増幅特性の強い影響下にある。ただし、多くの地点で、今回の地震の記録のフーリエスペクトルはサイト増幅特性よりピークが低周波側にあることが認められる。この違いの原因として、一つには震源スペクトルの

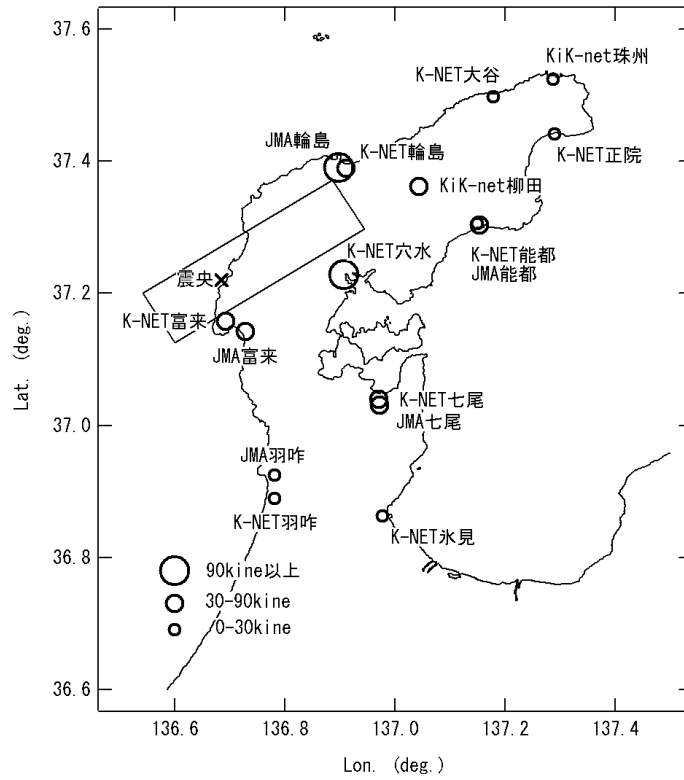


図2 震源周辺における最大速度の分布

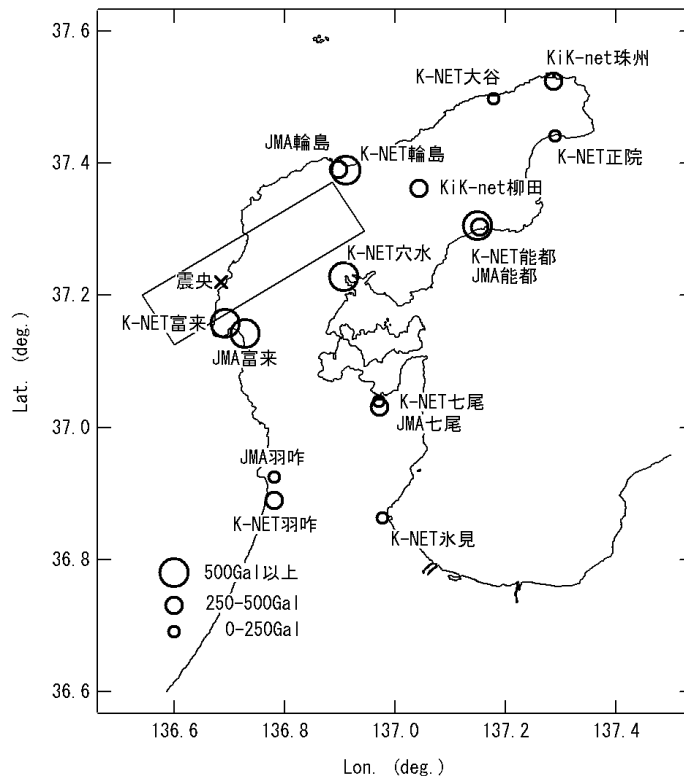


図3 震源周辺における最大加速度の分布

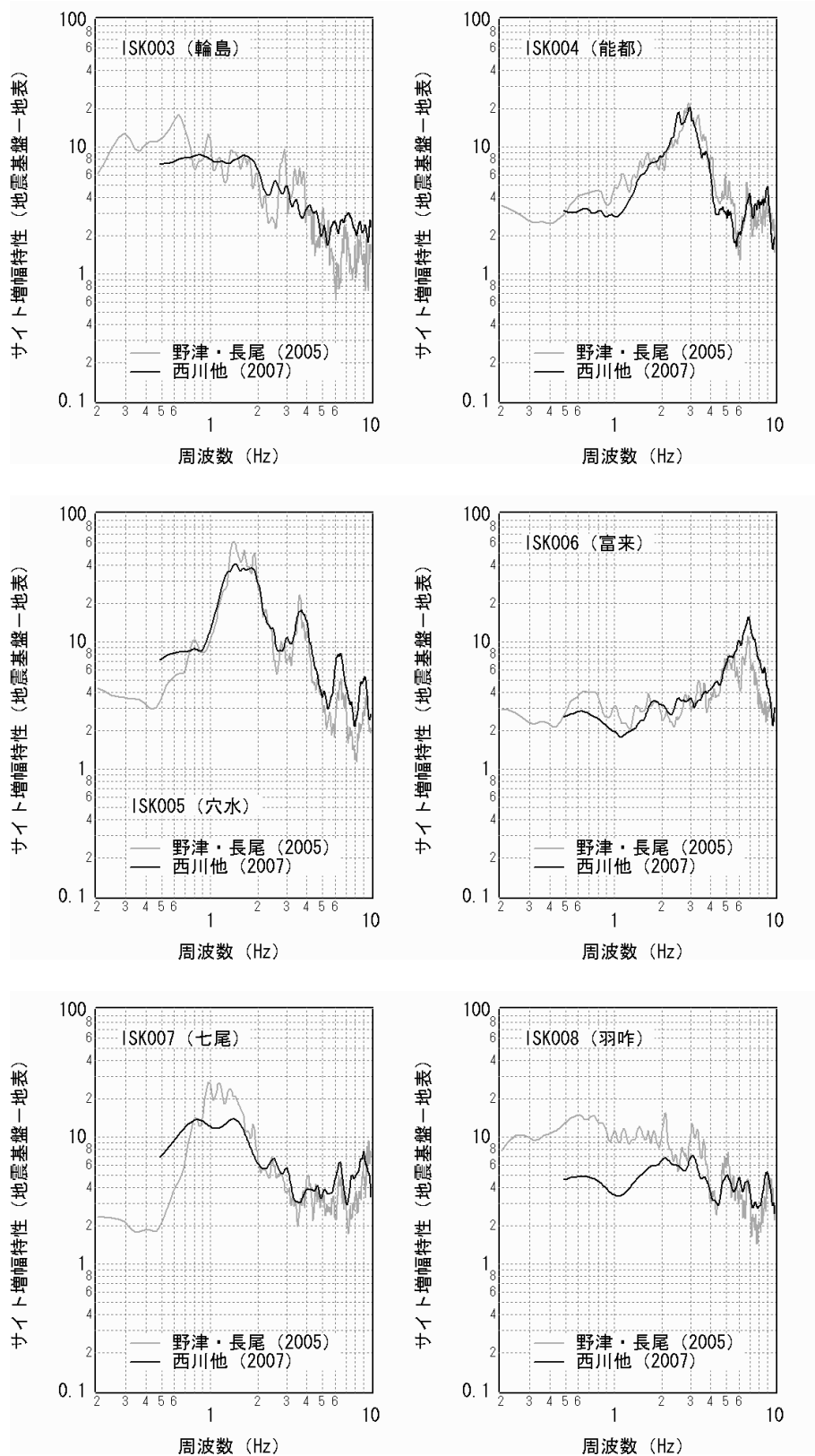


図4 震源周辺のK-NET観測点におけるサイト増幅特性^{3), 4)}

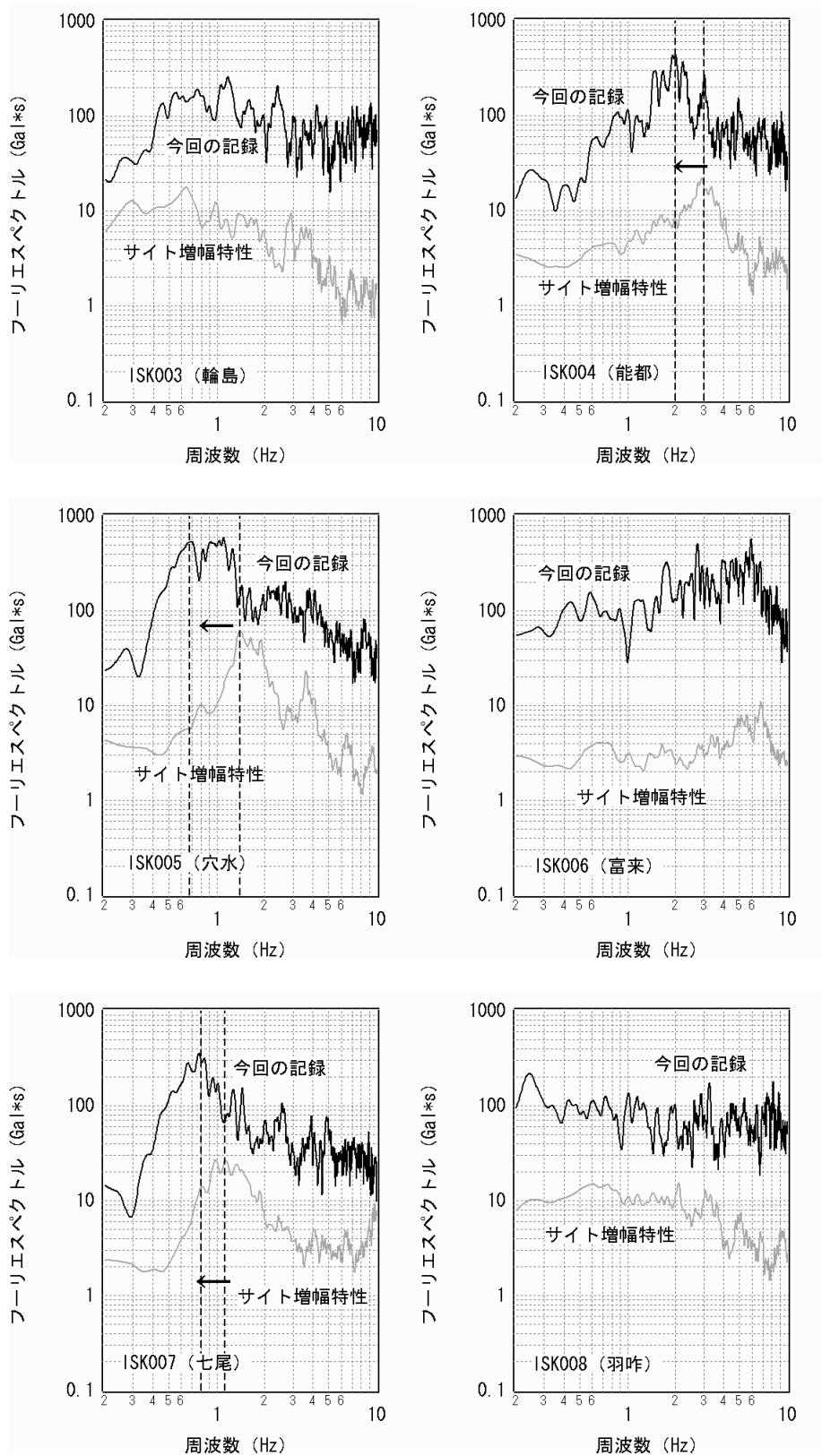


図5 震源周辺のK-NET観測点におけるフーリエスペクトルとサイト増幅特性³⁾
 (サイト増幅特性は無次元量であるが比較のため同じ図に示した)

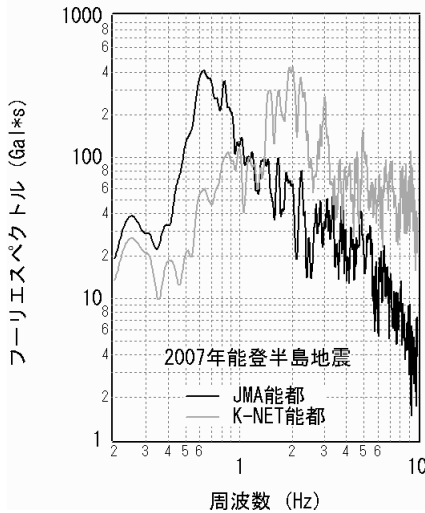
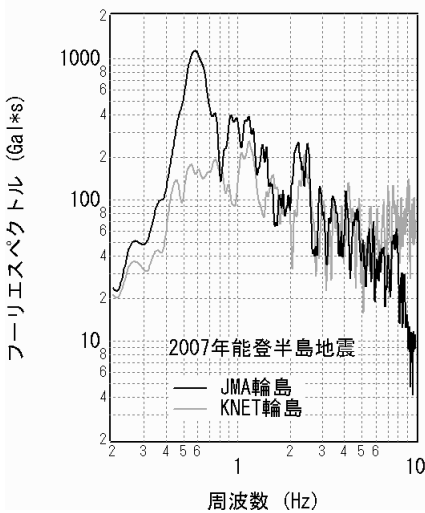
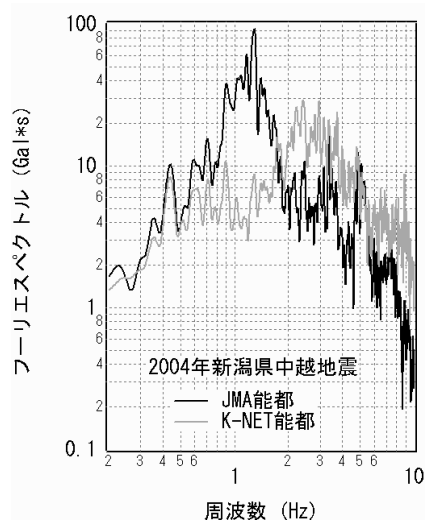
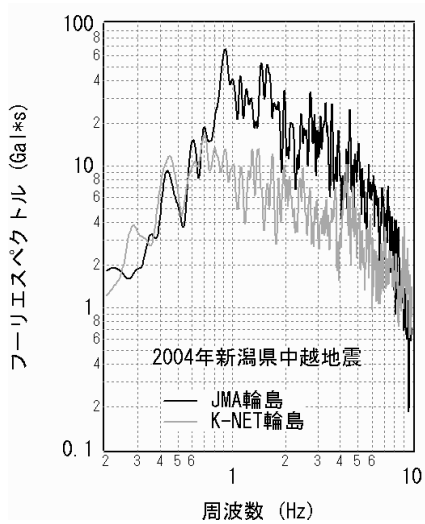


図6 2004年新潟県中越地震(上)と今回の地震(下)によるJMA輪島とK-NET輪島におけるフーリエスペクトル

図8 2004年新潟県中越地震(上)と今回の地震(下)によるJMA能都とK-NET能都におけるフーリエスペクトル

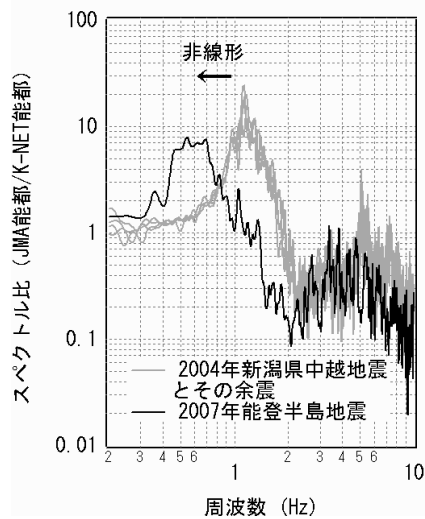
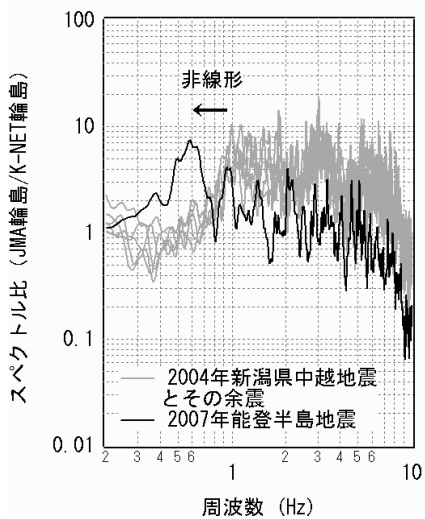


図7 JMA輪島とK-NET輪島における記録のフーリエスペクトルの比

図9 JMA能都とK-NET能都における記録のフーリエスペクトルの比

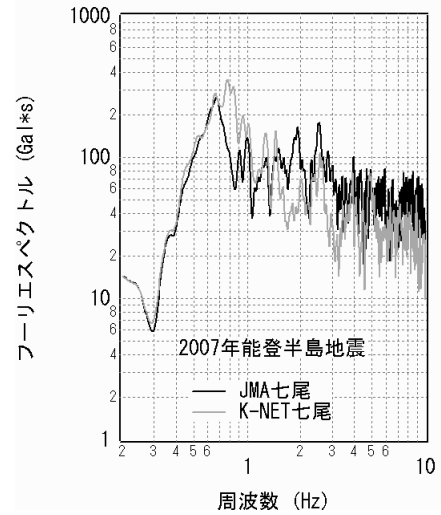
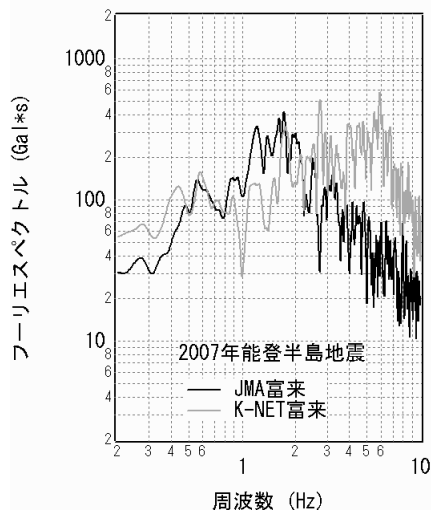
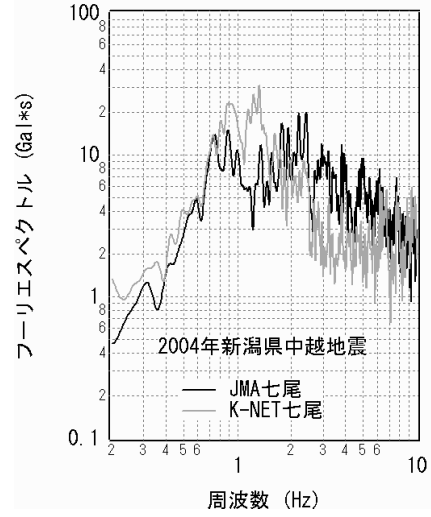
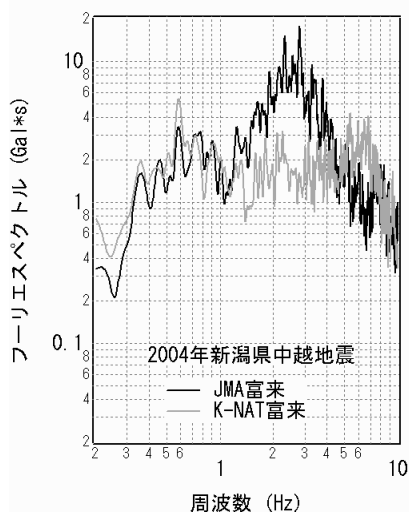


図10 2004年新潟県中越地震（上）と今回の地震（下）によるJMA富来とK-NET富来におけるフーリエスペクトル

図12 2004年新潟県中越地震（上）と今回の地震（下）によるJMA七尾とK-NET七尾におけるフーリエスペクトル

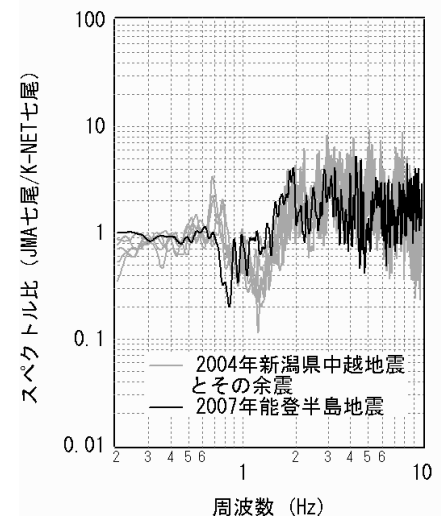
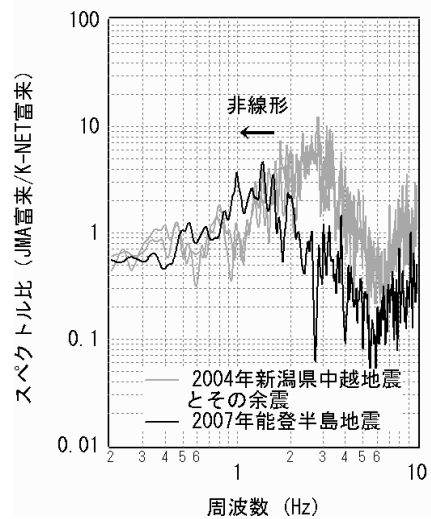


図11 JMA富来とK-NET富来における記録のフーリエスペクトルの比

図13 JMA七尾とK-NET七尾における記録のフーリエスペクトルの比

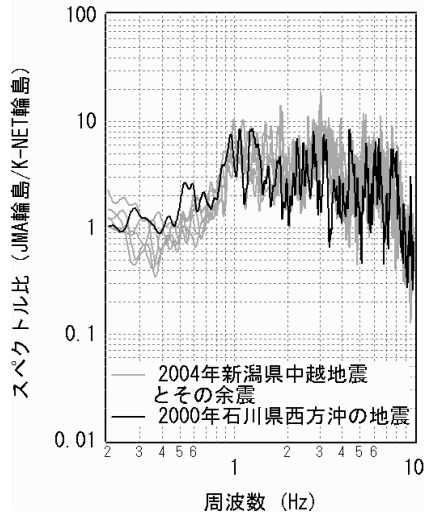


図 14 JMA 輪島と K-NET 輪島における記録のフーリエスペクトルの比 (2)

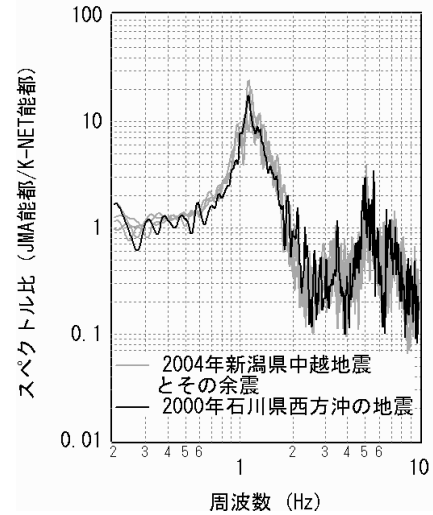


図 15 JMA 能都と K-NET 能都における記録のフーリエスペクトルの比 (2)

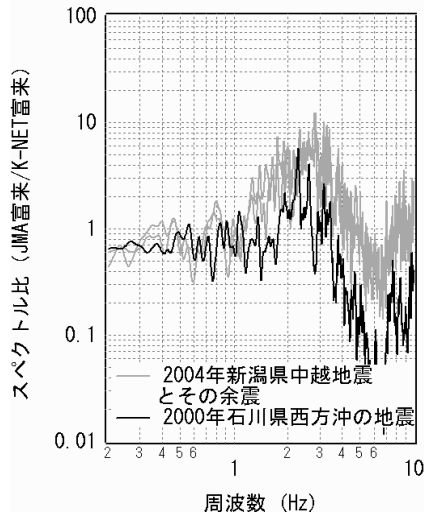


図 16 JMA 富来と K-NET 富来における記録のフーリエスペクトルの比 (2)

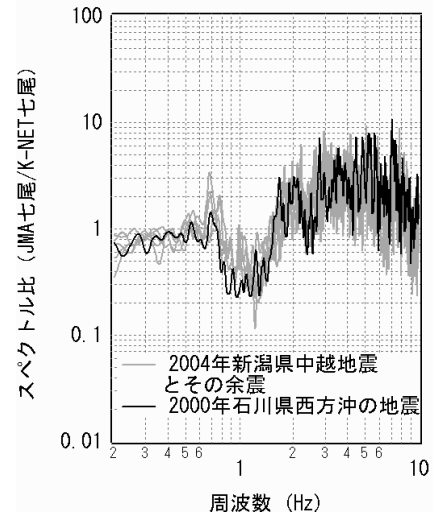


図 17 JMA 七尾と K-NET 七尾における記録のフーリエスペクトルの比 (2)

形状の影響が考えられるが、もう一つの要因として、表層地盤の非線型挙動の影響が考えられる。

4. 近接する 2 点間のスペクトル比

次に近接する 2 点間のスペクトル比について検討する。なお同様の検討はすでに福島他¹⁾により行われている。図 6 は 2004 年新潟県中越地震と今回の地震による JMA 輪島と K-NET 輪島におけるフーリエスペクトルを示したものである。図 7 は JMA 輪島と K-NET 輪島における記録のフーリエスペクトルの比を、2004 年新潟県中越地震とその余震、および今回の地震に対して示したものである。これを見ると、福島他¹⁾がすでに指摘しているように、スペクトル比のピークには明らかに低周波側へのシフトが認められる。図 7 が示すものは、図 5 と異なり、

近接する 2 点間のスペクトル比であるから、震源特性と伝播経路特性はキャンセルされていると考えることができる。従って、図 7 に見られるピークの低周波側へのシフトは表層地盤の非線型挙動によるものと考えられる。図 9、図 11、図 13 は能都、富来、七尾の JMA と K-NET のペアに対して同様の検討を行ったものである。七尾ではあまりはっきりしないが、能都と富来ではスペクトル比のピークの低周波側へのシフトが認められる。特に能都では、輪島と同様、非常に明瞭なシフトが認められる。

以上の検討では今回の地震に対する結果を 2004 年新潟県中越地震およびその余震に対する結果と比較しているので、この相違が azimuth の相違によるものである可能性が残る。そこで、もう一つの比較として、2000 年 6 月 7 日石川県西方沖の地震 (M6.2) によるフーリエスペ

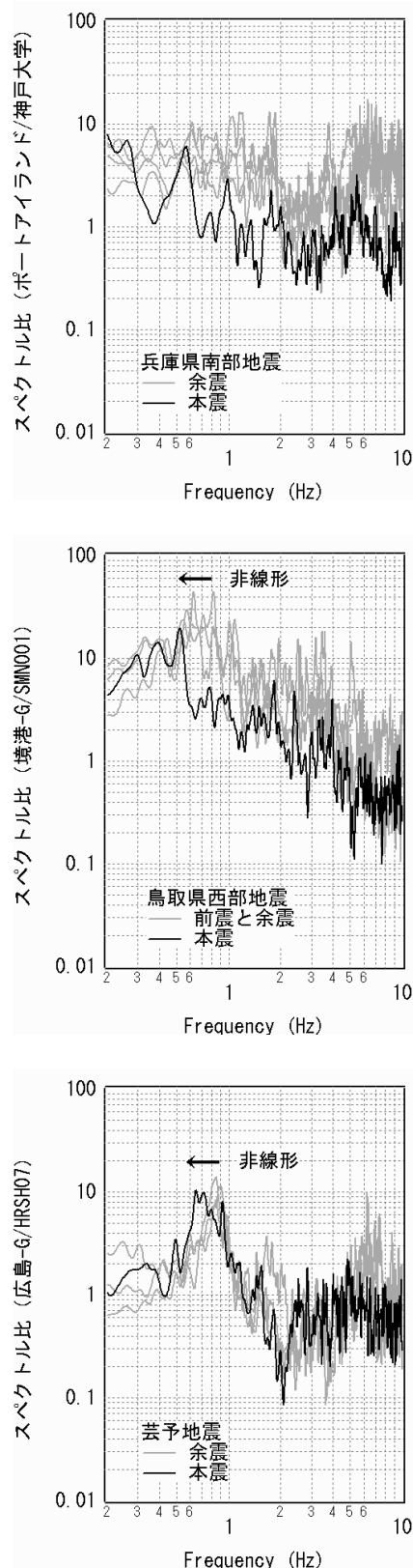


図 18 過去の地震における 2 地点間のスペクトル比の例
 (上)1995 年兵庫県南部地震, (中)2000 年鳥取県西部地震, (下)2001 年茨予地震

クトルの比を, 2004 年新潟県中越地震およびその余震によるフーリエスペクトルの比と比較したものを図 14~図 17 に示す. これらの図を見る限り, スペクトル比のピークに明瞭なシフトは認められない. 従って, 輪島 (図 7), 能都 (図 9) および富来 (図 11) におけるスペクトル比のピークのシフトは表層地盤の非線型挙動の影響であると考えられる.

輪島および能都におけるスペクトル比のピークは, 約 1Hz から約 0.6Hz まで, 約 40% も低下している. これは, 表層地盤のうち特に地震波の増幅に関係する部分の S 波速度が線形時より約 40% も小さくなったことに対応する. これは非常にドラスティックな変化である. 参考までに, 過去の地震に対して同様の検討を行った結果を図 18 に示す. 図 18 の上段は, 1995 年兵庫県南部地震およびその余震 (1/19, 2/2, 2/2, 2/18) の際にポートアイランドの地表で得られた記録のスペクトルを神戸大学で得られた記録のスペクトルで除したものを示したものである. この場合もスペクトル比は全体に左側にシフトしている様子が見て取れるが, 余震のスペクトル比のピークが明瞭でないために, シフトの大きさを正確に把握することはこの図からは難しい. 図 18 の中段は, 2000 年鳥取県西部地震およびその前震と余震 (7/17, 10/8, 11/3) の際に境港の港湾の地表で得られた記録のスペクトルを K-NET 美保関で得られた記録のスペクトルで除したものを示したものである. この場合もスペクトル比は左側にシフトしている様子が認められ, ピークは 0.8Hz 付近から 0.5Hz 付近まで約 40% 低下している. 図 18 の下段は, 2001 年茨予地震およびその余震 (3/25, 3/26, 3/26,) の際に広島港の地表で得られた記録のスペクトルを KiK-net 呉の地表で得られた記録のスペクトルで除したものを示したものである. この場合もスペクトル比は左側にシフトしている様子が認められ, ピークは 0.8Hz 付近から 0.65Hz 付近まで約 20% 低下している. 以上のことから考えると, 今回の地震の際に JMA 輪島および JMA 能都の周辺で生じた表層地盤の非線型挙動は, 2000 年鳥取県西部地震の際に境港の港湾付近に生じた表層地盤の非線型挙動と同程度に強いものであったと言えるかも知れない.

5. フーリエ位相の特徴

ここまで主にフーリエ振幅スペクトルの特性について検討を行ってきたが, これと対になるフーリエ位相についても若干の検討を行ってみた. 図 19 では, 今回の地震の K-NET 輪島における速度波形 (NS 成分) を上段に示している. また, 下段には, フーリエ振幅はそのままにして, フーリエ位相だけを 3/25 15:43 の余震の記録のフーリエ位相に置き換えた波形を示している. 上段と下段の波形は比較的類似している. 従って本震と余震のフ

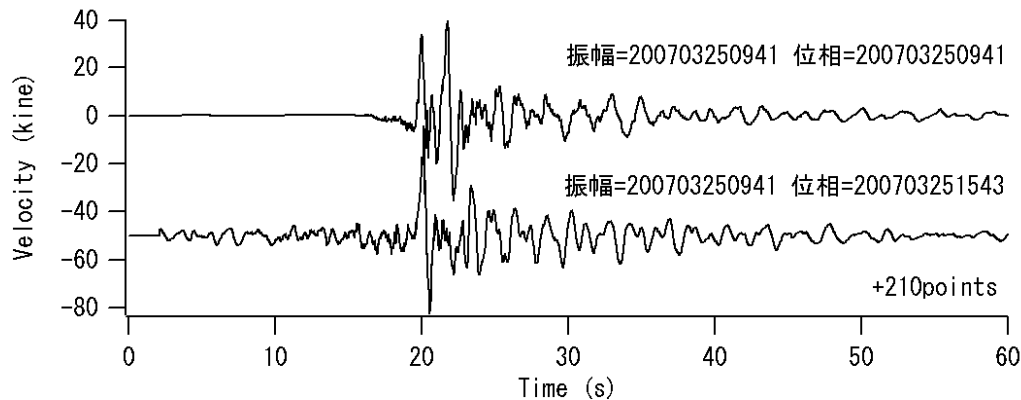


図 19 K-NET 輪島における 2007 年能登半島地震の本震と余震のフーリエ位相の類似

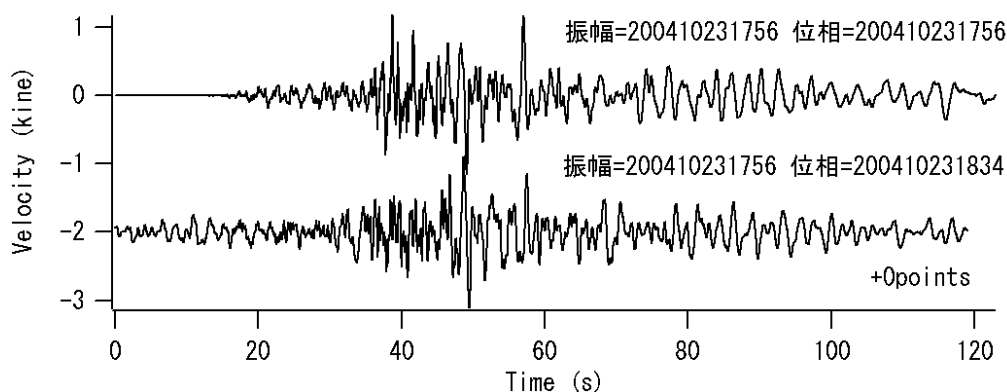


図 20 K-NET 輪島における 2004 年新潟県中越地震の本震と余震のフーリエ位相の類似

フーリエ位相は比較的類似していると考えて良いだろう。2004 年新潟県中越地震および 10/23 18:34 の余震についても、本震と余震のフーリエ位相は比較的類似している(図 20)。これらの結果から、K-NET 輪島におけるフーリエ位相は、震源のサイズよりも伝播経路およびサイト特性の影響をより強く受けていることがわかる。

7. まとめ

以上、2007 年能登半島地震による震源付近の強震記録について検討した結果、観測された記録のスペクトル特性はサイト増幅特性の強い影響下にあること、近接した 2 地点間のスペクトル比から、強い非線型挙動を示した観測点があると推察されることなどがわかった。

謝辞

本稿では防災科学技術研究所の K-NET および KiK-net、気象庁、神戸市開発局(当時)および関西地震観測研究協議会による強震記録を利用しています。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 福島康宏, 末富岩雄, 磯山龍二: 2007 年能登半島地震における地震動のサイト特性, 土木学会地震工学論文集, pp.168-177, 2007.
- 2) Kinoshita, S.: Kyoshin Net (K-net), *Seim. Res. Lett.*, Vol.69, pp.309-332, 1998.
- 3) 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の強震観測地点におけるサイト増幅特性, 港湾空港技術研究所資料, No.1112, 2005.
- 4) 西川隼人, 宮島昌克: 北陸地方の K-NET, KiK-net 観測点におけるサイト特性と地形分類, 標高との対応, 土木学会地震工学論文集, pp.214-219, 2007.
- 5) Aoi, S., Obara, K., Hori, S., Kasahara, K. and Okada, S.: New strong-motion observation network: KiK-net, *EOS. Trans. Am. Geophys. Union*, Vol. 329, 2000.
- 6) 岩田知孝, 入倉孝次郎: 観測された地震波から震源特性, 伝播経路特性及び観測点近傍の地盤特性を分離する試み, 地震 2, 第 39 巻, pp.579-593, 1986.
- 7) 鶴来雅人, 田居優, 入倉孝次郎, 古和田明: 経験的サイト増幅特性評価手法に関する検討, 地震 2, 第 50 巻, pp.215-227, 1997.