

# 地震動のフーリエ位相特性と地震発生位置 の関係に関する基礎的検討

若井 淳<sup>1</sup>・野津 厚<sup>2</sup>

<sup>1</sup>港湾空港技術研究所 地震動研究チーム  
(〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

E-mail:wakai-a@pari.go.jp

<sup>2</sup>港湾空港技術研究所 地震動研究チームリーダー (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

E-mail:nozu@pari.go.jp

地震動のフーリエ位相特性に着目した既往の研究の中には、過去に発生した大地震とそれに伴う特定の余震による地震動のフーリエ位相特性は概ね類似していることが指摘されている例がある。このことは、将来の大地震による地震動を予測する上で、余震をはじめとする中小地震による地震動のフーリエ位相特性が大変有用であることを示唆している。本論文では、例として2003年十勝沖地震(M<sub>JMA</sub>8.0)を取り上げ、将来想定される大地震による地震動とその震源域周辺で発生した複数の中小地震による地震動のフーリエ位相特性の類似性を定量的に評価し、フーリエ位相特性の類似性と中小地震の発生位置の関係を示す。

**Key Words :** *earthquake ground motion, Fourier phase characteristics, asperity, location of epicenter*

## 1. はじめに

過去の地震観測記録に基づいて、将来の大地震による地震動を予測する研究は従来から行われており、地震動予測の対象地点において地震観測記録を収集することの重要性は広く認識されている。既往の研究の中には、地震観測記録の重要な情報のひとつであるフーリエ位相特性に着目し、2003年十勝沖地震と特定の余震あるいは特定の中小地震の観測記録のフーリエ位相特性について比較検討し、2003年の地震の震源域近傍で発生した中小地震による地震動のフーリエ位相特性は2003年の地震による地震動のフーリエ位相特性と良好に類似していることを示した例がある<sup>1),2)</sup>。

このように、想定される大地震の震源域近傍で発生した既往の地震による地震動のフーリエ位相特性は、将来の大地震による地震動の予測にとって有用な情報であると考えられる。したがって、断片的にだけでなく、体系的にフーリエ位相特性について検討することは、将来の大地震による地震動を予測する上で大きな意義があるといえる。

著者らは、2003年十勝沖地震の観測記録が得られた地点について、その地点で得られた複数の中小地震の観測記録のフーリエ位相特性と2003年十勝沖地震の観測記録のフーリエ位相特性を比較し、その類似性を定量的に評価し、フーリエ位相特性の類似性と地震発生位置との関係を体系的に検討している。本論文では、それらの検討結果を報告する。具体的

には、まず、フーリエ位相特性の類似性に関する検討手法について述べる。次に、本論文で対象とした十勝支庁の3つの強震観測地点(KiK-netのTKCH06(芽室)、TKCH07(豊頃)、TKCH08(大樹))及び釧路支庁の3つの強震観測地点(KiK-netのTKCH02(足寄東)、KSRH02(阿寒南)、KSRH09(白糠南))ごとに2003年十勝沖地震及びその震源域近傍で発生した複数の中小地震による地震動のフーリエ位相特性を比較し、その類似性を定量的に評価し、地震発生位置に応じてフーリエ位相特性の類似性がどのように変化するかについて検討する。

## 2. フーリエ位相特性の類似性に関する検討手法

本論文では、2003年十勝沖地震による地震動のフーリエ位相特性との類似性を検討するため、マグニチュード4.5以上かつ7.0以下、震源深さ70km以下、震央距離200km未満の条件を満たす、十勝支庁の強震観測地点であるKiK-netのTKCH06、TKCH07、TKCH08及び釧路支庁の強震観測点であるKiK-netのTKCH02、KSRH02、KSRH09の6地点において観測された48の中小地震記録を採用する。図-1に、本論文で検討対象とする強震観測地点(▲印)、中小地震の震央位置(☆印)、2003年十勝沖地震の破壊開始点(×印、気象庁発表)及び2003年十勝沖地震の不均質震源モデル<sup>1)</sup>を示す。

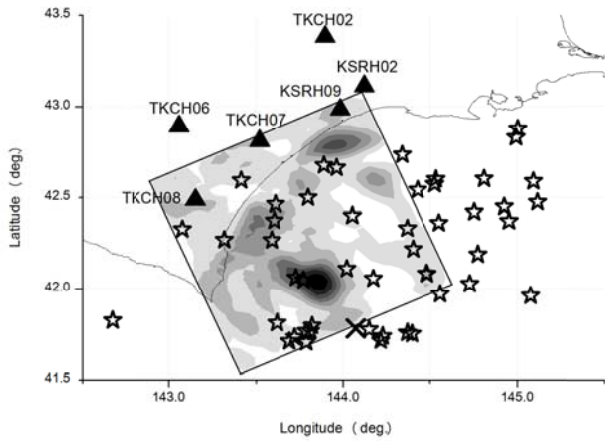
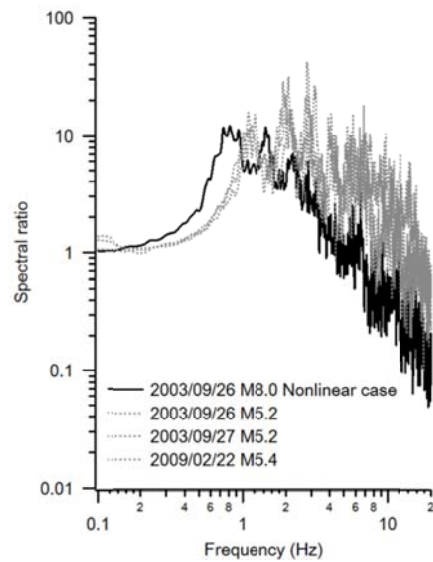


図-1 強震観測点(▲印), 中小地震の震央位置(☆印), 2003年十勝沖地震の破壊開始点(×印, 気象庁発表)および不均質震源モデル<sup>1)</sup>

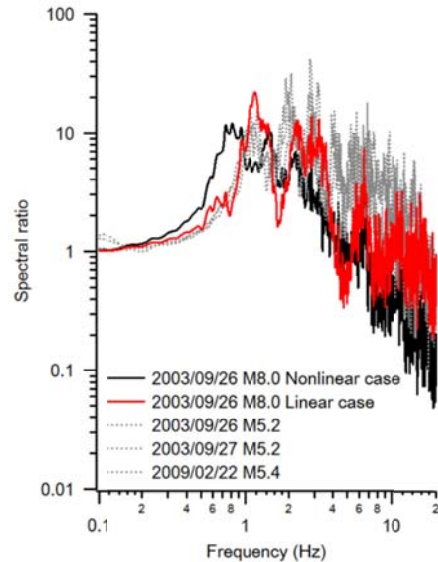


検討方法は以下に述べるとおりである。まず、2003年十勝沖地震による各強震観測点の鉛直アレイ観測記録の解析を行い、地表での本震観測記録に対して観測点直下の表層地盤の非線形挙動の影響を調べ、影響がある場合はそれを除去する。次に、各観測点において上記操作で得られた地表での線形時の本震波形に対して、そのフーリエ位相特性を比較対象の中小地震波形のものと比較することにより、その類似性を評価する。以下、詳細について述べる。

### (1) 本震観測記録からの表層地盤の非線形挙動の影響除去

まず、各強震観測点において2003年十勝沖地震で得られた地表および地中の観測記録のフーリエスペクトル比と、表層地盤が線形の範囲で挙動していると考えられる中小地震で得られた地表および地中の観測記録のフーリエスペクトル比を比較することで、地表での本震観測記録が観測点直下の表層地盤の非線形挙動の影響を受けているかを調べる。図-2は、例としてTKCH07(豊頃)における本震および中小地震のスペクトル比を示している。ここで、各フーリエスペクトルは水平2成分のベクトル和をとり、バンド幅0.05Hzのパーセンウィンドウを適用したものである。図-2では、本震観測記録のスペクトル比のピーク周波数が中小地震記録のスペクトル比のものよりも低周波数側に少し移動しており、地表での本震観測記録が表層地盤の非線形挙動の影響を受けていることがわかる。そこで、本震観測記録に対して非線形および線形の重複反射理論を適用することにより、非線形挙動の影響を取り除くを試みる。まず、非線形時(本震時)および線形時に対応する地盤モデルを作成する。具体的には、PS検層結果による地盤モデルに基づいて、S波速度と減衰定数のチューニングを行うことにより、図-2の非線形時および線形時のスペクトル比をそれぞれ満足するような地盤モデルを作成する。

得られた非線形時の地盤モデルを用いて重複反射



理論により地表の本震観測記録を地中の地震動に変換し、次に線形時の地盤モデルを用いて重複反射理論により地中の地震動を地表における線形時の地震動に変換する。非線形時、線形時の本震記録および中小地震記録のスペクトル比を比較したものを図-3に示す。線形時の本震記録のスペクトル比のピーク周波数は非線形時の本震記録のものより高周波数側に移動しており、中小地震記録のものと概ね一致していることがわかる。

### (2) フーリエ位相特性の類似性の評価方法

中小地震の速度波形をフーリエ変換し、中小地震

のフーリエ振幅に前節で評価した 2003 年十勝沖地震の線形時のフーリエ振幅と中小地震のフーリエ振幅の比を乗じ、その結果を逆フーリエ変換して新たな速度波形を合成する。得られた波形は、2003 年の地震のフーリエ振幅はそのまま、フーリエ位相のみを中小地震のものに置き換えた波形となっている。したがって、この置換え波形(以下、「置換え波」という)と 2003 年の地震波形(以下、「観測波」という)を比較することにより、双方の地震のフーリエ位相の類似性が評価できる。なお、検討に用いる速度波形の周波数帯域は、工学的に重要であると考えられる 0.2~1Hz とする。

さらに、フーリエ位相の類似性を定量的に評価するため、フーリエ位相の類似度の指標として、式(1)で得られる値を用いる。ここに、 $S(t)$ は置換え波を、 $O(t)$ は観測波を示す。積分区間は、TKCH07およびTKCH08については直達S波を含む20秒間、TKCH02については直達S波を含む25秒間、TKCH06、KSRH02およびKSRH09については直達S波を含む30秒間とする。この積分区間の相違は、それぞれの波形の特徴が表われている積分区間が異なることに起因する。(1)式で得られる値が小さいとフーリエ位相の類似度が高く、大きいとフーリエ位相の類似度が低いと判定できる。

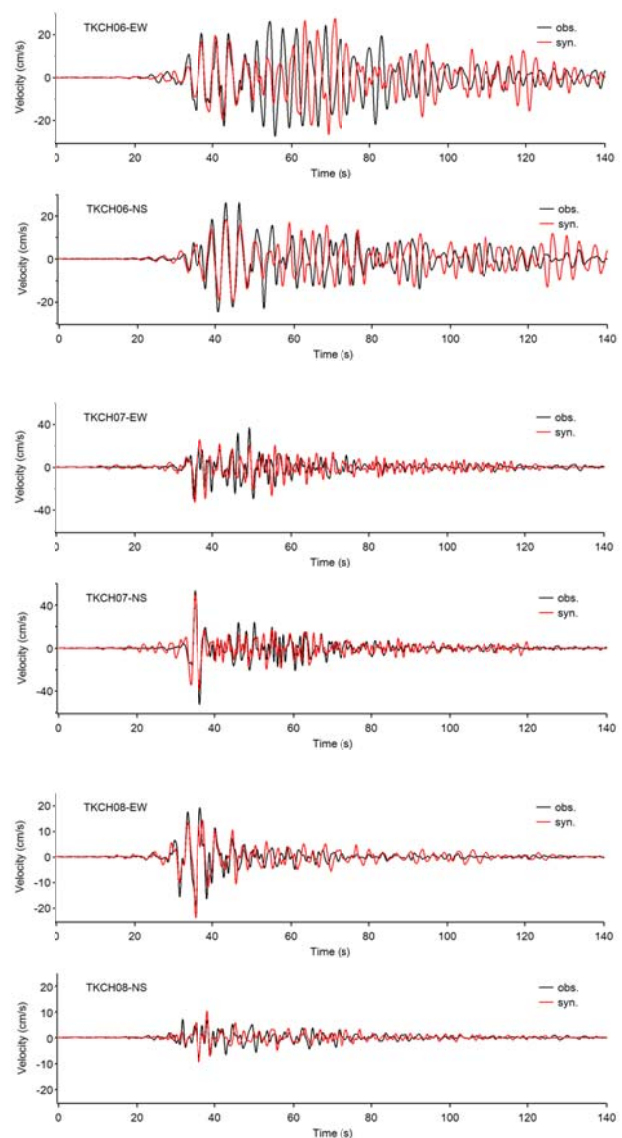
$$ERR = \frac{\int_{t_1}^{t_2} (S(t) - O(t))^2 dt}{\int_{t_1}^{t_2} (O(t))^2 dt} \quad (1)$$

そして、フーリエ位相の類似度及び地震発生位置との関係を視覚的に捉えることを可能にするため、地震発生位置に対して、類似度に対応して色分けされたマーキングを行う。

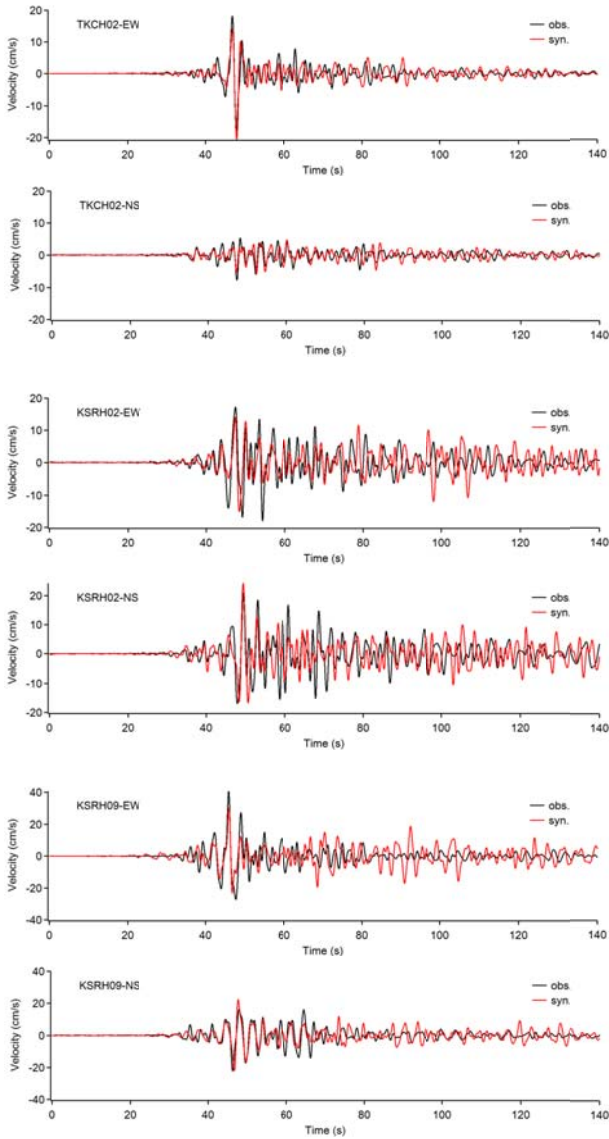
### 3. フーリエ位相特性の類似性と地震発生位置の関係

前章で述べた手法を用いて、強震観測地点(TKCH06, TKCH07, TKCH08, TKCH02, KSRH02, KSRH09)における観測波と置換え波を比較した例を観測地点ごとに図-4, 図-5に示す。これらの図では、いずれの観測地点についてもフーリエ位相の類似度が高い例を示しており、置換え波形は、NS成分およびEW成分ともに、観測波形の特徴を比較的良好に再現していることがわかる。

次に、TKCH06, TKCH07, TKCH08 (以上、十勝支庁)およびTKCH02, KSRH02, KSRH09 (以上、釧路支庁)で観測された、2003年十勝沖地震と複数の中小地震による地震動のフーリエ位相の類似度を地震発生位置ごとに評価した結果を図-6, 図-7に示す。図では、赤色に近いほど類似度が高く、青色に近いほど類似度が低いことを示している。まず、十勝支庁の観測点についてみてみると、TKCH06及びTKCH08では、本震の主要なアスペリティである asperity 1 の周辺で発生した地震による地震動

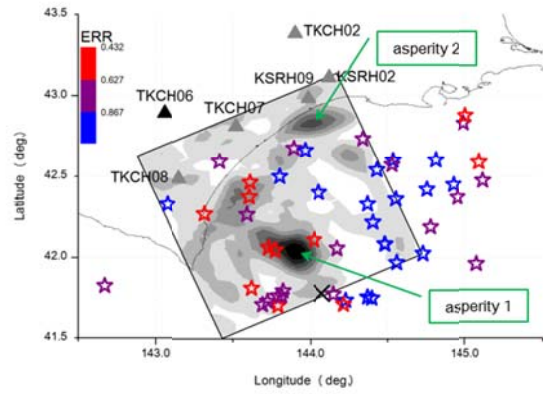


のフーリエ位相の類似度が比較的高いことがわかる。ただし、この領域から外れた箇所でも発生した地震でもフーリエ位相の類似度が高い例があり、この点は注意が必要である。一方、TKCH07では、本震の asperity 1 の周辺のみならず、asperity 2 の周辺で発生した地震による地震動のフーリエ位相の類似度も比較的高いことがわかる。これはTKCH07が比較的 asperity 2 に近く、そこでの地震動が asperity 2 の影響も少なからず受けているためと考えられる。フーリエ位相の類似度が高いグループ(赤色の☆)に属している地震発生位置に多少のばらつきがあるため、3つの観測地点の平均をとって類似度を評価した。その結果を図-8に示す。これを見ると、asperity 1 周辺で発生した地震のフーリエ位相の類似度が比較的高くなっている。なお、十勝支庁の各観測点では、特に asperity 1 付近の中小地震について、フーリエ位相の類似度が高いことを確認している。次に釧路支庁

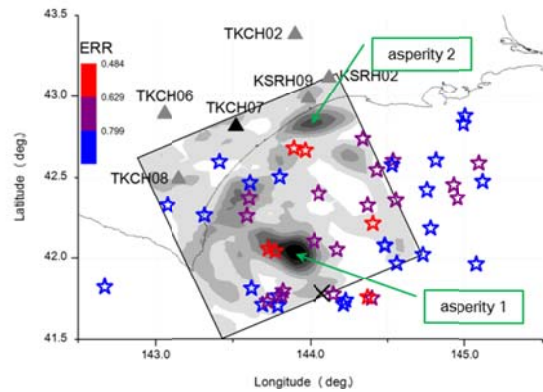


(黒  
ス)

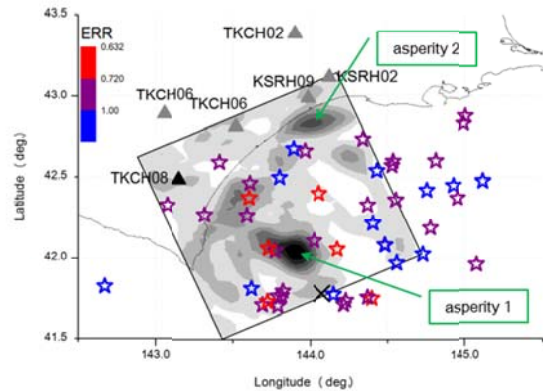
の観測点についてみると、TKCH02, KSRH02, KSRH09はいずれもasperity 2の周辺で発生した地震による地震動のフーリエ位相の類似度が比較的高くなっている。また、TKCH02, KSRH02については、フーリエ位相の類似度が比較的高い地震がasperity 1の周辺で発生している例もある。これは、釧路支庁の観測点の地震動は近傍のasperity 2の影響が大きいものの、本震の震源域の主要なアスペリティであるasperity 1の影響も多少はあると考えられる。フーリエ位相の類似度が高いグループ(赤色の☆)に属している地震発生位置に多少のばらつきがあるため、3つの観測地点の平均をとって類似度を評価した。その結果を図-9に示す。これを見ると、asperity 1およびasperity 2付近で発生した地震のフーリエ位相の類似度が比較的高くなっている。なお、釧路支庁の各観測点では、特にasperity 2付近の中小地震についてフーリエ位相の類似度が高いことを確認している。



a) TKCH06

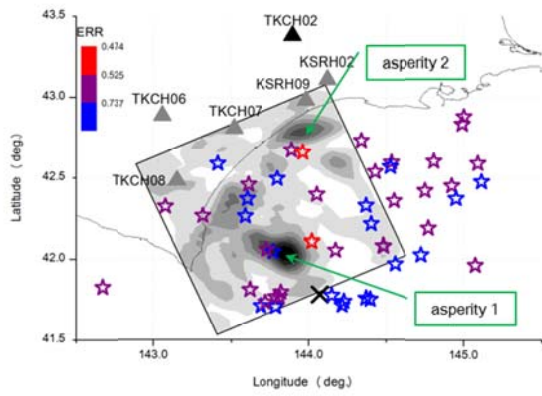


b) TKCH07

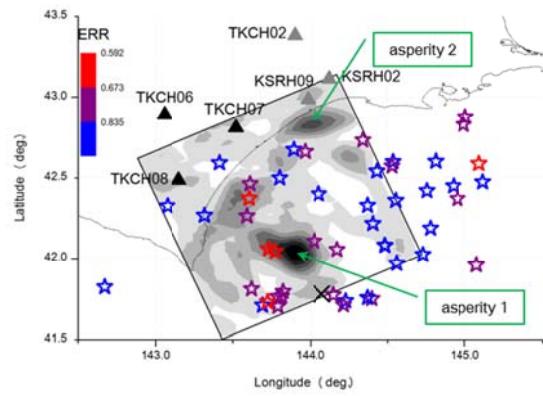


c) TKCH08

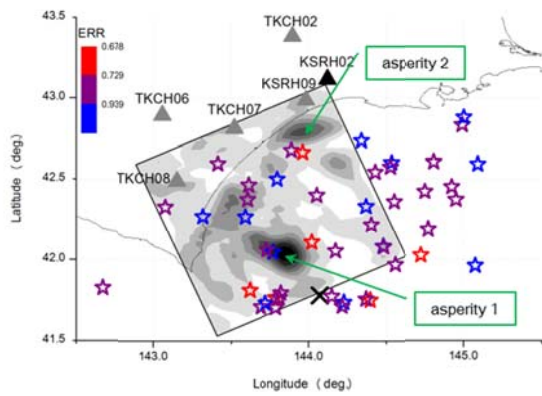
ところで、アスペリティから大きく離れた位置で発生した中小地震でもそのフーリエ位相の類似度が比較的高い例がある。実際、観測波と置換波を比較した図をみると、置換波形が概ね良好に観測波形の特徴を再現しているものがある一方で、それほど再現性が良好とは言えないものがある。ここでは、例としてTKCH06のケースを取り上げて検討する。図-10は、2つの中小地震に対して観測波と置換波を比較したものを示している。特に(a)の時間区間では下段の置換波の方が観測波の特徴を良好に再現しているように見える。しかし、類似度で見ると上段の方



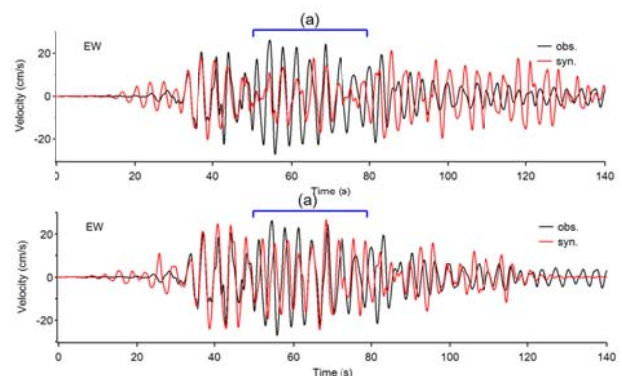
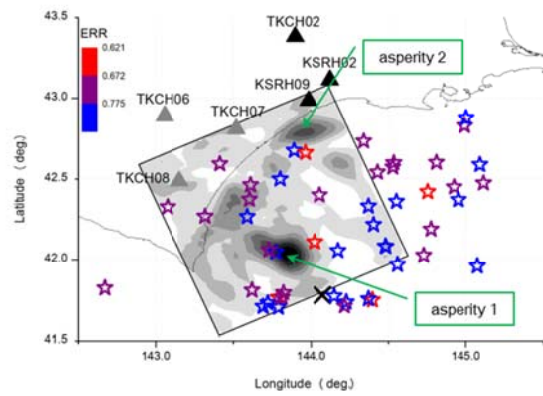
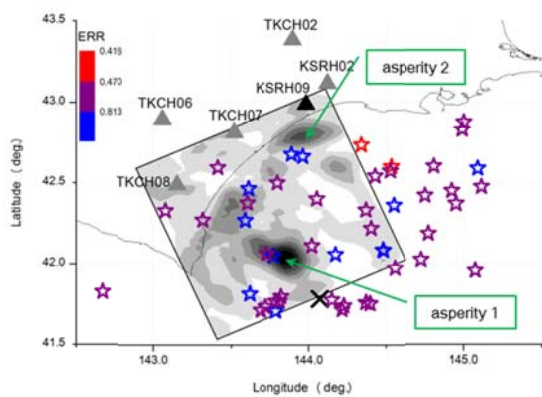
a) TKCH02



b) KSRH02



b) KSRH09



カの  
ミ

が2倍近く高くなっている。これは、本論文で用いた指標が分子で差をとっているため、特にその波形の振幅の大きい部分では、類似度の計算対象時間区間で位相がずれてしまうと結果に大きな影響を及ぼすことが原因と考えられる。一方、位相があまりずれなければ、ある程度、振幅に差があっても相対的には類似度が高くなる傾向が認められる。

#### 4. まとめ

本論文では、十勝支庁および釧路支庁の各3つの強震観測点を対象に、2003年十勝沖地震と複数の中小地震による地震動のフーリエ位相特性の類似性を評価し、その類似度と中小地震の発生位置との関係を検討した。その結果、フーリエ位相の類似度が高

いのは、2003年の地震のアスペリティのうち、各地点で観測された地震動への寄与が大きいと考えられるアスペリティ付近で発生した地震である傾向が比較的大きいことを確認した。この結果は、将来想定される大地震による地震動を予測するために、中小地震による地震動のフーリエ位相をフルに活用する強震動評価手法<sup>(例えば3), 4)</sup>を用いる場合、中小地震を選定する際のある程度の指針となり得ることを示唆している。ただし、前章でも述べたように、本論文で用いたフーリエ位相の類似度を示す指標は、必ずしも万能ではないため、用いる指標については今後より詳細な検討が必要である。

**謝辞**：本論文では、(独)防災科学技術研究所のKiK-netの強震記録および地盤データを使用させて頂きました。ここに記して謝意を表します。

## 参考文献

- 1) A. Nozu and K. Irikura : Strong-Motion Generation Areas of a Great Subduction-Zone Earthquake-Waveform Inversion with Empirical Green's Functions for the 2003 Tokachi-oki Earthquake, *BSSA*, Vol.98, No.1, pp.180-197, 2008
- 2) 野津 厚：2008年9月11日十勝沖の地震 (M7.1) による地震動のフーリエ位相特性, 地盤工学研究発表会, 2009
- 3) 古和田 明, 田居 優, 岩崎 好規, 入倉 孝次郎：経験的サイト増幅・位相特性を用いた水平動および上下動の強震動評価, 日本建築学会構造系論文集, 第514号, pp.97-104, 1998
- 4) 野津 厚, 菅野 高弘：経験的サイト増幅・位相特性を考慮した強震動評価手法—因果性と多重非線形効果に着目した改良—, 港湾空港技術研究所資料, No.1173, 2008

## THE RELATION OF FOURIER PHASE CHARACTERISTICS OF GROUND MOTIONS AND LOCATION OF EPICENTERS

Atsushi WAKAI and Atsushi NOZU

According to a few of conventional studies focused on Fourier phase, it is pointed out that there are some examples in which Fourier phase characteristics of a ground motion from an aftershock of a past damaging earthquake is similar to that of a ground motion from a mainshock. This means that Fourier phase characteristics of ground motions from small earthquakes like aftershocks can be useful in order to predict ground motions from scenario earthquakes in the future.

This paper presents, by using the 2003 Tokachi-oki earthquake ( $M_{JMA}8.0$ ) as an example of a past damaging earthquake, the quantitative relation between the similarity with respect to Fourier phase characteristics of ground motions and location of epicenters on small earthquakes which happened in Tokachi Area, Hokkaido, northern Japan.