

## 震源振動の非線形放射と地震予知 Nonlinear radiation of hypocenter and prevision of earthquakes

菊池 年晃<sup>1\*</sup>  
KIKUCHI, Toshiaki<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 防衛大学  
<sup>1</sup>National defence Academy

活断層や地殻の歪みに関する多くの報告がなされている。これらの静的な知見も必要であるが、近い将来の地震の予知には活断層の動態を知ることが重要である。

地震波エネルギーの大部分は S 波に含まれているが、S 波の振動は地表近くの地殻構造や断層等により大きく影響を受ける。そこで震源の動的な基本的振動を把握するために、それらの影響の少ない P 波に着目する。観測点で得られた P 波から震源の振動を求めるために、タイムリバーサル法を用いる。タイムリバーサルは、始めに光学の分野で位相共役波として研究された。その後、各分野に波及すると共に時間領域での位相共役波、即ちタイムリバーサルとして発展している。

観測点で受波した地震波の中から P 波成分を切り出して、その波を時間的に反転させる。その反転させた信号をシミュレーション上で放射して、震源位置に形成される波、即ちタイムリバーサルパルス (TRP) を求める。これが等価的な震源の動的な振動に相当する。

富士山付近で発生した地震に着目して、それらの震源の動的な振動を求める。始めに、2009 年 8 月に駿河湾の中部で発生した地震に対して、震源を囲む 44 ヶ所の観測点で受信した P 波信号にタイムリバーサル処理を施し、震源の位置に形成されるパルス、即ち、タイムリバーサルパルスを求めた。この TRP は震源が放射する等価的な音源に相当する。一般に、雑音はランダムな振動であるから干渉性を持たない。しかしながら、求められた TRP には明確な方位依存性が存在した。この方位依存性の成因を解明するために、方位に対する TRP の周波数スペクトルを求めた。周波数スペクトルは方位角によって大きく変化した。そこで、方位角に対する最大振幅周波数の分布を求めた。その結果、方位が西から東に移動するにつれて最大振幅周波数が大きく上昇して、そして下降した。音源の周波数変動は音源の移動によるドップラー効果が一般である。しかしながら、上記地震の場合、震源と観測点の相対位置は大きく変化していないのでドップラー効果ではない。この場合の周波数上昇は音源が局所的に高速で移動したためであると考えられる。移動方向は西伊豆西、河津及び伊東方向へ集中した。

これらの観測点で受信した P 波を調べると特徴ある波形が表れた。西伊豆西の受信波の先頭部が膨張していた。しかし、西伊豆西に近い伊東と河津での受信波は通常の波形であった。この様に頭部が大きくなることは活断層中での亀裂の進行速度が伝搬速度に近くなった場合に発生する。亀裂によって発生した圧力が高速で移動することにより累積的に加算される、即ち、パラメトリック効果によって生じると考えられる。西伊豆西はこの地震の特性を反映する特定点である。この観測点で受波した余震の波形は、本震以上に P 波の先頭部が膨張していた。これは亀裂が断層全般に拡大したためと考えられる。一方、本震以前に発生した前兆地震でも先頭部の膨張が多く観測された。これらの結果から震源振動の動的モデルを提唱した。活断層から放射された狭角のビームが地表に達する点をパラメトリックスポット、ここで観測される頭部の増大したパルスの頭部をパラメトリックヘッドと呼ぶ。

このモデルを、2009 年から 2012 年の間に富士山付近で発生した M5 以上の 4 つの地震について検証する。発生日と震源は、S1): 2009/8/11 駿河湾中部、S2): 2011/3/15 富士裾野、S3): 2011/8/1 駿河湾南部、S4) 2012/1/28 山梨県東部である。各地震に対して、周辺に配置されている観測点で受信した信号に、タイムリバーサル処理を施した。それらの TRP と周波数スペクトルの最大振幅周波数を求めた。その結果から、震源振動の移動方向を求め、その方向の観測点の受波波形を調べて、パラメトリックスポット (PS) を求めた。全ての地震に対してパラメトリックスポットが確認できた。各地震のパラメトリックスポットは、S1): 西伊豆西、S2): 西野原、S3): 真鶴、S4): 駒ヶ根であった。

動的モデルは上記のように、前兆、本震及び余震に関して一貫して成立する。従って、その特性を地震予知に利用することが出来る。2009 年 8 月に駿河湾の中部で発生した本震より前の、2008/1/26 から 2009/8/11 までに、同じ震源域で発生した M2 以上の地震は 17 回である。その中でパラメトリックヘッドを伴った波形は 7 回観測された。これらは活断層中を亀裂が高速で移動し始めた前兆を示している。従って、各活断層に固有のパラメトリックスポットで、M2 程度の微弱な段階の地震波を観測して、その変化を調べることは、その後の大きな地震を予知することができると考えられる。

本報告では、防災科学技術研究所の Hi-net による地震データを使用しました。ここに謝意を表します。

キーワード: 震源振動, 動的モデル, タイムリバーサル, 地震予知  
Keywords: hypocenter vibrations, dynamic model, time reversal, prevision of earthquakes

海溝沿いに伝搬する地震動の伝播解析—周波数領域 FEM 計算による Q 一定減衰の反映  
Frequency domain calculation of the seismic wavefield propagating along an ocean trench, with a constant Q attenuation

三橋 祐太<sup>1\*</sup>; 古村 美津子<sup>2</sup>; 松浦 律子<sup>2</sup>; 庄司 正弘<sup>1</sup>  
MITSUHASHI, Yuta<sup>1\*</sup>; FURUMURA, Mitsuko<sup>2</sup>; MATSU'URA, Ritsuko S.<sup>2</sup>; SHOJI, Masahiro<sup>1</sup>

<sup>1</sup>(株) 構造計画研究所, <sup>2</sup>(公財) 地震予知総合研究振興会  
<sup>1</sup>KKE, <sup>2</sup>ADEP

我々 (e.g. 古村ほか, 2011) は、東北日本の東西断面に相当する構造で、海溝軸外側の浅い震源の地震の場合に、海水の存在によって大きい振幅でやや遅い後続波が陸の観測点で見られることを 2 次元差分計算で示した。今回は、海溝軸の伸長方向に地震波が伝播した場合の海水の影響を見た。差分計算では、Graves(1996) が狭帯域の波形計算という条件で示した方法、つまり、Q 自体ではなく、 $f/Q$  が定数とした減衰を用いて計算している。そこで、Q が定数という、この方法より現実的な減衰を与えても同様に深い海を伝播した場合に大きい後続波が存在することを確認するため、周波数領域 FEM による 2.5 次元の構造で海水があった場合と無い場合との計算の比較を行った。2.5 次元構造は、南西諸島海溝に垂直な断面の構造が 1000km 程長さ方向に続く場合、たとえば 1911 年喜界島沖地震から本州に向けて地震波が伝わるケースを念頭に、海溝沿いに長距離を地震波が伝播する例を設定した。その結果、海溝軸に直行する方向に深い海を通過して地震波が伝播する場合と同様、海溝軸に平行な方向に長距離を地震波が伝播した場合でも、海水があると、大きい振幅でやや遅く長く続く後続波が陸の観測点で見られることが判った。また、差分法のように、 $f/Q$  が定数と設定した場合には、Q を定数とした場合より、差分計算上の Q 値参照周波数  $f_0$  より長周期側で振幅が小さくなることも、あたりまえであるが、確認できた。震源から数百キロ以上離れた場所のやや長周期地震の大きさを差分法を用いた手法で見積もる際には、 $f_0$  からの乖離具合によって数%以上の調整が必要であることに、注意を喚起したい。また、深い海を伝播してきた波を用いて昔の地震の規模を決める場合は、海水の影響による「やや長周期の大振幅後続波」の影響で規模が大きめになる傾向にも注意を喚起したい。

## 堆積盆地内を伝播する長周期地震動の発達と消失 Development and extinction of long-period ground motion in thick sediments

武村 俊介<sup>1\*</sup>; 吉本 和生<sup>1</sup>  
TAKEMURA, Shunsuke<sup>1\*</sup>; YOSHIMOTO, Kazuo<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 横浜市立大学  
<sup>1</sup>Yokohama City University

### 観測波形に見られる特徴

2011年3月12日に長野・新潟の県境付近で発生した地震について関東平野で観測された強震記録を調べてみると、卓越周期5秒の孤立的な大振幅の表面波が見られた。この孤立的な大振幅の表面波は、群馬県南部の盆地端で生成され、群馬・埼玉県境の堆積層の厚い(>3 km)地域にそって発達しながら伝播してきたLove波であることがわかった。Love波の振幅は、盆地構造が急変する埼玉・茨城県境付近で突如弱まる。

厚い堆積層内におけるLove波の発達過程を明らかにするため、現実的な盆地構造モデルを用いた差分法による地震動シミュレーションを行った。

### 3次元差分法による地震動シミュレーション

盆地端で生成された表面波に着目するため、半無限均質媒質内にJIVSMによる関東平野の盆地構造を入れ込んだモデルでシミュレーションを行った。JIVSMでは関東平野の堆積層を $V_s = 0.5, 0.9, 1.5$  km/sの3層でモデル化されおり、関東平野北部では堆積層の厚さが3.5 kmを超える大規模な盆地構造が発達している。関東平野から見て北西に45°の方向から、卓越周波数0.2 Hzの平面SH波を入射させ、盆地端で励起した表面波の伝播・発達の様子を解析した。

現実的な盆地構造を含んだ地震動シミュレーションにより、観測されたLove波の発達、伝播速度および極性を概ね再現することができた。シミュレーション結果と仮定した構造モデルを比較すると、Love波の発達は堆積層の厚さが伝播方向に増加していることが原因であることが示唆された。また、深部(>3 km)地震基盤構造を大きく変化させてシミュレーションを行っても計算波形に大きな変化が現れないことから、2 km以浅の浅部低速度層によって表面波の振幅が大きく増幅していることを明らかにした。

### 謝辞

防災科学技術研究所のK-NET/KiK-netおよび首都圏強震動総合ネットワークSK-netの波形記録を使用させていただきました。

キーワード: 長周期地震動, 表面波, 関東平野, 盆地構造, 地震動シミュレーション

Keywords: long-period ground motion, surface wave, kantou basin, basin structure, numerical simulation

## レシーバ関数走時トモグラフィー Receiver function travel time tomography

平原 和朗<sup>1\*</sup>; 山崎 朋奈<sup>1</sup>; 安部 祐希<sup>1</sup>; 澁谷 拓郎<sup>2</sup>  
HIRAHARA, Kazuro<sup>1\*</sup>; YAMASAKI, Tomona<sup>1</sup>; ABE, Yuki<sup>1</sup>; SHIBUTANI, Takuo<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 京都大学大学院地学研究科, <sup>2</sup> 京都大学防災研究所

<sup>1</sup>Graduate School of Science, Kyoto University, <sup>2</sup>Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

。Hirahara et al. (2006) は、従来の近地および遠地地震からの P 波及び S 波走時をデータとするトモグラフィーとレシーバ関数解析を結び付けるレシーバ関数 (RF) トモグラフィーを提唱した。RF トモグラフィーでは、ガウシアンビーム法による RF 合成波形を用いることにより、RF 解析から得られる速度不連続面で P から S 波へ変換した波 Ps 相の振幅および走時をデータに加えることによって、3次元 P 波及び S 波速度構造に加えて、起伏を持つ地震波不連続面の形状も推定する。しかしながら、RF に見られる Ps 変換波の振幅から速度不連続面での地震波速度コントラストを安定に推定することは現状では困難である。

そこでここでは、直達 P 波と Ps 変換波の走時差を直達 P および S 波走時データに加えて、3次元速度構造と地震波不連続面の形状を推定する RF 走時トモグラフィーコードを開発する。Abe et al.(2011) では、30度から70度の傾斜角を持つ傾斜する地震波不連続面の形状を RF 関数から推定する方法を開発している。彼らは、波面を追跡する Fast marching method (de Kool et al., 2006) を用いて、地震波不連続面での屈折・変換波の波線を安定に推定している。3次元セルでスタックした RF 振幅の大きなセルで Ps 変換波が生じたとして、これを走時に戻し、直達 P 波との時間差を P-Ps 走時としてデータに加えることが考えられる。

本講演では、実際のデータを扱っていないが、Rawlinson (2007) による FMTOMO (Fast Marching Tomography) に基づいて、RF 走時トモグラフィーコードを開発している。まず、沈み込み帯を想定して、モホ面および沈み込むスラブ形状を含む3次元不均質構造を仮定し、近地および遠地の直達 P 波および S 波走時、およびモホ面およびスラブ上面、海洋モホ面での Ps 変換波走時データを作成する。これらの合成データに RF 走時トモグラフィー法を適用して、3次元速度および不連続面形状推定能力を検討する。

キーワード: レシーバ関数, トモグラフィー, Ps 変換波, 走時, 地震波不連続面

Keywords: Receiver function, Tomography, Ps converted wave, Travel time, Seismic velocity discontinuity interface

## 地震波による音響レーリー波の定常的な励起 Ocean acoustic Rayleigh wave persistently excited by earthquake signals

利根川 貴志<sup>1\*</sup>; 深尾 良夫<sup>1</sup>; 高橋 努<sup>1</sup>; 尾鼻 浩一郎<sup>1</sup>; 小平 秀一<sup>1</sup>; 金田 義行<sup>1</sup>  
TONEGAWA, Takashi<sup>1\*</sup>; FUKAO, Yoshio<sup>1</sup>; TAKAHASHI, Tsutomu<sup>1</sup>; OBANA, Koichiro<sup>1</sup>; KODAIRA, Shuichi<sup>1</sup>; KANEDA, Yoshiyuki<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 海洋研究開発機構

<sup>1</sup>JAMSTEC

In the interferometry, the wavefield propagating between two positions can be retrieved by correlating ambient noise recorded on the two positions. This approach is useful for applying to various kinds of wavefield, such as ultrasonic, acoustic (ocean acoustic), and also seismology. Off the Kii Peninsula, Japan, more than 150 short period (4.5 Hz) seismometers, in which hydrophone is also cosited, had been deployed for 2 months on 2012 by Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC) as a part of “ Research concerning Interaction Between the Tokai, Tonankai and Nankai Earthquakes ” funded by Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology, Japan. In this study, correlating ambient noise recorded on the hydrophones, we attempt to investigate characteristics of wavefield observed at seafloor.

The observation period is from Sep. 2012 to Dec. 2012. Station spacing is around 5 km. For 5 lines off the Kii Peninsula, the 30 - 40 seismometers are distributed at each line. Sampling interval is 200 Hz for both seismometer and hydrophone. The instruments are located at 100 - 4800 m in water depth. In the processing for the both records, we applied a bandpass filter of 1 - 3 Hz, replaced the amplitude to zero if it exceeds a value that was set in this study. We calculated cross correlation function (CCF) by using continuous records with a time length of 600 s, stacked the CCFs over the whole observation period.

We first aligned only CCFs using two stations with a separation distance of 5 km along lines off Kii Peninsula. As a result, we could detect strong signals in the CCFs that clearly show travel time variation as a function of water depth. The group velocity of the signal gradually changes from 1.3 km/s to 0.7 km/s at water depths from 2000 to 4000 m. In addition to the wave, a relatively weak signal with a group velocity of 1.4 - 1.5 km/s can be seen in the region at water depth of 4,000 m.

We investigated the wavefield by using a numerical simulation with finite difference technique. As a result, all of these signals can be explained by acoustic Rayleigh wave, which has the energy within not only the ocean but also sediment. A case in which vertical forces are located at subseafloor generated the acoustic Rayleigh wave well, and the CCFs using synthetic waveforms match well with the observed ones. However, another one in which vertical forces are located at sea surface failed to describe the observation. This means that the observed acoustic Rayleigh wave in background wavefield would be generated by earthquake signal, not signals due to microseisms. Moreover, we will show that the amplitude of the signals possibly correlates with seismicity distribution, which also supports that the signals are excited by earthquake signals.

キーワード: 音響レーリー波, 常時微動, 相関解析

Keywords: acoustic Rayleigh wave, ambient noise, correlation analysis

## 2次元差分格子における傾斜した亀裂のモデル化 Modeling inclined cracks in a 2-D finite difference grid

那須野 新<sup>1</sup>; 河原 純<sup>1\*</sup>; 椎名 高裕<sup>2</sup>; 岡元 太郎<sup>3</sup>  
NASUNO, Arata<sup>1</sup>; KAWAHARA, Jun<sup>1\*</sup>; SHIINA, Takahiro<sup>2</sup>; OKAMOTO, Taro<sup>3</sup>

<sup>1</sup>茨城大学, <sup>2</sup>東北大学, <sup>3</sup>東京工業大学

<sup>1</sup>Ibaraki University, <sup>2</sup>Tohoku University, <sup>3</sup>Tokyo Institute of Technology

亀裂による地震波散乱を数値的に扱う手法には、境界積分方程式法、有限要素法、差分法などがある。その中で差分法は、格子の形状に制約はあるものの、取り扱いが容易であるという大きな利点を持つ。Saenger et al. (2000, *Wave Motion*) は、彼等が開発した rotated staggered grid を用いることにより、弾性定数を0とした格子点の集合により亀裂や空隙を表現することに成功した。一方、Suzuki et al. (2006, 2013, *Earth Planets Space*) は、標準的な2次元差分法 (Virieux, 1984, 1986, *Geophysics*) に基づき、スタガード格子に応力0の点を線状に並べることで中空亀裂を表現した。彼等はこの手法により、亀裂による地震波の散乱が精度良くシミュレートできることを示した。しかし、彼等の手法では格子に沿った亀裂しか扱えないという制約があった。

本研究では、面外剪断応力0の亀裂をモデル化した Suzuki et al. (2006) の手法を、差分格子に対して傾斜した亀裂の場合に拡張した。自由地表面を階段状に離散化する Ohminato and Chouet (1997, *Bull. Seis. Soc. Am.*) の手法を参考にして、スタガード格子内に面外剪断応力0の格子点を階段状に並べることで中空亀裂をモデル化した。この亀裂に対して平面正弦SH波を斜め入射させ、亀裂を振動させるという差分シミュレーションを行った。そして振動が安定した時点で変位不連続の振幅を計測し、その結果を境界積分方程式法 (Murai et al., 1995, *Geophys. J. Int.*) による計算結果と比較した。その結果、格子間隔が亀裂長よりも十分に小さく、階段近似された亀裂面の凹凸が十分に小さければ、亀裂の傾斜角によらず両手法の結果はよく一致した。このことは、傾斜した亀裂をモデル化する本手法の妥当性を示唆する。

謝辞: 数値計算の一部に東京大学地震研究所地震火山情報センターの計算機システムを利用し、村井芳夫氏 (北海道大学) による計算プログラムを使用させていただいた。

キーワード: 差分法, 亀裂, SH波

Keywords: finite difference method, crack, SH wave