

群馬県館林市における地震波干渉法実験

Seismic Interferometry at Tatebayashi, Gunma

伊藤 忍^{1*}・山口和雄¹
Shinobu Ito^{1*} and Kazuo Yamaguchi¹

Abstract: We tried to make pseudo shot records by applying seismic interferometry with traffic noise along highway. During the period of the survey, the 2011 Tohoku Earthquake occurred, and the highway was closed. Therefore, we tried to record seismograms of aftershocks. In the pseudo shot record, surface wave is dominant with traffic noise, especially for vertical components. Direct wave can be seen in the pseudo shot records with aftershocks. However, apparent velocity is still larger than what is expected. It seems difficult to make pseudo shot records neither by traffic noise nor by aftershocks. However, it may be possible that we can make ideal shot records with both traffic noise and aftershocks.

Keywords: seismic interferometry, 2011 Tohoku Earthquake, aftershock, traffic noise, seismic reflection survey

1. はじめに

地震波干渉法の理論は 1960 年代頃から研究されてきたが、理想的にデータを取得することが困難なこともあり、あまり活用されてきたとは言い難い。しかしながら、近年、調査機器の高性能化や理論の成熟・普及が進んだことなどから（たとえば Shuster, 2009）、注目されるようになってきた。理想的なデータを取得することができれば、制御震源の代替として地震波干渉法を地下構造調査に適用することが可能かもしれない。しかしながら、様々な制約により理想的なデータを取得することは容易ではない（たとえば相澤ほか, 2008）。人工地震探査に用いるような制御震源を使用する場合には、振動が効率的に地中の深い方向に伝搬し、地震波干渉法の適用に適したデータを取得することができるが、そもそもこの場合は、敢えて地震波干渉法を適用するまでもない。逆に、人間活動によって生成される振動、たとえば交通雑音による振動などは地中深くに伝播しにくく、表面波が卓越する。このため、表面波の分散特性を利用した地下構造調査には比較的適用されているが、実体波が利用されることは少ない。

伊藤ほか（2010）によって宮城県北部で実施され

た地震波干渉法実験では、上下動成分を中心に 10m 間隔で受振器を設置し、100m 間隔で 3 成分受振器を設置した。この結果、上下動成分は表面波が卓越し、反射法地震探査の処理を適用したものの、その結果の信頼度は低く、課題を残した。一方、100m 間隔で設置した 3 成分受振器による水平動成分は、上下動成分のそれよりもやや表面波が抑制されている様子が見られた。ただし、これは受振器の間隔が疎であるために生じた見かけ上のものである可能性も否定できない。また、この実験の際には総延長約 2km に渡って受振器を展開したが、表面波でさえもその到達できた最大オフセットは 500m にも満たず、無駄に多チャンネルのデータを取得する結果に終わった。

この知見をもとに、地震波干渉法を適用して実体波を抽出することを試みるために、2011 年 3 月に群馬県館林市において実験を行った（第 1 図）。東北自動車道を走行する車両が発生する振動に地震波干渉法を適用し、擬似ショット記録を作成することを試みた。実験の期間中に東北地方太平洋沖地震が発生し、当初の目的の実験は中断せざるを得なくなったが、継続して自然地震のデータを収録した。

* Correspondence

¹ 産業技術総合研究所 地質調査総合センター 地質情報研究部門 (AIST Geological Survey of Japan, Institute of Geology and Geoinformation)



第 1 図 群馬県館林市および邑楽郡板倉町で実施した地震波干渉法適用実験の調査路線。基図に国土地理院発行数値地図 50000 (地図画像) を使用。

Fig.1 Survey line of this study in Tatebayashi and Ohra in Gunma on the digital map 50000 (Map Image) issued by GSI.

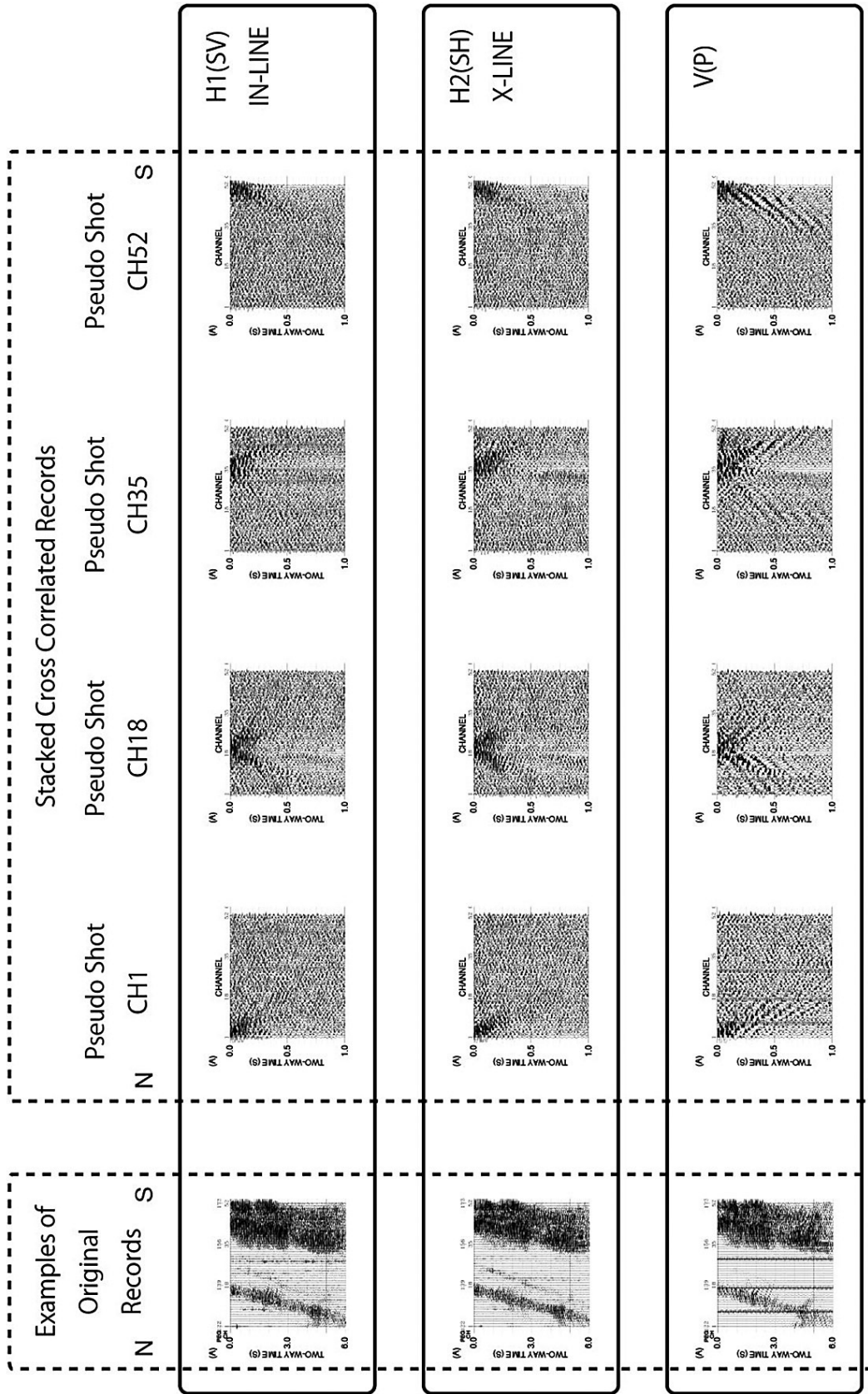
2. データ

実験は 2011 年 3 月 8 日から 17 日まで実施した。路線は東北自動車道の側道沿いで、高速道路を通行する車両が発生する振動を利用することを想定していた。受振点の間隔は 10m とし、一展開につき 52 点、510m の測線長を基本とした。1 時間の連続観測の後に 8 点、80m ずつ移動するものとし、任意の CMP において最低でも 440m のオフセットを確保できるようにした。測線の総延長は、北は渡良瀬川から南は東北自動車道館林インターチェンジと交差する国道 354 号線に至る約 7km を予定した。

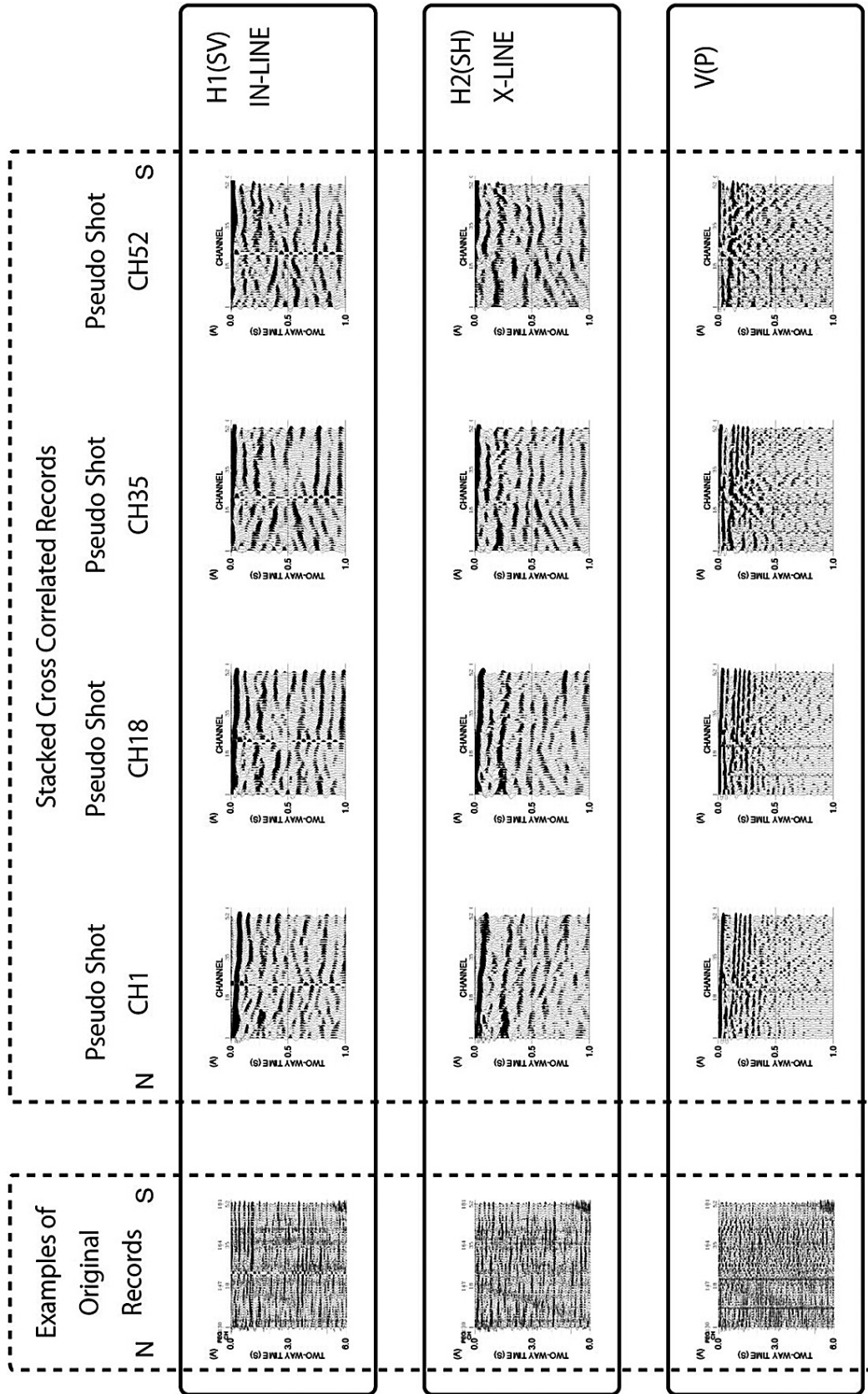
収録にはサンコーコンサルタント株式会社製の分散型探鉱機 DSS-12 を用いた。受振器は OYO Geospace 社製の固有周波数 10Hz の SNG 32CT を収納したシングル 3 成分ユニットを使用した。水平動成分は、高速道路に平行な成分 (以下 H1 成分) と直交する成分 (以下 H2 成分) となるように設置した。サンプリング間隔はオーバースペックではあるがシステムの制約により 1ms で固定されている。

3 月 8 日の収録開始から 11 日昼過ぎまでは順調に

車両の振動を収録することができた (第 2 図)。しかしながら、3 月 11 日に東北地方太平洋沖地震が発生すると、東北自動車道は通行止めとなり、車両の発生する振動を収録することは不可能になった。一方、東北地方太平洋沖地震発生以降、その余震が多く発生した。このため、当初の予定を変更し、これらの余震を収録することにした (第 3 図)。少なくとも多数の有感地震が発生していることは体感できたが、無感の地震がどの程度発生しているのかを知ることは困難な状況であった。どれくらいの自然地震の波形記録が収録されているのか把握しづらく、また、展開を移動する際に自然地震の収録を逃がしてしまう可能性を考慮して、展開の移動は一日分のデータを収録した後に行うこととし、日中には展開を移動せずにデータを収録した。3 月 12 日以降は、災害復旧のための緊急車両が走行するようになったが、通常時と比較すると走行する車両は著しく少ないため、引き続き展開を 1 日の日中約 8 時間連続して収録を行い、一日ごとに 80m ずつ移動した (第 4 図)。結果的に、地震発生前に収録した測線長は約 1.5km、地震発生後に収録した測線長は約 1km、両者が重複する部分が生じるため、

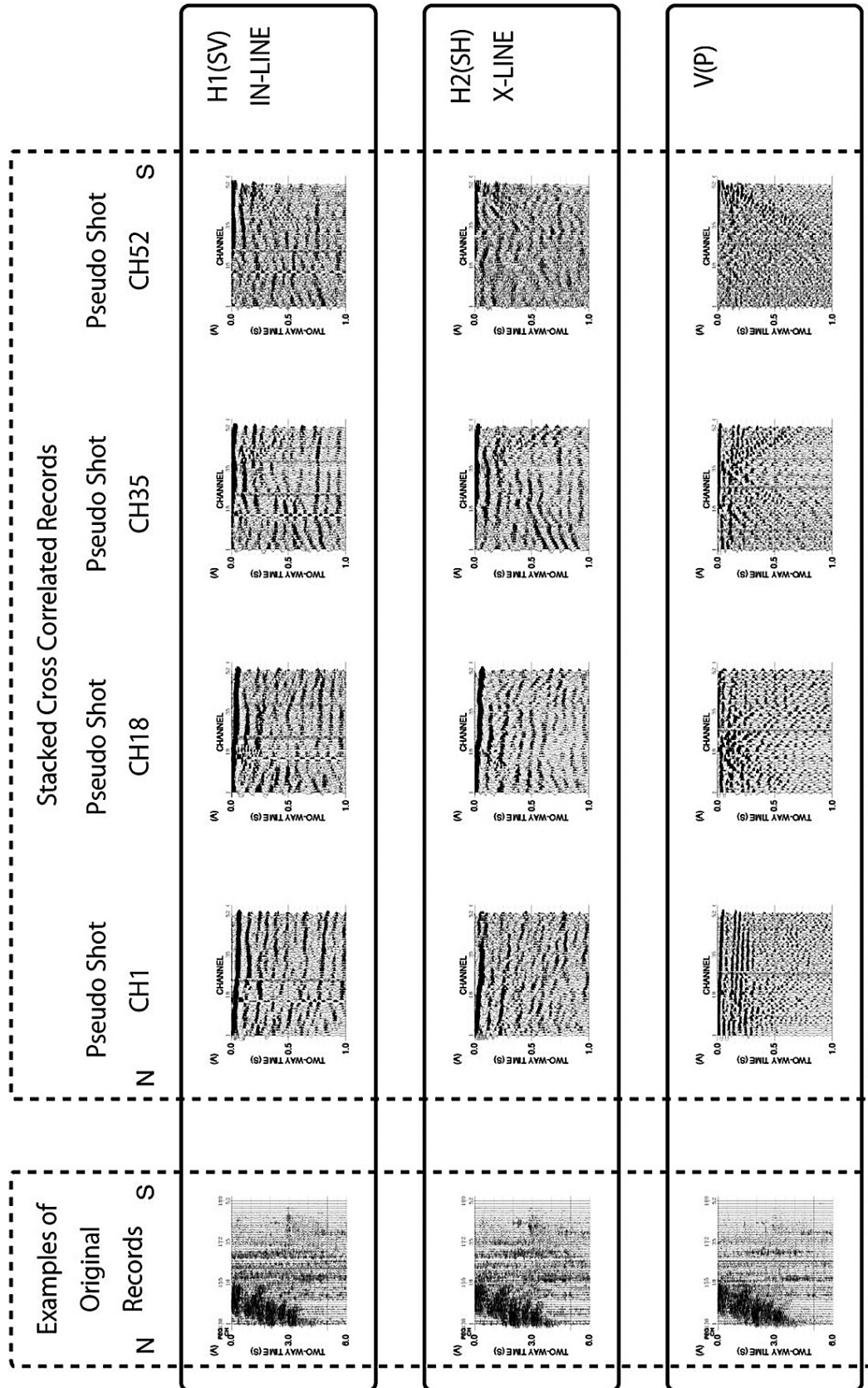


第 2 図 交通雑音の波形記録例(左)およびその相互相関をとり重ねて作成した擬似発震記録例(右)。列順に測線に平行な水平動(上)、測線に直交する水平動(中)、上下動成分(下)。
 Fig.2 Examples of seismogram by traffic noise (left) and stacked pseudo shot records produced by cross-correlation. Each row is horizontal component along survey line (top), horizontal component across survey line (middle) and vertical component (bottom).



第 3 図 自然地震の波形記録例(左)およびその相互相関をとり重ねて作成した擬似発震記録の例(右). 列順に測線に平行な水平動(上), 測線に直交する水平動(中), 上下動成分(下).

Fig.3 Examples of seismogram by earthquakes (left) and stacked pseudo shot records produced by cross-correlation. Each row is horizontal component along survey line (top), horizontal component across survey line (middle) and vertical component (bottom).



第 4 図 自然地震に交通雑音が混入する波形記録例 (左) およびその相互相関をとり重合して作成した擬似発震記録の例 (右)。列順に測線に平行な水平動 (上)、測線に直交する水平動 (中)、上下動成分 (下)。自然地震による振幅は交通雑音に対して小さく、この振幅スケールでは認識できない。

Fig.4 Examples of seismogram by earthquakes and traffic noise (left) and stacked pseudo shot records produced by cross-correlation. Each row is horizontal component along survey line (top), horizontal component across survey line (middle) and vertical component (bottom). The amplitudes of earthquakes are much smaller than that of traffic noise, and they cannot be seen in this scale.

総延長は約 2.3km にとどまった。

測点は VRS-RTK による GPS 測量を実施する予定であった。しかしながら、東北地方太平洋沖地震の発生により電子基準点の成果公表が停止され、VRS のサービスも停止された。従って精密な測量は未実施であり、測点を決定するためにホイールメジャーで測った程度の精度でのデータがあるのみである。

3. 処理

データは連続収録されているが、ファイルは 30 秒ごとに個別に生成される。はじめに 156 チャンネルのデータを成分ごとの 52 チャンネルに分離した。次に、各ファイルの両端 1.5 秒にコサインテーパーをかけ、サンプリング間隔を 4ms に変更し、DC 成分を除去した。その後、周波数領域で相互相関処理を行った。相互相関処理を行った各トレースについて、ダイバシティスタックを行った。

4. 相互相関記録例

東北地方太平洋沖地震が発生する前の記録は、常に高速道路を走行する車両が発生する振動を良好に記録していた（第 2 図）。これの相互相関処理を行うと、表面波が卓越する。水平動成分は H1 成分と H2 成分で大きな違いは見られない。しかしながら、上下動成分には水平動成分に比べて明らかに卓越した表面波が記録されている。

東北地方太平洋沖地震発生直後には、高速道路を走行する車両がほぼ皆無となり、また、地震が連続して発生している（第 3 図）。振動源は東北地方太平洋沖地震の余震がほぼすべてである。相互相関処理を行った結果には、見かけ速度が表面波と比較して明らかに速い明瞭なイベントが見られる。3 成分のいずれにも見られるが、上下動成分では水平動成分に比べて短周期の成分が卓越している。また、水平動成分には顕著な後続波が見られるが、上下動成分では明瞭な後続波は見られない。

東北地方太平洋沖地震発生翌日には、高速道路を間欠的に走行する緊急車両による振動と、東北地方太平洋沖地震の余震による振動が含まれている（第 4 図）。上述した、東北地方太平洋沖地震の発生前および発生直後の記録を足しあわせたような印象であり、水平動成分では後続波が見られるものの、表面波によって不

明瞭となっているように見える。一方、上下動成分では表面波が明らかに卓越している。

5. 考察

東北地方太平洋沖地震が発生する前の記録は、車両が発生する振動を記録しているが、いずれの成分においても表面波が卓越している（第 2 図）。特に上下動成分の方が水平動成分よりも表面波が卓越している。このような特徴は、伊藤ほか（2010）によって実施された宮城県北部における調査と似た傾向にある。伊藤ほか（2010）では主として上下動成分を収録し、水平動成分はほぼ 100m おきに設置した。水平動成分の設置間隔が十分でなかったために断定はできないが、上下動成分の方が表面波が卓越しているようであった。主としてこの知見をもとに本研究では 3 成分でデータを収録し、この知見が正しかったことを裏付けている。

東北地方太平洋沖地震の発生直後は、高速道路を走行する車両が激減したため、車両が発生する振動はほとんど記録されていない（第 3 図）。一方、余震が発したため、これに伴う振動が収録されている。この記録を相互相関処理して垂直重合した記録には、表面波はほとんど見られない。卓越しているのは見かけ速度の速いイベントである。測線の北端（CH1）に地表震源を想定した擬似ショット記録には、見かけ速度が 10km/s 程度のイベントが見られる。逆に、南端（CH52）に地表震源を想定した擬似ショット記録には、見かけ速度がほぼ無限大のイベントが見られる。堆積層中を伝播する際に期待される速度は 1.5km/s 程度であるが、いずれもそれに比べて著しく速い。東北地方太平洋沖地震の震源域は南北に極めて広く、余震も広範囲で発生している。全体として本研究の測線から見ると、余震の発生域は北に偏在している。このため、北寄りの受振器に到達した振動は地表で散乱され、他の受振器に到達することがある程度期待できる。しかしながら、南寄りの受振器に到達した振動が、地表で散乱されて北に向けては伝播しにくいと考えられる。したがって、特に南寄りの受振器による波形記録をリファレンスとして作成した擬似ショット記録では、地表で散乱されたイベントよりも、震源から直接到達したイベント同士の相関が良くなっていると考えられる。

震源が偏在している影響が大きいということは、こ

れをそのまま重合しても、直達波の見かけ速度を反映しない擬似ショット記録が作成されてしまうことを意味している。正しい見かけ速度を反映した擬似ショット記録を作成するためには、測線の方向の延長上で発生している地震の記録を抽出するなどの工夫が必要である。また、一方向からの擬似ショット記録しか作成できないため、反射法地震探査の処理を行うには十分な速度解析を実施できない、十分な重合数やオフセットを確保できないといった制約が生じることになる。

いずれの振動を用いても単独で実用的な擬似ショット記録を作成するには至っていない。しかしながら、たとえば、交通雑音による擬似ショット記録で卓越する表面波の振幅を調整して、自然地震を用いて作成した擬似ショット記録から表面波の成分を差し引くなどの処理により、実用的な擬似ショット記録を作成することが可能になるかもしれない。

6. まとめ

高速道路を走行する車両が発生する振動を用いて地震波干渉法による擬似ショット記録の作成を試みた。また、東北地方太平洋沖地震が発生したために、その余震を用いて地震波干渉法による擬似ショット記録を作成した。両者を比較すると、車両の振動では表面波が、特に上下動成分で卓越した。自然地震では少なくとも直達波は見られるようであるが、測線からみて震源が偏在することにより、見かけ速度の大きいイベントが卓越するようである。いずれの記録を用いても、単独で実用的な擬似ショット記録を作成することは困難であることが示唆された。しかしながら、これらの性質が著しく異なることから、両者の性質を利用した処理を行うことで、実用的な擬似ショット記録を作成することが可能になるかもしれない。

文献

- 相澤隆生・山中義彰・伊東俊一郎・木村俊則・尾西恭亮・松岡俊文 (2008) フィールドでの実データを用いた地震波干渉法の適用条件に関する検討。物理探査, 61, 2, 121-132
- 伊藤 忍・山口和雄・加野直巳・横倉隆伸・楮原京子 (2010) 旭山撓曲南方延長における地震波干渉法による地下構造調査。平成 21 年度沿岸域の地質・活断層調査研究報告, 地質調査総合セン

ター速報 No.54, 81-87

Shuster, G. T. (2009) Seismic Interferometry. Cambridge University Press