

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

Geological Structure Survey by Seismic Interferometry on the South of the Asahiya Flexure

伊藤 忍¹・山口和雄¹・加野直巳¹・横倉隆伸¹・楳原京子²

Shinobu Ito¹, Kazuo Yamaguchi¹, Naomi Kano¹, Takanobu Yokokura¹
and Kyoko Kagohara²

Keywords: seismic interferometry, seismic reflection survey, flexure

要旨

都市域における地震波干渉法による地下構造調査の適用可能性を検証した。宮城県北部の旭山撓曲南方延長の、地下に撓曲が存在することがほぼ確実に予想される地域で地震波干渉法による地下構造調査を実施した。予備的な解析として自己相関処理を行い、さらにこれを垂直重合することにより、旭山撓曲に関連すると考えられる構造を得た。現場での処理を可能とするために高速で演算可能なソフトウェアのモジュールを開発した。開発したモジュールを用いた相互相関処理によって擬似ショット記録を作成した。擬似ショット記録の中には良好な結果が存在し、地下構造の解明に資するものと期待される。

1. はじめに

近年、地震波干渉法による地下構造調査の有用性が認識されるようになり、適用例も急速に増加している。しかしながら、反射法地震探査等の能動的な調査と異なり各種環境に大きく影響されるため、現状では実用化されているとはいいがたい。比較的長波長の振動源は自然界に多く存在し、地震波の非弾性減衰も比較的小さいために、反射法地震探査等に迫る良好な結果も見られる。しかしながら、数 Hz 以上の短波長域においては、特に地震波の減衰が大きいという困難によりあまり良好な結果が得られていない。また、短波長域においては、人工的な震源を比較的容易に調達できるということもあり、積極的に地震波干渉法を適用

しようという試みもあまり多くは見られないようである。しかしながら、我が国のような都市化の進んだ国土においては、比較的小規模な人工震源を用いたとしても地下構造調査を実施するのが困難な地域も少なくない。受振器の展開は可能だが発震作業が不可能というような、地震波干渉法が有効となるケースも少なくないと考えられる。ケーススタディとして、反射法地震探査が不可能な地域で、かつ地下構造がほぼ既知である地域において、地震波干渉法の適用を試みた。その概要と予備的な解析結果を紹介するとともに、今後の展開と問題点を指摘するのが本稿の目的である。

2. 調査地域の概要

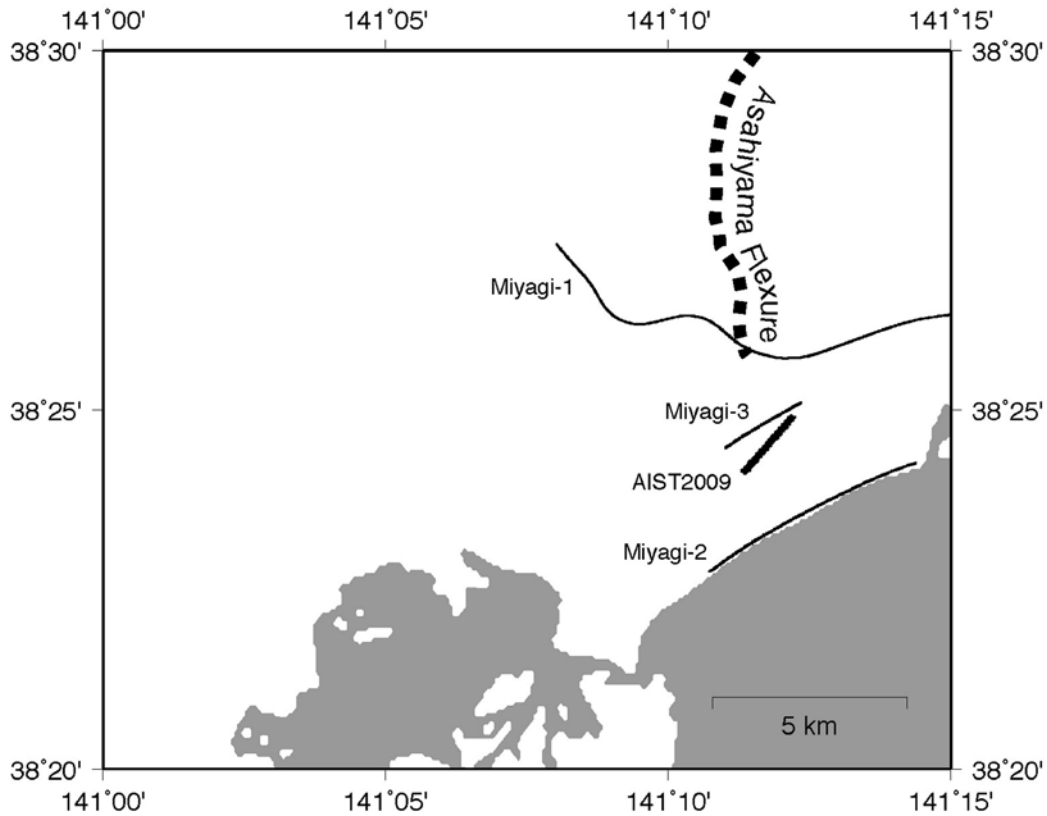
産業技術総合研究所では、2003 年宮城県北部の地震の震源域周辺で反射法地震探査を実施している（山口ほか、2004、横倉ほか、2005、第 1 図）。測線は東西に 3 本展開し、そのいずれにおいても旭山撓曲（石井ほか、1982）の南方延長と推定される特徴的な構造が見出されている。本研究の調査路線は、これら 3 本の測線の一番南にあたる Miyagi-2 測線と、南から 2 番目にあたる Miyagi-3 測線の間に位置し、これら 3 測線と同様に旭山撓曲の南方延長に該当する撓曲構造が検出されることが期待される路線である。

3. 調査の概要

調査は宮城県東松島市内で実施した。データは 2009 年 9 月 8 日から 17 日までの 10 日間の日中のみ収録した。鉄道を走る列車や国道を走行する車両が

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）

²産業技術総合研究所 地質調査総合センター 活断層・地震研究センター（AIST, Geological Survey of Japan, Active Fault and Earthquake Research Center）



第 1 図 宮城県北部周辺の地図。太い実線は本研究の調査測線を示す。細い実線は過去の調査測線を示す。太い点曲線は旭山撓曲（石井ほか，1982）に対応する。

Fig.1 Map around Miyagiken-Hokubu. Thick solid line shows a survey line of this study. Thin lines show survey lines of previous studies. Thick dotted curve corresponds to the Asahiya Flexure (Ishii et al., 1982).

発生する振動を地震波干渉法に利用することを念頭におき、JR 仙石線と国道 45 号線との幅 10m 未満の狭小な土地に測線を展開した。鉄道に近接しているため、ここで反射法地震探査を実施することはきわめて難しいと考えられる。国道 45 号線の南側を利用したの反射法地震探査は実現可能かもしれないが、国道を走行する車両の発生する雑音が大なる障害になると考えられる。なお、JR 仙石線は直流で電化されている。

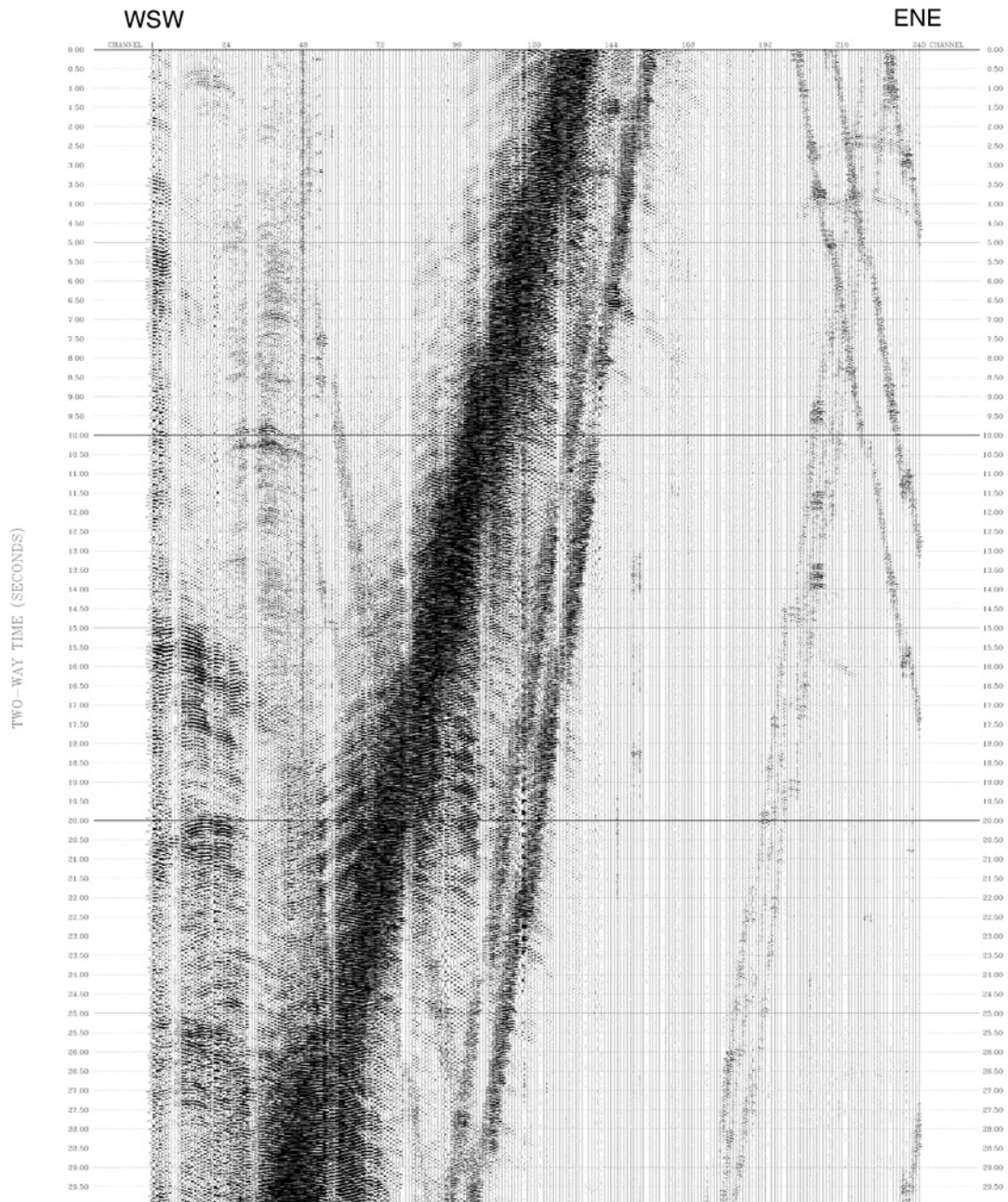
測線は東北東-西南西方向で、展開長は約 2km である。基本的に固有周波数 10Hz の上下動受振器 (Sensor 社製 SG-10) を 10m 間隔で設置した。また、100m ごとに 3 成分受振器を設置した。3 成分受振器は 2Hz 計 (MarkProducts 社製 L-22D) と 10Hz 計 (Geospace 社製 GS32CT) を交互に設置した。データ収録にはサンコーコンサルタント社製の分散型収録システム DSS-12 を使用した。DSS-12 は分散型の個々の収録ユニットで A/D 変換によるサンプリングを行っているが、すべての収録ユニットでの A/D 変換のタイミングを同期させるという特長を持っており、地震波干渉法のためのデータ収録には大変適している。分散型の

収録ユニットの電源にはリチウムイオン二次電池を使用した。

地震波干渉法のために収録されるデータはただの地動ノイズであり、反射法地震探査と異なり見ただけでデータの質を把握することは困難である。そこで、収録したデータの質をなるべく現場で見極められるよう、データの処理を観測中に進められるシステムを構築することを目指した。観測中に処理システムを動作させるために、収録システムとは別に大容量のリチウムイオン二次電池と DC/AC インバータを用意し、データの逐次処理を試みた。

4. 取得データの例

取得したデータの例を第 2 図に示す。記録長は 30 秒、サンプリングは 1ms 間隔で収録した。国道は交通量が多く、コヒーレントなノイズがほぼ恒常的に見られる。しかしながら、信号等のタイミングによっては非常に振動の少ない時間帯も存在する。



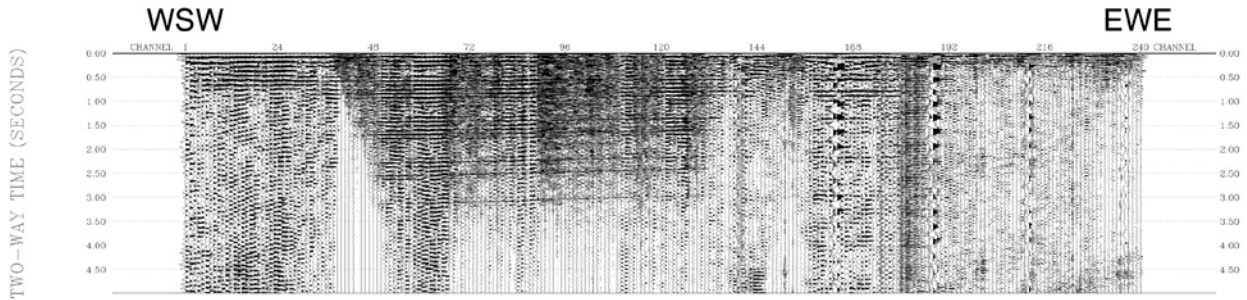
第2図 取得した波形記録の例.

Fig.2 An example of recorded raw traces.

5. 自己相関処理

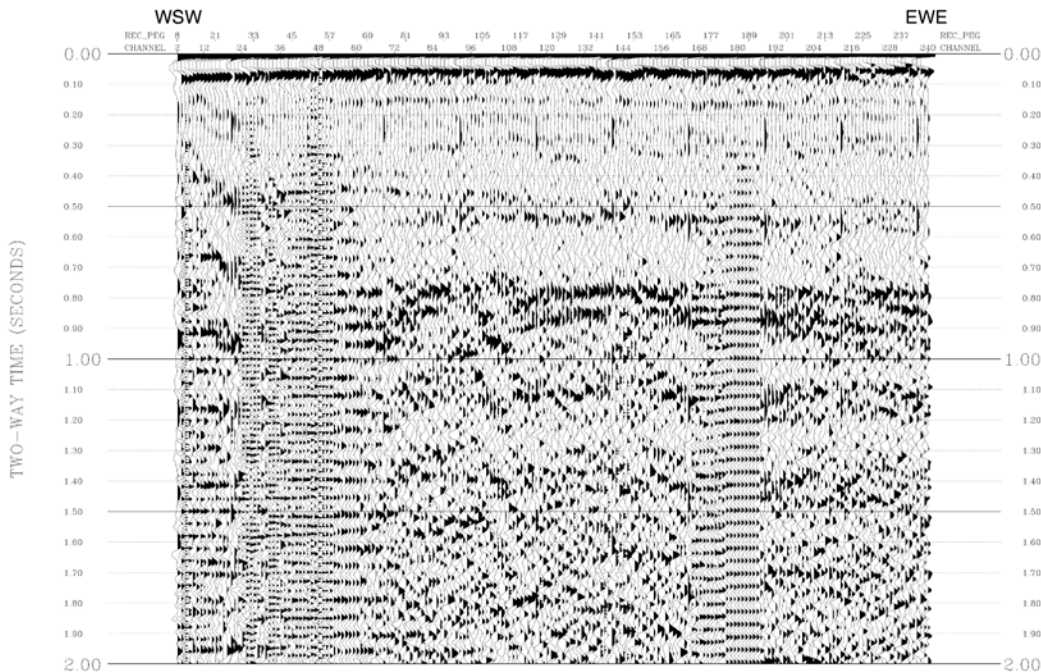
データの処理は相互相関をとることを念頭においている。しかしながら、計算機のリソース(CPU、メモリ、HD容量、データ入出力速度等)に伴う制限と電源周りのトラブルのため、今回の現場においては相互相関を取ることは到達できなかった。しかしながら、一部のデータについては、予備的に各チャンネルの自己相関をとるところまで現場で行うことができた。自己相関後の記録長はHDの容量を考慮し5秒とした。

自己相関処理を施した波形記録を第3図に示す。全体としてなにかしらの特徴が見られるようにも感じられるが、断定は困難である。周期的かつコヒーレントなイベントが卓越しているように見えるが、これは鉄道を走行する列車が、レールの継ぎ目部分を通過する際に発生する振動によるものと考えられる。記録の総量が膨大なため、すべてに目を通したわけではないが、各々の記録からは構造に起因することが明瞭と言えるようなイベントは見られない。



第 3 図 第 2 図の波形記録の自己相関.

Fig.3 Autocorrelation of the Fig. 2 traces.



第 4 図 7109 個の波形記録の自己相関の垂直重合.

Fig.4 Vertical stack of all the 7109 autocorrelations.

6. 垂直重合およびデコンボリューション

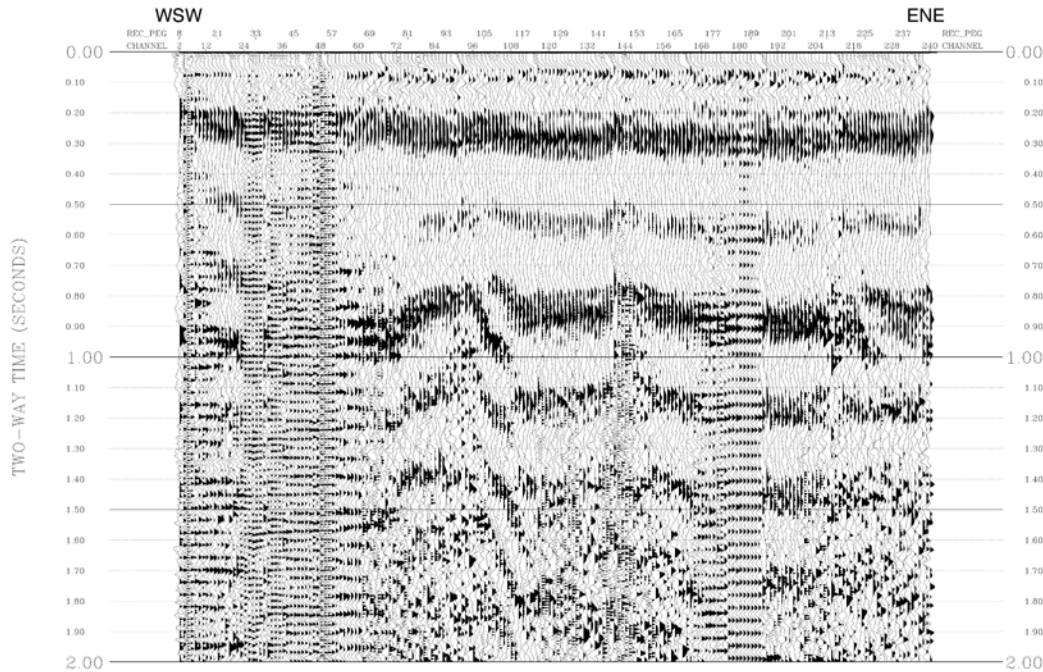
上述した通り、現場における予備的な処理では各々の記録に明瞭なイベントが見られなかった。後日、すべての記録について自己相関処理を行い、すべてについて垂直重合を行った。上下動成分のみを抜き出した結果を第 4 図に示す。全体に平坦な構造が見られるが、受振点（図中の REC_PEG）93 から 117 付近にかけて明らかに周辺と異なる様相の構造が見られる。旭山撓曲の南方延長が測線と交わるとすると、その位置は測線の西半分のどこかになると予想される。この断面からだけでははっきりとしたことは言えないが、この構造は旭山撓曲と関連している可能性が高い。また、この結果は、2003 年に産総研が実施した反射法地震

探査の結果（山口ほか，2004，横倉ほか 2005）と調和的である。

地表付近の多重反射が後続波の S/N 比を低下させているように見えるため、デコンボリューションを施したのが、第 5 図である。旭山撓曲の南方延長と考えられる構造はやや見やすくなり、撓曲のようにも見える。しかしながら、短波長の構造はほとんど見えなくなった。数 Hz 程度の波長が卓越しており、それよりも短い波長の空間分解能は失われている。

7. 相互相関処理による擬似ショット記録の作成

一連の処理には GNS Science 社製の GLOBE Claritas を使用している。このソフトウェアはシンプルで使い勝手が良いが、自己相関、相互相関等のモジュールは



第5図 第4図の波形記録にデコンボリューション処理を施した結果。

Fig.5 Deconvolved seismogram for the Fig. 4 traces.

時間領域で演算を行うものとなっており、周波数領域で行うモジュールは提供されていない。一般に時間領域での演算は周波数領域での演算と比較してメモリを多く必要とし、演算時間も多く必要とする。演算に要する時間は計算機環境によって大きく変化するが、本研究の自己相関処理については数日を要し、時間領域で相互相関処理を行うのは現実的でないことは明らかである。また、GLOBE Claritas は地震波干渉法による処理を念頭において設計されているわけではないため、そのモジュールはあらゆる組み合わせでのトレース間の相互相関を直ちに行うような設計になっておらず、標準モジュールのみでの処理では大変な手間がかかる。

GLOBE Claritas には、自作のモジュールを組み込む方法が2通り提供されている。ひとつはC言語またはFortranでモジュールを自作する方法、もうひとつはPythonにデータを引き渡すモジュールを使用する方法である。近年、PythonにはNumPyやSciPyといった科学技術計算向けのライブラリが充実してきており、本研究ではこれらのライブラリを使用することにした。

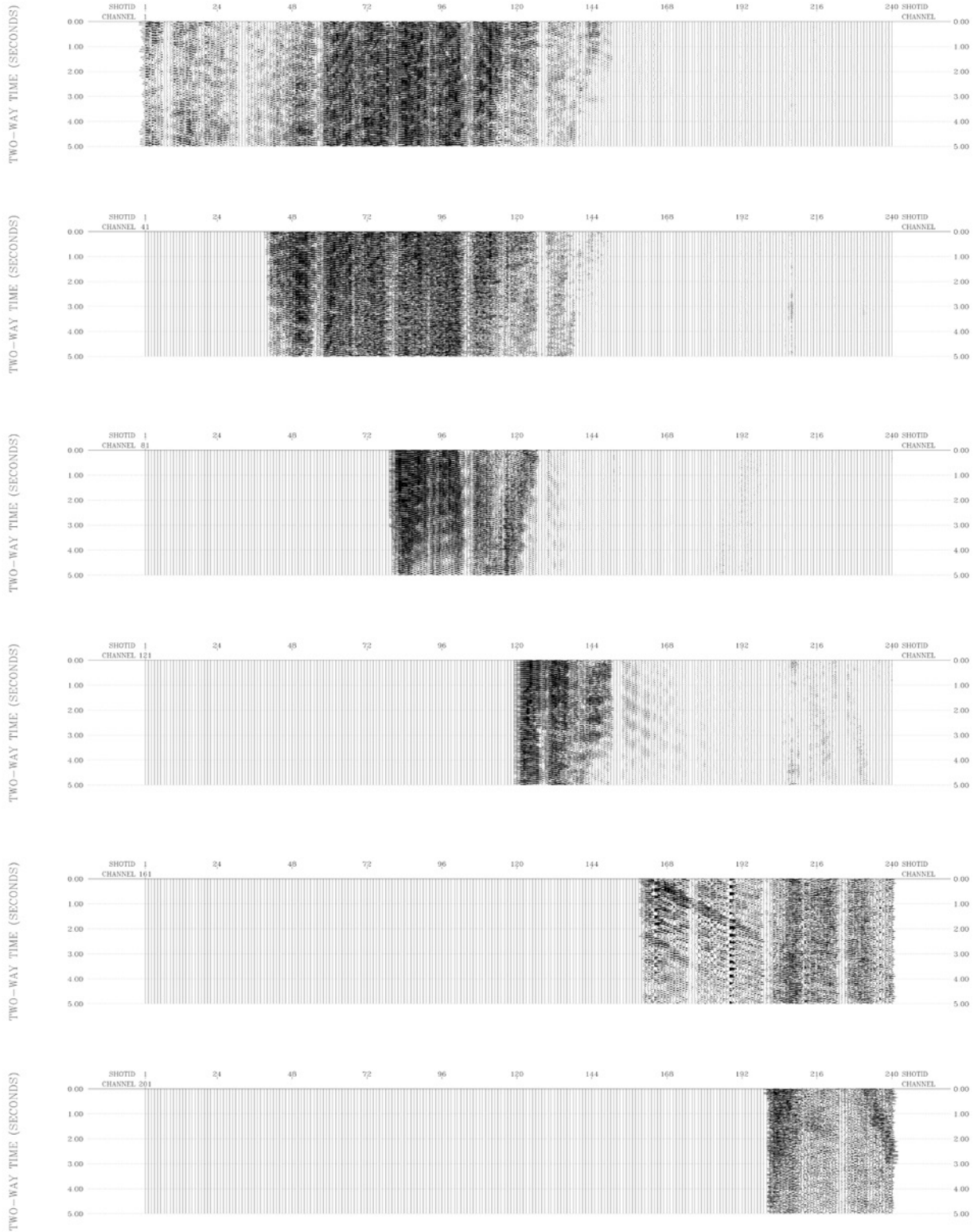
作成したモジュールは、一度の処理で全てのトレースの組み合わせについて相互相関処理を行うもので、手間がかからない。しかしながら、すべてのトレースの組み合わせにあわせてメモリを確保する必要がある

ため、そのまま240チャンネル、1msサンプリングのデータを処理しようとするハードディスクにスワップすることになり、CPUの演算速度ではなくハードディスクへのアクセスがボトルネックとなり、著しく処理速度が低下する。計算機環境にも依存するが、4msにリサンプリングすると現場での処理も可能と思われる実用的な速度となった。ただし、処理した結果は膨大な量になるため、ハードディスクは十分に用意する必要がある。なお、自己相関だけであれば、1msサンプリングのままでも十分に現場で処理可能である。

周波数領域で相互相関処理を行って作成した擬似ショット記録の例を第6図に示す。すべての組み合わせについて表示すると膨大なトレースになるため、適当な間隔（ここでは40チャンネル）で抽出したものである。全体的に反射法地震探査で得られるショット記録には遠く及ばない。しかしながら、チャンネル161に見られるような良好な記録が一部で得られている。このような記録を抽出することにより、地下構造を得ることが期待される。

8. まとめ

都市域における地震波干渉法による地下構造調査の適用可能性を検証するために、地下構造がほぼ明らかである宮城県北部の旭山撓曲南方延長で地震波干渉法



第 6 図 第 2 図の波形記録を相互相関処理することによって得られた擬似ショット記録の例.

Fig.6 Pseudo shot gather obtained by cross-correlation from Fig. 2 traces.

による地下構造調査を実施した。予備的な解析として自己相関処理を行い、旭山撓曲に関連すると考えられる構造を得た。現場での処理を可能とするために、高速で演算可能なソフトウェアのモジュールを開発した。開発したモジュールを用いて作成した擬似ショット記録の中には良好な結果が存在し、地下構造の解明に資することが期待される。

謝辞

調査を実施するにあたり、宮城県東松島市建設課、国土交通省仙台河川国道事務所石巻国道維持出張所、東日本旅客鉄道株式会社小牛田保線技術センターのご協力を得た。記して感謝の意を表します。

文献

- 石井武政・柳沢幸夫・山口昇一・寒川 旭・松野久也 (1982), 松島地域の地質, 地域地質研究報告 (5 万分の 1 図幅), 産業技術総合研究所地質調査総合センター, 121p.
- 山口和雄・横倉隆伸・加野直巳 (2004), 2003 年宮城県北部地震震源域南部における反射法地下構造探査 (その 2) --P 波ミニバイブ探査結果--, 地球惑星科学関連学会合同大会予稿集, S053-P016.
- 横倉隆伸・加野直巳・山口和雄・田中明子・大滝壽樹・伊藤 忍・駒澤正夫・稲崎富士・横田俊之 (2005), 地下地質調査, 平成 16 年度原子力安全基盤調査研究 原子力安全基盤調査自然科学分野総合的評価研究報告書, 産業技術総合研究所.