

新潟海岸南西部における海陸接合反射法地震探査—データ取得と処理—

Offshore-onshore integrated seismic reflection survey in the southwest of Niigata coast, central Japan: data acquisition and processing

楮原京子¹・加野直巳²・山口和雄²・横田俊之³・郷 隆之⁴・藤原 明⁴・清水信之⁴
Kyoko Kagohara¹, Naomi Kano², Kazuo Yamaguchi², Toshiyuki Yokota³, Takayuki Go⁴,
Akira Fujiwara⁴ and Nobuyuki Shimizu⁴

Abstract: The offshore of Niigata, where earthquake source faults that causes the 1964 Niigata Earthquake and the 2007 Chuetsu-Oki earthquake are distributed, is located in the high strain rate belt. However, most of offshore geology is poorly known due to limit of observation. To obtain the integrated seismic data in and around the Niigata coastal area, we conducted offshore-onshore seismic reflection profiling across a northern extension of inland active reverse fault along the eastern foot of Kakudayama. Along the offshore part and the onshore part of the seismic profile, 120ch hydrophones and 180ch geophones were deployed, respectively. The source used in offshore survey is an air gun array (80 cubic inch), and in onshore survey is one middle vibrator truck (ENVIRO-VIB) with 10-80 Hz signals. The survey source spacing of both surveys was 5 m, and also receiver spacing was 10 m. The obtained seismic profiling data were processed by conventional common mid-point (CMP) methods.

キーワード: 新潟海岸, 沿岸域, 海陸接合反射法地震探査, CMP 重合法

Keywords: Niigata coast, littoral zone, offshore-onshore integrated seismic reflection profile, CMP stack method

1. はじめに

新潟沿岸域は日本海東縁の歪集中帯に位置し、1964年新潟地震や2007年中越沖地震を引き起こした震源断層が分布している。このような日本海東縁は、地震発生ポテンシャルが高いと予想される領域であるものの、これまで調査アプローチの難しさからその沿岸部の地質情報はほとんど得られていない。一方、本地域の主要地質構造の一つである長岡平野西縁断層帯は、東頸城丘陵に代表されるような褶曲山地の東翼をなし、石油資源調査や活断層調査から下部更新統を大きく変位させる西上がりの逆断層であるとされている。この断層帯の北部を構成する角田山東縁断層は、その平均上下変位速度が3mm/yrと日本の内陸活断層の中でも高いグループに属している(地震調査研究推進本部, 2004)。また、その分布は、角田・弥彦山塊の東縁から新潟海岸の沖合海域へと連続すると

され、角田山東縁断層の位置・形状を詳細に知ることが、新潟沿岸域の地質情報としても重要であると考えられる。本調査では浅部(地下500m)を対象深度とする反射法地震探査を実施し、海陸をまたぐ地下断面を得た。本稿では、海域・陸域の両方で得られたデータに対して行った解析結果について報告する。

2. 海陸接合反射法地震探査の概要

探査は平成21年8月16日—同年8月29日までの間、新潟市西区内野上新町・中権寺およびその沿岸域において実施した。測線は、石油公団(1991, 1992)の2つの反射断面(SN90_AとSN90_9;第1図)で捉えられた断層の位置を結んだ線分(断層の推定位置)を、海域で横断するように設計し、測線長は陸域約3km、海域約3kmとした。第1図に探査測線図を示す。反射法地震探査は、(1)陸域発震-陸域受振(LL測線)、(2)陸域発震-海域受振(LM測線)、(3)海

¹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)

²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)

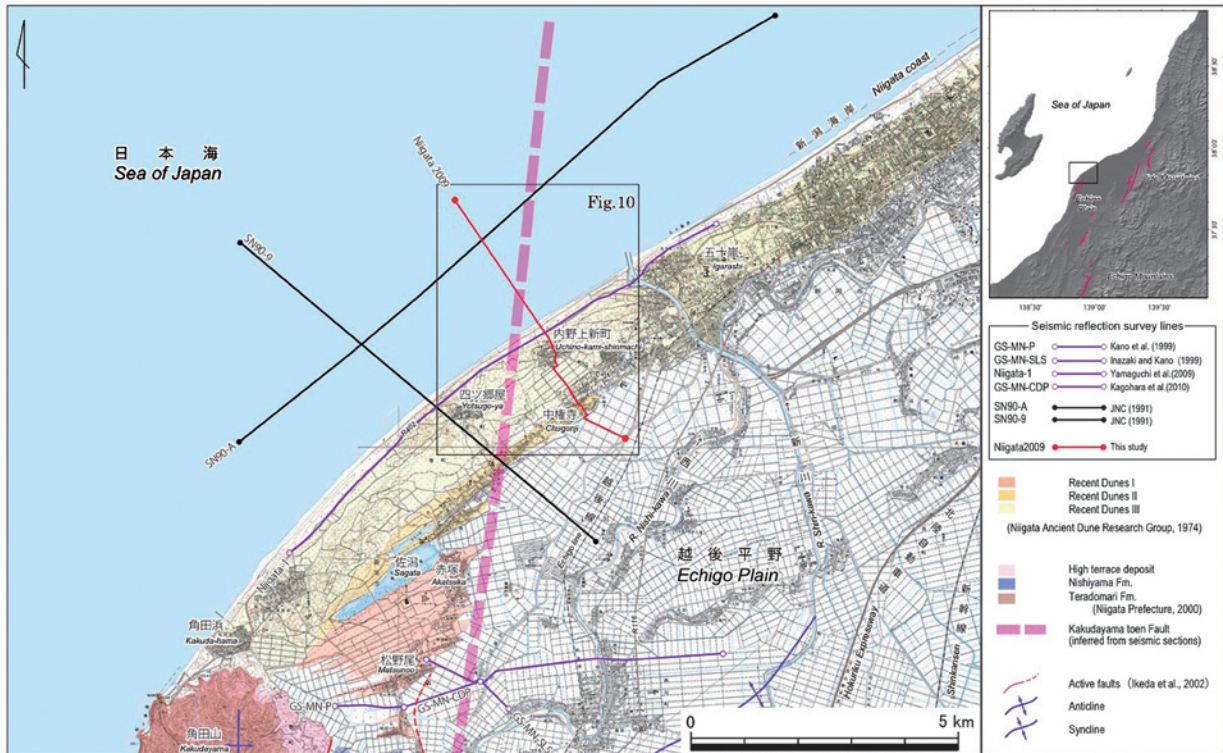
³産業技術総合研究所 地質調査総合センター 地圏資源環境研究部門 (AIST, Geological Survey of Japan, Institute for Geo-Resources and Environment)

⁴株式会社ジオシス (GEOSYS, INC, 1-5-18 Otsuka, Bunkyo-ku, Tokyo, 112-0012 Japan)

域発震-陸域受振 (ML 測線), (4) 海域発震-海域受振 (MM 測線) の合計 4 つの調査形態によるデータ取得を行った (第 2 図). 各測線の探査仕様は第 1 表に示す.

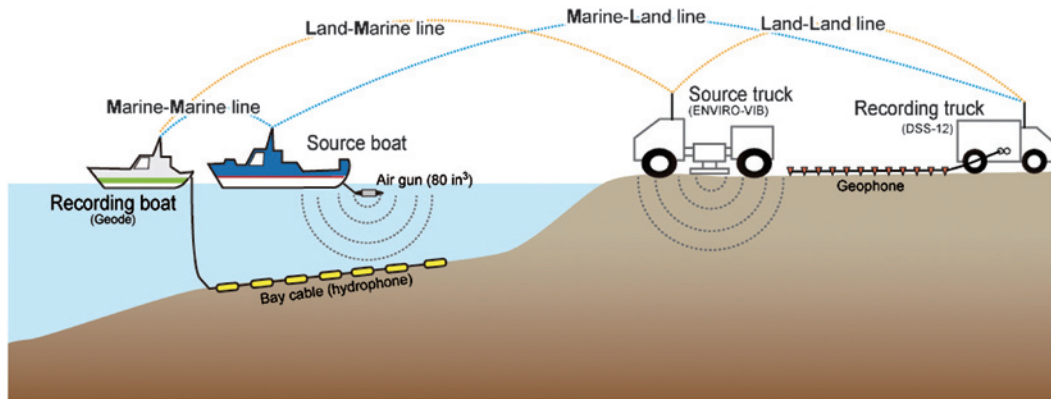
陸域の受振は, 固有周波数 10Hz のジオフォン (6 個組) を 10m 間隔で設置し, 通常 180ch で収録した (第 3 図-a). 探鉱機には DSS-12 (サンコーコンサルタント (株) 製) を用いた. 受振器の展開は測線の状

況等により, 切り替えのタイミングが不規則となったが, 基本的には固定した 180ch の受振点の南端から発震を開始し, 適当な受振点まで発震したところで受振点を 12ch 分北へ移動する方法をとった. したがって, LL 測線の場合, 発震・受振の最大オフセットは発震位置により 1800m から 1000m の間で変化する. ML 測線では, 海岸線際から 180ch (約 1.8km) の固定展開で海発震の記録を受振した. また, 陸上震源に



第 1 図 調査地域周辺の地形・地質と反射法地震探査測線。
地質図は新潟県地質図改訂委員会 (2000), 活断層線は, 池田ほか (2002) による。

Fig.1 Geology and seismic lines around the survey area.
The geologic map is after Niigata Prefecture Geological Map Revision Committee (2000). The distribution of active faults is after Ikeda et al. (2002).



第 2 図 海陸接合反射法地震探査の概念図。

Fig.2 Conceptual image of offshore-onshore integrated seismic reflection profiling.

第 1 表 新潟 2009 反射法地震探査のデータ取得パラメータ.

Table 1 Data acquisition parameters for the Niigata 2009 seismic line.
(a) LL line, (b) LM line, (c) ML line, (d) MM line

(a) LL seismic line

Length of seismic line	3150 m
<i>Receiver parameters</i>	
Receiver	Geophone, group of 6
Natural frequency	10 Hz
Receiver interval	10 m
No. of receiver points	316
<i>Source parameters</i>	
Source	ENVIRO-VIB
Shot interval	5 m
No. of shot points	576
Sweep frequency	10–80 Hz
Sweep length	13 sec
No. of sweeps	4 (standard)
<i>Recording parameters</i>	
Instruments	DSS-12
No. of channels	180–192 ch
Recording length	15.99 sec
Pre-trigger	10 ms
Sampling rate	1 ms

(b) LM seismic line

Length of seismic line	Off-side: 1200 m, Shore-side: 1200 m
<i>Receiver parameters</i>	
Receive	Hydrophone
Receiver interval	10 m
No. of receiver points	240
<i>Source parameters</i>	
Source	ENVIRO-VIB
Shot interval	5 m
No. of shot points	203
Sweep frequency	10–80 Hz
Sweep length	
No. of sweeps	4 (standard)
<i>Recording parameters</i>	
Instruments	Geode
No. of channels	180 ch
Recording length	15.99 sec
Pre-trigger	10 ms
Sampling rate	1 ms

(c) ML seismic line

Length of seismic line	1800 m
<i>Receiver parameters</i>	
Receiver	Geophone, group of 6
Natural frequency	10 Hz
Receiver interval	10 m
No. of receiver points	180
<i>Source parameters</i>	
Source	Air gun (80 cu inch)
Shot interval	5 m
No. of shot points	1102
No. of vertical stacks	1
<i>Recording parameters</i>	
Instruments	DSS-12
No. of channels	180 ch
Recording length	3 sec
Pre-trigger	20 ms
Sampling rate	1ms

(d) MM seismic line

Length of seismic line	Off-side: 1200 m, Shore-side: 1200 m
<i>Receiver parameters</i>	
Receive	Hydrophone
Receiver interval	10 m
No. of receiver points	240
<i>Source parameters</i>	
Source	Air gun (80 cu inch)
Shot interval	5 m
No. of shot points	1146
No. of vertical stacks	1
<i>Recording parameters</i>	
Instruments	Geode
No. of channels	120 ch
Recording length	3 sec
Pre-trigger	20 ms
Sampling rate	0.5 ms

は、ENVIRO-VIBE (IVI 社製; 第 3 図 -b) を使用した。震源の Sweep 周波数はテストの結果を踏まえ 10–80Hz, 垂直重合数は標準で 4 回とした。発震は、LL 測線, LM 測線のいずれも, 受振点と受振点間の中点で行い, 発震点間隔は 5m となる。

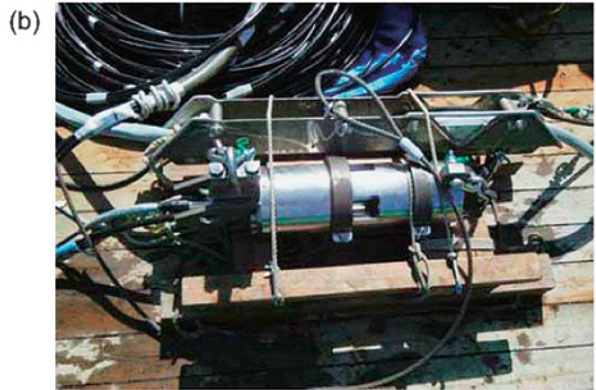
海域の受振は、120ch のハイドロフォンを 10m 間隔に組み込んだケーブル (ベイケーブル; 第 4 図 -a) を海底に敷設し, 浜側展開と沖側展開に分けて受振した。探鉱機には Geode (Geometrics 社製) を用いた。浜側展開は、可能な限り海岸線に近づく計画であった

が、海況不良のため海岸線より約 400m 沖合からの敷設となった。LM 測線では、海岸線から 1km の区間で行った発震記録を浜側展開と沖側展開のそれぞれで収録した。海域の震源には、総容量 80 立方インチのエアガン (第 4 図 -b) を使用し、船速を調整しながら 20m 間隔で発震した。また、発震は同じ航路で位置をずらしながら 2 往復しており、最終的には、発震点間隔 5m のデータを取得した。



第 3 図 陸域調査機器。
(a) 受振器設置状況, (b) 発震装置 (ENVIRO-VIB)。

Fig.3 Land survey equipments.
(a) Receiver. (b) Seismic source (ENVIRO-VIB).



第 4 図 海域調査機器。
(a) 受振ケーブル (パイケーブル), (b) 発震装置 (エアガン)。

Fig.4 Sea survey equipments.
(a) Receiver cable, (b) Seismic source (Air gun).

3. データ処理

取得データは一般的な共通反射点 (CMP) 重合法に基づいて処理し、海陸接合断面を作成するため、1. 各測線の CMP 重合断面の作成、2. 各 CMP 重合断面に対する接合処理 (接合 CMP ギャザーの作成)、3. 接合 CMP ギャザーによる CMP 重合断面・深度断面の作成に分けて行った。反射法地震探査処理は、株式会社地球科学総合研究所製のデータ処理ソフトである、Super X-C を用いた。各測線データに対する処理フローは第 5 図に、各測線のデータに適用した処理パラメータは第 2 表に示す。

3.1 各測線データの処理

3.1.1 データ編集

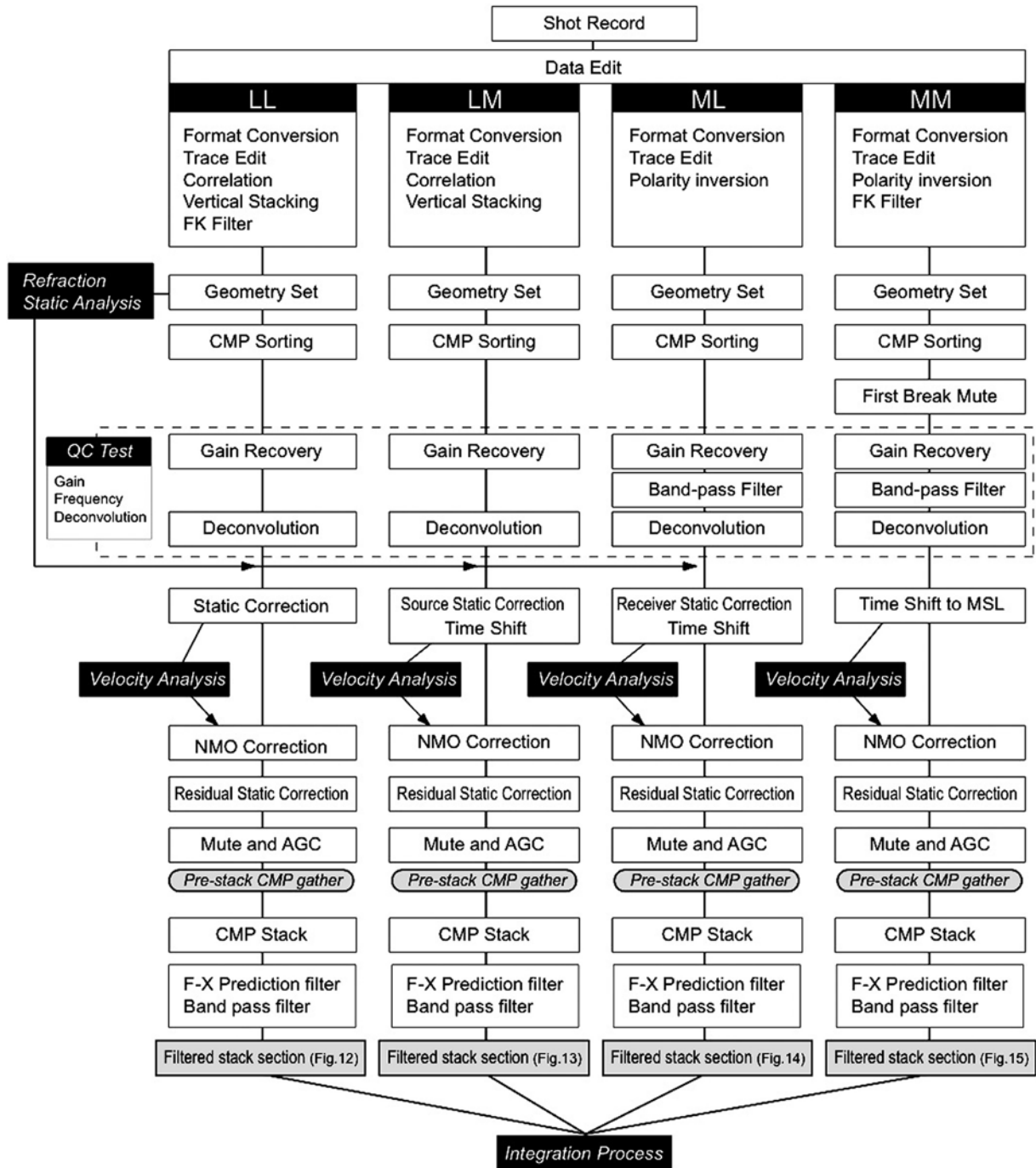
後述する海陸接合断面を作成するためには、震源と受振器がそれぞれ異なる組み合わせで取得されたデータの極性を予め統一する必要がある。そこで LL 測線のコリレーション後の取得データ波形の極性を基準と

して、MM 測線 (海発震-海受振)、ML 測線 (海発震-陸受振) のデータに対して波形の極性反転を行った。

また、収録データにおける無線による T.B. の遅延、各種レコーダおよび展開で異なる pre trigger の値、さらに、ENVIRO-VIBE の Synthetic に対する Filtered Ground Force (FGF) の遅延 (13ms) を考慮した時間補正を各データに対して行った。

この後、LL 測線および LM 測線のショットギャザーに対しては FGF の Sweep 波形を用いてコリレーションを行った。また、LL 測線のショットギャザーに対しては、データ収録時にオペレートミス・システムの不具合で収録チャンネル数の増減が生じたため、不要なチャンネルの削除などのトレース編集を行った。以上の作業を行い、LL 測線および LM 測線の全ショットギャザーの編集が整った後、発震点毎に記録を垂直重合 (Diversity stack) した。

第 6 図～第 9 図には各測線のショット記録の例を示す。LL 測線 (第 6 図) では、ほとんどの記録で初



第5図 共通反射点重合法の解析フロー。

Fig.5 Flowchart of individual data processing by Common mid-point method.

動が届いた範囲はオフセット 500–1000m 程度，反射面は往復走時 0.5sec 以浅であった。LM 測線では，SP. 603 の発震（第7図-a）において初動が沖展開の 110ch 付近（震源から約 1800m）まで届いており，反射面も往復走時 1.5sec 以浅で確認できる。SP. 700 の発震（第7図-b）においては遠地であることもあり，初動が確認できるのは陸側展開の 180ch（震源から約 800m）までである。ML 測線では，海岸線近

傍の発震（第8図-a）では，初動は 80ch（震源から約 1200m）付近まで届くが，反射面を確認できるのは 25ch 付近（震源から約 650m）までである。なお，最も沖合の SP.1 の発震記録（最小オフセット 3km，第8図-b）では，有効な信号を確認できなかった。MM 測線（第9図）では，展開した 1.2km の範囲では初動が届いており，側方へ連続の良い反射面群が確認できる。しかし，見え方の強弱はあるものの，全ト

第 2 表 新潟 2009 反射法地震探査データの処理パラメータ。

Table 2 Processing parameters for the CMP of the Niigata2009 seismic data.

(a) LL line seismic data, (b) LM line seismic data, (c) ML line seismic data, (d) MM line seismic data

(a) LL seismic line

CMP Sorting	CMP interval: 5 m
Gain Recovery	Gain: $t^{1.2}$
Deconvolution	Gate length: 1000 msec, Operator length: 200 msec Sliding velocity: 2000msec, Predictive distance: 1msec White noise scale factor: 7 %
Static Correction	Time-term method, Two layers model Weathered layer (400 m/sec) and higher velocity layer
Velocity Analysis	Constant velocity stack, Velocity scan interval: 20 CMP
Trace balance (AGC)	Gate length: 50 msec
F-X Prediction Filter	Gate length: 15 traces, Operator length: 3 traces
Band Pass Filter	5/8-60/70 Hz

(b) LM seismic line

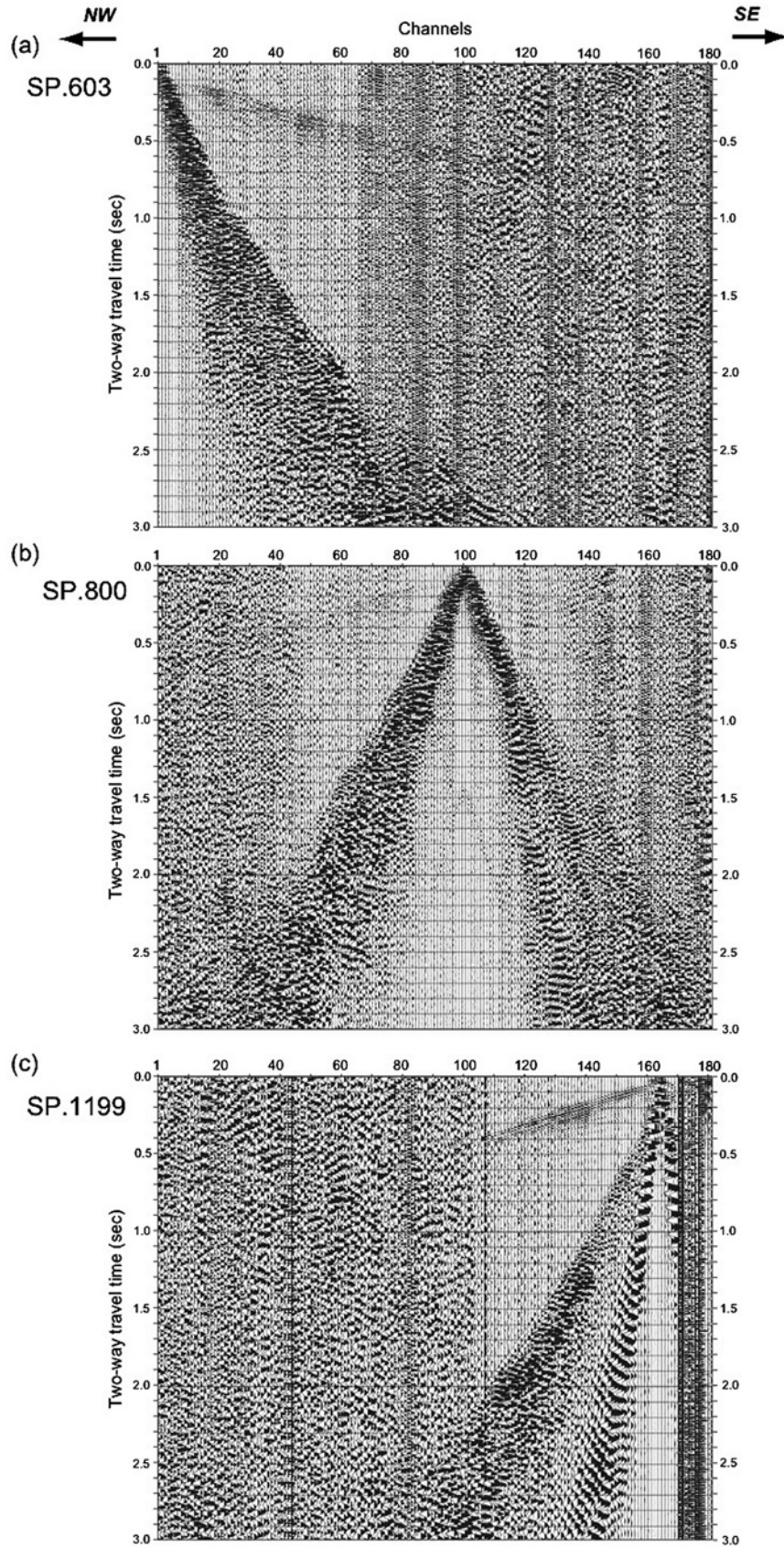
CMP Sorting	CMP interval: 5 m
Gain Recovery	Gain: $t^{1.2}$, AGC gate length: 600 msec
Deconvolution	Gate length: 1000 msec, Operator length: 200 msec Sliding velocity: 2000 msec, Predictive distance: 1 msec White noise scale factor: 7 %
Static Correction (shot statics)	Time-term method, Two layers model Weathered layer (400 m/sec) and higher velocity layer
Velocity Analysis	Constant velocity stack, Velocity scan interval: 16 CMP
Trace balance (AGC)	Gate length: 100 msec
F-X Prediction Filter	Gate length: 15 traces, Operator length: 3 traces
Band Pass Filter	5/8-60/70 Hz

(c) ML seismic line

CMP Sorting	CMP interval: 5 m
Gain Recovery	Gain: $t^{1.2}$
Pre-Filter	Band Pass Filter 5/8-80/90 Hz
Deconvolution	Gate length: 2000 msec, Operator length: 200 msec Sliding velocity: 1500 msec, Predictive distance: 1 msec White noise scale factor: 0.5 %
Static Correction (receiver statics)	Time-term method, Two layers model Weathered layer (400 m/sec) and higher velocity layer
Velocity Analysis	Constant velocity stack, Velocity scan interval: 40 CMP
Trace balance (AGC)	Gate length: 300 msec
F-X Prediction Filter	Gate length: 15 traces, Operator length: 3 traces
Band Pass Filter	5/8-60/70 Hz

(d) MM seismic line

CMP Sorting	CMP interval: 5 m
Gain Recovery	Gain: $t^{1.2}$
Pre-Filter	Band Pass Filter 5/8-80/90 Hz
Deconvolution	Gate length: 2000 msec, Operator length: 200 msec Sliding velocity: 1500 msec, Predictive distance: 0.5 msec White noise scale factor: 0.5 %
Velocity Analysis	Constant velocity stack, Velocity scan interval: 40 CMP
Trace balance (AGC)	Gate length: 300 msec
F-X Prediction Filter	Gate length: 15 traces, Operator length: 3 traces
Band Pass Filter	5/8-60/70 Hz

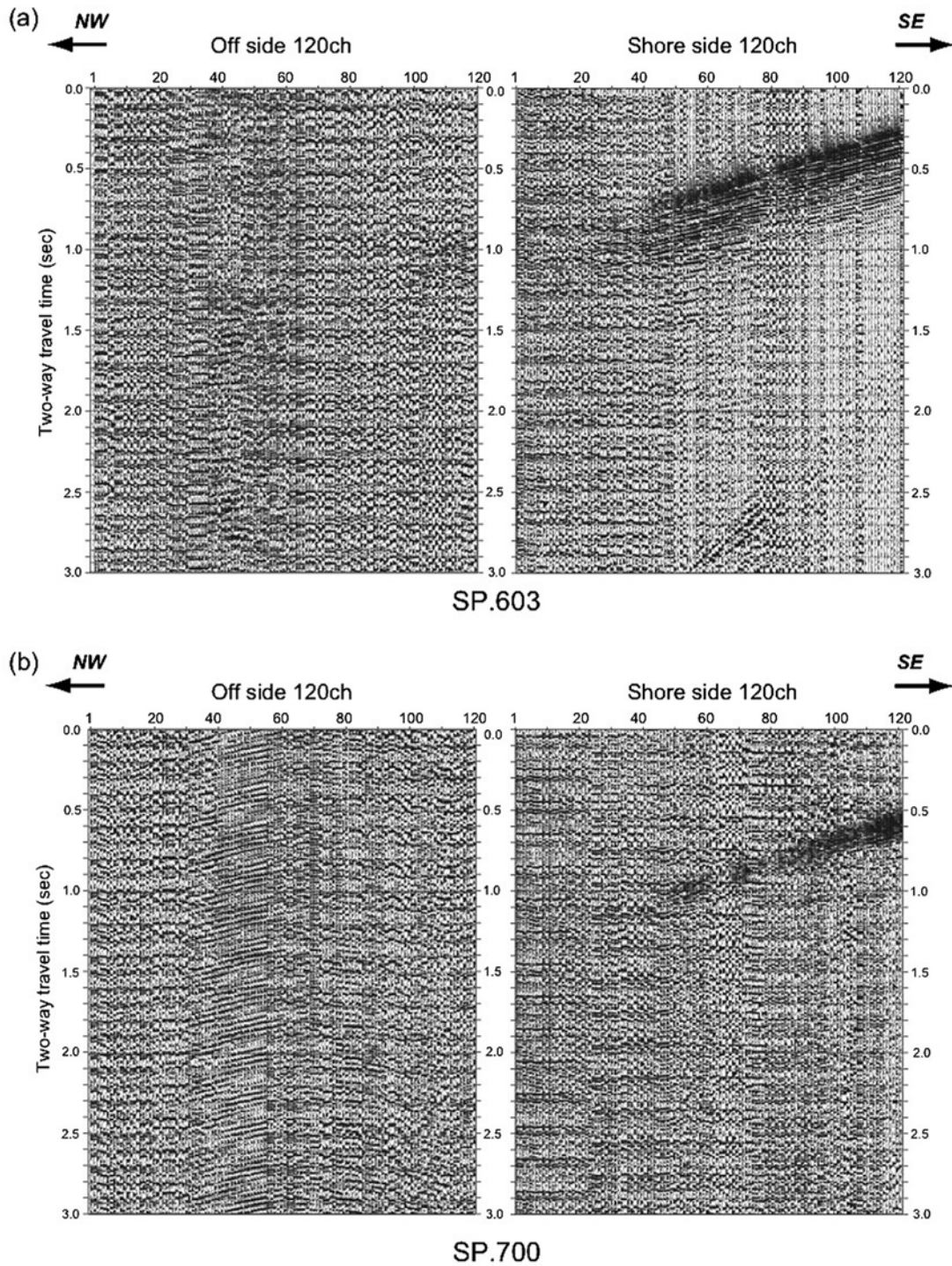


第 6 図 LL 測線のショット記録。

(a) は SP.603, (b) は SP.800, (c) は SP.1199 のショット記録で、それぞれ 4 回の発震を垂直重合し振幅調整している。

Fig.6 Example of the LL line shot records.

Shot record at SP.603 (a), SP.800 (b) and SP.1199 (c) are shown with 4 fold vertical stacks and trace balancing.



第 7 図 LM 測線のショット記録。
 (a)は SP.603, (b)は SP.700 のショット記録で、それぞれ 4 回の発震を垂直重合し振幅調整している。

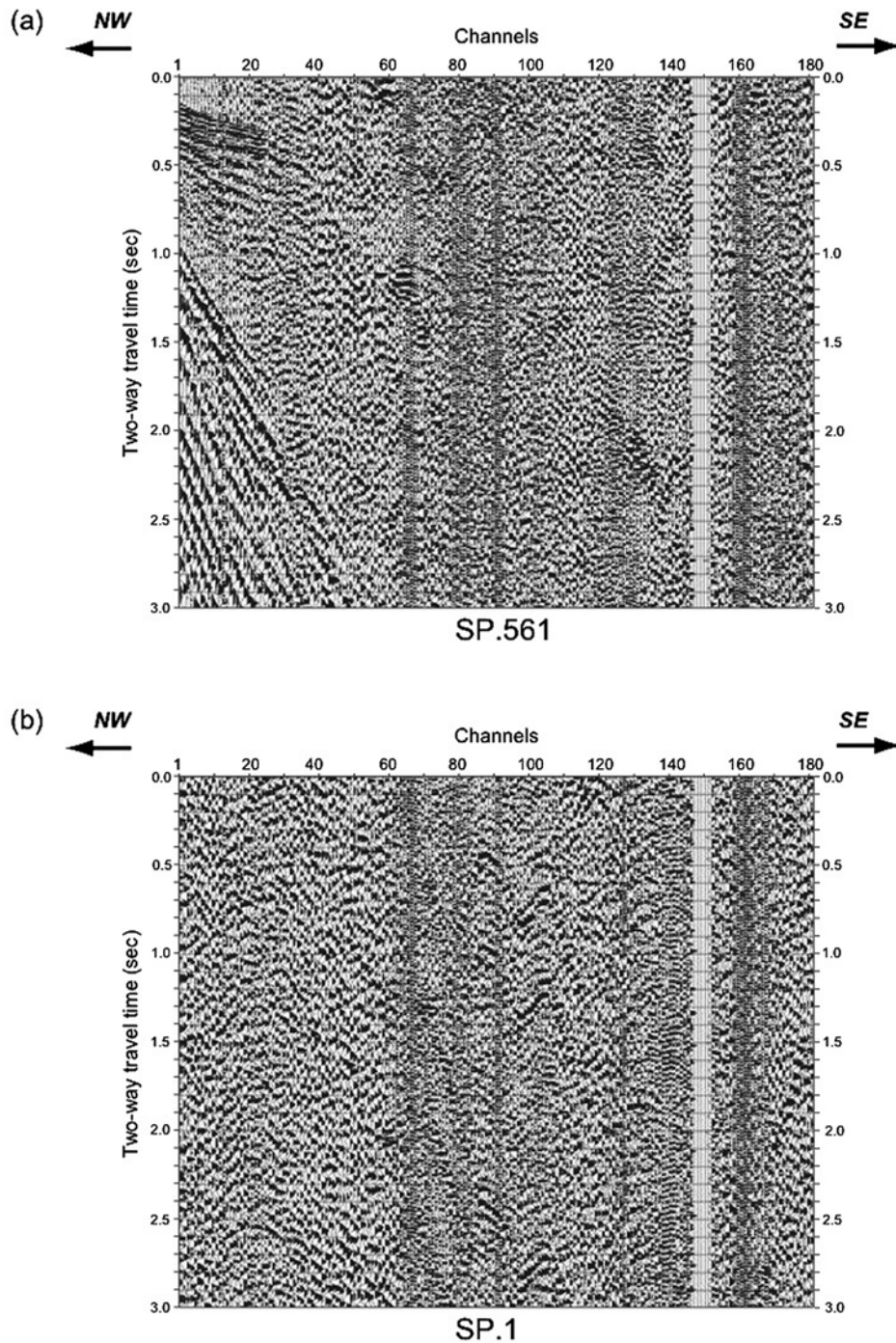
Fig.7 Example of the LM line shot records.
 Shot record at SP.603 (a) and SP.700 (b) are shown with 4 fold vertical stacks and trace balancing.

レースに 200msec 間隔のスパイク状ノイズが出現している。LL 測線および MM 測線のデータに関しては、卓越していたコヒーレントノイズや表面波のノイズ除去するため、この段階で F-K ノイズ除去フィルタ（時間・空間領域の速度フィルタ）を適用した。また MM

測線のデータに対しては、デスパイクフィルタを施し、前述のスパイク状ノイズを除去した。

3.1.2 CMP 編集

4 測線の受振点・発震点の座標を元に共通反射点 (CMP) の分布を調べ、CMP 分布域の中央部を横切る



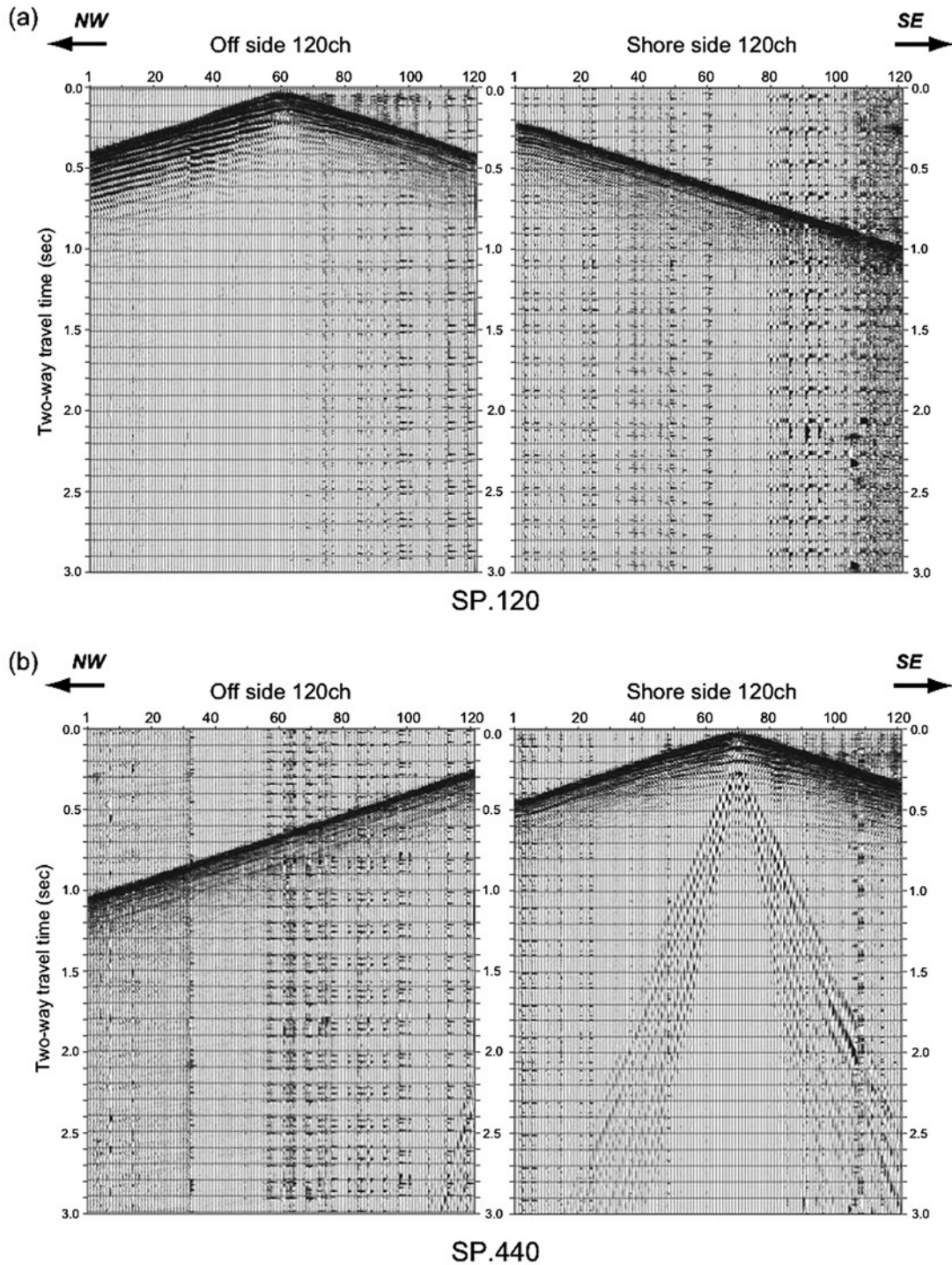
第 8 図 ML 測線のショット記録。
 (a) は SP.561, (b) は SP.1 のショット記録. それぞれ振幅調整している.

Fig.8 Example of the ML line shot records.
 Shot record at SP.561 (a) and SP.1 (b) are shown with trace balancing.

ように重合測線を設定した. CMP ギャザーは重合測線に沿って集めた. CMP 番号は, 海域北端を 1 とし, 陸域南端では 1097 となる. CMP 間隔は, 受振点間隔の半分である 5m と定義した. 重合測線図を第 10 図に示す.

3.1.3 振幅回復

取得波形は, 波動の球面発散, 非弾性的吸収, 反射波の透過損失等により, 時間と共に急激に減衰する. これらの減衰を補償することを目的として, 各測線の CMP ギャザーに対して時間の 1.2 乗の関数を用い



第 9 図 MM 測線のショット記録。
 (a)はSP.120, (b)はSP.440のショット記録. それぞれ左側が沖展開, 右側が浜展開の記録を示し, 振幅調整している.

Fig.9 Example of the ML line shot records.
 Shot records at SP. 120 (a) and SP.440 (b) are shown with gain recovery. Left: Off side spread, right: shore side spread.

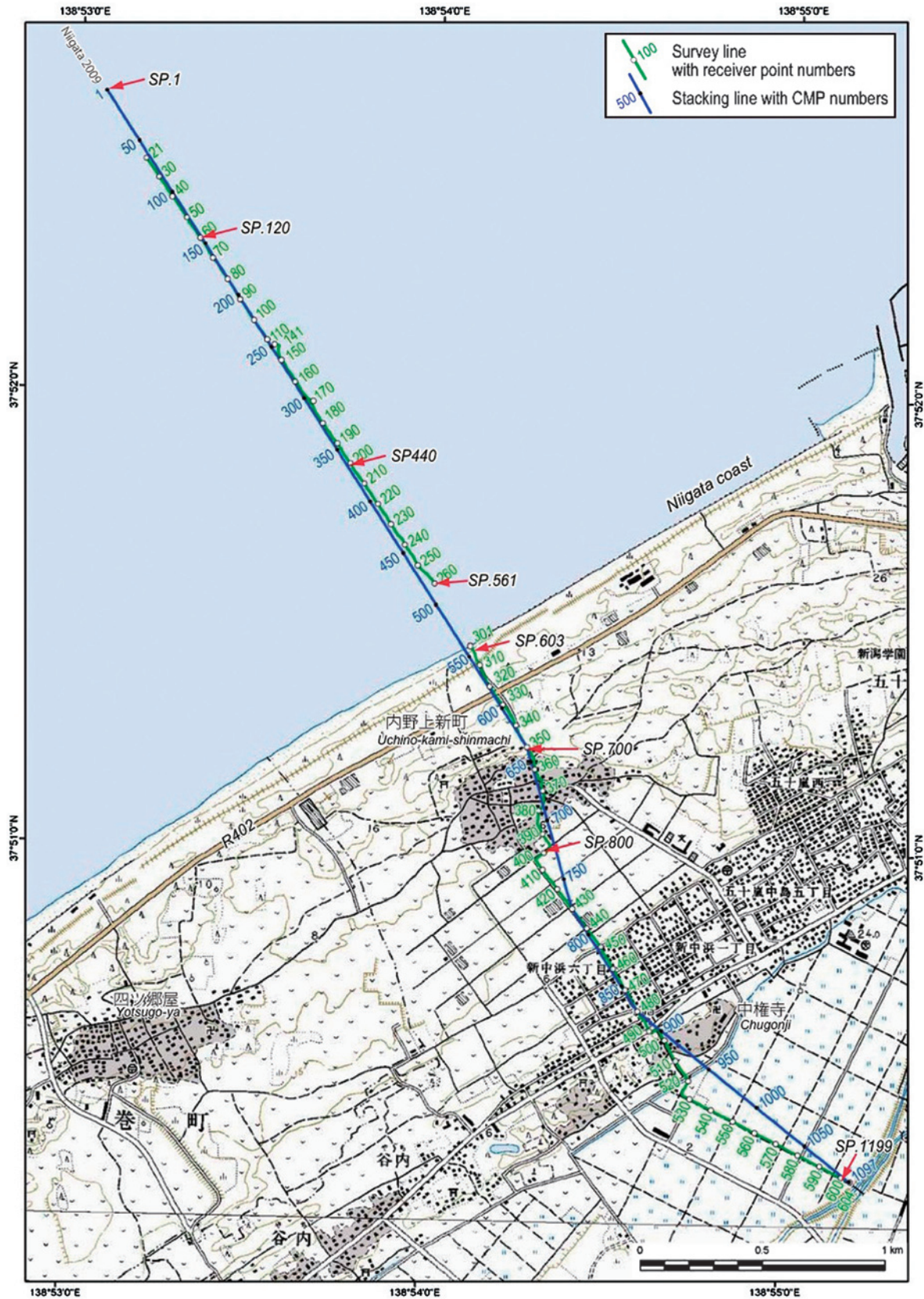
た振幅回復を適用した. ML 測線および MM 測線の CMP ギャザーに対しては 5/8-80/90Hz の帯域通過フィルタを適用した.

3.1.4 デコンボリューションフィルタ

システムの応答がインパルスでないことに起因する

波形のなまり, 地層の中での多重反射, ハムの様なリングングノイズ等を除くことを目的としたデコンボリューションフィルタを適用した.

ENVIRO-VIB を震源とする LL 測線および LM 測線の CMP ギャザーには, ゲート長: 100ms, オペレ



第 10 図 新潟 2009 の反射法地震探査測線と重合測線。
 緑線は新潟 2009 探査測線と受振点番号，青線は重合測線と CMP 番号を示す。

Fig.10 Niigata 2009 seismic survey line and CMP stacking line.
 The green line is the Niigata 2009 survey line and green numbers are receiver point numbers. The blue line is Niigata 2009 CMP line and blue numbers are CMP numbers.

ータ長：200ms，スライディング速度：2000ms，予測距離：1ms，ホワイトノイズ補正：7%とした BLRR (Band-Limited Ridge Regression) 型デコンボリューションを適用した。

MM 測線および ML 測線の CMP ギャザーには，ゲートタイプ：タイムインバリエント型，ゲート長：2000ms，オペレータ長：200ms，スライディング速度：1500ms，予測距離：1ms，ホワイトノイズ補正：0.5%としたホワイトニングデコンボリューションを適用した。

3.1.5 屈折初動解析に基づく静補正

陸上表層付近の風化層の影響および標高差の補正を行うことを目的とした静補正を，LL 測線の記録を用い屈折法解析によって求めた。屈折法解析では，まず，LL 測線の全ショットギャザーの初動（明瞭に読めるもののみ）を読み取り，改良型タイムターム法により表層構造を求めた。表層風化層の速度は，測線全体の平均的な値として 400m/s を仮定し，第二層速度の推定には，初動の走時分布を参考に，オフセット（発震点－受振点間の距離）150－600m のデータを用いることとした。第 11 図に屈折初動解析結果を示す。LL 測線の CMP ギャザーには，NMO (Normal Move

Out) 補正前にこの結果から算出される受振点補正值と発震点補正值を適用し，標高差の補正は，CMP 重合・深度変換後に実施した。

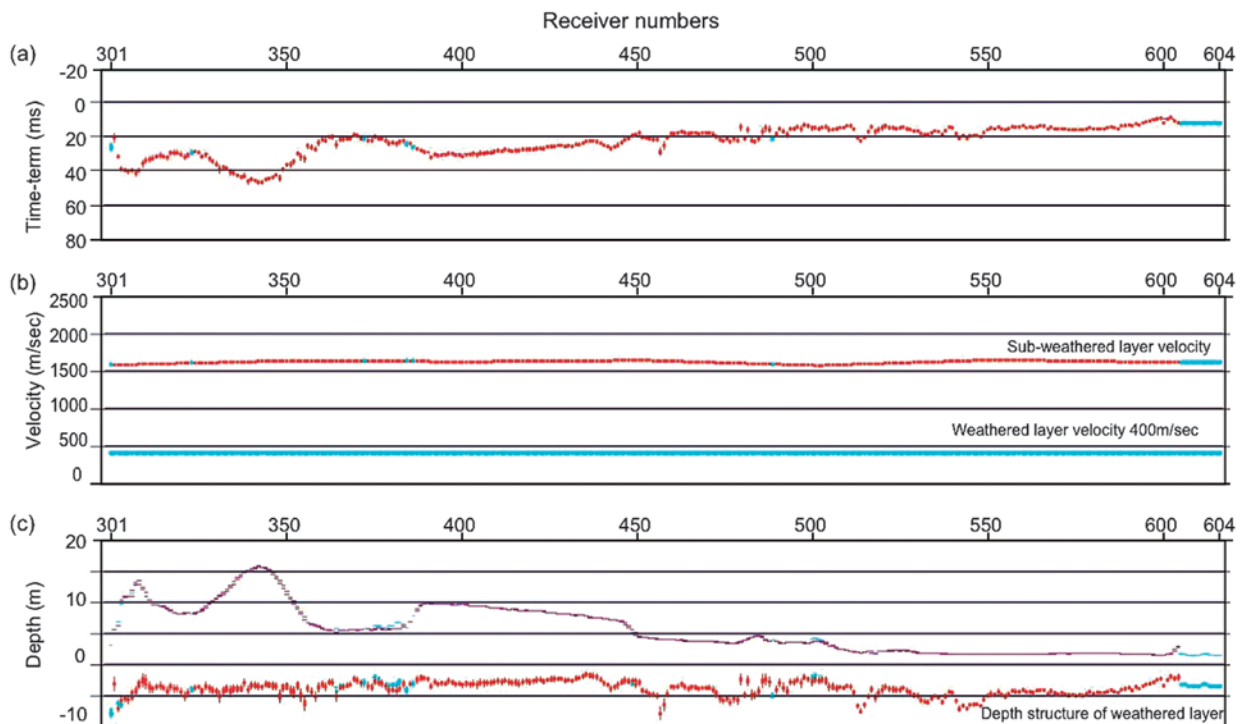
なお，求められた受振点補正值および発震点補正值は，LL 測線のほかに ML 測線の受振点における表層静補正 (receiver statics)，LM 測線の発震点における表層静補正 (shot statics) として適用した。また，LM 測線，ML 測線，MM 測線のデータについては，基準面を Mean Sea Level に合わせるために，エアガンおよびハイドロフォンケーブルに対し，設置深度に対応する時間補正を行った。

3.1.6 速度解析と NMO 補正

上記までの処理を行った後，定速度重合法および定速度スペクトル法により速度解析を実施した。解析点は LL 測線および LM 測線では約 100m 毎，ML 測線および MM 測線では約 200m 毎に設けた。速度解析結果に基づき，反射波走時を垂直走時に変換する NMO 補正を行った。

3.1.7 残差静補正

NMO 補正後の各測線の CMP ギャザーに対してトレース間の相互相関を計算し，最大相関値を与えるタイムラグの平均値からのずれを誤差とし，その値を統



第 11 図 屈折初動解析による表層構造。
(a) タイムターム値，(b) 表層速度構造，(c) 表層第 1 層の基底深度と標高。

Fig.11 Near-surface structure determined by time-term analysis.
(a) Time-terms, (b) Velocity structure, (c) Topography and depth structure of weathered layer.

計的に発震点，受振点の補正值に分離して2次的な静補正を行った。

3.1.8 NMO 後ミュートとトレースバランス

オフセットの大きいデータ波形のNMO補正による過大な伸長を防ぐため，各測線のCMPギャザーに対して，アウトサイドミュートを行った。この後，振幅分布を均一化し，重合効果を上げるため，短いタイムゲートのAuto Gain Control (AGC) を適用した。

3.1.9 CMP 重合

NMO補正後のCMPギャザーをCMP重合し，反

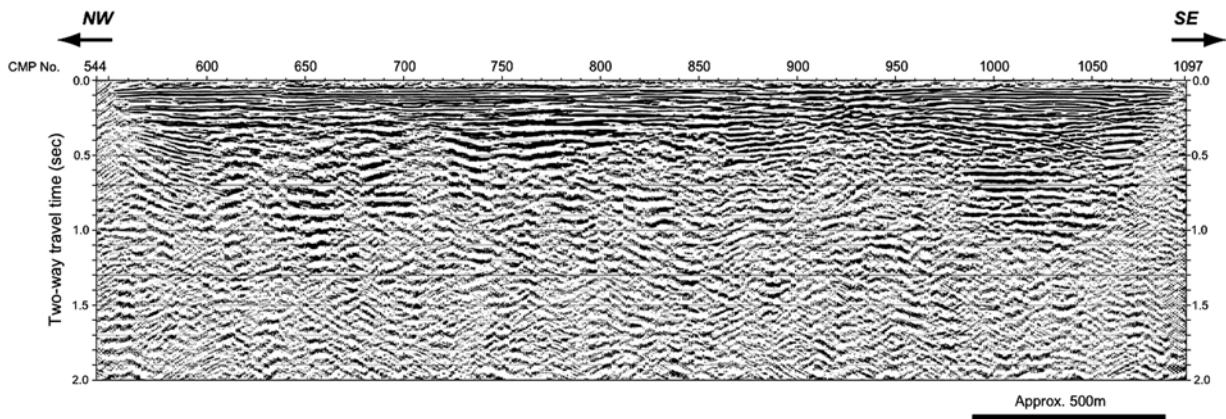
射波の時間断面図を作成した。第12図～第15図に各測線のCMP重合断面図を示す。第12図～第15図には，重合後にFX予測フィルタと5/8-60/70Hzの帯域通過フィルタが適用されている。

3.2 各測線データの接合

ここでは接合CMPギャザーの作成に際して行った統合処理について記述する。

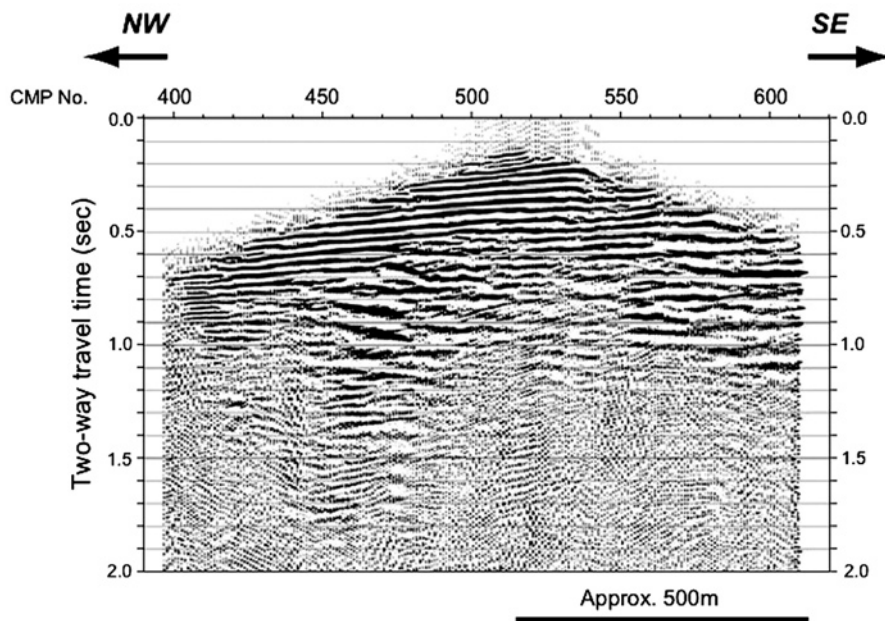
3.2.1 時間補正量の推定

4測線のCMP重合断面を正しく接合するにあたり，



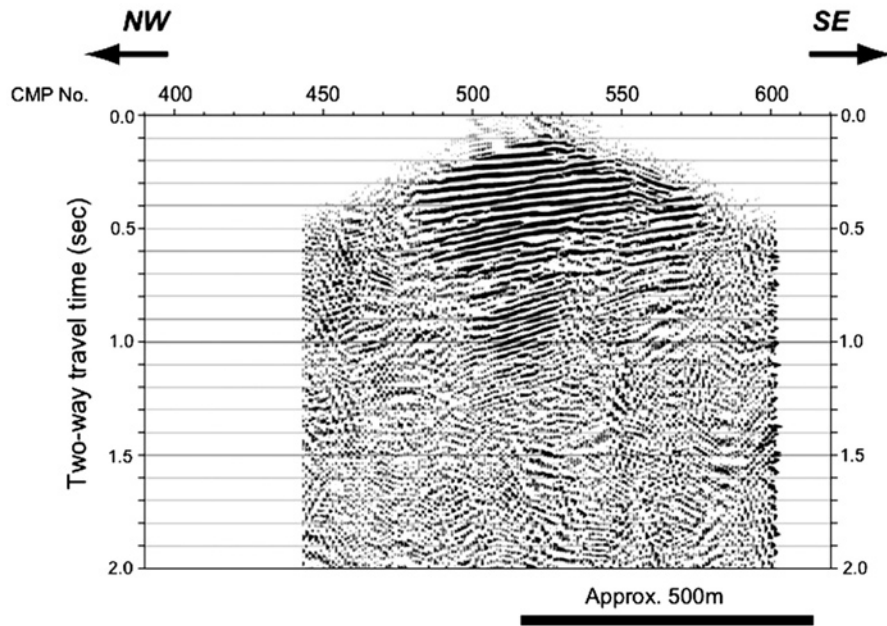
第12図 LL測線の重合断面。

Fig.12 Filtered stacked section of the LL line.



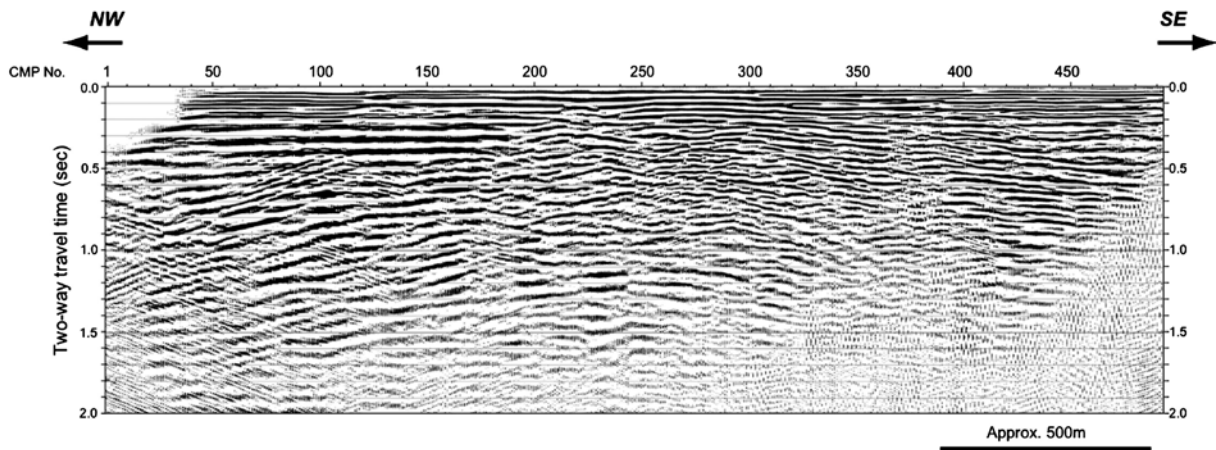
第13図 LM測線の重合断面。

Fig.13 Filtered stacked section of the LM line.



第 14 図 ML 測線の重合断面.

Fig.14 Filtered stacked section of the ML line.



第 15 図 MM 測線の重合断面.

Fig.15 Filtered stacked section of the MM line.

各 CMP 重合断面に対する時間補正量を推定した。具体的には、Mean Sea Level を基準面とする基準面補正がなされている各 CMP 重合断面を用いて、1) LM 断面を固定とし、MM 断面を両断面に共通する反射波が一致する様にずらした時の時間シフト量をエアガンに与える補正量として求めた。その値は +10ms である。同様の方法で 2) ML 断面（固定）と MM 断面とを比較し、ハイドロフォンに与える補正量を求めた。その値は -4ms である。

3.2.2 時間補正量の適用

3.2.1 で求めた時間補正量は、LM 測線、ML 測線、

MM 測線の CMP 重合直前の CMP ギャザーに適用した。すなわち、LM 測線の CMP ギャザーには、ハイドロフォンに対する時間補正量として、-4ms を与えた。ML 測線の CMP ギャザーには、エアガンに対する時間補正量として、+10ms を与えた。MM 測線の CMP ギャザーには、ハイドロフォンおよびエアガンに対する時間補正量として、+6ms を与えた。

3.3 接合 CMP 重合処理

接合重合断面は、上記による時間補正を行った後、各測線の CMP ギャザーを統合し、再度 CMP 重合法

による処理を行うことで作成される。接合 CMP 重合処理のフローチャートを第 16 図に、処理パラメータを第 3 表に示す。

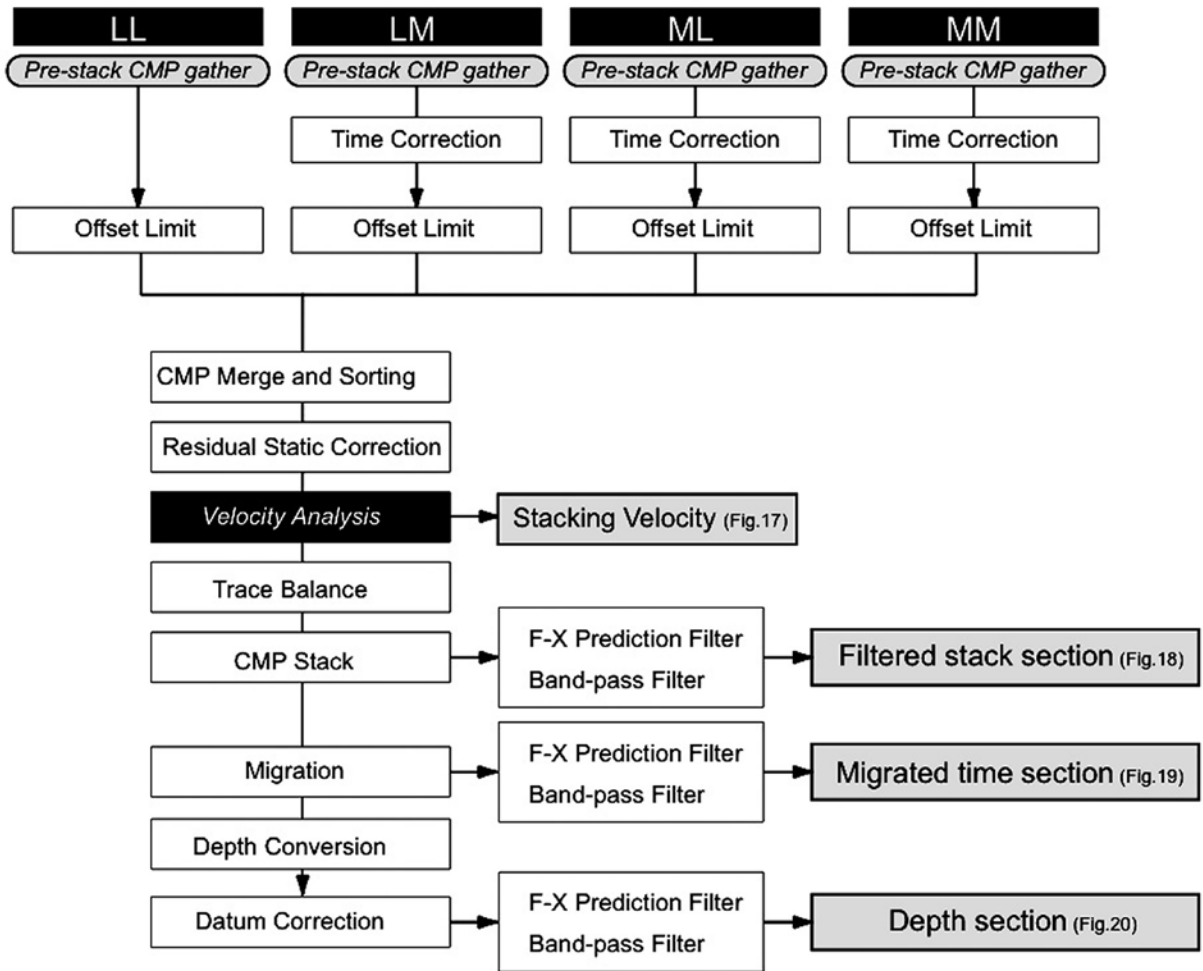
3.3.1 接合 CMP 編集

時間補正を行った各測線の CMP ギャザーを統合し、再度 CMP 編集を行った。この際、大きなオフセット

のデータは不要 (S/N の向上に寄与しない) と判断し、LL 測線・MM 測線・LM 測線ではオフセットを 1500m まで、ML 測線ではオフセットを 1000m までとする制限を設けた。

3.3.2 残差静補正

NMO 補正後の接合 CMP ギャザーに対してトレー



第 16 図 接合 CMP データの重合処理フロー。

Fig.16 Flowchart of integrated data processing by Common mid-point method.

第 3 表 新潟 2009 接合 CMP データの処理パラメータ。

Table 3 Processing parameters for the integrated CMP data.

Time Correction	LM: -4 msec, ML: +10 msec, MM: +6 msec
Offset Limitation	LL: 0-1500 m, LM: 0-1500 m, ML: 0-1500 m, MM: 0-1000 m
Residual static correction	4 msec
Velocity Analysis	Constant velocity stack, Velocity scan interval: 40 CMP
Band Pass Filter	5/8-60/70 Hz
F-X Prediction Filter	Gate length: 15 traces, Operator length: 3 traces
Post-stack Migration	Kirchoff migration
	Velocity scaling: 0-1sec=70 %, 1-2sec=90%, 2-3sec=80%

ス間の相互相関を計算し、最大相関値を与えるタイムラグの平均値からのずれを誤差とし、その値を統計的に発震点、受振点の補正值に分離して2次的な静補正を行った。

3.3.3 残差補正後速度解析

残差補正を施したデータに対し、定速度重合法および定速度スペクトル法による速度解析を行った。解析点は40CMP 毎(200m 毎)とし、21箇所において実施した。この結果の重合速度プロファイルを第17図に示す。

3.3.4 トレースバランス

接合CMP ギャザーの全トレースの振幅を揃えるため、トレース振幅の標準偏差値を用いて、ノンタイムヴァリエーション型のトレーススケールリングを行った。

3.3.5 接合CMP 重合

接合CMP ギャザーをCMP 重合し、海陸が接合された反射断面を作成した。

3.3.6 フィルタリング処理

CMP 重合後のデータに対して、S/N を向上させるため、5/8-60/70Hz の帯域通過フィルタ処理、コヒーレンシー強調フィルタ(FX 予測フィルタ)処理を行った。第18図にCMP 重合断面図を示す。また、後述のマイグレーション処理、深度変換処理は、この

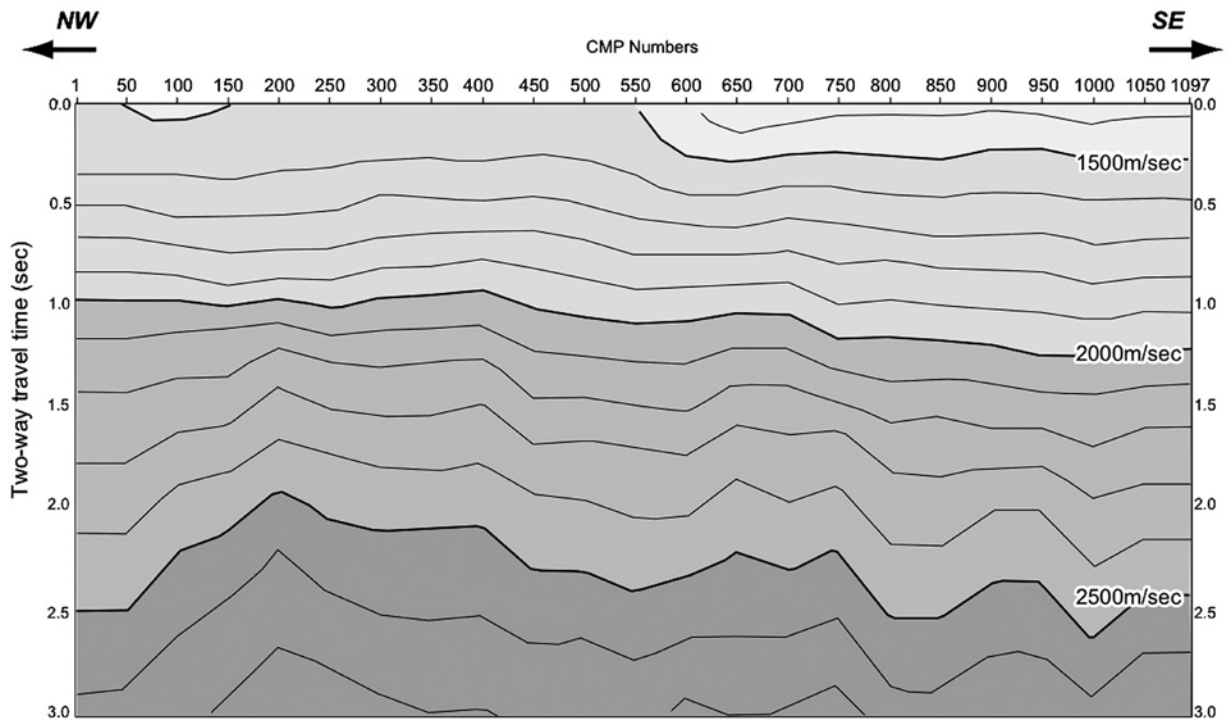
フィルタ処理を行う前のCMP 重合データに対して実施し、それぞれの処理後に、フィルタを適用することとした。

3.3.7 マイグレーション処理

傾斜した地層からの反射をその本来の位置に戻すため、マイグレーション処理を行った。今回は、キルヒホッフ時間マイグレーションを適用した。この手法は、浮動基準面からのマイグレーションが可能であり、また、重合測線の屈曲が補償される利点がある。パラメータは、オペレータ距離:2000m、マイグレーションが適用される最大傾斜角:45度である。速度情報には速度解析で得た重合速度プロファイルを滑らかにした速度プロファイルを用いた。また、その速度プロファイルに対するスケールファクターは、タイムヴァリエーションとし、往復走時0-1sec:100%、1-2sec:90%、2-3sec:80%とした。マイグレーション時間断面を第19図に示す。

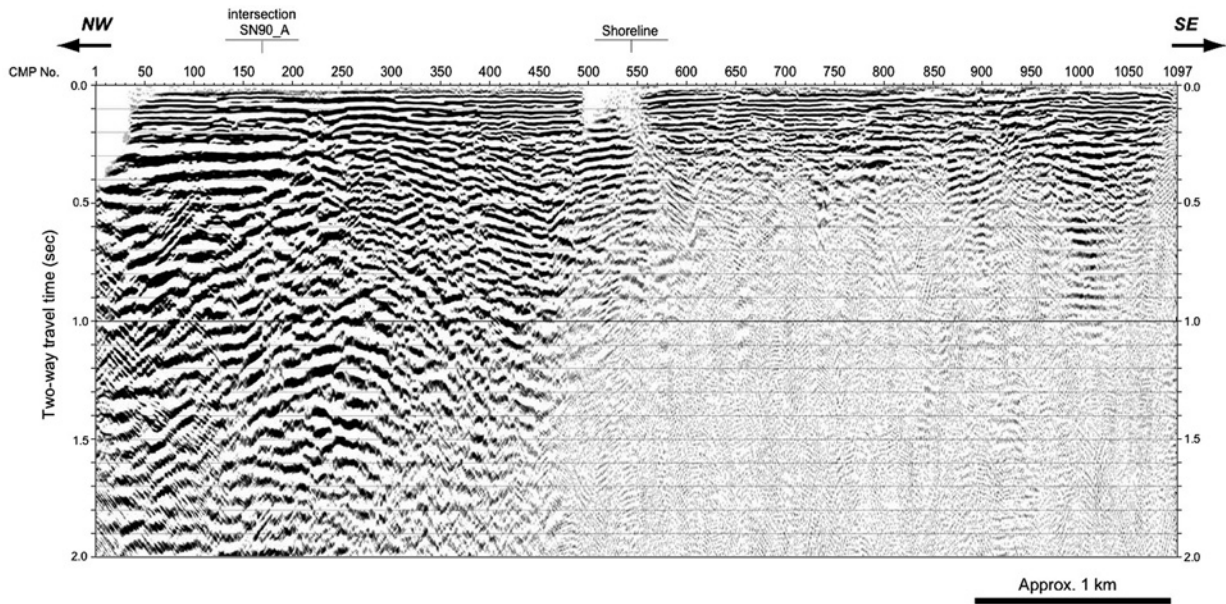
3.3.8 深度変換および標高補正

マイグレーション処理で用いたものと同じ速度プロファイルを用いて深度変換を行った。標高補正を行い、標高0mを基準にした深度断面図を第20図に示す。



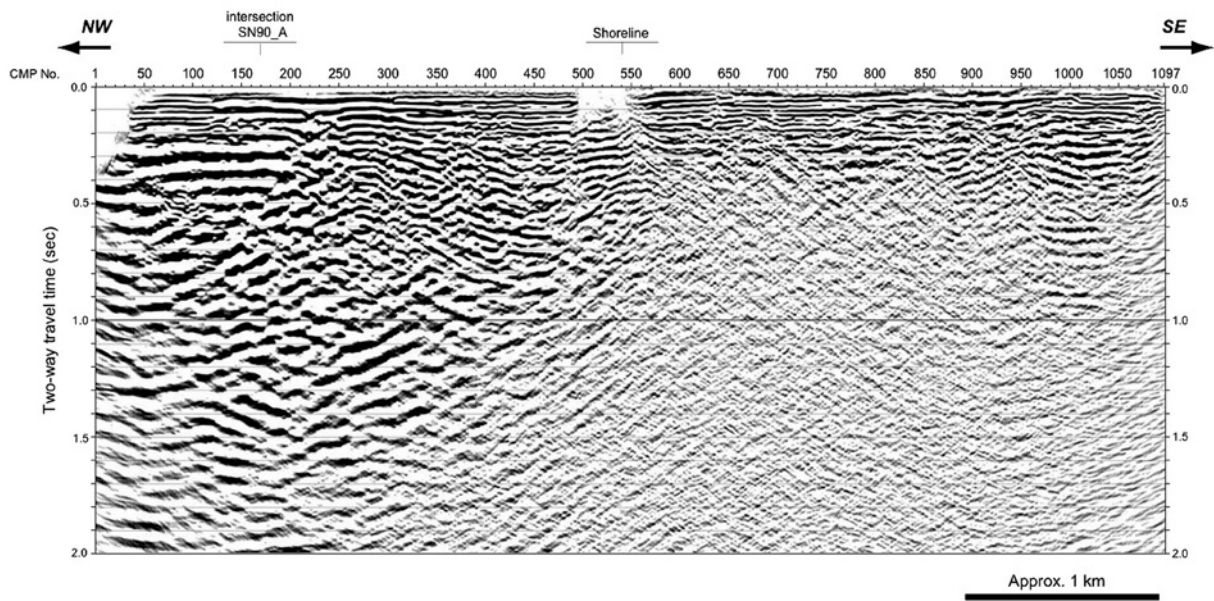
第17図 重合速度プロファイル。

Fig.17 RMS velocity profile determined by velocity analysis.



第 18 図 接合新潟 2009 CMP データの重ね時間断面.

Fig.18 Filtered stacked time section of the integrated Niigata 2009 seismic data.



第 19 図 接合新潟 2009 CMP データのマイグレーション時間断面.

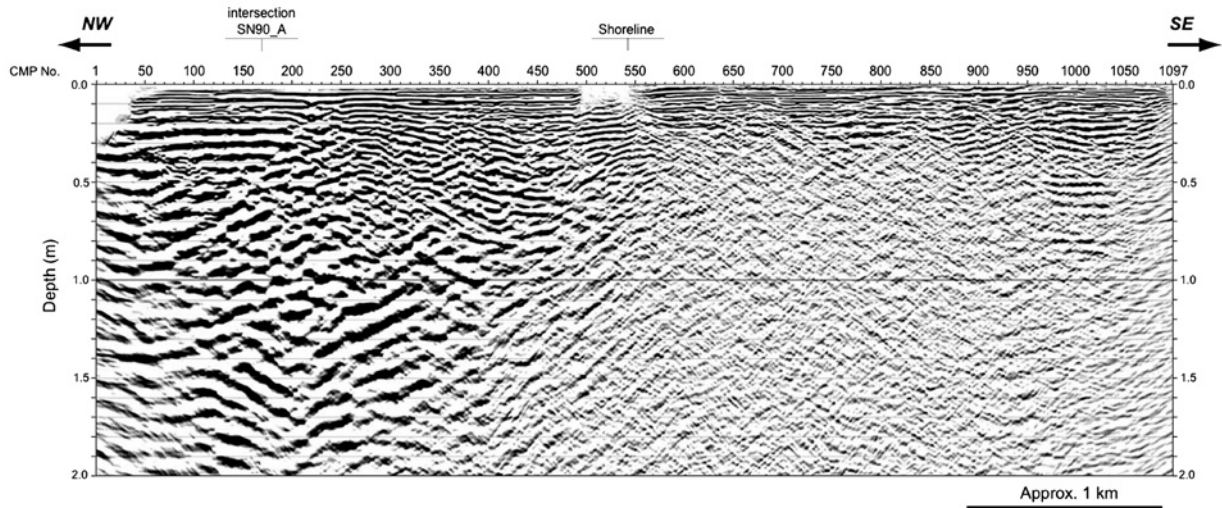
Fig.19 Migrated time section of the integrated Niigata 2009 seismic data.

4. 反射断面と今後の課題

海陸接合深度断面（第 20 図）では、海域において深度 2km 付近まで反射面が捉えられているが、陸域では明瞭な反射イベントがほぼ 500m 以浅に限られている。以下には、反射面の特徴について詳述する。

地表から深度 150–200m において、連続性の良

いほぼ水平な反射面群が、測線全般にわたって捉えられている。この反射面群は、出現深度や下位の反射面を不整合に覆うような特徴から完新統に対比される。その下位では、CMP230–450 において、やや低周波で東への見かけ傾斜 10–20 度の反射面群が見られる。この反射面群は CMP450 付近より南東側では西へ緩く傾斜するか、ほぼ水平な反射面へと連続する。



第 20 図 接合新潟 2009 CMP データの深度断面。

Fig.20 Depth section of the integrated Niigata 2009 seismic data with no vertical exaggeration.

断面の北西端からこの反射イベントの下限をなぞって CMP400 の深度 900m に至る領域には、振幅が強く周波数の低い反射面が認められ、上位の反射面群との違いが明瞭である。また、前述の CMP230-450 の傾斜イベントと特徴の類似する反射面は CMP650-1050 の深度 200-400m にも断片的に見られ、CMP700-750 付近の反射面は南東へ、CMP860-950 の反射面はやや北西へ傾斜する様子が捉えられている。なお、CMP350-390 および CMP450-550 は、初動の屈折波解析において表層第 1 層の基底が乱れていた範囲でもあるため、反射断面の地質解釈は、解釈は詳細な静補正を行った結果をもって行うこととする。

一方、新潟地域は従来の浅層反射法地震探査からも、急激な波の減衰が生じることが知られていた。その要因は、平野下に分布するとされるガス層 (G1 基底礫層) の影響とも考えられており、山口ほか(2009)は、国道 402 号線の探査において、四ツ郷屋以東で 200m 以深に反射面がほとんどイメージされないことを踏まえ、今回の実験にあたり発震エネルギーの増大や周波数などの工夫が必要であることを指摘した。そのため本探査では、陸上震源を小型から中型のバイブレータ (道幅の制限で大型バイブレータは使用できず) に変更し、周波数テストを行った結果を踏まえ、発震パラメータを決定した。しかし、結果的には記録が劇的に向上することはなく、CMP570 より南東側では、CMP970-1030 の深度 500-900m の水

平な反射イベントを除いては、500m 以深に反射イベントを確認することができなかった。データの取得段階で言えば、測線が未固結で乾燥した砂地であり、受振計や震源の地面とのカップリングが悪かったことも、記録向上に結びつかなかった原因の一つと思われる。また、この地域は砂丘が分布し、低速度層の層厚・標高の変化が著しい場所であるため、処理段階においては、静補正を詳細かつ適切に行うこと、リングングへの対処としてデコンボリューションのパラメータ設計を適切に行うことが重要である。

5. まとめ

新潟沿岸域の地質調査の一環として、本地域の主要地質構造の一つである長岡平野西縁断層帯北部を構成する角田山東縁断層の位置・形状を明らかにすることを目的に、海陸を接合する反射法地震探査 (新潟 2009 測線) を実施した。反射法地震探査測線は海域 3km、陸域 3km の全長約 6km で、海上発震および陸上発震を陸と海の受振ラインで同時に観測することによって、海陸が接合した反射断面を得た。その結果、海域では 2km 付近まで反射面が捉えられているが、陸域における波の減衰は著しく、明瞭な反射イベントは、ほぼ 500m 以浅に限られる。海域で捉えられた東傾斜の反射イベントは、地層の変形を表現している可能性が高いが、地質解釈は今後の再処理の結果を踏まえて検討していく。

謝辞

反射法地震探査を実施するにあたり、土木研究所・稲崎富士氏、産業技術総合研究所・地質情報研究部門宮地良典氏、新潟大学・卜部厚志准教授には、事前調査にご同行いただき測線の設計や探査諸元に対するご助言を頂いた。新潟市役所、新潟県巻農業振興部、海上保安庁第9管区海上保安部、新潟県漁業協同組合五十嵐浜支所、内野上新町・中権寺の住民の方々には、ご協力とご理解を頂いた。観測に際しては、(株)川崎地質、阪神コンサルタンツ(株)、村尾技研(株)のご協力を得た。以上の方々に記して感謝いたします。

文献

- 池田安隆・今泉俊文・東郷正美・平川一臣・宮内崇裕・佐藤比呂志編(2002) 第四紀逆断層アトラス。東京大学出版会, 254p.
- 稲崎富士・加野直巳(1999) 高分解能S波反射法及びサイズミックコーン貫入試験による角田・弥彦断層群の浅部構造調査。地質調査所速報, No. EQ/99/3 (平成10年度活断層・古地震研究調査概要報告書), 59-68.
- 地震調査研究推進本部(2004) 長岡平野西縁断層帯の長期評価について, http://www.jishin.go.jp/main/chousa/04oct_nagaoka/index.htm.
- 加野直巳・山口和雄・粟田泰夫(1999) 角田・弥彦断層群のP波反射法地震探査。地質調査所速報, No. EQ/99/3 (平成10年度活断層・古地震研究調査概要報告書), 47-58.
- 新潟県地質図改訂委員会(2000) 新潟県地質図(2000年版) 1:200,000 及び説明書。新潟県商工労働部商工振興課, 200p.
- 新潟古砂丘グループ(1974) 新潟砂丘と人類遺跡—新潟砂丘の形成史I—。第四紀研究, 13, 57-65.
- 石油公団(1991) 平成2年度国内・石油・天然ガス基礎調査 海上基礎物理探査「新潟～富山浅海域」調査報告書。28p.
- 石油公団(1992) 平成3年度国内・石油・天然ガス基礎調査 海上基礎物理探査「新潟～富山浅海域」調査報告書。29p.
- 山口和雄・住田達哉・加野直巳・大滝壽樹・伊藤 忍・横田俊之・横倉隆伸(2009) 角田山東縁断層の沿岸陸域における浅部地下構造。活断層・古