

馬追丘陵周辺の反射法データ解析

Processing of seismic reflection data across the Umaoi hill, Hokkaido

山口和雄^{1*}・阿部 進²・横倉隆伸¹・岡田真介³

Kazuo Yamaguchi^{1*}, Susumu Abe², Takanobu Yokokura¹ and Shinsuke Okada³

Abstract: We processed three seismic reflection data which extend the Yufutsu plain and the Umaoi hill, in the Eastern Boundary Fault Zone of the Ishikari Lowland, Hokkaido, by CRS (Common Reflection Surface) and MDRS (Multi-Dip Reflection Surface) methods. The seismic lines are Yufutsu line1 (19.2km long), Yufutsu line2 (8.8km long) and Naganuma85 line (17.5km long). As a result of MDRS methods, weak or discontinuous reflection events by conventional CMP stack became easy to recognize in the Umaoi hill and the deep parts of the Yufutsu plain. The inferred blind thrust can be traced in each seismic section. Especially the western edge of the thrust is clearly imaged in the Naganuma85 section. Folds are easily perceived in shallow parts of each seismic section around the Umaoi hill.

Keywords: Seismic reflection survey, data processing, CMP stack method, Common Reflection Surface, Multi-dip Reflection Surface, Eastern Boundary Fault Zone of Ishikari Lowland, Umaoi fault, Umaoi hill, thrust, subsurface structure

キーワード: 反射法地震探査, データ処理, CMP 重合法, CRS 法, MDRS 法, 石狩低地東縁断層帯, 馬追断層, 馬追丘陵, 衝上断層, 地下構造

1. はじめに

石狩低地東縁断層帯は、石狩平野とその東側に分布する岩見沢丘陵、栗沢丘陵、馬追丘陵との境界付近に位置する活断層帯である（地震調査研究推進本部地震調査委員会，2010）。本断層帯の主要断層は地下に伏在する東側隆起の衝上断層とされ、地表で確認される西側隆起で東側を向いた低断層崖（泉郷断層、馬追断層、嶮淵断層等）は、主要断層から副次的に派生したバックスラストと考えられている（池田ほか，2002；産業技術総合研究所，2007；地震調査研究推進本部，2010）。この伏在する衝上断層は日高衝突帯一前縁褶曲・衝上断層帯の最前縁部に相当する（伊藤，2000）。栗田・横井（2000）の地質断面図には、馬追丘陵周辺の地下に東上がりの低角な衝上断層が伏在し、断層の先端が丘陵より数km西方の地下に達している様子が描かれている。馬追丘陵西縁に位置する馬追断層等の形態を明確にし、日高衝突帯一前縁褶

曲・衝上断層帯の最前縁部とみなされる石狩低地東縁断層帯の解釈資料を提供することを目的として、馬追丘陵を横切る新規反射法地震探査データの解析および既存データの再解析を実施した。解析の対象とした調査測線は、横倉ほか（2011）の勇払測線 1 と勇払測線 2、浅野ほか（1989）の長沼 85 測線の計 3 本の測線である。いずれの測線も、まず標準処理として通常の CMP 重合法を適用し、その後、特殊処理として CRS(Common Reflection Surface) 法・MDRS(Multi-Dip Reflection Surface) 法を適用した。本報では、標準処理・特殊処理の概要を述べ、それぞれの結果を提示し地下構造について考察する。

2. 反射法地震探査データ

第 1 図と第 2 図に今回対象とした 3 本の測線位置を示す。測線沿いの地形は、いずれも西側部分は平野部、東側部分は丘陵である。

* 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)

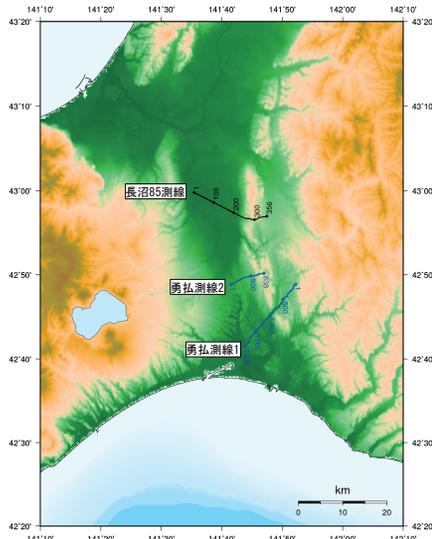
² (株) 地球科学総合研究所 (JGI, Inc.)

³ 東北大学 (Tohoku University)

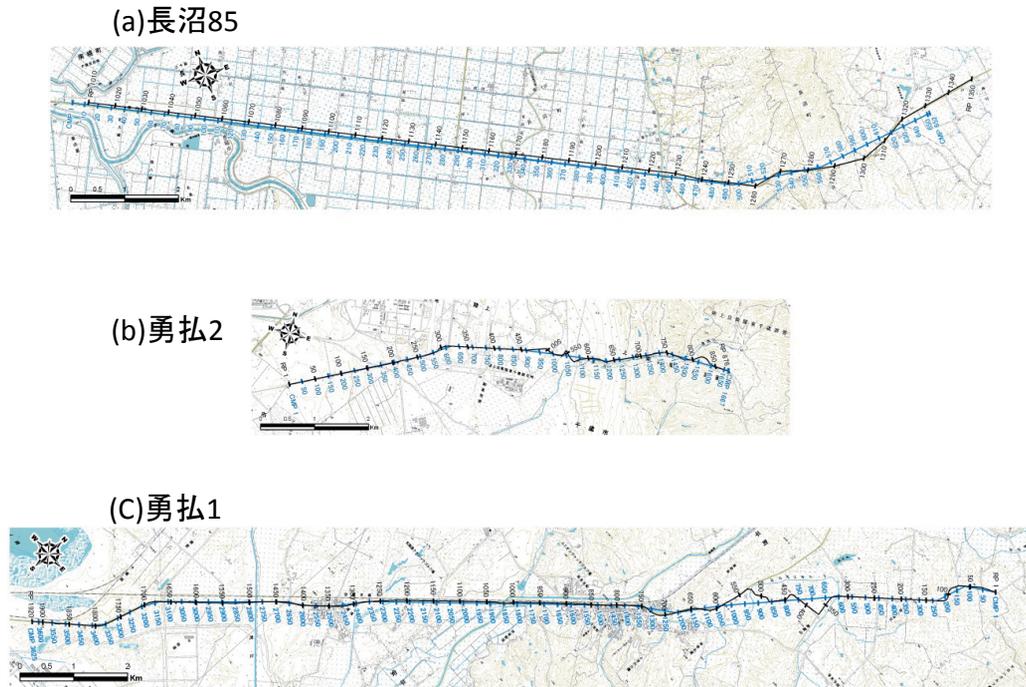
勇払測線 1 は、勇払平野の苫小牧市柏原から国道 234 号線に沿って馬追丘陵南部を横断し安平町早来緑丘の丘陵部に至る 19.2km の測線である。勇払測線 2 は、ほとんどが陸上自衛隊東千歳駐屯地・演習場内にあり、千歳市柏台から馬追丘陵に至る 8.8km の測線

である。この 2 本の測線の調査は、平成 22 年度産業技術総合研究所「沿岸域の地質・活断層調査」の一環として実施され、これまでに予備的な CMP 重合時間断面まで作成されている（横倉ほか，2011）。長沼 85 測線は、幌向原野の長沼町から始まり、国道 274 号線に沿って馬追丘陵を越え由仁町に至る 17.5km の測線である。この調査は、昭和 60 年度文部省自然災害特別研究「地震動予測精密化のための地下深部構造の研究」において実施され、CMP 重合時間断面、マイグレーション断面、深度断面まで作成された（浅野ほか，1989）。

第 1 表にそれぞれの調査仕様を示す。勇払測線 1 と勇払測線 2 は、エンドショット発震で展開長 2.4km（240 チャンネル，受振点間隔 10m）の移動展開方式でデータ取得された。10m 間隔で稠密に発震しオフセット分布に偏りはなく標準 Fold 数 120 である。長沼 85 測線は、幌向原野ではエンドショット発震，馬追丘陵では対称中点発震であり，展開長 5 ～ 5.4km（96 チャンネル，受振点間隔 50m）の移動展開方式でデータ取得された。標準 100m 間隔で発



第 1 図 測線位置図。
Fig.1 Location map of seismic lines.



第 2 図 各測線の詳細位置図。
(a) 長沼 85 測線，(b) 勇払測線 2，(c) 勇払測線 1。
黒：受振点・発震点，青：CMP/MDRS 重合測線と CMP 番号。基図：国土地理院 2 万 5 千分の 1 地形図「北広島・南長沼・三川・千歳・追分・ウトナイ湖・遠浅・早来・幌内」。

Fig.2 Detailed location map of each seismic line.
(a) Naganuma85 line, (b) Yufutsu line2, (c) Yufutsu line1.
Black lines and numbers: receiver and shot points, blue lines and numbers: CMP/MDRS line with CMP numbers. Geographical maps: Kitahiroshima, Minaminaganuma, Mikawa, Chitose, Oiwake, Utonaiko, Toasa, Hayakita, Horonai (1:25,000 scale) by Geospatial Information Authority of Japan.

第1表 データ取得仕様一覧。
Table 1 Data acquisition specifications.

	測線名	勇払測線1	勇払測線2	長沼85測線
発震系	発震種別	バイブレータ発震	バイブレータ発震	バイブレータ発震
	測線長	19.19km	8.75km	17.45km
	震源	Y-2400	Y-2400	Y-900LF
	バイブレータ台数	1台	1台	4台
	標準発震点間隔	10m	10m	100m
	スイープ長	16秒	16秒	20秒
	発震回数/発震点	4回	4回	30回
	スイープ周波数	10~100Hz	10~100Hz	8~43Hz
受振系	総発震点数	1861	869	131
	受振点間隔	10m	10m	50m
	受振器種別	SG-10	SG-10	OYO McSEIS 3
	受振器数/受振点	6	6	24
	展開パターン	ロールアロング, エンドショット	ロールアロング, エンドショット	エンドオン, スプレッド
	受振測線長	19.19km	8.75km	17.45km
記録系	受振点数	1920	876	350
	有線テレメトリー	DSS-12	DSS-12	GUS-BUS
	サンプルレート	2ms	2ms	4ms
	チャンネル数	240ch	240ch	96ch
	記録長	20秒	20秒	32秒

震し標準 Fold 数 24 である。いずれの測線も馬追丘陵付近での最大オフセットは 2.4km ないし 2.7km であるため、石狩低地東縁断層帯の深部構造把握のためには広角領域のオフセット距離がやや不足している可能性が考えられる。

3. データ処理

標準処理は、勇払測線 1 と勇払測線 2 に対しては予備的に作成した CMP 重合時間断面（横倉ほか，2011）を参照し、また、長沼 85 測線に対しては既往の処理フロー及びパラメータ（浅野ほか，1989）を参照・再評価した上で、それぞれデータ品質及びノイズ状況を勘案して CMP 重合法の処理フロー及びパラメータの最適化を図った。

特殊処理として CRS 処理・MDRS 処理を適用した。CRS 法 (Jager et al., 2001; Mann et al., 2007; Schleicher et al., 1993) は CMP に属するトレースだけではなく、その近傍の CMP を集積したいわゆる Super Gather を重合処理することで従来の CMP 重合法と比べて飛躍的に高い重合数を得て、反射波の抽出と品質改善を図る手法である。MDRS 法 (Aoki et al., 2010) は複数の交差する傾斜を持つ反射面（コンフリクティング・ディップ）のイメージングに対応可能な改良型 CRS 法である。これらの処理を石狩低地東

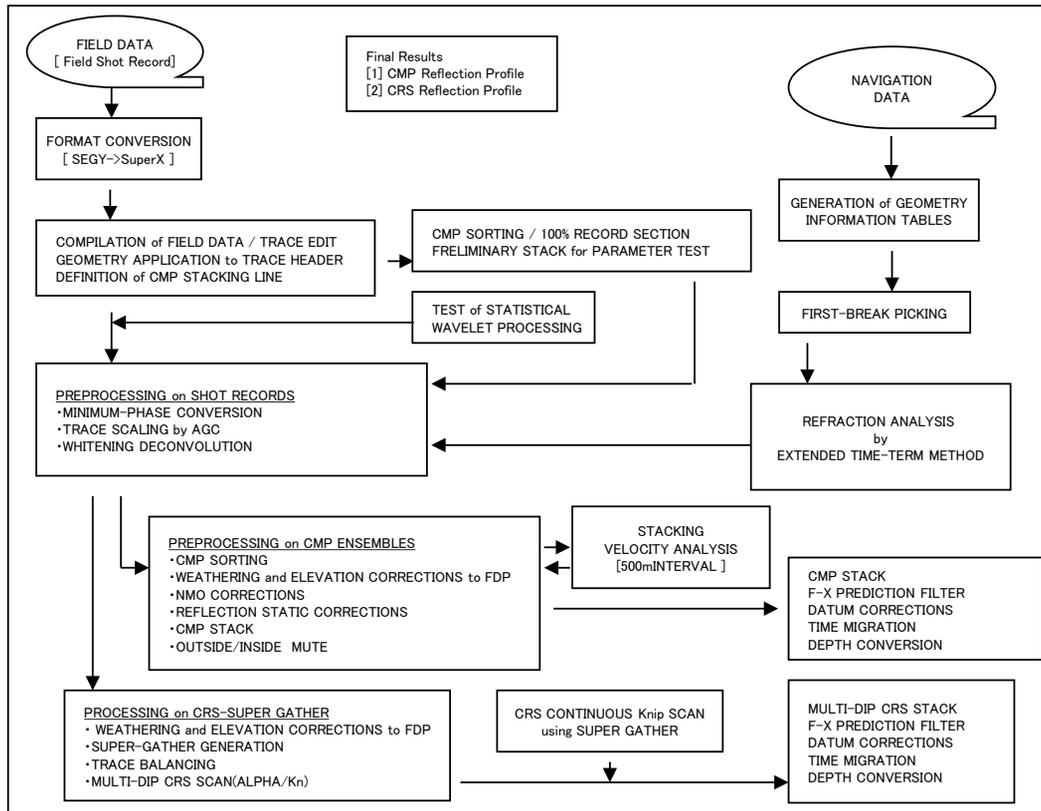
縁断層帯周辺の反射法データに適用した事例（山口ほか，2011，2012）では、従来認識が困難だった馬追丘陵区間の褶曲構造・衝上断層や勇払平野部の深度 8000m に至る傾斜反射面のイメージングに成功している。

第 3 図に標準処理・特殊処理の処理フローを、第 2 表にデータ解析パラメータをそれぞれ示す。いずれも山口ほか（2011，2012）に準じており、詳細はそちらを参照されたい。

第 4 図～第 6 図に各測線の標準処理の CMP 重合時間断面、特殊処理の MDRS 重合時間断面図、MDRS 重合後時間マイグレーション断面図、MDRS 深度断面図を示す。

4. 考察

国安ほか（2004）によれば、調査地西側の平野部では地下浅部の構造変形が相対的に乏しく深部は伸張性構造群が地質構造を支配し、一方、馬追丘陵部は、浅部はスラストなどの圧縮性構造が発達し深部は正断層による伸張性構造という遷移域に相当する。いずれの測線も馬追丘陵の区間は、従来の CMP 重合法による標準処理では有意な反射波列の抽出は困難であるが、MDRS 処理により反射面のイメージング結果は大きく改善され、褶曲構造あるいは衝上断層などの反射



第 3 図 データ解析フローチャート。
Fig.3 Data processing flow.

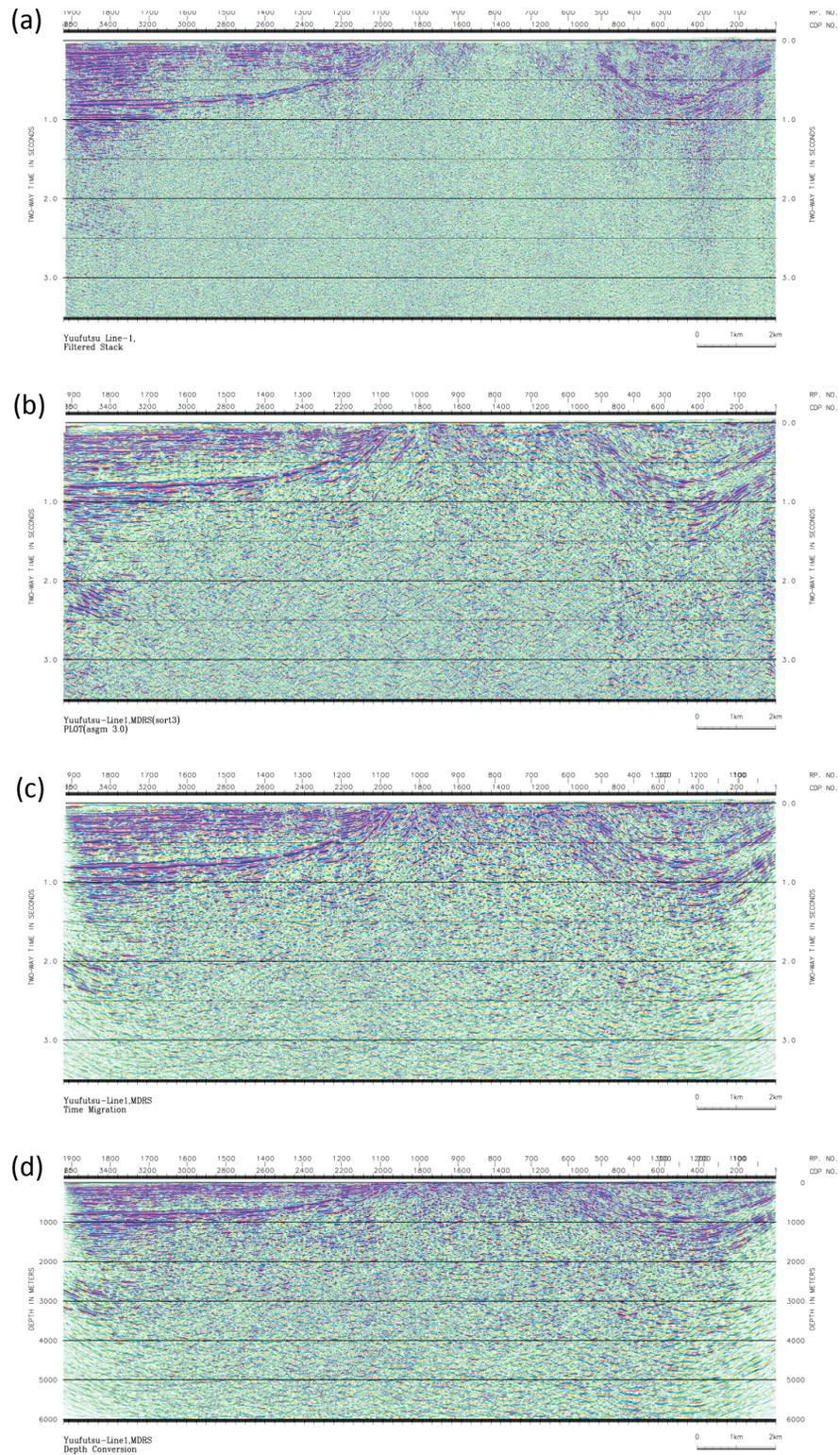
面が認識できるようになった。丘陵区間以外の部分は、標準処理ではわずかに捉えられていたものの明瞭ではなかった反射面（特に深部）が MDRS 処理により明瞭になった。特徴的な反射面を MDRS 深度断面上でトレースした（第 7 図）。

具体的な改善箇所は以下である。勇払測線 1 では、馬追丘陵の東方 CMP500 付近を軸とする向斜構造が走時 1.5s 付近まで明瞭に捉えられ、馬追丘陵区間 CMP1200 ~ 1800 は浅部から走時 1.5s 付近に断片的ではあるが東傾斜の反射波列が見られる。勇払平野部では CMP1800 ~ 2100 で走時 0.7s 以浅の西に急傾斜するイベント、CMP2000 ~ 2800 の走時 1s ~ 1.5s のほぼ水平なイベント、CMP3200 以西走時 2s ~ 2.5s の東傾斜のイベントなどが明瞭になった。勇払測線 2 では、勇払平野部の CMP1000 以西走時 0.8s ~ 1.5s の西傾斜のイベント、CMP800 走時 0.5s 付近で傾斜変化するイベントが鮮明にイメージされた。CMP500 ~ CMP1400 の走時 2s ~ 2.5s 付近に水平あるいはやや緩い東傾斜のイベントが断片的に認識できる。馬追丘陵の区間では、CMP1400 以東の浅部から走時 0.5s 付近に東傾斜のイベントが見られる。長沼 85 測線では、幌向原野では CMP250

以西走時 3.5s ~ 4.5s にもイベントがイメージされ、幌向原野と馬追丘陵の遷移部 CMP350 ~ 500 走時 2.5s ~ 4.5s のイベントが強調された。馬追丘陵区間 CMP450 以東は、東傾斜の構造が捉えられた。

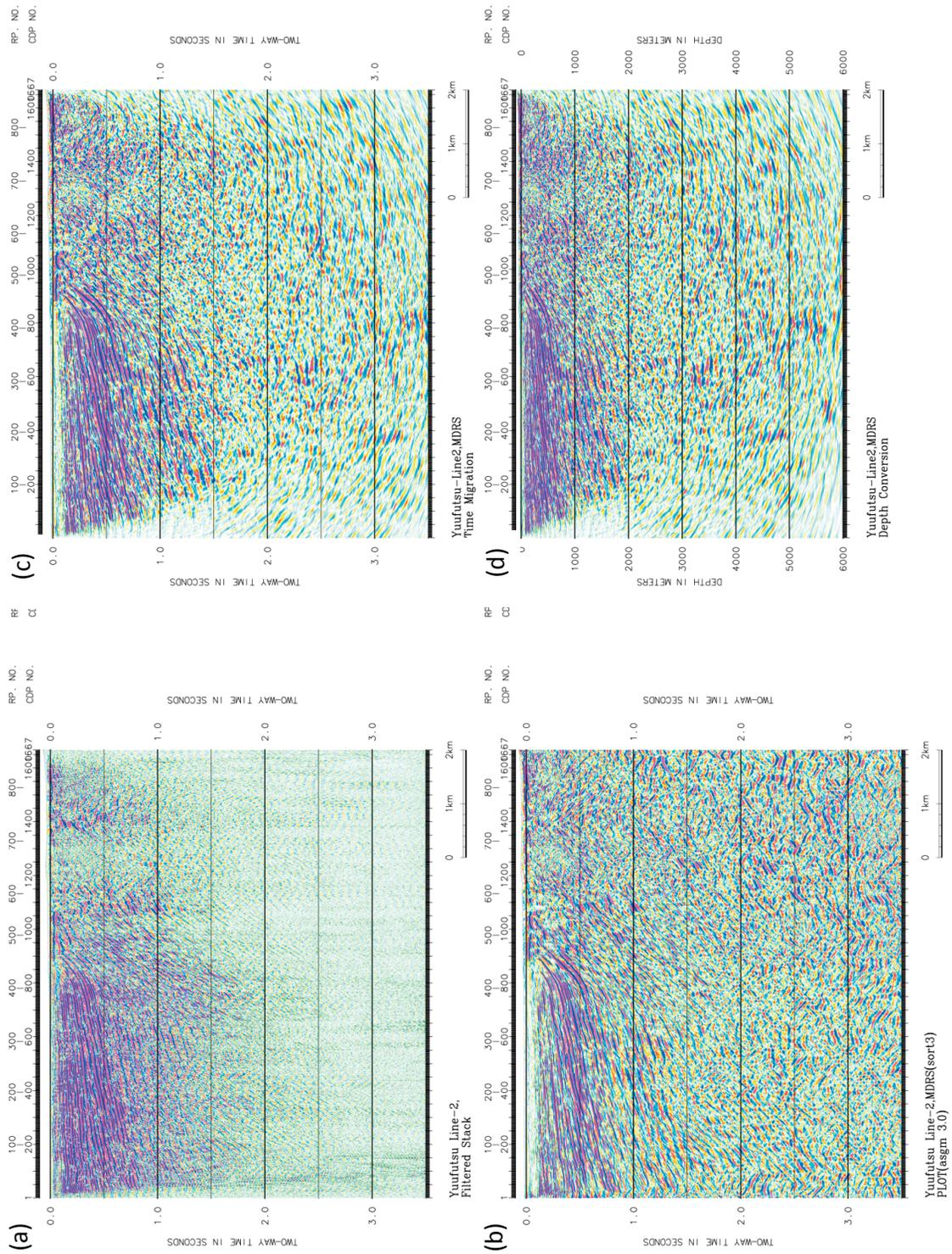
既存の反射断面地質解釈（栗田・横井，2000；北海道，2001；産業技術総合研究所，2007）を参照しつつ、長沼 85 測線の MDRS 処理を適用した反射断面を見ると、反射面のトレースとして第 7 (a) 図のような衝上断層先端の楔状の構造を想定することが容易になった。他の 2 測線でも深度 3000m 付近に断片的な反射イベントがイメージされ衝上断層を捉えたものと考えてもよいかもしれない。

今後の課題として、衝上断層の形状及び深度に関する決定的な解釈に資するために、CRS パラメータスキャン範囲を規定する基準速度の修正、CRS 速度による重合前深度マイグレーション適用等の改善の余地は残されていると考えられる。MDRS 処理は弱振幅の真の反射面を強調する一方で、疑似反射面も生成する。地質解釈に際して、MDRS 処理断面と通常の CMP 重合断面を対比し真の反射面の見極めが重要である。また、浅部は CMP 重合断面の方が高分解能のようである。



第4図 勇払測線1の各種断面図。
 (a) CMP 重合時間断面図, (b) MDRS 重合時間断面図, (c) MDRS 重合後時間マイグレーション断面図, (d) MDRS 深度断面図。

Fig.4 Yufutsu line1 seismic sections.
 (a) CMP stacked time section, (b) MDRS time section, (c) MDRS migration time section, (d) MDRS depth section.

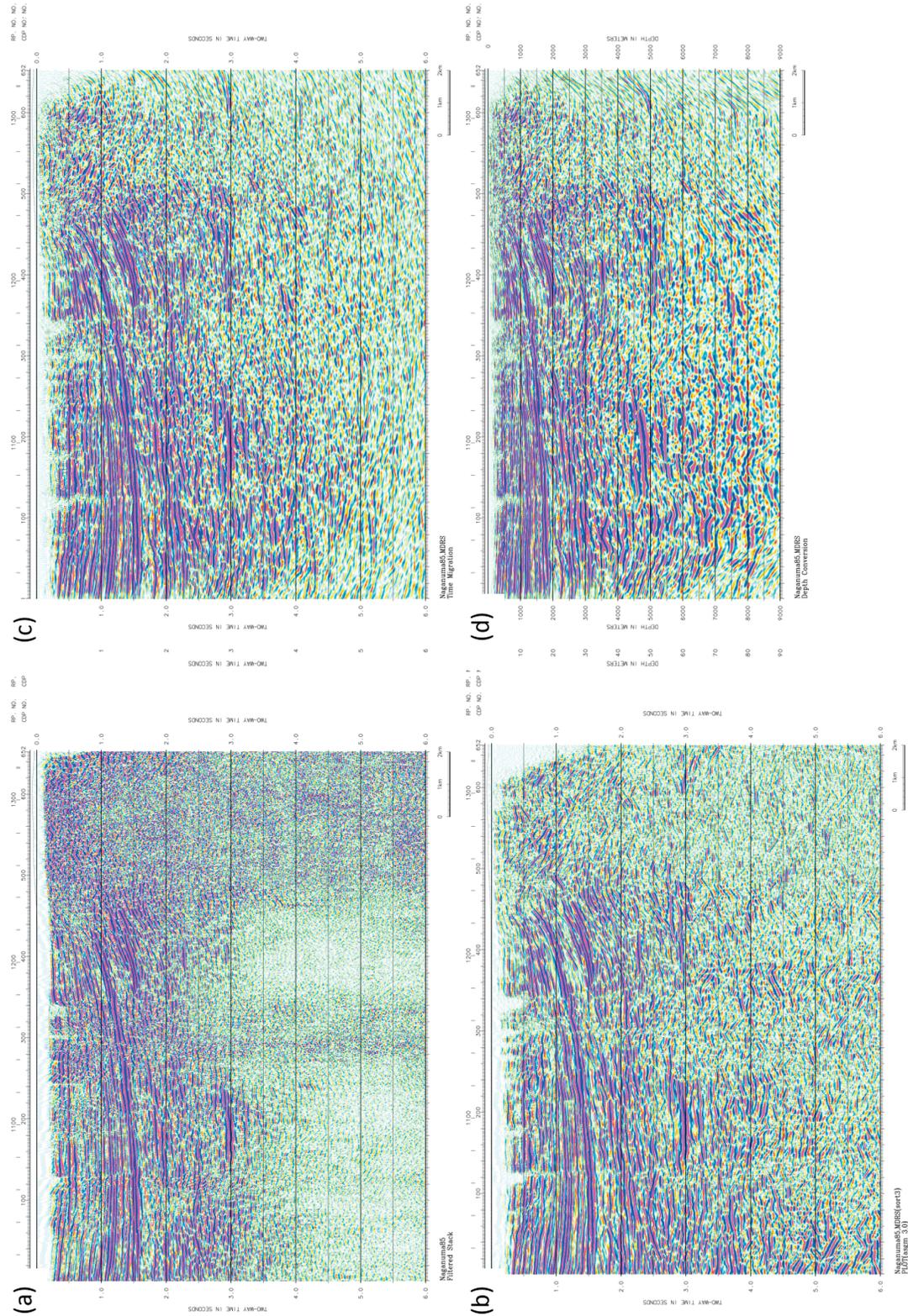


第 5 図 勇払測線 2 の各種断面図。

(a) CMP 重合時間断面図, (b) MDRS 重合時間断面図, (c) MDRS 重合後時間マイグレーション断面図, (d) MDRS 深度断面図。

Fig.5 Yuufutsu line2 seismic sections.

(a) CMP stacked time section, (b) MDRS time section, (c) MDRS migration time section, (d) MDRS depth section.



第 6 図 長沼 85 測線の各種断面図。

(a) CMP 重合時間断面図, (b) MDRS 重合時間断面図, (c) MDRS 重合後時間マイグレーション断面図, (d) MDRS 深度断面図。

Fig.6 Naganuma85 line seismic sections.

(a) stacked time section, (b) MDRS time section, (c) MDRS migration time section, (d) MDRS depth section.

第 2 表 データ解析パラメータ.

Table 2 Data processing parameters.

測線名		勇払測線1, 勇払測線2		長沼85測線	
解析方法		標準CMP重合	特殊MDRS	標準CMP重合	特殊MDRS
CMP編集	CMP間隔	5m	5m	25m	25m
振幅補償	AGC適用ゲート長	600msec	600msec	600msec	600msec
デコンボリューション	適用領域	共通発震記録	共通発震記録	CMP ENSEMBLES	CMP ENSEMBLES
	ウェーブレット位相	最小位相	最小位相	最小位相	最小位相
	予測距離	2msec	2msec	2msec	2msec
	設計ゲート	3000msec	3000msec	3000msec	3000msec
	オペレータ長	300msec	300msec	300msec	300msec
	プリホワイトニングファクター	5%	5%	5%	5%
速度解析	解析内容	重合速度	CRS Knip Search	重合速度	CRS Knip Search
	解析点間隔	500m	Continuous	500m	Continuous
CMP重合	アルゴリズム	CMP Stack	CRS Scan + Multi-dip CRS	CMP Stack	CRS Scan + Multi-dip CRS Stack
	NMOストレッチファクター	5	-	5	5
	重合前振幅調整	AGC 300msec	AGC 1000msec	AGC 300msec	AGC 300msec
	標準重合数	120	41CMPs × 120Folds	24	41CMPs
周波数-空間領域フィルタ	予測フィルタオペレータ長	3traces	3traces	3traces	3traces
	予測フィルタゲート長	30traces	30traces	30traces	30traces
	予測フィルタ時間ゲート長	1000msec	1000msec	1000msec	1000msec
時間マイグレーション	アルゴリズム	F-D Time Migration	F-D Time Migration	F-D Time Migration	F-D Time Migration
	最大傾斜角度	45degree	45degree	45degree	45degree

5. おわりに

馬追丘陵を通る 3 測線の反射法地震探査データに対して、通常の CMP 重合法と、石狩低地東縁断層帯の形状および深部地下構造のイメージング向上を目的とする特殊処理（CRS 処理・MDRS 処理）を適用した。特殊処理の結果、幌向原野・勇払平野の地下深部構造および馬追丘陵区間のイメージング結果は大きく改善され、衝上断層の先端部と考えられる楔状構造の想定が容易になった。課題として、CRS 解析パラメータの検討、CRS 速度による重合前深度マイグレーション適用等の改善の余地は残されている。

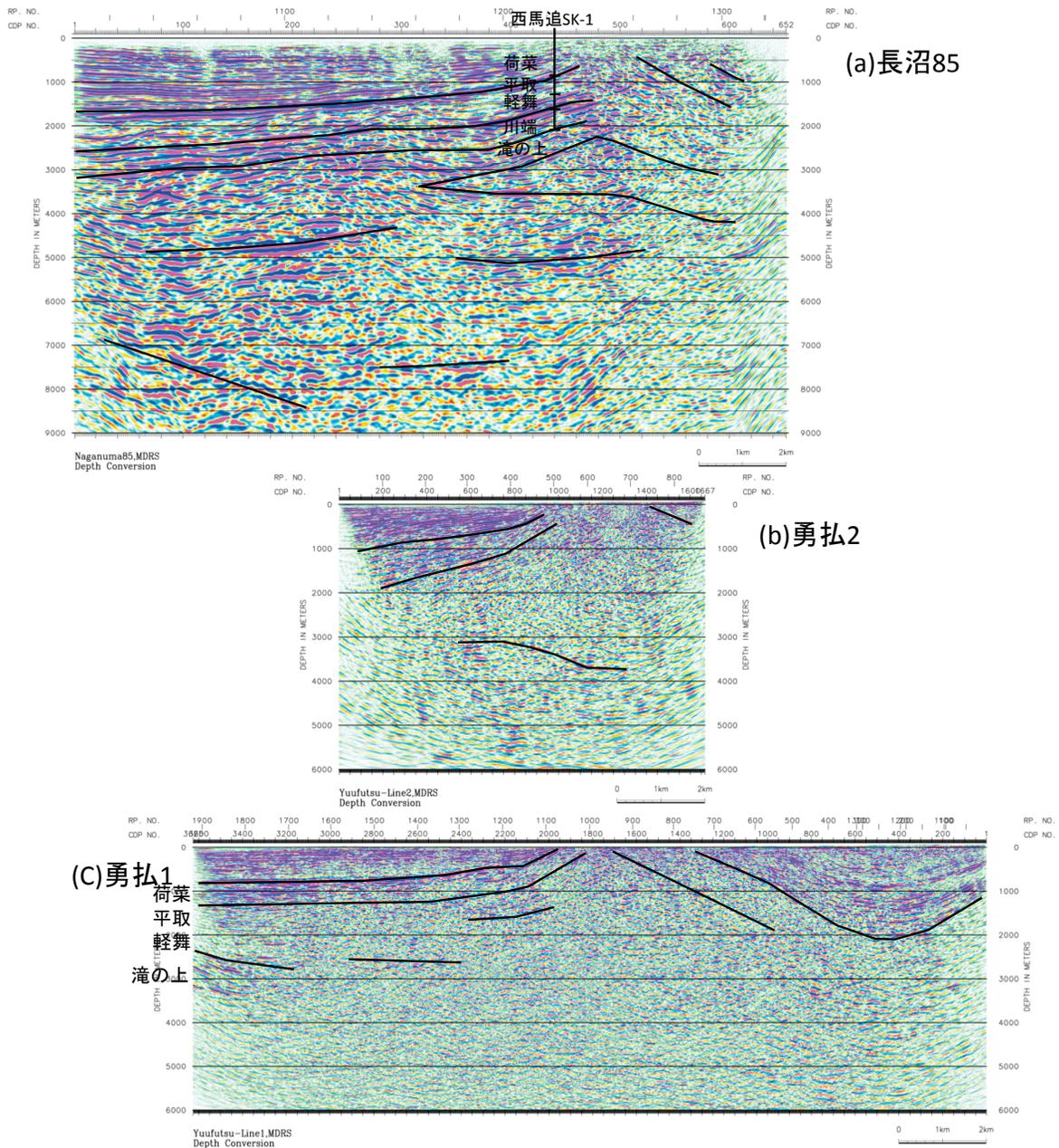
本研究は、産業技術総合研究所と（株）地球科学総合研究所の共同研究として実施した。データ再解析業務では、（株）地球科学総合研究所の地震探査データ解析ソフトウェア SuperX を使用した。

謝辞

本研究を進めるにあたり、日本大学の吉井敏尅教授及び東京大学地震研究所の岩崎貴哉教授から、「長沼 85」反射法地震探査データの再解析及びそれを利用した研究成果の公開に関してご快諾をいただきました。心からの謝意を表します。

文献

- Aoki, N., Narahara, S., Takahashi, A., and Nishiki, T. (2010) Imaging of conflicting dipping events by the multi-dip reflection surfaces method, SEG Expanded Abstract.
- 浅野周三（研究代表）（1989）地震動予測精密化のための地下深部構造の研究，文部省科学研究費自然災害特別研究成果，No.A-63-3.
- 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.
- 伊藤谷生（2000）日高衝突帯-前縁褶曲・衝上断層帯の地殻構造，石油技術協会誌，65，103-109.
- 北海道（2001）北海道活断層図 No.3 石狩低地東縁断層帯 活断層図とその解説，157p.
- Jager, R., Mann, J., Hocht, G. and Hubral, P. (2001) Common-reflection-surface stack: Image and attributes, Geophysics, 66, 1, 97-109.
- 地震調査研究推進本部地震調査委員会（2010）石狩低地東縁断層帯の評価（一部改訂），34p.
- 国安 稔・山田泰広（2004）中央北海道南部地域の深部構造，石油技術協会誌，69，2，131-144.
- 栗田裕司・横井 悟（2000）中央北海道南部における新生代テクトニクスの変遷と油田構造形成，



第7図 改善された反射面。

(a) 長沼85 測線, (b) 勇払測線2, (c) 勇払測線1。 いずれも MDRS 深度断面を使用。

(a) の西馬追 SK-1 の地層区分は浅野ほか (1989) による。(c) 左端の地層区分は石油公団 (1996) の SI95-3 測線からの推定。

Fig.7 Improved reflectors.

(a) Naganuma85 line, (b) Yufutsu line2, (c) Yufutsu line1.

Geologic strata of NishiumaokiKS-1 of (a) is after Asano et al.(1989). Geologic strata at the left edge of (c) is inferred from SI95-3 (JNOC,1996).

石油技術協会誌, 65, 1, 58-70.

No.H18-8, 35p.

Mann, J., Schleicher, J. and Hertweck, T. (2007) CRS Stacking - A Simplified Explanation, in Extended abstracts, 69th Conf. Eur. Assn. Geosci. Eng. B044.

Schleicher, J., Tygel, M. and Hubral, P. (1993) Parabolic and hyperbolic paraxial twopoint traveltimes in 3d media, Geophysical Prospecting, 41, 495-5.

産業技術総合研究所 (2007) 石狩低地東縁断層帯の活動性および活動履歴調査「基盤的調査観測対象断層帯の追加・補完調査」成果報告書

石油公団 (1996) 平成7年度国内石油・天然ガス基礎調査海上基礎物理探査「胆振沖浅海域」調査報告書. 35p.

山口和雄・横倉隆伸・岡田真介（2011）苫小牧周辺の反射法地震探査データ再処理，平成 22 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.56，93-111.

山口和雄・阿部 進・横倉隆伸・岡田真介（2012）MDRS 法による苫小牧 86 測線反射法データの再解析，平成 23 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.59，75-87.

横倉隆伸・山口和雄・岡田真介（2011）石狩低地東縁断層帯における反射法地震探査，平成 22 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.56，71-84.