

MDRS 法による苫小牧 86 測線反射法データの再解析

Re-processing of Tomakomai86 seismic reflection data by MDRS method

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 re-processed a 15km long seismic reflection data in the southern area of the Eastern Boundary Fault Zone of the Ishikari Lowland, Hokkaido, which had been acquired and processed in 1986. The data was pre-processed by the standard CMP stack method of nowadays with reexamining parameters and some additional menus, then processed by CRS (Common Reflection Surface) and MDRS (Multi-Dip Reflection Surface) methods. Finally, we obtained newly stacked time section, time migrated section, depth section by standard CMP method, and those by MDRS method. Data quality is remarkably improved in shallower part than 2s in two way time on the newly CMP stacked section and deeper part than 2s in two way time on the MDRS section, respectively. In particular, apparently east dipping events have good continuities and strength between 2s at the west edge of the section and 5s at the east edge. They can be correlated to the Ishikari formation on the basis of well logging data and velocity analysis near the seismic survey line.

Keywords: Seismic reflection survey, data processing, CMP stack method, CRS, MDRS, Eastern Boundary Fault Zone of Ishikari Lowland, subsurface structure

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

1. はじめに

北海道苫小牧付近の陸域の既存反射法地震探査データ(浅野ほか(1989)の「苫小牧 86」測線)を再解析した。解析目的は、石狩低地東縁断層帯の最前縁部(西縁)に関して、既存データの再解析を通じて、断層帯の南部から海域への延長形態を明確にし地質解釈資料を提示することである。

再解析では、まず、現在の標準的な CMP 重合法を適用した(標準処理)。標準処理は、既往の処理フロー及びパラメータを参照・再評価した上で、データ品質及びノイズ状況を勘案し、処理フロー及びパラメータの最適化を図った。その後、標準処理後の CMP アンサンブルを入力として、特殊処理である CRS 法・MDRS 法を適用した。

反射法地震探査のデータ処理技術は時代と共に進歩し、調査時期が古いデータでも、最新のデータ処理技

術の適用により、地下構造断面図の改善を図ることが可能である。CRS 法(Common Reflection Surface Stack, 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(Multi-Dip Reflection Surfaces, Aoki et al. (2010))は複数の交差する傾斜を持つ反射面のイメージングに対応可能な改良型 CRS 法である。

本報では、MDRS 法を主体としたデータ再解析の詳細を述べ、再解析の標準処理と MDRS 法による断面図を比較し、MDRS 法によって改善された箇所を指摘する。また、参考のために 1986 年のデータ処理との対比結果を提示する。

* 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)

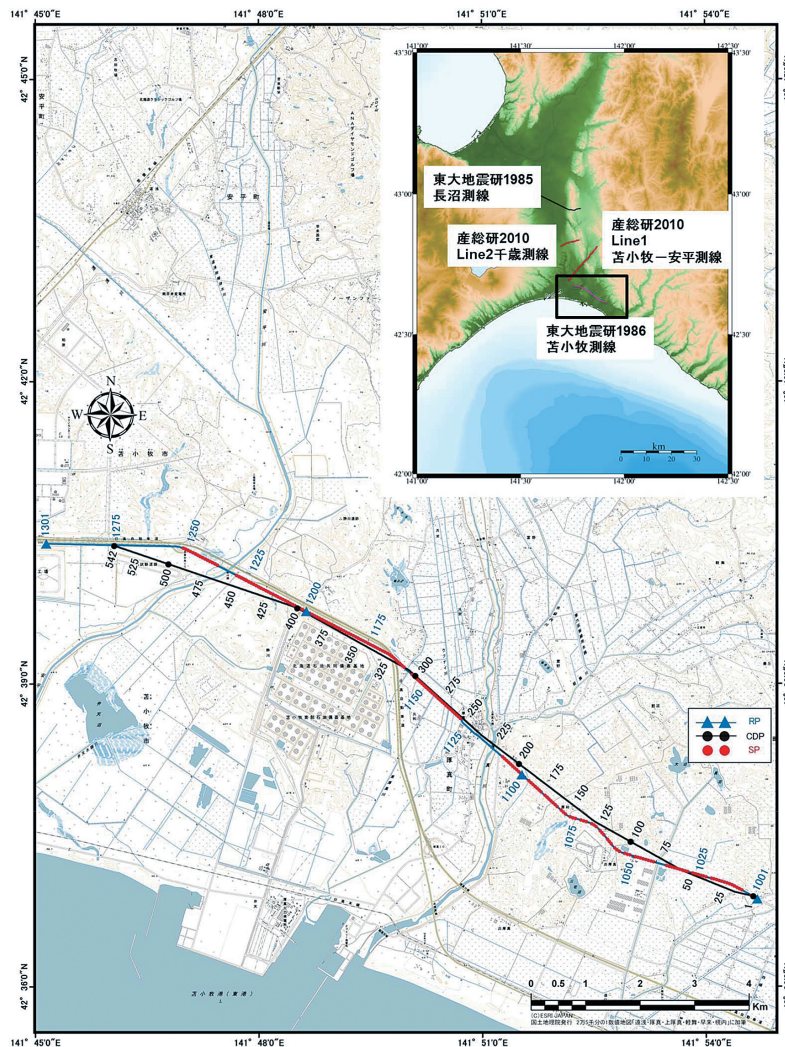
2. 再解析データ

対象としたデータは、文部省による昭和 61 年度自然災害特別研究「地震動予測精密化のための地下深部構造の研究」(浅野ほか(1989))において取得された「苫小牧 86」測線の反射法データである。これは東京大学地震研究所の浅野周三教授(当時)を中心とするグループが研究主体となって行われた調査である。調査は、前年度(昭和 60 年)に実施された「長沼 85」測線調査と共に、我が国で初めて取得されたバイプロサイス反射法による学術研究目的の深部地殻構造探査に該当する。第 1 図に、受振点、発震点、CMP の位置を示す。調査測線は、道道 1046 号鶴川・厚真線と道道 259 号上厚真 - 苫小牧線を通る長さ

14.85km の北西 - 南東方向のほぼ平坦な測線である。測線周辺地域の多くは耕作地、牧場、荒地であり、厚真町上厚真地区には民家及び工場が点在する。発震点は総て公道上に位置し、測線の東側約 1/3 区間が未舗装道路、残りの 2/3 区間は舗装道路である。受振機材はほぼ道路沿いに配置された。表層地質は最上部が火山灰層で、その下部に層厚変化を伴う草炭層が分布している。第 1 表にデータ取得仕様一覧を示す。

3. データ再解析

第 2 図に再解析フローチャートを、第 2 表に既往データ解析と再解析のパラメーター一覧を示す。



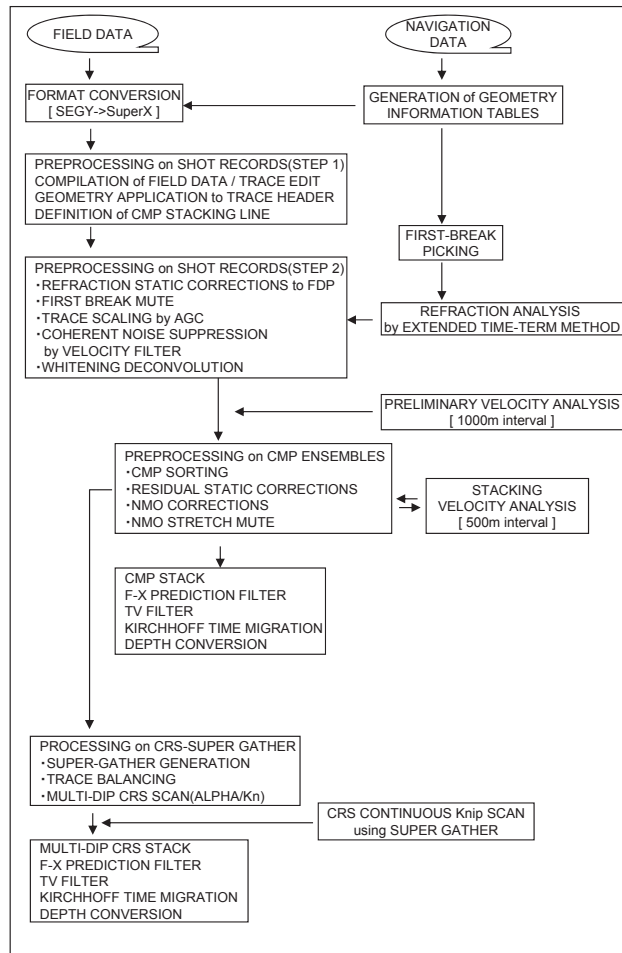
第 1 図 苫小牧 86 測線の位置図。青：受振点、赤：発震点、黒：CMP/MDRS 重合測線と CMP 番号。
基図：国土地理院 2 万 5 千分の 1 数値地図「遠浅・厚真・上厚真・軽舞・早来・幌内」。

Fig.1 Location map of the Tomakomai 86 seismic reflection survey line. Blue line: receiver, red line: source, black line: CMP/MDRS line with CMP numbers. Basemap: Toasa, Atsuma, Kamiatsuma, Karumai, Hayakita, Horonai, Digital Map 25,000, Geographical Survey Institute.

第 1 表 苫小牧 86 測線 データ取得仕様一覧.

Table 1 Data acquisition specification of the Tomakomai 86 survey.

系統	項目	本観測用 内容・パラメータ
震源系	震源	パイプレータ Y-900LF(FAILING社製)
	台数	4台
	標準発震点間隔	50m
	発震区間	14.85km
	スイープ長	20sec
	標準発震回数 / 発震点	15回
	スイープ周波数	8~43Hz
	総発震点数	200点
受振系	受振点間隔	50m
	受振器 / 固有周波数	OYO McSEIS 111 / 8Hz
	受振器アレイ / アレイ長	6個組*4グループ / 2m間隔
	展開長及び展開パターン	4.8km(終点発震, 移動展開)
	受振測線長	14.85km
	総受振点数	298点
記録系	探鉱機	GUS-BUS(GUS社製)
	サンプルレート	4msec
	チャンネル数	96ch
	記録長	12sec(相互相関後)
レイアウト	発震	VP1.5-VP203.5 終点発震 VP204.5-VP250.5 固定展開
	Near Offset	125m
	Far Offset	4900m



第 2 図 データ再解析フローチャート.

Fig.2 Data processing flow.

第 2 表 データ再解析パラメータ。1986 年の既往解析パラメータと合わせて示す。
Table 2 Data processing parameters.

		既往解析(1986)	再解析(2011)	
フォーマット変換及びデータ編集				
	発震点範囲	VP1.5-VP203.5(終点発震)	VP1.5-VP203.5(終点発震)	
		VP204.5-VP250.5(固定展開)	VP204.5-VP250.5(固定展開)	
	受振点範囲	Loc.1004-Loc.1301	Loc.1004-Loc.1301	
トレースヘッダーへの測線情報の入力				
	CMP間隔	25m	25m	
	重合測線からの最大許容偏倚	制限無し	制限無し	
屈折初動解析				
	屈折初動読み取り位相	正のピーク位置	正のピーク位置	
	屈折波同定オフセット範囲	400-850m	200-600m	
	表層基底速度算出の空間ブロック長	3750m	3750m	
初動ミュート				
		適用	適用	
振幅補償				
		指数関数型補償(α, β, γ 型)	幾何減衰補償	
	AGC適用ゲート長	-	800ms	
コヒーレントノイズ抑制処理				
	アルゴリズム	-	周波数-空間領域速度フィルター	
	適用領域	-	NMO補正後の共通発震記録	
	通過帯域	-	-3000m/s~+3000m/s	
デコンボリューション				
	アルゴリズム	時間領域トレース単位デコンボリューション	時間領域トレース単位デコンボリューション	
	前提とするウェーブレット位相	最小位相	最小位相	
	予測距離	32ms	32ms	
	零オフセット位置における設計ゲート長	300-2300ms(SPTV)	300-2500ms(ATTV)	
	オペレータ長	250ms	250ms	
	プリホワイトニングファクター	5.0%	5.0%	
静補正				
	浮動基準面の定義	標高補正速度: 1600m/s	標高補正速度: 1600m/s	
	補正内容	定義なし	定義なし	
		表層補正及び標高補正	表層補正及び標高補正	
			標準処理	CRS・MDRS処理
速度解析				
	解析内容	重合速度	重合速度	CRS Knip search
	解析点間隔	500m	500m	Continuous
	解析速度数	40 (1400-6800 m/s)	50 (1500-5000 m/s)	Continuous
残差静補正				
	アルゴリズム	Linear Traveltime Inversion	Linear Traveltime Inversion	Linear Traveltime Inversion
	時間シフトの最大許容値	15ms	4~8ms	4~8ms
	時間ウィンドー	300-2500ms	300-2000ms	300-2000ms
CMP/CRS重合				
	アルゴリズム	CMP Stack	CMP Stack	MDRS Stack
	NMOストレッチファクター	1.5	2.5(Mute design)	-
	重合前振幅調整	300msec	300msec	300msec
	重合オフセット距離範囲	0-4800m	0-4800m	0-4800m
重合後時間マイグレーション				
	解析アルゴリズム	Stolt F-K	Kirchhoff	Kirchhoff
	下方接続ステップ(msec)	-	-	-
	最大アパチャー距離	-	5000m	5000m
	最大傾斜角度	90degree	75degree	75degree
周波数-空間領域フィルター				
	空間オペレータ長	-	3 CMPs	3 CMPs
	空間ウィンドー長	-	50 CMPs	50 CMPs
	時間ウィンドー長	-	1000ms	1000ms
帯域通過フィルター				
	オペレータ長	200ms	500ms	500ms
	周波数通過帯域	Time-variant	Time-variant	Time-variant

3.1 標準処理

標準処理では、1986 年度当時の各処理ステップにおけるパラメータを、現在の反射法データ処理技術に照らして精査の上、最適値に修正した。併せて、深部反射波に関わる S/N 向上を前提として、コヒーレントノイズ及びランダムノイズ抑制処理を新たに適用した。以下に、データ解析内容を記述する。

(1) フォーマット変換及びデータ編集 (Format Conversion and Trace Edit)

フィールドデータに記録された原記録を SuperX (JGI Internal Format) フォーマットへ変換した。S/N 比が著しく低く、初動が判別出来ないトレースは処理対象から除外した。

(2) トレースヘッダーへの測線情報の入力 (Geometry Application)

SuperX トレースヘッダーに、発震点、受振点及び各 CMP のインデックス、座標、標高値、オフセット距離、基準面標高値等の測線情報を入力した。データ処理の基準面は平均海水面位置に設定した。

(3) 屈折波初動解析 (Refraction Analysis)

改良型タイムターム法による屈折初動解析を行い、受振点及び発震点タイムターム値と表層基底層速度を算出した。表層速度は 500m/sec とした。

(4) 基準面に対する静補正 (Static Corrections to Datum Plane)

平均海水面に対する静補正を実施した。静補正は、標高補正量及び表層補正量の和として各発震点、受振点に与えた。表層補正量は (3) の結果を用いた。

(5) 初動ミュート (First Break Suppression)

屈折波の初動部分及び Reverberation の抑制を目的として初動ミュートを適用した。

(6) 振幅補償 (Gain Recovery)

弾性波の振幅変化を補償することを目的として、自動振幅調整による振幅補償を行った。

(7) コヒーレントノイズ抑制処理 (Suppression of

Coherent Noise)

比較的継続時間の長い屈折波多重反射波を抑制するために、NMO 補正及び屈折波静補正後の共通発震点アンサンブルに対して、周波数-空間領域速度フィルターを適用した。

(8) デコンボリューション (Deconvolution)

基本波形を地震トレースから推定・除去し、記録の分解能向上を図るために、トレース単位で最小位相型デコンボリューションを適用した。

(9) 共通反射点編集 (Common Midpoint Sorting)

上記 (2) の受振点、発震点位置にしたがって共通反射点編集を行った。

(10) 重合速度解析 (Stacking Velocity Analysis)

定速度重合法による速度解析を実施した。また、残差静補正後に再度速度解析を行った。この速度関数は、後述の CRS パラメータ探索における初期値としても使用した。

(11) 残差静補正 (Residual Static Corrections)

Surface-consistent な発震点、受振点残差静補正量を LTI (Linear Travel-time Inversion) によって統計的に計算し適用した。

(12) NMO 補正 (Normal Moveout Corrections)

速度解析によって求められた重合速度-時間の関数を時間-空間方向に内挿し、その速度テーブルに従って NMO 補正を適用した。同時にストレッチミュートを実施した。

(13) ミュート (Outside Mute)

NMO 補正に伴う波形の伸長及び Far オフセット側に残留する屈折波初動部分を抑制する目的で、ミュート処理を全 CMP アンサンブルについて設計し適用した。

(14) 共通反射点重合処理 (CMP Stacking)

NMO 補正および残差静補正適用後の共通反射点アンサンブルの全オフセット距離について CMP 重合処理を実施した。

(15) 周波数-空間領域予測フィルター

(F-X Prediction Filter)

周波数 - 空間領域においてランダムノイズを抑制し相対的に S/N を向上させる F-X 予測フィルター処理を実施した。

(16) 帯域通過フィルター (Bandpass Filter)

零位相帯域通過フィルターを適用した。周波数通過帯域は以下に示す通り時間方向に可変とした。

往復走時 [sec]	通過帯域 [Hz]
0	6-40
6.0	6-35
12.0	6-30

(17) キルヒホッフ型時間マイグレーション (Geometry-oriented Kirchhoff Time Migration)

時間断面上の反射点位置を実際の位置に移動させ、回折波を回折点に復元することを目的として、キルヒホッフ型時間マイグレーションを適用した。マイグレーション速度は時間及び空間方向に平滑化した重合速度を用いた。

(18) 深度変換 (Depth Conversion)

重合速度プロファイルから、時間及び空間方向に平滑化した平均速度分布を用いて、Vertical Stretch 法による深度変換を実施した。

第 3 図に標準処理で得られた CMP 重合時間断面図を示す。また、対比のため、第 4 図に 1986 年段階の CMP 重合時間断面図を示す。

3.2 MDRS 処理

CRS 法及び MDRS 法による高精度イメージングにおいては、残差静補正適用後の CMP アンサンブルを入力とした。

(1) CRS 法

MDRS 法の第一段階として CRS 法を適用した。直線状の 2 次元測線における CRS 法の走時近似式は、

$$T^2(x_m, h) = \left[T_0 + \frac{2 \sin \alpha}{v_0} (x_m - x_0) \right]^2 + \frac{2 T_0 \cos^2 \alpha}{v_0} (K_N (x_m - x_0)^2 + K_{NIP} h^2)$$

ここで T_0 (m_0, h_0) と $T(x_m, h)$ は CMP- ハーフオフセット座標におけるゼロオフセット反射波線とその近軸波線の往復走時、 $x_m - x_0$ は中点間の距離、 h はハーフオフセット、 v_0 は地表付近の媒質の速度である。

K_N , K_{NIP} は N 波 (Normal wave の略; 反射面上の各点から同時に発する波で、観測面 (地表) に向けて進行する) と NIP 波 (Normal incident point wave の略; ゼロオフセット反射波線の反射点からの点震源波動である) と呼ぶ仮想の波の到来方向と波面の形状に関するパラメータである。 α は地表への NIP 波の入射角を表し、 K_N と K_{NIP} はそれぞれ N 波と NIP 波の地表付近での曲率である。

本解析では、 α の一次元探索、 α と K_{NIP} の二次元探索、 α と K_N の二次元探索、という順の 3 ステップで、各パラメータの範囲と刻み幅を適切に設定し、センブランス値を最大にするパラメータを探索した。

(2) MDRS 法

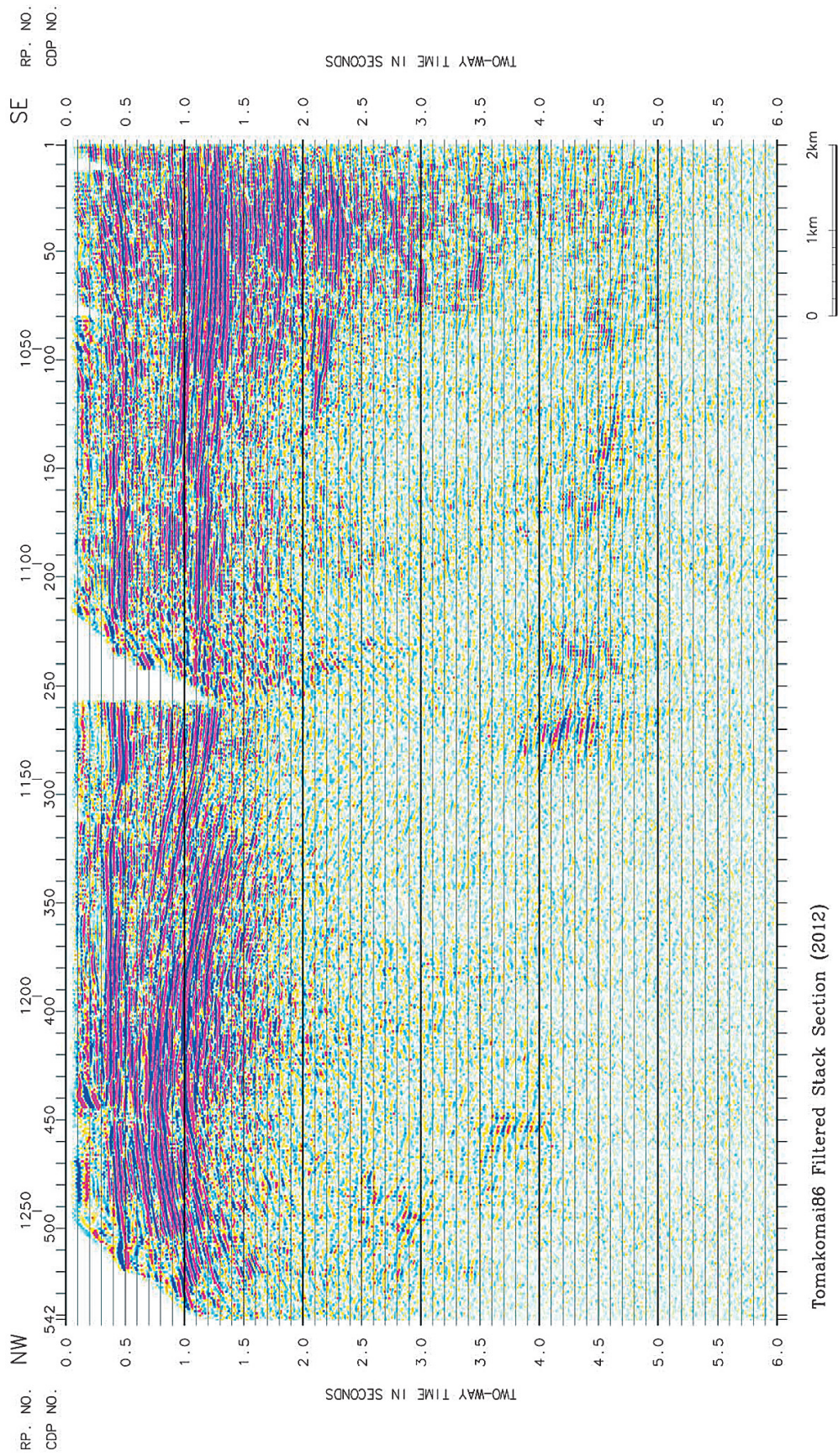
本調査地域では、褶曲構造及び衝上断層群が卓越し、ゼロオフセット断面上で反射波が交差する状況 (コンフリクティング・ディップ) が予想される。このような状況に対応するため、第二段階として、高精度 CRS 解析として位置付けられる MDRS 法を適用し、複数の交差する傾斜を持つ反射面のイメージングの改善を実施した。MDRS 法は、S/N 比を改善しながらコンフリクティング・ディップのイメージングを達成することが可能である。

MDRS 法ではまず予測した反射波の出現角の範囲を幾つかの領域に分割し、それぞれの領域で CRS 法を適用した CRS 重合記録 (MDRS サブセクション) を作成する。次に、CRS 法の副産物であるセンブランスアトリビュートを参照し、サンプル単位に MDRS サブセクションの並び替えを行うセンブランス・ソート法によって反射波イベントを抽出する。最後にこれらの重ね合わせを行って MDRS 重合記録を作成する。

第 5 図に MDRS 解析における Super Gather の例を示す。左側には標準処理の CMP 重合処理結果 (CMP100-300) と CMP Gather (CMP100, NMO 後) を示した。CMP Gather においては、発震点の抜けやトレースエディットなどにより、トレースのオフセット間隔が疎らであり、1.5 秒以深で反射波を確認することが困難である。第 5 図の右側に CRS 重合処理結果 (CMP100-300) と CRS Super Gather (CMP100, NMO 後) を示す。CRS Super Gather においては、50 m 間隔でトレースが最大オフセットまで密に存在し、浅部から深部まで全域に互って反射波を確認することが容易である。

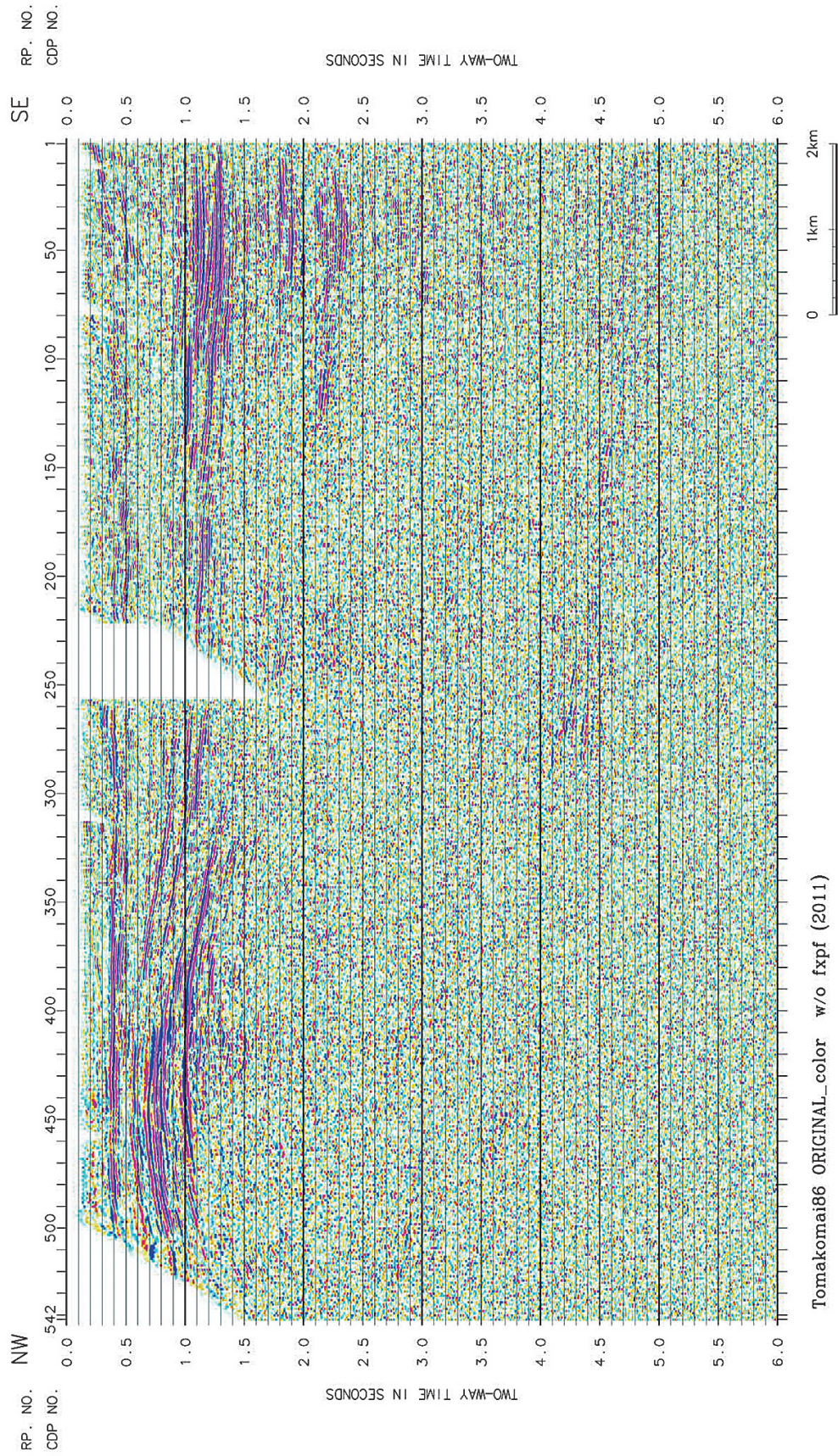
(3) CRS による速度構造の推定

CRS 法では、NMO 速度や RMS 速度を明示的に推

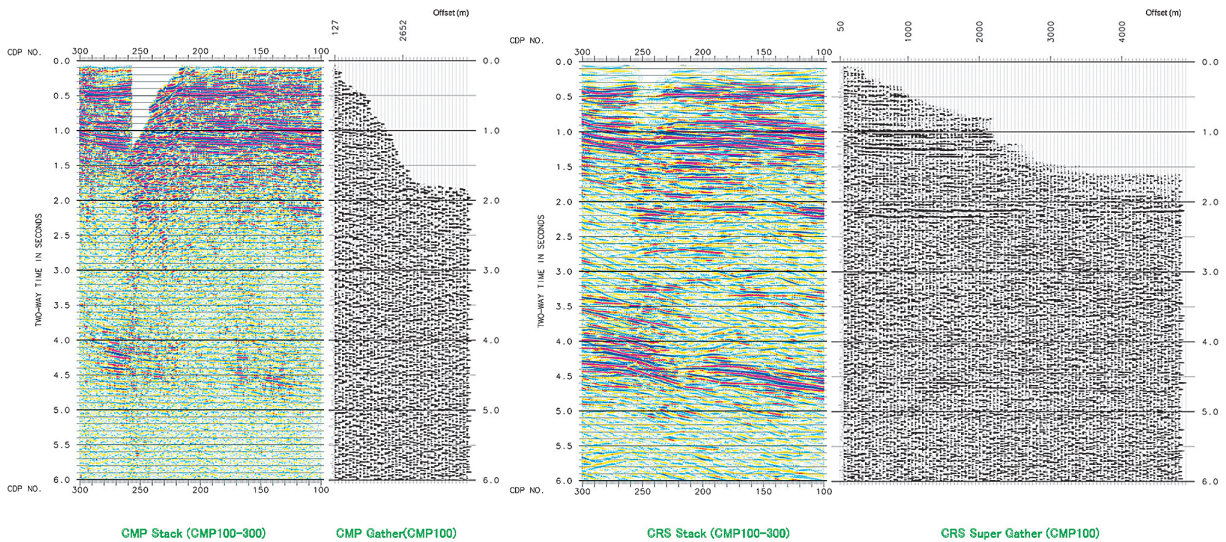


第3図 再解析標準処理 CMP 重合時間断面図。

Fig.3 CMP stacked time section by standard processing of this study.



第 4 図 1986 年既往処理の CMP 重合時間断面図。
Fig.4 CMP stacked time section by previous processing in 1986.



第5図 CRS解析のスーパーギャザ。
Fig.5 Super gather of CRS processing.

定しているわけではないが、CRSのパラメータからRMS速度プロファイルを推定することが可能である。標準処理の速度解析結果と同じ傾向の速度構造が得られ、MDRS解析の妥当性を確認した。

3.3 MDRS 重合後の処理

標準処理のCMP重合後と同様の処理を適用した。

- (1) キルヒホッフ型時間マイグレーション (Geometry-oriented Kirchhoff Time Migration) 前節(17)と同じ。
- (2) 深度変換 (Depth Conversion) 前節(18)と同じ。

第6図[1], [2], [3]にMDRS解析で得られた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。

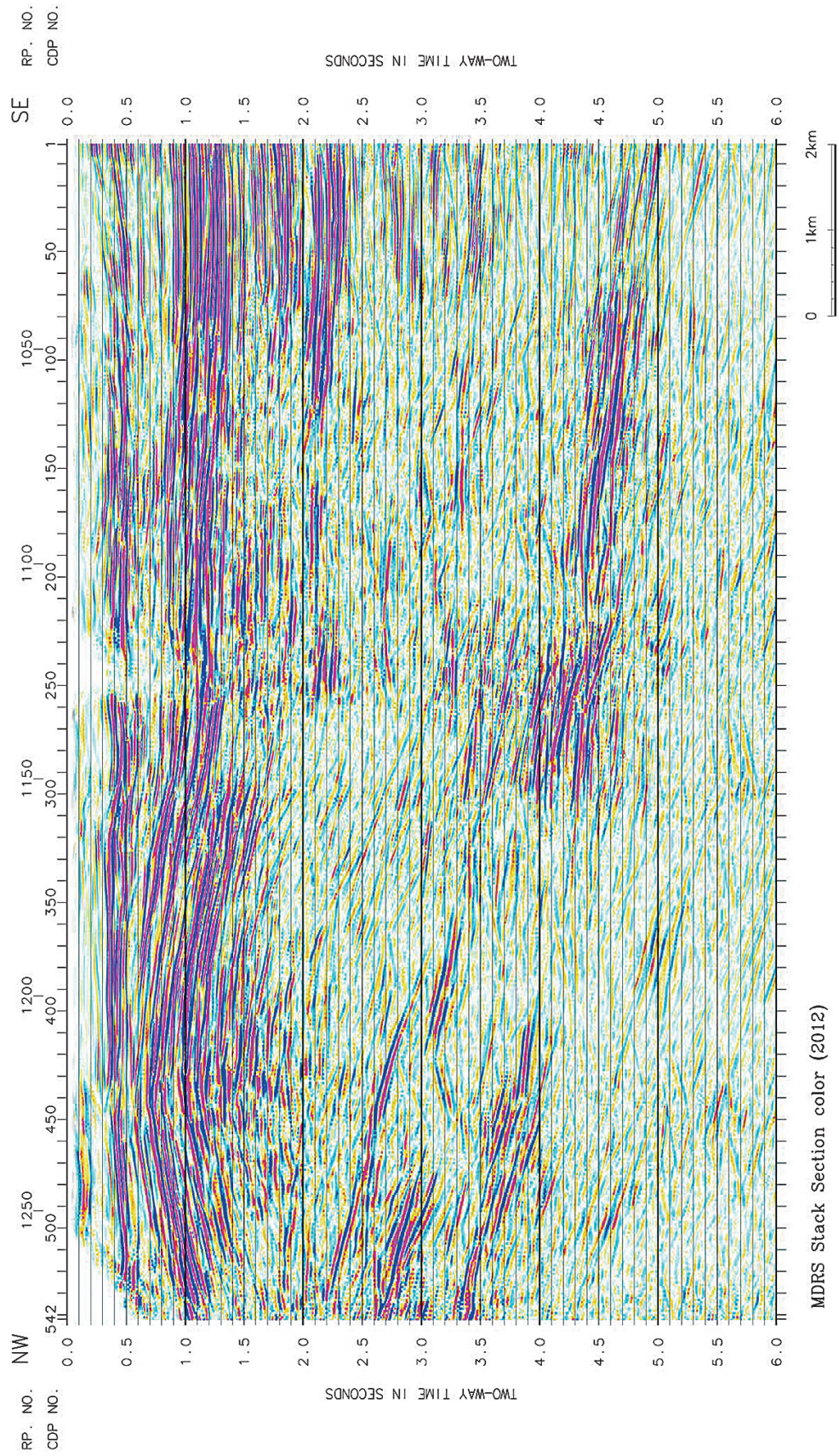
4. 考察

再解析の標準処理断面図(第3図)を1986年当時の結果(第4図)と見比べると、全体としてイベントの連続性が向上した。極浅部から走時2s付近の部分は、再解析の方がイベントが連続し振幅も強いが、それ以深は両断面に大きな差はない。

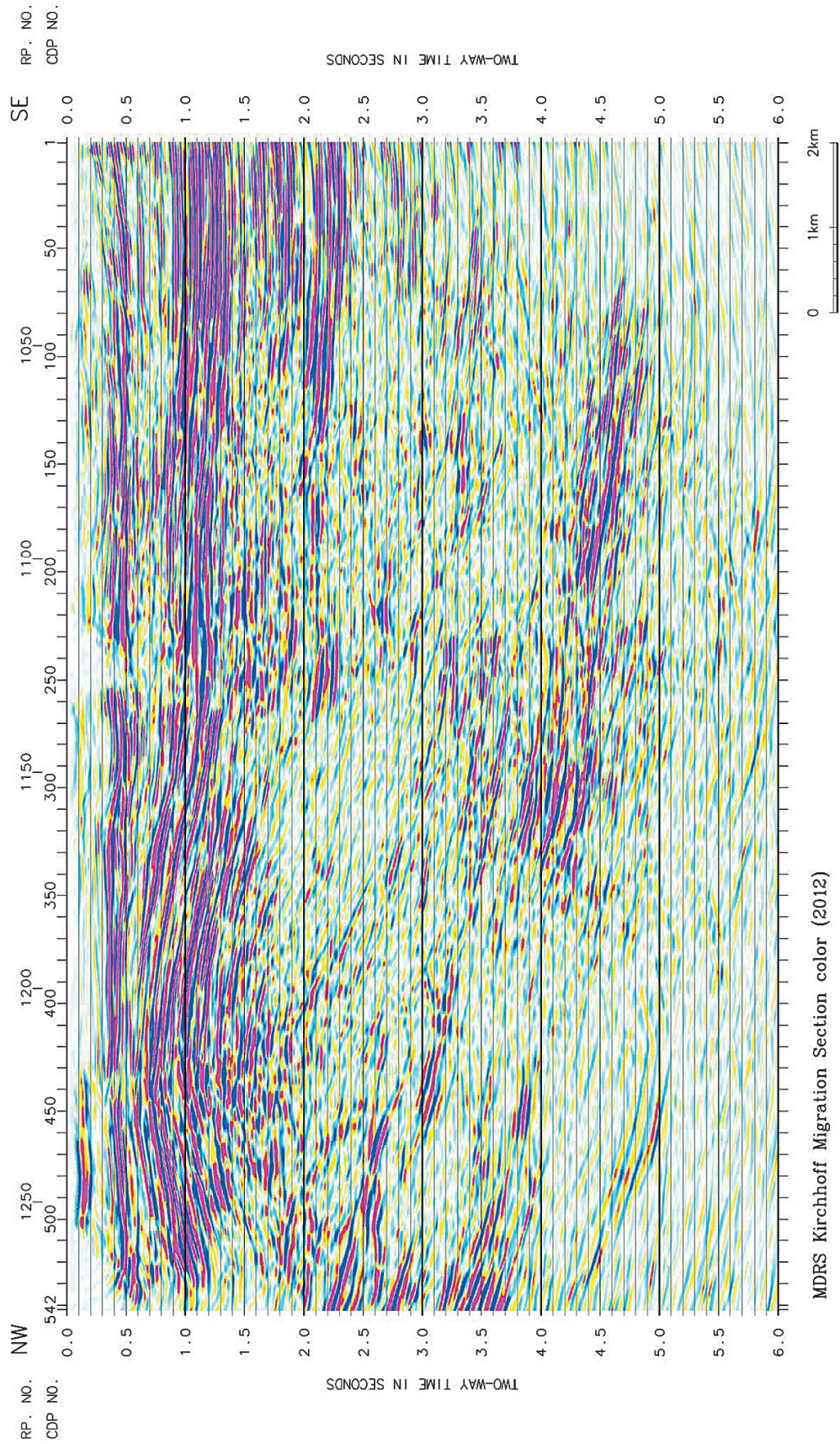
MDRS処理断面図(第6[1]図)をCMP重合処理結果(1986年処理(第4図)及び今回の標準処理(第3図))と比較すると、Super Gather生成による平滑

化の影響は否めないものの、認定できる反射面が増えいずれも連続性が良い。走時2sより深い部分の東傾斜のイベントは、標準処理では弱振幅で断片的に認められるだけであるが、MDRS処理により連続性の向上が顕著である。厚真川横断箇所において浅部データが欠落していたCMP220~250付近では、Super Gatherによる内挿効果によって、浅部がイメージングされている。一方、極浅部に関しては、MDRS処理よりも標準処理結果の方が分解能が高い。また、MDRS重合時間断面図では、3sより深部で西に緩く傾斜する短いイベントが見られ、調査地の地層傾斜などから、これらは偽像である可能性が高い。

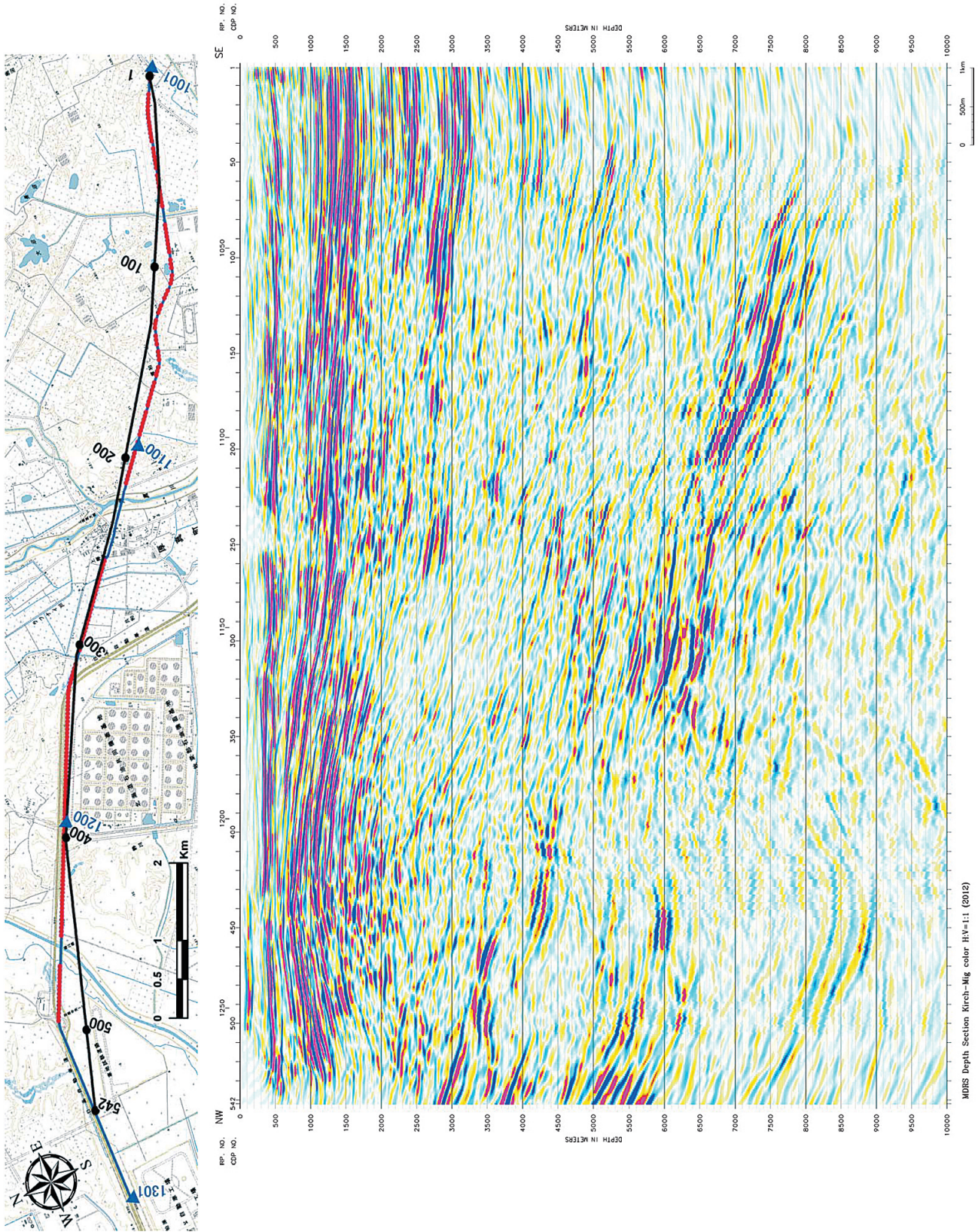
国安ほか(2004)によれば、日高山地西縁部から石狩低地に至る中央北海道南部地域は3つの地質構造帯から成り立つと考えられる。西側の勇払地域は、浅部における構造変形が極めて乏しく、主に滝の上層以下の地質によって構成される伸張性構造群が地下深部の地質構造を支配している。東側の日高山地西縁部は、強力な圧縮性の造構応力場で、深部にまで至る複数階建てのデュプレックス構造で特徴付けられる地域である。両者の中間に位置する馬追丘陵部は、浅部ではスラストなどの圧縮性構造が発達するが、深部では正断層による伸張性構造の発達で特徴付けられる遷移地域に相当する。本測線は、この遷移地域のさらに西部に位置する。石狩低地帯南部の千歳-苫小牧地域の東部地域では数条の伏在褶曲の存在が指摘されている(佐藤ほか, 1998)。本測線西部域の静川背斜構造は、こうした伏在褶曲の一つであり、日高衝突帯前縁



第 6[1] 図 MDRS 処理 重合時間断面図.
Fig.6[1] MDRS stacked time section.



第 6[2] 図 MDRS 処理 時間マイグレーション断面図.
Fig.6[2] MDRS time migrated section.



第 6[3] 図 MDRS 処理 深度断面図。縦横比は 1:1。
 Fig.6[3] MDRS depth section. No vertical exaggeration is applied.

褶曲・衝上断層帯の西側先端部でその影響を強く受けている。

本再解析では、MDRS 処理を適用した結果、静川背斜を中心とする伏在褶曲構造、その褶曲構造を規定する衝上断層群の解釈に必要な堆積盆に関する基本形状把握が可能となった。静川背斜頂部に掘削された「静川 SK-4 号井」(CMP410/SP209) では、振老層(川端層)及び滝の上層の層厚が厚く、古第三系には到達していない(浅野ほか, 1989)。検層結果を参照すると、平取-軽舞層基底相当 1500m 以深では P 波速度は漸増傾向を持ち、岩相はシルト・泥岩が主体であり、凝灰岩が数レベルで挟在するに止まっている。反射断面図では、この区間は反射波に乏しい Transparent な反射パターンを示しているが、その以深においては、静川背斜頂部位置で往復走時 2.5-3.5 秒に数条の深部反射波が抽出された。これらの反射波群は CRS 解析の速度情報を参照すると、石狩層群夾炭層及び礫岩層相当である可能性が高く、見掛けで約 20 度の東傾斜を伴い、勇払平野東部域(測線東端)においては約 8000m の層厚を持つ堆積盆深部を構成する。

5. おわりに

石狩低地東縁断層帯の最前縁部(西縁)について、断層帯の南部から海域への延長形態を明確にし地質解釈資料を提示することを目的として、苦小牧付近の既存反射法地震探査データ(浅野ほか(1989)の「苦小牧 86」測線)を再解析した。再解析は現在の標準的な CMP 重合法と特殊処理 MDRS 法を適用した。その結果、極浅部から往復走時 2s 付近までは標準的な処理により反射面の連続性と振幅強度が改善され、2s ~ 5s の深い部分では MDRS 法により東傾斜を伴う反射面の連続性と振幅強度が大きく改善された。この東傾斜の反射面は石狩層群夾炭層及び礫岩層相当と考えられ、断面東端では深度 8000m に達する。

今後、この地域の構造形成と石狩低地東縁断層帯の形状把握を高度化する上で、CRS パラメータ探索手法の再検討、CRS 速度による重合前深度マイグレーション適用等、改善の余地は残されていると考えられる。

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。データ再解析業務には(株)地球科学総合研究所が同社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、「苦小牧 86」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.
- 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.
- Jager, R., Mann, J., Hocht, G. and Hubral, P. (2001) Common-reflection-surface stack: Image and attributes. Geophysics, 66, 1, 97-109.
- Mann, J., Schleicher, J. and Hertweck, T. (2007) CRS Stacking-A Simplified Explanation, in Extended abstracts, 69th Conf. Eur. Assn. Geosci. Eng. B044.
- 佐藤比呂志・平川一臣・池田安隆・折戸雅幸・井川 猛(1998) 苦小牧市勇払の伏在活断層. 石油技術協会誌, 63, 323-324.
- Schleicher, J., Tygel, M. and Hubral, P. (1993) Parabolic and hyperbolic paraxial twopoint traveltimes in 3d media. Geophysical Prospecting, 41, 495-5.