

## 7) データ解析

本節では、反射法桐生バイブレータ測線、反射法太田バイブレータ測線・反射法相模湖低重合バイブレータ測線・反射法松田バイブレータ測線・屈折法及び広角反射法測線の順に従って、データ解析内容を詳述する。尚、反射法各測線データ解析における処理パラメータの一覧を表1、2に示した。

### a) 反射法桐生バイブレータ測線及び反射法太田バイブレータ測線データ解析

本節では、広域測線北部の群馬県大間々町・埼玉県東秩父村間に位置する関東平野におけるバイブレータ桐生測線 KR-1(測線長 53km)及びバイブレータ太田測線 KR-2(測線長 11km)の反射法データ処理内容について記述する。図 28 に、データ処理フローを示す。

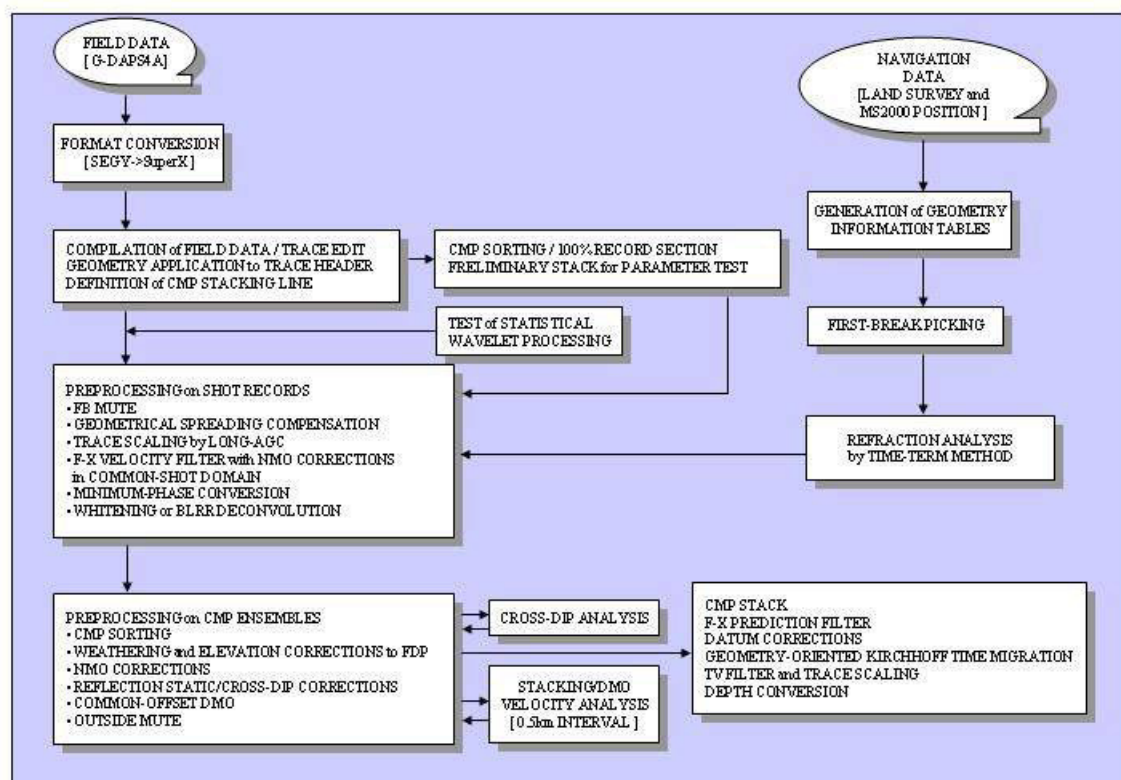


図 28 反射法データ処理フロー

### i) 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(GDSPS-4 SEG-Y Format)について、SuperX(JGI Internal Format)フォーマットへ変換を行った。

さらに、S/N 比が著しく低く、初動が判別できないトレースを処理対象から除外した。

表1 反射法各測線に関するデータ処理パラメーター一覧 (1)

|                         | 反射法桐生及び太田バイブ<br>プレート測線 | 反射法相模湖低重合バイブ<br>プレート測線 | 反射法松田バイブプレート測線           |
|-------------------------|------------------------|------------------------|--------------------------|
| フォーマット変換及びデータ編集         |                        |                        |                          |
| 解析対象の発震点範囲              | 桐生測線                   | VP2601-VP.3511         | 松田測線 VP.3804.0-VP.4018.5 |
|                         | 太田測線                   |                        | 防災研 90-AS 測線 VP.1-VP.170 |
| 有効発震点数                  | 桐生測線 347 点             | 77 点                   | 松田測線 94 点                |
|                         | 太田測線 69 点              |                        | 防災研 90-AS 測線 142 点       |
| トレースヘッダーへの測線情報の入力       |                        |                        |                          |
| CMP 間隔                  | 25.0m                  | 25.0m                  | 25.0m                    |
| 重合測線からの最大許容偏倚           | 制限無し                   | 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                | 正のピーク位置                  |
| 屈折波インバージョン実施オフセット範囲     | 400-1200m(測線中央)        | 400-0200m              | 100-700m                 |
| 表層基底速度を求める際の空間<br>ブロック長 | 2500m                  | 2500m                  | 2500m                    |
| 初動ミュート                  |                        |                        |                          |
| テーパー長                   | 200m                   | 200m                   | 200m                     |
| ミュート位置のスライディング速度        | 4000m                  | 4000m                  | 4000m                    |
| 振幅補償                    |                        |                        |                          |
| 幾何減衰補償                  | 平滑化重合速度を適用             | -                      | -                        |
| AGC 適用ゲート長              | 800msec                | 800msec                | 800msec                  |
| 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        | 周波数-空間領域速度フィルター        | 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         | NMO 補正後の共通発震記録         | NMO 補正後の共通発震記録           |
| 通過(抑止)速度範囲              | 通過領域 ±3000m/sec        | 通過領域 ±3000m/sec        | 通過領域 ±2500m/sec          |
| デコンボリューション              |                        |                        |                          |
| バイブプレートスイープ波形位相処理       | 最小位相変換                 | -                      | 最小位相変換                   |
| アルゴリズム                  | 周波数領域                  | 時間領域 BLRR 型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                   | 零位相                    | 最小位相                     |
| 予測距離                    | 4.0msec                | 4.0msec                | 4.0msec                  |
| 零オフセット位置における設計ゲート       | 200-3000msec(Non-TV)   | 200-3000msec(Non-TV)   | 0-2000msec(Non-TV)       |
| オペレータ長                  | 320msec                | 320msec                | 200msec                  |
| プリホワイトニングファクター          | 5.0%                   | 5.0%                   | 0.5%                     |
| 浮動基準面に関する静補正            |                        |                        |                          |
| 補正内容                    | 表層補正及び標高補正             | 表層補正及び標高補正             | 表層補正及び標高補正               |
| 浮動基準面定義に用いたオフセット範囲      | 0-2000m                | 0-5000m                | 0-2000m                  |
| クロスディップ補正               |                        |                        |                          |
| クロスディップスキャン範囲           | -50 ~ +50msec/100m     | -                      | -                        |
| クロスディップスキャン間隔           | 2000m                  | -                      | -                        |
| 速度解析                    |                        |                        |                          |

表 2 反射法各測線に関するデータ処理パラメーター一覧 (2)

|                 | 反射法桐生及び<br>太田バイブレータ測線       | 反射法相模湖低重合<br>バイブレータ測線       | 反射法松田<br>バイブレータ測線           |
|-----------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 解析内容            | 重合速度及び DMO 速度               | 重合速度                        | 重合速度                        |
| 解析点間隔           | 2000m                       | 2000m                       | 1000m                       |
| 解析速度数           | 48(1500-7000m/sec)          | 48(1500-7000m/sec)          | 48(1500-7000m/sec)          |
| 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地     | 12msec                      | 16msec                      | 12msec                      |
| 時間ウィンドー         | 100-2500msec                | 1000-5000msec               | 100-700msec                 |
| Dip Moveout     |                             |                             |                             |
| アルゴリズム          | 共通オフセット時間-空間領域              | -                           | -                           |
| 解析対象の最大傾斜角      | 70 度                        | -                           | -                           |
| 解析対象の最小基準速度     | 1600m/sec                   | -                           | -                           |
| DMO オペレータの片側最大長 | 2500m                       | -                           | -                           |
| DMO オペレータの定義数   | 100(150-10050m / 100m 間)    | -                           | -                           |
| 振幅補償            | F-K DMO 等価型                 | -                           | -                           |
| 位相補償            | Dip-dependent Alias Filter  | -                           | -                           |
| CMP(DMO)重合      |                             |                             |                             |
| NMO ストレッチファクター  | 5.0                         | 5.0                         | 4.5                         |
| 重合前振幅調整         | AGC 100msec                 | AGC 100msec                 | AGC 100msec                 |
| 標準重合数           | 79                          | 79                          | 64                          |
| 重合オフセット距離範囲     | 150-10000m                  | 100-10000m                  | 0-8000m                     |
| 周波数-空間領域フィルター   |                             |                             |                             |
| 空間オペレータ長        | 3 CMPs                      | 3 CMPs                      | 3 CMPs                      |
| 空間ウィンドー長        | 50 CMPs                     | 50 CMPs                     | 50 CMPs                     |
| 時間ウィンドー長        | 500msec                     | 500msec                     | 500msec                     |
| 帯域通過フィルター       |                             |                             |                             |
| オペレータ長          | 500msec                     | 500msec                     | 500msec                     |
| 周波数通過帯域         | 0.0sec : 3 - 40Hz           | 0.0sec : 3 - 25Hz           | 0.0sec : 4 - 40Hz           |
|                 | 1.0sec : 3 - 35Hz           | 2.0sec : 3 - 30Hz           | 1.0sec : 4 - 35Hz           |
|                 | 2.0sec : 3 - 30Hz           | 4.0sec : 3 - 25Hz           | 2.0sec : 4 - 30Hz           |
|                 | 4.0sec : 3 - 25Hz           | 16.0sec : 3 - 20Hz          | 16.0sec : 4 - 30Hz          |
|                 | 8.0sec : 3 - 20Hz           |                             |                             |
|                 | 16.0sec : 3 - 20Hz          |                             |                             |
| 時間マイグレーション      |                             |                             |                             |
| アルゴリズム          | キルヒホッフ型時間マイグレーション           | キルヒホッフ型時間マイグレーション           | キルヒホッフ型時間マイグレーション           |
| 最大アパチャー範囲       | 6000m                       | 6000m                       | 6000m                       |
| 反射面最大傾斜角度       | 60 度                        | 40 度                        | 60 度                        |

## ii) 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関して、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。データ解析における基準標高面は平均海水面に設定された。また、CMP 重合測線は下記の基準によって決定された。

CMP 間隔..... 25.0m

重合測線からの最大偏倚制限.... 制限無し

重合測線決定のために CMP 分布を平滑化したオフセット範囲.....0-2000m

図 29 に重合数分布を示した。

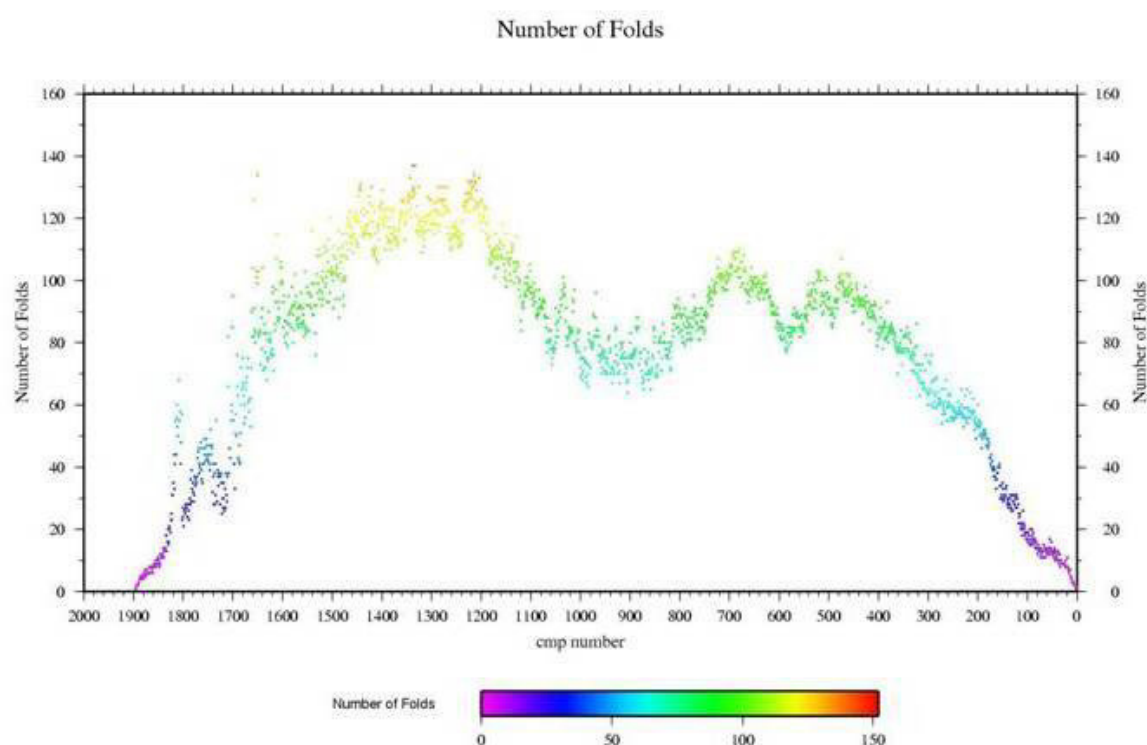


図 29 桐生測線 (KR-1) における CMP 重合数

## iii) 屈折波初動解析( Refraction Analysis )

桐生バイブレイタ測線及び太田バイブレイタ測線各々について独立に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。この手法では解析対象とする屈折面が 2 次元ブロックに分割され、各ブロックに対して表層基底層速度が定義される。このモデルは以下の関係式で記述される。

$$T_{ij} - \sum_k s_{k,0} \Delta_{ijk} = a_i + b_j + \sum_k \delta s_k \Delta_{ijk} \quad (1)$$

ここに、 $T_{ij}$  は屈折初動走時、 $a_i, b_j$  は発震点及び受振点タイムターム、 $s_{k,0}, \delta s_k, \Delta_{ijk}$  は各ブロックにおけるスローネス初期値、スローネスの初期値からの偏倚量及び屈折波線長である。この受振点及び発震点タイムターム値と表層基底層速度はインバージョン(‘Generalized Linear Inverse Method’)によって算



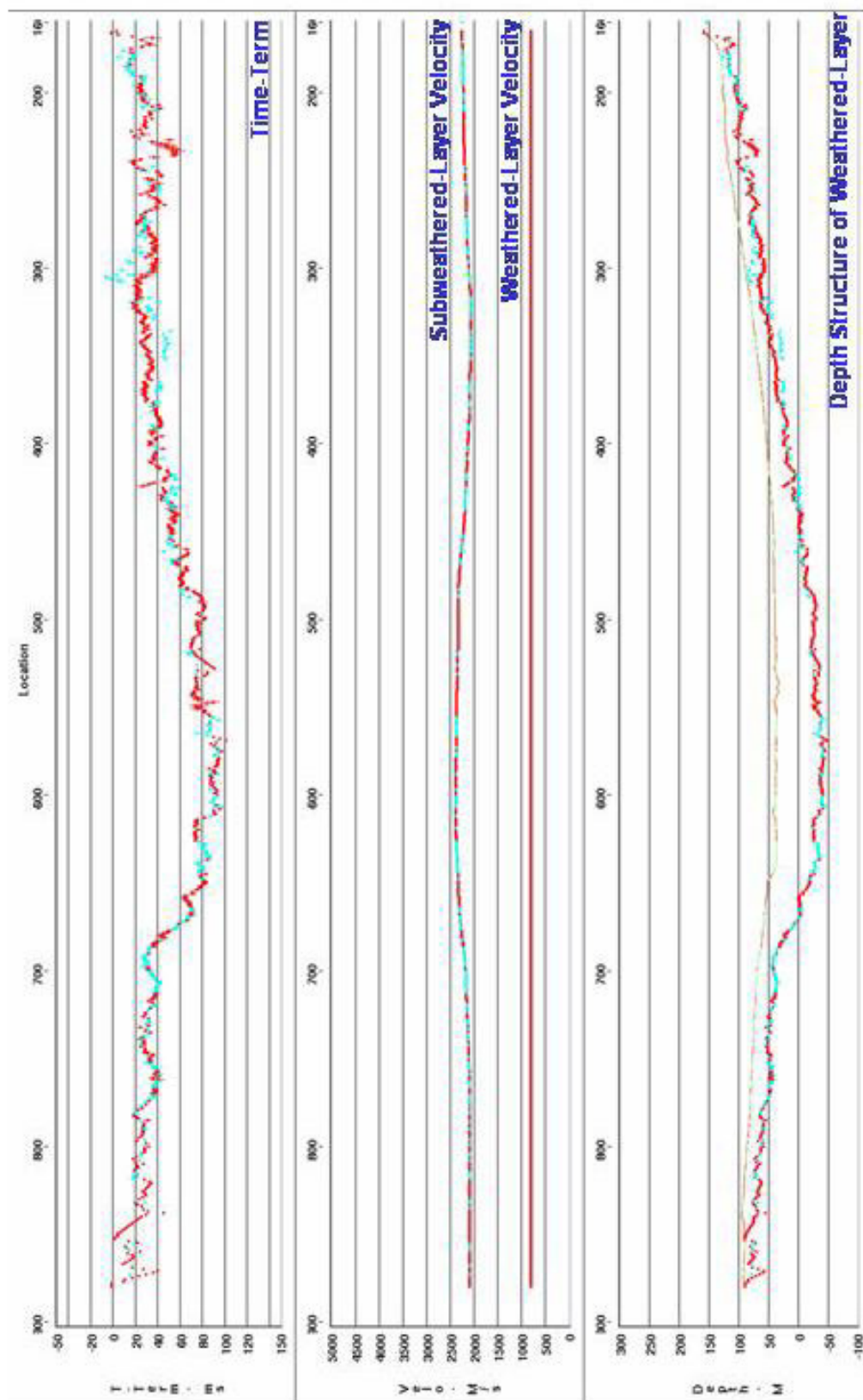


図 30 屈折初動解析結果 バイブレーター桐生測線 (KR-1)。

出される。この改良型タイムターム法解析には、以下のパラメータが採用された。

|                            |               |
|----------------------------|---------------|
| 初動読み取り位相.....              | 正のピーク位置       |
| 表層基底速度を求める際のブロック区分.....    | 5000m         |
| 屈折波インバージョンに用いるオフセット距離..... | Space-Variant |

関東平野内では表層地質の変化に対応して、表層構造は大きく変化し、同一屈折面を解析対象とするタイムターム法的前提条件を勘案して、以下のオフセット範囲を採用した。

|               |           |
|---------------|-----------|
| Loc.201.....  | 150-550m  |
| Loc.401.....  | 400-1200m |
| Loc.801.....  | 45-300m   |
| Loc.1001..... | 25-100m   |

改良型タイムターム法解析の結果を用いて、表層基底深度は各発震点及び各受振点について以下の様に計算される。

$$D_w = \frac{T_m}{\sqrt{1 - \left(\frac{V_w}{V_{sw}}\right)^2}} \cdot V_w \quad (2)$$

ここに、 $T_m$  は'Time-Term',  $V_w$  は表層速度、 $V_{sw}$  は表層基底層速度である。表層速度として受振点側及び発震点側共に 800m/sec を採用した。この値は表層速度を変化させた重合スキャンによって確定した。図 30 に、改良型タイムターム法による解析結果を示す。

#### iv) 初動ミュート( First-break Mute )

強振幅の屈折波初動部分を抑制する目的で、以下のパラメータによる初動抑制処理を実施した。

|                       |           |
|-----------------------|-----------|
| テーパー長.....            | 200msec   |
| ミュート位置のスライディング速度..... | 4000m/sec |

#### v) 振幅補償( Gain Recovery )

弾性波の震源からの伝播に伴う幾何減衰、多層構造内を透過,多重反射することによる伝播損失及び非弾性効果による減衰、さらには受振点、発震点毎のカップリングの相異に起因する振幅特性の変化を補償することを目的として、振幅補償を行った。利根川北側の群馬県内における工業団地群周辺ではデータ S/N が著しく低く、幾何減衰補償単独では不十分であると判断された。従って、振幅補償として、以下の手法を採用した。

幾何減衰補償 +AGC[ ウィンドー長.....800msec ]

#### vi) コヒーレントノイズ抑制処理( Suppression of Coherent Noise )

今回取得されたデータでは、利根川北部 2.5km の低地及び櫛引礫砂層に被覆されている区間の発震記録では、比較的継続時間の長い屈折波多重反射波が確認された。従って、こうしたコヒーレントノイズを抑制するために、次のフィルター処理を適用した。

速度フィルター(通過帯域)..... -3000m/sec～+3000m/sec

この速度フィルターは、NMO 補正及び屈折波静補正後の共通発震点アンサンブルで適用した。また、速度フィルターの適用に際しては、反射波列よりも見掛け速度が遅い傾斜波列が周波数-空間領域において最小二乗的に抽出され、発震記録から除去される。この周波数-空間領域における速度フィルターは、通常の周波数-波数領域における速度フィルターと異なり、固定したトレース間隔を仮定せずに実際のオフセット距離を参照するため、不規則な震源-受振点ジオメトリを扱うことが可能である。

## vii) デコンボリューション( Deconvolution )

デコンボリューション処理では、次式で示される 1 次元コンボリューションモデルが前提とされている。

$$F(t) = W(t) * R(t) + N(t) \quad (3)$$

ここに  $F(t)$  は地震波トレース、 $W(t)$  は基本波形、 $R(t)$  はランダム定常な反射係数列、 $N(t)$  はランダムノイズである。このモデルにおいて基本波形を構成する要素としては、以下の項目を挙げることができる。

- ・ 震源波形：バインプレートスweep波形、震源カップリング効果、ゴースト効果
- ・ 地層効果：多重反射、非弾性による吸収
- ・ 記録系：受振器特性及び設置効果、表層に関わるゴースト効果、探鉱機の応答特性

こうした要素の集積としての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デコンボリューションを適用した。'Surface-consistent'型デコンボリューション処理を含めた比較重合テストを通じて、以下のパラメータが採用された。パラメータテストの結果、'Surface-consistent'型デコンボリューションが有効であることが確認された(図 31)。53km に亘る関東平野の広域な区間を横断する桐生測線では、地表地質、受振器設置条件及び受振測線周辺の定常ノイズ等が測線内で大きく変化し、同様に発震条件についても、足尾帯・三波川帯及び関東平野堆積層上の発震点での発震カップリングの地域差は顕著であり、'Surface-consistent'な受振及び発震スペクトルを推定し、最小位相の前提によってデコンボリューションオペレータを構築することは有効性が非常に高いものと考えられる。

|                         |                                                                |
|-------------------------|----------------------------------------------------------------|
| 予測距離.....               | 4.0msec                                                        |
| ゼロオフセット位置における設計ゲート..... | 200～3000msec [Non-TV]                                          |
| オペレータ長.....             | 320msec                                                        |
| プリホワイトニングファクター.....     | 5.0%                                                           |
| アルゴリズム.....             | 'Surface-consistent Deconvolution with Spectral Decomposition' |

尚、デコンボリューション適用に際しては、零位相であるバインプレート震源の sweep 波形(探鉱機 A/D Decimation Filter(DCF)及び相互相関処理実施後の sweep 波形)について、最小位相変換処理を適用した。今回用いた GDAPS-4A 探鉱機では 24 ビット  $\Delta$ - $\Sigma$  A/D 変換が採用されているため、ローカットフィルターは探鉱機では適用されず、最小位相推定において問題となる 10Hz 以下の低周波数成分についての影響は少ない。図 32 は sweep 周波数(6-35Hz)の範囲内における'Spectral Decomposition'によって得られた共通受振点スペクトルの空間分布である。この図から、受振点カップリングの地域性は顕著であり、特に利根川兩岸の低地帯約 12.0km の範囲内では表面波の励起度が低いにもかかわらず、8～10Hz の低周波成分が卓越していることが、またこの区間南側の櫛引礫砂層分布範囲では 12～15Hz の周波数成分が卓越していることが確認できる。

## viii) 共通反射点編集( Common Midpoint Sorting )

上述 ii) のパラメータによって、共通反射点の編集が実施された。

## ix) 浮動基準面に対する静補正( Static Corrections to FDP )

浮動基準面に対する静補正を実施した。静補正については、下式で定義される標高補正量及び表層補正量の和として各発震点、受振点について与えられる。

[A] 標高補正  $T_e$ ：観測面を一定基準面へ補正する。

$$T_e = - (H_e - H_b) / V_{sw} \quad (4)$$

[B] 表層補正  $T_w$ ：低速度の表層構造変化による影響を除去する。

$$T_w = S_d * (-1/V_w + 1/V_{sw}) \quad (5)$$

ここに、  
 He : 発震点あるいは受振点標高(m)  
 Hb : 基準面 [平均海水面 0.0m]  
 Sd : 表層厚(m)  
 である。

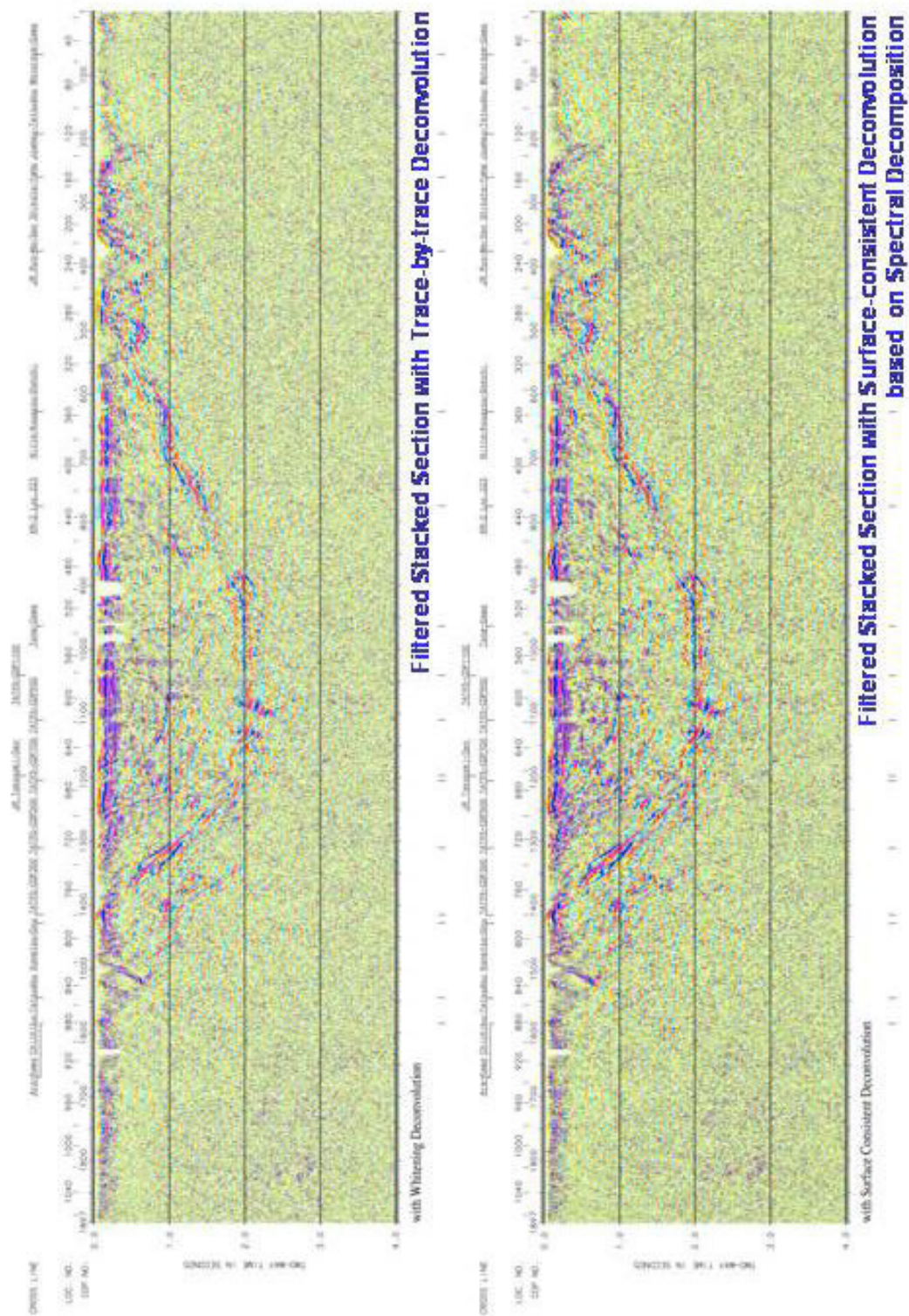


図31 デコンボリューションパラメータテスト結果 (1) 比較重合処理結果。



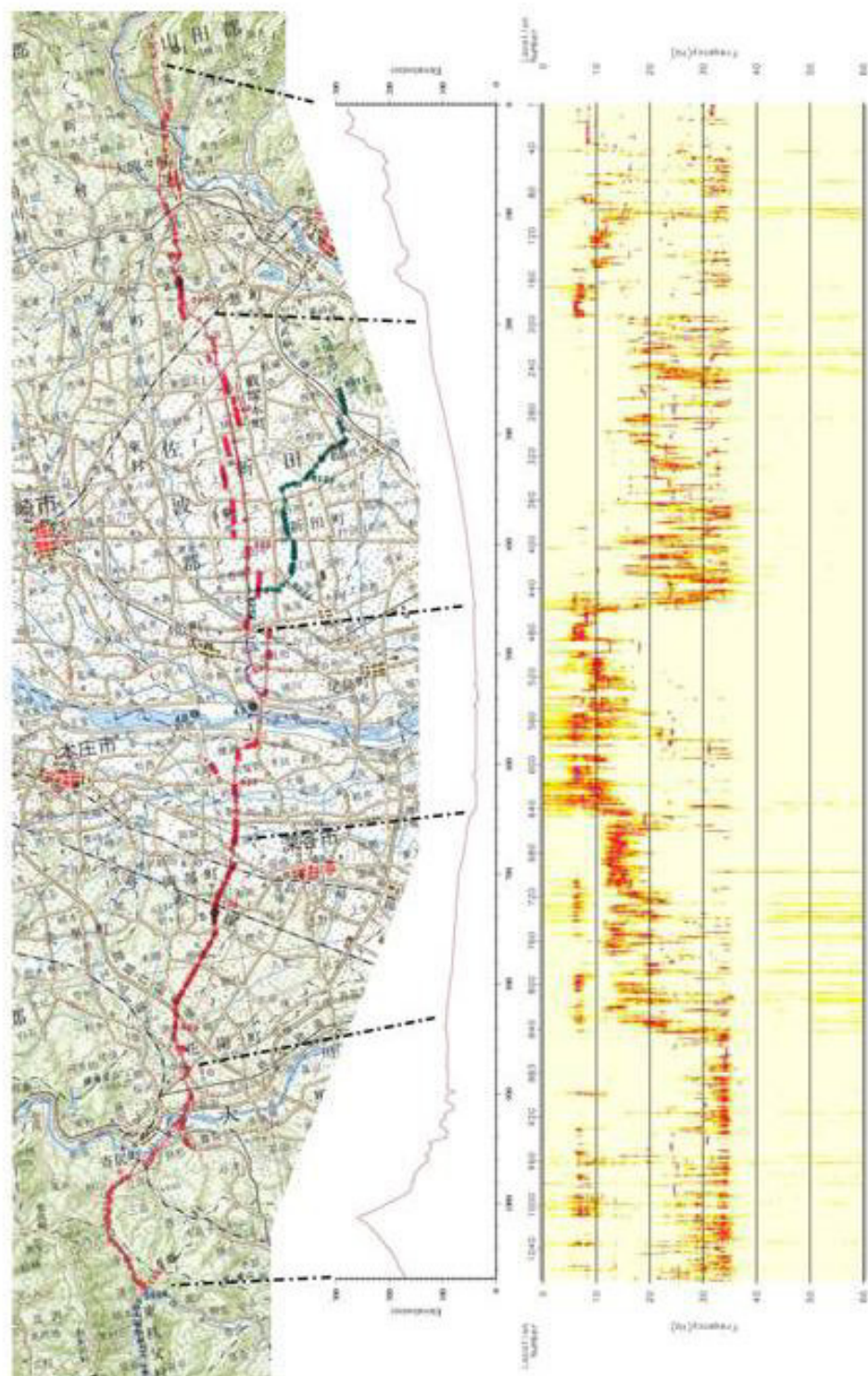


図32 デコンボリューションパラメータテスト結果 (2)  
 ‘Spectral Decomposition’によって得られた共通受振点スペクトル

表層補正值は、前述 iii) の屈折波初動解析による結果を用いて計算された。本調査の基準面( Datum )は平均海面 0.0m に設定されたが、絶対値の大きい標高補正值の適用を回避するため、CMP アンサンブル上において平均標高を定義し、これを浮動基準面( FDP: 'Floating Datum Plane' )とした。この FDP から基準面までの基準面補正量 Td は、下記のように定義される。

$$Td = -2.0 * (Hf - Hb) / Vc \quad (6)$$

ここに、 Hf : 浮動基準面(FDP)

Vc : 基準面補正速度(1800m/sec)

である。この FDP の計算には CMP 内のオフセット距離範囲 0 - 2000m のトレースが用いられた。

#### x) クロスディップ補正( Cross-dip Correction )

発震及び受振測線が屈曲している場合、地下の反射点は重合測線上に収束せず、空間的な広がりを持つ。この反射点の重合測線からの偏倚が大きい場合、同一 CMP 内で反射面走時が重合測線と直交する方向への構造傾斜を反映する誤差が系統的に含まれる。クロスディップ補正は、各トレースの発震点-受振点の midpoint と重合測線との距離 X(m) に対する時間補正量を  $X(m) \times a(\text{msec/m})$  として、重合スキャンによって各 CMP 位置及び時間ウィンドーにおいて重合効果が向上する見掛け時間傾斜量 a を決定する解析手法である。図 33 に推定されたクロスディップ量を重合記録に投影表示した結果を示す。この図では、浅層部から先新第三系基盤面まで、測線に対して直交方向のクロスディップ量は西傾斜の傾向を Loc.101-700 の区間で示しており、図 7 の広域ブーゲー異常図から推定される構造傾斜とほぼ調和的な結果であることが確認できる。尚、図 34 にクロスディップ補正処理に関わる比較重合テスト結果を示す。また、クロスディップスキャンに関わるパラメータは以下の通りである。

クロスディップスキャン範囲 ..... -50 ~ +50msec/100m

クロスディップスキャン間隔..... 2000m

#### xi) 速度解析及び DMO 速度解析( Velocity Analysis )

以下に示す定速度重合法による速度解析を実施した。尚、残差静補正後に再解析がなされている。また、速度解析結果を用いて NMO 補正したデータを入力として、速度解析箇所の DMO モニターアンサンブルを抽出し、同様の定速度重合法による速度解析を実施した。図 35 に桐生測線 KR-1 に関する DMO 速度解析例を、図 36 に桐生測線の DMO 速度プロファイルを、図 37 に太田測線 KR-2 に関する重合速度プロファイルを示す。この DMO 速度プロファイルは、関東平野の先新第三系基盤面までの速度構造を比較的精度良く表現していることがわかる。

解析点間隔 ..... 2000m

解析速度数..... 48( 1500 – 7000 m/sec )

#### xii) 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、下記のストレッチミュートを実施した。

ストレッチミュートファクター..... 5.0

#### xiii) 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て、適用した。

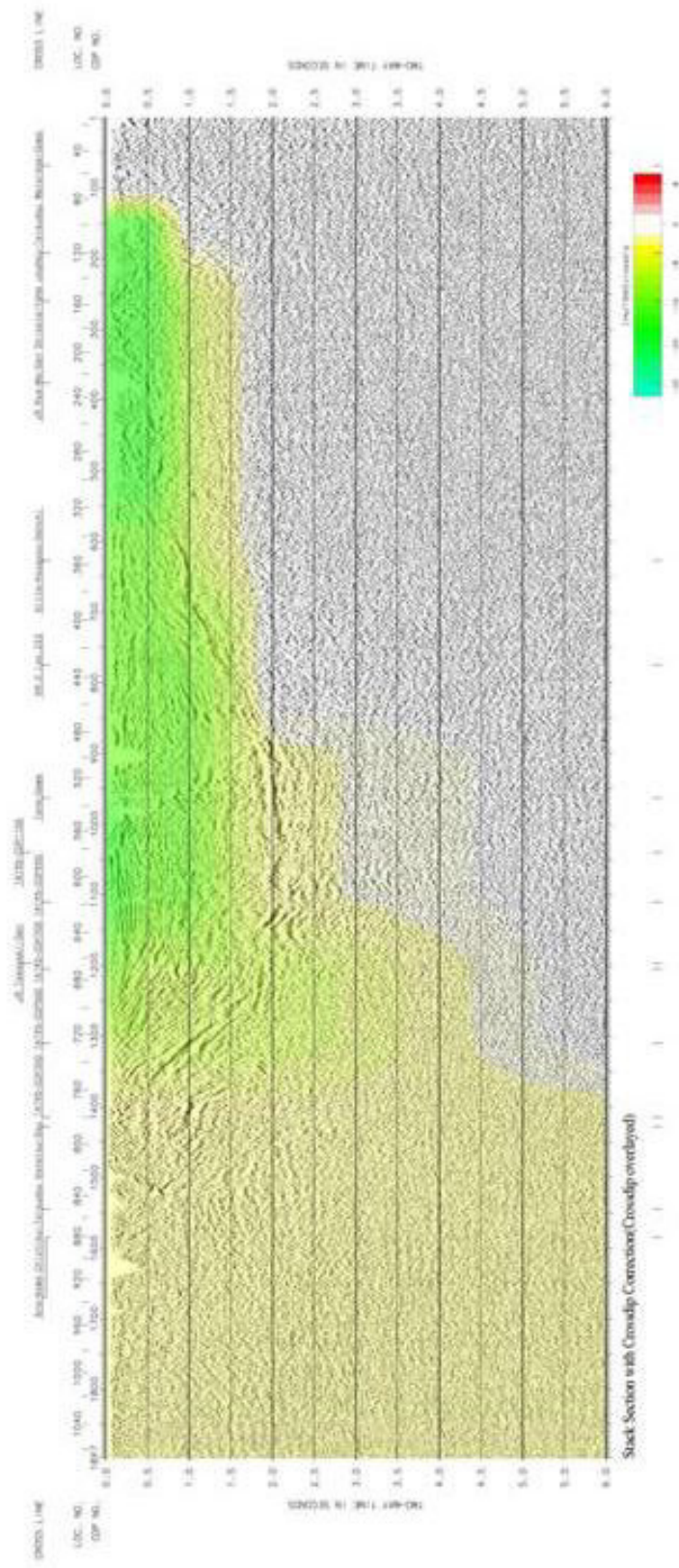


図 33 クロスディップ解析の結果推定されたクロスディップ量（重合断面上に重複表示）。



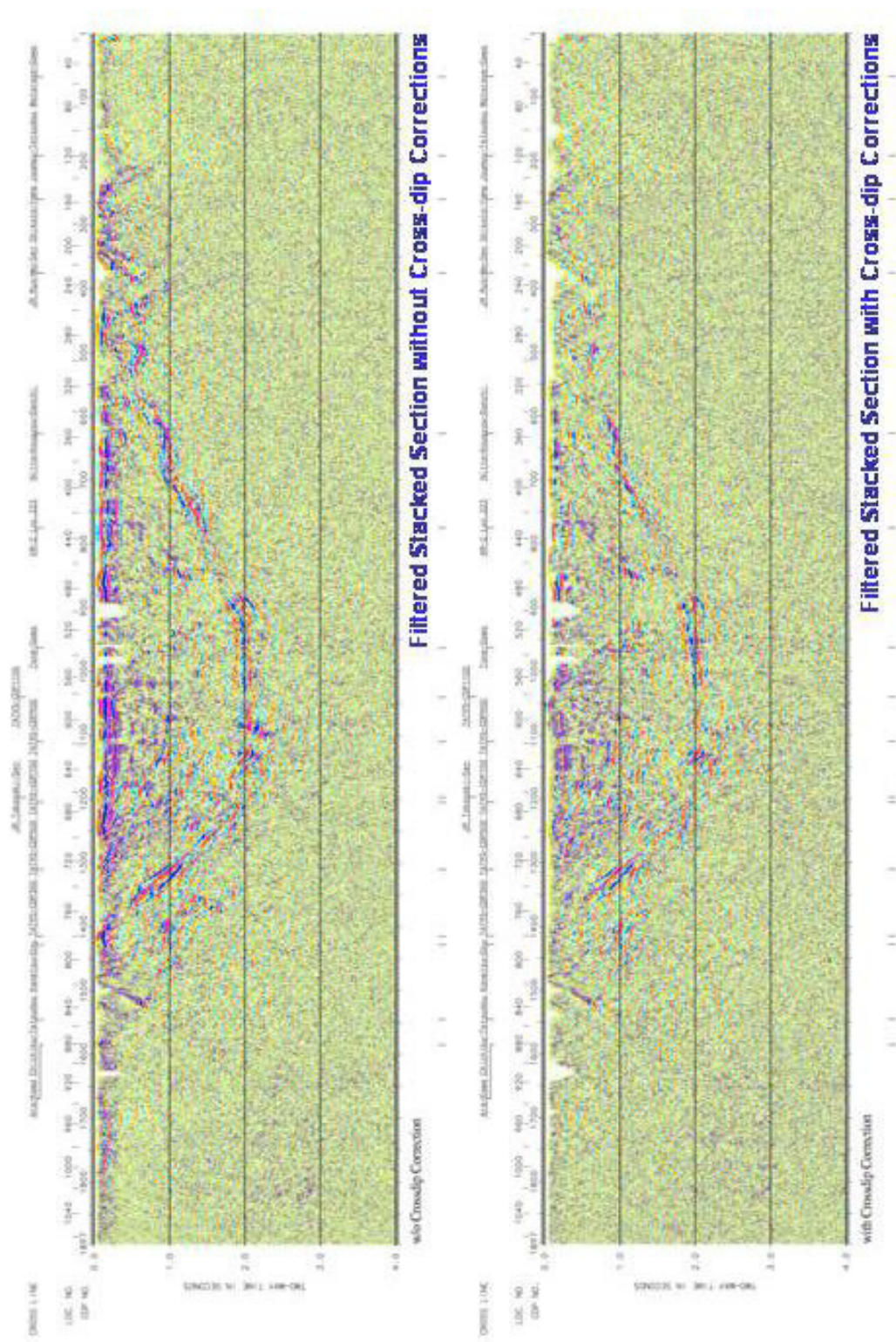


図 34 クロスディップ補正処理比較重合テスト結果





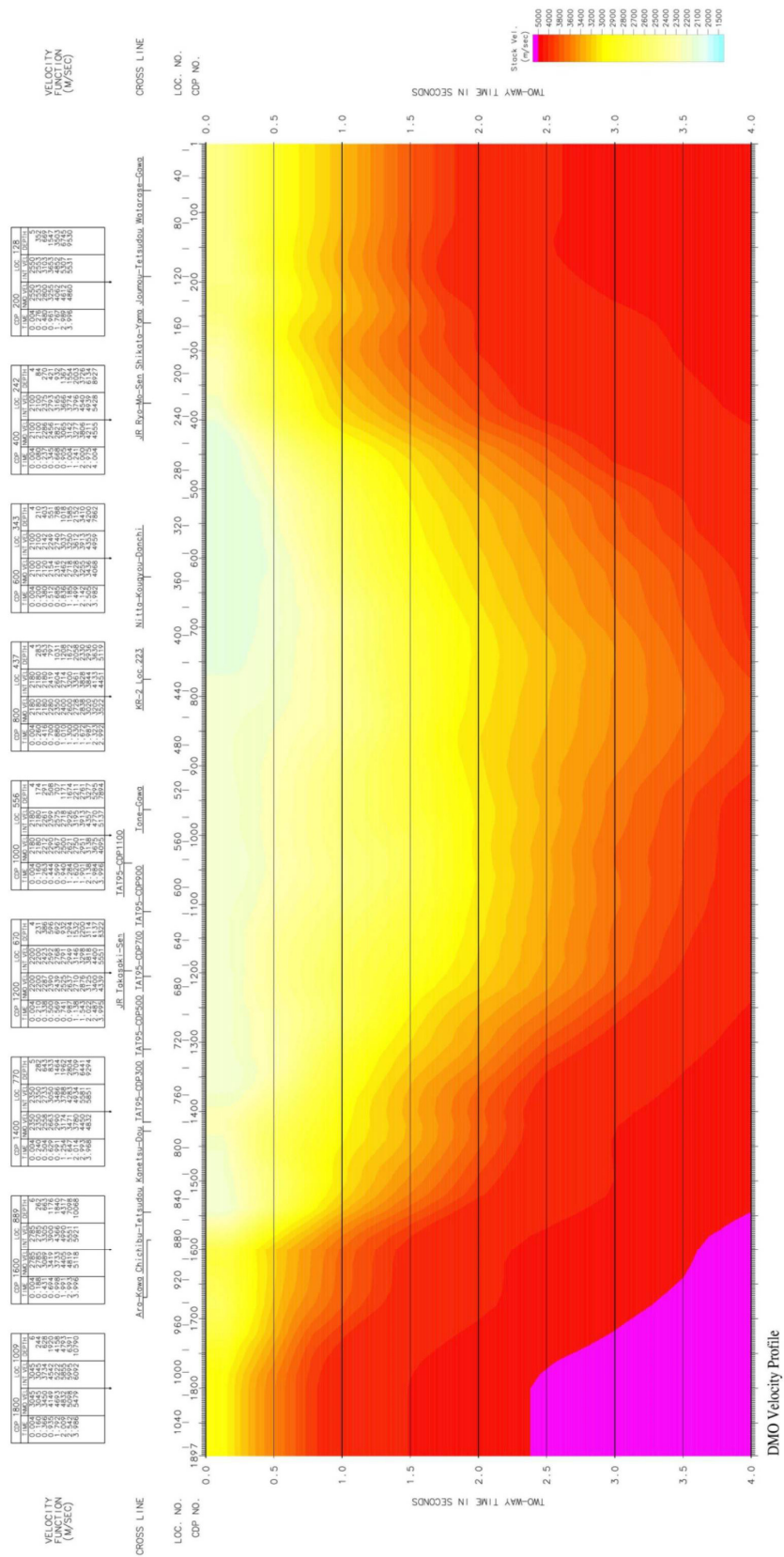


図 36 速度プロファイル(桐生測線 KR-1) (DMO 重合速度)

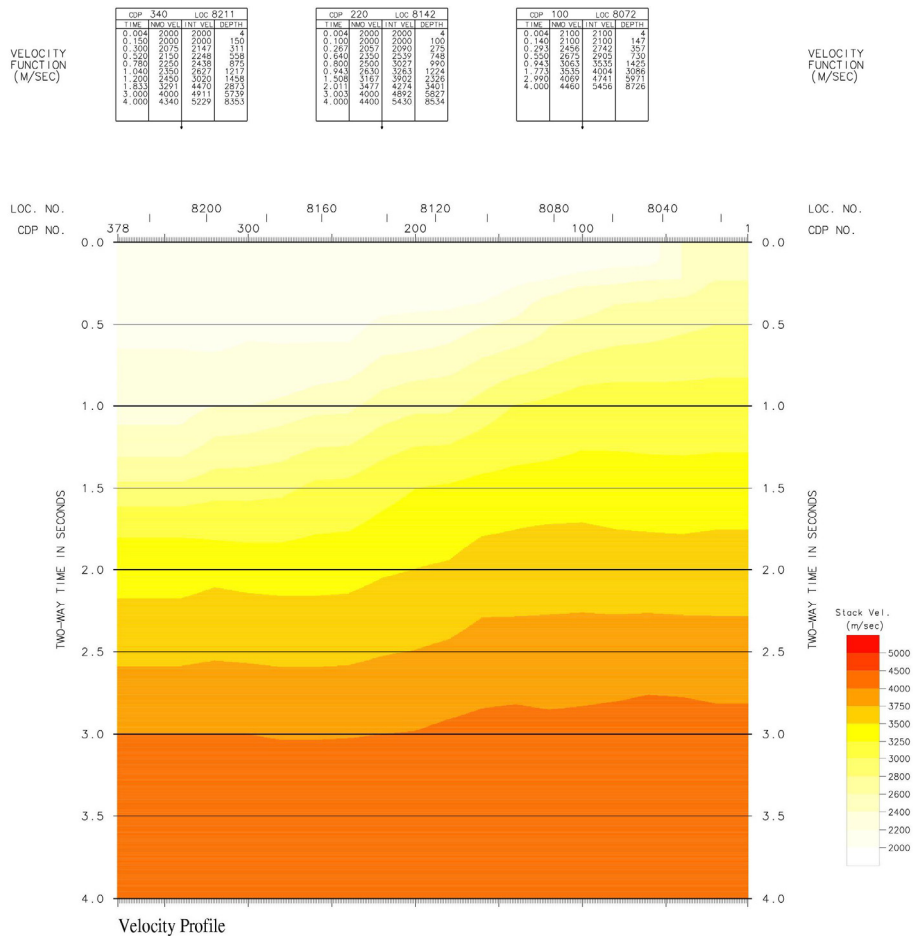


図 37 速度プロファイル(太田測線 KR-2) CMP 重合速度

#### xiv) 残差静補正( 2D Residual Static Corrections )

NMO 補正後の CMP アンサンブルを入力として、基準トレースとの相互相関関数から得られる最大ラグ値を用いて'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、これを適用した。

時間シフトの最大許容値..... 12msec(1st)

時間ウィンドー..... 100-2500msec

#### xv) DMO 重合(DMO Stack )

空間-時間領域に於けるキルヒホッフ積分型 DMO 処理を適用した。その目的は第一に、反射点を零オフセット位置にマッピングし、傾斜面に沿った反射点の広がり除去して重合効果を高めることであり、第二に重合速度の傾斜依存性を解消することである。今回の DMO 重合処理では以下の処理パラメータが採用された。

解析対象の最大傾斜角..... 70 度

解析対象の最小基準速度..... 1600m/sec

DMO オペレータの片側最大長..... 2500m

標準 DMO 重合数..... 79Folds

DMO オペレータの定義数..... 100[ 150m - 10050m 100m 間隔 ]

|                      |                               |
|----------------------|-------------------------------|
| DMO 重合オフセット距離範囲..... | 150 - 10050m                  |
| 振幅補償.....            | F-K DMO 等価型                   |
| 位相補償.....            | dip-dependent alias filter 適用 |

xvi) 周波数-空間領域予測フィルター( F-X Prediction Filter )

周波数-空間領域に於いて複素型予測フィルターを設計・適用して、ランダムノイズを抑制し相対的に S/N を向上させる以下の F-X 予測フィルター処理を実施した。

|               |          |
|---------------|----------|
| オペレータ長.....   | 3 CDPs   |
| 空間ウィンドー長..... | 50 CDPs  |
| 時間ウィンドー長..... | 500 msec |

xvii) 帯域通過フィルター( Bandpass Filter )

反射波の有効周波数帯域が周波数成分解析によって決定され、以下の零位相帯域通過フィルターが採用された。

|                   |                            |
|-------------------|----------------------------|
| オペレータ長.....       | 500 msec                   |
| 周波数通過帯域往復走時 ..... | 0.0sec / 通過帯域[ 3 - 40Hz ]  |
|                   | 1.0sec / 通過帯域[ 3 - 35Hz ]  |
|                   | 2.0sec / 通過帯域[ 3 - 30Hz ]  |
|                   | 4.0sec / 通過帯域[ 3 - 25Hz ]  |
|                   | 8.0sec / 通過帯域[ 3 - 20Hz ]  |
|                   | 16.0sec / 通過帯域[ 3 - 20Hz ] |

これらの通過帯域のフィルターパラメータは線型内挿される。

xviii) 基準面補正( Datum Corrections )

浮動基準面から基準面への、時間補正が適用された。

xix) 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。この手法では、重合測線に沿った標高変化と測線の屈曲への対応が可能である。以下に適用パラメータを示す。

|                |        |
|----------------|--------|
| 最大アパチャー距離..... | 6000 m |
| 最大傾斜角度.....    | 60 度   |

xx) 深度変換 (Depth Conversion)

図 36 及び図 37 に示した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。

以上の処理ステップを逐次経ることによって、図 38-40 の CMP/DMO 重合処理断面図、図 41-43 の時間マイグレーション断面図が得られた。また、これらの重合記録及び時間マイグレーション記録を用いて深度変換を実施した結果を、図 44-49 に示した。



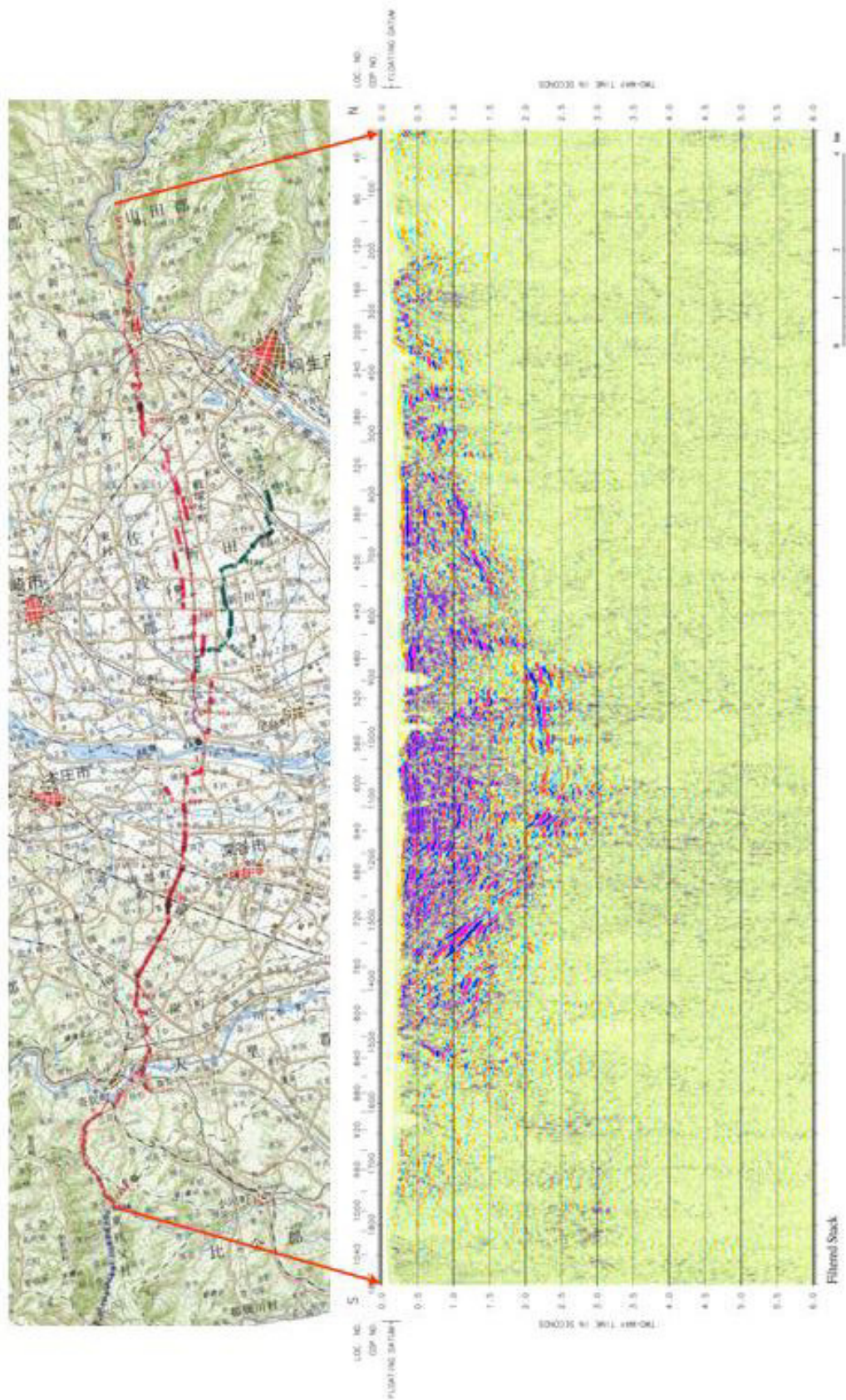


図 38 CMP/DMO 重合時間断面図 [1] 桐生測線 KR-1 CMP 重合時間断面図



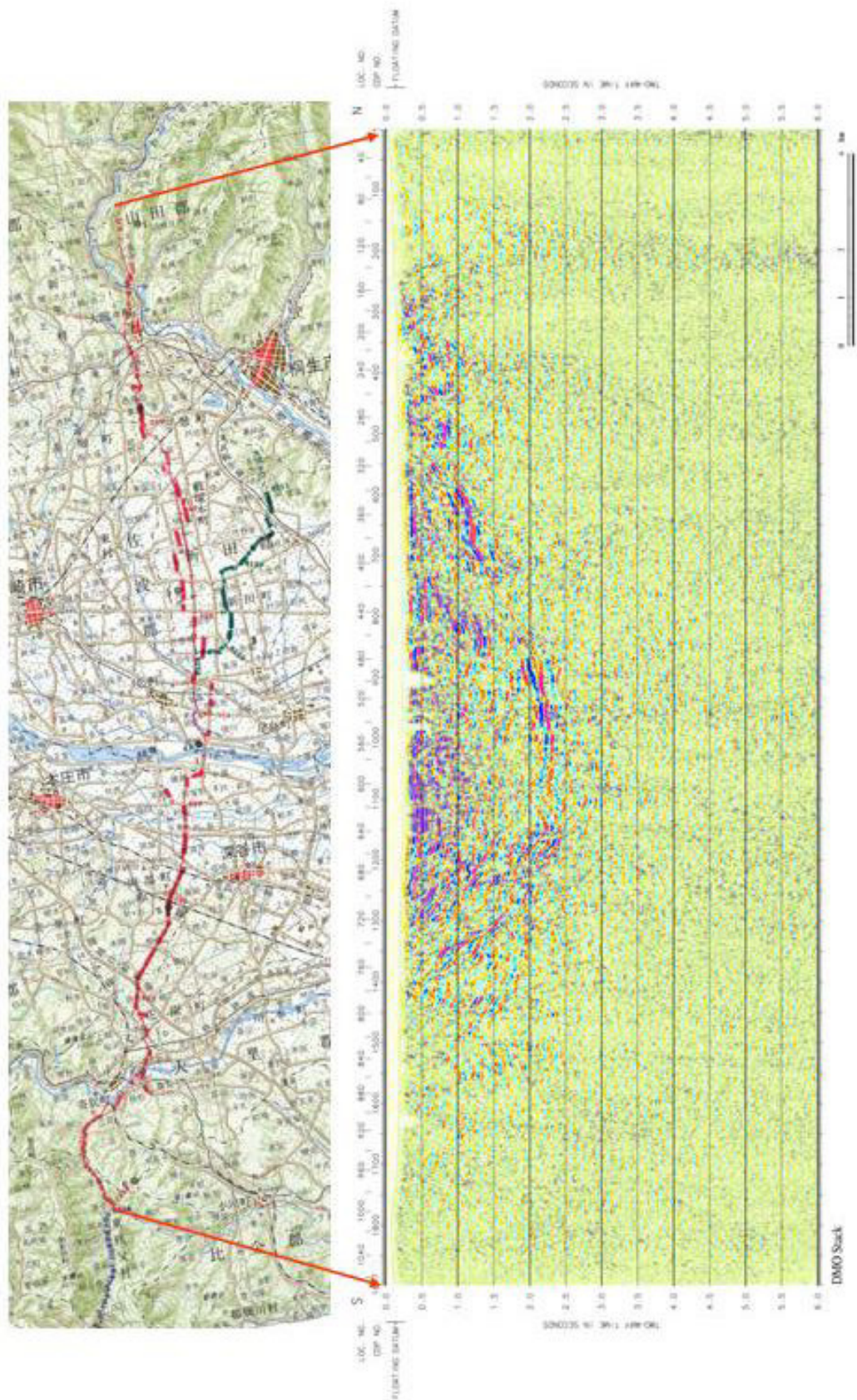


図 39 CMP/DMO 重合時間断面図 [2] 桐生測線 KR-1 DMO 重合時間断面図



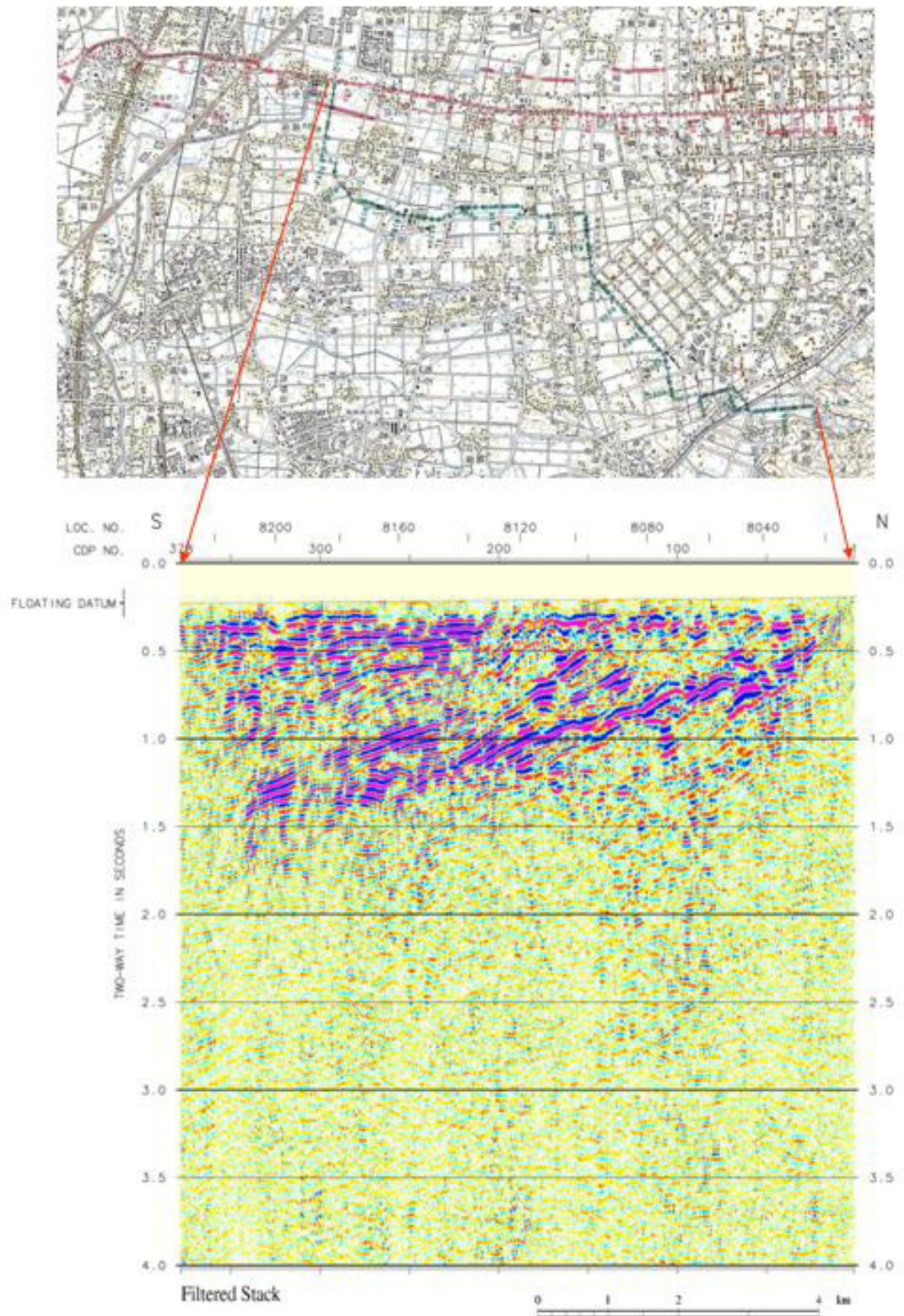


図 40 CMP 重合時間断面図 太田測線 KR-2 CMP 重合時間断面図



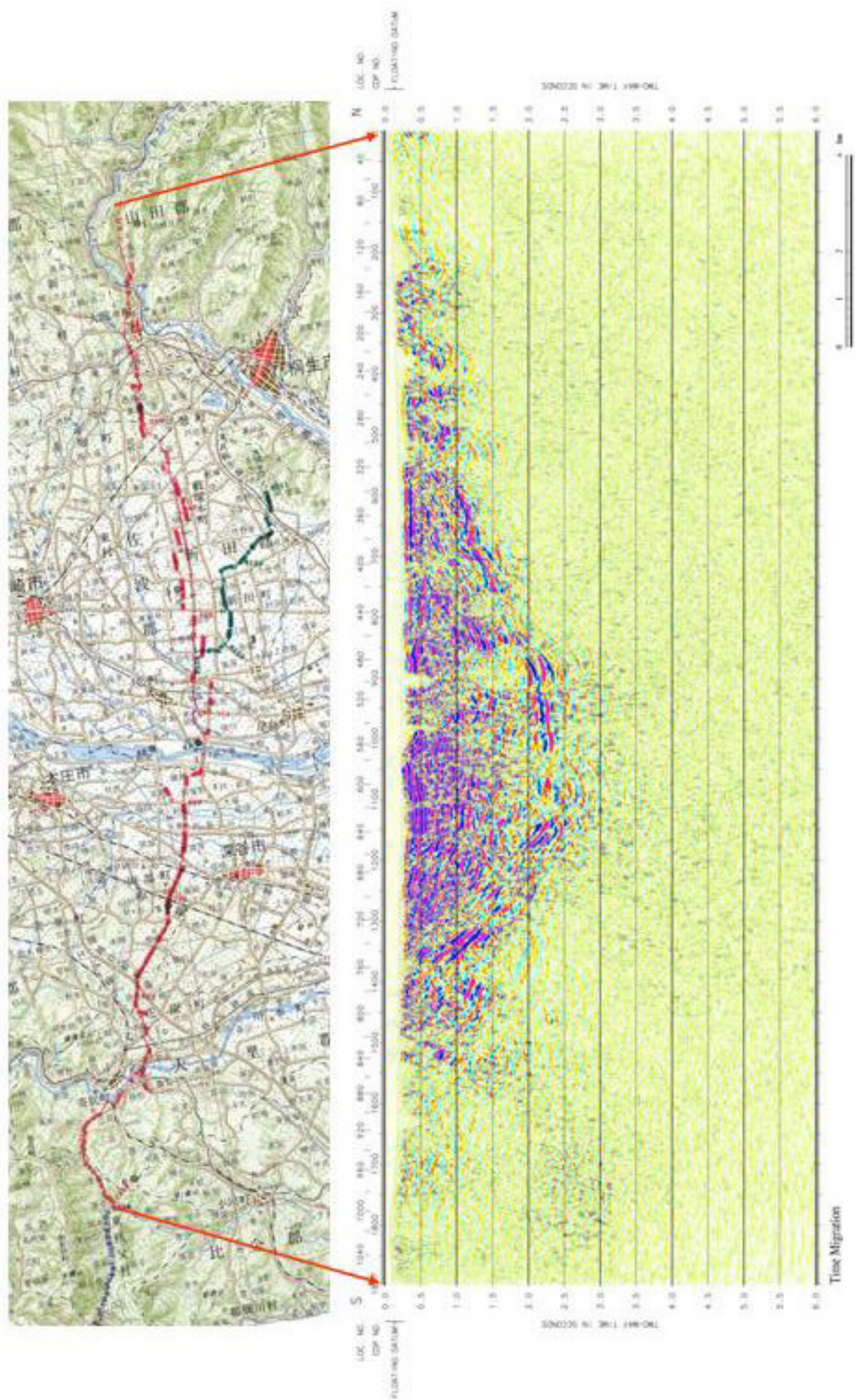


図 41 重合後時間マイグレーション断面図 [1] 桐生測線 KR-1 CMP 重合+‘Geometry-oriented’キルヒホッフマイグレーション



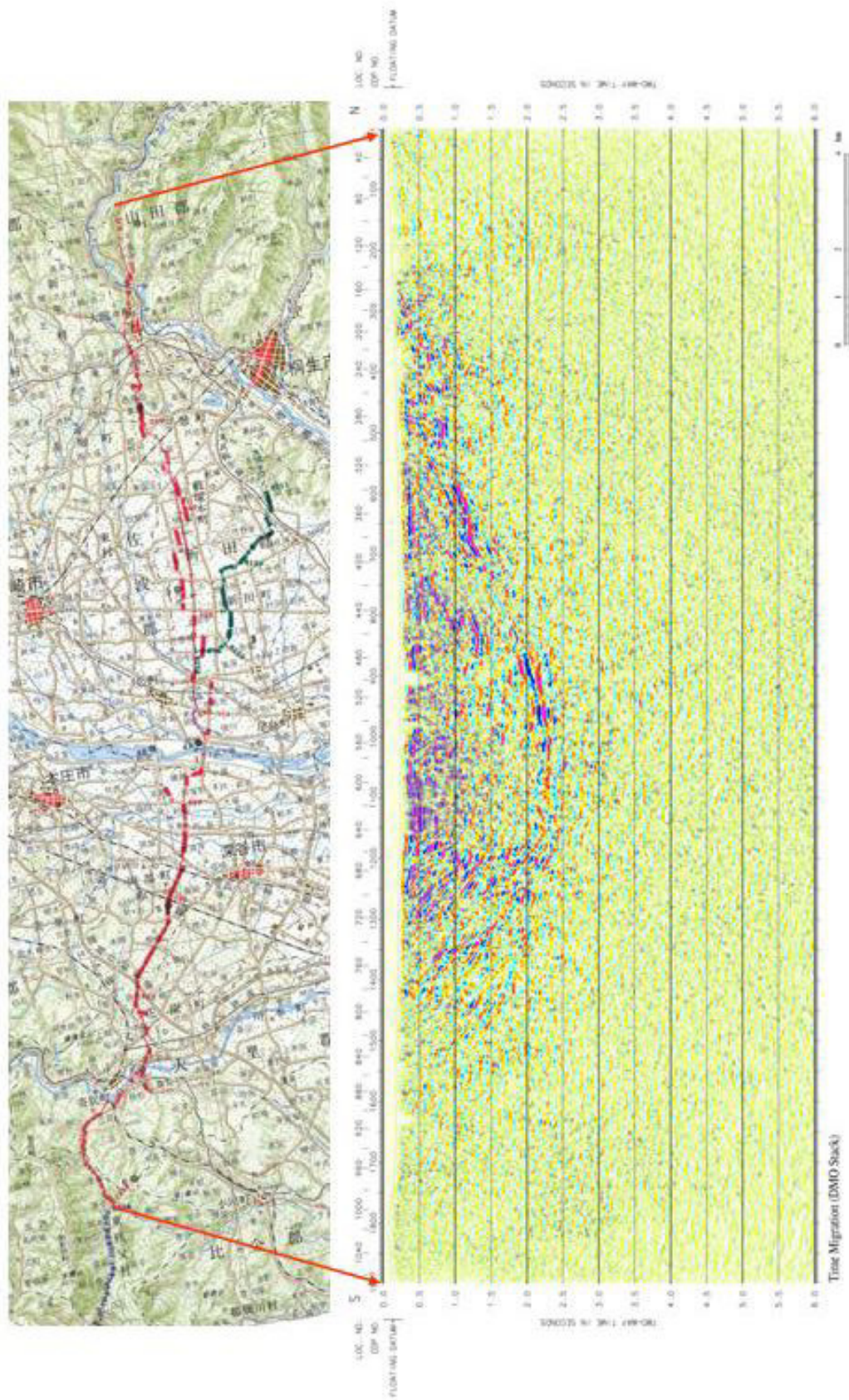


図 42 重合後時間マイグレーション断面図 [2] 桐生測線 KR-1 DMO 重合+‘Geometry-oriented’キルヒホッフマイグレーション



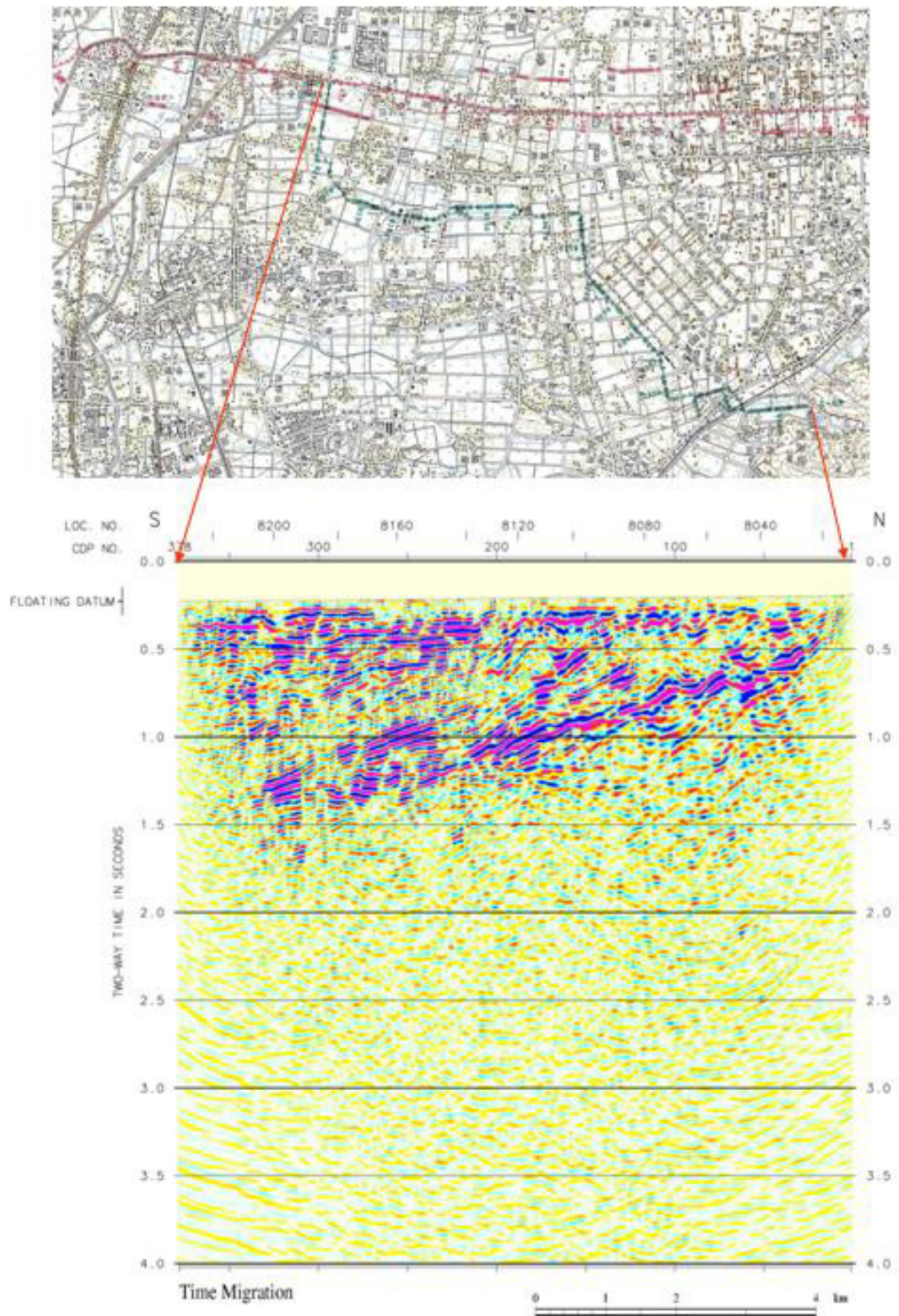


図43 重合後時間マイグレーション断面図 太田測線KR-2  
CMP 重合+Geometry-oriented'キルヒホッフマイグレーション



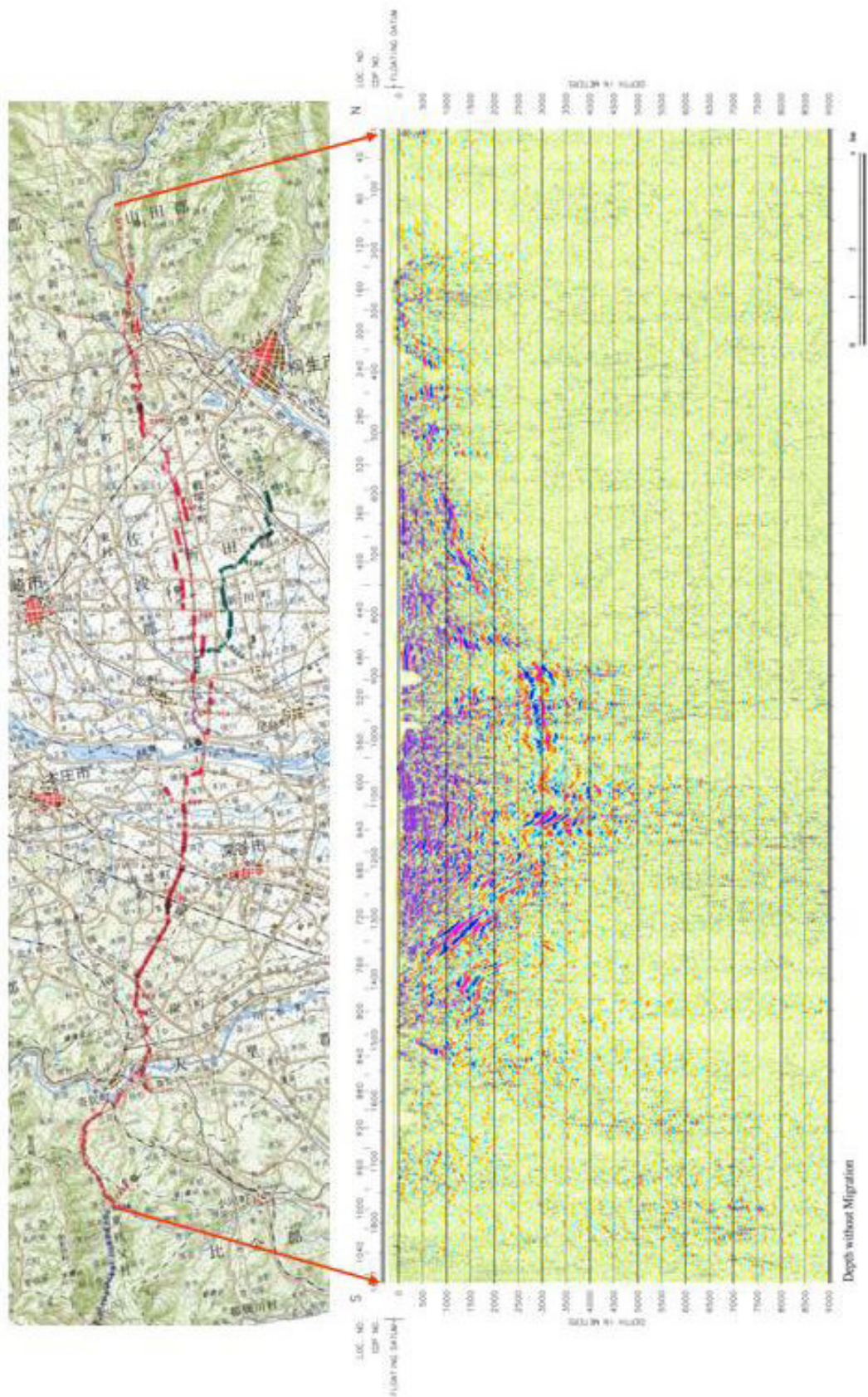


図 44 深度断面図 [1] 桐生測線 KR-1 CMP 重合+深度変換



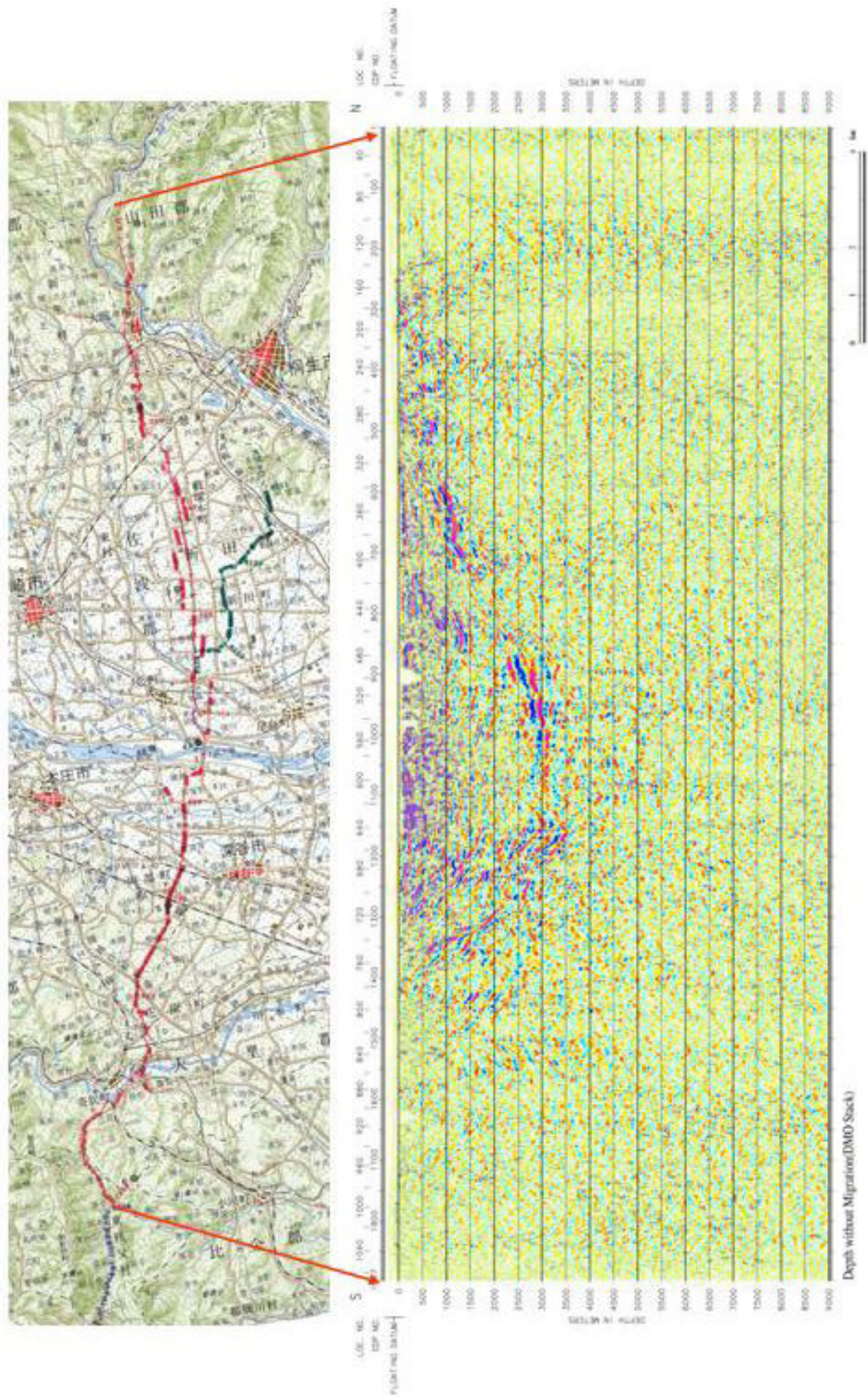


図 45 深度断面図 [2] 桐生測線 KR-1 DMO 重合+深度変換



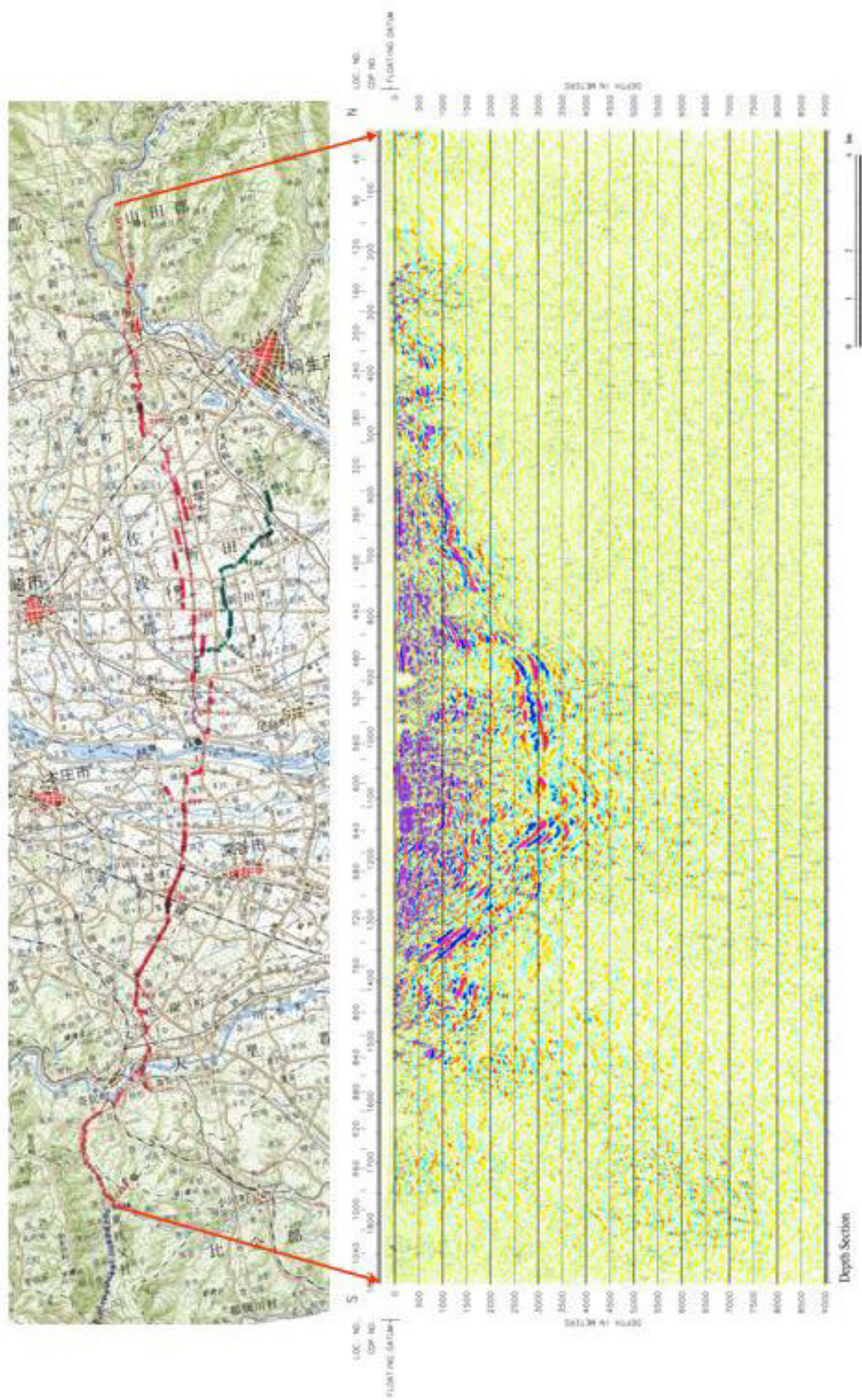


図 46 深度断面図 [3] 桐生測線 KR-1 CMP 重合+Geometry-oriented'キルヒホッフマイグレーション+深度変換



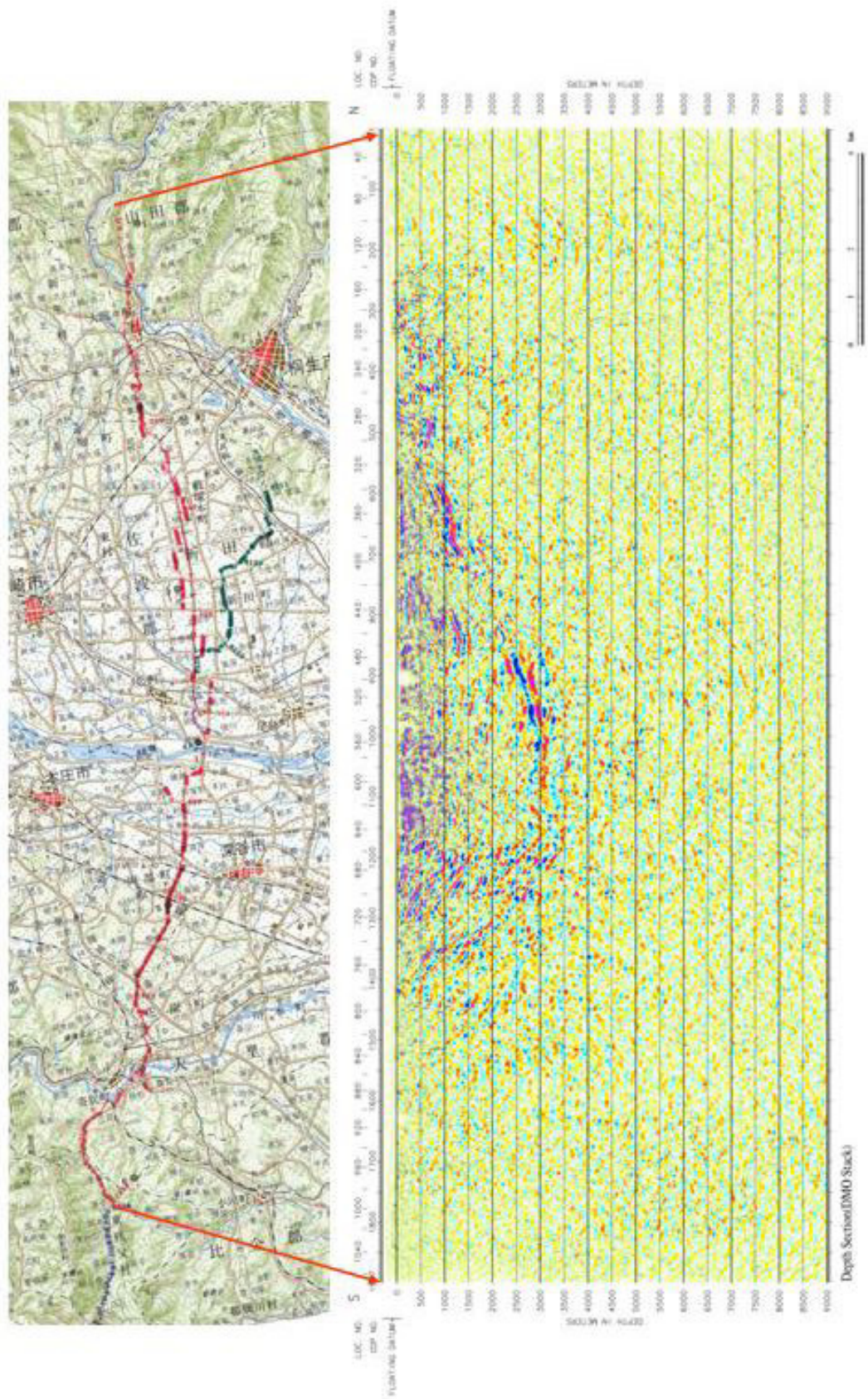


図 47 深度断面図 [4] 桐生測線 KR-1 DMO 重合+‘Geometry-oriented’キルヒホッフマイグレーション+深度変換



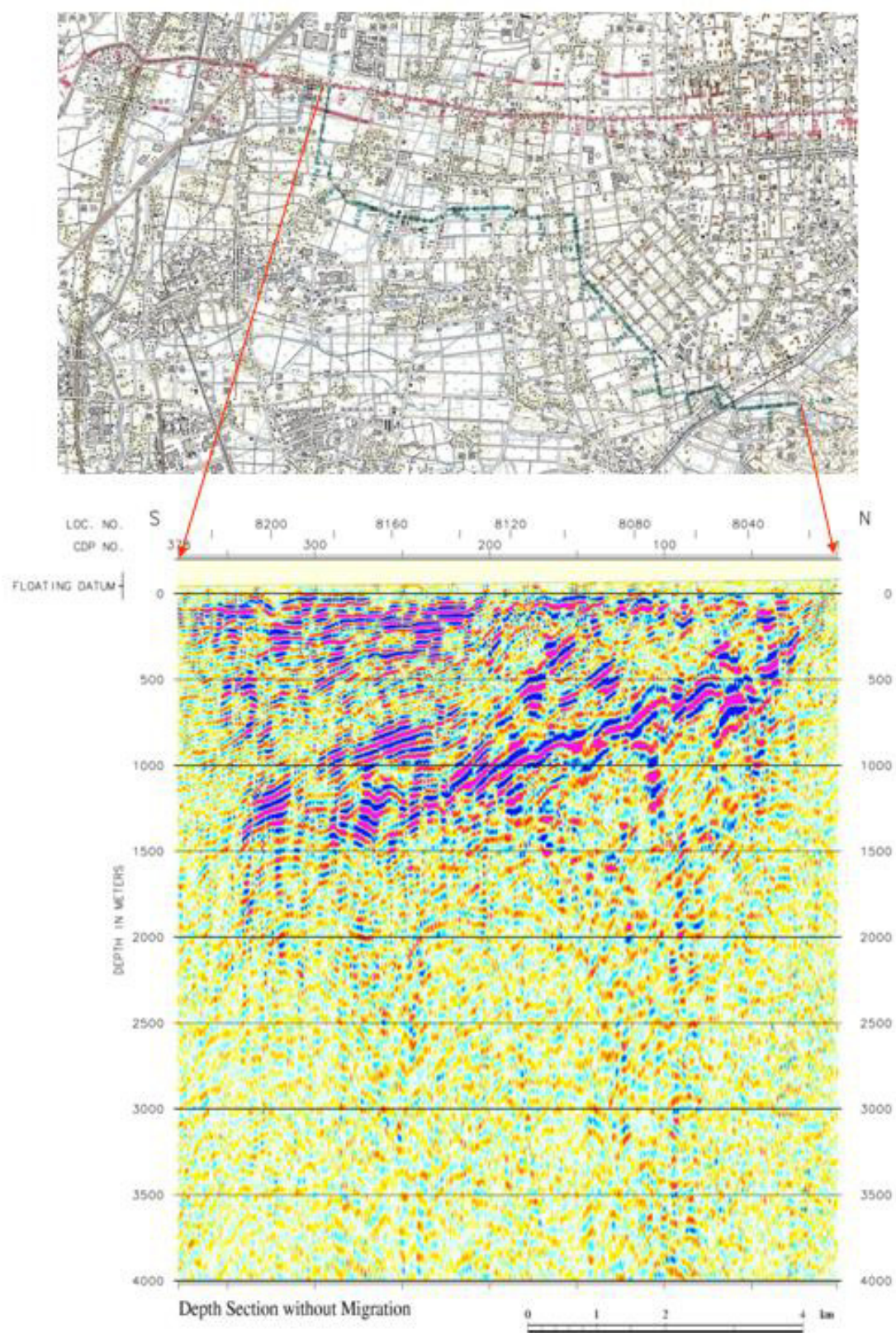


図 48 深度断面図 太田測線 KR-2 CMP 重合+深度変換



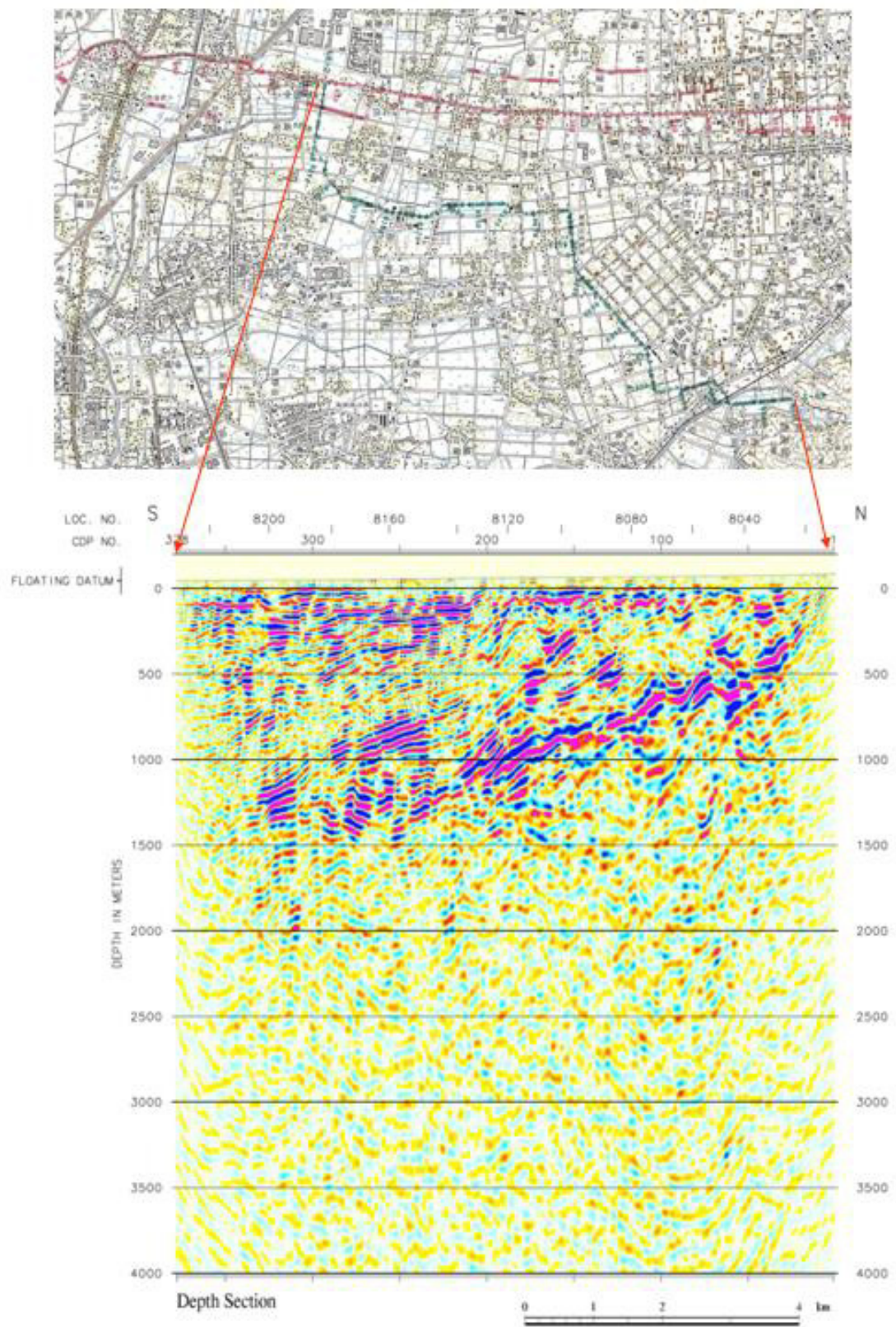


図49 深度断面図 太田測線KR-2

CMP 重合+'Geometry-oriented'キルヒホッフマイグレーション+深度変換

## b) 反射法松田バイブレータ測線データ解析

本節では、広域測線南端部の神奈川県秦野市-同県南足柄市間に位置する丹沢山地南部から足柄平野におけるバイブレータ松田測線MA-1(測線長 16km)の反射法データ処理内容について記述する。図 50 に、データ処理フローを示す。この測線の内県道 78 号線御殿場大井線沿いの区間は平成 2 年度に科学技術庁防災科学技術研究所（当時）が実施した反射法地震探査測線(AS-90)と重複している。今回の松田測線では、平成 2 年当時と比較して都市化の進行が著しく、制御出力 20%以下でバイブレータ 1~2 台による低エネルギーによる発震をせざるを得なかった区間は全体の 38%に達した。従って、データ解析に際しては(独)防災科学技術研究所から AS-90 測線のデータ使用について承認を得て、MA-1(発震点数 94 点)及び AS-90(発震点数 142 点)の両データを同一測線で得られた記録と見なしてデータ処理を実施した。尚、各処理内容に関する解説は、前述した内容と重複するため省略する。各処理ステップについての詳細パラメータは表 1、2 の反射法各測線データ解析における処理パラメータの一覧に示した。図 51 にタイムターム法によって推定された表層速度構造、図 52 に重合速度プロファイル、図 53、54 に重合断面、図 55、56 に時間マイグレーション断面、図 57-60 に深度変換断面を示した。

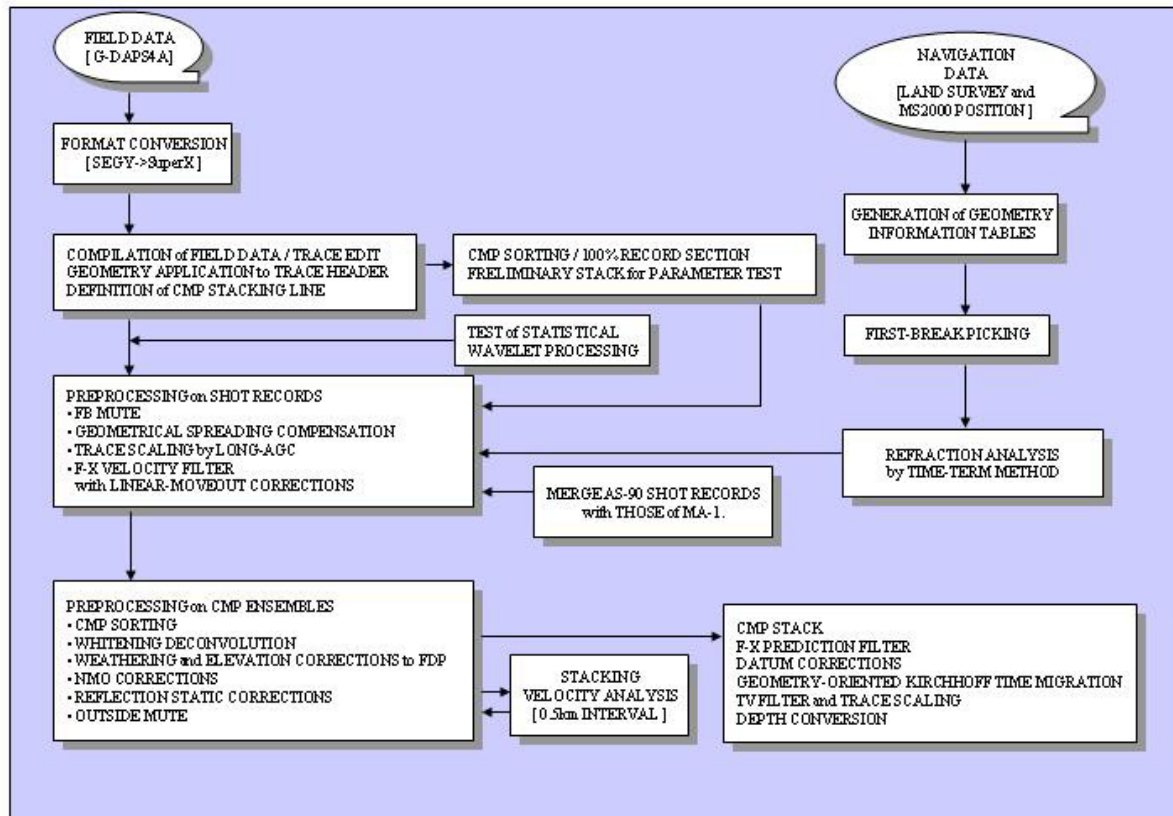


図 50 松田測線反射法データ処理フロー



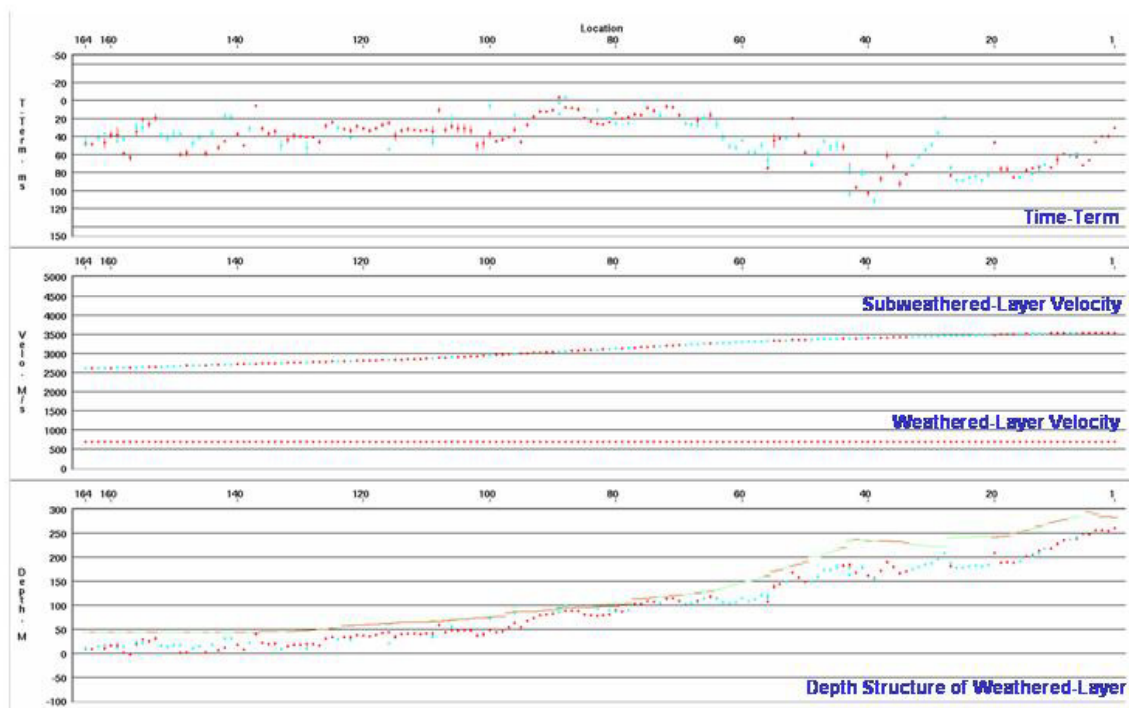
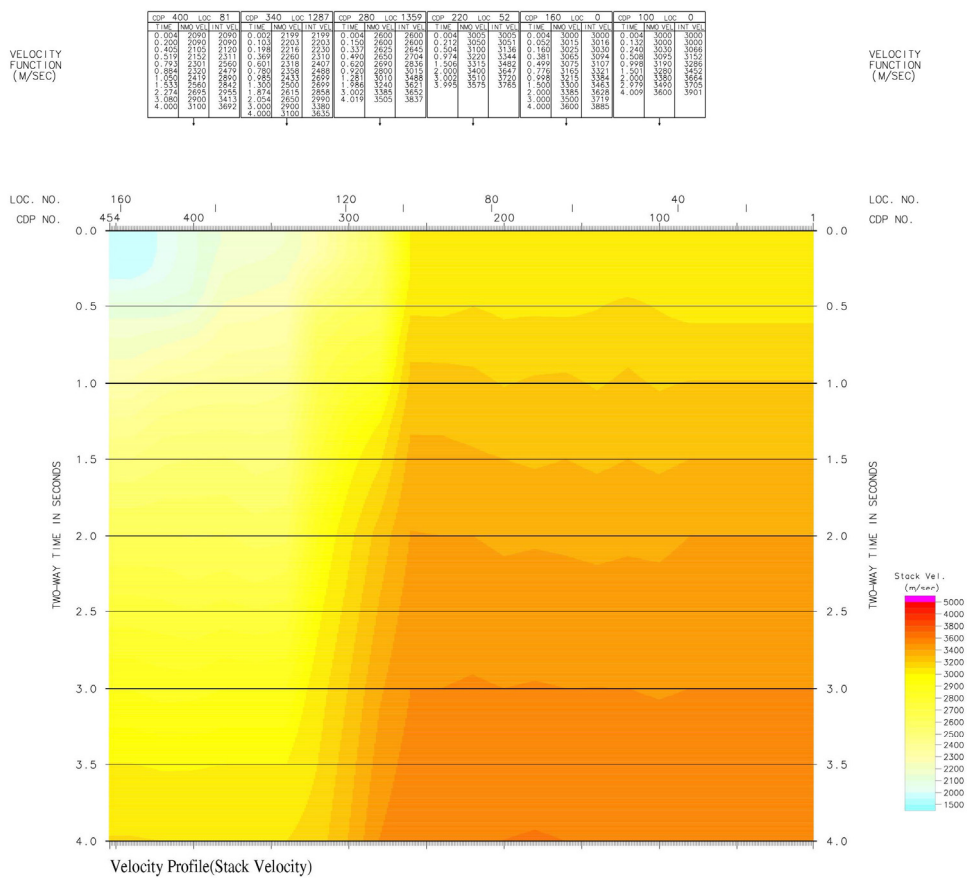


図 51 松田測線におけるタイムターム法によって推定された表層速度構造図



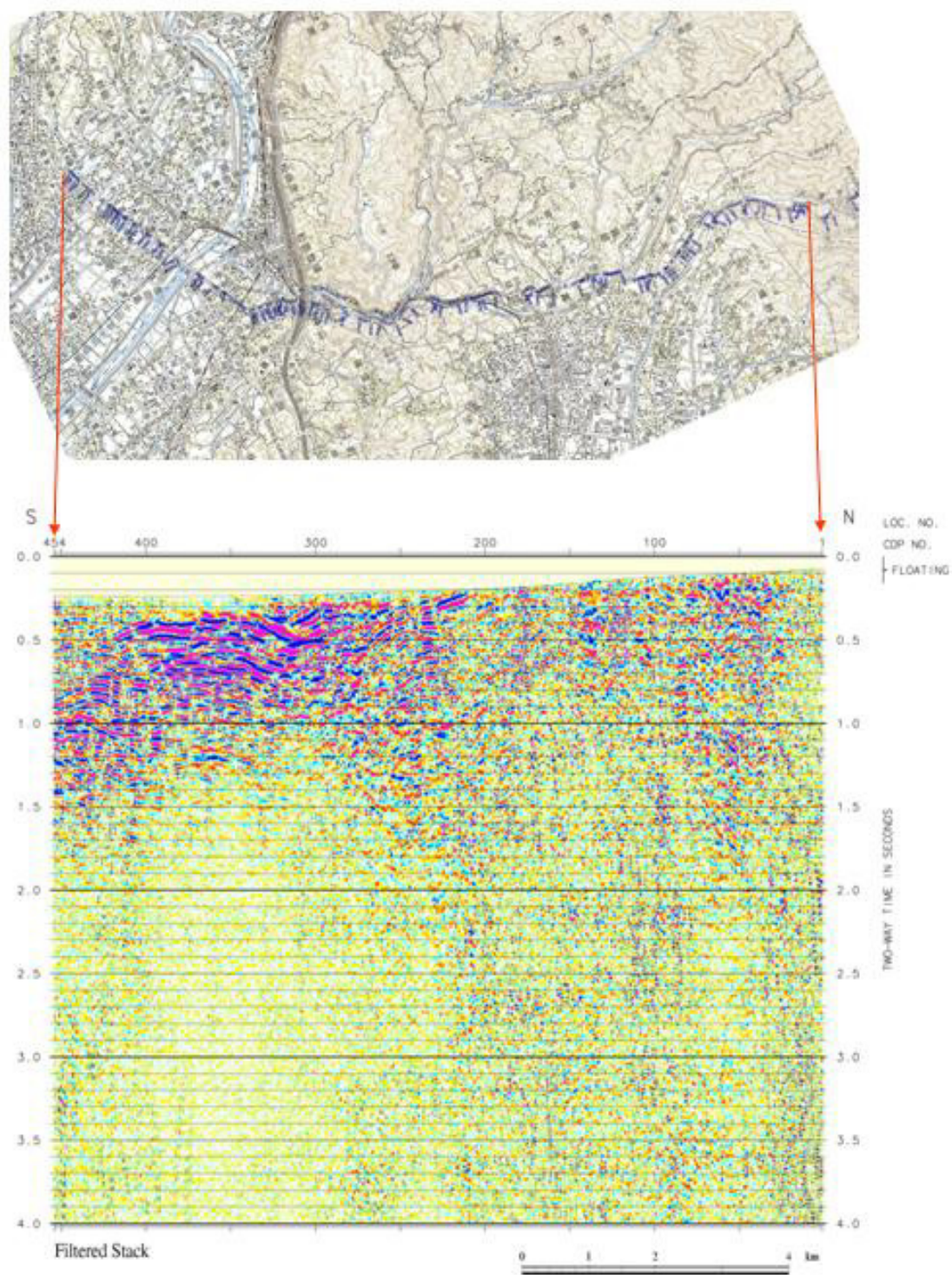


図 53 CMP 重合断面図 [1] 表示時間(0.0-4.0sec)



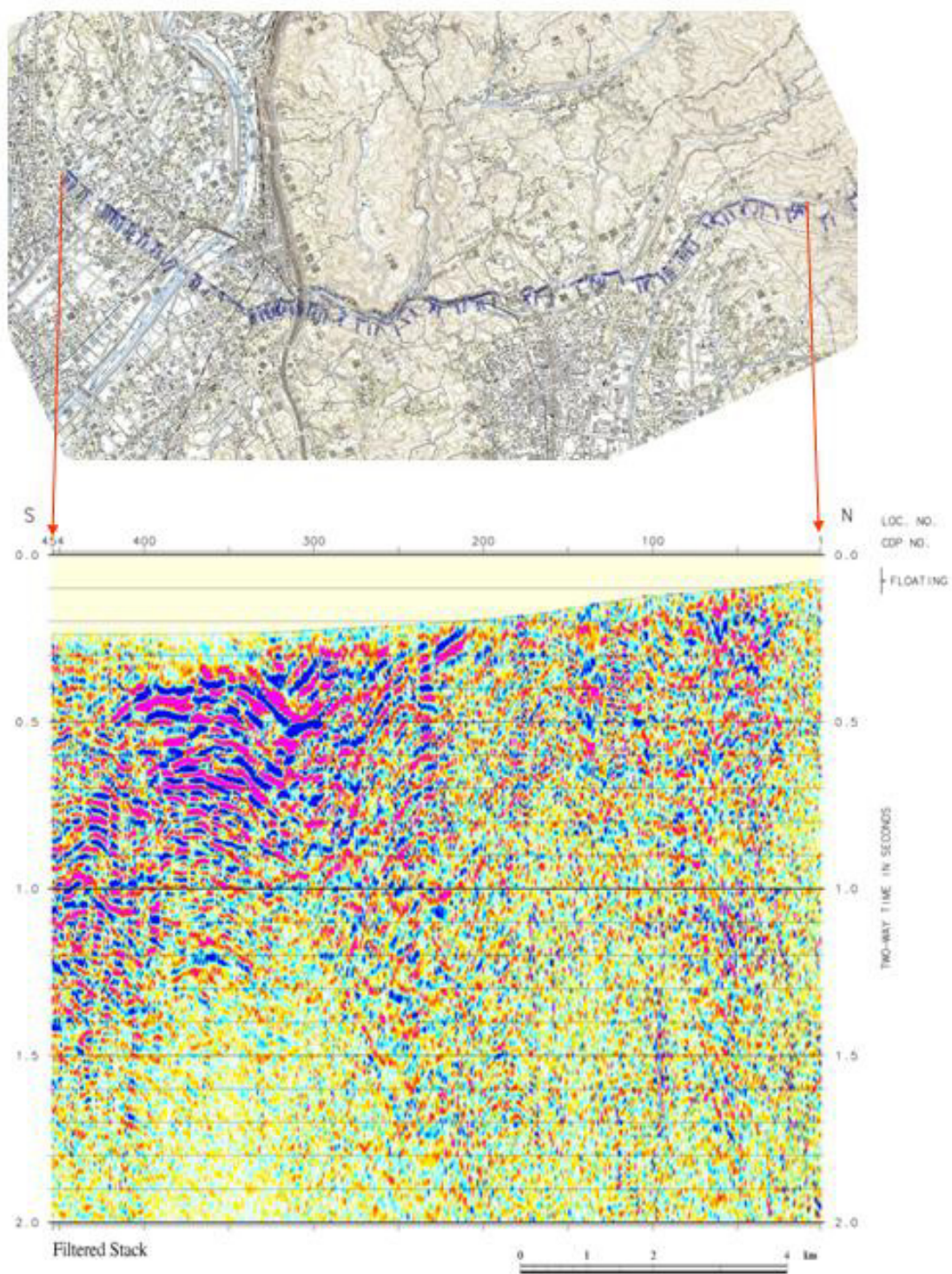


図 54 CMP 重合断面図 [2] 表示時間(0.0-2.0sec)



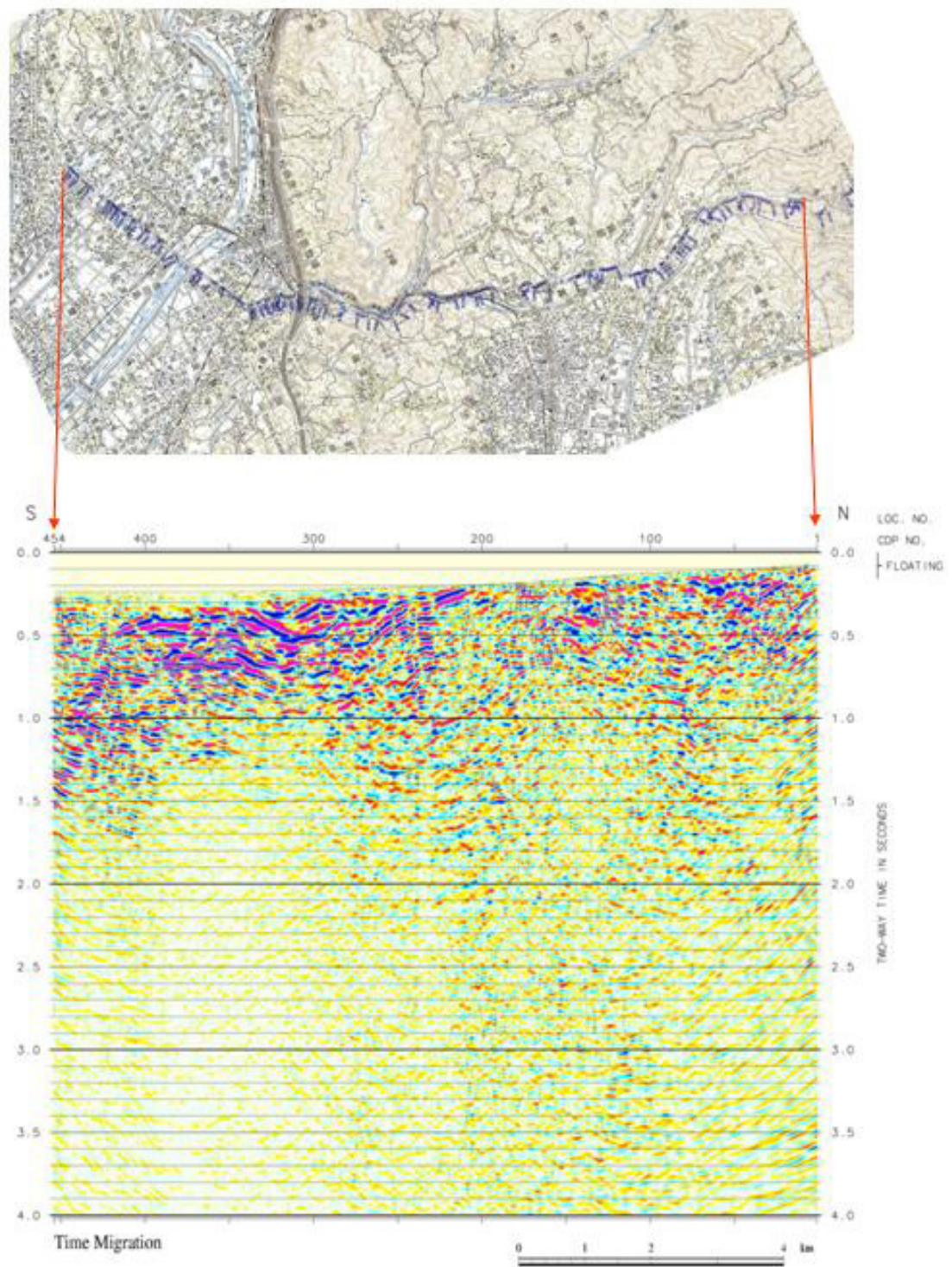


図 55 重合後時間マイグレーション断面図[1] 表示時間(0.0-4.0sec)



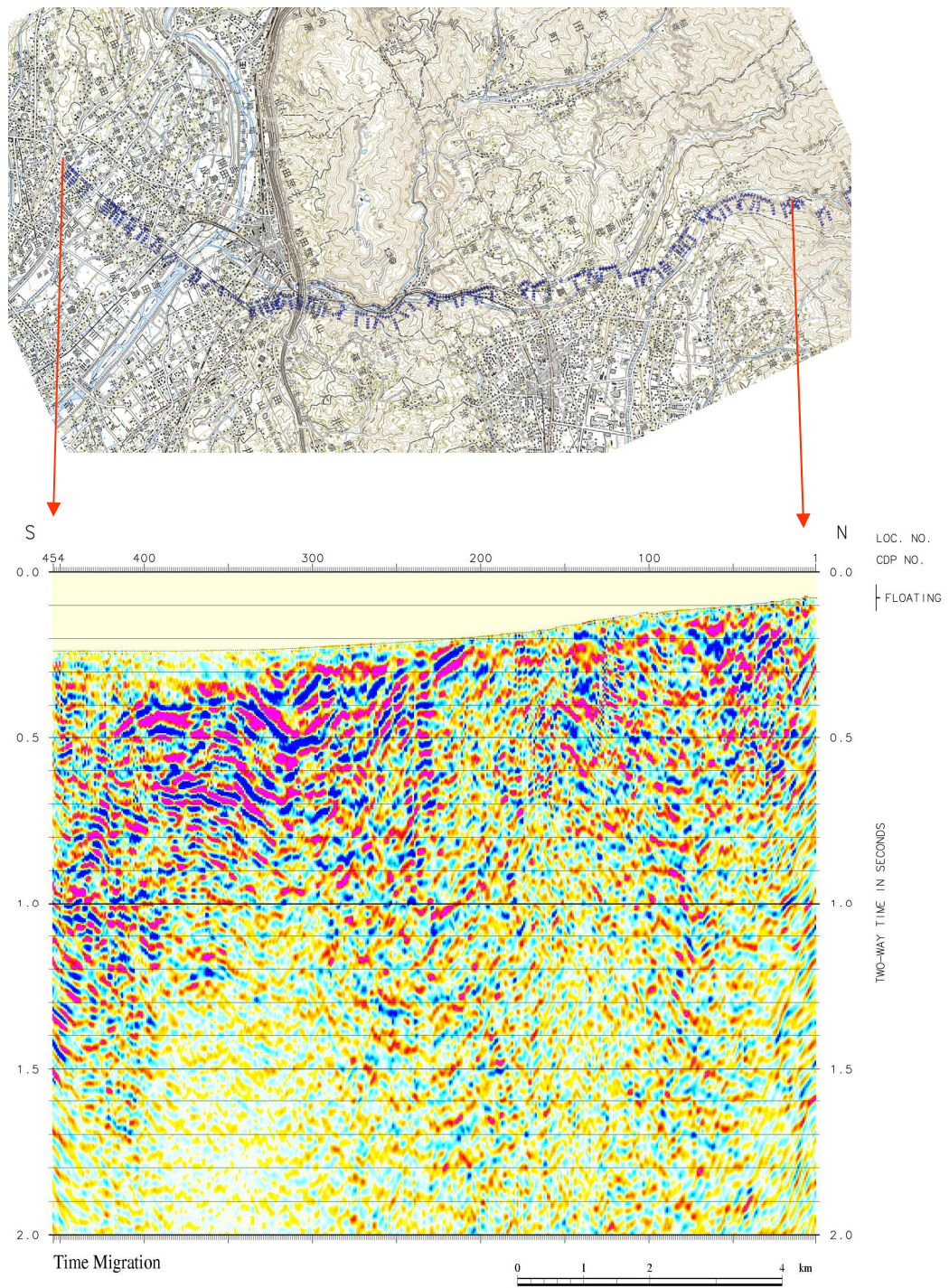


図 56 重合後時間マイグレーション断面図 [2] 表示時間(0.0-2.0sec)



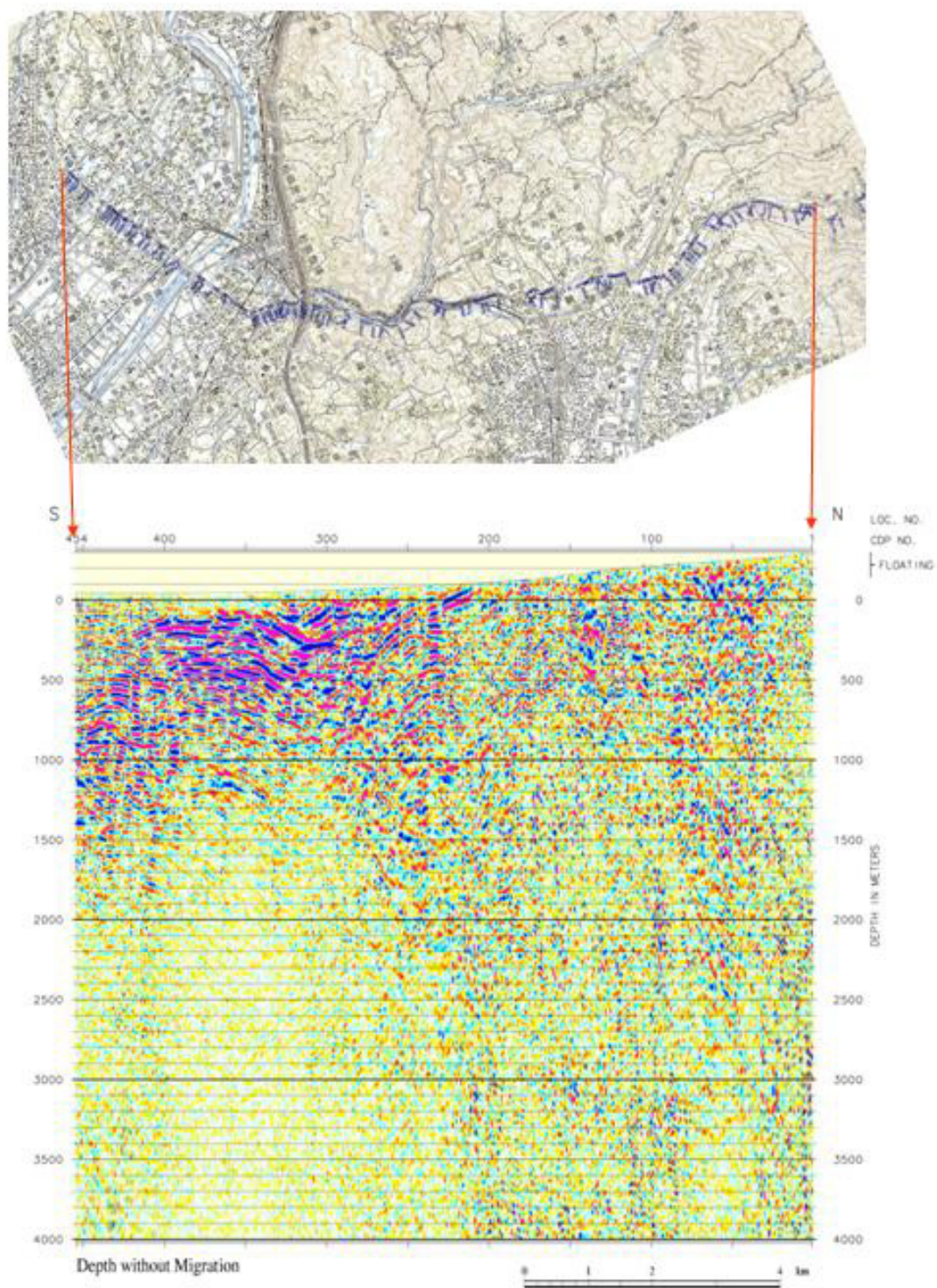


図 57 深度断面図 [1] CMP 重合記録 (-0.3-4.0km)



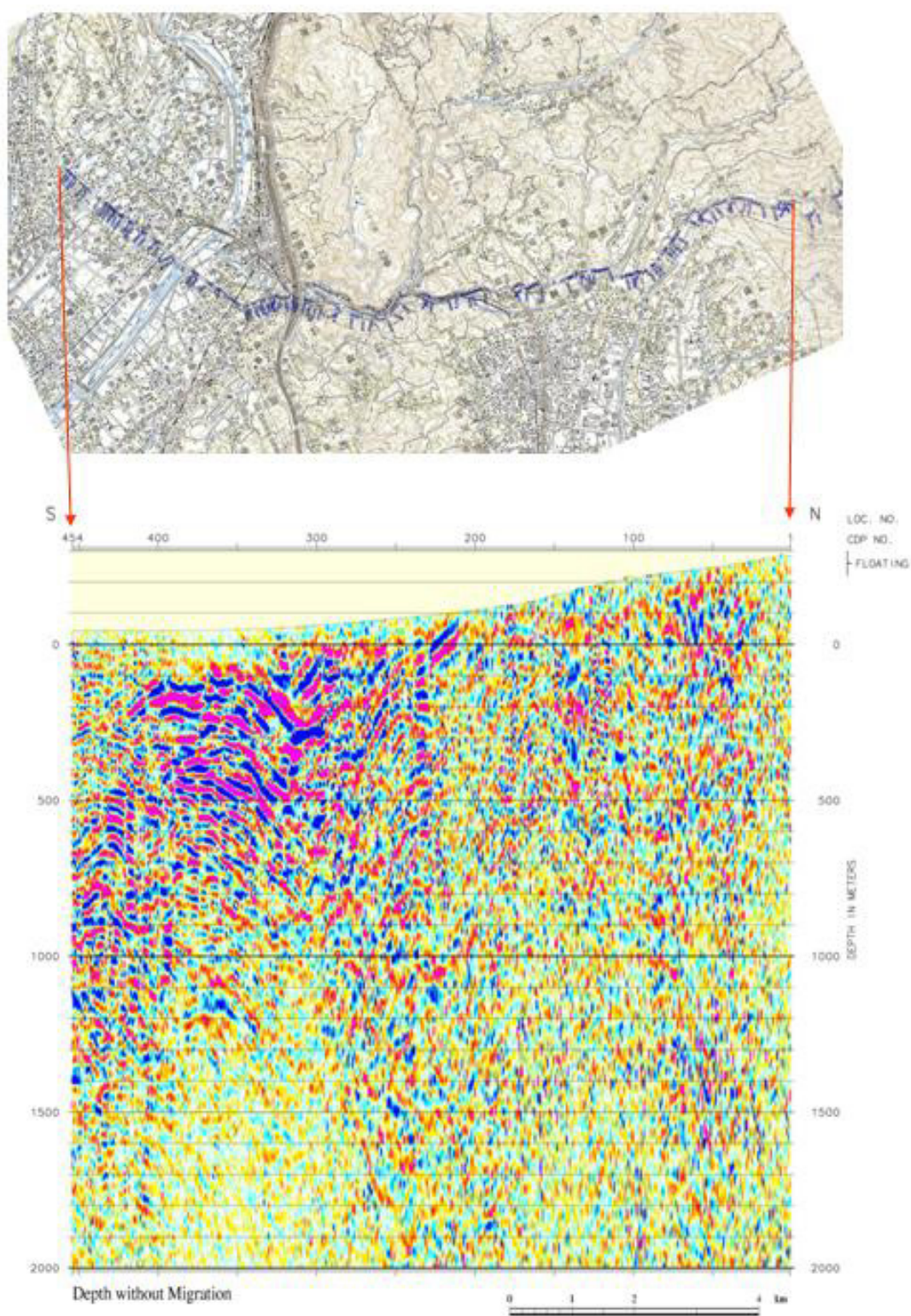


図 58 深度断面図 [2] CMP 重合記録 (-0.3-2.0km)



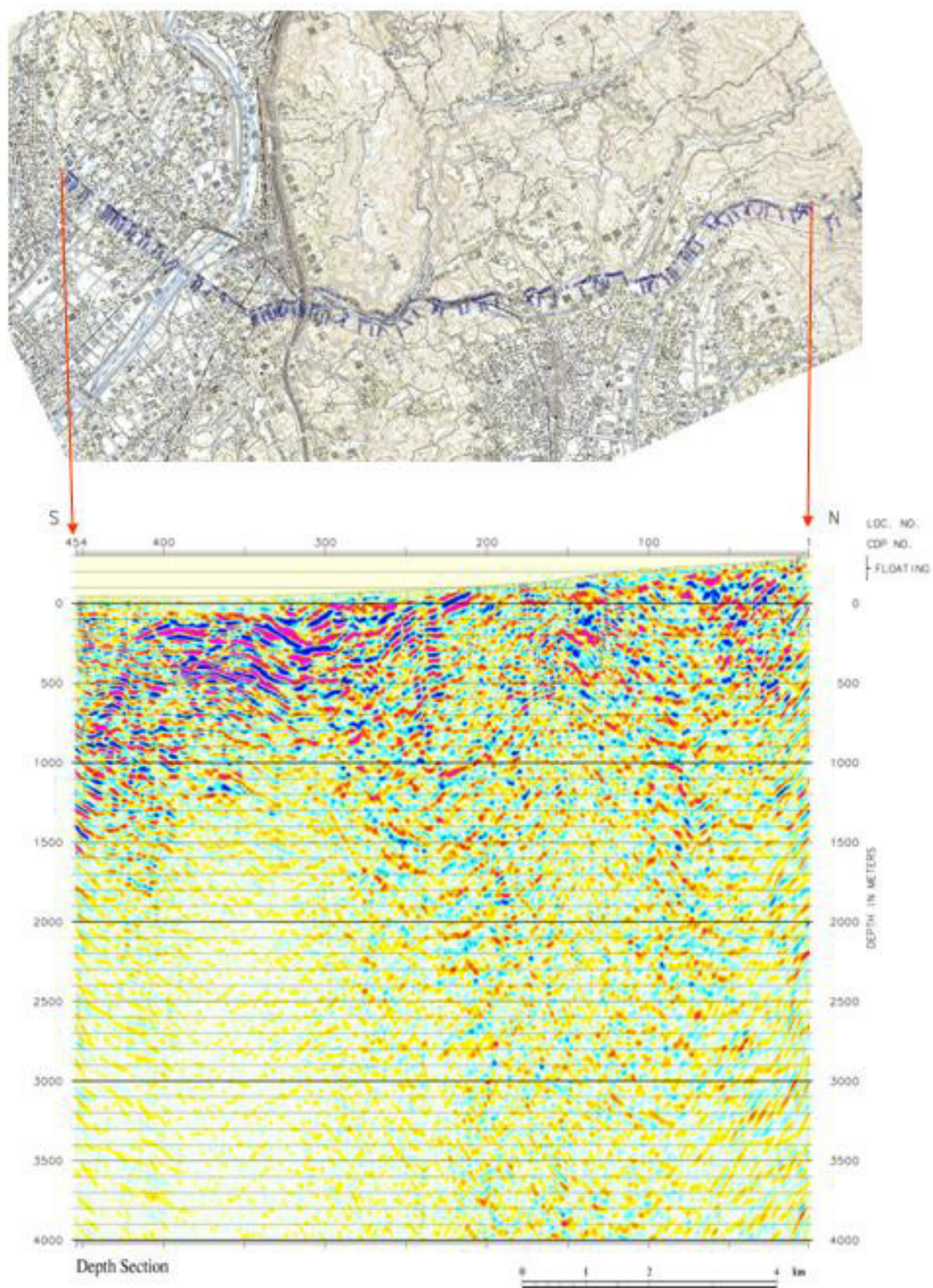


図 59 深度断面図 [3] 'Geometry-oriented'キルヒホッフマイグレーション記録(-0.3-4.0km)



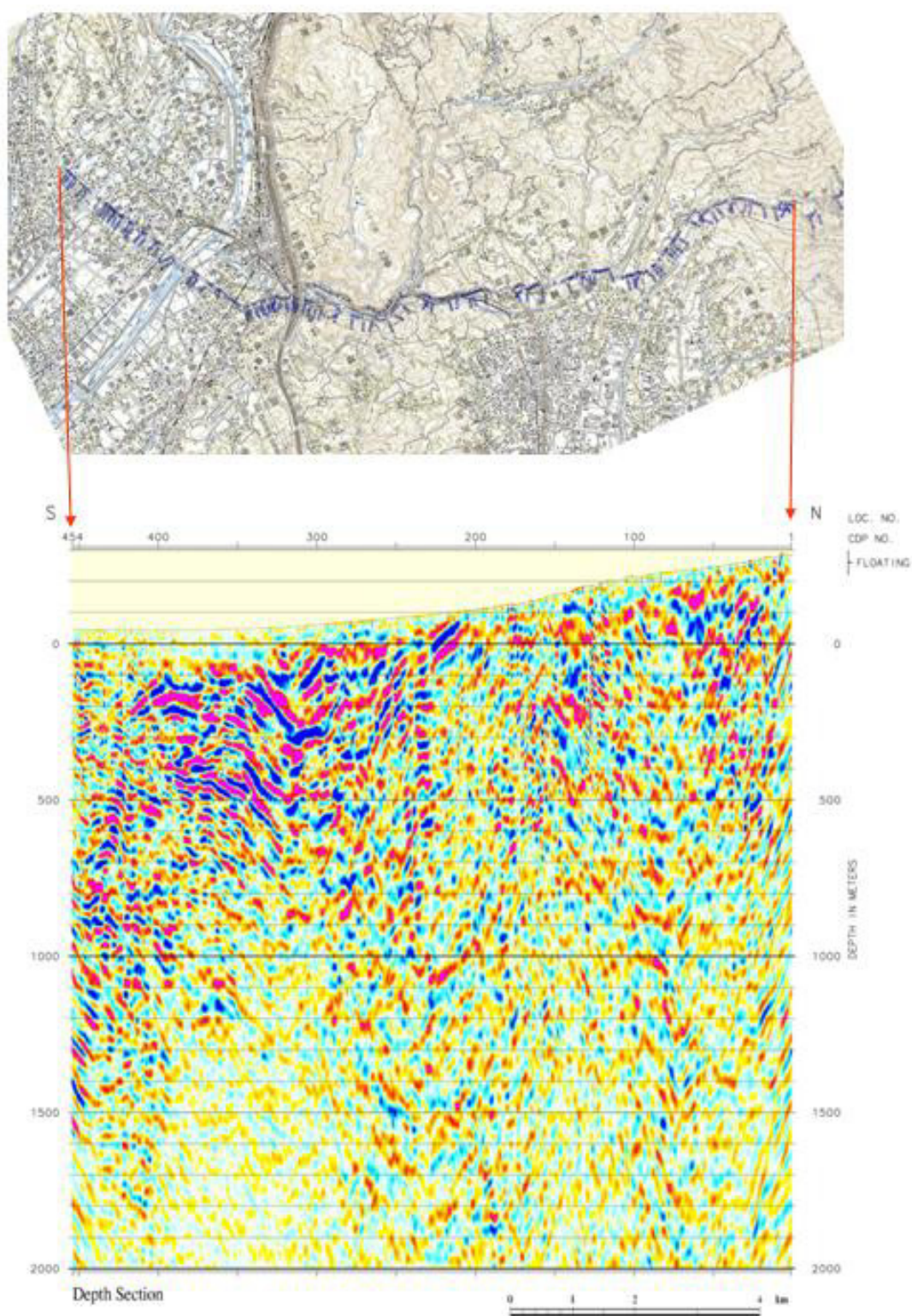


図 60 深度断面図 [4] 'Geometry-oriented'キルヒホッフマイグレーション記録(-0.3-2.0km)

### c) 屈折法データ解析

約 140km の測線長に亙る長大展開で取得されたダイナマイト発震点 9 点、バイブレータ集中発震 7 点の計 16 点の屈折法(広角反射法)データに関して、改良型タイムターム法及び波線追跡法によって解析作業を実施した。以下にその結果を示す。図 60 に屈折波データ解析に関する処理フローを示した。

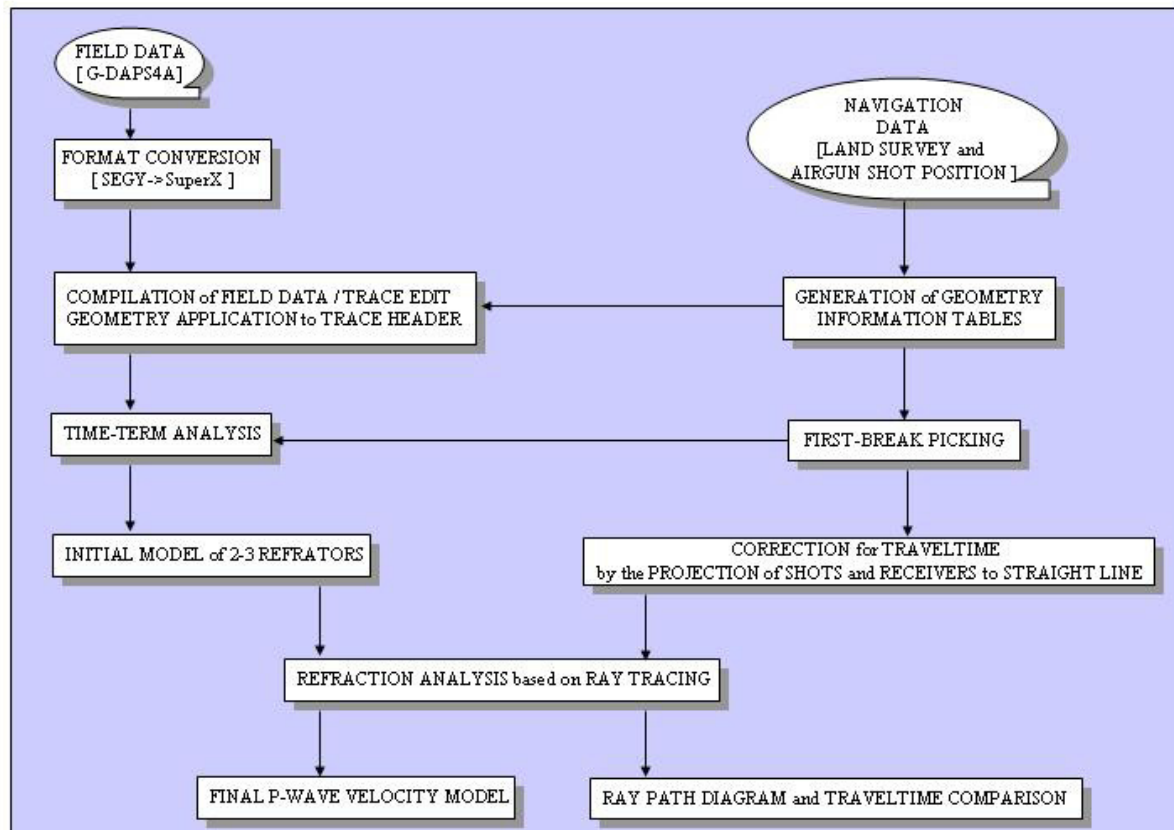


図 61 屈折法データ処理フローチャート

#### i) データ編集( Format Conversion and Data Compilation )

有線テレメトリーシステム G-DAPS4A 展開区間及び独立型受振システム MS-2000D の展開区間で取得されたデータを編集、結合し、各発震記録を構築した。MS-2000D で取得されたデータについては具体的に、以下のコンパイル作業を順次行った。

- ・ 有線テレメトリーシステムの記録装置でデータ収録時に取得した GPS 刻時装置による記録開始時間と記録長をもとにデータ抽出が行われた。
- ・ バイブレータ集中発震記録に関しては、ノイズエディットを伴う 'Diversity Edit' 及び垂直重合処理が実施された。この際のノイズエディットパラメータは、ウィンドー長=16.0 秒、冪乗係数=3.0 である。重合数は実際のスイープ回数に応じて 100~715 回である。但し、'Diversity Edit' は相互相関後のデータについて適用された。

#### ii) 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(JGI Internal Format)に関して、発震点及び受振点のインデックス・座標、・標高値、・オフセット距離等の測線情報を入力した。座標系は 'Bessel' 楕円体に準拠した座標値を UTM54 系



に投影した値が用いられた。

### iii) 屈折初動の読み取り(First Break Picking)

広域測線北部の群馬県大間々町-埼玉県東秩父村間に位置する関東平野のノイズレベルは、交通量の少ない秩父-青梅-丹沢山地区間と比較して夜間においても 20～24dB 高い。本解析では全区間での屈折初動読み取りを目的として、バンドパスフィルター(6-15Hz)・振幅調整(AGC(2000msec))・トレース移動平均(5 トレース)及びサンプル値の冪乗(3.0)等の強調処理を行った。屈折波初動の読み取りは、会話型システム(地球科学総合研究所ソフトウェア'iRAS')によって行った。読み取った屈折波について、その走時曲線を図 62 に示す。但し、この図において示した屈折初動読み取り値は、後述の直線測線への投影と屈折初動走時の修正を実施してはいない原データの値である。

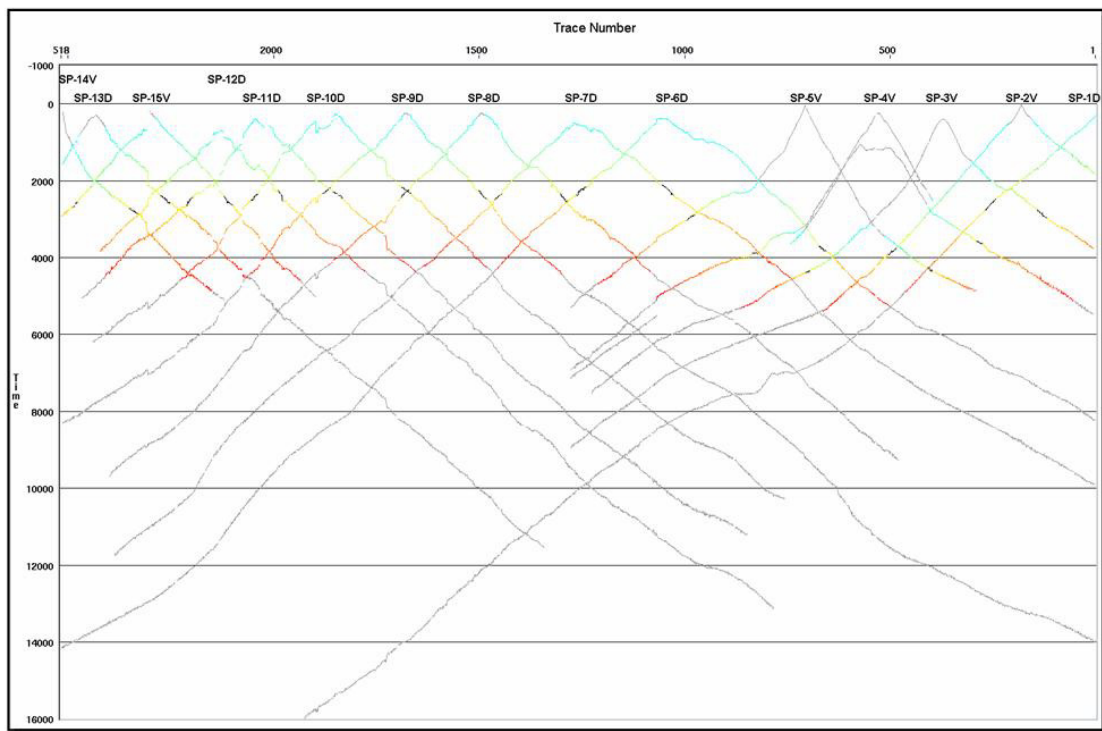


図62 屈折初動読取值  
ダイナマイト及びパイブレータ屈折法発震データ

### iv) 改良型タイムターム法による屈折波解析

#### ( Refraction Analysis based on Modified Time-term Method )

計 16 点の屈折波データについて改良型タイムターム法による解析を行い、受振点及び発震点タイムターム値と屈折面速度を算出した。この手法では解析対象とする屈折面が 2 次元ブロックに分割され、各ブロックに対して屈折面速度が定義される。このモデルは以下の関係式で記述される。

$$T_{ij} - \sum_k s_{k,0} \Delta_{ijk} = a_i + b_j + \sum_k \delta s_k \Delta_{ijk} \quad (1)$$

ここに、 $T_{ij}$  は屈折初動走時、 $a_i, b_j$  は発震点及び受振点タイムターム  $s_{k,0}, \delta s_k, \Delta_{ijk}$  は各ブロックにおけるスローネス初期値、スローネスの初期値からの偏倚量及び屈折波線長である。この受振点及び発震

点タイムターム値と表層基底層速度はインバージョン(‘Generalized Linear Inverse Method’)によって算出される。長大展開データに対してタイムターム法を適用する場合、屈折面の傾斜による見掛け速度の変化については考慮されていない。また、解析結果として得られる屈折面形状は受振点直下にマッピングされるため、マイグレーション処理を適用する必要がある。従って、タイムターム法で得られる構造モデルは、大局的な構造変化を反映したものとする必要がある。尚、この改良型タイムターム法解析には、以下のパラメータが採用された。

|                                 |                               |
|---------------------------------|-------------------------------|
| 初動読み取り位相.....                   | 正のピーク位置(バイブレータ),立下り位置(ダイナマイト) |
| 屈折波インバージョンに用いるオフセット距離(第2層)..... | 2.0-25.0km(‘Space-variant’)   |
| 屈折波インバージョンに用いるオフセット距離(第3層)...   | 25.0-135.0km(‘Space-variant’) |
| 表層基底速度を求める際のブロック区分.....         | 25km                          |

図 63、64 に改良型タイムターム法による解析結果(タイムターム・速度分布・深度構造)を二層構造及び三層構造について示す。第一層速度については、桐生,相模湖低重合及び松田測線の反射波データ処理で得られた速度解析結果によって代替した。

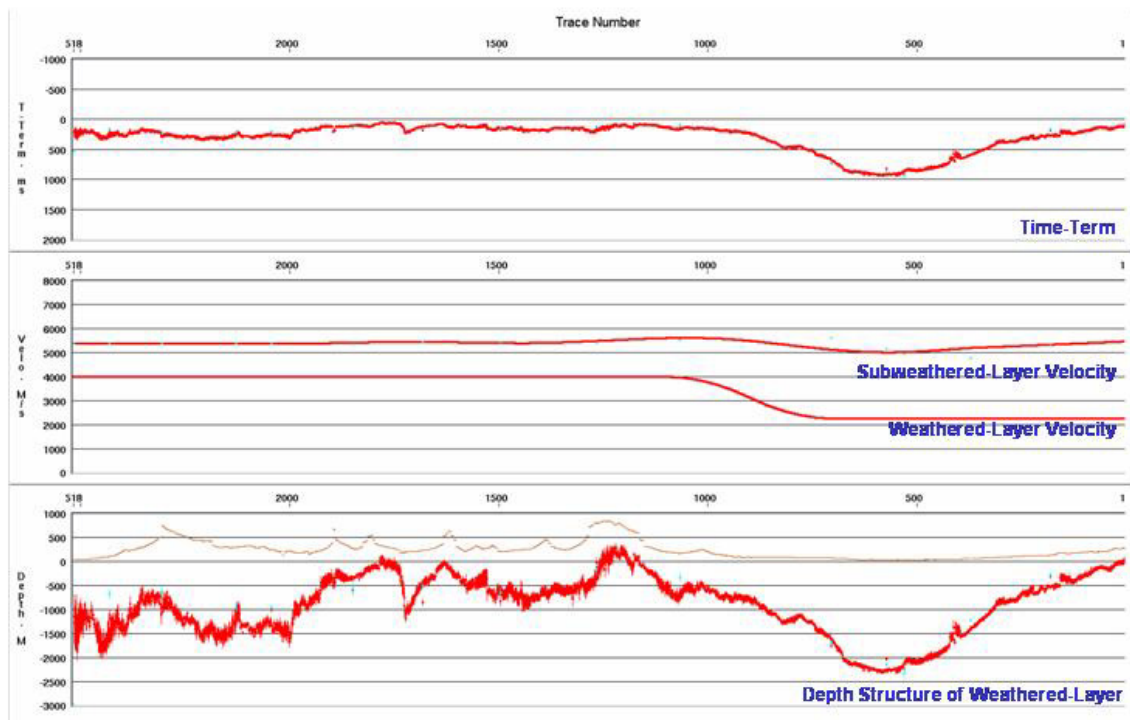


図63 長大オフセットデータを用いたタイムターム法による解析結果 [1] 2層構造

#### v) 直線測線への投影と屈折初動値の修正

( Modification of First-break by Projection of Shots and Receivers to Straight Line )

本来、発震点-受振点間の可逆性を前提とした屈折法解析では直線測線を前提としている。従って、波線追跡による屈折初動解析を実施する前に、仮想直線測線へのオフセット補正及び走時補正を下式に従って適用した。

$$X_{md} = X \cos \theta \quad (2)$$



$$T_{md} = T_{ic} + (T - T_{ic}) \cos \theta \quad (3)$$

ここに、 $X_{md}$ ,  $X$ ,  $T_{md}$ ,  $T_{ic}$ ,  $T$ ,  $\theta$  はそれぞれ、投影測線上の受振点-発震点オフセット距離、受振測線

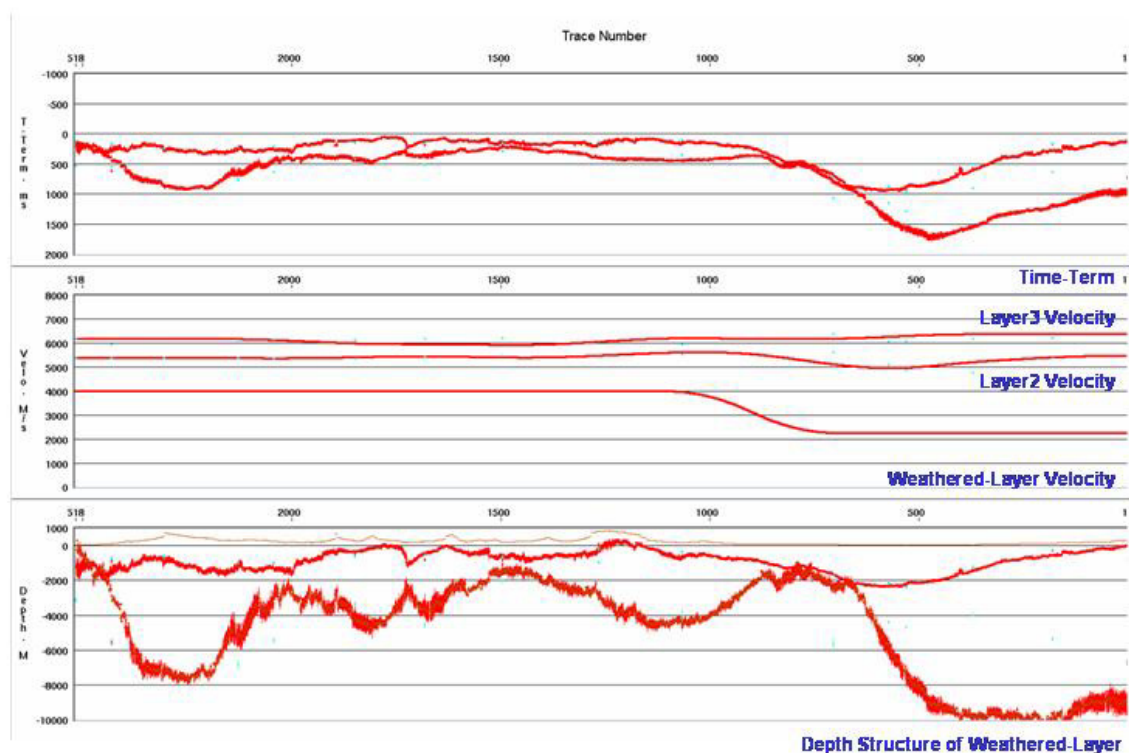


図64 長大オフセットデータを用いたタイムターム法による解析結果 [2] 3層構造

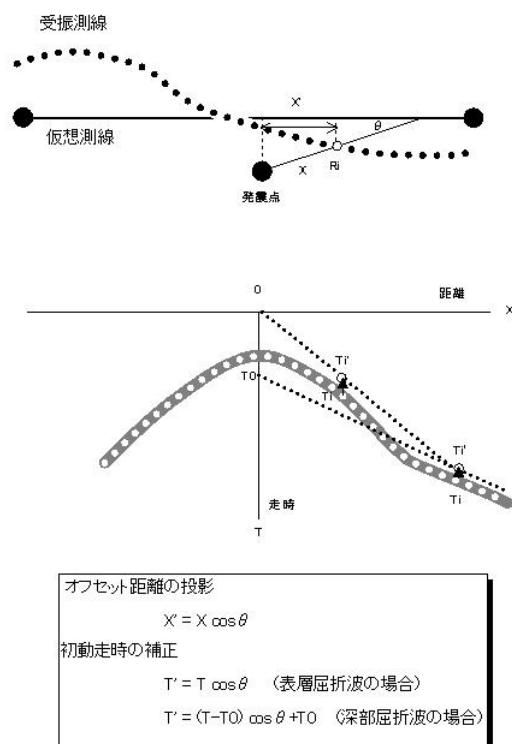


図 65 仮想測線投影による  
オフセット距離と読取走時の  
補正

仮想測線投影によるオフセット距離と読取走時の補正

上の受振点-発震点オフセット距離、投影処理後の屈折波走時、解析対象である屈折波のインターセプト時間、読み取り屈折波走時、及び受振点-発震点アジマスと投影測線間の角度として定義される。図 65 に、屈折初動走時に関する直線投影と走時補正の概念図を示す。

#### vi) 波線追跡法による屈折波解析( Refraction Analysis based on Ray Tracing )

改良型タイムターム法によって得られた速度構造を第一入力モデルとして、波線追跡法による屈折波解析を実施した。但し、深度 10-12km の上部地殻基底深度及びフィリピン海プレート上面の形状及び深度については既存の地質学的知見に基づいて妥当なモデルを仮定している。図 66 には初期モデル、観測走時、及び初期モデルから計算された理論走時を表示した。

波線追跡法による屈折波解析法では、観測走時と計算走時の誤差を最小にする様に、屈折面深度及び屈折面速度が試行錯誤の上、決定された。具体的には、神縄断層と篠野木-愛川構造線によって南北を画される丹沢山塊の部分に対して独立した'Layer Cake'を付与することが走時残差の低減に寄与したものと考えられる。図 67 には最終的に得られた速度構造モデルを、また、図 68-70 には観測走時と最終モデルを仮定して計算した理論走時の比較図を示す。

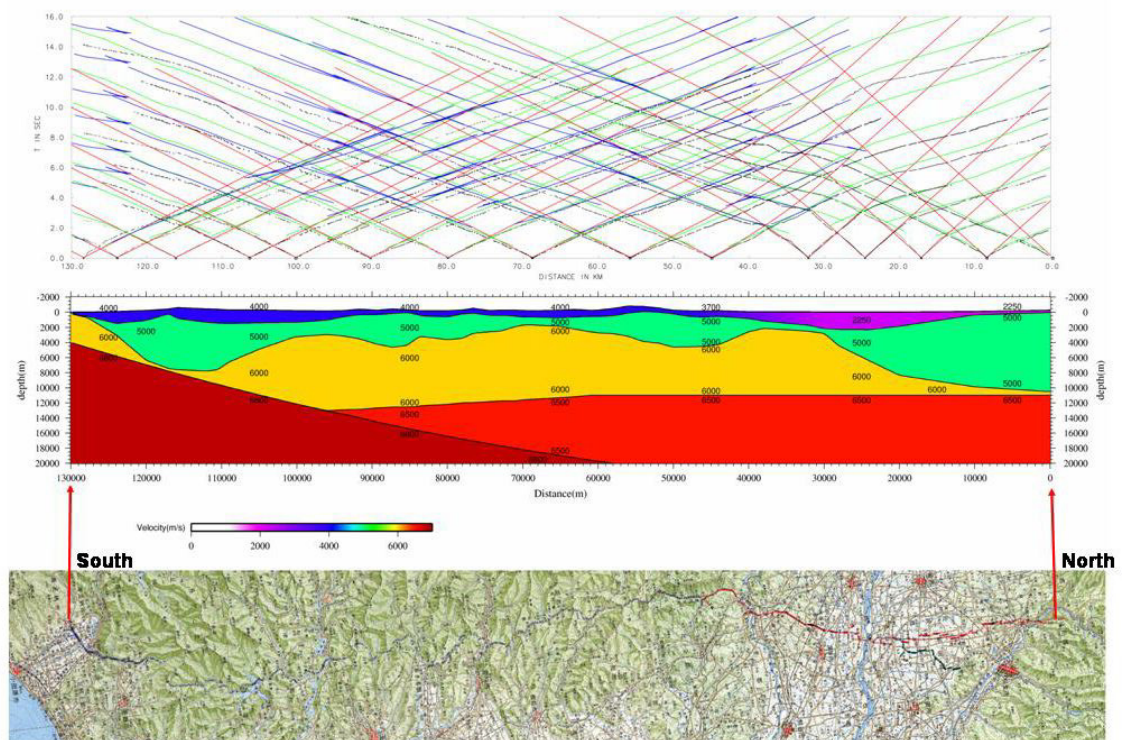
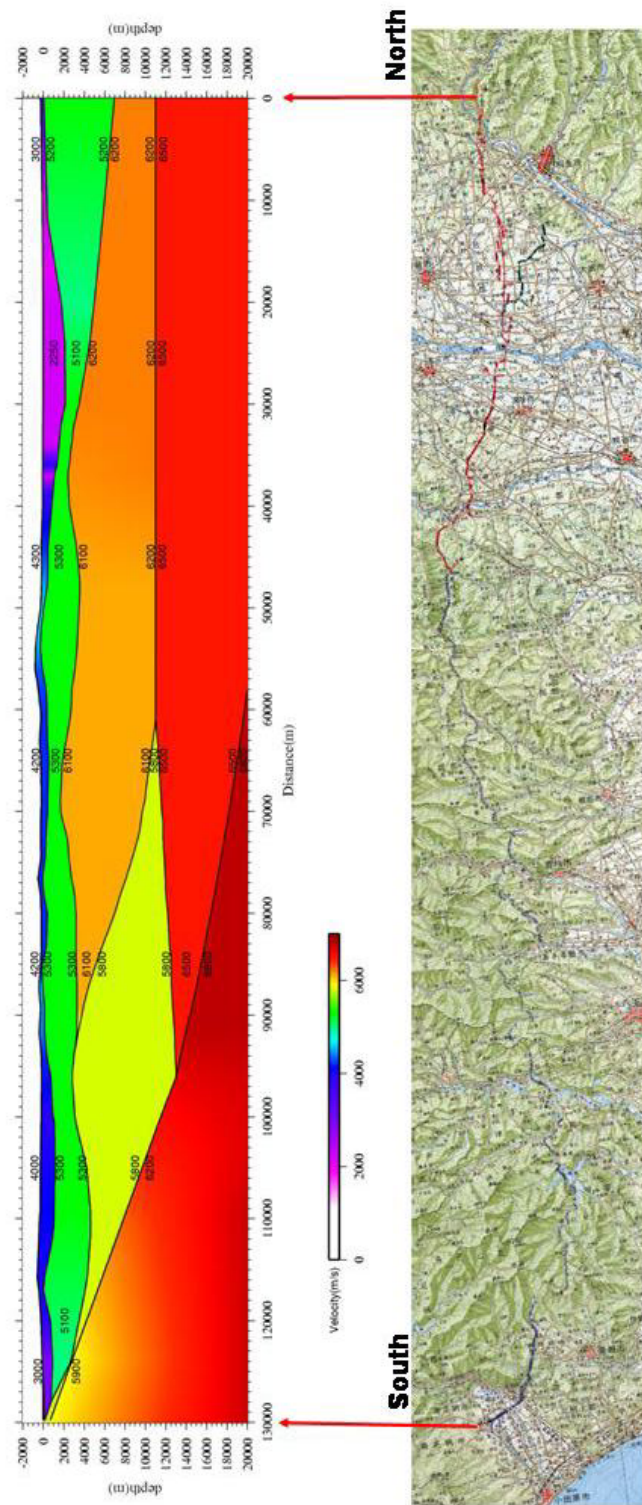


図 66 波線追跡による屈折初動解析(小田原-桐生測線) 初期モデルと走時曲線(計算走時と観測走時)





図B-4-4-6 波線追跡による屈折初動解析(小田原-桐生測線) 最終速度モデル

図 67 波線追跡による屈折初動解析(小田原-桐生測線) 最終速度モデル

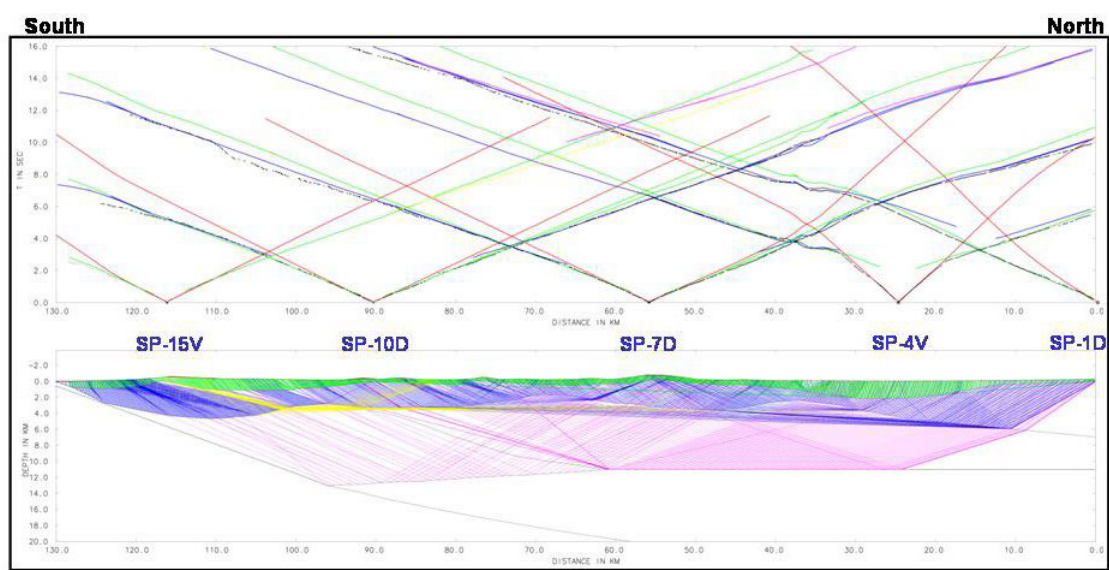


図68 発震点別の波線追跡解析結果[1] SP-1D, SP-4V, SP-7D, SP-10D及びSP-15V  
(点線:観測走時, 実線:Layer Cake'別計算走時)

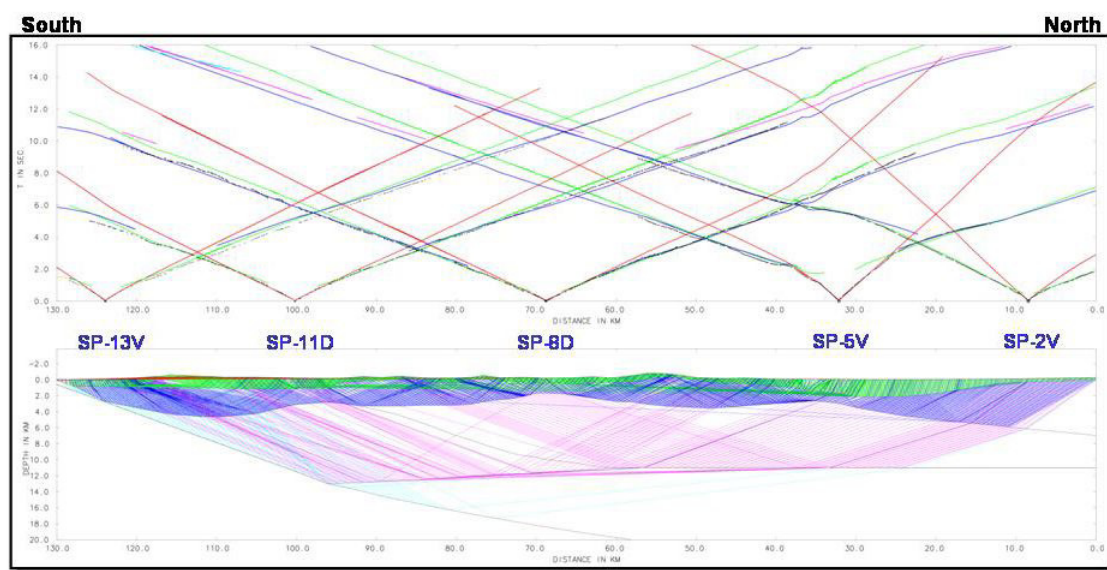


図69 発震点別の波線追跡解析結果 [2] SP-2V, SP-5V, SP-8D, SP-11D及びSP-13D  
(点線:観測走時, 実線:Layer Cake'別計算走時)



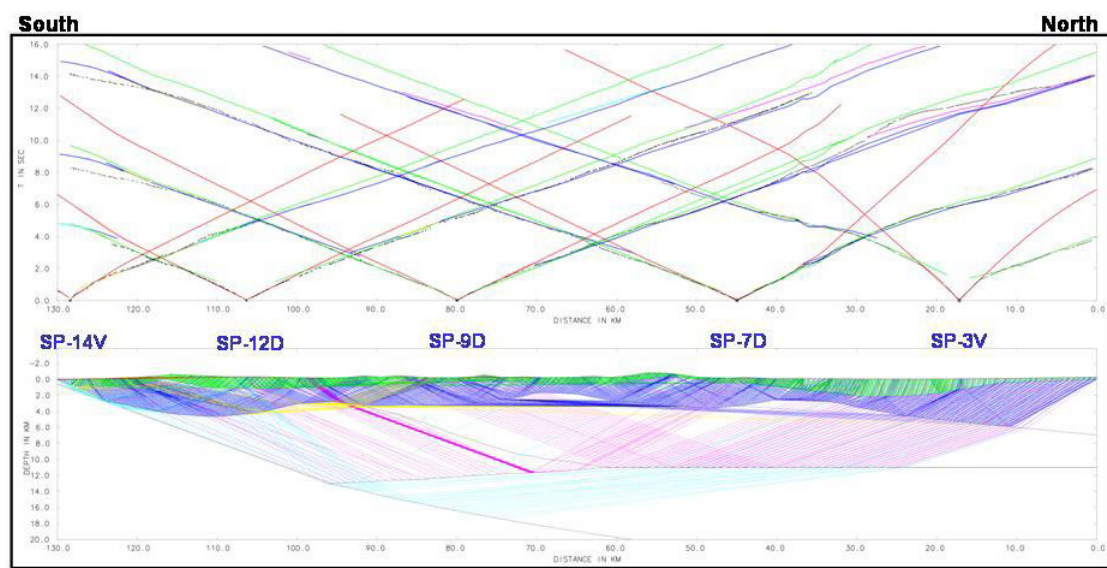


図70 発震点別の波線追跡解析結果 [3] SP-3V, SP-7D, SP-9D, SP-12D及びSP-14V  
(点線:観測走時, 実線:Layer Cake'別計算走時)

#### d) 広角反射法データ解析

広角反射法データの解析対象は屈折波データ(計 16 発震点)であり、基本的な処理パラメータは反射法データ解析と同一である。データ解析フローに関しては、図 71 に示した。以下に、その解析内容を記述する。

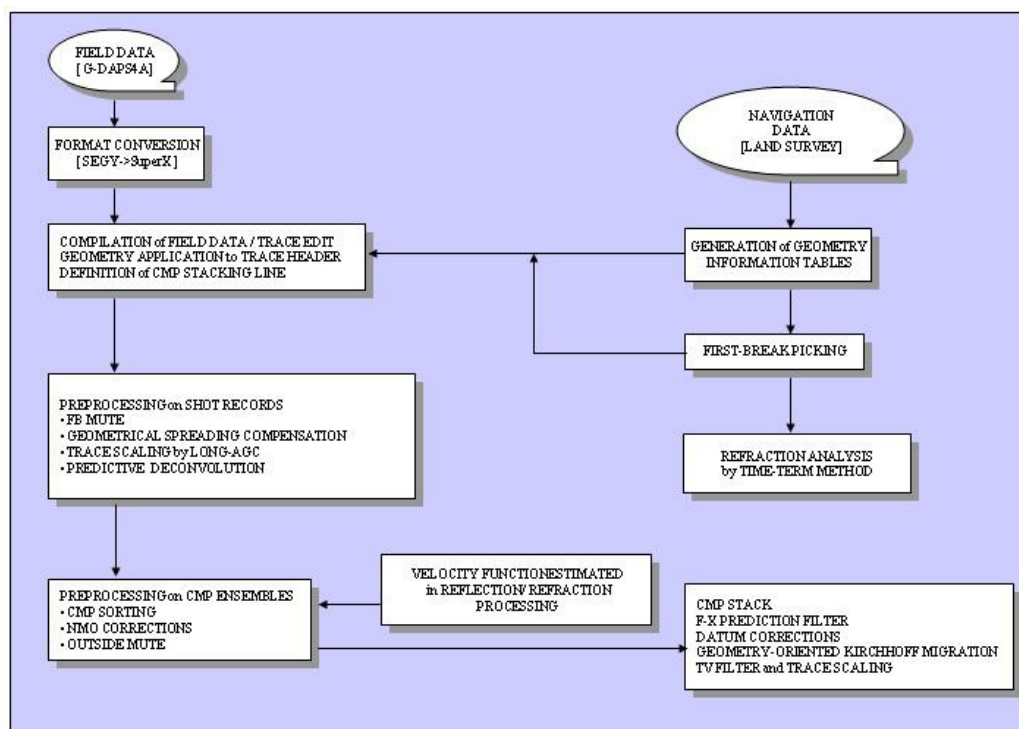


図 71 広角反射法データ処理フローチャート

#### i) データ編集( Format Conversion and Data Compilation )

有線テレメトリーシステム G-DAPS4A 展開区間及び独立型受振システム MS-2000D の展開区間で取得されたデータを編集・結合し、各発震記録を構築した。MS-2000D で取得されたデータについては具体的に、以下のコンパイル作業を順次行った。

- ・ 有線テレメトリーシステムの記録装置でデータ収録時に取得した GPS 刻時装置による記録開始時間と記録長をもとにデータ抽出が行われた。
- ・ パイプレータ集中発震記録に関しては、ノイズエディットを伴う 'Diversity Edit' 及び垂直重合処理が実施された。この際のノイズエディットパラメータは、ウィンドー長=16.0 秒、冪乗係数=3.0 である。重合数は実際のスイープ回数に応じて 100~715 回である。但し、'Diversity Edit' は相互相関後のデータについて適用された。

#### ii) 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(JGI Internal Format)に関して、発震点及び受振点のインデックス・座標・標高値・オフセット距離等の測線情報を入力した。座標系は 'Bessel' 楕円体に準拠した座標値を UTM54 系に投影した値が用いられた。データ解析における基準標高面は平均海水面に設定された。CMP 座標は前述した各反射波データ解析における CMP 重合測線と同一のものが用いられた。

#### iii) 初動ミュート( First-break Mute )

強振幅の屈折波初動部分を抑制する目的で、以下のパラメータによる初動抑制処理を実施した。

テーパー長..... 200msec(屈折初動近傍)

#### iv) 振幅補償( Gain Recovery )

弾性波の震源からの伝播に伴う幾何減衰、多層構造内を透過、多重反射することによる伝播損失及び非弾性効果による減衰、さらには受振点、発震点毎のカップリングの相異に起因する振幅特性の変化を補償することを目的として、振幅補償を行った。利根川北側の群馬県内における工業団地群周辺及び神奈川県内の足柄平野ではデータ S/N が著しく低く、幾何減衰補償単独では不十分であると判断された。従って、振幅補償として、以下の手法を採用した。

幾何減衰補償 +AGC[ ウィンドー長.....800msec ]

#### v) デコンボリューション( Deconvolution )

デコンボリューション処理では、次式で示される 1 次元コンボリューションモデルが前提とされている。

$$F(t)=W(t)*R(t)+N(t) \quad (1)$$

ここに F(t) は地震波トレース、W(t) は基本波形、R(t) はランダム定常な反射係数列、N(t) はランダムノイズである。このモデルにおいて基本波形を構成する要素としては、以下の項目を挙げることができる。

- ・ 震源波形：エアガン震源波形、スイープ波形、震源カップリング効果、ゴースト効果
- ・ 地層効果：多重反射、非弾性による吸収
- ・ 記録系：受振器特性及び設置効果、OBC に関するゴースト効果、探鉱機の応答特性

こうした要素の集積としての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デコンボリューションを適用した。'Surface-consistent' 型デコンボリューション処理を含めた比較重合テストを通じて、以下のパラメータが採用された。また、デコンボリューション処理のアルゴリズムとして最小位相型を採用した。

予測距離..... 32.0msec

零オフセット位置に於ける設計ゲート..... 200~5200msec [Non-TV]



|                     |         |
|---------------------|---------|
| オペレータ長.....         | 320msec |
| プリホワイトニングファクター..... | 5.0%    |

尚、デコンボリューション適用に際しては、零位相であるバイブレータ震源のスイープ波形(探鉱機'A/D Decimation Filter(DCF)'及び相互相関処理実施後のスイープ波形)について、最小位相変換処理を適用した。

#### vi) 共通反射点編集( Common Midpoint Sorting )

上述(ii)のパラメータによって、共通反射点の編集が実施された。

#### vii) 浮動基準面に対する静補正( Static Corrections to FDP )

浮動基準面に対する静補正を実施した。静補正については、下式で定義される標高補正量及び表層補正量の和として各発震点、受振点について与えられる。

[A] 標高補正  $T_e$  : 観測面を一定基準面へ補正する。

$$T_e = - (H_e - H_b) / V_{sw} \quad (2)$$

[B] 表層補正  $T_w$  : 低速度の表層構造変化による影響を除去する。

$$T_w = S_d * (-1/V_w + 1/V_{sw}) \quad (3)$$

ここに、  $H_e$  : 発震点あるいは受振点標高(m)

$H_b$  : 基準面 [平均海水面 0.0m]

$S_d$  : 表層厚(m)

である。

表層補正值は、反射法桐生測線、相模湖低重合測線及び松田測線の屈折波初動解析による結果を内挿して決定した。本調査の基準面( Datum )は平均海水面 0.0m に設定されたが、絶対値の大きい標高補正值の適用を回避するため、CMP アンサンブル上において平均標高を定義し、これを浮動基準面( FDP: 'Floating Datum Plane' )とした。この FDP から基準面までの基準面補正量  $T_d$  は、下記のように定義される。

$$T_d = -2.0 * (H_f - H_b) / V_c \quad (4)$$

ここに、  $H_f$  : 浮動基準面(FDP)

$V_c$  : 基準面補正速度(1800m/sec)

である。この FDP の計算には反射法データ CMP 内のオフセット距離範囲 0 - 5000m のトレースが用いられた。

#### viii) NMO 補正( Normal Moveout Corrections )

広角反射法データでは重合数が不足しているため、反射法データ解析で通常実施されている定速度重合法による速度解析は困難である。しかしながら、CMP 投影測線上で速度スキャンを行うことで、隣接する発震点で確認できる顕著な反射面の走時及び形状の相関が最も高い速度を最適重合速度としてピックアップすることが可能である。この速度スキャン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。低重合記録に関する速度スキャンは、重合パワーのみではなく、隣接発震点の間で共通した反射面について空間的な接合の程度が速度決定の重要な指標となる。図 72 は秩父帯北部(CMP.2201)及び秩父帯南部(CMP.2701)における上部地殻反射波に関する速度スキャン結果である。尚、NMO 補正では下記のストレッチミュートが適用された。

|                     |     |
|---------------------|-----|
| ストレッチミュートファクター..... | 5.0 |
|---------------------|-----|

また、深度に対してオフセット距離が大きい広角反射データを扱うために、走時補正に四次の高次項

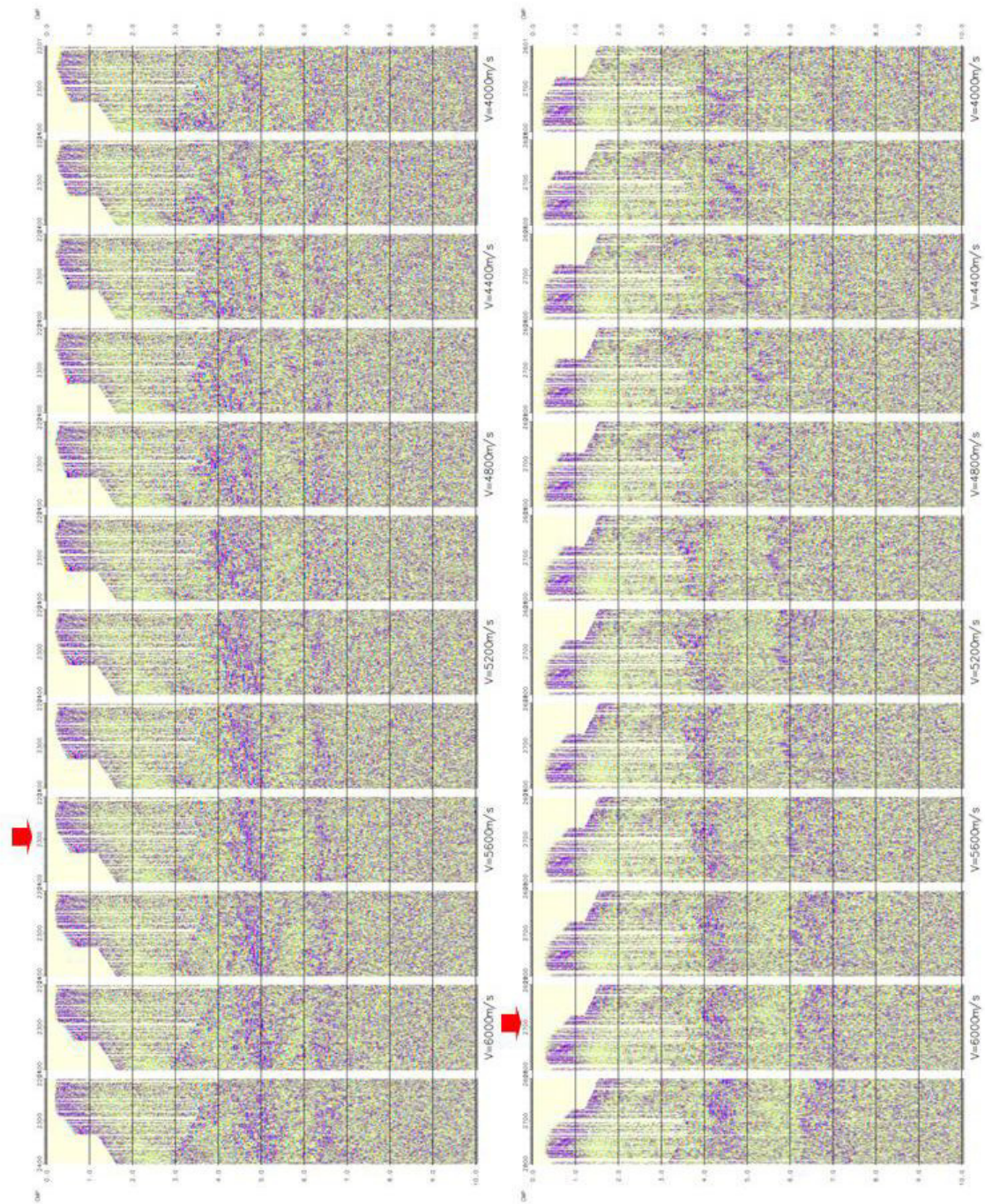


図72 広角反射法データによる速度スキャン結果  
 [上段]...CDP. 2201-2400, [下段]...CDP. 2601-2800



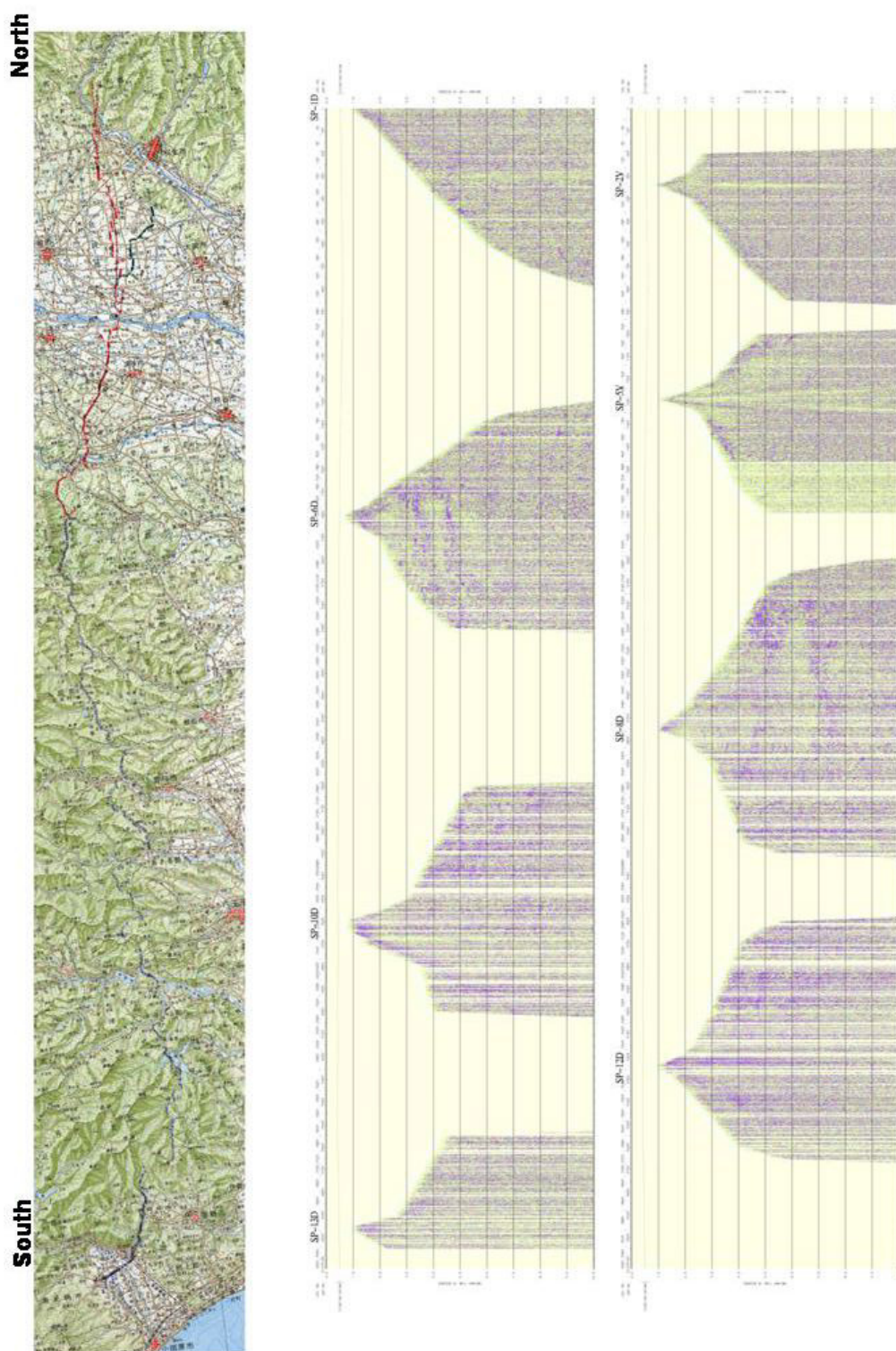


図73 広角反射法'Single Fold'プロファイルに関する発震記録並列表示[1]  
 [ NMO補正を含む事前処理適用結果 ]

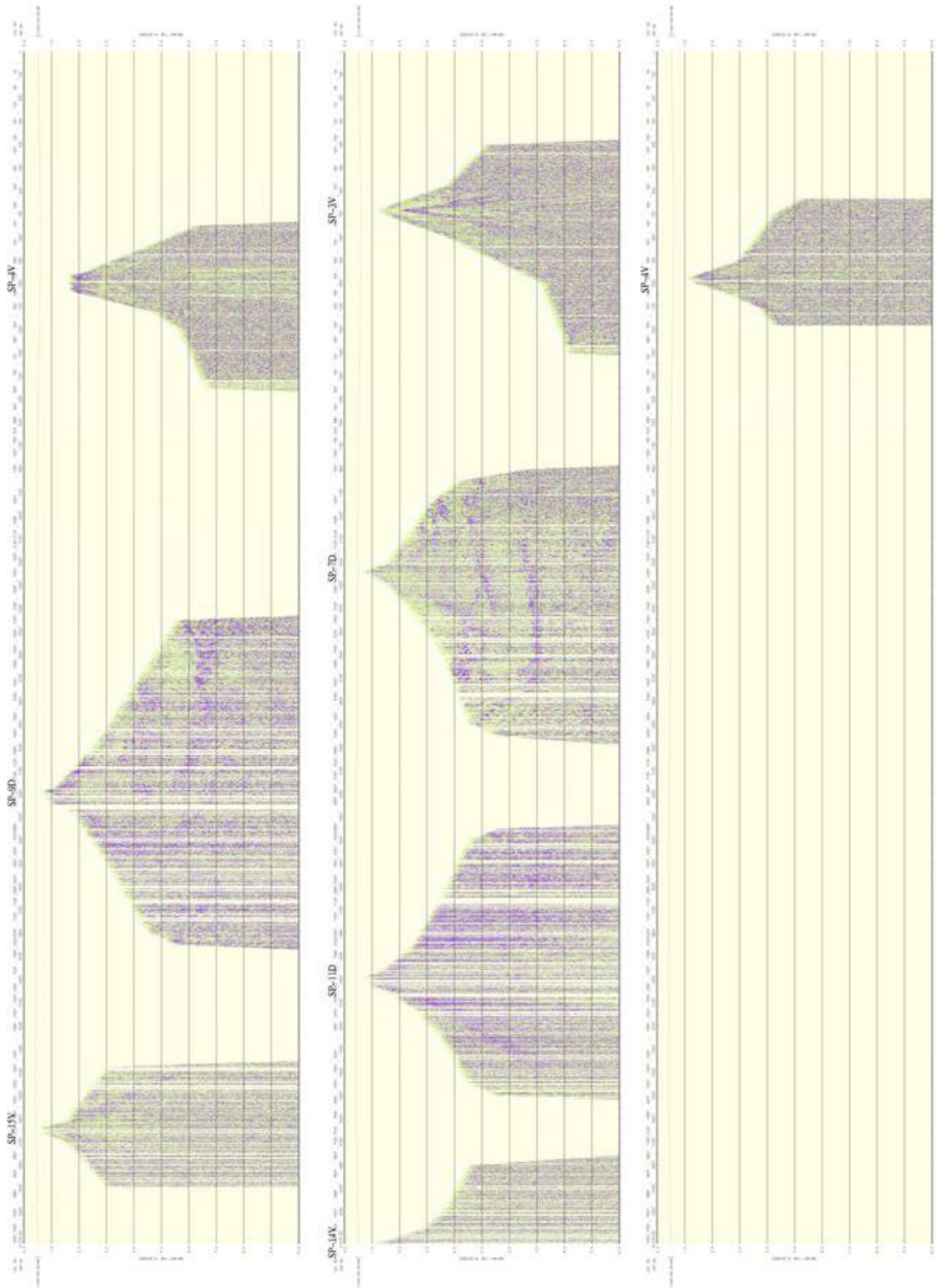


図74 広角反射法'Single Fold'プロファイルに関する発震記録並列表示[2]  
 [ NMO補正を含む事前処理適用結果 ]

を近似的に含む下記の補正処理を適用した。

$$T = \frac{1}{2}T_0 + \sqrt{\left(\frac{T_0}{2}\right)^2 + \frac{X^2}{2V_{RMS}^2}} \quad (5)$$

ここに、 $T, T_0, X, V_{RMS}$  はそれぞれ、往復走時、垂直往復走時、オフセット距離及び RMS 速度である。



尚、重合測線に関する投影表示を行った NMO 補正を含む事前処理を実施した後の全発震記録の並列表示結果を図 73、74 に示す。

#### ix) 共通反射点重合( CMP Stack )

共通反射点アンサンブルに関して、以下の有効オフセット距離に関して水平重合処理を実施した。

重合オフセット距離範囲..... 100 - 135000m

#### x) 周波数-空間領域予測フィルター( F-X Prediction Filter )

周波数-空間領域に於いて複素型予測フィルターを設計・適用して、ランダムノイズを抑制し相対的に S/N を向上させる以下の F-X 予測フィルター処理を実施した。

オペレータ長..... 5 CDPs

空間ウィンドー長..... 50 CDPs

時間ウィンドー長..... 500 msec

#### xi) 帯域通過フィルター( Bandpass Filter )

反射波の有効周波数帯域が周波数成分解析によって決定され、以下の零位相帯域通過フィルターが採用された。

オペレータ長..... 500 msec

周波数通過帯域往復走時 .....0.0sec / 通過帯域[ 3 - 30Hz ]

4.0sec / 通過帯域[ 3 - 25Hz ]

16.0sec / 通過帯域[ 3 - 15Hz ]

これらの通過帯域のフィルターパラメータは線型内挿される。

#### xii) 基準面補正( Datum Corrections )

浮動基準面から基準面への、時間補正が適用された。

#### xiii) 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。この手法では、重合測線に沿った標高変化と測線の屈曲への対応が可能である。以下に適用パラメータを示す。

最大アパチャー距離..... 10km

最大傾斜角度..... 40 度

#### xiv) 深度変換(Depth Conversion)

上記の速度スキャン結果及び屈折法によって得られた速度構造を用いて、時間及び空間方向に平滑化した平均速度プロファイルを構築し、'Vertical Stretch'法による深度変換を実施した。

以上の処理ステップを逐次経ることによって、図 75 の広角反射法低重合記録、図 76 の広角反射法低重合マイグレーションプロファイルが得られた。尚、時間マイグレーションに関しては、重合後キルヒホッフ型時間マイグレーション記録、'Shot-panel'に関する差分マイグレーション適用後の重合記録、'Shot-panel'に関するキルヒホッフマイグレーション適用後の重合記録を比較図面として作成した。また、図 77 に、CMP 重合記録及び各種マイグレーション記録に関して深度変換を実施した結果を示した。

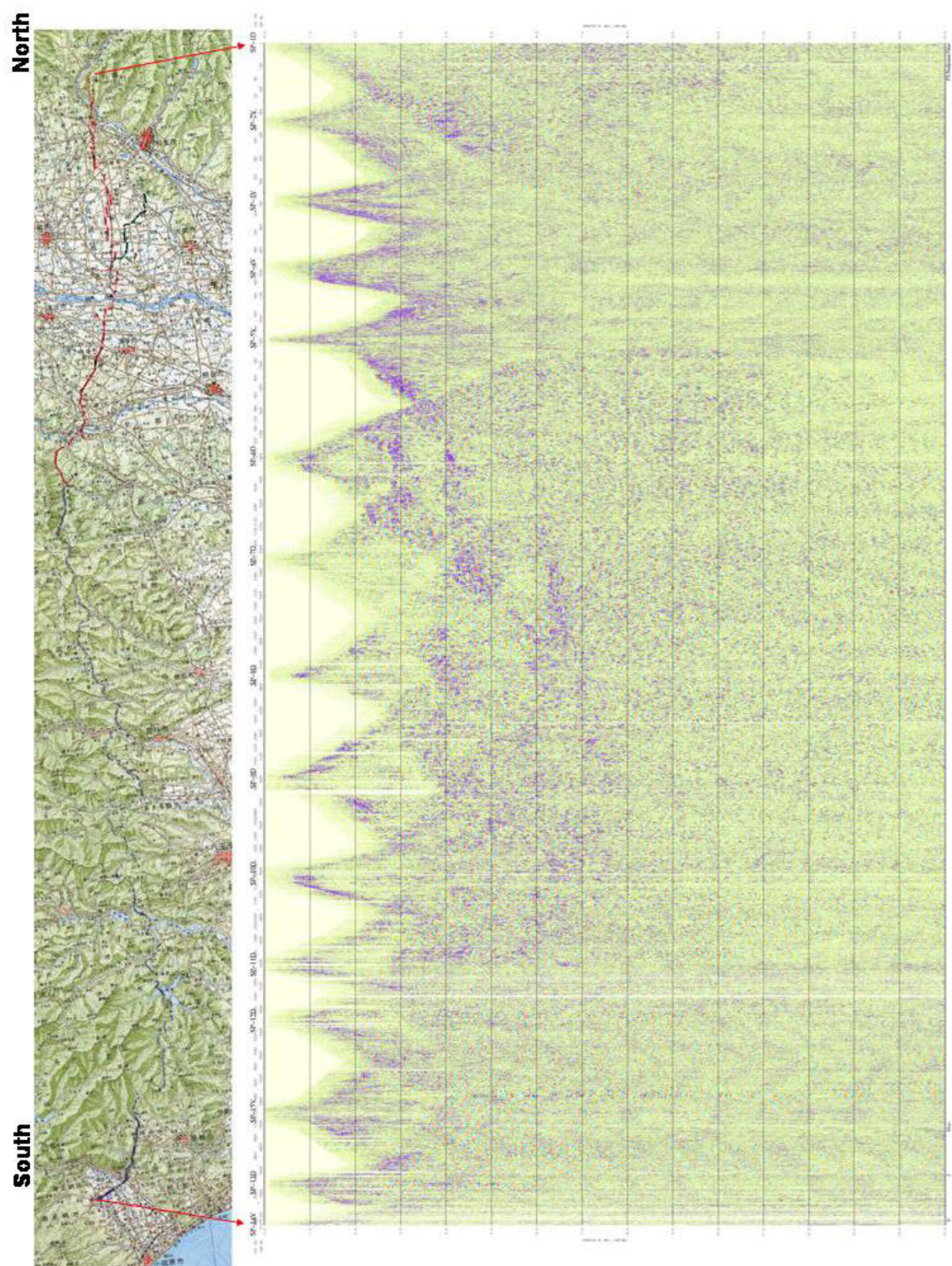


图 75 广角反射法 CMP 重合处理断面图



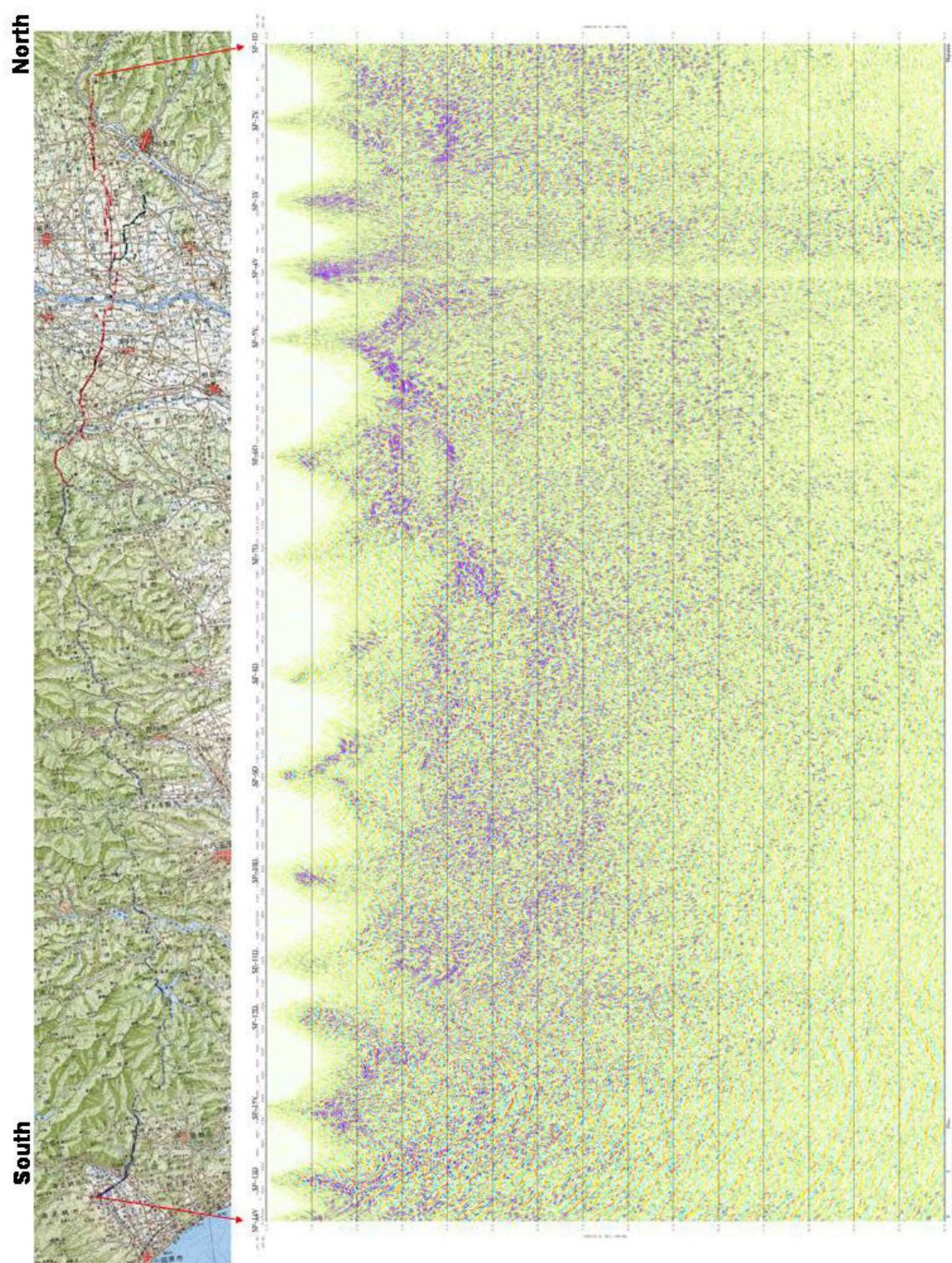


図76 広角反射法時間マイグレーション処理断面図  
 [1] 重合後キルヒホッフマイグレーション適用結果



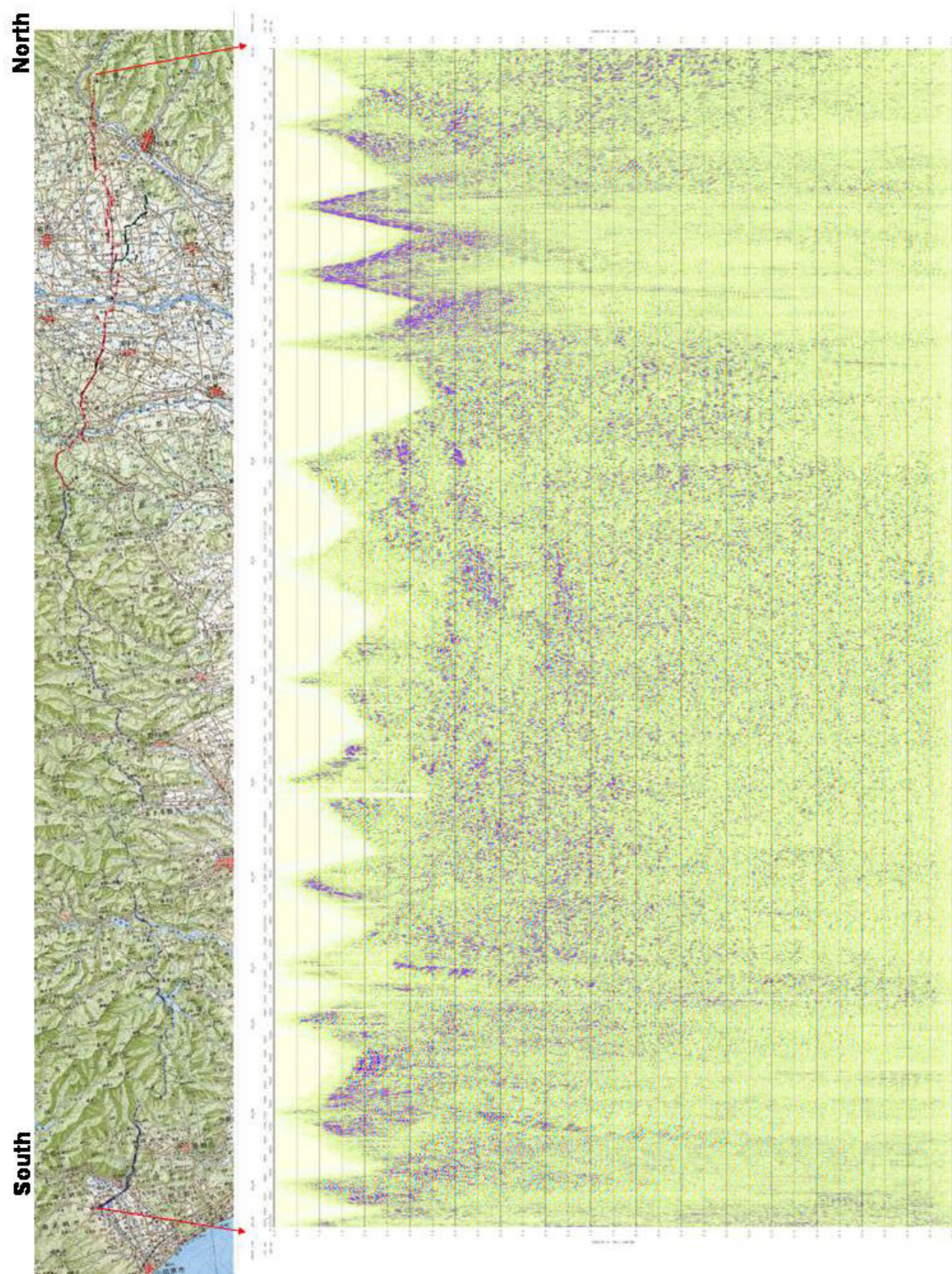


図77 広角反射法時間マイグレーション処理断面図  
 [2] 'Shot-Panel'に関する差分マイグレーション適用後の重合結果