

(1) 調査方法

a) 測定

図 3.1.3 に測定状況の模式図を示す。測定方法は以下の通りである。

①測定準備作業

○測量

計画測線沿いに所定の間隔で測定点を設置し、中心線測量および水準測量により全測定点の XY 座標およびレベルを求めた。

○受震器およびケーブル、アンプボックスの設置

受震点間隔は 1・2 両測線とも 10m である。地震計は 1 測定点に 9 個グループのものを使用し、測定点を中心に測線方向に 1 測線では約 1.1m 間隔で、2 測線では約 0.6m 間隔で設置した。地震計の設置は原則として地震計に装着されているスパイクを直接地表面に突き刺す方法により設置を行ったが、舗装区間等で設置が不可能な場合にはピックスタンドを用いて地震計を固定した。

9 個の地震計は直列に結線されており、9 個で 1 つのアナログ信号にして観測装置への入力とする。1 受震点に多数個の地震計を設置して観測することを群設置(グルーピング)と呼んでいるが、この目的は、i) 反射波観測においてノイズとなる表面波を減衰する。ii) 受震器の感度を増す。iii) 測定点間隔が粗いために起こる波数領域でのエイリアスを防ぐ。等である。

探鉱機はテレメトリ型を使用した。これは、増幅・A/D 変換・スタックなどの処理を、地震計の近傍に置いたアンプ・ボックスで処理するシステムである。このため受震点から観測車までのデータ転送がデジタルとなり、各アンプボックス間に 1 本のケーブルを設置するだけで済むため、チャンネル数の多い場合の観測が容易となる。

②測定作業

1 発震点での測定区間は原則として 1 測線では 110ch 収録、2 測線では 110~174ch 収録し、発震点間隔は 1・2 両測線とも 5m である。また、1 発震点での発震回数は 5~20 (標準 10) 回とし、記録の質により適宜回数を調整した。

なお、スタック時には、ランダムなノイズを低減してシグナルを強調するアルゴリズムを用い、データ収録はスタック後の記録のみとした。

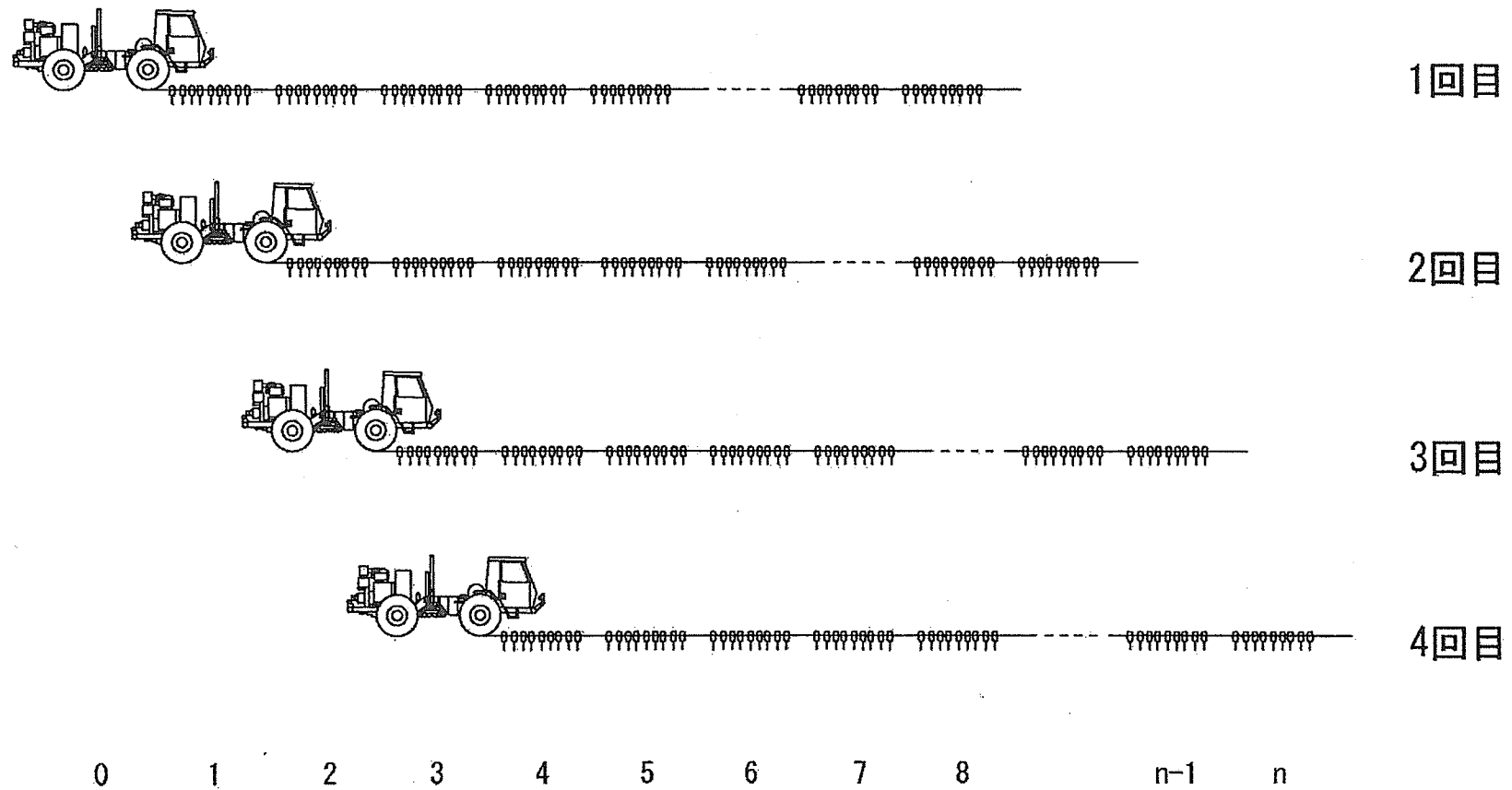


図 3. 1. 3 測定状況の模式図

反射法探査での計測は、それぞれの発震点ごとに起震を行いデータの収録を行う。起震が終了したら次の地点に順次移動して同様な計測を行う。図中下側の数字は発震および受震点の番号を示す。

③使用機器

I) 震源：ミニバイブレーターT-15000 (IVI 製)

起震を行う場合には、まず車体中央のプレートを地面に降ろし、これに車重の大部分をかけて地面に圧着する。車体とプレートの間にはエア・ダンパーを挟んでおり、車重はプレートに加わるが起震時の振動は車体へ伝わらない構造となっている。起震時にはプレート上のアクチュエーターでカウンターマス（約 150kg）を上下に振動させ、その反力によりプレートを介して地面を振動させる。発生する波はパルスではないが、コリレーション演算を行うことによってダイナマイトのようなパルス震源と等価な記録を得ることができる。

図 3.1.4 にミニバイブレーターの外形図を示す。

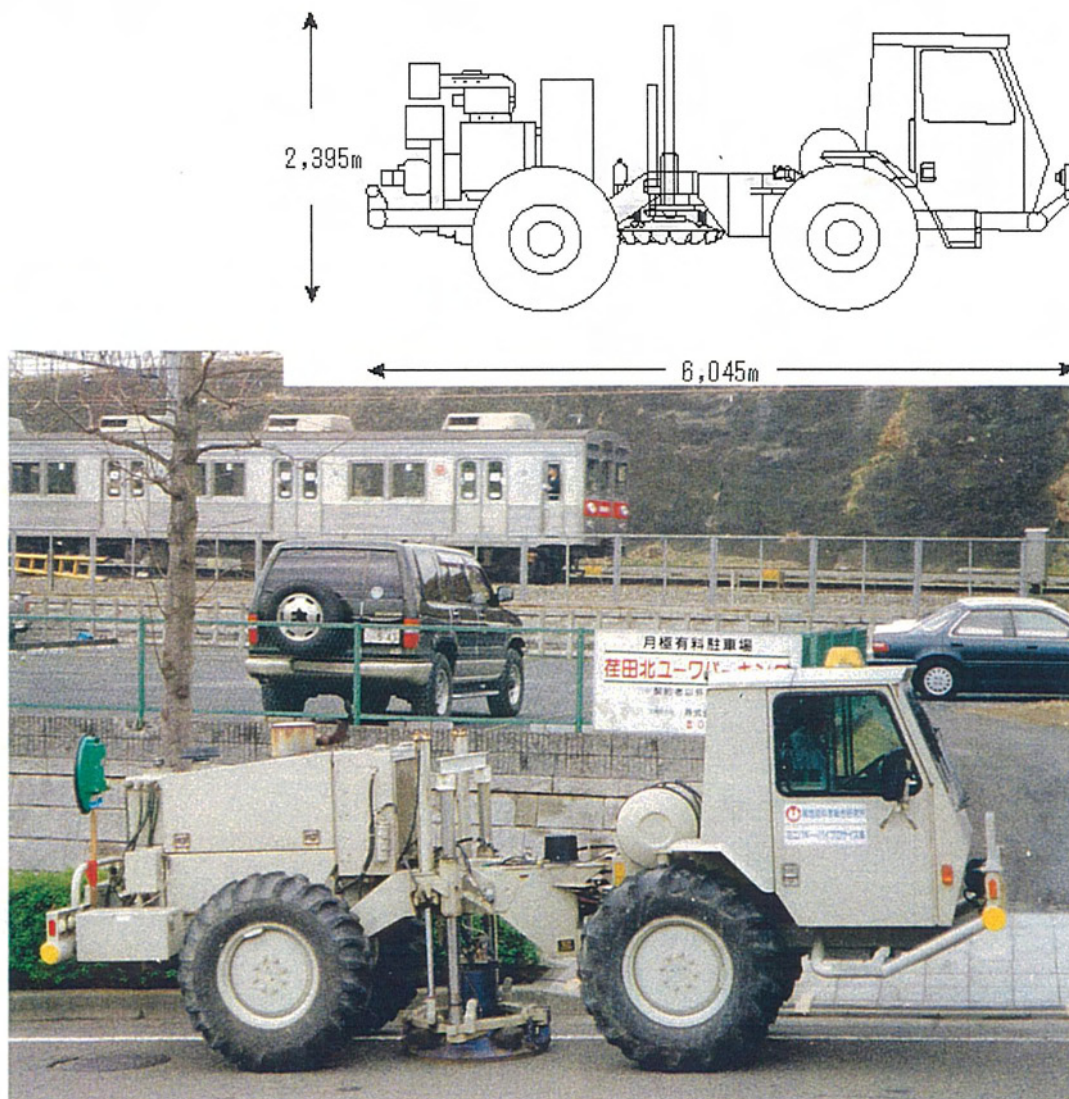


図 3.1.4 ミニバイブレーターの外形図

＜バイブロサイスの原理＞

バイブレーターを震源とした探査は通常バイブロサイスと呼ばれており、その原理をまとめると図 3. 1. 5 に示すとおりである。

- バイブレーターで低い周波数から高い周波数まで徐々に周波数が遷移する波形で起震する (①)。発生波の振幅は速度振幅が一定となるように再帰的に制御する。
- 反射波は図の③～⑤に示すように、ダイナマイトなどのパルス震源とは異なり、震源波形の初動時刻・振幅・位相をずらした波形となる。従って観測波形は②に示すように、これらを重ね合わせた複雑な波形となる。
- 観測終了後、震源波形 (①) と観測波形 (②) の相互相関関数を計算する。この結果は⑥に示すように、ダイナマイトなどのパルス震源と等価な記録となる。

＜バイブロサイスの特徴＞

- 起震エネルギーが大きい。
- 低い出力のエネルギーを継続して出力する震源機構のため、環境への影響が少ない。
- 起震周波数範囲を選択できるため、所望の周波数帯域の観測が可能である。
- 可搬性に優れており、作業効率が高い。

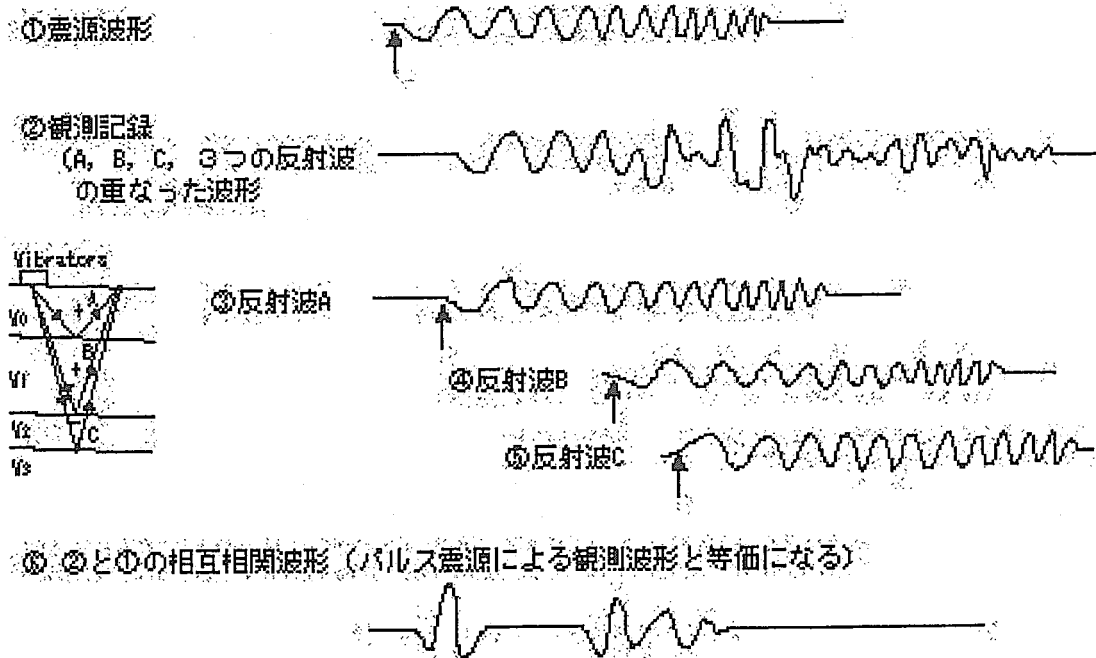


図 3. 1. 5 バイブロサイスの原理

II) 探査装置 (G-DAPS-4: (株)地球科学総合研究所開発)

有線テレメトリ型の探査装置で、アナログ増幅、A/D 変換、スタック、相互相関計算、ノイズ除去などの処理を、地震計の近くに設置したアンプボックス (RSU: 1 箱で 4ch) で行うことが出来る。このためチャンネル数が多くても (1 ラインで 2032CH)、観測車との間のケーブルは 1 本で済み、またアナログケーブルを長く張ることがないため電磁ノイズを拾うことも少ない。観測車には、これらの RSU を管理するコントロール部があり、地震計の接続状態・アンプボックスの状態・バッテリーの残量などがリアルタイムで監視できるほか、収録したデータに波形処理をして記録の質を検討できるモニター機能も持っている。

この装置の特徴および諸元は次のとおりである。

- ・テレメトリ型のため、1 本のケーブルで多チャンネルの収録が可能である。
- ・2032CH/line×1024 line と、ほぼ無限のチャンネル数の収録が可能である。
- ・24bit デルタ-シグマ型の A/D 変換器を使用しており、ワイドレンジである。
- ・データ収録計画機能、テストデータ処理機能を持つ。
- ・収録データ長 : 最大 16000 データ/ch
- ・サンプリング間隔 : 0.5, 1.0, 2.0, 4.0msec
- ・データ書式 : SEGY FORMAT
- ・周波数特性 : DC~822 Hz
- ・分解能 : 120 db
- ・プリアンプゲイン : 0, 12, 24 db

III) 地震計 ~ SM-7 (Sensor 製)

- ・固有周波数 : 10Hz
- ・グルーピング : 9 個グループ/ch

地震計は複数個の直列 (9 個グループは 3 直列×3 並列) に結線されたものを使用し、1 つのアナログ信号にして観測装置への入力する。このように 1 測定点に多数個の地震計を設置して観測することをグルーピングと呼んでいるが、主な目的は次のとおりである。

- a. 反射波観測においてノイズとなる表面波を減衰する。
- b. 受震器の感度を増す。
- c. 測定点間隔が粗いために起こる波数領域でのエイリアスを防ぐ。

IV) その他の機材

- ・パイプレーター起震制御装置 ~ ADVANCE-II (PELTON 製)
- ・無線機 ~ 10Watt. VHF (JRC 製)

b) データ処理

反射法探査の処理について、以下に示す。

①データ処理の概要

処理は、次の2種類に大きく区分される。

○基本処理

- a. 初期編集……データ整理・CMP編集
- b. 波形処理……プレフィルター・位相振幅補償・デコンボリューション
- c. 静補正……表層静補正・標高補正・残留静補正
- d. 速度解析……重合速度の推定
- e. 重 合

これらは時間断面の作成を目的とする処理である。

○解釈のための処理

- a. マイグレーション……地層の傾斜・回折による見かけの断面を補正する。
- b. 深度変換……時間断面を深度断面に変換する。

これらは、時間軸上で与えられた見かけ上の記録から、真の地質構造を推定するための処理である。この処理においては、与えた速度分布により結果が大きく異なることがあり、出来る限り正確な速度分布を与える必要がある。この処理過程では、処理を行う技術者の地質解釈が、ある程度結果に反映する。

データ処理のブロックダイアグラムを図3.1.6に、各測線の処理手順および処理諸元を表3.1.1および表3.1.2に示す。

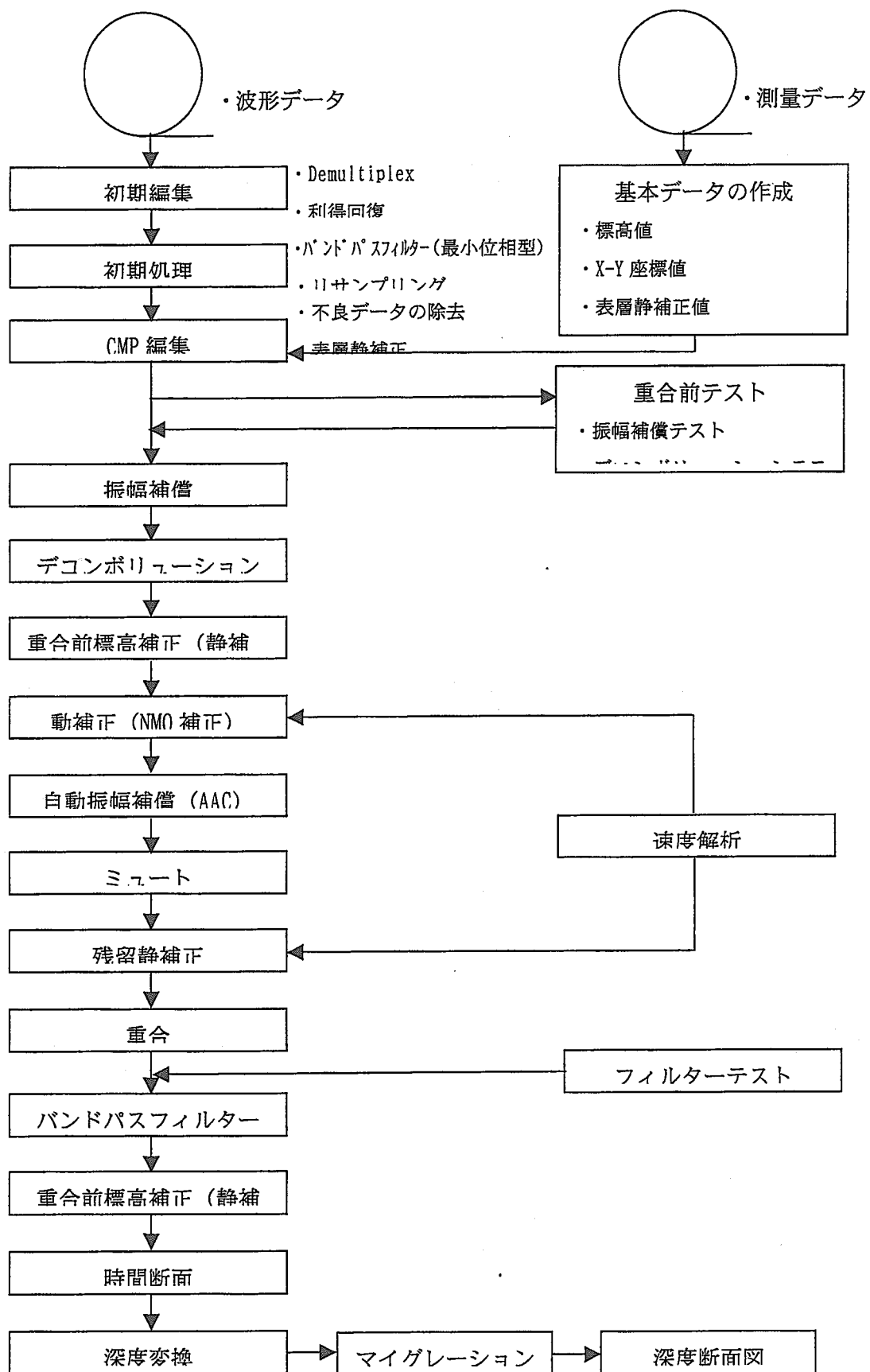


図 3.1.6 データ処理のブロックダイアグラ

表3. 1. 1 Line 1 測線 データ処理手順および処理諸元一覧表

- ①初期編集：不良データの除去，CMP 編集
- ②初期処理：イ. プレ・フィルターリング 25～100Hz
ロ. 探鉱機の位相特性補償.
- ③初期処理：イ. 原記録より統計的に求めた振幅特性カーブを用いた補償.
ロ. 各トレース別に，ゲート幅180msecで自動振幅補償（AAC）.
- ④デコンボリューション：
・タイプタイムバリエーション・ホワイトニング・デコン
・自己相関を算出するゲート長—1200msec
・フィルター・オペレーター長—120msec
・ホワイトニング・ノイズ—3%
- ⑤振幅補償：各トレース別に，ゲート幅200msecで自動振幅補償（AAC）.
- ⑥表層静補正：観測記録の初動を読みとり，このデータを用いて屈折波トモグラフィーにより解析を行い，静補正值を算出.
- ⑦標高静補正：設定した基準標高（100m）と各CMPの平均標高との差を1550m/secと表層速度を仮定して静補正.
- ⑧速度解析：CVSおよびセンブリンスを用いた速度スペクトル法を併用.
- ⑨残留静補正：最大補正量を8msecに制限した自動残留静補正.
- ⑩NMO補正・ミュート
- ⑪重合
- ⑫フィルター：20～90Hzのバンドパスフィルター.
- ⑬マイグレーション：FK法に基づく波動場補外法（下方接続）による.
- ⑭深度変換
- ⑮標高静補正：基準標高（100m）と各CMPの平均標高との差を1550m/secと表層速度を仮定して静補正.

表3.1.2 Line 2 測線 データ処理手順および処理諸元一覧表

- ①初期編集：不良データの除去，CMP編集
- ②初期処理：イ. プレ・フィルターリング 21～100Hz
ロ. 探鉱機の位相特性補償.
- ③初期処理：イ. 原記録より統計的に求めた振幅特性カーブを用いた補償.
ロ. 各トレース別に，ゲート幅170msecで自動振幅補償（AAC）.
- ④デコンボリューション：
・タイプタイムバリエーション・ホワイトニング・デコン
・自己相関を算出するゲート長—1000msec
・フィルター・オペレーター長—110msec
・ホワイトニング・ノイズ—3%
- ⑤振幅補償：各トレース別に，ゲート幅190msecで自動振幅補償（AAC）.
- ⑥表層静補正：観測記録の初動を読みとり，このデータを用いて屈折波トモグラフィーにより解析を行い，静補正值を算出.
- ⑦標高静補正：設定した基準標高（100m）と各CMPの平均標高との差を1550m/secと表層速度を仮定して静補正.
- ⑧速度解析：CVSおよびセンプランスをを用いた速度スペクトル法を併用.
- ⑨残留静補正：最大補正量を8msecに制限した自動残留静補正.
- ⑩NMO補正・ミュート
- ⑪重合
- ⑫タイムバリエーションフィルター：
0～450msec : 25～90Hz
450msec～ : 20～80Hz
- ⑬マイグレーション：FK法に基づく波動場補外法（下方接続）による.
- ⑭深度変換
- ⑮標高静補正：基準標高（100m）と各CMPの平均標高との差を1550m/secと表層速度を仮定して静補正.

②波 形 処 理

処理の概略と諸元は、以下の通りである。

○初 期 編 集

- a. データ整理…不良データの除去，ノイズ除去，測量データ整理等。
- b. CMP編集…Line1・Line2測線とも，測定は道路沿いおよび障害物を避けて実施したため，測線は一直線ではなく，CMP（反射中点）は平面上に分布する。重合用測線は，これらのCMPの分布を最適に通る折れ線として設定し，この測線沿いにCMP編集を行った。

○初 期 処 理

波形処理のうち最も重要な処理は，パルスの短縮，短い周期の多重反射の除去，スペクトルの平滑化，等を目的に実施するデコンボリューションである。この処理を良好にするため，次の前処理を実施した。

・プレフィルタリング

回帰型のフィルターを用い，位相特性は次に述べる位相補償処理で併せてミニマムフェーズに直した。なお，Line1測線では25～100Hzの，Line2測線では21～100Hzのバターワース特性のバンドパスフィルターを用いた。

・位相補償

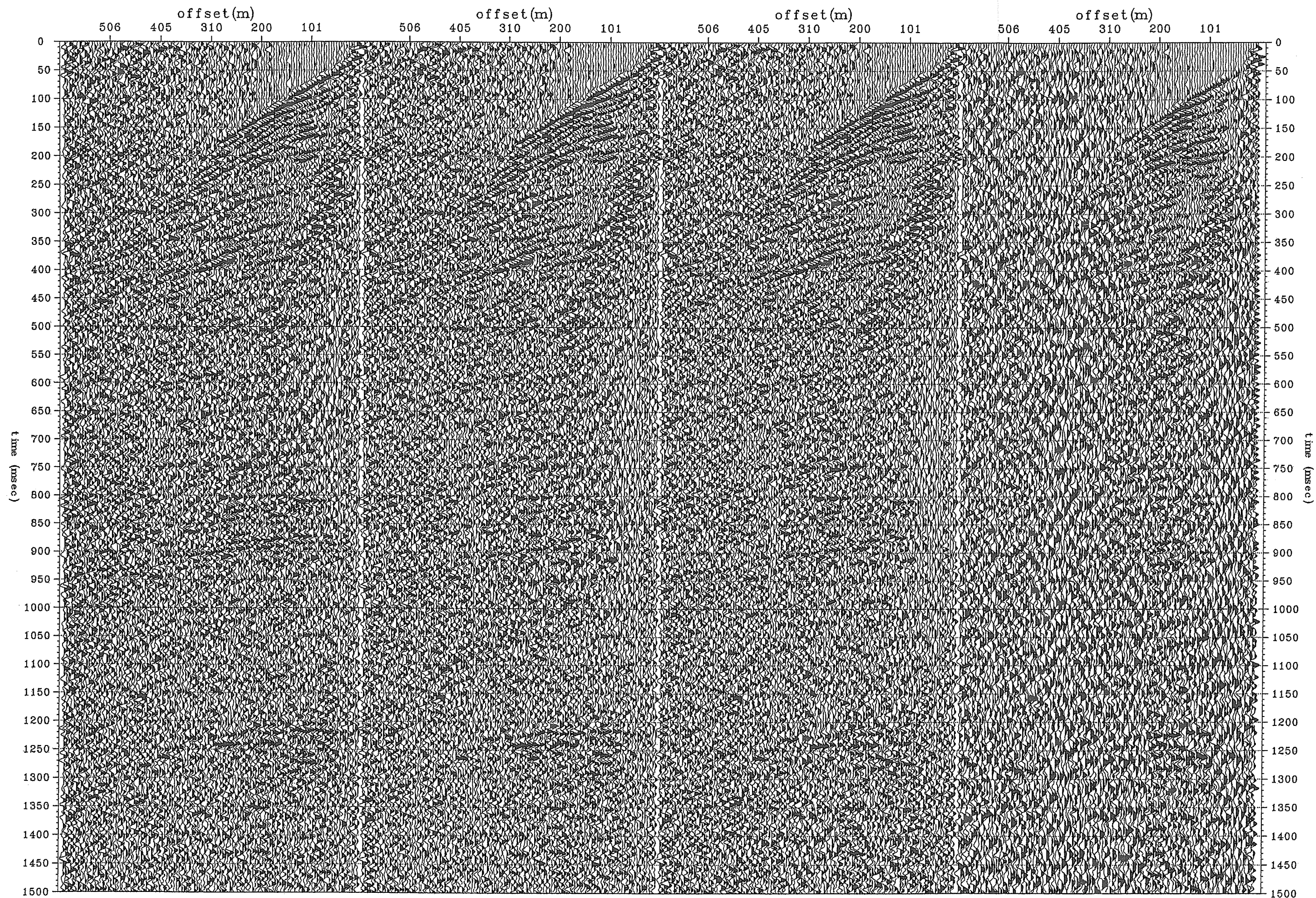
デコンボリューションが有効に働くためには，トレースがミニマムフェーズ特性であることが条件の一つである。測定系で記録がミニマムフェーズから外れる最も大きな原因は，探鉱機のフィルターによる位相特性である。この探鉱機の位相特性，およびプレフィルターの位相特性をミニマムフェーズに戻すフィルターを設計して全トレースに掛け，補償を行った。

・振幅補償…次の2段階に分けて実施した。

- a. 全トレースよりオフセット距離（震源－受震器間距離）別に振幅の時間減衰特性を統計的に求め，この特性の逆数で振幅補償を行った。
- b. 次に各トレース別に，Line1測線ではゲート幅180msecで，Line2測線ではゲート幅170msecで平均振幅の時間変化を求め，振幅補償を行なった（AAC）。

○デコンボリューション

Line1測線には自己相関演算のゲート長 1200msec，フィルター長 120msec，ホワイトノイズ3%の，Line2測線には自己相関演算のゲート長 1000msec，フィルター長110msec，ホワイトノイズ3%のタイムバリエーション型ホワイトニング・デコンボリューションを用いた。デコンボリューションテスト結果を図3.1.7(1)～(4)に示す。



whitening decon
gate(msec) =800
filter(msec)=80

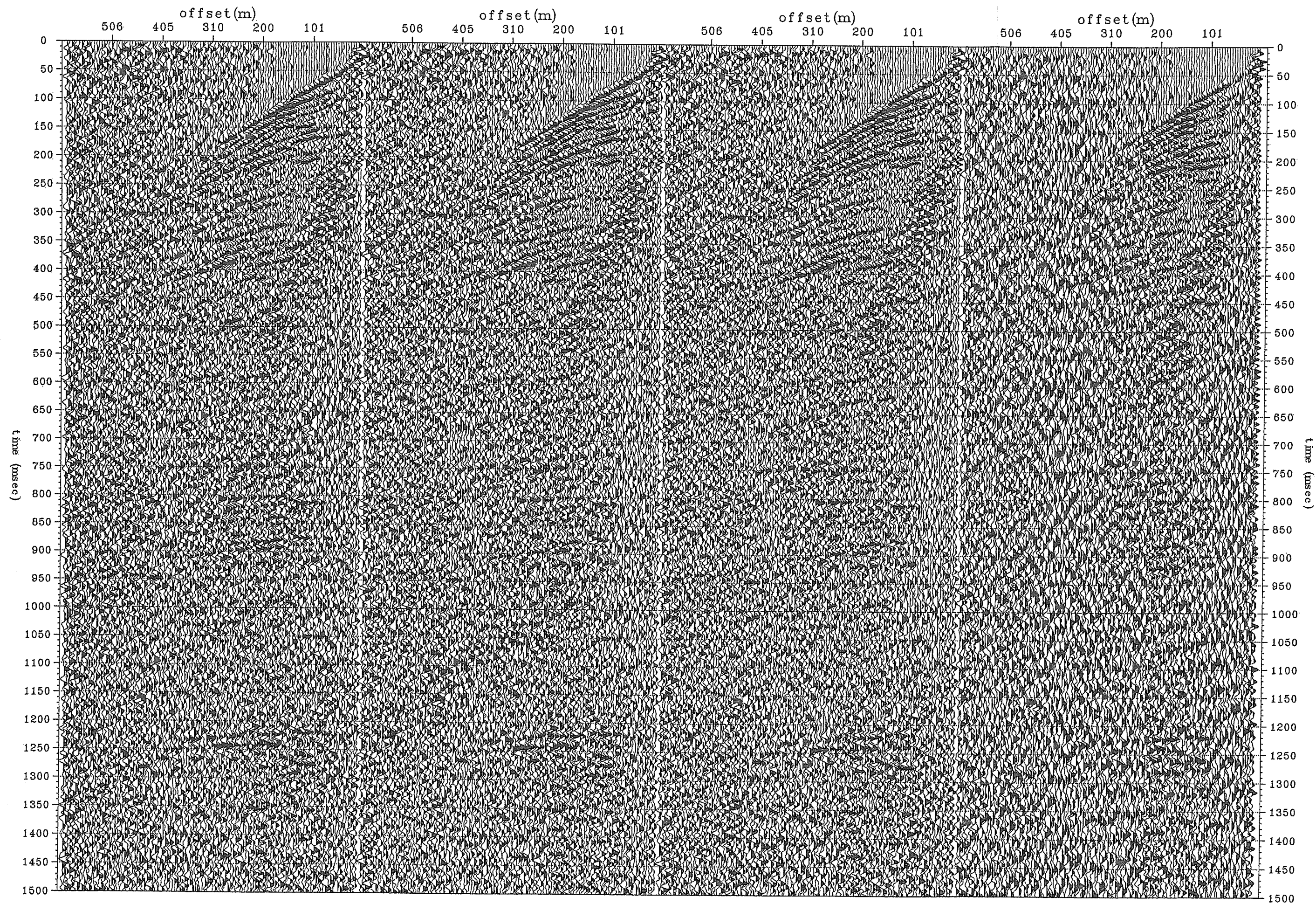
whitening decon
gate(msec) =1100
filter(msec)=110

whitening decon
gate(msec) =1400
filter(msec)=140

original

図 3. 1. 7 (1) デコンボリューションテスト

(ホワイトニング・デコン・line1 測線)



predictive decon
gate(msec) =800
filter(msec)=80

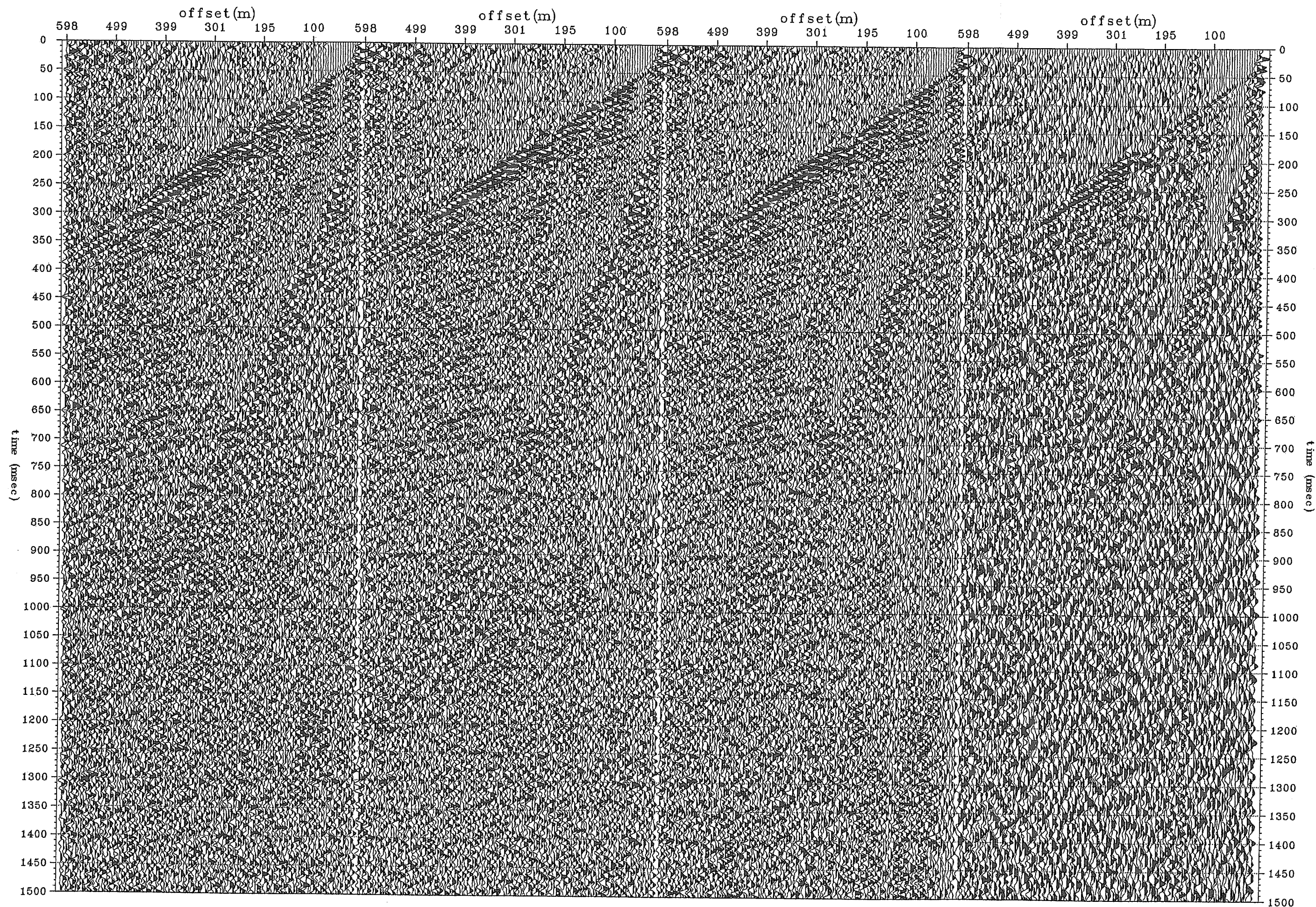
predictive decon
gate(msec) =1100
filter(msec)=110

predictive decon
gate(msec) =1400
filter(msec)=140

original

図 3. 1. 7 (2) デコンボリューションテスト

(プレディクティブ・デコン: Line1 測線)



whitening decon
gate(msec) =800
filter(msec)=80

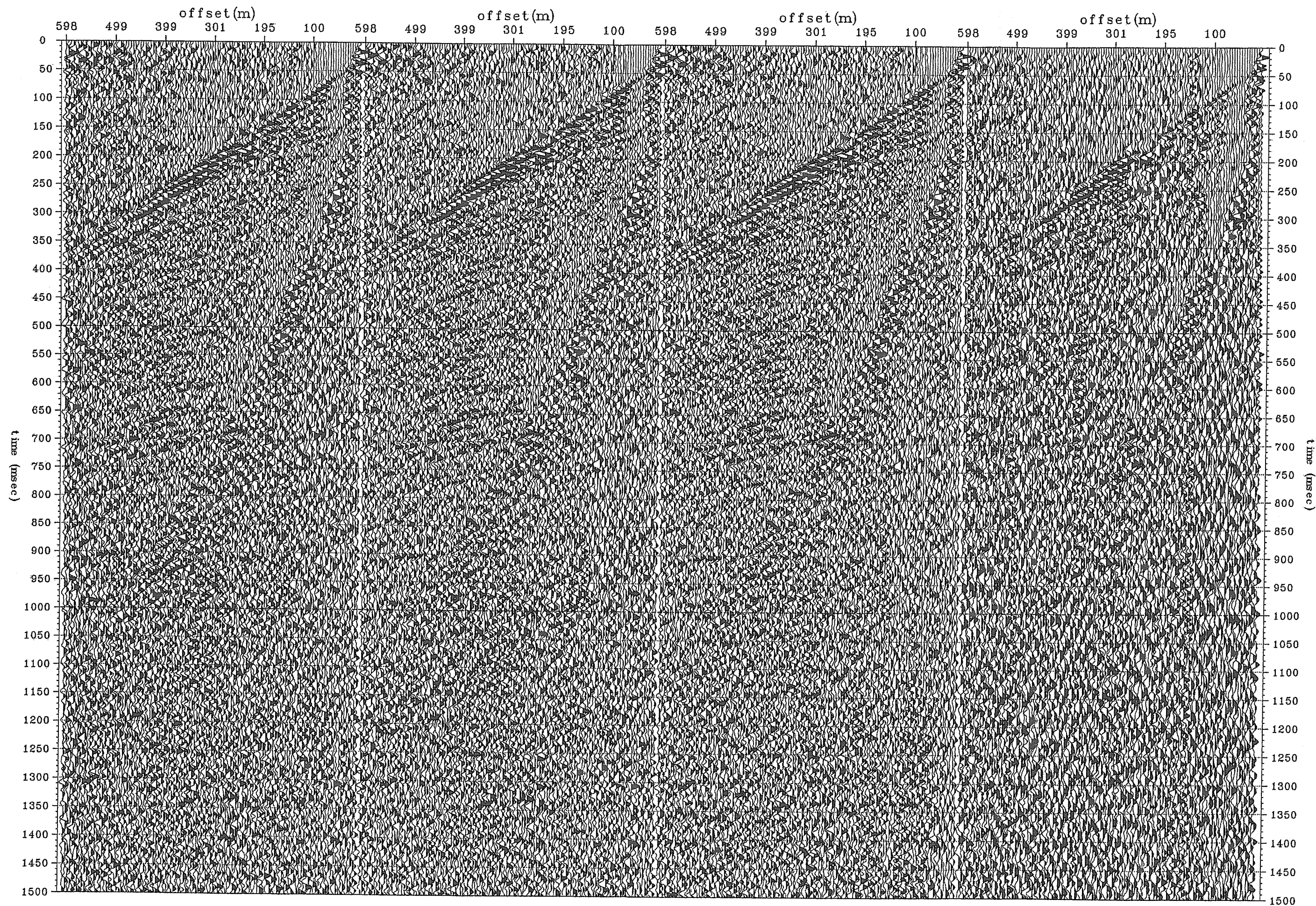
whitening decon
gate(msec) =1100
filter(msec)=110

whitening decon
gate(msec) =1400
filter(msec)=140

original

図 3. 1. 7 (3) デコンボリューションテスト

(ホワイトニング・デコン : Line2 測線) - 21 -



predictive decon
gate(msec) =800
filter(msec)=80

predictive decon
gate(msec) =1100
filter(msec)=110

predictive decon
gate(msec) =1400
filter(msec)=140

original

図 3. 1. 7 (4) デコンボリューションテスト
(プレディクティブ・デコン : Line2 測線)

③ 静 補 正

静補正は、低速度の表層を第2層の速度で置き換え、発震点・受震点が見かけ上基準面に並ぶようにする処理である。

○表層補正

一般的には屈折法により表層を”はぎ取る”方法が用いられるが、特にミラージ的な速度変化を示すような速度構造地盤では、必ずしも精度の高い補正值を得られるとは限らない。そこで、次に述べる「屈折波を用いたトモグラフィー」により表層の速度分布を求め、これにより静補正值を算出し、表層に起因する乱れを補正した。図3.1.8(1)にLine1測線の図3.1.8(2)にLine2測線の表層速度解析結果を示す。

屈折波を用いたトモグラフィーの解析手順は、次の通りである。

- ① 観測波形よりP波の初動走時を読みとる。
- ② 差分格子点に適当な初期速度分布値を与える。
- ③ アイコナール法により、ある発震点で起震した場合の各格子点の初動走時を計算する。
- ④ 初動走時分布をもとに波線を求める。
- ⑤ 各波線の観測走時と計算走時の比を修正係数とし、波線周辺の格子点に記憶する。
- ⑥ ③～⑤を全発震点について行う。
- ⑦ 格子に配られた修正係数をもとに波線を求める。
- ⑧ ③～⑦を収束するまで繰り返す。

○残留静補正

NMO補正後に最大値を8msecに制限した自動残留静補正を行った。

○CMPアンサンブル内での標高静補正

NMO補正前に、補正速度を1550m/secとして、各アンサンブルごとにその平均標高までの標高差補正を行った。

○重合後標高静補正

マイグレーション、深度変換後に各CMPの平均から基準標高までの標高静補正を行った。なお、時間断面図のプロットの際も、地表平均標高から基準標高までを、1550m/secの速度を仮定して標高補正を行った。

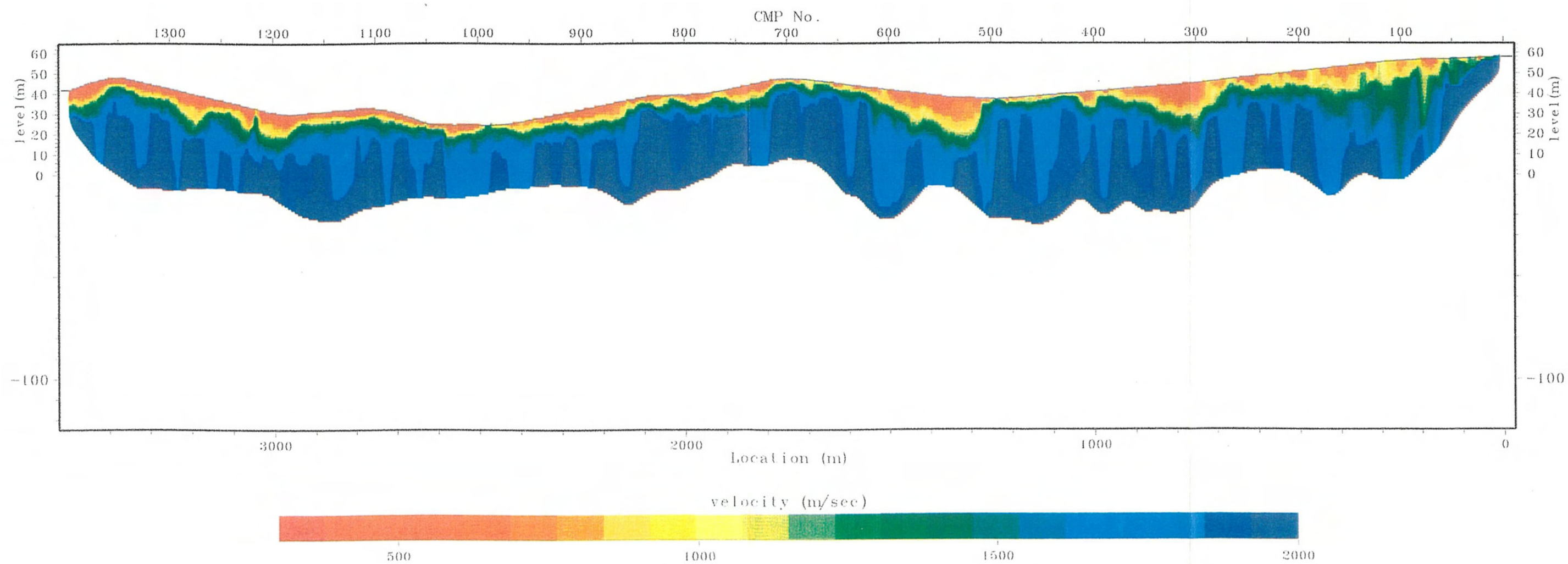
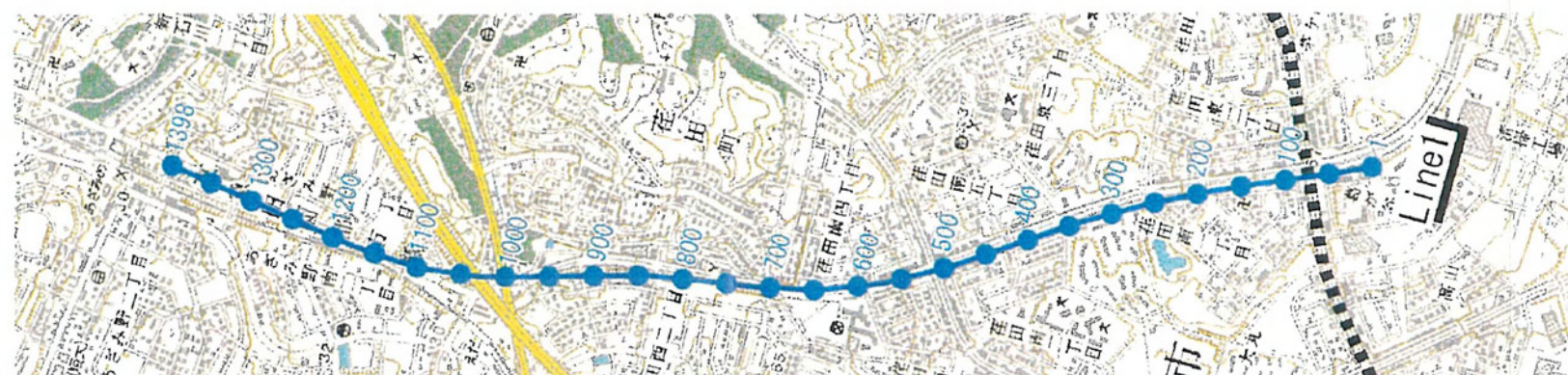


図 3. 1. 8 (1) No. 1測線表層解析結果
(鉛直方向を 5 倍に誇張して表示)

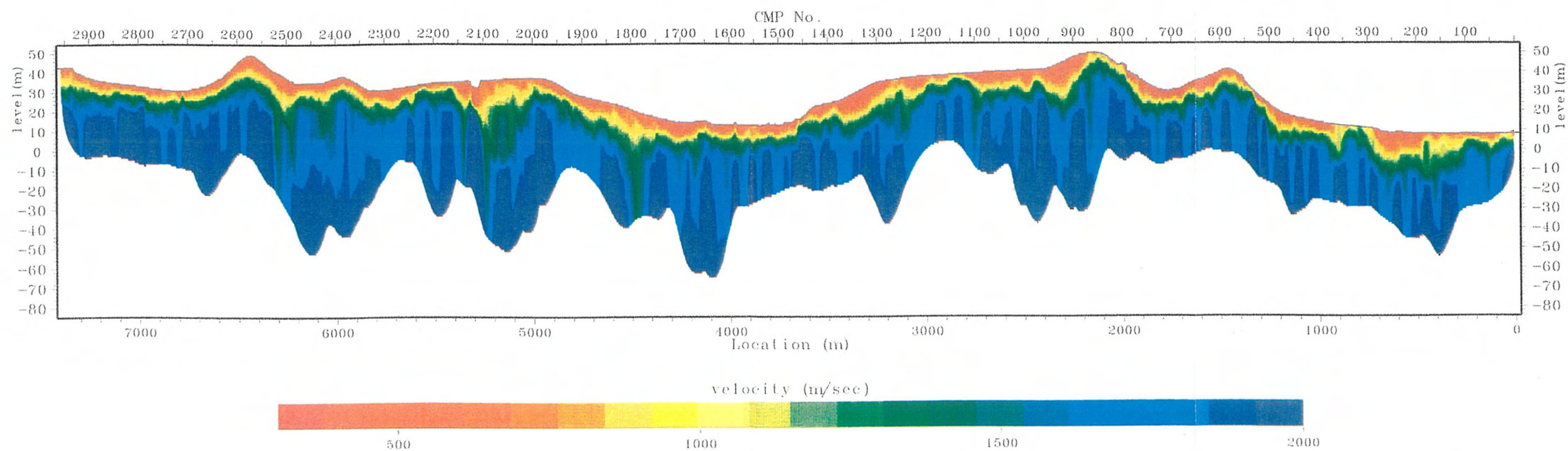


図 3. 1. 8 (2) No. 2 測線表層解析結果
(鉛直方向を 10 倍に誇張して表示)

④NMO補正と速度解析

○NMO補正

NMO補正とは、オフセットの違いによる走時のずれをゼロオフセットの記録に補正するものである。通常、直線の波線を仮定した下記の方法で行う。

地下構造が水平2層でオフセットがXの時、第1層下端から反射して受震点に到達する波の走時は、

$$t^2 = 4 t_0^2 + (X^2/V^2)$$

となる。ここで、

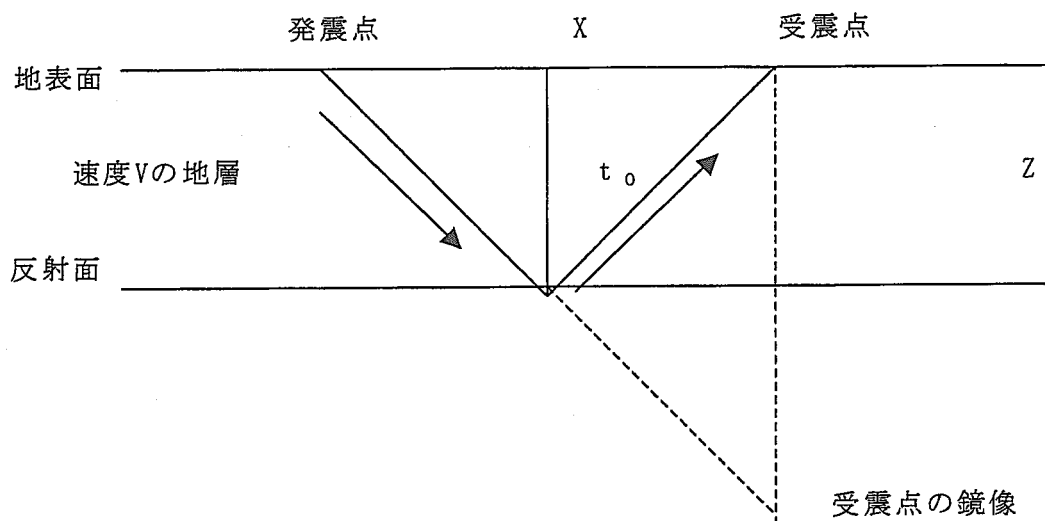
$$t_0 = 2Z/V$$

V ; 波の伝播速度

X ; 発震点と受震点の距離

t_0 ; ゼロオフセットの走時

<NMO補正における波線の考え方>



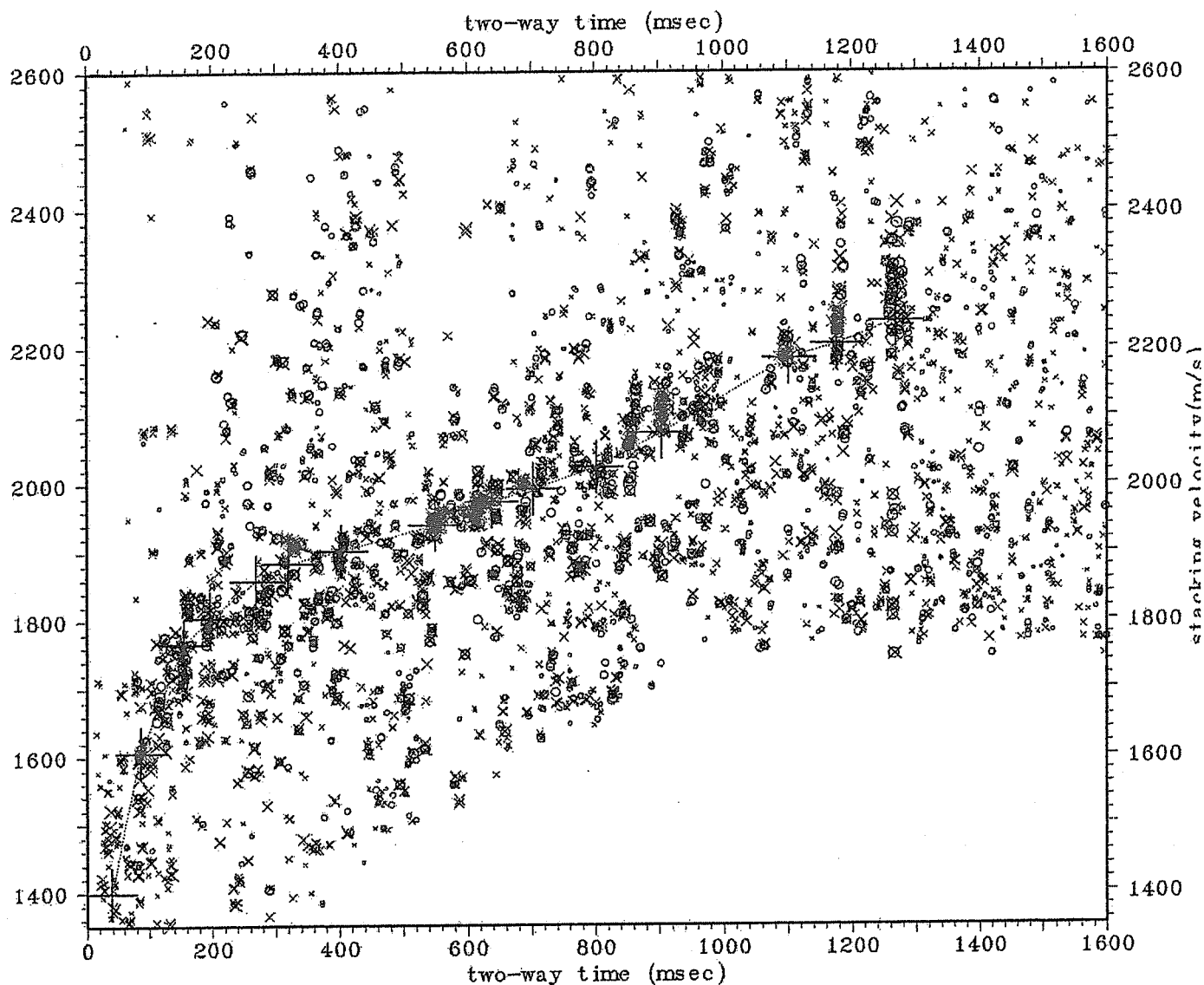
多層構造の地層の場合も、オフセットXに比べ反射面深度が十分に大きければ、

$$T_n(X)^2 = T_n(0)^2 + (X^2/V_R^2)$$

と近似できる。ここで V_R はRMS速度と呼ばれるもので、第1層の速度を V_i , 第i層の鉛直走時を Δt_i とすると、

$$V_R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n V_i^2 \Delta t_i}{T_n(0)}$$

と定義される。



layer No.	two-way time (millisecond)	RMS velocity (meter/sec.)	interval vel. (meter/sec.)	layer depth (meter)
1			1399	26.8
2	38	1399	1754	68.9
3	86	1606	1947	136.2
4	156	1766	1941	176.6
5	197	1804	1999	249.1
6	270	1859	2014	300.3
7	320	1884	1971	382.4
8	404	1903	2043	531.9
9	550	1941	2172	627.3
10	638	1974	2165	697.3
11	703	1993	2236	809.4
12	803	2025	2436	933.2
13	905	2075	2620	1192.2
14	1102	2183	2493	1285.9
15	1178	2204	2629	1407.4
	1270	2237		

图 3.1.9 速度解析结果例

⑥波形処理結果

以上(②～⑤)の波形処理結果を、次の100%断面図(1 重合断面図)で示す。なお、図3. 1. 10および図3. 1. 11はそれぞれLine1測線およびLine2測線の100%断面である。

- 図3. 1. 10, 3. 1. 11 (1) 観測記録の100%断面図
- 図3. 1. 10, 3. 1. 11 (2) プレフィルタ、位相・振幅補償の100%断面図
- 図3. 1. 10, 3. 1. 11 (3) 静補正後の100%断面図
- 図3. 1. 10, 3. 1. 11 (4) デコンボリューション後の100%断面図
- 図3. 1. 10, 3. 1. 11 (5) NMO補正後の100%断面図
- 図3. 1. 10, 3. 1. 11 (6) $\tau - p$ フィルタ後の100%断面図

⑦重合およびマイグレーション・深度変換

○ミュート、重合

速度解析で得た速度分布を用いてNMO補正し、ミュート後、重合した。

○タイムバリエーションフィルタ

重合後の時間断面について周波数解析(フィルターテスト)を行い、タイムバリエーションフィルタを決定した。図3. 1. 12 (1) ～ (4) にLine1およびLine2測線のフィルターテストの実施例を示す。

○マイグレーション

重合後時間断面を水平方向の速度分布が均一なストレッチ断面(深度方向には速度変化を認める)に変換した後、波動場補外法(位相移動によるイメージングと下方接続)によるFKマイグレーションを行った。

○深度変換

マイグレーション後の時間断面を、マイグレーションに用いたRMS速度より求めた区間速度を用いて深度変換した。