

3. 浅層反射法弾性波探査結果

3-1. 探査仕様

探査は以下の3測線である。測線配置図を図3-1・1～図3-1・3に示す。

- ・ 段関・大代地区：鳴門市大津町段関・大代 測線長102m (図3-1・1参照)
- ・ 姫田地区：鳴門市大麻町姫田 測線長135m (図3-1・2参照)
- ・ 川端地区：板野町町川端 測線長200m (図3-1・3参照)

探査では起振装置としてS波ポータブルバイブレーターを使用した。この起振装置は高い分解能でS波を発生できるものである。

一般的に起振装置は震源と呼ばれ、今回探査に用いた震源は特殊合金で作製された箱の内部に水平に小型のバイブレーターを設置し振動させることにより、S波を発生させることができる。道路表面などに損傷を与えることなく小さな振動を発生することができるうえ、比較的大きなエネルギーの信号を得られる。また、地盤状況や調査対象により震源特性を変化させられる性能を持ち合わせている。

使用した震源はコンパクトな設計がされており、震源を運ぶ機械（キャリアー）を使用しても横幅1mほどの幅であり、一般車両等の交通を妨げることなく歩道や路肩を使用して探査することが可能である。

受振器としては固有周波数14Hzの水平動用の地震計を用いた。また、データ収録装置としてはOYO Geospace社製のDAS-1を用いた。DAS-1は、シグマデルタ方式のA/D変換器を搭載した地震探査装置で、24ビットという高い分解能を有する。本測線の探査の観測に使用した機器の一覧を表3-1・1にまとめる。

表3-1・1 使用機器一覧

使用機器	名称	数量	仕様	製造元
バイブレーター型震源	S波ポータブルバイブレーター	1台	最大出力荷重：500N 発震周波数帯：10～500Hz 総重量：約100kg	OYOCAG (オランダ)
受振器	GS-100	100台	換振器：速度型 固有周波数：100Hz	OYO Geospace社 (米国)
CDPケーブル	CDPケーブル	10本	ケーブル数：12/本 ケーブル間隔：2m 最大接続成分数：48/本	OYO Geospace社 (米国)
データ収録器	DAS-1	1台	A/D変換：24ビット (シグマデルタ方式) チャンネル数：144 サンプリングレート： 32.5μs～4ms 最大データ長：80000点	OYO Geospace社 (米国)

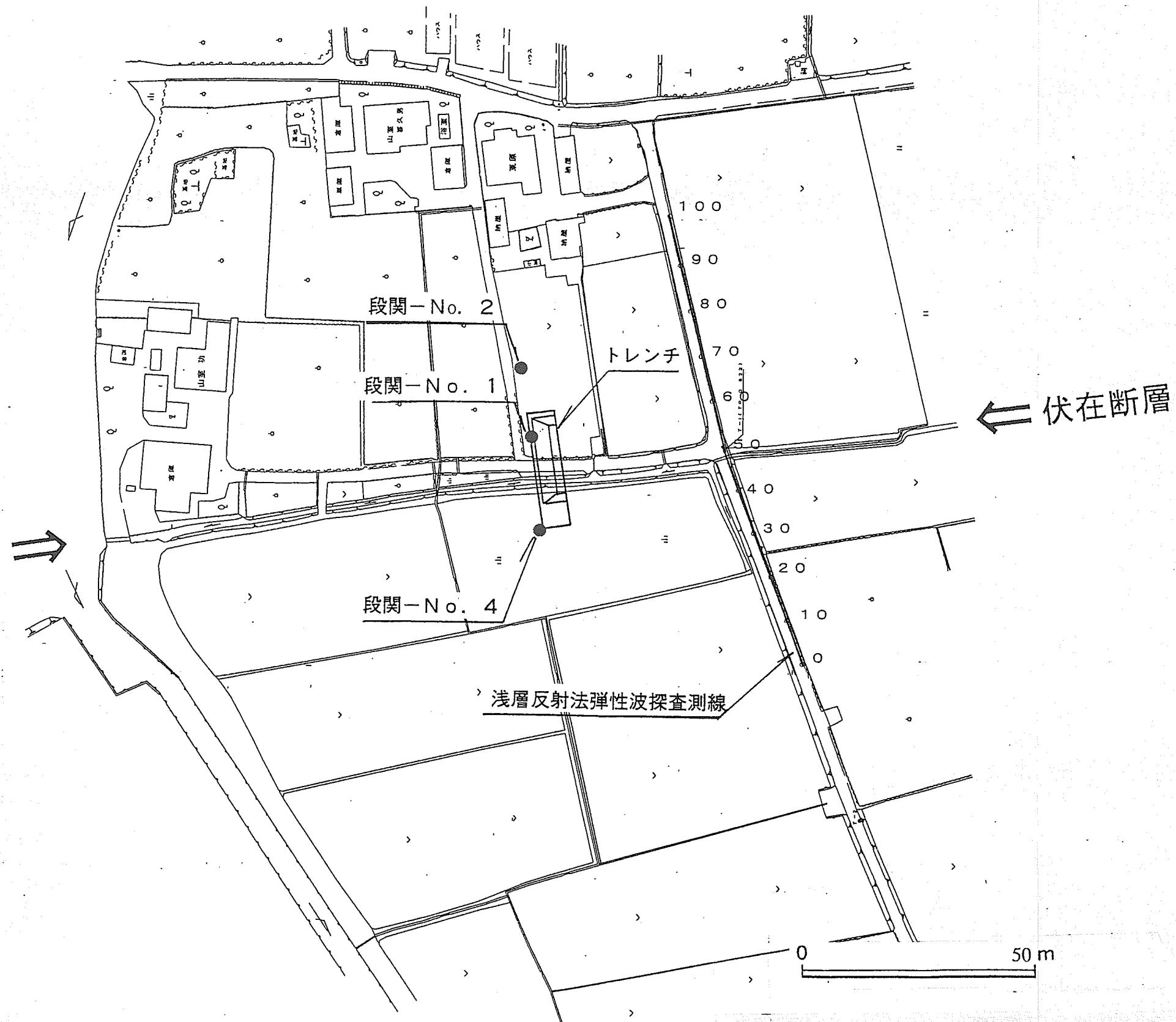
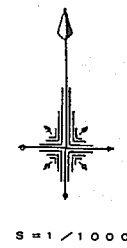


図3-1・1 段関・大代地区測線配置図

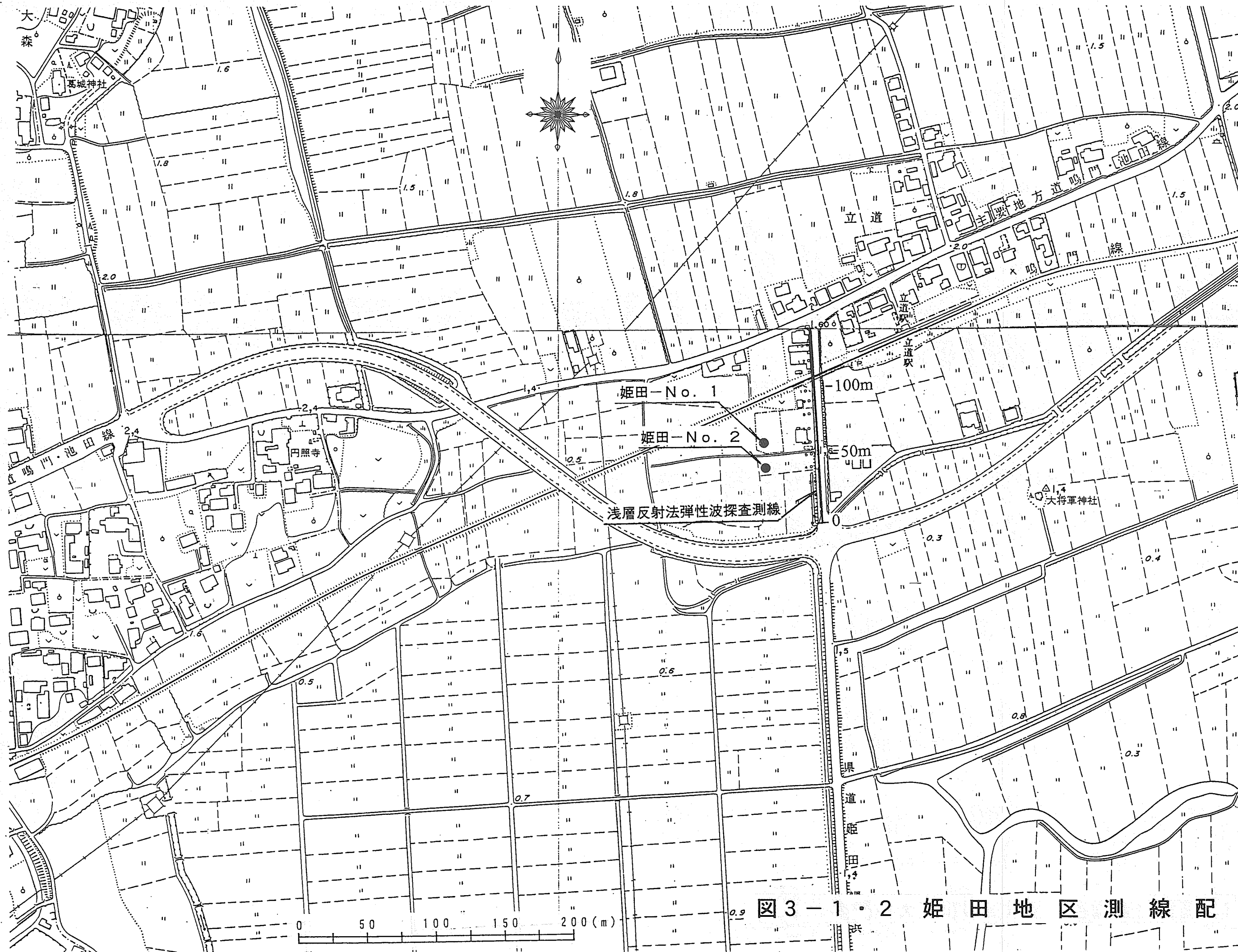


図3-1・2 姫田地区測線配置図

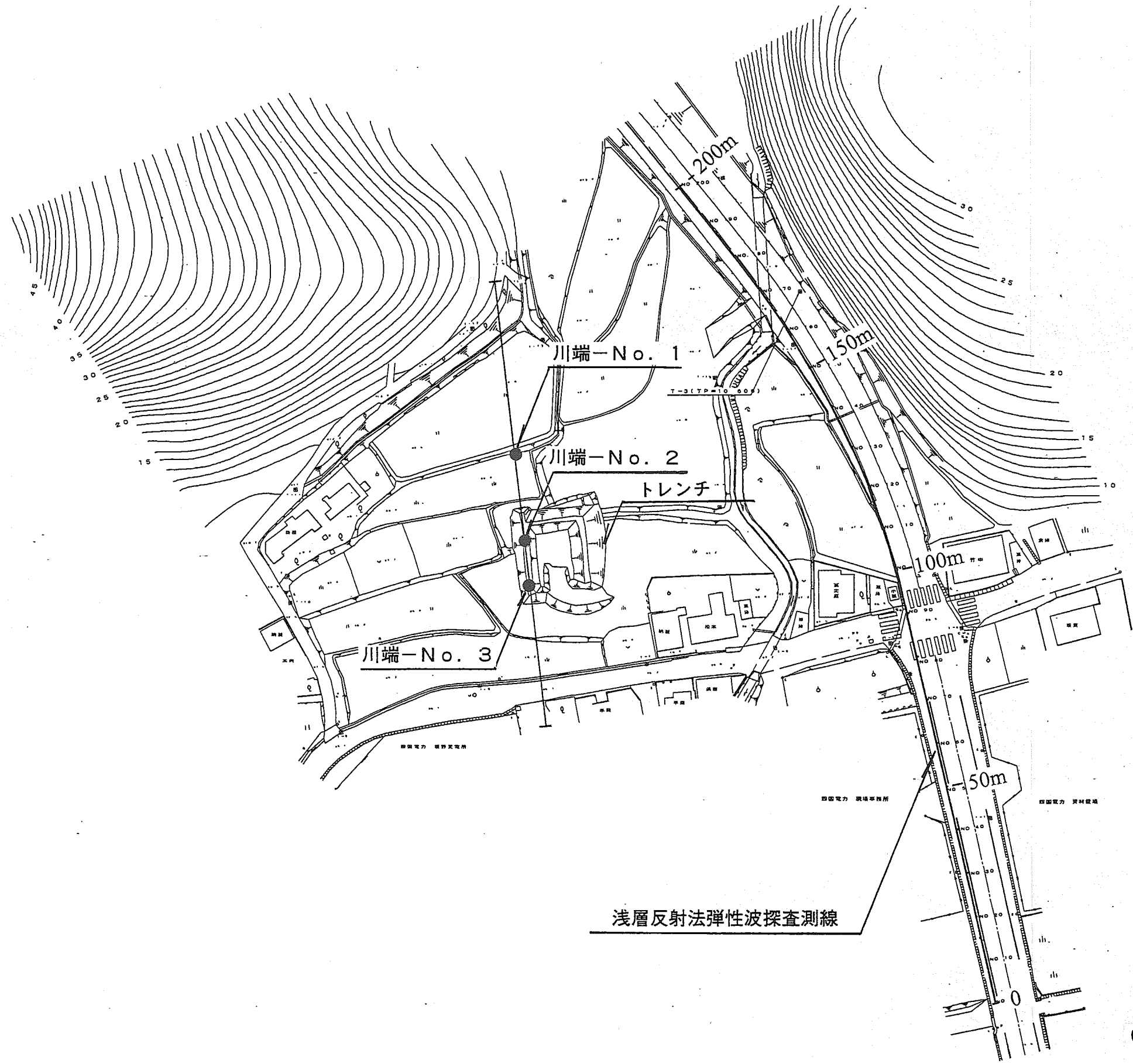


図 3 - 1 ・ 3 川 端 地 区 測 線 配 置 図

以下に各測線の探查仕様について示す.

1) 段関・大代地区

表 3-1・2 に段関地区の探查仕様を示す. 段関地区は南側を始点として, 断層推定位置を中心とした 102m の測線を設けた. 観測は最小オフセット距離を 0.5m, 最大オフセット距離を 30m とするインライン・エンドオンオフセット展開を基本とし, 測線終端の 30m 区間では受振器固定とした.

表 3-1・2 探查仕様 (段関地区)

場 所		鳴門市大津町大代・段関
測 線 長		102 m
起 振	波 種	S 波
	スイープ周波数	40~300 Hz
	スイープ時間	7 sec
	起振点数	104
	起振点間隔	1 m
受 振	受振点数	201
	受振点間隔	0.5 m
展 開	展開方式	インライン・エンドオン展開
	最小オフセット距離	0.5 m
	最大オフセット距離	30 m
記 録	同時受振点数	60
	サンプルレート	1 msec
	記録時間	8 sec
	垂直重合数	4
	C D P 重合数	15

2) 姫田地区

姫田地区では南側を始点として, 断層推定位置を中心とした 135m の測線を設けた. 途中 105m 付近で J R 線の踏み切りを横切る. 観測は最小オフセット距離を 1m, 最大オフセット距離を 60m とするインライン・エンドオンオフセット展開を基本とし, 測線終端 60m 区間では受振器固定とした. 表 3-1・3 に姫田地区の探查仕様を示す.

表 3-1・3 探查仕様 (姫田地区)

場 所		鳴門市大津町姫田
測 線 長		135 m
起 振	波 種	S 波
	スイープ周波数	20~120 Hz
	スイープ時間	7 秒
	起振点数	102
	起振点間隔	1 m
受 振	受振点数	130 (103~108は欠測)
	受振点間隔	1 m
展 開	展開方式	インライン・エンドオン展開
	最小オフセット距離	1 m
	最大オフセット距離	60 m
記 録	同時受振点数	60
	サンプルレート	1 msec
	記録時間	8 sec
	垂直重合数	4
	C D P 重合数	30

3) 川端地区

川端地区は南側を始点として、断層推定位置を中心とする200mの測線を設けた。観測は最小オフセット距離を1m、最大オフセット距離を48mとするインライン・エンドオンオフセット展開を基本とし、測線終端48m区間では受振器固定とした。表3-1・4に川端測線の探査仕様を示す。

表3-1・4 探査仕様（川端地区）

場 所		上板町川端
測 線 長		200 m
起 振	波 種	S 波
	スイープ周波数	20~120 Hz
	スイープ時間	7 秒
	起振点数	201
	起振点間隔	1 m
受 振	受振点数	201
	受振点間隔	1 m
展 開	展開方式	インライン・エンドオン展開
	最小オフセット距離	1 m
	最大オフセット距離	48 m
記 録	同時受振点数	48
	サンプルレート	1 msec
	記録時間	8 sec (相互相関後は 1 sec)
	垂直重合数	4
	C D P 重合数	24

3-2. 探査実施期間及び担当者

探査実施期間及び担当者は以下のとおりである。

- ・ 川端地区 : 平成10年6月10日～6月15日 (全5日間)
- ・ 姫田地区 : 平成10年8月3日～8月5日 (全3日間)
- ・ 段関・大代地区 : 平成10年8月6日～8月7日 (全2日間)

担当者……応用地質株式会社 高橋 亨,杉山正嗣,甲斐田康弘,鈴木晴彦

3-3. 測線配置及び探査仕様決定の経緯

平成9年度に実施された地形地質調査の結果に基づき、平野部伏在断層及び鳴門断層を対象としたトレンチ調査を段関・大代地区、姫田地区、川端地区で計画した。浅層反射法探査はトレンチ調査に先立ち、トレンチ地点の選定や深度数10mまでの地下の地質構造を把握することを目的として実施した。

<段関地区>

段関地区では伏在断層を対象として、沖積低地においてトレンチを計画した。浅層反射法はトレンチ予定地点の近くの未舗装の畦道を利用して測線を設けた。測線の長さは推定断層位置を中心として100mである。

本地域ではテスト的な探査を行っていたことで、深度40m付近にコントラストの大きい反射面があること、オフセット距離を大きくとらなくてもこの深度までの反射波は十分得られること、また、より浅い部分に対象を絞った探査が必要なが分かっていて、したがって、とくに浅い部分を対象として受振器間隔を0.5m、最大オフセット距離を30mとした探査を行った。スイープ周波数は分解能を重視して40～300Hzと他の2測線と比べて高い設定とした。

<姫田地区>

姫田地区では平野部伏在断層を対象としてトレンチを計画している。本地区では、高架橋建設調査のためのボーリング調査が実施されており、この結果より高架橋下では伏在断層の位置は明らかであった。しかしながら、高架橋付近ではトレンチを実施できる場所がなかったため、高架橋より約200m東側で南北に通る道路を利用して、浅層反射法の測線を設定した。南側の県道との交差点を始点として、測線の長さは132mとした。103mから108mにかけてはJR線を横切るため、受振器は設置できなかった。また、踏み切りの手前の100m地点で断層は超えていると判断して、起振は100mまでとした。

本測線観測時は県道を通るトラック等によるノイズの影響で、S/Nは良好ではなかった。スイープ周波数はS波ポータブルバイブレータとしては低めの20～120Hzを中心として、S/Nの向上を図った。現場での垂直重合は4回とし、ノイズを大きく含んだと判断された場合には取り直しを行うことにより、データ品質の向上に努めた。

<川端地区>

川端地区では、鳴門断層を対象として沖積扇状地においてトレンチを計画している。浅層反射法では同扇状地の東端をほぼ南北に通る道路を利用し、地形判読により推定した鳴門断層位置よりやや南側を中心として200mの測線を設置した。また、測線の西側にトレンチが実施できそうな用地があったことから、測線は道路の西側とした。受振器間隔は浅層反射法探査では標準的である1mとし、起振点の間隔も1mとした。本測線観測時には測線沿いや測線に直交する道路を通る車両が多く、これによるノイズのためS/Nは良好ではなかった。スイープ周波数はS波

ポータブルバイブレータとしては低めの20～120Hzとして,S/Nの向上を図った.現場での垂直重合は4回とし,ノイズを大きく含んだと判断された場合には取り直しを行うことによりデータ品質の向上に努めた.

3-4. 探査方法

(1) 測線の測量

反射法弾性波探査の観測に先立って測量を実施した。測量では測線を設定し、受振点間隔が川端地区及び姫田地区では1m、段関地区では0.5mとなるよう受振点位置の測量を行い、杭の敷設またはマーキングを行った。これら受振点のうち、川端地区及び姫田地区ではすべての点、段関地区では偶数の点を起振点とした。

(2) 観測作業

反射法弾性波探査の観測では、以下に述べる受振器・ケーブルの設置作業、起振作業、データ収録作業を全測線にわたって繰り返し行った。図3-4・1に反射法弾性波探査の観測作業の概要を示す。次ページに観測状況の写真を貼付する。

・受振器、ケーブルの設置

図3-4・1に示すように、測量で設定した各受振点に受振器を設置する。次に受振器とデータ収録器を専用ケーブル（CDPケーブル）で接続する。また、観測本部と起振機（S波ポータブルバイブレータ）間には、起動電流やバイブレータに設置してある加速度計の記録を伝えるための専用ケーブル接続する。

・起振作業

本部の連絡を受け、バイブレータを測量で設定した起振点位置に移動し待機する。本部からの起動電流により、バイブレータは一定時間周波数を変えた振動を地中に送り込む。

・データ収録

観測本部では、起振点位置に応じて受振する48点（川端地区）または60点（姫田、段関地区）の受振器を選択し、設定を行う。受振点におけるノイズ状況をモニターし、比較的ノイズの小さい時に起振バイブレータを起振させる。バイブレータを振動させると同時に、データ収録器は各受振器からの信号およびバイブレータに設置した加速度計からの信号を収録する。収録が終了するとただちに、加速度計記録と各受振器記録の相互相関処理が行われる。観測者はその相互相関処理結果を観察し、良好であると判断した場合、そのデータをハードディスクに保存する。その後、起振点へ次の点へ移動するよう指示を行う。

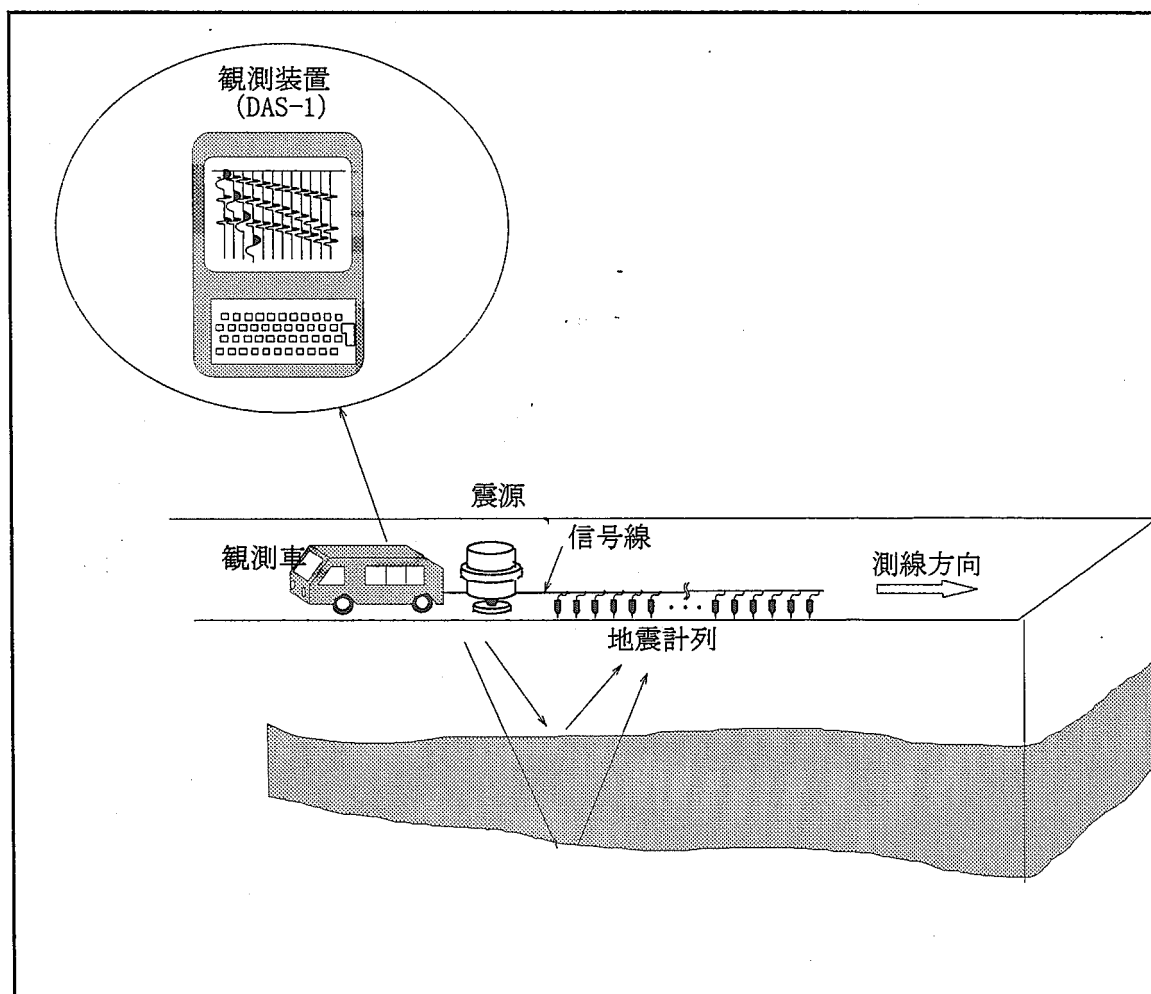
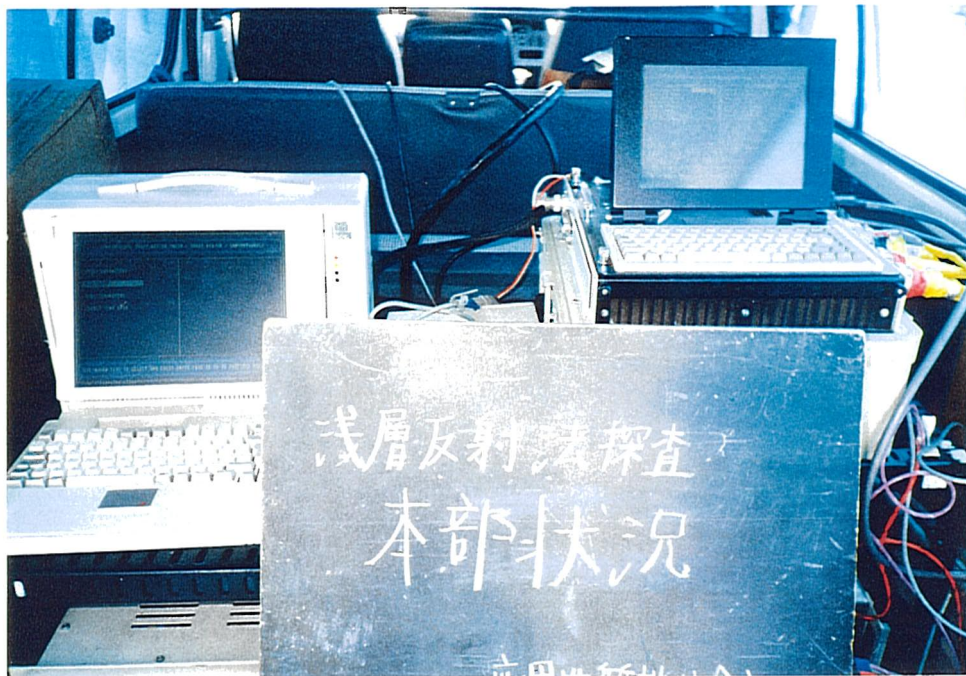


図 3 - 4 ・ 1 反射法弾性波探査観測状況図



浅層反射法弾性波探査 段関・大代地区の観測本部



浅層反射法弾性波探査 段関・大代地区の測線状況



浅層反射法弾性波探査 段関・大代地区の震源及び受振器



浅層反射法弾性波探査 姫田地区の観測本部



浅層反射法弾性波探査 姫田地区の測線状況



浅層反射法弾性波探査 姫田地区の震源



浅層反射法弾性波探査 姫田地区の震源及び受振器



浅層反射法弾性波探査 川端地区の測線状況



浅層反射法弾性波探査 川端地区の地震計設置状況



浅層反射法弾性波探査 川端地区の震源

3-5. データ処理方法

観測時に得られた記録中には、通過する車両や構造物の中の大きな機械より発する振動等のノイズや、電磁波によるノイズ、また、屈折波や表面波といった起振に伴うノイズ（コヒーレントノイズ）等、様々なノイズが含まれている。反射法データの処理の主な目的は、これらのノイズを多く含んだデータから必要な反射波だけを抽出することである。

現場でハードディスクに収録した各起振点ごとのデジタル記録は、ワークステーション（SUN Ultra）に転送され、反射法探査解析システムProMAX（LandMark社製）によって処理を行う。図3-5・1に解析処理のフローチャートを示す。

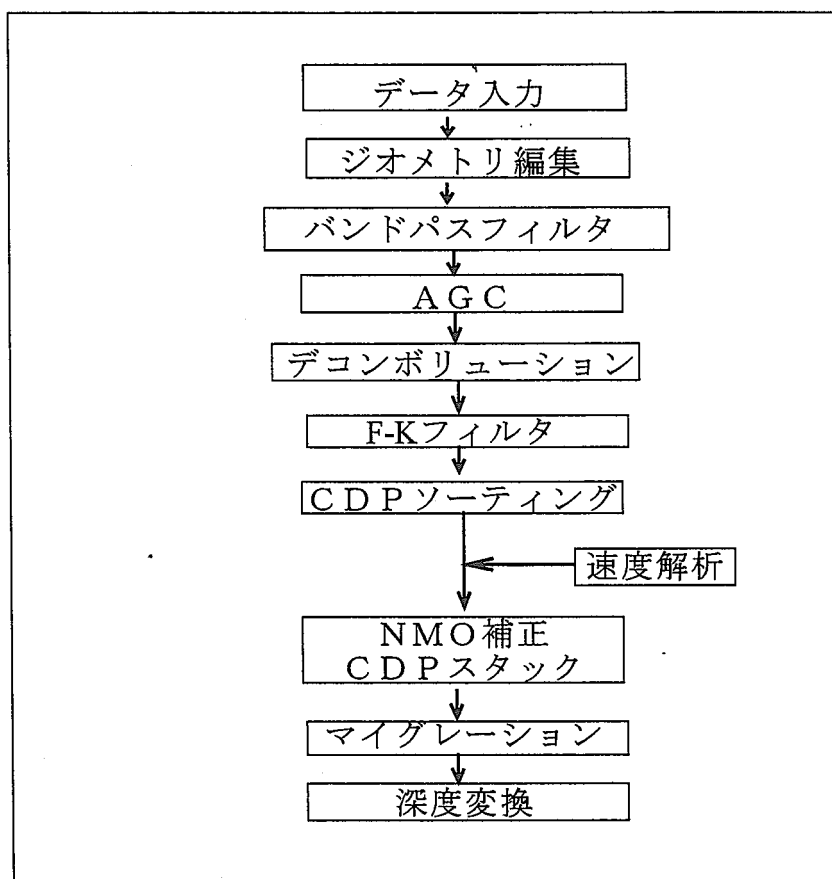


図3-5・1 解析処理のフローチャート

以下に主要な処理の概要を述べる。

(1) ジオメトリ編集

各観測波形データと、それが得られた起振位置、受振点位置などを関連づけるための処理である。

(2) バンドパスフィルター (band pass filter)

周波数フィルターの一つ。観測された記録には、表面波のような反射波以外の波やバックグラウンドノイズが含まれている。これらのいわゆるノイズと反射波の周波数帯域の違いに着目して、反射波の信号と異なる周波数を持つノイズを減少させる処理である。

(3) A G C (Automatic Gain Control)

観測された記録は屈折波や表面波の振幅が大きく、反射波の振幅はこれらの波に比べて小さいのが普通である。このような振幅の小さい反射波を初動付近の波の振幅と同程度の大きさになるように強制的に増幅する処理をA G Cと呼ぶ。

(4) デコンボリューションフィルター (deconvolution filter)

観測された反射波形は地層の音響インピーダンス変化に伴う反射係数列と、地下を伝わる波の基本波形のコンボリューションであると考えられる。したがって、基本波形の逆特性を持つフィルタを設計し、これに観測波形を入力すると、地下の反射係数列を得ることができる。このような処理をデコンボリューションフィルターと呼ぶ。この処理により、多重反射波が除去され（弱められ）、反射波はインパルスに近い（独立している）波に変換される。

(5) F-Kフィルター

観測された記録は各オフセット距離 (x) における走時 (t) として保存されており、 $t-x$ 領域として表現される。 $t-x$ 領域における時間領域、距離領域をそれぞれフーリエ変換すると、周波数 (f) - 波数 (k) 領域となる。 $f-k$ 領域における原点を通る直線の傾きは、 $t-x$ 領域における速度を示す。この原理を用いて、 $f-k$ において速度を基準としたノイズの分離を行い、ノイズを除去した後に、逆フーリエ変換（二重）によって $t-x$ 領域に戻す。このように $f-k$ 領域でノイズ除去を行う処理をF-Kフィルターという。

(6) C D Pソーティング (C D P Sorting)

観測に際しては1回の起振で48受振点（姫田、段関地区では最大60受振点）の波形記録が得られ、1起振点ごとの記録として収録される。以下の処理を行うためには、すべての記録がC D Pギャザーごとに並んでいる方が扱いやすいため、起振点ごとの記録をC D Pギャザーごとに並び変える作業を行う。この並び替えをC D Pソーティングと呼ぶ。

<CDPギャザー>

図3-5・2(a)に示したような起振点受振点配置の観測データを並び替え,図3-5・2(b)に示すように反射点が共通な記録,すなわち起振点と受振点の midpoint が同じ位置となる記録を集める.このような記録群をCDPギャザーと呼ぶ.最終的には微弱な反射波を強調させる目的でこの記録群内の記録を加算する.このような手法はCDP重合法(CDPスタック)と呼ばれ,反射法探査の標準的な解析法として用いられている.

(7) 速度解析

速度解析はCDPスタックを実行する際に必要な速度を知るために,CDPギャザー内の反射走時 $T_i(X)$ が,オフセット距離 X (起振点と受振点の距離),2-way time T ($X=0$ での反射面までの往復走時),CDPギャザー内での反射位相のみかけの平均速度 V_{stk} によって次式のように表されることを利用し, V_{stk} と T を決定する作業である.

$$T_i(X) = \{ (T_{i,0})^2 + (X/V_{stk,i})^2 \}^{1/2}$$

ここに、 i : i 番目の反射面を表す添字

X : オフセット距離

T : 垂直($X=0$ での)往復走時

V_{stk} : CDPギャザー内の反射位相のみかけの平均速度

(8) NMO補正、CDPスタック

CDPスタックの目的はCDPギャザー内の記録を加算(重合)し,CDP位置における地下情報を表す1個の波形記録を作成することである.CDPスタックに先立ち,CDPギャザー内の各オフセット距離の波形記録をオフセットがゼロの場合の記録に変換する必要がある.この処理をNMO補正(Normal Moveout)補正と呼ぶ(図3-5・2(b)).そして,CDPスタックして各オフセット距離の波形記録を重合する(図3-5・2(c)).CDPスタックを行うことによって,速度 V_{stk} を持つ反射位相だけが重ね合わされ強調され,一方,多重反射波や表面波など,この V_{stk} と異なる速度を持つ波の振幅は相対的に抑制される.重合後は,各CDP地点につき1本の波形記録となり,各々CDP点の記録として断面表示される(時間断面).

(9) 残差静補正

起振点や受振点近傍の地表条件の違いによる反射波の走時のばらつきを補正する処理.ここで用いたMaximum Power Autostaticsは,NMO補正後のCDPギャザーにおいて,あらかじめ指定したウィンドウ内でのスタック結果のパワーが最も大きくなるような補正値を各受振点,起振点別に求め,これをすべてのCDPに対して行い,測線全体を通して最もスタック結果のパワーが大きくなる各受振点,起振点の補正量を自動反復計算によって求めるものである.

(10) マイグレーション

CDPスタックにより得られる時間断面は,反射面が傾斜していたり,凹凸があった場合には見かけの構造しか示さない.このような時間断面を真の構造に近い断面に変換する処理をマイグレーションと呼ぶ.ここでは,周波数-空間領域で真の傾斜へ変換するF-Kマイグレーションを用いた.

(11) 深度変換

ここまで述べたような処理を行って得られる時間断面において,その縦軸は時間を表している.縦軸を深度で表す深度断面を得るためには,速度解析で求めた速度値あるいは,VSP探査やボーリング資料から推定された速度値を用いて,時間を深度に変換する必要がある.この処理を深度変換という.

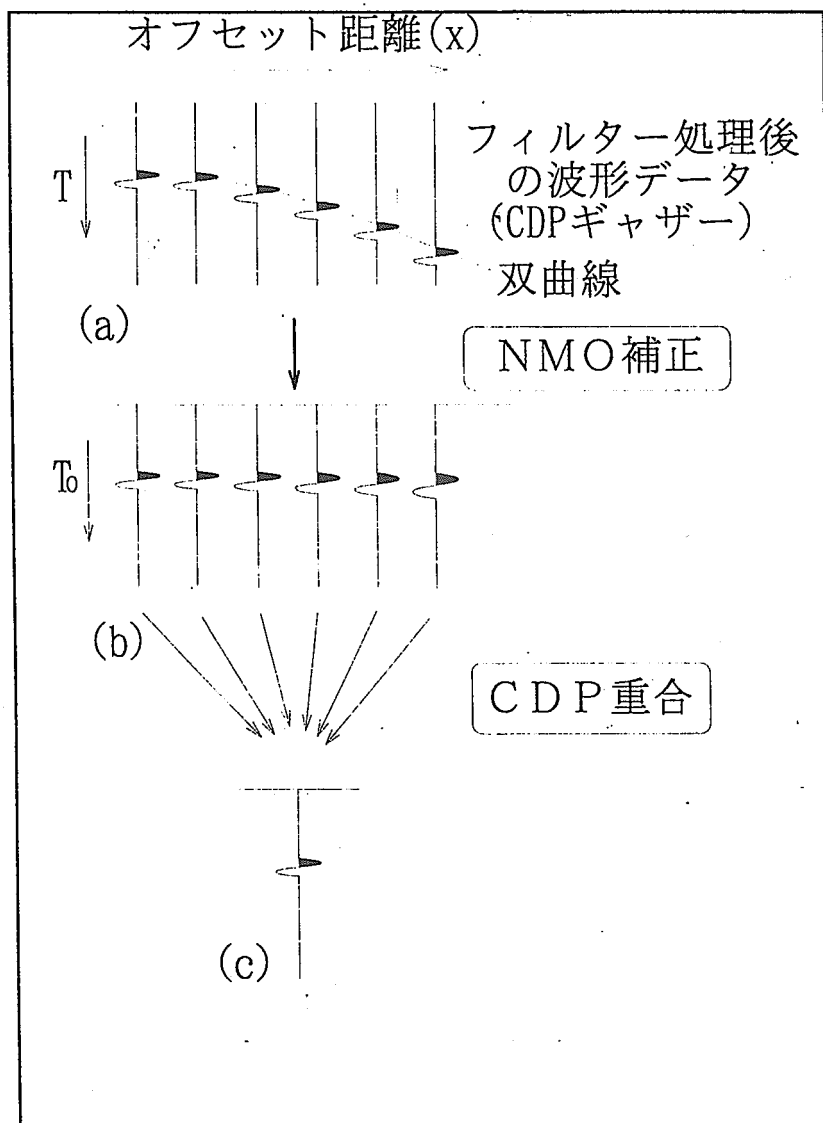


図 3-5・2 CDP 重合の概念図