

1.3 相模測線における地殻構造探査

1.3.1 相模湾岸地殻構造探査（相模 2003）

佐藤 比呂志（東京大学地震研究所）
平田 直（東京大学地震研究所）
伊藤 谷生（千葉大学理学部）
岩崎 貴哉（東京大学地震研究所）
瀧澤 一起（東京大学地震研究所）
笠原敬司（防災科学技術研究所）
伊藤 潔（京都大学防災研究所）

(1) 研究の背景と目的

足柄平野は、地質学的には伊豆-小笠原弧と本州弧の衝突境界であり、丹沢山地や大磯丘陵との境界部には、内陸の活断層としては最大級の平均変位速度を示す神縄-国府津-松田断層が位置する。1923 年関東地震の際の地殻変動や実体波の解析から関東地震の震源断層は、足柄平野下に伏在していると推定されている（Matsu'ura and Iwasaki, 1983; Wald and Somerville, 1995）。首都圏に最も大きな被害を及ぼした関東地震の震源断層の位置は、間接的に推定されているのみで、地殻構造の中で実体としてイメージされたわけではない。本測線は、関東地震を引き起こしたフィリピン海プレート上面の断層や、神縄-国府津-松田断層との接合関係を明らかにすることを主要な目的として設定された。この他、測線周辺の数値構造を明らかにすることと、丹那断層・伊勢原断層など活断層の深部形状を明らかにすることも目的の一つである。

(2) 相模測線周辺の地学的特徴

本測線は、伊豆-小笠原弧と本州弧の衝突境界を横断する（図 1）。伊豆半島北縁の地質構造は、丹沢山地・伊豆半島の本州弧への多重衝突によって特徴づけられる（Amano, 1991）。丹沢山地は伊豆半島衝突前に本州弧に接合した伊豆-小笠原弧の地塊であり、北縁を限る藤の木-愛川構造線は本州弧の地殻との境をなしている。丹沢山地の本州弧への衝突付加は約 800 万年前に、伊豆半島は 150 万年前と推定されている（平・清川, 1998）。伊豆半島と丹沢山地の間に存在したかつての伊豆-小笠原弧と本州弧の境界のトラフ充填堆積物である鮮新-更新統の足柄層群は、強い短縮変形を被っている。足柄層群は、丹沢山地と足柄平野の間の丘陵部に分布し、平野とは神縄断層で境される。伊豆半島の北縁には箱根火山が位置し、厚い火山噴出物に覆われるため伊豆半島北縁の地質構造は不明な点が多い。おそらく伊豆半島を構成する火山噴出物を主体とする新第三系が分布しているであろう。足柄平野の第四紀後期における沈降は急激であり、反射法地震探査によれば 50-20 万年前に噴出した箱根古期外輪山溶岩の延長部が深さ約 1~1.5km まで沈降している（笠原ほか, 2002）。

足柄周辺での反射法地震探査の実施例は多く、笠原ほか（1991）などの他、2001 年には神奈川県によって足柄平野の西縁から国府津-松田断層をへて大磯丘陵にいたる測線で反射法地震探査が実施されている（神奈川県, 2002）。この他、海上保安庁水路部によって相模トラフに沿った反射法地震探査が実施され、国府津-松田断層の南東延長の地下構造が判明している（加藤ほか, 1983）。神奈川県（2002）では、国府津-松田断層の深部延長は約 3km 程度までは東に傾斜した逆断層としてマッピングされている。1923 年の大正関東地震の際には国府津-松田断層は活動せず、深部に伏在する東傾斜の断層が活動したと推定されるが（図 2）、このようなプレート境界部の断層は地殻構造の上からはイメージされていない。

箱根火山の南麓にはほぼ南北に丹那断層が分布する。この活断層は、1930年の北伊豆地震(M7.3)の際に活動した。地質構造の観点から、丹那断層は箱根火山の南麓に伏在し、北麓の平山断層に連続する可能性がある。地殻構造探査測線「相模 2003」は、箱根火山南麓の丹那断層の北方延長部を通過する。丹那断層は高角度の左横ずれ断層であり、反射法地震探査によって直接断層面のイメージングを試みることは困難であるが、断層の分布パターンが断層を隔てた東西で異なっており、断層を隔てて地殻構造に差異がある可能性がある。

(3) 地震探査測線

静岡県三島市北東部から相模湾沿岸部(小田原～鎌倉)を経て横浜市金沢区に至る約 77km の区間で地震探査を実施した。地震探査測線は下記の地域に設定された。

- ・神奈川県 : 小田原市・湯河原町・二宮町・大磯町・平塚市・茅ヶ崎市・
藤沢市・鎌倉市・寒川町・横浜市金沢区
- ・静岡県 : 三島市・函南町

図 3 に調査測線概略図を、図 4 に調査測線図を示した。

調査測線は、静岡県三島市北東部から箱根を越え、相模湾の海岸線を経て、東京湾に面した横浜市金沢区に至る全長約 77km である。この内、測線の基点(三島市北西部)から、相模湾岸の鎌倉由比ガ浜までの約 65km の区間が CDP 法による反射法測線であり、有線テレメトリー方式を用いた。鎌倉由比ガ浜から横浜市金沢区までの約 12km の区間は、屈折法・広角反射法の測線として、独立型観測装置 MS2000 を配置した。

三島から小田原区間では、主として、国道 1 号線と箱根ターンパイクを測線として、道路の路肩に受振点を設定するとともに、パイプロサイズ車の発震に利用した。小田原市から鎌倉由比ガ浜までは、海岸線の砂浜地域を受振点とし、海岸線から約 500m～1km 沖合にエアガンの発震測線を設定した。

本測線の受振点数は

- ・陸域(箱根区間) : Loc 1 ~ Loc 519 (三島～小田原)
- ・陸域(相模湾岸) : Loc 520 ~ Loc 1314 (小田原～鎌倉)
- ・陸域(屈折法) : Loc 2001 ~ Loc 2120 (鎌倉～横浜市金沢区)

更に、屈折法・広角反射法の観測時には、神奈川県の県央部に、DAT による観測点を 18 箇所追加した。従い、受振点の総数は、1452 点であった。現地調査は、平成 15 年 1 月 29 日～同年 3 月 17 日まで実施された。

(4) 測量作業

(a) 陸上測量作業

予定測線上に 50m 毎に杭打ちを実施し、受振及び発震点(パイププレート及びダイナマイト)を木杭で表示した。国家三角点を与点として、測線近傍に基準点を設置した。国家三角点、公共基準点、RTK 測量で設置した基準点を与点として、測線付近に多角測量及び細部測量を実施した。各多角点を与点として、間接水準測量により受振点・発震点の平面直角座標値及び標高値を決定した。発震点及び受振点位置を示す測線図の作成には以下の 2 種類の測地システムを用い、国土地理院の地形図[1:25,000, 1:50,000]に対応させた。

(b) 海上測量作業

エアガン発震船の発震制御は震源位置を基準としたため、予め調査船 GPS アンテナから震源位置までのオフセット距離(28.3m)を算出し、この値を小型航法システム CHiPS2 に設定して観測作業を行った。また、計画予定測線の水深を測定することによって、定置網及び岩礁等の障害物の詳細な位置を事前に把握し、発震船の進入可能範囲を確認すると共に、エアガン発震深度及び実際の発震測線位置を決定した。海上測量作業は Differential GPS を利用して行われた(図 5)。リファレンス局として海上保安庁が運営する DGPS 基準局を利用した。具体的には海上保安庁運用の DGPS 基準局から送信される電波をビーコン受信機で受信し、受信した補正データを GPS 受信機に送り正確な位置を決定した。エアガン発震における船舶位置の誘導は、地球科学総合研究所(株)の小型航法システム CHiPS2 によって行われた。このシステムには、GPS 受信機から出力される緯度・経度・高度、並びに時刻・衛星情報等(NMEA における GGA フォーマット)と共に、調査船において測定されるジャイロコンパスからの方位、測深器からの水深データが集約され、編集後に出力された。観測作業では、DGPS 基準局から毎秒送信される DGPS 補正データによって補正された GPS 受信機からのデータを利用し、測線に対するジオメトリや船速等の情報を CHiPS2 によって計算した。DGPS の利用に際しては、以下の測位基準を考慮した。

利用する衛星数	5 個以上
HDOP 及び VDOP (観測位置データの誤差)	4 以下

エアガン発震点位置を示す測線図の作成には以上の測地システムを用い、国土地理院の地形図 [1:25,000, 1:50,000]に対応させた。

(4) 反射法地震探査

(a) データ取得

静岡県三島市北東部から箱根を越え、相模湾の海岸線(主に海浜部)を経て、鎌倉市の由比ガ浜海岸に至る約 65km の区間で反射法調査を実施した。反射法は、箱根区間でのパイプロサイス震源による測定と、相模湾でのエアガン震源による測定に分けて実施した。三島市から小田原市までの区間では、パイプロサイス 4 台(図 6, 7)を震源として、約 200m 間隔に発震点を設けた。各発震点において、原則として 50 回のスイープを行ったが、厚い火山灰層やスコリア層の影響によってデータ品質の低下が顕著な箇所に関しては、100 回までスイープ回数を増加させた。こうしたスイープ回数の変更箇所は全パイプレータ発震箇所の中で 19%に達した。相模湾岸では、エアガン(容量 1500cu.in. 圧力 2000psi)を震源とした(図 8, 図 9, 10, 11, 12)。海岸線から約 500m~1km 沖合において、海岸線に平行して原則として 50m 間隔で発震点を設定した。但し、江ノ島より東部地域については 100m 間隔の発震とした。エアガンの発震深度は標準 10m として、40Hz 以下の低周波エネルギーの確保に努めた。

受振点は、箱根-小田原区間では主として道路(箱根ターンパイク)の路肩に、相模湾沿岸部(小田原~鎌倉区間)では海岸線(主として海浜部)に沿って設置し、有線テレメトリー方式を用いてデータの収録を行った(図 13, 14)。但し、この受振測線は酒匂川及び相模川における幅 150-400m の河口箇所では無線伝送方式を併用した。

三島~小田原区間では、パイプロサイス車 4 台を震源とした反射法地震探査を実施した。相模湾でのエアガン発震記録との重複区間を設けるため、受振区間は、小田原から東へ約 6km の国府津まで延長し

た。観測仕様を以下に述べる。

<震源系>

- ・震源 : 大型パイロサイズ車 4台 (図)
- ・発震点間隔 : 標準 200 m
- ・スイープ長 : 24 sec
- ・スイープ周波数 : 6~30Hz
- ・スイープ回数 : 50~100回
- ・総発震点数 : 98点

<受振系>

- ・受振器の固有周波数 : 10 Hz
- ・受振器数/受振点 : 9個
- ・受振点間隔 : 50 m
- ・展開長 : 約 26km ~ 33km
- ・総受振点数 : 668点 (Loc 1 ~ Loc 668)

<記録系>

- ・探鉱機 : GDAPS-4A (デジタルテレメトリー型)
- ・サンプル間隔 : 4 msec
- ・記録長 : 16 sec(相互相関後)
- ・チャンネル数 : 667

相模湾岸については、エアガン発震を相模湾岸に配置した陸上受振点で観測する方法で反射法データを取得した。小田原周辺海域の発震では、パイロサイズ震源データとの重複区間を設けるために、箱根ターンパイク上での受振点でも観測を行った。観測仕様を以下に述べる。

<震源系>

- ・震源タイプ : エアガン
- ・容量 : 1500 cu. in.
- ・圧力 : 2000 psi
- ・発震深度 : 10m
- ・発震点間隔 : 50 m ~ 100m
- ・発震回数/発震点 : 1回
- ・発震点数 : 689点

<受振系>

- ・受振器の固有周波数 : 10 Hz
- ・受振器数/受振点 : 9個
- ・受振点間隔 : 50 m
- ・展開長 : 32.5km (原則)
- ・総受振点数 : 900点

<記録系>

- ・探鉱機 : GDAPS-4 A (デジタルテレメトリー型)
- ・サンプル間隔 : 4 msec
- ・記録長 : 16 sec
- ・チャンネル数 : 650 (標準)

調査測線に沿って 50m 間隔で設置した木杭を目印にして、受振器、データ伝送装置および本線ケーブルを敷設した。各受振点において、9 個の受振器 (ジオフォン) を約 2 m 間隔で設置し、25 m の線型アレイを構築した。データ伝送装置 (RSU) は、6 受振点ごとに配置すると共に、データ伝送用の本線ケーブルを測線に沿って敷設した。

データ取得作業は、箱根区間での受振ラインの設定の完了後、パイプロサイズ震源のパラメータテストに引続き、平成 15 年 2 月 4 日に箱根区間より開始した。発震は、パイプロサイズ (4 台) を用いた。各発震に関する受振は、原則として固定展開としたが、測定作業と並行して実施した小田原～国府津間の受振ラインの展開が完了した区間を逐次追加したので、測定が進むに従って、展開長が増加している。測定の展開長は、20～33 km となった。

箱根区間でのパイプロサイズ震源での観測作業終了後、測定作業を一時中断し、国府津～鎌倉区間の受振ラインの設定、エアガン震源の儀装などを行い、屈折法・広角反射法の観測作業を行った後に、エアガン発震による反射法データの取得を行った。エアガン発震による反射法データの取得では、展開長約 32.5km の非対称中点展開を移動方式で実施した。エアガンは、発震船から水深約 10m に曳航した。陸上の観測車との間は無線で同期をとり、原則として 100m 間隔で発震を行い、反射法データを取得した。データ収録は陸上部の有線テレメトリー方式で行い、発震ごとに、データを RSU から観測車に送りデータの収録を行った。尚、相模湾内の江ノ島より西部では発震点を追加し、50m 間隔の発震となるような高密度データを取得した。平成 15 年 3 月 9 日に予定したすべての発震点での観測が終了した。引続き、撤収作業を行い、同年 3 月 17 日にはすべての作業を終え、現地調査が完了した。

図 15 から 26 に得られたショット記録の典型的なものを示した。図 15 から 19 まだが、パイプロサイズによる発震記録である。箱根ターンパイク上の発震は、厚い火山噴出物に起因する低速度層 (400 m/sec) が分布し、とくに図 17 の発震点近傍の初動到達時間で明らかなように、ダイアグラム上では大きな勾配を示している。火山噴出物によりエネルギーの減衰が著しいために、スイープ回数を増大させて発震作業を行ったが、小田原以東に比べノイズレベルが極めて小さいため比較的良好な記録が得られた。

図 20 から 26 には、エアガンによる発震記録を示した。図 20 の記録でも明らかなように、小田原沖で発震したエアガンの初動は、ターンパイク上ではよく到達しているが海岸沿いでは到達距離が短くなっている。受振ラインは西湘バイパスと砂浜の間に設定せざるをえず、浜辺に波が打ち寄せる振動とバイパス車両通行による振動を重複して受ける結果となり、また砂浜に受振器を設置する際の極めて弱いカップリングも記録を劣化させる要因となった。このような要因は事前に予想できたことであり、このため震源に大容量のエアガンを使用し、かつ水平方向での重合による S/N 比の向上を目的として、発震間

隔を短くして発震した。

茅ヶ崎より東方の区間では、遠浅の海域になりエアガンの有効な発震には深度が必要なため、より海側に発震測線を設定することになった。このような事情から、発震点と受振点の距離が増大することになり、図 24・25・26 に示したように、測線東端部の記録は S/N 比が低下した記録となった。

(b) 反射法データ解析

本節では、パイプレータ及びエアガン反射法データ処理の内容について記述する。図 27 に、データ処理フローを示す。

(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 SEGY Format)について、SuperX (JGI Internal Format) フォーマットへ変換を行った。また、各発震測線に関して下記の発震記録を発震点番号の昇順に従って抽出した。これは、パイプレータ発震及びエアガン発震の作業順序が発震路あるいは発震船航行海域の状況によって適宜変更され、フィールドテープに収録されているためである。

陸域パイプレータ発震点 (100 点) VP.2002 - VP.2119

海域エアガン発震点 (689 点) SP.3001.0 - SP.3371.0

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。

(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..... 25.0 m

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.....0-3000 m

図 28 に受振点、発震点及び CMP 重合測線位置図を示す。

(iii) 屈折波初動解析(Refraction Analysis)

三島-小田原間の陸域パイプレータ発震区間(Loc.1-520)に関して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(図 29)。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
屈折波インバージョンに用いるオフセット距離.....	450 – 2200 m
表層基底速度を求める際のブロック区分.....	5000 m

改良型タイムターム法解析の結果を用いて、表層補正量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。

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

ここに T_w は表層補正量、 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。尚、表層速度として受振点側及び発震点側共に 870m/sec を採用した。図 29 に三島-小田原区間に関するタイムターム法解析結果を示す。

(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.....	200 msec
ミュート位置のスライディング速度.....	3000 m/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。陸域受振器展開の相模湾岸区間におけるデータ S/N 比が著しく低く、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.....800 msec]

(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、一部海域エアガン発震記録において分散性境界波、三島-小田原区間のバイブレータ発震記録における屈折波多重反射波、及び海岸線展開箇所におけるうねり及び波浪ノイズ(4 Hz 以下)を抑制するために、次のフィルター処理を適用した。

最小位相型バンドパスフィルター(通過帯域).....	4-100 Hz
速度フィルター(通過帯域).....	-3500m/sec ~ +3500 m/sec

後者に関しては、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。

(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 次元を前提とする。

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

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ができる。

- ・震源波形：エアガン震源波形、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、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は、パイプレータ発震記録に関しては零位相型を、エアガン発震記録に関しては最小位相型を採用した。

予測距離.....	4.0 msec
零オフセット位置に於ける設計ゲート.....	200 ~ 5200 msec [Non-TV]
オペレータ長.....	320 msec
プリホワイトニングファクター.....	5.0 %

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

上述(ii)における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、 H_e : 発震点あるいは受振点標高(m)

H_b : 基準面 [平均海面 0.0 m]

S_d : 表層厚(m)

である。

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 T_d は、下記のように定義される。

$$T_d = -2.0 * (H_f - H_b) / V_c \quad (6)$$

ここに、 H_f : 浮動基準面 (FDP)

V_c : 基準面補正速度 (1800 m/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 - 3000 m のトレースが用いられた。

(x) 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。

解析点間隔 2000 m
 解析速度数..... 50(1500– 6500 m/sec)

(xi) 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

(xii) 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、ミュート処理を適用した。

(xiii) 残差静補正(3D 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..... 16 msec(1st), 8 msec(2nd)

時間ウィンドー... フィリピン海プレート上面境界前後 3.0 秒区間を設定

(xiv) 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 – 7500 m

(xv) 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 比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

(xvi) 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0.0 sec / 通過帯域[3 – 40 Hz]

1.0 sec / 通過帯域[3 – 35 Hz]

2.0 sec / 通過帯域[3 – 30 Hz]

4.0 sec / 通過帯域[3 – 25 Hz]

8.0 sec / 通過帯域[3 – 20 Hz]

16.0 sec / 通過帯域[3 – 20 Hz]

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。

(xvii) 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。

(xviii) 差分法時間マイグレーション(FD 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、45度差分方程式時間マイグレーションを適用した。以下に適用パラメータを示す。

下方接続の時間 Step..... 8.0 msec 最大有効周波数..... 50 Hz

以上の処理によって、得られた重合反射法地震断面を図 30 に、マイグレーション処理断面を図 31 に示す。データ取得後、短期間であるため各処理プロセスについて十分な解析が終了していない。これらの処理断面は暫定的なものである。

(c) 反射法地震探査断面（暫定判）の地学的な解釈

マイグレーション後重合断面に、重要な反射イベントを矢印でマークした解釈図を図 32 に示した。また、同様の図面に解釈線を記入した図を図 33 に示した。この図はエアガンないしパイプロサイズによる稠密発震を行った三島から鎌倉沖までの区間の断面である。

顕著な特徴としては、箱根火山から東側に向かって東に傾斜した反射層が、図の上端の CMP 番号で 800 番の往復走時 2 秒付近から茅ヶ崎沖 CMP 番号 2000 番付近の 6 秒付近まで追跡できる。この反射層より下ではほぼ同様の東に傾斜した反射層が卓越し、その上位ではとくに CMP1300 番以上ではやや水平な反射イベントが卓越する。

この他、大磯丘陵沖の CMP1200-1600 区間では、往復走時 4-5 秒に東に緩傾斜を示す反射層が認められる。地表での国府津-松田断層のトレースは CDP1050 番周辺を通過する。CDP1100 から 1200 にかけての 1.5 秒から 2 秒付近には、西傾斜のイベントも存在し複雑な様相を示すが、この西傾斜の構造は神奈川県（2001）や水路部による沖合の探査結果でも（加藤ほか，1983）、国府津-松田断層の西側に 2 秒付近に見られる構造である。したがって、処理が充分でないため不明瞭な点もあるが、国府津-松田断層の断面上の位置は図 32 に示したような位置に推定している。

現時点で構造上有意と判断した反射層の位置を図 33 に示してある。赤破線で示したものが国府津-松田断層からその深部延長に連続する断層である可能性が高い。東傾斜の反射層は地表の国府津-松田断層のトレースを越えてさらに西側にも延長されることから、東傾斜の主断層は地下での分岐を示している可能性が高い。図 33 に黒破線で示した大磯丘陵下 4~5 秒に分布する反射層も、より東方に分布する主断層からの分岐である可能性もある。いずれにせよ、反射層の分布のみで関東地震の震源断層を特定することはできない。今後、明らかになる有意な断層と解釈される反射層について、多方面からの検討が必要になる。

(5) 屈折法・広角反射法

(a)データ取得

発破とエアガンを震源とした屈折法・広角反射法調査を三島市から横浜市金沢区までの区間で実施した。発破点は、測線の西端（三島市）近傍の1箇所とし、薬量200kgの発破を行った。エアガン震源については、相模湾内に5点、横浜市金沢区の沖合（東京湾内）に1点の合計6箇所に発震点を設定し、データ品質を勘案して50回～100回の発震を行った。受振については、反射法測線の約65kmに、その東側延長部（鎌倉～横浜市金沢区）約12kmを加えた合計約75kmの区間で観測を行った。データ収録には主として、有線テレメトリシステムを用いたが、反射法測線の西端約7.5kmの区間と鎌倉 - 横浜市金沢区の区間（12km）については、独立型レコーダーを配置して、観測した（図34）。加えて、神奈川県中央部の18箇所に、別途、DATシステムによる測定点を設けて、同時観測を行った。

発破と観測装置との同期は、時刻発破方式として、有線テレメトリー方式では発破時刻の約15秒前から録音を開始し、正常にシステムが作動していることを確認して、発破を行った。発破は、周辺ノイズの影響を避けるため、夜間（午前1時00分10秒）に実施した。観測仕様を以下に述べる。

- ・ 発破点 : SP-SA-1 (1点)
- ・ 薬量 : 200 kg
- ・ 発破時刻 : 平成15年2月24日午前01時00分10.730秒
- ・ 受振区間 : 本測線 (Loc 1-1314)・延長測線 (Loc 2001-2120)・
DAT 観測点 18点

エアガンによる集中発震は、同年2月27日～3月6日に実施された。観測仕様を表1に示す。

表1. エアガン震源を用いた屈折法・広角反射法のための観測仕様

発震点	発震地点	発震回数	受振点 (本測線)	受振点 (本測線延長部)	DAT 観測点
A2	小田原沖合	96	1-1314	2001-2120	DAT 1-18
A2-1	国府津沖合	53	1-1314	2001-2120	DAT 1-18
A3	平塚沖合	70	1-1314	2001-2120	DAT 1-18
A3-1	藤沢沖合	50	232-1314	2001-2120	DAT 1-18
A4	鎌倉沖合い	50	232-1314	2001-2120	DAT 1-18
A5	横浜市金沢区沖合	70	817-1314	2001-2120	DAT 1-18

各地点では、記録の品質に応じて、50回～70回の発震を行ったが、A2地点では、スタック回数のテストを兼ねて96回の発震を行った。発震船と陸上の観測車との間は無線で同期をとり、各発震点での発震に対しRSU内で測定データのノイズエディットを伴う垂直重合処理を実施した。

ダイナマイト発震とエアガンを震源とした屈折法・広角反射法データの仕様は以下のようになる。

<エアガン震源系>

- ・震源タイプ : エアガン
- ・容量 : 1500 cu. in.
- ・圧力 : 2000 psi
- ・発震深度 : 14 m
- ・発震回数/発震点 : 50~96 回
- ・発震点数 : 6 点

<発破>

- ・薬量 : 200kg
- ・発破孔深度 : 56 m(坑底)
- ・発破点数 : 1 点

<受振系>

本測線 (有線テレメトリー・MS-2000)

- ・受振器タイプ : Geophone
- ・受振器の固有周波数 : 10 Hz
- ・受振器数/受振点 : 9 個
- ・受振点間隔 : 50 m
- ・受振点数 : 1434 点 (Loc 1- 1314 ; Loc 2001-2120)

神奈川県中部 (DAT 観測点)

- ・受振器タイプ : Geophone
- ・受振器の固有周波数 : 4.5 Hz
- ・受振器数/受振点 : 1 個
- ・受振点数 : 18 点

<記録系>

有線テレメトリー方式

- ・サンプル間隔 : 4 msec
- ・記録長 : 50 sec
- ・チャンネル数 : 1164 (固定展開 Loc 978-1314)

独立型観測装置 MS-2000

- ・サンプル間隔 : 4 msec
- ・記録長 : 連続観測
- ・受振点数 : 120 点 (Loc 2001-2120)

独立型観測装置 DAT

- ・サンプル間隔 : 4 msec
- ・記録長 : 連続観測
- ・チャンネル数 : 18 点

図 35 から図 41 までに、観測された発震記録を示す。ノイズレベルについては、反射法地震探査で述べたように、ノイズレベルの小さい箱根ターンパイク沿いの受振測線と、ノイズレベルの高い湘南海岸沿いの受振測線の差異が顕著に現れている。図 35 の発破は夜間に実施したにも関わらず小田原以東では急激に初動が不明瞭になっている。図 37 に示した二宮沖のショットでは小田原の地殻深部（往復走時 1-15 秒程度）からの反射波が観測されている。図 39 の茅ヶ崎沖のショットや図 40 の鎌倉沖のショット記録では、ノイズの低さから箱根ターンパイク沿いでは発震点により近い大磯-小田原よりも良好な記録が得られている。図 41 に示したように東京湾で発震した信号は、三浦半島から鎌倉周辺まで初動が明瞭に追跡できる。

これらの取得されたデータについての解析作業は、データ所得後、短期間しか経ていないため成果を報告できる状況にはない。今後、屈折法による解析や低重合法による反射法解析などを進めていく予定である。

(5) まとめと平成 15 年度の研究計画

本プロジェクトが開始されたのは平成 14 年度後期であり、地殻構造探査「相模 2003」は平成 15 年 3 月にデータ取得が終了した。当初目的に沿ったデータは収集され、解析作業を進めている。暫定的な反射法地震探査重合断面についての解析作業を行った。

この断面では、足柄平野下から東に傾斜した反射層が認識され、鎌倉西部では往復走時 6 秒付近まで追跡される。国府津-松田断層の深部延長はこの反射イベントに収斂する可能性が高い。足柄平野下にはこの他、4~5 秒に東に緩傾斜する反射層が分布し、より東方の主要な東傾斜の反射層に連結する可能性もある。

本報告で紹介したデータ解析結果は暫定的なものであり、今後多様な処理が必要になる。反射法については暫定的な重合断面までは求められているが、より多数の処理パラメータについての検討が必要である。また、屈折法・広角反射法データについては、処理過程にあり、今後、早急に解析作業を行う必要がある。

引用文献

- 1) Matsu'ura, M. and Iwasaki, T. : Study on the coseismic and postseismic crustal movements associated with the 1923 Kanto earthquake, *Tectonophysics*, 97, 201-215, 1983.
- 2) Wald, D. and Somerville, P.: Variable-Slip rupture model of the Great 1923 Kanto, Japan, earthquake : geodetic and body-wave form analysis, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 85, 159-177, 1995.
- 3) 総理府地震調査研究推進本部地震調査委員会編：日本の地震活動-被害地震から見た地域別の特徴-（追補版），395 pp., 1999.
- 4) Amano, K. : Multiple collision tectonics of the south Fossa Magna in Central Japan, *Modern Geology*, 15, 4, 315-329, 1991.
- 5) 笠原敬司, 田中 環, 井川 猛, 太田陽一, 川崎慎治, 伊藤谷生: 足柄・丹沢地域における防災科学技術研究所反射法地震探査 90-AS, 91-TAN データの再解析, *地震研究所彙報*, 77, 267-275, 2002.

6) 神奈川県：平成 13 年度 地震関係基礎調査交付金 神奈川県活断層（神縄・国府津-松田断層）調査事業成果報告書，108p.，2002.

7) 加藤 茂，佐任 弘，桜井 操：南海・駿河・相模トラフのマルチチャンネル反射法音波探査，水路部研究報告，18，1-23，1983.

成果の論文発表・口頭発表等

1) 論文発表 なし

2) 口頭発表、その他

発表者	題名	発表先、主催、発表場所	発表年月日
佐藤 比呂志	大都市圏地殻構造調査研究における活断層-震源断層システムのイメージング	2002 年活断層成果および堆積平野地下構造調査成果報告会，文部科学省主催，東京、こまばエミナースホール	平成 14 年 11 月 18 日
Sato,H.,Hirata, N.,Ito,T.,Iwasaki,T., Ito, K., Kasahara, K., Koketsu, K. and Okaya, D.	Deep Seismic Profiling of Metropolitan Areas in Japan for strong ground motion	The 10th International Symposium on Deep Seismic Profiling of the Continents and their margins, in Taupo, NewZealand	平成 15 年 1 月 10 日
東京大学地震研究所	大都市圏地殻構造調査・相模測線について	日本経済新聞など，朝刊数紙	平成 15 年 1 月 31 日
佐藤 比呂志	サイエンスZERO “すすむ大都市地下探査 地震研究最前線”	NHK 教育TV 全国放送	平成 15 年 4 月 3 0 日
佐藤比呂志・平田直・伊藤谷生・岩崎貴哉・纈纈一起・笠原敬司・伊藤潔・井川 猛・大西正純・阿部 進	大都市圏地殻構造調査・相模測線について	地球惑星科学関連学会 2003 年合同大会、幕張 千葉	2003 年 5 月 26 日~5 月 29 日
平田直・佐藤比呂志・纈纈一起・梅田康弘・岩田知孝・笠原敬司	大都市圏地殻構造調査計画	地球惑星科学関連学会 2003 年合同大会、幕張 千葉	2003 年 5 月 26 日~5 月 29 日

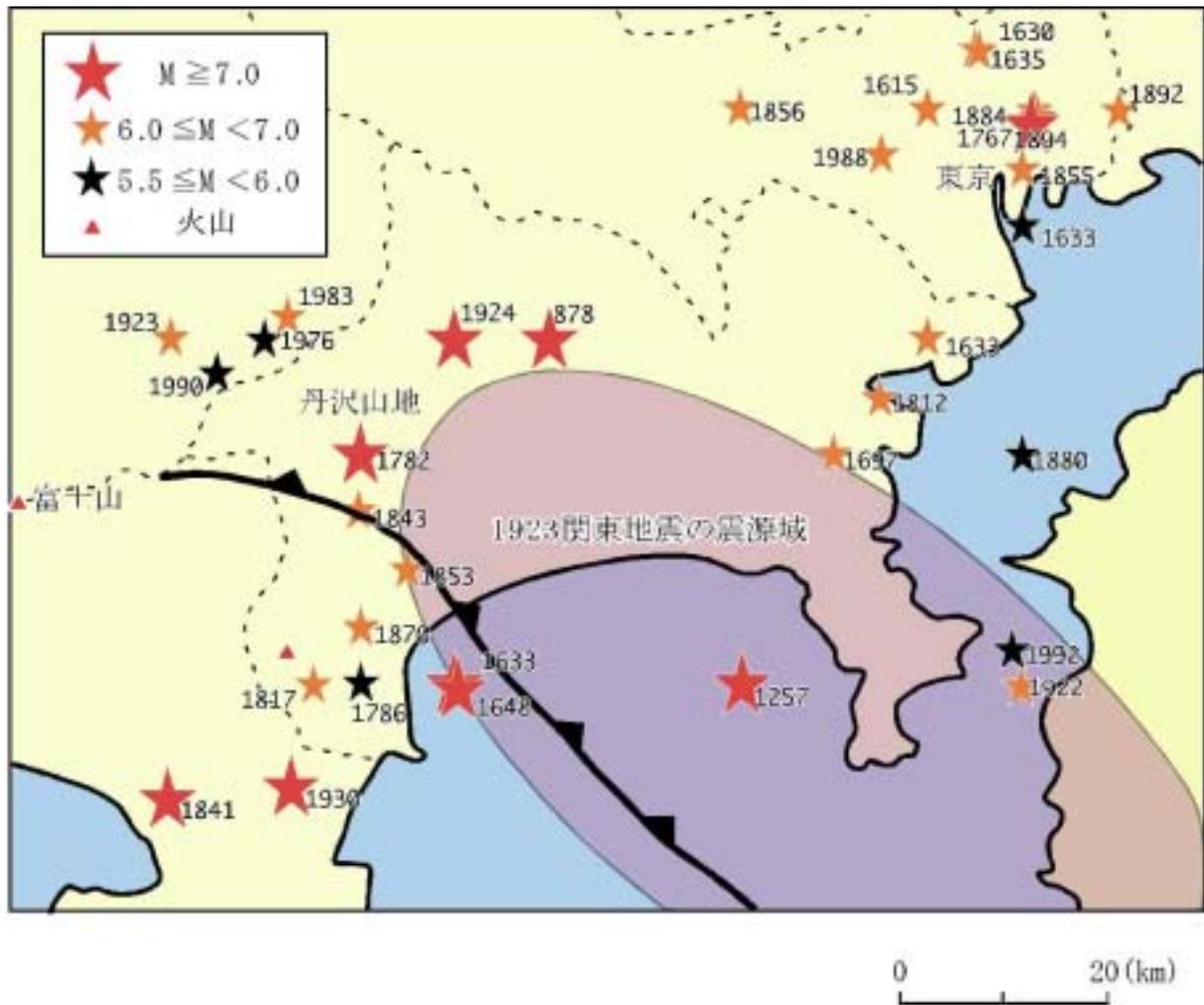


図2 関東地震の震源域と南関東の震源分布（地震調査研究推進本部地震調査委員会，1999）

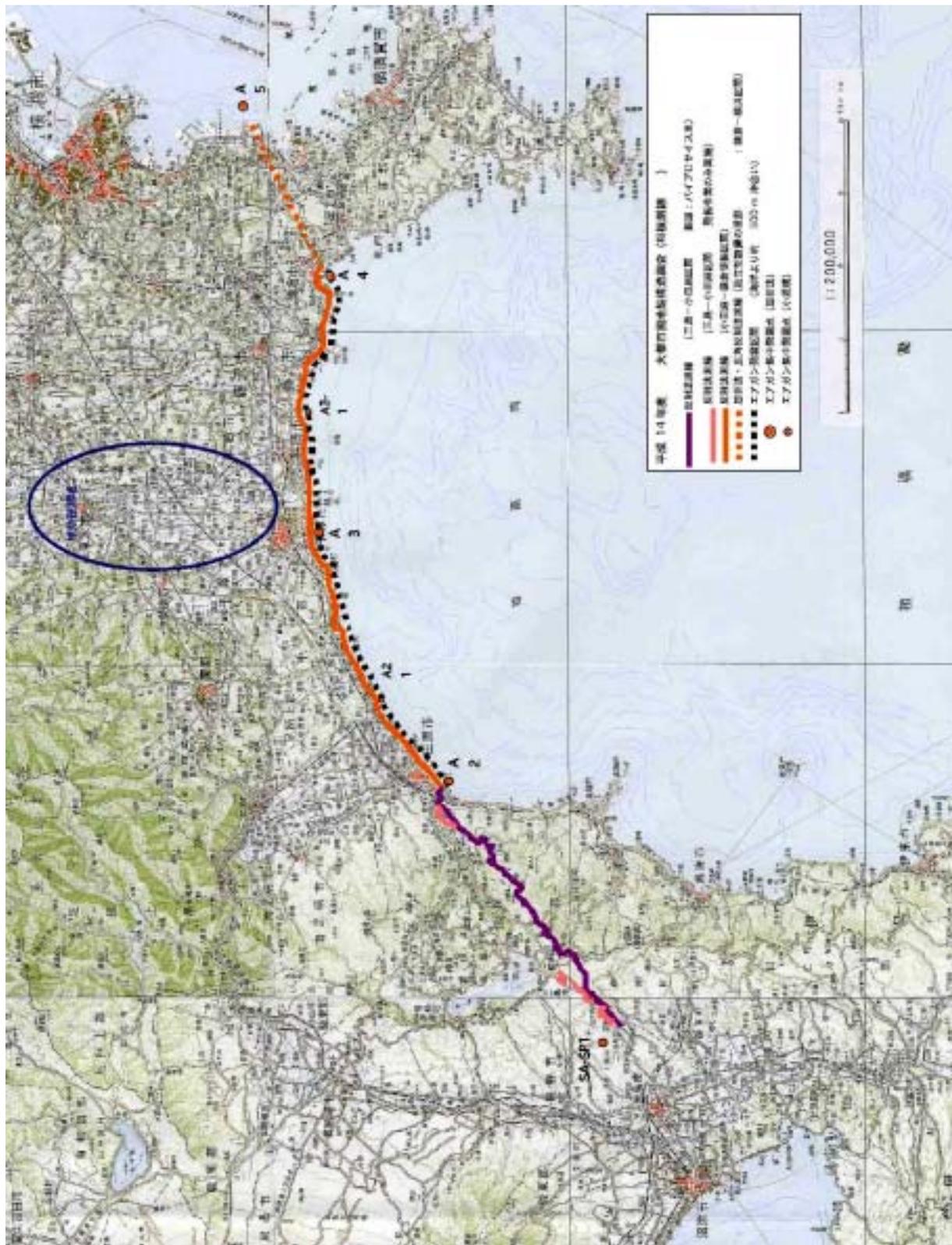


図 3 相模 2003 測線概略図



图 4 相模 2003 測線図

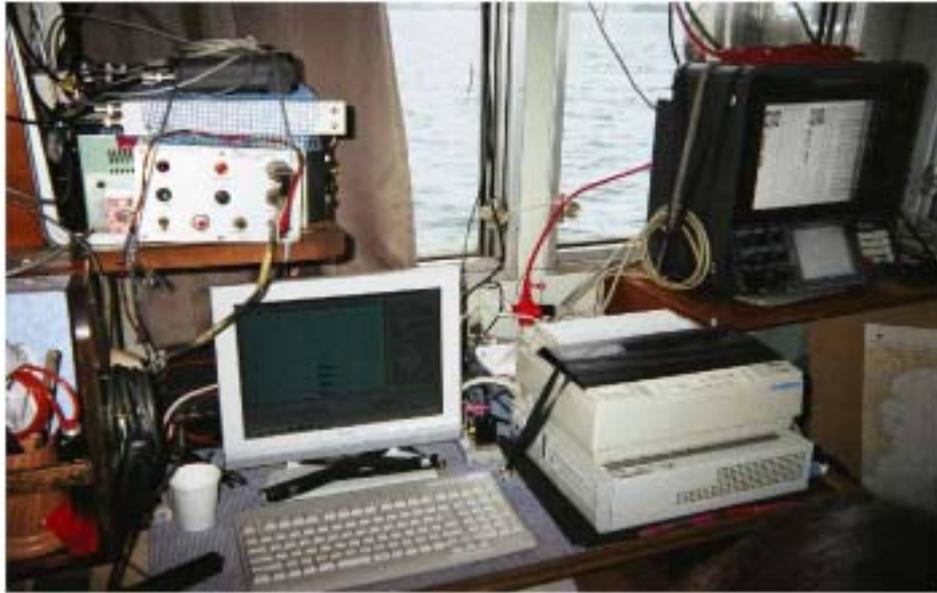


図5 DGPSによる発震船位置制御システム。



図6 VP.2063 箱根ターンパイク大観山北側。
調査期間中、5-10cm程度の降雪に見舞われることが数日あり。



図7 GDAPS4A観測車 大観山展望台駐車場



図8 エアガン用コンプレッサー (Hamworthy 425D)
一回のエア充填によって、5～8回の発震作業が可能である。
本観測の標準発震圧力は2000psiである。



図9 エアガン第一クラスター(200cu. inch×3基)。
本調査では、第二クラスター (200cu. inch×3基)と併せて、
計1500cu. inchの総容量が使用された。



図10 トリガン型エアガン(米国Bolt社製)。
同一容量を持つ単ガンを三角フレームに固定して斉一発震し、
射出パターンを含めた相互干渉によってバブルが抑制される。



図11 エアガン降下作業。

深部反射波の低周波側の有効周波数成分を確保するため、
反射法については発震深度を10m、屈折法については14mを標準とした。



図12 エアガン発震状況
湘南海岸公園沖。



図13 小田原-相模川区間展開機材設置状況。 受振点番号731 袖ヶ浦海岸



図14 小田原-相模川区間受振器設置状況 受振点784 大磯海岸。
砂地における受振器カップリングは非常に低い。

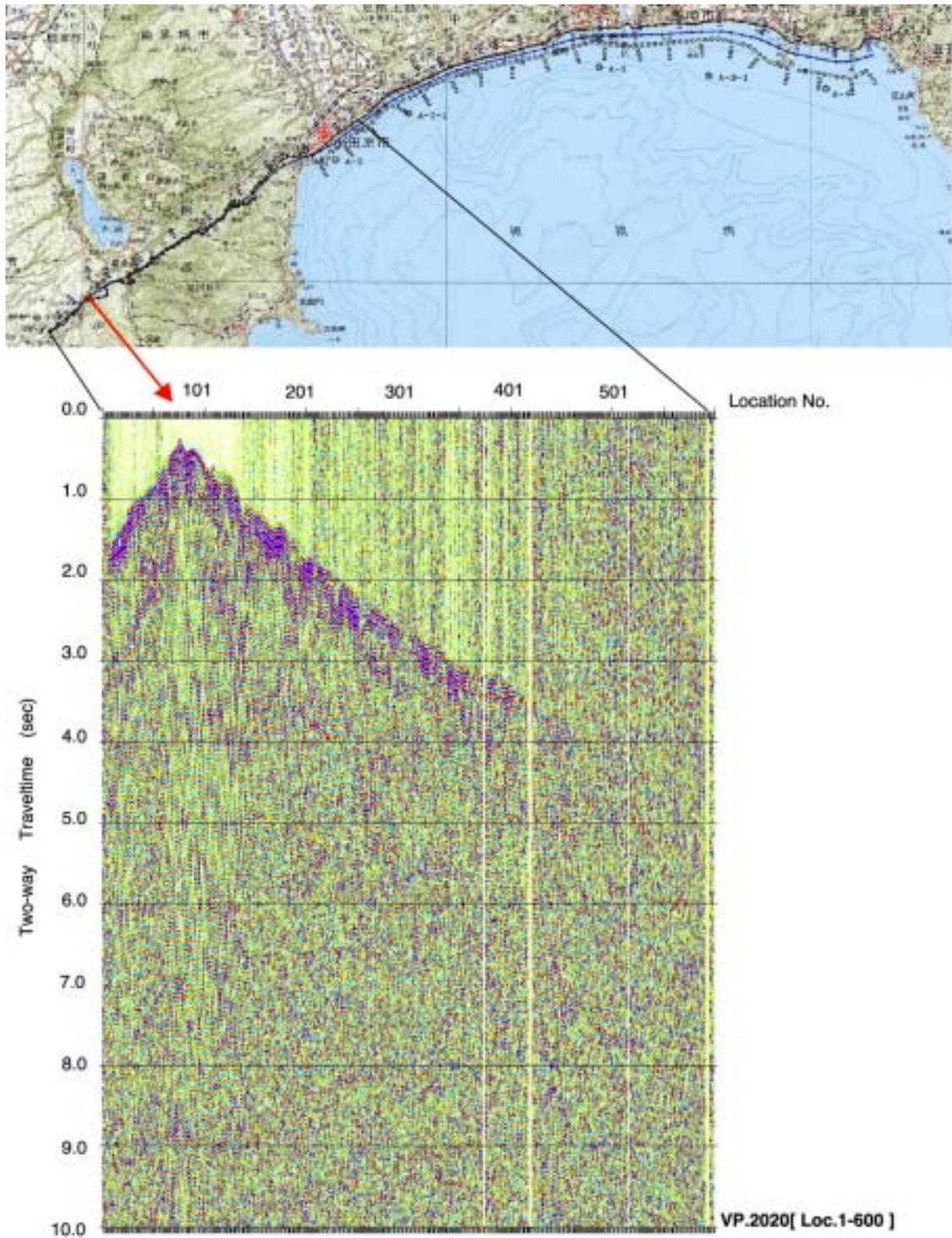


図15 パイプレートによる典型的発震記録(1)

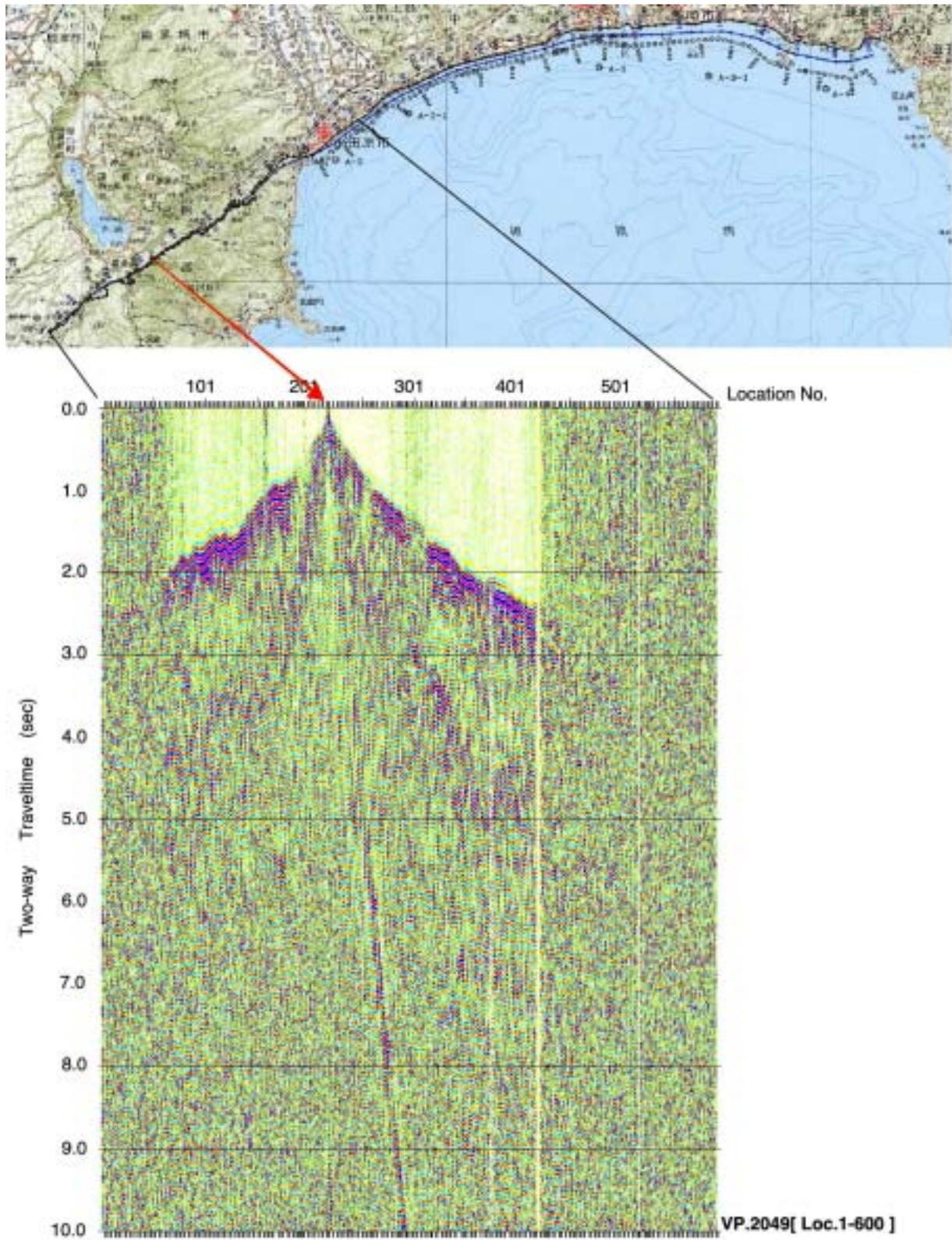


図16 パイプレートによる典型的発震記録(2)

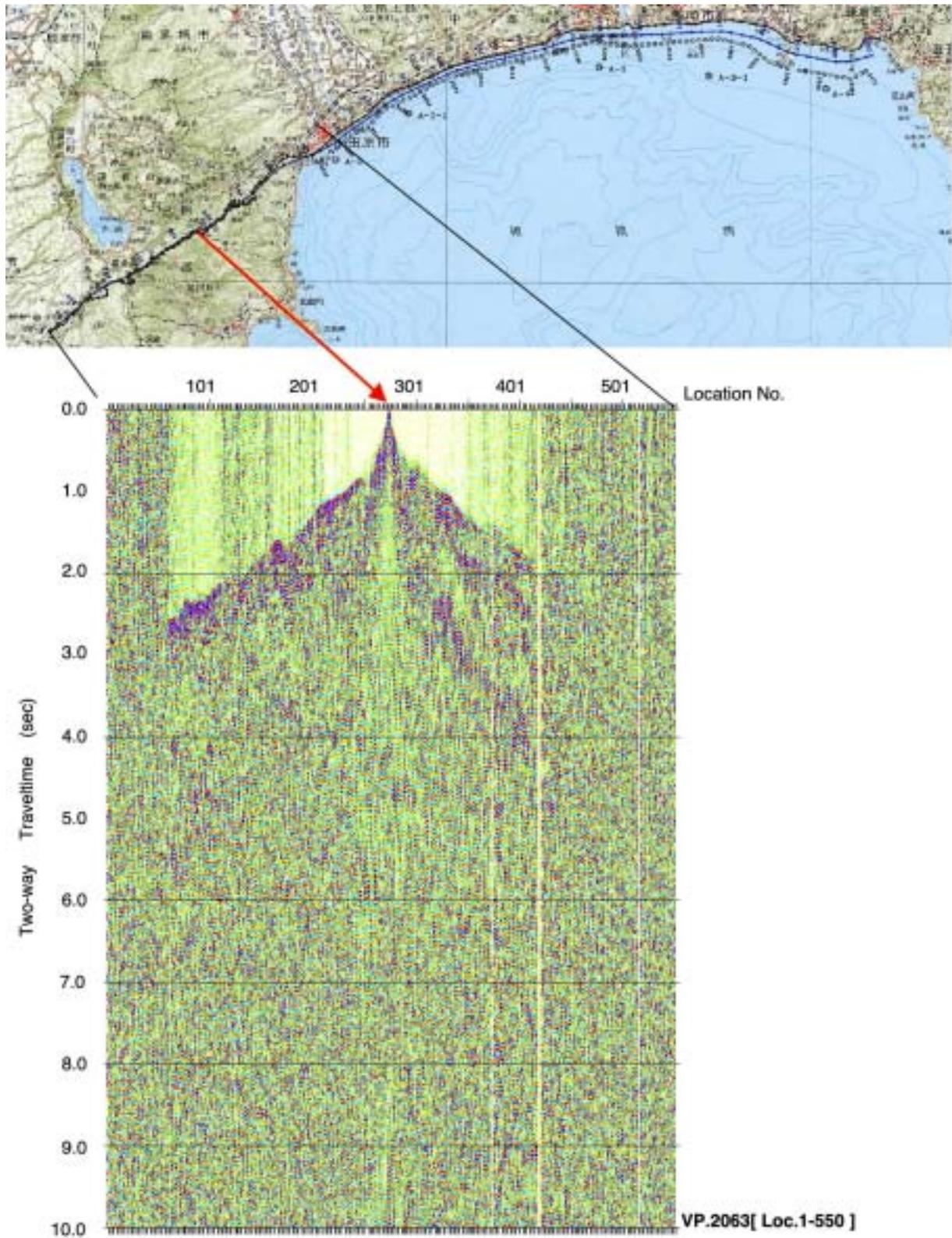


図17 バイブレータによる典型的発震記録(3)

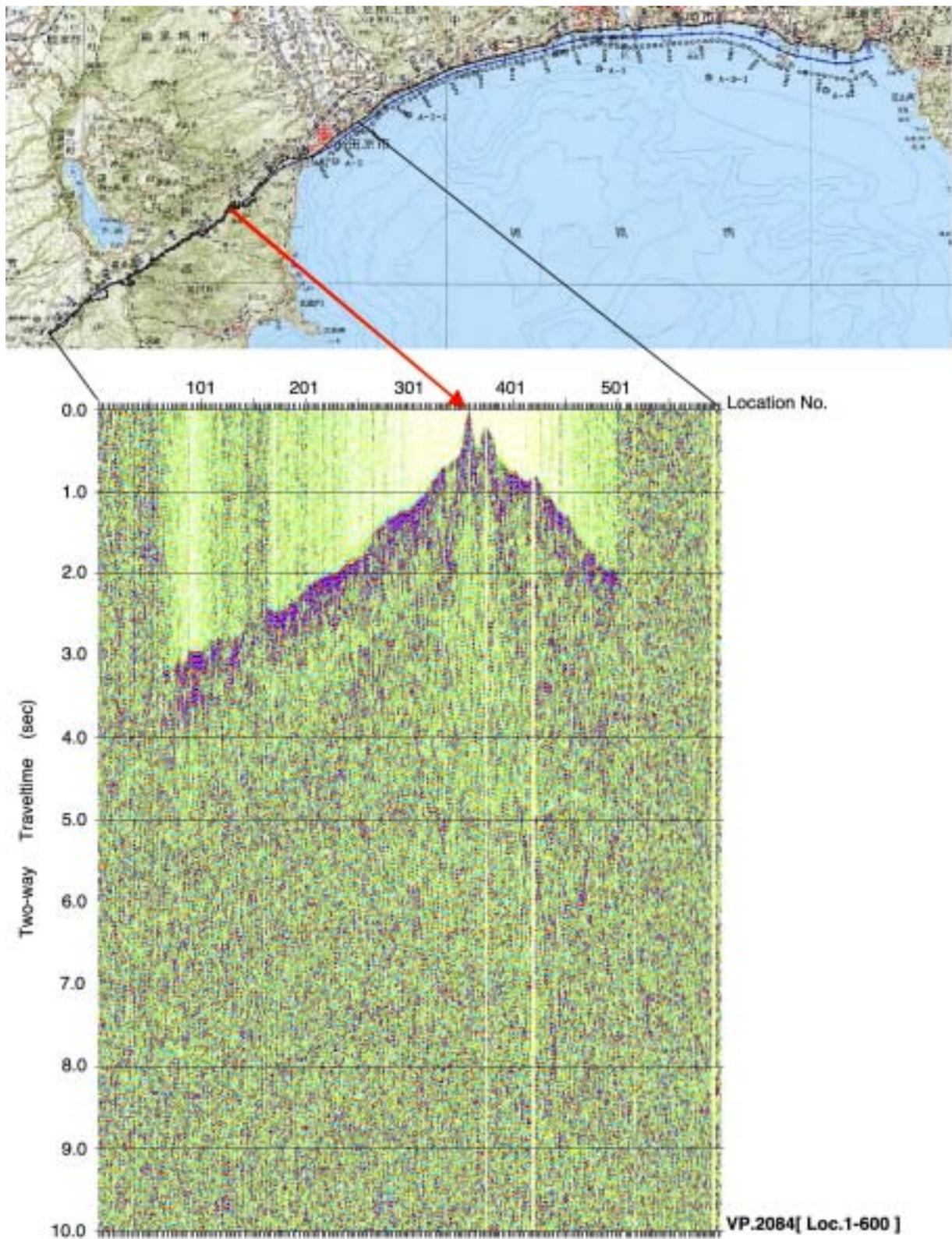


図18 バイブプレートによる典型的発震記録(4)

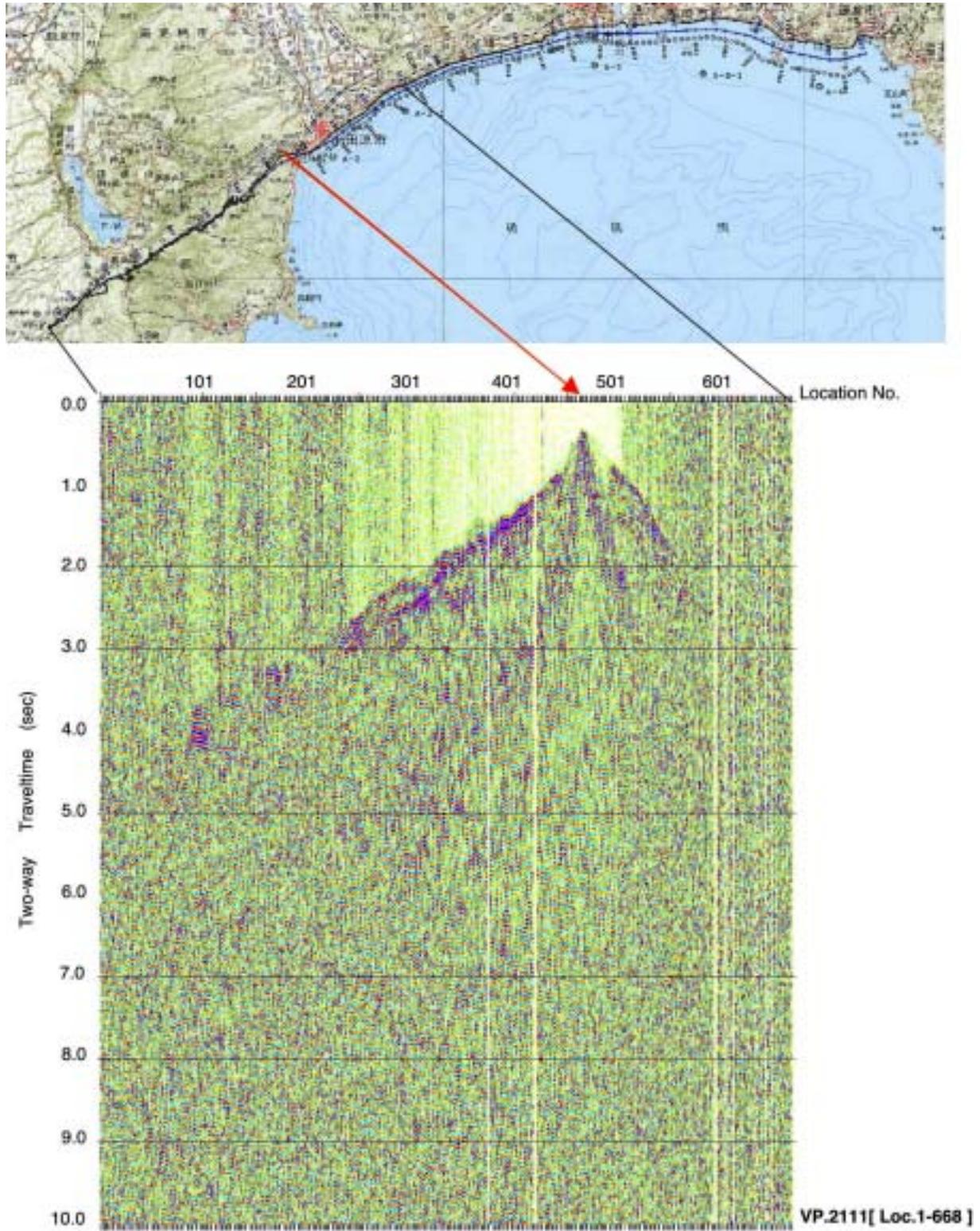


図19 バイブプレートによる典型的発震記録(5)

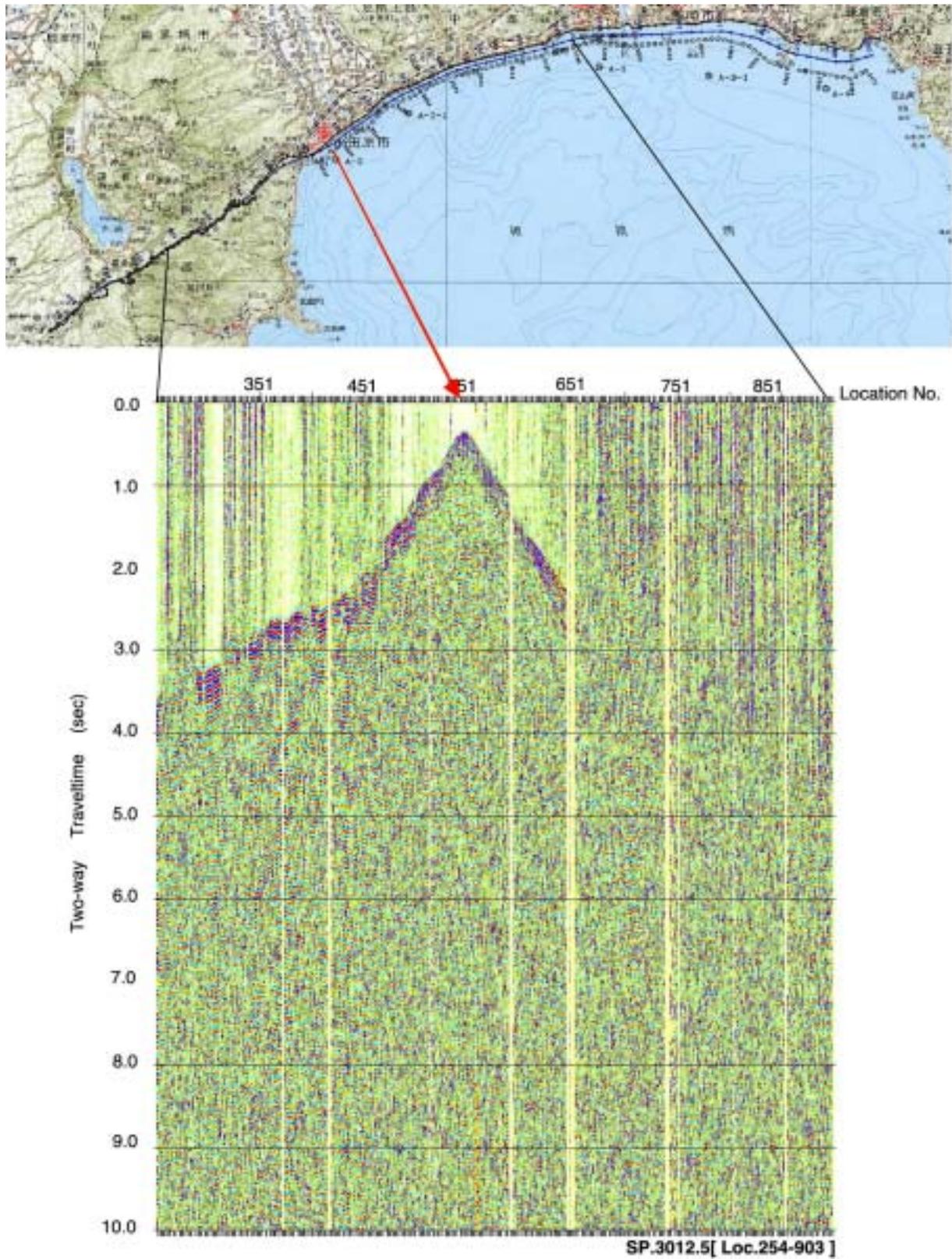


図20 海域エアガンによる典型的発震記録(1)