3.2 制御震源を用いた地殻構造探査

3.2.1 低重合反射法地震探査及び自然地震波干渉法による地殻・上部マントル構造 調査研究

(1) 業務の内容

(a) 業務の目的

首都圏において、制御震源を用いた反射法・屈折法地震探査等を行い、10 km~15km 程 度の深さまでの地殻の速度構造や不連続面の形状等を把握する。制御震源のほかに自然地 震も併用して詳細な地殻・上部マントル構造断面を明らかにする。

(b) 平成21年度業務目的

首都圏北西部アレイの奥多摩周辺約 50 km 区間において、ダイナマイト震源を用いた 低重合反射法地震探査を実施する。また、これと直交する関東山地東縁測線において約 1 km 間隔で稠密アレイを展開して自然地震観測を行う。首都圏北西部アレイと関東山地東 縁測線で観測された制御震源・自然地震波形データと大都市大震災軽減化特別プロジェク トの中で実施された小田原-山梨測線の観測結果から、反射法・屈折法・地震波トモグラ フィ・地震波干渉解析法・レシーバ関数解析法により、フィリピン海プレートの詳細な構 造を明らかにするための解析を引き続き行う。

(c) 担当者

所属機関	役職	氏名	メールアドレス
東京大学地震研究所	教授	佐藤比呂志	
東京大学地震研究所	教授	岩崎貴哉	
東京大学地震研究所	助教	蔵下英司	

(2) 平成21年度の成果

(a) 業務の要約

1)首都圏北西部アレイの奥多摩周辺約 60 km 区間において、ダイナマイト震源を用いた 低重合反射法地震探査を実施した。

2)首都圏北西部アレイと直交する関東山地東縁測線において約1km間隔で稠密アレイを 展開して自然地震観測を行った。

3) 反射法・屈折法解析や地震波トモグラフィ解析、地震波干渉解析法・レシーバ関数解析 法により、フィリピン海プレートの構造を明らかにするための解析を引き続き行なった。

(b) 業務の成果

1) 首都圏北西部アレイにおける低重合反射法地震探査

a) 飯能-笛吹測線

平成 14 年度以来、文部科学省の受託研究として「大都市圏地殻構造調査研究」が実施 された。とくに伊豆衝突帯の北部から北西部においては、関東山地を南北に横切る関東山 地東縁測線、富士山東麓を北西方向に通過する小田原-山梨測線において制御震源を用い た構造探査が実施され、フィリピン海プレートの形状が明らかになった 1.2)。フィリピン海 プレート上面の出現深度はこれら 2 測線で異なっており、この間の区間での複雑な構造が 予想された。このため平成 20 年度にはこれらの 2 測線を繋ぐ飯能-御坂測線で稠密自然地 震観測を実施した。稠密地震観測にもとづいたレシーバー関数解析では、フィリピン海プ レートの最上部と判断される変換面が山梨県側では明瞭に深さ 40km に存在するが、東部 ではその連続が断たれる。このことはフィリピン海プレートが破断・変形している可能性 を示唆している。フィリピン海プレートの破断は、関東平野下に沈み込んでいるフィリピ ン海スラブがプレート本体とは独自の運動をする可能性を示唆することになり、関東下の フィリピン海スラブの運動を理解するために重要である。こうした背景から、関東山地下 におけるフィリピン海スラブの形状を明らかにするために、東京都飯能市から西南西方向 に大菩薩峠を越え、山梨県笛吹市の御坂山地に至る投影長で約 60km の区間で低重合反射 法地震探査を実施した(図 1、 2)。当初計画では 50km の予定であったが、測線東部の発 破点の確保が難しく、当初案より 10km 測線を延長させた。

深部地殻構造探査「飯能-笛吹測線(測線長約 60 km)」は、山梨県東部に位置する大菩薩 連嶺を境として、北部測線,中部測線,南部測線に分けられる。北部測線は、埼玉県飯能市 原市場を基点として東京都青梅市北部から奥多摩町内の多摩川及び奥多摩湖沿いに、山梨 県北都留郡小菅村の大菩薩連嶺東側に至る約 34.0km の区間に設定した。大菩薩連嶺西側 の南部測線は、山梨県甲州市塩山上日川ダム北部から甲州市勝沼町深沢を経て、甲府盆地 南東縁沿いに山梨県笛吹市八代町に至る約 21.0km の区間に設定した。この両者を接続す る補間測線が大菩薩嶺北西部の中部測線であり、鶏冠山南部に位置する泉水谷林道の約 5.0km 区間に設定した。この調査測線は中部区間を除き、平成 20 年度に実施された自然 地震連続観測の調査測線と同一である。

測線沿いには、秩父帯・四万十帯に相当する泥質岩を主体とする岩石や第三系花崗岩類 が分布する(図 3)^{3),4)}。これらはいずれも弾性波速度の大きい岩石から構成される。関 東地域のフィリピン海プレートの形状については、近年、地震波トモグラフィーによって 推定されているが ⁵⁾、伊豆衝突帯の北方から北西方向に伸びるフィリピン海スラブの背斜 状の高まりの延長部に相当している。

b) データ取得

本調査では、広角反射法探査及び屈折法データ取得を 2009 年 12 月 1 日から同年 12 月 12 日に実施した(表 1)。60km 区間に稠密に展開した受振器を用いた自然地震観測、屈 折法及び広角反射法バイブレータ発震、屈折法及び広角反射法ダイナマイト発震を行った。

受振器システムとしては、有線テレメトリーG-DAPS4 システム、独立型受振システム (MS2000)を用いた。ダイナマイト発震作業に関するモニター測線として、有線テレメト リーシステムを山梨県甲州市塩山牛奥-同塩山上萩原区間の約5km区間に50m間隔で受振 機材を展開した。この区間では、後述の独立型受振システムの南部測線と重複しているが、 有線テレメトリーシステムの受振点は独立型システム南部測線の受振点中点に設置され た。従って、このモニター測線区間の受振点間隔は25.0mである。本調査では、全区間に おいて独立型受振システム MS-2000Dを用いて受振器を設置した。使用した受振器の固有 周波数は10Hzである。受振点間隔は50m、総受振点数は1279点である。 屈折法及び広角反射法用のダイナマイト発震は、埼玉県内1点、 東京都内2点及び山 梨県内4点の計7点で実施した。

- SP-1D 場所:山梨県甲府市畑瀧戸山 1282-1(林道大窪鶯宿線)北緯 35 度 33 分 44.3 秒、
 東経 138 度 37 分 5.7 秒、表層地質:中部中新統西八代層群常葉層、発破時刻: 2009 年
- 12月7日0時32分10.942453秒、薬量:100kg、装薬深度範囲: 30.59-40.31m
 SP-2D場所:山梨県笛吹市一ノ宮町京戸入会石2359(林道京戸岩崎山線)北緯35度37分20.4秒、東経138度44分46.9秒、表層地質:上部中新統石英閃緑岩、発破時刻:2009
 - 年12月7日3時32分11.145749秒、薬量:200kg、装薬深度範囲: 26.30-45.71m
- SP-3D 場所:山梨県甲州市塩山牛奥山 5532-1(林道砥山線分岐線)北緯 35 度 42 分 7.6 秒, 東経 138 度 48 分 38.3 秒、表層地質:上部中新統石英閃緑岩、発破時刻:2009 年 12 月 8 日 0 時 32 分 11.340293 秒、薬量:300kg、装薬深度範囲: 26.57-55.77m
- SP-4D 場所:山梨県甲州市塩山上荻原字上荻原山 4783-2(林道泉水横手山線)、北緯 35 度 47 分 8.7 秒、東経 138 度 48 分 44.2 秒、表層地質:上部中新統石英閃緑岩、発破時刻:2009年12月8日 0時02分10.704951秒、薬量:100kg、装薬深度範囲:25.67-35.72m
- SP-7D 場所:東京都西多摩郡檜原村月夜見沢 9477-ロ 地内(林道月夜見線終端)、北緯 35 度 45 分 12.2 秒、東経 139 度 3 分 54.0 秒、表層地質:四万十帯小仏層群、発破時刻:2009 年 12 月 7 日 1 時 32 分 10.609954 秒、薬量:100kg、装薬深度範囲:25.68-35.54m
- SP-9D 場所:東京都青梅市二俣尾 5 丁目 1490 番先(林道平溝線)、北緯 35 度 49 分 28.3
 秒、東経 139 度 10 分 56.0 秒、表層地質:秩父帯砂泥互層、発破時刻:2009 年 12 月 7 日 3 時 2 分 11.057792 秒、薬量:200kg、装薬深度範囲:27.77-46.95m
- SP-10D 場所:埼玉県飯能市大字井上字湯出ノ久保 932 番先(林道平坂飛村線)、北緯 35 度 53 分 46.5 秒、東経 139 度 14 分 27.6 秒、表層地質:秩父帯砂泥互層、発破時刻: 2009 年 12 月 7 日 0 時 2 分 10.830016 秒、薬量:100kg、装薬深度範囲:25.75-36.54m
 発破作業では、観測車及び発破点がそれぞれ独立にデータ収録と発破を実施する時刻発

破が採用された。

バイブロサイス4台による集中発震は、以下の3点で実施した。

SP-5V.....山梨県北都留郡小菅村字橋立都道 508 号大菩薩峠線

発震回数... 255 回

発震時刻…2009/12/08 01:18:20.856013 - 2009/12/08 04:57:51.036655 SP-6V.....山梨県北都留郡小菅村字大成国道 139 号線

発震回数… 282 回

発震時刻…2009/12/07 19:06:21.854053- 2009/12/07 23:02:10.677626

SP-8V... 東京都西多摩郡奥多摩町白丸 白丸ダム駐車場周辺

発震回数… 251回

発震時刻…2009/12/06 19:56:37.144195 - 2009/12/06 23:32:05.524907

屈折法発震においては、30Hz以下の低周波数帯域におけるエネルギー確保を目的として、スウィープ周波数を 6-30Hz、スウィープ長を 24 秒とした。SP-6V 及び SP-8V は 19

時以降の準夜間に、SP-5Vは午前1時以降の夜間に発震作業を実施した。SP1からSP10までの発震記録を図4から13に示す。

図 14 は、全調査測線における夜間(19:00-5:00)におけるバックグラウンドノイズの空間 変化を示したものである。大菩薩連嶺西側地域(Loc.1001-1401)の相対ノイズレベルは、奥 多摩-青梅地域(Loc.3001-3696)と比較して約 20dB 高く、また、甲府盆地南部地域 (Loc.1402-1551)と比較しても約 12dB 高い。これは、東京電力葛野川揚水発電所の稼動、 及び JR 東海によりリニア新線地下掘削工事等の影響に起因すると推測される。

受振点,発震点座標及び標高値は下記手法の複合的使用によって求めた。

- ・ GPS-RTK 測量.... ネットワーク型 RTK-GPS (VRS 方式)の単点観測法による直接推定
- ・ 図上読み取り... 主に各市町村が発行している詳細図を使用
- ・ 汎用携帯 GPS 測定..... 汎用型の携帯 GPS を用いて測定した。

制御震源データ取得時には、独立型受振システムを 2009 年 12 月 6 日午前 10 時より 12 月 8 日午前 10 時の時間ウィンドーにおいて、連続観測が実施された。この時間内において、甲府盆地-関東山地-関東平野周辺では、マグニチュード 2.0 以上の自然地震が計 12 イベント観測された。これらのデータをもとに地震波干渉法による地殻構造断面を求めた。解析結果は、3)d)で述べる。

2) 関東山地東縁における稠密アレイによる自然地震観測

a) 観測地域及びアレイ観測測線(秩父-丹沢測線)

関東地域下では、フィリピン海プレートが陸側プレートと太平洋プレートとの間に沈み 込むという複雑なプレート配置を形成している。フィリピン海プレートのスラブは、関東 北東部下で太平洋スラブと接触し、沈み込むスラブを変形させ、首都圏下の被害地震の要 因になる可能性がある 6)。首都直下地震を考察する上で、関東地域下における複雑なプレ ート配置・形状を詳細に把握することは必要不可欠である。関東地域下には伊豆-小笠原弧 の前弧と背弧海盆が沈み込んでいるが、関東地方西部では,伊豆-小笠原弧の島弧地殻部分 が本州弧と衝突し、伊豆衝突帯を形成している。この伊豆衝突帯の北西部では深い地震が 発生せず,フィリピン海プレートスラブの存否も含め、その形状については不明な点が残さ れていた。こうした背景から、文部科学省の「大都市大震災軽減化特別プロジェクト」の 大都市圏地設構造調査研究の中で、2003年度に関東山地東縁で2005年度に小田原から山 梨に至る地域で、それぞれ地殻構造探査が実施された ^{1),7),8)}。また、この 2 直線を繋ぐ飯 能-御坂測線で、平成21年度に制御震源による低重合反射法地震探査を実施した。地殻か ら上部マントルにおよび詳細な構造を理解するためには、制御震源と自然地震を組み合わ せた総合的なイメージングが必要である。関東地方西部での3測線の中で、小田原-山梨 測線・飯能-御坂測線については制御震源・自然地震データの取得が終了している。一方、 関東山地東縁測線については制御震源を用いた地殻構造探査は実施しているが、稠密自然 地震観測は実施していない。このため、平成21年度には関東山地測線沿い55kmの区間(秩 父-丹沢測線)に75点の地震計を設置し、4ヶ月間の自然地震の連続観測を行った。観測機 器は平成20年度に実施した飯能-御坂測線と同様のものを使用した。

b) 測定作業

自然地震観測測線「秩父-丹沢測線」は埼玉県の飯能市と神奈川県秦野市を結ぶ測線長 55kmの区間に設定した(図15)。観測期間は,平成21年11月11日から平成22年3月 7日までで,受振点は測線上に500-750mの間隔で、計75か所に配置した.各受振点座 標は、携帯GPS測定によって確定した。

c) 使用機器

本観測では、主システム(1.0 Hz 速度型地震計)と副システム(ディジタル MEMS 型加速 度計)⁹⁾を原則として交互に設置し、近地地震に関しては両システムによる約 500 m、遠 地地震については主システムによる約 1000 m の空間サンプリングを実現した。以下にシ ステム構成を記述する。

i) 主システム使用機材

速度型地震計 ALennartz Electric LE-3D lite 1.0Hz	31 台
速度型地震計 BMarkproducts L-4-3D 1.0Hz	4 台
速度型地震計 CMarkproducts L-22D 2.0Hz	6 台
記録システム AJGI MS-2000	41 台
ii)副システム使用機材	
加速度型地震計 ディジタル MEMS 型加速度センサー	34 台
記録システム BJGI DMS-3000	34 台

d) 自然地震観測波形例

秩父-丹沢測線において取得した自然地震観測例を図 16 と図 17 に示す。図 16 は測線南 下の深さ約 121km で発生した深発地震(Mj2.4)の観測記録例である。時間軸は原点が震源 時に対応し,波形記録にはフィルター処理を施していない。得られた記録からは、P 波初 動やS 波初動が明瞭に確認でき、それらの相の間にも幾つか相を確認できる。図 17 は、 測線北端の深さ約 62 km で発生した近地地震(Mj1.0)の 観測記録例である。時間軸は,上 下動成分は 6 km/s でリデュ-スし、水平動成分は、上下動成分で見られる P 波に対応する S 波が同定できるように、リデュ-ス速度を上下動成分のリデュ-ス速度(6 km/s)の 1/3^{1/2} (3.4 km/s)、表示時間の長さを上下動成分の表示時間長(15 秒間)の 3^{1/2}倍(25.95 秒間) とした。波形記録にはフィルター処理を施していない。P 波初動やS 波初動が明瞭に観測

され、全センサー記録に関して、ほぼ同等の品質を持った記録が得られていることがわか る。

e) 高精度震源決定

秩父-丹沢測線近傍の震源分布を得るために、測線上に設置した観測点で得た観測データ を用いた震源決定を実施した。本観測で得た記録は連続記録であるため、震源決定を実施 する震源リストに基づき、地震毎のデータに編集する必要がある。気象庁一元化震源カタ ログによると、観測期間中の2009年11月11日-2010年3月7日の間では、図18で示 す範囲で427個の震源が決定されている。この震源リストから以下の基準で地震を抽出し、 震源決定を実施する280個の震源リストを作成した。

①北緯 35.35 度~36.10 度、東経 138.80 度~139.50 度、マグニチュード 0.0 以上
②北緯 35.50 度~36.10 度、東経 138.60 度~138.80 度、マグニチュード 1.0 以上
③北緯 35.35 度~36.10 度、東経 139.50 度~139.56 度、マグニチュード 1.0 以上

④北緯 36.10 度~36.22 度、東経 138.60 度~139.56 度、マグニチュード 1.0 以上 作成した震源リストに従って、連続記録から地震毎のデータに編集する作業を行った。さ らに、本観測で得たデータと、図 18 で示す周辺の 73 点のテレメータ観測点で得られたデ ータとの統合作業を行った。

本観測で得たデータと測線周辺のテレメータ観測点で得られたデータを統合したデータ から作成した 280 個の地震波形データから、各観測点における P 波到達時刻、S 波到達時 刻、最大振幅、P 波初動振動方向を読み取った。読み取り個数は、P 相が 15,826 個、S 相 が 19,397 個、最大振幅が 16,148 個、P 波初動振動方向が 5,927 個である。得られた P 波 到達時刻、S 波到達時刻に Hypomh ¹⁰⁾を使用して震源決定を行った。その際、図 19 で示 す 1 次元 P 波速度構造を使用した。また、Vp/Vs 比を 1.73 と仮定した S 波速度を用いた。 最初の震源決定後、観測走時と計算走時の差の平均値を基に観測点補正値を決定した。こ の観測点補正値を用いて再び震源決定を行った。観測点補正値を用いた震源決定により得 られた震源分布を図 20 に示す。震源分布図から、埼玉県・山梨県県境,山梨県・神奈川県 県境(丹沢)のそれぞれの地域で地震の密集域が確認できる。東西方向断面図の深さ 100 km 以深には、太平洋プレートの沈み込みに伴う西傾斜の二重深発地震面が確認できる。丹沢 地域下の深さ 30 km 以浅で見られる北傾斜の震源分布は、フィリピン海プレートの沈み込 みに起因したものであると考えられる。

3)制御震源・自然地震波形データを用いたフィリピン海プレートのイメージンング解析 a)低重合反射法地震探査

i)解析と結果

広角反射法データの解析対象は、投影測線長約 67.3km の全測線区間で取得された広角 反射法データ 10 点(ダイナマイト発震 7 点及びバイブレータ集中発震 3 点)のデータであ る。データ解析フローに関しては、図 21 に示した。解析には Super X (JGI)を使用した。 (1) データ編集(Format Conversion and Data Compilation)

原記録(GDSPS-4 SEGY Format)を Super X (JGI Internal Format)フォーマットへ変換した。

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

トレースヘッダーに関して、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。CMP 重合測線は受振点分布から長波長成分を抽出し、 平滑化の上で決定した。

(3) 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、初動抑制処理を実施した。

テーパー長......2000msec(屈折初動近傍)

(4) 振幅補償(Gain Recovery)

大菩薩連嶺西側地域を中心としてバックグラウンドノイズレベルが相対的に高い領域が 存在するため、幾何減衰補償の適用によって上部地殻相当震度の振幅レベルを過度に増大 させることが懸念されたため、下記の自動振幅調整のみを適用した。

Instantaneous AGC [ウィンドー長......5000msec]

(5) デコンボリューション(Deconvolution)

主に予測距離に関する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......4.0msec

零オフセット位置における設計ゲート......300~4000msec [TV]

プリホワイトニングファクター......5.0%

- (6) 共通反射点編集(Common Midpoint Sorting)
- (7) 浮動基準面に対する静補正(Static Corrections to FDP)

(8) 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キング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。NMO 補正後の発震記録を図 22~26 に示す。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 27 は大菩薩連嶺周辺地域 [CMP.1501-2000]のフィリピン海プレート上面相当の深部反射面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

(9)共通反射点重合(CMP Stack)

重合オフセット距離範囲.....100 - 45000m

(10) 周波数一空間領域予測フィルター(F-X Prediction Filter)

オペレータ長......5 CDPs

空間ウィン	ドー長	CDPs
-------	-----	------

時間ウィンドー長......500 msec

(11) 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。

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。

(12) 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。

(13) 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、二種類の異なった差分マイグレーションを組み合わせ、残差マイグレーション を適用した。この手法では、基準速度(1490m/s)によるキルヒホッフマイグレーション後 に、残差速度が再定義され、時間-空間領域差分マイグレーションが適用される。各マイグ レーション処理では以下のパラメータを用いた。

(14) 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。

広角反射法低重合記録(時間断面図)を図 28 に、各種マイグレーション手法による比較適用結果(時間断面図)を図 29~31 に示した。以上の処理ステップを逐次経ることによって得られた深度断面図を図 32 に、重合後マイグレーション深度断面図を図 33 に示した。

ii) 低重合反射法地震探査断面についての考察

広角反射法低重合記録(時間断面図、図 28)と深度断面(図 33)に基づいて地球科学的な解 釈を行う。飯能-笛吹測線は 2003 年に実施した関東山地東縁測線 ⁷と、2005 年の小田原-山梨測線 ⁸と交差するため、これらの測線と反射面の特徴について比較する。2003 関東山 地東縁測線(図 34)においては、測線南部でフィリピン海プレート上面に相当する北に傾斜 する反射面が分布する。図 34 の逆三角形で示した飯能-笛吹測線との交差部分では、往復 走時約 9 秒に相当する。深度変換断面では約 26km となる。この他、往復走時 7 秒付近に みかけ上緩く南に傾斜する本州の中部地殻内の反射面が分布する。この面は伊豆-小笠原 弧に起源を有する丹沢ブロックと本州弧が接合する際に形成された wedge thrust の延長 部に相当する。この面は、交差部で往復走時 7 秒、深さは約 18km となる。やや不明瞭で はあるが測線中部の往復走時 4~5 秒の上部地殻中にほぼやや南に傾斜する反射面が存在 する。

次に、図 35 に示した小田原-山梨測線で飯能-笛吹測線との交点での反射面の状況を検討 する。この断面では測線北部の御坂山地下で北に見かけ上中角度で傾斜する反射面群が顕 著である。これはフィリピン海プレートの非地震性のスラブと考えられている²⁾。交点下 では往復走時10.5秒付近にその上面が認められ、反射面群の下面は約11.5秒程度となる。 深度変換断面では32~38 kmの深度となる。

図 36 には時間重合断面と深度断面にもとづく解釈を示す。大菩薩連嶺の西側、測線西部地域では中角度で西に傾斜する反射波群が存在する。小田原-山梨測線との交点下での

判断から、この反射波群は北西〜西北西に傾斜するフィリピン海スラブに相当するものと 判断される。このスラブ上面は、御坂山地北縁下で35kmの深度となり、大菩薩連嶺の西 翼下で25kmとなる。大菩薩連嶺の東側の測線東部では、主に3層からなる反射面群が認 められる。最も連続性の良好なものは、往復走時7秒から6秒で基本的には北東傾斜を示 す。関東山地東縁測線での情報から、この反射面群は丹沢ブロックと接合する wedge thrust の延長部、すなわち鰐口状の口の開いていない部分に相当する地殻中部のデタッチ メント断層であると判断される(図36のRL)。測線の北東端ではフィリピン海プレート上 面は往復走時9秒付近に位置し、北東に傾斜する形状を示す。この他、4秒から5秒の地 殻中部には同様に緩く東に傾斜したイベントを示す。

b) トモグラフィー解析

関東地方西部地域では、平成 21 年度に実施した秩父-丹沢測線に加え、平成 20 年度に 飯能-御坂測線¹¹⁾、平成 17 年度に小田原 - 山梨測線⁸⁾で、それぞれ自然地震観測が実施さ れている。これら自然地震観測データを用いてトモグラフィー解析¹²⁾を行い、地震波速度 構造の推定を試みた。

関東地方西部地域で実施された自然地震観測3測線のうち、小田原 - 山梨測線で得られ た自然地震データに対しては、P 波到達時刻、S 波到達時刻、最大振幅、P 波初動振動方 向の読み取りが実施されていない。そこで、小田原 - 山梨測線の観測期間中における気象 庁一元化震源カタログのリストから測線近傍の地震を抽出し、解析に使用する 280 個の震 源リストを作成した。観測期間中の2006年1月11日-2006年4月10日の間では、図37 で示す範囲で 319 個の震源が決定されている。これらの地震から、測線上の観測点で得ら れた波形の S/N が良い 280 個の地震を抽出し、解析に使用する震源リストを作成した。作 成した震源リストに従って、連続記録から地震毎のデータに編集する作業を行った。さら に、編集後のデータと、図 37 で示す周辺の 54 点のテレメータ観測点で得られたデータと の統合作業を行った。統合したデータから作成した 280 個の地震波形データから、各観測 点における P 波到達時刻、S 波到達時刻、最大振幅、P 波初動振動方向を読み取った。読 み取り個数は、P相が10,545個、S相が13,132個、最大振幅が10,590個、P波初動振動 方向が 4,503 個である。このようにして得た小田原 - 山梨測線の自然地震走時データと、 飯能-御坂測線の自然地震走時データ 11)、秩父-丹沢測線の自然地震走時データから、読 み取り観測点数が、P相が20個以上、S相が10個以上ある地震の走時データを解析に使 用した。また、図 38 で示す関東地方で実施された地殻構造探査 7).8).13)での発破と平成 21 年度に飯能-笛吹測線上で実施した発破を定常観測網で観測したデータから P 波初動の検 測を行い、トモグラフィー解析に用いる走時データに加えた。

トモグラフィー解析には、プログラム simul2000¹²⁾を使用し、3 次元速度構造の推定と 震源再決定を行った。解析を行う際には,調査地域に X-Y-Z 座標系を設定し(図 38)、その 領域内に格子を 3 次元的に作成した。設定した座標系の X 軸は、小田原 - 山梨測線に沿っ た方向とし、格子点は X 方向、Y 方向が 5km 間隔に設定した。また、Z 方向には、-4km から 0km までが 1km 間隔、0km から 15km までが 3km 間隔、15km から 40km までが 5km、50km から 210km までが 20km 間隔で設定した。トモグラフィー解析の初期モデル には、連携震源決定法¹⁴⁾を用いて計算した1次元速度構造モデルを使用した。トモグラフィー解析により再決定された震源分布を図39に、最終的に得られた3次元P波速度構造を当から、小田原-山梨測線下のP波速度構造を図40、秩父-丹沢測線下のP波速度構造を図41に、飯能-御坂測線のP波速度構造を図42にそれぞれ示す。図40、図41から伊豆-小笠原弧に起源をもつ丹沢ブロック、御坂ブロックが高速度領域を形成し、境界部の松田北断層・神縄断層・籐の木-愛川構造線,曽根丘陵断層などの深部延長は顕著な低速度帯となっていることが分かる。また、飯能-御坂測線下(図42)では、6km/sの速度を示すコンターが、測線中奥部付近で凹状に深くなっている特徴を示す。

本解析では、定常観測点で得られた発破観測データから読み取った走時データしか使用 していない。今後、3 測線での深部地殻反射法地震探査時に稠密展開された受振点で得ら れた発破の走時データも加えたトモグラフィー解析を実施することで、さらに詳細な地震 波速度構造を得ることが期待できる。

c) レシーバ関数解析

一般に、制御震源による地殻構造探査では、高エネルギー震源による稠密長大展開の採用によって、浅部の堆積盆から地震発生層基底面までの上部地殻構造に関するプロファイルを構築できる可能性は比較的高い。しかし、モホ面に至る中下部地殻構造及び島弧下に 沈み込むスラブのイメージングについては、制御震源データはエネルギー透過度及びノイズレベル等によってデータ品質は大きく影響を受けるため、自然地震データを補完的に用いた確実度の高い統合プロファイルの構築が望まれる。近年、ポータブル型の観測システムが徐々に普及するにつれて比較的稠密な観測アレイが可能となり、遠地地震から求められるレシーバ関数について、P-S 変換点マッピング及びマイグレーションといった反射法地震探査における解析技術の適用が定着している。また、各地表受振点記録間の相互相関を行い、二点間のグリーン関数を抽出する地震波干渉法を用いた遠地地震への適用例が報告されている。一方、近地地震を用いた地殻構造のイメージングに関しては、地震波干渉 法及び逆 VSP 解析に等価な重合前マイグレーション法が有望であるとされているが、実データへの適用事例は少ない。図 43 に現在考えられる自然地震データ解析に関わる手法の総括図を示す。

本報告におけるレシーバ関数解析では、反射法地震探査における P-SV 変換波重合処理 手法に準拠した標準的な手法を用いた。図 44 に地震波干渉法と併せた遠地地震に関する 解析フローを提示する。レシーバ関数解析の処理ステップは順に、ジオメトリー情報のコ ンパイル,震源-受振点間のアジマス回転,スペクトラルデコンボリューション、 2.5 次 元速度構造を前提とした共通 P-SV 変換点ビンニング、 NMO 補正及び共通変換点重合で ある。また、信号強調処理である SVD フィルターでる K-L (Karhunen-Loeve) 変換処理 を適用した。

レシーバ関数解析には、観測期間中の平成 21 年 11 月 9 日~平成 22 年 3 月 7 日におい て、マグニチュードが 5.8~7.5 で、震央距離が 23~85 度の 32 個の遠地地震が用いられ た。但し、受振点条件及びノイズ環境によって有意なレシーバ関数を推定できなかった場 合は、最終的なイメージング対象から除外した。今回は P-SV 変換点のビンニング、NMO 補正及びキルヒホッフマイグレーション処理の前提となる速度構造として、大都市圏地殻 構造調査 2003 年関東山地東縁測線の深部中核構造探査における制御震源並びに遠地地震 解析の速度構造を敷衍して利用した。また、P-SV 変換点のビンニング(重合前マイグレー ション)における水平方向ビンサイズは 50m に設定した。図 45 に遠地地震を用いた Ps レ シーバ関数プロファイルを示す。ここに示した解は暫定的なものであり、今後、より詳細 な検討が必要である。

d) 地震波干涉法解析

近年、不均質媒質において、解析対象である最下層以深に分布する震源からの透過波を 含むデータについて、各受振点記録間の相互相関を行い、因果律を満たす記録部分を抽出 することによって、地表震源によるグリーン関数を抽出する試みが提示されてきている¹⁵⁾。 これは、透過波が地表面で反射して生成されるゴースト波を抽出することに相当し、全受 振点位置における発震記録が生成されることと等価である。こうしたデータでは発震-受振 系の対称サンプリングが自動的に実現されていることから、速度解析を含む反射法地震探 査の基本技術を直接的に適用できることが可能となる。実際に反射波の波動場を再現する には、最下層以深において相関関係の無い多数のノイズ震源が前提となっているが、隣接 する受振点間の位相差のみに注目して光干渉と同様の様々なジオメトリーを想定したイメ ージング('Seismic Interferometry')を行うことの可能性が報告されている¹⁶⁾。本研究では、 反射法地震探査の基本技術を直接応用する視点から、近地地震波が地表面に到達後に生成 されるゴースト波、及び制御震源データに含まれる'Surface-related Multiple'を抽出し、 擬似反射記録を生成して、上部地殻のイメージング解析への応用を試みた。

受振点間の相互相関解析を経て擬似発震記録を構築するための入力として、制御震源デ ータ取得時に観測された自然地震データを解析対象とした。

制御震源データ取得時には、独立型受振システムを 2009 年 12 月 6 日午前 10 時より 12 月 8 日午前 10 時の時間ウィンドーにおいて、連続観測が実施された。この時間内におい て、甲府盆地-関東山地-関東平野周辺では、マグニチュード 2.0 以上の自然地震が計 12 イベント観測された。本解析では、12 イベントから比較的データ S/N が高く、P-S 初動走 時の分離を前提に、深度 40km 以深の 3 イベントを抽出し解析に使用した。それぞれの観 測波形記録を図 47~49 に示す。

制御震源データに関しては、一次反射波に関する解析内容を前節で記述したが、上部地 殻内のインピーダンス境界と地表を介在する'Surface-related Multiple'がデータに包含さ れている可能性がある。本解析では、全発震記録に関して全受振点における擬似反射記録 を生成した。

地震波干渉法型のデータ解析においては、擬似発震記録の生成以外の解析フロー及びパ ラメータは一次反射波に関する解析内容と同一である。この擬似発震記録は、各イベント に関して全受振点(1279点)に相当する点数が生成される。但し、地表震源データに関して は、地震波干渉法の基本仮定である「イメージング対象下方に多数のランダム震源が存在 する」条件を満たしていないため、偽像生成の可能性は排除できない。従って、十分な高 重合数を維持する擬似発震記録を生成し、こうした偽像を抑制する必要がある。また、相 互相関処理によって生成される擬似発震記録は'Surface-related Multiple'であり、制御震 源データや測線近傍の近地地震に関しては、相対的に卓越周波数が高いため、減衰によっ てエネルギーは大きく減退する。従って、抽出可能な構造は堆積盆から地殻上部に限定さ れる。

制御震源データ取得時に観測された茨城県周辺の3地震を用いた地震波干渉法型解析に よる時間断面図を図50、図51に示す。図50がCMP重合処理結果、図51が重合後時間 マイグレーション処理結果である。往復走時6~7秒程度までみかけ上緩く西に傾斜する 反射面が分布する。今後、制御震源から求められた反射面・地質構造との対比などの解析 を進める必要がある。

e) 伊豆衝突帯・関東山地周辺のフィリピン海プレートの形状と地殻構造

中部日本におけるフィリピン海プレートの深部形状は近年、地震波トモグラフィーによ る解析が進展し明らかになってきた。図 52 に Nakajima et al. (2008)⁵による関東周辺の プレート形状を示す。飯能-笛吹測線で実施した低重合反射法地震探査断面(図 36)によ れば、フィリピン海プレートは大菩薩連嶺の東麓で背斜状の形状をなしている。この背斜 の形状は東翼が見かけ上、緩傾斜、西は急傾斜の非対称な形状を示し、キンク褶曲に類似 した形態をとる。このヒンジラインは NNW 方向の地震波トモグラフィーから推定された フィリピン海プレート上の深部でのヒンジラインに連続するように見える(図 52)。また、 関東地震時のすべり量の大きな部分は、ほぼこのヒンジラインを境に、これよりも東側に 位置する¹⁾。関東地震時の断層面の西端がこのヒンジラインに位置することから、今回の 探査によって関東地震の西端を規定する構造が明らかになった。背斜状の構造なのか、断 裂があるかについては今後のより詳細な解析が必要である。

(c) 結論ならびに今後の課題

関東山地の飯能-笛吹測線で、地殻構造探査を実施した。その結果、フィリピン海プレー ト上面がキンク型の褶曲を構成し、ヒンジラインが大菩薩連嶺の東翼を通過することが明 らかになった。このヒンジラインは、伊豆衝突帯の北方にのびるフィリピン海プレート上 の深部までヒンジラインとして追跡され、1923年関東地震の断層の西端を限る構造となっ ている。また、平成21年度に実施した関東山地東縁・秩父-丹沢測線における稠密自然地 震観測波形を用いてレシーバ関数解析が行われ、北に傾斜した PS 変換面の存在が明らか になった。

2003年関東山地東縁測線、2005年小田原-山梨測線、2008年と2009年の飯能-笛吹測線での観測によって、それぞれ交差する3測線においてダイナマイトを主体とする低重合反射法地震探査、稠密自然地震観測データをほぼ同様の仕様で取得することができた。

地殻構造と地震活動との関係、異なる手法によるイメージングの成果を合理的に判断す るためには、速度構造を共通化させ様々な観測資料を重ね会わせていく必要がある。今後、 統合的な解析を続けていく予定である。 [謝辞]本調査・研究は、文部科学技術省、東京都、山梨県及び埼玉県をはじめとする 数多くの関係諸機関の協力によって完遂することができた。ここに記して謝意を表する。

(d) 引用文献

- Sato, H., Hirata, N., Koketsu, K., Okaya, D., Iwasaki, T., Ito, T., Kasahara, K., Ikawa, T., Abe, S., Kawanaka, T., Matsubara, M., Kobayashi, R., Harder, S.: Earthquake source fault beneath Tokyo, Science, 309, pp.462-464, 2005.
- 2) 佐藤比呂志・平田 直・阿部 進,2008 震源断層のイメージングの現状と地震被害 想定へのインパクト,物理探査学会 創立60周年記念事業実行委員会編「最新の物理探 査適用事例集」,社団法人 物理探査学会pp.381-386,2008.
- 3) 坂本亨・酒井彰・秦光男・宇野沢昭・広島俊男・駒沢正夫・村田泰章: 20万分の1地質 図「東京」,地質図, 1:200,000,地質調査所, 1987.
- 4) 尾崎正紀・牧本博・杉山雄一・三村弘二・酒井彰・久保和也・加藤碵一・駒沢正夫・ 広島俊男・須藤定久,20万分の1地質図幅「甲府」,地質図幅,1:200,000,,NI-54-31,1 sheet, 産業技術総合研究所地質調査総合センター,2002.
- 5) Nakajima, J., Hirose, F. and Hasegawa, A.: Seismotectonics beneath the Tokyo metropolitan area, Japan: Effect of slab-slab contact and overlap on seismicity, Jour. Geophys. Res., 114, B08309, doi:10.1029/2008JB006101, 2009.
- Wu, F., Okaya, D., Sato, H., and Hirata, N.: Interaction between two subducting plates under Tokyo and its possible effects on seismic hazards, *Geophys. Res. Letts.*, *34*, L18301, doi:10.1029/2007GL30763, 2007.
- 7) 佐藤比呂志・平田 直・伊藤谷生・岩崎貴哉・纐纈一起・笠原敬司・伊藤 潔:大深 度弾性波探査 3.1.3.関東山地東縁地殻構造探査(関東山地2003),大都市大震災軽 減化特別プロジェクト 1 地震動(強い揺れ)の予測「大都市圏地殻構造調査研究」 (平成15年度)成果報告書,83-191,2004.
- 8) 佐藤比呂志・平田 直・岩崎貴哉・纐纈一起・伊藤 潔・伊藤谷生・笠原敬司・加藤 直子,大深度弾性波探査 3.1.3.関東地殻構造探査(小田原-山梨測線),大都市大震 災軽減化特別プロジェクト 1 地震動(強い揺れ)の予測「大都市圏地殻構造調査研 究」(平成17年度)成果報告書,98-182,2006.
- 9) 村上文俊,佐藤比呂志,黒田徹,阿部進,加藤直子:自然地震観測におけるMEMS型 加速度センサーの特性評価,東京大学地震研究所彙報,84,251-266,2009.
- 10) Hirata, N. and Matsu'ura M.: Maximum-likelihood estimation of hypocenter with origin time eliminated using nonlinear inversion technique, Phys. Earth Planet, Inter., 47 50-61, 1987.
- 11) 蔵下英司, 佐藤比呂志, 阿部進, 加藤直子: 関東山地「飯能一御坂測線」における稠密自然地震観測, 東京大学地震研究所彙報, 84, 217-227, 2009.
- 12) Thurber, C. and D. Eberhart-Phillips: Local earthquake tomography with flexible gridding, *Comp. Geosci.*, **25**, 809–818, 1999.
- 13) 及川純, 鍵山恒臣, 田中聡, 宮町宏樹, 筒井智樹, 池田靖, 潟山弘明, 松尾糾道, 西村裕一,

山本圭吾,渡辺俊樹,大島弘光,山崎文人:人工地震を用いた富士山における構造探査, 月刊地球, 号外, 48, 23-26, 2004.

- 14) Kissling, E., W. L. Ellsworth, D. Eberhart-Phillips, and U. Kradolfer: Initial reference models in local earthquake tomography, *J. Geophys. Res.*, 99, 19635–19646, 1994.
- Wapenaar, K., J. Thorbecke, and D. Draganov: Relations between reflection and transmission responses of three-dimensional inhomogeneous media, Geophys. J. Int., 156, 179-194, 2004.
- 16) Schuster, G.T., J. Yu, J. Sheng, and J. Rickett: Interferometric/daylight seismic imaging, Geophys. J. Int., 157, 838-852, 2004.

(e) 学会等発表実績

学会等における口頭・ポスター発表

発表成果(発表題目、口	発表者氏名	発表場所	発表時期	国際·
頭・ポスター発表の別)		(学会等名)		国内の
				別
Features of seismic wave	Ryuta Arai,	Makuhari Messe	平成21年	国際
velocity structure and	Takaya Iwasaki,	International	5月18日	
seismicity in the Izu	Hiroshi Sato,	Conference Hall,		
Collision zone (口頭)	Susumu Abe and	Chiba, Japan		
	Naoshi Hirata	(Japan Geoscience		
		Union)		
首都圏の地殻・フィリピ	佐藤比呂志・ 阿	幕張メッセ国際会	平成21年	国内
ン海プレートの構造とテ	部 進 · 蔵 下 英	議場、千葉市(日	5月19日	
クトニクス(口頭)	司 · Okaya	本地球惑星科学連		
	David ・ 伊 藤 谷	合)		
	生・平田直			
マルチモード型重合前マ	阿部進・佐藤比	幕張メッセ国際会	平成21年	国内
イグレーションによる自	呂志・平田直・	議場、千葉市(日	5月19日	
然地震波を用いた地殻構	蔵下英司・ 岩崎	本地球惑星科学連		
造のイメー	貴哉・ 飯高隆・	合)		
ジング(口頭)	越谷信・加藤直			
	子・加藤愛太			
	郎・川中卓			
反射法データによる伊豆	加藤直子・佐藤	京都大学、京都市	平成21年	国内
衝突帯北縁部曽根丘陵断	比呂志・蔵下英	(日本地震学会)	10月21日	
層帯の浅部波速度構造	司			
(口頭)				
伊豆衝突带丹沢御坂地域	新井隆太·岩崎	京都大学、京都市	平成21年	国内

の地震波速度構造(口頭)	貴哉・佐藤比呂	(日本地震学会)	10月21日	
	志・阿部 進・			
	平田直			
稠密地震観測による伊豆	蔵下英司 · 佐藤	京都大学、京都市	平成21年	国内
衝突帯の地殻構造(口頭)	比呂志・阿部	(日本地震学会)	10月21日	
	進・加藤直子・			
	石川正弘・小原			
	一成			
Crustal structure of the Izu	Eiji Kurashimo,	Moscone	平成21年	国際
Collision zone, central	Hiroshi Sato,	Convention Center,	12月17日	
Japan, revealed by dense	Susumu Abe,	San Francisco, CA,		
seismic array observations	Naoko Kato,	USA (American		
(ポスター)	Masahiro	Geophysical		
	Ishikawa,	Union)		
	Kazushige Obara			
Collision and subduction	Ryuta Arai,	Moscone	平成21年	国際
structure of the Izu-Bonin	Takaya Iwasaki,	Convention Center,	12月18日	
arc, central Japan: Recent	Hiroshi Sato,	San Francisco, CA,		
studies from	Susumu Abe and	USA (American		
refraction/wide-angle	Naoshi Hirata	Geophysical		
reflection analysis and		Union)		
seismic tomography (口頭)				
Recent progress on the	Sato, H., S. Abe,	Hokudan	平成22年1	国際
imaging of seismogenic	N. Kato, and T.	Earthquake	月19日	
source faults in Japan (\square	Iwasaki	Memorial Park in		
頭)		Awaji City, Awaji		
		Island, Japan		
		(HOKUDAN		
		International		
		Symposium on		
		Active Faulting,In		
		Commemoration of		
		the 15th		
		Anniversary of the		
		1995 Great		
		Hanshin-Awaji		
		Earthquake)		
Contribution of recent	Hiroshi Sato,	ERI, Tokyo, Japan	平成22年3	国際

seismic profiling for	Susumu Abe,	(The 3 rd SCEC-ERI	月16日	
constructing source fault	Takaya Iwasaki,	Joint Workshop on		
models in Japanese islands	Naoko Kato, Eiji	"Earthqake Hazards		
(口頭)	Kurashimo &	in Urban		
	Naoshi Hirata	Area"Toward		
		Constructiong		
		Forecast Systems of		
		Earthquakes")		
伊豆-小笠原弧の沈み込	佐藤比呂志・阿	東京大学地震研究	平成22年3	国内
みと関東のテクトニクス	部進・蔵下英	所)(研究集会「首	月18日	
(口頭)	司・岩崎貴哉・	都圏における地震		
	石川正弘・新井	テクトニクス」)		
	隆太・加藤直			
	子・亚田直			

学会誌・雑誌等における論文掲載

掲載論文(論文題目)	発表者氏名	発表場所	発表時期	国際・国
		(雑誌等名)		内の別
関東山地「飯能一御坂測	蔵下英司・佐藤	東京大学地震研究	平成22年	国内
線」における稠密自然地	比呂志・阿部	所彙報	3月29日	
震観測	進·加藤直子			
自然地震観測における	村上文俊・佐藤	東京大学地震研究	平成22年	国内
MEMS型加速度センサー	比呂志・黒田	所彙報	3月29日	
の特性評価	徹・阿部進・加			
	藤直子			

マスコミ等における報道・掲載

なし

(f) 特許出願,ソフトウエア開発,仕様・標準等の策定

1)特許出願

なし

2)ソフトウエア開発

なし

3) 仕様・標準等の策定

なし

(3) 平成22年度業務計画案

関東地域下では、フィリピン海プレートが陸側プレートと太平洋プレートとの間に沈 み込むという複雑なプレート配置を形成している。フィリピン海プレートのスラブは, 関東北東部下で太平洋スラブと接触し、沈み込むスラブを変形させ、首都圏下の被害地 震の要因になる可能性がある。関東北東部下におけるフィリピン海プレートと太平洋ス ラブの接合部の構造を高い精度で把握することは、関東地方下におけるスラブの運動方 向に拘束条件を与える上で重要であり、首都直下地震を考察する上でも必要不可欠であ る。

したがって、平成22年度は、関東北東域下におけるフィリピン海スラブと太平洋プレ ートの形状と両者の接合関係、先新第三系基盤の形状変化、中央構造線もしくは銚子ー 柏崎構造線の位置と構造形態を明らかにする為に、制御震源を用いた地殻構造調査およ び稠密自然地震観測を関東北東域で実施する。地殻構造探査は、茨城県稲敷市から利根 川を横断し、下総台地・千葉県旭市を経て九十九里沖に至る測線長約 55km の「九十九 里-霞ヶ浦測線」で実施する(図 52)。制御震源として、海域ではエアガン、陸域ではバ イブレータとダイナマイトを用い、海域に敷設した浅海着底ケーブルシステム、陸域に 設置した有線テレメトリーシステムと独立型受振システムで観測することで海陸統合の 地殻構造断面図を得る。稠密自然地震観測は、茨城県稲敷市から加波山山塊北端に至る 「霞ヶ浦-つくば測線」、および茨城県つくば市から那珂市に至る「つくば-水戸測線」で 実施する(図53)。「つくば-水戸測線」は、首都圏中感度地震観測網(MeSO-net)の「つ くば-藤沢測線」の東北部とその延長部に位置するように設定した。「つくば-水戸測線」 と「霞ヶ浦-つくば測線」は、筑波連山の南端部において交差する。観測点間隔は、「霞 ヶ浦-つくば測線」上で約 1km 間隔、「つくば-水戸測線」上で約 1-2km 間隔に設定し、 約5カ月間の連続観測を実施する。これら得られたデータに対してトモグラフィー解析・ 地震波干渉解析法・レシーバ関数解析法により、フィリピン海スラブと太平洋プレート の接合部の構造を明らかにするための解析を行う。