

15. 環状第 8 号線沿い反射法地震探査 (東京都地下構造調査)

Seismic Reflection Profiling Survey along No.8 Loop in Tokyo

地象部 中山俊雄 中嶋庸一(現水道局)

1 はじめに

東京都は、文科省の地震関係基礎調査交付金を受け、「関東平野(東京都)地下構造調査」を平成 14 年度から取り組んでいる。平成 16 年度は本事業の第 3 年目、最終年度にあたる。平成 16 年度は、平成 14・15 年度に実施した探査測線と神奈川県下で実施されている既存測線を結び、東京の南北地下断面構造を明らかにすることを目的に、P 波反射法・屈折法地震探査を実施した。

調査にあたっては学識経験者等からなる「東京都地域地下構造調査委員会」から専門的・技術的指導および助言を受けて実施した。なお、本調査は株式会社地球科学総合研究所が担当した。

2 調査位置および内容

調査測線は、埼玉県和光市の荒川河川敷を起点とし、笹目通りおよび環八通りに沿いに南下し、多摩川河川敷に至る南北 22km の測線で、板橋区・練馬区・杉並区・世田谷区を通過する。この測線では交通振動ノイズが相当高いこと、住家と近接することから、発振測線(点)と観測測線を分離するという方式を昨年に引継ぎ今回も採用した。観測測線は、ノイズレベルの比較的低い住宅地、公園、河川沿いをつなぐラインを設定した。このため、観測測線は発振測線である笹目通り・環状八号線道路とは、平行・交差し、蛇行した測線となった。発振震源には、前回同様大型

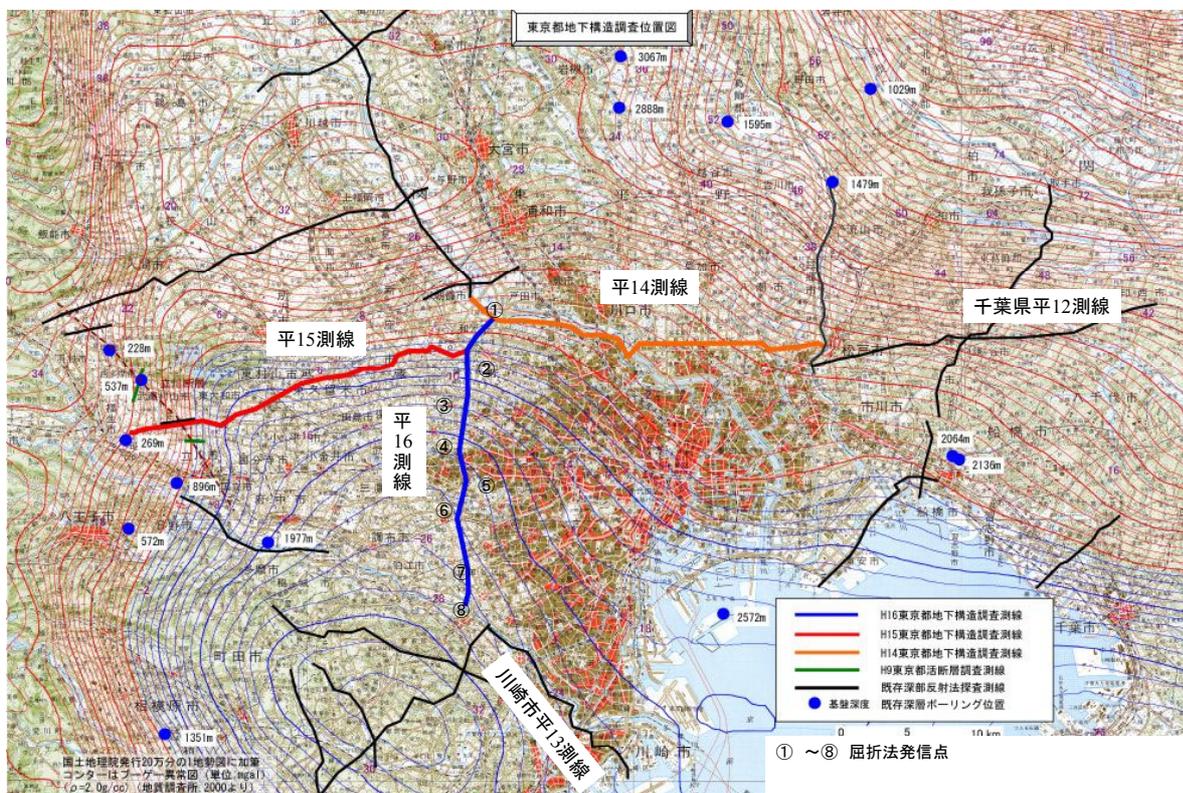


図-1 調査位置図(国土地理院 1/20 地勢図 東京、ブーゲ異常図(地調 2000)に加筆)

表—1 探査仕様

発振系	震源(バイプロサイズ車)	反射法	屈折法
	スイープ周波数(Hz)	1~4	2~4
	スイープ数/1発振点	8~50	6~40
	発振点間隔	5~20	13~200
	総発振点数	150m(標準)	9点
受振系	受振器	SM-7(10Hz) SM-24(10Hz)	SM-7(10Hz) SM-24(10Hz)
	受振点あたり受振器個数	3個	3個
	受振点間隔	25m	25m
	総受信点数	884点	884点
	受振点展開長	22.075km	22.075km
記録系	探鉱器	GDAPS-4A	GDAPS-4A
	サンプル間隔	4ミリ秒	4ミリ秒
	記録長	8秒(コリレーション後)	16秒
	チャンネル数	400(標準)	884
	展開	固定展開	固定展開

バイプロサイズ車を用いた。P波反射法地震探査では主に2台(発振間隔は原則150m)を用い、P波屈折法地震探査では発振点8地点を選び、バイプロサイズ車2~4台による多重発振を行った。地震探査測線の位置を図-1に、探査仕様を表-1に示す。

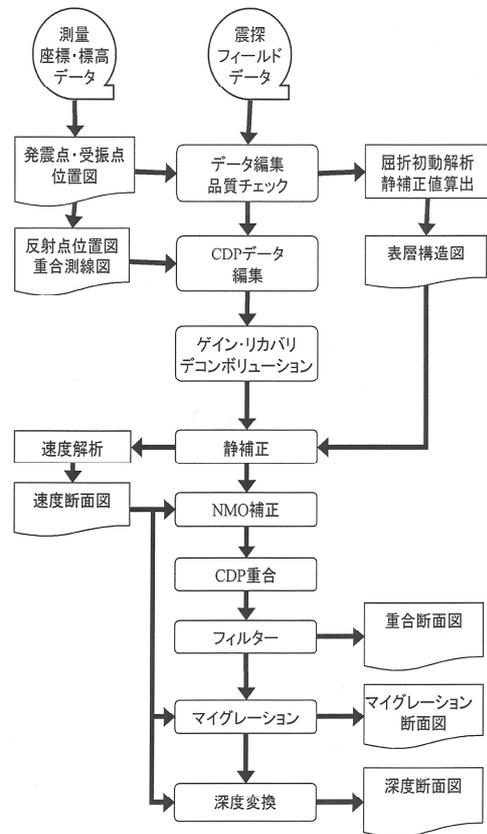
3 調査・解析方法

(1) P波反射法弾性波探査

反射法弾性波探査の解析流れを図-2に示す。処理方法は平成14・15年度調査と同様である¹⁾。

今回解析に採用した共通反射点重合測線(CDP重合)、デコンボリューションパラメーター、屈折波静補正でのV1とV2の値等のパラメータを表-2に示す。

振幅補償ではテストの結果、ゲート長1000ミリ秒の自動振幅調整(AGC)で行った。スタック後にもゲート長1200m秒の自動振幅調整(AGC)を行っている。速度解析では定速度重合法を用い、100CDP(1250m)毎の地点で、残差静補正前後2回の速度解析を行った。NMO補正では波形の伸張が4.0を越えるものについてはミュートを施し、さらに



図—2 解析流れ

表—2 パラメーター諸元

共通点重合	総CDP数	最終CDP範囲	CDP間隔	重合測線長	
	1668	1-1668	12.5m	20.9km	
デコンボリューション	ゲート長	オペレーター長	ホワイトノイズ	予測距離	時間ゲート
	2000ミリ秒	200ミリ秒	0.50%	36ミリ秒	TV
F-X予測フィルター	ゲート長	オペレーター長	ウインド長	オーバーラップ	
	91トレース	13トレース	800ミリ秒	400ミリ秒	
屈折波静補正で採用した速度値	V _i	V ₂	第一層の厚さ		
	800m/s	1700-1800m/s	0-50m		
バンドパスフィルター	0.0~2.0秒	2.0~3.0秒	3.0~5.0秒		
	12~30Hz	8~25Hz	8~20Hz		

適当な速度での線形ミュートを施している。重合後のデータに対しては、フィルターテストにより最終重合断面を作成した。重合深度断面図の深度変換後のサンプル間隔と、マイグレーション深度変換の深度変換後のサンプル間隔はともに2mとした。

(2) 屈折法地震探査

屈折法地震探査は、P波反射法地震探査と同じ受振測線で実施した。発振点は、測線の両端付近を含めた8点、荒川河川敷（和光市）、都立光が丘公園（練馬区）、都立石神井公園（練馬区）、区立桃井はらっぱ（杉並区）、三井不動産高井戸運動場（杉並区）、都立芦花公園前（世田谷区）、都立砧公園（世田谷区）、多摩川河川敷（世田谷区）である。

震源として大型のバイブロサイズ車2~4台を用い、反射法の全受振器である932チャンネルの展開を用いてGDAPS-4A、MS2000探鉱機でデータを取得した。

各地点で取得された屈折法ショット記録を示す。

①荒川河川敷

初動は、オフセット距離10km程度まで明瞭に見られた。10kmを超えると初動が不明瞭になるが、発振点の地盤状況の他に、都市部の人工ノイズによる影響が大きいと考えられる。基盤の不連続を示唆する初動走時のズレは確認できない。なお、他の走時曲線との対応から、基盤からの屈折波は、3.5~4.0秒以降の初動であり、それ

以前は中間層からの屈折波である。

②光が丘公園（図-3）

初動は、交通ノイズの大きい区間を除いて全区間で追跡できた。特に、基盤からの屈折波が比較的明瞭に捉えられており、測線南端で約5.6秒である。見かけ速度は、約5.4km/sである。また、基盤屈折波のインターセプトタイムは2.6秒である。堆積層からの屈折波はミラージュ層的な振る舞いを見せており、見掛け速度は、1.8から3.6km/sと緩やかに変化する。S波とそれに続く表面波も5km以上遠方でも確認されている。

③石神井公園

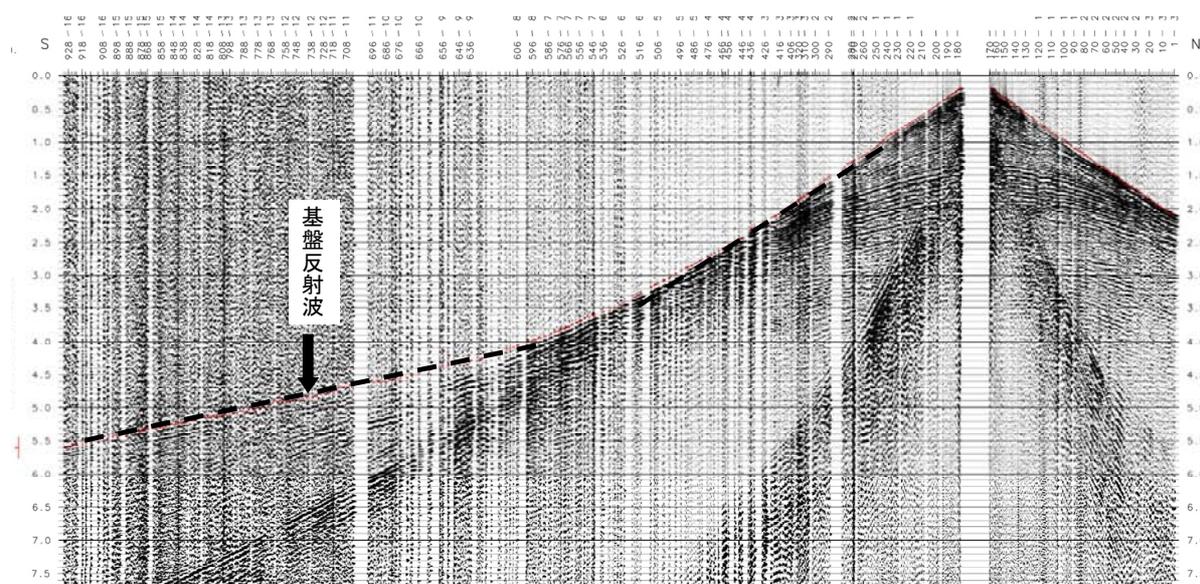
発振点から受振測線まで最短で2km程度離れているため、ニアオフセット記録は存在しない。基盤屈折波はかなり不明瞭ではあるが測線南端まで追跡できた。発振点は石神井池の脇であり地下水位は浅いが、地面とのカップリング等発振状況は良好であった。

④桃井はらっぱ広場

ここでは100m程度離れた住宅地からの苦情が相次いだため、スイープ13回で発振作業を終了せざるを得なかった。しかし、発振状況は良好でスイープ回数は少なかったものの、初動が測線両端でまで追跡できた。一方、堆積層からの反射として垂直往復走時約1.8秒が顕著である。

⑤三井不動産高井戸運動場及び⑥都立芦花公園脇

いずれの地点も住宅密集地域が隣接していることか



図—3 練馬区光が丘でのショット記録

ら、パワーを落として発振を行った。このため初動は測線端までは届かなかったが、浅部を含めた堆積層からの反射波を得ることができた。

⑦砧公園

広大な公園敷地内であることから発振地点を住宅地から300m程度離すことができたので、十分な発振パワーを与えることができた。初動は19km離れた測線北端でも確認できた。この見かけ速度は、約5.4km/sである。また、基盤も含め反射波が豊富に捕らえられた。

⑧多摩川河川敷

この地点でも良好な記録を得ることができた。初動は21km離れた測線北端付近でも確認できた。この見かけ速度は約5.4km/sである。また、反射波についても基盤を含め2.5秒程度まで多数確認できた。

4 解析結果

(1) 反射法弾性波探査

マイグレーション深度断面を図-4に示す。

比較的コントラストの強い反射面(C面、B面、A面)により堆積層を4層(表層を含む)に層区分した。

1) C面: C面深度は南端付近で約2800m、比較的明瞭に認められる。測線中央部では不明瞭となり、測線北端付

近では深度2500、3200m~3500m、3800m付近に反射面が見られるが、本測線と接合する平成15年度東京都下構造調査の結果(北多摩測線)を参考に、深度3200mをC面に設定した。

2) B面: 測線北端では深度700m~1700m付近にかけて連続性がよくやや顕著な反射面が複数確認できる。また、測線南端では深度1200m~2200m付近に連続性の良い複数の反射面が確認できる。測線両端部における他測線との接合も良好であり、B面深度は測線北端で約1500m、測線南端で約1600mを設定した。測線中央部については反射面は不明瞭である。

3) A面: 今回の調査では深部を対象にしたもので、今回の調査仕様では、浅部(500m以浅)の細かい議論には精度上の限界があるが、測線の一部記録がノイズ状況により不明瞭な部分があるが、A面は測線北端で約200m、測線南端で約100m、測線全域ではほぼ平坦、もしくは、緩やかな北傾斜を示す面を採用した。

(2) 屈折法弾性波探査

今回の屈折法測線は、やや曲がりくねっているが、レイトレーシングのモデリングでは、測線は直線であると仮定した。レイトレーシングは、岩崎(1988)²⁾による波線追跡プログラムを用いて、何回か試行錯誤を繰り返し、モデ

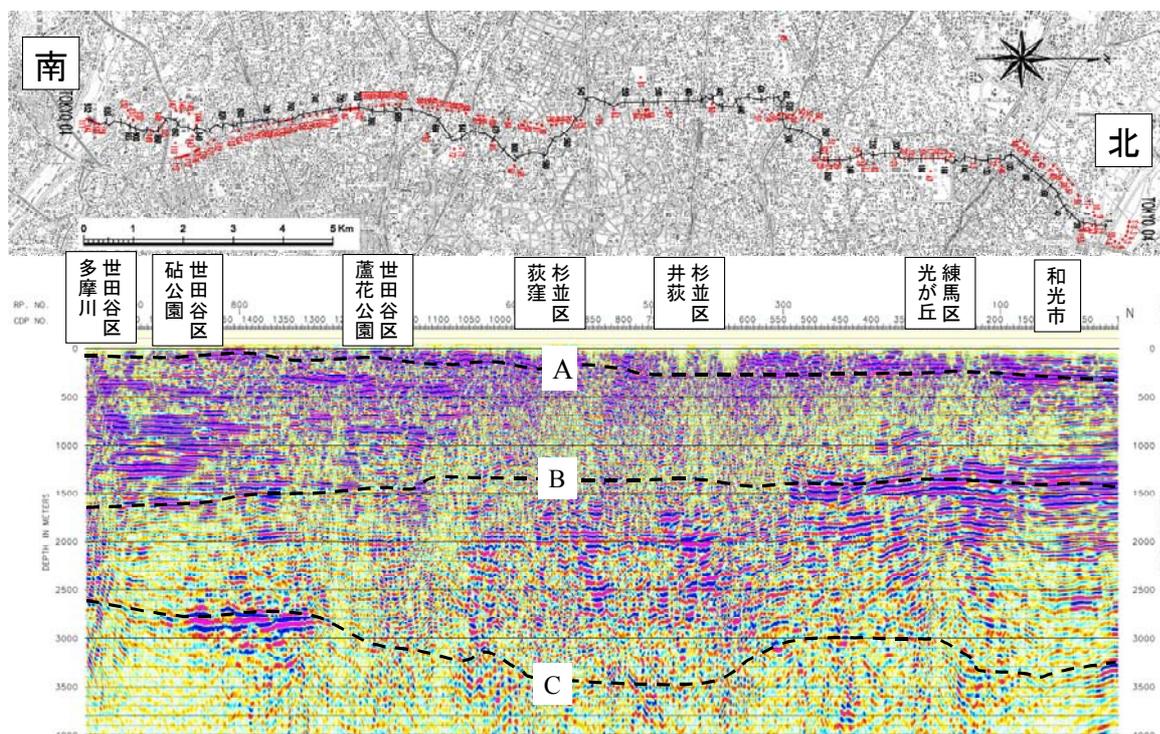


図-4 マイグレーション深度断面図

リングと実記録の走時合わせを行った。8つの屈折データの初動として現れている見掛け速度1.7km/s程度の屈折波から基盤に相当する屈折波初動までの読み取り時刻を用いた。反射法断面の解釈線(A面、B面、C面)を初期モデルとして、浅部の層から、順次、速度および層面を試行錯誤的にチューニングすることで最終モデルを作成した(図-5)。

最上位(地表-A面間)の速度は1.7km/sである。A面の屈折波速度は1.9km/sであり、A面~B面にかけては、走時曲線の弓なりの形状から直線的に速度を漸増(1.9-2.5km/s)させた。B面に対応する屈折波速度は2.6km/sであり、その下位のB面~C面にかけては、基盤屈折波のインターセプトタイムを合わせるために、3.2km/sまで直線的に速度を漸増させた。基盤速度(C面)については、事前解析としてタイムターム法により測線全区間の平均値として5.4km/sが求められ、レイトレーシングの初期モデルとして一様に5.4km/sを与えたが、観測値とモデル計算値の違いが生じることから基盤速度を変化させ、基盤上面(C面)の速度を、北端で5.4km/s、南端で5.1km/sとなるように設定した。基盤上面の深度は、測線北端で3200m、測線南端で2800mであり、測線中部で若干の起伏が存在する。なお、走時曲線で得られた見かけ速度4.6km/s前後については、初動曲線の順・逆走時の双方から確認されており、これらの層の存在についてはモデル化していない。つまり、4.6km/s程度の中間層はモデル化せず、基盤の起伏による見かけ速度を表していると解釈した。

レイトレーシングによる最終モデルでは、基盤上面(C

面)速度は北端で5.4km/s、南端で5.1km/sとした。基盤岩上面の深度は、測線北端で3200m、測線南端で2800mであり、測線中部で深度3500m程度に達する落ち込みが存在する。

5 考察

本測線の解釈断面図を図-6に示す。図中の数字は、反射法速度解析の結果から得られた代表的な区間速度、および、屈折法解析から得られた基盤速度を表示した。

屈折法のレイトレーシングで求められた速度境界は、反射法断面図の反射面と対比することができ、反射法、屈折法でそれぞれ求めた速度は、解析精度の範囲内で整合している。堆積層のP波速度は、上位から0.8km/s(表層)、1.6~1.7km/s(表層基底~A面)、1.8~2.5km/s(A面~B面)、2.5~3.4km/s(B面~C面)と求められた。

本測線の解釈は、屈折法の最終速度モデルを基に、反射波の特徴と連続性に着目して速度境界線を追跡しているため、屈折法の最終速度モデル(境界が平滑化されているモデル)とは若干異なっている。

(1) A面: A面(測線北端部での)は、平成14年度東京都地下構造調査での、上総層群/下総層群境界または、上総層群中(北多摩層上面)とした反射面に連続する。このA反射面は、平成11年度千葉県地下構造調査測線を經由し、下総観測井(防災科学技術研究所のKiK-Net)での上総層群と下総層群の境界(海拔からの深度350m)に追跡できる。ただし、追跡にあたっては、比較的明瞭な反射面を速度境界としてトレースしているため、不整合により下

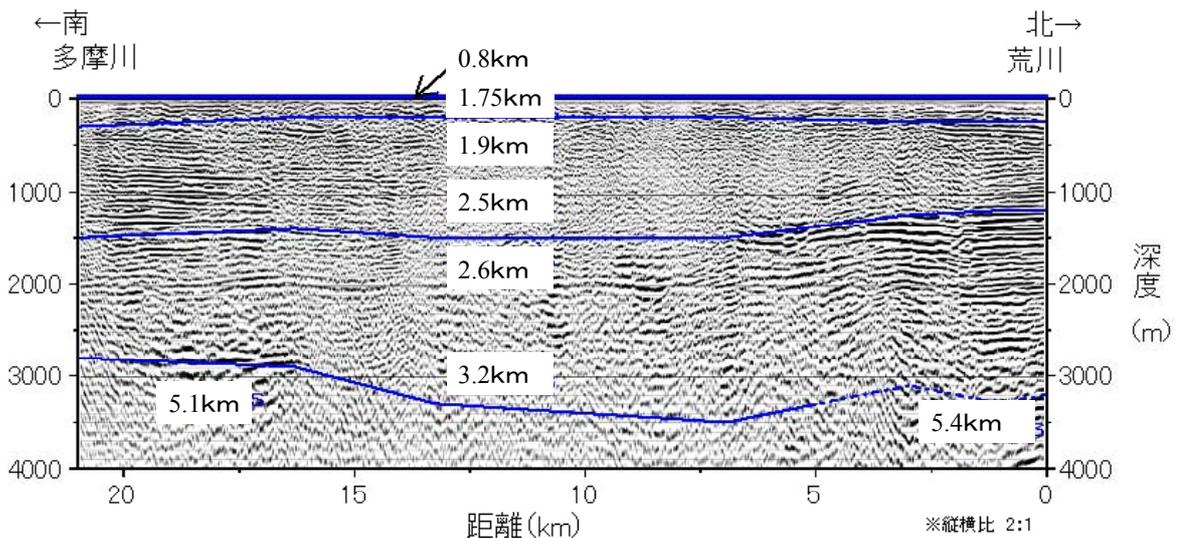


図-5 レイトレーシングによる解析結果

位層が削剥されている部分では下位の地層へ乗り換えることも考えられ、必ずしも地層対比ではない。平成15年度千葉県地下構造調査では、このA面を上総層群中の柿の木台層と国本層の境界という解釈を行っている。

一方、平成12年度川崎市地下構造調査では、防災科学技術研究所の横浜地殻活動観測井³⁾、⁴⁾付近の深度約300mに確認できる上総層群中の反射面を追跡し、本測線南端部に見られる深度約700mの反射面に対応できる(A'面)。

A面～B面にかけてのP波速度は大略1.8～2.5km/sであり、速度が深度とともに漸増する結果が得られている。

CDP220付近の中間層(上総層群および三浦層群)が若干撓んでいるように見られるが、地表部付近において断層運動による大規模な不連続は見られない。従って、活断層の疑いとして危急性を持った調査を行う必要はないが、今後、新たな地盤調査を行う際には十分な注意を払う必要がある。測線中央部は、オフセット発振を多用しているため浅部の詳細な議論はできないが、今回の調査仕様では有意なアノマリーは確認できない。以上をまとめると、今回の調査からは、環状八号線に沿った南北測線において、断層(活断層)が潜在している様相は認められない。

(2) B面: B面は測線両端部において他測線との連続性が良好である反射面を選んだ。これはいくつかの強反射波列の下部付近に現れる反射面で、測線北端で約1500m、測線南端で約1600mである。B面～C面のP波速度は2.6～

3.2km/sである。既存の結果によれば、三浦層群のP波速度は2.7～3.4km/sであることから、B面～C面は三浦層群相当層であると考えられる。B面はおよそ上総層群と三浦層群相当層の境界付近に対応すると推定される。

B反射面は、CDP550～1100にかけて反射面が急激に不明瞭になっている。特にCDP550の深度1500mの反射面は一見すると不連続であり断層のようにも見えるが、この部分はノイズ状況の急変に伴うものであり、これより南側の反射面はノイズのより掻き消された可能性が高いので、ここでは反射面は水平に連続していると解釈した。

光が丘周辺(CDP300)付近では、B面上下(上総層群および三浦層群)で反射面が若干撓んでいるように見られる。地表部付近には断層運動による大規模な不連続は見られないことから、地上に達する断層(活断層)が潜在するとは考えられない。なお、調査地域におけるA面と、B面において、傾斜不整合の存在は確認できない。

(3) C面: 測線の北端付近に隣接する既存探査結果⁵⁾、⁶⁾、⁷⁾、⁸⁾での基盤深度は3000m～3400mとされており、今回の調査結果の3300mとほぼ一致する。一方、測線南端については、平成12年度川崎市地下構造調査測線と約2kmの距離をおいて接続する。この測線の北西端での基盤上面深度は約2700mであり、今回の測線南端における基盤深度2700mと一致する。これらのことから、C面は、先新第三系基盤の上面に対応すると考えられる。

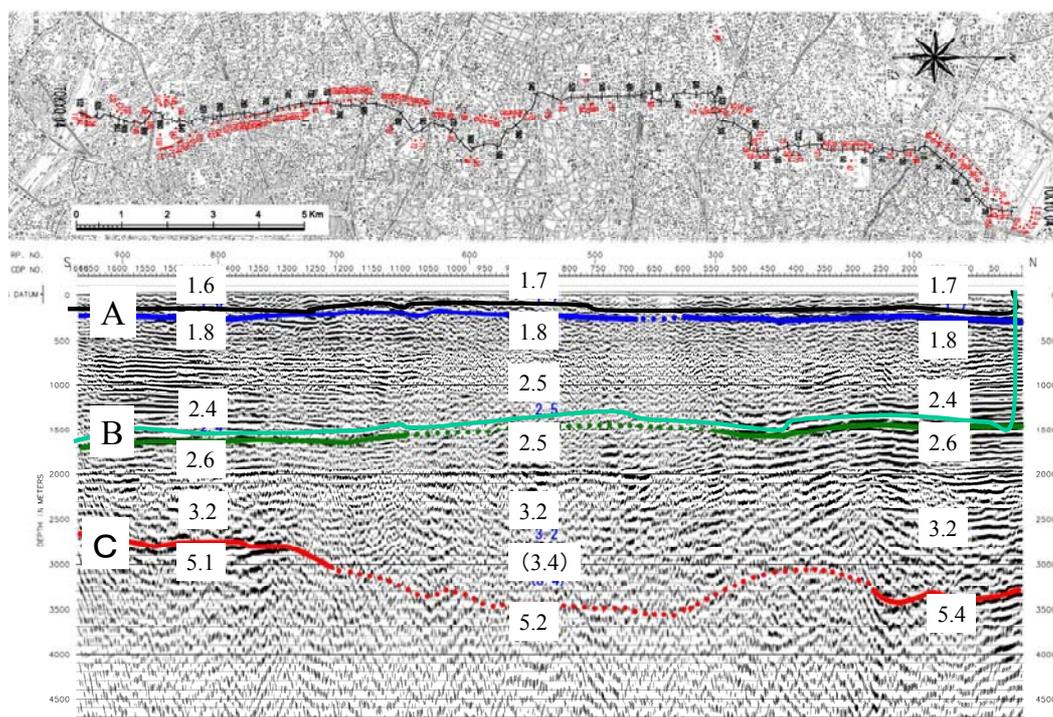


図-6 最終断面モデル

基盤上面形状のうち南部の反射面は明瞭でフラットであるが、中部から北部にかけて反射面は不明瞭である。この部分はレイトレーシング解析結果を踏まえ、杉並区南荻窪から高井戸 (RP500~600) にかけての基盤の落ち込みと練馬区の光が丘公園周辺 (RP120~200) にかけての基盤の高まりによる深度3000~3500mの起伏があると解釈した。

測線中部の基盤面の凹部を充填している部分は反射が乱れており、区間速度はやや信頼性は低い、基盤面までの区間速度は3.2~3.4km/sとやや高い値が得られた。

基盤層の速度を測線北端で5.4km/s、南端で5.1km/sである。

ブーゲー異常図⁹⁾によると、今回測線沿いの大局的なトレンドとしては北から南に向かって低く(深く)なり、測線両端における基盤深度とは逆相関を示している。このことは、ひとつには、中間層の影響、特に、上総層群以浅と三浦層群以深の構成比(層厚比)の違いも考えられるが、もうひとつには基盤以深の密度の違いが考えられる。すなわち北で基盤以深の密度が高く、南で密度小さいことを示していると考えることができる。また、練馬区~杉並区にかけてはブーゲー異常のコンターがやや密になるが、これも測線北部から中部の基盤面傾斜と一致している。基盤P波速度については先に述べたように、北端で5.4km/s、南端で5.1km/sとした。測線北端については、平成14年度東京都地下構造調査では5.5km/s、平成15年度東京都地下構造調査では5.3km/sが得られており、今回の結果(5.4km/s)とはほぼ一致している。測線南端についても、関東平野南西部(川崎市・横浜市地域)の基盤速度は5.1km/s程度であり、今回の結果(5.1km/s)と一致している。

以上のことから、測線沿いに北から南へとP波速度が小さくなり、密度も小さくなると推定されるが、これは瀧瀬(1993)¹⁰⁾などの結果とも整合的であり、当地域の基盤地質とは、北東から南西にかけて三波川帯の変成岩から秩父帯、四万十帯に移ると推定されていることから、基盤速度・密度の変化はこれを反映したものであると考えられる。基盤速度・密度の変化する詳細な地点については、調査手法の限界をこえており不明である。

6 まとめ

今回の反射法・屈折法地震探査で判明したことを以下にま

とめる。

(1) 反射法地震探査

1) 調査地域は特に交通ノイズの大きい地域であったが、受振測線について交通量の多い環八通り・笹目通りをさけ、白子川、石神井川、善福寺川、神田川などの静かな側道を極力利用した。また、発振作業をできる限り夜間に実施することにより、受振ノイズレベルを低下させた結果、部分的ではあるが深部基盤までの反射波を得ることができ、地表から最大深度約3500mの先新第三系基盤までの地下構造(形状とP波速度)が明らかとなった。

2) C面(先新第三系基盤上面に対応)の深度は、調査測線の北端付近で約3200m、南端付近で約2800mであり、測線中央部で不明瞭である。不明瞭な部分を除き、基盤に不連続は確認できない。南部ではフラットであるが、測線中部から北部にかけては深度3000~3500mの起伏があり、杉並区南荻窪から高井戸(RP500~600を底とする)にかけて基盤の落ち込み、練馬区の光が丘公園周辺(RP120~200)で基盤の高まりがあると解釈される。

3) 測線中部の基盤面の凹部を充填している部分には反射が乏しく乱れている。この部分の区間速度の信頼性は低いが、3.2~3.4km/sであり、上総層群以前の堆積物であると推定される。

4) B面は、上総層群基底付近に厚く堆積する礫層の強反射波列の下部付近であり、おおよそ上総層群と三浦層群相当層の境界付近に対応すると推定される。既存の結果によれば¹¹⁾、三浦層群のP波速度は大略2.7~3.3km/sであり、速度情報からもB面~C面にかけてはこれに相当する地層であると考えられる。B面~C面にかけて、連続性がよくやや顕著な反射面が複数確認できる。測線両端部における他測線との接合は良好であり、測線北端で約1500m、測線南端で約1600mを示している。測線中央部については反射面が不明瞭であり、B面の解釈線を破線で表現した。

5) A面は、平成14年度、15年度東京都地下構造調査によると、上総層群と下総層群の境界または上総層群中の反射面に対比されており、今回の測線北端で連続する。A面~B面にかけてのP波速度は大略1.8~2.5km/sであり、速度が深さとともに漸増する結果が得られている。

6) A面についても、測線の一部記録がノイズ状況により不明瞭な部分があるが、測線全域でほぼ平坦、もしくは緩やかな北傾斜である。練馬区光が丘(RP160)周辺の中間層(上

総層群および三浦層群)が若干撓んでいるように見られるが、地表部付近には大規模な不連続は見られない。

(2) 屈折法弾性探査

7) バイブロサイズ車 4 台の夜間発振によって、最大到達距離 21km までの屈折波初動を確認することができた。5 つの発振記録から、ペーストアップおよび初動読取結果が表示され、基盤層上面からの屈折波を識別することができた。震源からのオフセット距離 7km 程度から基盤上面に相当する屈折初動が得られた。

8) レイトレーシング法によるフォワードモデリングで屈折波を解析した結果、堆積層 3 層 (基盤を含めると 4 層) に層区分された速度構造モデルで、初動走時をほぼ説明することができた。

9) 最上位の下総層群相当の速度は、1.75km/s である。上総層群上部 (A 面) に相当する屈折波は速度 1.9km/s であり、A 面～B 面にかけては、走時曲線の弓なりの形状から直線的に速度を漸増 (1.9 - 2.5km/s) させた。

10) 三浦層群相当層上面 (B 面) に対応する屈折波は、速度 2.6km/s であり、その下位の B 面～C 面にかけては、基盤屈折波のインターセプトタイムを合わせるために、3.2km/s まで直線的に速度を漸増させた。

11) 基盤岩の P 波速度は、既存の屈折法の結果を総合すると、関東平野の北東から南西にかけて基盤の地震波速度が減少していることが推定された。

12) 既存資料を参考にレイトレーシングによる試行錯誤的に求めた最終モデルでは、基盤上面 (C 面) 速度が、北端で 5.4km/s、南端で 5.1km/s である。これは基盤岩の地質帯の変化に対応していると考えられるが、その境界は現データからは明瞭ではない。

13) レイトレーシングによる最終モデルでは、基盤岩上面の深度は、測線北端で 3200m、測線南端で 2800m であり、測線中部で深度 3500m 程度に達する落ち込みが存在する。

14) レイトレーシングで求められた速度境界は、反射法断面図の反射面と対比することができ、反射法、屈折法でそれぞれ求めた速度は、解析精度の範囲内で整合している。

15) 総合解析により求められた堆積層の P 波速度は深度と共に漸増し、0.8km/s～3.4km/s を示している。上位から 0.8km/s (表層)、1.6～1.7km/s (表層基底～A 面：下総層群相当層と上総層群上部に対応)、1.8～2.5km/s (A 面～B 面：上総層群に対応)、2.5～3.4km/s (B 面～C 面：主に三浦層群相当層および下位層に対応) と求められた。

7 おわりに

3 年にわたる首都圏 (東京都) の反射法・屈折法地震探査結果から、深度が 3000m を超える深部基盤構造が明らかにされた。また、神奈川県や千葉県における既存反射法結果との総合的な解釈から、広域的な深部地下構造を大局的であるが把握することができた。

参 考 文 献

- 1) 中山俊雄、中嶋庸一 (2006) : 東京都区部および北多摩地区での反射法地震探査、平 16 都土技研年報
- 2) 岩崎貴哉 (1988) : 海底地震探査に基づく地下構造研究のための破線追跡プログラム、地震 2-41、263-266
- 3) 鈴木宏芳・小林健太郎 (1999) : 関東地域の坑井データ資料集、防災科学技術研究所研究資料、119、1-80.
- 4) 鈴木宏芳 (2002) : 関東平野の地下地質構造、防災科学技術研究所研究報告、63、1-19.
- 5) 埼玉県 (1998) : 平成 9 年度地震関係基礎調査交付金 荒川断層に関する調査 成果報告書
- 6) 笠原敬司 (2001) : 首都圏のバイブロサイズ反射法地震探査による地下構造調査、月刊地球、34
- 7) 東京都 (2003) : 平成 14 年度地震関係基礎調査交付金関東平野 (東京都) 地下構造調査 成果報告書
- 8) 東京都 (2004) : 平成 15 年度地震関係基礎調査交付金関東平野 (東京都) 地下構造調査 成果報告書
- 9) 地質調査所 (2000) : 日本重力 CD-ROM.
- 10) 瀧川一 (1993) : 基盤構造の探査、地震、2-46、351-370.
- 11) 鈴木宏芳 (1996) : 江東区深層地殻活動観測井の作井と抗井地質、防災科学研究所研究報告、56、77-123.