

バイプロサイスによる大都市深部地下構造調査

(株)地球科学総合研究所
井川 猛

1. 初めに

小林啓美先生に初めて、仕事の間でお目にかかったのは、昭和 60 年(1985 年)の自然災害特別研究、「地震動予測精密化のための地下深部構造調査の研究」の北海道長沼の現場が最初です。この調査は、昭和 61 年度にも苫小牧市域で実施され、成果は、参考文献 1. に詳述されています。このプロジェクトは、当時東京大学地震研究所の浅野周三先生を代表者として実施されたもので、小林先生他の多くの専門の先生方が参加されている委員会によって運営されていました。私どものような石油探査のための反射法地震探査を専門とするものにとっては、地震動予測という新しい適用分野に参加する機会を得たわけです。しかし、それまでのこの分野における地下構造探査は、主に発破震源を用いた屈折法が用いられており、反射法は地下の堆積構造のパターンを示すもので、地質解釈には向いているが、物理量(地盤の弾性波速度など)を求めるのには向かないと思われていましたが、特に小林先生、浅野先生などの熱意により、地震動予測のための「バイプロサイスを用いた反射法、深部地下構造調査」が試みられることになったと思います。

上記のプロジェクトの成果を契機に、その後、不整形地盤による地震動への影響に関する研究調査、例えば

- ・ FBR 免震システム確証試験、(財)電力中央研究所、平成 3 年~4 年、：東松山地域における調査研究：
- ・ 地震波伝ば特性評価法調査、(財)原子力発電技術機構、
現 独立行政法人 原子力安全基盤機構、平成 6 年~平成 15 年、
：神戸地域、北関東地域における調査研究：

や、平成 7 年(1995 年)の兵庫県南部地震後の、活断層調査、盆地の地下構造調査などに、バイプロサイス反射法が多数使用され、それぞれの委員会の場所で、小林先生の励ましの言葉を頂いたことに、改めて感謝の意を表します。

以下には、上記のようなプロジェクト遂行の中で、特に都市部におけるバイプロサイスによる地下構造調査について直面した幾つかの技術的問題を論じたいとおもいます。

2. 地震動と地盤構造

地震波が、ある堆積盆地(大きな都市は、大抵堆積盆地に発達している)に入ってきた場合、その盆地の基盤岩(代表的には、S 波速度で 3km/s 程度の岩盤、P 波では、5km/s 強、花崗岩や中・古生代の岩盤であることが多い)とその上部の堆積層の速度のコントラスト、および堆積層の厚さに依存して増幅され、場所によっては、大きな地震動が起こる。また、盆地の

基盤岩の分布深度は均一とは限らず、一般には、盆地周辺では浅く中央では深く、盆地周辺や、場合によっては中央でも埋没した古い断層がある事もあり、基盤深度が急変している場合もある。このような不整形な基盤によっても特定の場所で、地震波の特異な増幅がおこると言われている。

従って、盆地の地震動の予測を行うには、

- ・ 基盤岩深度の分布
- ・ 基盤岩の S 波速度
- ・ 堆積層の S 波速度の深度・空間方向の分布

を求める必要がある。

これらの正確な情報は、ボーリングを行い、直接的に P/S 検層や VSP (Vertical Seismic Profiling, 垂直速度測定) を行えばよいのであるが、盆地において多数のボーリングを行うことは経済的に不可能であり、従って地表からの物理探査を行わざるを得ない。基盤岩深度の分布を空間的に求める一つの方法としては、重力探査を行うことであるが、これは基盤岩分布深度の相対的な変化を把握し、予備的な調査として大局を把握するには有効であるが、精密な深度分布決定は困難である。

屈折法探査は、基盤岩速度と、基盤岩の分布形状の大局を把握するには有効であるが、複雑に変化する基盤形状を精密に把握するのは困難である。少なくとも、従来行われてきた粗い受振点間隔 (500m ~ 1000m) では無理である。また、多層構造を示す堆積層中の速度変化を精密に求めることも困難である。

一方反射法では、堆積層の構造とその速度変化を比較的正確に求めることが出来、また、基盤岩の形状も、速度コントラストが大きい場合は精度良く認識できる。しかし、基盤岩の下に更に反射面がない場合は、基盤岩速度を求めることはできない。

この両者の利点を生かし、欠点を補う方法として、

「反射法による稠密な受振器展開 (25 ~ 50m) を生かして、同時に稠密受振器展開による屈折法を併用する調査：反射法・屈折法併用調査」

が考えられた。また、屈折法では、対象とする基盤岩深度の数倍程度の震源距離を必要とするが、バイプロサイス震源波の最大到達距離は、対象深度を 3km とすれば、20km 程度を必要とする。

このような観点から最初に行われた、埼玉県嵐山町における実験調査について、概要を述べる。

3. バイプロサイス超多重発振による稠密観測屈折法と反射法の併用調査
前項で述べた方法を確認するため、1997 年に埼玉県比企郡嵐山町で実験を行った (Fig.1、測線図参照)
反射法としての仕様は下表のごとくであるが、この測線のほぼ両端にて、バイプロサイスの超多重発振 (50 ~ 100 回のスイープのスタッキング) を行い、屈折法記録を取得した (Fig.2,3 参照)。これによれば、昼間の高ノイズを避けて、夜間での発振を行えば、都市部でも、20km くらいの展開の屈折法が可能であり、基盤深度 3km 程度までの反射法・屈折法併用調査が現実的であることがわかった。

また、反射法断面図 (Fig.4 参照) によれば、南端部に露頭として見られる基盤岩 (三波川変成岩) は、北側に緩やかに傾斜しており、測線の 3 分の 1 くらいから、急速に深くなり、北端付近では追跡できなくなる。また、基盤岩上の堆積岩は複雑な褶曲構造を示しており、その速度は、Fig.6 の代表的な場所での反射法速度解析によれば、上部から基盤まで、約 2.0km から 4.0km まで変化している。屈折法の解析は、この反射法から読み取れる構造を初期モデルとして、レイトレーシングによる Forward Modeling を行った (Fig.5)。ここでわかるように、基盤岩の同定とその速度は、反射法だけではわからず、また屈折法だけでは、基盤岩上の複雑な構造を読み取れない。両者の併用が有効な例である。この測線の北端では、断層とその運動に伴い基盤岩が非常に深くなっていることが想定されるが、これを明確にするためには、北部への調査測線の延長が必要である。

その後、文部科学省交付金による地震動シミュレーションのための地下構造調査として、川崎市 (小林啓美委員長)、千葉県 (瀬尾和夫委員長)、東京都 (工藤一嘉委員長) 他多くの地下構造調査でこの方式が採用されるようになった。

4 . S 波の問題

前項までの議論では、反射法、屈折法ともに P 波による探査について述べているが、地震動予測のためには、S 波の構造が必要である。この為には、従来から、反射法や屈折法で P 波構造が分かるとすれば、微動探査を行い、そのデータから S 波構造が求められてきた。しかし、微動探査データは、完全な水平多層構造を前提に解析されており、構造急変帯での適用はむずかしく、S 波による反射法や屈折法が出来れば、理想的である。S 波のバイプロサイズも存在するが、大型のものについては、舗装道路上での使用は実際的ではないとおもわれる。中型の S 波バイプロサイズ (米国 IVI 社の MINIVIB : ミニバイブ) は日本にも導入されており、使用実績もある。また、(株)地球科学総合研究所の開発した油圧パター震源 (加速式重錘落下装置) の S 波への適用も試みられているが、何れも、地下へのエネルギー透過力は、せいぜい 1 km 程度である。しかし、基盤岩が浅いところなどでは、堆積層中の S 波速度を連続的に求められるという利点がある。Fig.7 は平成 13 年度、地震波伝ば特性評価法調査、北関東 (成田地域) における S 波反射法調査風景であり、Fig.8 はその現場記録の一例である。

さて、深いボーリングが存在すれば、この中に 3 成分の受振器を降下し、地表においてバイプロサイズを発振させ波動の伝播速度を直接観測計測することが出来る。このとき、先に述べた S 波震源でも反射法と比べて伝

反射法調査仕様

測線長 : 14.7km(受振点)

記録システム

デジタルテレメトリ : 588ch

サンプルレート : 4msec

震源

18トンバイブレータ : 4台

スイープ数 : 5 ~ 20

標準発振間隔 : 100m

受振器

固有周波数 : 10hz

受振点間隔 : 25m

受振器展開長 : 6000m

播距離が半分なのと、孔中ではノイズが少ないので、2000m くらいの透過力はある。Fig.9 は、大林組技術研究所、地球科学総合研究所、防災科学技術研究所の共同実験による府中地殻活動観測井における VSP 調査から得られた V_p, V_s である。どちらも約 2100m の深度で急速に速度が増加しており基盤岩に到達したことが分かる。 V_p については、堆積層中で 1.6km/s ~ 3.2km/s の速度を持ち、基盤岩の速度は 5.0km/s 強となる。4.0 km/s 付近の速度は、基盤岩の凹部を埋める基底礫岩や基盤岩の風化層が薄く分布することがあり、データの精度はあまりない。 V_s については地表付近で 0.3 km/s、基盤岩上部で 1.5 km/s 程度である。基盤岩では約 3.0 km/s となる。Fig.10 には V_p, V_s の分散図を示す。これによれば、 V_p/V_s の直線的関係は大局的にはよく成り立っており、 V_p から V_s を推定するのに有効である。一つの堆積盆地では、一つの関係式で代表できる可能性があり、そうであれば、 V_p の構造がわかれば V_s 構造も比較的精度良く求められる可能性がある。但し、地表から 100m 程度までの極浅部では、数十メートル毎秒の V_s が観測されることもあり、この低速度の V_s が地震動に大きく影響することが考えられ、地震動予測においてはその分布について個別に調査する必要があるとおもわれる。

5. 堆積盆地の特性

関東平野の多くの地域では、前項の府中のボーリングで示されるように、堆積層と基盤岩の速度コントラストが非常に明瞭である。しかし、小林先生がよく指摘されていたように、関東北部などにおいては、基盤岩上に 4.0 km/s 程度の速度を持つ中間層が伏在しているところがある。また、盆地周辺の火山活動により、火山岩類が盆地内部に流れ込んでいるような地域もあり、このような場合、基盤岩と堆積層の境界は不明瞭になる。このような構造における地震動の予測方法については、今後の重要な課題となると思われる。

また一方、先に述べた表層付近の S 波低速度異常の分布については、虱潰しに調べなくてはならない問題と思われる。

6. 終わりに

バイプロサイスによる反射法とその関連技術を用いた地震動予測のための地下構造調査が始まってまだ日も浅い。反射法がこの分野で更に貢献するためには、その工学的利用法をさらに開発してゆく努力が必要とおもう。このことは、小林先生が最も期待しておられたテーマの一つと考えている。

以上

1. 浅野周三研究代表 (1989) : 地震動予測精密化のための地下深部構造の研究 . 文部省科学研究費自然災害特別研究成果 No. A-63-3 (自然災害科学総合研究班)
2. 井川 猛他 (1998) : 関東平野北西部の反射法地震探査による地下構造、地球惑星科学関連合同大会予稿集、p370、SL-p013

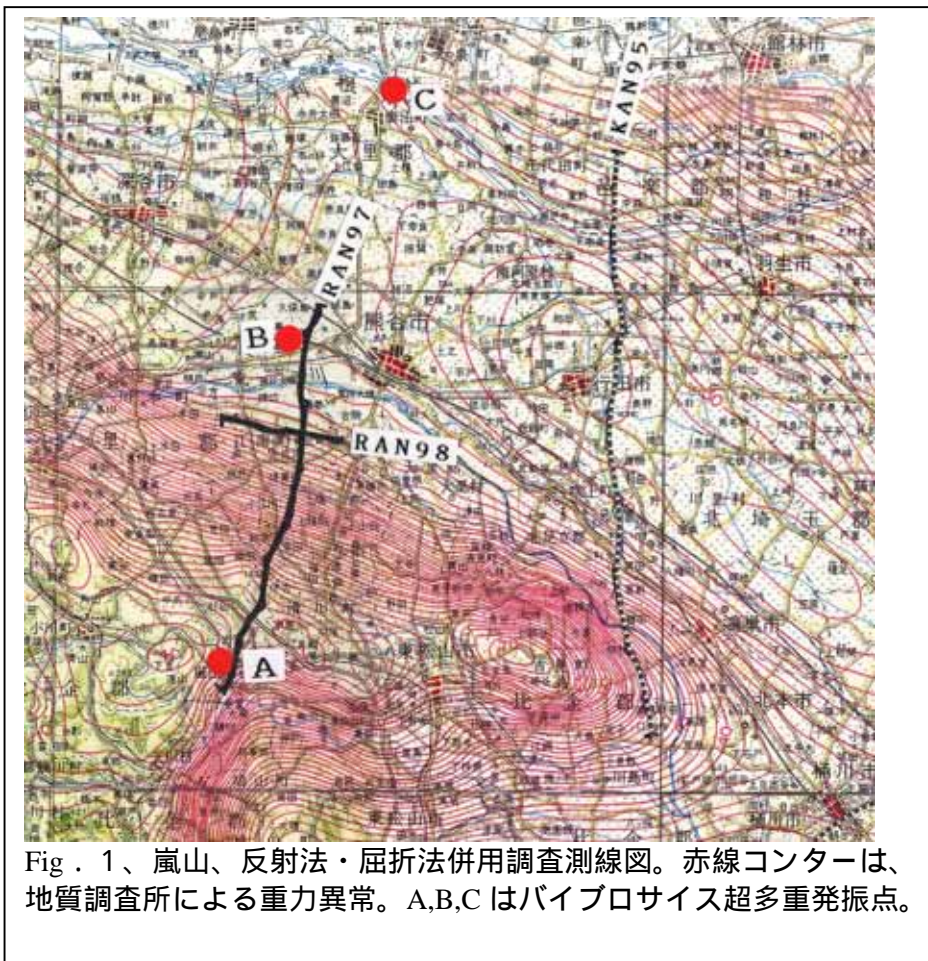


Fig. 1、嵐山、反射法・屈折法併用調査測線図。赤線コンターは、地質調査所による重力異常。A,B,C はパイプロサイス超多重発振点。

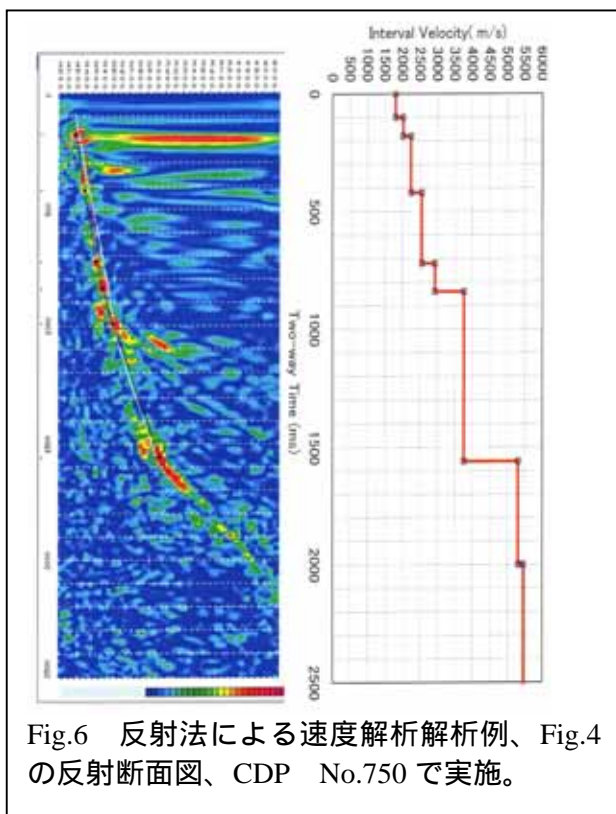
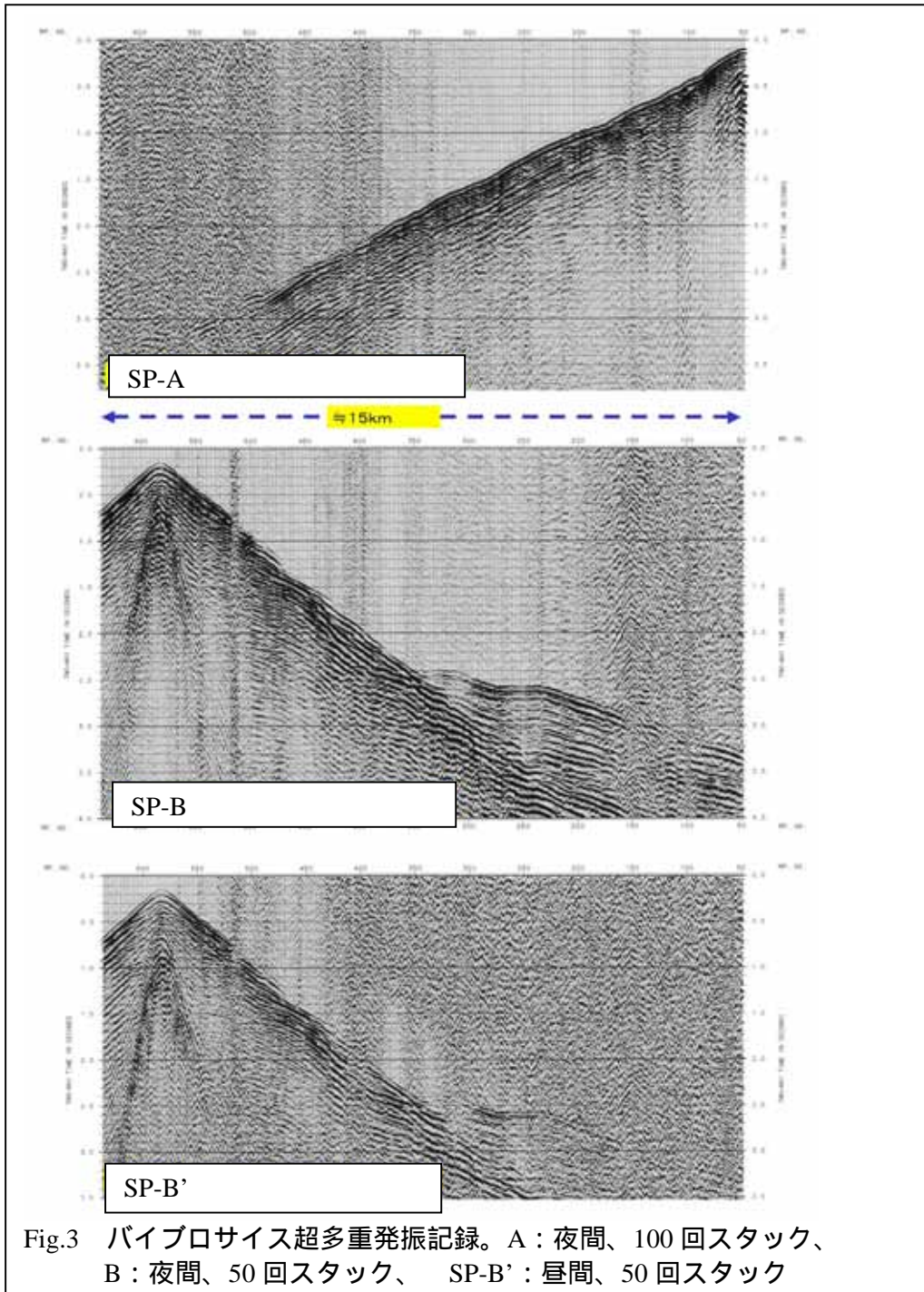
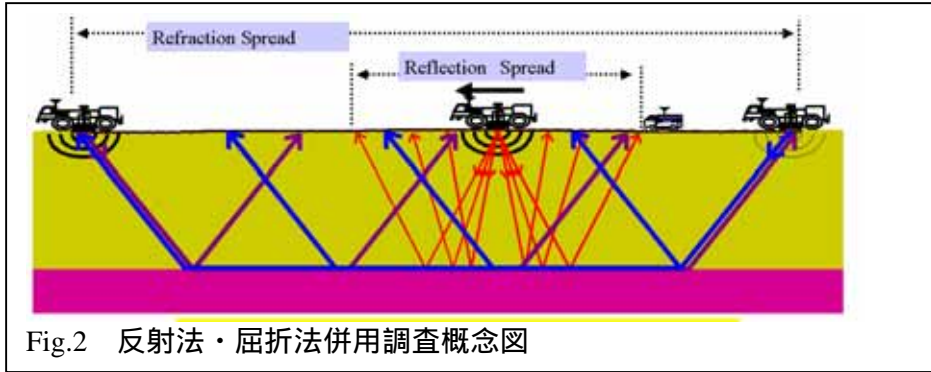


Fig.6 反射法による速度解析解析例、Fig.4の反射断面図、CDP No.750 で実施。



パイプロサイス夜間発振



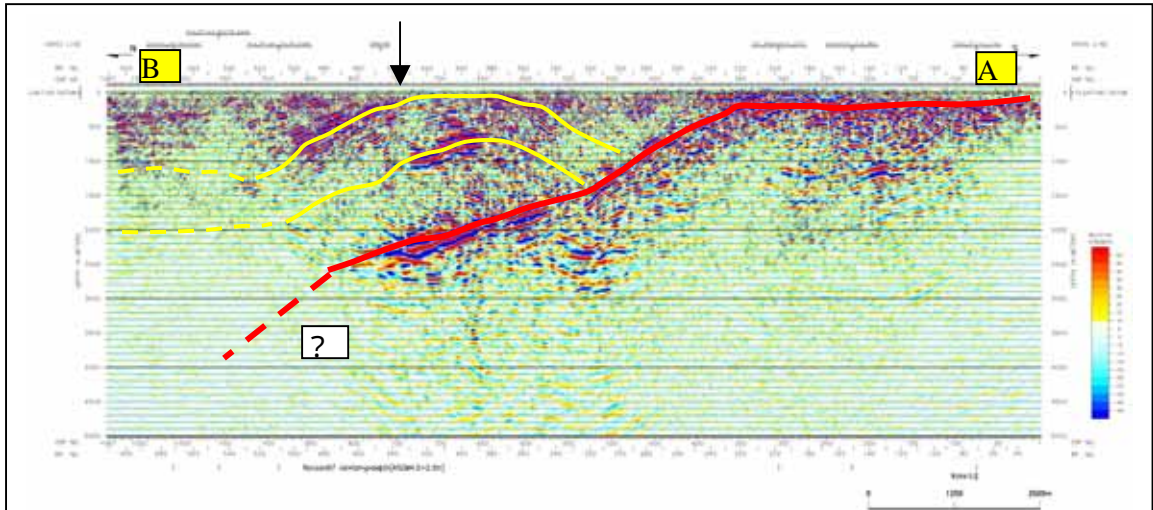


Fig.4 反射法断面図。測線右端（南）には基盤岩露頭（三波川変成岩）が見られる。仙測線左端は基盤の更なる落ち込みが想定される。

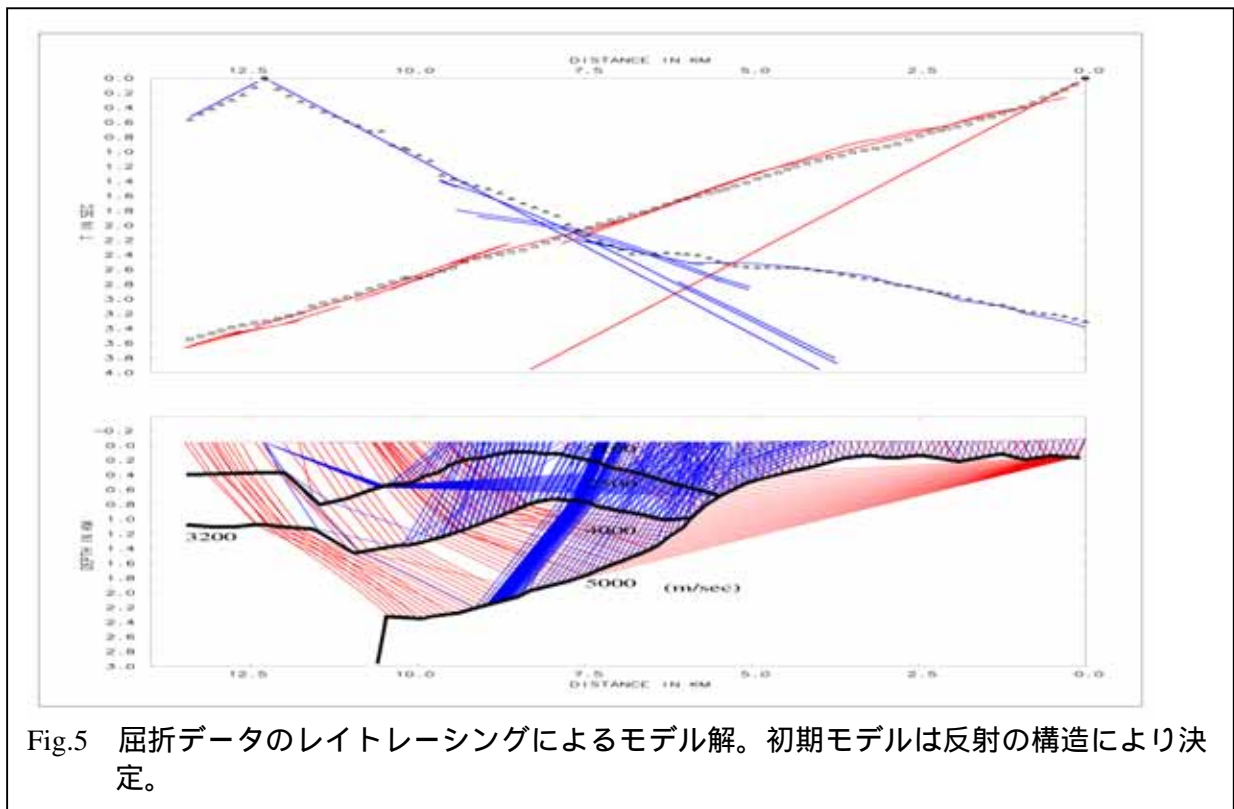


Fig.5 屈折データのレイトラッキングによるモデル解。初期モデルは反射の構造により決定。



Fig.7 平成 13 年度、成田地区、地震波伝ば特性評価法調査における S 波ミニバイブ実験。中央は小林先生。右上はミニバイブの S 波プレート。

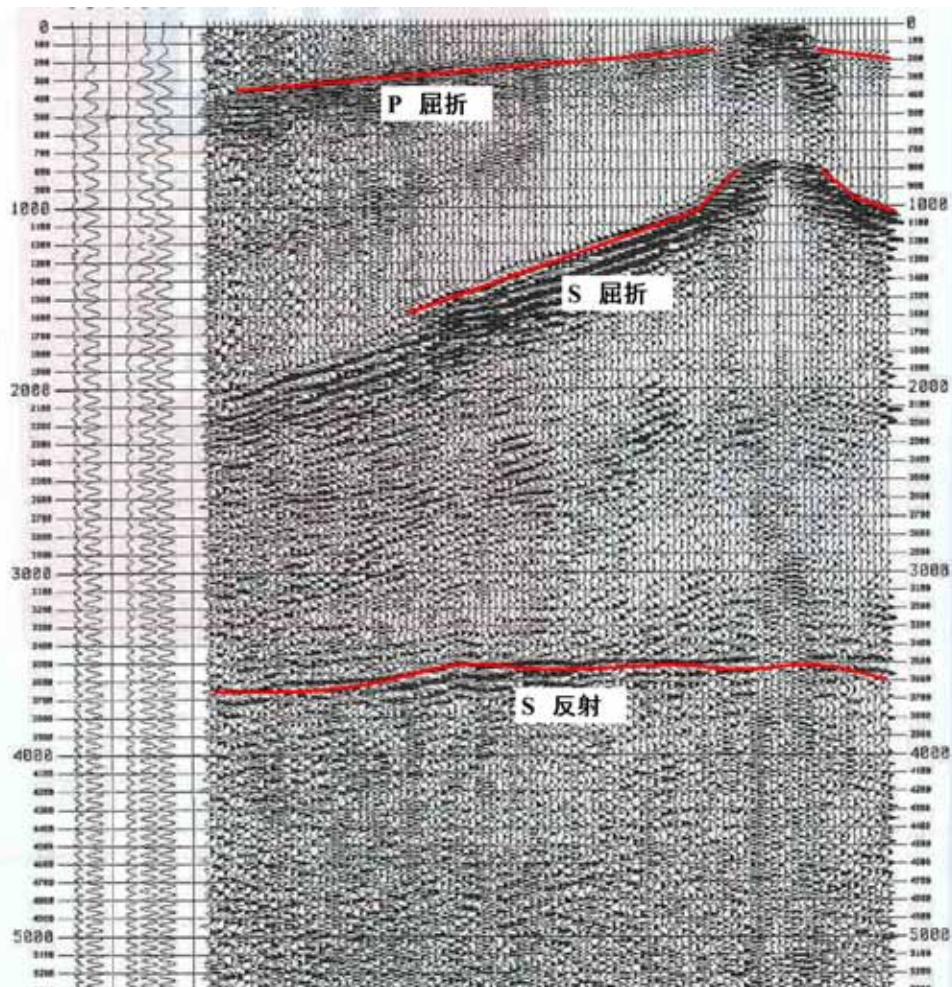


Fig.8 成田地区における S 波ミニバイブ源記録例。

