

S 波ランドストリーマーの開発と都市域表層地盤構造調査への適用

稲崎 富士*

Development of an S-wave type Land Streamer tool and its application to the near-surface seismic reflection surveys in urban areas

INAZAKI Tomio*

要 旨

舗装道路においても効率的かつ高分解能で反射法地震探査を実行できる、S 波ランドストリーマーと称する計測ツールを開発し、都市域の表層地盤構造調査に適用した。開発したランドストリーマーは、非伸縮性の荷受け用ベルトを牽引部材として使用し、その上に振動を感知するセンサユニットを等間隔で配置してある。センサユニットは地面と堅固に固着されてはならず、金属製のベースプレートを通じて面的に接触しているだけであるが、ランドストリーマーは表層地盤内を伝播する微弱な信号も捉えることができる。地面と固着した部分がないので、ツールを人力でも容易に牽引移動させることができる。この特長が現地での大幅な作業性の向上を保障し、コンパクトな形状と相まって都市域での表層地盤探査の適用拡大をもたらした。

これまで都市域を主体に国内 25 箇所で同ツールを活用した表層地盤調査を実施してきた。その結果、深さ 60m 程度までの領域の詳細な地盤構造を把握することが可能であることが実証された。今後、都市開発分野のみならず、地盤環境調査、地震防災調査等への活用が期待される。

キーワード: ランドストリーマー、布ベルト、S 波、浅層反射法探査、舗装

Synopsis

Shear wave type Land Streamers were developed and successfully applied to high-resolution shallow seismic reflection surveying at paved areas. The Land Streamer is featured by non-stretch woven belt which acts as a towing member but also as a module to mount geophone units. Whereas each geophone unit is placed on the paved surface through a metallic baseplate instead of firm planting to the ground, the Land Streamer tool provides comparatively clean data even on the pavement resistant to traffic noises. Because it is easily towed by a vehicle or by hand, the tool leads to high performance in field measurements and resultant cost-effectiveness of high-resolution reflection surveys. Thus, the tool is capable of expanding the opportunity for S-wave reflection surveys in urban areas where many surfaces are paved and traffic noise is severe.

A series of high-resolution S-wave reflection surveys on paved areas delineated detailed structures of surface layers shallower than 60 m, and proved the wide applicability of the tool to engineering, environmental applications, and earthquake disaster prevention projects.

Key Words: Land Streamer, woven belt, S-wave, shallow seismic reflection survey, pavement.

*: 独立行政法人 土木研究所 つくば中央研究所 技術推進本部 特命事項担当 上席研究員

1. はじめに

地盤工学が対象とする地下 100m 程度までの地圏表層の地質構造を探索する反射法地震探索を浅層反射法と称する。反射法地震探索は、弾性波を用いて地下構造を推定する物理探索手法の一種であり、石油や天然ガスなどの資源探索の分野で古くから利用されてきた。海域の構造調査に用いられているマルチチャンネル音波探索も反射法地震探索の一種である。

反射法地震探索は 1920 年代に技術開発が開始され、1930 年代には石油探索の主流を占めるようになった。当時は 50cm 近い大きさの機械式地震計を使用し、映画用フィルムに波形を焼き付ける光学式記録計が用いられていた。第二次大戦後のトランジスタ技術の開発にともない、1960 年代には波形記録を磁気テープに書き込み収録するデジタル探鉱機が普及し始めた。さらに 1970 年代以降のコンピュータ技術の発達とそれと連動したデータ処理技術の進歩は、反射法地震探索のイメージング精度を飛躍的に向上させるとともに、物理探索の中心的な地歩を固めることに貢献した。我が国でも 1950 年代後半にアナログ式の地震探鉱機が導入され、石油・天然ガス調査に反射法地震探索が利用され始めた。その後 1970 年代後半に国産のデジタル探鉱機が開発され、土木分野でも反射法地震探索の適用が試みられはじめた（たとえば大島ほか、1977）。1970 年代後半から 1980 年代前半にかけては、わが国における浅層反射法の揺籃期とも言える時期で、旧鉄道技術研究所、旧地質調査所、そして土木研究所などで、技術開発と浅部地質構造調査への適用が精力的に進められた。なお「浅層反射法」は、田ほか（1965）が使い始めた用語で、彼らは“reflection method for shallow layers”と英訳しているが、最近では海外を含めて、“shallow seismic reflection method”と称されることが多い。

土木研究所では筑波研究学園都市への移転に伴い、1978 年にアナログ探鉱機を導入し、浅層反射法探索技術の開発研究を開始した。しかし導入した装置はチャンネル数がわずか 6ch しかなく、実験は難渋を極めた。研究開発当時、他研究機関も含めて浅層反射法探索・解析技術の研究蓄積はほとんどなく、従来の石油資源探索に適用されてきた反射法地震探索のデータ取得・処理手法がそのまま適用されていた（たとえば石井、1974）が、満足できる成果を得られない時期が続いた。1982 年に地質調査所では浅層反射法探索用の新しいデジタル探鉱機を導入し、浅部構造のイメージングに成功した（渡辺・加野、1982）。彼らの成功につられて資源調査を実施して

きた民間各社も類似探索システムを導入し、浅層反射法探索技術開発に参入した。一方土木研究所では S 波を利用した浅層反射法探索に研究開発目標を絞り込んだ。これは、S 波が工学的示標として有用であること、表層地盤では P 波に比べ S 波速度は 1/10~1/5 程度しかなく、波長が短くなるため高い分解能が期待されることを考慮してのことであった。1982 年に土木研究所構内地質野外実験場で S 波浅層反射法探索実験を実施し、初めて S 波による浅部構造イメージングに成功した（稲崎、1983a）。その後名古屋港 9 号地において大規模道路計画の基礎地質調査の一環として S 波浅層反射法を適用し、深さ 40m 付近の沖積基底礫層を明瞭に捉えることができた（稲崎、1983b）。S 波探索という未開拓の分野で、従来の反射法探索技術の桎梏に囚われず独自のデータ取得手法を構築したことがこの成功をもたらした。特に高分解能での探索、すなわち 2m ないし 2.5m 間隔の地震計配置による計測は、当時の浅層反射法探索の一般的な受振点間隔と比べると 5 倍ないし 10 倍程度の高密度であり、きわめて特徴的な計測条件であった。現在においても、活断層調査などに適用される浅層反射法探索の受振点間隔は 5m~10m であり、この先行性は失われていない。さらに稲崎（1985）は、S 波浅層反射法が深さ 50m 程度までの浅部地盤構造探索に有効であることを示し、土木分野への適用推進の契機となった。土木地質調査に携わってきた民間各社も、相次いで浅層反射法探索システムを導入し、土木分野へ S 波浅層反射法探索を適用し始めた。

1995 年には兵庫県南部地震が発生し、都市型災害の深刻さと規模の甚大さを改めて教訓づけたが、この震災を契機に反射法地震探索の適用が一気に拡大し、同手法は活断層調査や深部地殻構造調査など地震防災分野において標準的な手法となった。地震防災にかかわる調査は、人口や社会資本が集中する都市域においてむしろ重要な役割を果たす。しかし都市域は交通振動や産業活動に伴う振動雑音レベルが高く、微弱な振動を取り扱う反射法地震探索にとっては計測条件が厳しい。地表部が高度利用されているので測線設定にも困難が伴う。さらに都市域は地表がほとんど舗装で覆われているため、従来のスパイク型地震計を設置することができない。このような測定条件の厳しさは、都市域での反射法地震探索、特に浅部を対象とした反射法探索の適用機会を狭めていた。これに対し 1980 年代後半から 1990 年代初頭にかけて、都市域の大深度地下空間開発の機運が高まり、浅層反射法探索技術に対してもさまざまな技術的工夫改良が加えられ、適用が進んだ。土木研究所においても 1987 年に建設省総合技術開発プロジェクト「地下空間の利用技術の

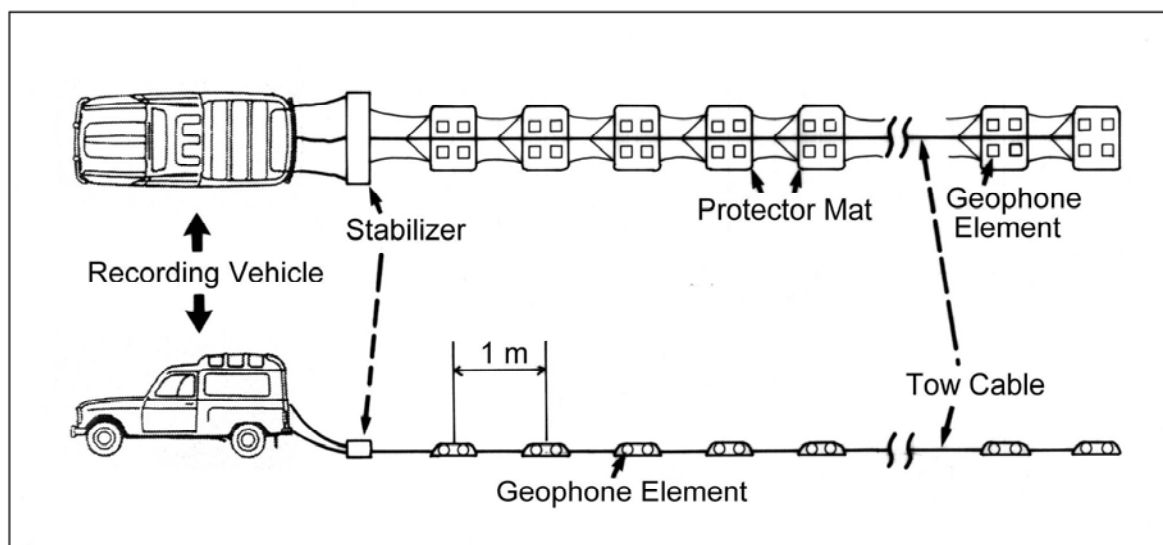


Fig. 1 Layout of a proto-type Land Streamer (revised from Inazaki, 1992b)
 図-1 プロトタイプランドストリーマーの概要(稲崎, 1992b を一部改変)

開発」が開始されたが、その一課題として都市域での地盤調査技術の開発を推進した。その技術開発の中で、筆者は改めて S 波浅層反射法探査技術の開発に取り組む機会を得ることができた。この技術開発では、まず当時の都市域での浅層反射法探査の適用事例を聞き取り調査することから開始した。その結果、各社の測定条件の違いが品質に大きな影響を与えていることが明らかにされ、高品質の探査結果を得ることができるよう、統合的な浅層反射法探査解析マニュアルを作成・整備した(稲崎, 1992a, 1993)。

さらに、適用上の障害となっていた舗装路面上での地震計設置方法、展開の移動方法について以下に示すような解決策を考案し、専用計測ツールとして「ランドストリーマー」(Fig.1)を開発した(稲崎, 1992b)。

陸域での反射法地震探査では、あらかじめ多数の受振器を事前に設置し、その中から特定の範囲の受振器群を切換えスイッチを介して選択し収録する方法がとられてきた。しかし都市域における探査では事前に長い測線を設定することが困難であるとともに、道路等を占用する場合、その時間をなるべく短縮することが求められていた。ランドストリーマーは、一定数の受振器群を一本のケーブルに一体化したシステムであり、車で牽引・移動することができる。これを利用すれば占用面積(区間)を最小限にとどめることができ、都市域での適用性を大幅に拡大することが可能になると期待された。しかしその当時土木研究所では 16bit A/D, 24ch 仕様の探鉱機しか保有しておらず、開発経費も不足していたため、このラ

ンドストリーマーはプロトタイプを試作するだけで終わった。幸い 1993 年に施設整備費が認められ、その中で多チャンネルのデジタル探鉱機を導入するとともに、実機タイプのランドストリーマーを開発・導入することができた。同ツールは 93 年度末に導入されたが、同時期に導入したマルチチャンネルの音波探査システムや検層ツールの適用評価を優先したこと、95 年には兵庫県南部地震が発生しその被害調査研究に追われたこともあり、ランドストリーマーの本格的な運用は 1997 年になってから実施された。1997 年の現地適用実験は、同ツールが幹線道路脇という高い交通振動雑音条件下でも高品質・高分解能の地下イメージングが可能であることを示し、同ツールの有用性を実証するとともに都市域浅層反射法探査における画期的な成功例となった(稲崎, 1997)。その後、現在に至るまで国内 25 サイトでランドストリーマーを利用した浅層反射法探査の実績を積み上げてきた。その多くは筆者の併任先である旧地質調査所とその後身の産業技術総合研究所における活断層調査研究、地下構造調査への活用であった。また 2002 年からは民間 5 社と共同研究を実施し、同ツールの普及・民間への技術移転を図ってきた。

以下、実機タイプのランドストリーマーツールの特長と、いくつかの適用事例を紹介する。

2. ランドストリーマーツールの開発経緯とその特長

2.1 反射法地震探査におけるデータ取得技術

反射法地震探査では反射波信号の強度を高めるために共通中点重合法（Common Mid Point (CMP)重合法）という特徴的な技法が用いられる。そして CMP 重合データを効率的に取得するために、ある起振点での測定が終了すると Fig.2 (a) に示すような震源と地震計類一式を一受振点間隔分次の展開まで移動し収録範囲をオーバーラップさせて測定を繰り返すという冗長な測定方法がとられる。陸域探査では、通常多数の地震計をあらかじめ測線上に展開しておき、震源のみを移動させ全ての受振点のデータを収録するか、あるいは震源近傍にある限られた受振点群からの信号のみを収録する。浅層反射法探査では、遠隔位置にある受振点からの信号は基本的に使用しないので、通常は後者を採用し、切替えスイッチ（ロールアロングスイッチ）を介して収録受振点群をシフトさせながらデジタル探鉱機の収録チャンネル数分のデータを収録する。同図 (b) に示すように、起振点を S1, S2...と移動させながら測定すると起振点と各受振点との中点の位置に受振点数と同数の反射点が生じる（同図 (c)）。通常波形記録は起振点ごとに表示されている

（共通起振点記録）が、それから反射点が共通な波形記録を選択する。これが共通中点重合法であり、波線経路は同図 (d) のように、またこの波線経路に対応する波形記録（共通中点記録）は Fig.2 (e) のようになる。図 (e) に示すように反射波の出現走時はオフセット距離に対応して異なっているのでこのままでは同等に取り扱うことができない。しかし反射点までの地盤速度が想定できればゼロオフセットすなわち起振点と受振点とが同一地点にある場合の走時まで各反射波をシフトすることが可能である（同図 (f)）。この走時補正を NMO（Normal MoveOut）補正という。NMO 補正によって出現走時がそろった反射波は足し合わせることによって強調される（同図 (g)）、反対にランダムに出現すると想定されるノイズ成分は相対的に抑制される。

前述のように、通常の反射法地震探査では、事前に多数の受振器群を測線上に展開しておき、震源を移動し各起振点での起振記録を収録する、という方法が一般的である。しかしこの手法は都市域での浅層反射法には適した手法とは言いがたい。第一に、浅層反射法では起振点-受振点距離（オフセット）の大きなトレース（個々の記録波形）は必要としない。オフセットは最大でもせいぜい探査対象深度と同程度かその2倍まで、すなわち100m程度以下であることが望ましい。第二に、都市域では探査のために地表を長期間占有することが困難であるとい

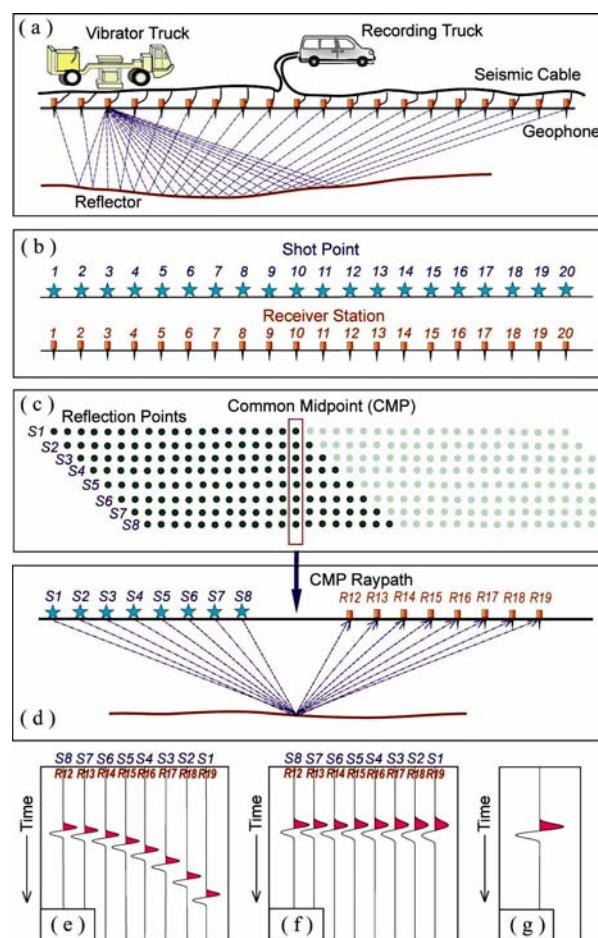


Fig. 2 Outline of seismic reflection survey method

図-2 反射法探査手法の概念図

うことを考慮する必要がある。保安管理の点でも、高価格の地震計やケーブル類を残置しておくことにはリスクが伴う。以上の制約に適合するように、現場計測システムをコンパクト化して占有区間・占有期間を可能な限り短くし、現地作業性の高いツールを開発することが必要と考えた。その際まず参考にしたのが、海域でのマルチチャンネル音波探査に使用されてきたストリーマケーブルである。ストリーマーには圧力感知するハイドロフォンセンサが一定間隔で組み込まれている。船尾から曳航し、航行しながら観測する。曳航によるノイズは振動ノイズがほとんどで圧力変化を伴わないため、移動しながらでもデータを取得することができる。その結果陸域探査に比べて極めて高い効率で探査作業を実施できる。このストリーマケーブルを基本とし、既往の類似ツール・アイデアを参照した上で筆者は独自のツールとしてランドストリーマーを考案した。

2.2 既往関連ツールとランドストリーマー開発の経緯

陸域探査用のストリーマー様ツールの嚆矢は、Kruppenbach (1975) らの“Towed land cable”まで遡ることができる (Fig.3a) . 彼らのツールは、ジンバルタイプの鉛直成分地震計を内蔵したセンサをセクションケーブルから分岐させた構造で特徴付けられる。このセクションを多数接合して1本の牽引型ランドストリーマーケーブルを構成する。しかしこのアイデアは実際に使用された形跡はなく、実用化には至らなかったようである。このジンバル方式の地震計を使用するという方式は、van der Veen (1998) らの“land-streamer”にも採用されている (Fig.3b) . 彼らは、雪上での反射法地震探査用に開発され、実際に極地で使用された“snow streamer” (Eiken, et al., 1989) を参考にP波浅層反射法探査用のツールを開発した。彼らのツールでは、鉛直成分地震計をジンバル方式で内蔵したユニットをケーブルから分岐させ、ストリーマー全体をゴムシートで覆い、シートの荷重で地震計のカップリングを確保した。さらにそのゴムシートを牽引部材とし、センサを覆うことで空中伝播ノイズの低減にも効果があったとしている。これらのツールは、基本的に以下の点で共通した構造を有している。すなわち、ジンバル方式の鉛直地震計を使用していること、主ストリーマーからセンサ部を分岐させていること、である。ただし牽引部材については、Veen らは主ケーブルではなく、ゴムシートを用いている。

一方国内では、渡辺ほか (1985) が牽引型の受振器列のアイデアを提案した (Fig.3c) . 内部に地震計と重石を組み込んだ地震計収納体 (受振器ユニット) は下面が凸状の紡錘形を呈し、「起き上がり小法師」のように、常に地震計を所定の方位に制御することができるという。各ユニットには連結用の留め具がつけられており、ユニット間を鎖あるいはロープで接合することで一体化させ、連鎖型の受振器アレイを構成することができる。しかしこのツールも考案で留まり、実用化に至らなかった。西田ほか (1989) は、都市域での浅層反射法探査を重ねる中で、重石に従来の地震計を据え付け、それを舗装路面上に設置するだけで従来と同等の信号を得られることを示した (Fig.3d) . さらに車輪付の懸架装置を考案し、それに重石型地震計を装着して設置・移動の効率を上げようとする試みが実施された (黒岩ほか, 1993) . しかしこの懸架装置は多数の地震計を移動させることには適しておらず、調査現場に大がかりな資材を展開することで機動性が低下することから普及することはなかった。

前述のように、1987年に開始された地下空間の利用技術の開発に関わる建設省総合技術開発プロジェクトの

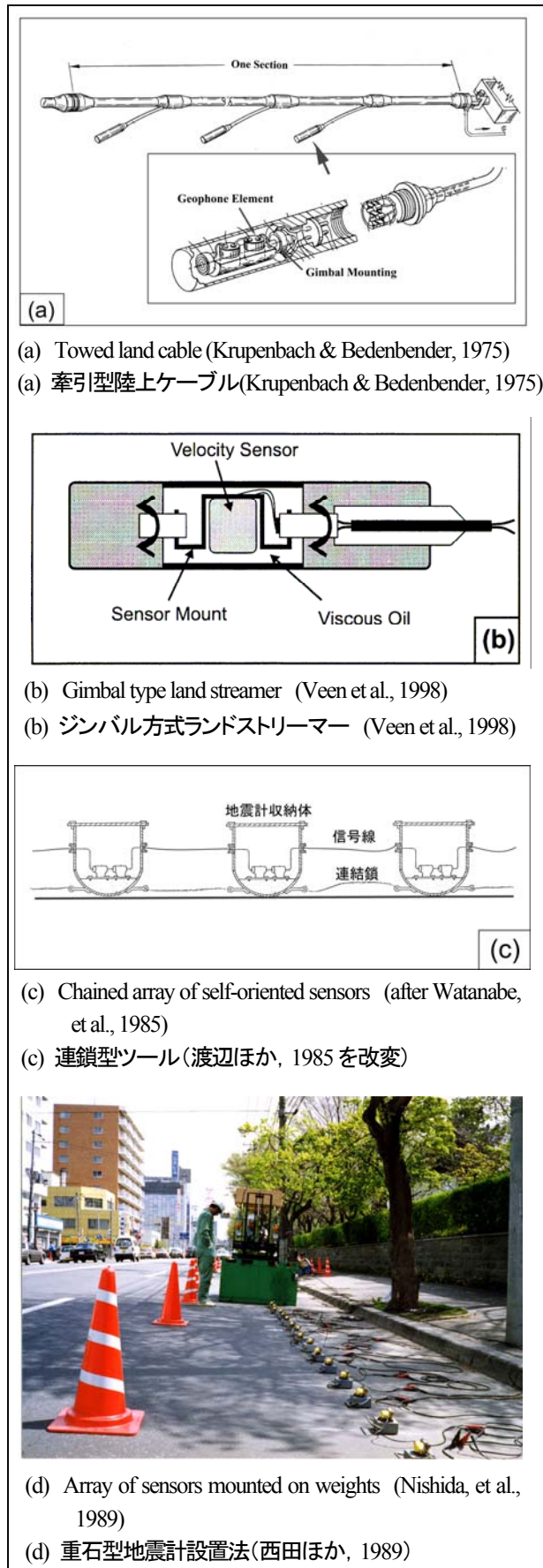


Fig. 3 Similar tools proposed in previous works
図-3 既往類似ツール

一環として、筆者は都市域における新しい地盤調査技術の開発に携わった。このなかで上述した既往技術のレ

ビューを行ない、主として渡辺ほか（1985）と西田ほか（1989）のアイデアを参考に、都市域での浅層反射法探査に利用する独自のツールを考案し、「ランドストリーマー」と名づけた（稲崎，1992b）。ランドストリーマー（land streamer）という呼称は、既に Kruppenbach ほか（1975）がその特許ドキュメントの中で使用していたが、筆者が提唱した 1990 年代初頭はインターネット環境は未整備であり、彼らの文献を参照することができなかった。したがって呼称の一致は全くの偶然である。ただし、海域で使用するストリーマーケーブルとの類似性を考慮すれば、誰でも思いつく用語であろう。

実機タイプのランドストリーマーは新たな技術開発項目を加え、93 年度末に導入された。まず同時期に導入されたデジタル探鉱機に機械的・電氣的に適合するようにした。さらに基礎的な実験結果を踏まえ、牽引部材およびカップリング法に改良を加え S 波浅層反射法探査用のランドストリーマーツールを製作した。

以下この実機タイプの S 波ランドストリーマーツールの特長について述べる。

2.3 ランドストリーマーツールの特長

S 波ランドストリーマーは、舗装されたエリアにおいて高分解能 S 波反射法探査を実施するために筆者が独自に考案・製作した専用の現場計測ツールであり、従来は別々に設置・展開していた地震計アレイと信号ケーブルを一体化し、一度に展開・移動できるようにしたものである。同ツールの外観を Fig4 に、またその主な仕様を Table1 に掲げる。

Fig4 に示すように、実機タイプの S 波ランドストリーマーは、2 本のベルトとその上に装着された地震計ユニット、および信号ケーブルからなる。組立て・分解は容易であり、現地で 20 分以内に立ち上げが可能である。また車両あるいは人力で牽引することにより、ツール全体を次の測定区間まで容易にかつ迅速に移動させることができる。

開発したランドストリーマーツールの第一の特長は、牽引部材として荷受用のスリング布ベルトを使用していることにある。このベルトが牽引時のテンションをすべて受け持ち、他の部品には引張力がかからない。ベルトは幅を有しており、その上にユニットを装着させる。ケーブルは非伸縮性であることから、地震計ユニットの間隔を常に一定に保つことができる。地震計ユニットは、板状のベースプレートを通じて地面とカップリングしている。ただし各々のベースプレートは地面と固着しているわけではなく、地震計ユニットの自重とベースプレート間のベルトの撓みによる下方への押下げ力とで地面とカップリングしている。それにもかかわらず、後述するようにこの方式で比較的良好な波形データを得ることができる。これは面でのカップリングの効果によるものである。このベースプレートを通じた非固着、面カップリングがランドストリーマーの第二の特長としてあげられる。従来のスパイク型地震計は、地面と堅固なカップリングを確保することができるが、設置が手作業で時間がかかること、カップリングはほぼ「線」であり、スパイク挿入部の局所的な不均質性の影響を受けやすい。またスパイクの挿入が不十分だと、エレメント部が「転倒振り子」のように不安定になり、雑振動の影響を受けやすくなるという問題が指摘されていた。S 波ランドスト

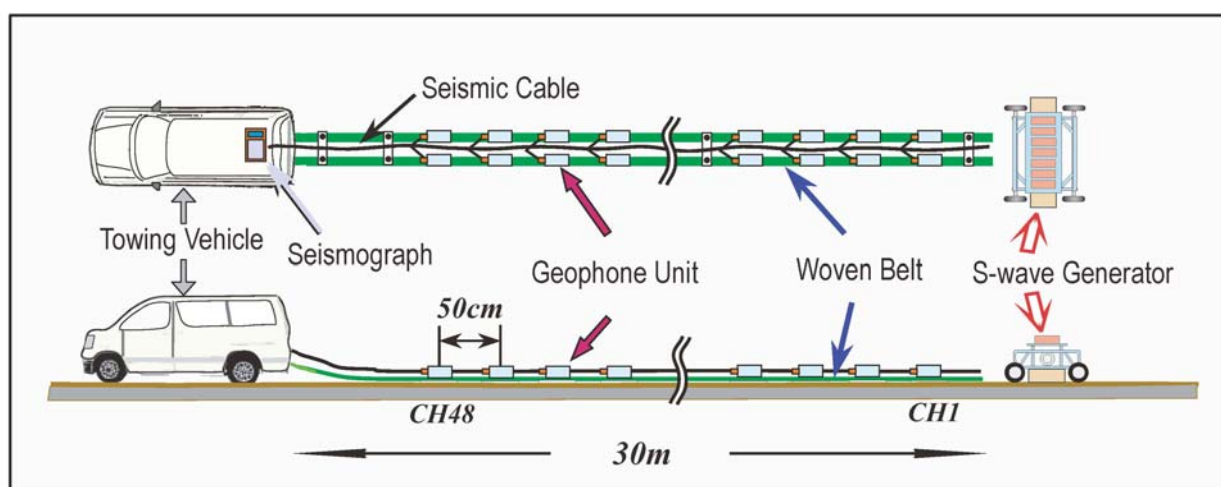


Fig. 4 Layout of the production version of S-wave type Land Streamer (revised from Inazaki, 1997)

図-4 実機型ランドストリーマーツール(稲崎, 1997 を一部改変)

リーマーの地震計ユニットには、水平成分の地震計エレメントが2個内蔵されている (Fig.5) 。地震計エレメントは金属製の装着部材によってフレームに堅固に固定されており、雑振動ノイズ、スプリアスノイズの発生を抑制している。各受振点には2個の地震計ユニットが配置される。このように一受振点に4個のセンサエレメントを用いることにより、S/N 向上を図っている。

測定時には地震計ユニットは牽引部材である布ベルト上に固定するが、保管時には取り外される。またベルト上のベースプレートを設置間隔を変えることで、受振点間隔を容易に変更することができる。この牽引ベルト、地震計ユニット、信号ケーブルからなる部品構成とそれらの組立て調整によって測定条件を変更できる点がランドストリーマーの第三の特長である。

Table 1 に示すように、最初に開発した S 波ランドストリーマーには 50cm 間隔に 48 チャンネルの受振点がセットされており、展長部を含めても全長は 30m しかない。牽引する車両と震源部を含めても、占有区間長は 50m もあればよい。占有区間は従来の地震計事前展開方式の反射法探査に比べると圧倒的に短い。しかも移動するので特定の区間に限れば占有にかかる時間は数 10 分程度しかない。さらに地震計や信号ケーブル等の事前設置に費やしていた準備工程を必要としないので、現地での計測の作業性を大幅に向上させることができる。準備作業・撤収作業も簡便で、従来 1 時間程度を要していた工程を 20 分程度に短縮することができる。この固定長システムをステップ的に移動して観測する、という現場作業形態によって、都市域でコンパクトかつ作業効率の高い探査が可能であることがランドストリーマーの第四の特徴である。ただし海域でのストリーマーケーブルを使用したマルチチャンネル音波探査とは異なり、移動中に計測することはできない。

特筆すべきこととして、ランドストリーマーツールは舗装路面上での探査に特に威力を発揮することをあげることができる。舗装路面は表面が平滑なのでベースプレートを介したカップリングが良好に保たれる。さらに後述するように、舗装構造が高分解能反射法探査に有利な条件をもたらすこともわかってきた。従来の反射法地震探査では測線設定を避けてきた舗装路上で計測することを前提としていることがランドストリーマーの第五の特長ということができる。

本ツールを海外で紹介した後 (Inazaki, 1999) , 類似ツールの製作とそれを用いた探査が海外で実施されるようになった (たとえば, Pugin, et al., 2002) 。このような中で、ツールの改良、筆者の想定範囲を超えた新たな

Table 1 Technical specifications of S-wave type Land Streamer

表一 S 波ランドストリーマーツールの仕様

Specifications	S-wave Type
No. of Channels	48
Natural Frequency	28 Hz
No. of Elements/Channel	4
No. of Belts	2
Channel Spacing	50 cm
Length of Active Section	23.5 m
Total Length	30.0 m
Geophone Unit	Detachable
Total Weight	Ca. 180 kg

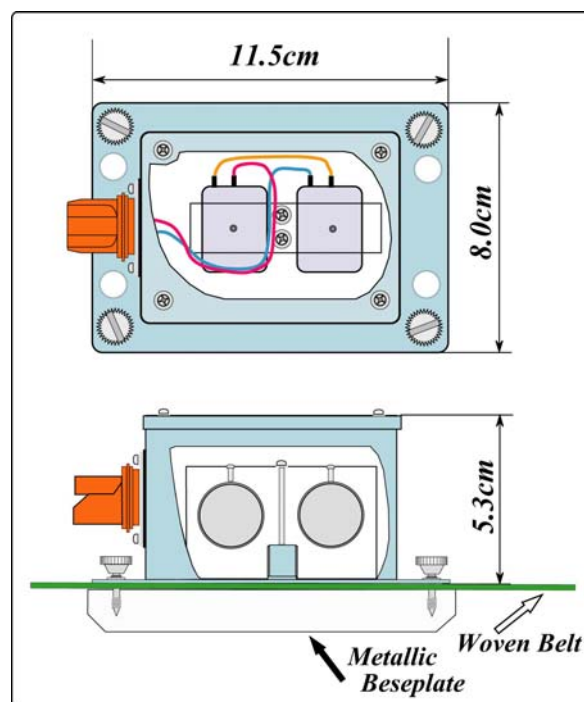
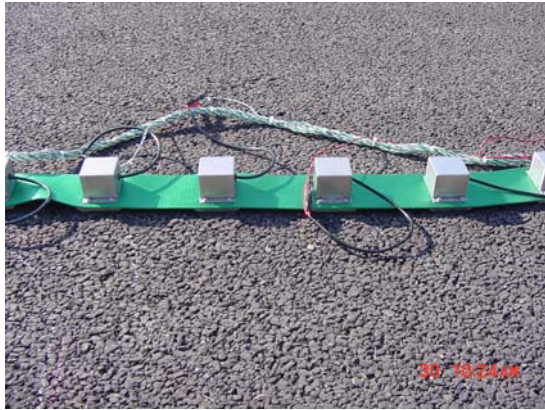


Fig. 5 Diagram of the S-wave type geophone unit (revised from Inazaki, 1997)

図一 S 波用地震計ユニット(稲崎, 1997 に加筆)

測定手法の案出 (Pugin, et al., 2004) や、大規模な反射法地震探査 (Vangkilde-Pedersen, et al., 2006) への利用が進みつつある。逆にこのような追従研究開発に刺激を受け、筆者も新たなバリエーションツールを開発してきた。たとえば、3 次元ランドストリーマーの考案 (稲崎, 2004) 。小間隔ランドストリーマー (Fig. 6a) の開発と利用 (稲崎, 2001a) , P 波タイプのランドストリーマー (Fig. 6b) の開発 (稲崎, 2003) , そして表面波探査用ランドストリーマー (Fig. 6c) の開発 (林ほか, 2003) などがあげられる。



(a) A photo of the short spacing type Land Streamer
(a) 小間隔ランドストリーマーの外観



(b) A photo showing P-wave type Land Streamer
(b) P波タイプランドストリーマーの外観



(c) A photo of the surface wave type Land Streamer
(c) 表面波ランドストリーマーの外観

Fig. 6 Various types of newly developed Land Streamers
図-6 新規開発した各種ランドストリーマー

3. 都市域における反射法地震探査の技術的課題とS波ランドストリーマーツールによる解決

3.1 舗装路面の影響の検討

前述のようにS波ランドストリーマーツールでは、ベースプレートを紹介した非固着型カップリングを一つの特長にしている。このようなカップリングでどのような波形が取得できるかをまず比較検討した。Fig.7は、同じ試験サイトで同一の計測配置の条件下で、地表面条件とセンサツールによって取得波形がどう変化するかを比較検討したものである(稲崎, 1997)。起振には測線と直交方向に板を設置し、重機で荷重をかけて地面に固定させ、板の側面をかけ矢で打撃してS波を発生させる「板叩き法」を採用した。板叩き法は、SH波の簡便な発生手法として定評があり、以前から浅層反射法探査に多用されている(稲崎, 1985)。

舗装路面上にS波ランドストリーマーツールを設置し往復走時300msおよび500ms付近に明瞭な反射波が出現した(Fig.7a)。ランドストリーマーで取得した波形記録は記象(イベント)が整然と配列しており、カップリングの影響および最表層の局所的な不均質性の影響を受けていないことを示している。これに対し、舗装路面測線上に従来のスパイク地震計を粘土ブロックを用いて設置した場合の波形記録(Fig.7b)では、対応する反射波が著しく乱れていることがわかる。これはスパイク地震計のカップリングが不良であることによるものである。特に固定用の粘土とスパイクとの固着度が低いと、転倒振り子と同様な設置条件となるためノイズの影響を受けやすくなる。一方路肩の未舗装部に測線を設置して計測した場合にはランドストリーマーツール使用の場合(Fig.7c)、スパイク挿入固定の場合の記録(Fig.7d)の両方ともに表面波が卓越し、微弱な反射波信号がわずかに認められる程度である。舗装路面上と路肩部測線での波形比較は、舗装路面が表面波の発生を抑制し、逆に反射波信号を際立たせ、浅部のイメージングに好都合な反射波通過フィルタの役割を果たしていることを示している。実際、舗装厚5cm程度の簡易舗装材だけでも表面波の低減に十分な効果があることを実験で確認している(稲崎, 2001b)。

表面波は表層に速度層構造があると励起される。浅層反射法探査にとって表面波はノイズ以外の何者でもなく、表面波を避ける、波形処理によって除去する、あるいは発生を抑制する、などの方策が採られてきた。ところで最表層に高速度層が存在する場合、表面波のエネルギーは速度の小さな下層に漏れ出し、発生が抑制されることが知られている(佐藤, 1984)。舗装路では通常表層の

アスファルト層の速度が下位の地盤より大きいので、表面波の発生が抑制され、浅層反射にはきわめて好都合の条件を提供する。菊池・狐崎（1986）は実測データの解析と波動論的手法を用いて舗装の影響を検討し、舗装構造が反射波を選択的に通過させるフィルタの効果を果たしていることを示した。

浅層反射法探査に限らず、屈折法探査やトモグラフィ探査など弾性波を利用する探査は本来地下の弾性波速度の不均質構造をイメージングする技術であるが、再生し

ようとする速度構造より小さなオーダーの不均質構造の影響を強く受ける。そして屈折法地震探査に典型的に示されるように、イメージング対象である地圏表層部のなかで最も不均質で速度変化が大きい部分は最表層部に存在する。この最表層の不均質構造の影響を受けて、地下からの反射波信号は乱される。浅層反射法探査ではこの影響がより大きくなることに留意しなければならない。浅部の構造からの反射波信号は往復走時が小さく、さらに高周波領域の信号を利用しているため不均質構造によ

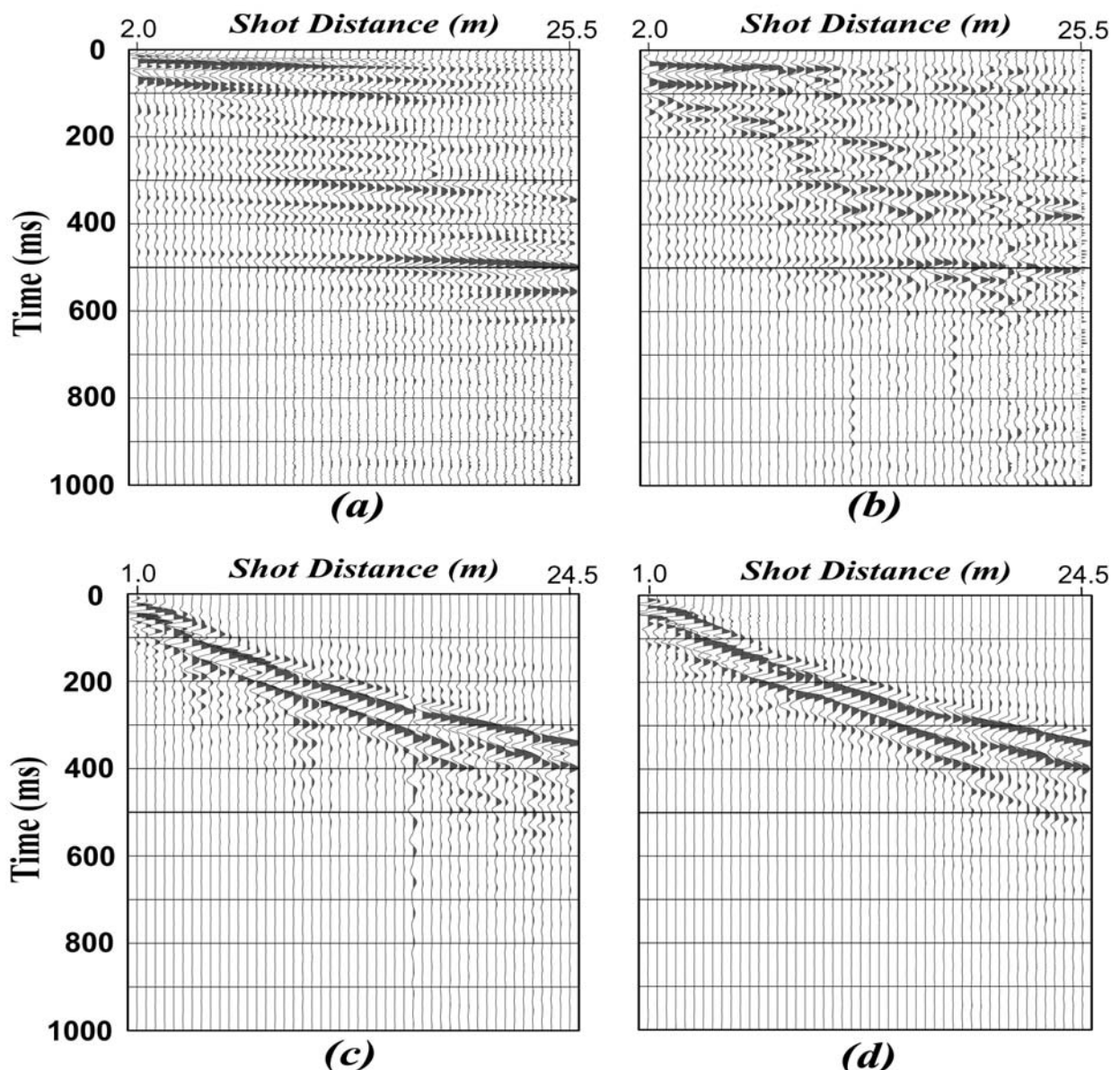


Fig. 7 Comparison of common shot gathers for different tools and different surface conditions (Revised from Inazaki, 1999)

(a): A Land Streamer record on a paved road; (b): A spike geophone record on the same paved road; (c): A Land Streamer record on the soft shoulder along the road; (d): A spike geophone record on the soft shoulder along the road.

図-7 測定条件・ツールによる記録波形比較(稲崎, 1997 を改変)

a: 舗装上ランドストリーマー記録, b: 舗装上スパイク地震計記録, c: 未舗装ランドストリーマー記録, d: 未舗装スパイク地震計記録

る擾乱の比率が高くなるからである．ところで地表を舗装する際には，最表層の地盤を除去・転圧し，路盤材やアスファルト層を敷詰める．これにより速度的にも構造的にもほぼ均質な状態が最表層部に形成されることになる．したがって浅層反射法探査の測線を舗装路面上に設定すれば，不均質表層構造の影響を無視あるいは軽減することができるのである．Fig.7は，ランドストリーマーツールを用いた舗装上での浅層反射法探査が，高分解能の浅部構造イメージングを可能にすることを示している．

舗装路上での浅層反射法探査は，表面波の影響を受けにくいこと，さらに均質な表層構造を期待できるという利点を有していることを明らかにした．一方表層部に高速度層が存在する場合，その境界部で波線が屈折して収束するために，反射波の走時が理想的な走時からずれることが想定される (Fig.8)．一様な媒質中での反射波の走時 T は，起振点－受振点間のオフセット距離を X とした場合， T^2-X^2 面上では直線上にプロットされ，その直線の傾きは $1/v^2$ となる．しかし高速度表層が存在すると，

走時 T は上に凸の曲線を描く．加野 (2000) は，S 波速度が 100m/s 程度の未固結層の表層に高速度層が存在するモデルを仮定して波線理論による走時計算を行なったところ，層境界の傾斜が大きくなると反射波が高速度層である舗装の下面で臨界屈折し，反射波の振幅が著しく減衰するとともに反射波列の走時が大きく変化することを示した．舗装路が存在することによって地下の傾斜構造からの反射波の検出が困難になるのであれば，舗装上には測線を展開するべきではないことになる．しかし上記の解析に使用した波線理論は，厳密には速度構造に対して波長が十分に小さい場合にのみ成立する理論である．高い S 波速度を有する舗装の層厚は，アスファルト層だけだと高々 10cm 程度，路盤層まで含めても数 10cm 程度に過ぎない．一方浅層反射法探査で利用する S 波の波長は軟弱地盤中で 2m 程度以上，高速度の舗装路盤内では 4m～10m に達する．したがって波線理論に基づく解析は適合しないことが推定された．加野 (同上) も波動論的な解析を試み，振幅は減少するものの臨界屈折現象の存

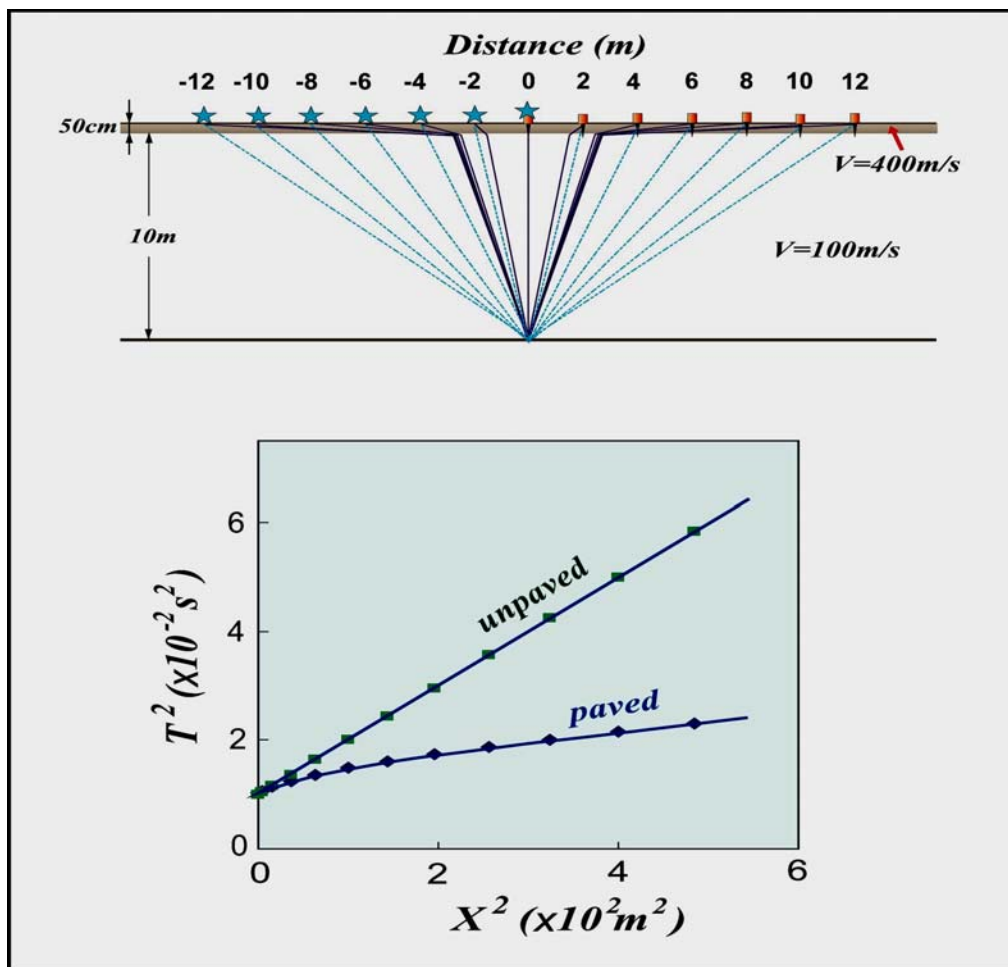


Fig. 8 Convergence of raypaths and shift of traveltimes caused by surface high velocity pavement
図一八 高速度表層による波線の収束と走時変化

否は不明であり、さらなる検討が必要とした。そこで実際に地盤内に伝播するS波が舗装路盤によってどのような影響を受けるかを実験で検証してみた。

土木研究所構内地質野外実験場に試験舗装路を敷設し、反射法探査に対する舗装路盤の影響を実験によって検証した(稲崎, 2001b)。同実験場の一角に、延長約60m、幅約1.6mの試験舗装路を作成した(Fig.9, Fig.25)。舗装路の作成にあたっては、まず対象部をローラーで転圧した後表層部約15cmを盤下げし、掘削土を再度投入して転圧し、約10cmの路床を形成した。その上に調粒碎石を転圧敷設し、10cm厚の路盤を形成した。さらに表層に5cm厚のアスファルトをかぶせて舗装を完成させた。したがって舗装全体の厚さは路盤・表層で15cm、転

圧路床を含めると25cmとなる。

この試験舗装路中央部でサイスミックコーンを用いたVSP探査を行ない、舗装下での弾性波の伝播特性を調べた。試験舗装路中央部、SW30地点でのコーン貫入試験のプロファイルおよびサイスミックコーン検層記録をFig.10に示す。コーン貫入試験のプロファイルには、深度7m程度までの表層部の速度構造および地盤構成がよく捉えられている。結果は周辺のボーリングデータおよびA、B観測孔(Fig.25参照)での検層結果とも調和的である。すなわち、深度2.2mまでの貫入抵抗がやや大きく変動する部分が盛土層、その下位5.5mまでがローム層、5.5m付近に薄い砂層を挟み、その下に厚さ5m程度の砂層(龍ヶ崎砂層)が分布する。A観測孔では、こ

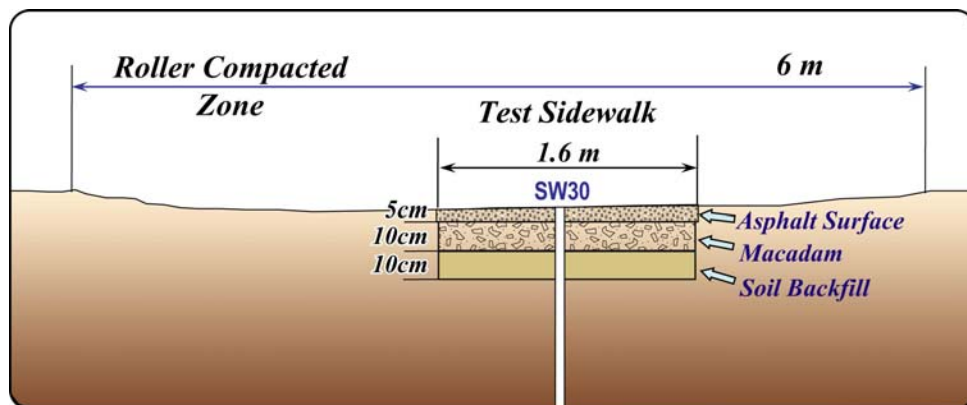


Fig. 9 Profile of a test sidewalk constructed in PWRI Tsukuba site (revised from Inazaki, 2001b)

図-9 試験舗装路の構造(稲崎, 2001bを改変)

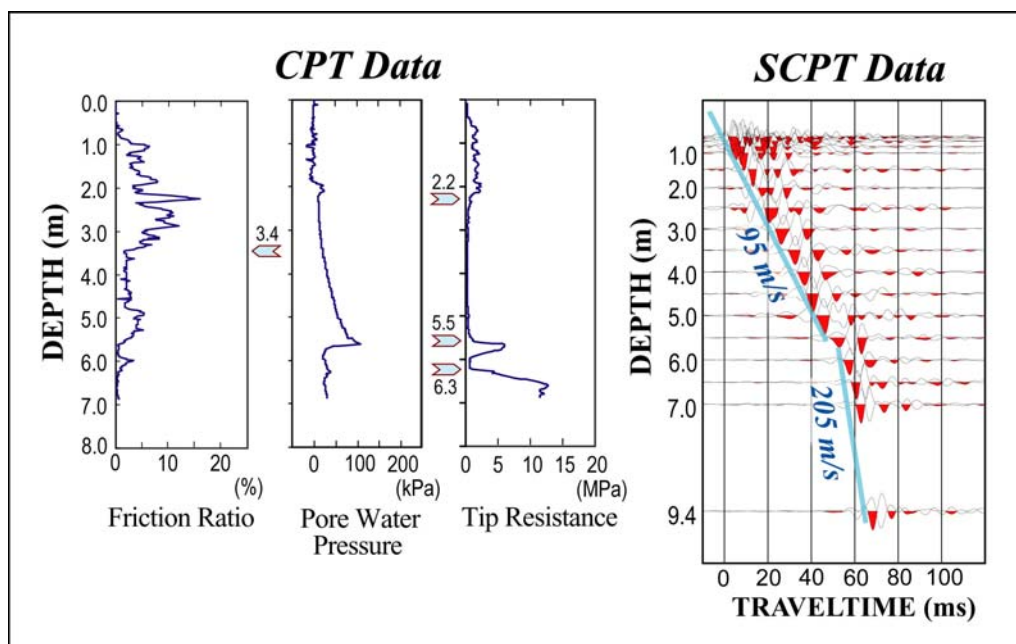


Fig. 10 CPT and Seismic CPT profile at SW30, the midpoint of the test sidewalk (revised from Inazaki, 2001b)

図-10 SW30 地点 CPT およびサイスミックコーンプロファイル(稲崎, 2001bを改変)

の砂層の下位には深度 10.7m~12.9m 間に高有機質土層およびシルト層が出現し、上下位両面とも大きな速度コントラストを有していることがわかっている。S 波速度値としては深度 5.5m までが約 95m/s、それ以深では約 205m/s 程度と見積もられ、以前にサイト内で実施した屈折法探査結果(稲崎ほか, 1989)ともよく一致していた。そこで舗装路面によって反射イベントの走時が変化するかを計測実験によって検証した。これには、舗装路中央部 SW30 孔にあらかじめサイスミックコーンを挿入し、路面上で振源位置を移動させながら片走時データを取得する Walk Away 方式を採用した。

コーンの深度 9.4m、振源位置を-20m から+20m 間で移動させて正逆起振して取得した共通受振点記録を Fig.11a に示す。3 成分データのうち、打撃方向と同じ成分のみを合成せずに表示してある。振源オフセットが小さい記録では直接波は 70 ms 付近に出現するが、オフ

セット距離が大きくなると、出現走時は 100 ms から 150 ms 程度まで遅れる。一方同図 (b) は、同一ジオメトリでの理論走時を示したものである。ただし入射角による透過係数の変動、位相ずれは考慮していない。ここで速度構造としては深度 5.5 m までが $V_s=95$ m/s、それ以深を $V_s=205$ m/s と仮定し、舗装モデルでは表層 25 cm を $V_s=450$ m/s で置き換えて波線を計算している(同図(c))。波線理論で舗装内での逆屈折を考慮すると、理論走時は (b) の淡色表示した位置に出現するはずである。実際の Walk Away 記録は、むしろ舗装路盤の存在を無視した場合の理論走時 (b) の濃色表示波形) と調和的である。

これより、一般的な舗装路(舗装厚数 10cm)と S 波浅層反射法探査の計測条件(卓越波長数 m)においては、反射走時に対する舗装の影響は無視することができると結論づけてもよいであろう。

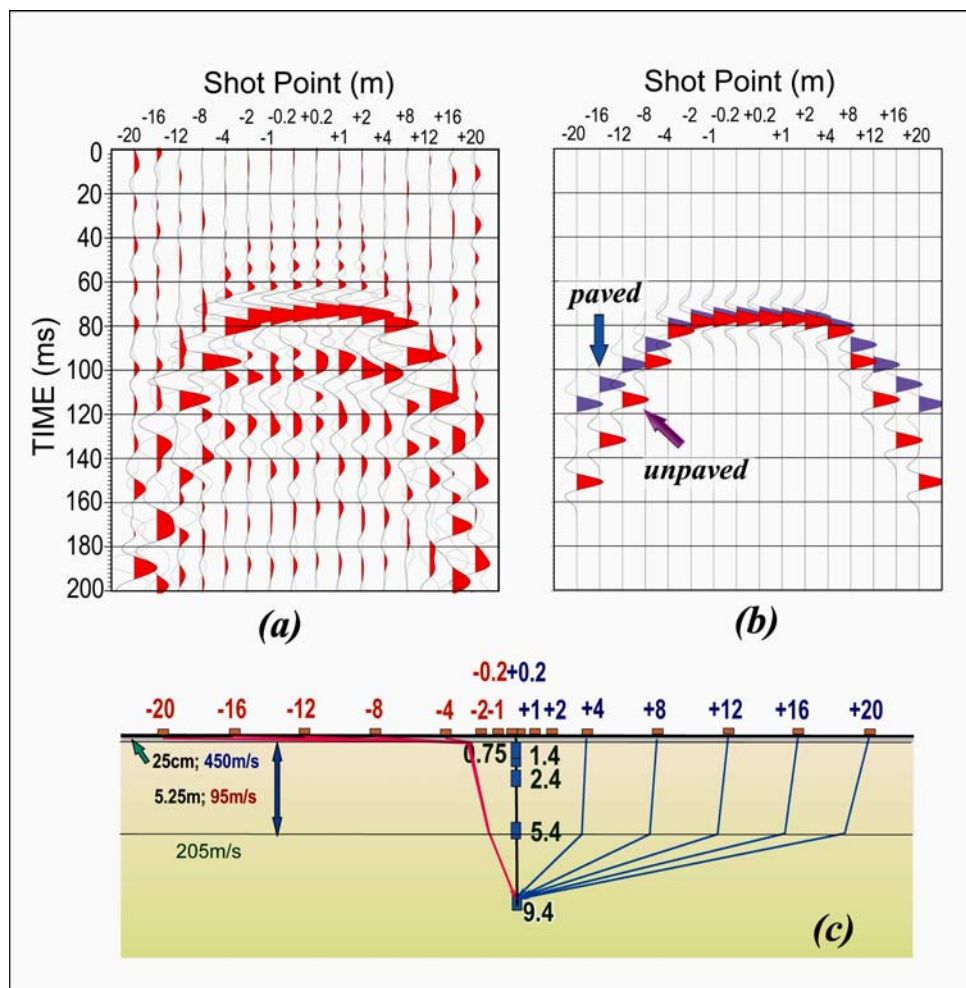


Fig. 11 Comparison of a walkaway VSP record (a) with the synthetic records (b) in and without consideration of the surface thin high velocity pavement. Corresponding raypaths are drawn in (c). (revised from Inazaki, 2001b)

図-11 観測走時と計算走時との比較(稲崎, 2001b を改変)。(a): ウォークアウェイ VSP 観測走時; (b): 波線理論による計算走時; (c): 対応波線

3.2 解像度の向上に関する検討

実機タイプのS波ランドストリーマーツールは、Table 1 に示したように、50cm 間隔で地震計を配置している。したがって一般的な測定条件では、CMP の間隔は受振点間隔の 1/2 の 25cm になる。この間隔は海域で実施されるスパーカー音波探査より高密度である。従来のP波を利用する反射法探査ではCMP間隔は5m ないし 2.5m なので、それと比較しても 10~20 倍の分解能を実現していることがわかる。従来、反射法地震探査における受振点間隔は、空間サンプリング定理を基準として設定されてきた。サンプリング定理は、時間空間領域で連続的な信号波形を離散的にサンプリングする場合、エリアジングを起こさずに波形を復元するためには信号波形に含まれる最高周波数の最低2倍のサンプリング間隔が必要である、と定義される。信号波形に含まれる最高周波数を $f_{\max}$ 、見かけ最小波長を

$\lambda_{\min}$ とすると、時間領域でのサンプリング間隔 $\Delta t_{\max}$ 、空間領域でのサンプリング間隔 $\Delta x_{\max}$ は各々、

$$\Delta t_{\max} \leq \frac{1}{2f_{\max}}$$

$$\Delta x_{\max} \leq \frac{\lambda_{\min}}{2} \quad \dots (1)$$

を満たす必要がある。S波浅層反射法探査では、含まれる最高周波数は200Hz 程度であるので、時間サンプリング間隔は2.5ms 以下であればエリアジングの問題は生じない。通常は余裕を見て1ms に設定している。また見かけ最小波長は2m 程度であるので、受振点間隔が1m 程度以下であれば空間的配列によって生じるエリアジングも発生しない。一般に反射波信号は斜め下方から受振点に入射してくるので、見かけ速度が大きくなり見かけ波長も大きくなるので反射波に対しては条件を満足している。逆に50cm という受振点間隔は、空間領域で約2倍のオーバーサンプリング条件を確保していることを意味している。

S波浅層反射法におけるこの高密度の探査条件は、浅部地盤の詳細な地盤構造のイメージングと解釈に不可欠である。Fig.12 は同一測線上で実施されたS波ランドストリーマー探査(稲崎, 1997)の断面と従来のP波反射

法探査断面(名古屋市, 1998)とを比較したものである。S波ランドストリーマー探査断面には深さ30m 付近に、緩く北に傾斜する反射面が明瞭に再現されている。この反射面は周辺のボーリングデータから、沖積層と下位層との境界に比定される。P波反射法探査では浅部構造の再現性を高めるためにスプリットオフセット方式を採用し、ニアトレースの確保に努めてはいるが、起振点、受振点間隔はともに5m であり、表層部のP波速度($V_p=1400\text{m/s}$ 程度)、卓越周波数($f=70\text{Hz}$ 程度)、という条件から、深さ30m 付近のこの反射波は往復走時で40msec 程度に出現すると推定される。卓越周期とその波長は各々15msec 程度、20m 程度と計算されるので、オフセットの大きなトレースでは初動と浅部反射の分離は極めて困難で、浅部イメージングに利用できるトレースは多くても10 以下と見積もられる。P波反射法探査断面でもこの深度に地層構造らしきものが再現されているが、浅部については真の構造かどうか疑わしい。

一方この測線でのS波ランドストリーマー探査では起振点、受振点間隔とも0.5m であり、深さ30m 付近の境界面からの反射波は、ショット記録においても往復走時400msec 付近に明瞭に分離して記録されている(Fig.13)。卓越周波数は50Hz 程度であるが、ここでのS波速度は

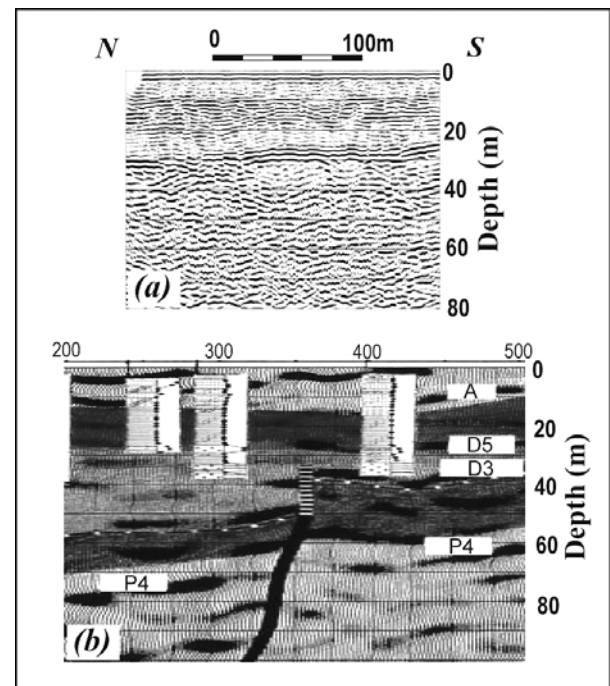


Fig. 12 Comparison of “high-resolution” seismic reflection sections. (a): S-wave section obtained using 50cm interval Land Streamer (Inazaki, 1997); (b): P-wave section obtained under the conventional shallow seismic reflection technique, or 5 m station intervals (Nagoya City Fire Department, 1998).

図-12 高分解能反射法探査断面の比較。(a):S波ランドストリーマー浅層反射法探査断面(稲崎, 1997), (b):P波浅層反射法探査断面(名古屋市消防局, 1998)

150m/s 程度なので、卓越波長は3m 程度になる。このことは、S 波ランドストリーマー反射法探索断面が、P 波探索断面に比べて時間軸方向にも水平距離向にも約7 倍の解像度で地下構造をイメージングしていることを意味する。

一般的にはP 波による反射法探索は、深部およびやや深部の探索には適しているが、浅部の地盤構造探索には適当な手法とは言いがたい。さらに5m という受振点間隔も浅部構造のイメージングには粗すぎると言わざるを得ない。では浅部地盤の高分解能解析に必要とされる受振点間隔はどの程度が適当であろうか。実は受振点間隔を小さくしても、解像度がそれに比例して向上するわけではない。一方小間隔にすると作業効率はそれに比例して確実に低下する。ランドストリーマーを用いた浅層反射法探索では、起振点をランドストリーマーの後方に設置する、End-on スプレッドとし、起振点間隔も基本的に受振点間隔と同じにするのが標準的な計測方法である。まずこの起振点間隔および受振点間隔とイメージング深度との関係について検討してみよう。

Fig.14 は、受振点間隔と CMP ギャザに含まれる実効トレース数との関係を示したものである (Inazaki, 2002)。ここで、最表層地盤の V_s を 180m/s と仮定し、2m の深さに反射面 (速度境界) を考える。NMO 補正によって浅部からの反射波信号は間延びする (NMO stretch)。この間延びの程度は反射面が浅く、かつオフセットが大きいトレースほど大きくなる。間延びした反射波信号を重合すると反射波の波形が歪むので、通常はある基準値以上に間延びした信号を除去する処理 (stretch mute) が施

される。ここではその基準値を 25%としている。End-on スプレッド配置で、震源と地震計との最短距離 (震源オフセット距離) を受振点間隔の2 倍とした場合、50cm 間隔では CMP ギャザに含まれる実効トレースは3 本しかない。受振点間隔を 20cm まで狭めると7 本、10cm 間隔では12 本にまで増加する。実際の記録波形には初動や雑音が含まれるので、反射波信号を含むトレースが最低3 本は必要である。すなわち、受振点間隔が 50cm 間隔の場合、深さ 2m の反射面がかろうじてイメージングできる程度で、それより浅い反射面のイメージングは基本的に不可能であることを意味する。

次に受振点間隔を固定し、反射面の深度を変えた場合の実効トレース数を調べた (Fig.15)。受振点間隔が 20cm の場合、深さ 1m の反射面では実効トレース数は3、2m で7 本、4m、8m では12 本以上まで増加する。重合速度が小さくなると、NMO 補正量が大きくなるので実効トレース数は減少する。

以上の考察から、

$$D_{\min} \geq 5a \quad \dots \quad (2)$$

という経験式を導き出すことができる。

ここで、 $D_{\min}$; イメージング最浅深度、 a ; 受振点間隔である。この式は、たとえば深さ 2m 付近に存在する地層境界をイメージングしようとする場合、受振点間隔は40cm 以下に設定する必要があることを意味している。

一方鉛直方向の構造分解能は、基本的に波長によって決定され、地中の近接した2 枚の反射面を分離できる限界区間として一般に定義される。鉛直方向解像度 R を、

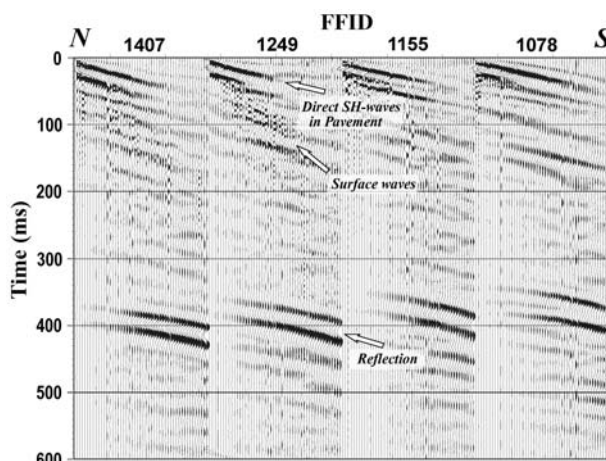


Fig. 13 An example of Land Streamer shot record including a strong and separate reflection event (Inazaki, 2004)

図-13 S 波ランドストリーマー探索波形記録例 (Inazaki, 2004)

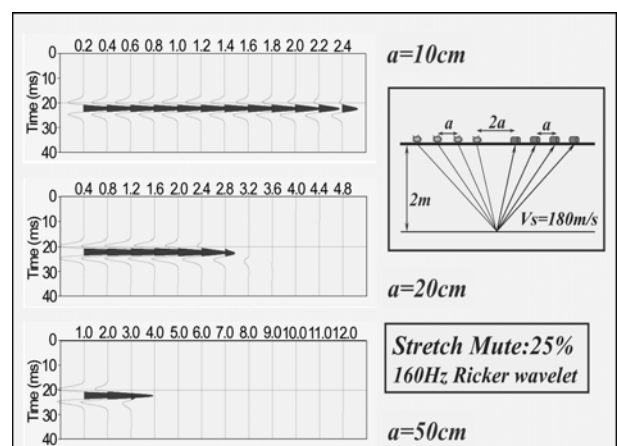


Fig. 14 Decrease in effective traces representing the event reflected from 2 m in CMP gathers with increase in geophone intervals. (Inazaki, 2002)

図-14 受振点間隔と CMP 実効トレース数の関係 (Inazaki, 2002)

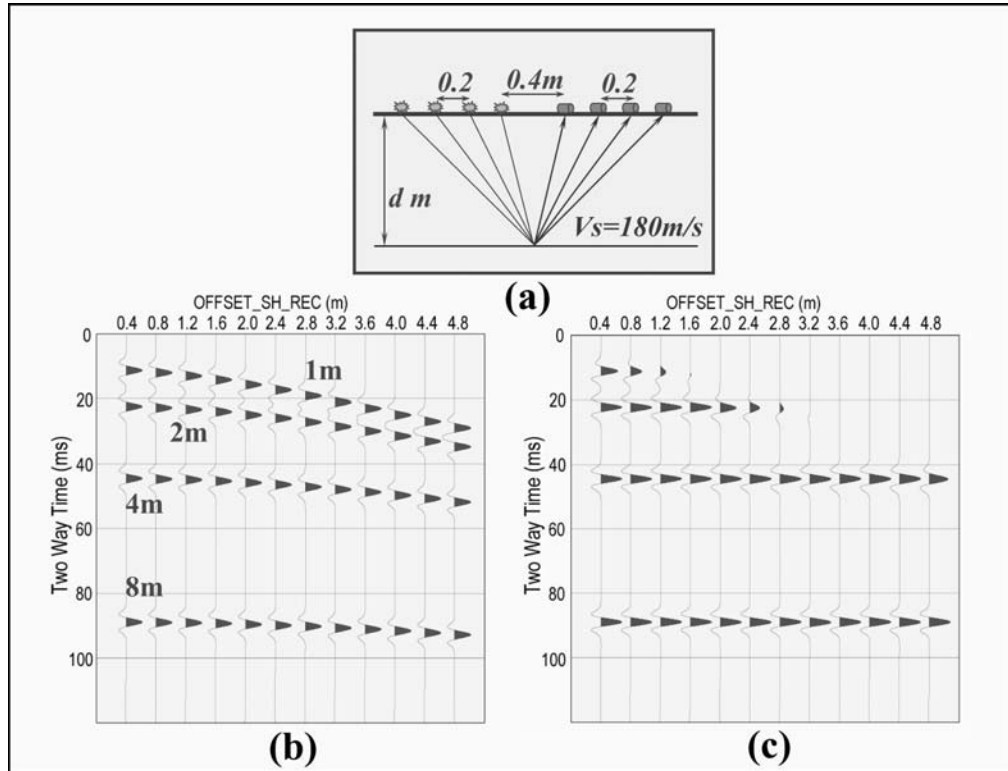


Fig. 15 Decrease in effective traces for the reflection events in a CMP gather with shallowing of the reflector depths. (a): geometry of a CMP gather, (b): reflection events from 4 reflectors, (c): The same events after 25 % NMO stretch mute. (Inazaki, 2002)

図-15 反射面深度とCMP実効トレース数の関係(Inazaki, 2002)

卓越波長 λ_d の関数で表わしてみよう。Fig. 14 中に示したようなリッカータイプのウェーブレットを想定し、トラフ間の時間幅を b と置くと、時間軸上で $b/2$ シフトした波形は分離して観測される。往復走時で $b/2$ シフトさせるには、2枚の反射面の間隔が時間軸上で $b/4$ だけ離れていればよい。空間領域では b が卓越波長 λ_d に対応するので、結局、

$$R = \lambda_d / 4 \quad \dots \quad (3)$$

となる。これは Rayleigh の 1/4 波長則として知られている式である。卓越波長が 3m 程度の場合、0.75m 離れた地層境界は2枚に分離して観測することができるが、それ以下の間隔の地層境界は1枚の反射面として表示される、ということを意味する。

水平方向の構造分解能も受振点間隔ではなく、波長の関数であるフレネルゾーン半径によって定義されている。卓越波長 λ_d の波が媒質中を伝播するとき、波線片経路で $\lambda_d/8$ 、往復経路の長さが $\pm\lambda_d/4$ の範囲の波は干渉して強め合う。鉛直入射の波の場合、深さ Z_0 の水平の反射面上にある点Pからの反射波に対し、点Pから点Aまでの間に分布する点からの反射波は加算されて強めあうのに

対し、点A以遠の点からの反射波は逆位相となり加算されると弱めあう。結果的にはAA'間の点から反射してきた波が重ね合わされて地表の点Oで観測される。このAP間の距離を、第1フレネルゾーン半径 (r_f) と呼ぶ。第1フレネルゾーン半径は、Fig.16から、

$$r_f = \sqrt{(z_0 + \lambda_d/8)^2 - z_0^2} \approx 1/2\sqrt{z_0 * \lambda} \quad \dots \quad (4)$$

と近似される。深さ30mの反射面を卓越波長3mの波で観測する場合、第1フレネルゾーン半径は約5mとなる。鉛直方向の分解能に対し、水平方向の分解能は一桁劣ることがわかる。実際の反射法探査データ解析では、斜め入射の波もイメージングに使用している。また第1フレネルゾーン内の反射強度は一樣でもない。さらに実際の反射法探査データ処理では、フレネルゾーンを分解し水平方向の分解能を向上させる機能があるマイグレーション処理を施している。そこで受振点間隔を第1フレネルゾーン半径より十分小さくしておけば、水平方向の構造変化をより小さな区間で検出することが可能となる。ま

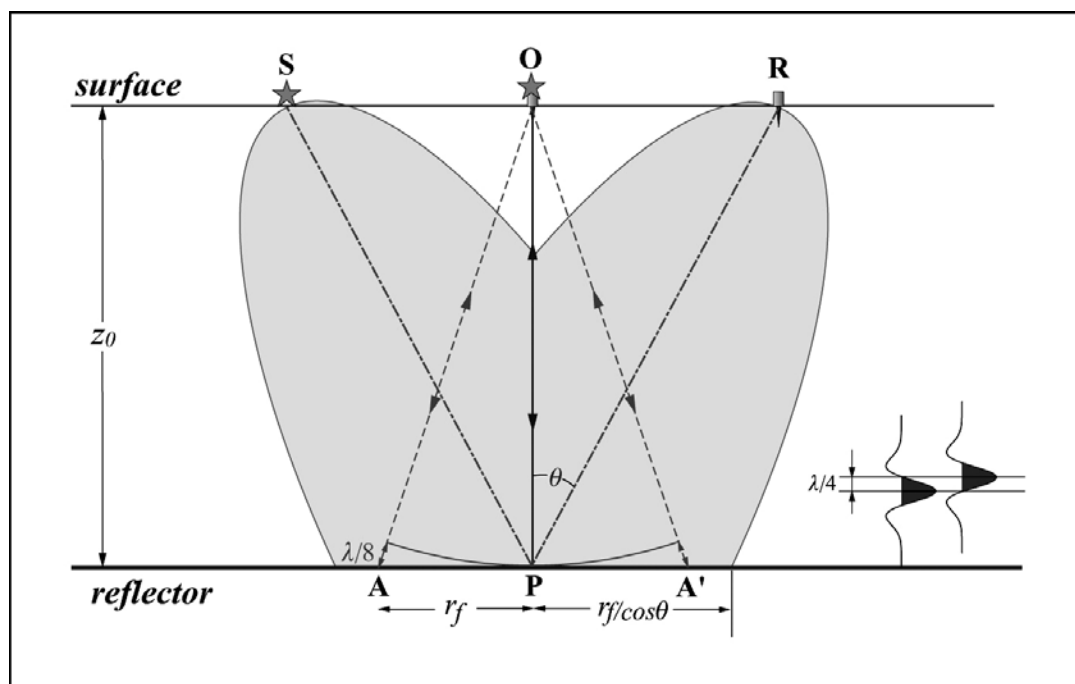


Fig. 16 Schematic illustration explaining Fresnel zone for zero-offset and offset geometry.

図-16 フレネルゾーン半径概念図

た波長より充分小さな構造体からは回折波が発生するので、それを利用したイメージングも可能である。

ところで、実際の地盤は均質ではなく、局所的な速度のゆらぎ構造を有している。前述のように表層はもともと地盤構造が複雑な上、人工改変や風化により地圏では最も不均質な部分の一つとなっている。この不均質性の空間的オーダーと探査に利用する波長の関係によってイメージングの可否が決まる。不均質構造のオーダーが大きい場合、波長の大きい、すなわち低周波数の波を使わない限りイメージングができないことを意味している。逆に高周波数の信号で地下をイメージング使用とする場合、不均質構造のオーダーが波長に比べて充分小さいことが要求される。

4. S波ランドストリーマー浅層反射法探査の適用例

前述のように、1993年度に実機タイプのS波ランドストリーマーを導入した後、1997年より本格的な調査研究に活用し始めた。そして現在に至るまで国内25サイトでランドストリーマーを利用した浅層反射法探査の実績を積み上げてきた。それらのうち、土木研究所で独自に実施した適用実験、現地調査例をいくつか紹介する。

4.1 天白河口断層の調査

都市域の伏在断層の有無を効率的に検出する断層調査法の研究の一環として、S波ランドストリーマーを利用

した浅層反射法探査を実施した(稲崎, 1997)。対象とした断層は、名古屋市と東海市との境界にある天白川付近に存在すると指摘されていた「天白河口断層」である。Fig.17は、断層周辺地域の地形と沖積層基底の等深線分布を示したものである(桑原, 1976)。ボーリング資料等から編集された等深線図には、名古屋港域に沖積層に埋積された旧河道が存在することが示されている。旧河道は、天白川河口付近で天白川に沿って続く支谷と北方から流下する支谷とが合流し、9号地の地下を通過して伊勢湾へと流下している。この沖積層基底面の形状には断層の存在を示唆する異常は認められないが、沖積層の直下に分布する地層が、天白川の南側では新第三紀層であるのに対し、北側では第四紀層であることから、河口付近を北東-南西方向に走る北西側落ちの断層が推定され、天白河口断層と称されていた。天白河口断層は、確実度II、活動度はA級、東北東-西南西方向の走向を有し、走向方向に20km程度追跡できるとされた(日本の活断層, 1980)。また変位のセンスは南東側隆起で、北東端では落差は小さいが、南西端では大きくなり最大300m程度になると推定されていた。この断層は、地表の変動地形からではなく、周辺で実施された膨大なボーリング資料に対する綿密な対比検討によって見出されたものである(桑原, 1984)。桑原(前出)は、天白河口付近東海市新宝町付近で実施されたボーリングデータを詳細に解析し、第三系の東海層群を変位させる断層構造

を解釈した (Fig.18) . なお名古屋港湾部には3本の大規模橋梁からなる伊勢湾岸道路が東西方向に走っており、計画当時から本断層がそれと海上横断部の何処かで交差すると想定されていた。ただしその交差位置は、港湾部でのボーリング資料が少ないことから明確ではなく、9号地あるいは名港東大橋下と推定されていた。

対象とした天白河口断層が、基盤層にどの程度の変位を与えているか、また新しい時代の堆積層にまで変位を与えているか否かを確認するためにS波を利用した高分解能浅層反射法を適用した。対象深度は約 80m 程度までとし、起振点/受振点間隔を 50cm に設定して鉛直変位で数 10cm 程度のずれが識別できるよう高分解能探査を実施した。調査地は天白川河口南側に位置する東海市新宝町地先の天白貯木場跡地である。同地内に、既往のボーリング調査資料および9号地での断層調査資料等によって想定された断層位置と交差するようにA~Dの4本の測線を設定した。

Fig.19 に測線配置を示す。測線長は、A 測線;260m , B 測線;200m , C 測線;342m , D 測線;220m である。また測線条件を Table 2 に掲げた。Fig.20 に示した測線風景に見られるように、A 測線は交通量約 3 万台/日、かつ大型車両の混入率の高い幹線道路に沿った歩道上に設定した。桑原 (1984) が示した断層構造解釈断面 (Fig.18) は、ほぼこの A 測線に対応している。D 測線は舗装道路

上に、C 測線は埋立て地内の低草が繁茂し小礫が散在する未利用地に設定した。

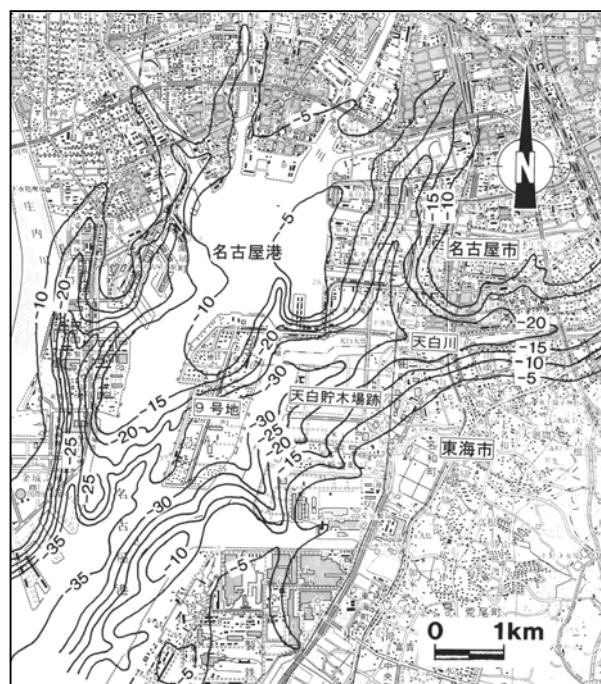


Fig. 17 Contour map showing drowned topography around the Nagoya Port (after Kuwahara, 1976).

図一17 天白河口周辺沖積層基底面深度分布図(等深線は桑原, 1976 による)

国土地理院発行 1/5 万地形図「名古屋南部」を使用

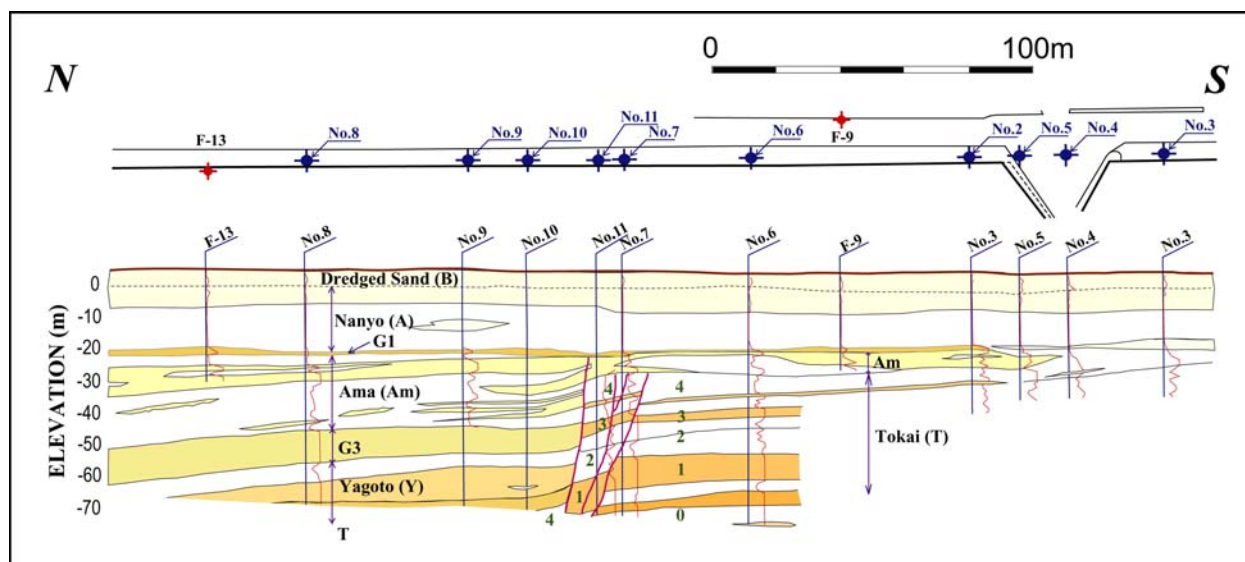


Fig. 18 "Tenpaku-Kako Fault" interpreted from dense boring data (after Kuwahara, 1984). B: Dredged sand, A: Nanyo Formation (Holocene), G1: First Gravel Bed (late Pleistocene), Am: Ama Formation (late Pleistocene), G3: Third Gravel Bed (late Pleistocene), Y: Yagoto Formation (Middle Pleistocene), T: Tokai Group (late Pliocene). The beds in Tokai Group numbered from 0-4 were interpreted to be displaced by faulting at least 40 m.

図一18 天白河口断層解釈断面(桑原, 1984 による)。D: 浚せつ盛土, A: 南陽層(完新統), G1: 第一礫層(後期更新統), Am: 海部累層(後期更新統), G3: 第三礫層(後期更新統), Y: 八事層(中期更新統), T: 東海層群(後期鮮新統)。東海層群中, 0-4 の層が断層によって最大 40m ずれていると解釈された。

取得データを土木研究所が保有する専用の反射法探査データ処理システム (FOCUS) で処理した。処理フローを Fig.21 に示す。まず取得データを探鉱機から専用の計算機にコピーし、不良データ除去等のトレース編集を施し、測量データをもとに計測位置座標を入力した (ジオメトリ編集)。次にデータを CMP 領域に並べ替え、帯域通過フィルタ、振幅調整、デコンボリューション等を施した。その後 CMP 領域のデータに対して速度解析を行ない、NMO 補正、ミュート、残差静補正処理を加えた。さらに CMP 重合後、マイグレーション、振幅調整、ミキシング処理を行ない、速度解析によって推定された速度構造情報を参照して深度変換して最終的な深度断面図を作成した。なお深度変換に際して対象地盤の S 波速度情報が利用できると変換精度を向上させることができる。本処理時には VSP 検層やサスペンション PS 検層な

どの検層データを利用することができなかったため、土質調査ボーリングの標準貫入試験データを参考に S 波速度構造を仮定し、深度変換に利用した。

測線 A, D, C の解析処理後の深度変換断面をそれぞれ Fig.22, Fig.23 に、また A 測線沿いに追加実施された土質調査ボーリングから推定される地質解釈断面を Fig.24 に示す。反射深度断面には、S 波速度インピーダンスを指標とした地質構造が可視画像化されている。水平方向に連続する反射面は、地盤内の速度変化部 (ほとんどの場合地層境界) に対応している。断層部では反射イベントが上下方向に食い違っていると想定されるが、深度方向の分解能は卓越波長 (約 2m) の 1/4 程度と期待できるので、数 10cm のずれがあれば検出できるはずである。当該地区での天白河川断層の鉛直変位量は Fig.18 に示されるように東海層群上部で約 50m、海部累層基底で 25m 程度と見積もられていたため、派生的な断層分岐も含めて充分検出可能であると想定された。

名古屋市消防局 (1998) は、本探査を実施した東海市新宝町において 60m 長さのオールコアボーリングを 3ヶ所で実施している。また牧野内ほか (2001) は、伊勢湾

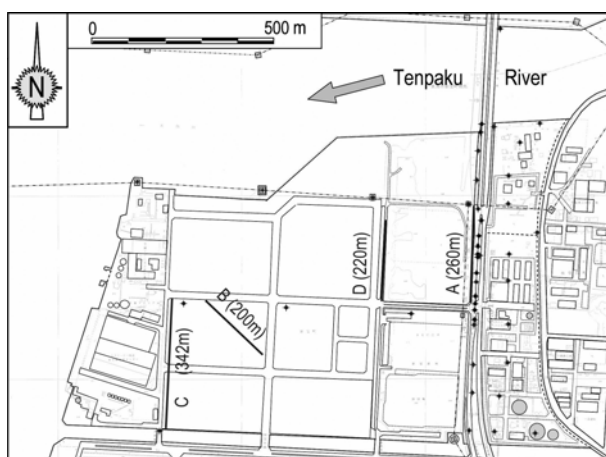


Fig. 19 Location map of S-wave reflection survey lines set at Tenpaku site. Small solid circles indicate boring points.

図一19 天白河口地区探査測線位置図。黒丸はボーリング地点に対応。



Fig. 20 A photo showing field survey condition along the A Line.

図一20 天白河口地区 A 測線測定風景

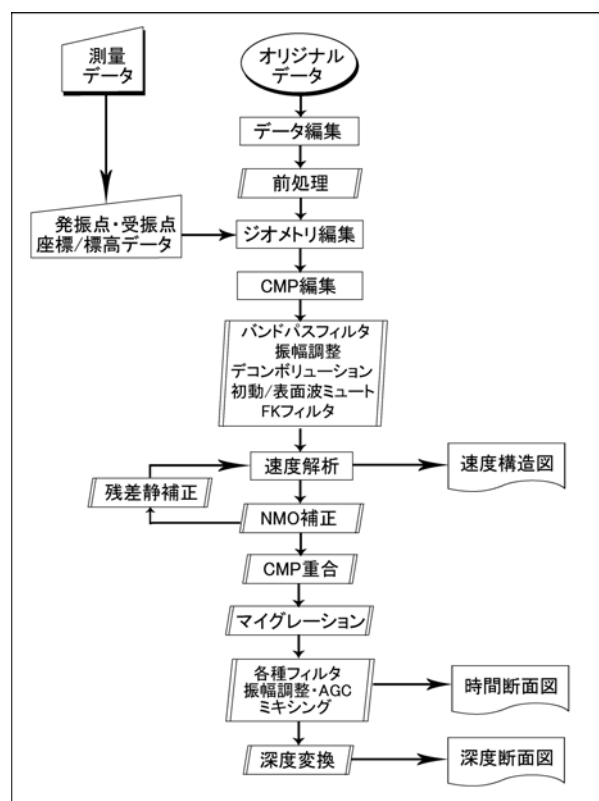


Fig. 21 Flow diagram of data processing for the S-wave Land Streamer reflection survey conducted at Tenpaku site

図一21 S 波ランドストリーマー浅層反射法探査記録データ処理流れ図

岸道路に沿って実施されたボーリングの残存コアを詳細に分析し、伊勢湾岸部の東西方向の浅部地質構造を明らかにしている。これらと本測線に沿って以前に実施されていたボーリング調査資料を参考に、反射断面を解釈した。

A 測線の深度断面 (Fig.22) には、深度 25m 付近に北へゆるく傾斜する連続性の極めて良好な反射面が認められる。この反射面の上位・下位にも、ほぼフラットな反射イベントがいくつも認められるが、断層に対応するような著しい不連続は認められない。なお表層の 3 波は、舗装内部からの反射と考えられる。ボーリングデータとの対比から、当該境界は南陽層 (沖積層) とその直下に分布する第一礫層との境界に対比することができる。また深度 10m 付近に地層不連続境界を引くことができるが、これは南陽層内の上部層と下部層の境界に比定される。南陽層上部はゆるい砂層を含むが、N 値は最大でも 5 程度である。上部層層準では斜交する波群が認められ、測線距離 170m 付近には、下位層を削り込んでいる小規模なチャンネル状堆積構造がある。ボーリングデータに基づいた断面 (Fig.18) ではレンズ層として解釈されていた部分に対応する。深度 10m~25m 間は、海成粘土を主体とする南陽層下部層に比定される。反射面はほぼ平行で、振幅も小さい。ボーリング資料では下部層は N 値 0 (自沈) を示す区間が多い。このように、S 波ランドストリーマーによる浅層反射法探査断面からは、ボーリングデータと調和的かつより詳細な地質構造情報を取得することができる。またこの断面では、第一礫層および南陽層中には明瞭な断層構造は認められず、天白河口断層の活動時期を第一礫層堆積以前に限定することができた。

Fig.23 (上) の D 測線深度断面には、深度 30m 付

Table 2 Survey parameters at Tenpaku Site

表一 天白河口地区測線測定条件

Line	A	D	C	B
Parameters				
Length	260m	220 m	342 m	200 m
Group interval		0.5 m		
Geophone type		L21/28 Hz/Horizontal		
Geophones/Station		4		
Shot interval		0.5 m		
Source type		Plank Hammering		
Minimum offset		1 m		
Vertical stack	16	8	4-8	4-8
No. of shots	472	401	643	393
Bin size		0.25 m		
Max. folds		24		
Acquisition tool	Land Streamer		Spiked Geophone	
Recording system	ABEM Mk6+		OYO DAS-1	
Recording channels	48		48	
Sample rate		1 ms		
Record length		1024 ms		
Average speed (shots/hour)	20	50	34	30

近に連続する強い反射面 (地層境界) が認められる。大まかな構造は A 測線断面と類似しており、この北にゆるく傾斜する反射波群は第一礫層に比定される。南陽層上部砂層・下部粘性土層の出現深度・内部構造も A 測線と類似している。一方第一礫層下部層には、波曲状構造が認められる。これが堆積構造であるとする、少なくとも深度 60m 付近までは東海層群ではなく、砂質層が優勢な熱田層ないし先熱田層に対比されうる。本解釈断面内でも、第一礫層より上位層はよく連続しており、小規模

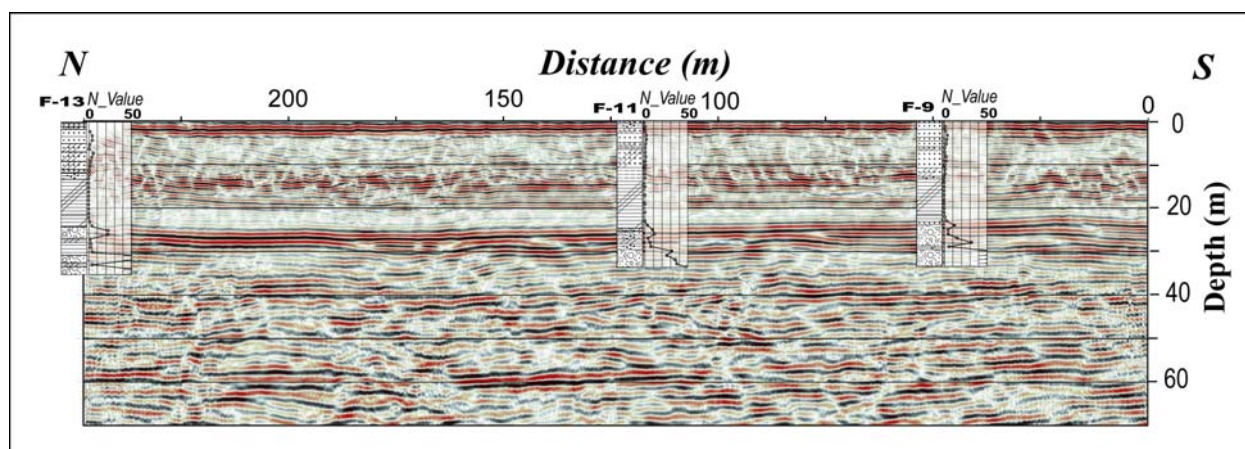


Fig. 22 A migrated depth section along A Line, at the Tenpaku site, with geotechnical drilling data superimposed (revised from Inazaki, 2004).

図一 22 天白河口地区 A 測線反射深度断面図 (Inazaki, 2004 を改変)

なずれは認められるが、想定される大規模な落差を有する断層構造は認められない。

C 測線深度断面 (Fig. 23 下) では、第一礫層相当の反射面は深度約 30m に出現し、ほぼフラットである。測線距離 230m 付近で急に振幅を減じてせん滅するようにも見える。測線南端付近のボーリング資料では、対応深度約 25m~34m にかけて N 値 30 前後の砂質土層が分布しているが、北端付近のボーリング資料では層厚が 2m 程

度に減じている。上部層の水平方向の連続性は、A 測線と比べると良くはないが追跡可能であり、その中に大規模なずれは存在しない。第一礫層下位層もほぼフラットで、連続性はよい。なお測線距離 50~100m 付近および 300m 付近に小規模な削り込み構造が認められる。

当該地域での高分解能反射法探査の適用の結果は、以下のように要約することができる。

①：反射断面には第一礫層と上位の南陽層に対応する反

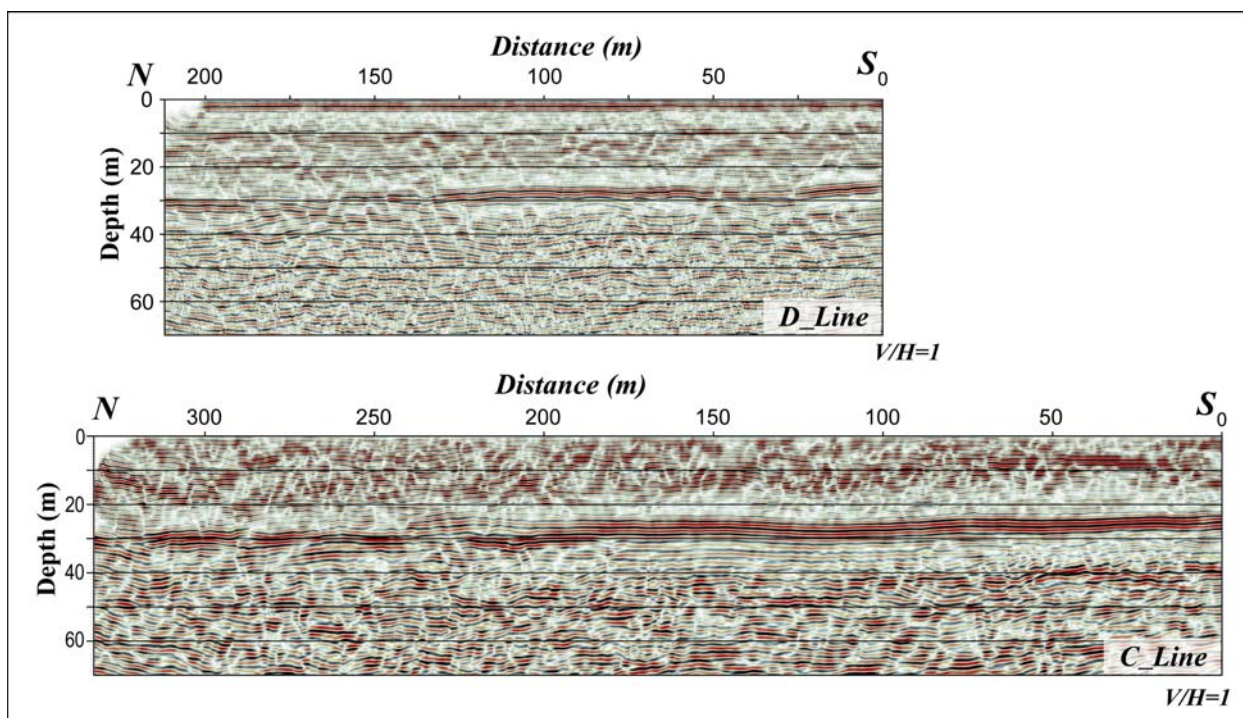


Fig. 23 Migrated depth sections of D (top), and C (bottom) Line at the Tenpaku site.

図-23 天白河口地区 C, D 測線反射深度断面図

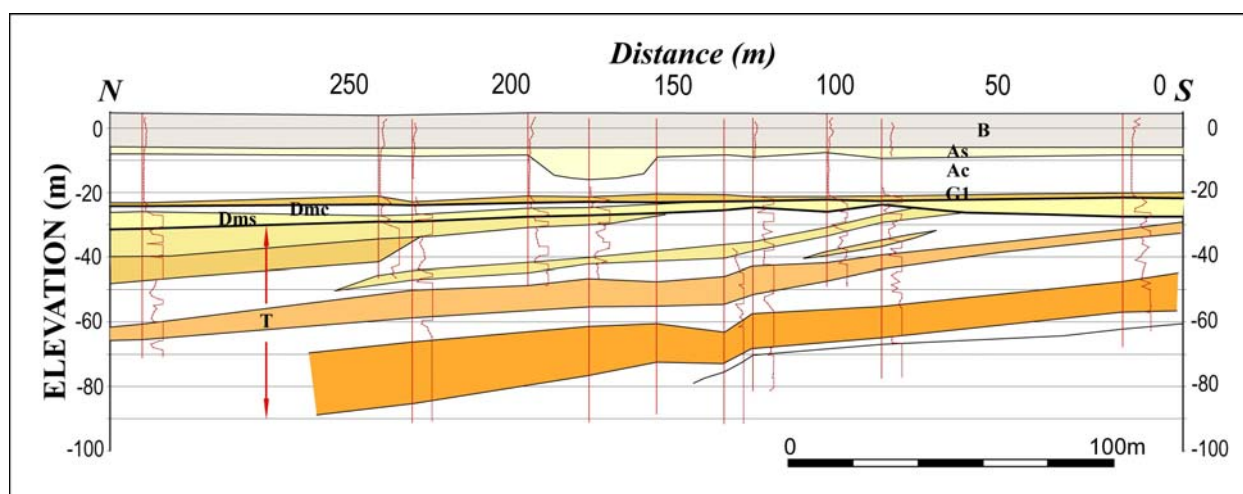


Fig. 24 An interpreted geologic section along the A Line based on the S-wave Land Streamer reflection survey in combination with additional boring data. B: Dredged sand, A: Holocene Nanyo Formation, G1: First Gravel Bed, Dm: Late Pleistocene Ama-Yatomi Formation, T: Tokai Group.

図-24 A 測線地質解釈断面図。B: 浚せつ盛土, A: 南陽層, G1: 第一礫層, Dm: 海部一弥富累層, T: 東海層群。

射波群が明瞭に認められ、微細な堆積構造を復元・解釈することができる。

②：第一礫層と南陽層の連続性は良好で、それらに変位を与える断層を解釈することは困難である。

③：A 測線の断層交差想定部での第一礫層下位層中の構造は、変位量の大きな断層を考慮しなくても不整合、あるいは屈曲で解釈できる。

これらより、当該地域では、天白河口断層の最新活動時期は第一礫層と南陽層の堆積以前であり、Fig.24 に示されるように下位の先熱田層・東海層群の上部についても、大きな断層構造を考えないでも解釈することができる。

前述のように、本適用調査の成果を受けて名古屋市によって当該地域で浅層反射法とボーリング調査を組み合わせた活断層調査が追加実施された (Fig.12b) . 浅層反射法探査測線は上記のD 測線とその延長上に設定されている。しかしこの探査での起振点/受振点間隔はともに5m であったため、深度100m 以浅の構造は不鮮明であり上位層の変位の有無は確認することが困難である。一方、深度250m 付近の東海層群中の反射面が約25m ずれていると解釈された。ずれのセンスは北落ちで、断層面の傾斜は70 度程度と見積もられている。

これらの調査結果をもとに、当該地域に天白河口断層があることはほぼ確実であるものの、その活動時期は時代的に古く、最近の活動性は低いと評価された (名古屋市消防局, 1998) .

4.2 小間隔ランドストリーマーを用いた高分解能極浅層反射法探査

浅層反射法探査のうち、特に深度10m 程度以浅の表層部を対象とする探査を極浅層反射法探査と称することがある。極浅層反射法探査に対するニーズは、地下浅所の開発・調査機会の多い都市域で高いことが想定される。都市域の表層は基本的にアスファルトで覆われているので、舗装上でも探査が可能であるランドストリーマーを用いることで極浅層反射法探査を実施することができる。そこで極浅部を対象とする、前述のように受振点間隔を狭めた小間隔ランドストリーマーを開発し、まずその特性を評価するための基礎実験を実施した (稲崎, 2001a) .

小間隔ランドストリーマーの仕様を Table 3 に、外観を Fig. 6a に示す。地震計ユニットと牽引ベルトを一体化したことが、小間隔ランドストリーマーの特長である。最初に製作したランドストリーマーは、牽引ベルト、着脱式地震計ユニット、CDP ケーブルから構成され、全体重量は約180kg である。この重量は、人力2 人による牽

Table 3 Technical specifications of short-spacing type Land Streamer

表-3 小間隔ランドストリーマーのツール仕様

Specifications	Short-spacing Type
No. of Channels	48
Natural Frequency	40 Hz
No. of Elements	1
No. of Belts	1
Channel Spacing	20 cm
Length of Active Section	9.4 m
Total Length	20.5 m
Geophone Unit	Fixed on the Belt
Total Weight	Ca. 80 kg

Table 4 Survey parameters of a line set on a test pavement at PWRI

表-4 土木研究所構内実験測線測定条件

Site	PWRI
Line	LS_20P
Survey Length	60 m
Geophone Spacing	20 cm
No. of Channels	48
Source Type	Plank Hammering
Vertical Stack	2
Shot Interval	20 cm
Min. Offset	40 cm
Total Record	262
Recording System	ABEM Mk6+
Crew Person	4
Recording Time	2.0 h
Average Speed (shots/hour)	130

引が可能な範囲内ではあるが、1 時間あたり60 回程度以上の作業を繰り返すことは大変であった。このため前方に配置した観測車を利用して牽引する方法を採用してきた。また準備として地震計ユニットの装着作業が必要になる。一体型ランドストリーマーでは現地で組立てする必要がなく、すぐに計測を開始することができる。ただし探査対象領域に対応させて受振点間隔を調整することはできない。新たに開発した小間隔ランドストリーマーは、探査対象を20m 以浅の地表部に限定し、受振点間隔を20cm に、またチャンネル数を48 とした。したがってランドストリーマーのアクティブセクションの長さは9.4m となる。ストレッチセクションをあわせて全長を20m とした。重量は約80kg で、独りでも簡単に牽引移動が可能で、現場計測作業の省力化・簡素化が期待できた。なお本型では、ツールの軽量化と低価格化を図るためにチャンネルあたりの地震計エレメント数を1 個にした。これは従来型の1/4 であり、取得記録のS/N 低下が懸念された。そこで、舗装路面とのカップリングを高め、か

つ形状に起因する機械的雑音の影響を低減化させるように、地震計ユニットに設計改良を加えた。

開発・製作した小間隔ランドストリーマーの適用性および操作性を検証するために、土研構内に敷設した簡易舗装路面上で探査実験を実施した。測線位置図を Fig.25 に、測定パラメータを Table 4 に示す。

まず、小間隔ランドストリーマーの信号取得機能を評価することを目的として、従来のスパイク型地震計との比較計測を実施した。Fig.26 は、舗装路面上で小間隔ランドストリーマーで取得した波形記録を、未舗装の路肩部にスパイク型地震計を設置して取得したそれと比較したものである。測定条件はほぼ同一で、振源は舗装路面上の同一地点に設置した。ただし後者では約 50 cm の振源オフセットが生じている。ランドストリーマーを未舗装路肩部に設置して観測した記録 (Fig.26b) では、チャネル毎にカップリングの影響によるゆらぎが認められる。一方スパイク地震計記録 (Fig.26c) では、チャネル間のカップリングの影響は小さく、イベントがよく整列している。しかし両者とも全体として表面波が卓越し、反射イベントがマスクされている。これに対し、舗装路上でのランドストリーマー記録 (Fig.26a) では、表面波成分のエネルギーが相対的に小さく、反射イベントを明瞭に識別することができる。ただしカップリングの不良なトレースが散見された。これより、シングルベルト型のランドストリーマーでは、カップリング不良による低品質

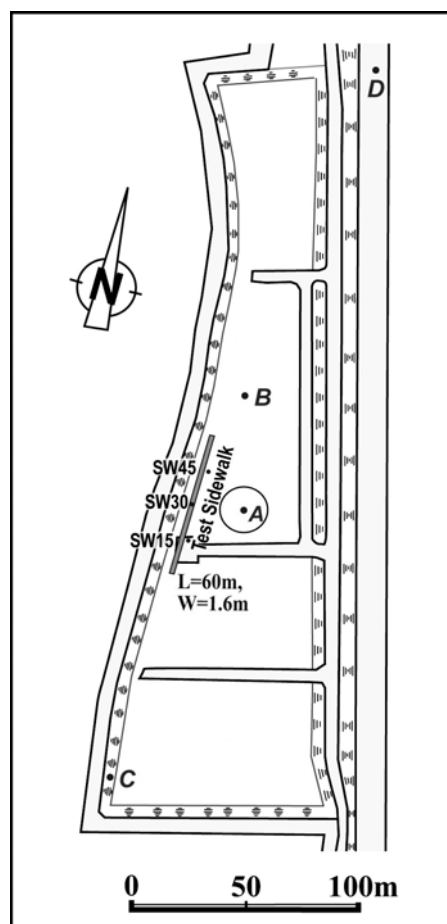


Fig. 25 Geometry of the test sidewalk constructed in PWRI Tsukuba Site.

図一25 土研構内探査測線位置図

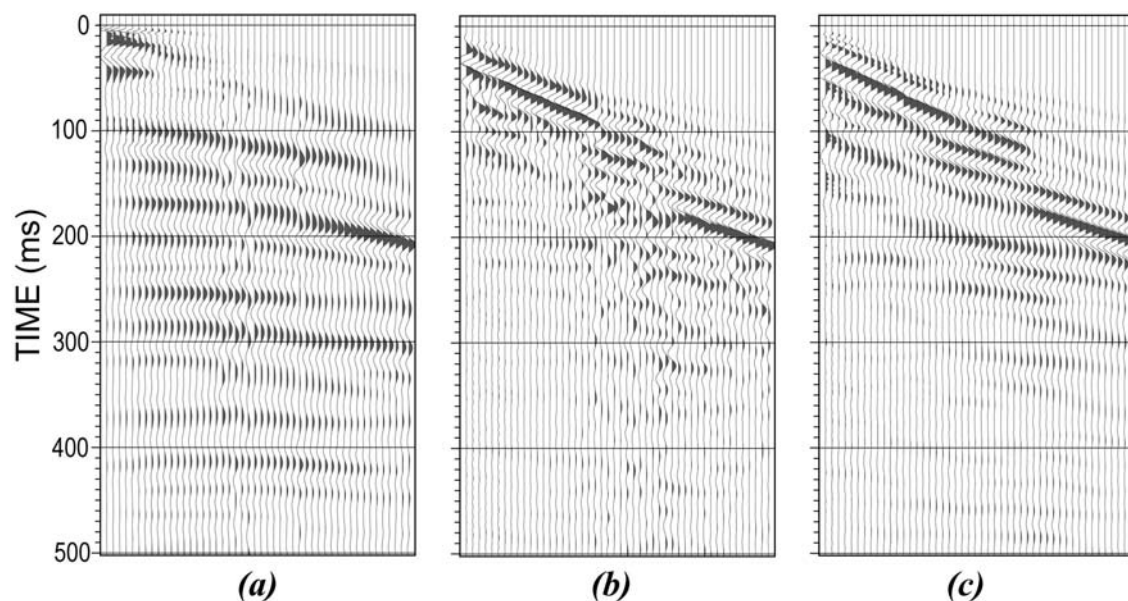


Fig. 26 Comparison of common shot gathers recorded using short-spacing type Land Streamer (Inazaki, 2002). (a): A short-spacing type Land Streamer record on the test sidewalk; (b): A short-spacing type Land Streamer record on the soft shoulder along the sidewalk; (c): A spike geophone record on the soft shoulder along the sidewalk.

図一26 小間隔ランドストリーマー記録波形比較(Inazaki,2002). (a): 簡易舗装上小間隔ランドストリーマー記録波形, (b): 地面上小間隔ランドストリーマー記録波形, (c): 地面上スパイク地震計記録波形.

トレースの混合率が相対的に高くなることが想定されるものの、従来のスパイク型地震計による地面での測定よりは反射波の分離が良好であること、また通常の反射データ処理に先立ち、トレース編集などの入念な品質管理を施すことが重要であることが示された。

ところで従来のランドストリーマー探査では、舗装面上に振源板をカップリングさせるために、従来ミニバックホウなどの重機のブレードを使用していた。しかしその使用のためには測線区間を工事区域として届け出る必要があり、また重機の使用・操作に経費がかさむという問題があった。ランドストリーマー探査の適用を拡大するには、より簡便に操作できる振源を工夫することが求められた。そこで手押し油圧制御式フォークリフトと振源板、重石用鋳鉄ブロックを用いた移動の容易な板叩き振源を新たに考案した。これを用いることで、次点への移動および設置にかかる時間を 20 秒以下にまで短縮させることが可能となった。実際、打撃回数を各点 4 回とした場合、起振点 250 点の取得に要した時間は約 2 時間であった。起振回数を少なくすれば、1 時間あたり 180 ～ 200 点での起振作業が可能になる。この測定作業効率は、地中レーダー探査に比べると依然として小さいが、得られる断面の品質の点からは充分に対抗できるものと考えられる。

小間隔ランドストリーマーの重合深度断面を Fig.27 に示す。測線距離 15, 30, 45m 地点で実施したコーン貫入試験 (CPT) のプロファイルを重ねて示してある。なお 30m 地点ではサイズミックコーンによる S 波 VSP も実施

しており、そのプロファイルもあわせて表示した。また測線近傍 (B 地点) で実施されていたボーリングによる地層構成を断面右端に示した。同図に示されるように、小間隔ランドストリーマー探査は深さ 15m 程度以浅の詳細な地質構造のイメージングに成功しており、それはボーリング調査結果および CPT と極めて調和的である。たとえば、深さ 5m 付近の砂層の出現が CPT プロファイルで捉えられているが、その深度に連続する強い反射イベントが再現されている。10m 付近に出現する反射イベントは砂層と高有機質土層との境界に対比される。実験サイトは盛土地であるが、測線部での盛土層と元地盤との境界は、深さ 2.2m 付近であることが部分掘削によって確かめられている。この深度にも振幅は小さいが起伏する反射イベントが認められる。深さ 3.5m 付近にも連続する反射面が認められる。この境界は VSP プロファイルや柱状図では明瞭であるが CPT の貫入抵抗プロファイルでははっきりしない。しかし周辺摩擦比プロファイルではこの境界は明瞭であり、風化ローム層の上面に対比される。

この図に示されるように、小間隔ランドストリーマーを用いた極浅層反射法探査によって、15m 程度以浅の表層地盤の詳細な構造をイメージング可能であることが示された。前述したイメージング最浅深度限界によって最表層 1m 程度はイメージングできていないが、GPR では把握が不可能であった 2m 以深の領域の調査に、小間隔ランドストリーマーを用いた極浅層反射法探査が有効であることが実証された。

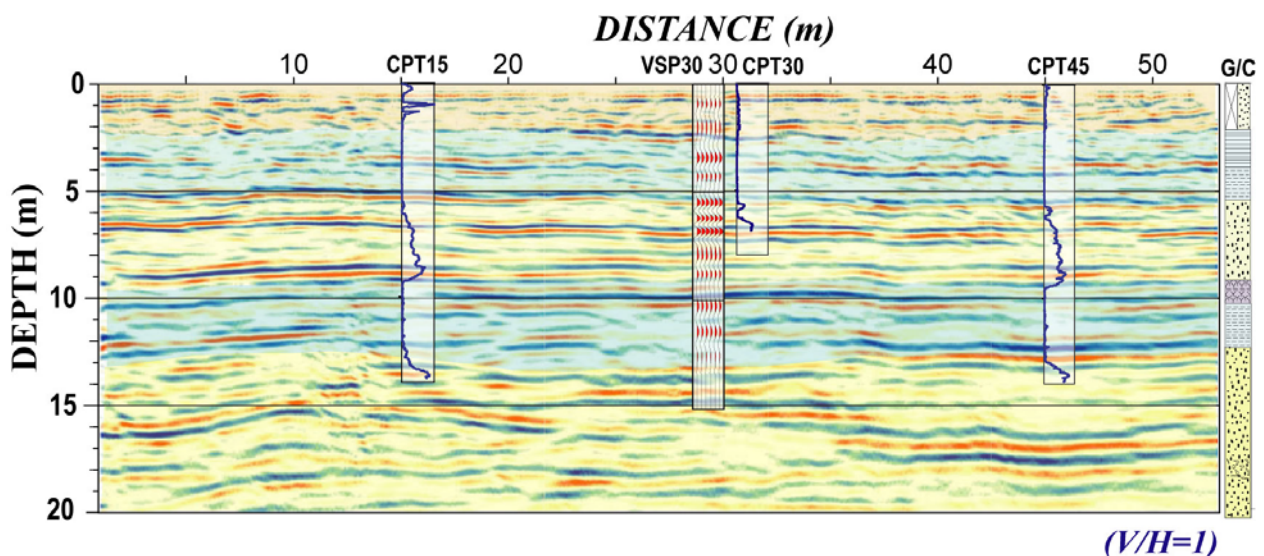


Fig. 27 An interpreted depth section along the test sidewalk provided using short-spacing type Land Streamer (revised from Inazaki, 2002). CPT and VSP profiles are superposed on the section along with a geologic column for borehole B.

図-27 小間隔ランドストリーマーによる極浅層反射法探査深度断面 (Inazaki, 2002 に加筆)

4.3 堤防調査への適用

近年多発した大規模洪水事故を受けて、既存堤防の質的向上が治水対策の中核的課題として位置づけられ、既存堤防のかさ上げ、高規格堤防の整備、そして既存堤防の弱点箇所の補強等の堤防整備が推進されている。河川堤防の管理区間延長は全国で 10,000 km 以上あり、堤防の弱点箇所、すなわち破堤やその誘因となる損傷をこうむるポテンシャルの高い部分の点検調査を効率的に進めることが求められている。この点検調査では、まず概査として目視点検による変状箇所の抽出し、次に簡便な物理探査や連通試験などの精査を変状箇所で行うという手順がとられている。しかしこの点検調査は、基本的に樋管・樋門などの堤防横断工作物部分を対象としており、堤防全区間を対象としたものではない。またどのような物理探査を、どのような測定条件で適用するかも明確にはなっていなかった。

経験則として、旧河道交差部が堤防の弱点箇所になっている、ということはほぼ認知されているようである。空中写真判読や、現地調査による微地形分類によって旧河道部を識別することは可能であり、実際それによる基図情報が提供されている。しかし沖積低地では、地表に地形的兆候が認められなくても、地下に埋没谷が分布する場合があります。また旧河道部に多段状に埋没谷が形成されている場合も知られている。空中写真ではせいぜい数百年前以降に形成された旧河川地形しか判読できないといわれている。S 波浅層反射法探査は、そのような伏在埋没谷検出に大きく貢献してきた（たとえば稲崎, 1984）。S 波浅層反射法探査は、埋没谷調査の有効な物理探査手法として、検証済みであるといつてよいであろう。

このランドストリーマーを活用すれば、堤防の弱点箇所調査をより効率的に推進することが可能になると期待された。そこで、同ツールを用いて実際の堤防において探査実験を実施し、堤体内部構造の再現性、構造分解能当を評価するとともに、実用化の鍵となる作業条件検討とコスト分析を実施した（稲崎, 2002）。その概要を以下に報告する。

探査実験を実施したのは小貝川左岸 34km 付近の堤防である。対象サイトは、旧河道との交差部に排水樋管が設置してあり、台地との接合部にも近い。探査地点の位置図を Fig.28 に、測線での測定条件を Table 5 に示す。

本探査実験には、受振点間隔 20cm の小間隔ランドストリーマーを使用した。また探査機は土木研究所保有の ABEM Mark6+を使用している。震源には人力板叩き法を採用し、4~8 回の垂直重合を実施した。振源板の押付けには重石と油圧式台車を組み合わせた振源板・重石一

体移動法を採用しており、高い現場作業効率を達成できている。実際、Table 5 に示したように、筆者と作業員 3

Table 5 Acquisition parameters of a line set on a levee along Kokai River

表一五 小貝川堤防上測線測定条件

Site	Kokai River
Line	Kokai_34L
Survey Length	480 m
Geophone Spacing	20 cm
No. of Channels	48
Source Type	Plank Hammering
Vertical Stack	2
Shot Interval	40 cm
Min. Offset	40 cm
Total Record	1200
Recording System	ABEM Mk6+
Crew Person	4
Recording Time	11 h
Average Speed (shots/hour)	110

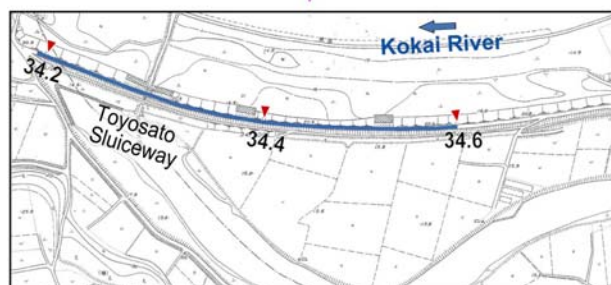
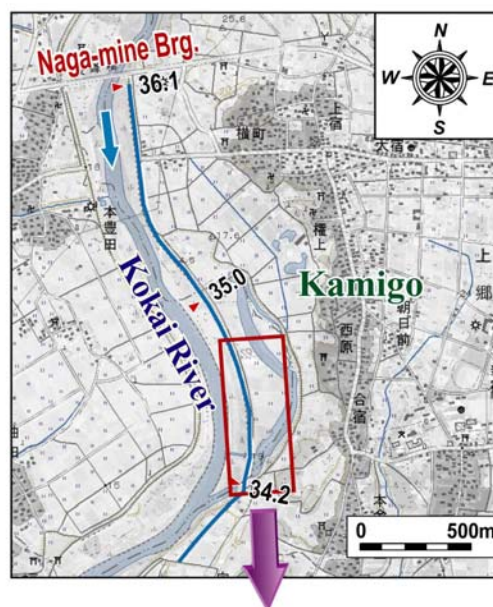


Fig. 28 Site map of high-resolution S-wave reflection survey. The line was set on a levee along the Kokai River.

図一28 小貝川堤防上測線位置図

国土地理院発行 1/2.5 万地形図「上郷」使用

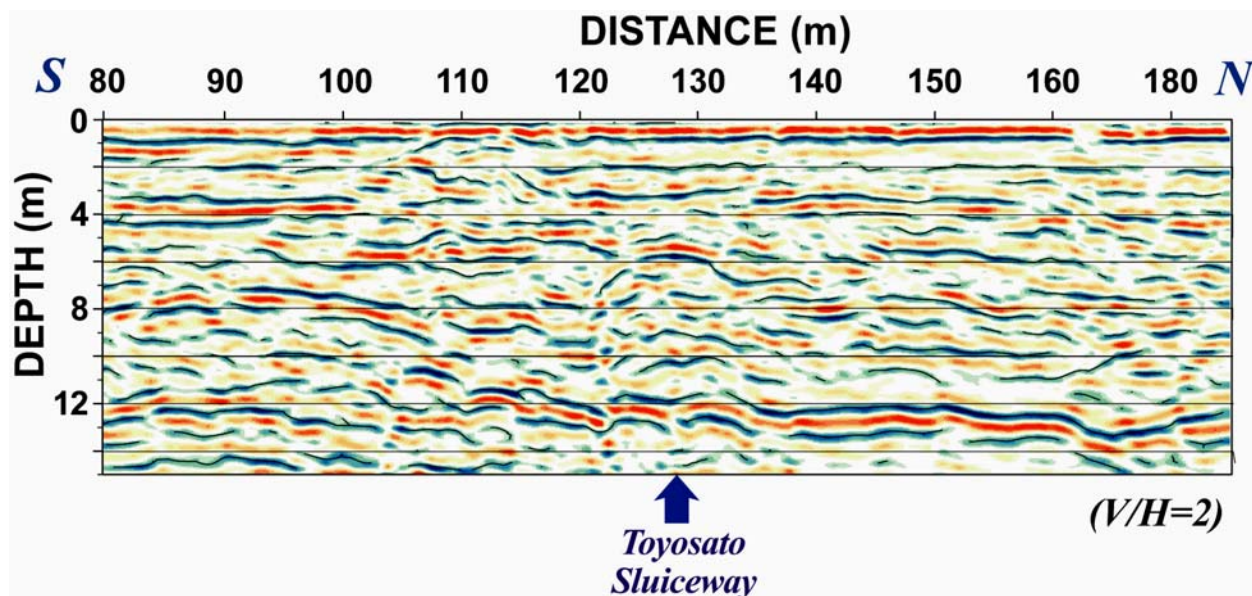


Fig. 29 A depth section along a levee provided using short-spacing type Land Streamer (revised from Inazaki, 2002). Diffraction event from the concrete culvert appears clearly at 128 m, about 6 m in depth.

図-29 小間隔ランドストリーマーによる堤防探査深度断面(稲崎, 2002 に加筆)

名の4人構成で、約500mの測線を1.5日で測定することができた。したがって人件費・機械経費を合わせても、現場経費は数10万円程度に抑えることができています。取得したデータを、WindowsXP上で動作する反射法データ処理ソフトウェア「VISTA」に読み込み、データ処理した。汎用のPCと比較的安価なソフトウェアを使用しているため、内業にかかる経費も数10万円程度と見積もられた。処理手順は通常の反射法データ処理と同様であるが、舗道上で実施したS波高分解能反射法探査データについては、屈折静補正の解析が原理的にできないことから残留静補正のみを施している。深度変換にあたっては、樋管の深度を基準にして重合速度を調整した。したがって極表層部の深度再現精度は高いと想定されるが、深部、あるいは基準として利用できるような外的情報がない場合は、深度変換の精度はあまり期待できない。

重合処理後の深度断面をFig.29に示す。断面には測線距離128m部に横断樋管からの回折波が明瞭に捉えられている。測線直下に樋管継ぎ手部の張り出しがあり、その深度は図面から5.3mと見積もられた。この樋管回折波より上面に位置する反射面は、基本的に堤体内部からの反射波である。樋管周辺で、それらの反射イベントが乱れていることが確認できれば、堤体表面で観察される変状の内部へのつながりを評価することができるようになる。しかし、再現された反射断面は全体に反射イベントの連続性が不良であり、変状に対応する微細な構造異常を識別することは困難であった。樋管横断部での反射

面の乱れは他の探査事例でも認められており、開削による擾乱の影響と考えられる。この樋管横断部では、堤防表面の形状から測線距離95~160m間が開削区間と推定された。この開削による擾乱帯の外側では、深さ4m付近にほぼ水平な反射面が認められる。堤防下面と原地盤との境界に比定される。断面の南側80-110mの区間には、深度8m付近に出現し、北側へゆるく傾斜する反射面が認められる。また深さ12m付近に出現する反射面は、北側にほぼフラットにつながる。この反射面は35.2km付近まで追跡することができ、34.6-34.9km区間で3m程度出現深度が深くなる。この形状から旧河道の上面、すなわち沖積層の基底面と解釈することが可能である。

5. 都市域表層地盤構造調査へのランドストリーマー浅層反射法探査の適用性

S波ランドストリーマーを用いることで、都市域における浅層反射法探査の適用性を拡大することができる。ツールがコンパクトであり、占有区間が短く機動性に優れている。組み立てが容易で牽引移動も簡便であることから現場作業の効率化を図ることができる。またランドストリーマーツールは、舗装路上での使用を前提としている。都市域では道路に探査測線を設定するほうが有利であり、計測に車両を活用することも簡単にできる。一方で一般通行車両への障害とならないような手立てが必要となる。コンパクトといえどもランドストリーマーは

全長が 30m 程度あり、占有区間は観測車や震源まで含めると 40m 近くになる。この区間でランドストリーマーを横断しようとする車両がある場合、ツール上をそのまま車両が通過するとツールが破損したり、また車両が損傷する恐れがある。測線が交差点部を横断する部分で計測作業を実施する場合、従来はツールが通過するまで一時的に交通を遮断していた。その時間が 2 車線道路では 40 分程度になる場合もあった。そこでツール上を車両が横断できるように簡易的な通過ステップを開発した (Fig.30)。

ランドストリーマー反射法探査における影響の大きなノイズに風がある。特に S 波反射法探査では水平方向の振動を感知するセンサを使用しているため、もともと横風の影響を受けやすい。さらにランドストリーマーは非固着カップリング方式のため、さらに影響を受けやすい。その風の影響を如何に低減するか、現場作業を重ねる中で工夫を蓄積してきた。最初の試みは農業用ビニールトンネルでツール全体を覆うことであった。Fig.31 に示すように、確かに風の影響を低減することができた。しかし強風時には全体が風にあおられて逆にノイズ発生源になることが認められた。次に径 30cm 程度の塩ビパイプを縦に反割りにし、カマボコ状に加工したものを被せることを試みた。この方法は極めて効果的で、強風下・強雨時でも高品質の記録を取得することに成功した。しかし重量があり、搬送保管も容易ではない上、材料としては高価であることが問題となった。その次の工夫は貨物



Fig. 30 A photo showing steps for a vehicle to pass over the Land Streamer

図一30 ステップによる通過車両制御

用幌生地を被せることであった。幌生地は折り畳みが簡単で搬送保管の問題がない。これで風によるノイズをかなり低減することができることがわかったが、やや軽量で強風にあおられてしまうという弱点があった。最近では長尺のゴムマットを被せる方式を採用している (Fig.32)。重量があるため強風時でもあおられることはなく、また搬送時には巻き立ててコンパクト化をはかることもできる。これらの工夫により現地作業効率は向上し、現在では多少の降雨や強風下でも計測作業を中断することなく実施することができるようになり、作業効率を向上させることができた。現状では起振点数で一日

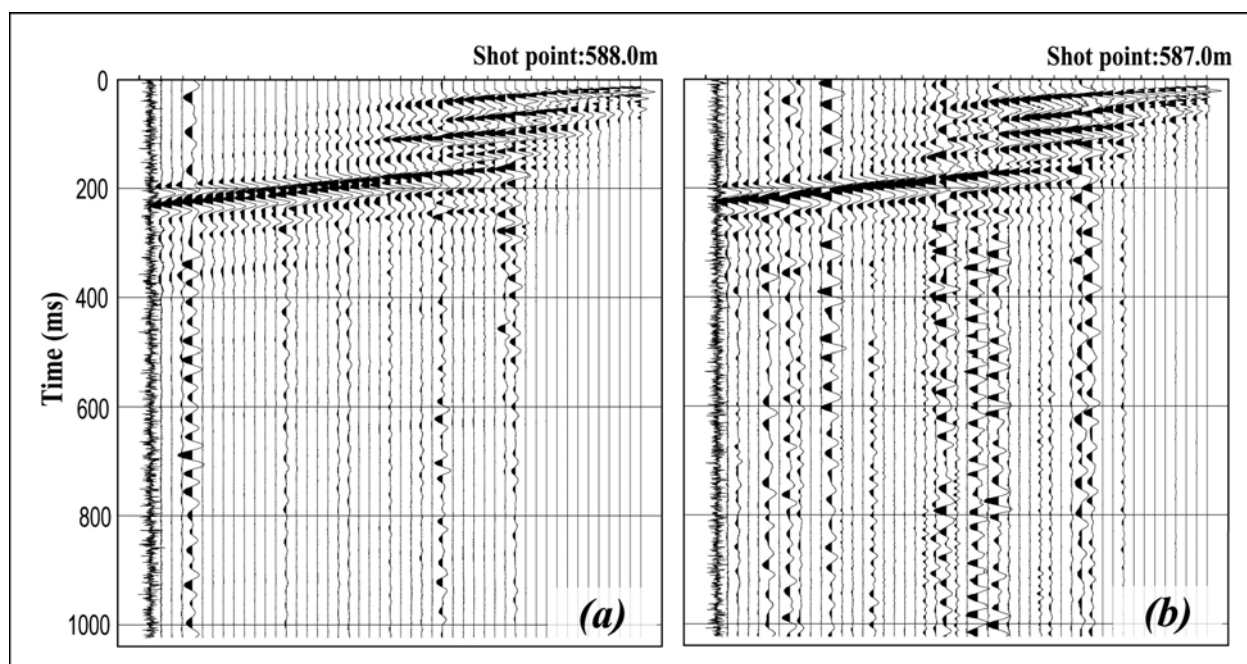


Fig.31 Comparison of shot records with windbreaker hood (a) and without hood (b).

図一31 防風ツール利用による風ノイズの低減 (a): 防風ツール被覆時の記録例, (b): 防風ツール無被覆時の記録例

500 点～800 点（測線距離は起振点間隔に依存するが、おおむね 250m～500m 程度）まで実施可能になってきている。

6. まとめ

土地利用が高度に進展し、地表の大部分が舗装で覆われている都市域においても、高精度での表層地盤構造調査を可能にする S 波ランドストリーマーと称する計測装置を開発し、現地調査に活用した。

都市域は地表・地下空間開発に伴う表層地盤調査のニーズが極めて高い。この地盤調査には従来スポット的なボーリング調査が多用されてきた。しかしボーリングでは調査地点の詳細情報は得られても、2 次元的な地盤の広がりや局所的な構造の把握は困難であった。我が国の大都市のほとんどは軟弱な沖積層地盤が分布する臨海平野域に立地しているが、沖積層分布域には埋没谷や埋没段丘など層厚が局所的に急変する構造が普遍的に存在することが知られている。群列ボーリング調査によってもこのような空間的な地盤構造を明らかにできない場合があり、2 次元的、3 次元的に表層地盤構造をイメージングすることが可能な探査・調査技術の開発適用が求められていた。都市域の表層地盤構造の把握は、地震防災の面においても重要性が拡大してきている。

空間的な地質構造を詳細にイメージングすることが可能な探査技術の一つに反射法地震探査技術がある。同探査技術は燃料資源探査や基盤構造調査など深部地下構造調査に用いられてきており、最も重要な物理探査手法の一つとなっている。反射法地震探査技術のなかで浅部を対象とする技術に浅層反射法探査技術がある。この浅層反射法探査技術を、都市域の浅部地盤構造探査への適用することが期待された。しかし都市域は振動雑音が大きく、また地表が大部分舗装でおおわれているため従来のセンサ設置法が採用できないなど、同手法の適用を妨げる技術的課題が存在していた。そこで都市域で浅層反射法探査を実現するために解決すべき課題を整理し、技術的検討を加え独創的な計測ツールであるランドストリーマーを開発した。

S 波ランドストリーマーは、非伸縮性のベルトを牽引部材とし、その上に多数の受振器ユニットを配置した構造を特徴とする。

従来の弾性波探査では、高品質の波形データを取得するには、スパイク等を用いて地震計センサを地面に堅固に固定させる必要があるとされていた。開発したランドストリーマーは、牽引移動の繰り返しを容易にするため、

センサ類は地面と固着させていない。センサを内蔵した受振器ユニットは、ベースプレートを介して地面と面接触しているだけである。このようなセンサ非固定方式を採用しているにもかかわらず、S 波ランドストリーマーツールは、S/N の良好な波形データの取得を可能にした。さらに従来の弾性波探査では、測線の一部に地震計と信号ケーブルを設置し、測定が終了したら次の区間に地震計類を設置し直して測定を繰り返す、という手順をとっていたが、この作業には多大な労力と時間を必要としていた。これに対し開発したランドストリーマーを用いた測定では、ツールを車両あるいは人力で一定区間牽引移動させるだけ、という極めて簡易な操作でこの手順を遂行することができる。特に反射法探査では、測線区間内の計器類の移動作業を頻繁に繰り返す必要があり、当ツールを活用することで、反射法探査の現場計測の作業性を飛躍的に向上させることが可能になった。

S 波ランドストリーマーは、測定所要時間を短縮化し、さらに探査に関わる土地の使用領域も狭小化することができることから、その面での制約が厳しい都市域での弾性波探査に適したツールといえよう。実際、都市域での探査に適用した結果、表層地盤の詳細な構造を把握することができた。

前述のように、本ツールは受振器ユニットを交換するだけで、S 波反射法探査だけではなく P 波探査や表面波探査へも利用することができる。既にこのような受振器ユニットを製作し、当該探査を実用化した。また小間隔のランドストリーマーツールを開発し、深度 2m 程度までを対象とする極浅層反射法探査という新しい探査領域を開拓した。一方活断層調査を目的とした反射法探査では、依然として従来の地震計固定方式が主流となっている。今後は中深部を対象とした反射法探査に、本ツールを適用拡大することを計画している。

なお実機タイプのランドストリーマーの製作は、ソフィー(株)の田中倫美氏によるものである。さらに田中氏には数次にわたって現地検証実験に立ち会っていただいた。氏の多大なる助力に深甚の謝意を表する次第である。またプロトタイプのランドストリーマーの考案・開発に際して、ダイヤコンサルタントの故西田薫氏、地質調査所（現産総研）の渡辺史郎氏、NTT フィールド技術センター（当時）の黒岩正信氏らとの技術交流が極めて有益であった。土木研究所地質チームの倉橋稔幸氏には、計測機材の整備や現場計測の準備等に多大な協力を得た。氏らの貢献に改めて感謝の意を表します。

参考文献

- 田 望, 森谷 武男, 小川 逸郎, 田治米 鏡二 (1965) : 浅層反射法, 北海道大学地球物理学研究報告, vol.14, p81-93.
- Eiken, O., Gegutsch, M., Riste, P., and Rod, K., (1989) : Snowstreamer: An efficient tool in seismic acquisition: First Break, Vol.7, p374-378.
- 林 宏一・岡田 聡・鈴木 晴彦・稲崎 富士 (2003) : ランドストリーマーを用いた表面波探査, 物理探査学会学術講演会講演論文集, 第 108 回, p298-301.
- 稲崎 富士 (1983a) : S波を利用した浅層反射法の実験的考察, 土木技術資料, Vol.25, No.2, p3-8.
- 稲崎 富士 (1983b) : S 波反射法による礫層調査, 物理探査学会講演会講演予稿集, 第 69 回, p43-44.
- 稲崎 富士 (1985) : P波およびS波浅層反射法による浅部地盤構造調査, 物理探査, Vol. 38, p201-209.
- 稲崎 富士・神保 悟・阿部 昌彦・長沢 政和 (1989) : 中洪積層を対象とした物理探査(その1) - 土木研究所地質野外実験場における総合的調査 -, 土木研究所資料, 第 2759 号, 61p.
- 稲崎 富士 (1992a) : 浅層反射法探査・解析マニュアルの作成, 物理探査学会学術講演会講演論文集, 第 86 回, p1-6.
- 稲崎 富士 (1992b) : 地盤調査技術の開発, 地下空間の利用技術の開発報告書, 第 3 分冊, 2-26, 建設省
- 稲崎 富士 (1993) : 浅層反射法マニュアル, 土木研究所資料, No.3170, p 23-65.
- 稲崎 富士 (1997) : 断層調査法の開発, 大都市域における地震防災技術の開発 土木部会 研究報告書, 平成 8 年度版, 68-77, 建設省土木研究所・国土開発技術研究センター.
- Inazaki, T., (1999) : Land Streamer: a new system for high-resolution S-wave shallow reflection surveys: Ann. Symp. Environ. Eng. Geophys. Soc. (SAGEEP1999) Expanded Abstracts, p207-216.
- 稲崎 富士 (2001a) : 極浅層反射法探査用小間隔ランドストリーマーの開発, 物理探査学会学術講演会講演論文集, 第 104 回, p127-131.
- 稲崎 富士 (2001b) : 極浅層反射法探査における表面構造の影響の実験的検討, 物理探査学会学術講演会講演論文集, 第 105 回, p24-27.
- Inazaki, T., 2002, Ultra-shallow reflection surveying using short-spacing S-wave Land Streamers: Ann. Symp. Environ. Eng. Geophys. Soc. (SAGEEP2002) Expanded Abstracts, Paper 12GAP6, 9p.
- 稲崎 富士 (2002) : 堤体内部構造調査への S 波ランドストリーマー探査技術の利用, 物理探査学会学術講演会講演論文集, 第 106 回, p55-58.
- 稲崎 富士 (2003) : P 波ランドストリーマーの開発と浅部地盤構造探査への利用, 物理探査学会学術講演会講演論文集, 第 108 回, p302-305.
- 稲崎 富士 (2004) : 高密度反射法地震探査装置, 日本国特許, 2004-020448
- 石井 吉徳 (1974) : 土地地震探査と信号改善について, 物理探査, Vol.27, p64-75.
- 加野 直巳 (2000) : 高速度表層の反射法探査に与える制限. 物理探査学会学術講演会講演論文集, 第 103 回, p302-305.
- 菊池 真市・狐崎 長琅 (1986) : 細内表面上の浅層 SH 波反射法における反射波の特徴, 物理探査, Vol.39, p275-287.
- Kruppenbach, J.A., and Bedenbender, J.W., (1975) : Towed land cable: US Patent, No. 3923121.
- 黒岩 正信・渡辺 亮・斉藤 恒範・西田 薫・是石 康則 (1985) : 反射法地震探査装置, 日本国実用新案, No. 1993081778.
- 桑原 徹 (1976) : 濃尾傾動盆地の発生と地下の第四系. 地盤沈下の実態とその対策に関する調査研究報告書, 愛知県環境部, p. 109-182.
- 桑原 徹 (1984) : ネオテクトニクス, 「地質構造の科学」(木村敏雄編), p261-292, 朝倉書店.
- 牧野内 猛・森 忍・壇原 徹・竹村 恵二・濃尾地盤研究委員会断面 WG (2001) : 濃尾平野における沖積層基底礫層 (BG) および熱田層下部海成粘土層の年代-臨海部ボーリング・コアのテフラ分析に基づく成果-, 地質学雑誌, Vol.107, p283-295.
- 名古屋市消防局 (1998) : 天白河口断層に関する調査報告書, <http://www.hp1039.jishin.go.jp/danso/Nagoya2/mokuji.htm>
- 西田 薫・近藤 章司・黒岩 正信・平野 浩治・岡田 信・名越 澄生 (1989) : 福岡市内における浅層反射法地震探査, 物理探査学会学術講演会講演論文集, 第 80 回, p1-6.
- 大島 洋志・樋口 岩雄・中林 好範 (1977) : 反射法による地質構造の解析-長崎県大村市, 長野県塩尻市の火山砕屑岩地域-, 鉄道技術研究報告, No.1033, 82p.

- Pugin, A. J. M., Larson, T. H., and Phillips, A., (2002) :
Shallow high-resolution shear-wave seismic reflection
acquisition using a land-streamer in the Mississippi
River floodplain: potential for engineering and
hydrogeologic applications: Ann. Symp. Environ. Eng.
Geophys. Soc. (SAGEEP2002) , Expanded Abstracts,
Paper P3, 7p.
- Pugin, A. J. M, Larson, T. H., Sargent, S. L., McBride, J. H.,
and Bexfield, C. E., (2004) : Near-surface mapping
using SH-wave and P-wave seismic land streamer data
acquisition in Illinois, U. S., The Leading Edge, Vol.23,
p677-682.
- 佐藤 泰夫 (1978) : 弾性波動論, 454p, 岩波書店
- Van der Veen, M., and Green, A.G., 1998, Land streamer for
shallow data acquisition: evaluation of gimbal-mounted
geophones: Geophysics, Vol. 63, p1408-1413.
- Vangkilde-Pedersen, T., Fris D. J., and Ringgaard, J., (2006) :
Five Years of Experience with Landstreamer Vibroseis
and Comparison with Conventional Seismic Data
Acquisition, Ann. Symp. Environ. Eng. Geophys. Soc.
(SAGEEP2006) Expanded Abstracts, 1086-1093.
- 渡辺 史郎・加野 直巳 (1982) : 浅層反射法, 物理探鉱,
Vol.35, p290-300.
- 渡辺 史郎・横倉 隆伸・加野 直巳・山口 和雄
(1985) : 地表における地震探査方法および地表
受振器, 日本国特許, No. 1985089788.