

表層地盤構造の再現性

-高分解能S波反射法探査と地中レーダ探査の比較-

稲崎 富士¹⁾・加野 直巳²⁾・倉本 真一³⁾

1. はじめに

地下構造調査を目的として物理探査が適用される場合、通常は特定の手法が単独で実施され、複数の手法が同一地区・同一測線で実施されるケースはあまり多くはありませんでした。これは、主に予算的な制約によるものですが、一方で各々の物理探査技術の競争を避ける、という一種の「すみわけ」が行なわれている結果であると見なすことも可能です。いくつかの物理探査技術が同一地区で実施される場合でも、探査深度や対象構造を別にするケースが多いことから、これをうかがい知ることができます。一般に、専門の物理探査技術とその担い手には、相互の干渉を避け、探査結果・適用性を比較されることを嫌い、それぞれ得意とする領域に安住する傾向があるようにみえると考えるのは、筆者達だけでしょうか？

ところで、深度20~30mより浅い地表部分についてはこれまで有力な手法がなく、物理探査技術にとって「穴場」ともいえる領域でした。表層地盤は、文字どおりの「生活基盤」として、私たちの生活環境・社会環境に密接に関わっています。道路や下水道などのライフラインのネットワークを構築し、また安全な建築物を造るためにも表層地盤の内部構造やその物性を詳細に評価することが必要とされています。さらに近年は、埋没活断層の検出やその活動履歴を評価する上でも、表層地盤の調査は極めて重要な役割を担いつつあります。

いくつかの物理探査手法の中で、この領域の探査に名乗りをあげたのが、今回紹介する地中レーダ探査(以下GPR探査と略称)と浅層反射法でした。GPR探査は、従来道路舗装下の空洞調査や遺跡調査など、深度2~3m以浅の極表層部の地盤調査に利用さ

れてきましたが、デジタル収録機器の機能向上や連続波発信法(鈴木ほか、本特集号)の採用によって、可探深度を数10mまで下げることが可能とされています。しかし、まだ適用実績が少なく、可探深度や構造再現性を吟味することが求められていました。一方浅層反射法は、もともと資源探査領域で適用されてきた反射法地震探査に対して相対的に浅い領域を対象とした探査を特称するものでしたが(加野・稲崎, 1998), S波を利用した高分解能反射法によって、探査対象領域を従来の数100mから数10m以浅の領域まで上げることができるようになり、表層部の地盤構造調査や活断層調査に広く適用されるようになってきています(稲崎, 1985, 七山ほか, 1998など)。

この両手法を、ある現場で同一の測線上で実施し、その適用性、特に浅部地盤構造の再現性を比較してみました。しかし公平な評価には、外的な評価基準が必要とされます。そこで第三の方法として、測線近傍でコーン貫入試験(以下CPTと略称)およびサイスミックコーンを用いた速度検層を実施しました。以下にその概要を紹介します。

2. 調査地概要

新潟平野下に伏在する角田・弥彦断層群を対象に、表層部での断層構造を明らかにするための比較調査を実施しました。新潟平野西縁部には、陸域から北方の日本海沿岸域にかけて、弥彦断層系(茅原, 1979)と称される延長70km以上に及ぶ活断層が分布しています。この断層系は、その分布形態から大きく4つのセグメントに分割されています。すなわち北から角田・弥彦断層群、鳥越断層群、上富岡断層および片貝断層群です(第1図)。

1) 地質調査所 地殻物理部(併任, 原所属:建設省土木研究所)
2) 地質調査所 地殻物理部
3) 地質調査所 海洋地質部

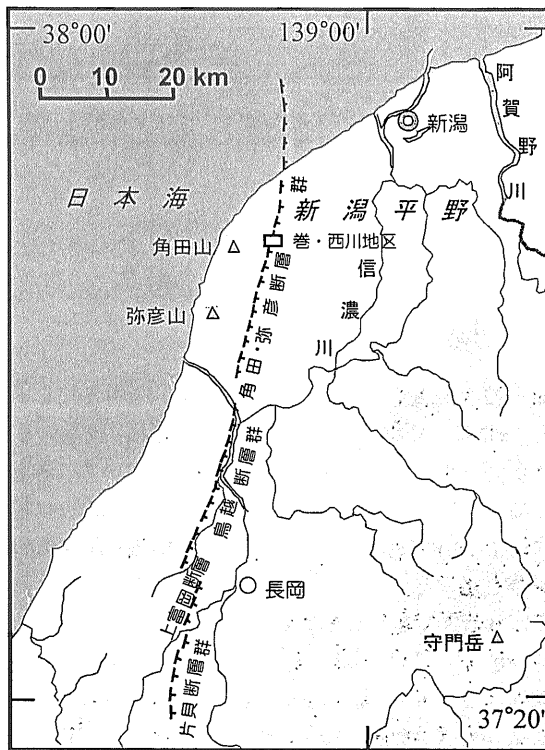
キーワード:新潟平野西縁断層群, S波反射法, 地中レーダ, コーン貫入試験

これらの断層はいずれも西側隆起の逆断層で、垂直変位量は鮮新統の灰爪層下部で最大3000m以上と推定されています。

対象とした角田・弥彦断層群は、これまでに実施された石油探鉱を目的とした反射法探査やボーリング調査で第四紀更新世前期～中期に活発な活動をした断層であることが知られています。しかし地表部は信濃川の沖積堆積物に覆われており、明瞭な断層地形は認められていませんでした。地質調査所では日本海東縁部における地震活動ポテンシャルの調査の一環として、角田山東側において断層周辺の地下構造の概略を把握することを目的として、P波による反射法弾性波探査を実施しました(加野ほか, 1998)。さらに表層部のより詳細な地下構造の解明を目的として、同地区においてS波を用いた高分解能反射法探査(稲崎・加野, 1999)とGPR探査を実施しました。

第2図は、探査を実施した巻・西川地区における測線配置を示すものです。測線は、巻町松野尾から西川町下山に向かう幅約6mのアスファルト舗装された県道上に設定しました。また測線を設定した県道脇の水田内3地点でCPTおよび速度検層を実施しました。計測地点と測線とのオフセット距離は最大でも6m以内に設定しました。

測線の起点付近は新潟平野の海岸部に特徴的に発達する古砂丘列(新潟古砂丘グループ, 1979)の上に位置していますが、測線距離約200m以遠の大部分はほぼ平坦な沖積面上に位置します。古砂丘面と沖積面との間には、3～5m程度の比高差



第1図 新潟平野西縁部の活断層の分布と調査地点(稲崎・加野, 1999)。

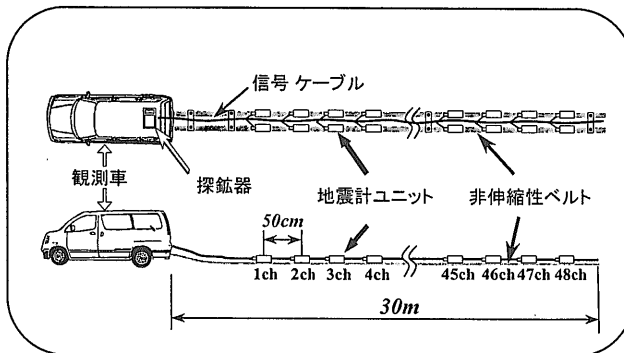
が認められます。測線中ほどの西川町中島集落は、旧河道沿いの自然堤防上に発達した集落です。

3. 調査手法概要

3.1 高分解能S波反射法探査



第2図 測線・調査地点位置図(稲崎・加野, 1999)。国土地理院発行2.5万分の1地形図「巻」を使用。



第3図 ランドストリーマーシステムの概要図(稲崎, 1997)。

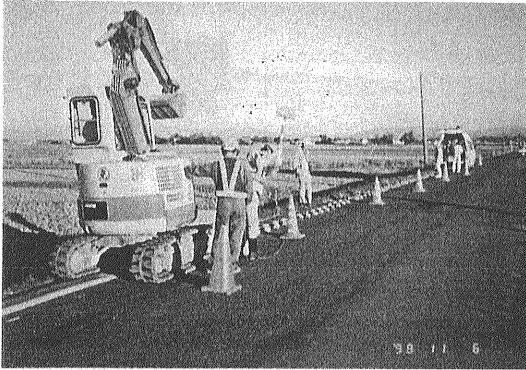


写真1 ランドストリーマーでの現地探査風景。

舗装道路上に測線を設定した場合、地震計をスパイクで固定することができないため、これまでは粘土ブロックや専用の三脚を用いて地震計を設置する方式がとられてきました。しかし、この方式は地震計の設置・移動に手間がかかる上に交通振動雑音の影響を受けやすく、調査時に大規模な交通規制を要するという問題が指摘されていました。そこで本探査には、「ランドストリーマー」(稲崎, 1992)という新しく開発した特殊な器材を使用しました。第3図にその概要を、また写真1に現地での探査風景を示します。この器材は、従来別々に設置、展開していた信号ケーブルと地震計を一体化したもので、非伸縮性のベルト上に地震計ユニットが装着されています。地震計が舗装面と非固定的に接しているため、全体を観測車で容易に牽引・移動させることができます。これにより、従来の2倍近い効率での計測が可能となり、調査にかかる道路占有区間および期間を大幅に短縮させることが可能になりました。

地震計間隔は50cm、チャンネル数は48で、最終断面のトレース間隔は25cmと高い水平分解能を有しています。この値は、従来の浅層反射法探査と比べても2~5倍程度、海域で実施されてきたシングルチャンネル音波探査と比較しても同等か数倍の解像度に相当するものです。

ある大都市における幹線道路側道での適用実績から、この機材が高い操作性を有していること、道路交通雑音に強いこと、そして深度60m程度以浅の詳細な地盤構造を再現できることが検証されています(稲崎, 1997)。なお震源には、簡便性に優れ、移動の容易な人力板叩き法を採用し、S/N比

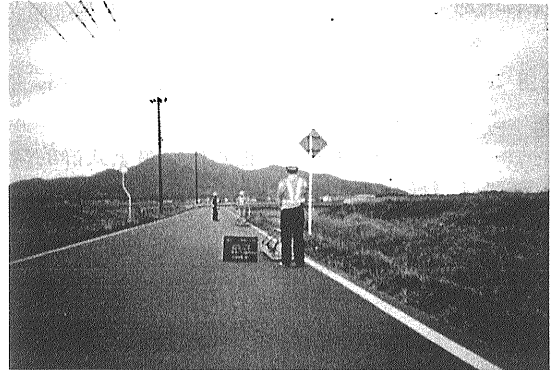


写真2 GPR探査風景 遠景は角田山。

の向上をはかるため同一地点で4~8回の垂直重合を実施しました。

3.2 GPR探査

GPR探査手法については、本特集号に詳細な報告があるので(倉本および西山ほか, 1999)、ここでは簡単な紹介にとどめます。

前述のように従来のGPR探査では、地表下深度数m程度が探査の限界でした。探査深度を深くするには、出力エネルギーを大きくすることが有効ですが、電波法の制約があり大出力の送信は不可能です。今回の調査で利用した連続波地中レーダ探査法は、地震探査におけるパイプレイタ震源と類似の手法を採用しており、周波数変調をかけたステップ掃引信号を発信し、出力エネルギーと分解能の向上を達成しています。ただし、手法的改良とそれによる探査深度の増大が、地盤構造の再現性向上と直接結びつくとは限りません。送受信信号が大きくなっても、それと同じ程度に雑音が大きくなっていれば、総合的なS/N比は改善されないからです。

現地での調査では、信号波に伴って様々な形態の雑音や信号妨害波が記録されます。GPR探査では特に地表付近に埋設された金属製の埋設物が強力な雑音源になることが知られています(佐藤・利岡, 1998)。浅層反射法を含む地震探査では、マルチチャンネル受振方式によるCMP重合法が、雑音からの信号波形の分離、すなわちS/N比の向上に極めて重要な役割を果たしています。シングルチャンネル受信が一般的なGPR探査では、記録上での信号波形の識別に特別な吟味が必要とされます。

なお現地での探査風景を写真2に示しました。

3.3 コーン貫入試験およびサイスマックコーンによる速度検層

コーン貫入試験(CPT), 正式には電気式静的コーン貫入試験は, 直径3.6cm (断面積10cm²), 先端角60度のコーン状プローブを地盤内に一定速度で貫入させて, 貫入抵抗, 周面摩擦, 間隙水圧を連続的に測定する現場計測法です。コーンの貫入には, 写真3に示すようなクローラー自走式貫入マシンを使用します。CPTは, 基本的にはノンコアのサウンディング法に分類されますが, 計測データから概略的な地層構成とその変化を評価することが可能です。たとえば筆者の一人は, 高密度のCPT現地調査の結果を検討し, 貫入抵抗プロファイルから砂層内の級化構造が推定できることを示しています(稲崎, 1996)。

CPTは, 深度15m程度までを2時間弱で調査することが可能であるため, 作業効率が高く, 高密度の予察的な調査に適しているといえるでしょう。また先端のプローブを, 加速度計センサを内蔵したサイスマックコーンに取り替えることで, 同一地点で表層地盤の速度構造を把握することも可能です。従来, 速度検層を実施するには既設のボーリング孔を必要としていましたが, この方法によればボーリング孔は不要で, 任意の地点での速度検層が可能です。

4. 探査結果とその評価

測線の起点部付近, すなわち古砂丘面から沖積面へ移行する部分400mについての高分解能S波

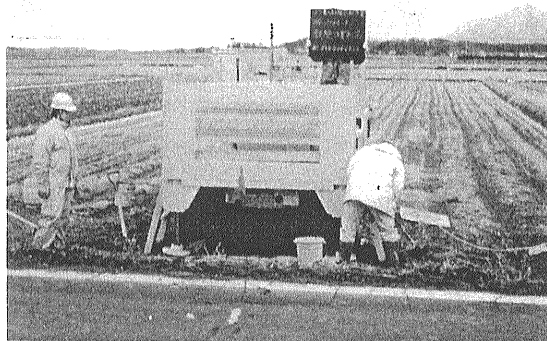
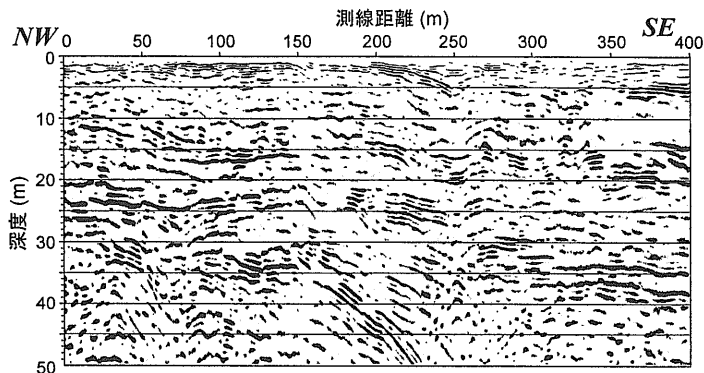


写真3 CPT計測風景。板叩き法によりS波を発生し、ロッド先端に取り付け地盤内に貫入させたサイスマックコーンで計測する。

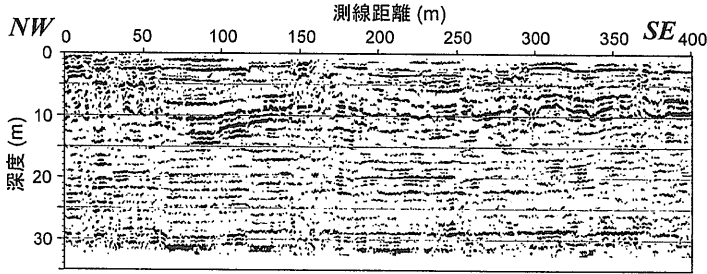
反射法探査とGPR探査の解析結果をそれぞれ第4図, 第5図に示します。第4図では, 測線距離200~300mにかけて認められる, 南東落ちの傾斜構造が特徴的です。傾斜の程度は下位ほど大きく, またこの部分を挟んで連続すると考えられる反射面も, 下位ほどずれが大きくなっており, この部分に断層運動による累積変形構造を解することが可能です。ただし, これらの図では縦横比が約4倍に誇張されていますので, 実際の傾斜は最上部では4度程度, 下部40m付近のそれで11度程度でしかありません。測線距離250m付近には変形帯の南東縁を形成すると考えられる, 急傾斜の不連続面があります。

この不連続面は, 最上位約5m付近の反射面にも変形を与えているように解釈することが可能です。

第5図は, 同じ測線でのGPR探査結果を, 後に述べるワイドアングル測定結果を基に深度断面表



第4図
高分解能S波反射法
探査深度断面。



第5図
GPR探査深度断面。

示したものです。一見して第4図のS波反射法深度断面とは全く様相を異にしていることがわかります。

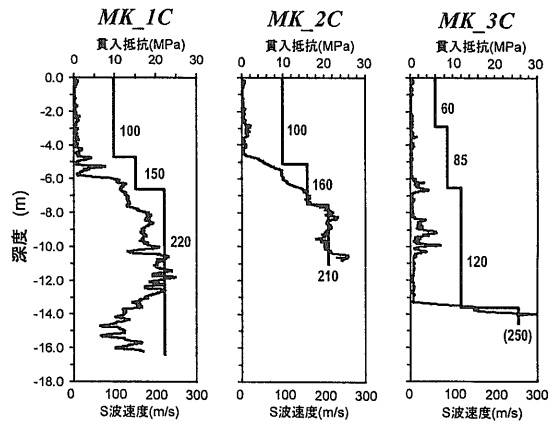
現地探査およびデータ処理の担当者は、この断面に対して、測線距離220mから280m間の反射面がY字状に切られて落ち込んでいること、深度10m付近に認められる強い反射面が75mおよび160～170m付近で不連続になっていることを指摘しています(川崎地質, 1998)。

このように、解析断面が全く類似していないため、その解釈も当然のことながら全く異なっています。

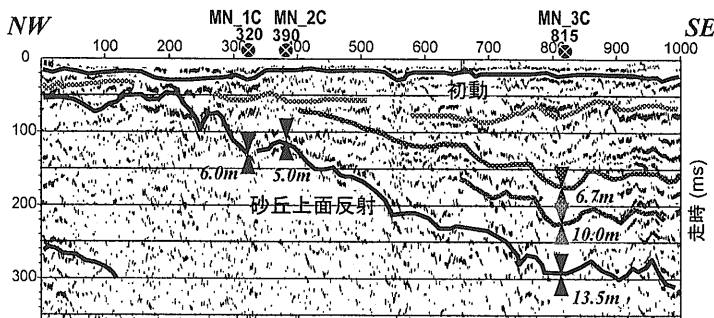
一体どちらが正しいのでしょうか？あるいはどちらの断面が真の構造に近いのでしょうか？そして、何故こんなにも解析結果が異なるのでしょうか？このような疑問に答えるためには、それぞれの探査手法のデータ取得および解析過程について、特にその中で前提としている仮定や条件について詳細に吟味する必要があります。しかし、もっと現実主義的な手段として、他の方法で得られたより直接的なデータと比較し、解析結果との整合性を評価する方法があげられます。このような対処法は、本質的な原因追求には至らないものですが、結果の優劣の評価、そしてその相違の原因の糸口を見出す

ことには役立てることができるでしょう。今回はCPTおよびサイスマックコーンによる速度検層を、そのような外的判断のためのデータを得るために採用しました。

第6図は、測線近傍3地点でのCPTおよびS波速度検層結果をプロファイル化したものです。貫入抵抗値は、各々深度約6m、5mおよび13m付近で急激に増加しており、この部分を境に層相が大きく変化していることがわかります。これまでの実績データとの比較から、この深度より上位は粘性土を主体とした沖積層、下位は古砂丘列を構成している砂質土と推定することができます。S波速度もこの



第6図 コーン貫入試験およびS波速度検層結果(稲崎・加野, 1999)。



第7図 S波反射法探査時間断面とコーン貫入試験との比較(稲崎・加野, 1999)。

境界部で変化しており、大きな音響インピーダンス比を有していることがわかりました。古砂丘面は南東方向に向かって、波曲しながら上面深度を減じていく傾向が認められます。なお沖積層内には薄い砂の挟み層が2層準に認められます。

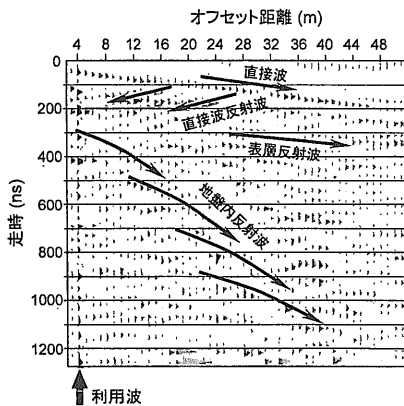
CPTおよびS波速度検層結果から、古砂丘上面に対比される境界面が大きな速度コントラストを有していることがわかりました。また境界面深度とそのS波走時を直接求めることができました。第7図はこのデータをS波反射法探査データと比較したものです。両データは極めて調和的です。対応する走時には顕著な反射面が出現しており、起伏しながら南東方向にもぐり込んでいく構造が明瞭に捉えられています。沖積層内の砂質挟み層に相当する反射イベントも追跡することが可能です。

CPT調査結果は、GPR探査結果とは非調和的でした。第5図に示すように、深度10m付近の反射イベントは、測線右方向に向かって上昇しています。出現深度も構造も、他から推定される古砂丘列上

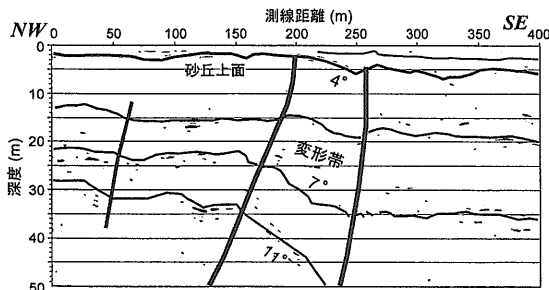
面のそれとは一致していません。このイベントは真の情報でないか、深度が実際とは異なっている可能性があります。一般に表層地盤のS波速度は、もともと低いため含水状態の影響を受けにくいのに対し、電磁波の振幅と速度はその影響を強く受けることが知られています。測定時の地下水面は測線下約1.1m付近と非常に浅い部分にありました。したがって実地盤の電磁波の減衰がかなり大きかったことが推察されます。第8図は、測線起点付近においてGPR探査の一部として実施されたワイドアングル測定結果を示したものです。同図には、比較的高速の舗装部分を伝播した直接波とその反射波、地盤内から反射してきた地盤内反射波等が記録されています。しかし第5図の断面で利用しているデータは、矢印で示したオフセット距離4mの一本のトレースだけです。このトレースのS/N比は決して良好とはいえません。またオフセット距離の大きなトレースで認められる地盤内反射波の多くは、利用波では認められません。GPRのデータ解析では、ワイドアングル測定結果から電磁波の伝播速度を求め、測線方向にも時間方向にも一様な速度構造を仮定して深度断面を作成しています。ところが最表層の舗装路盤材は、S波に対しても電磁波に対しても高周波帯域通過フィルタとしてはたらくとともに、その速度が下位地盤よりかなり大きいため、道路下の実地盤の速度値を実際より大きく見積もりがちになります。

S波反射法のデータ処理過程では、50m間隔で速度解析を実施するとともに、速度検層データも参照して深度変換を実施しています。CMP重合法を含めこのような処理を可能にする取得データの冗長性が、S/N比の本質的な改善につながり、結果として微細な断層構造の再現を保障しているといえるでしょう。GPR探査に対しても、幾通りかのオフセット距離を設定して探査を実施するか、反射法探査では一般的なマルチチャンネル計測を採用する等の対応が必要と思われます。

第9図は、第4図に示したS波反射法深度断面に対して概略的な解釈を加えたものです。左端で深度約2m、右端で6m付近に連なる反射面は、古砂丘列上面に対比することができます。この反射面は、測線距離200m付近で東落ちになりますが、上位の沖積層内の反射イベントでは同様の傾斜構造



第8図 GPRワイドアングル測定記録およびその解釈。



第9図 S波反射法探査結果の解釈図。

は不明瞭で、この傾斜構造が変形によるものか否かは不明です。しかし前述のように、この部分は幅50m～100mの変形帯を形成していると解釈することができます。古砂丘面以深の地質構成については、ボーリング資料等が少なく現時点では対比されていません。今後の追加的な調査、資料収集が必要で

5. おわりに

活断層が伏在していると想定された地点で、深度数10m以浅の表層部を対象として高分解能S波反射法探査とGPR探査を実施し、その適用性、特に構造の再現性を測線近傍で実施したコーン貫入試験(CPT)結果と比較し検討しました。その結果、S波反射法探査結果はCPTの結果と極めて整合的でしたが、GPR探査結果は他の結果とは非調和的でした。ただし、CPTには浅層反射法と同じ弾性波を利用した手法が含まれており、しかもこの両手法は筆者らが直接現地調査・解析を実施しているのに対し、GPR探査は民間会社の委託調査として実施されていますので、はじめから公平さを欠いているとそしりを受けるかもしれませんが、実測データに即して、客観的に評価したつもりです。いずれにしろ、ある条件、ある現場では調和的・合理的な解釈ができた、違う現場では非調和的であったと、ケースヒストリー的に評価するだけでは本質的な解決に到達することはできません。各々の物理探査手法が、どのような条件を仮定して現場計測を実施し、またどのような前提条件の下にデータ処理を実施しているのか、その仮定が妥当で、かつ対象とした地盤構造で成り立っているのか、を吟味することが大切です。

特にGPR探査では、発信法を工夫して出力エネルギーをあげることは、たしかに探査深度を深くすることには貢献しますが、全般的なS/N比の改善には反射法探査が一般的に採用しているマルチチャンネル受振とCMP重合法がより効果的であるようです。GPR探査は、さらに地下埋設物や周辺構造物(道路標識や電柱など)の影響を受けやすい、という問題点があります。物理探査技術者は概し

て取得データには興味を抱いても、データの品質に関わる可能性のある現地の諸条件は軽視する傾向があるようです。現地調査の際に測線近傍の詳細な観察を行ない、その影響を可能な限り回避して計測を実施するとともに、解析時にそれらの情報を活用することが解析結果の再現性および品質向上にとって必要不可欠であるといえることができるでしょう。

文 献

- 茅原一也(1979):新潟平野をめぐる地形と地質 ①基盤、アーバンポタ, no.17, 2-5
- 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, 38, 201-209.
- 稲崎富士(1992):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(1996):都市域における沖積地盤の地質工学的調査法の開発. 大都市地域における地震防災技術の開発 土木部会 研究報告書, 建設省土木研究所, 49-60.
- 稲崎富士(1997):断層調査法の開発. 大都市地域における地震防災技術の開発 土木部会 研究報告書, 建設省土木研究所, 68-77.
- 稲崎富士・加野直巳(1999):高分解能S波反射法探査とサイスミックCPTによる埋没断層の表層構造調査, 物理探査学会第100回学術講演会講演論文集, 360-363.
- 加野直巳・稲崎富士(1998):浅層反射法地震探査, 物理探査ハンドブック, 95-98.
- 加野直巳・山口和雄・粟田泰夫(1998):角田・弥彦断層系の反射法調査, 物理探査学会第99回学術講演会講演論文集, 29-32.
- 川崎地質(株)(1998):日本海東縁陸地地下レーダ調査及び解析作業報告書, 44p.
- 倉本真一(1999):GPRを用いたイメージング研究-特集号概略-, 地質ニュース, no.537, 6-7.
- 七山 太・北田奈緒子・竹村恵二・杉山雄一(1998):群列ボーリング及びS波反射法地震探査による上町断層系住之江撓曲の活動履歴調査, 地質調査所速報, no.EQ/98/1, 137-149.
- 新潟古砂丘グループ(1979):新潟平野をめぐる地形と地質 ⑤砂丘と平野, アーバンポタ, no.17, 12-15.
- 西山英一郎・鈴木敬一・笠井弘幸(1999):GPRにおけるデータ処理法, 地質ニュース, no.537, 53-60.
- 佐藤源之・利岡徹馬(1998):地中レーダ, 物理探査ハンドブック, 401-421.
- 鈴木敬一・笠井弘幸・西山英一郎(1999):ステップ式連続波レーダ探査装置を用いた地中レーダ法探査, 地質ニュース, no.537, 44-52.

INAZAKI Tomio, KANO Naomi and KURAMOTO Shinichi (1999): Comparison of the Resolution for Surficial Structures Reconstructed by High-resolution S-wave Reflection Survey and Ground Penetrating Radar Survey.

<受付: 1999年4月1日>