

小型軽量坑井内3成分弾性波検出器による 坑井掘削音の観測と地下構造推定法の検討

相馬宣和¹・歌川学²・瀬戸政宏³・長秋雄⁴・浅沼宏⁵

¹正会員 工博 産業技術総合研究所 地圏資源環境研究部門 (〒305-8569 つくば市小野川16-1)

²正会員 工修 産業技術総合研究所 エネルギー利用研究部門 (〒305-8569 つくば市小野川16-1)

³正会員 工博 産業技術総合研究所 企画本部 総括企画主幹 (〒305-8561 つくば市東1-1-1)

⁴理修 産業技術総合研究所 地圏資源環境研究部門 (〒305-8567 つくば市東1-1-1)

⁵工博 東北大学大学院助教授 環境科学研究科 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉01)

高レベル放射性廃棄物の地層処分での調査・開発を想定し、調査ボーリングに付随して地下構造の推定が行える坑井掘削音利用法の、土木開発規模への適用を検討した。小規模な掘削行為を利用するために、初めに小型軽量坑井内3成分弾性波検出器を製作し、特性評価試験により従来の大型の機器と同等の性能を持つことを確認した。花崗岩採石場において、掘進長約10 mを対象に坑井掘削音の観測を行い、3軸VSP法により地下反射係数分布を評価したところ、比抵抗などの検層結果と調和的であった。比較的小規模の掘削行為への適用で簡便に深部の推定が可能であり、本方法の有効性を確認することができた。

Key Words : seismic prospecting while drilling(SWD), geophysical prospecting, reflection coefficient, high level radio active waste disposal repository

1. はじめに

高レベル放射性廃棄物の地層処分を実現するためには、処分サイトの選定段階だけでなく施工期間中も含めて、深部の地下構造を把握することが大変重要である。本事業については、理想的には10万年程度未来を考えた厳重な安全管理が不可欠であると考えられており¹⁾、このため地下計測についても可能な限り詳細に行うことが望ましいと言える。

処分サイト選定のためには、いくつかの候補地において多くの調査ボーリングが実施されることが予想される。また、最終的な処分地決定のための段階では、様々な技術を結集して地下計測が実施されると考えられる。しかしながら、現実的には経済的な面などからの制約が存在し、1件あたりの調査に膨大な資金を充てるのが難しい場合もあると考えられ、概査や開発途上の段階では必ずしも理想的な規模、数量の地下計測が実施できない可能性がある。また、地域の社会的な状況などによっては、大規模な物理探査手法を早急に実施することが難しい場合

も想定される。したがって、一回の調査からできるだけ多くの地下情報を抽出することが有効であると考えられる。ここで地下情報としては、地質状況や岩盤物性、地下応力に加え、長期的な物質移動可能性が考慮されるため、断層構造やき裂帯、風化なども評価する必要がある。また、これらは調査ボーリング孔付近だけでなく、ある程度の空間的な広がりを持って把握することが重要である。

それらを踏まえ本研究では、地質状況、地下応力、流体性状等を調べるための調査ボーリングが実施されることを想定し、これに付随して地下深部に関する情報を抽出する方法として、ボーリング時の掘削音を利用する地下構造推定法を検討している。掘削音を利用する地下構造推定法は、一般に簡便かつ低コストであると考えられているうえ、調査ボーリングからの点ないしは線状の情報を空間的に補完できる可能性があるなどの特長をもつ。

石油、地熱開発等の分野において、坑井掘削(ボーリング)時に放出される弾性波を利用した地下構造の推定法(Seismic While Drilling法: SWD法)

が、1990年頃より検討されている^{2), 3), 4)}。ここでは、大深度の坑井掘削を対象に研究が進められており、坑井掘削音の解析により地下の反射係数分布を求め、地下構造の推定に成功している。これまでは観測システムも総じて大掛かりであることが多かった。

一方、放射性廃棄物の地層処分で想定される調査ボーリングは、掘削孔径が比較的小さく、放出される弾性波エネルギーも比較的小さいことが予想される。また調査段階では、様々な地形的な制約が予想されると共に、付加コストも押さえる必要があることから、できるだけ小規模の観測装置により簡便に地下構造の推定を行うことが望ましいと言える。

本論文では、放射性廃棄物の地層処分为念頭に、土木分野への坑井掘削音を利用する地下構造推定法の適用を目的に、比較的小孔径のボーリングを対象に坑井掘削音観測を行い、掘削音波形データを用いた地下構造推定法について検討する。まず、坑井掘削音利用法についての基本概念を述べ、本研究で作製した従来より小型軽量の坑井内3成分弾性波検出器の諸特性とキャリブレーション試験について報告する。次に、花崗岩採石場で実施した坑井掘削音観測について概説し、坑井掘削音を利用して地下構造推定を行った結果を別途に実施した検層データ等と比較し、本手法の有効性について議論する。

2. 土木分野における坑井掘削音の利用法と地下構造推定法

(1) 坑井掘削音を利用する地下構造推定法の概念

坑井掘削音を利用する地下構造推定法では、反射法地震探査における人工音源の代わりに、ボーリング掘削時に発生する振動、すなわち掘削ビット付近から放出される弾性波を音源として利用することが最大の特徴である。このことにより、①地下開発と同時に地下情報の取得が可能である、②人工音源を用いる手法に比べて計測システムが小規模であり、機動性に富んだ計測が可能である、③掘削システムから連続的に放出される弾性波の総エネルギーを利用することにより、地下深部計測を簡便かつ低コストに行える、④掘削行為に付随することから、掘削が可能ならば、地下深部や高温高压条件下などでも計測が行える、などの利点を有している。坑井掘削音を用いる方法は、複雑で微弱な掘削音を扱う難しさ等のために一般に概査手法とみなされており、他の地下計測手法に付随することにより、効率的に比較的広範囲の深部情報が得られる手法の一つとして

期待されている。図-1 に、坑井掘削音を利用する地下構造推定法の概念を示す。

これまでの坑井掘削音の利用では、主に石油や地熱開発での数千m級の大規模ボーリングを対象に、放出弾性波エネルギーが大きいと考えられているトリコーン式掘削ビットを音源として検討されてきた。坑井掘削音を利用する地下構造推定法としては、主なものとして、これまで TOMEX 法³⁾と3軸 VSP 法^{2), 4)}(Triaxial Drill-bit VSP (TAD-VSP) 法とも呼称される)が報告されている。TOMEX 法では、坑井掘削音の観測を通常の反射法地震探査と同様の地表多点ネットワークで行い、同時に掘削リグ部に取り付けたパイロットセンサからも振動波形を取得する。解析では、これらの相関解析から反射波成分の強調を行い、地下構造の推定を行う。一方3軸 VSP 法では、あらかじめ用意した観測用坑井内に3成分弾性波検出器を設置し、掘削井と観測井間でのクロスホール計測を行う。これにより比較的高い S/N 環境下で坑井掘削音の受信が可能になり、3次元粒子運動解析に基づく時空間相関解析により、原理的には1観測点でも地下構造の推定が可能になっている。

土木開発分野における坑井掘削音の利用を想定すると、これまでに比べて全体の規模が小さくなることと共に、対象とする掘削行為も幅広くなることが考えられる。放射性廃棄物地層処分为対象とした場合の適用可能性としては、地表からの調査ボーリング、立坑の掘削、水平坑の掘削、坑道内での試推調査、放射性廃棄物(オーバーパック)の埋設孔の掘削、などが考えられる。調査ボーリングに付随する場合は、調査ボーリング結果を補完し、少ない付加コストで空間的に広がりのある地下構造評価が実現できる可能性がある。処分サイト開発の段階には、立坑

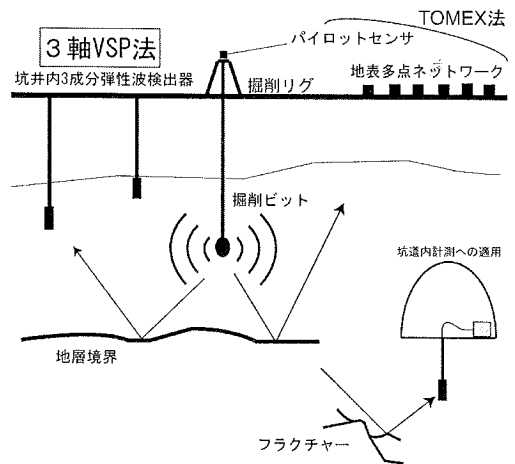


図-1 坑井掘削音を利用する地下構造推定法の概念

や水平坑の掘削時に周辺の地下構造評価が行え、切羽の前方監視も可能であると考えられる。開発期間中にリアルタイム的に得られる地下情報は、施工の安全確保や、当初想定外の断層等の検出による設計修正などに活用されることが期待できる。坑内の試験作業などからの掘削音が利用可能になれば、処分サイトの操業中にも、低コストに周辺地下構造のデータの蓄積を行えると考えられる。

これらの可能性を考えると、より簡便で観測システムの小型化も容易な3軸VSP法が、土木分野を対象にした坑井掘削音の解析手法として有利であると考えられる。本手法では、観測器を地中に設置することから、弾性波減衰の大きい堆積系岩盤内での観測や、放出弾性波エネルギーが小さいと予想される岩石コアサンプル採取時のボーリング等への適用にも有利であると考えられる。また地表観測ネットワークが不要であるため、坑道内等狭い場所での作業への適応性も高く観測コストもより小さいと予想される。

(2) 3軸VSP法

3軸VSP法^{2), 4)}は、少数観測点において坑井内3成分弾性波検出器を用いて掘削音信号を受信し、3次元粒子運動の時空間相関解析により反射波の検出を行い、地下構造を推定する手法である。通常、音源は掘削ビットであるため地盤内部に位置するため、送受信点の位置関係が逆VSP法と同一になることから“VSP法”と呼ばれている。以下に3軸VSP法の解析の流れを概説する⁵⁾。

掘削音信号受信時の3次元粒子運動を、送受信点を含む垂直面（以下P-SV面と呼ぶ）へ投影した模式図を図-2に示す。音源（掘削ビット）からの直接波と反射体からの反射波が存在し、それらが平面波でありモード変換は存在せず減衰が小さく媒質が均質である（ただし散乱点を含む）と仮定するとき、P-SV面での3次元粒子運動は図-2のようになり、それらの離散時系列ベクトルは以下の式のように表すことができる。

$$\vec{O}(nT) = \vec{P}(nT) + \vec{SV}(nT - \tau_s) + \sum_{n=1}^m k_{pn} \vec{A}_i \vec{P}_n(nT - \tau_{pi}) + \sum_{n=1}^m k_{sn} \vec{A}_i \vec{SV}_n(nT - \tau_{si}) \quad (1)$$

ここで、 $\vec{P}(nT)$ 、 $\vec{SV}(nT)$ 、 $\vec{P}_n(nT)$ 、 $\vec{SV}_n(nT)$ はそれぞれ直達P、SV波および反射P、SV波の粒子運動ベクトル、 τ_s 、 τ_{pi} 、 τ_{si} は直達P波に対する直達SV波および*i*番目の反射P、SV波の時間遅れ、 k_{pi} 、 k_{si} は*i*番目の反射P、SV波の反射係数、 \vec{A}_i は相対方向 ζ_i に関する回転行列、 n は離散データのサンプリング数、 T はサンプリング周期、 m は反射波の数を意味する。

十分に高精度に3成分観測波形が得られている場合、3次元ベクトル場が正確に記録されているとみなせることから、任意の振動方向の波形成分を合成することが可能である。ゆえに、仮想的に到来方向を設定した反射波成分と直接波成分によって相関解析を行うことが可能である。例えば仮想反射波到来方向 ϕ （直接波方向との相対角度）からのSV波成分は次のように記述できる。

$$SV'_i(nT, \phi) = P(nT)(-\sin\phi) + SV(nT - \tau_s)\cos\phi + \sum_{n=1}^m k_{pn} P(nT - \tau_{pi})(-\sin(\phi - \zeta_i)) + \sum_{n=1}^m k_{sn} SV(nT - \tau_{si})\cos(\phi - \zeta_i) \quad (2)$$

このとき掘削ビットからの直接波成分は $\phi=0$ の場合にあたり $SV'_i(nT, 0)$ 、相対方向 ϕ からの反射SV波成分は $SV'_i(nT, \phi)$ のように記述できる。相対方向 ϕ を連続的に変化させて合成した仮想反射波成分を用いることにより、直接波成分と反射波成分に関してディレイと方向に関する2次元の相関関数が計算可能であることが分かる。2次元相関関数 $C_{dv}(\eta, \phi)$ は、ディレイと相対方向が真の反射波のそれらと一致した時（ $\tau = \tau_{si}$ および $\phi = \zeta_i$ の時）に極大となる。岩盤の反射係数は、2次元相関関数を直接波成分のエネルギーで正規化することによって次式のように定められる。

$$R_{dv}(\eta, \phi) = \frac{C_{dv}(\eta, \phi)}{C_{dv}(0, 0)} \quad (3)$$

実際の2次元相関関数の計算は、FFT法を用いたスペクトル解析により周波数領域で行われる。ここで、相関解析によって正しくディレイを推定するためには、対象とする信号が、出来るだけ広い周波数帯域（理想的には全周波数帯域）に渡って、等しいパワーとランダムな位相を有する信号（白色信号）であ

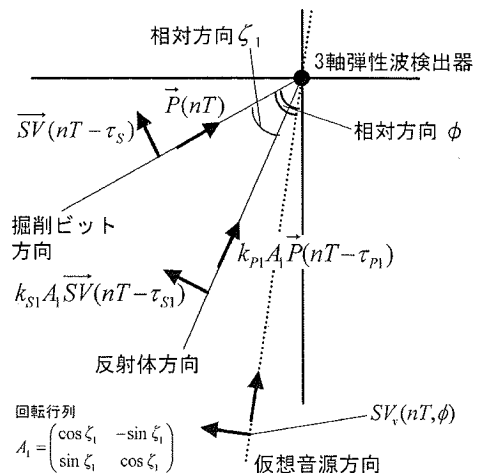


図-2 P-SV面での3次元粒子運動ベクトルの模式図

る必要がある。もし対象とする掘削音信号が、帯域制限の影響や強い周期性ノイズの影響などを受けている（白色性が十分でない）場合には、通常的手法では周期的な虚像の影響を強く受ける⁶⁾。そのような場合には、信号の周波数特性の影響を抑圧する手法である一般化相関関数法の Roth 法⁷⁾を用いて、2次元相関関数を計算することで対処している⁶⁾。

2次元相関関数により反射係数を求めた後、対象とする空間座標上にそれらを投影することにより地下構造の推定が行える。3軸 VSP 法は原理的に比較的容易に3次元への拡張が可能であり、観測データが良好である場合には、既にその有効性が報告されている⁸⁾。

3. 小規模坑井掘削音利用のための弾性波検出システムと特性評価

(1) 小孔径対応型・坑井内3成分弾性波検出および記録システム

3軸 VSP 法によって、坑井掘削音を利用する地下構造推定法を幅広く土木開発分野に適用するためには、微弱な弾性波の受信が可能な高感度と高精度な3次元粒子運動検出能力を持つ弾性波検出器が必要である。しかしながら石油や地熱開発を対象にした

機器は、一般にその大きさから利用困難であることが予想されることから、本研究では初めに土木分野での活用を前提にした比較的小型軽量で高性能な3成分弾性波検出器を製作した。

図-3 に本研究における3成分弾性波検出器の外観を、表-1 に主な仕様についての従来の3成分弾性波検出器との比較を記す^{6), 9)}。本検出器のセンサ部分には、直交3軸の高感度な加速度計が採用されている。センサ部は感度およびノイズレベルが石油・地熱開発等を対象に用いられてきたものと同等のレベルであるとともに、成分間感度差および位相誤差も小さく押さえられている。またツール全体としても低い成分間クロス感度が保障されており、従来の検出器と同様に高精度な3次元粒子運動の検出が可能となっている。孔壁には上下2本ずつの電動

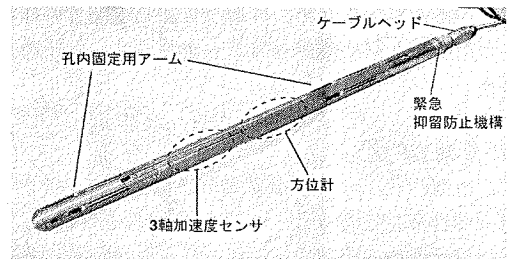


図-3 小型軽量坑井内3成分弾性波検出器の外観

表-1 小型軽量坑井内3成分弾性波検出器の主な仕様

	本研究の弾性波検出器の設計仕様	従来の3軸VSP法での検出器の仕様 ^{6), 9)}
外形・重量	・直径60mm, 全長1450mm, 重量約13kg (筐体の一部にチタン使用)	・直径約90mm, 全長1789mm ・ステンレス鋼製(重量60kg前後)
センサ部	・直交3軸加速度センサ, プリアンプ内蔵型 (ESG社製 model A3003 および A3005) ・感度 A3003: 3 V/g, A3005: 0.5 V/g (出力フルスケール±5 V) ・各成分間感度・位相誤差 ±5%以内 (20 Hz~1 kHz) ・振幅レベル 周波数特性 -3 dB以内 (20 Hz~1 kHz)	・3軸圧電加速計, 3チャンネル・チャージアンプ ・感度 3.16 V/g ・成分間クロス感度 2%以下 ・周波数帯域 20 Hz~1 kHz
総合特性	・ツール全体クロス感度 ±15%以内 ・入力換算雑音レベル $8 \times 10^{-4} \text{ m/s}^2$ 以下 (約80 μg以下)	・ツール全体クロス感度 2.4%(100 Hz), 4.7%(200 Hz), 10.5%(400 Hz) ・入力換算雑音レベル $6.49 \times 10^{-4} \text{ m/s}^2$ ・3次元粒子運動軌跡検出周波数上限 350 Hz
内蔵方位計	・水平面内直交2軸磁気抵抗素子(360度表示) ・精度 ±3度以内 (傾斜が鉛直より±10°以内の時)	・電子方位計
孔内固着機構	・開閉型アーム4本 (アクチュエータ上下2ユニット) ・孔内抑留防止用脱出機構装備 ・適用孔径 φ76~131mm(アーム交換式)	・開閉型アーム4本 (上下2箇所, 直流モーター駆動)
耐環境性	・耐水圧 10 MPa(深度約1000m) ・使用上限温度 100℃ ・対応深度 ~60m(手作業用ケーブル), ~600m(電動ウインチ)	・耐水圧 20 MPa ・使用上限温度 150℃ ・対応深度 ~約1,000m(ウインチ車など)

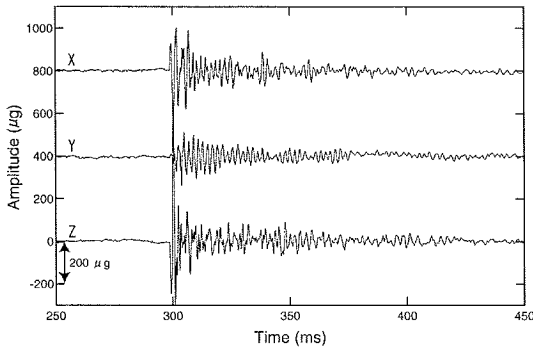


図-4 キャリブレーション試験時の受信波形例. (人工音源設置深度 40m, 弾性波検出器設置深度 180m)

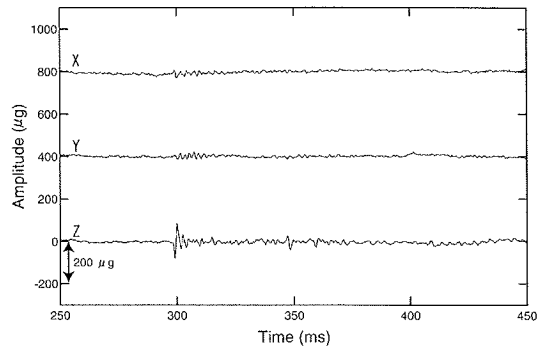


図-5 キャリブレーション試験時の受信波形例. (人工音源設置深度 40m, 弾性波検出器設置深度 280m)

式的アームで強固に固定され、センサの基準軸の方向は高精度の内蔵方位センサにより観測前に把握できるようになっている。その上、これらの性能を直径 60 mm, 全長 1.45 m, という小型の筐体に格納し、重量も 13 kg と従来の 1/4 以下であるため独りでも持ち運びが可能で、狭い坑道内での観測にも十分対応できるハンドリング性を有している。

(2) 人工音源を用いた小型軽量坑井内 3 成分弾性波検出器の特性評価

製作した小型軽量坑井内 3 成分弾性波検出器の特性評価のために、人工音源を用いたキャリブレーション試験を実施した。本試験の目的は、製作した坑井内 3 成分弾性波検出器が、坑井掘削音を取得するのに十分な感度を有しローノイズであること、正確な 3 次元粒子運動が受信可能であること、安定して 3 次元粒子運動の受信が行える周波数帯域の確認等である。

キャリブレーション試験では、孔口間の距離が 75 m である 2 坑井を用い、坑井内 3 成分弾性波検出器を深度 80 m, 180 m, 280 m の 3 深度に、人工音源を深度 80 m, 60 m, 40 m の 3 深度に設置し、これらの組み合わせで人工音源から弾性波を発振し波形記録を行った。坑井内 3 成分弾性波検出器からの信号は、地上コントロール部で 60 dB の増幅と 2 kHz のローパスフィルタ処理を行い、AD コンバーターを介してサンプリング周波数 10 kHz で離散化してパーソナルコンピュータのハードディスク上に記録した。

図-4, 5 に、人工音源設置深度 40 m 時の、坑井内 3 成分弾性波検出器の設置深度 180 m および設置深度 280 m の際の 3 成分記録波形例を示す。図-4 では受信波形エネルギーが十分大きく、明確な P 波

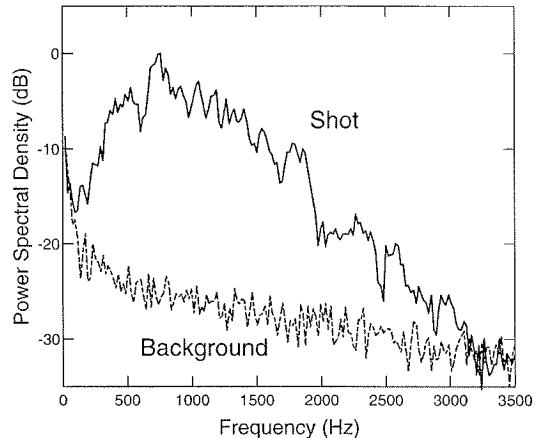


図-6 キャリブレーション試験時の受信波形のパワースペクトル (3 成分の平均。実線が人工音源からの受信波形の、点線がバックグラウンドノイズのパワースペクトルをそれぞれ表す。)

初動の立ち上がりを示す良好な波形が、高い再現性を持って記録された。検出器の設置深度が 280m である図-5 では、送受信間距離の増加のため受信波形の振幅レベルが小さくなっているが、受信状態は安定しており、図に示すような波形を同様に高い再現性で記録することができた。これらの記録でのバックグラウンドノイズレベルの評価を行ったところ、ノイズの 3 成分の二乗平均値は 20 μg 前後 ($2 \times 10^{-1} \text{ m/s}^2$) であり、設置深度としては外部振動の影響が完全には皆無ではない条件であったにも関わらず、設計仕様より十分低い入力換算ノイズレベルが達成されていることが確認できた。図-6 には、図-4 の波形のパワースペクトルを示す。100~3000 Hz 程度の広い周波数帯域に渡って、波形エネルギーが受信されている。スペクトルには極端なピークは無く、機械的な共振の影響はほとんどないと考えられる。

次に、3 軸 VSP 法適用のために最も重要である 3

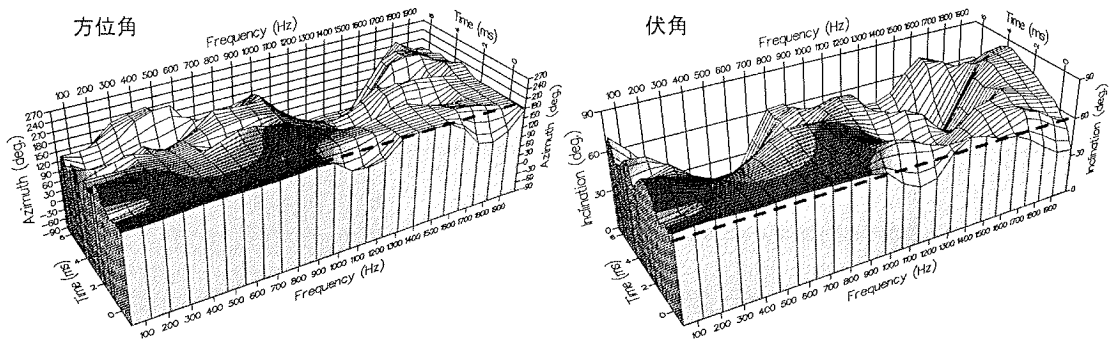


図-7 スペクトル行列解析による P 波初動部の 3 次元粒子運動の時間-周波数領域での過渡応答の例。(左：方位角，右：伏角を表す。図中の点線は幾何学的関係から定まる音源の方向を表し，方位角 202.7°，伏角 62.8° である。コンターの濃淡は 3 次元粒子運動軌跡の直線性を意味する。)

次元粒子運動検出能力の確認のために，新妻ら¹⁰⁾に倣い，スペクトル行列解析法により，坑井内弾性波検出器の 3 次元粒子運動検出時の過渡応答の時間-周波数領域での評価を行った。図-7 は，図-4 の波形の P 波初動到来時刻付近のスペクトル行列解析結果であり，時間-周波数領域で検出された 3 次元粒子運動軌跡を方位角と伏角で表現している。本図では横軸は周波数を，奥行き方向は時間を，縦軸は方位角あるいは伏角の角度をそれぞれ表している。時刻 0 が P 波初動到来時刻を表している。コンター図の濃淡は，スペクトル行列の固有値解析による第一主成分寄与率を表し，これは 3 次元粒子運動軌跡を楕円近似した際の直線性を意味している。本図によると，P 波初動到来時刻付近では，周波数約 900 Hz までの範囲では共振等の影響がなく，方位角・伏角ともに安定した振動状態となっており，その直線性も良好に受信されていることが分かる。検出されている P 波初動部の方位角・伏角は，幾何学的な位置関係から想定される方向にほぼ一致しており，高精度に 3 次元粒子運動を受信できていることが分かる。音源の方向が方位角 15.7 度，伏角 53.1 度からの中庸な入射角の場合，幾何学的関係との誤差の平均は，方位角について約 4 度，伏角について約 2 度であった。

以上のようなことから，製作した坑井内 3 成分弾性波検出器は，当初設計どおり高感度で低いノイズレベルであり，周波数 900 Hz 付近までの従来の検出器よりも広帯域で，正確に 3 次元粒子運動の検出が可能であることが確認された。本弾性波検出器は 3 軸 VSP 法の適用に十分な性能を有しており，このことから，土木分野における坑井掘削音を利用する地下構造推定法の本格的な活用が検討可能になったと考えられる。

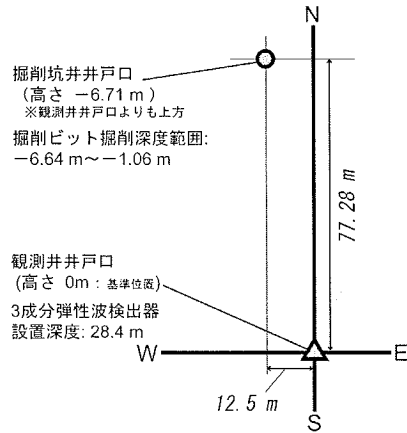


図-8 観測井と掘削井の位置関係

4. 小口径ボーリング時の坑井掘削音観測と 3 軸 VSP 法の適用

(1) 花崗岩採石場における坑井掘削音観測の概要

坑井掘削音の観測は，2001 年 7 月 24 日から 28 日にかけて花崗岩採石場において実施した。伝搬媒質としては，ほぼ均質とみなせる花崗岩であり，微弱な信号の送受信には有利な条件であった。対象としたボーリングは，水圧破碎法等による原位置地下応力の測定と地質環境の調査等を本来の目的として深度約 320 m まで掘られたもので，基本的にコア・ボーリングで行われた。本研究では，ボーリング工程の最初期に行われたトリコーン式掘削ビットを利用した井戸口付近の拡孔作業に注目し，掘進長約 10 m の区間のみを対象に，主に 7 月 27 日に記録された掘削音波形データを解析に利用した。掘削音の観測は完全に受動的に行い，観測の最中に掘削作業には一切影響を与えなかった。

図-8 に示すように，観測井の位置は深度 320 m

の掘削井井戸口から見てほぼ南方に約 77 m 離れており、井戸口の標高は深度 320 m の掘削井の方がやや高くその差は約 6.7 m である。解析に利用した掘削音波形データ受信時の掘削ビット位置の範囲は、地表からの深度 0.1~5.7 m である。弾性波検出器の深度は地表より 28.4 m である。観測井付近の設置状況を図-9 に示す。観測井では、坑井内 3 成分弾性波検出器を孔内に設置しアームにより孔壁に固着した後は、ケーブルを緩め撓ませ共振の抑制を行った。また孔内への落下物を防止し、雨滴等によるノイズの発生も抑えるために、弾性波検出器の設置後には井戸口にウェスを巻いて保護を行っている。坑井内 3 成分弾性波検出器からの信号は、地上コントロール部でゲイン 60 dB の増幅と 2 kHz のローパスフィルタを適用した後、サンプリング周波数 5 kHz に離散化して、PC 上のハードディスクに 24 bit の分解能、1 ファイルあたり 30 万ワード（約 1 分間）のデータ長でトータル約 8 時間記録した。図-10 に計測システムのブロック図を示す。

(2) 受信掘削音の諸特性

観測された掘削音の波形例を図-11 に示す。本図

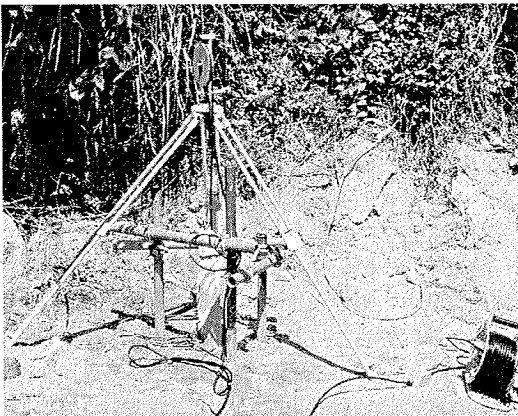


図-9 坑井内 3 成分弾性波検出器の設置状況

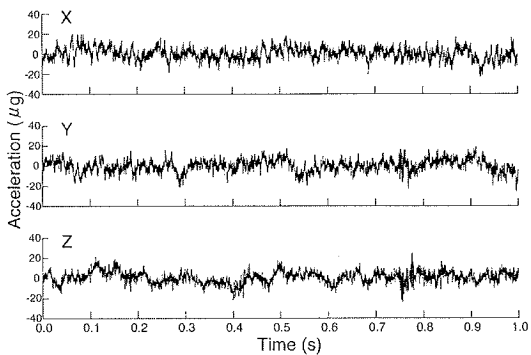


図-11 観測された坑井掘削音の 3 成分観測波形の例

は比較的良好な受信例で、時折 AE のようなバースト状ノイズの混入があるものの、比較的安定して掘削に対応した波形エネルギーが記録され、本研究で製作した坑井内 3 成分弾性波検出器により、掘削に伴って放出される微弱な弾性波の検出に成功していることが確認できた。しかしながら観測期間中には、主に 7 月 28 日を中心に周波数 5 Hz 程度 of 極低周波の大振幅ノイズの混入が頻繁に発生した。低周波ノイズは採石場の重機等の動作とは無相関であり、原因が特定できず現場での除去は困難であった。本研究では、その対策として解析前に 80 Hz のハイパスフィルタ処理を行っている。

受信掘削音信号のパワースペクトルの例を図-12 に示す。バックグラウンドノイズとの比較によると、SN 比は約 5~10 dB 程度有しており、3 軸 VSP 法が十分適用可能である波形エネルギーが得られている。スペクトル分布については、図-12 の例では約 400 Hz 付近および約 550~700 Hz 付近に帯域制限を受けたようにエネルギーが集中している（白色性が不十分である）。このことから、帯域制限による悪影

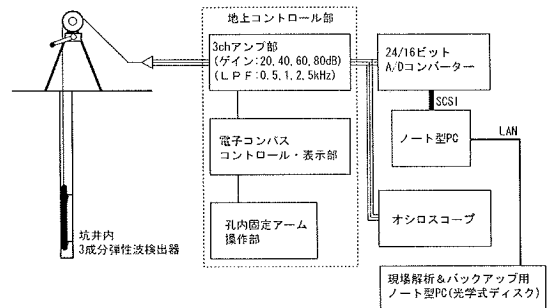


図-10 坑井掘削音観測システムのブロック図

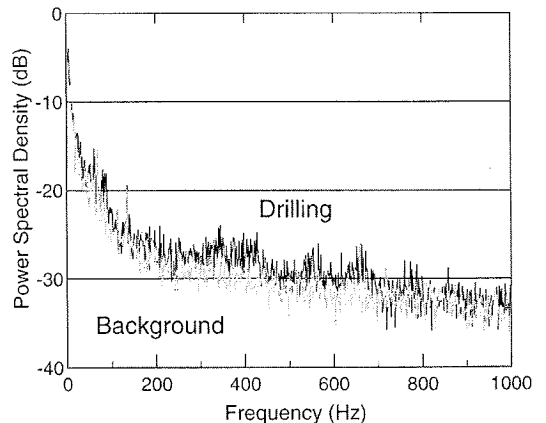


図-12 観測された掘削音のパワースペクトル。(3成分平均。黒：掘削中の、灰色：バックグラウンドノイズ時のパワースペクトルをそれぞれ表す。)

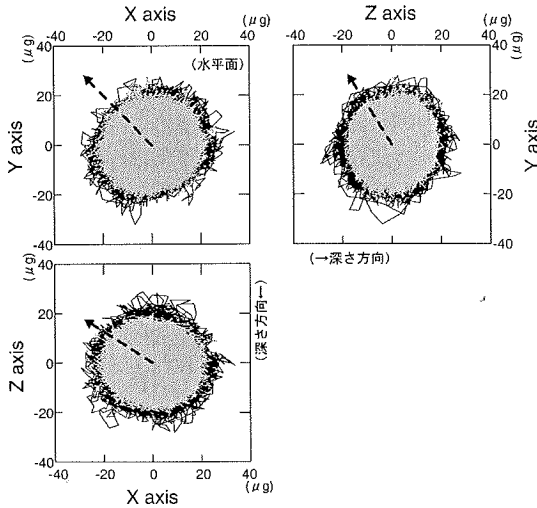


図-13 掘削前後の3次元ホドグラムの形状変化の例。(3次元振動の投影を表す。黒：掘削中の、灰色：バックグラウンドノイズ時のもので、図中の矢印は観測器から見た掘削ビットの方向を表す。)

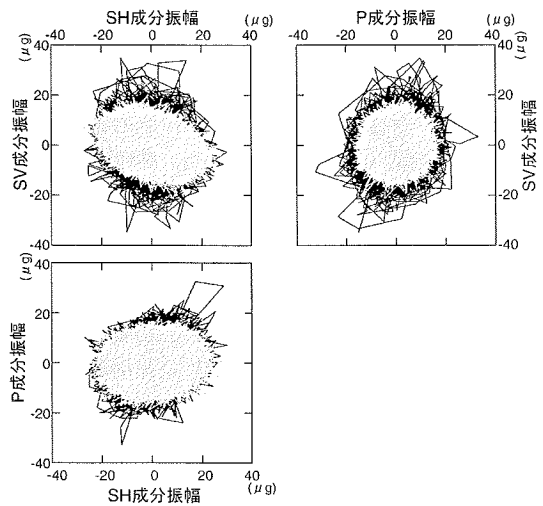


図-14 P-SV-SH座標系における掘削前後の3次元ホドグラムの形状変化。(図-13と同一のデータ。黒：掘削中の、灰色：バックグラウンドノイズ時。)

響を低減するために、前節で述べた Roth 法による相関解析を適用する。

受信された掘削音の振動状態を評価するために、掘削前後での3次元ホドグラム(3次元粒子運動軌跡)の評価を行った(図-13, 14)。図-13では生観測波形の3次元の粒子運動軌跡をX-Y面、Y-Z面、X-Z面に投影して表示しており、図中の矢印の方向が観測点から見た掘削ビットの方向を表している。図-14は、同じ波形データを80Hzのハイパスフィルタ処理後、掘削ビットを音源(P波軸方向)と仮定して座標変換し、P-SV-SH座標系で3次元ホドグラムを表示したものである。もし、掘削ビットから放出される弾性波がP波のモードである場合には、受信エネルギーの増加に伴う3次元ホドグラムの延伸方向は図-13の矢印方向に一致し、図-14ではP波成分の振幅が増加すると考えられる。しかしながら図-14においてはSV波成分の振幅増加が卓越しており、図-13での形状変化も掘削ビットの方向に対して直交している成分が見られる。すなわち、掘削ビットからの放出弾性波が、主にSV波のモードを有していることを意味している。両図の3次元ホドグラムの形状変化からは厳密にはSV波とP波およびSH波の混合モードを有している可能性が考えられるが、本研究では掘削ビットからはSV波が主に放出されていると仮定して取り扱うこととした。SH波については、2次元面内での3軸VSP法では、直達SH波と反射SH波の分離が不可能でSH波利用時の推定精度が低いことが予想され、本研究での解

析法への適用性は低い。

(3) 3軸VSP法による地下構造評価

3軸VSP法の解析では、観測井と掘削井を含む鉛直2次元断面を対象にして実施した。原位置での弾性波伝搬速度の評価が行われていないため、ここでの弾性波速度の値は、岩石コアの超音波測定結果に基づく弾性波速度(V_s : 2678 m/s)を用いた。前述のように信号の周波数帯域が制限されている影響への対策として、Roth法による相関解析を用いている。

図-15に3軸VSP法による地下反射係数分布推定結果を示す。図中、濃淡の濃い箇所がより高い反射係数を表している。深度120m前後、150m前後、175m前後、220m前後、275m前後、350m前後などに比較的強い反射係数が検出されている。今回の解析では観測点数が1点であるなどのために、方向や深度に対する精度、分解能は十分とは言えないが、大局的に見て、これらの高反射係数を示す箇所は何らかの地下の不連続構造に対応していると考えられる。

詳細な検討のために、掘削された深度320mの坑井沿い(図-15中の点線)について、3軸VSP法により求められた反射係数と各種検層結果との比較を行った(図-16)。ただし、3軸VSP法ならびに各種検層のそれぞれの深度基準については、厳密なキャリブレーションは行われていない。図-16の左から、(a)3軸VSP法による坑跡沿いの反射係数、(b)BHTVに基づく深度2mあたりのき裂本数、(c)

比抵抗, (d) 速度及び密度検層結果から計算した音響インピーダンス, (e) 地質と岩級区分についての柱状図である. 音響インピーダンスの変化は一般に反射係数の発生に対応していることが知られているが, 図-16(d)の深度 80 m 付近, 115 m 付近, 140 m 付近, 225 m 付近, 275 m 付近の音響インピーダンスの急変箇所が, 図-16(a)の 3 軸 VSP 法による反射係数の主要なピークとよく一致している. このことから, 本研究で 3 軸 VSP 法により推定された反射係数が, ノイズや虚像だけでなく地下構造変化を反映したものとなっていると考えられる. 音響インピーダンスの急変箇所付近について, コア観察結果・地質柱状図・ボアホールテレビューワー解析結果らとの対応を調べたところ, 深度 78 m, 83 m, 116 m, 121 m, 130~140 m, 225 m, 225~243 m, 275~276 m などに, 土砂状・岩片状の破砕帯(岩級区分 CL~CM)の存在が確認された. 今回の 3 軸 VSP 法では, 観測点数の制約等から地下構造の形状や配置に関する議論は困難であるが, 推定された反射係数分布は破砕帯のような岩体の性状変化を反映していると考えられる.

比抵抗(図-16(c))には, 深度 75 m 付近, 160 m 付近, 225 m 付近などに平均レベルの大きな変化が

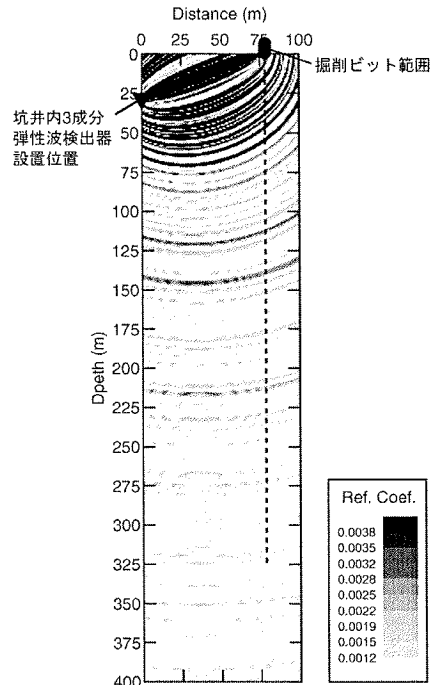


図-15 3 軸 VSP 法による地下反射係数の分布. (濃淡が反射係数を表す. 図中の点線は, 掘削井のおよその坑跡を示す.)

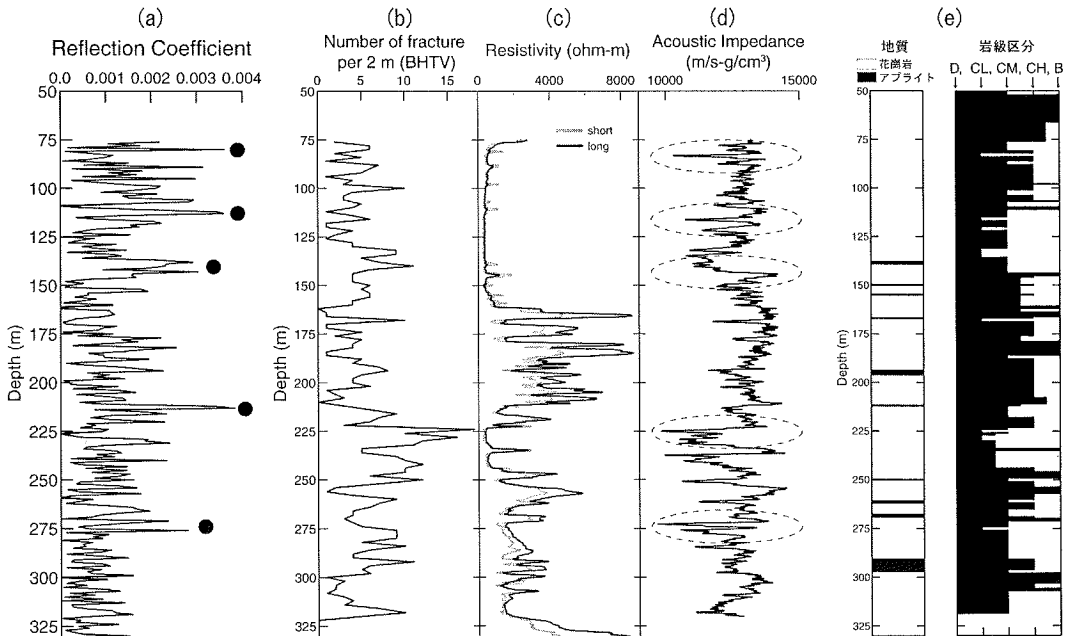


図-16 図-13 中の点線に対応する 3 軸 VSP 法による坑井沿いの反射係数分布と各種検層結果の比較. (深度 75 m 以下の比較. 左より (a) 3 軸 VSP 法による反射係数, (b) ボアホールテレビューワーによる観察に基づく深度 2 m 辺りのき裂本数, (c) 比抵抗 (電極間隔 25 cm: short, 100 cm: long), (d) 密度と速度の検層結果より求めた音響インピーダンス, (e) 地質および岩級区分に関する柱状図. 点線で囲んだ音響インピーダンスの急変点に対応する反射係数のピークを●で示している.)

見られた。これらの付近には、若干の深度のズレがあるものの、図-16(a)における深度 75 m 付近、140 m 付近、215 m 付近の反射係数の比較的明瞭なピークに対応していると考えられる。これらは、図-15でも比較的大きな反射係数帯として現れている。

また、2 m あたりのき裂本数（図 16-(b)）についても、その変化の仕方に対して推定された反射係数が調和して見える箇所がある。ここで反射係数は前述のように音響インピーダンス変化の反映と考えられることから、き裂本数との比較を考える際には、ピークだけでなく増減の変化が生じているゾーンとの対応に注目した。き裂本数が深度 100 m 付近のピークから 115 m 付近にかけて減少する変化に対して、3 軸 VSP 法の深度 115 m の高反射係数が対応していると考えられる。同様に、深度 140 m 付近のき裂本数のピークが深度 140 m の高反射係数に、深度 210 m から 225 m 付近のき裂本数の急増が深度 215 m の高反射係数に、それぞれ対応しているように見える。反射係数の深度 275 m 付近は、き裂本数の、深度 260 m 付近からの減少ないしは深度 270 m 付近からの増加に対応していると考えられる。

比抵抗は孔隙率や水飽和率に関連して岩石性状を反映していると考えられ、き裂本数とも比較的良好な対応がみられる深度もあり、また前述のように破碎帯深度と調和的であることから、坑井掘削音の 3 軸 VSP 法の解析によって、花崗岩体中のき裂や岩質変化等の不連続構造が検出されている可能性が高いと考えられる。

今回の坑井掘削音の観測は工程最初期のわずか約 10 m の掘削区間だけを対象に実施した小規模で簡便なものであったが、3 軸 VSP 法の適用には成功し、深度 300 m 程度までの地下構造推定にも成功したと考えられる。これには花崗岩体という地盤特性が反映されており、実際には観測サイト毎の媒質の減衰特性に左右されることであるが、本結果は 3 軸 VSP 法によって観測規模の割に比較的大きい可探深度が得られる可能性があることを示していると考えられる。

5. まとめ

本論文では、高レベル放射性廃棄物の地層処分のような土木開発分野での坑井掘削音を利用する地下構造推定法の適用を考え、その有効性について検討を行った。ここでは、本方法適用の概念を示し、具体的な検討に不可欠である、本研究で制作した小型軽量で高性能な坑井内 3 成分弾性波検出器の概要と

特性評価試験について報告した。そして、花崗岩採石場で行われた比較的小規模なボーリング時の坑井掘削音を観測し、3 軸 VSP 法による深部の地下反射係数分布の評価結果と各種検層データ等との比較を行った。それらの結果、以下のようなことが明らかとなった。

- 1) 3 軸 VSP 法は、少数の坑井内 3 成分弾性波検出器のみで成立し、様々な掘削行為に伴う放出弾性波を幅広く利用できるため、土木分野における坑井掘削音の解析手法として利用可能である。
- 2) 本研究において製作した小型軽量坑井内 3 成分弾性波検出器は、石油や地熱開発における坑井掘削音観測で用いられていた機器と同等の性能を有している。特性評価試験の結果、十分に高感度で低ノイズレベルであるうえ、900 Hz 程度までの広い周波数帯域に渡って共振等の影響なく高精度に 3 次元粒子運動を検出できることが明らかとなり、本検出器により土木分野での坑井掘削音を対象に 3 軸 VSP 法が利用可能になることが分かった。
- 3) 製作した小型軽量坑井内 3 成分弾性波検出器を用いて、花崗岩採石場における比較的小孔径のボーリング時の坑井掘削音の観測を行ったところ、解析に十分な波形エネルギーを持つ掘削音波形データの取得に成功した。
- 4) 3 軸 VSP 法により地下構造推定を行ったところ、約 10 m の掘削区間の波形データから深度 300 m 付近までの反射係数分布が得られた。可探深度は媒質の減衰特性に影響を受けるが、3 軸 VSP 法により小規模の掘削音観測によっても比較的深部まで地下構造の推定が行える可能性を示している。ここで推定された高反射係数箇所は、比抵抗検層の平均レベルの変化点やき裂本数と調和的であり、岩体中の岩質の変化を反映していると考えられた。

以上のように、小型軽量坑井内 3 成分弾性波検出器を用いることにより、比較的小規模の掘削行為からの坑井掘削音データの取得が可能になり、数 m 程度の掘削区間の簡便な計測によっても深部の地下構造推定が行える可能性が示された。本研究の成果として 3 軸 VSP 法の適用範囲が広げられたことになり、観測用坑井が準備可能で、トリコーン式掘削ビットが用いられる場合には、掘削規模の大小を問わず、3 軸 VSP 法による地下構造推定が実現可能であると考えられる。

推定精度については、仮定する弾性波速度の影響

やデータ解析上の誤差を含むが、検層等の他の情報との比較が可能であれば、一定の信頼性は確保できると考えられる。従って、調査ボーリングや他の探査手法に付随する手法として、土木分野においても3軸VSP法が高いコストパフォーマンスを示すことが期待できる。今後は、放射性廃棄物の地層処分等でのさらに幅広い利用を鑑み、堆積系岩盤や坑道内での掘削、コアボーリング等他の掘削方式への適用等を検討していく予定である。

謝辞：本研究は、平成12年度産業技術研究助成事業（新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO））の一環として実施したものである。また、本研究の一部は、原子力委員会の評価に基づき文部科学省原子力試験研究費により実施されたものである。これらの関係各位に謝意を表します。

参考文献

- 1) 核燃料サイクル開発機構：わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性—地層処分研究開発第2次とりまとめ—総論レポート，1999.
- 2) Asanuma, H., Niitsuma, H. and Chubachi, N.: An Analysis of Three Dimensional AE Lissajou Pattern during Well-drilling and Estimation of Source Direction, *Progress in Acoustic Emission-5*, Yamaguchi, K., Takahashi, H. and Niitsuma, H. eds., Jap. Soc. Non-Destruct. Insp., pp. 436-443, 1990.

- 3) Rector III, J. W. and Marion, B. P.: The use of Drill-Bit Energy as a Downhole Seismic Source, *Geophysics*, Vol. 56, pp. 628-634, 1991.
- 4) Asanuma, H. and Niitsuma, H.: Triaxial seismic measurement while drilling and estimation of subsurface structure, *Geothermal Science and Technology*, Vol. 5, pp. 31-51, 1995.
- 5) Soma, N., Utagawa, M., Seto, M., Cho, A. and Asanuma, H.: Identification of subsurface structures using the seismic-while-drilling technique, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, (in press).
- 6) 吉田 剛：確率論的手法による坑井掘削音の解析と地下構造の推定，平成7年度 東北大学修士学位论文，1996.
- 7) Knapp, C. H. and Carter, G. C.: The Generalized Correlation Method for Estimation of Time Delay, *IEEE Trans. Acoustics Speech, Signal Processing*, Vol. 24, No.4, pp. 320-327, 1976.
- 8) Asanuma, H., Liu, H., Niitsuma, H. and Baria, R.: Discrimination of polarization of reflected waves in the triaxial drill-bit VSP and imaging of subsurface structure at Soultz, France, *SEG 2000 Annual Mtg.*, CD-ROM, 2000.
- 9) 新妻弘明，長島重憲：広帯域・高精度坑井内3軸AEゾンデの開発と性能評価，第4回地下と土木のAE国内コンファレンス論文集，pp. 75-84，1991.
- 10) Niitsuma, H., Moriya, H. and Nagano, K.: Calibration method using the spectral matrix for downhole triaxial seismic detectors: *Acoustic Emission/Microseismic Activity in Geologic Structures and Materials 19*, Hardy, H. R., Jr., ed., Trans Tech Publications, pp. 611-624, 1995.

(2003. 3. 28 受付)

MEASUREMENT OF SEISMIC SIGNAL WHILE DRILLING USING SMALL-SIZE DOWNHOLE THREE COMPONENT SEISMIC DETECTOR AND ESTIMATION OF SUBSURFACE STRUCTURE

Nobukazu SOMA, Manabu UTAGAWA, Masahiro SETO,
Akio CHO and Hiroshi ASANUMA

A geophysical prospecting technique using seismic signal while drilling has been applied to a relatively small-scale drilling in a civil engineering such for high level nuclear waste disposal repository. For the purpose of it, a small-size downhole three component seismic detector was developed for measuring drilling signal. Then, the performance of the measurement system was verified by a calibration test using an artificial seismic source. A data acquisition of in-situ drilling signal was conducted during a drilling at a granitic quarry, and subsurface structure were estimated by the triaxial drillbit VSP method. The distribution of underground reflection coefficients was obtained to a depth of about 300 m by drilling signals from only 10 m drilling, and the estimated image agrees well with other borehole observations.