



超深地層研究所計画における 弾性波探査手法の適用性評価

松岡 稔幸 石垣 孝一

東濃地科学センター 瑞浪超深地層研究所

The Evaluation of Reflection Seismic Methods in the Mizunami Underground Research Laboratory Project (MIU project)

Toshiyuki MATSUOKA Koichi ISHIGAKI

Mizunami Underground Research Laboratory Tono Geoscience Center

超深地層研究所計画の調査・研究実施領域のひとつである正馬様用地において、断層や基盤花崗岩中の割れ目帯の分布及び堆積岩の堆積構造や堆積岩層と基盤花崗岩の不整合面の分布などを把握するための調査技術の開発を目的に、反射法地震探査並びにボーリング孔を利用したマルチオフセットVSP探査を実施し、それらの適用性を検討した。その結果、a) 反射法地震探査では、基盤花崗岩中において相対的に低角度傾斜の割れ目が卓越するような箇所の存在の有無を推定できる可能性があること、b) マルチオフセットVSP探査では、反射法地震探査結果を補完し、反射法地震探査では推定が困難なより深部（基盤花崗岩中）の割れ目の分布傾向などを捕捉する上で有効であることがわかった。

Reflection seismic and multi-offset VSP surveys were conducted at JNC Shobasama-site to develop investigation techniques in the granite area, and the applicability of these geophysical methods was evaluated.

As the result of this study : a) it is possible to infer the existence of the lower angle fracture zone in the granite by reflection seismic survey and b) multi-offset VSP supplements the result of reflection seismic survey and it is possible to infer the distribution of the fracture zone in deeper area of the granite.

キーワード

超深地層研究所計画, 物理探査, 反射法地震探査, VSP探査, 花崗岩, 断層, 上部割れ目帯

Mizunami Underground Research Laboratory Project, MIU, Geophysics, Reflection Seismic, VSP, Granite, Fault, Upper Highly Fractured Domain

1. はじめに

超深地層研究所計画の地表からの調査予測研究段階における地質・地質構造に関する調査・研究では、結晶質岩である花崗岩を対象に地下水流動や地下水の水質を規制すると考えられる断層や割れ目帯などの地質構造の分布特性を把握するための調査技術の開発を行っている^{1), 2)}。このうち、地上からの物理探査手法を用いた調査技術として、

超深地層研究所計画の調査・研究実施領域のひとつである正馬様用地（図1）において、事前に実施される文献調査や空中からの調査（リニアメント判読や空中物理探査など）では把握することが困難な、より小規模な断層や基盤花崗岩中の割れ目帯の分布及び堆積岩の堆積構造や堆積岩と基盤花崗岩の不整合面の分布などを把握するための調査技術の開発を目的に、反射法地震探査並びにボーリング孔を利用したマルチオフセットVSP探査を実施した^{3), 4), 5)}。

これらの探査手法は、主に堆積岩中の地質構造の把握を目的として発展してきた手法であり、堆積岩に対しては、これまでに探査結果とボーリング孔データとの対比が数多く行われており、ボーリング孔で確認された地質構造に対する弾性波応



松岡 稔幸

瑞浪超深地層研究所 超深地層研究グループ 地質チーム
超深地層研究所計画及び広域地下水流動研究における物理探査手法を利用した調査・研究業務に従事



石垣 孝一

瑞浪超深地層研究所 超深地層研究グループ 地質チーム
超深地層研究所計画及び広域地下水流動研究における物理探査手法を利用した調査・研究業務に従事

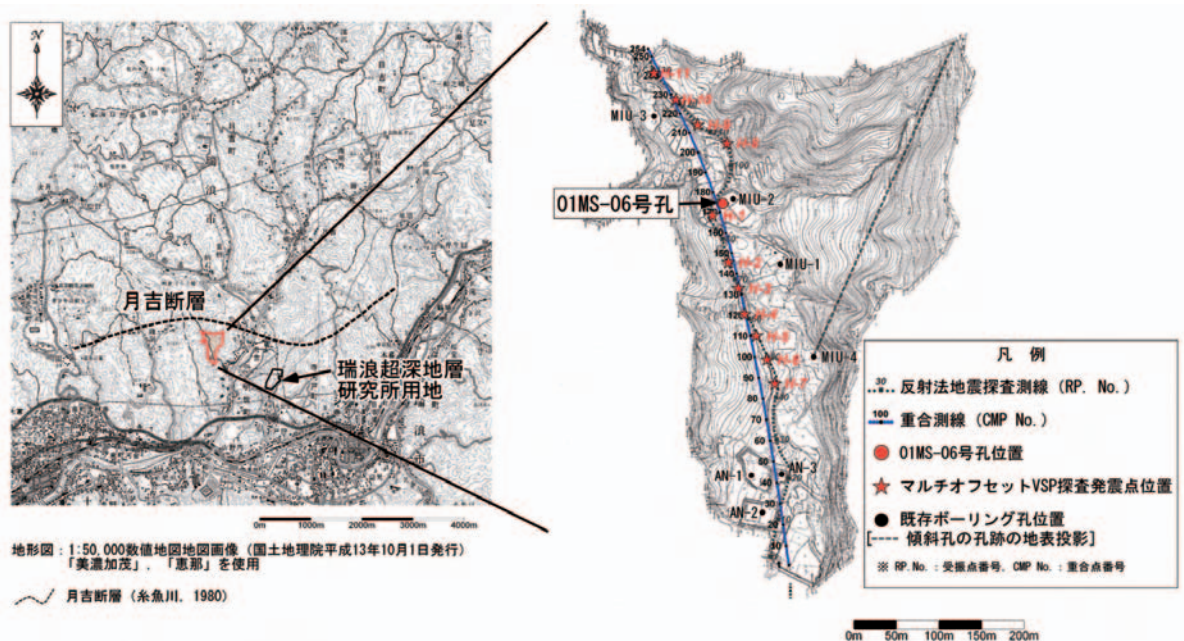


図1 調査位置

答について、比較的良く把握されているものの、花崗岩中の内部構造を把握する目的で適用した例は非常に少なく、その適用性についてはこれまでに十分に把握されていない。

本報告では、これら2つの探査手法に関して、正馬様用地におけるボーリング調査データとの比較を通して、花崗岩分布地域を対象とした地質構造調査手法としての適用性を検討した。

2. 調査・研究実施領域の地質概説

超深地層研究所計画における調査・研究実施領域のひとつである正馬様用地周辺の地質は、基盤である後期白亜紀の土岐花崗岩を不整合に中新世の瑞浪層群が覆っている。正馬様用地周辺に分布する瑞浪層群は、下位より土岐夾炭累層、明世累層であり、両者の関係は不整合にある。また、正馬様用地の北方数百mには、東西走向、南傾斜の逆断層である月吉断層⁶⁾が分布している。

正馬様用地では、超深地層研究所計画の一環として、掘削長約1,000mの鉛直ボーリング孔：MIU-1～3号孔^{7),8),9)}と掘削長約790mの傾斜ボーリング孔：MIU-4号孔¹⁰⁾を掘削しているほか、超深地層研究所計画以前の既存のボーリング孔として、AN-1～3号孔^{11),12)}が存在する(図1(右))。これらのボーリング調査結果から、正馬様用地南端に位置するAN-1, AN-3号孔では、土岐夾炭累層が

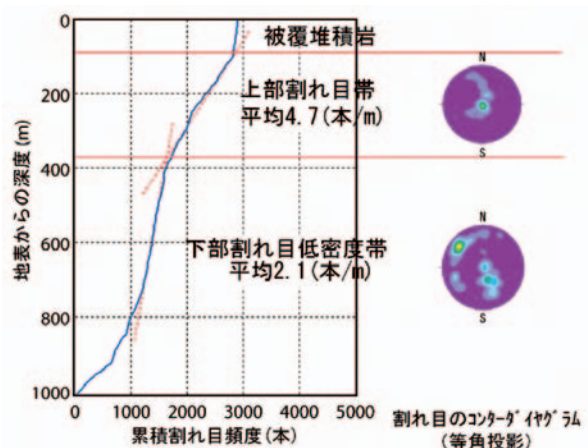


図2 花崗岩中の割れ目の分布 (MIU-2号孔)

欠如し、明世累層が基盤花崗岩の上に不整合に接し (AN-2号孔では、コアが回収されておらず不明)、正馬様用地の中央付近から北方に位置するMIU-1～4号孔では、基盤花崗岩の上に、下位より土岐夾炭累層、明世累層がそれぞれ不整合に堆積している。また、各ボーリング孔における基盤花崗岩の上面までの深度は、南端のAN-1号孔及びAN-3号孔でそれぞれ16.6m及び30.8m、中央付近から北方へかけて、MIU-1号孔で88.8m、MIU-2号孔で88.6m、MIU-3号孔で88.0mであり、南端に位置するAN孔からMIU-1号孔までの間において、基盤花崗岩上面の起伏及び堆積岩の

層厚が急激に変化していることが推定される。

一方、花崗岩内部においては、これらのボーリング調査におけるコア観察やボアホールテレビ観察（以下、BTV観察）による割れ目解析によって、堆積岩との不整合面下、190～280m付近までの花崗岩上部において低角度の傾斜（0～30°）を有する割れ目の分布密度が有意に高い岩盤領域（上部割れ目帯）が存在することが確認されている（図2）^{13),14)}。また、MIU-2号孔の890～915.2m、MIU-3号孔の693.2～719.3m及びMIU-4号孔の587.59～673.43mにおいてそれぞれ、月吉断層に遭遇し、その分布が確認されている^{8),9),10)}。

3. 探査概要

本調査・研究で実施した反射法地震探査及びマルチオフセットVSP探査のそれぞれの原理及び仕様を以下に示す。

3.1 反射法地震探査

(1) 原理

反射法地震探査は、地表で人工的に振動（弾性波）を発生させ、地下からの応答（地震記録）を測定して地下構造を推定する手法である。人工的に発振された弾性波は、地下の弾性的性質の異なる地層や岩石などの境界面（地層境界など）に達すると、その振動エネルギーの一部は上方へ反射して地表に返ってくる。この波を地表に配列展開した受振器によってとらえ、弾性波の到達時間や振動エネルギーの減衰の状況などから地下の構造を推定する。図3（上段）に反射法地震探査の基本原則である共通反射点重合法の概念を示す。測線上に一定間隔に受振点を設け、測線上の一点で発震して多数の受振点で反射波を同時観測する。この時、同時受振する受振点数をチャンネル数と呼ぶ（概念図中では12チャンネルとしている）。次に、発震点と受振点全体を同距離だけ移動して（受振点は固定させても良い）発震を行って記録を取得する。この様に発震／受振を規則的に繰り返すことにより、地下の同一の点（共通反射点：CMP）で反射したデータが2重、3重に取られることになる。このデータに種々の補正処理を行い、足し合わせる（重合）ことにより、測線上の各CMP位置直下の地下反射波が強調される。

(2) 仕様

反射法地震探査は、正馬様用地内に南北方向に

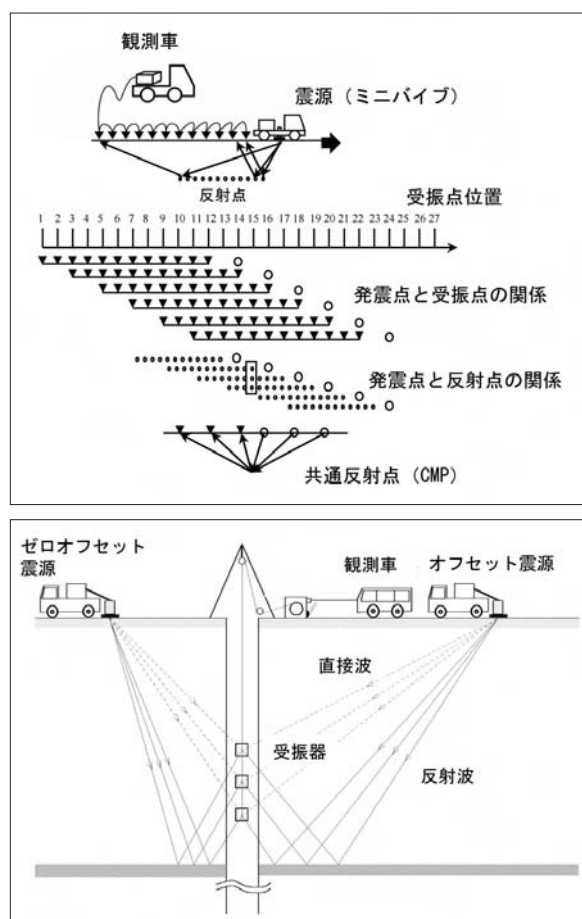


図3 探査の概念（上段：反射法地震探査，下段：VSP探査）

延びる舗装された林道において、測線長660mを展開して実施した（図1（右）の黒丸点線）。

表1に仕様並びに測定機器一覧を示す。探査測線の受振点並びに発震点間隔は、それぞれ5m間隔であり、測線の1測定あたりの展開チャンネル数は120chである。探査の震源には、ミニパイプレータ1台を使用した。

3.2 マルチオフセットVSP探査

(1) 原理

VSPとは、Vertical Seismic Profilingの略で、地表で人工的に振動（弾性波）を発生させ、この振動をボーリング孔内に設置した受振器によってとらえる地震探査の一手法である。ボーリング孔内で受振した記録には、震源から地層中を伝わる直接波やボーリング孔近傍における地層境界面からの反射波が含まれているので、弾性波の反射、透過及び減衰過程についての詳細な情報を得ることができる。

表1 反射法弾性波探査仕様および測定機器一覧

項 目	探 査 仕 様	名 称	仕 様	製 造 元
受 振 点 間 隔	5 m	探 針 機	Strata View R120	Geometrics 社, USA
受振器グルーピング	1 m×6 個/点 (5 m)			
発 震 点 間 隔	5 m			
垂直重合数(回/点)	4～8 回			
発 震 周 波 数	20～150Hz			
ス ウ ィ ー プ 長	10秒			
記 録 長	2 秒	震 源	minivib T-2500	IVI 社, USA
サンプリング間隔	1 ミリ秒			
フ ィ ル タ	ローカット, ハイカット:out	受振器	UM-2	Mark Products 社, USA
記録チャンネル数	118チャンネル			
CDP (水平) 重合数	標準59重合			
展 開 方 法	固定展開			

通常の反射法地震探査では、地表で発震し、地表に展開した受振器で反射波を観測するので、その走時は地表と反射面までの往復走時となる。一方、VSP探査では、ボーリング孔内に受振器を深度方向に展開するため、観測する反射波はほぼ片道走時となり、反射法地震探査と比較して高い分解能を有する記録を得ることができる。また、VSP探査は、ボーリング孔内で観測していることから、観測される弾性波応答とボーリング孔内で観察される地質特性とを直接に対比できるため、反射法地震探査の結果と実際の地質とを対応づける際には、VSP探査データを介して行うほうが、より正確に解釈することが可能となる。なお、発震点をボーリング孔近傍に設置し、ボーリング孔近傍の地質特性を探査対象とする方法を、ゼロオフセットVSP探査といい、発震点をボーリング孔から離れた場所に設置し、その間の地質特性を探査対象とする方法をオフセットVSP探査という(図3(下

段))。本探査は、ゼロオフセットと複数のオフセット距離に発震点を設置して探査を実施していることから、これをマルチオフセットVSP探査という。

(2) 仕様

反射法地震探査の測線近傍に新たに掘削深度400mのボーリング孔(図1(右)の赤色丸印:01MS-06号孔)を掘削し、マルチオフセットVSP探査を実施した。マルチオフセットVSP探査では、反射法地震探査の結果と十分に比較できるように、反射法地震探査測線沿いに計11点の発震点を設置した(図1(右)の赤色星印)。表2に調査仕様並びに測定機器一覧を示す。孔内の受振には、多連(12連)式のハイドロフォンを使用し、震源には、反射法地震探査と同様に1発震点につきミニバイブレータ1台を使用した。

表2 VSP探査仕様および測定機器一覧

項 目	探 査 仕 様	名 称	仕 様	製 造 元
受 振 点 間 隔	2 m	探 針 機	Strata View R60	Geometrics 社, USA
発 震 周 波 数	20～220Hz			
ス ウ ィ ー プ 長	10秒			
垂 直 重 合 数 (回/点)	5 回			
記 録 長	2 秒			
サンプリング間隔	1 ミリ秒			
フ ィ ル タ	ノッチフィルタ:60Hz	震 源	Minivib T-2500 Minivib T-15000	IVI 社, USA
ハイドロフォン記録チャンネル数	12チャンネル			
		受振器	ハイドロフォン TC-12	Vivrometric 社, USA

4. 花崗岩分布地域を対象とした各探査の適用性

4.1 反射法地震探査

(1) データ処理

反射法地震探査の重合測線の位置を図1（右）（青色線）に示す。適用したデータ処理のフローは図4のとおりである。

データ処理の結果、測線全域にわたっていくつかの明瞭な反射イベントが認められる良質な反射断面記録が得られた（図5）。往復走時100msec付近までにおいて、堆積岩中の地層境界に対応すると考えられる水平方向に連続性のよい反射イベントが複数認められ、さらにそれ以深の往復走時250msec付近までにおいても、水平方向の連続性は悪いものの比較的振幅の強い反射イベントが認められており、花崗岩内部から反射イベントが抽出されている可能性があると考えられる。

(2) 反射法地震探査結果の評価

取得した反射断面記録と既存のボーリング調査結果との比較により、花崗岩分布地域における反

射法地震探査の適用性を検討した。図6（左）に既存ボーリング孔データの一例としてMIU-2号孔のボーリング調査データ⁸⁾を示す。図6（左）は、左から地質柱状図、BTV観察により得られた花崗岩中の割れ目密度分布（黒色：全割れ目、赤色：低角度傾斜（ $\sim 30^\circ$ ）の割れ目、青色：高角度傾斜（ $60^\circ \sim$ ）の割れ目）、低角度傾斜（ $0 \sim 30^\circ$ ）を有する割れ目の累積本数、物理検層記録（密度、P波速度）である。MIU-2号孔では、地表から深度43.9mまでに明世累層が、深度43.9m～88.8mまでに土岐夾炭累層が分布しており、深度88.8m以深に基盤花崗岩が分布する。また、BTV観察による割れ目解析により得られた低角度傾斜（ $0 \sim 30^\circ$ ）を有する割れ目の累積本数を示す曲線の変曲点深度から、上部割れ目帯の下限深度は深度370m付近と見積もられる。一方、P波速度及び密度の検層においては、明世累層と土岐夾炭累層の境界部付近並びに基盤花崗岩上面付近に対応して大きな物性変化が認められるとともに、基盤花崗岩中

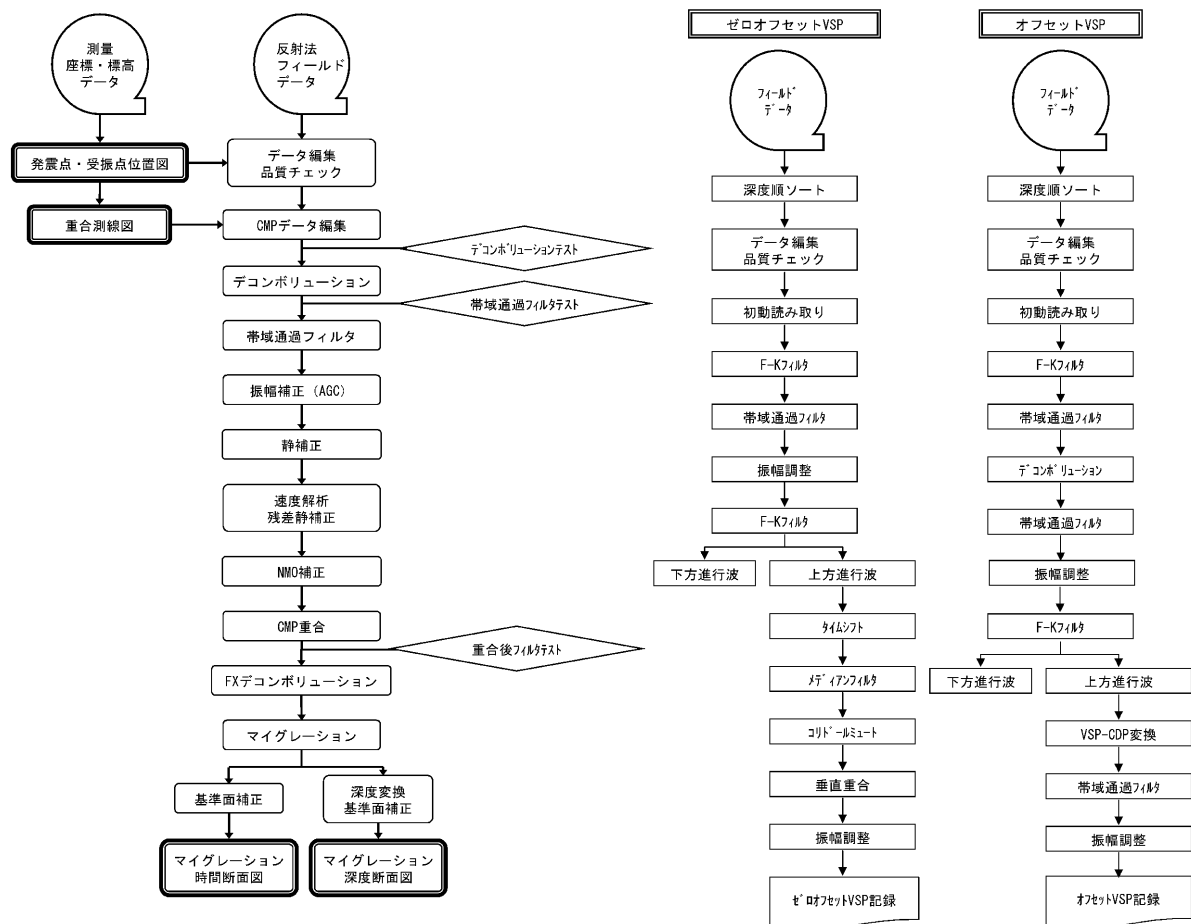


図4 データ処理の流れ（左：反射法地震探査，右：VSP探査）

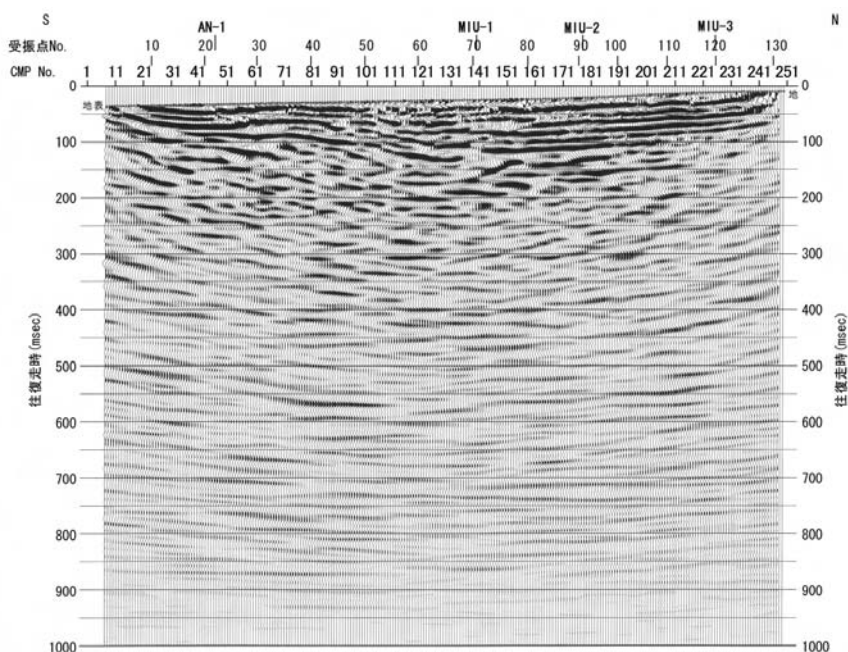


図5 マイグレーション時間断面記録

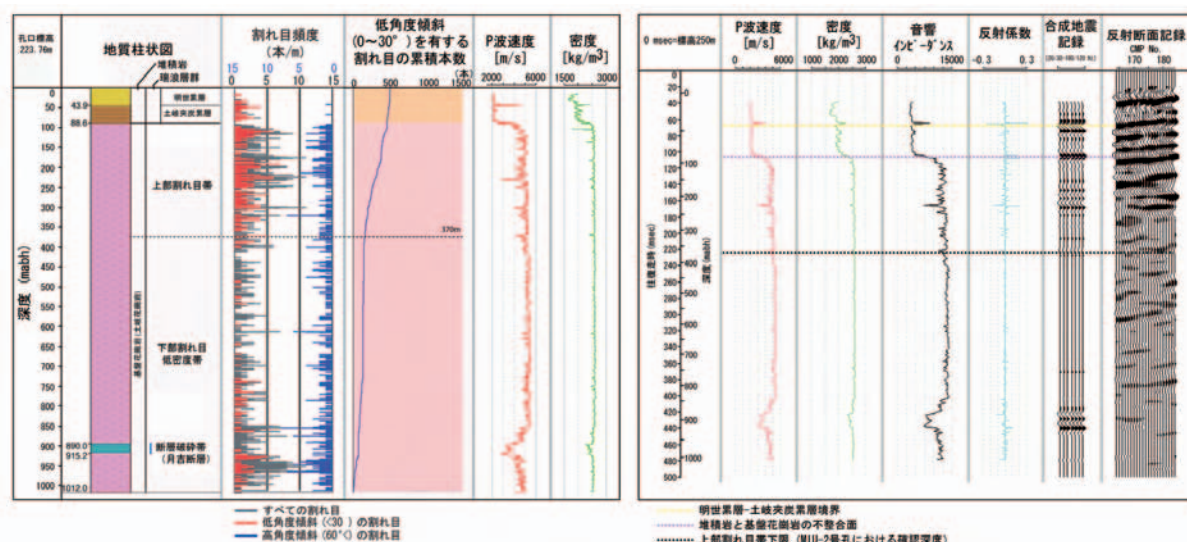


図6 MIU-2号孔ボーリング調査データ(左)と合成地震記録と反射断面記録との比較(右)

においても、上部割れ目帯の分布域及びその下部の比較的割れ目の分布密度が低い岩盤領域(下部割れ目低密度帯)中の深度890.0m~915.2mに遭遇した月吉断層付近に対応して、比較的顕著な物性の変化が認められる⁸⁾。

反射断面記録と実際の地質分布とを対応付けるために、音波検層及び密度検層により得られたP波速度及び密度の値から合成地震記録*を作成し

た。図6(右)に合成地震記録と反射断面記録(MIU-2号孔近傍における断面の切り出し)とを比較した結果を示す。比較に際して、合成地震記録の波形には、反射法地震探査のデータ処理で適用したのと同じ帯域のバンドパスフィルター(20/30-100/120Hz)を適用した。

各検層における明世累層と土岐夾炭累層の境界部付近及び基盤花崗岩上面付近の大きな物性変化

*速度検層と密度検層から作成される人工的な反射地震記録で、反射係数と波形のコンボリューション(畳み込み積分)として計算される。反射係数は、ある境界面前後の音響インピーダンス(速度に密度を掛けた量)の差と和の比で表現される。波形には、震源波形や処理過程で使用するフィルタなどを考慮する。

(それぞれ、図6(右)中の黄色破線及び桃色破線部)に対応して、合成地震記録にそれぞれ、負のピークと正のピーク**を示す明瞭な反射波が得られている。反射断面記録上においても、ほぼ同じ深度において明瞭な反射イベントが認められており、合成地震記録の反射波と比較することにより、反射断面記録上で明世累層と土岐夾炭累層の境界部及び基盤花崗岩上面を容易に解釈することができる(図7)。また、基盤花崗岩中の上部割れ目帯の分布域(図6(右):黒色破線は上部割れ目帯の下限深度)においても、各検層の物性変化に対応して、合成地震記録にはいくつかの反射波が得られており、反射断面記録上においても概ね同様の深度付近に水平に分布するいくつかの明瞭な反射イベントが認められている。このことから、反射断面記録の花崗岩中に認められる反射イベントは、上部割れ目帯に対応して現れているものと解釈される。

しかしながら、例えば、明世累層と土岐夾炭累層の境界部の直下など、反射断面記録と合成地震記録が必ずしも対応していない箇所も実際には見られる(図6(右))。これは、検層が1次元データであるのに対して反射法地震探査が2次元データ

であることやそれぞれで使用する信号の周波数が異なることなどによるものと考えられる¹⁵⁾。

一方、断層の解釈は、反射断面記録上の解釈ホライゾン(反射面)が途切れることにより認識することができ¹⁵⁾、反射断面記録上において、堆積岩及び基盤花崗岩上面に対応する明瞭な反射イベントの不連続から、数条の断層を推定することができた(図7中の赤色線)。ただし、すでにその分布が確認されている月吉断層に関しては、合成地震記録(図6(右))上では振幅の強い反射波が得られているものの、水平構造を前提とした本探査手法では、高角度傾斜を有する断層面(MIU-2号孔で実施したBTV観察による断層主要部の走向傾斜でN88E,62S)からの反射波を直接にイメージすることは困難であり、また反射断面記録上の対応する深度には、解釈の指標となる反射面も得られていないため、その分布を推定することはできなかった。

以上のことから、反射法地震探査は、地表から堆積岩中の地層境界や基盤花崗岩上面の起伏の把握、及びそれらの構造に対応する反射イベントの不連続から断層を推定することができるとともに、基盤花崗岩中で相対的に低角度傾斜の割れ目

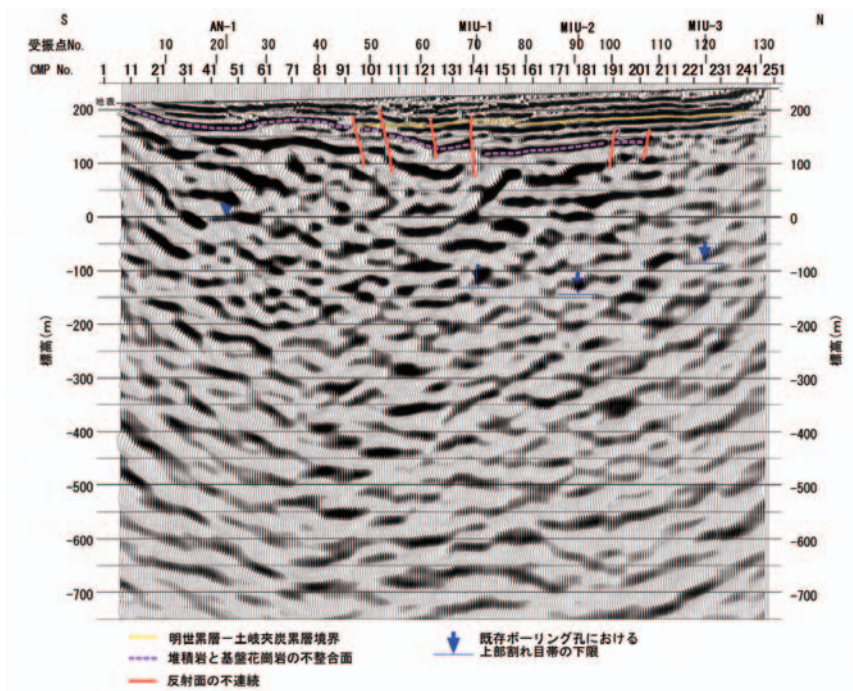


図7 反射断面記録の地質構造解釈

**反射係数の正と負に対しコンボリューションされた波形の振幅の最大値部分

が卓越するような箇所の存在の有無を推定できる可能性があるものと考えられる。

4.2 マルチオフセットVSP探査

(1) データ処理

適用したデータ処理のフローを図4に示す。データ処理の結果、得られたゼロオフセットVSP記録(図8上段)及びオフセットVSP記録(図8下段)のそれぞれにおいて、反射法弾性波探査と同様に、往復走時200msec付近までの間、いくつかの明瞭な反射イベントが得られた。

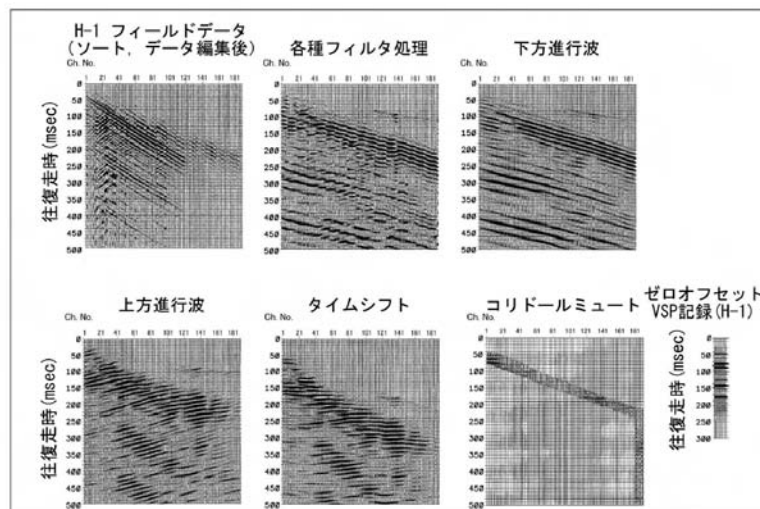
(2) マルチオフセットVSP探査結果の評価

ゼロオフセットVSP記録とH1～H11のすべてのオフセットVSP記録を重合処理したオフセットVSP重合断面記録を01MS-06号孔における地質データや反射法地震探査結果と比較し、花崗岩分布地域におけるマルチオフセットVSP探査の適用性を検討した。

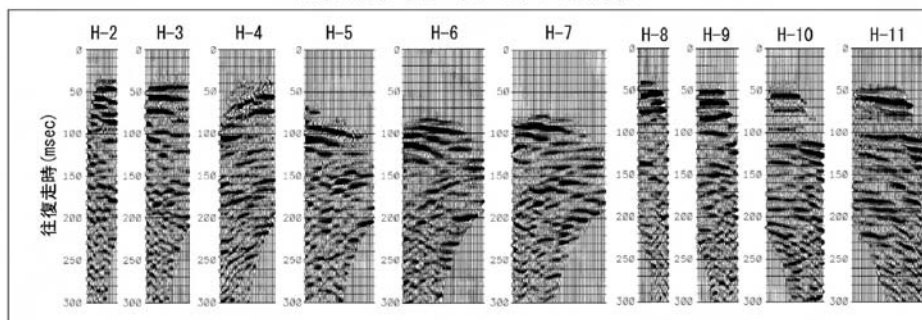
図9に、ゼロオフセットVSP記録と01MS-06号

孔における地質データとの比較を示す。図9では、左から地質柱状図、BTV観察により得られた花崗岩中の割れ目密度分布(黒色:全割れ目, 赤色:低角度傾斜($\sim 30^\circ$)の割れ目, 青色:高角度傾斜($60^\circ \sim$)の割れ目), 物理検層記録(密度, P波速度), 密度とP波速度から求めた音響インピーダンス及び反射係数であり, ゼロオフセットVSP測定記録(初動記録)から求めた深度-時間曲線を介して, ゼロオフセットVSP記録と比較している。01MS-06号孔では, 地表から深度42.6mまでに明世累層が, 深度42.6m～86.7mまでに土岐夾炭累層が, 深度86.7m以深に基盤花崗岩が分布しており, 花崗岩上部割れ目帯の下限深度はMIU-2号孔と同様に深度370m付近である。

図9から, 堆積岩中の基底礫岩上面や地層境界などの地質と反射イベント(図9中の黄色線)を直接に対比することができる。基盤花崗岩中の割れ目が卓越する箇所において, 対応する反射イベント(図9中の桃色線)が得られており(データ



(a) ゼロオフセットVSPのデータ処理過程(図4に基づく)とその結果(ゼロオフセットVSP記録)



(b) オフセットVSPのデータ処理結果(オフセットVSP記録)

※H-1～H-11: 図1の発震点

図8 ゼロオフセットVSP記録およびオフセットVSP記録

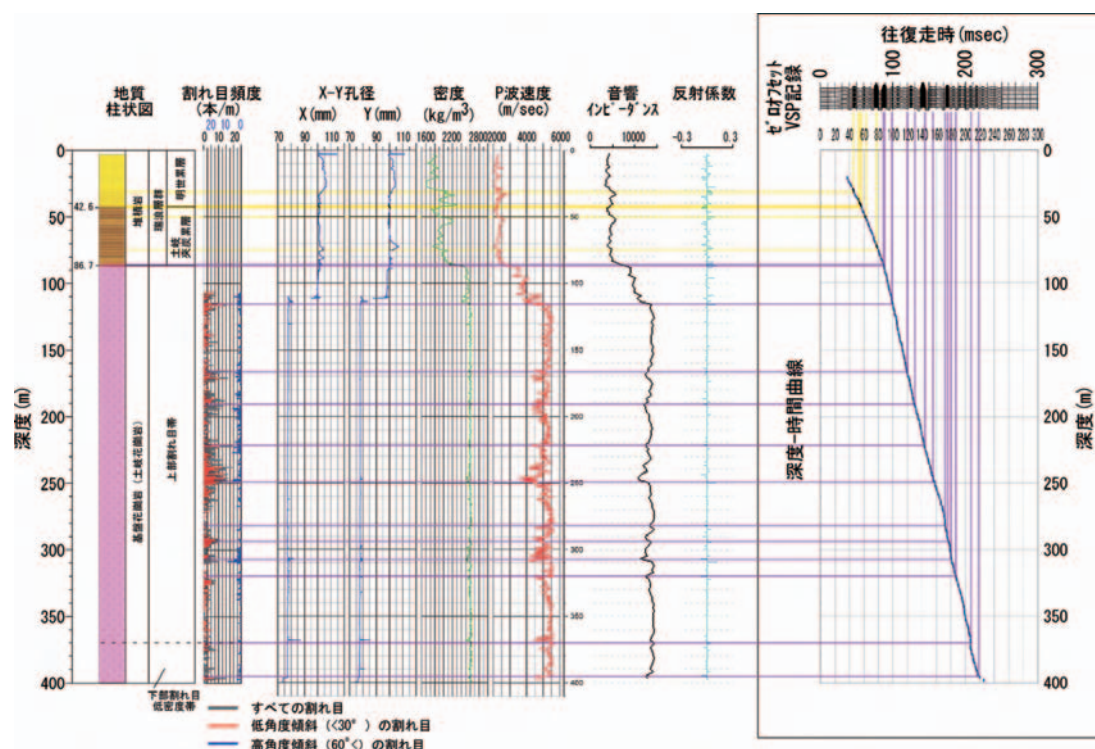


図9 ゼロオフセットVSP記録と01MS-06号孔データの比較

処理が水平構造を前提としているため、低角度の割れ目に乏しい深度190m付近や370m以深ではあまり明瞭でない)、MIU-2号孔の合成地震記録(図6(右))と同じく、花崗岩中の低角度の割れ目が卓越する箇所、実際に反射波が発生していることを確認した。

オフセットVSP重合断面記録(図10)において、基盤花崗岩中の反射イベントに着目すると、オフセットVSP重合断面記録上の標高130m～-70m付近の反射イベントは、低角度に北傾斜を示している。これを01MS-06号孔のBTV観察による割れ目の傾斜と比較してみると、深度105m～250m及び深度250m～300mの割れ目の傾斜方位の集中点は、それぞれN24E8W、N65W6Nで低角度で北に傾斜しており、オフセットVSP重合断面記録と整合する。同様に、深度300m(標高-70m)以深についても、オフセットVSP重合断面記録の反射イベントは、01MS-06号孔の南側で南傾斜を示している。これに対して、深度300m～315m及び深度315m～399.8mにおける割れ目の傾斜方位の集中点は、それぞれN89W9S、N71W1Sで低角度で南に傾斜している。オフセットVSP重合断面記録に認められる反射イベントの分布は、実際の基盤花崗岩中の割れ目の分布傾向を示しているものと考

えられる。なお、反射断面記録(図7)については、反射イベントの大局的な分布位置は一致するものの、マルチオフセットVSP探査に比べて分解能やS/Nが低いためか、上記の傾向とはあまり整合していない。

一方、基盤花崗岩中における断層の解釈については、オフセットVSP重合断面記録上の深度100m～360m(標高130m～-130m)付近に、反射イベントの不連続が数箇所認められる(図10中の赤色破線)が、基盤花崗岩中に認められる反射イベントの不連続を、堆積岩や基盤花崗岩上面に対応する反射イベントの不連続と同様に、断層解釈の指標にできるかどうかは不明である。しかしながら、01MS-06号孔の深度197m付近、220m付近、300m付近、320m付近並びに近傍に位置するMIU-2号孔の深度150m付近、225m付近、320m付近、366m付近など⁸⁾において、小規模ではあるが、高角度傾斜の断層が認められていること(図6及び図9では、これらの深度付近において高角度傾斜を有する割れ目が卓越)、及びオフセットVSP重合断面記録から抽出された反射イベントの不連続箇所と反射法地震探査で解釈された断層(図7)の分布位置を比較した場合(それぞれ、図10中の赤色破線と赤色実線)、それらの位置が概ね整合的で

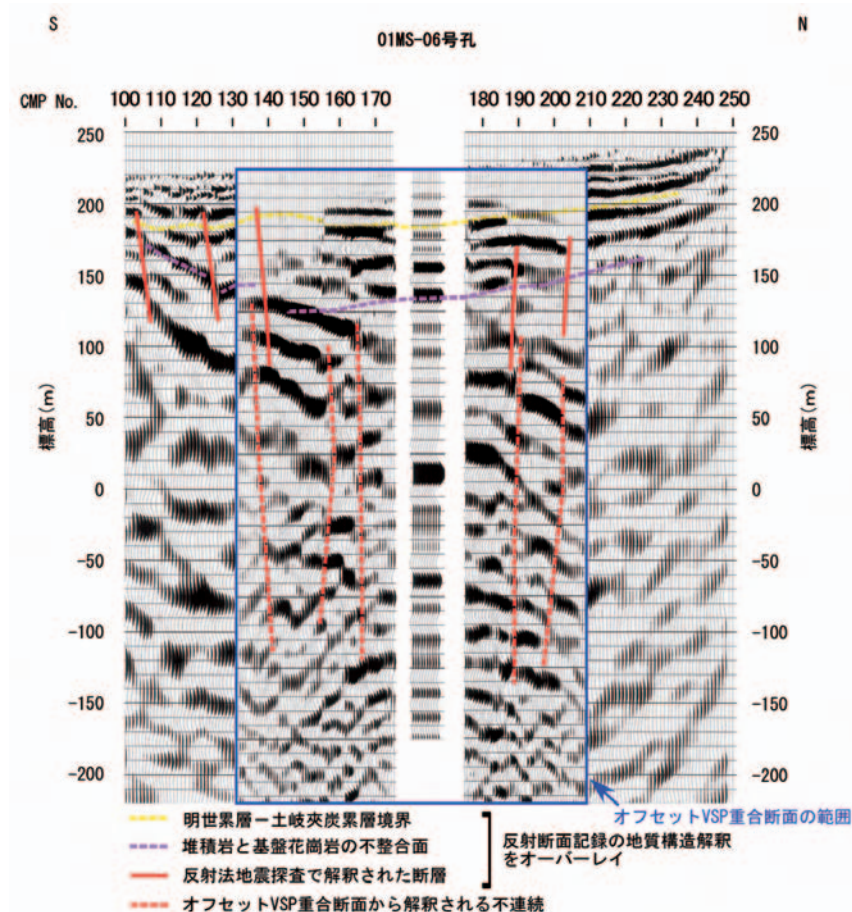


図10 オフセットVSP重合断面記録と推定される不連続構

あることなどから、オフセットVSP重合断面記録の基盤花崗岩中に認められるこれらの反射イベントの不連続は断層に対応している可能性があると考えられる。

以上のことから、マルチオフセットVSP探査は、ボーリング孔で認められる地質と反射イベントとを直接に対比できることから、反射法地震探査を補完し、地質構造解釈の精度を向上させることが可能であり、さらに反射法地震探査では推定が困難なより深部（基盤花崗岩中）の割れ目の分布傾向などを捕捉する上で有効であると考えられる。

5. まとめ

超深地層研究所計画の調査・研究実施領域のひとつである正馬様用地において、花崗岩分布地域を対象とした、反射法地震探査及びマルチオフセットVSP探査の適用性について検討した。その結果、以下の技術的な知見を得た。

(1) 反射法地震探査は、地表から堆積岩中の地層境界や基盤花崗岩上面の起伏の把握、及びそれ

らの構造に対応する反射イベントの不連続から断層を推定することができるとともに、基盤花崗岩中で相対的に低角度傾斜の割れ目が卓越するような箇所是否存在の有無を推定できる可能性があるものと考えられる。

(2) マルチオフセットVSP探査は、ボーリング孔で認められる地質と反射イベントとを直接に対比できることから、反射法地震探査を補完し、地質構造解釈の精度を向上させることが可能であり、さらに反射法地震探査では推定が困難なより深部（基盤花崗岩中）の割れ目の分布傾向などを捕捉する上で有効であると考えられる。

6. 今後の課題

基盤花崗岩中の割れ目帯に対応する反射イベントに関して、より複雑な地質構造に対応することが可能なデータ処理（例えば、重合前マイグレーションなど）の適用により、そのイメージ精度を向上できる可能性があり、今後、それらのデータ処理についても適用していく必要がある。また、

基盤花崗岩中における高角度傾斜の断層に関して、解釈の指標となる反射面がない場合には、その分布を把握することは困難であるため、別途、高角度傾斜の断層面からの反射波を直接抽出し、可視化するような解析方法についても検討する必要がある。

参考文献

- 1) 核燃料サイクル開発機構：超深地層研究所地層科学研究基本計画，JNC TN7410 2001-018(2001).
- 2) 核燃料サイクル開発機構：高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する研究開発—平成14年度報告—，JNC TN1400 2003-004(2003).
- 3) 大柳雅寒，廣岡知，他：パイププレート振源による弾性波探査，JNC TJ7420 99-005(1999).
- 4) 核燃料サイクル開発機構：高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する研究開発—平成13年度報告—，JNC TN1400 2002-003(2002).
- 5) 核燃料サイクル開発機構：超深地層研究所計画年度報告書（平成14年度），JNC TN7400 2003-006(2003).
- 6) 糸魚川淳二：瑞浪地域の地質，瑞浪市化石博物館専報，第1号，pp.1-50 (1980).
- 7) 西出 四郎，窪田 亮，他：立坑掘削予定地点における試錐調査（MIU-1号孔），JNC TJ7440 98-001(1998).
- 8) 石川清，目崎吉彦，他：正馬様洞用地における試錐調査（MIU-2号孔），JNC TJ7420 99-016(1996).
- 9) 豊蔵勇，橋井智毅，他：正馬様用地における試錐調査（MIU-3号孔），JNC TJ7440 2000-022(2000).
- 10) 栗原正治，山口昌司，他：正馬様用地における試錐調査（MIU-4号孔），JNC TJ7440 2002-008(2001).
- 11) 亀和田俊一，遠藤努：ボアホールテレビジョン装置によるAN-1号孔の岩盤割れ目の特性調査（0～500m区間），JNC TJ7417 95-001(1995).
- 12) 阿部信，石川清，他：地質構造把握のための岩芯観察，JNC TJ7440 2000-015(2000).
- 13) 三枝博光，須山泰宏：超深地層研究所計画における地質構造モデルの構築及び地下水流動解析，サイクル機構技報，No.9，pp.89-101(2000).
- 14) 核燃料サイクル開発機構：東濃地域における地質環境特性に関する調査研究—地表からの調査研究の考え方と進め方—，JNC TN7410 2002-008(2002).
- 15) 物理探査学会：“物理探査ハンドブック 手法編 第1章 反射法地震探査”，物理探査学会（1998）.