

# サイスミック・トモグラフィによる地盤調査例

平 間 邦 興      桑 原      徹

## Geological Survey of Tertiary System by Seismic Tomography Method

Kunioki Hirama      Tohru Kuwahara

### Abstract

The geotomography technique, which is one of the most efficient exploration methods for selecting nuclear waste depositories, was used for the geological survey of Tertiary sedimentary rocks including typical Tertiary faults. The results of seismic tomography showed the exact locations of faults with widths of 1 m. The authors also carried out both rock and soil tests concerning rock samples and fault gouge, and discussed the relation between rock material and seismic tomography.

### 概 要

ジオトモグラフィは、高レベル放射性廃棄物地層処分場の建設にあたって、有力な深部岩盤の調査方法である。岩盤中の多数の亀裂、大小の断層、岩盤の変質、高い地下水位などのわが国固有の地質条件は、「ジオトモグラフィ技術」の確立にあたり様々な問題を生じている。今回は地層処分場の対象岩盤の一つである第三紀層堆積岩中に、典型的に発達する断層を対象にして、弾性波を利用した「サイスミック・トモグラフィ」を実施した。その結果幅 1 m の主断層と幅 30 cm の副断層の存在を検証できたが、該当岩盤のコア試験も併せて実施し、物性面からもトモグラフィの結果を考察した。

## 1. はじめに

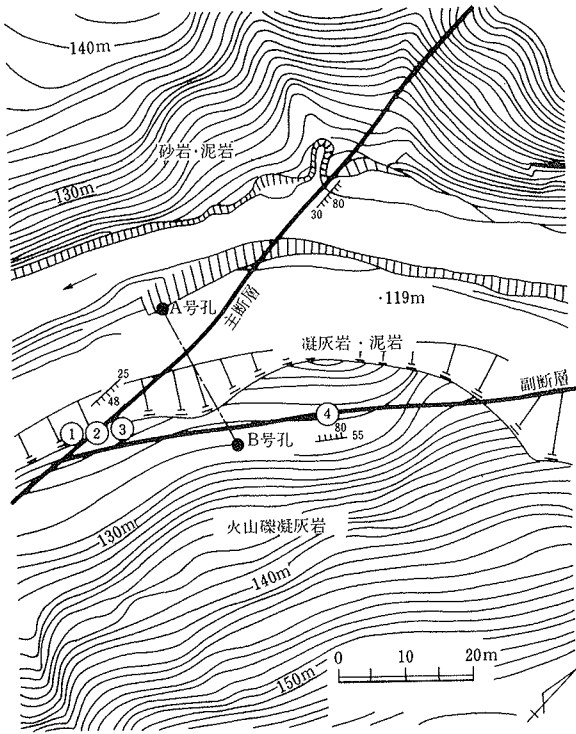
近年、高レベル放射性廃棄物地層処分の処分場建設に当たり、深部岩盤の地質・岩盤物性・地下水流動の非破壊調査・試験技術の研究開発が大きく進められている。あるボーリング孔中で弾性波あるいは電磁波を発生させ、他のボーリング孔でその波を観測して、孔間の岩盤状況を調査する、「ジオトモグラフィ技術(クロスホール法)」は海外における大きな成果の一つである<sup>1)2)</sup>。「ジオトモグラフィ」は、原理的には医学界で広く利用されている X 線 CT スキャンと同様なものである。この技術は当然我が国でも導入あるいは開発されるはずであるが、海外では極めて良好な地質・岩盤条件下で優れた成果が得られており、地質条件が全く異なる我が国では必ずしも同様な結果が得られるかは明らかではない。特に我が国特有の地質条件を考えると、岩盤中の多数の亀裂、大小の断層、岩盤の変質、高い地下水位といった問題は、「ジオトモグラフィ技術」の確立にあたり、ハード・ソフト両

面にわたってさまざまな課題を与えている。

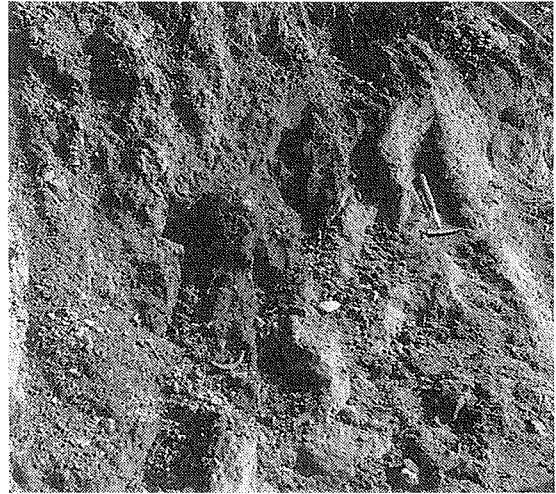
今回の報告は、地層処分の対象岩盤の一つである第三紀層の泥岩・凝灰岩層と、その中に分布する既知の典型的な第三紀の断層を対象にして、弾性波を利用したジオトモグラフィ、すなわち「サイスミック・トモグラフィ」を実施し、日本固有の地質条件に対する当技術の可能性や問題点を検討した。

## 2. 地質条件

調査対象地の地質平面図は図-1 に示す。調査地は、主として第三紀層の火山れき凝灰岩・凝灰岩・泥岩・砂岩などからなり、2本の断層、すなわち主断層と副断層を含んでいる。主断層は幅 1 m の断層粘土からなるほぼ垂直に傾斜する正断層で、長さは全長で約 8 km と報告されている<sup>3)</sup>、典型的な第三紀に活動した断層である。副断層は幅約 30 cm の変質帯からなるほぼ垂直の正断層であるが、主断層に切られており、その分布は局所的である。写真-1 は主断層の状況を示す。



図一 調査位置図



写真一 主断層の状況

### 3. 測定方法と解析方法

#### 3.1. 測定方法

今回の調査は2本のボーリング孔を使用した。ボーリング孔A, Bは、図一に示すように両孔からなる測線が主断層に対してほぼ直交するように設置した。孔間距離は23m, 探査深度は平坦面からGL-30mである。

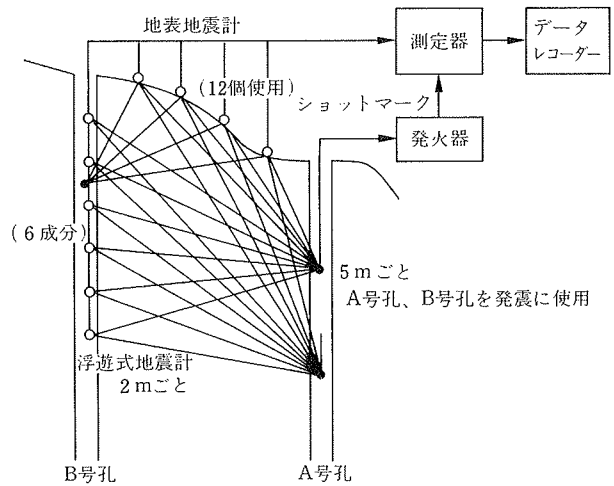
図二は測定系の模式図である。測定の方法は概略次のようになる。

- (1) まずA号孔を発震用に、B号孔を受震用とする。
- (2) A号孔の中に電気雷管を所定の深度まで挿入する。
- (3) B号孔の中に2mごとに6個連結した浮遊式地震計を挿入し、地表面にも2mごとに12個の地震計を設置して、弾性波の測定を実施する。浮遊式地震計は6成分10m分であるので、移動しながら測定を繰り返す。
- (4) (3)の測定が終了したら、発震点を5m間隔にとったA号孔の次の点に移動して測定を繰り返す。
- (5) 以上の測定が完了したら、発震・受震に関してA号孔とB号孔を入れ換えて再び測定を継続する。

#### 3.2. 解析方法

解析法の概略は、次のようにまとめられる。

- (1) 測定記録から、各発震点から受震点までの走時時間を読む。
- (2) 測定した地盤の断面を、水平2.06m×深度2mの「セル」、すなわち合計209個のセルに分解して、逆投影法



図二 測定系の模式図

により各セルの弾性波速度を計算する。この速度値は、最終解析結果への初期値となる。

逆投影法 (BPT法) は、実際に得られた波線ごとに各セルに逆投影する形で重ね合わせて速度を決定する方法であり、直接的に計算可能であるため容易に求められるが、誤差が大きいため計算上の初期値を与えるのに用いられる。すなわち、

$$\text{投影時間 } t_i = \sum L_{ij} / v_j$$

$$\text{平均速度 } v_i = \sum L_{ij} / t_i$$

$$\text{再生速度 } V_j = \sum L_{ij} \cdot v_i / \sum L_{ij}$$

$t_i$  :  $i$  番目の波線に対する観測走時

$L_{ij}$  :  $i$  番目の波線が  $j$  番目のセルを通過する距離

$v_i, v_j$  :  $i, j$  番目のセルの速度

$V_j$  :  $j$  番目のセルの最終解析速度

- (3) 逆投影法で求めた初期値を使用して、この与えた速度による走時時間が実際に測定されている(1)の走時時

間と極めて良く一致するまで、各セルの弾性波速度を変更しながらこのような計算を繰り返し、地盤の弾性波速度の値を決定する。このような計算方法は代数的再構成法 (ART 法) と呼ばれる。すなわち、

$$\text{観測走時: } t_i = \sum L_{ij} / v_j$$

$$\text{走時誤差: } \Delta t_i = -\sum L_{ij} \cdot \Delta v_j / v_j^2$$

この走時誤差が最小になるようにセルの  $V_j$  を決定する。

代数的再構成法には次の三つの代表的な解法がある。

直線 ART 法: 発震点から受震点までを直線で表す。

屈折 ART 法: スネルの法則による屈折経路を忠実に再現するが、計算量が多い。

屈曲 ART 法: スネルの法則による屈折経路を円弧で近似したものである。発震点と受震点の中間点から、左右直角方向に円の中心点を移動させて複数の円弧を作成して、このうち計算走時が最小になる円弧をもって経路とするもので、計算時間は比較的短い。

今回は、直線 ART 法と屈曲 ART 法を用いた。

#### 4. 測定結果および解析結果

##### 4.1. 測定結果

受震点: B号孔 発震点: A号孔, 深度23m

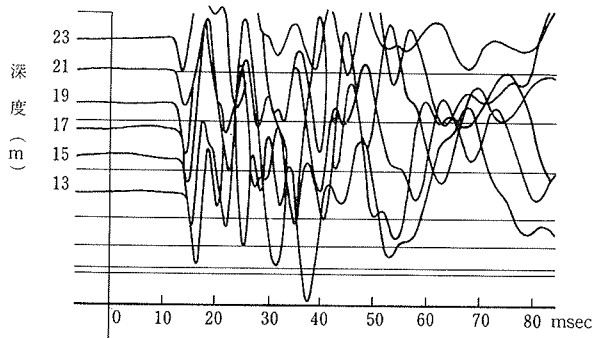


図-3 サイスマック・トモグラフィの波形測定例

図-3 は今回の測定記録の一例である。図中に示した位相の部分が P 波の初動であり、この初動までの走時時間を読み取っている。各発震点から受震点までの走時時間は、図-4 にまとめて示す。

##### 4.2. 解析結果

図-5 は今回解析の直線波線と屈曲波線の一部分である。解析は、逆投影法・直線 ART 法 (反復計算回数 IT=5)・直線 ART 法 (IT=10)・屈曲 ART 法 (IT=5) の 4 ケースについて行なった。全体的な速度分布を把握するためにこれらの値に対して平滑化処理を施した。平滑化はある任意のセルの速度と、それを囲む 8 個のセルの速度値の重み付き平均値として求めた。

これら 4 ケースの解析結果は、今回の断層の調査に当たって、直線 ART 法 (IT=5) と屈曲 ART 法 (IT=5)

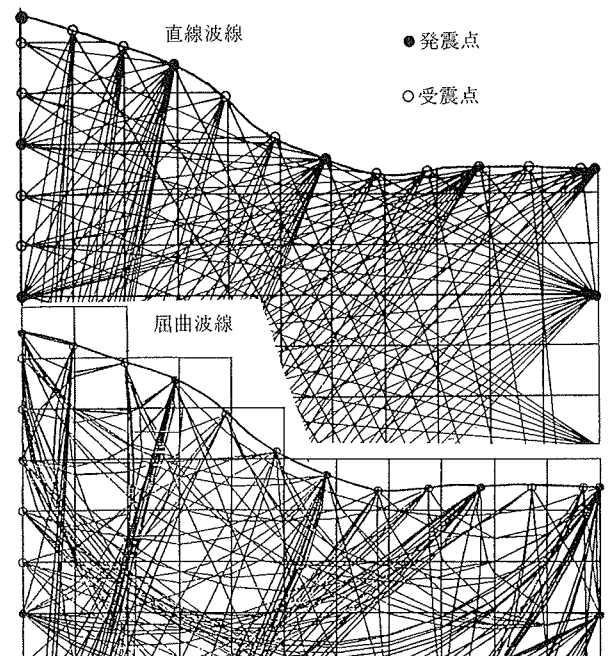


図-5 サイスマック・トモグラフィの波線経路

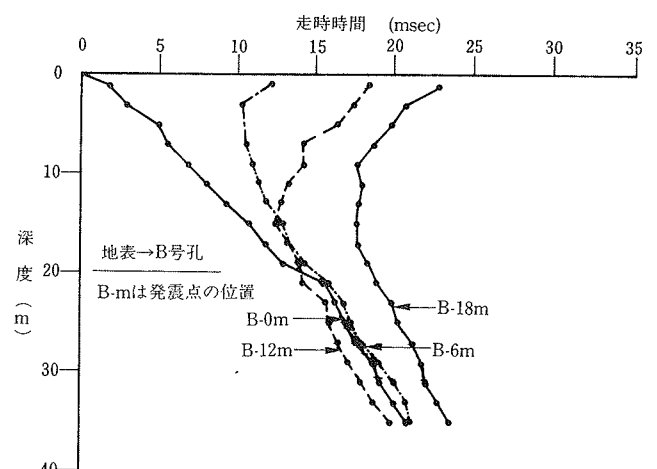
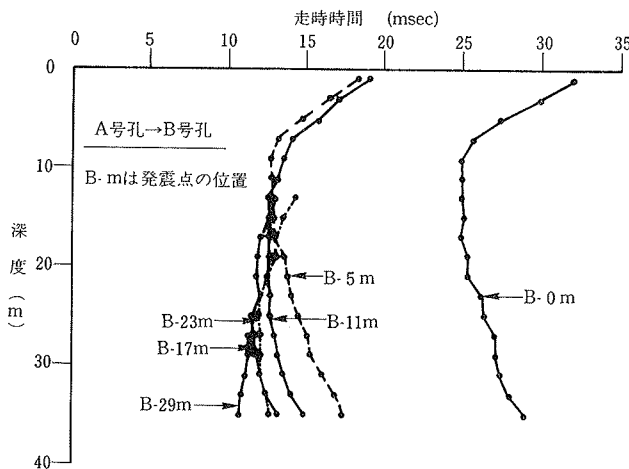
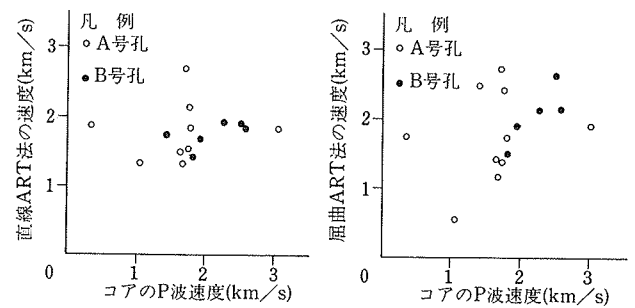


図-4 サイスマック・トモグラフィの走時曲線



	深度 (m)	P-S検層 (km/s)	コア速度 (km/s)	サイスマック・トモグラフィ (km/s)		
				P波検層	直線ART	屈曲ART
A号孔	0~2.4	0.35	—	—	0.75	0.77
	~21.0	1.65	1.82	—	1.83	1.78
	~29.0	1.53	1.69	—	1.58	1.49
B号孔	0~4.2	0.67	—	0.90	0.83	0.78
	~17.0	1.40	1.52	1.59	1.57	2.07
	~23.0	1.58	1.94	1.59	1.70	1.84
	~35.0	2.11	2.52	2.39	1.89	2.22

表一 弾性波速度の各種測定結果の比較



図一七 セル別速度値の相関性

A号孔				B号孔			
深度	コア速度	直ART	屈ART	深度	コア速度	直ART	屈ART
3~5	1.06(1)	1.30	0.56	9~11	1.81(1)	1.40	1.49
9~11	1.72(3)	2.65	2.71	11~13	1.43(3)	1.72	2.49
11~13	1.76(3)	2.12	2.41	21~23	1.94(4)	1.66	1.87
17~19	3.07(1)	1.80	1.89	23~25	2.29(14)	1.88	2.12
21~23	(0.34)(3)	1.83	1.75	25~27	2.53(14)	1.88	2.62
23~25	1.73(3)	1.49	1.38	27~29	2.60(8)	1.81	2.13
25~27	1.68(13)	1.30	1.16				
27~29	1.65(5)	1.46	1.42				
29~31	1.77(4)	1.81	1.73				

単位: km/s 注: ( )は、平均の個数

表二 セル別速度値の比較

速度層	水平位置: B号孔~9m			水平位置: 9m~A号孔		
	屈折法	直線ART	屈曲ART	屈折法	直線ART	屈曲ART
第一層	0.30	0.49	0.41	0.43	0.61	0.62
第二層	1.04	0.92	0.80	0.82	1.17	0.91

単位: km/s

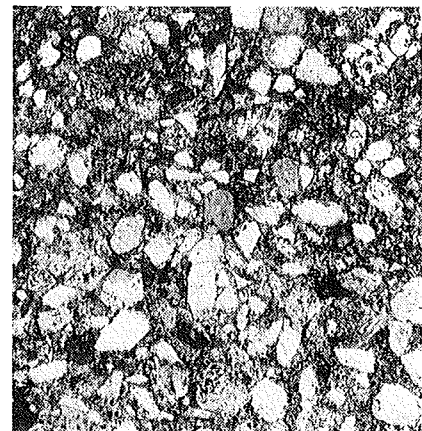
表三 屈折法とサイスマック・トモグラフィの比較

表一はPS検層の速度区分に従い3者を比較した。表層が浅い(A号孔の場合)と、検層とトモグラフィの結果はやや異なるが、表層が深い(B号孔の場合)とほぼ同様となる。これは表層が浅い場合、検層で速度を決める走時点が1~2箇所と少ないためであろう。

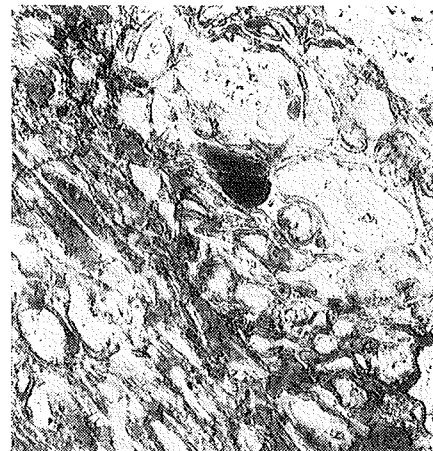
またサイスマック・トモグラフィを検層として解析すると、PS検層の結果よりも、前者の速度が大きくなるが、これは地震計の固定式と浮遊式との測定システムの違いによると判断できる。コア速度とトモグラフィの結果は、細粒砂岩からなるA号孔で良い一致を示す。

(2) セルごとのコアの超音波速度測定・サイスマック・トモグラフィ

表二はコア速度、直線ART法、屈曲ART法の比較を示し、図一七はこれらを図示したものである。コア速度と直線ART法との間には明瞭な相関は見られないが、屈曲ART法との高い相関を示す。これは屈曲ART法



写真二 砂岩の偏光顕微鏡写真



写真三 凝灰岩の偏光顕微鏡写真

の信頼性を示すものと考えられる。

(3) サイスマック・トモグラフィと屈折法

表三はトモグラフィの記録から屈折法の解析を実施した結果と、各ART法の結果を対比したものである。第一層の速度については、各ART法の結果は屈折法よりも30~40%速い。屈折法の解析結果によると、第二層速度はB号孔に近い部分がA号孔付近よりも速い結果が得られているが、各ART法では逆の結果である。これ

試料番号 鉱物名	①砂岩	②主断層	③凝灰岩	④副断層
緑泥石		+		
雲母	+	+		
スメクタイト	++	+++	+++	+++
カオリナイト	+			
斜プチロル沸石		+	+++	+
長石	+++	++	+	+++
石英	++	+++	+	+
クリストバライト	++			
普通輝石	+			

+++：多い、++：中、+：少ない

表-4 岩盤の鉱物組成

は、屈折法では「はぎとり曲線」から速度を決定するが、A号孔付近では「はぎ取り点」が少なく、精度が低下したためと判断できる。

5.2. 地質および土質の検討

今回のサイスミック・トモグラフィの解析結果は、原位置岩盤ですでにその位置を確認している2本の断層の存在を検証することができた。ここでは断層の地質・土質の特性とトモグラフィの結果について考察する。

主断層は幅1mで連続性の良い典型的な第三紀層中の断層である。この主断層は断層粘土からなり、露頭観察では断層に接する灰色細粒砂岩を起源としている。断層粘土、およびこの断層に接する細粒砂岩(写真-2)と凝灰岩(写真-3)の粘土鉱物組成は、表-4のようになる。断層粘土はスメクタイト、石英を多量に含み、母岩に対して相対的なスメクタイト、石英の増加、長石、クリストバライトの減少が見られる。砂岩には含まれない斜プチブル沸石も存在することから、凝灰岩の一部もこの断層に含まれるらしい。このように当断層では、母岩の粘土化が著しく進行している。

また断層粘土の土質試験、A、B号孔の代表的なコア試料の岩石試験結果は、表-5のようにまとめられる。これから断層部分は、特に強度・変形特性の面で弱層となっていることが分かる。供試体のサイズでは断層粘土のP波速度は特に低い値ではない。

副断層は幅30cmの変質帯からなるが、これは表-4にもあるように、スメクタイトの存在からも裏付けられる。

サイスミック・トモグラフィの結果は弾性波速度の分布として表現される。主断層はトモグラフィの結果でも低速度帯として良く表現されているが、主断層部分は物

試験試料 試験結果	A号孔 (細粒砂岩)	主断層 (断層粘土)	B号孔 (火山れき凝灰岩)
単位体積重量(g/cm³)	1.45-1.88	1.80-1.89	1.76-2.13
含水比(%)	29.7-36.1	31.3-42.9	14.4-26.2
真比重	2.584-2.657	2.641	2.420-2.650
間隙率	44.8-56.8	46.0-52.3	34.8-41.8
P波速度(km/sec)	1.50-1.82	1.54	1.66-2.74
S波速度(km/sec)	0.85-1.20	—	1.00-1.57
一軸圧縮強度(kgf/cm²)	82.5-176.2	—	148.0-408.0
圧裂引張強度(kgf/cm²)	10.8-32.3	—	16.6-39.8
静弾性係数(kgf/cm²)	1.0-3.1×10 <sup>4</sup>	—	1.5-6.9×10 <sup>4</sup>
動弾性係数(kgf/cm²)	3.1-5.3×10 <sup>4</sup>	—	3.2-11.7×10 <sup>4</sup>
静ポアソン比	0.10-0.20	—	0.06-0.33
動ポアソン比	0.05-0.35	—	3.2-11.7×10 <sup>4</sup>
粘着力(kgf/cm²)	—	0.35(cu)	—
内部摩擦角(度)	—	7(cu)	—

表-5 地盤の土質・岩石試験結果

質的变化とそれに伴う物性変化を生じており、弾性波速度の差として当然現れたと判断できる。一方副断層は、規模も小さく地山全体としては物性的にも大差無いと思われるが、表層部分の劣化がやや大きく、そのためトモグラフィの結果でも表層部で表現されたと考えられる。したがって副断層の検出は好条件に恵まれたためと思われる、一般的にこの程度の断層が通常検出可能かどうか明らかではない。

6. おわりに

今回、軟岩中に含まれる典型的な断層に対して弾性波を利用したサイスミック・トモグラフィを実施した結果、良好な解析結果が得られ、断層の検出が可能であることが判明した。これは岩盤調査に対する有効性を示す一つのデータとなると考えられる。しかし実際の深部岩盤の調査を考えると、大きなエネルギーを持つ非破壊震源の開発、解析方法や解析精度、解析結果に対する地質・土質的判断など、今後検討すべき課題が多く残されている。

参考文献

- 1) Technical Report/SKB Annual Report 1985, (1986), pp. 1-33
- 2) Crosshole Investigations-SKB Final Report, TR 87-16, (1987)
- 3) 5万分の1地質図幅「城端」および同説明書, 通産省地質調査所, (1964), pp. 1-32