

ボアホールレーダーによる 結晶質岩盤中の割れ目帯調査

— 釜石鉾山原位置試験場における調査について —

1992年 3月

仙 波 毅
尾 方 伸 久
長谷川 健
岩 崎 浩
渡 辺 邦 夫

動力炉・核燃料開発事業団 中部事業所

岐阜県土岐市泉町定林寺園戸959-31
TEL 0572-54-1271 FAX 0572-54-8940

ボアホールレーダーによる結晶質岩盤中の割れ目帯調査
—釜石鉱山原位置試験場における調査結果について—*1

仙波毅*2, 尾方伸久*2, 長谷川健*2
岩崎浩*3, 渡辺邦夫*4

要 旨

動力炉・核燃料開発事業団では結晶質岩の1つである花崗岩中の地下水の流れの評価技術の開発を行っている。地下水の流れを把握するためには割れ目帯の空間的広がりやその規模を明確にする必要がある。そのための調査技術開発の一環として、事業団ではOEC D/NEAストリパ計画で開発された試錐孔レーダーシステム(RAMAC)を導入し、日本の岩盤に対する適用試験を行っている。

本報告書では、日本の本州の北部に位置する釜石鉱山の原位置試験場で行われたクロスホール調査結果について述べる。

調査は地表下約260mに掘削された4本の試錐孔で行った。ここで得られたデータを用いてトモグラフィ解析を実施し、スローネス分布図を求め、その結果と湧水を伴う割れ目について比較・検討した。

その結果を要約すると以下のようなになる。

- (1) 電磁波速度の遅い部分及び速い部分の空間的広がりが明らかになった。
- (2) ボアホールTVで確認された湧水点のほとんどが電磁波の低速度部に位置していた。
- (3) クロスホール調査に利用した試錐孔に沿って新たに坑道が掘削された。この坑道壁面で観察された地下水の湧水を伴う割れ目集中帯や破碎帯は、電磁波の低速度部とよく対応した。
- (4) このことは、地下深部においてレーダー法調査で得られた電磁波の低速度部が、地下水を伴う割れ目集中帯や破碎帯に対応している可能性が高いことを示している。

*1 「ボアホールレーダーによる花崗岩岩盤特性調査(応用地質 Vol.32, No.6)」に加筆。

*2 動力炉・核燃料開発事業団 中部事業所

*3 日鉄鉱業株式会社

*4 埼玉大学工学部

Characterization of the granitic rock by means of the borehole radar
- On the result of the measurements at the Kamaishi Mine In-situ Experiment
Site -

Takeshi SEMBA, Nobuhisa OGATA, Ken HASEGAWA
Hiroshi IWASAKI and Kunio WATANABE

ABSTRACT

Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation (PNC) has been developing techniques for evaluation of groundwater flow in the granitic rock as crystalline rock. In a link of this purpose, PNC introduced the borehole radar system (RAMAC) which was developed in Stripa Project by OECD/Nuclear Energy Agency because it is essential to investigate the spatial extent and dimensions of fracture zones.

This report describes the results of crosshole measurements which were performed with RAMAC system at the Kamaishi In-situ Experiment Site in the northern part of Honsyu Island, Japan.

Crosshole measurements were performed with four boreholes which were drilled at G.L. -260 meters. The tomographic inversion was made using crosshole data and figures of slowness distribution were interpreted. Integrated analysis on the tomograms was carried out in the combination of the observation of the fracture zones with flowing groundwater.

The results are summarized as follows;

- (1) Spatial extent of some low velocity zones and high velocity zones of electromagnetic waves were delineated.
- (2) Most of the seeping points identified by borehole TV lies in the low velocity zones.
- (3) The low velocity zones exactly correspond to the fracture-concentrated zones or fracture zones with flowing groundwater recognized on the walls of the gallery, which was excavated after drilling of the boreholes.
- (4) This may indicate that low velocity zones obtained by the borehole radar measurements corresponds with fracture-concentrated zones or fracture zones with groundwater in the deep underground.

目次

	ページ
1. はじめに	1
2. 調査位置	1
3. 測定及び解析法	4
3. 1 クロスホール調査の場合の測定法	4
3. 2 解析法	5
4. 解析結果	7
5. 考察	10
6. 調査終了後に掘削された坑道壁面で観察された割れ目との比較	10
7. まとめ	14
8. 参考文献	14

1. はじめに

結晶質岩盤中では地下水は主に割れ目や割れ目帯を流れると考えられ、結晶質岩の水理地質特性を評価するためには、割れ目や割れ目帯すなわち「水みち」の位置・規模・その透水性を把握することが必要不可欠である¹⁾。動力炉・核燃料開発事業団では、この割れ目や割れ目帯の位置・規模・その透水性を非破壊で且つ3次元的に把握するための調査技術開発の一環として、OECD/NEA国際ストリパ計画において開発された試錐孔内用レーダースystem (RAMAC) を1988年度に導入し、岐阜県東濃地域の花崗岩における適用試験を実施してきた^{2) 3)}。レーダー法は波長の短い電磁パルスを送信させ、電磁波の速度や減衰特性の変化に着目して、非破壊で岩盤の不均質性や不連続面等を調べる手法である⁴⁾。レーダー法で得られる情報は岩盤の電気的な特性に関するものである。岩盤の電気的な特性はその含水量や水の電気比抵抗と密接な関係がある。岩盤中に割れ目等が発達していると、その部分の含水量が多くなり、含水量が多くなると電磁波速度は遅く、減衰は大きくなる。このような含水量の違いに起因する電磁波の速度や減衰の特性の変化から、岩盤の水理地質特性に深く関連している割れ目や割れ目帯の3次元的分布を推定することが可能となる。

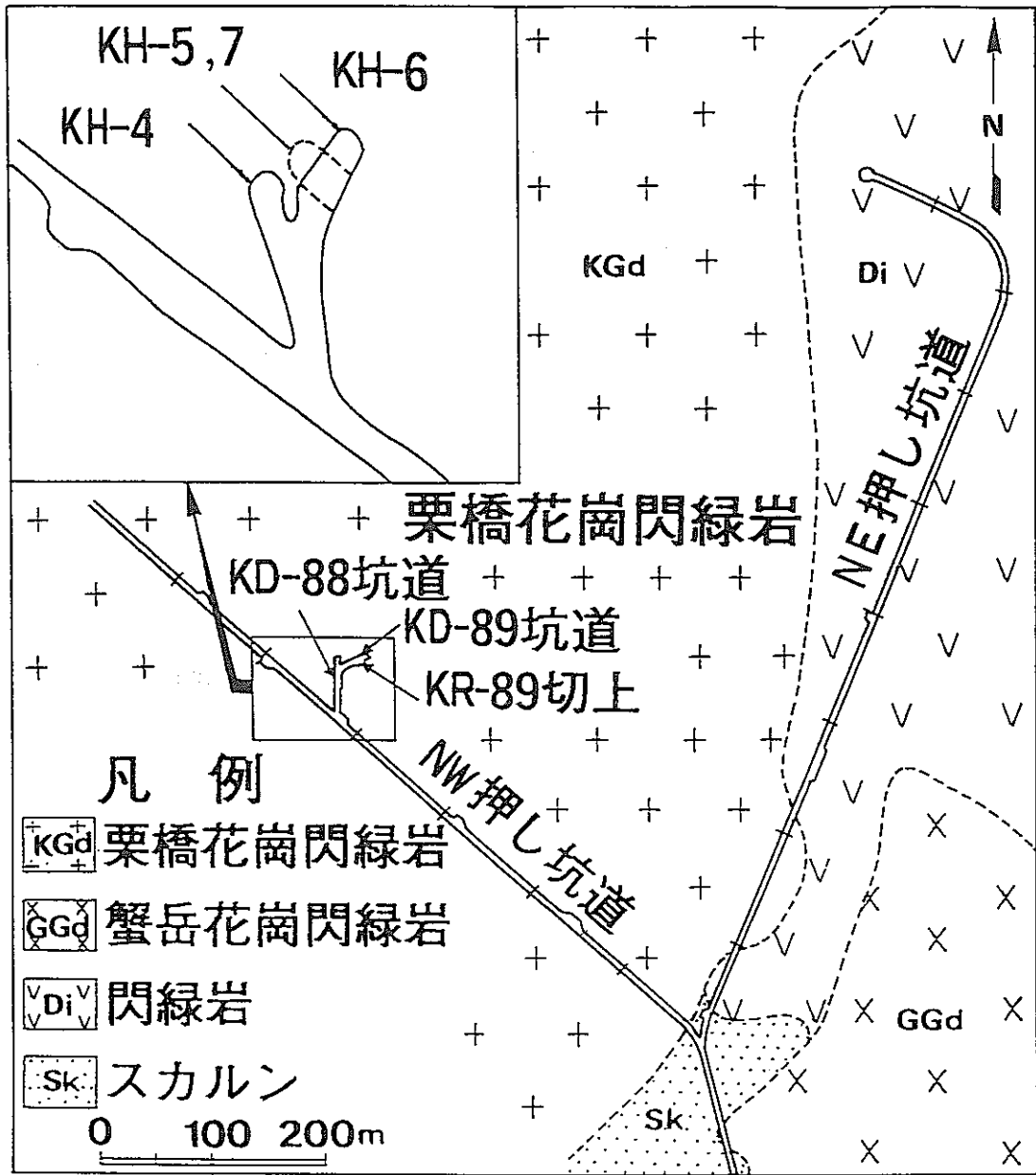
本稿では、試錐孔内用レーダースystemの、日本の岩盤における適用試験の一環として、東濃地域の花崗岩よりもさらに年代の古い釜石鉾山の花崗岩において掘削された試錐孔を用いてクロスホール調査を行ったので、その結果について報告する。

2. 調査位置

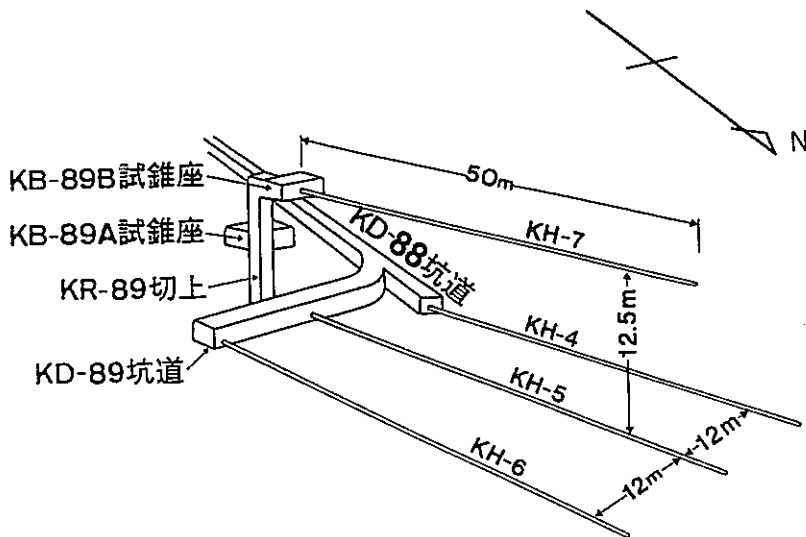
釜石鉾山は岩手県釜石市と遠野市の中間に位置する(図-1)。調査を実施した試錐孔は地表下約260m、海拔575.6mに位置する550mレベル坑道に掘削されており、試錐孔は全て栗橋花崗閃緑岩中に掘削されている(図-2)。図-3は調査に使用した試錐孔の位置を示したものである。この図に示したように、KD-89坑道からKH-5号孔が水平に掘削されており、KH-5号孔を中心として、同一坑道の東側にKH-6号孔が孔間距離12mで、西側のKD-88坑道に孔間距離13mでKH-4号孔がそれぞれ同一平面内に水平に掘削されている。また、KH-5号孔鉛直上方13mのKB-89B試錐座からKH-7号孔が水平に掘削されている。なお、試錐孔は全て北北西方向に掘削されており、それらの掘削長は約50mである。試錐孔の仕様を表-1に示す。

表-1 試錐孔仕様

試錐孔名	掘削長 (m)	孔口高さ (海拔m)
KH-4	46.1	577.13
KH-5	52.1	577.04
KH-6	52.2	577.06
KH-7	52.1	589.53



図一 2 原位置試験場550mレベル坑道位置図及び地質平面図



図一3 試錐孔配置詳細図

3. 測定及び解析法

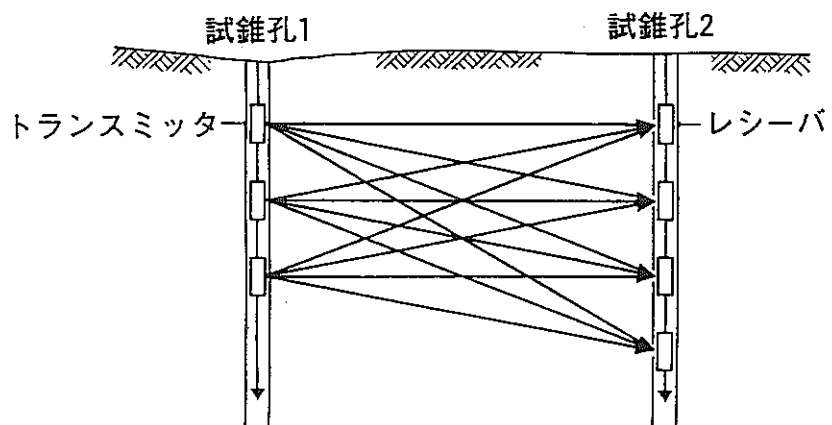
3. 1 クロスホール調査の場合の測定法

クロスホール調査は2本以上の試錐孔を利用して行う。この調査では、一方の試錐孔にトランスミッタ（発信プローブ）を、他の試錐孔にレシーバ（受信プローブ）を設置し、トランスミッタを一定

深度に固定し、レシーバを一定間隔で移動させ測定を行う。トランスミッタとレシーバ間の距離が大きくなり、明瞭な受信信号が得られなくなれば、このトランスミッタ深度における測定を終了し、トランスミッタを次の点に移動し、同様の測定を繰り返す（図一4）。

今回の調査ではトランスミッタ、レシーバとも2m間隔で移動させ

た。測定に用いたアンテナの中心周波数は20MHz及び60MHzである。表一2に各測定断面における測定波線数及び解析に用いた波線数などの測定仕様を示す。ただし、測定深度は、各試錐孔の孔口からの深度で示してある。各プローブの3次元的位置は試錐孔の孔曲りデータを用いて決定した。



図一4 クロスホール調査概念図

3. 2 解析法

クロスホール調査で得られたデータを用いて、トモグラフィ解析を行った。トモグラフィ解析では、試錐孔間の岩盤を幾つかの格子（セル）に分割し、各セル内の電磁波のスローネス（slowness；遅さ）は一定と仮定して試錐孔間の岩盤の電磁波のスローネス分布を求める。ここで、電磁波のスローネスとは速度の逆数、すなわち、
 $(\text{スローネス}) = 1 / (\text{速度})$
 である。今回の解析では、電磁波の伝播経路をトランスミッタとレシーバを結んだ直線であると仮定し（反射、回折等は考えない）、CG法（Conjugate Gradient method；共役勾配法）を用いて解析を行った^{5) 6) 7)}。

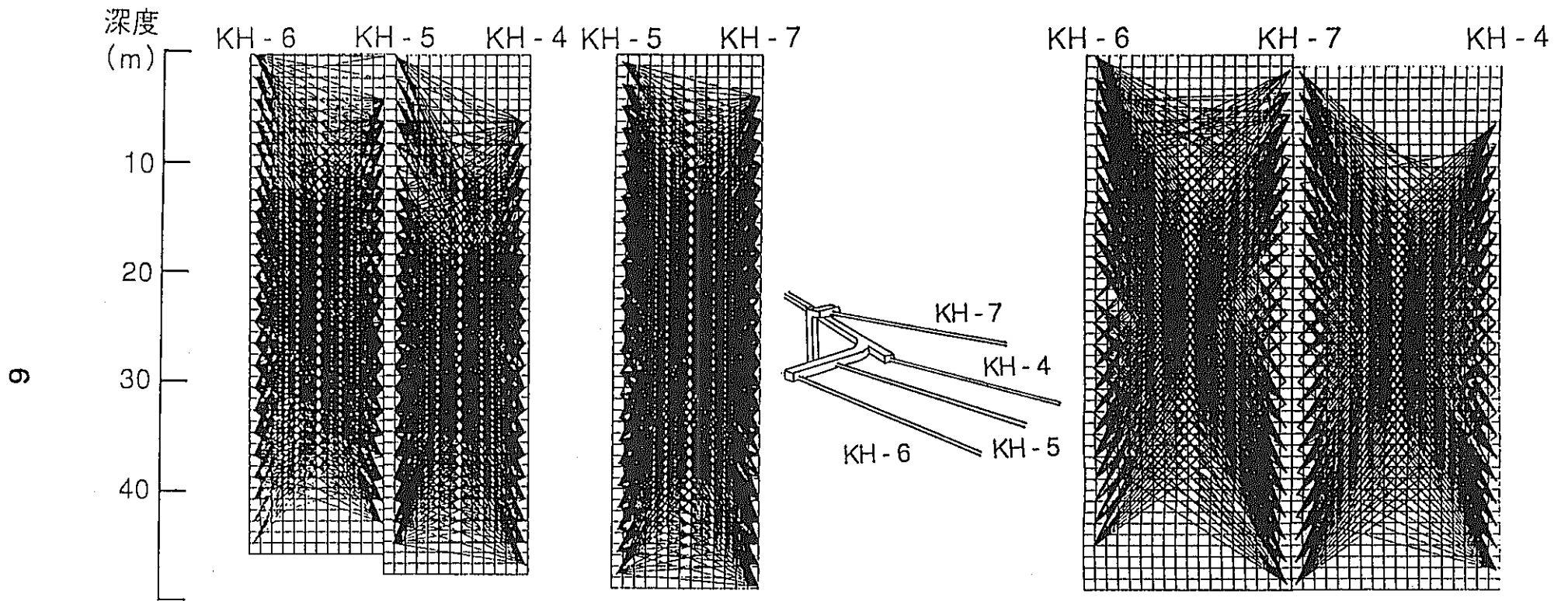
セルサイズについては、Olssonらが「トランスミッタ・レシーバの移動間隔の同程度とその半分程度の大きさの2通りについて解析を行ったところ、両者の結果は良く整合し、さらに後者は前者と比較して隣接するセル間のスローネスの連続が滑らかで図が見やすくなる」と報告している⁴⁾。そこで今回はOlssonらにならい、トランスミッタ・レシーバの移動間隔の半分の1m×1mの正方形セルを用いて解析を行った。各々のセルを通過する波線数の平均は2.5であった（図-5）。

トモグラフィ解析結果から得られるスローネスは、基準値との差（スローネス残差；residual slowness）で示した。ここではスローネスの基準値として9259psec/mを用いた。これは、KH-7とKH-5号孔間の測定波線の内、46本の波線を用いて求めた電磁波の平均伝播速度108m/μsecの逆数である。なお、解析に十分な受信波形が得られていない波線については、予め測定データから除去し、さらに、測定誤差が大きいと考えられる波線については測定データから順次除去して解析を行った。

表-2 測定仕様

KH-4・KH-5号孔間	
電磁パルスの中心周波数	80MHz
サンプリング周波数	832MHz
測定深度 トランスミッタ	1. 2.0m~4.5. 2.0m (KH-5号孔)
レシーバ	1. 2.7m~4.1. 2.7m (KH-4号孔)
測定波線数の総数	419
解析に用いた波線の総数	354
KH-6・KH-5号孔間	
電磁パルスの中心周波数	80MHz
サンプリング周波数	832MHz
測定深度 トランスミッタ	1. 2.0m~4.3. 2.0m (KH-5号孔)
レシーバ	1. 3.0m~4.5. 3.0m (KH-6号孔)
測定波線数の総数	439
解析に用いた波線の総数	358
KH-7・KH-5号孔間	
電磁パルスの中心周波数	80MHz
サンプリング周波数	832MHz
測定深度 トランスミッタ	1. 2.0m~4.5. 2.0m (KH-5号孔)
レシーバ	1. 2.0m~4.7. 2.0m (KH-7号孔)
測定波線数の総数	482
解析に用いた波線の総数	425
KH-7・KH-4号孔間	
電磁パルスの中心周波数	20MHz
サンプリング周波数	230MHz
測定深度 トランスミッタ	1. 2.7m~4.1. 2.7m (KH-4号孔)
レシーバ	1. 2.0m~4.7. 2.0m (KH-7号孔)
測定波線数の総数	504
解析に用いた波線の総数	246
KH-7・KH-6号孔間	
電磁パルスの中心周波数	20MHz
サンプリング周波数	230MHz
測定深度 トランスミッタ	1. 3.0m~4.5. 3.0m (KH-6号孔)
レシーバ	1. 2.0m~4.7. 2.0m (KH-7号孔)
測定波線数の総数	552
解析に用いた波線の総数	254
サンプル数*	512
スタッキング数	128

*1レコード中のデータ数



図一五 トモグラフィ解析に用いた波線経路とセル分割図

4. 解析結果

図-6が解析の結果得られたスローネス分布図であり、縦軸方向に試錐孔深度をとってある。この図では明色系はスローネスが小さいこと（以後、速度が速いと表現する）を表し、暗色系はスローネスが大きいこと（以後、速度が遅いと表現する）を表している。左から、KH-6・KH-5号孔間断面、KH-4・KH-5号孔間断面、KH-7・KH-5号孔間断面、KH-7・KH-6号孔間断面及びKH-7・KH-4号孔間断面の解析結果である。解析結果では電磁波速度の速い部分及び遅い部分の連続が認められ、これをまとめると、図-7及び図-8のようになる。前者はトモグラフィ解析結果から推定される低速度（102~105m/ μ sec）を示す部分の連続（低速度部1~4）を、後者は同じく比較的高速度（106~110m/ μ sec）を示す部分（高速度部1~2）の連続を示す。ここで、102~105m/ μ secはスローネス残差が600~250psec/m、106~110m/ μ secはスローネス残差が200~-150psec/mの部分である（図-6）。

今回の調査から以下のことが明らかになった。

(1) 低速度を示す部分の連続について（図-7）

・低速度部1（N80~90° W系）

KH-7・KH-6号孔間断面の深度5m付近にみられる低速度部は、KH-7・KH-5号孔間断面を通り、KH-4・KH-5号孔間断面をかすめ、KH-7・KH-4号孔間断面へ抜ける。

・低速度部2（N80~90° W系）

KH-7・KH-6号孔間断面の深度10m付近にみられる低速度部は、KH-6・KH-5号孔間断面を通り、KH-7・KH-5号孔間断面に抜けるが、KH-4・KH-5号孔間断面においてはKH-4号孔に向かっては延びていかない。

・低速度部3（N30~40° E系）

KH-7・KH-4号孔間断面の深度7m付近にみられる低速度部は、KH-7・KH-5号孔間断面を通り、KH-6・KH-5号孔間断面に抜ける。

・低速度部4（N30~40° E系）

KH-7・KH-4号孔間断面の深度37m付近にみられる低速度部は、KH-7・KH-5号孔間断面を通り、KH-6・KH-5号孔間断面に抜ける。

(2) 比較的高速度を示す部分の連続について（図-8）

・高速度部1

KH-7号孔孔口付近からKH-4, 5, 6号孔を含む断面の深度30m付近へ抜けるように、比較的高速度を示す部分が連続している（トモグラフィ解析結果ではある厚みをもっているが、ここでは便宜上平面として図示した）。この部分の走行はNE系、傾斜はNW系である。

・高速度部2

KH-4・KH-5号孔間断面、KH-6・KH-5号孔間断面及びKH-7・KH-5号孔間断面の孔口付近に比較的高速度を示す部分が認められる。この高速度部は、KH-7・KH-4号孔間断面及びKH-7・KH-6号孔間断面へは連続していない。この高速度部は坑道の開放面に接しているため、空気中を伝播してきた電磁波を誤って読み取ってしまい、結果として孔口付近の電磁波速度が実際よりも速く解析されたのではないかと懸念された。そこで、KH-6・KH-5号孔間断面の坑道の開放面近くで得られたデータにより電磁

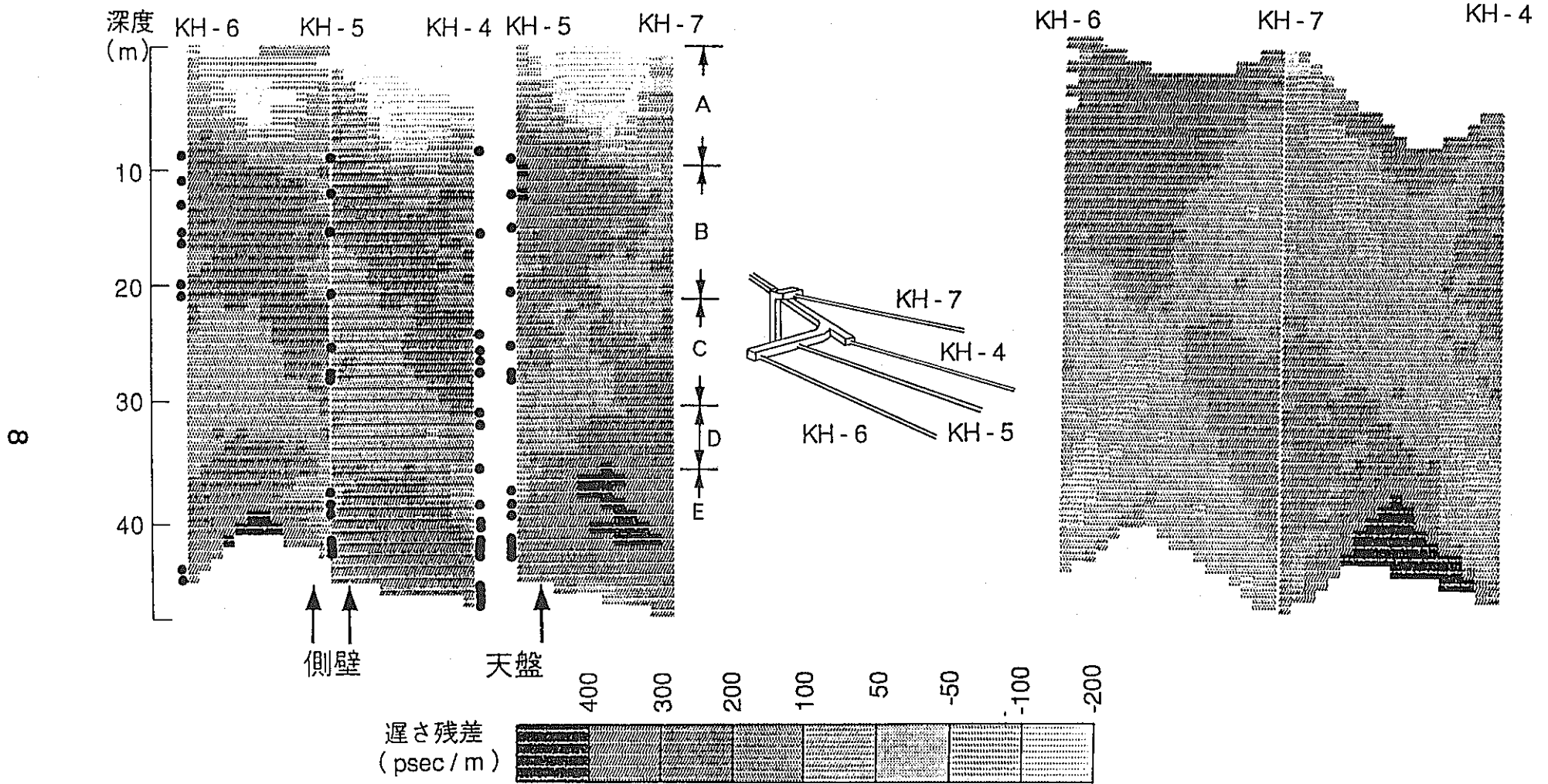


図-6 トモグラフィ解析結果

(図中の●は、ボアホールテレビで観察された湧水点位置を示す)

波速度を求めた結果、 $109\text{m}/\mu\text{sec}$ の値を得た。これは、空气中を伝播する電磁波速度約 $300\text{m}/\mu\text{sec}$ の約3分の1にあたることから、空气中を伝播した電磁波を誤って読み取ったとは考えられず、この高速度部は岩盤の状況を反映しているものと考えられる。

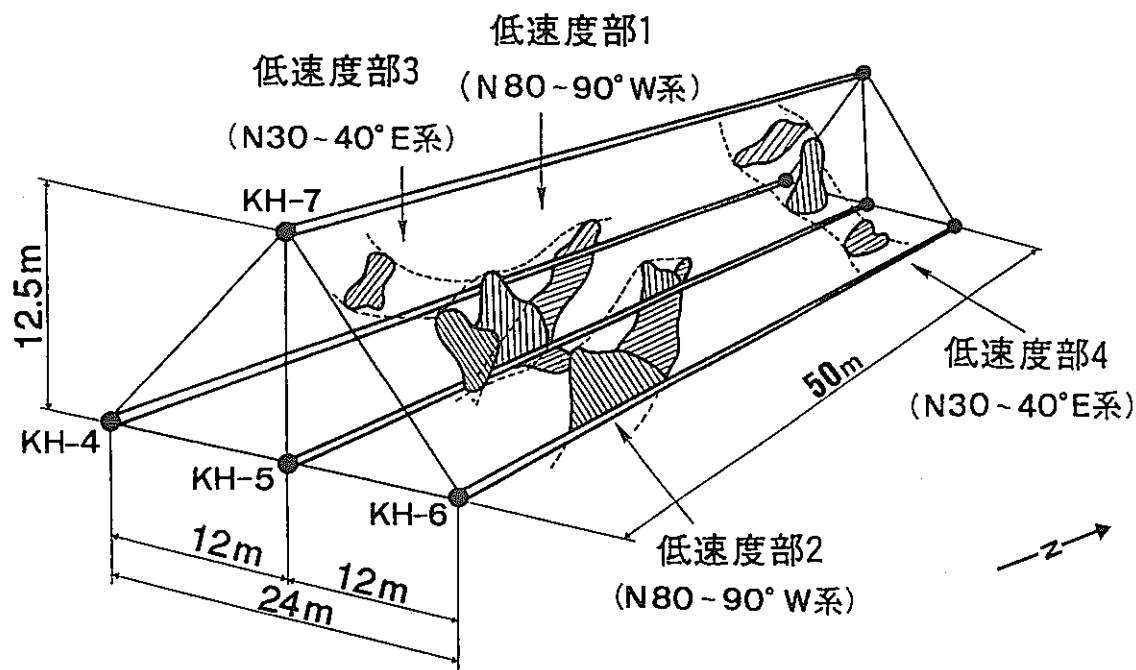


図-7 トモグラフィ解析結果から推定される低速度部
($102 \sim 105 \text{ m}/\mu\text{sec}$) の3次的連続

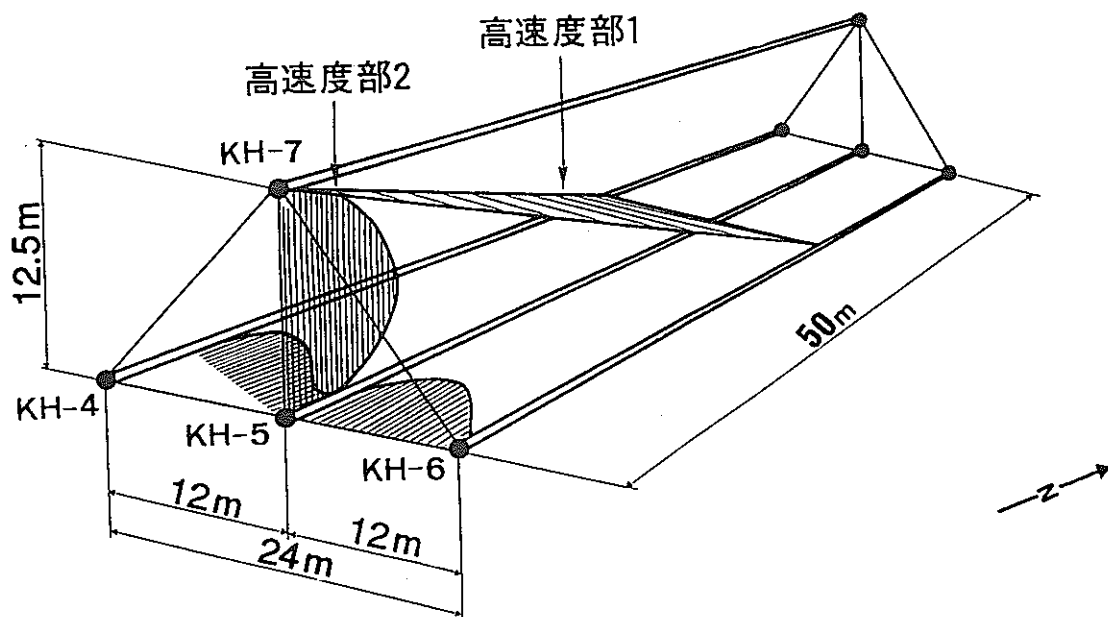


図-8 トモグラフィ解析結果から推定される高速度部
($106 \sim 110 \text{ m}/\mu\text{sec}$) の3次的連続

5. 考察

岩盤中を伝播する電磁波の速度 V_p は、真空中を伝播する電磁波の速度を V_c ($= 299.8$ m/ μ sec), 岩盤の比誘電率を ϵ_r とすると、

$$V_p = V_c / \sqrt{\epsilon_r} \quad (1)$$

で表される。従って、岩盤中を伝播する電磁波の速度は岩盤の比誘電率によって決定される。岩盤のマトリックス部の比誘電率は一般的に 5~10であるのに対し、水の比誘電率は約80と非常に大きな値をとるため⁹⁾、岩盤の比誘電率は岩盤中の含水量に大きな影響を受ける。すなわち、空隙率が大きくなったり、割れ目が発達して岩盤中の含水量が多くなれば、岩盤の比誘電率が大きくなるため電磁波の速度は遅くなる。従って、前章で述べたトモグラフィ解析結果で確認された電磁波速度が遅い部分は含水量が多い部分であると考えられる。また、電磁波速度が速い部分は岩盤中に割れ目等が発達していないために含水量が少ない部分であるか、あるいは割れ目等が発達していてもその含水量が少ない部分であると考えられる。

これを確認するために、KH-4, 5, 6, 7号孔においてボアホールテレビにより孔内の割れ目観察を行った。この結果、割れ目の卓越方向として N80~90° W 系と N30~40° E 系の2方向が確認された。トモグラフィ解析結果より推定した上記低速度部1~4の連続のうち、1と2は N80~90° W 系、3と4が N30~40° E 系と読み取れ、両結果は整合している。また、試錐孔KH-4, 5, 6号孔では、湧水割れ目の位置が確認された。図-6中に示した●が湧水割れ目の位置であり、湧水割れ目の位置と電磁波速度の遅い部分の位置は良く一致している。先にも述べたように、電磁波速度の遅い部分は含水量の多い部分である可能性が高い。従って、電磁波の遅い部分は含水割れ目帯であると考えられ、先に推定した電磁波の低速度部の3次元的連続(図-7)は、含水割れ目帯の連続であると推定される。

6. 調査終了後に掘削された坑道壁面で観察された割れ目との比較

この試験場では試錐孔を利用した調査終了後、KH-5号孔に沿って水平坑道(KD-90坑道深度約50m)が掘削された(図-9)。この坑道壁面における割れ目分布状況を調べることにより、試錐孔内の観察結果だけではなく、さらに広範囲の割れ目とトモグラフィ解析結果との対比が可能となった。

図-10にKD-90坑道における割れ目観察結果を示す。この図は坑道天盤を中心とした

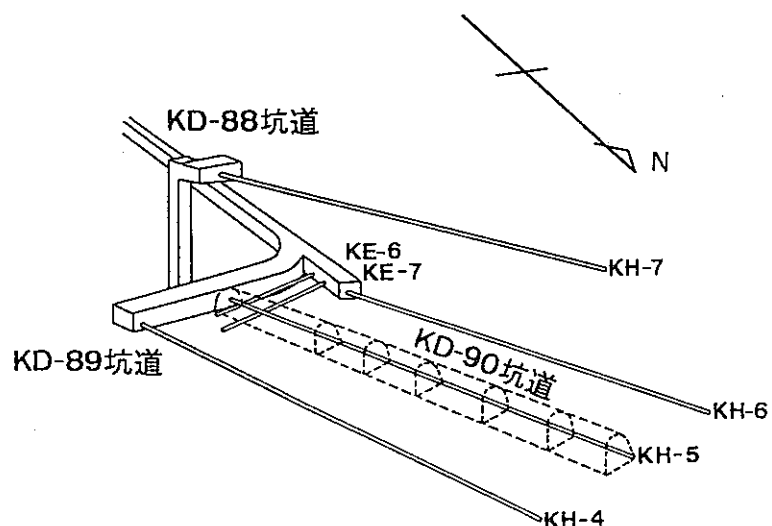
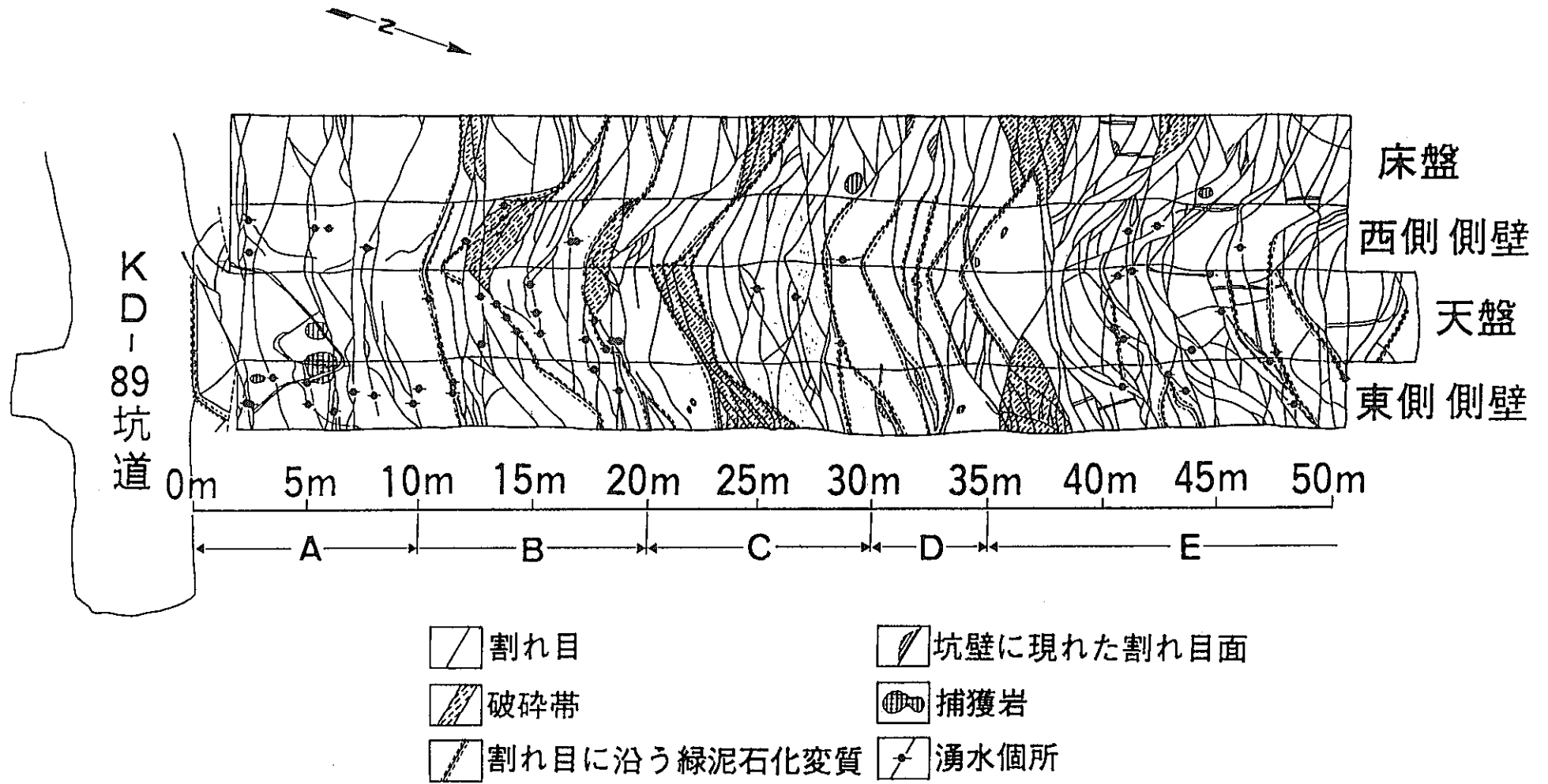


図-9 KD-90坑道及びKE-6, KE-7号孔の位置図



図一10 KD-90 坑道における壁面観察結果

展開図となっている。坑道の天盤の位置はKH-7・KH-5号孔間断面においては、KH-5号孔からKH-7号孔に向かって3番目のセルに相当する。また坑道壁面の位置は、KH-4・KH-5号孔間断面ではKH-5号孔からKH-4号孔に向かって2番目のセルに相当し、KH-6・KH-5号孔間断面ではKH-5号孔からKH-6号孔に向かってやはり2番目のセルに相当する(図-6)。

トモグラフィ解析結果と坑道壁面で観察された割れ目とを定性的に対比するにあたり、坑道天盤で観察された割れ目の集中度合いにより、A～Eの5つのゾーンに分割した(図-10)。各ゾーンとトモグラフィ解析結果とを比較した結果について以下に示す(図-11)。

(1) ゾーンA (坑道面より0 m～10 m)

このゾーンは全体的に割れ目の密度が低く、割れ目充填鉱物としては石英、方解石、濁沸石、束沸石、ブドウ石等が認められる。割れ目に伴う変質は少なく、天盤からの滴水は殆ど認められない。坑道壁面においては特に東側の側壁で多数の湧水点が認められたが、湧水量は極わずかであった。

トモグラフィ解析結果では、KH-4・KH-5孔間、KH-6・KH-5孔間及びKH-7・KH-5号孔間の各断面でこのゾーンで電磁波の速度が速くなっているが、これは上記のように、割れ目の発達が少ないことと対応しているものと考えられる。しかし、ここは坑道の開放面側であるため、坑道壁面からの水分の蒸発により岩盤内の水分量が減少している可能性もある。

トモグラフィ解析結果では、KH-5号孔を含む水平面内でKH-6号孔方向と比較して、KH-4号孔方向が電磁波の速度が速くなっている(図-6)。この部分では以前にKD-88坑道から2本の試錐孔(KH-6及びKH-7号孔、孔長はそれぞれ15m)がKH-5号孔と直行する方向に掘削されていた(図-9)。これら2本の試錐孔では掘削直後は多量の湧水が認められたが、その後湧水量は漸次減少しクロスホール調査時点では湧水はほとんど観察されなかった。つまり、この2本の試錐孔が新たな水みちとなり、試錐孔周辺岩盤の水をKH-4号孔側より多く排水する形になり岩盤の乾燥が進んだため、KH-4号孔側の電磁波速度がKH-5号孔側の電磁波速度よりも速くなったものと考えられる。

(2) ゾーンB (同10 m～20 m)

このゾーンは割れ目密度が高く破碎帯も認められる。割れ目充填鉱物としては、石英、方解石、濁沸石、束沸石、ブドウ石等が主体をなし、他に緑レン石、緑泥石等も多く認められる。また、割れ目に伴う変質も発達する。このゾーンにおいては天盤及び側壁において多数の流水・滴水箇所が認められる。

トモグラフィ解析結果では、天盤の位置には電磁波速度が非常に遅い部分が解析されており、割れ目観察結果とよい対応を示している。また、このゾーンでは破碎帯は天盤から西方向に延びているが、この部分では電磁波速度はKH-6号孔側(東側方向)よりもKH-4号孔側(西側方向)で遅くなっており、トモグラフィ解析結果と割れ目観察結果はやはりよい対応を示している。

(3) ゾーンC (同20 m～30 m)

このゾーンは割れ目密度が高く、破碎帯も認められる。割れ目充填鉱物はゾーンBと同

様である。ゾーンCにおいては天盤及び側壁に幾つかの滴水箇所が認められる。

トモグラフィ解析結果では、天盤の位置の電磁波速度はゾーンBより速く、ゾーンAより遅くなっており、割れ目観察結果とよい対応を示している。また、このゾーンでは破碎帯は天盤から東方向に延びているが、この部分では電磁波速度はKH-4号孔方向（西側方向）よりもKH-6号孔方向（東側方向）で遅くなっており、トモグラフィ解析結果と割れ目観察結果とはやはりよい対応を示している。

(4) ゾーンD (同30m~35m)

このゾーンの割れ目密度はゾーンAよりは若干高いが、ゾーンB、Cよりは低くなっている。割れ目充填鉱物はゾーンB、Cとほぼ同様で、割れ目に伴う変質はゾーンB、Cと比較して少ない。またこの区間は坑道天盤及び側壁からの滴水はほとんど観察されない。トモグラフィ解析結果では、KH-4・KH-5号孔間、KH-6・KH-5号孔間及びKH-7・KH-5号孔間の各断面とも電磁波速度はゾーンCよりも速いが、ゾーンAよりは遅い中間の速さを示している。

(5) ゾーンE (同35m~50m)

このゾーンは割れ目密度が最も高く、ゾーンB、Cと同様に破碎帯も発達している。割れ目充填鉱物はゾーンB、Cと同様である。割れ目に伴う変質はゾーンB、Cに次いで多く発達する。坑道天盤及び側壁からの流水、滴水箇所及び湧水量は他のどのゾーンよりも多く観察されている。

トモグラフィ解析結果では、KH-4・KH-5号孔間、KH-6・KH-5号孔間及びKH-7・KH-5号孔間の各断面ともゾーンBと比較して電磁波の速度が遅くなっており、坑道天盤及び側壁からの流水、滴水量が他のどのゾーンよりも多いこととよく対応している。さらに、KH-7・KH-5号孔間断面には他の断面と比較してより低速度を示す部分があり、天盤方向に含水割れ目帯が発達しているものと考えられる。

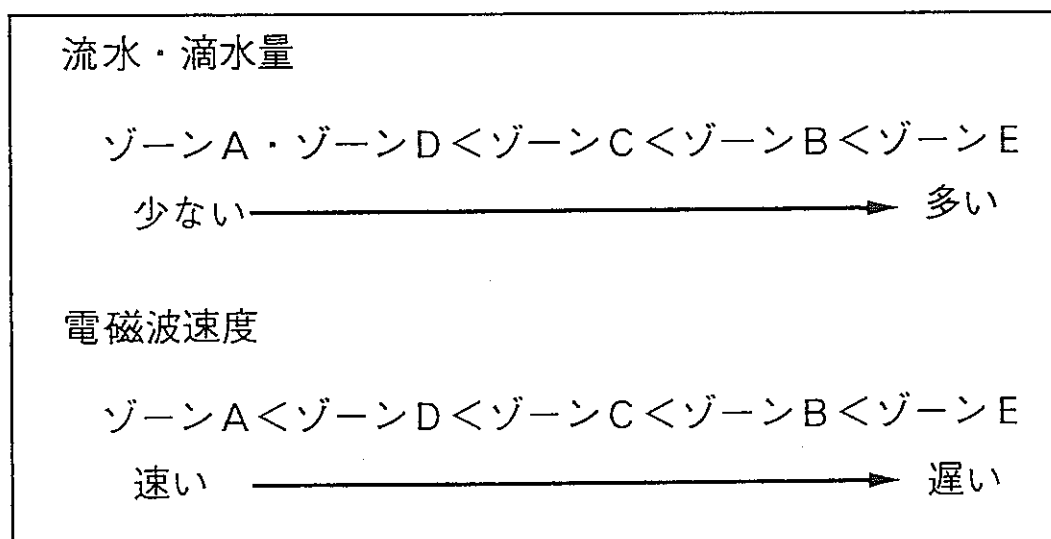


図-11 各ゾーンの流水・滴水量と電磁波速度の比較

様である。ゾーンCにおいては天盤及び側壁に幾つかの滴水箇所が認められる。

トモグラフィ解析結果では、天盤の位置の電磁波速度はゾーンBより速く、ゾーンAより遅くなっており、割れ目観察結果とよい対応を示している。また、このゾーンでは破碎帯は天盤から東方向に延びているが、この部分では電磁波速度はKH-4号孔方向（西側方向）よりもKH-6号孔方向（東側方向）で遅くなっており、トモグラフィ解析結果と割れ目観察結果とはやはりよい対応を示している。

(4) ゾーンD (同30m～35m)

このゾーンの割れ目密度はゾーンAよりは若干高いが、ゾーンB、Cよりは低くなっている。割れ目充填鉱物はゾーンB、Cとほぼ同様で、割れ目に伴う変質はゾーンB、Cと比較して少ない。またこの区間は坑道天盤及び側壁からの滴水はほとんど観察されない。トモグラフィ解析結果では、KH-4・KH-5号孔間、KH-6・KH-5号孔間及びKH-7・KH-5号孔間の各断面とも電磁波速度はゾーンCよりも速いが、ゾーンAよりは遅い中間の速さを示している。

(5) ゾーンE (同35m～50m)

このゾーンは割れ目密度が最も高く、ゾーンB、Cと同様に破碎帯も発達している。割れ目充填鉱物はゾーンB、Cと同様である。割れ目に伴う変質はゾーンB、Cに次いで多く発達する。坑道天盤及び側壁からの流水、滴水箇所及び湧水量は他のどのゾーンよりも多く観察されている。

トモグラフィ解析結果では、KH-4・KH-5号孔間、KH-6・KH-5号孔間及びKH-7・KH-5号孔間の各断面ともゾーンBと比較して電磁波の速度が遅くなっており、坑道天盤及び側壁からの流水、滴水量が他のどのゾーンよりも多いこととよく対応している。さらに、KH-7・KH-5号孔間断面には他の断面と比較してより低速度を示す部分があり、天盤方向に含水割れ目帯が発達しているものと考えられる。

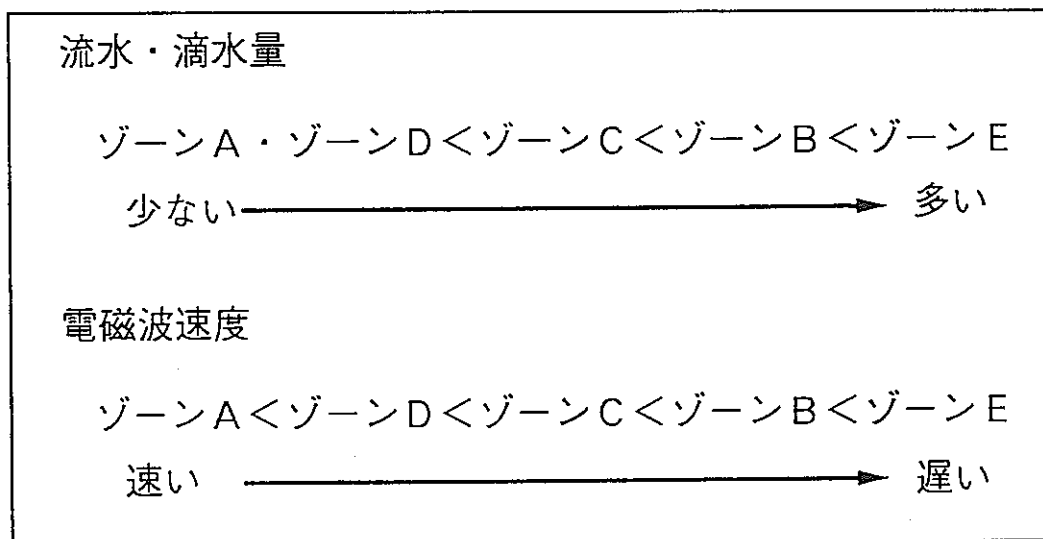


図-11 各ゾーンの流水・滴水量と電磁波速度の比較

以上示したように、坑道壁面観察の結果、岩盤の含水量が多いと考えられる部分とトモグラフィ解析の結果得られた電磁波速度の低速度部は、ここでの区分に用いたような数メートルオーダーで非常によく対応を示し（図-11）、電磁波の低速度部が含水割れ目帯の連続であるという推定の妥当性が確認された。

7. まとめ

- (1) 釜石鉱山・原位置試験場内に掘削された試錐孔を利用してレーダー法クロスホール調査を行った。調査には水平に掘削された4本の試錐孔を用いた。
- (2) クロスホール調査で得られたデータを用いて、トモグラフィ解析を行い、計5断面について試錐孔間のスローネス分布図を求めた。
- (3) その結果と試錐孔及び調査後開削した坑道の側壁面観察結果について比較・検討した。
- (4) トモグラフィ解析結果で把握できた電磁波速度の低速度部は含水割れ目帯の集中している所であり、低速度部の3次元的連続は含水割れ目帯の連続であるという推定の妥当性が確認された。このことは、レーダー法クロスホール調査はボーリングや坑道調査と併用することにより、割れ目帯や破碎帯の3次元的調査に有効であることを示している。

以上、本稿において、クロスホール調査で得られたデータをトモグラフィ解析することにより岩盤内の含水状況を定性的に把握できることを示した。さらに、岩盤の空隙率とその誘電率の関係を明らかにすることにより、(1)式を用いて電磁波速度から直接岩盤の空隙率を推定できるものと考えられる。今後は、トモグラフィ解析結果から岩盤の空隙率分布を求め、岩盤内の含水量を定量的に把握する手法を構築し、その結果及び透水試験、地質記載等により岩盤の透水性を3次元的に評価するための手法を開発していく予定である。

8. 参考文献

- 1) 渡辺邦夫, 柳沢孝一, PUSCH R., 佐久間秀樹, 藍沢稔幸, 山本肇, 神田信之(1990): 蒸発量計測によるトンネル壁面からの湧水量の測定(その2) —現場計測—, 応用地質, 第31巻, 第1号, pp. 1-11.
- 2) 佐久間秀樹, 坪田浩二(1988): 土岐花崗岩におけるRAMACシステムの適用試験について, 物理探査学会第78回学術講演会講演論文集, pp. 305-309.
- 3) 仙波毅, 尾方伸久, 坪田浩二(1989): ポアホールレーダの我が国における花崗岩岩盤への適用試験, PNC TR/GE 89-02, PNC TN7410 90-003
- 4) OLSSON, O., FALK, L., FORSLAND, O., LUNDMARK, L., SANDBERG, E. (1987): Crosshole Investigations - Results from Borehole Radar Investigations, Stripa Project TR 87-11, SKB, Stockholm, Sweden

- 5) IVANSSON, S., (1984): Crosshole investigations - Tomography and its application to crosshole seismic measurements, Stripa Project TR 84-08, SKB, Stockholm, Sweden
- 6) 坪田浩二, 則竹和光, 伊東慎司, 落合竜夫: Geotomography における再構成手法評価 (その1), 物理探査学会第79回学術講演会講演論文集, pp. 49-54.
- 7) 坪田浩二, 則竹和光, 伊東慎司, 落合竜夫: Geotomography における再構成手法評価 (その2), 物理探査学会第80回学術講演会講演論文集, pp. 36-41.
- 8) CARMICHAEL, R. S., (1989): Practical Handbook of Physical Properties of Rocks and Minerals, CRC Press, Inc.

— 技術レポートリスト —

- TR/GE 89-01 清水和彦：地質環境データベースシステムの開発研究（基本設計），
PNC TN7410 89-029
- TR/GE 89-02 仙波毅・尾方伸久・坪田浩二：ボアホールレーダの我が国における花
崗岩岩盤への適用試験，PNC TN7410 90-003
- TR/GE 89-03 武田精悦（訳）：国際ストリパプロジェクト，PNC TN7410 90-004
- TR/GE 89-04 尾方伸久・大澤英昭：地下水特性調査技術開発の現状，検層技術(1)，
PNC TN7410 90-005
- TR/GE 89-05 尾方伸久・大澤英昭：地下水特性調査技術開発の現状，検層技術(2)，
PNC TN7410 90-006
- TR/GE 89-06 大澤英昭・吉田英一：深部花崗岩中の割れ目解析－花崗岩岩盤におけ
る割れ目特性およびその分布特性に関する研究－，
PNC TN7410 90-007
- TR/GE 89-07 杉原弘造・二宮康郎：堆積岩盤中における掘削影響評価－掘削による
緩み領域の計測・評価手法の研究開発－，
PNC TN7410 90-009
- TR/GE 89-08 柳澤孝一：広域地下水流動調査の現状について，PNC TN7410 90-021
- TR/GE 89-09 吉田英一：粘土質岩中における核種移行試験・研究－ベルギー・モル
原子力研究所との共同研究（その1）－，
PNC TN7410 90-019
- TR/GE 90-01 今井久・柳澤孝一：3次元飽和不飽和浸透流解析プログラムTAGSACの
概要，PNC TN7410 90-026

- TR/GE 90-02 野原壯・瀬尾俊弘・落合洋治：ウラン鉱床を利用したナチュラルアナログ研究（その1）－ウラン系列核種の放射非平衡について－，PNC TN7410 91-030
- TR/GE 90-03 吉田英一：粘土質岩中における核種移行試験研究－ベルギー・モル原子力研究所との共同研究（その2）－，PNC TN7410 91-017
- TR/GE 90-04 柳澤孝一・今井久・斎藤章・大澤英昭・中島誠：立坑掘削影響試験における地下水流動影響予測解析，PNC TN7410 91-013
- TR/GE 90-05 清水和彦：地質環境の長期的隔離能に係わる天然事象について(1)－気候変動と海面変動－，PNC TN7410 91-010
- TR/GE 91-01 Yoshida, H., M. Yui and T. Shibutani: A Study of Influence Factor on Uranium Fixation in the Tono Uranium Deposit, Japan, PNC TN7410 91-061
- TR/GE 91-02 中野勝志・斎藤章・花木達美：難透水性岩石を対象とした室内透水試験装置の開発，PNC TN7410 91-050
- TR/GE 91-03 尾方伸久・大澤英昭・仙波毅・柳澤孝一：多変量統計解析手法を用いた結晶質岩盤の割れ目解析，PNC TN7410 92-001
- TR/GE 91-04 石丸恒存・清水和彦：地質環境の長期的隔離性能に係わる天然事象について(2)－火山活動－，PNC TN7410 91-031
- TR/GE 91-05 仙波毅・尾方伸久・長谷川健・岩崎浩・渡辺邦夫：ボアホールレーダーによる結晶質岩盤中の割れ目帯調査－釜石鉱山原位置試験場における調査について－，PNC TN7410 92-005