



研削により測定した50cmスケール岩体中の
天然亀裂の形状に関する研究

Study of Natural Fracture Topography in 50cm Scale Granitic Rock Block Measured
by a Precision Grinder

鐵 桂一* 澤田 淳

Keiichi TETSU* and Atsushi SAWADA

地層処分研究開発部門
システム性能研究グループ

Performance Assessment Research Group
Geological Isolation Research and Development Directorate

October 2008

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

JAEA-Research

本レポートは独立行政法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<http://www.jaea.go.jp>)
より発信されています。

独立行政法人日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,
Japan Atomic Energy Agency
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2008

研削により測定した 50cm スケール岩体中の天然亀裂の形状に関する研究

日本原子力研究開発機構
地層処分研究開発部門 地層処分基盤研究開発ユニット

鐵 桂一*1, 澤田 淳+1

(2008年8月4日受理)

花崗岩など亀裂性岩盤中を対象とした高レベル放射性廃棄物地層処分の安全評価では、核種移行評価モデルの一つとして亀裂を均質な平行平板でモデル化する方法が一般的に使われている。一次元平行平板モデルでは、亀裂の平均的な特性としての透水量係数や亀裂開口幅が重要なパラメータとなる。しかしながら実際の亀裂は内部にガウジなどの介在物、分岐や亀裂表面の粗さなど複雑な形状を呈しており、このため亀裂開口部は不均質に分布している。このように不均質な特性を有する亀裂を一次元平行平板モデルで表現する際、透水量係数や亀裂開口幅の値をどのように設定するかが課題となっている。

上記課題解決に向けた研究のひとつとして、釜石鉱山原位置試験場で採取した天然の単一亀裂を有する 50cm スケールの花崗岩のブロック試料表面の研削を繰り返し、内部にある亀裂を撮影、観察した。その結果、亀裂に直交する方向に 500 断面の亀裂断面をデジタル画像データとして取得した。これより亀裂の上下面間の距離、亀裂幅の中心座標を 1mm 間隔で計測し、約 25 万箇所座標データからなる亀裂形状データを取得した。これより、平均亀裂幅、亀裂面の粗度、亀裂幅の空間的相関性など、50cm スケール天然岩石亀裂の特徴を表す平均的なパラメータを評価することができた。また評価されたパラメータ値から亀裂の透水異方性を推定することができた。

核燃料サイクル工学研究所（駐在）：〒319-1194 茨城県那珂郡東海村 4-33

*1 検査開発株式会社，核燃料サイクル工学研究所 環境技術管理部 処分技術課（兼務）

+1 核燃料サイクル工学研究所 環境技術管理部 処分技術課（兼務）

Study of Natural Fracture Topography in 50cm Scale Granitic Rock Block Measured by a
Precision Grinder

Keiichi TETSU*¹ and Atsushi SAWADA*¹

Geological Isolation Research Unit
Geological Isolation Research and Development Directorate
Japan Atomic Energy Agency
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received August 4, 2008)

For the safety assessment of HLW geological disposal system in a fractured host rock of such as granite, the homogeneous parallel plate model is usually applied as one of the nuclide migration evaluation models. The transmissivity coefficient and the fracture aperture as an average characteristic of fracture is one of important parameters used in the parallel-plate model. However, the natural fractures have complex characteristics such as infilling of gouge, branching and roughness of fracture surface. Therefore, the fracture aperture is distributed heterogeneously. The methodology how to justify those parameter values is one of the important issues, in case of modeling the fractures which have heterogeneous with the 1-dimensional parallel-plate model.

As one of the studies for solving the issue, 50cm scale of the rock block includes single natural fracture was excavated from Kamaishi in-situ experiment site and observed a fracture by grinding the rock surface iteratively. In this study, a series of the digital image data of the fracture was obtained in 500 grinding sections, perpendicular direction to fracture profile. The coordinate of fracture center and the separation distance between the fracture surface were measured in intervals of 1mm at each section, and the fracture shape data was obtained about 250,000 data points. Thus, the average characteristics that the natural fracture of 50cm scale rock block, such as, the average of fracture separation distance, roughness of fracture surface, spatial correlation of fracture separation distance etc. was

*¹ Inspection Development Corporation,

Waste Isolation Technology Section, Waste Management Department, Nuclear Fuel Cycle Engineering Laboratories (additional post)

*¹ Waste Isolation Technology Section, Waste Management Department, Nuclear Fuel Cycle Engineering Laboratories (additional post)

evaluated. Moreover, anisotropy of fracture permeability was presumed from these parameters.

Keywords: Precision Grinder, Granitic Rock Block, Natural Fracture,
Fracture Topography, Fracture Aperture, Transmissivity

目次

1. はじめに	1
2. 試験方法	2
2.1 岩体亀裂形状の測定原理	2
2.2 試験装置	2
2.2.1 岩体試料平面研削装置	2
2.2.2 岩体試料平面撮影装置	3
2.2.3 亀裂開口幅測定プログラム	4
2.2.4 50cm 岩体	5
2.3 岩体研削・亀裂撮影の作業手順	7
2.3.1 岩体研削・亀裂撮影の準備	7
2.3.2 1mm 毎の研削による画像撮影	7
2.3.3 画像処理による開口幅測定	7
2.4 撮影，データ処理条件	7
2.4.1 亀裂撮影条件	7
2.4.2 データの画像処理条件	9
3. 50cm 岩体亀裂形状の撮影結果	10
3.1 撮影デジタル画像	10
3.2 亀裂開口幅測定プログラムによる亀裂幅計測	11
3.3 取得データ	13
4. 考察	17
4.1 亀裂中点の z 座標分布と亀裂幅分布の観察	17
4.2 亀裂幅の頻度分布	20
4.3 亀裂の特徴を示すパラメータ値評価	21
4.3.1 亀裂表面形状の評価	21
4.3.2 亀裂幅の空間的相関性	23
4.4 トレーサー試験結果との比較	25
5. まとめ	28
参考文献	29
付録	30

Contents

1. Introduction	1
2. Experimental procedure	2
2.1 Measurement principle of rock block fracture shape	2
2.2 Experiment systems	2
2.2.1 Rock block plane grinding system	2
2.2.2 Rock block fracture recording camera	3
2.2.3 Fracture measurement program	4
2.2.4 Specimen of 50cm scale granetic rock block	5
2.3 Procedure of rock block grinding and fracture photo recording	7
2.3.1 Equipment of rock block grinding and fracture photo recording	7
2.3.2 Rock block grinding at interval of 1mm and photo recording	7
2.3.3 Measurement of fracture aperture by image photo data processing	7
2.4 Condition of photo recording and data processing	7
2.4.1 Condition of fracture photo recording	7
2.4.2 Condition of image photo data processing	9
3. Photo recording of fracture shape by rock block specimen	10
3.1 Fracture digital image	10
3.2 Fracture aperture by fracture measurement program	11
3.3 Fracture data	13
4. Consideration	17
4.1 Observation of fracture aperture and aperture center	17
4.2 Frequency distribution of fracture aperture	20
4.3 Evaluation of the fracture characteristic parameter	21
4.3.1 Evaluation of the fracture surface shape	21
4.3.2 Spatial correlation of fracture aperture	23
4.4 Comparison between this study and tracer migration experiments	25
5. Conclusion	28
References	29
Appendix	30

表目次

表 2.2.1	撮影装置仕様 -----	3
表 2.4.1	デジタルカメラ設定 -----	8
表 2.4.2	デジタルカメラ撮影範囲 -----	8
表 2.4.3	デジタル画像1枚のデータサイズ -----	9
表 2.4.4	データ処理条件設定値 -----	9
表 4.2.1	亀裂幅の統計量 -----	21
表 4.3.1	亀裂表面の粗度 JRC -----	22
表 4.3.2	亀裂表面の凹凸形状パラメータ Z2 -----	22
表 4.3.3	各方向のシルとレンジ -----	25

図目次

図 2.1.1	岩体研削撮影イメージ図	2
図 2.2.1	研削装置図	3
図 2.2.2	デジタルカメラ取付け状況	4
図 2.2.3	座標の定義	5
図 2.2.4	亀裂開口幅測定プログラムによる亀裂判定	5
図 2.2.5	50cm 岩体	6
図 2.2.6	50cm 岩体設置状況	6
図 2.4.1	撮影対象亀裂	8
図 2.4.2	目印貼り付け例	9
図 3.1.1	撮影画像 1	10
図 3.1.2	撮影画像 2	10
図 3.1.3	撮影画像 3	10
図 3.1.4	撮影画像 4	10
図 3.1.5	撮影画像 5	11
図 3.1.6	撮影画像 6	11
図 3.1.7	撮影画像 7	11
図 3.1.8	撮影画像合成図	11
図 3.2.1	レジンの未充填	12
図 3.2.2	亀裂の閉塞	12
図 3.2.3	ガウジなどの介在物	12
図 3.2.4	亀裂の分岐	12
図 3.2.5	ステップ構造の様なズレ	12
図 3.2.6	急激な角度変化と急勾配	12
図 3.2.7	センサー孔	12
図 3.2.8	試験で使用したシール剤	12
図 3.3.1	亀裂中点の z 座標分布	14
図 3.3.2	亀裂中点座標と亀裂幅分布	15
図 3.3.3	上亀裂面の亀裂表面形状	16
図 3.3.4	下亀裂面の亀裂表面形状	16
図 4.1.1	亀裂中点座標と亀裂幅分布	18
図 4.1.2	光の照射方向の違いによる亀裂形状の抽出例	19
図 4.2.1	50cm 岩体亀裂幅の頻度分布	20
図 4.2.2	50cm 岩体亀裂幅の累積和	21
図 4.3.1	バリオグラムの例	23
図 4.3.2	E-W (X 軸) 方向のバリオグラム	24
図 4.3.3	N-S (Y 軸) 方向のバリオグラム	24

図 4.3.4	NW-SE 方向のバリオグラム	-----	24
図 4.3.5	NE-SW 方向のバリオグラム	-----	24
図 4.4.1	トレーサー試験概略図	-----	26
図 4.4.2	トレーサー試験における定常状態の濃度分布	-----	27
図 4.4.3	50cm 岩体亀裂幅分布図	-----	27

1. はじめに

花崗岩など亀裂性岩盤中を対象とした高レベル放射性廃棄物地層処分の安全評価では、核種移行評価モデルの一つとして亀裂を平行平板でモデル化する方法が一般的に使われており、第2次とりまとめ^[4]の天然バリア中核種移行解析においてもこのモデルが採用されている。一次元平行平板モデルは、亀裂の平均的な特性としての透水量係数や亀裂開口幅が重要なパラメータとなる。しかしながら、実際の亀裂は内部にガウジなどの介在物を含んでいるほか、分岐や亀裂表面の粗さなど複雑な形状を呈しているため、地下水の浸透や核種が移行する場となる亀裂開口部は不均質に分布している。このように不均質な特性を有する亀裂を一次元平行平板モデルで表現した際に用いられる亀裂の平均的な特性として、透水量係数や亀裂開口幅の値をどのように設定するかが課題となっている。

上記課題解決に向けた研究のひとつとして、釜石鉱山原位置試験場で採取した天然の単一亀裂を有する 50cm スケールの花崗岩^[5]を用いた透水・トレーサー試験が実施され、50cm スケール亀裂の平均的な透水量係数や物質移行に寄与する開口幅の評価に関する研究が行われている^[6]。また同じ場所で採取した天然の交差亀裂を有する 50cm スケールの花崗岩を用いた透水試験では、交差亀裂に沿った方向の透水性がその周辺の亀裂と比較して数倍から数十倍程度高いことが確認された^{[5][6]}。

本研究では亀裂の内部構造を詳細に計測することを目的に開発した亀裂の三次元形状および開口幅の測定手法^{*}を、釜石鉱山で採取し透水・トレーサー試験を実施してきた天然の単一亀裂を有する 50cm スケール花崗岩（以下、50cm 岩体という）に適用して、内部亀裂の撮影、観察を実施した。この測定手法は閉塞した亀裂内部の開口幅や亀裂形状を直接観察、計測できるため、信頼性の高いデータが取得できる利点がある^{[7][8]}。レジン注入して亀裂内部を測定する試みはこれまでも行われているが^{[7][10]}、50cm スケールの比較的大きな天然の亀裂の亀裂面を 1mm×1mm の分解能で詳細に計測を行ったのは今回が初めてである。測定の結果、50cm 岩体天然亀裂に直交する方向に 500 断面の実際の亀裂形状をデジタル画像データとして取得し、亀裂が閉塞した箇所、ガウジなどの介在物、亀裂の分岐など、亀裂内の複雑な形状を観察した。本報告では、亀裂内に介在物を含む亀裂断面のデジタル画像データより亀裂の上下面間の距離、亀裂幅の中心座標を 1mm 間隔で計測し、約 25 万箇所の座標データからなる亀裂形状データを取得した。取得データより、平均亀裂幅、亀裂幅の粗度、亀裂幅の空間的相関性など、50cm スケール天然岩石亀裂の特徴を表す平均的なパラメータを評価した。また、今回測定した亀裂幅分布とトレーサー試験による定常濃度分布の比較により、亀裂形状測定結果に基づく透水異方性について概略的に評価することができた。これらのデータは今回用いた 50cm 岩体の単一亀裂における特性の 1 つのサンプルではあるが、天然単一亀裂分布の貴重なデータの一例となる。

※ 特許第 3866257 号，名称：亀裂の三次元形状及び開口幅の測定方法及び測定装置

2. 試験方法

2.1 岩体亀裂形状の測定原理

岩体内部の亀裂形状を測定するため、岩体の精密研削と亀裂部の撮影を繰り返す手法[※]を用いた。

岩体研削、撮影のイメージを図 2.1.1 に示す。亀裂を有する岩体に対し図 2.1.1 (a) の様に岩体の表面を精密に平面研削することで、内部の亀裂を研削面に表出させる。研削表面に表出した亀裂は、図 2.1.1 (b) の様にデジタルカメラで撮影し画像データとして記録する。この様な研削と撮影を繰り返すことで、岩体全体の亀裂形状画像データが取得できる。またこれらの画像を組み合わせて分析することで、亀裂面全体の詳細な亀裂形状を計測することができる。本手法は閉塞した亀裂内部の開口幅や亀裂形状を直接計測できるため、信頼性の高いデータが得られる利点がある。

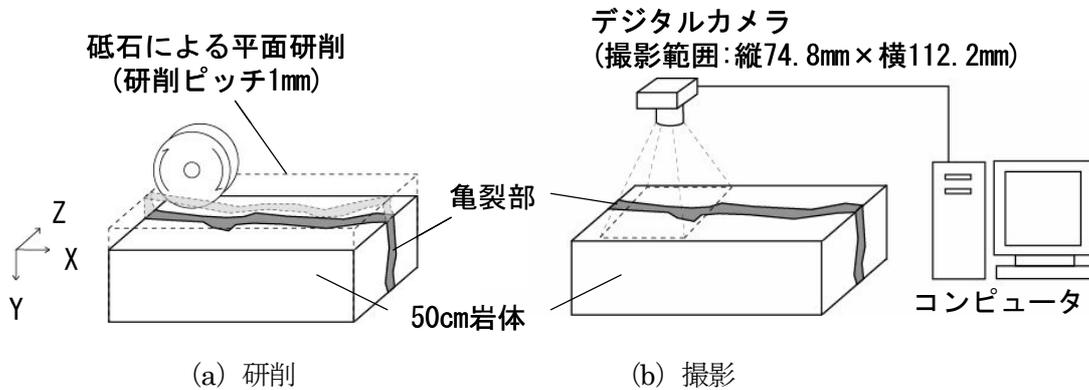


図 2.1.1 岩体研削撮影イメージ図

2.2 試験装置

2.2.1 岩体試料平面研削装置

岩体試料の研削には、黒田精工製機械平面研削盤 GS-64PF を改造した岩体試料平面研削装置 (以下、研削装置という) を使用した。研削装置の概観を図 2.2.1 に示す。研削装置は、最大で縦 600mm×横 400mm×高さ 600mm サイズの岩体試料を 0.1 μ m の精度で平面研削可能な精密平面研削盤である。テーブル (及びサドル) の上に固定した岩体試料をテーブルごと前後左右に動かし、上下に移動可能な回転砥石により 50cm 岩体試料表面の精密研削を行う。

回転砥石が上下移動するストローク下限まで岩体試料を研削した場合、岩体試料の下に設置高さ調整治具を入れることで残りの岩体試料全体を研削可能にした。今回は、岩体上部からの研削深さ 382mm で 50cm 岩体を一度取り外し、設置高さ調整治具を取り付けている。

※ 特許第 3866257 号, 名称: 亀裂の三次元形状及び開口幅の測定方法及び測定装置

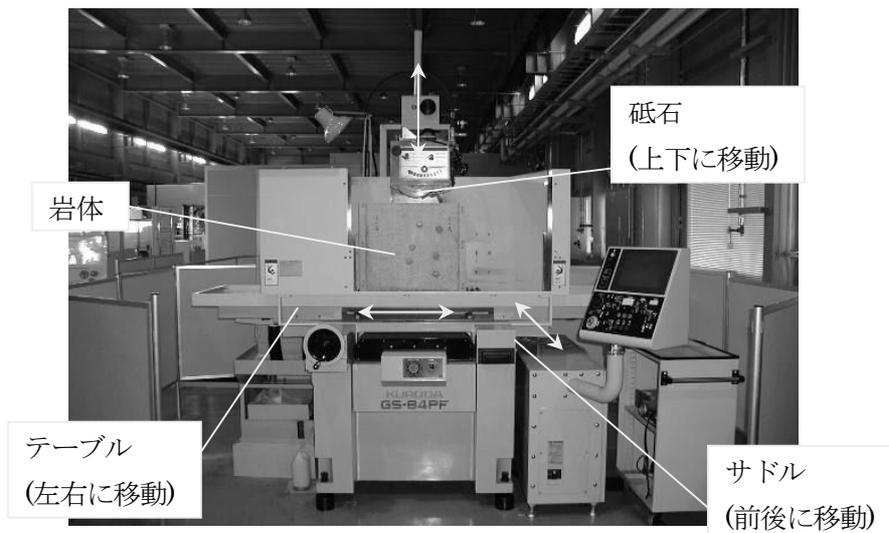


図 2.2.1 研削装置図

2.2.2 岩体試料平面撮影装置

岩体試料表面の亀裂を撮影する岩体試料平面撮影装置(以下、撮影装置という)の仕様を表 2.2.1 に示す。岩体試料表面の亀裂は、1350 万画素クラスのデジタルカメラによりデジタル画像データを記録した。デジタルカメラは研削装置砥石カバー上方のカメラ固定治具に図 2.2.2 のように取付け、カメラレンズを岩体試料に対し水平に固定できる(研削作業時はデジタルカメラをカメラ固定治具から取外す)。岩体試料とカメラレンズの位置調整は、研削装置のテーブル、サドル、砥石軸を操作して行なった。デジタルカメラにより撮影した画像データは、IEEE1394 ケーブルを経由して画像保存用コンピュータに転送、収録した。

表 2.2.1 撮影装置仕様

デジタルカメラ仕様	KODAK DCS Pro SLR/n CMOS センサー1350 万画素 : 4500pixel×3000 pixel 保存ファイル形式 : DCS
レンズ仕様	TAMRON SP AF90mmF/2.8Di 焦点距離 90mm, MACRO 1:1
画像保存用コンピュータ	バイオ PCV-RX72K CPU : Intel Pentium4 メモリー : 512MB

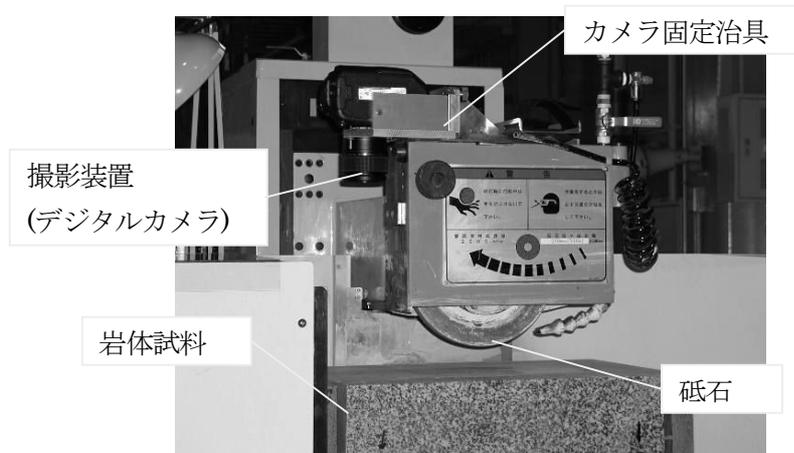


図 2.2.2 デジタルカメラ取付け状況

2.2.3 亀裂開口幅測定プログラム

亀裂開口部空隙形状の測定には、株式会社ニコン技術工房製の画像診断支援ソフト Nikon GS-1 をベースに作成した亀裂開口幅測定プログラムを使用した。亀裂開口幅測定プログラムは、デジタル画像 (bmp 形式) で保存されたデータから岩体試料の亀裂開口幅や亀裂中点座標を抽出、計算するプログラムである。このプログラムは複数枚のデジタル画像を、パターンマッチングまたは手動でつなぎ合わせることができ、一回のデジタルカメラの撮影範囲以上のデータをシームレスに処理することができる。

亀裂開口幅測定プログラムによる亀裂座標の定義を図 2.2.3 に、亀裂測定画面の例を図 2.2.4 に示す。図 2.2.4 で緑色の格子線は測定間隔であり、本研究では 1mm に指定している。また格子線上の赤線は、画像から判読した亀裂上下面間の距離 (以下、亀裂幅という) である。この赤線の長さや位置座標をプログラムが読み取り、赤線の長さを亀裂幅データ、赤線中央の座標 (以下、亀裂中点座標という) を中点座標データとして算出する。この様に亀裂形状は指定した格子上で計測されるため、亀裂幅は亀裂表面間の最短距離 (Perpendicular aperture) ではなく、図 2.2.4 の x-y 平面に対して垂直な z 方向の値 (Vertical aperture) が算出されることになる。

亀裂開口幅測定に用いるデジタル画像は大容量である。このため複数枚のデジタル画像を扱う際はデジタル画像一枚毎に亀裂位置座標データなどを出力させ、デジタル画像のつなぎ合わせを出力した亀裂位置座標データなどを用いて行うことで、コンピュータの作業負荷量を低減させている。出力データは Excel 形式のファイルとして、亀裂幅、亀裂中点座標、重ね合わせた画像の位置関係などが表示、保存される。

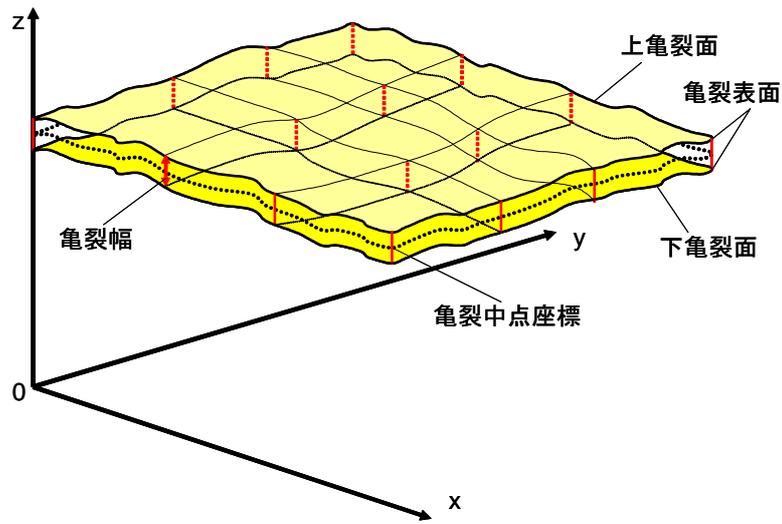


図 2.2.3 座標の定義

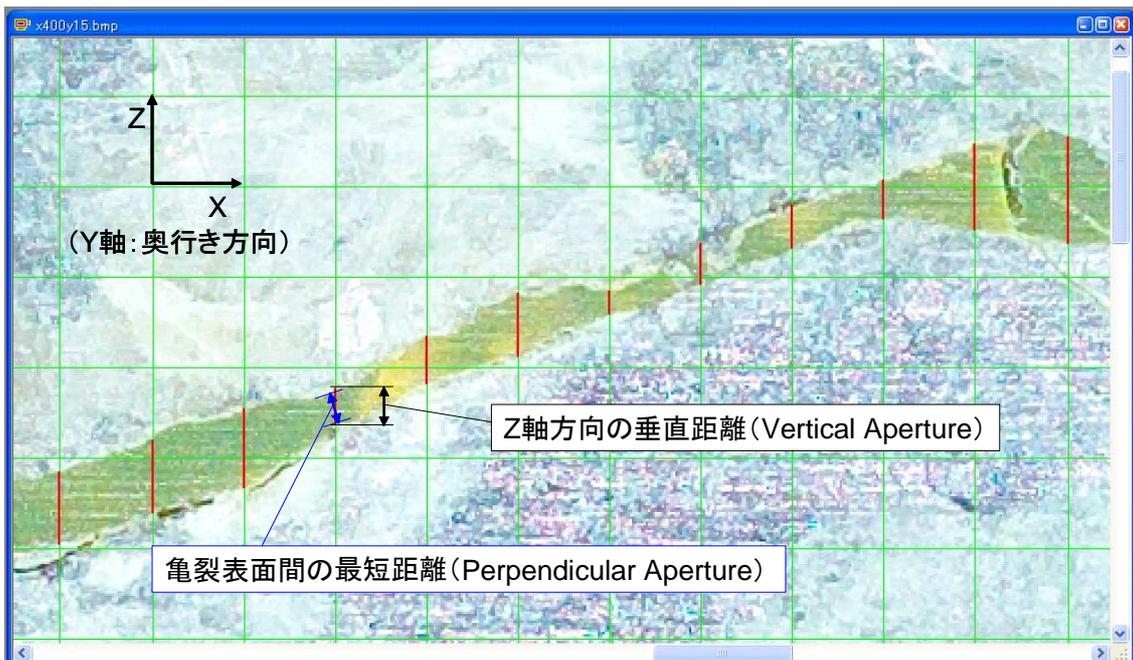


図 2.2.4 亀裂開口幅測定プログラムによる亀裂判定
(黄色いレジン樹脂で亀裂部を充填, 緑色の格子線は測定間隔, 赤線は判定した亀裂幅)

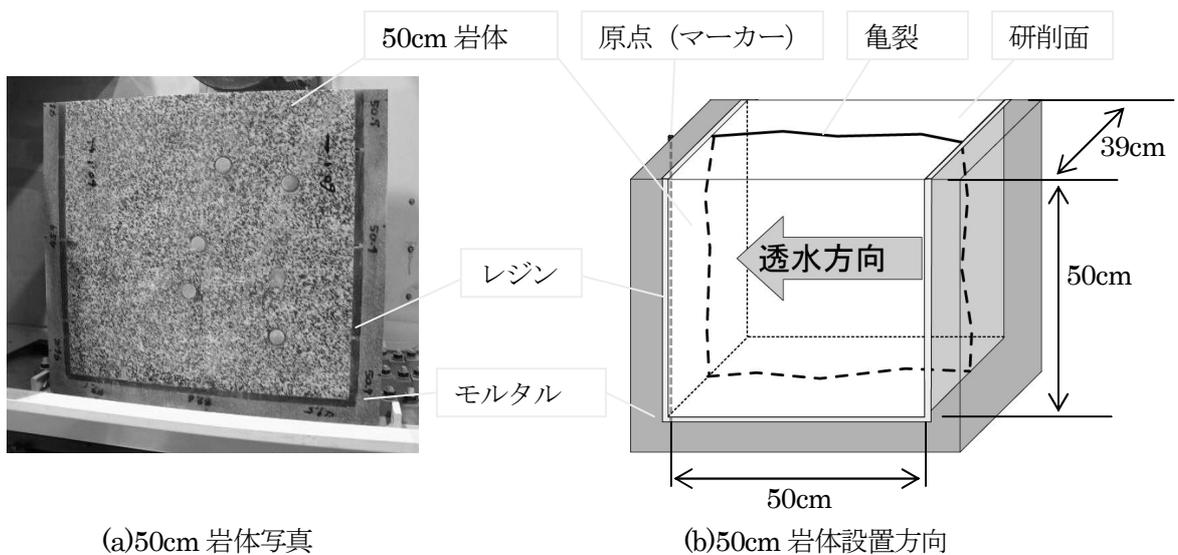
2.2.4 50cm 岩体

50cm 岩体は釜石鉱山原位置試験場で採取された天然の単一亀裂を有する花崗岩であり³⁾, 岩体の中央付近に岩体ブロックの一面とはほぼ平行な単一亀裂が存在する。50cm 岩体は岩体内部の不均質な特性を把握することを目的として, これまでに LABROCK (亀裂状媒体水理試験設備) を用いた透水・トレーサー試験が行われてきた³⁾⁴⁾。図 2.2.5 に研削装置に設置する直前の 50cm 岩体の様子を示す。また図 2.2.6 は, 50cm 岩体を研削装置に設置した様子を示している。50cm 岩

体は亀裂部の固定と亀裂部判定のため、亀裂に対して垂直応力を加えない状態で岩体亀裂部内に黄色に着色したレジンを注入した。その後、50cm 岩体の保護のため岩体の周囲をレジン（厚さ 15mm）及びモルタル（厚さ 35mm）で固定し、幅 600mm×高さ 600mm×奥行き 390mm のサイズに加工，整形した（図 2.2.5 参照）。このとき 50cm 岩体本体のサイズは，幅 500mm×高さ 500mm×奥行き 390mm である。図 2.2.5，図 2.2.6(a)の岩体表面に見られる 6 個の丸型は透水・トレーサー試験で用いた直径 30mm のボーリング孔であり，亀裂に対してほぼ垂直に岩体を貫通している^[4]。これらのセンサー孔は透水・トレーサー試験終了後，木片とレジンで充填，固定してある。50cm 岩体の左側面には，データを処理するときに座標原点とするマーカを研削深さ 4mm の時点で図 2.2.6 (b) のように取り付けた。原点（マーカ）を付ける前の出力データは，50cm 岩体の左手前角を仮の原点として計測し，後に出力データの位置座標を補正した。



図 2.2.5 50cm 岩体



(a)50cm 岩体写真

(b)50cm 岩体設置方向

図 2.2.6 50cm 岩体設置状況（上部モルタル，レジン研削後）

（矢印は本岩体を用いて実施した透水・トレーサー試験の透水方向を示す）

2.3 岩体研削・亀裂撮影の作業手順

2.3.1 岩体研削・亀裂撮影の準備

- (1) 50cm 岩体を研削装置に設置，固定する。
- (2) 50cm 上部のモルタルとレジン部を研削する。
- (3) モルタルとレジン部の研削により岩体上面が全て出た高さを，岩体の基準断面 ($y=0\text{mm}$) とする。
- (4) 50cm 岩体基準断面を，デジタルカメラで撮影する。

2.3.2 1mm 毎の研削による画像撮影

- (1) 50cm 岩体の上面から 1mm 研削する。
- (2) 50cm 岩体上面を，デジタルカメラで撮影する（研削断面上の計測対象とする亀裂を全て撮影できる様に，一断面につき 7～8 回撮影を行う）。
- (3) 50cm 岩体の下部まで，(1)，(2)の作業を繰り返す。

2.3.3 画像処理による開口幅測定

- (1) 同一断面のデジタル画像を，亀裂開口幅測定プログラムに登録する。
- (2) デジタル画像の格子原点，画像解像度を設定する。
- (3) デジタル画像上で 1mm ピッチの格子を表示させ，プログラム使用者が格子上の亀裂開口を判定し，手動で赤線を引いていく。
- (4) 同一面の亀裂画像全てに対して(3)を実施する。
- (5) 亀裂開口幅と亀裂中点座標を，数値データとして Excel 形式で出力する。
- (6) 全ての研削断面に対し，(1)から(5)の作業を繰り返す。

2.4 撮影，データ処理条件

2.4.1 亀裂撮影条件

本研究では，50cm 岩体を研削深さ 1mm 毎に撮影した。撮影する際，デジタル画像の解像度が高くなるように，撮影距離を可能な範囲で近づけた。撮影時の基本的な設定を表 2.4.1 に示す。また撮影対象とする亀裂付近を図 2.4.1 に示す。

デジタルカメラの撮影距離は， $0.1\mu\text{m}$ の精度で高さを設定可能な研削砥石を岩体表面から離れた距離によって調整した。表 2.4.2 に，砥石と岩体表面の距離が 40mm のときのデジタルカメラ撮影範囲を示す。50cm 岩体の亀裂はデジタルカメラの撮影範囲より大きいため，複数のデジタル画像を撮影し画像をつなぎ合わせる。このため撮影範囲が重複する場所に，画像を繋ぎ合わせる際の目印を貼り撮影した。目印を貼った 50cm 岩体の一例を図 2.4.2 に示す。図 2.4.2 の四角い枠は，デジタル画像撮影箇所例である。50cm 岩体の撮影には，断面あたり最低 7 枚のデジタル画像が必要となる。

表 2.4.1 デジタルカメラ設定

撮影距離	40 mm (砥石と岩体表面間固定)
フォーカス	オートフォーカス (撮影中適宜ピント調整を実施)
フラッシュ	カメラ内蔵 (TTL 調光)
ISO 感度	160
レンズ絞り	f5.6
シャッタースピード	1/125(s)

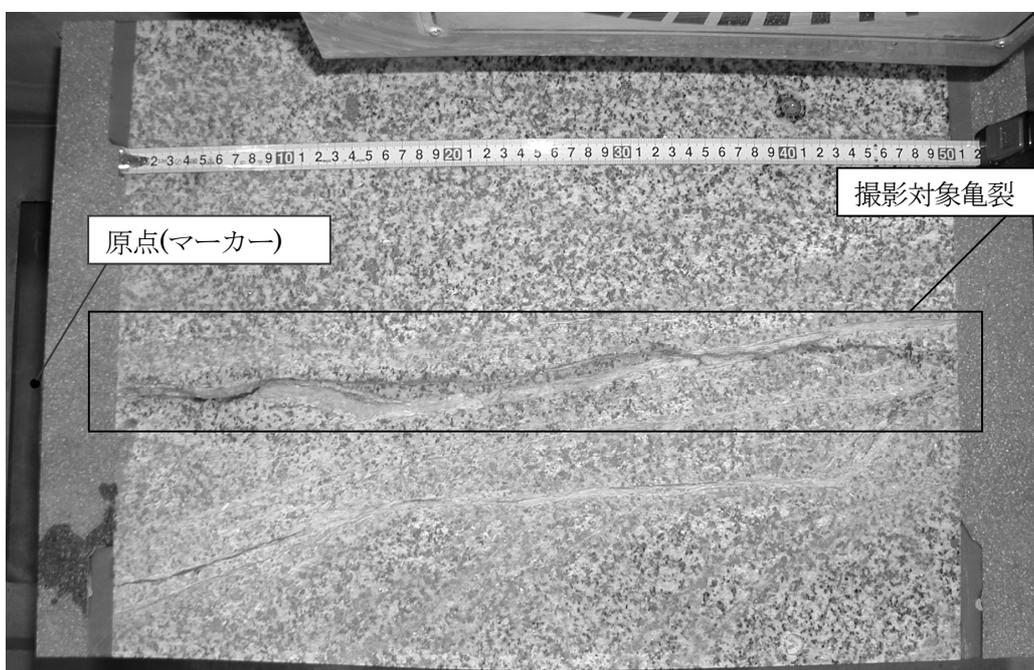


図 2.4.1 撮影対象亀裂

表 2.4.2 デジタルカメラ撮影範囲

砥石-岩体間の距離 (撮影距離) mm	撮影範囲 縦 mm	撮影範囲 横 mm
40	74.8	112.2

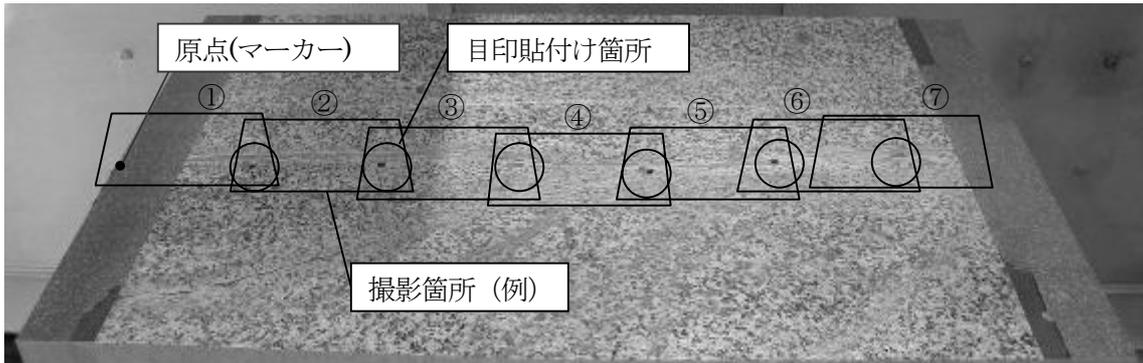


図 2.4.2 目印貼り付け例

2.4.2 データの画像処理条件

撮影したデジタル画像は、デジタルカメラ固有の DCS という形式で保存される。DCS 形式のデジタル画像は亀裂開口幅測定プログラムでのデータ処理のため、Adobe Photoshop 7.0 により bmp 形式に変換した。DCS 形式および bmp 形式のデジタル画像 1 枚のデータサイズを表 2.4.3 に示す。このデジタル画像を用い、亀裂方向に 1mm 間隔で亀裂幅の測定を実施した。

亀裂幅測定のためのデータ処理の設定を、表 2.4.4 に示す。デジタルカメラの画像解像度は、ガラススケールを撮影した画像より求めた。デジタル画像の繋ぎ合わせに際しては岩体に貼り付けた目印(図 2.4.2)を参考にしつつ、亀裂幅測定の対象となる亀裂形状を合わせる事で画像間の相対位置を決定した。その際、各研削断面間の位置座標の整合性にも留意した。また、デジタル画像はカメラ設置で回転方向にわずかな傾きが発生するため、各研削断面との整合性に留意し、出力された亀裂中点座標データの傾きを補正した。

表 2.4.3 デジタル画像 1 枚のデータサイズ

画像データ形式	画像データサイズ
DCS 形式	15.5MB
bmp 形式	38.6MB

表 2.4.4 データ処理条件設定値

設定条件	設定値
画像解像度	40.1pixel/mm (24.9 μ m/pixel)
測定間隔	1mm
画像データ形式	bmp

注 1) 砥石と岩体の距離(撮影距離) 40mm。

注 2) 研削深さ 175mm のデジタル画像データのみ解像度が 38.6pixel/mm (25.9 μ m/pixel) となった。

3. 50cm 岩体亀裂形状の撮影結果

3.1 撮影デジタル画像

一回の研削深さを 1mm とし、研削深さ 0mm～499mm までの合計 500 断面について研削及び撮影を実施した。デジタル画像データを整理する際に用いる各研削断面の名称は、研削深さに対応させ $y_0\sim y_{499}$ とする。各研削断面の bmp 画像データは、原点を含む画像のファイル名を $x0y0$ とし、それ以降は撮影時に研削装置に表示されたおおよその位置座標をファイル名とした（データをプログラムで処理する都合上、 z 軸の位置座標をファイル名では y で表している）。

50cm 岩体一断面を撮影したデジタル画像の一例として、図 2.3.2 に示した断面における撮影画像を図 3.1.1～図 3.1.7 に、図 3.1.1～図 3.1.7 の合成画像を図 3.1.8 に示す（図 3.1.1～図 3.1.8 は印刷用に実際の撮影画像より解像度を粗くしている）。

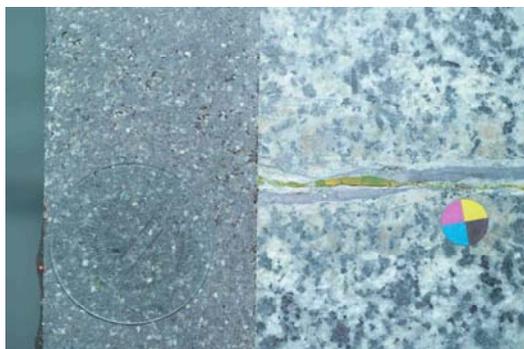


図 3.1.1 撮影画像 1 (図 2.3.2①)
(縦 74.8mm×横 112.2mm : 表 2.4.2 参照)

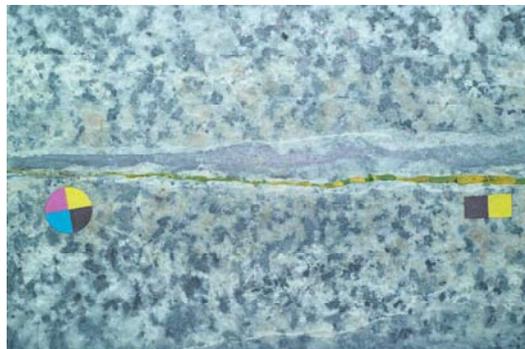


図 3.1.2 撮影画像 2 (図 2.3.2②)



図 3.1.3 撮影画像 3 (図 2.3.2③)

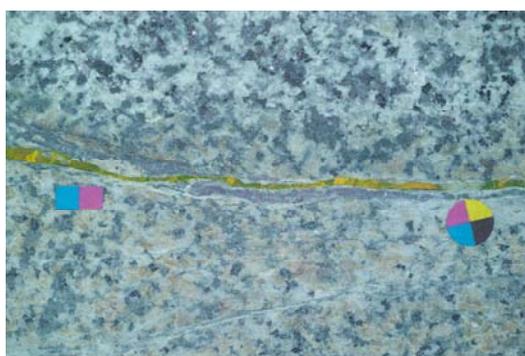


図 3.1.4 撮影画像 4 (図 2.3.2④)



図 3.1.5 撮影画像 5 (図 2.3.2⑤)

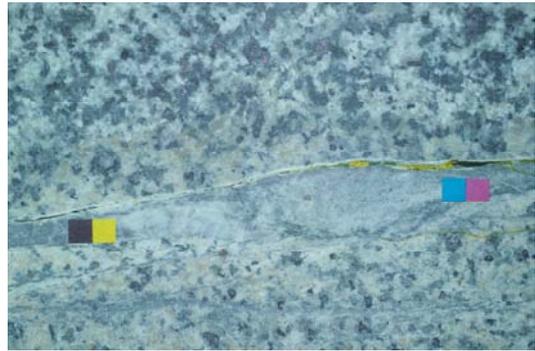


図 3.1.6 撮影画像 6 (図 2.3.2⑥)



図 3.1.7 撮影画像 7 (図 2.3.2⑦)

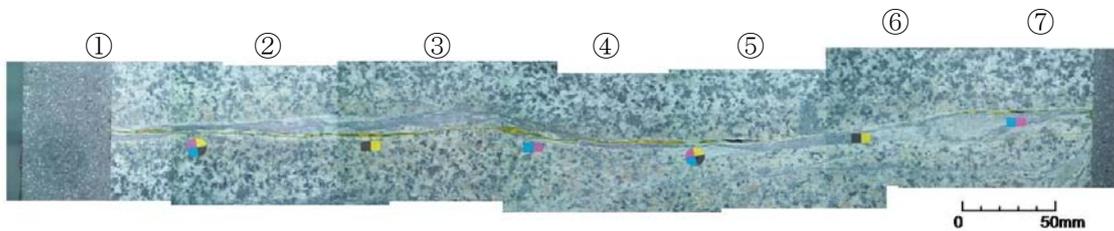


図 3.1.8 撮影画像合成図 (図 3.1.1～図 3.1.7)

3.2 亀裂開口幅測定プログラムによる亀裂幅計測

撮影により取得したデジタル画像と亀裂開口幅測定プログラムを用い、z 軸方向の亀裂幅、亀裂中点座標を研削深さ 0mm から 499mm まで亀裂方向に 1mm 間隔で計測した。取得した亀裂幅データ、亀裂中点座標データを Microsoft® Excel 形式で保存した CD を付録として添付する。

撮影した画像の亀裂には、レジンが充填されてない箇所 (図 3.2.1)、亀裂が閉塞した箇所 (図 3.2.2)、ガウジなどの介在物 (図 3.2.3)、亀裂の分岐 (図 3.2.4) などが多数存在した。また、ステップ構造の様な亀裂のズレ (図 3.2.5) や亀裂の急激な角度変化と急勾配 (図 3.2.6) も見られた。このような亀裂の形状は、Hakami ら⁹⁾による亀裂測定で見られた特徴と一致している。岩体の加工などの人工的な影響の特徴としては、センサー孔による欠損 (図 3.2.7) や透水・トレーサー試験で岩体端面部を止水するために用いたシール剤 (図 3.2.8) がある (図 3.2.1～図 3.2.8 は印刷用に解像度を粗くしている)。このような亀裂の特徴は、岩体基質部と亀裂空隙部の境界の判

断を困難にする原因となっている。

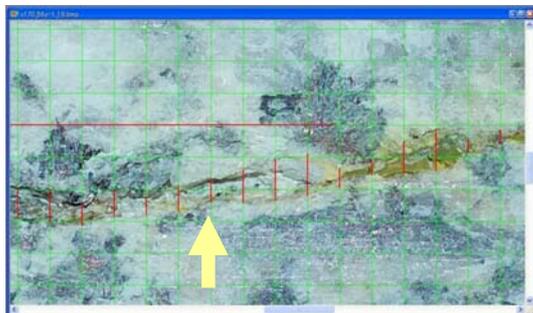


図 3.2.1 レジンの未充填

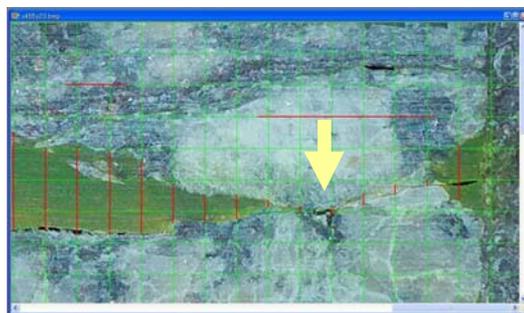


図 3.2.2 亀裂の閉塞

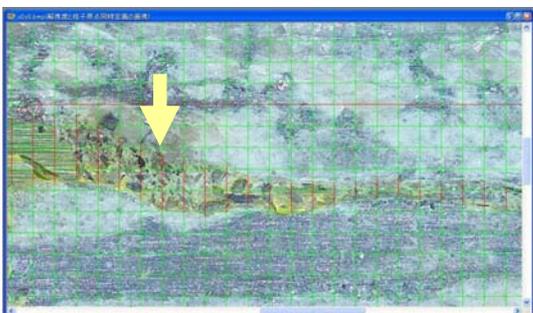


図 3.2.3 ガウジなどの介在物

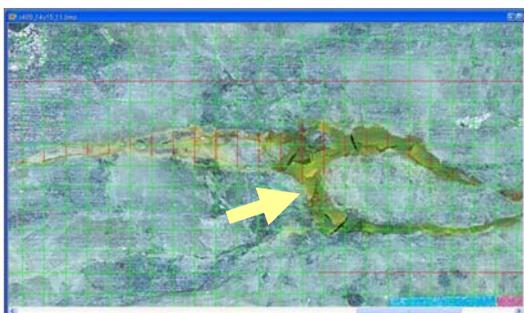


図 3.2.4 亀裂の分岐

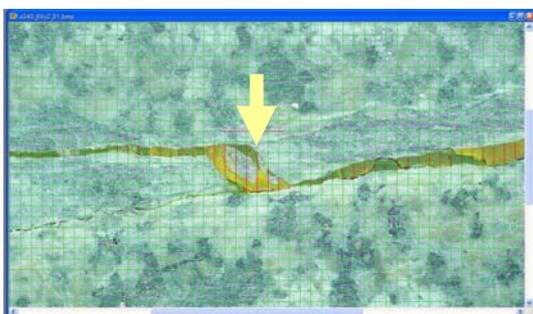


図 3.2.5 ステップ構造の様なズレ



図 3.2.6 急激な角度変化と急勾配

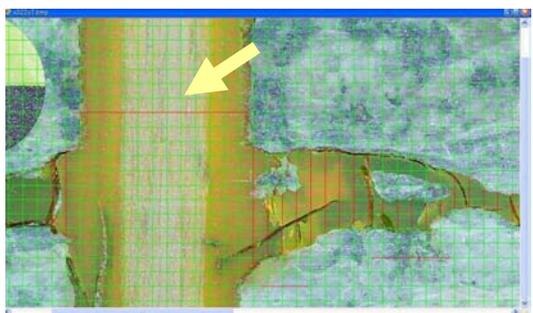


図 3.2.7 センサー孔

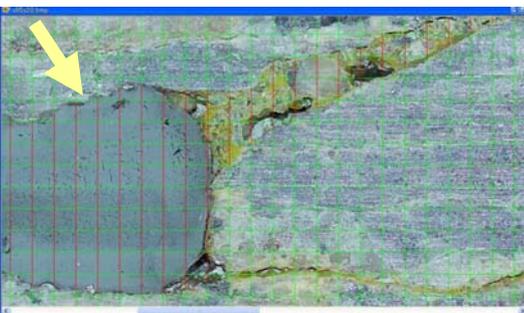


図 3.2.8 試験で使ったシーラ剤

本報告では、50cm 岩体のほぼ中央にあるメインの亀裂一本のみを測定対象とした。亀裂幅は、ガウジなどの介在物を含む亀裂上下面間の距離で判定した。亀裂の分岐等は、亀裂幅が大きい方を選択した。また亀裂が閉じている箇所は、位置座標を取得するために最小値 (1pixel) を亀裂幅に設定した。このため取得したデータは、実際の亀裂開口幅より大きい箇所が含まれる。ガウジなどの介在物が存在する箇所や亀裂の分岐等の扱いについては今後検討、修正する予定である。

3.3 取得データ

亀裂開口幅測定プログラムにより取得したデータを元に、亀裂の形状を示す亀裂中点の z 座標分布を図 3.3.1 示す。Z 軸の座標は、図 2.4.1 の原点 (マーカー) を基準に設定した。図 3.3.2 は亀裂開口幅測定プログラムにより取得したデータを元に、三次元的な形状の亀裂中点座標上に亀裂幅を色の濃淡で表したものである。また、亀裂中点座標と亀裂幅より計算で求めた亀裂表面の形状を図 3.3.3 (上亀裂面)、図 3.3.4 (下亀裂面) に示す。なお図 3.3.1~図 3.3.4 は、仰角を変えた図を 4 パターン表示してある

図 3.3.1 の z 座標の等高線より 50cm 岩体の亀裂部は図の左上(x,y)=(0,0)が高く、右下(x,y)=(500,500)方向に傾斜していることがわかる。図 3.3.2 より今回使用した 50cm 岩体では、0~2mm の亀裂幅が多く存在することが分かる。また、50cm 岩体端面部やセンサー孔付近に亀裂幅の極めて大きな箇所が見られる。これらは岩体整形時やセンサー孔を開けたとき、亀裂部が破碎され開口幅が広がったものであると考える。また今回は、ガウジなどの介在物を含めて亀裂幅と判定しているため、亀裂幅の極めて大きな箇所が他にも現れたと考える。

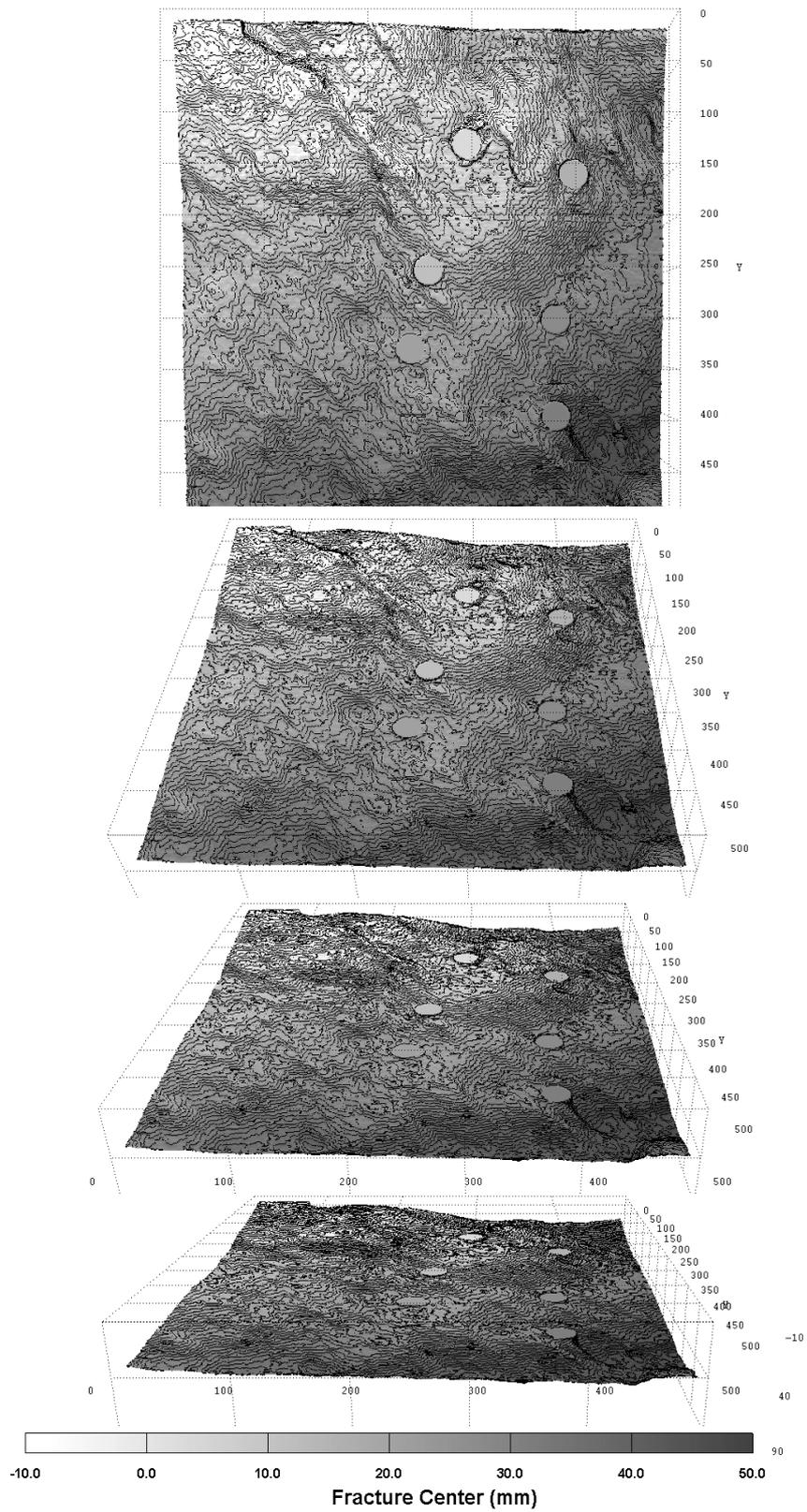


図 3.3.1 亀裂中心の z 座標分布

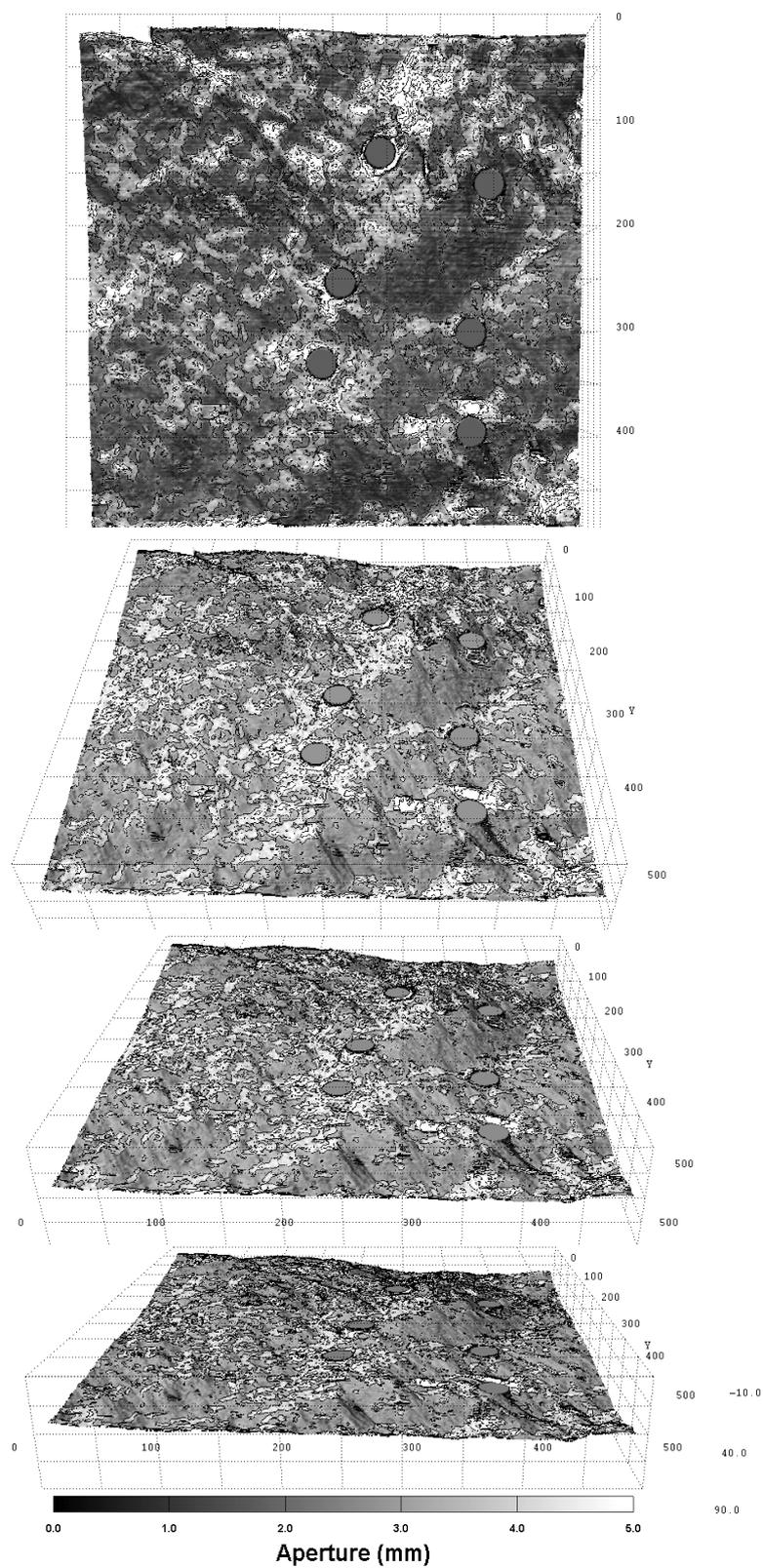


図 3.3.2 亀裂中点座標と亀裂幅分布

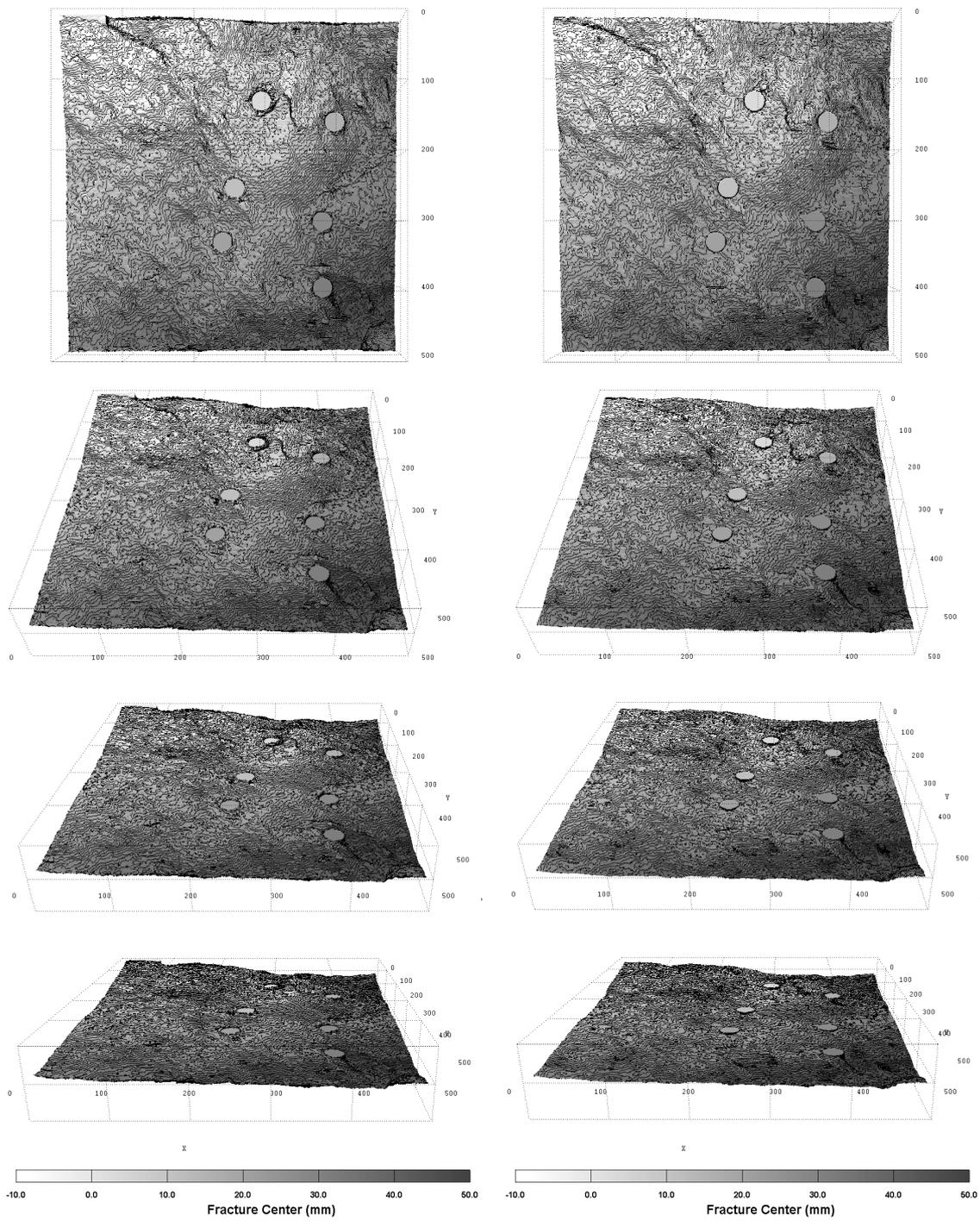


図 3.3.3 上亀裂面の亀裂表面形状

図 3.3.4 下亀裂面の亀裂表面形状

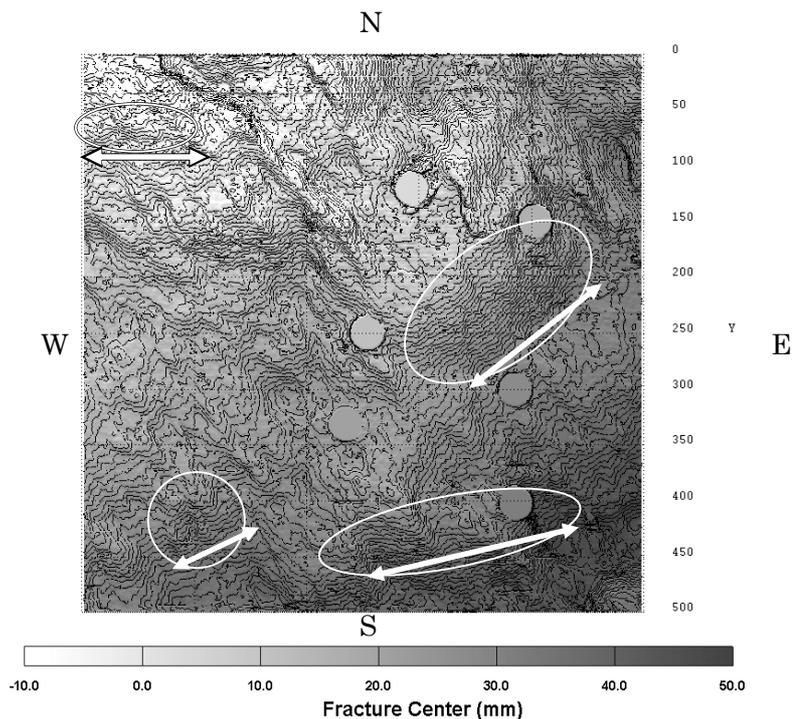
4. 考察

4.1 亀裂中点の z 座標分布と亀裂幅分布の観察

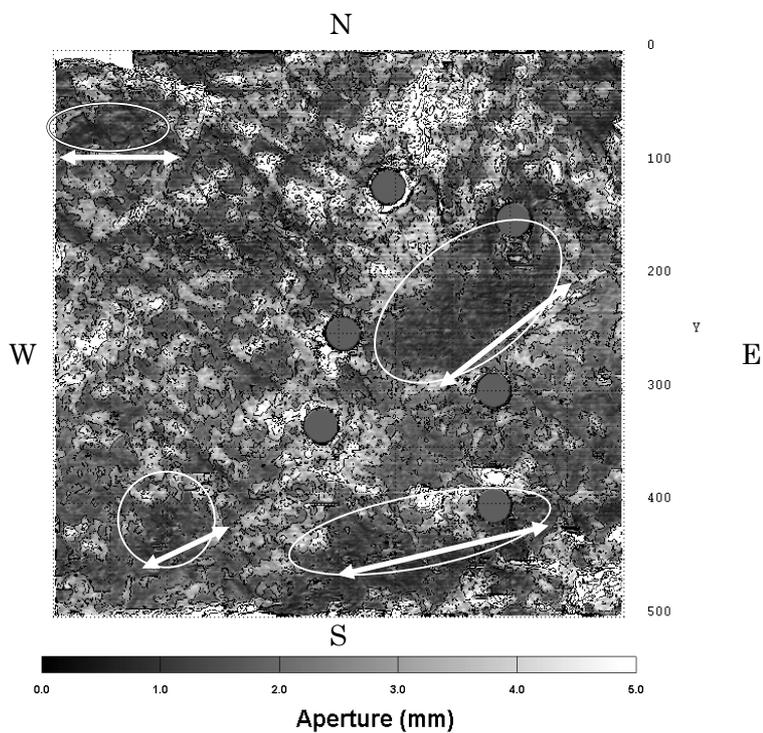
亀裂中点座標と亀裂幅分布を図 4.1.1 に示す。以後の亀裂面を示す図において、方向に関する説明のため、図の上方を N、右方を E、左方を W、下方を S のように呼ぶこととする。図 4.1.1 の白丸は亀裂幅が小さい場所であり、白矢印は亀裂幅の小さいエリアの z 座標等高線に沿った方向を示す。亀裂幅が小さい場所は等高線の密な場所であり、z 座標の傾斜が急である事が分かる。また図 4.1.1 の白矢印より、この等高線に沿った方向は E-W から NE-SW であり、亀裂幅の小さいエリアは等高線方向にある程度の広がりを持って存在している。

図 4.1.2 は亀裂中点座標面形状に亀裂幅を色の濃淡で表し、黒矢印方向から角度を付け光を当てることで亀裂中点の凹凸を強調させたものである。これにより図の表面に、条線と思われる幾筋もの小さな溝の存在が確認できた。図 4.1.2 の白線は小さな溝の平均的な方向を強調したものであり、白丸は亀裂幅が小さい場所、白矢印は亀裂幅の小さいエリアの等高線に沿った方向である。図 4.1.2 より、小さな溝の方向は光の照射方向によって多少変化するが、おおよそ NW-SE 方向となった。この小さな溝の方向（白線方向）と亀裂幅の小さなエリアの等高線方向（白矢印方向）は、垂直かそれに近い角度である。これより亀裂の小さなエリアは、小さな溝の方向（白線方向）に何らかの力が働いたことにより、白線方向に直角な傾斜を持つエリアの亀裂幅が狭められ出来たものと推測する。

小山ら^[4]によれば、亀裂にせん断する力が加わると、せん断と垂直な方向に亀裂の接触領域がより分布し、せん断に垂直な方向の流れは平行な流れより流量が大きくなることを示している。これにより透水性、物質移行特性に顕著な異方性を示すとしている。このことから 50cm 岩体の亀裂は、上記の小さな溝が亀裂面のせん断運動によって生じた条線と思われ、また、せん断方向に垂直な図 4.2.2 の等高線方向（白矢印方向）に流れやすく、せん断方向と平行な小さな溝の方向（白線方向）に流れにくい透水異方性を示す可能性があると考ええる。



(a) 亀裂中点座標



(b) 亀裂幅分布

図 4.1.1 亀裂中点座標と亀裂幅分布
(白丸は亀裂幅の小さい箇所，矢印は等高線の方角)

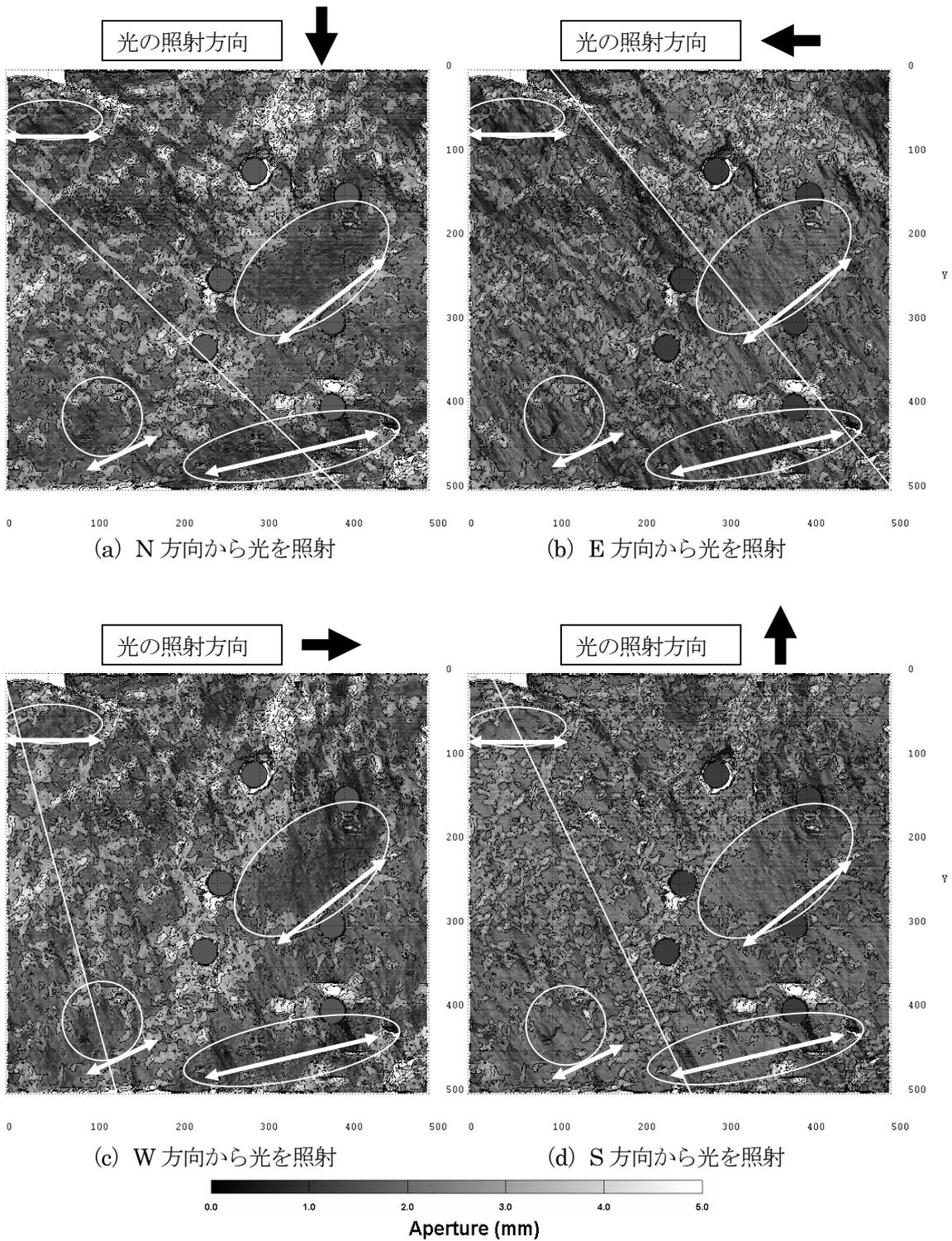


図 4.1.2 光の照射方向の違いによる亀裂形状の抽出例
 (亀裂中点座標面形状に亀裂幅を色の濃淡で表し、光を照射する方向を変えて描写したもの。
 白丸は亀裂幅の小さい箇所、白線は小さな溝の方向、白矢印は等高線の方向)

4.2 亀裂幅の頻度分布

50cm 岩体の亀裂幅の頻度分布を図 4.2.1 に、累積和を図 4.2.2 示す。頻度分布及び累積和は、0.2mm 間隔の亀裂幅頻度より求めた。亀裂幅データは亀裂閉塞部に最小値(24.9 μ m/pixel)を与えているため、これらは 0mm としてカウントした。また、平均亀裂幅、中央値、標準偏差、分散を表 4.2.1 に示す。今回の報告では岩体の加工等で破碎の影響が大きいと考えられる岩体端面部を除外し、座標(x,y)=(10,10)~(490,490)の範囲のデータを用いた。また、センサー孔に近接した約 5mm の範囲のデータも本検討から除外している。

図 4.2.1 より 50cm 岩体は 1mm 付近の亀裂幅が最も多く、またグラフの形状は対数正規分布に近い傾向が見られた。第 2 次とりまとめ¹⁾では、開口幅分布は対数正規分布を示すとしている。図 4.2.2 より、1mm 以上の大きさの亀裂幅が亀裂表面積の約半分を占めることが分かった。亀裂幅の平均値は 1.144mm であった。これらの値は、50cm 岩体を用いた透水・トレーサー試験³⁾⁴⁾により求められた 50cm 岩体の平均的な水理学的開口幅 0.35mm~0.45mm、物質移行開口幅 0.25mm~0.35mm より大きな値となっている。今回の研削による亀裂幅測定ではガウジなどの介在物を亀裂開口部と判定しているため、亀裂幅が実際の開口幅よりも大きくなる。これは、今後行う亀裂開口部の判定基準の検討とデータの見直しにより、水理学的開口幅や物質移行開口幅に近づくと考える。

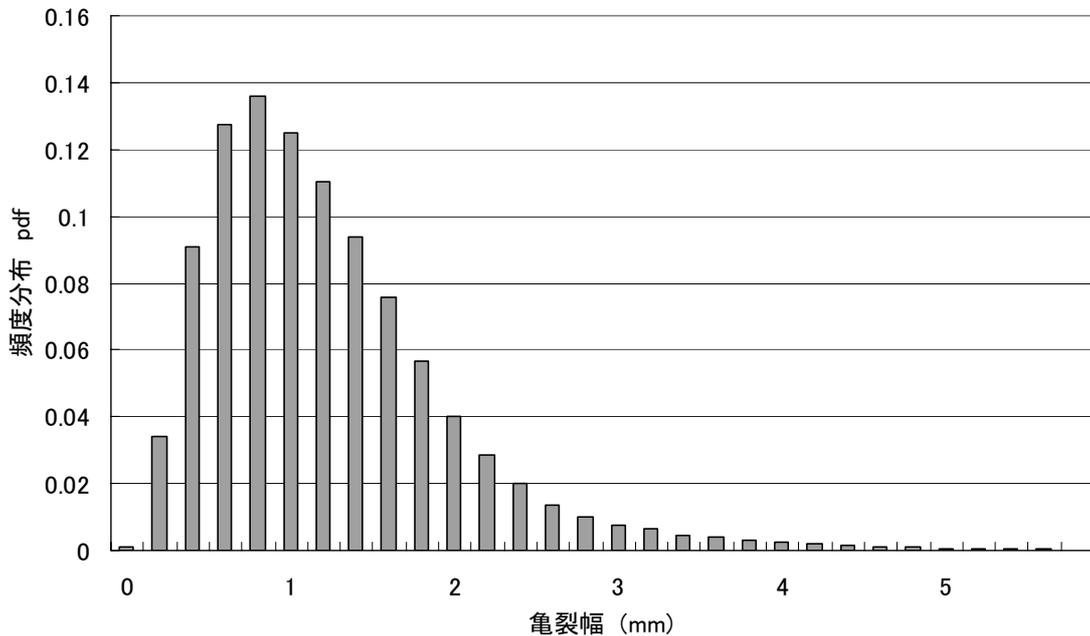


図 4.2.1 50cm 岩体亀裂幅の頻度分布

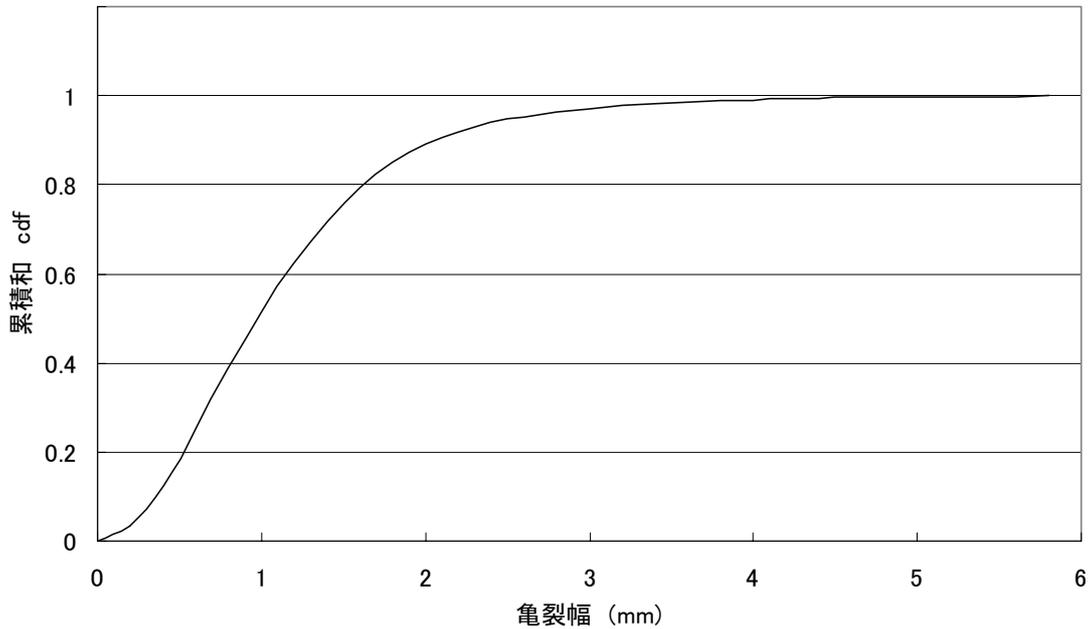


図 4.2.2 50cm 岩体亀裂幅の累積和

表 4.2.1 亀裂幅の統計量

亀裂幅平均値(mm)	1.144
亀裂幅中央値(mm)	0.998
標準偏差(mm)	0.779
分散(mm)	0.607

4.3 亀裂の特徴を示すパラメータ値評価

50cm 岩体の亀裂幅データ, 亀裂中点座標データを用い, JRC (Joint Roughness Coefficient)^[12]により亀裂表面形状を評価した。また同様に, バリオグラム^[14]により亀裂幅の空間的相関性を評価した。これらの計算では, 岩体の加工等で破碎の影響が大きいと考えられる岩体端面部のデータを除外し, 座標(x,y)=(10,10)~(490,490)について実施した。また, センサー孔に近接した約 5mm の範囲のデータも検討から除外している。

4.3.1 亀裂表面形状の評価

亀裂表面形状の評価には, Barton らにより定義された表面の粗さを示す JRC を用いた。JRC は値が大きくなるほど表面形状は粗くなり, JRC=20 で一般的に粗い亀裂とされている。この評価方法は表面粗さ形状を図にしたものを判断基準とし, 測定対象の表面粗さを観察者自身が判定するため, 定量的な評価とは言いにくい。そこで Tse らにより提案された不連続面の凹凸形状を特徴付ける統計学的なパラメータ Z2 と, Xianbin らにより導き出された Z2 と JRC の関係式^[13]を用いて定量的に JRC を求める。パラメータ Z2 を求める式を式(4.3.1)に, Z2 と JRC の関係式

を式(4.3.2)～(4.3.4)に示す。Z2とJRCの関係式は測定間隔Δxにより、用いる式が変わってくる。

$$Z2 = \left[\frac{1}{M-1} \sum_{i=1}^{M-1} \left(\frac{y_{i+1} - y_i}{\Delta x} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (4.3.1)$$

M : 測定点数, y_i : i番目のラフネス表面高さ, Δx : 測定間隔

$$JRC = 60.32(Z2) - 4.51 \quad (\Delta x=0.25\text{mm}) \quad (4.3.2)$$

$$JRC = 61.79(Z2) - 3.47 \quad (\Delta x=0.50\text{mm}) \quad (4.3.3)$$

$$JRC = 64.22(Z2) - 2.31 \quad (\Delta x=1.00\text{mm}) \quad (4.3.4)$$

50cm 岩体の上亀裂面及び下亀裂面のJRCを表4.3.1に示す。今回は50cm 岩体の測定間隔Δxが1mmであるため、JRCの算出には式(4.3.4)を使用した。JRCの計算方向はE-W方向(x軸方向)およびN-S方向(y軸方向)とした。表4.3.1より、上亀裂面および下亀裂面のJRCは11.9～14.5と求められた。上亀裂面、下亀裂面とも、E-W方向に比べN-S方向のJRCの値が大きい。

斜め方向を含めた亀裂表面形状の特性を、式(4.3.1)のZ2を用いて比較した。式(4.3.1)の測定間隔Δxは、E-W, N-S方向では1mm, NW-SE, NE-SW方向では√2mmと異なっている。Z2の計算結果を表4.3.2に示す。表4.3.2よりZ2の値は方向によって異なり、本試験に用いた50cm岩体の亀裂表面形状は異方性があることが分かる。また亀裂表面に小さな溝のあるNE-SW方向は、他の方向に比べ上亀裂面、下亀裂面ともZ2が小さい。この方向は他の方向に比べ、亀裂表面の粗さが小さいと思われる。

表 4.3.1 亀裂表面の粗度 JRC

		上亀裂面	下亀裂面
E-W (x 軸) 方向	↔	11.9	12.2
N-S (y 軸) 方向	↕	14.5	13.9

表 4.3.2 亀裂表面の凹凸形状パラメータ Z2

		上亀裂面	下亀裂面
E-W (x 軸) 方向	↔	0.222	0.225
N-S (y 軸) 方向	↕	0.261	0.253
NW-SE 方向	↘	0.210	0.208
NE-SW 方向	↙	0.236	0.232

4.3.2 亀裂幅の空間的相関性

亀裂幅分布の距離と方向の関係(空間的相関性)を、セミバリオグラム(semi-variogram)を使用して評価した。セミバリオグラム $\gamma(h)$ はバリオグラム $2\gamma(h)$ の1/2の値と定義されるが、どちらもバリオグラムと呼ばれることが多い。本報告では、セミバリオグラム $\gamma(h)$ を用いる。

バリオグラムは、ある点(x)とそこからhだけ離れた点(x+h)の値の差を示すベクトル関数である。同じ距離hにおいて、あらゆる方向で値が変わらない場合は等方性、方向により値が変化する場合は異方性を示している。バリオグラム $\gamma(h)$ を式(4.3.5)に示す。

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i - h)]^2 \quad (4.3.5)$$

N(h):2点間の距離がhとなるデータ組み合わせ総数

試験バリオグラムは測定データを元に、2点間の距離がh, 2h, 3h...のバリオグラム $\gamma(h)$ をそれぞれ計算し、縦軸 $\gamma(h)$ 、横軸hのグラフとして示す。バリオグラムのグラフの例を、図4.3.1に示す。バリオグラム $\gamma(h)$ の安定レベルはシル(Sill)と呼ばれ、分散に等しい値とされている。シルに達する距離h(lag distance)をレンジ(Range)と呼び、ある点(x)が影響を及ぼす範囲(影響範囲)を示す。このため、レンジの値が大きいほど高い相関性があるといえる。

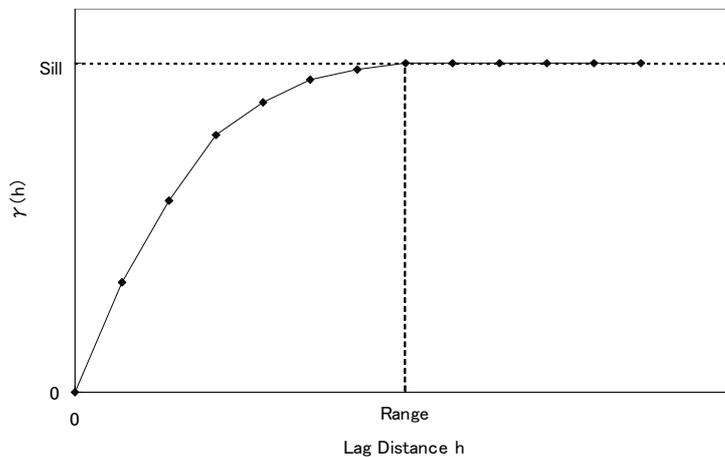


図 4.3.1 バリオグラムの例

50cm 岩体の格子状の亀裂幅データと座標データを用い、式(4.3.5)より E-W(X 軸)方向, N-S(Y 軸)方向, NW-SE 方向, NE-SW 方向についてバリオグラム $\gamma(h)$ を計算した。バリオグラムのシルとレンジは、非線形最小二乗法を用い、理論バリオグラムと試験バリオグラムのフィッティングにより求めた。代表的な理論バリオグラムモデルには、球状モデル(Spherical Model), 指数モデル(Exponential Model), ガウスモデル(Gaussian Model), パワーモデル(Power Model), ホール効果モデル(Hole effect Model)などがある。50cm 岩体の亀裂幅データは Hakami ら⁹⁾による報

告と同じく、指数モデルで良く近似することができた。指数モデルを式(4.3.6)に示す。

$$\gamma(h) = c \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{3h}{a}\right) \right] \quad (4.3.6)$$

c : シル, a : レンジ, h : データ組み合わせ 2 点間の距離

試験バリオグラムと理論バリオグラムを、方向別に図 4.3.2~図 4.3.5 に示す。また理論バリオグラムのフィッティングにより求めたシル及びレンジを、表 4.3.3 に示す。これよりシルは 0.496~0.643, レンジは 29.6~60.8 と求められた。

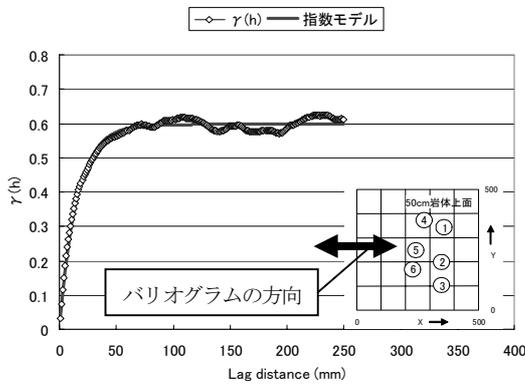


図 4.3.2 E-W(X 軸)方向のバリオグラム
(Sill : c=0.597, Range : a=46.0)

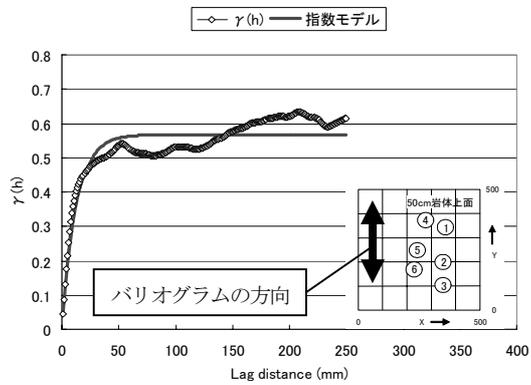


図 4.3.3 N-S(Y 軸)方向のバリオグラム
(Sill : c=0.568, Range : a=37.5)

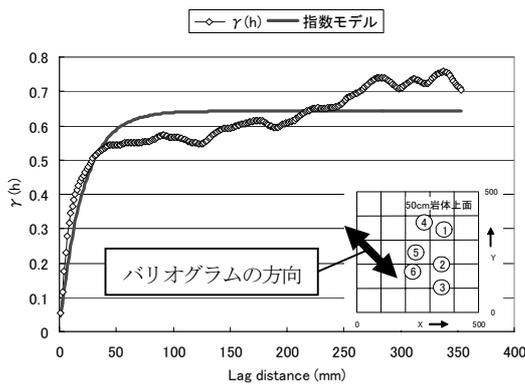


図 4.3.4 NW-SE 方向のバリオグラム
(Sill : c=0.643, Range : a=60.8)

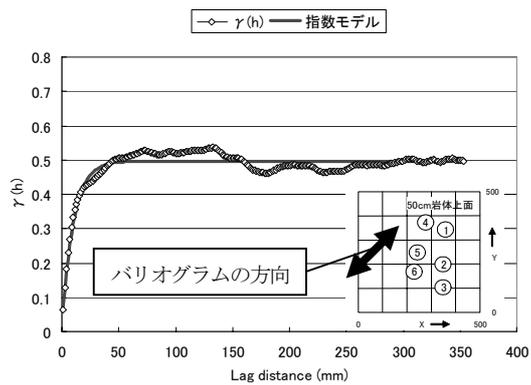


図 4.3.5 NE-SW 方向のバリオグラム
(Sill : c=0.496, Range : a=29.6)

表 4.3.3 各方向のシルとレンジ

		シル c	レンジ a(mm)
E-W(X 軸)方向	↔	0.597	46.0
N-S(Y 軸)方向	↑↓	0.568	37.5
NW-SE 方向	↙↘	0.643	60.8
NE-SW 方向	↗↖	0.496	29.6

図 4.3.2～図 4.3.5 より、本研究で使用した 50cm 岩体の亀裂幅は、同じデータの組み合わせ距離 h において方向により値が異なるため、異方性があるといえる。

表 4.3.3 より、NE-SW 方向でシル、レンジとも他の方向に比べ特に小さく、影響範囲が小さいことがわかる。また、シル、レンジとも最も大きな値を示したのは NW-SE 方向であった。この方向は、図 4.1.2 の小さな溝が存在する方向とほぼ一致する。Hakami ら¹⁰⁾の報告では、高いシルレベルの方向はせん断変位が大きい方向と一致しているとしている。このことから本研究で使用した 50cm 岩体は、小さな溝に沿った NW-SE 方向にせん断変位が発生し、NE-SW 方向に流れやすく NW-SE 方向に流れにくい透水異方性になっているものと考えられる。

4.4 トレーサー試験結果との比較

本試験で使用した 50cm 岩体は吉野ら¹⁰⁾により、岩体内部の不均質性を把握することを目的としてトレーサー試験が行われている。この報告では、図 4.4.1 の注水側ポート一箇所よりトレーサーを注入し、排水側の全ポートより排水されるトレーサーを測定し、図 4.4.2 に示す定常状態の濃度分布を得ている。これより、注水ポート 1 から排水ポート 1 にかけて卓越した流路が存在すること、注水ポート 2～4 からの流れはほぼ同じ経路を通ること、注水ポート 5 からの流れは亀裂中央付近を通過し排水ポート 5 に到達することを推定している。

研削により測定した 50cm 岩体の亀裂分布を図 4.4.3 に示す。図 4.4.3 は、亀裂幅の分布が最も多い 0mm～2mm の範囲を強調してある。図 4.4.2 と図 4.4.3 を用い、50cm 岩体亀裂を比較する。

図 4.4.2 (b) ～ (d) 注水ポート 2～4 からのトレーサーは、濃度センサー孔①、④、⑤を通過する。これは、図 4.4.3 の濃度センサー孔①、②、⑤の間に存在する亀裂幅の小さいエリアを、トレーサーが迂回しているためと考える。このため、注水ポート 2～4 のトレーサーはほぼ同じ経路を通る。また図 4.2.2 (e) 注水ポート 5 からのトレーサーは、濃度センサー②、③、⑥を通過する。そしてそのトレーサーのほとんどが、排水ポート 5 に到達する。これもまた、図 4.4.3 下部に存在する亀裂幅の小さいエリアをトレーサーが迂回していると思われる。この様に、せん断により発生したと推定する亀裂幅の小さいエリアは、亀裂内の物質の流れに強く影響すると考える。

図 4.4.2 (b) 注水ポート 2 からのトレーサーは、排水ポート 1～4 へほぼ均等に到達している。図 4.4.3 の亀裂面中央付近から左側に分布する 1～2mm 亀裂幅のエリアが、幅広く流路になっていると考える。これに対し図 4.4.2 (a) の注水ポート 1 からのトレーサーは、排水ポート 2～4 や

センサー孔④へはほとんど流れず、排水ポート1へ到達する。また図4.4.3では、亀裂面上部に卓越した流路と思われる亀裂幅の大きな箇所が見られる。これらのことより注水ポート1と排水ポート1の間は、幅10cm以下の卓越した流路であると思われる。

図4.4.2(d)注水ポート4からのトレーサーは、図4.4.1濃度センサー孔①④⑤へ、図4.4.2(e)注水ポート5からのトレーサーは図4.4.1濃度センサー孔②③⑥へ流れる。このことから、注水ポート4と注水ポート5の間から注水ポート4とセンサー孔②の間にかけて、透水性の低いエリアが連続していると推測する。しかしこの様な形状は、図4.4.3から推測することは出来なかった。また4.1節の、せん断に垂直な方向に流れやすくせん断と平行な方向に流れにくい予想とは異なっている。これらの詳細は、今後予定している亀裂内のガウジ等の介在物を考慮した亀裂部の検討により理解できるものと考ええる。

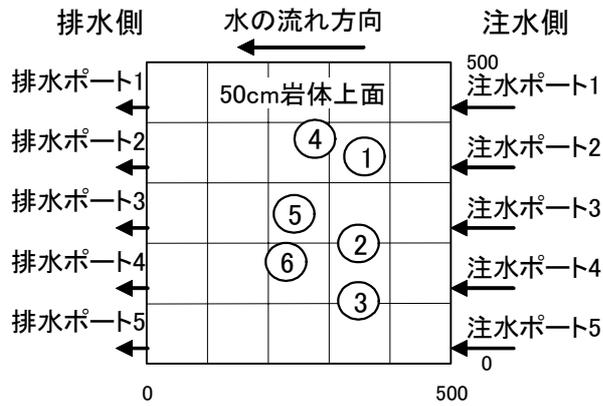


図4.4.1 トレーサー試験概略図

(①~⑥は濃度センサー孔)

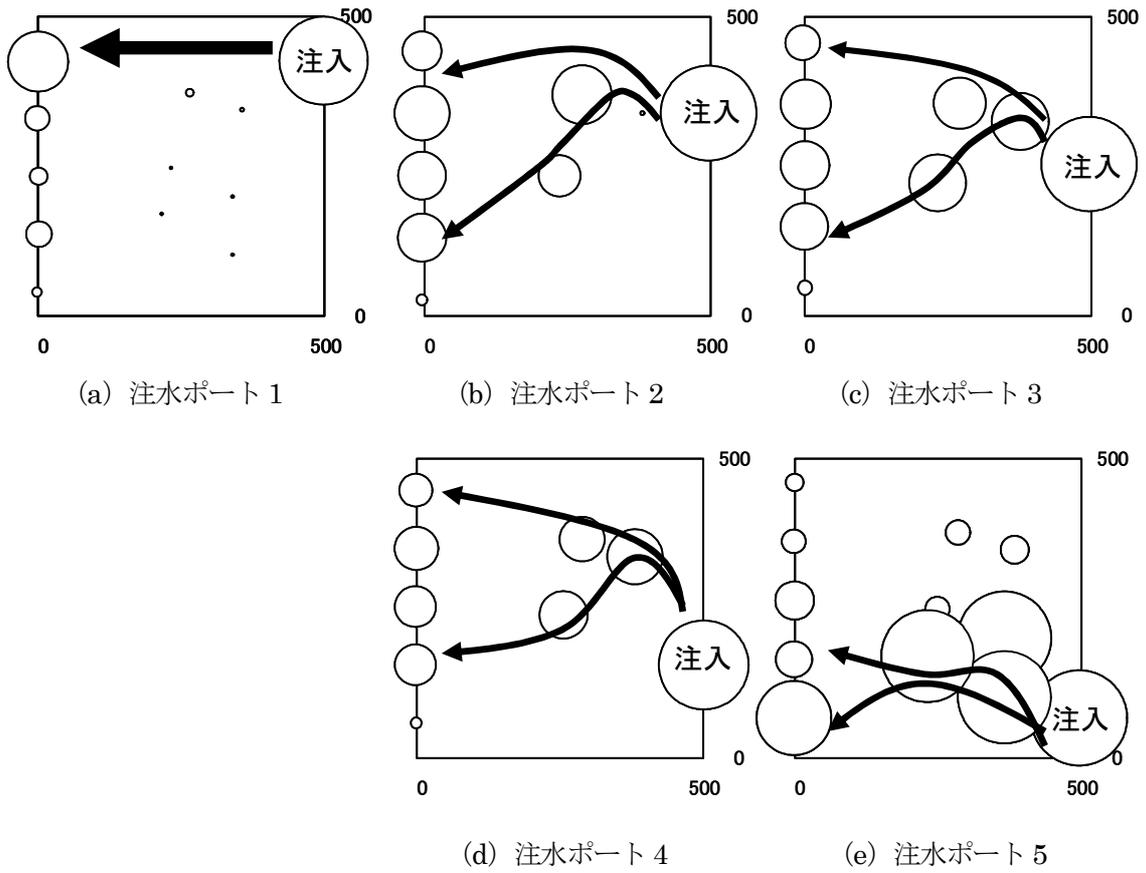


図 4.4.2 トレーサー試験における定常状態の濃度分布
 (吉野ら^[4]より引用, 丸の直径はトレーサーの濃度, 矢印は主要な流路の流れイメージ図)

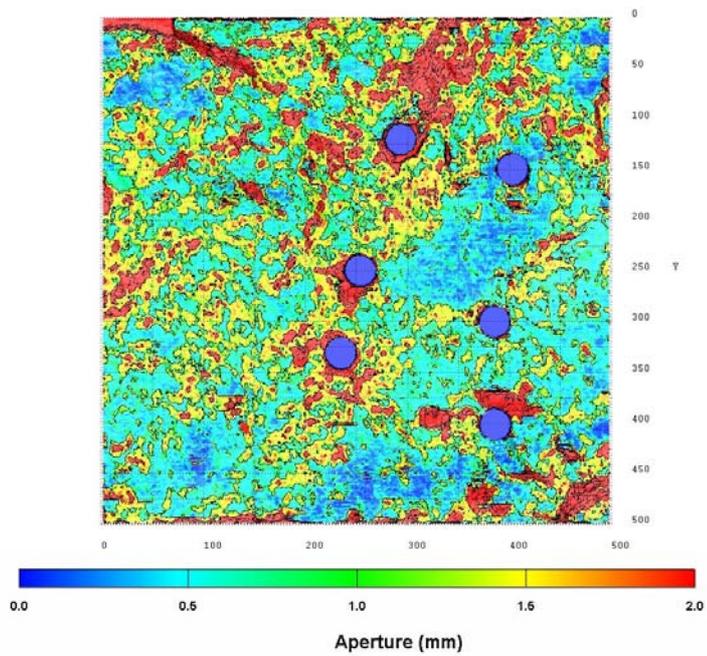


図 4.4.3 50cm 岩体亀裂幅分布図

5. まとめ

岩体試料平面研削装置, 撮影装置を用いて 50cm 岩体 500 断面(0mm~499mm)の亀裂開口部デジタル画像データを取得し, これより天然亀裂内の複雑な亀裂形状を観察することが出来た。

取得したデジタル画像データより, 500 断面の亀裂開口幅及び亀裂中点座標データ, 亀裂表面形状を抽出した。このデータから 50cm 岩体の亀裂開口幅は 1mm 付近にピークを持つ対数正規分布に近い傾向を示した。JRC およびバリオグラムを用いて亀裂表面形状と亀裂幅の異方性を確認し, 亀裂表面の条線と思われる小さな溝の方向が亀裂の閉塞箇所や透水異方性に影響すると推測した。また, 今回測定した亀裂幅分布と吉野らが行ったトレーサー試験^{[3][4]}による定常濃度分布より, 亀裂形状を概略的に評価し, 亀裂幅の小さな箇所や透水異方性, 物質の移行経路を推定することが出来た。

測定した亀裂部は, レジンの充填されていない箇所, ガウジや砂などの介在物, 亀裂の分岐, センサー孔による欠損等が多数存在することから, 今後はガウジなどの介在物を考慮した亀裂部の検討を行うとともに, 不均質に分布する亀裂の開口幅が透水量係数などの亀裂の平均的な特性に与える影響を検討していく予定である。

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次取りまとめ—分冊3 地層処分システムの安全評価, JNC TN1400 99-023, V54-V74, (1999)
- [2]吉野尚人,内田雅大：“亀裂媒体水理試験設備(LABROCK)用試験岩体の切り出し・整形”, サイクル機構技術資料,JNC TN8410 2001-015,(2001)
- [3]吉野尚人,佐藤久：“亀裂状媒体水理試験設備(LABROCK)による透水・トレーサー試験—2001年度までの成果—”, サイクル機構技術資料,JNC TN8400 2002-001,(2002)
- [4]吉野尚人,佐藤久,内田雅大：“亀裂状媒体水理試験設備(LABROCK)による天然亀裂内の透水・物質移行特性評価”, サイクル機構技報,No18 2003.3,pp.51-58,(2003)
- [5]鐵桂一,澤田淳：“高粘性流体を用いた天然亀裂岩体の透水試験—NETBLOCK 試験報告—”, サイクル機構技術資料,JNC TN8430 2001-006,(2001)
- [6]鐵桂一,澤田淳：“高粘性流体を用いた天然亀裂岩体の透水試験 2—NETBLOCK 試験報告—”, サイクル機構技術資料,JNC TN8430 2003-004,(2003)
- [7]鐵桂一,澤田淳：“研削した岩体亀裂開口部の観察による開口幅の測定 —NETBLOCK 試験報告—”, サイクル機構技術資料,JNC TN8430 2005-001,(2005)
- [8]鐵桂一, 澤田淳, 内田雅大：“研削による岩体亀裂開口部の測定”, 第 59 回年次学術講演会講演概要集, CS1-013, pp.25-26
- [9]EVA HAKAMI,ERIK LARSSON：“Aperture Measurements and Flow Experiments on a Single Natural Fracture”, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, Vor33, No.4, pp.395-404, (1996)
- [10]赤堀邦晃,内田雅大：“エポキシ樹脂注入による亀裂開口幅の測定について”, 動燃技術資料,PNC TN8410 97-004,(1997)
- [11]小山倫史,Lanru Jing,大西有三：“岩盤不連続面のせん断時における透水性および物質移行に関する研究”,第 37 回岩盤力学に関するシンポジウム公演集,pp.269-274,(2008)
- [12]N.Barton,V.Choubey：“The Shear Strength of Rock Joints in Theory and Practice”,Rock Mechanics, Vol.10, pp.1-54, (1977)
- [13]XIANBIN YU,B.VAYSSADE：“Technical Note Joint Profiles and their Roughness Parameters”,Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. Vol.28, No.4, pp.333-336,(1991)
- [14]Clayton V. Deutsch, Andre G. Journel：“GSLIB: Geostatistical Software Library and User's Guide SECOND EDITION”, OXFORD UNIVERSITY PRESS,(1998)

付録

添付の CD-ROM に、50cm 岩体の亀裂幅データ、亀裂中点座標データ及び、これらのデータより算出した亀裂表面形状を収録した。データの詳細及び各ファイル名を以下に示す。

測定単位：mm

測定間隔：1mm

測定範囲：x 軸方向 1~507mm, y 軸方向 0~499mm

保存形式：xls (Microsoft® Excel 形式), csv (カンマ区切りのデータ),
txt (タブ区切りのテキストファイル)

フォルダ名：亀裂表面形状データ

L50cm 岩体 0-499 亀裂表面形状データ.xls

亀裂表面形状_下亀裂面.csv

亀裂表面形状_下亀裂面.txt

亀裂表面形状_上亀裂面.csv

亀裂表面形状_上亀裂面.txt

フォルダ名：亀裂幅_中点座標データ

L50cm 岩体 0-499 亀裂幅_中点座標データ.xls

亀裂幅.csv

亀裂幅.txt

中点座標.csv

中点座標.txt

国際単位系 (SI)

表1. SI 基本単位

基本量	SI 基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 基本単位		記号
	名称	記号	
面積	平方メートル	m ²	m ²
体積	立方メートル	m ³	m ³
速度	メートル毎秒	m/s	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s ²	m/s ²
波数	毎メートル	m ⁻¹	m ⁻¹
密度 (質量密度)	キログラム毎立方メートル	kg/m ³	kg/m ³
質量体積 (比体積)	立法メートル毎キログラム	m ³ /kg	m ³ /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m ²	A/m ²
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m	A/m
(物質質量の)濃度	モル毎立方メートル	mol/m ³	mol/m ³
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m ²	cd/m ²
屈折率	(数の) 1	1	1

表5. SI 接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10 ²⁴	ヨタ	Y	10 ⁻¹	デシ	d
10 ²¹	ゼタ	Z	10 ⁻²	センチ	c
10 ¹⁸	エクサ	E	10 ⁻³	ミリ	m
10 ¹⁵	ペタ	P	10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ¹²	テラ	T	10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁹	ギガ	G	10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁶	メガ	M	10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ³	キロ	k	10 ⁻¹⁸	アト	a
10 ²	ヘクト	h	10 ⁻²¹	ゼプト	z
10 ¹	デカ	da	10 ⁻²⁴	ヨクト	y

表3. 固有の名称とその独自の記号で表されるSI組立単位

組立量	SI 組立単位			
	名称	記号	他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン ^(a)	rad		m・m ⁻¹ =1 ^(b)
立体角	ステラジアン ^(a)	sr ^(c)		m ² ・m ⁻² =1 ^(b)
周波数	ヘルツ	Hz		s ⁻¹
力	ニュートン	N		m・kg・s ⁻²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²	m ⁻¹ ・kg・s ⁻²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N・m	m ² ・kg・s ⁻²
工率, 放射束	ワット	W	J/s	m ² ・kg・s ⁻³
電荷, 電気量	クーロン	C		s・A
電位差 (電圧), 起電力	ボルト	V	W/A	m ² ・kg・s ⁻³ ・A ⁻¹
静電容量	ファラド	F	C/V	m ⁻² ・kg ⁻¹ ・s ⁴ ・A ²
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻³ ・A ⁻²
コンダクタンス	ジーメン	S	A/V	m ⁻² ・kg ⁻¹ ・s ³ ・A ²
磁束	ウェーバ	Wb	V・s	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻² ・A ⁻¹
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²	kg ⁻¹ ・s ⁻² ・A ⁻¹
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻² ・A ⁻²
セルシウス温度	セルシウス度 ^(d)			K
光照射 (放射性核種の)放射能	ルーメン	lm	cd・sr ^(c)	m ² ・m ⁻² ・cd=cd
吸収線量, 質量エネルギー当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量, 組織線量当量	グレイ	Gy	lm/m ²	m ² ・m ⁻⁴ ・cd=m ⁻² ・cd
	シーベルト	Sv	J/kg	s ⁻¹
			J/kg	m ² ・s ⁻²

- (a) ラジアン及びステラジアンの使用は、同じ次元であっても異なった性質をもった量を区別するときの組立単位の表し方として利点がある。組立単位を形作るときにいくつかの用例は表4に示されている。
 (b) 実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号“1”は明示されない。
 (c) 測光学では、ステラジアンの名称と記号srを単位の表し方の中にそのまま維持している。
 (d) この単位は、例としてミリセルシウス度mのようにSI接頭語を併せて用いても良い。

表4. 単位の中に固有の名称とその独自の記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	SI 基本単位による表し方
粘力のモーメント	パスカル秒	Pa・s	m ⁻¹ ・kg・s ⁻¹
表面張力	ニュートンメートル	N・m	m ² ・kg・s ⁻²
角速度	ニュートン毎メートル	N/m	kg・s ⁻²
角加速度	ラジアン毎秒	rad/s	m・m ⁻¹ ・s ⁻¹ =s ⁻¹
熱流密度, 放射照度	ラジアン毎平方秒	rad/s ²	m ² ・m ⁻¹ ・s ⁻² =s ⁻²
熱容量, エントロピー	ワット毎平方メートル	W/m ²	kg・s ⁻³
質量熱容量 (比熱容量), 質量エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m ² ・kg・s ⁻² ・K ⁻¹
質量エネルギー (比エネルギー)	ジュール毎キログラム	J/(kg・K)	m ² ・s ⁻² ・K ⁻¹
熱伝導率	ジュール毎メートル毎ケルビン	J/(m・K)	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻³ ・K ⁻¹
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ ・kg・s ⁻²
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻³ ・A ⁻¹
体積電荷	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ ・s・A
電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² ・s・A
誘電率	ファラド毎メートル	F/m	m ⁻³ ・kg ⁻¹ ・s ⁴ ・A ²
透磁率	ヘンリー毎メートル	H/m	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻² ・A ⁻²
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻² ・mol ⁻¹
モルエントロピー	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol・K)	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻² ・K ⁻¹ ・mol ⁻¹
モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol・K)	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻² ・K ⁻¹ ・mol ⁻¹
照射線量 (X線及び線)	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ ・s・A
吸収線量	グレイ毎秒	Gy/s	m ² ・s ⁻³
放射強度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m ⁴ ・m ⁻² ・kg ⁻¹ ・s ⁻³ =m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻³
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m ² ・sr)	m ² ・m ⁻² ・kg ⁻¹ ・s ⁻³ =kg ⁻¹ ・s ⁻³

表6. 国際単位系と併用されるが国際単位系に属さない単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1 h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86400 s
度	°	1 °=(/180) rad
分	'	1'=(1/60) °=(/10800) rad
秒	"	1"=(1/60)'=(/648000) rad
リットル	l, L	1 l=1 dm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1 t=10 ³ kg
ネーパ	Np	1 Np=1
ベル	B	1 B=(1/2) ln10(Np)

表7. 国際単位系と併用されこれに属さない単位でSI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
電子ボルト	eV	1 eV=1.60217733(49) × 10 ⁻¹⁹ J
統一原子質量単位	u	1 u=1.6605402(10) × 10 ⁻²⁷ kg
天文単位	ua	1 ua=1.49597870691(30) × 10 ¹¹ m

表8. 国際単位系に属さないが国際単位系と併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
海里		1 海里=1852m
ノット		1 ノット=1 海里毎時=(1852/3600)m/s
アール	a	1 a=1 dam ² =10 ² m ²
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²
バール	bar	1 bar=0.1MPa=100kPa=1000hPa=10 ⁵ Pa
オングストローム		1 Å=0.1nm=10 ⁻¹⁰ m
バール	b	1 b=100fm ² =10 ⁻²⁸ m ²

表9. 固有の名称を含むCGS組立単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
エルグ	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N
ポアズ	P	1 P=1 dyn・s/cm ² =0.1Pa・s
ストークス	St	1 St=1cm ² /s=10 ⁻⁴ m ² /s
ガウス	G	1 G ≡ 10 ⁴ T
エルステッド	Oe	1 Oe ≡ (1000/4π) A/m
マクスウェル	Mx	1 Mx ≡ 10 ⁻⁸ Wb
スチルブ	sb	1 sb=1cd/cm ² =10 ⁴ cd/m ²
ホト	ph	1 ph=10 ⁴ lx
ガリ	Gal	1 Gal=1cm/s ² =10 ⁻² m/s ²

表10. 国際単位に属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
キュリー	Ci	1 Ci=3.7 × 10 ¹⁰ Bq
レントゲン	R	1 R=2.58 × 10 ⁻⁴ C/kg
ラド	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
X線単位	X unit	1 X unit=1.002 × 10 ⁻⁴ nm
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 ⁻⁹ T
ジャンスキー	Jy	1 Jy=10 ⁻²⁶ W・m ⁻² ・Hz ⁻¹
フェルミ	f	1 fermi=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット		1 metric carat=200 mg=2 × 10 ⁻⁴ kg
トル	Torr	1 Torr=(101325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm=101325 Pa
カロリー	cal	1 cal=4.184 J
マイクロン	μ	1 μ=1 μm=10 ⁻⁶ m

