



JAEA-Research

2007-006



JP0750246

光学的手法を用いた亀裂開口幅測定及び 亀裂内濃度分布測定手法の開発

Development of Measurement System of Aperture and Tracer Concentration
Distribution in a Single Fracture by Optical Visualization Method

佐藤 久 肖俊 澤田淳

Hisashi SATO, Jun XIAO 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

March 2007

日本原子力研究開発機構

JAERI-Research

本レポートは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/index.shtml>)
より発信されています。このほか財団法人原子力弘済会資料センター*では実費による複写頒布を行つております。

〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4
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
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920

* 〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4 日本原子力研究開発機構内

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

光学的手法を用いた亀裂開口幅測定及び亀裂内濃度分布測定手法の開発

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

佐藤 久※1、 肖 俊※2、 澤田 淳

(2007年1月15日受理)

亀裂内の透水・物質移行特性は、亀裂内の不均質な開口幅分布に強く影響を受けることから、その影響を検討するためには、亀裂開口幅分布を詳細に測定する必要がある。

亀裂開口幅の測定手法には、亀裂表面形状から推定する方法、亀裂面の切断もしくは研磨を行い、亀裂を直接観察する方法及びCTなどの非破壊手法があり、それぞれに利点、欠点がある。光学的手法は、測定解像度が高い、亀裂内のトレーサー移行を観察できる等の利点があることから、光学的手法による亀裂開口幅及び亀裂内のトレーサー濃度の測定装置を開発し、人工割裂亀裂を型として作製した透明レプリカ試験体を対象に、開口幅測定及び亀裂内トレーサー濃度分布の測定を行った。また、得られた亀裂開口幅の測定精度を検証するために、接触式三次元測定機を用いた亀裂表面形状データから求めた亀裂開口幅分布や、亀裂内体積測定から求めた平均開口幅との比較検討を行った。その結果、光学的手法により得られた開口幅は、亀裂表面形状データから求めた開口幅分布と同様の開口幅分布であり、亀裂内体積測定から求めた平均開口幅とほぼ等しい値となったことから、光学的手法による亀裂開口幅測定の有効性を確認できた。また、亀裂内のトレーサー濃度分布も亀裂開口幅分布の不均質性による影響を除去した濃度分布を取得できることが確認できた。

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村松 4-33

※1 技術開発協力員

※2 博士研究員

Development of Measurement System of Aperture and Tracer Concentration Distribution
in a Single Fracture by Optical Visualization Method

Hisashi SATO^{*1}, Jun XIAO^{*2} and Atsushi SAWADA

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

(Received January 15, 2007)

It is important to investigate fracture aperture distribution in order to study the influences of heterogeneous aperture distribution onto the fracture hydraulic and mass transport properties. There are any methods to measure fracture aperture distribution, such as an estimating method by measuring both fracture surface shape, a direct measuring method with cutting or grinding of rock sample at the direction perpendicular to the fracture, and nondestructive method such as CT. Each method has its own advantages and/or disadvantages, respectively. An optical method has an advantage that measurement resolution is high and tracer movement can be observed. We have developed aperture measurement and tracer movement measuring system by optical method, and have made transparent replica which model of artificial fracture, and measured aperture distribution and tracer concentration distribution. As a result, aperture distribution measured by this method was similar to the aperture distribution measured from fracture surface shape data, and average aperture measured from volume in a fracture was approximately equal to the value, measured by the optical method, and was able to confirm the effectiveness of aperture measurement. In addition, the optical method could acquire the tracer concentration distribution which was not disturbed by the influence of heterogeneous aperture distribution.

Keywords: Optical Visualization, Aperture, Tracer Concentration, Fracture,
Transparent Replica

^{*1} Cooperative Staff

^{*2} Post-Doctoral Fellow

目次

1.はじめに	1
2.画像可視化試験	2
2.1 透明レプリカ試験体の作製	2
2.1.1 シリコン型の作製	2
2.1.2 透明レプリカの作製	2
2.1.3 透明レプリカの整形、研磨、組み立て	2
2.2 画像可視化法による開口幅及び染料濃度の算出	9
2.2.1 楔状亀裂を用いた開口幅キャリブレーション	9
2.2.2 開口幅の算出	10
2.2.3 濃度データの算出	12
2.3 撮影装置	14
2.4 試験方法	14
2.4.1 画像可視化法による開口幅測定	14
2.4.2 トレーサー移行状況撮影	14
3.試験結果	19
3.1 開口幅測定	19
3.1.1 �edge状亀裂キャリブレーション	19
3.1.2 レプリカ試験体開口幅測定	19
3.2 画像可視化法による開口幅分布の測定精度検証	31
3.2.1 亀裂表面形状測定による亀裂開口幅測定	31
3.2.2 亀裂内体積測定による平均開口幅測定	31
3.2.3 開口幅比較結果	33
3.3 染料濃度データへの変換	40
3.3.1 染料濃度分布	40
3.3.2 ブレークスルーカーブ	40
3.4 エポキシ製試験体が透水及び可視化に与える影響の検討	46
3.4.1 エポキシ樹脂製平板試験体の作製	46
3.4.2 エポキシ樹脂製平行平板を用いた透水試験	46
3.4.3 ガラス及びエポキシ製楔状亀裂を用いたキャリブレーション係数の比較	48
4.まとめ	51
参考文献	52
付録	53

Contents

1 . Introduction	1
2 . Optical visualization method	2
2.1 Preparation of transparent replica specimen	2
2.1.1 Preparation of silicon rubber mould	2
2.1.2 Preparation of transparent replica	2
2.1.3 Trim, grind, assemble of transparent replica	2
2.2 Aperture and dye concentration measurement by optical visualization method	9
2.2.1 Aperture calibration using wedge shape fracture specimen	9
2.2.2 Calculation of aperture	10
2.2.3 Calculation of concentration	12
2.3 Photograph system	14
2.4 Examination procedure	14
2.4.1 Aperture measurement by optical visualization method	14
2.4.2 Tracer movement photography	14
3 . Experimental results	19
3.1 Aperture measurement	19
3.1.1 Aperture calibration	19
3.1.2 Aperture measurement of transparent replica	19
3.2 Inspection of precision of measurement of aperture distribution by optical visualization method	31
3.2.1 Aperture measurement by fracture surface shape measurement	31
3.2.2 Aperture measurement by measurement of fracture volume	31
3.2.3 Comparison measurements of aperture	33
3.3 Conversion to dye concentration data	40
3.3.1 Dye concentration distribution	40
3.3.2 Breakthrough curve	40
3.4 Influence of epoxy specimen in this examination system	46
3.4.1 Preparation of flat epoxy specimen	46
3.4.2 Permeability test using parallel epoxy plate	46
3.4.3 Comparison of calibration coefficient using wedge shape fracture made of glass and epoxy resin	48
4 . Conclusion	51
References	52
Appendix	53

図目次

2. 画像可視化試験

図 2.1 人工割裂亀裂	3
図 2.2 シリコン反転型	3
図 2.3 レプリカ試験体	5
図 2.4 レプリカ試験体（重ね合わせ）	5
図 2.5 レプリカ試験体（組み立て後）	7
図 2.6 楔状亀裂試験体概略	11
図 2.7 撮影装置概要	15
図 2.8 染料トレーサー注入方法概要	17

3. 試験結果

図 3.1 楔状亀裂試験体（亀裂内染料）	21
図 3.2 楔状亀裂透過光強度（亀裂内水）	23
図 3.3 楔状亀裂透過光強度（亀裂内染料）	23
図 3.4 楔状亀裂試験体透過光比率分布	24
図 3.5 楔状亀裂試験体の透過光比率と開口幅の関係	25
図 3.6 楔状亀裂試験体の透過光比率と開口幅の関係（透過光比率対数）	25
図 3.7 レプリカ試験体透過光強度（亀裂内水）	27
図 3.8 レプリカ試験体透過光強度（亀裂内染料）	27
図 3.9 レプリカ試験体透過光比率	29
図 3.10 レプリカ試験体開口幅	29
図 3.11 亀裂表面形状からの開口幅の算出方法	32
図 3.12 亀裂下面形状	35
図 3.13 亀裂上面形状	35
図 3.14 亀裂表面形状から求めた開口幅分布	35
図 3.15 開口幅分布比較	37
図 3.16 開口幅分布比較（0.07mm シフト）	37
図 3.17 接触式三次元測定機で生じる測定誤差	39
図 3.18 トレーサー移行状況	41
図 3.19 トレーサー移行状況（濃度変換後）	43
図 3.20 ブレークスルーカーブ	45
図 3.21 エポキシ製平行平板透水試験結果	47
図 3.22 キャリブレーション係数比較	49

This is a blank page.

1. はじめに

高レベル放射性廃棄物の地層処分の安全評価に際しては、深部地質環境における地下水流动特性や核種移行特性を適切に評価する必要がある。特に、花崗岩などの結晶質岩においては地下水は主に断層や亀裂中を流れると考えられる。これらの亀裂は第2次取りまとめのレファレンスケースモデルとしても採用されたように、平行平板でモデル化されるのが一般的である。その一方で、実際の亀裂の表面形状は複雑でそれに伴い地下水流动に寄与する開口部は不均質に分布しており、亀裂の水理物質移行特性に大きな影響を与えると考えられる。しかしながら、亀裂中を不均質に分布する亀裂の開口幅が亀裂の水理物質移行特性に与える影響について十分に理解されておらず、物質移行に寄与する亀裂開口幅の設定などその不確実性は大きいのが現状である。それらの原因のひとつとしては、亀裂開口幅分布、亀裂中の地下水流速分布やトレーサー移行の様子などの定量的な測定が困難であることが考えられる。

亀裂開口幅の測定手法には亀裂表面形状から推定する方法¹⁾、亀裂面の切断もしくは研磨を行い亀裂断面を直接観察する方法²⁾³⁾及びX線CT(Computed Tomography)等の非破壊手法⁴⁾⁵⁾⁶⁾などがある。亀裂表面形状から推定する方法は亀裂面を重ね合わせるため、亀裂面の重ね合わせ時に上下面の座標のずれによる誤差が生じる可能性がある。また、亀裂を直接観察する方法は、開口幅の測定精度が最も高いと考えられるが、高解像度のデータを得るために測定に時間が掛かること、測定により試験体が無くなる等の問題点がある。また、X線CTなどの非破壊手法は対象となる試料の大きさと開口幅に比べて測定解像度が低く、定量的な測定には向きである。亀裂内の物質移行特性を評価する方法としては、トレーサー試験があるが、一般にトレーサー試験は亀裂に入力するトレーサー濃度や、亀裂を破過してきたトレーサー濃度測定により、亀裂面全体の平均的なデータを得ることはできるが、亀裂内部のトレーサー濃度分布の経時変化の測定はできない。X線CTなどの非破壊測定法を使用すれば、亀裂内の物質移行を直接観察することも可能であると考えられるが、時間、空間的な測定解像度が低いことが課題となる。一方これらの岩体試料を直接用いた方法とは異なる測定法として、透明な試料を用いて光学的に亀裂内の測定を行う方法⁷⁾⁸⁾がある。透明な材料により作製した岩石試料のレプリカと染料を用いて亀裂内部を可視化することにより、亀裂開口幅の測定及び亀裂内のトレーサー移行を観察することができる。

光学的手法は、単一亀裂にしか適用できない、ガウジ等の亀裂充填物がある亀裂には適用できない等の欠点もあるが、得られるデータの解像度が高い(100mm×100mmの試験体を1000×1000ピクセルで撮影した場合、0.1mmピッチで開口幅を測定することが可能)、得られる開口幅の分解能が高い(12bitのCCDカメラを用いた場合開口幅を最大4096階調で表現することが可能)等の利点がある。

そこで本論では、亀裂開口幅を測定すると同時に、亀裂内のトレーサー移行の様子を定量的に計測する手法の開発を目的として、光学的手法による亀裂開口幅及び亀裂内のトレーサー濃度の測定装置を開発し、人工割裂亀裂を型として作製した透明レプリカ試験体を対象に、開口幅測定及び亀裂内トレーサー濃度分布の測定(以下では画像可視化法と呼ぶ)を行い、他の開口幅測定手法(亀裂表面形状から推定する方法、亀裂内体積測定から求めた平均開口幅)と比較することにより、画像可視化法による亀裂開口幅の測定精度の検討を行った結果について報告する。

2. 画像可視化試験

2.1 透明レプリカ試験体の作製

画像可視化法で用いる透明なレプリカ試験体は、人工割裂亀裂（稻田花崗岩）を型として作製した。透明レプリカ試験体の作製方法を次に示す。

2.1.1 シリコン型の作製

原型となる 100mm×100mm の人工割裂亀裂（図 2.1）から型取用のシリコンゴム（信越化学工業㈱KE12）を用いて、亀裂の反転型（メス型）（図 2.2）を作製する。作製手順は以下のとおりである。

- ・シリコンゴムに硬化剤を混ぜ、エア抜きのために真空引きを行う。
- ・型枠に試験体を設置し、シリコンゴムを注入し硬化させる（常温 8 時間以上）。
- ・型枠から試験体を取り外す。
- ・シリコン型を洗浄し乾燥させる。

2.1.2 透明レプリカの作製

透明レプリカ試験体はシリコン型に透明エポキシ樹脂（日新レジン㈱クリスタルレジンⅡ）を注入し作製する。作製手順は以下のとおりである。

- ・シリコン型に離型剤（フッ素系）を満遍なく吹き付ける。
- ・透明エポキシ樹脂の主剤と硬化剤を混合し、エア抜きのために真空引きを行う。
- ・亀裂の反転型に透明エポキシ樹脂を注入し硬化させる（常温 48 時間以上）。
- ・シリコン型から固化した透明エポキシ樹脂を慎重に取り外す。
- ・エポキシ樹脂に付着した離型剤等を除去するために、レプリカ試験体を洗浄し乾燥させる。

2.1.3 透明レプリカの整形、研磨、組み立て

レプリカ試験体の亀裂と反対の面を耐水研磨紙及び研磨剤を用いて鏡面になるまで研磨を行う。研磨が終了した後（図 2.3）、亀裂を重ね合わせて、側面を研磨する（図 2.4）。研磨が終了した後に、注排水用の当て板、配管を接続する（図 2.5）。

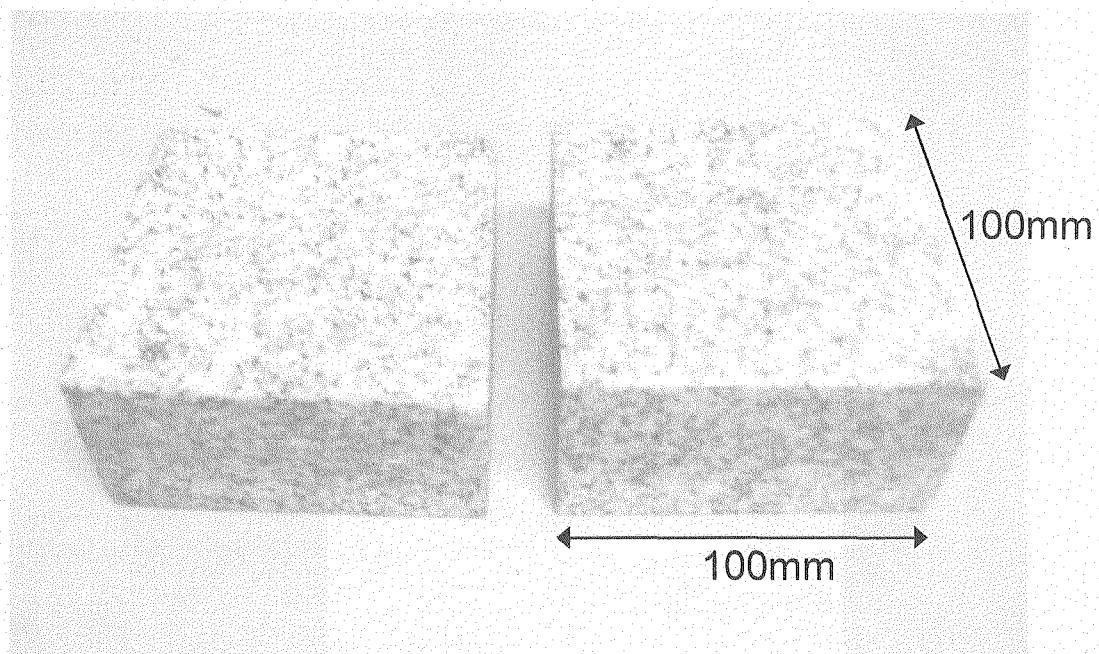


図2.1 人工割裂亀裂

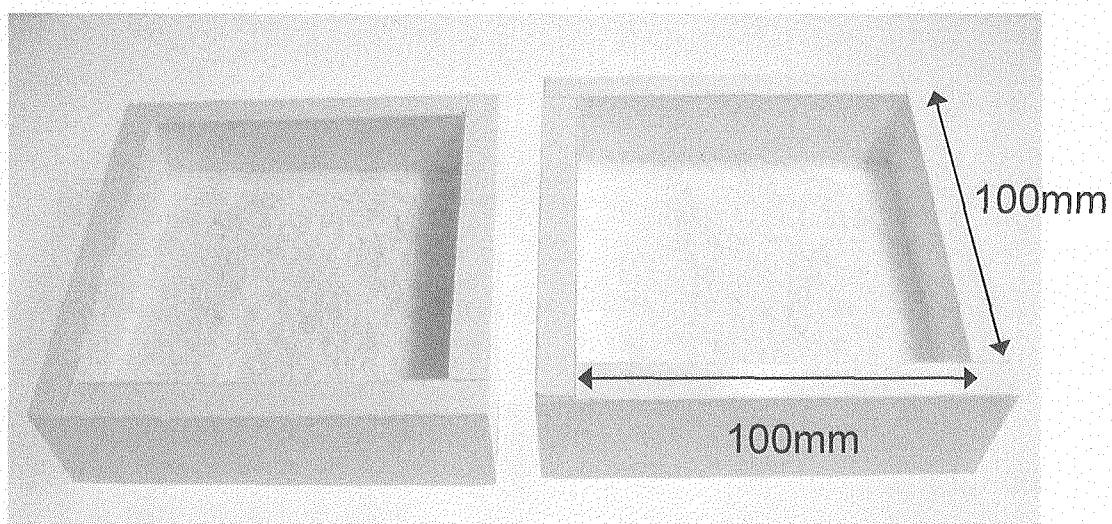


図2.2 シリコン反転型

This is a blank page.

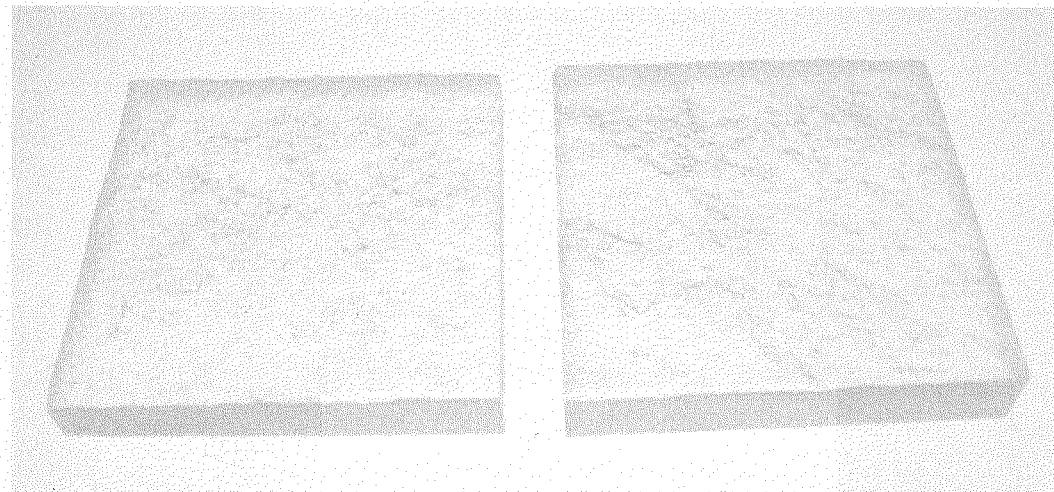


図2.3 レプリカ試験体

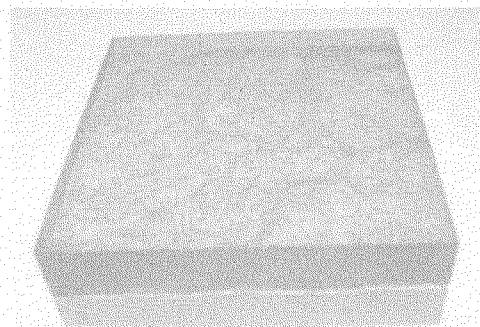


図2.4 レプリカ試験体(重ね合わせ)

This is a blank page.

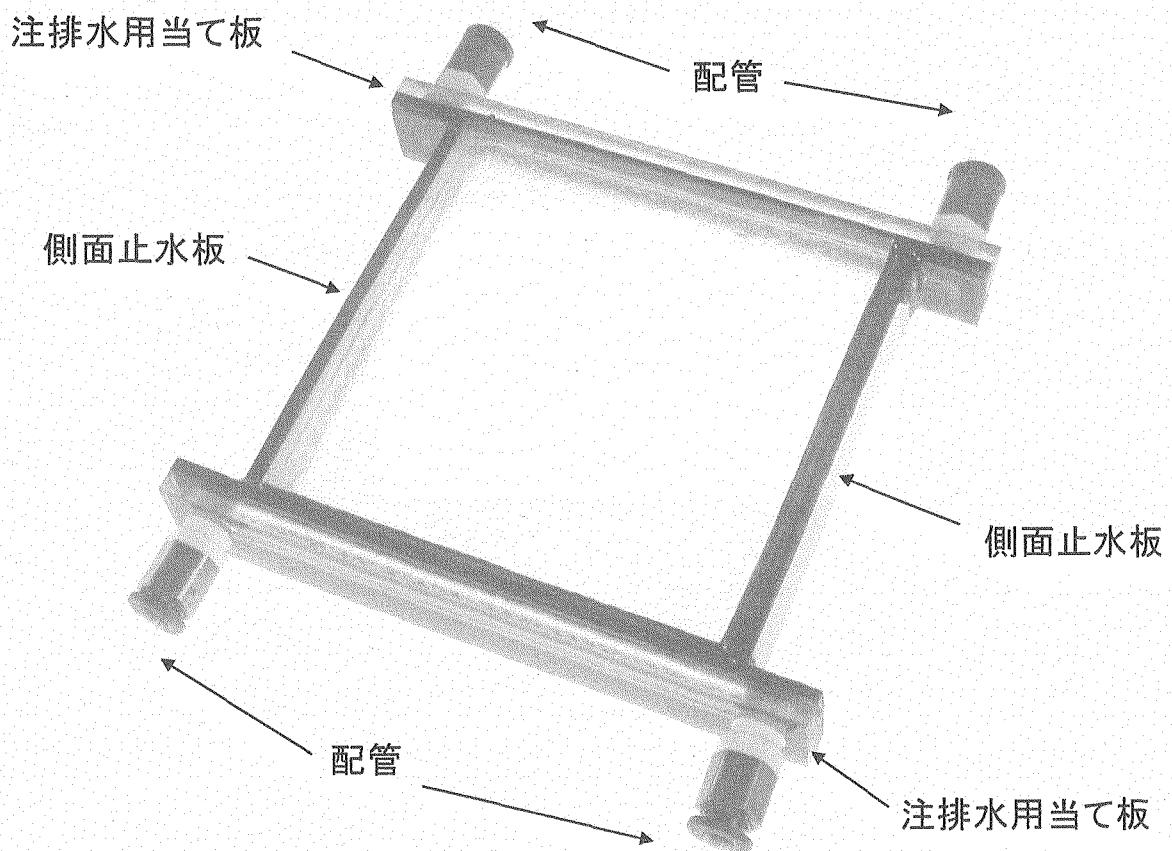


図2.5 レプリカ試験体(組み立て後)

This is a blank page.

2.2 画像可視化法による開口幅及び染料濃度の算出

2.2.1 楔状亀裂を用いた開口幅キャリブレーション

透過光強度と染料の濃度、液層の厚さの関係を示す Lambert-Beer の法則は次式で表される。

$$I = I_0 e^{-\varepsilon_d \cdot c_d \cdot b} \quad (1)$$

I_0 : 入射光強度 I : 透過光強度 ε_d : 染料の吸光係数 b : 開口幅 (液層の厚さ)

c_d : 染料濃度

図 2.6 に楔状亀裂試験体の概要を示す。ガラス製の楔状亀裂試験体を用いた開口幅と透過光強度の関係は、以下のとおりである。

亀裂内が水の場合の透過光強度 I_{waterW} はガラスによる吸光と水による吸光の影響を受けたため以下の式となる。

$$I_{waterW} = I_0 (e^{-\varepsilon_g \cdot b_g}) \cdot (e^{-\varepsilon_w \cdot b}) \quad (2)$$

b_g : 試験体 (ガラス) の厚さ ε_g : ガラスの吸光係数 ε_w : 水の吸光係数

亀裂内が濃度 c_d の染料の場合、ガラスによる吸光、水による吸光、染料による吸光の影響を受けるため、ガラス製試験体内が染料の場合の透過光強度 I_{dyeW} は以下の式となる。

$$I_{dyeW} = I_0 (e^{-\varepsilon_g \cdot b_g}) \cdot (e^{-\varepsilon_w \cdot b}) \cdot (e^{-\varepsilon_d \cdot c_d \cdot b}) \quad (3)$$

式(2)、式(3)より

$$I_{dyeW} = I_{waterW} e^{-\varepsilon_d \cdot c_d \cdot b} \quad (4)$$

亀裂内が水と亀裂内が染料の透過光強度の関係は、試験体 (ガラス) 及び溶媒 (水) の吸光に関するパラメーターの影響を無視した、開口幅と染料濃度に関するパラメーターの式で表すことができる。

式中の ε_d は定数、 c_d は一定であることから、 $\varepsilon_d \cdot c_d$ をキャリブレーション係数 a とすると次式のようになる。

$$I_{dyeW} = I_{waterW} e^{-a \cdot b} \quad (5)$$

式(5)を変形すると、式(6)となる。

$$\frac{I_{dyeW}}{I_{waterW}} = e^{-a \cdot b} \quad (6)$$

ここで、 $\frac{I_{dyeW}}{I_{waterW}}$ は亀裂内が水の透過光強度に対する亀裂内が染料の透過光強度の比率（透過光比率）であり、 T とすると次式のようになる。

$$T = e^{-a \cdot b} \quad (7)$$

両辺の対数をとると次式となる。

$$\ln T = (-a) \cdot b \quad (8)$$

式(8)より、開口幅 b と透過光比率 T の対数の関係は、傾きが(-a)の直線関係となることが分かる。

この関係式から、開口幅が連続的に変化するガラス製楔状亀裂試験体を用いて、開口幅と透過光比率 T の関係からキャリブレーション係数 a を求める。

2.2.2 開口幅の算出

式(4)より透過光比率は試験体の厚さ及び吸光係数の影響を受けないことから、同濃度の染料であれば試験体の材質に係わらず、透過光比率が等しければ開口幅も等しくなる。このことから、エポキシ樹脂製のレプリカ試験体においても、ガラス製楔状亀裂試験体により求めたキャリブレーション係数 a を用いて、式(9)により開口幅を求めることができる。

$$b = -\frac{\ln T}{a} \quad (9)$$

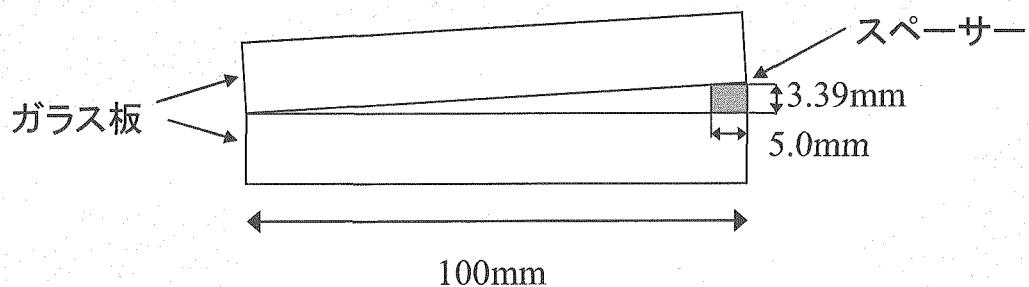


図2.6 楔状亀裂試験体概略

2.2.3 濃度データの算出

式(1)より透過光強度は染料濃度と亀裂開口幅の影響を受けることがわかる。このため、式(1)から、染料濃度比 C/C_0 を求める式を導く。

亀裂内が水の場合の透過光強度 I_{water} は以下の式となる。

$$I_{water} = I_0 (e^{-\varepsilon_e \cdot b_e}) \cdot (e^{-\varepsilon_w \cdot b}) \quad (10)$$

ε_e : 試験体の吸光係数 b_e : 試験体の厚さ

トレーサー試験時の時間 t における透過光強度 $I_{dye \cdot t}$ は以下の式となる。

$$I_{dye \cdot t} = I_0 (e^{-\varepsilon_e \cdot b_e}) \cdot (e^{-\varepsilon_w \cdot b}) \cdot (e^{-\varepsilon_d \cdot c_t \cdot b}) \quad (11)$$

$$I_{dye \cdot t} = I_{water} \cdot (e^{-\varepsilon_d \cdot c_t \cdot b}) \quad (12)$$

c_t : 時間 t における染料濃度

式(12)を変形すると式(13)となる。

$$\frac{I_{dye \cdot t}}{I_{water}} = e^{-\varepsilon_d \cdot c_t \cdot b} \quad (13)$$

ここで、 $\frac{I_{dye \cdot t}}{I_{water}}$ 染料濃度 C_t における亀裂内が水の透過光強度に対する亀裂内が染料の透過光強度の比率（透過光比率）であり T_{Ct} とすると次式のようになる。

$$T_{Ct} = e^{-\varepsilon_d \cdot c_t \cdot b} \quad (14)$$

対数を取ると次式となる。

$$\ln T_{Ct} = -\varepsilon_d \cdot c_t \cdot b \quad (15)$$

同様にトレーサー濃度が初期濃度の場合の透過光強度 I_{dye} は以下の式となる。

$$I_{dye} = I_0 (e^{-\varepsilon_e \cdot c_e \cdot b_e}) \cdot (e^{-\varepsilon_w \cdot c_w \cdot b}) \cdot (e^{-\varepsilon_d \cdot c_0 \cdot b}) \quad (16)$$

$$I_{dye} = I_{water} (e^{-\varepsilon_d \cdot c_0 \cdot b}) \quad (17)$$

c_0 : 染料の初期濃度

式(17)を変形すると式(18)となる。

$$\frac{I_{dye}}{I_{water}} = e^{-\varepsilon_d \cdot c_0 \cdot b} \quad (18)$$

ここで、 $\frac{I_{dye}}{I_{water}}$ は染料濃度 c_0 における入射光に対する透過光の比率（透過光比率）であり T_{C_0} とすると次式のようになる。

$$T_{C_0} = e^{-\epsilon_d \cdot c_0 \cdot b} \quad (19)$$

対数を取ると次式となる。

$$\ln T_{C_0} = -\epsilon_d \cdot c_0 \cdot b \quad (20)$$

式(15)、式(20)からトレーサー濃度 C_0 で規格化した濃度の時間変化を示す式(21)が得られる。

$$\frac{c_t}{c_0} = \frac{\ln T_{c_t}}{\ln T_{C_0}} \quad (21)$$

2.3 撮影装置

撮影装置の概念図を図 2.7 に示す。撮影装置は、照明、CCD カメラ、バンドパスフィルター、データ取得用のパソコンで構成されている。照明には LED を使用したフラット照明を使用している。Lambert-Beer の法則が成り立つ条件が単色（波長幅が狭い）の照明光であるため、CCD カメラには、可視化に用いる染料トレーサー（食用赤色 102 号）の吸収スペクトルの中心波長に合わせて、透過中心波長 514.5nm、透過波長半値幅 2nm のバンドパスフィルターを設置している。CCD カメラ (DVC 社製 DVC1412 IEEE1394 接続) による撮影画像の階調はモノクロの 4096 階調 (12bit) であり、撮影サイズは最大 1292×1030 ピクセルである。CCD カメラによる撮影はパソコン上から制御している。撮影された画像は無圧縮のモノクロ 16bit TIF 画像として保存される。パソコンを除く装置一式は暗室内に設置されており、外光の影響を受けないようにになっている。

2.4 試験方法

2.4.1 画像可視化法による開口幅測定

画像可視化法では試験体内に水を満たした画像及び試験体内に染料を満たした画像を用いることから、ガラス製楔状亀裂及びレプリカ試験体について、亀裂内に水を満たした画像及び亀裂内に染料を満たした画像を取得する。水及び染料の注入にはシリンジを用いて、エアの混入に注意しながら亀裂内が染料で完全に置換されるまで注入する。開口幅を計算する際に撮影画像の座標がずれると誤差を生じるため、試験体は撮影装置内に固定した状態で水及び染料の注入を行う。また、撮影を行う際にはノイズを低減するために、100 枚の画像を用いた平均化処理を行っている。

2.4.2 トレーサー移行状況撮影

染料トレーサーの移行状況を撮影する際には、試験体内を予め水で満たした状態から、一定流量で染料トレーサーを亀裂内に注入しながら、一定の時間間隔で撮影を行う。なお、染料トレーサーを注入する際には、亀裂内に一様に染料を注入するために、注入ポート内に染料を満たした後に、亀裂内に染料を注入する。図 2.8 に染料の注入方法を示す。

手順としては、バルブ③、④を閉じた状態で、バルブ①、②を開放し染料を注入ポート内に注入する。ポート内の水が染料で完全に置換された後に、一旦染料の注入を止め、バルブ②を閉に、バルブ④を開にして、染料の注入を開始する。なお、染料の注入には脈動が無く、微小流量での精度が高いダブルプランジャーポンプ（協和精密株式会社 KHP-011 最小流量 0.1ml/min）を使用している。また、トレーサー移行状況撮影の際にもノイズを低減するために、16 枚の画像を用いた平均化処理を行っている。

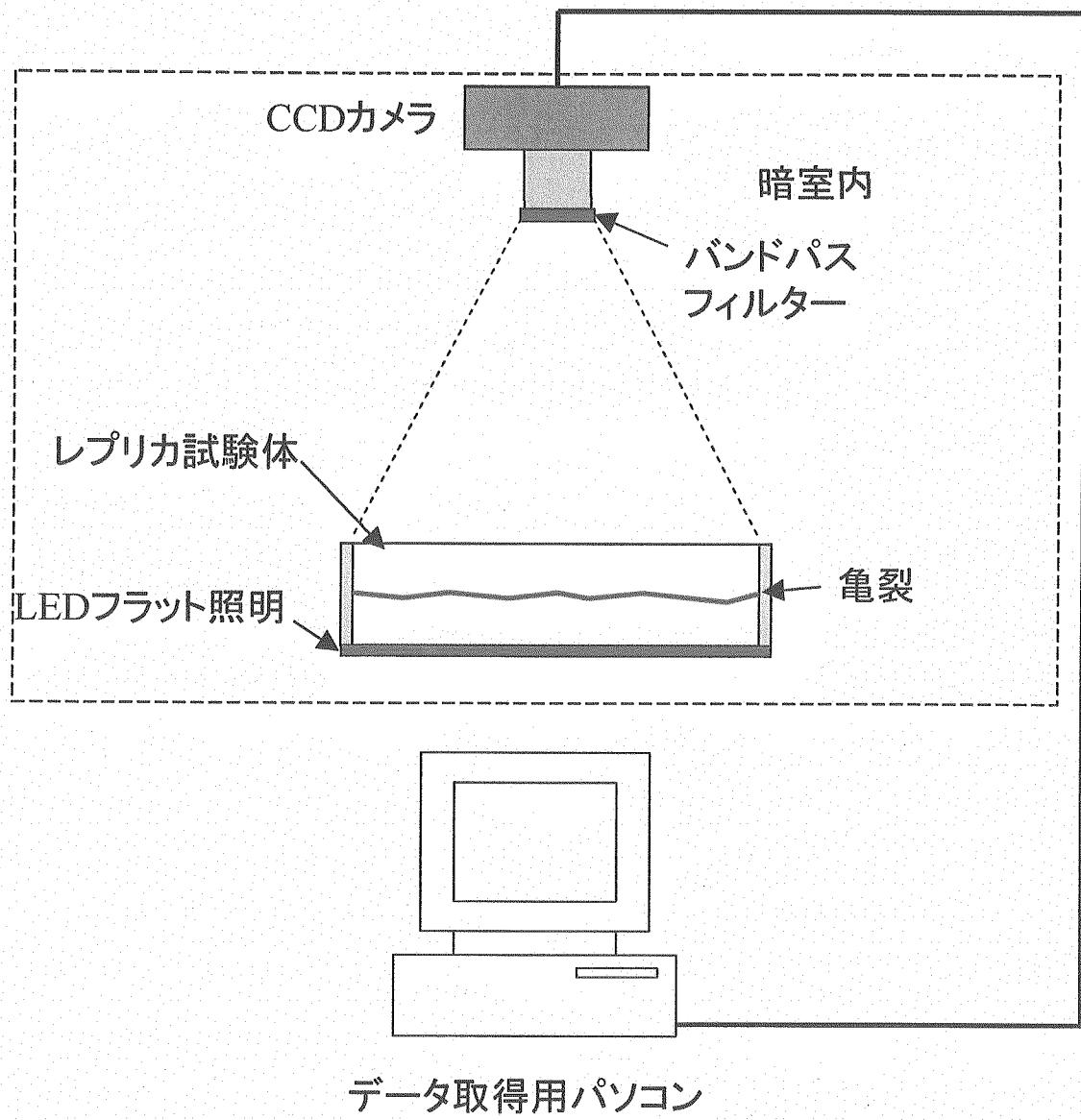


図2.7 撮影装置概要

This is a blank page.

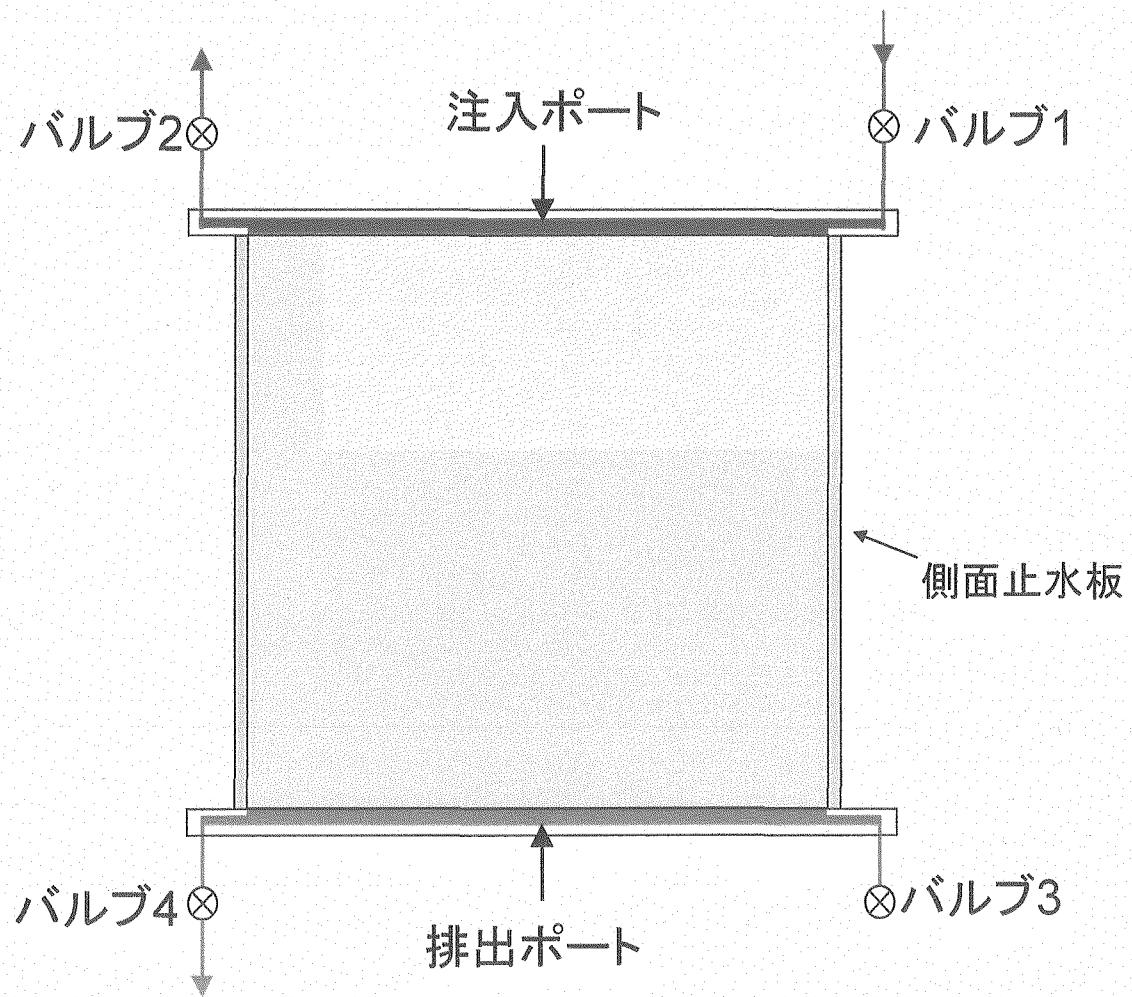


図2.8 染料トレーサー注入方法概要

This is a blank page.

3. 試験結果

3.1 開口幅測定

3.1.1 楔状亀裂キャリブレーション

開口幅と透過光強度の関係を調べるためにあたり、画像データを数値化する必要がある。撮影された画像は、画素毎に光の強度を階調値として記録したものである。今回使用しているCCDカメラは12bit(4096)の階調での撮影が可能で、撮影された画像の階調値4095が白に相当し、階調値0が黒に相当する。画像データを用いて開口幅やトレーサー濃度などの計算を行う際には、階調値を数値データとして用いている。

図3.1に亀裂内に染料を注入した楔状亀裂試験体を示す。試験体は光学基盤用の平滑な2枚のガラス板(縦100mm、横100mm、厚さ15mm)の一方に厚さ3.39mm幅5mmのステンレス製スペーサーを挟み、専用の治具で固定することにより作製した。(図2.6参照)亀裂開口幅の最小値は0mm、最大値は3.39mmであり、亀裂の長さはスペーサーの幅の分短くなるため95mmである。この試験体に水および染料(食用赤色102号 100mg/L)を注入しそれぞれ撮影を行う。

図3.2に亀裂内を水で満たした画像、図3.3に亀裂内を染料で満たした画像を示す。亀裂内が染料の画像では、開口幅が小さい領域から大きい領域に掛けて染料による吸光のため、次第に画像が暗くなっている。また、若干ではあるが、照明のムラにより、開口幅が等しい領域(画像の縦方向)でも画像の明るさが異なっていることがわかる。図3.4に亀裂内を水で満たした画像と亀裂内を染料で満たした画像を用いて算出した楔状亀裂の透過光比率の分布図を示す。透過光比率とすることにより、照明のムラの影響が除去されており、開口幅が等しい領域では透過光比率が一定となっていることがわかる。

図3.5に透過光比率と開口幅の関係を示す。開口幅が大きくなるに従い、透過光比率が小さくなっていることがわかる。また、透過光比率を対数表示にしたもの図3.6に示す。透過光比率を対数表示にすると、開口幅と透過光比率は直線関係となっている。このことから、今回の試験条件でLambert-Beerの法則が成り立っていることが分かる。また、この曲線の指数近似式を求めるとき $y=0.998 \times e^{-0.619x}$ となる。この式を式(8)に当てはめると、キャリブレーション係数aは0.619となる。

3.1.2 レプリカ試験体開口幅測定

図3.7にレプリカ試験体の亀裂内が水の透過光強度、図3.8に亀裂内が染料の透過光強度を示す。亀裂内が染料の透過光強度は開口幅分布のばらつきにより、濃淡が現れているのがわかる。図3.9に2枚の画像を用いて算出した透過光比率分布を示す。この透過光比率のデータに前項で求めたキャリブレーション係数aを式(9)にあてはめることにより、開口幅を求めることができる。図3.10に開口幅分布を示す。開口幅の平均値は0.419mm(921600点の平均)であった。

This is a blank page.

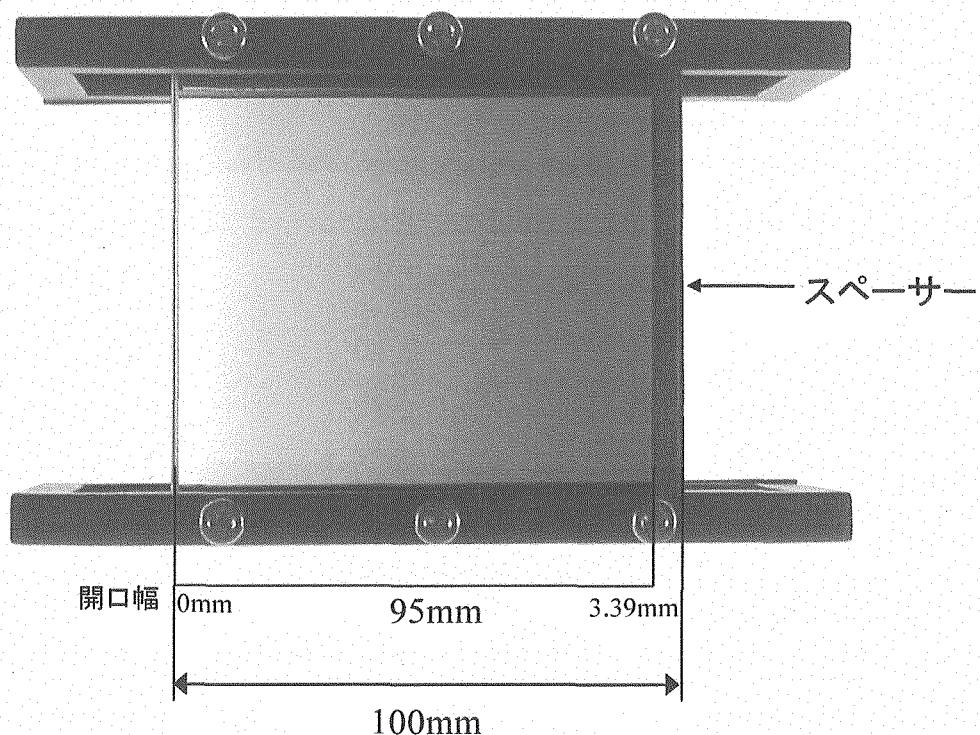


図3.1 楔状亀裂試験体(亀裂内染料)

This is a blank page.

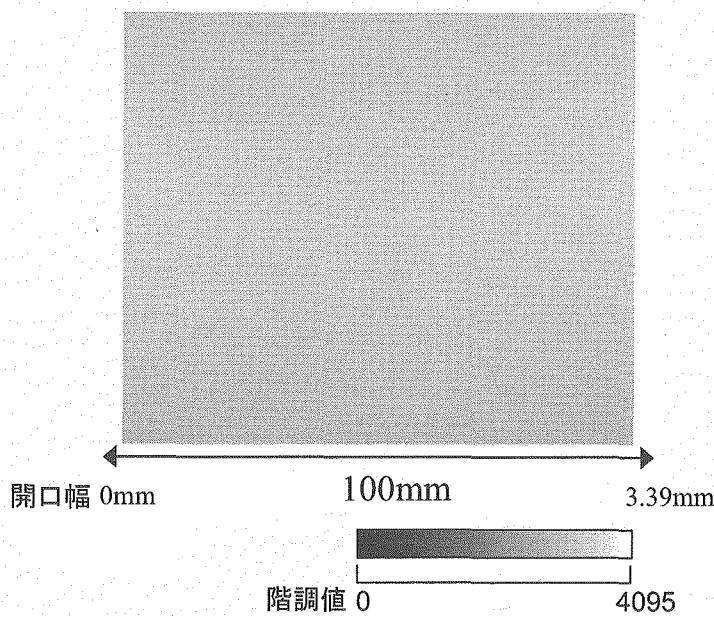


図3.2 楔状亀裂透過光強度(亀裂内水)

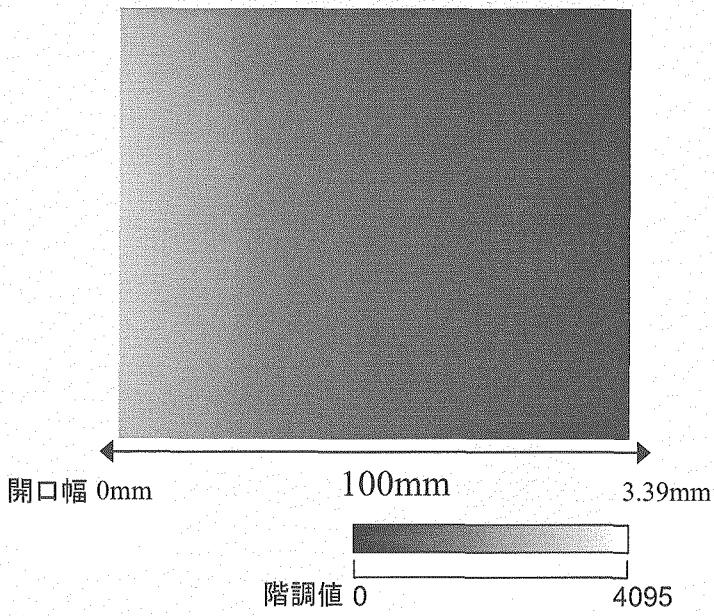


図3.3 楔状亀裂透過光強度(亀裂内染料)

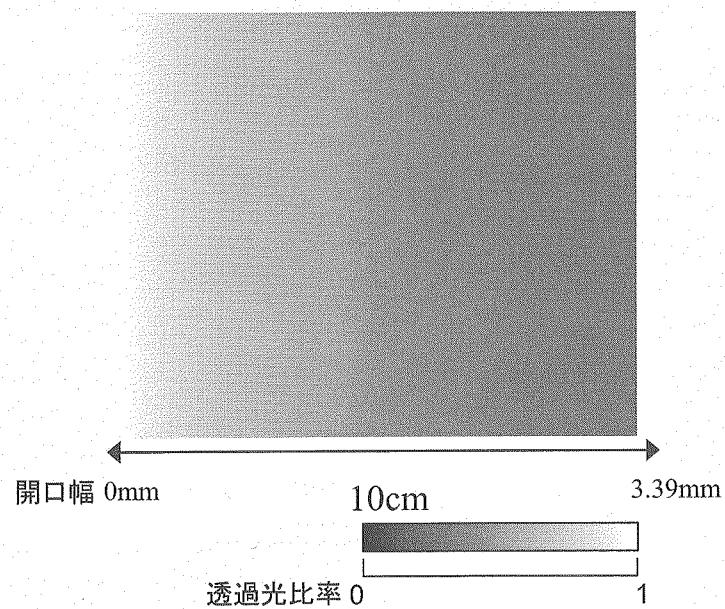


図3.4 楔状亀裂試験体透過光比率分布

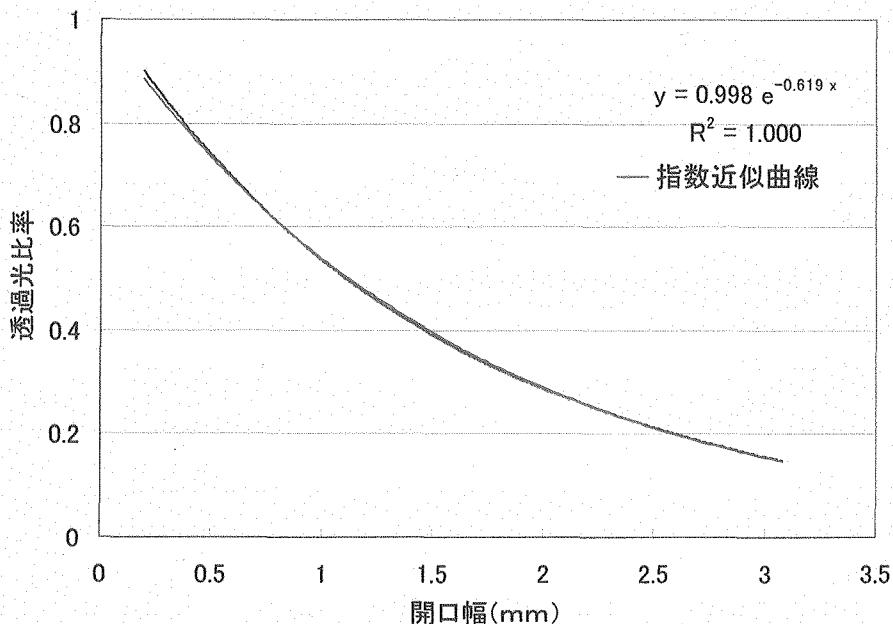


図3.5 楔状亀裂試験体の透過光比率と開口幅の関係

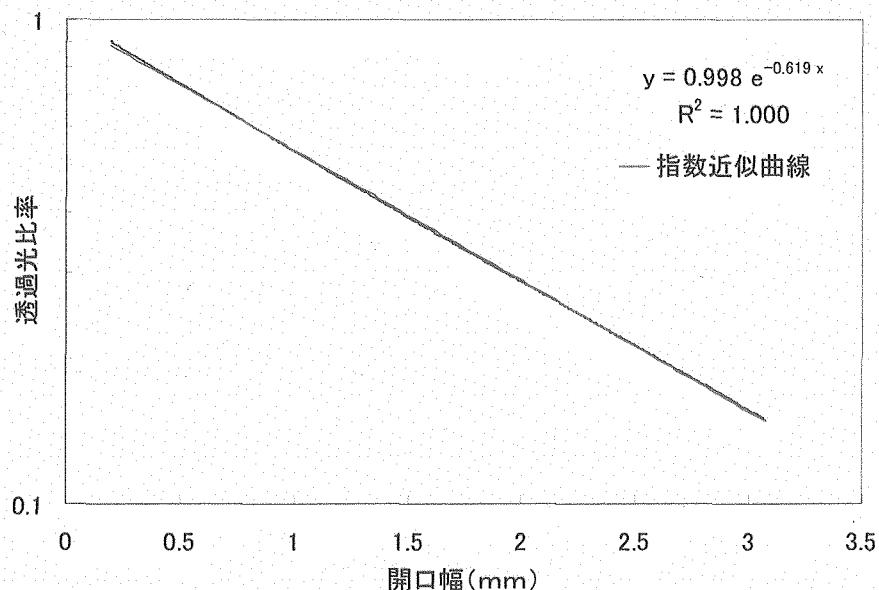


図3.6 業状亀裂試験体の透過光比率と開口幅の関係
(透過光比率対数)

This is a blank page.

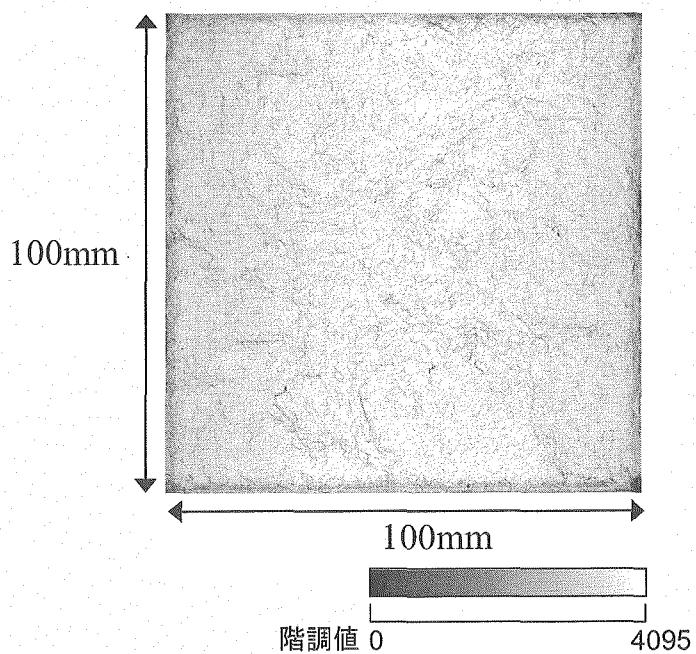


図3.7 レプリカ試験体透過光強度(亀裂内水)

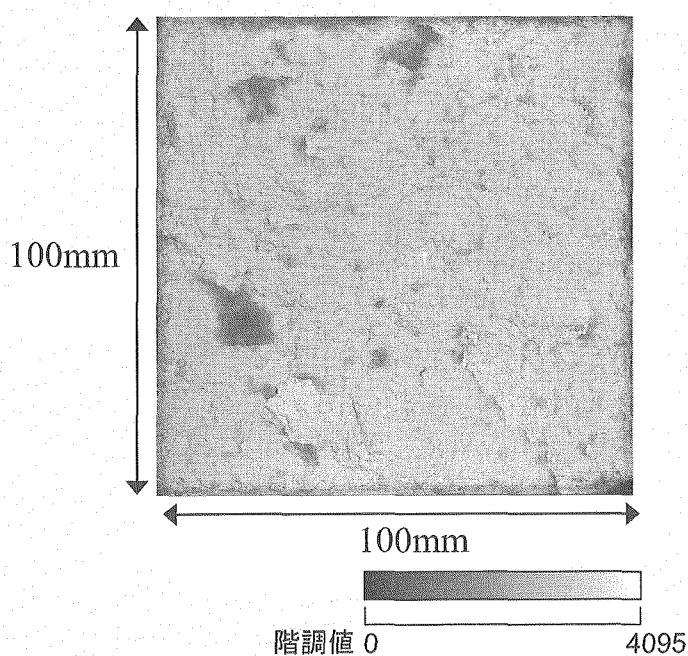


図3.8 レプリカ試験体透過光強度(亀裂内染料)

This is a blank page.

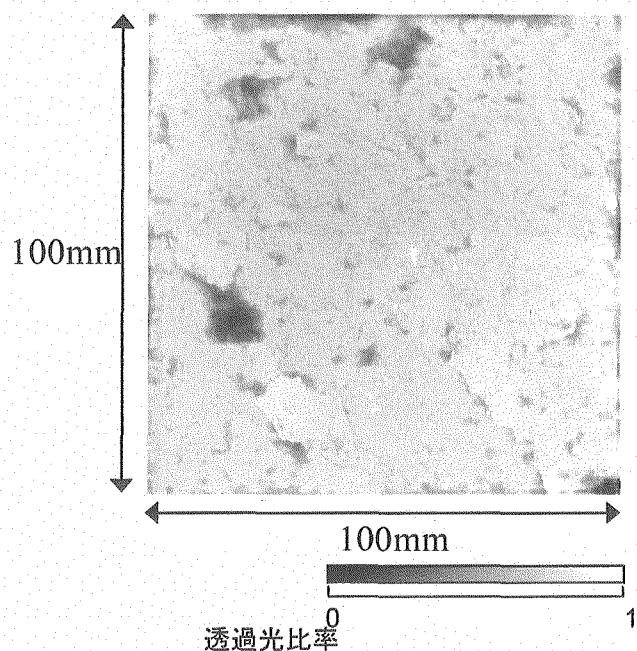


図3.9 レプリカ試験体透過光比率

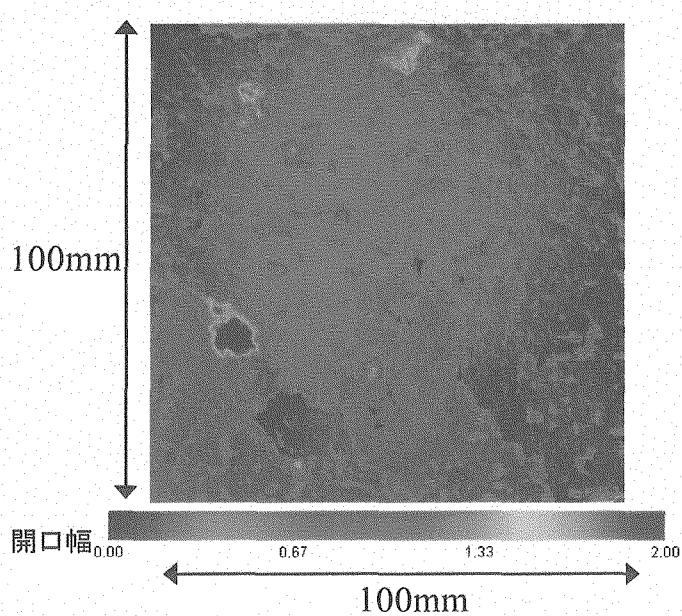


図3.10 レプリカ試験体開口幅

This is a blank page.

3.2 画像可視化法による開口幅分布の測定精度検証

画像可視化法による亀裂開口幅の測定精度を検証するために、接触式三次元測定機を使用した亀裂表面形状測定による開口幅測定及び亀裂内体積測定による平均開口幅の測定を行った。

3.2.1 亀裂表面形状測定による亀裂開口幅測定

レプリカ試験体の亀裂表面形状は、接触式三次元測定機（株ミツトヨ製 BRT710）により測定を行った。開口幅の算出方法は、図 3.11 に示すように、レプリカ試験体を組み立てた後の高さ H_3 から、亀裂の上下面の高さ H_1 、 H_2 を引くことにより求めている。測定範囲は x 、 y それぞれ 2mm～98mm、測定ピッチは 1mm、測定子の直径は 0.1mm である。図 3.12 に下面の亀裂表面形状、図 3.13 に上面の亀裂表面形状、図 3.14 に亀裂表面形状測定による開口幅分布を示す。画像可視化法による計測に比べて測定ピッチが大きいことから、詳細な部分までは表現できていないが、画像可視化法による開口幅分布と傾向が一致していることがわかる。また、亀裂表面形状測定による開口幅の平均値は 0.348mm（9409 点の平均）であり、画像可視化法により求められた値より約 0.07mm 小さい結果となった。

3.2.2 亀裂内体積測定による平均開口幅測定

平均開口幅を検証するために、亀裂内の体積を測定することにより平均開口幅を算出した。測定方法は亀裂内が空気と亀裂内が水の場合の試料全体の重量差を測定することにより求めた。測定方法詳細は以下のとおりである。

- ・注排水の当て板を取り外し、試験体内の水を抜く。
- ・亀裂内の水を完全に抜くために、デシケーター内で真空乾燥させる。
- ・デッドボリュームを極力削減した注入用の当て板を貼り付ける。
- ・この状態での重量を測定する。
- ・試験体を垂直に立てた状態で試験体の下側から亀裂内に定流量ポンプで水を注入する。
- ・亀裂内に水が満ちた状態での重量を測定する。

水の密度は 0.997g/cm³(24°C)であることから、亀裂内が水と空気の重量差(g)を水の密度(g/cm³)で割ると亀裂内の体積(cm³)となる。試験体のサイズは、100.0mm×99.0mm である。

仮に測定された亀裂内体積が 1cm³ の場合、平均開口幅は 0.101mm となる。

重量測定の結果、亀裂内の水の重量は 4.08g であった。この結果から求められる平均開口幅は 0.413mm となり画像可視化法により求められた平均開口幅とほぼ同様の値となつた。

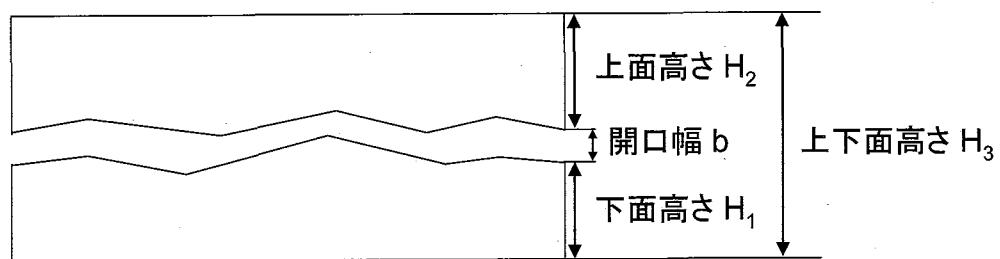


図3.11 亀裂表面形状からの開口幅の算出方法

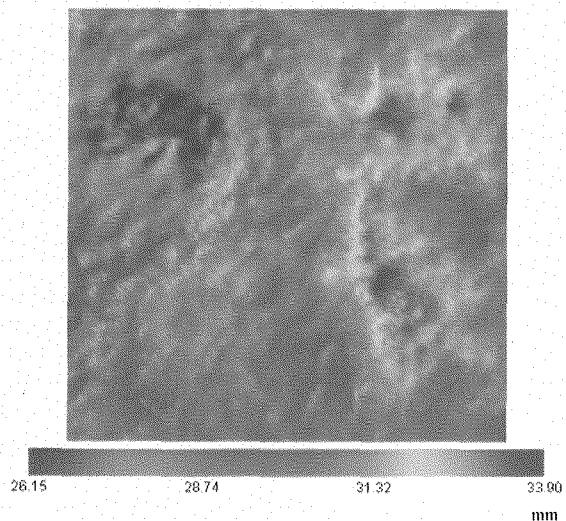
3.2.3 開口幅比較結果

画像可視化法による平均開口幅と亀裂内体積測定により求められた平均開口幅はほぼ等しい値となったが、亀裂表面形状測定による開口幅は約 0.07mm 小さな値となっているため、この原因について検討を行った。

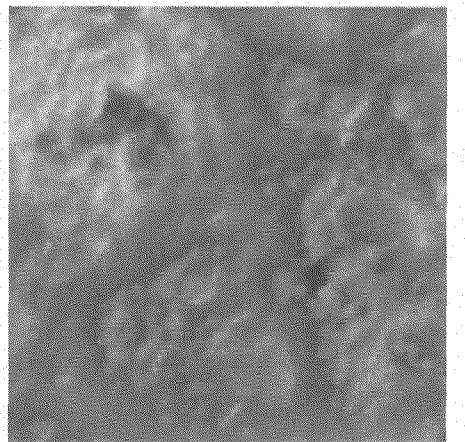
図 3.15 に画像可視化法による開口幅のヒストグラムと、亀裂表面形状測定による開口幅のヒストグラムの比較を示す。図より、分布の形状はほぼ等しいが、亀裂表面形状測定による開口幅は全体的に開口幅が小さいほうにシフトしている。分布形状を正確に比較するために、亀裂表面形状測定による開口幅を画像可視化法との平均開口幅の差である 0.07mm 開口幅が大きくなる方向にシフトした図を 3.16 に示す。分布形状はほぼ一致していることがわかる。開口幅分布及びヒストグラムの形状がほぼ等しいことから、亀裂開口幅分布は正確に求められていると考えられる。一方、亀裂内体積測定による平均開口幅と画像可視化法による平均開口幅はほぼ一致していることから、画像可視化法による平均開口幅は正確に測定できている可能性がある。亀裂表面形状測定による平均開口幅が他より小さいのは、次の理由が考えられる。接触式三次元測定機による亀裂表面形状測定では、先端が球状の測定子が亀裂面に触れた高さを記録している。平面を測定する場合には問題ないが、傾いている面を測定する場合には測定子の大きさにより測定誤差が生じる。図 3.17 にこの概念図示す。測定の基準点は測定子の移動方向の先端 (C 点) であり、図に示すように、測定面が傾いていると測定子の先端が A 点に接触する前に B 点で接触してしまうことから、実際の座標は A 点であるのに対して、測定される座標は C 点となることから測定誤差が生じる。また、測定誤差は測定値が大きくなる方向に発生する。図 3.11 から判るように、亀裂表面の高さが大きく評価されると、亀裂開口幅は小さく評価される。このことから、亀裂表面形状測定による亀裂開口幅測定結果は過小評価されている可能性がある。

画像可視化法により求めた亀裂開口幅は、亀裂表面形状測定による亀裂開口幅分布と同様の開口幅分布であること、亀裂内体積測定により求められた平均開口幅とほぼ等しいことから、画像可視化法により求められた開口幅の信頼性は高いと考えられる。

This is a blank page.



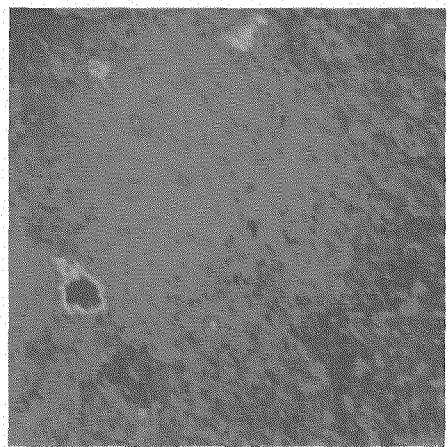
26.15 28.74 31.32 33.90
mm



10.06 12.60 15.13 17.67
mm

図3.12 亀裂下面形状

図3.13 亀裂上面形状



0.00 0.67 1.33 2.00 mm

図3.14 亀裂表面形状から求めた開口幅分布

This is a blank page.

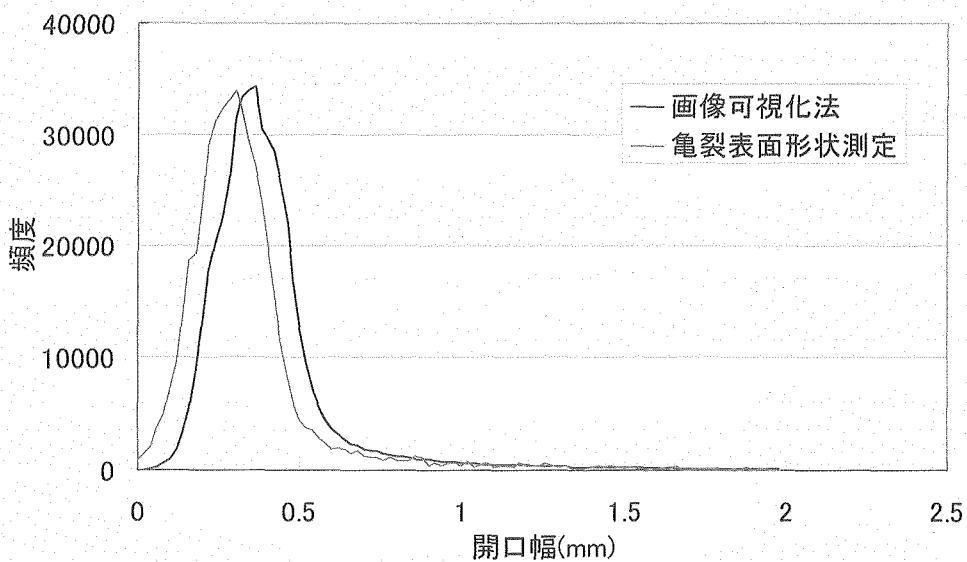


図3.15 開口幅分布比較

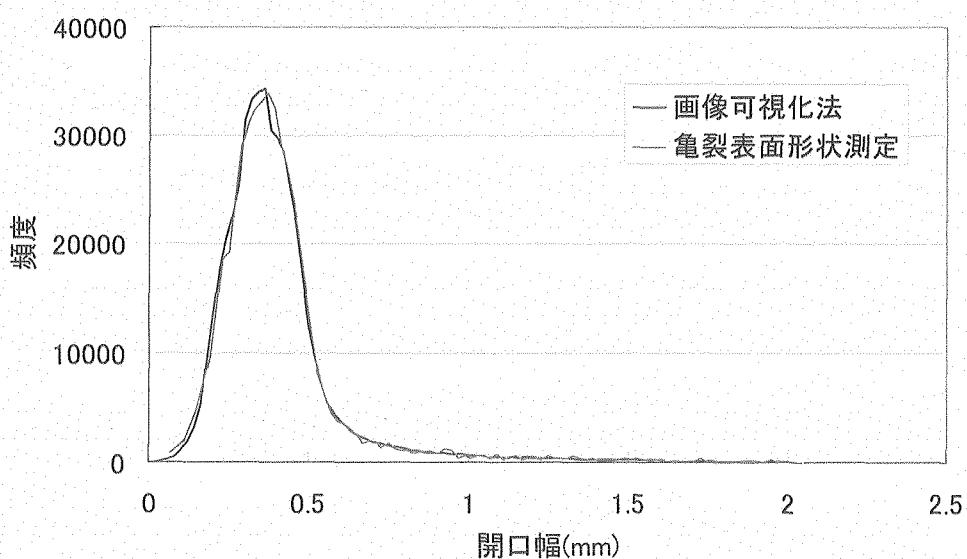


図3.16 開口幅分布比較(0.07mmシフト)

This is a blank page.

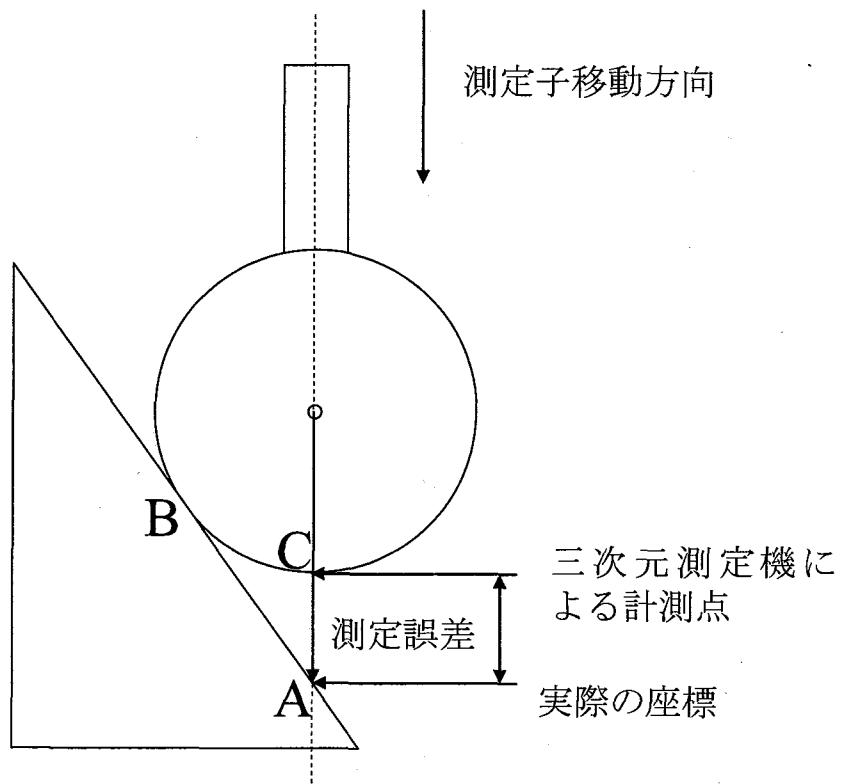


図3.17 接触式三次元測定機で生じる測定誤差

3.3 染料濃度データへの変換

3.3.1 染料濃度分布

図 3.18 にレプリカ試験体に染料を注入した撮影画像を示す。流れの方向は図の上から下方で、染料が注入された領域は階調値が小さくなっている。この図からは、染料が移行していく状況と、階調値が変化している状況が確認できる。この図から染料の移行状況を確認することはできるが、画像の階調値は亀裂開口幅の影響を受けていることから、式(21)を用いて濃度データへの変換を行う。

図 3.19 に濃度データに変換後の移行状況を示す。開口幅分布の影響を受けていない染料濃度分布を得られた。このように亀裂内の開口幅分布に加えて詳細なトレーサー濃度分布の定量的な測定が可能であり、これらのデータは亀裂開口幅の不均質性がトレーサー移行に与える影響の検討などに用いることができると考えられる。

3.3.2 ブレークスルーカーブ

亀裂を対象にトレーサー試験を実施する場合、一般的には食塩水等の電気伝導性を有するトレーサーを用いて注入側及び排出側の電気伝導度の変化を測定する。画像可視化法では任意の断面を通過するトレーサー量の計測が可能であることから、亀裂の排出側のトレーサー量の変化からブレークスルーカーブを算出することができる。式(20)より、透過光比率の対数値は、開口幅と濃度と係数を掛けたものであることから、その値はピクセルに存在するトレーサーの量となる。ブレークスルーカーブは排出されたトレーサー量の時間変化であることから、画像可視化法によりブレークスルーカーブを求めることができる。そこで、亀裂の排出側のトレーサー量の変化からブレークスルーカーブを算出した。亀裂内が水から染料を注入に十分に亀裂内が飽和した後に、注入側を水に変え、亀裂内が染料から水に移行するブレークスルーカーブも取得している。図 3.20 に亀裂内が完全にトレーサーで置換されたときのトレーサー移行量 M_0 で規格化したブレークスルーカーブを示す。立ち上がりに屈折が見られるが、これは亀裂内の流れの不均質性によるものだと考えられる。染料から水のカーブも水から染料のカーブとほぼ同様の形状をしていることから、亀裂内での吸着等による遅延の影響はないことがわかる。ここでトレーサー移行時間は式(22)に示す平均滞留時間 t_m ⁹⁾としており、今回のケースでは 310 秒であることから、平均流速は 0.0323(cm/s)となる。なお、今回はトレーサー試験を模擬するために排出側の平均的なブレークスルーカーブを算出したが、任意のポイントでのブレークスルーカーブを取得することも可能である。

$$t_m = \int \frac{M_0 - M_t}{M_0} dt \quad (22)$$

M_t : 時間 t におけるトレーサー移行量

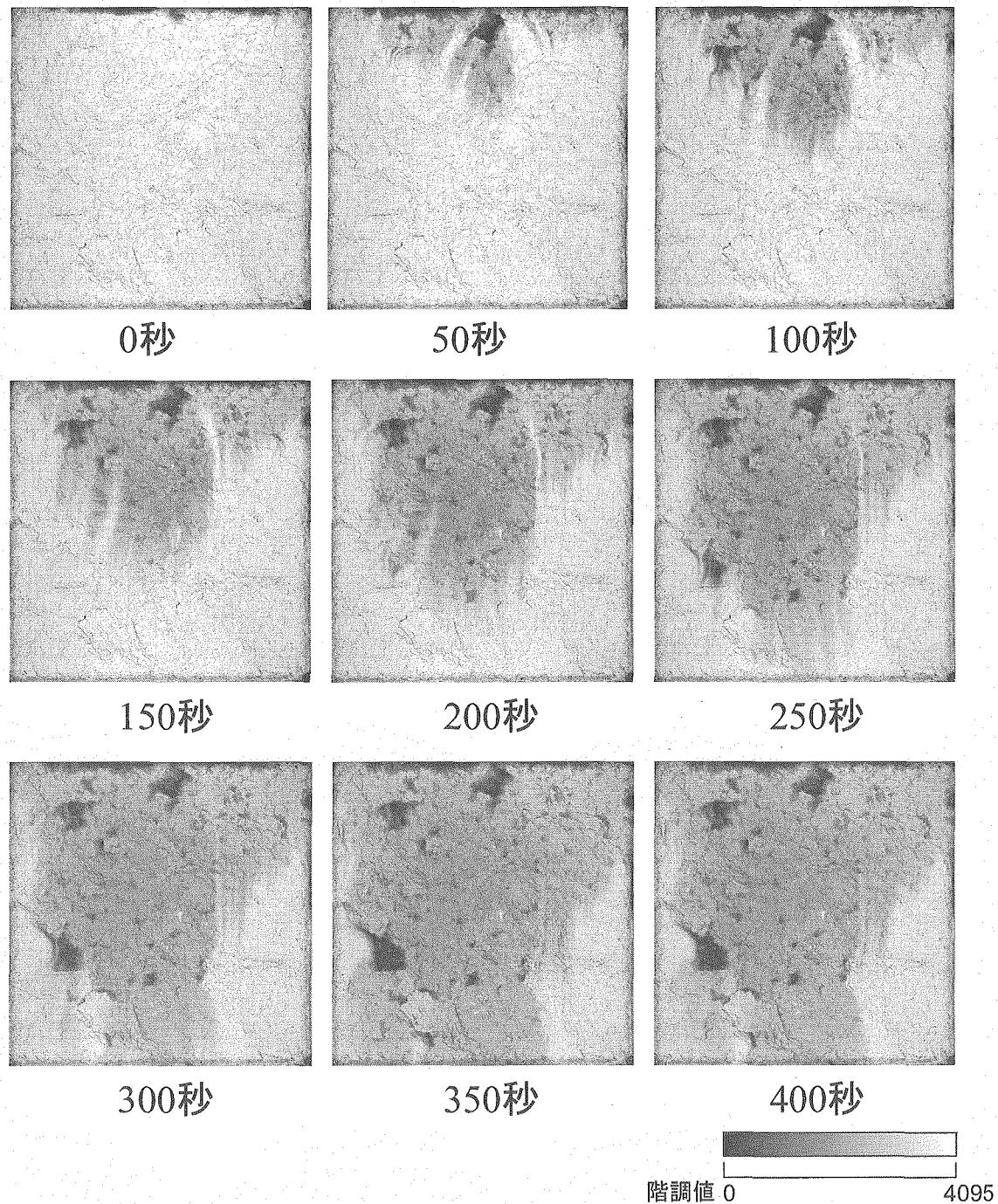


図3.18 トレーサー移行状況

This is a blank page.

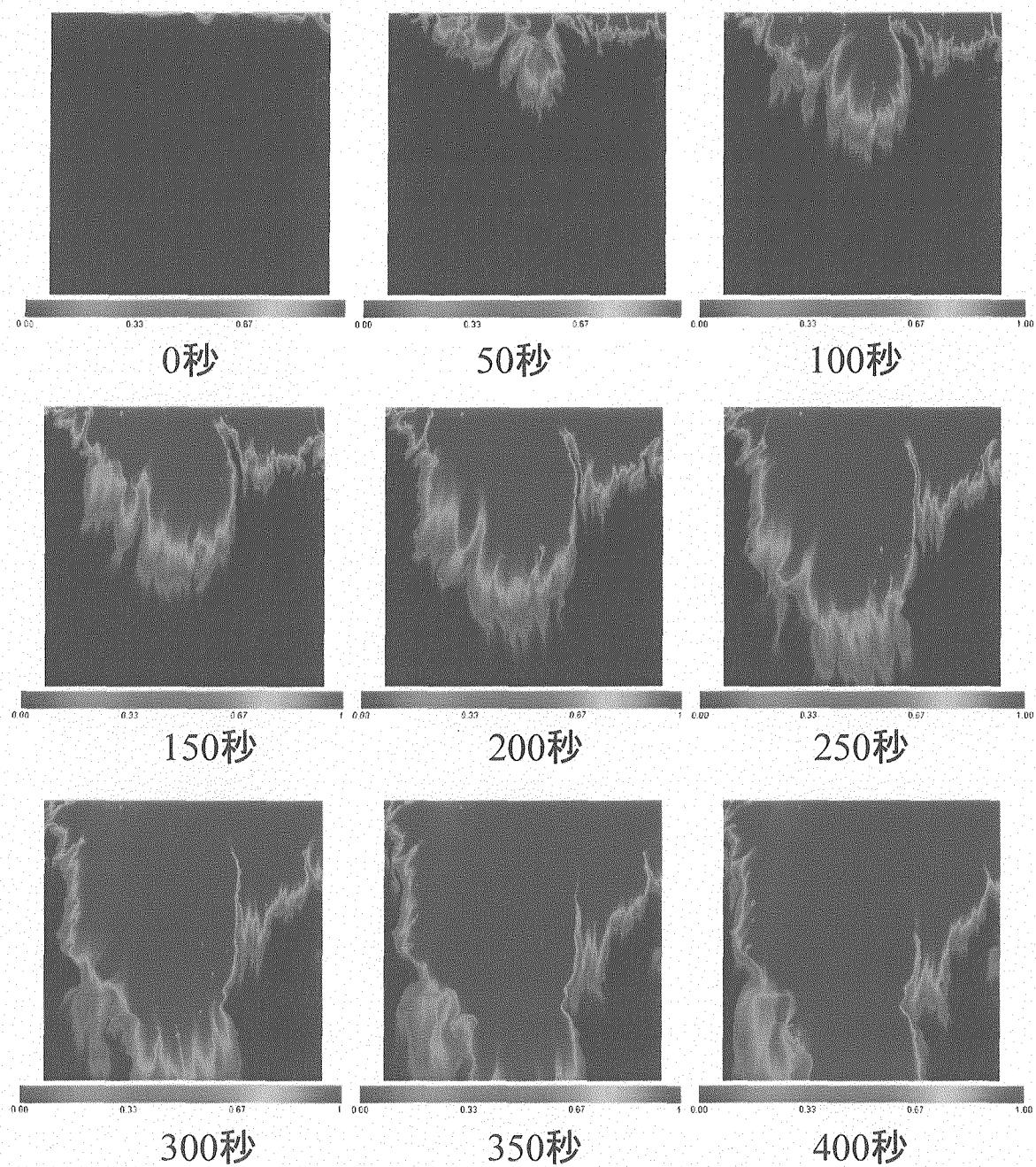


図3.19 トレーサー移行状況(濃度変換後)

This is a blank page.

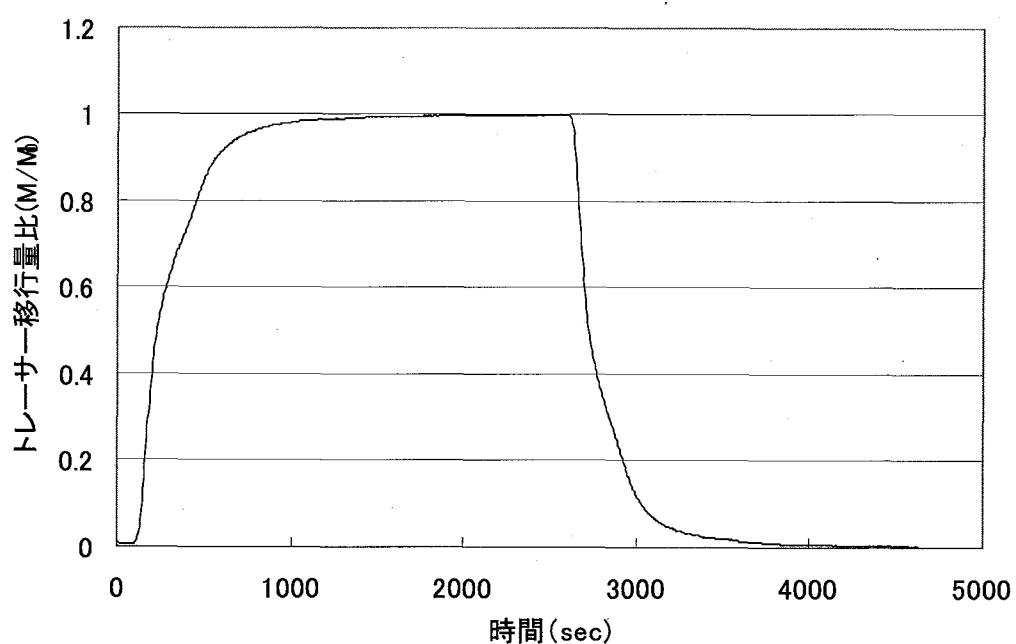


図3.20 ブレークスルーカーブ

3.4 エポキシ製試験体が透水及び可視化に与える影響の検討

画像可視化試験を行う上で透明な試験体が必要なことから、エポキシ樹脂製のレプリカ試験体を用いて試験を実施している。しかしある程度はガラス試料や岩石試料と濡れ性等の界面の特性が異なることから、開口幅分布が等しくても岩石試料と透水性が異なることが懸念される。また、楔状亀裂を用いて開口幅のキャリブレーションを行うにあたり、試験体がエポキシ樹脂製なのに対して、キャリブレーションで使用している試験体がガラス製であることから、理論式上では、試験体の材質は影響しないことになっているが、実際にはキャリブレーション曲線に何らかの影響を与えていた可能性が考えられる。そこで以下の検討を行い、エポキシ樹脂製の試験体が画像可視化試験に与える影響についての検討を行った。

- ・エポキシ樹脂製平行平板を用いた透水試験
- ・ガラス製楔状亀裂及びエポキシ製楔状亀裂を用いたキャリブレーション係数の比較

3.4.1 エポキシ樹脂製平板試験体の作製

エポキシ樹脂製平板試料を作製するにあたり、表面の平滑性及び平行度が要求されることから、光学基盤用のガラス板を型にして作製した。表面を離型処理したガラス板の側面に離型処理したプラスチック板を張り付けることにより型を作製し、エポキシ樹脂を注入して作製した。硬化後に型から外した試験体はレプリカ試験体と同様に、型と反対の面を研磨紙と研磨剤により鏡面研磨を行っている。平行平板試験体は、エポキシ樹脂製平板試料の間に0.2mmのステンレス製スペーサーを挟み専用の治具で固定することにより作製した。また、注入側と排出側には注排水用の当て板を貼り付けてある。楔状亀裂試験体は図2.6と同様に平板試験体の間に3.39mmのステンレス製スペーサーを挟みこみ、専用の治具で抑えることにより作製する。

3.4.2 エポキシ樹脂製平行平板を用いた透水試験

透水試験は定水位で行い、透水流量は電子天秤を用いて測定した。水位差はマノメーターを用いて測定を行い、水頭差を変えた5ケースのデータを取得した。

図3.21に水位差と流量の関係を示す。水位差と流量は直線関係になっており、ダルシー則を満たしている。この結果から三乗則を用いて求められる水理学的開口幅は0.207mmとなる。スペーサーによる設定開口幅が0.2mmであるのに対し、透水試験の結果から算出される水理学的開口幅が0.207mmであり、両者はほぼ同様の値となっていることから、本試験条件においてエポキシ製の試験体が透水に有意な影響を与えていないといえる。

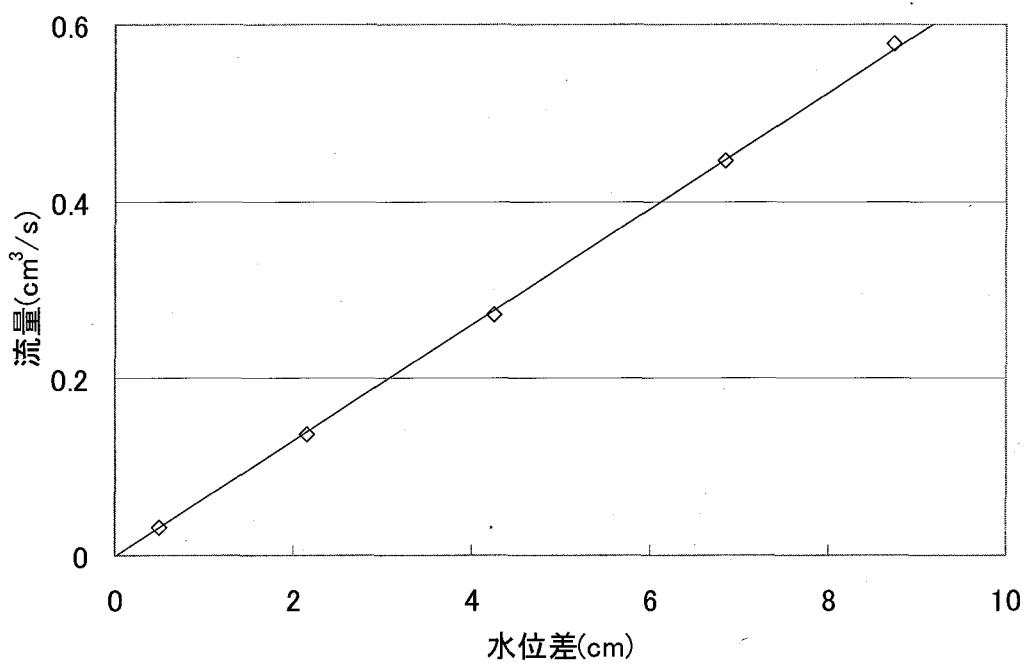


図3.21 エポキシ製平行平板透水試験結果

3.4.3 ガラス及びエポキシ製楔状亀裂を用いたキャリブレーション係数の比較

エポキシ樹脂製、ガラス製楔状亀裂試験体に水を満たした透過光強度と、染料を満たした透過光強度を測定し、それぞれの試験体に対する、開口幅と透過光比率の関係について比較検討を行った。

図 3.22 にエポキシ製楔状亀裂とガラス製楔状亀裂の開口幅と透過光比率（対数表示）の関係を示す。線が重なり見難くなるため、エポキシ製楔状試験体をずらして表示している。指數近似曲線の乗数がキャリブレーション係数となるが、エポキシ製が-0.616 に対してガラス製が-0.618 であり、ほぼ同様の値となっていることから、試験体の材料の違いがキャリブレーション係数に与える影響は無いと言える。なお、ガラス製楔状亀裂のキャリブレーション係数が図 3.6 のキャリブレーション係数と若干異なるが、この原因としては同時期にデータを取得していないために、濃度調整時の誤差及び温度等の影響を受けているためと考えられる。しかし、開口幅測定とキャリブレーションデータの取得は毎回同じ染料を用いて行うため、これらの誤差の影響を受けることは無い。

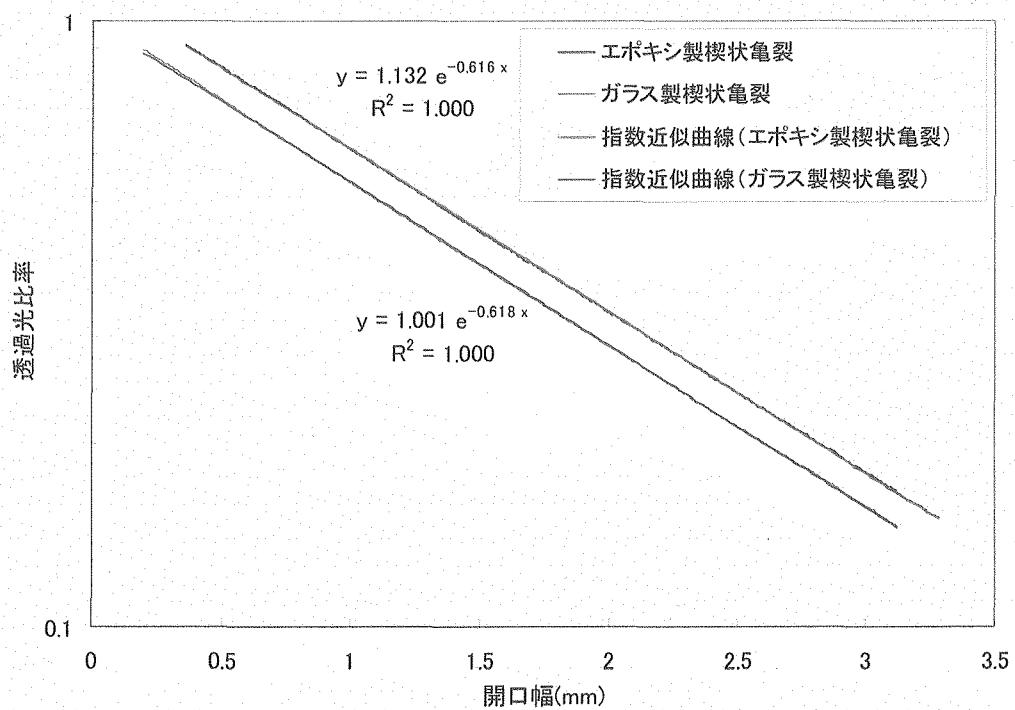


図3.22 キャリブレーション係数比較

This is a blank page.

4.まとめ

本研究では亀裂開口幅を測定すると同時に、亀裂内のトレーサー移行の様子を定量的に計測する手法の開発を目的として、透明レプリカ試験体を対象とした光学的手法による亀裂開口幅測定及び亀裂内濃度分布測定手法（画像可視化法）を開発し、その測定精度についての検討を行った。その結果、本研究で得られた知見は以下のとおりである。

- (1) 今回の試験条件では Lambert-Beer の法則が成立しており、画像可視化法が適用可能であることが判明した。
- (2) 亀裂表面形状測定による開口幅測定及び亀裂内体積測定による平均開口幅測定との比較より画像可視化法により正確な開口幅分布が取得できていることが確認できた。
- (3) 楔状亀裂によるキャリブレーション係数の比較及び平行平板試験体の透水性確認からエポキシ製試験体が画像可視化試験に与える影響は無いことが判明した。
- (4) 接触式三次元測定機による亀裂表面形状測定は測定誤差が生じている可能性があり、求められた平均開口幅は過小評価されている可能性があることが判明した。
- (5) トレーサー濃度分布測定の結果、開口幅の影響を除去できており、トレーサー濃度を正確に測定できていると考えられることから、開口幅の定量的測定に加えてトレーサー濃度の分布の定量的測定が可能となった。また、これらのデータの任意の断面でのブレークスルーパートを取得することが可能であることを確認した。

開口幅分布と透水・物質移行特性をより包括的に検討するためには、多種多様な亀裂の開口幅分布のデータが必要となるが、現状では1つの試験体に対して1ケースの開口幅データしか取得できないことから、今後は開口幅を変化させられるような改良を行い、複数の試験体及び開口幅設定でのデータを取得することにより、開口幅分布が透水・物質移行特性に与える影響の検討を行う予定である。

参考文献

- 1) 木村 強,江崎哲郎,：“岩盤不連続面の凹凸および開口幅の特徴と水理学的性質”,応用地質,第33巻第2号,pp61-70(1992)
- 2) S.Baraka-Lokmane : “A new resin impregnation technique for characterising fracture geometry in sandstone cores”, International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, vol39, pp815-823 (2002)
- 3) E.Hakami : “Aperture Measurements and Flow Experiments on a Single Natural Fracture”, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, Vol 33, pp395-404 (1996)
- 4) 吉野尚人,他,：“岩盤亀裂開口幅評価に関する検討”,岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集,pp.347-352(2002)
- 5) R.A Johns, et al. : “Nondestructive measurements of fracture aperture in crystalline rock cores using X ray computed tomography”, Journal of Geophysical Research, 98(B2), pp1889-1900, (2003)
- 6) A.A. Keller : “single and Multiphase Flow and Transport in Fractured Porous Media”, PH.D dissertation, Stanford University, (1996)
- 7) Evgeny Isakov, et al. : ”Fluid flow through rough fracture in rocks I”, Earth and Planetary Science Letters, vol.191, pp267-282 (2001)
- 8) Jaehyoung Lee : “Experimental analysis on the effects of variable apertures”, WATER RESOURCES RESEARCH, vol.39, No.1, 1015 (2003)
- 9) L.Moreno, et al. : “Flow and Tracer Transport in a Single Fracture : A Stochastic Model and Its Relation to Some Field Observations”, WATER RESOURCES RESEARCH, vol.24, No.12, pp2033-2048 (1988)

付録

添付の CD-ROM に開口幅分布データ及びトレーサー濃度分布データを収録している。データの詳細は以下のとおりである。

開口幅分布データ

データ形式：タブ区切りのテキストファイル

測定単位：mm

測定範囲：97mm×97mm

測定ポイント：702×702

測定ピッチ：0.138mm

トレーサー濃度分布データ

データ形式：タブ区切りのテキストファイル

測定単位：染料濃度（C/C₀）

測定範囲：97mm×97mm

測定ポイント：583×583

測定ピッチ：0.166mm

撮影間隔：2秒

撮影枚数：200枚

This is a blank page.

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	
	名称	記号
面積	平方メートル	m^2
体積	立方メートル	m^3
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s^2
波数	メートル毎秒	m^{-1}
密度(質量密度)	キログラム毎立方メートル	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
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m^2
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
(物質量の)濃度	モル毎立方メートル	mol/m^3
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m^2
屈折率(数の)	1	1

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
平面角	ラジアン ^(a)	rad	$m \cdot m^{-1} = 1^{(b)}$
立体角	ステラジアン ^(a)	sr ^(c)	$m^2 \cdot m^{-2} = 1^{(b)}$
周波数	ヘルツ	Hz	s^{-1}
圧力、応力	パスカル	Pa	N/m^2
エネルギー、仕事、熱量	ジュール	J	$N \cdot m$
功率、放射束	ワット	W	J/s
電荷、電気量	クーロン	C	$N \cdot A \cdot s$
電位差(電圧)、起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラード	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	$m^{-2} \cdot kg^{-1} \cdot s^4 \cdot A^2$
コンダクタンス	シemenス	S	V/A
磁束密度	テスラ	T	$m^{-2} \cdot kg^{-1} \cdot s^3 \cdot A^2$
インダクタンス	ヘンリイ	H	$V \cdot s$
セルシウス温度	セルシウス度 ^(d)	$^\circ C$	Wb/m^2
光束度	ルーメン	lm	Wb/A
(放射性核種)の放射能	ベクレル	Bq	$kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$
吸収線量、質量エネルギー	グレイ	Gy	$kg \cdot s^{-2}$
線量当量、周辺線量当量	シーベルト	Sv	J/kg
方向性線量当量、個人線量当量			$m^2 \cdot s^{-2}$

(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つ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の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”は示明されない。

(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 $m^\circ C$ のようにSI接頭語を伴って用いても良い。

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
粘度	パスカル秒	Pa · s	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-1}$
力のモーメント	ニュートンメートル	N · m	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$
表面張力	ニュートン每メートル	N/m	$kg \cdot s^{-2}$
角速度	ラジアン毎秒	rad/s	$m \cdot m^{-1} \cdot s^{-1} = s^{-1}$
角加速度	ラジアン毎平方秒	rad/s ²	$m \cdot m^{-1} \cdot s^{-2} = s^{-2}$
熱流密度、放射照度	ワット每平方メートル	W/m^2	$kg \cdot s^{-3}$
熱容量、エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
質量熱容量(比熱容量)	ジュール每キログラム	J/(kg · K)	$m^2 \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
質量エントロピー	毎ケルビン		
質量エネルギー(比エネルギー)	ジュール每キログラム	J/kg	$m^2 \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
熱伝導率	ワット每メートル毎ケルビン	$W/(m \cdot K)$	$m \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot K^{-1}$
体積エネルギー	ジュール每立方メートル	J/m ³	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2}$
電界の強さ	ボルト每メートル	V/m	$m \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-1}$
体積電荷	クーロン每立方メートル	C/m ³	$m^{-3} \cdot s \cdot A$
電気変位	クーロン每平方メートル	C/m ²	$m^{-2} \cdot s \cdot A$
誘電率	ファラード每メートル	F/m	$m^{-3} \cdot kg^{-1} \cdot s^4 \cdot A^2$
透磁率	ヘンリー每メートル	H/m	$m \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-2}$
モルエネルギー	ジュール每モル	J/mol	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot mol^{-1}$
モルエントロピー	ジュール每モル每ケルビン	J/(mol · K)	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}$
モル熱容量	クーロン每キログラム	C/kg	$kg^{-1} \cdot s \cdot A$
照射線量(X線及びγ線)	クーロン每キログラム		
吸収線量率	グレイ每秒	Gy/s	$m^2 \cdot s^{-3}$
放射強度	ワット每スチラジアン	W/sr	$m^4 \cdot m^{-2} \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot m^{-2} \cdot kg \cdot s^{-3}$
放射輝度	ワット每平方メートル每スチラジアン	W/(m ² · sr)	$m^2 \cdot m^{-2} \cdot kg \cdot s^{-3} = kg \cdot s^{-3}$

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}	ゼット	z
10^1	デカ	da	10^{-24}	ヨクト	y

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	1h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86400 s
度	°	$1^\circ = (\pi/180) \text{ rad}$
分	'	$1' = (1/60)^\circ = (\pi/10800) \text{ rad}$
秒	"	$1'' = (1/60)' = (\pi/648000) \text{ rad}$
リットル	L	$1L=1 dm^3=10^{-3} m^3$
トン	t	$1t=10^3 \text{ kg}$
ネーベル	Np	$1Np=1$
ベル	B	$1B=(1/2) 1n10 (Np)$

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	$1eV=1.60217733 (49) \times 10^{-19} J$
統一原子質量単位	u	$1u=1.6605402 (10) \times 10^{-27} kg$
天文単位	ua	$1ua=1.49597870691 (30) \times 10^{11} m$

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	里	1 海里=1852 m
ノット	ト	1 ノット=1 海里毎時=(1852/3600) m/s
アール	ル	$1a=1 dm^2=10^{-2} m^2$
ヘクタール	ha	$1 ha=1 hm^2=10^4 m^2$
バル	bar	$1 bar=0.1 MPa=100 kPa=10^5 Pa$
オングストローム	Å	$1 Å=0.1 nm=10^{-10} m$
パン	b	$1 b=100 fm^2=10^{-28} m^2$

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	$1 erg=10^{-7} J$
ダイナ	dyn	$1 dyn=10^{-5} N$
ボルト	P	$1 P=1 dyn \cdot s/cm^2=0.1 Pa \cdot s$
ストークス	St	$1 St = 1 cm^2/s = 10^{-4} m^2/s$
ガウス	G	$1 G = 10^{-4} T$
エルステッド	Oe	$1 Oe = (1000/4\pi) A/m$
マクスウェル	Mx	$1 Mx = 10^{-8} Wb$
スチール	sb	$1 sb = 1 cd/m^2 = 10^4 cd/m^2$
ホタル	ph	$1 ph = 10^4 lx$
ガル	Gal	$1 Gal = 1 cm/s^2 = 10^{-2} m/s^2$

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	Ci	$1 Ci=3.7 \times 10^{10} Bq$
レントゲン	R	$1 R = 2.58 \times 10^{-4} C/kg$
ラド	rad	$1 rad=1 cGy=10^{-2} Gy$
レン	rem	$1 rem=1 cSv=10^{-2} Sv$
X線単位	IX unit	$1X unit=1.002 \times 10^{-4} nm$
ガンマ	γ	$1 \gamma = 1 nT = 10^{-9} T$
ジャンスキー	Jy	$1 Jy=10^{-26} W \cdot m^2 \cdot Hz^{-1}$
フェルミ	fermi	$1 fermi=1 fm=10^{-15} m$
メートル系カラット		$1 metric carat = 200 mg = 2 \times 10^{-4} kg$
トル	Torr	$1 Torr = (101.325/760) Pa$
標準大気圧	atm	$1 atm = 101.325 Pa$
カロリ	cal	
ミクロ	μ	$1 \mu = 1 \mu m = 10^{-6} m$