

単一亀裂を対象とした
亀裂の間隙構造データの取得技術の開発と
亀裂内での透水・物質移行特性データの取得

Development of Technique for Acquiring Fracture Void Structure Data
for a Single Fracture and Acquisition of Hydraulic/Mass Transport Properties
in a Fracture

佐藤 久 澤田 淳 高山 裕介

Hisashi SATO, Atsushi SAWADA and Yusuke TAKAYAMA

核燃料・バックエンド研究開発部門

核燃料サイクル工学研究所

環境技術開発センター

基盤技術研究開発部

Department of Geological Disposal Research

Nuclear Backend Technology Center

Nuclear Fuel Cycle Engineering Laboratories

Sector of Nuclear Fuel, Decommissioning and Waste Management Technology Development

November 2020

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは国立研究開発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 (<https://www.jaea.go.jp>)
より発信されています。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 研究連携成果展開部 研究成果管理課
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村大字白方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
Institutional Repository Section,
Intellectual Resources Management and R&D Collaboration Department,
Japan Atomic Energy Agency.
2-4 Shirakata, 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, 2020

単一亀裂を対象とした亀裂の間隙構造データの取得技術の開発と
亀裂内での透水・物質移行特性データの取得

日本原子力研究開発機構 核燃料・バックエンド研究開発部門
核燃料サイクル工学研究所 環境技術開発センター
基盤技術研究開発部

佐藤 久*、澤田 淳、高山 裕介

(2020年8月24日受理)

高レベル放射性廃棄物の地層処分における安全評価において、亀裂の透水や物質移行に関するパラメータを設定する際には、実際の亀裂の透水特性や物質移行特性を十分に理解していることが重要である。亀裂の透水特性や物質移行特性は亀裂の間隙構造の影響を受ける。そのため、亀裂を対象に水理試験を実施するだけでなく、亀裂の間隙構造に基づいた亀裂の透水や物質移行特性の評価を行う必要がある。

しかし、亀裂の間隙構造が亀裂の水理特性に与える影響を評価した例は限られている。その要因として、水理試験を実施した際の亀裂の間隙構造を保持した、亀裂開口部の3次元形状データを取得することが困難であることが挙げられる。

そこで本研究では、亀裂の表面形状データから亀裂の3次元的な間隙構造を取得する技術を開発するとともに、その技術を用いた亀裂の3次元的な間隙構造データと水理試験結果のデータセットを取得することを目的とする。具体的には、実際の亀裂を型として作製した透明な亀裂のレプリカ試料を対象に、座標を厳密に設定して測定した亀裂表面形状データから亀裂の3次元的な間隙構造データを取得する手法を構築し、その適用を試みた。また、同試料を対象に透水試験や筆者らがこれまでに整備してきた光学的な測定手法を用いたトレーサー試験を実施し、亀裂の透水特性や物質移行特性を示すデータを取得した。

取得した亀裂の3次元的な間隙構造データの妥当性を評価するために、他の異なる方法で得た開口幅の平均値と比較した。その結果、亀裂の間隙構造データから得られた開口幅は、互いに異なる複数の方法で得られた開口幅の平均値とほぼ一致したことから、本試験で得られたデータの妥当性が確認できた。

Development of Technique for Acquiring Fracture Void Structure Data for a Single Fracture
and Acquisition of Hydraulic/Mass Transport Properties in a Fracture

Hisashi SATO*, Atsushi SAWADA and Yusuke TAKAYAMA

Department of Geological Disposal Research
Nuclear Backend Technology Center
Nuclear Fuel Cycle Engineering Laboratories
Sector of Nuclear Fuel, Decommissioning and Waste Management Technology Development
Japan Atomic Energy Agency
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received August 24, 2020)

In the safety assessment of the geological disposal of high-level radioactive waste, it is important to fully understand the permeability and mass transport properties of actual fractures when setting parameters for permeability and mass transport properties of fractures. Permeability and mass transport properties of a fracture are affected by the void structure of the fracture. Therefore, it is necessary not only to conduct a hydraulic test but also to evaluate hydraulic properties based on the void structure of the fracture.

Therefore, the purpose of this study is to develop a technique to acquire a three-dimensional void structure of a fracture from fracture surface shape data, and to obtain a dataset of three-dimensional void structure data and hydraulic data of the fracture. Specifically, we made a transparent replica sample of fracture and measure the fracture surface shape data in the exact coordinates. The three-dimensional void structure data was constituted from fracture surface shape data in the same coordinates. In addition, we conducted a permeability test and tracer test for the same sample to obtain a permeability and mass transport properties of the fracture.

To assess the validity of the acquired data, we compared it with the apertures evaluated based on different methods. As a result, the average aperture from the fracture void structure was almost same as the average aperture acquired by different methods, from the above that the test result was validated.

Keywords: Fracture, Fracture Void Structure, Mass Transport Property
Surface Topography, Transparent Replica

* Inspection Development Company Ltd.

目次

1. はじめに	1
2. 亀裂の透明レプリカ試料	3
3. 亀裂開口部の 3 次元形状データの取得	6
3.1 亀裂表面形状測定による亀裂開口部の 3 次元形状データの取得方法	8
3.2 測定装置	9
3.3 亀裂の両面で共通の座標軸の設定	11
3.3.1 座標の基準の設置	11
3.3.2 亀裂の両面の間隔の測定 (Z 軸基準の間隔の測定)	14
3.3.3 XY 軸の基準座標の設定	14
3.4 亀裂表面形状測定	17
3.5 亀裂開口部の 3 次元形状の算出	20
4. 水理・トレーサー試験による亀裂の透水・物質移行特性の把握	22
4.1 光学的手法によるトレーサー試験	22
4.1.1 光学的測定装置及びトレーサー試験方法	22
4.1.2 トレーサー濃度分布の取得	24
4.1.3 破過曲線の算出	27
4.2 透水試験	29
4.2.1 試験装置概要	29
4.2.2 透水試験結果	29
4.2.3 水理学的開口幅の算出	29
5. 開口幅を指標とした亀裂開口部の 3 次元形状データの妥当性の評価	31
5.1 亀裂内体積測定による平均開口幅	31
5.2 マスバランス開口幅	31
5.3 光学的手法による開口幅測定	32
5.4 開口幅の比較	32
6. まとめ	34
参考文献	35
付録 CD-ROM	37

Contents

1. Introduction	1
2. Transparent replica specimen	3
3. Acquisition of three dimensional fracture void space data	6
3.1 Acquisition method of three dimensional fracture void space data by fracture shape measurement	8
3.2 Measuring device	9
3.3 Setting a common coordinate axis on both sides of the fracture	11
3.3.1 Installation of coordinate reference	11
3.3.2 Measurement of the space between both sides of the fracture	14
3.3.3 Setting the reference coordinates of the XY Axis	14
3.4 Measurement of fracture surface shape	17
3.5 Calculation of three dimensional fracture void space	20
4. Understanding of mass transport property and permeability	22
4.1 Tracer test by optical method	22
4.1.1 Optical measuring equipment and optical tracer test method	22
4.1.2 Acquisition of tracer concentration distribution	24
4.1.3 Calculation of breakthrough curve	27
4.2 Permeability test	29
4.2.1 Test equipment	29
4.2.2 Permeability test results	29
4.2.3 Calculation of hydraulic aperture	29
5. Evaluation of validity of fracture void structure using aperture as a indication	31
5.1 Average aperture by measurement of fracture void volume	31
5.2 Mass balance aperture	31
5.3 Measurement of aperture by optical method	32
5.4 Comparison of apertures	32
6. Conclusion	34
References	35
Appendix (CD-ROM)	37

図表目次

図 1	亀裂の透明レプリカ試料	4
図 2	亀裂の固定	4
図 3	注排水ポートの概念図	5
図 4	亀裂開口部の 3 次元形状の概念図	7
図 5	亀裂の両面で共通の XY 座標軸の設定	8
図 6	亀裂の分離（亀裂の上側を Y 軸対象に反転）	8
図 7	亀裂表面形状測定装置	10
図 8	座標の基準の設置（側面図）	12
図 9	座標の基準の設置（上面図）	12
図 10	座標の基準の設置	13
図 11	座標の基準の設置（亀裂の分離後）	13
図 12	XY 座標軸の中心座標の算出方法	15
図 13	亀裂の上側と下側の XY 座標軸の設定	16
図 14	亀裂の下側の表面形状測定結果	18
図 15	亀裂の上側の表面形状測定結果	19
図 16	開口幅の算出方法	20
図 17	亀裂表面形状データから算出した開口幅分布	21
図 18	光学的測定装置の概要	23
図 19	トレーサー濃度分布（上側の注排水ポートから注入）	25
図 20	トレーサー濃度分布（下側の注排水ポートから注入）	26
図 21	破過曲線の算出結果	28
図 22	透水試験方法の概念図	30
図 23	透水試験結果	30
図 24	光学的手法による開口幅分布	33
図 25	亀裂表面形状から算出した開口幅と光学的手法による開口幅の頻度分布の比較	33
表 1	トレーサー試験条件	23
表 2	異なる方法で測定した平均開口幅の比較	32

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における安全評価では、核種は地下水を媒体として移行するとしている。処分地の岩盤に亀裂が卓越している場合には、核種は主に亀裂内を移行すると考えられることから、亀裂内での透水特性や物質移行特性を十分に理解することが高レベル放射性廃棄物の地層処分の安全評価を行う上で重要である。

これまでに、複雑な亀裂の内部構造が透水量係数等の透水特性に与える影響を評価するために、亀裂開口幅分布を 3 乗則に基づき局所的な透水係数分布に置き換えた浸透流解析 (Local Cubic Law:以降、「LCL」と呼ぶ) が行われているが、LCL に基づく浸透流解析結果は、透水試験結果を過大評価する結果が得られている^{1),2)}。その要因の一つとして、LCL に基づく浸透流解析では亀裂表面の凹凸が透水特性に与える影響を考慮していないことが挙げられる。

亀裂表面の凹凸の影響を考慮した浸透流解析の検討例として、Al-Yaarubi et al.は、20 mm×20 mm の実際の亀裂を型として作製した亀裂のレプリカ試料を対象に透水試験を実施するとともに、亀裂の表面形状測定により取得した亀裂の 3 次元的な間隙構造 (以降、「亀裂開口部の 3 次元形状」と呼ぶ) を対象に、Navier-Stokes 方程式に基づく浸透流解析を実施した³⁾。その結果、亀裂開口部の 3 次元形状を対象とした Navier-Stokes 方程式に基づく浸透流解析結果は、透水試験結果を再現できることが示された。この報告により、亀裂を対象とした浸透流解析結果が透水試験結果を過大評価する原因の長年の議論に決着が付いた。

一方、実際の亀裂内での物質移行特性として、破過曲線や亀裂内の溶質の濃度分布等を Navier-Stokes 方程式に基づく浸透流解析等により取得した透水場を基に評価した例は限られている。1 例として Nishiyama et al.は、亀裂の表面形状測定により取得した亀裂開口部の 3 次元形状を対象に、非圧縮性粘性流れにおいて Navier-Stokes 方程式を直接解いた場合と同様の結果を得られる手法である Lattice Gas Automaton 法 (LGA) を用いた物質移行解析を実施している⁴⁾。その結果、亀裂内を移行中のトレーサーの濃度分布が得られている。しかし、トレーサー試験を実施した際に、亀裂内のトレーサーの濃度分布は実測できていないため、解析結果との比較に用いている試験データは亀裂の注入側と排出側でのトレーサーの破過曲線である。

実際の亀裂を対象とした物質移行特性の検証例が少ない要因の一つとして、Navier-Stokes 方程式に基づく物質移行解析等の亀裂内での物質移行現象を厳密に評価できる解析手法は、計算負荷が非常に高いことが挙げられる。しかし主な要因は、試験を実施して以下に示すデータを取得することが困難なことである。

- 1) トレーサー試験を実施した際の亀裂の間隙構造を保持した、亀裂開口部の 3 次元形状データ
- 2) 精度の高いトレーサー試験データ

3) 試験結果を検証するデータ

これらのデータを同じ亀裂試料を対象に相互に比較可能な程度の高い精度や高い空間解像度で取得した例はこれまでにないため、亀裂の物質移行特性の理解を深めるためには、実際の亀裂を対象とした上記の条件を満たしたデータが求められている。

一方、筆者らはこれまでに亀裂を型として作製した透明な亀裂のレプリカ試料を対象とした光学的手法による測定技術⁵⁾を整備することにより、精度の高いトレーサー試験データを取得可能な技術を示してきた。

また、亀裂開口部の3次元形状データは、Ameli et al.により座標を厳密に設定して測定した亀裂の表面形状データを組み合わせて構築する概念が示されている⁶⁾。この概念を亀裂の透明レプリカ試料に適用する手法を検討することにより、トレーサー試験を実施した際の亀裂の間隙構造を保持した、亀裂開口部の3次元形状データの取得が可能であると考えられる。

そこで本検討では、花崗岩の割裂亀裂を型として作製した亀裂の透明レプリカ試料を対象に、トレーサー試験を実施した際の亀裂の間隙構造を保持した亀裂開口部の3次元形状データを亀裂表面形状データから算出する技術を構築することを目的とする。そして、同試料を対象に、透水試験を実施するとともに、光学的手法を用いたトレーサー試験を実施し、排出側での破過曲線及び亀裂内のトレーサー濃度分布を取得することにより、亀裂開口部の3次元形状データと亀裂の透水特性や物質移行特性を示す水理試験データを組み合わせたデータセットを取得した。

さらに、取得したトレーサー試験データ及び亀裂開口部の3次元形状データは、他の異なる手法で取得したデータとの比較によりその妥当性を示した。具体的には、亀裂内の体積測定による平均開口幅や光学的手法により取得した開口幅の2次元分布などの異なる測定方法で評価した開口幅を指標に比較を行い、お互いの試験結果の妥当性を評価した。

2. 亀裂の透明レプリカ試料

試験で使用する亀裂試料には、花崗岩の割裂亀裂試料⁷⁾を型として作製した透明な亀裂のレプリカ試料（以降、「亀裂の透明レプリカ試料」と呼ぶ）を使用した。花崗岩には、お互いにほぼ直交する3方向に石目と呼ばれる潜在的な弱面が存在しており、割れやすい順にrift面、grain面、hardway面と呼ばれている⁸⁾。本試験では割裂試験により人工的に作製した約85 mm×85 mmの花崗岩の亀裂試料⁷⁾のうち、rift面の亀裂試料から亀裂の透明レプリカ試料を作製した。亀裂の表面形状を測定する際には、レーザー変位計の測定範囲が亀裂の凹凸の高低差よりも狭いことから、一度に亀裂全体の表面形状を測定できないため、複数回の表面形状測定を行い数値的に合成することにより、亀裂全体の表面形状を取得する。この際、亀裂の凹凸の高低差が小さいほど亀裂表面形状測定を行う回数を減らせることから、今回は試験時間の短縮を目的として亀裂の凹凸の高低差が最も少ない面であったrift面⁷⁾を採用した。

亀裂の透明レプリカ試料は、亀裂試料から型取り用のシリコンを用いて亀裂の上側と下側それぞれの反転型を作製し、シリコン型に透明エポキシ樹脂を注入することにより作製した。図1に作製した亀裂の透明レプリカ試料を示す。

なお、亀裂試料を作製するための割裂試験では、花崗岩に楔を当てて亀裂を発生させているため亀裂試料の端部は開口幅が大きくなるなどの影響を受けている。この端部の影響を取り除くために、作製した亀裂の透明レプリカ試料は、4辺の端部を均等に約5 mmずつ切断することにより74.8 mm×74.8 mmに整形している。

亀裂の透明レプリカ試料を対象にレーザー変位計で表面形状を測定する際に、レーザーが亀裂表面を透過すると測定不能となる。このため、亀裂表面にブラスト加工を行い微細な傷をつけることで亀裂表面において拡散反射が起こるようにして、レーザー変位計での測定不能点が少なくなるように工夫をほどこしている。また、光学的手法による測定では、亀裂面と反対側の平面部で光の乱反射が起きると測定結果に影響を与えるため、亀裂面と反対側の平面部は研磨紙と研磨剤を用いて鏡面加工を行っている。

表面処理加工が終了した亀裂の透明レプリカ試料は、図2に示すように亀裂の両面を重ね合わせて側面にアクリル板を張り付けることにより亀裂の上側と下側を固定する。亀裂を固定した後に図3に示すようにアクリル板を固定していない側面に注排水ポートを設置して、亀裂内に透水できるようにする。

透水試験時には、図3に示すようにそれぞれの注排水ポートに2つずつある注排水孔の片方を注水用、もう片方を水頭差の測定に用いる。トレーサー試験の開始前には、注入側の注排水ポートのうち、片方の注排水孔からトレーサーを注入し、もう片方の注排水孔からトレーサーを排出することにより、注排水ポート内をトレーサーで置換させ、注入側の注排水ポートから一定の濃度のトレーサーを亀裂に注入できるように工夫した。

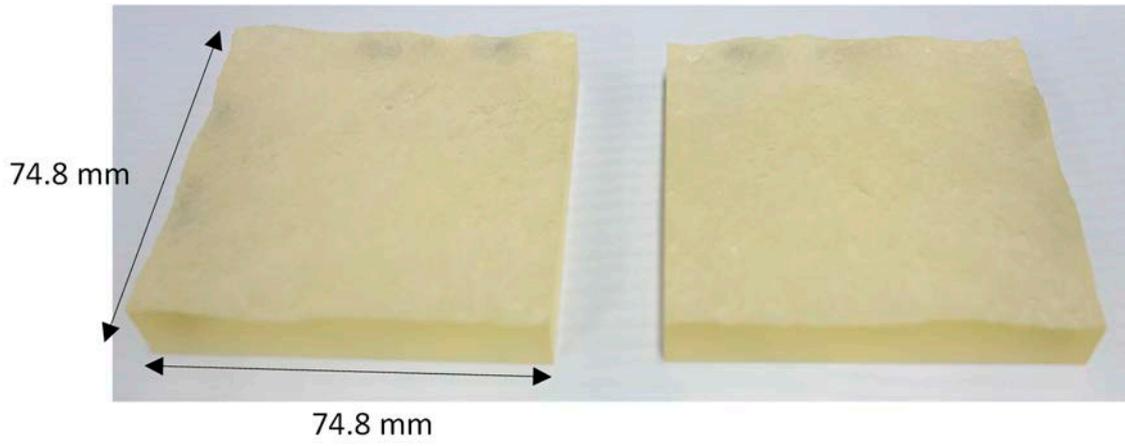


図1 亀裂の透明レプリカ試料

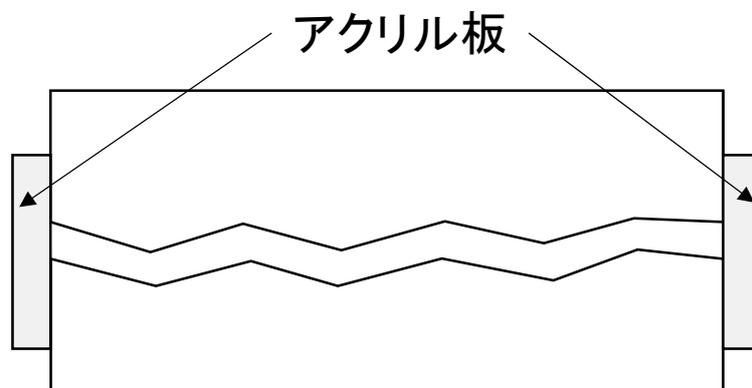


図2 亀裂の固定

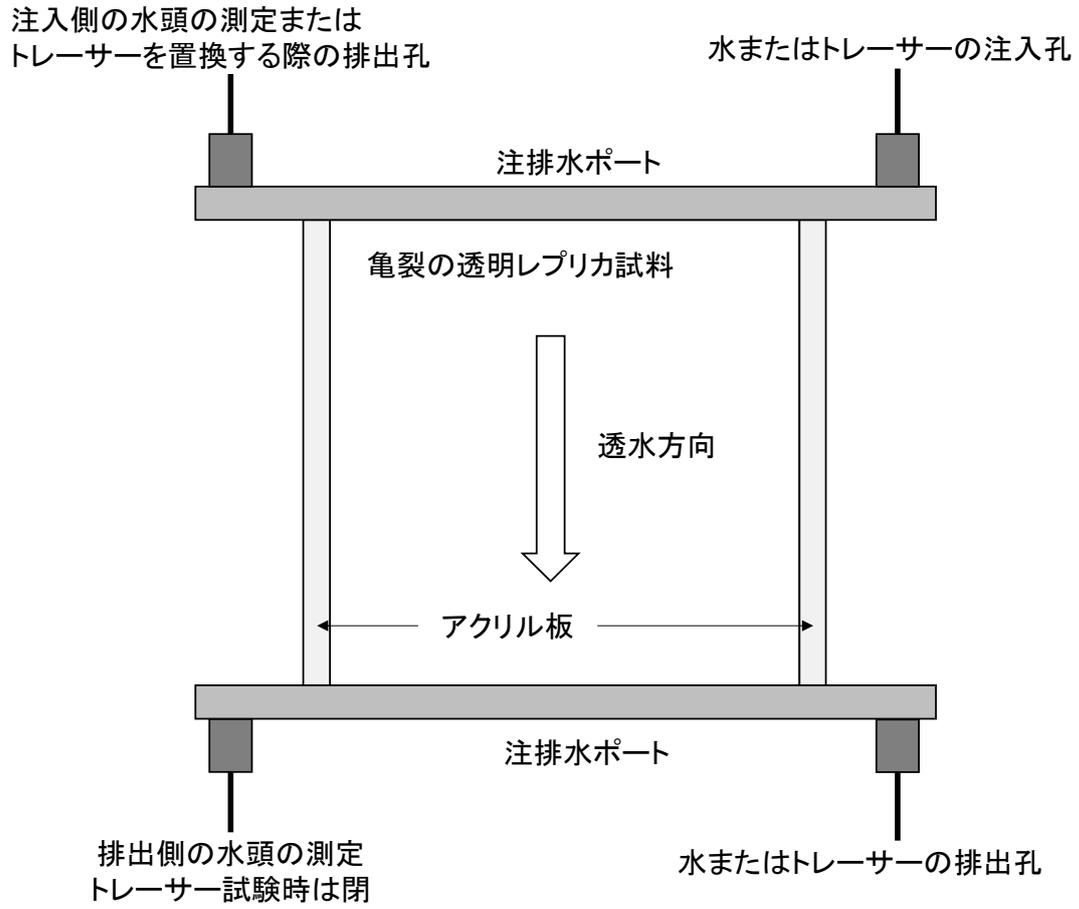


図 3 注排水ポートの概念図

3. 亀裂開口部の 3 次元形状データの取得

水理試験を実施した際と同じ亀裂の間隙構造を保持しながら、亀裂開口部の 3 次元形状を取得する方法として、これまでに様々な方法が提案されている。

亀裂断面の観察による亀裂開口部の 3 次元形状の取得方法^{9),10),11)}では、水理試験を実施後に亀裂内に樹脂を注入して亀裂を固定し、樹脂が硬化後に亀裂試料の切断や研磨により、亀裂の断面を露出させて直接亀裂の幅の分布を測定する。この方法は、亀裂の断面を直接観察することができるので、観察する断面については精度の高いデータを取得できるが、切断や研磨する方向の分解能を高めるには時間やコストが掛かる。

X 線 CT による亀裂開口部の 3 次元形状の取得方法^{12),13),14)}は、水理試験だけでなく、垂直応力やせん断応力を掛けた状態での亀裂開口部の 3 次元形状を測定できるなどの利点があるが、測定可能な試料のサイズに制限があることや、空間分解能の問題から亀裂開口部の 3 次元形状を定量的に評価するのは難しい。また、マイクロフォーカス X 線 CT を用いた検討¹⁴⁾では、より高い空間分解能で亀裂開口部の 3 次元形状を評価可能であるが、測定できる試料のサイズには制限がある。

光学的手法による亀裂開口部の 3 次元形状の取得方法¹⁵⁾は、亀裂の透明レプリカ試料を対象とした水理試験を実施した状態のまま、亀裂の両面を分離せずに光学的手法を用いて開口幅分布と表面形状をそれぞれ測定することにより亀裂開口部の 3 次元形状を取得可能である。光学的手法により得られる開口幅分布は他の測定手法による平均開口幅との比較によりその精度が検証されている。一方、光学的手法により得られる亀裂表面形状は、レーザー変位計により測定した亀裂表面形状と比較すると、亀裂表面の波長の長い凹凸の傾向は一致しているが、岩石を構成する鉱物の粒径レベルの凹凸を再現するには至っていない。岩石を構成する鉱物の粒径レベルの亀裂表面の凹凸に起因する流路の複雑さが亀裂の透水特性や物質移行特性に与える影響が大きいことから、光学的手法により得られる亀裂表面形状は、透水や物質移行特性に与える影響の評価に十分な精度を有していないと考えられる¹⁵⁾。

一方、亀裂表面形状測定による亀裂開口部の 3 次元形状の取得方法^{16),17)}は、上記の方法と比較して適用例が多い。しかし、この方法は亀裂表面形状を測定する際に亀裂の両面を分離させる必要がある。そのため、亀裂の両面の表面形状データを組み合わせて亀裂開口部の 3 次元形状を再構築する際の再現性に大きな課題がある。すなわち、水理試験を実施した際の亀裂の両面の位置関係を再現するためのデータをいかに得るかが亀裂開口部の 3 次元形状データを得るための課題となる。

この課題に対して、亀裂の両面を重ね合わせて固定した状態（水理試験を実施する状態）で亀裂の両面それぞれに座標の基準を設けて、亀裂の両面の位置関係を把握することにより、亀裂表面形状から精度の高い亀裂開口部の 3 次元形状を取得可能であることが示されている^{6),18),19)}。

本検討でも前述の手法と同様に亀裂の両面それぞれに座標の基準を設定して亀裂の透明レプリカ試料の亀裂表面形状を測定することにより、亀裂開口部の3次元形状を取得した。ここで、亀裂開口部の3次元形状の表現方法について、図4に示すように亀裂の上側の高さは亀裂の下側の高さに開口幅を足したものであることから、本報告では亀裂開口部の3次元形状を亀裂の下側の表面形状と亀裂開口幅分布の組み合わせた値として示す。

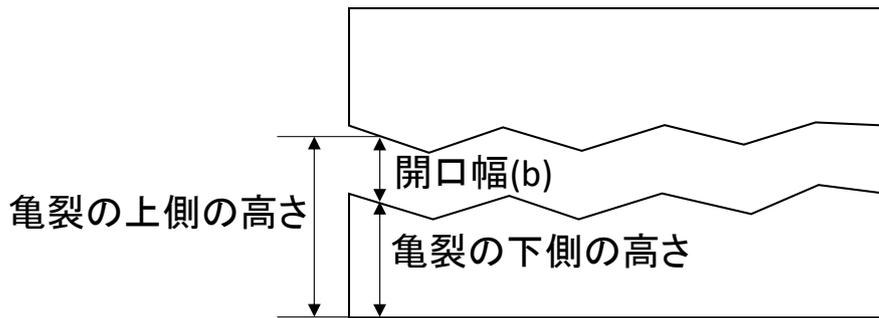


図4 亀裂開口部の3次元形状の概念図

3.1 亀裂表面形状測定による亀裂開口部の 3 次元形状データの取得方法

亀裂表面形状測定データから亀裂開口部の 3 次元形状を算出する方法を以下に記す。まず、図 5 に示すように、水理試験を実施した状態（亀裂の両面を重ね合わせて固定した状態）で、亀裂の両面で共通の XY 座標軸を設定する。そして、亀裂の両面の間隔（z 軸方向の位置関係）を測定する。その後、図 6 に示すように亀裂の上側を y 軸に沿った軸対象に反転するように分離し、亀裂の両面で共通の座標軸に基づき亀裂の表面形状を行う。

測定した亀裂の両面の表面形状データ（Z 座標のデータ）を XY 座標が一致するように数値的に重ね合わせ、亀裂の両面の間隔（z 軸方向の位置関係）を水理試験を実施した時と一致させる。これにより、図 5 に示す水理試験を実施した際と同じ亀裂の位置関係での亀裂開口部の 3 次元形状を取得できる。

具体的な共通の XY 座標軸の設定方法や、亀裂表面形状の測定方法を、次節以降に示す。

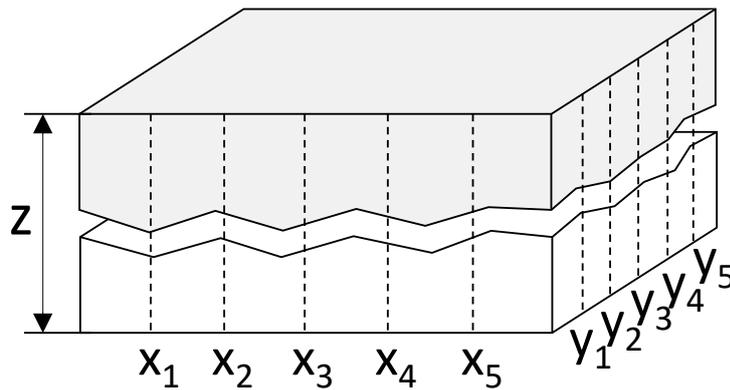


図 5 亀裂の両面で共通の XY 座標軸の設定

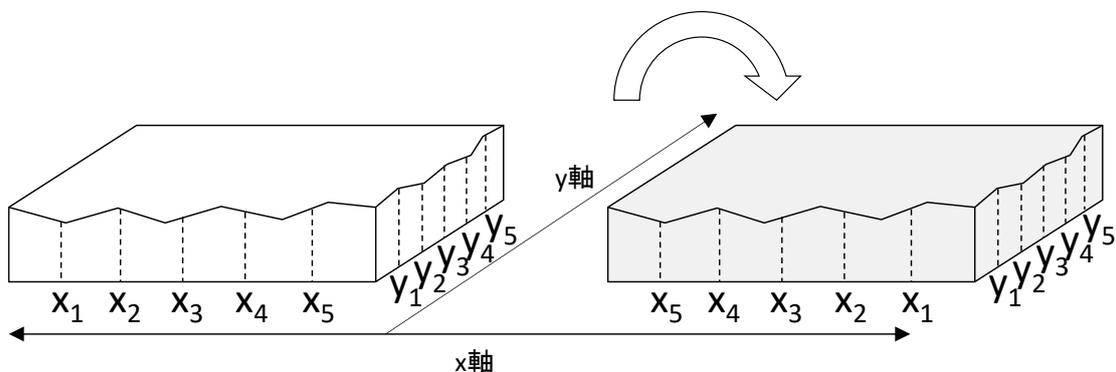


図 6 亀裂の分離（亀裂の上側を Y 軸対象に反転）

3.2 測定装置

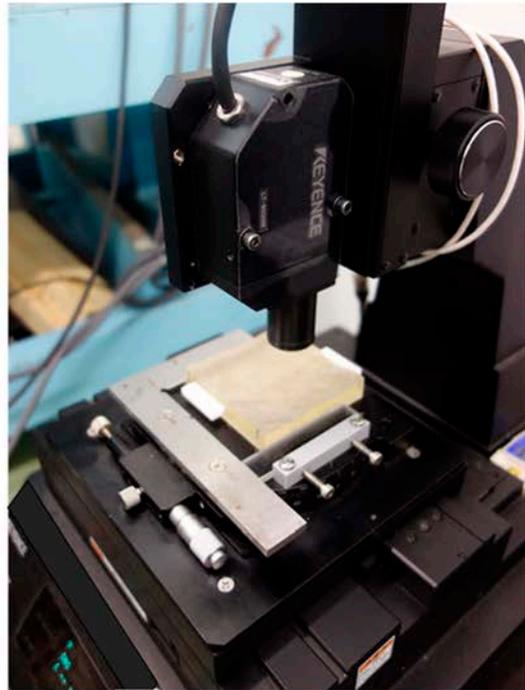
図 7 に亀裂表面形状測定装置の外観と亀裂の透明レプリカ試料を XY ステージ上に設置した状態を示す。なお、XY ステージの上には回転ステージが設置してあり、亀裂の透明レプリカ試料の回転方向の位置を調整可能である。

亀裂表面形状測定装置は、高精度形状測定システム KS-1100 (株式会社キーエンス) と共焦点方式のレーザー変位計 (株式会社キーエンス LT-9030M) で構成されている。XY ステージを動かしながら Z ステージに設置してあるレーザー変位計で亀裂面全体を走査することにより亀裂の表面形状 (XY 直交座標上の Z の高さ) を測定する。

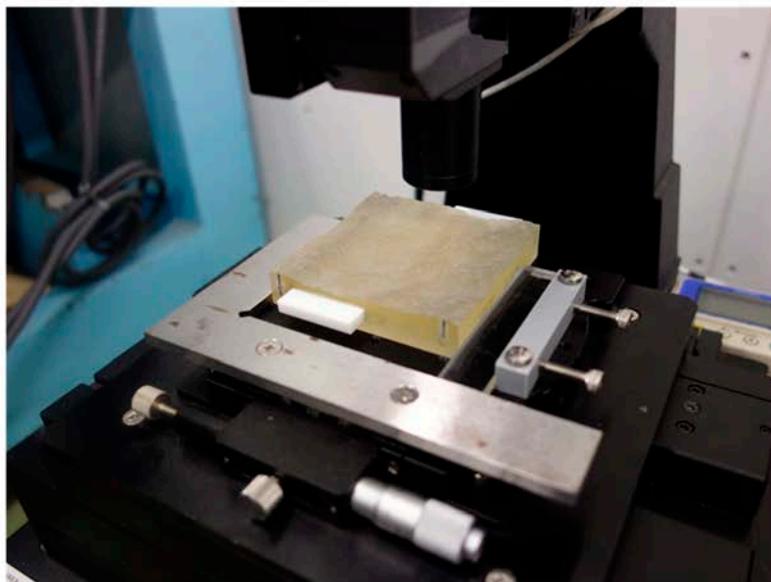
レーザー変位計の測定方法には三角測量方式と共焦点方式がある。三角測量方式は一般に測定速度が速いが、測定対象の色や反射率が異なると測定値の誤差が大きくなる特性を有する。一方、共焦点方式は測定速度が遅く測定には時間が掛かるが、測定対象の色や反射率の違いの影響を受けにくい特性を有することから、亀裂の透明レプリカ試料の表面形状測定には共焦点方式のレーザー変位計を採用した。



(a) 亀裂表面形状測定装置外観



(b) XY ステージとレーザー変位計



(c) 回転ステージ上の治具で固定した亀裂の透明レプリカ試料

図 7 亀裂表面形状測定装置

3.3 亀裂の両面で共通の座標軸の設定

3.3.1 座標の基準の設置

図 8 に亀裂の両面を固定した状態で亀裂の透明レプリカ試料に座標の基準を取り付けた状態の側面図、図 9 に上面図を示す。また、図 10 に亀裂の透明レプリカ試料に座標の基準を取り付けた写真を示す。ここで、X 軸座標、Y 軸座標の基準及び Z 軸座標の基準には、それぞれ以下の仕様を満たす物が求められる。

X 軸座標、Y 軸座標の基準の仕様

- ・断面形状が一定で棒状である
- ・塑性変形しない
- ・容易に切断が可能

Z 軸座標の基準の仕様

- ・平面の精度が高い
- ・厚さが一定（マイクロメートルオーダー）
- ・表面で乱反射しない（レーザー変位計での測定で誤差を生じない）

この条件を満たす物として今回は、X 軸座標、Y 軸座標の基準にはシャープペンシルの芯（以降、「XY 軸基準」と呼ぶ）、Z 軸座標の基準には、セラミックブロックゲージ（以降、「Z 軸基準」と呼ぶ）を採用した。

座標の基準は、4 章に記した透水試験及びトレーサー試験や 5 章の光学的手法による開口幅分布測定を実施した後に設置する。設置場所は、注排水ポートを取り外した側面とする。なお、それぞれの座標の基準は、設置後に位置が変化しないようにエポキシ系の接着剤で固定する。

Z 軸基準は、図 8、図 9 に示すように、上から見た場合に亀裂の両面に設置した Z 軸基準が重なり合わないように設置する。これにより、亀裂の両面に設置した Z 軸基準の高さを測定することで亀裂の両面の間隔を測定できる。なお、Z 軸基準を設置する高さは、亀裂の高さの最も低い位置とほぼ同じ高さとする。

XY 軸基準は、図 8 に示すように亀裂を跨ぐように設置する。接着剤が硬化した後に XY 軸基準を亀裂の位置で切断する。この状態で、亀裂の両面で XY 軸基準の位置は一致していることから、図 11 に示すように亀裂の両面を分離した後でも、亀裂の両面それぞれで XY 軸基準の中心を基準に XY 座標軸を設定することで、亀裂の両面の XY 座標軸は一致する。

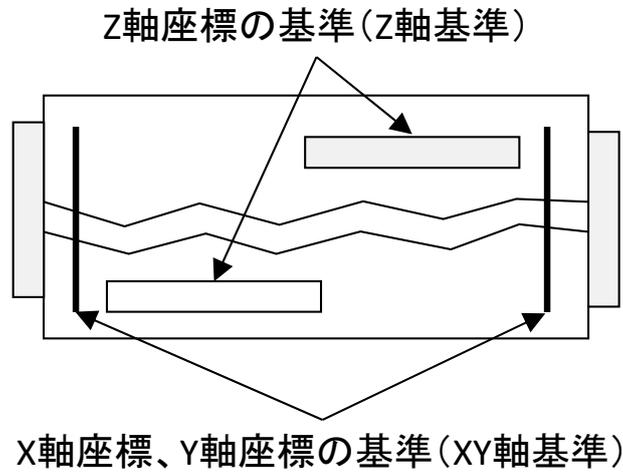


図8 座標の基準の設置 (側面図)

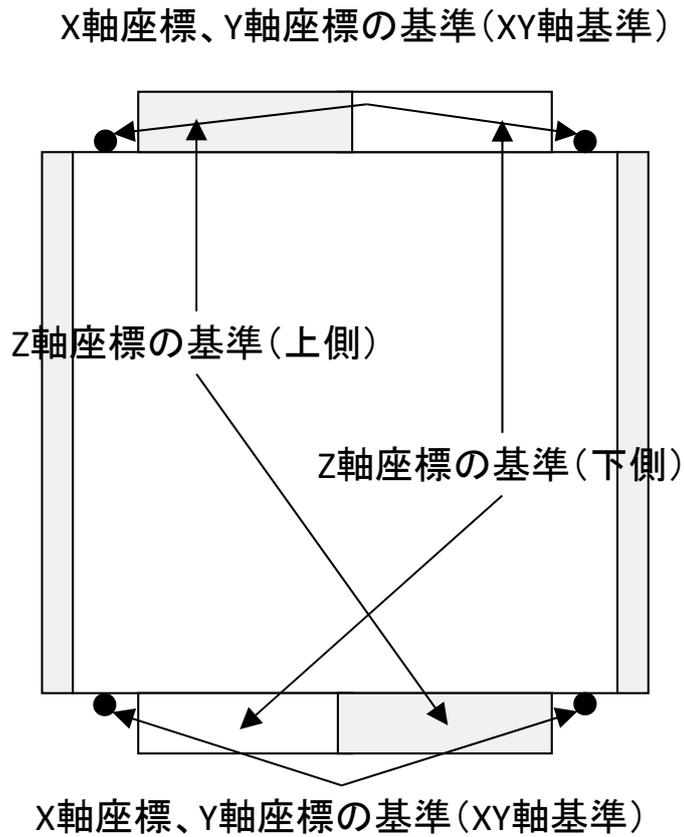


図9 座標の基準の設置 (上面図)

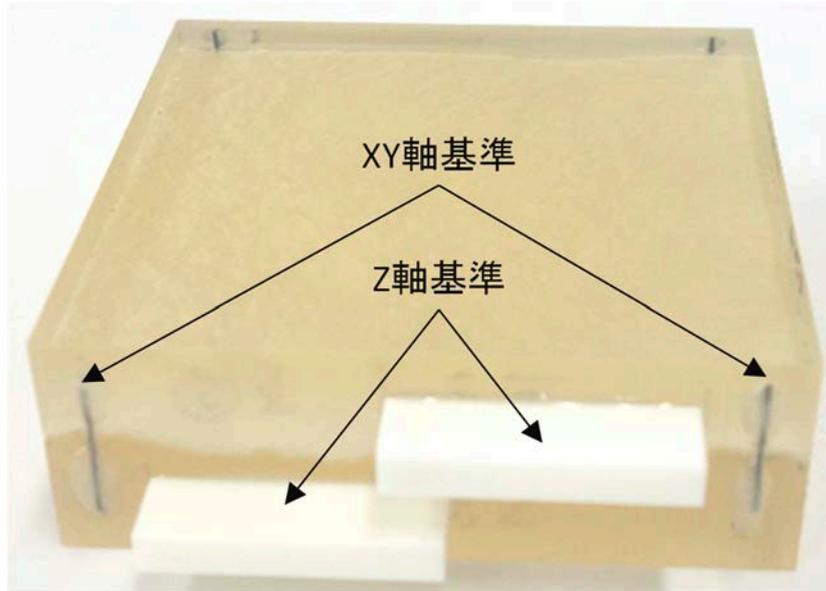


図 10 座標の基準の設置

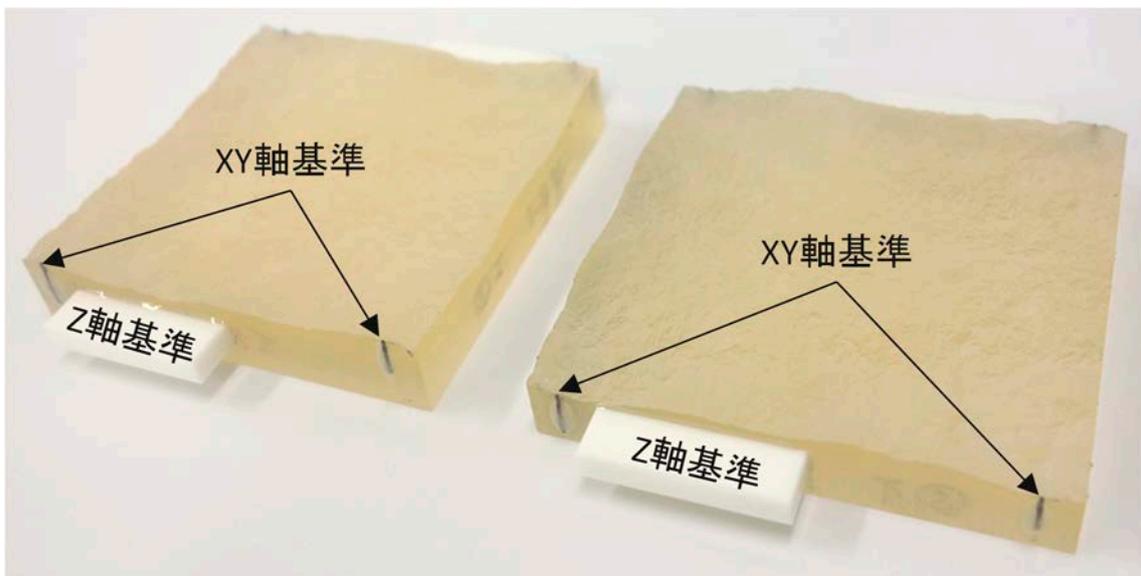


図 11 座標の基準の設置 (亀裂の分離後)

3.3.2 亀裂の両面の間隔の測定（Z 軸基準の間隔の測定）

図 8 に示すように、Z 軸基準は亀裂の両面で重なり合わないよう設置してあることから、それぞれの Z 軸基準の高さを測定することにより、亀裂の両面に設置した Z 軸基準の間隔を測定することができる。しかし、それぞれの Z 軸基準の高さを測定する際に、亀裂の両面の Z 軸基準の高さの差はレーザー変位計の測定範囲（2000 μm ）を超えていることから、同時に両面の Z 軸基準の高さを測定することはできない。このため、下側の Z 軸基準の高さを測定した後に、レーザー変位計の設置高さ（Z ステージの高さ）をレーザー変位計の測定範囲である 2000 μm を超えない範囲で上昇させて、上昇した高さを記録することをレーザー変位計の測定範囲が上側の Z 軸基準の高さの範囲に入るまで繰り返す。その後、上側の Z 軸基準の高さを測定し、測定した高さに Z ステージの高さを上昇させた累積値を加えることで上側の Z 軸基準の高さが得られる。

Z 軸基準の高さを測定した後に、側面を固定しているアクリル板を取り外して、図 11 に示すように亀裂の両面を分離させる。

3.3.3 XY 軸の基準座標の設定

亀裂の上側と下側の XY 軸をあわせるためには、XY 軸基準の中心座標を基準とした XY 座標軸に基づき表面形状を測定する必要がある。

亀裂表面形状測定装置の XY ステージ上には図 7 に示すように、回転ステージが設置されており、回転方向の調整が可能となっている。亀裂の透明レプリカ試料を XY ステージに設置した後に、手前側の 2 つの XY 軸基準の中心を結んだ直線と平行になるように XY ステージ上に設置している回転ステージで調整する。

具体的には、図 12 に示すように赤色の枠で囲んだ XY 軸基準を含む範囲の表面形状を 10 μm 間隔で測定し、XY 軸基準の断面の輪郭を抽出する。抽出した XY 軸基準の断面の輪郭に対して、円形の近似曲線を重ねてその中心座標を求める。これを左右両方の XY 軸基準に対して実施する。左右両方の XY 軸基準の中心座標の Y 軸の値が一致していない場合には回転ステージを調整する。この作業を左右両方の XY 軸基準の中心座標の Y 軸の値が一致するまで繰り返す。

なお、亀裂の透明レプリカ試料を XY ステージに設置する際に、亀裂の上側は図 6 に示すように亀裂の下側に対して Y 軸対象に反転している。このため、図 13 に示すように亀裂の下側は、左側の基準の中心を原点とし、右方向が X 軸のプラス方向となる XY 座標軸を設定するのに対して、亀裂の上側は、右側の基準の中心を原点とし、左方向が X 軸のプラス方向となる XY 座標軸を設定する。

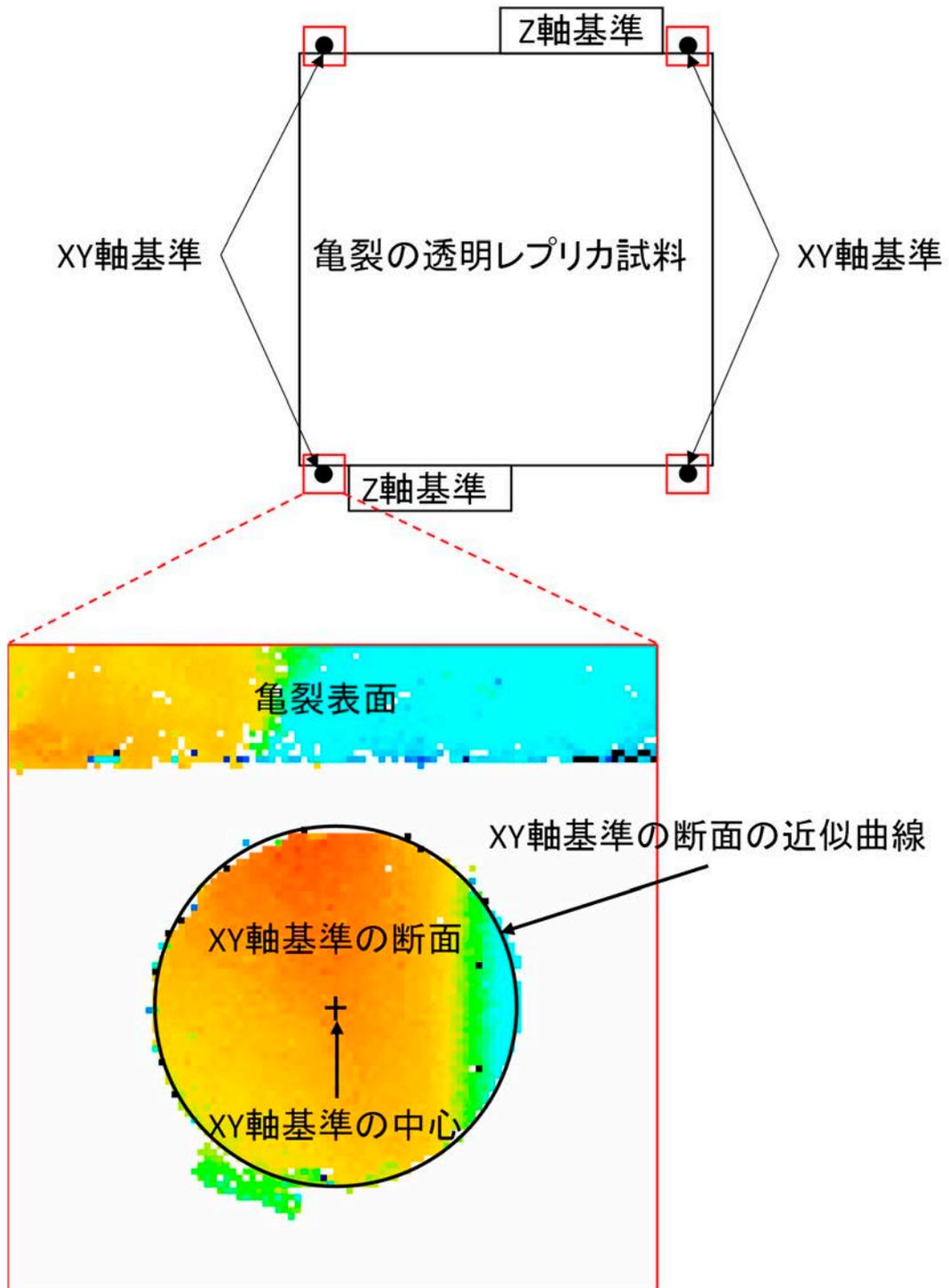


図 12 XY 座標軸の中心座標の算出方法

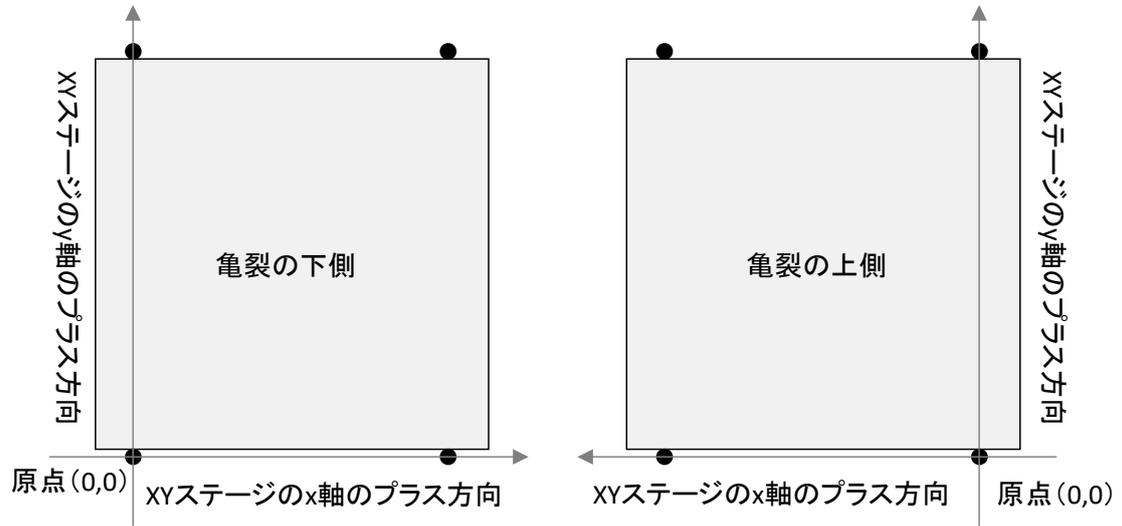


図 13 亀裂の上側と下側の XY 座標軸の設定

3.4 亀裂表面形状測定

レーザー変位計の測定精度と測定範囲には一般にトレードオフの関係があり、測定精度を求めると測定範囲が狭くなる。本検討では、測定精度を優先してレーザー変位計を選定したため、亀裂表面形状測定に用いる共焦点方式のレーザー変位計の測定範囲は 2000 μm であり、この測定範囲は亀裂の凹凸の高低差よりも狭い。このため、亀裂の両面に設置した Z 軸基準の高さを測定した場合と同様に、レーザー変位計の測定範囲内でレーザー変位計の設置高さを段階的に変えて複数回の表面形状測定を行う。各段階で測定した亀裂表面形状を、数値的に合成することにより亀裂全体の表面形状を取得する。

段階的に測定した亀裂表面形状の数値的な合成による亀裂表面形状の取得手順を以下に示す。

- ① Z 軸座標の基準を含む範囲の表面形状を測定する。
- ② レーザー変位計の設置高さ (Z ステージの高さ) をレーザー変位計の測定範囲である 2000 μm を超えない範囲である 1800 μm を目安に上昇させ、上昇させた値を記録する。
- ③ 亀裂の表面形状を測定する。
- ④ 測定した表面形状の高さに②で上昇させた Z ステージの高さとこれまでの Z ステージの上昇量の累積を加える。
- ②、③、④を亀裂面全体の表面形状データが取得できるまで繰り返す。
- ⑤ レーザー変位計の測定範囲外で亀裂表面形状が測定されていない領域の値を 0 として、測定した全ての亀裂表面形状を足し合わせる。なお、重複している部分については平均値とする。

亀裂表面形状の測定間隔は X 軸方向、Y 軸方向それぞれ 200 μm 、XY ステージの移動方法は、測定中はステージが停止しているステップ移動とした。ステップ移動の場合、測定時間は長くなるが、ステージを連続的に移動しながら測定する方法と比較すると、測定値や、座標の再現性が高い利点がある。

図 14 に亀裂の下側の各段階での表面形状測定結果と合成した亀裂の下側の亀裂表面形状測定結果、図 15 に亀裂の上側側の各段階での表面形状測定結果と合成した亀裂の上側の亀裂表面形状測定結果を示す。各段階での表面形状を合成することにより、亀裂全体の表面形状を測定することができた。

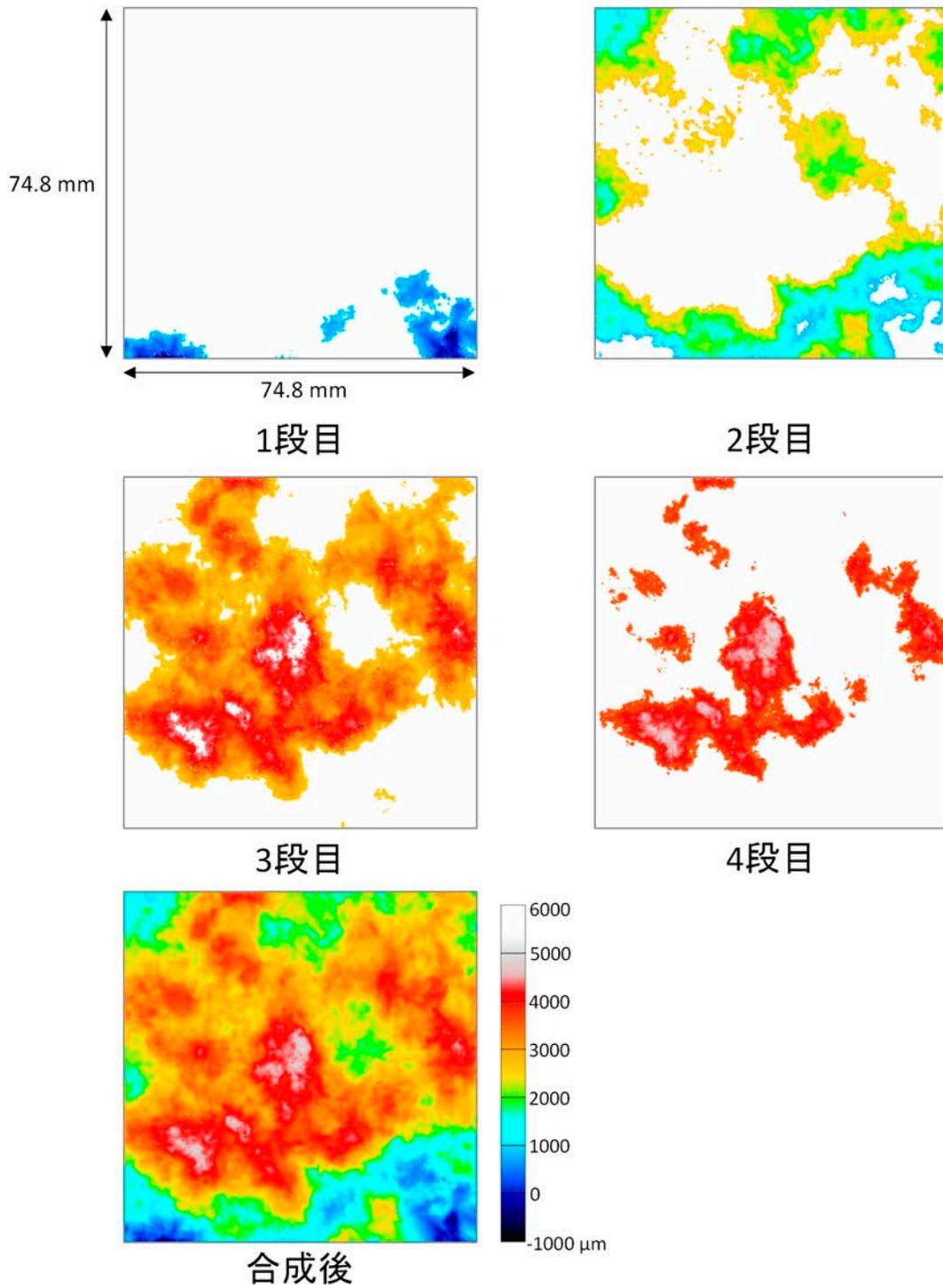


図 14 亀裂の下側の表面形状測定結果

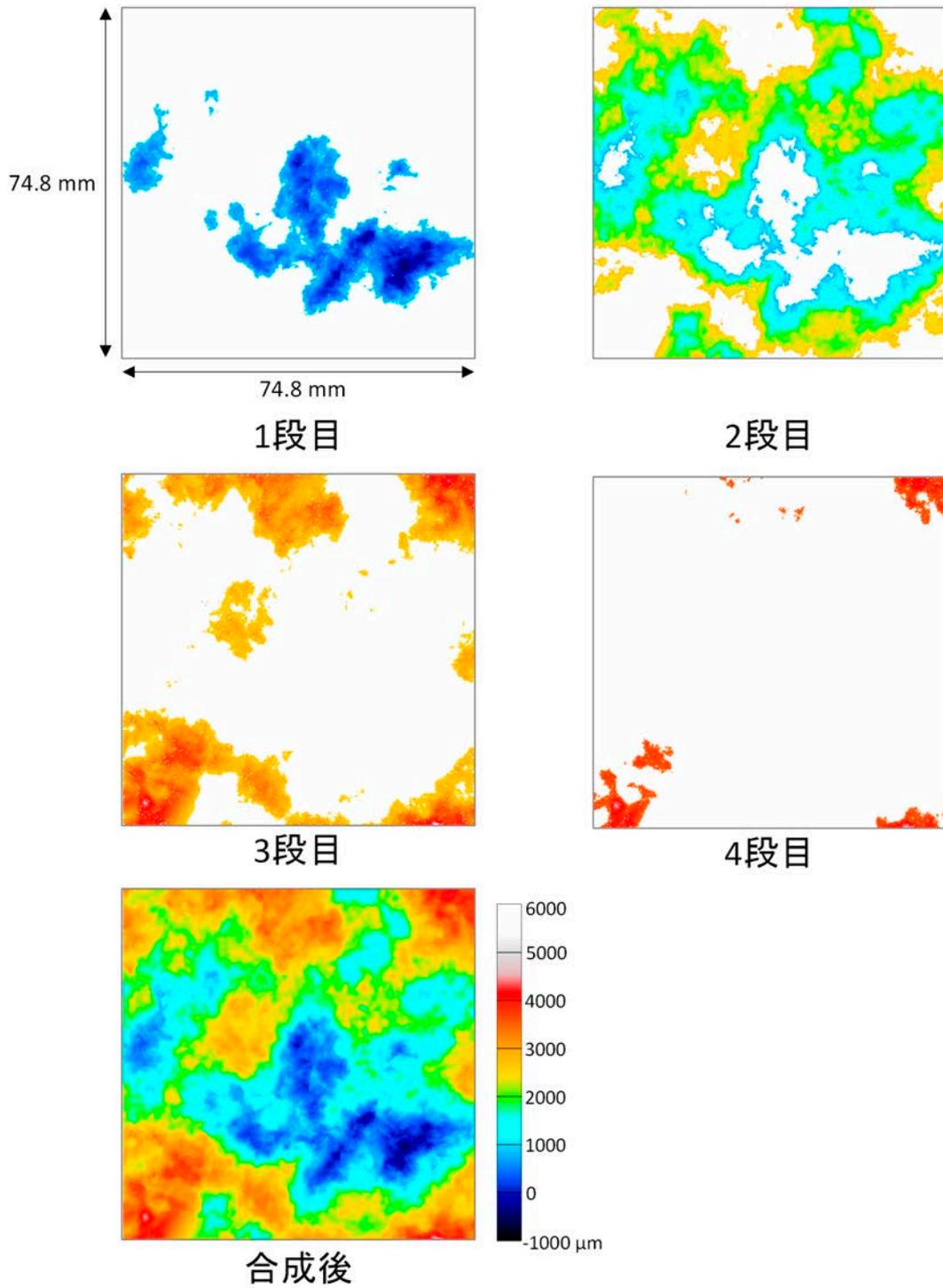


図 15 亀裂の上側の表面形状測定結果

3.5 亀裂開口部の 3 次元形状の算出

本報告では亀裂開口部の 3 次元形状を、亀裂の下側の表面形状と亀裂開口幅分布の組み合わせとして提示することとしている。下側の亀裂表面形状については、既に図 14 に示しているので、ここでは、開口幅分布の算出方法と算出結果を示す。

図 16 に開口幅の算出方法を示す。開口幅 b は、Z 軸基準間距離から上側亀裂高さとして下側亀裂高さを引くことにより求めることができる。ここで、Z 軸基準間距離は、3.3.2 項で測定した上側 Z 軸基準高さから、下側 Z 軸基準の高さと Z 軸基準の厚さ (5000 μm) を引くことにより求められる。また、3.4 節で測定した亀裂表面形状 (亀裂高さの値) は、任意の高さに設定した Z 軸基準の高さを基準としているため、Z 軸基準の高さが 0 μm となるように亀裂全体の高さを調整する。

図 17 に亀裂表面形状データから算出した開口幅分布を示す。概ね一様な開口幅分布となっているが、図の下側の開口幅が大きい傾向が見られる。これは、亀裂を重ね合わせる際に若干の傾きが生じたためと考えられる。

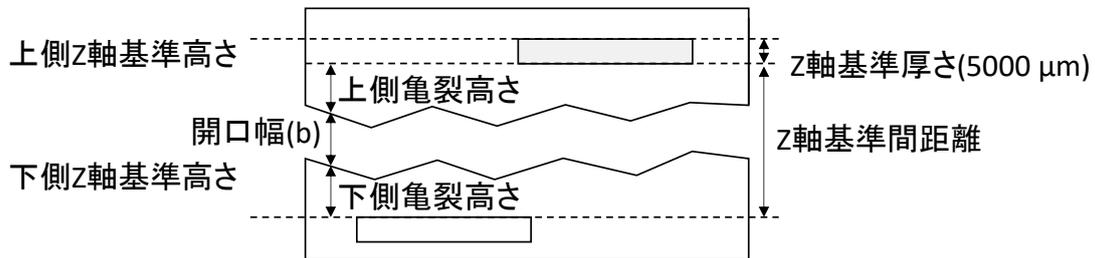


図 16 開口幅の算出方法

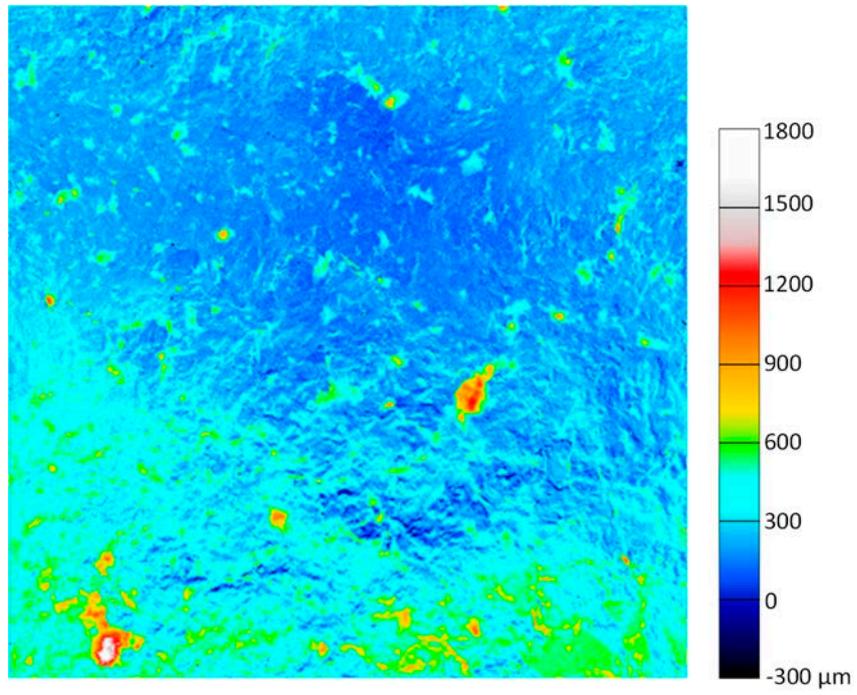


図 17 亀裂表面形状データから算出した開口幅分布

4. 水理・トレーサー試験による亀裂の透水・物質移行特性の把握

本章では、3章で算出した亀裂開口部の3次元形状データに加えて、亀裂の透水特性や物質移行特性を把握するために、光学的手法によるトレーサー試験と透水試験を実施して、得られたデータについて述べる。ここで、亀裂の物質移行特性を示すデータとしては、亀裂内の濃度分布の時間変化と亀裂の排出側でのトレーサーの破過曲線を取得した。また、亀裂の透水特性を示すデータとしては、水理学的開口幅を取得した。水理試験データの取得方法と取得結果を次節以降に示す。

4.1 光学的手法によるトレーサー試験

4.1.1 光学的測定装置及びトレーサー試験方法

光学的手法に関する詳細は筆者らによる研究開発報告書⁵⁾に譲るが、図18に示すように試験装置を外光の影響を受けないように暗室内に設置し、亀裂の透明レプリカ試料を透過した光の強度（透過光強度）を CCD（Charge Coupled Device）センサーを用いて測定することにより、亀裂内のトレーサーの濃度分布や開口幅分布を測定する手法である。ここで、透過光強度の測定に用いる CCD センサー（DVC Company, DVC-2000M-00-GE）は、最大 1600×1200 ピクセルの空間解像度と 12 bit（4096 階調）の分解能で光の強度を数値データとして記録することができる。

トレーサー試験では、亀裂内を水で満たした状態を初期状態として、透水試験で使用したダブルプランジャーポンプを使用して亀裂内に一定流量でトレーサー溶液を注入する。その際に、亀裂内に一様にトレーサー溶液を注入させるために、図3に示す上側の注排水ポート内を予めトレーサー溶液で置換しておく。トレーサー溶液の注入開始と同時に CCD センサーによる透過光強度の測定を開始し、亀裂内が完全にトレーサー溶液で置換されたのを確認した後に試験を終了する。トレーサー溶液には赤色の食用色素（赤色 102 号）を水に溶かした溶液（200 mg/L）を使用している。なお、トレーサー試験は、図3の上側の注排水ポートからトレーサー溶液を注入したケースと、下側の注排水ポートから注入したケースの2ケースを実施した。

トレーサー試験条件の一覧を表1に示す。

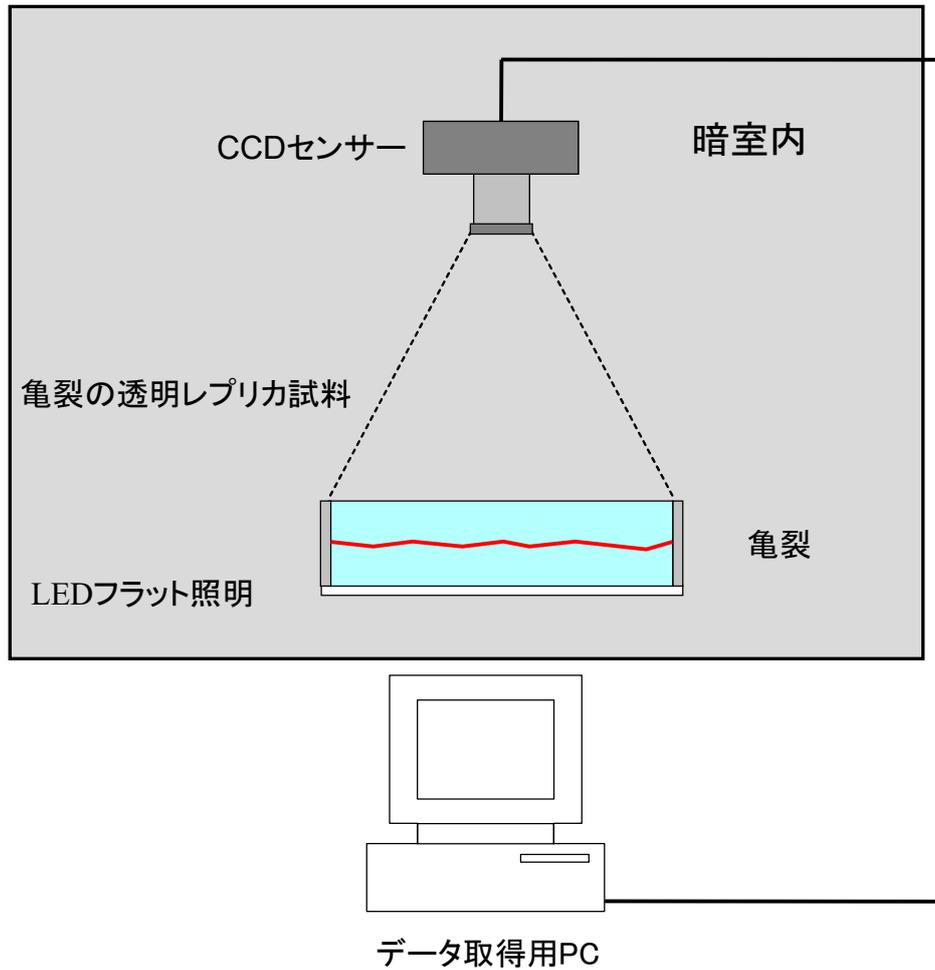


図 18 光学的測定装置の概要

表 1 トレーサー試験条件

亀裂の透明レプリカ試料の初期状態	亀裂内を無着色の水で満たす
トレーサーに用いる染料	食用色素 (赤色 102 号)
トレーサーの染料濃度	200 mg/L
トレーサーの注入方法	ダブルプランジャータイプの定流量ポンプによる注入
トレーサーの注入方向	図 3 に示す上側の注排水ポートからトレーサーを注入したケースと下側の注排水ポートから注入したケース
トレーサーの注入流量 (m ³ /s)	3.33×10 ⁻⁹
試験終了基準	亀裂内がトレーサーで置換されたことを透過光強度の差分で確認
透過光強度データの取得間隔 (s)	3.2
試験時間 (s)	1800
透過光強度データの形式	マルチイメージ TIFF (12bit)

4.1.2 トレーサー濃度分布の取得

亀裂内を透明な流体で満たした場合の透過光強度を I_s 、亀裂内を染料で着色した流体で満たした場合の透過光強度を I_d とすると、透過光強度と開口幅の関係は式(1)で表せる。

$$\ln\left(\frac{I_d}{I_s}\right) = -\varepsilon_d \cdot c_d \cdot b \quad (1)$$

ここで、 ε_d は染料の吸光係数(m^2/kg)、 c_d は染料の濃度(kg/m^3)、 b は開口幅(m)である。

亀裂内を濃度 C_0 の染料トレーサーで満たした場合の透過光強度を I_{d-c_0} 、とすると、透過光強度と開口幅の関係は式(2)で表せる。

$$\ln\left(\frac{I_{d-c_0}}{I_s}\right) = -\varepsilon_d \cdot c_0 \cdot b \quad (2)$$

同様に、亀裂内を透明な流体で満たした試験体の亀裂内に染料トレーサーを注入後、時刻 t における透過光強度を I_{d-c_t} とすると、透過光強度と開口幅の関係は式(3)で表せる。

$$\ln\left(\frac{I_{d-c_t}}{I_s}\right) = -\varepsilon_d \cdot c_t \cdot b \quad (3)$$

式(2)、式(3)より、亀裂内の濃度分布は式(4)で表せる。

$$\left(\frac{c_t}{c_0}\right) = \ln\left(\frac{I_{d-c_t}}{I_s}\right) / \ln\left(\frac{I_{d-c_0}}{I_s}\right) \quad (4)$$

図 19 に、図 3 の上側の注排水ポートからトレーサーを注入した場合の試験開始から約 60 秒毎のトレーサー濃度分布、図 20 に図 3 の下側の注排水ポートからトレーサーを注入した場合の試験開始から約 60 秒毎のトレーサー濃度分布を示す。ここで、図中の経過時間は試験を実際に開始してからの時間ではなく、試験開始時に亀裂内に侵入していたトレーサーの量を経過時間に換算して試験開始からの時間に加えた経過時間である。このため、測定開始時の経過時間が 0 秒となっていない。トレーサーをどちら側から注入した場合でもトレーサーは図 19、図 20 に示す濃度分布図の左側と右側を選択的に移行している様子が確認できる。

ここで、トレーサーを下側から注入した際には、トレーサーの注入開始時点で亀裂内に若干のトレーサーが侵入している。これは、トレーサー試験開始前に注排水ポート内をトレーサーで置換する際に、トレーサーが亀裂内に僅かに侵入したためと考えられる。亀裂の上側からトレーサーを注入した際に亀裂内にトレーサーがほとんど侵入していないのは、図 17 の亀裂表面形状データから算出した開口幅分布に示すように、下側の注排水ポート付近の開口幅が比較的広いのに対して、上側の注排水ポート付近の開口幅が比較的狭いためであると考えられる。

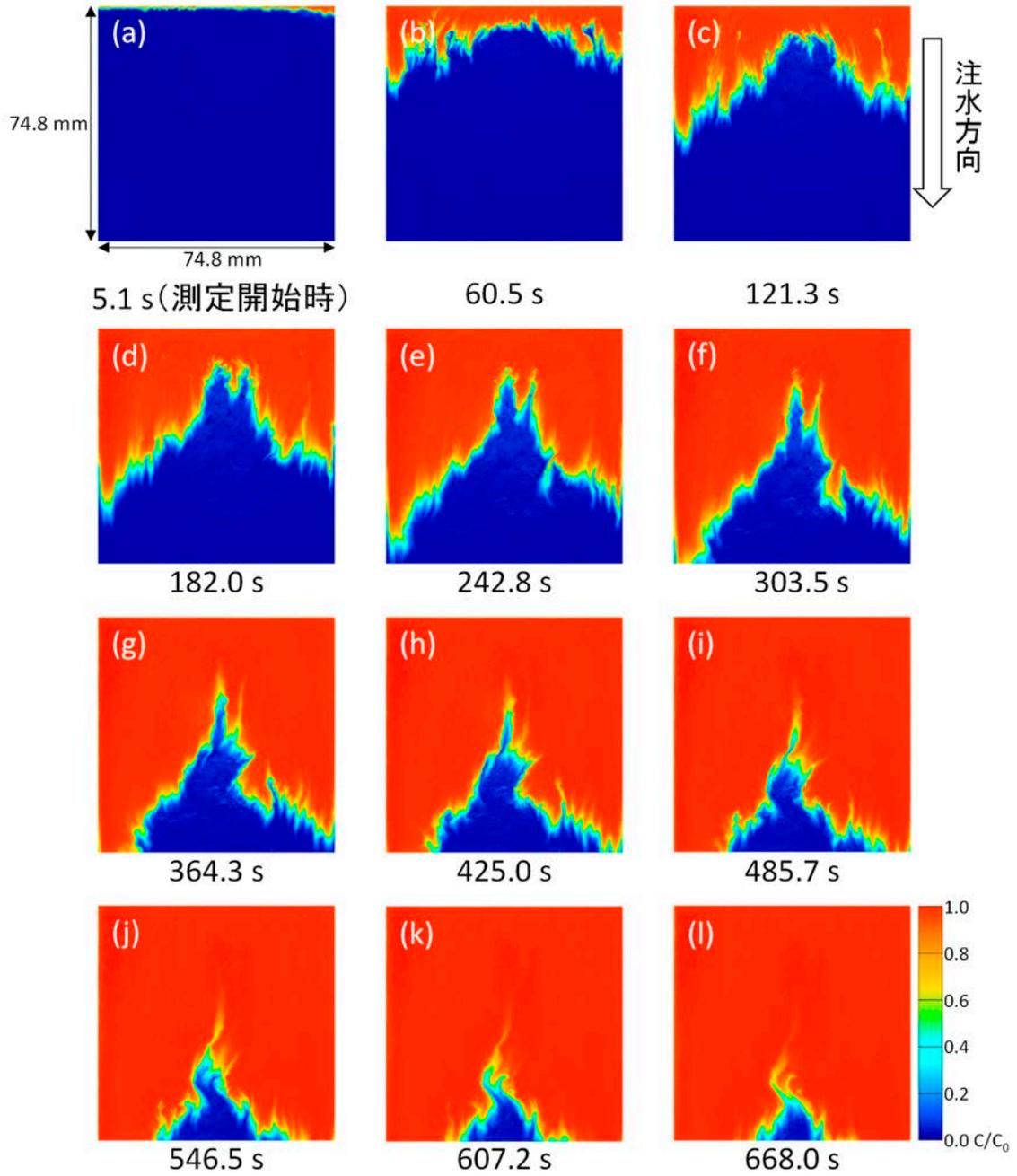


図 19 トレーサー濃度分布（上側の注排水ポートから注入）

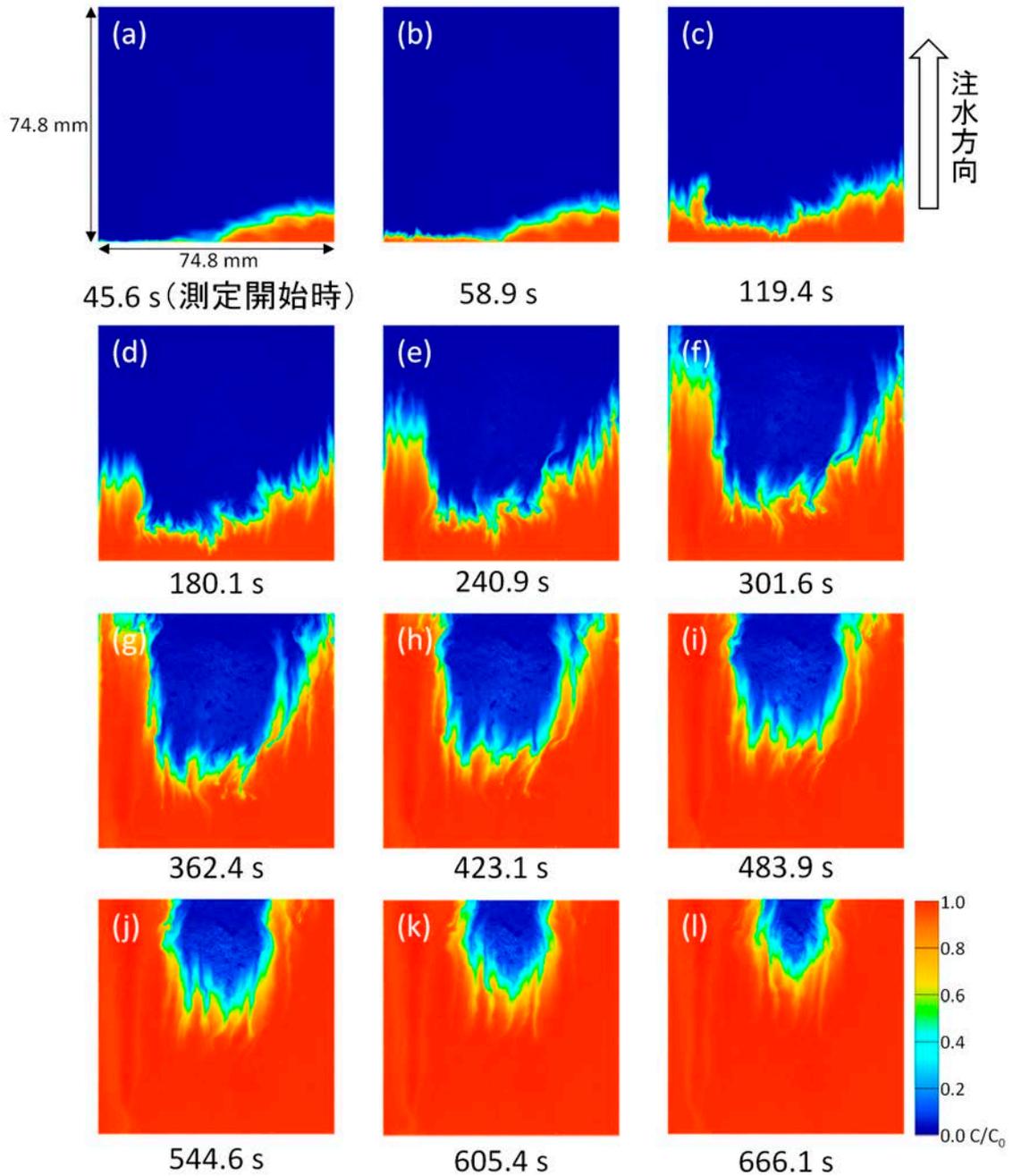


図 20 トレーサー濃度分布 (下側の注排水ポートから注入)

4.1.3 破過曲線の算出

破過曲線とは、評価対象となる面を通過（破過）するトレーサー濃度の経時変化を表したものであり、亀裂を対象としたトレーサー試験では、一般に亀裂の一方からトレーサーを注入し、もう一方から排出されたトレーサーの濃度を取得する。その際、排水ポートで集められたトレーサーの濃度を測定するのが一般的だが、その場合、排水ポート等の体積分の時間遅れや濃度の分散などにより誤差が生じることから、亀裂内で生じたトレーサーの分散や移行時間のみを評価することは難しい。一方、光学的手法によるトレーサー試験では、亀裂内でのトレーサーの濃度分布の時間変化を直接観察することが可能であり、そのデータからトレーサーが亀裂から排出された瞬間の破過曲線を算出することができる。

図 21 にトレーサーを下側の注排水ポートから注入した場合と上側の注排水ポートから注入した場合の破過曲線を示す。全体的にノイズのようなばらつきが見られるが、これは、定流量ポンプの脈動や照明光の強度の微小な時間変化が影響していると考えられる。また、トレーサーの透水方向の違いにより破過曲線の形状が若干異なっている。破過曲線を算出する際に、トレーサーが亀裂内に一様に侵入することを仮定している。しかし、図 20 に示すように、注入ポート内をトレーサー溶液で置換する際にトレーサーが若干亀裂内に侵入している。そのため、トレーサーを下側の注排水ポートから注入したケースではこの仮定が満たされず、破過曲線の形状に違いが生じたと考えられる。

より誤差の小さなデータを取得するためには、注排水ポート内をトレーサーで置換する際に亀裂内へトレーサーが侵入するのを防ぐために、亀裂の入り口にシャッターを設けるなどの物理的な対策が必要であると考えられる。

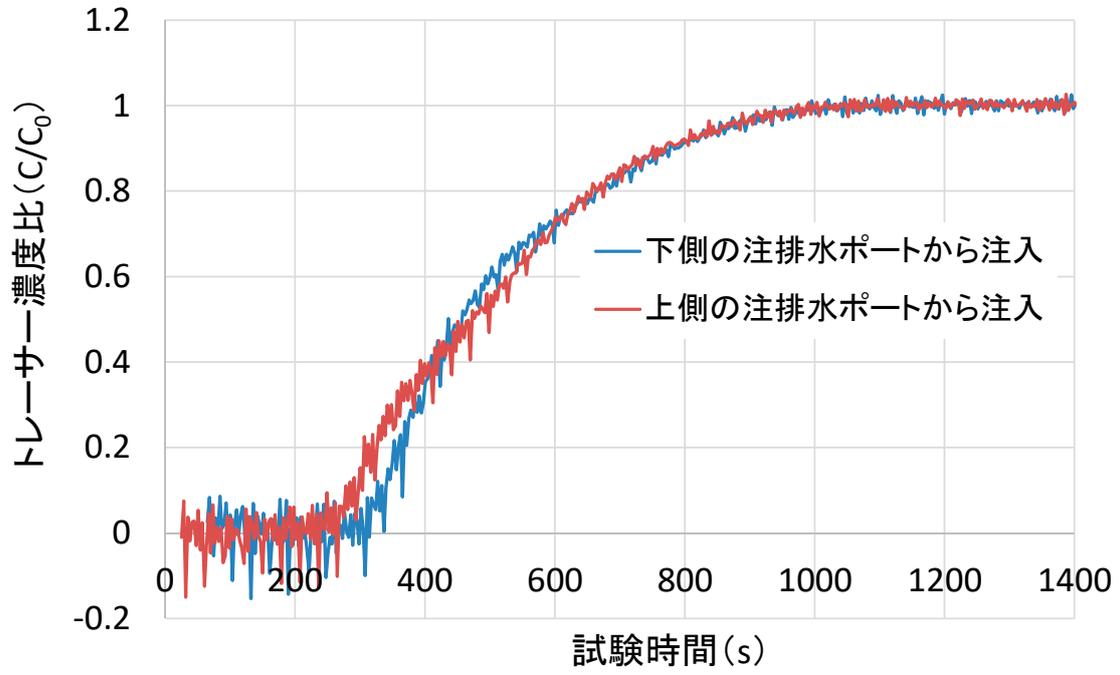


図 21 破過曲線の算出結果

4.2 透水試験

4.2.1 試験装置概要

図 22 に透水試験方法の概要を示す。亀裂内への透水には、脈動の少ないダブルプランジヤータイプの定流量ポンプ（共和精密株式会社 KHP-011）を用いた。排出された流量は、電子天秤を用いて測定した。水頭差の測定には、高精度の差圧計（Paroscientific, Inc. 1000-3D）を用いた。

亀裂内への透水量は、ダルシー則の成立性を考慮して設定している。ダルシー則が成立するのはレイノルズ数が 1 程度までの範囲とされていることから、最大流量でもレイノルズ数が約 1.1 となる流量の範囲で透水量を変えて透水試験を行い、透水量と水頭差の関係を 5 点取得した。なお、透水試験の再現性の確認と亀裂の透水性に異方性が無いかを確認するために、図 22 の上側の注排水ポートから透水したケースと、下側の注排水ポートから透水したケースの 2 ケースを実施した。また、透水試験中の温度の変化による水の粘性係数の変化を防ぐために、透水試験中は亀裂の透明レプリカ試料を、20℃に設定した恒温水槽に設置した。

4.2.2 透水試験結果

図 23 に透水試験結果を示す。水頭差と透水量の関係は直線関係となっており、ダルシー則を満たしている。各測定点は、直線関係からの乖離がほぼ無いことから、精度の高い試験結果が得られている。また、透水方向を変えた 2 回の試験結果はほぼ一致していることから、亀裂の透水性には異方性は無く、再現性が高い結果が得られている。

4.2.3 水理学的開口幅の算出

水理学的開口幅は、亀裂の開口幅が一樣であると仮定した場合に、測定した水頭差と透水量の関係から導かれる開口幅であり、式(5)で求めることができる。

$$b_h = \left(\frac{12 \cdot \mu \cdot L \cdot Q}{\rho \cdot g \cdot W \cdot \Delta h} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (5)$$

ここで、 μ は粘性係数(Pa・s)、 L は亀裂長さ(m)、 Q は単位時間流量(m³/s)、 ρ は水の密度(kg/m³)、 g は重力加速度(m/s²)、 W は亀裂幅(m)、 Δh は水頭差(m)である。

図 23 に示す透水試験結果から算出された水理学的開口幅は 0.208 mm となった。

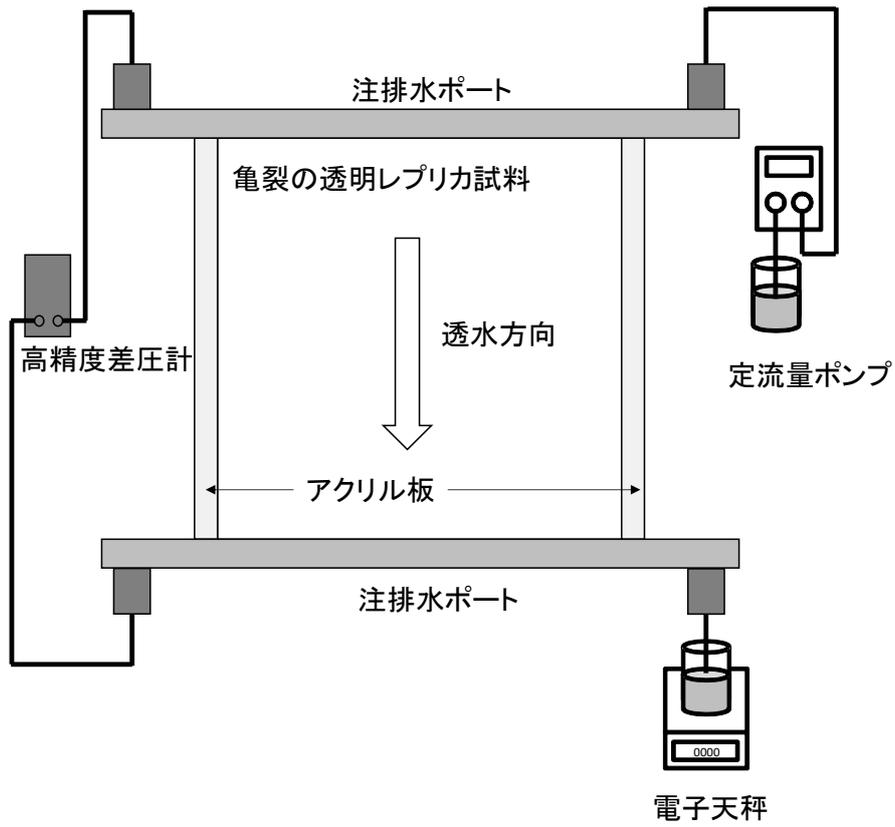


図 22 透水試験方法の概念図

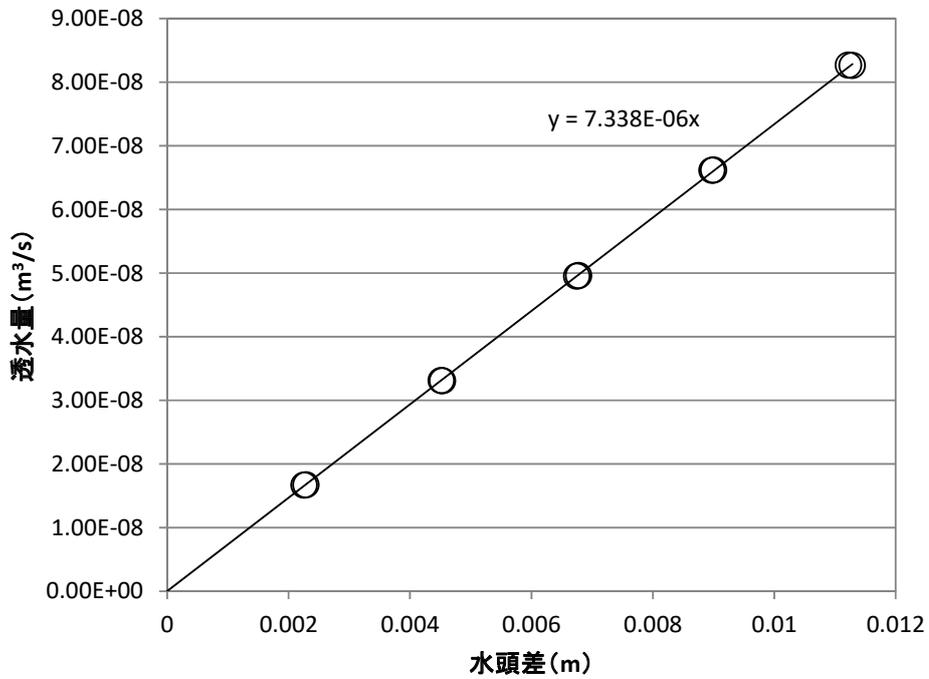


図 23 透水試験結果

5. 開口幅を指標とした亀裂開口部の 3 次元形状データの妥当性の評価

亀裂表面形状から算出した亀裂開口部の 3 次元形状データの妥当性を確認するために、異なる測定手法で取得した開口幅の値をお互いに比較することで、亀裂表面形状データから算出した開口幅の妥当性を評価した。比較に用いる開口幅の取得方法と比較する開口幅の種類を以下に示す。

- ・亀裂内体積測定（平均開口幅）
- ・トレーサー試験によるマスバランス開口幅（平均開口幅）
- ・光学的手法による開口幅測定（平均開口幅、開口幅分布）
- ・亀裂表面形状から算出した亀裂開口部の 3 次元形状（平均開口幅、開口幅分布）

5.1 亀裂内体積測定による平均開口幅

亀裂内体積測定による平均開口幅は、亀裂内が空気の場合と亀裂内を水で満たした場合の重量差から算出される開口幅であり、亀裂内体積測定による平均開口幅 b_v は式(6)で求めることができる。

$$b_v = \frac{M_a - M_w}{\rho \cdot W \cdot L} \quad (6)$$

ここで、 M_a は亀裂内を空気で満たした場合の重量(kg)、 M_w は亀裂内を水で満たした場合の重量(kg)、 ρ は水の密度(kg/m³)、 W は亀裂幅(m)、 L は亀裂長さ(m)である。

5.2 マスバランス開口幅

マスバランス開口幅は、トレーサー試験から得られる破過曲線から算出される開口幅であり、亀裂内でのトレーサーの分解や収着が無い場合には、平均開口幅と等しくなる。マスバランス開口幅 b_m は、式(7)で求めることができる。

$$b_m = \frac{Q \cdot t_m}{L \cdot W} \quad (7)$$

ここで、 Q は単位時間流量(m³/s)、 t_m はトレーサーの平均移行時間(s)、 L は亀裂長さ(m)、 W は亀裂幅(m)である。平均移行時間 t_m は Moreno et al.²⁰⁾ が提案している式(8)を用いてトレーサーの破過曲線から算出した。

$$t_m = \int_0^{\infty} \frac{c_{(\infty)} - c(t)}{c_{(\infty)}} dt \quad (8)$$

ここで $c_{(\infty)}$ は排出されたトレーサーの濃度が定常状態に達した時の濃度で、注入したトレーサーの濃度と等しい。なお、トレーサー試験は注入方向を変えて 2 回実施していることから、平均移行時間 t_m は、2 回のトレーサー試験で求めた値の平均値とした。

5.3 光学的手法による開口幅測定

光学的手法による開口幅分布測定では、光学的手法によるトレーサー試験と同様に亀裂内を透明な流体で満たした場合と亀裂内を染料で着色した流体で満たした場合での亀裂の透明レプリカ試料を透過した光の強度（透過光強度）を CCD センサーで測定する。透過光強度から開口幅を算出する際には、トレーサー試験と同様に式(1)の関係を用いる。式(1)を開口幅 b について解くと、式(9)となる。

$$b = -\frac{\ln\left(\frac{I_d}{I_s}\right)}{\varepsilon_d \cdot c_d} \quad (9)$$

ここで、開口幅分布を測定する際には、亀裂内に濃度が一定の染料溶液を満たすことから、 $\varepsilon_d \cdot c_d$ は定数となる。このため、 $\varepsilon_d \cdot c_d$ の値は、開口幅が既知の試料を用いて算出することができる。開口幅が既知の試料を用いて取得した $\varepsilon_d \cdot c_d$ の値と、亀裂内を透明な流体で満たした場合の透過光強度及び亀裂内を染料で着色した流体で満たした場合の透過光強度から開口幅分布を算出できる。

5.4 開口幅の比較

表 2 にそれぞれの測定手法により算出した平均開口幅を示す。異なる方法で測定した平均開口幅がほぼ一致していることから、それぞれの平均開口幅を算出した手法の妥当性は高いと言える。

図 24 に光学的手法による開口幅の 2 次元分布を示す。画像から判断する限りでは、図 17 の亀裂表面形状から算出した開口幅分布とほぼ一致していることがわかる。また、図 25 に亀裂表面形状から算出した開口幅と光学的手法による開口幅の頻度分布の比較を示す。開口幅の頻度分布で比較した場合でもお互いにほぼ一致している。

このことから、今回実施した亀裂表面形状から算出した亀裂開口部の 3 次元形状データの妥当性が確認することができた。

表 2 異なる方法で測定した平均開口幅の比較

平均開口幅の測定方法	平均開口幅 (mm)
亀裂内体積測定	0.308
トレーサー試験 (マスバランス開口幅)	0.303
光学的手法	0.308
亀裂表面形状から算出	0.300

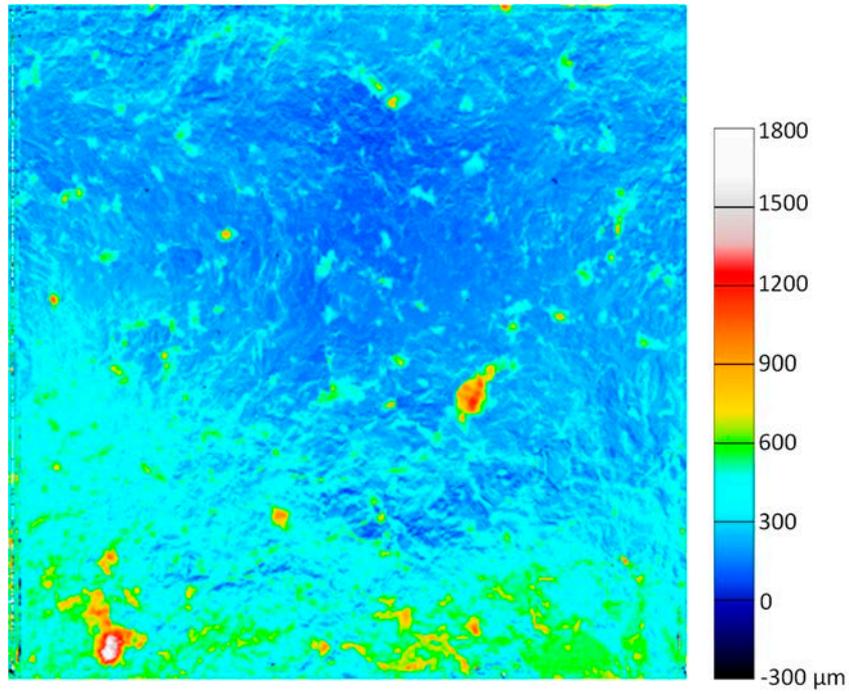


図 24 光学的手法による開口幅分布

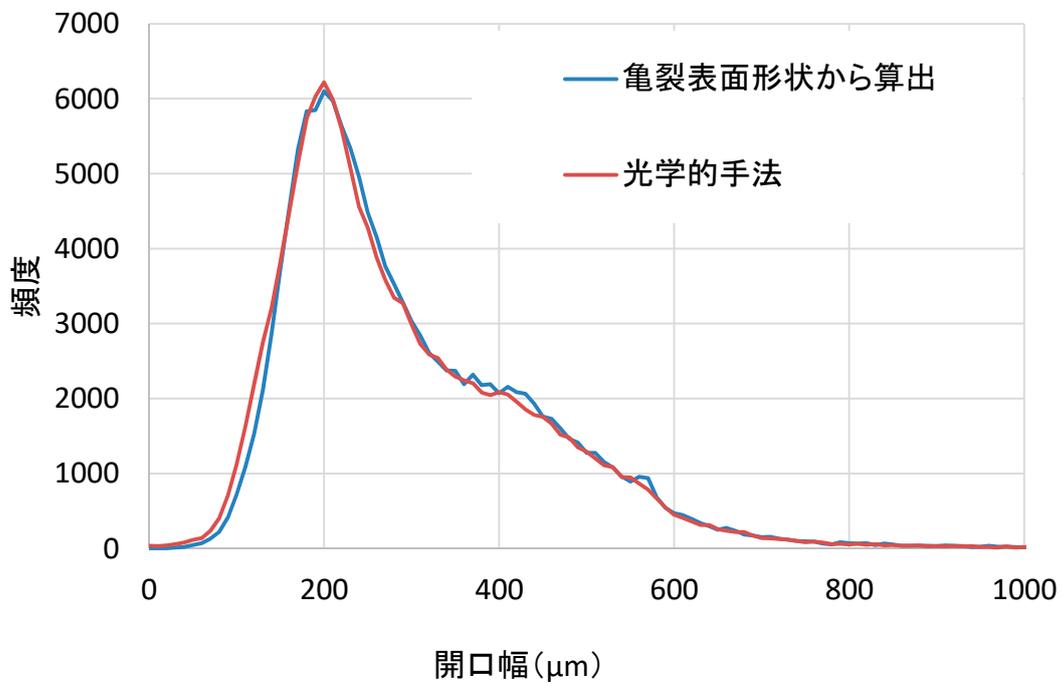


図 25 亀裂表面形状から算出した開口幅と光学的手法による開口幅の頻度分布の比較

6. まとめ

本検討では、亀裂開口部の 3 次元形状データと亀裂の物質移行特性を示す破過曲線や亀裂内の濃度分布の時間変化を組み合わせた妥当性の高いデータセットを取得することを目的として、亀裂の透明レプリカ試料を対象に、トレーサー試験を実施した際の亀裂の間隙構造を保持した、亀裂開口部の 3 次元形状データの取得技術の構築を試みた。

そのため、亀裂の両面を固定した状態（トレーサー試験を実施した状態）で亀裂の両面で共通の座標軸を設定するなどの工夫により、亀裂の表面形状の測定を行った。その結果、トレーサー試験を実施した際の亀裂の間隙構造を保持した状態と同じ条件で、亀裂開口部の 3 次元形状データを取得することができた。また、同じ条件でトレーサー試験の光学的測定を行い、亀裂の排出側での破過曲線や亀裂内のトレーサーの濃度分布の時間変化等のデータを取得した。これらのデータに加えて、透水試験データや比較のための開口幅データとして、亀裂内の体積測定による平均開口幅データ、光学的手法による開口幅の 2 次元分布データを取得した。

亀裂表面形状データから算出した亀裂開口部の 3 次元形状データの妥当性を評価するために、トレーサー試験結果から算出されるマスバランス開口幅を含む異なる方法で得られた開口幅の平均値をお互いに比較した。その結果、それぞれの測定手法により算出した平均開口幅はほぼ一致した。また、亀裂表面形状から算出した開口幅分布は、光学的手法による開口幅分布とほぼ一致した。これらの結果から、本検討で取得した亀裂開口部の 3 次元形状データ及びトレーサー試験結果の妥当性は高いといえる。

本検討により得られたデータは、亀裂内での透水や物質移行現象の理解に資するものであると考えられる。また、本データは浸透流解析や物質移行解析を実施する際の検証データとしても有用であると考えられる。

参考文献

- 1) Nicholl, M. J. et al., Saturated flow in a single fracture: Evaluation of the Reynolds equation in measured aperture fields, *Water Resources Research*, Vol.35, No.11, 1999, pp.3361-3373.
- 2) Konzuk, J. S. et al., Evaluation of cubic law based models describing single-phase flow through a rough-walled fracture, *Water Resources Research*, Vol.40, No.2, W02402, 2004.
- 3) Al-Yaarubi, A. H. et al., Navier-Stokes Simulations of Fluid Flow through a Rock Fracture, *Proceedings of the Second International Symposium on Dynamics of Fluids in Fractured Rock*, 2004, pp.201-205.
- 4) Nishiyama, S. et al., Mechanical and hydraulic behavior of a rock fracture under shear deformation, *Earth, Planets and Space*, Vol.66, Article number: 108, 2014.
- 5) 佐藤久, 他, 花崗岩の人工割裂亀裂から作製したレプリカ試料を用いた亀裂特性の評価, *JAEA-Research 2011-052*, 2012, 55p.
- 6) Ameli, P. et al., High-resolution fracture aperture mapping using optical profilometry, *Water Resources Research*, Vol.49, 2013, pp.7126-7132.
- 7) 佐藤久, 他, 花崗岩の割裂により作成した引張り亀裂の特性評価, *JAEA-Research 2010-069*, 2011, 45p.
- 8) 石瀬康浩, 他, 中部領家帯に分布する領家花崗岩類の巨視き裂構造と弾性波速度との関係, *資源と素材*, Vol.122, 2006, pp.56-64.
- 9) Hakami, E., Aperture Measurements and Flow Experiments on a Single Natural Fracture, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, Vol.33, 1996, pp.395-404.
- 10) Yeo, I. W. et al., Effect of Shear Displacement on the Aperture and Permeability of a Rock Fracture, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 35, No.8, 1998, pp.1051-1070.
- 11) 羅紹河, 他, 引張亀裂面の形態評価に関する実験的研究, *資源と素材*, Vol.120, 2004, pp.569-576.
- 12) 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*, 2002, pp.347-352.
- 13) Johns, R. A. et al., Nondestructive measurements of fracture aperture in crystalline rock cores using X ray computed tomography, *Journal of Geophysical Research*, Vol.98, 1993, pp.1889-1900.
- 14) 中島伸一郎, 他, マイクロフォーカス X線 CTによる花崗岩の亀裂形状及び開口幅の評価, *第 39 回岩盤力学に関するシンポジウム講演集*, 2010, pp. 276-281.

- 15) 佐藤久, 他, 光学的手法による単一亀裂の亀裂表面形状と亀裂開口幅分布の同時測定, 第13回 岩の力学国内シンポジウム講演論文集, 2013, pp. 501-506.
- 16) 木村強, 他, 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, Vol.33, No.2, 1992, pp.61-70.
- 17) 岩井卓, 他, 単一亀裂内の非線形流れに関する実験的・解析的研究その1〜エポキシ製岩石亀裂レプリカ試料による非線形流れの実験およびパラメータの検討, 地下水学会誌, Vol.45, No.3, 2003, pp.279-298.
- 18) Wang E., 他, 一定垂直応力における小規模水圧破碎き裂の閉鎖と透水性の経時変化に関する実験的研究, 資源と素材, Vol.117, 2001, pp.101-108.
- 19) Lanaro, F., A random field model for surface roughness and aperture of rock fractures, International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, Vol.37, 2000, pp.1195-1210.
- 20) Moreno, L. 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, 1988, pp.2033-2048.

付録 CD-ROM

本文に示した亀裂表面形状データ、開口幅分布データ、トレーサー濃度分布データ及びトレーサーの破過曲線を電子データとして添付する。各データの概要は以下に示す通りである。なお、トレーサー濃度分布のデータはマルチイメージ TIFF (multi-image TIFF) 形式と avi 形式 (動画ファイル (毎秒 10 フレーム)) で保存している。TIFF ファイルのイメージ毎の経過時間及び avi ファイルのフレーム毎の経過時間は、破過曲線の経過時間と整合している。

マルチイメージ TIFF 形式のファイルの取り扱いには、オープンソースでパブリックドメインの画像処理ソフトウェアである ImageJ (<https://imagej.nih.gov/ij/>) を推奨する。なお、本報告でもデータ処理及び図化には ImageJ を使用している。

亀裂表面形状データ

ファイル名 : geometry.csv、geometry.tif

データ形式 : csv、TIFF

データの間隔 : 200 μm

データの単位 : μm

開口幅データ

ファイル名 : aperture.csv、aperture.tif

データ形式 : csv、TIFF

データの間隔 : 200 μm

データの単位 : μm

トレーサー濃度分布データ

ファイル名 : conc_L.tif、conc_L.avi (トレーサーを下側の注排水ポートから注入)

conc_U.tif、conc_U.avi (トレーサーを上側の注排水ポートから注入)

データ形式 : マルチイメージ TIFF、avi

データの間隔 : 200 μm

データの単位 : 濃度比 (無次元)

破過曲線

ファイル名 : btc.csv

データ形式 : csv

1 カラム目 : 経過時間 (s) (トレーサーを下側の注排水ポートから注入)

2 カラム目 : 濃度比 (トレーサーを下側の注排水ポートから注入)

3 カラム目 : 経過時間 (s) (トレーサーを上側の注排水ポートから注入)

4 カラム目 : 濃度比 (トレーサーを上側の注排水ポートから注入)

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량	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 組立単位	
	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	毎メートル	m ⁻¹
密度, 質量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m ²
比体積	立方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
量濃度 ^(a) , 濃度	モル毎立方メートル	mol/m ³
質量濃度	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m ²
屈折率 ^(b)	(数字の)	1
比透磁率 ^(b)	(数字の)	1

(a) 量濃度 (amount concentration) は臨床化学の分野では物質濃度 (substance concentration) ともよばれる。
 (b) これらは無次元量あるいは次元1をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の1は通常は表記しない。

表3. 固有の名称と記号で表される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 ^(b)	rad	1 ^(b)	m/m
立体角	ステラジアン ^(b)	sr ^(e)	1 ^(b)	m ² /m ²
周波数	ヘルツ ^(d)	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
仕事率, 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 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	Vs	m ² kg s ⁻² A ⁻¹
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²	kg s ⁻² A ⁻¹
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m ² kg s ⁻² A ⁻²
セルシウス温度	セルシウス度 ^(e)	°C		K
光照射量	ルーメン	lm	cd sr ^(e)	cd
放射線量	グレイ	Gy	J/kg	m ² s ⁻²
放射性核種の放射能 ^(f)	ベクレル ^(d)	Bq		s ⁻¹
吸収線量, 比エネルギー分与, カーマ	グレイ	Gy	J/kg	m ² s ⁻²
線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量	シーベルト ^(g)	Sv	J/kg	m ² s ⁻²
酸素活性化	カタール	kat		s ⁻¹ mol

(a) SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。
 (b) ラジアンとステラジアンは数字の1に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。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である数字の1は明示されない。
 (c) 測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。
 (d) ヘルツは周期現象についてのみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。
 (e) セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の大きさは同一である。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。
 (f) 放射性核種の放射能 (activity referred to a radionuclide) は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。
 (g) 単位シーベルト (PV, 2002, 70, 205) についてはCIPM勧告2 (CI-2002) を参照。

表4. 単位の中に固有の名称と記号を含む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	ラジアン毎秒毎秒	rad/s ²	m 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
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m ² kg s ⁻² K ⁻¹
比エネルギー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	m ² s ⁻² K ⁻¹
熱伝導率	ジュール毎キログラム	J/kg	m ² s ⁻²
体積エネルギー	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s ⁻³ K ⁻¹
電界の強さ	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ kg s ⁻²
電荷密度	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m kg s ⁻³ A ⁻¹
電表面電荷密度	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ s A
電束密度, 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	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ² s A
透磁率	ファラド毎メートル	F/m	m ³ kg ⁻¹ s ⁴ A ²
モルエネルギー	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s ⁻² A ⁻²
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル	J/mol	m ² kg s ⁻² mol ⁻¹
照射線量 (X線及びγ線)	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	m ² kg s ⁻² K ⁻¹ mol ⁻¹
吸収線量率	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ s A
放射線強度	グレイ毎秒	Gy/s	m ² s ⁻³
放射輝度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m ⁴ m ⁻² kg s ⁻³ = m ² kg s ⁻³
酵素活性濃度	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 s ⁻³ = kg s ⁻³
	カタール毎立方メートル	kat/m ³	m ³ s ⁻¹ mol

表5. SI 接頭語

乗数	名称	記号	乗数	名称	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6. SIに属さないが、SIと併用される単位

名称	記号	SI単位による値
分	min	1 min=60 s
時	h	1 h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	'	1'=(1/60)°=(π/10 800) rad
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648 000) rad
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²
リットル	L, l	1 L=1 l=1 dm ³ =10 ³ cm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1 t=10 ³ kg

表7. SIに属さないが、SIと併用される単位で、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単位で表される数値
電子ボルト	eV	1 eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J
ダルトン	Da	1 Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ kg
統一原子質量単位	u	1 u=1 Da
天文単位	ua	1 ua=1.495 978 706 91(6)×10 ¹¹ m

表8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI単位で表される数値
バール	bar	1 bar=0.1MPa=100 kPa=10 ⁵ Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg=133.322Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 ⁻¹⁰ m
海里	M	1 M=1852m
バイン	b	1 b=100fm ² =(10 ¹² cm) ² =10 ⁻²⁸ m ²
ノット	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネーパ	Np	SI単位との数値的関係は、 対数量の定義に依存。
ベレル	B	
デシベル	dB	

表9. 固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI単位で表される数値
エル	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 ⁻¹ =10 ⁻⁴ m ² s ⁻¹
スチルブ	sb	1 sb=1cd cm ⁻² =10 ⁴ cd m ⁻²
フオト	ph	1 ph=1cd sr cm ⁻² =10 ⁴ lx
ガリ	Gal	1 Gal=1cm s ⁻² =10 ⁻² ms ⁻²
マクスウェル	Mx	1 Mx=1 G cm ² =10 ⁻⁸ Wb
ガウス	G	1 G=1Mx cm ⁻² =10 ⁻⁴ T
エルステッド ^(a)	Oe	1 Oe _e =(10 ³ /4π)A m ⁻¹

(a) 3元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「△」は対応関係を示すものである。

表10. SIに属さないその他の単位の例

名称	記号	SI単位で表される数値
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
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 ⁻⁹ T
フェルミ	f	1 フェルミ=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット		1 メートル系カラット=0.2 g=2×10 ⁻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	1 cal=4.1858J (「15°C」カロリ), 4.1868J (「IT」カロリ), 4.184J (「熱化学」カロリ)
マイクロ	μ	1 μ=1μm=10 ⁻⁶ m

