

光学的手法による単一亀裂内測定データに基づく 水理物質移行特性評価手法の検討

Study on Flow and Mass Transport Property Evaluation Method
by Optically Measured Data in a Single Fracture

佐藤 久 澤田 淳

Hisashi SATO 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

September 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

光学的手法による単一亀裂内測定データに基づく水理物質移行特性評価手法の検討

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、 澤田 淳⁺

(2008年 5月 22日受理)

高レベル放射性廃棄物地層処分の安全評価などにおける、花崗岩などの結晶質岩を対象とした亀裂中の水理物質移行特性評価では、地層処分研究開発の第2次取りまとめでも用いられているように、一般に亀裂を平行平板で近似したモデルが用いられる。しかし、実際の亀裂の表面形状は複雑で、亀裂開口幅分布も不均質であることから、不均質に分布する亀裂開口幅が亀裂の平均的な透水特性と物質移行特性に与える影響が異なることが知られている。

このため、不均質な開口幅分布が亀裂内の透水物質移行現象に与える影響を検討するために、人工割裂亀裂から作製した亀裂の透明レプリカを対象に、透水試験及び光学的手法による開口幅分布測定、亀裂内のトレーサー濃度分布測定を行い、開口幅分布から推定される透水量と透水試験結果の比較及び透水量係数と物質移行に関する開口幅の関係を検討した。

光学的手法を用いて得られた開口幅分布から、局所的には三乗則が成立することを仮定して透水量係数に換算し、有限要素法による2次元浸透流解析を行い透水量を比較した結果、モデル全体の透水量は透水試験で得られた透水量の約1.6倍と過大評価される結果となり、これまでに報告されている局所三乗則の不成立性を実験的に証明できた。

Study on Flow and Mass Transport Property Evaluation Method by Optically Measured Data
in a Single Fracture

Hisashi SATO and Atsushi SAWADA⁺

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

(Received May 22, 2008)

A parallel plate fracture model is used for the safety assessment of radioactive waste disposal in crystalline rocks, such as granitic rocks. The parallel plate model was also applied in the second progress report for the research and development of radio active waste disposal program in Japan, called H12 report. However, it is known that an effect of heterogeneously distributing fracture aperture onto the hydraulic property is different from the transport property used for the parallel plate model, because actual fractures show fully complex structure and fracture aperture is heterogeneously distributed.

Therefore, we have examined to measure aperture distribution and tracer concentration distribution data by optical method for transparent replica made from artificial fracture by casting method in order to investigate influences of heterogeneity of aperture distribution to the hydraulic and mass transport properties used for parallel plate model and to understand the relationship between fracture transmissivity and transport aperture.

The numerical simulation based on darcy flow and heterogeneous transmissivity field estimated from the measured aperture under the assumption local cubic law, shows 1.6 times larger flow rate than the data obtained from the hydraulic test. This result is one of precious evidence supported by quantitatively measured aperture data to demonstrate the inconsistency of the assumption of “local cubic law”.

Keywords: Aperture, Mass Transport, Fracture, Transparent Replica, Optical Method

Collaborating Engineer

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

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

目次

1. はじめに	1
2. 測定原理	3
2.1 基本原理	3
2.2 開口幅測定	3
2.3 トレーサー濃度測定	3
3. 試験の概要	4
3.1 光学的測定装置の概要	4
3.2 透明レプリカ試験体	4
4. 試験結果と考察	6
4.1 開口幅測定	6
4.2 亀裂内体積測定	6
4.3 透水試験方法	6
4.4 亀裂の透水特性評価	9
4.5 開口幅データによる透水特性の推定	10
4.6 トレーサー試験方法	13
4.7 トレーサー試験結果	13
4.8 物質移行特性評価	15
4.8.1 破過曲線の算出	15
4.8.2 マスバランス開口幅	15
4.8.3 透水量係数と物質移行に関する開口幅の関係	16
4.8.4 亀裂内の分散特性	18
5. まとめ	20
参考文献	21
付録	22

Contents

1. Introduction	1
2. Measurement theory	3
2.1 Primitive theory	3
2.2 Measurement of aperture	3
2.3 Measurement of tracer concentration	3
3. Examination outline	4
3.1 Summary of optical examination equipment	4
3.2 Transparent replica specimen	4
4. Experimental results and discussion	6
4.1 Result of aperture measurements	6
4.2 Result of aperture volume measurements	6
4.3 Permeability test	6
4.4 Evaluation of fracture permeability	9
4.5 Evaluation of permeability using aperture data	10
4.6 Procedure of tracer experiments	13
4.7 Result of tracer experiments	13
4.8 Evaluation of mass transport Characteristics	15
4.8.1 Calculation of breakthrough curve	15
4.8.2 Mass balance aperture	15
4.8.3 Relationship between transmissivity and transport aperture	16
4.8.4 Characteristics of dispersion in the fracture	18
5. Conclusion	20
References	21
Appendix	22

図・表目次

3. 試験の概要	
図 1 光学的測定装置の概要図	5
図 2 透明レプリカ試験体の例	5
4. 試験結果と考察	
図 3 幾何学的開口幅分布測定結果	7
図 4 幾何学的開口幅の頻度分布	7
図 5 透水試験方法概念図	8
図 6 透水試験結果	8
表 1 開口幅比較	11
図 7 透水試験結果と開口幅データから推定した透水量の比較	12
図 8 開口幅の評価方法の違いの概念図	12
図 9 トレーサー移行中の濃度分布と開口幅分布	14
図 10 累積破過曲線	17
図 11 一次元理論解によるフィッティング	19
図 12 局所的な破過曲線と亀裂全体の破過曲線の比較	19

This is a blank page.

1.はじめに

高レベル放射性廃棄物地層処分の安全評価などにおける、花崗岩などの結晶質岩を対象とした亀裂中の水理物質移行特性評価では、地層処分研究開発の第2次取りまとめ¹⁾でも用いられているように、一般に亀裂を平行平板で近似したモデルが用いられる。しかし、実際の亀裂の表面形状は複雑で、亀裂開口幅も不均質に分布していることから、亀裂開口幅分布の不均質性が透水と物質移行に与える影響はそれぞれ異なることが知られている。このため、亀裂開口幅が不均質に分布する亀裂を平行平板で近似する際に用いる水理的開口幅や物質移行開口幅などのパラメータを合理的に設定する手法を構築することが課題のひとつとなっている。亀裂開口幅分布の不均質性の影響についての検討はこれまでも行われており、理論的な検討として、Silliman²⁾は開口幅分布が対数正規分布に従う場合について、水理的開口幅と開口幅の対数値の標準偏差との関係を整理している。また、実際に測定された開口幅を用いた検討としては、例えば Nicholl et al.³⁾は模様ガラスを貼り合わせて岩石亀裂を模擬した試験体を対象に、透水試験と光学的手法による高解像度の開口幅測定を行い、得られた開口幅データを用いて局所的には三乗則が成立すること(LCL:Local Cubic Law)を仮定して開口幅から各点の透水量係数を求め、ダルシー則に基づく浸透流解析を行った結果、透水量は実測値に対して約1.4倍であると報告している。また、Konzuk and Bernard⁴⁾は石灰岩を対象に人工的に作製した亀裂を用いて、透水試験を実施するとともに、試験体をスライスすることにより、約5mm間隔で計測した開口幅のデータを用いてLCLとダルシー則に基づく浸透流解析を行った結果、透水量は実測値に対して1.75倍であると報告しているが、この理由は明らかにされていない。以上のように、LCLが亀裂全体の透水性を過大評価する可能性が模様ガラスや断片的な開口幅データに基づいた予察的検討により示されているが、岩石亀裂を対象とした高解像度のデータを用いた例はない。

このような開口幅分布の不均質性が透水や物質移行に与える影響についての検討を行うためには、亀裂開口幅分布の正確な測定が求められる。亀裂開口幅分布の測定方法としては、亀裂形状測定からの開口幅の推定⁵⁾、亀裂断面の直接観察⁶⁾や、X線CT、MRI等の非破壊手法⁷⁾⁸⁾など様々な手法が提案されている。これらのうち亀裂形状からの推定は亀裂形状を正確に測定することができるが、亀裂開口幅分布は亀裂を重ね合わせる際のかみ合わせの再現性の精度に依存し、その誤差は比較的大きい。亀裂断面の直接観察は亀裂をレジン等で固定した後に試験体をスライスや研磨することにより亀裂を露出し直接測定する手法であり、得られるデータの信頼性は最も高いが、高い分解能での測定には膨大な費用や時間が掛かる。非破壊手法はトレーサー試験と同一条件で測定が可能な魅力的な手法であるが、1回の測定で得られるのは亀裂の1断面のデータであり、三次元空間のデータを得るには多数の測定を繰り返し行う必要があるとともに、数センチメートルから数十センチメートルスケールの岩石試料の亀裂の開口幅やトレーサー濃度の測定には、ノイズの影響の排除や測定解像度の向上といったさらなる検討が必要と考えられる。一方、光学的手法は透明な試験体と染料トレーサーを用いて亀裂を可視化することにより、亀裂開口幅やトレーサー濃度分布を測定する手法であるため、岩石試料から亀裂の透明レプリカ試験体を作製する必要はあるが、高解像度で定量的な開口幅データとトレーサー濃度分布を同一条件で取得することができる。

そこで筆者らは、光学的手法による計測システムの整備を行い⁹⁾、人工割裂により作製した岩石亀裂から不均質な開口幅分布を有する透明レプリカ試験体を作製し、光学的手法による開口幅測定と同一条件でトレーサー試験及び透水試験を実施することにより、高い精度で開口幅の空間分布とトレーサー濃度の空間分布の時間変化を測定し、得られたデータに基づき不均質な亀裂開口幅分布が透水物質移行特性に与える影響についての検討を行った。また、光学的手法の測定精度は CCD カメラの性能に依存することから、CCD のノイズが測定結果に与える影響についての検討を付録にまとめた。

2. 測定原理

2.1 基本原理

測定原理についての詳細は既存の報告⁹⁾に譲り、ここではその概要について記す。

光学的な測定手法は透明な試験体と染料トレーサーを用いて亀裂を可視化することにより亀裂開口幅やトレーサー濃度分布を測定する手法であり、基本的な測定原理は吸光光度法と同様に式(1)に示す Lambert-Beer の法則を用いている。

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

ここで、 I_0 は入射光強度、 I は透過光強度、 ε_d は染料トレーサーの吸光係数、 b は開口幅（液層の厚さ）、 c_d は染料トレーサーの濃度である。

2.2 開口幅測定

亀裂内を水で満たした場合の透過光強度を I_{water} 、亀裂内を染料トレーサーで満たした場合の透過光強度を I_{dye} とすると透過光強度の関係は式(2)となる。

$$\ln\left(\frac{I_{dye}}{I_{water}}\right) = -\varepsilon_d \cdot c_d \cdot b \quad (2)$$

ここで、 ε_d は染料の種類により決定され、 c_d は染料濃度であることから、 $\varepsilon_d \cdot c_d$ は一定であるとみなせるため、開口幅が既知の試験体における I_{dye} と I_{water} から $\varepsilon_d \cdot c_d$ を算出することができる。算出した $\varepsilon_d \cdot c_d$ の値と I_{dye} 、 I_{water} から、開口幅分布を求めることができる。

2.3 トレーサー濃度測定

亀裂内を濃度 C_0 の染料トレーサーで満たした透過光強度を I_{dye-C_0} 、亀裂内を水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_{dye-C_t} とすると、時刻 t におけるトレーサーの正規化濃度は式(3)で示され、トレーサー試験中の各時間における I_{dye-C_t} からトレーサーの正規化濃度を求めることができる。

$$\frac{c_t}{c_0} = \ln\left(\frac{I_{dye-c_t}}{I_{water}}\right) / \ln\left(\frac{I_{dye-c_0}}{I_{water}}\right) \quad (3)$$

3. 試験の概要

3.1 光学的測定装置の概要

測定装置の概要を図 1 に示す。測定装置は暗室内に設置したフラット照明（CCS 社製 LED フラット照明）、CCD カメラ（DVC 社製 1412AM）、データ記録用の PC で構成されている。フラット照明の上に透明レプリカ試験体を設置して、CCD カメラにより透過光強度を最大 1392×1040 ピクセルで 12 ビット（4096 階調）の数値データとして記録する。また、Lambert-Beer の法則は単色光の場合に成立するため、試験に用いる染料レーザーの吸光特性に合わせたバンドパスフィルター（中心波長 510nm 半値幅 10nm）を使用することにより、単色光に近い条件で測定を行う。

3.2 透明レプリカ試験体

試験で使用する透明レプリカ試験体は、一辺 10cm の立方体に整形した稲田花崗岩の中央に割裂により人工的に作製した亀裂から、型取り用のシリコンと透明エポキシ樹脂によるキャストイングにより作製した。図 2 に今回の検討に用いた透明レプリカ試験体を示す。作製したレプリカ試験体は、2 枚を重ね合わせた後に側面の止水と注排出用の治具を取り付けて、試験を実施する。

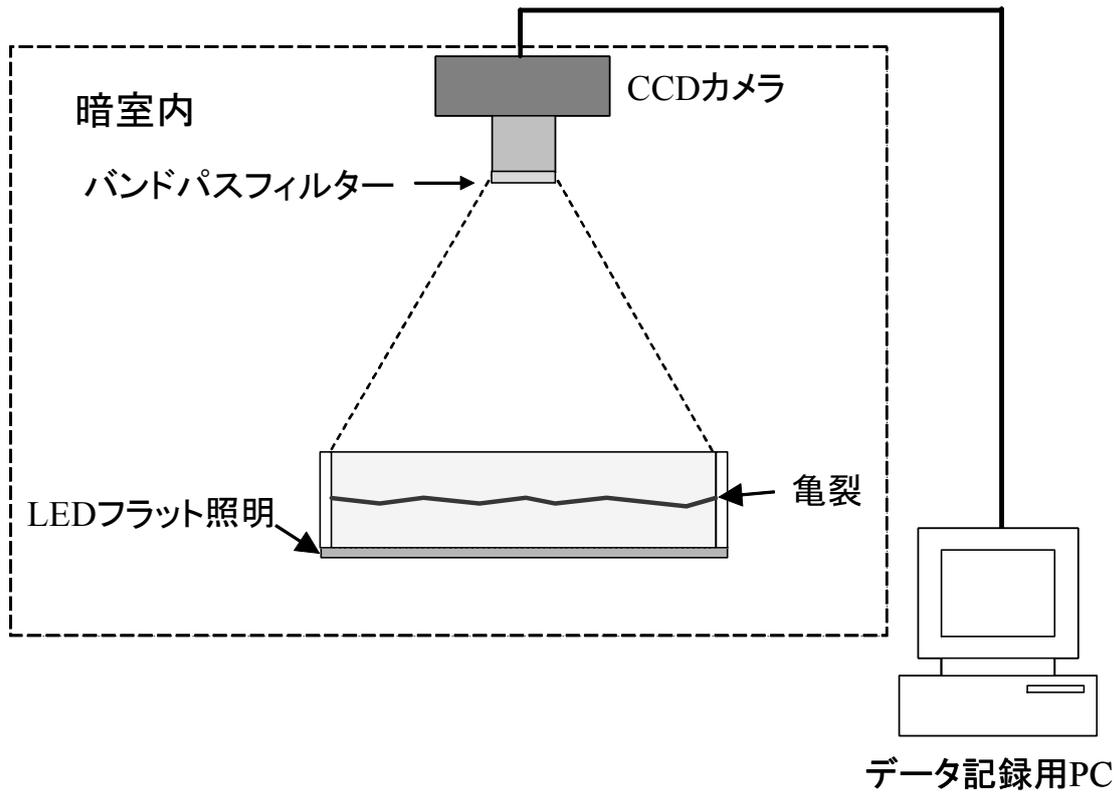


図 1 光学的測定装置の概要図



図 2 透明レプリカ試験体の例

4. 試験結果と考察

4.1 開口幅測定

図3に光学的手法により測定した幾何学的開口幅分布を示す。100mm×100mmの試験体を688ピクセル×688ピクセルで測定したため、1ピクセルの大きさは約0.15mm×0.15mmとなる。図中の左側に開口幅が大きい領域が連続している領域があるが、全体的には、ランダムに分布している傾向にあることが確認できる。得られた開口幅の算術平均値は0.27mmであった。また、垂直応力を掛けておらず、接触領域はほとんど無いことがわかる。

幾何学的開口幅の頻度分布を図4に示す。開口幅を対数表示にした場合、左右対称となっていることから、今回の試験体の開口幅分布は対数正規分布の特徴を示している。

4.2 亀裂内体積測定

開口幅測定結果の妥当性を検討するために、亀裂内の体積測定を行った。測定方法は、亀裂内を空気で満たした場合の重量と亀裂内を水で満たした場合の重量差から求めた。その結果、亀裂内の体積は2.9cm³であった。試験体のサイズが100mm×100mmであることから、亀裂内の体積測定から求められる平均開口幅は0.29mmとなり、光学的手法により求めた開口幅の平均とほぼ等しい値となった。

4.3 透水試験方法

図5に透水試験方法の概要を示す。透水試験は、一定の動水勾配の条件下で亀裂を透過する単位時間当たりの透水量を電子天秤で測定することにより実施した。図6に透水試験結果を示す。水頭差と透水量はほぼ直線関係となっており、ダルシー則を満たしていると考えられる。なお、同図には平均的なレイノルズ数 Re も併せて示している。厳密にダルシー則が成立するのは、レイノルズ数が1以下とされており、レイノルズ数が1より大きくなると慣性の影響により、透水量が減少する傾向にあることが知られている。今回の試験ケースでのレイノルズ数の範囲は約0.8から2.9であり、厳密にダルシー則が成立する範囲を超えているが、水頭差と透水量の関係は直線関係となっていることから、慣性による影響は大きくないといえる。

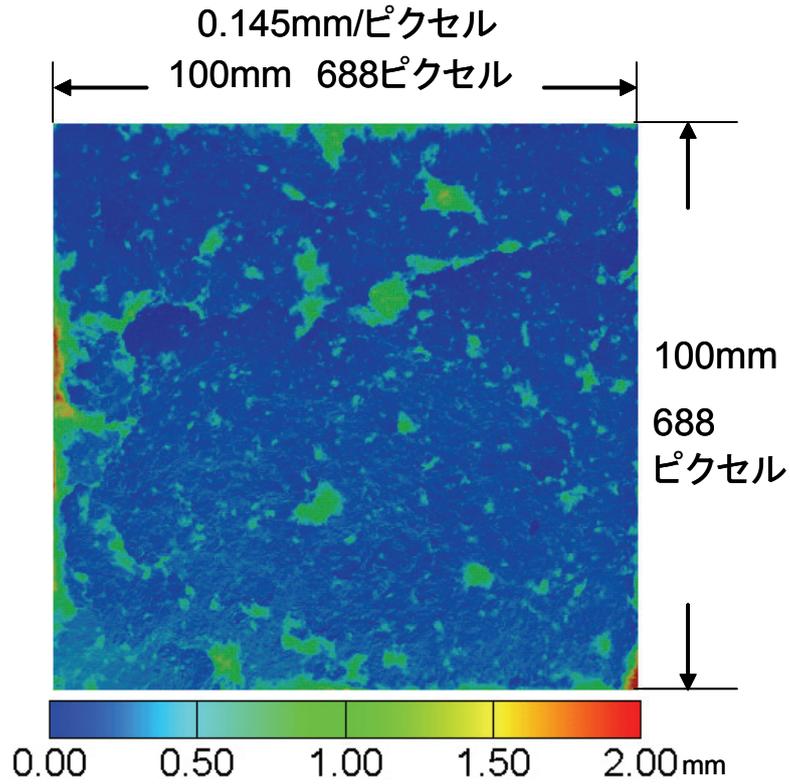


図3 幾何学的開口幅分布測定結果

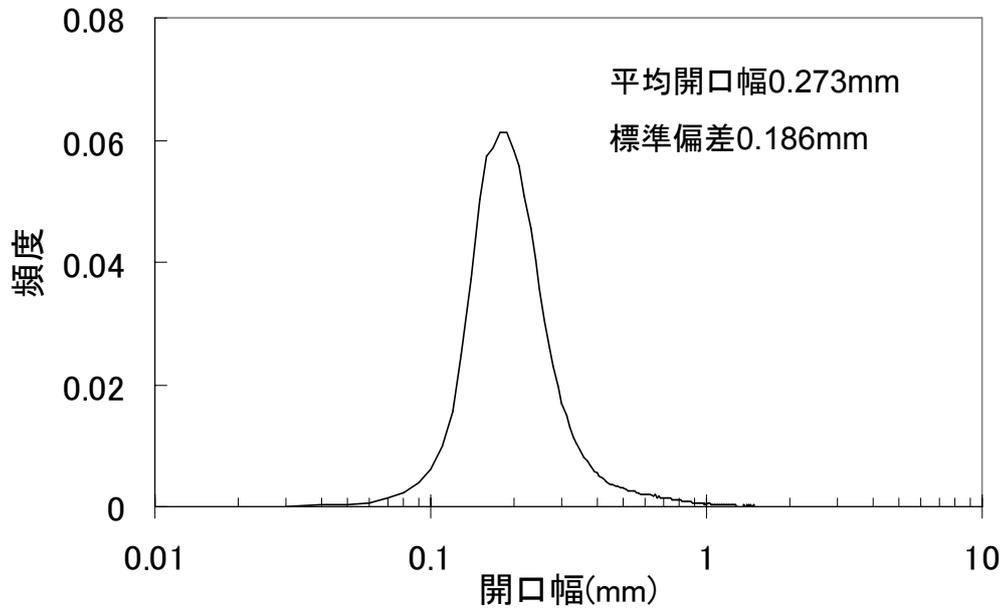


図4 幾何学的開口幅の頻度分布

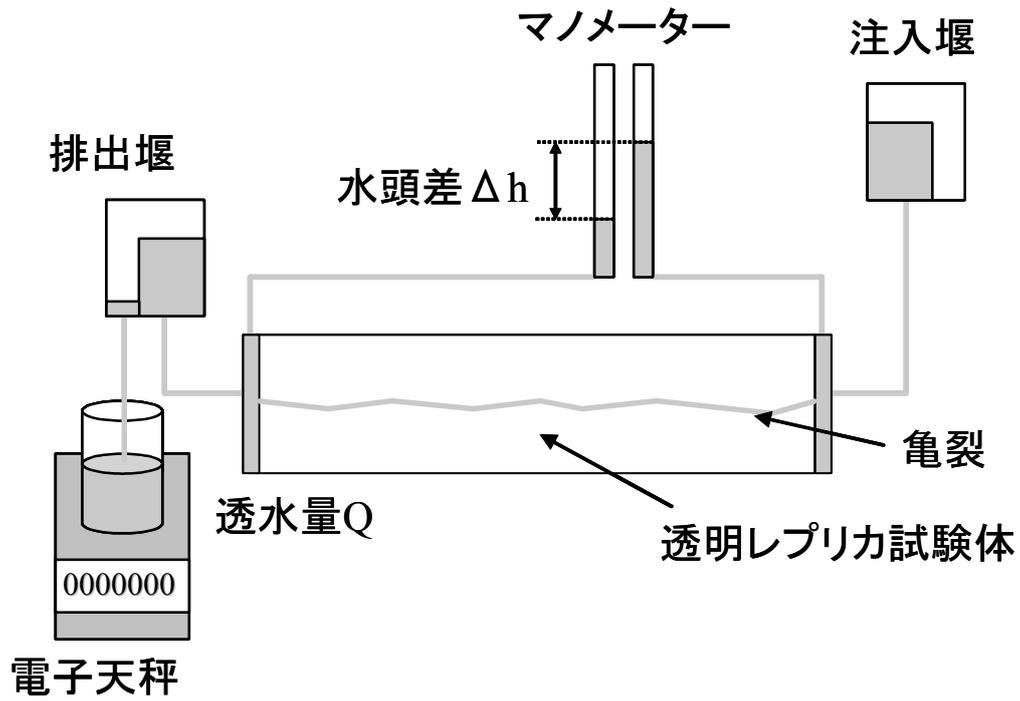


図 5 透水試験方法概念図

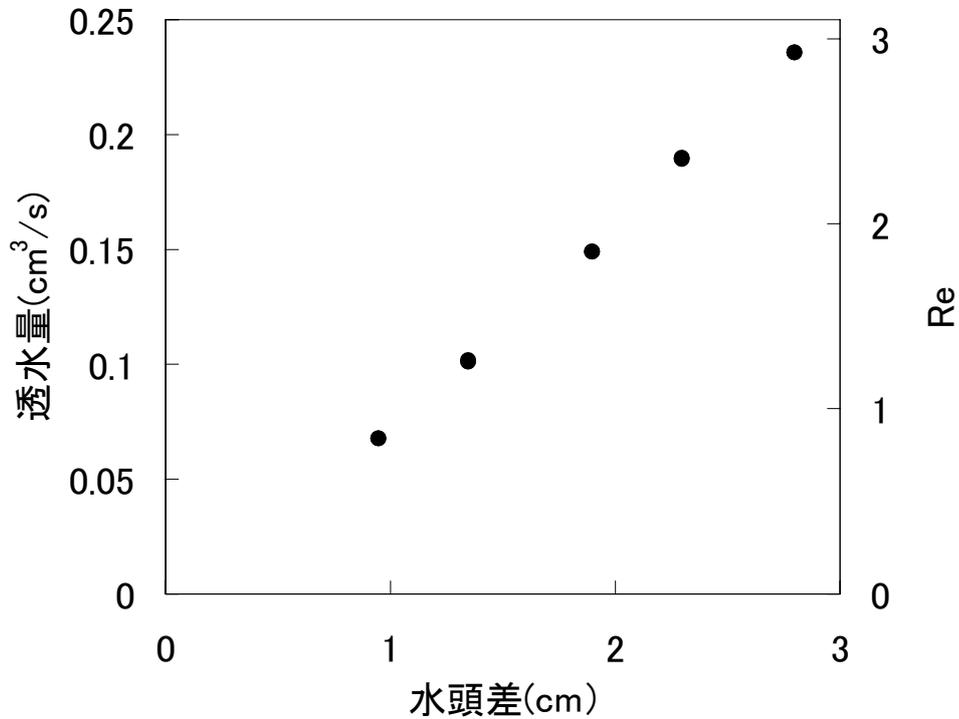


図 6 透水試験結果

4.4 亀裂の透水特性評価

ダルシー則により透水量は式(4)により算出することができる。

$$Q = K \cdot A \left(\frac{\Delta h}{L} \right) \quad (4)$$

ここで、Q は透水量、K は透水係数、A は断面積、h は水頭差、L は移行経路長である。

亀裂を対象とした場合の透水係数 K は式(5)となる。また、断面積 A は式(6)で表せる。

$$K = \frac{b^2 \cdot \rho \cdot g}{12 \cdot \mu} \quad (5)$$

$$A = b \cdot W \quad (6)$$

ここで、b は開口幅、ρ は密度、g は重力加速度、μ は粘性係数、W は亀裂幅である。

式(4)、(5)、(6)より、(7)式が得られる。

$$Q = \frac{b^3 \cdot \rho \cdot g}{12 \cdot \mu} \cdot W \left(\frac{\Delta h}{L} \right) \quad (7)$$

式(7)より、透水量は亀裂開口幅の3乗に比例することから、一般に三乗則と呼ばれている。ここで、 $\frac{b^3 \cdot \rho \cdot g}{12 \cdot \mu}$ は透水量係数と呼ばれており、亀裂を対象とした透水量の評価に用いられる。

また、式(7)を開口幅について整理すると、式(8)となる。

$$b = \left(\frac{Q \cdot 12 \cdot \mu \cdot L}{\rho \cdot g \cdot W \cdot \Delta h} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (8)$$

式(8)から算出される開口幅 b を水理的開口幅 b_h と呼ぶ。式(8)より、透水試験結果から求められる水理的開口幅 b_h は 0.20mm となった。また、透水量係数は $8.11 \times 10^{-7} \text{m}^2/\text{s}$ となった。

4.5 開口幅データによる透水特性の推定

亀裂の開口幅データを用いて、亀裂の透水特性を推定する方法には様々な方法が提案されている。接触領域が無く、開口幅分布が対数正規分布に従い、空間的にランダムに分布している場合には、水理学的開口幅は幾何平均と等しくなるとされている¹⁰⁾。また、開口幅分布の統計値から水理学的開口幅を算出する方法が提案されており、Silliman²⁾は開口幅分布が対数正規分布に従い、空間的にランダムに分布している場合には、水理学的開口幅 b_h が式(9)で求められるとしている。

$$b_h = b_a \cdot \exp(-\sigma_b^2 / 2) \quad (9)$$

ここで、 b_a は開口幅の平均値、 σ_b は開口幅の対数値の標準偏差である。

一方、数値解析による手法としては、局所的には三乗則が成立すること(LCL:Local Cubic Law)を仮定して開口幅から各点の透水量係数を求めることにより、ダルシー則に基づく有限要素法などの数値解析を行う手法が一般的に行われている。

幾何平均や Silliman の式により水理学的開口幅を推定するためには、亀裂開口幅分布が対数正規分布に従っている必要があるが、開口幅分布は図 4 に示すように、対数正規分布に近い分布となっていることから、幾何平均や Silliman の式により水理学的開口幅を推定可能であると考えられる。このため、幾何平均、Silliman の式による値及び LCL に基づく透水量係数分布を用いた 2 次元浸透流解析による結果と透水試験結果の比較を行った。

水理学的開口幅の推定値の算出結果を表 1 に示す。透水試験から求められた水理学的開口幅とこれら 3 つの結果を比較すると、幾何平均、Silliman の式による値及び LCL に基づく浸透流解析から求められた透水量から算出した水理学的開口幅は、ほぼ等しい値となっているが、試験で求められた水理学的開口幅と比較すると約 1.2 倍程度過大評価されている。透水量での比較を図 7 に示す。透水試験結果と比較して、約 1.6 倍から 1.8 倍過大評価されている。

このような透水試験結果と解析結果の乖離については、これまでに報告されている結果^{3),4)}と整合的である。しかしながら既往の報告^{3),4)}は、試験体が岩石亀裂ではなく模様ガラスであったり、試験体は岩石亀裂であるが解像度の低い開口幅データを使用しているため測定データそのものに問題がある可能性が考えられる。光学的手法による高解像度で定量的なデータを用いた検討においても同様の結果が得られたことから、開口幅分布を用いた透水量の推定には未だに課題が残されているといえる。透水試験結果と解析結果の乖離については、今後の更なる検討が必要であると考えられるが、光学的手法による高解像度で定量的なデータは、試験結果との乖離を解明する為に有用であると考えられる。

透水試験結果と解析結果が乖離する原因として、亀裂形状の 3 次元的な凹凸の影響が考えられる。例えば、3 次元的な流れにより移行経路長の増加が考えられる。また、光学的手法による亀裂開口幅測定では、図 8 に示す Vertical Aperture を評価しているが、実際に透水特性に寄与する局所的な開口幅の量は Perpendicular Aperture に近いと考えられる。亀裂形状と亀裂開口幅を同条件で高精度に測定することが困難であることや、亀裂形状の 3 次元的な凹凸の影響を考慮した数値解析も困難である。しかしながら、透水試験結果と解析結果が乖離する原因を検討するため、

3次元的な亀裂形状が透水特性に与える影響の検討が必要である。

表 1 開口幅比較

	開口幅(mm)	開口幅比**
透水試験から求めた水理学的開口幅 b_h	0.200	1.00
開口幅の幾何平均	0.239	1.19
Sillimanによる式(9)から求めた値	0.245	1.22
LCLによる解析から求めた水理学的開口幅 b_h^*	0.234	1.17

*解析による透水量から三乗則に基づき算出した

**透水試験による水理学的開口幅を1とした場合の比

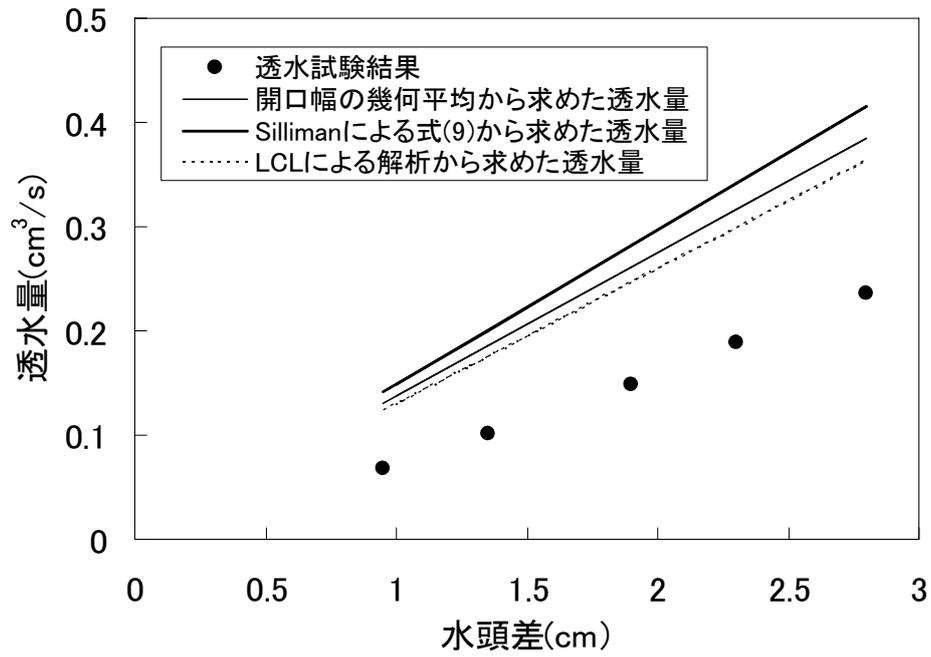


図 7 透水試験結果と開口幅データから推定した透水量の比較

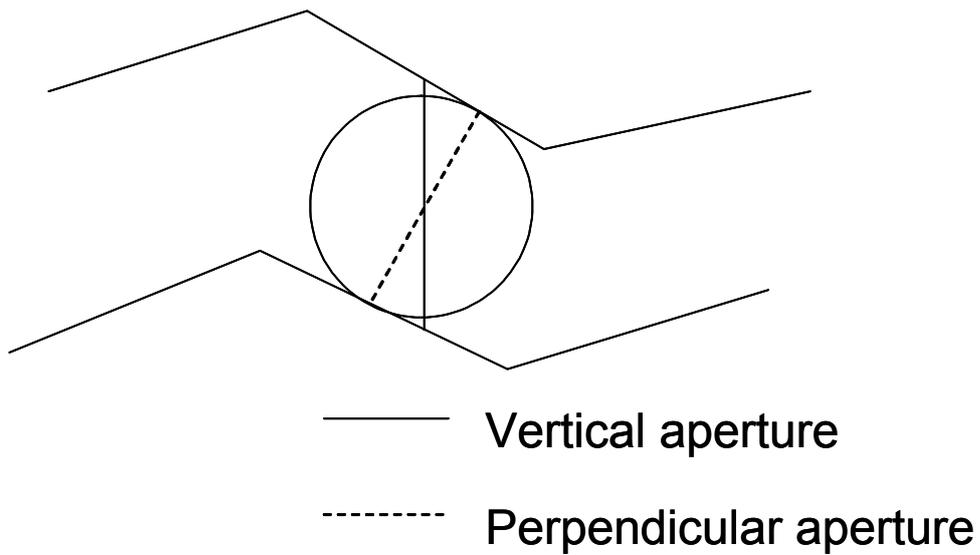


図 8 開口幅の評価方法の違いの概念図

4.6 トレーサー試験方法

トレーサー試験は定流量ポンプを用いた流量一定条件で行った。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。

トレーサー試験は、亀裂内を水で満たした状態の試験体に染料トレーサー溶液を定流量ポンプを用いて 1.0ml/min の一定流量で透水試験と同じ方向に注入する方法で行った。また、データの取得はトレーサー注入開始から光学的手法により 7 秒間隔で行った。なお、この条件でのレイノルズ数は 0.41 である。

4.7 トレーサー試験結果

図 9 に亀裂内を移行中のトレーサー濃度分布と開口幅分布を示す。開口幅測定と同じ解像度で亀裂内のトレーサー濃度分布が定量的に測定できていることがわかる。また、70 秒後、105 秒後には左側に選択的な流れが見られるが、これは図の左側に流れ方向に沿った開口幅の大きな領域が連続しているためであると考えられる。

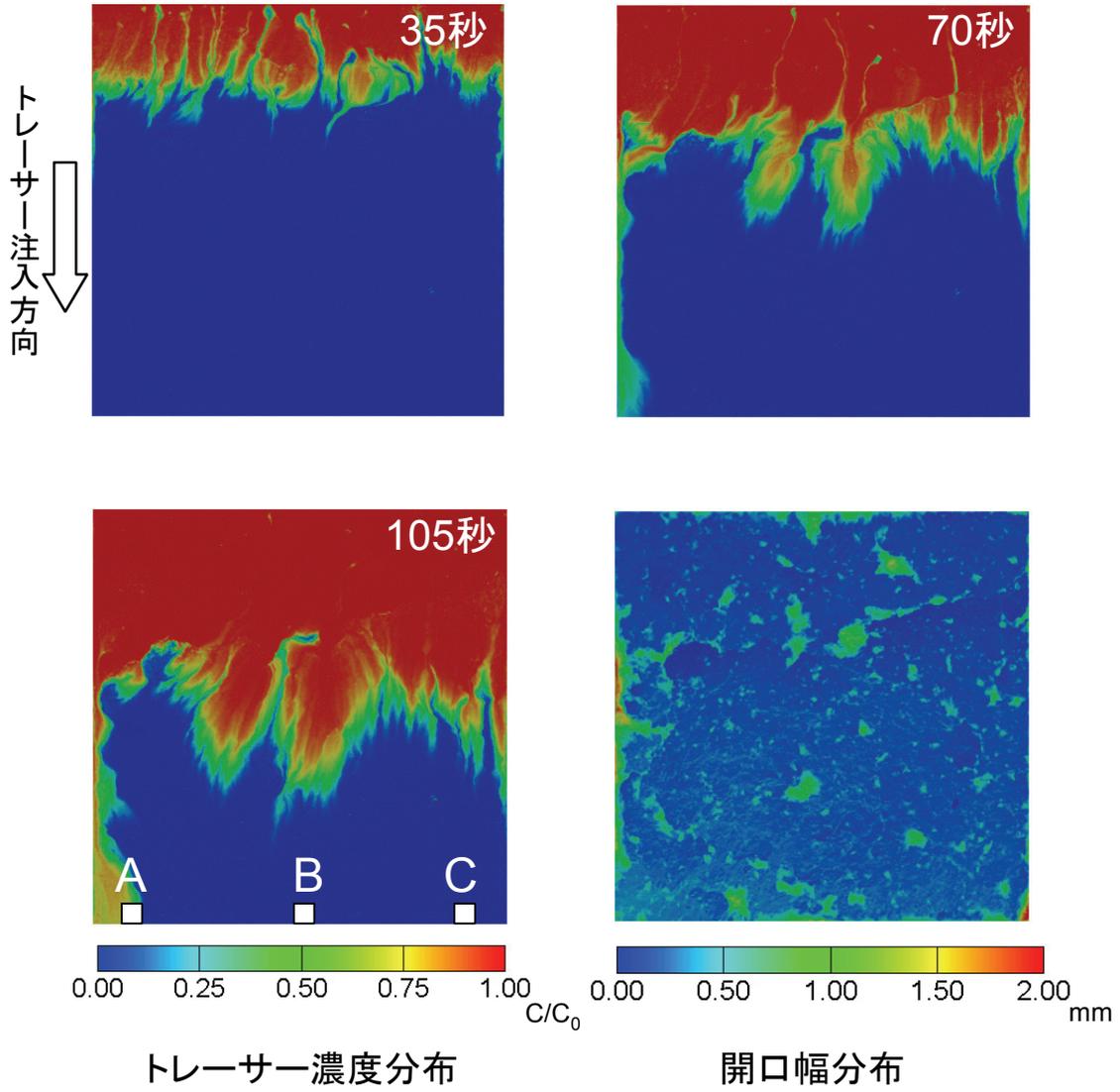


図9 トレーサー移行中の濃度分布と開口幅分布

4.8 物質移行特性評価

4.8.1 破過曲線の算出

破過曲線を求めるには、亀裂から排出されたトレーサー濃度の時間変化を測定するのが一般的であるが、亀裂内の体積に比べて排出ポート内の体積が大きい場合、排出ポート内体積の影響によりトレーサーの分散効果や移行時間が過大評価される傾向にあり、特に小さな試験体や開口幅が小さい場合には影響が大きい。一方、光学的手法は、亀裂内のトレーサーを直接測定して求めるため、これらの影響を受けていない破過曲線を求めることができる。

破過曲線は一般に排出されたトレーサー量の時間変化から求めるが、光学的手法では、任意の観測点におけるトレーサーの濃度を測定することができるが、任意の観測点における透水量を求めることはできないことから、亀裂の排出側での濃度変化から、直接破過曲線を算出することはできない。しかし、光学的手法では亀裂内の各点の亀裂開口幅とトレーサー濃度から亀裂内に存在するトレーサーの総量を求めることができるため、瞬時に一定量のトレーサー (M_0) を亀裂内に注入し、亀裂内に存在するトレーサー量 (M) の時間変化を測定することにより破過曲線を求めた。ここで、亀裂から排出されたトレーサー量は $M_0 - M$ となることから M_0 で正規化した $(M_0 - M) / M_0$ の時間変化から破過曲線を算出した。

図 10 に累積破過曲線を示す。累積破過曲線には 100 秒過ぎあたりに停滞域が見られる。これは、図 9 に示されるように、亀裂の左側に開口幅が大きな領域が連続しているため、そこがチャンネル流れとなっており、チャンネル部を通過したトレーサーが排出側に到達してからその他の領域を透過したトレーサーが排出されるまでに時間差が生じたためであると考えられる。

4.8.2 マスバランス開口幅

亀裂の物質移行特性を表すパラメータとして、マスバランス開口幅がある。マスバランス開口幅 b_m は式(10)で表される。

$$b_m = \frac{Q \cdot t}{L \cdot W} \quad (10)$$

ここで、 Q は透水量、 t はトレーサーの平均移行時間、 L は移行経路長、 W は亀裂幅である。

平均移行時間 t の算出方法として、トレーサーの濃度が 50% に到達した時間 t_{50} が多く用いられているが、Moreno et al.¹⁰⁾ は Mean Residence Time として以下の式を提案している。

$$\text{Mean Residence Time} = \int_0^{\infty} \frac{C_0 - C_t}{C_0} dt \quad (11)$$

ここで、 C_0 は注入したトレーサーの濃度である。

式(11)より、Mean Residence Time は図 10 の破過曲線における斜線の領域の面積に相当する。図 10 の斜線の領域の面積はトレーサーが破過する時間の平均値を表している。

図 10 の累積破過曲線から求めた t_{50} と Mean Residence Time はそれぞれ 174 秒と 162 秒と

なり、マスバランス開口幅はそれぞれ 0.29mm と 0.27mm となった。今回のケースでは亀裂全面が物質移行に寄与していることから両者にあまり違いは見られないが、チャンネル流れのように亀裂内の流れの不均質性が顕著な場合 Mean Residence Time が t_{50} に比べて大きくなる傾向になることが知られている。

今回のケースでは、Mean Residence Time により求めた平均移行時間から場算出した亀裂内体積は、光学的手法で算出した開口幅の算術平均とほぼ等しくなることから、トレーサー試験結果から推定した亀裂内の体積の妥当性を示すことができた。

4.8.3 透水量係数と物質移行に関する開口幅の関係

第 2 次取りまとめでは、釜石における原位置トレーサー試験の結果から得られた透水量係数 T と物質移行に関する開口幅 b_m の関係は $b_m = c \cdot T$ の関係の経験則を用いている。しかしながらその不確実性はおおきく、 c の値は 1 から 10 の範囲に分布するとした感度解析を行っている。今回の試験結果をこの経験則に適用した場合に算出される c は 0.11 となり、釜石における原位置試験の結果よりもかなり小さな値となっている。その一方で、今回の試験結果から求められる b_m は三乗則に基づく開口幅に近い値となっている。これは、今回室内試験で使用した試験体は人工亀裂から作製したレプリカであり、亀裂全面が物質移行に寄与していることから、比較的一様な流れであるためであると考えられる。これに対して原位置試験では、天然の亀裂を対象としていることから、亀裂面形状や亀裂開口幅分布がより複雑であり、それに伴いチャンネル流れが卓越して流路も複雑になっていることから、 c の値の不確実性が大きく三乗則に基づく開口幅より大きな c の値として評価されていると考えられる。

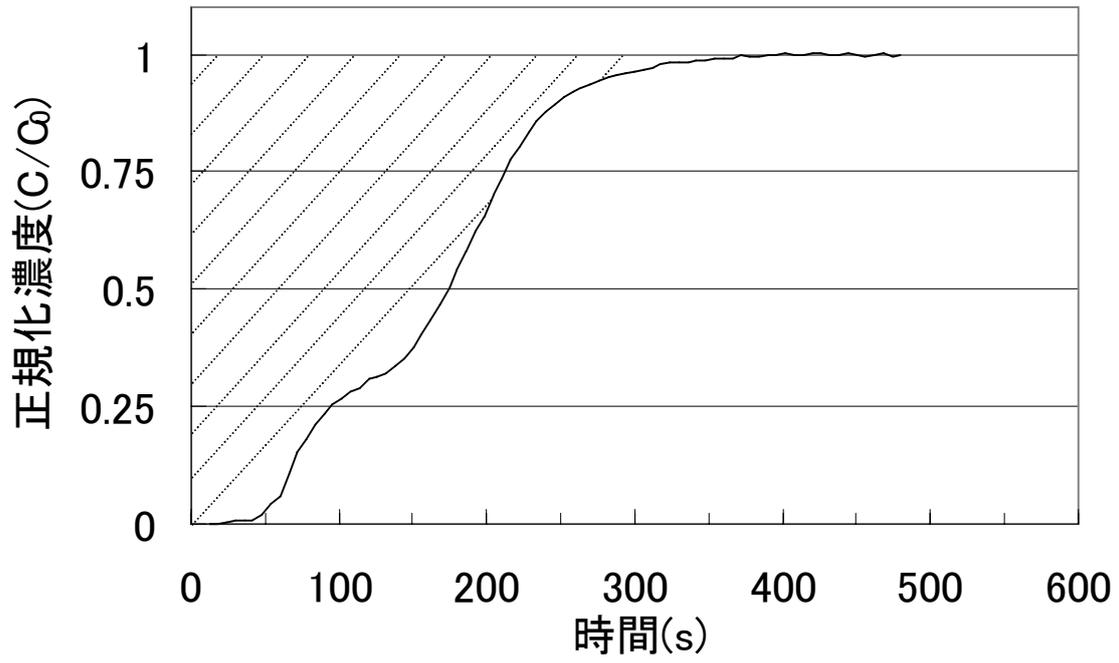


図 10 累積破過曲線

4.8.4 亀裂内の分散特性

分散の程度を示すパラメータとして分散長が用いられている。このため、破過曲線を一次元移流分散の理論解¹¹⁾にフィッティングすることにより分散長を求めた。一次元移流分散の理論解とのフィッティングには、流速と分散長の2つのパラメータを同定する必要があるが、今回は流速については Mean Residence Time から算出した流速を用いて、分散長のみをフィッティングにより求めた。図 11 に破過曲線と分散長をフィッティングした理論解を示す。得られた分散長は 0.98cm となり、移行距離の約 1/10 となった。この値は一般的な単一亀裂内での分散長と整合的である。しかし、今回のように停滞域がある破過曲線を一次元移流分散の理論解にフィッティングした単一の分散長で表現することは難しいと考えられる。

亀裂全体での分散は比較的大きいが、図 9 に示す亀裂内の濃度分布からもわかるように、トレーサーの移流フロントでの濃度勾配は比較的シャープであることがわかる。このため、微小な領域での分散効果を把握するために、図 9 に示す排出側における任意の観測領域 (A、B、C) における 1 ピクセルでのトレーサー濃度の変化を破過曲線として求めた。ここでの破過曲線は観測領域における正規化濃度の時間変化であり、トレーサーの移行量ではない。微小な観測領域ではトレーサー濃度の立ち上がりはシャープであり、破過曲線に一次元移流分散の理論解をフィッティングして求めた分散長は非常に短く、移行距離の約 1/100 となった。このことから、各観測領域に到達したトレーサーはある 1 つの経路を移行してきたと仮定すると、個々の経路における開口幅分布の不均質性に起因する分散効果は相対的に小さく、経路毎の流速の違いが主要な分散の要因であると考えられる。

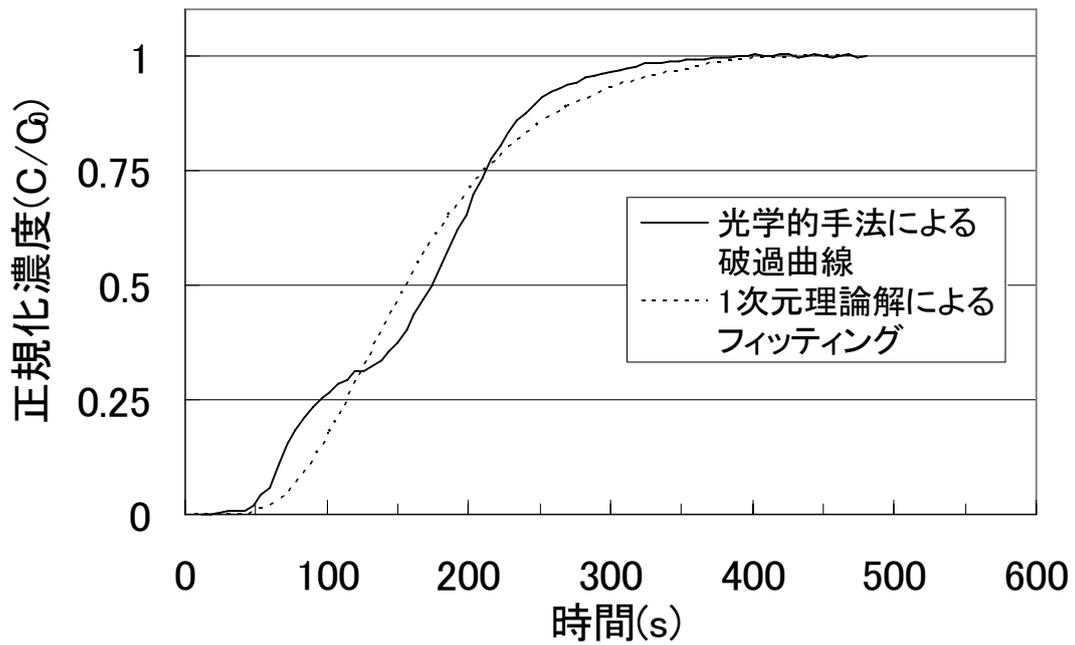


図 11 一次元理論解によるフィッティング

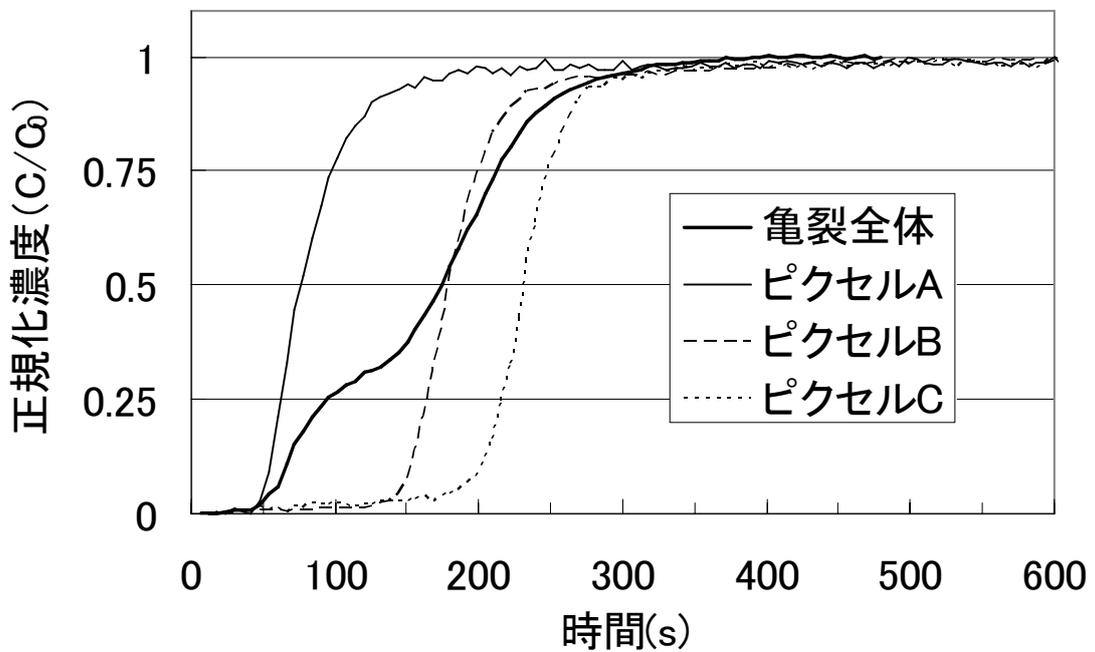


図 12 局所的な破過曲線と亀裂全体の破過曲線の比較

5. まとめ

本研究では岩石試料を型として作製した透明レプリカ試験体を対象に、光学的手法による亀裂開口幅測定と亀裂内物質移行の測定を行い、亀裂開口幅分布の不均質性が物質移行に与える影響についての検討を行った。今回の検討で得られた知見を以下に示す。

- ・ 光学的手法により、高解像度の開口幅データ及びトレーサー濃度分布データを取得することができた。
- ・ 光学的手法により得られた開口幅データを用いて透水量の比較を行った結果、統計データから推定される透水量や解析による透水量は、透水試験で得られた透水量の 1.6 から 1.8 倍となった。この試験結果と解析結果の乖離については、これまでに報告されている研究例と整合的である。
- ・ トレーサーの平均移行時間から算出されるマスバランス開口幅は、光学的手法により求められた開口幅の算術平均値とほぼ等しいことから、トレーサー試験結果から推定した亀裂内の体積の妥当性を示すことができた。
- ・ 今回の試験条件において、微小な領域での分散長は移行経路長の約 1/100 程度であるが、亀裂全面での分散長は移行経路長の約 1/10 となっており、このことから、個々の経路での分散効果は相対的に小さく、経路毎の流速の違いが分散の主要な要因であることが確認できた。
- ・ 透水量係数と物質移行に関する開口幅の関係における比例定数 c の値は 0.11 となり、釜石における原位置試験よりもかなり小さな値となった。これは、天然の亀裂は亀裂面形状や亀裂開口幅分布が複雑であり、それに伴いチャンネル流れが卓越しているのに対して、今回の試験結果は亀裂全面が物質移行に寄与していることから、比較的一様な平行平板に近い流れであるためと考えられる。

今回の検討では、1 ケースのデータを用いての評価であり、今後更なる検討を行うためには、複数の試験ケースでの評価を行う必要がある。また、今後は 3 次元的な亀裂形状の影響を定量的に評価した上で、合理的に 2 次元や 1 次元へ近似を行う際に用いるパラメータの妥当性を検討する必要がある。これらの検討結果は、1 次元平行平板モデルの信頼性向上に資するものである。

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, (1999)
- 2) Silliman, S. E. : “An Interpretation of the Difference Between Aperture Estimates Derived From Hydraulic and Tracer Tests in a Single Fracture”, WATER RESOURCES RESEARCH, VOL.25, NO.10, pp.2275-2283, (1989)
- 3) Nicholl, M. J., H. Rajaram, R. J. Glass, and R. Detwiler : “Saturated flow in a single fracture: Evaluation of the Reynolds equation in measured aperture fields”, WATER RESOURCES RESEARCH, VOL.35, NO.11, pp.3361-3373, (1999)
- 4) Konzuk, J. S., and B. H. Kueper : Evaluation of cubic law based models describing single-phase flow through a rough-walled fracture”, WATER RESOURCES RESEARCH, VOL.40, W02402, (2004)
- 5) 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, pp.61-70(1992)
- 6) 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, pp.395-404 (1996)
- 7) 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), pp.1889-1900, (2003)
- 8) A.A. Keller : “Single and Multiphase Flow and Transport in Fractured Porous Media”, Ph.D dissertation, Stanford University, (1996)
- 9) 佐藤 久, 肖俊, 澤田 淳: “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”, JAEA-Research 2007-006, (2007)
- 10) Moreno, L., Y. W. Tsang, C. F. Tsang, F.V. Hale, and I. Neretnieks : “Flow and Tracer Transport in a Single Fracture”: A Stochastic Model and Tts Relation to Some Field Observations, WATER RESOURCES RESEARCH, VOL.24, NO.12, pp.2033-2048, (1988)
- 11) Ogata, A., R. B. Banks : “A solution of difference equation of longitudinal dispersion in porous media” , Geological survey professional, pp.411-A, (1961)

付録

既存の報告（本文の参考文献(9)）において、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の測定精度についての確認を行っている。この中で、CCDのノイズについては、ノイズを低減するためにスタッキング（画像の平均化）を行っているが、その定量的な評価までは行っていない。このため、CCDのノイズが測定精度に与える影響についての定量的な評価を行った。

付録1. CCDのノイズについて

付録1.1 ノイズの種類

CCD(Charge Coupled Device) は固体撮像素子のひとつであり、フォトダイオードで光を電荷に変えることにより光の強度を測定する。CCDは他の撮像素子に比べて相対的に感度が高く、ノイズが少ないという特徴を持つが、測定データには以下のノイズが含まれている。

- ・暗電流ノイズ
- ・読み出しノイズ
- ・ショットノイズ

暗電流ノイズは露光しない状態でも、時間に比例して電荷がフォトダイオードに蓄積されることにより発生するノイズであり、温度が高いほど大きくなる。また、暗電流ノイズは個々のピクセルを構成しているフォトダイオードの性能に依存するため、その出現は固定パターンとして現れる。

読み出しノイズは電気回路に起因するノイズであり、露光時間、光量、温度の影響は受けずに、撮影毎に発生し、出現する空間分布はランダムである。

ショットノイズはフォトダイオードで光を電荷に換える時に発生するノイズであり、露光時間、温度の影響は受けずに光量の平方根に比例し、出現する空間分布はランダムである。

暗電流ノイズの評価は、照明光のない状態での撮影を行い、撮影画像にデータが無ければ、影響が無いと言える。また、ノイズが存在する場合には、差分を取ることでキャンセルすることができる。

読み出しノイズとショットノイズについては、出現する空間分布がランダムであることから、スタッキングを行うことにより、ノイズを低減することができる。

付録1.2 暗電流ノイズの評価

暗電流ノイズの影響を確認するために、照明をつけている場合と同じ撮影条件（露光時間）で、照明を消して撮影を行った。その結果、データは全て0でありこの撮影条件では、暗電流ノイズの影響を受けていないことを確認した。

付録 1.3 スタッキングによるノイズの低減

ノイズの影響は透過光強度のばらつきとして評価できることから、ノイズの定量的な評価には透過光強度の標準偏差を用いる。

スタッキングによるノイズ低減効果を確認するために 100 枚の連続画像を撮影することにより、同一ピクセルでの透過光強度を 100 個抽出し、その標準偏差を求めた。ここで、透過光強度の平均値は CCD の最大階調数 4096 に対して 3655 である。なお、画像の平均化は撮影ソフトウェアの機能を利用し、2、4、8、16、25、36、49、64、81、100 枚での平均化画像を取得した。なお、撮影ソフトウェアでは 100 枚までの平均化を自動で行うことができ、それ以上の平均化を行うためには、手動で行う必要があるため、今回の検討では最大の平均化枚数を 100 枚としている。

付録図 1 に画像の平均化枚数と透過光強度の標準偏差の関係を示す。平均化枚数が増えるにしたがい透過光強度の標準偏差は小さくなっており、100 枚平均では平均化無しの場合と比較して約 1/10 に低減していることが分かる。このことから、CCD のノイズ低減にスタッキングが有効であることが確認できた。

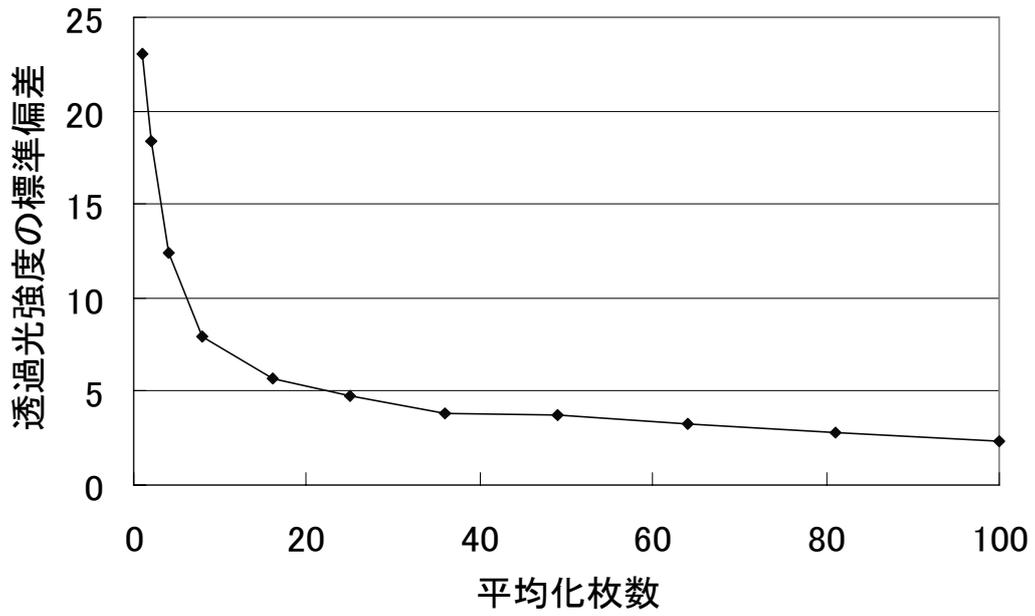
付録 1.4 ノイズの透過光強度依存性

ショットノイズは露光量（透過光強度）の平方根に比例することから、ノイズが開口幅測定及びトレーサー濃度測定に与える影響を評価する上で、露光量とノイズの関係を明らかにする必要がある。そこで、開口幅を連続的に変化させることにより、透過光強度を連続的に変化させることができる楔状亀裂試験体を作製した。付録図 2 に楔状亀裂試験体の概要を示す。楔状亀裂試験体は、2 枚のガラス板の間にステンレス製のスペーサーをはさむことにより作製しており、開口幅が 0mm からスペーサーの厚さである 2.42mm まで連続的に変化している。

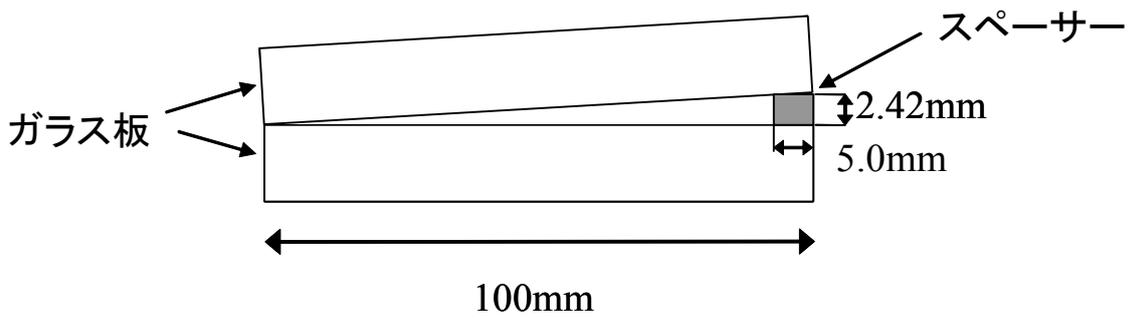
付録図 3 に楔状亀裂試験体を用いて測定した、100 枚平均画像における透過光強度と透過光強度の標準偏差の関係を示す。若干のばらつきはあるが、透過光強度の標準偏差は透過光強度が大きくなるに従い大きくなっていることがわかる。ショットノイズは露光量の平方根に比例することから、透過光強度を平方根としたものを付録図 4 に示す。透過光強度の平方根と透過光強度の標準偏差は比例関係となっていることから、透過光強度の増加に対する透過光強度の標準偏差の増加の影響はショットノイズの影響であると考えられる。これらの結果から、透過光強度の標準偏差を σ 、透過光強度を I とすると、近似曲線は付録式(1)となる。

$$\sigma = 2.76 \times 10^{-2} \times I^{(1/2)} + 3.72 \times 10^{-1} \quad \text{付録式(1)}$$

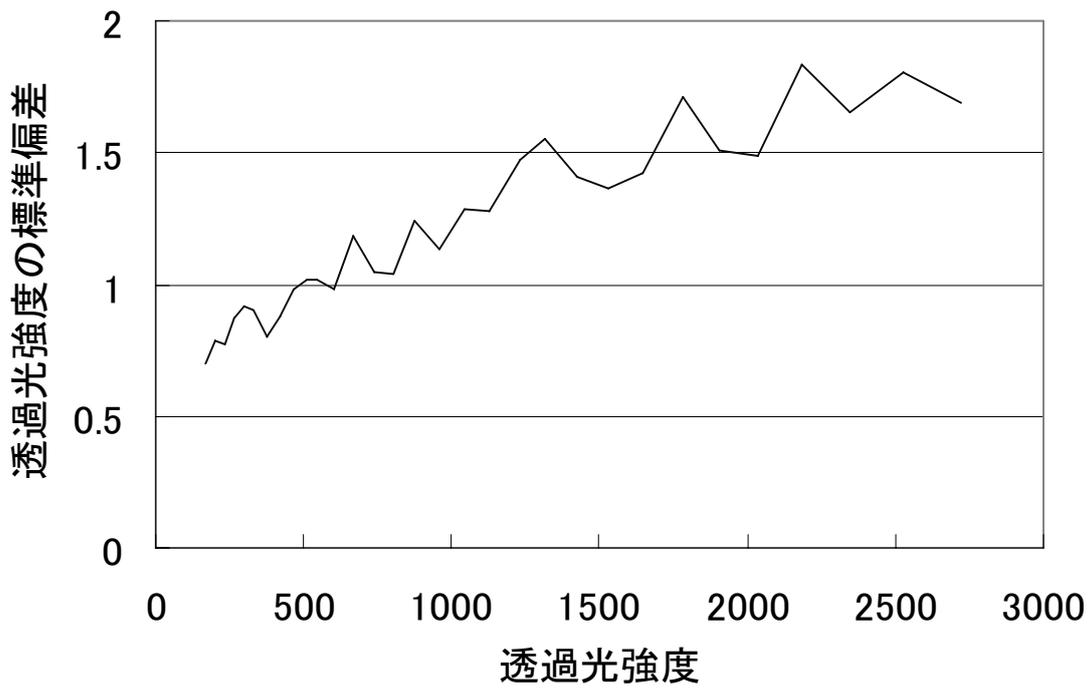
ショットノイズは透過光強度の平方根に比例し、読み出しノイズは透過光強度に関係なく一定の割合で発生することから、付録式(1)の右項の第 1 項がショットノイズに相当し、第 2 項が読み出しノイズに相当するものであると考えられる。今後のノイズ評価においては、付録式(1)を用いて求めた透過光強度の標準偏差を使用する。



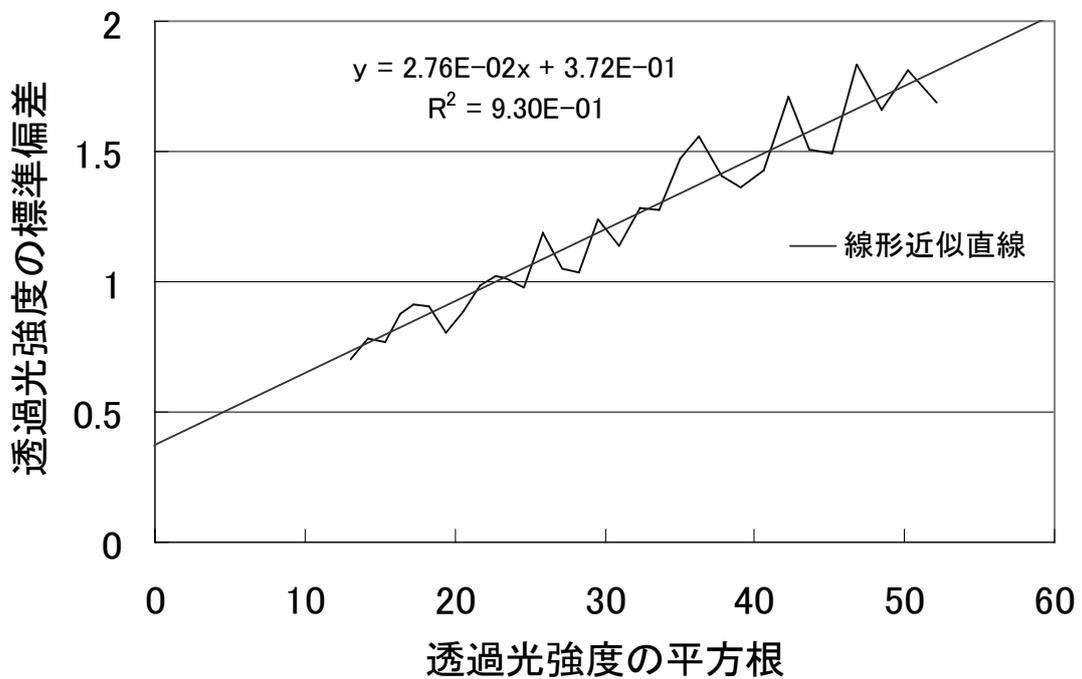
付録図 1 平均化枚数と透過光強度の標準偏差の関係



付録図 2 楔状亀裂試験体概要



付録図 3 透過光強度と透過光強度の標準偏差の関係 (100枚平均)



付録図 4 透過光強度の平方根と透過光強度の標準偏差の関係 (100枚平均)

付録 2 . ノイズが試験結果に与える影響

付録 2.1 ノイズが開口幅測定に与える影響

Lambert-Beer の法則により、透過光強度と開口幅の関係は付録式 (2)となる。亀裂内をトレーサーで満たした場合の透過光強度 I_{dye} にノイズによる σ の透過光強度の増加があった場合に評価される開口幅を b' とすると、透過光強度と開口幅の関係は付録式 (3)となる。

$$\ln\left(\frac{I_{dye}}{I_{water}}\right) = -\varepsilon_d \cdot c_d \cdot b \quad \text{付録式(2)}$$

$$\ln\left(\frac{I_{dye} + \sigma}{I_{water}}\right) = -\varepsilon_d \cdot c_d \cdot b' \quad \text{付録式(3)}$$

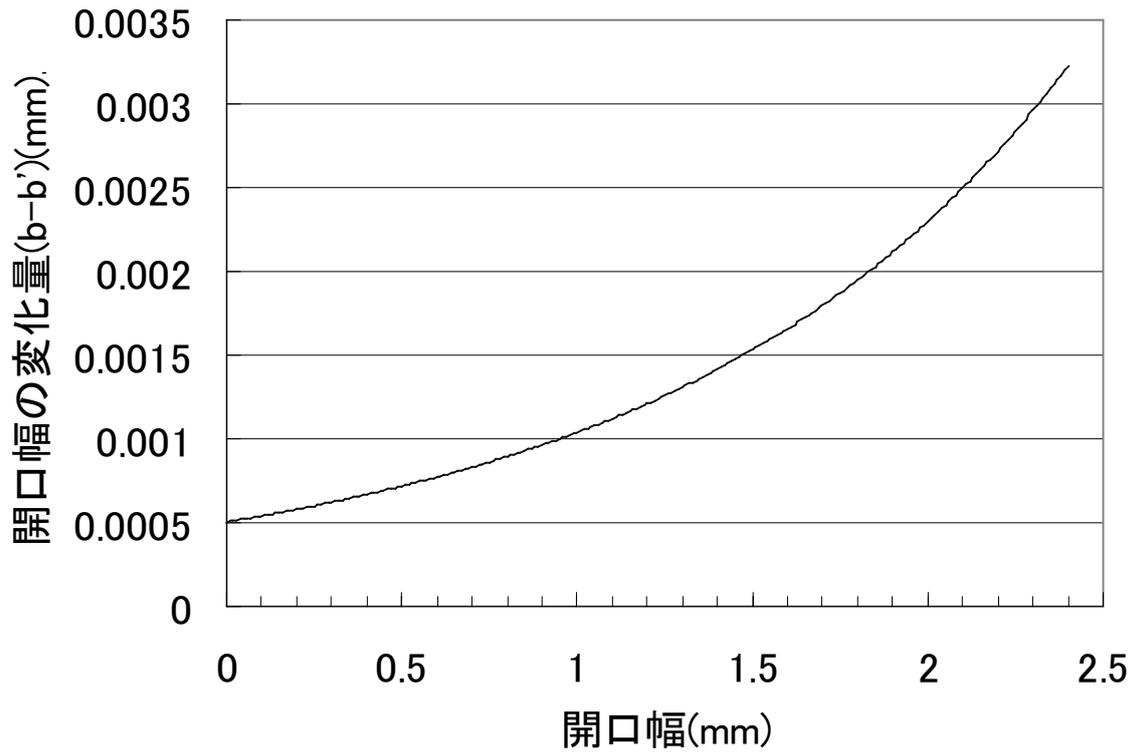
付録式(2)、付録式(3)を開口幅についてまとめると付録式(4)となる。

$$b - b' = \frac{\ln\left(\frac{I_{dye}}{I_{dye} + \sigma}\right)}{-\varepsilon_d \cdot c_d} \quad \text{付録式(4)}$$

付録式(1)から求めた透過光強度の標準偏差 σ と、付録図 2 に示す楔状亀裂試験体を用いて算出した透過光強度比と開口幅の比例係数から、 σ の透過光強度の増加が開口幅測定に与える影響について検討を行った。

付録図 5 に σ の透過光強度の増加による開口幅の変化量($b-b'$)を示す。開口幅が大きい領域ほど開口幅の変化は大きくなっていることが分かる。

本報告書で使用したレプリカ試験体の平均開口幅が $2.7 \times 10^{-1} \text{mm}$ であるのに対して、 σ の透過光強度の増加による開口幅の変化量は $6.09 \times 10^{-4} \text{mm}$ であることから、ノイズによる開口幅の変化量は測定対象としている亀裂開口幅に対して十分に小さいといえる。



付録図 5 の透過光強度の増加による開口幅の変化量

付録 2.2 ノイズがトレーサー濃度測定に与える影響

付録 2.2.1 正規化濃度の算出

亀裂内をトレーサーで満たした場合における透過光強度 I_{dye} にノイズによる σ の増加があった場合に評価されるトレーサー濃度を c'_d とすると、透過光強度とトレーサー濃度の関係は付録式(5)となる。

$$\ln\left(\frac{I_{dye} + \sigma}{I_{water}}\right) = -\varepsilon_d \cdot c'_d \cdot b \quad \text{付録式(5)}$$

付録式(2)、付録式(5)より、ノイズにより影響を受けたトレーサーの正規化濃度は付録式(6)となる。

$$\frac{c'_d}{c_d} = \frac{\ln\left(\frac{I_{dye} + \sigma}{I_{water}}\right)}{\ln\left(\frac{I_{dye}}{I_{water}}\right)} \quad \text{付録式(6)}$$

付録 2.2.2 楔状亀裂を用いた検討

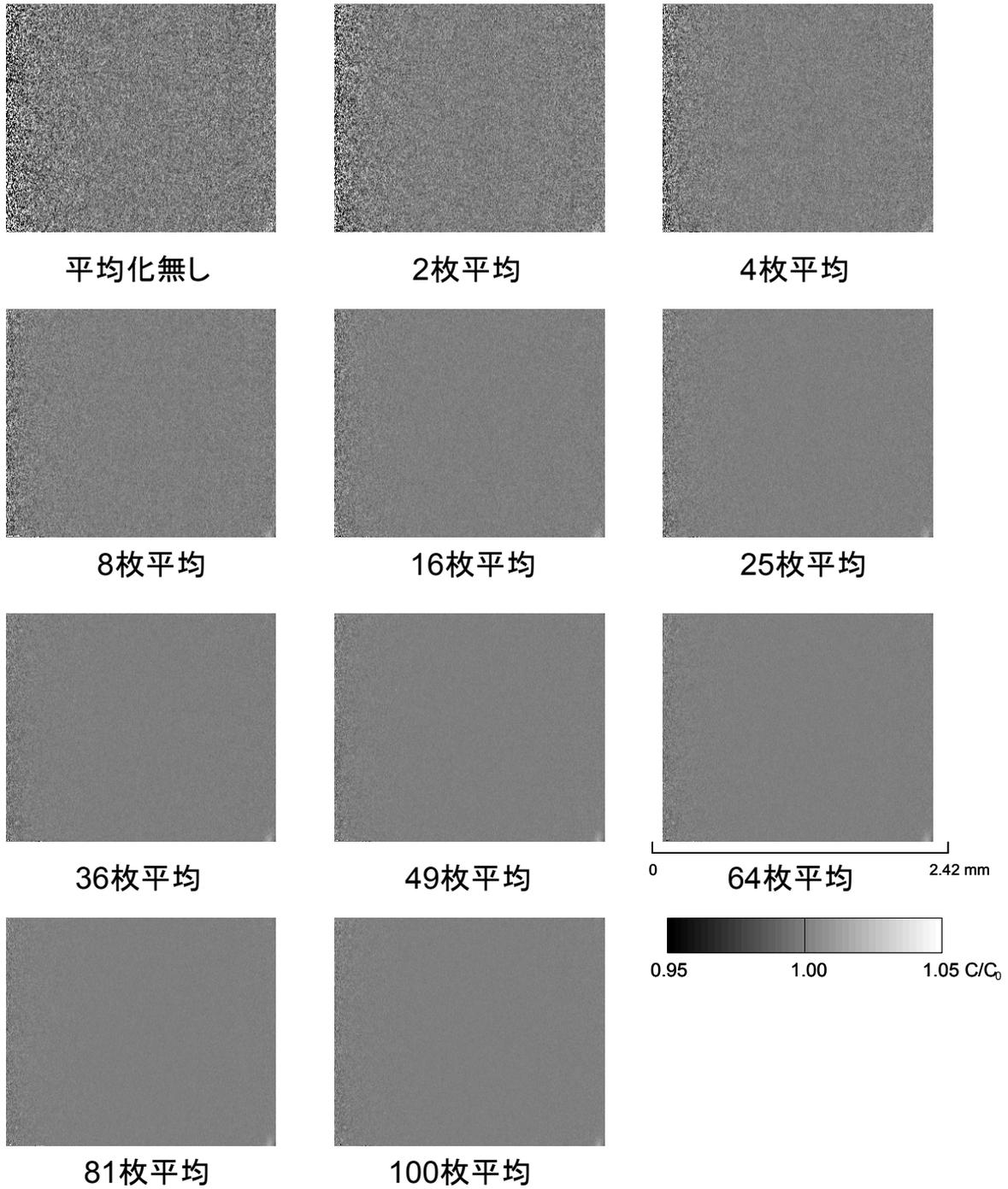
付録図 6 に楔状亀裂試験体の各平均化枚数におけるトレーサーの正規化濃度測定結果を示す。一定濃度のトレーサーを注入していることから、正規化濃度は全て 1 となるはずであるが、ノイズの影響により、正規化濃度にばらつきが生じている。図より、平均化枚数が多くなるほどトレーサーの正規化濃度のばらつきが小さくなっているのが分かる。また、開口幅が小さい領域において、トレーサーの正規化濃度のばらつきが大きくなっていることが分かる。これは、開口幅の小さい領域において、亀裂内を水で満たした透過光強度と亀裂内をトレーサーで満たした透過光強度の差が小さくなるため、ノイズが相対的に大きく影響するためである。

付録図 7 に楔状亀裂試験体の各平均化枚数における開口幅とトレーサーの正規化濃度の標準偏差の関係を示す。平均化枚数が増えるに従いトレーサーの正規化濃度の標準偏差が小さくなっていることが分かる。

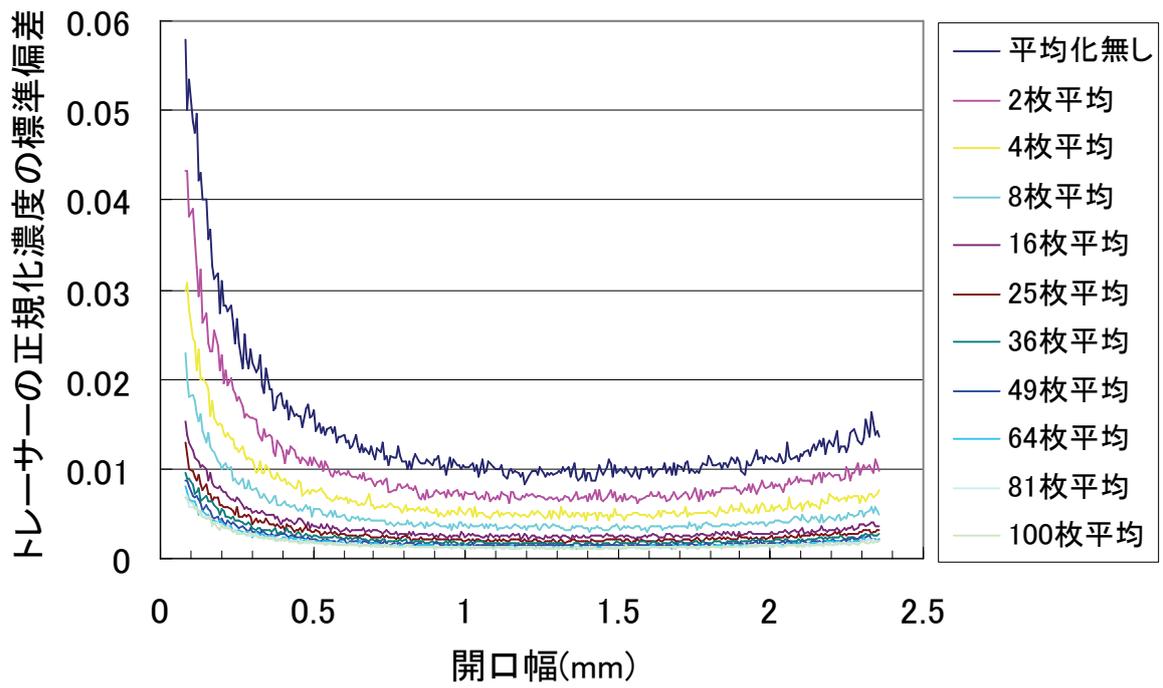
付録 2.2.3 ノイズがトレーサーの正規化濃度に与える影響の計算値と実測値の比較

付録図 8 に付録式(1)で求められる σ の値を付録式(6)に入力した場合に算出される正規化濃度を示す。図より、開口幅の小さい領域ではノイズの影響を強く受けていることが分かる。

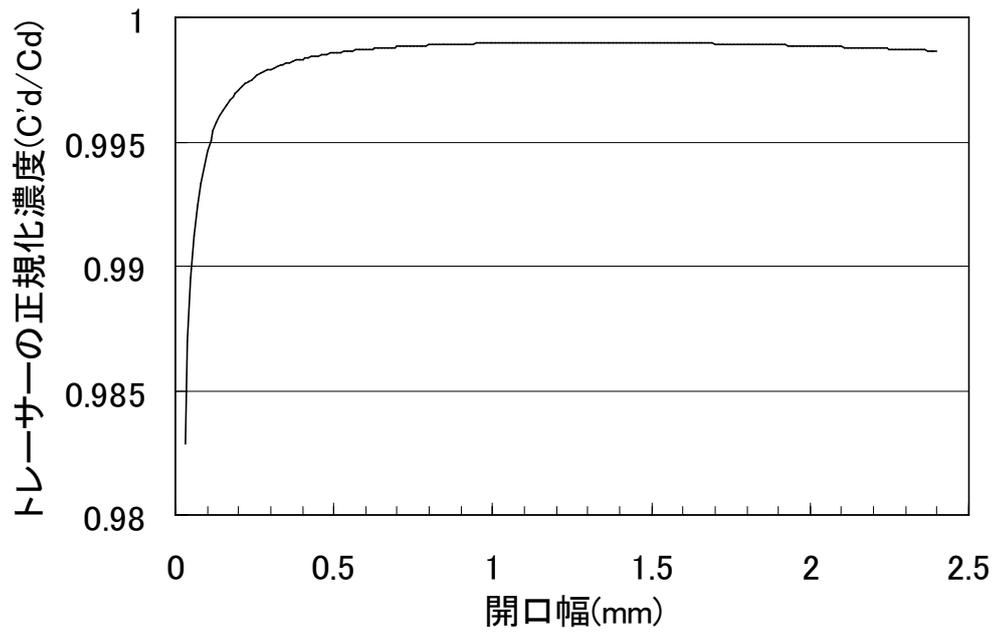
付録図 9 にトレーサーの正規化濃度の基準値である 1 と付録式(6)で計算されるトレーサーの正規化濃度の差と、100 枚平均画像でのトレーサー濃度の標準偏差の実測値と開口幅の関係を示す。両者はほぼ一致していることから、トレーサーの正規化濃度のばらつきの主要因は CCD のノイズに起因するものであることが確認できた。



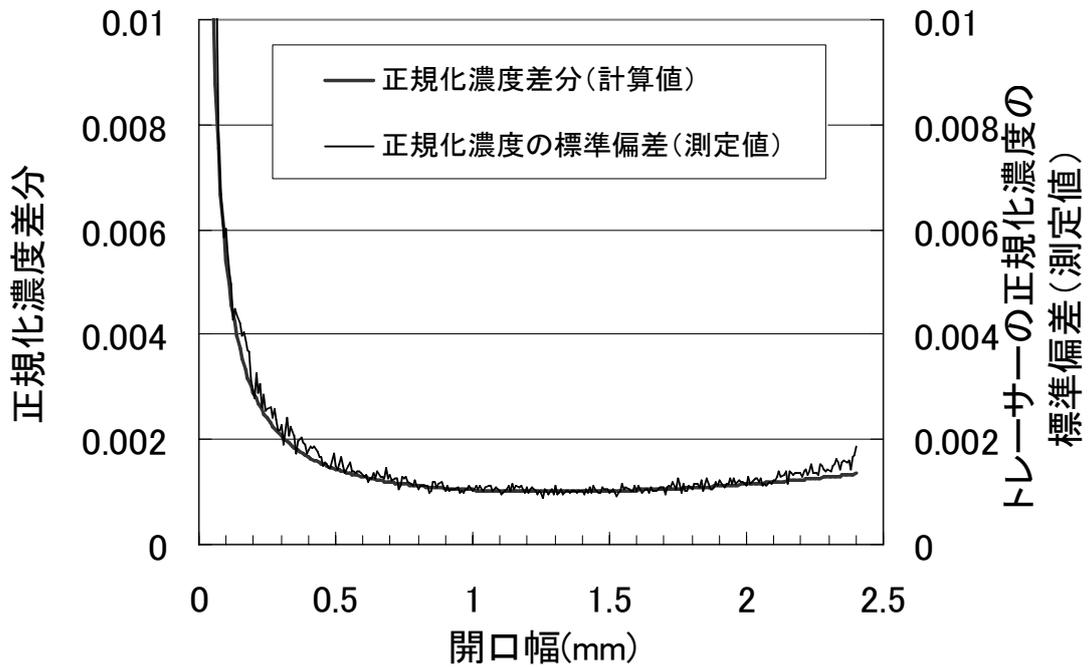
付録図 6 各平均化枚数における楔状亀裂の正規化濃度測定結果



付録図 7 平均化枚数とトレーサーの規格化濃度の標準偏差の関係



付録図 8 透過光強度が 増加した場合における正規化濃度



付録図 9 の透過光強度の増加が正規化濃度を与える影響と正規化濃度の標準偏差の関係

付録 3 . まとめ

楔状亀裂試験体を用いて、ノイズが開口幅測定及びトレーサー濃度測定に与える影響を検討した。その結果以下の結論が得られた。

- ・ ノイズをその発生原因に応じて分類することにより、ノイズと透過光強度の関係を明らかにした。
- ・ 100 枚の画像を平均化することによりノイズを約 1/10 に低減できることを確認した。
- ・ 開口幅測定において、平均化枚数 100 枚でのノイズに起因した誤差はレプリカ試験体の平均開口幅に対して十分小さな値であることを確認した。
- ・ 楔状亀裂内をトレーサーで満たした場合における、測定値と計算値はほぼ一致したことから、測定されたトレーサー濃度のばらつきの主な要因は CCD のノイズに起因するものであることが確認できた。

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
物質の量	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
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

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	エタ	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 ² ・m ⁻² =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 ² ・kg ² ・s ⁻²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²	m ⁻¹ ・kg ² ・s ⁻²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N・m	m ² ・kg ² ・s ⁻²
工率, 放射束	ワット	W	J/s	m ² ・kg ² ・s ⁻³
電荷, 電気量	クーロン	C		s ² ・A
電位差 (電圧), 起電力	ボルト	V	W/A	m ² ・kg ² ・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 ² ・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 ² ・s ⁻² ・A ⁻¹
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²	kg ² ・s ⁻² ・A ⁻¹
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m ² ・kg ² ・s ⁻² ・A ⁻²
セルシウス温度	セルシウス度 ^(d)	°C		K
光束	ルーメン	lm	cd・sr ^(c)	m ² ・m ⁻² ・cd=cd
照射度	ルクス	lx	lm/m ²	m ² ・m ⁻⁴ ・cd=m ⁻² ・cd
(放射性核種の)放射能	ベクレル	Bq		s ⁻¹
吸収線量, 質量エネルギー分与, カーマ線量当量, 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	J/kg	m ² ・s ⁻²
	シーベルト	Sv	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。組立単位を形作る際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°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 ・kg ² ・s ⁻¹
力のモーメント	ニュートンメートル	N・m	m ² ・kg ² ・s ⁻²
表面張力	ニュートン毎メートル	N/m	kg ² ・s ⁻²
角速度	ラジアン毎秒	rad/s	m ² ・m ⁻¹ ・s ⁻¹ =s ⁻¹
角加速度	ラジアン毎平方秒	rad/s ²	m ² ・m ⁻¹ ・s ⁻² =s ⁻²
熱流密度, 放射照度	ワット毎平方メートル	W/m ²	kg ² ・s ⁻³
熱容量, エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m ² ・kg ² ・s ⁻² ・K ⁻¹
質量熱容量 (比熱容量), 質量エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg・K)	m ² ・s ⁻² ・K ⁻¹
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	m ² ・s ⁻² ・K ⁻¹
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m・K)	m ² ・kg ² ・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 ² ・s ⁻²
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m ² ・kg ² ・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 ² ・A
電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² ・s ² ・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 ² ・s ⁻² ・A ⁻²
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	m ² ・kg ² ・s ⁻² ・mol ⁻¹
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol・K)	m ² ・kg ² ・s ⁻² ・K ⁻¹ ・mol ⁻¹
照射線量 (X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ ・s ² ・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 ² ・m ⁻² ・kg ² ・s ⁻³ =m ² ・kg ² ・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 ² ・s ⁻³ =kg ² ・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°=(π/180) rad
分	′	1′=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	″	1″=(1/60)′=(π/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	Å	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
ガル	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	1X unit	1X unit=1.002×10 ⁻¹¹ J
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	fm	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 = (101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
カロリ	cal	
マイクロン	μ	1 μ = 1μm=10 ⁻⁶ m

