**JAEA-Research** 2010-041



# 研削により測定した 50cm スケール岩体中の 天然亀裂の形状と開口幅の分布に関する研究

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

> 鐵 桂一 澤田 淳 Keiichi TETSU and Atsushi SAWADA

地層処分研究開発部門 地層処分基盤研究開発ユニット

Geological Isolation Research Unit Geological Isolation Research and Development Directorate

November 2010

日本原子力研究開発機構

Japan Atomic Energy Agency

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(<u>http://www.jaea.go.jp</u>) 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, 2010

#### JAEA-Research 2010-041

研削により測定した 50cm スケール岩体中の天然亀裂の形状と開口幅の分布に関する研究

#### 日本原子力研究開発機構

#### 地層処分研究開発部門 地層処分基盤研究開発ユニット

#### 鐵 桂一\*1, 澤田 淳+1

#### (2010年9月8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として、地質媒体を対象とした核種移行特 性の評価が行われる。花崗岩などの結晶質岩の場合、岩石内の亀裂が地下水の主たる経路となり、 地下水を媒介して物質が移動すると考えられている。この様な亀裂性岩盤における核種移行の評 価では、亀裂を均質な平板で近似した解析モデルが広く用いられる。しかし実際の亀裂は、亀裂 表面の粗さや亀裂の分岐、ガウジ等の充填物などにより複雑な形状を呈している。この様に複雑 な形状を有する亀裂を均質な平板でモデル化した場合、透水量係数や開口幅等のパラメータ値と して等価な値を必要とするため、詳細な亀裂の特徴の理解に基づいた亀裂内の地下水流動や物質 移行特性の検討が必要となる。

本研究では、天然の単一亀裂を含む 50cm スケール花崗岩の平面研削を繰り返して得られた岩 石内亀裂の画像データを元に、亀裂の開口幅を計測した。開口幅の計測は、亀裂内の充填物を含 まない空隙のみを対象とした。これより、50cm スケールの天然岩石亀裂の亀裂表面間の幅で表 される亀裂幅と、開口幅の諸特性値を取得することができた。また、亀裂幅が小さい箇所ほど充 填物の比が大きく、開口幅が閉塞しやすい傾向があった。これにより亀裂の開口部によるチャン ネル構造は、亀裂幅に比べ局所化することが分かった。

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

+1 核燃料サイクル工学研究所 環境技術管理部 処分技術課 (兼務)

#### JAEA-Research 2010-041

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

Keiichi TETSU<sup>\*1</sup> and Atsushi SAWADA<sup>+1</sup>

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

(Received September 8, 2010)

Nuclide migration in geological environment is evaluated for the safety assessment of the geological disposal system of HLW. In the case of the crystalline rock such as granite, the fracture in the rock dominates groundwater and mass transport path. In the analysis of the nuclide migration in such a fractured host rock, the numerical model is approximated by homogeneous parallel plate. And the parallel plate mode is widely applied for the various problems. However, the natural fractures have complex characteristics such as roughness of fracture surface, branching and infilling gouge. In the case to model the fracture of complex shape with a homogeneous plate, it is necessary to define an appropriate parameter value for the transmissivity, the fracture aperture and etc. Therefore, it is important to evaluate groundwater flow and mass transport behavior based on well understood fracture characterizations.

In this study, we measured fracture aperture by using a series of the digital image data of a single natural fracture in the 50cm scale of the granite rock block by grinding the rock surface in 1mm increment perpendicular to the fracture. The fracture aperture was measured by scaling of the width of void space in between fracture walls, without taking account fracture infilling materials. Thus, we obtained both fracture characteristics, fracture width (separation distance between the fracture walls) and fracture aperture, in 50 cm scale of a natural rock. Ratio of infilling to fracture width is large in which fracture width is relatively

\*1 Inspection Development Corporation,

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

<sup>&</sup>lt;sup>+1</sup> Waste Isolation Technology Section, Waste Management Department, Nuclear Fuel Cycle Engineering Laboratories (additional post)

small. In this area, fracture aperture tended to become small. Consequently, the flow channel by connecting the fracture aperture become to be localized.

Keywords: Natural Fracture, Fracture Aperture, Fracture Width

This is a blank page.

цК	
1. はじめに	1
2. 試験方法	2
2.1 岩体亀裂形状の測定原理	2
2.2 試験装置	3
2.2.1 亀裂開口幅測定プログラム	3
2.2.2 50cm 岩体亀裂デジタル画像データ	4
2.3 開口幅測定の作業手順	5
3. 50cm 岩体開口幅の計測結果	<b>5</b>
3.1 「亀裂開口幅測定プログラム」による開口幅計測	<b>5</b>
3.2 開口幅データ	7
4. 考察	8
4.1 開口幅, 亀裂幅, 充填物, 充填物の比の比較	8
4.2 岩体亀裂の統計量	13
4.3 開口幅, 亀裂幅, 充填物の空間的相関性	15
4.4 トレーサー試験との比較	18
5. まとめ	22
参考文献	23
付録	24

# 目次

Contents
----------

1. Introduction	1
2. Experimental procedure	2
2.1 Measurement principle of fracture shape rock block specimen	2
2.2 Experiment systems	3
2.2.1 Fracture measurement program	3
2.2.2 Digital image data of fracture by 50cm scale rock block specimen	4
2.3 Procedure of fracture measurement	<b>5</b>
3. Measurement result of fracture aperture by 50cm scale rock block	
specimen	<b>5</b>
3.1 Fracture aperture by fracture measurement program	<b>5</b>
3.2 Fracture aperture data	7
4. Consideration	8
4.1 Comparison of fracture aperture, fracture width, infilling and infilling	
ratio	8
4.2 Statistic of fracture by rock block specimen	13
4.3 Spatial correlation of fracture aperture, fracture width and infilling	15
4.4 Comparison between this study and tracer migration experiments	18
5. Conclusion	22
References	23
Appendix	24

# JAEA-Research 2010-041

# 表目次

表 4.2.1	50cm 岩体亀裂の統計量	 13
表 4.3.1	各方向の Sill と Range	 16

岩体研削撮影イメージ図	2
三次元的な画像データのイメージ図	2
画像データ繋ぎ合わせのイメージ図	3
「亀裂開口幅測定プログラム」による亀裂判定	3
画像データの例	4
50cm 岩体	4
開口幅の座標の定義	<b>5</b>
亀裂内の充填物	6
亀裂の分岐	6
レジンの未充填	6
亀裂の閉塞	6
止水用のシール剤	7
センサー孔	7
50cm 岩体の開口幅分布	7
開口幅分布	8
亀裂幅分布	9
充填物分布	9
充填物の比	10
開口幅分布, 亀裂幅分布, 充填物分布, 充填物の比(1)	11
開口幅分布, 亀裂幅分布, 充填物分布, 充填物の比(2)	12
充填物の比の平均値	13
開口幅, 亀裂幅の頻度分布	14
開口幅, 亀裂幅の累積和	14
各方向の Sill と分散	16
各方向の Range	16
開口幅のバリオグラム	17
亀裂幅のバリオグラム	17
充填物のバリオグラム	18
トレーサー試験概略図	20
トレーサー試験における定常状態の濃度分布	20
亀裂内のトレーサー流動の推定の例	21
	岩体研削撮影イメージ図

# 図目次

#### 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として、地質媒体を対象とした核種移行特 性の評価が行われる。花崗岩などの結晶質岩の場合、岩石内の亀裂が地下水の主たる経路となり、 地下水を媒介して放射性物質が移動すると考えられている。この様な亀裂性岩盤における核種移 行の評価では、亀裂を均質な平板で近似した解析モデルが広く用いられる<sup>[1]</sup>。しかし実際の亀裂 は、亀裂表面の粗さや亀裂の分岐、ガウジ等の充填物などにより複雑な形状を呈している。この 様に複雑な形状を有する亀裂を均質な平板でモデル化した場合、透水量係数や開口幅などのパラ メータ値として等価な値を必要とするため、詳細な亀裂の特徴の理解に基づいた亀裂内の地下水 流動や物質移行特性の検討が必要となる。

本研究では、天然の単一亀裂を含む 50cm スケールの亀裂の形状の精密計測により、亀裂内の 複雑な形状の理解に資するデータの取得を進めてきた。対象とした試料は、釜石原位置試験場で 採取して 50cm 角の立方体に整形した岩石である<sup>[2]</sup>。この岩石中の亀裂を対象に、透水試験によ る 50cm スケールの平均的な透水量係数の評価や、トレーサー試験による物質移行に寄与する開 ロ幅の評価が行われている<sup>[3][4]</sup>。また、亀裂開口部内をレジンで固化し、亀裂に直行する方向面 に垂直な方向に研削と撮影を繰り返す手法<sup>\*\*</sup>により、亀裂内形状の詳細な観測及び画像データの 取得を行なってきた<sup>[5][6]</sup>。取得した画像からは約 25 万箇所の亀裂幅中央の座標、亀裂幅のデータ を抽出するとともに、それらのデータから亀裂表面形状を評価した。また JRC<sup>[7][8]</sup>およびバリオ グラム<sup>[0]</sup>を用いて、亀裂表面形状と亀裂幅の異方性を評価した。この亀裂幅のデータは亀裂内の 充填物を含む亀裂の上下面間の幅であり、実際に地下水の流動や物質の移行に関与すると考えら れる開口幅より大きな値である。このため、亀裂幅データを用いて数値解析により行った透水試 験やトレーサー試験を対象とした検討では、亀裂の透水量が過大に評価される結果となった<sup>[10]</sup>。

そこで本報告では、亀裂幅から亀裂内の充填物を除いた空隙部の幅を抽出した。これより開口 幅の分布などの諸特性値の取得や、亀裂幅との比較を行った。また、不均質に分布する亀裂の開 口幅が、亀裂の平均的な特性に与える影響を検討した。

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

#### 2. 試験方法

#### 2.1 岩体亀裂形状の測定原理

岩石亀裂のデジタル画像データより, 亀裂開口部の座標と幅の数値データを取得する<sup>[5]</sup>。 本研究で使用する画像データは, 岩石の精密研削と亀裂部の撮影を繰り返す方法<sup>\*(</sup>以下, 岩体 研削撮影という)により得られたものである。岩体研削撮影は図 2.1.1 の様に, 亀裂内に着色レジ ンを注入して亀裂を固定した岩石を一定の厚さで平面に研削し(図 2.1.1(a)), その亀裂断面を撮影 する(図 2.1.1(b))。この作業を繰り返すことにより, 図 2.1.2 の様に岩石内の亀裂情報を三次元的 にデジタル画像データとして取得することができる。各画像データの亀裂座標と幅を「亀裂開口 幅測定プログラム」により数値化することで, 亀裂形状の三次元的な分布を取得することができ る。



図 2.1.1 岩体研削撮影イメージ図



図 2.1.2 三次元的な画像データのイメージ図 (岩体の研削と撮影の繰り返しにより亀裂形状の三次元的な分布データを取得)

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

2.2 試験装置

2.2.1 亀裂開口幅測定プログラム

亀裂開口部空隙形状の計測には、デジタル画像(bmp 方式)で保存されたデータから岩石試料の 亀裂の開口幅、開口幅の中点座標を抽出し、数値データに変換する「亀裂開口幅測定プログラム」 <sup>[5]</sup>を使用した。このプログラムは、複数枚のデジタル画像の位置関係を図 2.2.1 の様にパターンマ ッチングまたは手動で繋ぎ合わせる事ができ、一回のデジタルカメラの撮影範囲以上のデータを シームレスに処理することができる。これにより、各研削断面に表出した亀裂を連続的に分析し、 亀裂形状や幅の計測が可能になる。

「亀裂開口幅測定プログラム」による亀裂測定画面の例を図 2.2.2 に示す。図 2.2.2 で緑色の格 子線は測定間隔であり、本研究では 1mm 間隔に設定している。また格子線上の赤線は、画像か ら判読した亀裂の開口幅である。この赤線の長さと位置座標をプログラムが読み取り、赤線の長 さを開口幅データ、赤線中央の座標を開口幅中点座標データとして算出する。この様に亀裂形状 は指定した格子上で計測されるため、図 2.2.2 の X-Y 平面に対して垂直な Z 方向の値が算出され る。これにより各断面の開口幅、開口幅中点座標などが、Excel 形式のファイルとして出力され る。



50cm

0

図 2.2.1 画像データ繋ぎ合わせのイメージ図 (長方形及び丸型のカラーシールは画像データを繋ぎ合わせる際の目印)



図 2.2.2 「亀裂開口幅測定プログラム」による亀裂判定 (黄色いレジンで亀裂部を充填,緑色の格子線は測定間隔,赤線は判定した開口幅)

2.2.2 50cm 岩体亀裂デジタル画像データ

使用するデジタル画像データは、50cm スケールの岩石(以下、50cm 岩体という)の亀裂を、岩石の精密研削と亀裂部の撮影を繰り返す方法により取得したものである<sup>[5]</sup>。画像データの一例を図 2.2.3 に示す。

50cm 岩体は、釜石鉱山原位置試験場で採取された天然の単一亀裂を有する花崗閃緑岩であり、 画像データ取得前に透水・トレーサー試験が行われている<sup>[3][4]</sup>。吉野らによれば、50cm 岩体を用 いたこれらの試験では物質の移行経路であるチャンネルを包含した試験が実施可能であり、従来 のコアサイズでは得るのが困難であったデータの取得が可能になるとしている。

研削による亀裂形状の計測時には幅 500mm×高さ 500mm×奥行き 390mm に成形されてお り、岩体の中央付近に岩体ブロックの一面とほぼ平行な単一亀裂が存在する<sup>[2]</sup>。50cm 岩体の周囲 は図 2.2.4 の様にレジン及びモルタルで固定してあり、亀裂部内は黄色に着色したレジンが注入 してある。またモルタルの左側面には、亀裂の座標原点となるマーカーを取り付けてある。

50cm 岩体の研削間隔は作業性を考慮して 1mm とし、全研削断面は 500 面である。吉野らに よれば、50cm 岩体の平均的な水理学的開口幅は約 0.4mm、マスバランス開口幅はその 2 倍程度 と求められている<sup>[3][4]</sup>。これら平均的な開口幅とほぼ同じオーダーの測定間隔 1mm とすることで、 開口幅の大まかな形状や亀裂内の不均質なチャンネル構造を表現できるものと考える。なお、 50cm 岩体に対しこれまでに行われた、充填物を含む亀裂表面間の幅である亀裂幅の測定では、 平均 1.144mm の亀裂幅が確認されている<sup>[5]</sup>。今回の測定では亀裂一断面に対し約 7 枚の画像デ ータを収録しており、画像データ数は約 3500 枚、データの測定点は約 25 万箇所である。また画 像データの解像度は 24.9(µm/pixel)である。



図 2.2.3 画像データの例 (カラーシールは画像データを繋げる際の目印)



図 2.2.4 50cm 岩体 (黒点線は 50cm 岩体, 赤点線は亀裂の方向のイメージを表す)

- 2.3 開口幅測定の作業手順
  - (1)「亀裂開ロ幅測定プログラム」によりデジタル画像上に 1mm ピッチの格子を表示させ、 プログラム使用者が格子上の亀裂開口部を判定し、手動で赤線を引く。(図 2.2.2 参照)
  - (2) 同一面の亀裂画像全てに対して(1)を実施する。
  - (3) 開口幅と開口幅中点座標を、数値データとして Excel 形式で出力する。
  - (4) 全ての研削断面(全500面)に対し、(1)から(3)の作業を繰り返す。

#### 3. 50cm 岩体開口幅の計測結果

3.1 「亀裂開口幅測定プログラム」による開口幅計測

デジタル画像データと「亀裂開口幅測定プログラム」を用い,Z軸方向の開口幅および開口幅 中点座標を,Y軸方向(深さ方向),X軸方向(横方向)ともに1mm間隔で計測した。開口幅の座 標の定義を図 3.1.1 に示す。開口幅がゼロの箇所は開口幅中点座標の判定が困難であるため,亀 裂幅データの中点座標(亀裂幅中点座標)を代用した。また各亀裂断面間の傾きを,出力した数値 データ上で補正した。開口幅と亀裂中点座標及び亀裂幅と亀裂幅中点座標の数値データを, Microsoft<sup>®</sup> Excel 形式で保存し,付録として添付する。





本報告では、50cm 岩体のほぼ中央にあるメインの亀裂一本のみを測定の対象とした。開口幅 は主に、亀裂内の充填物(図 3.1.2)を除いたレジン部の厚さで判定した。この充填物は大小様々な 粒状の物質で構成され、無数の細孔が分布している。この様な充填物はある程度の透水性を有す る可能性があるが、レジンはこの小さい空隙に十分に浸透しない事がある。今回の測定では、こ の様にレジンの入らない小さな空隙は、閉塞箇所と判定した。亀裂の分岐等は、亀裂幅の大きさ や連続性などから主要な経路と判断される亀裂を選択した(図 3.1.3)。亀裂に注入したレジンは水 より粘性が高く、充填物等の存在によりレジンが十分に浸透していない個所や、気泡が残ってい る箇所が存在する。このためレジンが充填されていなくても、周囲の亀裂の状況等で透水に関係 する空隙であると判断した箇所は、開口部と判定した(図 3.1.4)。亀裂が閉じている箇所(図 3.1.5) は、出力データの位置座標の欠損を防ぐために最小値(1pixel)の開口幅を記録し、数値データの後 処理時に閉塞部(開口幅 0mm)と修正した。透水・トレーサー試験で岩体端面部を止水するために 用いられたシール剤(図 3.1.6)や 50cm 岩体内の観測のために開けたセンサー孔(図 3.1.7)は、本研 究の測定対象外として閉塞部と記録した。



図 3.1.2 亀裂内の充填物 (赤線は判定した開口幅)



図 3.1.3 亀裂の分岐 (赤線は判定した開口幅)



図 3.1.4 レジンの未充填 (赤線は判定した開口幅)



図 3.1.5 亀裂の閉塞 (赤線は判定した開口幅)

## JAEA-Research 2010-041







図 3.1.7 センサー孔 (赤線は判定した開口幅)

3.2 開口幅データ

図 3.2.1 は、「亀裂開口幅測定プログラム」により取得した数値データを元に、0~5mmの開口 幅を青色の濃淡で示したものである。開口幅の閉塞している箇所(0mm)は白色、5mm 以上の開 ロ幅は黒色で示している。図 3.2.1 中の6 個の白丸は、透水・トレーサー試験で用いた直径約 30mm のセンサー孔であり、亀裂に対してほぼ垂直に岩体を貫通している。



#### 4. 考察

4.1 開口幅, 亀裂幅, 充填物, 充填物の比の比較

「亀裂開口幅測定プログラム」を用い,取得した画像データを元に計測した開口幅分布のうち 0~2mmの分布を図4.1.1に,亀裂幅分布を図4.1.2に示す「5」。閉塞している箇所(0mm)は白色, 2mm以上の開口幅,亀裂幅は,黒色で示している。以下では,図の上方をN,右方をE,左方 をW,下方をSと呼ぶこととする(図4.1.1参照)。開口幅分布が亀裂内の充填物を含まないのに 対し,亀裂幅分布は充填物を含む値である。このため開口幅(図4.1.1)は亀裂幅(図4.1.2)に比べ, 全体的に幅が小さくなる。これより充填物による亀裂内の閉塞部が確認でき,亀裂幅分布に比べ 開口幅分布でチャンネル構造が局所化する傾向が見られた。亀裂幅と開口幅の差(亀裂幅一開口 幅)より求めた充填物の分布を,図4.1.3に示す。充填物の無い箇所は白色,2mm以上の充填物 は黒色で示している。また,亀裂幅に対する充填物の比(以下,充填物の比という)を図4.1.4に示 す。図4.1.4において白色の部分は充填物の無い箇所であり,青色の薄い部分は充填物が少なく, 青色の濃い部分は充填物により閉塞している事が分かる。







## JAEA-Research 2010-041



比較のため、図 4.1.1~4.1.4 を一つにまとめて図 4.1.5、図 4.1.6 に示す。

開口幅分布(図 4.1.5(a)①)や充填物の比(図 4.1.5(d)①)に見られる N, S 側の岩体端面の閉塞部 は、透水・トレーサー試験時に止水を目的として使用したシール剤である。また充填物分布(図 4.1.5(c)②)より、センサー孔付近には充填物が多く存在する箇所が見られる。

亀裂幅分布(図 4.1.5(b)③)より, 亀裂幅が大きい箇所でも充填物(図 4.1.5(c)③)により開口幅(図 4.1.5(a)③)が閉塞する箇所(図 4.1.5(d)③)が存在することが確認できる。この部分は主に図 3.1.2 の様な細粒状の充填物であり,小さな空隙が多数存在している。



図 4.1.5 開口幅分布, 亀裂幅分布, 充填物分布, 充填物の比(1)

図 4.1.6(d)の充填物の比では、色の濃い箇所において亀裂幅に占める充填物の割合が大きい。 この充填物の比と亀裂幅の関係を見るために、亀裂幅 0.1mm ごとに充填物の比の平均を求め、 図 4.1.7 にプロットした。図 4.1.7 には同時に、亀裂幅 0.1mm ごとのデータ数も示す。図 4.1.7 より、亀裂幅の小さい箇所は充填物の比が大きくなりやすい傾向が見られた。亀裂幅の小さい箇 所とその近辺(図 4.1.6(b)④)は、開口幅(図 4.1.6(a)④)でさらに小さく、閉塞や閉塞に近くなる場 所がある。この幅の小さい箇所は充填物の比(図 4.1.6(d)④)で表した時に青色を示し、ほぼ閉塞し ていることが分かる。この様に亀裂幅の狭い箇所は他の箇所に比べ選択的に充填物が集まりやす く、閉塞しやすい可能性があると考える。また図 4.1.7 より、データ数が少ないが、亀裂幅 2.5mm 以上では充填物の比が少し大きくなる。亀裂幅が 2.5mm 以上の箇所には、図 4.1.5②や図 4.1.5 ③の細粒状の充填物などがある。このような閉塞により、図 4.1.6(a)開口幅分布は図 4.1.6(b)亀裂 幅分布に比べ、亀裂の開口部のチャンネル構造が局所化する傾向が現れたものと考える。

開口幅分布(図 4.1.6(a)⑤)より N 側の E-W 方向に,特に開口幅が大きな箇所が存在する。この 箇所には充填物がほとんど存在しない事が,充填物の分布(図 4.1.6(c)⑤)より分かる。またこの他 にも,開口幅の大きな箇所が存在する(図 4.1.6(a)⑥)。この様に局所的に開口幅の大きい箇所は, 選択的に水が流れる箇所(水みち)となる可能性が高いと考える。



図 4.1.6 開口幅分布, 亀裂幅分布, 充填物分布, 充填物の比(2)



図 4.1.7 充填物の比の平均値

#### 4.2 岩体亀裂の統計量

50cm 岩体の開口幅, 亀裂幅及び充填物の平均値, 中央値, 標準偏差, 分散及び亀裂の閉塞率 を表 4.2.1 に示す。また開口幅, 亀裂幅の頻度分布を図 4.2.1, 累積和を図 4.2.2 に示す。これら は岩体成型時の影響が考えられる岩体端面部を除外し,座標(x,y)=(10,10)~(490,490)の範囲を対 象とした。また, センサー孔とその近傍約 5mm の範囲のデータも, 同様の理由で除外した。

	開口幅	亀裂幅	充填物
平均值(mm)	0.75	1.14	0.39
中央値(mm)	0.60	1.00	0.15
標準偏差(mm)	0.71	0.78	0.63
分散	0.50	0.61	0.39
閉塞率(%)	17.41	0.11	

表 4.2.1 50cm 岩体亀裂の統計量



図 4.2.1 開口幅, 亀裂幅の頻度分布





表4.2.1 より、開口幅の平均値、中央値は亀裂幅の平均値、中央値よりも小さな値となった。 開口幅の平均値0.75mmは、トレーサー試験により得られたマスバランス開口幅bm(約0.7mm) に近い値を示した<sup>[4]</sup>。50cm 岩体の亀裂幅を用いた数値解析<sup>[10]</sup>では、亀裂幅をa=0.43 倍(以下、 ケース a と呼ぶ)、または亀裂幅に関係なく一定厚さb=0.57mmの充填物が存在していると仮定 (以下、ケース b と呼ぶ)し、亀裂幅を補正して開口幅を推定している。これらの補正を亀裂幅の 平均値に対して行うと、ケース a は 0.49mm、ケース b は 0.57mm となり、開口幅の平均値 0.75mm よりも小さな値となった。実際の亀裂は充填物が局所的に分布するなど複雑な形状を呈しており、 開口部の連続性が透水や物質移行を考察する上で重要なファクターとなるため、測定値と解析値 の間に差が現れたものと考える。今回測定した開口幅のデータを用い数値解析を行うことで、開 口幅や充填物の分布が透水性に与える影響等を確認できるものと考える。

50cm 岩体の開口幅が閉塞している割合(閉塞率)は17.4%であり, 亀裂幅の閉塞率 0.11%に比べ かなり大きい。これは, 亀裂幅が充填物を含む値であるのに対し, 開口幅は亀裂内の充填物を除 き,透水に関係すると考えられる幅(レジンにより判断)を測定しているためである。このため, 有為な亀裂幅を有する箇所でも,開口幅では閉塞している(開口幅ゼロ)と判定される箇所が多数 発生した。開口幅が閉塞している箇所が増えたことにより,図 4.2.1,図 4.2.2 とも開口幅分布は 亀裂幅分布よりも幅の小さい方 (閉塞側)へシフトしている。また 50cm 岩体開口幅分布の閉塞率 は,花崗岩コア試料(直径 190mm×長さ 410mm)の亀裂計測において接触領域が 5%以下である こと示した Hakami ら<sup>[11]</sup>の結果よりも大きな値であった。

4.3 開口幅, 亀裂幅, 充填物の空間的相関性

開口幅, 亀裂幅, 充填物の空間的相関性は, バリオグラム<sup>10</sup>を用いて評価した。バリオグラム による計算範囲は, 岩体成型時の影響が考えられる岩体端面部を除外し, 座標(x,y)=(10,10)~ (490,490)とした。また, センサー孔とその近傍約 5mm の範囲のデータも, 同様の理由で除外し た。バリオグラムは非線形最小二乗法を用い, 指数モデルによるフィッティングを行った。指数 モデル関数の特徴を表す Sill は, 分散に等しい値とされる。また, この関数の別の特徴である Range は, ある点が影響を及ぼす範囲(影響範囲)を示しており, Range が大きいほど高い相関性 があるといえる。表 4.3.1 に各方向の Sill と Range を, 図 4.3.1 に各方向の Sill と分散を, 図 4.3.2 に各方向の Range を示す。また開口幅のバリオグラムを図 4.3.3, 亀裂幅のバリオグラムを図 4.3.4, 充填物のバリオグラムを図 4.3.5 に示す。

図 4.3.1 より、開口幅の Sill は分散よりやや小さい値で、等方性に近い形を示した。亀裂幅と 充填物の Sill は、NW-SE 方向でわずかに大きく、NE-SW 方向でわずかに小さい形状となった。 充填物の Sill は、亀裂幅の Sill を一回り小さくした様な形状であった。また図 4.3.2 より、開口 幅の Range は W-E 方向でやや大きく、N-S 方向でやや小さい異方性を示した。これに対し亀裂 幅と充填物の Range は、NW-SE 方向で大きい異方性を示した。充填物の Range は、亀裂幅の Range を一回り小さくした様な形状であった。

充填物の Sill, Range とも、亀裂幅の Sill, Range を小さくした様な形状となることより、今回測定した 50cm 岩体では、充填物の分布は亀裂形状の影響を受ける可能性があるものと考える。

そしてこの充填物により、開口幅の Range は亀裂幅の Range に比べ等方性に近い形になったも のと考える。

		開口幅(分	分散=0.498)	亀裂幅(分散=0.607)		充填物(分散=0.393)	
方向		Sill	Range	Sill	Range	Sill	Range
			(mm)		(mm)		(mm)
E-W(X 軸)	<b>+</b>	0.447	38.6	0.597	46.0	0.411	33.4
N-S(Y 軸)		0.418	26.1	0.568	37.5	0.400	30.3
NW-SE		0.447	32.2	0.643	60.8	0.465	51.7
NE-SW		0.417	33.3	0.496	29.6	0.339	19.0

表 4.3.1 各方向の Sill と Range







# JAEA Research 2010-041





(a)E-W(X 軸)方向のバリオグラム

(b)N-S(Y 軸)方向のバリオグラム



(c)NW-SE 方向のバリオグラム
 (d)NE-SW 方向のバリオグラム
 図 4.3.4 亀裂幅のバリオグラム



図 4.3.5 充填物のバリオグラム

4.4 トレーサー試験との比較

岩体内部の不均質性を把握することを目的に実施されたトレーサー試験結果と,開口幅分布を 比較する。トレーサー試験は図 4.4.1 の様に,E 側に5 箇所ある注水ポートのうち1 箇所より一 定濃度の塩水トレーサーを注入し,W 側5 箇所の排水ポートとセンサー孔で濃度変化を測定して いる。吉野ら<sup>[3][4]</sup>はこれより求めたトレーサーの定常状態濃度分布(図 4.4.2)より,注水ポート 1 から排水ポート1にかけて卓越した流路が存在すること,注水ポート2~4 からの流れはほぼ同じ 経路を通ること,注水ポート5 からの流れは岩体中央付近を通過し排出ポート5 に到達すること を推定している。

開口幅分布(図 4.1.1)とトレーサー試験の定常状態濃度分布(図 4.4.2)を合わせたものを,図 4.4.3 に示す。図中の黄色い矢印は、亀裂内のトレーサー流動を推定したものである。

図 4.4.3(a)より注水ポート1からのトレーサーは、注水ポート1と排水ポート1の間の連続した開口幅の大きなエリアを通り、そのほとんどが排水ポート1へ到達すると推定できる。この連続した開口幅の大きなエリアは、卓越した流路であると考える。また、注水ポート1と排水ポート1の間にはセンサー孔④へ向かう大きな開口幅があるが、トレーサーはセンサー孔④や排水ポート2~5 へはほとんど流れない。このことよりトレーサーは、特に開口幅の大きな箇所を選択的に流れるものと考える。

図 4.4.3 (b)(c)(d)に示す注水ポート 2~4 からのトレーサーは, 濃度センサー孔①④⑤を通過し排

水ポート1~4 へほぼ均等に到達する。このうち,図4.4.3(b)の注水ポート2からのトレーサーは, 濃度センサー孔①の通過量が他に比べ極端に少ない。これは,注水ポート2のトレーサーのほと んどが,センサー孔①上部にある開口幅の大きな箇所を通るためと考える。このことからも,ト レーサーは局所的に開口幅の大きい箇所を選択的に通る可能性があるものと考える。

図 4.4.3 (c), (d)に示す注水ポート 3, 4 からのトレーサーは, 濃度センサー孔, 排水ポートと も同じような値を示す。このことから注水ポート 3, 4 からのトレーサーは, 亀裂内でほぼ同じ 経路を通るものと考える。またその経路は, 濃度センサー孔①②⑤の間にある開口幅の小さいエ リアをセンサー孔①(側(N 側)に迂回し, 排水ポート方向(W 側)に流れるものと考える。

図 4.1.5③の排水ポート3付近は、大きな亀裂幅が充填物により閉塞し、開口幅が狭くなる。 これより排水ポート3付近はトレーサーが流れにくいと推測出来るが、注水ポート2~4からのト レーサーは、排水ポート3にも他の排水ポートと同程度の量が到達している。排水ポート3付近 の充填物は細粒状であり、小さな空隙が多数存在する。この空隙により、排水ポート3付近の充 填部はある程度の透水性を有する可能性があると考える。亀裂を判定するために注入した着色レ ジンは水に比べ粘性が高く、上記の様な小さい空隙にうまく浸透しなかったものと考える。今回 の測定では亀裂の判定を着色レジンで行っているため、レジンが入らない小さな空隙が多数存在 する充填物も閉塞箇所と判定している。

図4.4.3 (e)に示す注水ポート5からのトレーサーは、そのほとんどが濃度センサー②③⑥を通 過し、わずかなトレーサーが濃度センサー①④⑤を通過する。このうち濃度センサー①④⑤へは、 注水ポート4とセンサー孔②の間に存在する開口幅の小さい(もしくは閉塞した)エリアを通過し、 濃度センサー①にも達するものと考える。濃度センサー①に達したトレーサーは、注水ポート3、 4からの流れと同じ流路を通ると考える。これに対し注水ポート3、4からのトレーサーは、注水 ポート4とセンサー孔②の間の開口幅の小さいエリアを通過しない。これは、N側への流路が局 所的に大きいため、全てのトレーサーがN側へ移動したためと考える。注水ポート3、4からの トレーサーは排水ポート2、3、4にほぼ同じ濃度で到達する。注水ポート5からトレーサーは、 排水ポート2に比べ排水ポート3、4の濃度が大きい。この濃度の差は、濃度センサー②③⑥を 通って到達したトレーサーであると考える。また、S側には開口幅の小さいエリアが存在するた め、注水ポート5からのトレーサーはこれを迂回して流れるものと考える。



図 4.4.1 トレーサー試験概略図(①~⑥は濃度センサー孔)





図 4.4.3 亀裂内のトレーサー流動の推定の例 (吉野らより引用<sup>[3][4]</sup>,丸の直径はトレーサーの濃度,矢印は主要な流路の流れイメージ図)

#### 5. まとめ

50cm 岩体亀裂のデジタル画像データより,開口幅分布の数値データを取得した。開口幅分布 の観察により,充填物による閉塞部や開口幅の大きな箇所の分布を確認できた。開口幅の平均値 は0.75mm でありマスバランス開口幅 bm<sup>[4]</sup>に近い値を示した。また 50cm 岩体の閉塞率は 17.4% であり,50cm 岩体よりも小さな花崗岩コア試料の亀裂計測において接触領域が 5%以下であるこ と示した Hakami ら<sup>[11]</sup>の結果よりも大きな値となった。

開口幅, 亀裂幅, 充填物分布の比較では, 亀裂幅の小さい個所やその近辺は充填物が集まりや すく, 閉塞しやすい傾向が見られた。またこれにより, 亀裂の開口部によるチャンネル構造は, 亀裂幅に比べ局所化することが分かった。

開口幅の空間的相関性をバリオグラムにより求め、開口幅の Range(影響範囲)が亀裂幅の Range とは異なる方向の異方性であることが分かった。充填物の存在により、開口幅の特性は亀 裂幅の特性とは違ってくると考えた。また、充填物の Sill, Range は亀裂幅の Sill, Range を縮 小した様な形状であることより、充填物の分布は亀裂幅形状の影響を受ける可能性がある。

50cm 岩体開口幅とトレーサー試験とを比較し, 亀裂内のトレーサー流動を推定した。これより, 局所的に開口幅の大きな箇所が, 選択的に水の流れる箇所(水みち)となる可能性が高いと考えた。また, 細粒状の充填物で小さな空隙が多数見られる様な閉塞箇所は, ある程度の透水性がある可能性が考えられた。

今後は,開ロ幅データを用いた数値解析を行うことで,開ロ幅や充填物の分布が透水性に与え る影響等を確認できるものと考える。

#### 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

- [2]吉野尚人,内田雅大: "亀裂媒体水理試験設備(LABROCK)用試験岩体の切り出し・整形", サイクル機構技術資料,JNC TN8410 2001-015, (2001)
- [3]吉野尚人,佐藤久: "亀裂状媒体水理試験設備(LABROCK)による透水・トレーサー試験-2001 年度までの成果-",サイクル機構技術資料,JNC TN8400 2002-001, (2002)
- [4]吉野尚人,佐藤久,内田雅大: "亀裂状媒体水理試験設備(LABROCK)による天然亀裂内の透水・物質移行特性評価",サイクル機構技報,No18,pp.51-58, (2003)
- [5]鐵桂一,澤田淳: "研削により測定した 50cm スケール岩体中の天然亀裂の形状に関する研究",日本原子力研究開発機構技術資料,JAEA-Research 2008-079, (2008)
- [6]澤田淳,鐵桂一: "50cm スケールの花崗岩試料の研削による亀裂形状計測について",第38 回岩盤力学に関するシンポジウム講演集,pp.266-271, (2009)
- [7]Xianbin, Y., Vayssade, B. : "Technical Note Joint Profiles and their Roughness Parameters", Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. Vol.28, No.4, pp.333-336, (1991)
- [8]Barton, N., Choubey V. : "The Shear Strength of Rock Joints in Theory and Practice" ,Rock Mechanics, Vol.10, pp.1-54, (1977)
- [9]Deutsch, C. V., Journel, A. G. : "GSLIB : Geostatistical Software Library and User's Guide Second Edition", Oxford University Press, (1998)
- [10]澤田淳,佐藤久,鐵桂一,坂本和彦: "岩石試料の研削による亀裂形状計測データを用いた透水トレーサー試験の評価",第39回岩盤力学に関するシンポジウム講演集,pp.54-59,(2010)
- [11]Hakami, E., Larsson, E.: "Aperture Measurements and Flow Experiments on a Single Natural Fracture", International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, Vor33,No.4,pp.395-404, (1996)

一地層処分研究開発第2次取りまとめ一分冊3 地層処分システムの安全評価,JNC
 TN1400 99-023, (1999)

# 付録

付録として, 50cm 岩体の開口幅データ,開口幅中点座標データ及び, 亀裂幅データ,亀裂幅中点 座標データを収録した。データの詳細及び各ファイル名を以下に示す。

測定単位:mm

測定間隔:1mm

測定範囲:x軸方向 1~507mm, y軸方向 0~499mm

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

フォルダ名:開口幅\_開口幅中点座標データ

L50cm 岩体 0·499 開口幅\_開口幅中点座標データ.xlsx 開口幅.csv 開口幅.txt 開口幅中点座標.csv 開口幅中点座標.txt

フォルダ名: 亀裂幅\_亀裂幅中点座標データ

L50cm 岩体 0-499 亀裂幅\_亀裂幅中点座標データ.xlsx 亀裂幅.csv 亀裂幅.txt 亀裂幅中点座標.csv 亀裂幅中点座標.txt

表 1. SI 基本单位					
甘大昌	SI 基本ì	単位			
巫平里	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	А			
熱力学温度	ケルビン	Κ			
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				
<sub>知力</sub> 員 SI 基本単	位			
粗立重 名称	記号			
面 積平方メートル	m <sup>2</sup>			
体 積 立法メートル	m <sup>3</sup>			
速 さ , 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 <sup>-1</sup>			
密度,質量密度キログラム毎立方メー	トル kg/m <sup>3</sup>			
面 積 密 度キログラム毎平方メー	トル kg/m <sup>2</sup>			
比体積 立方メートル毎キログラ	ラム m <sup>3</sup> /kg			
電 流 密 度 アンペア毎平方メート	$h/\nu$ $A/m^2$			
磁 界 の 強 さアンペア毎メートル	A/m			
量濃度 <sup>(a)</sup> ,濃度モル毎立方メートル	mol/m <sup>3</sup>			
質量濃度 キログラム毎立法メー	トル kg/m <sup>3</sup>			
輝 度 カンデラ毎平方メート	$\nu cd/m^2$			
屈 折 率 <sup>(b)</sup> (数字の) 1	1			
比 透 磁 率 (b) (数字の) 1	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

		SI 組立単位			
組立量	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 鱼	ラジアン <sup>(b)</sup>	rad	1 <sup>(b)</sup>	m/m	
· 協 角	ステラジア、/(b)	er <sup>(c)</sup>	1 (b)	$m^{2/m^2}$	
周 波 数	ヘルツ <sup>(d)</sup>	Hz	1	s <sup>-1</sup>	
力	ニュートン	Ν		m kg s <sup>-2</sup>	
压力, 応力	パスカル	Pa	N/m <sup>2</sup>	$m^{-1} kg s^{-2}$	
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 <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup>	
電荷,電気量	クーロン	С		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	$m^2 kg s^{\cdot 3} A^{\cdot 2}$	
コンダクタンス	ジーメンス	s	A/V	$m^{2} kg^{1} s^{3} A^{2}$	
磁東	ウエーバ	Wb	Vs	$m^2 kg s^{\cdot 2} A^{\cdot 1}$	
磁束密度	テスラ	Т	Wb/m <sup>2</sup>	$\text{kg s}^{2}\text{A}^{1}$	
インダクタンス	ヘンリー	Н	Wb/A	$m^2 kg s^2 A^2$	
セルシウス温度	セルシウス度 <sup>(e)</sup>	°C		K	
光東	ルーメン	lm	cd sr <sup>(c)</sup>	cd	
照度	ルクス	lx	lm/m <sup>2</sup>	m <sup>-2</sup> cd	
放射性核種の放射能 <sup>(f)</sup>	ベクレル <sup>(d)</sup>	Bq		s <sup>-1</sup>	
吸収線量,比エネルギー分与,	グレイ	Gv	J/kg	$m^2 s^{-2}$	
カーマ					
線量当量,周辺線量当量,方向	シーベルト <sup>(g)</sup>	Sv	J/kg	$m^2 s^{2}$	
性線量当量, 個人線量当量		2.			
酸素活性	カタール	kat		s <sup>1</sup> 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

(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、ベクレルは放射性抜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。
 (e)セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度で表すために使用される。
 (f)数単位を種の大きさは同一である。したがって、温度差や温度問隔を表す数値はとちらの単位で表しても同じである。
 (f)数単性核種の放射能(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

	S	SI 組立単位		
組立量	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 <sup>-1</sup> kg s <sup>-1</sup>	
カのモーメント	ニュートンメートル	N m	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup>	
表 面 張 九	コニュートン毎メートル	N/m	kg s <sup>-2</sup>	
角 速 度	ラジアン毎秒	rad/s	$m m^{-1} s^{-1} = s^{-1}$	
角 加 速 度	ラジアン毎秒毎秒	$rad/s^2$	$m m^{-1} s^{-2} = s^{-2}$	
熱流密度,放射照度	ワット毎平方メートル	W/m <sup>2</sup>	kg s <sup>-3</sup>	
熱容量、エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	$m^2 kg s^2 K^1$	
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	$m^2 s^{-2} K^{-1}$	
比エネルギー	ジュール毎キログラム	J/kg	$m^2 s^{-2}$	
熱 伝 導 率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s <sup>-3</sup> K <sup>-1</sup>	
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m <sup>3</sup>	m <sup>-1</sup> kg s <sup>-2</sup>	
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m kg s <sup>-3</sup> A <sup>-1</sup>	
電 荷 密 度	クーロン毎立方メートル	C/m <sup>3</sup>	m <sup>-3</sup> sA	
表 面 電 荷	f クーロン毎平方メートル	C/m <sup>2</sup>	m <sup>-2</sup> sA	
電 束 密 度 , 電 気 変 位	クーロン毎平方メートル	C/m <sup>2</sup>	m <sup>-2</sup> sA	
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 kg s <sup>-2</sup> A <sup>-2</sup>	
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	$m^2 kg s^2 mol^1$	
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)	$m^{2} kg s^{2} K^{1} mol^{1}$	
照射線量(X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	kg <sup>-1</sup> sA	
吸収線量率	グレイ毎秒	Gy/s	$m^2 s^{-3}$	
放 射 強 度	ワット毎ステラジアン	W/sr	$m^4 m^{-2} kg s^{-3} = m^2 kg s^{-3}$	
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 <sup>2</sup> m <sup>-2</sup> kg s <sup>-3</sup> =kg s <sup>-3</sup>	
酵素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m <sup>3</sup>	m <sup>-3</sup> s <sup>-1</sup> mol	

表 5. SI 接頭語						
乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号	
$10^{24}$	э 9	Y	$10^{-1}$	デシ	d	
$10^{21}$	ゼタ	Z	$10^{-2}$	センチ	с	
$10^{18}$	エクサ	Е	$10^{-3}$	ミリ	m	
$10^{15}$	ペタ	Р	$10^{-6}$	マイクロ	μ	
$10^{12}$	テラ	Т	$10^{-9}$	ナーノ	n	
$10^{9}$	ギガ	G	$10^{-12}$	ピョ	р	
$10^{6}$	メガ	М	$10^{-15}$	フェムト	f	
$10^{3}$	キロ	k	$10^{-18}$	アト	а	
$10^{2}$	ヘクト	h	$10^{-21}$	ゼプト	z	
$10^1$	デ カ	da	$10^{-24}$	ヨクト	У	

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=60s			
時	h	1h =60 min=3600 s			
日	d	1 d=24 h=86 400 s			
度	۰	1°=(п/180) rad			
分	,	1'=(1/60)°=(п/10800) rad			
秒	"	1"=(1/60)'=(п/648000) rad			
ヘクタール	ha	1ha=1hm <sup>2</sup> =10 <sup>4</sup> m <sup>2</sup>			
リットル	L, 1	1L=11=1dm <sup>3</sup> =10 <sup>3</sup> cm <sup>3</sup> =10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup>			
トン	t	$1t=10^{3}$ kg			

\_

表7.	SIに属さないが、	SIと併用される単位で、	SI 単位で
	キャトアルは	ジャートレートレート	

衣される剱値が美験的に待られるもの					
名称		記号	SI 単位で表される数値		
電 子 ボ	ルト	eV	1eV=1.602 176 53(14)×10 <sup>-19</sup> J		
ダル	、 ン	Da	1Da=1.660 538 86(28)×10 <sup>-27</sup> kg		
統一原子質量単位 u		u	1u=1 Da		
天文単	1 位	ua	1ua=1.495 978 706 91(6)×10 <sup>11</sup> 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	1	ル	bar	1 bar=0.1MPa=100kPa=10 <sup>5</sup> Pa
水銀	柱ミリメー	トル	mmHg	1mmHg=133.322Pa
オン	グストロー	- 4	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 <sup>-10</sup> m
海		里	М	1 M=1852m
バ	-	$\sim$	b	1 b=100fm <sup>2</sup> =(10 <sup>-12</sup> cm)2=10 <sup>-28</sup> m <sup>2</sup>
1	ッ	ŀ	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネ	-	パ	Np	
ベ		N	В	↓ 51単位との数値的な関係は、 対数量の定義に依存。
デ	ジベ	N	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			
エルグ	erg	1 erg=10 <sup>-7</sup> J			
ダイン	dyn	1 dyn=10 <sup>-5</sup> N			
ポアズ	Р	1 P=1 dyn s cm <sup>-2</sup> =0.1Pa s			
ストークス	$\operatorname{St}$	$1 \text{ St} = 1 \text{ cm}^2 \text{ s}^{\cdot 1} = 10^{\cdot 4} \text{m}^2 \text{ s}^{\cdot 1}$			
スチルブ	$^{\mathrm{sb}}$	1 sb =1cd cm <sup>-2</sup> =10 <sup>4</sup> cd m <sup>-2</sup>			
フォト	ph	1 ph=1cd sr cm <sup>-2</sup> 10 <sup>4</sup> lx			
ガル	Gal	$1 \text{ Gal} = 1 \text{ cm s}^{\cdot 2} = 10^{\cdot 2} \text{ms}^{\cdot 2}$			
マクスウェル	Mx	$1 \text{ Mx} = 1 \text{ G cm}^2 = 10^{-8} \text{Wb}$			
ガウス	G	$1 \text{ G} = 1 \text{Mx cm}^{2} = 10^{4} \text{T}$			
エルステッド <sup>(c)</sup>	Oe	1 Oe ≙ (10 <sup>3</sup> /4π)A m <sup>-1</sup>			

(c) 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	ユ		IJ	ĺ	Ci	1 Ci=3.7×10 <sup>10</sup> Bq
$\scriptstyle  u$	ン	ŀ	ゲ	$\sim$	R	$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{C/kg}$
ラ				ド	rad	1 rad=1cGy=10 <sup>-2</sup> Gy
$\scriptstyle  u$				ム	rem	1 rem=1 cSv=10 <sup>-2</sup> Sv
ガ		$\boldsymbol{\mathcal{V}}$		7	γ	1 γ =1 nT=10-9T
フ	I		N	11		1フェルミ=1 fm=10-15m
メー	ートル	系	カラゞ	ット		1メートル系カラット = 200 mg = 2×10-4kg
ŀ				ル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標	準	大	気	圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
力			IJ	ļ	cal	lcal=4.1858J(「15℃」カロリー), 4.1868J (「IT」カロリー)4.184J(「熱化学」カロリー)
Ξ	ク		П	$\sim$	μ	$1 \text{ u} = 1 \text{ um} = 10^{-6} \text{ m}$

この印刷物は再生紙を使用しています