

# X線CTによる亀裂性岩盤内の移流・分散現象の分析

(先行基礎工学研究に関する平成16年度共同研究報告書)

2005年3月

熊 本 大 学  
核燃料サイクル開発機構

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松4番地49  
核燃料サイクル開発機構  
技術展開部 技術協力課  
電話：029-282-1122（代表）  
ファックス：029-393-7980  
電子メール：jserv@jnc.go.jp

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to :

Technical Cooperation Section,  
Technology Management Division,  
Japan Nuclear Cycle Development Institute  
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1184, Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)  
熊本大学 (Kumamoto University)  
2005

X 線 CT による亀裂性岩盤内の移流・分散現象の分析  
(先行基礎工学研究に関する平成 16 年度共同研究報告書)

佐藤晃\*1 内田雅大\*2 澤田淳\*2 武部篤治\*2 佐藤久\*3

要 旨

サイクル機構と熊本大学は、「X 線 CT による亀裂性岩盤内の移流・分散現象の分析」に関する共同研究を行っている。本報告書は、その H16 年度の成果をとりまとめたものである。

H16 年度は、サイクル機構において、100×100×100[mm]規模の花崗岩岩体を用いた亀裂表面の 3 次元測定から、亀裂の開口幅を評価した。また熊本大学においては、X 線 CT 装置を用いて、スタッキング法・移動平均法などを基礎としたノイズ処理技術手法と、密度分布に不均質性を持つ材料に対しても有効であると考えられる画像間差分法を適用し、高精度の亀裂開口幅評価を目的とした手法技術を確立した。そしてサイクル機構で実施した 10cm 岩体の亀裂開口幅評価結果を用いて、X 線 CT 計測結果の精度確認を行った。

---

本報告書は、先行基礎工学分野に関する研究として熊本大学と核燃料サイクル開発機構との共同研究により実施した研究の成果である。

機構担当課室：東海事業所 環境保全・研究開発センター 処分研究部 システム解析グループ

\*1 熊本大学工学部

\*2 東海事業所環境保全・研究開発センター処分研究部システム解析グループ

\*3 検査開発株式会社

Analysis of Flow and Dispersion Phenomenon in Fracture Aperture by X-Ray CT  
(Document on Collaborative Study  
: the JNC Cooperative Research Scheme on the Nuclear Fuel Cycle)

Akira SATO\*<sup>1</sup> Masahiro UCHIDA \*<sup>2</sup> Atsushi SAWADA\*<sup>2</sup>  
Atsuji TAKEBE \*<sup>2</sup> Hisashi SATO \*<sup>3</sup>

Abstract

JNC (Japan Nuclear Cycle Development Institute) and Kumamoto University have carried out research and development titled “Analysis of Flow and Dispersion Phenomenon in Fracture Aperture by X-Ray CT”. This report summarized a result in the H16 year in the cooperation research.

In H16, we carried out measurement of fracture surface on  $100 \times 100 \times 100$ [mm] granite and evaluate fracture aperture. And we suggest how to evaluate fracture aperture for highly quality by X-ray CT. This technique is composed of the noise reduction method, based on the way of stacking and averaging data, and the image subtraction method, which is effective to heterogeneous materials. Then, we compared the results of fracture aperture, measured  $100 \times 100 \times 100$ [mm] granite fracture rock, with the results of X-ray CT value.

---

This progress report was the result of cooperated research between Kumamoto University and JNC in the field of precedence-foundation engineering.

JNC Liaison : Waste Isolation Research Division, Tokai Works

\*1 Kumamoto University

\*2 Waste Isolation Research Division, Tokai Works, JNC

\*3 Inspection Development Corporation

## 目 次

1. はじめに	1
2. X線 CT の原理	2
3. ノイズ軽減処理法の基礎式	3
3.1 スタッキング法	3
3.2 移動平均法	4
4. 画像間差分法	7
4.1 基礎式	7
4.2 適用上の問題点に関する検討	9
5. 3次元測定器による岩石試料の亀裂表面および亀裂開口幅評価	11
5.1 岩石試料	11
5.2 3次元測定装置	11
5.3 亀裂表面計測結果および亀裂開口幅	11
6. X線 CT 装置および岩石試料	16
6.1 X線 CT スキャナー	16
6.2 岩石試料および撮影条件	16
7. X線 CT 法の適用	18
7.1 X線 CT 画像	18
7.2 スタッキングによるノイズ軽減効果	18
7.3 画像間差分による亀裂情報の抽出	18
7.4 亀裂開口幅の評価	19
7.5 破断面を形成する主亀裂の開口幅の評価	19
7.6 考察	20
8. おわりに	37
参考文献	38

## 目 次

図 3.1	直方体領域と座標の概念図	6
図 4.1	物質内の亀裂と座標軸の概念図	10
図 5.1	岩体試料(100mm×100mm×100mm)	12
図 5.2	3次元測定器の写真	12
図 5.3	3次元測定器による計測方法の概念図	13
図 5.4	岩体試料の亀裂表面形状分布	14
図 5.5	亀裂開口幅の算出方法	15
図 5.6	岩体試料の亀裂開口幅分布	15
図 6.1	X線 CT の撮影断面および座標	17
図 7.1	X線 CT 画像 (Slice1, x=18mm)	22
図 7.2	X線 CT 画像 (Slice2, x=33mm)	22
図 7.3	X線 CT 画像 (Slice3, x=50mm)	23
図 7.4	X線 CT 画像 (Slice4, x=67mm)	23
図 7.5	X線 CT 画像 (Slice5, x=82mm)	24
図 7.6	岩石マトリクス部における CT 値変化の評価領域 (赤線内, 76472 Pixels)	25
図 7.7	岩石マトリクス部分における CT 値分布 (Slice1)	25
図 7.8	岩石マトリクス部分における CT 値分布 (Slice2)	26
図 7.9	岩石マトリクス部分における CT 値分布 (Slice3)	26
図 7.10	岩石マトリクス部分における CT 値分布 (Slice4)	27
図 7.11	岩石マトリクス部分における CT 値分布 (Slice5)	27
図 7.12	スタッキングおよび画像間差分後に移動平均処理を行った CT 値分布 (Slice1, y=49.5mm 位置)	28
図 7.13	スタッキングおよび画像間差分後に移動平均処理を行った CT 値分布 (Slice2, y=49.5mm 位置)	28
図 7.14	スタッキングおよび画像間差分後に移動平均処理を行った CT 値分布 (Slice3, y=49.5mm 位置)	29
図 7.15	スタッキングおよび画像間差分後に移動平均処理を行った CT 値分布 (Slice4, y=49.5mm 位置)	29

図 7.16	スタッキングおよび画像間差分後に移動平均処理を行った CT 値分布 (Slice5, y=49.5mm 位置) .....	30
図 7.17	亀裂開口幅評価結果 (Slice1) .....	31
図 7.18	亀裂開口幅評価結果 (Slice2) .....	31
図 7.19	亀裂開口幅評価結果 (Slice3) .....	32
図 7.20	亀裂開口幅評価結果 (Slice4) .....	32
図 7.21	亀裂開口幅評価結果 (Slice5) .....	33
図 7.22	X 線 CT で観察された主亀裂と副亀裂 .....	33
図 7.23	主亀裂の開口幅評価結果 (Slice1) .....	34
図 7.24	主亀裂の開口幅評価結果 (Slice2) .....	34
図 7.25	主亀裂の開口幅評価結果 (Slice4) .....	35
図 7.26	主亀裂の開口幅評価結果 (Slice5) .....	35
図 7.27	各断面 (Slice1~5) の平均亀裂開口幅 .....	36



## 1. はじめに

X線CT (Computed Tomography) は医療用検査技術として発展した技術であり、現在では非破壊検査技術として産業界でも広く用いられている。基本的にX線CTは物体内部におけるX線吸収係数の分布、すなわち密度分布を評価する方法である。したがって岩石力学への適用については、岩石内部の空隙構造や亀裂構造といった幾何学的特徴の評価<sup>1)~4)</sup>、透水現象のような過渡現象の可視化と分析<sup>5)~11)</sup>などに有効な非破壊検査技術であると考えられる。最近の研究としては、中野ら<sup>3)</sup>による岩石の内部構造観察に関する研究や、菅原らによる亀裂投影法を用いた開口亀裂の開口量評価<sup>4)</sup>、透水現象の可視化と分析などの研究<sup>8)~11)</sup>が挙げられる。また、岩石のみならず土質やコンクリートといった地盤材料に対する適用についても盛んに研究が行われている<sup>12)</sup>。さらには、従来のX線CTスキャナーよりも分解能の優れたマイクロフォーカスX線CTスキャナーの岩石への適用も試みられている<sup>13)</sup>。

菅原ら<sup>4)</sup>はX線CT画像を用いた亀裂開口幅評価の基本的な考え方を示した。すなわち、X線CT画像に必然的に含まれるノイズの軽減処理法の提案を行いその有効性について検証し、さらに、亀裂情報の抽出に有効な画像間差分の概念を取り入れ、亀裂開口幅評価に必要な亀裂情報の抽出方法と具体的な評価方法について検討している。さらに、亀裂表面が平面に加工された平板亀裂については前述の方法を適用し、その有効性について検討している。具体的には、 $\phi 50$ の円盤状さらに一辺が100mmの立方体の花崗岩試料中に存在する平板亀裂を作成した結果、0.06mm程度の亀裂開口幅の評価が可能であることを示した。

しかし、佐藤ら<sup>14)</sup>の結果は平板亀裂に対する評価結果であり、実際の亀裂面の形状は凹凸も大きく、しかも通常はより複雑な幾何学形状を示す。そこで本報では、より天然に存在する亀裂の性状に近いものとして人工的に作成した割裂亀裂を対象とし、X線CT法を用いて割裂亀裂の開口幅の評価を行うものとする。ここで、割裂亀裂の場合には主たる破断面を形成する亀裂の他に、表面の観察からは確認することが困難な亀裂、つまり岩石マトリクス内部に進展した亀裂などの微小な亀裂の存在が予想される。本報では、佐藤ら<sup>14)</sup>に示した方法を基本として、撮影断面内に主たる亀裂以外にも複数の亀裂が存在する場合を考慮した開口幅評価法について検討する。さらに、花崗岩供試体中に存在する割裂亀裂の亀裂開口幅評価を行った結果について述べる。

## 2. X線 CT の原理

等方・均質な媒質からなる長さ  $P$  の物体に強度  $i_0$  の X 線ビームが入射したとき、透過 X 線の強度  $i$  は次式で与えられる。

$$i = i_0 \exp(-f_m P) \quad (1)$$

また、式(1)より投影  $p$  は次式で与えられる。

$$p = -\ln\left(\frac{i_0}{i}\right) = f_m P \quad (2)$$

ここで、 $f_m$  は線吸収係数と呼ばれる係数で、この係数は X 線の波長、媒質の密度と状態に依存する物質固有の値である。X 線 CT では、様々な方向から式(2)の投影を計測し、撮影断層内の線吸収係数の分布をフィルタ補正逆投影法により再構成する。また、再構成された線吸収係数  $f_m$  は断層厚さあたりの平均値に相当し、その表示には  $f_m$  の値を適当にスケールした CT 値が用いられる。本論文では、空気を 0、水を 1000 と表示したものを CT 値と呼ぶことにする。

### 3. ノイズ軽減処理法の基礎式

#### 3.1 スタッキング法

X線CT値のノイズを軽減する方法の一つに、スタッキング法がある。これは、同じ性質を持つデータを重ね合わせることにより、データの持つノイズを軽減する方法である。以下にその詳細を述べる。

まず、図 3.1 に示す直方体領域を考え、その中心を原点  $O$  とし各面に直交する方向に座標  $(x,y,z)$  を定める。直方体領域の  $x$  軸方向長さを  $X$ 、 $y$  軸方向長さを  $Y$ 、 $z$  軸方向長さを  $Z$  とする。いま、 $x$ - $y$  平面に平行な断面を X 線 CT 撮影した場合を考え、画像の 1 画素の辺長を  $d$ 、断層厚さを  $h$  と表記する。このとき、この直方体領域に含まれる  $x$  軸方向の画素数を  $\bar{X}$ 、 $y$  軸方向の画素数を  $\bar{Y}$ 、 $z$  軸方向の画素数を  $\bar{Z}$  と表記すると、これらは次式で与えられる。

$$\bar{X} = \frac{X}{d}, \bar{Y} = \frac{Y}{d}, \bar{Z} = \frac{Z}{h} \quad (3)$$

つぎに、画素の番地として、 $x$  軸方向の画素番号  $i=1,2,\dots,\bar{X}$ 、 $y$  軸方向の画素番号  $j=1,2,\dots,\bar{Y}$ 、 $z$  軸方向の画素番号  $k=1,2,\dots,\bar{Z}$  を採用し、番地  $(i,j,k)$  での CT 値を  $f(i,j,k)$  と表記する。

さて、 $k$  番目の撮影断面において、同一条件で  $n$  回撮影が実施された場合を考える。このとき、 $l$  回目の撮影において番地  $(i,j,k)$  での CT 値  $f_l(i,j,k)$  は真の値  $f^0(i,j,k)$  とノイズ成分  $\Delta f_l(i,j,k)$  に分解できると仮定すると、

$$f_l(i,j,k) = f^0(i,j,k) + \Delta f_l(i,j,k) \quad (4)$$

となる。ここで、 $n$  枚の画像を重ね合わせて  $x$ - $y$  平面の番地  $(i,j,k)$  での平均 CT 値  $f^*(i,j,k)$  を求めると、式(4)は次式のようになる。

$$f^*(i,j,k) = f^0(i,j,k) + \frac{\sum_l^n \Delta f_l(i,j,k)}{n} \quad (5)$$

ここで、 $\sum_l^n$  は  $l$  について  $n$  までの総和を表す。ノイズ成分はランダムノイズであると仮定し、 $n$  を限りなく大きくすると、

$$\sum_l^n \Delta f_l(i,j,k) \approx 0 \quad (n \rightarrow \infty) \quad (6)$$

となる。したがって、同じ場所できるだけ多くの撮影を行ってそれらをスタッキングすると、CT 値の平均値は真の値に近づくことになる。

### 3.2 移動平均法

先に図 3.1 に示した直方体領域を考える。この直方体領域の平均 CT 値  $f_v$  は次式で与えられる。

$$f_v = \frac{1}{XYZ} \sum_i \sum_j \sum_k f(i, j, k) \quad (7)$$

ここで、 $\sum_i$  は添字  $i$  についての総和を表す。上式を用いてある領域の平均 CT 値を求め、この値を領域中心での代表 CT 値とする方法を単純平均化<sup>15)</sup>という。この方法では、領域の大きさ  $(X, Y, Z)$  を種々変えることにより任意の領域での平均化が可能である。とくに、対象となる領域で密度が均質である場合には、式(7)による単純平均化はノイズ成分どうしを足し合わせるにより取り除くことができるため、ノイズ軽減法として有効である。

この単純平均化を、画像データ内で原点  $O$  の位置を順次移動させて実施し、それぞれの位置での領域の平均値を求める方法として移動平均法がある<sup>15)</sup>。移動平均法を実施する場合には、単純平均化に用いられた領域の大きさも重要なパラメータである。

さて、式(7)で示した移動平均法は 3 次元データの処理を基本としているが、画像データの処理を容易にするために本研究では 2 次元の画像データを取り扱うものとする。2 次元画像データとしては次の 3 通りが考えられる。

- ① X 線 CT 原画像の利用
- ② 3 次元画像データのスタッキング画像
- ③ 同一断面で撮影を実施した複数の画像のスタッキング画像

ここでは、前節で説明したスタッキング画像 (③) の適用を前提とする。なお、3 次元画像データのスタッキング法に関しては菅原ら<sup>4)</sup>および佐藤ら<sup>14)</sup>を参照されたい。先に式(5)で示したスタッキング後の CT 値に関して、対象とする  $z=k$  の断面での 2 次元の CT 値を次のように書き換える。

$$f_s(i, j) = f^*(i, j, k) \quad (8)$$

つぎに、式(7)で示したように、 $f_s(i, j)$  を用いて  $x$ - $y$  平面上で 2 次元の単純平均

化を実施すると,

$$f_v = \frac{1}{\overline{XY}} \sum_i^{\overline{X}} \sum_j^{\overline{Y}} f_s(i, j) \quad (9)$$

となる。

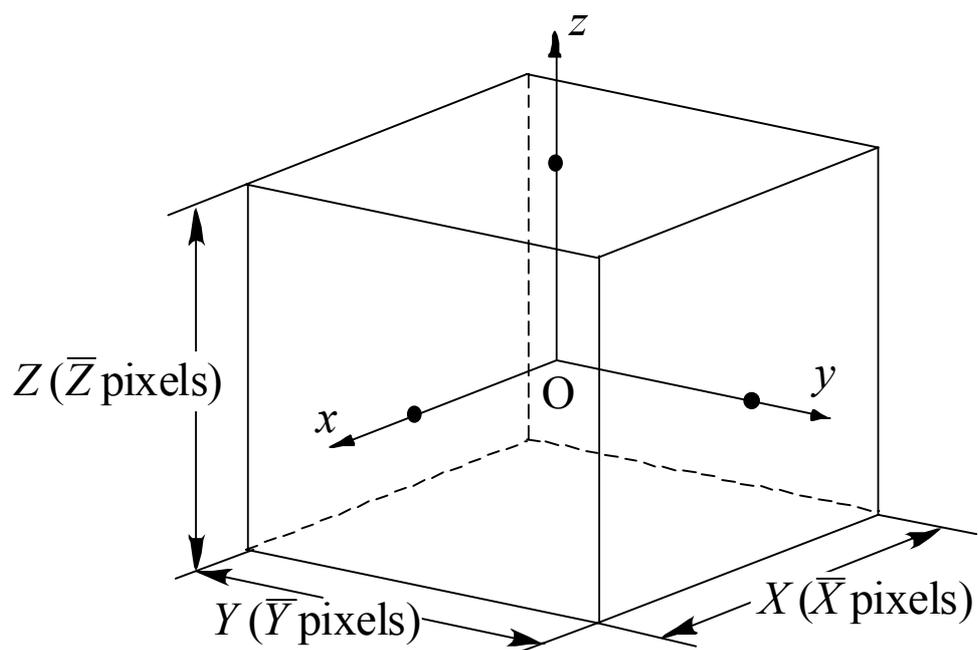


図 3.1 直方体領域と座標の概念図

## 4. 画像間差分法

### 4.1 基礎式

佐藤ら<sup>14)</sup>の示した亀裂開口幅評価法を基本とし、撮影断面内に複数の亀裂が存在する場合の開口量評価法について述べる。X線CT画像の撮影は、まず、密度の小さい物質で亀裂内部を満たした状態で実施する。その後、亀裂内部を密度の高い物質で満たし、亀裂以外の部分は同じ条件で撮影を実施する。密度の異なる物質としては、例えば空気と水、あるいは水とヨウ化カリウム (KI) 水溶液などが考えられる。

まず、図 4.1 のように、線吸収係数が  $f_m(x)$  の物質内に存在する亀裂と交差する方向を  $x$  軸とする直角座標  $(x, y, z)$  を定める。ここで  $x$  軸と交差する  $l$  番目の亀裂の開口幅を  $w_l$  と表記し、また、亀裂内部は線吸収係数が  $f_c^{(\alpha)}$  の物質  $\alpha$  で満たされていると仮定する。いま、亀裂としては  $l$  番目の亀裂のみを含む領域  $V_l$  を考える (図 4.1)。このとき領域  $V_l$  に関する X 線の投影  $p_l^{(\alpha)}$  は式(1)の関係から、

$$p_l^{(\alpha)} = f_m(x)\{X_l - w_l\} + f_c^{(\alpha)} w_l \quad (10)$$

と表すことができる。また、亀裂内部が線吸収係数  $f_c^{(\beta)}$  の物質  $\beta$  で満たされている場合の投影を  $p_l^{(\beta)}$  とすると、

$$p_l^{(\beta)} = f_m(x)\{X_l - w_l\} + f_c^{(\beta)} w_l \quad (11)$$

となる。画像間差分を行うということは、式(10)と式(11)の差分をとることに対応し、それを  $w_l$  について解くと次のようになる。

$$w_l = \frac{p_l^{(\alpha)} - p_l^{(\beta)}}{f_c^{(\alpha)} - f_c^{(\beta)}} \quad (12)$$

上式のように、測線上に多数の亀裂を有する場合でも、1つの亀裂のみを含む区間を設定し、その区間での投影を取るにより個々の亀裂開口幅の評価が可能になる。さらに、式(12)で示すように、画像間差分を実施することによって物体の線吸収係数  $f_m(x)$  の影響がなくなり、試料内部の不均質性やカップング (材料の端付近では CT 値が相対的に高く評価され、試料 (画面) 中央付近では CT 値が相対的に低く評価される現象) の影響を取り除くことができる。

次に、上述の関係を、CT 値を用いて表す方法について説明する。まず、式(12)の  $f_c^{(\alpha)}$  および  $f_c^{(\beta)}$  を亀裂内に満たされた物質の平均 CT 値  $\bar{f}_c^{(\alpha)}$  および  $\bar{f}_c^{(\beta)}$  と仮定

すると、

$$w_i = \frac{p_i^{(\alpha)} - p_i^{(\beta)}}{\bar{f}_c^{(\alpha)} - \bar{f}_c^{(\beta)}} \quad (13)$$

を得る。また、投影域  $V_l$  に含まれる  $x$  軸方向のピクセル数が  $\bar{X}$ 、 $y$  軸方向のピクセル数が  $\bar{Y}$ 、 $z$  軸方向のピクセル数が  $\bar{Z}$  であるとき、投影断面のピクセル数は  $\bar{S} = \bar{Y} \cdot \bar{Z}$  である。投影域の番地  $(i, j, k)$  における CT 値を  $f^{(\alpha)}(i, j, k)$  と表記すると、亀裂内が物質  $\alpha$  で満たされている場合、投影域  $V_l$  における投影断面  $i$  の平均 CT 値  $g_l^{(\alpha)}(i)$  は、

$$g_l^{(\alpha)}(i) = \frac{\sum_j \sum_k f^{(\alpha)}(i, j, k)}{\bar{S}} \quad (14)$$

と表される。ここで、 $\Sigma_n$  は添字  $n$  についての総和を表す。また同様に、亀裂内に物質  $\beta$  が満たされている場合は番地  $(i, j, k)$  における CT 値を  $f^{(\beta)}(i, j, k)$  と表記すると、投影断面  $i$  の平均 CT 値  $g_l^{(\beta)}(i)$  は、

$$g_l^{(\beta)}(i) = \frac{\sum_j \sum_k f^{(\beta)}(i, j, k)}{\bar{S}} \quad (15)$$

となる。ただし、 $f^{(\alpha)}(i, j, k)$  と  $f^{(\beta)}(i, j, k)$  は亀裂の部分だけが異なった値である。上式を用いると、両者の投影は次式で与えられる。

$$p_l^{(\alpha)} = \sum_i g_l^{(\alpha)}(i) d, \quad p_l^{(\beta)} = \sum_i g_l^{(\beta)}(i) d \quad (16)$$

一方、亀裂内を満たしている物質の平均 CT 値  $\bar{f}_c^{(\alpha)}$  および  $\bar{f}_c^{(\beta)}$  は、その物質だけの X 線 CT 撮影を行って評価する必要がある。ただし、物質  $\alpha$  および物質  $\beta$  がそれぞれ水と空気の場合には次のように設定されている。

$$\bar{f}_c^{(\alpha)} = 1000, \quad \bar{f}_c^{(\beta)} = 0 \quad (17)$$

上述の方法は、1 枚の亀裂のみを含む領域を対象領域として設定することによって、試料内部での個々の亀裂の開口幅を評価する方法である。

#### 4.2 適用上の問題点に関する検討

CT 画像データを用いた亀裂開口量の評価に関して、菅原ら<sup>4)</sup>は画像再構成時に生じる CT 値のスケールの影響を論じている。つまり、再構成された CT 値  $f$  とその真の値  $f^0$  との関係は次式で表される。

$$f = \kappa f^0 + \kappa e \quad (18)$$

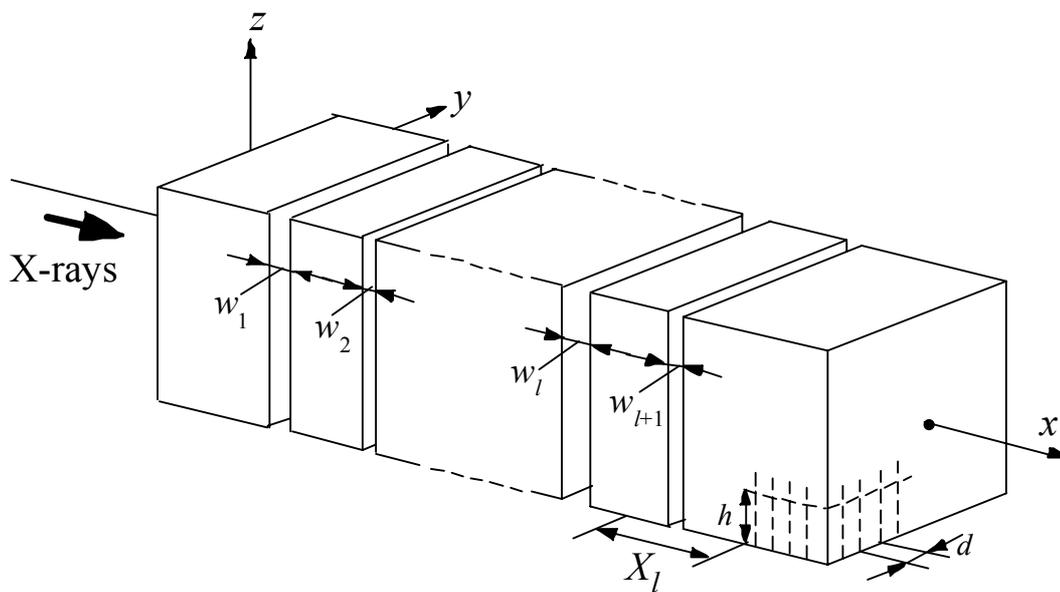
ここで、 $\kappa$  は比例定数であり、誤差がない場合には  $\kappa=1$  である。また第 2 項はスケールのシフトを示し、誤差がない場合には  $e=0$  である。先に式(10)～式(12)で示した画像間差分法の場合、亀裂内部の CT 値分布のみが異なる 2 つの画像の差分を実施する。このことから、式(18)中の  $\kappa e$  の項は画像間差分によって除去されるものの、比例定数  $\kappa$  の補正が必要になる。

著者らのこれまでの研究により、比例定数  $\kappa$  に関しては、試料の密度、寸法と形状、撮影方法などによって値が変化することが知られている。これは、同じ画像中においても場所による密度分布の違いや分析対象位置周辺の形状の違いにより、その影響が異なっているためであると考えられる。したがって、式(12)で示した亀裂開口量の評価式のうち、亀裂を含んだ岩石マトリクス部の投影(式(10)および式(11))ならびに亀裂内流体それぞれについて誤差を評価する必要がある。そこで、亀裂を含んだ岩石マトリクス部の投影の比例定数を  $\kappa_{\text{mat}}$ 、亀裂内流体の比例定数を  $\kappa_{\text{liq}}$  であるとすると、式(12)の関係から真の亀裂開口量  $w_m$  は次のように表される。

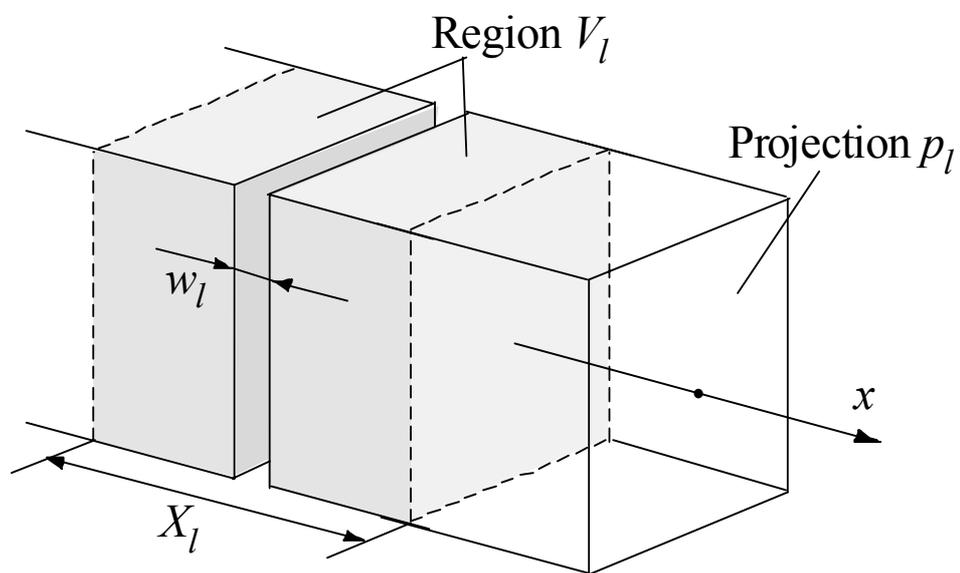
$$w_m = \eta w \quad (19)$$

ただし、 $\eta$  は補正係数であり次式で与えられる。

$$\eta = \frac{\kappa_{\text{mat}}}{\kappa_{\text{liq}}} \quad (20)$$



① 複数の亀裂への照射と座標の概念図



② 解析領域  $V_l$

図 4.1 物質内の亀裂と座標軸の概念図

## 5. 3次元測定器による岩石試料の亀裂表面および亀裂開口幅評価

### 5.1 岩石試料

亀裂開口幅の評価に用いた試料は「稲田花崗岩」である。主要鉱物としては雲母・石英・長石であり、それぞれ平均粒径は目視で雲母約 1mm、石英約 3mm、長石約 5mm である。まず、100mm×100mm×100mm の立方体に整形した後、試料の中央に人工的に割裂亀裂を発生させた。岩体の写真を図 5.1 に示す。図では亀裂側面に当て板を設置しているが、当て板を設置する前に、亀裂面で岩体を 2 つに分離させ、それぞれの亀裂表面を 3次元測定器で計測している。

### 5.2 3次元測定器

本研究で用いた測定装置は、MITUTOYO 製「BRT710」で、接触式測定装置である。3次元測定器の写真を図 5.2 に、計測方法の概念図を図 5.3 に示す。測定精度は、最大誤差で  $3+4L/1000[\mu\text{m}]$  (ここで L: 任意の測定長[mm])、最小表示量は 0.0005[mm] である。測定子には 0.1[mm] のルビー球を使用し、亀裂面の端を除いた 2~98[mm] 間を 1mm ピッチで、図 5.3 に示すように計測した。

### 5.3 亀裂表面計測結果および亀裂開口幅

図 5.4①②に、3次元測定器で計測した上面亀裂および下面亀裂の表面形状分布図を示す。また、亀裂開口幅も算出しているが、その算出方法を図 5.5 に示す。100mm 岩体の上面および下面の亀裂高さ ( $a_1$ ,  $a_2$ ) を計測し、亀裂表面計測後、亀裂を組み合わせた状態で全体の高さ ( $h$ ) を計測する。全体高さから上面・下面の亀裂面高さを引くと、亀裂開口幅 ( $d$ ) が算出される。図 5.6 に、算出した亀裂開口幅分布図を示す。亀裂開口幅の平均値は 0.198[mm] となった。表面計測実施後は再び亀裂面どうしを合わせて、試料端面に取り付けたアクリル板により岩体を固定した。

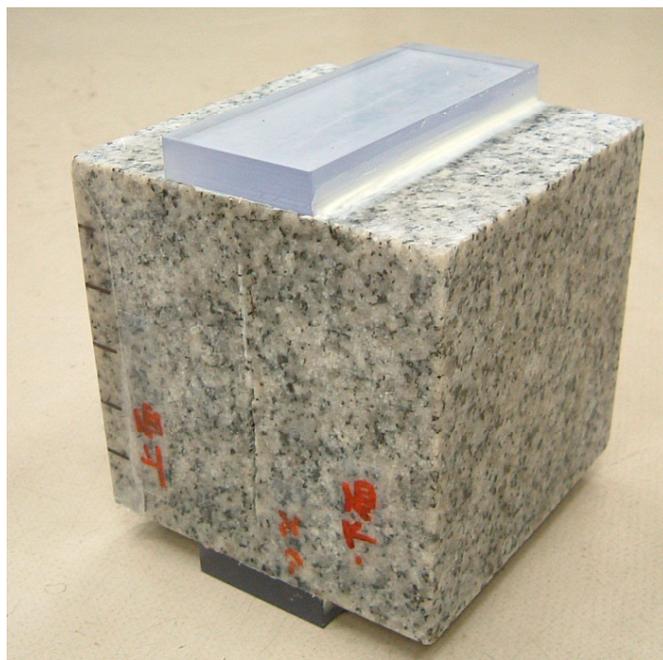


図 5.1 岩体試料(100mm×100mm×100mm)



図 5.2 3次元測定器の写真

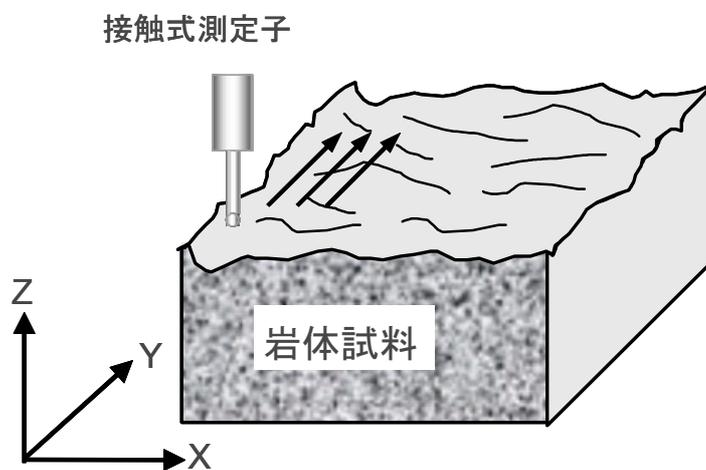
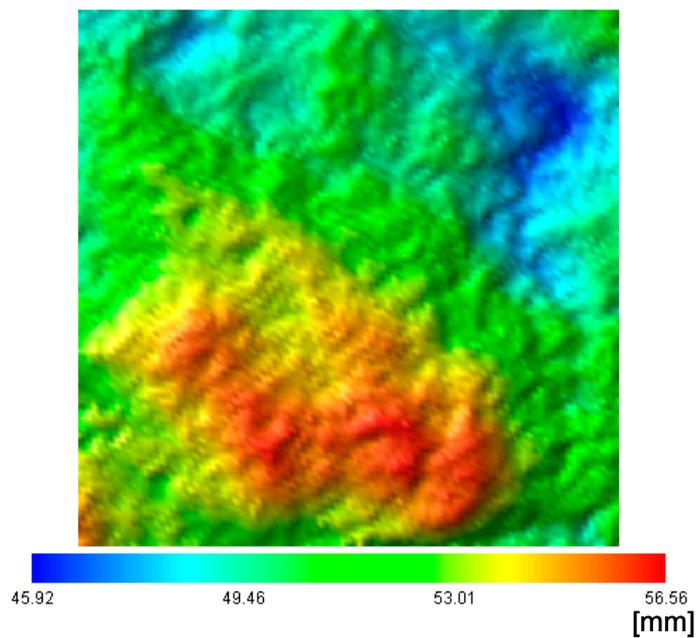
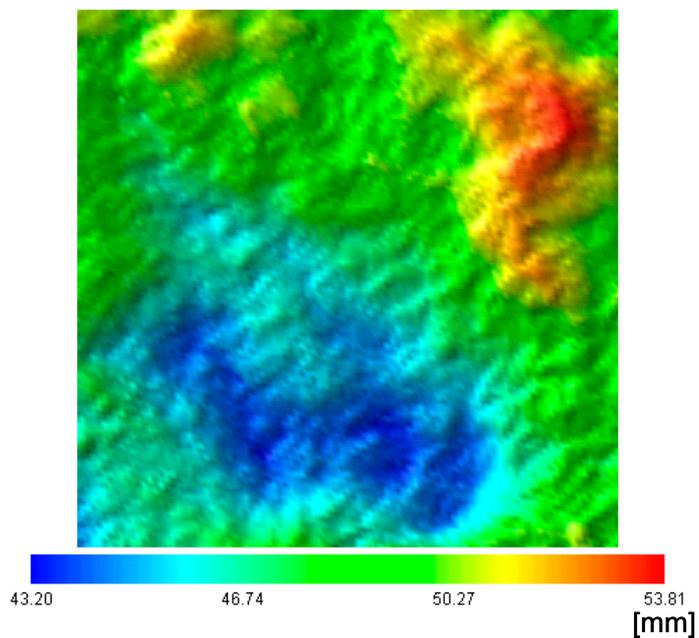


図 5.3 3次元測定器による計測方法の概念図

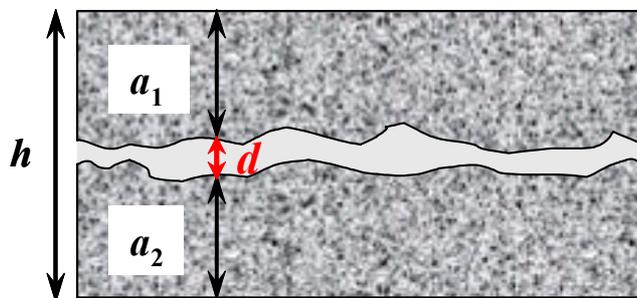


①上面亀裂形状分布図



②下面亀裂形状分布図

図 5.4 岩体試料の亀裂表面形状分布



開口幅  $d = h - (a_1 + a_2)$

図 5.5 亀裂開口幅の算出方法

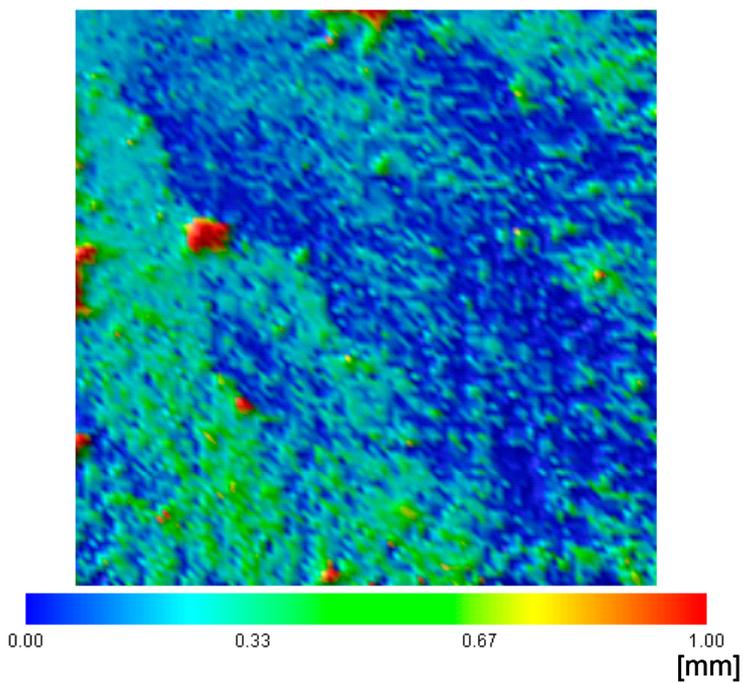


図 5.6 岩体試料の亀裂開口幅分布

## 6. X線 CT 装置および岩石試料

### 6.1 X線 CT スキャナー

本研究で用いた装置は東芝製産業用 X 線 CT スキャナー (TOSCANNER-20000) である。撮影条件は種々設定可能であるが、本研究では管電圧 300kV, 管電流 2mA, 断層撮影厚 2mm の条件の下で撮影を実施した。なお、本研究で用いた X 線 CT スキャナーに関する仕様の詳細ならびに X 線 CT の基本原理については菅原ら<sup>4)</sup>および Sugawara et al<sup>9)~11)</sup>を参照されたい。

### 6.2 岩石試料および撮影条件

亀裂開口幅の評価に用いた試料は、3次元測定に用いた試料と同じものである (図 5.1 参照)。X 線 CT の撮影は、試料端面にアクリル板を固定した後、試料が完全に固定された状態で実施した。

撮影断面および座標を図 6.1 に示す。今回、X 線 CT の撮影は図 6.1 の赤線で示すように Slice1~5 の計 5 断面で実施した。ここでは画像間差分を実施するために、まず、亀裂内部が空気で満たされている場合について撮影を実施し、その後、亀裂内部を水で満たした状態で再び撮影を実施した<sup>14)</sup>。また、ノイズ軽減処理としてスタッキング法を適用するために、亀裂内部が空気および水で満たされている状態でそれぞれ 5 回の撮影を実施した。

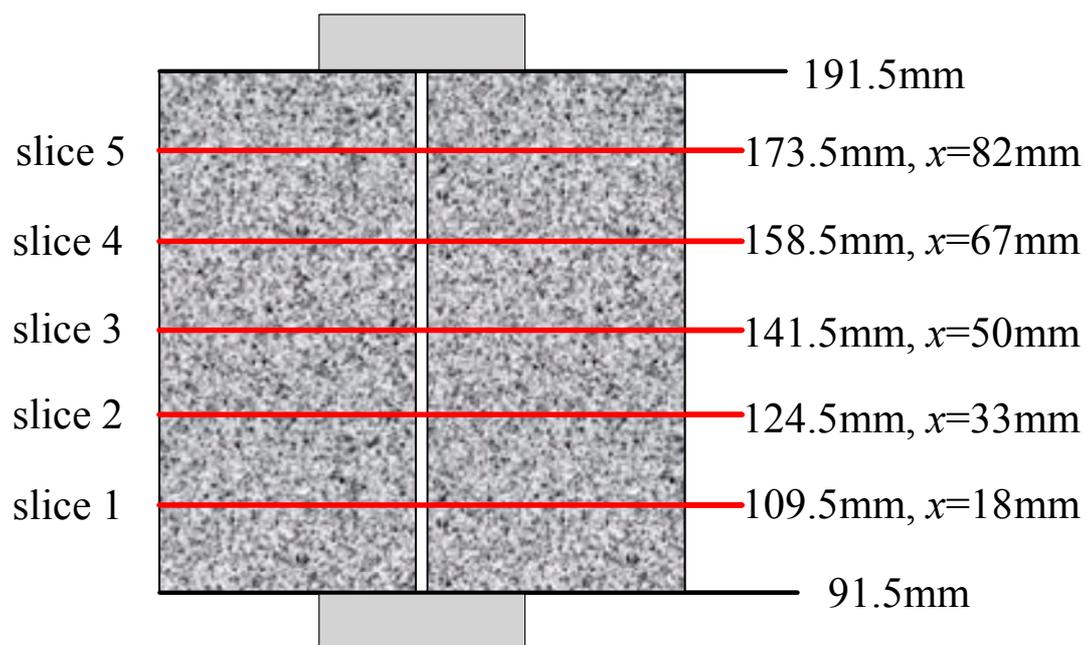


図 6.1 X 線 CT の撮影断面および座標

## 7. X線 CT 法の適用

### 7.1 X線 CT 画像

撮影によって得られた X 線 CT 画像の例を図 7.1～図 7.5 に示す。これらはそれぞれ撮影断面での画像に相当し、比較のため、シングルスキャン画像（各図の(a)）およびスタッキング画像（各図の(b)）を併せて示す。先に述べたように、撮影は同じ断面で計 5 回実施したことから、スタッキング画像は 5 枚の画像データを重ね合わせることで作成した。これらの図に示すように、花崗岩岩石試料のほぼ中央付近に亀裂が形成されていることが明瞭に確認できる。また、割裂亀裂は全体的には比較的直線的ではあるが、佐藤ら<sup>14)</sup>が対象とした平板亀裂よりは表面の凹凸が大きい点に注意されたい。さらに、画像中には割裂により試料が分断された破断面とは別に、岩石試料内部に進展している亀裂がいくつか確認できる。これらの取り扱いについては後述する。

各図のシングルスキャン画像とスタッキング画像を比較すると、スタッキング画像の方が明らかに鮮明である。さらに、花崗岩構成鉱物の密度の違いも、スタッキング画像の方が明確に判別できることがわかる。

### 7.2 スタッキングによるノイズ軽減効果

画像スタッキング（重ね合わせ）によるノイズ軽減効果について検討する。ここでは、図 7.6 中の点線で示した亀裂を含まない岩石マトリクス部分の画像データを抽出し、シングルスキャン画像およびスタッキング画像それぞれについて CT 値の分布を求めた。その結果を図 7.7～図 7.11 に示す。なお、用いた Pixel 数は 76472 である。この図に示すように、いずれの断面においてもスタッキング画像の方がシングルスキャン画像よりも CT 値のバラツキが小さくなっている。また、これらの分布から標準偏差  $\sigma$  を求めると、シングルスキャン画像の場合には  $\sigma=220$  程度であるのに対して、スタッキング画像は  $\sigma=135$  程度である。このように、5 枚の画像をスタッキングにより画像に含まれるノイズが軽減され、CT 値の分布が岩石本来の密度分布に近づいていることが確認できる。また、これらの図に示すように、今回用いた試料の密度分布はほぼ正規分布に従うものであることが分かる。

### 7.3 画像間差分による亀裂情報の抽出

亀裂内部を空気および水で満たした状態でそれぞれ撮影を実施し、スタッキング画像どうしの差分を取ることで亀裂情報の抽出を試みた。さらに、亀裂面と平行な方向（y 軸方向）に移動平均処理を実施した<sup>14)</sup>。前述の処理の結果得られる CT 値の分布を図 7.12～図 7.16 に示す。これらの図は、亀裂と交差す

る測線上での CT 値の分布であり、いずれの図も撮影断面のほぼ中央部での分布である。また、移動平均処理では、11 pixel と 25pixel の 2 種類の幅を用いて実施した。

図中で CT 値が大きい部分が画像間差分法によって抽出された亀裂部分である。また、それ以外の場所は、CT 値は零に近い値を取っていることが分かる。また、移動平均を実施する幅が 25pixel の方が CT 値のばらつきが小さい。しかし、移動平均の幅を大きく取るとは局所的な情報を丸めてしまうことになり、亀裂開口幅評価結果の精度に影響する。この点については後述する。

#### 7.4 亀裂開口幅の評価

先に示した図 7.12～図 7.16 の情報を基に亀裂開口幅の評価を実施した。ここでは試料の端面間を分析領域として設定し、投影方向である x 軸と複数の亀裂が交差する場合についてはそれらを全て含んだ平均亀裂開口量として評価した。その結果を図 7.17～図 7.21 に示す。なお、開口幅評価に必要な係数ならびにシフト量は佐藤ら<sup>14)</sup>が示した値を用いた。また、先に述べたように、割裂亀裂作成後には接触式 3 次元測定器（接触端球半径 0.1[mm]）を用いて表面形状の計測を実施し、その結果から亀裂開口幅の評価を行っている。従って、図中には比較のためこの結果を合わせて示す。

移動平均の幅が 11pixel と 25pixel の結果を比較すると、移動平均の幅が大きい方が開口幅の最小値と最大値の差が小さく評価されている。これは、移動平均の幅が大きくなるにつれて局所的な情報が丸められた結果である。

X 線 CT 法ならびに接触式 3 次元測定器による評価結果を比較すると、亀裂形状の大きな傾向ならびに平均的な亀裂開口幅はほぼ一致しているとみなすことが出来る。しかし、図 7.17、図 7.18 および図 7.20、図 7.21 の点線で囲んだ領域は、ある範囲にわたって亀裂開口幅の傾向が異なっている。これは先に述べたように測線上に複数の亀裂が存在する区間である。一方、表面形状で測定される亀裂は破断面上であり、マトリクス内部に進展した亀裂については測定することができない。このように X 線 CT 法は表面計測では確認不可能な岩石内部の亀裂開口量の評価が可能であり、表面の状態が悪い場合あるいは亀裂表面付近で複数の破壊が進展している場合については有効な方法であると考えられる。

#### 7.5 破断面を形成する主亀裂の開口幅の評価

前節での考察を基に、図 7.22 に示すように破断面を形成している亀裂を主亀裂、マトリクス内部に進展している亀裂を副亀裂と定義し、ここでは主亀裂の開口幅の評価を行う。

主亀裂の開口幅の評価結果を図 7.23～図 7.26 に示す。ただし、Slice3 については、副亀裂は無いものとみなして分析から除外してある。また、ここでも同様に接触式 3 次元測定器による評価結果を併せて示す。これらの図に示すように、先に示した図 7.17～図 7.21 の分布に比較して、より両者の関係が近づいていることが確認できる。

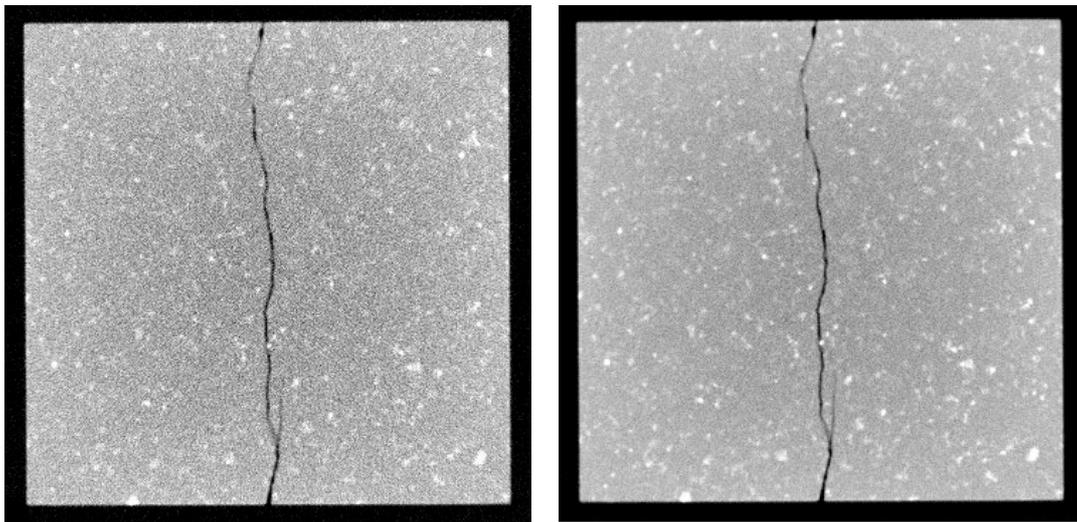
## 7.6 考察

上述のように、接触式 3 次元測定器を用いた亀裂開口幅の評価では、破断面として形成された主亀裂のみの評価結果となり、岩石内部に進展している副亀裂の存在を確認することはほぼ不可能である。しかし、一連の図 7.1～図 7.5 に示した CT 画像より、副亀裂の幾何学的形状は容易に判別できる。さらに、画像データから副亀裂の開口幅の評価も可能である。このように、X 線 CT を用いた評価法では、直接測定では評価不可能な主亀裂以外の亀裂についても評価可能である点に大きな特徴があるといえる。

次に、X 線 CT 法ならびに接触式 3 次元測定器を用いた亀裂開口幅の評価結果の違いについて検討する。各断面の平均亀裂開口量を求めた結果を図 7.27 に示す。ただし、岩石試料端面からそれぞれ 10[mm]部分を除いた計 80[mm]の区間で平均を求めた。この図から分かるように、両者の差は最大でも 0.05[mm]程度であり、異なる 2 つの方法で求めた結果は良く一致していると考えられる。また、Slice5 以外は接触式 3 次元測定器よりも X 線 CT 法の方が亀裂開口幅を大きく評価する傾向が読み取れる。これは以下の理由によるものと考えられる。まず、接触式 3 次元測定器の測定子の直径は 0.1[mm]である。従って、亀裂表面上で測定子の直径以下の隙間がある場合にはそれ以深の形状の評価が計測不可能であり、結果、亀裂開口幅が小さく見積もられる可能性がある。一方、X 線 CT 法の場合、本撮影で用いた X 線のビーム幅は 2[mm]である。従って、得られた X 線 CT 画像はビーム幅である 2[mm]の厚さの平均の密度分布を示す事になる。その結果、対象としている箇所以外の亀裂情報まで画像データには含まれるために、亀裂開口幅が若干大きく評価されたものと考えられる。また、ノイズ軽減処理として移動平均を取る必要があることから、その移動平均の幅に応じた平均的な亀裂開口幅を評価したため、亀裂開口幅を過大評価した可能性がある。さらに、X 線 CT 法に用いた試料は、一度 2 つに分断した試料を再度重ね合わせて作成したものである。したがって、完全に破面どうしが一致せず、かみ合わせの不一致によるせり上がりが生じることが考えられる。また、破面上の鉱物粒子が何らかの原因で剥離し、それがかみ合わせの不一致を生む原因になることも考えられる。

以上のように計測方法に起因する要因、さらに、試料作成に起因する要因を

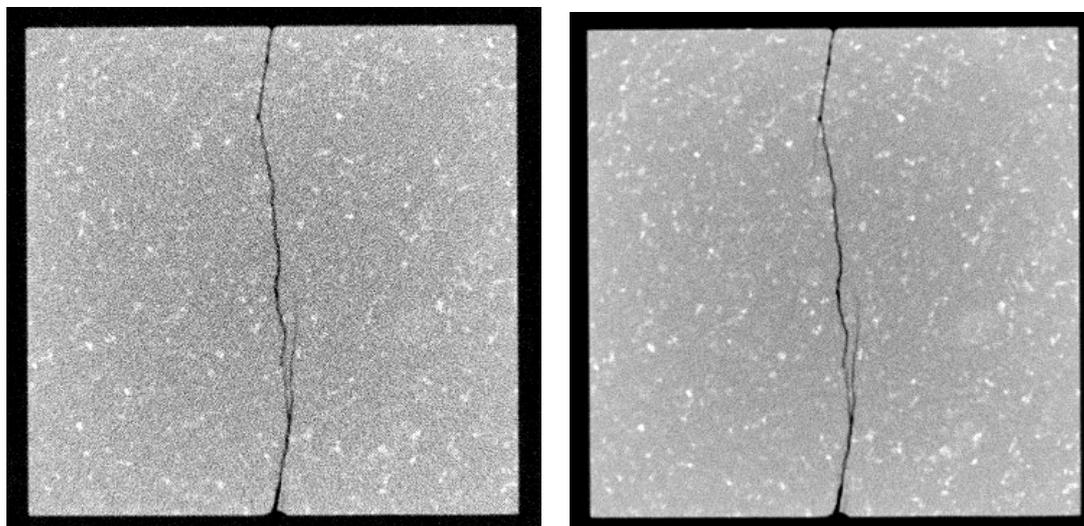
勘案すると、本研究で示した一連の手順は亀裂開口幅を若干大きく評価する方法であるといえる。しかし、先に述べたように両者の評価結果の差が **0.05[mm]** 程度である事を考えると、**X線 CT** 画像を用いた本手法が亀裂開口幅の評価に非常に有効であると考えることができる。



(a) シングルスキャン画像

(b) スタッキング画像

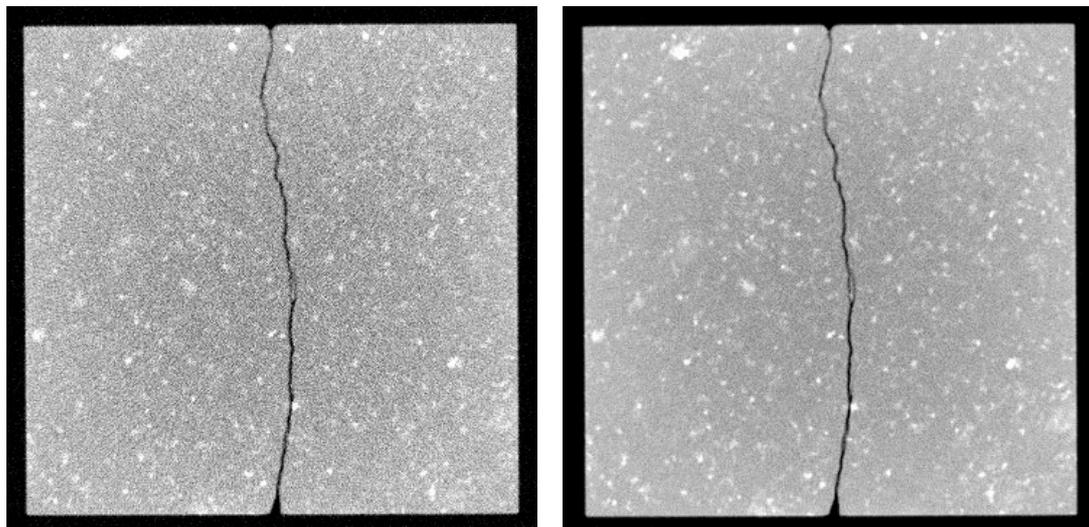
図 7.1 X線 CT 画像 (Slice1,  $x=18\text{mm}$ )



(a) シングルスキャン画像

(b) スタッキング画像

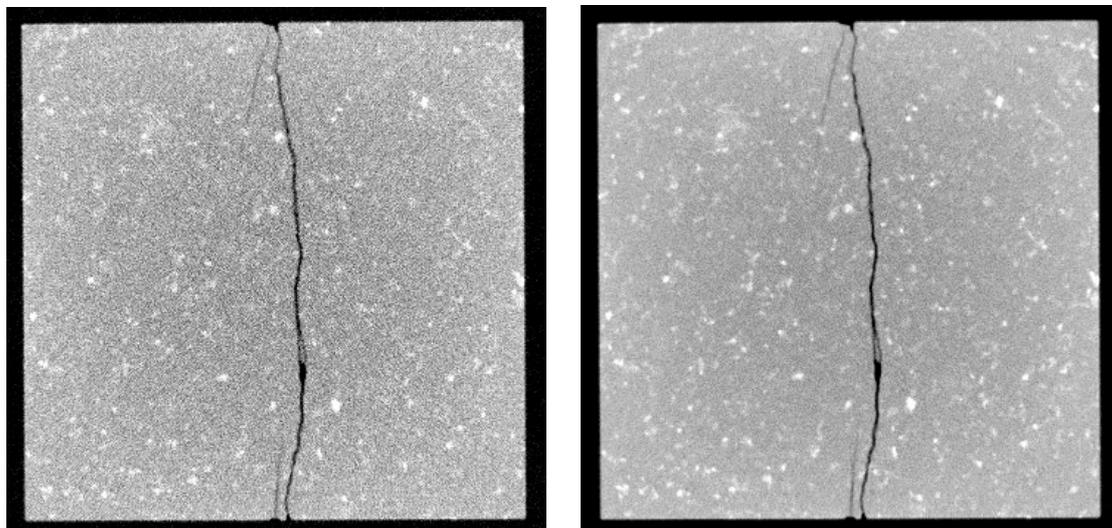
図 7.2 X線 CT 画像 (Slice2,  $x=33\text{mm}$ )



(a) シングルスキャン画像

(b) スタッキング画像

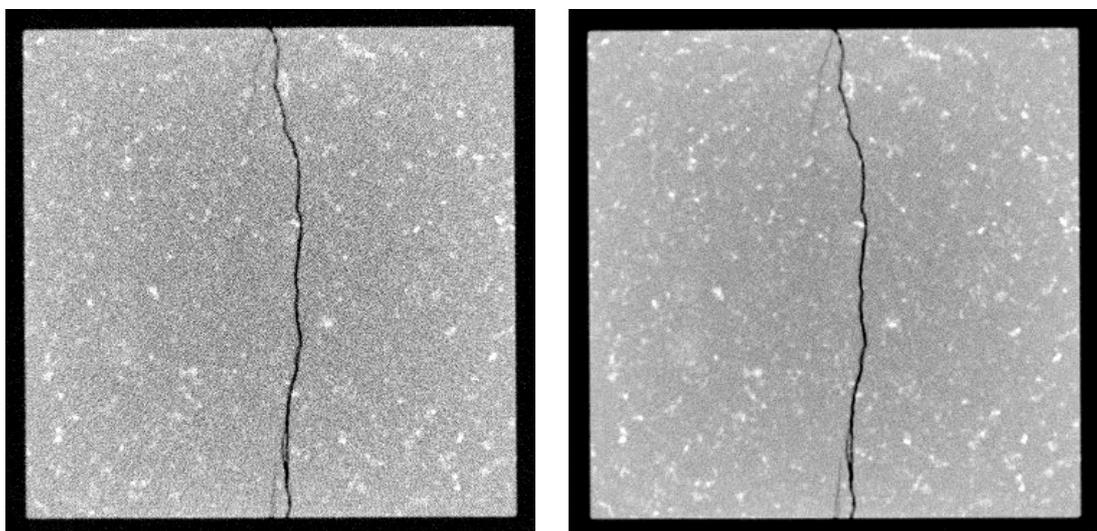
図 7.3 X線 CT 画像 (Slice3,  $x=50\text{mm}$ )



(a) シングルスキャン画像

(b) スタッキング画像

図 7.4 X線 CT 画像 (Slice4,  $x=67\text{mm}$ )



(a) シングルスキャン画像

(b) スタッキング画像

図 7.5 X 線 CT 画像 (Slice5,  $x=82\text{mm}$ )

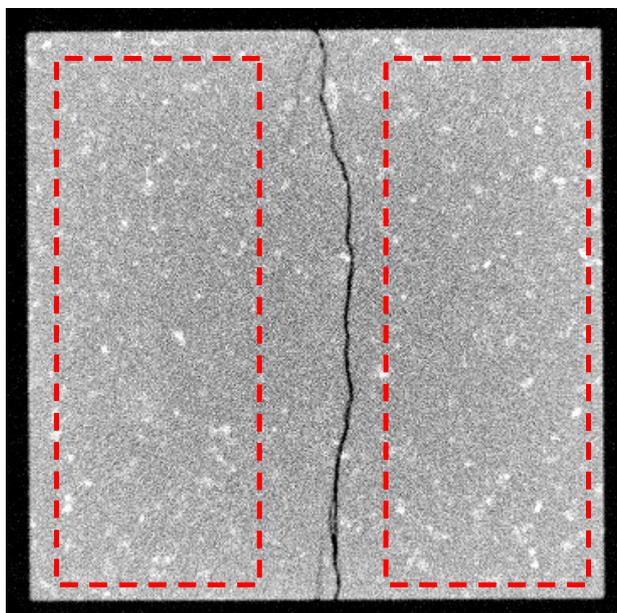
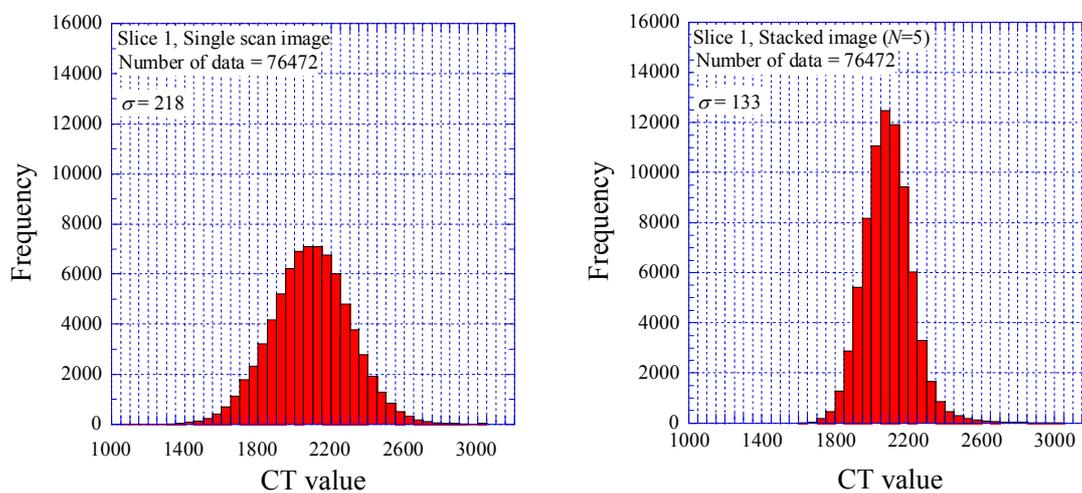


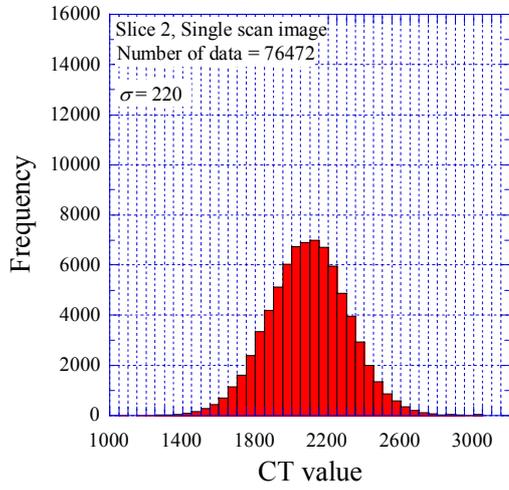
図 7.6 岩石マトリクス部における CT 値の評価領域（赤線内，76472 Pixels）



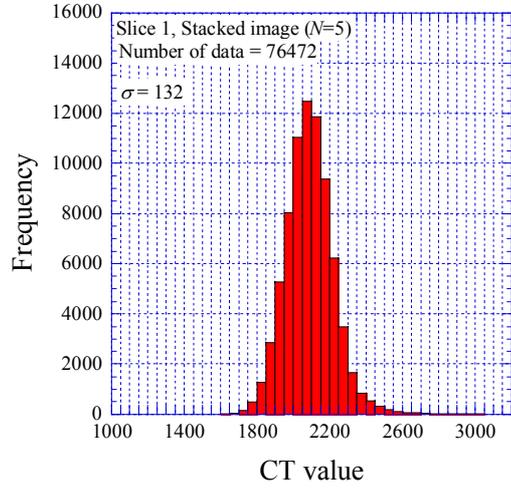
(a) シングルスキャン画像

(b) スタッキング画像

図 7.7 岩石マトリクス部分における CT 値分布 (Slice1)

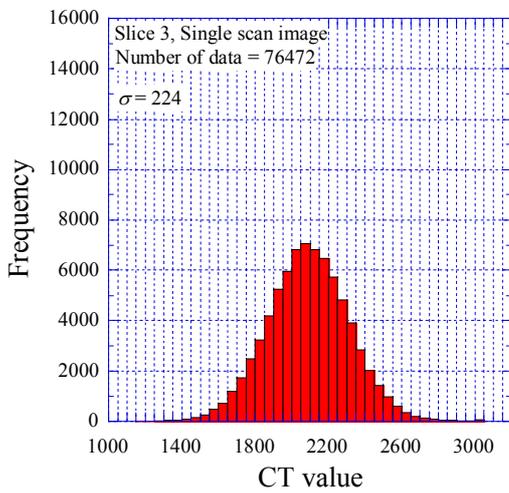


(a) シングルスキャン画像

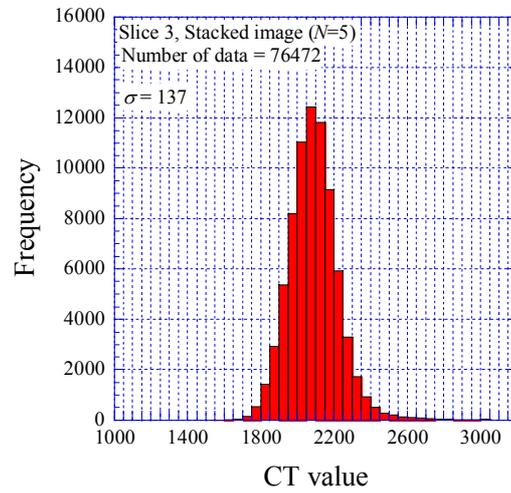


(b) スタッキング画像

図 7.8 岩石マトリクス部分における CT 値分布 (Slice2)

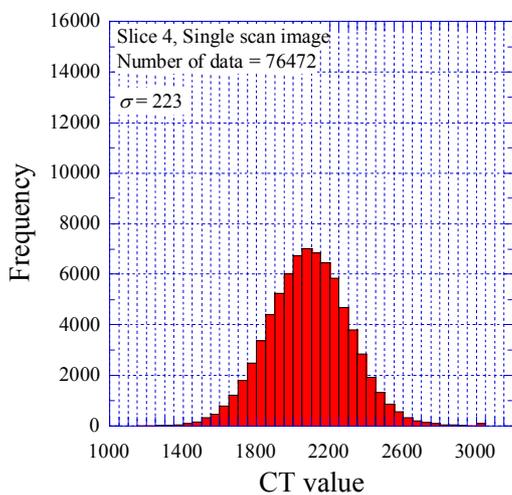


(a) シングルスキャン画像

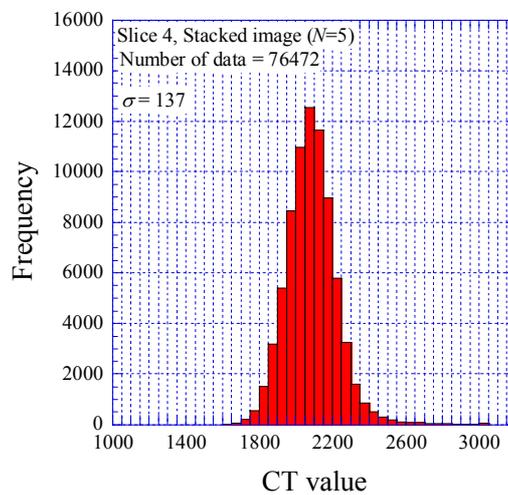


(b) スタッキング画像

図 7.9 岩石マトリクス部分における CT 値分布 (Slice3)

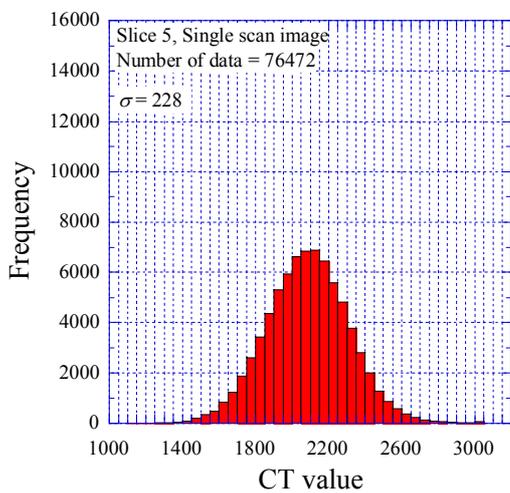


(a) シングルスキャン画像

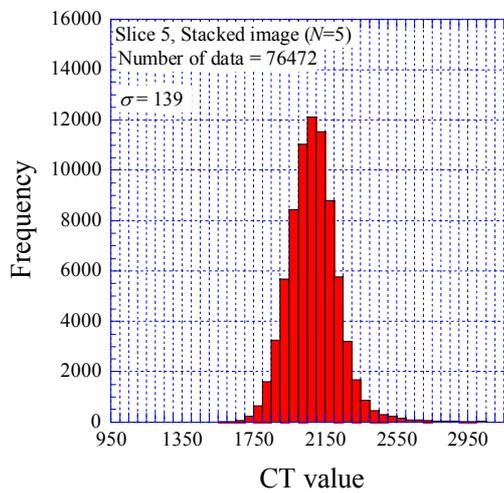


(b) スタッキング画像

図 7.10 岩石マトリクス部分における CT 値分布 (Slice4)

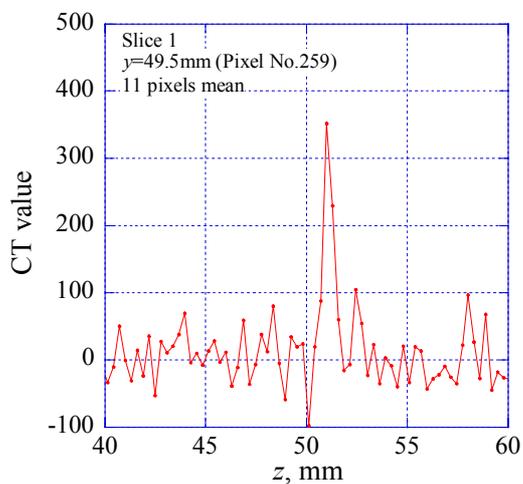


(a) シングルスキャン画像

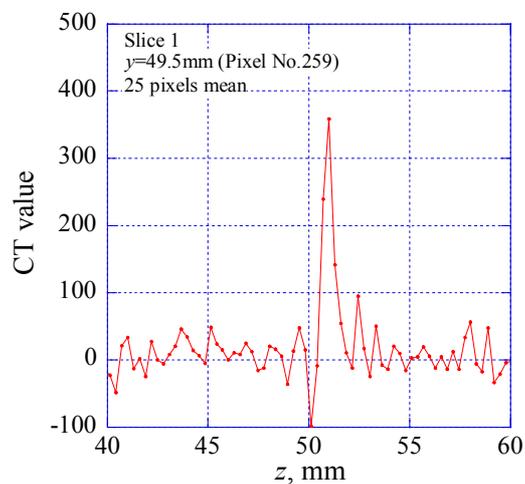


(b) スタッキング画像

図 7.11 岩石マトリクス部分における CT 値分布 (Slice5)

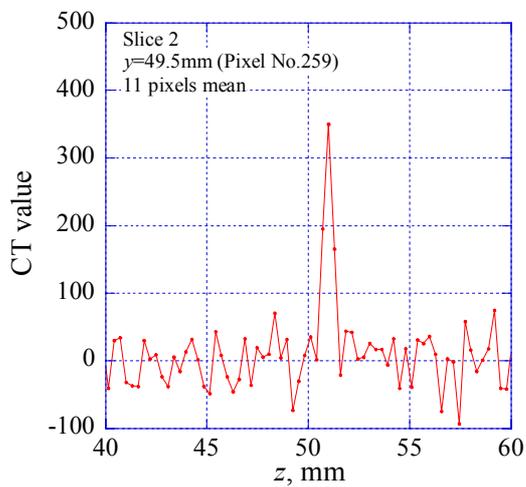


(a) 11 Pixels 移動平均

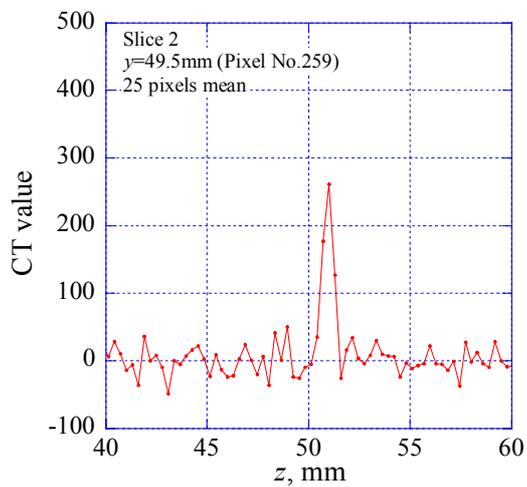


(b) 25 Pixels 移動平均

図 7.12 スタッキングおよび画像間差分後に移動平均処理を行った CT 値分布 (Slice1, y=49.5mm 位置)

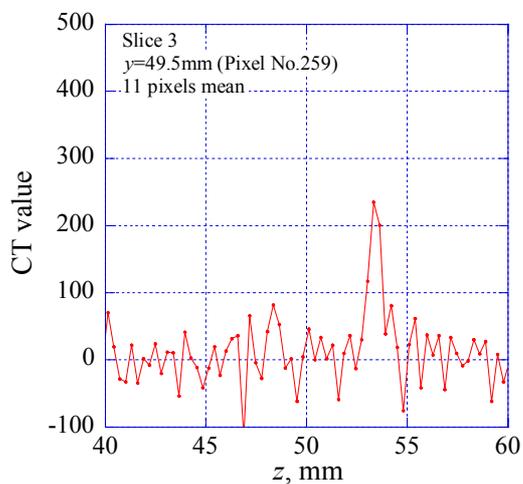


(a) 11 Pixels 移動平均

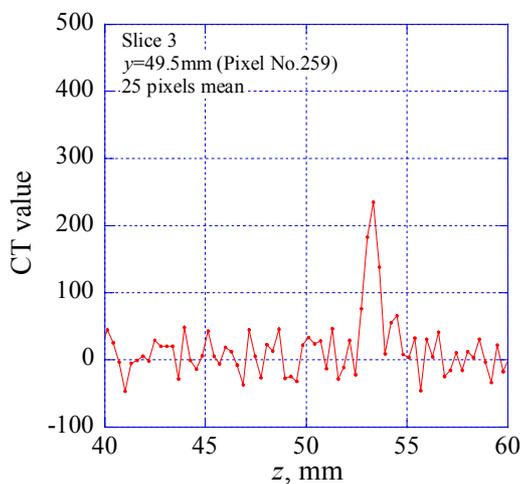


(b) 25 Pixels 移動平均

図 7.13 スタッキングおよび画像間差分後に移動平均処理を行った CT 値分布 (Slice2, y=49.5mm 位置)

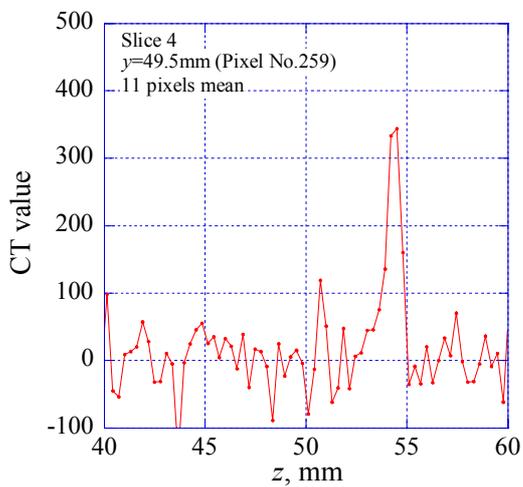


(a) 11 Pixels 移動平均

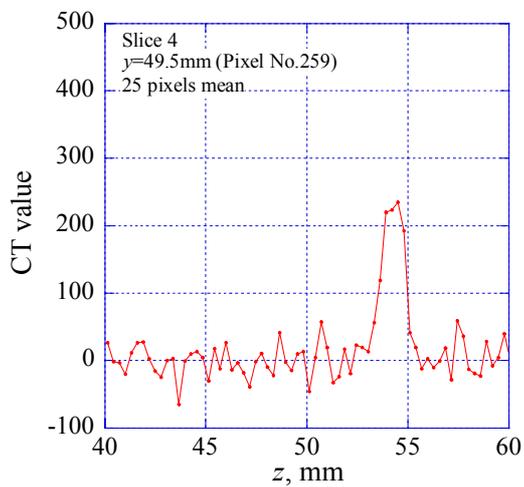


(b) 25 Pixels 移動平均

図 7.14 スタッキングおよび画像間差分後に移動平均処理を行った CT 値分布 (Slice3, y=49.5mm 位置)



(a) 11 Pixels 移動平均



(b) 25 Pixels 移動平均

図 7.15 スタッキングおよび画像間差分後に移動平均処理を行った CT 値分布 (Slice4, y=49.5mm 位置)

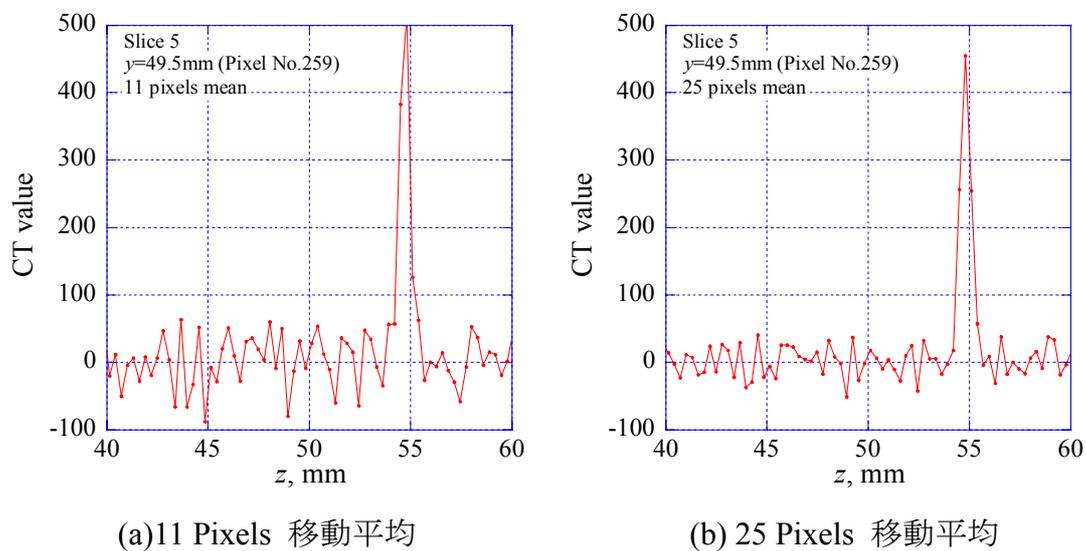
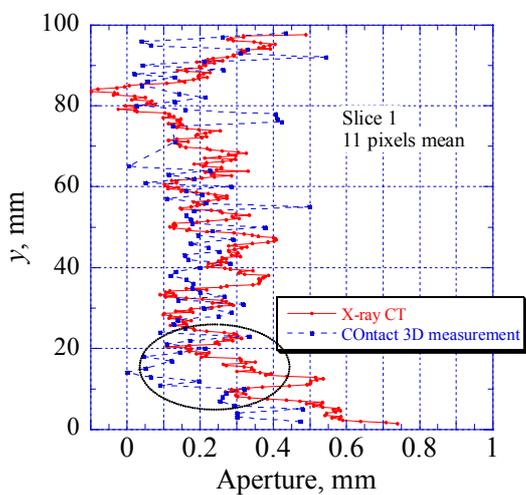
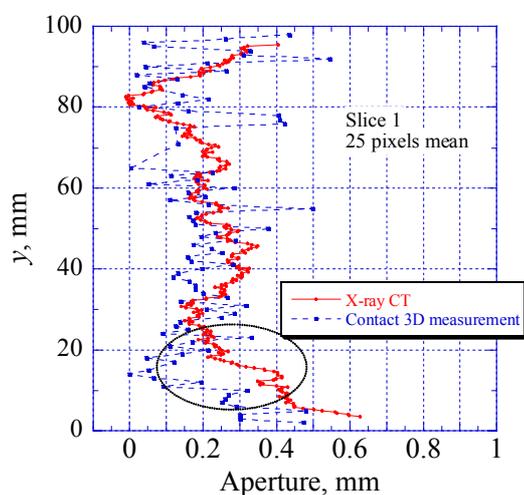


図 7.16 スタッキングおよび画像間差分後に移動平均処理を行った CT 値分布  
(Slice5, y=49.5mm 位置)

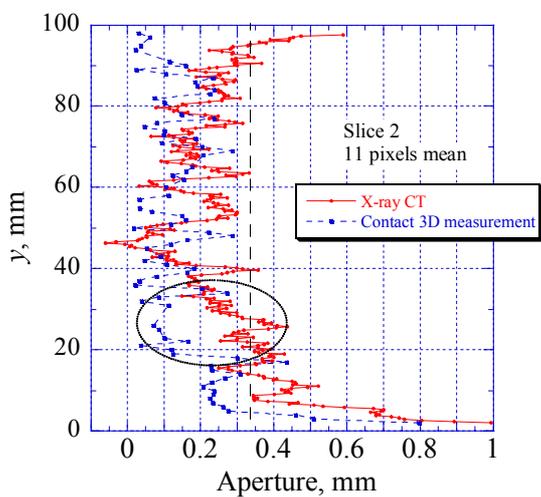


(a) 11 Pixels 移動平均

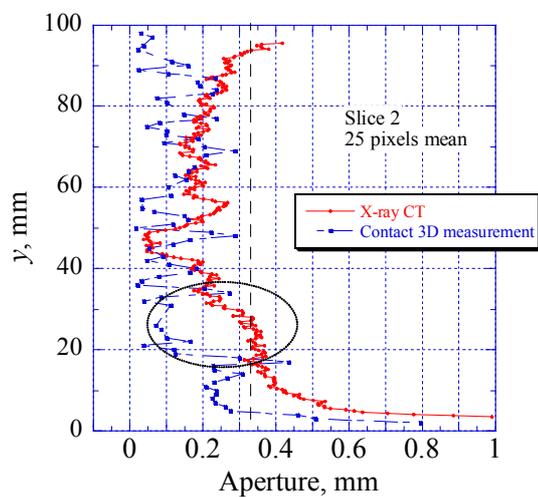


(b) 25 Pixels 移動平均

図 7.17 亀裂開口幅評価結果 (Slice1)



(a) 11 Pixels 移動平均



(b) 25 Pixels 移動平均

図 7.18 亀裂開口幅評価結果 (Slice2)

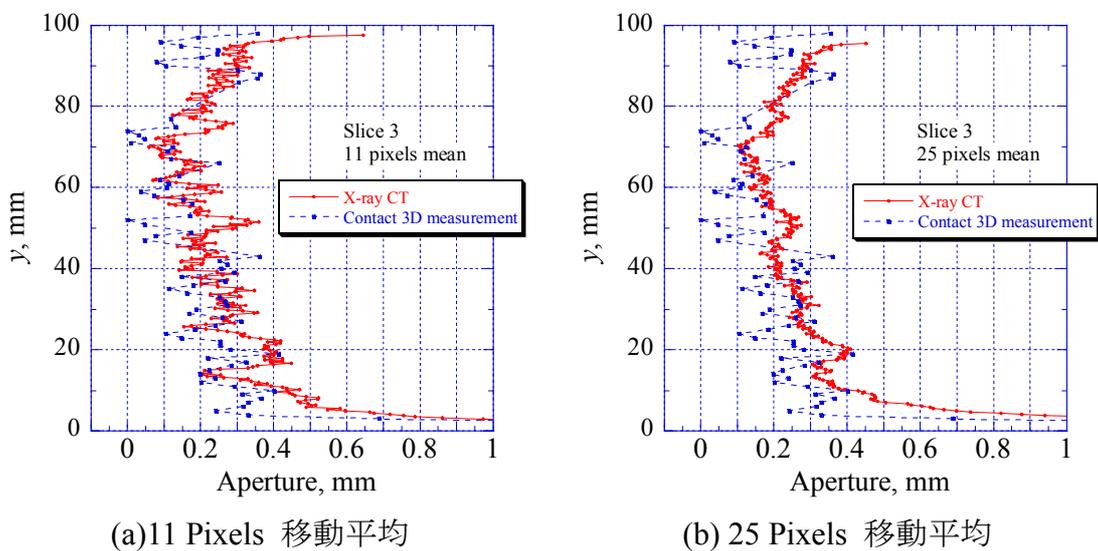


図 7.19 亀裂開口幅評価結果 (Slice3)

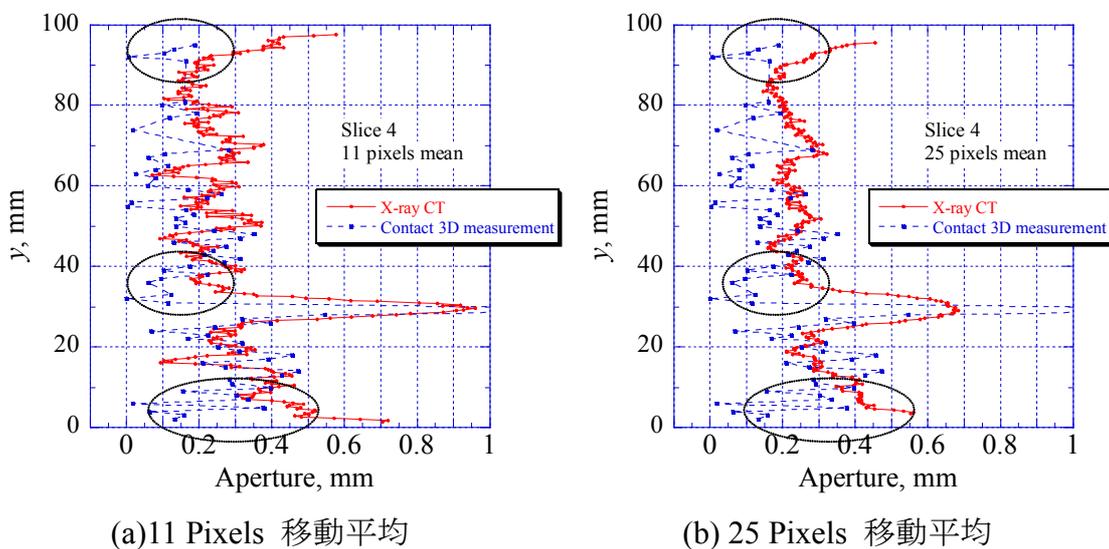


図 7.20 亀裂開口幅評価結果 (Slice4)

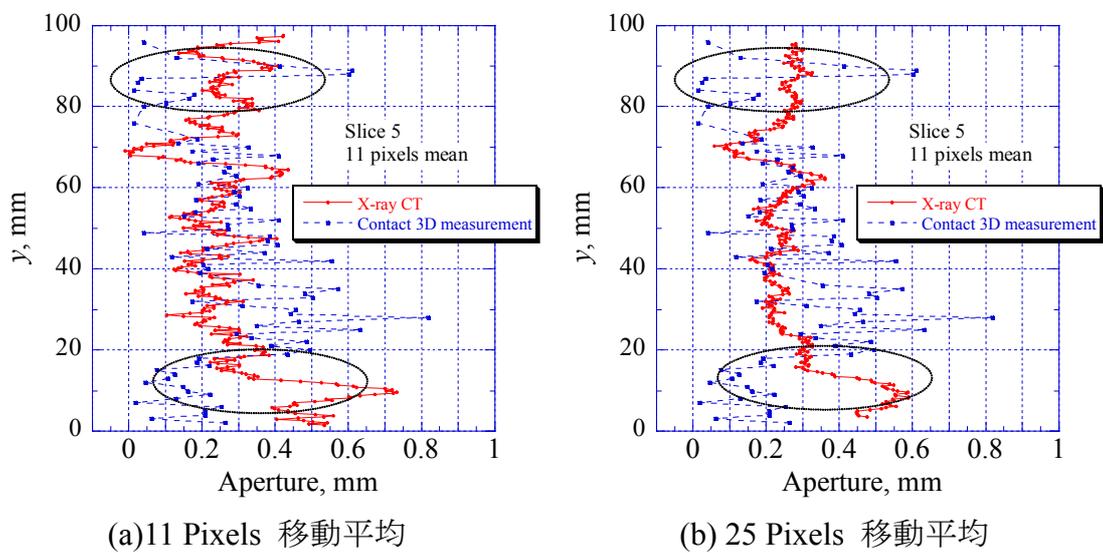


図 7.21 亀裂開口幅評価結果 (Slice5)

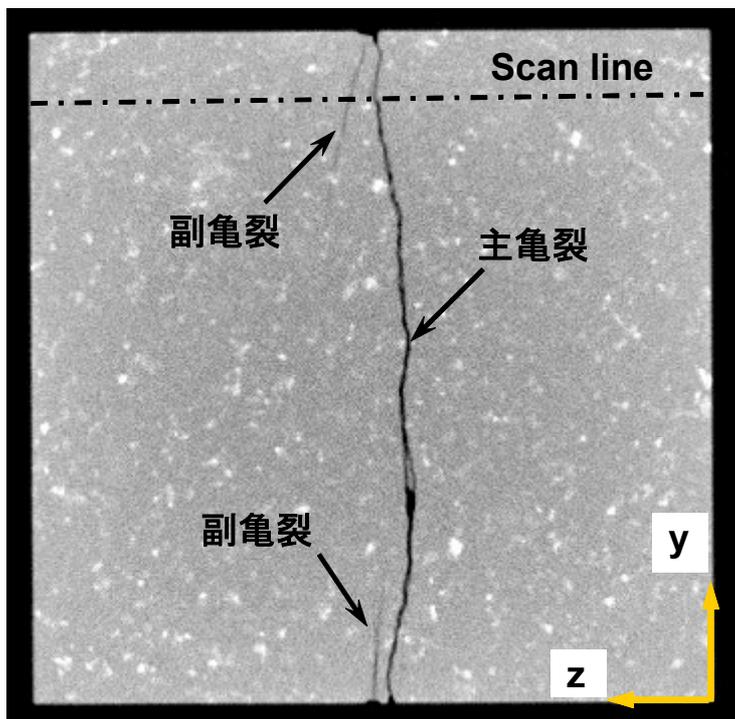
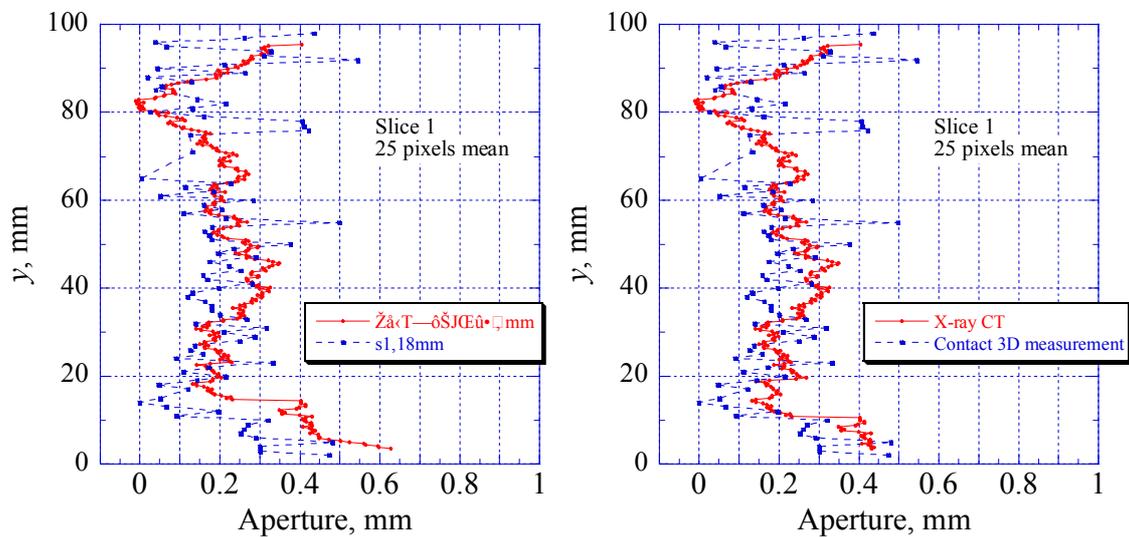


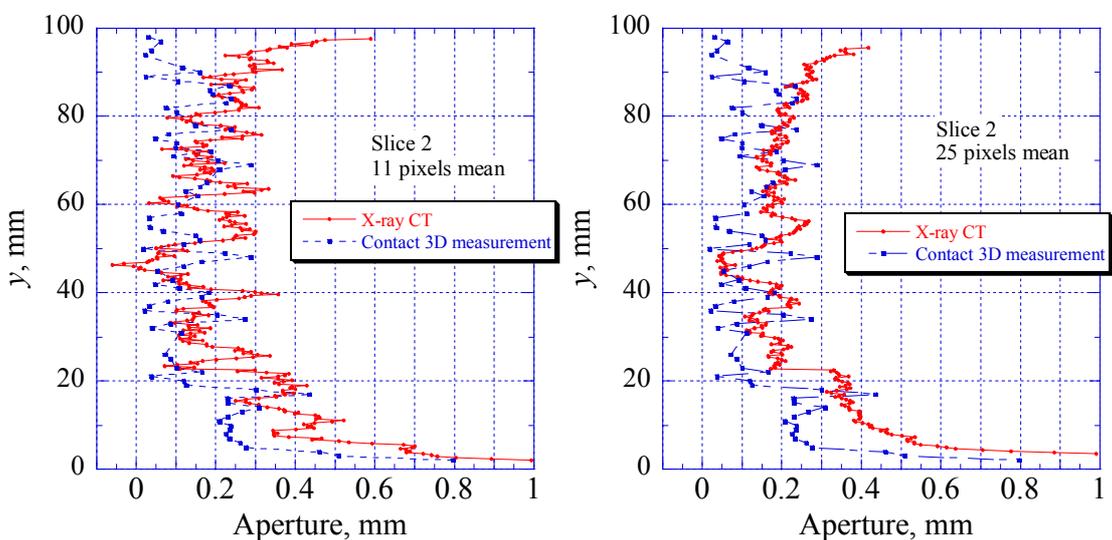
図 7.22 X線 CT で観察された主亀裂と副亀裂



(a)11 Pixels 移動平均

(b) 25 Pixels 移動平均

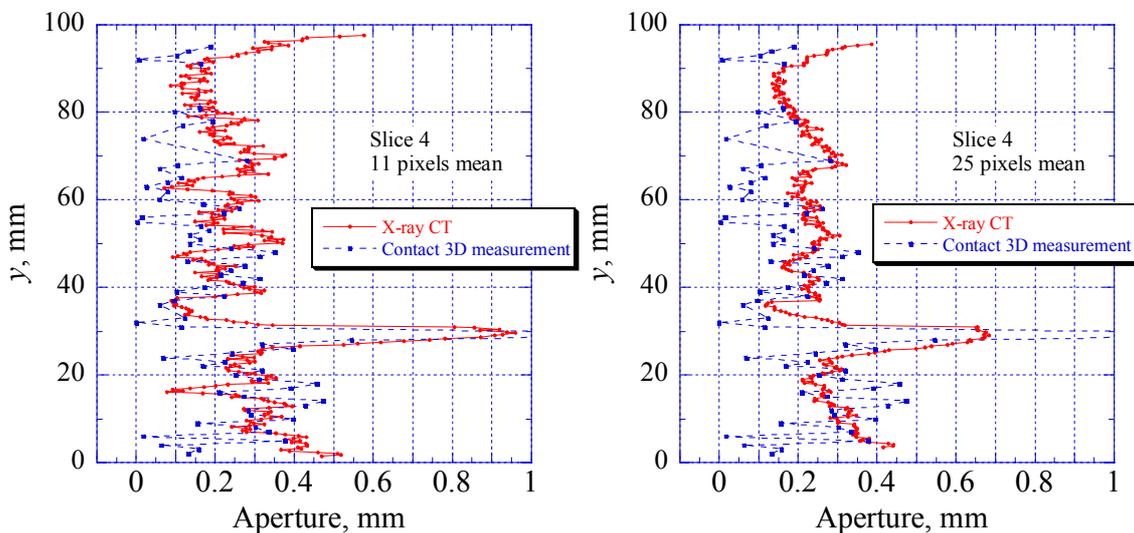
図 7.23 主亀裂の開口幅評価結果 (Slice1)



(a)11 Pixels 移動平均

(b) 25 Pixels 移動平均

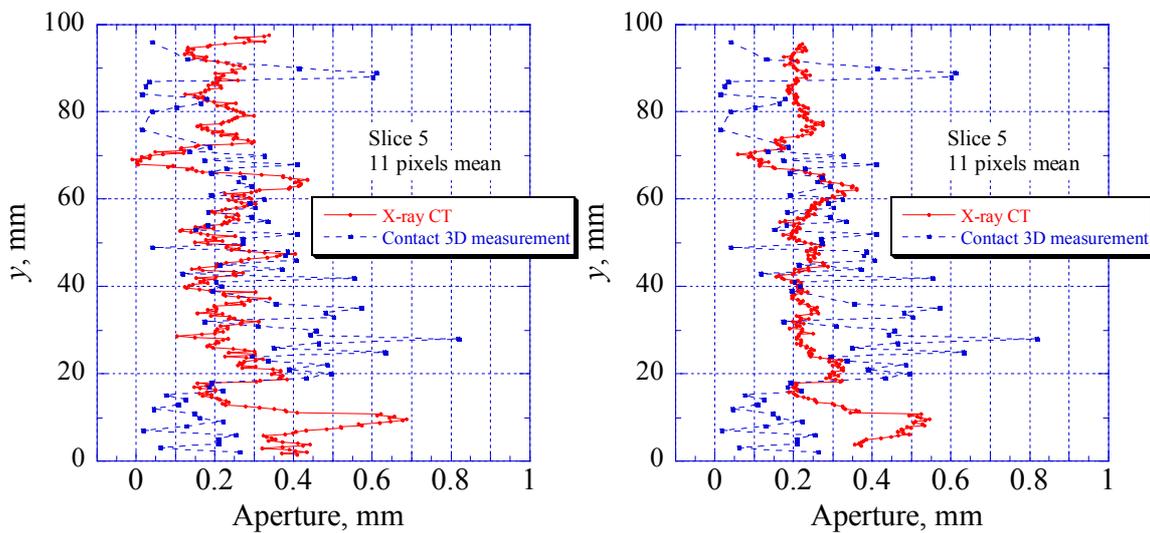
図 7.24 主亀裂の開口幅評価結果 (Slice2)



(a) 11 Pixels 移動平均

(b) 25 Pixels 移動平均

図 7.25 主亀裂の開口幅評価結果 (Slice4)



(a) 11 Pixels 移動平均

(b) 25 Pixels 移動平均

図 7.26 主亀裂の開口幅評価結果 (Slice5)

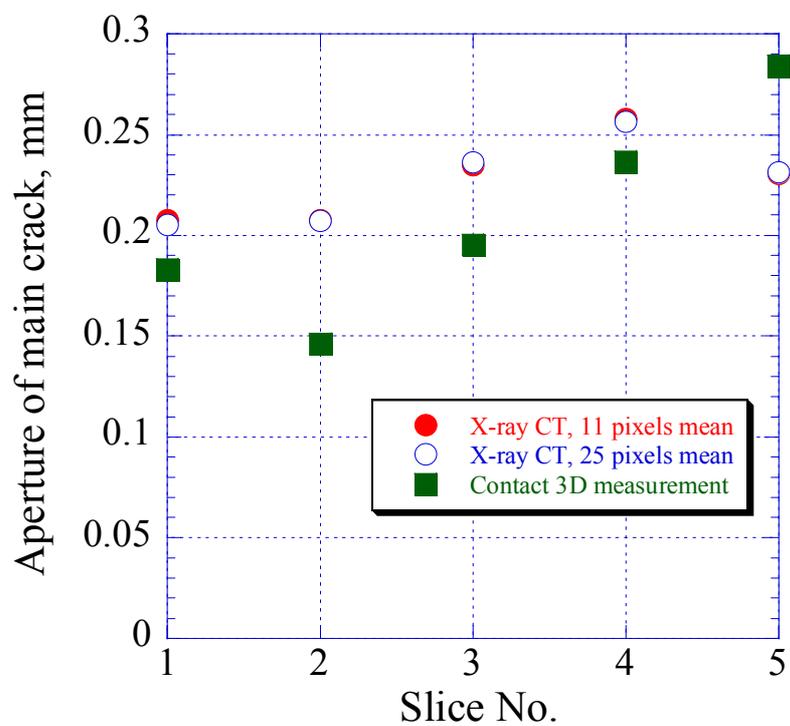


図 7.27 各断面 (Slice1~5) の平均亀裂開口幅

## 8. おわりに

本報では、割裂亀裂を有する花崗岩試料に対して、接触式 3 次元測定器による亀裂表面計測手法を実施し、亀裂の表面形状および開口幅の評価を行った。また同じ花崗岩試料に対して、X線 CT を適用し、画像データに含まれるノイズの特徴とその適切な軽減法について論じるとともに、画像データを用いて亀裂開口幅の評価を行った。本研究で得られた知見をまとめると以下の通りである。

- (1) 対象領域内に複数の亀裂がある場合について、X線 CT 画像データから亀裂開口幅を評価する方法を示した。
- (2) 同一断面において撮影した 5 枚の画像データを用いてスタッキング画像を作成し、シングルスキャン画像と比較した。その結果、スタッキング画像はシングルスキャン画像に比較してより鮮明であることを確認した。さらに、スタッキングにより CT 値のバラツキが小さくなり、ノイズ軽減法として非常に有効であることを示した。
- (3) 亀裂内部を水と空気それぞれで満たした状態で撮影した画像データについて画像間差分を実施した。その結果、岩石マトリクス部分については CT 値の分布は零に近い値を取り、密度の不均質の影響を除去可能であることを示した。さらに、画像間差分により亀裂に関する情報のみを抽出可能であることを示した。
- (4) 上記の画像データを用いて亀裂開口幅の評価を実施した。本研究では移動平均を実施する際の Pixel 数を 11 と 25 とした。その結果、移動平均の幅が局所的な亀裂情報を抽出する際に重要な要素であることが分かった。ただし、平均開口幅に関しては両者の違いがないことを確認した。
- (5) 接触式 3 次元測定器を用いた亀裂表面形状計測による開口幅評価結果と、X線 CT 法による評価結果を比較検討した。その結果、亀裂表面形状は両者の結果は良く一致することが分かった。また、X線 CT 法では破断面を形成する主亀裂以外の亀裂の存在を確認できることを示した。
- (6) 上記(5)の様に平均開口幅について比較検討した。その結果、破断面を形成している主亀裂の亀裂開口幅は X線 CT 法による結果の方がやや大きな値を取る傾向があるものの、ほぼ一致した結果が得られることが分かった。このことから、X線 CT 法が岩石内部の可視化のみならず割裂亀裂のような複雑な形状を呈する亀裂を対象とした開口幅の定量化にも非常に有効であることを示した。

## 参考文献

1. Arthur, J.R.E. : “New techniques to measure new parameters” , Proc. of Eoscoe Material Symp. on Stress-Strain Behavior of soils, Cambridge, pp.340-346 (1971).
2. Verhelst, F., Vervoort, A., de Bosscher, PH., and Marchal, G. : “X-ray computerized tomography, Determination of heterogeneities in rock sample” , Proc. of 8th ISRM Cong. Tokyo, No.1, pp.105-108 (1995).
3. 中野司, 中村光一, 染谷利明, 大塚浩士 : “X 線 CT による岩石内部構造の 3 次元観察－(1)CT 値と物体密度の関係式の決定”, 情報地質, Vol.8, No.4, pp.239-255 (1997).
4. 菅原勝彦, 小島隆輔, 尾原祐三, 佐藤晃, 島田英樹 : “X 線 CT による亀裂開口解析” , 資源と素材, Vol.114, No.12(岩盤工学特集号), pp.881-887 (1998).
5. Cromwell, V., Kortum, D.J. and Bradley, D.J. : “The use of a medical computer tomography (CT) system to observe multi phase flow in porous media” , Soc. of Petroleum Eng., 13098, Soc. Petroleum Eng., Richardson, TX (1984).
6. Coles, M.E., Muegge, E.L. and Sprunt, E.S. : “Application of CAT scanning for oil and gas production research” , IEEE Trans. Nucl. Sci., No.38, pp.510-515 (1991).
7. Sugawara, K., Obara, Y. and Sato, A. : “Visualization of water saturation process in rock by X-rays CT” , '99 Japan-Korea Joint Symposium on Rock Engng. Fukuoka, Japan, pp.503-508 (1999).
8. Sugawara, K., Sato, A., Obara, Y. and Yanagisako, M. : “Measurement of permeability of rock by means of X-ray CT” , Shigen-to-sozai, Vol.115, No.11, pp.803-808 (1999).
9. Sato, A., Kubota, S., Kawaguchi, T., Ezoe, K., and Sugawara, K. : “Analysis of permeation process in rock by means of X-ray” , Proc. of ISRM Int. Symp. Rock Engng. for mountainous regions, Portugal, pp.675-682 (2002).
10. Sugawara, K., Fukahori, D., Iwatani, T. and Kubota, S. : “Analysis of water flow in rock by means of X-ray CT” , Proceedings of GeoX2003, pp.303-314 (2003).
11. Sugawara, K., Fukahori, D., Iwatani, T., Ikutake, T. and Kubota, S. : “Analysis of wetting process of rock by means of X-ray CT” , Proceedings of GeoX2003, pp.283-302 (2003).
12. Otani, J. and Obara, Y. : “X-ray CT for geomaterials –soils, concret,

- rocks” , Balkema, (2003).
13. 廣野哲朗, 横山正, 高橋学, 中嶋悟, 山本由弦, 林為人: “マイクロフォーカス X 線 CT 装置を用いた堆積物・岩石の内部構造の非破壊観察”, 地質学雑誌, Vol.108, No.9, pp.606-609 (2002).
  14. 佐藤晃, 深堀大介, 澤田淳, 菅原勝彦: X 線 CT による不均質材料中の亀裂開口量評価, 資源と素材, Vol.120, No.6-7, pp.365-371 (2004).
  15. William, K. : Pratt, Digital image processing, Jon and Wiley & Sons, Inc., Chapter 12 (1978).