

# X線 CT による亀裂開口幅評価

(核燃料サイクル開発機構 契約業務報告書)

2003年2月

大成建設株式会社

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

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)  
2003

## X線 CT による亀裂開口幅評価

(核燃料サイクル開発機構 契約業務報告書)

下茂道人\*, 文村 賢一\*

尾原 祐三\*\*, 佐藤 晃\*\*, 菅原 勝彦\*\*

### 要 旨

高レベル放射性廃棄物の性能評価の信頼性を向上させるためには、亀裂中の微細な構造や不均質性が地下水の流れや物質移行に及ぼす影響を理解する必要がある。そのためには、亀裂中の開口幅分布を測定する技術を確立することが重要な課題となる。亀裂開口幅測定技術には、①亀裂表面形状から推定する方法、②亀裂を直接観察する方法、③トモグラフィー技術等により非破壊で推定する方法などがある。このうち、③のトモグラフィー技術等により非破壊で亀裂開口幅を推定する方法については、未だ測定手法等に関する十分な知見は得られていないものの、亀裂開口幅を非破壊で推定するため、①、②に比較して、効率性・実用性の観点から有効な手法であると期待される。そこで、本役務契約では、亀裂開口幅を評価する方法の一つとして、非破壊検査の一種である X線 CT を使用した亀裂開口幅測定方法について検討した。

その結果、以下の知見を得た。①管電圧の高い産業用の CT 装置は医療用の装置に比べてノイズの少ない CT 値が得られる。②画像のスタッキングは、ノイズ軽減法として有効である。③新たに提案する移動平均法は、亀裂情報の損失を抑えながら、ノイズ軽減が可能である。④花崗岩試料の測定結果には、鉍物粒子の CT 値のばらつきに依存すると思われるノイズが見られるため、亀裂投影法による開口幅測定には使用できない。⑤画像間差画像を用いる方法を花崗岩試料の測定に適用した結果、CT 値のばらつきが軽減され、亀裂投影法による開口幅測定が可能となった。

-----  
本報告書は、大成建設(株)が、核燃料サイクル開発機構との契約により実施した業務成果に関するものである。

機構担当部課室: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

\*:大成建設(株)

\*\* :熊本大学

## Evaluation of Fracture Aperture using X-Ray CT (Document Prepared by Other Institute, Based on the Contract)

Michito Shimo\*, Kenichi Fumimura\*

Yuzo Obara\*\*, Akira Sato\*\*, Katsuhiko Sugawara\*\*

### abstract

Understanding the influence of small scale structure and its heterogeneity onto flow through rock fractures is important for improving the reliability of performance assessment of Geologic Disposal of High Level Nuclear Waste. An established technique for measuring the fracture aperture profile is required to achieve the above purpose. There are several aperture measuring techniques: (1) estimation of aperture from roughness measurement results, (2) direct measurement of the fracture from rock surface, (3) non-destructive method, such as tomography. Among above, tomography method, which is rather new technique and its applicability to aperture measurement is not well known, is expected to become an effective and feasible approach since the aperture profile can be obtained without destroying the rock specimen. In this work, we investigated problems associated with fracture aperture measurement using X-Ray, then we proposed several approaches to improve measurement accuracy, finally we conducted X-Ray measurements using some of the proposed methods to investigate the feasibility.

The obtained results are as follows: (1) an industrial X-Ray system, having higher X-ray source power gives lower noises in CT-values than medical X-Ray system, (2) stacking is effective for reducing noises, (3) newly proposed moving average is useful in reducing noised with minimum information loss, (4) Fracture Projection Method can not be directly applied to granite specimen because of noises due to heterogeneity of CT-value for different minerals, (5) Differential Image Method can reduce the noises in CT-values and enables the application of Fracture Projection Method for aperture measurement.

-----  
Work performed by Taisei Corporation under contract with Japan Nuclear Cycle Development Institute

JNC Liaison: System Analysis Group, Japan Nuclear Cycle Development Institute, Tokai Works

\*Taisei Corporation

\*\*Kumamoto University

## 目 次

1. はじめに	1
2. X線CTを用いた亀裂開口幅評価手法の検討	2
2.1 X線CTスキャナーの性能（管電圧）とノイズの関係	3
2.2 スタッキング法	9
2.2.1 基礎式	9
2.2.2 花崗岩試料への適用	10
2.3 移動平均法	16
2.3.1 基礎式	16
2.3.2 花崗岩試料への適用	17
2.4 亀裂開口量評価のためのノイズ軽減法の検討	18
3. 花崗岩試料を用いた亀裂開口幅測定手法の検討	26
3.1 亀裂投影法による花崗岩内の亀裂開口量評価	26
3.1.1 岩石試料	26
3.1.2 X線CT撮影	26
3.1.3 亀裂投影法の基礎式	26
3.1.4 花崗岩試料への亀裂投影法の適用性の検討	33
3.2 画像間差分法による亀裂開口量の評価	41
3.2.1 画像間差分法の原理	41
3.2.2 画像間差分法による亀裂開口量の評価式	41
3.2.3 画像間差分法の適用	45
(1) 試料および実験方法	45
(2) アルミニウム試料の結果	46
(3) 花崗岩試料の結果	47
4. おわりに	73

## 目 次

1. はじめに	1
2. X線 CT を用いた亀裂開口幅評価手法の検討	
Fig.2.1 花崗岩試料と座標	4
Fig.2.2 産業用 X線 CT スキャナーで撮影した花崗岩資料の原画像例 (シングルスキャン)	5
Fig.2.3 医療用 X線 CT スキャナーで撮影した花崗岩試料の原画像例 (シングルスキャン)	6
Fig.2.4(a) 産業用 X線 CT スキャナーによる CT 値の分布	7
Fig.2.4(b) 医療用 X線 CT スキャナーによる CT 値の分布	8
Fig.2.5 物体内の 3次元領域	11
Fig.2.6 5 画像のスタッキングにより求めた花崗岩試料の CT 画像	12
Fig.2.7 スタッキング法 ( $n=5$ ) を適用した場合の測線 I-I' の CT 値の分布	13
Fig.2.8(a) $n=1$ (シングルスキャン) における測線 I-I' の CT 値の頻度分布	14
Fig.2.8(b) $n=5$ (スタッキング) における測線 I-I' の CT 値の頻度分布	15
Fig.2.9 撮影断面設定位置と断層厚さとの関係	19
Fig.2.10(a) 移動平均後の CT 画像 ( $\bar{P}=\bar{W}=13, \bar{H}=3$ )	20
Fig.2.10(b) 移動平均後の CT 画像 ( $\bar{P}=\bar{W}=25, \bar{H}=3$ )	21
Fig.2.11(a) 移動平均後の測線 I-I' の CT 値の分布 ( $\bar{P}=\bar{W}=13, \bar{H}=3$ )	22
Fig.2.11(b) 移動平均後の測線 I-I' の CT 値の分布 ( $\bar{P}=\bar{W}=13, \bar{H}=3$ )	23
Fig.2.12 移動平均 ( $\bar{P}=1, \bar{W}=25, \bar{H}=3$ ) 後の CT 画像	24
Fig.2.13 移動平均 ( $\bar{P}=1, \bar{W}=25, \bar{H}=3$ ) 後の測線 I-I' の CT 値分布	25
3. 花崗岩試料を用いた亀裂開口幅測定手法の検討	
Fig.3.1 撮影に用いた花崗岩試料	29
Fig.3.2 X線 CT 画像の例と測線の配置 (花崗岩試料)	30
Fig.3.3 亀裂を含む解析領域における基準域と降下域	31

Fig.3.4	基準域と降下域の配置	32
Fig.3.5	アルミニウムの半月板試料模式図	35
Fig.3.6	アルミニウムの半月板を用いた模擬亀裂の X 線 CT 画像 (亀裂内：空気)	36
Fig.3.7	測線 I の CT 値分布 (アルミニウム, 亀裂内：空気)	37
Fig.3.8	測線 I における CT 値分布 (花崗岩)	38
Fig.3.9	測線 II における CT 値分布 (花崗岩)	39
Fig.3.10	測線 III における CT 値分布 (花崗岩)	40
Fig.3.11	物質内の亀裂と座標軸	44
Fig.3.12	半月板試料模式図	48
Fig.3.13(a)	アルミニウムを用いた模擬亀裂の X 線 CT 画像 (亀裂内：KI 水溶液)	49
Fig.3.13(b)	アルミニウムを用いた模擬亀裂の X 線 CT 画像 (亀裂内：空気)	50
Fig.3.13(c)	アルミニウムを用いた模擬亀裂の X 線 CT 画像 (差画像：{画像(a)- {画像(b)}})	51
Fig.3.14(a)	測線 I における CT 値分布 (アルミニウム, 亀裂内：KI 水溶液)	52
Fig.3.14(b)	測線 I における CT 値分布 (アルミニウム, 亀裂内：空気)	53
Fig.3.14(c)	測線 I における CT 値分布 (アルミニウム, 差画像：{ 画像 (a) }-{ 画像 (b) })	54
Fig.3.15(a)	測線 II における CT 値分布 (アルミニウム , 亀裂内：KI 水溶液)	55
Fig.3.15(b)	測線 II における CT 値分布 (アルミニウム, 亀裂内：空気)	56
Fig.3.15(c)	測線 II における CT 値分布 (アルミニウム, 差画像：{ 画像 (a) }-{ 画像 (b) })	57
Fig.3.16(a)	測線 III における CT 値分布 (アルミニウム , 亀裂内：KI 水溶液)	58
Fig.3.16(b)	測線 III における CT 値分布 (アルミニウム, 亀裂内：空気)	59
Fig.3.16(c)	測線 III における CT 値分布 (アルミニウム, 差画像：{ 画像 (a) }-{ 画像 (b) })	60
Fig.3.17(a)	花崗岩を用いた模擬亀裂の X 線 CT 画像 (亀裂内：水)	61

Fig.3.17(b)	花崗岩を用いた模擬亀裂の X 線 CT 画像 (亀裂内：空気)	.....62
Fig.3.17(c)	花崗岩を用いた模擬亀裂の X 線 CT 画像 (差画像：{ 画像 (a) }-{ 画像 (b) })	.....63
Fig.3.18(a)	測線 I における CT 値分布 (花崗岩, 亀裂内：水)	.....64
Fig.3.18(b)	測線 I における CT 値分布 (花崗岩, 亀裂内：空気)	.....65
Fig.3.18(c)	測線 I における CT 値分布 (花崗岩, 差画像：{ 画像 (a) }-{ 画像 (b) })	.....66
Fig.3.19(a)	測線 II における CT 値分布 (花崗岩, 亀裂内：水)	.....67
Fig.3.19(b)	測線 II における CT 値分布 (花崗岩, 亀裂内：空気)	.....68
Fig.3.19(c)	測線 II における CT 値分布 (花崗岩, 差画像：{ 画像 (a) }-{ 画像 (b) })	.....69
Fig.3.20(a)	測線 III における CT 値分布 (花崗岩, 亀裂内：水)	.....70
Fig.3.20(b)	測線 III における CT 値分布 (花崗岩, 亀裂内：空気)	.....71
Fig.3.20(c)	測線 III における CT 値分布 花崗岩, 差画像：{ 画像 (a) }-{ 画像 (b) })	.....72



## 1. はじめに

高レベル放射性廃棄物の性能評価の信頼性を向上させるためには、亀裂中の微細な構造や不均質性が地下水の流れや物質移行に及ぼす影響を理解する必要がある。そのためには、亀裂中の開口幅分布を測定する技術を確立することが重要な課題となる。

現在用いられている亀裂開口幅測定法の多くは、亀裂面を一旦剥がして測定するため、測定した試料は、透水試験等の試験に供することはできない。

非破壊による開口幅の測定が可能となれば、開口幅分布が既知の試料を用いて種々の試験が行えるため、亀裂構造と地下水流れや物質移行特性との関連についての詳細な検討が可能となる。非破壊検査の一手法に、X線CTがある。X線CTは医療分野で発展した技術であるが、最近では岩石への応用も進んでいる。しかし、測定分解能が対象としている亀裂開口幅とほぼ同程度であることや造岩鉱物の多様性などの不均質性に起因したノイズが大きいことなどの技術的課題が多く、結晶質岩中の亀裂の開口幅を測定評価する手法は確立されているとは言えない。

そこで、本業務では、①X線CTを用いた亀裂開口幅評価手法の検討、②上記評価手法に基づく亀裂開口幅の評価、を実施した。

2章においては、岩石の亀裂開口幅の測定手法や測定データの評価手法について述べる。岩石内の亀裂の分布状況や開口量の分布をX線CT画像から分析する方法として亀裂投影法が提案されているが、この方法は砂岩、安山岩などの比較的均質・等方な岩石に有効である。しかし、花崗岩のように、異方性を有し、さらに、長石、石英、雲母などCT値の異なる鉱物粒子で構成されている岩石では、等方・均質な材料に比較してCT値のバラツキは大きいと予想される。したがって、亀裂投影法を適用するための前処理として、X線CT画像のノイズの除去処理を行う必要がある。そこで、はじめに、X線CT装置の性能、特に、管電圧の違いによるCT画像のノイズへの影響について花崗岩試料を用いた測定結果をもとに検討する。また、得られた画像のノイズ低減方法として、スタッキングや移動平均法について検討する。移動平均法については、亀裂情報の損失をできるだけ抑えながら、ノイズ低減を図る新たな手法を提案する。

3章においては、サイクル機構から貸与した亀裂入り花崗岩試料、アルミニウム試料および新たに購入した花崗岩試料を用いて、さらに詳細な亀裂開口幅の評価法について述べる。特に、亀裂内を充填する物質を変えて撮影した2枚のCT測定画像の差を取ることで、CT値のばらつきやキャッピング現象等の影響を取り除く「画像差分法」について詳述する。また、同手法を、アルミニウム試料および花崗岩試料の撮影画像を用いて、同手法の適用性を検討する。

4章では、X線CTによる亀裂開口幅測定における今後の課題について述べる。

### (実施場所)

大成建設技術センター：〒245-0051 神奈川県横浜市戸塚区名瀬町 344-1  
熊本大学：〒860-8555 熊本市黒髪2丁目 39番1号

## 2. X線 CT を用いた亀裂開口幅評価手法の検討

一般に、均質・等方な物質を撮影した X 線 CT 画像でもノイズが発生し、CT 値はばらつくことが知られている。したがって、X 線 CT データを用いた物理量の分析にはノイズ処理が必要不可欠である。

ノイズ発生の原因は種々あるが、中でも撮影に用いる X 線 CT スキャナーの基本性能、とくに、X 線管電圧に依存している。そこでまず、熊大所有の産業用 X 線 CT スキャナーおよび JNC 所有の医療用 X 線 CT スキャナーを用いて岩石試料を撮影した画像をもとに、ノイズと X 線管電圧との関係について検討する。

つぎに、画像処理による X 線 CT データのノイズ軽減法として 2 つの方法を取り上げ、これらの特徴について述べる。具体的にはまず、同質の画像を重ね合わせる方法である画像スタッキング法について述べ、花崗岩を撮影した画像に適用した結果について考察する。つぎに、画像内にある領域を設定し当該領域内の平均値を順次求めていく方法である移動平均法について述べ、花崗岩を撮影した画像に適用した結果について検討する。最後に、これらのノイズ軽減法の適用結果を基に、亀裂開口量評価に適切なノイズ軽減法について考察する。

## 2.1 X線 CT スキャナーの性能（管電圧）とノイズの関係

撮影対象は Fig.2.1 に示す 100mm×100mm×100mm の立方体花崗岩（サイクル機構提供）である。この花崗岩試料には人工亀裂が作成されている。Fig.2.1 中の固定用岩石は透水試験時に取り付けられたものである。透水試験実施後、亀裂面の保護を目的として亀裂内部は樹脂で充填されている。なお、結果表示のために、Fig.2.1 に示すように試料の角を原点とする座標を設定する。

$z = -66\text{mm}$  の  $xy$  平面における X 線 CT 画像（シングルスキャン）を Fig.2.2 および Fig.2.3 に示す。Fig.2.2 は産業用 X 線 CT スキャナー（X 線管電圧：300kV，熊大所有）で撮影した画像であり、Fig.2.3 は医療用 X 線 CT スキャナー（X 線管電圧：140kV，JNC 所有）で撮影を実施した結果であり、Fig.2.3 についてはデータ容量の制限により、試料の右半分の画像を示す。いずれの場合も花崗岩試料内部の亀裂の存在を確認することができる。なお、撮影箇所については同じ位置を設定したが、亀裂の形状などがわずかに異なっているので、完全に同じ位置ではなかったと思われる。

Fig.2.2 および Fig.2.3 の  $y$  の値が同じ位置の測線 I-I' 上での CT 値の分布を Fig.2.4 に示す。Fig.2.4 (a) は産業用 X 線 CT スキャナーにより得られた結果であり、Fig.2.4 (b) は同じく医療用 X 線 CT スキャナーにより得られた結果である。なお、一般に撮影された画像の CT 値は空気を -1000，水を 0 と出力されるが、本報告では、出力されたの値に 1000 を加え、空気を 0，水を 1,000 と定義した。以下に示す CT 値はすべてこの定義にしたがっていることに注意されたい。X 線管の電圧が高い場合の Fig.2.4 (a) の CT 値は亀裂を除く領域で 2000～2500 に分布している。一方、X 線管の電圧が低い場合の Fig.2.4 (b) においてのその分布は、平均的には 2500～3000 であるが、分布の範囲は(a)に比較して大きくなっている。したがって、X 線管電圧の違いにより CT 値の平均やそのバラツキの範囲が異なることを示している。

以上要するに、X 線管電圧の高い産業用 X 線 CT スキャナーを用いた場合は CT 値のバラツキを小さくすることができ、精度の高い分析に有利であることを示している。以下に示すノイズ軽減処理では、熊大所有の産業用 X 線 CT スキャナーによる撮影画像を用いる。

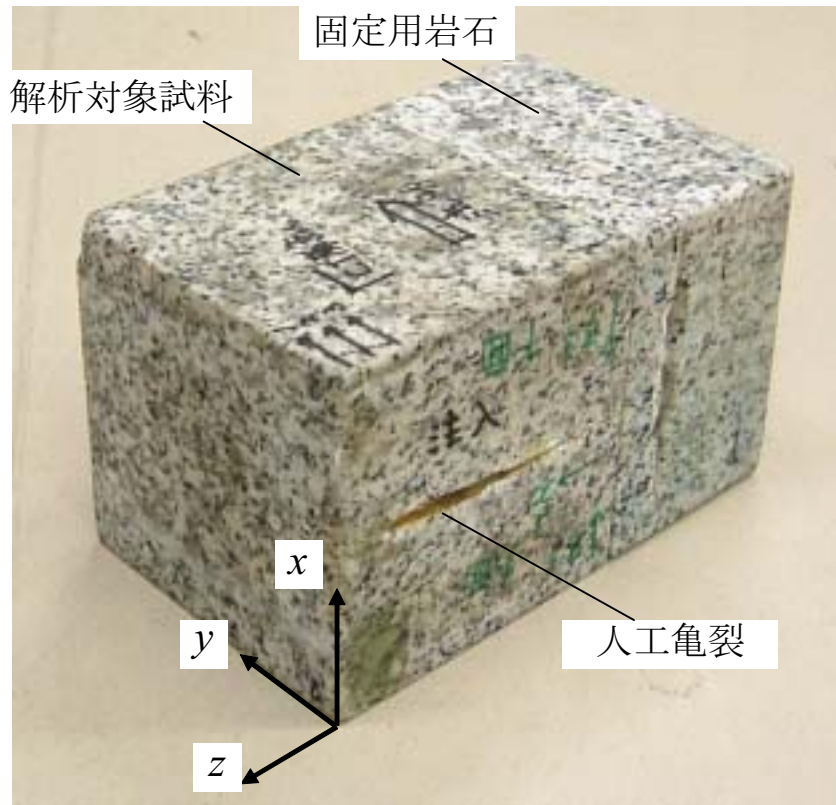


Fig.2.1 花崗岩試料と座標

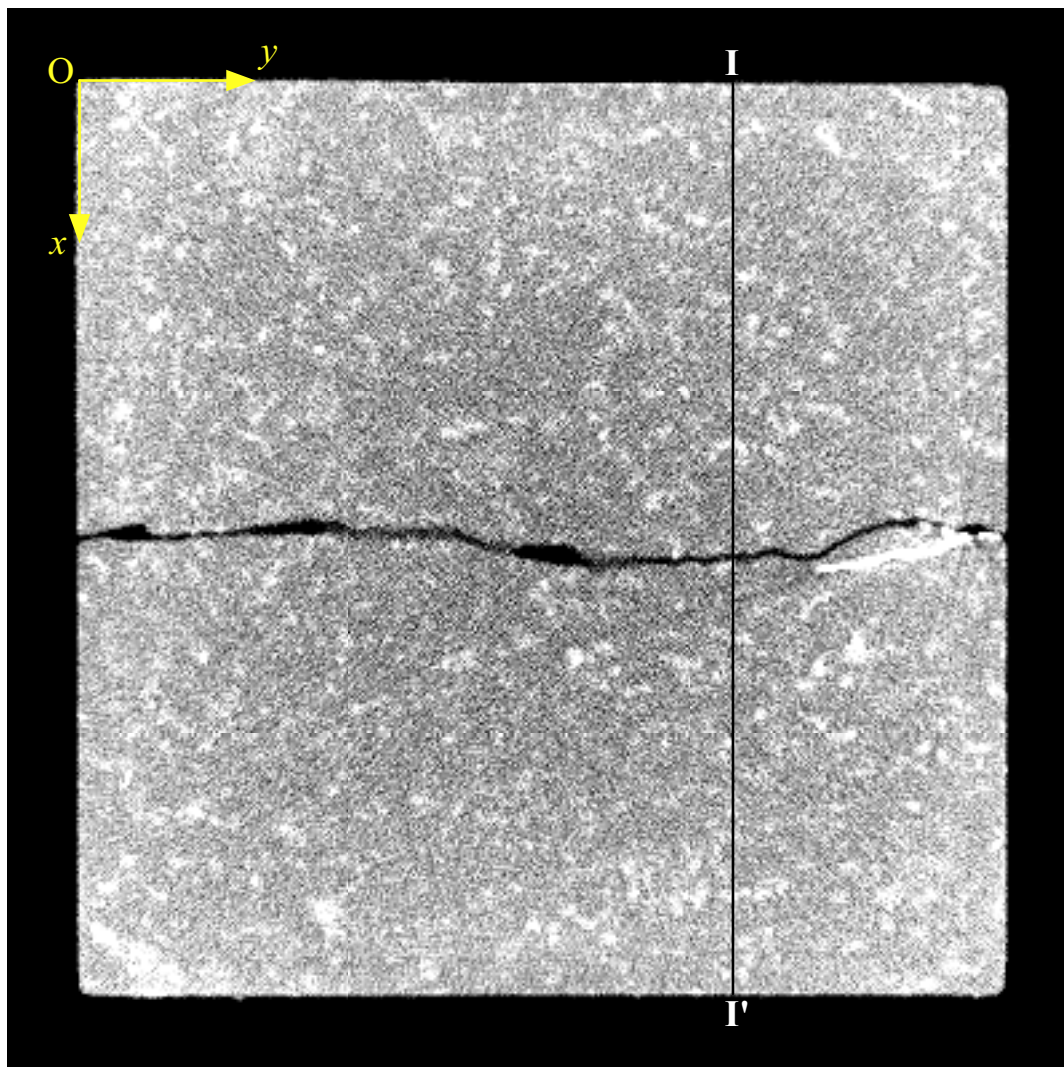


Fig.2.2 産業用 X 線 CT スキャナーで撮影した花崗岩試料の原画像例（シングルスキャン）

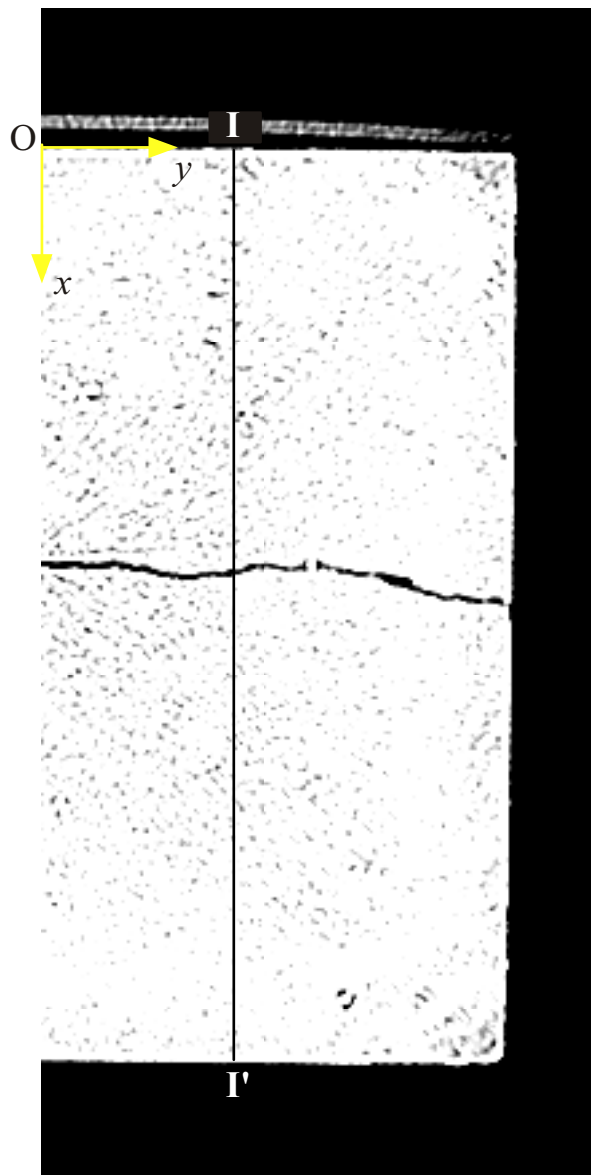


Fig.2.3 医療用 X 線 CT スキャナーで撮影した花崗岩試料の原画像例  
(シングルスキャン)

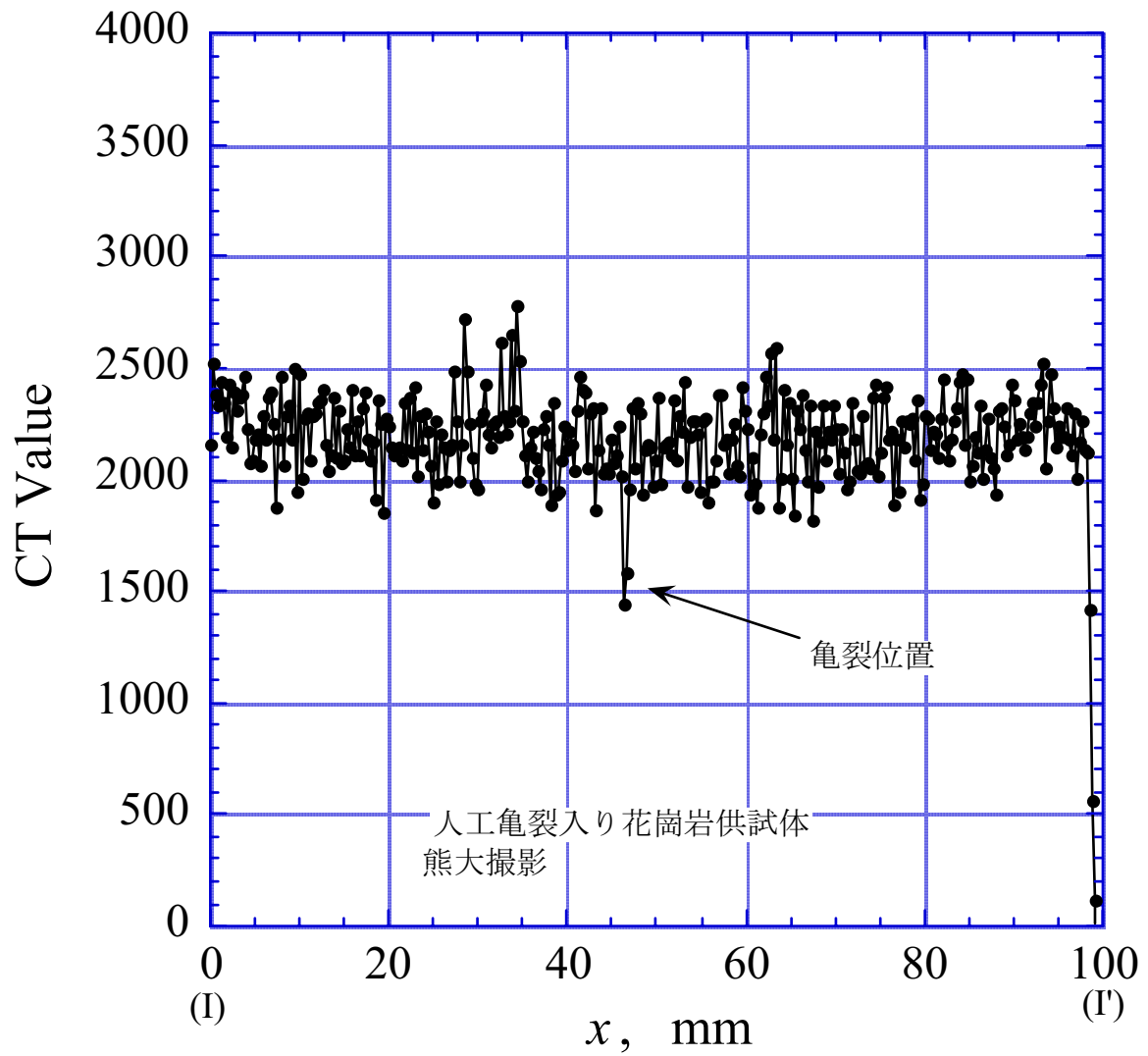


Fig.2.4 (a) 産業用 X 線 CT スキャナーによる CT 値の分布

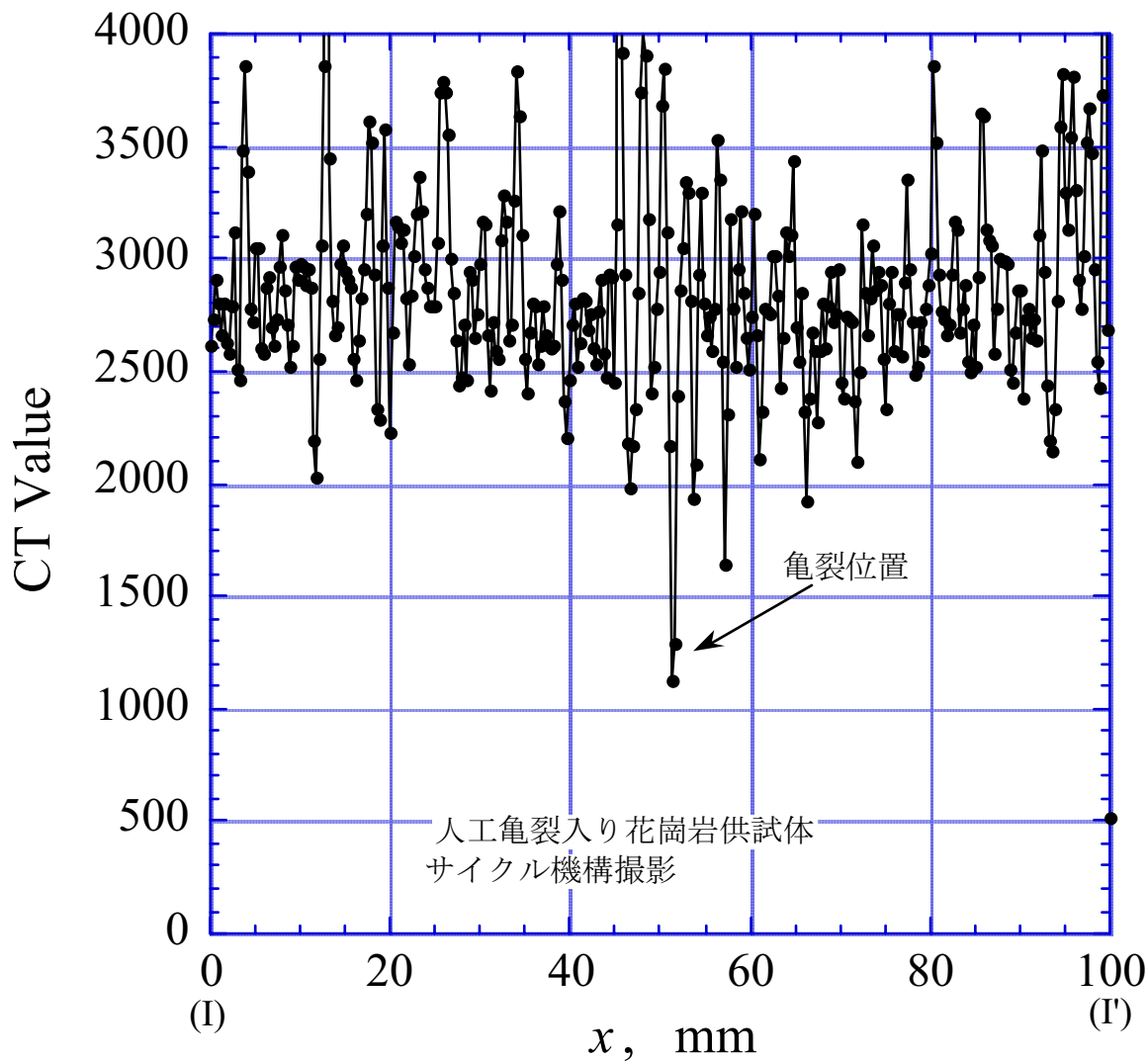


Fig.2.4 (b) 医療用 X 線 CT スキャナーによる CT 値の分布



## 2.2 スタッキング法

### 2.2.1 基礎式

ノイズ軽減法として用いられている中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、Fig.2.5 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  $P$ 、 $y'$  軸方向長さを  $W$ 、 $z'$  軸方向長さを  $H$  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  $\bar{P}$ 、 $y'$  軸方向の画素数を  $\bar{W}$ 、 $z'$  軸方向の画素数を  $\bar{H}$  と表記すると、これらは次式で与えられる。

$$\bar{P} = \frac{P}{d}, \bar{W} = \frac{W}{d}, \bar{H} = \frac{H}{h} \quad (2.1)$$

つぎに、画素の番地として、 $x'$  軸方向の画素番号  $i=1, 2, \dots, \bar{P}$ 、 $y'$  軸方向の画素番号  $j=1, 2, \dots, \bar{W}$ 、 $z'$  軸方向の画素番号  $k=1, 2, \dots, \bar{H}$  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、

$$f_l(i, j, k) = f^0(i, j, k) + \Delta f_l(i, j, k) \quad (2.2)$$

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 (2.2) はつぎのようになる。

$$f^*(i, j, k) = f^0(i, j, k) + \frac{\sum_l^n \Delta f_l(i, j, k)}{n} \quad (2.3)$$

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、

$$\sum_i^n \Delta f_i(i, j, k) \approx 0 \quad (n \rightarrow \infty) \quad (2.4)$$

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。

### 2.2.2 花崗岩試料への適用

Fig.2.1 示した花崗岩試料の  $z = -66\text{mm}$  の位置の同一平面において、同一条件で 5 回の撮影を行い、 $n=5$  の場合について式 (2.3) で示したスタッキング処理を行った。その結果を Fig.2.6 に示す。Fig.2.2 に示した画像 ( $n=1$ ) と比較すると、画像の濃淡分布が鮮明に表現されていることがわかる。

つぎに、Fig.2.6 の測線 I-I' における CT 値分布を Fig.2.7 に示す。ここで、Fig.2.6 の測線 I-I' は Fig.2.2 の測線 I-I' と同じ位置である。 $n=1$  のときの同じ測線の CT 値分布は Fig.2.4(a) に示されており、それと比較すると CT 値のバラツキは小さくなり、亀裂位置における CT 値の減少が明瞭になっている。

そこで、Fig.2.4(a) および Fig.2.7 における CT 値の頻度分布を求めた結果を Fig.2.8(a) および (b) に示す。図の横軸は、岩石試料部分での平均  $\bar{f}$  値と各点の CT 値  $f$  との差である。両者ともに CT 値の差の分布は正規分布に従っていると考えられるので、標準偏差  $\sigma$  を求めると、 $n=1$  で 178、 $n=5$  で 120 となり、5 回のスタッキングで標準偏差は約  $2/3$  となっている。したがって、スタッキング数  $n$  を可能な限り増やすことができれば、花崗岩中の構成鉱物の分布に従った真の CT 値の分布が得られると考えられる。

以上のように、画像のスタッキングはノイズ軽減法として有効である。しかし、スタッキングを実施する場合には同一断面の画像を複数回撮影することが必要となり、時間的あるいは経済的に負担が大きくなる。このため、現実的には  $z$  方向にわずかつ撮影断面を移動させながら、1 断面について 1 回の撮影を行い、近接する断面画像を同一断面の画像とみなしてスタッキング法を適用することが望ましいと考えられる。以下では、このようなスタッキング操作を全てスタッキング法と呼ぶこととする。

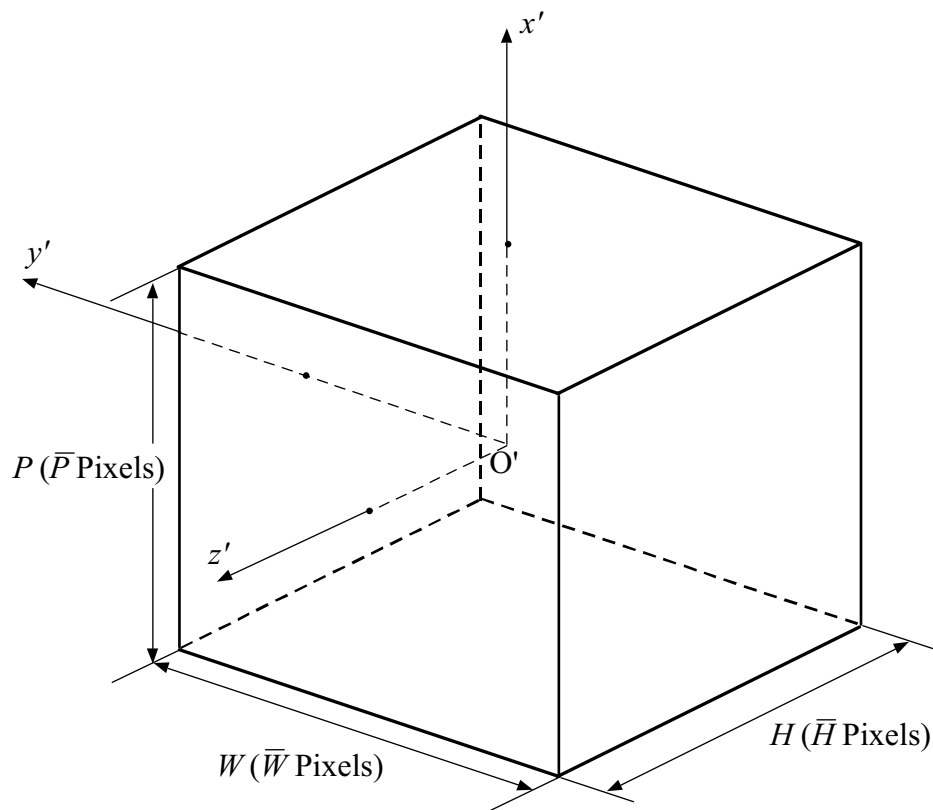


Fig.2.5 物体内の3次元領域

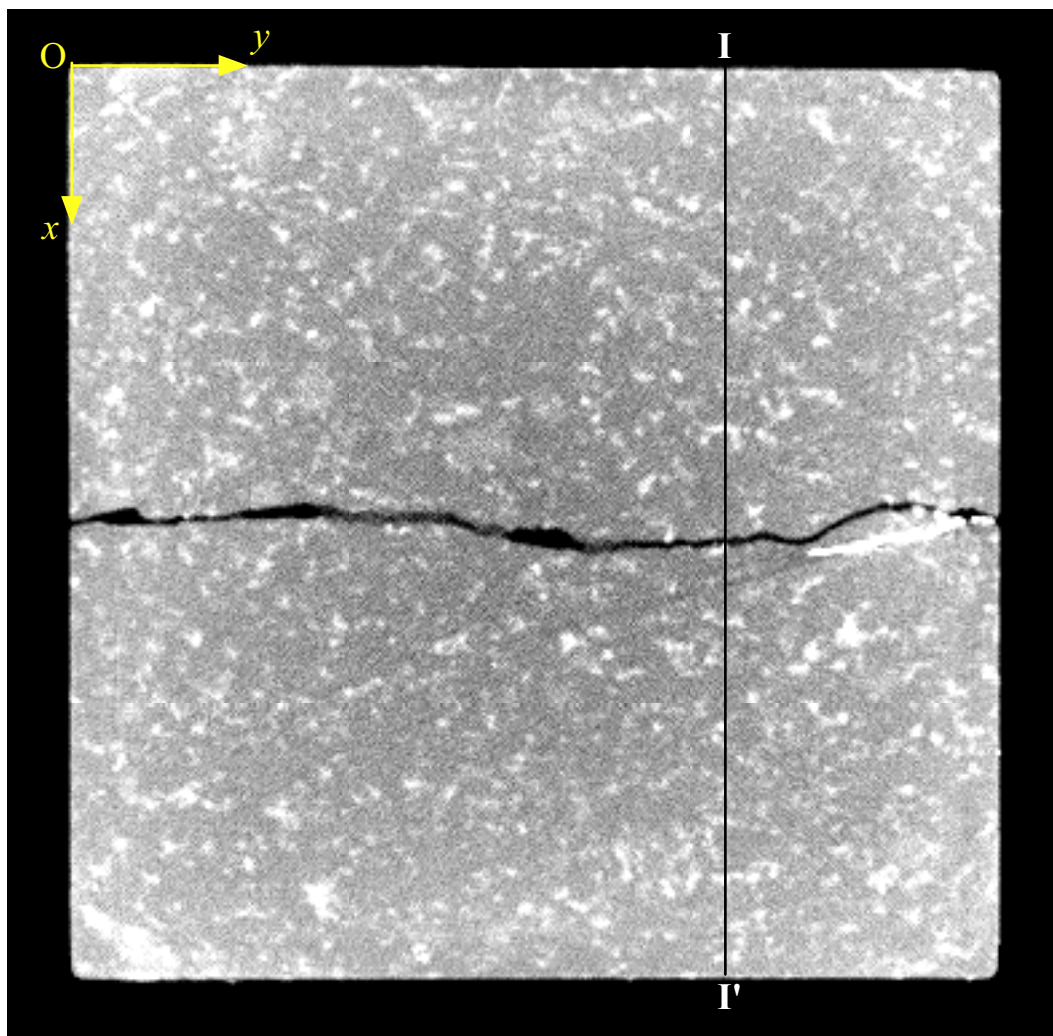


Fig.2.6 5画像のスタッキングにより求めた花崗岩試料のCT画像

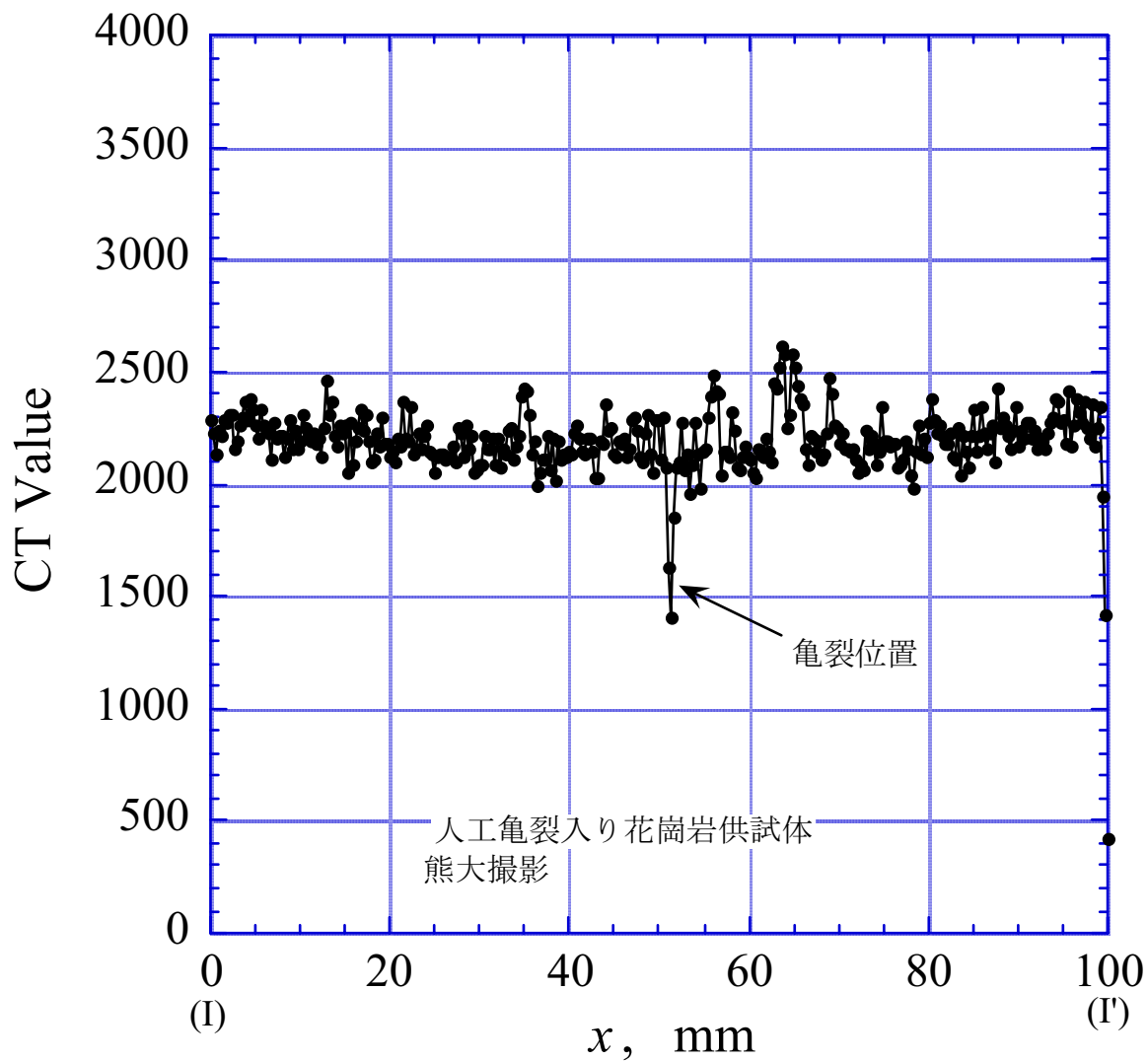


Fig.2.7 スタッキング法 ( $n=5$ ) を適用した場合の測線 I-I' の CT 値の分布

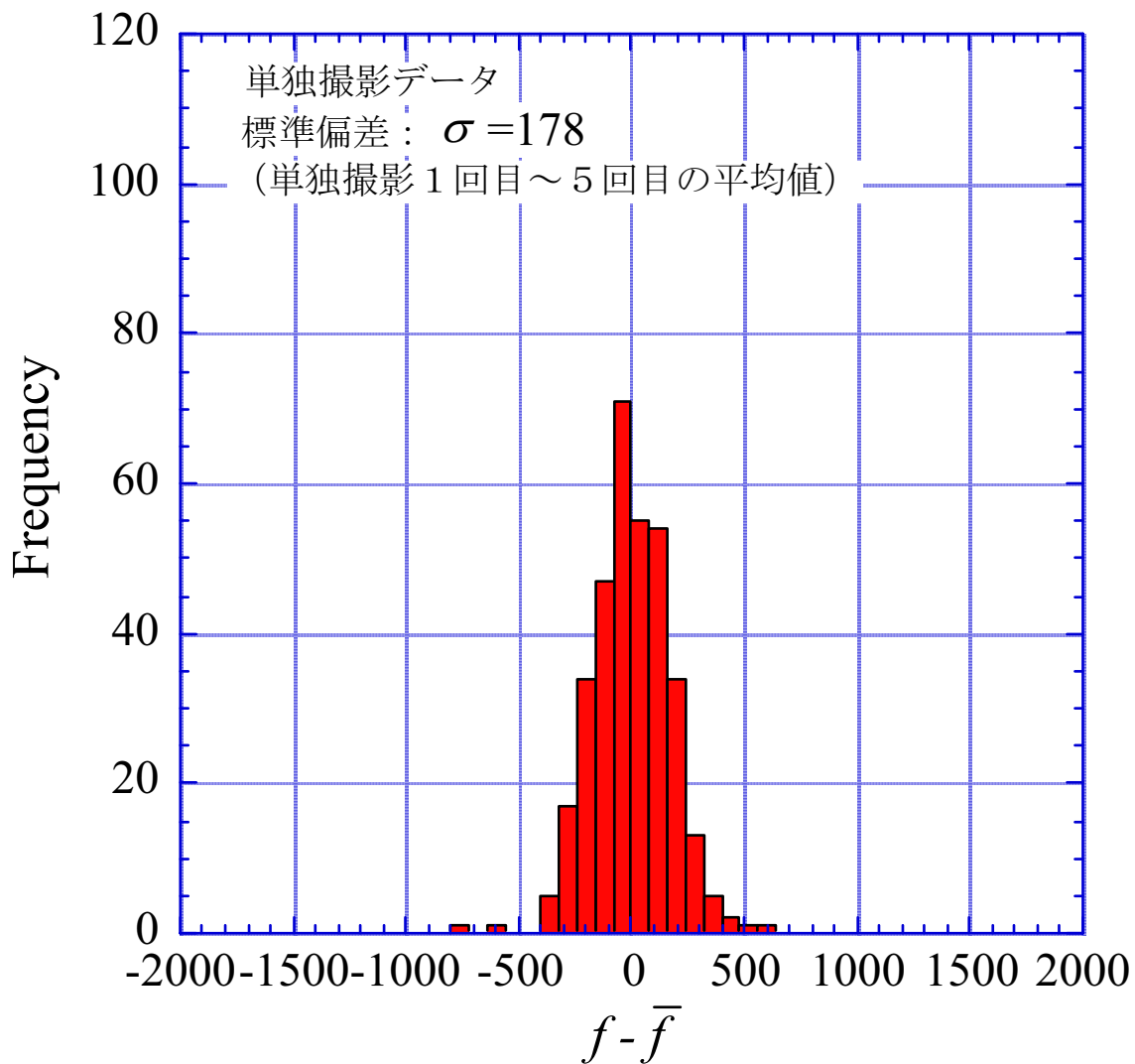


Fig.2.8 (a)  $n=1$  (シングルスキャン) における測線 I-I' の CT 値の頻度分布

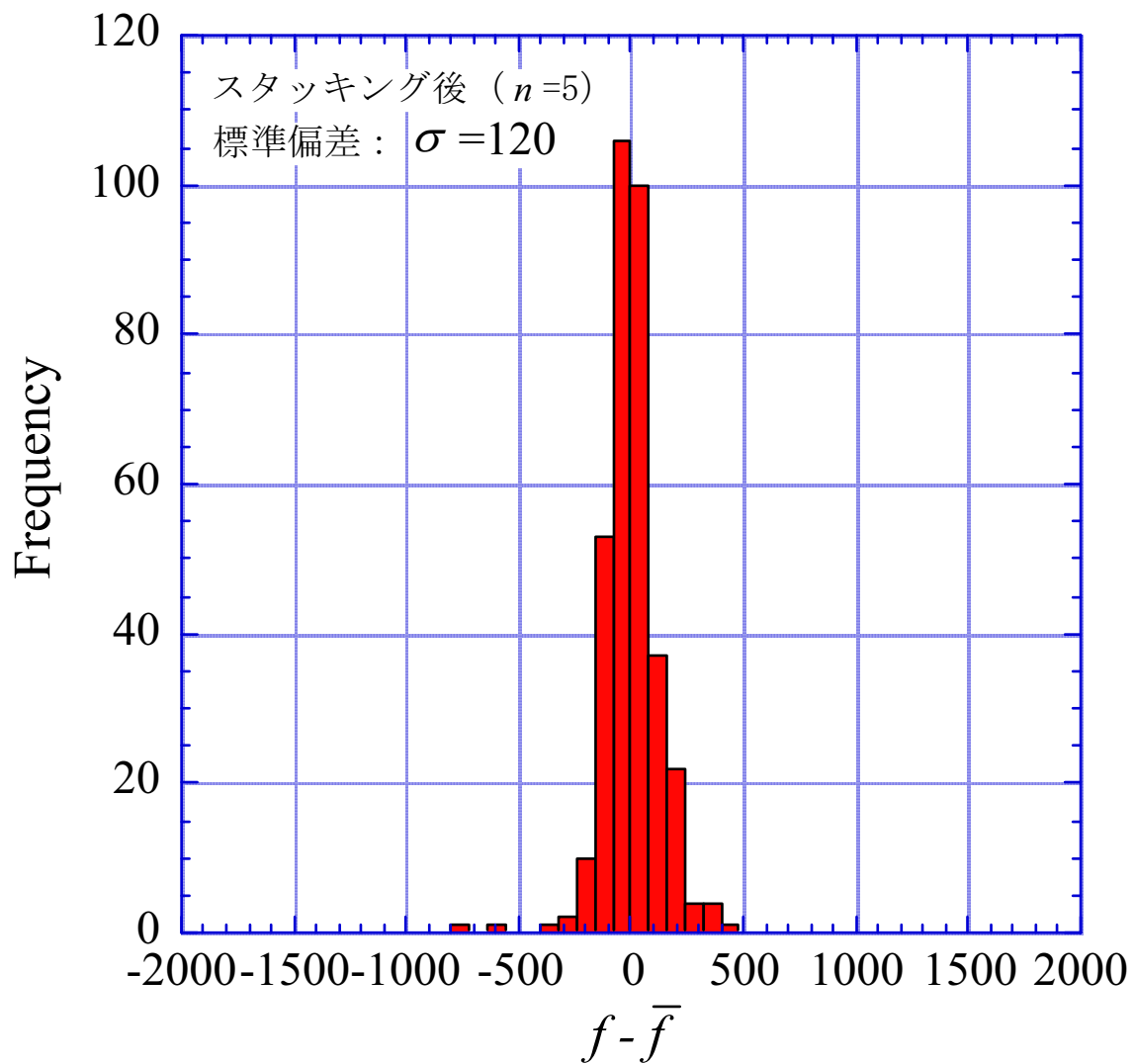


Fig.2.8 (b)  $n=5$  (スタッキング) における測線 I-I' の CT 値の頻度分布

## 2.3 移動平均法

### 2.3.1 基礎式

まず, Fig.2.5 に示した直方体領域を考え, 番地  $(i, j, k)$  での CT 値を  $f(i, j, k)$  とする。ここで, この直方体領域の平均 CT 値  $f_v$  は次式で与えられる。

$$f_v = \frac{1}{PWH} \sum_i \sum_j \sum_k f(i, j, k) \quad (2.5)$$

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>1)</sup>という。この方法では, 領域の大きさ  $(P, W, H)$  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 (2.5) 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>2)</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。

式 (2.5) を用いて移動平均法を適用する場合は 3 次元データの処理となる。そこでまず, 取り扱いを容易とするために, 3 次元画像データをスタッキングし, 2 次元画像データとする。すなわち,  $z$  方向にわずかつつ移動させて撮影した  $\bar{H}$  枚の画像にスタッキング法を適用する。つまり, 式 (2.5) において  $k$  方向について  $\bar{H}$  枚の画像のスタッキングを行うと,

$$f_s(i, j) = \frac{1}{\bar{H}} \sum_k^{\bar{H}} f(i, j, k) \quad (2.6)$$

となる。この操作によって CT 値  $f_s(i, j)$  の 2 次元画像を作成する。

つぎに,  $f_s(i, j)$  を用いて式 (2.5) で示した単純平均化を実施すると,

$$f_v = \frac{1}{P\bar{W}} \sum_i^{\bar{P}} \sum_j^{\bar{W}} f_s(i, j) \quad (2.7)$$

となる。



### 2.3.2 花崗岩試料への適用

Fig.2.1 に示した花崗岩試料の画像に対して、移動平均法を適用した結果について述べる。

まず、 $z=-65\text{mm}$ ,  $-66\text{mm}$ ,  $-67\text{mm}$  の位置で撮影を行った3枚 ( $\bar{H}=3$ ) の画像のスタッキングを行った。撮影はX線断層厚さ  $h=2\text{mm}$  で  $z$  軸方向に  $1\text{mm}$  ピッチで行われた。この時の撮影断面設定位置と断層厚さとの関係を Fig.2.9 に示す。設定位置  $z_1$ ,  $z_2$ ,  $z_3$  における撮影断面はそれぞれ  $1\text{mm}$  ずつ重なり合っているため、 $z$  方向には  $4\text{mm}$  の区間での平均値となっている。つぎに、得られた2次元画像に対して、 $x$  軸および  $y$  軸方向について  $\bar{P}=\bar{W}=13$  ( $P=W=3.81\text{mm}$ ) および  $\bar{P}=\bar{W}=25$  ( $P=W=7.33\text{mm}$ ) の2つの領域を定め、それぞれの領域の移動平均を求めた。

2種類の大きさの領域にを用いた移動平均法を実施した結果を Fig.2.10(a)および(b)に示す。Fig.2.2 と比較すると、鮮明さが減少する。また、単純平均化を実施する領域が大きいくほど画像としてはぼやけたものになり、亀裂の判別が困難になっていくことがわかる。

つぎに、Fig.2.10 の測線 I-I' の CT 値分布を Fig.2.11 に示す。測線 I-I' は Fig.2.2 の測線 I-I' と同じ位置にある。シングルスキャンの CT 値分布を示した Fig.2.4 (a) に比較すると、CT 値のバラツキは小さくなるが、領域が大きくなるほど亀裂位置を判別するのが困難となっていることがわかる。このように、移動平均法を用いるとノイズは軽減されるが、局所的な CT 値の情報は平均化され、知りたい情報までも除去されることとなる。したがって、解析対象を考慮した適切な領域を設定する必要がある。

## 2.4 亀裂開口量評価のためのノイズ軽減法の検討

画像スタッキング法はノイズ軽減法として有効であることが明らかとなった。しかし、充分な断面数を撮影するためには経済的および時間的な負担が大きいので、適用は特殊な場合に限られるであろう。

一方、亀裂を有する断面の画像データに移動平均法を適用した場合、ノイズは軽減されるものの亀裂に関する情報も平均化される。これは、Fig.2.2 に示すように画像上で亀裂と判別できる開口幅は3～4画素分に対して、亀裂の開口方向を考慮せずに13画素あるいは25画素のように一律にある領域について平均化を実施したためである。

そこで、亀裂を分析のためにつきのような移動平均法を導入する。すなわち、スタッキングした2次元画像に、亀裂面にほぼ並行であるy軸方向、画素の番地で言い換えればj方向についてのみの1次元の移動平均を行う。すなわち、

$$f_v = \frac{1}{\bar{W}} \sum_j^{\bar{W}} f_s(i, j) \quad (2.8)$$

である。

上式を、前述と同様に $z=-65\text{mm}$ ,  $-66\text{mm}$ ,  $-67\text{mm}$ の位置で撮影を行った3枚( $\bar{H}=3$ )の画像のスタッキングを行った画像に適用した。すなわち、y軸方向について25画素( $\bar{W}=25$ )の移動平均を実施した。その結果をFig.2.12に示す。亀裂面は必ずしもy軸と平行ではないので、上述の移動平均により亀裂の輪郭がぼやけているが、Fig.2.10で示した画像に比較すると亀裂の様子を判別しやすい。

つぎに、Fig.2.12の測線I-I'のCT値分布をFig.2.13に示す。岩石部分においてはCT値のバラツキが小さくなっており、上述の移動平均によりノイズが充分軽減されていることがわかる。この分布は、 $n=5$ のスタッキング法を適用したFig.2.7と比較してもバラツキは小さくなり、また、亀裂位置においてはCT値の減少が顕著に現れている。したがって、亀裂開口量の分析を行う場合には、移動平均の式としては式(2.8)を適用することが最適であると結論される。

以下での検討では、式(2.8)で表される移動平均法を用いることとする。

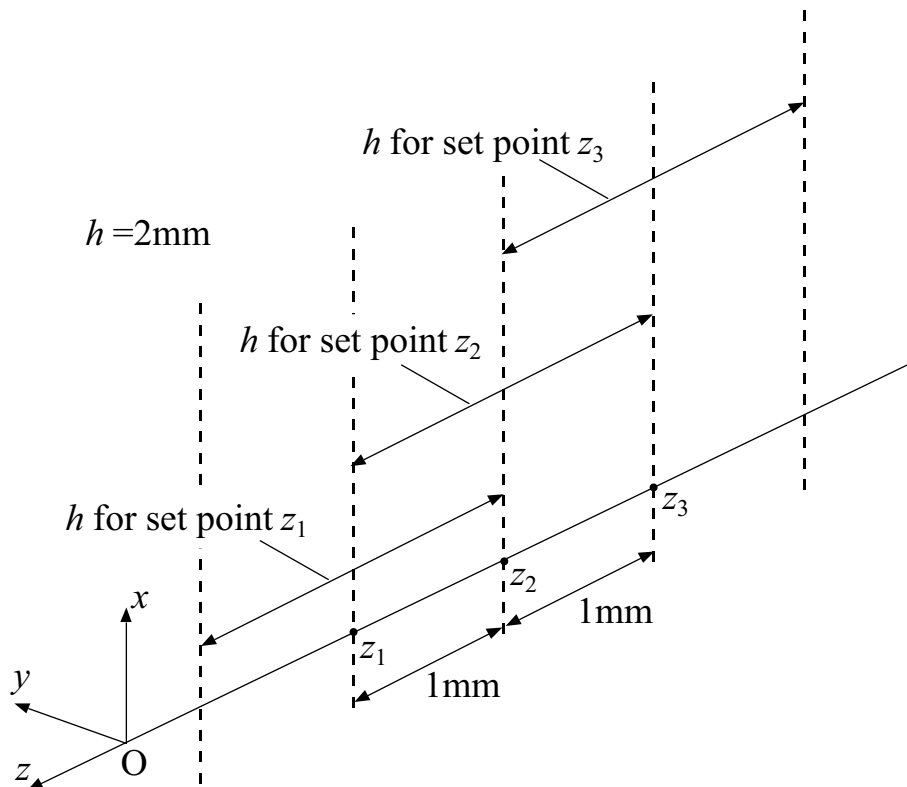


Fig.2.9 撮影断面設定位置と断層厚さとの関係

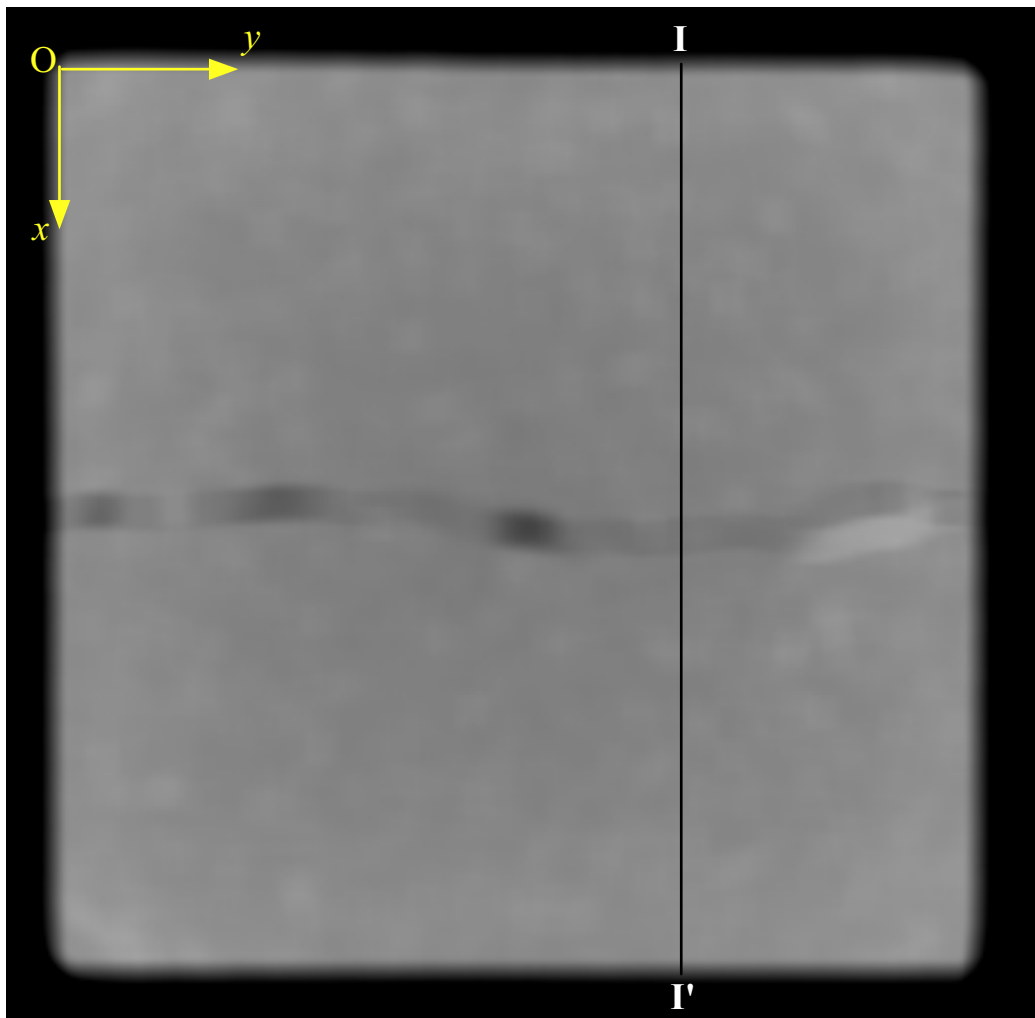


Fig.2.10 (a) 移動平均後の CT 画像 ( $\bar{P}=\bar{W}=13, \bar{H}=3$ )

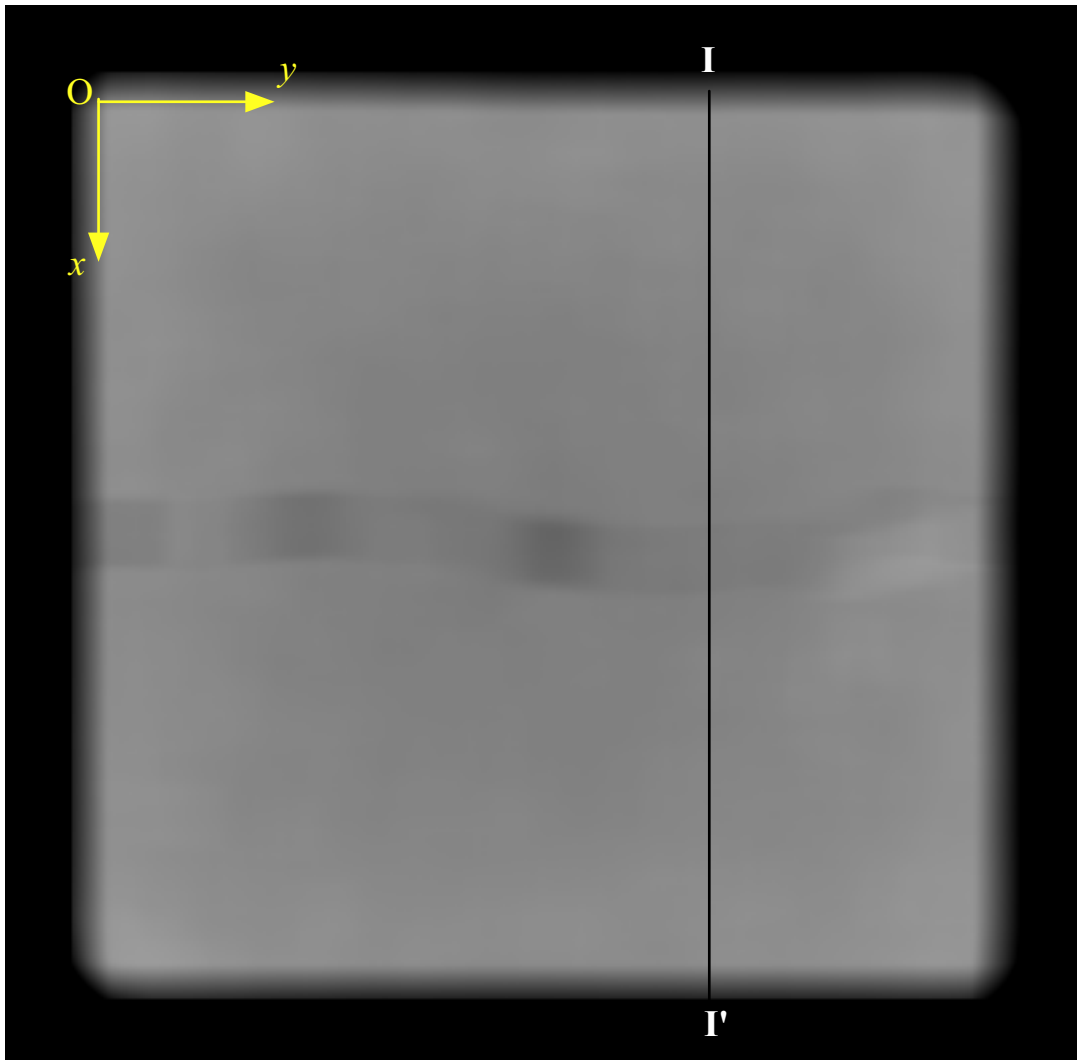


Fig.2.10 (b) 移動平均後の CT 画像 ( $\bar{P}=\bar{W}=25$ ,  $\bar{H}=3$ )

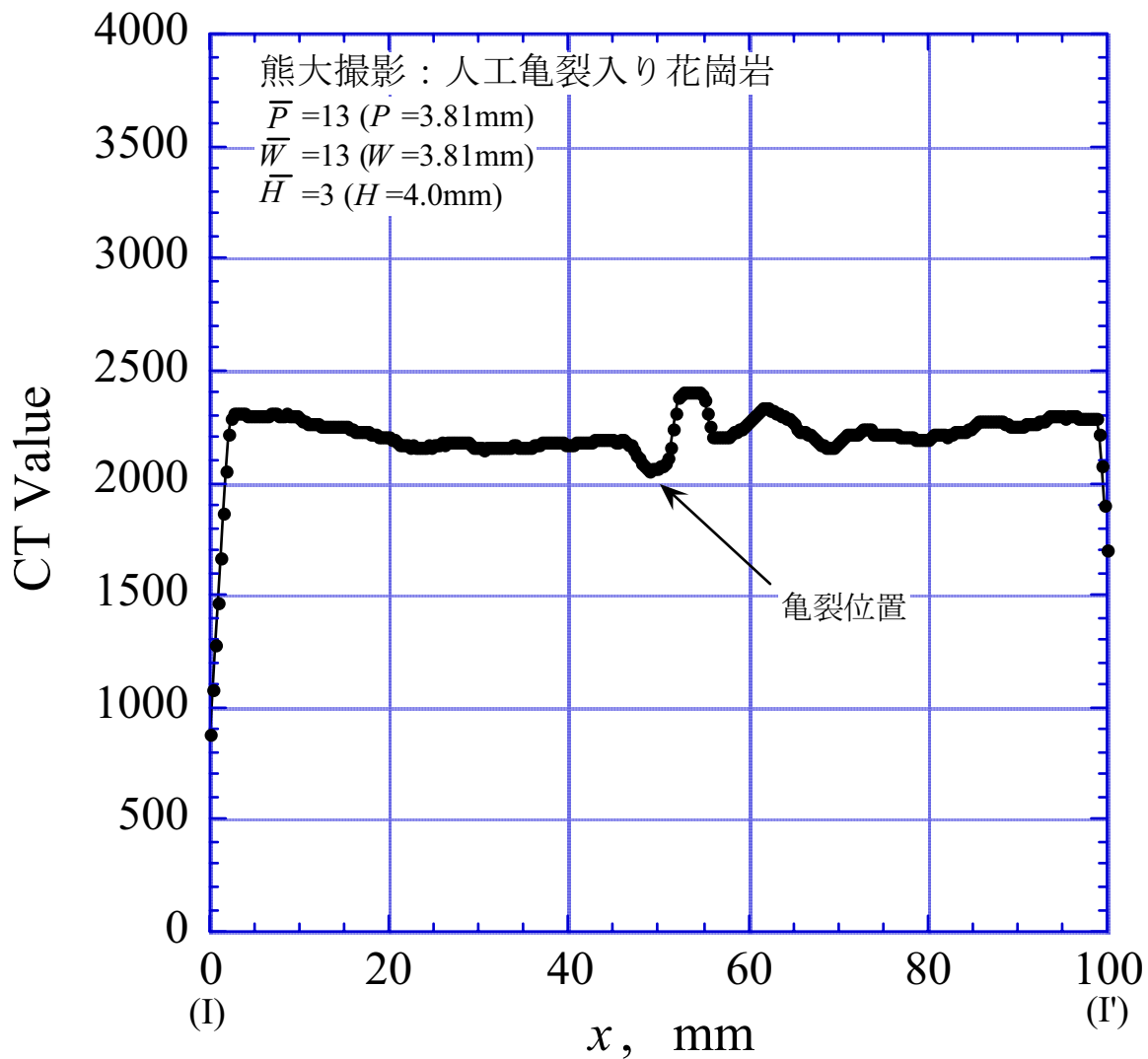


Fig.2.11 (a) 移動平均後の測線 I-I' の CT 値の分布 ( $\bar{P} = \bar{W} = 13$ ,  $\bar{H} = 3$ )

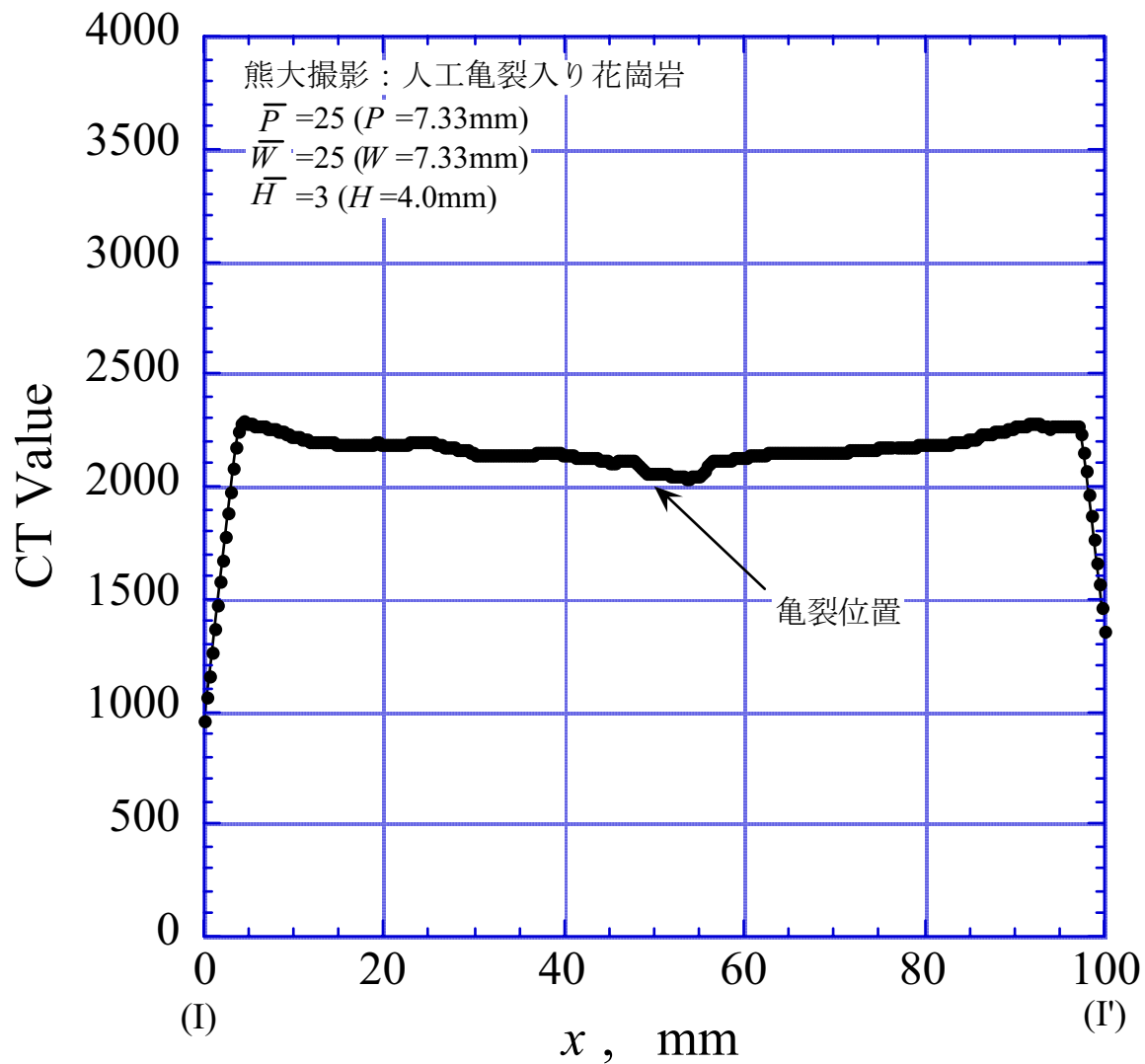


Fig.2.11 (b) 移動平均後の測線 I-I' の CT 値の分布 ( $\bar{P} = \bar{W} = 13$ ,  $\bar{H} = 3$ )

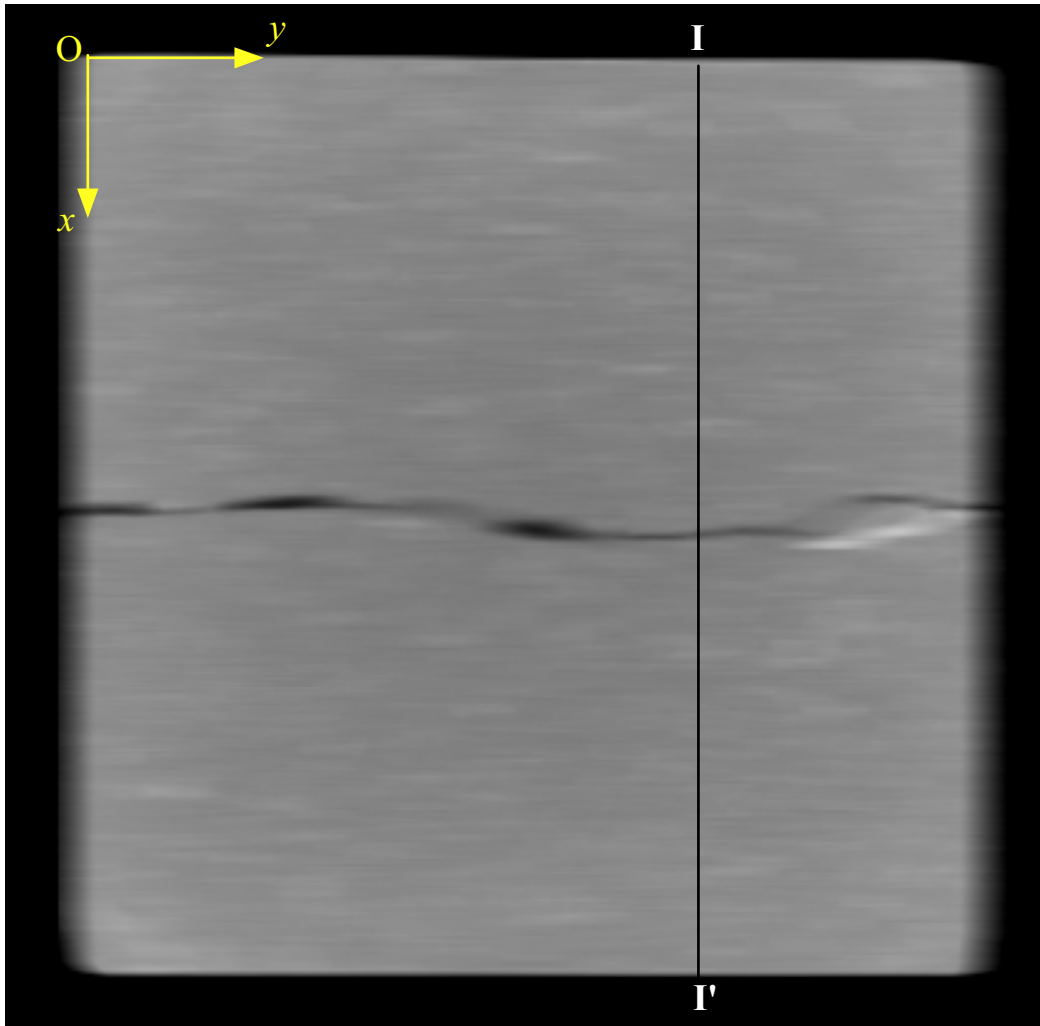


Fig.2.12 移動平均 ( $\bar{P}=1$ ,  $\bar{W}=25$ ,  $\bar{H}=3$ ) 後の CT 画像



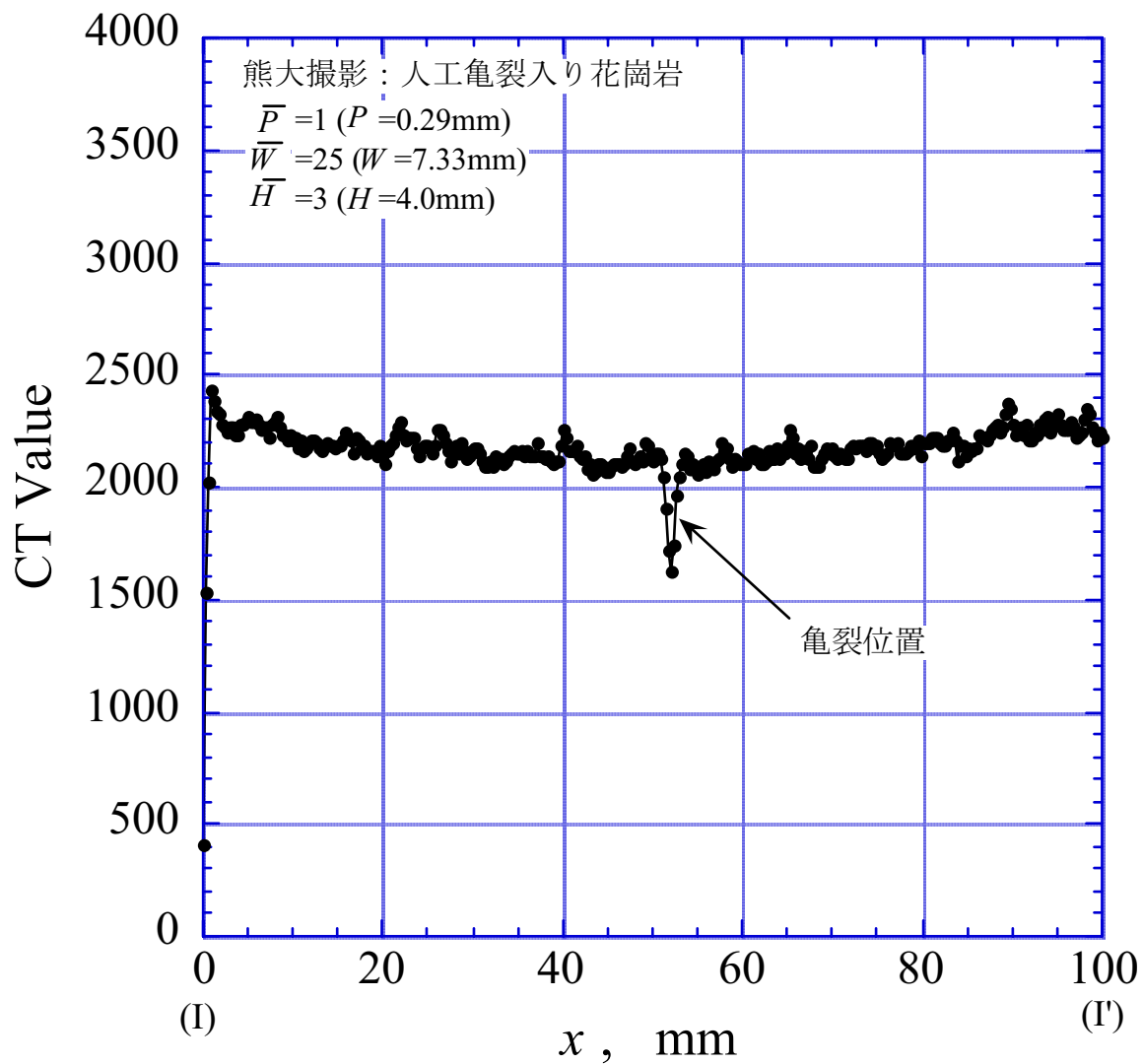


Fig.2.13 移動平均 ( $\bar{P}=1$ ,  $\bar{W}=25$ ,  $\bar{H}=3$ ) 後の測線 I-I' の CT 値分布

### 3. 花崗岩試料を用いた亀裂開口幅測定手法の検討

#### 3.1 亀裂投影法による花崗岩内の亀裂開口量評価

##### 3.1.1 岩石試料

JNC で透水試験を実施した亀裂入り試料の X 線 CT 撮影を実施した。撮影に用いた試料を Fig.3.1 に示す。試料は花崗岩で、解析対象部分は 100mm×100mm×100mm の立方体である。また、透水試験実施後、亀裂の状態を保存するために亀裂内部に樹脂が注入されている。

##### 3.1.2 X 線 CT 撮影

X 線 CT 画像の例を Fig.3.2 に示す。この断面は、Fig.3.1 に定めた座標系の  $xy$  平面と平行な面である。図は密度の大きい部分が白く、反対に密度が小さい領域を黒く表示している。したがって、試料を囲む黒い領域は空気である。また、内部を横切るように黒い線構造が見られるが、これが亀裂である。ただし、この部分には樹脂が充填されている。

試料には白い領域が点在するとともに、濃い灰色から薄い灰色までの領域が全体的に分布している。これは、花崗岩を構成する鉱物粒子の分布を反映していると考えられる。なお、試料の中央右寄りに白い線構造が確認できるが、この画像データからこれが何かは判断できない。

##### 3.1.3 亀裂投影法の基礎式

従来の亀裂投影法<sup>3)</sup>では、亀裂内は空気で満たされているとして基礎式を導出している。ここで用いた試料の亀裂内は樹脂で充填されているので、亀裂内に空気以外の物質が満たされている場合の基礎式を以下に示す。

まず、Fig.3.3(b)に示すように、線吸収係数が  $f_m$  の均質・等方な媒質内に存在する開口量  $w$  の亀裂面間の中心点  $O$  を原点とし、亀裂面に垂直な方向を  $x$  軸とする直角座標  $(x, y, z)$  を定める。ここで、亀裂面の位置は  $x = \pm w/2$  であり、亀裂内部は線吸収係数が  $f_c$  の物質で満たされていると仮定する。つぎに、原点  $O$  を中心として座標軸に平行な辺を持つ解析領域を設定し、 $x$  軸方向の長さを  $P$ 、 $y$  軸方向の長さを  $W$ 、 $z$  軸方向の長さを  $H$  とする。解析領域に対して強度  $I_0$  の X 線ビームが  $-x$  軸の方向の端面から入射し、 $+x$  軸方向の端面を透過する透過 X 線の強度  $I$  は

$$I = I_0 \exp\{-f_m(P-w) - f_c w\} \quad (3.1)$$

で与えられ、投影  $p$  は次式で与えられる。

$$p = -\ln(I_0 / I) = f_m(P - w) + f_c w \quad (3.2)$$

解析領域内に、Fig.3.3(a)に示すような内部に亀裂を含まない基準域 (Base region) として、Fig.3.3(b)に示す座標軸に平行な辺をもつ降下域 (Drop region) と同じ寸法の直方体を物体の内部に想定すると、この領域の投影  $p_0$  は式(3.2)に  $w=0$  を代入して、

$$p_0 = f_m P \quad (3.3)$$

で与えられる。式(3.3)から式(3.2)を差し引き、 $w$  について解くと、

$$w = \frac{\Delta p}{f_m - f_c} = \frac{p_0 - p}{f_m - f_c} \quad (3.4)$$

となる。なお、亀裂内の物質が空気の場合は  $f_c = 0$  である。上式の  $\Delta p$  は亀裂に起因する投影の変化量である。

式(3.4)で示す関係が亀裂開口量測定の基本式であり、その関係を CT 値を用いて表す方法について以下に説明する。まず、式(3.4)の  $f_m$  および  $f_c$  をそれぞれ基準域の平均線吸収係数  $\bar{f}_m$  および亀裂内物質の平均線吸収係数  $\bar{f}_c$  と仮定する。

$$w = \frac{\Delta p}{\bar{f}_m - \bar{f}_c} = \frac{p_0 - p}{\bar{f}_m - \bar{f}_c}, \quad \bar{f}_m = \frac{p_0}{P} \quad (3.5)$$

また、簡単のため、Fig.3.4 に示すように、降下域と基準域を直列に配置する方法を採用する。降下域に含まれる  $x$  軸方向のピクセル数を  $\bar{P}$ 、 $y$  軸方向のピクセル数を  $\bar{W}$ 、 $z$  軸方向のピクセル数を  $\bar{H}$ 、投影断面のピクセル数を  $\bar{S}$  と表記すると、これらは次式で与えられる。

$$\bar{P} = \frac{P}{d}, \quad \bar{W} = \frac{W}{d}, \quad \bar{H} = \frac{H}{h}, \quad \bar{S} = \bar{W} \bar{H} \quad (3.6)$$

ここで、 $d$  は 1 ピクセルの辺長であり、 $h$  は断層厚さである。つぎに、ピクセルの番地として、 $x$  軸方向のピクセル番号  $i=1, 2, \dots, \bar{P}$ 、 $y$  軸方向のピクセル番号  $j=1, 2, \dots, \bar{W}$ 、 $z$  軸方向のピクセル番号  $k=1, 2, \dots, \bar{H}$  を採用し、降下域の番地  $(i, j, k)$  における CT 値を  $f(i, j, k)$  と表記すると、投影断面  $i$  の平均 CT 値  $g(i)$  は、

$$g(i) = \frac{\sum_j \sum_k f(i, j, k)}{\bar{S}} \quad (3.7)$$

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、基準域についても同様に、番地  $(i, j, k)$  における CT 値を  $f_0(i, j, k)$  と表記すると、投影断面  $i$  の平均 CT 値  $g_0(i)$  は、

$$g_0(i) = \frac{\sum_j \sum_k f_0(i, j, k)}{\bar{S}} \quad (3.8)$$

となる。したがって、

$$p = \sum_i g(i)d, \quad p_0 = \sum_i g_0(i)d, \quad \bar{f}_m = \frac{\sum_i g_0(i)}{P} \quad (3.9)$$

となる。ただし、 $\bar{f}_c$  については、その物質だけの X 線 CT 撮影を行い、その投影から  $\bar{f}_m$  と同様に値を評価することが必要となる。

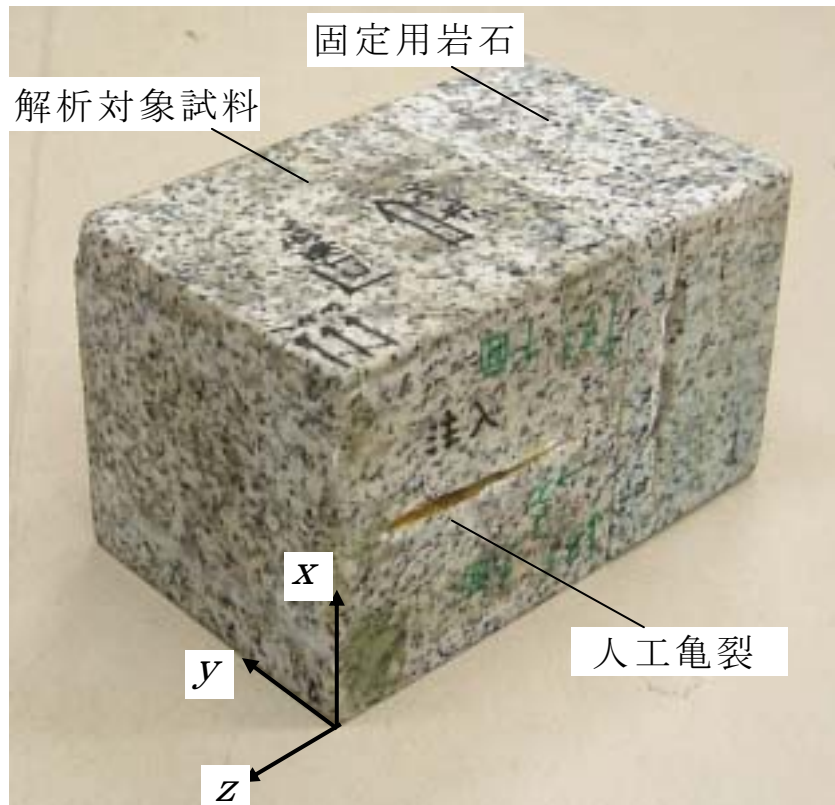


Fig. 3.1 撮影に用いた花崗岩試料

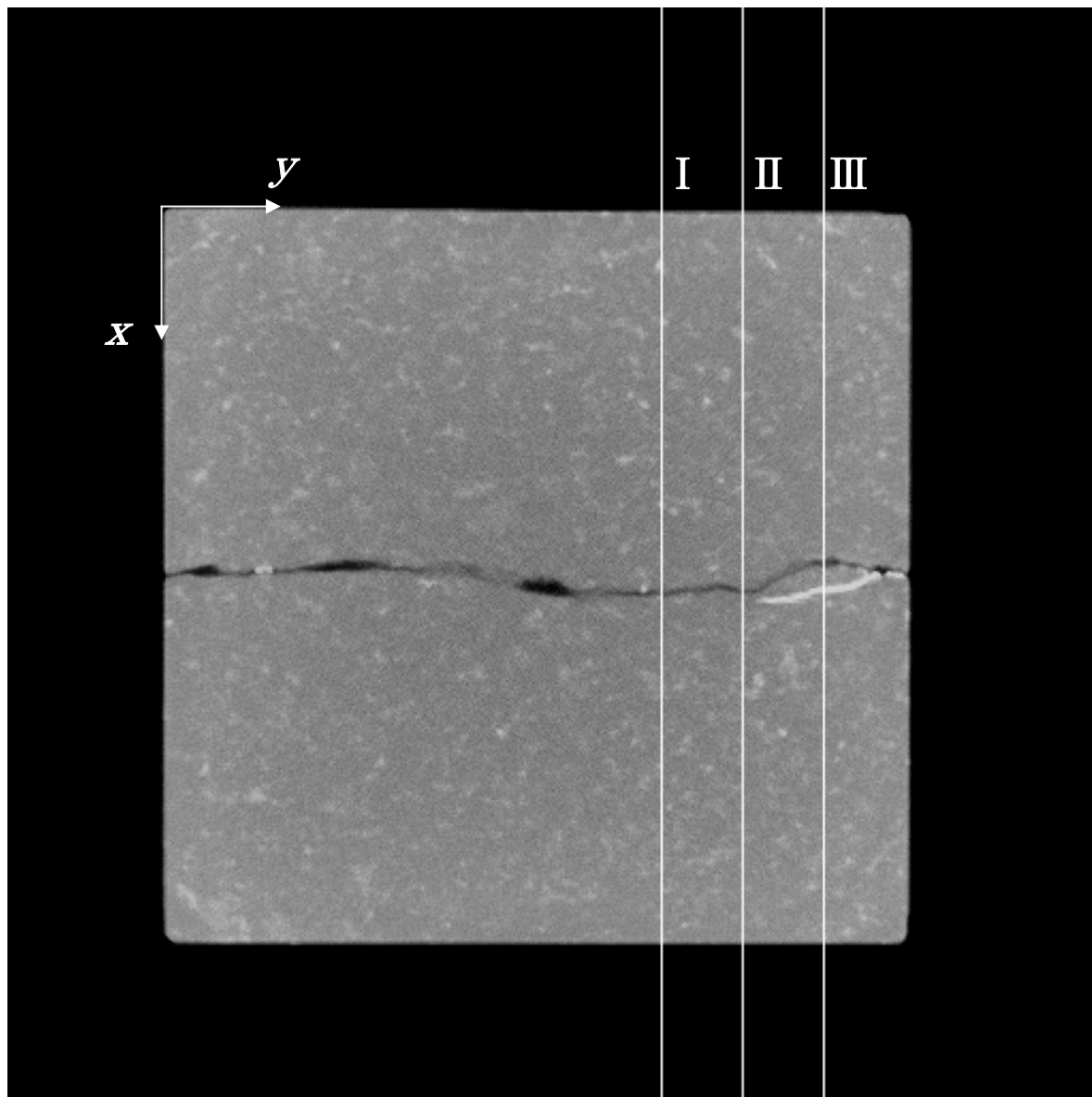
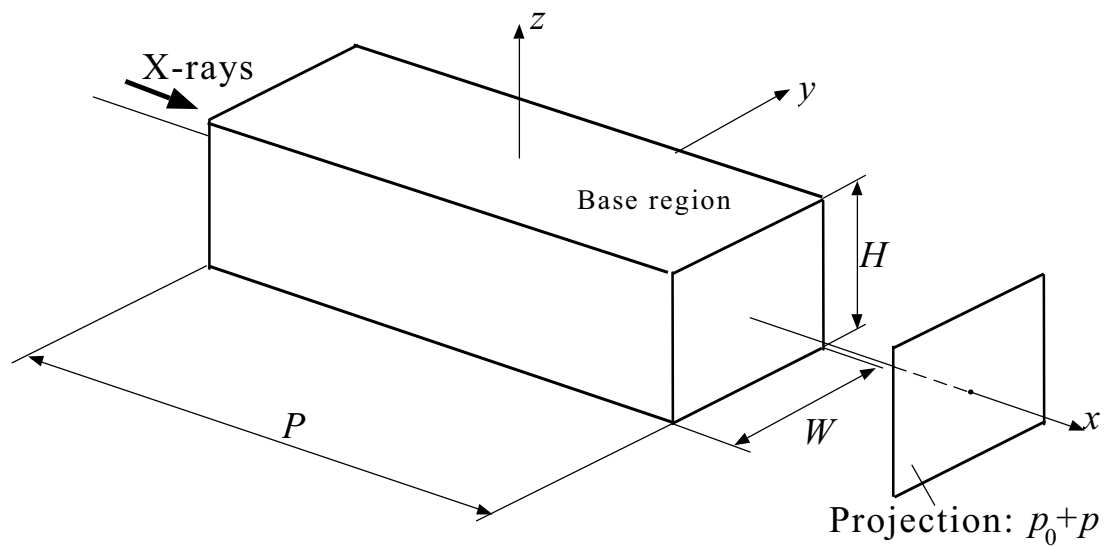
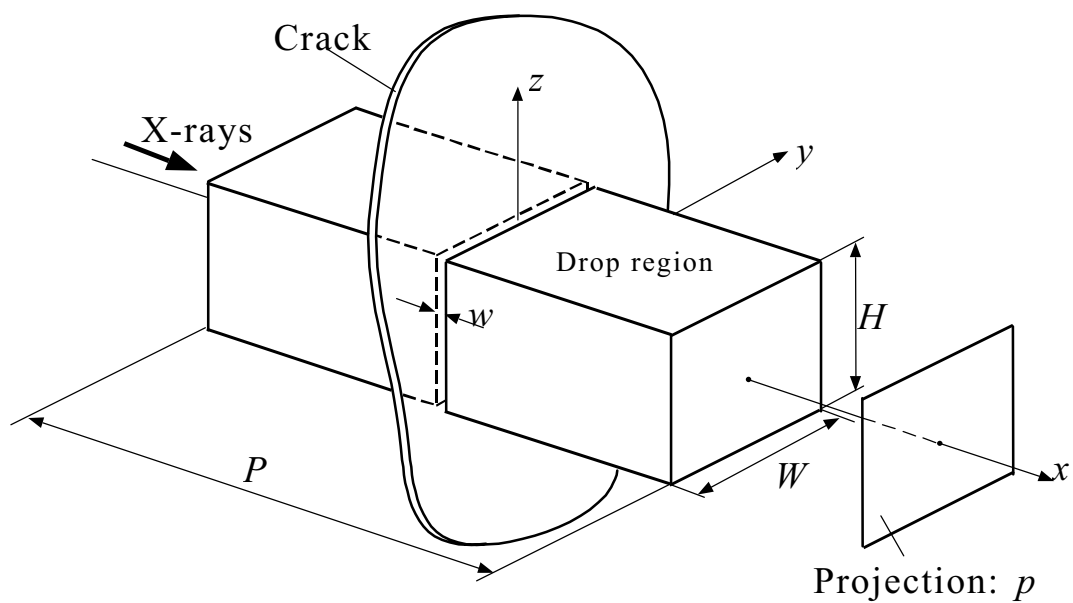


Fig. 3.2 X線 CT 画像の例と測線の配置 (花崗岩試料)



(a)



(b)

Fig. 3.3 亀裂を含む解析領域における基準域と降下域

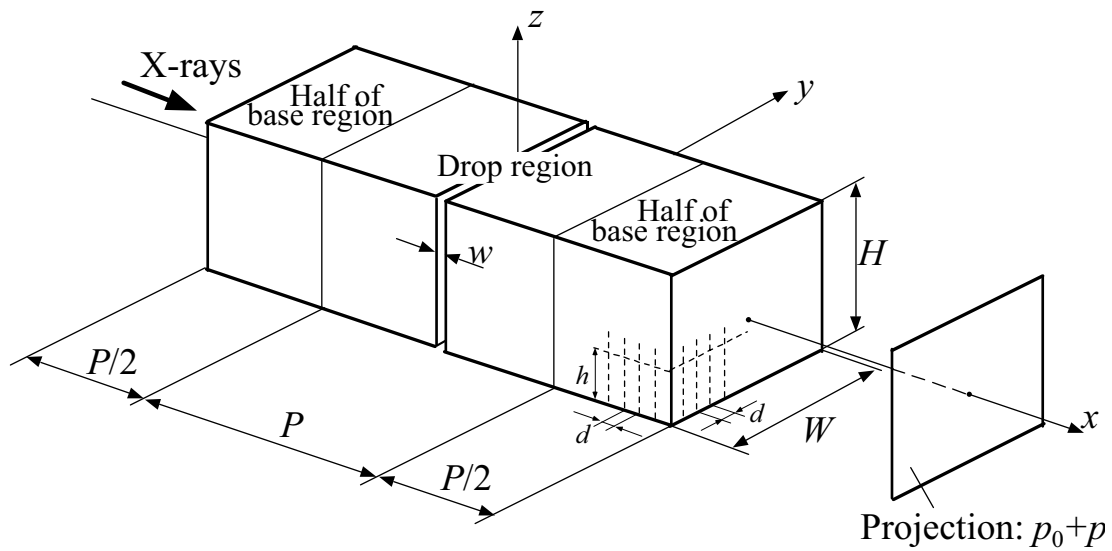


Fig. 3.4 基準域と降下域の配置



### 3.1.4 花崗岩試料への亀裂投影法の適用性の検討

まず、式(3.9)を用いると従来の亀裂投影法の適用は可能である。しかし、用いた試料内の亀裂には樹脂が充填されているため、その線吸収係数を知らなければ、亀裂開口量を求めることはできない。これについては、同種の樹脂を用いてその線吸収係数を評価する必要がある。

つぎに、亀裂投影法では、媒質、すなわち材料基質部は均質・等方で線吸収係数は一定であるものとして亀裂開口量を評価する。

そこで、均質・等方な材料として Fig.3.5 に示すように、アルミニウムの試料を用意した。すなわち、2つのアルミニウムの半月板を用意し、その直径の面を亀裂面と見なし、面を合わせた後その一端に隙間ゲージを挿入して亀裂幅が線形に変化する模擬亀裂を作成した。開口側の端面における亀裂の中心点を原点  $O'$  とする直角座標  $(x, y, z)$  を用いる。なお、半月板の直径は 60mm である。

X線 CT 撮影は、まず、模擬亀裂内部が空気の場合について撮影を実施した。ただし、撮影は亀裂を横切る半月板の中心断面で実施し、同じ位置で合計 3 回の撮影を行った。なお、試料の周辺は KI 水溶液で満たされている。撮影画像の一例を Fig.3.6 に示す。真中の円形がアルミニウム試料であり、模擬亀裂を表す黒い線が横方向に確認できる。

一般に、均質・等方な材料を用いた場合でも CT 値にはバラツキが存在することが知られている。そこで、撮影画像のノイズ軽減を目的として平均化処理を実施した。まず、同じ位置で 3 枚の画像データが得られていることから、これら 3 つの画像のスタッキングを行った ( $\bar{H}=3$ )。さらに、このスタッキングした画像について、 $y$  軸方向に 25 ピクセル分の移動平均を取った ( $\bar{W}=25$ )。

測線 I おける CT 値の分布を Fig.3.7 に示す。図の横軸は  $x$  軸である。模擬亀裂が位置する原点付近で CT 値の急激な減少がみられるが、それ以外の領域ではほぼ様な値を示している。 $\bar{P}=20$  とした基準域での平均 CT 値は 2264、標準偏差は 16 である。このようなデータに対しては、従来の亀裂投影法の適用が可能である。

花崗岩は、一般に異方性を有し、さらに、長石、石英、雲母などの鉱物粒子で構成されている。これらの鉱物粒子は密度が異なるため、等方・均質な材料に比較して CT 値のバラツキは大きいと予想される。そこで、Fig.3.2 で示した画像データに平均化処理を施した。具体的には、 $z$  軸方向の 1mm ごとに撮影された 3 枚の画像をスタッキングし、さらに、その画像の  $y$  軸方向に 25 ピクセル分の移動平均をとり、その中心の値をその位置での代表 CT 値とした。

平均化処理後の測線 I, II および III における CT 値の分布を Fig.3.8 から Fig.3.10 に示す。原点付近に CT 値の低い領域が存在し、亀裂の存在を読みとることができる。Fig.3.10 の  $x=52\text{mm}$  付近で CT 値が大きな値となっているのは、測線が高密度領域を通過しているためである。3 つの測線いずれの場合においても、 $\bar{P}=128$  とした場合の基準域の標準偏差は 40, 36, 40 であり、アルミニウムのそれに比較して 2 倍以上大きい。したがって、均質・等方

の材料を対象としている従来の亀裂投影法をこのような花崗岩に適用することは困難であると考えられる。さらに、Fig.3.8 の分布はわずかではあるが、下に凸の分布となっており、カップリング<sup>4)</sup>の影響が現れている。

以上要するに、種々の鉱物粒子で構成される花崗岩のような岩石に亀裂投影法をそのまま適用することは困難であるため、次章で述べるような画像間差分法を適用した画像に対して亀裂投影法を適用することが望ましいと考えられる。

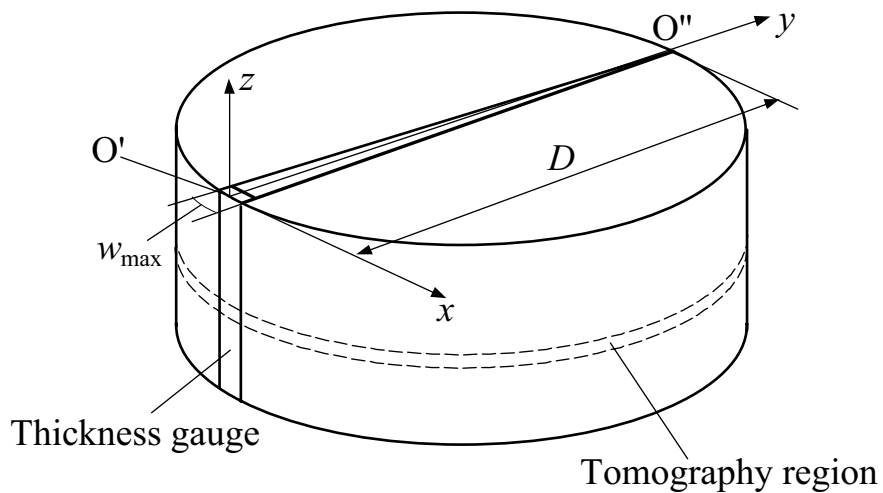


Fig. 3.5 アルミニウムの半月板試料模式図

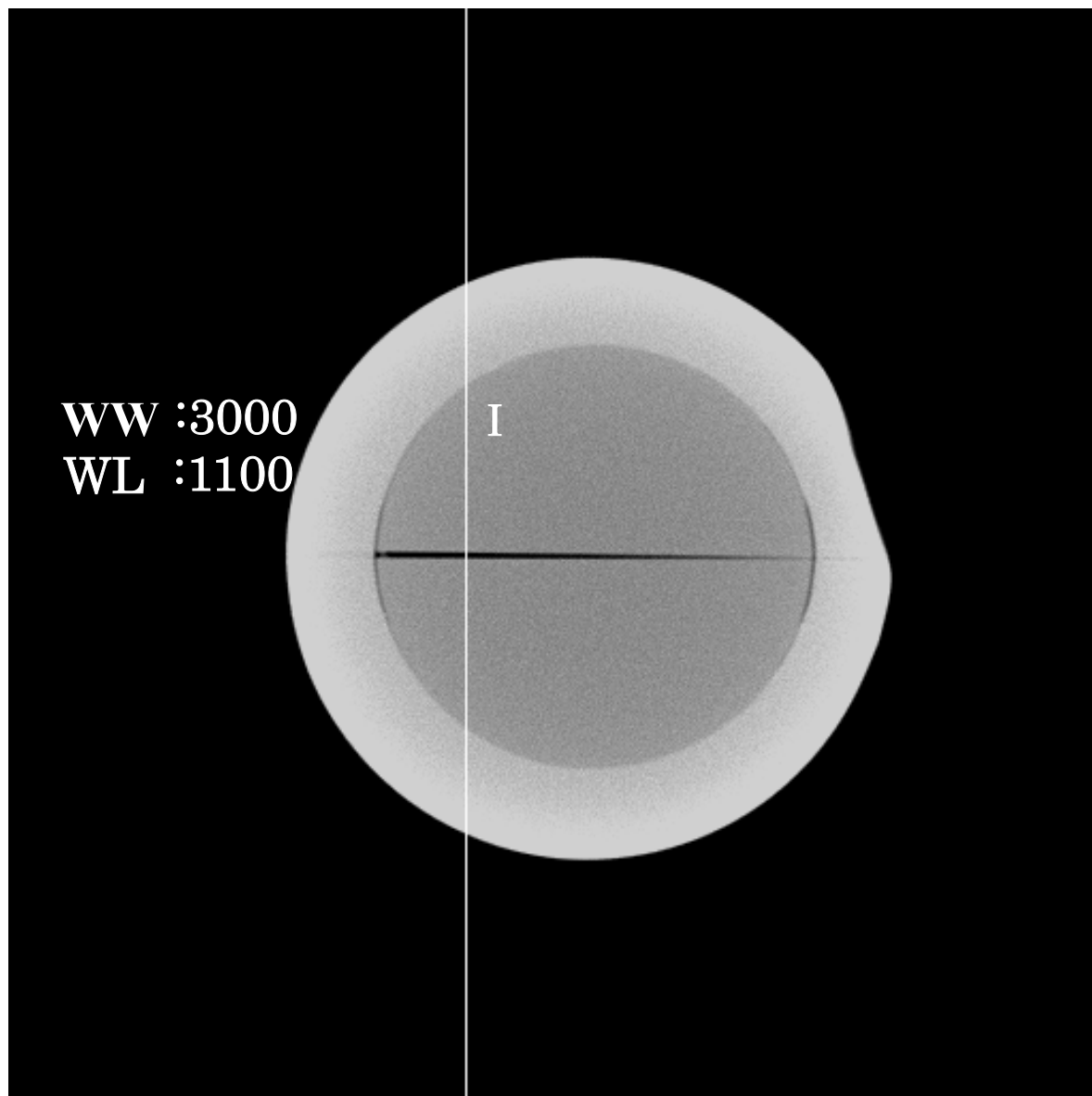


Fig. 3.6 アルミニウムの半月板を用いた模擬亀裂の X 線 CT 画像（亀裂内：空気）

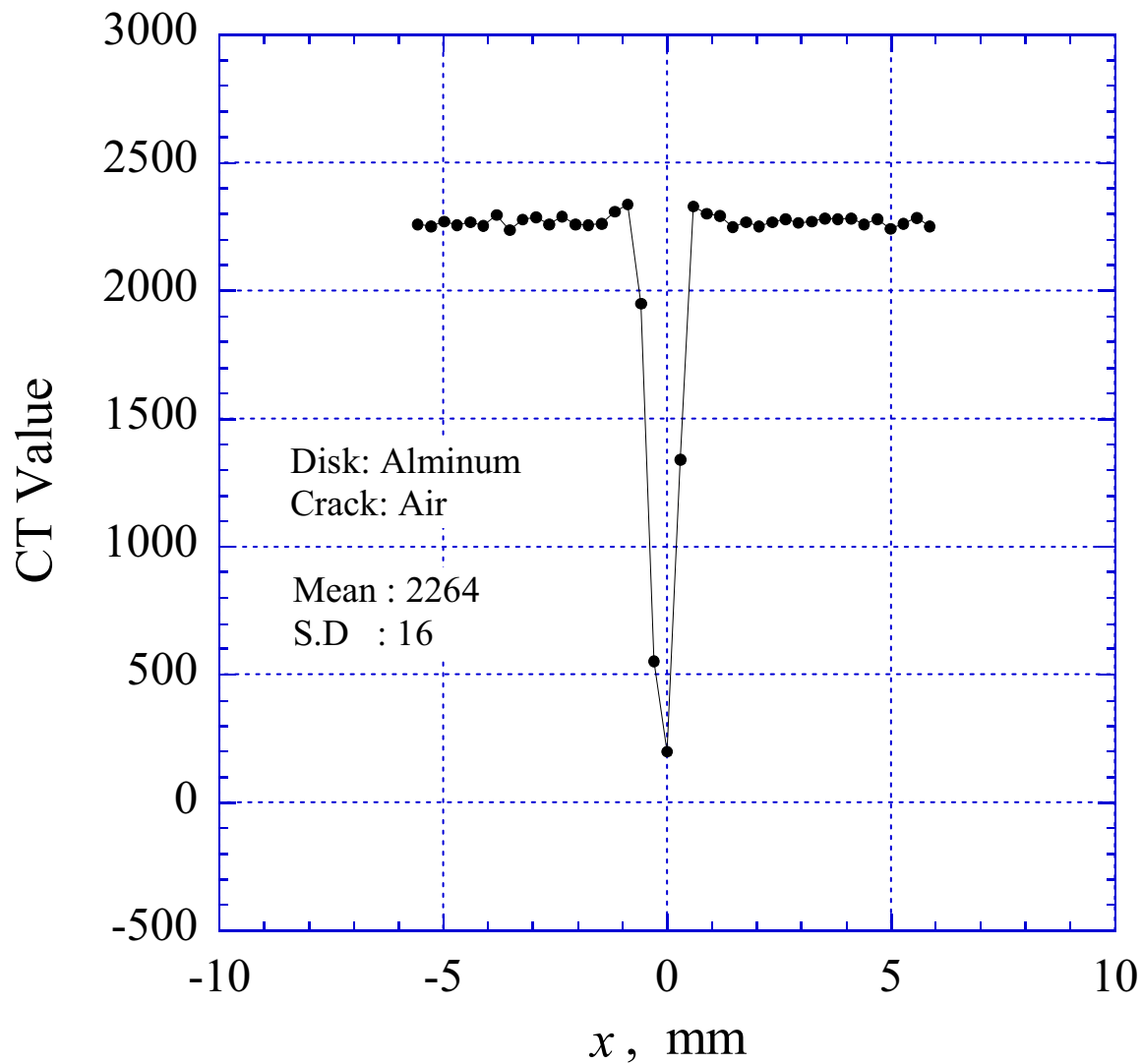


Fig. 3.7 測線 I の CT 値分布 (アルミニウム, 亀裂内: 空気)

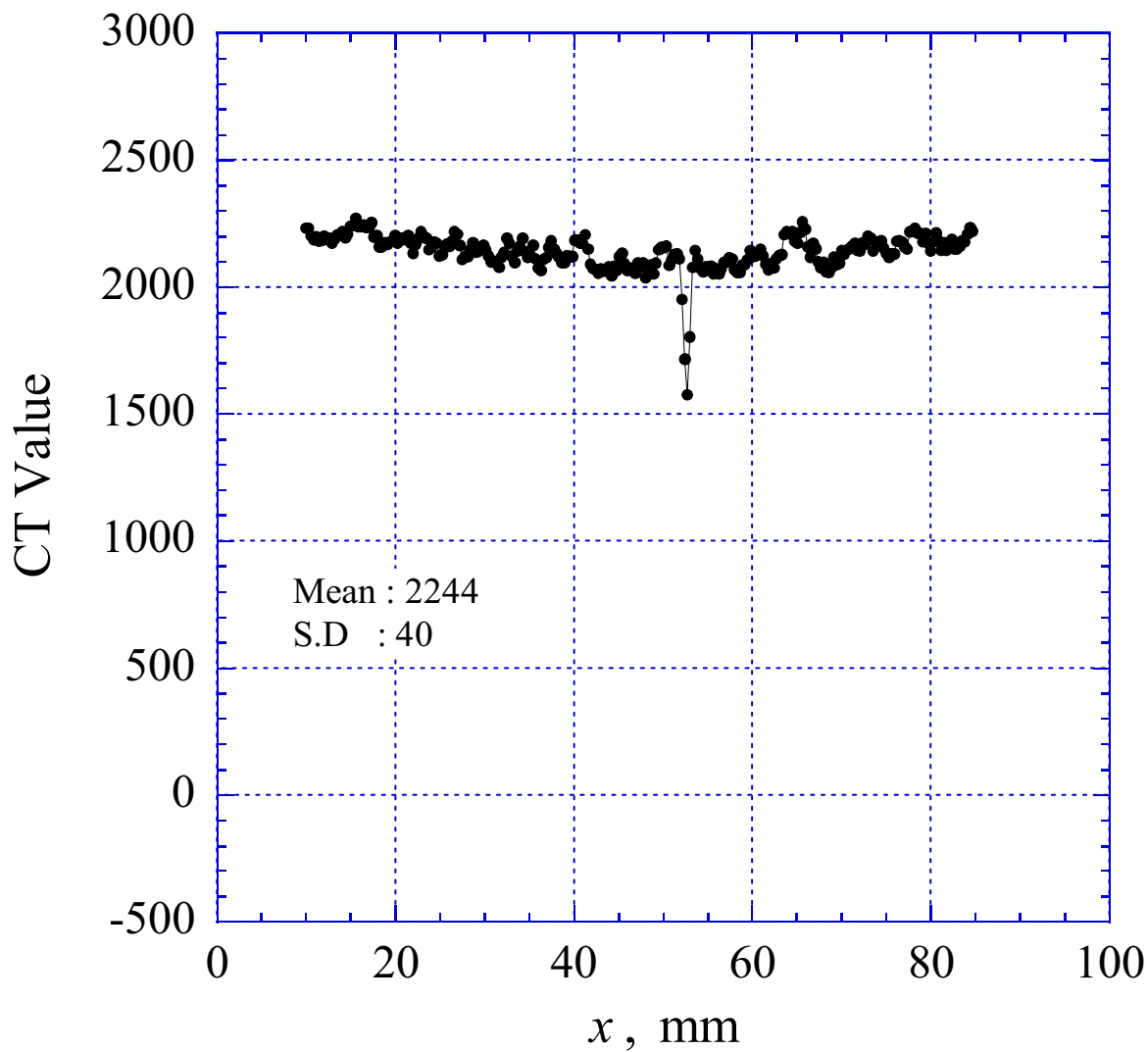


Fig. 3.8 測線 I における CT 値分布 (花崗岩)

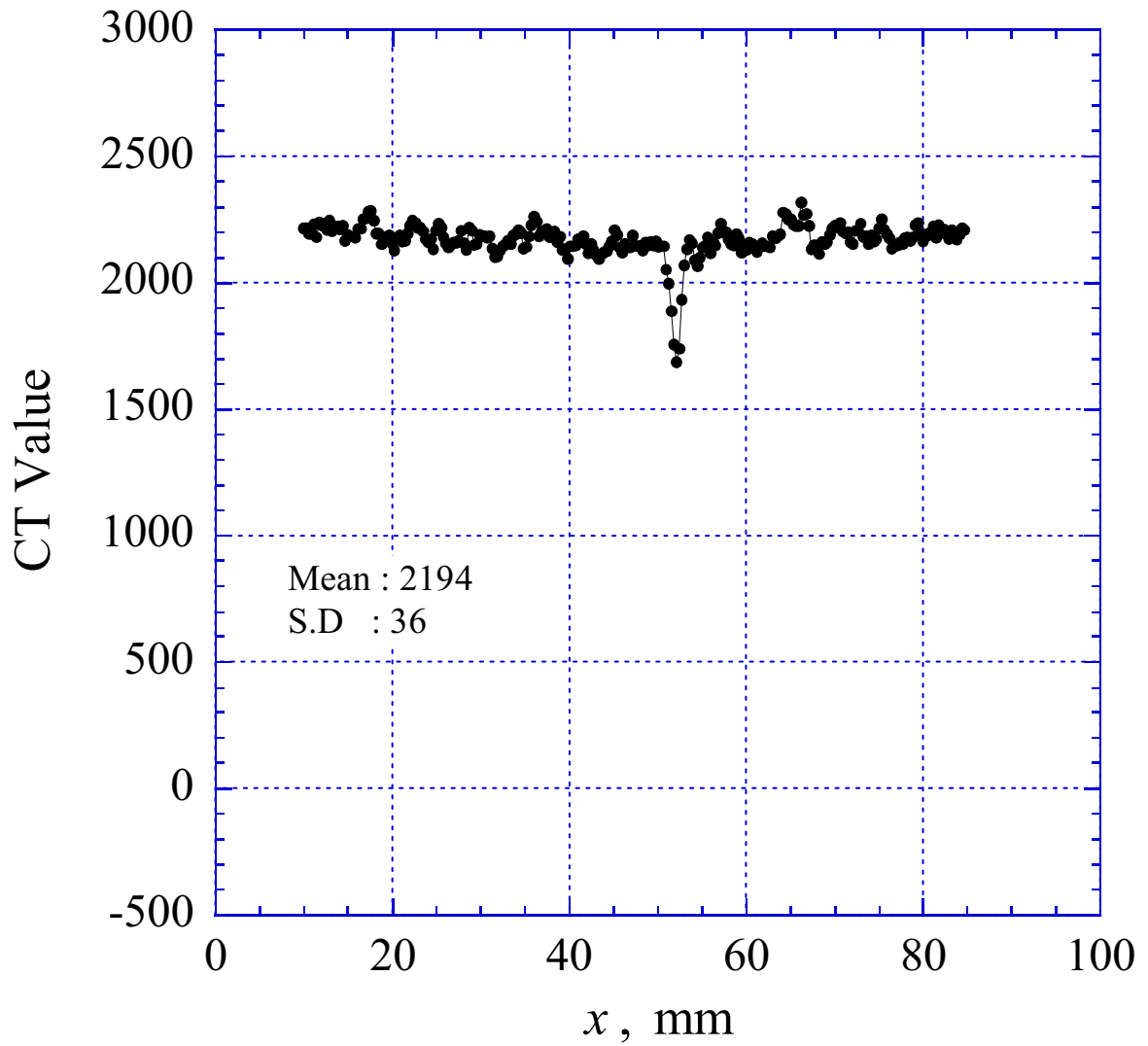


Fig. 3.9 測線ⅡにおけるCT値分布（花崗岩）

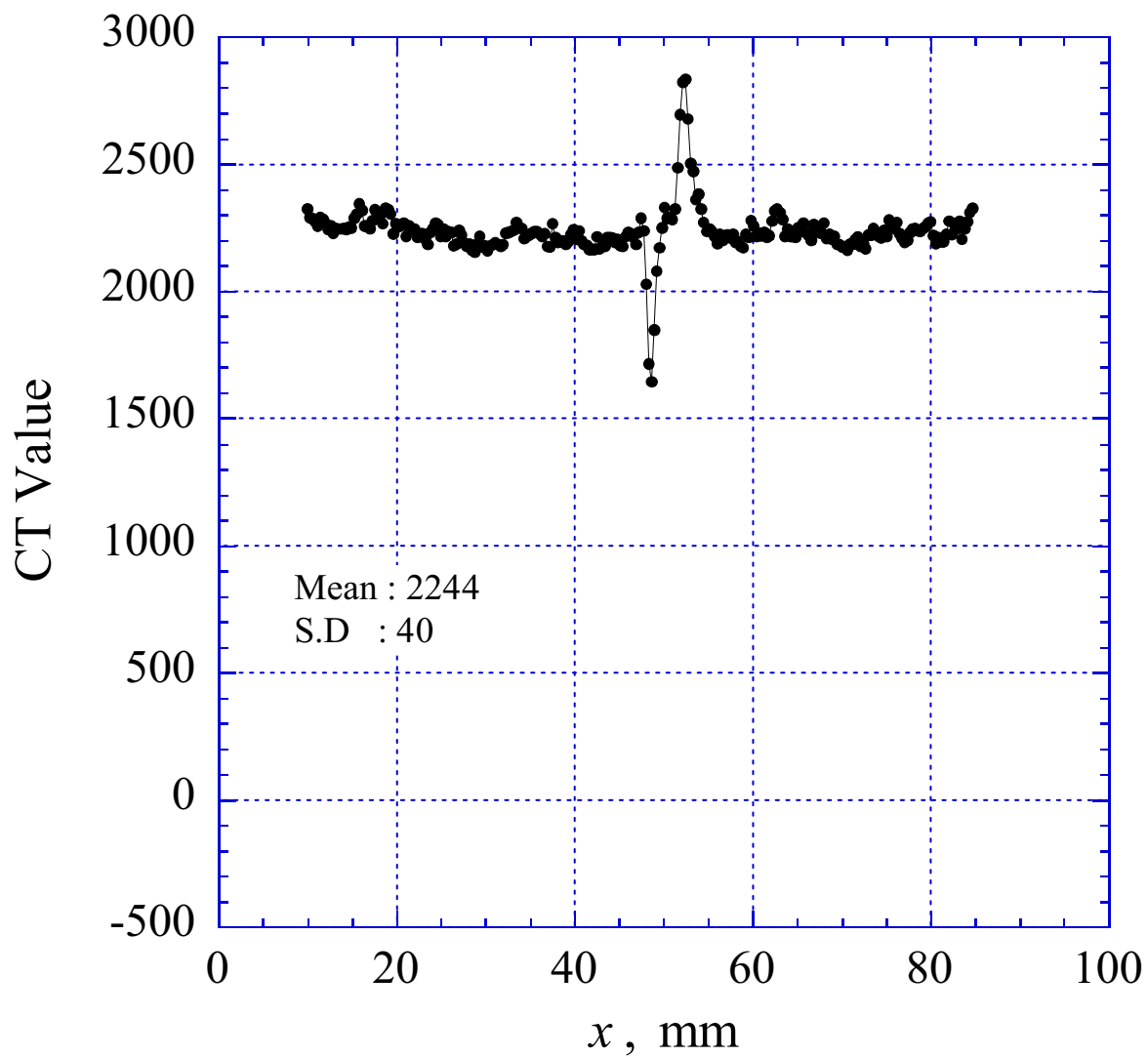


Fig. 3.10 測線ⅢにおけるCT値分布（花崗岩）



### 3.2 画像間差分法による亀裂開口量の評価

#### 3.2.1 画像間差分法の原理

画像間差分法とは、同じ物体を異なる状態で撮影した画像の差を取った画像を用いて解析する方法である。この方法では、物体の不均質性による CT 値のバラツキやカップリング現象がそれぞれの撮影画像に同様に含まれているので、差画像をとると、これらの影響を取り除くことができるとともに、変化した領域だけを取り出して解析することができるという利点を有している。したがって、前章で述べたような花崗岩については有効な方法と考えられる。

#### 3.2.2 画像間差分法による亀裂開口量の評価式

亀裂内を満たす物質を変えた画像を用いる画像間差分法による亀裂開口量の評価式を誘導する。そこで、それぞれの画像には亀裂内部に密度の異なる物質が満たされていると仮定する。密度の異なる物質としては、密度の小さい空気、密度の大きい水や KI 水溶液などが考えられる。

まず、Fig.3.11 のように、線吸収係数が  $f_m(x)$  の物質内に存在する開口量  $w$  の亀裂面間の中心点  $O$  を原点とし、亀裂面に垂直な方向を  $x$  軸とする直角座標  $(x, y, z)$  を定める。ここで、亀裂面の位置は  $x = \pm w/2$  であり、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。式(3.2)を用いると、X 線の投影  $p^{(\alpha)}$  は、

$$p^{(\alpha)} = f_m(x)\{P - w\} + f_c^{(\alpha)}w \quad (3.10)$$

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  $\beta$  で満たされていると、投影  $p^{(\beta)}$  は、

$$p^{(\beta)} = f_m(x)\{P - w\} + f_c^{(\beta)}w \quad (3.11)$$

となる。画像間差分を行うということは、式(3.10)から式(3.11)を差し引きことに対応し、それを  $w$  について解くとつぎのようになる。

$$w = \frac{p^{(\alpha)} - p^{(\beta)}}{f_c^{(\alpha)} - f_c^{(\beta)}} \quad (3.12)$$

上式に従うと、物体の線吸収係数  $f_m(x)$  の影響がなくなり、花崗岩の鉱物粒子やカップリングの影響は完全に取り除くことができる。

つぎに、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(3.12)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、

$$w = \frac{p^{(\alpha)} - p^{(\beta)}}{\bar{f}_c^{(\alpha)} - \bar{f}_c^{(\beta)}} \quad (3.13)$$

を得る。そこで、降下域に含まれる  $x$  軸方向のピクセル数を  $\bar{P}$ ,  $y$  軸方向のピクセル数を  $\bar{W}$ ,  $z$  軸方向のピクセル数を  $\bar{H}$ , 投影断面のピクセル数を  $\bar{S}$  と表記すると、これらは次式で与えられる。

$$\bar{P} = \frac{P}{d}, \quad \bar{W} = \frac{W}{d}, \quad \bar{H} = \frac{H}{h}, \quad \bar{S} = \bar{W} \bar{H} \quad (3.14)$$

ここで、 $d$  は 1 ピクセルの辺長であり、 $h$  は断層厚さである。つぎに、ピクセルの番地として、 $x$  軸方向のピクセル番号  $i=1, 2, \dots, \bar{P}$ ,  $y$  軸方向のピクセル番号  $j=1, 2, \dots, \bar{W}$ ,  $z$  軸方向のピクセル番号  $k=1, 2, \dots, \bar{H}$  を採用し、降下域の番地  $(i, j, k)$  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、投影断面  $i$  の平均 CT 値  $g^{(\alpha)}(i)$  は、

$$g^{(\alpha)}(i) = \frac{\sum_j \sum_k f^{(\alpha)}(i, j, k)}{\bar{S}} \quad (3.15)$$

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  $g^{(\beta)}(i)$  は、

$$g^{(\beta)}(i) = \frac{\sum_j \sum_k f^{(\beta)}(i, j, k)}{\bar{S}} \quad (3.16)$$

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。

$$p^{(\alpha)} = \sum_i g^{(\alpha)}(i)d, \quad p^{(\beta)} = \sum_i g^{(\beta)}(i)d \quad (3.17)$$

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。

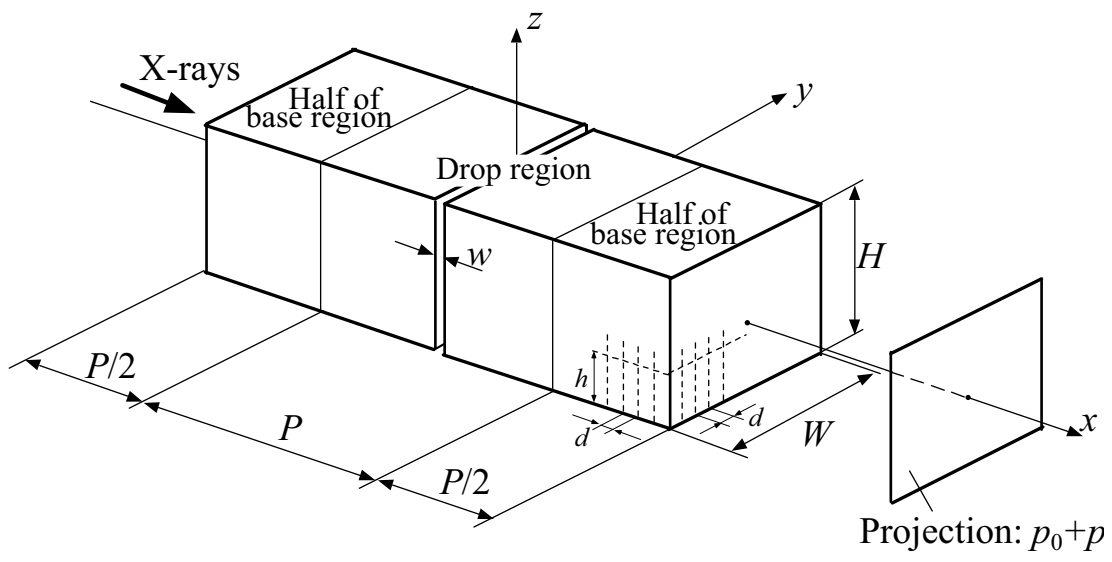


Fig.3.11 物質内の亀裂と座標軸

### 3.2.3 画像間差分法の適用

#### (1) 試料および実験方法

一对の半月板を用いた模擬亀裂を有する試料を作成し、これを用いて3.2に示した画像間差分法による亀裂開口量の評価法の妥当性を検討する。試料に用いた材料は、以下の二種類である。

- 1) 均質な材料としてのアルミニウム
- 2) 不均質材料としての花崗岩

それぞれの材料によって作成された2つの半月板を用意し、Fig.3.12 に示すように、その直径の面を亀裂面と見なし、面を合わせた後その一端に隙間ゲージを挿入して亀裂幅が線形に変化する模擬亀裂を作成し、これを試料とした。また、開口側の端面における亀裂の中心点を原点  $O'$  とする直角座標  $(x, y, z)$  を用いる。なお、半月板の直径は 60mm である。

X線CTの撮影は、まず、模擬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、亀裂内部にKI水溶液あるいは水を注入して再度撮影を実施した。どちらの撮影においても亀裂を横切る半月板の中心断面の位置で3回の撮影を実施した。以下の解析では、これら3枚の画像をスタッキングしている。

また、それぞれの撮影のとき、撮影範囲での密度分布は変化しないことが望ましいので、亀裂内部が空気の場合においても、試料の周囲は亀裂内部に注入した溶液を満たして同じ状態で撮影を実施した。

## (2)アルミニウム試料の結果

### ①X線CT画像

X線CTにより撮影したアルミニウムの断面画像を Fig.3.13 に示す。真中の円形がアルミニウム試料であり、模擬亀裂は試料中心を通り横方向に位置している。Fig.3.13 (a) は亀裂内部が KI 水溶液（質量パーセント濃度：30%）で満たされている時の画像であり、Fig.3.13 (b) は亀裂内部が空気で満たされている場合である。Fig.3.13 (c) は Fig.3.13 (a)と(b)の画像の差画像（{画像(a)} - {画像(b)}）である。

画像(a)は亀裂内に KI 水溶液が満たされているために亀裂部分はアルミニウムより白く表示されている。画像(b)での亀裂は KI 水溶液周辺の空気と同様に黒く表示されている。画像(c)では試料の輪郭はほとんど消えて亀裂だけが白く浮かびあがって表示されている。したがって、試料の線吸収係数のバラツキやカップリングの影響を取り除くことができたと考えられる。

### ②CT値の分布

まず、3断面の画像をスタッキングした画像について、y軸方向に25ピクセル分の移動平均を取った（ $\bar{W}=25$ ）。以上の手順で求めたx軸上のCT値の分布のうち、Fig.3.13の測線I、IIおよびIIIにおけるCT値の分布をFig.3.14からFig.3.16に示す。図の(a)、(b)および(c)はそれぞれ亀裂内部がKI溶液で満たされている場合、空気で満たされている場合、および(a)と(b)の差画像のそれに対応している。ただし、ここではx軸方向の降下域は亀裂を中心とした20ピクセル（ $\bar{P}=20$ ）とした。

まず、測線IのFig.3.14について見ると、図(a)は亀裂内部がKI水溶液であるので、亀裂内のCT値はアルミニウムのそれよりも大きくなる。図(b)は亀裂内部が空気であるため亀裂部分でCT値が減少しており、亀裂の存在を明瞭に読み取ることができる。図(a)および(b)の基準域のCT値の平均値は両者で2264と一致し、標準偏差はそれぞれ、13および16であった。つぎに、図(c)における基準域のCT値の分布はほぼ $0 \pm 24$ （平均値 $\pm$ 標準偏差）で、亀裂部分ではCT値が大きくなっている。これは、基準域のCT値の標準偏差は小さく、その平均値が零となっており、画像間差分法が有効であることを示している。

なお、上記の傾向は、測線IIのFig.3.15および測線IIIのFig.3.16からも同様に確認でき、図(c)における基準域のCT値の分布は、測線IIで $0 \pm 24$ 、測線IIIで $-1 \pm 14$ であった。また、測線は、亀裂開口量が多い方からI、II、IIIの順に配置しているため、開口量が小さくなるにしたがって、亀裂部分のCT値の値も小さくなっていることがわかる。

### (3)花崗岩試料の結果

#### ①X線 CT 画像

X線 CTにより撮影した花崗岩の断面画像を Fig.3.17 に示す。真中の円形が花崗岩試料であり、模擬亀裂は試料中心を通り横方向に位置している。Fig.3.17 (a) は亀裂内部が水で満たされている場合の画像であり、Fig.3.17 (b) は亀裂内部が空気で満たされている場合である。Fig.3.17 (c) は Fig.3.17 (a)と(b)の画像の差画像（{画像(a)} - {画像(b)}）である。

画像(a)および(b)ともに花崗岩中に密度の高い白い斑点が分散し、花崗岩を構成する鉱物粒子の存在が確認できる。画像(c)では試料の輪郭はわずかに現れているが、亀裂だけが白く浮かびあがって表示されている。また、画像(a)および(b)で確認された花崗岩中の白い斑点はほとんど除去されていることが確認できる。このように、花崗岩のような不均質な試料においても、アルミニウムの場合と同様に、線吸収係数のバラツキやカップリングの影響を取り除くことができると考えられる。

#### ②CT 値の分布

Fig.3.17 の測線 I, II および III における CT 値の分布を Fig.3.18 から Fig.3.20 に示す。図の (a), (b) および (c) はそれぞれ亀裂内部が水で満たされている場合、空気で満たされている場合、および 画像(a) と(b)の差画像のそれに対応している。ただし、ここでは x 軸方向の降下域は亀裂を中心とした 20 ピクセル ( $\bar{P}=20$ ) とした。

まず、測線 I の Fig.3.18 について見ると、図(a)は亀裂内部が水であるので、亀裂内の CT 値は花崗岩のそれよりも小さくなる。図(b)は亀裂内部が空気であるため亀裂部分で CT 値が図(a)の場合よりも減少している。両図ともに、亀裂の左右での平均値が異なっており、周期的な CT 値の変化が確認できる。これは、鉱物粒子の影響と考えられる。図(a)および(b)の基準域の CT 値の分布は、図(a)で  $2397 \pm 46$ 、図(b)で  $2391 \pm 46$  とほぼ一致している。これらの標準偏差はアルミニウムのそれに比較して大きく、約 3 倍となっている。つぎに、図(c)における基準域の CT 値の分布は  $6 \pm 14$  と平均値はほぼ 0 であり、亀裂部分の CT 値が大きくなっている。また、図(a)および(b)での標準偏差の約 1/3 となり、アルミニウムのそれとほぼ同様な値となっている。この結果は、花崗岩のような不均質な物体においても画像間差分法が有効であることを示している。

なお、上記の傾向は、測線 II の Fig.3.19 および測線 III の Fig.3.20 から同様に確認でき、図(c)における基準域の CT 値の分布は、測線 II で  $5 \pm 13$ 、測線 III で  $1 \pm 11$  であった。また、測線は、亀裂開口量が多い方から I, II, III の順に配置しているため、開口量が小さくなるにしたがって、亀裂部分の CT 値も小さくなっている。

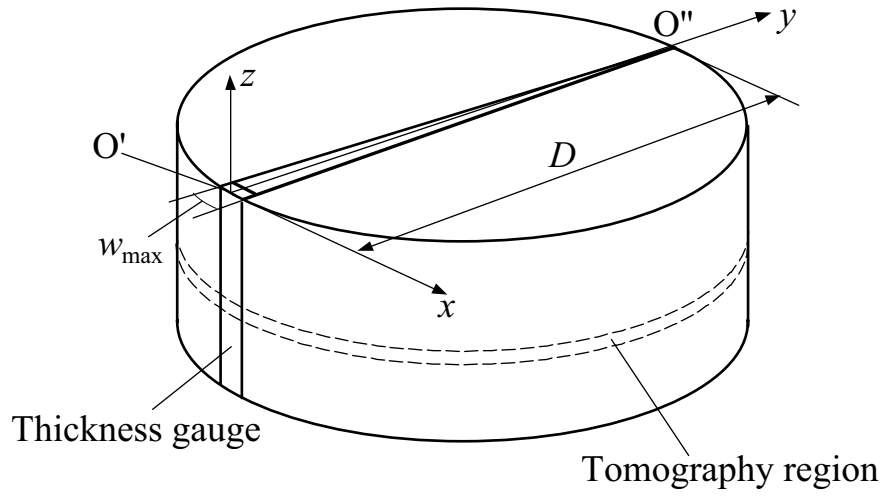


Fig.3.12 半月板試料模式図



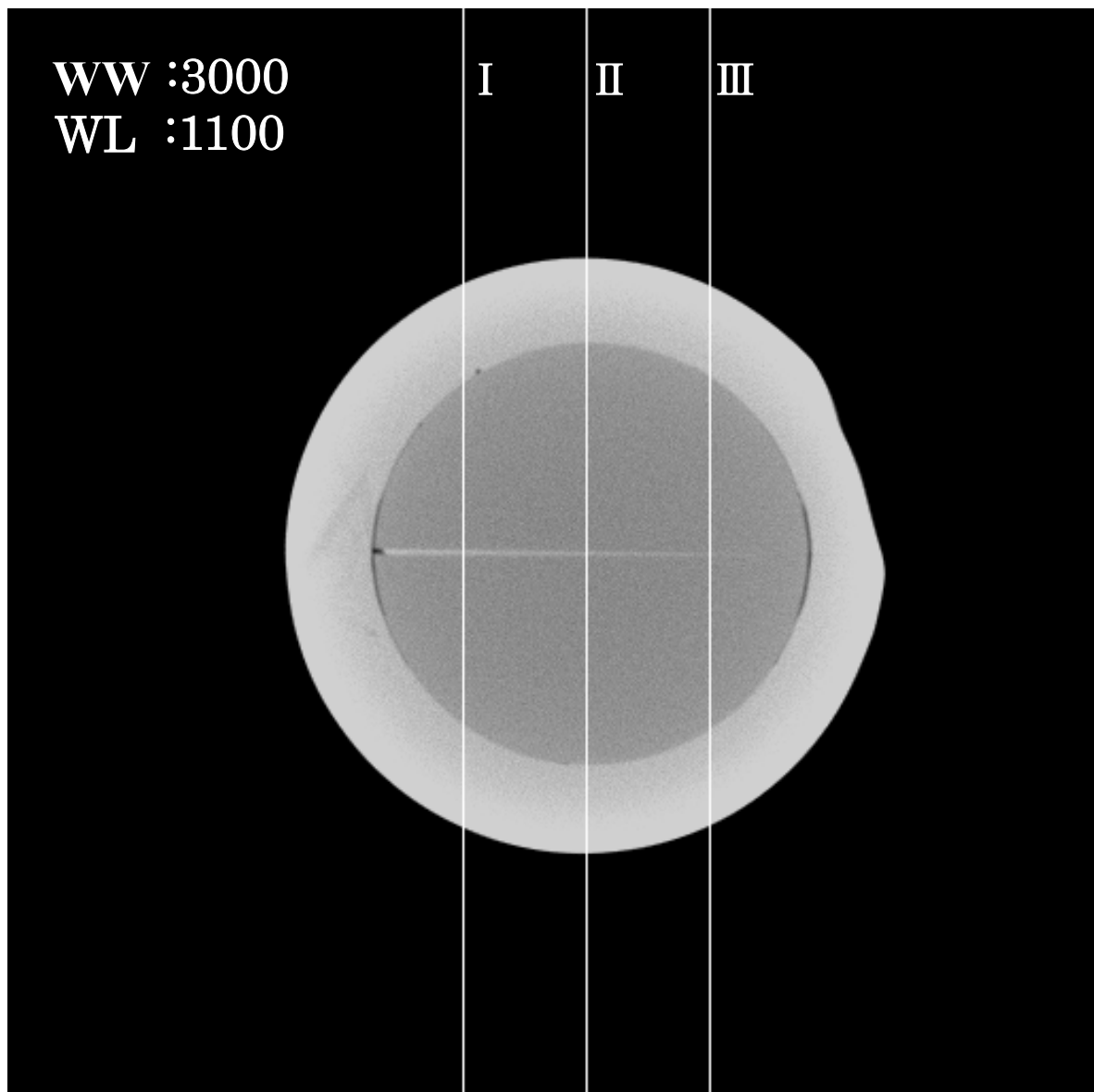


Fig.3.13(a) アルミニウムを用いた模擬亀裂の X 線 CT 画像（亀裂内：KI 水溶液）

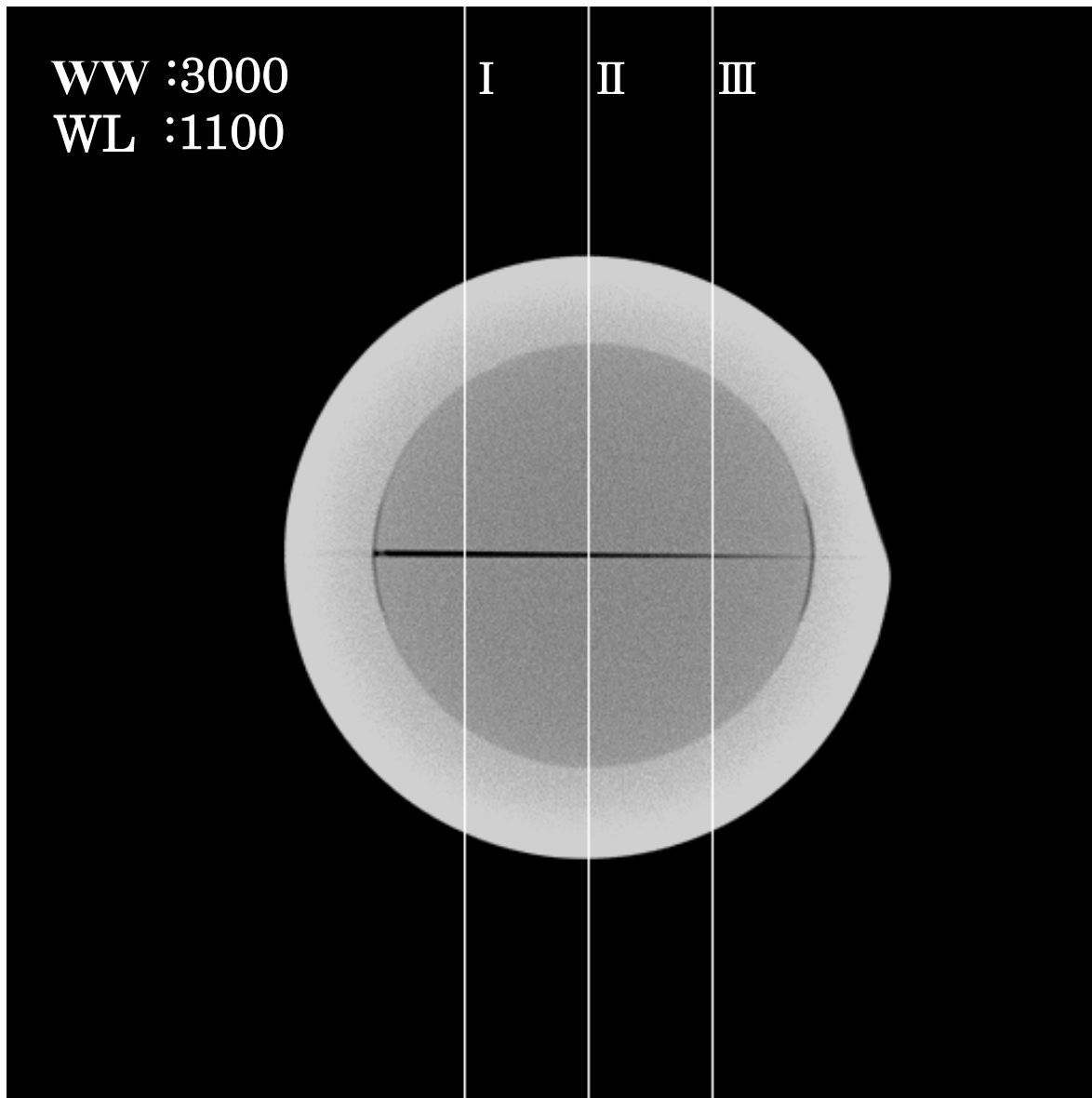


Fig.3.13(b) アルミニウムを用いた模擬亀裂の X 線 CT 画像（亀裂内：空気）

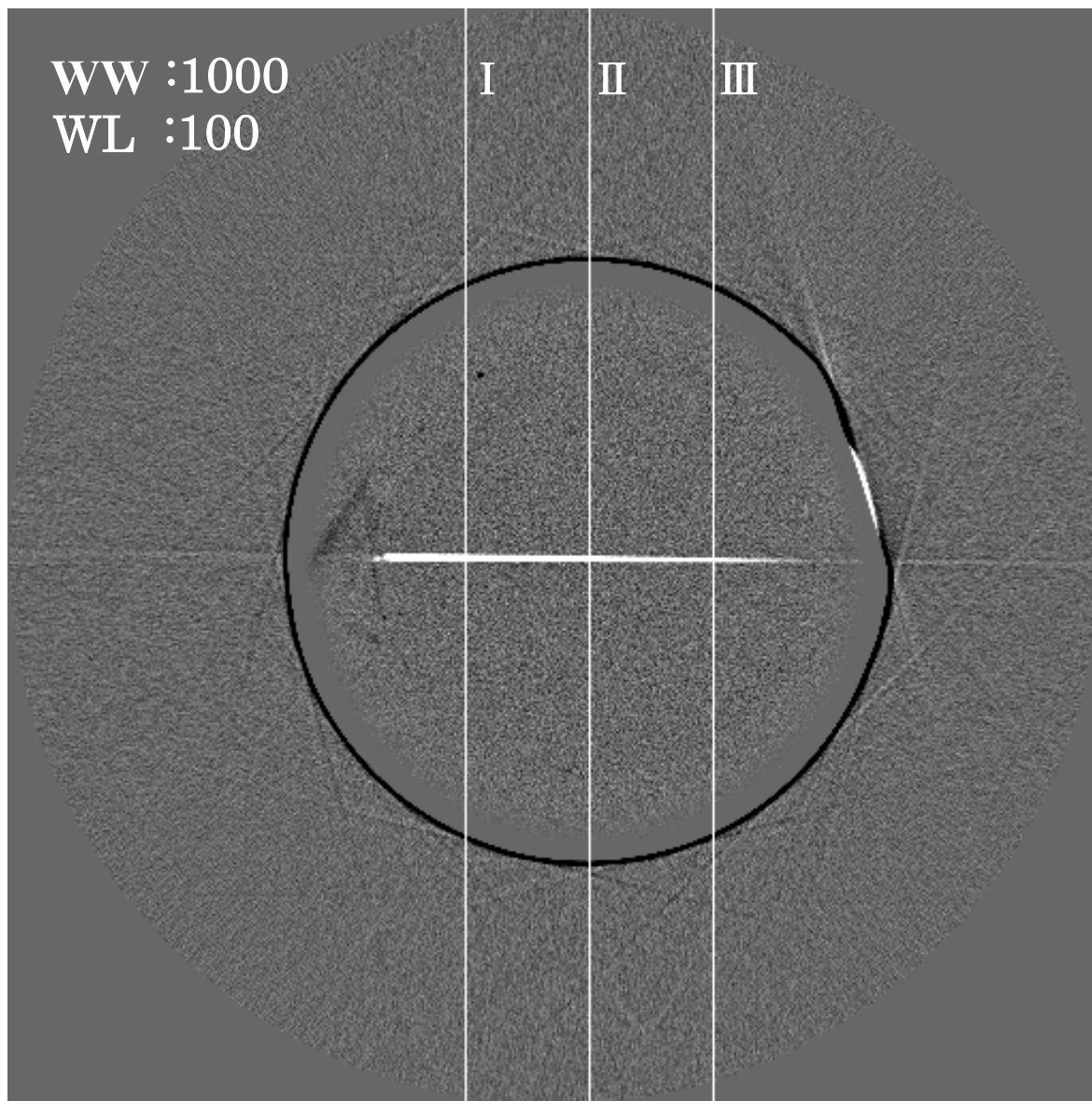


Fig.3.13(c) アルミニウムを用いた模擬亀裂の X 線 CT 画像  
(差画像 : {画像(a)- {画像(b)}})

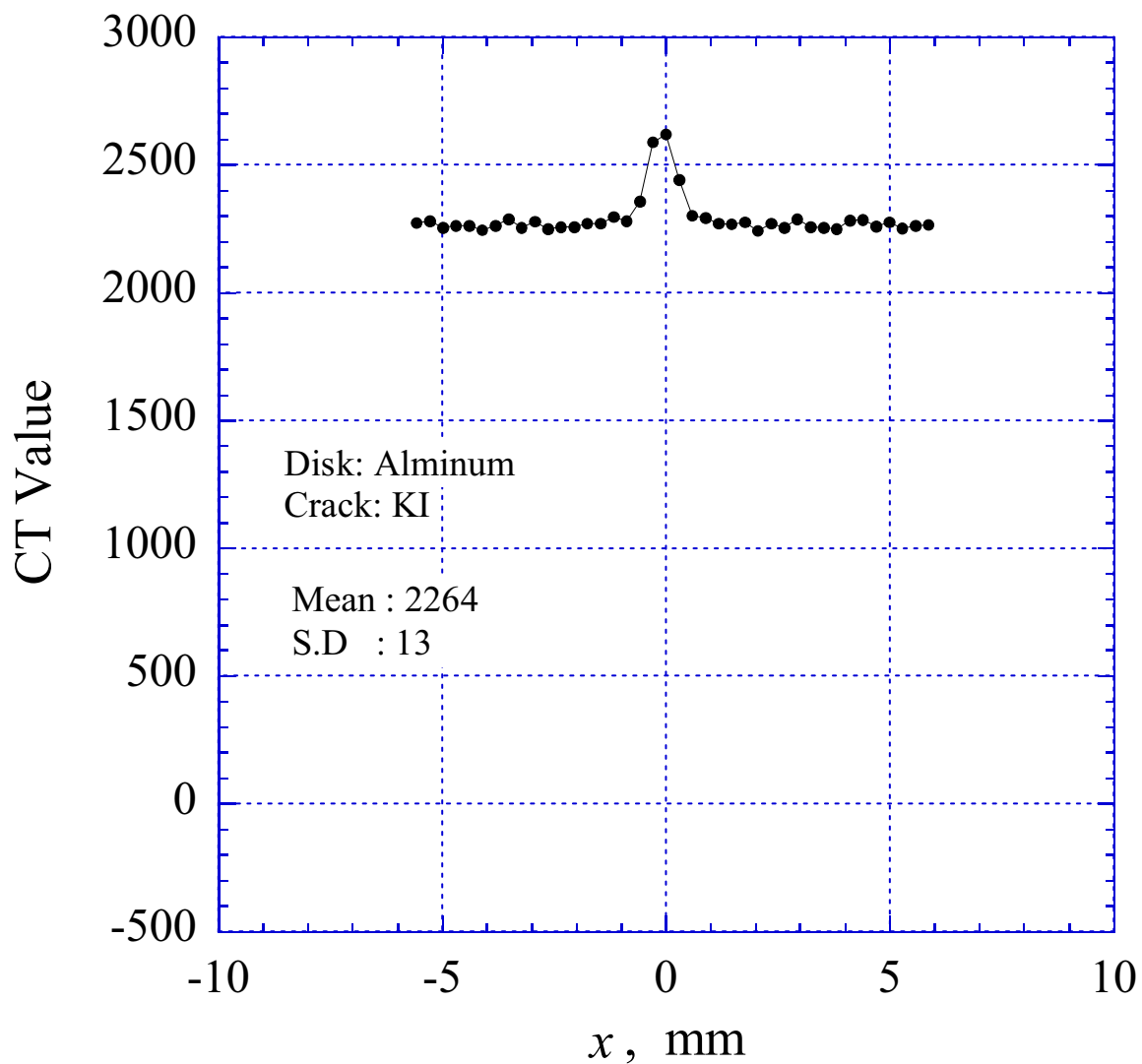


Fig.3.14(a) 測線 I における CT 値分布 (アルミニウム, 亀裂内 : KI 水溶液)

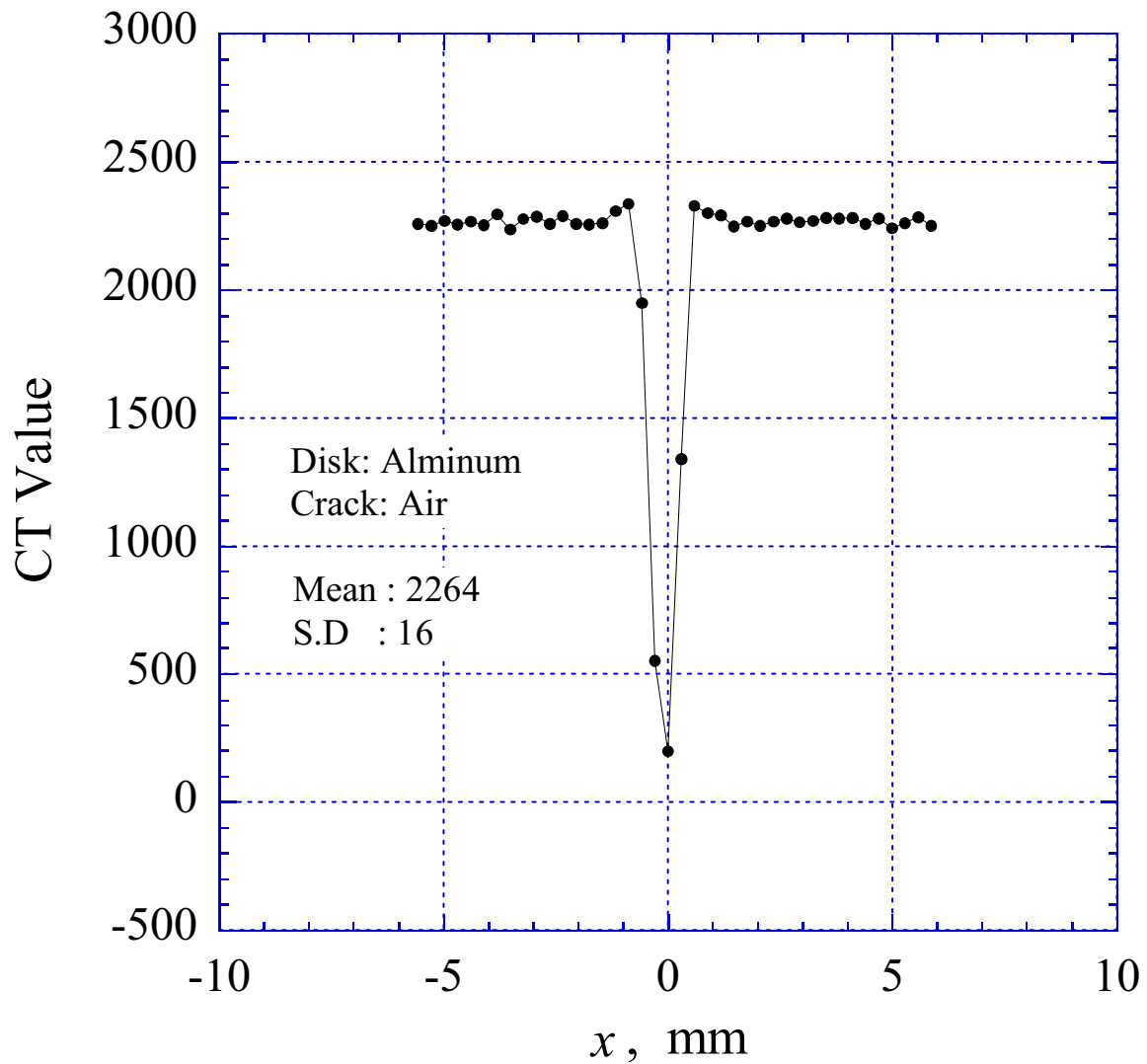


Fig.3.14(b) 測線 I における CT 値分布 (アルミニウム, 亀裂内: 空気)

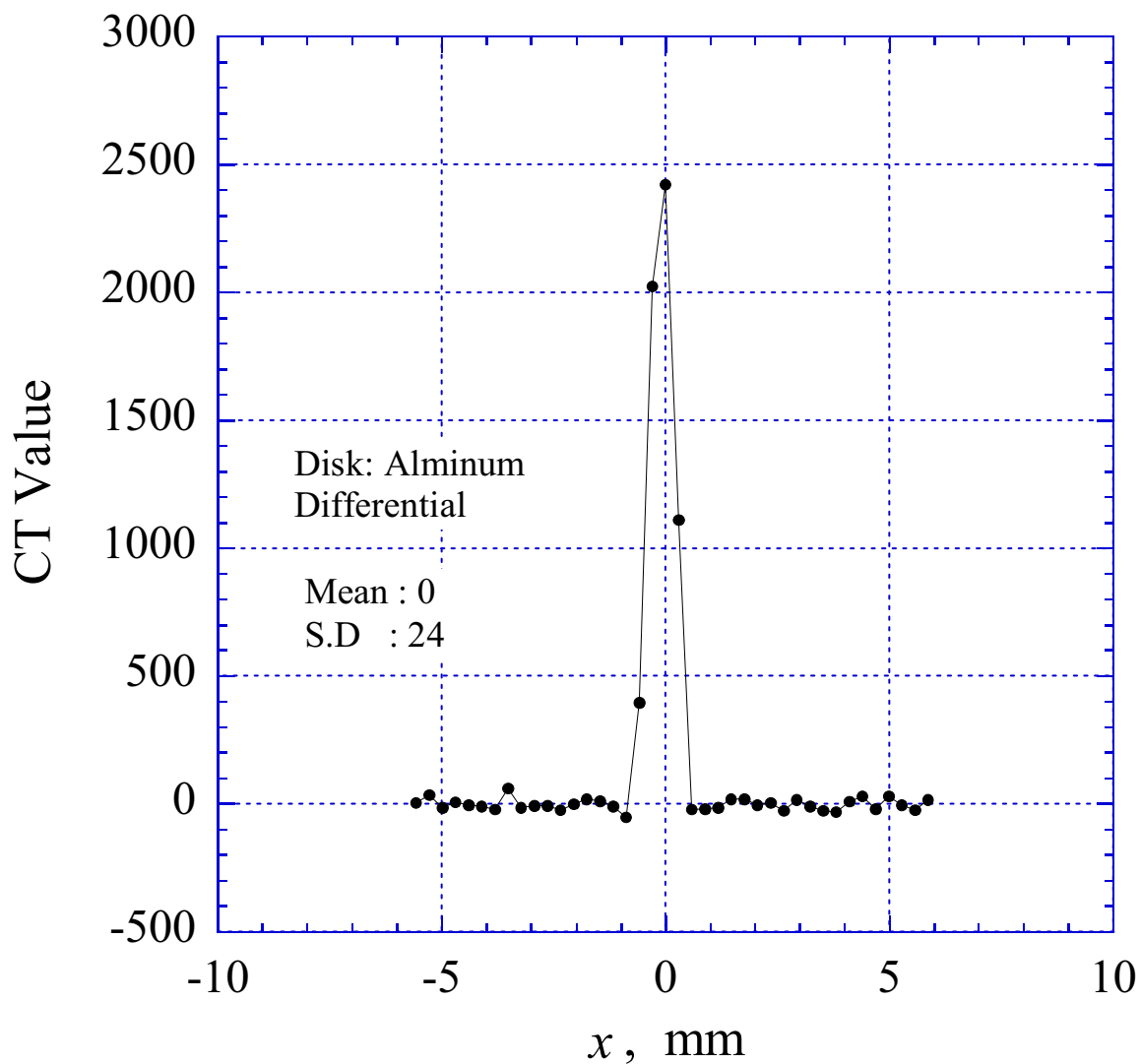


Fig.3.14(c) 測線 I における CT 値分布  
(アルミニウム, 差画像 : { 画像 (a) } - { 画像 (b) })

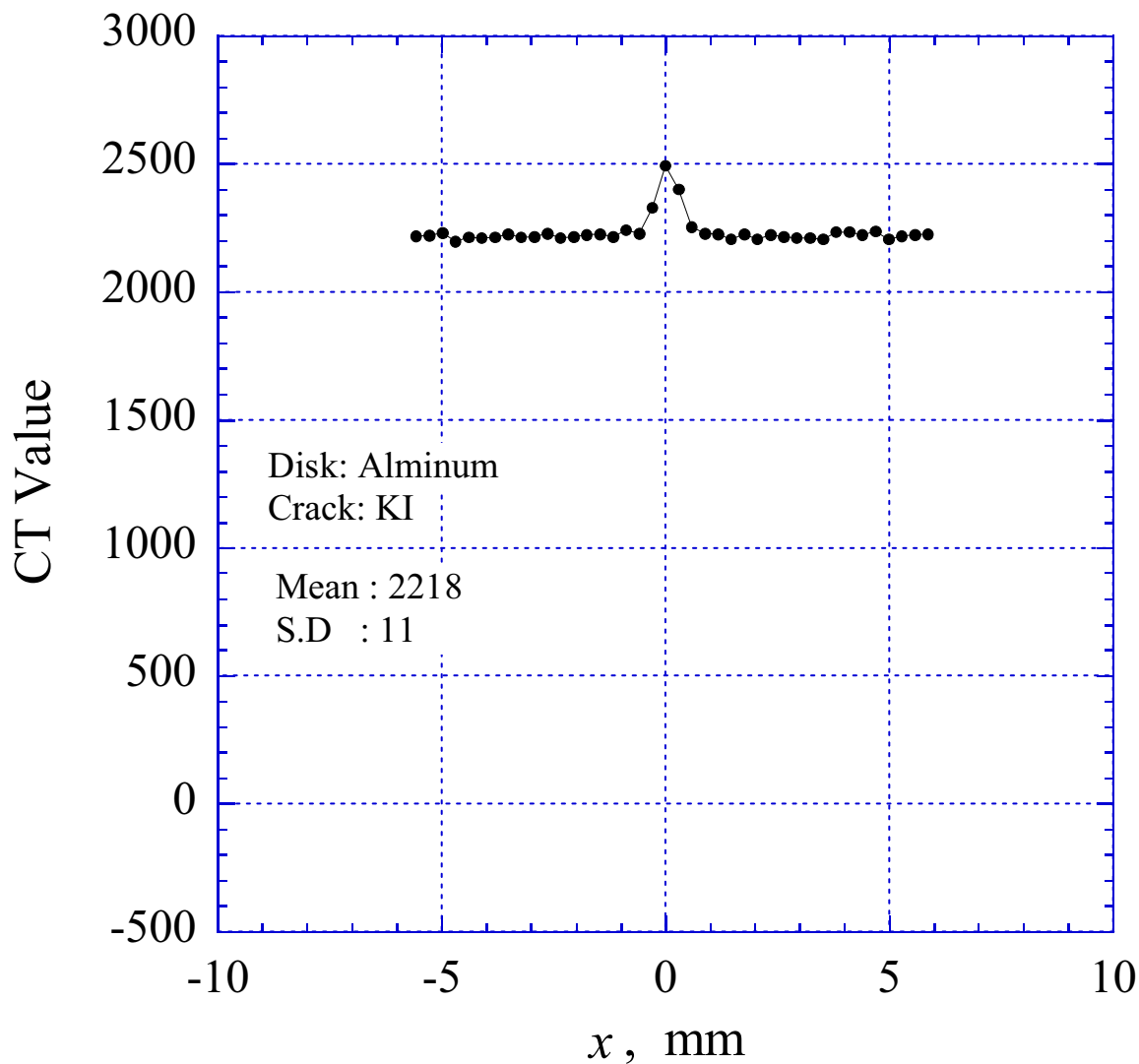


Fig.3.15(a) 測線Ⅱにおける CT 値分布 (アルミニウム, 亀裂内 : KI 水溶液)

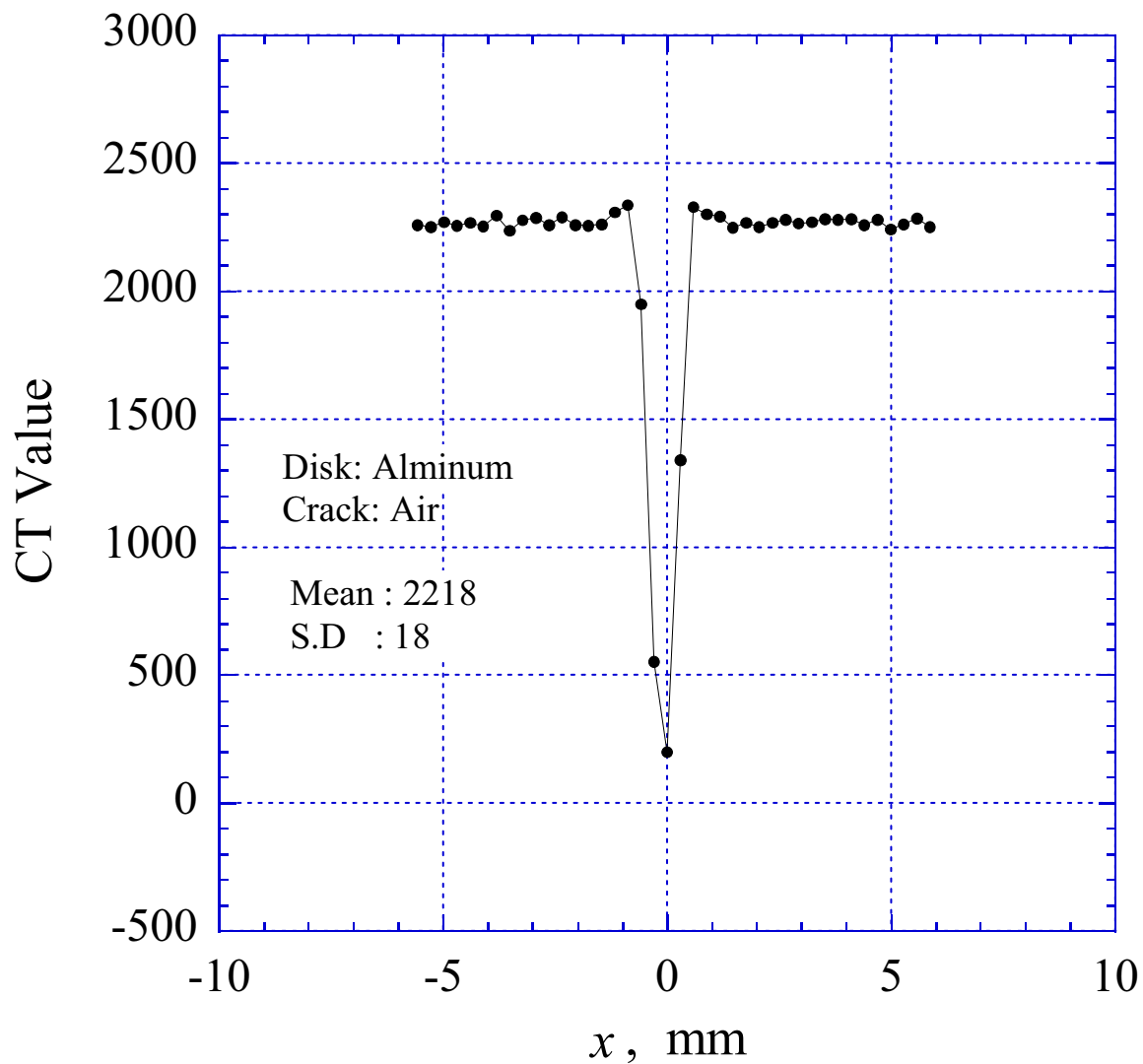


Fig.3.15(b) 測線Ⅱにおける CT 値分布 (アルミニウム, 亀裂内: 空気)



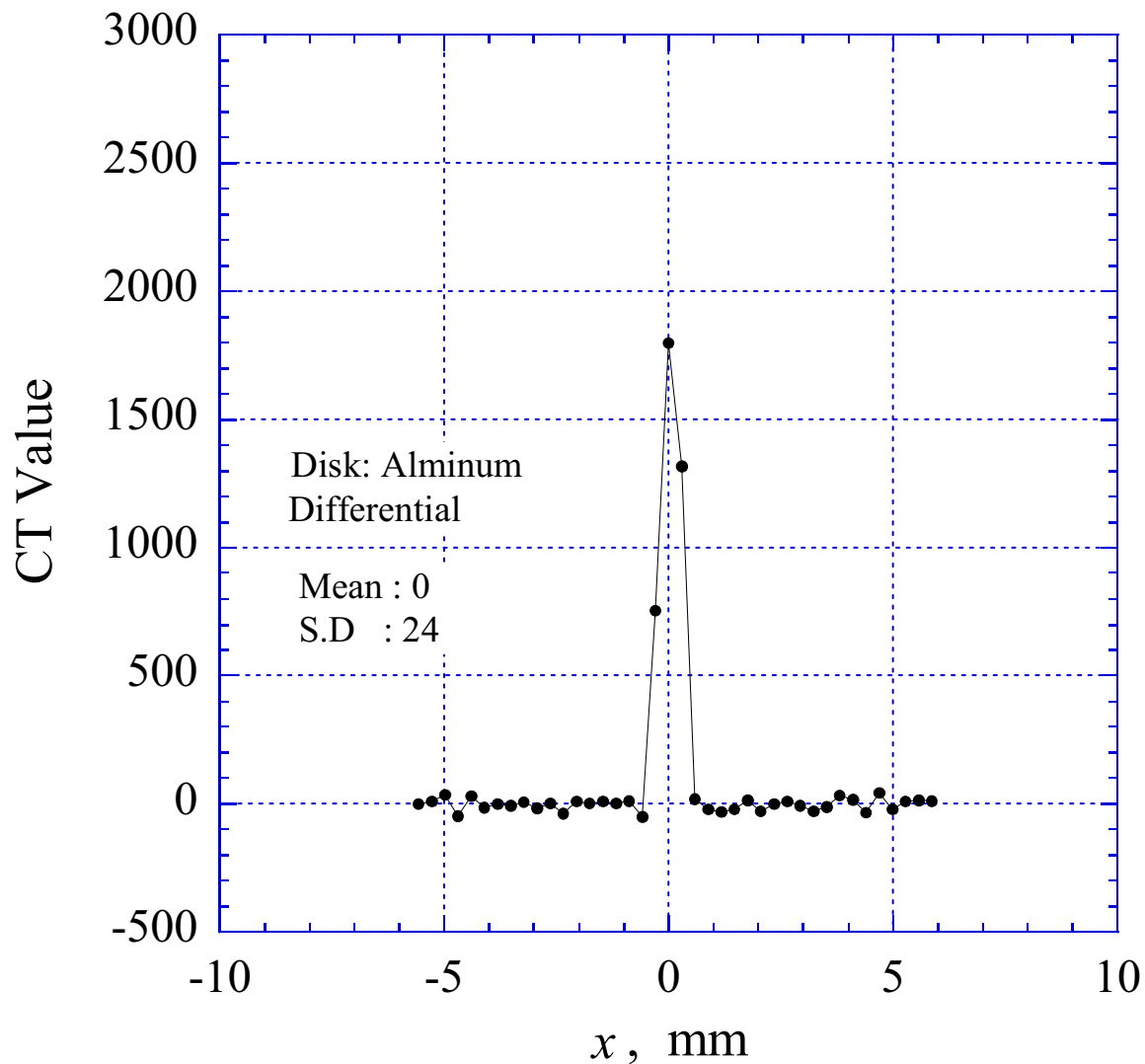


Fig.3.15(c) 測線IIにおけるCT値分布  
(アルミニウム, 差画像 : { 画像 (a) } - { 画像 (b) })

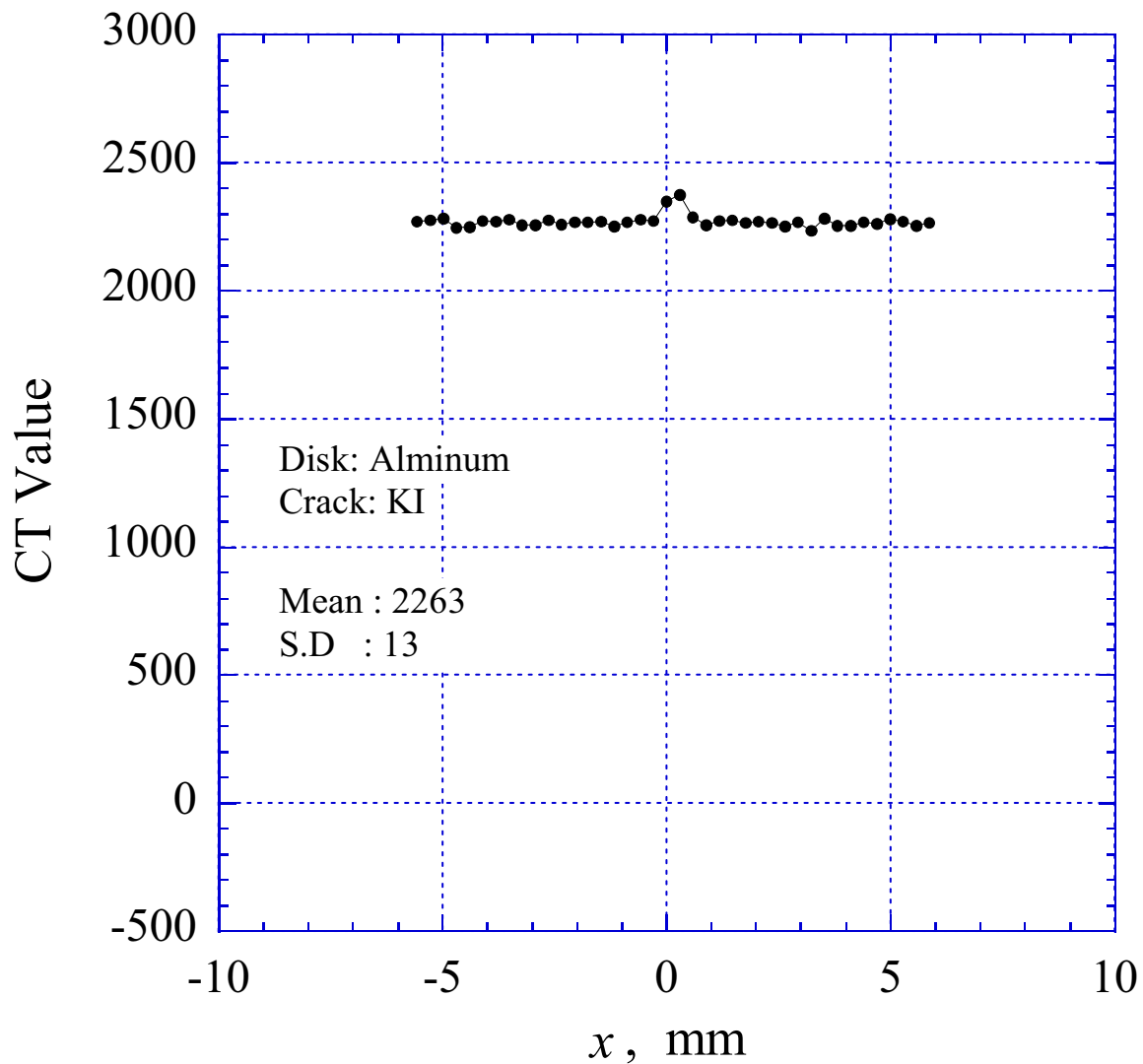


Fig.3.16(a) 測線Ⅲにおける CT 値分布 (アルミニウム, 亀裂内 : KI 水溶液)

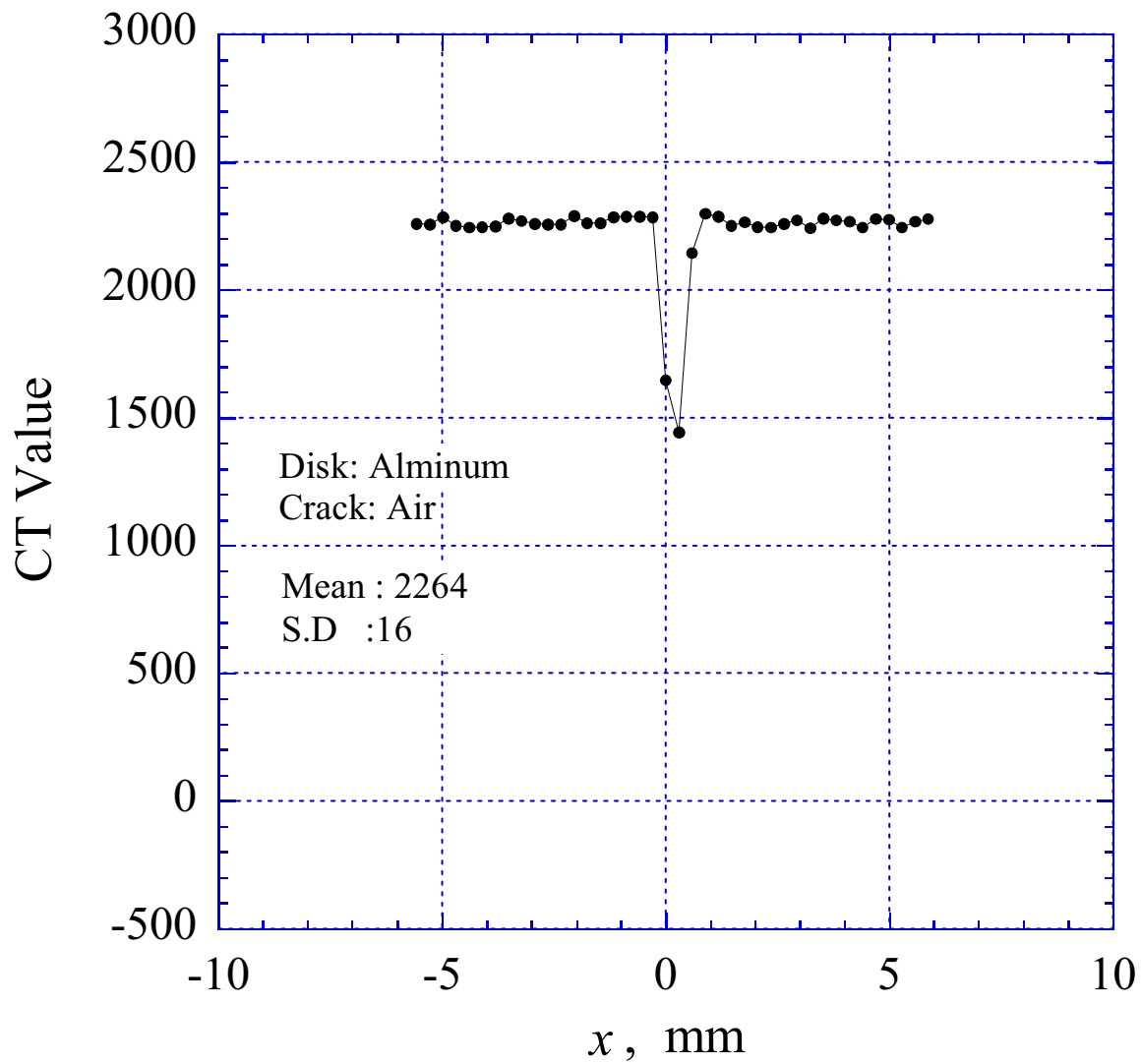


Fig.3.16(b) 測線Ⅲにおける CT 値分布 (アルミニウム, 亀裂内: 空気)

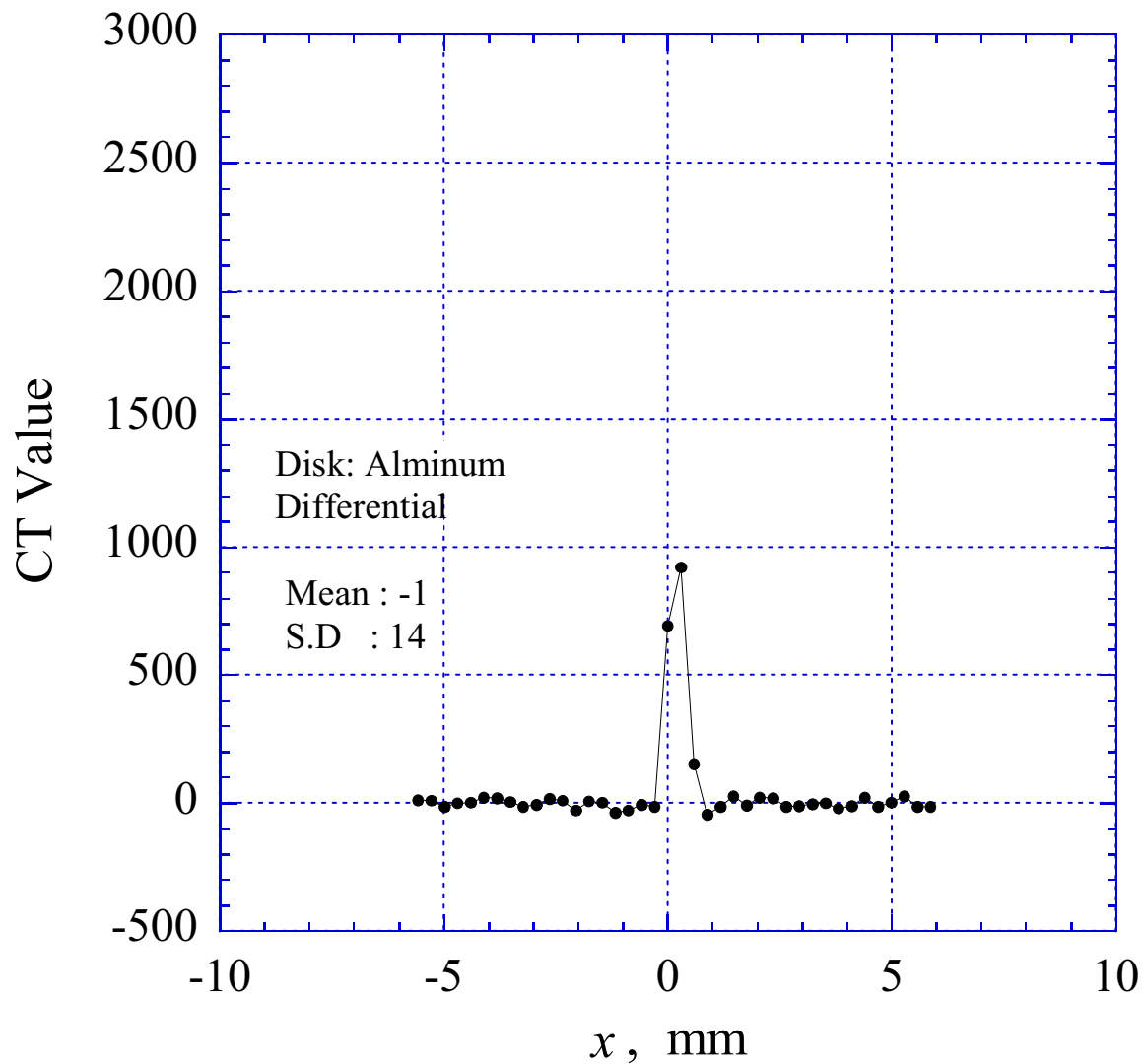


Fig.3.16(c) 測線Ⅲにおける CT 値分布  
(アルミニウム, 差画像 : { 画像 (a) } - { 画像 (b) })

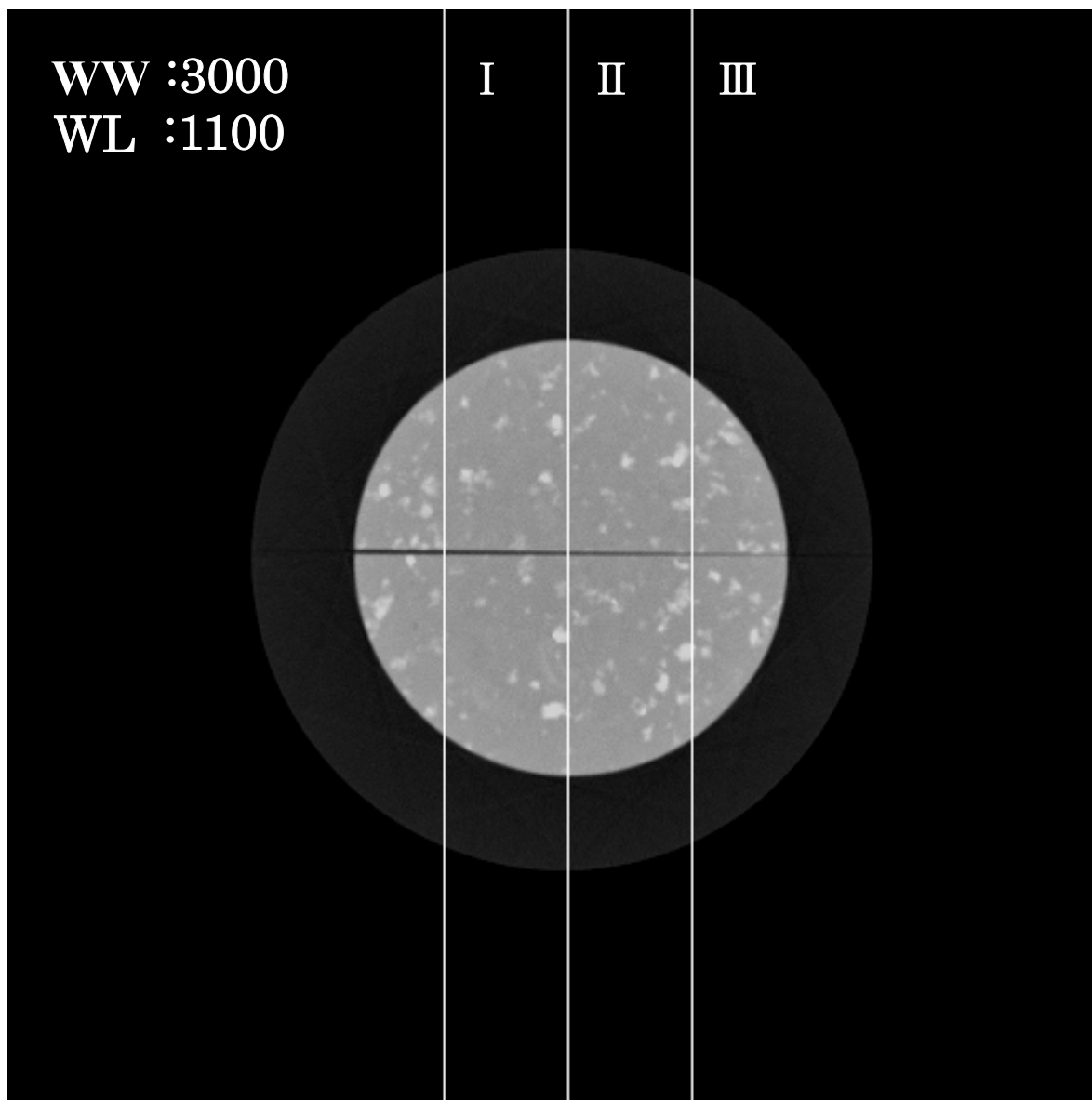


Fig.3.17(a) 花崗岩を用いた模擬亀裂の X 線 CT 画像（亀裂内：水）

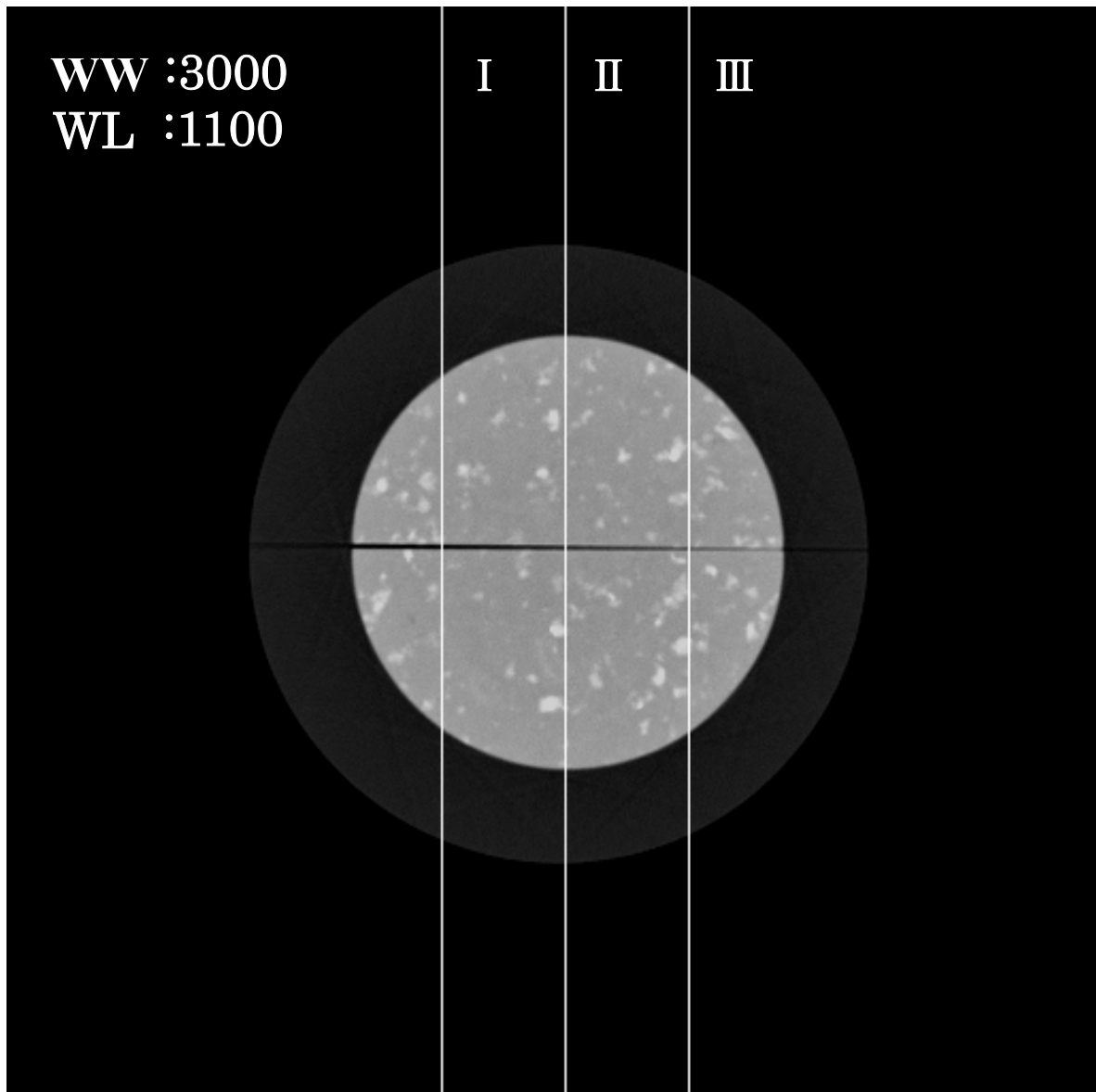


Fig.3.17(b) 花崗岩を用いた模擬亀裂の X 線 CT 画像（亀裂内：空気）

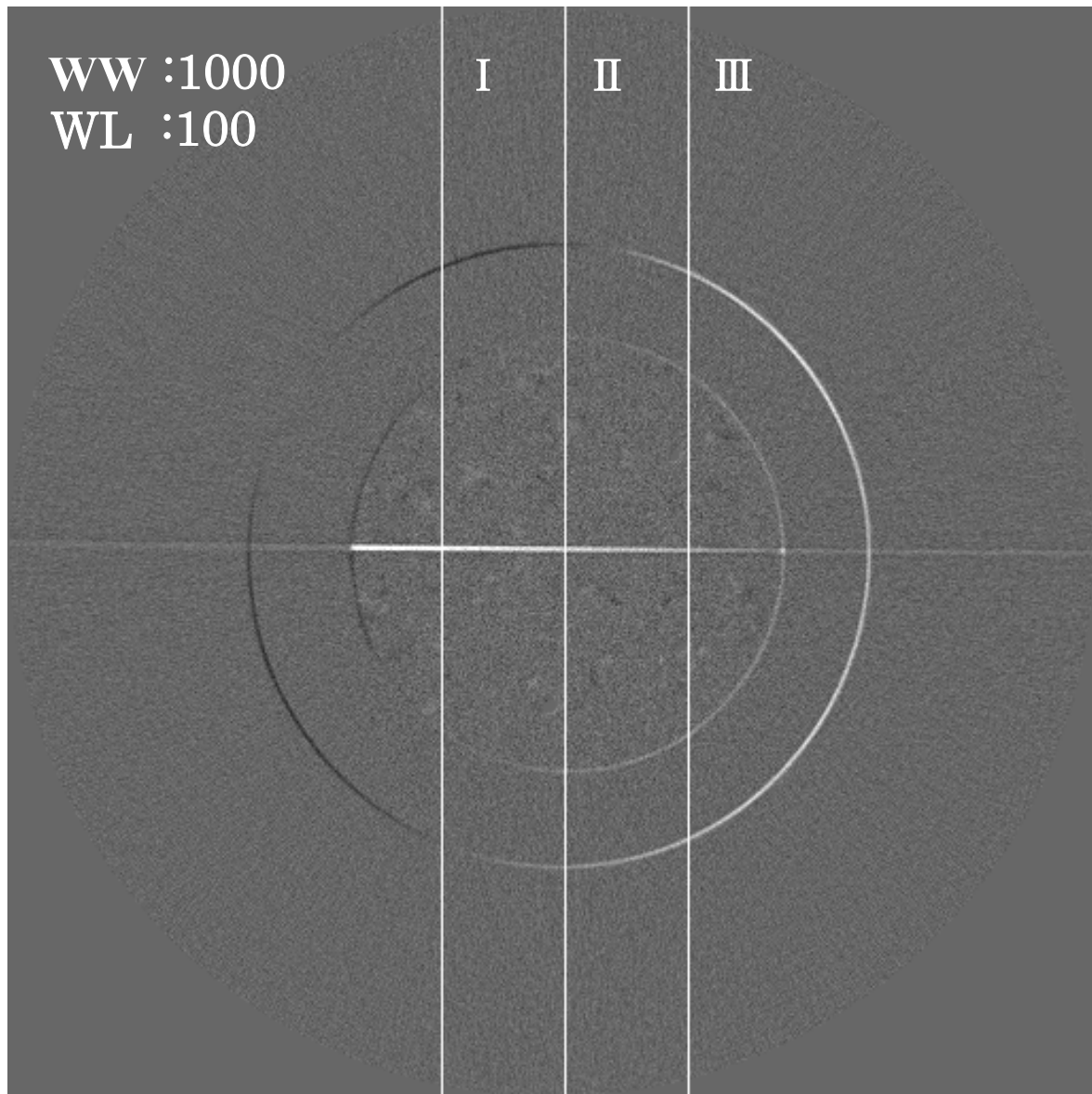


Fig.3.17(c) 花崗岩を用いた模擬亀裂の X 線 CT 画像  
(差画像 : { 画像 (a) } - { 画像 (b) })

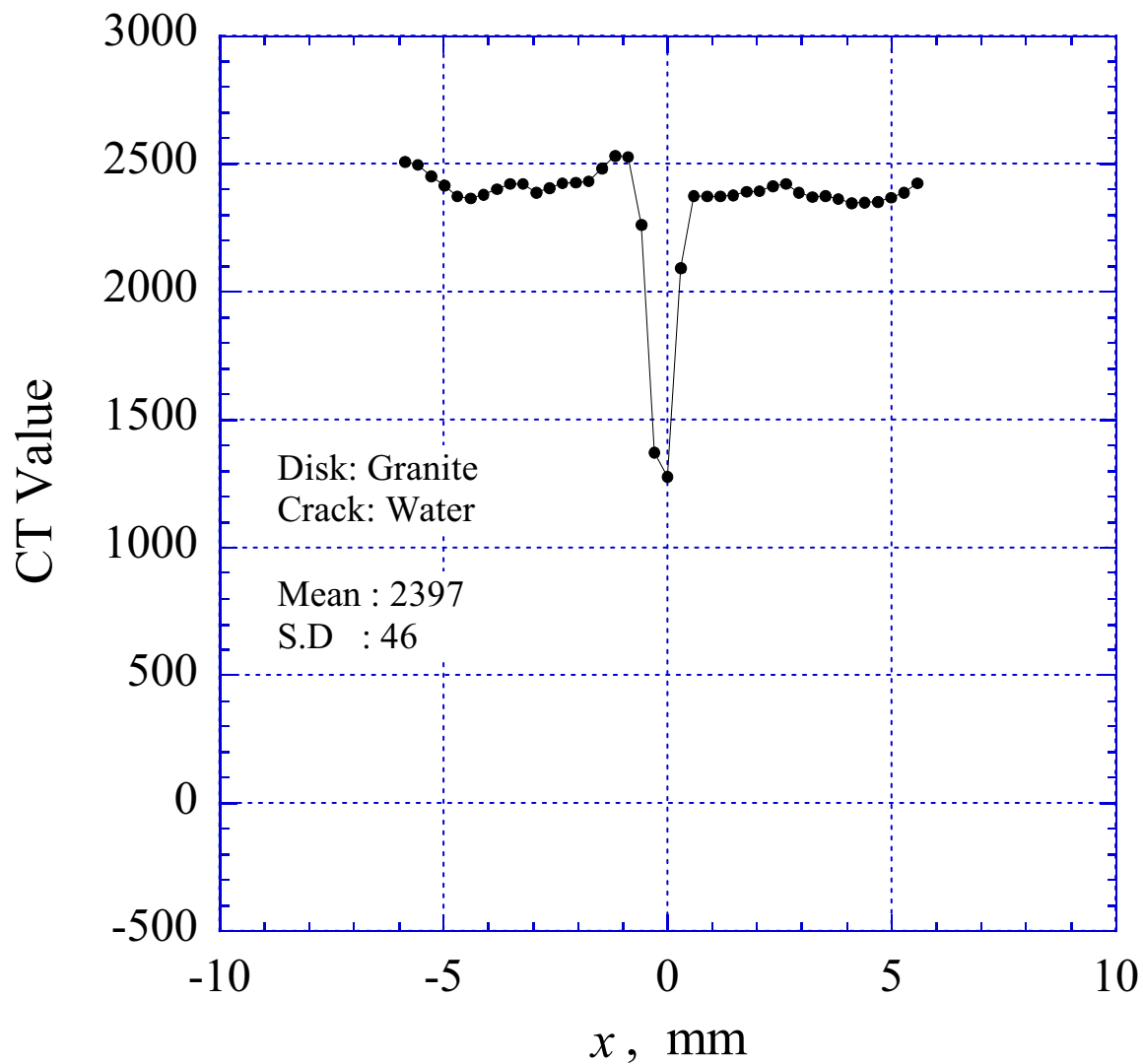


Fig.3.18(a) 測線 I における CT 値分布 (花崗岩, 亀裂内 : 水)



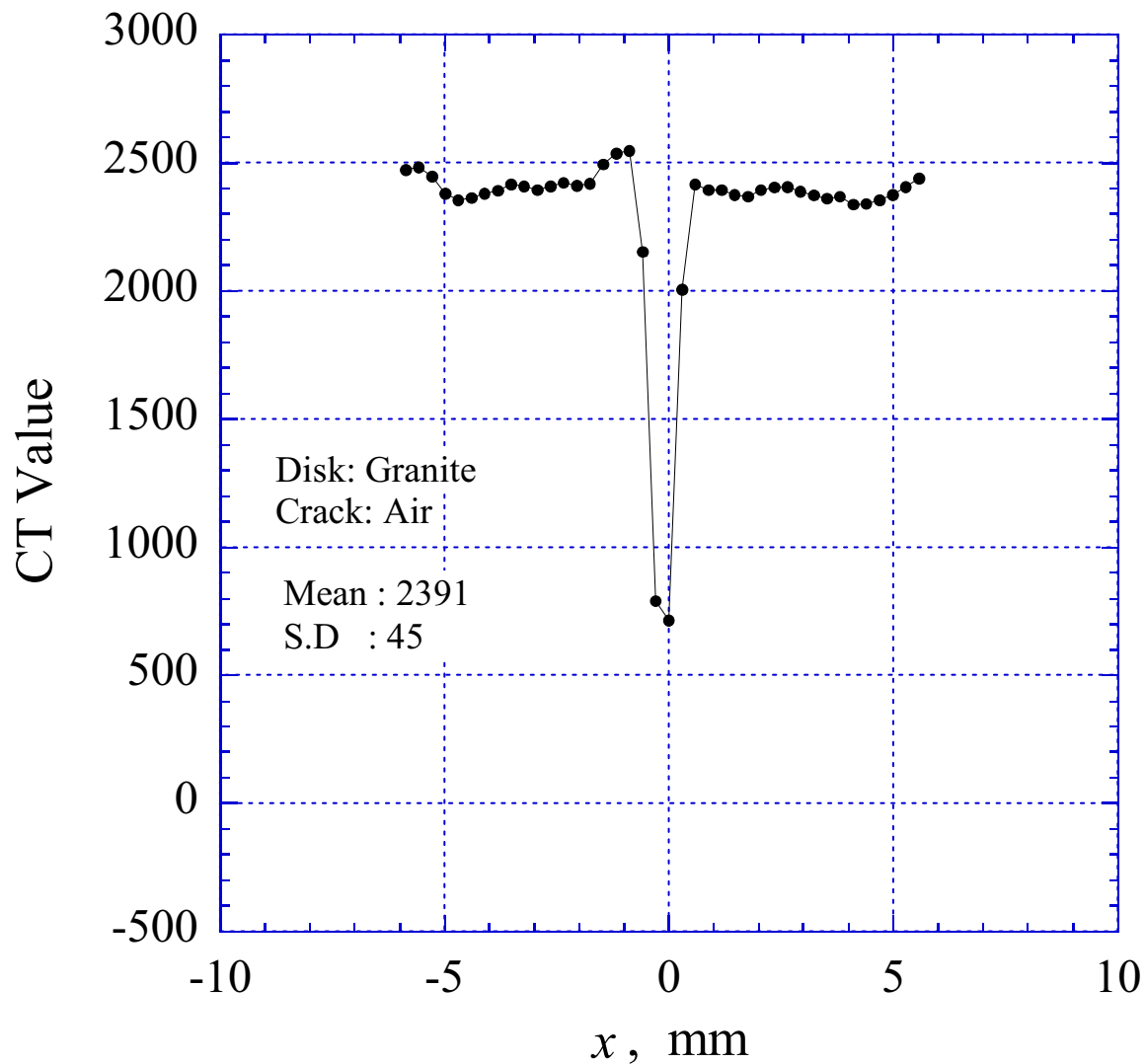


Fig.3.18(b) 測線 I における CT 値分布 (花崗岩, 亀裂内: 空気)

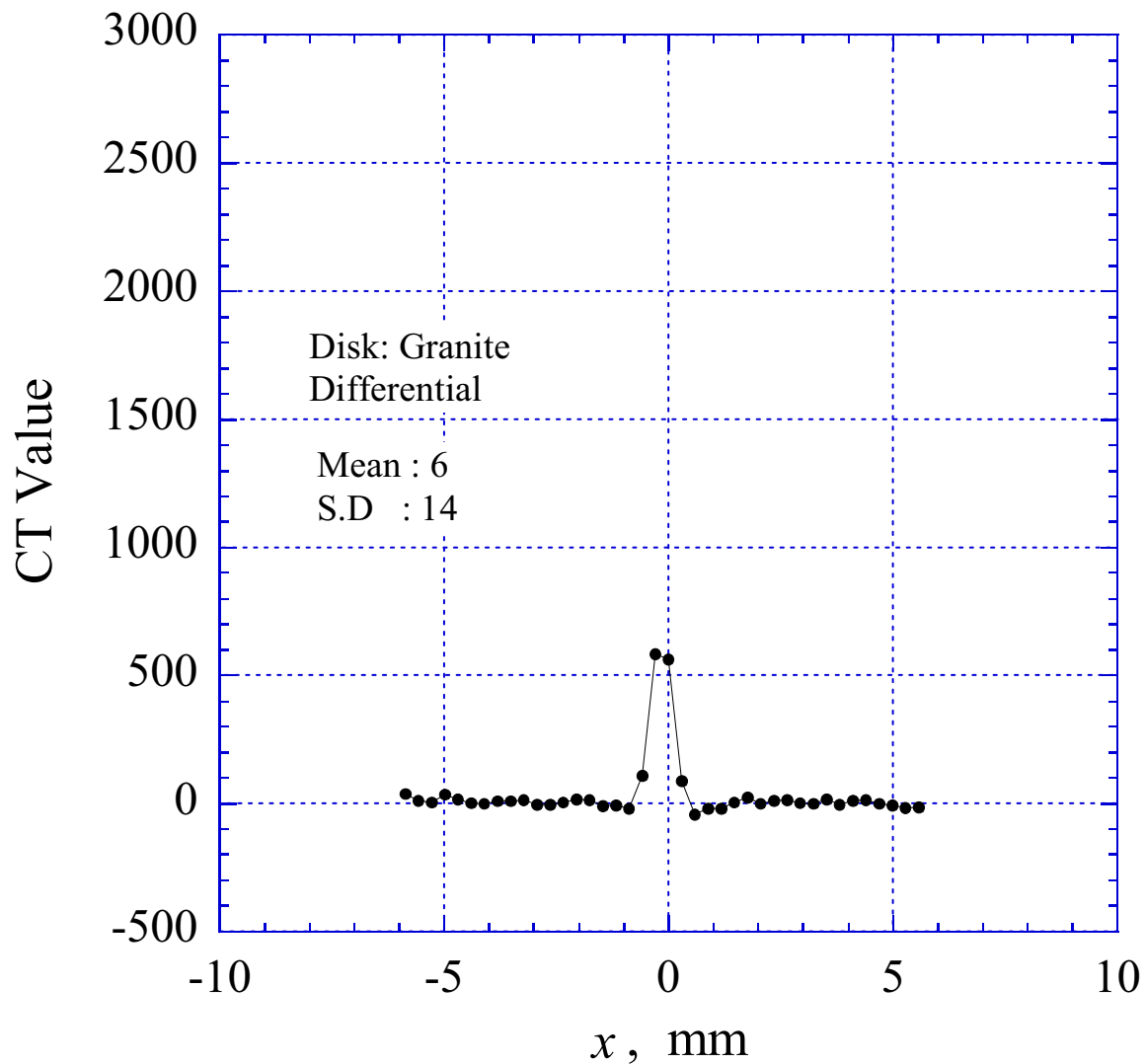


Fig.3.18(c) 測線 I における CT 値分布 (花崗岩, 差画像 : { 画像 (a) } - { 画像 (b) })

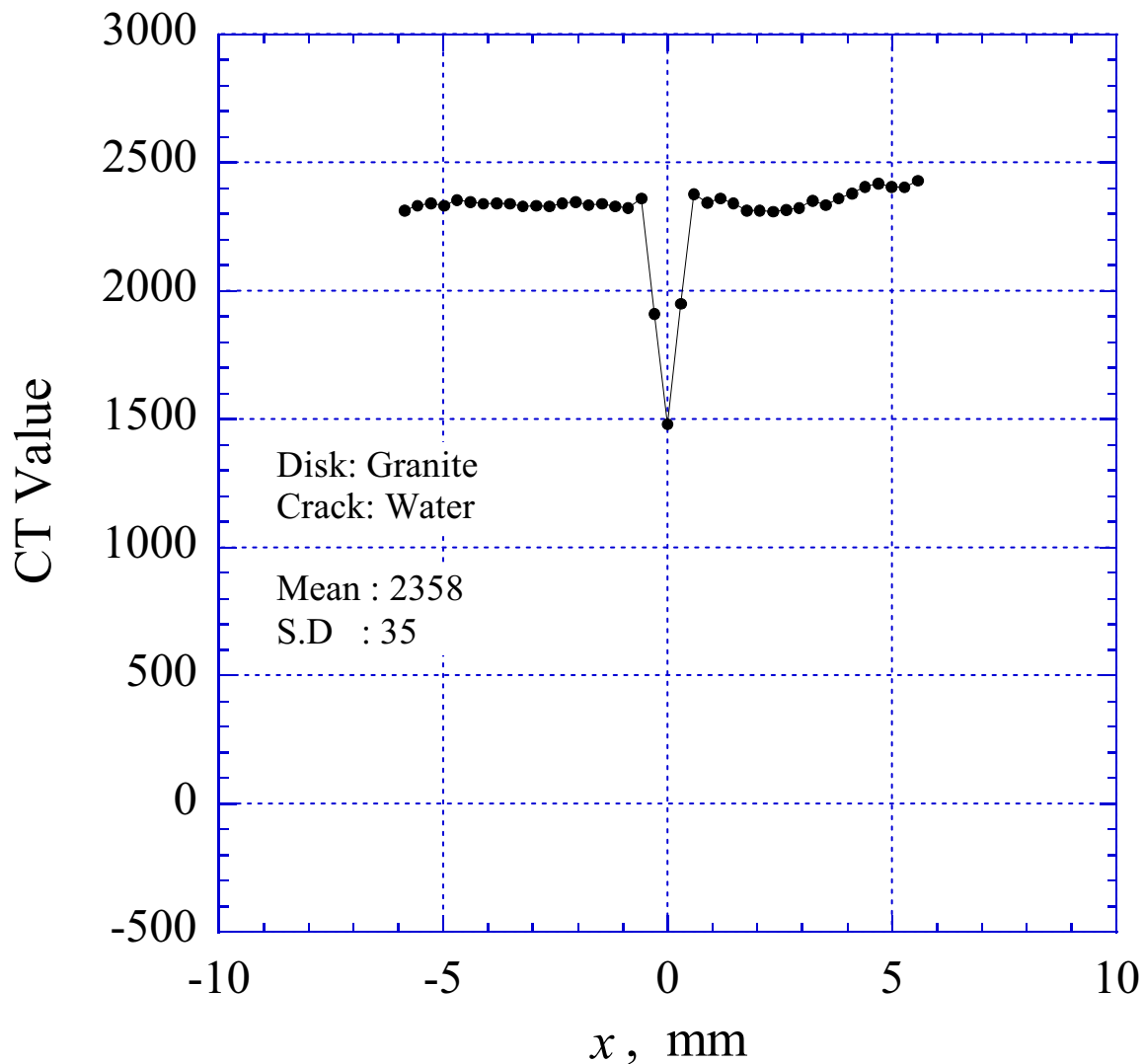


Fig.3.19(a) 測線ⅡにおけるCT値分布（花崗岩，亀裂内：水）

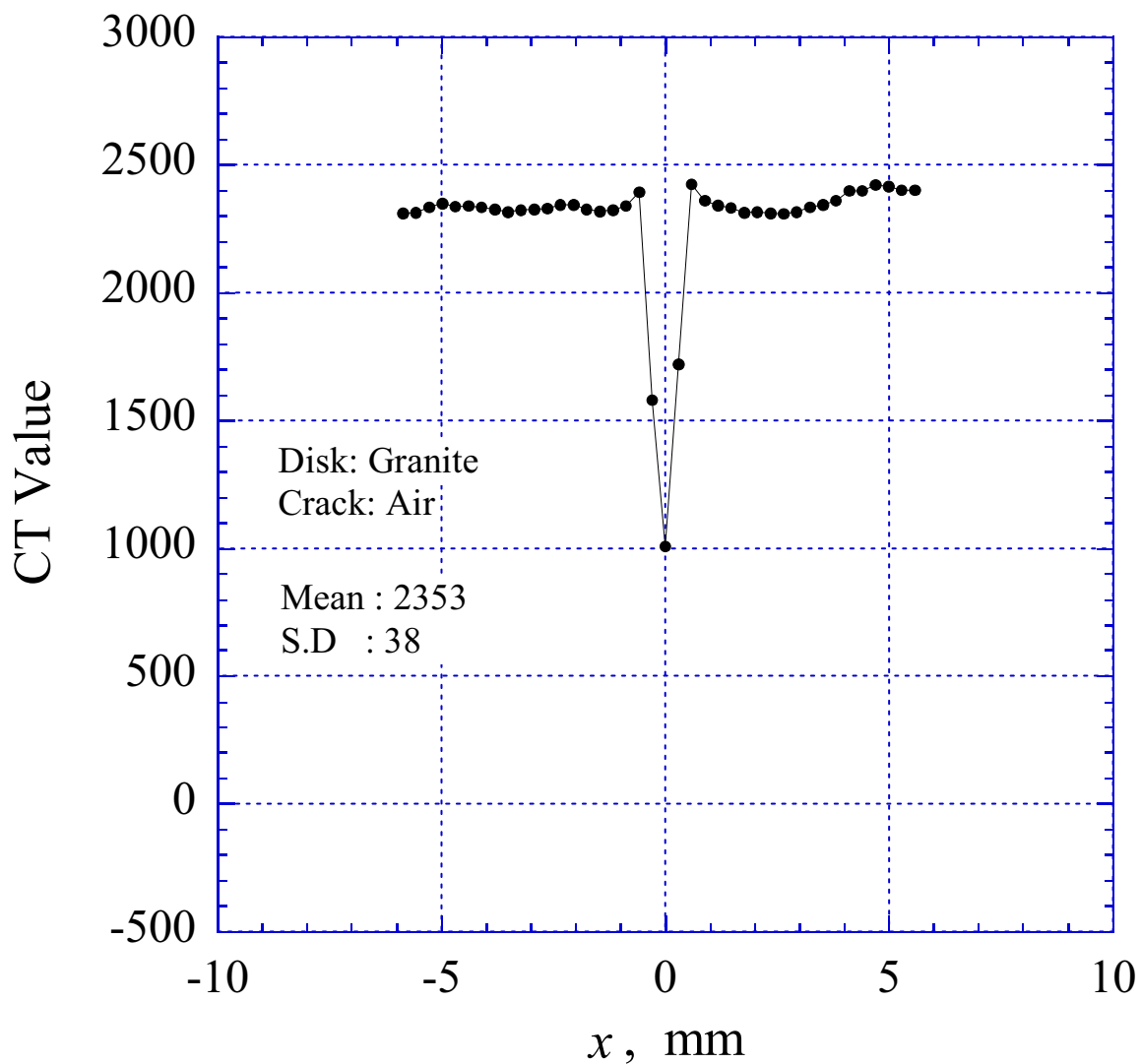


Fig.3.19(b) 測線Ⅱにおける CT 値分布 (花崗岩, 亀裂内: 空気)

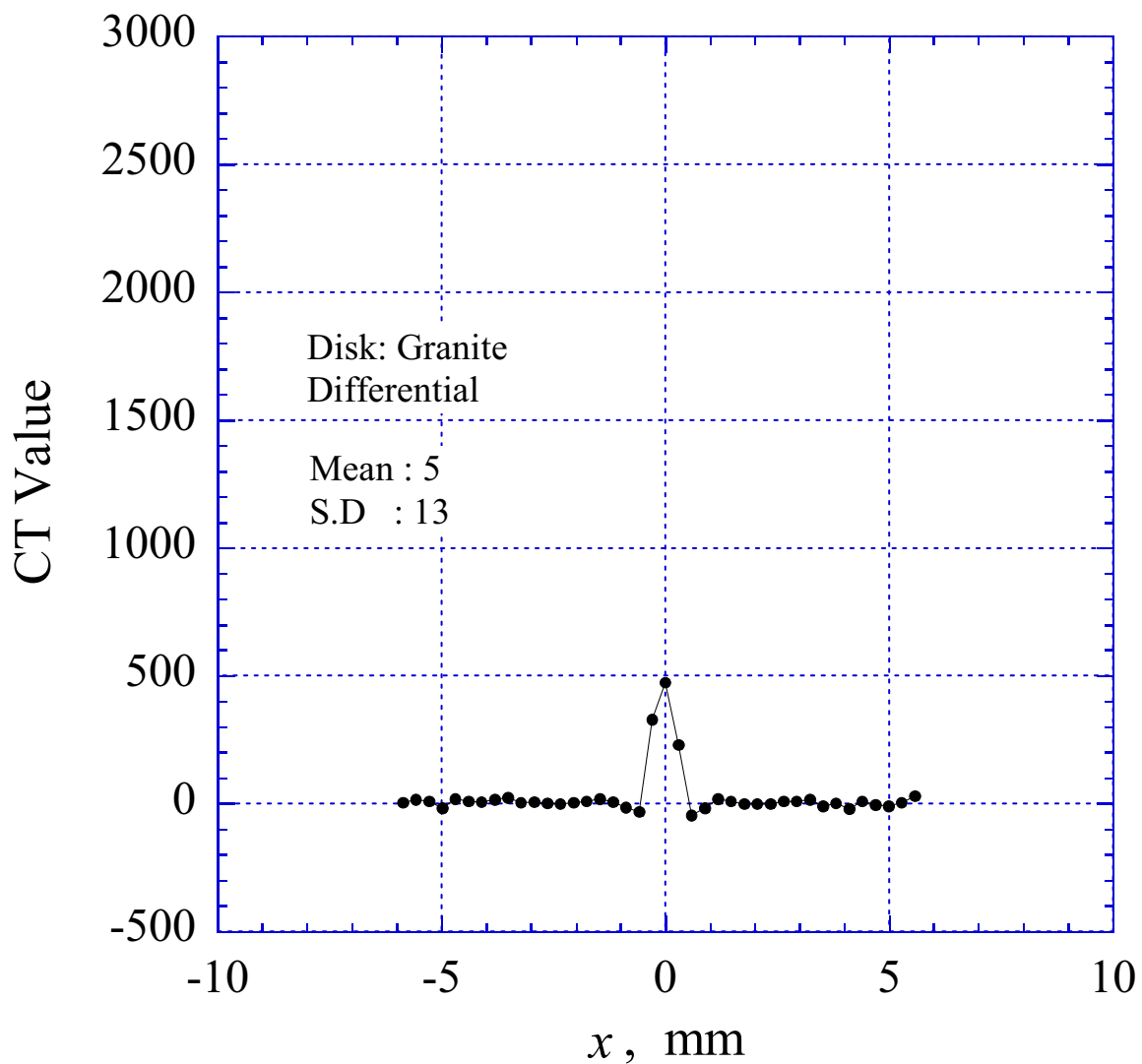


Fig.3.19(c) 測線Ⅱにおける CT 値分布 (花崗岩, 差画像 : { 画像 (a) } - { 画像 (b) })

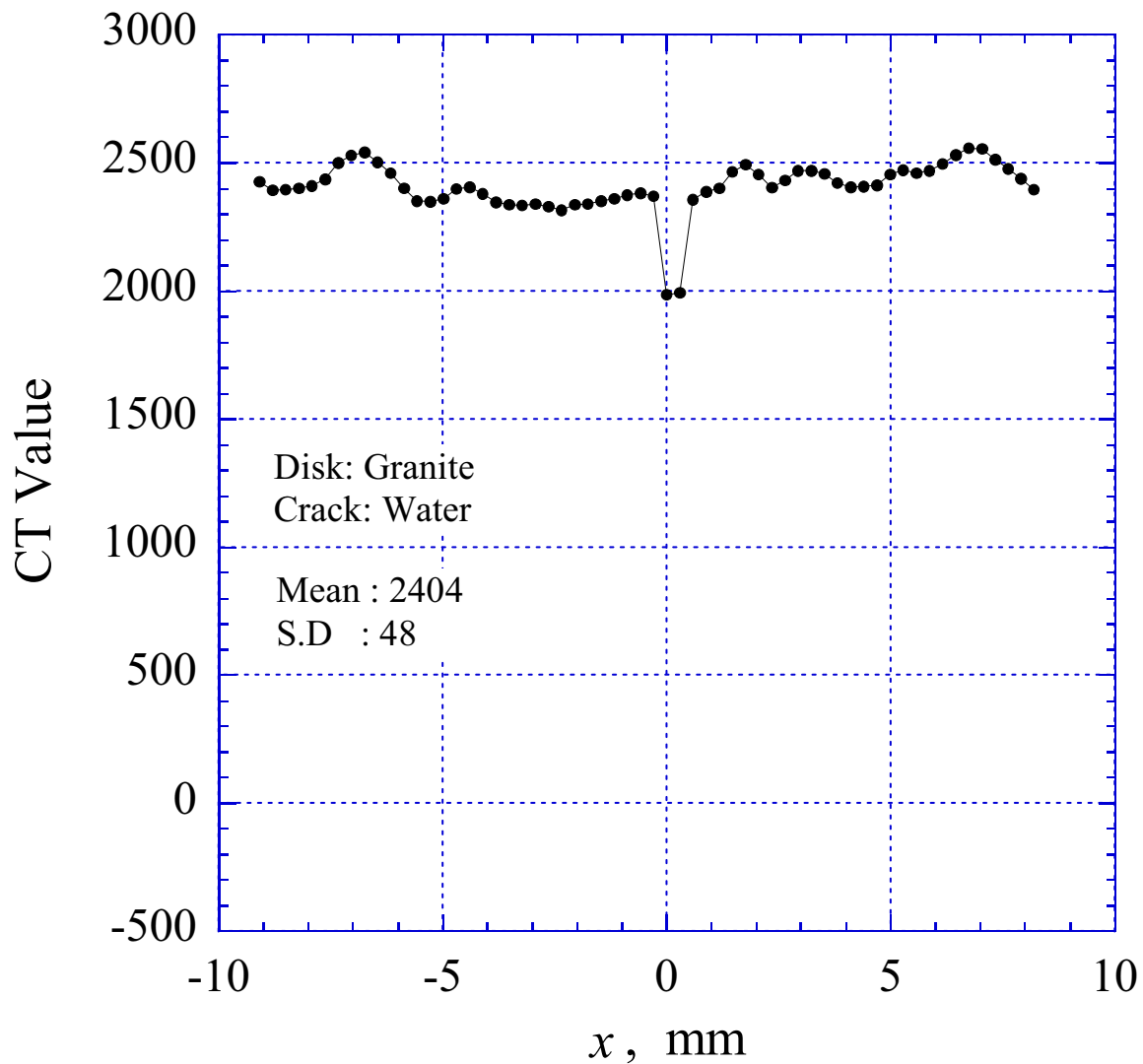


Fig.3.20(a) 測線Ⅲにおける CT 値分布 (花崗岩, 亀裂内: 水)

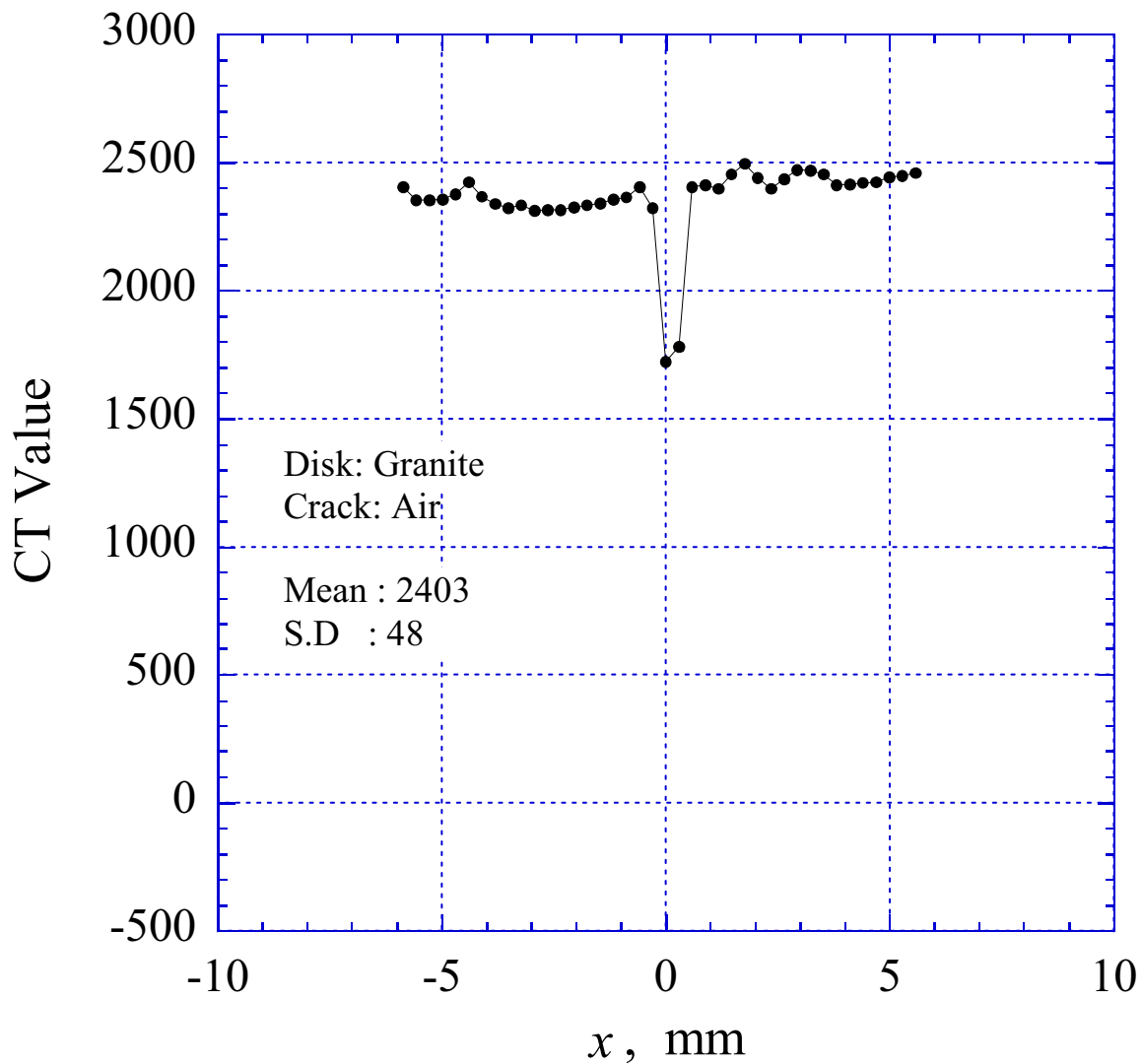


Fig.3.20(b) 測線Ⅲにおける CT 値分布 (花崗岩, 亀裂内: 空気)

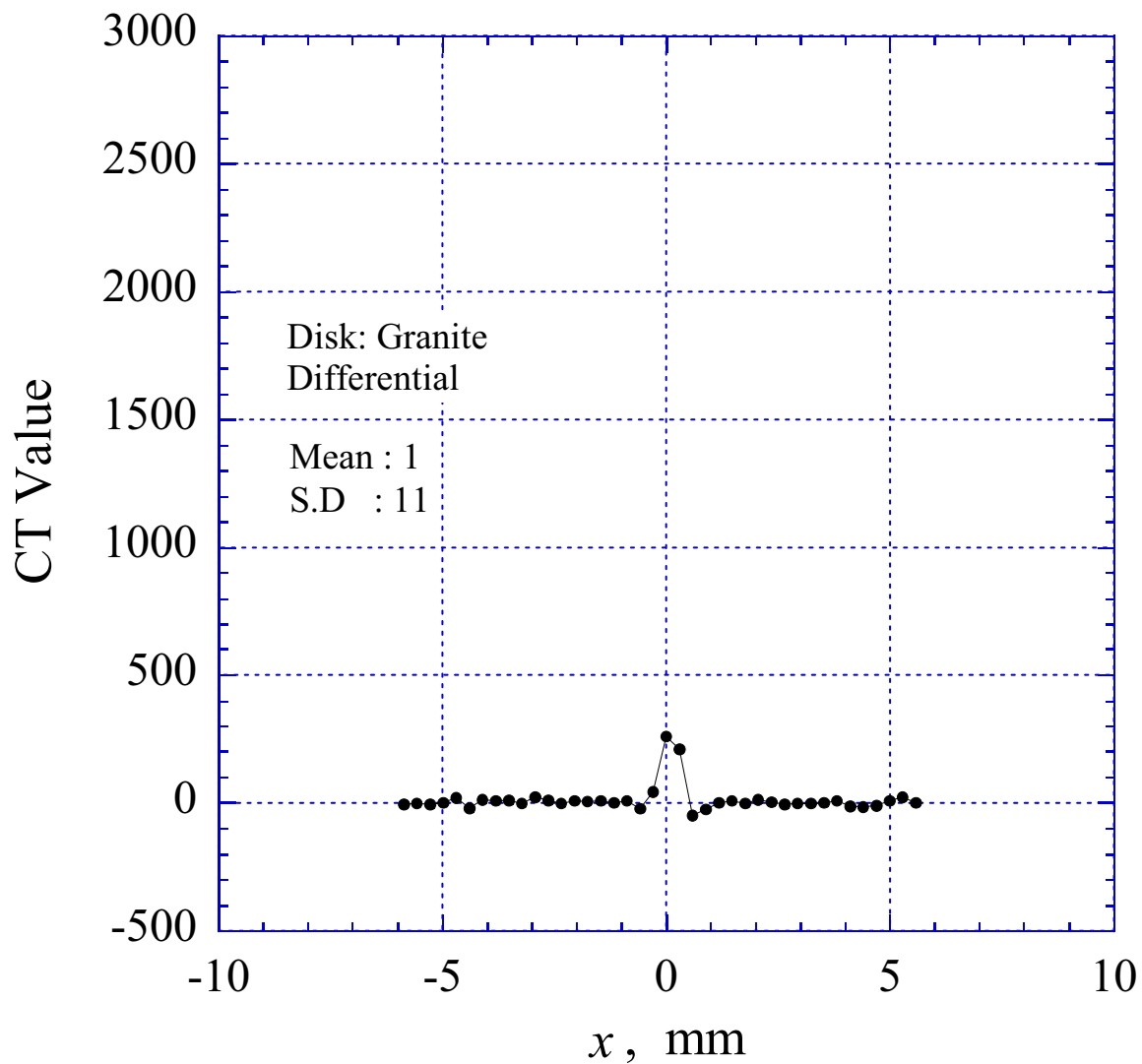


Fig.3.20(c) 測線Ⅲにおける CT 値分布  
(花崗岩, 差画像 : { 画像 (a) } - { 画像 (b) })



#### 4. おわりに

花崗岩のような不均質な物体においても上記のような画像間差分法を適用すると、物体の線吸収係数のバラツキやカップリングの影響を取り除くことができ、処理後の画像における CT 値のバラツキも小さくなることが明らかとなった。したがって、その画像を用いることで、亀裂開口量の評価は十分可能であると結論できる。

このためには、まず、亀裂内へ注入する物質の平均 CT 値を評価する必要がある。また、今回は時間の都合上、アルミニウムおよび花崗岩を用いて作成した模擬亀裂の亀裂面の仕上げ精度が十分とは言えないので、得られた結果に亀裂面の凹凸の影響が表れている可能性がある。したがって、亀裂面を十分な精度で加工した後に上記の方法を適用する必要がある。さらに、隙間ゲージを用いた模擬亀裂の亀裂開口量を十分な精度で設定した上で、本方法を適用することが必要である。

なお、本研究では、花崗岩の亀裂内に水を注入したが、岩石内への水の浸透は考慮していない。したがって、水溶液を用いた画像に画像間差分法を適用する場合は浸透の影響を明らかにする必要があると考えられる。

### 参考文献

- 1) 高木幹雄, 下田陽久監修: 画像解析ハンドブック, 東京大学出版会, pp. 538-539, (1991)
- 2) 高木幹雄, 下田陽久監修: 画像解析ハンドブック, 東京大学出版会, pp. 504-505, (1991)
- 3) 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, 114 巻, 12 号, pp. 881-887, (1998)
- 4) 岩井喜典編: CT スキャナーX 線コンピュータ断層撮影装置, コロナ社, pp. 35-37, (1982)