

大型鉄遺物のX線CT測定法の比較

Comparison of X-ray CT Measurement for Large Size Iron Artifact

林 真紀* 吉川 英樹

Maki HAYASHI* and Hideki YOSHIKAWA

地層処分研究開発部門

核種移行研究グループ

Radionuclide Migration Research Group
Geological Isolation Research and Development Directorate

March 2008

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<http://www.jaea.go.jp/index.shtml>)
より発信されています。このほか財団法人原子力弘済会資料センター*では実費による複写頒布を行っ
ております。

〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4
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
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920

*〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4 日本原子力研究開発機構内

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

大型鉄遺物の X 線 CT 測定法の比較

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

林 真紀^{*1}、吉川 英樹

(2008 年 1 月 18 日受理)

本研究では、オーバーパックのベントナイト中での長期腐食挙動に関するナチュラルアナログとして、長期間土壌中に埋蔵されていた考古学的鉄製品の腐食量調査を行う。これにより、より信頼性の高い長期腐食モデルを確立し、設計や安全評価の基本的な根拠とする。長期挙動評価の妥当性を保証するには、より多くのデータの蓄積が必要と思われる。

これまでに国内 17 遺跡から出土した約 40 点の鉄製品の腐食状況を調査し、1000 年間の腐食深さは、核燃料サイクル開発機構が、わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性—地層処分研究開発第 2 次取りまとめ¹⁾で見積った炭素鋼の腐食深さ：31mm より十分に低いことを明らかにした²⁾。しかし、埋蔵環境は大半が酸化性雰囲気、地層処分で想定される還元性雰囲気に埋蔵されていたと推定されたものは数点にすぎず、この雰囲気におけるデータの蓄積が必要と考えられた。

ここでは、つくば市小田地区の国指定史跡である小田城より発掘された「鋤」を含有する土壌固体試料について、腐食量を調査した。また、X 線 CT 測定の効率化を図るために、日本原子力機構で所有する医療用 X 線 CT スキャナ（東芝製 AsteionVI）を金属ナチュラルアナログ研究に活用することを考えている。そこで前述の「鋤」を試料として、日本原子力機構の医療用 X 線 CT スキャナの適用性を、同試料の高出力工業用 X 線 CT の測定結果と比較することにより評価した。

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：株式会社 NESI

Comparison of X-ray CT Measurement for Large Size Iron Artifact

Maki HAYASHI*¹ and Hideki YOSHIKAWA

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

(Received January 18, 2008)

In this study, the corrosion amount of archaeological iron artifact that had been buried in the soil for a long-term is investigated, as natural analogues concerning the long-term corrosion behavior of the overpack in the bentonite. As a result, high reliable long-term corrosion model will be established, and assumed basic grounds of design and safety assessment. Many corrosion data is necessary to guarantee the validity of the long-term behavior assessment.

Corrosion analysis had carried out on forty archaeological iron artifacts, which had been dug out at seventeen relics in Japan. Although JAEA estimated the corrosion depth of the carbon steel to be 31mm for 1000 years by the second progress Report (H12), corrosion analysis results clarified the corrosion depth of the archaeological iron artifact was lower than 31mm. Many of archaeological iron artifacts for this analysis had been buried in a oxidizing environment. Because the disposal environment is expected to be reducing condition, the corrosion data in conditions relevant for geological disposal are desirable.

This study investigated the corrosion of the plow with soil excavated from the Oda castle. We examine use of medical X-ray CT owned in the JAEA for this purpose. The plow was measured by high energy industry machine for industry and medical X-ray tomography. And the applicability of medical X-ray CT, owned in the JAEA, for metal natural analogue study was evaluated by the comparison of each measurement.

Keywords : X-ray CT Measurement, X-ray CT Image, Thickness of Rust

*1: NESI

目 次

1. はじめに	1
2. 目的.....	1
3. 測定方法	2
3.1 測定試料.....	2
3.2 測定概要.....	2
3.2.1 日立エンジニアリング	2
3.2.2 JAEA.....	2
3.3 錆厚測定方法	3
3.3.1 日立エンジニアリング	3
3.3.2 JAEA.....	3
4. 測定結果	3
4.1 X線CT像.....	3
4.1.1 日立エンジニアリング	3
4.1.2 JAEA.....	4
4.2 断面物質密度分布	4
4.2.1 日立エンジニアリング	4
4.2.2 JAEA.....	4
4.3 錆厚測定.....	5
4.3.1 日立エンジニアリング	5
4.3.2 JAEA.....	5
5. 考察	7
5.1 錆厚測定方法の比較	7
5.2 等高線グラフによる錆厚測定とボクセル値.....	7
5.3 腐食量の推定	8
6. おわりに.....	9
謝辞	9
参考文献.....	9

Contents

1. Introduction.....	1
2. Purpose	1
3. Measurement Method.....	2
3.1 Sample.....	2
3.2 Outline of Measurement.....	2
3.2.1 Hitachi Engineering Co. , Ltd	2
3.2.2 Japan Atomic Energy Agency JAEA	2
3.3 Measuring Method of Thickness of Rust.....	3
3.3.1 Hitachi Engineering Co. , Ltd	3
3.3.2 JAEA.....	3
4. Results	3
4.1 X-ray CT Image	3
4.1.1 Hitachi Engineering Co. , Ltd	3
4.1.2 JAEA.....	4
4.2 Density Distribution of Material in Section.....	4
4.2.1 Hitachi Engineering Co. , Ltd	4
4.2.2 JAEA.....	4
4.3 Thickness of Rust	5
4.3.1 Hitachi Engineering Co. , Ltd	5
4.3.2 JAEA.....	5
5. Discussions	7
5.1 Comparison of Measuring Method of Thickness of Rust	7
5.2 Contour Line Graph and Voxel Value.....	7
5.3 Presumption of the Corrosion Amount.....	8
6. Summary	9
Acknowledgment.....	9
References	9

目 次

Fig.1	試料の外観.....	11
Fig.2	測定状況.....	12
Fig.3	画像濃度と物質密度との関係.....	13
Fig.4	X線写真(1).....	14
Fig.5	X線写真(2).....	15
Fig.6	X線写真(3).....	16
Fig.7	X線CT像①(HiXCT).....	17
Fig.8	X線CT像②(HiXCT).....	18
Fig.9	X線CT像③(HiXCT).....	19
Fig.10	X線CT像④(HiXCT).....	20
Fig.11	X線CT像⑤(HiXCT).....	21
Fig.12	X線CT像⑥(HiXCT).....	22
Fig.13	X線CT像⑦(HiXCT).....	23
Fig.14	X線CT像⑧(HiXCT).....	24
Fig.15	X線CT像⑨(HiXCT).....	25
Fig.16	X線CT像⑩(HiXCT).....	26
Fig.17	X線CT像①'(JAEA).....	27
Fig.18	X線CT像②'(JAEA).....	28
Fig.19	X線CT像④'(JAEA).....	29
Fig.20	X線CT像⑤'(JAEA).....	30
Fig.21	X線CT像②”(JAEA).....	31
Fig.22	X線CT像②””(JAEA).....	32
Fig.23	X線CT像③の断面物質密度分布図(A-A')(HiXCT).....	33
Fig.24	X線CT像④の断面物質密度分布図(B-B')(HiXCT).....	34
Fig.25	X線CT像⑩の断面物質密度分布図(C-C')(HiXCT).....	35
Fig.26	X線CT像①'(JAEA)の断面画像濃度分布図とヒストグラム.....	36
Fig.27	X線CT像②'(JAEA)の断面画像濃度分布図とヒストグラム.....	37
Fig.28	X線CT像④'(JAEA)の断面画像濃度分布図とヒストグラム.....	38
Fig.29	X線CT像⑤'(JAEA)の断面画像濃度分布図とヒストグラム.....	39
Fig.30	X線CT像②”(JAEA)の断面画像濃度分布図とヒストグラム.....	40
Fig.31	X線CT像②””(JAEA)の断面画像濃度分布図とヒストグラム.....	41
Fig.32	測定時モニタ画面_X線CT像②(HiXCT).....	42
Fig.33	測定時モニタ画面_X線CT像③(HiXCT).....	43
Fig.34	測定時モニタ画面_X線CT像④(HiXCT).....	44
Fig.35	測定時モニタ画面_X線CT像⑥(HiXCT).....	45

Fig.36	測定時モニタ画面_X線 CT 像⑦ (HiXCT)	46
Fig.37	測定時モニタ画面_X線 CT 像⑩ (HiXCT)	47
Fig.38	測定時モニタ画面_X線 CT 像② (HiXCT) 再検討	48
Fig.39	測定時モニタ画面_X線 CT 像③ (HiXCT) 再検討	49
Fig.40	測定時モニタ画面_X線 CT 像⑥ (HiXCT) 再検討	50
Fig.41	測定時モニタ画面_X線 CT 像⑩ (HiXCT) 再検討	51
Fig.42	等高線グラフによる錆厚測定_X線 CT 像②” (JAEA)	52
Fig.43	等高線グラフによる錆厚測定_X線 CT 像②” (JAEA)	53
Fig.44	等高線グラフによる錆厚測定_X線 CT 像②’ (JAEA)	54
Fig.45	等高線グラフによる錆厚測定_X線 CT 像④’ (JAEA)	55
Fig.46	錆層の検出とボクセル値の関係	56

表 目 次

Table 1	X線 CT スキャナ仕様	2
Table 2	X線 CT スキャン測定条件	3
Table 3	X線 CT 測定条件 (スキャン時間 [sec]/スライス厚 [mm])	4
Table 4	錆厚の再検討結果 (日立エンジニアリング)	5
Table 5	錆厚の測定結果 (JAEA)	6
Table 6	錆厚測定結果の比較	7
Table 7	推定腐食量	8

Figure Contents

Fig.1	Externals of Sample	11
Fig.2	Situation of Measurement	12
Fig.3	Relation between image contrast and material density	13
Fig.4	X-ray CT Photograph (1).....	14
Fig.5	X-ray CT Photograph (2).....	15
Fig.6	X-ray CT Photograph (3).....	16
Fig.7	X-ray CT Image ① (HiXCT).....	17
Fig.8	X-ray CT Image ② (HiXCT).....	18
Fig.9	X-ray CT Image ③ (HiXCT).....	19
Fig.10	X-ray CT Image ④ (HiXCT).....	20
Fig.11	X-ray CT Image ⑤ (HiXCT).....	21
Fig.12	X-ray CT Image ⑥ (HiXCT).....	22
Fig.13	X-ray CT Image ⑦ (HiXCT).....	23
Fig.14	X-ray CT Image ⑧ (HiXCT).....	24
Fig.15	X-ray CT Image ⑨ (HiXCT).....	25
Fig.16	X-ray CT Image ⑩ (HiXCT).....	26
Fig.17	X-ray CT Image ①' (JAEA).....	27
Fig.18	X-ray CT Image ②' (JAEA).....	28
Fig.19	X-ray CT Image ④' (JAEA).....	29
Fig.20	X-ray CT Image ⑤' (JAEA).....	30
Fig.21	X-ray CT Image ②" (JAEA).....	31
Fig.22	X-ray CT Image ②" (JAEA).....	32
Fig.23	Profile (A - A') of X-ray CT Image ③ (HiXCT)	33
Fig.24	Profile (B - B') of X-ray CT Image ④ (HiXCT).....	34
Fig.25	Profile (C - C') of X-ray CT Image ⑩ (HiXCT).....	35
Fig.26	Profile and Histogram of X-ray CT Image ①' (JAEA).....	36
Fig.27	Profile and Histogram of X-ray CT Image ②' (JAEA).....	37
Fig.28	Profile and Histogram of X-ray CT Image ④' (JAEA).....	38
Fig.29	Profile and Histogram of X-ray CT Image ⑤' (JAEA).....	39
Fig.30	Profile and Histogram of X-ray CT Image ②" (JAEA).....	40
Fig.31	Profile and Histogram of X-ray CT Image ②" (JAEA).....	41
Fig.32	Monitor Screen for Measuring _X-ray CT Image ② (HiXCT).....	42
Fig.33	Monitor Screen for Measuring _X-ray CT Image ③ (HiXCT).....	43
Fig.34	Monitor Screen for Measuring _X-ray CT Image ④ (HiXCT).....	44
Fig.35	Monitor Screen for Measuring _X-ray CT Image ⑥ (HiXCT).....	45

Fig.36	Monitor Screen for Measuring _X-ray CT Image ⑦ (HiXCT).....	46
Fig.37	Monitor Screen for Measuring _X-ray CT Image ⑩ (HiXCT).....	47
Fig.38	Monitor Screen for Reexamination _X-ray CT Image ② (HiXCT)	48
Fig.39	Monitor Screen for Reexamination _X-ray CT Image ③ (HiXCT)	49
Fig.40	Monitor Screen for Reexamination _X-ray CT Image ⑥ (HiXCT)	50
Fig.41	Monitor Screen for Reexamination _X-ray CT Image ⑩ (HiXCT)	51
Fig.42	Contour Line Graph for Measuring of Thickness of Rust _ X-ray CT Image ②” (JAEA).....	52
Fig.43	Contour Line Graph for Measuring of Thickness of Rust _ X-ray CT Image ②” (JAEA)	53
Fig.44	Contour Line Graph for Measuring of Thickness of Rust _ X-ray CT Image ②’ (JAEA)	54
Fig.45	Contour Line Graph for Measuring of Thickness of Rust _ X-ray CT Image ④’ (JAEA)	55
Fig.46	Relation between Detection of Rust Layer and Voxel Value.....	56

Table Contents

Table 1	Specification of X-Ray CT Scanner	2
Table 2	X-ray CT Scan Measurement Conditions	3
Table 3	X-ray CT Measurement Conditions (Scanning Time [sec] / Slice Thickness [mm]).....	4
Table 4	Reexamination Results of Thickness of Rust (Hitachi Engineering Co. , Ltd). 5	
Table 5	Measurement Results of Thickness of Rust (JAEA)	6
Table 6	Comparison of Thickness of Rust	7
Table 7	Presumption of the Corrosion Amount	8

1. はじめに

高レベル放射性廃棄物の地層処分において、オーバーパックには数百年間以上にわたる健全性が期待されている。炭素鋼はその候補材料の一つであり、これまでに室内試験を通して腐食速度と腐食形態に関する種々の評価が行われてきた。しかし、評価に用いられている試験は数年～10年程度であり、長期の腐食量をより高い精度で予測するためには、他の方法で補完する必要があると思われる。1000年間に及ぶ長期の腐食量を直接的に求めることは不可能であるため、補完する方法としてナチュラルアナログが提案されている。

これまでに国内17遺跡から出土した約40点の鉄製品の腐食状況を調査し、1000年間の腐食深さは、核燃料サイクル開発機構が、わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性—地層処分研究開発第2次取りまとめ¹⁾で見積った炭素鋼の腐食深さ:31mmより十分に低いことを明らかにした²⁾。しかし、埋蔵環境は大半が酸化性雰囲気、地層処分では想定される還元性雰囲気に埋蔵されていたと推定されたものは数点にすぎず、この雰囲気におけるデータの蓄積が必要と考えられた。そこで、埋蔵環境を合わせて調査する目的で、周囲の土壌を含めて発掘する方法を筑波大学 松井先生が考案され³⁾、今回その試料を分析する機会を得たので報告する。

2. 目的

本研究では、オーバーパックのベントナイト中での長期腐食挙動に関するナチュラルアナログとして、長期間土壌中に埋蔵されていた考古学的鉄製品の腐食量調査を行う。これにより数百年以上のデータ取得が可能であり、既存の室内試験データ(数年以内)、数十年の土壌埋設鉄管のデータを合わせて、より信頼性の高い長期腐食モデルを確立し、設計や安全評価の基本的な根拠とする。長期挙動評価の妥当性を保証するには、より多くのデータの蓄積が必要と思われる。

ここでは、つくば市小田地区の国指定史跡である小田城より発掘された「鋤」を含有する土壌固体試料について、腐食量を調査した。また、これまで発掘された鉄遺物の腐食量を調査するためには、マイクロX線CT測定や工業用X線CT測定を行ってきた。腐食量の調査には鉄が残存している試料を取り扱う上で、遺物中の鉄の存在の有無を発掘後速やかに確認する必要がある。日本原子力機構(以下、「JAEA」という)地層処分基盤研究施設で所有する医療用X線CTスキャナ(東芝製AsteionVI)は汎用機であり、工業用X線CTに比べ多量の試料を短時間で測定できる。X線CT測定の効率化を図るために、金属ナチュラルアナログ研究への活用を考えている。そこで前述の「鋤」を試料として、JAEAの医療用X線CTスキャナの適用性を、同試料の高出力工業用X線CTの測定結果と比較することにより評価した。

3. 測定方法

3.1 測定試料

本測定の見料は、当時の池の底に当たる地層より出土し、出土した際の「鋤」周辺土壤を含めて発掘したものをポリウレタンで固めた状態となっている。鉄器の発掘された池跡は深さ50cm程で、人為的に埋め戻されたとされている。埋蔵期間はおよそ400年と推定される。試料が池の底から出土したため、池の中に存在していた間は還元性雰囲気であるとも推定でき、地金が残存する可能性がある。

3.2 測定概要

3.2.1 日立エンジニアリング

測定には、X線CT装置（日立製 HiXCT-6M）⁴⁾を使用した^{5),6)}。X線エネルギーの最大値は6 MeV、スライス厚は0.4 mmである。本装置での測定状況をFig.2に示す。また、試料の密度を評価する際の基準物質として、ステンレス鋼の測定を実施した。

3.2.2 JAEA

測定には、医療用X線CTスキャナ（東芝製 AsteionVI）を使用した⁷⁾。装置の仕様をTable 1に示す。なお、測定条件は、Table 2のとおりとした。本測定条件におけるX線エネルギーは、45 keV程度である。また、基準物質として炭素鋼の測定を実施したが、X線CT像のハレーションを避けるため、試料の測定時には用いていない。このため、試料の断面画像より得られる情報は、試料の内部状態とその密度分布を表すCT値分布となる。

Table 1 X線CTスキャナ仕様

スキャン方式	R / R 連続回転方式
スキャン時間 [sec]	0.75 , 1 , 1.5 , 2 , 3
スライス厚 [mm]	1 , 2 , 3 , 5 , 7 , 10
ガントリ開口部 [mm]	720
X線管電圧 [kV]	80 , 120 , 135
X線管電流 [mA]	30 ~ 300
最大スキャン時間 [sec]	100
最大スキャン範囲 [mm]	1390
画像再構成数	512 × 512
空間解像度 [mm]	0.35

Table 2 X線 CT スキャン測定条件

スキャン方式	ノンヘリカルスキャン ヘリカルスキャン		
	X線管電流 [mA]	200	150
X線管電圧 [kV]	135	120	120
スライス厚 [mm]	1	7	10
スキャン時間 [sec]	3.00	1.00	1.50

3.3 錆厚測定方法

3.3.1 日立エンジニアリング

X線 CT では物質密度の違いを画像濃度として表示する。白色で画像濃度が高く鮮明な部分は物質密度が高く鉄質であることを、灰色で低濃度の部分は低密度の錆層であることを示している⁴⁾。画像濃度と物質密度との関係を Fig.3 に示す⁴⁾。X線 CT 像から鉄質と錆層の分離が可能であるので、ビューソフト上で目視により錆厚[mm]を測定した。

3.3.2 JAEA

錆厚を測定する部分の X線 CT 像生データを Excel に取り込み、等高線グラフを作成した。物質密度と CT 値には比例関係があるため⁸⁾、高密度の錆層はマグネタイト、低密度の錆層はゲーサイトの密度を基準に、CT 値をそれぞれ鉄質:8000～、内側錆層(高密度):5000～8000、外側錆層(低密度):2000～5000、空隙～土層:-1000～2000 とした。まず X線 CT 測定サイズ(錆厚測定部分によっては画像再構成を行う)から 1 ボクセルの値を算出した。次に Excel で作成したグラフのうち、鉄質が残存するものに対して垂直面で錆層部分の長さ[mm]を定規で測定し、グラフ上での一ますの長さとの比から錆厚[mm]を算出した。ここで、錆層は CT 値 2000～8000 範囲の外側錆層+内側錆層部分とした。また鉄質の厚さについても同様の方法で算出した。

4. 測定結果

4.1 X線 CT 像

4.1.1 日立エンジニアリング

X線写真を Fig.4～6 に示し、X線写真内①～⑩の各段面における X線 CT 像①～⑩を Fig.7～16 に示す。X線 CT 像では物質密度の違いから、白色で画像濃度が高く鮮明な部分は物質密度が高い鉄質であり、その周りの淡灰色の部分は錆層で、外側の濃灰色部分は土層であると思われる。また、亀裂のように見える黒色部分は空隙であり、その周辺に多く見られる淡灰色の塊部分は石であると思われる。

4.1.2 JAEA

日立エンジニアリングによる X 線 CT 像① (Fig.7), ② (Fig.8), ④ (Fig.10), ⑤ (Fig.11) に測定位置の近い X 線 CT 像を Fig.17~22 にそれぞれ示す。日立エンジニアリングによる X 線 CT 像に比べて、X 線エネルギーや測定条件の違いから、やや不鮮明である。X 線 CT 像の物質密度から 4.1.1 と同様に、白色部分は鉄質、その周りの淡灰色の部分は錆層、外側の濃灰色部分は土層であり、亀裂のような黒色部分は空隙、その周辺にある淡灰色の塊部分は石であると思われる。

4.2 断面物質密度分布

4.2.1 日立エンジニアリング

X 線 CT 像③ (Fig.9) の A-A', ④ (Fig.10) の B-B', ⑩ (Fig.16) の C-C' の各断面についての断面物質密度分布図を Fig.23~25 に示す。図中の物質密度は、基準物質として測定したステンレス鋼の X 線 CT 像での密度を基にした、密度換算値である⁴⁾。Fig.23 では、密度が 3~4 g/cm³ の錆層と、約 3 g/cm³ の石、密度がさらに低い約 2 g/cm³ の土層のみで構成されていることが分かる。Fig.24 および Fig.25 では、錆層、石、土層のほか高密度 (約 7.5 g/cm³) の鉄質が残存していることが確認できる。

4.2.2 JAEA

X 線 CT 像 (Fig.17~22) の各断面についての断面画像濃度分布図とそのヒストグラムを Fig.26~31 に示す。ここで、試料の断面画像より得られる情報は、試料の内部状態とその密度分布を表す CT 値分布となる。また、各 X 線 CT 像における X 線 CT 測定条件 (スキャン時間 [sec]/スライス厚 [mm]) を Table 3 に示す。

Fig.31 から、CT 値が 1200~1500 の土層および 1800 付近の石が高い割合で存在し、2000 を超える錆層がわずかに存在することが分かる。測定位置の近い Fig.27 でも同じような結果となった。Fig.28 では、CT 値が 1600 付近の土層が高い割合で存在し、12000 を超える鉄質および 3000 付近の錆層がわずかに存在することが分かる。

Table 3 X 線 CT 測定条件 (スキャン時間 [sec]/スライス厚 [mm])

X 線 CT 像	測定条件	
	スキャン時間 [sec]	スライス厚 [mm]
X 線 CT 像①'	1.00	7
X 線 CT 像②'		
X 線 CT 像④'		
X 線 CT 像⑤'		
X 線 CT 像②''	3.00	1
X 線 CT 像②'''	1.50	10

4.3 鍍厚測定

4.3.1 日立エンジニアリング

X線CT像② (Fig.8), ③ (Fig.9), ④ (Fig.10), ⑥ (Fig.12), ⑦ (Fig.13), ⑩ (Fig.16) について、鍍厚をビューソフト上で目視により測定した際の、モニタ画面を Fig.32~37 に示す。測定位置が不明確であった Fig.32, 33, 35, 37 については、同様の方法で鍍厚を再検討した (Fig.38~41)。測定位置の状態および鍍厚再検討結果を Table 4 に示す。Fig.34, 38, 39 から鍍厚は 2.9~6.0 mm, 母材 (鉄質) 厚は 3.3 mm である。Fig.36, 40, 41 では、土が混ざっている土・鍍混合層であると思われ、厚さも 8.9~29.4 mm とバラツキが大きくなっている。

Table 4 鍍厚の再検討結果 (日立エンジニアリング)

Fig.		X線CT像		状態	鍍厚等 [mm]
38	再検討	X線CT像②	a'	鍍層*	2.9
			b'	鍍層*	3.9
39	再検討	X線CT像③	d'	鍍層*	3.6
			f'	鍍層*	6.0
34	—	X線CT像④	h	鍍層*	5.7
			i	鍍層*	5.1
			j	鉄質	3.3
40	再検討	X線CT像⑥	n'	土・鍍混合層	10.5
36	—	X線CT像⑦	k	土・鍍混合層	29.4
41	再検討	X線CT像⑩	p'	土・鍍混合層	8.9
			q'	土・鍍混合層	10.2

※比重から酸化性環境で生成した鍍相当であった。

4.3.2 JAEA

X線CT像②” (Fig.21, 30), X線CT像②” (Fig.22, 31), X線CT像②' (Fig.18, 27), X線CT像④' (Fig.19, 28) について鍍厚を測定した。X線CT像生データから測定部分の等高線グラフを Excel で作成したものの一部を Fig.42~45 に示す。測定位置の状態および鍍厚測定結果を Table 5 に示す。Fig.42 から鍍厚は 0.66~5.17mm, 鉄質厚は 1.39~1.69mm である。Fig.43, 44 については鉄質が残存していなかったため、鍍厚等の測定は行わなかった。Fig.45 から鍍厚は 4.54~6.89mm, 鉄質厚は 2.44~3.36mm である。

Table 5 鍍厚の測定結果 (JAEA)

Fig.	X線CT像		状態	鍍厚等 [mm]
42	X線CT像② ^{※3}	A	鍍層 ^{※1}	5.17
		B	鍍層 ^{※1}	4.24
		C	鉄質	1.66
		D	鉄質	1.59
		E	鍍層 ^{※2}	0.96
		F	鍍層 ^{※2}	0.72
		G	鍍層 ^{※2}	0.66
		H	鍍層 ^{※2}	0.78
		I	鍍層 ^{※2}	2.11
		J	鉄質	1.69
		K	鉄質	1.51
		L	鉄質	1.39
43	X線CT像② [”]	—	—	—
44	X線CT像② [’]	—	—	—
45	X線CT像④ ^{※4}	M	鍍層	6.89
		N	鍍層	5.71
		O	鍍層	4.54
		P	鉄質	2.69
		Q	鉄質	3.36
		R	鉄質	2.44

等高線グラフを400%に拡大して測定した。

※1 酸化性環境で生成した鍍相当。

※2 低密度の酸化性環境で生成した鍍と、高密度の弱酸化性環境で生成した鍍の和。

※3 鍍厚[mm] = ボクセル値 × $\sqrt{2}$ × (測定値[mm] / グラフ一ますの対角線の長さ[mm])

$$= 0.469 \times \sqrt{2} \times (\text{測定値[mm]} / 10) \cdots A \sim D$$

$$= 0.469 \times \sqrt{2} \times (\text{測定値[mm]} / 11) \cdots E \sim L$$

※4 鍍厚[mm] = ボクセル値 × ます目の数 = 0.084 × ます目の数

5. 考察

5.1 鍍厚測定方法の比較

鍍厚測定を目視と等高線グラフの2種類の方法で行った。目視による方法は、X線CT像の画像濃度の違いから、ビューソフト上で目視により簡単に鍍厚を測定できる。しかし、どの部分を鍍層とするかの判断や、目視による測定範囲の指定により測定誤差が大きくなる可能性がある。

等高線グラフ化による方法は、グラフ上でCT値の範囲を同色表示できるので、鍍層や鉄質等の識別が容易である。しかしCT値の範囲は、部位ごとに任意に指定することはできないので、CT値の範囲の取り方が測定誤差につながる可能性がある。また、CT値の測定を正確に行うことが重要となる。それぞれの方法で測定した鍍厚の比較をTable 6に示す。

Table 6 鍍厚測定結果の比較

目視による測定 (HiXCT)			等高線グラフ化による測定 (JAEA)		
X線CT像	状態	鍍厚等 [mm]	X線CT像	状態	鍍厚等 [mm]
X線CT像②	a'	鍍層 2.9	X線CT像②'	A, B	鍍層 4.24 ~ 5.17
	b'	鍍層 3.9		E~I	鍍層 0.66 ~ 2.11
	—	—		C, D, J~L	鉄質 1.39 ~ 1.69
X線CT像④	鍍層	5.1 ~ 5.7	X線CT像④'	鍍層	4.54 ~ 6.89
	鉄質	3.3		鉄質	2.44 ~ 3.36

X線CT像④およびX線CT像④'は、鍍層および鉄質の厚さともに、同じような結果となった。X線CT像②およびX線CT像②'については、目視による測定の鍍厚が2.9~3.9mmであるのに対して、等高線グラフ化による測定では0.66~5.17mmとなり、鍍厚に幅がある。測定方法による鍍厚の誤差の原因としては、鍍厚測定範囲の違いや、X線CT測定時のCT値の不正確さ等が考えられる。また、鍍厚は残存する鉄質に対して垂直面で測定する必要があるため、測定位置が不適切である場合（例えば、鉄質面に対して斜めに測定が行われた場合）には、鍍層を過大に見積もる可能性がある。したがって、複数の測定結果を基に定量化を試みる必要がある。

5.2 等高線グラフによる鍍厚測定とボクセル値

等高線グラフを用いて鍍厚を測定するとき、鍍厚とボクセル値との関係について考察する。測定に使用したX線CTスキャナの空間解像度は0.35 mmなので、0.35×0.35 mm²の鍍層が存在しているとする。ボクセル内に異なる物質（CT値）が存在するとき、ボクセル内のCT値は平均化されるため、Fig.46に示すように鍍層の位置により検出できない可能性がある。鍍層を検出するには、ボクセル内で対象となるCT値が50%より大きい必要がある。

CT 値をボクセル内での面積に置き換えると、錆層を検出するには、錆層の面積が一ますの面積の 1/2 よりも大きい必要がある。

(1) 錆層が 1 ます中にある場合

一ますの長さ（ボクセル値）を x とすると、

$$\frac{x^2}{2} < 0.35 \times 0.35 \quad \text{から} \quad x < 0.49$$

$0.35 \times 0.35 \text{ mm}^2$ の錆層を検出するには、一ますの長さ（ボクセル値）は 0.49 mm よりも小さい値にする必要がある。

(2) 錆層が複数ます中にある場合

一ますの長さ（ボクセル値）を x とすると、

$$\frac{0.35 \times 0.35}{4} \leq \frac{x^2}{2} < \frac{0.35 \times 0.35}{2} \quad \text{から} \quad 0.25 \leq x < 0.35$$

複数ます中にある錆層を検出するには、再構成を行い、一ますの長さ（ボクセル値）を $0.25 \leq x < 0.35 \text{ mm}$ にする必要がある。ボクセル値を 0.25 mm よりも小さくすると、錆層を過大に見積もる可能性がある。

5.3 腐食量の推定

X 線 CT 像から、腐食生成物の大半が錆層として残っていることが確認された。そこで、錆厚を基に腐食深さと平均腐食速度の推定を試みた⁴⁾。ここで、母材の比重は 7.9 g/cm^3 、錆層の密度は断面物質密度分布図から 3.8 g/cm^3 と 1.8 g/cm^3 とした。また、錆の化学分析を行っていないので、錆層中の鉄の含有量は不明である。本 X 線 CT 測定の結果、酸化性の環境で生成する錆（比重： 1.8 g/cm^3 ）に相当する比重の錆層が多かったことから、鉄の含有率を $50 \text{ wt}\%$ とした⁹⁾。これは、これまでの考古学的鉄遺物の測定でも成立しうる環境条件である^{4),9)}。本試料は池の底から出土したため、池の中に存在していた間は還元性雰囲気であると推定できたが $50 \text{ wt}\%$ は、保守的な値となる。結果を Table 7 に示す。

以上の結果から、本試料の平均腐食速度は $1.49 \times 10^{-3} \text{ mm/y}$ 程度であると推定できる。

Table 7 推定腐食量

X 線 CT 像	錆厚 [mm]	腐食深さ [mm]	平均腐食速度 [mm/y] [※]	環境
X 線 CT 像②	2.9 ~ 3.9	0.33 ~ 0.44	1.11×10^{-3}	酸化性環境
X 線 CT 像②”	4.24 ~ 5.17	0.48 ~ 0.59	1.47×10^{-3}	酸化性環境
	0.66 ~ 2.11	0.16 ~ 0.51	1.27×10^{-3}	酸化性 + 弱酸化性環境
X 線 CT 像④	5.1 ~ 5.7	0.58 ~ 0.65	1.62×10^{-3}	酸化性環境
X 線 CT 像④’	4.54 ~ 6.89	0.52 ~ 0.78	1.96×10^{-3}	酸化性環境

※ 平均腐食速度は腐食深さの最大値を用い、埋蔵期間を 400 年として算出した。

6. おわりに

つくば市小田城遺跡から出土した「鋤」の X 線 CT 測定から、以下のことが明らかになった。

- (1) 鉄の残存は試料形によるが、本試料では 3mm 残存で錆厚を測定できた。JAEA で所有する医療用 X 線 CT スキャナ（東芝製 AsteionVI）が金属ナチュラルアナログ研究においても活用できることが分かった。
- (2) 本試料の錆厚は、刃の部分と柄側の部分の測定を行った結果、目視による測定ではそれぞれ、2.9～3.9, 5.1～5.7 mm、等高線グラフによる測定では 0.66～5.17, 4.54～6.89 mm となった。錆厚は、錆厚測定範囲の違いや X 線 CT 測定時の CT 値の不正確さ等が測定誤差となるので、複数の測定結果を基に定量化を試みる必要がある。
- (3) 本試料の平均腐食速度は、 1.49×10^{-3} mm/y 程度であると推定できる。

謝辞

本 X 線 CT 測定については、地層処分研究開発部門 松本一浩氏のご協力を得ましたので、ここに感謝いたします。

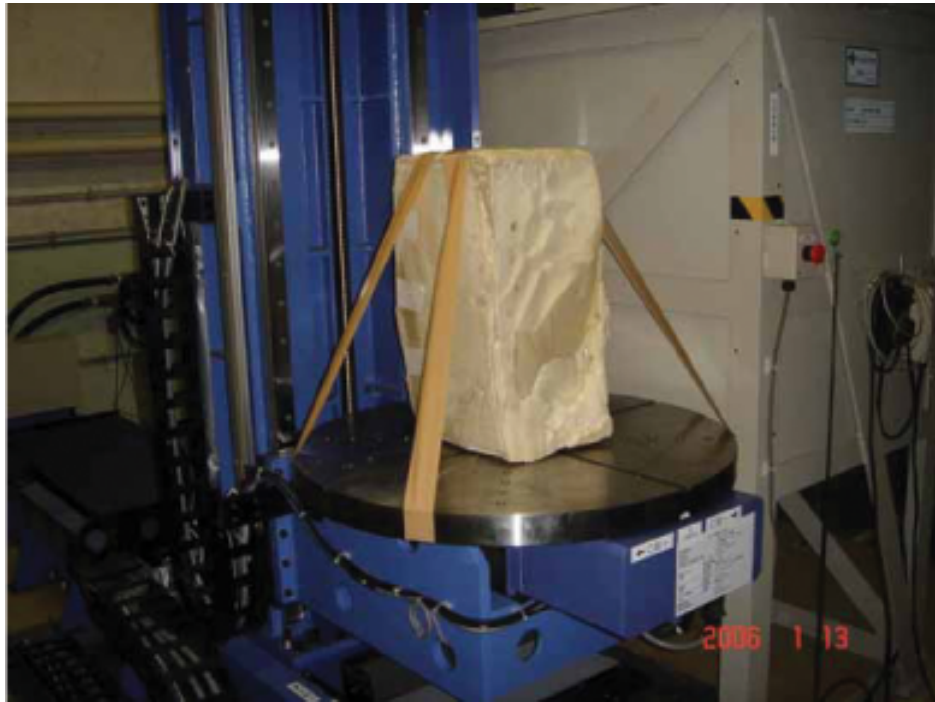
参考文献

- 1) 核燃料サイクル開発機構：“わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性—地層処分研究開発第2次取りまとめ— 総論レポート”，JNC TN1400 99-020, IV-28(1999).
- 2) 吉川英樹、林真紀：“考古学的金属製品を用いた土壤中金属腐食のナチュラルアナログ研究（Ⅱ）”，（社）日本原子力学会「2006年秋の大会」, B37, (2006).
- 3) 松井敏也（2005）（私信）.
- 4) 本田卓、山口新吾：“土壤中の考古学的金属製品の腐食に関する調査”，JNC TJ8400 2000-007 (2000).
- 5) So Kitazawa, Jun Nukaga, Hiroshi Kamimura, Katsutoshi Sato：“HITACHI ADVANCED X-RAY COMPUTED TOMOGRAPHY SYSTEM FOR DIGITAL ENGINEERING”，International Conference on Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping, (2003).
- 6) 村上博：“産業用高エネルギーX線CT装置とデジタルエンジニアリングへの応用”，電学誌, 122, 2, pp.100～103 (2002).
- 7) 棚井憲治、松本一浩、菊池広人：“X線CT法の適用性に関する検討”，JNC TN8430 2003-001 (2003).

- 8) So Kitazawa, Jun Nukaga, Hiroshi Kamimura, Katsutoshi Sato : “HITACHI ADVANCED X-RAY COMPUTED TOMOGRAPHY SYSTEM FOR DIGITAL ENGINEERING”, International Conference on Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping, (2003).
- 9) 本田卓、山口新吾 : “土壤中の考古学的金属製品の腐食に関する調査 (II)”, JNC TJ8400 2001-045 (2002).



Fig.1 試料の外観



試料縦置き



試料横置き

Fig.2 測定状況

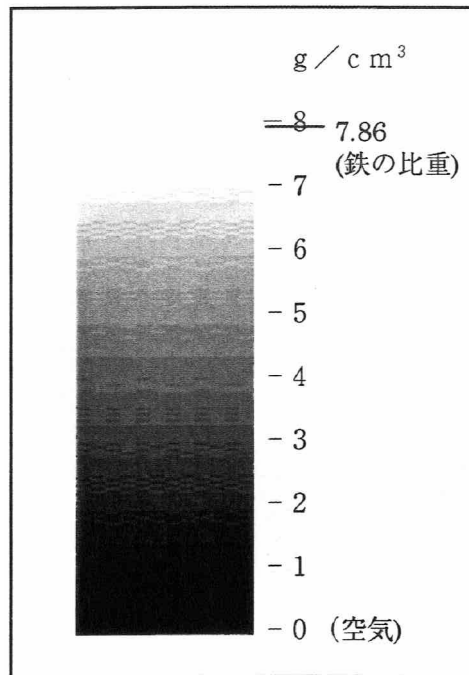


Fig.3 画像濃度と物質密度との関係

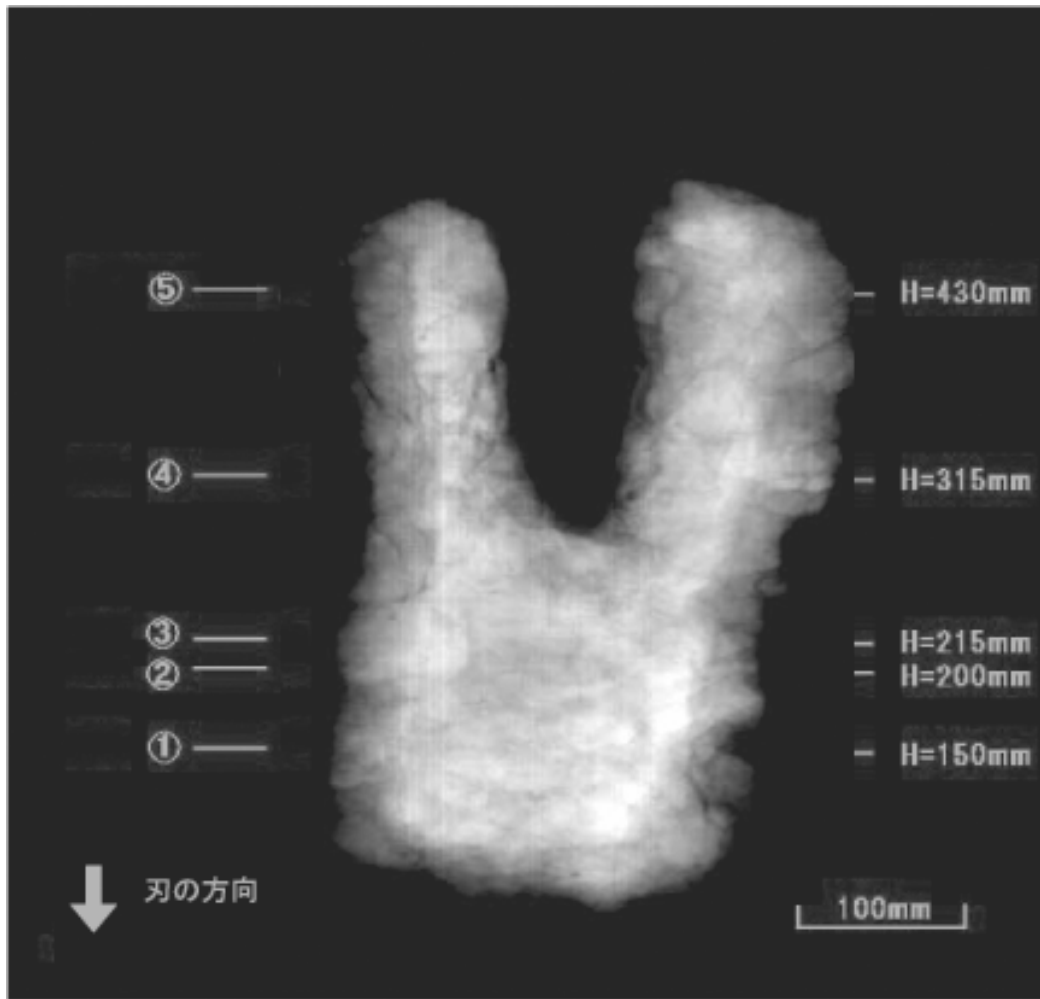


Fig.4 X線写真(1)
(写真奥：池の底側，写真手前：地表側)



Fig.5 X線写真(2)



Fig.6 X線写真(3)

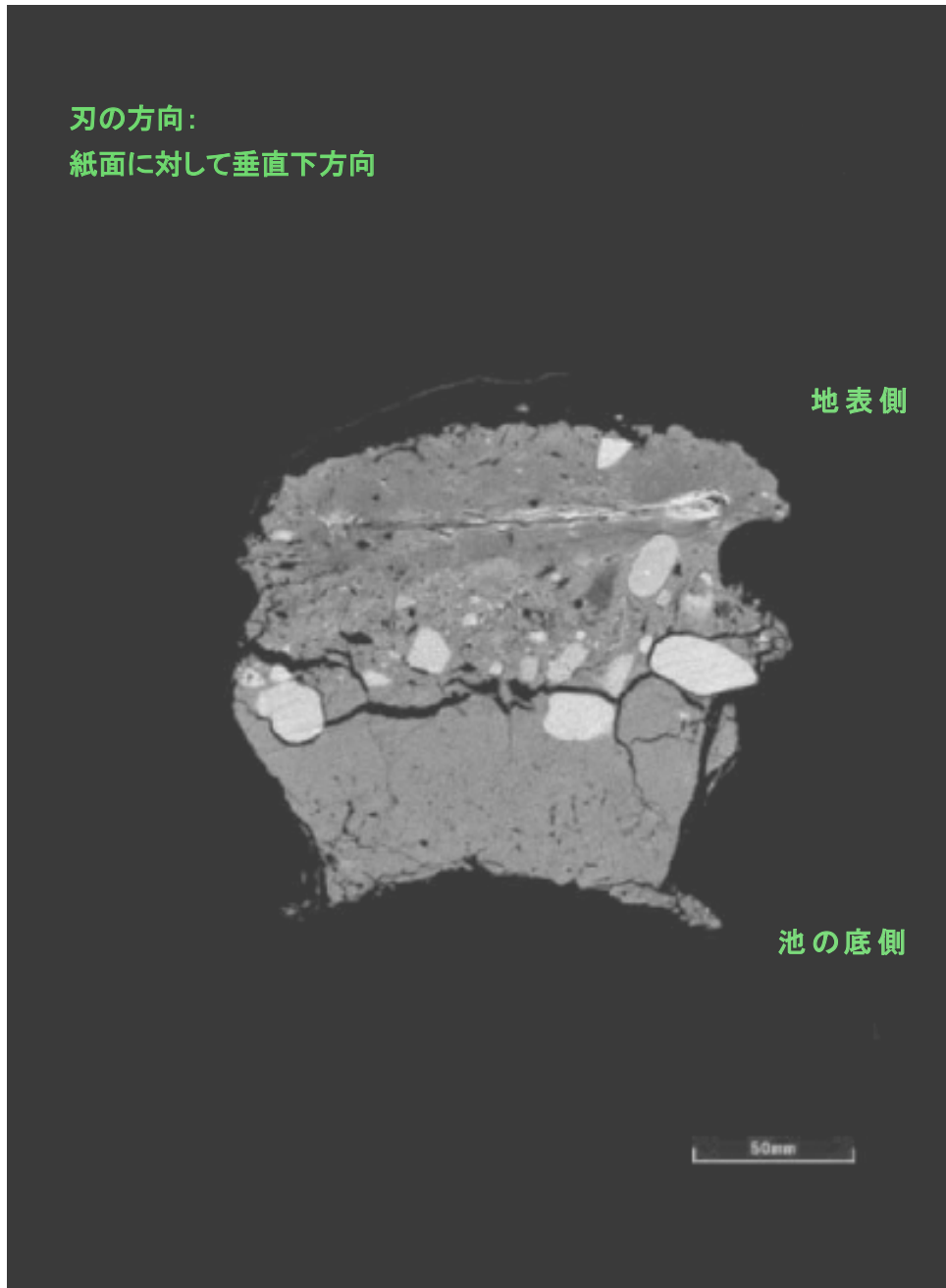


Fig.7 X線CT像① (HiXCT)

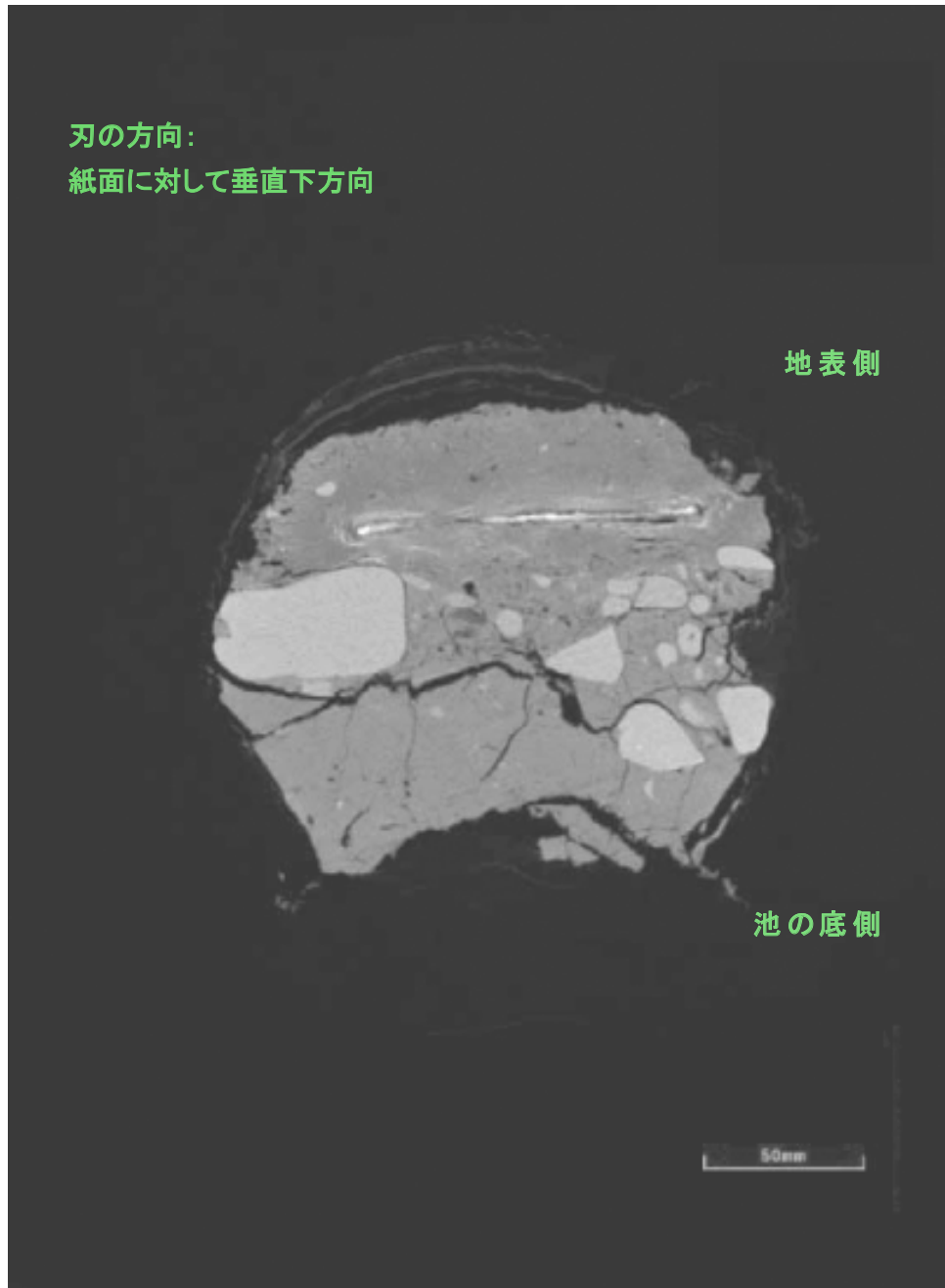


Fig.8 X線 CT 像② (HiXCT)

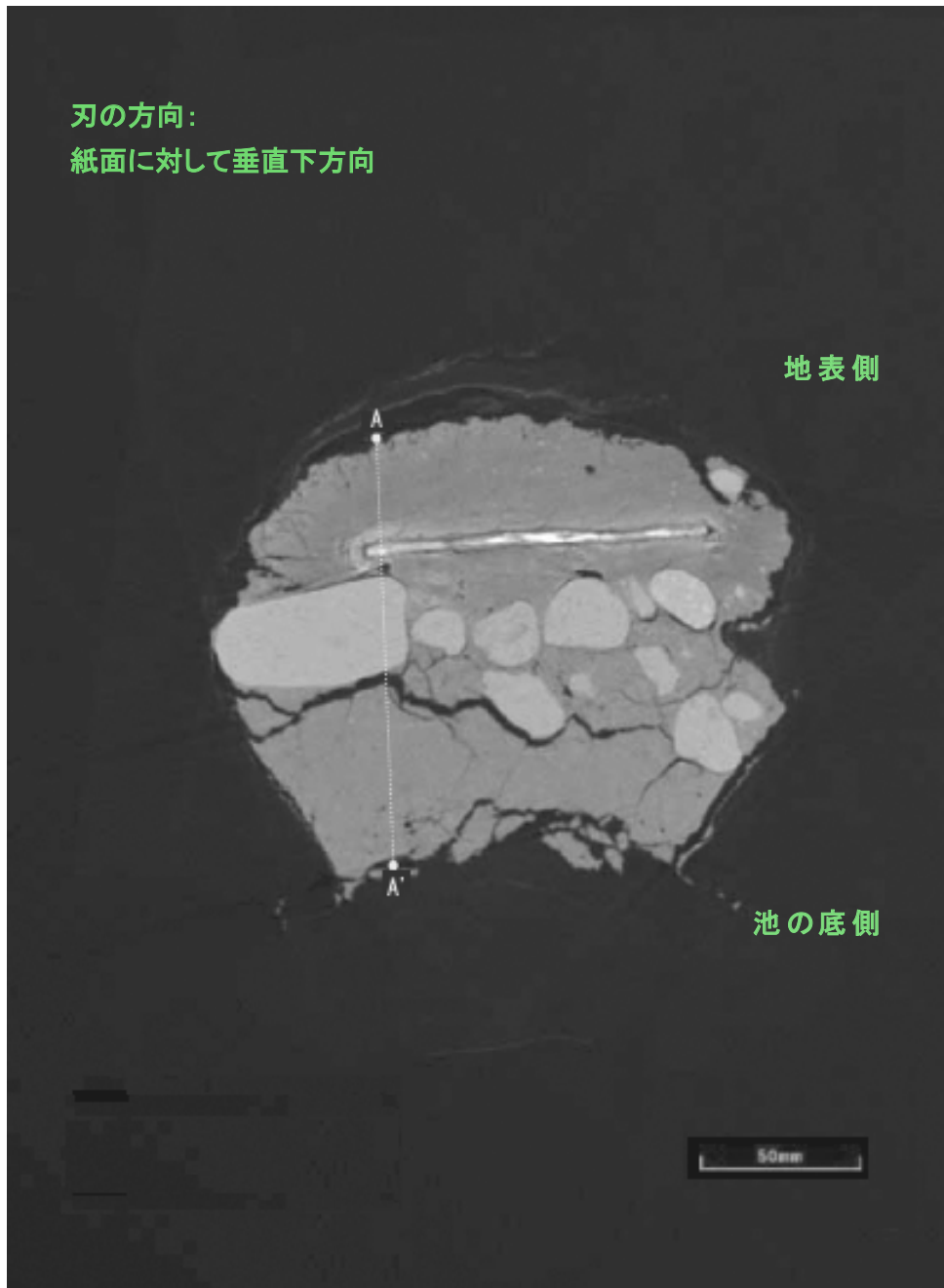


Fig.9 X線CT像③ (HiXCT)

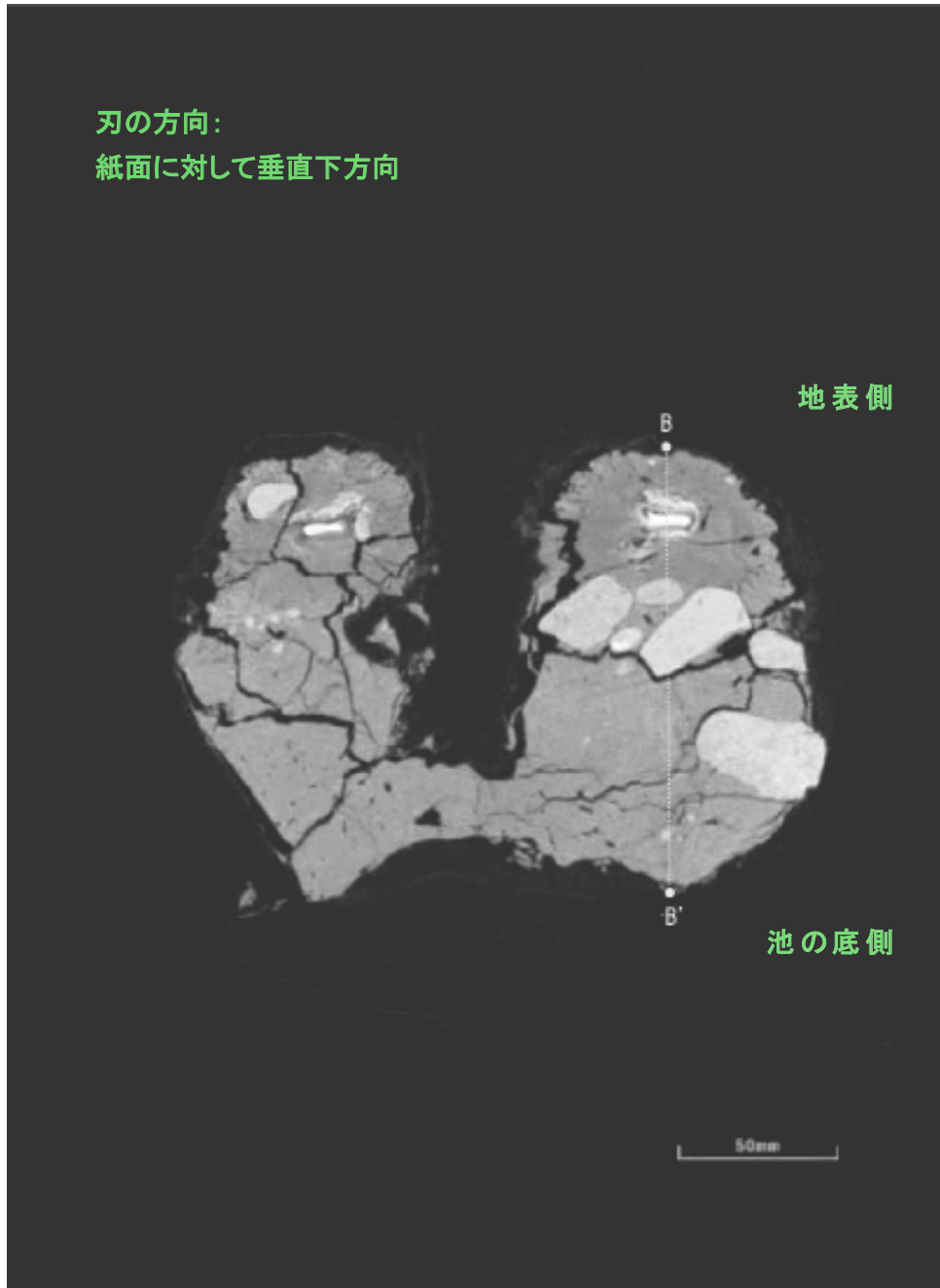


Fig.10 X線 CT 像④ (HiXCT)

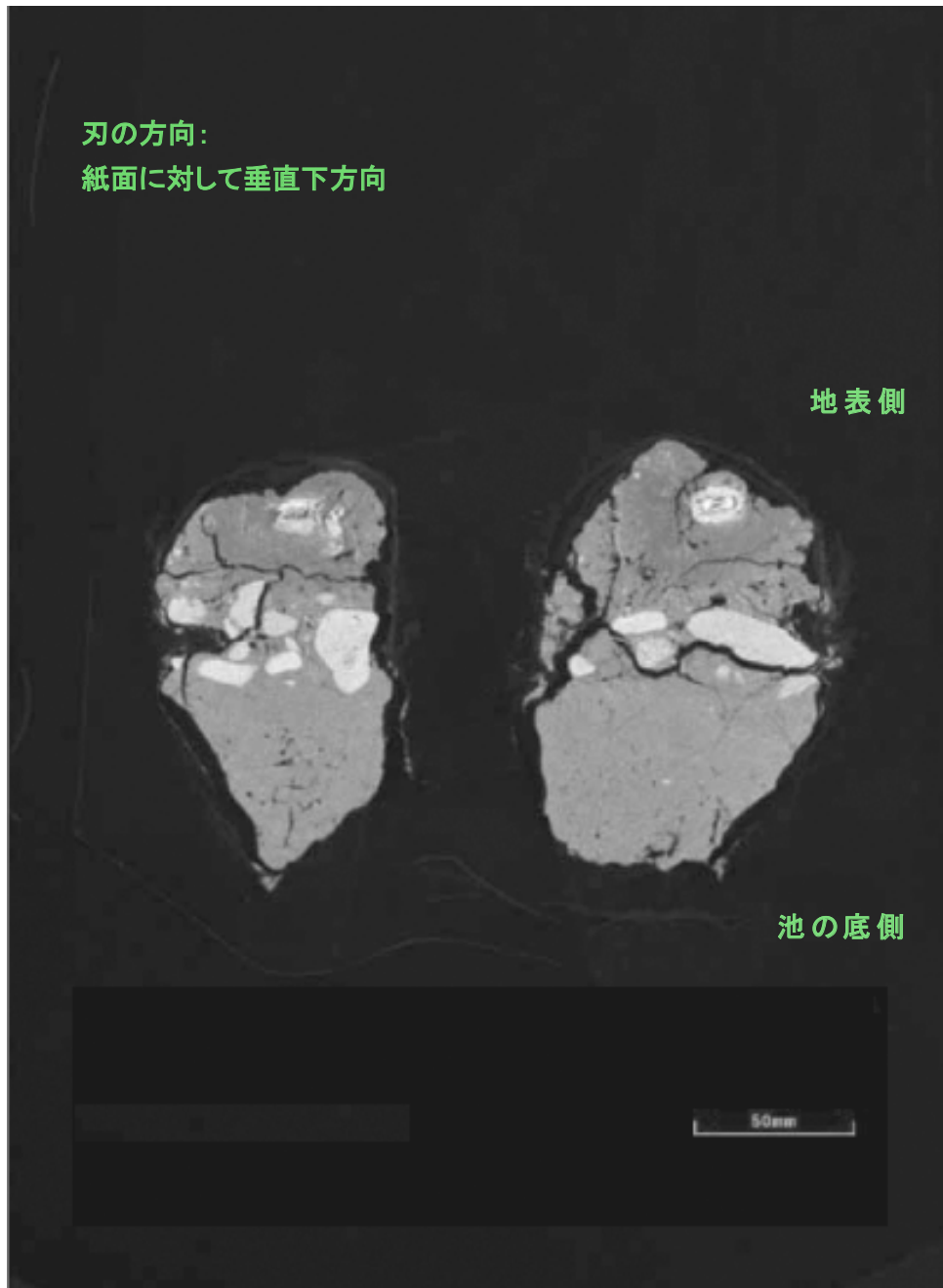


Fig.11 X線 CT 像⑤ (HiXCT)

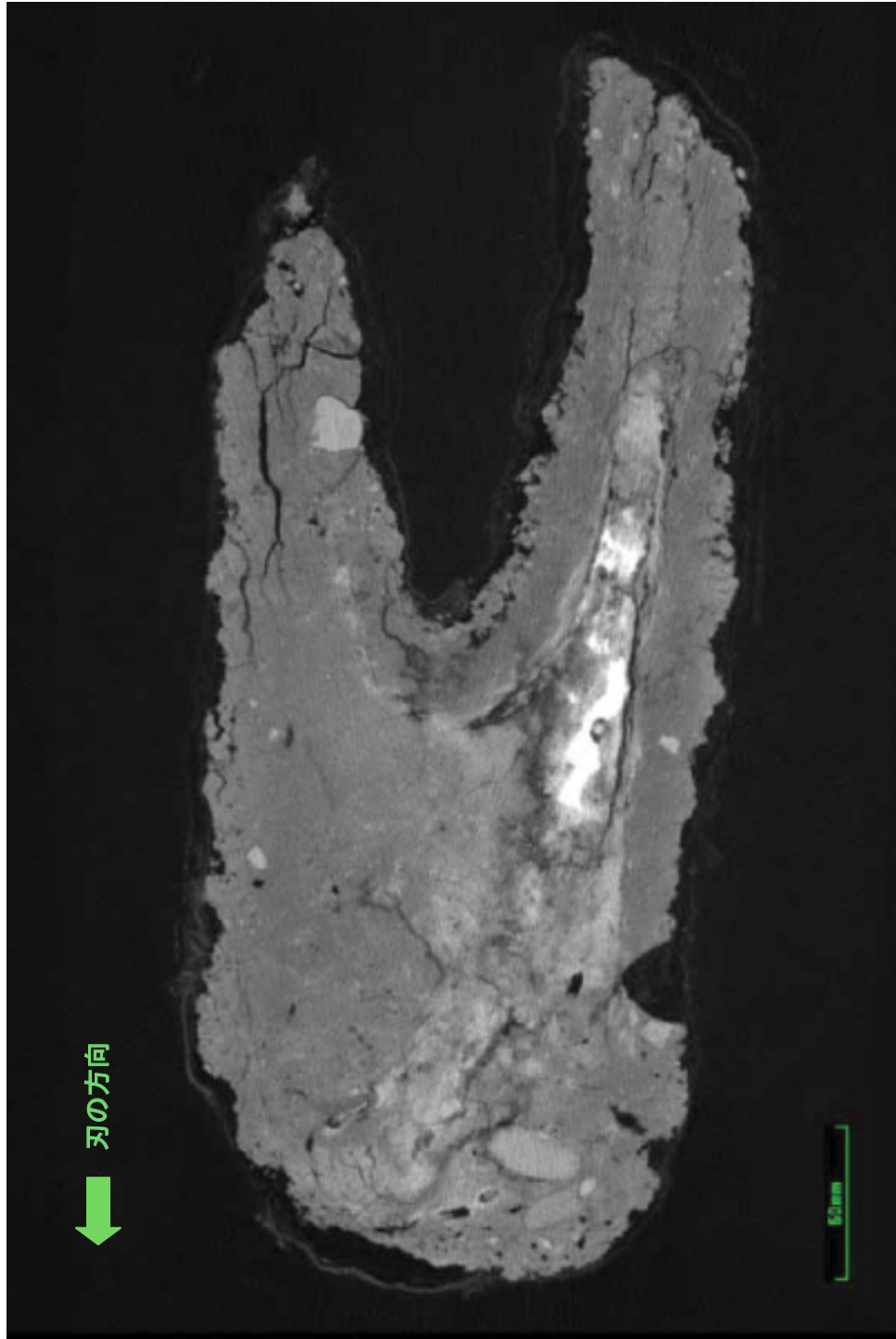


Fig.12 X線CT像⑥ (HiXCT)

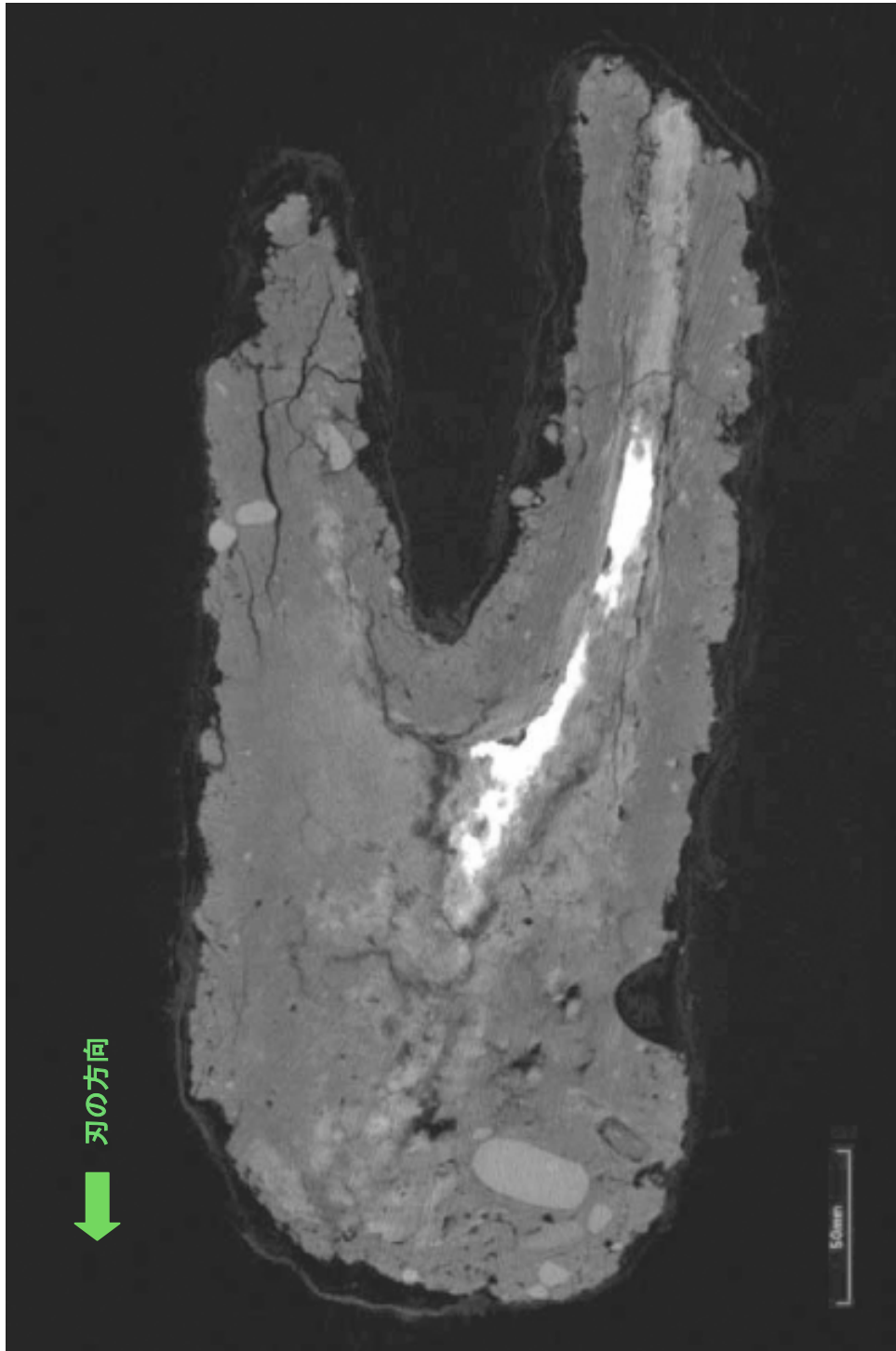


Fig.13 X線CT像⑦ (HiXCT)

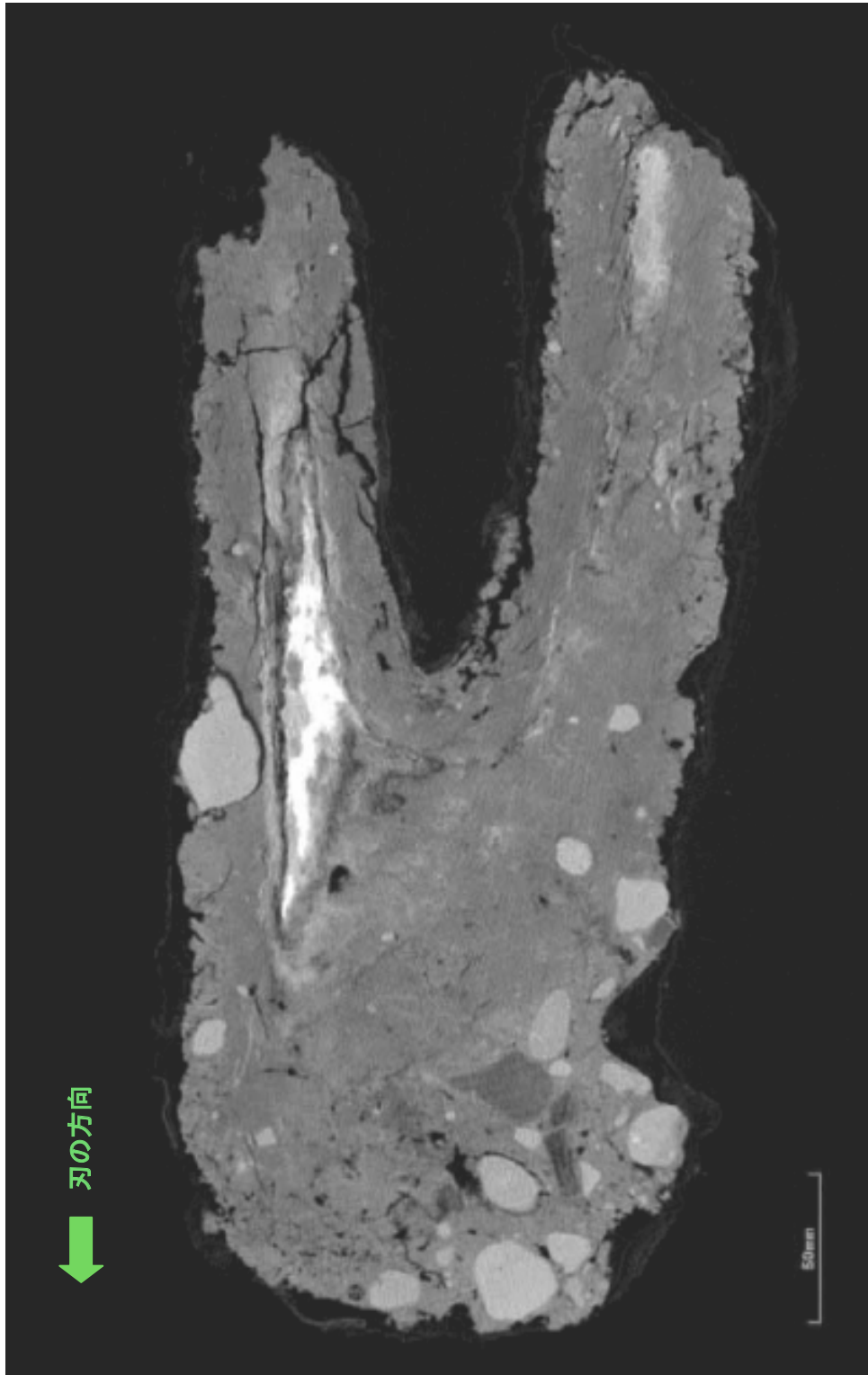


Fig.14 X線CT像⑧ (HIXCT)

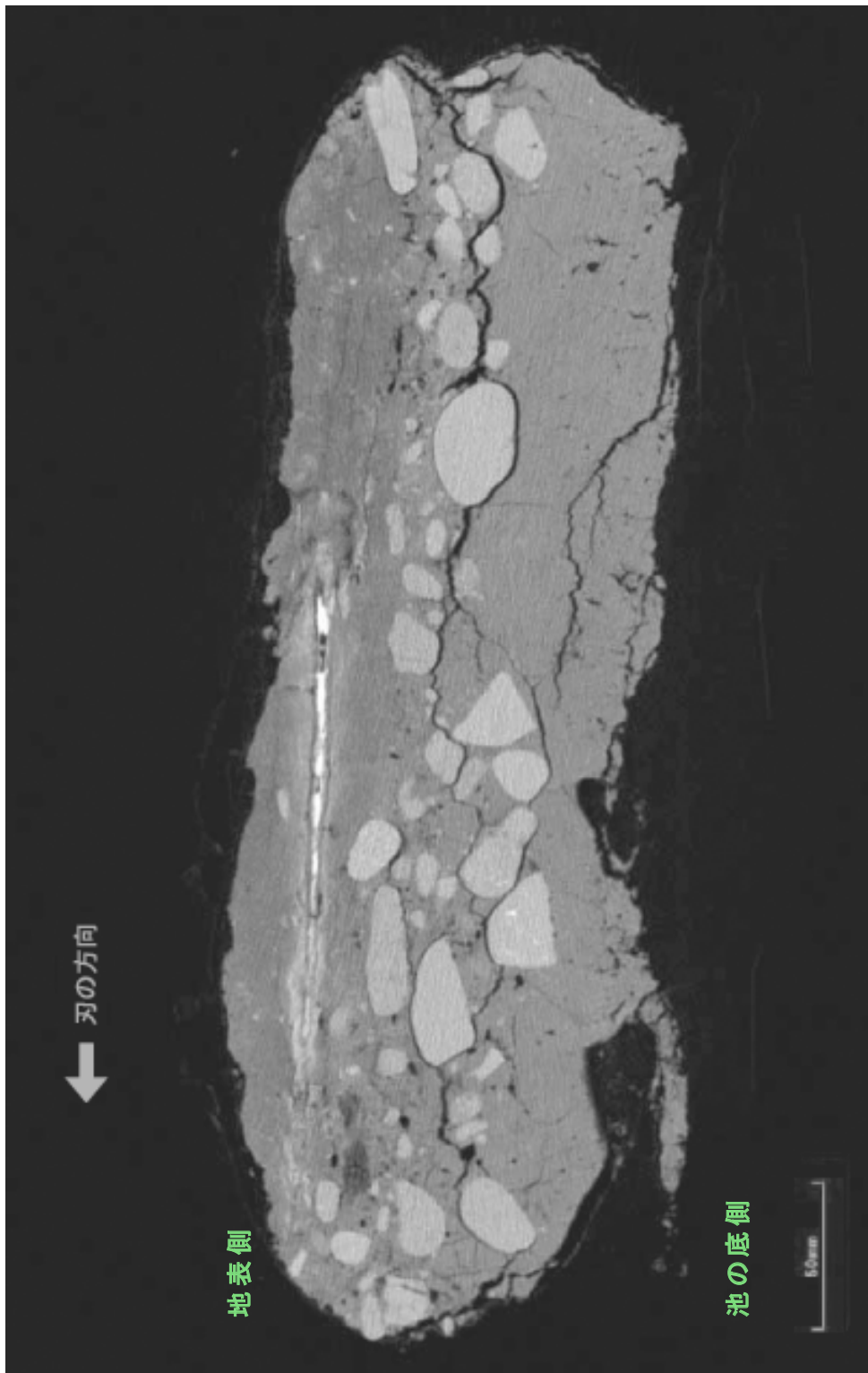


Fig.15 X線CT像⑨ (HiXCT)

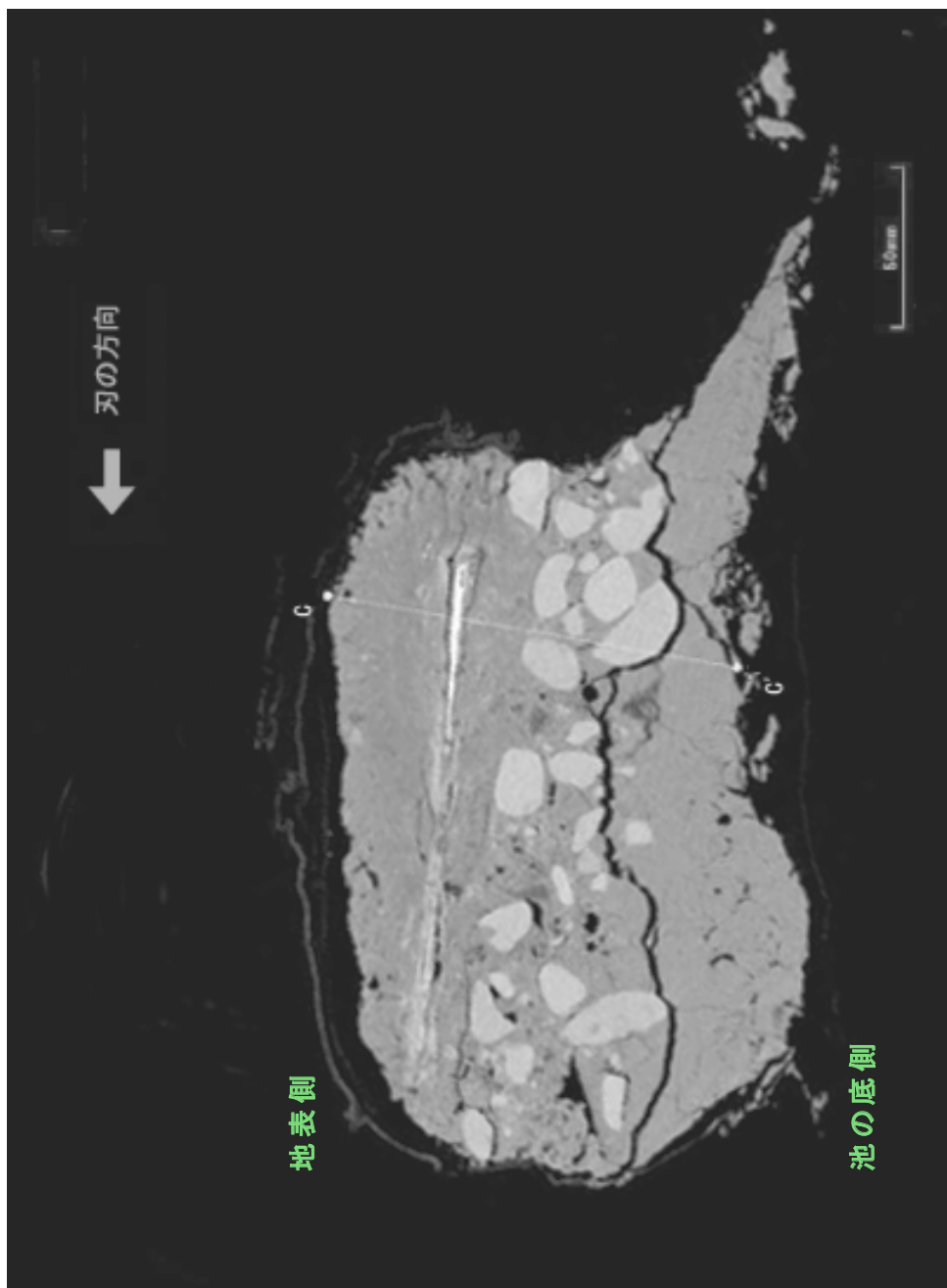


Fig.16 X線CT像⑩ (HiXCT)

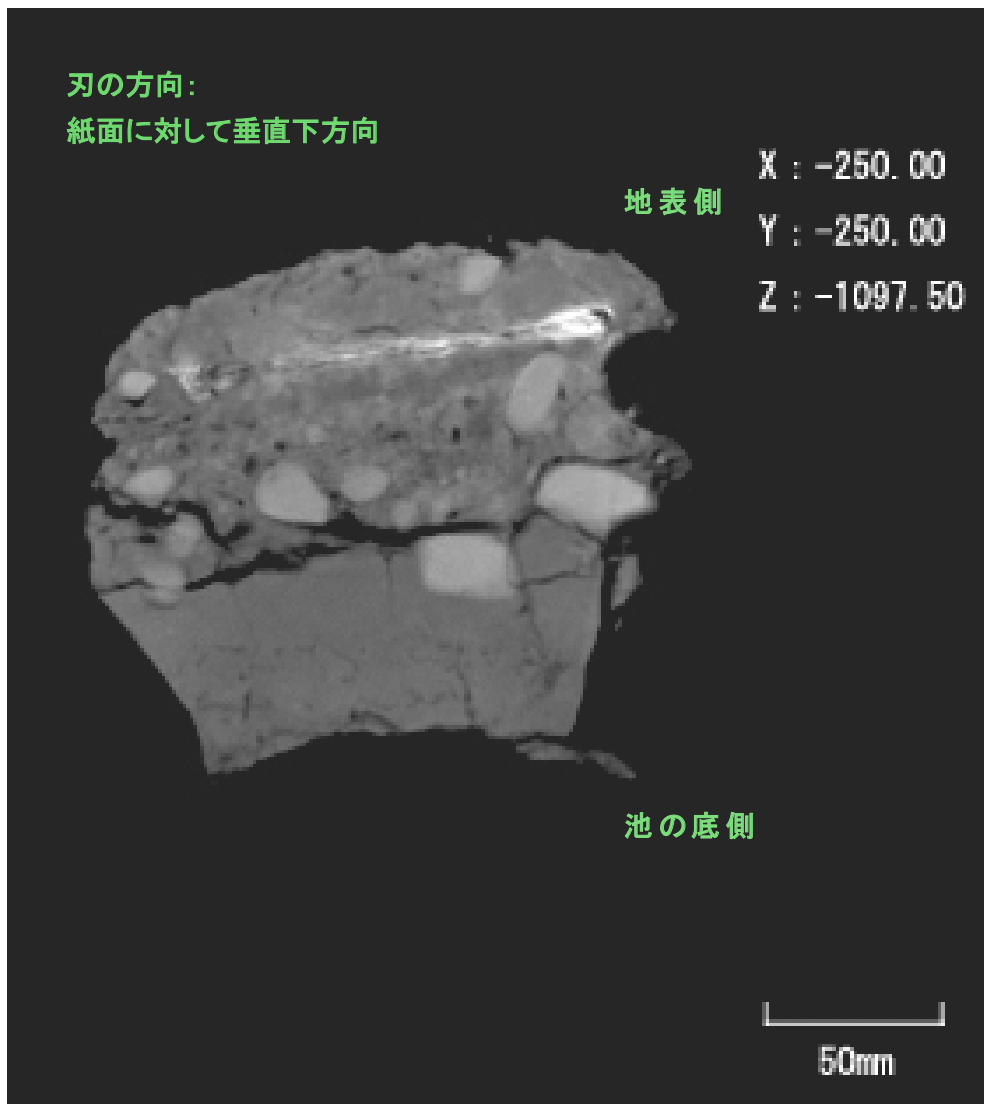


Fig.17 X線CT像①' (JAEA)
(Fig.4の①面近傍(①'とした)でのAsteionVIによる測定)

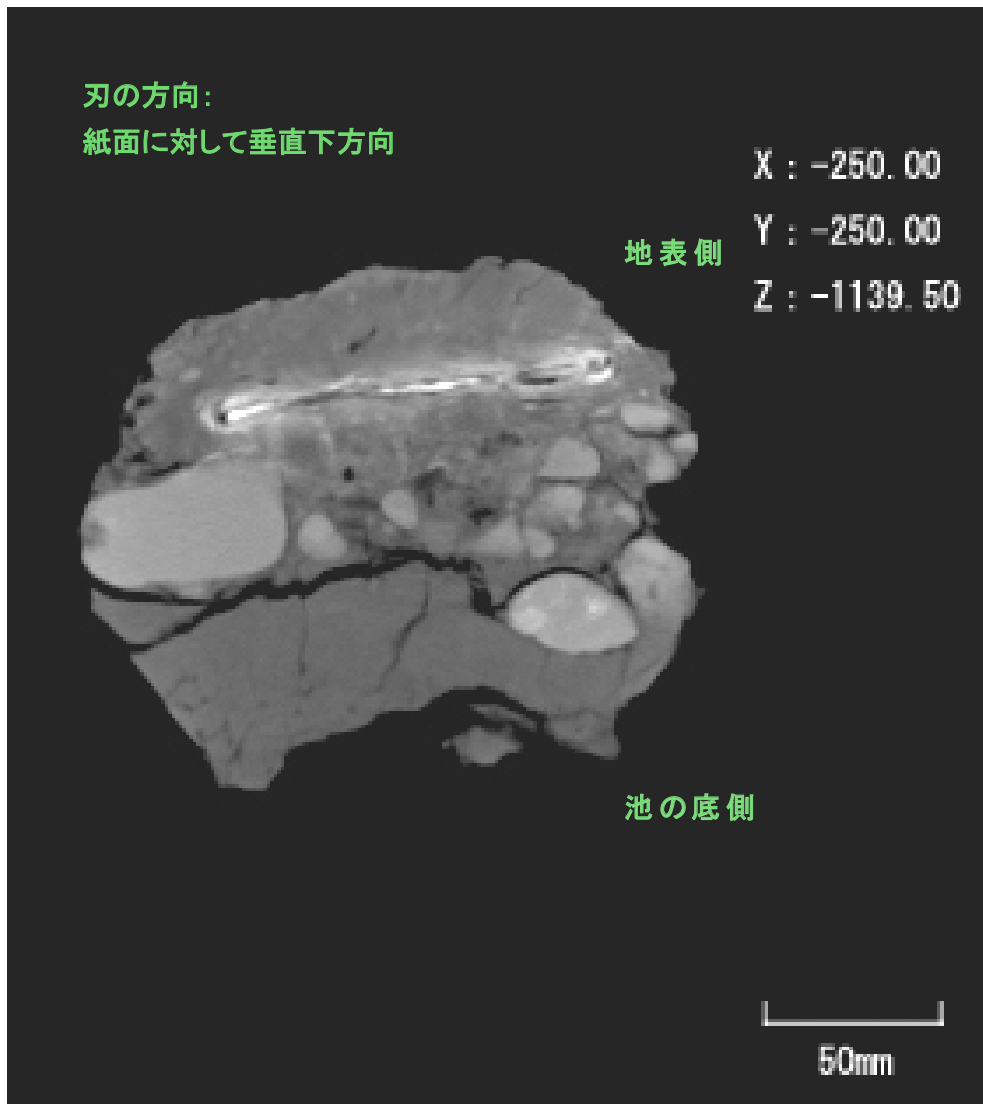


Fig.18 X線 CT 像②' (JAEA)
(Fig.4 の②面近傍 (②'とした) での AsteionVIによる測定)

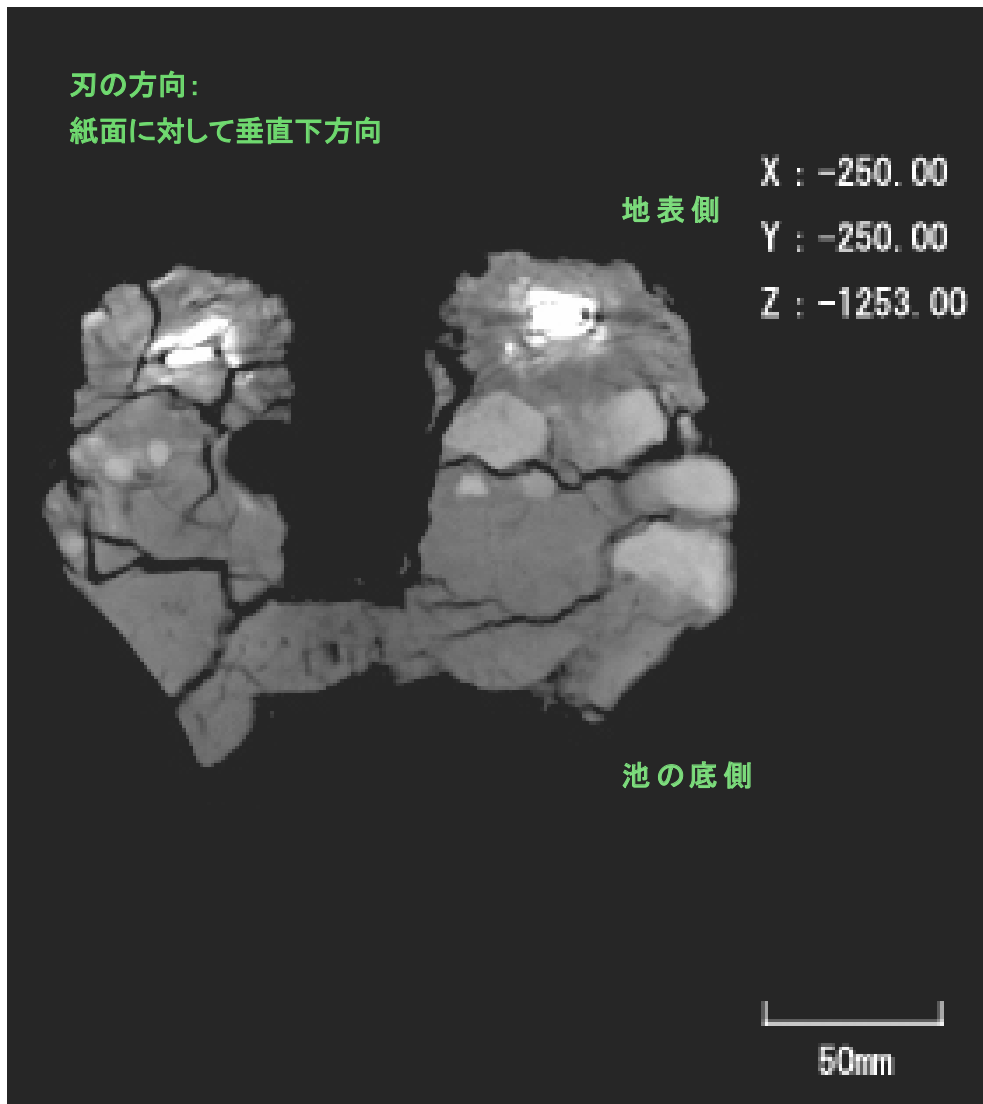


Fig.19 X線CT像④' (JAEA)
(Fig.4の④面近傍(④'とした)でのAsteionVIによる測定)

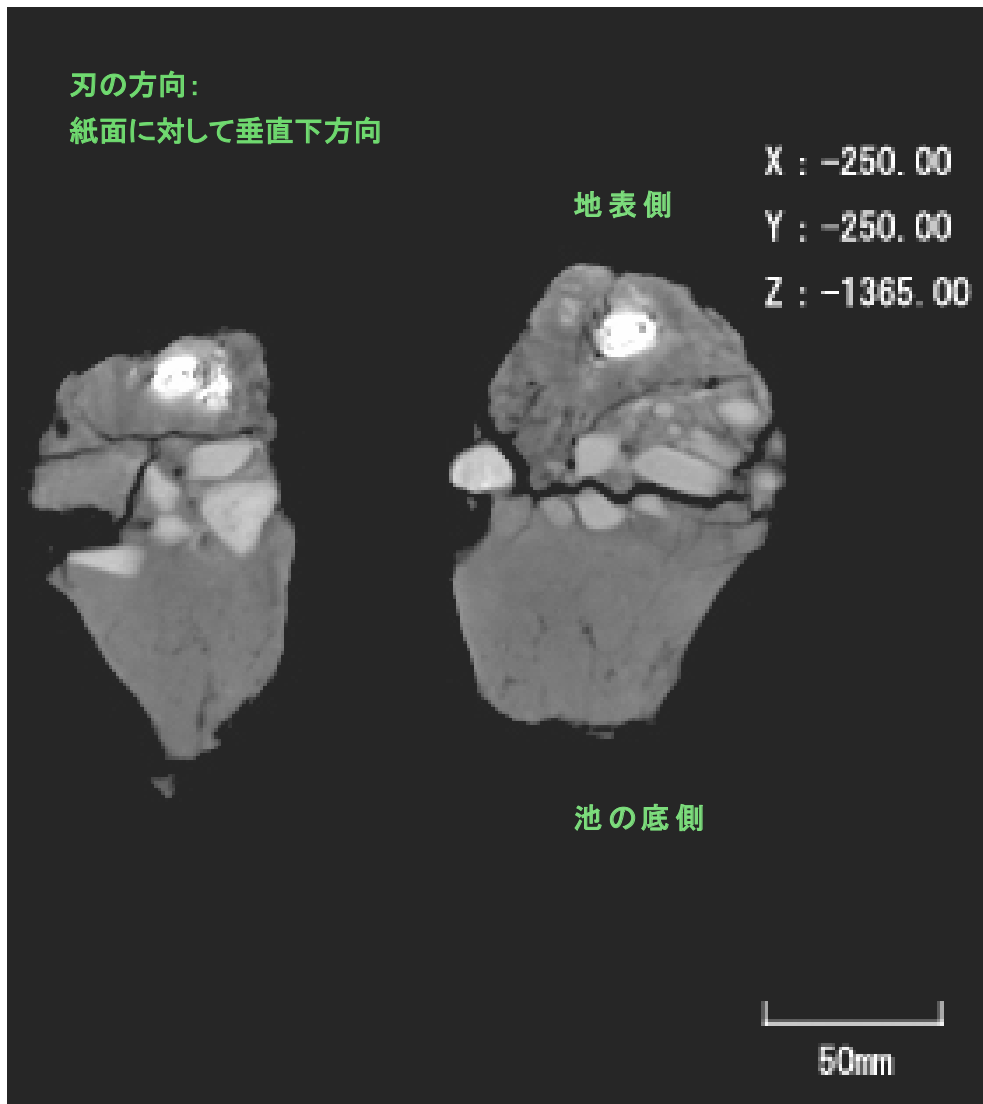


Fig.20 X線CT像⑤' (JAEA)
(Fig.4の⑤面近傍(⑤'とした)でのAsteionVIによる測定)



Fig.21 X線CT像②” (JAEA)

(Fig.4の②面近傍(②”とした)でのAsteionVIによる測定。ただし、画像処理として測定を行った。)

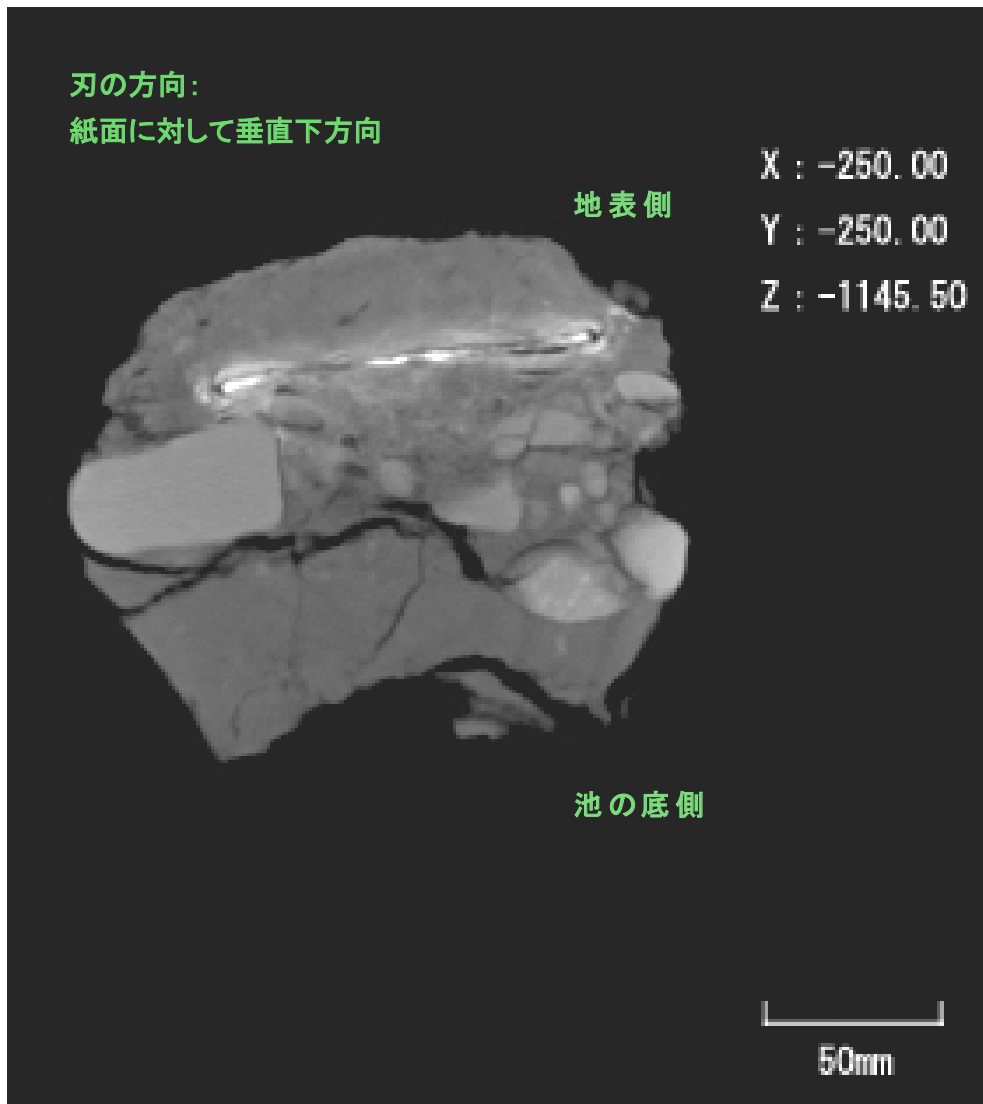


Fig.22 X線CT像②” (JAEA)
(Fig.4の②面近傍(②”とした)でのAsteionVIによる測定。
ただし、画像処理として測定を行った。)

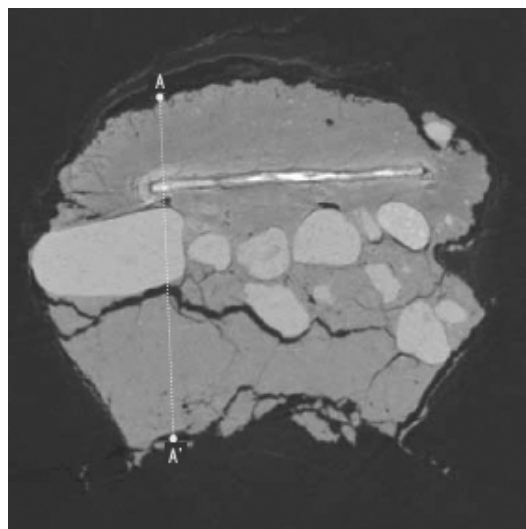
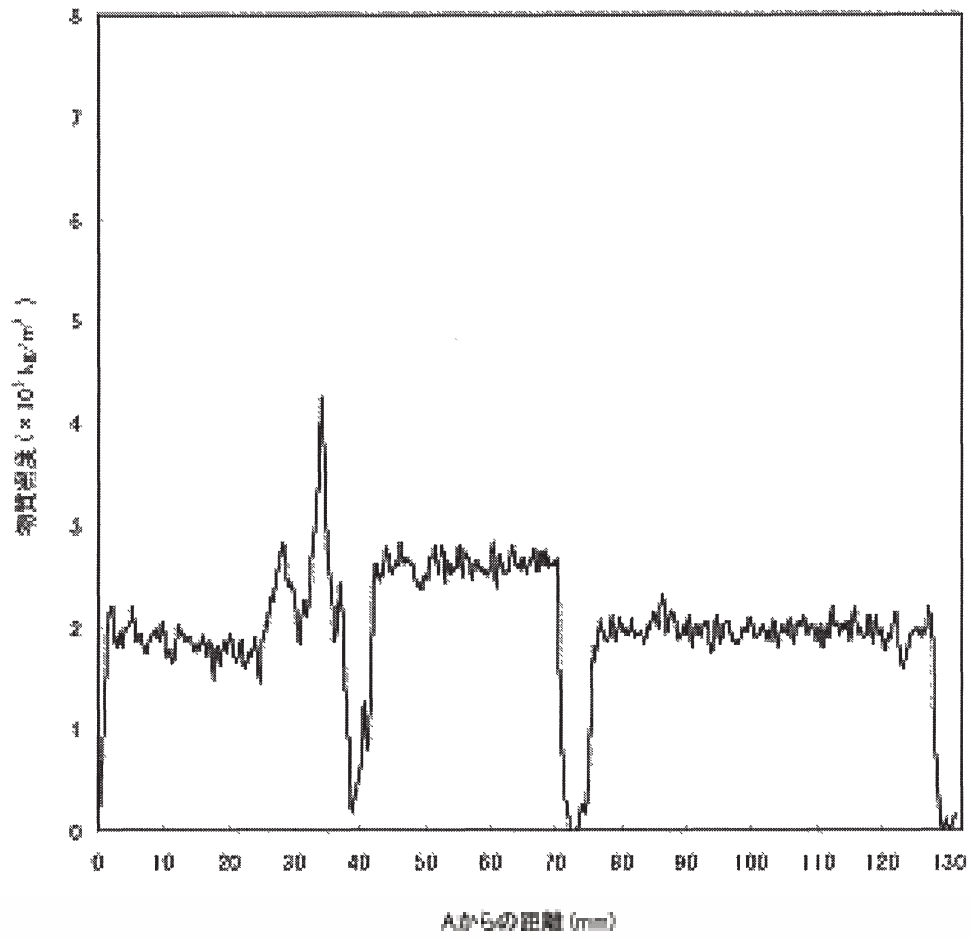


Fig.23 X線CT像③の断面物質密度分布図 (A-A') (HiXCT)

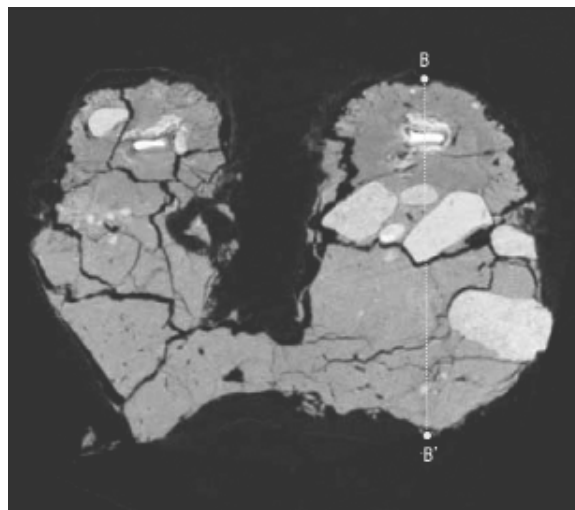
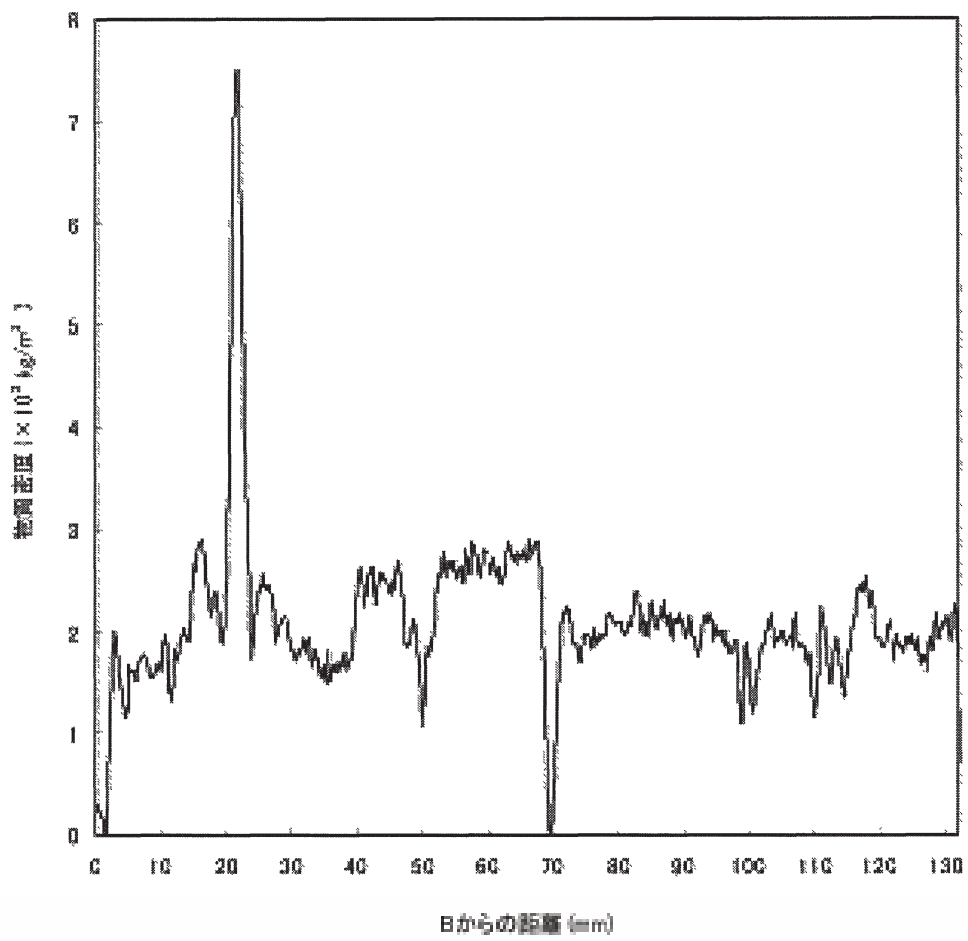


Fig.24 X線CT像④の断面物質密度分布図(B-B') (HiXCT)

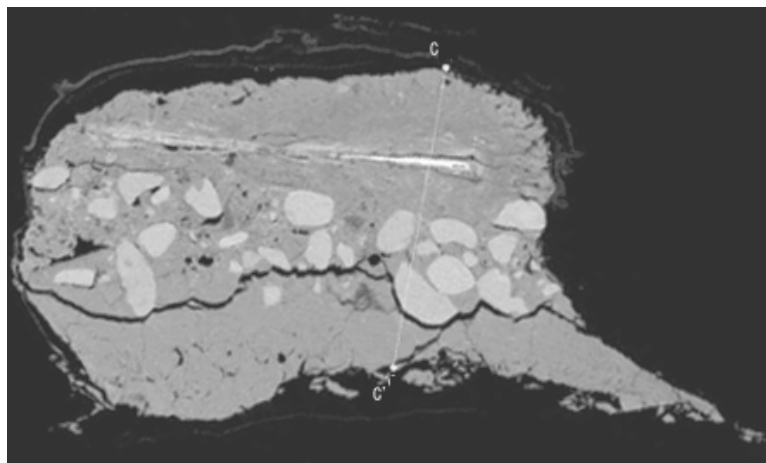
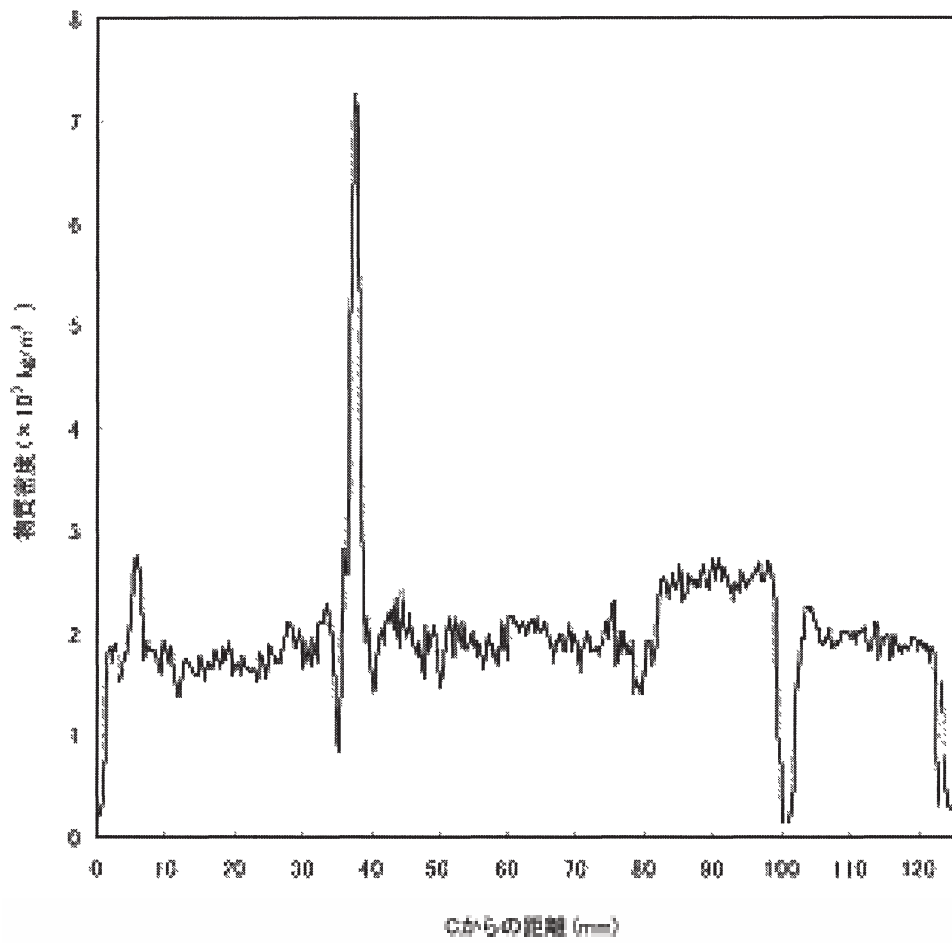


Fig.25 X線CT像⑩の断面物質密度分布図 (C-C') (HiXCT)

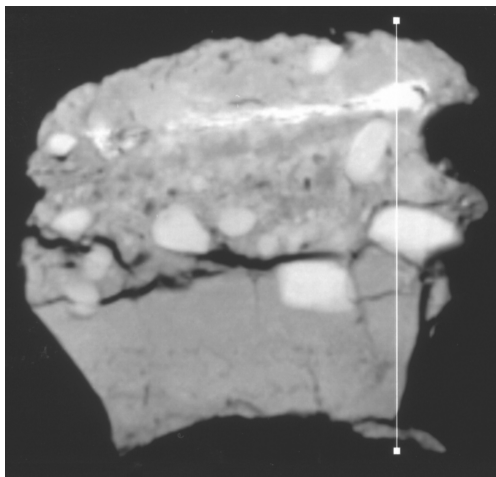
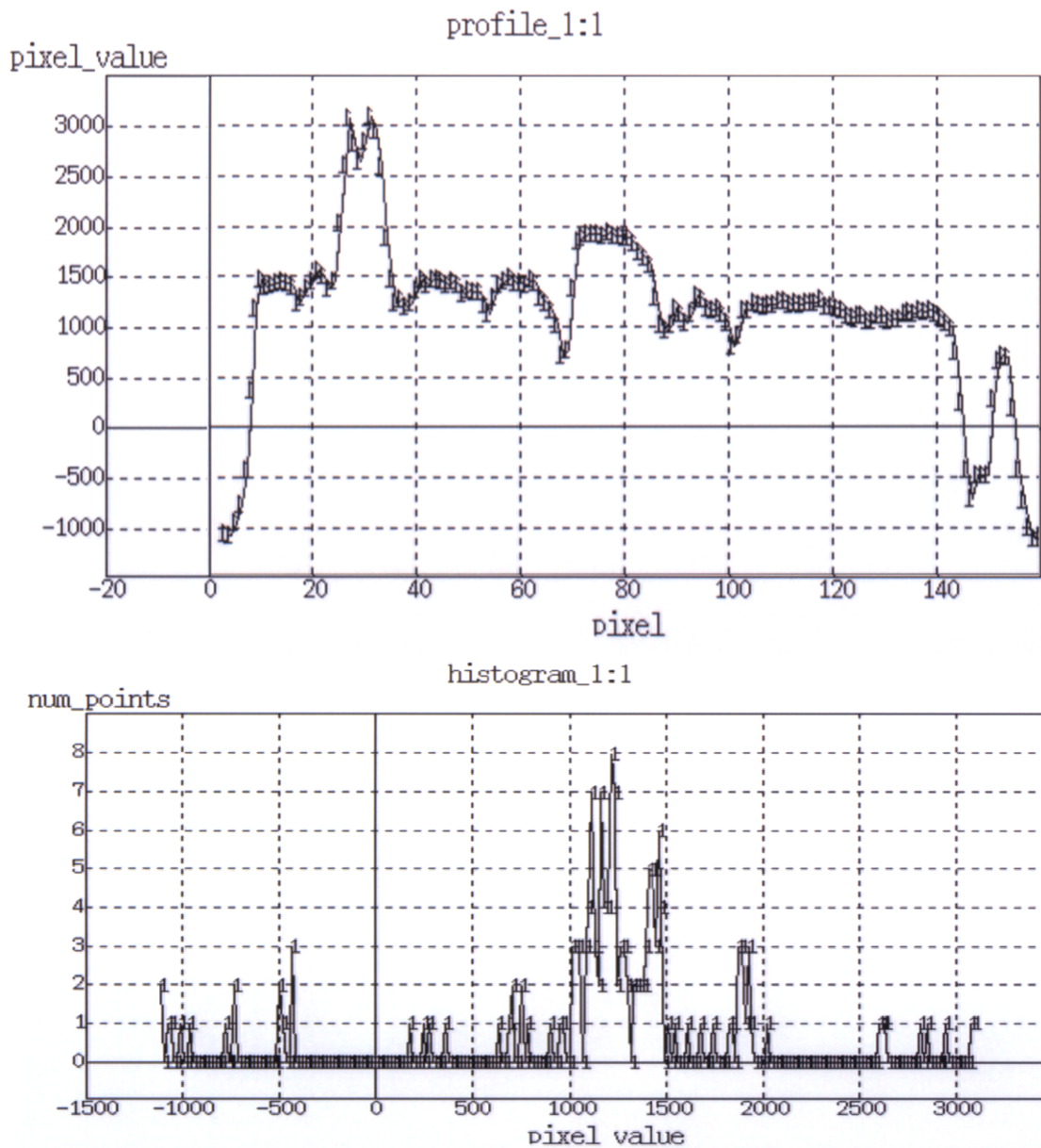


Fig.26 X線 CT 像①' (JAEA) の断面画像濃度分布図とヒストグラム

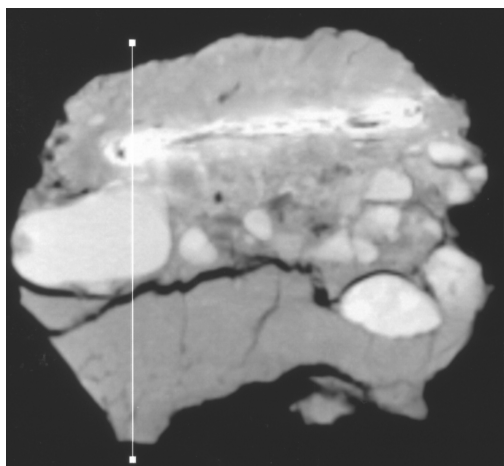
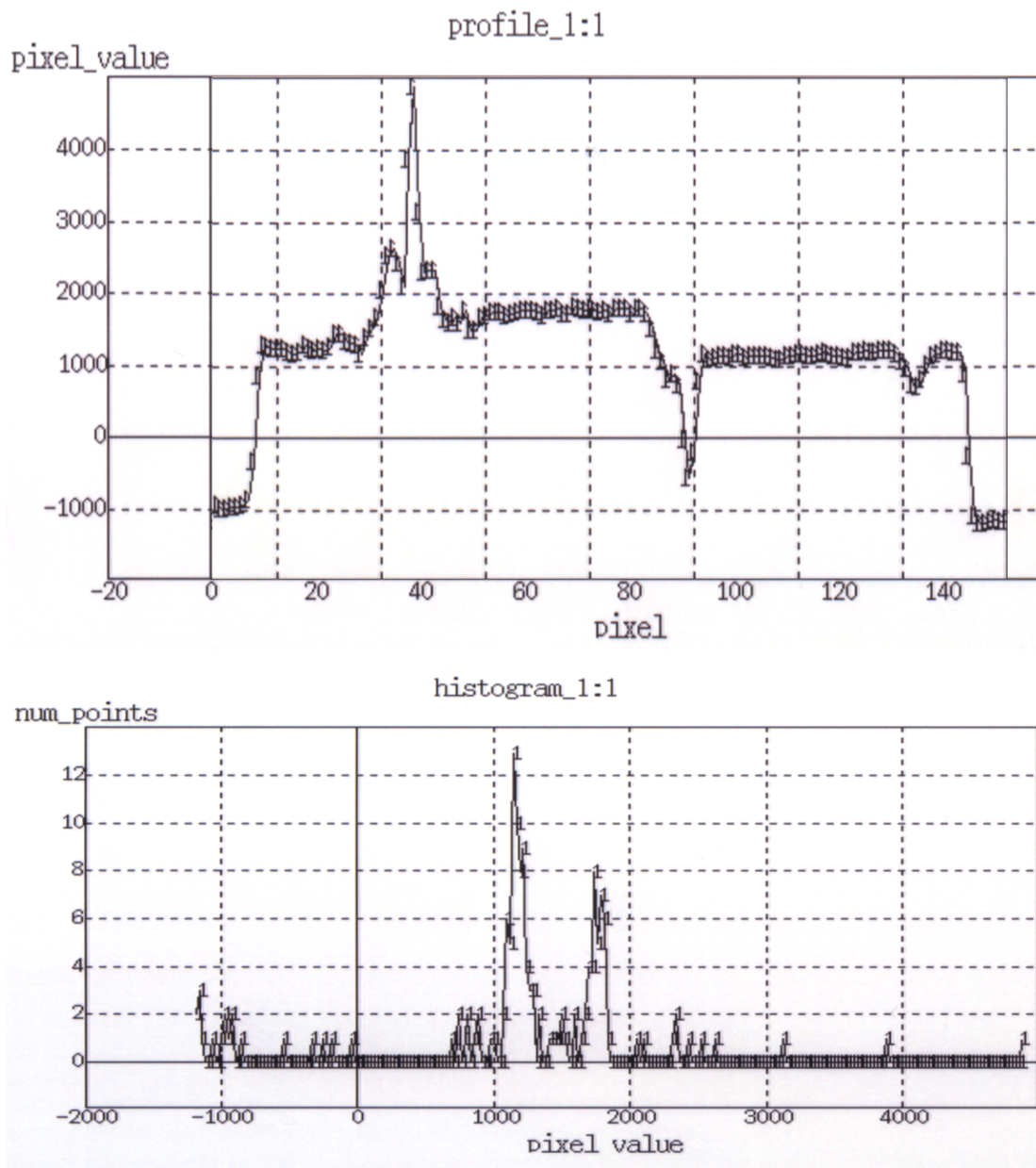


Fig.27 X線CT像②' (JAEA) の断面画像濃度分布図とヒストグラム

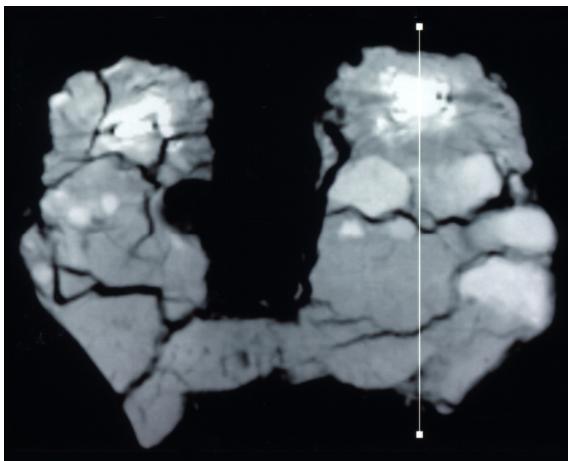
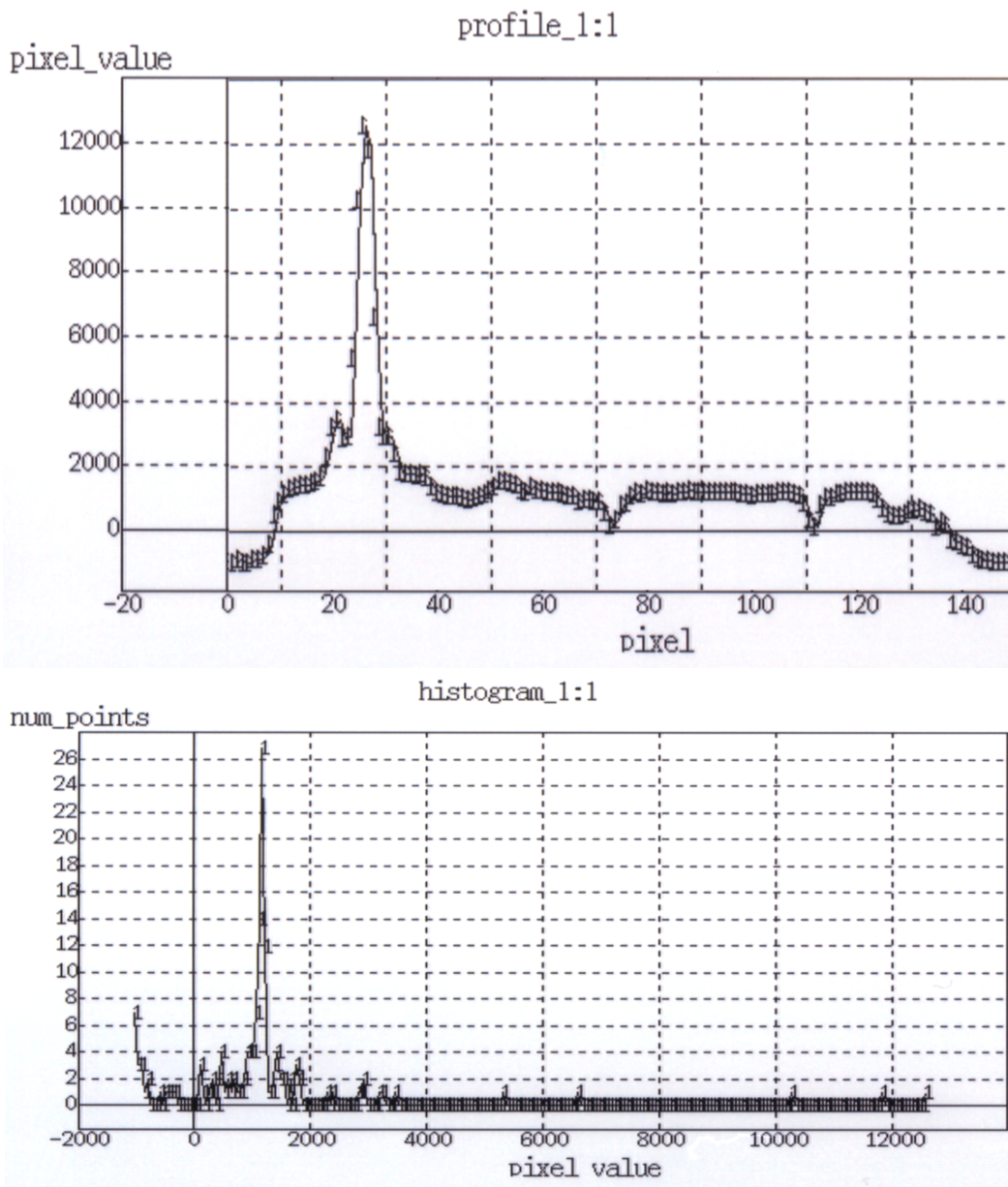


Fig.28 X線CT像④' (JAEA) の断面画像
濃度分布図とヒストグラム

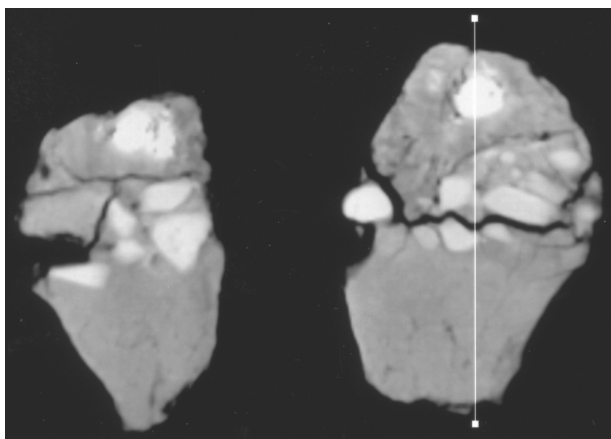
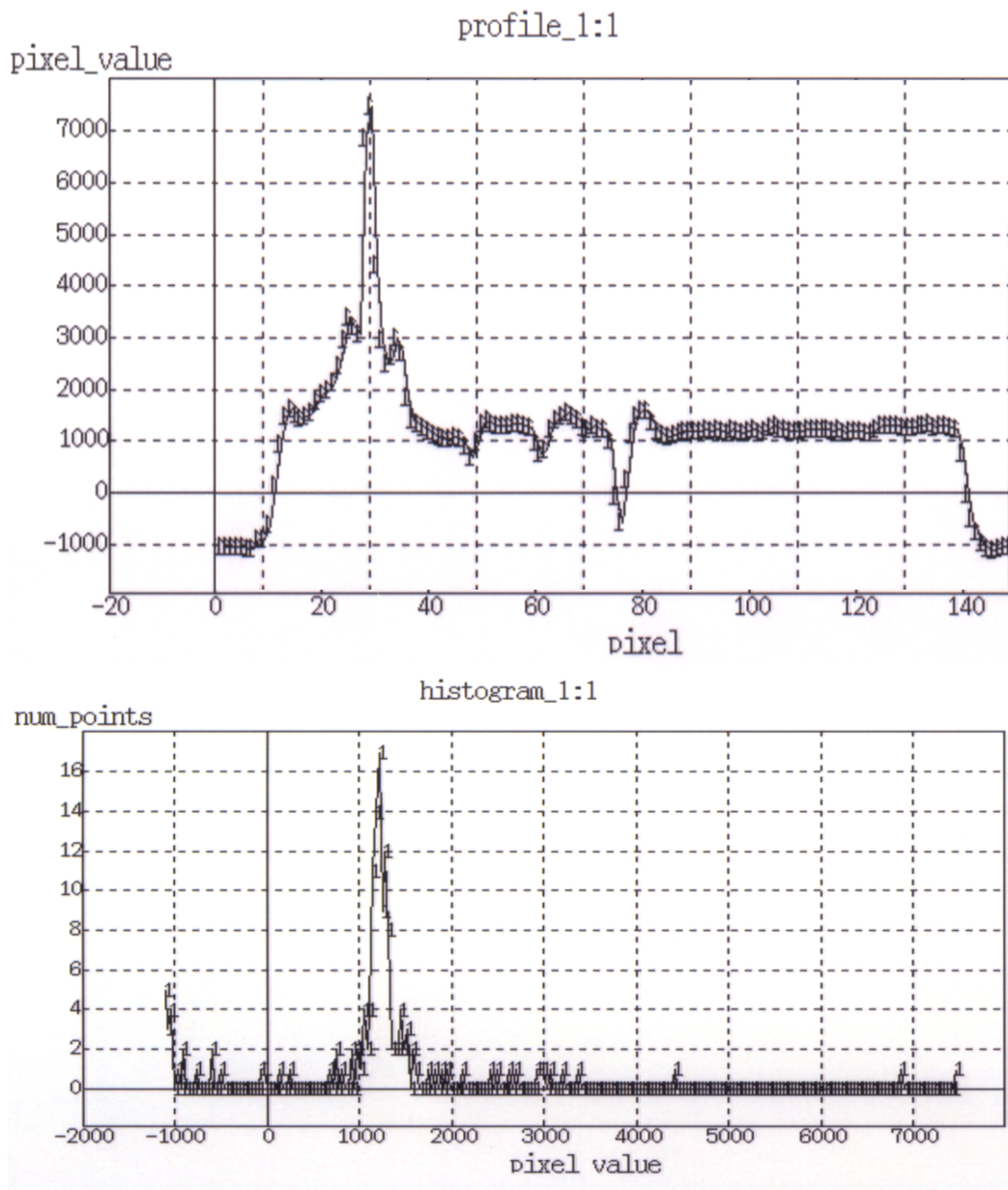


Fig.29 X線 CT 像⑤' (JAEA) の断面画像
濃度分布図とヒストグラム

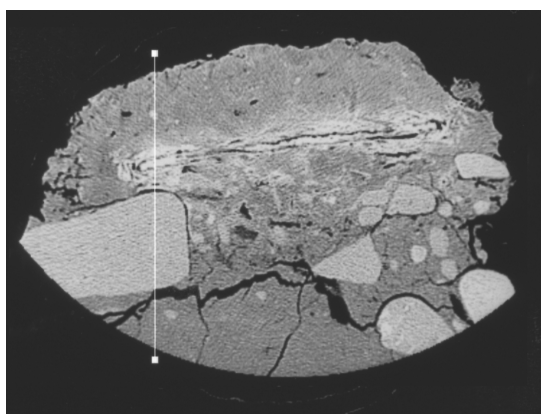
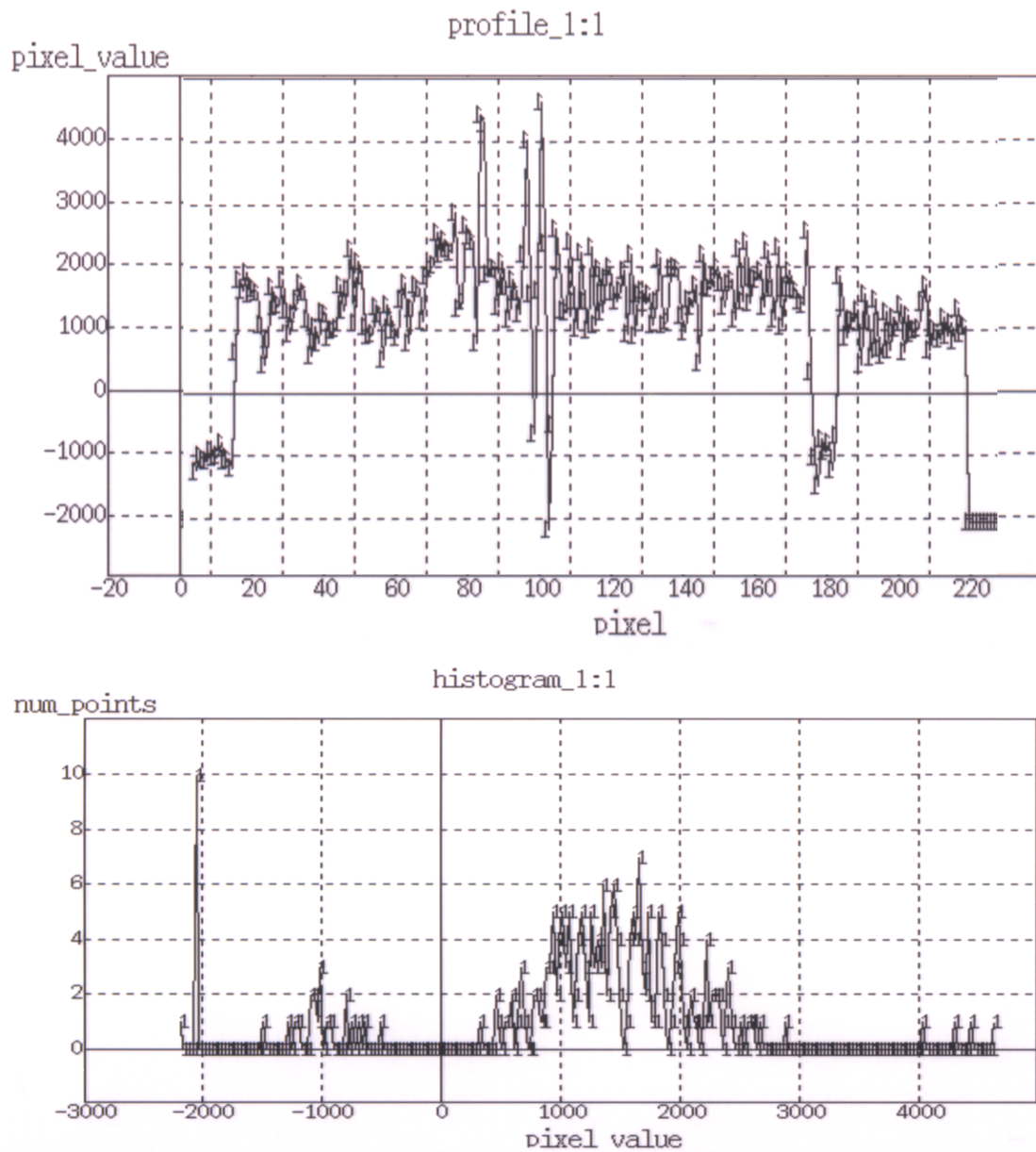


Fig.30 X線CT像②” (JAEA) の断面画像
濃度分布図とヒストグラム

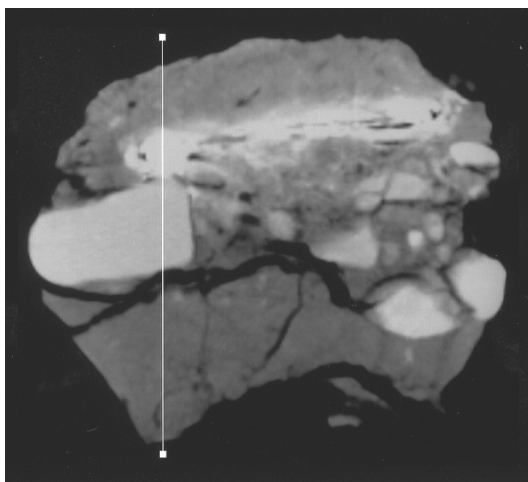
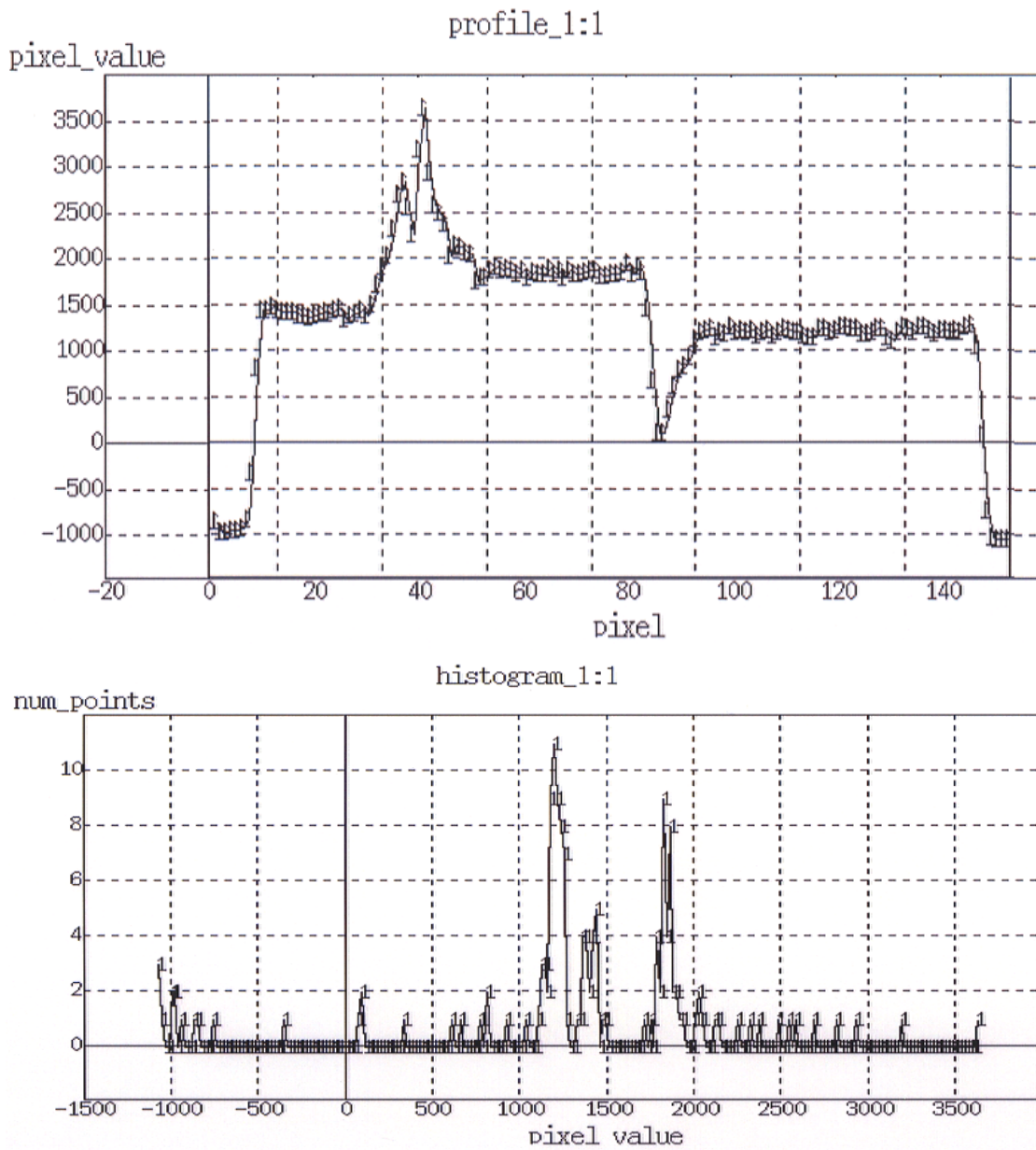


Fig.31 X線CT像②” (JAEA) の断面画像
濃度分布図とヒストグラム

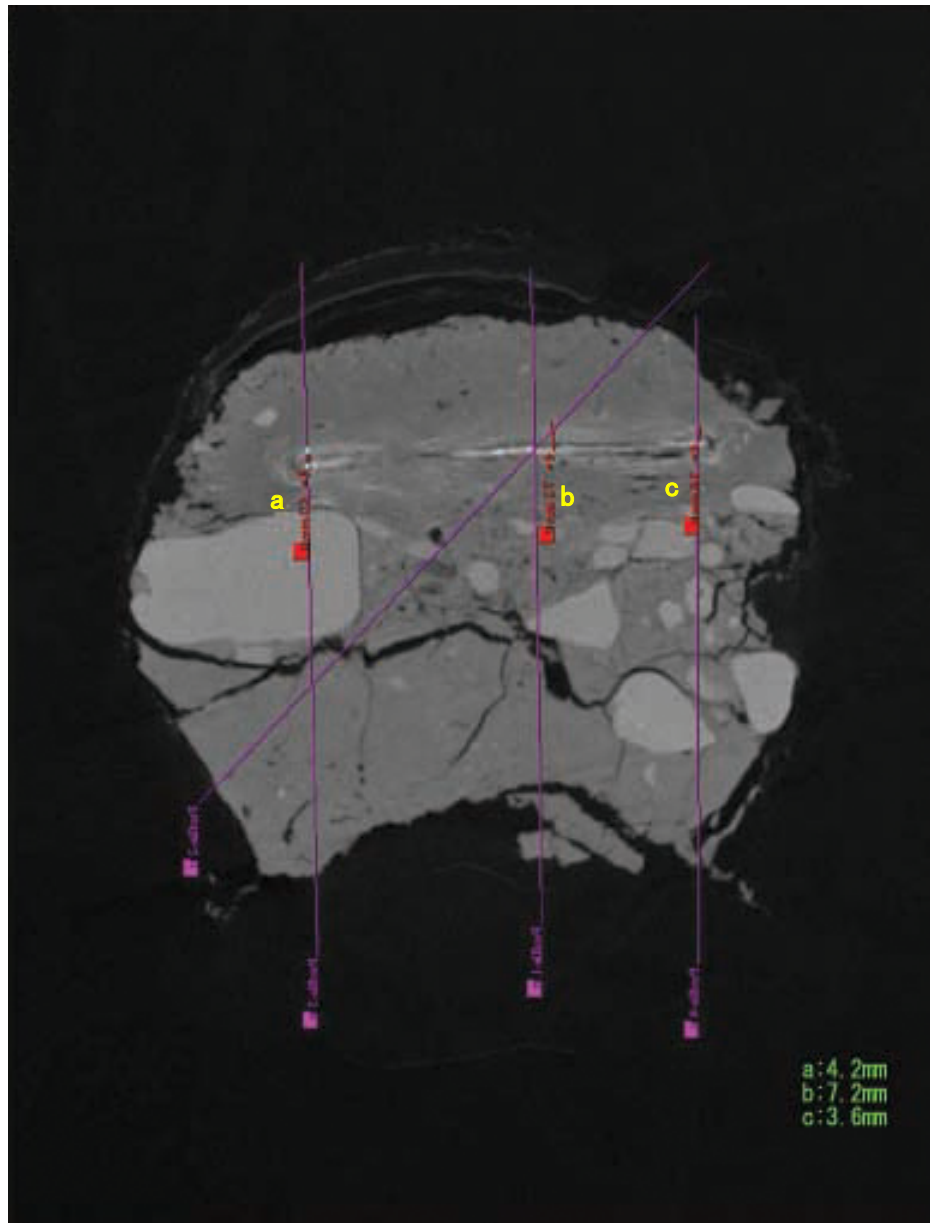


Fig.32 測定時モニタ画面_X線 CT 像② (HiXCT)
(X線 CT 像の方向性を統一したので、一部画像内文字が反転した)

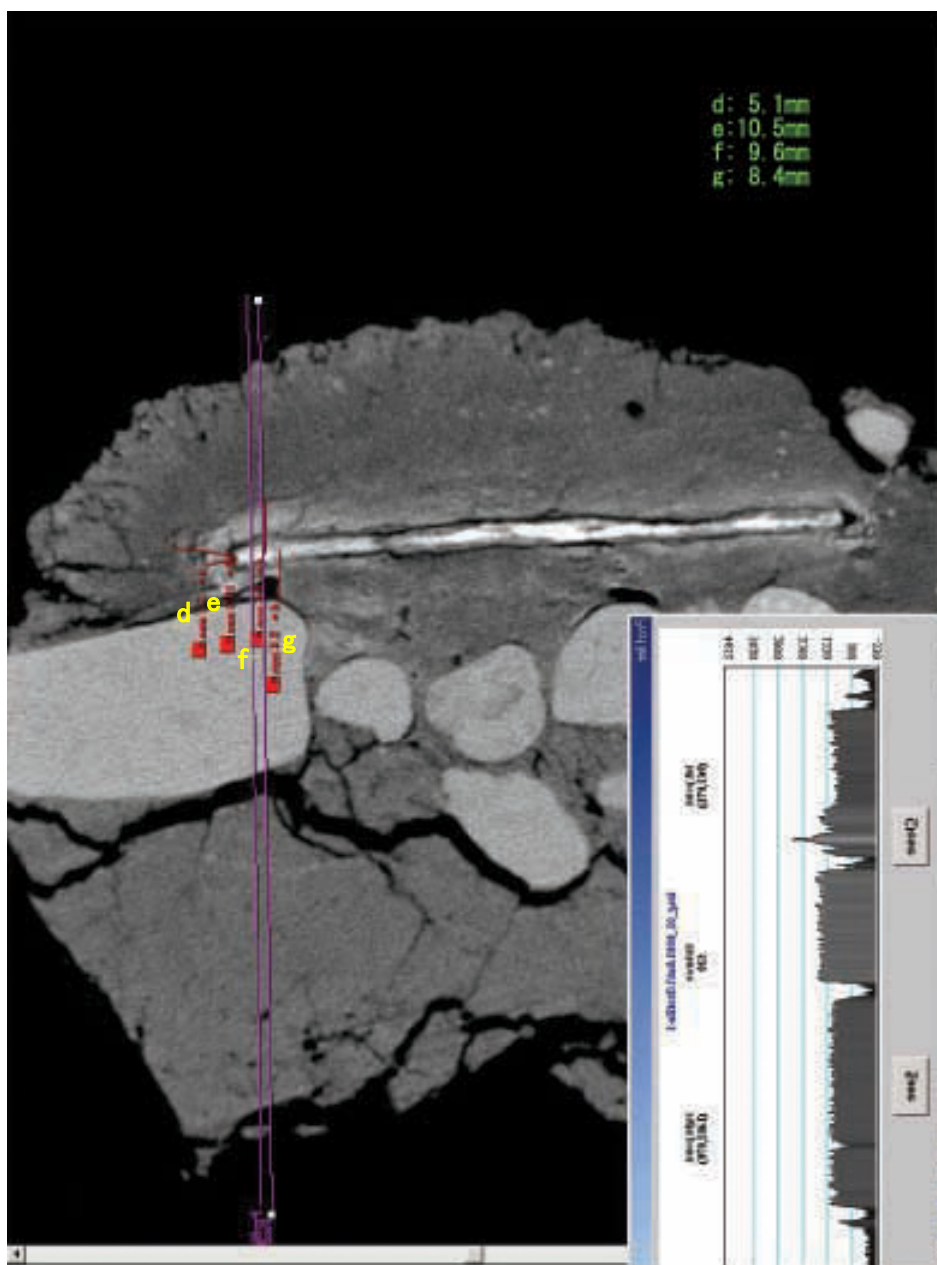


Fig.33 測定時モニタ画面_X線 CT 像③ (HiXCT)
(X線 CT 像の方向性を統一したので、一部画像および文字が反転した)

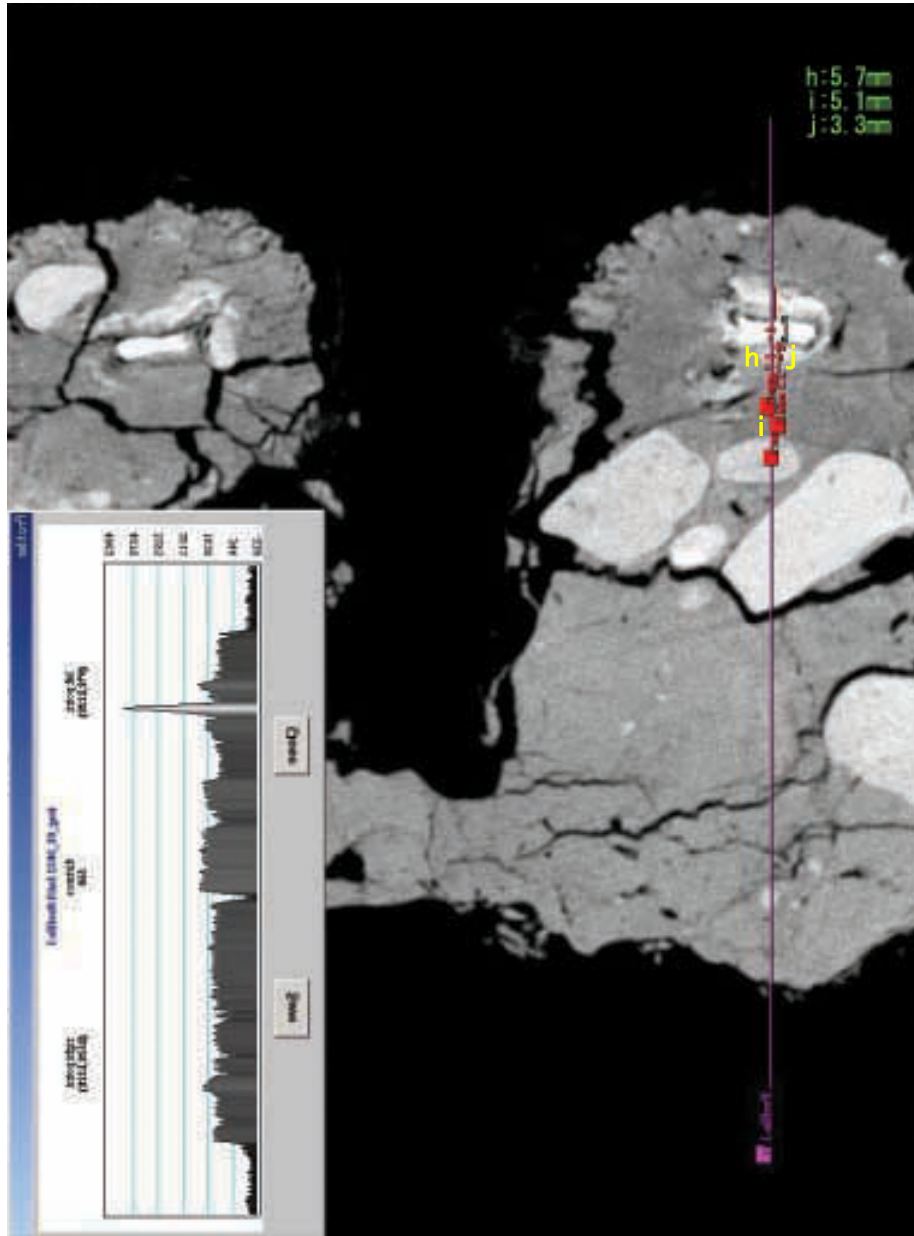


Fig.34 測定時モニタ画面_X線 CT 像④ (HiXCT)
(X線 CT 像の方向性を統一したので、一部画像および文字が反転した)

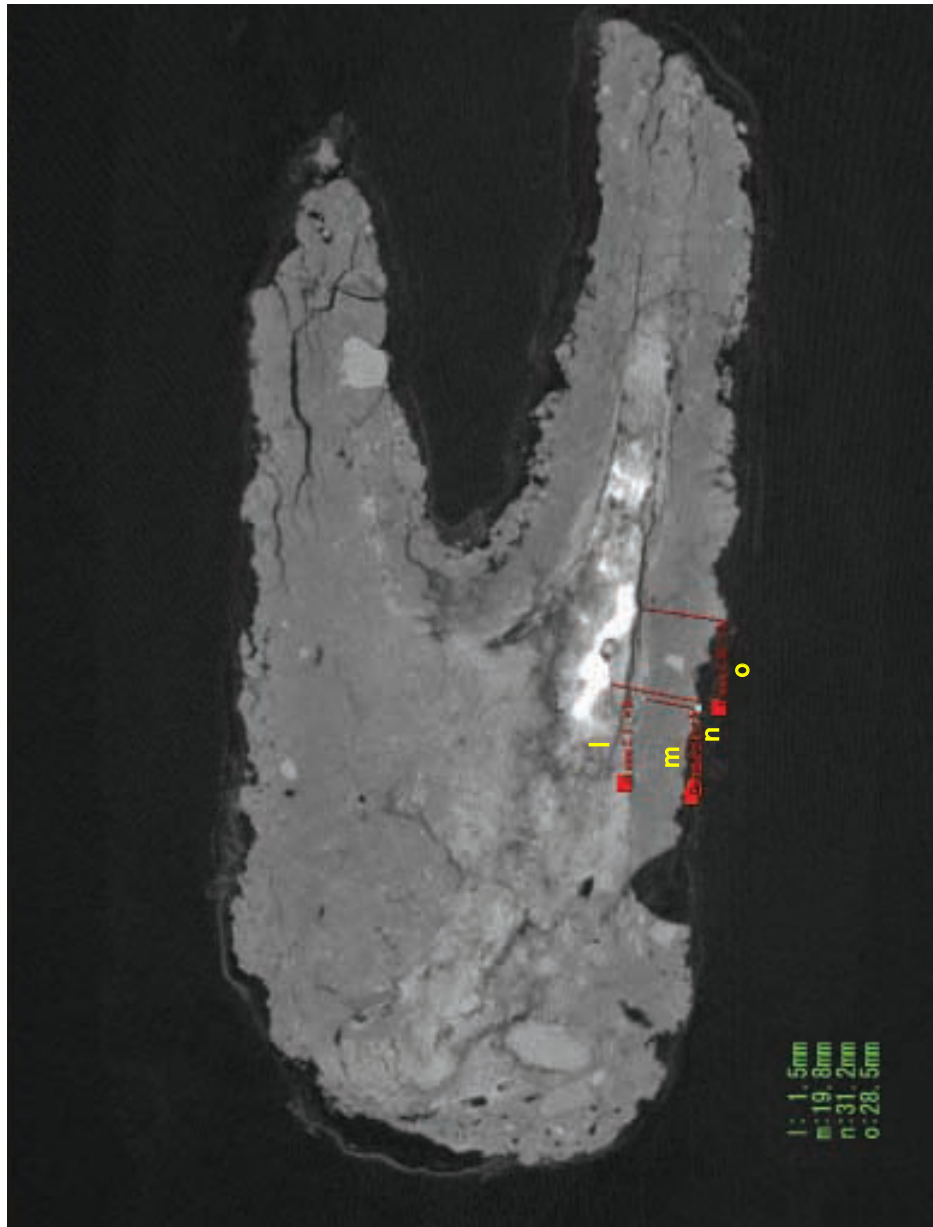


Fig.35 測定時モニタ画面_X線CT像⑥ (HiXCT)
(X線CT像の方向性を統一したので、一部画像内文字が反転した)

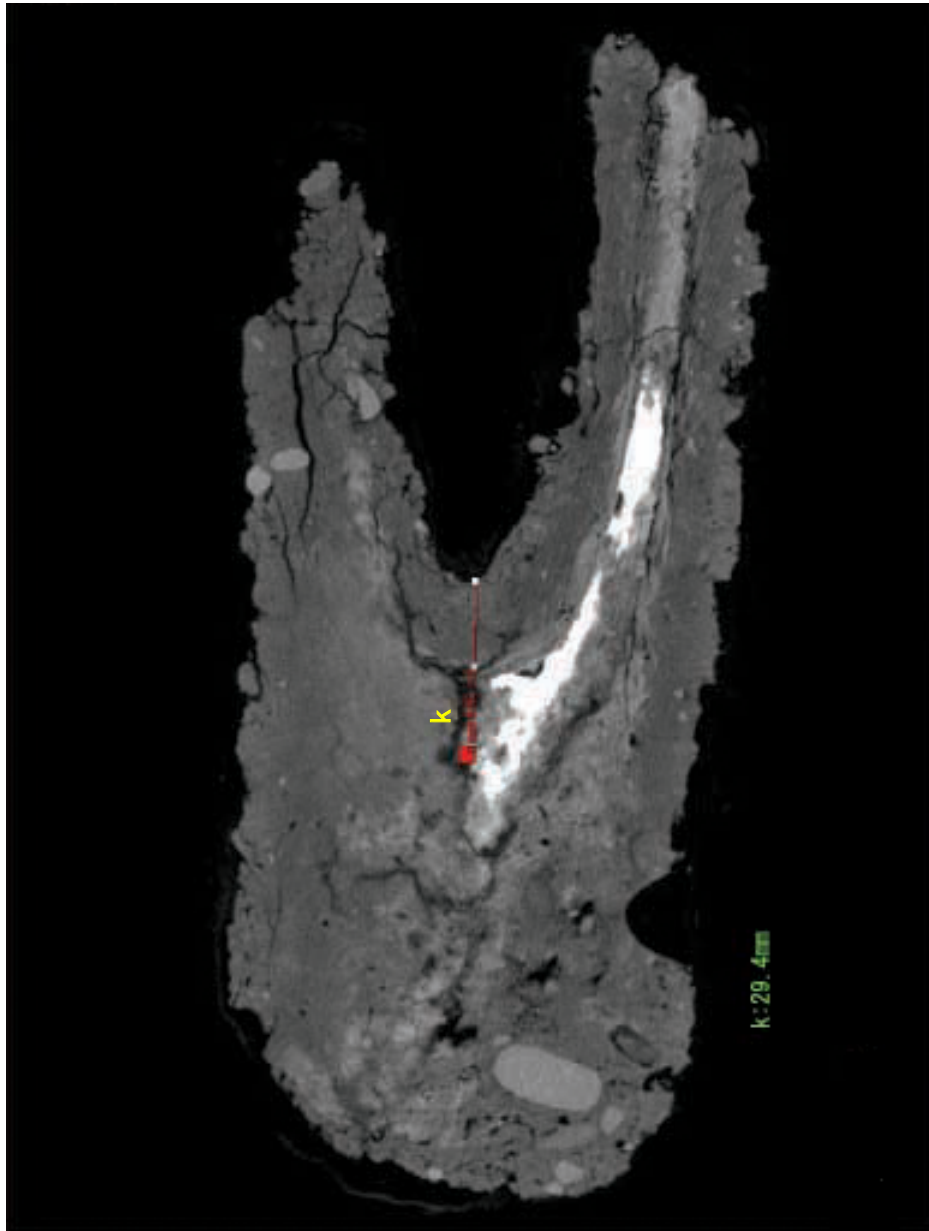


Fig.36 測定時モニタ画面_X線 CT 像⑦ (HiXCT)
(X線 CT 像の方向性を統一したので、一部画像内文字が反転した)

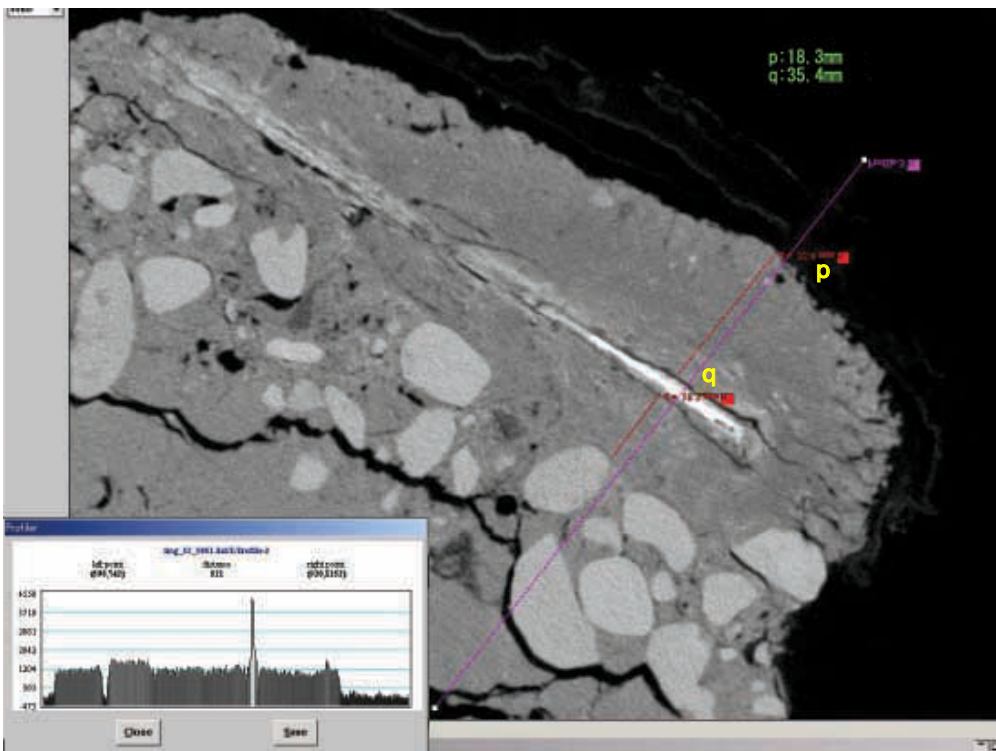
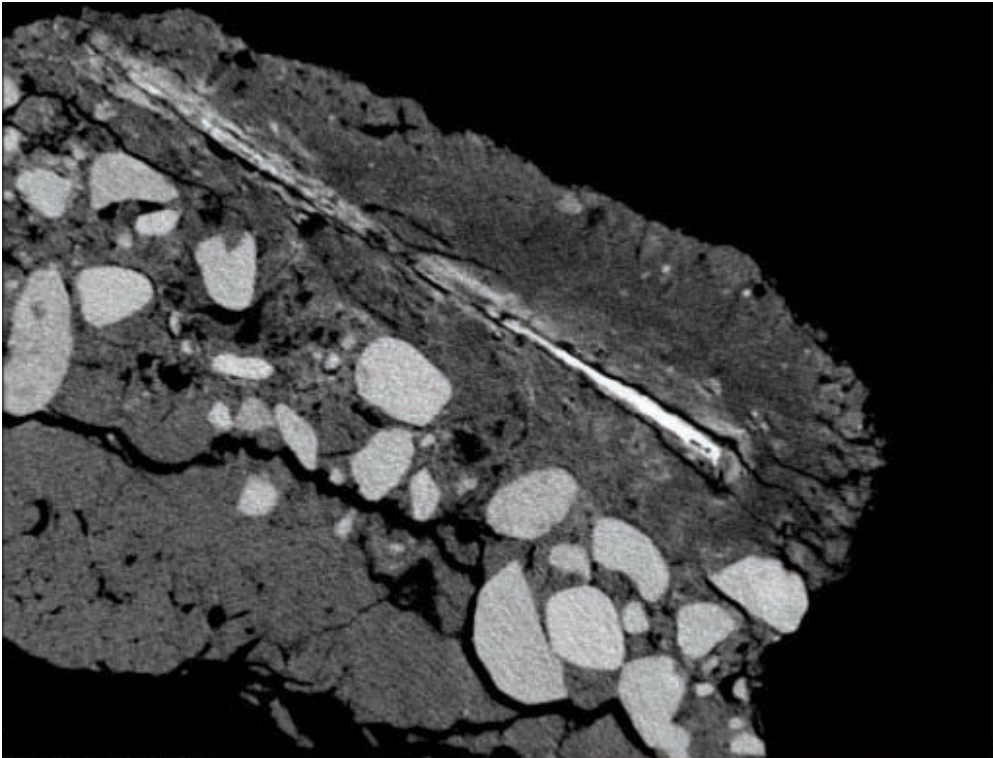
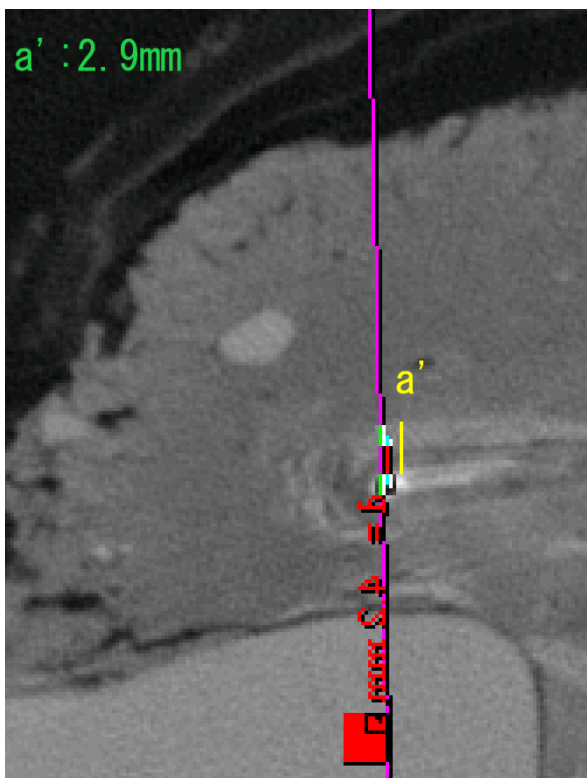
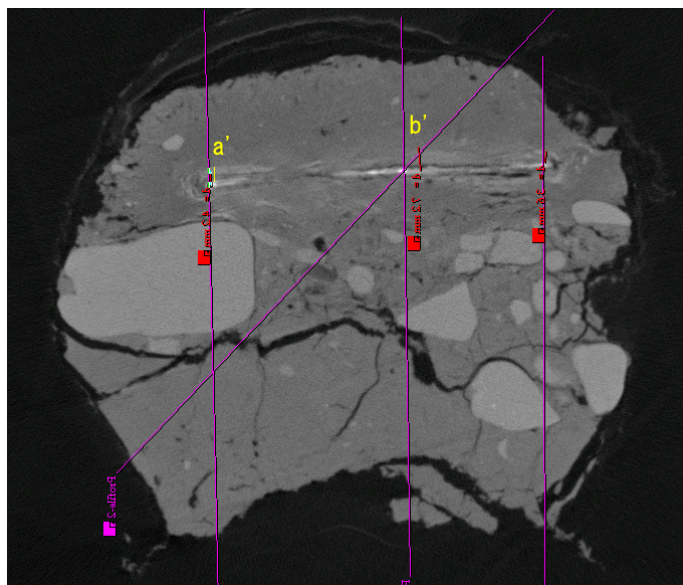
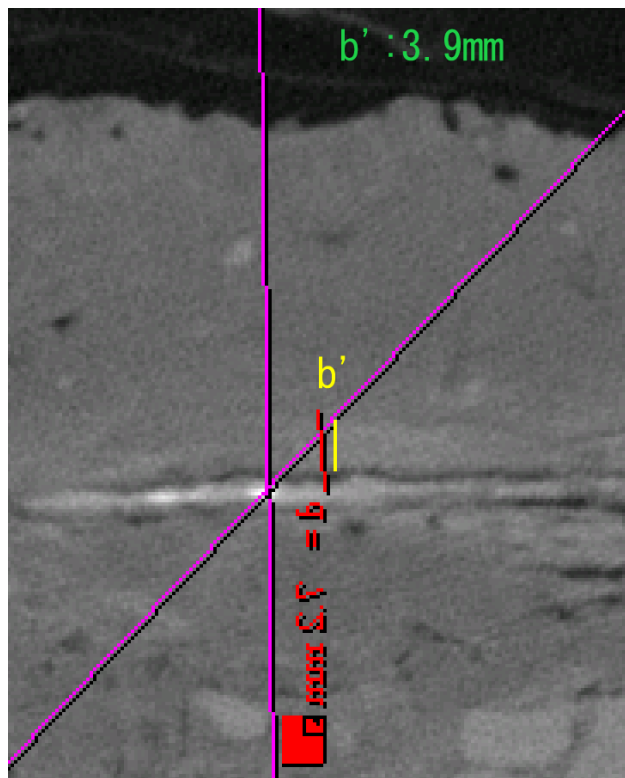


Fig.37 測定時モニタ画面_X線 CT 像⑩ (HiXCT)
(X線 CT 像の方向性を統一したので、一部画像および文字が反転した)

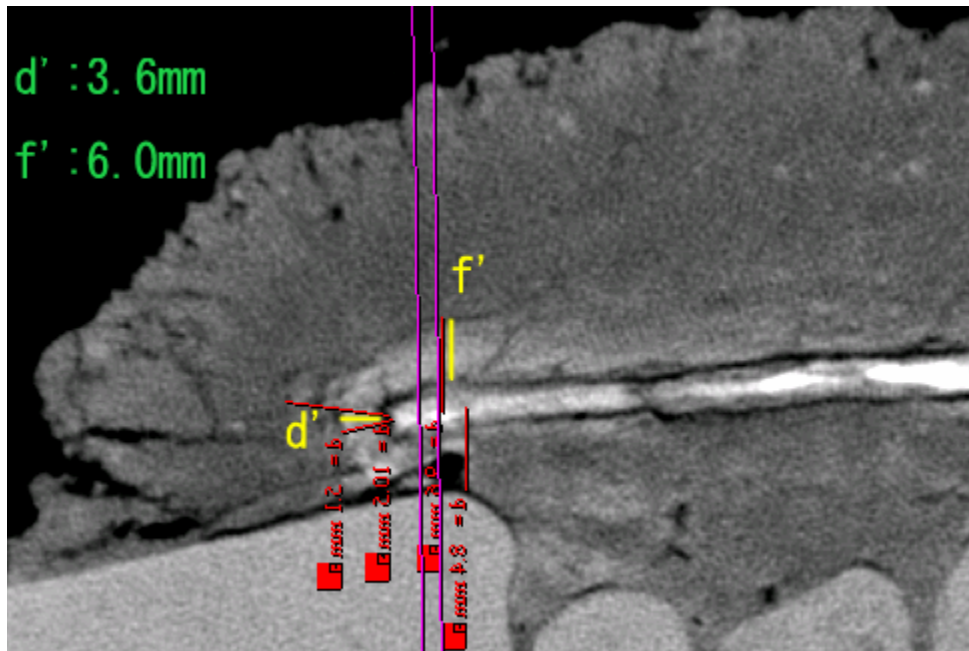
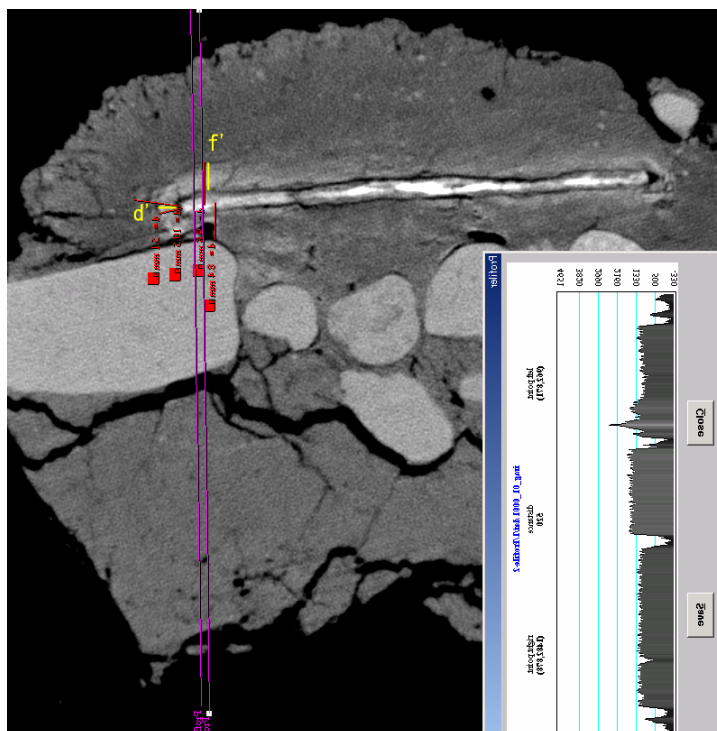


a' 部分拡大



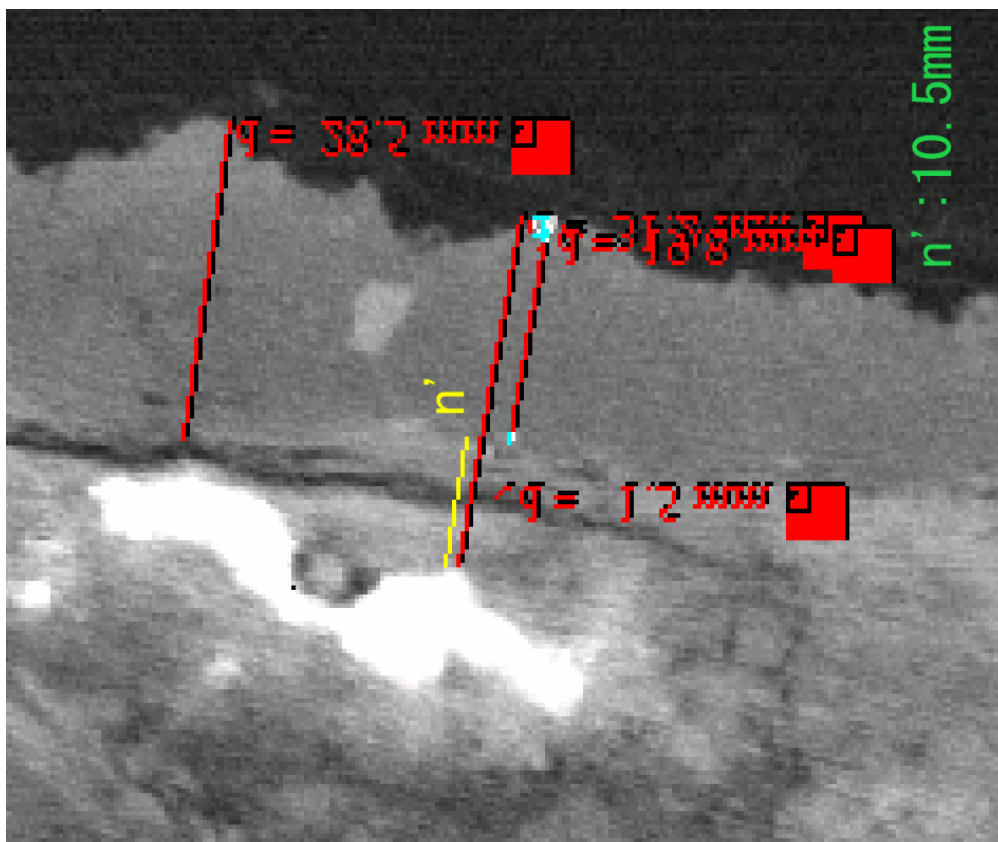
b' 部分拡大

Fig.38 測定時モニタ画面_X線 CT 像② (HiXCT) 再検討
(X線 CT 像の方向性を統一したので、一部画像内文字が反転した)



測定部分拡大

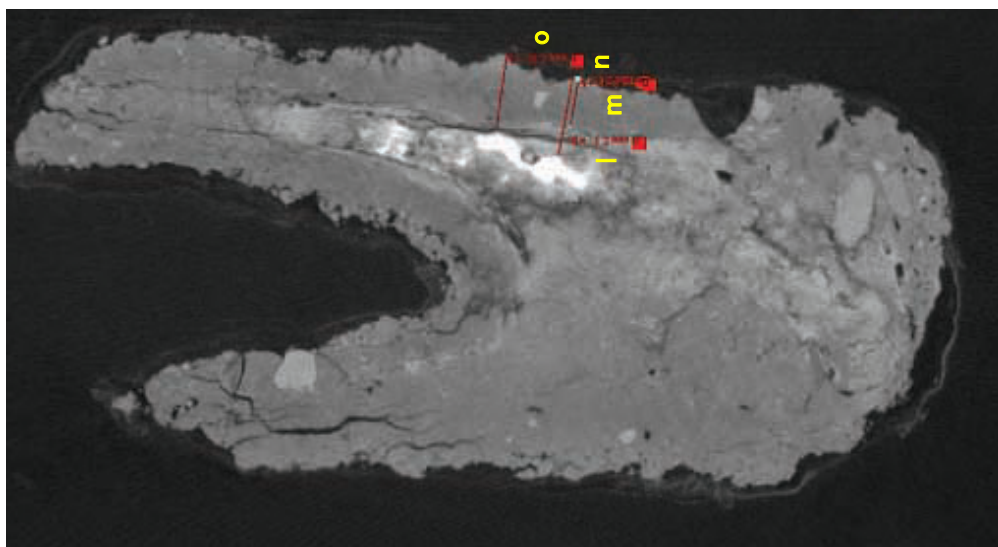
Fig.39 測定時モニタ画面_X線 CT像③ (HiXCT) 再検討
(X線 CT像の方向性を統一したので、一部画像および文字が反転した)

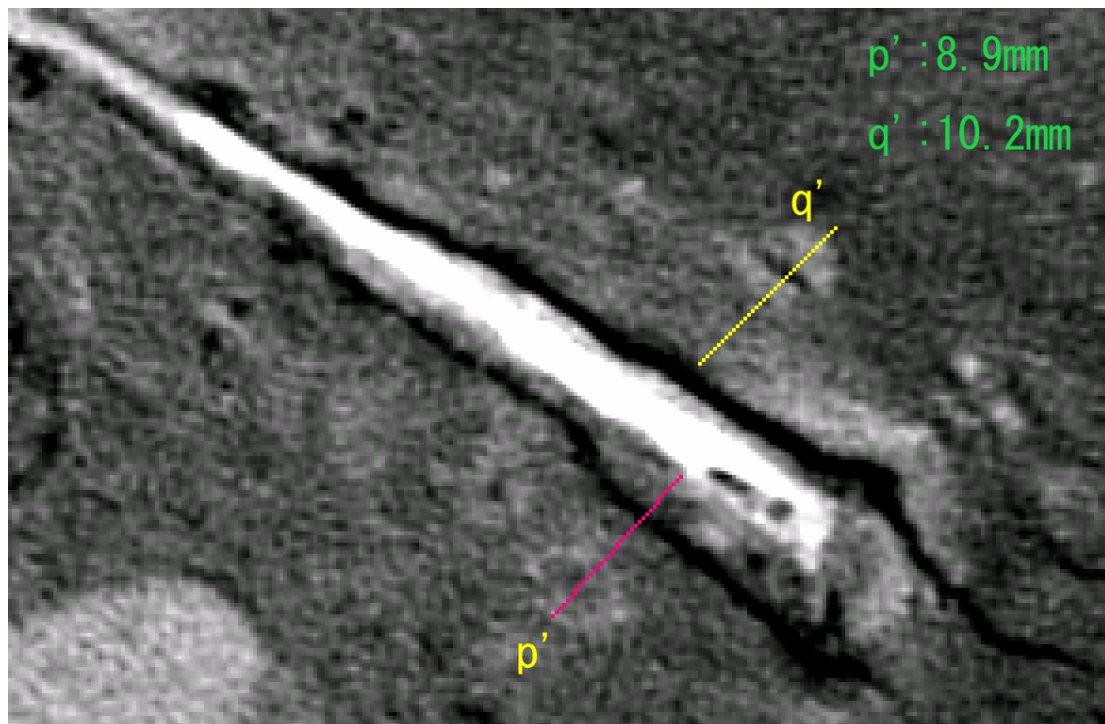
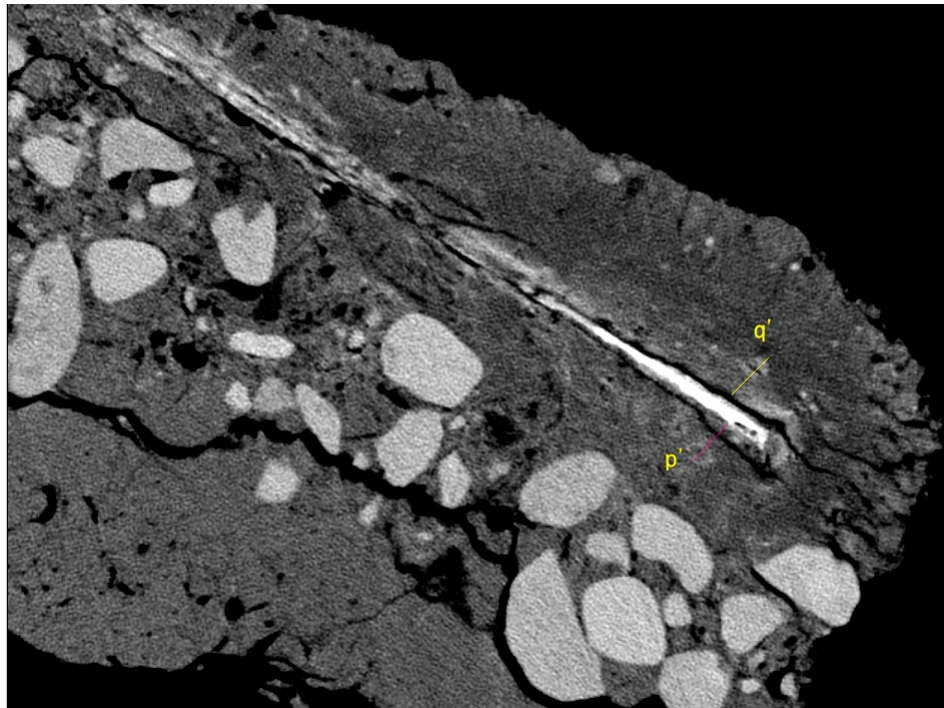


測定部分拡大

Fig.40 測定時モニタ画面_X線CT像⑥ (HiXCT) 再検討

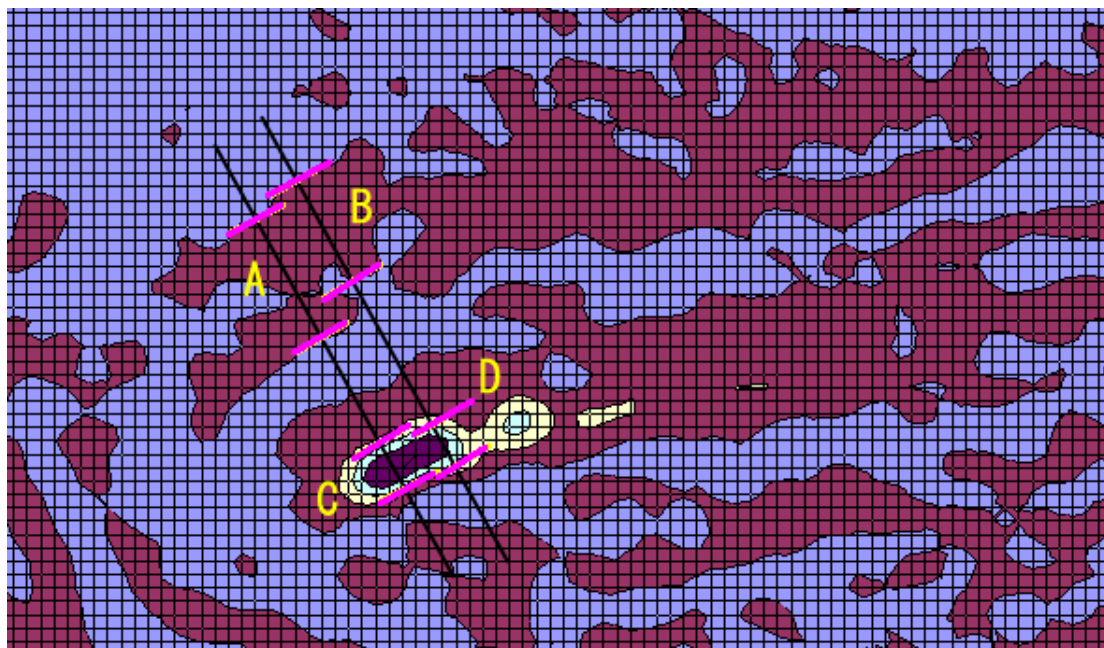
(X線CT像の方向性を統一したので、一部画像内文字が反転した)



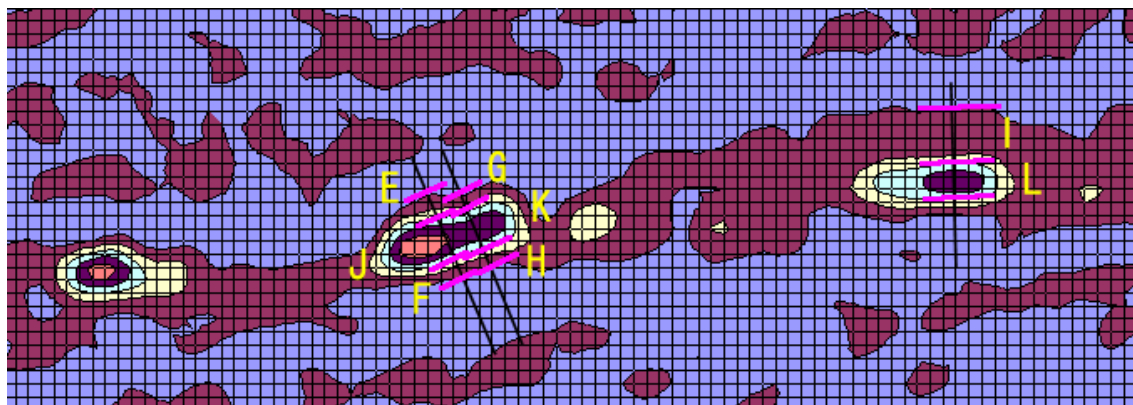


測定部分拡大

Fig.41 測定時モニタ画面_X線 CT像⑩ (HiXCT) 再検討



X線 CT 像② (HiXCT) (Fig.38) _a'付近の解析



X線 CT 像② (HiXCT) (Fig.38) _b'付近の解析

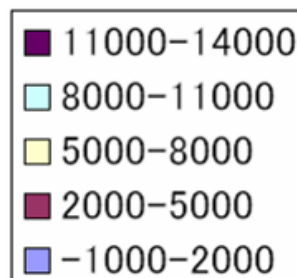
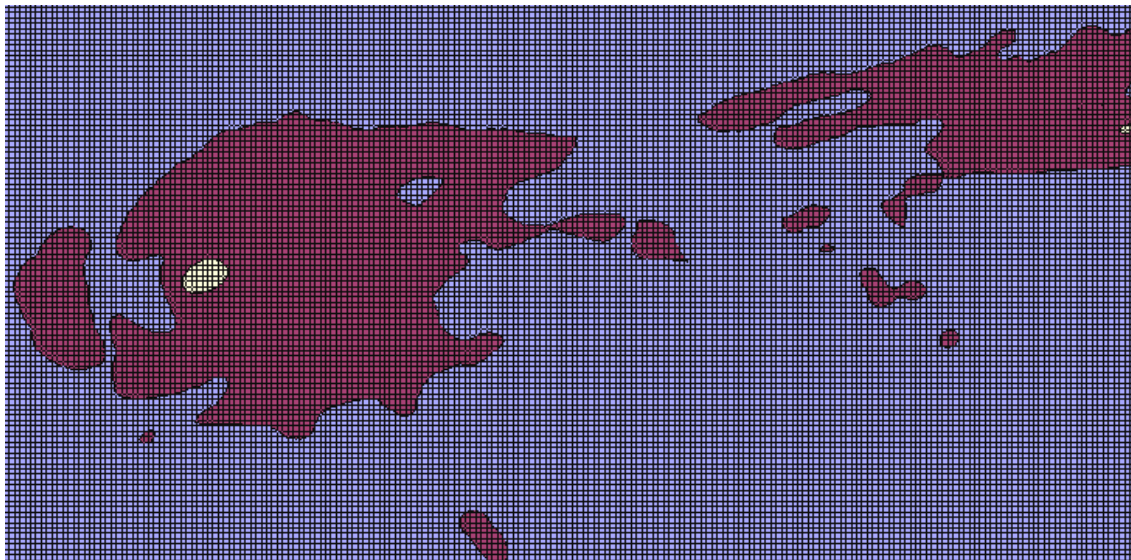
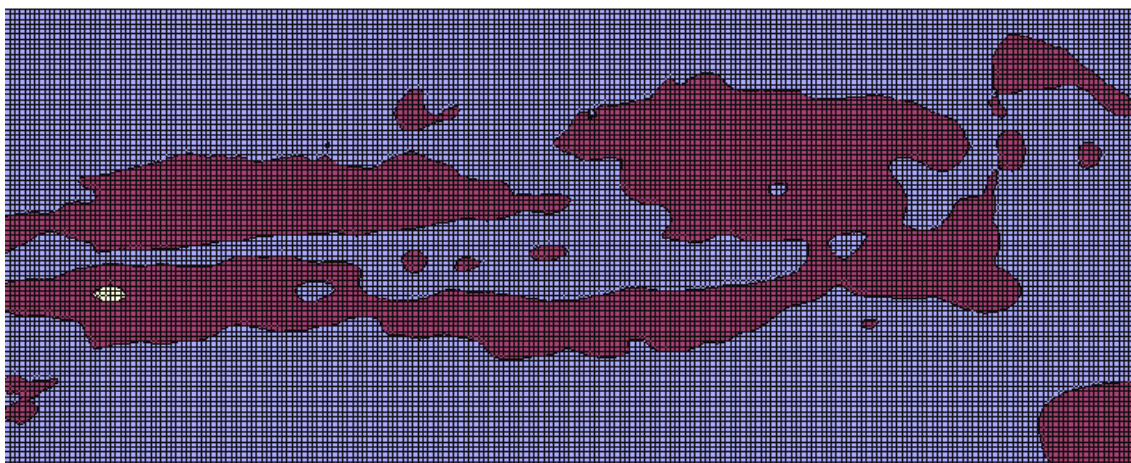


Fig.42 等高線グラフによる鍍厚測定_X線 CT 像②” (JAEA)



X線 CT 像② (HiXCT) (Fig.38) _a'付近の解析



X線 CT 像② (HiXCT) (Fig.38) _b'付近の解析

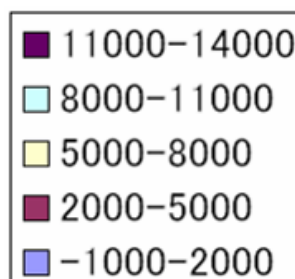
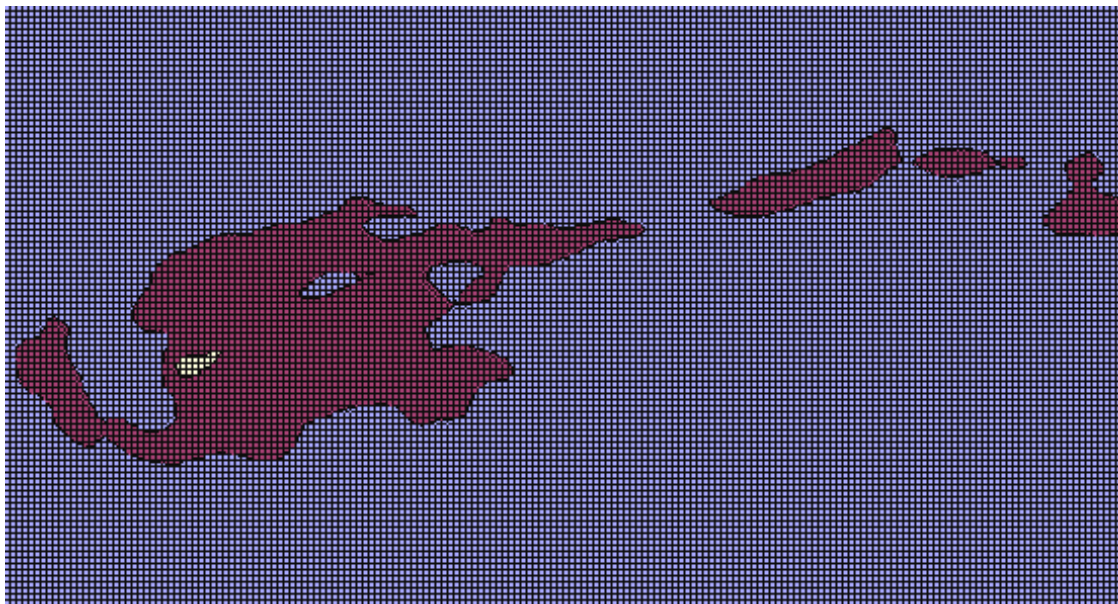
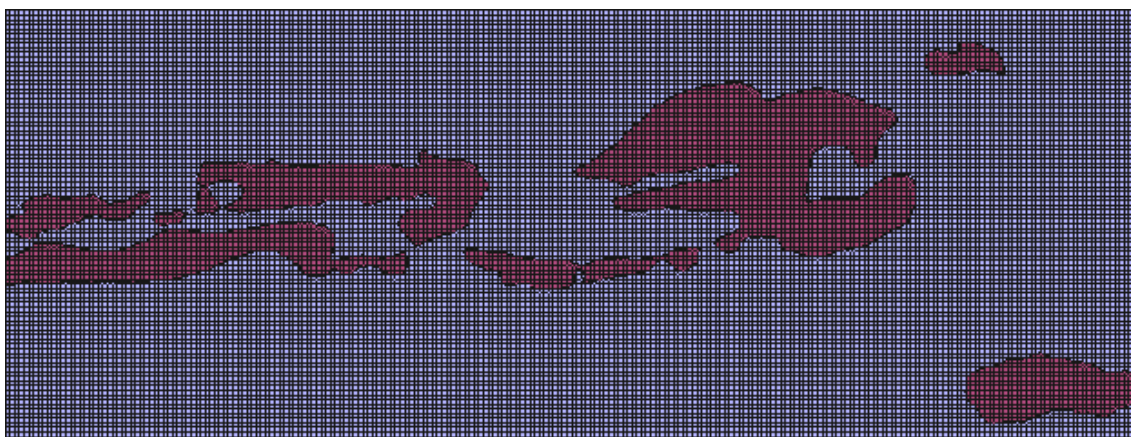


Fig.43 等高線グラフによる鍍厚測定_X線 CT 像②” (JAEA)



X線 CT 像② (HiXCT) (Fig.38) _a'付近の解析



X線 CT 像② (HiXCT) (Fig.38) _b'付近の解析

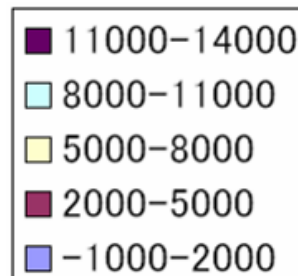
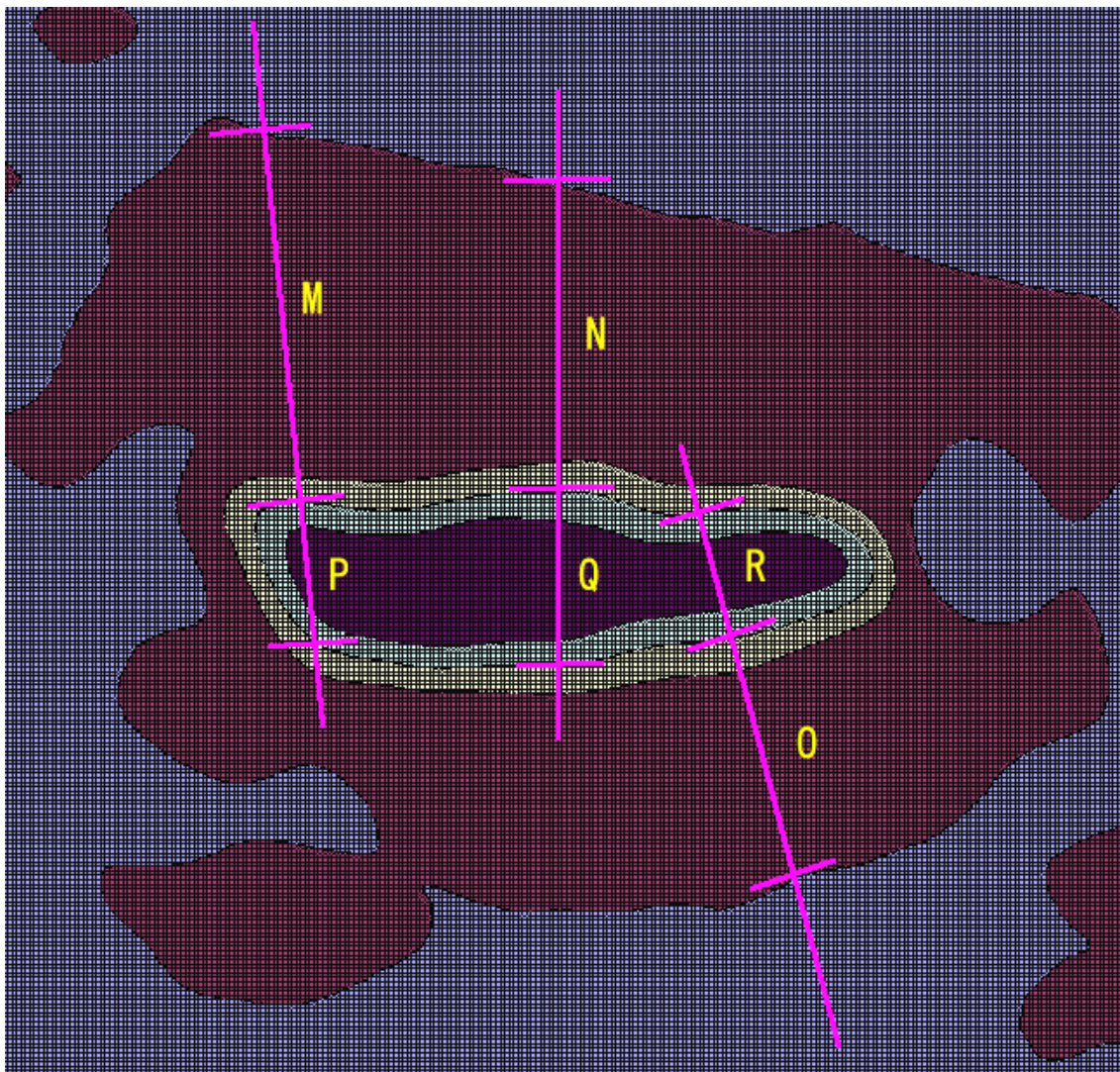


Fig.44 等高線グラフによる鍍厚測定_X線 CT 像②' (JAEA)



X線 CT 像④ (HiXCT) (Fig.34) の測定部分付近の解析

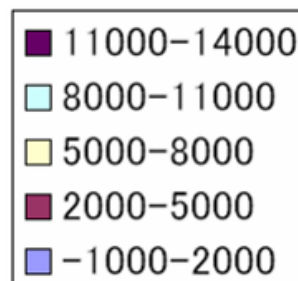


Fig.45 等高線グラフによる鍍厚測定_X線 CT 像④' (JAEA)

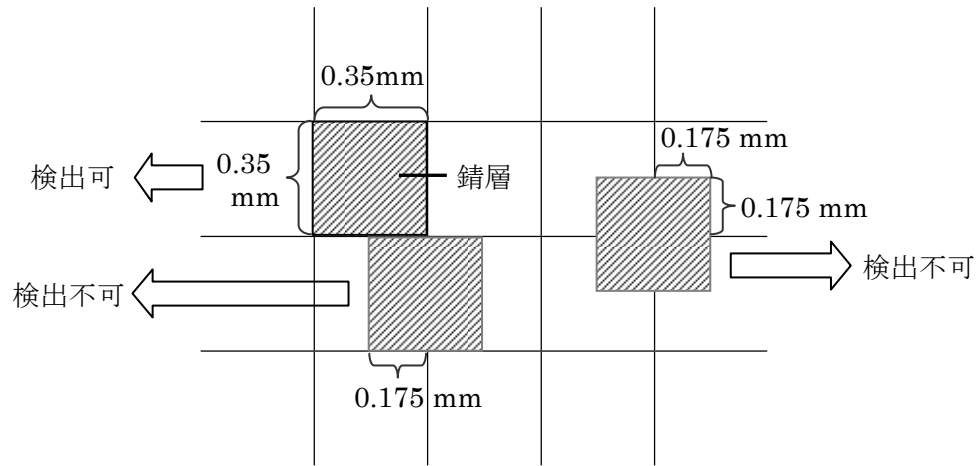


Fig.46 鍍層の検出とボクセル値の関係

国際単位系 (SI)

表1. SI 基本単位

基本量	SI 基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質の量	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m ²
体積	立方メートル	m ³
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s ²
波数	毎メートル	m ⁻¹
密度 (質量密度)	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
質量体積 (比体積)	立法メートル毎キログラム	m ³ /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m ²
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
(物質量の) 濃度	モル毎立方メートル	mol/m ³
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m ²
屈折率	(数の) 1	1

表5. SI 接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10 ²⁴	ヨタ	Y	10 ⁻¹	デシ	d
10 ²¹	ゼタ	Z	10 ⁻²	センチ	c
10 ¹⁸	エクサ	E	10 ⁻³	ミリ	m
10 ¹⁵	ペタ	P	10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ¹²	テラ	T	10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁹	ギガ	G	10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁶	メガ	M	10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ³	キロ	k	10 ⁻¹⁸	アト	a
10 ²	ヘクト	h	10 ⁻²¹	ゼプト	z
10 ¹	デカ	da	10 ⁻²⁴	エクスト	y

表3. 固有の名称とその独自の記号で表されるSI組立単位

組立量	SI 組立単位			
	名称	記号	他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン ^(a)	rad		m ² ・m ⁻¹ =1 ^(b)
立体角	ステラジアン ^(a)	sr ^(c)		m ² ・m ⁻² =1 ^(b)
周波数	ヘルツ	Hz		s ⁻¹
力	ニュートン	N		m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²	m ⁻¹ ・kg ⁻¹ ・s ⁻²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N・m	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻²
工率, 放射束	ワット	W	J/s	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻³
電荷, 電気量	クーロン	C		s ⁻¹ ・A
電位差 (電圧), 起電力	ボルト	V	W/A	m ² ・kg ⁻¹ ・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 ⁻¹ ・s ⁻³ ・A ⁻²
コンダクタンス	ジーメン	S	A/V	m ⁻² ・kg ⁻¹ ・s ³ ・A ²
磁束	ウェーバ	Wb	V・s	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻² ・A ⁻¹
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²	kg ⁻¹ ・s ⁻² ・A ⁻¹
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻² ・A ⁻²
セルシウス温度	セルシウス度 ^(d)	°C		K
光照射度	ルーメン	lm	cd・sr ^(c)	m ² ・m ⁻² ・cd=cd
(放射性核種の) 放射能	ベクレル	Bq	lm/m ²	m ² ・m ⁻⁴ ・cd=m ⁻² ・cd
吸収線量, 質量エネルギー	グレイ	Gy	J/kg	m ² ・s ⁻²
線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量, 組織線量当量	シーベルト	Sv	J/kg	m ² ・s ⁻²

- (a) ラジアン及びステラジアンの使用は、同じ次元であっても異なった性質をもった量を区別するときの組立単位の表し方として利点がある。組立単位を形作るときにいくつかの用例は表4に示されている。
 (b) 実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号“1”は明示されない。
 (c) 測光学では、ステラジアンの名称と記号srを単位の表し方の中にそのまま維持している。
 (d) この単位は、例としてミリセルシウス度m°CのようにSI接頭語を伴って用いても良い。

表4. 単位の中に固有の名称とその独自の記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	SI 基本単位による表し方
粘力のモーメント	ニュートンメートル	N・m	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻²
表面張力	ニュートン毎メートル	N/m	kg ⁻¹ ・s ⁻²
角速度	ラジアン毎秒	rad/s	m ² ・m ⁻¹ ・s ⁻¹ =s ⁻¹
角加速度	ラジアン毎平方秒	rad/s ²	m ² ・m ⁻¹ ・s ⁻² =s ⁻²
熱流密度, 放射照度	ワット毎平方メートル	W/m ²	kg ⁻¹ ・s ⁻³
熱容量, エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻² ・K ⁻¹
質量熱容量 (比熱容量), 質量エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg・K)	m ² ・s ⁻² ・K ⁻¹
質量エネルギー (比エネルギー)	ジュール毎キログラム	J/kg	m ² ・s ⁻² ・K ⁻¹
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m・K)	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻³ ・K ⁻¹
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ ・kg ⁻¹ ・s ⁻²
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻³ ・A ⁻¹
体積電荷	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ ・s ⁻¹ ・A
電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² ・s ⁻¹ ・A
誘電率	ファラド毎メートル	F/m	m ⁻³ ・kg ⁻¹ ・s ⁴ ・A ²
透磁率	ヘンリー毎メートル	H/m	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻² ・A ⁻²
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻² ・mol ⁻¹
モルエントロピー	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol・K)	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻² ・K ⁻¹ ・mol ⁻¹
モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol・K)	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻² ・K ⁻¹ ・mol ⁻¹
照射線量 (X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ ・s ⁻¹ ・A
吸収線量	グレイ毎秒	Gy/s	m ² ・s ⁻³
放射強度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m ⁴ ・m ⁻² ・kg ⁻¹ ・s ⁻³ =m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻³
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m ² ・sr)	m ² ・m ⁻² ・kg ⁻¹ ・s ⁻³ =kg ⁻¹ ・s ⁻³

表6. 国際単位系と併用されるが国際単位系に属さない単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1 h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	'	1'=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	''	1''=(1/60)'=(π/648000) rad
リットル	l, L	1 l=1 dm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1 t=10 ³ kg
ネーパ	Np	1 Np=1
ベル	B	1 B=(1/2) ln10 (Np)

表7. 国際単位系と併用されこれに属さない単位でSI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
電子ボルト	eV	1 eV=1.60217733(49)×10 ⁻¹⁹ J
統一原子質量単位	u	1 u=1.6605402(10)×10 ⁻²⁷ kg
天文単位	ua	1 ua=1.49597870691(30)×10 ¹¹ m

表8. 国際単位系に属さないが国際単位系と併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
海里		1 海里=1852m
ノット		1 ノット=1 海里毎時=(1852/3600)m/s
アール	a	1 a=1 dam ² =10 ² m ²
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²
バール	bar	1 bar=0.1MPa=100kPa=1000hPa=10 ⁵ Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=10 ⁻¹⁰ m
バイン	b	1 b=100fm ² =10 ⁻²⁸ m ²

表9. 固有の名称を含むCGS組立単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
エルグ	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N
ポアズ	P	1 P=1 dyn・s/cm ² =0.1Pa・s
ストークス	St	1 St=1cm ² /s=10 ⁻⁴ m ² /s
ガウス	G	1 G ≙ 10 ⁴ T
エルステッド	Oe	1 Oe ≙ (1000/4π) A/m
マクスウェル	Mx	1 Mx ≙ 10 ⁻⁸ Wb
スチルブ	sb	1 sb=1cd/cm ² =10 ⁴ cd/m ²
ホト	ph	1 ph=10 ⁴ lx
ガリ	Gal	1 Gal=1cm/s ² =10 ⁻² m/s ²

表10. 国際単位系に属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
レントゲン	R	1 R=2.58×10 ⁻⁴ C/kg
ラド	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy
レム	rem	1 rem=1cSv=10 ⁻² Sv
X線単位		1 X unit=1.002×10 ⁻⁴ nm
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 ⁻⁹ T
ジャンスキー	Jy	1 Jy=10 ⁻²⁶ W・m ⁻² ・Hz ⁻¹
フェルミ	fm	1 fermi=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット		1 metric carat=200 mg=2×10 ⁻⁴ kg
トル	Torr	1 Torr=(101325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm=101325 Pa
カロリ	cal	
マイクロン	μ	1 μ=1μm=10 ⁻⁶ m

