

# レーザ除染技術の開発（7） —レーザ除染後の汚染分布確認試験— (技術報告)



2001年12月

# 核燃料サイクル開発機構 大洗工学センター

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)  
2001

## レーザ除染技術の開発(7) -レーザ除染後の汚染分布確認試験- (技術報告)

小川竜一郎\*、福井康太\*、吉澤俊司\*、谷本健一\*

### 要旨

物質表面にレーザ光線を照射することにより、表面を急速に加熱して、溶融、蒸散させることが出来る。このプロセスを利用して汚染された機器表面の除染を行うレーザ除染技術を開発している。

これまでに、ノーマルパルスYAGレーザによる除染試験を実施した結果、150μm以上表面層を研磨しても、放射性核種が残留していることがわかった。このため、レーザ除染時の溶融によって放射性核種が金属中に残留している深さを確認するため、ノーマルパルスYAGレーザを照射した試験片を用いて試験を行つた。試験結果は以下のとおりである。

- (1) マイクロスコープによる試験片の断面観察では、凸凹の幅は200μm～500μmであった。また、溶融の際に生じたドロスの再付着による物と思われる付着物が存在していた。
- (2) 蛍光X線分析装置を用いた金属組成分析では、アシストガスにAirを用いた試験片にCrの偏析が観察された。アシストガスにArを用いた試験片には偏析は観察されていない。
- (3) イメージングプレート、オートラジオグラフィーによる試験片の観察では、明確な分布は確認できなかった。しかし、放射性核種は表面から約500μm以下の表面のごく一部の範囲に存在していることは観察できた。
- (4) 試験片の段階研磨とGe測定器による放射線量測定試験からは、アシストガスにArを用いた試験片では120μm、アシストガスにAirを用いた試験片では300μm深さまで汚染が取り込まれていることが確認できた。

## Development of Laser Decontamination technique (VII)

- The pollution distribution check examination of the test piece after  
laser decontamination -

R.Ogawa\*, Y.Fukui\*, S.Yoshizawa\*, K.Tanimoto\*

### Abstract

On irradiating laser ray to surface of metal, the surface is rapidly heated, melted, and evaporated. Laser decontamination technique has been developed by using the transpire process to radionuclides contaminated machine surface.

The decontamination experiments using normal pulse YAG laser and hot sample were carried out. In the experiments, it was understood that even if the surface is ground by 150 $\mu\text{m}$  or more, radioactivities could not be completely removed.

On this account, for the purpose of study the depth where a radioactivities merges in the metal by the laser irradiation, surveys using the hot test specimen were performed.

Results are as follows.

- (1) Observation of topographic profile suggested that the depth of irregularity by laser irradiation were from 200 $\mu\text{m}$  to 500 $\mu\text{m}$ , and there were crud on the surface, which seems reattached melting crud by laser irradiation.
- (2) Metallic composition analysis with fluorescent X-ray analysis device suggested that there was the segregation of Cr in the test specimen that used Air for the assistance gas, and there were not the segregation that used Ar for the assistance gas.
- (3) The radioactivity analysis of the test specimen that uses the imaging plate and the radio autograph could not clear the distribution of radioactivities. However, it could be confirmed that a radioactive nuclide exited in a range of 500  $\mu\text{m}$  or less.
- (4) Grounding the test specimen and measurement of the doses of radiation with Ge measuring tool suggested that there were radioactivities up to the depth of 300 $\mu\text{m}$  in the test specimen which used Air for the assistance gas, and 120 $\mu\text{m}$  in the test specimen which used Ar for the assistance gas.

---

\*Oarai Engineering Center Waste Management Section

## 目 次

1. はじめに . . . . .	1
2. 試験装置 . . . . .	2
2.1 試験片 . . . . .	2
2.2 試験装置 . . . . .	2
2.3 除染試験手順 . . . . .	3
2.4 レーザ除染試験パラメータ . . . . .	4
2.5 試験片の性状 . . . . .	4
3. 試験方法 . . . . .	6
3.1 概要 . . . . .	6
3.2 マイクロスコープによる試験片の断面観察 . . . . .	6
3.3 EDXを用いた金属組成分布分析 . . . . .	7
3.4 IP, ARGによる放射能分布の可視化測定 . . . . .	7
3.5 試験片表面の段階研磨・Ge測定 . . . . .	7
4. 試験結果・考察 . . . . .	9
4.1 マイクロスコープによる試験片の断面観察 . . . . .	9
4.2 EDXを用いた金属組成分布分析 . . . . .	12
4.3 IP 及びARGによる試験片の放射能分布測定 . . . . .	13
4.4 試験片表面の段階研磨・Ge測定 . . . . .	15
5. まとめ . . . . .	18
6. 参考文献 . . . . .	20
図表 . . . . .	21

## 1. はじめに

レーザ光を放射性物質で汚染された機器表面に照射し、放射性物質を溶融、蒸散して除染するレーザ除染技術は、以下の特徴を有しており、原子力施設のデコミッショニングに際しての除染に適した技術である。

- 化学物質等を必要としない気中のプロセスであるため、放射性廃液等の二次廃棄物の低減が図られる。
- 非接触プロセスで除染を行うことができ、多関節ミラーやファイバによる伝送が可能であるため、遠隔操作に適している。
- 金属以外の物質に対しても適用が可能であり、汎用性が高い。
- 大型機器を原位置で除染することができ、局所的汚染の除染に適している。

これまでに、ノーマルパルスYAGレーザと光ファイバーを組み合わせたレーザ除染装置の開発<sup>1,2,3,4,5)</sup>を行い、実際の放射性廃棄物を対象に除染試験を行った結果、バックグラウンドレベルまでの除染効果を得るために、150μm以上の表面層の除去が必要であることが解った<sup>7)</sup>。

これは、レーザ除染時の溶融によって放射性核種が金属中に取り込まれていることが考えられ、ノーマルパルスYAGレーザで除染したホットサンプル試験片<sup>7)</sup>を対象に以下の試験によってどの程度まで試験片中に残留しているかを確認した。

- (1) マイクロスコープによる試験片の断面観察を行い、除染後の試験片の表面状況等について観察評価した。
- (2) 蛍光X線分析装置を用いた金属組成分析を行い、試験片の付着物等の主要構成元素を調べた。
- (3) イメージングプレート、オートラジオグラフィによる試験片の放射能分析を行い、試験片への放射能の取り込み状況を観察評価した。
- (4) 試験片の段階研磨とGe測定器による放射線量測定試験を行い、レーザで除染した試験片の深さ方向の放射能分布を定量的に測定し評価した。

本報告は、これらの結果を取りまとめたものである。

## 2. 試験装置

### 2.1 試験片

試験片は、「常陽」廃棄物処理建家で不要となった配管を切り出して平坦に加工したものである。試験片の材質はSUS304であり、形状は長方形の平板で、概略寸法は40mm×50mm、厚み3mmである。また、試験片の汚染核種は<sup>60</sup>Coである。これら、試験片情報を表2.1に、試験片の外観写真を図2.1(アシストガス: Ar)、図2.2(アシストガス: Air)に示す。

試験片に加工した配管は、高レベルタンクから蒸発缶に廃液を輸送する配管であり、試用期間が長いことから放射性物質は深層部まで侵食していると推定される。また、過去に硝酸による除染を実施しているSUS表面に薄い酸化皮膜を形成しており<sup>9)</sup>、汚染核種はこの酸化皮膜中にも取り込まれているものと推測される。

### 2.2 試験装置

ノーマルパルスYAGレーザを用いた除染試験の概略図を図2.3に示す。試験装置は、レーザ発振装置、伝送光学系(ファイバ)、集光光学系(集光レンズ)、移動ステージ、飛散防止フード、アシストガス供給部からなる。

#### (1) レーザ発振器

- ・名称 : SL117-2C型 (NEC製)
- ・出力(定格) : 400W
- ・出力(ピーク) : > 800W

#### (2) 伝送光学系(ファイバ)

- ・名称 : 石英ファイバ SGLH-600F (三菱電線工業製)
- ・形式 : GI型(Graded Index)
- ・コア径 : 600 μm
- ・長さ : 2.0m

#### (3) レーザ照射ノズル

ファイバにより伝送されたビームを点状に集光するための集光光学系レンズは、平凸球面レンズ、両凸球面レンズ・平凹球面レンズを組合せて作成した。この集光系を用いた集光後の照射ビーム径は、スタンドオフ4mm時には1mmである。

また、本ノズルはアシストガスの噴出口も組み込まれており、アシストガスの噴出し方向は、レーザ照射位置からずらした構造としており、溶融金属を一定方向に除去するように制御することができる。ドロスの飛散方向と移動進行方向と一致させることにより、除染後の面への汚染物の再付着を防止することができる。

#### (4)アシストガス

アシストガスには以下の3種類を使用した。

- ・アルゴン：高い除去能力を有している<sup>4)</sup>。
- ・窒素：上記アルゴンガスより安価な不活性ガスである。
- ・空気：コンプレッサにより供給可能である。

ArとN<sub>2</sub>は不活性ガスであるのに対して、アシストガスに空気を使用した場合は、空気中の酸素による酸化反応で研磨量が増加する。その反面、除染後の表面状態は2次生成物が付着した状態となる。

#### (5)移動ステージ

除染試験装置は、レーザとアシストガスノズルを固定して試験片を動かして試験片全面にレーザ光を照射する。試験片を一定速度で二軸方向に移動させる移動ステージは、以下の装置を組合わせて使用した。移動速度の精度は0.1mm/sである。

- ・x軸方向用：SGAM26-100(x)（シグマ光機製）
- ・z軸方向用：SGAM26-100(z)（シグマ光機製）

#### (6)飛散防止フード

レーザ照射時の二次生成物・汚染等の拡大防止のために、以下のフードを製作し除染フード内に設置し、その中で試験を実施した。

- ・サイズ：1300mm×740mm×1900mm(H)
- ・排気風量：260m<sup>3</sup>/h
- ・材質：アクリル板

### 2.3 除染試験手順

レーザ除染試験は以下の手順で実施した。

- ①試験前にGMサーベイメータにより計数率を、Ge測定器により放射能量を測定する。
- ②レーザの照射は、発振器から照射されたレーザ光の中心をXZ移動ステージに取付けた試験片の左上端に合わせ、試験片を一定速度で水平方向に移動させ

ながら行う。

③一行の照射が終了した後、XZ移動ステージは自動的に改行され次行へと移る。

④試験片の面積の約半分が照射されるまでこの工程を自動で実施する。

⑤半分まで終了後、試験片の上下を反転させて残りを照射する。

試験片を移動ステージに留める金具の関係上、半分まで照射後反転させなくてはならない。

⑥全面照射後、GMサーベイメータで線量測定を行う。

⑦上記②～⑥までを2回～3回行う。

⑧全照射終了後にはGe測定器で核種分析を行う。

なお、以降の章で試験片の断面観察を行うために切断を行うがレーザの照射方向に対して垂直に切断したものを「垂直方向」レーザの照射方向に平行に切断したものを「水平方向」と呼ぶことにする。

#### 2.4 レーザ除染試験パラメータ

パラメータ及び制御範囲は以下のとおりである（表 2.2）。

- ・レーザ出力制御電圧 : 6.5、7、8、9、10V
- ・試験片移動速度 : 10、20、30、40、50、60mm/s
- ・周波数 : 30、40、50、60Hz
- ・試験片行送り量 : 0.5、0.75、1.0mm
- ・Dt比 : 30、40、50、60 %
- ・アシストガス種類 : Ar、Air、N<sub>2</sub>
- ・アシストガス流量 : 40、60、80 ℓ/min
- ・スタンドオフ : 4mm（固定、この時のレーザ径1mm）

レーザ照射による試験片の研磨厚については、照射時に凹凸ができることと、熱の影響で試験片が歪み、直接厚みを測定することはできないことから、照射前後の重量測定から得た研磨重量と材質の比重から平均研磨厚として求めた。

試験片の残存放射能量については、Ge測定器で3,600秒測定を行ったところ、～8Bq/gの汚染が残っていることが確認された。

#### 2.5 試験片の性状

本報告書に用いた試験片は、上記の中でレーザ出力制御電圧は10Vのものを選定した。このとき、照射されるレーザのエネルギー密度は約1.5kJ/cm<sup>2</sup>である。

また、照射幅(mm)・周波数(Hz)/移動速度(mm/s) = 1の条件のものを選定した。これは今回使用したレーザ発振装置における最適条件である。アシストガスの違いによる影響を比較するため、アシストガスに不活性ガスであるAr、N<sub>2</sub> Airを使用したものをそれぞれ用意した。

試験片のレーザ照射後の諸データを表2.3に示す。ここで試験片No.はノーマルパルスYAGレーザの除染試験で用いた試験片番号をそのまま記載した。

### 3. 試験方法

#### 3.1 概要

試験はまず、試験片のレーザ光による熱影響等の状態を目視で観察するため、マイクロスコープによる断面の観察を行った（3.2節）。次に、レーザ照射後の試験片の金属組成変化を調査するため、蛍光X線分析装置のエネルギー分散型XMA（以下、EDXとよぶ）による断面観察を行った（3.3節）。次に、放射性核種の試験片内への分布状態を観察するため、イメージングプレート（以下、IPと呼ぶ）とオートラジオグラフィ（以下、ARGと呼ぶ）による撮影を行い放射性核種のある範囲を観察した（3.4節）。ただし、試験片の汚染核種が $\gamma$ 線源である $^{60}\text{Co}$ であることから、可視化の解像度は十分得られない可能性が懸念されたため、放射能分布を定量的に測定するために、更に、試験片を一定厚に研磨し、各段階でGe測定を行い深さ方向の放射性核種の取り込み分布を測定した（3.5節）。

#### 3.2 マイクロスコープによる試験片の断面観察

本試験では、切断した断面のレーザー照射時に生じたドロスの再付着状況、金属母材の変性の有無等を観察することを目的に行った。

試験片を樹脂埋めしレーザー照射方向に対して垂直方向、平行方向に切断し、研磨後、断面をマイクロスコープを用いて観察した。装置外観図を図3.1に示す。外観図左側がマイクロスコープであり、映像を右手のモニターで観測する。

対象試験片は、レーザ照射時のアシストガスの種類が活性ガスと不活性ガスの比較を行うため、AirとArガスの2種類のアシストガスを使用した試験片とし、観察する方向は、レーザ照射方向に対して垂直と水平の2種類の断面に対して行い、観察の記録はそれぞれの方向について、試験片の中央、端、その中間の三箇所とることとした。切断の方向と、観察の記録のポイントを図3.2に示す。

また、汚染拡大を防止するため、試験片は予め樹脂に埋め固定した状態でレーザ照射方向に対して水平・垂直に切断し、その断面の観察を行うこととした。

マイクロスコープの観察倍率は、50倍から始めて、測定対象部分を選定し、最大で1,500倍まで観察を行った。

### 3.3 EDXを用いた金属組成分布分析

次にこれら試験片の断面の金属組成について分析した。分析試料は、3.2節で使用した試験片を更に5mm以下にスライスしたもの用いた。

元素分析を実施した試料は、

- アシストガスAirを用いた試験片20A014垂直方向中央
- アシストガスAirを用いた試験片20A014平行方向中央
- アシストガスArを用いた試験片20A039垂直方向中間

とし、観察対象部位は、マイクロスコープによる試験片の断面観察で付着物が観察された部位を選定することとした。

また、分析対象元素は、試験片の主要構成元素であるCr、Mn、Fe、Niとした。

なお、元素分析用機器にはHORIBA社製EMAX 5770型EDXを使用し、観察倍率300倍とした。

### 3.4 IP, ARGによる放射能分布の可視化測定

マイクロスコープによる観察で使用した試験片の放射能の取込状況を観察するため、イメージングプレート（以下、IP）及びオートラジオグラフィ（以下、ARG）による放射能分布測定を行った。

通常、IP、ARGによる観察は $\alpha$ 核種を対象として行うものであり、今回のように $\gamma$ 核種を対象とした場合には、試験片の表面からの放射線だけでなく奥行き方向からの $\gamma$ 線を拾ってしまい、線源位置の特定精度が低下する。そこで、解像度を高めるために、マイクロスコープによる観察で使用した試験片の観察面から5mm以下にスライスし放射能分布測定用試験片を作成した。IPの読み出しには、解像度は、 $100\ \mu\text{m} \times 100\ \mu\text{m}$ の読み出しが可能な装置を使用した。使用した富士写真フィルム社製のIP測定装置BAS2000の仕様データを表3.1に示す。

### 3.5 試験片表面の段階研磨・Ge測定

レーザーで照射した試験片の放射能分布を定量的に求めるため、試験片表面を一定間隔で研磨し、各研磨時のGe測定を行うことで放射能分布を求めた。

電解研磨では、電気量と通電時間から定量的に研磨量を調整することができるが、一方でエッジ部分が選択的に研磨されるため、最初にグラインダーを用

いて機械的に研磨を行い、試験片の凸部を研磨し、全体を平坦に研磨した後に電解研磨を行うこととした。

### 3.5.1 試験表面の機械研磨・Ge測定

試験片の凸部分をグラインダーを用いて一定間隔で研磨し、Ge測定器を用いて放射線測定を行った。用いたグラインダー装置を図3.3に示す。

研磨精度は最初の3回は $10\mu\text{m}$ の精度で実施することとした。その後の研磨厚はGe測定結果を参考に決定するものとした。研磨厚の目標は、一応の目安として、表面がほぼ平坦になるか、放射能量が $0.4\text{Bq/g}$ になることとした。

対象とする試験片は、アシストガスにAr(20A025, 20A026)、N<sub>2</sub>(20A021)、Air(20A012)を用いた3種類である。なお、アシストガスArについては、ガス流量 $40\ell/\text{min}$ と $80\ell/\text{min}$ の2種類を用いて、合計4試験片について実施することとした。

### 3.5.2 電解研磨による研磨・Ge測定作業

前節で表面を平坦にした試験片表面を、電解研磨により一定間隔で研磨しGeによる放射線計測を行った。試験装置を図3.4に示す。上段が電解液、下段が電源である。電解研磨は、研磨液として硫酸アンモニウム溶液を用いて電流制御法で定電流にて行った。

電解研磨処理時に試験片のエッジ部分を選択的に研磨することを防止するために、研磨面を除き樹脂で埋めることにより研磨の偏り防止した。1試験片は、研磨厚を求めるために、試験片からGe測定で放射能がほとんど検出されなくなるまで電解研磨を実施し、研磨厚を求めることとした。研磨厚は、試験片の重量の減少量と比重から計算により求めた。

他の3試験片は、上記で求めた研磨厚データを元に $60\sim70\mu\text{m}$ 毎に研磨とGe測定を行うこととした。

## 4. 試験結果・考察

### 4.1 マイクロスコープによる試験片の断面観察

試験片を、樹脂埋めしレーザ照射方向に垂直・平行方向に切断し、研磨後、その断面をマイクロスコープを用いて観察した。本観察には表2.3の試験片のうち、アシストガスにAirを用いた20A014とアシストガスにArを用いた20A039を使用した。

#### 4.1.1 試験片20A014(アシストガス Air)の断面観察

アシストガスに空気を用いた試験片20A014の顕微鏡観察写真を図4.1～図4.7に示す。

図4.1は、試験片を樹脂で埋めて、平行、垂直方向に切断した断面の状態の写真である。図に示した、中央、中間、端それぞれに対して、観察ポイントを選定して、倍率を上げながら観察を行った。

図4.2は、垂直方向断面の端の部分の写真である。上段の50倍の倍率の写真において灰色の部分が試験片断面、黄土色の部分が樹脂の部分である。その中間にある黒ずんで見える部分は試験片が歪んでいるために試験片の奥行き部分の陰影が見えているものである。レーザ照射方向に対して、垂直方向の断面では、レーザ照射行の重なりによる凹凸が観察される。この写真から、凹凸の幅はおよそ400μmあることが観察される。次にこの写真の左部分を500倍に拡大したものが、中段の写真である。写真の明るい部分が金属部分である。金属部分には筋状の色の濃い部分が観察される。また、金属面の上部にも色の濃い部分が観察される。さらに倍率を1,500倍まで上げたのが下段の写真である。これは、500倍の写真の右側の2色の層構造になっている部分を拡大したものである。この写真でも、色の濃い筋状の部分と金属上部に色のやや濃い部分が観察される。これらは、観察面に対し金属面が奥行き方向に深い位置にある場合に光の加減により影ができたものか、金属の酸化によるものが原因であると推測される。

図4.3は垂直方向断面の中間部分の観察写真である。写真上段の50倍の写真から、端部分同様に、レーザ照射面の重なりによる凹凸が観測される。凹凸の幅はおよそ500μmある。写真中段の500倍は50倍の写真の左端の凸部分を拡大した

ものである。この写真でも、図4.2同様に、金属の色の異なる部分があることが観測される。写真右側中央にある、水泡のようなものは、樹脂埋め込み時に入った気泡である。写真下段の1,500倍の写真では、金属色の部分、灰色の部分に加え、黒い塊と茶色の粉状のものが観察される。アシストガスにAirを用いた場合の試験片表面には、黒い粉状の酸化鉄が付着していた。(図2.1参照) この1,500倍の写真の黒い塊はこの粉状の酸化物である。

図4.4は垂直方向断面の中央部分の観察写真である。上段の50倍の写真では、先の2組の写真に比べて凹凸が少ない。これは、試験片の端の部分は、レーザ照射時の熱影響による変形のためレーザの重なりが大きいのに対して、中央部分では比較的熱影響による変形が小さいため、レーザ照射面の重なりが少ないことが原因である。但し、凹凸の幅は同様に500 $\mu\text{m}$ あることが観察される。中段の500倍の写真は、上段の50倍写真中央の凸部を拡大したものである。色の濃い溝のようなものと、その上部に茶色付着物が観測される。下段の1,500倍の写真はこの付着物を拡大したものである。

図4.5は平行方向断面の端部分の観察写真である。上段50倍写真の下の黄土色の部分が樹脂の部分であり、中央の弧状の部分が金属断面である。平行方向断面の凹凸は、レーザパルスの重なりによるものであるが、垂直方向と比べて凹凸は小さく観測される。凹凸の最大幅は凡そ200 $\mu\text{m}$ である。写真中段は凸部分を500倍に拡大したもの、写真下段はさらに1,500倍まで拡大したものである。色の濃い、光の陰影によると思われる溝の部分のほかに、酸化されたと推測される変色部分が観測される。

図4.6は平行方向断面の中間部分の観察写真である。上段50倍写真では、平行方向端部分よりもはつきりとした凹凸が観測される。凹凸の最大幅は凡そ500 $\mu\text{m}$ である。中段写真は上段写真の中央やや左よりの凹凸部の斜面部分を500倍に拡大したもの、写真下段は同じ部分を1,500倍に拡大したものである。色や他の部分との比較から、この部分は溝の陰影ではなく変色であると推測される。

図4.7は平行方向断面の中央部分の観察写真である。上段の50倍の写真より凹凸の最大幅は約300 $\mu\text{m}$ であることが観測される。写真左側の凹凸部分を500倍に拡大したのが中段の写真、1,500倍まで拡大したのが下段の写真である。

以上から、凹凸の最大幅は500 $\mu\text{m}$ であった。また、倍率を500倍、1,000倍に拡

大すると、金属の表面層に金属色の部分と、黒い溝の部分、そして濃い灰色の層が混在しているのが観察された。濃い灰色の層は、母材の変性及び一旦アシストガスで除去されたドロスが再付着した結果生じたドロス状の付着物であり、黒い溝の部分は、付着物と母材の境界層の陰影である。変色の原因は、空気中の酸素によって酸化物が生成した結果である。

#### 4.1.2 試験片 20A039 (アシストガス Ar)

アシストガスにArを用いた試験片 20A039 の顕微鏡観察写真を図 4.8～図 4.14 に示す。

図 4.8は、試験片を樹脂で埋めて、平行、垂直方向に切断した断面の状態の写真である。図に示した、中央、中間、端それぞれに対して、観察ポイントを選定して、倍率を上げながら観察を行った。

図 4.9は垂直方向断面の端の部分の写真である。上段の50倍の倍率の写真において、20A014 同様に凹凸が観測される。凹凸の最大幅は約 $200\mu\text{m}$ である。凸部の一部を500倍に拡大したものが中段写真、1,500倍に拡大したものが下段写真である。各写真の下部分が試験片断面で、上の層が樹脂である。500倍の写真に再付着物と母材の界面が樹脂側と同じ色で観察される。しかし、金属の変性による変色は観察されなかった。

図 4.10は垂直方向断面の中間部分の写真である。上段の50倍の写真から、端の部分(図 4.9)と比べて凹凸は小さいことが観察される。凹凸の最大幅は約 $150\mu\text{m}$ である。凸部分の倍率を500倍、1,500倍に拡大したのが、それぞれ中段、下段の写真である。端の部分同様に再付着物と思われる部分は観測されるが、変色は観測されていない。写真全体に見られる筋のようなものは、断面を切断して研磨した際にいた傷である。

図 4.11は垂直方向断面の中央部分の写真である。凹凸は中間部分同様少なく、凹凸の幅は $150\mu\text{m}$ である。中段の写真は、写真中央部の凸部分を拡大したものである。付着物や変色は観察されない。下段は上段写真の左端部分の拡大写真である。金属光沢のある試験片母材部分と付着物と思われる部分の間に黒い層が観察される。黒い部分の焦点があつてないことから、この部分は溝の陰影であり、母材の変色ではない。

図 4.12は平行方向断面の端部分の観察写真である。凹凸の最大幅は約 $300\mu\text{m}$ で

ある。端部分のほうが、中央部分よりも凹凸が大きい。写真右の凸部分を500倍に拡大したのが中段写真であり、写真の付着物部分を1,500倍まで拡大したのが下段写真である。付着物の溝の陰影部分以外に変色した部分は観測されなかった。

図4.13は平行方向断面の昼間部分の観察写真である。上段の50倍写真から、凹凸は殆ど観察されない。凹凸の最大幅は100 $\mu\text{m}$ 以下である。写真中央部分を500倍に拡大したのが中段写真、付着物の部分を更に1,500倍に拡大したのが下段写真である。この観察写真でも特に変色した部分は観察されなかった。

アシストガスにArを用いた試験片の観察結果から、凹凸の幅は最大で200 $\mu\text{m}$ であった。アシストガスがArの場合は、レーザ除染の際に生じた山状の表面に、前節のアシストガスAirの際のような、付着物はほとんど確認されなかつたが、一部には、金属面の凹凸部に母材と分離した箇所が観察された。これは、一度溶解した金属片がアシストガスで除去されたものが再付着し固化した箇所であるが、変色は確認されなかつた。

## 4.2 EDXを用いた金属組成分布分析

4.1節で、変色、再付着物が見られた箇所について、金属組成の分布分析を行つた。元素分析結果を図4.15～図4.20に示す。試験片20A014はアシストガスにAirを用いた試験片であり、20A039はArを用いた試験片である。

図4.15は、20A014垂直方向断面の中央部分の付着物について、Cr, Mn, Fe, Niそれぞれの元素の分布をそれぞれ表示したものである。SEM像の外側の層にはCr, Mnが、中央の層にはFe, Niが偏在していることが観測される。特にCrとFeの偏在の度合いが強い。図4.16は、図4.15から、CrとFeを拡大したものである。

図4.17は、20A014平行方向断面の中央部分の付着物について、Cr, Mn, Fe, Niそれぞれの元素の分布をそれぞれ表示したものである。図4.15同様にCrとFe, Niの偏在している層があることが観測された。図4.18は、図4.17から、CrとFeを拡大したものである。

図4.19は、20A039垂直方向断面の中間部分の付着物について、Cr, Mn, Fe, Niそれぞれの元素の分布をそれぞれ表示したものである。また、図4.20はCrとFeを抽出して拡大したものである。アシストガスにArを用いた試験片においては、特定の元素の偏在は観測できなかつた。

元素分析結果より、アシストガスAirを用いた試験片である20A014垂直方向中央および20A014平行方向中央の図の色の黒ずんでいる箇所には、Crの偏析が観察された。一方で、アシストガスArを用いた試験片である20A039垂直方向中间においては、偏析は観察されなかった。

また、元素分析を行うことにより、金属母材のレーザ照射により熱影響を受ける深さを観察できることを期待したが、母材の変性については観測できなかつた。

アシストガスにAirを用いた際に金属元素の偏析が生じて、アシストガスにArを用いた場合にAirを用いた場合のような偏析が無いこと、EDXでは酸素を対象として分析を行うことはできなかつたが、図4.15のその他の元素の分布から、アシストガス中の酸素の影響により、元素の偏在が生じたことがわかる。

#### 4.3 IP及びARGによる試験片の放射能分布測定

マイクロスコープによる観察で使用した試験片を用いて、IP及びARGによる放射能分布測定を行つた。

##### 4.3.1 IPによる観察

測定に供した試料の断面をGe検出器の検出面に当てた状態で放射能測定を行つた結果、これら試験片の<sup>60</sup>Coの放射能量は、

- 20A014の平行方向：30.2Bq／切断試料
- 20A014の垂直方向：1.88Bq／切断試料
- 20A039の平行方向：2.27Bq／切断試料
- 20A039の垂直方向：2.66Bq／切断試料

であった。試料の大きさはほぼ同じであるが、放射能量は大きく異なる。このことから汚染は一様に分布しているのではなく、局部的に偏在しており、汚染が高く偏在している面をスライスした20A014平面方向が高い数値となつたものと推測される。

これら試験片を用いてIPによる測定を行つた。上記の放射能量を目安に、IPと試料のコンタクト時間は24時間とし、富士写真フィルム社製のIP測定装置BAS 2000を用いて読み出し及び画像処理を行つた。IPの測定結果を、図4.21～図4.24に示す。

図 4.21は、4試料中最も放射能量の高かった20A014平行方向の試料であり、IPにも、線源位置が強く撮影されている。写真上段は試料の写真であり、中段のIP画像の線源位置は上段写真の左端上部である。下段の写真の長方体は、図 4.25のプロファイルの測定位置であり、長方体の上端が試験片の上端に相当する。

同様に、図 4.22は20A014垂直方向の試料を用いたIP撮影画像である。写真中段のIP画像では帯状の線源位置がぼんやりと確認できる。下段の写真の直方体2の上辺が試験片左端上面に対応している。

図 4.23は20A039平行方向の試料を用いたIP撮影画像である。IP画像では線源は部分的に観測された。下段の写真の直方体3の上辺が試験片右側の上面に対応している。

図 4.24は20A039垂直方向の試料を用いたIP撮影画像である。この試料からは線源位置を画像から特定することはできなかった。下段の写真の直方体4の上辺が試験片左端の上面に対応している。

次に、図 4.21～図 4.24の下段写真の直方体部分の放射能強度プロファイル解析を行った。プロファイル解析の結果を図 4.25に示す。図 4.25中のProfile ID:1は、20A014 平行方向におけるプロファイル解析結果（イメージングプレート写真図 4.21 中に示す位置：1での解析結果）を、Profile ID:2は、20A014 垂直方向におけるプロファイル解析結果（イメージングプレート写真図 4.22 中に示す位置：2での解析結果）を、Profile ID:3は、20A039 平行方向におけるプロファイル解析結果（イメージングプレート写真図 4.23 中に示す位置：3での解析結果）を、そして、Profile ID:4は、20A039 垂直方向におけるプロファイル解析結果（イメージングプレート写真図 4.24 中に示す位置：4での解析結果）を示している。図 4.21～図 4.24のそれぞれの直方体の上辺がグラフの原点に対応し、下に下がる方向が図 4.25の横軸に対応している。グラフの縦軸はIPの光刺激ルミネッセンス量であり、放射線強度に対応する量である。但し、光刺激ルミネッセンス量から定量的に放射線カウント数、或いは放射能量に換算することはできていない。今後の課題である。

放射線が  $\gamma$  線であり、観察面以外に奥行き (5mm) にある放射線源からの影響があることから、プロファイル結果には明確な分布のしきいは無いが、この図から汚染核種は <約500 $\mu\text{m}$  以下の表面のごく一部の範囲に存在していることが

確認された。

#### 4.3.2 ARGによる観察

次に、X線フィルムを用いたARG測定では、線源の強度から試料とX線フィルムとのコンタクト時間を1ヶ月間とし撮影を行い現像処理を行った。X線フィルムを用いたARGの測定結果を、図4.26～図4.29に示す。コンタクト時間に長時間要した原因は、X線フィルムの感度がイメージングプレートと比較して1桁以上低いためである。

図4.26は20A014垂直方向断面のARG画像であり、上段左が撮影位置、右がARG画像、下段が拡大画像である。同様に、図4.27が20A014平行方向のARG画像、図4.28が20A014垂直方向のARG画像、図4.29が20A014平行方向のARG画像である。図4.27、図4.29には帯状の汚染位置が目視で確認できる。

ARGはカラーマッピング処理をすることにより、イメージングプレート同様に汚染核種の分布測定が可能である。

放射能強度プロファイル解析位置を、図4.30に示す。これらの位置に対してARGの測定結果について線分析を実施した。プロファイル分析結果を図4.31に示す。グラフの横方向は、図4.30の各試験片に描かれた直方体の上辺を原点として下方向に向かう距離、縦軸は放射線強度に対応した黒化度である。

IPの線分析の際と同様に $\gamma$ 線が測定対象であるため、厳密に汚染部位をこのグラフから特定することは難しい。しかし、図からアシストガスにAirを用いた20A014のほうが、Arを用いた20A039の場合よりも汚染核種が深くまで浸透していることが判り、その深さは、20A014については500 $\mu\text{m}$ 以下、20A039については300 $\mu\text{m}$ の範囲にあると推測されるが、厳密に汚染核種の存在する範囲を調査するには、4.4節の段階研磨とGe測定結果が必要である。

一方で、マイクロスコープの観察結果から、レーザ照射により生じる凹凸の幅は、アシストガスAirの場合約500 $\mu\text{m}$ 、Arの場合約200 $\mu\text{m}$ 程度であった。このことから、放射性核種の大部分はこの凸部分に集中していることが推測される。

### 4.4 試験片表面の段階研磨・Ge測定

試験に用いた試験片(20A012、20A021、20A025及び20A026)は表2.3に示すように、20A012のアシストガスはAirであり、20A021のアシストガスはN<sub>2</sub>、20A025、

20A026 のアシストガスは Ar である。

#### 4.4.1 試験表面の機械研磨・Ge測定

試験片はレーザー照射により表面が縞状に凸凹がある。この凸部分を一定間隔で研磨し Ge による放射線測定を行った。研磨作業は、超鋼カッターの歯を用いて、試料の反り具合に合わせて研磨を実施した。研磨前後の写真を、図 4.32 ~ 図 4.35 に示す。試験前の試験片の外観は、アシストガスに不活性ガスを用いた 20A021 (図 4.32)、20A025 (図 4.34)、20A026 (図 4.35) は殆ど変わらない。一方で、アシストガスに Air を用いた 20A012 (図 4.33) は表面に粉状の黒い酸化物の付着物が付いており、表面状態は良くない。放射能量は、アシストガスに Ar を用いた 20A025 と 20A026 が比較的小さく、アシストガスに Air を用いた 20A012 は比較的大きい。不活性ガスの N<sub>2</sub> を使用した 20A017 の放射能量も、Air を用いた 20A012 と同程度に大きかった。

機械研磨の研磨精度は、変化が大きいことが予想される最初の3回は 10 μm の精度で実施した。その後、Ge の測定結果と照らし合わせながら、30 μm の精度で、試験片表面が平坦になるまで実施した。

機械研磨後の放射能量測定結果を表 3.2 に示す。

試料により多少の違いがあるが、試験片 20A012, 20A021, 20A026 については 60 ~ 90 μm まで研磨をした時点で急激に放射能が減少している。この結果は凸部の中間までの<sup>60</sup>Co の汚染が集中していることを示している。

研磨は一応の目安として、表面がほぼ平坦になるか、放射能量が 0.4Bq/g になることを目標に行った。試験片の重量が約 40g であることから、試験片の放射能量が 16Bq が除染の目安となる。機械研磨の結果で、この目標まで達したのはアシストガスに Air を用いた 20A012 と Ar を流量 80 l/min で使用した 20A026 であった。

これらの試験片はレーザ除染試験では悪条件で行ったもので（アシストガスに活性ガスである Air を用いる、あるいはアシストガスの流量を多くする）、残存放射能量の高い（除染結果の悪い）これらの試験片が、今回の試験では逆に、汚染核種の浸透深さが低い結果となった。レーザ除染で除染効果を高めるための選定条件が、逆にそれ以上の除染を行う上では悪影響となつたことは注目するべき点である。

20A025 のアシストガス Ar の研磨結果は、上記のように凸部に汚染核種が偏在

しているとは考えられない結果となった。この試験片は、レーザー除染実施時に表面の汚染が一番良く除去されていたものであるが、一方で母材深くまで汚染核種が浸透していることが判明した。

#### 4.4.2 電解研磨による研磨・Ge測定作業

前節で表面を平坦にした試験片表面を、さらに電解研磨により一定間隔で研磨し Geによる放射線計測を行った。試験結果を、表 3.2～表 3.6に示す。ここで、機械研磨で目標となる放射能量に達した試験片（20A012と20A026）についても、同じく研磨を行った。

電解研磨の試験結果より、研磨厚130～330 μmの研磨処理を実施することにより汚染核種の殆どを除染出来た。20A021は機械研磨、電解研磨合わせて、185μm 研磨することで、20A025は310μm研磨することで目標とする数値（16Bq）に達した。

それぞれの試験片において、残った極微量の汚染核種は、母材内部にまで入り込んでいるものと推測される。

同じアシストガスを使用した20A025, 20A026 でも、アシストガスの流量が異なることにより、異なる結果となった。即ち、除染時の最適条件の倍の流量の20A026は汚染核種を含む溶融した金属母材の冷却効果が大きく、レーザ除染時には十分な除染効果を得られなかった反面、冷却が早かったことから、汚染核種は母材表層から約120μmの範囲に存在するにとどまったものと推測される。

機械研磨、電解研磨を合わせて実施することにより、レーザ除染を行った試験片は、アシストガスにAirを用いた際には120μm, アシストガスにArを用いた際の最適条件（印加電圧10V 周波数30Hz 移動速度30mm/sアシストガス流量40 l/min: 照射エネルギー約1.3kJ/cm<sup>2</sup>）では300μmの範囲まで汚染が取り込まれていることが確認された。

## 5. まとめ

ノーマルパルスYAGレーザで除染したホットサンプル試験片を対象に、レーザ除染時の溶融によって放射性核種が金属中にどの程度の深さまで残留しているかを試験により確認した。

試験結果を要約すると以下のとおりである。

(1) マイクロスコープによる試験片の断面観察では、アシストガスにAirを用いた場合の凹凸の最大幅は約 $500\mu\text{m}$ であった。倍率を500倍、1,000倍に拡大すると、金属の表面層に金属色の部分と、黒い溝の部分、そして濃い灰色の層が混在しているのが観察された。濃い灰色の層は、母材の変性及び一旦アシストガスで除去されたドロスが再付着した結果生じたドロス状の付着物であり、変色の原因は、空気中の酸素によって酸化物が生成した結果である。

アシストガスにArを用いた試験片の断面観察では、凹凸の最大幅は約 $200\mu\text{m}$ であった。アシストガスがArの場合は、レーザ除染の際に生じた山状の表面上に、前節のアシストガスAirの際のような、付着物はほとんど確認されなかつた。一部には、金属面の凹凸部に母材と分離した箇所が観察された。これは、一度溶解した金属片がアシストガスで除去されたものが再付着し固化した箇所であるが、変色は観測されなかつた。

(2) 蛍光X線分析装置を用いた金属組成分析では、アシストガスAirを用いた試験片である20A014垂直方向中央および20A014平行方向中央の図の色の黒ずんでいる箇所には、Crの偏析が観察された。一方で、アシストガスArを用いた試験片である20A039垂直方向中間においては、偏析は観察されなかつた。

(3) イメージングプレート、オートラジオグラフィによる試験片の放射能分析では、放射線が $\gamma$ 線であり、観察面以外に奥行き(5mm)にある放射線源からの影響があることから、プロファイル結果には明確な分布のしきいは無いが、汚染核種は $< \text{約 } 500\mu\text{m}$ 以下の表面のごく一部の範囲に限定して存在していることが確認された。

(4) 試験片の段階研磨とGe測定器による放射線量測定試験からは、レーザ除染を行った試験片は、アシストガスにAirを用いた際には $120\mu\text{m}$ 、アシストガスに

Arを用いた際の最適条件（印加電圧10V 周波数30Hz 移動速度30mm/sアシストガス流量40 ℓ/min：照射エネルギー約1.3kJ/cm<sup>2</sup>）では300μmの範囲まで汚染が取り込まれていることが確認された。

## 6. 参考文献

- (1) 福井康太、根本正信、谷本健一、照沼誠一：レーザー除染技術の開発(1)(レーザー除染に関する調査と基礎試験), PNC ZN9410 95-041 (1994.12)
- (2) 福井康太、根本正信、谷本健一：レーザー除染技術の開発(2) (レーザー除染に関する適用性試験), PNC ZN9410 96-058 (1996.02)
- (3) 清水幸喜、谷勝学、佐藤俊一、須賀芳睿：レーザー除染システム概念検討, PNC ZJ1564 96-003 (1996.02)
- (4) 福井康太、小川竜一郎、石島昇、谷本健一：レーザー除染技術の開発(3) (レーザー伝送系の特性試験), JNC TN9410 99-008 (1999.04)
- (5) 福井康太、小川竜一郎、石島昇、谷本健一：レーザー除染技術の開発(4) (レーザービーム伝送試験と照射条件の最適化), JNC TN9410 99-014 (1999.07)
- (6) 福井康太、小川竜一郎、石島昇、谷本健一：レーザー除染技術の開発(5) (実廃棄物除染試験), JNC TN9410 99-016 (1999.08)
- (7) 福井康太、小川竜一郎、近藤等士、谷本健一：レーザー除染技術の開発(6) ノーマルパルスYAGレーザーを用いた除染試験, JNC TN9410 2000-015 (2000.09)
- (8) 原光男、堂野前寧、谷本健一、照沼誠一：電解研磨除染技術の開発試験, PNC ZN9410 93-144 (1993.06)
- (9) 吉澤俊司、石島昇、谷本健一：旧「常陽」廃棄物処理建家の汚染性状分析, JNC TN9410 99-017 (1999.08)

表 2.1 除染試験試験片の概略

材質	SUS304
形状	平板(輪切り配管を縦に二分割し、プレスした)
サイズ(概寸)	40 mm (H), 50 mm (W), 3 mm (t)
主要汚染核種	<sup>60</sup> Co

表 2.2 レーザ除染試験条件

レーザ出力制御電圧	6.5、7、8、9、10V
試験片移動速度	10、20、30、40、50、60 (mm/s)
周波数	30、40、50、60 (Hz)
試験片行送り量	0.5、0.75、1.0 (mm)
Dt 比	30、40、50、60 (%)
アシストガス種	Ar、Air、N <sub>2</sub>
アシストガス流量	40、60、80 (ℓ/min)
スタンドオフ	4 (mm) (固定、この際のレーザ径1 mm)

表 2.3 レーザ除染試験片の各種条件

試験片 No.	アシストガス		照射条件			寸法		重量 (g)	放射能量 (Bq)	放射能量 (Bq/g)
	種類	流量 (ℓ/min)	電圧 (V)	周波数 (Hz)	速度 (mm/s)	縦 (mm)	横 (mm)			
20A014	Air	40	10	60	60	60	39	40.6	256	6.3
20A039	Ar	40	10	30	30	30	39	43.3	236	5.4
20A021	N <sub>2</sub>	40	10	30	30	30	39	43.5	337	7.7
20A012	Air	40	10	60	60	60	38	39.1	227	5.8
20A025	Ar	40	10	30	30	30	37	39.0	38.8	1.0
20A026	Ar	80	10	30	30	30	39	41.4	145	3.5

表 3.1 イメージングプレート BAS2000 仕様

■ イメージ読み取り仕様	
サイズ	20*40 cm / 20*25cm
ピクセルサイズ	100 $\mu$ m/200 $\mu$ m
色階調	256 / 1024
読み取り感度 (RI:1h 照射時)	
P-32	0.3 dpm/mm <sup>2</sup>
C-14	2.1 dpm/mm <sup>2</sup>
S-35	2.1 dpm/mm <sup>2</sup>
I-125	0.8 dpm/mm <sup>2</sup>
X線(80keV)	1.3 $\mu$ R
■ 装置構成	
イメージリーダー	
Image Processor	32 bit workstation(SUN)
Main memory	16MB
External memory	Hard disk 414MB (データエリア: 160MB)
1/4 inch テープ	150MB
OS	UNIX 4.2BSD
インターフェイス	Ethernet, RS423
モニター	16-inch カラーモニター
レーザプリンター	
IP Eraser	
IP Cassette	
IP Magazine	
■ 操作環境	
電圧	AC 120V ±10%, 220 ± 10%
周波数	50/60Hz
設定環境	
温度	18~28度
湿度	35~70%
電力消費量	4.0KVA

表 3.2 機械研磨後放射能量

研磨深さ (μm)	放射能量			
	20A021 (Bq)	20A012 (Bq)	20A025 (Bq)	20A026 (Bq)
0	404	175	44	149
10	275	173	42	148
20	247	163	39	135
30	244	157	38	134
60	259	40	39	58
90	95	19	30	11
120	54	13	32	9
150	24	11	27	
180	23			

表 3.3 電解研磨後放射能量 (20A021)

研磨回数	電流値 (A)	研磨時間 (h)	研磨厚 (μm)	<sup>60</sup> Co (Bq)
0	—	—	—	23.0
1	0.15	0.5	2.0	18.6
2	0.15	0.5	4.5	14.0
3	0.15	0.5	7.8	13.9
4	0.30	0.5	11.9	13.0
5	1.50	1.5	36.2	12.7
6	1.50	1.5	44.7	12.5
7	1.50	1.5	69.4	12.2
8	1.50	2.0	77.5	12.0
9	1.50	2.0	110.5	11.4
10	3.00	2.0	118.8	11.2
11	3.00	3.0	185.9	10.4
12	3.00	3.0	242.2	10.2

表 3.4 電解研磨後放射能量 (20A012)

研磨回数	電流値 (A)	研磨時間 (h)	研磨厚 (μm)	<sup>60</sup> Co (Bq)
0				10.7
1	3.0	0.75	3.2	10.6
2	3.0	3.00	77.4	11.5
3	3.0	3.00	133.4	8.3
4	3.0	3.00	188.4	8.2
5	3.0	3.00	232.4	8.1
6	3.0	3.00	277.4	7.4

表 3.5 電解研磨後放射能量 (20A025)

研磨回数	電流値 (A)	研磨時間 (h)	研磨厚 (μm)	<sup>60</sup> Co (Bq)
0				26.9
1	1.0	0.5	3.7	29.4
2	3.0	1.0	94.9	27.5
3	3.0	1.0	158.1	14.7
4	3.0	3.0	207.1	12.4
5	3.0	3.0	265.1	12.2
6	3.0	3.0	321.1	5.8

表 3.6 電解研磨後放射能量 (20A026)

研磨回数	電流値 (A)	研磨時間 (h)	研磨厚 (μm)	<sup>60</sup> Co (Bq)
0				8.93
1	1.0	0.5	2.8	8.4
2	3.0	3.0	71.2	6.7
3	3.0	3.0	129.1	6.2

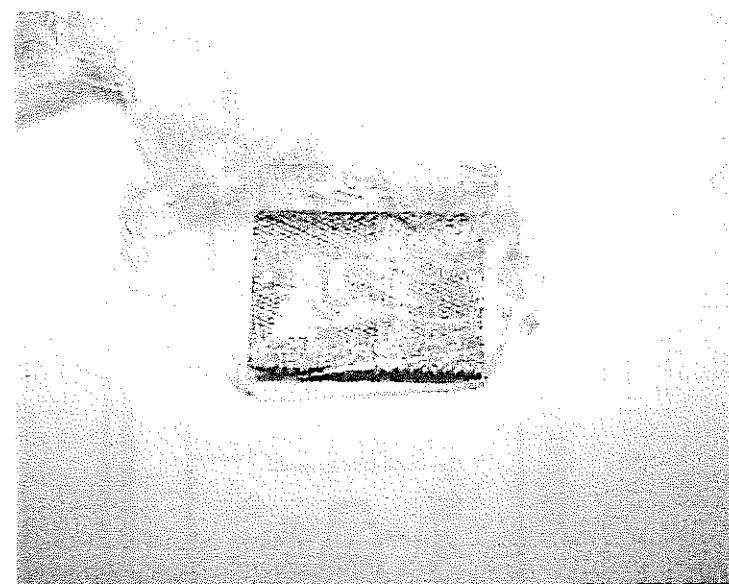


図 2.1 試験片外観図 (Ar)

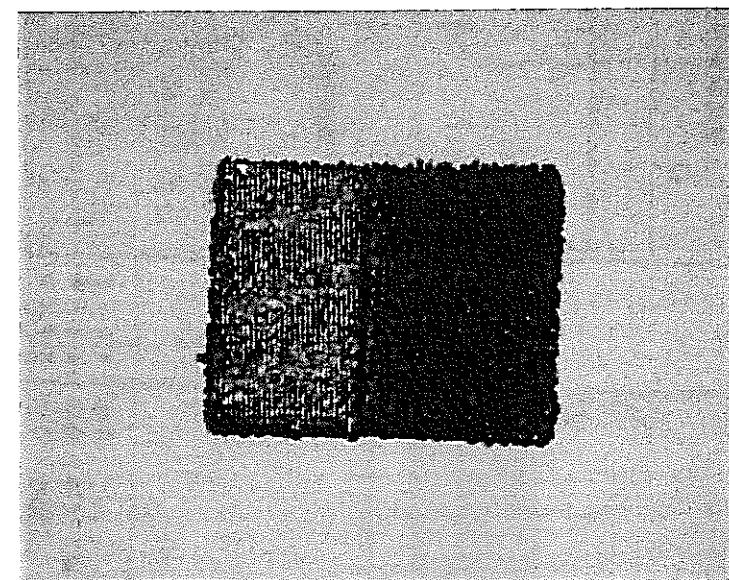


図 2.2 試験片外観図 (Air)

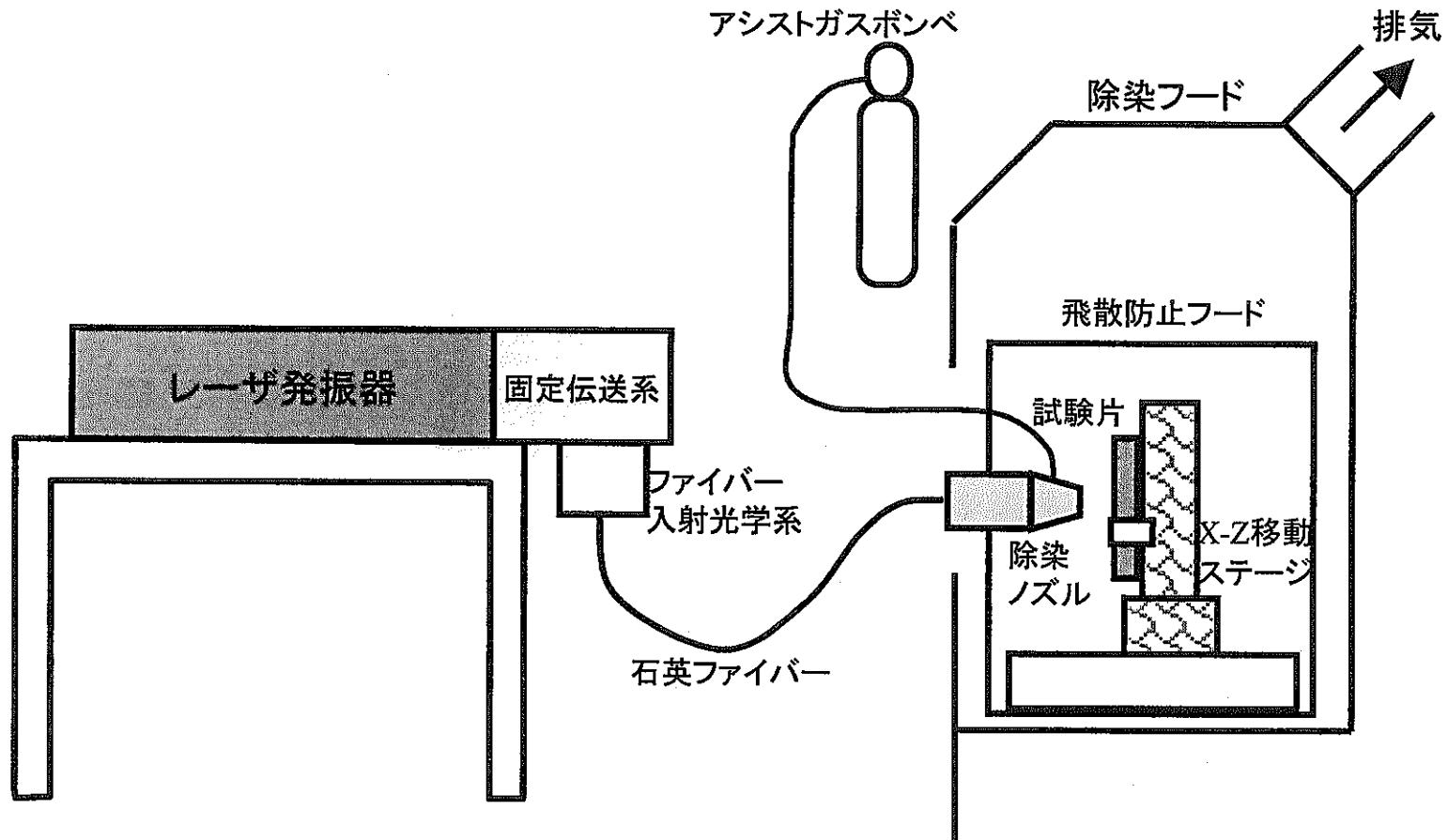


図 2.3 レーザ除染試験外観図

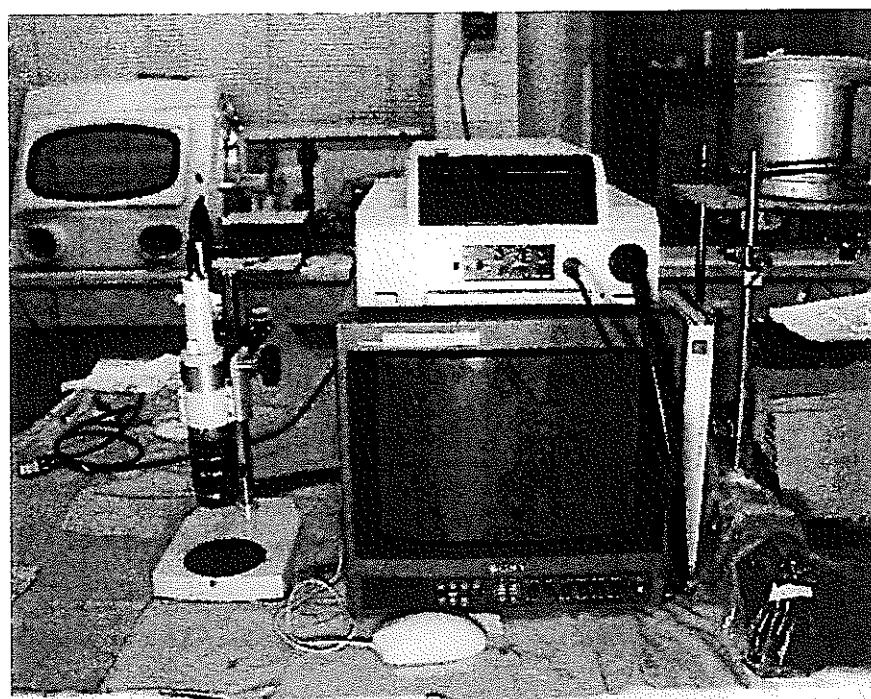


図 3.1 マイクロスコープ装置外観

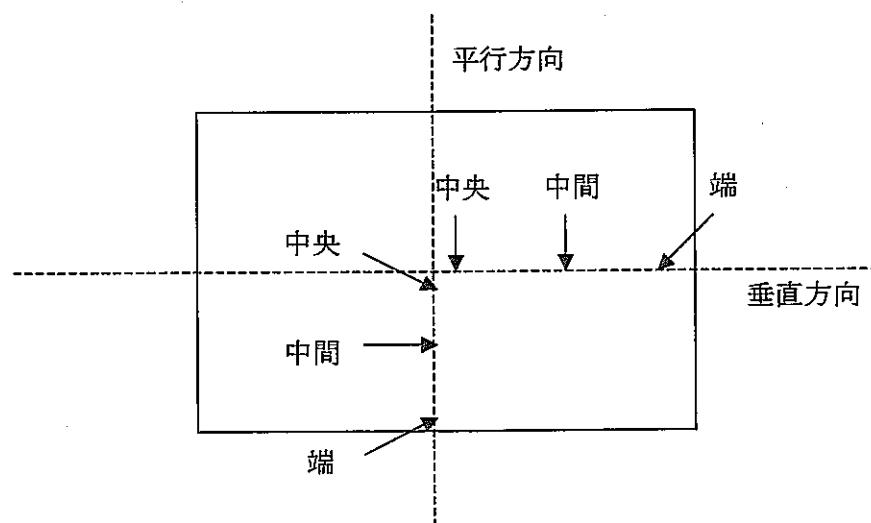


図 3.2 マイクロスコープ観察ポイント

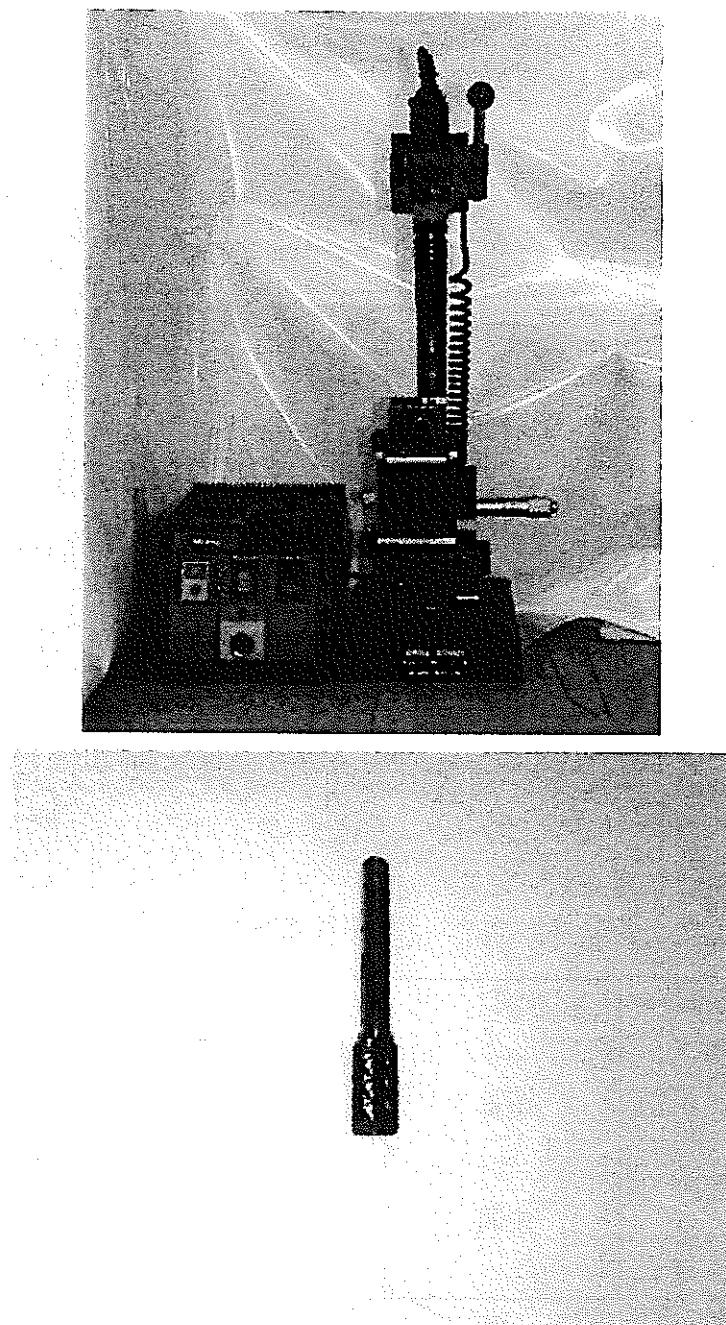


図 3.3 グラインダー

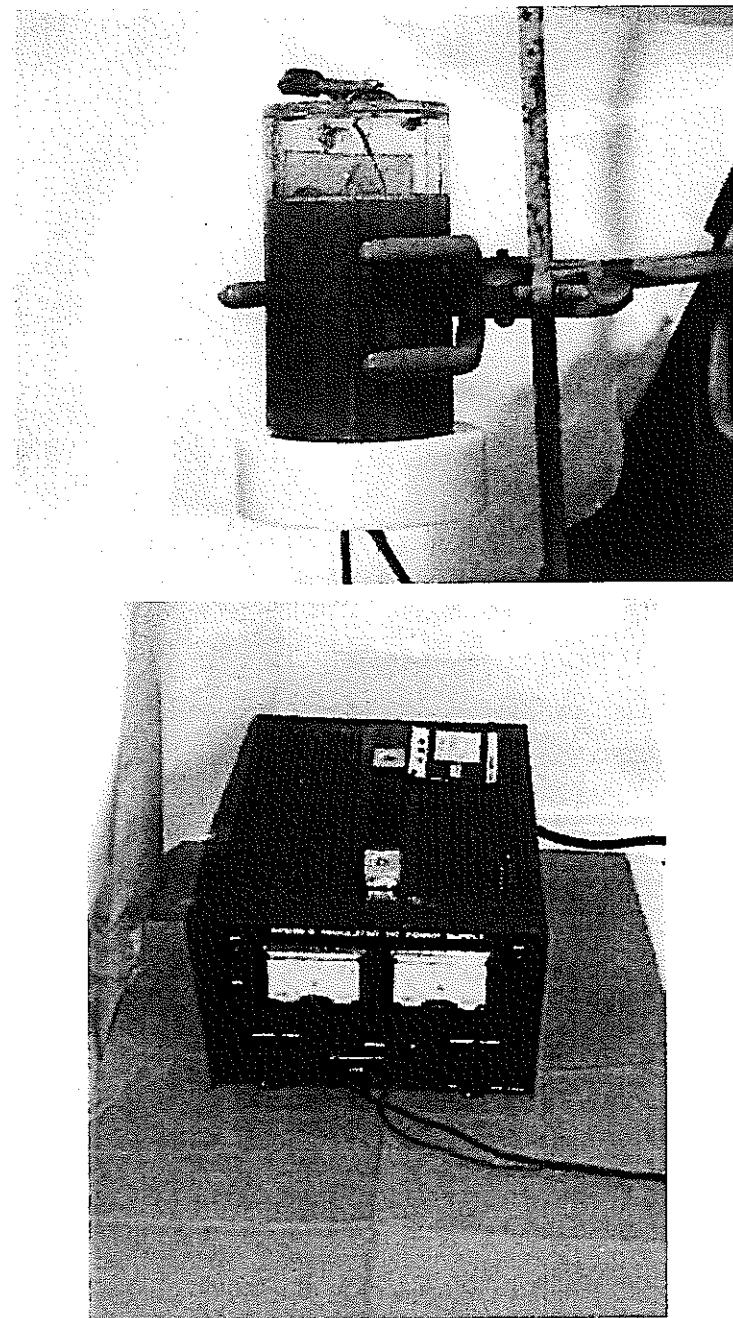


図 3.4 電解研磨装置装置

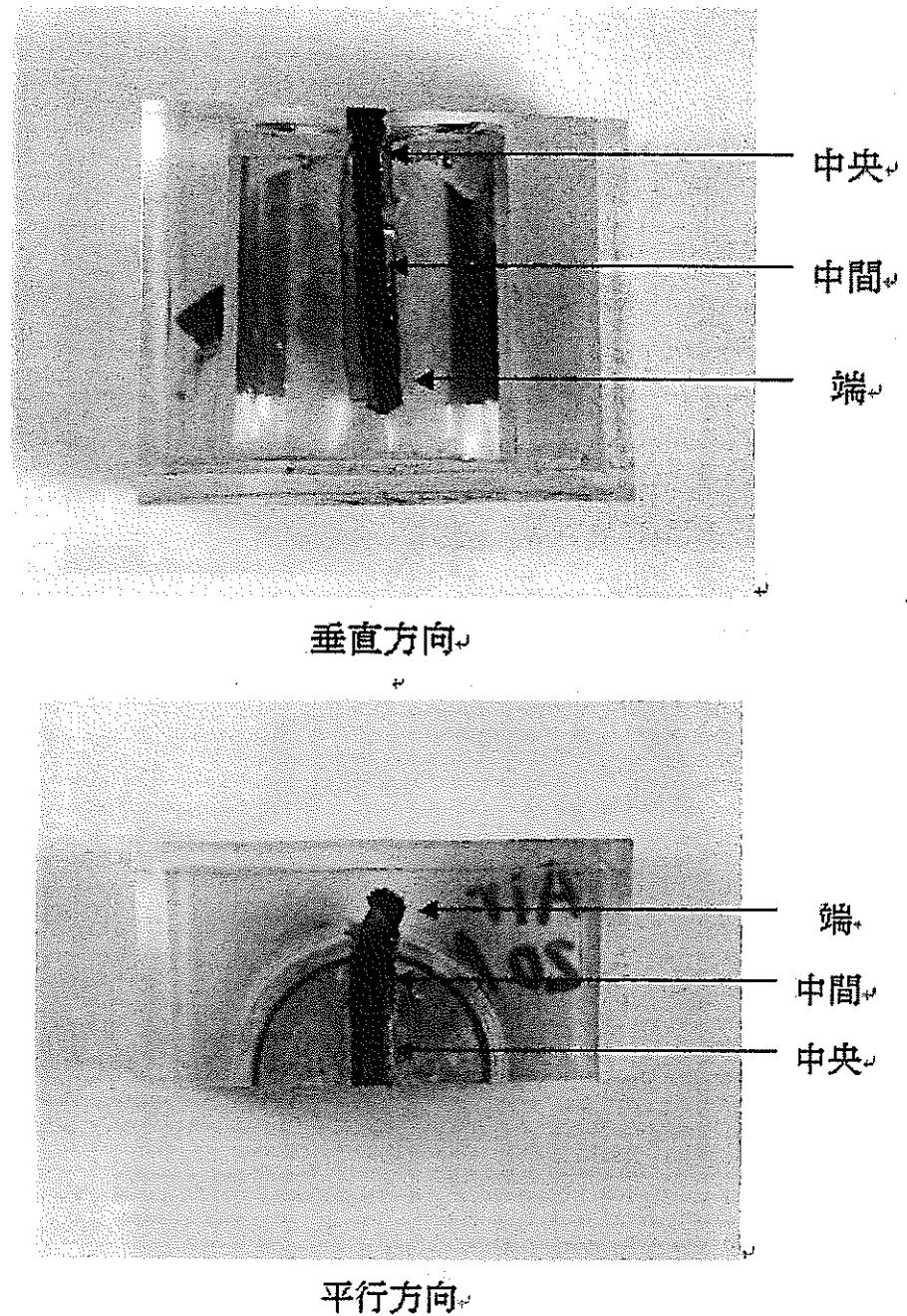


図 4.1 20A014 樹脂埋め状態

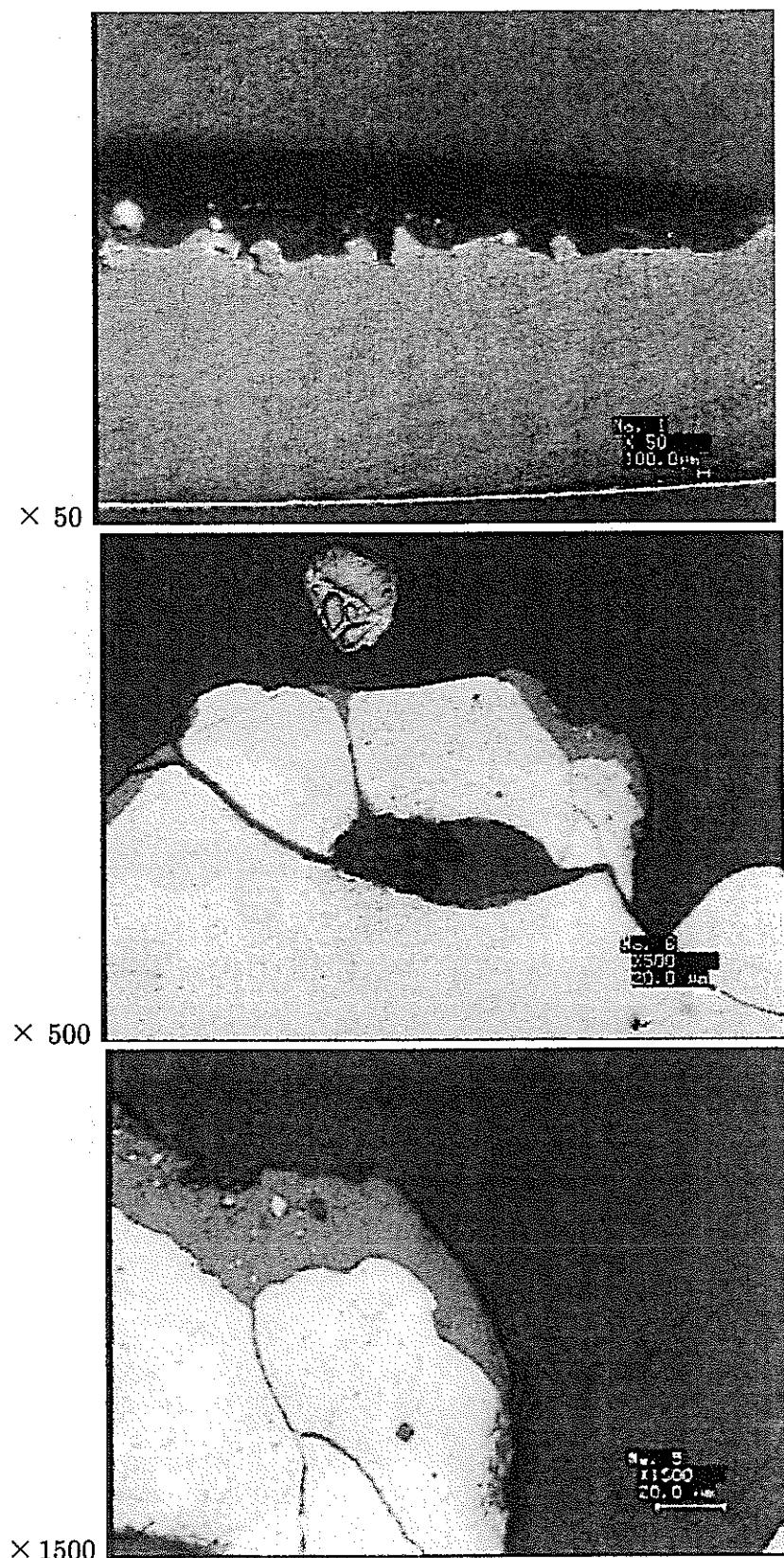


図 4.2 20A014 垂直方向端 観察写真

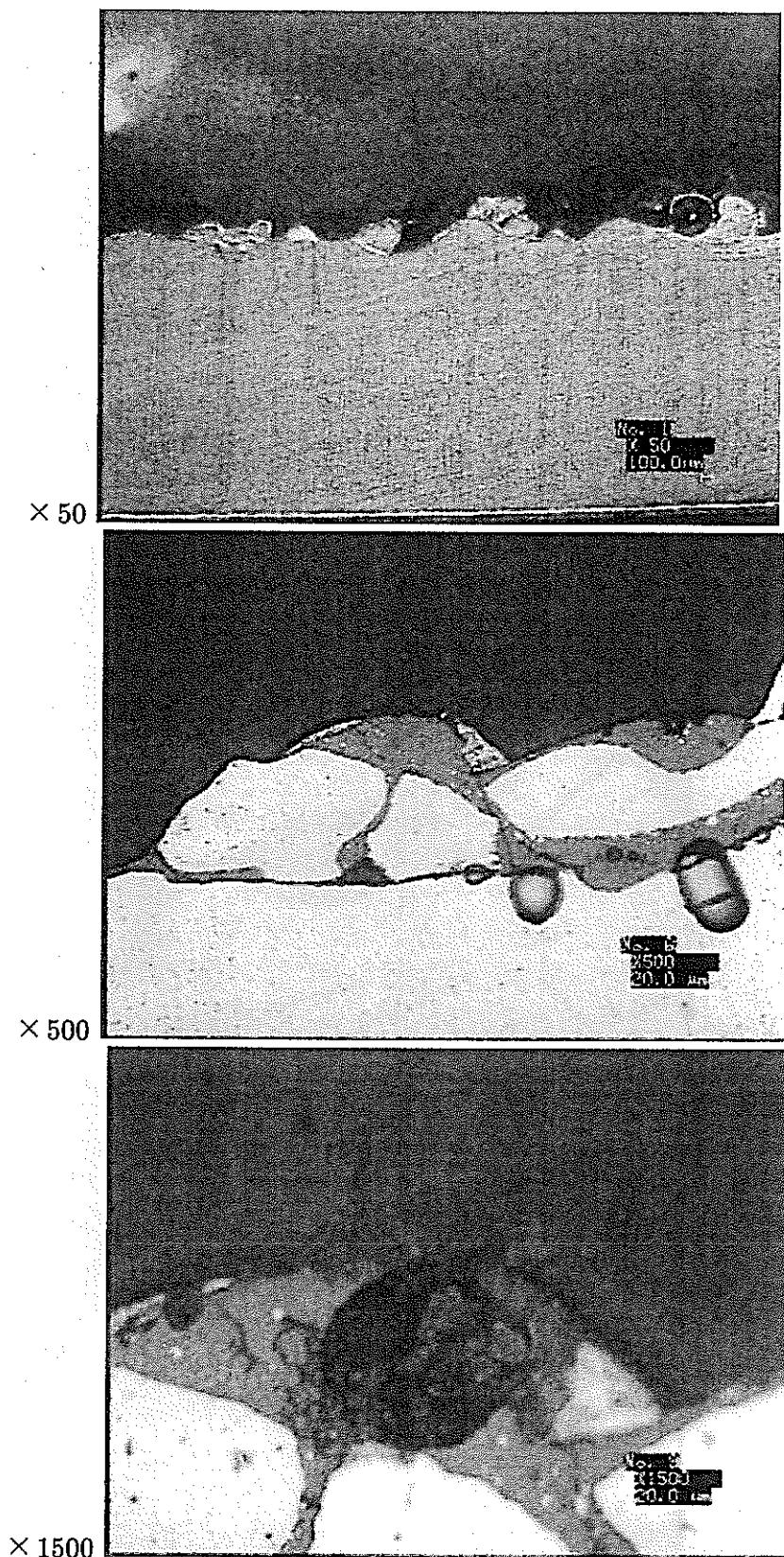


図 4.3 20A014 垂直方向中間 観察写真

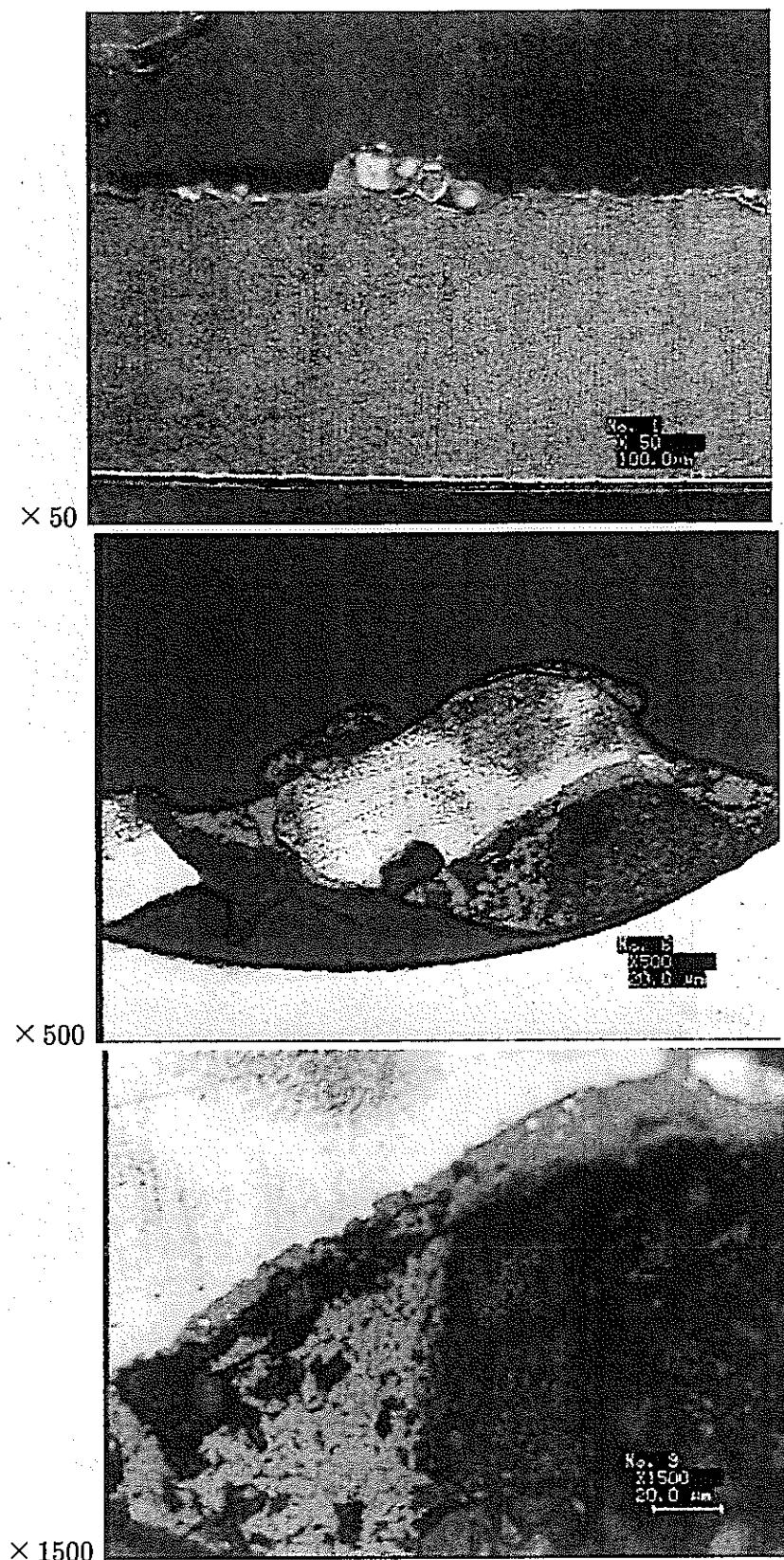


図 4.4 20A014 垂直方向中央 観察写真

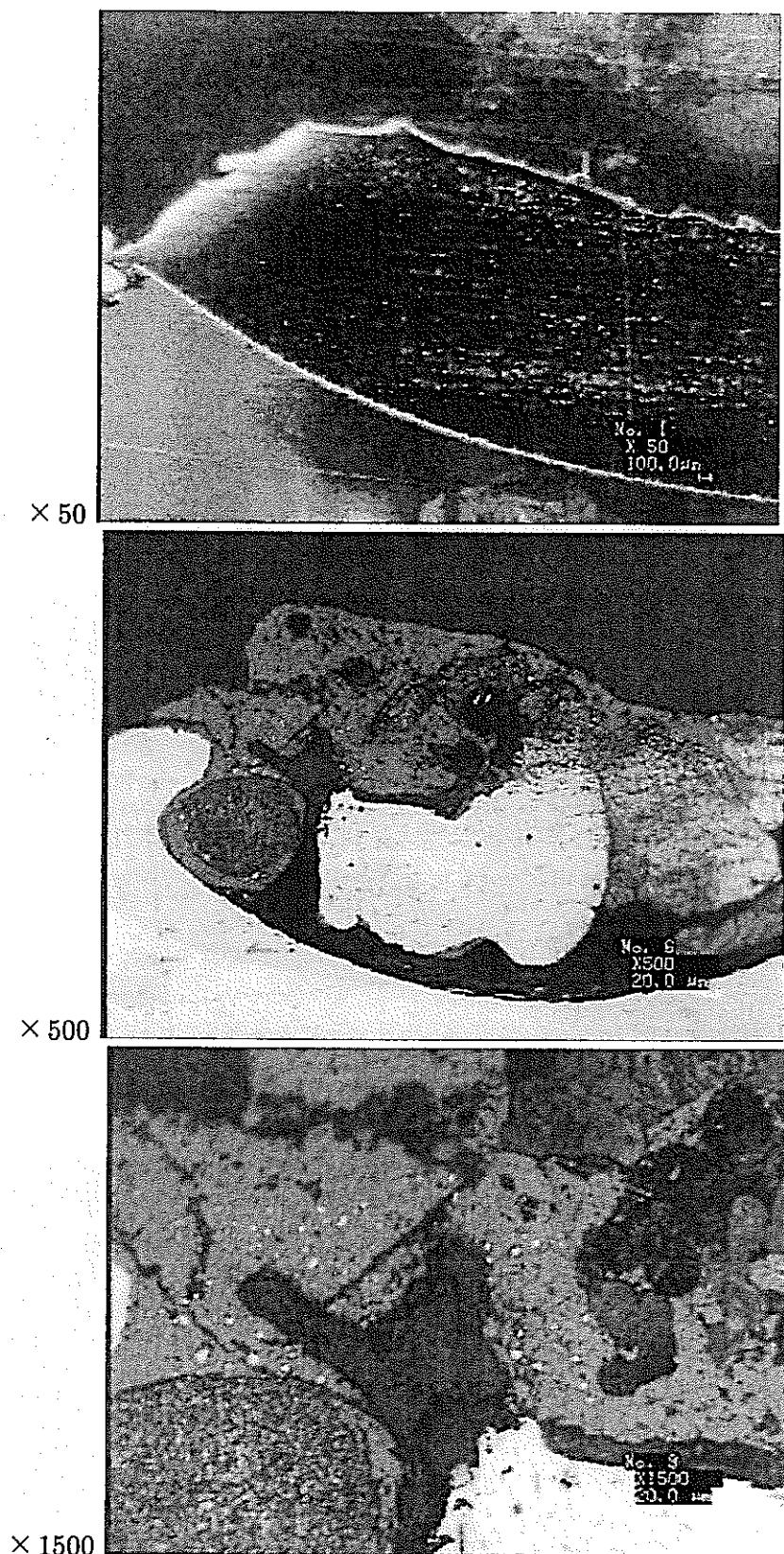


図 4.5 20A014 平行方向端 観察写真

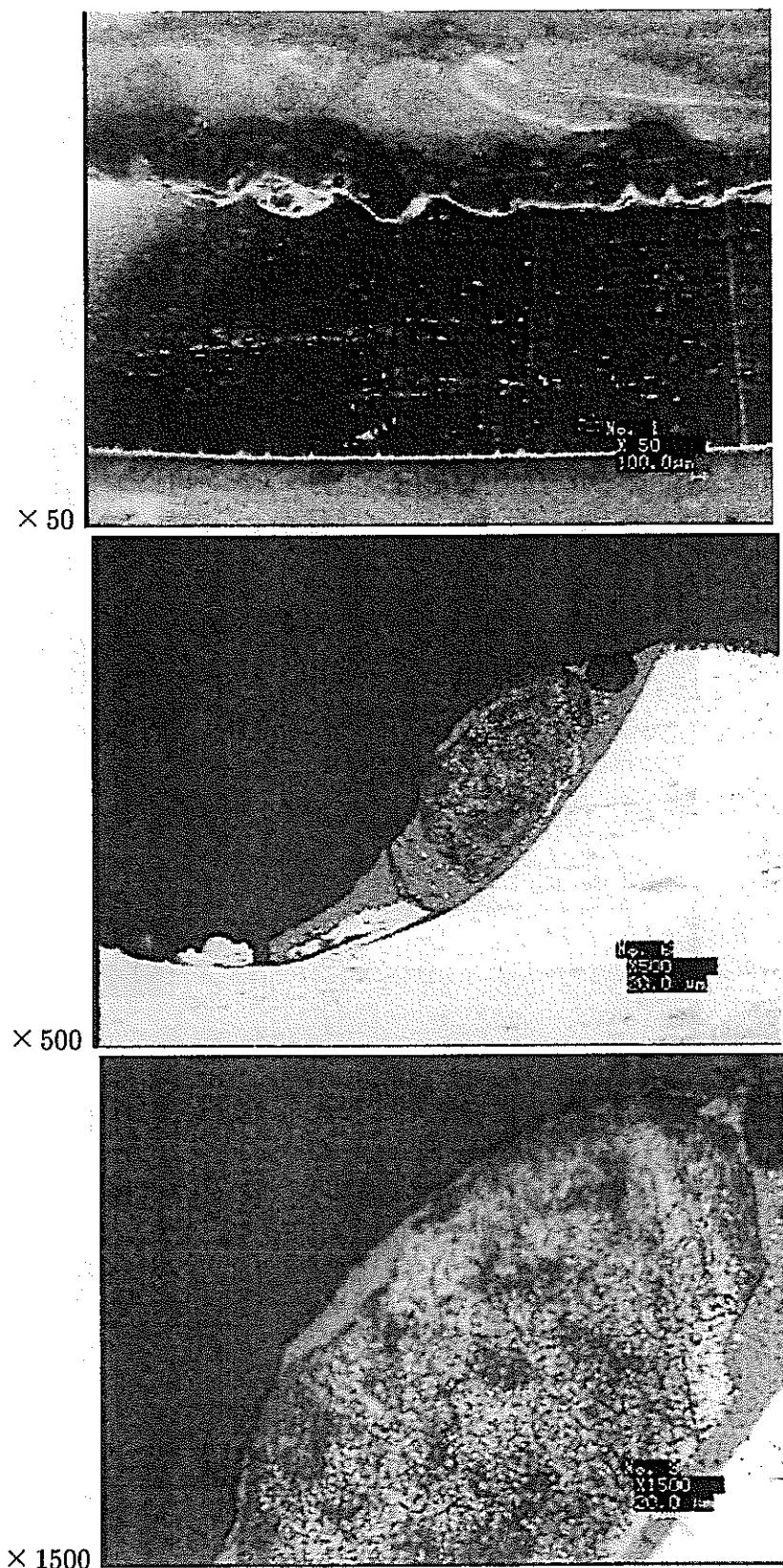


図 4.6 20A014 平行方向中間 観察写真

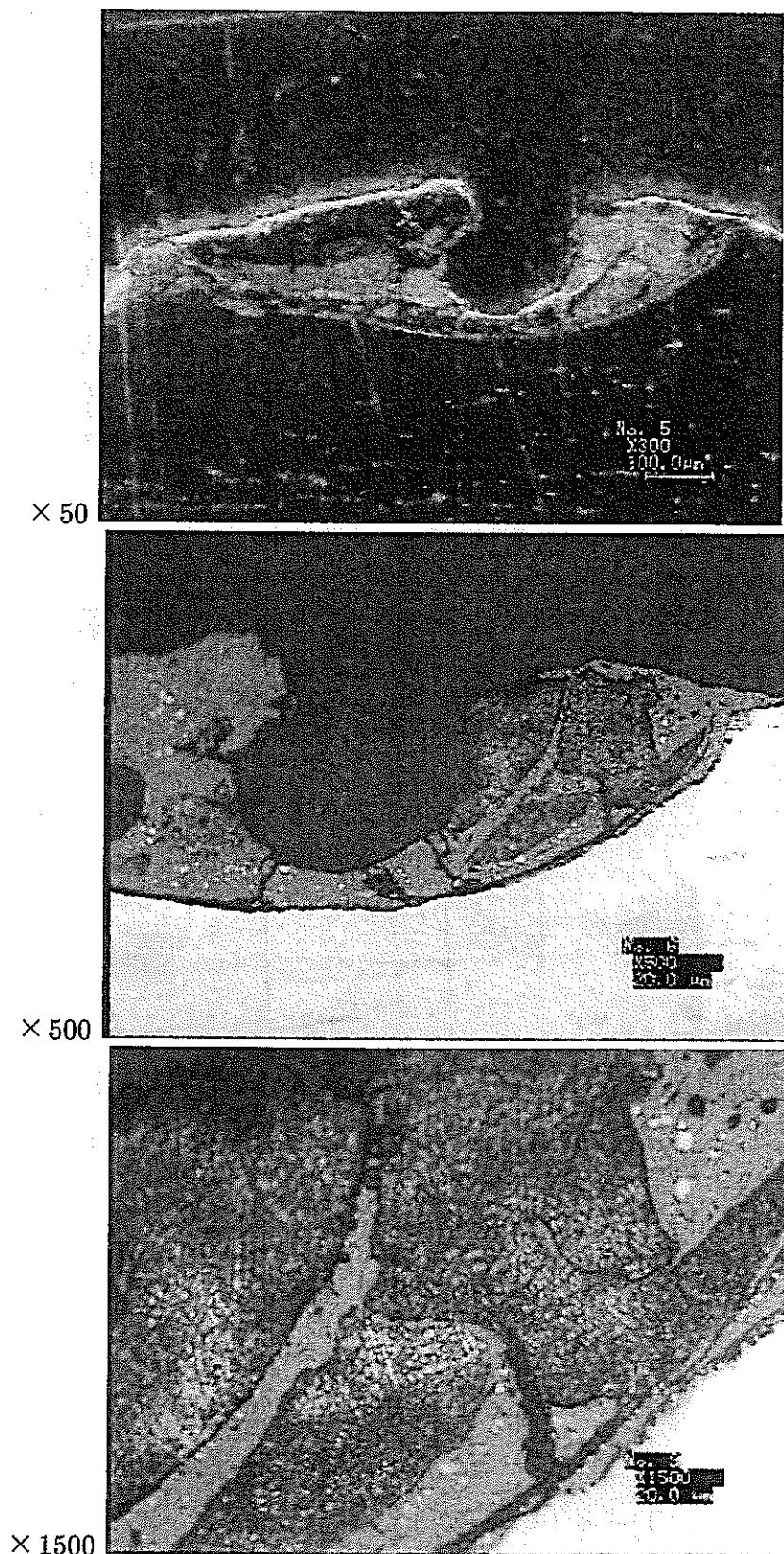


図 4.7 20A014 平行方向中央 観察写真

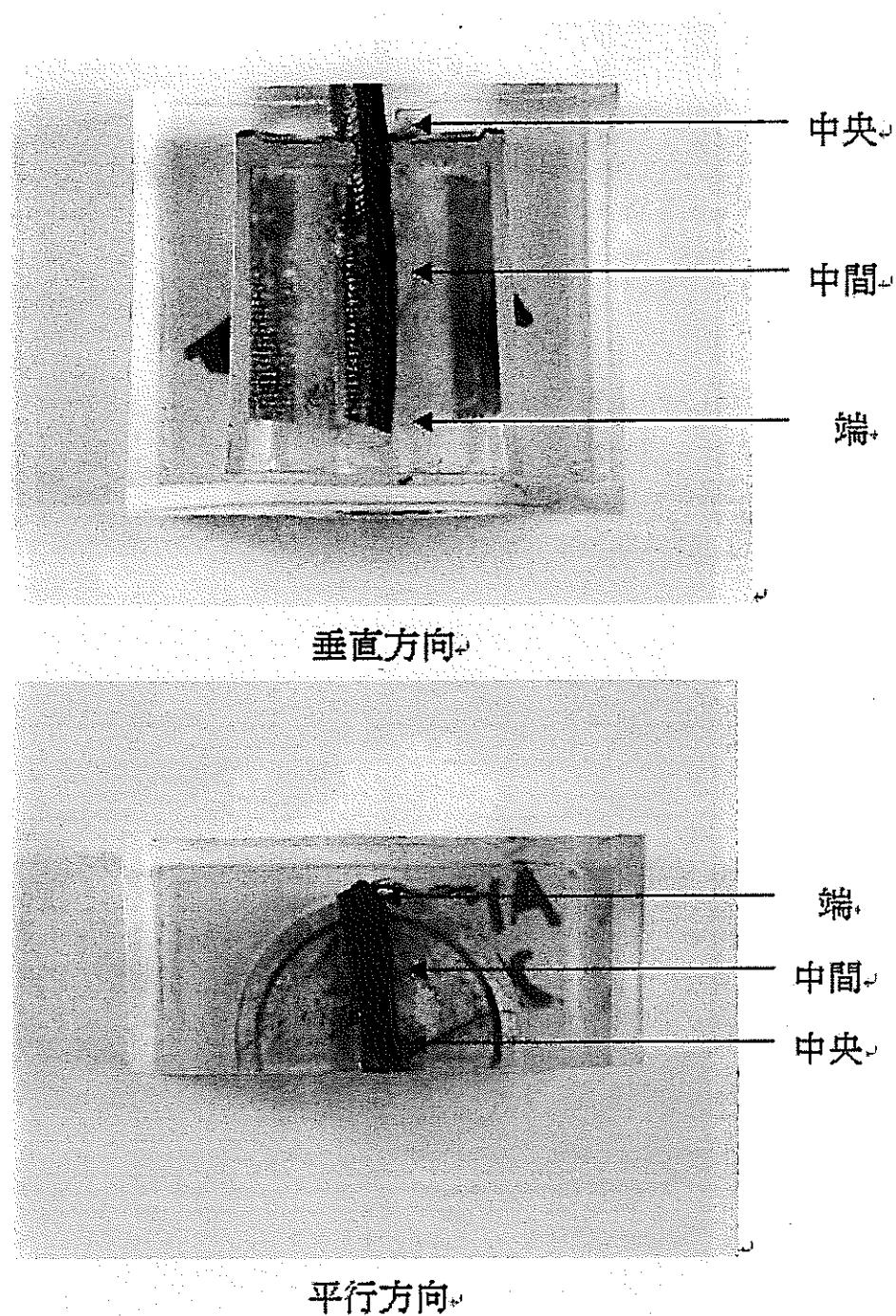


図 4.8 20A039 マイクロスコープ写真

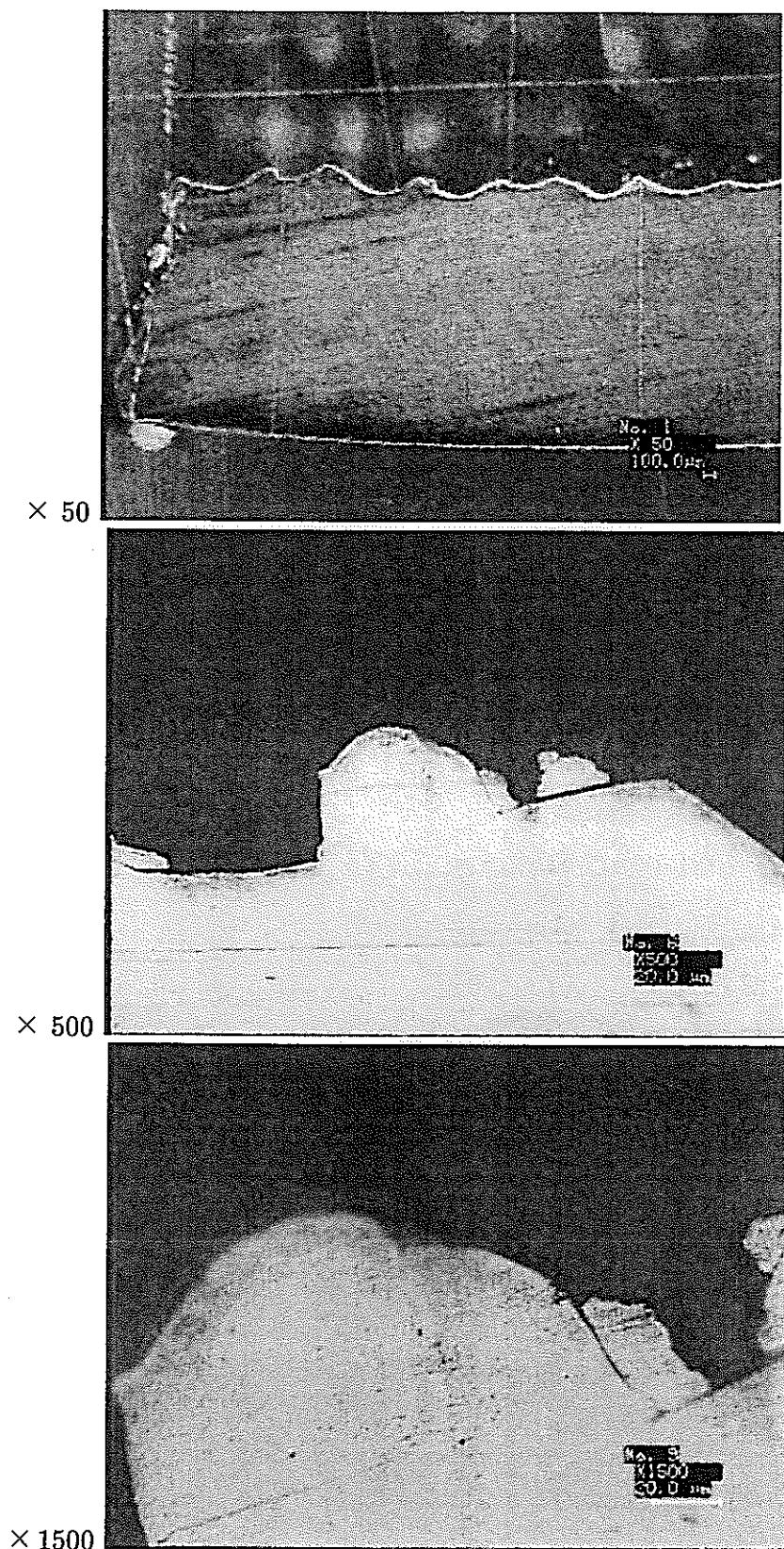


図 4.9 20A039 垂直方向端 観察写真

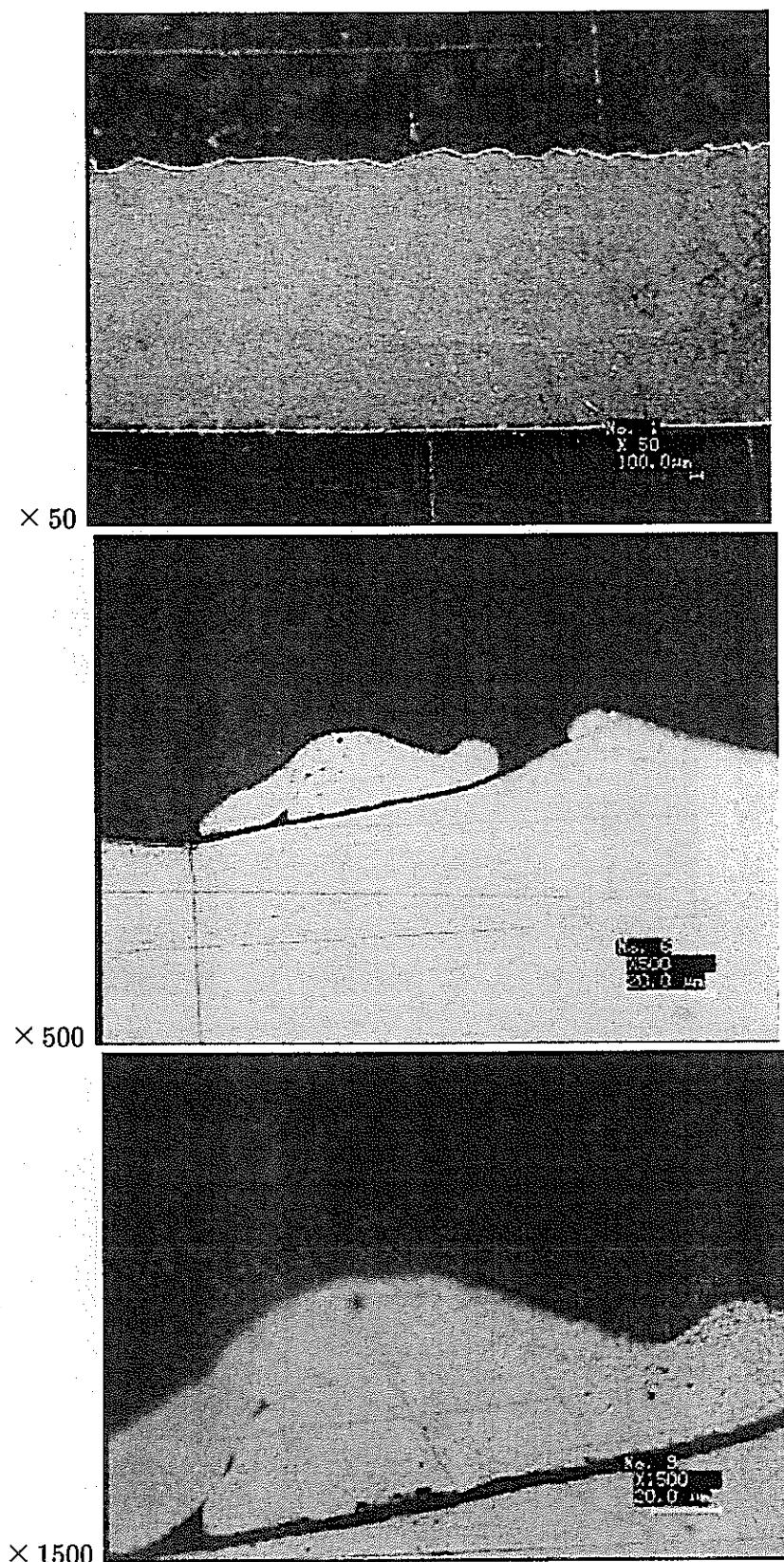


図 4.10 20A039 垂直方向中間 観察写真

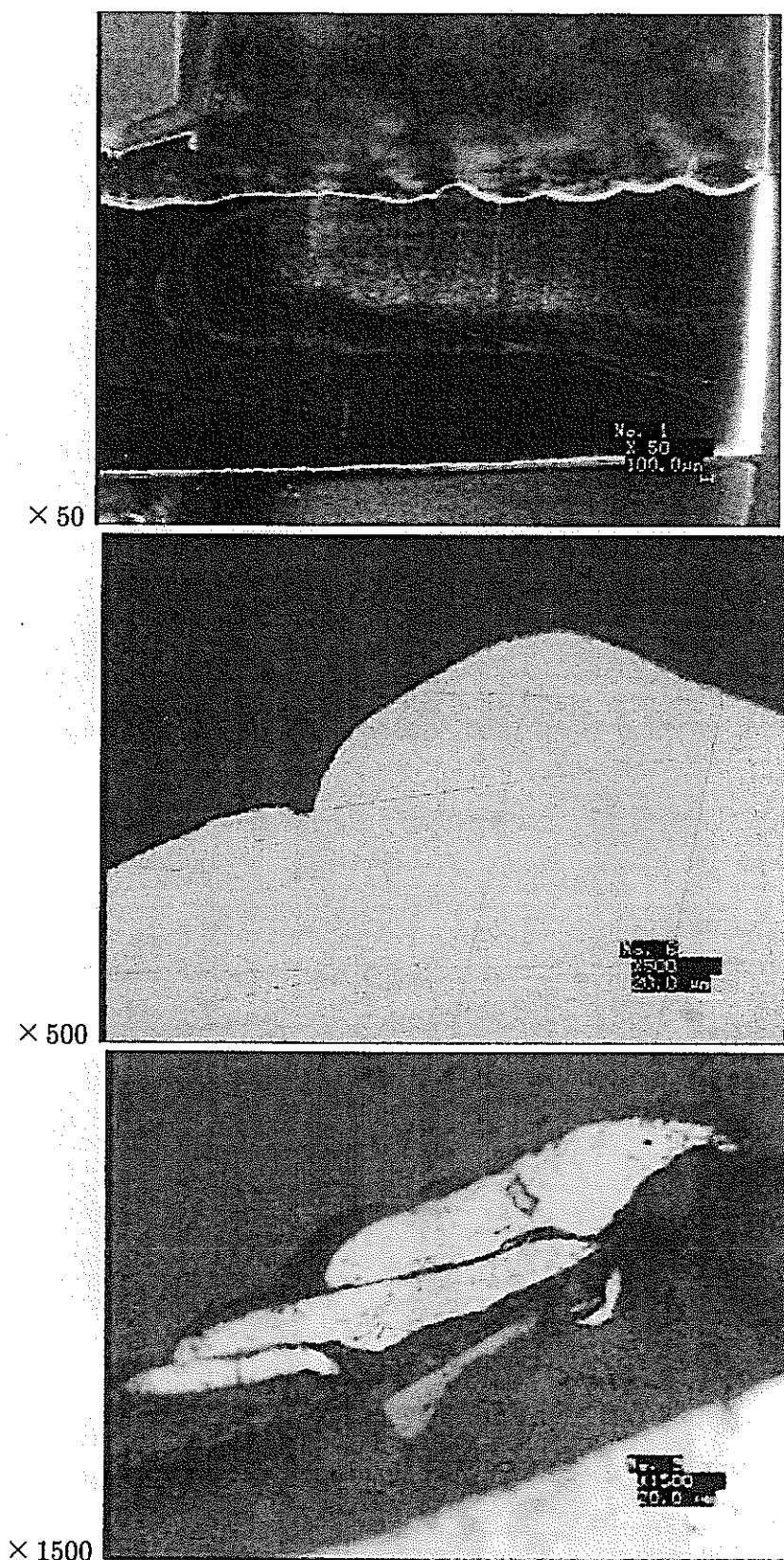


図 4.11 20A039 垂直方向中央 観察写真

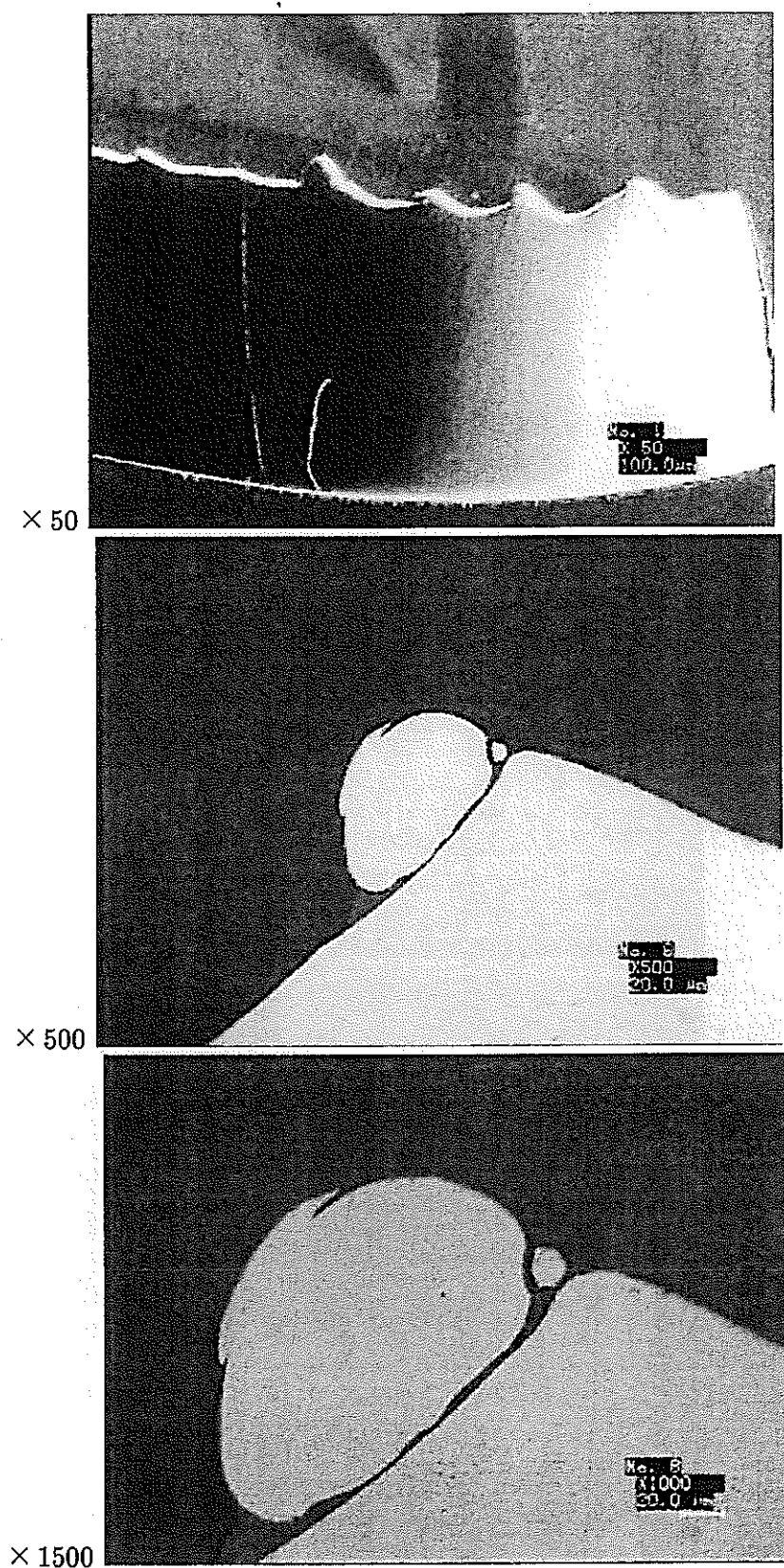


図 4.12 20A039 平行方向端 観察写真

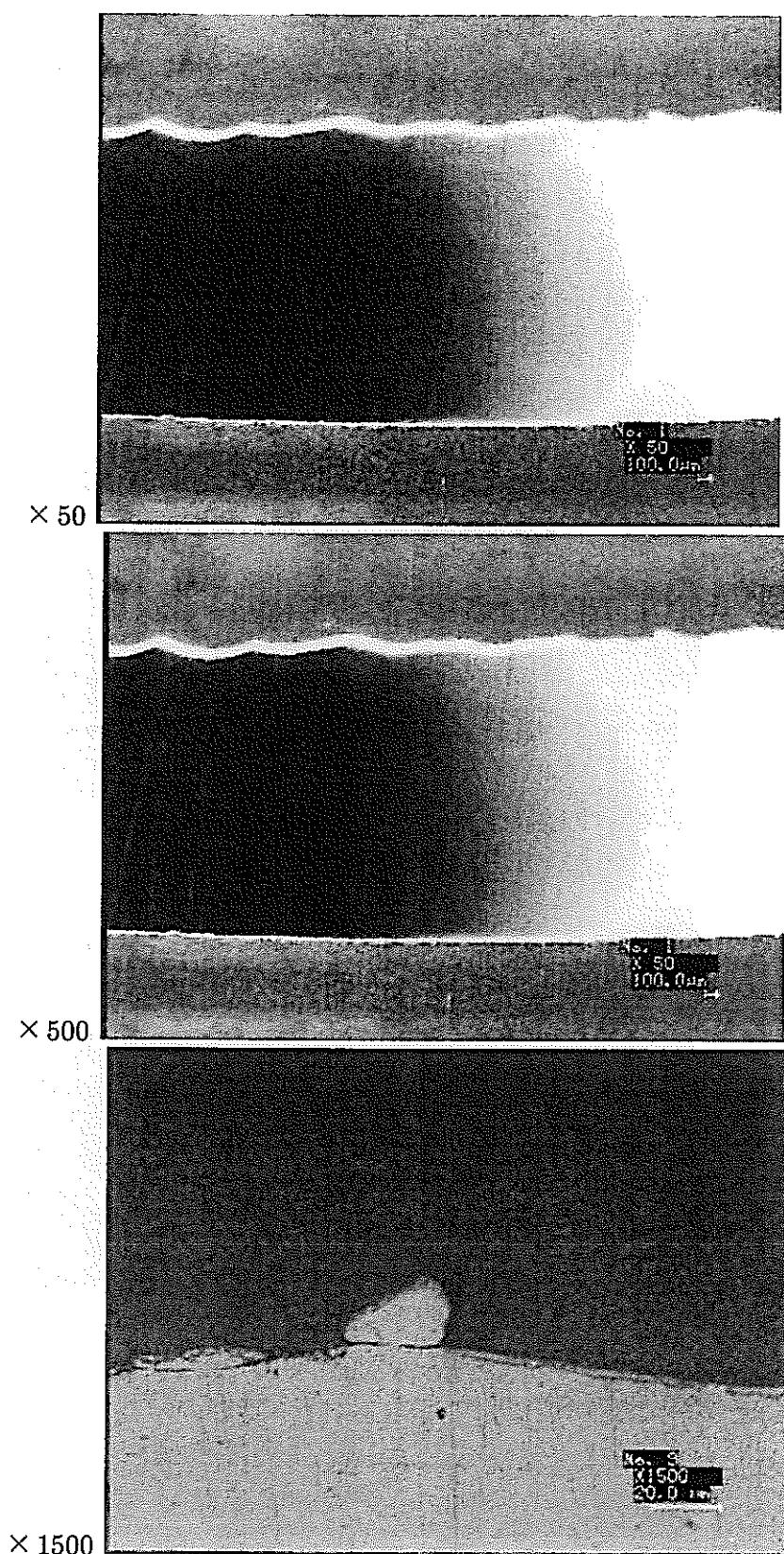


図 4.13 20A039 平行方向中間 観察写真

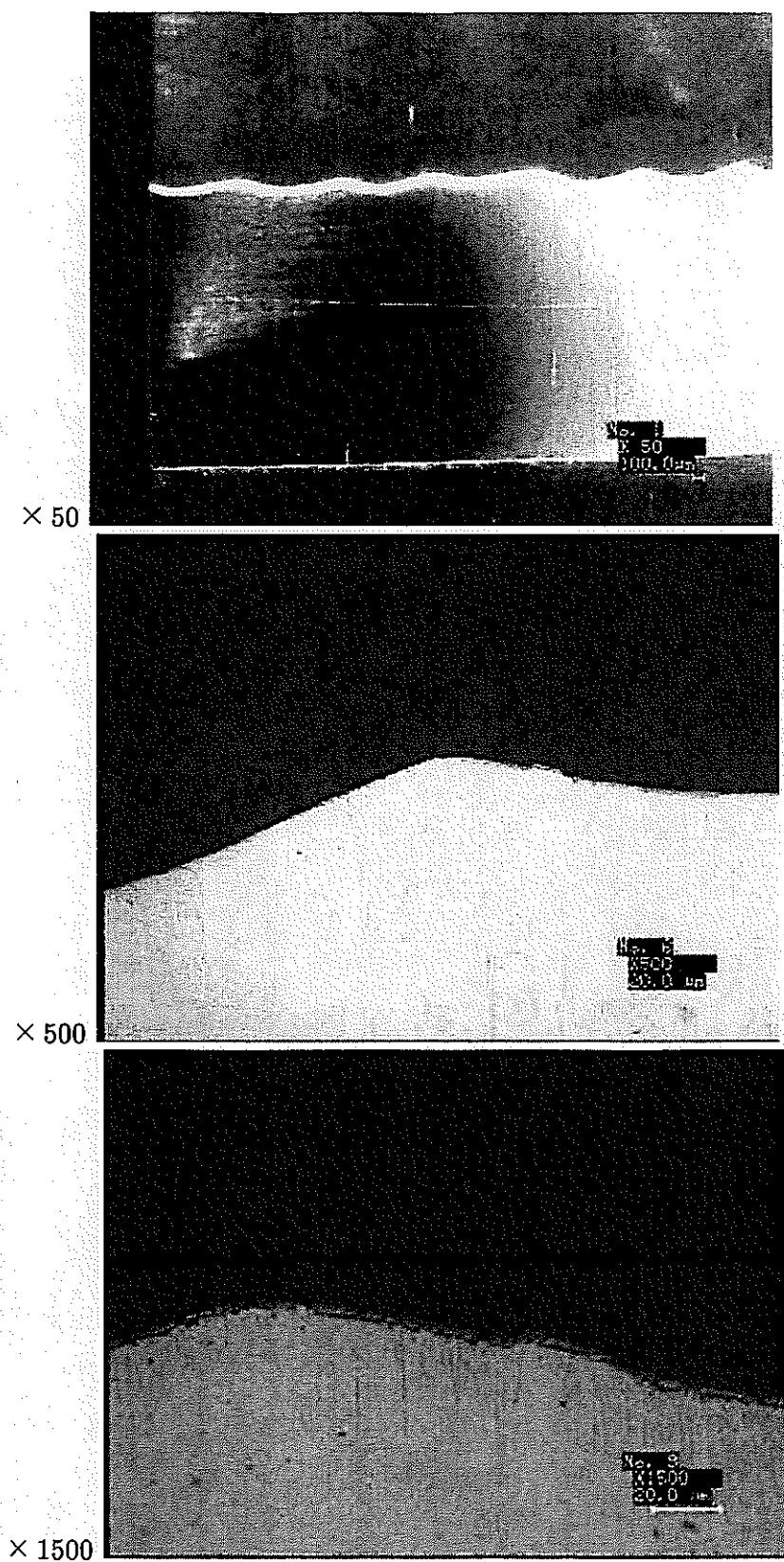


図 4.14 20A039 平行方向中央 観察写真

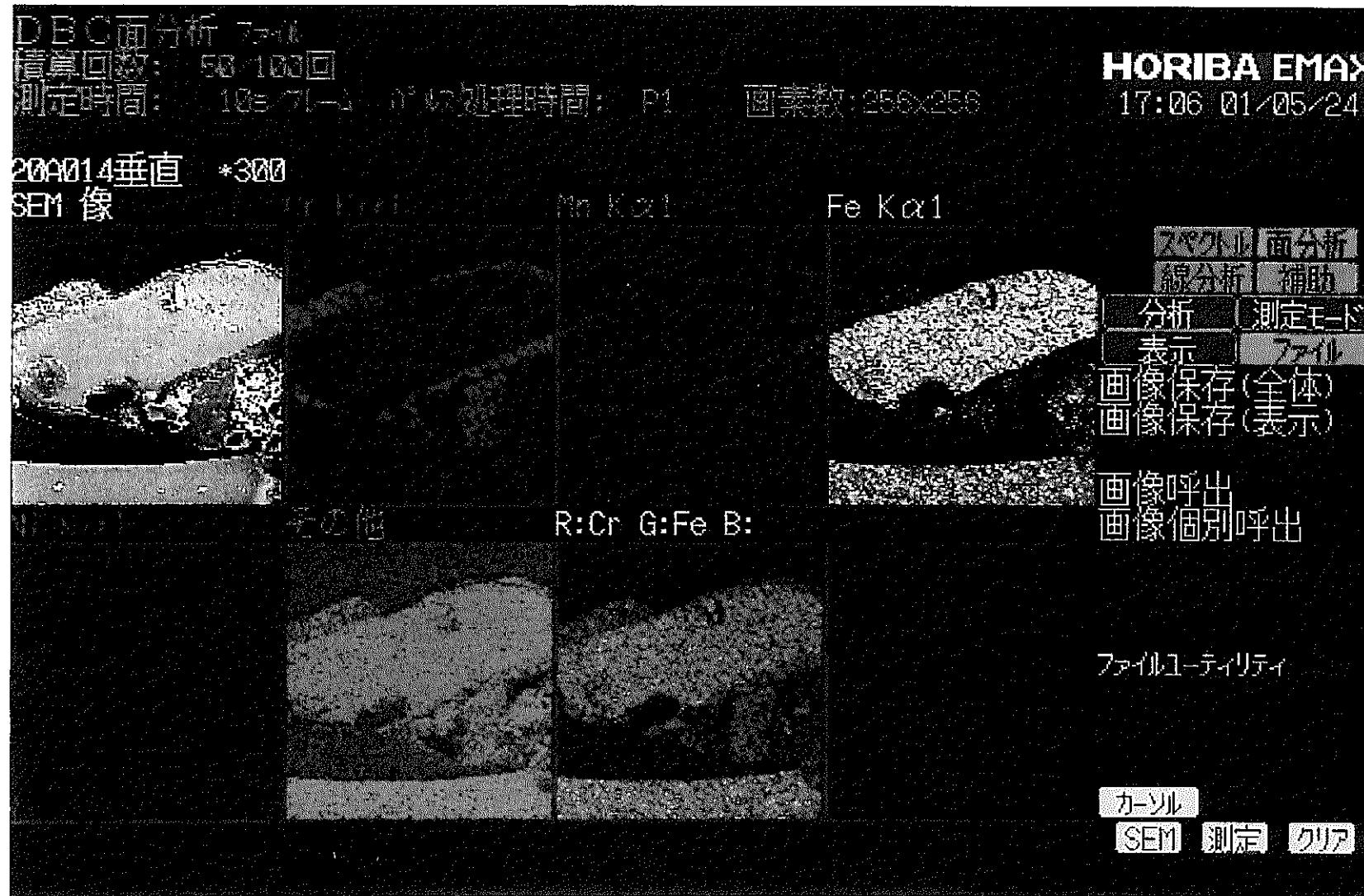


図 4.15 金属元素分析1-1 20A014垂直 中央(×300)

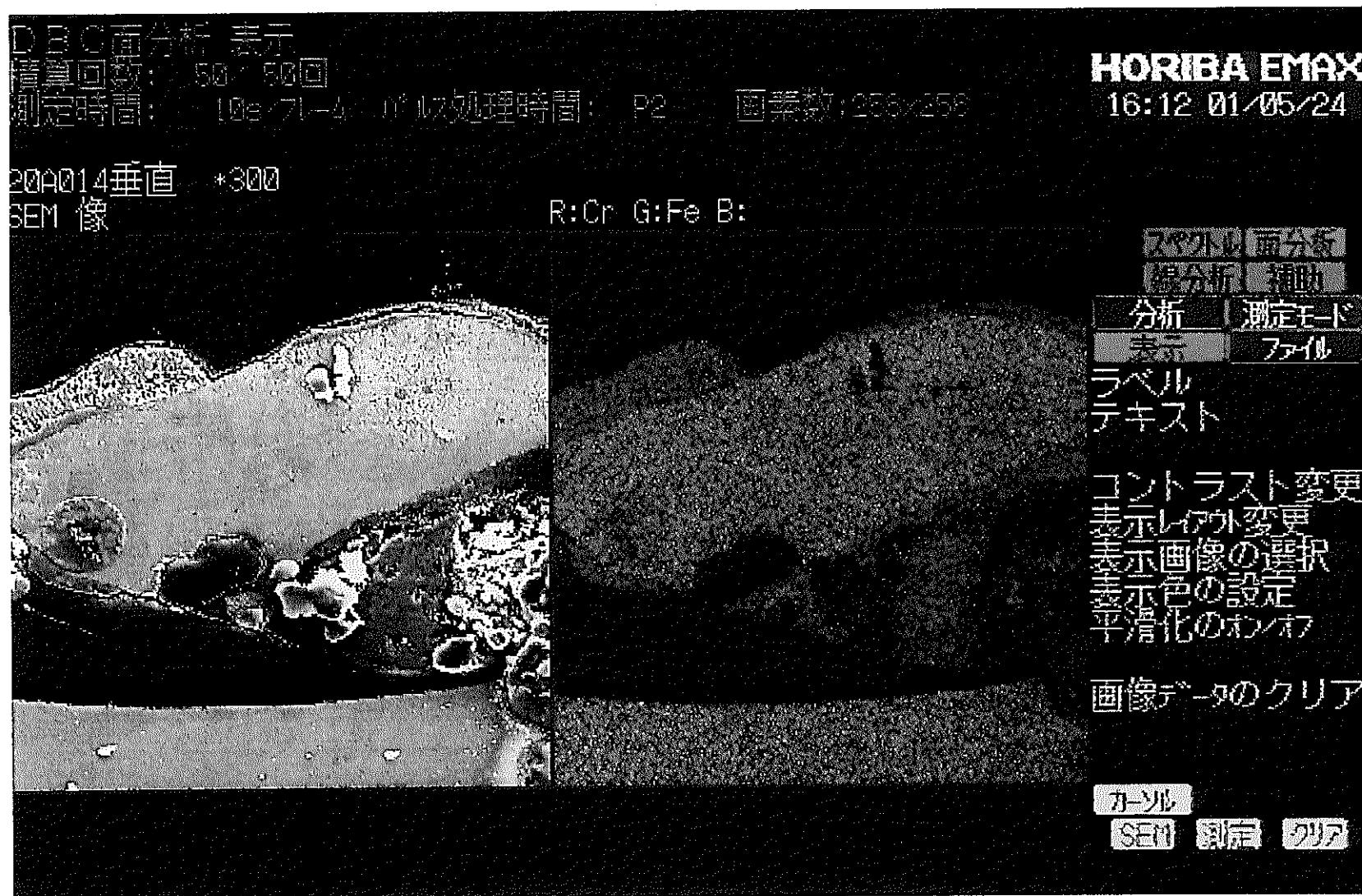


図 4.16 金属元素分析1-1 20A014垂直 中央(×300) 2



図 4.17 金属元素分析 1-1 20A014 平行 中央 (×300)

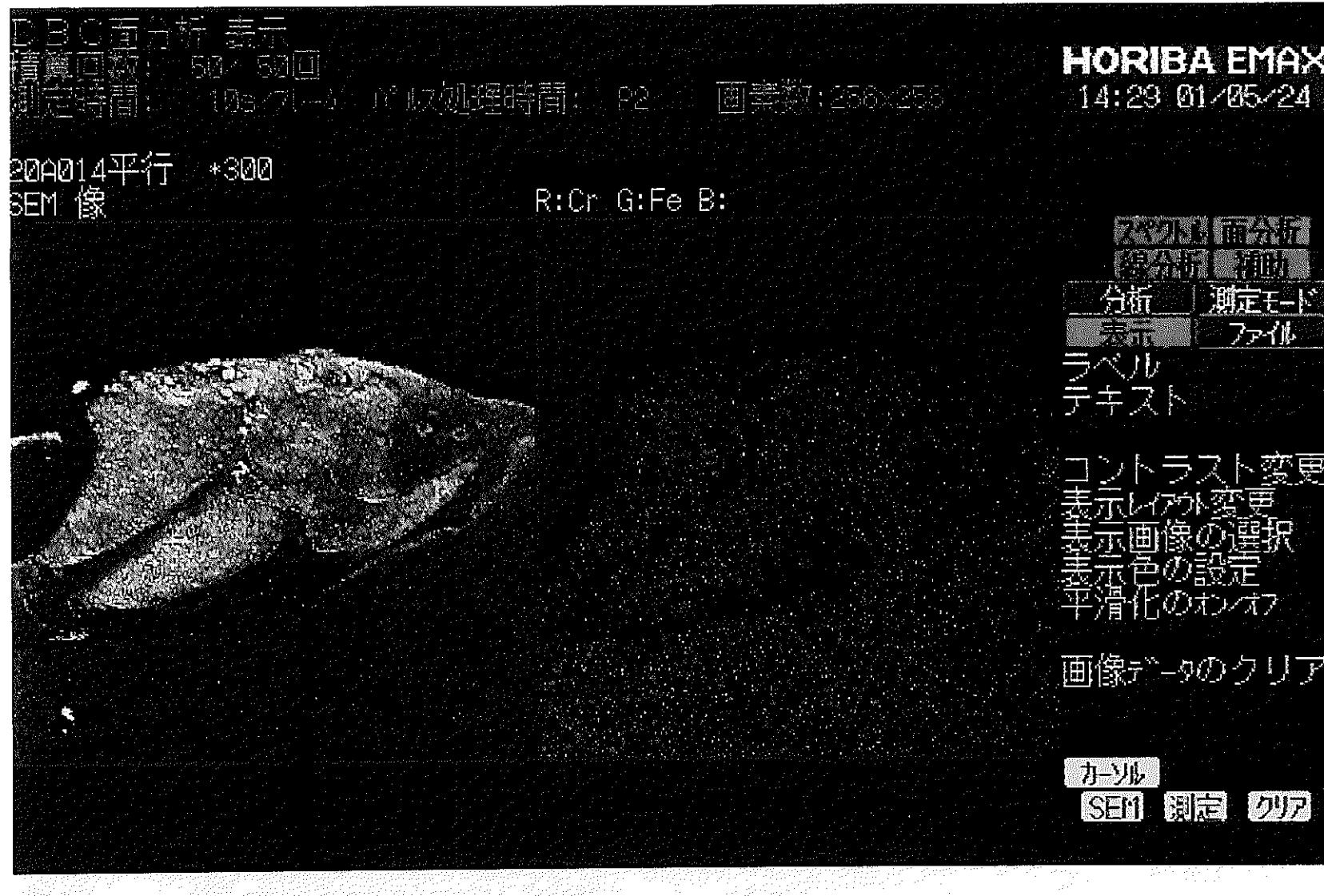


図 4.18 金属元素分析1-1 20A014平行 中央(×300) 2

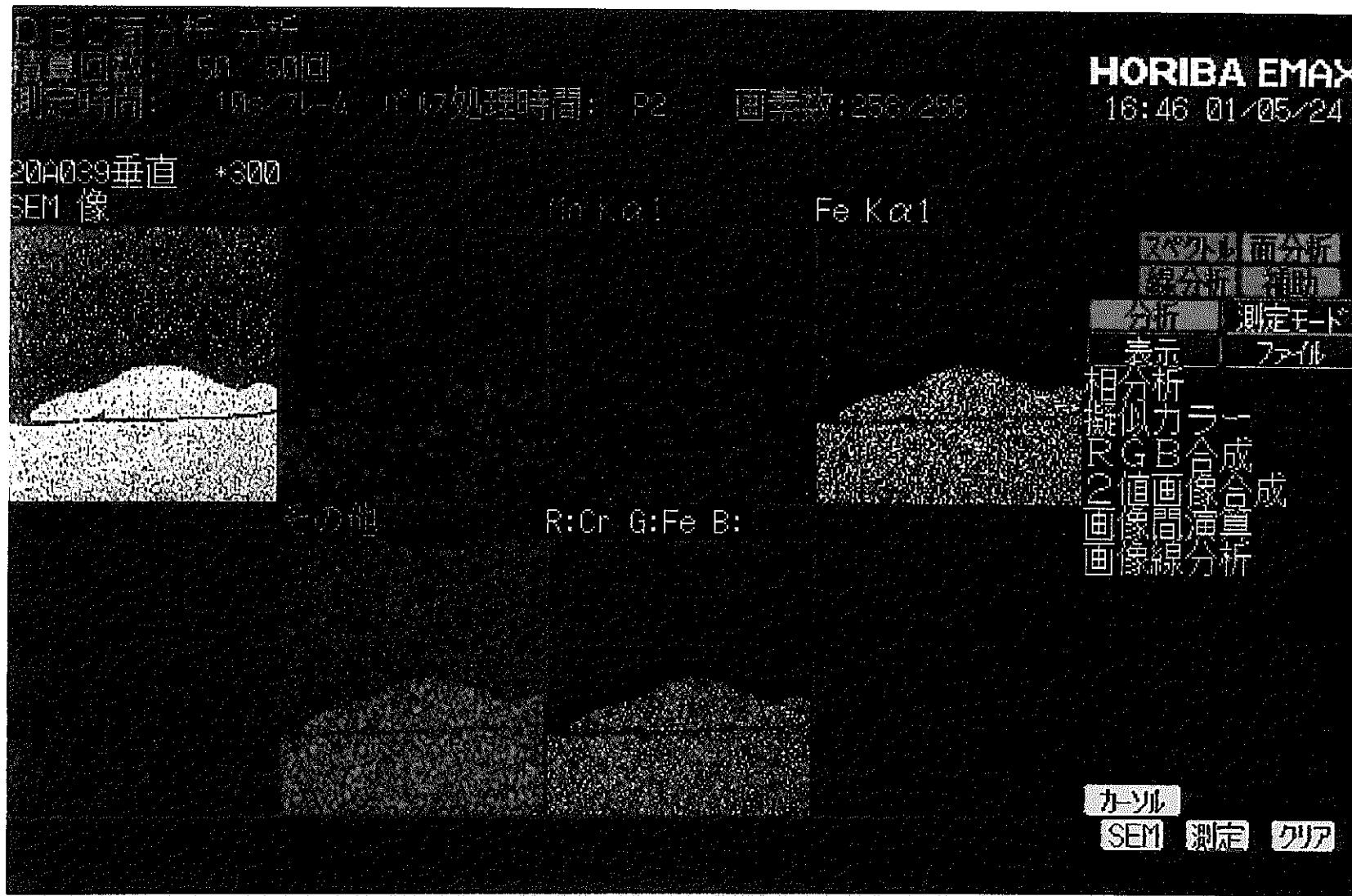


図 4.19 金属元素分析1-1 20A039垂直 中央(×300)

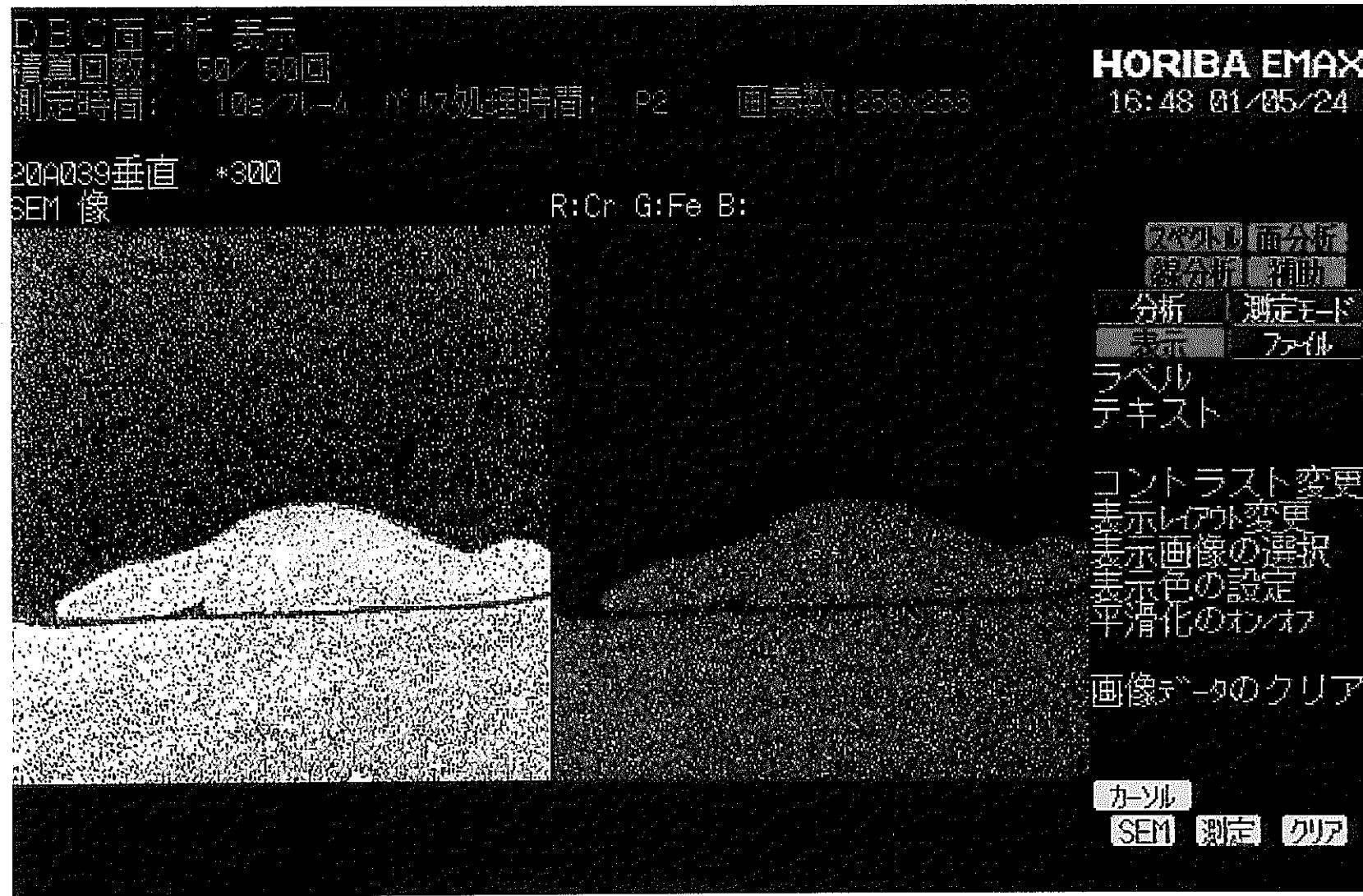
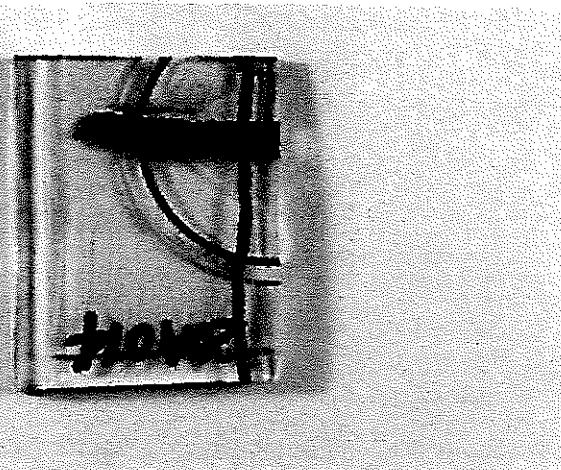
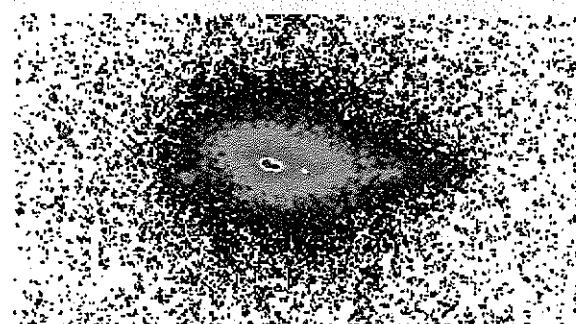


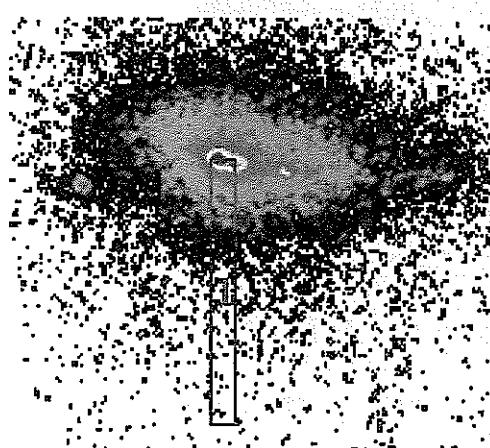
図 4.20 金属元素分析1-1 20A039垂直 中央(×300) 2



20A014 平行方向



イメージングプレート 画像

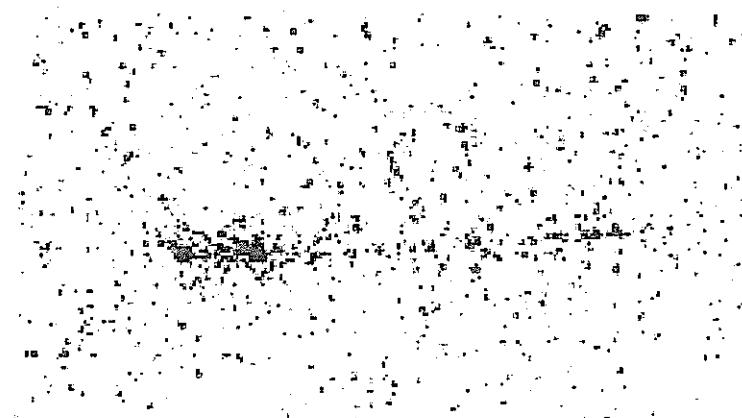


イメージングプレート 放射能強度プロファイル位置(Profile ID :1)

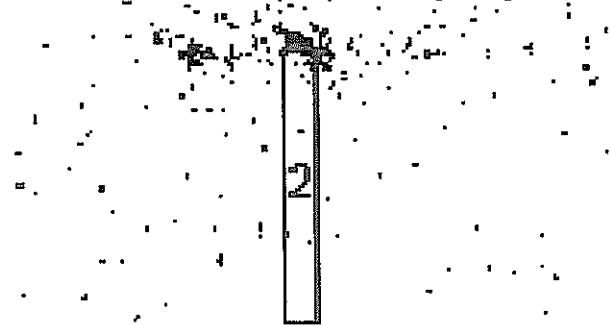
図 4.21 イメージングプレート 20A014 平行方向



20A014 垂直方向

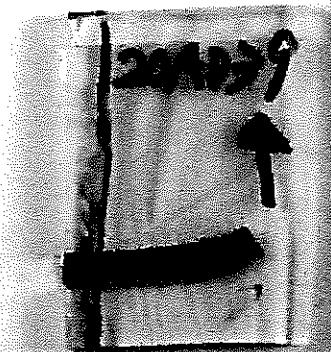


イメージングプレート画像

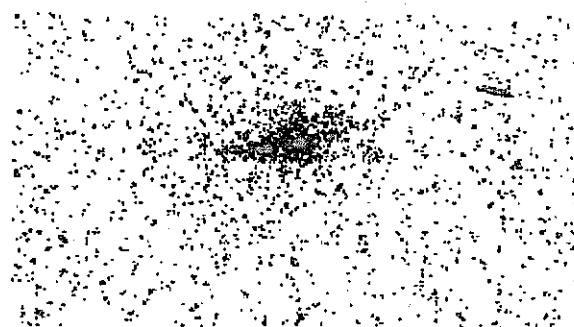


イメージングプレート 放射能強度プロファイル位置(Profile ID :2)

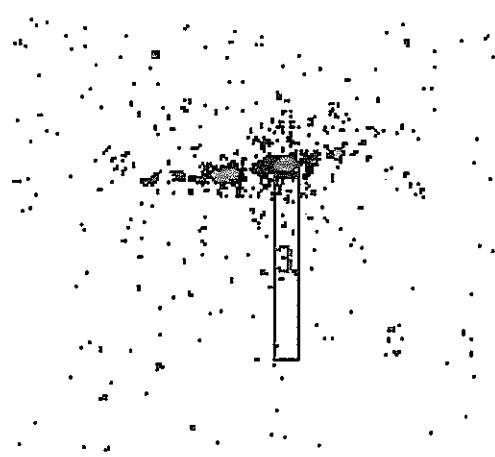
図 4.22 イメージングプレート 20A014 垂直方向



20A039 平行方向

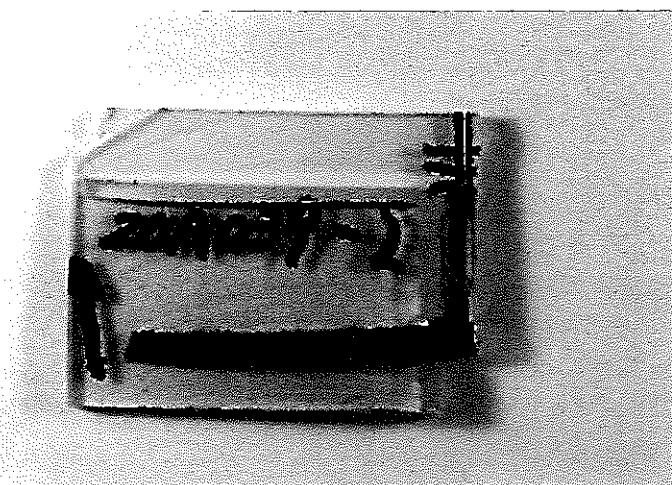


イメージングプレート 画像



イメージングプレート 放射能強度プロファイル位置(Profile ID :3)

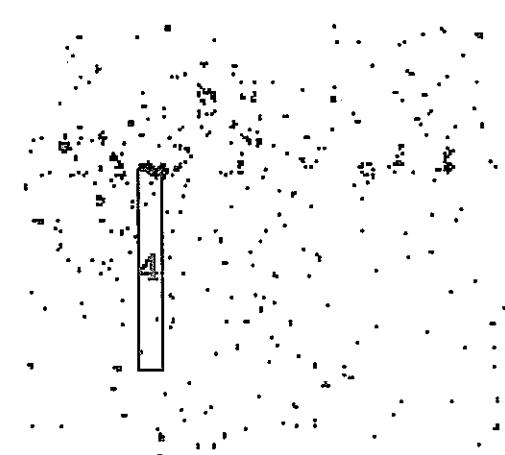
図 4.23 イメージングプレート 20A039 平行方向



20A039 垂直方向

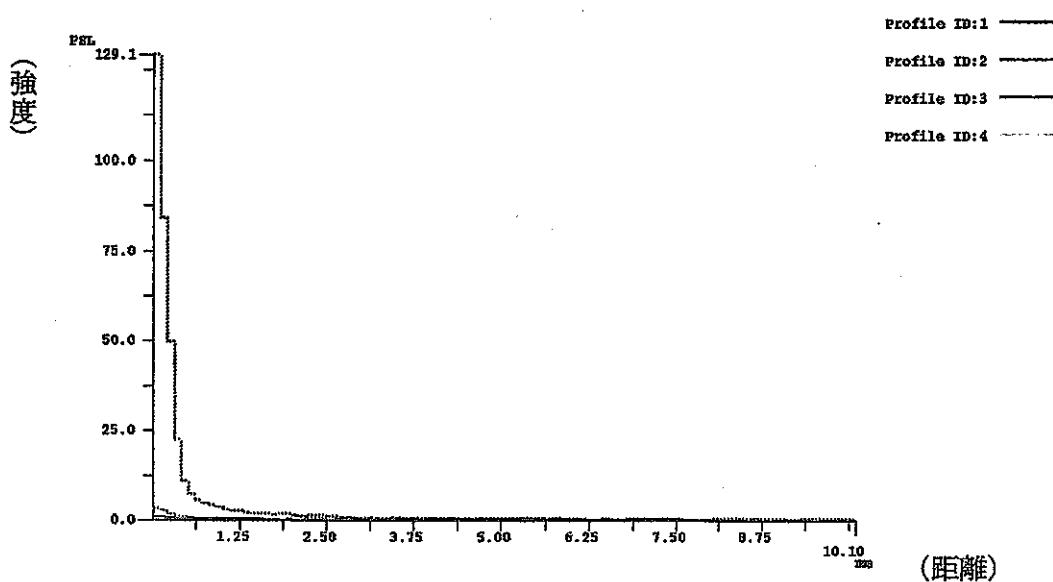


イメージングプレート 画像



イメージングプレート 放射能強度プロファイル位置(Profile ID :4)

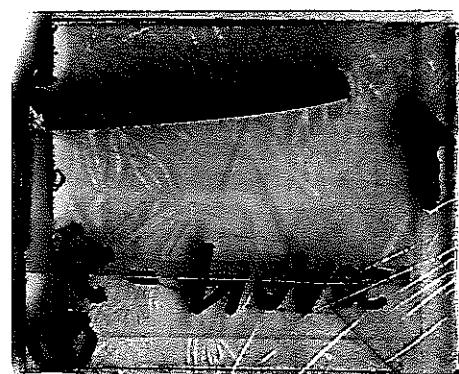
図 4.24 イメージングプレート 20A039 垂直方向



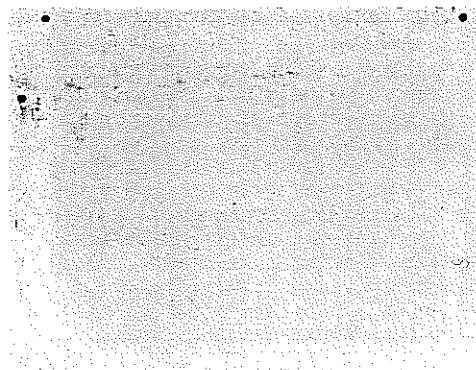
PSL：光刺激ルミネッセンス  
(放射能強度に比例する値)

Profile ID:1 ————— 20A014 平行方向試料  
Profile ID:2 ----- 20A014 垂直方向試料  
Profile ID:3 -·- 20A039 平行方向試料  
Profile ID:4 -·-- 20A039 垂直方向試料

図 4.25 イメージングプレート 放射能強度プロファイル解析結果



撮影位置



ARG画像

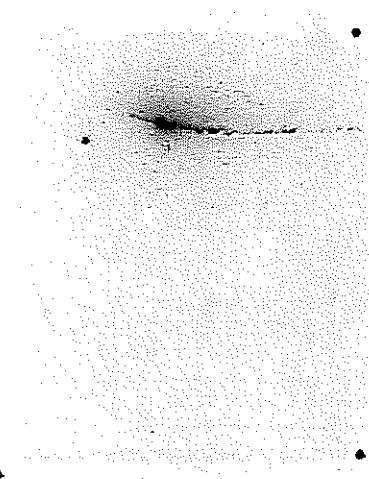


20A014 垂直方向 ARG マッピング

図 4.26 ARG 20A014 垂直方向



撮影位置



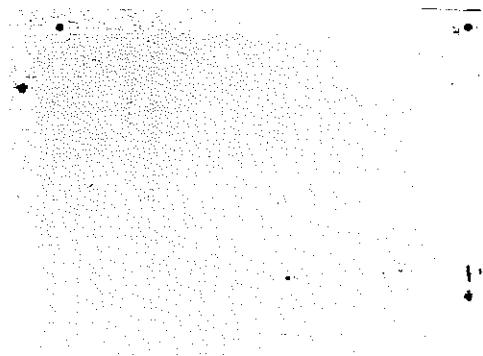
ARG画像

20A014 平行方向 ARG マッピング

図 4.27 ARG 20A014 平行方向



撮影位置



ARG画像

20A039 垂直方向 ARG マッピング

図 4.28 ARG 20A039 垂直方向



撮影位置



ARG画像

20A039 水平方向 ARG マッピング

図 4.29 ARG 20A039 平行方向

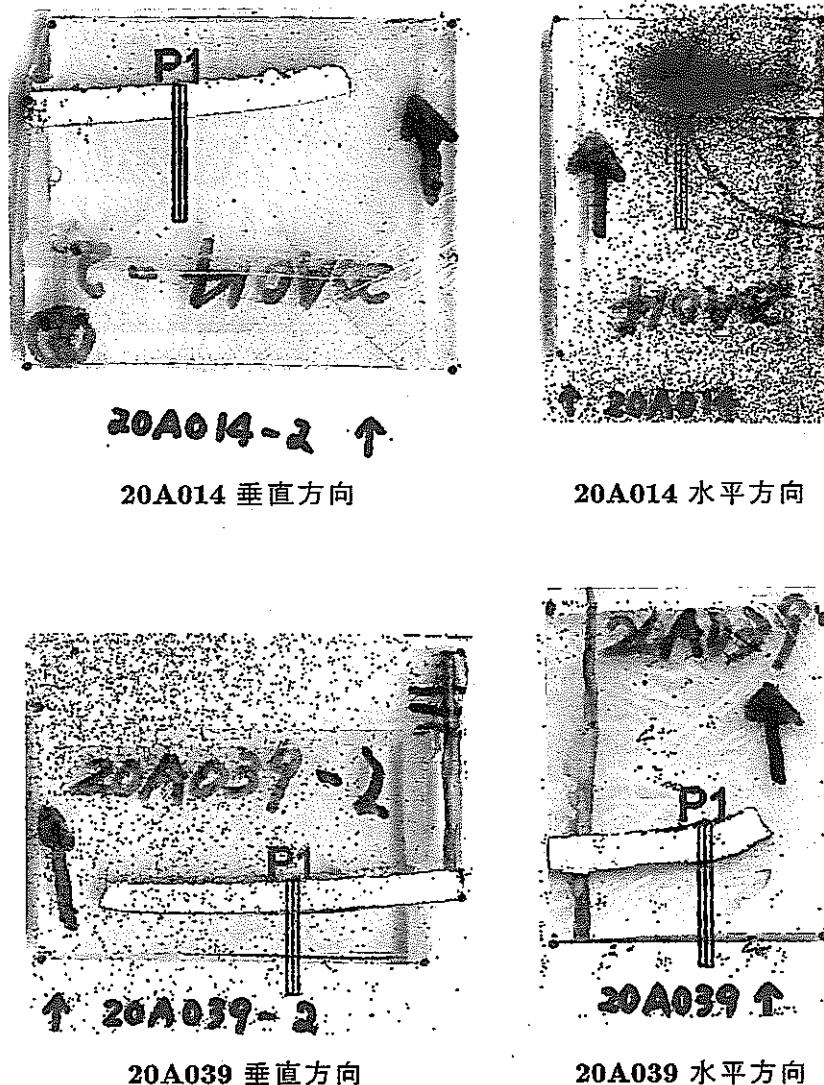


図 4.30 ARG プロファイル位置

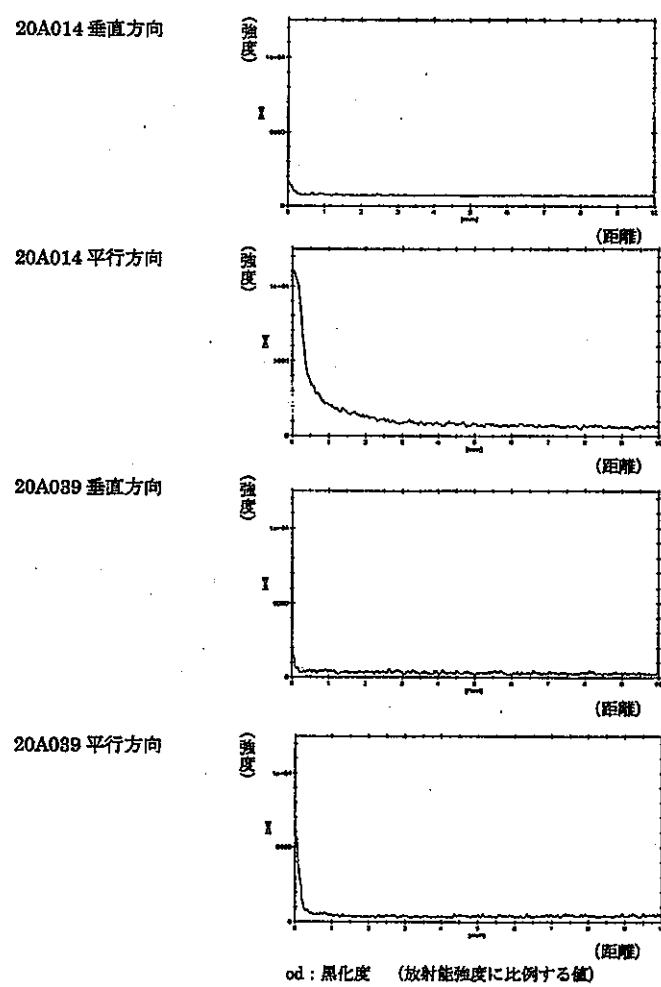


図 4.31 ARG 放射能強度プロファイル解析結果

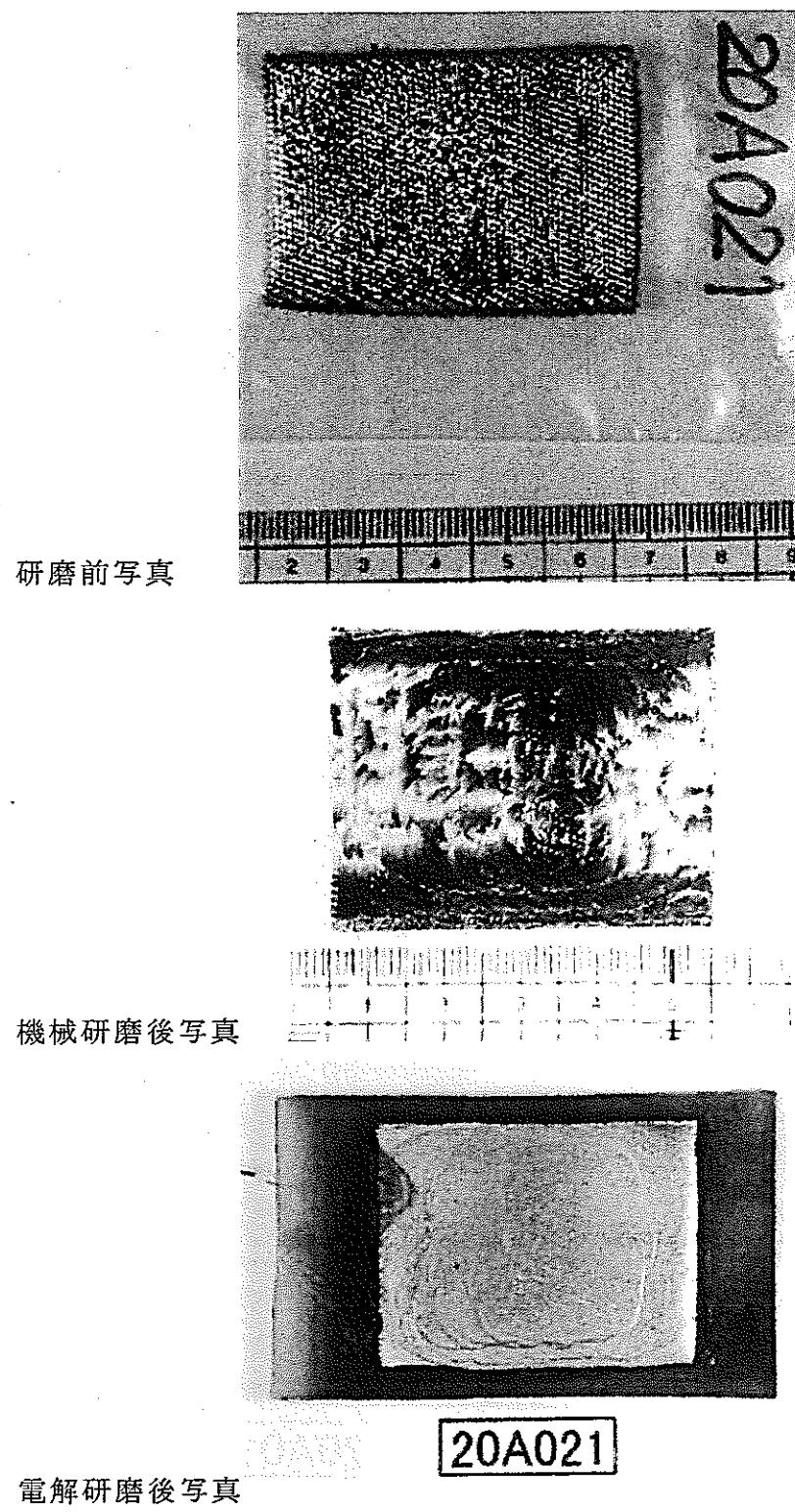
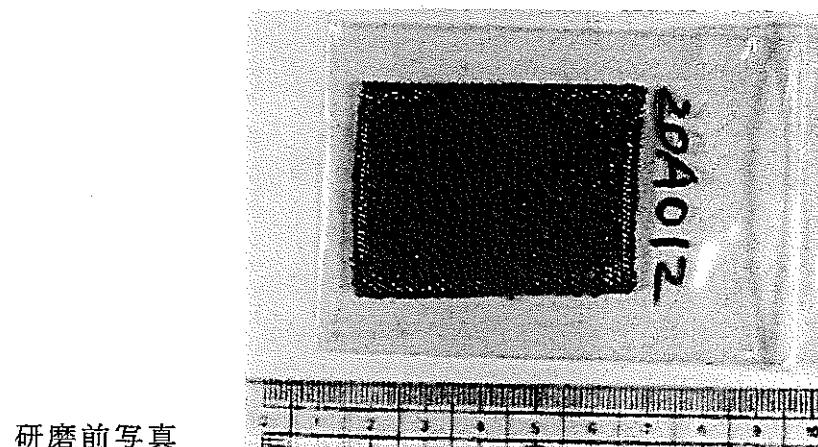
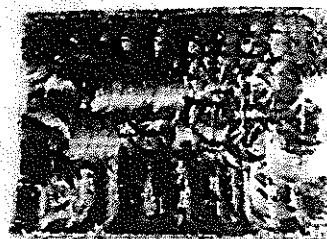


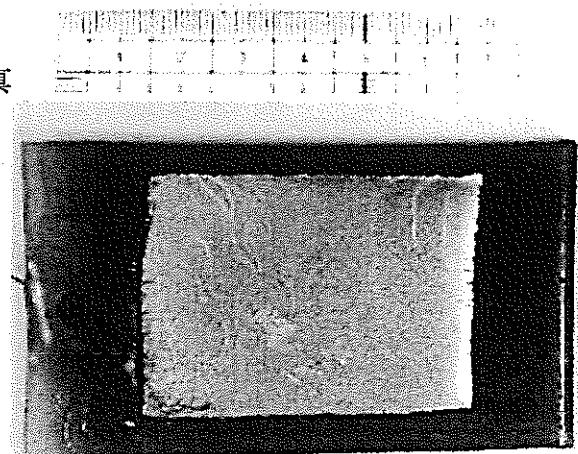
図 4.32 研磨前後 (20A021)



研磨前写真



機械研磨後写真



電解研磨後写真

図 4.33 研磨前後 (20A012)

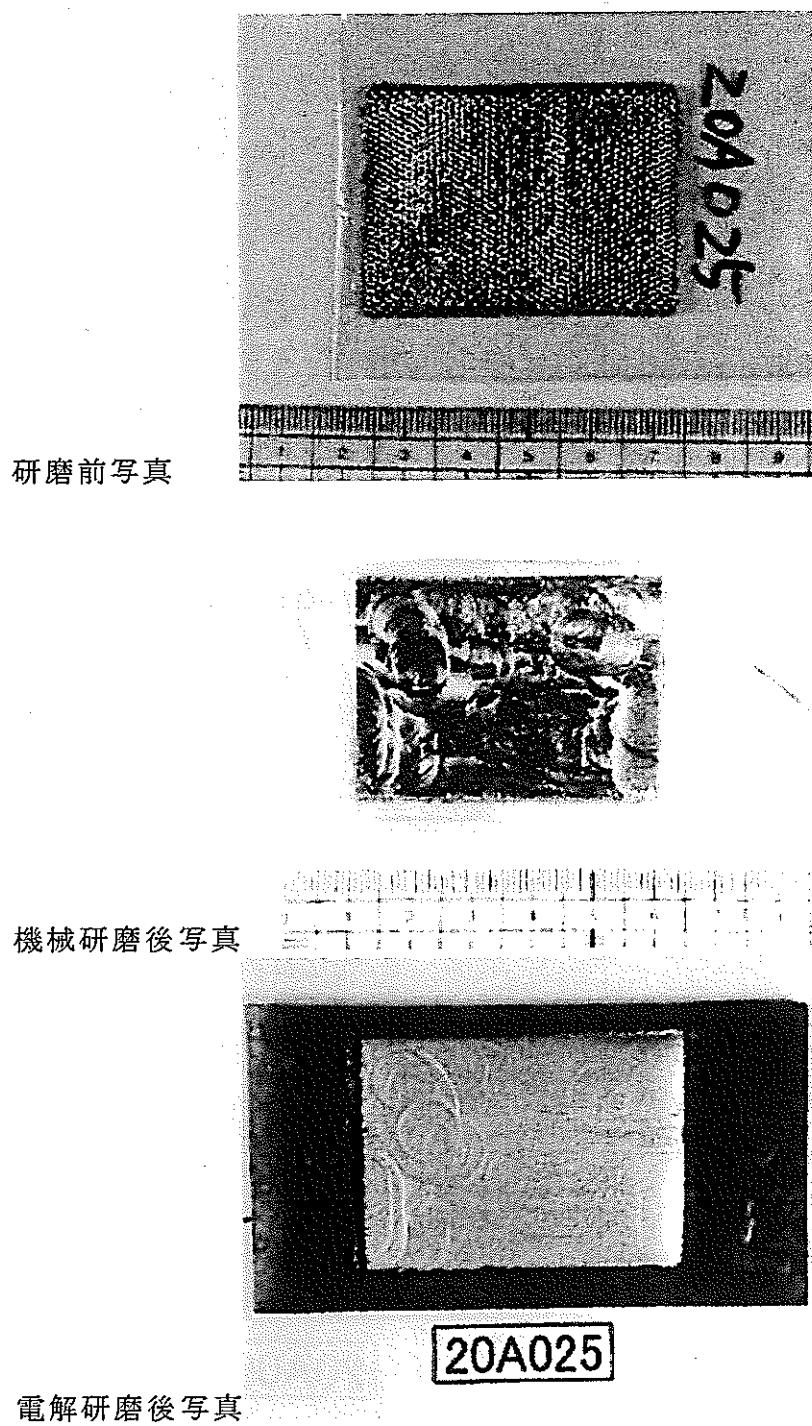


図 4.34 研磨前後 (20A025)

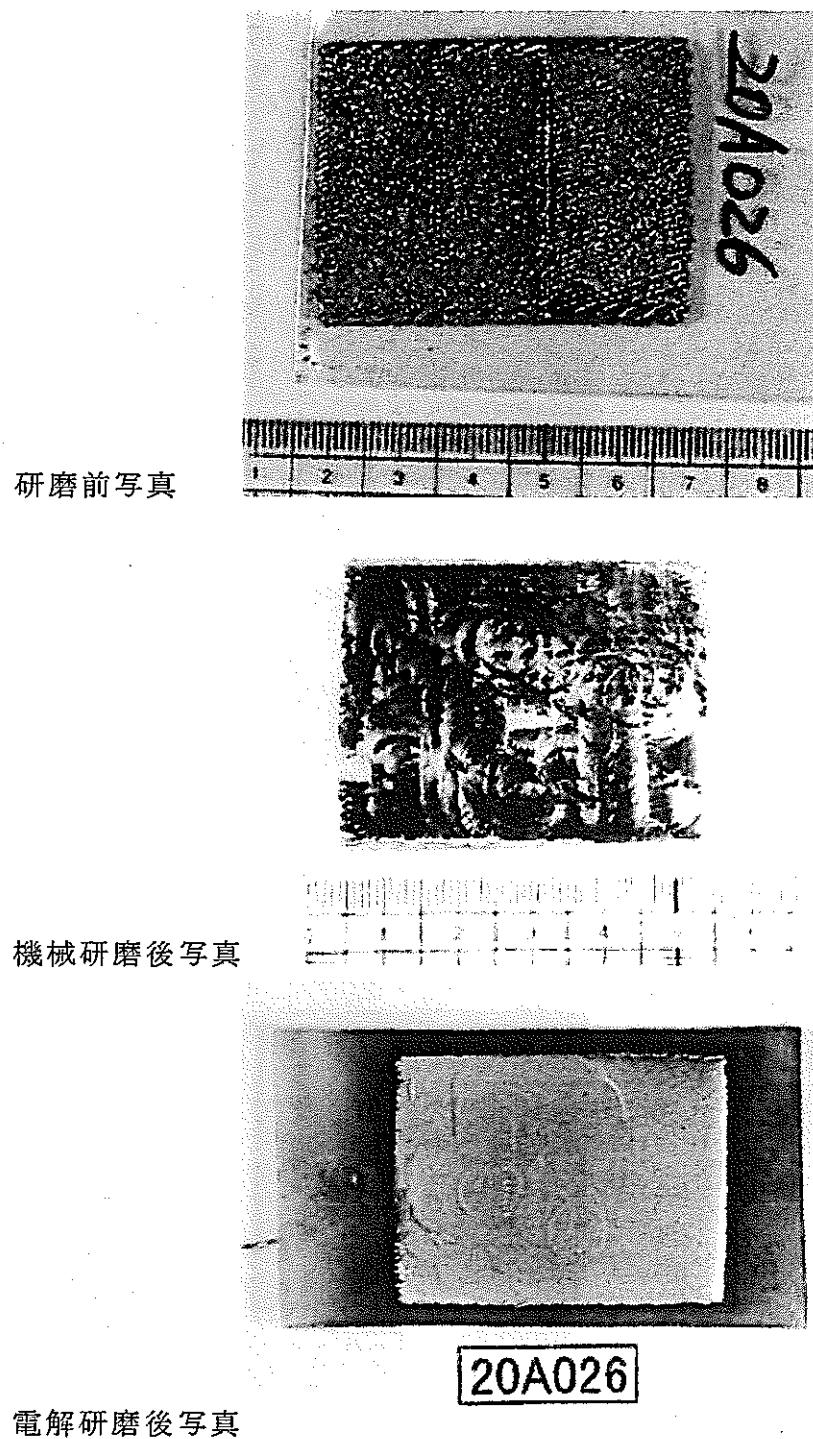


図 4.35 研磨前後 (20A026)