

[課題番号] 2007B1814

[実施課題名] CO<sub>2</sub>レーザー照射によるファイバ融着接続における光ファイバ内部構造変化の Spring-8 放射光光源を用いた X 線マイクロ CT 観察による研究

[使用ビームライン] BL47XU

[実験責任者所属機関及び氏名] NTT フォトニクス研究所 小池真司

[共同研究者] 長瀬 亮 (NTT フォトニクス研究所)、 梶原堅太郎 (JASRI)、  
鈴木芳生 (JASRI)、 上杉健太郎 (JASRI)、 竹内 晃久 (JASRI)  
渡辺義夫 (JASRI)

## 1. 背景

大容量光通信の普及により、通信装置内ボード上において光ファイバの高集積化が益々求められている。ボード内布線ファイバ融着接続においては、従来型アーク放電融着接続を変えて、ボード搭載した光ファイバ接続部への CO<sub>2</sub> レーザ照射によりファイバ融着を行う簡易手法が提案されている[1](図1参照)。

しかしながら、レーザー融着後のファイバ機械強度の低下が報告され[2]、様々な設置状態で十分な接続信頼性を持つ融着条件を得るために、融着部のファイバ内部構造の非破壊観察が行える手法を明らかにすることで、効率的に融着プロセスを確立できる可能性がある。

また、アーク放電融着についても、さらなる機械強度向上が望まれ、その強度劣化機構については放電過程によるファイバの変質が関係していると推定され [3]、融着部のファイバ変質状態を明らかにすることが重要である。

これまでに、筆者らは産業用 X 線 CT (Computed Tomography) を用い両融着手法により、融着部内部構造について観察を試み、本 CT 像をもとに画像解析を行うことにより得られた CG (Computer Graphics) 像は両者で特徴的な構造差異を示唆する結果であった。本観察手法によるファイバの変質構造が観察評価手法として確立できれば、破壊試験に基づくデータ累積手法ではなく、機械強度向上が期待できるプロセス条件が、効率的に得られる可能性がある。

しかしながら、これまで得られた産業用 X 線 CT 画像は十分な元画像品質では無いため、高画像分解能が期待できる Spring-8 放射光による CT 装置 (以下、SP- $\mu$ CT と呼ぶ) を用いて、コントラストを最適化して SN 比を良くし、融着部での局所的な密度揺らぎにつき、CT 像による観察可否の可能性を検討することにした。

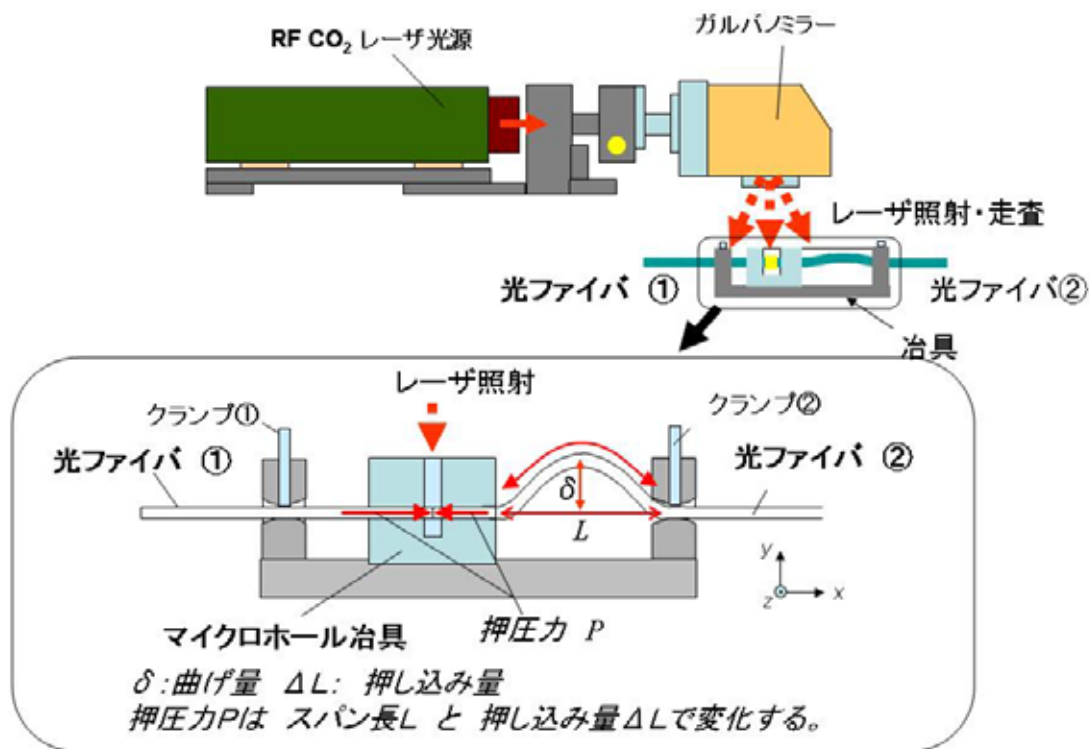


図1 ボード上光ファイバ融着を実現する光ファイバたわみを利用したレーザ融着方法

## 2. サンプル作製条件と観察実験条件

CO<sub>2</sub> レーザ照射によるレーザ融着接続光ファイバサンプル、アーク放電融着により接続された光ファイバサンプル、標準サンプルである未処理光ファイバの3種類についてそれらの内部構造を高分解能  $\mu$ -CT 装置を保有する BL47XU で CT 観察を行った。特に、提案するレーザ融着手法[1]においては図1に示すように、屈曲する光ファイバのスパン長  $L$  を異なる値に設定することで、押圧力  $P$  を変化させることができる。本実験ではファイバ押圧力  $P$  を変え、レーザ融着サンプルとして3条件、 $L=8.5\text{mm}$ 、 $20\text{mm}$ 、ならびに  $25\text{mm}$  の3サンプルについて SP- $\mu$ CT 観察を試みた。SP- $\mu$ CT 観察にあたっては  $8\text{keV}$  の X 線エネルギーを用いた。

### 3. 結果および考察

#### 3.1 融着部SP- $\mu$ CT観察結果

図2にBL47XUにて得られたレーザ融着サンプルのSP- $\mu$ CT像を示す。図2に示すように、3サンプルともに、その融着界面には高い輝度を示す内包物が観察された。それら内包物サイズと挿入損失とは比例する関係を示し、内包物がレーザ融着による挿入損失の原因のひとつになっている可能性が、放射光 SPring-8 によって始めて示された。

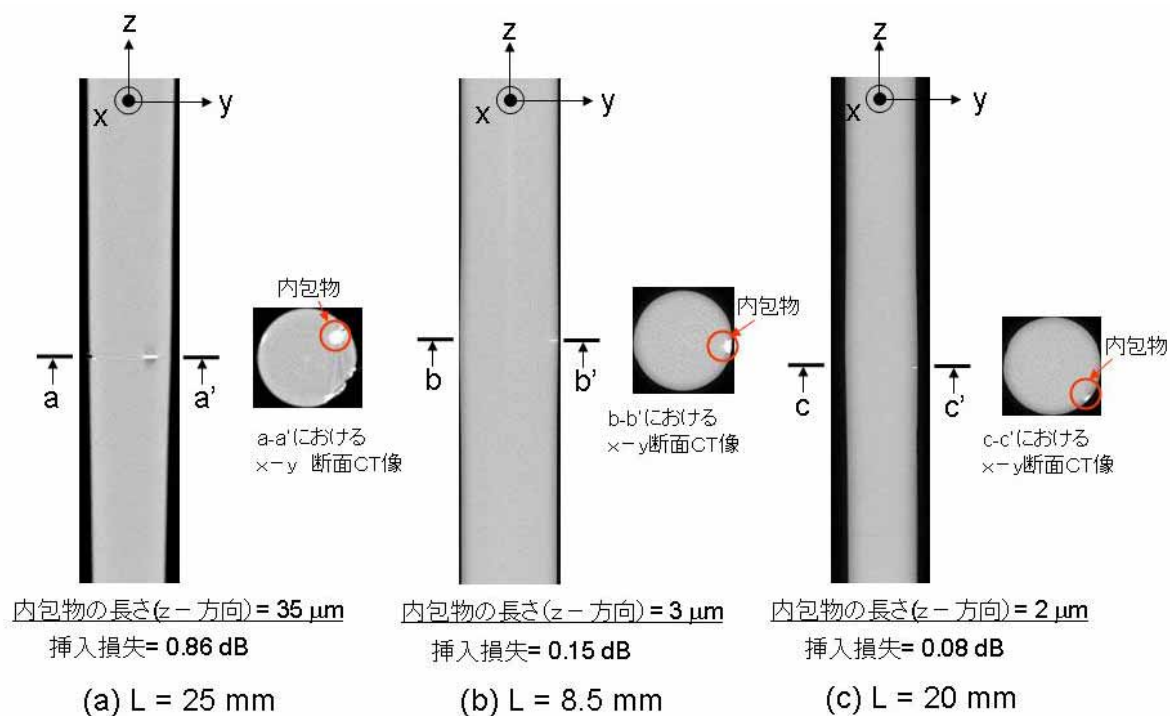


図2 SP- $\mu$ CTによるレーザ融着光ファイバの観察結果  
(z軸は光ファイバ長手方向に対応する。光ファイバの直径は $\sim 125 \mu\text{m}$ である。)

一方、アーク放電融着界面ならびに標準光ファイバサンプルについても、同様に観察を試みたものの、いずれも、これらの輝点は観察されなかった。図3には、その結果の一例として標準光ファイバの観察結果を示した。図中にはファイバ長手方向(図中 Z 方向)  $\sim 650 \mu\text{m}$  長におよぶ観察領域に対して、ファイバ x - y 断面観察 SP- $\mu$ CT 像を一定間隔で示している。図中に示す SP- $\mu$ CT 像の観察においては、均質なテクスチャを示す画像がほぼ全領域にわたり観察され、レーザ融着サンプルに見られたものと同様の内包物は見出せなかった。

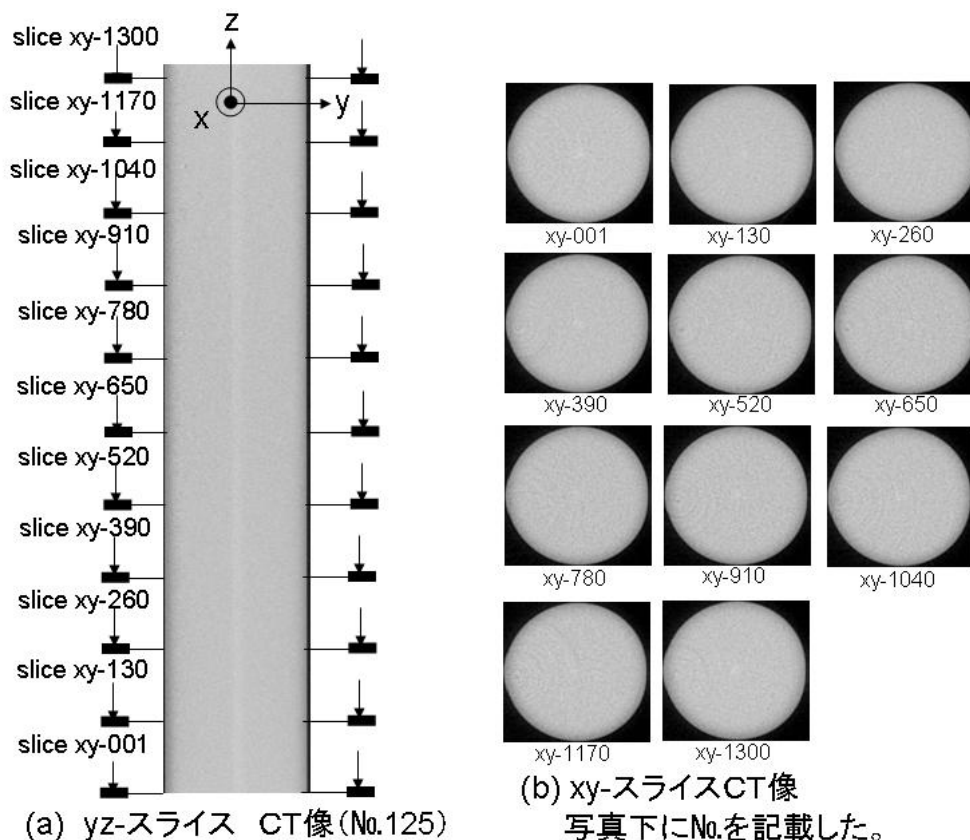


図3 SP- $\mu$ CTによる未処理光ファイバの観察結果  
(z軸は光ファイバ長手方向に対応する。光ファイバの直径は $\sim 125\ \mu\text{m}$ である。)

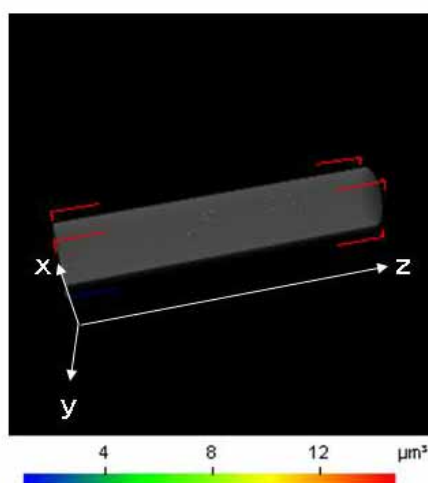
### 3.2 融着部SP- $\mu$ CT像 porosity 解析

次に、CT画像解析ソフトウェア VGStudio MAX に含まれる porosity 解析ツールを使って、光ファイバ SP- $\mu$ CT 像中の線吸収係数のゆらぎに相当する値の解析を行った。

porosity 解析は解析対象母材に対して、“潜在的な欠陥”が占める割合を CT 像から算出を行う解析機能である。潜在的な欠陥は、光ファイバ SP- $\mu$ CT 像中で線吸収係数が小さくなっている部分に対応する。線吸収係数が小さくなる原因には多様な要因が想定されるものの、ここでは母材密度が“粗”な状態に対応するものと単純化して考える。本解析を光ファイバ長手方向(z軸方向)で各 z 位置の x-y 断面に相当する SP- $\mu$ CT 像で、それぞれ潜在的な欠陥(以下、強調する場合以外は潜在欠陥と呼ぶ)密度を求め、それを光ファイバ長手方向(z軸方向)に解析を行った結果をまとめることで、光ファイバの長手方向の潜在欠陥の空間密度分布、すなわち、ここではファイバ母材の密度ゆらぎ分布が表現可能であると想定し、解析を進めた。なお、潜在欠陥の判定は、解析ソフトウェアにおける quality limit の設定によって変化する。本報告では、その値を 0.05 に設定して解析を行った。

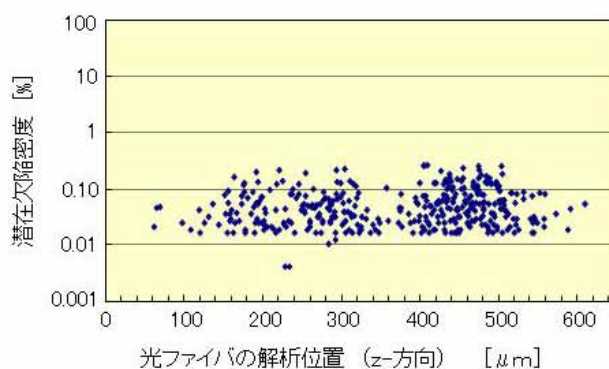
### 3.2.1 標準サンプルの解析結果

図4には、標準サンプルとしての未処理の光ファイバの porosity 解析結果を示す。同図(a)では潜在欠陥を画像処理により抽出し、その潜在欠陥の空間分布を3次元CG像で示している。同図(b)ではその密度分布を定量化した結果(各z位置の光ファイバx-y断面スライス SP- $\mu$ CT 像において、欠陥面積が光ファイバ面積に占める割合)を示している。未処理の光ファイバは均質なガラス密度分布と考えられるものの、本結果で図示するように潜在欠陥密度分布を示す結果が得られた。しかしながら、porosity 解析の定量解析結果である同図(b)では、その潜在欠陥密度値は小さく、0.01%から0.10%の間を推移している様子が見られる。また、前提として標準サンプルが均質であることから、本潜在欠陥密度値は測定系のバックグラウンドノイズレベルに相当すると判断し、以下に述べる解析結果の評価・考察の可否の基準とした。



(a) 光ファイバ 潜在欠陥抽出の画像処理を行った3次元CG像

(褐色部分が光ファイバ領域であり、  
図中には抽出した潜在欠陥も合わせて表示。  
潜在欠陥はサイズによって色分けして表示。)



(b) 光ファイバ中の潜在欠陥密度分布解析結果

図4 未処理光ファイバのSP- $\mu$ CT像解析結果

### 3.2.2 レーザ融着サンプルの解析結果

次に、レーザ融着サンプルの解析結果について述べる。

図5にはスパン長  $L=20\text{mm}$  にて作製したレーザ融着サンプルの SP- $\mu\text{CT}$  像の porosity 解析結果を示す。同図(a)では潜在欠陥を抽出し、潜在欠陥の空間分布を3次元CG像にて示している。同図(b)ではその密度分布を定量化した結果(各z位置の光ファイバ x-y 断面スライス SP- $\mu\text{CT}$  像において、潜在欠陥面積が光ファイバ面積に占める割合)を示している。同図(a-i), (a-ii)では図2に示すレーザ融着に特徴的な白い輝点がここでも抽出できており、この位置が融着界面であることを示している。同図(b)中の定量解析結果では融着界面を境に潜在欠陥密度値が光ファイバと側でそれぞれ明確な差異となって現れる特徴的な分布を示している様子が分かる。しかしながら、その潜在欠陥密度値は大部分が 0.01%から 0.1%内を推移し、バックグラウンドノイズレベルとほぼ同程度であることから、本条件での光ファイバレーザ融着部位のガラスの粗密分布を表しているとは推定することは難しい。

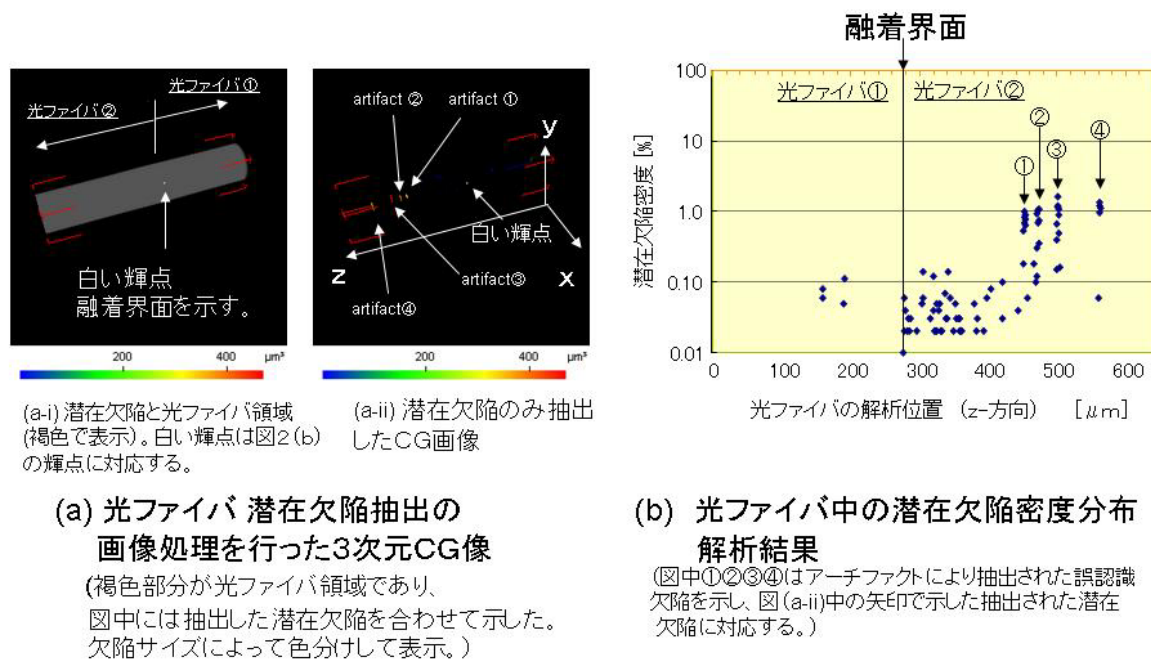
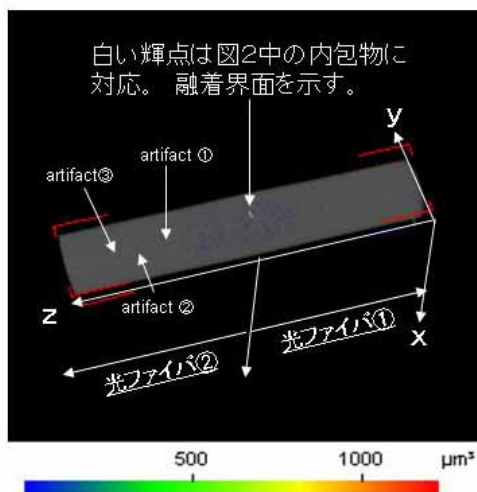


図5 レーザ融着( $L=20\text{mm}$ )光ファイバのSP- $\mu\text{CT}$ 像解析結果

一方、同図(b)中にはノイズレベルを十分超える 0.1%の値を示す、比較的大きな潜在欠陥密度(図中、 $\bullet$ 、 $\bullet$ 、 $\bullet$ として矢印にて表示)も観測されているが、これらは同図(a)中の3次元CG像中に画像処理により、抽出・図示された潜在欠陥(図中 artifact、 $\bullet$ 、 $\bullet$ 、 $\bullet$ として矢印にて表示)に対応している。これら欠陥はCT像に特徴的に現れるアーチファクトを原因とし、それらが欠陥として誤認識して抽出された結果と考えられ、実際の欠陥とは異なる。

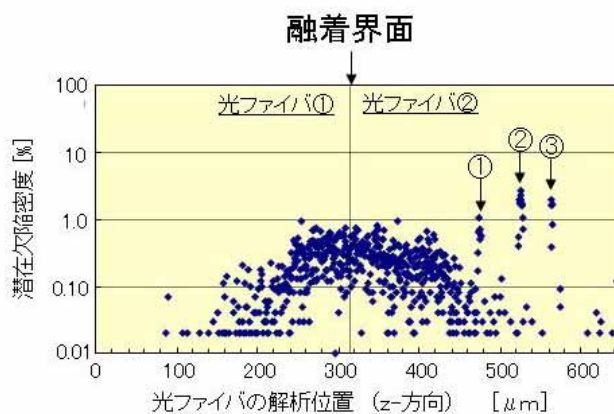


図6にスパン長  $L=8.5\text{mm}$  でレーザー融着にて作製したサンプルの SP- $\mu$ CT 像 porosity 解析結果を示す。同図(a)では潜在欠陥を画像処理によって抽出し、潜在欠陥の空間分布を3次元CG像にて示している。同図(b)ではその密度分布を定量化した結果(各z位置の光ファイバx-y断面スライスSP- $\mu$ CT像において、潜在欠陥面積が光ファイバ面積に占める割合)を示している。同図(a)の3次元画像処理結果を見ると、レーザー融着に特徴的な白い輝点がここでも抽出できており、この位置が融着界面を示している。また同図(b)の解析結果をみると、バックグラウンドノイズレベルの0.10%を超える潜在欠陥密度分布が融着界面でガウシアン分布状に観測でき、 $L=8.5\text{mm}$ の実験結果では融着界面付近でガラス密度が低下した状態が現れていると推定できる。一方、こちらでもアーチファクトによる潜在欠陥が観測され、同図(a),(b)両図中に、  
、  
として矢印にて表示した。



(a) 光ファイバ 潜在欠陥抽出の  
画像処理を行った3次元CG像

(褐色部分が光ファイバ領域であり、図中には褐色部分の光ファイバに埋没している抽出した潜在欠陥分布とアーチファクト(矢印)を示す。潜在欠陥はサイズで色分けして表示されている。)




(b) 光ファイバ中の潜在欠陥密度分布  
解析結果

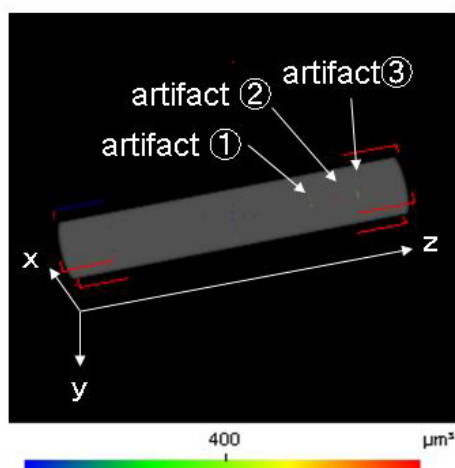
図中①②③はアーチファクトにより抽出された誤認識欠陥を示し、図(a)中の矢印で示した抽出された潜在欠陥に対応する。

図6 レーザ融着( $L=8.5\text{mm}$ )光ファイバのSP- $\mu$ CT像解析結果

### 3.2.3 アーク放電融着サンプルの解析結果

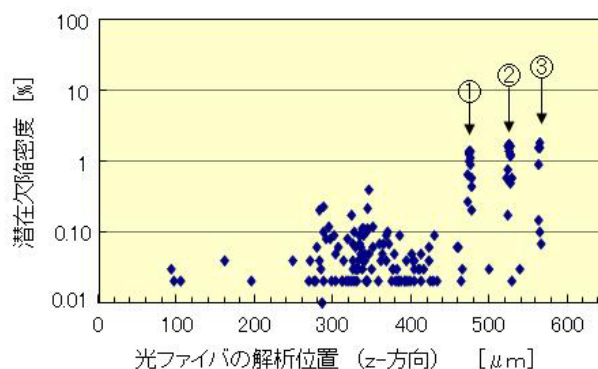
図7にはアーク放電融着による光ファイバサンプルのSP- $\mu$ CT像 porosity 解析結果を示した。同図(a)では潜在欠陥を画像処理によって抽出し、その潜在欠陥の空間分布を3次元CG像にて示している。同図(b)ではその密度分布を定量化した結果(各z位置の光ファイバx-y断面スライスSP- $\mu$ CT像において、潜在欠陥面積が光ファイバ面積に占める割合)を示している。同図7(b)に示すように解析領域中央位置で“潜在欠陥”が多く分布している様子が観測できた。得られた観察結果においては、レーザ融着サンプルに見られる内包物のように、その融着界面位置が容易に特定できる明瞭な特徴はなかった。一方、3.2.1で得られた結果をバックグラウンドノイズレベルと考えた場合には、本アーク放電融着サンプルでは0.01~0.10%を推移していることから、アーク放電融着においては特徴的なガラスの粗密分布が得られていると推定することは困難と考えられる。

また、本観察結果においてもアーチファクトを原因とする潜在欠陥が観測され、同図(a),(b)中にて、として矢印にて示した。



(a) 光ファイバ 潜在欠陥抽出  
画像処理を行った3次元CG像

(褐色部分が光ファイバ領域であり、図中には褐色に示した光ファイバに埋設した抽出した潜在欠陥が分布しているのが分かる。潜在欠陥はサイズで色分けして表示している。)



(b) 光ファイバ中の潜在欠陥密度分布  
解析結果

(図中①②③はアーチファクトにより抽出された誤認識欠陥を示し、図(a)中の矢印で示した抽出欠陥に対応する。)

図7 アーク放電融着光ファイバのSP- $\mu$ CT像解析結果



#### 4.まとめ

今回、CO<sub>2</sub> レーザ照射による融着手法にて作製した光ファイバサンプルを中心にBL47XUにおけるSP- $\mu$ CT像観察とその解析を行った。レーザ融着サンプルの解析結果においては当初目的とは異なるものの、高い線吸収係数示す物質を融着部に内包する興味深い結果が得られた。今後は本結果についてはさらなる分析評価を進め、物質の同定を行い、融着プロセスに反映して行きたい。

また、SP- $\mu$ CT像においても画像処理を施すことで、“潜在的な欠陥分布”が各融着手法によって特徴的な分布を示すことが明らかとなった。しかしながら、標準試料としての未処理光ファイバの潜在欠陥密度値をバックグラウンドノイズレベルと判断して、これら融着サンプルの結果を考えた場合には、スパン長L=8.5mmで作製したレーザ融着サンプルのみ、融着部においてガラス密度が低下する結果が得られたものと考察できる。本結果が示す物理的解釈には議論の余地があり、他分析手法との比較・相関をとり、解析データが示唆する解釈をさらに明確化することが今後求められる。

#### 参考文献

- [1] 平山守、阿部宜輝、小林勝、田村保暁、長瀬亮  
「光ファイバの座屈を利用した融着接続」  
2005年電子情報通信学会エレクトロニクスソサエティ大会 C-3-119
- [2] 小池真司、浅川修一郎、小林勝、長瀬亮  
「炭酸ガスレーザによるファイバ融着接続の一評価 - 機械強度特性 -」  
平成19年春季 第54回応用物理学関係連合講演会 27p-K-8
- [3] 村田誠治、大塚年久、田村宏、小林志好、金子郁夫、矢口尚之助、斉藤茂  
「融着した光ファイバの強度特性」日本機械学会論文集(A編)  
71巻703号(2005-3)pp.567-572.