

光ファイバのオンボードレーザー融着技術の研究

小池真司

日本電信電話株式会社 NTT フォトニクス研究所
〒243-0198 神奈川県厚木市森の里若宮 3-1 NTT 厚木研究開発センター

柳 秀一

日本電信電話株式会社 NTT フォトニクス研究所
〒243-0198 神奈川県厚木市森の里若宮 3-1 NTT 厚木研究開発センター

鈴木賢哉

日本電信電話株式会社 NTT フォトニクス研究所
〒243-0198 神奈川県厚木市森の里若宮 3-1 NTT 厚木研究開発センター

高橋哲夫

日本電信電話株式会社 NTT フォトニクス研究所
〒243-0198 神奈川県厚木市森の里若宮 3-1 NTT 厚木研究開発センター

要旨

インターネットサービスの益々の普及による高速・大容量通信の要求のため、通信媒体として代表的な光ファイバを用いる光通信技術が不可欠となっている。この通信系諸装置の光化進展に伴う光部品のボード上への高集積搭載に向け、光部品間の効率的かつ高集積化対応のファイバ融着接続が望まれている。本融着接続への適用を狙いとした CO₂ レーザー照射とファイバ自体のたわみによるファイバ押圧力を組み合わせたオンボードファイバ融着技術について研究開発が進められてきた。初期の研究においては融着接続損失劣化や機械的強度低下が顕著であり、劣化原因が不明確なままであった。SPring-8 放射光を用いたサブミクロンの空間分解能を有するマイクロ CT (Computed Tomography) により、レーザー融着ファイバサンプルの 3 次元構造の詳細な解析を行い、融着界面域に不純物の内包を明らかとした。さらに、放射光蛍光 X 線分析と併用して使用することによって、その内包不純物がジルコニウム含有物であることを突きとめた。本元素が混入する起源は融着プロセスにおいて使用される光ファイバ整列用基板部材の部分安定化ジルコニアと推定された。そこで、整列基板表面のクリーニングプロセスの導入により、内包不純物サイズの低減や損失改善が見られた。加えて、整列基板部材の変更により融着界面への含有物の内包状態が変化する観測結果から、基板材料が含有物の起源であることが明らかとなってきた。また、界面内包不純物が大きな場合には内包位置がファイバ周縁部であっても、吸収端を用いる放射光 CT 計測技術とクラスターラベリング画像処理を駆使したファイバコアと内包不純物の 3 次元構造体の抽出とその構造解析によって、ファイバ中心部にあるコア変形にも寄与する可能性があることを明らかとした。

1. はじめに

インターネットを介した新たな通信サービスの登場によって、通信需要が増加する結果として、通信装置の高速・大容量化の必要性が益々高まってきている¹⁾。それにとともに、データセンター内の情報流通量は爆発的な増加を示し、設置される通信装置の消費電力も増大し、昨今のエネルギー危機的な観点からも、その低減が必須となってきている²⁻⁴⁾。配線媒体として光ファイバを用いる光通信はこれら通信動向を満たす上で必須の技術になっており、光ファイバ配線をして、そのインタフェースをもつ光デバイスの通信装置内への導入は基幹系ネットワークに配備される装置のみならず、データセンターに配備されるサーバー装

置にも進展してきている。光通信の基本単位は電気信号による変調を受けた信号を発光素子を介して光信号に変換し、光媒体そして受光素子で電気信号に変換して受信するというリンクで成立している。そのため、この電気・光変換を伴う結果としてエネルギー変換損があるとみられがちであるものの、光波としての性質を利用した波長分割多重、スイッチングを行う大規模集積光回路技術は、電気光変換を行う必要がなく光波のままの信号処理も行うことができることから、光回路部品を導入することで、高速・大容量化の軸に加えて低消費電力においても十分に寄与できる可能性を秘めていると考えられる⁵⁻⁹⁾。

Fig. 1 には代表的な通信装置構成階層概念図を示す。通信装置構成は一般に素子から、その素子をパッケージ収容

The optical interconnection techniques tend to be incorporated into shorter interconnection distance in accordance with larger communication capacity.

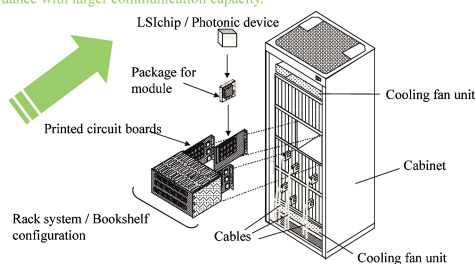


Fig. 1 (Color online) A standard communication system packaging level hierarchy. Communication systems consist of cabinets that include several packaging level hierarchies.

してモジュール化し、そのパッケージを複数個搭載するボード、ボードを収容するラック（本図ではブックシェルフ形の収容形態で示している）、キャビネットという装置階層から成立している。これまで述べたように高集積な光回路素子を従来からある通信装置キャビネット内に光ファイバとともに収容することに目を転じると、回路部品が搭載されるボード上には光ファイバインタフェースが莫大なる量を占めることが容易に想像することができる。一方、データセンターにおいてはサーバー間ネットワークの同階層でのデータトラフィックが多くみられ、必ずしも階層型のネットワーク形態が最良でなく¹⁰⁾シリアル化によるパケット遅延を防止する点、サーバー間トラフィックが主をなす場合にはエネルギー消費量削減という点からも¹¹⁾、“適度”に高速な光信号速度でのサーバー間接続に膨らみを持ったネットワーク形態が求められる。この点からも、装置の光インタフェースの増加が見込まれ、装置内の効率的な光ファイバ配線収容のための実装技術が重要となる。このような大規模な光インタフェースを持つ光回路部品の装置内集積化の動向の一方で、携帯電話、スマートホン、タブレット端末などの開発が進展するエレクトロニクス産業の実装技術に目を転じてみると、小型・薄型電子機器の登場により、電子回路実装基板の高密度化が要求されている。そのため、従来のコテによるはんだ付け接続ではモジュールのボード搭載が困難となった結果、細く絞り込めるレーザーを利用するはんだ付け装置が注目を集めている¹²⁾。このエレクトロニクス部品の接続技術潮流と同様に、プリント基板上で大規模に布線されたファイバへの適用を狙いとしたレーザー融着接続技術は、ファイバマネジメント技術のひとつとして開発要求が上げられてきた¹³⁾。**Fig. 2**にはファイバ融着接続に一般的に用いられるアーク放電形の融着機を用いる場合と、提案するレーザー融着技術のボード上に布線されたファイバ融着接続に用いた場合のそれぞれについて特徴を示す。レーザー融着では遠隔からのレーザー光の光ファイバ融着部位への照射によって、融着に要する実装面積が少なく済み（**Fig. 2(b)**）、光部品の高密度実装下においても接続可能となる。その一方

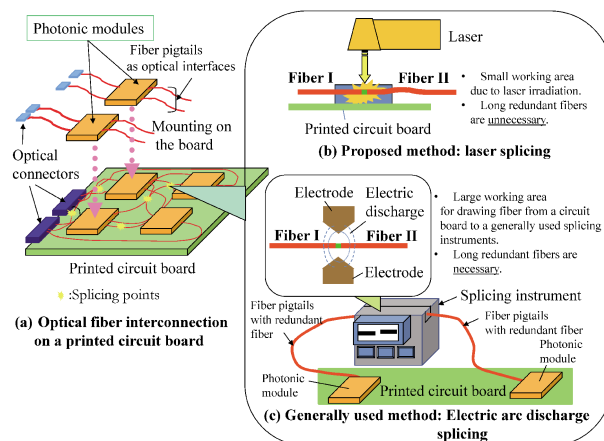


Fig. 2 (Color online) The concept of laser splicing for optical fibers wired on the printed circuit board.

で、ファイバ融着技術として一般に用いられるアーク放電形ファイバ融着機を用いる手法では、ファイバをボードから融着機まで引き出すためのファイバ余長（**Fig. 2(c)** Redundant fiber）が必要となり、融着接続完了後にはファイバの大きな束がボード上を占めることになる。本ファイバ束が搭載されたボードを**Fig. 1**のラックに収容する場合には、ボード間隔を広げる必要があるため通信装置内へのボード収容数が低減するとともに、通信装置キャビネット内上下に流れる冷却風の流れる風切の障害ともなり、データセンターでは重要とされる装置冷却の問題も顕在化する事態が生じることが考えられる¹⁴⁾。

2. オンボードレーザー融着のメカニズムと融着品質の初期結果

現用の光通信システムにおいて、ボード間、キャビネット間などの通信装置階層間で光ファイバ接続をする際には光コネクタインタフェースでもって着脱を行い、インタフェース階層間接続を行う。しかしながら、ボード内で収容されている光ファイバインタフェースをもつ高集積化された光モジュール同士を低損失でかつ低反射な接続状態を得るためには光ファイバ自体を溶融してインタフェースがないように接続する融着接続が求められる（**Fig. 2(a)**参考）¹⁵⁾。そこで、**Fig. 2(b)**で示した遠隔からのレーザー照射の特徴に加えて、特に光ファイバ座屈を用いたコンパクトな融着接続技術を提案している。**Fig. 3**にはオンボードレーザー融着実現に向けて用いた具体的な実験系を示す。すなわち、光ファイバ同士をファイバ整列部材に収容することで、サブミクロンオーダーで両光ファイバの位置合わせを行い、かつ一方のファイバをファイバ同士の突合後に ΔL だけ進ませてファイバ自体をたわませ、ファイバ界面に押圧力 P を発生させ、この条件下でファイバ界面に向けて CO_2 レーザー照射を行い、ファイバたわみによって

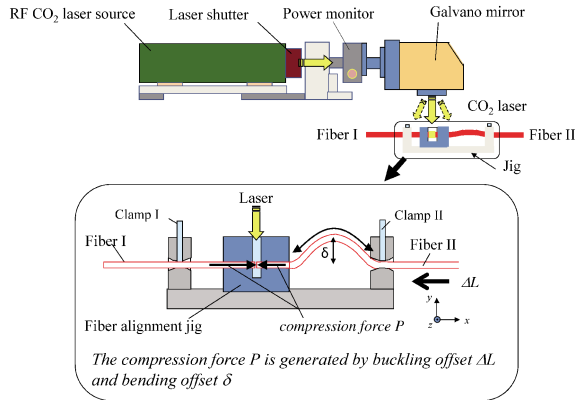


Fig. 3 (Color online) Proposed method for fiber splicing by CO₂ laser irradiation.

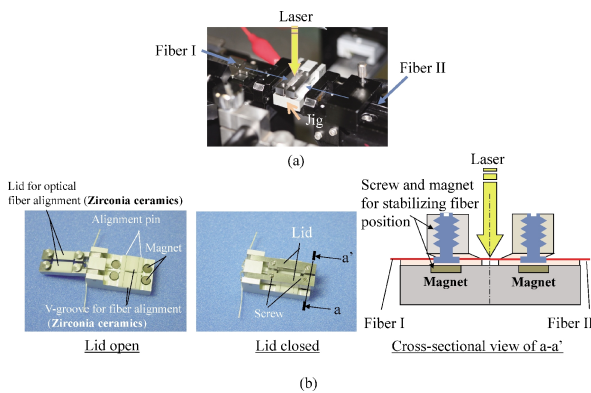


Fig. 4 (Color online) The experimental setup and the jig to make samples for evaluating the spliced optical fibers. (a) experimental setup, (b) jig operation and configuration.

生成した押圧力 P によって、ファイバ溶融時にファイバ界面に溶融したファイバ材料が供給され融着接続が完了する手法である¹⁶⁾。融着機が保有するようなモータ機構が不要であるため、オンボード上でコンパクトな融着治具構成が期待できる。

Fig. 4 には実験に用いたレーザー融着治具構成を示す。融着する光ファイバを部分安定化ジルコニア V 溝基板の V 溝に収容して整列配置したのちに、上から蓋をとじてファイバをある一定のクリアランス以内に収める構成である (参考 同図(b)中、治具蓋開閉写真)。また、治具の蓋側には磁性をもったネジを設ける一方で、ステージ側には磁石を埋設している (参考 図(b)中、治具 a-a' 断面図)。また、ファイバ整列 V 溝の一部に精密に外径設定された位置合わせガイドピン (参考 図(b)治具蓋開閉写真中 Alignment pin) がファイバ整列する V 溝の両脇に設定されているため、上蓋を閉じた際に磁力で確実に上蓋がガイドピン周縁の頂点に当たり保持され、精密に $1\ \mu\text{m}$ 以下の一定のクリアランスが保持できる構成になっている。

本提案融着接続技術と従来技術であるアーク放電形融着接続とで機械強度についての品質比較を試みた。融着前段

階まで同一サンプル作製工程を経た後に、融着手法のみを変えて従来技術との比較を行った。引張破断応力¹⁷⁾について累積破断確率50%で比較した場合には、初期に得られたデータでは従来技術であるアーク放電形融着接続では $600\ \text{MPa}$ であったのに対して、 $390\ \text{MPa}$ にまで低下する結果であった¹⁸⁾。

3. レーザー融着ファイバサンプルの X 線 CT 分析適用の背景

オンボード融着接続が期待されるレーザー融着接続技術において、接続損失ならびに機械強度の劣化はレーザー照射による光ファイバガラス密度分布変化によって引き起こされるものと当初考えられていた。そこで、顕微ラマン分光分析ならびに、産業用 X 線 CT による分析を進め、その劣化原因探究に向け検討を進めた。特に顕微ラマン分光分析においては内部応力分布によって変化が現れるシリカのラマンスペクトラム¹⁹⁾中の D_2 ライン^{20,21)}のバンドシフトに注目して、アーク放電形融着とレーザー融着によるサンプル間の比較を行ってきた²²⁾。しかしながら、顕微ラマン分光分析装置の波数分解能に近接した中での密度変化の識別であったため、明確な構造変化を決定づけるまでに至らなかった。

さらに、顕微ラマン分光分析が微細箇所にも局部的にプローブを置くのに対して、巨視的に光ファイバ融着部を観測しつつ、微細構造変化も捉えられる X 線 CT による観測を当初は産業用 X 線 CT を用いて行った。得られた CT 画像の精細さは十分でないものの、非線形拡散法²³⁾による画像処理技術でファイバ内の CT 値の均質化を図った上で擬似的な密度分布として潜在欠陥分布から解析を試みたが、決定的な劣化原因となる要因究明には至らなかった。そこで、鮮明な光ファイバ CT 画像を得ることを目的に SPring-8 の X 線 CT による分析を進めることとした。

4. 高輝度放射光吸収コントラスト型マイクロ CT (SP- μ CT: SPring-8 micro-CT) を用いた融着界面内包物の検出

Fig. 5 には実験を行った SPring-8 BL47XU に設置されたマイクロ CT 計測光学系を示す²⁴⁾。本図に示すように、アンジュレータ光を用いることで産業用 X 線 CT 装置とは比較にならない大規模なフォトンドーズ量によって極めて高い SN 比の CT 画像を得ることができる。また Si (111) モノクロメータによりエネルギー分解能がより高く、得られた CT 値は変換式に基づき、物質の推定にも役立てることができる線吸収係数 LAC (Linear Absorbance Coefficients) に変換可能である。Fig. 6 に放射光 SP- μ CT により、融着光ファイバの長手方向 (z 軸方向) に平行な $y-z$ 断面 CT 画像、光ファイバ融着界面域にはファイバ

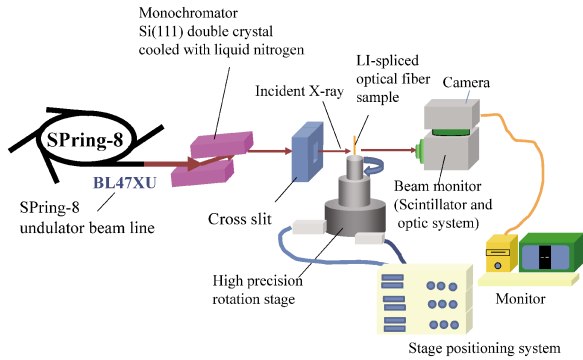


Fig. 5 (Color online) SPring-8 micro-computed tomography system installed at beamline 47XU.

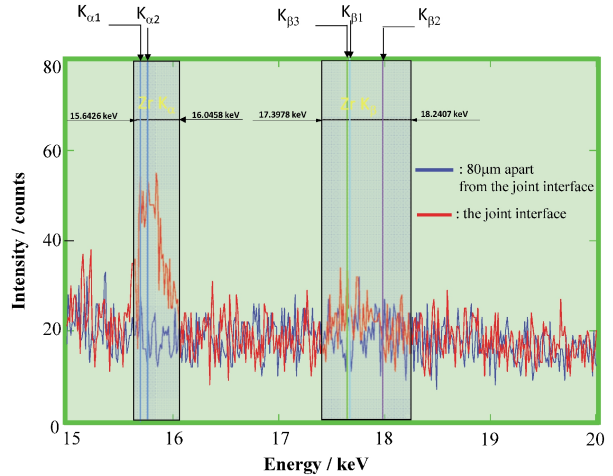


Fig. 7 (Color online) Results of fluorescent X-ray spectroscopic microbeam analysis at the interface of the laser-spliced fiber and a position away from the joint interface.

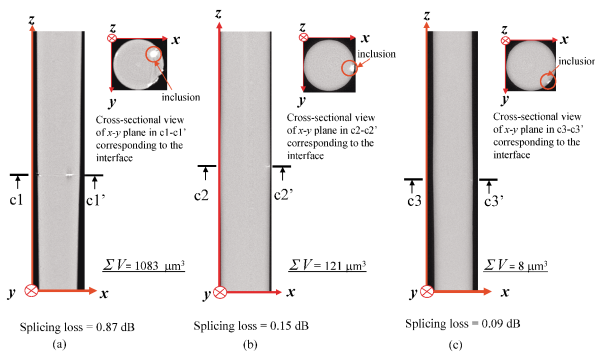


Fig. 6 (Color online) SP- μ CT observation results for laser-fusion spliced optical fibers depending on the splicing loss. The position of the inclusions are found to be located at the circumference of the optical fiber based on the slice CT images of the interface. The splicing loss is also found to have the tendency to be proportional with the total volume of the inclusions ΣV .

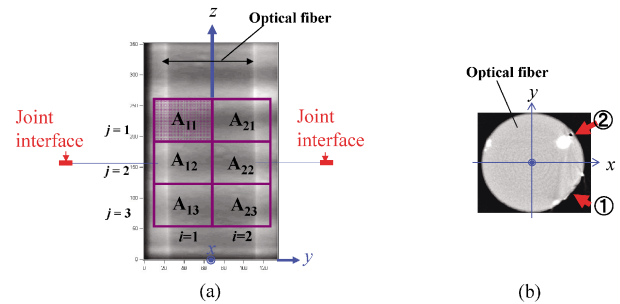


Fig. 8 (Color online) (a) Transmitted image of the laser spliced fiber and slit positions for fluorescent X-ray spectroscopic micro-beam analysis. A slit address is expressed as A_{ij} ($i=1, 2, j=1 \dots 3$). Slit size is $60 \mu\text{m} \times 85 \mu\text{m}$ in the z and y direction, respectively. (b) CT image of the cross section of the interface of the spliced fiber obtained by SP- μ CT. The slit address indices A_i, j in (a) and number markers in (b) correspond to the histogram in Fig. 9, respectively. The x - y - z coordinates shown here are used only in Figs. 8 and 9(a).

長手方向を法線とする x - y 断面 CT 画像とを接続損失測定結果とともに示した。本図に示すように、これまでの分析手法では気が付かなかった LAC が極めて高い物質の内包がレーザー融着界面にて見られることが初めて明らかとなった。また、その物質の内包サイズ (ΣV) が大きい場合には、接続損失の著しい劣化を認めることができた²⁵⁾。本結果を受け、レーザー融着プロセスの根本的な見直しとともに、内包物の構成主元素の特定を行うべく、放射光蛍光 X 線分析によって、蛍光 X 線ピーク強度の空間分布を調べた²⁶⁾。その融着光ファイバの代表的な蛍光 X 線スペクトル測定結果の一例を Fig. 7 に示す。本図に示すように融着界面と界面から $80 \mu\text{m}$ 離れた位置とでジルコニウムの蛍光 X 線 $K\alpha$ のピーク強度に変化が現れていることが明らかとなった。この結果を受けて、融着界面において高い LAC を示す不純物のサイズが大きいものを内包する融着サンプルを対象にジルコニウム蛍光 X 線の $K\alpha$ ピーク強度と X 線 CT 画像中の内包物に対応する体積の空間依存性を調べた。Fig. 8 には融着界面にジルコニウムを含有する融着光ファイバの蛍光 X 線分析を行うにあたり、その

蛍光 X 線強度の空間分布測定のためのスリット配列を示している。Fig. 8(a) には融着光ファイバサンプルに対して蛍光 X 線の検出スリットの配列構成を示し、Fig. 8(b) には融着界面の断面 CT 画像中で含有物の占める量が特に大きい融着界面でのスリット位置を① (スリット A_{12} 側) と② (スリット A_{22} 側) のマーカーにて融着界面の CT 像中に示している。Fig. 9 にはジルコニウム $K\alpha$ の蛍光 X 線ピーク強度の空間分布ヒストグラム、並びに CT 画像中の内包不純物体積とジルコニウム蛍光 X 線のピーク強度のマーカー①と②のスリット位置での比較結果を示している。Fig. 9(a) にはジルコニウム $K\alpha$ 蛍光 X 線ピーク強度の測定カウント値を Fig. 8(a) で示した各スリット毎に得られた結果をヒストグラムにて空間分布として示している。本図に示すように、接続界面域 (Fig. 9(a) 中の Joint interface 部) でピーク強度が高く、Fig. 8(b) にて断面 CT 画像中に示し

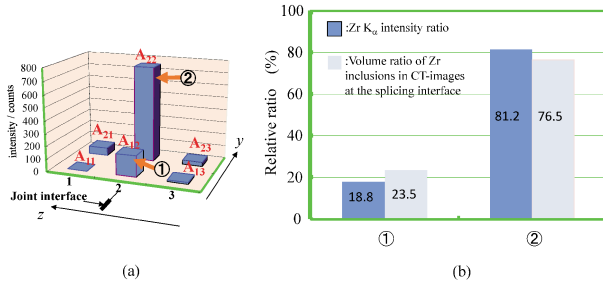


Fig. 9 (Color online) Comparison of relative ratio of peak intensity of zirconium K α fluorescent X-ray energy with the ratio of volume of zirconium inclusions of CT-image depending on position marker 1 and 2. (a) Histogram of the peak intensity corresponding to the zirconium energy obtained from the fluorescent X-ray spectra. (b) Relative ratio between position marker 1 and 2 from the viewpoint of zirconium K α -X-ray intensity and total inclusion volume based on CT-image, respectively.

たマーカー①と②側で蛍光ピーク強度でも同様に対応した差異が見られることが分かる。**Fig. 9(b)**には CT 画像中で含有不純物として検出された含有物の各スリット内での総体積 ΣV と蛍光 X 線ピーク強度とをマーカー①と②の位置で、それぞれの相対比で比較を行った結果を示している。**Fig. 9(b)**に示すように、両測定法で求められたマーカー①と②の空間で見た相対比はほぼ一致する様子を認めることができ、融着界面内包物はジルコニウム含有物質と考えられ、レーザー融着ファイバの品質劣化原因であると推定された。

そこで、ジルコニウム含有物の混入の起源をレーザー融着プロセス全体から見直しを行った。**Fig. 4(b)**で示したレーザー融着治具内に設けられた融着光ファイバ同士を精密に整列させる部分安定化ジルコニア V 溝基板以外にジルコニウムの存在を主に示すものではなく、改めてジルコニア V 溝基板を顕微鏡観察を行うことにより、基板表面にデブリとレーザー照射位置側の V 溝基板端に構造劣化を認めることができた。そこで、微細繊維を編みこんだ布により CO₂ レーザーの融着接続光ファイバへの照射の度ごとに、基板上のデブリを掻き出す簡便なクリーニングを繰り返し行うプロセスを導入し、その効果を放射光 μ CT 観測ならびに、融着接続損失分布の変化により調べた。**Fig. 10**にはクリーニングプロセス導入前後での融着界面内の内包不純物サイズ ΣV と融着接続損失の関係を示した。また、図中にはクリーニングに用いた微細繊維の顕微鏡写真も合わせて示している。本図に示すようにクリーニングプロセス導入後には、これまでみられた極端に大きなサイズの内包不純物が解消している様子が明らかとなり、導入前のような極端に大きな接続損失を生み出していないことも明らかとなった²⁷⁾。その一方で導入したクリーニングプロセスでは完全に内包物の消失には至っていないことも明らかとなった。本プロセス前後のサンプルにて平均接続損失として 0.18 dB から 0.15 dB にわずかながら改善する

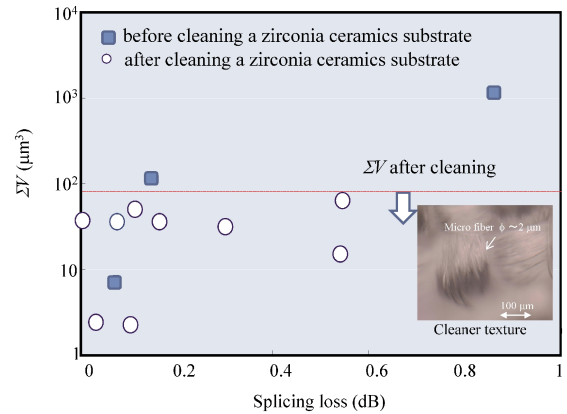


Fig. 10 (Color online) Relationships between the splicing loss and total volume ΣV of Zr inclusions observed by SP- μ CT before and after the cleaning process. Inset shows optical micrograph of polyester-nylon texture of the fiber stick cleaner used in cleaning process of zirconia ceramics substrate.

結果が得られたが、提案クリーニングプロセスのみではその解決には十分ではないと考えられた。

5. 高輝度放射光マイクロ CT (SP- μ CT) を用いたレーザー融着ファイバ界面内包物の光ファイバコアへの影響の観測とその評価手法の検討

これまで述べてきた分析結果から、レーザー融着界面へのジルコニウム含有物の内包はファイバ整列ジルコニア基板の損傷に起源があると考えられた。しかしながら、ファイバ周縁部分の不純物の内包が融着ファイバの機械強度に対し影響が及ぼす点については過去のファイバ機械強度に関する論文¹⁷⁾にも示されてはいるものの、コア構造そのものへの影響の有無については検討の余地があった。光ファイバコア部にはクラッド部に対してわずかな屈折率差として 0.2% の差²⁸⁾を与えるように主に GeO₂ 等が含有されており、コア構造の CT 観測のためにはコア部のコントラストを高めるために、Ge の K 吸収端上の X 線エネルギー (11.19 keV) にて CT 測定を行うこととした。その吸収端上・下での光ファイバ断面 CT 画像の代表的な結果を **Fig. 11** に示す。**Fig. 11(a)** に示すように、**Fig. 11(b)** に比べて、ファイバ中心部のコア対応位置に LAC が高い分布を見ることができる。しかしながら、わずかな GeO₂ の光ファイバコアへのドーピングのために光ファイバクラッド部と比べて LAC がわずかな差としか現れておらず、ファイバ内にリングアーチファクトが見られる場合には特に LAC の閾値設定のみでは光ファイバコアをクラッドから画像抽出することは困難と考えられた。また、吸収端上・下の X 線エネルギーで測定した画像間のサブトラクション処理^{29,30)}によって Ge の存在分布を得ることでコア部画像の

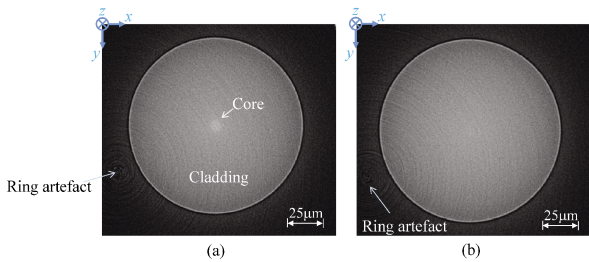


Fig. 11 (Color online) CT images of single-mode optical fiber at X-ray energies (a) above (11.19 keV) and below (11.09 keV) the Ge-K absorption edge. The z-direction in each image corresponds to the fiber-longitudinal direction.

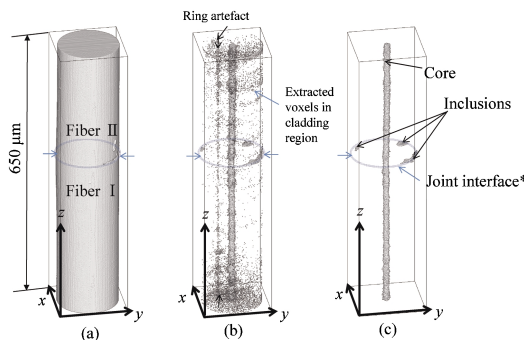


Fig. 12 (Color online) Extracted results of core and inclusions at a fiber joint by the proposed method. (a) 3D external configuration of laser-fusion-spliced single-mode optical fiber. (b) Results of core and inclusions extracted by the threshold of LAC of 35 cm^{-1} . (c) Results of core and inclusions extracted by using the cluster labeling method. The z-direction in each image corresponds to the fiber-longitudinal direction. *Joint interface (\leftrightarrow) shows the position of fusion splicing.

抽出も行うことが可能ではあるものの、サブミクロンオーダーでの両画像間の位置合わせは困難であることから、ファイバコアの正確な位置検出のための手法としては適用が難しいと考えられた。そこで、CT画像解析を進める経過の中で、光ファイバコアと含有不純物を抽出するために、統計解析の一手法であるクラスターラベリング³¹⁾法が特にシングルモード光ファイバコア部分を抽出する上で有効であることが明らかとなってきた。Fig. 12には本手法によって画像抽出された、レーザー融着光ファイバのコアと含有不純物の立体的な位置関係を示した。本図中(b), (c)には特定のLAC閾値以上を物体として認識させることで抽出して得られたCT立体3次元画像と、クラスターラベリング処理を行ったものとを比較して示している。Fig. 12(b)に示すように、閾値設定のみではコア部の画像抽出にあたり、クラッドとリングアーチファクトのボクセルがノイズとして顕著に現れ、コア部の画像抽出を阻んでいたものが、クラスターラベリング処理を行ったFig. 12(c)ではノイズレスにコアと含有不純物の抽出ができることが分かった³²⁾。本結果をもとに、光ファイバコア重心点を融着

光ファイバの各断面CT画像(x-y断面)毎に求め、そのコア位置に対して3軸不等楕円体近似³³⁻³⁵⁾された融着界面内包物の主軸とコア重心位置変形方向との関係を解析し、内包物サイズが大きい場合には統計的にそのコア変形主方向と楕円体主軸の相似性を確認することができた。光ファイバクラッド周縁部に位置する内包不純物であっても、そのサイズが大きい場合には融着時の溶融状態にあるファイバの表面張力によって融着後の外形構造が形成されるに際して、軸対称性が失われ、その中心にある光ファイバコアにまでも変形がもたらされたものと推定される³²⁾。

近年、基幹系ネットワークの光ファイバ伝送においては100 Tbpsが限界と言われてきており³⁶⁾、その解決手法として複数のコアを有するマルチコア光ファイバを用いる空間多重伝送技術が勢力的に研究が進められてきている³⁷⁻³⁹⁾。これまで述べてきた融着光ファイバの界面内包不純物がもたらすコア構造への影響を考察するにあたって、コア構造を立体的に精密に画像抽出できる本手法は標準的なシングルモード光ファイバのコア構造の抽出手法にとどまらず、これら研究開発の途上にある光ファイバのCT構造解析にあたって適用可能性があると考えられる。

6. レーザー融着ファイバサンプルの放射光分析のまとめと今後の展望

CO₂レーザーを用いた石英系シングルモード光ファイバのオンボード融着接続技術においては、整列V溝基板起因のデブリ内包が融着品質劣化に影響を及ぼしていることが高輝度放射光吸収コントラスト型マイクロCTによって明らかとなってきた。ジルコニア製ファイバ整列V溝基板からレーザー照射耐性のある材料からなるV溝基板などに現在更改し新たな挑戦を進めてきており、基板材料の変更によって異常を示す融着サンプルの劣化形態にも変化が見られることも明らかとなってきている。レーザー照射による基板損傷に着目しつつ、融着界面内包物を低減する融着治具構成についても検討を進めている。

謝辞

放射光実験は、(公財)高輝度光科学研究センターが実施する利用研究課題としてSPRING-8のBL47XUならびにBL19B2で実験しました(課題No. 2007B1814, No. 2008A1790, No. 2009B1830, No. 2010A1699, No. 2011A1697, No. 2012B1224)。

また、本研究を力強く支えて下さいました公益財団法人高輝度光科学研究センターのスタッフの皆様、ならびに長きにわたり、ご指導を賜っております東京大学先端科学技術研究センター 鈴木宏正教授はじめ公益社団法人精密工学会 現物融合型エンジニアリング専門委員会の皆様方に心より感謝を申し上げます。

参考文献

- 1) 総務省平成24年版「情報通信白書」
<http://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/h24/index.html>
- 2) 株式会社 NTT データ経営研究所
平成24年度 我が国情報経済社会における基盤整備 (IT 機器のエネルギー消費量に係る調査事業) 報告書
http://www.meti.go.jp/meti_lib/report/2013fy/E002741.pdf
- 3) http://www.cisco.com/en/US/solutions/collateral/ns341/ns525/ns537/ns705/ns1175/Cloud_Index_White_Paper.html
- 4) Xiaoxue Zhao, Vijay Vusirikala, Bikash Koley, Valey Kamalov and Ted Hofmeister: "The Prospect of Inter-Data-Center Optical Networks," *IEEE Communications Magazine* September 2013 vol. 51, no. 9, pp. 32-38 (2013).
- 5) Ken-ichi Sato, Hiroshi Hasegawa, Tomonobu Niwa and Toshio Watanabe: "A Large-Scale Wavelength Routing Optical Switch for Data Center Networks," *IEEE Communications Magazine* September 2013 vol. 51, no. 9, pp. 46-52 (2013).
- 6) 渡辺俊夫, 鈴木賢哉, 高橋哲夫: 「ROADM の運用性を向上させるマルチキャストスイッチ技術」NTT 技術ジャーナル, 2013, 11, pp. 25-28 (2013).
- 7) 福徳光師, 佐藤康博, 鈴木扇太: 「柔軟かつ経済的なネットワークを実現する光ノードおよびスイッチ技術」NTT 技術ジャーナル, 2013, 11, pp. 12-15 (2013).
- 8) 坂巻陽平, 河合武司, 福徳光師: 「より柔軟な光ノードを実現する光スイッチ技術」NTT 技術ジャーナル, 2013, 11, pp. 16-20 (2013).
- 9) 石井雄三, 大庭直樹, 佐原明夫, 葉玉恒一: 「ROADM を高機能化する WSS モジュール技術」NTT 技術ジャーナル, 2013, 11, pp. 21-24 (2013).
- 10) H. J. S. Dorren: "Optics in computers servers and computers: challenges and opportunities," <http://www.optics.rochester.edu/workgroups/knox/myweb/ISUPT2013/archive/Dorren.pdf>
- 11) Loukas Paraschins: "Advancements in Data-Center Networking, and the importance of Optical Interconnections," *ECOC 2013 Th. 2. F.3.* (2013).
- 12) Focal Point: 「レーザーはんだ付け装置が注目を浴びる理由」*OPTRONICS*, NO. 3, pp. 85-86 (2013).
- 13) M. Kobayashi, S. Asakawa, M. Hirayama, Y. Abe, Y. Hida, T. Kominato, T. Goh, T. Kawai and S. Sumida: "Study of fiber management for optical board integration," *Electronics and Communications in Japan (Part II: Electronics)*, vol. 85, issue 7, pp. 37-47, July (2002).
- 14) R. H. Katz: "Tech Titans Building Boom," *IEEE Spectrum*, vol. 46, issue 2 pp. 40-54 (2009).
- 15) A. D. Yablon: *Optical Fiber Fusion Splicing* (Springer Verlag, Berlin, 2005) Chap. 1, p. 17.
- 16) 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 (2005).
- 17) 山田 剛, 新井孝敏, 渡辺 興, 稲田浩一: 「融着接続部の引張り強度に関する検討」昭和55年度電子通信学会総合全国大会1847, p. 7-302 (1980).
- 18) S. Koike, S. Asakawa, M. Kobayashi and R. Nagase: "A Simple Optical Fiber Splicing Technique using CO₂ Laser Irradiation for Board-level Optical Interconnections," *Int. Conf. Electronic Packaging (ICEP) 12B4-1*, p. 421 (2008).
- 19) 日比野善典: 「石英系光ファイバの破壊機構に関する研究」東京大学 学位論文 第5章応力による石英ガラス構造の変化
- 20) C. Martinet, V. Martinez, C. Coussa, B. Champagnon and M. Tomozawa: "Radial distribution of the fictive temperature in pure silica optical fibers by micro-Raman spectroscopy," *Journal of Applied Physics* vol. 103 issue 8, pp. 083506-083506-4 (2008).
- 21) A. Perriot, D. Vandembroucq and E. Barthel: "Raman Microspectroscopic Characterization of Amorphous Silica Plastic Behavior," *J. Am. Ceramic Society* vol. 89, no. 2, pp. 596-601 (2006).
- 22) 小池真司, 浅川修一郎, 小林 勝, 長瀬 亮: 「炭酸ガスレーザーによるファイバ融着接続部のラマンスペクトル D₂ ラインの一測定結果」第55回応用物理学関係連合講演会, 28a-ZB-1, p. 1033, March (2008).
- 23) Francine Catte, Pierre-Louis Lions, Jean-Michel Morel and Tomeu Coll: "Image Selective Smoothing and Edge Detection by Nonlinear Diffusion," *SIAM J. Numer. Anal.* 29(1), pp. 182-193 (1992).
- 24) K. Uesugi, Y. Suzuki, N. Yagi, A. Tsuchiyama and T. Nakano: "Development of high spatial resolution X-ray CT system at BL47XU in SPring-8," *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A* **467-468**, pp. 853-856 (2001).
- 25) 小池真司, 長瀬 亮, 上杉健太郎, 梶原堅太郎, 竹内晃久, 渡辺義夫: 「(実施課題名) CO₂ レーザー照射によるファイバ融着接続部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」課題 No. 2007B1814 平成19年度 SPring-8 重点産業利用課題成果報告書 vol. 2007B, 課題 No. 2007B1814, pp. 21-29 (2007).
- 26) 小池真司, 梶原堅太郎, 廣沢一郎, 渡辺義夫, 鈴木芳生, 上杉健太郎, 竹内晃久, 長瀬 亮: 「(実施課題名) CO₂ レーザー照射によるファイバ融着接続部内含有物質の SPring-8 放射光光源を用いた蛍光 X 線分析研究」課題 No. 2008A1790 平成20年度 SPring-8 重点産業利用課題成果報告書 vol. 2008A, 課題 No. 2008A1790, pp. 61-67 (2009).
- 27) S. Koike, S. Asakawa, M. Kobayashi, R. Nagase, J. Kobayashi, K. Uesugi, K. Kajiwara, A. Takeuchi, Y. Suzuki, I. Hirose and Y. Watanabe: *IEEE Trans. Compon., Packag. Manuf. Technol.* 1[1], 100 (2011).
- 28) N. Kashima: *Optical Transmission for the Subscriber Loop*, (Artech House, Boston, 1993), Chap. 2, p. 30.
- 29) Y. Suzuki, K. Usami, K. Sakamoto, H. Kozaka, T. Hirano, H. Shiono and H. Kohno: "X-Ray Computerized Tomography Using Monochromated Synchrotron Radiation," *Jpn. J. Appl. Phys.* **27**[3], pp. L461-L464 (1988).
- 30) A. Tsuchiyama, M. Uesugi, T. Matsushima, T. Michikami, T. Kadono, T. Nakamura, K. Uesugi, T. Nakano, S. A. Sandford, R. Noguchi, T. Matsumoto, J. Matsuno, T. Nagano, Y. Imai, A. Takeuchi, Y. Suzuki, T. Ogami, J. Katagiri, M. Ebihara, T. R. Ireland, F. Kitajima, K. Nagao, H. Naraoka, T. Noguchi, R. Okazaki, H. Yurimoto, M. E. Zolensky, T. Mukai, M. Abe, T. Yada, A. Fujimura, M. Yoshikawa and J. Kawaguchi: "Three-Dimensional Structure of Hayabusa Samples: Origin and Evolution of Itokawa Regolith," *Science* **333**, p. 1125, (2011).
- 31) D. L. Davies and D. W. Bouldin: "A Cluster Separation Measure," *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.* **PAMI-1**[2], pp. 224-227 (1979).
- 32) S. Koike, S. Yanagi, Y. Ueno, K. Suzuki, T. Takahashi, K. Uesugi, A. Takeuchi, M. Hoshino, Y. Suzuki and Y. Watanabe: "Nondestructive Three-Dimensional Observation of the influence of Zirconium Inclusions in Laser-irradiated Fusion-Spliced Optical Fiber on Core Structure Changes Using Synchrotron Radiation X-ray Micro-Computed Tomography," *Japanese Journal of Applied Physics*, vol. 52, pp. 096602-01-11 (2013).

- 33) S. Ikeda, T. Nakano and Y. Nakashima: "Three-dimensional study on the interconnection and shape of crystals in a graphic granite by X-ray CT and image analysis," *Mineralogical Magazine* **64**, pp. 945-959 (2000).
- 34) A. Tsuchiyama, K. Uesugi and T. Nakano: "Hayabusa Analogue Sample Analysis Using Synchrotron Imaging" in *JAXA Special publication The second open competition for the Hayabusa Asteroidal Sample Preliminary Examination Team (HASPET)* edited by T. Yamamoto, I. Kushiro, A. Fujiwara and H. Yano: March 2006 Japan Aerospace Exploration Agency.
- 35) T. Nakano, A. Tsuchiyama, K. Uesugi, M. Uesugi and K. Shinohara: (2008, April) Slice Software for Basic 3-D Analysis, Japan Synchrotron Radiation Institute (JASRI) Hyogo, Japan [Online] Available: <http://www-bl20.spring8.or.jp/slice/>.
- 36) D. Qian, M. F. Huang, E. Ip, Y. K. Huang, Y. Shao, J. Hu and T. Wang: "101.7-Tb/s (370×294-Gb/s) PDM-128 QAM-OFDM Transmission over 3×55-km SSMF using Pilot-based Phase Noise Mitigation," *OFC/NFOEC, PDPB5* (2011).
- 37) J. Sakaguchi, Benjamin J. Puttnam, Werner Klaus, Jose Manuel Delgado Mendinueta, Yoshinori Awaji, Naoya Wada, Atsushi Kanno and Tetsuya Kawanishi: "Large-capacity transmission over a 19-core fiber," *OFC/NFOEC Technical Digest OW11.3* (2013).
- 38) 今村克徳, 杉崎隆一, 吉田真人, 中沢正隆: 「Ⅲ 多値伝送実現に向けたマルチコア光ファイバの大コア化とクロストーク評価技術」*ITU ジャーナル*, vol. 43, no. 11, pp. 6-9 (2013).
- 39) J. Sakaguchi, Benjamin J. Puttnam, Werner Klaus, Yoshinori Awaji, Naoya Wada, Atsushi Kanno, Tetsuya Kawanishi, Katsunori Imamura, Harumi Inaba, Kazunori Musaka, Ryuichi Sugizaki, Tetsuya Kobayashi and Masayuki Watanabe: "305 Tb/s Space Division Multiplexed Transmission Using Homogeneous 19-Core Fiber," *Journal of Lightwave technology*, vol. 31, no. 4, pp. 554-562 (2013).

著者紹介



小池真司

日本電信電話株式会社 NTT フォトニクス研究所 主任研究員

E-mail: koike.s@lab.ntt.co.jp

専門: 精密工学

【略歴】

1988年3月大阪大学大学院工学研究科博士前期課程修了。同年4月日本電信電話株式会社入社。1997年博士(工学)(大阪大学)。2004年4月より現職。

柳 秀一

日本電信電話株式会社 NTT フォトニクス研究所 主幹研究員

E-mail: yanagi.shuichi@lab.ntt.co.jp

専門: 光接続技術

【略歴】

1997年3月慶應義塾大学大学院博士課程修了。1997年4月日本電信電話株式会社入社。2008年4月東日本電信電話株式会社。2011年7月より現職。

鈴木賢哉

日本電信電話株式会社 NTT フォトニクス研究所 主任研究員

E-mail: s.kenya@lab.ntt.co.jp

専門: 電子工学

【略歴】

2000年3月東京大学大学院電子工学専攻博士課程修了。同年日本電信電話株式会社入社。2004年9月～2005年8月マサチューセッツ工科大学客員研究員。2008年7月～2010年6月NTT エレクトロニクス株式会社。2010年7月～現職。

高橋哲夫

日本電信電話株式会社 NTT フォトニクス研究所 主幹研究員

E-mail: takahashi.tetuo@lab.ntt.co.jp

専門: 光伝送システム

【略歴】

1991年3月東京大学大学院理学系研究科修士課程修了。同年4月日本電信電話株式会社入社。2010年4月より現職。



A study on the fusion splicing of optical fibers wired on a circuit board by laser irradiation techniques

Shinji KOIKE

NTT Photonics Laboratories,
NIPPON TELEGRAPH AND TELEPHONE CORPORATION
3-1, Morinosato Wakamiya, Atsugi-shi, Kanagawa Pref., 243-0198 Japan

Shuichi YANAGI

NTT Photonics Laboratories,
NIPPON TELEGRAPH AND TELEPHONE CORPORATION
3-1, Morinosato Wakamiya, Atsugi-shi, Kanagawa Pref., 243-0198 Japan

Kenya SUZUKI

NTT Photonics Laboratories,
NIPPON TELEGRAPH AND TELEPHONE CORPORATION
3-1, Morinosato Wakamiya, Atsugi-shi, Kanagawa Pref., 243-0198 Japan

Tetsuo TAKAHASHI

NTT Photonics Laboratories,
NIPPON TELEGRAPH AND TELEPHONE CORPORATION
3-1, Morinosato Wakamiya, Atsugi-shi, Kanagawa Pref., 243-0198 Japan

Abstract A proposed fusion splicing method for optical fibers wired on a circuit board under laser irradiation is mainly described in this paper. This method uses compression force between optical fibers to be spliced due to a buckled optical fiber without motor drive mechanisms which is generally used in arc fusion splicers. In addition to this merit, CO₂ laser irradiation can provide the interface between fibers with the melting heat apart from a circuit board. Accordingly, this method also enables the compact fusion splicing between fibers wired on the integrated circuit board. However, the fusion spliced fiber quality is so crucial because of a large number of splicing points and lower return loss, when the method is applied for fibers wired on a circuit board. SPring-8 micro-Computed Tomography system at BL47XU has raised the important problem: the fusion splicing interface was intruded by the inclusion consisting of the fiber-alignment substrate material. This paper describes not only improvement of the splicing quality based on results of SPring-8 computed tomography but also the background of this fusion splicing method and the chronicle that analyzing methods for fiber fusion splicing quality have been achieved by SPring-8.