

CO<sub>2</sub> レーザ照射によるファイバ融着接続における光ファイバ内部  
密度変化の 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

**Three-Dimensional Observation of Silica Glass Density Distributions in  
Optical Fiber Formed by the CO<sub>2</sub> Laser Irradiation Using the X-ray  
Micro-Tomography System called SP- $\mu$ CT**

小池 真司<sup>a</sup>, 小林 潤也<sup>a</sup>, 上杉 健太郎<sup>b</sup>, 竹内 晃久<sup>b</sup>, 星野 真人<sup>b</sup>, 鈴木 芳生<sup>b</sup>,  
渡辺 義夫<sup>b,†</sup>

Shinji Koike<sup>a</sup>, Junya Kobayashi<sup>a</sup>, Kentaro Uesugi<sup>b</sup>, Akihisa Takeuchi<sup>b</sup>, Masato Hoshino<sup>b</sup>, Yoshio Suzuki<sup>b</sup>,  
Yoshio Watanabe<sup>b,†</sup>

<sup>a</sup> 日本電信電話株式会社, <sup>b</sup> (財) 高輝度光科学研究センター  
<sup>a</sup> NTT Corp., <sup>b</sup> JASRI

CO<sub>2</sub> レーザ照射による光ファイバ融着部の微細構造変化を SPring-8 BL47XU 設置のマイクロ Computed Tomography (CT) 装置 SP- $\mu$ CT により評価した。当期は SP- $\mu$ CT の投影数の増加によって、線吸収係数測定精度向上を図り、融着光ファイバ中に観察された微細孔群における線吸収係数変化について評価した結果について報告する。

キーワード： ボード内光ファイバインタコネクション、レーザ融着、SPring-8  $\mu$ CT (SP- $\mu$ CT)

**背景と研究目的：**

インターネットを基盤とする様々な通信サービスが日常生活に欠かせないものとなりつつある。その結果、通信装置は益々の大容量化ならびに高速化が要求され続けている。この要求を満たすため、通信装置内配布線を光化することより解決を図る光インタコネクションが注目を集めている[1]。我々はなかでもボード上での光ファイバ簡易融着技術の確立に向け、光ファイバ座屈を応用した CO<sub>2</sub> レーザ照射による融着手法の検討を進めてきた (図 1 参照)。しかしながら、短距離接続であり多数の光接続部が見込まれるため、接続信頼性の向上が一層求められるにも関わらず、その機械特性については従来のアーク放電融着技術によるファイバ破断強度特性をしのぐまでに至っていない[2]。高分解能ラマン分光分析手法によって、かろうじて測定された融着部光ファイバガラスピーク波数変化を手がかりに、プロセス改善を行い、特定サンプル数から割り出したワイブル分布に基づく平均破壊強度においては向上する結果が得られた。しかしながら、破壊試験であるため強い強度を示したサンプルの構造変化を十分に定量的に評価することができなかった。また、得られた顕微ラマン分光分析結果が局所表面での観察結果であり、構造変化をファイバ融着部断面全体と微視的評価を組み合わせた総合評価を行うことが容易ではないため、破壊強度変化の原因を特定するに十分では無かった。一方、SPring-8 放射光  $\mu$ CT (micro-Computed Tomography) (以下、SP- $\mu$ CT[3]) は、これまでも融着部における内包物質の観察を行うなど、レーザ融着部の微細構造変化をファイバ断面全体、ならびにその特定微視領域とで総合的に観察を行うことができる[4]。

今回、SP- $\mu$ CT における投影数を増加させることで、吸収型 CT 装置で測定される線吸収係数 (LAC: Linear Absorption Coefficient) の信号対雑音比 (S/N: Signal-to-noise ratio) 特性を向上させ、融着プロセスによって光ファイバ内に誘起されるシリカガラス微細構造変化について高精度観測を試みた結果を述べる。

† 現所属： (独) 科学技術振興機構

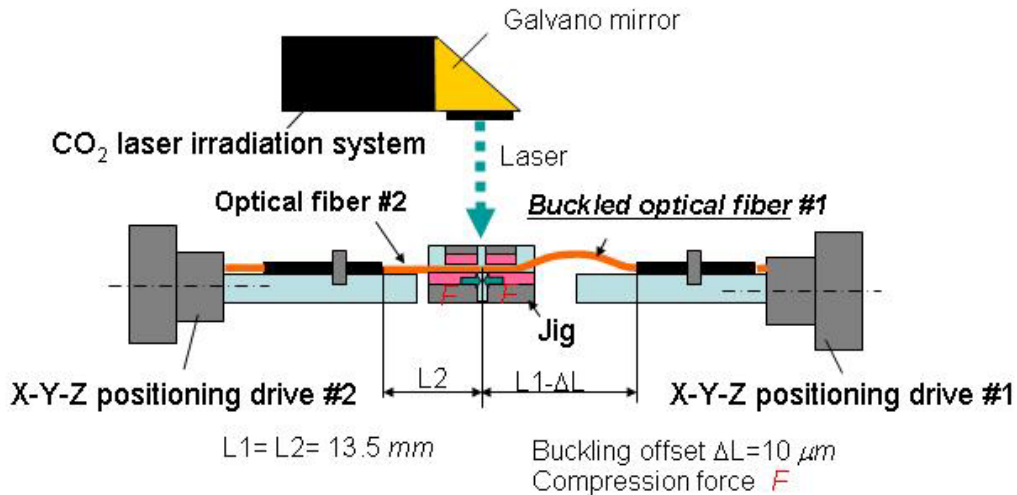


図 1. 提案するファイバ座屈を用いるレーザ融着実験系

**実験：**

図 1 に示すように、提案している光ファイバ融着手法は 2 本の光ファイバ同士を突合し、一方の光ファイバを座屈させた状態で、CO<sub>2</sub> レーザを両ファイバ界面付近に照射を行って融着を実現する。一方の光ファイバを座屈させた時のファイバ界面にかかる押圧力  $F$  は座屈が起こりうる設定ファイバ長（スパン長） $L$  と座屈を起こさせるファイバ押し込み量  $\Delta L$  に依存する[5]。本報告で述べる評価サンプルは光ファイバスパン長  $L1, L2$  を  $13.5\text{mm}$ 、押し込み量  $\Delta L$  を  $10\mu\text{m}$  に設定して作製したサンプルでの測定結果を示している。

融着光ファイバの線吸収係数の融着部密度変化を測定するにあたって、SPring-8 BL47XU 設置の SP- $\mu$ CT を用いた。本測定に用いた X 線エネルギーは  $8 \text{ keV}$  である。CT 測定領域は光ファイバ長手方向（z-軸方向）に  $400\mu\text{m}$  であり、ファイバ断面（x-y 軸面内）およびファイバ長手方向（z 軸方向）の分解能はともに  $1\mu\text{m}$  である[3]。また、投影数  $M$  を変えて光ファイバ線吸収分布の精密評価を行うため、これまでの  $M=900$  に加えて  $M=4,500$  で LAC の高精度測定を行った。

**結果および考察：**

図 2 には SP- $\mu$ CT 像で光ファイバ周縁部と光ファイバコア部をさけて、測定光ファイバ全長 ( $400 \mu\text{m}$ ) での線吸収係数分布について投影数  $M$  を変えて測定した結果を示している（投影数を変えた CT 像を、それぞれグラフ内に挿入図として表示しており、LAC 分布測定の画素取得位置を CT 像中に挿入して示している）。構成画素サンプル数は、 $N=1.5808 \times 10^6$  である。図 2 に示すように  $M=4,500$  では、測定時間を考慮して投影数を  $M=900$  にて測定した場合と比較して、LAC の分散が小さくなっている様子が分かり、その標準偏差  $\sigma_{\text{total}}$  は、 $1.95 \text{ cm}^{-1}$  から  $1.20\text{cm}^{-1}$  に向上していることが明らかとなった。また、挿入図に示した光ファイバ断面の CT 像も粗い画像から平滑な画像に変化していることから画像が改善されたことが明らかである。

図 3 には投影数  $M$  を  $4,500$  に設定して微小な孔群が観測された融着光ファイバの孔群近傍について、光ファイバの長手方向での LAC 分布測定実験結果を示した。なお、各光ファイバ長手方向位置で測定された断面光ファイバ CT 像を、対応する LAC 分布と関連づけて挿入図として示している。図中の CT 像に示すように、光ファイバ断面中で  $10\mu\text{m}$  を直径とする円で示す領域をデータ取得領域としており、各 Z 位置ともに同一位置である。構成画素サンプル数は、 $N=316$  である。また、孔群が観察され始める直前の断面 CT 像の位置を  $z=0$  として各 CT 像の Z 方向の位置を表示している。孔群が形成される直前（挿入図 (a)  $z=0$ ）での平均 LAC 値は  $65\text{cm}^{-1}$  であった。孔群の形成が確認された位置（挿入図 (b)  $z=+4\mu\text{m}$ 、挿入図 (c)  $z=+6\mu\text{m}$ ）では LAC 分布はブロードとなり、その平均 LAC 値は  $76\text{cm}^{-1}$ 、 $71\text{cm}^{-1}$  と、光ファイバ周縁部分であるにもかかわらず、図 2 でも示す平均 LAC 値 ( $74\text{cm}^{-1}$ ) に近接した高い値を示すことが明らかとなった。また、孔群から

外れた位置（挿入図 (d)  $z=+8\mu\text{m}$ ）では、 $z=0$  位置で採取した LAC 分布と同様のプロファイルに戻る様子（平均 LAC 値は  $67\text{cm}^{-1}$ ）を確認することができた。これらの孔群形成位置とそうでない位置との LAC 値の平均値の差異は図 2 で精度検証したように、有意差があると考えられ、孔群の形成にともなって、形成するシリカガラスの微細構造に変化が生じたものと考えられる。

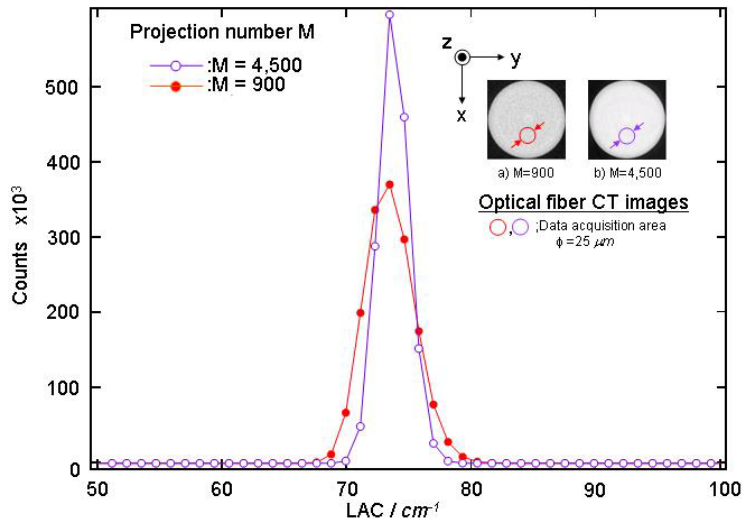


図 2. 投影数 M の増加によるファイバ線吸収係数分布の変化

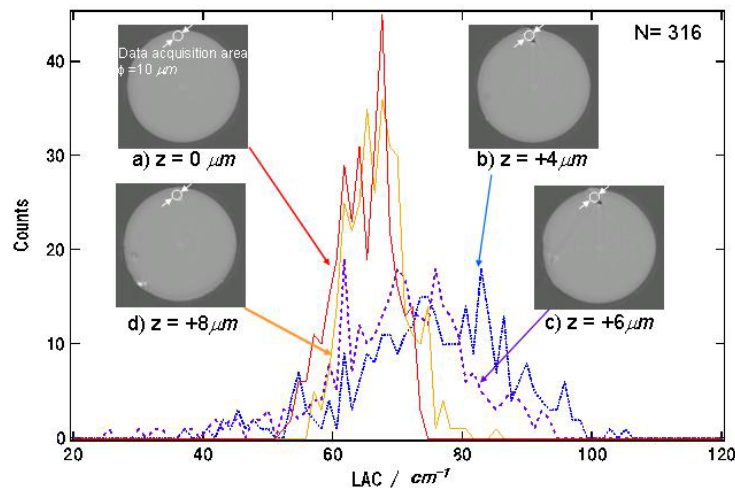


図 3. 微小孔群形成位置での LAC 分布のファイバ長手方向 (Z 軸方向) 依存性

#### 今後の課題：

SP- $\mu$ CT において投影数 M の増加によって、光ファイバクラッド部の LAC 分布の分散が低減できることが明らかとなり、光ファイバの高精度な線吸収係数分布測定の可能性を示した。また、融着プロセスの歩留まり低下をもたらす、微小孔群が観察されたサンプルについては、光ファイバの周縁を構成するシリカガラスの LAC 分布とは異なる新しい LAC 分布を示した。それらの平均 LAC 値間の差異は投影枚数を向上させて得られた CT 画像では十分に有意差があるものと考えられ、今後はその内部ガラス構造変化を特定することが課題となる。

参考文献：

- [1] 三上 修 監修「光配線実装技術ハンドブック」オプトロニクス社 2008年9月刊行
- [2] S. Koike, S. Asakawa, M. Kobayashi, and R. Nagase, “A Simple Optical Fiber Splicing Technique using CO<sub>2</sub> Laser Irradiation for Board-level Optical Interconnections,” *International conference on Electronic Packaging* (ICEP) **12B4-1**, pp.421-426, (2008) .
- [3] K. Uesugi, Y. Suzuki, N. Yagi, A. Tsuchiyama, T. Nakano, “Development of high spatial resolution X-ray CT system at BL47XU on SPring-8,” *Nuclear Instruments and Methods in Physical Research A* vol.**467-468**, pp.853-856, (2001) .
- [4] 小池真司 浅川修一郎 阿部宜輝 小林勝 長瀬亮 上杉健太郎 梶原堅太郎 竹内晃久 鈴木芳生 廣沢一郎 渡辺義夫「クリーニングプロセス導入による炭酸ガスレーザ照射光ファイバ融着部内包Zrサイズ低減のSP- $\mu$ CT観察」第70回応用物理学会学術講演会 8p-A-9(2009).
- [5] M. Kobayashi, T. Yoshida, S.Asakawa, S. Iwano, R. Nagase, S. Sumida, and S. Mitachi, “Injection Molded Plastic Multifiber Connector Realizing Physical Contact with Fiber Elasticity,” *IEEE Journal of Selected topics in Quantum Electronics*, vol.**5**, no.5,pp.1271-1277, (1999) .