

多芯光コネクタファイバ端面の新しい突出し研磨方法の開発[†]

Development of a New Polishing Method for Fiber Protrusion in Multi-fiber Connector

徐

傑*

Jie Xu

村上彰啓*

Akihiro Murakami

繁松 孝*

Takashi Shigematsu

概 要 被加工物である多芯光コネクタ端面と超音波振動源の間に研磨補助フェルールという新しい加工要素を導入することによって、高精度の超音波砥粒加工が実現された。この新しい加工原理による多芯光コネクタファイバ端面の突出し加工により、光コネクタの材質に関係なく効率よく必要とされるファイバ端面の突出し量を自在に得ることが可能となった。十分なファイバ端面の突出し量が得られた12芯MPO型光コネクタにおいても、極めて良好なPC (Physical Contact) 接続特性を示し、500回の繰返し接続テストにおける接続損失と反射減衰量特性の安定性が確認された。

1. はじめに

近年、光伝送機器においては、高速に画像と音声の大容量データ情報を伝送するために、高密度な光ファイバケーブルの配線技術が必要とされている。

装置内・装置間の光ファイバ接続では、高芯線密度で簡易な着脱機構を有する光コネクタが求められ、現在、国内外に多芯MT (Mechanically Transferable) 光コネクタ¹⁾²⁾や、MTコネクタ技術を基に着脱を容易にしたMPO (Multifiber Push-On) 光コネクタ³⁾が普及しつつある。

このような光機器で用いられる光コネクタでは、接続端面に空気層の存在によって生じるフレネル反射による接続ロスの増大を低減するために、予め接続端面に屈折率整合剤を塗布するケースが多い。しかし、長期的に安定かつ良好な光学特性を得るためには、屈折率整合剤の塗布を必要としない光ファイバ端面同士の直接接続、いわゆるPC (Physical Contact) 接続が強く求められている。

高精度なPC接続を実現するためには、全てのファイバ端面は不揃いがなく、均一にフェルール端面より突出している必要がある。このため、光ファイバコネクタの端面加工技術の向上が、高品質の光伝送にとって極めて重要な課題である。MTやMPOコネクタ等のファイバ端面突出し研磨においては、一般的に、プラスチックフェルールとファイバとの材質の硬度差を利用した遊離砥粒研磨法が用いられている。

この方法では、光ファイバ(石英)より軟質であるフェルール(溶融シリカとエポキシ樹脂の成形体)の端面部分が早く研磨されるため、5分程度の研磨時間をかければ、フェルール端面より1 μ m程度のファイバ端面突出し量が得られる。

しかし、この従来の研磨法では、コネクタ材質の硬度差に制約を受け、十分な研磨時間をかけても、必要とする3 μ m以上のファイバ突出し量を得ることは困難である。また、所定の突出し量を得ようとするとファイバ端面の不揃いを引き起こしてしまう問題がある。特に、多芯光コネクタ、例えば8芯ないし12芯光コネクタ等の場合には、良好なPC接続を得るための十分なファイバ突出し量と端面の均一性を満足させることが困難であった。

本論文では、ファイバとフェルールの材質に関係無く、所定のファイバ端面突出し量が容易に得られる新しい超音波振動式研磨法について報告する。

2. ファイバ端面の新しい突出し研磨方法

2.1 PC接続のためのコネクタ端面要素

図1に8芯MPO型光コネクタの構造を示す。このMPO型光コネクタは、光の反射戻り光を低減するために、光ファイバ端面が光ファイバ軸の垂直端面と8度傾くように研磨されている⁴⁾。二つのコネクタ端面が、接続基準であるガイドピン孔に挿入されるガイドピンによって、対向接続される。この種の光コネクタのPC接続を得るには、主に以下の三つの端面要素が研磨加工によって保証される必要がある。

- (1) 十分なファイバ端面突出し量
- (2) 不揃いのないファイバ端面
- (3) 接続基準面とファイバ端面の角度精度

新しい超音波振動方式によるファイバ端面突出し研磨方法によれば、コネクタ端面の平坦研磨と、ファイバ端面の突出し研磨を完全に分離して行うことが可能となり、予め平面に仕上げられたファイバ端面同士の平坦精度を損なうことなく、上記PC接続に要求される三つの端面要素を満足することができた。

2.2 突出し研磨方法の仕組み

ファイバ端面と接続基準面に対する良好な角度精度と加工変質層のないファイバ端面を得るには、まず、コネクタ端面をメ

[†] 本論文は、2001年10月に日本機械学会論文集(C編)67巻662号に掲載されたものを編集して転載されたものである。

* 設備部 生産技術開発センター

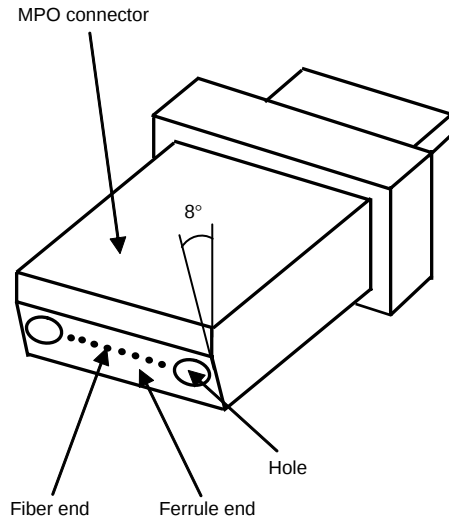


図1 8芯MPO型光コネクタの構造
8 MPO optical fiber connector

カノケミカル効果のあるラッピング砥石によって平坦度良く仕上げ、その後、図2に示す超音波振動研磨法によって、ファイバ端面以外のフェルル端面のみを研磨し、ファイバ端面の所定の突出し量を得ることとした。

図2は、筆者らが考案した新しい超音波振動研磨方式によるファイバ端面突出し研磨方法を示す概略図である。まず、予め平坦に仕上げられた光コネクタ端面を位置決め用ガイドピンによって、研磨補助フェルルの端面と対向させる。その後、両者の端面間に砥粒を塗布し、光コネクタ側の圧縮パネにより研磨のための押付け荷重を加えながら、研磨補助フェルル側に押付けられた超音波振動子に超音波振動を加える。その結果、超音波振動からの動的エネルギーを受けた砥粒が光コネクタ端面と研磨補助フェルルの端面を研磨することになる。

図2のように構成された研磨方法では、各々の光ファイバ端面（直径 $125\mu\text{m}$ ）は、研磨補助フェルルのファイバ挿入孔（直径 $126\mu\text{m}$ ）に対向しているために、塗布された研磨砥粒によって研磨されない。したがって、ファイバ端面周辺のフェル

ル端面のみが研磨され、ファイバ端面はコネクタの材質に関係なく、その周辺のフェルル端面より容易に突き出すことが可能となる。このようにして得られた複数のファイバ突出し端面は、予め高精度に仕上げられた平面状態のままに保てられており、振動研磨工程によって、ファイバ端面の不揃いを引き起こすことがない。また、ファイバ端面の突出し量も適切な研磨条件の選定によって、自由自在に得られる。

超音波振動を利用した研磨加工は、硬脆性材料の穴あけ加工等によく使われているが、その一般的な使い方としては、超音波振動子と直結されたホーンの先端部分自体が研磨媒体となる砥石であったり、または、研磨媒体となる砥粒に超音波振動パワーを直接的に加えたりする転写工具であったりするものが多い⁵⁾。

図2に示した今回の超音波振動研磨方法では、超音波振動子と直結されたホーンの先端部分が、研磨補助フェルルとを一体化しておらず、超音波の振動パワーが、研磨補助フェルルを通じて、ある程度減衰された状態で研磨砥粒に伝わる研磨補助フェルルを介在させたこの新しい超音波振動加工方法は、適切な加工環境設定と、高い加工位置精度の維持に大きな特徴がある。

まず、適切な加工環境については、研磨補助フェルルの採用によって、研磨砥粒の過剰な振動によって引き起こされ易い急激な熱エネルギーの上昇を抑える効果がある。従って、砥粒近傍での異常な温度上昇を回避できることから、複合材料（樹脂、接着剤、ガラス）で構成される光コネクタの材質劣化を防ぐことができる他、振動系の安定性に与える砥粒液の過度な蒸発による悪影響の緩和にも寄与できる利点がある。

第2の特徴は、得られるコネクタの高い加工位置精度である。多芯光コネクタのファイバ端面突出し研磨には、 $250\mu\text{m}$ ピッチに配置された直径 $125\mu\text{m}$ のファイバ端面をそのコア中心とのずれがなく、突出すことが求められる他、効率良く安定した突出し量が制御できることも必要とされる。研磨補助フェルルに設けられたファイバ挿入孔が、ガイドピンによって、光コネクタのファイバ端面と正確な位置に決められるので、突き出されるファイバ端面の芯ずれに及ぼす超音波振動子や研磨装置

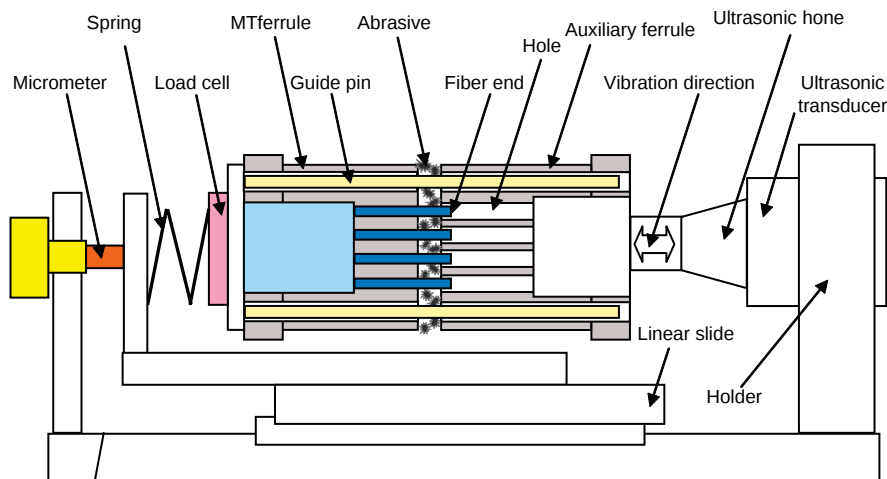


図2 超音波振動研磨方式によるファイバ端面突出し研磨方法の概略図
The principle of the novel vibration polishing method

等の横振動ブレの悪影響を抑えることが可能である。また、研磨される光コネクタ毎に研磨補助フェルールを交換するため、ホーンの先端部分は、研磨補助フェルールのような複雑な形状と高い位置精度を満たすような転写体とする必要がなく、その磨耗や交換等による振動系安定性への悪影響も避けられる。したがって、常に高い位置精度を有する超音波振動研磨が可能となる。

3. 超音波振動研磨によるファイバ端面突出し実験

3.1 実験装置と実験方法

図3は、図2に示した研磨仕組みを持つ実験装置の写真である。超音波振動部として、市販の小型超音波研磨装置を使用した。光コネクタと補助フェルールは、水平に配置された2本のガイドピンによって位置決めされ、両者の端面は、圧縮バネによって、研磨砥粒を介して互いに押付けられている。

研磨時の押付け荷重は、マイクロメータとロードセルによって定量的に設定できるようになっている。研磨作業中に超音波振動が加えられるが、その振幅や実際の研磨量等が非常に小さく、圧縮バネに与える変位量が殆どないため、設定された押付け荷重はほぼ一定値に保持される。

超音波振動によるファイバ端面の突出し実験には、予め平坦面に仕上げられた12MPO型コネクタを用いた。本研究では、押付け荷重がファイバ端面の突出し量と芯ずれ精度に与える影響について調べた。

押付け荷重を、それぞれ2 N、3 N、4 Nの三つの値に設定して実験した。ファイバ端面の突出し研磨量を研磨時間10秒毎に測定した。測定は、ファイバの配列方向に沿って、ファイバ端面の中心を通過するように2次元触針表面粗さ測定機で測定した。超音波振動の発振周波数は20 kHzに固定されている。研磨効率の向上と、ファイバ周辺へのダメージ低減を図るために砥粒濃度を10 wt.%とし、直径が3 μm のダイヤモンド砥粒を使用した。

3.2 実験結果及び考察

上記の実験装置と実験方法により、ファイバ端面の突出し研磨実験を行なった結果、以下の成果を得ることができた。

3.2.1 突出し量と押付け荷重の関係

図4に、超音波振動によるファイバ端面の突出し量と押付け荷重の関係を示す。ファイバ端面の突出し研磨量は、研磨時間と比例関係を示し、その増加傾向が押付け荷重の増大に従って大きくなることが認められる。また、従来の遊離砥粒方式を利用したファイバ端面突出し研磨方法では、最大1 μm 程度のファイバ端面突出し量を得るには5分間の長い加工時間を要したと比較すると、新しい加工方法が、加工効率向上効果のあることが分る。

累積突出し量に占めるサンプル別の突出し量のバラツキは、押付け荷重が小さいほど、大きい比率を示している。これは、押付け荷重が小さいほど、研磨砥粒が、研磨に寄与できる程度の振動が安定して付与されず、加工挙動が不安定要素を持つためと考えられる。

また、研磨初期の20秒までの突出し量の増加傾向はやや小さくなっている。これは、コネクタ端面と研磨補助フェルールの初期平坦度が僅かに異なることや初期の平滑な端面が砥

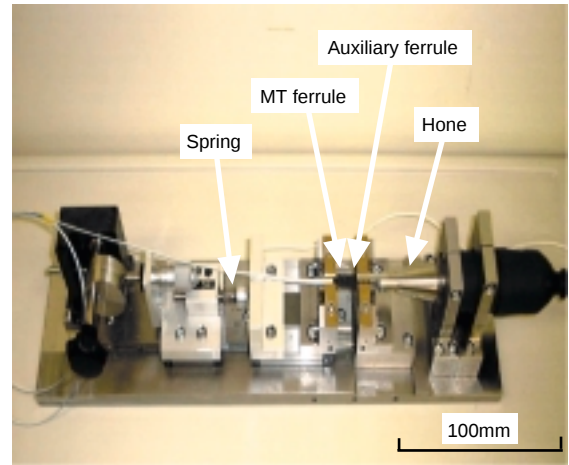


図3 実験装置の概観
External view of experimental equipment

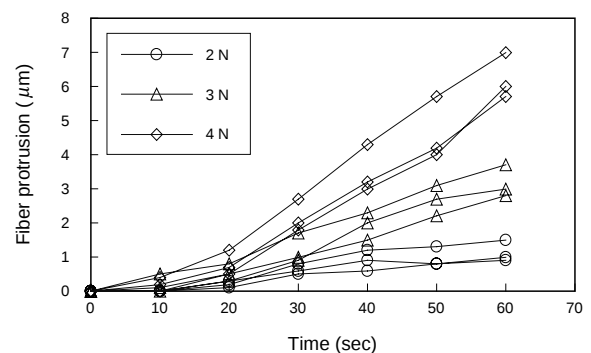


図4 突出し量と押付け荷重の関係
Relationship between fiber protrusion and load

粒を端面外に弾き出し易いこと等によるものと考えられる。

砥粒の種類とその粒径の大きさが、研磨効率等の特性に大きな影響を及ぼすことは良く知られている。ダイヤモンド砥粒を用いた上記の結果に比べて、同じ粒径のアルミナ砥粒を用いると、研磨効率が十分の程度に下がったことを確認している。

3.2.2 突出し端面の芯ずれ

超音波振動によるファイバ端面の突出し研磨においては、図2に示すように、125 μm 径のファイバ端面が、対向する研磨補助フェルールの126 μm 径のファイバ挿入孔に精度よく配置される必要がある。これは、研磨によって突出されるファイバ端面が、光通路であるコア（直径10 ~ 62.5 μm ）中心となれるかどうかを左右する。特に、62.5 μm 径のファイバにとっては、芯ずれ量が20 μm を超えると、コア端面の一部が超音波振動研磨によって除去されてしまう恐れがある。実用上、この芯ずれ量を10 μm 以下に抑えることが望ましいといわれている。

図5に、押付け荷重と突出されたファイバ端面の芯ずれ量について、それぞれの荷重で3回実験した結果を示す。2 Nと3 Nの押付け荷重の場合は、芯ずれ量が僅か5 μm 以下と良好である。芯ずれ量は、超音波振動研磨の押付け荷重の増加とともに増える傾向を示す理由は、8度の傾斜端面に加えられた押付け荷重の横分力が横方向振動を引き起こした影響と考えられる。

3.2.3 ファイバ端面の突出し状態

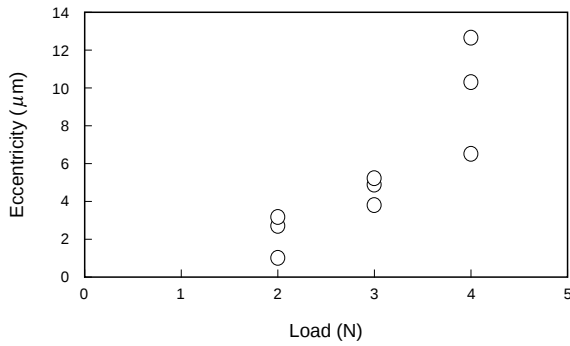


図5 ファイバ端面芯ずれ量と押付け荷重の関係
Relationship between fiber protrusion eccentricity and load

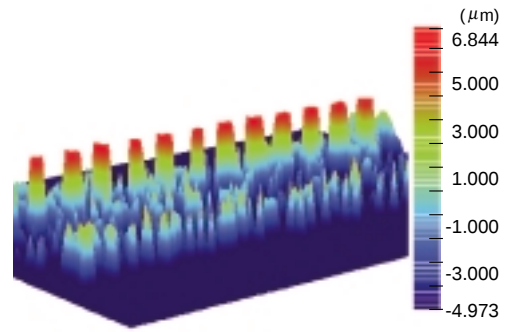


図6 12MPO光コネクタのファイバ端面突出し状態
Fiber protrusion of 12-fiber MPO connector

図6に、WYKO社製測定機によるファイバ端面の突出し状態を測定した一例を示す。12芯のファイバ端面には不揃いがなく、超音波振動によって研磨されたフェルールの端面より5μm程度の突出し量をもっている。

図7は、超音波振動によるファイバ端面の突出し研磨を行なった前後のファイバ端面とその周辺のフェルール端面のSEM写真を示している。振動研磨後のSEM写真にはファイバ端面に損傷がなく、その周辺のフェルール端面のみが研磨されたことが分かる。

また、ファイバ外周の欠け傷が小さく、その真円度も数μm程度と良好であった。

ダイヤモンド粒径の影響についても調べた結果、3μmと6μmの場合について研磨効率は粒径にほぼ比例関係を示したが、ファイバ周辺に生じる欠け傷の大きさは6μm径の方が十数μmと顕著に大きかった。したがって、ダイヤモンド粒径は3μm程度が適当と考えられる。

4. 光学特性による評価

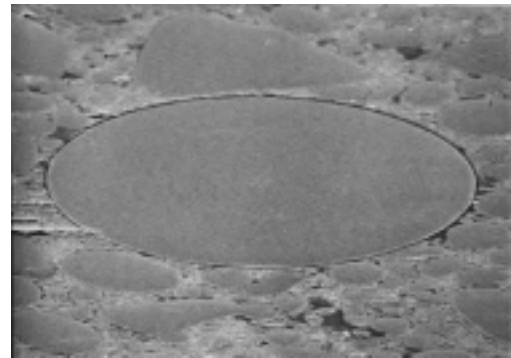
超音波振動によるファイバ端面の突出し研磨方法を用いて、5μm程度のファイバ端面突出し量が得られた12MPO型光コネクタについて、PC接続特性と、500回の繰り返し接続による接続ロスと反射減衰量の信頼特性を評価した。

4.1 PC接続特性

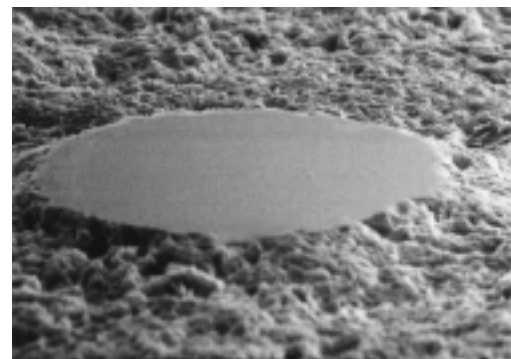
PC接続特性の評価は、接続端面に屈折率整合剤を塗布する場合と塗布しない場合の接続ロスの違いによって行った。

屈折率整合剤を塗布しない場合は、ファイバ端面同士が直接的に物理的な接触（PC）がなされなければ、接続端面間に屈折率の異なる空気層が生じてしまい、大きな接続ロスを引き起こす。シングルモードファイバの場合、僅か0.3μmの空気層が、0.6 dB以上の接続ロスを引き起こすことが知られている。一般的に、整合剤有無による接続ロスの違いが、0.05 dBを越えると良好なPC接続と言えなくなる。

図8に、今回の超音波振動研磨と従来の遊離砥粒研磨によるファイバ端面の突出し方法の違いによって、屈折率整合剤の有無における12MPO光コネクタの接続ロス変動の結果を示す。屈折率整合剤有り（Li）と無し（Ln）で差が無ければ、理想的なPC接続を表わす直線（Li = Ln）となる。超音波振動研磨方法の場合は、整合剤の有無による接続ロスの変動が殆ど認めら



(a) Before vibration polishing 30 μm



(b) After vibration polishing 30 μm

図7 研磨前後のファイバ端面とフェルール端面
Endfaces of fiber and ferrule before and after polishing

れず、全てのファイバ芯線に良好なPC接続が得られた。

一方、遊離砥粒研磨方法を利用した従来のファイバ突出し方法の場合には、整合剤の有無による接続ロスに大きな変動が見られ、十分なファイバ端面突出し量と、揃ったファイバ端面が得られていないことがこの評価によって裏付けられた。

4.2 光学特性の信頼性評価

良好なPC接続を実現するために、超音波振動研磨方法を用いれば、コネクタの材質に制約されずに十分なファイバ端面突出し量を得ることが可能となった。一方、ファイバ端面突出し量を大きくすることはファイバ端面のダメージを増大させることにつながるものが心配される。このため、頻繁に繰り返し接

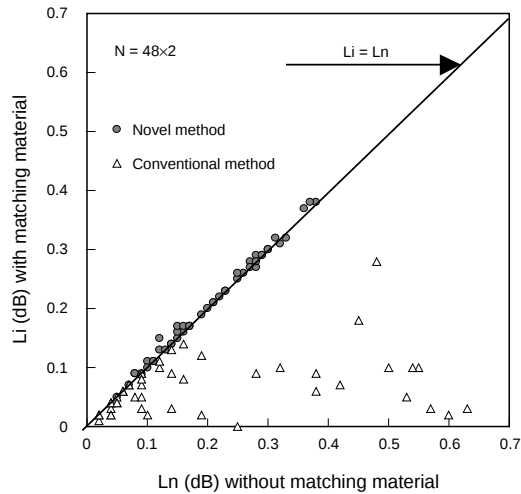


図8 屈折率整合剤の有無における12MPO光コネクタの接続ロス

Relationship between insertion losses with and without index-matching material for single-mode 12-fiber MPO connectors, when polished by the new and conventional methods.

続を必要とする用途に適用できるかについての信頼性評価が求められる。光学的な信頼性評価として、屈折率整合剤を使用しない条件で、12MPOコネクタの500回繰り返し接続における接続ロスと反射減衰量の変動評価を行なった。12本のファイバ芯線全数について評価を行なった。

多量な評価結果を簡略に表示するために、図9および図10は、それぞれ1芯目、6芯目、7芯目と12芯目ファイバの100回毎の接続ロスと、反射減衰量の結果のみを示している。12MPOコネクタのファイバ端面突出し量は約 $5\mu\text{m}$ 程度であり、コネクタ接続力は、実用上必要とされる9.8 Nである。また、光源には、1310 nm波長のレーザー光源を使用した。これらの評価結果から分かるように、500回の繰り返し接続では、光コネクタの接続ロスと反射減衰量における光特性の劣化が認められなかった。

5. おわりに

多芯光コネクタのPC接続を実現するために、ファイバ端面の新しい突出し研磨方法として、研磨補助フェルールを取り入れた超音波振動研磨方法を提案した。12MPO型光コネクタにこの研磨法を適用した結果、以下のことを明らかにすることができた。

- (1) 超音波振動における研磨補助フェルールの導入によって、コネクタの材質に制約されずに十分なファイバ端面突出し量を得ることが可能である。
- (2) ファイバ端面の突出し量は、研磨時の押付け荷重と良い比例の関係を示した。
- (3) コア中心に対する突出し端面の芯ずれ量は、過大な押付け荷重を避ければ、数 μm 程度に抑えることが可能である。
- (4) 本研磨方法によって得られた12MPO光コネクタは、極めて良いPC接続を実現した。
- (5) $5\mu\text{m}$ のファイバ端面突出し量を有する12MPO光コネク

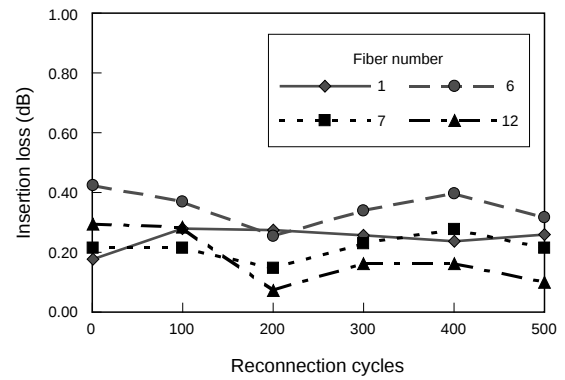


図9 500回繰り返し接続における接続ロス
Insertion loss changes for reconnection of 500 cycles

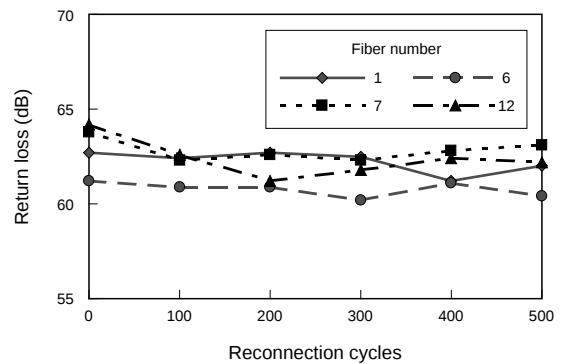


図10 500回繰り返し接続における反射減衰量
Return loss changes for reconnection of 500 cycles

タは、500回繰り返し接続テストでの接続ロスと反射減衰量が極めて安定である。

- (6) 本研磨方法の研磨効率率は、従来法の研磨効率に比べて約10倍向上できる。
- (7) 研磨補助フェルールという新しい加工要素を導入することによって、超音波砥粒加工法はミクロンオーダーの加工精度まで向上する。

参考文献

- 1) T. satake, et al.: "A new type of demountable plastic-molded single-mode multifiber connector," J. Light. Tech., 4(1986), 1232.
- 2) S. Nagasawa, et al.: "Mechanically transferable single-mode multifiber connector," in Tech. Dig. IOOC'89, 21C2-1(1989), 48.
- 3) S. Nagasawa, et al.: "A high-performance single-mode multifiber connector using oblique and direct endface contact between multiple fibers arranged in a plastic ferrule," Photon. Tech. Lett., 3(1991)937.
- 4) W. C. Young, et al.: "Loss and reflectance of standard cylindrical ferrule single-mode connectors modified by polishing a 10 deg. Oblique endface angle," Photon. Tech. Lett., 1(1989)461.
- 5) 奥出顕造：超音波工学，コロナ社（1995）