単一工程光コネクタ現場組立用小型研磨機の開発*

松井伸介** 長瀬 亮*** 柳 秀 一†

Development of One-Step Polishing Machine for On-Site Optical Connector Assembling

Shinsuke MATSUI, Ryo NAGASE, and Shuichi YANAGI

A new optical-connector-end polishing machine for On-Site was developed. This machine can polish a connector end with only one-step by a very simple mechanism. Using this machine, the end polishing of the optical connector can become very easy and fast. We characterized the one-step polishing process. As a result, it revealed that the machine has sufficient power for good polished planes unless only one-step. Polished planes had good precision met with the specification and the polishing had good reproducibility.

Key words: optical connector, on-site assembling, end polishing, lapping film, polishing machine

1. 緒 言

光ファイバが通信のさまざまな場面に用いられる時代を迎え、光信号接続技術はますます重要となってきた。特にオフィス内などでの LAN (Local Area Network) の構築作業、一般家庭への FTTN (Fiber To The Network) 等のフィールド工事、あるいは電話会社内での修理、改修等、現場での光接続は大きな課題である。例えば FTTN においては、FAS コネクタに代表される非常に施工の簡単な新しい簡易コネクタが開発されアクセス系に導入されている。このように重要になってきている現場での光接続技術の中の一つの有力な方法に、一般に広く用いられ主に工場で作られている SC 形や MU 形などの高性能な単心系コネクタを、現場等さまざまな場所で短時間に簡単、低コストに組み立てることが考えられる。しかし、これら光コネクタ組立は、光ファイバの接着、コネクタ端面研磨、部品の組立の要素からなっており、従来現場では現実には難しいとされてきた。すなわち、光ファイバのフェルールへの接着は、厳しい屋外環境でもコネクタの接続特性が担保されるように強固な接着を必要とされる。そこで、従来は高性能なエポキシタイプの接着剤を用いて高温で 30 ～ 60 分という長い時間をかけて硬化させていた。また、コネクタ端面研磨は、工場では比較的大型の高精度研磨機を用いて、十分な洗浄を行いながら多数の工程を経て行われている。このとき研磨技術特有の技能と熟練も必要とされる。これらの作業は多数のコネクタに対し 1 括で行われるため、1 端子あたりの作製時間の短縮とコストの低減を実現していた。ところが現場では、一度に 1 ～ 2 端子程度の作製しか要求されないにもかかわらず、多数の工程を経るため長い時間がかかる。その上、研磨作業に代表される特有の熟練された技能が必要となるため専門家ではない一般の配線施工者には難しいと考えられてきた。

これら難しいと考えられてきた課題に対し、我々はこれまで

に必要な強度を得ることができる新しい高性能瞬間接着剤の開発による接着時間の大幅な短縮と、接着ジグによる接着作業の簡便化及び、小型高性能で、高速研磨が可能な研磨機の検討によって現場組立技術の開発を行ってきた²⁾。

この中で重要なポイントを占める小型高速なコネクタ端面研磨機では、これまでに、電池駆動で高速に研磨できる小型研磨機の開発について報告した^{3) 4)}。しかしこの装置では、再現性、確実性は向上したものの、形状形成する粗加工と鏡面研磨する仕上げ加工からなる一般的な 3 工程加工を踏襲しており各工程間では研磨フィルムの交換、洗浄等の作業が必要であり、時間がかかるのみならず煩雑であった。また、洗浄等ではある程度の経験が必要となる。このことが研磨技術への抵抗感という課題としていぜん残っていた。

そこで本論文で新しい今までにない考え方の加工法に基づいてこれら 3 工程を単一工程化する小型研磨装置について記述する^{5) 6)}。この装置を用いれば、研磨技術を意識せずに誰でも簡単にコネクタフェルール端面加工が行える。これにより元来広い適応範囲が考えられる通常の高性能な光コネクタの現場組立技術の導入を加速することが可能となる。

2. 単一工程研磨技術および実験方法

2.1 加工工程

光コネクタにおいて光ファイバは、ジルコニア製の円柱形 (外径 2.5 mm (SC 形)、1.25 mm (MU 形)) のフェルールと呼ばれる部材の中心軸部に保持される。本論文で対象としている光ファイバ (外径 125 μ m の石英製) は、通信に最も多く用いられるシングルモードである。通信光はその中心、直径ほぼ 10 μ m のコア部を導波伝送される。コネクタ同士の光接続は、対向するフェルール同士を割りスリーブ (りん青銅あるいはジルコニア製) の中で整列することによって行われる。この際、ファイバ同士の調心は高精度なフェールの外形基準 (0.5 μ m 以下の偏心) に拠っている。対向するフェール端面はわずかに凸球面 (曲率半径 $R=10 \sim 25$ mm) に加工される。そして両側から 10 N 程度の荷重で押圧することによりこの凸球面同士をわずかに弾性変形させ、光ファイバのコア同士の間に空気層が存在しないよう確実に接触させている。この接続状態をフ

* 原稿受付 平成 21 年 7 月 6 日

** 正 会 員 日本電信電話(株) フォトニクス研究所 (神奈川県厚木市森の里若宮 3-1)

*** 千葉工業大学

† 東日本電信電話(株)

イジカルコンタクト (Physical Contact ; PC) という、石英とジルコニアという弾性定数や線膨張係数の異なる 2 つの材料からなる端面の研磨では、広い環境温度範囲で良好な接続を保つために高い端面形状精度が必要とされる。そしてさらに反射戻り光による通信への悪影響が無いように加工変質層の非常に少ない低ダメージな端面加工であることも要求される。

図 1 に従来の技術(a)と本技術(b)における光コネクタ端面加工工程を比較する。加工はすべて水を研磨液とした湿式で研磨フィルムを用いて行う。従来工程では、まず前処理としてフェルールに接着固定された光ファイバの余分な長さをファイバ用ルビーカッターで切断する。この切断ではファイバは図のようにわずかにフェルール端面から突出しており、さらに通常はエポキシ接着剤によってその周辺が保護されている。その後ファイバとフェルールがほぼ同一面になるように加工 (第 1 工程) を行う。次に第 2 工程として高速に精度良く加工が行えるダイヤモンドフィルムを用いて凸球面形成をする。そして最後にガラスに対しダメージの少ない加工が行えるシリカフィルムを用い鏡面仕上げを行う。凸球面形成は研磨フィルムを貼付する弾性板の変形を利用する。円柱形のフェルール端面を研磨フィルムに加工荷重で押し込むと弾性板の変形の量の違いによってフェルール端面周辺部により大きな反力としての応力が集中する。この応力分布により平均として凸球面の形成が行える⁹⁾。これら従来技術に対しわれわれは接着・組立作業を含めると多くの工程からなるオンサイトでの組立がより行いやすいように研磨工程の大幅な簡略化を行った。まず、簡単・短時間な新規前処理を導入し第 1 工程を省いた。具体的には、図 1 (b) の工程図のようにファイバを切断するのではなくフェルール根元部で確実にブレイク (破断) することによってファイバのフェルール端面からの突出を前処理の段階で除去する。これは例えば比較的硬い金属上をフェルール端面をスライドさせれば容易に行えた。ただしこのような処理ではフェルール内部へのファイバ折れ込みが発生してしまう。しかし新しい方式による加工装置では高速にフェルールを加工することが可能であり折れ込みの除去は容易である。第 2・3 工程に関しては、以下に述べるような従来にない加工方式を開発し、簡単な加工装置で粗、仕上げ連続加工を行い単一工程化を実現した。

2.2 単一工程研磨装置

次に、開発した単一工程化を可能とする新しい粗・仕上げ連続加工方式及び装置について述べる。図 2 は加工の概念図を示す。この図はフェルールと研磨定盤の相対運動軌跡の概略図を示している。実際にはフェルールが静止し研磨定盤が動く。図のように研磨定盤の同一面に粗加工用と仕上げ加工用のフィルムを設置する。加工は図における粗加工研磨フィルム上のスタートポイントから始まる。研磨定盤は、速い小径の公転運動による加工を行いながらゆっくり自転する。これに伴い、加工位置は、連続して粗加工領域から仕上げ加工領域へ図 2 矢印のように移動し、仕上げ加工領域のエンドポイントで加工が終了する。加工液である純水はスタートポイントで 1 滴を供給する。工程の途中での洗浄、それに伴う加工液の再供給はしない。加工装置はこのような簡単な 2 種類の回転の組み合わせだけで動作するので、小型で安価に構成できる。しかしこの方法では従来からの一般的な見地からすると粗加工領域で発生する脱離砥粒あるいは加工屑が加工液ともに仕上げ領域まで持ち込まれ、それらが仕上げ加工中に研磨面にスクラッチ等の大きなダメージを与えてしまうことが予想される。そのため通常は、加工技

Fig.1 Polishing process

Fig.2 Ferrule trajectory to polishing plate in machining process

Fig.3 Elimination mechanism for influence of debris occurred in rough polishing region

Fig.4 Developed one-process polishing apparatus for optical connector

術として用い難いと考えられてきた。そこで本加工法では加工に小径の高速公転を使用する。図3に示されるようにフェルール保持部底面と研磨板との間に保持されている研磨液には、これにより大きな攪拌力と旋回力が発生する。すると液中に存在する遊離残渣固形物は常に研磨液の中で浮遊状態になり研磨面にはほとんど存在しなくなる。さらに液中の旋回力によりフェルール近傍から排除され、加工点であるフェルール端面と研磨定盤の接触面には遊離残渣固形物等が進入できなくなり仕上げ加工への影響をなくすることができると考えられる。なお、高速回転が公転運動であるため、研磨液自体に働く力は、時間的に一定方向（半径方向）の遠心力ではなく、短時間に方向が変化する旋回力である。そのため研磨液は、定盤が十分な高速で公転しても飛散せずメナスカス力で保持される。図4(a)は、この新しい加工方式を実現する単一工程研磨装置を示す。大きさはほぼ高さ150 mm、直径75 mm、重さ1.2 kgであり、現場等での作業用としては十分小型である。また、電源は、DC15Vとなっており、屋外施工用のバッテリーが利用できる。図4(b)には、実際に研磨板に研磨フィルムが貼付されている様子を示す。粗加工用ダイヤモンド、仕上げ加工用シリカそれぞれの砥粒層を有するフィルムが同一面に構成されている様子がわかる。

2.3 実験

この新しい工程および加工方式を用いて、コネクタの加工特性を評価する実験を行った。評価したコネクタは、SC形光コネクタ（フェルール直径2.5mm）である。研磨フィルムとしては、粗加工領域に粒径5 μm のダイヤモンド、仕上げ領域にシリカフィルムを用いた。ここで、ダイヤモンド砥粒径は以前の検討によって必要な加工量を得るために適当とされた粒径である⁴⁾。研磨は標準条件として、粗加工領域1分間、仕上げ加工領域1分間で行い、総加工時間は2分である。公転の半径は、3.5 mmと小径で、回転数は1500 min^{-1} とした。実験においては、開発した単一工程研磨装置（図4）及び同等の動きができ駆動パラメータの変更が可能な検討装置（図5）を用いた。研磨定盤の自転による領域の移動は加工の公転中心が半径15 mmの円上を300度動くことによって行った。加工量の測定は工具顕微鏡を用い加工の前後のフェルールの長さの変化を調べた。精度はおおよそ $\pm 1 \mu\text{m}$ である。加工荷重は2.45 N加えた。これは光コネクタ研磨機としては比較的良く用いられる荷重であるが、フェルール端面の径がほぼ2.1mm（端面にC面が形成されているため）であるので、加工圧力としては850 kPaとなり、研磨としてはかなり高い圧力となる。研磨液としては純水を0.5 ml程度使用した。

加工状況の詳細な評価は、主に粗加工である前半部分と仕上げ加工である後半部分について行った。粗加工は、加工開始直後および20, 30, 40, 50秒後で加工を中断し、その時点での、加工量と端面の状況の測定・観察を行った。これにより前工程でのファイバのブレイクによる折れ込みの影響がどのように消えていくかを観察した。

一方、後半の加工では、加工の進行に伴い、スクラッチ等の加工ダメージがない、良好な鏡面が形成されていく様子を観察した。その際、本加工のような粗加工領域で発生する遊離残渣固形物の影響が考えられる加工と原理的にそれらの発生のない加工法とを比較をした。これは本加工法による仕上げ加工領域において、離脱砥粒等の固形物の影響が見られないことを検証するためである。具体的には粗仕上げ連続加工による単一工程加工と、仕上げ加工領域に入り始める70秒で装置を停止し、別

途単独で同一の装置を用いて残りの仕上げを行う加工とを比較した。ここで粗仕上げ連続加工では、加工前に供給した純水（0.5 ml）を加工液として最後まで用いる。一方別途単独仕上げ加工では、加工停止時に洗浄を行い、あらたに、シリカ研磨フィル

Fig. 5 Sustainability of polishing liquid during high speed revolution

Fig. 6 Change of connector end surface with machining time in rough polishing region

Fig. 7 Relation between machining length and machining time in rough polishing region

ムのみを装着し、新たな研磨液とともに、合計で粗・仕上げ連続加工と同一の加工領域の移動距離（研磨板の自転角度）、加工時間になるように加工した。比較は、加工時間に対する加工面の性状変化と反射減衰量変化によって行った。反射減衰量は、その値が小さいと加工面に残されたダメージが大きい⁹⁾。反射減衰量の測定は、安定した値を得ることが可能なカブラー法により測定し、この測定系でほぼ 60 dB までの値を測定することが可能である。

最後に、加工されたフェルール端面について総合的な評価をした。評価項目は、実際の光コネクタ特性として重要な、ファイバ引き込み量（端面でフェルールに対しファイバ面が引き込んでいる量）、偏心量（ファイバ中心と凸球面頂点とのずれ量）、曲率半径、反射減衰量、面状況の観察である。ここでファイバ引き込み量はフェルールの材料であるジルコニアと光ファイバの材料であるシリカでは、ジルコニアの方が硬く、難加工材であるためファイバが引き込む傾向にある。そこでコネクタ研磨では仕上げ加工にシリカ砥粒を用いることにより、ジルコニアに対する化学的な作用も利用してこの段差を解消している。

3. 結 果

図 5 は、実際に加工している様子を示す。研磨液は、研磨定盤が 1500 min^{-1} の高速で公転運動しているにもかかわらず定盤とフェルール保持部底面との間に、メニスカスを形成し保持されている。したがって以下の実験で加工点に研磨液が常に存在しているとしてよい。

次に図 6 は、フェルールから突出したファイバをブレイクした後の粗加工領域での加工時間経過に伴うファイバ端面の様子を示す。図の濃い灰色の円形部分が直径 $125 \mu\text{m}$ の光ファイバに相当し、その周辺がジルコニア製のフェルールである。図(a)の加工開始直後は装置駆動後 3~5 秒で加工を止め観察したものである。フェルールには、ダイヤモンドの加工による破碎を伴うスクラッチ痕が観察される。一方ファイバは、ブレイクによる折れ込みが大きく、加工は一部にとどまっている。図(b)は 30 秒加工した場合の 1 例であるが、ファイバの一部にディンプルが観察され折れ込みの影響がまだ残っている様子がわかる。一方、40 秒加工した図(c)では、ファイバ全面に加工痕が広がり、折れ込みの影響はなくなっている。この状況は 50 秒後（図(d)）でも同様である。これらの端面の状況に対応し、加工時間と加工量および折れ込みの影響の有無を図 7 に示す。それぞれの実験値は、一度の加工で指定の加工時間まで加工したサンプルの加工長さを示している。図のように加工量は、加工時間とともに増えていることがわかる。折れ込みの影響は加工開始直後の試料ではすべてあるのに対し、20 秒（平均加工量 $26 \mu\text{m}$ ）、30 秒（平均加工量 $40 \mu\text{m}$ ）では、折れ込みの影響が見られない試料もある。一方平均加工量 $51 \mu\text{m}$ の 40 秒後以降では折れ込みの影響は観察されていない。そして 50 秒の加工で加工量は平均で $60 \mu\text{m}$ 程度に達している。したがって本装置において粗加工として 60 秒程度加工すれば十分前工程のブレイクの影響は除去できることがわかる。

図 8 は、粗仕上げ連続加工の仕上げ加工領域において、加工開始から 70 秒後（図(a)）、80 秒後（図(b)）、85 秒後（図(c)）、90 秒後（図(d)）、95 秒後（図(e)）、120 秒後（図(f)）で加工を中止した時の加工面の状況を示す。70 秒後では、フェルール、ファイバ共にダイヤモンドによるスクラッチ痕が大きく残り、大きな加工ダメージが表面に形成されていると思われる。それに対し、80

秒後では、シリカ砥粒の仕上げ加工によりこのスクラッチがある程度減少している。しかし、依然フェルール部、ファイバ部共に比較的大きいものを含んだ大小のスクラッチが存在していることもわかる。それに対し 90 秒後で加工面の状況が大きく変化する。フェルール部では、もはやスクラッチが見られずファイバ端面でも薄いものが数本見られる程度であった。この 80 秒後と 90 秒後の違いは、単独仕上げ加工でもほぼ同様であった。この中間の 85 秒後では図からわかるように、ファイバ端面には比較的小さいスクラッチが比較的多くまだ存在しているが、フェルール部のスクラッチはなくなっている。さらに加工時間を長くし 95 秒になるともはやファイバ端面にもほとんどスクラッチはなくなり図では 1 本薄いものが観察される程度となる。そして最終的に 120 秒加工すると図 8(f)のようになり、ほとんどの加工でフェルール、ファイバともにスクラッチのない滑らかな鏡面となる。

Fig. 8 Connector end surface change with machining in the fine polishing region

Fig. 9 Relation between return loss and machining time in fine polishing region

図9は加工時間に対する反射減衰量の変化の様子を示す。反射減衰量は、ファイバ端面のガラスの加工ダメージによる高屈折率層に起因する光の反射戻り光の量の指標となっており、値が低いほど反射光が多くダメージ大きく、層が厚いことを示している。70秒後では、反射減衰量は連続加工、単独仕上げ加工ともに、32.8 dBの低い値を示し、加工面にダイヤモンド砥粒の加工ダメージがほぼそのまま残っている。これに対し80秒後ではファイバ面のスクラッチが少なくなることに伴って反射減衰量は連続加工で39.1 dB、仕上げ単独加工で、37.8 dBまでそれぞれほぼ同程度まで上昇する。さらに、90秒後では、この値は、両加工条件共に50 dB前後（連続加工49.7 dB、仕上げ単独加工50.4 dB）にまで達する。このとき加工面はファイバ端面でも薄いスクラッチが数本観察される程度となる。そしてこれ以降いずれの加工時間でも反射減衰量は、50 dB前後の値を維持し続けていることがわかる。ここで85秒後の加工では、単独仕上げ加工43.7 dBに対し、連続加工では47.3 dBを示している。若干、単独仕上げ加工の方が反射減衰量の改善に時間がかかっている。連続加工では加工液に粗加工での離脱砥粒、加工屑が存在しえて、それにより、仕上げ加工による加工面、反射減衰量の改善により時間がかかる可能性が考えられる。しかし実際には単独仕上げ加工と同等以上の加工が行えることがわかる。また、一度加工面が良好になるとその状況が加工中維持される。以上の事実より本加工法では粗加工領域での遊離残渣固形物の影響がないと結論付けることができる。

図10は、加工された100端子端面の形状特性と反射減衰量を示す。曲率半径は仕様値10から25 mmに対し平均16.9 mm、標準偏差0.9 mmである。またファイバとフェルールとの段差（プラスがファイバが突出）を指すファイバ段差量は仕様値が $-0.05 \mu\text{m}$ から $0.1 \mu\text{m}$ であるのに対し、平均 $0.03 \mu\text{m}$ 、標準偏差 $0.02 \mu\text{m}$ を示した。さらにファイバの中心と凸球面頂点の偏心を示す偏心量も仕様値が $50 \mu\text{m}$ 以下であるのに対し、平均 $18 \mu\text{m}$ 、標準偏差 $9.8 \mu\text{m}$ であり、いずれの値も十分仕様を満たす良好なものであった。反射減衰量（高いほど加工ダメージの少ない良好な加工面）はすべての試料で50 dB以上を示しこれも良好な結果となった。これらの結果より、新しい加工工程、方式を採用した単一工程研磨機は、工場で作製される光コネクタとほぼ同等なコネクタ研磨を行えることが明らかになった。

4. 結 言

新しい工程設計、加工方式による単一工程研磨機を開発した。そして、この単一工程光コネクタ現場組立用小型研磨機の単一加工工程における粗加工領域での切りくず、離脱砥粒の影響を調べた結果、以下のことがわかった。

- (1) 本加工技術・装置により簡単に短時間でSC形光コネクタの仕様値を満たす研磨加工ができることがわかった。これにより本コネクタ研磨技術を一般の施工技術として広く使用することが可能となる。
- (2) 単一工程化による連続仕上げ工程において加工残渣物が存在していても、単独仕上げ加工と同等の良好な加工面を実現する。

参 考 文 献

- 1) 鎌 光男, 棚瀬博之, 小田泰男, 栗森雅史, 中島龍哉, 渡辺ひろし: 光サービスの経済化・即応化に貢献する R&D, NTT 技術ジャーナル, 18, 12 (2006) 53.
- 2) Shuichi Yanagi, Masaru Kobayashi, Sigeru Hosono, Ryo Nagase, Shinsuke

Fig. 10 Polished end plane characteristics of optical connectors

- Matsui, and Shigehisa Ohki : Rapid Assembly Technique for Optical Connector, IEICE TRANS. ELECTRON., E89-C (2006) 1227.
- 3) Shinsuke Matsui, Shigehisa Ohki, Shuichi Yanagi, Ryo Nagase, and Masaru Kobayashi : Development of a Rapid Polishing Machine for On-Site Optical Connector Assemble, IEICE TRANS. ELECTRON., E89-C (2006) 1233.
 - 4) 松井伸介, 大木茂久, 柳 秀一, 長瀬 亮, 小林 勝: SC形光コネクタ現場組み立て用小型高速研磨機の開発, 2005年度精密工学会秋季大会学術講演論文集(2005)307.
 - 5) 松井伸介, 大木茂久, 柳 秀一, 長瀬 亮, 小林 勝: 単一工程光コネクタ現場組立用小型研磨機の開発, 2006年度精密工学会秋季大会学術講演論文集(2006)305.
 - 6) 松井伸介, 柳 秀一, 長瀬 亮: 単一工程光コネクタ現場組立用小型研磨機の開発 (第2報) - 単一工程加工と他コネクタへの適応 -, 2007年度精密工学会秋季大会学術講演論文集(2007)721.
 - 7) Y. Ando, S. Iwano, R. Nagase, K. Kanayama, and E. Sugita, : Advanced Optical Connectors for Single-mode fibers," NTT Review, vol. 3, no.3 (1991) 110.
 - 8) 松永和夫 大平文和 斎藤忠男 松井伸介 菊谷幸雄: 光コネクタ端面の高性能研磨装置の開発, 砥粒加工学会誌, 40 (1996) pp. 75-80
 - 9) 松井伸介, 大平文和, 小藪国夫, 松永和夫: 光ファイバの端面研磨と加工変質層・加工変質層と反射減衰量の関係, 精密工学会誌, 64(1998)1467