

光コネクターの加工技術

大平 文和・松永 和夫・斎藤 忠男

マルチメディア時代の到来に向けて、そのインフラストラクチャーとして家庭まで光ファイバーを導入する fiber to the home (FTTH) の実現が検討されている。このとき使用される光通信用部品のうち、光コネクターは、光ファイバー、光源とともに光通信システムを構成する基本部品の一つである。NTT の光加入者システムの概略とそこへの光コネクターの適用例を図 1 に示す¹⁾。このように、交換機や各種端末の接続部で数多く使用されており、今後ますますその数は増えていくものと予想される。

実用的な光コネクターの開発の経緯を以下に示す。1977 年にはマルチモードファイバー用 fiber connector (FC) 型コネクター²⁾が開発され、1979 年にはシングルモードファイバーにも適用できることが確認された³⁾。1986 年には NTT の鈴木らはフェルールの先端を凸球面状に研磨して突き合わせて光ファイバー同士を密接に接続する physical contact (PC) 接続技術を開発した⁴⁾。1988 年には新宅らは高信頼化 PC 接続技術を開発した⁵⁾。この PC 接続技術は、日本のみならず世界主要国のほとんどの光通信システムで採用され、光コネクターの主流技術となっている。

本稿においては、この接続用の最重要部品である光コネクターの概要を述べるとともに、このコネクターの光学特性、価格、信頼性に大きく影響を及ぼすコネクター端面の研磨加工技術および装置を中心に解説する。

1. 光コネクターの構成と製作法

1.1 構 成

光ファイバーコネクターについては、従来より各種の構成が提案、開発されており、用途に応じた使用がされている。特に、局内用は FC コネクター⁴⁾、single fiber coupling (SC) コネクター^{6,7)}など、また、線路用は mechanically transferable (MT) コネクター⁸⁾が開発され、光通信システムにおいて広く用いられている。

このうちコネクター端面を凸球面状に形成した SC コネクターは、光ファイバー相互を直接突合せできる PC 接続光コネクターの代表例である。この SC コネクターは、フェルールとしてジルコニアセラミックスを用いて部品点数を減らすとともに、研磨も容易な構成となっている（図 2）。光ファイバーを、接続ロスを少なく高い信頼性で接続するため、コア同士を正確に位置決めた上で適当なバネ圧力で接触させ、完全な密着状態で接続する構成としている（図 3）⁹⁾。さらに、アナログ映像光伝送特性等に向けて、反射減衰量を 40 dB 以上とした光学特性の優れたコネクターを advanced physical contact (APC) 光コネクターと称している^{10,11)}。

1.2 製作法と課題

上記のように優れた特性をもつコネクター構造ではあるが、その特性を十分発揮するためには、種々の製作上の技術課題を解決する必要がある。

SC コネクターの製作工程を図 4 に示す。本工程は大別して、フェルールへのファイバー挿入と接着、端面研磨、部品アセンブル、検査の工程からなるが、それぞれの工程において各種課題がある。そのうち、特に光学特性とコストに直接影響する端面研磨工程がきわめて重要である。

Machining technology for optical fiber connectors (1995 年 10 月 13 日受理)
Fumikazu OHIRA, Kazuo MATSUNAGA, Tadao SAITO
NTT 境界領域研究所 〒180 武蔵野市緑町 3-9-11

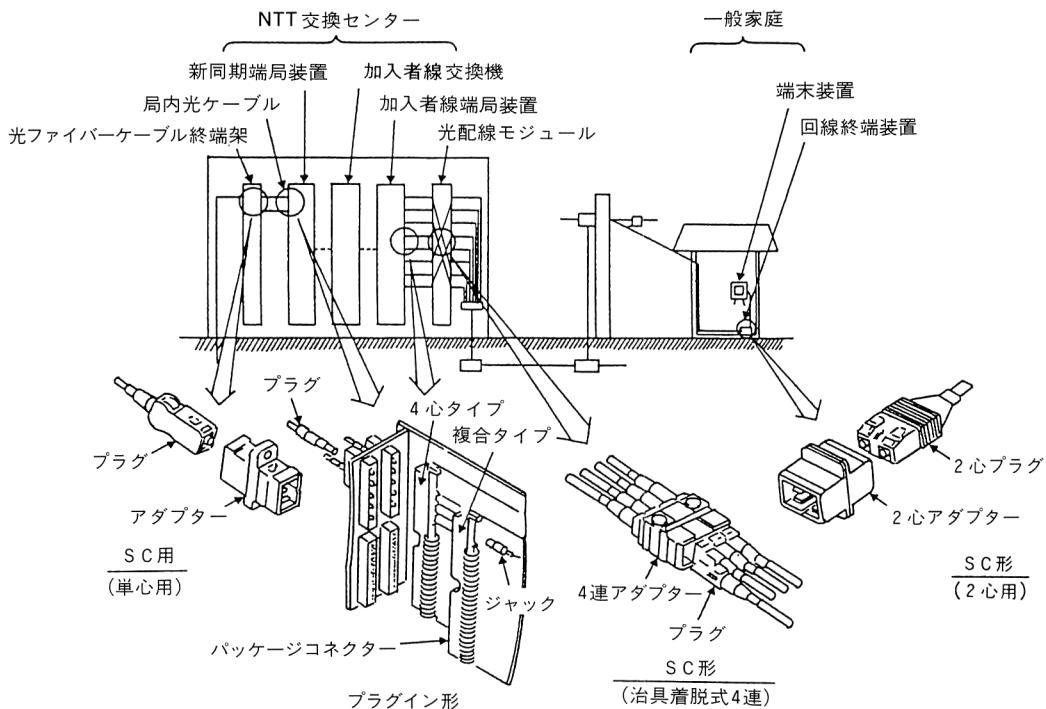


図1 光加入者系システムの概要と光コネクターの適用例。

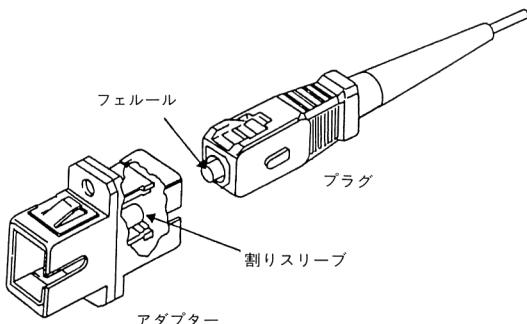


図2 SC型光コネクター（単芯用）。

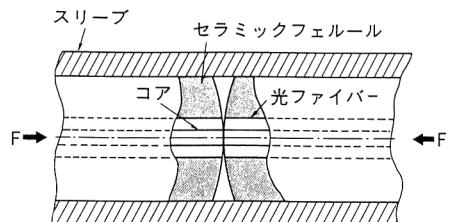


図3 PC型コネクターの構造。

本研磨工程においては、下記の課題を解決する必要があり、このため、次項以降で述べる各種研磨技術や研磨装置の研究開発が行われている。

- ① 高精度研磨により、コネクターの光学特性を向上させる。
- ② 研磨時間の短縮により、コネクター価格を低減させる。
- ③ 量産型、現場用小形軽量型等の用途に応じた研磨装置を実現させる。

図5に、上記工程におけるコネクター端面の研磨前と研磨後の状態、および研磨への要求条件を示す。ファイ

バーをフェルールに挿入して接着剤で固定した状態から、接着剤を除去し、フェルールとファイバー端面を一定の曲率半径をもつ凸形状に研磨する工程である。このときの要求条件は、先端部を所定の曲率半径の凸形状に形成すること、反射減衰量を向上させるために低歪研磨を行うこと、優れた形状（ファイバーとフェルールの段差が少ない、偏芯が少ない等）に形成すること、そして研磨コストを低減させることである。具体的には以下のような仕様を満たす必要がある。光学特性としては、挿入および反射特性がある。挿入損失については、凸形状の曲率半径精度、偏芯精度が大きく影響する。そのためのコネクター端面の仕様としては、曲率半径は10~25 mm、偏芯は50 μm以下と規定されている。これらの条

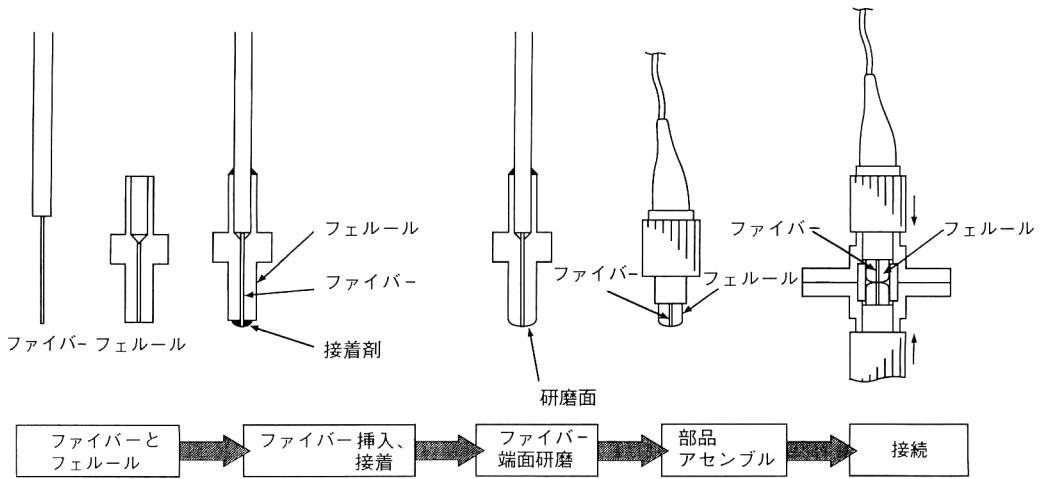


図4 SC型光ファイバーコネクターの製作工程。

件を満たしたコネクターの透過損失の特性は0.5 dB以下ときわめて小さい損失値を示す。反射の特性については、反射減衰量といわれる指標で示される。この反射戻り光が大きいと、コネクター間の多重反射やレーザーへの戻りが伝送特性の劣化を招くため、コネクターの光学特性として最も重要な項目の一つである。この反射戻り光の主な発生原因是、研磨端面の加工変質層の高屈折率層で発生するフレネル反射である。このため、研磨においては、できるだけ低歪研磨を行う必要があり、このため種々の研磨剤や研磨法が検討されている。

さらに各種環境下での信頼性向上には、フェルール端面からのファイバー端面の段差（引込み量）を小さくする必要がある。この段差が大きいコネクターでは、最悪条件の場合には、光ファイバーとフェルールの熱膨張率係数の違いから高温下で光ファイバー端面間に隙間が生じ、PC状態が解除される。このため著しく反射減衰量が低下するので、段差は0.05 μm以下が必要とされる。

2. 研磨技術、装置

2.1 PC研磨技術および装置

ここでは、PC接続のために先端を凸球面状に形成するために開発された研磨技術および研磨装置の例を示す。凸球面形状を形成するための装置構成としては、大別して金型転写方式と、弾性体による形状形成方式があげられる。

金型転写方式はレンズ研磨を行うのと同様な方法であり、四面形状の金型にダイヤモンドなどの研磨粒子を供給し、これにコネクター端面を押し当てて、金型の形状

形状精度	曲率半径 球面頂点の偏芯 段差（ファイバーとフェルール間）	10~25 mm <50 μm <0.05 μm
光学特性	反射減衰量	40 dB以上

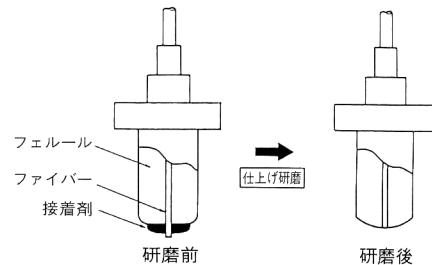


図5 SC型光ファイバーコネクターの端面研磨における要求条件。

をコネクター端面に転写する方法である。しかし、この方法には次の問題があった。
①研磨時間が長い（25~30分），
②錫製凹球面ラップ皿の維持管理コストが高い，
③凸球面偏芯が大きい，
④凸球面曲率半径の低減に対応しにくい。

一方、弾性体を用いる方式では、ゴムやセルロースフィルム¹²⁾を用いる手法が提案されている。ゴムを用いる方法は、例えばゴムの上に貼り付けたラッピングフィルム等にフェルールを押し付けて相対移動させることにより、フェルールを所定の形状に研磨する方式である。一方、セルロースフィルムを用いる方法は、セルロースフィルムにフェルールを押し付け、そのフィルムの弾性変形量に応じた曲率を形成し、そこにダイヤモンド等の

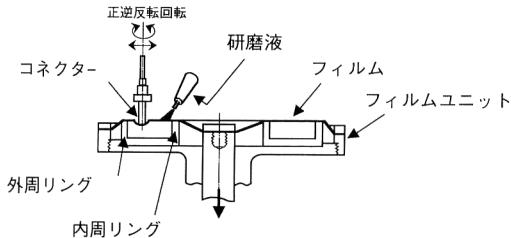


図6 弾性フィルムポリッシャーによる研磨方式。



図7 1工程高速研磨装置。

研磨粒子を供給する遊離砥粒研磨方式である。ここでは特に、金型に代えて、費用が安価で取扱いが容易なセルロースフィルムと、これに遊離砥粒を用いる研磨方法と装置を中心に述べる¹³⁾。

本研磨技術を用いて、粗加工、仕上げ加工の2工程からなる高速凸球面加工機が開発されている^{14,15)}。本装置は、粗加工として接着剤の除去と凸形状の形成を砥石で行い、その後、仕上げ加工として遊離砥粒による精密研磨を行う。図6にその仕上げ研磨用装置の構成を示す。この研磨機は、セルロースフィルムを内外周から張力をかけて張り、これにコネクターフェルールを一定量押し付けることにより所定の曲率半径の変形をさせ、ここにダイヤモンド微粒子等の研磨剤を供給することによりコネクター端面の形状を所定の曲率に形成するものである。この研磨機により、曲率半径などの形状を設計値どおりに加工することができ、また光学特性も、反射減衰量27~30dB、接続損失平均0.1dB以下など、高精度かつ高性能な光コネクターが得られる。研磨時間も粗加工と仕上げ加工の2工程で3分と、従来の金型を用いる方法に比べて、1/10以下に短縮している。さらに、本構成の2工程研磨を1工程研磨で1分間で実現する装置

も開発されている。図7に高能率加工を実現した1工程研磨機の外観を示す。

2.2 アドバンスト PC 研磨技術

将来の加入者系における映像分配サービスの導入などを考慮した場合、従来より1桁以上反射戻り光を抑えた高性能な光コネクターが必要となると予想され、その反射減衰量は40~45dB以上が必要といわれている¹⁶⁾。PC光コネクターでは、短時間に光ファイバーの端面を凸球面に形成するためダイヤモンド砥粒を用いて研磨している。ダイヤモンド砥粒による研磨加工は、加工能率は高いが光ファイバー端面に加工変質層が発生する原因となる¹⁷⁾。この加工変質層の高屈折率層で発生するフレネル反射が反射減衰量を低下させる¹⁸⁾。

このような加工変質層を除去するためには、ダイヤモンド砥粒により凸球面状に形成した後、バフ研磨する方法も考えられる。しかし、バフ研磨を施すと、光ファイバーとそれを保持しているジルコニアフェルールとの研磨速度の相違により、光ファイバー端面がフェルール端面から引っ込む。一方、各種環境下での信頼性向上には、フェルール端面からのファイバー端面の引込み量を小さくする必要がある¹⁹⁾。一例として、引込み量のほとんどないAPC光コネクターと、引込み量の大きい低反射PC光コネクターの温度変化に対する反射減衰量の測定結果を図8に示す²⁰⁾。引込みのないAPCコネクターは安定な温度特性を有しているのに対して、引込み量の大きなコネクターの場合は、最悪条件の場合には光ファイバーとフェルールの熱膨張係数の違いから高温下で光ファイバー端面間に隙間が生じPC状態が解除されることもある。このため著しく反射減衰量が低下している。

この反射をいっそう低減させ、かつ引込みのないコネクターを実現させるには新しい研磨技術が必須である。

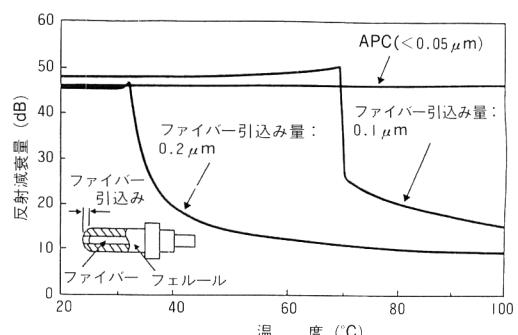


図8 反射減衰量の温度特性。

このため、高性能加工を実現させる超低反射研磨技術が開発されている²¹⁾。具体的には、研磨液に SiO_2 系の直径数十 nm の超微粒子を用い、前項で述べた PC 研磨したコネクター端面を、さらにこの研磨技術により表面から $0.1 \mu\text{m}$ 程度の深さまで研磨すると、反射減衰量を大幅に改善でき、信頼性の高い APC コネクターを実現できる。

2.3 アドバンスト PC 研磨装置

APC コネクターを実現させるための研磨装置として、弾性体上にセルロースフィルムポリシャーを貼り合せたパッドの研磨盤と、これへのコネクター端面押付けによる端面の凸球面形状研磨技術を基に、用途に応じた、1) 工場での量産を目指した一芯コネクター当りの低成本を実現する量産型機、2) 現場での作業性を改善できる小形・軽量のハンディー型機、の 2 機種の研磨装置の開発が行われている^{22,23)}。

(a) 工場用量産型研磨装置

図 9 にコネクター先端を凸球面形状に形成するための加工原理を示す。この方法は、弾性板上のセルロースフィルムにフェルールを押し付け、その弾性変形量に応じた曲率を形成し、そこに各種遊離砥粒を供給する方式である。

図 10 に本研磨工程を示す。まず接着剤の除去のため SiC の研磨紙で加工を行う。次の粗加工では、コネクターの端面の形状を所定の曲率に形成するため、ダイヤモンド微粒子を供給し、高能率でしかもセラミックスフェルールとファイバー間に段差のない曲面研磨を行う。最後の仕上げ用 APC 研磨では、粗加工で曲面研磨したフェルール端面を SiO_2 超微粒子を用いて研磨する。この研磨により、ファイバー表面の微細傷、加工変質層をなくすことができる。

図 11 に、量産型研磨装置において粗加工工程で、研

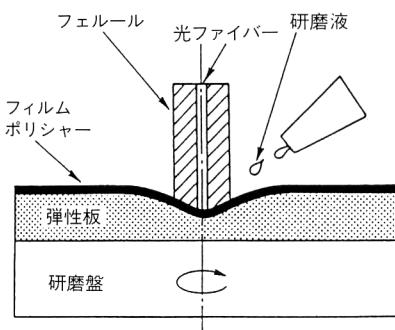


図 9 曲面形成の原理.

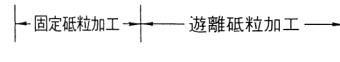
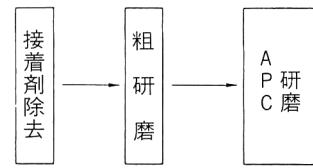


図 10 研磨工程.

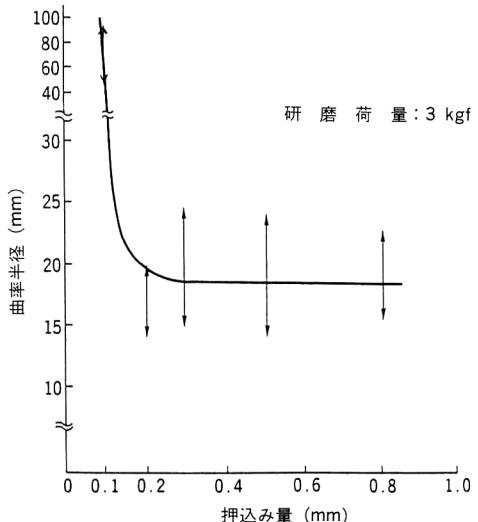


図 11 押込み量と曲率半径.

磨荷重を 3 kg としたときの曲率半径と押込み量の関係を示す。曲率半径は押込み量の増大に伴ってほぼ一定値になる傾向を示す。これは、一定以上の押込みに対しては、加圧バネによるフェルール押込み量を増大させても弾性体の変形がなくなり、みかけのフェルール押込み量が一定となり、この結果、曲率半径が一定となるためである。これにより、制御性のよい曲率形成が可能である。図 12 に本技術により製作したコネクター端面の曲率半径、段差、偏芯および反射減衰量を評価した結果の一例を示す。これより、曲率半径、段差、偏芯とも仕様値を十分満たすことができ、また、反射減衰量も実力値平均 48 dB と高精度かつ高性能な APC コネクターが得られる。図 13 に 8 本一括研磨処理が可能な量産型研磨装置の外観を示す。このように、研磨工程を 3 工程に簡素化するとともに、8 本一括研磨処理を行う装置構成とし、さらに安価なセルロースと SiO_2 等の研磨剤を用いることにより、研磨時間 1 分/本で、APC 研磨コストを従来の PC 研磨と同等以下に低減できる。

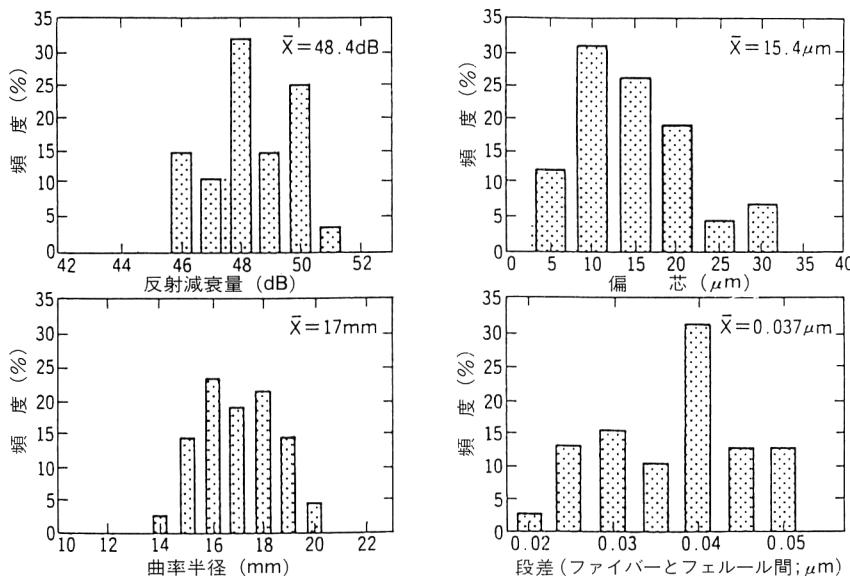


図 12 研磨特性（量産型装置）。

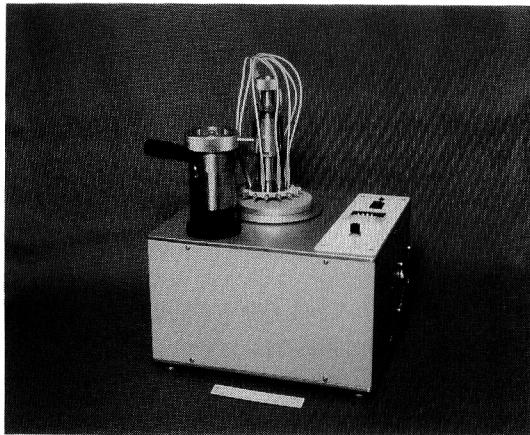


図 13 量産型研磨装置。

(b) 現場用ハンディー型研磨装置

今後の LAN (local area network) 工事などでは、その場でのコネクター付けが必要と予想されるため、現場で用いられるハンディー型装置も開発されている。本装置は、上記の量産型装置の研磨方式と工程を踏襲し、現場での操作性向上のためコネクター単芯研磨を基本とした構成としている。

図 14 に本研磨装置の外観を示す。機構構成は、駆動モーターに結合し回転するセルロース系樹脂を弾性体上に貼り付けた研磨盤、フェルールの端面を垂直に保持し、バネにより押圧する保持盤、研磨面に対し揺動運動させる揺動軸とそれに嵌合するモーター制御部等からな

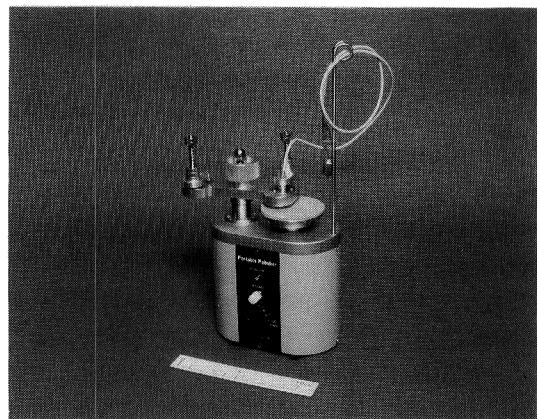


図 14 ハンディー型研磨装置。

る。本装置は小形（高さ：168、奥行：64、幅：110 mm）、軽量（約 1 kg）で、また操作の容易化により、現場作業性を大幅に改善している。本ハンディー型装置による研磨特性も、上記量産型装置と同様の優れた形状精度と光学特性が得られる。

今後の通信の光化時代の実現には、安価で高性能な光コネクターが必須である。本稿では、特に低損失接続を可能にする SC 型光コネクターを中心にその概要を述べるとともに、この高性能化を実現する鍵となるコネクタ一端面の研磨技術および装置について解説した。

今後とも、光コネクターはいっそうの光学特性の向上

と低コスト化、使用性の向上等に向けた改良が続けられてゆくであろう。研磨加工技術は古代からある技術ではあるが、通信用光部品の光学特性と価格に直接影響を及ぼす重要な技術であるといえる。

文 献

- 1) 杉田悦治, 安藤泰博, 金山和則, 長瀬 亮, 岩野真一：“単一モードファイバ用光コネクタの低反射化を実現”, NTT 技術ジャーナル, **12** (1991) 56-59.
- 2) 鈴木信雄, 繩田喜代志：“単心光コネクタの基本検討”, 信学技報, **OQE77-120** (1977) 83-90.
- 3) N. Suzuki, Y. Iwahara, M. Saruwatari and K. Nawata : “Ceramic capillary connector for 1.3 μm single-mode fibers,” Electron. Lett., **15** (1979) 809-810.
- 4) N. Suzuki, M. Saruwatari and M. Okuyama : “Low insertion-and high return-loss optical connectors with spherically convex-polished end,” Electron. Lett., **22** (1986) 110-112.
- 5) T. Shintaku, E. Sugita and R. Nagase : “Highly stable physical-contact optical fiber connectors with spherical convex ends,” J. Lightwave Technol., **11** (1993) 241-248.
- 6) 長瀬 亮, 岩佐恭一, 新宅敏宏, 杉田悦治：“ジルコニアフェルールを用いたシングルモード光コネクタの特性”, 昭和61年信学会全国大会, 297 (1986) p. 2-126.
- 7) E. Sugita, R. Nagase, K. Kanayama and T. Shintaku : “SC-type single-mode optical fiber connectors,” J. Lightwave Technol., **7** (1989) 1689-1696.
- 8) 佐竹俊明, 長沢真二, 加島宣雄：“プラスチック成形光ファイバ多心コネクタの設計と特性”, 信学論, **J68-B**, **3** (1985) 427-434.
- 9) 栗本栄治, 新宅敏宏, 長岡新二, 杉田悦治：“単一モードPC光ファイバ用光コネクタのファイバ間隙と反射特性”, 信学会総合全国大会, No.2382 (1987) p. 10-260.
- 10) 金山和則, 長瀬 亮, 安藤泰博, 松永和夫：“アドバンスト PC コネクタ”, 信学会秋季全国大会, C-283 (1990) p. 4-325.
- 11) K. Kanayama, Y. Ando, R. Nagase, S. Iwano and K. Matsunaga : “Advanced physical contact technology for optical connectors,” IEEE Photon. Technol. Lett., **4** (1992) 1284-1287.
- 12) 渡辺純二, 斎藤忠男, 土肥俊郎, 松永和夫：“光ファイバコネクタ端面の精密加工技術(1)”, 昭和61年精密工学会秋季大会講演論文集, 215 (1986) p. 65.
- 13) 斎藤忠男, 松永和夫, 大平文和：“光コネクタの可搬式高性能端面研磨機を開発”, NTT 技術ジャーナル, **8** (1990) 80-83.
- 14) 斎藤忠男, 渡辺純二, 松永和夫, 土肥俊郎：“光ファイバコネクタの高速研磨機を開発”, 昭和63年信学会春季大会論文集, B-606 (1988) p. 1-357.
- 15) “PC 光コネクタの高速端面研磨機を開発”, 通研月報, **41** (1988) 18-22.
- 16) W. I. Way, C. Lin, L. E. Zah, L. Curtis, R. Spicer and W. C. Young : “Multiple-reflection induced intensity noise studies in a lightwave system for multichannel AM-VSB television signal distribution,” IEEE Photon. Technol. Lett., **2** (1990) 360-362.
- 17) F. Ohira, S. Matsui, K. Matsunaga, T. Saitoh and Y. Kikuya : “Development of optical fiber connector polishing machines and ellipsometric characterization of the polished surface damage,” Proc. of ASPE 1993 Annual Meeting (1993) pp. 122-125.
- 18) 松井伸介, 松永和夫, 菊谷幸雄, 大平文和：“光ファイバ端面の加工変質層の評価”, 1992年精密工学会春季大会 (1992) pp. 249-250.
- 19) T. Shintaku, E. Sugita, R. Nagase and J. Watanabe : “Highly stable low-insertion and high-return-loss PC optical fiber connectors,” Proc. of ECOC (1988) pp. 599-602.
- 20) 安東泰博, 岩野真一, 長瀬 亮, 金山和則：“単一モードファイバ用光コネクタ”, NTT R&D, **40** (1991) 277-288.
- 21) 斎藤忠男, 松永和夫, 金山和則：“超低反射光コネクタ用研磨技術の開発”, 信学技報, **EMC90-23** (1990) 23-28.
- 22) 斎藤忠男, 松永和夫, 大平文和：“多芯一括形高速研磨機の開発”, 信学会春季大会, C-310 (1993) p. 4-346.
- 23) 松永和夫, 大平文和, 斎藤忠男：ハンディ型光コネクタ端面研磨機の開発, 信学会春季大会, C-311 (1993) p. 4-347.