アレーバ光ファイバーの一括端面加工*

松井伸介** 松永和夫** 大平文和*** 浅川修一郎†
小藪国夫** 碓氷光男‡ 小林勝†

Precision Machining of Arrayed Fiber Ends for
a Bare Optical Fiber Connector

Shinsuke Matsui, Kazuo Matsunaga, Fumikazu Ohira, Shuichiro Asakawa,
Kunio Koyabu, Mituo Usui and Masaru Kobayashi

A precise process for machining arrayed optical fiber ends to have tapered corners and slightly convex planes for use as the bare optical fiber connectors have been developed. The taper shapes are determined by the length L of the fiber from holder to the fiber ends, the height h of the holder, and number of revolutions. The underlying principle is that the machining amount is proportional to the product of the load and the work traveling length. The curvature radius (8 to 18 mm) of the slightly convex fiber end plane can be controlled by adjusting the polishing load. The polished plane with the silica abrasive lapping film has high optical return loss (55 to 60 dB).

Key words: optical fiber, optical connector, taper machining, lapping film, return loss, silica abrasive

1. はじめに

WDM(Wavelength Division Multiplex)をベースにしたフォトニックネットワーク,あるいは通信線の多重化による大容量高速データ転送などにおいて多数の光通信線を高密度に簡便に接続する技術の要請が高まっている。その一つの解として,光ファイバ素線自体をコネクタにする技術が開発されつつある^{1)~3)}。その光接続の際にスリーブにファイバを挿入するためにファイバ先端のテーパ加工が不可欠となる。また端面はPC接続するために凸球面にする必要がある。光ファイバの外径125 μm に対しマルチモードの場合コア径は50 μm であり,このテーパは良好な接続特性を得るためには残り端面,テーパ角等の形状制御が必要となる。また,光コネクタでは,凸球面にされた端面どうしを押圧することにより微小な弾性変形を起こすことによりコア部とコア部を物理的に接続する(PC; Physical Contact)ため,良好な光接続には凸球面の曲率の制御,および平均的な傾きの低減が必須となる。さらにこのコネクタは高密度に使用することが想定され,そのため接続点が多くなり,1接続点あたりの反射減衰量も小さいことが望まれる。そしてこの加工では,低コストな高密度配線を実現するため,アレーファイバに対して一括で加工することが要求される。本論文では,典型的な値である250 μm ピッチのアレーファイバの一括端面加工装置⁴⁾⁵⁾と加工における形状制御要因について加工特性に基づき記述する。

2. 工程設計

2.1 テーパ加工

図1はテーパ加工の加工原理を示す。光ファイバは研磨面に対し垂直に固定され,固定部から研磨面までの間隔 h は突き出しているファイバの長さ(突出量; L)より短くなっており図のよ

Fig. 1 Principle of taper machining

Fig. 2 Schematic diagram of tapering machine

* 原稿受付 平成12年8月10日

** 正会員 日本電信電話(株)通信エネルギー研究所(厚木市森の里若宮3-1)

*** 正会員 香川大学工学部(香川県高松市林町2217-20)

† 日本電信電話(株)フォトニクス研究所(茨城県那珂郡東海村白方白根162)

‡ 日本電信電話(株)通信エネルギー研究所

Fig. 3 Machined taper shapes of arrayed fibers

Fig. 4 Tilt angle measurement

うにたわむ。これにより研磨面を押すたわみ力が発生し、これが加工圧となる。この状態で図のように研磨面に対して固定部を自転させずに公転させると、ファイバは進行方向と逆の方向に常にたわみ、加工点はファイバ端面外周を次々と移動し、1公転で1周しテーパ加工が行われる。光ファイバは材料的に均質でしかも非常に形状精度を要するため、この方法によると均一な加工力が発生し、高精度のテーパ形状が得られる。また、図1から明らかなように、固定部からのファイバ長が等しければ、アレー状に保持されているすべてのファイバが同一の加工を経るため一括のテーパ加工が可能となる。

図2に加工装置の概要を示す。アレーファイバホルダを公転させる円盤がモータ駆動され、このホルダ自体は回転している円盤から適当な減速機構により逆回転駆動され自転しない構成となっている。また、ホルダのファイバ固定点から研磨面までの高さは装置本体を支える3本のマイクロメータにより精密に決定できる。この構成を取ることにより研磨面の交換が簡便になり、また、研磨面の加工する位置を加工ごとに替え研磨面の長寿命化も実現できる。図3は加工されたテーパ形状の模式図を示す。テーパ形状として本加工で重要なのはテーパ角 θ と残り端面径 d で、これらは加工パラメータ L , h , および総しゅう動量で決定されると考えられる。 L はホルダから突出し量で、ファイバのたわみ剛性に影響する。また、たわみ量は $L-h$ で定義でき加工荷重及び、テーパ角のパラメータとなる。また総しゅう動量は総公転数と公転周長の積で計算でき加工量に影響する。所定のテーパ形状を得るためにはこの加工パラメータを設定することになる。そこで、この加工パラメータがどのように実際に影響するか調べた。実験に用いたアレーファイバはピッチ $250\mu\text{m}$ の8芯テープファイバである。研磨は平均粒径 $5\mu\text{m}$ のアルミナラッピングフィルムを用いた。ホルダの公転半径は 50mm であり、数rpmで加工した。総公転数一定の条件では5回転させて評価した。また、実際の加工荷重を研磨定盤の代わりに電子天びんを置くことによって、ファイバをたわませしゅう動させながら測定した。

2.2 球面加工

光ファイバ端面の凸球面研磨ではテーパ加工とはほぼ同様な装置を用いた。この装置を用いファイバ端面を研磨した場合、端面の各点が1公転で同一の距離研磨板と摺動し、通常、研磨に用いられる研磨定盤と加工試料を同一の回転数で回転させる装置構成と同じ相対運動軌跡が得られる。従ってこの装置により運動軌跡の面ではファイバ端面内で均一な加工が行える。ファイバは端面の極近くで支持され、支持部を上下可動とすることにより、一定の荷重で研磨板に押圧される。この時の荷重は1本あたり $10\sim 42\text{mN}$ の範囲で実験した。端面を球面加工するために2つの方式を検討した。一つは従来のジルコニアフェール付きコネクタで用いられている研磨定盤上の弾性体の変形による加工中のファイバ端面内の応力分布を用いた球面形成法で、加工荷重を変え応力分布を変化させて検討した。また、比較のために弾性体を用いずに、材質が硬く研磨面の変形による圧力分布がほとんど発生しないと考えられる石英基研磨板と遊離砥粒の場合についても検討した。第2は、テーパ加工で用いたたわみを利用する方法で、ファイバをわずかに支持部より突き出している微小なたわみによる球面形成である。実験では、ファイバ支持部からの突出し量を変化させて検討した。

実際の加工では、粗加工と仕上げ加工の2工程で行い、粗加工では、各ファイバの長さをそろえるとともに球面形成をする。本研究ではダイヤモンド粒径 $3\mu\text{m}$ のラッピングフィルムを用いた。次の仕上げ加工では、前工程でのスクラッチを取り鏡面に仕上げるとともに最終的な曲率の曲面にする。また、この加工では極力加工ダメージを表面に残さないように仕上げ、高い反射減衰量を得る必要がある。この目的のために、ここではガラスに対して加工ダメージが非常に小さいと考えられるシリカ系の研磨フィルム⁹⁾を用いた。この研磨フィルムの採用により、多数本のファイバが並ぶアレーファイバに対しても研磨後の洗浄が簡便に行える。研磨された端面の平均面のファイバ軸に対する傾きは、図4のように測定した。この測定は通常のSC形光コネクタ研磨における凸球面の偏心の測定に相当する。外径 $125\mu\text{m}$ と非常に小さいファイバ端面に対し、曲率 10mm の球面の偏心の測定は、曲面を平面に近似する本方法の方が測定精度が良く実用的である。測定では加工されたファイバを中心部にファイバよりわずかに大きい $126\mu\text{m}$ の穴を持つジルコニアフェールに挿入し、端面からのレーザーの反射スポットをスクリーン上に投影する。このファイバをフェールの中で回転させるとスポットもスクリーン上を回転し、回転半径 r より以下の計算式で計算する。

$$\tan \theta_t = \frac{r}{l} \quad (1)$$

θ_t が傾き角で、 l はファイバとスクリーンの距離（本実験では 650mm ）である。この測定では、ジルコニアフェールの穴精度、ファイバの外径精度が非常に良いため、高精度に傾きを測定することができる。

3. 実験結果と考察

3.1 テーパ加工

図5にテーパ加工されたアレーファイバが示してある。加工は、突出し量 15mm 、たわみ量（図1の $L-h$ に相当） 2mm である。ファイバの直径は $125\mu\text{m}$ であるが、どのファイバも同一直径で

(a) View of machined fiber end planes

(b) Side view of fibers

Fig. 5 Photos of taper machined allied-fiber ends
The diameter of the fiber is 125 μm

ほぼ真円の残り端面を示していることがわかる。また、テーパ角もすべてのファイバではほぼ 50° 一定である。

図 6 は突出し量 15 mm、たわみ量 2 mm の場合の総公転数に対する残り端面径の変化とテーパ角度の変化を示す。テーパ角度はたわみ形状に依存し、たわみ量 2 mm に対して加工量は高々数十 μm であるためたわみ形状は変化せず、総公転数に対して一定の値を取る。一方残り端面径は加工されるに従い小さくなる。しかしその減少は加工初期に大きく一様でない。これは加工初期には加工部の面積が小さく加工圧が高い上に、小さい除去量で端面径が大きく減少するためと考えられる。図 7 に総公転数が一定の場合のたわみ量に対するテーパ角 θ の関係がそれぞれの突出し量に対して示してある。同じ突出し量の場合、たわみ量が増えるに従い接触角が小さくなりテーパ角が小さくなる。また、同一のたわみ量の場合は突出し量が増えると、たわみ量の L に対する比が小さくなりテーパ角は大きくなる。図 8 は、総公転数が一定の場合のたわみ量に対する残り端面径 d の変化を示す。端面径はたわみ量一定の場合、突出し量 L が小さくなるほどファイバのたわみ剛性が大きくなり加工荷重が増す。これによる加工量の増加が大きく影響し端面径が小さくなる。一方、突出し量一定の場合、突出し量 9 mm では、たわみ量が大きくなると残り端面径も大きくなるが、突出し量 15 mm ではたわみ量が大きくなっても端面径はあまり変化しない。この突出し量一定の場合の傾向は、残り端面径が加工量一定の場合はテーパ角が大きい程小さく、テーパ角が一定の場合は、加工量が大きいほど小さくなり、これらの効果の複合として決まると考えられる。

以上の検討から加工パラメータ L , h , および総しゅう動量によりテーパ形状が制御できることがわかった。次にこれらの制御要因を統一的に加工特性に基づき評価するために実験および考察を加える。通常の研磨、例えばウェハ等の研磨では、研磨速度（ウェハの板厚（ h ）変化速度）は加工圧（ F/A , F は加工

Fig. 6 Change of shape with total numbers of revolutions

Change in the taper angle with the bending amount; $L - h$

Fig. 8 Change in the residual diameter with the bending amount; $L - h$

荷重, A はウェハ面積) とウェハとポリシャとの相対速度 (dx/dt) との積に比例するとされ (プレストンの式), k を定数とすると次式で表される。

$$\frac{dh}{dt} = k \cdot \frac{F}{A} \cdot \frac{dx}{dt} \tag{2}$$

これらの関係はラッピング領域においても一般に成り立つと言われている。しかし本研究のように加工中に加工面の面積が変化し、加工圧も変化する場合はこの式をまったく同様の次式に書き換える必要がある。

$$\Delta h \cdot A = k \cdot F \cdot \Delta x \tag{3}$$

従ってこの式から総加工量は加工荷重と総しゅう動量の積に比例するとできる。この関係を適用するためにまず総加工量の計

Fig. 9 Relation between machining amount and bending amount

Fig. 11 Relation between machining amount and bending force

Fig. 10 Bending-force measurement

Fig. 12 Change of residual diameter and removal amount with total number of revolution

算をした。計算は図3に示すようにテーパ部で加工前の円柱から加工後の円すい台を端面径及びテーパ角から計算し差をとって行った。図9に総摺動量一定の場合のたわみ量と総加工量の関係を示す。たわみ量が大きくなるといずれの突き出し量でも加工量が増えることがわかる。次に実際の加工荷重を電子天びんにより測定した。測定は公転速度を遅くし電子天びんの安定した値を採取した。図10は、実際に測定されたファイバ1本あたりのたわみ荷重を示す。例えば $L = 15 \text{ mm}$, $h = 2 \text{ mm}$ ではほぼ 9.8 mN (1 gf) となる。すべての突き出し量でたわみ量が大いほど荷重が大きくなっている。また、たわみ量が一定の場合は、突き出し量が小さくなるとファイバの剛性が大きくなることが影響して荷重が大きくなる。

図11に総公転数一定の時の加工荷重と体積除去量の関係を示す。荷重に対して体積除去量が比例しており、式(3)の関係と一致していることがわかる。また、図12は $L = 15 \text{ mm}$, $h = 13 \text{ mm}$ とした時の総公転数に対する端面径の変化と体積除去量の変化を示している。この場合たわみ量が一定のため加工荷重は一定となる。前記のように端面径は回転数に対して非線形に減少しているのに対し体積除去量は比例しており、この場合も式(3)の関係と一致している。従って本加工におけるテーパ形状の制御は総加工量は加工荷重と総しゅう動量の積に比例するという関係に基づくものと結論できる。

3.2 球面加工

図13に突き出し量に対する凸球面の曲率変化を示す。加工は粒径 $3 \mu\text{m}$ の厚さ $75 \mu\text{m}$ のラッピングフィルムを用いて行った。荷重はファイバ1本あたり 42 mN である。0.2から0.6 mmの範囲で突き出し量に対し曲率は変化せず一定である。さらに大きい突き出し量ではこの加工荷重の場合ファイバがせん断破壊を起こ

Fig. 13 Curvature radius change with fiber length from holding point

した。この図より突き出し量による微小たわみ変化では球面曲率の制御はできないことがわかった。

次にファイバ端面の押込みによる研磨面の変形応力分布による球面曲率の制御について検討した。その結果1本あたりの加工荷重 42 mN で、石英定盤とダイヤモンド遊離砥粒による加工では曲率が 50 mm であったのに対し、ステンレス定盤の上に弾性体としても機能するダイヤモンドラッピングフィルムを設置した加工では曲率半径 8 mm と小さくなった。また、図14に示すようにラッピングフィルムによる研磨で加工荷重を変化させると荷重が大いほど曲率が小さくなることがわかった。弾性体に円柱を押し込んだ場合、荷重が大いほど円柱周辺での弾性体の変形量が大きくなり、周辺と中心部での応力差が大きくなる。また、荷重一定の場合は、弾性体が硬いほど周辺部の変形量が小さく応力差は小さくなる。従ってその基材として、ポリ

Fig. 14 Curvature radius change with load

Fig. 15 Return loss variation

エステル (PET) で構成されており石英基板に対して柔らかい弾性体であるラッピングフィルムによる加工では、荷重が大きいほど応力差が大きくなり、曲率半径は小さくなる。また、非常に硬い石英基板では応力差が小さく大きな曲率半径となる。

従来の外径 2.5 mm のジルコニアフェール付きのコネクタでは、曲率を形成するために 1 mm 程度の厚みのあるゴム弾性体の上にラッピングフィルムをのせフェールの押込みによるゴム弾性体の弾性変形を利用している。それに対し本実験では、75 μm と薄いラッピングフィルム自体を弾性体として面形成およびその制御が可能となっている。これはこの加工が加工圧力は比較的高いにもかかわらず荷重は数十 mN と小さく、また加工された形状も、例えば曲率半径 10 mm でファイバの中心と周辺部の高さの違いは 0.1 μm と非常に小さいマイクロ形状であるため、厚さ 75 μm の弾性体のファイバ端面ごく近傍の弾性変形だけで曲率形成および制御が可能であるためと考えられる。図 14 では曲率半径は 8 ~ 18 mm になっており、これはほぼ通常の SC コネクタの曲率半径と同等である。

実際の加工においては、ラッピングフィルムを用いたことに

より、通常の遊離砥粒より洗浄が簡単で、特に本加工のような多数の非常に小さい端面の洗浄には有利であることがわかった。また、本加工によって加工された端面の平均傾きは、ジグ等の高精度化によって 40 本の測定で 0.5° 以内、平均 0.26° の加工精度を実現した。さらにシリカ系のラッピングフィルムの採用により図 15 に示すように平均 55 dB の高い反射減衰量を示し良好な特性を実現した。

4. ま と め

アレー光ファイバに対し、端面をテーパ加工および凸球面加工を一括で行う技術を開発し、その形状制御要因を究明した。

- (1) テーパ形状は突出し量 l とホルダ高さ h により制御できる。
- (2) テーパ形状は、総加工量は総しゅう動量と加工荷重の積に比例するという関係に従って制御される。
- (3) 凸球面は、ラッピングフィルムの弾性変形による応力分布によって形成され、加工荷重によって制御できる。
- (4) 加工された端面の平均的な傾きは 0.26° の良好な精度であった。また、反射減衰量はシリカ系ラッピングフィルムを用いることにより平均 55 dB の良好な値を示した。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、実験において多大なる助力をいただいた島田慶保氏に感謝します。

参 考 文 献

- 1) M. Kobayashi, S. Iwano, R. Nagase, and S. Mitachi: A New Physical Contact Connection Method Using the Buckling Force of Optical Fiber, IEIEC Trans. Electron., E80-C, 2, (1997) 334.
- 2) M. Kobayashi, S. Iwano, R. Nagase, S. Asakawa and S. Mitachi: Multiple-fiber PC connector with 0.2 dB insertion and 60 dB return losses, Optical Fiber Conf. '97, (1997) WL11.
- 3) 碓氷光男, 佐藤信夫, 桂 浩輔, 中村正人, 安東泰博: 並列リンクモジュール用多心光ファイバ素線コネクタ, 信学総合大会講演論文集, (1997) C-3-116.
- 4) 松井伸介, 松永和夫, 小藪国夫, 大平文和, 浅川修一郎, 碓氷光男, 小林 勝: アレーファイバ端面のテーパ加工と装置, 信学総合大会講演論文集 (1998) C-3-56.
- 5) 松永和夫, 松井伸介, 小藪国夫, 大平文和, 小林勝: アレーファイバ端面の球面研磨及び装置, 信学総合大会講演論文集 (1998) C-3-52.
- 6) 松永和夫, 小藪国夫, 大平文和: 光ファイバコネクタ用高性能 SiO_2 研磨フィルムの開発, 信学ソサイエティ大会講演論文集 (1997) C-166.