

## 光コネクタの変遷と将来展望

安東 泰博<sup>†a)</sup>

The Evolution of Optical Connector Technologies and Future Perspective

Yasuhiro ANDO<sup>†a)</sup>

あらまし 光ファイバ通信における 3 大要素である発光デバイス, 受光デバイスと光ファイバが 1980 年前後には実用レベルにまで成熟し, 商用化に向けての機運が高まった。しかし実用的なシステムを構築するためには 3 大要素だけでは当然不十分で, 周辺の諸技術の開発が急がれた。特に 3 大要素を相互に接続する高性能な光コネクタの開発は不可欠とみなされた。現在, 光コネクタは通信用途以外にもその適用範囲を拡大しつつあるが, 光ファイバ通信用としてその開発は始まった。本論文では, まず光コネクタ開発の歴史を概観し, 次いで現在の光コネクタを構成している主な要素技術の進歩の経緯を述べる。更に現在の標準的な光コネクタを紹介するとともに, 光コネクタ開発の最前線の状況を概観する。光コネクタの将来動向についてもその展望を述べる。最後に光コネクタの盛衰に大きな影響を与える標準化について, 一部歴史を振り返りながら紹介する。

キーワード 光コネクタ, 光ファイバ接続, フェルルール, 開発経緯, 標準化

## 1. ま え が き

光コネクタは 1 対の光ファイバを分離・接続するだけの単純な機能をもつ部品であるが, 着脱を繰り返しても常にサブミクロンの精度で光ファイバの光軸合せが達成される必要がある。このため高精度な位置決めを経済的に実現する数々の提案がこれまでに行われてきた。しかし現在の光コネクタは結局フェルルールと呼ばれる光ファイバを収容する高精度部品をバットジョイントで突き合わせる方法に落ちついている。複雑なメカニズムを応用するより結果として経済的になるためである。

今回の特集号のテーマは最近 40 年間における技術の変遷ということであるが, 残念ながら光コネクタの歴史は 40 年に若干欠ける。しかしこの間の技術進展の早さは開発にタッチした経験のある者でさえ驚きを禁じ得ない。特に低価格化の勢いはすさまじく, 最近 10 年で光コネクタの価格は 1/10 以下に低下しており, 開発当初のコスト目標であった同軸コネクタよりはるかに低価格となってしまった。

本論文では, まず光コネクタ開発の歴史を概観し, 次いで現在の光コネクタを構成している主な要素技術の進歩の経緯を述べる。更に現在の標準的な光コネクタを紹介するとともに, 光コネクタ開発の最前線の状況を概観する。また光コネクタの将来動向についても筆者の展望をまとめたい。最後に光コネクタの盛衰に大きな影響を与える標準化について一部歴史を振り返りながら私見を述べる。

## 2. 光コネクタの開発小史

光コネクタとは着脱が可能な光ファイバ接続部品であるが, 光ファイバ接続にはスプライスと呼ばれる永久接続法もある。スプライスにも 2 種類あり, 光ファイバを加熱溶融して一体化する融着接続と, V 溝等の整列用部材で機械的に軸合せしたのち接着剤等で固定するメカニカルスプライスである。本論文は光コネクタに関する概説であるが, 類似技術であるスプライスも含めて, まず光ファイバ接続開発の歴史を概観する。

光ファイバ接続の研究は 1970 年に F.P. Kapron から [1] によって光ファイバの低損失性が実証された翌年にはもう報告されている。D.L. Bisbee によるニクロム線の抵抗加熱による融着接続である [2]。しかし本格的にはまず光ファイバの接続損に関する理論解析が先行し, 1973 年から 1977 年にかけて AT&T ベル研

<sup>†</sup> (株)フジクラ 光電子回路開発センター, 東京都  
Optoelectronic Circuits & Systems R&D Center, Fujikura  
Ltd., Koto-ku, Tokyo, 135-8512 Japan

a) E-mail: yando@fujikura.co.jp

(当時)の E.A.J. Marcatili, D. Gloge, C.M. Miller, D. Marcuse, H. Kogelnik, 並びに NTT の土屋, 左貝らを中心に精力的に進められた. 1975 年ごろからスプライスを中心としたハードウェアの研究が報告され始め, 1975 年にはベル研からモールド形の多心一括スプライス [3], 1977 年にはシリコン V 溝を使った多心一括スプライス [4] が報告されている. また 1976 年には, アーク放電による融着接続が初めて報告され, 翌年には NTT の土屋らと平井らのグループによって基本技術が完成された [5], [6]. 光コネクタに関しては二重偏心光コネクタが 1974 年に NTT の土屋らから発表されており [7], ベル研の Biconic 形光コネクタ [8] が 1976 年, NTT の鈴木らによる C 形光コネクタ [9] が 1977 年にそれぞれ報告されている. しかしこれらのコネクタはいずれもファイバをフェルールに接着固定した後, 出射光をモニタしながらファイバ中心をフェルール中心に一致させる加工ないし調整を行う, いわゆる調心式のコネクタであった.

光コネクタの開発初期段階における最大の困難は接続損の低減であった. 特に伝送帯域や伝送損に優れた単一モード光ファイバ (以下「SMF」) のコア径は約  $10\ \mu\text{m}$  と多モード光ファイバ (以下「MMF」: コア径  $50$  ないし  $62.5\ \mu\text{m}$ ) の  $1/5$  以下であり, 低損失化が極めて困難であった. なぜなら  $98\%$  の透過率 ( $0.1\ \text{dB}$  の損失) を得るためには, 着脱を繰り返しても常にサブミクロンの精度で双方の光ファイバを整列させる技術が要求されるからである. このため初期の光コネクタでは調心が必要であったり, レンズによるビーム拡

大で位置ずれ許容量を増したり [10], また比較的高精度部品が得られやすい球やロッドのすき間, V 溝を利用する方法など種々の整列メカニズムの提案が続いた [11], [12]. ブレークスルーは NTT の鈴木らによる FC 形光コネクタ [13] であった. アルミナキャピラリを内蔵した高精度なステンレス製フェルール (その中心に光ファイバが挿入される細孔が形成された円柱状部品) を割りを入れたスリーブ内で整列させる技術により, 無調心でも低損失な接続が可能なることを実証した. その後, 杉田らによる SC 形光コネクタ [14] の開発に伴いジルコニア一体形のフェルールが実用化され, 経済化も進んだ. このため, 現用の主要な光コネクタは, 多心一括接続用として開発された MT 形光コネクタ [15] (この場合は角形フェルール) も含めて, ほとんどこのフェルール技術によるバットジョイント方式が利用されている. また光ファイバ端面での反射の抑制についても, 鈴木らの提案による PC (Physical Contact) 技術という凸球面研磨したフェルール端面同士を密着接触させる技術によって, フレネル損による接続損の増加を回避し,  $25\ \text{dB}$  程度の反射減衰量が得られる光コネクタが可能となった [16].

このように, 光コネクタは光通信システム実現への必要性からまず開発された. その後, 光技術の適用範囲が広がるにつれて, 方式や用途に合わせた多彩な性能と多様な形態が求められ始めた. 光通信システムでは, SMF 接続のいっそうの低損失化が必要とされた. これは, 光ファイバ自体の外径ばらつきやコア偏心が  $0.5\sim 1\ \mu\text{m}$  の範囲に分布しているため接続損に

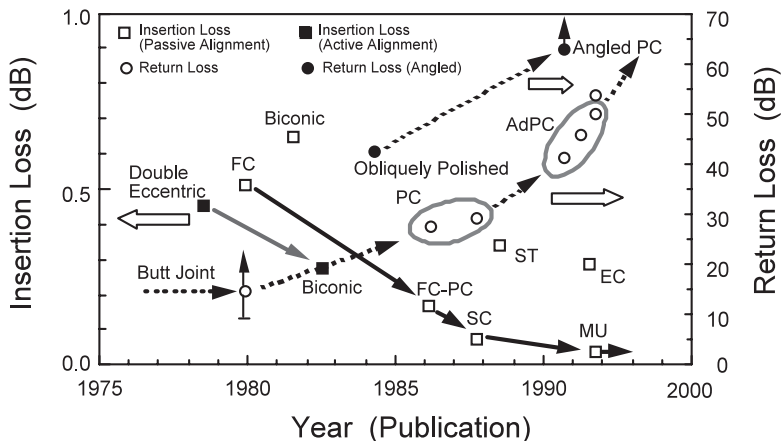


図 1 SMF 用光コネクタの光学特性の開発推移

Fig. 1 Optical characteristics evolution of optical connectors for single-mode fiber.

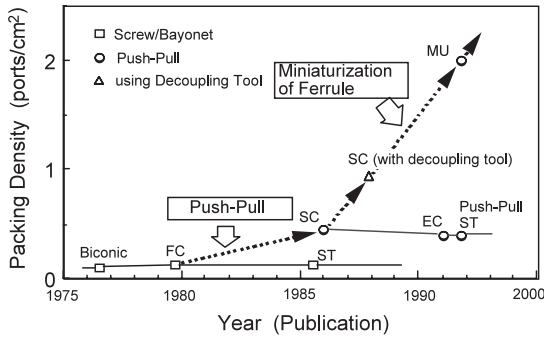


図 2 単心光コネクタの実装密度の推移

Fig. 2 Packing density evolution of simplex optical connectors.

大きな変動が生じ、実際に使用したときの伝送損を見積もることが難しかったためであった。また当時 FTTH (Fiber-To-The-Home) での映像伝送方式として検討されていたアナログ光伝送では光コネクタの接続点での反射がシステム構成上の大きな問題となり、PC 接続では反射減衰量が不十分であることが指摘された。更に、通信装置に大量の光ファイバが使用されるようになると、光コネクタのいっそうの小形化と高密度実装化が要請された。

図 1 に光コネクタ開発前史としての 2000 年までの SMF 用の単心光コネクタの特性改善の推移を示す。接続損については、筆者らの開発した偏心方向調整技術 [17] を採用した SC 形光コネクタ以降、平均値で 0.1 dB 以下の低損失化を実現し、実用上問題のない水準に達した。反射についても、アドバンスド PC (AdPC) 技術 [18] やアングルド PC (APC) 技術により 50 ~ 60 dB 級の反射減衰量が可能になった。一方、単心光コネクタの小形化あるいは高密度実装化の推移を図 2 に示す。FC 形、Biconic 形のねじ締結や ST 形のパイヨネット締結等の回転系の締結機構から、SC 形で開発されたプッシュ・プル締結により実装密度は約 4 倍向上した。その後、直径 1.25 mm の細径フェルールの開発を基礎とした MU 形光コネクタの実用化により [19]、単位面積当りの実装密度は SC 形光コネクタの更に 4 倍となり、1 心ごとの着脱が必要な単心光コネクタとしてはほぼ極限に達した。

### 3. 光コネクタの要素技術の進展

光コネクタの光学特性として重要なのは接続損と反射減衰量である。光ファイバ接続における接続損の要因や理論及び光ファイバ端面での反射に関する理

論とその低減法については既に詳しい解説があるので [20], [21], 本論文では要点だけを簡潔に述べる。

#### 3.1 光ファイバの高精度整列技術 (低損失化)

光ファイバ接続における損失要因は大別して、外的要因と内的要因に分類できる。外的要因としては、接続する光ファイバ相互間の、①軸ずれ、②角度ずれ、③間げき、及び④ファイバ端面品質、⑤端面反射があり、接続手段の不完全性に起因するものである。これに対して、内的要因は接続すべき光ファイバが固有に有している不完全性によるもので、光コネクタ等の構造を完全にしても避け得ない損失要因である。接続する光ファイバの、①コア径の不一致、②コアまたはクラッドの真円からのずれ (楕円性)、及びファイバの外径基準で接続させるときに損失要因となる、③外径のばらつき、④ファイバの幾何学的中心からのモードフィールド中心のずれ (偏心) が代表的なものである。

上記の損失要因の多くに関しては、接続損との関係を理論的に求めることができる [22]。しかし MMF に関しては、モードの励起条件によって接続損は大きく変化するため、入射条件を厳密に規定しないと再現性を確保できない (最近、国際標準化機関 IEC では Encircled Flux という手法を用いて MMF の励起条件を規格化する動きがある [23])。一方、SMF の接続損と損失要因との関係はガウスビーム間の結合を仮定した比較的簡単な理論式が根本ら [24] によって導出されており、実験との一致も良い。しかし角度ずれや間げきによる接続損への影響は軸ずれに比べてかなり小さいため、SMF の接続損は軸ずれ量に支配される。軸ずれ  $d$  と dB 単位で表した接続損  $L$  の関係は簡単で、次式で得られる。

$$L[\text{dB}] = 4.34 \left( \frac{d}{\omega} \right)^2 \quad (1)$$

ここで、 $\omega$  はモードフィールド半径で SMF の界分布をガウス分布で近似した場合のスポットサイズ (光強度が最大値の  $1/e^2$  となる半径) に対応する。図 3 に SMF の軸ずれと接続損の関係を示す。光通信システムにおいて要求される光コネクタの接続損は一般に 0.5 dB である。しかしこの値は最悪値であるため、平均的には後述するように 0.1 dB 以下の性能が必要となる。これを式 (1) により軸ずれに換算すると  $0.7 \mu\text{m}$  となりサブミクロンの位置決め精度が求められる。

上記のかん合精度を実現する方法として、単心光コネクタにおいては円柱状フェルールの中心孔に光ファイバを接着固定し、割りを入れて弾性をもたせたス

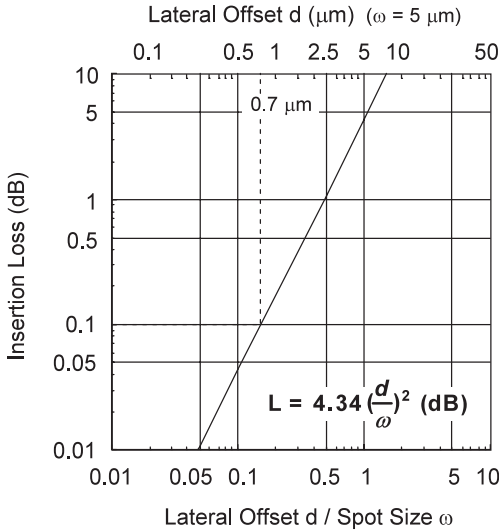


図 3 単一モード光ファイバにおける軸ずれと接続損の関係  
 Fig. 3 Insertion loss due to lateral offset for single-mode fiber connection.

リーブ内で整列する手法が主流である（図 4 参照）。フェルール、スリーブともジルコニアセラミックス製のものが一般的で、主要な寸法は  $0.5\mu\text{m}$  以下の精度で作製されている。一方、多心光コネクタでは上記のような同心系の軸整列技術が適用できないため、NTT で開発された MT フェルール [15] と呼ばれる 1 列に光ファイバ挿入孔が形成された角形の樹脂モールド成型品（80%程度の石英フィラ入り）が多心光ケーブル接続用に開発された。図 5 に MT フェルールとその接続メカニズムを示すが、光ファイバ挿入孔と同時に形成された二つのガイドピン孔を使いガイドピンで位置合せするかん合構造である。図では金属クリップで固定する場合を示しているが、固定方法を変更することにより頻繁な着脱が可能なコネクタを構成することができる。現在 24 心までが実用化されており、多心一括接続用のフェルールとしては現状ではほとんど唯一の技術である。

さて、式 (1) はある特定の接続における軸ずれと接続損の関係を示す。ところが実使用状況では各光コネクタの偏心状態の組合せにより接続損が変動する。実使用状況での接続損を評価するためには統計的な取扱いが必要となる。また接続損のカタログ値やアSEMBリメーカーでの検査結果は通常マスターコネクタと呼ばれる特に精度の良い光コネクタと接続した場合の値で

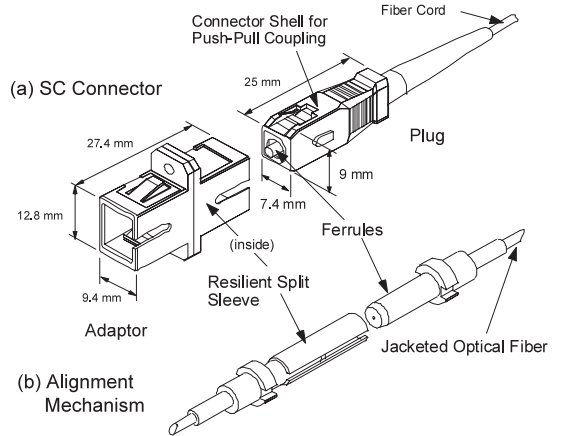


図 4 割りスリーブを用いたフェルールの整列機構と SC 形光コネクタ  
 Fig. 4 Basic alignment mechanism of cylindrical ferrules with a resilient split sleeve and SC optical connector.

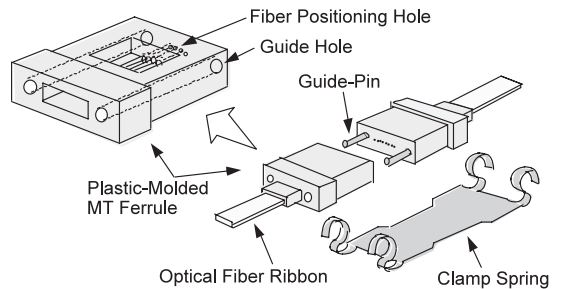


図 5 ガイドピン方式による MT フェルールの整列機構  
 Fig. 5 Alignment mechanism of MT ferrules based on a guide-pin method.

あり、現場で光コネクタをランダムに接続する状況では検査結果どおりの損失が得られる保証はない。SMF をフェルールに組み込んだ状態でのモードフィールド中心がフェルール中心に対して標準偏差  $\sigma$  をもった二次元正規分布をしていると仮定すると、1 対のフェルールを無作為に選び出し接続したときの dB 単位で表した接続損  $L$  の確率密度関数  $h_r(L)$  は次式で与えられる指数分布となる [25]。

$$h_r(L) = \tau e^{-\tau L}, \quad \tau = \omega^2 / (17.36\sigma^2) \quad (2)$$

一方、マスターコネクタと任意のサンプルを接続した場合の確率密度関数  $h_m(L)$  は次式となり、ランダム接続では平均値  $(1/\tau)$  も標準偏差  $(1/\tau)$  も対マスターコネクタとの接続  $(1/2\tau)$  に比べて 2 倍となることが分かる。

$$h_m(L) = 2\tau e^{-2\tau L} \quad (3)$$

実測値によると、光ファイバをフェルールに組み込んだ後のモードフィールド中心の標準偏差  $\sigma$  は  $0.6 \mu\text{m}$  程度であるので、1組のフェルールをランダムに接続すると平均接続損は  $0.25 \text{ dB}$  であるが、接続の  $13.5\%$  が  $0.5 \text{ dB}$  を超えることになる。このフェルールをマスターコネクタと接続した場合の平均損失は  $0.13 \text{ dB}$  となるので、出荷検査で平均  $0.1 \text{ dB}$  程度の光コネクタプラグであっても実使用状態では約 1 割が  $0.5 \text{ dB}$  を超えることになる。このように、光通信システムに要求されるコネクタ接続損  $0.5 \text{ dB}$  を保証するためには、フェルールや光ファイバの寸法精度はいまだ十分とはいえない。そこで光ファイバをフェルールに組み込んだ後、偏心方向を一定の方向（例えば位置決めキーの方向）に一致させる調整を行って低損失化を図る方法がとられている [17]。すべてのフェルールの偏心方向を同一方向に整えることによって、光ファイバのコア中心間の軸ずれを減少させることができ、接続損を低減できる。シミュレーションと実験によると、偏心方向を位置決めキーに対して  $\pm 60^\circ$  以内に合わせただけで  $0.5 \text{ dB}$  以上の損失が出る確率を  $1\%$  以下にすることができる [25]。

また式 (2) が指数分布であることは、光コネクタの設計を評価する上で重要な判断基準となる。図 6 に MU 形光コネクタのランダム接続時の損失のヒストグラムを示す。理論どおりの指数分布となっている。これは理論の前提であるファイバ中心の偏心が平均値 0 の正規分布で近似できるという前提からの帰結である。したがって、もし損失ヒストグラムが  $0 \text{ dB}$  以外で極大値をもつような分布を示した場合は、光コネクタに構造上の不具合があるか、または軸ずれ以外の損失要因が本質的に存在すると判断できる。

### 3.2 光コネクタの端面処理（低反射化）

光コネクタで反射した光が半導体レーザに戻ったり、伝送路中のコネクタ間での繰返し反射があると、雑音になることが知られている。これを防止するためには、コネクタでの光の反射は入射光の  $1$  万分の  $1$  以下（反射減衰量  $40 \text{ dB}$  以上）とすることが必要になる。反射を低減するには大きく分類して三つの方法がある。すなわち、①ファイバ間げきをコアと同屈折率の物質で満たす、②ファイバ端面を斜めにして反射光を放射する、③間げきを生じないようにする方法である。屈折率整合剤を使用する方法は頻繁な着脱が前提となるコ

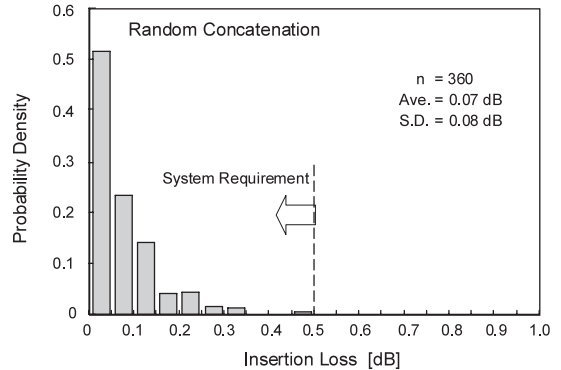


図 6 MU 形光コネクタの接続損  
Fig. 6 Insertion-loss histogram of MU optical connector.

ネクタには不適当であり、斜め研磨は接続損を犠牲にする。このため現在の主流技術は、密着接続を実現する PC 技術 [16] 及びその改良であるアドバンスド PC (AdPC) 技術 [26] 並びに PC と斜め研磨を複合させたアングルド PC (APC) 技術である。

PC 接続はフェルール端面を凸球面に研磨して互いに突き合わせるによりファイバ端面同士を密着させ、フレネル反射を防止する技術である。フェルール同士を互いに押し付けることによってフェルール端面が弾性変形し、ファイバのコア部分が完全に密着するとともに、フェルール端面から多少ファイバが引き込んだ状態でも PC 接続を実現できる。このファイバ引込みは研磨により発生する初期的な要因のほか、温度変化による可逆的、あるいは接着剤の劣化による永久的なファイバすべりにより発生する。したがって、研磨技術としては、引込み量を極力小さくすることに加えて、十分な形状精度が得られることが条件になる。これは、フェルール端面の曲率半径や球面頂点のずれがフェルールの弾性変形により吸収できる引込み量に影響するためである。ジルコニア製フェルールでは曲率半径  $20 \text{ mm}$  程度に最適値があることが知られている [27]。この形状を形成する方法としては、フィルムやゴムなどの弾性体にフェルールを押し付けることにより弾性体の変形量に応じた曲率を形成する研磨法が一般的である。この方法により、ファイバ引込み量  $50 \text{ nm}$  以下、曲率半径  $10 \sim 25 \text{ mm}$ 、球面頂点の偏心  $50 \mu\text{m}$  以下が実現されている。

しかし研磨にダイヤモンド等の硬い砥粒を用いるとファイバ表面に加工変質層が生成されることが知られている。この厚さにして  $50 \text{ nm}$  程度の加工変質層の



屈折率は光ファイバコアの屈折率より約6%高いため、この屈折率差によるわずかな反射が残る。そこでSiO<sub>2</sub>超微粒子と特殊なフィルムを用いて、加工変質層の生成を最小限に抑えつつフェルール（ジルコニア）と光ファイバ（石英）をほぼ同じ能率で研磨できる仕上げ研磨技術が開発された。アドバンスドPC (AdPC) とかスーパー PC (SPC) と呼ばれている技術である。この技術により屈折率増加は0.5%程度に抑制され、50dB以上の反射減衰量が得られる。ちなみに物理接触(PC)という命名は今となっては適切とは思えない。実質的には光学接触である。当時は単にフェルール同士を押し付けただけで光学接触が実現するのが確信がなかったため、PCと命名したものと思われる。

一方、MTフェルールのような多心一括形フェルールでは、光ファイバをフェルール端面から数μm突き出させる研磨を施すことにより、光学接触を実現している[28]。

#### 4. 開発の現状と将来展望

光コネクタにもいろいろな種類がある。まず適用光ファイバに応じて、①MMF用、②SMF用、③プラスチックファイバ用がある。また心数に応じて、①単心、②2心、及び③多心コネクタがある。2心以上の光コネクタはその構造により、単心コネクタの集合形と多心一括フェルール形に分類できる。用途によっても、①多心光ケーブルの接続用、②光コードの接続

用、③装置用のバックプレーン光コネクタや④光トランシーバ・光インタコネクション等のインタフェース用がある。

##### 4.1 市場における光コネクタ

表1に現在市場で流通している主要な通信用光コネクタをまとめて示す。多くの光コネクタがNTTをはじめとする日本で開発されており、この分野をリードしていることが分かる。

##### (1) 単心光コネクタ

日本における最初の実用的なコネクタの一つはFC形光コネクタであるが、現在は測定器等の入出力用を除いて使用量は減少している。1990年代以降はSC形光コネクタが単心光コネクタの主流となり一時は世界シェアの80%以上を占めていた(図4参照)。ジルコニア一体フェルール、プッシュ・プル締結、プラスチック製角形ハウジング構造を世界に先駆けて採用し、光通信システムに適用可能な高性能性と経済性・操作性・実装密度を両立させた。一方、実装密度の向上、光モジュール類の小形化ニーズに対応できるように、直径1.25mmの細径フェルールを利用したMU形光コネクタが開発された(図7)。単心用MU形プラグの断面寸法は4.4mm×5.6mmとSC形と比べて断面積で約37%となっており、4.5mmピッチで実装することができる。またこのプラグはコード接続用とバックプレーン用で共用できる設計となっており汎用性が高い。直径1.25mmフェルールは新たな世界標準となっ

表1 市場で流通している主な通信用光コネクタ  
Table 1 Major optical connectors available in the telecommunication market.

用途	コネクタ名称	開発企業	心数	整列技術	締結構造	端面処理	標準化状況
単心光コネクタ 汎用局内DF、加入者光コード接続測定機器	FC	NTT	1	φ2.5フェルール /割りスリーブ	Screw	凸球面PC	IEC 61754-13/JIS C 5970
	ST	Lucent			Bayonet	突き出し	IEC 61754-2
	SC	NTT	φ1.25フェルール /割りスリーブ	Push-Pull RJ-45形フラッチ	凸球面PC	IEC 61754-4/JIS C 5973	
	MU (-A)	NTT				IEC 61754-6/JIS C 5983	
	LC	Lucent				IEC 61754-20	
多心光コネクタ ケーブル接続 光インタコネクト 多ch光モジュール 装置 バックプレーン用	mini-MT	NTT	1-4	MTフェルール /ガイドピン	Clip	屈折率整合	JIS C 5987
	MT	NTT	12			Push-Pull	斜め研磨/突き出し
	MPO (MTP)	NTT		2-8	φ2.5フェルール φ1.25フェルール		平面研磨
	LIGHTRAY MPX	AMP	12			MTフェルール	斜め研磨/突き出し
	DS	NTT		φ2.5フェルール φ1.25フェルール	ボード固定 Push-Pull 自己保持機構		凸球面PC
	MU (-B)	NTT	IEC 61754-6/JIS C 5983				
	MBP	NTT	φ2.5フェルール φ1.25フェルール	Push-Pull 自己保持機構	斜め研磨/突き出し 平面研磨	IEC 61754-7/JIS C 5982	
RAO	ASET	IEC 61754-25					
2心光コネクタ 光トランシーバ SFF/SFPモジュール	Duplex SC	NTT	2	φ2.5フェルール φ1.25フェルール /割りスリーブ	Push-Pull RJ-45形フラッチ	凸球面PC	IEC 61754-4/JIS C 5973
	Duplex MU	NTT					IEC 61754-6/JIS C 5983
	Duplex LC	Lucent	φ2.5フェルール φ1.25フェルール	Push-Pull RJ-45形フラッチ	斜め研磨/突き出し 平面研磨	IEC 61754-10/JIS C 5984	
	mini-MPO	NTT				IEC 61754-18	
	MT-RJ	AMP	mini-MT フェルール Bare Fiber/V溝	Push-Pull RJ-45形フラッチ	斜め研磨/突き出し ファイバ斜め研磨	IEC 61754-4	
	SG	3M				IEC 61754-19	

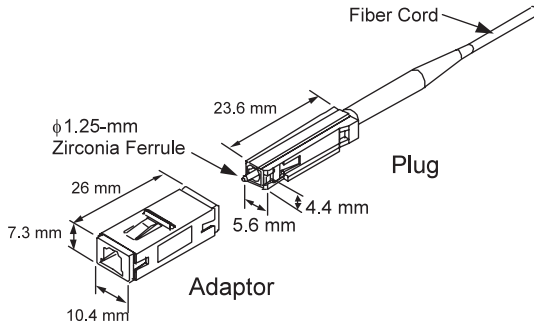


図 7 MU 形光コネクタの構造

Fig. 7 Configuration of MU optical connector.

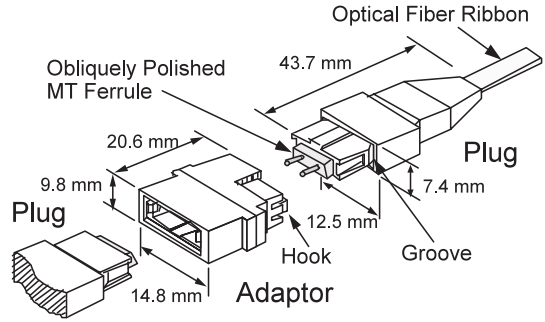


図 8 MPO 形光コネクタの構造

Fig. 8 Configuration of MPO optical connector.

ており、Lucent Technologies 社で開発された LC 形光コネクタ [29] においても採用されている。現在、LC 形光コネクタはデータコム分野を中心に小形光コネクタでは主流となっている。

## (2) 多心光コネクタ

多心光コネクタは多心光ケーブルの接続や光インタコネクタモジュールのインタフェース用として MT フェルルをベースとした各種製品が実用化されている。光モジュール用は各社の設計思想によってハウジングの構造には特徴があるが、プッシュ・プル締結で小形化を目指している。図 8 に 12 心 MPO 形光コネクタの構造を示す [28]。MT コネクタの低反射性は屈折率整合剤を用いるのが一般的であるが、MPO 形では頻繁な着脱に耐えられるようフェルル端面を  $8^\circ$  に斜め研磨して反射を防止し、かつフェルル端から光ファイバを突き出させて PC 接続を実現している。

また、装置実装用のバックプレーン光コネクタも基本的には多心光コネクタである。通信システム用には接続損が低く、かつ一心ごとの着脱も可能な単心光コネクタの集合形が多く用いられている (DS 形 [30]、MU 形 [31])。特に MU 形は小形化が図られており、45 mm の領域で 8 心実装できるタイプと 20 mm の領域で 2 心実装できるタイプがある。一方、最近の光クロスコネクタ装置等ではより多くの心数を収容できるバックプレーン光コネクタが求められており、MT フェルルと MU 形ハウジングを利用した MBP 形や RAO 形も開発されている。これを利用すると 20 mm の領域で 4~12 心、45 mm の領域で最大 48 心の光入出力が可能になる。

## (3) 2 心光コネクタ

2 心光コネクタは光トランシーバのインタフェース用として、主にデータコムの世界で多用されている。

従来は SC 形 2 心光コネクタがデファクト標準であったが、最近は SFF/SFP (Small Form Factor/Small Form-Factor Pluggable) と呼ばれる小形光トランシーバ用に LC 形 2 心光コネクタが多用されている。

## 4.2 光コネクタ開発の現況

ここ数年、注力されている光コネクタの開発領域について概観する。単心光コネクタについては有力な新規製品は出現しておらず、国内における FTTH 工事の簡略化のための現場組立形光コネクタがトピックスである。一方、多心光コネクタに関しては大きな変化が現れ始めている。これまでの多心光コネクタは MT フェルルをベースとしたものだけであったが、最近はスーパーコンピュータや超高速ルータ、光デバイスが大規模実装させるネットワークノード等での光インタコネクションを目的とした新しい接続方式の光コネクタの開発が進んでいる。また光アクティブケーブルという光送受信器を電気コネクタに内蔵した電気インタフェースの光リンクが本格的に普及を開始した。

### (1) 現場組立形光コネクタ

FTTH における家庭での工事時間短縮のための現場組立形光コネクタが種々開発されており、既に実用に供されている。光コネクタとしての着脱部は SC 形光コネクタの技術をベースとしているが、フェルル端面を現場で研磨しなくてもよいようあらかじめ光ファイバを組込み済みのフェルルの後端部に光コードのファイバをスプライスする形式の光コネクタである。国内では屈折率整合剤を使って、V 溝上で光ファイバを接続する方法が一般的である。作業の簡素化のためスプライス用部材に工夫が成されている。NTT では屋外・宅内での光コードやケーブル接続用の FA コネクタとクロージャ内の心線接続用の FAS コネクタがある [32]。

一方、北米での光アクセス系ではビデオ映像配信のためにアナログ伝送方式が採用されているため、反射減衰量に対する規格が厳しい。このため、スプライス作業を融着接続で行うタイプの現場組立形光コネクタが採用されている。

### (2) 光インタコネクション用多心光コネクタ

比較的短距離の伝送においても、必要な伝送速度を満たすのに電気による信号伝送では限界があるシステムが現れ始めた。これまでも言われ続けていたが、なかなか実用化に到らなかった光インタコネクションがいよいよ始動を始めた。最もニーズが顕在化したのがスーパーコンピュータのノード間通信である。これまでも MT フェルルをベースとした種々の光インタコネクション用コネクタが提案されてきたが、ここにきて新しい接続方法による多心光コネクタが報告され始めている。一つのタイプは図 9 に示す PT 形光コネクタ (JPCA-PE03-01-06S-2005) である [33]。従来の光コネクタとは異なり光ファイバ間接続が前提ではない。光インタコネクションでしばしば利用される面発光レーザ VCSEL や PD (Photodiode) との結合に配慮した構造となっている。VCSEL からの出射光を 45° ミラーで 90° 光路変換する機構を内部にもつ光コネクタである。現在 12 心タイプが開発され一心当り 10 Gbit/s の伝送が可能な光 I/O モジュール用として実用化が始まった。

多心光コネクタのもう一つのアプローチはフェルルを使用せず、本来精度良くできている光ファイバの外径をそのまま整列基準としようとする試みである [34], [35]。光ファイバの保護は直接触れられないようにプラグ構造を設計することにより可能であり、また光ファイバ表面に発生する傷による破断を防止するために、表面に薄い硬質プラスチック被覆を施した光

ファイバを利用する。この光ファイバを精密な整列孔や V 溝上で整列させるのであるが、光ファイバの先端が整列孔に挿入されさえすれば、光ファイバの柔軟性によりピッチずれは吸収されるため、整列孔等の位置精度は大きく緩和される特徴がある。また PC 接続に必要な光ファイバ同士の押圧には光ファイバの座屈力を利用する。現在、SF 形 (JPCA-PE03-01-01S-2003) と MF 形 (JPCA-PE03-01-04S-2004) の 2 種類のタイプが日本電子回路工業会 (JPCA) で標準化されている。まだ使用例は少ないが、将来の超多心光コネクタ (例えば 100 心以上) には有力な技術である。

### (3) 光アクティブコネクタ

光技術は一般に使いにくいとされている。光コードは小さく曲げられないし強い力で引っ張ると切れるおそれがある。また光コネクタは汚れや埃に弱く、着脱のたびに清掃することが義務づけられている。そのため、配線の工事業業者や環境の良くない工場での管理者または一般個人は光コネクタの使用に躊躇する傾向がある。そこで現れてきたアイデアが光アクティブコネクタまたは光アクティブケーブルである。電気コネクタのハウジング内に E/O, O/E 変換機能を内蔵しており、光伝送であるがインタフェースは電気コネクタのままとしている。このアイデア自体は決して新しくないが [36]、近年本格的に実用化が始まった。主に複数のプロセッサとハードディスク等の高速外部装置との接続に使用されている InfiniBand™ と呼ばれるインタフェース規格がある。基本は電気配線であったが、チャンネル当りの伝送速度が 5 Gbit/s や 10 Gbit/s の高速版においては電気配線では数メートルも届かない。そこで機器の物理的インタフェースは電気コネクタのまま伝送距離を延長できる光アクティブケーブルと呼ばれる製品が出現した。この傾向は 10 Gbit/s イーサネットへも波及しつつあり、FA (Factory Automation) 等でも期待されている。

### (4) 光通信応用以外への展開

光ファイバ通信以外の分野へも光技術の浸透が始まっている。その応用分野は自動車、航空機等のピークル内配線、工場内 FA 用途、医療分野、オーディオ・ビデオあるいはパーソナル・コンピュータや PDA 等のデジタル家電の内部配線と広がりを見せてきている。用途に応じて、これまでの光ファイバ通信分野では顕在化しなかった要求条件が現れつつあるが、多岐にわたるので詳細は割愛する。

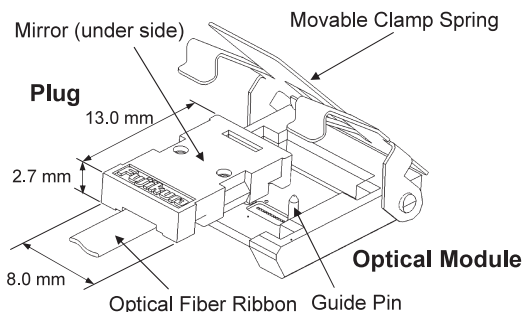


図 9 PT 形光コネクタの構造

Fig. 9 Configuration of PT optical connector.



### 4.3 将来展望

光コネクタも産声を上げておよそ 40 年が過ぎて、その方向性が固まってきた。フェルールやハウジングの材料、加工法の開発は光コネクタのよりいっそうの経済化に向けて持続的に進められるであろうが、今後の光コネクタの開発の方向性は大きく三つあると考えられる。第 1 は、標準化されたフェルール/スリーブを共通部品として使い、コネクタ開発は締結構造等のハウジング設計が中心となる方向である。その用途と目的に応じて多彩な電気コネクタが使用されている現在のパーソナルコンピュータ等からも見てとれるように、用途に合わせた心数、締結構造や形状をもった多くの種類の光コネクタが今後必要とされる。それぞれをゼロから開発するのではなく、標準部品を有効に利用して開発期間の短縮と経済化を図る進め方である。第 2 は、最近の多心光コネクタに代表されるように、光ファイバの整列技術を含めて全く新しい原理のコネクタを開発する方向である。このタイプの開発は抜本的な経済化や従来技術では対応できないようなニーズに裏打ちされる必要がある。光デバイスの大規模実装が必要な装置における光インタコネクションや車載・モバイル機器内での超小形・低コストコネクタ等へのニーズがこのような新原理光コネクタの開発を推進させる原動力となることが期待される。最後は、組立・使用の容易さを追求する方向である。光コネクタは電気コネクタと比べるとまだまだ使いづらいと思われる。最近の傾向である現場組立形や光アクティブコネクタがその方向性を示している。DIY (Do It Yourself) で光コネクタが組み立てられ、家庭内の光配線を個人でできるまで使いやすさを追求していく必要がある。

## 5. 標準化

光コネクタはその性格上、標準化が不可欠である。光コネクタの標準化は国際的には IEC (International Electrotechnical Commission) で、国内では日本工業規格 JIS として進められている。IEC では TC86/SC86B が光コネクタ標準化の主体で、主要な光コネクタに対して「かん合標準」、「性能標準」及び「光コネクタ光学互換標準」が定められている。一方、JIS では光産業技術振興協会内に光コネクタ標準化委員会が設立されており、ここで JIS の原案を作成している。当初は国際標準と国内標準は独立に策定されていたが、現在では JIS も国際標準である IEC に調和させる方向で改訂が進んでいる。具体的には IEC

では 20 品種、JIS では 18 品種の光コネクタの標準化が完了している。

さて上記標準はデジュール (de jure) 標準といわれる正式な標準化機関による規格化であるが、世の中にはデファクト (de facto) 標準と呼ばれる業界標準もある。現在流通している主な光コネクタはほぼ IEC 標準となっているが、デジュール標準はたとえば「店の陳列棚にのる」ことであり、世の中で使用されることが保証されるわけではない。実際に世界で広く使用されるためには、例えば ANSI (American National Standards Institute) の FDDI (Fiber-Distributed Data Interface) や Fibre Channel 等のシステム標準で規格光コネクタとして指定されることが必要となる。SC 形光コネクタが 1990 年台後半以降、単心光コネクタとして世界市場の 70% 以上を占有したのも FDDI や Fibre Channel 用のコネクタとして指定されたことがきっかけであった。

SC 形光コネクタは当時の競争相手であった AT&T 開発の ST 形光コネクタと熾烈な標準化競争を繰り広げ、勝利した。当時の米国業界紙では “The Battle of Optical Connector” と呼ばれたほどであった。これにより FC 形以来の日本発の光コネクタの優位性が確立されたが、後継の直径 1.25 mm フェルールを使った小形光コネクタでは、NTT 開発の MU 形光コネクタは開発は先行していたにもかかわらず米国発の LC 形光コネクタに主流を奪われてしまった。

後続の技術者のために MU 形光コネクタの開発者の 1 人として分析を加えておきたい。敗北の理由は技術的なものと政策的なものがある。まず技術的には MU 形光コネクタは光コード接続と装置のバックプレーン接続を主な用途として設計されたが、この頃から小形化が急速に進みつつあった光トランシーバへの配慮に欠けていた。単心と 2 心の光プラグを開発したが、2 心プラグのピッチ (フェルール間距離) が問題であった。ピッチの異なる 2 種類の 2 心プラグを当初実用化したが、いずれも「帯に短し褌に長し」であった。SFF/SFP と呼ばれるデファクト標準光トランシーバの送受信間ピッチ 6.25 mm と整合しなかった (MU 形は 4.5 mm と 7.5 mm)。TOSA/ROSA (Transmitter Optical Sub-Assembly/Receiver Optical Sub-Assembly) と呼ばれる光送受信モジュールの外径 (約 5.6 mm) から 6.25 mm 程度のピッチに最適値があった。また光コネクタのロックばねがレセプタクル側に必要なことも、光トランシーバの構造を

複雑化するとともにロックばねが樹脂製であるため光トランシーバの電磁シールドに不利に働いた。一方、政策的には NTT での社内使用が優先され、一般市場への投入が遅れたことが一因である。また IEC 等のデジュール標準を優先したため、光コネクタの用途としては主流になりつつあった光トランシーバへのアプローチがおろそかになったことも大きな敗因であった。デファクト標準である SFF/SFP 光トランシーバへの適合性が結局は死命を制した。

## 6. む す び

装置・機器の実装においてコネクタは“かなめ”となる部品である。機器間の物理的インタフェースとしての重要性とともに、機器内部での実装に関しても小形・軽量・薄形化が標榜されているモバイル機器にその典型が見られるように、しばしばその製品価値に決定的な影響を与える。光コネクタはまだ電気コネクタほど広い分野での使用は進んでいないが、通信系諸装置、バックボーン LAN、音響機器や一部の自動車内信号配線では不可欠な部品となっている。これは装置全体をモジュールや機器に分割して設計することにより、①製造、②建設・組立、③保守が容易になり、この分割点での光接続のためにコネクタが必要となるからである。また標準化された光コネクタを利用すれば、④光配線の切替や、⑤装置調達のマルチベンダ化に対応できることも光コネクタが必要となる重要な理由である。

単心光コネクタの分野ではここ 10 年ほどは全くの新方式といえるような光コネクタは出現しておらず、既存光コネクタの改良・形態変更が中心になっている。一方、多心光コネクタの分野での開発は多彩である。従来は MT フェルールの応用品が唯一の実用的なコネクタであったが、スーパーコンピュータ等での配線ボトルネックの解消のためのいわゆる光インタコネクション向けに各種の試みが提案されている。ここ数年の開発競争での勝者が多心光コネクタの将来を決することになるであろう。また光伝送技術をより使いやすくするためにも光コネクタの機能拡張が進んでおり、光アクティブコネクタはその一つの方向性を示すものである。

## 文 献

- [1] F.P. Kapron, D.B. Keck, and R.D. Maurer, "Radiation losses in glass optical waveguides," *Appl. Phys. Lett.*, vol.17, no.10, pp.423-425, 1970.
- [2] D.L. Bisbee, "Optical fiber joining technique," *Bell Syst. Tech. J.*, vol.50, no.10, pp.3153-3158, 1971.
- [3] A.H. Cherin and P.J. Rich, "A multi-groove embossed plastic splice connector for joining groups of optical fibers," *Appl. Opt.*, vol.14, no.12, pp.3026-3030, 1975.
- [4] C.M. Miller, "Fiber-optic array splicing with etched silicon chips," *Bell Syst. Tech. J.*, vol.57, no.1, pp.75-90, 1978.
- [5] H. Tsuchiya and I. Hatakeyama, "Fusion splices for single-mode optical fibers," *Proc. OFT II, PD1*, 1977.
- [6] M. Hirai and N. Uchida, "Melt splice of multimode optical fiber with an electric arc," *Electron. Lett.*, vol.13, pp.123-124, 1977.
- [7] H. Tsuchiya, H. Nakagome, N. Shimizu, and S. Ohara, "Double eccentric connectors for optical fibers," *Appl. Opt.*, vol.16, no.5, pp.1323-1331, 1977.
- [8] J.S. Cook and P.K. Runge, "An exploratory fiber-guide interconnection system," *Proc. 2nd ECOC, Paris*, pp.253-256, 1976.
- [9] N. Suzuki, M. Koyama, N. Kurochi, Y. Koyama, H. Furuta, and S. Oguro, "A new demountable connector developed for a trial optical transmission system," *Tech. Dig. of IOOC, B10-4*, p.351, 1977.
- [10] A. Nicia and A. Tholen, "High-efficient ball-lens connector and related functional devices for single-mode fibers," *Proc. 7th ECOC*, 1981.
- [11] H. Murata, "Moulded optical-fibre connectors using rods and balls," *Electron. Lett.*, vol.15, pp.369-370, 1979.
- [12] P. Hensel, "Triple-ball connector for optical fibres," *Electron. Lett.*, vol.13, pp.734-735, 1977.
- [13] N. Suzuki, Y. Iwahara, M. Saruwatari, and K. Nawata, "Ceramic capillary connector for 1.3 $\mu$ m single-mode fibres," *Electron. Lett.*, vol.15, no.25, pp.809-811, 1979.
- [14] E. Sugita, R. Nagase, K. Kanayama, and T. Shintaku, "SC-type single-mode optical fiber connectors," *J. Lightwave Technol.*, vol.7, no.11, pp.1689-1696, 1989.
- [15] S. Nagasawa, H. Furukawa, M. Makita, and H. Murata, "Mechanically transferable single-mode multifiber connector," *Proc. Integrated Optics and Optical Fiber Commun.*, '89, 21C2-1, pp.48-49, 1989.
- [16] N. Suzuki, M. Saruwatari, and M. Okuyama, "Low insertion- and high return-loss optical connectors with spherically convex-polished end," *Electron. Lett.*, vol.22, no.2, pp.110-112, 1986.
- [17] Y. Ando, S. Iwano, R. Nagase, K. Kanayama, and E. Sugita, "Advanced optical connectors for single-mode fibers," *NTT Review*, vol.3, no.3, pp.110-121, 1991.
- [18] K. Kanayama, Y. Ando, R. Nagase, S. Iwano, and K. Matsunaga, "Advanced physical contact technology for optical connector," *IEEE Photonics Technol.*

- Let., vol.4, no.11, pp.1284–1287, 1992.
- [19] R. Nagase, E. Sugita, S. Iwano, K. Kanayama, and Y. Ando, “Design for MU-type single-mode miniature optical connector,” *IEICE Trans. Electron.*, vol.E81-C, no.3, pp.408–415, March 1998.
- [20] 安東泰博, “光コネクタ技術,” *信学論 (C)*, vol.J83-C, no.5, pp.365–379, May 2000.
- [21] R. Nagase, “Technical trends in optical fiber connectors for telecommunication systems,” *IEICE Trans. Electron.*, vol.E86-C, no.6, pp.968–974, June 2003.
- [22] C.M. Miller, S.C. Mettler, and I.A. White, “Optical fiber splices and connectors,” pp.90–176, Marcel Dekker, New York, 1986.
- [23] IEC 61280-4-1, ed. 2 (CD) 文書.
- [24] S. Nemoto and T. Makimoto, “Analysis of splice loss in single-mode fibers using a Gaussian field approximation,” *Opt. Quantum Electron.*, vol.11, pp.447–457, 1979.
- [25] Y. Ando, S. Iwano, K. Kanayama, and R. Nagase, “Statistical analysis on connection characteristics of optical connectors,” *IEICE Trans. Electron.*, vol.E77-C, no.12, pp.1970–1982, Dec. 1994.
- [26] K. Kanayama, Y. Ando, R. Nagase, S. Iwano, and K. Matsunaga, “Advanced physical contact technology for optical connector,” *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol.4, no.11, pp.1284–1287, 1992.
- [27] T. Shintaku, R. Nagase, and E. Sugita, “Connection mechanism of physical-contact optical fiber connectors with spherical convex polished ends,” *Appl. Opt.*, vol.30, no.36, pp.5260–5265, 1991.
- [28] S. Nagasawa, Y. Yokoyama, F. Ashiya, and T. Satake, “A high-performance single-mode multifiber connector using oblique and direct endface contact between multiple fibers arranged in a plastic ferrule,” *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol.3, no.10, pp.937–939, 1991.
- [29] M.A. Shahid, N.R. Lampert, A.W. Carlisle, D.A. Hendrickson, D.M. Emmerich, T.E. McNeil, and J.E. George, “Small and efficient connector system,” *Proc. 49th ECTC*, pp.375–380, 1999.
- [30] S. Iwano, E. Sugita, K. Kanayama, R. Nagase, and K. Nakano, “Design and performance of single-mode plug-in type optical-fiber connectors,” *J. Lightwave Technol.*, vol.8, no.11, pp.1750–1756, 1990.
- [31] S. Iwano, R. Nagase, K. Kanayama, E. Sugita, K. Yasuda, and Y. Ando, “Compact and self-retentive multi-ferrule optical backpanel connector,” *J. Lightwave Technol.*, vol.10, no.10, pp.1356–1362, 1992.
- [32] 中嶋龍哉, 寺川邦明, 粟森雅史, 棚瀬博之, 豊永雅信, 鎌光男, “大量光開通工事を実現する架空光コネクタの開発,” 2006 信学ソ大 (通信), B-10-7, Sept. 2006.
- [33] 佐々木健志, 藤原邦彦, 西村顕人, 林 幸生, 古川 洋, 清水隆徳, 畠山意知郎, 佐々木純一, 蔵田和彦, “光 I/O 内蔵システム LSI モジュール (5) 基板実装方コネクタの開発,” 2003 信学ソ大 (エレクトロニクス), C-3-127, Sept. 2003.
- [34] M. Kobayashi, S. Iwano, R. Nagase, and S. Mitachi, “A new physical contact connection method using the buckling force of optical fiber,” *IEICE Trans. Electron.*, vol.E80-C, no.2, pp.334–339, Feb. 1997.
- [35] Y. Ando, M. Usui, N. Sato, and K. Katsura, “Multiport optical Bare-Fiber connector for parallel optical interconnect module,” *IEICE Trans. Electron.*, vol.E82-C, no.1, pp.72–80, Jan. 1999.
- [36] 稲垣秀一郎, 安東泰博, 金井恒雄, “光送受信モジュール内蔵形コネクタ,” 昭 59 信学通信部門全大, S4-3, Sept. 1984.

(平成 20 年 12 月 24 日受付)



安東 泰博 (正員:フェロー)

昭 49 阪大・工・電子卒。昭 51 同大大学院修士課程了。同年日本電信電話公社 (現 NTT) 入社。以来, 接点現象, 電気コネクタ, 光接続技術の研究及びデジタルシステム実装用コネクタ類や各種光コネクタ, 光インタコネクション技術の開発に従事。平 12 より (株) フジクラ。現在, 理事・光電子回路開発センター長。博士 (工学)。平 10 ~ 11 本会機構デバイス研究専門委員長。IEEE: ECTC プログラム委員会 Co-chair, ICEP 論文委員会副委員長, IEC TC86/SC86C/WG1, WG4 委員。平 11 本会エレクトロニクスソサイエティ賞, A MOC Paper Award '99, 平 12 本会論文賞・猪瀬賞, MES '99 ベストペーパー賞, 平 13 IEMT/IMC Symposium Outstanding Technical Paper Award, 平 16 IEC 活動推進会議議長賞を受賞。エレクトロニクス実装学会会員, IEEE Fellow。