

医療機器向け光アクティブケーブルの開発

Development of Active Optical Cable for Medical Device

田邊賢吾
Kengo TANABE

佐野義昭*
Yoshiaki SANÔ

鈴木修司*
Shuji SUZUKI

村瀬知丘
Tomotaka MURASE

金子貴皇
Takao KANEKO

高機能化した医療機器内において電気伝送は限界を迎えつつあり、光伝送の導入が進められている。今回、細径・小型でかつ、光伝送を意識しない電気伝送のようなインターフェースをコンセプトにした医療機器向け光アクティブケーブルを開発した。光ケーブル部はクラッド径 80 μm の高 NA-GI 形細径クラッド光ファイバ心線を用い、コネクタ部は光電気変換部の大幅な小型化を実現した。本ケーブルは、極小曲げや耐屈曲性に優れるとともに、最大 6.25 Gbps の信号伝送が可能で、コネクタは一般的な電気コネクタと同様な構造を有している。本ケーブルは、配線形態への要求が厳しい医療機器分野で適用可能である。

Recently, some interconnect wirings into sophisticated medical devices have become optical transmission systems due to electrical limitation of metallic transmission systems. We have developed active optical cable for medical devices, which had design concepts of minimal compact design and metallic-like interface in unconscious optics. The cable consisted of high NA-GI optical fiber with 80 μm cladding diameter and super compact connectors of electric-optic converter for producing high density mounting. Additionally, the cable realized small size wiring, highly flexure resistance and signal transmission rate of 6.25 Gbps. This cable is suitable for wiring with stringent requirements into medical devices.

1. はじめに

近年の医療機器内の高機能電子部品は、送受信すべき信号が多様化複雑化し、情報通信量の大容量化・高速化が進んでいる。このため、電子機器間の光伝送化への要求は明らかな高まりを見せている。医療機器内で配線される光ケーブルは、空間的な裕度が非常に少ないため、細径でかつ、極小曲げに対して高い信頼性が要求される。これに加え、固定配線のような静的な曲げだけでなく可動部における動的な曲げが加わることもあるため、高い屈曲寿命をもつことが望まれている¹⁾。このような要求に対し、クラッド径 125 μm の一般的な石英系グレーデッドインデックス (Graded Index: GI) 形光ファイバでは、伝送損失の増加を招きやすだけでなく、屈曲寿命においても破断に至る確率が高くなるなど、そのまま適用するには種々の課題が生じる。

一方、光伝送方式には、必ず光信号と電気信号の変換部

が必要となる。一般に、光電気変換部は、光源からの信号光を効率的に光ファイバに入射することが求められる。そのため、高精度に光源と光ファイバを調心したり、レンズ等の光学部品を内蔵させたりすることがあり、小型化することが非常に難しい。また、メタル伝送方式がいまだに一般的であるため、光伝送方式を意識しない電気コネクタのインターフェースが重要となっている。

そこで、われわれは光ケーブルと光電気変換コネクタを一体化した医療機器向け光アクティブケーブル (Active Optical Cable: AOC) を開発した。外観を図 1 に示す。本 AOC の光ケーブル部は、クラッド径を 80 μm に細径化した高 NA-GI 形細径クラッド光ファイバ心線²⁾を用いており、半径 10 mm の耐屈曲性試験において連続屈曲回数 300 万回を満足する。また、コネクタ部は、光電気変換部に面発光レーザ (Vertical Cavity Surface Emitting LASER: VCSEL) / 光検出器 (Photo Diode: PD) を用い、封止樹脂の工夫などによって高さ 1.5 mm の低背化を実現している。加えて、一般的な 0.5 mm ピッチの電気コネクタと同様な構造としていて、最大 6.25 Gbps までの高速、

* ヒロセ電機株式会社

高品質の信号伝送が可能である。

本報告では、最初に医療機器向け AOC の光ケーブル部とコネクタ部の設計内容について述べた後、伝送特性および信頼性試験結果について述べる。

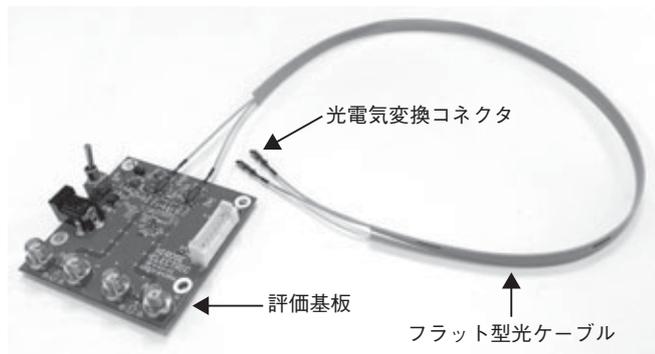


図1 医療機器向け AOC

2. ケーブル設計

医療機器向け AOC は汎用の光通信ケーブルとは異なり、ケーブル構造は配線性を意識して細径化および屈曲寿命を考慮する必要がある。

2.1 光ファイバ心線

光ファイバの極小曲げによる損失増加および屈曲時に生じる光ファイバひずみの低減のため、クラッド径 80 μm 、コア径 50 μm 、開口数 (Numerical Aperture : NA) 0.27 の GI 形光ファイバを熱可塑性フッ素系樹脂で被覆した高 NA-GI 形細径クラッド光ファイバ心線を開発した。表 1 に心線構造を示す。

図 2 にマンドレルに 1 ターン巻いたときの曲げ損失特性 (波長 850 nm) を示す。曲げ半径 2.5 mm における高 NA-GI 形細径クラッド光ファイバ心線の損失増加量は 0.14 dB であり、一般的な GI 形光ファイバ心線と比較して十分小さく、極小曲げに強いことがわかる。

また、U 字曲げ (180°曲げ) 時の耐破断特性を図 3 に示す。高 NA-GI 形細径クラッド光ファイバ心線の破断確率は一般的な GI 形光ファイバ心線と比較して非常に優れており、曲げ半径 2.5 mm においても高い信頼性を持っていることがわかる。

表 1 高 NA-GI 形細径クラッド光ファイバ心線構造

項目	単位	設計値
ファイバ	材質	石英系
	屈折率分布	GI 形
	NA	0.27
	コア径	μm 50
	クラッド径	μm 80
一次被覆	材質	紫外線硬化型樹脂
	最外径	mm 0.17
二次被覆	材質	熱可塑性フッ素系樹脂
	最外径	mm 0.50

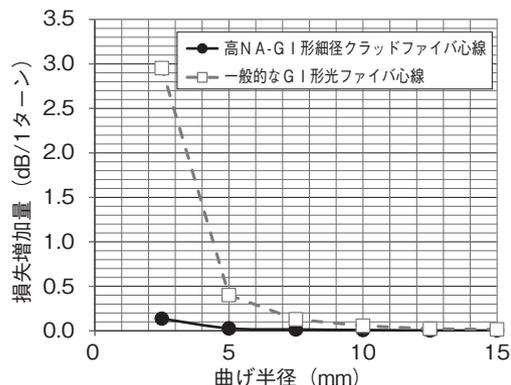


図2 曲げ損失特性 (波長 850 nm)

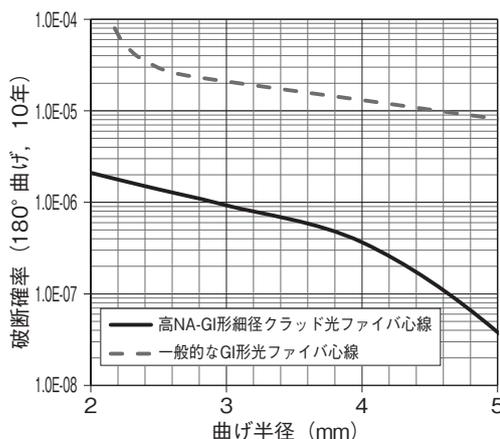


図3 U字曲げ時の耐破断特性

2.2 ケーブル構造

医療機器向け AOC は双方向通信のため、光ファイバは 2 心実装する。ケーブルの細径化を実現するため充実構造とし、高い屈曲寿命を実現するために外周樹脂は柔軟性と強靭性を兼備したポリ塩化ビニル系樹脂で被覆した。さらに、ケーブル特性の向上と配線時に要求される可撓性を実現するため、プラスチックテンションメンバを光ファイバ心線の両端に配置する構造とした。図 4 にフラット型光ケーブルの断面構造を示す。

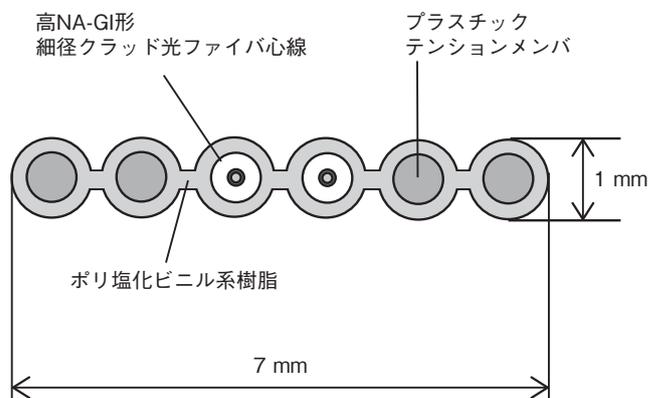


図4 フラット型光ケーブル断面構造

2.3 ケーブル特性

表2に医療機器向けAOCのケーブル特性を示す。ケーブルを短径方向に、半径2.5 mmのマンドレルで1ターン巻きつけても、損失変動は0.1 dB未満となった。医療機器内で配線されるケーブルとして十分な性能をもつ。

表2 ケーブル特性 (波長 850 nm)

項目	評価条件	評価結果
伝送損失	ボビン巻き	<3.0 dB/km
曲げ損失特性 (短径方向)	半径 2.5 mm マンドレル, 1 ターン	<0.1 dB
捻回特性	±360° / 1 m	<0.1 dB
温度サイクル特性	-40 ~ +85°C, 3 サイクル	<0.1 dB/60 m
温湿度サイクル特性	-10 ~ +65°C, 95%RH, 10 サイクル	<0.1 dB/60 m

次に、可動部などで動的な曲げが加わったときの性能を検証するため、図5に示す耐屈曲性試験 (JIS C 5016 準拠) を実施した。このとき、100 往復/min の速さでしゅう動ステージを往復運動させ、光ファイバが破断するなど、伝送不能となったときの屈曲回数 (往復回数) を記録した。表3に評価結果を示す。本AOCは、屈曲半径10 mmの耐屈曲性試験において連続屈曲回数300万回でも伝送可能であり、過酷な使用環境においても十分対応する。

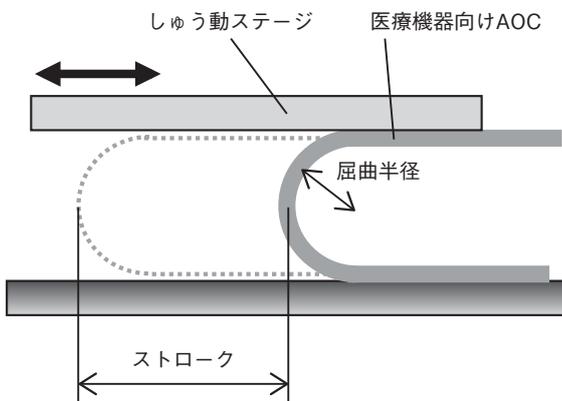


図5 耐屈曲性試験の構成

表3 耐屈曲性試験結果

項目	条件1	条件2
屈曲半径	10 mm	7 mm
ストローク	90 mm	90 mm
屈曲回数	300 万回以上	223 万回にて断線

3. コネクタ設計

医療機器向けAOCはコネクタにおいても小型化が要求される。また、コネクタ挿抜時のハンドリング性についても簡便さが要求される。今回、コストと拡張性を考慮してケーブル片端には、送信用/受信用2個の光電気変換コネクタを各々の光ファイバに実装した。

3.1 コネクタ概要

コネクタ部は光接続点を排除するため、光電気変換を担うプラグコネクタと、通常の電気コネクタと同様の0.5 mmピッチの接点をもつレセプタクルコネクタの2つに着脱可能な構造とした (プラグプル)。これにより、接続は電気接点同士の接触により完結され、挿抜時の清掃処理が不要となり、良好なハンドリング性が実現される。図6にコネクタ外観を示す。

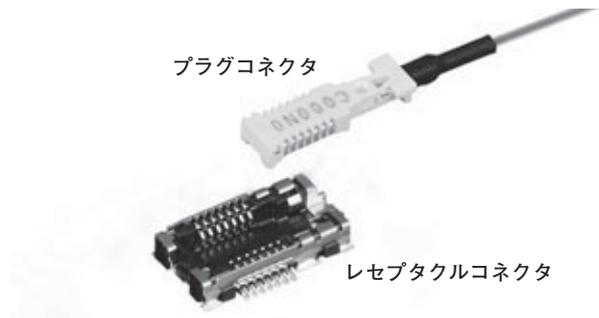


図6 光電気変換コネクタ概要

3.2 アライメント設計

プラグコネクタにおける、光電気変換部のVCSEL/PDと光ファイバまでの光学配置を図7に示す。VCSEL/PDは実装面 (以下リードフレーム) に対して垂直方向に光軸をもつが、光ファイバはリードフレームに対して水平方向に光軸をもつ。そのため、光路を90度変向する必要が生じるが、従来のように反射面を有した部材を空間的に配置させると光軸調整が煩雑になる上、小型化が困難になる。そこで、VCSEL/PD直上まで透明樹脂を充填させ、金型により透明樹脂表面に45度の非球面形状の反射面を形成した。このとき、同時に光ファイバ位置決め用V溝を形成し、光路が光ファイバへ集光されるよう設計することで、光ファイバ実装時の光学的な位置合わせも不要とした。その結果、部品点数が少なく光軸調整が自動的に行われ、かつ光学配置が確実に維持される小型な光電気変換部を実現した。

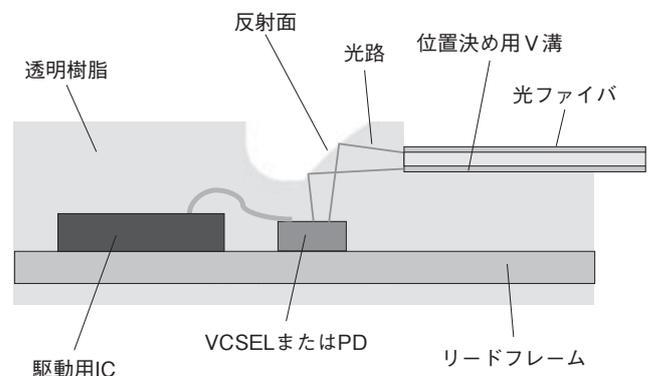


図7 プラグコネクタにおける光学配置

3.3 機構設計

図8に光電気変換コネクタの断面構造を示す。ここで、駆動用ICなどの実装部品からの放射ノイズに対するシールド性能を勘案しながら、リードフレームおよびレセプタクルシェル最適化を図った。また、内部配線のワイヤボンディング長についても短縮化を図った³⁾。それらの結果、プラグコネクタ高さを1.3 mmまで小型化することに成功し、コネクタ嵌合時高さが1.5 mmの低背化を実現した。なお、光電気変換コネクタの幅は5 mm、長さは11 mmである。これらは、一般的な電気コネクタと同様の大きさで、医療機器内に実装される部品として十分な構造である。

また、本コネクタは低消費電力の駆動用ICを使用しているため、発熱量が極めて少なく、放熱設計としてはリードフレームおよび透明樹脂が放熱パスとして機能するのみで十分であり、小型化を追求した構造となっている。

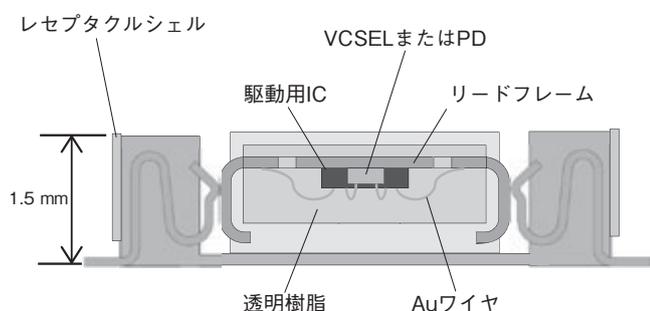


図8 光電気変換コネクタの断面構造 (嵌合時)

4. 伝送特性評価

図9に医療機器向けAOCの伝送特性評価系を示す。信号発生器から出力する信号は6.25 Gbps (PRBS7)とし、評価基板を介して、長さ10 mの本AOCに接続し、出力される信号品質をサンプリングオシロスコープによって確認した。測定系における入力信号のPRBS7は、実際の入力信号として推奨する8b10b符号化でのデータ伝送に近い状態となるため、実使用におけるジッタ値予測と近い値になる。なお、ビットエラーレート (Bit Error Rate: BER) 1×10^{-12} でのジッタ評価は一般に広く用いられている指標である。

図10に本AOCの電気出力信号波形を示す。また、表4にBER 1×10^{-12} におけるランダム・ジッタ (Random Jitter: RJ) p-p値とデターミニスティック・ジッタ (Deterministic Jitter: DJ) の試料数5の平均値を示す。なお、BER 1×10^{-12} におけるRJ (p-p値)は次の式で見積もられる⁴⁾。

$$RJ \text{ (p-p 値)} = 14.069 \times RJ \text{ (rms)} \quad (1)$$

RJ (p-p値)とDJの和として得られるトータルジッタ (Total Jitter: TJ)は34.3 psであった。この結果から6.25

Gbps, BER 1×10^{-12} におけるエラーフリー領域は125.7 ps (=0.79 UI)であり、十分なジッタマージンを有していることを確認した。

このときの本AOCの消費電力は送信側で約25 mW、受信側で約70 mWであった。また、プラグコネクタ上面における温度上昇は送信側が1°C未満、受信側が3°C未満であった。実使用における周囲環境へ与える影響は軽微であるといえる。

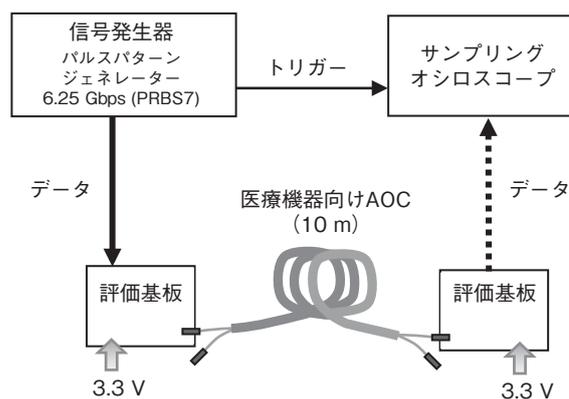


図9 伝送特性評価系

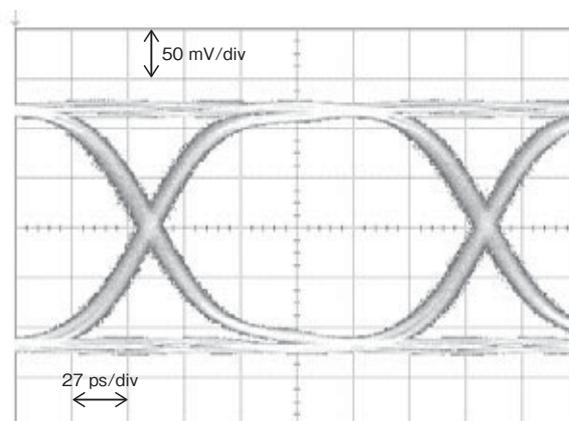


図10 医療機器向けAOCのアイパターン

表4 BER 1×10^{-12} におけるRJおよびDJ値

RJ (p-p 値)	DJ	TJ (BER)
24.7 ps	9.6 ps	34.3 ps

5. 信頼性試験結果

表5に医療機器向けAOCの信頼性試験結果を示す。試験後のケーブル/コネクタの機能は、全試験項目において正常であり、十分な信頼性を有していることを確認した。

表5 信頼性試験結果

項目	試験条件	判定基準	結果
振動特性	10 ⇄ 55 ⇄ 10 Hz, 振幅 1.5 mm, 3 軸方向 各 10 サイクル	試験前後で機能 および外観に異 常ないこと	合格
衝撃特性	加速度 490 m/s ² , 作用時間 11 ms, 3 軸方向 各 3 回		合格
耐熱特性	+85°C, 1000 hr		合格
耐寒特性	-40°C, 1000 hr		合格
温度 サイクル特性	-40°C ~ +85°C, 100 サイクル		合格

6. ま と め

細径・小型で配線性に優れた医療機器向け AOC を開発した。光ケーブル部は、クラッド径 80 μm の高 NA-GI 形細径クラッド光ファイバ心線を用いたフラット型光ケーブルであり、極小曲げや繰返し曲げに優れる。また、コネクタ部は、光電気変換部の樹脂封止の工夫などにより、高さ 1.5 mm の低背であり、かつ電気コネクタと同様な構造を有している。

本 AOC は、過酷な環境下でも高い信頼性を示すことから、ますます高機能化する医療機器分野において、貢献することを期待している。

参 考 文 献

- 1) G. Astfalk : "Why optical data communications and why now?" Applied Physics A, June 2009, Vol. 95 issue 4, pp.933-940
- 2) 村瀬知丘, 他 : 昭和電線レビュー, Vol.53, No.1, pp.32-36 (2003)
- 3) Summit Technical Media, LLC : "Sensitivity of an Optical Receiver", High Frequency Electronics Design Notes, Vol.10, No.6, p.72 (2011)
- 4) J. Hancock : "Jitter - Understanding it, Measuring it, Eliminating it part 1 : Jitter Fundamentals", High Frequency Electronics, Vol.3, No.4, pp.44-50 (2004)

昭和電線ケーブルシステム(株)

田邊 賢吾 (たなべ けんご)
通信システムユニット 技術部 技術課 主査
通信ケーブルの研究・開発に従事

ヒロセ電機株式会社

佐野 義昭 (さの よしあき)
技術本部 SB 事業部 光技術課 主事
光アクティブコネクタの設計・開発に従事

ヒロセ電機株式会社

鈴木 修司 (すずき しゅうじ)
技術本部 SB 事業部 光技術課 副参事
光アクティブコネクタの設計・開発に従事

昭和電線ケーブルシステム(株)

村瀬 知丘 (むらせ とまたか)
営業本部 営業技術部 主査
通信ケーブルの設計・販売に従事

昭和電線ケーブルシステム(株)

金子 貴皇 (かねこ たかお)
通信システムユニット 光素線プロジェクト長
通信ケーブルの研究・開発に従事