

氏名（本籍）	境目 賢義（福岡県）
学位の種類	博士（工学）
学位記番号	甲第 211 号
学位授与の日付	平成 30 年 3 月 22 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当
学位論文題目	マルチコアファイバ用光コネクタの構造創成と設計に関する研究
論文審査委員	(主査) 教授 長瀬 亮 (副査) 教授 坂本 幸弘 教授 松井 伸介 准教授 徳永 剛 慶應義塾大学 准教授 石樽 崇明

学位論文の要旨

マルチコアファイバ用光コネクタの構造創成と設計に関する研究

インターネットによる動画配信やスマートフォンの世界的な普及により光ネットワークを流れる通信容量は年々増大を続けており、高速大容量化が求められている。光通信に使用されているシングルモードファイバ（Single-mode Fiber：SMF）の最大伝送容量は、これまでの研究から 100 Tbit/s 程度であることが明らかになっており、今後数年でネットワーク容量が限界に達すると考えられている。これらのことから、現在の SMF を超える伝送容量の実現を目指し、新しい光ファイバであるマルチコアファイバ（Multicore Fiber：MCF）が提案されている。

MCF で光通信ネットワークを構築するためには着脱可能な光コネクタ接続技術が必要不可欠であるが、MCF 双方を実用可能な精度で接続できる方法はこれまで無かった。本研究の目的は、SMF コネクタに匹敵する光学特性、実用的な機械的特性及び信頼性を有する MCF 用光コネクタの実現にある。また MCF コネクタは、これまで培われてきた SMF コネクタの設計条件と異なる。よって MCF コネクタの信頼性を確保するためには、未だ明らかになっていないコネクタ端面の微小変形や割りスリーブの微小変形について解明する必要がある。

本論文では、以下に示す 3 つの検討により、新たな構造により実使用に耐える MCF コネクタを実現するとともに、接続特性と信頼性を決定づけるコネクタ端面の弾性変形及び、割りスリーブの微小変形に関する有限要素解析手法を確立した。

(1) MCF コネクタを従来の SMF コネクタに匹敵する光学特性の実現を目指す。本研究で開発する MCF コネクタは実用化を前提とし、既存の光コネクタと同等の作業性、信頼性を有すると

ともに複数ベンダ間の互換性を確保できることを条件として設計，検討を行った．また MCF は複数の光ファイバ製造メーカーで作られている 7 コア MCF を対象とした．

開発した MCF コネクタの光学特性を評価するとともに，MCF コネクタの接続損失データから軸ずれ量，角度ずれ量を算出し，モンテカルロシミュレーションを行った．その結果，実測値とシミュレーション値に良い一致が見られたため，開発した MCF コネクタの設計手法が正しいことを実証した．また信頼性を評価するため，開発した MCF コネクタについて様々な機械的特性試験を行った．その結果，IEC 61753-021-6 に規定された光学特性や，ケーブル引張等の機械的特性に関する性能を満足することを確認した．よって，本研究で検証した MCF コネクタは，IEC に規定されている光学特性，機械的特性を満たしていることから，光通信ネットワークを構築するための実使用に耐える MCF コネクタであることを示した．

(2) 光コネクタは，コネクタ内部のフェルール押圧ばねによりファイバ双方を軸方向に押し付ける PC (Physical Contact) 接続技術が用いられるが，フェルール押圧力によるファイバ端面の弾性変形の詳細については不明である．光通信用に MCF が標準化された場合，その MCF を PC 接続できるかの判断は，フェルール押圧力とファイバ端面弾性変形の関係が明らかになっていなければ検証することができない．本研究では PC 接続時のフェルール押圧力とファイバ端面弾性変形の関係を，19 コア MCF を用いて明らかにすることを目的とした．

19 コア MCF が接着されたフェルールに押圧力を与えながら各コアの反射減衰量を測定することにより，押圧力とファイバ接触領域変化の関係を実測した．また 3D モデルを使用した有限要素解析にて，実験と同じ端面形状について解析を行った．その結果，ヘルツの接触理論式による予測，実測値と解析結果がそれぞれ近い値を示していることを確認した．本研究により，これまで検討されていなかった PC 接続時のフェルール押圧力とファイバ端面弾性変形の詳細を明らかにするとともに，フェルール押圧力とファイバ端面弾性変形の有限要素解析手法を確立した．

(3) フェルールを使用した単心光コネクタは，フェルール双方の軸を整列させるために割りスリーブを使用する．割りスリーブはフェルール挿入時，弾性変形によりフェルールを保持すると考えられているが，変形量が微小なため実測が難しく，これまで経験則により設計されていた．通信用に標準化された MCF の各種寸法が既存の SMF と異なる場合，MCF 全コアを PC 接続させるためにフェルール押圧力を変更する可能性が考えられる．その場合，既存の割りスリーブのフェルール保持力が適切であるかを判断しなければならないが，割りスリーブの設計手法は未だ確立しておらず，フェルール保持力の最適化は困難である．本研究では，割りスリーブの微小変形を，実験と有限要素解析を用いて明らかにし，経験則により設計されていた割りスリーブの設計手法確立について検討した．

フェルール挿入時に生じる割りスリーブのひずみや割り幅の変形量を実験と有限要素解析にて明らかにしたのち，それらの結果を比較した．またフェルール先端を斜め 8 度に凸球面状に研磨する APC コネクタにおいて，接続時に観測される接続損失の割りスリーブ方向依存性に着目し，

フェルール挿入時の割りスリーブの変形に関する有限要素解析結果と接続損失変動の実測値を比較した。それぞれの比較結果より、有限要素解析と実験で近い値を確認した。よって有限要素解析で得られた値は妥当であることが確認でき、割りスリーブの設計手法確立に役立つ有限要素解析手法を確立することができた。

以上述べた通り、本研究では、実用化を前提とした新たな MCF コネクタを実現した。また PC 接続時のファイバ端面およびフェルール挿入時の割りスリーブ微小変形に関する解析手法を確立し、これまで長年の実績を有する SMF 接続と条件の異なる MCF 接続において、SMF 光コネクタと同等の信頼性を確保するための MCF コネクタの設計手法を確立した。

審査結果の要旨

光通信用に開発された汎用シングルモードファイバ (Single-Mode Fiber : SMF) が完成して以来、現在に至るまで光ファイバを使用した通信技術は世界的に普及した。現在、インターネットによる動画配信やスマートフォンの世界的な普及により光ネットワークを流れる通信容量は年々増大を続けており、さらなる高速大容量化が求められている。SMF の最大伝送容量はこれまでの研究から 100 Tbit/s 程度であることが明らかになっており、今後数年でネットワーク容量が限界に達すると考えられている。これらのことから、現在の SMF を超える伝送容量の実現を目指し、新しい光ファイバであるマルチコアファイバ (Multicore Fiber : MCF) が提案されている。MCF で光通信ネットワークを構築するためには着脱可能な光コネクタ接続技術が必要不可欠であるが、MCF 双方を実用可能な精度で接続する方法はこれまで無かった。

本論文では、SMF 用光コネクタに匹敵する光学特性、実用的な機械的特性及び信頼性を有する MCF 用光コネクタの設計手法について論ずるとともに、新たな構造の創成により実用的な MCF 用光コネクタを実現することを目的としており、全 6 章で構成されている。

第 1 章では、通信容量の増大に関する背景と、容量増大を実現可能な MCF の概略、また SMF 用光コネクタの基本技術と MCF をコネクタ接続する場合の問題点について述べている。

第 2 章では、コネクタを使用した光ファイバ接続時における基本特性である接続損失と反射減衰量について述べるとともに、その発生原因と測定方法について述べている。単心 MCF コネクタを開発するうえで、その開発コンセプト、MCF 接続に要求される条件を満たすために必要な技術を解説するとともに、MCF コネクタの開発や接続に必要なとされる部品やデバイスについて紹介している。

第 3 章では従来の SMF 用光コネクタに匹敵する光学特性を有する MCF 用光コネクタを実現することを目指し、既存の光コネクタと同等の作業性、信頼性を有するとともに複数ベンダ間の互換性を確保できることを条件として設計を行っている。7 コア MCF 用の光コネクタを試作して光学特性を評価するとともに、接続損失発生要因を明らかにすることによって、試作した MCF 用光コ

ネクタの設計の正しさを証明している。また、IEC 等で規定されている様々な機械的特性評価を実施することにより、光通信ネットワークにおいて実用上十分な基本特性を備えていることを確認している。

第4章では3章で開発した単心MCFコネクタを19コアMCFに適用した内容について述べている。19コアMCFのフィジカル・コンタクト (Physical Contact: PC) 接続時のフェルール押圧力と各コアの反射減衰量の関係を測定することにより、接続端面の微小変形を詳細に調べ、実験と同じ端面形状の3Dモデルを使用した有限要素解析結果およびヘルツの接触理論式による解析結果と比較することにより、これまで明らかになっていなかったファイバ中心以外の端面弾性変形の詳細を明らかにすることによって、高信頼なMCFのPC接続を実現するための設計手法に指針を与えている。

第5章ではコネクタ接続に使用されている割りスリーブについて、フェルール挿入時の微小変形の有限要素解析を行っている。フェルール先端を斜め8度に凸球面状に研磨するAPC (Angled Physical Contact) コネクタにおいて接続時に観測される接続損失の割りスリーブ方向依存性に着目し、解析結果と接続損失変動実測値を比較することによって有限要素解析手法の正しさを明らかにしており、これまで経験値に頼っていた割りスリーブの設計が可能となった。これによりSMF用光コネクタと条件の異なるMCF用光コネクタの設計に生かすことができると考えられる。

第6章では、本論文の総括と今後の展望をまとめている。

以上、本論文はますます高速・大容量化する通信需要に応えるために必要とされているマルチコアファイバの接続技術に取り組んだものであり、新たな構造の創成によって従来のSMF用光コネクタと同等の接続特性、機械的特性、信頼性を期待できるMCF用光コネクタを実現するとともに、MCFの特徴を生かしてPC接続端面の微小変形について詳しく解析することにより、SMF用光コネクタとPC接続条件が異なるMCF用光コネクタの設計手法に指針を得た。さらに、割りスリーブの微小変形についても詳しく解析し、新たなPC接続条件に対応できる割りスリーブの設計にも指針を得た。以上の研究成果はいずれも新たな手法で問題点を解決することにより、高信頼性を求められる光通信ネットワークに適用可能なMCF用光コネクタを実現できることを証明したものである。これらの技術的貢献は工学における学術論文として高く評価できる。

よって本論文は、博士 (工学) の学位論文として合格と認められる。