

称号及び氏名 博士（工学） 藤本 暁

学位授与の日付 平成18年3月31日

論文名 「Design and Performance Studies on Optical IP Networks  
for Metropolitan Area Network Applications  
(メトロエリアネットワークにおける光 IP ネットワークの設計と評価に関する研究)」

論文審査委員 主査 勝山 豊

副査 山下 勝己

副査 大橋 正治

## 論文要旨

光ファイバネットワークは、その大容量性と低損失性を利用して、年々増加するトラフィックを収容できる方式として今後その利用がさらに増加すると考えられている。光ネットワークはアクセス網やコアネットワークとして広く用いられている。光損失は波長に依存し、1550nm 帯では 0.2~0.25dB/km と低損失な値が達成されている。このため、21~30dB の光送受信器を用いて、光増幅器なしで 70~100km の通信が可能であり、コアネットワークに適している。

高速通信のための光伝送技術は、ITU-T(International Telecommunication Union-Telecommunication Sector) において、SDH(Synchronous Digital Hierarchy) として規格化されている。SDH は TDM(Time Division Multiplexing: 時分割多重)であり、STM-1(Synchronous Transport Module-1) を SDH における多重化の基本単位として、STM-1、STM-4、STM-16、STM-64、STM-256 の 5つの勧告が定められている。STM-256 におけるビットレートは 39.81312Gbps であり、約 50 万の電話回線数に等しい。このような回線数が 1本のファイバを通して 1つの波長により伝送できる。

高速伝送の別の技術として WDM(波長分割多重)がある。WDM 技術によって、違う波長の光を光合波器を用いて合波し、同時に伝送できる。CWDM(低密度波長分割多重方式)においては、1291nm を始点として 16 の波長を 20nm 間隔で用いる方式が規格化されている。DWDM(高密度波長分割多重方式)においては、より狭い波長間隔を用いた C、L 周波数帯などが規格化されている。これらに関する研究は数多く行われ、100 以上の波長を多重した結果が報告されている。1つの波長によって STM-256 のビットレートで伝送し、100 波長多重すれば、約 5000 万の回線に相当し、莫大な数の電話回線を 1つのファイバに多重することができる。このように、トラフィックが大きいコアネットワークで光通信は最適であり、広く使われている。

アクセスネットワークや地域ネットワークでは、電話の銅線ケーブルから光ケーブルへの更改が進んでいる。需要の大小により、FTTB(fiber-to-the-building) 、

FTTC(fiber-to-the-curb) 、FTTP(fiber-to-the-premises) 、FTTH(fiber-to-the-home) のように区別されている。ビジネス用の FTTB は大口需要が予想されるため、光ファイバ導入は効果的である。一方、FTTH はホームユーザ用である。これはビジネス用に比べて小口であり、経済的には不利であるため、PON (passive optical network) などの共有型光ファイバネットワークが適用されている。

最近の重要な動きはダークファイバを用いたユーザ管理型ネットワークの構築が盛んになっていることである。この新しいネットワークは大企業によって構築される場合が多く、米国やカナダで利用が広がっている。ユーザは光ファイバを取得し、帯域幅が必要になれば機器をアップグレードするだけでよい。

ユーザ管理型ネットワーク利用の進展を考慮すると、ユーザ自身で MAN を所有する CO-MAN(customer-owned MAN)を開発することが必要であると考えられる。CO-MAN に必要な技術として、ネットワーク管理者が遠隔地から管理業務をサポートする管理システムの開発と、ネットワークに拡張性を与えることがある。

CO-MAN のネットワーク構築方法と管理システムに関しては、ほとんど論文が発表されていない。また、パケットを広域で転送する際に、アプリケーションがルーティング法に依存する問題がある。アプリケーションは OSI (Open Systems Interconnection) 第 2 層で動作するものと、第 3 層で動作するものがあり、ルーティングは広域で使用する場合には一般に第 3 層の IP 接続になる。この場合、第 2 層で動作するアプリケーションは何らかの変換が必要になる。通常は、広域イーサネットと IP-VPN の 2 種類の方法で拠点間を接続する方式が使われる。また、IP ネットワークの定量的評価も問題である。IP 通信において、伝送媒体はユーザの間で共有されており、輻輳が起こっても、パケットは衝突なしで送られるようになっている。広域の光 IP ネットワークでパケットが衝突なしで転送され、スループットが良好なことを定量的に評価する必要がある。

本研究では、上記のような技術的背景を元に、未検討部分が多い CO-MAN を対象とし、適切な管理システムと拡張性に優れた CO-MAN の設計と構築方法について提案する。CO-MAN に必要な管理システムには、ネットワーク管理者が遠隔地から情報を取得し、ネットワークを操作できるものが求められる。障害時における素早い復旧時間も重要な要素である。拡張性に関しては、以下に述べる 2 つのタイプの光リンクを統合したネットワークの構築方法について提案する。すなわち、一般的なポイントツーポイントリンクと、この論文で提案する One-by-One(0-0) リンクを基に、これを多重することで拡張性に優れた光 IP ネットワークが設計できることを提案する。さらに、提案したネットワーク構築法が有効であることを確認するため、実際にネットワークを構築し特性を評価した。

以下、本論文の構成にしたがって概要を述べる。

第 1 章では、本研究の背景ならびに目的を述べるとともに、研究内容の概要について述べている。

第 2 章では、光 IP ネットワークを定量的に評価するため、限界性能モデルに基づき、ネットワークを評価する方法を提案している。ここで、限界性能とは、すべてのクライアントが同時に同サイズのデータをサーバに転送したときの転送時間として定義した。まず、LAN をフロー制御方法と伝送速度との可能な組み合わせに従って、10 タイプに分類した。分類した LAN ごとに限界性能に基づいたファイル転送時間を表現する式を導出した。LAN はクライアント／サーバ型であり、クライアントがハブ経由でサーバと接続された場合を評価できるようにしたが、一般の IP ネットワークに拡張できる。次に、LAN を実際に構築し、ファイル転送時間を測定することによって限界性能を評価した。測定値と計算された結果を比較し、低速から高速までの各種 LAN が提案した方法により定量的に評価できることを理論的、実験的に確認し、この評価方法の有効性を確認している。

第 3 章では、適切な管理システムを実装した CO-MAN の設計法を提案している。第 1 に、

ネットワーク設計において、散在する小トラフィックを効率的に收容する 0-0 リンクを提案した。0-0 リンクは、光ファイバでリング状に接続したノードを順にパケットをルーティングさせる方式で、最小構成は各ノードに一つの光トランシーバだけでリンクを構成でき、一つの波長のみを用いて全ノードを接続できるため、経済性に優れる。この 0-0 リンクを用いた基本的なネットワークを構築し、限界性能評価法を用いて性能評価を行い、その有効性を確認することができた。次に、光ファイバリングネットワークにおいて、0-0 リンクとポイントツーポイントリンクを多重すると、必要な光トランシーバ数が少数になる設計法を提案している。具体的にノード数を設定し、ポイントツーポイントリンクのみの場合と、0-0 リンクを合わせた 2 種類のリンクを混在させた場合の光トランシーバ数を比較し、後者のほうが必要な光トランシーバが少なくなり、有効な設計法であることを示している。また、上記の 0-0 リンクを用いて、管理機能を実装したネットワークの構築方法について提案している。ユーザトラフィックの伝送にはポイントツーポイントリンクを用い、管理機能には低コストな 0-0 リンクを用いている。この機能を用いてネットワークの管理を行うことができ、その有効性を確認した。また、このネットワークを実際に構築し、その性能評価を行った。CWDM を用いて複数の波長を 1 本の光ファイバに多重したリング型ネットワークを実際に構成し、2 種類のリンクを多重するルーティングを 1 ヶ所から遠隔設定する機能を動作させた。遠隔設定した内容を動作させるためには、各ノードのスイッチを再起動させる必要があるが、それに必要な時間を実測し、5 つのノードに対し約 1 分で初期設定が完了することを明確にした。また、このネットワークには、障害復旧用にバックアップが存在する。サービス用リングに障害が発生したとき、自動的にバックアップが動作することも確認済である。

第 4 章では、レイヤ 2、およびレイヤ 3 通信を統合した光 IP ネットワークの設計法を提案している。それぞれの通信の利点を利用するため、レイヤ 2 通信相当のポイントツーポイントリンクと、レイヤ 3 通信相当の 0-0 リンクを一つのネットワークに統合している。このネットワークを実際に構築し、2 つのレイヤの通信が統合できることが確認できた。また、用いた光波長合分波器のロスを測定した結果から、リングのファイバ長は 24km 以上確保できることを確認した。

最後に第 5 章では、本研究で得られた結果について総括し、今後の課題について述べている。

以上のように、今後の拡大が期待される CO-MAN について、拡張性に優れたネットワーク設計法とそれを管理するシステムについて検討し、実験ネットワークを構築して動作確認、評価による実証を行って有効性を確認することができた。

## 審査結果の要旨

本論文は、今後のブロードバンド通信の主流である光 IP (Internet Protocol) ネットワークをビジネス用メトロエリアネットワークに適用することを取り上げ、ユーザ数の変動に対する拡張性や、異種サービスの統合などの主要な問題を取り上げ、その解決法を提案すると共に、モデルネットワークを構築して特性を評価した実証結果を示したものである。得られた主な結果は、以下の項目に要約できる。

(1) 光 IP ネットワークをビジネス用メトロエリアネットワークとして適用する場合に、ユーザ数が変動しても必要な帯域を効率的に配分できる 2 種類の光リンクの多重法を提案し、そのネットワーク設計法を明確にしている。この 2 種類の光リンクは、汎用的に用いられる Point-to-Point リンクに、新しく提案した One-by-One リンクを多重するもので、Point-to-Point リンクだけで構成する場合に比べ、必要な光トランシーバの数が少ない構成をとれる。また、光トランシーバの数を調整することで、提案したネットワークが拡張性

に優れることを具体的に示している。

(2) 広域イーサネットを伝送させるレイヤ2伝送と、IPパケットを伝送させるレイヤ3伝送を、波長多重を利用することで、1つの光ネットワークに統合できることを提案している。この手法を使えば、LANなど閉じた領域での使用が前提であったレイヤ2のアプリケーションが、レイヤ3で伝送するのに必要な変換をすることなく、1つのネットワークによって広域で 사용할ことが可能になる。

(3) 提案した光IPネットワークのモデルネットワークを実際に構築し、光損失やスループットなどの基本的なネットワーク特性を測定し、上記のネットワークの拡張性と、レイヤ2とレイヤ3の伝送を統合できることなど、提案したネットワークが必要な性能を有することを実証している。

(4) 光IPネットワークを評価するのに、呼の発生確率に依存しない限界特性としてネットワークのスループットを測定・評価する手法を明確にし、上記のモデルネットワークの実証実験に適用している。

以上の結果は、光IPネットワークをビジネス用メトロエリアネットワークに適用する上で必要となる技術を進展させており、本分野の学術および産業上の発展に寄与するところ大である。また、申請者が自立して研究活動を行うのに必要な能力と学識とを有することを証したものである。