

報告番号	甲 第 14534 号
------	-------------

## 主 論 文 の 要 旨

論文題目 柔軟なトラフィック収容を実現する光ネットワーク構成法に関する研究  
(Study on Optical Networks Enabling Flexible Traffic Accommodation)

氏 名 中川 雅弘

## 論 文 内 容 の 要 旨

インターネットを介した情報のやりとりが当たり前となった現代において、通信ネットワークは今や重要な社会インフラとなったと言っても過言ではない。通信ネットワークを介して提供されるサービスとしては、従来の音声通話、web ブラウジング、電子メールの他、昨今では SNS や web 会議、電子決済等が広く普及しており、サービス形態やニーズが多様化し続けていると言える。通信サービスの進化は我々の暮らしを豊かにする一方で、ネットワーク上を流れる通信トラフィックの増加・多様化を招いている。本研究では、通信サービス提供の根幹をなす光ネットワークに着目し、増加傾向ならびに多様化傾向が継続する通信トラフィックを将来にわたってコスト効率良く収容するために、柔軟性の高い光ネットワークの実現方法を創出している。本論文は、その成果をまとめたものであり、以下の6章で構成されている。

第1章では、本研究の背景として、我々の暮らしの中でのネットワークの位置づけや、光ネットワークを取り巻く環境、解決すべき課題について説明している。昨今の情報通信技術の発展は目覚ましく、あらゆるものがネットワークに接続される時代へと近づいている。我々が社会生活を営む上でもネットワークを介した通信サービスが広く利活用されており、遠隔地間で大容量のデータをやりとりする上で根幹をなす光ネットワークの重要性が高まり続けている。近い将来、通信サービスが更に多様化した場合、光ネットワークは、「従来の常時接続形態を前提としない、一時的な大容量・高品質通信需要」を収容するとともに「トラフィック量の更なる増加」に効率良く対処することが求められる。しかしながら、既存技術の延長では資源の無駄遣いやネットワーク自体の並列化に起因する過剰設備

が必要となってしまう、将来のトラヒックに対応できないという問題に直面することとなる。したがって、革新的なサービス創出・普及を可能にし、将来にわたって豊かな暮らし・持続発展可能な社会を実現していく上で、限られた設備・資源の中で、需要に応じて自由にネットワークの再構成・拡張が可能な、柔軟性の高い光ネットワークを実現することが極めて重要な課題となっている。具体的には、サービス品質を担保した上でオンデマンドな需要をより多く収容可能という特徴と、単位ファイバで実現可能な容量を最大限拡大可能という特徴を併せ持つ、柔軟な光ネットワーク実現に向けた技術開発が重要であると言える。

第 2 章では、限られたネットワーク資源でサービス品質の担保と収容可能なオンデマンド需要拡大を両立する、ネットワーク上のパスを動的に制御する方式・アルゴリズムについて述べている。サービス品質の指標としては、ユーザ間の公平性と瞬断可能性という重要な観点を明示的に考慮しており、ユーザ毎のブロッキング率（オンデマンド需要の収容が棄却される確率）の公平化・サービス断の回避・収容トラヒック量向上を同時に実現する方式を検討している。ユーザ間の公平性担保に向けては、短距離通信と長距離通信の比較を行い、ネットワーク上で生じ得るブロッキングの傾向を把握した上で、パス長と送受信ノード間の経路候補数を考慮した重み付けを導入した経路割当手法を提案している。また、サービス断の回避と収容トラヒック量向上を両立するために、既設パスの再配置（リルーティング）をする際に **Make Before Break** 技術を適用した無瞬断でのリルーティング手法を提案している。既設パスのリルーティングにおいては、パス長と残り保留時間、リルーティング回数を考慮してリルーティング対象となるパスとリルーティング先の経路を決定するアルゴリズムを提案している。具体的には、ブロッキングが生じた際に該当する新規需要を収容する空きを作り出すために障害となる現用パスをリルーティングする **passive rerouting** を対象として、リルーティング対象パスの探索について適切な局所探索を行う高速手法 **L-MBBR** ならびに全探索を行う手法 **G-MBBR** を提案している。加えて、ネットワーク上の負荷を分散させるために前もって現用パスをリルーティングする **intentional rerouting** を対象に、将来のトラヒック収容余地を拡大させる手法 **I-MBBR** を提案している。これらの手法は、ケースバイケースに使い分けることが有効であり、また、**I-MBBR** と **L-MBBR** もしくは **I-MBBR** と **G-MBBR** を組み合わせて用いることも可能である。これらは、サービス品質を担保した上でオンデマンドな需要をより多く収容可能という特徴を具現化する手法である。第 2 章で述べている各種技術は、光ネットワークにおける論理パス運用の柔軟化に資するものとして位置づけられる。

第 3 章では、第 2 章で説明した動的制御方式・アルゴリズムの有効性を、数値実験によって評価している。具体的には、サービス提供上の公平性を改善可能な度合、ならびに、リルーティングによる改善効果（ブロッキング率低減・収容トラヒック量向上）を定量的に検証している。動的なパス運用としてはバッチ処理とオンデマンド処理の 2 種のシナリオを対象として、現実的な前提条件の下で、提案リルーティング手法によってサービス断

を回避しながらも収容トラフィック量を大幅に向上可能なことを示している。公平性の評価においては、**Fairness Index** と呼ばれる指標を用いることとし、提案した経路割当方式が低計算コストながらも既存方式よりも大幅に **Fairness Index** を改善可能なことを明らかにしている。また、リルーティングの性能評価においては、リルーティングのアルゴリズム間の比較の他、様々な観点から解析を行っている。リルーティング時の経路長増加制約や、トラフィック分布、複数サービスの混在、リルーティングの無瞬断化がそれぞれ性能に与える影響を評価している他、リルーティングの成功率・回数も定量化しており、革新サービス提供に向けた有用な知見を創出していると言える。

第 4 章では、効率的に光ネットワークの容量を拡大するために、光ネットワークのマルチバンド化に着目し、複数のバンドに跨るスペクトル資源を効率良く利用できる大容量マルチバンドネットワーク技術について述べている。マルチバンド化は既存する光ファイバの利用可能な波長資源を増加可能な一方で、特有の物理現象（非線形光学効果）に起因して実効的な容量が制限されるという根本的な問題があった。これに対し、波長帯変換器を活用してパス経路上において波長単位で適応的にバンドを切替可能なネットワークアーキテクチャ（**BSN**: 波長選択バンドスイッチング対応ネットワーク）を提案している。**BSN** においては、波長選択バンドスイッチングという新たな光切替機能を具備することにより、波長連続性制約とバンドに依存した伝送品質制約の両方を緩和でき、既存のマルチバンドネットワークに比べて実効的な容量をコスト効率良く拡大可能という特長を持つ。第 4 章においては、この波長選択バンドスイッチングによってもたらされる効能を図解するとともに、波長選択バンドスイッチングを具現化する光ノード構成例を示している。加えて、汎用的な条件を前提にした数値解析を行い、幅広い領域で **BSN** が従来のマルチバンド光ネットワークに比べて同一のトラフィックを収容する際に所要ファイバ資源を大幅に節約できることを示している。これは、**BSN** が同一ファイバ資源における収容トラフィック量を大幅に向上できることを意味しているに他ならない。すなわち、**BSN** は単位ファイバで実現可能な容量の最大化に寄与するアーキテクチャであると言える。なお、数値解析では波長選択バンドスイッチングに起因する伝送ペナルティを明示的に考慮した定量評価も行っており、**BSN** 適用の効果を享受できる条件や効果の大小について明らかにしている。これらの内容は、光ネットワークにおける物理インフラの柔軟化に資するものとして位置付けられる。

第 5 章では、第 4 章で提案したマルチバンド光ネットワーク **BSN** の実現性を示すためにコンセプト実証実験を行った結果について述べている。波長選択スイッチベースのマルチバンド光ノード構成を用いてマルチバンド光ネットワークをエミュレートする実験系を構築し、物理レイヤの観点から波長選択バンドスイッチングならびにそれを用いた **BSN** の特性を評価している。評価にあたっては **C+L** バンドの環境下で波長あたり 100 Gbps の **WDM** 信号を最大 4 ホップ伝送させた際の伝送品質（**Q** 値）を測定し、また通過ノード毎に波長チャンネル単位でのバンドスイッチングを適用した際でもエラーフリー動作が実現可能なこ

とを実証している。また、バンドスイッチングに起因する伝送ペナルティを測定データに基づき評価している。これらの結果は、第 4 章の数値解析とあわせ、大容量マルチバンドネットワークにおける BSN の実現可能性ならびに有用性を裏付けている。

第 6 章では、本研究の成果を総括し、本論文の結論を述べている。本研究は、コストを抑えつつ多様な要件を満たす、柔軟性の高い光ネットワーク実現を目的としており、その実現手段の提案を行い、様々な評価により提案方式の有効性を示している。本研究で確立された技術は、将来の革新的なサービス提供の根幹をなす光ネットワーク基盤実現に寄与するものと考えられる。