

博士学位論文

柔軟なトラヒ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

名古屋大学大学院工学研究科

中川 雅弘

目次

第1章 序論	8
1.1 研究背景.....	8
1.2 通信ネットワークの進展	10
1.2.1 通信の歴史	10
1.2.2 有線ネットワークの登場と進化.....	12
1.2.3 光通信の発展	14
1.2.4 光ネットワークの進化.....	15
1.3 光ネットワークの現状と課題	18
1.4 本研究の目的	22
1.5 本論文の構成	23
1.6 第1章参考文献	26
第2章 無瞬断でのパス再配置を考慮した動的ネットワーク制御	30
2.1 はじめに.....	30
2.2 動的ネットワーク運用	30
2.3 パス需要間の公平性を考慮した経路割当手法.....	34
2.3.1 長距離通信と短距離通信の比較.....	34
2.3.2 公平性を考慮した経路割当手法.....	35
2.4 提案リルーティング手法	36
2.4.1 Passive Rerouting 手法.....	36
2.4.2 Intentional Rerouting 手法 (I-MBBR).....	39
2.5 まとめ.....	40
2.6 第2章参考文献	42
第3章 動的ネットワーク制御の有効性評価	44
3.1 はじめに.....	44
3.2 前提条件.....	44
3.3 バッチ処理シナリオにおける数値実験.....	45
3.3.1 シミュレーションパラメータ	45
3.3.2 実行結果	47
3.3.3 バッチ処理実験の総括	63

3.4	オンデマンド処理シナリオにおける数値実験.....	63
3.4.1	シミュレーションパラメータ.....	63
3.4.2	実行結果.....	65
3.4.3	オンデマンド処理実験の総括.....	74
3.5	まとめ.....	75
3.6	第3章参考文献.....	76
第4章	波長単位でのバンド切替機能を有する高効率マルチバンドネットワーク.....	77
4.1	はじめに.....	77
4.2	マルチバンド伝送技術の進展と検討の位置づけ.....	77
4.3	ネットワークコンセプト.....	80
4.3.1	光切替機能.....	80
4.3.2	期待される効能.....	82
4.4	マルチバンド光ノード構成.....	85
4.4.1	マトリクススイッチベース構成.....	86
4.4.2	波長選択スイッチベース構成.....	88
4.5	数値解析による有効性評価.....	90
4.5.1	想定条件.....	91
4.5.2	解析手順.....	93
4.5.3	結果と考察.....	96
4.6	まとめ.....	103
4.7	第4章参考文献.....	104
第5章	マルチバンドネットワークの実証実験.....	108
5.1	はじめに.....	108
5.2	実験系.....	108
5.3	実験結果.....	110
5.4	まとめ.....	114
5.5	第5章参考文献.....	115
第6章	結論.....	116
	謝辞.....	118
	研究業績リスト.....	120

目次

図 1-1	サービス多様化にともなう通信トラフィック多様化のイメージ	10
図 1-2	光ネットワークの概要図	16
図 1-3	光ネットワークの構成例と役割	16
図 1-4	国内のインターネットトラフィックの推移（文献 [26] を元に作成）	19
図 1-5	本論文の構成	25
図 2-1	定期的なパスの接続/切断操作のイメージ	31
図 2-2	従来のリルーティングと MBBR の比較	33
図 2-3	L-MBBR の動作例	37
図 2-4	G-MBBR の動作例	39
図 3-1	4×4 格子型ネットワーク	46
図 3-2	日本のネットワークモデル	46
図 3-3	COST266 ヨーロッパネットワークモデル	47
図 3-4	リルーティングを行わない場合における公平性	48
図 3-5	4×4 格子におけるブロッキング率	50
図 3-6	日本のネットワークにおけるブロッキング率	51
図 3-7	COST266 ネットワークにおけるブロッキング率	52
図 3-8	リルーティングありの場合における公平性	53
図 3-9	4×4 格子におけるホップスラッグ制約の効果	55
図 3-10	日本のネットワークにおけるホップスラッグ制約の効果	56
図 3-11	COST266 ネットワークにおけるホップスラッグ制約の効果	56
図 3-12	日本のネットワークにおけるブロッキング率（人口分布を考慮した場合）	57
図 3-13	COST266 ネットワークにおけるブロッキング率（人口分布を考慮した場合）	57
図 3-14	4×4 格子におけるリンク使用率向上効果	58
図 3-15	日本のネットワークにおけるリンク使用率向上効果	58
図 3-16	COST266 ネットワークにおけるリンク使用率向上効果	59
図 3-17	4×4 格子におけるリルーティング成功率の比較	59
図 3-18	日本のネットワークにおけるリルーティング成功率の比較	60
図 3-19	COST266 ネットワークにおけるリルーティング成功率の比較	60
図 3-20	4×4 格子における Passive MBBR 手法間の比較	61

図 3-21	日本のネットワークにおける Passive MBBR 手法間の比較.....	62
図 3-22	COST266 ネットワークにおける Passive MBBR 手法間の比較	62
図 3-23	6×6 格子型ネットワーク	64
図 3-24	6×6 格子におけるブロッキング率 (オンデマンド).....	66
図 3-25	日本のネットワークにおけるブロッキング率 (オンデマンド).....	66
図 3-26	COST266 ネットワークにおけるブロッキング率 (オンデマンド)	67
図 3-27	6×6 格子におけるリルーティング回数	68
図 3-28	日本のネットワークにおけるリルーティング回数	69
図 3-29	COST266 ネットワークにおけるリルーティング回数	70
図 3-30	2 種のサービス (リルーティングの可/否) 混在時での 6×6 格子におけるブロッキング率.....	71
図 3-31	2 種のサービス (リルーティングの可/否) 混在時での日本のネットワークにおけるブロッキング率	72
図 3-32	2 種のサービス (リルーティングの可/否) 混在時での COST266 ネットワークにおけるブロッキング率	72
図 3-33	2 種のサービス (平均保留時間の長/短) 混在時での 6×6 格子におけるブロッキング率.....	73
図 3-34	2 種のサービス (平均保留時間の長/短) 混在時での日本のネットワークにおけるブロッキング率	73
図 3-35	2 種のサービス (平均保留時間の長/短) 混在時での COST266 ネットワークにおけるブロッキング率	74
図 4-1	切替自由度の例	81
図 4-2	波長連続性制約緩和の例.....	83
図 4-3	10 スパン伝送後の GSNR 値	84
図 4-4	SNR 制約の緩和の例	85
図 4-5	マトリクススイッチベースの OXC 構成	87
図 4-6	波長選択スイッチベースの OXC 構成	89
図 4-7	3×3 格子ネットワーク	91
図 4-8	ホップ数の分布	95
図 4-9	算出された所要ファイバリソース量.....	98
図 4-10	所要ファイバリソースの比率.....	99
図 4-11	バンド切替操作による GSNR ペナルティの影響.....	102
図 5-1	実験系	109
図 5-2	実験におけるパス設定パターン	110

図 5-3	リング 1 および 2 で観測された全体のスペクトル(上側) と 拡大したスペクトル (下側).....	112
図 5-4	測定された Q 値ならびに Q ペナルティ	113

表目次

表 3-1	4×4 格子での同一ブロッキング率における公平性の比較.....	54
表 3-2	日本のネットワークでの同一ブロッキング率における公平性の比較.....	54
表 3-3	COST266 ネットワークでの同一ブロッキング率における公平性の比較.....	54
表 4-1	100 km シングルスパン伝送後の GSNR 値.....	96

第 1 章 序論

1.1 研究背景

インターネットの登場ならびにブロードバンドサービスの普及を背景に、情報通信技術（ICT：Information and Communication Technology）は目覚ましい進展を遂げており、ICT は我々が社会生活を営む上で欠かせないものとなっている。我々の暮らしに目を向けると、従来の固定電話やパソコン（PC：Personal Computer）といった端末を介した音声通話、web ブラウジング、メールといったアプリケーションはもちろんのこと、昨今ではスマートフォンを介した SNS（Social Networking Service）や決済サービスの利用も広く普及している。また、近年では IoT（Internet of Things）と総称されるモノの通信を活用することで人々の利便性を向上させるサービス開発も盛んに進められている。すなわち、ICT の進展とともに我々の暮らしを支えるサービスの形態、ひいてはユーザのニーズが多種多様化してきており、この傾向は今後も継続することが見込まれる。

このような多様なサービスは通信ネットワークを介して提供されており、我々の暮らしを支える通信ネットワークは今や重要な社会インフラになっていると言っても過言ではない。例えば、スマートフォンでの電子決済が一般化された今日において、仮に通信障害が生じた場合、現金を持たずに外出したスマートフォンユーザが買い物中に支払不可能となり途方に暮れる姿が想像できよう。また、コンサート等のイベント入場時に、スマートフォンを介した電子チケット表示に遅延や接続不良が発生した場合、ユーザだけでなくイベントスタッフを巻き込んで混乱が生じてしまう。あるいは、自宅にいる場合においても、ノート PC の画面上で Wi-Fi は正常であるにも関わらずインターネットには接続できない、といった事象も起こり得るため、場合によってはトラブルシューティングに時間を要し、ネットショッピングや動画視聴を楽しむことができず日常生活に支障をきたしてしまふ。このように、通信ネットワークは、我々の社会生活の中

で重要な役割を担っていることがわかる。言い換えれば、我々は常日頃、存在を意識することなく通信ネットワークの恩恵を享受しているのである。

通信ネットワークは、光通信の発明・発展に伴って劇的な進化を遂げてきており、大容量な情報（データ）を遠隔地に届ける際には基幹光ネットワークが必要不可欠であることは疑いようがない。すなわち、基幹光ネットワークが、通信サービス提供の根幹をなしていると言えよう。近い将来、通信サービスが更に多様化した場合、基幹光ネットワークは、多様な通信トラフィックをより効率良く収容しなければならない状況に直面する。ここで、通信トラフィックの多様化を招くサービス・ニーズの例としては、昨今急速に普及したリモートワークのように、これまでは当たり前として受け入れていた「場所の制約」を取り払うものが考えられる。より具体的には、今後リモートワーク・リモートオフィス等が積極的に推進されていくものと想定すると、「遠隔データ／ストレージバックアップ」がより身近なものになる可能性がある [1]。職種／業務内容によっては常時バックアップが必要なケースや大量のデータを取り扱うケースも有り、サービス提供者側がバックアップの即時性や広帯域性を差別化要素とする可能性も考えられる。また、イベント会場や競技場間を接続し、遠隔地点から、あたかも現地で鑑賞・観戦／応援／競技を行っているかのような体感をもたらす革新的なサービスの登場も期待されており [2, 3]、遠隔地点間の高臨場感 **Live-video streaming** が普及していく可能性もある。このサービス形態の場合、イベント・競技の開催者は開催期間の間だけ通信ネットワークを使用できれば良く、従来の常時接続とは異なる一時的な需要となる可能性が高い。更には、都市部の病院と遠隔地の病院を接続した上で遠隔地からロボットを操作して手術を行う遠隔手術というアプリケーションにも注目が集まっている [4, 5]。遠隔手術は医師の偏在による医療格差という社会問題を解決するポテンシャルを持つ一方、通信ネットワークには超高信頼性が要求されることとなる。これらの具体例は、図 1-1 に示すように、従来のトラフィックと比べ、帯域や品質はもちろんのこと、利用期間も異なる可能性が高い。

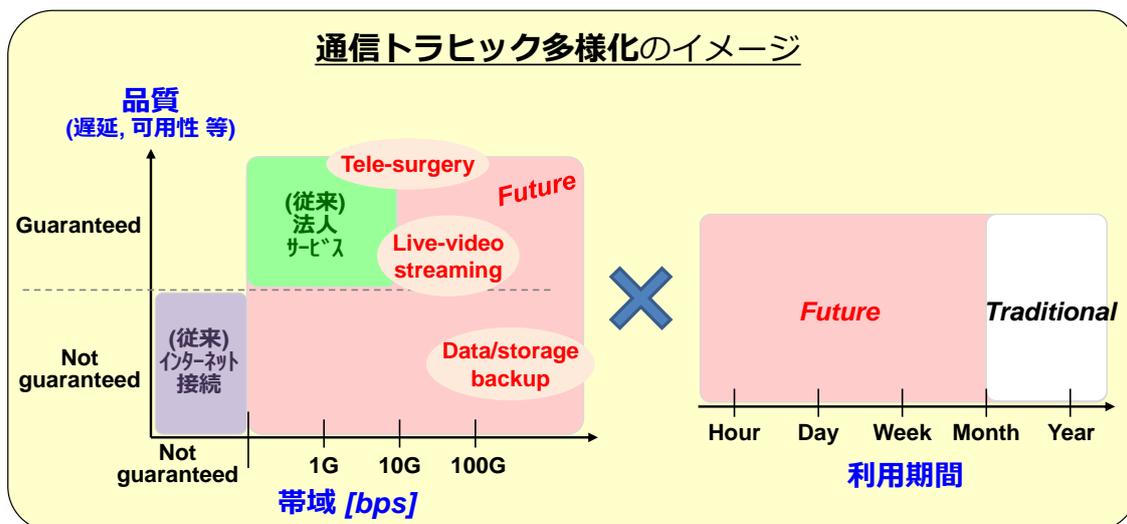


図 1-1 サービス多様化にともなう通信トラフィック多様化のイメージ

以上、通信ネットワークの重要性を述べ、通信トラフィック多様化の動向について概説した。革新的なサービス創出・普及をストレスなく可能にし、将来にわたってより豊かな暮らし・持続発展可能な社会を実現していくためには、多様な要件を満たす基幹光ネットワークを実現していくことが極めて重要である。環境変化に適応し、光ネットワークを進化させ続けていくことが求められているとも言える。

1.2 通信ネットワークの進展

本節では、通信ネットワークだけでなく通信そのものの歴史を概観し、通信がもたらす価値や重要性に改めてふれた上で、現在の光ネットワークについて述べる。

1.2.1 通信の歴史

これまで人類は、情報の伝達・コミュニケーションを活用して文化的な生活を営んできた。通信とは、空間的に離れた場所間でのコミュニケーションを意味し、一般に、何らかの道具や媒体を介して行われる。“通信”により、直接的に互いの顔や姿を見たり肉声を聞いたりすることができる距離の制約を超えて、遠

隔地間での意思疎通やコミュニティ形成が可能となっている。ここで、簡単に通信の歴史を遡ってみると、先史時代から狼煙（のろし）という形で通信が行われていたことがわかっている。あらかじめ約束した合図の仕方にもとづいて煙を上げ（情報を発信し）、目視によって確認する（情報を受信する）という形態であるが故、天候に影響される他、伝えられる情報量・伝達可能な距離は限られてしまう。それでも、遠方の大勢の相手に重要な情報を伝達できることから、日本においても広く使われていた。古代においては、火の目視のリレーや声／音のリレー等、人が媒体の役割も担うリレー形式の通信が登場している。これは、人員を配置する、というコストと引き替えに通信距離の延伸に成功した例ととらえることもできる。しかしながら、リレーに起因して、遠方まで到達するまでに長い時間を要するという側面もあった。

その後しばらくは伝達できる情報量・距離・伝達速度が限られる時代が続いたが、16世紀における望遠鏡の発明によって、より遠方からでも信号情報を識別できるようになり、効率的に通信距離が延伸されることとなる。望遠鏡を用いた通信手法として、18世紀末にフランスで腕木通信が登場し、腕木通信専用の通信網（ネットワーク）が整備されることとなった [6]。その形態は、通信を行う塔の上に形が可変の大きな「腕木」を設置し、形の変化を望遠鏡で観測することで情報を読み取り、塔から塔へと中継するというものであった。フランスをはじめヨーロッパで広く実用化された一方で、塔の設置／維持にかかる費用がかさむ他、腕木を操作するオペレータに熟練が必要であった。このような欠点もあり、江戸時代中期から手旗信号の一種である旗振り通信が導入されていた日本においては、腕木通信は導入には至らなかった。なお、旗振り通信でも望遠鏡を用いており、望遠鏡の発明が通信の中継間隔の延長・伝達速度向上につながり、ひいては通信ネットワークをより重要なものにしたと言える。また、ここまで挙げた例は、いずれも空間（大気）を用いる通信形態であり、大気の影響を強く受けるという側面もある。しかしながら、当時のニーズ（腕木通信では、例えば、戦況の迅速な把握。旗振り通信では、例えば、米相場の早急な伝達）に応えるものであったため、世に広く受け入れられたと考えられる。

1.2.2 有線ネットワークの登場と進化

19世紀には、大気の影響をほとんど受けない通信手段として、「電気」を活用する方式が大きく発展を遂げた。電気現象が電線を通じて瞬時に遠距離まで伝送され、また、前述の大気中を伝達させる場合より遠方まで伝搬し得ることが認識されると、電気信号を通信に利用しようとする試みが積極的に進められたのである。1830年代に電信機が発明されて（1832年、Pavel Schillingが電磁石を利用した電信機を開発。アメリカでも、1837年にSamuel Morseが電磁式電信機を開発）以降、電信技術は飛躍的に発展し、世界中が電信網によりつながることとなった。なお、電信機の発明と同時期に、伝送路の電気抵抗によって弱くなった電気信号を中継する継電器もアメリカで発明されている。日本では、1869年に横浜ならびに東京～横浜間に電信線（電信の信号を伝達する導線）が架設され、1870年には電信サービスが開始されている [7]。その後、1880年頃には大都市間、1890年頃には全国の県庁所在地間が電信網でつながった。電気信号がやりとりされる有線ネットワークが、商取引で必要とされる最新データや遠隔地の重大な出来事等、重要な情報を迅速に伝達可能としたのである。言い換えれば、伝達速度の価値が認識されたとともに、有線ネットワークが身近なものになったととらえることができる。

更に、1876年にAlexander Graham Bellによって電話機が発明され、その後、急速に電話サービスが普及していくこととなった。アメリカでは1878年に早くも電話交換業務が開始された。日本では、1890年、東京と横浜で公衆通信としての電話サービスが開始され、1906年には公衆網の輻輳に影響されない専用線電話サービスが開始された。ここで、電話網の構成要素は、端末（電話機）・伝送路（一般に、電話線と呼ばれるメタルケーブル）・交換機であり、ユーザ宅に配置された電話機が有線ネットワークを介して相互接続される形となる。サービス開始当時、交換機は手動のものが導入されていたが、技術の進展に伴い、ステップバイステップ交換機、クロスバ交換機、電子交換機と変遷／進化を遂げていくこととなる [8]。なお、交換機自体の詳細については文献 [8-10] に記載されている。前述の変遷の過程で、継続的に大容量化・経済性向上・網としての柔軟性向上が図られ、1970年代後半に積滞解消（申し込めば「すぐつく電話」）、

全国自動即時化（かけたら「すぐつながる電話」）が実現され [8]，一般家庭に固定電話サービスが普及した．自宅にいながらにして，いつでも遠く離れた人と会話できるようになり，通信の利便性が一般ユーザにも広く知れ渡ることとなったわけである．すなわち，通信ネットワークが生活に浸透している状態となったと言える．

こうして電話機の発明から約 100 年の時を経て電話サービスが一般家庭にまで普及したわけであり，1970 年代半ばまでは，主として電話機を介して音声情報がアナログ通信（音の強弱を電気信号の強弱にして送る方法）でやりとりされていた．しかしながら，コンピュータの発達に伴い [11]，データ通信の需要が登場し，ネットワークのデジタル化が進むこととなった [8, 9, 12]．1970 年代後半からデータ通信専用網が提供され，1980 年代前半には回線交換に加えてパケット交換方式も導入されることとなり，交換機はアナログ電子交換機からデジタル電子交換機へと変遷を遂げることとなった．文献 [8] によれば，1997 年には交換機のデジタル化が完了している．これにより，文字や画像等をデータとしてやりとりするコンピュータ同士の通信を可能とする基盤が構築されたととらえることができる．オンライン取引や電子メール等，コンピュータを介して様々なことができるようになり，通信のニーズが音声通話主体から多様化することとなった．

その後，次項で述べる光通信技術にも支えられてインターネットが爆発的に普及することとなった [13–15]．日本におけるインターネット普及の詳細については，文献 [15] にまとめられている．インターネットへのアクセスとしてはブロードバンドサービスが登場し [16]，2000 年代からは光アクセス（FTTH: Fiber To The Home）が急速に進展することとなった [17]．このような FTTH を介したインターネット利用の需要動向をふまえ，日本では 2000 年代後半に，光とフル IP (Internet Protocol) 化をベースとした次世代ネットワーク (NGN: Next Generation Network) が導入され [18, 19]，主として IP ルータが交換機の代わりにパケット交換を担うこととなった．NGN では，データ通信（インターネット接続）・IP 電話・映像（放送）がトリプルプレイサービスとして提供され，通信ネットワークが我々の生活により深く浸透することとなった．音声通話サービスに着目する

と、従来からの固定電話の他に、IP 電話やインターネット電話という選択肢が生まれた。従来の固定電話では通話時間と距離に応じて従量課金されるのに対し、IP 電話では距離に依存しない料金体系となり、インターネット電話ではデータ通信料以外は不要となった。ここで、データ利用量によらない定額制の FTTH サービス等を利用している場合、インターネット通話自体は追加料金なしで利用できることになる。つまり、品質やコストといったニーズに応じて音声通話の方法を使い分けられるようになったと言える。これは、通信サービスの形態が多様化した例ともとらえることができる。人々の豊かな暮らしを支える通信ネットワークには、このようなサービス提供形態の多様化・ニーズの多様化に 대응していくことが求められている。

1.2.3 光通信の発展

前項で述べた電話交換網の進展を途中から支え、また、今日の情報社会を支えているのが、光通信技術である。光ファイバにはメタルケーブルと比べて低損失、広帯域、無漏話・無誘導、細径、軽量といった特長があり、各種光デバイス技術の進展を受けて、メタルケーブルに取って代わることとなった。以降、光通信の歴史を簡単に振り返り、技術進展の動向をまとめる。

1966 年、Charles Kao により光ファイバの低損失化の可能性が提唱されると、1970 年には、コーニング社による伝送損失 20 dB/km の石英ガラス光ファイバ、ベル研究所による半導体レーザの室温連続発振がそれぞれ達成され、一気に長距離光ファイバ伝送の可能性が拓けた。その後、VAD (Vapor phase Axial Deposition) 法といった光ファイバ量産技術も開発され、1980 年代には単一モード光ファイバ (SMF: Single-Mode Fiber) が導入され、基幹伝送路がメタルケーブルから光ファイバに置き換わっていくこととなった。その後、大規模集積回路 (LSI: Large Scale Integration) 技術の進展とともに時分割多重 (TDM: Time-Division Multiplexing) 方式による単一波長システムの高速度化によって伝送システム容量の向上が進んだ [20]。

その後、1990 年代にはエルビウム添加光ファイバ増幅器 (EDFA: Erbium-Doped Fiber Amplifier) が開発・導入され、電気信号に変換することなく光のまま中継

伝送できるようになった。加えて、平面光波回路 (PLC: Planar Lightwave Circuit) 技術の進展によって低損失な波長合分波器としてアレイ導波路回折格子 (AWG: Arrayed Waveguide Grating) が登場し、波長分割多重 (WDM: Wavelength-Division Multiplexing) 方式が適用されることで一気に伝送容量が拡大されることとなった [20]。WDM ネットワークは、異なる波長に設定した複数の光信号を AWG で一括して多重/分離でき、多重された区間においては、複数の光信号が 1 本の光ファイバ伝送路ならびに EDFA をシェアすることが可能となるという特長を持つ。また、EDFA によって、電気に変換する再生中継器の所要数が大幅に削減され、コスト効率良く伝送容量が拡大された。

続いて、2000 年代半ばあたりからは 1 波長あたりの容量拡大に関する研究開発が進展し、位相変調技術 [21]、デジタル信号処理 (DSP: Digital Signal Processing) を適用したデジタルコヒーレント伝送技術が導入された。2010 年代前半には、1 波長あたり 100 Gbps・ファイバあたりの伝送容量が 8 Tbps のシステムが実用化されている [22]。これらの技術進展によって光ファイバ伝送路は継続的な大容量化を遂げ、爆発的なインターネットの普及を陰で支えてきたわけである。

1.2.4 光ネットワークの進化

1.2.3 項では光ファイバあたりの伝送容量に焦点を当てて進化を述べてきたが、実際の基幹ネットワークは 2 地点間のポイントツーポイント接続だけでなく、様々な物理形状 (トポロジ) が存在する。これに対し、ROADM (Reconfigurable Optical Add/Drop Multiplexer) や光クロスコネクタ (OXC: Optical Cross Connect) と呼ばれる光ノード技術の開発/導入により [22, 23]、今日の基幹光ネットワークはリングやメッシュといったトポロジに対応可能となっている。図 1-2 に示す通り、一般に、基幹光ネットワークは、伝送装置と光ファイバから成るシステムであり、送信地点 (送信元) から受信地点 (宛先) までパスと呼ばれる論理的な通信路を設定し、IP ルータ等のクライアント装置間を接続している。

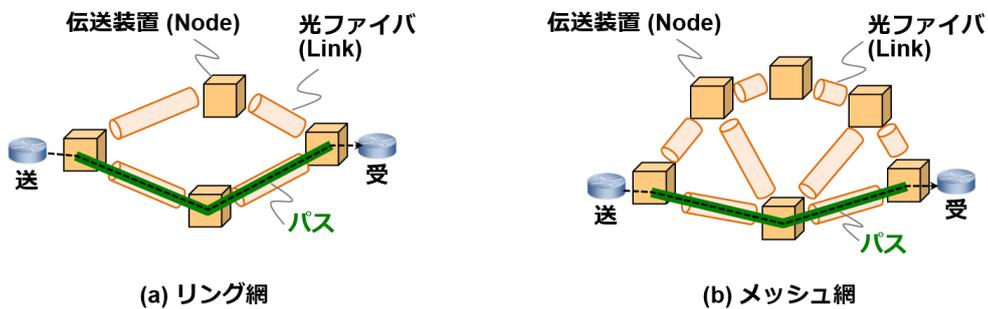


図 1-2 光ネットワークの概要図

図 1-3 に、基幹光ネットワークの構成例と、一般的な役割を示す。トランスポンダとは、クライアント信号（イーサネット等）と光伝送信号の変換を担う機能部であり、光パスの端点となる。図 1-3 では集中制御型のネットワーク例を示しており、この場合、コントローラからの指示に従って伝送装置の設定が行われ、送受信ノード間に光パスが設定される。光ネットワーク内では、送信元のクライアント装置が接続されたトランスポンダから送信された光伝送信号が ROADM やアンプを介して宛先のトランスポンダまで届けられる。つまり、ネットワーク上の 2 地点間を光のパスで直結することで、遠隔のクライアント装置間で距離を意識せずに直接通信できる環境を提供していることとなる。ここで、図の中で「≒」と表記した理由は、光ファイバ伝搬に伴う遅延（1 km あたり約 5 μs）が実際には発生することと、受信時の光信号品質が十分に高い場合に限りエラーフリー（クライアント信号の欠落や誤りがない）動作が可能なためである。

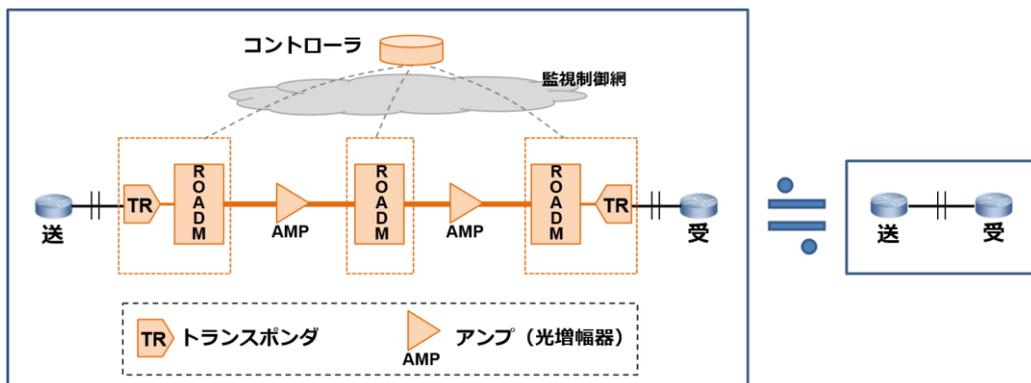


図 1-3 光ネットワークの構成例と役割

光ネットワークの進化の過程では、光ノードの進化が重要である。例えば ROADM の多方路化により [24], 図 1-2 (b) のようなメッシュ網が構成できるようになった。また, ROADM の CDC (Colorless, Directionless, and Contentionless) 化技術が開発されたことで, 遠隔から光パスを設定する際の制約が大幅に緩和され [24], 運用性の向上も可能となった。具体的には, 光パスの設定変更の際, 従来必要であった通信局舎における現地作業 (ケーブルの接続変更等) が不要になり, 多方路化ならびに CDC 化は運用コスト削減に寄与する技術である。今日においては既に多方路 CDC-ROADM が一般的になっている。

加えて, 2000 年代末には, 光ネットワーク資源利用効率を向上させる「エラスティック光ネットワーク (EON: Elastic Optical Network)」のコンセプトおよび各種実現技術が提案され [25], 2020 年代初頭の今もなお関連トピックの研究開発が盛んに行われている。EON が提案された時点以前の光ネットワークは固定的であり, 多くの場合, あるネットワークシステム内で送受される光信号の変調方式や容量は単一であった。また, 光信号は固定周波数グリッド上に一定間隔に配置され, ネットワーク内で最も長距離のパスが十分な品質を担保できるように設計されていた。これに対し, EON の登場により, 適応的な光パス設定が可能となってきている。具体的には, 同一の光ネットワークの中であっても光信号の変調方式や容量を複数の候補から選択できるようになり, 周波数資源については従来と比べ細かい粒度 (従来例 50 GHz 単位に対して, 例えば 12.5 GHz 単位) で利用することが可能となった。求められる容量や伝送距離に応じて光ネットワーク資源を効率良く利用できるように進化を遂げたのである。

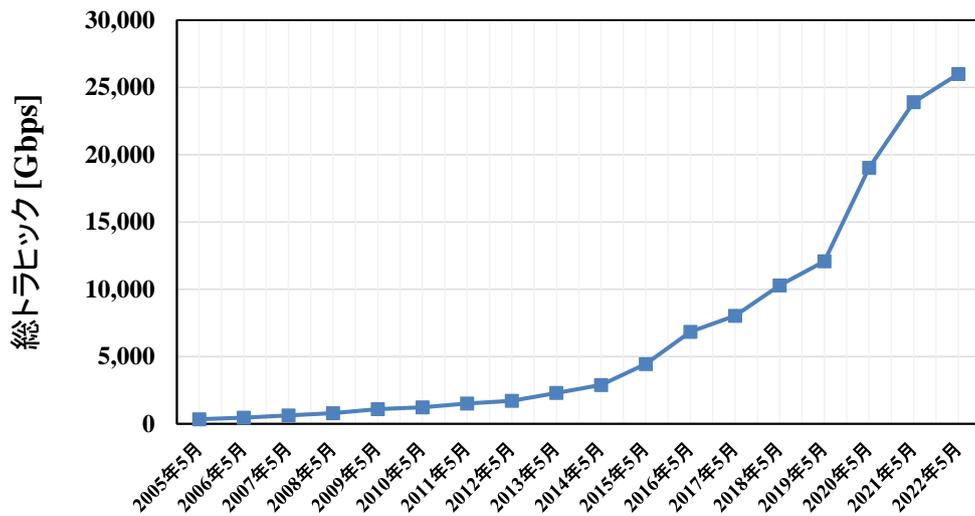
以上, 通信の歴史を振り返り, 光通信ならびに光ネットワークの動向を述べた。有線ネットワークが整備される前の時代においても, 容量・距離・伝達速度の制限こそあれ通信技術は人々のニーズに応える重要なものであったことは間違いないと言える。今や通信ネットワークは我々の生活に深く浸透しており, それ自身の存在を意識させることなく人・モノをつなぎ, 利便性を提供している。また, ネットワークの進化は, それまでできなかったことを当たり前にし得るものであり, 社会に大きなインパクトを与えるものである。しかしながら, 1.2.1 項で

述べた腕木通信が日本に導入されなかった理由の 1 つにみられるように、コストという観点は極めて重要である。文献 [8] でも、交換機網の進化の過程で、コストの観点で新たな交換機の導入が進まなかった事例について述べられている。これらのことから、コスト効率良く光ネットワークを進化させるアプローチが求められていると言える。

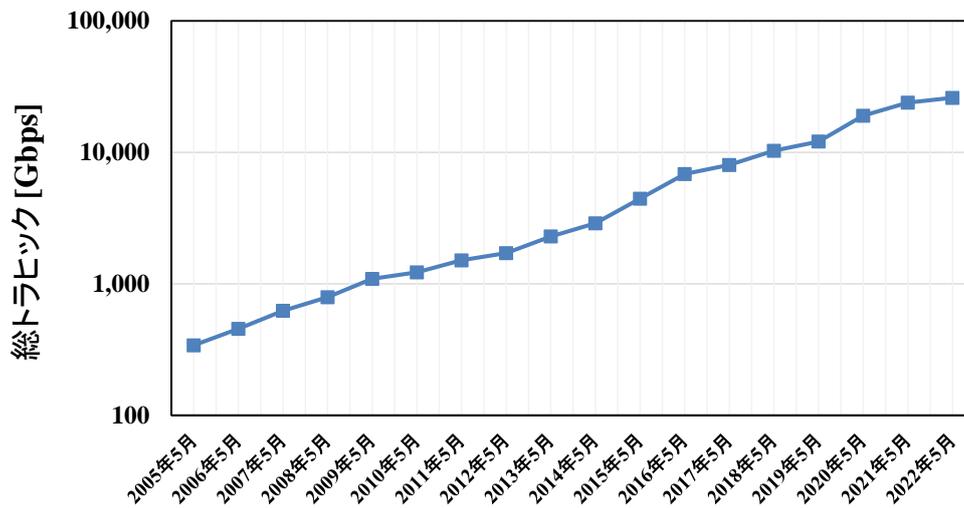
1.3 光ネットワークの現状と課題

これまで、光ネットワークは継続的な進化を遂げ、インターネットの進展を支えてきた。本節では、まず、インターネットトラフィックの動向にふれるとともに光ネットワークが置かれている状況を述べる。さらに、トラフィックの更なる多様化という環境変化がもたらす影響について説明し、本研究で着目する課題を述べる。

FTTH をはじめとするブロードバンドアクセス技術の進化やイーサネット等 LAN (Local Area Network) の高速化、ICT 端末の高機能化に伴い、ネットワークを流れるトラフィックは年々増加している。図 1-4 に、日本における固定系ブロードバンドサービスの総ダウンロードトラフィックの推移を示す。図 1-4 (a) より、総トラフィックが指数関数的に増加していることが確認できる。また、図 1-4 (b) のグラフが直線に近い形状をしていることから増加率はほぼ一定であるといえ、15 年以上のスパンにわたってトラフィックが概ね年率 20~30%の割合で増加し続けていることが確認できる。2020 年代に入って今もなおトラフィックの増加が継続していることから、基幹光ネットワークには更なる進化が求められていると言える。加えて、今後は 1.1 節で述べたようにトラフィックが多様化していくことも見込まれ、トラフィックの多様化が更なるトラフィック増加を招く可能性もある。一方で、1.2.2 項でふれたように、定額制の料金体系が世の中に浸透している今日において、通信事業者は、コストを抑えつつトラフィック多様化・トラフィック増加に対応しなければならない。これは非常に重要な課題である。



(a) 線形グラフ



(b) 片対数グラフ

図 1-4 国内のインターネットトラフィックの推移 (文献 [26] を元に作成)

続いて、トラフィック多様化の影響について述べていく。図 1-1 に示した通り、将来は、更なる広帯域化だけでなく、更なる高品質性や一時利用を前提とするサービス/アプリケーションが登場することが見込まれる。つまり、従来の前提にはない「一時的かつ大容量な高品質通信需要」の収容が求められることとなる。加えて、広帯域化ならびにサービス/アプリケーション拡充は「トラフィック量の更なる増加」に直結する。以降、これらが基幹光ネットワークにもたらす影響について説明する。

・「一時的かつ大容量な高品質通信需要」の影響

これまでのネットワークでは、一般に、常時接続型のサービスを前提とした運用がなされており、クライアント装置間に流れるトラフィック量のピーク等を考慮した半固定的な光パス設定がなされている。具体的には、発生した通信需要（パス設定要求）に対して逐次パスを設定し、設定後は不要となるまで固定的に維持することが一般的である。トラフィックが固定的であれば、頻繁に光パスの設定を変更する必要はなかったわけである。しかしながら、常時接続を前提とせず、一時的に大容量通信を行うサービスが増えていく場合、ピークをみた半固定的な運用のままでは資源の無駄遣いが生じ、過剰設備が必要となってしまう。

・「トラフィック量の更なる増加」の影響

前述の通り光ネットワークは飛躍的な進化を遂げ、現在は 1 波長あたりの容量が 200 Gbps を超え、ファイバあたり 10 Tbps 超の容量が達成されている [27]。しかしながら、文献 [28] で指摘されている通り、伝送容量増加のペースダウンが顕在化しつつあり、光ネットワークの容量拡大速度をトラフィック量の増加速度が上回る状態となる可能性がある。このような状態が続き、光ネットワークの容量不足に陥った場合、ネットワーク自体を並列化せざるを得ず、莫大な設備が必要となってしまう。

すなわち、常時接続でない革新サービス利用が促進され、また、トラフィック量が急速に増加していくと、著しいネットワークコスト増加につながる可能性があると言える。仮に定額制でない料金設定をする場合においても、コストに見合う利用料金にしないと採算がとれない一方で、高い利用料金ではユーザに敬遠されるというジレンマを抱えることとなる。したがって、既存技術／方式ならびにその延長線上にある改善だけでは、将来のトラフィックに対応できないという問題に直面することとなってしまう。

以上をふまえると、今後の光ネットワークは、「(1) 一時的かつ大容量な高品質通信需要を効率良く収容できること」と「(2) 伝送容量を効率良く拡大できること」が求められる。これら両方に共通する課題は、『ネットワークの柔軟化』

である。これまで波長あたり／ファイバあたりの容量拡大が図られてきているが、それらのアプローチだけでは不十分であり、限られたネットワーク資源の中で、需要に応じて自由にネットワークの変更・拡張を可能にする高い柔軟性が重要となると考えられる。

ここで、上記 (1) は、光ネットワークにおける論理パス運用の柔軟化という課題ととらえることができる。従来の半固定的（非柔軟）なパス運用は、一時的な通信需要に対応できず、通信分布の変動等が生じた場合は最適状態から乖離してしまう。一方で、事前に入念にネットワーク設計を行うことで収容トラヒックの最適化が可能であり、故障時以外は既設パスの設定変更を行わないため高信頼・高安定という特長を持っていることも事実である。したがって、論理パス運用の柔軟化に向けては、収容トラヒック量の最大化と通信品質担保の両立という観点も重要となる。すなわち、限られたネットワーク資源で、通信品質を担保しつつ、より多くのトラヒックを収容可能にする技術開発が求められていると言える。

さらに、上記 (2) は、光ネットワークにおける物理インフラの柔軟化という課題ととらえることができる。近年は波長あたりの伝送容量を拡大させることで着実に物理インフラが進化してきている。しかしながら、既存の延長では様々なレードオフが顕在化するようになってきている。具体的には、ボーレート（単位時間あたりの変調回数）を向上させると占有周波数帯域幅が増加し、多重可能な波長数が減少してしまう。また、変調方式の多値度を向上させるとシンボル間隔の縮小に伴い雑音耐力が劣化し、伝送可能距離が減少してしまう。つまり、従来と同様の伝送距離や提供光パス数を保ちながら容量を拡大させることが困難になってきている。すなわち、波長あたりの伝送容量拡大とは異なるアプローチを用いて、限られたネットワーク資源でネットワークの拡張を可能にする技術開発が求められていると言える。

1.4 本研究の目的

本研究は、コストを抑えつつ多様な要件を満たす光通信ネットワーク提供を実現するために、「(I) 限られたネットワーク資源で、品質を担保しつつ、より多くのトラフィックを収容可能」という特徴と「(II) ファイバをパラレル化することなくネットワーク容量を拡大可能」という特徴を併せ持つ『柔軟性の高い光ネットワークの実現』を目的とする。以降で、上記2つの特徴について説明するとともに、具体的な目標を述べる。

(I) 限られたネットワーク資源で、品質を担保しつつ、より多くのトラフィックを収容可能

前述した背景から、半固定的なパス運用では将来の革新的なサービス提供時のトラフィック需要（一時的かつ高信頼性が求められる通信需要）をコスト効率良く収容できない。ピークをみた運用では、クライアント装置間に流れ得る最大トラフィックに依存して過剰設備が必要となってしまうからである。これに対して、限られたネットワーク資源で一時的な需要をコスト効率良く収容するためには、動的なパス運用が必要となってくる。しかしながら、一般に動的なパス運用ではパスの切断に伴うサービス品質劣化を引き起こす可能性がある。したがって、サービス品質を明示的に考慮した動的運用技術の確立が求められる。

本研究では、第2章において、サービス品質を考慮しつつオンデマンドな需要をより多く収容する動的ネットワーク制御方式の確立に向け、サービス提供上重要な観点である公平性ならびに信頼性（サービス断の回避）を考慮した上で収容可能なトラフィック量拡大を実現するアルゴリズムを創出し、第3章においてその有効性を評価する。

(II) ファイバをパラレル化することなくネットワーク容量を拡大可能

前述の通り通信トラフィック量は今後も増加傾向にあり、コスト効率良く光ネットワークの容量を拡大することが求められる。一方で、波長あたりの容量拡大を行う従来アプローチ群は、提供可能光パス数や伝送可能距離の観点で欠点が顕在化しつつあり、それらだけに頼ることはできない。ここで、光ネットワークのコスト構造を考えた際に、敷設光ファイバは自由自在な張替が困難なことからファイバコストが支配的であるという前提に立つと、ファイバのパラレル化

が伴うアプローチは避けなければならない。したがって、現存するファイバ資源を活用しつつ容量を効率良く拡張可能なアプローチが有効であり、本研究ではマルチバンド化に着目する。

マルチバンド化とは、従来使われていない光ファイバの周波数帯（波長帯）を追加して利用するアプローチであり、追加ファイバを必要としない一方で、マルチバンド特有の物理現象を考慮することが必要不可欠となる。具体的には、誘導ラマン散乱という非線形光学効果により、波長帯によって伝送可能距離がばらつく・減少するということが明らかとなっている。つまり、波長帯追加によってファイバあたりの波長資源が増えたとしても、伝送可能距離減少に起因してネットワークワイドでの実効的な容量拡大が制限されてしまうこととなる。本研究では、第4章において、この制限要因を打破し、単位ファイバで実現可能な容量を最大限拡大するネットワークアーキテクチャを創出し、第5章において実証実験によりその実現性を評価する。

1.5 本論文の構成

第1章では、本研究の背景として、通信ネットワークが重要な社会インフラとなっていることにふれ、今後も通信トラフィック量が増加し続ける傾向にあること、および通信トラフィックが多様化し続ける傾向にあることについて説明した。加えて、通信の歴史にもふれ、現在の光ネットワークが置かれている状況について説明した。より豊かな暮らし・持続発展可能な社会の実現に寄与する通信環境を提供できるようにするため、コストを抑えつつ多様な要件を満たすことができる、柔軟性の高い光ネットワーク実現に向けた研究開発が必要不可欠である。

第2章では、光ネットワークにおける論理パス運用の柔軟化に向けた取組について述べる。限られたネットワーク資源で、品質を担保しつつ、より多くのトラフィック需要を収容可能（1.4節参照）という特徴を具現化・実装するために、サービス品質を考慮しつつオンデマンドな需要をより多く収容する動的ネットワーク制御方式ならびにパス制御のアルゴリズムを提案する。

第3章では、数値実験により第2章で提案した方式・アルゴリズムの有効性

を検証し、公平性の担保・サービス断の回避・収容トラフィック量の大幅な向上が実現可能であることを明らかにする。実サービスを考慮した網羅的な解析を行うことによって、論理パス運用の柔軟化がもたらす効能を定量的に示す。

第4章では、物理インフラの柔軟化に向けた取組について述べる。光ファイバの平行化が不要な光ネットワーク容量拡大アプローチとしてマルチバンド化に着目し、マルチバンド特有の性能制限要因を解説するとともに、該当要因を効率的に打破可能なネットワークアーキテクチャを提案する。加えて、提案アーキテクチャを実現する上で必要となる光ノード構成を説明するとともに、数値解析によって有効性を示す。

第5章では、コンセプト実証実験により、第4章で提案したアーキテクチャの実現性を示す。提案アーキテクチャが十分な実現性を有しており、同一のファイバ資源における容量を柔軟に拡大することができる有効なアプローチであることを裏付けている。

第6章では、以上の研究成果を総括し、本論文の結論を述べる。

図1-5に、本論文の構成を示す。

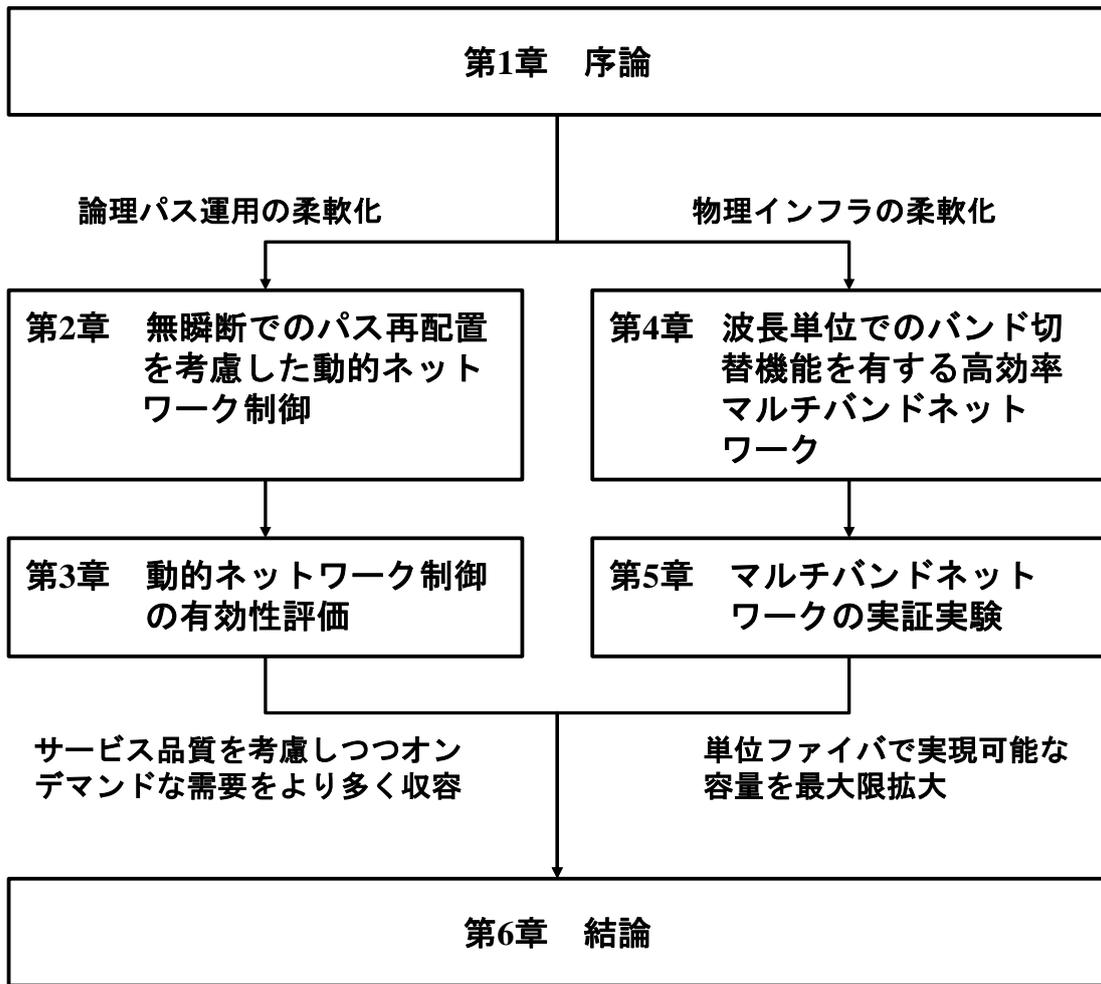


図 1-5 本論文の構成

1.6 第 1 章参考文献

- [1] J. Yao, P. Lu, L. Gong, and Z. Zhu, “On fast and coordinated data backup in geodistributed optical inter-datacenter networks,” *J. Lightw. Technol.*, vol. 33, no. 14, pp. 3005–3015, July 2015.
- [2] J. Choi, M. Yoo, and B. Mukherjee, “Efficient video-on-demand streaming for broadband access networks,” *J. Opt. Commun. Netw.*, vol. 2, no. 1, pp. 38–50, Jan. 2010.
- [3] 吉岡, 鳴海, 中川, 松本, “高臨場コミュニケーションサービスを支える「オンデマンド光多地点接続技術」,” *NTT 技術ジャーナル*, vol. 33, no. 8, pp. 15–18, 2021 年 8 月.
- [4] 光石, “遠隔手術 (Tele-Surgery) ,” *BME*, vol. 12, no. 11, pp. 35–41, 1998 年 11 月.
- [5] A. Clemm, M. T. Vega, H. K. Ravuri, T. Wauters, and F. D. Turck, “Toward truly immersive holographic-type communication: Challenges and solutions,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 58, no. 1, pp. 93–99, Jan. 2020.
- [6] 中野, “腕木通信 ナポレオンが見たインターネットの夜明け,” 朝日新聞社, ISBN: 978-4022598400, 2003 年 11 月.
- [7] NTT 技術資料館, “電信電話ことはじめから (1800 年代半ばから),” Available: https://hct.lab.gvm-jp.groupis-ex.ntt/floorguide/history_01.html (accessed 2022-11-06)

- [8] 川島, “公衆通信網における交換システム技術の系統化調査,” 国立科学博物館技術の系統化調査報告, vol. 22, pp. 217–281, Mar. 2015.
- [9] 鈴木, “NTTにおける歴史に残すべき技術,” 電子情報通信学会誌, vol. 82, no. 11, pp. 1098–1103, 1999年11月.
- [10] H. Tode, K. Kawashima, and T. Ito, “100-year history and future of network system technologies in Japan,” IEICE Trans. Commun., vol. E100-B, no.9, pp. 1581–1594, Sept. 2017.
- [11] 情報処理学会, “IPSJ コンピュータ博物館,” Available: <https://museum.ipsj.or.jp/index.html> (accessed 2022-11-12)
- [12] 秋山, “デジタル統合網,” 情報処理, vol. 24, no. 10, pp. 1186–1192, 1983年10月.
- [13] 石田, “インターネットはここまできた –現状と課題–,” 情報処理, vol. 39, no. 5, pp. 393–399, 1998年5月.
- [14] 総務省, “安心してインターネットを使うために 国民のための情報セキュリティサイト インターネットを使ったサービス,” Available: https://www.soumu.go.jp/main_sosiki/cybersecurity/kokumin/basic/basic_service.html (accessed 2022-11-08)
- [15] JPNIC, “インターネット歴史年表,” Available: <https://www.nic.ad.jp/timeline/> (accessed 2022-11-12)
- [16] 依田, “ブロードバンド・サービスの需要分析と情報通信政策,” 社会科学研究, vol. 60, no. 3-4, pp. 33–50, 2009年2月.

- [17] H. Shinohara, “FTTH experiences in Japan,” *J. Opt. Netw.*, vol. 6, no. 6, pp. 616–623, June 2007.
- [18] K. Knightson, N. Morita, and T. Towl, “NGN architecture: generic principles, functional architecture, and implementation,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 43, no. 10, pp. 49–56, Oct. 2005.
- [19] 江崎, 黒川, 松本, “次世代ネットワークの概要,” *NTT 技術ジャーナル*, vol. 19, no. 4, pp. 32–37, 2007 年 4 月.
- [20] 宮本, 森田, “大容量光中継伝送技術,” *信学会誌*, vol. 100, no. 8, pp. 783–788, 2017 年 8 月.
- [21] 松田, 松岡, “東名阪基幹伝送路に導入した 40G-DWDM システムの開発,” *NTT 技術ジャーナル*, vol. 20, no. 4, pp. 58–61, 2008 年 4 月.
- [22] 堀口, 島崎, 笹倉, 井波, 山本, “100G パケットトランスポートシステム (100G-PTS) の実用化,” *NTT 技術ジャーナル*, vol. 26, no. 10, pp. 54–57, 2014 年 10 月.
- [23] 笠原, 金子, “集積型 ROADM モジュール,” *NTT 技術ジャーナル*, vol. 19, no. 11, pp. 47–51, 2007 年 11 月.
- [24] 高橋, “光スイッチ適用による光ネットワークの革新,” *光学*, vol. 42, no. 5, pp. 220–228, 2013 年 5 月.
- [25] M. Jinno, H. Takara, B. Kozicki, Y. Tsukishima, Y. Sone, and S. Matsuoka, “Spectrum-efficient and scalable elastic optical path network: architecture, benefits, and enabling technologies,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 47, no. 11, pp. 66–73, Nov. 2009.

- [26] 総務省, “我が国のインターネットにおけるトラヒックの集計・試算,” Available: https://www.soumu.go.jp/joho_tsusin/eidsystem/market01_05_03.html (accessed 2022-12-09)
- [27] T. Kawasaki, T. Seki, K. Ito, Y. Sugano, H. Date, H. Kawahara, D. Shimazaki, and H. Maeda, “Development of beyond 100G optical cross connect (B100G-OXC) system,” *NTT Technical Review*, vol. 19, no. 11, pp. 59–64, Nov. 2021.
- [28] P. J. Winzer, D. T. Neilson, and A. R. Chraplyvy, “Fiber-optic transmission and networking: The previous 20 and the next 20 years,” *Opt. Express*, vol. 26, no. 18, pp. 24190–24239, Sept. 2018.

第 2 章 無瞬断でのパス再配置を考慮した動的ネットワーク制御

2.1 はじめに

本章では、限られたネットワーク資源で一時的な需要をコスト効率良く収容するために、ネットワーク上のパスを動的に制御する方式・アルゴリズムの提案を行う。具体的には、各需要の伝送経路を動的に指定することで、動的トラヒックに対するロバスト性の強化および収容トラヒック量の最大化を図る。なお、提案方式・アルゴリズムは、動的なパス運用に起因する品質劣化を回避可能という特長を持つ。

以降、まず動的ネットワーク運用のフレームワークを説明する。次に、短距離通信と長距離通信の比較を論じた上で、各ユーザからの通信要求 1 つ 1 つに対する公平性を考慮した経路割当方法について説明する。さらに、通信需要の棄却率（ブロッキング率）を低減し収容トラヒック量の向上を実現する、既設パスの再配置（リルーティング）アルゴリズムについて述べる。

2.2 動的ネットワーク運用

本節では、想定するネットワーク運用形態の説明を行い、さらに動的リルーティングの概要を説明する。

図 1-3 に例示したように、ネットワーク中にはコントローラと呼ばれる制御機構が存在し、コントローラによって集中制御される形態を想定する。コントローラは PCE（Path Computation Element）と呼ばれる機能部を具備し [1]、PCE がトポロジ情報やネットワーク資源利用状況を考慮してパスの経路制御を行うものとする。一時的な通信需要、つまり、ある保留時間を持つパス接続要求が動的に到着する状況を想定する。需要の平均保留時間 h はアプリケーションによって

異なり、数時間の場合もあれば、数週間あるいはそれ以上の場合もある。また、ここでは、図 2-1 のように一定時間 Δt ごとにコントローラがパスの制御を行う状況を想定する。以降では Δt をルーティング契機期間と呼ぶことにする。このルーティング契機期間の長さによって、動的制御はオンデマンド・バッチ処理・事前予約と大きく 3 種類に分類できる。オンデマンドではパスの設立を最大限高速に行う必要があり、バッチ処理では一定の計算時間内でのブロッキング率削減を目的とし、事前予約では十分な計算時間を費やした上でブロッキング率最小化を迫するという特徴がある。

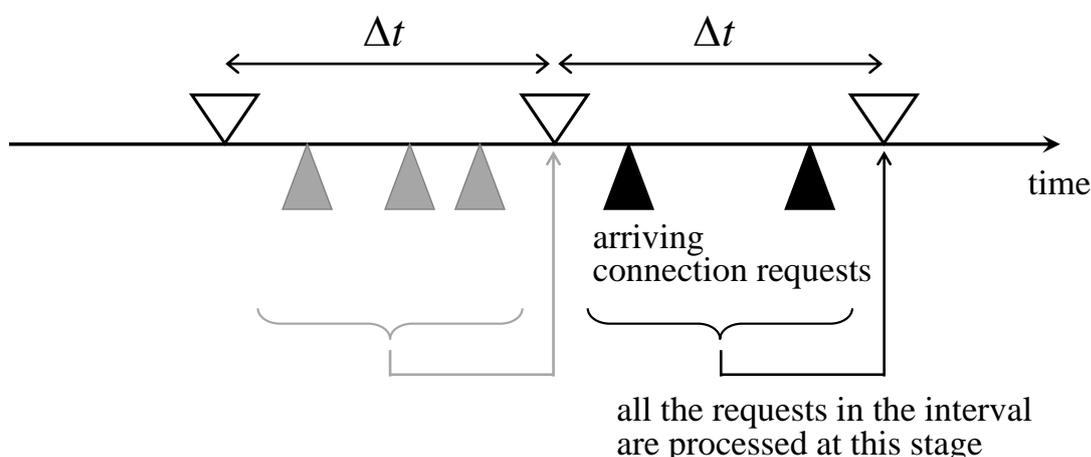


図 2-1 定期的なパスの接続/切断操作のイメージ

制御するタイミング（ルーティング契機）においては、以下の操作を行う。

Dynamic Routing with Rerouting

- Step1. 保留時間が終了し切断するパスのリソースを解放する。
- Step2. Δt の間に到着した接続要求に対し、新しくパスの確立を行う。
- Step3. 新規パスをネットワークに收容する。
- Step4. Step3 においてリルーティングを行う条件を満たす場合、現存するパスをリルーティングすることによってネットワークの再最適化を試みる。

Step2 では、Dijkstra のアルゴリズム [2] を用いて最短経路を探索する。この最短経路を用いる方法は後の他の通信への影響を少なくできることが既存検討か

らも明らかになっている [3]. Step3 では、通信需要間の公平性を得るために次節で紹介する收容方法を用いる. Step4 では、現存するパスをリルーティングする際に 2.4 節で紹介する **Make Before Break** を考慮する.

なお、動的にネットワークを制御する際、次式で定義されるブロッキング率 p_B が性能評価として用いられることが多い.

$$p_B = \frac{B}{A+B} \quad (2.1)$$

式中の A , B はそれぞれ、收容に成功した接続要求数、ブロックされた接続要求数を表す.

なお、実際にはサービス特性が重要なパラメータとなる. TV 会議や CAD などリアルタイム性を有する場合リルーティングは実質不可能であり、データバックアップやファイル転送など非リアルタイムなものは積極的なリルーティングが可能である. また、サービス継続時間による影響も大きいと考えられる. VPN サービスを対象とするとき、 h は 1 ヶ月や数ヶ月となり、 Δt は 1 日や 1 週間となり得る. リアルタイム動画配信サービスを対象とするときには、 h は数時間、 Δt は数十分となり得る.

リルーティングの概念は、従来、電話の回線交換網において議論がなされているが [4, 5], 近年光通信ネットワークにも導入されている [6, 7, 8, 9, 10]. 文献 [11] では回線交換網におけるリルーティングの分析がなされており、リルーティングが従来の動的経路制御に比べスループットを著しく増加させることを示している. 文献 [10] では WDM 技術が導入された光ネットワークにおけるパスプロビジョニングにリルーティングを導入し、その効果を検証している. また、いくつかのリルーティング技術が文献 [12] にまとめられている.

リルーティングとは現存するパスを現在の経路から別の経路に切りかえるというシンプルな操作であり、「passive rerouting」と「intentional rerouting」の2種類の戦略に大別できる [9]. passive rerouting とはブロッキングが起こった新規需要を收容する空きを作り出すために障害となる現用パスの経路を切り替えるという操作であり、intentional rerouting は負荷を分散させるために前もって現用パスの経路切り替えを意図的に行う操作である. 近年の研究では、ブロッキング率

低減および負荷の分散を目指すばかりでなく，切替に伴う通信の“瞬断”の時間短縮にも焦点が当てられている．その例として，[6] では瞬断時間の短縮を実現するリルーティングアルゴリズム，MTV-WR が提案されており，後に様々な検討が行われている [8, 9, 10]．一般的に，従来手法の多くは代替パスを確立する前に現用パスが切断されるため瞬断を引き起こす．瞬断はライブビデオストリーミングのようなリアルタイム性を有するアプリケーションにおいて著しい品質劣化を招く．無瞬断化を実現するためには“Make Before Break Routing (MBBR)” [13] と OTN (Optical Transport Network) [14, 15] による無瞬断パス再配置が有効である．MBBR では，リルーティングの際に現用パスを切断する前に代替パスを確立する．図 2-2 に従来のリルーティングとの比較を示す．

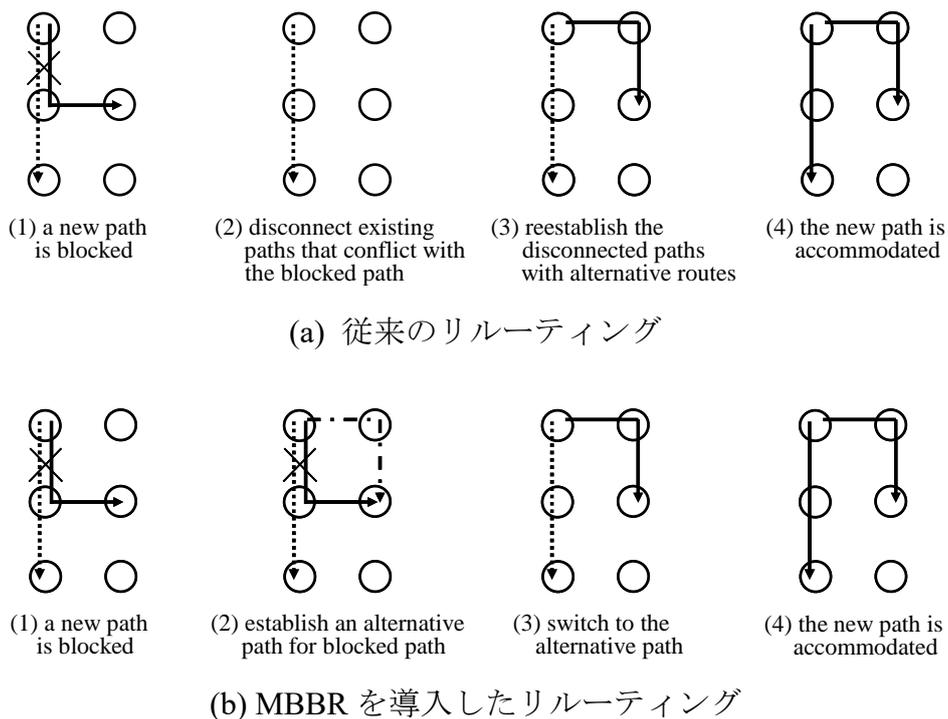


図 2-2 従来のリルーティングと MBBR の比較

MBBR では SDH (Synchronous Digital Hierarchy) [14, 16] の VC (Virtual Container) の情報を活用することができ, OTN においても同様に活用可能である. ここで, 無瞬断切替が実現されている例としては, TDM のデジタルパスを用いた専用線サービスが存在するが, 一般に, 予備経路が前もって決まっている 1+1 プロテクションを前提としている. 一方で, MBBR では代替経路を動的に決定する必要があり, 代替経路の選択方法に加え, リルーティング対象とする既設パスの選択方法によっても性能が大きく左右されるという特徴を持つ. 本研究では, MBBR による無瞬断パス再配置を適用することを前提とし, 計算時間とネットワーク性能 (例えば, ブロッキング率) を考慮したリルーティングアルゴリズムを創出する. 本論文では, 2.4 節で, リルーティング対象パス選択ならびに代替経路決定まで十分に考慮したアルゴリズムを述べ, 第 3 章で性能評価を行う. 第 3 章の中では, 従来明らかとなっていなかった無瞬断化の影響についても定量的に評価する.

2.3 パス需要間の公平性を考慮した経路割当手法

サービスプロビジョニングに必要な概念の中に公平性がある. 同じサービスレベルのユーザ間で, 通信要求の棄却率はできる限り同程度となるべきである. 本節では長距離通信と短距離通信の比較を行い, 公平性を考慮した経路割当手法を提案する.

2.3.1 長距離通信と短距離通信の比較

長いパスは多くのノードやリンクを通過するため短いパスよりも他のパスの影響を受けやすく, 確立することが困難になる傾向にある. したがって, 一般に長いパスと短いパスではブロッキング率が同等とならず, ユーザ間に不公平な状況となる.

あるリンクでのブロッキング率を B として, これが全てのリンクにおいて同様であると仮定する. このとき, 1 ホップの通信要求が正常に収容される確率は $1-B$ で与えられ, n ホップの通信要求がブロックされる確率は次式で与えられる.

$$B_{path} = 1 - (1 - B)^n \quad (2.2)$$

もし $1 \gg B$ の場合は次式のように近似することができる.

$$B_{path} \approx 1 - (1 - nB) = nB \quad (2.3)$$

つまり, B_{path} はパス長に比例することになる. しかし, これは経路候補が 1 つのみの場合の確率であり, ここで長距離通信には多く経路候補が存在することを考慮しなければならない. 経路候補数はネットワークのトポロジに依存する. そこで, 次項では各通信要求に対し, リンクを占有する確率を表す新しい指標を導入して公平性を確保する経路割当手法を提案する.

2.3.2 公平性を考慮した経路割当手法

ノード s, d 間の最短経路のホップ数を $h(s, d)$ とおく. s, d 間に最短経路でパスを確立する場合に, パスが通る可能性のあるリンクの集合を $l(s, d)$ としたとき, s, d 間通信要求のリンク占有率 $\rho(s, d)$ は次式のように見積もられる. ただし $\#X$ は集合 X の要素数を表す.

$$\rho(s, d) := h(s, d) / \#l(s, d) \quad (2.4)$$

リンク占有率 $\rho(s, d)$ を用いて, s, d 間の重み関数を次式のように定義する.

$$W(s, d) := h(s, d)^w \cdot \rho(s, d) \quad (2.5)$$

ここで式中のパラメータ $0 \leq w \leq 1$ は, トポロジやトラフィック分布などのネットワーク状況に応じて, 高い公平性が得られるように調整する. この重み関数は, 通常はブロッキング率が相対的に高い傾向にある長距離パスならびに経路候補数が少ないパスの優先度を相対的に上げる役割を担うものであり, パラメータ w によって距離 (ホップ数) の優先度合を調整することが可能となっている. 以下では重み関数 $W(s, d)$ を用いて, 公平性を考慮した経路割当手法の説明を行う.

一定期間に到着した全ての通信要求に対して, まず非負の一様乱数を割り当てる. 次に $W(s, d)$ を乱数に乗じる. その後, 割り当てられた数値 (乱数 \times 重み) の降順に通信要求のソース・デスティネーション間にパスの確立を試みる.

第 3 章で後述する数値実験において、計算コストの低いこのシンプルな手法が高い公平性を実現することを示す。

2.4 提案リルーティング手法

本節ではブロッキング率の低減と無瞬断化を同時に実現する動的リルーティングアルゴリズムの説明を行う。まず **passive rerouting** において退避させるパスの選択手法を 2 種類提案し、それに基づく提案手法、さらには制約を緩和し瞬断を許容した手法を説明する。続いて **intentional rerouting** における提案手法を説明する。

2.4.1 Passive Rerouting 手法

新しくパスを確立する際に、全ての経路候補に十分なリソースが空いてない場合ブロッキングが起こる。これに対し、まず簡単のためブロックされた新規パスの経路を最短経路の中からランダムに選び、次にこの経路上でいくつかの現存するパスをリルーティングすることによって新規パスを収容することを試みる。リルーティング成功率は、退避させるパスの探索方法に強く依存する。本項では、以下で 2 種類の被退避パス選択方法の提案を行う。なお、リルーティングの際には切替をエンドノードで行い、受信ノードで遅延補償を行うことにより無瞬断切替を実現する。

・被退避パスの局所的探索に基づく **MBBR (L-MBBR)**

図 2-3 を用いて、L-MBBR について述べる。まず、経路上に空きがないリンクがあるために新規パス p_{new} の確立ができない状況を想定する (図中, ①)。ここで、L-MBBR では経路上のリンクをソースからデスティネーションまで逐次的にチェックし、空きがないリンクを通過する現用パスをリルーティングしていき、 p_{new} を収容する余地をつくりだしていく。ここで、空きがないリンク l_f を通る現用パスの集合を $P_{\text{conflict}}(l_f)$ とし、まず、 $P_{\text{conflict}}(l_f)$ の中から p_{new} と競合している空きがないリンク数が最大のパス p_c を選択する。もし候補が複数存在する場合は適宜選択することにする。これらの操作が図 2-3 における②に対応している。図では 3 ホップの p_{new} に対し、先頭から空きがないリンクをチェックするた

め、まずリンク 1 に着目し、集合 $P_{\text{conflict}}(\text{link } 1)$ の中から上記の通り退避させるパス p_c (図では rerouting path と表記) を選択している。次に、 l_f を除いたトポロジに Dijkstra アルゴリズムを適用することによって p_c の代替経路を得た後に、MBBR (図 2-2 参照) により無瞬断で退避させるパスを切り替える (図中、②・③の通り、alternative path に切替)。続いて、 p_{new} の経路上で次の空きがないリンク 3 に着目し、同様の操作 (図中、④と⑤) を行うことによって、図中の⑥の通り p_{new} が収容可能となる。なお、図 2-3 では先頭から逐次的にリルーティングしている例を示したが、もし空きがないリンクを複数 (図の例では、リンク 1, 3 両方) 通過する現用パスをリルーティングできる場合にはリルーティングの回数は少なく済むことになる。

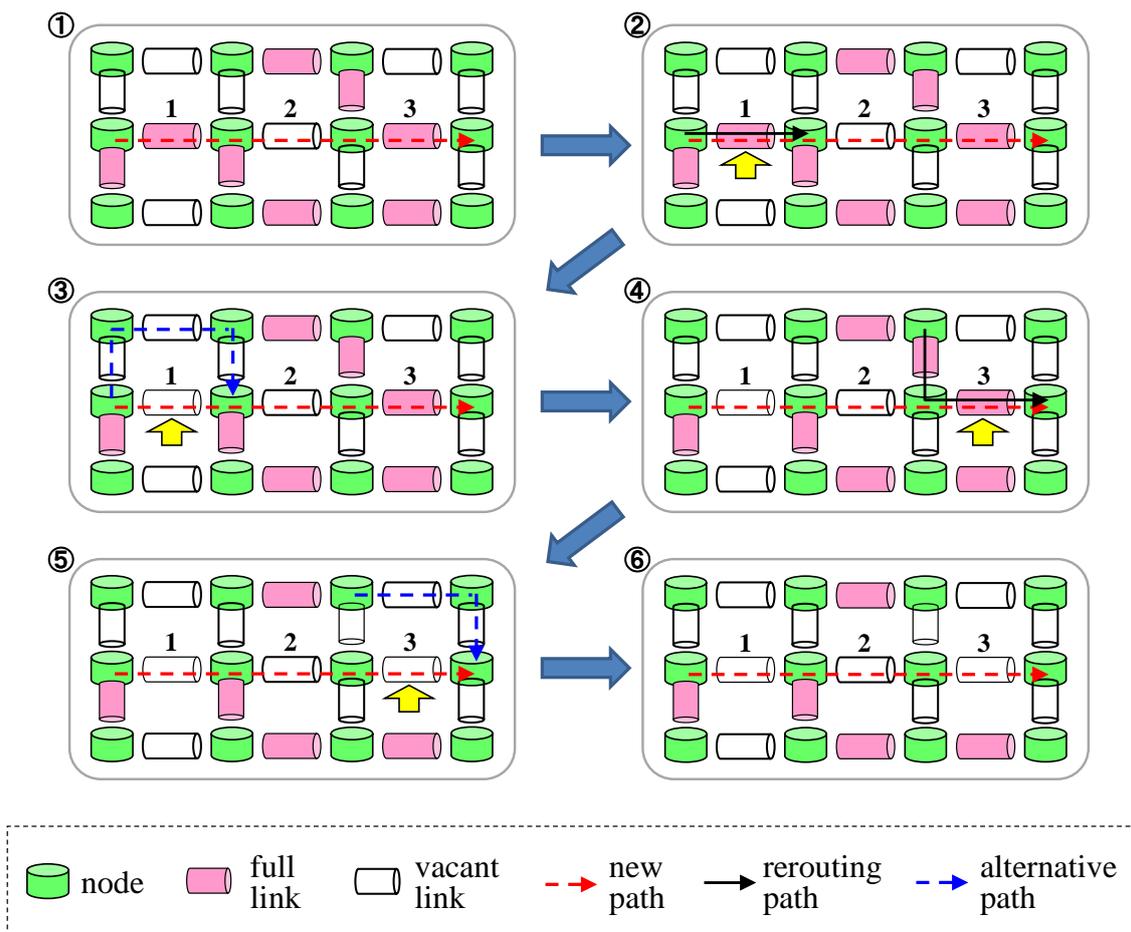


図 2-3 L-MBBR の動作例

L-MBBR の計算コストはブロックされた新規パスのホップ数に依存し、かつ、空きがないリンク l_f を通る現用パスの集合 $P_{\text{conflict}}(l_f)$ の探索は複雑な演算を必要としない。したがって、逐次的な計算を行うために局所最適となる一方で、次に紹介する手法に比べて計算時間が非常に短くてすむという特長を持つ。

・被退避パスの大域的探索に基づく MBBR (G-MBBR)

図 2-4 を用いて、G-MBBR について述べる。まず、経路上に空きがないリンクがあるために新規パス p_{new} の確立ができない状況を想定する (図中、①)。ここで、G-MBBR は経路上の全リンクを同時にチェックし、リルーティング回数を最小化し、リルーティング操作がもたらすその後の影響を最小化するようにリルーティング処理を行う手法である。経路上の空きがないリンクを通る全てのパスの集合を P'_{conflict} とする。 P'_{conflict} の部分集合全ての中からリルーティング操作回数が最小となるものを選択する。もし操作を最小化する部分集合が複数存在する場合は次式で定義するコスト関数を最小化するものを選択する。

$$C_{\text{rerouting}} = \alpha \cdot l + \beta \cdot t \quad (2.6)$$

ここで l はリルーティングするパスの総ホップ数で、 t はリルーティングするパスの残り保留時間の合計である。 α と β は係数であり、 $\alpha \gg \beta$ という関係をもつ。右辺の意味は以下の通りである。一般にリルーティングされた後の経路長は元の経路長よりも長くなるが、これはリソースの使用効率の低下につながり、使用効率の悪さの程度は残り保留時間に比例すると見なすことができる。この使用効率の低下が確率的であるのに対し、リルーティングにより新規収容が可能となって得られる利益は決定論的であるといえる。それゆえ、リルーティングのコストに関してこれらの性質を両方考慮して、決定論的な利益を奨励するために重み付けした係数を導入する。図 2-4 における②では上記のポリシーに基づき、空きがないリンク全てに着目した上で退避させるパス集合 (図では 1 パスをリルーティングすることで p_{new} を収容可能な例を示しており、該当の 1 パスを rerouting path と表記) を選択している。その後、残余帯域が 0 のリンクを除いたトポロジに Dijkstra アルゴリズムを適用して退避させるパスの代替経路を探索し、図 2-2 に示した MBBR を適用して無瞬断で alternative path に切り替える (図

中，③参照)．これにより，図中の④の通り p_{new} が収容可能となる．

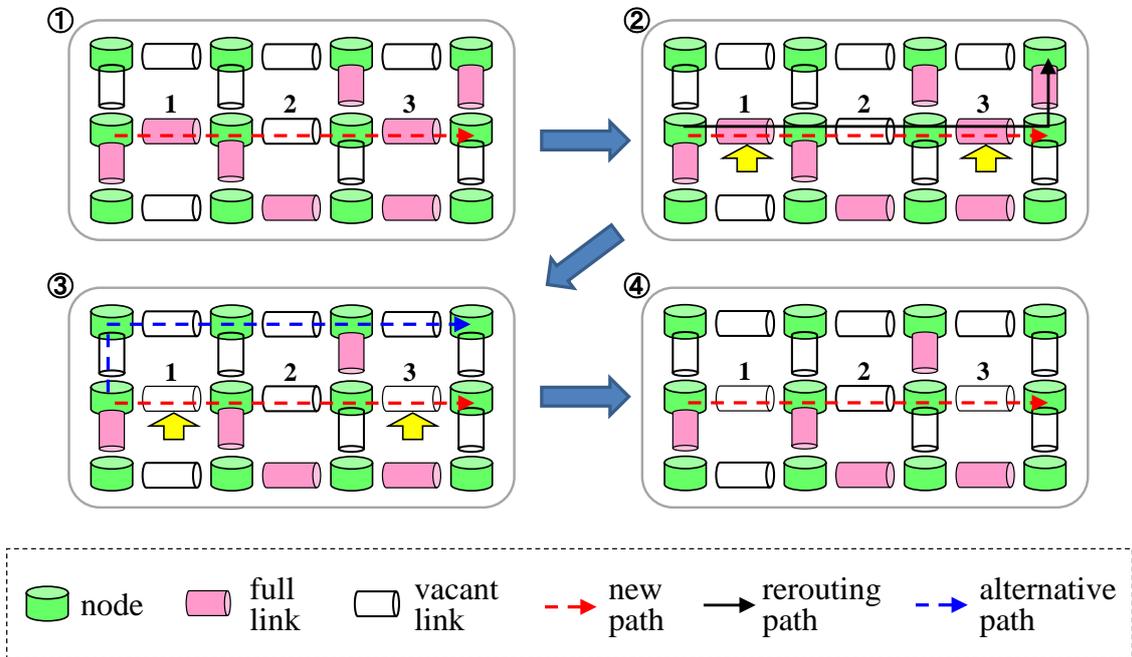


図 2-4 G-MBBR の動作例

G-MBBR の計算コストは新規パスのホップ数のべき乗に依存する． P'_{conflict} の部分集合，つまり退避させる候補となるパスの組合せ全てに対してコスト関数を演算する必要があり，組合せ数が膨大となるため L-MBBR より長い計算時間を必要とするが，非常に高いブロッキング率低減効果が得られることが期待できる．

L-MBBR はオンデマンドタイプのサービスに適しており，G-MBBR は長いプロビジョニング時間を有する場合に効果的である．

2.4.2 Intentional Rerouting 手法 (I-MBBR)

オンデマンドクラスのサービスでは将来の收容余地 (残余帯域) を大きくするようなリルーティング技術が有用である．本項では各々のパスのトラヒック集中への寄与を考慮した被退避パス選択手法および MBBR を導入した intentional rerouting 手法の提案を行う．

まず残余帯域が閾値 B_c 以下のリンクをクリティカルリンク (critical link) と定義し、既設パスをいくつかリルーティングすることによりクリティカルリンクを除去することにより負荷を分散させる。各クリティカルリンクに対し、リンクに張られているファイバ数の降順に、通過するクリティカルリンク数が最大のパスを選択し退避させていく。もし候補が複数存在する場合は残り保留時間が最小のパスを選択する。代替経路探索の際は、残余帯域が $B_c + \gamma$ 以下のリンクを準クリティカルリンク (quasi-critical link) と定義し、クリティカルリンクおよび準クリティカルリンクを除いたトポロジに Dijkstra アルゴリズムを適用して代替経路を得る。準クリティカルリンクの導入によりリルーティングによって退避させた先での新たなクリティカルリンクの出現を避けることが可能となる。

I-MBBR においても代替パスは現用パスと独立となるように探索されるため無瞬断でのリルーティングが実現される。

2.5 まとめ

本章では、限られたネットワーク資源でより多くのトラフィック需要収容を実現するために、サービス品質を考慮しつつオンデマンドな需要をより多く収容する動的ネットワーク制御方式・アルゴリズムについて説明した。本方式・アルゴリズムは、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である。

具体的には、2.2 節では想定する動的制御の全体像について述べた。さらに、動的リルーティングによる再最適化の従来研究をまとめ、リルーティングが2種類の戦略に分類可能であることを説明した。加えて、従来のリルーティングにおける問題点について説明するとともに本研究のポイントを述べた。2.3 節ではまず長距離通信と短距離通信の比較を行い、各通信要求間の公平性を考慮した経路割当手法の提案を行った。提案手法は送受信ノード間のリンク占有率の概念を導入した重み付けを行う、低計算コストながらも高い公平性を実現可能な手法である。2.4 節では Make Before Break Routing 技術を導入した無瞬断でのリルーティング手法の提案を行った。まず、第一の戦略である passive rerouting を検討し、被退避パスの探索について適切な局所探索を行う高速手法および全探索

を行う手法を提案した．続いて第二の戦略である **intentional rerouting** を検討し，将来のトラヒック収容余地を拡大させる手法を提案した．

続く第 3 章において，本章で説明した動的制御方式・アルゴリズムの性能評価を行う．

2.6 第 2 章参考文献

- [1] T. Miyamura, T. Kurimoto, R. Hayashi, I. Inoue, K. Shiimoto, and S. Urushidani, "Demonstration of PCE-Controlled Dynamic Traffic Engineering for GMPLS-Based Multilayer Service Network," *Proc. ECOC 2005*, pp. 269-270, September 2005.
- [2] E. W. Dijkstra, "A Note on Two Problems in Connexion with Graphs," *Numerische Mathematik*, vol. 1, pp. 269–271, 1959.
- [3] K. Kanie, H. Hasegawa, and K. Sato, "Quasi-Dynamic Network Design Considering Different Service Holding Times," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 26, no. 3, pp. 47-53, April 2008.
- [4] M. H. Ackroyd, "Call Repacking in Connecting Networks," *IEEE Transactions on Communications*, vol. COM-27, no. 3, pp. 589-591, March 1979.
- [5] A. Girard and S. Hurtubise, "Dynamic Routing and Call Repacking in Circuit-Switched Networks," *IEEE Transactions on Communications*, vol. COM-31, no. 12, pp. 1290-1294, December 1983.
- [6] K. C. Lee and V. O. K. Li, "A Wavelength Rerouting Algorithm in Wide-Area All-Optical Networks," *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, vol. 14, no. 6, pp. 1218-1229, June 1996.
- [7] G. Xue, "Optimal Lightpath Routing and Rerouting in WDM Networks," *Proc. IEEE GLOBECOM 2001*, pp. 2124-2128, 2001.
- [8] G. Mohan and C. S. R. Murthy, "A Time Optimal Wavelength Rerouting Algorithm

for Dynamic Traffic in WDM Networks,” *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, vol. 17, no. 3, pp. 406-417, March 1999.

- [9] X. Chu, T. Bu, and X. -Y. Li, “A Study of Lightpath Rerouting Schemes in Wavelength-Routed WDM Networks,” *Proc. IEEE ICC 2007*, pp. 2400-2405, June 2007.
- [10] W. Yao and B. Ramamurthy, “Rerouting Schemes for Dynamic Traffic Grooming in Optical WDM Mesh Networks,” *Computer Networks*, vol. 52, pp. 1891-1904, July 2008.
- [11] E. W. M. Wong, A. K. M. Chan, and T. S. P. Yum, “Analysis of Rerouting in Circuit-Switched Networks,” *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 8, no. 3, pp. 419-427, June 2000.
- [12] E. W. M. Wong, A. K. M. Chan, and T. S. P. Yum, “A Taxonomy of Rerouting in Circuit-Switched Networks,” *IEEE Communications Magazine*, pp. 116-122, November 1999.
- [13] IETF, RFC 3945, “Generalized Multi-Protocol Label Switching (GMPLS) Architecture,” October 2004.
- [14] 佐藤健一, 古賀正文, “広帯域光ネットワーク技術,” 電子情報通信学会, ISBN4-88552-193-9, 2003.
- [15] ITU-T Recommendation G.873.1, Optical Transport Network (OTN): Linear protection, March 2006.
- [16] N. Kawase, R. Yamabayashi, M. Tomizawa, and Y. Uematsu, “Route Diversity with Hitless Path Switching,” *Electronics Letters*, vol.30, No. 23, November 1994.

第3章 動的ネットワーク制御の有効性 評価

3.1 はじめに

本章では、第2章で述べた動的ネットワーク制御の有効性を定量的に評価する。具体的には、通信需要間の公平性を改善可能な度合、ならびに、リルーティングの有効性（ブロッキング率低減・収容トラヒック量改善）を定量的に評価する。リルーティングの性能評価においては、被退避パス探索アルゴリズムが性能に与える影響についても述べる。加えて、MBBRを適用した無瞬断化を前提とすることに起因する性能影響の他、様々な指標で評価を行い、実サービスを提供する上で有用な知見を創出する。

3.2 前提条件

本評価においては、パスの容量は一定値をとり、1ファイバあたりに収容される最大パス数 N が全てのファイバで共通であるネットワークを想定する。取り扱うパスが光パスである場合には、同一波長のパスを同じファイバ内に収容できないという波長制約は考慮しないものとし、パスの本数のみで容量評価を行う。これは電気パス（例えば、LSP (Label Switched Path) ネットワークや波長変換がある光パス、VWP (Virtual Wavelength Path) ネットワークに相当する。

具体的な数値評価にあたっては、初期パス需要を収容する初期設定ステージと、動的に到着する一時的なパス接続要求の収容を試みる動的制御ステージの2段階から成る数値実験を行うこととする。なお、初期設定ステージにおいては、文献 [1] の静的設計アルゴリズム (Min-hop algorithm) を用いて初期パス需要に対して最短経路で経路割当を行い、ファイバ数等のリソースを確定する。このとき、最短経路が複数存在する場合はランダムに選択することにする。動的制御ス

ページにおいては、2.2 節の内容を前提とするものとし、パス接続要求の到着はポアソン分布に従い、平均保留時間 h は負の指数分布に従うものとする。

3.3 バッチ処理シナリオにおける数値実験

本節では、2.3 節で提案した公平性を考慮した経路割当方法および 2.4 節で提案したリルーティングアルゴリズムの効果を検証する。様々なパラメータでシミュレーションを行い、提案手法の効果を定量的に評価する。具体的には、passive rerouting アルゴリズムを用いて、一定の計算時間内でブロッキング率の削減を図るバッチ処理のシミュレーションを実行し、得られるブロッキング率および公平性の評価を行った。

3.3.1 シミュレーションパラメータ

シミュレーションでは以下に示すネットワークモデルを仮定した。

- 物理トポロジ

- 4×4 格子 (図 3-1), 日本のネットワークモデル (図 3-2),
COST266 ヨーロッパネットワークモデル [2] (図 3-3)

- トラヒック需要

- 一様ランダム分布

- ノードペア間の平均トラヒック量は次式で与えられる

$$L = L_{amp} \cdot L_{static} \tag{3.1}$$

式中の L_{static} は初期設定ステージで使われる初期トラヒック量を表し、 L_{amp} は 0.7 から 1.2 まで変動する倍率である。

- パス/ファイバ

- 離散的な固定容量のパスを扱う (例: SDH の VC-3/4)

- 1 ファイバあたり 16 本のパスが収容される ($N=16$)

- 平均保留時間, ルーティング契機期間

- 平均保留時間 h : 4 時間

- ルーティング契機期間 Δt : 2 時間

- ・リルーティング時の制約

ホップスラッグ (リルーティングによって元のパス長から増加するホップ数) : 4 以下

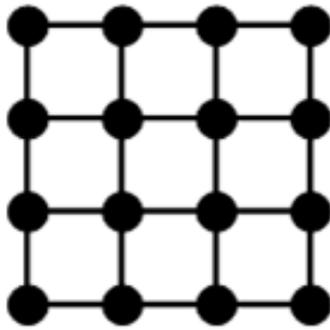


図 3-1 4×4 格子型ネットワーク



図 3-2 日本のネットワークモデル

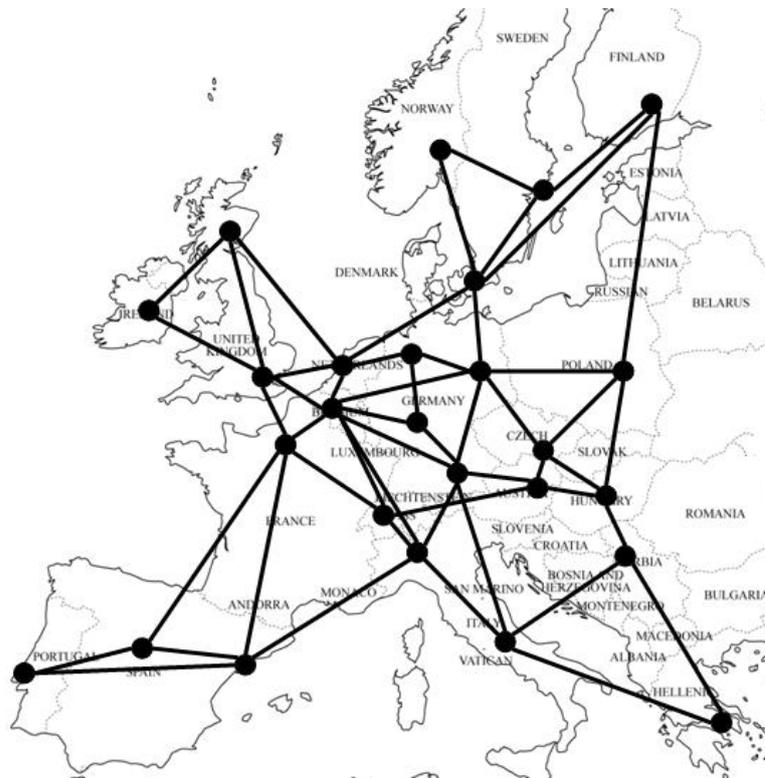


図 3-3 COST266 ヨーロッパネットワークモデル

3.3.2 実行結果

シミュレーションにより得られた結果を示すとともに、以下の観点から結果を考察する。

- (a) 得られる公平性
- (b) 得られるブロッキング率
- (c) 2.3 節で提案した公平性を考慮した経路割当方法と 2.4 節で提案したリルーティングアルゴリズムを組み合わせることによる効果
- (d) ホップスラッグおよびトラヒック分布の与える影響
- (e) リンク使用率
- (f) リルーティングの成功率
- (g) 無瞬断化が与える影響

(a) パス間の公平性

まず、リルーティングを行わない状況で、2.3 節で提案した公平性を考慮した経路割当方法の効果を検証する。パス間の公平性を評価するためにパス長毎にブロッキング率を調べる。最短経路のホップ数が i である通信要求のブロッキング率のアンサンブル平均を x_i とし、公平性を評価する指標として次式で与えられる Jain's Fairness Index [3] を用いる。

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n) = \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2 / n \sum_{i=1}^n (x_i^2) \quad (3.2)$$

この指標は、文献 [3] においてはチャネル間のスループットの公平性評価に用いられており、ある資源を複数のユーザでシェアする場合の評価に適している。また、0 から 1 までの値をとり、その値が大きい程公平性が高いことを表す指標である。本評価では、値が 1 のときに限り全てのパス長でブロッキング率が等しいということを示すことになる。加えて、 x_1, x_2, \dots, x_n がほぼ同程度であれば 1 に近い値をとる一方で、ある特定のパス長のブロッキング率だけ相対的に高い（もしくは低い）場合、極端に低い値をとるという特徴があり、ブロッキング率の観点でパス長間の公平性を定量評価する際に適していると考えられる。(2.5)式で定義されたパラメータ w を 0 から 1 まで変化させた時における 3 つのトポロジに対して得られた Fairness Index を図 3-4 に示す。ここでは L_{amp} を 1.0 とした。

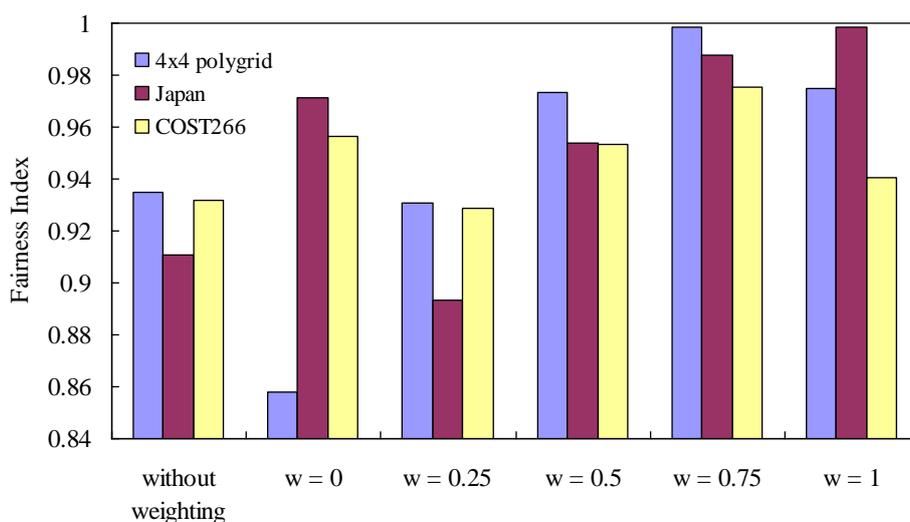


図 3-4 リルーティングを行わない場合における公平性

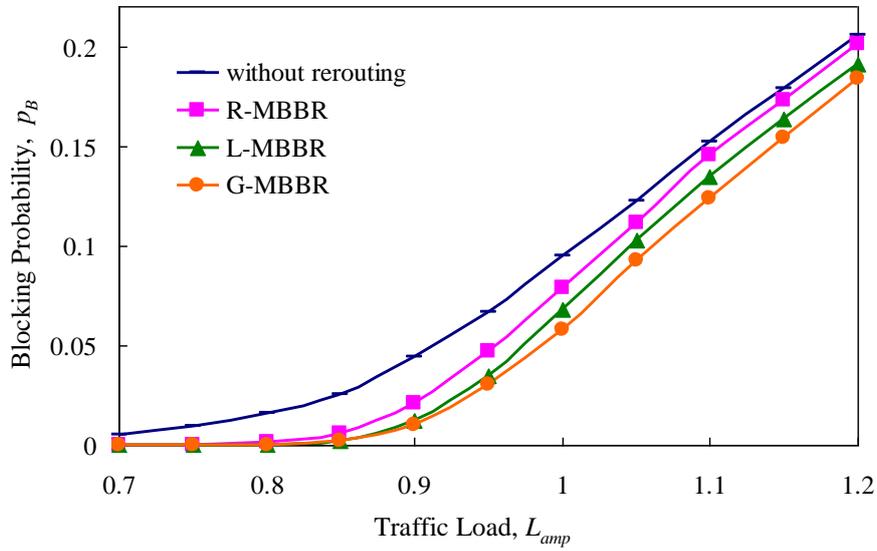
図 3-4 より，最適な w の値はトポロジに依存するが，いずれのトポロジにおいても提案した重み関数を適用して適した w を選択することによって公平性が改善していることがわかる．ネットワークの状況によって最適な w の値は変化すると考えられる．

(b) リルーティングによるブロッキング率改善と被退避パス選択法の効果

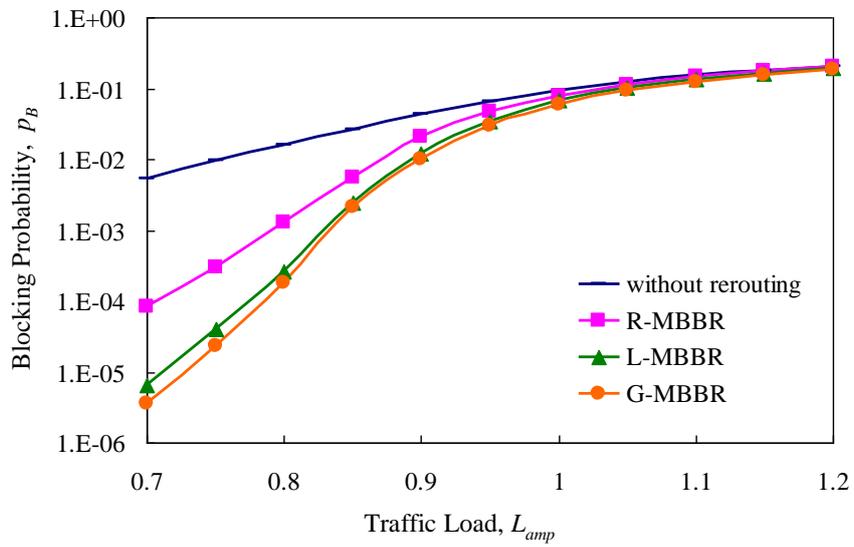
次に，公平性を考慮した経路割当方法は用いずに，MBBR アルゴリズムの効果を検証する．2.4 節で提案したアルゴリズムの性能を評価するために，リルーティングするパスをランダムに選択する基本的な手法 (R-MBBR) との比較を行った．それぞれのトポロジでのシミュレーション結果を図 3-5，図 3-6，図 3-7 に示す．

図より，リルーティングによってブロッキング率が大幅に改善していることがわかる．例えば目標とするブロッキング率が 10^{-3} のとき，MBBR を適用することによって許容できるトラフィック量が 10%以上増加する (図 3-5 では明確にわからないが， 4×4 格子においては 20%以上の増加がみられる)．L-MBBR は計算時間が短くてすむが，R-MBBR に比べて非常に高いブロッキング低減を達成している．また，G-MBBR が最も高いブロッキング低減効果を示しており，リルーティングなしでブロッキング率が 10^{-3} のときにおいて 2 桁から 3 桁のブロッキング率改善を達成している．

COST266 ネットワークでは 2 番目，3 番目，4 番目，・・・に短い経路と最短経路のホップ数の差が他のネットワークに比べて小さいが，このことが図 3-7 において R-MBBR と提案手法の差が他のトポロジより小さい原因である可能性が高い．

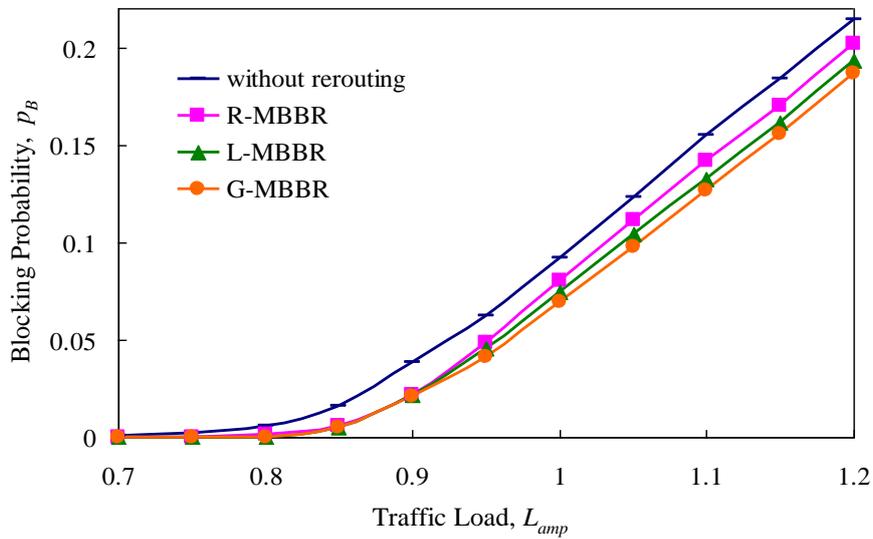


(a) 線形グラフ

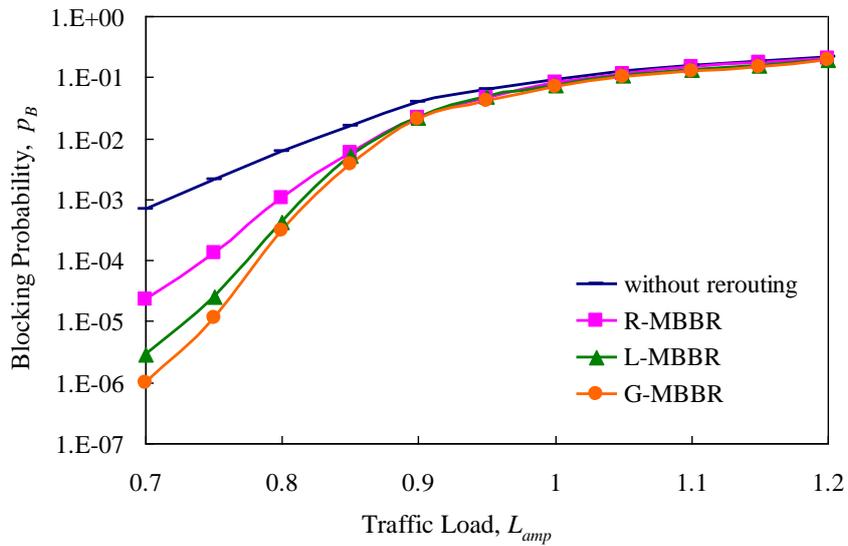


(b) 片対数グラフ

図 3-5 4×4 格子におけるブロッキング率

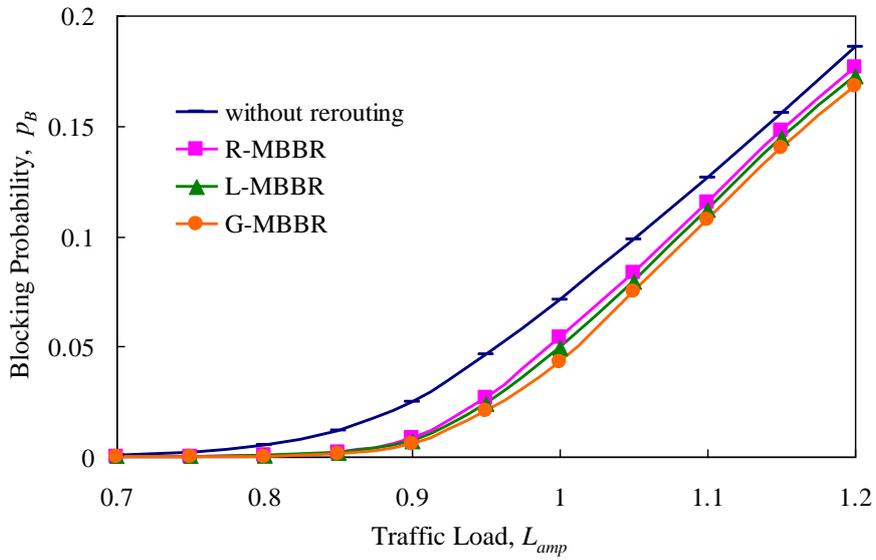


(a) 線形グラフ

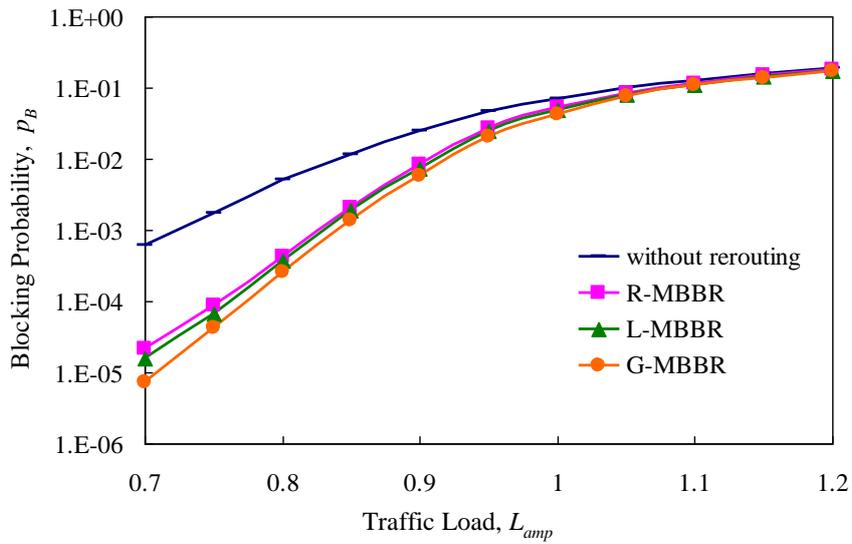


(b) 片対数グラフ

図 3-6 日本のネットワークにおけるブロッキング率



(a) 線形グラフ



(b) 片対数グラフ

図 3-7 COST266 ネットワークにおけるブロッキング率

(c) 提案手法の組み合わせ

2.3 節で提案した公平性を考慮した経路割当方法と 2.4 節で提案した G-MBBR を統合した手法の性能を検証する。シミュレーション結果を図 3-8 に示す。ここでは、 L_{amp} を 1.0 とした。図 3-8 は公平性の改善を強調したものである (ブロッキング率は 3~5%改善している)。

短いパスを収容するためのリルーティングは一般にリルーティングする必要のあるパス数が少なくて済むために成功する確率が高くなる。そのため、リルーティングを導入すると公平性が失われる可能性が高い。しかしながら、(2.5)式中の w を適当な値に設定することによってブロッキング率を低減しつつ公平性を改善することが可能であることを示している。

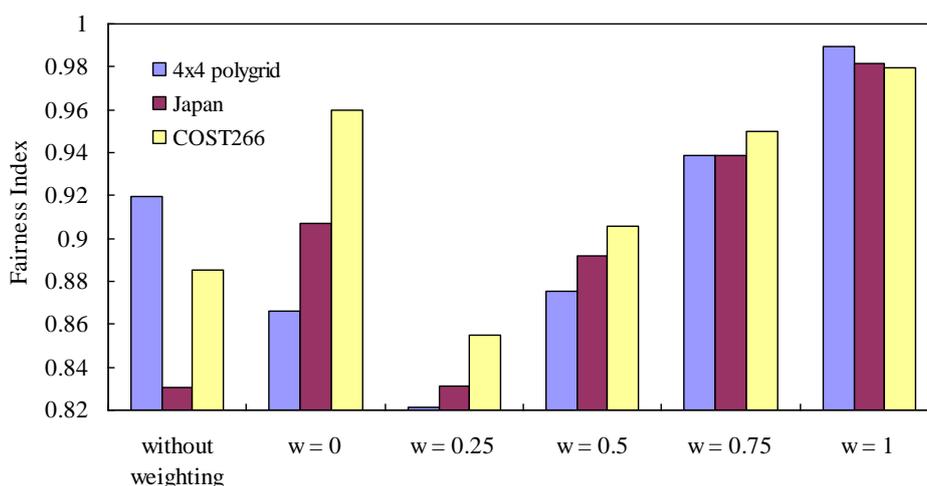


図 3-8 リルーティングありの場合における公平性

さらに、同一ブロッキング率時における Fairness Index の比較を表 2-1 から表 2-3 に示す。なお、重み関数を用いる場合には(2.5)式中の w は {0, 0.25, 0.5, 0.75, 1} の中で最も高い公平性が得られるよう設定した。表からリルーティングの有無に依らず公平性を大幅に改善していることがわかる。また、ブロッキング率が低くなるにつれ公平性が低くなる傾向があり、図 3-5~3-7 をみると静的設計時に比べ低トラヒック領域において公平性が低くなる傾向がある。これは低トラヒック領域ではリンクの空きが増加し、短距離パス (特に 1 ホップのパス) のブロッキング率が中/長距離パスに比べ著しく低下することに起因すると考えられる。

図 3-5 と図 3-6 および図 3-7 を比較すると 4×4 格子においてブロッキング率が 0.01 および 0.001 程度となる L_{amp} の値が他のトポロジに比べ小さくなっており、この差が表 2-1 におけるリルーティングを行わない場合の極端な公平性悪化の原因ではないかと考えられる。また、公平性を考慮した経路割当方法と G-MBBR を組み合わせることによる公平性改善がいずれのトポロジにおいても確認できた。G-MBBR によって同一ブロッキング率における収容可能なトラフィック量が増加し、かつ重み関数によって通信距離に関する不公平を解消するため、高い公平性改善効果が得られると考えられる。

表 3-1 4×4 格子での同一ブロッキング率における公平性の比較

Blocking Probability	without rerouting		with G-MBBR	
	without weighting	with weighting	without weighting	with weighting
≈0.1	≈0.93	≈0.99	≈0.92	≈0.99
≈0.01	≈0.59	≈0.80	≈0.91	≈0.99
≈0.001	≈0.48	≈0.52	≈0.88	≈0.98

表 3-2 日本のネットワークでの同一ブロッキング率における公平性の比較

Blocking Probability	without rerouting		with G-MBBR	
	without weighting	with weighting	without weighting	with weighting
≈0.1	≈0.90	≈0.99	≈0.86	≈0.99
≈0.01	≈0.91	≈0.98	≈0.76	≈0.95
≈0.001	≈0.7	≈0.8	≈0.75	≈0.94

表 3-3 COST266 ネットワークでの同一ブロッキング率における公平性の比較

Blocking Probability	without rerouting		with G-MBBR	
	without weighting	with weighting	without weighting	with weighting
≈0.1	≈0.93	≈0.97	≈0.92	≈0.98
≈0.01	≈0.90	≈0.93	≈0.85	≈0.97
≈0.001	≈0.83	≈0.89	≈0.71	≈0.93

(d) ホップスラッグおよびトラヒック分布がブロッキング率に与える影響

ホップスラッグを変化させた場合におけるブロッキング率のふるまいを図 3-9 から図 3-11 に示す。図よりホップスラッグを増加させるとブロッキング率の低減効果が大きくなるが、4以上の領域ではホップスラッグの拡大によって得られる低減効果がわずかとなる。一方で、ホップスラッグを大きくすると代替パス候補が増加し計算量が増えると同時に、長いパスはネットワークリソースを多く必要とするためネットワーク使用効率が低下する。そのためホップスラッグは充分小さく、かつブロッキング率を抑制する値を設定すべきである。ここで最適なホップスラッグの値はトポロジの規模および形状に依存すると考えられる。

次に、一様なトラヒック分布ではなく、人口密度分布を考慮し各始点終点間の人口密度の積に基づくトラヒック分布を与えた場合のブロッキング率を図 3-12 および図 3-13 に示す。図より、異なるトラヒック分布を与えた場合もブロッキング率の低減効果は一様分布と同じ傾向を示すことを確認した。このことにより、より現実的なトラヒック分布における提案手法の有効性が示されたといえる。

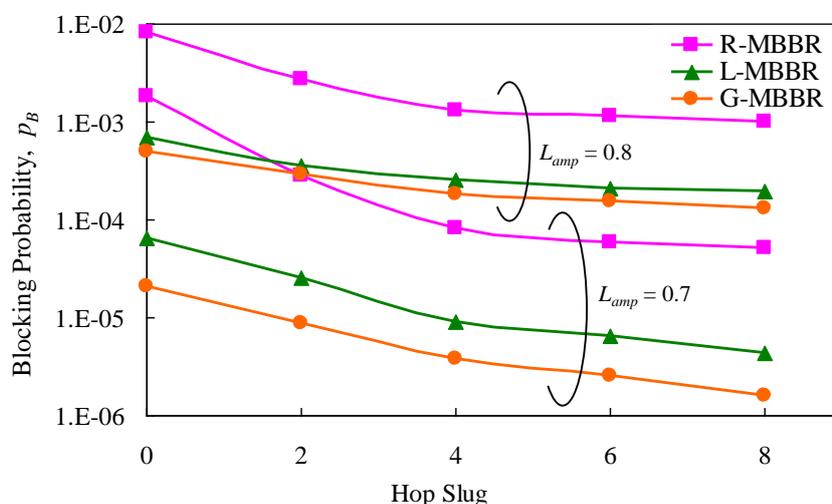


図 3-9 4×4 格子におけるホップスラッグ制約の効果

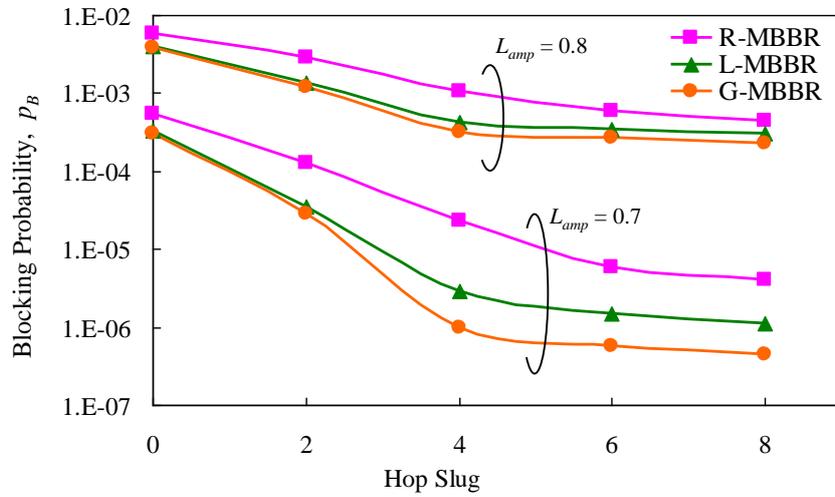


図 3-10 日本のネットワークにおけるホップスラッグ制約の効果

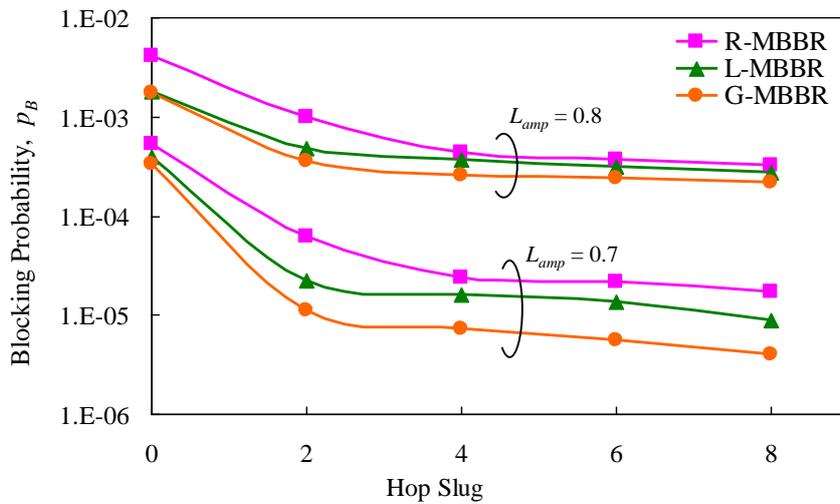


図 3-11 COST266 ネットワークにおけるホップスラッグ制約の効果

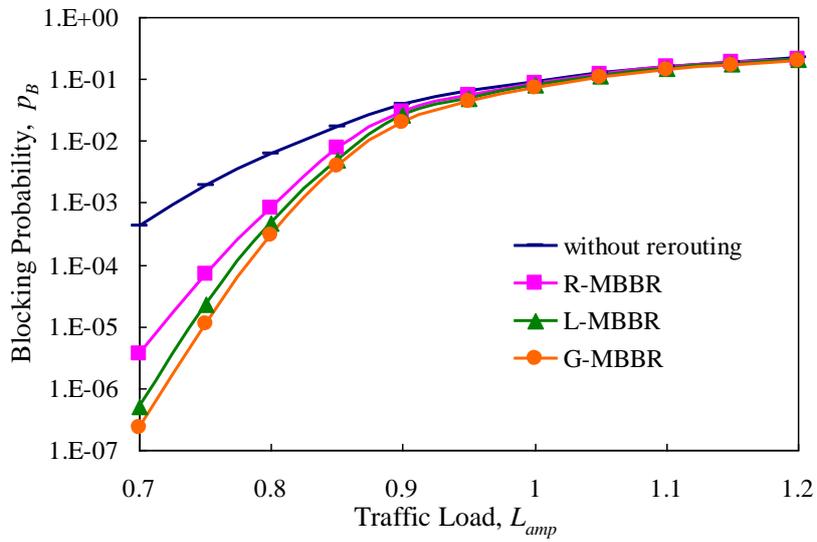


図 3-12 日本のネットワークにおけるブロッキング率
(人口分布を考慮した場合)

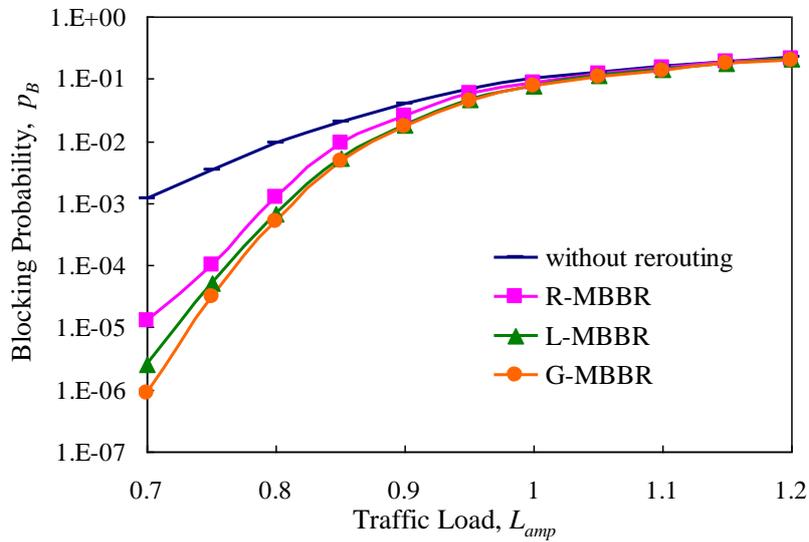


図 3-13 COST266 ネットワークにおけるブロッキング率
(人口分布を考慮した場合)

(e) リルーティングによるリンク使用率向上効果

ネットワークの制御を行った直後のリンク使用率と得られたブロッキング率の関係をそれぞれのトポロジについて図 3-14 から図 3-16 に示す。得られたブロッキング率が 10^{-3} のとき G-MBBR はリルーティングを行わない場合に比べリンク使用率を 10%以上増加させており、特に 4×4 格子において得られたブロッキング率が 10^{-2} のとき G-MBBR はリンク利用率を 15%ほど増加させている。動的な既設パスのリルーティングによって、リソースを有効活用しネットワーク全体のスループット改善を達成できることが示された。

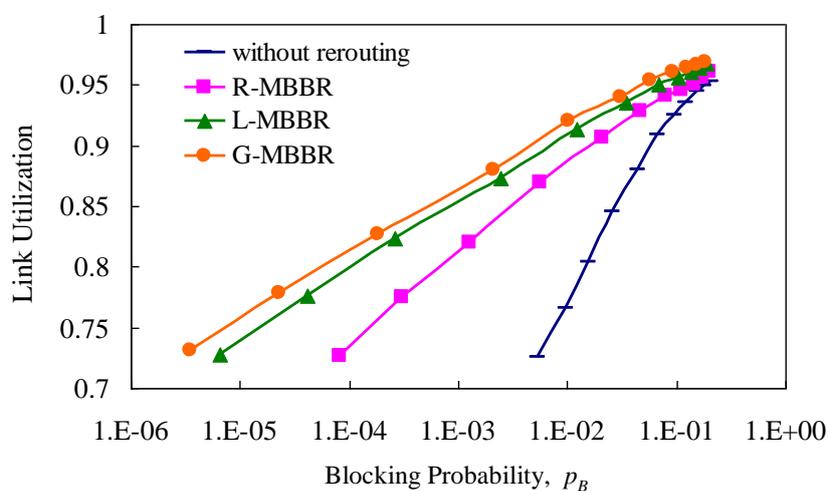


図 3-14 4×4 格子におけるリンク使用率向上効果

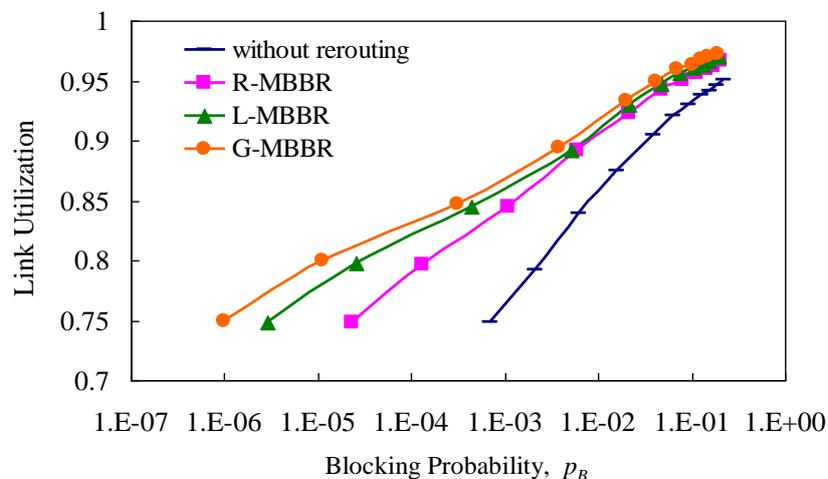


図 3-15 日本のネットワークにおけるリンク使用率向上効果

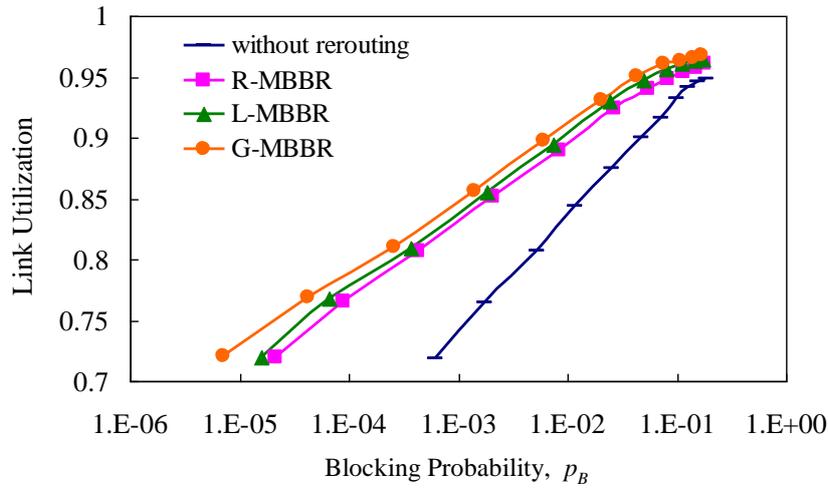


図 3-16 COST266 ネットワークにおけるリンク使用率向上効果

(f) リルーティングの成功率

図 3-17 から図 3-19 に各トポロジにおける提案手法および比較手法のリルーティング成功率を示す。リルーティングの成功率はトラフィック量の増加とともに低下していく。これは高負荷時には代替パスおよび新規パスを確立するのに十分なリソースがネットワークに残されていない可能性が高くなるためである。

L_{amp} が 1.0 前後において G-MBBR は R-MBBR に比べ成功率が 10%以上高く、長い計算時間を費やすことによって高いリルーティング成功率を達成することが示された。

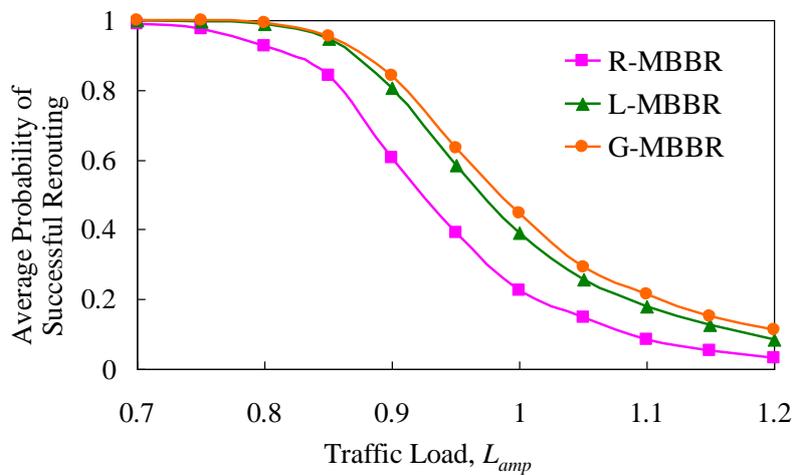


図 3-17 4×4 格子におけるリルーティング成功率の比較

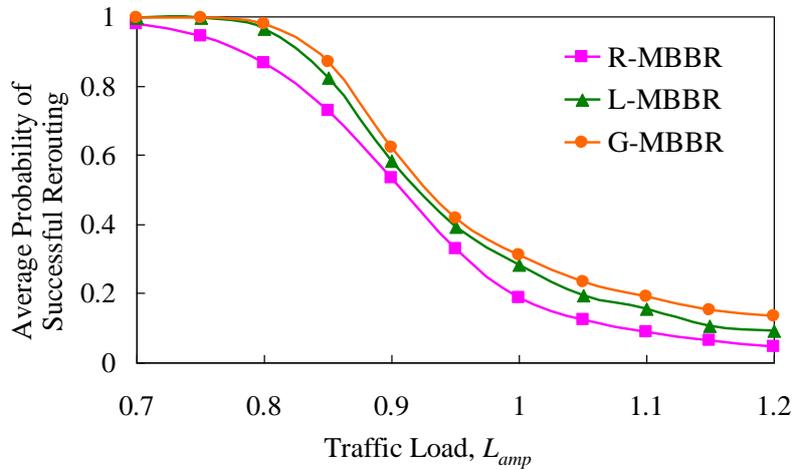


図 3-18 日本のネットワークにおけるリルーティング成功率の比較

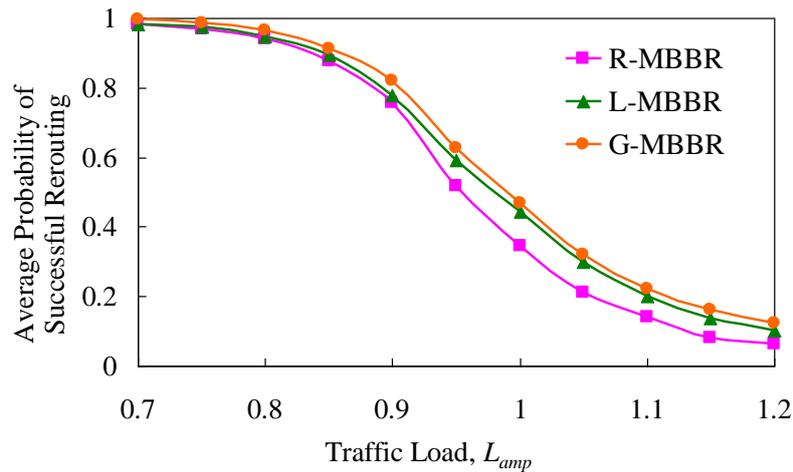


図 3-19 COST266 ネットワークにおけるリルーティング成功率の比較

(g) リルーティングの無瞬断化がブロッキング率に与える影響

2.4節で提案した無瞬断でのリルーティング手法と瞬断を許容するリルーティング手法を比較することによって無瞬断化がブロッキング率に与える影響を検証する。ここでポイントとなるのが代替パスの探索条件であり、2.4節で提案した手法では、代替パスが現用パスと容量の意味で独立となるように探索されている。この代替パス探索の制限は一見して厳しい制約である可能性が高いため、

ここでは代替パスの制約を緩和（瞬断を許容）した上でリルーティングを行う場合との比較を行う．ここで，制約を緩和した手法を，便宜上，MBBR(modified)と表記することとする．具体的には，2.4 節における L/G-MBBR では代替経路探索の際にトポロジから空きのないリンクを除いていたが，L/G-MBBR(modified)では空きのないリンクであっても現用経路上にあるリンクであり，かつ新規パス需要の経路上にないリンクであればトポロジから除去せず，代替パスと現用パスが容量を一部共用することを許容する．つまり「空きがなく，かつ現用経路上にないリンク」および「空きがなく，かつ新規パス需要の経路上にあるリンク」を除いたトポロジに Dijkstra アルゴリズムを適用することによって代替経路を得る．元の MBBR では独立した 2 パスに対し受信ノードで遅延補償を行うことで比較的容易に無瞬断化が実現可能であったが，MBBR(modified)ではエンドエンド間で独立した 2 パスとならない（リンク容量を一部共用する）場合もリルーティング対象に含めるため無瞬断化は困難と言える．

図 3-20 から図 3-22 に比較した結果を示す．図より L/G-MBBR と L/G-MBBR(modified) はほぼ同等のブロッキング率を達成することが確認された．したがって 2.4 節で提案した L/G-MBBR が無瞬断化を実現する一方で代替経路探索の制限によるペナルティは小さく，ブロッキング率の著しい悪化はみられないことが示された．

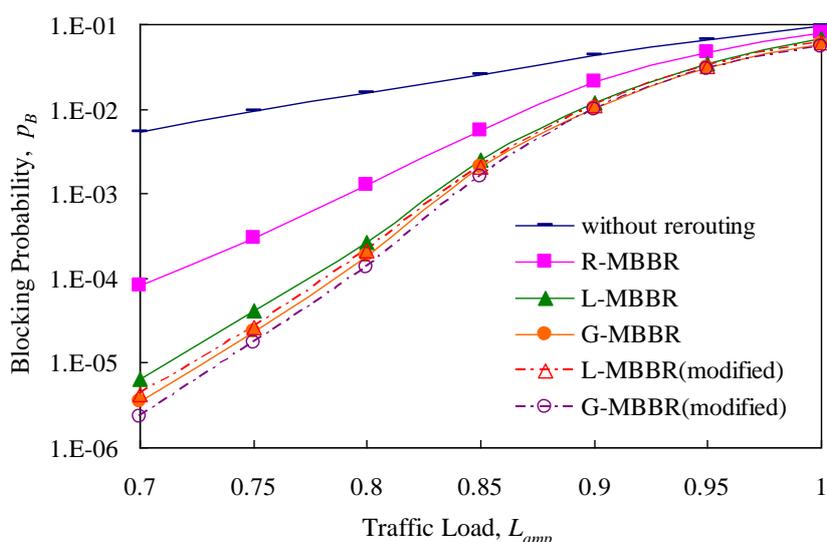


図 3-20 4×4 格子における Passive MBBR 手法間の比較

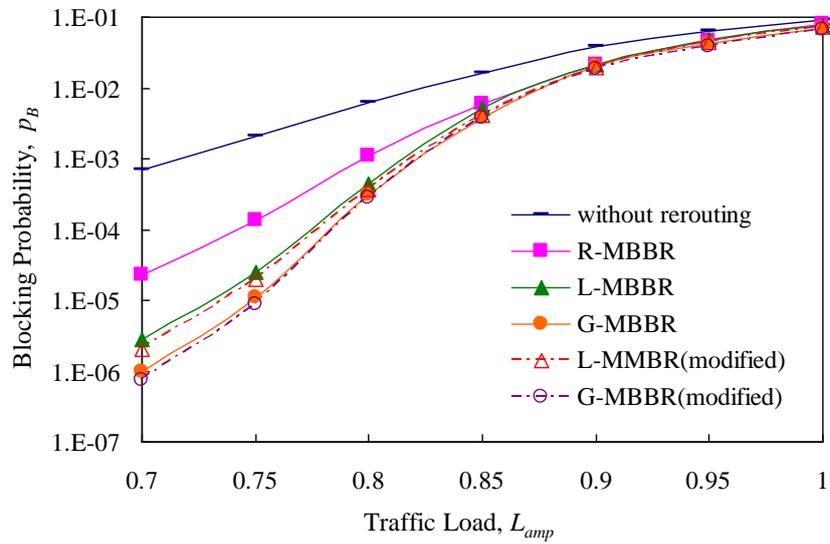


図 3-21 日本のネットワークにおける Passive MBBR 手法間の比較

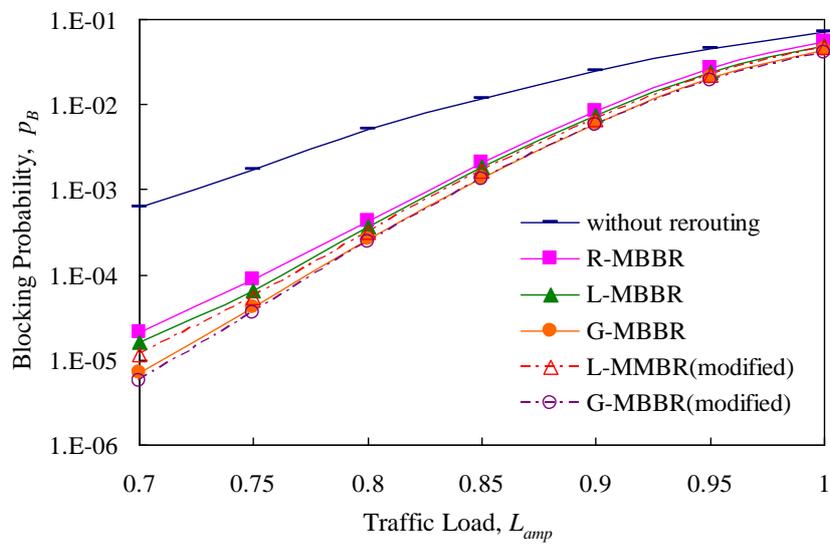


図 3-22 COST266 ネットワークにおける Passive MBBR 手法間の比較

3.3.3 バッチ処理実験の総括

本節では、動的に到着するトラヒックに対してバッチ処理でネットワークに収容する場合を前提として様々なパラメータを用いてシミュレーションを行い、提案した動的ネットワーク制御法の効果を検証した。各接続要求間の公平性およびブロッキング率という観点から提案アルゴリズムを評価した結果、2.4節で提案した重み付けが通信要求間の公平性の改善に極めて有効であることを示した。(2.5)式中のパラメータ w の値を適切に設定することによって様々な状況に対応できると考えられる。また、2.4節で提案した MBBR アルゴリズムは瞬断を防ぐことに加えてブロッキング率を大幅に低減することが可能であることを示した。リルーティングするパスの選択方法によってブロッキング率が変化することもわかり、大域的に探索を行う G-MBBR が長い計算時間を必要とするかわりに最も高いブロッキング低減効果を示した。このとき、パス選択のコスト関数によってブロッキング率は変化すると考えられる。さらに、重み付けと G-MBBR を組み合わせて用いることによって、瞬断の回避・高い公平性の確保・ブロッキング率の低減が同時に達成できることを確認した。また、リンク使用率やリルーティングの成功率といった観点からも提案手法の有効性を示し、2.4節で提案した手法との比較によって無瞬断化に伴うブロッキング率悪化が大きいものではないことも確認した。

3.4 オンデマンド処理シナリオにおける数値実験

前節では一定期間内に到着した通信需要を一括して処理していたが、本節では到着次第処理を行うオンデマンド割当のシミュレーションを行い、提案リルーティング手法の効果を評価する。なお、到着次第処理を行うため公平性の評価は行わず、ブロッキング率を重点的に評価する。

3.4.1 シミュレーションパラメータ

シミュレーションでは以下に示すネットワークモデルを仮定した。

- 物理トポロジ
 - 6×6 格子 (図 3-23), 日本のネットワークモデル, COST266 ヨーロッパネットワークモデル
- トラヒック需要
 - 一様ランダム分布
 - ノードペア間の平均トラヒック量は(3.1)式で与えられる
- パス/ファイバ
 - 離散的な固定容量のパスを扱う
 - 1 ファイバあたり 16 本のパスが収容される ($N=16$)
- 平均保留時間, ルーティング契機期間
 - 平均保留時間 $h \gg$ ルーティング契機期間 Δt
- (準)クリティカルリンク判定の閾値
 - B_c : パス 1 本分の容量 (ファイバの容量を F とおくと, $B_c = F/N$)
 - γ : パス 1 本分の容量
- リルーティング時の制約
 - ホップスラッグ (リルーティングによって元のパス長から増加するホップ数): 4 以下

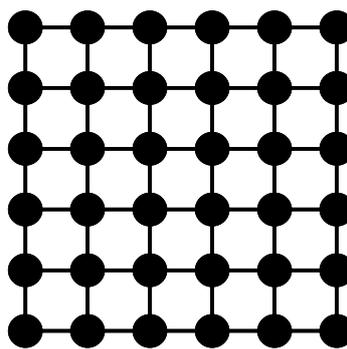


図 3-23 6×6 格子型ネットワーク

シミュレーションでは以下の 3 種のシナリオとリルーティングを行わない従来の動的ルーティングを比較する.

Scenario 1 : クリティカルリンクを検出した場合 2.4.2 項で提案した I-MBBR を実行する.

Scenario 2 : 新規パス確立が失敗した場合すぐにブロッキングとせずに 2.4.1 項で提案した passive rerouting を実行する (ここでは計算時間短縮のため L-MBBR を用いる).

Scenario 3 : Scenario 1 と Scenario 2 の統合. まず新規通信要求が到着次第パスを設立しブロッキングに対し L-MBBR を実行する. 次に全リンクをチェックしクリティカルリンクを検出した場合 I-MBBR を実行する.

3.4.2 実行結果

本項では, 得られた結果を示すとともに, 以下の観点から考察を行う.

- (a) 得られるブロッキング率
- (b) リルーティング回数
- (c) 複数サービス混在の影響

(a) リルーティングによるブロッキング率低減効果

動的にパスの確立・切断を行い, 得られたブロッキング率を図 3-24 から図 3-26 に示す. リルーティングによってブロッキング率が削減されていることが確認された. トラヒック量が多い領域では Scenario 1 と Scenario 2 の差が小さいことがわかる. Intentional Rerouting と Passive Rerouting を両方行う Scenario 3 は常に最もブロッキング率を低減しており, 目標とするブロッキング率が 0.01 のとき Scenario 3 は収容可能なトラヒック量をリルーティングなしの場合に比べ 15% 以上増加させており, 効果的にブロッキング率を改善していることが示された.

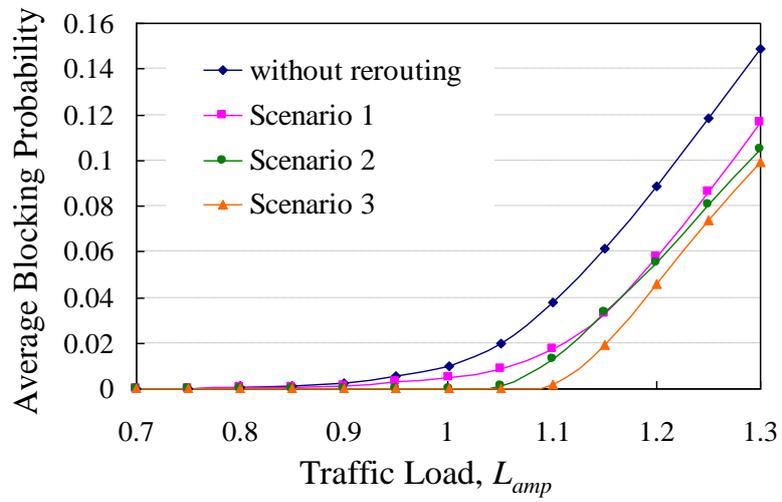


図 3-24 6×6 格子におけるブロッキング率 (オンデマンド)

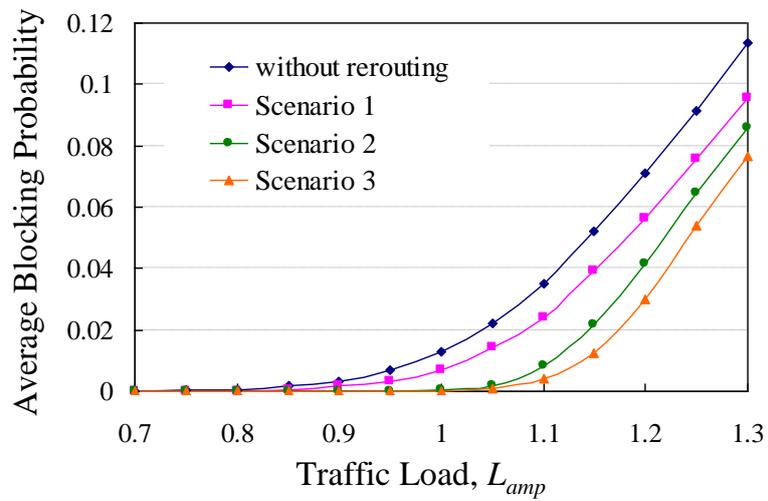


図 3-25 日本のネットワークにおけるブロッキング率 (オンデマンド)

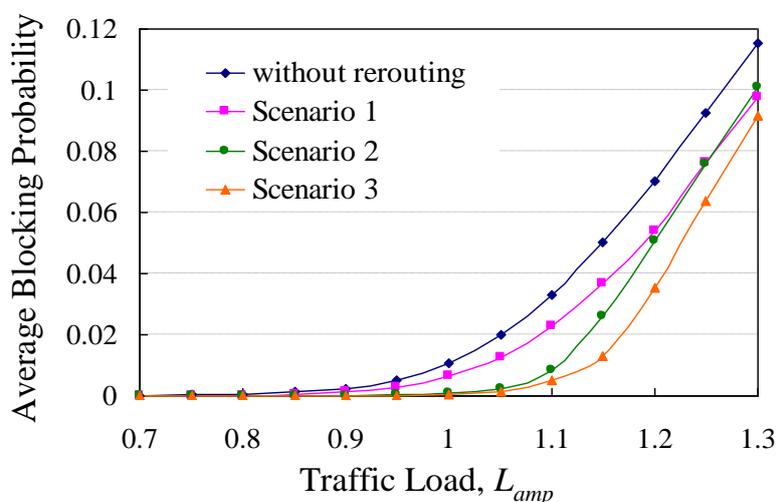
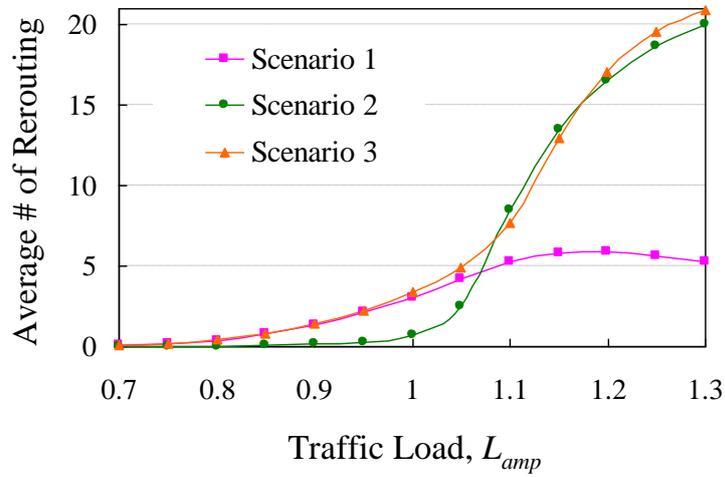


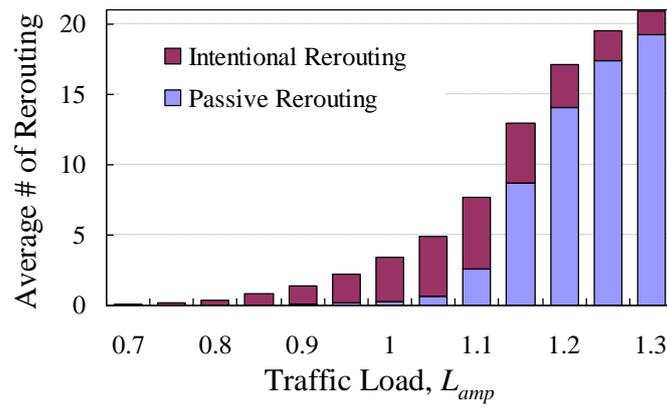
図 3-26 COST266 ネットワークにおけるブロッキング率 (オンデマンド)

(b) リルーティング回数

次に、単位時間あたりにリルーティングを行ったパスの本数をリルーティング回数と定義し、(a)と同様なパラメータ設定におけるリルーティング回数を評価した。結果を図 3-27 から図 3-29 に示す。Scenario 1 と Scenario 2 を比べてみると、トラフィック量が少ない領域において Scenario 2 が低ブロッキング率および少ないリルーティング回数を達成している。一方、トラフィック量が多くなると Scenario 2 のリルーティング回数は増加していくが Scenario 1 のリルーティング回数は少なく保たれている。特に L_{amp} が 1.3 の場合ブロッキング率はほぼ同等な値をとるが、リルーティング回数は 4×4 格子では約 4 倍、COST266 ネットワークでは約 2 倍となっている。つまり、低負荷時では Intentional Rerouting が支配的であり、高負荷時では Passive Rerouting が支配的となることが図 3-27~29 (b) の Scenario 3 の内訳からもわかる。

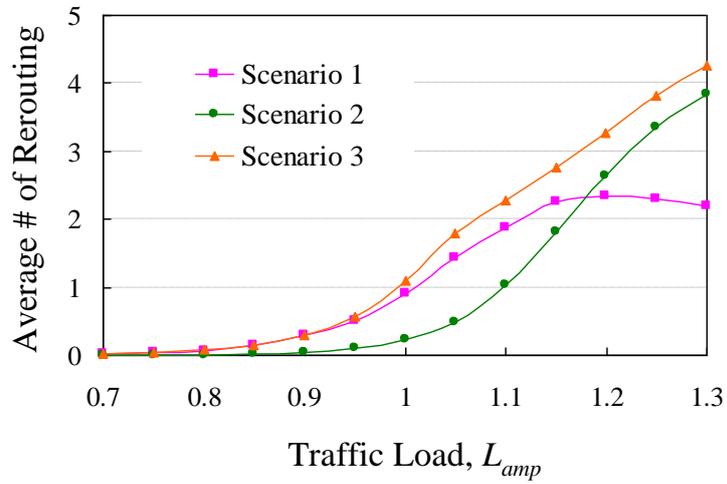


(a) 各シナリオのリルーティング回数

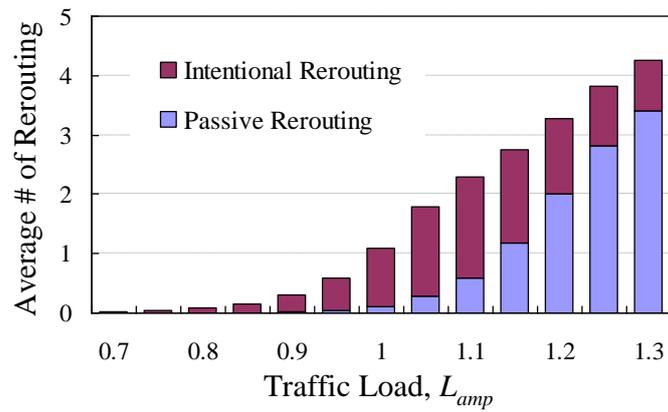


(b) Scenario 3 におけるリルーティングの内訳

図 3-27 6×6 格子におけるリルーティング回数

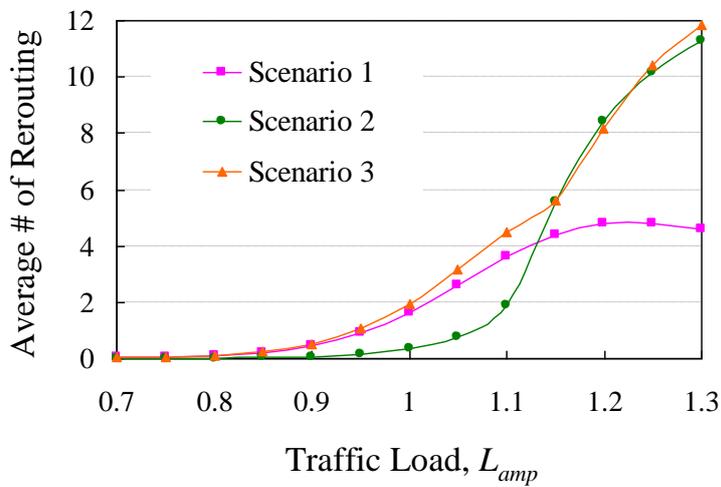


(a) 各シナリオのリルーティング回数

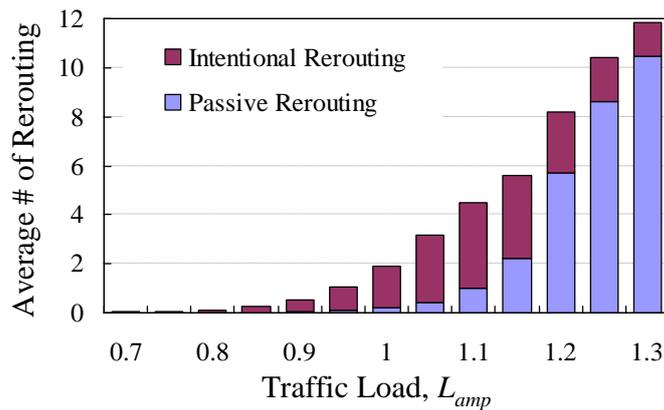


(b) Scenario 3 におけるリルーティングの内訳

図 3-28 日本のネットワークにおけるリルーティング回数



(a) 各シナリオのリルーティング回数



(b) Scenario 3 におけるリルーティングの内訳

図 3-29 COST266 ネットワークにおけるリルーティング回数

(c) 複数サービス混在時における提案手法の効果

これまでは単一のサービスのみ扱い、全てのパスはリルーティング可能であり、保留時間の平均値は一定としていた. ここでは複数のサービスを混在させた場合におけるリルーティングの効果を検証する. まず、リルーティングを許容しないサービスを想定し、リルーティング可能なパスとリルーティング不可能なパスの 2 種類のサービスを同比率で混在させた場合のブロッキング率を図 3-30

から図 3-32 に示す. これらの図を図 3-24 から図 3-26 と比較するとほとんど変化がないことがわかる. したがってリルーティング不可能なサービスを混在させてもブロッキング率に大きな影響はないことが確認された. しかしながらリルーティング不可能なサービスの比率が高くなるにつれ全体のブロッキング率は上昇していくと考えられる. 続いて, 平均保留時間の異なるサービスを混在させた場合を検証する. 一例として平均保留時間が 10 倍のサービスを同比率で混在させた場合におけるブロッキング率を図 3-33 から図 3-35 に示す. 平均保留時間が長いサービスを混在させるとブロッキング率が著しく上昇することがわかる. このとき Scenario 1 が Scenario 2 に比べ低いブロッキング率を達成している領域が広く, 保留時間が長いサービスが存在している場合では低ブロッキング率を達成するためには Intentional Rerouting が必要不可欠であることが示された. 図からはリルーティングによって著しくブロッキング率が改善していることが確認され, 目標とするブロッキング率が 0.01 のとき Scenario 3 はリルーティングを行わない場合と比較して収容可能なトラフィック量を 25%以上増加させていることがわかる. したがって提案した Intentional Rerouting 手法と Passive Rerouting 手法を組み合わせることによって様々な保留時間をもつサービスを効率的に収容できることが示された.

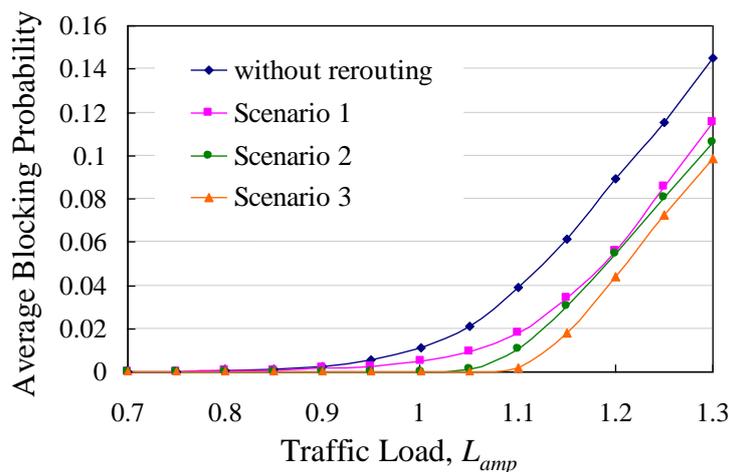


図 3-30 2 種のサービス (リルーティングの可/否) 混在時での 6×6 格子におけるブロッキング率

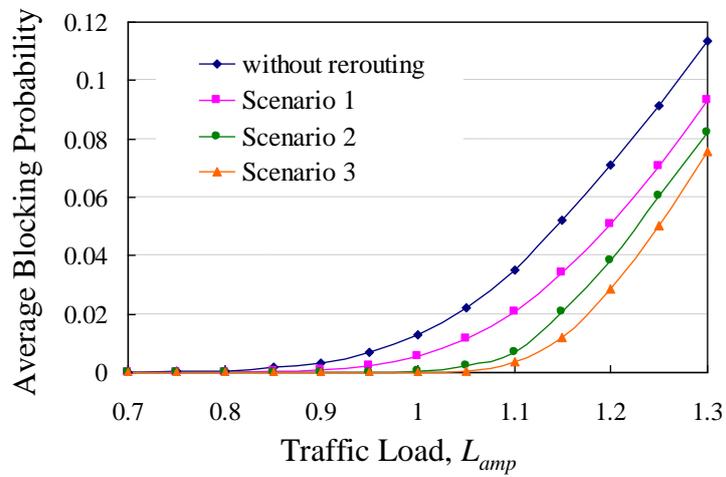


図 3-31 2種のサービス (リルーティングの可/否) 混在時での日本のネットワークにおけるブロッキング率

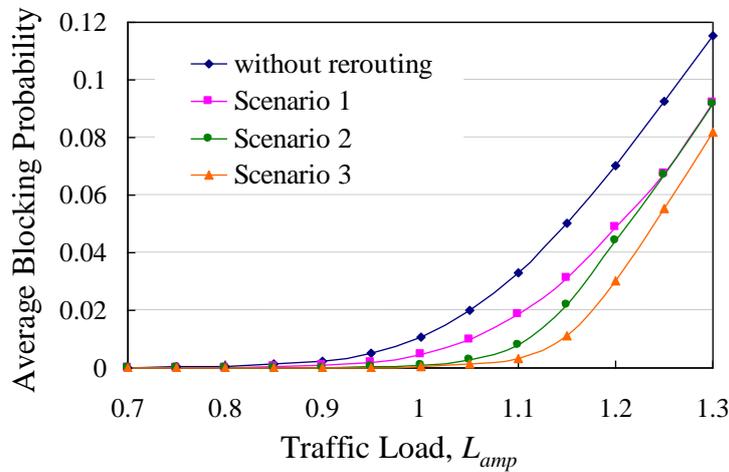


図 3-32 2種のサービス (リルーティングの可/否) 混在時での COST266 ネットワークにおけるブロッキング率

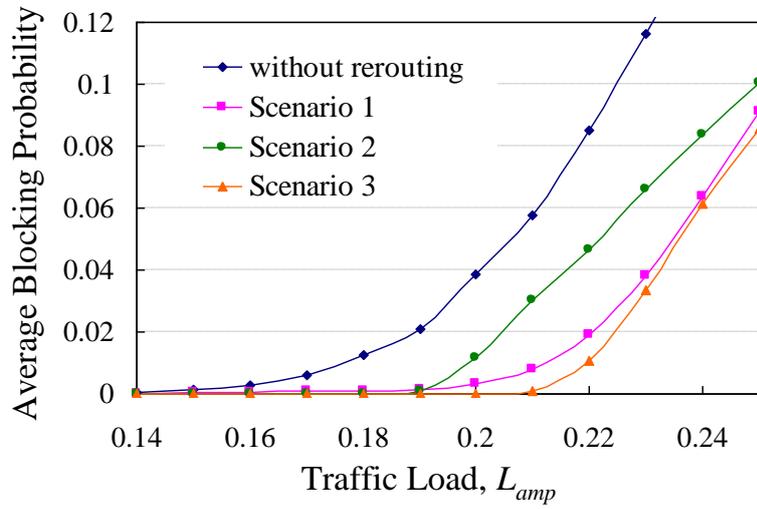


図 3-33 2 種のサービス (平均保留時間の長/短) 混在時での 6×6 格子における
ブロッキング率

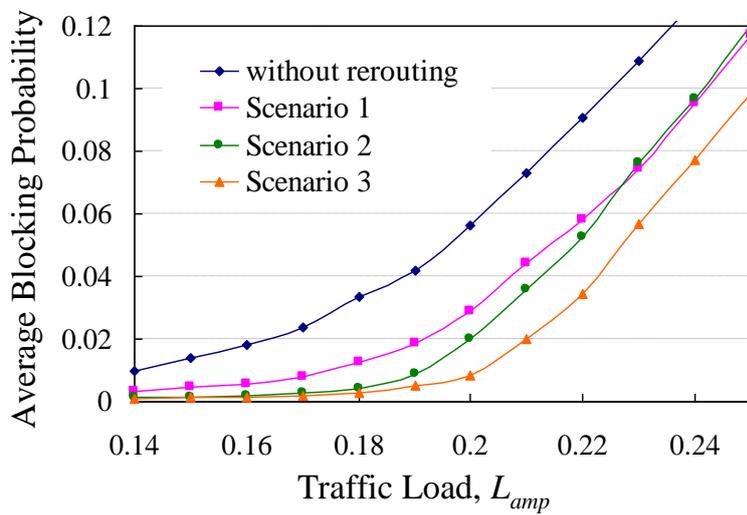


図 3-34 2 種のサービス (平均保留時間の長/短) 混在時での日本のネットワー
クにおけるブロッキング率

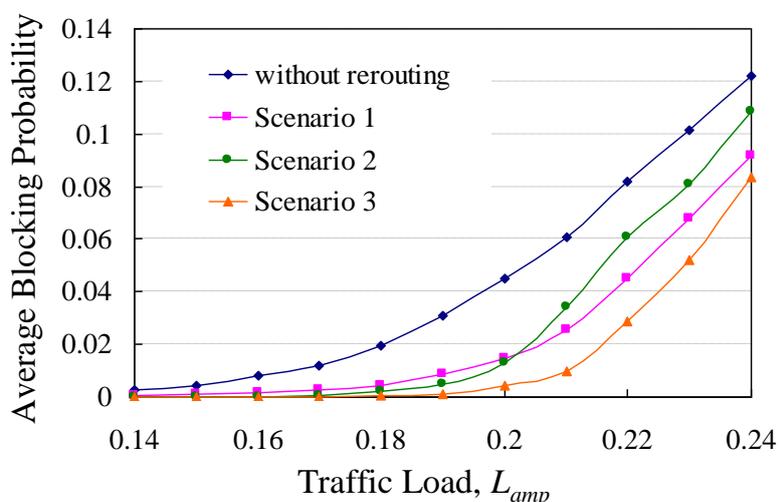


図 3-35 2種のサービス (平均保留時間の長/短) 混在時での COST266 ネットワークにおけるブロッキング率

3.4.3 オンデマンド処理実験の総括

本節では、動的に到着する通信要求に対してオンデマンド割当を行うシミュレーションを行い、2.4節で提案したリルーティング手法の効果を検証した。提案した **Passive Rerouting** 手法および **Intentional Rerouting** 手法はそれぞれ瞬断を回避しながらも高いブロッキング率低減効果があることがわかり、これらの手法を組み合わせることによって更なるブロッキング率低減が可能であることを示した。リルーティング回数の観点からもリルーティング手法の評価を行い、**Passive Rerouting**, **Intentional Rerouting** それぞれが支配的となるトラフィック領域について明らかにした。さらに、リルーティングの可否や平均保留時間といったサービス特性についての考察を行い、複数のサービスが混在する場合においても、提案した **Passive Rerouting** と **Intentional Rerouting** を組み合わせることによって大幅なブロッキング率低減および瞬断の回避を同時に達成できることを確認した。

3.5 まとめ

本章では、第 2 章で提案した動的制御方式・アルゴリズムの効能を定量評価した結果を示した。加えて、従来では明らかになっていなかった無瞬断化の影響を定量的に評価した他、様々な指標を用いて網羅的な評価を行った。

具体的には、3.2 節で数値実験全体の想定条件を述べ、3.3 節と 3.4 節ではバッチ処理による動的制御シナリオにおける評価結果とオンデマンド処理を前提とした動的制御シナリオにおける評価結果をそれぞれ示した。

これらから、提案方式・アルゴリズムの有効性を多角的に示すことができ、サービス品質担保と収容トラヒック量改善の両立を実現可能なことを明らかにした。これらの内容は、光ネットワークにおける論理パス運用の柔軟化、ひいては将来の革新サービス提供に貢献し得る結果であると言える。

3.6 第3章参考文献

- [1] K. Kanie, H. Hasegawa, and K. Sato, "Quasi-Dynamic Network Design Considering Different Service Holding Times," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 26, no. 3, pp. 47-53, April 2008.

- [2] [http://www.ure.cas.cz/dpt240/cost266/docs/COST266 Extended Final Report.pdf](http://www.ure.cas.cz/dpt240/cost266/docs/COST266%20Extended%20Final%20Report.pdf)

- [3] R. Jain, A. Durrezi, G. Babic; "Throughput Fairness Index: An Explanation," In *ATM Forum/99-0045*, February 1999.

第 4 章 波長単位でのバンド切替機能を有する高効率マルチバンドネットワーク

4.1 はじめに

本章では、コスト効率良く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的に利用できる大容量マルチバンドネットワークを創出する。単位ファイバで実現可能な容量を最大限拡大するアーキテクチャを確立し、トラヒック量の更なる増加に起因する光ネットワーク容量不足の未然回避を目指す。

4.2 マルチバンド伝送技術の進展と検討の位置づけ

近年、マルチバンド化によるスペクトル並列化が容量拡張の有望なアプローチとして注目を集めている。マルチバンド化は、既設光ファイバで主として使用されている C バンドに加えて、O, E, S, および L バンドといった未使用の波長帯（バンド）を利用するアプローチである [1-4]。このアプローチにより、既存のファイバ基盤上で従来と比べてより多くのスペクトル資源を利用できるようになるため、費用対効果の高いネットワーク容量拡張が可能になる。

このマルチバンド化というアプローチは、光ネットワークの容量拡張に向けて有用であるが、波長連続性制約に加えて信号対雑音比（SNR: Signal-to-Noise Ratio）の制約を十分に考慮する必要がある [3-8]。ここで、光パスは、通過するすべてのファイバリンクで同じ波長（言い換えれば、スペクトル資源）を占有する必要があり、受信時の SNR は、エラーフリー動作のために十分に高い値を達成することが求められる。なお、これらの制約のために拡張されたスペクトル資

源が十分に活用されない場合、実効的なネットワーク容量を大幅に拡張することはできない。したがって、2つの制約を同時に緩和できるソリューションを確立する必要がある。

波長連続性制約は、例え十分な予備リソースが使用可能であったとしても、波長が連続しないパスを設定できないため、効率的なスペクトル利用の制限要因となる。これは、当然のことながら、従来のシングルバンドネットワークと同様である。これまでに、この制約を緩和するために、全光波長変換器 (AO-WC: All-Optical Wavelength Converter) [9, 10] を活用する検討が多くなされてきた。これらの既存研究においてはシングルバンドネットワークのみに焦点が当てられていたので、同じバンド内の個々のチャンネルの波長シフトのみが考慮されていたわけである。このアプローチは、マルチバンドネットワークの各バンドにそのまま適用できる一方で、SNRの制約を緩和することはできない。

さらに言えば、マルチバンドネットワークでのスペクトル利用は、SNRの制約によって大幅に制限されてしまう。具体的には、マルチバンドネットワークでは、SNR性能はチャンネル間誘導ラマン散乱 (ISRS: Inter-channel Stimulated Raman Scattering) の影響を強く受ける。ISRSは、ファイバ伝搬中に短波長から長波長へのパワー遷移を引き起こす非線形光学効果である。パワーチルト自体は、各スパンまたはノードホップの終わりにパワー等化技術によって補償することも可能であるが、SNR劣化の累積量のばらつきは避けられない。このような複数のバンドに跨るSNRのばらつきは、ネットワークの規模や、ファイバの減衰や増幅器の雑音指数などの物理層パラメータのばらつきによっても影響を受ける。さらに、性能の悪いバンドではSNRが不十分なため、長距離の光パス設定が不可能となる可能性がある。つまり、性能の悪いバンドにおいて波長連続性制約を満たすスペクトル資源が利用可能であっても、長距離パスが設定できないという事象が生じる。このマルチバンド固有の問題に対応するために、最近、複数のバンドにわたるSNR性能の均一化を目的としたファイバ入力パワー最適化手法が検討されている [11]。ただし、この手法では、性能の良いバンドにおけるSNR値の低下を招いてしまう。実際に、文献 [11] では、性能が最も高いバンドのSNR値が著しく劣化していることが観測されている。この劣化に見られる

ように、性能の良いバンドが軒並み SNR 劣化を被ってしまうと、全てのバンドで長距離パスが設定不可能となる事態に陥る可能性がある。加えて、このような SNR 均一化手法では、波長連続性の制約を緩和できないことに注意する必要がある。また、光-電気-光 (OEO: Optical-Electrical-Optical) 再生中継器は両方の制約を緩和できる一方で、コストが高く、消費電力が大きいソリューションとなってしまう。

このような問題に対処するために、AO-WC の進化としてバンド間の AO-WC [12] に着目する。特に、WDM 信号を一括して「C バンドから L バンドへ/L バンドから C バンドへ」および「C バンドから S バンドへ/S バンドから C バンドへ」変換する実証が成功していることは非常に重要な技術進展である。つまり、異なるバンドへの波長シフトが可能になれば、前述した 2 つの制約を緩和できる可能性が高い。一方、筆者の知る限りでは、波長連続性制約と ISRS による SNR 制約の両方に同時に対処するために AO-WC を利用する検討は存在していなかった。

以上の技術的背景に基づき、本章では、複数のバンドに跨るスペクトル資源を効率的に利用するため、波長選択バンドスイッチング対応ネットワーク (BSN: wavelength-selective Band Switching-enabled Network) を提案する。BSN の構想における重要なアイデアは、個々の波長チャネルをパス経路上の任意のノードで任意のバンドと任意の方路に切り替えることができるようにすることである。AO-WC を適切に適用することで、このような新しい機能が提供され、波長連続性制約と ISRS による SNR 制約の同時緩和を実現することが期待できる。

以降、BSN のコンセプトを説明するために、波長選択バンドスイッチング機能によってもたらされる光切替の自由度とその効能について述べる。更に、BSN における波長選択バンドスイッチング機能を具現化するノード構成について詳しく説明する。加えて、マルチバンドネットワークのスペクトル資源利用効率の観点から BSN の有効性を定量的に分析し、貴重なファイバ資源を大幅に節約できることを明らかにする。

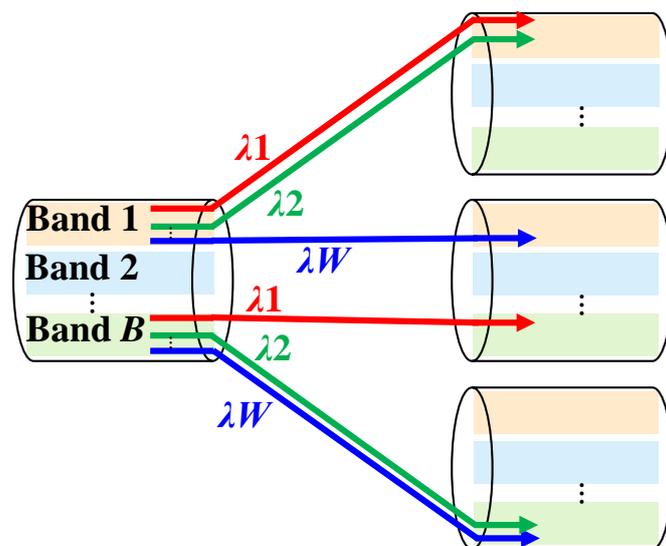
4.3 ネットワークコンセプト

本節では、提案ネットワークアーキテクチャである BSN のキーとなる概念を説明するために、ネットワーク上に具備される（網内で提供される）光レイヤでの切替機能について、従来と比べた差異を説明する。加えて、その差異がもたらす有効性に関して、マルチバンド光ネットワークにおけるスペクトル資源利用の観点から説明する。

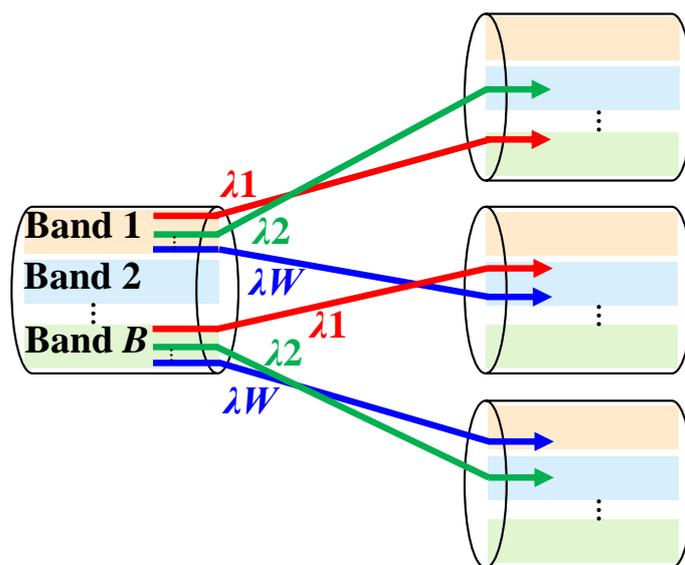
4.3.1 光切替機能

本項では、BSN を特徴づける光切替機能について、図 4-1 を用いて詳細に説明する。図 4-1 には、1つの入力方路（ファイバ）と3つの出力方路を接続する場合を例として、(a)には従来マルチバンドネットワークがサポートする光切替機能を、(b)には BSN がサポートする光切替機能を図示している。なお、簡単のために、各ファイバはそれぞれ、 W 波長チャンネルを収容可能な B バンドを伝送できるものとする（ W, B はそれぞれ自然数）。また、現実には、S, E, O バンドの帯域（スペクトル資源）は、それぞれ C バンドの約 2 倍、約 4 倍、約 2 倍であるが、各バンドをいくつかの部分に分割する“サブバンド”を導入することもできるため、ここではバンド間の帯域差については考慮しないこととする。

まず、従来のマルチバンド光ネットワークにおいては、図 4-1 (a) に示すように、個々の波長チャンネルを任意の方路に自由に切り替える（振り分ける）ことができる一方で、異なるバンド（波長帯）に切り替えることはできないという制約がある。それに対して、BSN においては、図 4-1 (b) に示すように各波長チャンネルを独立して任意の方路・バンドに切り替えることが可能となり、光レイヤでの切替自由度が高くなる。ここで、図中において、個々の波長は独立して異なるバンドの同じインデックス（波長番号等、バンド内の相対位置を意味する）を持つ波長に変換されている。この新たな機能を「波長選択バンドスイッチング」と呼ぶこととする。また、複数のバンドは、光ファイバ中における独立した“スペクトルレーン”とみなすことができ、各レーンに収容される個々の波長チャンネルは、波長選択バンドスイッチング機能によって、異なるレーンに自由に乗り換えることができるようになる。



(a) 従来のマルチバンド光ネットワーク



(b) 提案ネットワークアーキテクチャ BSN

図 4-1 切替自由度の例

ここまで BSN における波長選択バンドスイッチングについて述べてきたが、その動作／特性は、用いる光デバイス（特に、AO-WC）のアナログ仕様に強く依存する。そのため、適用する波長変換方式によっては、変換前後で波長インデックスの関係が変化する場合も考えられる。例えば、高非線形ファイバ（HNLF: Highly NonLinear Fiber）における縮退四光波混合（DFWM: Degenerated Four-Wave

Mixing) を活用した単一変換構成の場合 (例えば, [12]), 一般に, インデックスはポンプ光の波長に関して対称なインデックスに変更されることとなる. $W=80$ とした時に, 変換前のバンドでインデックス#1 であったものが変換後のバンドでインデックス#80 に, また, インデックス#2 は#79 に, といったインデックス変更が考えられる. これに対し, DFWM を活用した二段変換構成 (例えば, [14]) においては, 同じインデックスのまま異なるバンドに変換することが可能である. この場合, 変換前のバンドでインデックス#1 だったものが変換後のバンドでもインデックス#1 のまま, というバンドスイッチング動作となり, 光パスの設計・制御においてスペクトル資源探索の複雑化を回避することが可能となる. 本研究においては, 第 5 章の実証実験 (DFWM 単一変換構成の AO-WC を利用) を除き, 二段変換構成を想定するものとする.

4.3.2 期待される効能

本項では, 4.3.1 項で説明した波長選択バンドスイッチングによってもたらされる有効性について, マルチバンド光ネットワークにおける波長資源利用の柔軟性の観点から説明する. BSN においては, 波長選択バンドスイッチング機能によって, 光パスを設定する際に, 経路上の任意のノードにおいて任意のバンドに切り替えながら伝送させる設定が可能となる. これによって, 主に「波長連続性制約の緩和」と ISRS によって顕在化する「受信 SNR 制約の緩和」という 2 つの効能がもたらされることとなる.

まず, 前者の波長連続性制約の緩和について, 図 4-2 を用いて説明する. なお, 図 4-2 は, 波長連続性制約が緩和されることで得られる効能を強調した例である. 図では, 各リンクが S, C, L バンドをサポートし, 各バンドは 3 つの波長チャネルを収容可能な状況を想定している. ここで, 図の左側の初期状態においてノード#0 とノード#3 の間に光パス要求が新たに到着したと仮定すると, 初期状態のままでは波長連続性制約により, 要求された 3 ホップのパスは設定することが不可能である. 一方, ノード#1 とノード#2 において波長単位にバンドを切り替えることによって, 図の右側のように残存するリソースを活用して, 要求された光パス需要を収容することが可能となる.

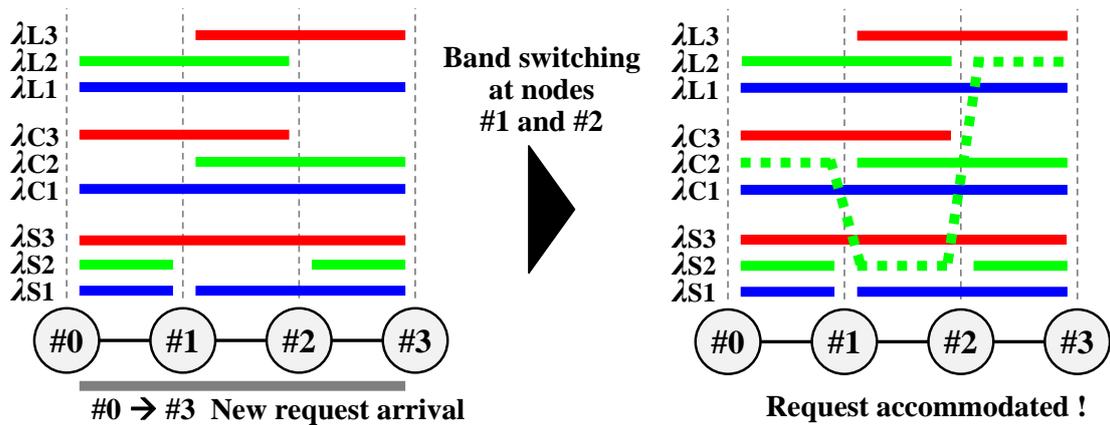


図 4-2 波長連続性制約緩和の例

次に、後者の受信 SNR 制約の緩和について、図 4-3 ならびに図 4-4 を用いて説明していくが、まず ISRS が伝送性能に与える影響を定量的に示す。ここでは、S, C, L バンドに跨る 15 THz の帯域において 50 GHz 間隔の 300 波長チャンネルを設定したマルチバンド伝送系を想定して説明を進める。なお、1 スパンあたり 100 km の SMF を 10 スパン伝送させた場合を想定するものとする。また、各波長チャンネルはガウス変調されており、光ファイバの減衰係数、分散、分散スロープ、非線形係数、ラマンゲインスロープは、それぞれ 0.22 dB/km, 17 ps/nm/km, 0.067 ps/nm²/km, 1.2 1/W/km, 0.05 1/W/km/THz であるものとする。各スパンの伝送後、スパン損失と ISRS に起因するパワーのチルトは全て光増幅器によって補償されるものとする。適用する光増幅器については、S バンドは、雑音指数 (NF) が 7 dB のトリウム添加ファイバ増幅器 (TDFA) とし、C バンドと L バンドは、NF がそれぞれ 5 dB と 6 dB のエルビウム添加ファイバ増幅器 (EDFA) であるものとする。このような条件下において、ISRS Gaussian Noise (GN) モデル [6] に基づく閉形式 (closed form) を使用し、まずは ISRS 発生を考慮する場合と非考慮の場合それぞれの単一スパン伝送後の一般化 SNR (GSNR) を計算した。さらに、10 スパン伝送後の GSNR について、各スパンで生成される非線形干渉 (NLI: NonLinear Interference) と誘導自然放出 (ASE: Amplified Spontaneous Emission) 雑音を合算することによって、10 スパン伝送後の GSNR を計算した。図 4-3 は、チャンネルあたりのファイバ入力パワーを、ISRS を考慮する場合と考慮しない場合で、それぞれ 0 dBm と 2 dBm とした場合における、周波数と算出した GSNR

値の関係性を示している. 図において, 実線は ISRS を考慮する場合, 点線は ISRS を考慮しない場合を表している. 図をみると, ISRS は GSNR のバンド依存性を誘発していることが明確であり, 特に S バンドにおける GSNR が大幅に劣化していることがわかり, 例えば最高周波数の波長チャンネルに着目した時, 約 6 dB もの差異が確認できる. また, バンド間の GSNR 偏差に着目すると, ISRS を考慮しない場合においてはバンド間での GSNR 差異は比較的小さく, 3 バンドの中で GSNR が最良となる C バンドの中の最悪値と GSNR が最悪となる S バンドの中の最悪値の差分は 1.5 dB 程度に収まっている. これに対し, ISRS を考慮する場合においては, GSNR と周波数の関係図上で大きな傾きがついており, L バンド中の最悪値と S バンド中の最悪値は約 6.5 dB も乖離してしまうことを示している.

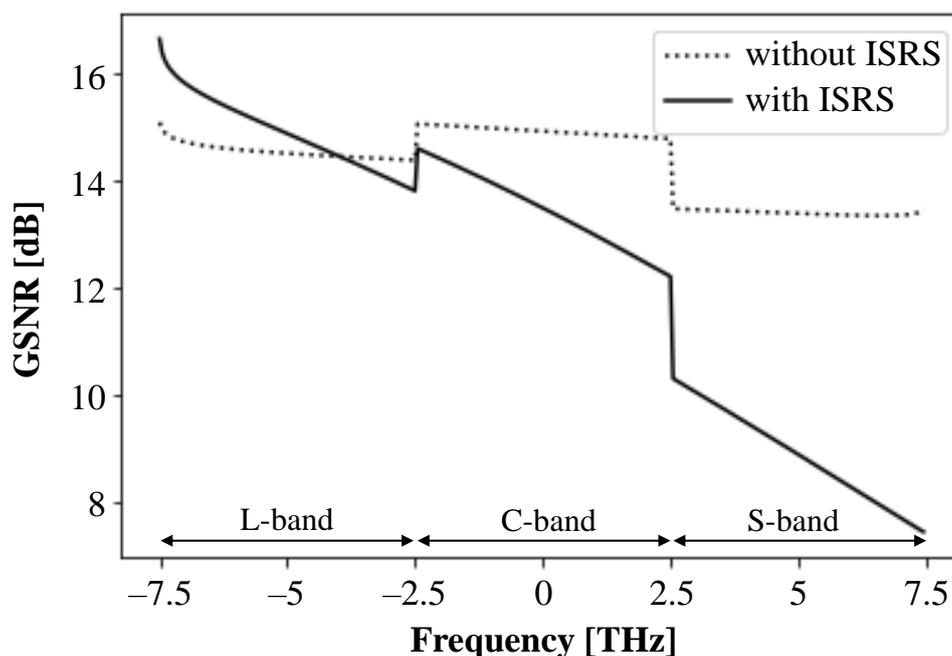


図 4-3 10 スパン伝送後の GSNR 値

続いて, 前述の GSNR のバンド依存性をもたらす影響を, 図 4-4 を用いて光パスのプロビジョニングの観点から説明する. 図 4-4 は, 図 4-2 と同様に, 各リンクが S, C, L バンドをサポートし, 各バンドは 3 つの波長チャンネルを収容可

能な状況を想定している。ここで、図の左側の初期状態において、ノード#0 とノード#3 の間に光パス要求が新たに到着したと仮定する。加えて、ISRS の影響で S バンドでは不十分な伝送性能によって 3 ホップのパスが設定不可能であるものと仮定した場合、波長連続性制約を緩和したとしても、要求された 3 ホップのパス需要を収容することはできず、棄却されてしまうこととなる。しかしながら、ノード#1 とノード#2 において波長単位にバンドを切り替えることによって、図の右側のように、S バンドよりも GSNR が高い C バンドや L バンドの残存リソースを活用して、要求された光パス需要を収容することが可能となる。

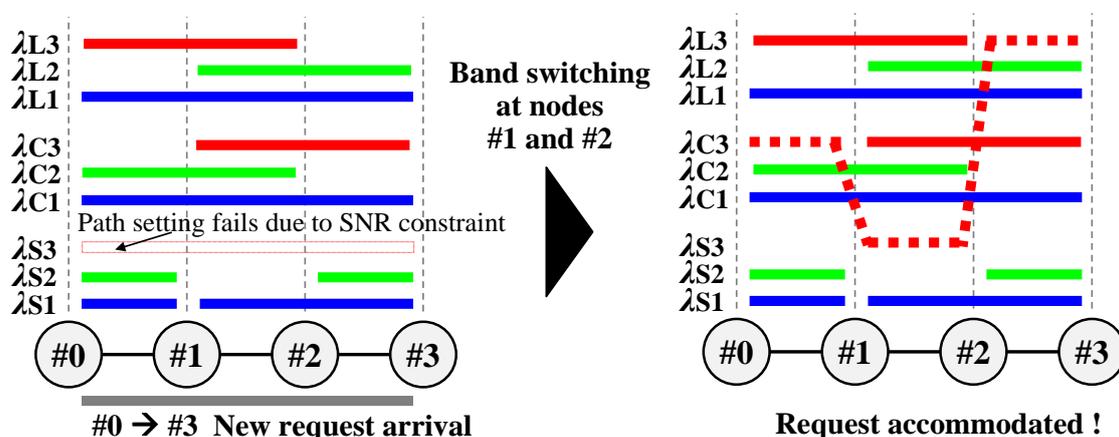


図 4-4 SNR 制約の緩和の例

ここまでの例で示してきたように、BSN の特徴的な機能である波長選択バンドスイッチングは、マルチバンド光ネットワークにおける波長連続性制約ならびに受信 SNR 制約の両方を同時に緩和することが可能となり、ネットワーク性能（具体的には、ネットワーク容量等）の大幅な向上が期待できる。

4.4 マルチバンド光ノード構成

前節では、BSN の特徴的な機能である波長選択バンドスイッチングとその効能に関して述べた。本節においては、波長選択バンドスイッチングを実現する光ノード構成について説明する。

波長選択バンドスイッチングを実現するために、光ノードには、複数のバンドに跨る波長チャンネルを柔軟にハンドリングし、各チャンネルの伝送バンドを自由に選択する能力が求められる。以降では、波長選択バンドスイッチング機能を具現化する光ノード構成として、マトリクススイッチベースの構成ならびに波長選択スイッチ（WSS: Wavelength-Selective Switch）ベースの構成という 2 例を紹介する。

4.4.1 マトリクススイッチベース構成

まず、マトリクススイッチベースの構成を、図 4-5 を用いて説明する。図中では、 M は方路数、 B はバンド数、 W は波長数を表すものとする。マトリクススイッチベースの光ノードは、方路毎に配備されたバンドマルチプレクサ/デマルチプレクサ（合波器 mux/分波器 demux）、バンド間 AO-WC、各バンドの波長マルチプレクサ/デマルチプレクサ（ λ mux/demux）、 $MB \times MB$ 光マトリクススイッチによって構成される。なお、 $MB \times MB$ 光マトリクススイッチは波長毎に配備されている。この構成においては、ある入力方路に注目すると、複数のバンドにわたる波長チャンネルがバンド分波器でバンド毎に分離され、次に各バンドの全ての波長チャンネルが、入側のバンド間 AO-WC で参照バンドに同時に変換される（例えば参照バンドを C バンドとすると、O バンド、E バンド、S バンド、L バンドから C バンドへ、という波長変換処理となる）。続いて、全て参照バンドとなった波長チャンネル群を波長デマルチプレクサで分波し、各波長チャンネルを波長毎に配備したマトリクススイッチで独立に方路選択し、宛先の方路・バンドにつながるポートに接続する。以降、これまで述べた内容と逆の手順で、各波長チャンネルが波長マルチプレクサで多重され、出側の AO-WC で参照バンドから各バンドに変換され、バンドマルチプレクサで多重され、光ノードから出力されることとなる。このように、図 4-5 に示す構成に入力された個々の波長チャンネルを任意のバンド・任意の方路に自由に切り替えることができ、波長選択バンドスイッチング機能が提供されることとなる。さらに、入側と出側にバンド間 AO-WC を配置していることにより、図中の破線間の光クロスコネクタ（OXC: Optical cross Connect）機能（ここでは示されていない光増幅器を含む場合もあり得る）を、C バンド等の参照バンドに対応するコンポーネントのみで実装するこ

とができることとなる。

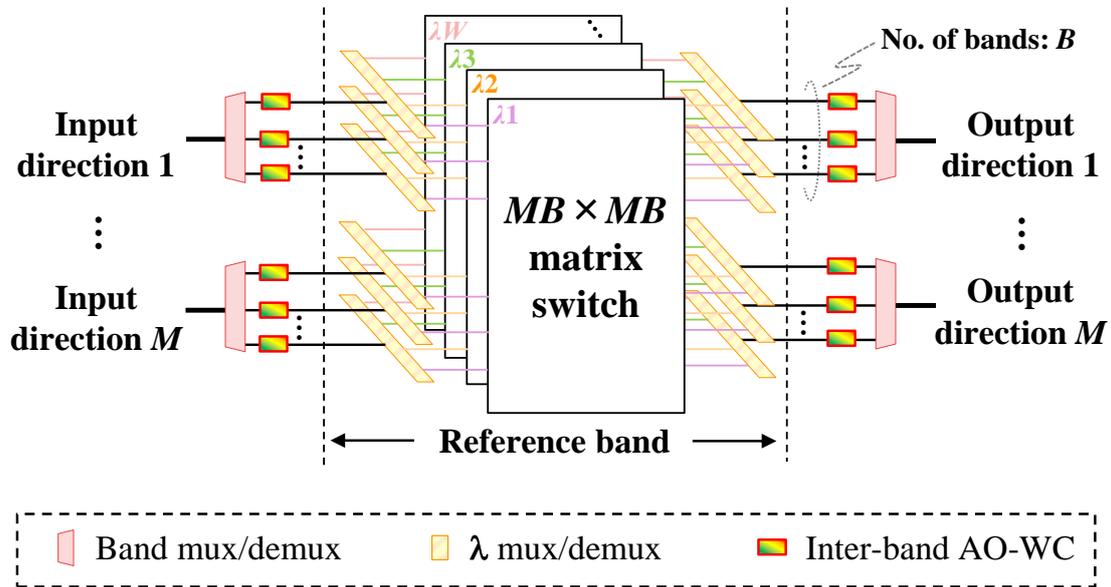


図 4-5 マトリクススイッチベースの OXC 構成

マトリクススイッチベース構成では、OXC 機能を実現する上で $2MB$ 台の波長マルチプレクサ/デマルチプレクサと W 台の $MB \times MB$ マトリクススイッチが必要となる。マトリクススイッチのコストやスペースがかさむことが懸念される場合もあるが、多ポート光スイッチを活用することで回避可能である。具体的には、多ポート光スイッチは論理的に複数のマトリクススイッチとして使用でき、例えば、1 台の 300×300 マトリクススイッチは、機能を論理分割することで 3 台の 100×100 マトリクススイッチとして動作させることができるため、コストやスペース効率の改善が可能となる。すなわち、より多くのポート数を備えたマトリクススイッチを使用（例えば、 $MBW \times MBW$ スイッチ 1 台）すると、この構成をより簡易に実装できる。このような多ポート光スイッチの実現構成とその特性については、例えば文献 [15], [16] にまとめられている。さらに、固定グリッドで運用する場合を想定すると、パッシブ光デバイスである AWG を波長マルチプレクサ/デマルチプレクサとして使用することができる。しかしながら、今日の光ネットワークでは一般に固定グリッドからフレキシブルグリッ

ドへと運用形態が変化しており、フレキシブルグリッド運用の場合にはその恩恵を享受することができない。加えて、フレキシブルグリッドに対応するためには、波長マルチプレクサ/デマルチプレクサに帯域可変性が求められ、例えば WSS を使用すると OXC 内部の損失が過剰に大きくなってしまう。このことから、マトリクススイッチベース構成はその簡易さから固定グリッド運用には適しているが、フレキシブルグリッド運用には適していないと言える。

4.4.2 波長選択スイッチベース構成

本項では、既に一般的になっているフレキシブルグリッド運用に対しても実用的なアプローチとして、波長選択スイッチ (WSS) ベースの光ノード構成について説明する。この構成は、図 4-6 に示すように、4.4.1 項で述べたマトリクススイッチベースの構成における波長マルチプレクサ/デマルチプレクサならびにマトリクススイッチが複数の WSS に置き換えられたものとみなすことができる。ここでは、入側が $1 \times MB$ の WSS、出側が $MB \times 1$ の WSS から成る R & S (Route and Select) 型の $MB \times MB$ クロスコネクタを想定している。マトリクススイッチベース構成と同様に、入側と出側両方にバンド間 AO-WC を配備しているため、2つの破線の間部分である OXC 機能部を参照バンドに対応する光コンポーネントのみで実装することができる。その結果、入側の WSS と出側の WSS の間を光ファイバで相互接続することによって、OEO 変換 (つまり、電気処理) を介さずに波長選択バンドスイッチング機能を提供できることとなる。電力消費が避けられない OEO 再生中継器を減らすことは、マルチバンド光ネットワークの電力利用効率の大幅な向上に直結する。例えば、 $W=80$ と仮定した時、図 4-6 において、AO-WC の代わりに 80 台の OEO 再生中継器が配備されている場合を想定し、文献 [17] のモデルならびに 100 Gbps というチャンネル容量を仮定すると、再生中継器での総消費電力は 20,000 W に達することになる。これに対し、AO-WC では 1 台で 80 チャンネルを同時に処理することができ、文献 [18] で説明されているように内部損失を補償するための光増幅器を適用した場合においても、消費電力は最大でも高々数 100 W である。このように、AO-WC を活用することで、波長選択バンドスイッチング機能を提供する上でキーとなる波

長変換に要する消費電力を2桁も抑制可能である。

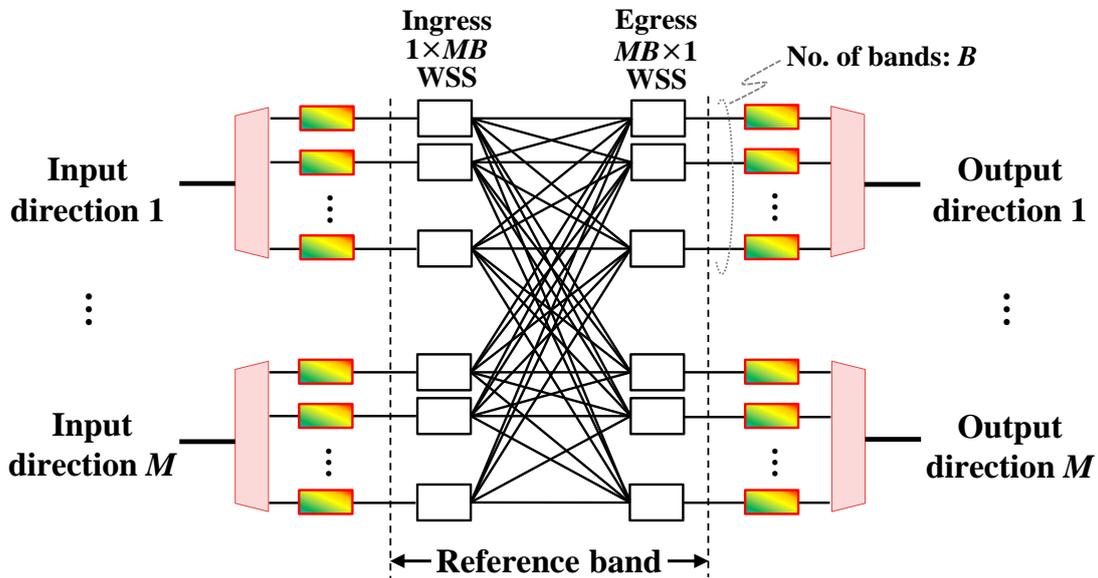


図 4-6 波長選択スイッチベースの OXC 構成

また、WSS ベース構成は、各バンドの OXC 機能を並列に配備する従来のマルチバンド OXC ノード [8] と比較して、様々な利点がある。具体的には、従来の OXC ノードでは C バンド以外に対応した光コンポーネントが必要不可欠であり、そのような光コンポーネントは、一般に技術確立済の C バンドコンポーネントよりも高価である。一方、図 4-6 に示したノード構成は、現在商用の光ノードで一般的に使用されている C バンド WSS のみを使用して OXC 機能部を構成していることが特徴である。なお、AO-WC を活用することで光送受信機（トランスポンダ）を C バンドに統一するというコンセプトは文献 [12] に記載されているが、本節のノード構成を用いることで OXC 機能部までも C バンドに統一することが可能となる。バンド毎の光デバイスがネットワークコストに与える影響については、文献 [19] におけるネットワークの経済性分析で述べられている。加えて、主要な OXC 機能を C バンドコンポーネントのみで実現可能という特徴は、関連光デバイスの市場断片化の回避や、市場性向上という効果をもたらすとも言える。

さらに言えば、WSS ベース構成においては、複数の C バンド WSS を単一光学系に集積実装する技術（例えば、[20–22]）を適用することができ、OXC 機能部をコンパクトに実装することが可能となる。また、ノード内ブロッキングを許容すれば、大規模 OXC を実現する上で費用対効果の高いアプローチ（例えば、[23, 24]）を適用することもでき、更なるハードウェア規模の削減も期待できる。

4.5 数値解析による有効性評価

本節では、BSN の有効性を定量的に明確化するために、汎用的な条件下での数値解析を行い、従来のマルチバンド光ネットワークと BSN のネットワーク性能を比較する。なお、従来のマルチバンド光ネットワークとは各パスにエンドツーエンドで同一のバンドを割り当てる場合を指し [8]、あるパスに着目した時、経路上の全てのリンクにおいて、同一の波長（スペクトル）資源が割り当てられるものとする。この場合、ネットワークの規模が大きくなるにつれてバンド間の SNR 偏差が大きくなり、性能が悪い（つまり、達成される着信 SNR が低い）バンドの波長を長距離パスに割り当てることができなくなる。これに対し、BSN では、経路上の通過リンク群で異なるバンドを組合せて割り当てることのできるため、性能が悪いバンドの利用に関する制限が緩和されることになる。ただし、波長選択バンドスイッチングを実現する上で AO-WC において伝送品質が劣化し得るという一面もある。したがって、ネットワークの規模や AO-WC における品質劣化の累積がネットワーク全体の性能に大きな影響を与えることとなる。本節においては、これらの要因を考慮した上で伝送ペナルティを推定してネットワーク性能評価に用いる。

以降では、まず解析に用いる想定モデルと評価指標について述べる。次に、分析手順を示す。続いて、波長選択バンドスイッチングによってもたらされる BSN の効能のポテンシャルを探っていく。加えて、BSN の実現可能性を評価するために、バンドスイッチング操作の物理層性能がネットワーク性能に与える影響についても検討する。

4.5.1 想定条件

本項では、数値解析を行うにあたり、想定条件をまとめる。まず、解析を行う物理ネットワークトポロジは、図 4-7 に示す 3×3 正方格子ネットワークを想定するものとし、各リンクでは S, C, L バンドが運用されるものとする。ここで、各リンクの長さは D に等しいものとし、スパン長は 100 km であるものとする。文献 [25] では、実際の光伝送ネットワーク 40 種の平均リンク長がおよそ 400 km であることが報告されていることから、本評価においては、 D を 400 km 程度、具体的には 300, 400, または 500 km と設定するものとする。また、現実的な条件で評価を行うべく、4.3.2 項で用いた光ファイバリンクの物理パラメータを使用することとする。さらに、簡単のため、各リンクでは、それぞれのバンドで同じ量のスペクトル資源（例えば、4.5 THz）を使用できるものとする。

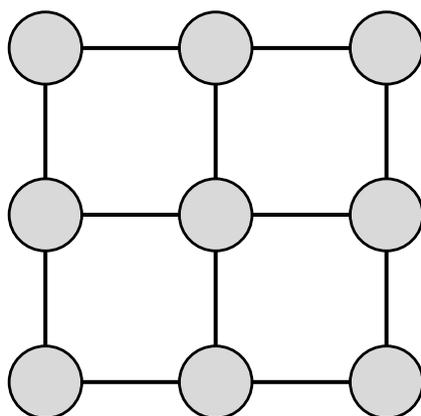


図 4-7 3×3 格子ネットワーク

本節におけるネットワーク性能の比較では、特定のトラフィック需要を収容するために必要な光ファイバリソースの量を性能指標として用いることとする。この指標は、スペクトル利用効率を議論する際にしばしば使用されているものである。本研究においては、可能な限り議論を単純にしつつ大局的に BSN の有効性を評価するために、所要ファイバリソースの下限値を見積もることとする。具体的な評価手順については事項で詳細を述べるが、以降では、所要ファイバリソースの算出方法の概要を説明する。本節では、あるパス設定需要群を想定し、

まずパス設定需要ごとに、各バンドの通過リンク数を表すベクトルである“バンド割当候補”の集合を抽出することとする。ここで、例えば候補 (i, j, k) は、S, C, L バンドでそれぞれ i, j, k リンクだけ通過することを表している。次に、各需要の伝送マージンを最小化する割当候補を選択する。なお、文献 [26] で説明されているように、伝送マージン最小化はスペクトル資源の効率的な使用という観点で妥当な戦略である。続いて、割当候補の選択状況を考慮して個々の需要のスペクトル使用量を合計し、バンド毎の合計スペクトル使用量を計算する。S, C, L バンドにおいて、個々の需要のスペクトル使用量は、必要なスペクトルと選択された i, j, k の値の積によってそれぞれ表される。その後、各バンドのスペクトル使用量を考慮して、バンド割当候補を変更して所要ファイバリソースを減らすような繰返し最適化処理を通じて、全ての需要を収容するために必要なファイバリソース量の最小化を図る。ここでは、経路・波長／スペクトル割当 (RWA/RSA: Routing and Wavelength Assignment/Routing and Spectrum Assignment) については省略するものとする。これは、RWA/RSA アルゴリズムに依存しない大局的・汎用的な評価を行うためである。つまり、RWA/RSA アルゴリズムの良し悪しによって所要ファイバリソース量が左右されることを避け、バンド利用の柔軟化によって得られる効能を議論の主対象とする。具体的には、ネットワークをスペクトル資源のプールとみなし、どのバンドのスペクトルがどの程度使用されるか、という観点で評価を行う。なお、所要ファイバリソースの下限 F_{bound} は、スペクトル使用量とファイバあたりの利用可能なスペクトル量から、次のように表される。

$$F_{bound} = \max\left(\frac{U_S}{A_S}, \frac{U_C}{A_C}, \frac{U_L}{A_L}\right) \quad (4.1)$$

ここで、 U_S , U_C , および U_L は、それぞれ S, C, および L バンドの総スペクトル使用量を示し、 A_S , A_C , および A_L は、1ファイバ上で利用可能な各バンドのスペクトル量を表すものとする。この時、バンド間でスペクトル使用量の不均衡が生じると、上記の下限値の増加につながる可能性がある。 F_{bound} は最も使用されているバンドのスペクトル使用量に依存するため、特定のバンドが集中して使用された場合、他のバンドの使用量が少なかったとしても下限値は上昇

してしまうのである。一方で、伝送性能のバンド依存性がある場合においても、バンド間でバランスのとれたスペクトル使用が達成されれば、貴重な光ファイバリソースを節約できることになる。なお、本節では、各需要は 100 Gbps の容量を要求するものとし、光パス設定の際は、50 GHz 間隔で 32 Gbaud の偏波多重直交位相シフトキーイング (DP-QPSK: Dual-Polarization Quadrature Phase-Shift Keying) を用いるものとする。

4.5.2 解析手順

本項では、実際に解析を行う手順を述べていく。前述の通り、本節における数値解析は、特定のトラフィック需要を収容する際の所要ファイバリソースの下限值 F_{bound} を評価指標として用いることとし、達成できる F_{bound} の最小値を BSN と従来のマルチバンド光ネットワークで比較する。 F_{bound} の最小値導出においては、シンプレックス法を活用する。ここで、シンプレックス法とは、線形計画問題を解くためのよく知られた手法の 1 つである。具体的には、最初に各需要のバンド割当候補を 1 つ選択して実行可能な初期解を得た後に、収束するまで解の改善操作 (F_{bound} を減らすようなバンド割当候補への変更) を繰り返し実行する。以降で、順を追って詳細を説明する。

- ステップ 1 あらかじめ与えられた需要の分布に従って、十分な数の需要を発生させる。
- ステップ 2 各需要に対して、伝送マージンを最小にするバンド割当候補を選択する。この手順により、初期解が求まることとなる。
- ステップ 3 4.5.1 項で述べた方法で、各バンドのスペクトル使用量 (U_S , U_C , および U_L) を計算する。また、そのときの F_{bound} も 4.5.1 項に記載した式(4.1)に従って算出する。
- ステップ 4 多数の需要群の中で単一の需要のみバンド割当を変更した“隣接解”を全て探索する。また、実行可能な隣接解毎に、その時点で得られている解を隣接解に置き換えることによる改善量 (F_{bound} の減少量) を計算する。
- ステップ 5 その時点での解を改善できる隣接解がない場合、終了する。

それ以外の場合は、ステップ 6 に進む。

ステップ 6 ステップ 4 の計算結果をもとに、 F_{bound} の改善量が最大となる隣接解を選択し、その時点での解を選択した隣接解に置き換える。

ステップ 7 ステップ 3 と同様に、各バンドのスペクトル使用量 (U_S, U_C, U_L) および F_{bound} の値を更新する。その後、ステップ 4 に進む。

このような手順によって、BSN と従来のマルチバンド光ネットワークそれぞれで達成可能な F_{bound} の最小値を導出し、それらを比較する。

ここで、需要の与え方について補足する。各需要のホップ数（つまり、パス長）は、(i) 一様、(ii) NSFNET-like、(iii) ERNET-like という 3 つの確率分布に従ってステップ 1 で決定されるものとする。3 つの分布を図 4-8 に示す。本節における解析では、ホップ数の分布がトラヒック特性を特徴づける重要なパラメータである。この時、(i) 一様とは、各需要の送信元／宛先のペアが一様分布に従って決定されるケースを想定しており、 3×3 正方格子ネットワークトポロジにおいては平均ホップ数が 2 となる。他の 2 つの分布は、NSFNET と ERNET と呼ばれる実在するネットワークトポロジ（文献 [27] に記載されている）における実際のパス長分布をモデル化した分布である。この時、実際の光ネットワークの最短パス長分布は、ジョンソン S_B 分布を用いて正確にモデル化できることが文献 [27] で報告されており、該当の文献中で記載されているパラメータ群を適用することで実世界に即した現実的なパス長分布を再現できることを利用している。本節では 3×3 正方格子ネットワークトポロジを用いるため、ジョンソン S_B 分布を活用して得たパス長分布を離散化して図 4-8 の分布を導出している。(ii) NSFNET-like、(iii) ERNET-like 分布の平均ホップ数は、それぞれ 2.5 と 2.6 である。

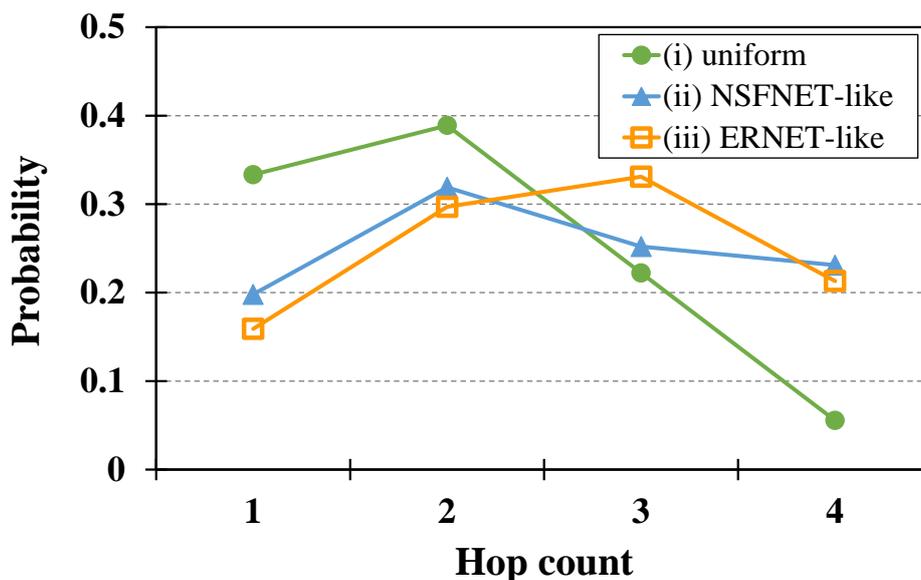


図 4-8 ホップ数の分布

また、ステップ 2 と 4 では、4.3.2 項で述べたように、伝送性能とそのマージンを GSNR で表すものとする。具体的には、文献 [6] に記載されている通り、各バンドの単一スパン GSNR 情報を使用して、達成可能な着信 GSNR を算出する。4.3.2 項で図 4-3 の評価をした際と同様に、チャンネルあたりのファイバ入力パワーを 0 dBm に設定し、100 km のシングルスパン伝送後における各バンドの最悪 GSNR 値を表 1 にまとめる。ここで、前述のファイバ入力パワー設定は、性能の良いバンド（今回のケースでは、C バンドや L バンド）の GSNR 劣化抑制を意図しており、長距離パスであっても十分な品質で設定できることを担保する。ここで、GSNR マージンとは、達成可能な着信 GSNR とエラーフリー伝送に必要な最小 GSNR との差である。文献 [4] に従い、許容される FEC 演算前のビット誤り率（BER: Bit Error Rate）の閾値を 4×10^{-3} と設定し、DP-QPSK で変調した光信号のエラーフリー伝送に必要な最小の着信 GSNR を 8.5 dB とし解析を行う。ここで、マージンが 0 以上の時に限りエラーフリー伝送が可能であることを意味しており、マージンが負となるようなバンド割当候補を用いる解は、実行不可能となる。

表 4-1 100km シングルスパン伝送後の GSNR 値

Scenario	S-band	C-band	L-band
C-band only	–	24.38 dB	–
S+C+L-band	17.45 dB	22.26 dB	23.9 dB

ステップ 2 においては、上記の方法で各需要に対して取り得るバンド割当候補全て（例えば、3 ホップであれば、 (i, j, k) は $(3, 0, 0), (0, 3, 0), (0, 0, 3), (2, 1, 0), (2, 0, 1), (1, 2, 0), (1, 1, 1), (1, 0, 2), (0, 2, 1), (0, 1, 2)$ の 10 通り）における GSNR マージンを計算し、マージンが 0 以上でかつ最小となる割当候補を選択する。つまり、ステップ 2 においては、他の需要の割当状態は考慮せずに演算を進める。

また、ステップ 4 における隣接解とは、前述の通り、需要群の中で単一の需要のみのバンド割当を別の候補に変更する操作を行った解である。例えばバンド割当が決まっている 3 つの需要 (I, II, III) が存在し、III が 3 ホップである場合、III の割当を前述の 10 通りから現在の割当を除いた候補に変えることで得られる解 (9 通り) は全て “III の割当のみを変更した隣接解” となる。同様に、“I の割当のみを変更した隣接解”、“II の割当のみを変更した隣接解” についても全て列挙した後に、それぞれが実行可能解（マージンが非負）か否かを判別し、実行可能である場合には、その時点で得られている解から置き換えることによる F_{bound} の減少量を、式(4.1)を考慮して計算する。その後ステップ 6 において F_{bound} の減少量が最大となる隣接解を選択し、解を改善させる。このように、1 需要ずつの割当変更を繰り返す、徐々に最適解に近づいていくこととなる。

4.5.3 結果と考察

本項では、4.5.2 で述べた手順によって実際に所要ファイバリソースの下限値を導出し、ネットワーク性能の観点で BSN の有効性を評価した結果を説明する。加えて、種々のパラメータに関する感度等の考察を行う。

まず、需要を 10,000 与えた際において算出された F_{bound} の最小値を図 4-9 に示す。ここでは、 A_S, A_C , および A_L はそれぞれ 4.5 THz であると仮定した。10,000

という需要の数は少々極端な例ではあるが、図 4-9 で示された結果は、リンク長やトラフィックパターンが変化した際における F_{bound} のふるまいの理解を容易にする例であると言える。得られた結果は、リンク長というパラメータが従来のマルチバンド光ネットワークの所要ファイバリソースに著しい影響を及ぼしていることを示している。特に、リンク長が長くなると（具体的には、300 km と 400 km の場合を比べると）、全てのトラフィックパターンにおいて従来のマルチバンド光ネットワークでは F_{bound} が増加している。これは、伝送性能の最も低い（距離が同一の際に達成可能な着信 GSNR が最も低い）S バンドが長距離パスの設定に使用できず、バンド間でのスペクトル使用量に不均衡が生じることに起因している。これに対し、BSN では、リンク長が増加しても F_{bound} の顕著な増加は観測されていない。以上から、小規模なネットワークを除いて、複数のバンドに跨るスペクトルの効率的な利用には、BSN が必要であることが示唆されたと言える。

さらに、BSN によって実現できる F_{bound} の最小値と従来のマルチバンド光ネットワークにおける F_{bound} の最小値の比率を計算した結果を図 4-10 に示す。ここで、図 4-9 と図 4-10 においては、BSN の潜在能力を評価するために、バンドスイッチング動作における伝送ペナルティは考慮していない結果を示している。図 4-10 の結果は、特に D が 400 km（平均規模）または 500 km（大規模）の場合に、BSN が所要ファイバリソースを大幅に抑制できることを示している。具体的には、今回想定した全てのトラフィックパターンで、従来のマルチバンド光ネットワークよりも 20%以上ファイバリソースを削減できることが明らかとなった。これは主に、BSN が複数のバンドに跨るスペクトルを柔軟に使用でき、大規模ネットワークにおいても S, C, L バンドのスペクトル使用量の均等化が可能になるためである。

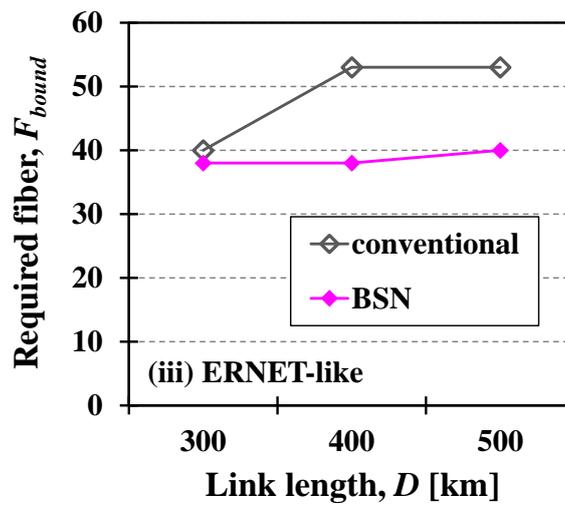
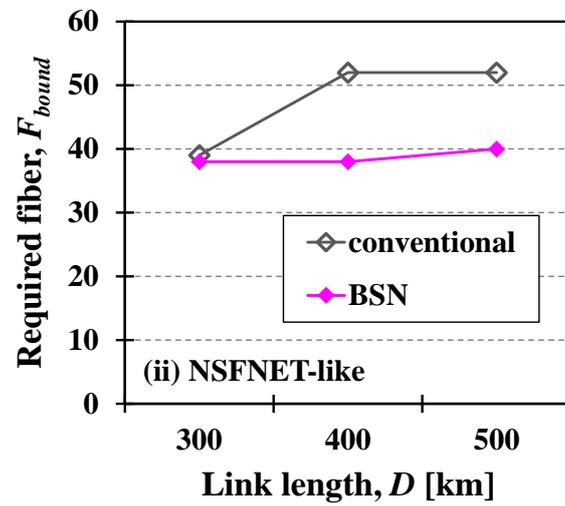
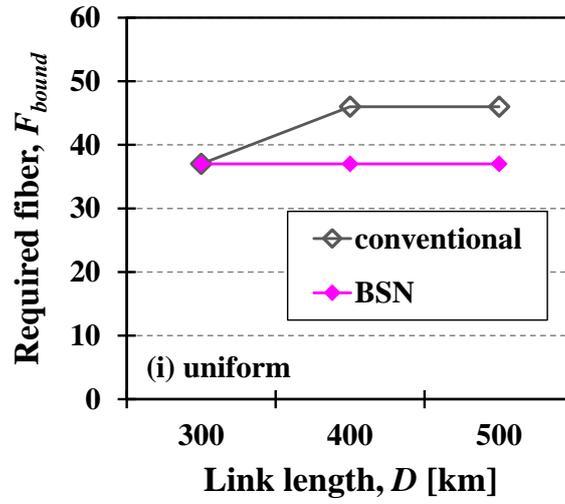


図 4-9 算出された所要ファイバリソース量

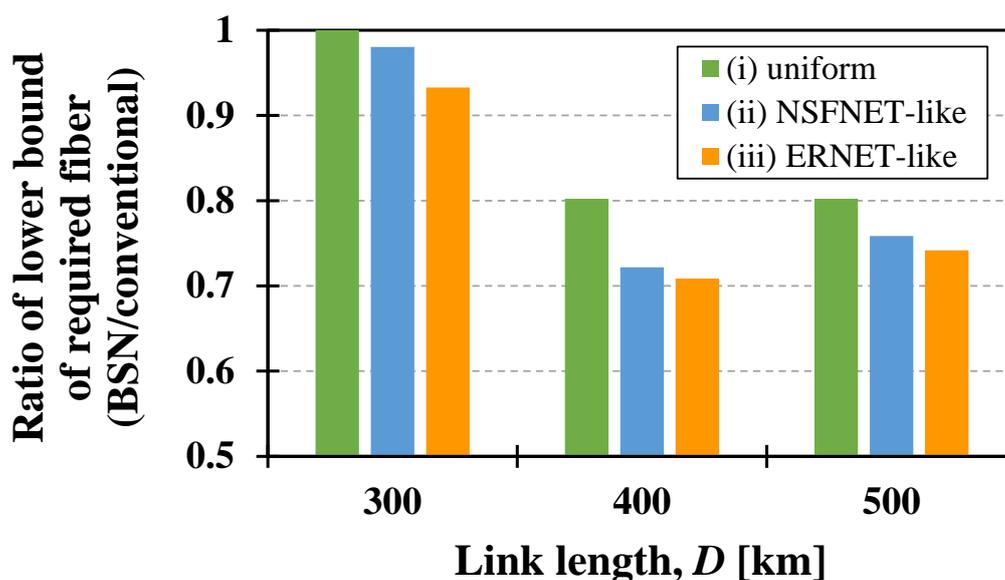


図 4-10 所要ファイバリソースの比率

ここで、トラフィックパターンの影響に着目すると、平均ホップ数 (平均パス長) が大きいほど BSN による F_{bound} の改善量が大きくなることがわかる。これは、平均パス長が増加すると、従来のマルチバンド光ネットワークでは S バンドがより少なく使用されるとともに、L バンドがより多く使用されるようになり、バンド間のスペクトル使用量偏差が更に大きくなることに起因している。さらに、NSFNET-like と ERNET-like パターンに注目すると、大規模網 ($D = 500$ km) で計算された F_{bound} の比率は、平均規模網 ($D = 400$ km) よりもわずかに大きいことがわかる。これは、平均パス長が一定のレベルを超えると、BSN においても S バンドに比べて C, L バンドの使用量が徐々に増加してしまうためである。この結果は、本節における数値解析が公正かつ合理的であることを表していると言える。

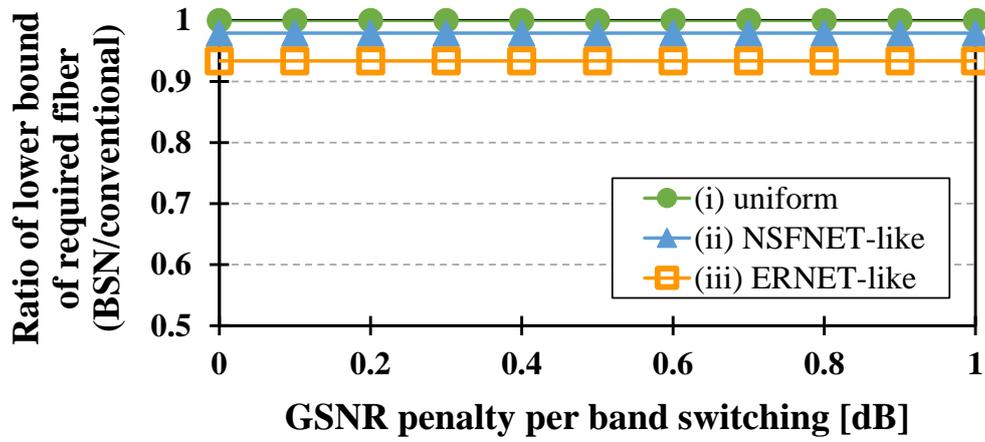
備考：全てのバンドにわたって着信時に達成可能な GSNR を均一にするためにファイバ入力パワーを最適化する手法 (例えば [11]) も検討されているが、今回の条件下では、平均規模網と大規模網において最長パスがマージン不足のため設定不可能となってしまう。これは、[11] の手法では C, L バンドの GSNR 劣化と引き替えに S バンドの GSNR 改善を達成することに起因しており、今回の想定条件においては、全バンドの最悪ケースにおける単一スパン GSNR 値をシ

シングルバンド（Cバンドのみ）の場合より 3.6 dB 以上低い値にしてしまうからである。すなわち、入力パワーを最適化して全バンドの GSNR を均一化するアプローチは、小規模ネットワークにおけるマルチバンド環境下の RWA/RSA を単純化できる一方で、大規模ネットワークには適していないと言える。

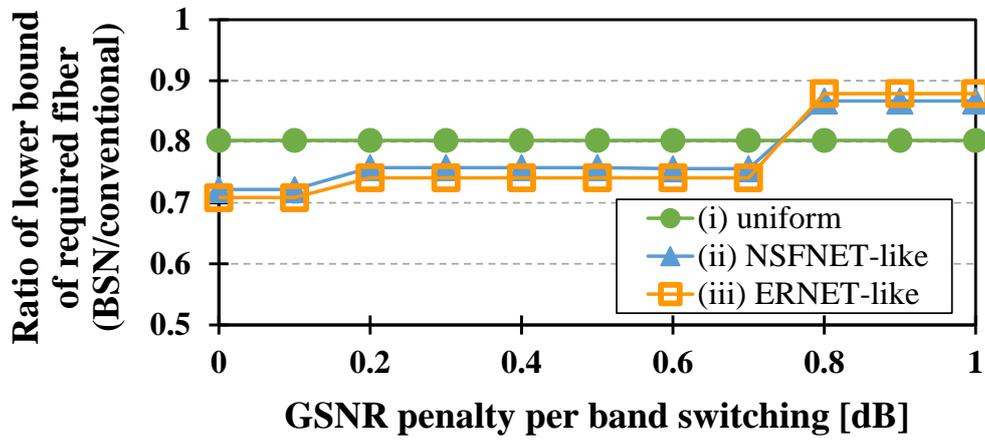
続いて、BSN の実現可能性を明らかにするために、波長選択バンドスイッチングによって誘発される GSNR ペナルティを考慮してネットワーク性能を評価する。実際に、波長選択バンドスイッチングを実現する上でキーデバイスとなる AO-WC による伝送ペナルティとそのネットワーク性能への影響は、現実的な懸念事項である。一般に、AO-WC の物理層の性能は、波長変換の原理や実装方法等、様々な要因に依存する。本項における分析では、“バンドスイッチングあたりの GSNR ペナルティ”を、達成可能な着信 GSNR 推定を行う際のパラメータとして導入することとする。具体的には、ファイバ伝送に伴う GSNR のみを考慮して推定した GSNR の値から、バンドスイッチングあたりの GSNR ペナルティとバンドスイッチング回数の積を減じることによって、バンドを切り替えながら伝送した場合に達成可能な着信 GSNR を推定することとした。このようにしてバンドスイッチングの GSNR ペナルティを考慮して導出したファイバリソース下限値の比率を図 4-11 に示す。これらの結果は、バンドスイッチングによって誘発される GSNR ペナルティを考慮した場合においても、BSN によって大幅なネットワーク性能の改善が可能なことを示している。例えば、バンドスイッチングあたりの GSNR ペナルティが 0.7 dB 以下の場合、BSN は、平均規模網では 20%以上、大規模網では 12%以上、ファイバリソースを節約できることを表している。ここで、0.7 dB というバンドスイッチングあたりの GSNR ペナルティは実現可能な値である可能性が高い。なお、今回は簡単化のため「バンドスイッチングあたりの GSNR ペナルティとバンドスイッチング回数の積」を総ペナルティとして評価したが、バンドスイッチングあたりの GSNR ペナルティを文献 [4] におけるノード GSNR の一要素として表現することも可能であるため、更なる解析は今後の課題である。一方で、今回の評価はバンドスイッチングに起因するペナルティの観点では最悪条件での評価ととらえることができ、そのような条件においても十分な性能改善が可能な見込が得られたことは特筆に値すると言

える。

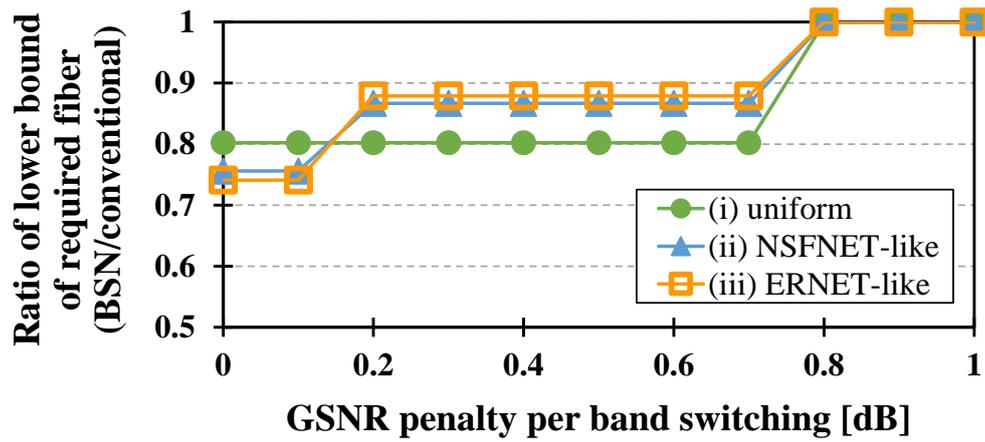
本節における解析結果をまとめると、様々なネットワーク規模とトラフィックパターン、言い換えれば、幅広い条件下で BSN が有益であることが明らかとなったと言える。



(a) $D = 300$ km



(b) $D = 400$ km



(c) $D = 500$ km

図 4-11 バンド切替操作による GSNR ペナルティの影響

4.6 まとめ

本章では、効率的なネットワーク容量拡張を実現するために、波長選択バンドスイッチング対応ネットワーク (BSN) を提案した。BSN では、波長連続性制約と ISRS による SNR の制約の両方を緩和できるため、マルチバンド化を通じて拡張されたスペクトル資源を効率的に利用できる。BSN 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アーキテクチャである。

4.2 節においては、マルチバンド化の技術トレンドをまとめるとともに、BSN 発案の背景について述べた。4.3 節では、BSN における光スイッチング自由度や期待される効能を説明した。また、4.4 節では波長選択バンドスイッチングという切替機能を具現化する 2 つの光ノード構成例を示した。加えて、4.5 節の数値解析により、BSN が従来のマルチバンド光ネットワークと比較して貴重なファイバ資源を大幅に節約できる可能性があることが明らかにした。

続く第 5 章では、プロトタイプノードを用いて BSN の実現可能性を実験的に実証する。

4.7 第 4 章参考文献

- [1] J. Renaudier, A.C. Meseguer, A. Ghazisaeidi, P. Tran, R.R. Muller, R. Brenot, A. Verdier, F. Blache, K. Mekhazni, B. Duval, H. Debregeas, M. Achouche, A. Boutin, F. Morin, L. Letteron, N. Fontaine, Y. Frignac, and G. Charlet, “First 100-nm continuous-band WDM transmission system with 115 Tb/s transport over 100km using novel ultra-wideband semiconductor optical amplifiers,” Proc. ECOC, paper Th.PDP.A.3, Sept. 2017.
- [2] A. Napoli, N. Calabretta, J.K. Fischer, N. Costa, S. Abrate, J. Pedro, V. Lopez, V. Curri, D. Zibar, E. Pincemin, S. Grot, G. Roelkens, C. Matrakidis, and W. Forysiak, “Perspectives of multi-band optical communication systems,” Proc. OECC, paper 5B3-1, July 2018.
- [3] F. Hamaoka, M. Nakamura, S. Okamoto, K. Minoguchi, T. Sasai, A. Matsushita, E. Yamazaki, and Y. Kisaka, “Ultra-wideband WDM transmission in S-, C-, and L-bands using signal power optimization scheme,” J. Lightw. Technol., vol. 38, no. 8, pp. 1764–1771, Apr. 2019.
- [4] N. Sambo, A. Ferrari, A. Napoli, N. Costa, J. Pedro, B. Sommerkorn-Krombholz, P. Castoldi, and V. Curri, “Provisioning in multi-band optical networks,” J. Lightw. Technol., vol. 38, no. 9, pp. 2598–2605, May 2020.
- [5] S. Okamoto, K. Minoguchi, F. Hamaoka, K. Horikoshi, A. Matsushita, M. Nakamura, E. Yamazaki, and Y. Kisaka, “A study on the effect of ultra-wide band WDM on optical transmission systems,” J. Lightw. Technol., vol. 38, no. 5, pp. 1061–1070, Mar. 2020.
- [6] D. Semaru, R.I. Killey, and P. Bayvel, “A closed-form approximation of the

- Gaussian noise model in the presence of inter-channel stimulated Raman scattering,” *J. Lightw. Technol.*, vol. 37, no. 9, pp. 1924–1936, May 2019.
- [7] A. Ferarri, E. Virgillito, and V. Curri, “Band-divison vs. space-division multiplexing: a network performance statistical assessment,” *J. Lightw. Technol.*, vol. 38, no. 5, pp. 1041–1049, Mar. 2020.
- [8] A. Ferrari, A. Napoli, J.K. Fischer, N. Costa, A. D’Amico, J. Pedro, W. Forysiak, E. Pincemin, A. Lord, A. Stavdas, J.P.F.-P. Gimenez, G. Roelkens, N. Calabretta, S. Abrate, B. Sommerkorn-Krombholz, and V. Curri, “Assessment on the achievable throughput of multi-band ITU-T G.652.D fiber transmission systems,” *J. Lightw. Technol.*, vol. 38, no. 16, pp. 4279–4291, Aug. 2020.
- [9] J.M. Yates and M.P. Rumsewicz, “Wavelength converters in dynamically-reconfigurable WDM networks,” *IEEE Commun. Surv. Tutor.*, vol. 2, no. 2, pp. 2–15, Second Quarter 1999.
- [10] K. Ishii, T. Inoue, I. Kim, X. Wang, H. N. Tan, Q. Zhang, T. Ikeuchi, and S. Namiki, “Analysis and demonstration of network utilization improvement through format-agnostic multi-channel wavelength converters,” *J. Opt. Commun. Netw.*, vol. 10, no. 2, pp. A165–A174, Feb. 2018.
- [11] D. Uzunidis, C. Matrakidis, A. Stavdas, and A. Lord, “Power optimization strategy for multi-band optical systems,” *Proc. ECOC*, paper Tu1H-4, Dec. 2020.
- [12] T. Kato, S. Watanabe, T. Yamauchi, G. Nakagawa, H. Muranaka, Y. Tanaka, Y. Akiyama, and T. Hoshida, “Real-time transmission of 240×200-Gb/s signal in S+C+L triple-band WDM without S- or L-band transceivers,” *Proc. ECOC*, paper PD.1.7, Sept. 2019.
- [13] H. Kawahara, M. Nakagawa, T. Seki, and T. Miyamura, “Experimental

demonstration of wavelength-selective band/direction-switchable multi-band OXC using an inter-band all-optical wavelength converter,” Proc. ECOC, paper Tu1H.3, Dec. 2020.

- [14] H.N. Tan, T. Inoue, K. Solis-Trapala, S. Petit, Y. Oikawa, K. Ota, S. Takasaka, T. Yagi, M. Pelusi, and S. Namiki, “On the cascability of alloptical wavelength converter for high-order QAM formats,” *J. Lightw. Technol.*, vol. 34, no. 13, pp. 3194–3205, July 2016.
- [15] M. Stepanovsky, “A comparative review of MEMS-based optical cross-connects for all-optical networks from the past to the present day,” *IEEE Commun. Surv. Tutor.*, vol. 21, no. 3, pp. 2928–2946, Third Quarter 2019.
- [16] Y. Mori and K. Sato, “High-port-count optical circuit switches for intra-datacenter networks,” *J. Opt. Commun. Netw.*, vol. 13, no. 8, pp. D43–D52, Aug. 2021.
- [17] J. Zhang, Y. Zhao, X. Yu, J. Zhang, M. Song, Y. Ji, and B. Mukherjee, “Energy-efficient traffic grooming in sliceable-transponder-equipped IP-over-elastic optical networks,” *J. Opt. Commun. Netw.*, vol. 7, no. 1, pp. A142–A152, Jan. 2015.
- [18] T. Kato, S. Watanabe, T. Yamauchi, G. Nakagawa, H. Muranaka, Y. Tanaka, Y. Akiyama, and T. Hoshida, “Multi-band WDM transmission technology exceeding transceiver wavelength band,” Proc. OECC, paper T1-4.1, Dec. 2020.
- [19] M. Nakagawa, T. Seki, and T. Miyamura, “Techno-economic potential of wavelength-selective band-switchable OXC in S+C+L band optical networks,” Proc. OFC, paper W2A.24, Mar. 2022.
- [20] K. Suzuki, K. Seno, and Y. Ikuma, “Application of waveguide/free-space optics hybrid to ROADM device,” *J. Lightw. Technol.*, vol. 35, no. 4, pp. 596–606, Feb. 2017.

- [21] H. Kawahara, A. Sahara, Y. Sone, S. Kawai, M. Fukutoku, and Y. Miyamoto, “First investigation and reduction of inter-WSS crosstalk in multiple-arrayed WSSs for large-scale optical node”, Proc. CLEO-PR/OECC/PGC, paper 3-2K-2, July/Aug. 2017.
- [22] H. Yang, P. Wilkinson, B. Robertson, S. Giltrap, O. Snowdon, H. Prudden, and D. Chu, “24 [1×12] wavelength selective switches integrated on a single 4k LCoS device,” J. Lightw. Technol., vol. 39, no. 4, pp. 1033–1039, Feb. 2021.
- [23] A. Sahara, H. Kawahara, S. Yamamoto, S. Kawai, M. Fukutoku, T. Mizuno, Y. Miyamoto, K. Suzuki, and K. Yamaguchi, “Proposal and experimental demonstration of SDM node enabling path assignment to arbitrary wavelengths, cores, and directions,” Opt. Express, vol. 25, no. 4, pp. 4061–4075, Feb. 2017.
- [24] Y. Iwai, H. Hasegawa, and K. Sato, “A Large-scale photonic node architecture that utilizes interconnected OXC subsystems,” Opt. Express, vol. 21, no. 1, pp. 478–487, Jan. 2013.
- [25] S.K. Routray, R. Morais, J.R.F. da Rocha, and A.N. Pinto, “Statistical model for link lengths in optical transport networks,” J. Opt. Commun. Netw., vol. 5, no. 7, pp. 762–773, July 2013.
- [26] M. Jinno, “Elastic optical networking: Roles and benefits in beyond 100-Gb/s era,” J. Lightw. Technol., vol. 35, no. 5, pp. 1116–1124, Mar. 2017.
- [27] S.K. Routray, G. Sahin, J.R.F. da Rocha, and A.N. Pinto, “Statistical analysis and modeling of shortest path lengths in optical transport networks,” J. Lightw. Technol., vol. 33, no. 13, pp. 2791–2801, July 2015.

第 5 章 マルチバンドネットワークの実証実験

5.1 はじめに

本章では、第 4 章で述べた提案ネットワークアーキテクチャ「BSN」の実現可能性を明らかにするために、コンセプト実証実験を行った結果を述べる。以降、4.4 節で説明した WSS ベースの光ノード構成を使用したマルチバンド光ネットワークをエミュレートした実験系を構築し、物理レイヤの観点からバンドスイッチングならびに BSN の特性を評価する。具体的には、ノード毎に波長選択バンドスイッチングを行いながら複数ノードを通過させた伝送実験の結果について説明する。

5.2 実験系

まず、実証実験を行う実験系について説明する。図 5-1 に、C+L バンドをサポートする 2 方路の光ノードを想定した実験系を示す。ここでは、この光ノードによって単方向リングが 2 つ接続されているケースを想定している。また、伝送実験のため、複数台の送信機と 1 台の受信機を使用している。光ノードは、C バンドと L バンドの両方の EDFA が、プリアンプとポストアンプとしてそれぞれ入力ポートと出力ポートに配置された構成となっている。バンド間 AO-WC としては、HNLF における縮退 FWM を変換原理としたプロトタイプを文献 [1] と同様の方法で実装している。今回実験に用いた各 AO-WC は実際には約 20 dB の挿入損失（変換損失とも呼ぶ）があり、文献 [2] と同様に、AO-WC 内部に C バンドまたは L バンドの EDFA を配備して損失を補償している。出側の WSS は、バンド間 AO-WC 特性の波長依存性や EDFA ゲインの波長依存性を等化する役割も担う。各リングは、60 km の SMF と、ISRS から生じるパワーチルトを補償

する C バンド後方励起ラマン増幅器で構成されている。

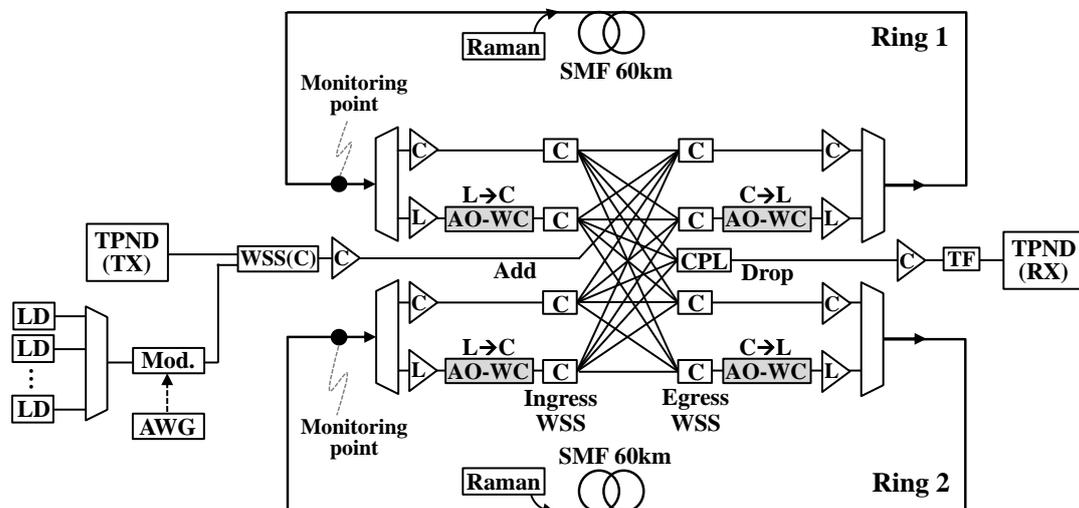


図 5-1 実験系

系の送信側は、1529.55～1556.96 nm の波長範囲で 112 Gbit/s DP-QPSK 信号が 50 GHz 間隔で 72 チャンネル生成され、そのうち 1 チャンネルがリアルタイムトランスポンダ (図中, TPND) からの出力信号に置き換えられる構成となっている。C バンドの WDM 信号は、光ノードにて Add され、まずリング 1 伝送路に送信される。この 1 スパン伝送後、個々のチャンネルは光ノードによって方路・バンド切替され、リング 1 またはリング 2 に、また、C バンドまたは L バンドに、振り分けられる。なお、リング 1 と 2 でのファイバ入力パワーは全てのチャンネルで 3 dBm/ch とした。

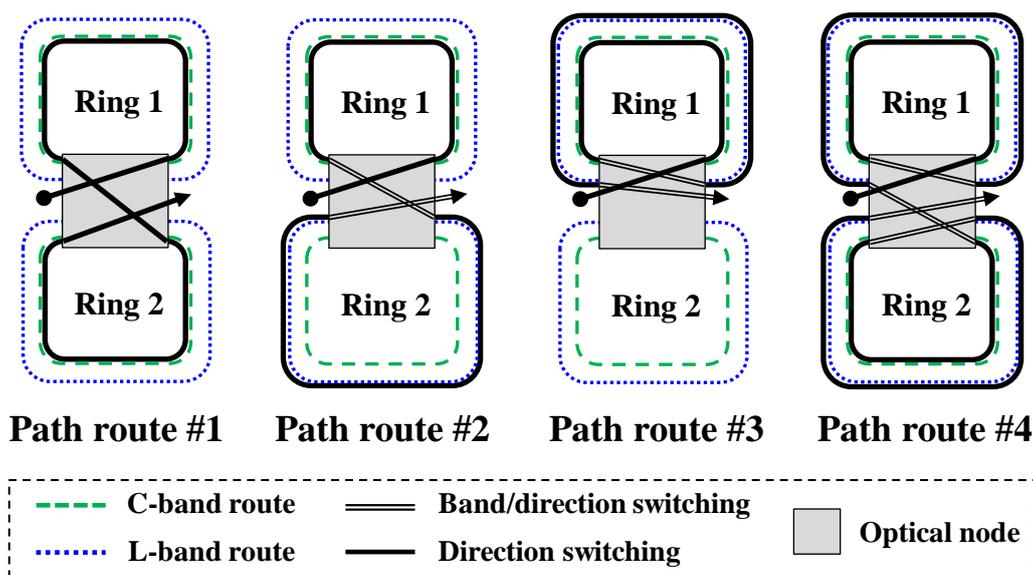


図 5-2 実験におけるパス設定パターン

次に、図 5-2 にパス設定パターンを示す。これは、通過ノード毎の波長選択バンドスイッチングを考慮したパターンとなっている。図中、緑の破線は C バンド伝送を、青の点線は L バンド伝送をそれぞれ示しており、黒の実線は実際のパス経路#1~#4 を示している。なお、72 チャンネル中 4 チャンネルごとにパス経路#1~#4 を割り当てることとする。また、リングの端点で、C バンドと L バンドの WDM 信号スペクトルを観測することとした。光信号を受信する際には、Drop 用の光カプラ、EDFA、帯域可変フィルタ (TF) を介して C バンド WDM 信号内の個々のチャンネルが TPND 内の受信機に入力され、Q ファクタをリアルタイムに測定した。

5.3 実験結果

本節では、5.2 節で述べた実験系を用いて測定されたデータをもとに、実験結果を説明する。まず、構成した光ノードで提供される波長選択バンドスイッチングの基本特性として、リング 1 と 2 の端点で観測したスペクトルを図 5-3 に示す。図の上側は C バンド~L バンド全体のスペクトルを、図の下側は C バンドと L バンドそれぞれ一部を拡大したスペクトルを示したものである。例えば、

パス設定#4 に割り当てられた波長チャンネルは、1 スパン目はリング 1 伝送路を C バンドで、2 スパン目はリング 1 伝送路を L バンドで、3 スパン目はリング 2 伝送路を C バンドで、4 スパン目はリング 2 伝送路を L バンドで、それぞれ伝送されたものとなっている（図 5-3 の下側を参照）。図から、C バンド～L バンド全域にわたって、概ね同様のパワーで伝送されており、大きなパワーばらつきやノイズばらつきが観測されていないことがわかる。

次に、TPND で測定した Q ファクタをもとに、チャンネル波長と Q ファクタおよび Q ペナルティの関係を図 5-4 に示す。なお、事前に測定したバックツーバックでの Q ファクタ特性をもとに、受信時の OSNR 条件下で、バックツーバック時の Q ファクタから測定 Q ファクタを減じることで Q ペナルティを算出した。図示した結果からは、72 チャンネル全ての Q 値がエラーフリー伝送の閾値となる Q 値の 5.2 dB を大幅に超えていることがわかり、波長選択バンドスイッチングを行いながらもエラーフリー伝送が実現されていることが示された。ただし、過度ではないが Q ペナルティは観測されている（パス設定#1～#4 でそれぞれ、0.5 dB 未満、1.4 dB 未満、1.4 dB 未満、2.4 dB 未満）こともわかる。ここで、パス設定#1～#4 において通過する AO-WC の数は、それぞれ 0 台、2 台、2 台、4 台であり、測定された Q ペナルティの主要因が、複数の波長入力条件で動作する AO-WC 内の非線形性であった可能性が高いと言える。しかしながら、得られた結果は、バンドスイッチングあたりのペナルティが十分に小さい値に抑制可能であることを示唆している。さらに言えば、FWM の生成条件を微調整することで AO-WC におけるペナルティは更に抑制可能だと考えられる。以上のことから、4.5.3 項で記載した「バンドスイッチングあたりのペナルティが 0.7 dB 未満」という条件は達成可能な見込みが得られたと言える（4.5.3 項では上記の条件を満たせば BSN がネットワーク性能を大幅に改善できることを定量的に示している）。

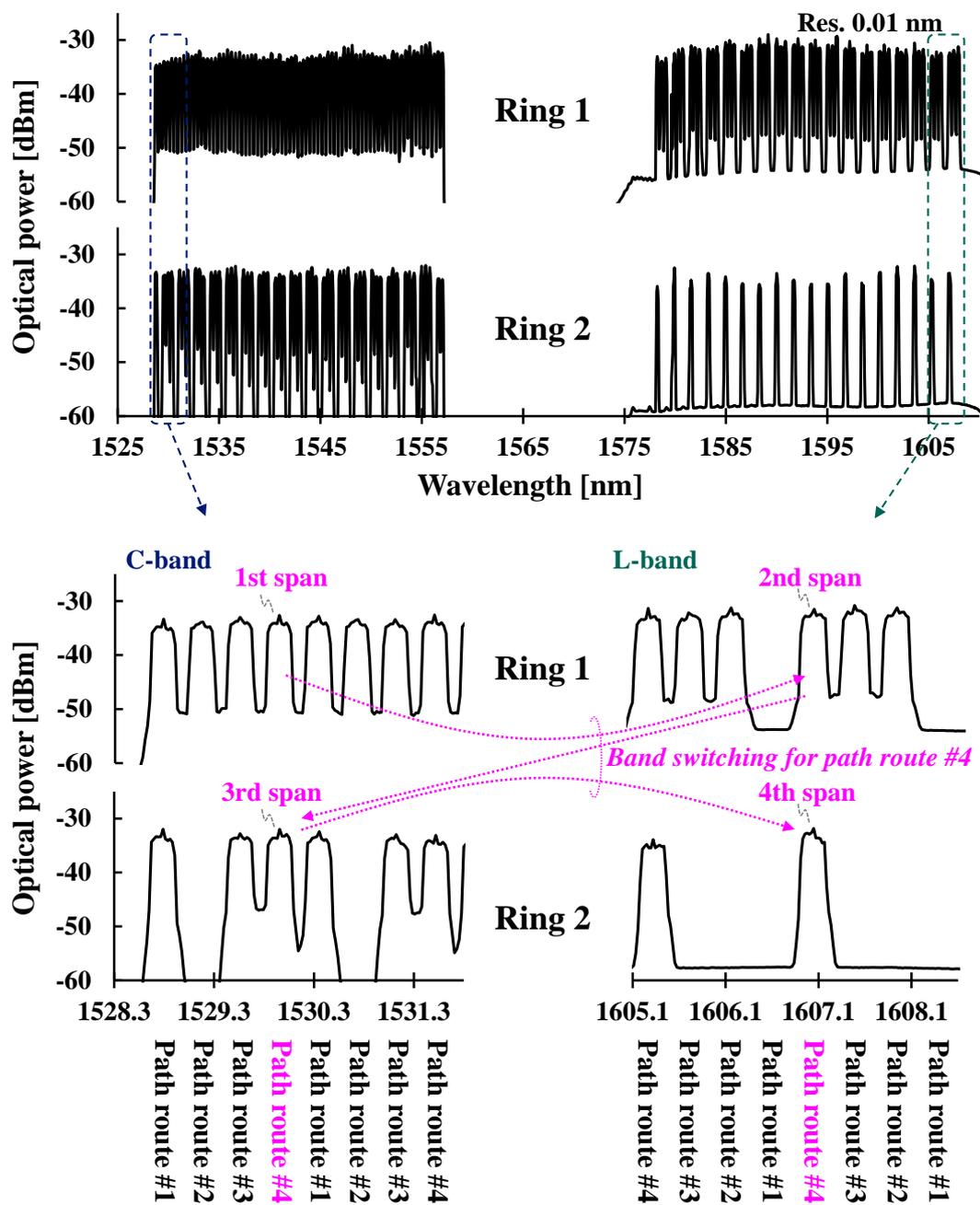


図 5-3 リング 1 および 2 で観測された全体のスペクトル(上側) と 拡大した
 スペクトル (下側)

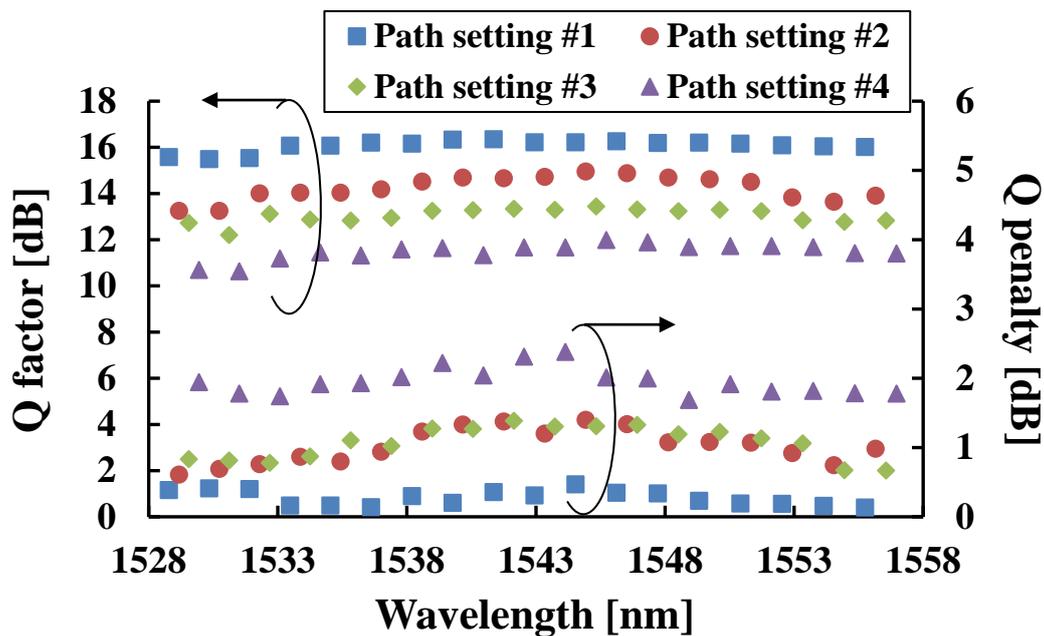


図 5-4 測定された Q 値ならびに Q ペナルティ

また、図 5-4 からは、Q ファクタ・Q ペナルティともに全チャネルに対して特異点等は観測されていないことがわかる。すなわち、最大 4 ホップのパスに対して、経路上のノード毎に各チャネルのバンドを切り替えながら、十分に高品質な信号伝送が実現できることが確認できた。これにより、光ネットワークを高効率・高柔軟にマルチバンド化する上で重要なステップである C+L バンド条件での BSN の実現可能性が実証された。

今後、AO-WC の技術進展（例えば、[2-4]）により、使用バンドやペナルティの観点で波長選択バンドスイッチングの実現性が向上することが期待される。例えば、文献 [2] では、C バンドから L バンド、L バンドから C バンド、C バンドから S バンド、および S バンドから C バンドの AO-WC が実証されている。また、文献 [3, 4] では変換損失の改善が実験的に実証されている。このような取組により、BSN の実行可能性と実用性が今後も向上していくことが期待できると言える。

5.4 まとめ

本章では、プロトタイプノードを構築してマルチバンドネットワークをエミュレートすることにより、BSN のコンセプト実証実験を実施した。具体的には、C+L バンド WDM 信号を最大 4 ホップ伝送し、通過ノード毎にチャンネル単位でバンドスイッチングを行った場合においてもエラーフリー伝送が実現可能なことを示した。4.5 節のネットワーク性能解析結果と合わせ、BSN の実現可能性が裏付けられたと言える。これらの内容は、光ネットワークの物理インフラの柔軟化、ひいては既設光ファイバのポテンシャル最大化に貢献し得る結果であると言える。

5.5 第 5 章参考文献

- [1] T. Kato, S. Watanabe, T. Yamauchi, G. Nakagawa, H. Muranaka, Y. Tanaka, Y. Akiyama, and T. Hoshida, “Real-time transmission of 240×200-Gb/s signal in S+C+L triple-band WDM without S- or L-band transceivers,” Proc. ECOC, paper PD.1.7, Sept. 2019.
- [2] T. Kato, S. Watanabe, T. Yamauchi, G. Nakagawa, H. Muranaka, Y. Tanaka, Y. Akiyama, and T. Hoshida, “Multi-band WDM transmission technology exceeding transceiver wavelength band,” Proc. OECC, paper T1-4.1, Dec. 2020.
- [3] T. Umeki, O. Tadanaga, and M. Asobe, “Highly efficient wavelength converter using direct-bonded PPZnLN ridge waveguide,” IEEE J. Quantum Electron., vol. 46, no. 8, pp. 1206–1213, Aug. 2010.
- [4] C. Wang, C. Langrock, A. Marandi, M. Jankowski, M. Zhang, B. Desiatov, M.M. Fejer, and M. Lončar, “Ultra-high-efficiency wavelength conversion in nanophotonic periodically poled lithium niobate waveguides,” OSA Optica, vol. 5, no.11, pp. 1438–1441, Nov. 2018.

第 6 章 結論

本章では，本研究の総括を行う．

本論文は，増加傾向ならびに多様化傾向が継続する可能性が極めて高い通信トラヒックを，将来にわたってコスト効率良く収容していくことを可能とする，柔軟性の高い光ネットワークの実現方法に関する研究を行った成果をまとめたものである．

第 1 章では，我々の暮らしの中での通信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と，解決すべき課題について説明した．基幹光ネットワークは今や極めて重要性の高い社会インフラとなっており，環境変化に応じてコスト効率良く進化させ続けていくことが必要となる．人々の暮らしの利便性を飛躍的に向上させ得るサービスの登場が期待される中で，そのサービス登場・普及を阻害することなく，続々とサービス開発／改善がなされる環境を提供するために，既存の延長ではない研究開発によって，より柔軟性の高い光ネットワークを実現していくことが極めて重要である．

第 2 章ならびに第 3 章では，第 1 章で説明した困難な課題を解決するため，限られたネットワーク資源で，少しでも多くのトラヒック需要を収容するために，動的にネットワーク内のパスを制御するアプローチに着目し，サービス品質担保と収容トラヒック量向上の両立を実現する方式ならびにパス制御アルゴリズムを検討した．サービス品質の中では，ユーザ間の公平性と瞬断可能性という重要な観点を考慮し，サービス断を回避可能なパス再配置を活用する方式にフォーカスした．公平性を担保するために，パス長だけではなく経路候補数を考慮した重み関数を提案し，シンプルながらもトポロジによらずユーザ間公平性を大幅に改善できることを数値実験によって確認した．また，パス再配置の際には，パス長と残り保留時間を考慮して再配置対象となるパスと再配置先の経路を決定するアルゴリズムを提案し，網羅的な数値実験によって有効性を確認した．これらの結果は，光ネットワークの論理パス運用の柔軟化に資するものである．

第4章ならびに第5章では、光ネットワークの物理インフラの柔軟化に資する技術として、マルチバンドネットワーキングに関する研究の成果について述べた。マルチバンド化は既設ファイバの利用可能な波長資源を増加可能な一方で、特有の物理現象に起因して実質的に利用可能な容量が制限されるという根本的な問題がある。これに対し、光デバイスの進化動向をとらまえて、波長帯変換器を活用してパス経路上で波長単位に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を提案し、実現する上で必要となる光ノード構成についても説明した。提案したアーキテクチャは、複数のバンドに跨る波長資源を柔軟に利用でき、コスト効率良く光ネットワークの容量拡大を実現できる。数値解析によって、幅広い条件下で提案アーキテクチャが有効であることを確認し、波長帯変換のデメリットを考慮した際の影響についても考察を行った。加えて、提案したアーキテクチャのコンセプトを実証するためにマルチバンド光ノードを構築し、伝送実験を行うことで実現可能性を明らかにした。

以上の検討により、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に資する技術を確立した。本研究の成果が、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向けた一助となることを祈念する。

謝辞

本論文は、筆者が NTT ネットワークサービスシステム研究所在職中ならびに名古屋大学大学院工学研究科博士後期課程在学中に行った研究を、名古屋大学大学院工学研究科 長谷川 浩 教授の御指導のもとにまとめたものであり、本研究を遂行するにあたり、終始懇切丁寧なる御指導・御鞭撻を賜りました長谷川浩 教授に謹んで深謝の意を表します。また、論文作成にあたり有益な御指導を頂きました、名古屋大学教養教育院 山里敬也 教授、名古屋大学大学院工学研究科 森 洋二郎 准教授、ならびに香川大学創造工学部 神野正彦 教授に深く感謝いたします。

さらに、NTT ネットワークサービスシステム研究所において、本論文をまとめる機会を与えていただき、熱心な励ましを賜った立元慎也プロジェクトマネージャ（現 NTT 情報ネットワーク総合研究所 所長）、川端明生プロジェクトマネージャ（現 豊橋技術科学大学 教授）、吉岡弘高プロジェクトマネージャ（現 NTT アドバンステクノロジー）、松本健一郎プロジェクトマネージャ（現 NTT ネットワークサービスシステム研究所 所長）、桑原 健プロジェクトマネージャに深く感謝いたします。また、本研究の機会を与えていただくとともに、日頃より熱心に御指導、御討論いただいた行田克俊ディレクタ（現 NTT アドバンステクノロジー）、松村和之ディレクタ（現 ミライト）、宮村 崇グループリーダー、関 剛志さん、河原光貴さん（現 NTT ドコモ）、深谷崇文さんに心より感謝いたします。その他、筆者が在籍したグループの皆様を中心として多くの方々に御助言をいただきました。中でも、入社当時には平松 淳プロジェクトマネージャ（現 NTT アドバンステクノロジー）、三澤 明グループリーダー（現 千歳科学技術大学 教授）、片山 勝さん（現 NTT アドバンステクノロジー）、君島直樹さん（現 NTT 東日本）、服部恭太さん、伊達拓紀さん（現 NTT ネットワークイノベーションセンタ）にお世話になりました。ここに感謝申し上げます。

最後に、筆者が博士前期課程において御指導を賜り、光ネットワーク分野の研

究に強い興味を持つきっかけを提供して頂いた名古屋大学 佐藤健一 名誉教授に御礼申し上げるとともに、論文をまとめるにあたり献身的にサポートしてくれた妻・亮子と、いつも応援してくれた娘・雅咲に心からの謝意を記します。

研究業績リスト

主著

• 論文誌

1. Masahiro Nakagawa, Kyota Hattori, Naoki Kimishima, Masaru Katayama, and Akira Misawa, “Hierarchical time-slot allocation for dynamic bandwidth control in optical layer-2 switch network,” IEICE TRANSACTIONS on Communications, vol. E97-B, no. 7, pp. 1303–1312, July 2014.
2. Masahiro Nakagawa, Kyota Hattori, Naoki Kimishima, Masaru Katayama, and Akira Misawa, “Proposal of rip-up & re-allocate algorithm for optical layer-2 switch network,” ACTA Photonica Sinica, vol. 43, no. 7, 0706002, July 2014.
3. Masahiro Nakagawa, Kyota Hattori, Toshiya Matsuda, Masaru Katayama, and Katsutoshi Koda, “Dynamic subwavelength protection using high-speed optical switches for optical metro networks,” IEICE TRANSACTIONS on Electronics, vol. E99-C, no. 2, pp.203–211, Feb. 2016.
4. Masahiro Nakagawa, Hiroshi Hasegawa, and Ken-ichi Sato, “Dynamic path provisioning and disruption-free reoptimization algorithms for bandwidth on-demand services considering fairness,” IEICE TRANSACTIONS on Communications, vol. E100-B, no. 4, pp. 536–547, Apr. 2017.
5. Masahiro Nakagawa, Hiroki Kawahara, Takeshi Seki, and Takashi Miyamura, “Highly efficient multi-band optical networks with wavelength-selective band switching,” IEICE TRANSACTIONS on Communications, accepted.

• 国際会議

1. Masahiro Nakagawa, Hiroshi Hasegawa, Ken-ichi Sato, Ryuta Sugiyama, Tomonori Takeda, Eiji Oki, and Kohei Shiomoto, “Performance evaluation of dynamic network

- design for provisioning of broadband connection services,” Proc. International Conference on Optical Internet (COIN) 2008, Oct. 2008.
2. Masahiro Nakagawa, Hiroshi Hasegawa, Ken-ichi Sato, Ryuta Sugiyama, Tomonori Takeda, Eiji Oki, and Kohei Shiomoto, “New dynamic network design and provisioning algorithms for broadband connection services considering fairness,” Proc. Conference on Optical Network Design and Modeling (ONDM) 2009, Feb. 2009.
 3. Masahiro Nakagawa, Hiroshi Hasegawa, Ken-ichi Sato, Tomonori Takeda, and Kohei Shiomoto, “Adaptive self-reconfigurable network to create cost-effective bandwidth-on-demand services,” Proc. Conference on Optical Fiber Communication / National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC) 2010, NWA2, Mar. 2010.
 4. Masahiro Nakagawa, Kyota Hattori, Naoki Kimishima, Masaru Katayama, and Akira Misawa, “Hierarchical timeslot allocation for optical layer-2 switch network,” Proc. OptoElectronics and Communications Conference (OECC) / Photonics in Switching (PS) 2013, TuQ4-6, July 2013.
 5. Masahiro Nakagawa, Kyota Hattori, Naoki Kimishima, Masaru Katayama, and Akira Misawa, “Proposal of rip-up & re-allocate algorithm for optical layer-2 switch network,” Proc. International Conference on Optical Internet (COIN) 2013, Oct. 2013.
 6. Masahiro Nakagawa, Kyota Hattori, Masaru Katayama, and Hiroaki Ogawa, “Fast bandwidth-variable path restoration method for optical layer-2 switch network,” Proc. Photonics in Switching (PS) 2014, PM4C.4, July 2014.
 7. Masahiro Nakagawa, Kyota Hattori, Toshiya Matsuda, Masaru Katayama, and Katsutoshi Koda, “Cost-effective control plane design for optical sub-wavelength switched ring network,” Proc. 10th Asia-Pacific Symposium on Information and Telecommunication Technologies (APSITT 2015), SS-3-1, Aug. 2015.
 8. Masahiro Nakagawa, Kyota Hattori, Toshiya Matsuda, Masaru Katayama, and Katsutoshi Koda, “Dynamic bandwidth protection in optical subwavelength switched ring network,” Proc. European Conference and Exhibition on Optical Communications (ECOC) 2015, P.6.8, Sept./Oct. 2015.

9. Masahiro Nakagawa, Kana Masumoto, Kyota Hattori, Toshiya Matsuda, Masaru Katayama, and Katsutoshi Koda, “Photonic sub-lambda networking for energy-efficient optical metro networks,” Proc. IEEE 17th International Conference on High Performance Switching and Routing (IEEE HPSR) 2016 Workshop, June 2016.
10. Masahiro Nakagawa, Kana Masumoto, Kyota Hattori, Toshiya Matsuda, Masaru Katayama, and Katsutoshi Koda, “Flexible and cost-effective optical metro network with photonic sub-lambda aggregation capability,” Proc. 21st OptoElectronics and Communications Conference (OECC) / International Conference on Photonics in Switching (PS) 2016, ThA2-2, July 2016.
11. Masahiro Nakagawa, Kana Masumoto, Hidetoshi Onda, and Kazuyuki Matsumura, “Photonic Sub-Lambda transport: An energy-efficient and reliable solution for metro networks,” Proc. International Conference on Optical Network Design and Modeling (ONDM) 2018, pp. 166–171, May 2018.
12. Masahiro Nakagawa, Hiroki Kawahara, Kana Masumoto, Hidetoshi Onda, and Kazuyuki Matsumura, “Numerical analysis of adaptive restoration in optical transport networks,” Proc. 24th OptoElectronics and Communications Conference (OECC) and International Conference on Photonics in Switching and Computing (PSC) 2019, TuG3-2, July 2019.
13. Masahiro Nakagawa, Kana Masumoto, Hidetoshi Onda, and Kazuyuki Matsumura, “Experimental demonstration of a PON technology-based optical transport solution over field installed DSF,” Proc. European Conference on Optical Communications (ECOC) 2019, M.2.F.3, Sept. 2019.
14. Masahiro Nakagawa, Hiroki Kawahara, Kana Masumoto, Toshiya Matsuda, and Kazuyuki Matsumura, “Performance evaluation of multi-band optical networks employing distance-adaptive resource allocation,” Proc. 25th OptoElectronics and Communications Conference (OECC), Oct. 2020.
15. Masahiro Nakagawa, Hiroki Kawahara, Takeshi Seki, and Takashi Miyamura, “Adaptive link-by-link band allocation: A novel adaptation scheme in multi-band optical networks,” Proc. International Conference on Optical Network Design and

Modeling (ONDM) 2021, June/July 2021.

16. Masahiro Nakagawa, Takeshi Seki, and Takashi Miyamura, “Techno-economic potential of wavelength-selective band-switchable OXC in S+C+L band optical networks,” Proc. Optical Fiber Communication Conference (OFC) 2022, W2A.24, Mar. 2022.

・国内講演

1. 中川 雅弘, 長谷川 浩, 佐藤 健一, 杉山 隆太, 武田 知典, 塩本 公平, “無瞬断でのパス再配置を考慮した動的ネットワーク制御法の効果,” 電子情報通信学会ソサイエティ大会講演論文集, B-7-59, 2009 年 9 月.
2. 中川 雅弘, 服部 恭太, 君島 直樹, 片山 勝, 三澤 明, “トラヒック変動に適応した光パケットスケジューリング方式 Dynamic-iSLIP の提案,” 信学技報, vol. 111, no. 93, PN2011-9, pp. 43-48, 2011 年 6 月.
3. 中川 雅弘, 服部 恭太, 君島 直樹, 片山 勝, 三澤 明, 平松 淳, “階層化パケットスケジューリング方式 HiSLIP の提案,” 電子情報通信学会総合大会講演論文集, B-6-95, 2012 年 3 月.
4. 中川 雅弘, 服部 恭太, 君島 直樹, 片山 勝, 三澤 明, 平松 淳, “階層化を用いた光 TDM スケジューリング方式 HOTS の提案,” 電子情報通信学会ソサイエティ大会講演論文集, B-6-24, 2012 年 9 月.
5. 中川 雅弘, 服部 恭太, 君島 直樹, 片山 勝, 三澤 明, “光 L2 スイッチネットワークにおける階層化スケジューリング方式の提案,” 信学技報, vol. 112, no. 208, NS2012-77, pp. 141-146, 2012 年 9 月.
6. 中川 雅弘, 服部 恭太, 君島 直樹, 片山 勝, 三澤 明, “光 L2 スイッチネットワークにおけるトラヒック変動差分に着目した動的帯域割当方式 Rip-up & Re-allocate の提案,” 電子情報通信学会総合大会講演論文集, B-6-3, 2013 年 3 月.
7. 中川 雅弘, 服部 恭太, 君島 直樹, 片山 勝, 三澤 明, “光 L2 スイッチネットワークにおける高速帯域再割当を実現するパス帯域割当アルゴリズムの提案,” 信学技報, vol. 113, no. 175, PN2013-16, pp. 47-52, 2013 年 8 月.

8. 中川 雅弘, 服部 恭太, 君島 直樹, 片山 勝, 三澤 明, “光 L2 スイッチネットワークにおける階層化計算と繰り返し最適化を用いた動的帯域割当方式,” 電子情報通信学会ソサイエティ大会講演論文集, B-6-45, 2013 年 9 月.
9. 中川 雅弘, 服部 恭太, 君島 直樹, 片山 勝, 小川 宏明, “光 L2 スイッチネットワークにおける高速リストレーション方式の提案,” 電子情報通信学会総合大会講演論文集, B-6-101, 2014 年 3 月.
10. 中川 雅弘, 服部 恭太, 片山 勝, 小川 宏明, “光 L2 スイッチネットワークにおける可変帯域パスリストレーション方式の性能評価,” 信学技報, vol. 113, no. 455, PN2013-104, pp. 73-78, 2014 年 3 月.
11. 中川 雅弘, 服部 恭太, 片山 勝, 小川 宏明, “光 L2 スイッチネットワークにおける可変帯域パスプロテクションを実現する動的帯域割当方式,” 信学技報, vol. 114, no. 109, PN2014-3, pp. 13-18, 2014 年 6 月.
12. 中川 雅弘, 服部 恭太, 片山 勝, 小川 宏明, “パスグルーピングを用いた光 TDM リソース割当方式の性能評価,” 電子情報通信学会ソサイエティ大会講演論文集, B-12-15, 2014 年 9 月.
13. 中川 雅弘, 服部 恭太, 片山 勝, 行田 克俊, “光 TDM リング網におけるトラヒック分布を考慮した高速リソース割当方式の評価,” 信学技報, vol. 114, no. 334, PN2014-24, pp. 21-26, 2014 年 11 月.
14. 中川 雅弘, 服部 恭太, 松田 俊哉, 片山 勝, 行田 克俊, “集中制御型光 TDM リング網における省リソース制御プレーン設計法,” 電子情報通信学会総合大会講演論文集, B-12-10, 2015 年 3 月.
15. 中川 雅弘, 服部 恭太, 松田 俊哉, 片山 勝, 行田 克俊, “光 TDM リング網における Active 光スイッチング方式と Passive 光カプラ多重分離方式の特性比較,” 電子情報通信学会ソサイエティ大会講演論文集, B-12-6, 2015 年 9 月.
16. 中川 雅弘, 益本 佳奈, 服部 恭太, 松田 俊哉, 片山 勝, 行田 克俊, “Photonic Sub-Lambda トランスポートネットワークの提案,” 信学技報, vol. 115, no. 497, PN2015-115, pp. 69-74, 2016 年 3 月.
17. 中川 雅弘, 益本 佳奈, 服部 恭太, 松田 俊哉, 片山 勝, 行田 克俊, “光パッシブデバイスを活用した Photonic Sub-Lambda トランスポートネットワー

- クの提案,” 電子情報通信学会総合大会講演論文集, B-12-11, 2016年3月.
18. 中川 雅弘, 益本 佳奈, 服部 恭太, 松田 俊哉, 片山 勝, 行田 克俊, “Photonic Sub-Lambda トランスポートネットワークの可用性解析 ～NetroSphere 構想実現に向けて～,” 信学技報, vol. 116, no. 113, PN2016-6, pp. 7-12, 2016年6月.
 19. 中川 雅弘, 服部 恭太, 松田 俊哉, 恩田 英俊, 片山 勝, 行田 克俊, “Photonic Sub-Lambda トランスポートネットワークにおける中継器が可用性に与える影響の解析,” 電子情報通信学会ソサイエティ大会講演論文集, B-12-5, 2016年9月.
 20. 中川 雅弘, 益本 佳奈, 並木 雅俊, 小川 雅也, 松田 俊哉, 荒谷 克寛, 恩田 英俊, 片山 勝, 行田 克俊, “[奨励講演] Photonic Sub-Lambda トランスポートネットワークの提案,” 信学技報, vol. 116, no. 498, PN2016-91, pp. 45-50, 2017年3月.
 21. 中川 雅弘, 並木 雅俊, 小川 雅也, 荒谷 克寛, 松田 俊哉, 恩田 英俊, 行田 克俊, “PSL ネットワークにおける任意ノード間パス提供方式の一検討,” 電子情報通信学会総合大会講演論文集, B-12-6, 2017年3月.
 22. Masahiro Nakagawa, Kana Masumoto, Masatoshi Namiki, Masaya Ogawa, Katsuhiko Araya, Toshiya Matsuda, Hidetoshi Onda, and Katsutoshi Koda, “Concept and Technology Challenges of Photonic Sub-Lambda Transport Network,” 電子情報通信学会総合大会講演論文集, BS-1-39, 2017年3月.
 23. 中川 雅弘, 並木 雅俊, 小川 雅也, 小泉 孝博, 植松 芳彦, 恩田 英俊, 行田 克俊, “伝送網の柔軟な機能拡張を実現する「機能モジュール」を導入したシステム構成の検討,” 信学技報, vol. 117, no. 186, PN2017-15, pp. 7-12, 2017年8月.
 24. 中川 雅弘, 田中 翔, 小川 雅也, 小泉 孝博, 植松 芳彦, 恩田 英俊, 行田 克俊, “伝送網の柔軟な機能拡張を実現する「機能モジュール」の有効性評価,” 信学技報, vol. 117, no. 204, NS2017-74, pp. 19-24, 2017年9月.
 25. 中川 雅弘, 並木 雅俊, 小川 雅也, 小泉 孝博, 植松 芳彦, 恩田 英俊, 行田 克俊, “伝送網の柔軟な機能拡張を実現する機能モジュールの一検討,” 電子

情報通信学会ソサイエティ大会講演論文集, B-12-2, 2017年9月.

26. 中川 雅弘, 益本 佳奈, 恩田 英俊, 松村 和之, “メトロ網における End-End 光 TDM パスの有効性評価,” 電子情報通信学会総合大会講演論文集, B-12-11, 2018年3月.
27. 中川 雅弘, 益本 佳奈, 恩田 英俊, 松村 和之, “PSL ネットワークにおける任意ノード間パス提供方式のコスト比較評,” 電子情報通信学会ソサイエティ大会講演論文集, B-12-7, 2018年9月.
28. 中川 雅弘, 益本 佳奈, 恩田 英俊, 松村 和之, “PSL ネットワークにおける光バースト増幅を考慮したノード構成の検討,” 電子情報通信学会ソサイエティ大会講演論文集, B-12-9, 2019年9月.
29. 中川 雅弘, 益本 佳奈, 松田 俊哉, 松村 和之, “NG-PON2 技術を活用した多中継光バースト伝送実験,” 信学技報, vol. 119, no. 366, OCS2019-67, pp. 13-18, 2020年1月.
30. 中川 雅弘, “All-Photonics Network 実現に向けた高効率・高柔軟光ネットワークング技術,” OCS Summer School 2021, 2021年7月

共著

・論文誌

1. 平松 淳, 中川 雅弘, 岡本 佳祐, 高野 奨太, 高橋 達郎, “広域同期光タイムスロット多重網におけるリンク伝搬遅延を考慮した連続タイムスロットスケジューリング法の提案,” 電子情報通信学会論文誌 B, vol. J97-B, no. 6, pp. 433–445, 2014年6月.
2. Kyota Hattori, Toru Homemoto, Masahiro Nakagawa, Naoki Kimishima, Masaru Katayama, and Akira Misawa, “Optical layer 2 switch network with bufferless optical TDM and dynamic bandwidth allocation,” IEICE TRANSACTIONS on Electronics, vol. E99-C, no. 2, pp.189–202, Feb. 2016.
3. 植松 芳彦, 中川 雅弘, 山本 宏, 鎌村 星平, 源田 浩一, 片山 勝, “光トラ

ンスポート網の堅牢性向上に向けた共用資源プール設計法,” 電子情報通信学会論文誌 B, vol. J99-B, no. 4, pp.345–355, 2016 年 4 月.

4. Akira Misawa, Konimi Mochizuki, Hideo Tsuchiya, Masahiro Nakagawa, Kyota Hattori, Masaru Katayama, and Jun-ichi Kani, “Virtual edge architecture with optical bandwidth resource control,” IEICE TRANSACTIONS on Communications, vol. E99-B, no. 8, pp. 1805–1812, Aug. 2016.
5. Kyota Hattori, Masahiro Nakagawa, Toshiya Matsuda, Masaru Katayama, and Katsutoshi Koda, “Bufferless bidirectional multi-ring networks with sharing an optical burst mode transceiver for any route,” IEICE TRANSACTIONS on Information and Systems, vol. E100-D, no. 5, pp. 948–962, May 2017.
6. Kyota Hattori, Masahiro Nakagawa, Masaru Katayama, and Jun-ichi Kani, “Passive optical metro network based on NG-PON2 system to support cloud edges,” IEICE Transactions on Communications, vol. E102-B, no. 1, pp. 88–96, Jan. 2019.
7. 服部 恭太, 中川 雅弘, 可児 淳一, “クラウドエッジ収容のためのバースト信号送信器と連続信号送信器間でのバースト信号受信器共有化方式の評価,” 電子情報通信学会論文誌 B, vol. J102-B, no.2, pp.98–105, 2019 年 2 月.
8. Hiroki Kawahara, Kohei Saito, Masahiro Nakagawa, Takashi Kubo, Takeshi Seki, Takeshi Kawasaki, and Hideki Maeda, “Real-time experiment and numerical analysis of highly-survivable adaptive restoration for high-capacity optical signal transmission,” IEICE Transactions on Communications, vol. E104-B, no. 4, pp. 360–369, Apr. 2020.

• レター

1. Kyota Hattori, Masahiro Nakagawa, Masaru Katayama, and Jun-ichi Kani, “Burst-mode transmitter / receiver sharing for VM migration of cloud edge,” IEICE Communications Express, vol. 7, no. 8, pp. 309–314, Aug. 2018.
2. Kana Masumoto, Toshiya Matsuda, Takeshi Seki, Masahiro Nakagawa, K. Nishiyama, and Takashi Miyamura, “An approach for suppressing waveform distortion of SOAs by controlling the temperature on in-line optical amplifier systems,” IEICE

Communications Express, vol. 11, no. 8, pp. 548–554, Aug. 2022.

• 国際会議

1. Kyota Hattori, Masahiro Nakagawa, Naoki Kimishima, Masaru Katayama, Akira Misawa, and Atsushi Hiramatsu, “Proposed optical multicasting method using tunable lasers and cyclic AWGs,” Proc. OptoElectronics and Communications Conference (OECC), pp. 22-23, July 2012.
2. Kyota Hattori, Masahiro Nakagawa, Naoki Kimishima, Masaru Katayama, Akira Misawa, and Atsushi Hiramatsu, “Optical layer-2 switch network based on WDM/TDM nano-sec wavelength switching,” Proc. European Conference and Exhibition on Optical Communications (ECOC), We.3.D.5, September 2012.
3. Kyota Hattori, Masahiro Nakagawa, Naoki Kimishima, Masaru Katayama, Akira Misawa, and Atsushi Hiramatsu, “Proposal of optical L2 switch network to achieve dynamic bandwidth allocation based on 10G-EPON,” Proc. Photonics in Switching (PS), Th-S34-O09, September 2012.
4. Kyota Hattori, Masahiro Nakagawa, Naoki Kimishima, Masaru Katayama, and Akira Misawa, “Dynamic path bandwidth allocation for 1000×10-scale optical layer-2 switch network based on hierarchical timeslot allocation algorithm and timeslot converter,” Proc. European Conference and Exhibition on Optical Communications (ECOC), Th.2.E.2, September 2013.
5. Kyota Hattori, Masahiro Nakagawa, Masaru Katayama, and Hiroaki Ogawa, “Method for synchronizing timeslots of WDM/TDM multi-ring network independent of fiber delay,” Proc. OptoElectronics and Communications Conference (OECC), TU4A-5, July 2014.
6. Kyota Hattori, Masahiro Nakagawa, Hiroki Date, Masaru Katayama, and Hiroaki Ogawa, “Flow burst conversion for large-scale optical layer-2 switch network based on scale-out flow control method,” Proc. European Conference and Exhibition on Optical Communications (ECOC) 2014, P.6.2, Sept. 2014.
7. Kyota Hattori, Masahiro Nakagawa, Toshiya Matsuda, Masaru Katayama, and

- Katsutoshi Koda, "Timeslot synchronization to share bandwidth for any route in bufferless bidirectional ring networks," Proc. International Conference on Photonics in Switching (PS) 2015, ThIII1-3, Sept. 2015.
8. Kyota Hattori, Masahiro Nakagawa, Toshiya Matsuda, Masaru Katayama, and Katsutoshi Koda, "Optical TDM fast reroute method for bufferless metro ring networks with arbitrary fiber length," Proc. European Conference and Exhibition on Optical Communications (ECOC) 2015, P.6.1, Sept./Oct. 2015.
 9. Akira Misawa, Konomi Mochizuki, Hideo Tsuchiya, Masahiro Nakagawa, Kyota Hattori, Masaru Katayama, and Jun-ichi Kani, "Proposal on virtual edge architecture using virtual network function live migration with wavelength ADM," Proc. The 21st Asia-Pacific Conference on Communications (APCC 2015), Oct. 2015.
 10. Kyota Hattori, Masahiro Nakagawa, Toshiya Matsuda, Masaru Katayama, and Katsutoshi Koda, "Method to share a burst-mode receiver between continuous- and burst- mode transmitter for VM migration of cloud edge," Proc. 21st OptoElectronics and Communications Conference (OECC) / International Conference on Photonics in Switching (PS) 2016, ThA2-5, July 2016.
 11. Kyota Hattori, Masahiro Nakagawa, Toshiya Matsuda, Masaru Katayama, and Katsutoshi Koda, "Passive optical metro network based on NG-PON2 with sharing burst-mode receiver between continuous-mode and burst-mode transmitters to support cloud edges," Proc. European Conference and Exhibition on Optical Communications (ECOC) 2016, W.4.P1.SC6.64, Sept. 2016.
 12. Kana Masumoto, Masahiro Nakagawa, Toshiya Matsuda, Masatoshi Namiki, Hidetoshi Onda, Masaru Katayama, and Katsutoshi Koda, "Pump power averaging method for suppressing transient response of EDFAs in burst optical signal transmission," Proc. International Conference on Photonics in Switching (PS) 2017, PTu2D.5, July 2017.
 13. Kana Masumoto, Masahiro Nakagawa, Toshiya Matsuda, Hidetoshi Onda, Masaru Katayama, and Kazuyuki Matsumura, "Pro-active control VOA for canceling transient response in burst optical signal transmission," Proc. 23rd Opto-Electronics

and Communications Conference (OECC), July 2018.

14. Hiroki Kawahara, Kohei Saito, Masahiro Nakagawa, Takashi Kubo, Takeshi Seki, Takeshi Kawasaki, Hideki Maeda, Tomohiro Sekino, Naoki Bannai, Masaki Shinkai, Tomoki Sakamaki, Kenjiro Yamanaka, and Takashi Kurimoto, “Real-time demonstration of 600Gbps/carrier WDM transmission and highly-survivable adaptive restoration on field installed fiber,” Proc. 24th OptoElectronics and Communications Conference (OECC) and International Conference on Photonics in Switching and Computing (PSC) 2019, TuB2-2, July 2019.
15. Kana Masumoto, Masahiro Nakagawa, Toshiya Matsuda, Hidetoshi Onda, Masaru Katayama, and Kazuyuki Matsumura, “Quantitative evaluation of cascaded EDFA transient response and transmission quality in long-reach optical burst transmission over field-installed fiber,” Proc. Asia Communications and Photonics Conference (ACP) 2019, S3B.5, Nov. 2019.
16. Hiroki Kawahara, Masahiro Nakagawa, Takeshi Seki, and Takashi Miyamura, “Experimental demonstration of wavelength-selective band/direction- switchable multi-band OXC using an inter-band all-optical wavelength converter,” Proc. European Conference and Exhibition on Optical Communications (ECOC) 2020, Tu1H-5, Dec. 2020.
17. Toshiya Matsuda, Kota Nishiyama, Kana Masumoto, Masahiro Nakagawa, and Takashi Miyamura, “Ultra-low latency short packet transmission experiments with optical bus platform based on PCIe,” Proc. Optical Fiber Communication Conference (OFC) 2022, Tu3G.2, Mar. 2022.

• 国内講演

1. 服部 恭太, 中川 雅弘, 君島 直樹, 片山 勝, 三澤 明, “周回性アレイ導波路回折格子を用いた波長スイッチにおける出力光均一化のための波長決定法,” 信学技報, vol. 110, no. 431, PN2010-73, pp. 85-88, 2011年2月.
2. 服部 恭太, 中川 雅弘, 君島 直樹, 片山 勝, 三澤 明, 平松 淳, “ポート間損失差最小化のための入出力ポート対応型周回性アレイ導波路回折格子間接

- 続方式の提案,” 電子情報通信学会ソサイエティ大会講演論文集, B-12-1, 2011年9月.
3. 君島 直樹, 中川 雅弘, 服部 恭太, 片山 勝, 三澤 明, “波長ルーティング型光スイッチにおける切替時のクロストーク低減方式の提案,” 電子情報通信学会ソサイエティ大会講演論文集, B-12-2, 2011年9月.
 4. 平松 淳, 中川 雅弘, 岡本 佳祐, 高野 奨太, 横田 健治, 高橋 達郎, “広域同期型光タイムスロット交換網の提案,” 信学技報, vol. 111, no. 475, PN2011-83, pp. 7-12, 2012年3月.
 5. 岡本 佳祐, 高野 奨太, 横田 健治, 平松 淳, 中川 雅弘, 高橋 達郎, “広域同期型光タイムスロット交換網におけるタイムスロット割り当てアルゴリズムの検討,” 信学技報, vol. 111, no. 475, PN2011-84, pp. 13-18, 2012年3月.
 6. 横田 健治, 平松 淳, 中川 雅弘, 高橋 達郎, “広域同期型光タイムスロット交換網における位相非同期のタイムスロット割り当て手法の検討,” 信学技報, vol. 111, no. 475, PN2011-85, pp. 19-24, 2012年3月.
 7. 平松 淳, 中川 雅弘, 岡本 佳祐, 高野 奨太, 横田 健治, 高橋 達郎, “広域同期型光タイムスロット交換網の提案,” 電子情報通信学会総合大会講演論文集, B-12-16, 2012年3月.
 8. 岡本 佳祐, 高野 奨太, 横田 健治, 平松 淳, 中川 雅弘, 高橋 達郎, “広域同期型光タイムスロット交換網における高効率タイムスロット割り当てアルゴリズムの検討,” 電子情報通信学会総合大会講演論文集, B-12-17, 2012年3月.
 9. 服部 恭太, 中川 雅弘, 君島 直樹, 片山 勝, 三澤 明, 平松 淳, “周回性アレイ導波路回折格子を用いた波長スイッチにおける光マルチキャスト方式の提案,” 電子情報通信学会総合大会講演論文集, B-12-24, 2012年3月.
 10. 君島 直樹, 中川 雅弘, 服部 恭太, 片山 勝, 三澤 明, “波長スイッチ大規模化に向けた検討,” 電子情報通信学会総合大会講演論文集, B-12-25, 2012年3月.
 11. 服部 恭太, 中川 雅弘, 君島 直樹, 片山 勝, 三澤 明, 平松 淳, “光 L2 スイッチネットワークの提案,” 信学技報, vol. 112, no. 87, PN2012-3, pp. 13-18,

2012年6月.

12. 服部 恭太, 中川 雅弘, 君島 直樹, 片山 勝, 三澤 明, 平松 淳, “光 L2 スイッチネットワークにおけるバーストフレーム同期方式の検討.” 電子情報通信学会ソサイエティ大会講演論文集, B-12-10, 2012年9月.
13. 君島 直樹, 中川 雅弘, 服部 恭太, 片山 勝, 三澤 明, “光 L2SW-NW におけるトラヒック変動に対する動的帯域制御方式の特性評価,” 信学技報, vol. 112, no. 398, PN2012-72, pp. 289-294, 2013年1月.
14. 服部 恭太, 中川 雅弘, 君島 直樹, 片山 勝, 三澤 明, “光 L2 スイッチネットワークにおけるマルチリング対応型のタイムスロット同期方式の検討,” 電子情報通信学会総合大会講演論文集, B-12-10, 2013年3月.
15. 服部 恭太, 中川 雅弘, 君島 直樹, 片山 勝, 三澤 明, “光 L2 スイッチネットワークにおける時刻配信型のタイムスロット同期方式の評価,” 信学技報, vol. 113, no. 175, PN2013-8, pp. 1-6, 2013年8月.
16. 伊達 拓紀, 中川 雅弘, 服部 恭太, 君島 直樹, 樋口 健一, 片山 勝, 三澤 明, “広域仮想 L2SW におけるアドレス移動に追従した光パス帯域制御方式の提案,” 電子情報通信学会ソサイエティ大会講演論文集, B-6-42, 2013年9月.
17. 服部 恭太, 中川 雅弘, 君島 直樹, 片山 勝, 三澤 明, “光 L2 スイッチネットワークにおける時刻配信型タイムスロット同期方式のタイムスロット制御精度の評価,” 電子情報通信学会ソサイエティ大会講演論文集, B-12-10, 2013年9月.
18. 服部 恭太, 中川 雅弘, 君島 直樹, 片山 勝, 小川 宏明, “マルチリング対応型光 L2 スイッチネットワークにおけるタイムスロット同期方式の評価,” 信学技報, vol. 113, no. 390, CS2013-90, pp. 35-40, 2014年1月.
19. 保米本 徹, 服部 恭太, 中川 雅弘, 片山 勝, 小川 宏明, “大規模バッファレス伝送 NW 向けの分散型動的帯域制御方式の提案,” 電子情報通信学会総合大会講演論文集, B-12-8, 2014年3月.
20. 服部 恭太, 中川 雅弘, 片山 勝, 小川 宏明, “光 L2 スイッチネットワークにおけるタイムスロット量更新タイミング制御方式の提案,” 電子情報通信学

会総合大会講演論文集, B-12-9, 2014 年 3 月.

21. 三澤 明, 片山 勝, 服部 恭太, 中川 雅弘, 伊達 拓紀, 望月このみ, 河野 伸也, 西山 聡史, “仮想エッジアーキテクチャとトラフィックフロー制御技術,” 信学技報, vol. 114, no. 6, NS2014-4, pp. 17-22, 2014 年 4 月.
22. 保米本 徹, 服部 恭太, 中川 雅弘, 片山 勝, 小川 宏明, “メトロ・アクセス融合型集線ネットワークにおける分散型動的帯域制御方式の一検討,” 信学技報, vol. 114, no. 119, CS2014-23, pp. 37-42, 2014 年 7 月.
23. 服部 恭太, 中川 雅弘, 松田 俊哉, 片山 勝, 行田 克俊, “低コストなメトロネットワークの実現に向けた光 TDM 多重化方式の適用領域評価,” 信学技報, vol. 114, no. 289, CS2014-62, pp. 49-54, 2014 年 11 月.
24. 三澤 明, 中川 雅弘, 望月このみ, 土屋 英雄, 服部 恭太, 片山 勝, “仮想エッジアーキテクチャと帯域制御技術,” 信学技報, vol. 114, no. 477, NS2014-212, pp. 203-208, 2015 年 3 月.
25. 服部 恭太, 保米本 徹, 中川 雅弘, 松田 俊哉, 片山 勝, 行田 克俊, “低コストなメトロネットワークの実現に向けた光 TDM 方式適用時のコストの一評価,” 電子情報通信学会総合大会講演論文集, B-12-9, 2015 年 3 月.
26. 植松 芳彦, 中川 雅弘, 山本 宏, “光トランスポート網の堅牢性向上に向けた共用資源プール設計法,” 電子情報通信学会総合大会講演論文集, B-6-77, 2015 年 3 月.
27. 三澤 明, 望月このみ, 土屋 英雄, 中川 雅弘, 服部 恭太, 片山 勝, “PON 対応仮想エッジと可変帯域リングの資源再分配方式,” 電子情報通信学会総合大会講演論文集, BS-2-1, 2015 年 3 月.
28. 植松 芳彦, 中川 雅弘, 山本 宏, 鎌村 星平, 片山 勝, 源田 浩一, “光トランスポート網の堅牢性向上に向けた共用資源プール設計法,” 信学技報, vol. 115, no. 92, NS2015-34, pp. 25-30, 2015 年 6 月.
29. 三澤 明, 土屋 英雄, 望月このみ, 中川 雅弘, 服部 恭太, 片山 勝, 可児 淳一, “仮想エッジのための光波長 ADD/DROP 装置の提案,” 信学技報, vol. 115, no. 94, PN2015-8, pp. 39-44, 2015 年 6 月.
30. 服部 恭太, 保米本 徹, 中川 雅弘, 松田 俊哉, 片山 勝, 行田 克俊, “光

- L2 スイッチネットワークにおける帯域利用効率向上のためのタイムスロット制御タイミング切り替え方式の提案,” 信学技報, vol. 115, no. 204, PN2015-21, pp. 63-68, 2015 年 8 月.
31. 三澤 明, 望月このみ, 土屋 英雄, 中川 雅弘, 服部 恭太, 片山 勝, 可児 淳一, “インサースライブマイグレーション仮想エッジ方式の提案,” 学技報, vol. 115, no. 204, PN2015-22, pp. 69-74, 2015 年 8 月.
 32. 三澤 明, 望月このみ, 土屋 英雄, 中川 雅弘, 服部 恭太, 片山 勝, 可児 淳一, “PON 対応仮想エッジでの複数光バスを持つ物理構成の提案,” 電子情報通信学会ソサイエティ大会講演論文集, B-12-18, 2015 年 9 月.
 33. 三澤 明, 望月このみ, 土屋 英雄, 中川 雅弘, 服部 恭太, 片山 勝, 可児 淳一, “リンクアグリゲーションを用いた仮想エッジサーバの提案,” 信学技報, vol. 115, no. 312, PN2015-32, pp. 49-54, 2015 年 11 月.
 34. 服部 恭太, 中川 雅弘, 松田 俊哉, 片山 勝, 行田 克俊, “Photonic Sub-Lambda トランスポートネットワークにおける上りバースト信号の送信方向切り替えによる低遅延化方式の評価,” 信学技報, vol. 115, no. 497, PN2015-116, pp. 75-80, 2016 年 3 月.
 35. 三澤 明, 望月このみ, 土屋 英雄, 中川 雅弘, 服部 恭太, 片山 勝, 可児 淳一, “仮想エッジ ADM での定率光分岐方式,” 電子情報通信学会総合大会講演論文集, B-12-10, 2016 年 3 月.
 36. 服部 恭太, 中川 雅弘, 松田 俊哉, 片山 勝, 行田 克俊, “Photonic Sub-Lambda トランスポートネットワークにおける上りバースト信号の送信方向切り替えによる低遅延化方式の提案,” 電子情報通信学会総合大会講演論文集, B-12-12, 2016 年 3 月.
 37. 植松 芳彦, 中川 雅弘, 山本 宏, 鎌村 星平, 源田 浩一, 片山 勝, “広域光トランスポート網における保守条件の緩和効果,” 電子情報通信学会総合大会講演論文集, B-6-85, 2016 年 3 月.
 38. 松田 俊哉, 服部 恭太, 中川 雅弘, 保米本 徹, 益本 佳奈, 片山 勝, 行田 克俊, “電気処理部の集約によるメトロ NW シンプル化の検討 ～NetroSphere 構想実現に向けて～,” 信学技報, vol. 116, no. 113, PN2016-5, pp. 1-6, 2016 年 6

月.

39. 服部 恭太, 中川 雅弘, 松田 俊哉, 片山 勝, 行田 克俊, “クラウドエッジ 収容のためのバースト信号と連続信号間でのバースト光受信器共有化方式の提案 ～NetroSphere 構想実現に向けて～,” 信学技報, vol. 116, no. 113, PN2016-12, pp. 39-44, 2016 年 6 月.
40. 益本 佳奈, 保米本 徹, 松田 俊哉, 片山 勝, 行田 克俊, 中川 雅弘, “バースト光信号を用いたメトロ伝送システムにおける EDFA 過渡応答特性抑圧に関する一考察,” 電子情報通信学会ソサイエティ大会講演論文集, B-12-6, 2016 年 9 月.
41. 並木 雅俊, 益本 佳奈, 中川 雅弘, 小川 雅也, 松田 俊哉, 荒谷 克寛, 恩田 英俊, 行田 克俊, “光 WDM/TDM ネットワークにおける Point to Multipoint パス提供方式,” 信学技報, vol. 116, no. 307, PN2016-36, pp. 67-72, 2016 年 11 月.
42. 益本 佳奈, 中川 雅弘, 松田 俊哉, 保米本 徹, 片山 勝, 行田 克俊, “励起光強度最適化により EDFA の過渡応答を抑圧したバースト光増幅中継方式,” 信学技報, vol. 116, no. 401, CS2016-73, pp. 53-58, 2017 年 1 月.
43. 松田 俊哉, 益本 佳奈, 中川 雅弘, 保米本 徹, 片山 勝, 行田 克俊, “トランスポート機能拡張モジュールによる予等化バースト光信号を用いた光増幅中継伝送方式の検討,” 信学技報, vol. 116, no. 498, PN2016-103, pp. 113-117, 2017 年 3 月.
44. 益本 佳奈, 中川 雅弘, 松田 俊哉, 並木 雅俊, 恩田 英俊, 保米本 徹, 片山 勝, 行田 克俊, “EDFA の過渡応答を抑圧したバースト光増幅中継方式における中継段数の評価,” 電子情報通信学会総合大会講演論文集, B-12-2, 2017 年 3 月.
45. 益本 佳奈, 中川 雅弘, 松田 俊哉, 恩田 英俊, 片山 勝, 行田 克俊, “EDFA 励起光パワー最適設計により過渡応答抑圧を可能にした WDM バースト光増幅手法の中継段数評価,” 電子情報通信学会ソサイエティ大会講演論文集, B-12-1, 2017 年 9 月.
46. 益本 佳奈, 中川 雅弘, 松田 俊哉, 恩田 英俊, 片山 勝, 松村 和之, “可変アッテネータのプロアクティブ制御によりバースト光伝送の長延化を可能

- にした光増幅中継方式,” 信学技報, vol. 117, no. 422, CS2017-84, pp. 31-36, 2018年1月.
47. 益本 佳奈, 中川 雅弘, 松田 俊哉, 恩田 英俊, 片山 勝, 松村 和之, “EDFA 過渡応答特性におけるオーバーシュート量評価,” 電子情報通信学会総合大会講演論文集, B-12-3, 2018年3月.
 48. 益本 佳奈, 中川 雅弘, 松田 俊哉, 恩田 英俊, 松村 和之, “メトロ網向けバースト光伝送時における分散補償最適設計法の提案,” 電子情報通信学会ソサイエティ大会講演論文集, B-12-6, 2018年9月.
 49. 益本 佳奈, 中川 雅弘, 松田 俊哉, 恩田 英俊, 松村 和之, “メトロ網向け光 TDM ネットワークにおける分散補償最適設計に関する一検討,” 信学技報, vol. 118, no. 393, CS2018-89, pp. 13-18, 2019年1月.
 50. 益本 佳奈, 中川 雅弘, 松田 俊哉, 恩田 英俊, 松村 和之, “伝送ペナルティと EDFA 過渡応答を考慮した長距離バースト伝送品質評価,” 信学技報, vol. 119, no. 94, PN2019-9, pp. 13-18, 2019年6月.
 51. 益本 佳奈, 中川 雅弘, 松田 俊哉, 恩田 英俊, 松村 和之, “多段・長距離バースト伝送に向けたダミー信号による過渡応答抑制実験,” 電子情報通信学会ソサイエティ大会講演論文集, B-12-10, 2019年9月.
 52. 益本 佳奈, 中川 雅弘, 松田 俊哉, 松村 和之, “メトロ網におけるバースト光増幅時の過渡応答抑制を可能とするノード構成の有用性評価,” 信学技報, vol. 119, no. 365, CS2019-93, pp. 27-32, 2020年1月.
 53. 松田 俊哉, 中川 雅弘, 益本 佳奈, 松村 和之, “プラグブル波長可変光モジュールと誤り訂正符号付きメモリを用いた遠隔メモリ間ダイレクト接続に関する検討,” 信学技報, vol. 119, no. 442, PN2019-54, pp. 7-11, 2020年3月.
 54. 益本 佳奈, 中川 雅弘, 松田 俊哉, 西山 公太, 松村 和之, “バースト光増幅時のメトロリングネットワークのコスト評価,” 信学技報, vol. 120, no. 71, PN2020-12, pp. 47-52, 2020年6月.
 55. 益本 佳奈, 中川 雅弘, 松田 俊哉, 西山 公太, 松村 和之, “Void filling を使用したバースト光伝送技術のメトロ網への適用検討,” 電子情報通信学会ソサイエティ大会講演論文集, B-12-6, 2020年9月.

56. 益本 佳奈, 松田 俊哉, 中川 雅弘, 西山 公太, 宮村 崇, “バースト光増幅技術に対する雑音の温度依存特性評価,” 信学技報, vol. 120, no. 309, OCS2020-38, pp. 55-60, 2021 年 1 月.
57. 西山 公太, 益本 佳奈, 中川 雅弘, 松田 俊哉, 宮村 崇, “EDFA を用いたバースト光増幅における OSNR の過渡応答特性評価,” 電子情報通信学会総合大会講演論文集, B-10-25, 2021 年 3 月.
58. 山口 秀, 中川 雅弘, 吉岡 弘高, “遅延測定による光ファイバセンシングにおける遅延測定粒度の影響,” 電子情報通信学会総合大会講演論文集, B-12-8, 2021 年 3 月.
59. 益本 佳奈, 松田 俊哉, 中川 雅弘, 西山 公太, 宮村 崇, “バースト EDFA における雑音と波形歪みの温度依存特性評価,” 信学技報, vol. 121, no. 76, PN2021-5, pp. 7-12, 2021 年 6 月.
60. 深谷 崇文, 中川 雅弘, 関 剛志, 宮村 崇, “キャリアネットワークにおけるトラヒック交流と光パス配置の関係,” 信学技報, vol. 121, no. 386, PN2021-52, pp. 1-4, 2022 年 3 月.
61. 広瀬 健太, 深谷 崇文, 中川 雅弘, 関 剛志, 宮村 崇, “マルチバンド波長多重ネットワークにおける波長多重数変化を考慮した誘導ラマン散乱影響の解析,” 信学技報, vol. 121, no. 386, PN2021-57, pp. 29-32, 2022 年 3 月.
62. 益本 佳奈, 中川 雅弘, 松田 俊哉, 関 剛志, 宮村 崇, “EDFA を用いた長距離バースト伝送時のオーバーシュート許容値評価,” 信学技報, vol. 121, no. 386, PN2021-58, pp. 33-36, 2022 年 3 月.
63. 西山 公太, 中川 雅弘, 松田 俊哉, 益本 佳奈, 関 剛志, 宮村 崇, “光 TDM 伝送における高精度同期を実現するタイミング調整方法の提案,” 信学技報, vol. 122, no. 71, PN2022-6, pp. 7-11, 2022 年 6 月.
64. 益本 佳奈, 松田 俊哉, 関 剛志, 中川 雅弘, 西山 公太, 宮村 崇, “メトロ網向け L 帯光 TDM ネットワークに関する一検討,” 電子情報通信学会ソサイエティ大会講演論文集, B-12-9, 2022 年 9 月.