

学術情報光コアネットワークにおける 波長群スイッチングとリンク通過パス数均一化の効果

Impact of Waveband Switching and Equalizing of Paths in a Link on Photonic Core Networks in Japan

高野勝美[†], 軽部良[‡], 齋藤慶太[‡], 武田利浩[‡], 伊藤智博[†]
Katsumi Takano[†], Ryo Karube[‡], Keita Saito[‡], Toshihiro Taketa[‡], Tomohiro Ito[†]

ktakano@ieee.org

[†] 山形大学 工学部学術情報基盤センター
[‡] 山形大学 大学院理工学研究科

[†] Networking and Computing Service Center, Yamagata University
[‡] Graduate School of Science and Engineering, Yamagata University

概要

次世代の学術情報ネットワークの高速化・低遅延・高信頼のため、その物理レイヤの構成を WDM 光パスネットワークとすることを念頭に、波長群パススイッチングの適用と波長資源の消費を抑えるためのリンク通過パス数の均一化が、ネットワークで必要となる波長数とノードスイッチ規模に与える影響を調査した。リンク通過パス数均一化は必要波長数を抑えるために有効である。波長群パススイッチングでは入力ポート数を低減できるが、リンク通過パス数均一化はその効果を劣化させることがないことがわかった。

キーワード

光クロスコネクタ, 波長群スイッチング, 光パス, フォトニックネットワーク, 波長資源

1. はじめに

一本の光ファイバ中に複数の異なる波長を多重する波長分割多重(WDM: Wavelength Division Multiplexing) 技術の進展により[1], 光ファイバ伝送の大容量化は著しく進歩した。その実用化により, 学術情報ネットワーク SINET4 においても, アクセス回線として WDM 技術が用いられている[2].

光を用いた広帯域な情報伝送技術は, ポイント・トゥ・

ポイントの伝送から, ROADM (Reconfigurable Optical Add/Drop Multiplexer)を用いるメトロ系の転送方式へと発展している。これは, 光の波長を有効に利用し, 電気処理を必要とせず, 高速の伝送速度を保ったまま, 柔軟なパス管理を可能としたものである。今後, 複数のノードをメッシュ型に接続した形態にもこの考え方を適用する方向へ発展していくものと予想される[3]. すなわち, 光方路の切替えに際し, 電気処理によるルータの機能を光の波長を有効に利用してオフロードし, ノードにおけるボトルネックを解消するものである。

一方で, 日本の科学技術 10 ペタフロップス級の計算能

力を有する世界最高水準の京速コンピュータ「京」が開発され[4],「京」を中核として, 計算機科学と計算科学分野の連携・融合を促す研究拠点の形成が求められている。「京」と全国の大学・研究所などに設置されている主要なスパコンをネットワークで結ぶ HPCI (High Performance Computing Infrastructure)の実現に向けた活動が進められており, そのネットワーク基盤として SINET4 が用いられている[5].

将来の計算機科学の進歩とネットワーク利用を考えれば, レイヤ2, 3にとどまらず, 物理レイヤも含めたボトルネック解消が必要となる。したがって, 次世代 HPCI のネットワーク基盤の設計では, 光による転送技術まで踏み込んで考えることが有効である。このことは, 学術情報ネットワーク利用上での, 即時性の高いアップグレードやリンク・ノード障害もしくは災害時のセルフヒーリングのためのスペアリソース確保などにも有効であると考えられ, 超高速・低遅延・高信頼な学術情報ネットワークの構築に役立つと思われる。

そこで本稿では, WDM を前提とした光パススイッチング技術を日本の学術情報コアネットワークに適用した場合を念頭に, 波長数が増大した時に光方路切換え(光クロスコネク)装置が大規模化する問題を解決するために, 経路が一致する複数の波長パスをグループ化する波長群スイッチングを適用した効果について述べる。また, 波長資源を節約するために, パスに対する経路の割当て方法として最短経路要請を緩和し, リンクを通過するパス数をネットワーク全体で均一化した経路割当てを行うことの効果について述べる。

波長群スイッチングについては, 文献[6], [7]で報告があるが, 扱っているネットワーク形態が東西南北に広がるメッシュ型である。本論文では, 日本の学術情報ネットワークを前提に, ラダー型のネットワークについて検討を行っている。また, 文献[6]ではリンク通過パス数均一化は行っていない。文献[7]では, リンク通過パス均一化は行っているが, その有無による違いについては検証されていない。本論文では, この違いについても述べる。

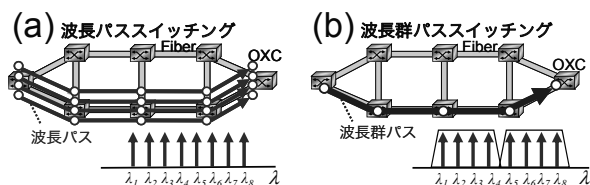


図1. 波長および波長群スイッチング

第2章では, 本論文で扱う前提となる技術について述べる。つまり, 光クロスコネク装置の構成およびその規模の評価方法について述べる。第3章では, パスに対する経路および波長割当て方法, およびリンク通過パス数の均一化方法について述べる。第4章では, 本論文で

評価した次世代学術情報ネットワークのネットワーク形態とリンク遅延について述べる。第5章では, ノード規模に対する評価結果と, ネットワークで必要となる波長数に関する結果を述べる。第6章はまとめである。

2. 波長, 波長群パスと光クロスコネク

2.1. 波長パスと光クロスコネク

図1(a)のように, 光の波長をパスに割当て(以下, 波長パスと呼ぶ), 光フィルタと光導波路による分合波器に基づいて方路を切り替える方法を波長スイッチングと言う。そのための光クロスコネク(OXC : Optical Cross-Connect)装置の構成を図2に示す。光ファイバから出た光は波長分離器(DEMUX)により波長ごとに分離され, 波長単位で方路を切り替えられる。その後, 波長合波器(MUX)により光ファイバ中に波長分割多重される。このように光の波長を利用して方路を切り替えることで, 電気的な経路切り替えをなくすことができ, ノードにおける転送速度を向上することができる。

2.2. 波長群パスと階層型光クロスコネク

光クロスコネクでは, 波長パスの数が増加すると OXC が大規模化し, 設備コストや消費電力の増加につながる事が懸念される。OXC の規模を低減するため, 波長群スイッチングが検討されている。波長群スイッチングは, 同一経路を通過する複数の波長パスを波長群パスにグループ化し, 波長群単位で一括してスイッチングする。その概念図を図1(b)に示す。図1における白丸がスイッチ素子を表しており, 図1(a)と(b)では, (b)の方がスイッチ素子の数を減らすことができることがわかる。これにより OXC を小規模化できる[6], [8], [9].

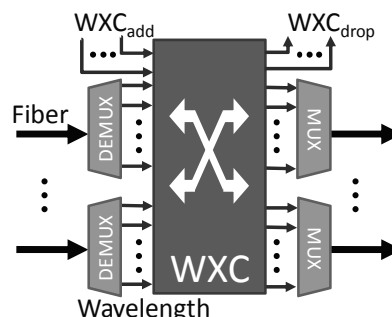


図2. 光クロスコネク(OXC)

波長群スイッチングでは, 階層型光クロスコネク(HOXC : Hierarchical OXC)を用いる。その構造を図3に示す[8]。二つの階層からなり, ノード入出力光ファイバに近い階層は波長群スイッチングの機能を有し, BXC

(Waveband Cross-Connect) と呼ぶ。ここでは、波長群の合分波、波長群単位でのスイッチング、波長群 Add/Drop が行われる。波長パスの単位でスイッチングする機能は図3の上部であり、WXC (Wavelength Cross-Connect) と呼ぶ。ここでは、波長群から波長への分波とその逆の機能、波長単位でのスイッチング、波長 Add/Drop が行われる。より多くの波長パスを波長群として BXC でスイッチングできれば、OXC の規模を削減できる。

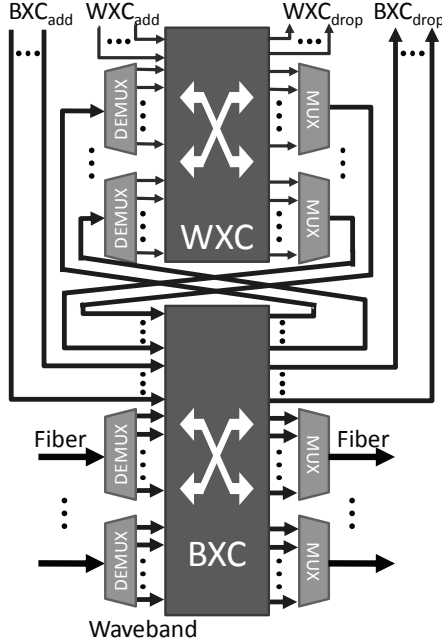


図3. 階層型光クロスコネクタ (HOXC)

表1. OXC 入力ポート数算出のためのパラメータ

記号	パラメータ
F	入力ファイバ数
B	ファイバ中の波長群数
N	波長群中の波長数
W	ファイバ中の波長数 (=BN)
y_{UP}	WXCからBXCへ送出される波長群数
y_{DOWN}	BXCからWXCへ送出される波長群数
x_{ADD}	WXCのAddポート数
x'_{ADD}	BXCのDropポート数

2.3. 光クロスコネクタの入力ポート数

OXC および HOXC の規模は、重要な評価指標である。それらを定量的に評価するには、与えられたトラフィックパスに対して必要となる OXC および HOXC の入力ポート数を調べればよい。

BXC, WXC および HOXC の入力ポート数をそれぞれ P_{BXC} , P_{WXC} , P_{HOXC} と書くことにすると、スイッチとして分配選択型を仮定すれば、それらは以下の式で計算できる[10], [11]。すなわち、

$$P_{BXC} = FB + y_{UP} + x'_{ADD} \quad (1)$$

$$P_{WXC} = Ny_{DOWN} + x_{ADD} \quad (2)$$

$$P_{HOXC} = P_{BXC} + P_{WXC} \quad (3)$$

式中のパラメータの意味は、表1に記載した。

比較のために、波長群へのグループ化を行わない場合のクロスコネクタ規模も以下のように計算する。想定するクロスコネクタ (COXC: Conventional OXC) は図2のように WXC のみであり、方路光ファイバが直接 WXC に接続される。その入力ポート数 P_{COXC} は、

$$P_{COXC} = FW + x_{ADD} \quad (4)$$

で評価する。

3. 経路、グループ化、波長の設定方法

3.1. パスに対する経路および波長割り当て

光パス(波長パス・波長群パス)スイッチングネットワークでは、経路、波長、波長群グループ化について、その設定方法を決める必要がある。それらの方法は、パスの遅延時間、ネットワークで必要になる波長数、ノードの規模などにより評価される。

一般に経路設定に関しては、最短経路を割り当てるのが通例と思われる。それは、(1) 通信における遅延を抑える、(2) 経路のホップ数をできるだけ小さくしてスイッチポート数を減らす、という考え方に基づく[7]。波長群スイッチングでは、パスのグループ化によりスイッチポート数を削減できる。したがって、最短経路を選ぶ必要性の一つが緩和できると考えられる。

一方で、波長パスおよび波長群パススイッチングネットワークでは、波長数の増加はリンクのコストが上昇するために好ましくない。そのため、ネットワークで必要となる波長数が経路設定の目的関数になることがある。必要波長数を減らすには、特定のリンクに通過パスが集中するのを避けることが重要で、ある程度の遅延を犠牲にし、リンクの通過パス数を均一化する方法が有効である[12]。

波長群へのグループ化は、経路が同一であるパス数が多いほどグループ化できるパス数が増え、スイッチポート数を低減する効果をもたらす。その一方で、リンクの通過パス数を均一化することは、ホップ数の増加をもたらす。スイッチ規模削減の妨げとなりうる。

このようなことから、本論文では、波長パススイッチングと波長群パススイッチングの両方の場合について、リンクの通過パス数を均一化する処理の有無が、ネットワークに必要な波長数とノード規模(スイッチポート数)に及ぼす効果について数値計算により検証する。

経路、波長および波長群の設定のための全体のフローチャートを図4に示す。大きく3つのステップからなる。

Step 1 では、与えられた要求トラヒックのパス（ソース・デスティネーションの対）に対して、Dijkstra アルゴリズム[13]により最短経路探索を行う(Step 1-1)。その結果に基づき、ネットワークの各リンクを通過するパス数が均一になるような経路変更処理を行う(Step 1-2)。この処理を施すことで、リンクで使用する波長数がほぼ同じになる[12]。本論文では、Step 1-2 の有無によるクロスコネクト規模削減効果の影響と、ネットワークに必要となる波長数への影響を調査する。この処理の詳細については、次の節で詳説する。

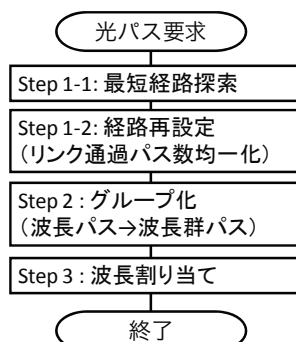


図4. 経路、波長、波長群グループ化のフローチャート

Step 2 は、波長パスを波長群パスにグループ化するために、全てのパスの経路を比較し、経路の一致する複数のパスをグループ化する。その際に、できるだけ長い経路が一致するパス同士をグループ化する。グループ化の方法として、経路の一部が一致しているパスをグループ化する Subpath grouping を用いた[14]。Subpath grouping はグループ化の対象となるパス数が比較的多くできる方法である。本報告中では波長群の大きさに関して、一つの波長群パスに含まれる波長パスを波長群容量 N とし、今回は5とした。同一経路の波長パスの数が N に満たないときにはグループせず、それらのパスは波長単位でスイッチングするものとした。

Step 3 で波長を割り当てる。波長割り当ては First-Fit により行った[15]。図5のように、まず波長群パスの波長割り当てを行い、その後、波長パスの波長を割り当てる。波長群パスの波長配置は、できるだけ連続するように配置されることとした。また、なお、リンクの上りと下りで同一波長を使用できないものとした。1つのパスデマンドに1つの波長を割り当てるものとし、ノードに波長変換を用いないことを仮定した。

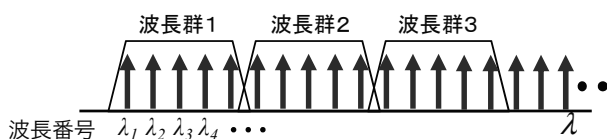


図5. リンクの波長配置の一例

3.2. リンクの通過パス数均一化

本節では Step 1-2 について詳述する。まず、全てのリンクに対して、通過するパス数を調査する。その結果、通過するパス数が最も大きなリンクをマキシマムリンク（以下、ML と表記）とする。もし、ML が複数ある場合には、リンク番号が小さいリンクを ML とする。ML に対して、ML を通過するパスの中で遅延時間の長いパスを経路再設定パス（リルーティングパス）とする。リルーティングパスの経路を再設定するために、ML をないものとして考えてリルーティングパスについて Dijkstra アルゴリズムを適用し、ML を通過しない最短経路探索を行い、その経路に再設定する。この処理を、ML を通過するパス数が変化しなくなるまで繰り返す。以上の処理をフローチャートにしたものを図6に示す。

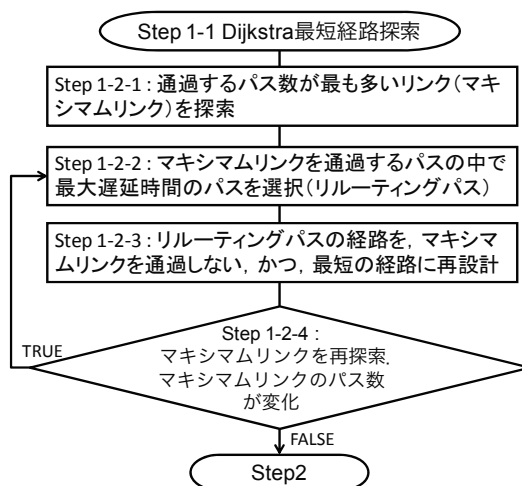


図6. リンクの通過パス数均一化処理

4. ノード配置およびリンクの構成

図7は、本稿でのシミュレーションに用いたネットワークである。8ノード、13リンクからなる。リンクの接続形態は、SINET4 の接続形態を次世代光パスネットワークに拡張したと考えた。具体的には、SINET4 のコアノード配置都市に光クロスコネクトを配置し、SINET4 のリンクを WDM 光ファイバリンクとした。各リンクの遅延時間は、ノード間の地理的な距離と光の速度から見積もり、各リンクの遅延時間は付録に表 A1 として記した。リンク番号を i とし、リンクの遅延時間 t_i の具体的な計算方法は、以下の式に基づく。すなわち、

$$t_i = n L_i / c \quad (5)$$

ここで、 n は単一モード光ファイバの伝搬モード屈折率、 c は真空中の光速、 L_i はリンク i 両端ノード間を結ぶ地理的直線距離である。



図7. ノードとリンクの構成

5. 計算結果

本稿では、トラヒックとして複数のデマンドパスをランダムに与え、その量に対する HOXC 規模ならびにネットワークで必要となる波長数を評価する。

全パス数をネットワークのノードの組み合わせ数で除した値をトラヒック負荷と定義し、トラヒック量の指標とした。これは、1つの送受信ノードあたりのデマンドパス数の平均の意味を持つ。計算では、トラヒック負荷が1から10まで、トラヒック負荷1ずつ増加させて評価した。

HOXC 規模の評価は、ネットワークの各ノードに HOXC を配置したと仮定して、デマンドパスを実現するために必要となる HOXC 入力ポート総数を計算することによって行った。必要波長数は、デマンドパスを実現するためネットワーク全体で必要となる波長数で評価した。

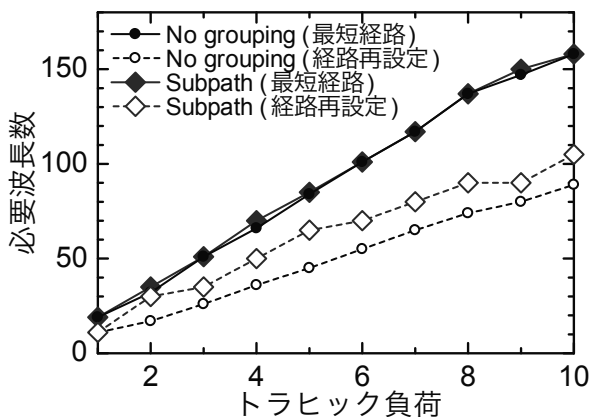


図8. トラヒック負荷に対する必要波長数

必要波長数のトラヒック負荷に対する結果を図8に示

す。経路設定時に、Dijkstra アルゴリズムに基づく最短の経路を設定した場合を「最短経路」と表記した。この場合、図4の Step 1-2 の処理は行わない。最短経路の状態に対し、リンクを通過するパス数を均一化するように経路の再設定(Step 1-2)を施したケースを「経路再設定」と表記した。また、経路の一部が同一の波長パスを波長群へグループ化したものを「Subpath」と表記し、比較のため、グループ化を施さないケースを「No grouping」とした。

波長群パススイッチングを用いないとき(No grouping)では、最短経路の場合よりも経路再設定の場合の方が、必要波長数を少なくできる。波長パススイッチングを用いるとき(Subpath)も同様に、最短経路の場合よりも経路再設定の場合の方が、必要波長数を少なくできる。つまり、リンク通過パス数の均一化は、ネットワークで必要となる波長数を少なくできることがわかる。必要波長数低減の効果は、波長群パススイッチングリンクを用いるときの方が、そうでない時よりも弱いことがわかる。これは、波長群パスを用いるために、リンクによっては波長が連続的に配置されず、一部に使われない波長のあるリンクが存在することに起因する。この増加は、最短経路の場合を下回っていることから、リンク通過パス数均一化による必要波長数低減の効果を損なうほどのものではないことがわかる。

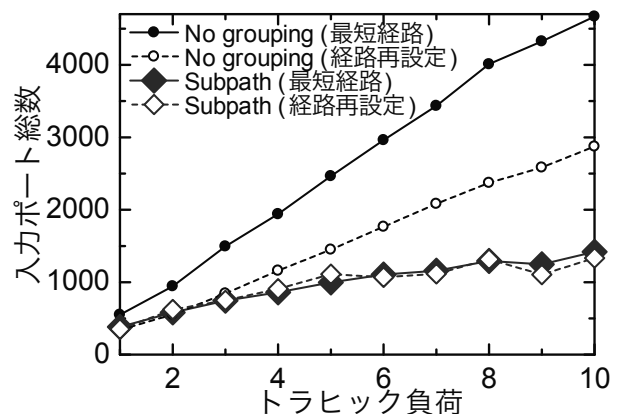


図9. トラヒック負荷に対する HOXC 入力ポート総数

HOXC 入力ポート総数のトラヒック負荷に対する変化を図9に示す。まず、波長群へのグループ化をしないとき(No grouping)では、経路再設定の場合は、最短経路選択の場合に比して入力ポート総数が小さくなる。この効果は、図8の結果で述べた波長数の低減に起因すると考えてよい。具体的には、式(4)の W が減少する。次に、No grouping と Subpath を比較する。最短経路の場合も、経路再設定の場合も、波長群パススイッチングを用いることにより、入力ポート総数を低減できることがわかる。波長群へのグループ化した場合(Subpath)については、経路再設定の有無によらず、ほぼ同等の入力ポート数となっている。このようにほぼ同一の特性となることは、ネットワークのノード数を増やしたケースで計算した場合

にも得られた。つまり、必要波長数を減じるためのリンク通過パス数均一化が、波長群によるスイッチ規模の低減効果に悪い影響を及ぼさないことがわかる。最短経路の場合、ML を通過するパス数が低減されていないことから、波長群を用いることによりグループ化が進み、入力ポート数が減少する。他方、経路再設定の場合、グループ化は比較的少なくなるが、図8の波長数低減の効果により入力ポート数が減少する。それでも、経路再設定をする場合には、ホップ数が増加すれば入力ポート数が増加してしまうと考えられる。しかし、図9の結果を見ると、最短経路で波長群を用いる場合とほぼ同一の特性となる。このことは、リンク通過パス数の均一化によって、ほとんどホップ数が増加していないことを意味する。北米を模擬したネットワークトポロジーなど、東西南北に広がるメッシュ型の場合には、経路再設定によって、著しくホップ数が増加し、入力ポート数が増加する場合があると思われる。しかし、日本の学術情報ネットワークのコアノードを接続する形態で、最短経路をベースにした経路再設定では大きく迂回する経路とならず、著しくホップ数が増えることがないと考えられる。SINET4の接続構造が、障害に対して堅牢となるような5ループ構造であることがこの効果をもたらしていると考えられることができる。

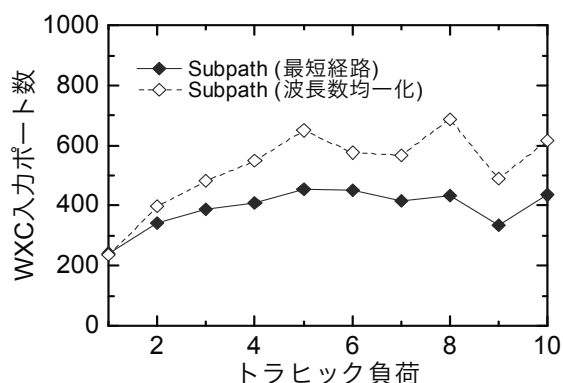


図10. トラフィック負荷に対する WXC 入力ポート総数

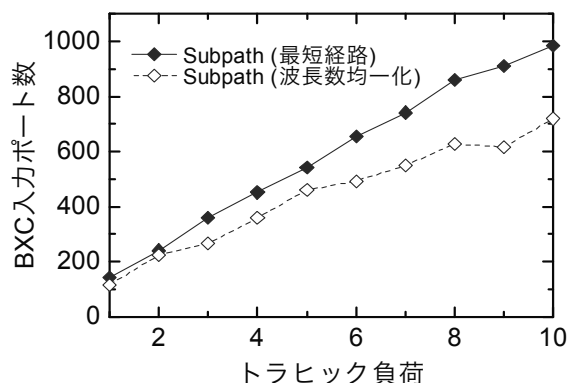


図11. トラフィック負荷に対する BXC 入力ポート総数

HOXC 入力ポート数は、式(3)に示すように、WXC と BXC のポート数の和である。波長群パススイッチング

(Subpath) の場合、図9に示したように、入力ポート総数は最短経路と経路再設定でほぼ同一であったが、その WXC と BXC の内訳を調査した。トラフィック負荷に対する WXC ポート総数および BXC ポート総数をそれぞれ図10、図11に示す。

最短経路では、同じソース・デスティネーションとなる波長パスは全て同じ経路を通過するため、グループ化されやすく、トラフィック負荷に対して WXC ポート数の増加を抑制できる。今回、波長群容量 N が5であるため、トラフィック負荷が5以上でその傾向が顕著である。

経路再設定では、リンク通過波長数均一化により、最短経路設定で同一経路を通過していた光パスの経路が変更されるため、同一経路の光パス数は減少し、波長群パスにグループ化できる波長パス数が減少し、式(2)における BXC から WXC へ送出される波長群数 y_{DOWN} が増加し、トラフィック負荷に対して WXC 入力ポート数はさほど抑制されない。しかし、リンク通過波長数均一化より必要波長数が減少するため、式(1)におけるファイバ中の波長群数 B が減少し、BXC 入力ポート数が減少する。

6. まとめ

次世代の日本学術情報ネットワークの高速化・低遅延・高信頼のため、その物理レイヤの構成を WDM 光パスネットワークとすることを念頭に、波長群パススイッチングの適用と波長資源の消費を抑えるためのリンク通過パス数均一化が、ネットワークで必要となる波長数とノードスイッチ規模に与える影響を調査した。リンク通過パス数均一化は必要波長数を抑えるために有効である。波長群パススイッチングでは入力ポート数を低減できるが、リンク通過パス数均一化はその効果を劣化させることがないことがわかった。これらの結果は、日本の大都市を結ぶネットワーク形態と、最短経路をベースにリンク通過パス数均一化の経路再設定を行うことに由来すると考えられる。

謝辞

本研究の一部は科研費(24246066)の支援を受けた。

参考文献

- [1] C. A. Brackett: Dense wavelength division multiplexing networks: principles and applications, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 8,

- no. 6, pp. 948-964 (1990).
- [2] <http://www.sinet.ad.jp/>
- [3] 佐藤健一, 古賀正文: 広帯域光ネットワークング技術, コロナ社 (2003).
- [4] <http://www.aics.riken.jp/>
- [5] <http://www.hpci-office.jp/>
- [6] 山浦純, 高田篤, 今宿互, 長津尚英, 盛岡敏夫: 波長群ルーチング NW の設備量評価と一括波長変換デバイスについての一検討, 信学技報, CS, vol. 102, no. 102, pp. 11-16 (2002).
- [7] 廣田悠介, 本多弘明, 戸出英樹, 村上孝三: 光波長群ネットワークにおけるパスグループ化に適した経路設計手法の提案, 信学技報, PN2004-36, pp. 13-18 (2004).
- [8] 梯昌二, 長谷川浩, 佐藤健一: 多階層光パスネットワークノードの研究, 信学技報, PN, vol. 106, no. 419, pp. 9-12 (2006).
- [9] 高橋耐志, 原井洋明, 小関健: 波長変換を用いた階層型光パスネットワークの装置コスト最小構成, 信学技報, OCS, vol. 103, no. 108, pp. 45-50 (2003).
- [10] 吉田英二, 高橋哲夫, 河合武司, 狩野文良: フォトニック MPLS ルータを実現する波長ルーチング技術, NTT R&D, vol. 50, no. 10, pp. 750-757 (2001).
- [11] 三木哲也, 須藤昭一: 光通信技術ハンドブック, オプトロニクス社 (2002).
- [12] Ardian Greca, Tatsuhiro Kato, Kiyoshi Nakagawa, and Mohd Fadzly: Provisioning Algorithm for Survivable WDM Optical Path Networks, Proc. of the Fifth Optoelectronics and Communications Conference (OECC2000), 12P-25, pp.236-237 (2000).
- [13] 片山直登: ネットワーク設計問題, 朝倉書店, (2008).
- [14] X. Cao, V. Anand, and C. Qiao: Waveband Switching in Optical Networks, IEEE Commun. Mag., vol. 41, no. 4, pp. 105-112 (2003).
- [15] H. Zang, J. P. Jue, B. Mukherjee: A review of routing and wavelength assignment approaches for wavelength-routed optical WDM networks, Optical networks magazine, vol. 1, no. 1, pp. 47-60 (2000).

付録

表 A1. リンクの遅延時間

Link number	Node number		Delay time [ms]
1	1	2	2.7
2	1	3	4.2
3	2	3	1.5
4	2	4	2.1
5	3	4	1.4
6	3	5	1.3
7	3	6	2.0
8	4	6	1.2
9	4	7	2.3
10	5	6	0.7
11	6	7	1.4
12	6	8	2.4
13	7	8	1.0