

平成29年度 修士論文

エラスティック光ネットワークにおける
変調方式を考慮した独立経路選択方式

所 属 情報理工学研究科
情報・ネットワーク工学専攻
キットスワン研究室

提 出 者 1631037 岸 祐斗

主任指導教員 キットスワン ナッタポン 助教

指導教員 來住 直人 教授

提 出 日 2018年1月29日

概要

本論文は, 1+1 path protection を導入したエラスティック光ネットワークにおいて, 発着ノード間の複数のリンク独立経路にかかるスペクトルスロットの使用量を最小化する経路選択方式を提案する. エラスティック光ネットワークでは, 光パスの経路長に応じて適切な変調方式を適用する. 経路長の長い光パスにおいては多くのスペクトルスロットを必要とする変調方式を使用し, 経路長の短い光パスに対しては少ないスペクトルスロットで済む変調方式が使用される. 光パスが設定される際に, 要求するスペクトルスロットの数は, 光パスの経路長と使用スペクトルスロット数との非線形な関係に基づいて決定される. 従来の独立経路選択方式として, 発着ノード間のリンク独立経路の総経路長を最小化する, または, 総ホップ数を最小化する経路選択方式がある. しかし, これらの経路選択方式では, 光パスの経路長とスペクトルスロットの使用量が非線形関係にあるため, 必ずしも光パスを設定される際に要求されるスペクトルスロットの使用量を最小化することができるとは限らなく, これはスペクトルの利用効率を減少させる要因になる. また, 既存研究に, スペクトルスロットの使用量を最小化する経路選択方式として, 経路長からスペクトルスロットの使用量を求める際に, 距離の刻み幅毎にスペクトルスロットの使用量を求めることにより, スペクトルスロットの使用量を最小化する経路選択問題の最適化問題を, 整数線形計画問題に定式化する方式があるが, 線形化にかかる計算量が大きくなり, スケーラビリティに欠けている. 本論文では, 光パスの経路長と要求するスペクトルスロットの数が階段関数で表せることに着目し, 前述したリンク独立経路選択問題を整数線形計画問題として定式化する. さらに, この経路選択問題が NP 完全であることを証明する. 性能評価により, 異なるバックボーンネットワークトポロジである JPN 48, Cost 239, German 17 に対して, 提案方式は, 従来方式と比較して, スペクトルスロットの使用量の削減効果を確認する. 提案方式と従来方式の経路選択にかかる計算時間を評価する. また, 各方式が選択した経路を考察した後, エラスティック光ネットワークにおいて, スペクトルスロット使用量を抑える独立経路選択アルゴリズムを紹介する.

目次

第 1 章	序論	1
1.1	研究背景	1
第 2 章	関連研究	2
2.1	エラスティック光ネットワーク	2
2.2	変調方式	3
2.3	1+1 path protection	3
第 3 章	従来方式	5
3.1	総経路長最小方式	5
3.2	総ホップ数最小方式	6
第 4 章	提案方式	7
4.1	提案方式の数理モデル	7
第 5 章	NP 完全であることの証明	10
第 6 章	性能評価	12
6.1	ネットワーク全体におけるスペクトルスロット使用量	12
6.1.1	評価方法	12
6.1.2	結果と考察	13
6.2	発ノードを固定したときのスペクトルスロット使用量	15
6.2.1	評価方法	15
6.2.2	結果と考察	15
6.3	各方式が選択した経路の評価	16
6.3.1	評価方法	16
6.3.2	結果と考察	16
6.4	計算時間	19
第 7 章	ヒューリスティックアルゴリズム	23
第 8 章	むすび	24

第1章 序論

1.1 研究背景

エラスティック光ネットワークでは、情報を伝送する際に光パスを設定する。エラスティック光ネットワークにおけるネットワーク資源の一つとして、スペクトルスロットが挙げられる。これは光ファイバなどの伝送媒介が扱うことのできる周波数帯域のことを指す。エラスティック光ネットワークにおいて光パスを設定する際、情報を乗せたスペクトルをスペクトルスロットに割り当てる [1], [2].

光パスを設定する際には変調が伴う。変調とは、伝送する情報をスペクトルに乗せる操作のことである。エラスティック光ネットワークでは、ユーザの要求する帯域や光パスの経路長に応じて、変調方式を適切に選択することができる [3]-[5].

変調は信号波の振幅や位相のパラメータを変化させることで行われるが、変調方式によってスペクトルスロットの使用量や情報を伝送できる距離が異なる。そのためエラスティック光ネットワークで光パスを設定する際には、経路長を求めた後、各変調方式の伝送できる距離から、適切な変調方式を選択してから、その変調方式に応じた使用スペクトルスロット数を割り当てる [6]-[8].

経路長と使用するスペクトルスロットの数は非線形な関係にある。なぜなら、経路長が異なっていたとしても、情報を伝送できる距離の範囲内であれば、同じ変調方式を用いる可能性があり、使用するスペクトルスロットの数は変調方式によって決まるからである。

光パス経路の冗長化を図るためには、同じリンクを共有しない2つの独立経路を用意しなければならない。このようなネットワーク冗長化技術に 1+1 path protection[9] が挙げられる。1+1 path protectionによって、通信で使われているリンクが故障したとしても、そのリンクを使用していないもう一つの経路に即座に切り替えることで通信を中断することなく続行することが可能である。

従来の独立経路選択方式として、発着ノード間の複数の独立経路の合計距離が最小となる経路選択方式 [10], [11] がある。この経路選択方式では、経路長と使用するスペクトルスロットの数が非線形な関係であるという理由により、複数の独立経路で使用する合計のスペクトルスロット数が必ずしも最小化されるとは限らない。

また、経路長からスペクトルスロットの使用量を求める際に、距離の刻み幅毎にスペクトルスロットの使用量を求めることにより、非線形なテーブルを参照する部分を、線形化して表現し、スペクトルスロットの使用量を最小化する経路選択問題の最適化問題を、整数線形計画問題 [12], [13] に定式化することにより、使用スペクトルスロット数を最小化する方式 [14] がある。しかし、この経路選択方式では、線形化にかかる計算量が大きくなるという理由により、ネットワーク規模によっては適用できない場合がある。

本論文は、経路長とスペクトルスロットの使用量の関係が階段関数であることに着目し、線形化による計算量を小さくする、エラスティック光ネットワークにおける、合計使用スペクトルスロット数を最小化する独立経路選択方式を提案する。提案方式で用いる独立経路選択問題を最適化問題として定式化する。性能評価により、提案方式は、従来方式と比較して、スペクトルスロットの使用量の削減効果を確認する。さらに、提案方式が実行時間で計算できることを確認する。本論文では、独立経路をリンク独立経路として扱う。リンク独立経路は、異なる経路が同一のリンクを共有しない経路である。

第2章 関連研究

2.1 エラスティック光ネットワーク

光ネットワークにおいて、情報を伝送するには光パスを設定する。このとき、利用可能な周波数帯域が空いているかを参照し、空いていれば、その周波数帯域に情報を乗せたスペクトルを割り当てることで光パスを設定する。空いていない場合は、その帯域要求は破棄される。Wavelength Division Multiplexing (WDM) のようなエラスティックでない光ネットワークでは、スペクトルを割り当てる間隔であるグリッドが固定であるため、周波数帯域にスペクトルを割り当てる際、あらかじめ定められたグリッド間にしかスペクトルを割り当てることができない（図 2.1）。このため、大きな帯域要求に対して、グリッド幅を超えるという理由で割り当てることができなったり、小さな帯域要求が割り当てられた際、グリッド幅の中で使われない帯域が存在してしまうといった問題が挙げられる。

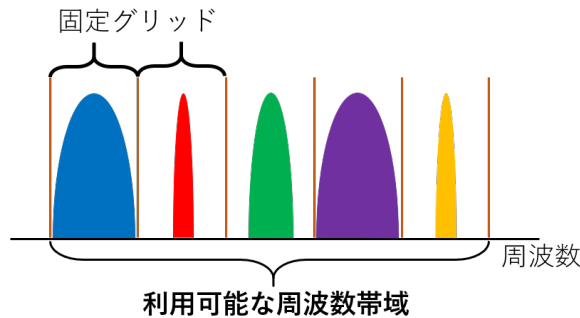


図 2.1: エラスティックでない光ネットワーク

エラスティック光ネットワークでは、周波数帯域をスペクトルスロットで管理する。エラスティック光ネットワークにおいて光パスを設定する際、スペクトルをスペクトルスロットに割り当てる。スペクトルスロットは、周波数帯域を細かく管理することができ、グリッドが可変であることから、様々な帯域要求に対して柔軟に応えることができる（図 2.2）。

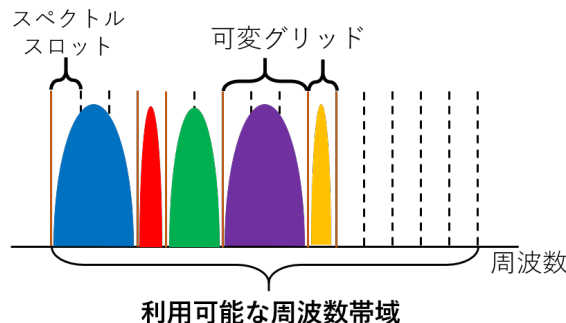


図 2.2: エラスティック光ネットワーク

2.2 変調方式

変調とは、信号波の振幅や位相を変化させることで、情報信号を伝送可能にするように変換することである。エラスティック光ネットワークにおいて、情報を伝送する際には変調する必要がある。変調には様々な方式が存在する。本研究では、Quadrature Phase Shift Keying (QPSK), 16 Quadrature Amplitude Modulation (16QAM), 32 Quadrature Amplitude Modulation (32QAM) の3つの変調方式を扱う。QPSK, 16QAM, 32QAM の信号空間ダイアグラムをそれぞれ、図 2.3, 2.4, 2.5 に示す。信号空間ダイアグラムとは、信号波の振幅と位相の関係を直交座標上に示した図である。横軸は余弦波を示し、I 座標と表記し、縦軸は正弦波を示し、Q 座標と表記する。

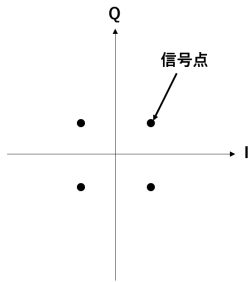


図 2.3: QPSK

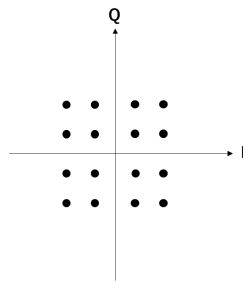


図 2.4: 16QAM

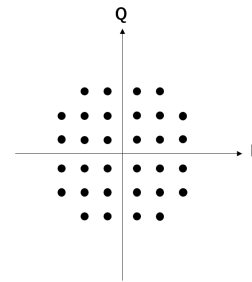


図 2.5: 32QAM

信号空間ダイアグラムにおける信号点の個数は 1 シンボルに乗せられる情報量を表している。シンボルとは、信号波に情報に乗せることのできる最小の単位のことである。図 2.3 - 2.5 から、QPSK, 16QAM, 32QAM における、1 シンボルに乗せられる情報量はそれぞれ、2bit, 4bit, 5bit であり、32QAM が最も多く、QPSK が最も少ない。したがって、同帯域の光パスを設定すると仮定した場合、スペクトルスロット使用量は、QPSK が最も多く、32QAM が最も少ない。また、信号点が密集している変調方式ほど、伝送によるノイズに弱いという性質を持つ。伝送距離が長いほど、ノイズも大きくなることから、伝送可能距離は、QPSK が最も長く、32QAM が最も短い。各変調方式の使用スペクトルスロット数と伝送可能距離を表 2.1[15] に示す。表 2.1 は、利用帯域を 100Gbps であるとしたときの場合である。

表 2.1: 各変調方式の使用スペクトルスロット数と伝送可能距離

変調方式	QPSK	16QAM	32QAM
使用スペクトルスロット数	3	2	1
伝送可能距離 [km]	2000	800	400

2.3 1+1 path protection

1+1 path protection とは、光ネットワークにおいて用いられているネットワーク冗長化技術である。

1+1 path protection は、発着ノード間において、同一のリンクを共有しない複数の異なる経路（リンク独立経路）、または、発ノードと着ノードを除いたノードにおいて、同一のノードを共有しない複数の異なる経路（ノード独立経路）を同時に確立することで、ネットワークの冗長化を図る。

以下、ノードを i_m と表したとき、経路を (i_1, i_2, \dots, i_n) と表記する。これは発ノードが i_1 、着ノードが i_n であり、 i_1, i_2, \dots, i_n の順で通る経路を意味する。

1+1 path protection について、具体例を挙げて説明する。図 2.6 において、発ノード A、着ノード H である光パスの設定要求が発生し、経路 (A, B, C, D, H) を使用していたとする。仮にリンク CD が故障したとすると、通信の続行ができなくなってしまう。一方で、経路 (A, B, C, D, H) に加え、経路 (A, B, C, D, H) とリンク独立である経路 (A, E, C, G, H) を同時に確立することで、リンク CD が故障したとしても、経路 (A, E, C, G, H) に切り替えることで即座に通信を続行することができる。また、経路 (A, B,

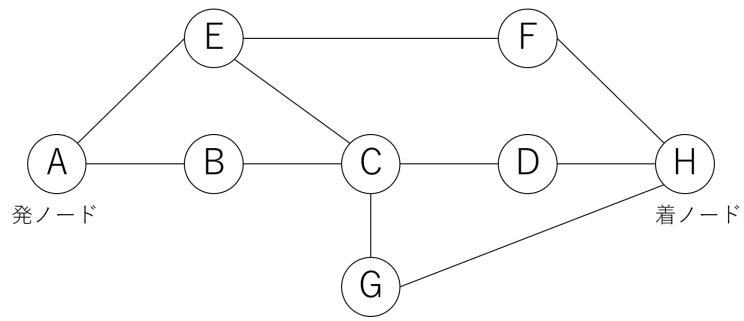


図 2.6: ネットワークモデル 1

C, D, H) と経路 (A, B, C, D, H) とノード独立である経路 (A, E, F, H) を同時に確立することで、ノード C が故障した場合にも、経路 (A, E, F, H) に切り替えることで即座に通信を続行することができる。

第3章 従来方式

従来方式は、発着ノード間の独立経路の合計経路長を最小化する経路選択方式である。また、この方式において、リンク長を1とすることで、発着ノード間の独立経路の合計ホップ数を最小化する経路選択方式となる。ここでは、発着ノード間の独立経路の合計経路長を最小化する経路選択方式を総経路長最小方式、発着ノード間の独立経路の合計ホップ数を最小化する経路選択方式を総ホップ数最小方式と呼ぶことにする。ネットワークを有向グラフ $G(V, E)$ で表し、 V をネットワーク内のノードの集合、 E をリンクの集合、及び、 K を独立経路の集合とする。従来方式は [10] のアルゴリズムで多項式時間 $O(|K|(|E| + |V|) \log |V|)$ で解くことができる。

エラスティック光ネットワークでない光ネットワークでは、使用スペクトルスロット数が使用リンクに対してのみ線形的に決まるため、従来方式が適用されていた。一方、エラスティック光ネットワークでは、距離に応じて適切な変調方式を選択することで、スペクトルスロットを有効利用する。従来方式では、複数の独立経路選択問題において、使用スペクトルスロット数と距離が非線形な関係であるゆえに、複数の独立経路を考える場合、使用スペクトルスロット数を最小化できるとは限らない。このような従来方式の問題点について、具体的な例を挙げて説明する。

エラスティック光ネットワークにおいて光パスを設定する際には、表 2.1 のような各変調方式の伝送可能距離と使用スペクトルスロット数が与えられる。以下の議論では、いずれも 100Gbps の光パスの設定要求とする。

本論文では、特に断らない限り、図中のネットワークのリンクにおいて、矢印を省略した場合、双方向のリンク長は等しいものとする。

図 3.1 におけるネットワークにおいて、発ノード A、着ノード K である光パスの設定要求が発生するとする。

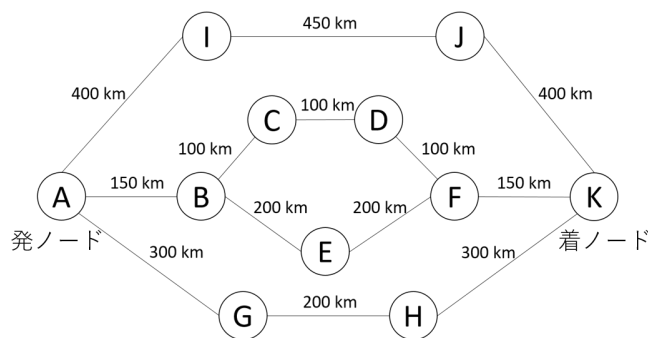


図 3.1: ネットワークモデル 2

3.1 総経路長最小方式

総経路長最小方式は、発着ノード間の独立経路の合計経路長を最小化する経路選択方式である。総経路長最小方式を適用すると、経路 (A, B, C, D, F, K) (600km) と経路 (A, G, H, K) (800km) が選択され、総経路長は 1400km となる。また、適用する変調方式は、表 2.1 の各変調方式の伝送可能距離から、どちらも 16QAM となる。2つの経路で使用されるリンクの合計の数が 8、16QAM における使用スペクトルスロット数が 2 であることから、全体の合計使用スペクトルスロット数は $16 (= 2 \times 8)$ となる。

3.2 総ホップ数最小方式

総ホップ数最小方式は、発着ノード間の独立経路の合計ホップ数を最小化する経路選択方式である。総ホップ数最小方式を適用すると、経路 (A, I, J, K) (1250km) と経路 (A, G, H, K) (800km) が選択され、総ホップ数は6となる。適用する変調方式は、表 2.1 の各変調方式の伝送可能距離から、QPSK と 16QAM となる。QPSK で使用するリンク数が3, 16QAM で使用するリンク数が3であることから合計使用スペクトルスロット数は $15(= 3 \times 3 + 3 \times 2)$ となる。

一方で、これらと異なる2つの独立経路である、経路 (A, B, E, F, K) (700km) と経路 (A, G, H, K) (800km) は総経路長は 1500km, 総ホップ数は7となるが、使用スペクトルスロット数を考えると、どちらの経路ともに 16QAM で変調することになり、全体の合計使用スペクトルスロット数は $14(= 2 \times 7)$ となる。

このように、総経路長最小方式と総ホップ数最小方式が、使用スペクトルスロット数に関して最小化するとは限らない。

第4章 提案方式

提案方式における独立経路選択問題は、エラスティック光ネットワークにおいて、発着ノード間の独立経路上での使用するスペクトルスロットを最小化する最適化問題である。

4.1 提案方式の数理モデル

提案方式を数理モデルとして定義する。ネットワークは無向グラフ $G(V, E)$ で表される。 V はネットワーク内のノードの集合、及び、 E はリンクの集合である。ノード $i \in V$ からノード $j \in V$ までのリンクを $(i, j) \in E$ とする。また、独立経路の集合を K とする¹。 l_{ij} はリンク (i, j) のリンク長である。決定変数 x_{ij}^k は経路 $k \in K$ がリンク (i, j) を使用するならば 1、そうでなければ 0 となるバイナリ変数である。

提案方式の経路選択問題は、(4.1a)-(4.1e) のように定式化される。(4.1a)-(4.1e) における決定変数は x_{ij}^k である。

$$\min \sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in E} S \left(\sum_{(i',j') \in E} l_{i'j'} \cdot x_{i'j'}^k \right) \cdot x_{ij}^k \quad (4.1a)$$

$$\sum_{j:(i,j) \in E} x_{ij}^k - \sum_{j:(i,j) \in E} x_{ji}^k = 1, \text{ if } i = p \quad (4.1b)$$

$$\sum_{j:(i,j) \in E} x_{ij}^k - \sum_{j:(i,j) \in E} x_{ji}^k = 0, \quad \forall i \in V \setminus \{p, q\}, \forall k \in K \quad (4.1c)$$

$$\sum_{k \in K} x_{ij}^k \leq 1, \forall (i, j) \in E \quad (4.1d)$$

$$x_{ij}^k \in \{0, 1\}, \forall (i, j) \in E, \forall k \in K \quad (4.1e)$$

(4.1a) は目的関数であり、 $|K|$ 本の独立経路上のリンクで使用するスペクトルスロット数の総和を最小化する。 $S(\theta_k)$ は、発着ノード間の k 番目の経路の長さ θ_k (以下、経路長と呼ぶ) の関数である。 $\theta_k = \sum_{(i',j') \in E} l_{i'j'} \cdot x_{i'j'}^k$ によって、 k 番目の経路長が表される。ここで、経路長を整数値で表す。使用リンクごとにスペクトルスロットを使用するので、経路全体でかかる使用スペクトルスロット数は $S \left(\sum_{(i',j') \in E} l_{i'j'} \cdot x_{i'j'}^k \right) \cdot x_{ij}^k$ となる。(4.1b) は、始点ノードがトラヒック量 1 を送出する条件を表す。(4.1c) は、中継ノード $i \in V \setminus \{p, q\}$ では、流入するトラヒック量と流出するトラヒック量は等しいという条件を表す。(4.1d) は、リンク独立経路の条件を表し、 $|K|$ 本の経路で使われるリンク (i, j) は高々 1 度であることを示す。

また、(4.1d) を次のようにすることで、合計使用スペクトルスロット数を最小化するノード独立経路を求める問題に適用することができる。

$$\sum_{k \in K} \sum_{j \in V: (i,j) \in E} x_{ij}^k \leq 1, \forall i \in V \setminus \{p\} \quad (4.2)$$

ここで、(4.1a) の $S \left(\sum_{(i',j') \in E} l_{i'j'} \cdot x_{i'j'}^k \right) \cdot x_{ij}^k$ は非線形関数である。したがって、このままでは線形計画法で解くことができないため、以下のように線形式で表す工夫をする。

$$\sum_{c \in C} y_c^k = 1, \quad \forall k \in K \quad (4.3)$$

¹6 章の性能評価では $|K| = 2$ とするが、4 章で述べる定式化は、 $|K| \geq 2$ に対して成立する。

$$y_c^k \in \{0, 1\}, \quad \forall c \in C, \forall k \in K \quad (4.4)$$

$C = \{1, \dots, |C|\}$ は経路長クラスの集合である。経路長クラス毎に変調方式が定められている。決定変数 y_c^k は経路長クラスが $c \in C$ のときのみ 1 となり、それ以外は 0 となるバイナリ変数である。(4.3) は、経路 k の経路長が $y_c^k = 1$ となる唯一の経路長クラスに属することを示す。 L_c を経路長クラス c の経路長の上限值とすると、経路 k の経路長のクラスは (4.5) によって決定される。

$$\sum_{(i,j) \in E} l_{ij} \cdot x_{ij}^k \leq \sum_{c \in C} L_c \cdot y_c^k, \quad \forall k \in K \quad (4.5)$$

(4.5) の左辺は使用リンクのリンク長の総和により経路長を示す。(4.5) は、経路長は経路長が属する経路クラス c の経路長の上限值以下であることを示す。

(4.3)-(4.5) を追加したことによって、(4.1a) は次式で表される。

$$\min \sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in E} \sum_{c \in C} n_c \cdot x_{ij}^k \cdot y_c^k \quad (4.6)$$

n_c は、与えられるパラメータであり、経路長が経路長クラス c に属する時の使用スペクトルスロット数である。また、(4.6) は 2 つの変数の積となっているため、線形の制約式で表すため、(4.7)-(4.10) を満たす決定変数 z_{ij}^{kc} を用意する。

$$z_{ij}^{kc} \leq x_{ij}^k, \quad \forall (i,j) \in E, \forall k \in K, \forall c \in C \quad (4.7)$$

$$z_{ij}^{kc} \leq y_c^k, \quad \forall (i,j) \in E, \forall k \in K, \forall c \in C \quad (4.8)$$

$$z_{ij}^{kc} \geq y_c^k + x_{ij}^k - 1, \quad \forall (i,j) \in E, \forall k \in K, \forall c \in C \quad (4.9)$$

$$z_{ij}^{kc} \in \{0, 1\}, \quad \forall (i,j) \in E, \forall k \in K, \forall c \in C \quad (4.10)$$

z_{ij}^{kc} を用いることによって、(4.6) は次のように表される。

$$\min \sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in E} \sum_{c \in C} n_c \cdot z_{ij}^{kc} \quad (4.11)$$

よって、(4.1a) を線形式として表すことができる。

以上のことから、提案方式の独立経路選択問題は (4.12a)-(4.12l) のように、整数線形計画問題として定式化される。これにより、整数線形計画問題を [16] [17] に代表される線形計画ソルバにより扱うことができる。決定変数は、 x_{ij}^k , y_c^k , 及び、 z_{ij}^{kc} である。

$$\min \sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in E} \sum_{c \in C} n_c \cdot z_{ij}^{kc} \quad (4.12a)$$

$$\sum_{j:(i,j) \in E} x_{ij}^k - \sum_{j:(i,j) \in E} x_{ji}^k = 1, \quad \text{if } i = p, \forall k \in K \quad (4.12b)$$

$$\sum_{j:(i,j) \in E} x_{ij}^k - \sum_{j:(i,j) \in E} x_{ji}^k = 0, \quad \forall i \in V \setminus \{p, q\}, \forall k \in K \quad (4.12c)$$

$$\sum_{k \in K} x_{ij}^k \leq 1, \quad \forall (i,j) \in E \quad (4.12d)$$

$$\sum_{(i,j) \in E} l_{ij} \cdot x_{ij}^k \leq \sum_{c \in C} L_c \cdot y_c^k, \quad \forall k \in K \quad (4.12e)$$

$$\sum_{c \in C} y_c^k = 1, \quad \forall k \in K \quad (4.12f)$$

$$z_{ij}^{kc} \leq x_{ij}^k, \quad \forall (i,j) \in E, \forall k \in K, \forall c \in C \quad (4.12g)$$

$$z_{ij}^{kc} \leq y_c^k, \quad \forall (i,j) \in E, \forall k \in K, \forall c \in C \quad (4.12h)$$

$$z_{ij}^{kc} \geq y_c^k + x_{ij}^k - 1, \quad \forall (i,j) \in E, \forall k \in K, \forall c \in C \quad (4.12i)$$

$$x_{ij}^k \in \{0, 1\}, \forall (i, j) \in E, \forall k \in K \quad (4.12j)$$

$$y_c^k \in \{0, 1\}, \forall k \in K, \forall c \in C \quad (4.12k)$$

$$z_{ij}^{kc} \in \{0, 1\}, \forall (i, j) \in E, \forall k \in K, \forall c \in C \quad (4.12l)$$

第5章 NP完全であることの証明

この章では、本研究に関連して、以下の問題 P_0 が NP 完全であることを証明する。

定義 1 P_0 . グラフ $G(V, E)$, リンク長関数 $length : E \rightarrow H$, 始終点 $s, t \in V$, 正整数 N , 伝送可能距離と使用スペクトルスロット数の関係を示す非線形なテーブルが与えられたとき, 合計使用スペクトルスロット数 N 以下で s と t を結ぶ 2 つのリンク独立経路が存在するか?

定理 1 P_0 は NP 完全.

証明 1 s と t を結ぶ 2 つの独立経路が与えられるとき, 多項式時間でそれぞれの経路長から使用スペクトルスロット数を求めることができるので, P_0 は NP クラスに属する.

以下, P_0 に類似した距離制限付きリンク独立 2 経路問題 [20] を取り上げて議論を進める.

定義 2 距離制限付きリンク独立 2 経路問題. グラフ $G(V, E)$, リンク長関数 $length : E \rightarrow H$, 始終点 $s, t \in V$, 正整数 L が与えられたとき, リンク独立な 2 本の s と t の経路において, どちらも経路長が L 以下のものが存在するか判定せよ.

定理 2 距離制限付きリンク独立 2 経路問題は NP 完全.

距離制限付きリンク独立 2 経路問題が NP 完全であることを, NP 完全として既知である分割問題 [21] に帰着することで証明する.

定義 3 分割問題. n 個の正整数 a_1, a_2, \dots, a_n が与えられるとき, $\sum_{i \in I} a_i = \sum_{i \in M-I} a_i$ となるような多重集合 $I \subseteq M$ が存在するか判定せよ.

距離制限付きリンク独立 2 経路問題におけるグラフ $G(V, E)$ を図 5.1 のように構成し ($|V| = n+1, |E| = 2n$), $L = \frac{(n+1)(a_1+a_2+\dots+a_n)}{2} + n$ とする. ノード v_i とノード v_{i+1} を結ぶ上側のリンクの重みは $(n+1)a_i$ であり, 下側のリンクの重みは 1 である. 距離制限付きリンク独立 2 経路問題において経路長が L 以下である s と t を結ぶ 2 本のリンク独立経路が存在するとき, それぞれの経路が含む上側の辺の重みの合計は $\frac{(n+1)\sum_{i=1}^n a_i}{2}$ となり, これは分割問題が解けたことになる. 逆に, 分割問題が解けたならば, グラフ G において, 分割問題の解である a_i の 2 つの集合を用いて, a_i に対応する, 重みが $(n+1)a_i$ である上側のリンクを取ってくることによって, 経路長が L 以下である 2 本のリンク独立経路を求めることができる. よって, 距離制限付きリンク独立 2 経路問題は NP 完全である.

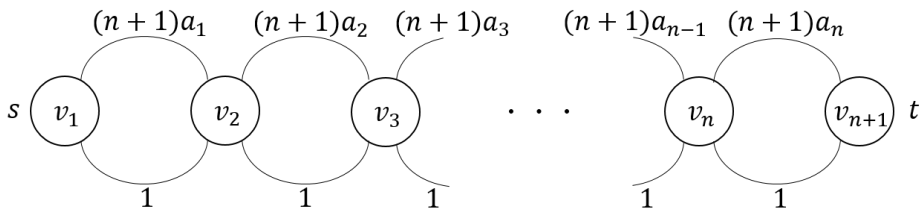


図 5.1: 距離制限付きリンク独立 2 経路問題におけるグラフ $G(V, E)$

また, 上の証明において求めた s と t を結ぶリンク独立経路はどちらも最小リンク数 (n) から構成されるものであり, その制約をつけても NP 完全である.

距離制限付きリンク独立 2 経路問題において, s と t を結ぶリンク独立経路の経路長が, L 以下では 1 スロット必要であり, L を超える場合は 2 スロット必要な場合を考える. P_0 での上限となる合計使用スペクトルスロット数 N に対して, $N = (1(\text{スロット}) \times n(\text{ホップ})) \times 2(\text{経路}) = 2n(\text{スロット})$ という条件を与えると, P_0 は距離付きリンク独立 2 経路問題を部分問題として完全に含む. よって P_0 は NP 完全である.

第6章 性能評価

6.1 ネットワーク全体におけるスペクトルスロット使用量

提案方式と従来方式における使用スペクトルスロット数を比較する。

6.1.1 評価方法

性能評価に用いたネットワークは、日本列島を48個のノードで表したネットワークである JPN 48[18], [19], ノード数11のヨーロッパのネットワークである Cost 239, ノード数17であるドイツのネットワーク German 17である。図6.1に JPN 48のネットワークトポロジ, 図6.2に Cost 239のネットワークトポロジ, 図6.3に German 17のネットワークトポロジを示す。リンク長は小数点以下を切り上げた値とする。発着ノード, 着ノードともに任意のノードとする。但し, 発着ノードのペアは, すべての独立経路選択方式において, 発着ノード間の独立経路の経路長がそれぞれ2000km以下となるものとする。発着ノード間に独立経路数 $|K|=2$ の光パスを設定するときの各ノードへの光パス設定にかかる使用スペクトルスロット数を, 提案方式, 従来方式ともに整数線形計画問題を解くことによって算出する。経路長クラスの集合 C に関して, $C = \{1, 2, 3\}$ と与え, $L_1 = 400, L_2 = 800, L_3 = 2000, n_1 = 1, n_2 = 2, n_3 = 3$ とした。本論文で扱う整数計画問題を, 線形計画ソルバ CPLEX 12.6.1.0 [16]を用いて解く。従来方式の独立経路選択問題は, [10]のアルゴリズムを用いても解くことができる。

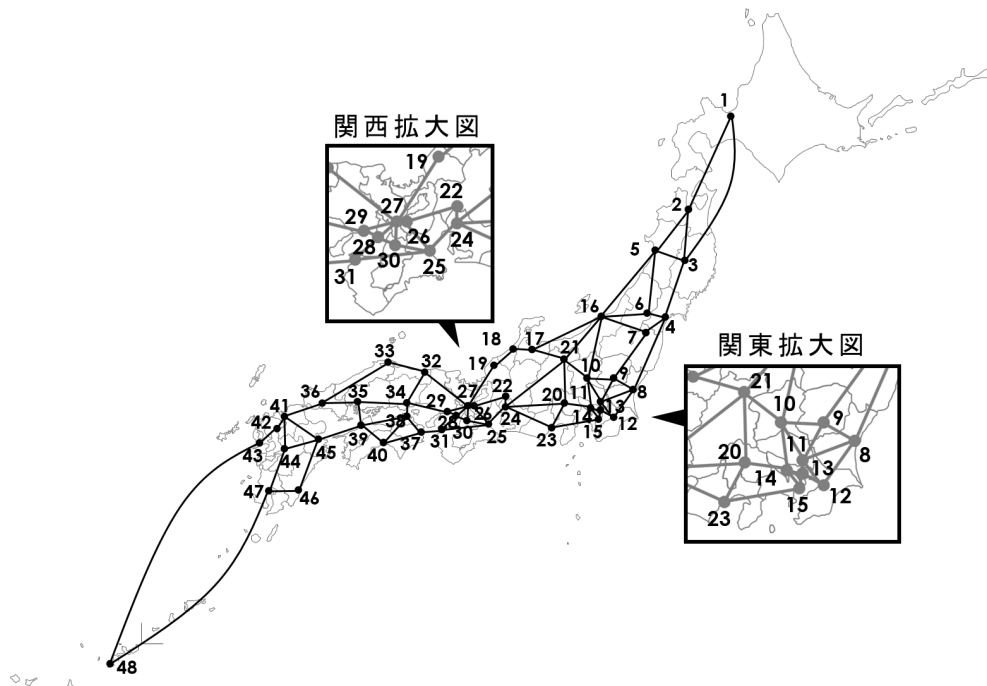


図 6.1: 評価で用いたネットワークモデル, JPN 48

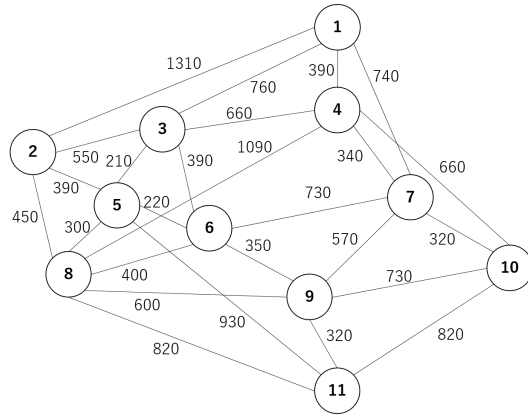


図 6.2: 評価で用いたネットワークモデル, Cost 239

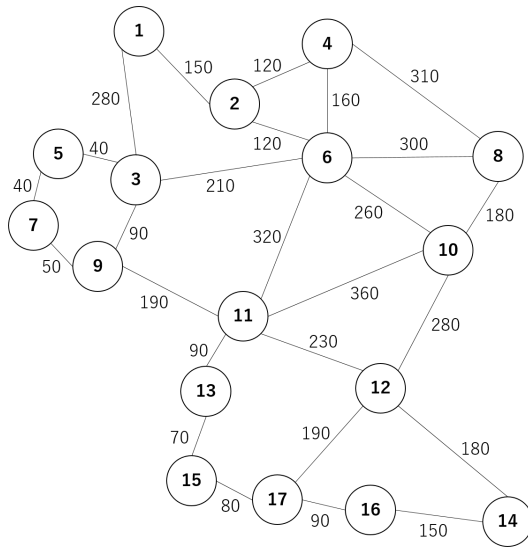


図 6.3: 評価で用いたネットワークモデル, German 17

6.1.2 結果と考察

提案方式と従来方式における使用スペクトルスロット数を比較した。JPN 48, Cost 239, German 17 におけるネットワーク全体の平均使用スペクトルスロット数をそれぞれ表 6.1, 6.2, 6.3 に示す。各発ノードから任意の着ノードまでの平均使用スペクトルスロット数を, JPN 48 は図 6.4, Cost 239 は図 6.5, German 17 は図 6.6 に示す。

表 6.1: JPN 48 におけるネットワーク全体の平均使用スペクトルスロット数

	総経路長最小方式	総ホップ数最小方式	提案方式
平均使用スロット数	31.16	29.06	28.05
提案方式の削減率 ($r \times 100$)	10.0%	3.5%	-

従来方式における使用スペクトルスロット数を N_α , 提案方式における使用スペクトルスロット数を N_β とすると, 提案方式の使用スペクトルスロット数削減率は r ($r = \frac{N_\alpha - N_\beta}{N_\alpha}$) で表せる。

表 6.1 より, 提案方式は従来方式と比較して使用スペクトルスロット数を削減していることが確認された。また, 平均使用スペクトルスロット数に関して, 総経路長最小方式は 31.16, 総ホップ数最小方式は 29.06, 提案方式は 28.05 であることから, 提案方式は総経路長最小方式と比較して 10.0%, 総ホップ数最

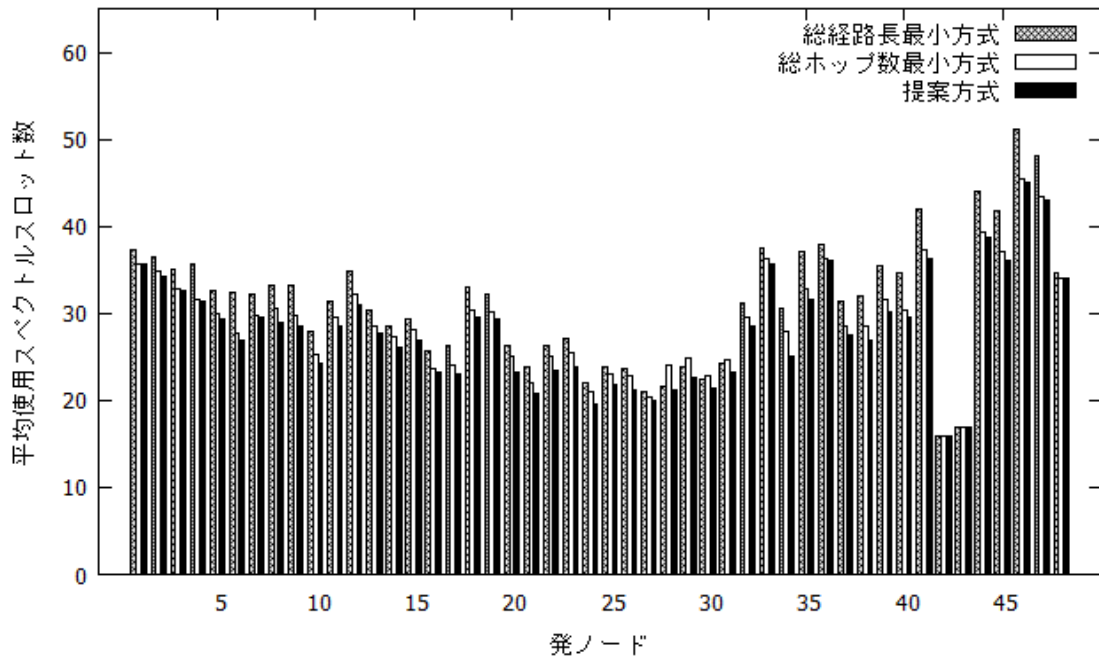


図 6.4: JPN 48 における各発ノードからの光パス設定にかかる平均使用スペクトルスロット数

小方式と比較して 3.5% の使用スペクトルスロット数削減効果が確認された。

表 6.2: Cost 239 におけるネットワーク全体の平均使用スペクトルスロット数

	総経路長最小方式	総ホップ数最小方式	提案方式
平均使用スロット数	10.85	9.71	9.64
提案方式の削減率 ($r \times 100$)	11.2%	0.8%	-

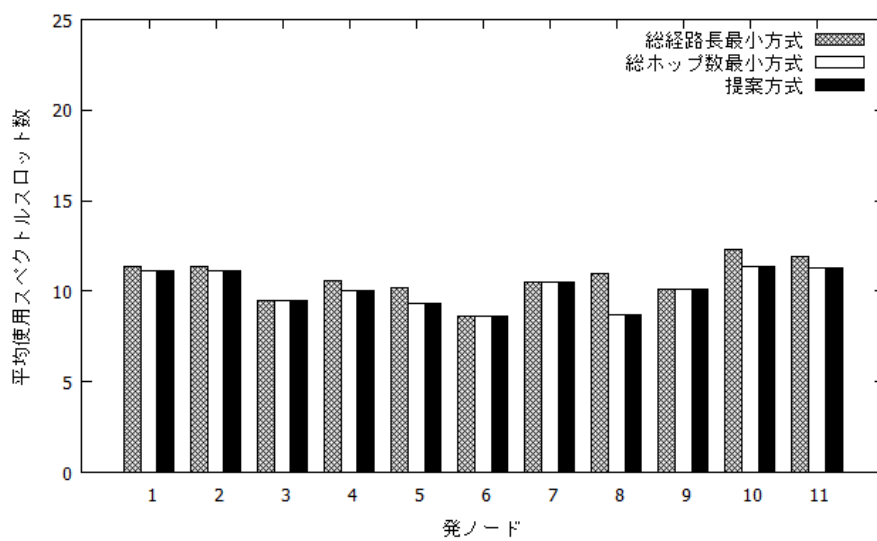


図 6.5: Cost 239 における各発ノードからの光パス設定にかかる平均使用スペクトルスロット数

表 6.2 より、提案方式と従来方式の平均使用スペクトルスロット数は、総経路長最小方式は 10.85、総ホップ数最小方式は 9.71、提案方式は 9.64 であることから、提案方式は総経路長最小方式と比較して

11.2%, 総ホップ数最小方式と比較して 0.8%の使用スペクトルスロット数の削減が確認された。提案方式と総ホップ数最小方式の平均使用スペクトルスロット数の差が小さい理由は, Cost 239 のネットワークにおけるリンク長の平均値が大きいため, 各変調方式の切り替わり付近での経路長の差が生じず, 提案方式と総ホップ数最小方式が選択した変調方式が同じになったからであると考えられる。

表 6.3: German 17 におけるネットワーク全体の平均使用スペクトルスロット数

	総経路長最小方式	総ホップ数最小方式	提案方式
平均使用スロット数	15.36	15.37	14.63
提案方式の削減率 ($r \times 100$)	4.8%	4.8%	-

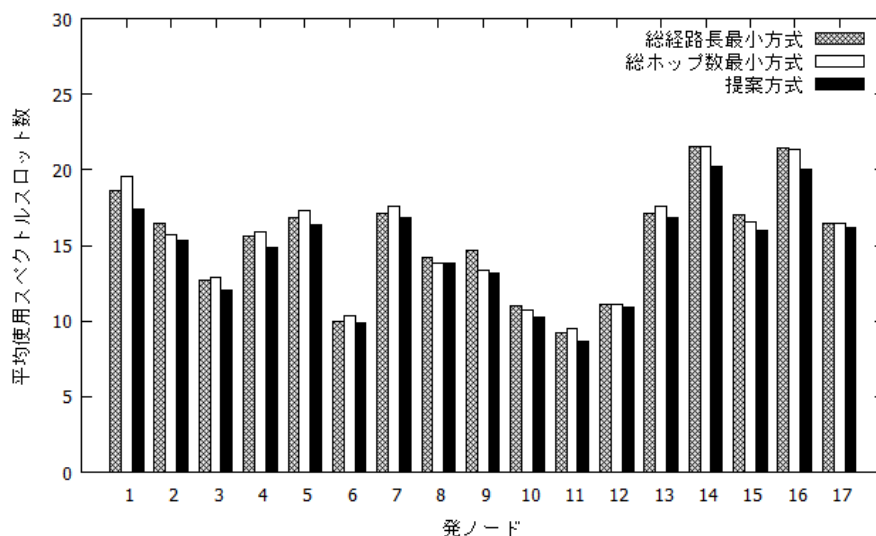


図 6.6: German 17 における各発ノードからの光パス設定にかかる平均使用スペクトルスロット数

表 6.3 より, 提案方式と従来方式の平均使用スペクトルスロット数は, 総経路長最小方式は 15.36, 総ホップ数最小方式は 15.37, 提案方式は 14.63 であることから, 提案方式は従来方式と比較して, 総経路長最小方式, 総ホップ数最小方式ともに 4.8%の使用スペクトルスロット数の削減が確認された。

6.2 発ノードを固定したときのスペクトルスロット使用量

6.2.1 評価方法

JPN 48 に対して, 6.1.1 章の評価方法において, 発ノードをノード 13 に固定し, 発着ノード間の光パスを設定した際の提案方式と従来方式における使用スペクトルスロット数を比較する。

6.2.2 結果と考察

提案方式と従来方式における使用スペクトルスロット数を比較した。JPN 48 においてノード 13 から任意の着ノードへの光パス設定にかかる使用スペクトルスロット数を表 6.4 に示す。ノード 13 から任意の着ノードまでの使用スペクトルスロット数の合計を, 図 6.7 に示す。

表 6.4 より, 提案方式は従来方式と比較して使用スペクトルスロット数を削減していることが確認された。また, 平均使用スペクトルスロット数に関して, 総経路長最小方式は 30.32, 総ホップ数最小方式は 28.52, 提案方式は 27.66 であることから, 提案方式は総経路長最小方式と比較して 8.8%, 総ホップ数最小方式と比較して 3.0%の使用スペクトルスロット数削減効果が確認された。

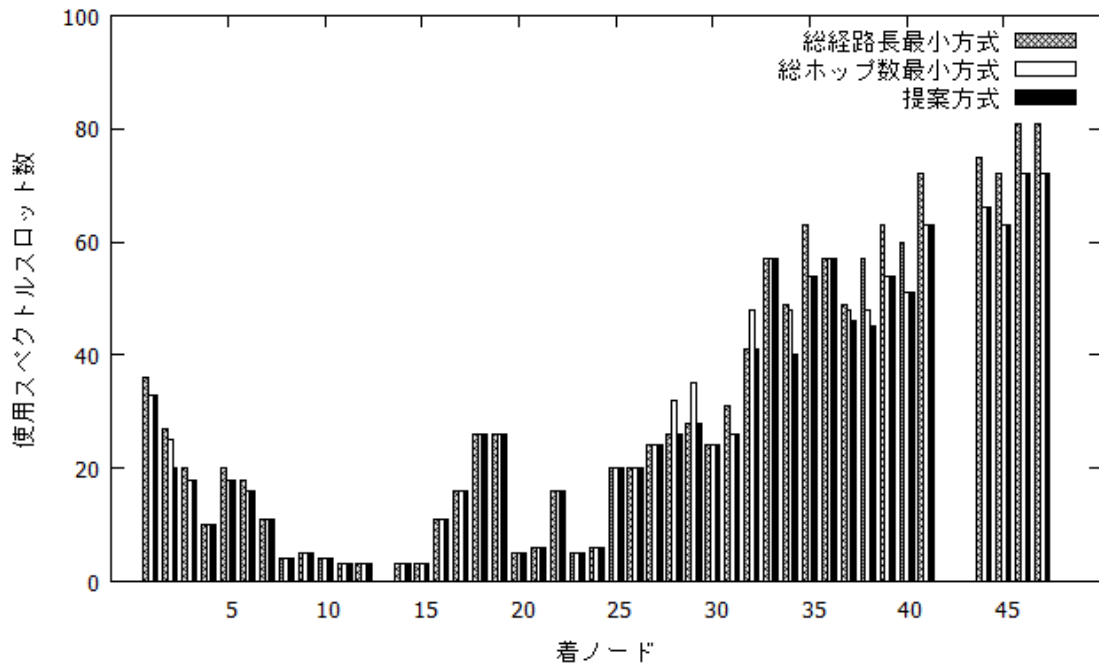


図 6.7: JPN 48 におけるノード 13 から各ノードへの光パス設定にかかる使用スペクトルスロット数

表 6.4: JPN 48 におけるノード 13 から各着ノードまでにかかる平均使用スペクトルスロット数

	総経路長最小方式	総ホップ数最小方式	提案方式
平均使用スロット数	30.32	28.52	27.66
提案方式の削減率 ($r \times 100$)	8.8%	3.0%	-

図 6.7 と表 6.8 の総経路長から、経路長の長い光パスでは、総経路長最小方式と提案方式で使用スペクトルスロット数の差異が大きくなり、総ホップ数最小方式と提案方式の使用スペクトルスロット数は同じになる傾向が読み取れる。

6.3 各方式が選択した経路の評価

提案方式と従来方式が選択した経路について比較する。

6.3.1 評価方法

6.2 章で得られた JPN 48 における提案方式と従来方式の使用スペクトルスロット数と選択した経路を比較する。

6.3.2 結果と考察

以下、総経路長最小方式と総ホップ数最小方式/提案方式（総ホップ数最小方式と提案方式の使用スペクトルスロット数が同じ場合）でかかる使用スペクトルスロット数が異なる光パス、総経路長最小方式、総ホップ数最小方式、及び提案方式の使用スペクトルスロット数がすべて異なる光パス、総ホップ数最小方式の使用スペクトルスロット数が多くなる光パスの 3 つの場合に分けて議論する。

総経路長最小方式と総ホップ数最小方式/提案方式の使用スペクトルスロット数が異なる光パスにおける経路選択

総経路長最小方式と総ホップ数最小方式/提案方式でかかる使用スペクトルスロット数が異なる光パスをいくつか取り上げ、これらの方式の経路選択の違いについて考察する。総経路長最小方式と総ホップ数最小方式/提案方式とで使用スペクトルスロット数に最も大きな差が観測されたのはノード 35, 39, 40, 41, 44, 45, 46, 47 への光パスであり、その差は 9 スロットである。

ここではノード 35 への光パスとノード 47 への光パスを取り上げて議論を進める。ノード 35 への光パスについて、総経路長最小方式が選択した経路は経路 (13, 15, 23, 24, 25, 30, 28, 29, 34, 35) (919km) と経路 (13, 14, 20, 24, 22, 26, 27, 28, 31, 37, 38, 39, 35) (1066km) であり、総ホップ数最小方式が選択した経路は経路 (13, 15, 23, 24, 25, 31, 37, 38, 39, 35) (1203km) と経路 (13, 14, 20, 24, 22, 26, 27, 32, 34, 35) (1105km)、提案方式が選択した経路は経路 (13, 14, 20, 24, 25, 31, 37, 38, 39, 35) (1234km) と経路 (13, 15, 23, 24, 22, 26, 27, 29, 34, 35) (900km) である。経路長から、3 つの方式の光パス設定での変調方式は、2 つの経路ともに QPSK となる。総経路長最小方式と総ホップ数最小方式/提案方式で異なるのは、選択した経路のホップ数である。総経路長最小方式が選択した経路の総ホップ数は 21 であり、総ホップ数最小方式/提案方式が選択した経路の総ホップ数は 18 である。

ノード 47 への光パスについて、総経路長最小方式が選択した経路は経路 (13, 14, 20, 24, 22, 26, 27, 28, 31, 37, 38, 39, 45, 46, 47) (1499km) と経路 (13, 15, 23, 24, 25, 30, 28, 29, 34, 35, 39, 41, 44, 47) (1424km) であり、総ホップ数最小方式が選択した経路は経路 (13, 15, 23, 24, 25, 31, 37, 38, 39, 45, 46, 47) (1636km) と経路 (13, 14, 20, 24, 22, 26, 27, 32, 34, 35, 39, 41, 44, 47) (1610km)、提案方式が選択した経路は経路 (13, 14, 20, 24, 25, 31, 37, 38, 39, 41, 44, 47) (1605km) と経路 (13, 15, 23, 24, 22, 26, 27, 29, 34, 35, 39, 45, 46, 47) (1467km) である。経路長から、3 つの方式の光パス設定での変調方式は、2 つの経路ともに QPSK となる。総経路長最小方式と総ホップ数最小方式/提案方式で異なるのは、選択した経路のホップ数である。総経路長最小方式が選択した経路の総ホップ数は 27 であり、総ホップ数最小方式/提案方式が選択した経路の総ホップ数は 24 である。これらの経路選択から、提案方式において、どの経路を選択しても 2 つの独立経路の変調方式の組み合わせが総ホップ数最小方式の 2 つの独立経路で選択する変調方式と等しくなってしまう場合、使用リンク数を減らすことでしか使用スペクトルスロット数を減らすことができないので、提案方式はホップ数が最小となるような経路を選択することが分かる。

以上のことから、使用スペクトルスロット数を減らす要因として、ホップ数を減らすことが挙げられ、提案方式において、どの経路を選択しても変調方式による使用スペクトルスロット数が減少しない場合、ホップ数が最も小さくなるような経路を選択する。ホップ数が最も小さい経路を選択をする理由として、使用スペクトルスロット数は、選択された経路で用いられる各変調方式の使用スペクトルスロット数と、経路で使用されるリンク数の積で表される。したがって、ホップ数が小さければ、使用リンク数も少なくなるので、使用スペクトルスロット数を最小化する経路選択を行う提案方式は、どの経路を選択しても変調方式による使用スペクトルスロット数が減少しない場合においては、ホップ数が最小である経路を選択する。

総経路長最小方式、総ホップ数最小方式、及び提案方式の使用スペクトルスロット数がすべて異なる光パスにおける経路選択

総経路長最小方式、総ホップ数最小方式、及び提案方式の使用スペクトルスロット数がすべて異なる光パスに関して、経路選択の違いについて議論する。

ノード 2 への光パスを取り上げると、使用スペクトルスロット数はそれぞれ、総経路長最小方式は 27、総ホップ数最小方式は 25、提案方式は 20 である。選択した経路に関しては、総経路長最小方式は経路 (13, 14, 10, 16, 5, 2) (829km) と経路 (13, 11, 9, 7, 4, 3, 2) (717km)、総ホップ数最小方式は経路 (13, 14, 10, 16, 5, 2) (829km) と経路 (13, 11, 8, 4, 3, 2) (757km)、提案方式は経路 (13, 12, 8, 4, 3, 2) (777km) と経路 (13, 11, 10, 16, 5, 2) (790km) である。総経路長最小方式の使用スペクトルスロット数が最も多くなる要因を考える。これは、経路長が 800km を超える経路が存在し、使用スペクトルスロット数の多

い QPSK で変調しなければならない点にある。また、同じく経路長が 800km を超える経路が存在する総ホップ数最小方式よりも使用スペクトルスロット数が多くなった理由は、総経路長最小方式の方がホップ数が大きいことにある。提案方式の使用スペクトルスロット数が最も少ない理由は、唯一 2 つの経路の経路長が 800km 以下であるので、2 つの経路ともに QPSK よりも使用スペクトルスロット数が少ない 16QAM で変調できるからである。

ノード 34 への光パスを取り上げると、使用スペクトルスロット数はそれぞれ、総経路長最小方式は 49、総ホップ数最小方式は 48、提案方式は 40 である。経路選択は、総経路長最小方式は経路 (13, 15, 23, 24, 25, 30, 28, 29, 34) (757km) と経路 (13, 14, 20, 24, 22, 26, 27, 28, 31, 37, 38, 34) (876km)、総ホップ数最小方式は経路 (13, 15, 23, 24, 25, 31, 37, 38, 34) (1012km) と経路 (13, 14, 20, 24, 22, 26, 27, 32, 34) (943km)、提案方式は経路 (13, 14, 20, 24, 25, 30, 28, 29, 34) (788km)、経路 (13, 15, 23, 24, 22, 26, 27, 32, 34) (912km) である。総経路長最小方式の使用スペクトルスロット数が最も多い理由について考える。まず、提案方式と比較すると、提案方式は QPSK で変調する経路のホップ数が 8、16QAM で変調する経路のホップ数が 8 であるのに対し、総経路長最小方式では QPSK で変調する経路のホップ数が 11、16QAM で変調する経路のホップ数が 8 であり、提案方式よりもホップ数が大きい点にある。また総ホップ数最小方式と比較すると、変調方式に関しては総経路長最小方式は 16QAM と QPSK、総ホップ数最小方式は 2 つの経路ともに QPSK で変調する。ホップ数に関しては総経路長最小方式は QPSK で変調する経路のホップ数が 11、16QAM で変調する経路のホップ数が 8、総ホップ数最小方式は総ホップ数が 16 である。変調方式に関しては総ホップ数最小方式よりも総経路長最小方式の方が使用スペクトルスロット数の少ない変調方式を選択していたが、ホップ数が大きくなってしまったために総ホップ数最小方式よりも使用スペクトルスロットは多くなってしまふ。次に、提案方式の使用スペクトルスロット数が最も少ないことについて考える。提案方式と総ホップ数最小方式の比較を行う。両方式の変調方式を調べると、提案方式は QPSK と 16QAM で変調する。一方、総ホップ数最小方式は 2 つの経路ともに QPSK で変調する。またホップ数に関しては、提案方式の総ホップ数は 16、総ホップ数最小方式の総ホップ数は 16 であり、等しい。よって、3 方式を比較して、提案方式の使用スペクトルスロット数が最も小さくなる。

総ホップ数最小方式の使用スペクトルスロット数が増える光パスにおける経路選択

総ホップ数最小方式の使用スペクトルスロット数が増える光パスについて考える。ノード 29 への光パスを取り上げると、使用スペクトルスロット数はそれぞれ、総経路長最小方式は 28、総ホップ数最小方式は 35、提案方式は 28 である。選択した経路は、総経路長最小方式は経路 (13, 15, 23, 24, 25, 30, 28, 29) (613km) と経路 (13, 14, 20, 24, 22, 26, 27, 29) (625km)、総ホップ数最小方式は経路 (13, 15, 23, 24, 25, 31, 28, 29) (914km) と経路 (13, 14, 20, 24, 22, 26, 27, 29) (625km)、提案方式は経路 (13, 15, 23, 24, 25, 30, 28, 29) (613km) と経路 (13, 14, 20, 24, 22, 26, 27, 29) (625km) である。総経路長最小方式と提案方式は同じ経路を選択している。総ホップ数最小方式が選択した経路の経路長から、QPSK と 16QAM で変調することが分かる。他の 2 方式は、2 つの経路ともに 16QAM で変調する。したがって、総ホップ数最小方式の使用スペクトルスロット数が最も多くなったのは使用スペクトルスロット数の多い変調方式を選択したことが原因である。

使用スペクトルスロット数と経路選択の考察のまとめ

総経路長最小方式、総ホップ数最小方式、及び、提案方式の 3 つの方式の比較を行ったことで、以下の特徴が読み取れる。発着ノード間において、どの経路を選択しても変調方式による使用スペクトルスロット数が減少しない場合、提案方式はホップ数が最小となるような経路を選択する。よって 2 つの独立経路の経路長が各変調方式の切り替わる距離と大きく異なり、経路を変えても変調方式が変わらない場合は、総ホップ数最小方式を適用することがよい。しかし、そうでない場合においては、ホップ数最小方式は、使用スペクトルスロット数の多い変調方式を選ぶ可能性が高い。これは、総経路長最小方式、総ホップ数最小方式、及び、提案方式の使用スペクトルスロット数が異なる光パスと総ホップ数最小方式の使用スペクトルスロット数が最も多くなる光パスを取り上げたとき、総ホップ数最小方式ではすべて、提案方

式よりも使用スペクトルスロット数の多い変調方式を選択していることから言える。また3つの方式の使用スペクトルスロット数がすべて異なる場合、3方式すべての、2つの独立経路で選択する変調方式の組み合わせが同じになることはない。これはホップ数のみで使用スペクトルスロット数の差が生じないことを意味しており、総ホップ数最小である総ホップ数最小方式の使用スペクトルスロット数が提案方式と一致しないことから裏付けられる。また総経路長最小方式、総ホップ数最小方式の経路選択に共通して、片方の経路で発着ノード間の短いリンクを占有してしまったために、他方の経路が長くなることで片方の経路において使用スペクトルスロット数の多い変調方式を選択されることが観測された。この場合、使用スペクトルスロット数が経路長と非線形な関係にあるので、短い方の経路で使用スペクトルスロット数の少ない変調方式を採用できなかつた場合、他方の経路で使用スペクトルスロット数の多い変調方式を採用しなければならなくなつたとき、使用スペクトルスロット数が多くなつてしまう。本性能評価では、片方の経路が長くなり、使用スペクトルスロット数の多い変調方式を選択しなければならない場合に、異なる経路選択を行うことで、両方の経路をバランスよく短くし、2つの独立経路に対して使用スペクトルスロット数の少ない変調方式を選択できるような経路選択が観測された。このような経路選択を行った場合、2つの独立経路の経路長の差は小さくなる。

6.4 計算時間

コンピュータを用いて、ネットワーク全体（6.1.1章）、発ノード固定（6.2.1章）における、従来方式と提案方式の経路選択にかかる計算時間を評価した。計算に用いるコンピュータは Dell-Precision-T7610 であり、CPU は Intel(R) Xeon(R) CPU E5-2609 v2 @ 2.50GHz、メモリは 64GB を用いた。ネットワーク全体における経路選択にかかる計算時間を、JPN 48 は表 6.5、Cost 239 は表 6.6、German 17 は表 6.7 に示す。また、JPN 48 において、発ノードを固定したときの経路選択にかかる計算時間を表 6.8 に示す。

表 6.5 - 6.7 より、従来方式、提案方式ともに、ネットワーク内のノード数、リンク数が多いほど、経路選択にかかる計算時間は大きくなる。また、すべてのネットワークにおいて、提案方式の計算時間は従来方式よりも大きい。提案方式の計算時間が大きくなるのは、非線形関数を線形化するために、決定変数が増加したことが原因である。

表 6.8 から、提案方式では、発着ノードのペアによって、計算時間にばらつきがあることが確認できるが、総経路長と計算時間の相関関係を見つけることはできなかつた。

表 6.5: JPN 48 のネットワーク全体における従来方式と提案方式の計算時間の比較

発ノード	総経路長最小方式 (従来方式) [sec]	総ホップ数最小方式 (従来方式) [sec]	提案方式 [sec]
1	0.108	0.107	0.684
2	0.108	0.109	0.979
3	0.108	0.106	0.975
4	0.109	0.107	1.044
5	0.108	0.107	0.969
6	0.106	0.108	1.086
7	0.109	0.107	0.940
8	0.108	0.107	1.053
9	0.108	0.109	1.054
10	0.108	0.107	1.080
11	0.109	0.109	0.967
12	0.108	0.108	1.069
13	0.108	0.108	1.131
14	0.109	0.107	1.003
15	0.109	0.107	0.946
16	0.108	0.108	0.995
17	0.110	0.109	0.949
18	0.109	0.110	0.979
19	0.109	0.109	0.962
20	0.109	0.108	0.909
21	0.109	0.110	1.066
22	0.109	0.108	1.057
23	0.109	0.108	0.948
24	0.109	0.110	0.965
25	0.109	0.108	0.883
26	0.119	0.116	1.009
27	0.118	0.117	0.861
28	0.108	0.108	1.007
29	0.108	0.107	1.026
30	0.109	0.109	0.889
31	0.107	0.109	0.937
32	0.110	0.109	0.971
33	0.109	0.110	0.995
34	0.109	0.110	1.174
35	0.108	0.109	0.878
36	0.109	0.109	0.850
37	0.109	0.109	0.828
38	0.109	0.108	0.885
39	0.109	0.109	0.866
40	0.110	0.107	0.886
41	0.108	0.109	0.809
42	0.109	0.107	0.536
43	0.108	0.109	0.439
44	0.109	0.109	0.839
45	0.109	0.107	0.821
46	0.109	0.109	0.868
47	0.109	0.107	0.687
48	0.108	0.113	0.102
平均	0.109	0.109	0.914

表 6.6: Cost 239 のネットワーク全体における従来方式と提案方式の計算時間の比較

発ノード	総経路長最小方式 (従来方式) [sec]	総ホップ数最小方式 (従来方式) [sec]	提案方式 [sec]
1	0.010	0.014	0.044
2	0.010	0.010	0.057
3	0.010	0.010	0.082
4	0.010	0.010	0.048
5	0.010	0.010	0.089
6	0.010	0.010	0.082
7	0.010	0.010	0.048
8	0.010	0.010	0.081
9	0.010	0.010	0.060
10	0.010	0.010	0.045
11	0.010	0.010	0.033
平均	0.010	0.010	0.061

表 6.7: German 17 のネットワーク全体における従来方式と提案方式の計算時間の比較

発ノード	総経路長最小方式 (従来方式) [sec]	総ホップ数最小方式 (従来方式) [sec]	提案方式 [sec]
1	0.030	0.030	0.136
2	0.030	0.030	0.138
3	0.030	0.030	0.142
4	0.030	0.030	0.136
5	0.030	0.029	0.134
6	0.030	0.030	0.122
7	0.030	0.030	0.145
8	0.030	0.030	0.125
9	0.030	0.030	0.137
10	0.030	0.030	0.111
11	0.030	0.030	0.122
12	0.030	0.029	0.109
13	0.030	0.030	0.156
14	0.030	0.030	0.133
15	0.030	0.030	0.138
16	0.030	0.029	0.140
17	0.030	0.030	0.121
平均	0.030	0.030	0.132

表 6.8: JPN 48 の発ノード固定（ノード 13）における従来方式と提案方式の計算時間の比較

着ノード	総経路長最小方式 (従来方式) [sec]	総ホップ数最小方式 (従来方式) [sec]	提案方式 [sec]	総経路長 (提案方式における) [km]
1	0.11	0.11	0.64	2275
2	0.11	0.11	0.90	1567
3	0.11	0.11	1.14	1334
4	0.11	0.10	1.23	768
5	0.11	0.11	1.12	1296
6	0.11	0.10	1.50	998
7	0.11	0.11	1.08	768
8	0.11	0.11	0.73	316
9	0.10	0.10	1.00	363
10	0.11	0.11	1.08	251
11	0.11	0.11	0.98	138
12	0.10	0.11	1.10	138
13 (発ノード)	-	-	-	-
14	0.11	0.10	1.02	114
15	0.10	0.11	1.38	114
16	0.11	0.11	1.21	810
17	0.11	0.11	1.03	1046
18	0.10	0.11	3.38	1219
19	0.11	0.11	2.61	1219
20	0.10	0.11	1.11	439
21	0.10	0.11	1.29	523
22	0.11	0.10	1.37	1056
23	0.10	0.10	1.18	439
24	0.10	0.10	0.93	765
25	0.11	0.11	1.20	1056
26	0.11	0.11	1.20	1056
27	0.11	0.11	1.37	1113
28	0.11	0.10	1.10	1162
29	0.11	0.11	1.35	1238
30	0.10	0.11	1.53	1113
31	0.11	0.11	1.08	1463
32	0.11	0.11	1.30	1700
33	0.11	0.11	1.83	2232
34	0.11	0.11	1.07	1700
35	0.11	0.11	0.74	2134
36	0.11	0.11	1.04	2232
37	0.11	0.10	1.07	1635
38	0.11	0.11	1.25	1635
39	0.11	0.10	0.98	2134
40	0.12	0.11	0.76	2024
41	0.11	0.11	0.95	2648
42	0.11	0.11	0.45	-
43	0.11	0.11	0.41	-
44	0.11	0.11	0.80	2796
45	0.11	0.11	0.61	2648
46	0.11	0.10	0.82	3152
47	0.11	0.11	0.89	3152
48	0.11	0.11	0.35	-
平均	0.108	0.108	1.131	

第7章 ヒューリスティックアルゴリズム

この章では、発着ノード間の光パス設定にかかる使用スペクトルスロット数を抑えるようなリンク独立経路選択アルゴリズムを紹介する。6.3章の考察において、経路長の長い発着ノードのペアにおいて、総ホップ数最小方式は使用スペクトルスロット数を抑えることができ、そうでない発着ノードのペアにおいては、総経路長最小方式は使用スペクトルスロット数を抑えることができることを確認した。したがって、以下の経路選択アルゴリズムが考えられる。

Algorithm 1 リンク独立経路選択.

Input: 発着ノードのペア

Output: 発着ノード間における使用スペクトルスロット数を抑えるリンク独立経路

Step 1: 総経路長最小方式と総ホップ数最小方式が選択した経路にかかる使用スペクトルスロット数をそれぞれ求める。総経路長最小方式が選択した経路にかかる合計使用スペクトルスロット数を X 、総ホップ数最小方式が選択した経路にかかる合計使用スペクトルスロット数を Y とする。

Step 2: $X \leq Y$ ならば、Step 3 に進む。そうでなければ、Step 4 に進む。

Step 3: 総経路長最小方式が選択した経路を選択する。

Step 4: 総ホップ数最小方式が選択した経路を選択する。

総経路長最小方式、総ホップ数最小方式における経路選択アルゴリズムの計算量は、ともに $O(|K|(|E| + |V|) \log |V|)$ であり、2つの方式における合計使用スペクトルスロット数の大小比較にかかる計算量は $O(1)$ であることから、上のアルゴリズムの計算量は $O(|K|(|E| + |V|) \log |V|)$ となる。

第8章 むすび

本論文は、エラスティック光ネットワークの発着ノード間の光パスにおいて、複数の独立経路によるスペクトルスロットの使用を最小化する独立経路選択方式を提案した。エラスティック光ネットワークでは、スペクトルスロットの使用量が経路長に対して非線形な関係によって決まり、かつ発着ノード間の独立経路を用いて光パスを設定するため、従来方式である総経路長最小方式と総ホップ数最小方式では、必ずしも独立経路で使用する合計のスペクトルスロット数が最小化されるとは限らない。提案方式は、発着ノード間の独立経路にかかるスペクトルスロットの使用量を最小化する。

提案方式で用いる独立経路選択問題を最適化問題として定式化するにあたり、経路長から使用スペクトルスロット数を求めるためには非線形関数を用いなければならなかった。そこで、その非線形関数を線形化して表現することにより、この最適化問題を整数線形計画問題に定式化した。また、本研究における独立経路選択問題がNP完全であることを証明した。性能評価により、提案方式は、従来方式と比較して、総経路長最小方式に対しては最大11.2%、総ホップ数最小方式に対しては最大4.8%のスペクトルスロット使用量の削減効果を確認した。提案方式の経路選択にかかる計算時間は、非線形関数を線形化することによる決定変数の増加が原因で、従来方式よりも大きくなる。提案方式の経路選択の特徴として、ホップ数を少なくするような経路を選択すること、及び、従来方式と比較して、独立経路の経路長の差がより小さい経路を選択する可能性があることを確認した。また、提案方式は、エラスティック光ネットワークにおける独立経路選択アルゴリズムの発見を助長する。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、ご指導を頂きました電気通信大学情報理工学研究科情報通信工学専攻のキッドスワンナッタポン助教授に心より感謝を申し上げます。また、研究を進めるにあたり、様々なご指導を頂きました先輩方、また同輩の方々に厚く感謝を申し上げます。

参考文献

- [1] B. C. Chatterjee, N. Sarma, and E. Oki, "Routing and Spectrum Allocation in Elastic Optical Networks: A Tutorial," *IEEE Commun. Surveys & Tutorials*, vol. 17, no. 3, pp. 1776-1800, 2015.
- [2] 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, 2009.
- [3] M. Jinno, B. Kozicki, H. Takara, A. Watanabe, Y. Sone, T. Tanaka, and A. Hirano, "Distance-adaptive spectrum resource allocation in spectrum-sliced elastic optical path network [Topics in Optical Communications]," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 48, no. 8, pp. 138-145, 2010.
- [4] O. Gerstel, M. Jinno, A. Lord, and S. J. B. Yoo, "Elastic optical networking: a new dawn for the optical layer?," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 50, no. 2, pp. s12-s20, 2012.
- [5] M. Aibin and K. Walkowiak, "Adaptive modulation and regenerator-aware dynamic routing algorithm in elastic optical networks," in *proc IEEE Int. Conf. on Communications (IEEE ICC)*, 2015, pp. 5138-5143.
- [6] C. Wang, G. Shen, and S. K. Bose, "Distance Adaptive Dynamic Routing and Spectrum Allocation in Elastic Optical Networks With Shared Backup Path Protection," *J. Lightwave Technol.*, vol. 33, no. 14, pp. 2955-2964, 2015.
- [7] C. Rottondi, M. Tornatore, A. Pattavina, and G. Gavioli, "Routing, modulation level, and spectrum assignment in optical metro ring networks using elastic transceivers," *J. Opt. Commun. Netw.*, vol. 5, no. 4, pp. 305-315, 2013.
- [8] T. Takagi, H. Hasegawa, K. Sato, Y. Sone, B. Kozicki, A. Hirano, and M. Jinno, "Dynamic routing and frequency slot assignment for elastic optical path networks that adopt distance adaptive modulation," in *Proc. OFC*, Mar. 2011.
- [9] G. Shen, H. Guo, and S. K. Bose, "Survivable elastic optical networks: survey and perspective," *Photon. Netw. Commun.*, vol. 31, no. 1, pp. 71-87, 2016.
- [10] J. W. Suurballe and R. E. Tarjan "A quick method for finding shortest pairs of disjoint paths," *Networks*, vol. 14, no. 2, pp. 325-336, 1984.
- [11] E. Oki, N. Matsuura, K. Shiomoto, and N. Yamanaka, "A disjoint path selection scheme with shared risk link groups in GMPLS networks," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 6, no. 9, pp. 406-408, 2002.
- [12] E. Oki, *Linear Programming and Algorithms for Communication Networks*, CRC Press, 2012.
- [13] 大木英司, 通信ネットワークのための数理計画法, コロナ社, 2012.
- [14] 岸祐斗, キットスワンナッタポン, 大木英司, "エラスティック光ネットワークにおける使用スペクトルスロット数を最小化する独立経路選択方式," 電子情報通信学会論文誌, vol. J100-B, no. 7, pp. 458-468, 2017.

- [15] H. D. Thanh, M. Morvan, and P. Gravey, "On the usage of flexible transponder in survivable transparent flex-grid optical network," in *Proc. Int. Symp. on Commun. Sys., Netw. & Digit. Signal Process. (CSNDSP)*, 2014, pp. 1123-1127.
- [16] "CPLEX Optimizer," URL: <<https://www-01.ibm.com/software/commerce/optimization/cplex-optimizer/>>, 参照, Oct. 2016.
- [17] "Gurobi Optimization," URL: <<http://www.gurobi.com>>, 参照, Oct. 2016.
- [18] Japan photonic network model. Retrieved March 3, 2016 from URL: <<http://www.ieice.org/cs/pn/jpn/jpnm.html>>.
- [19] S. Arakawa, T. Sakano, Y. Tsukishima, H. Hasegawa, T. Tsuritani, Y. Hirota, and H. Tode, "Topological Characteristic of Japan Photonic Network Model," *IEICE technical report*, vol. 113, no. 91, pp. 7-12, 2013.
- [20] A. Itai, Y. Perl and Y. Shiloach, "The Complexity of Finding Maximum Disjoint Paths with Length Constraints," *Networks*, vol. 12, pp. 277-286, 1982.
- [21] R. M. Karp, Reducibility among combinatorial problems. In "Complexity of Computer Computations," Miller, R. E. and J. W. Thatcher Eds. Plenum Press, NewYork, pp. 85-104, 1972.

発表実績

学術論文誌（査読付き）

1. Y. Kishi, N. Kitsuwana, H. Ito, B.C. Chatterjee, and E. Oki, “Modulation-Adaptive Link Disjoint Path Selection Model for 1+1 Protected Elastic Optical Networks,” *Optical Switching and networking*. (投稿中)
2. 岸祐斗, キットスワンナッタポン, 大木英司, “エラスティック光ネットワークにおける使用スペクトルスロット数を最小化する独立経路選択方式,” 電子情報通信学会論文誌 B, vol. J100-B, no. 7, pp. 458-468, 2017.

外部発表

1. 岸祐斗, キットスワンナッタポン, 大木英司, “エラスティック光ネットワークにおける変調方式を考慮した独立経路選択方式,” 信学技報, vol. 116, no. 386, PN2016-70, pp. 165-172, 2017年1月. (第4回 JPN デザインコンテスト優秀賞受賞)
2. 岸祐斗, キットスワンナッタポン, 大木英司, “エラスティック光ネットワークにおける独立経路選択方式,” 光ネットワーク研究会, 2016年11月.
3. 岸祐斗, キットスワンナッタポン, 大木英司, “エラスティック光ネットワークにおける独立経路選択,” 信学技報, PN 研究会, 2018年3月. (発表予定)