

# 超高密度WDMにおけるRWA問題

---

M1 山田航平

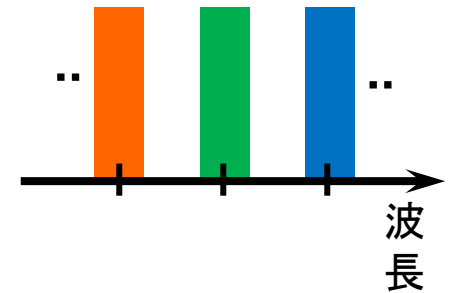
2023/06/27

- 背景
  - ・ 現行WDM
  - ・ 超高密度WDM(UD-WDM)
  - ・ スペクトル狭窄
  - ・ アプローチ手法
- 問題設定
  - ・ RWA問題
  - ・ スペクトル狭窄制約有りのRWA問題
- 実装および評価
  - ・ 検証に使用したトポロジーおよび手法
  - ・ 取得した結果と評価
- まとめ
  - ・ 今後の方針
  - ・ 参考文献

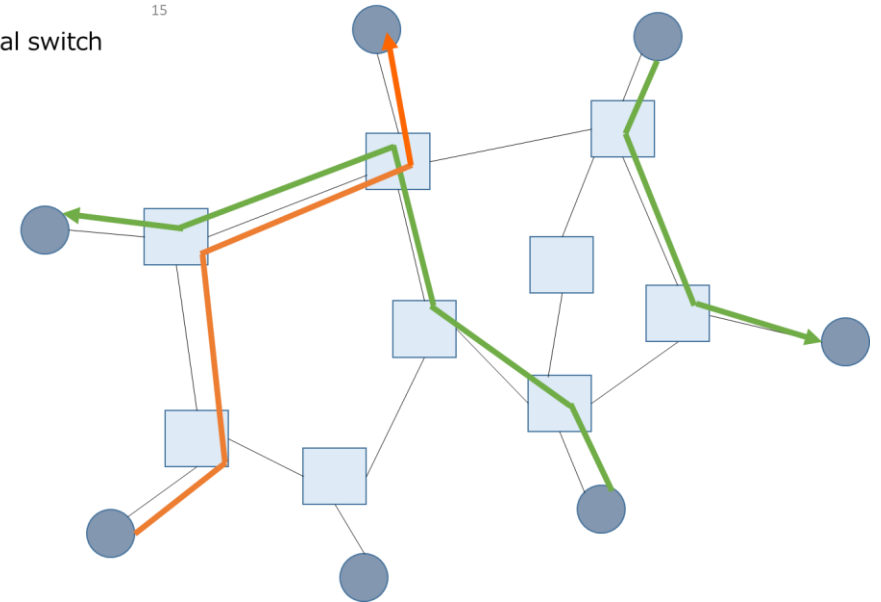
- 今日の光ファイバーネットワークにはWDMが用いられている
- WDMによって光ファイバの伝送容量を単一波長伝送と比較して大幅に増加
- 光信号のまま経路を切り替えることで低消費電力を実現している  
～（波長連続性）

## 波長分割多重 (WDM)

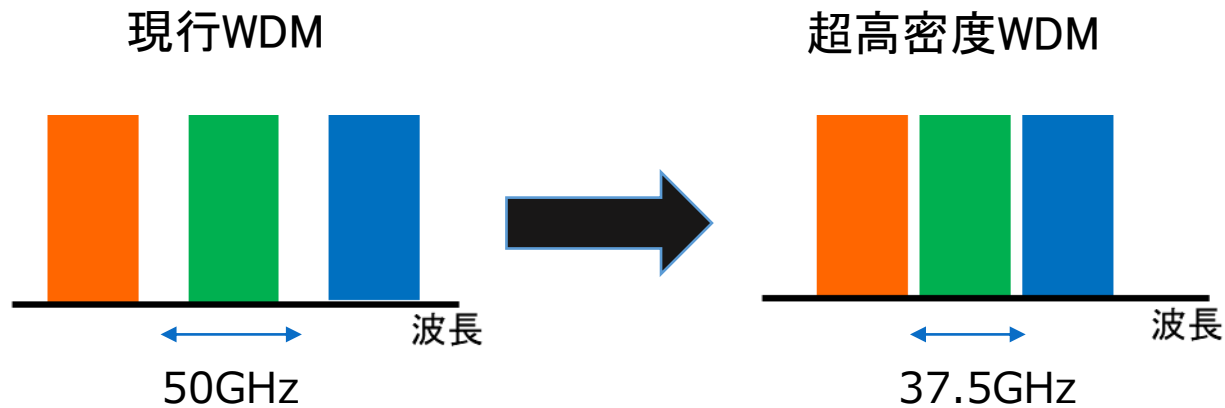
同一の光ファイバに  
複数の異なる波長の光信号  
を多重して伝送する方式



● Access node  
□ Optical switch



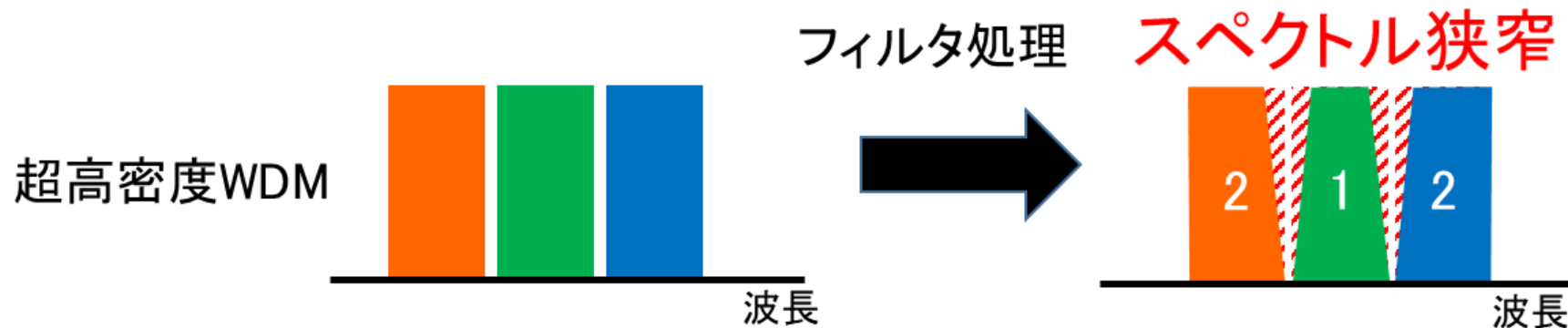
- 通信需要増加に伴い、通信容量の増加が求められる。
- 手法の一つとして超高密度WDM(Ultra-Dense WDM)がある。



(現行WDM→超高密度WDM)

- ・ **メリット** - より高い周波数利用効率が実現される。
- ・ **デメリット** - **スペクトル狭窄**が発生しうる。

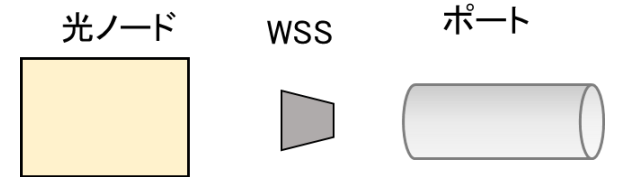
- スペクトル狭窄とは隣接波長の信号間で起こる信号劣化
- WSS(波長選択スイッチ)でのフィルタ処理の際にガードインターバルが小さいため信号劣化が起きる。



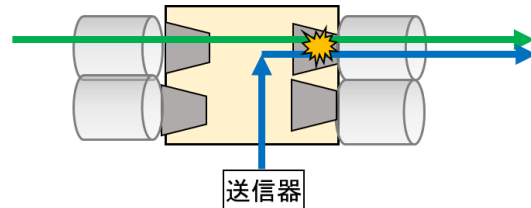
- 隣接波長の信号が同じ光ノードを共有するときにスペクトル狭窄は生じる
- 具体的にスペクトル狭窄が生じる条件は以下の4種類に分類される。

緑と青を隣接波長とする

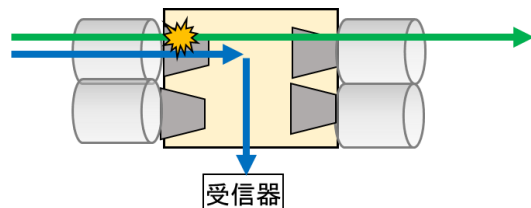
緑の信号を注目信号として緑の信号に狭窄が発生した箇所を<sup>★</sup>で表す。



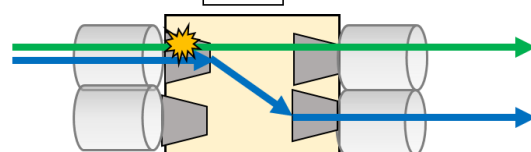
- (Add)



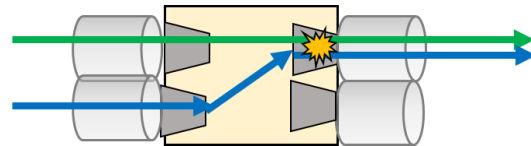
- (Drop)



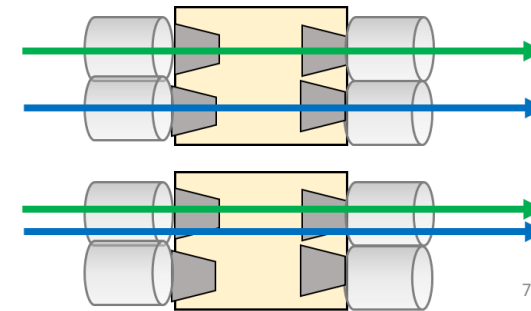
- (Express分岐)



- (Express結合)



狭窄が生じない条件



【超高密度WDMではスペクトル狭窄が起こる】



【光パスに対して適切な経路と波長割り当てを決定することで狭窄の影響を抑える】  
～RWA問題に落とし込む。

この問題の解を求めることでスペクトル狭窄による超高密度WDMを用いる  
光ファイバネットワーク容量の減少を抑える。

## ■ 光パスの経路と波長の割り当てを決定

### 【問題設定】

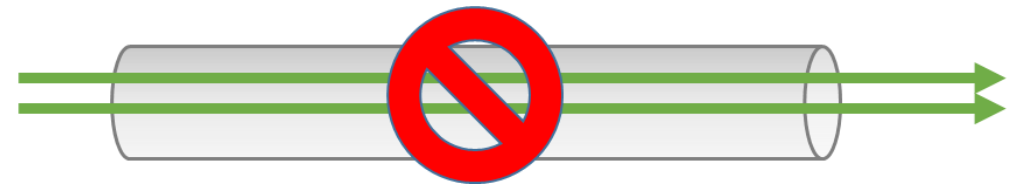
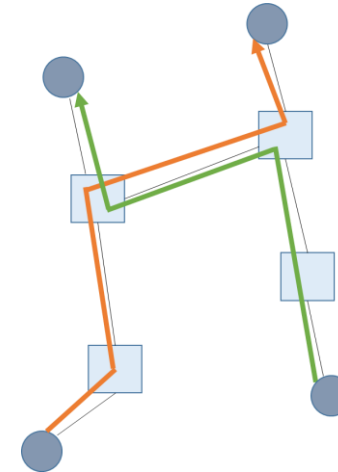
- ネットワークのトポロジーとトラフィック行列 $\Lambda$ が与えられている。  
( $\Lambda_{st}$ がsからtに送信するトラフィック数を表す。)

- 使用できる波長について波長の長い順に $1, 2, \dots, W_{max}$ と波長番号をつける。

使用する波長番号の最大値の最小化する。

### 【制約】

- 波長連続性  
(どの光パスもend-to-endで波長が変化しない。)
- 同リンクを同方向で通過する  
同波長の異なる光パスは存在しない





## ■ 光パスの経路と波長の割り当てを決定

【さらに加わる制約】

- 全ての光パスに対しての共通のスペクトル狭窄の許容回数をCとする  
この時すべての光パスに生じるスペクトル狭窄の回数はC回以内  
具体的なCの値については実験結果から定める

(ある光パスに対して過度な信号劣化が生じることを防いでいる)

## ■ RWA問題をILPとして定式化

$V$  を頂点の集合とする。

集合  $V$  のサイズを  $N$  として  $V = \{1, 2, \dots, N\}$  とする。

$E \subseteq \{(x, y) \mid (x, y) \in V^2\}$  を辺の集合とする。

$G=(V,E)$  によって通信に用いるグラフが与えられてる。

トラフィック行列  $\Lambda$  が与えられる。( $\Lambda_{st}$  は  $s$  から  $t$  へ送るトラフィック数を表す)

$W = \{1, \dots, W_{\max}\}$  として使用する波長を表す。(数字は波長の短い順に番号をつけているとする.)

またノードペア集合  $P = \{(s, t) \mid s \in V, t \in V \setminus \{s\}\}$  をもちいる。

$G$  と  $\Lambda$  と  $W$  が与えられたときに経路とそれぞれの経路への波長の割り当てを決定する

この問題を定式化すると以下の通り

・  $\lambda_{stw}$  は始点  $s$ 、終点  $t$ 、波長  $w$  の光パスが存在するとき 1 で存在しないとき 0 となるバイナリ変数

・  $F_{ij}^{stw}$  は上記の光パスがリンク  $(i, j)$  を通るときに 1 そうでないときに 0 となるバイナリ変数

$$\min F_{\max} \quad (1)$$

$$F_{\max} \geq w F_{ij}^{stw}, \forall (i, j) \in E, (s, t) \in P, w \in W \quad (2)$$

(3),(4),(5) はフロー保存の条件

$$\sum_{i:(i,s) \in E} F_{is}^{stw} - \sum_{k:(s,k) \in E} F_{sk}^{stw} = -\lambda_{stw}, \forall (s, t) \in P, w \in W \quad (3)$$

$$\sum_{i:(i,d) \in E} F_{id}^{stw} - \sum_{k:(t,k) \in E} F_{tk}^{stw} = \lambda_{stw}, \forall (s, t) \in P, w \in W \quad (4)$$

$$\sum_{i:(i,j) \in E} F_{ij}^{stw} - \sum_{k:(j,k) \in E} F_{jk}^{stw} = 0, \forall (s, t) \in P, j \in V \setminus \{s, t\}, w \in W \quad (5)$$

$$\sum_{w \in W} \lambda_{stw} = \Lambda_{st}, \forall (s, t) \in P \quad (6)$$

$$\sum_{(s,t) \in P} F_{ij}^{stw} \leq 1, \forall (i, j) \in E, w \in W \quad (7)$$

$$F_{ij}^{stw} \in \{0, 1\}, \forall (i, j) \in E, (s, t) \in P, w \in W \quad (8)$$

光パスにループが発生することを防ぐ制約式

$$\sum_{i:(i,j) \in E} F_{ij}^{stw} + \sum_{k:(j,k) \in E} F_{jk}^{stw} \leq 2, \forall j \in V, (s, t) \in P, w \in W \quad (9)$$

式(1)-(9)はWDMについてのRWA問題の定式化

(参考)

Zang, Hui, Jason P. Jue, and Biswanath Mukherjee. "A review of routing and wavelength assignment approaches for wavelength-routed optical WDM networks." *Optical networks magazine* 1.1 (2000): 47-60.

# RWA問題の定式化(2)

$V$  と集合  $V_a = \{a_1, a_2, \dots, a_N\}$  と  $V_d = \{d_1, d_2, \dots, d_N\}$  を用いて、  
 集合  $V' = V \cup V_a \cup V_d$  を定義する。

同様に  $E$  と  $E_a = \{(a_i, i) | 1 \leq i \leq N\}$  と  $E_d = \{(i, d_i) | 1 \leq i \leq N\}$  を用いて、  
 集合  $E' = E \cup E_a \cup E_d$  と定義する。  
 このとき  $G' = (V', E')$  と定義する。

【新たに追加される決定変数】

- $\beta_{ij}^{stws't'-}$  始点  $s$ , 終点  $t$ , 波長  $w$  または始点  $t'$ , 終点  $t'$ , 波長  $w-1$  の光パスがリンク  $(i, j)$  を使用するかを表すバイナリ変数
- $\beta_{ij}^{stws't'+}$  始点  $s$ , 終点  $t$ , 波長  $w$  または始点  $s'$ , 終点  $t'$ , 波長  $w+1$  の光パスがリンク  $(i, j)$  を使用するかを表すバイナリ変数
- $\gamma_j^{stws't'-}$  はノード  $j$  の周囲の辺のうちいくつが始点  $s$ , 終点  $t$ , 波長  $w$  または始点  $s'$ , 終点  $t'$ , 波長  $w-1$  の光パスによって使用されているかを表す変数
- $\gamma_j^{stws't'+}$  は頂点  $j$  の周囲の辺のうちいくつが始点  $s$ , 終点  $t$ , 波長  $w$  または始点  $s'$ , 終点  $t'$ , 波長  $w+1$  の光パスによって使用されているかを表す変数
- $z_j^{stws't'-}$  はノード  $j$  で始点  $s$ , 終点  $t$ , 波長  $w$  の光パスと始点  $s'$ , 終点  $t'$ , 波長  $w-1$  の光パスが三叉になるかを表すバイナリ変数
- $z_j^{stws't'+}$  はノード  $j$  で始点  $s$ , 終点  $t$ , 波長  $w$  の光パスと始点  $s'$ , 終点  $t'$ , 波長  $w+1$  の光パスが三叉になるかを表すバイナリ変数

グラフ変形後のフロー保存の条件が (10),(11),(12) によって表されている。

$$\sum_{i:(i,a_s) \in E'} F_{ia_s}^{stw} - \sum_{k:(a_s,k) \in E'} F_{a_sk}^{stw} = -\lambda_{stw}, \forall (s,t) \in P, w \in W \quad (10)$$

$$\sum_{i:(i,d_t) \in E'} F_{id_t}^{stw} - \sum_{k:(d_t,k) \in E'} F_{d_ik}^{stw} = \lambda_{stw}, \forall (s,t) \in P, w \in W \quad (11)$$

$$\sum_{i:(i,j) \in E'} F_{ij}^{stw} - \sum_{k:(j,k) \in E'} F_{jk}^{stw} = 0, \forall j \in V, (s,t) \in P, w \in W \quad (12)$$

(13),(14),(15),(16),(17) は波長  $w$  に対してスペクトル狭帯を起こしえる波長  $w-1$  との関係式

$$\beta_{ij}^{stws't'-} = F_{ij}^{stw} \vee F_{ij}^{s't'(w-1)}, \forall (i,j) \in E, (s,t) \in P, (s',t') \in P, w \in W \setminus \{1\} \quad (13)$$

$$\beta_{ij}^{stws't'-} \in \{0, 1\}, \forall (i,j) \in E, (s,t) \in P, (s',t') \in P, w \in W \setminus \{1\} \quad (14)$$

$$\gamma_j^{stws't'-} = \sum_{i:(i,j) \in E'} \beta_{ij}^{stws't'-} + \sum_{k:(j,k) \in E'} \beta_{jk}^{stws't'-}, \forall j \in V, (s,t) \in P, (s',t') \in P, w \in W \setminus \{1\} \quad (15)$$

$$1 - |\gamma_j^{stws't'-} - 3| \leq z_j^{stws't'-}, \forall j \in V, (s,t) \in P, (s',t') \in P, w \in W \setminus \{1\} \quad (16)$$

$$z_j^{stws't'-} \in \{0, 1\}, \forall j \in V, (s,t) \in P, (s',t') \in P, w \in W \setminus \{1\} \quad (17)$$

(18),(19),(20),(21),(22) は波長  $w$  に対してスペクトル狭帯を起こしえる波長  $w+1$  との関係式

$$\beta_{ij}^{stws't'+} = F_{ij}^{stw} \vee F_{ij}^{s't'(w+1)}, \forall (i,j) \in E, (s,t) \in P, (s',t') \in P, w \in W \setminus \{W_{\max}\} \quad (18)$$

$$\beta_{ij}^{stws't'+} \in \{0, 1\}, \forall (i,j) \in E, (s,t) \in P, (s',t') \in P, w \in W \setminus \{W_{\max}\} \quad (19)$$

$$\gamma_j^{stws't'+} = \sum_{i:(i,j) \in E'} \beta_{ij}^{stws't'+} + \sum_{k:(j,k) \in E'} \beta_{jk}^{stws't'+}, \forall j \in V, (s,t) \in P, (s',t') \in P, w \in W \setminus \{W_{\max}\} \quad (20)$$

$$1 - |\gamma_j^{stws't'+} - 3| \leq z_j^{stws't'+}, \forall j \in V, (s,t) \in P, (s',t') \in P, w \in W \setminus \{W_{\max}\} \quad (21)$$

$$z_j^{stws't'+} \in \{0, 1\}, \forall j \in V, (s,t) \in P, (s',t') \in P, w \in W \setminus \{W_{\max}\} \quad (22)$$

絶対値の線形計画法は以下を参考

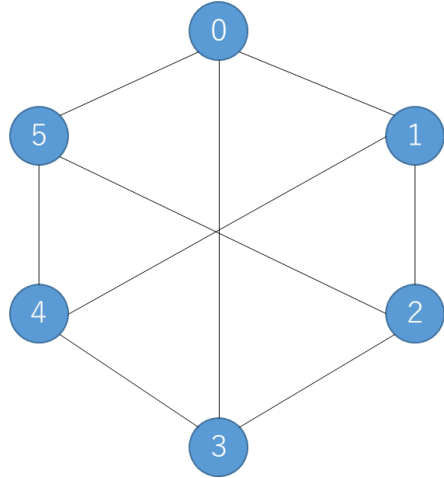
[https://optimization.cbe.cornell.edu/index.php?title=Optimization\\_with\\_absolute\\_values#Form\\_when\\_.7F.27.22.60UNIQ-postMath-0000000D-QINU.60.22.27.7F\\_.7F.27.22.60UNIQ-postMath-0000000D-QINU.60.22.27.7](https://optimization.cbe.cornell.edu/index.php?title=Optimization_with_absolute_values#Form_when_.7F.27.22.60UNIQ-postMath-0000000D-QINU.60.22.27.7F_.7F.27.22.60UNIQ-postMath-0000000D-QINU.60.22.27.7)

$C$  は各光パスのスペクトル狭帯の許容回数

$$\sum_{j \in V \setminus \{s,t\}} \sum_{(s',t') \in P} z_j^{stws't'+} + z_j^{stws't'-} \leq C, \forall (s,t) \in P, w \in W \quad (23)$$

式(10)-(23)はUD-WDMになることで加わるスペクトル狭帯の制約を表している

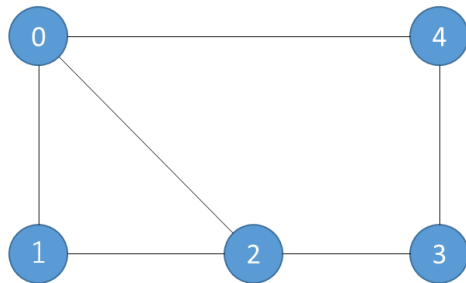
- WDMのRWA問題



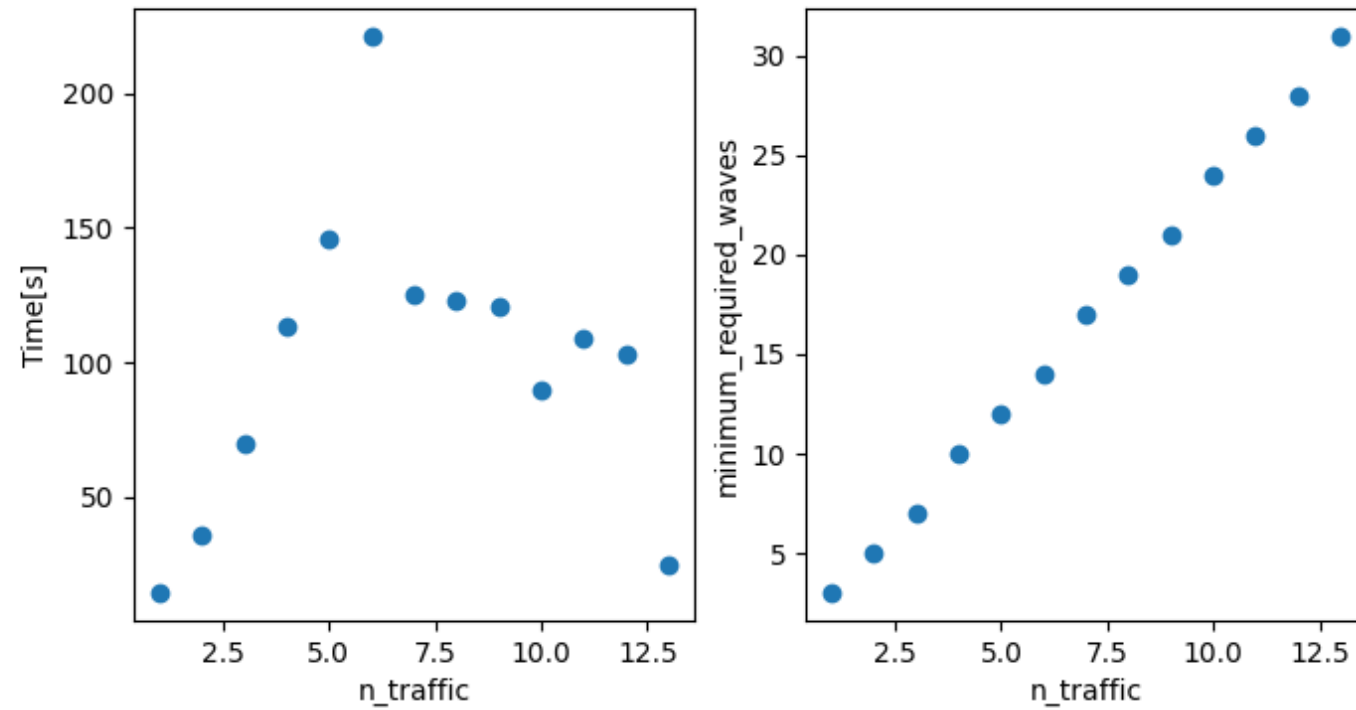
ILPのソルバーとしてCPLEXを使用

全ノードペア間に共通のトラフィック数  
n\_trafficを定めて送信する。  
実行時間と最小の必要な波長番号を取得

- 超高密度WDMのRWA問題【スペクトル狭窄制約有】

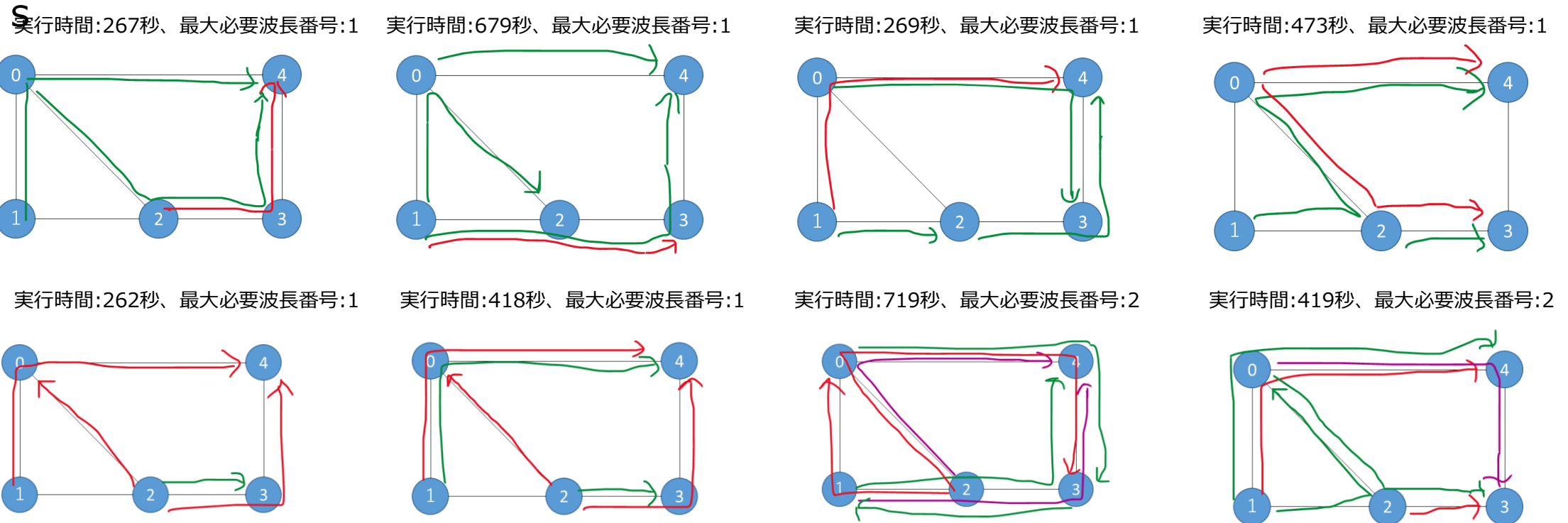


複数の例を用いて実行時間および経路と波長の  
割り当てを取得して経路と波長の割り当てが  
条件を満たしているか確認



Wmax = 31で試した結果

各光パスのスペクトル狭帯域回数を1回と設定  
波長番号0を赤、波長番号1を緑、波長番号2を紫とする



- 扱えるトポロジーのサイズが小さい
- 問題を緩和してより大きなトポロジーでも扱えることを目指す
- 発見的アルゴリズムも考慮する
- 今後検討する手法の妥当性をILPで確認

. [1] Shiraki, Ryuta, et al. "Design and evaluation of quasi-Nyquist WDM networks utilizing widely deployed wavelength-selective switches." *Optics express* 27.13 (2019): 18549-18560.

• [2] Zang, Hui, Jason P. Jue, and Biswanath Mukherjee. "A review of routing and wavelength assignment approaches for wavelength-routed optical WDM networks." *Optical networks magazine* 1.1 (2000): 47-60.