

# 大容量フォトニックネットワークのアーキテクチャ

長谷川 浩 佐藤 健一

名古屋大学 大学院工学研究科 電子情報システム専攻

〒464-8603 愛知県 名古屋市 千種区 不老町

E-mail: {hasegawa,sato}@nuee.nagoya-u.ac.jp

**あらまし** 本稿では、超大容量通信を実現するためのフォトニックネットワークのアーキテクチャについて解説する。従来の IP 技術をベースにしたネットワークでは、パケット単位での経路制御を電気処理にて行うため、宛先検索にかかるオーバーヘッドが通信容量を制限しかつ膨大な消費電力に直結していた。光ファイバ中の波長多重信号の経路制御を、波長をラベルとし光信号のまま行うことにより、超低消費電力と大容量を実現するフォトニックネットワークが導入されつつあるが、コスト面やハードウェア規模の面から多数の光信号の経路制御処理は容易ではなく、更なる大容量化は困難であった。本稿ではフォトニックネットワークの現状と課題について述べ、ボトルネックであるフォトニックノードの容量を向上させるためのアーキテクチャを解説する。

**キーワード** フォトニックネットワーク 階層化光パス エラスティック光パス フォトニックノードアーキテクチャ

## Architectures of Bandwidth Abundant Photonic Networks

Hiroshi HASEGAWA Ken-ichi SATO

Dept. Electrical Engineering and Computer Science, Nagoya University

Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya 464-8603 Japan

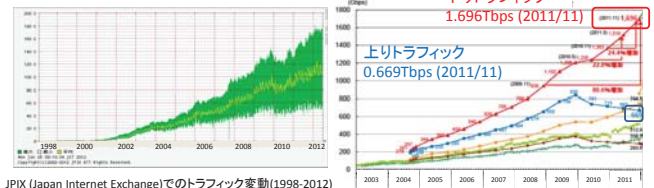
E-mail: {hasegawa, sato}@nuee.nagoya-u.ac.jp

**Abstract** In this manuscript, we present architectures of photonic networks to realize bandwidth abundant optical transport. Current IP-based networks are suffered from the energy consumption and the capacity limitation caused by the packet-by-packet forwarding in the electrical layer. This fact motivates the introduction of photonic networks that utilize wavelength routing in the optical layer. The elimination of costly E/O and O/E conversion and the routing in the optical layer makes photonic networks energy efficient and capacity abundant. However, due to the difficulty in realizing large scale optical switches, further capacity enhancement is not straightforward. We elucidate the current situation and issues in photonic networks and then show novel node architectures that can achieve larger capacity cost-effectively.

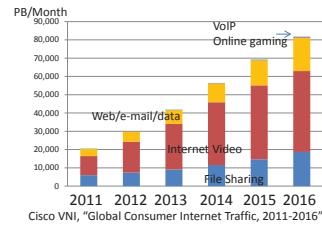
**Keyword** Photonic Network, Hierarchical Optical Path, Elastic Optical Path, Photonic Node Architecture

## 背景

## 背景 -増加し続ける通信トラフィック-



JPIX (Japan Internet Exchange)でのトラフィック変動(1998-2012)

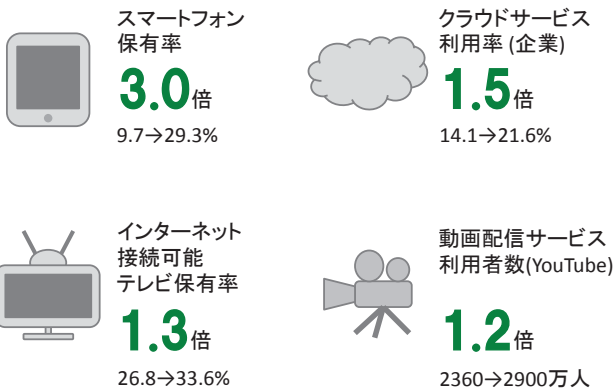


日本国内の総通信量(総務省発表資料より)

- トラフィックは依然として増加 (+30-40%/年).
- 映像中心のサービスが増加
- 各種移動端末の増加

3

## 通信産業の発展 (日本'10→'11)



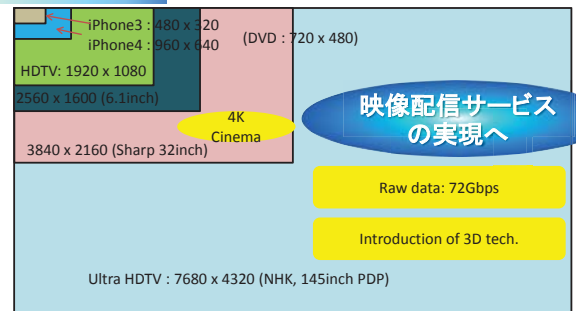
出典:総務省 通信利用動向調査

4

## ディスプレイの高精細化

トラフィックの性質の変化 データ → 映像主体へ  
✓ブロードバンドアクセス技術の進展 (ADSL, FTTH)

### 映像技術の進展



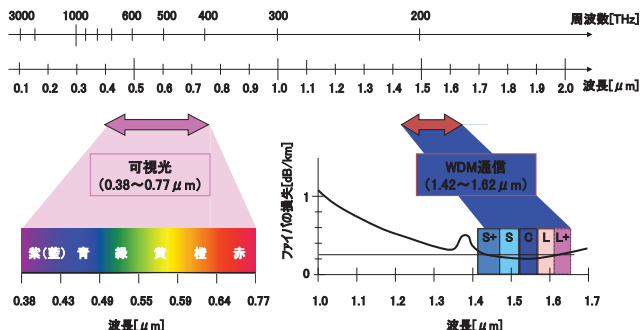
5

## 次世代のネットワークサービスへ



## 光ファイバ通信=超大容量

## 光ファイバ通信に使われる波長／周波数領域



9

## 光ファイバ通信と無線通信の比較

無線と光ファイバ伝送の比較 光ファイバ内に信号が閉じこめられて伝送されるので効率が非常に高いファイバを増やすことで通信路を多数確保することも容易

	無線	光ファイバ伝送
送受間電力差	大 (特に低ビットレート)	小
帯域使用効率 (ex. 8b/Hz ; Cable Modem)	大	小 (ex. <1b/Hz)
伝送容量 (キャリア周波数)	小 (< 100Mb/s) (1~数10 GHz)	大 (> 10Gb/s) (~200 THz)
伝播損失	$\propto 1 / \text{距離}^2$	$\propto 1 / \text{距離}$
最適領域	・ブロードキャスト ・モバイルアクセス	・大容量並びに長距離 ・ポイント・ポイント

(シャノン)「通信容量は、利用可能な帯域幅に比例する」  
& 光ファイバは極めて広帯域

10

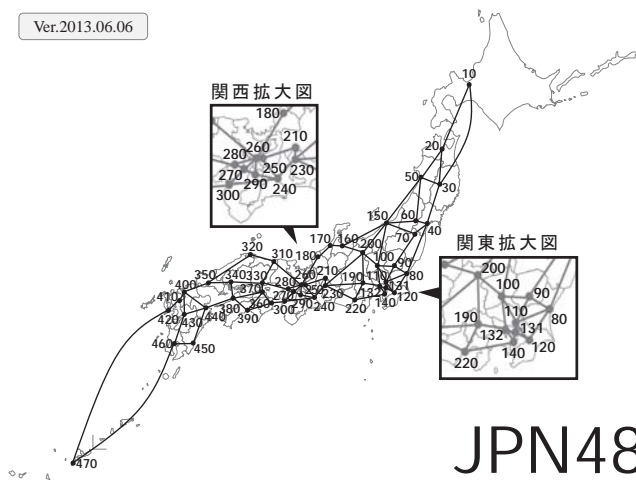
## 現在の達成度

- 波長多重による大容量化が先行していたが、無線通信では当然のこととなっているデジタルコヒーレント (DSPによる伝送路等価や多値判定) 技術が導入されたことで 100Gbps/波長が商用レベルで実現された
- すでに実験室レベルでは、100+Tbps/ファイバが実現されている
  - D. Qian, "101.7-Tb/s (370 × 294-Gb/s) PDM-128QAM-OFDM Transmission over 3 × 55-km SSMF using Pilot-based Phase Noise Mitigation," OFC/NFOEC, PDPB5, Mar. 2011.
  - J. Sakaguchi et.al., "19-core fiber transmission of 19x100x172-Gb/s SDM-WDM-PDM-QPSK signals at 305Tb/s," OFC/NFOEC, PDP5C.1, Mar. 2012.
- 一方で光ファイバの非線形性や投入できる光パワーが限られることから、光ファイバの容量には限界が見えてきている ("Capacity Crunch", 「非線形シャノン限界」)
- マルチコア・マルチモードの検討の他、光ファイバの容量を使い切るための OFDM / Nyquist WDM の導入や、通信需要に応じたダイナミックな波長資源の割り当てが研究されている。

11

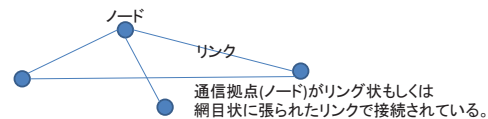
## フォトニックネットワーク

Ver.2013.06.06

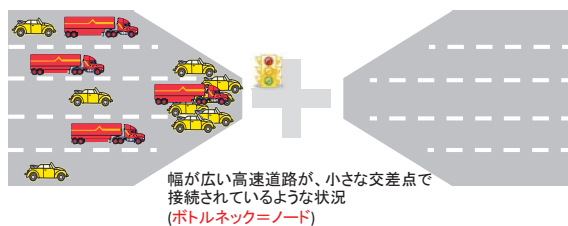


13

## 現在のネットワークのイメージ

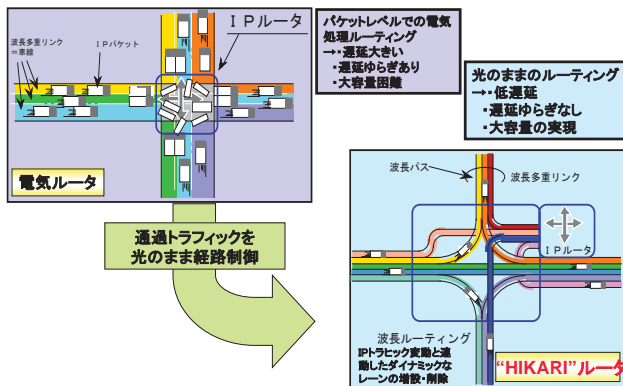


通信容量のイメージ (リンク>>ノード)



15

## 電気処理の限界を超えて ～波長ルーティング～

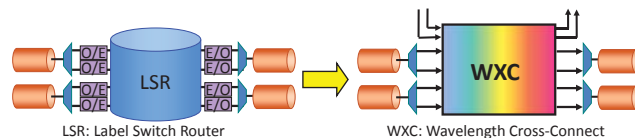


16

## フォトニックネットワーク

各ノードでの電気・光変換を極力排して、ボトルネックとなる電気処理を削減

- 波長そのものをラベルとして信号を識別し、ルーティング
- 低遅延
- 超大容量 (インターフェース高速化によりスケールする)
- 超低消費電力



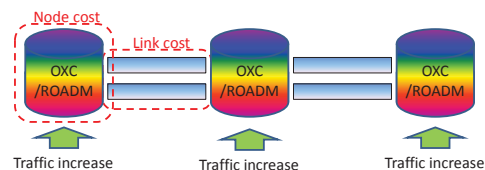
光信号の直接処理の難しさ

- 光スイッチの高コスト
- 高次スイッチの製造の難しさ
- 光パッファは限定的 (パケット化による統計多重効果が得にくい)

17

## フォトニックネットワークの大容量化

## トラフィック増によるコスト増大



### 1. Link cost 削減 (ファイバの周波数資源の最大利用)

エラスティック光パスネットワーク  
= OFDMの導入・密な周波数グリッドの導入

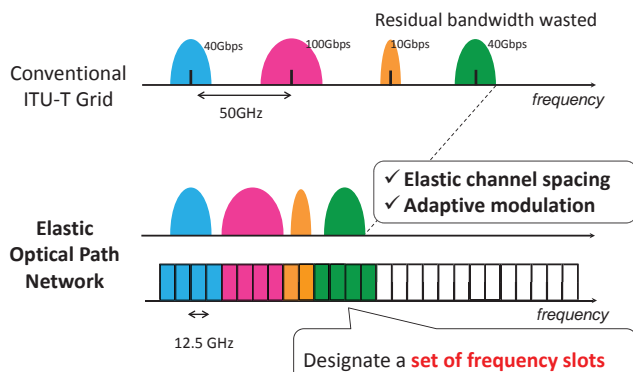
### 2. Node cost 削減 (光スイッチ規模を削減)

階層化光パスネットワーク  
= パスを論理的に束ねることによるスイッチ規模削減

新たなルーティング手法に基づくコンパクトなノード

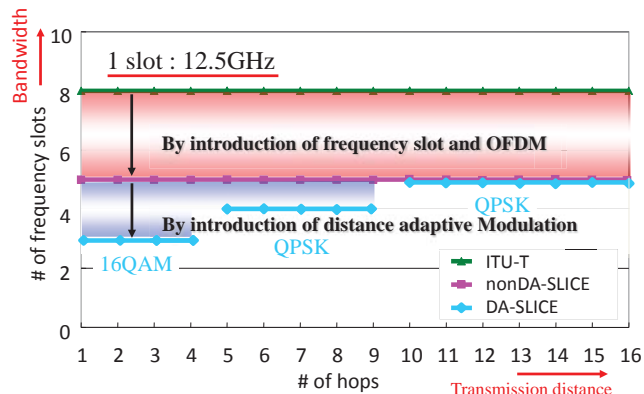
19

## エラスティック光パスネットワーク



※ 400Gbps, 1Tbpsも視野に

## 距離に応じた変調方式の選択



22

## 経路・周波数スロット割当問題

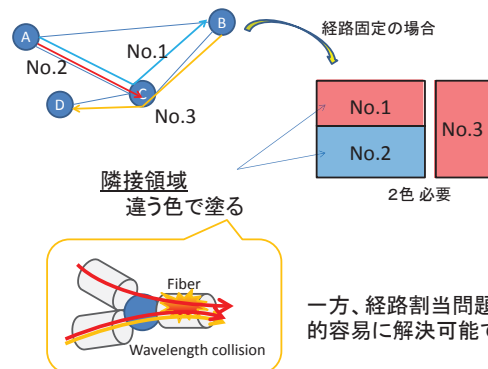
- 従来型ネットワークにおける“経路・波長割当問題(RWA)”は“経路・周波数スロット割当問題(RSA)”へ
- 波長や周波数スロットの割り当ては、グラフ理論における彩色問題に相当
- 使用周波数の断片化が大きな問題に

細かな単位での割り当て・不均一な使用帯域

静的設計・動的制御の双方で困難さを生む

23

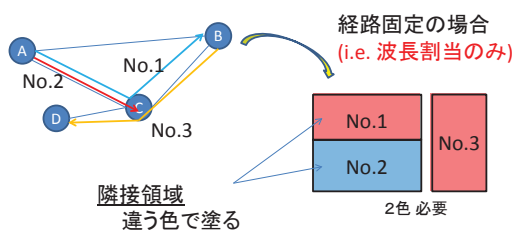
## 波長(経路)割り当て問題



一方、経路割当問題は比較的容易に解決可能である

24

## 波長(経路)割り当て問題



波長割当はどの程度困難？

- Finding a coloring that minimizes the number of colors used. => NP-hard
- Finding a coloring that minimizes the number of fibers used subject to given color set. => NP-complete

25

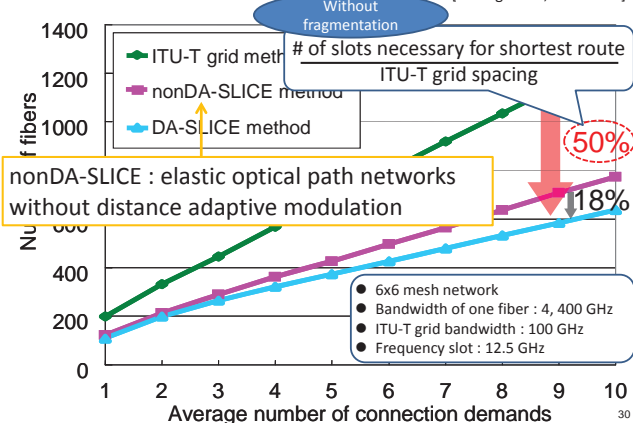
## Iterative ILP based Route Assignment [T.Takagi et al., ECOC2010]

- 距離に応じた変調方式を採用するエラスティック光パスネットワークの設計法
- 与えられた光パス設立需要の各々について、最短の経路で必要となる周波数スロット数を計算
- 上記の周波数スロット数の見積もり値が同一になる光パス集合を、スロット数が小さい順から順次経路割り当て => 周波数割り当て

29

## Link cost reduction by path elasticity (static)

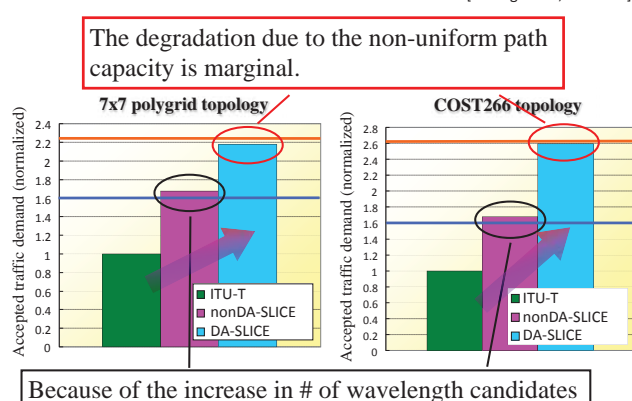
[T.Takagi et al., ECOC2010]



30

## Ratio of Accommodated Traffic

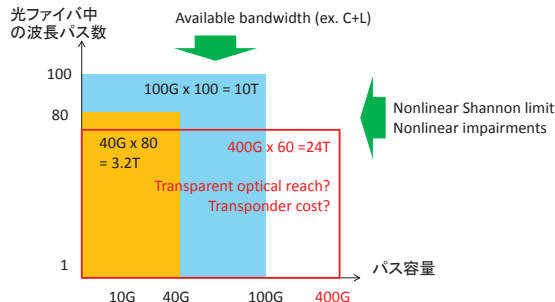
[T.Takagi et al., OFC2011]



Because of the increase in # of wavelength candidates

32

## ファイバ容量拡大の限界



Traffic: +30%/year → ネットワーク全体の最適化による、実質的な容量拡大等が必須

33

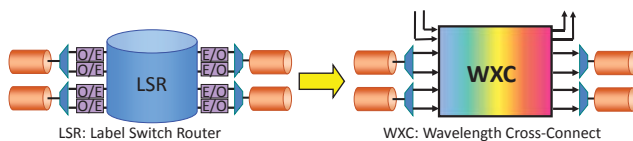
## 超大容量フォトニックノード

## 一階層光パスネットワーク

大容量化・低消費電力化:

1<sup>st</sup> stage : 一階層光パスネットワーク

← Bottleneck and prevent the constructing cost-effective networks

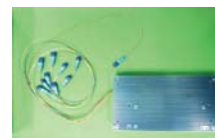
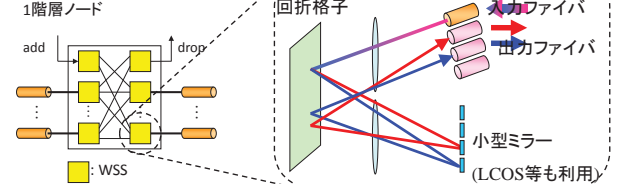


37

## 波長選択スイッチ

(Wavelength Selective Switch)

WSSのみで構成された1階層ノード



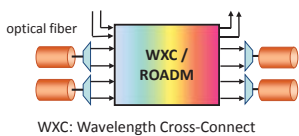
Finisar社製 1x9 WSS (140mm x 220mm)

現在 1x20までが商用化されているが、より高次のWSSを製造するのは容易ではない

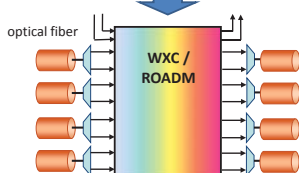
38

## ノード拡張の限界

一階層光パスネットワーク



- ✓ 極低消費電力
- ✓ 超大容量
- ✓ 最小遅延 他



The issues

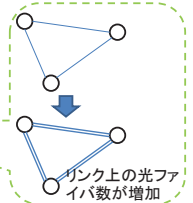
- ✓ 光スイッチポート数が膨大に
- ✓ 巨大な光スイッチを構成するのは極めて困難

39

## トラフィック増に応じて起こること

- ネットワーク内の光パスは増加
- 光ファイバ数はそれに応じて増加
- &
- ネットワーク形状は固定

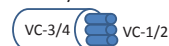
同一経路上を移動する光パスが増える



A possible solution

過去の解決策: 高次パスを導入する

Ex.) VC-3/4 in SDH/SONET



ルーティングの効率向上  
クロスコネクタの効率向上



## 小規模光スイッチによる大容量ノード構築



複数波長のグループ化 (高次パスの導入)

ネットワークの分割

### 階層化光パスネットワーク (2000年頃~)

- 複数の波長を論理的にグループ化(「波長群/パス」)
- 可能な限りグループ単位でルーティング
- 波長群/パスを乗り換えるとき・add/dropの時に一階層型と同様の処理を実施
- 大規模化に限界

### Grouped Routing Entity based Optical Networks (2011年~)

- 波長群単位での経路制御と波長単位のadd/dropを組み合わせている
- 波長用クロスコネクは不要でノードがコンパクト

### 2-stage Routing Optical Networks (2011年~)

- 次の経由ノードに応じて、波長を動的にグループ化
- 続く小型の光スイッチで、光ファイバを選択する

### Subsystem modular OXC Node Architecture (2011年~)

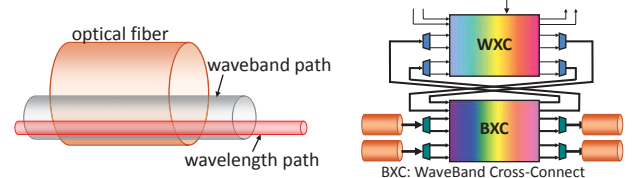
- 各ネットワークノードを、小型OXCサブシステムを並べたもので構成
- 各サブシステムは容易に構成可能

41

## 階層化光パスネットワーク



一部の波長パスのみがWXCを利用



**Waveband Path = a group of wavelength paths**

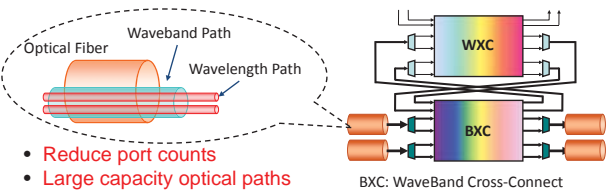
- 可能な限り波長群/パス単位でルーティング
- WXCは依然として大きく、大規模化に限界

42

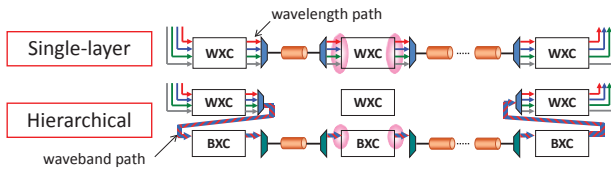
## Hierarchical Optical Path Network



**Waveband Path = a group of wavelength paths**



- Reduce port counts
- Large capacity optical paths

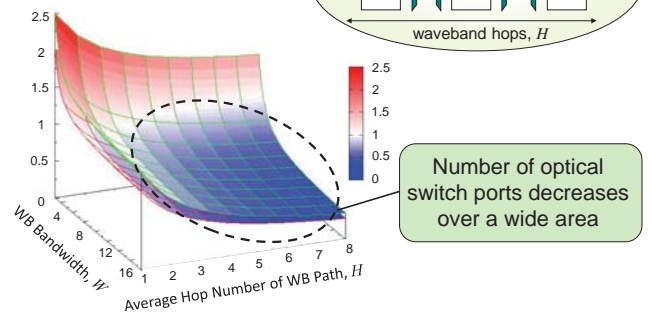


43

## Benefit of Wavebands



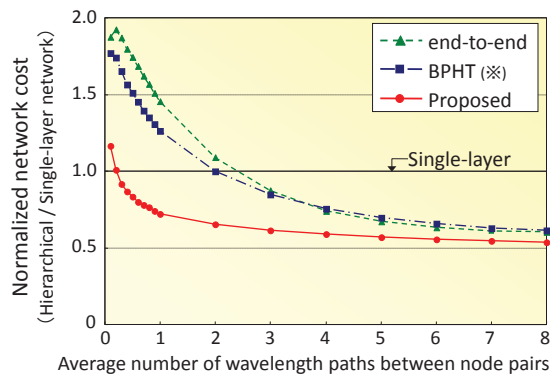
Ratio of the total number of switch ports in the networks (R: Hierarchical/Single Layer)



Number of optical switch ports decreases over a wide area

44

## Performance Evaluation [I.Yagyu et.al. 2008]



※) BPHT : X.Cao et al., IEEE J-SAC, 2003

## 階層化光パスクロスコネクノードの試作



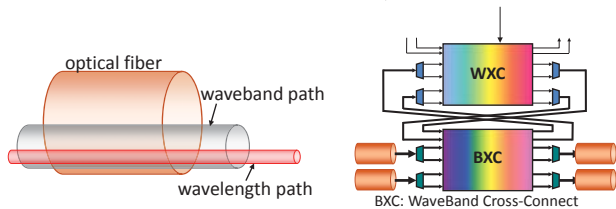
長谷川 浩 佐藤 隆一 (名古屋大学) 高橋 浩 (NTTフォトニクス研究所) 奥野 将之 (NTTエレクトロニクス) 電子情報通信学会ソサイエティ大会2010 招待講演



OFC2010 Post-deadline Paper  
4/6プレス発表 (日経産業新聞, 日刊工業新聞, フジサンケイビジネスアイ, 中日新聞, 科学新聞に掲載)

## 階層化光パスネットワーク

一部の波長パスのみがWXCを利用

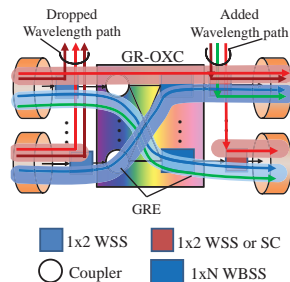


**Waveband Path = a group of wavelength paths**

- 可能な限り波長群パス単位でルーティング
- WXCは依然として大きく、大規模化に限界

47

## Grouped Routing Scheme



ルーティングは疎な粒度で実施  
(波長群パスと同様)

- ファイバ中の波長パスは、幾つかのグループに論理的に分割 (GRE).
- BXCはGRE単位でのルーティングを担当

**Grouped Routing Entity (GRE)**  
= The bundle of wavelength paths used for coarse granular routing

1x2 WSS 1x2 WSS or SC  
Coupler 1xN WBSS

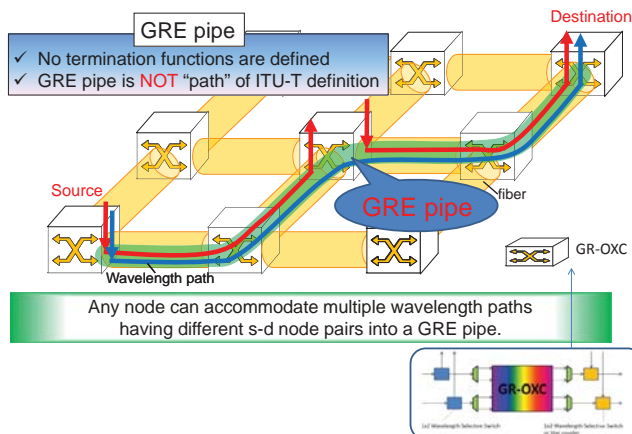
**Grouped Routing**  
= Coarse granular routing with  
Fine granular add/drop

Add/drop操作は細粒度で実施  
(波長単位)

- 任意の波長をGREより抽出・挿入可能
- 抽出・挿入時には、GREが終端する必要は無い ("GREパイプ")

48

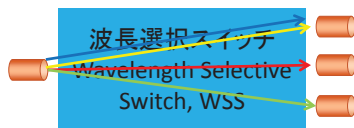
## Grouped Routing Scheme



## 大容量光ルーティング用デバイス

51

## 波長選択スイッチ



- 入力ポートからの波長信号を、波長毎に所望の出力ポートへルーティングする
- パワー調整等、様々な機能を一つの箱に詰め込んでいる
- 何台かのWSSを接続することで、光クロスコネクタが構成可能
- 2005年頃から登場、現在急激に出荷量を伸ばしている

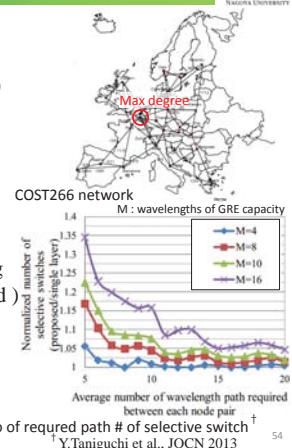
52

## Req. on WBSS's spec [K.Takaha et.al. 2013]

- ◆ Higher degree
  - Pan-European network (COST266)

Number of nodes	26	Min	200
Node degree	Min 2	Link distance	Max 1712
	Max 8		Ave. 627.2
	Ave. 3.92		Min 1
Number of links	51	Hop count	Max 6
			Ave. 2.76

- ◆ More wavelength paths
  - 88 + 8 wavelengths 50GHz spacing (C-band + a part of S-band, L-band)
- ◆ Broader WB/GRE capacity
- ◆ Compact implementation

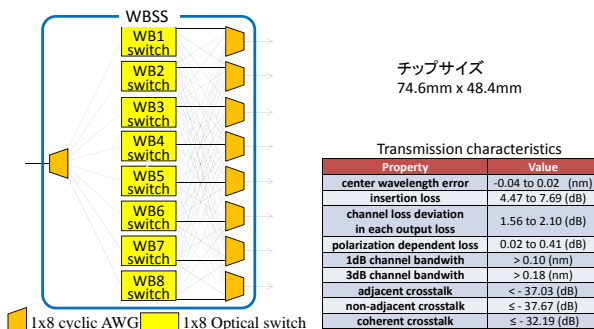


Ratio of required path # of selective switch<sup>†</sup>  
<sup>†</sup> Y.Taniguchi et al., JOCN 2013

54



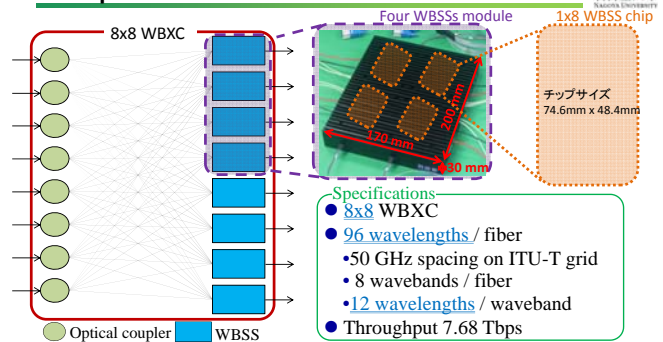
## Proposed 1x8 WBSS



- ✓ Adaptation to 50 GHz spacing signals
- ✓ Larger WBSS Scale (1x5 WBSS → 1x8 WBSS) by very small increase of WBSS PLC chip's size

55

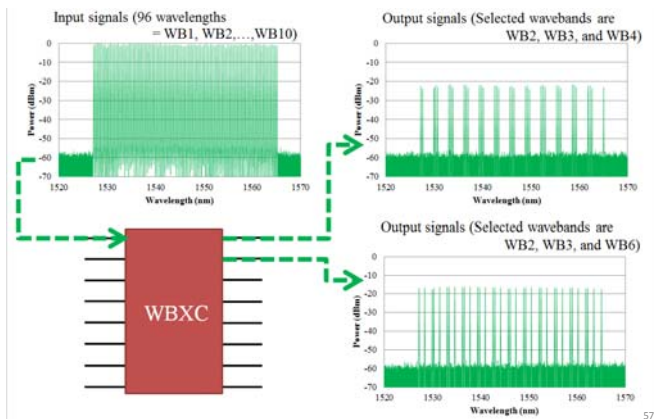
## Proposed 8x8 WBXC



- ✓ Compared to previous device (5x5 WBXC)
  - Number of ports : 1.60 times
  - Size of WBXC module : 0.68 times
  - Capacity of wavelengths : 1.50 times

56

## Experiment:spectra



57

まとめ

58

## 結論

- 通信量は依然として増加している(+30-40%/年)。
- エネルギー消費・装置コストには限度がある。
- 超低消費電力かつ超大容量を実現する上では、フォトニックネットワークを導入していくことが必要である。
- フォトニックネットワークの導入では、依然として高価な装置コストをどのように抑制するかが鍵である。
- 限定的な能力しか持たない装置・ネットワークと、その特性を考慮した最適化手法を組み合わせることで大きな性能アップを実現できる。
- ネットワークアーキテクチャ・新たな光デバイスの開発により、大幅な容量拡大が可能となった。

59

ご清聴ありがとうございました!!

謝辞: 本研究の一部は KAKENHI (23246072) およびSCOPE により実施された。

60