

# 平成25年度「高機能光電子融合型パケットルータ基盤技術の研究開発」の研究開発目標・成果と今後の研究計画

## 1. 実施機関・研究開発期間・研究開発費

- ◆実施機関 日本電信電話株式会社(幹事者), 大阪大学, 九州大学, 日本電気株式会社
- ◆研究開発期間 平成23年度から平成27年度(5年間)
- ◆研究開発費 総額1,478百万円(消費税を除く, 平成25年度: 同294百万円)

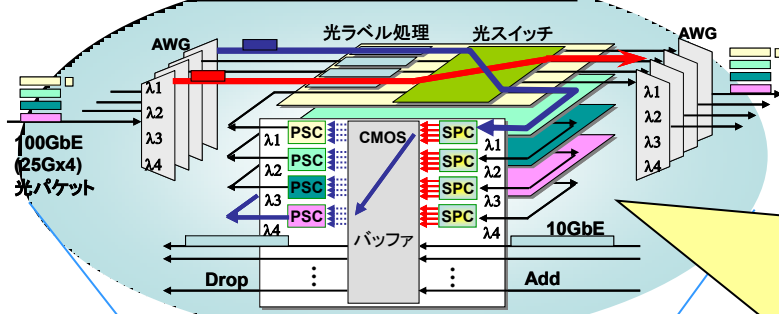
## 2. 研究開発の目標

- ・低消費電力・低遅延100Gbps級フロー制御型高機能光パケットルータと、その革新的フォトニックデータセンタへの導入を目指した応用技術の研究開発を行う。

## 3. 研究開発の成果

### 研究開発目標

#### 光電子融合型パケットルータ



### 研究開発成果

#### 課題ア-1 100Gbps(25Gx4) 級に向けた各サブシステム技術の開発(NTT)

- ・100G(25Gx4)動作可能とする様々な光・電子デバイスの作製と評価を実施して、各種デバイスの25G動作を実証

#### 課題ア-2-1 極低消費電力集積ナノデバイス技術の開発(NTT)

- ・多ビットアレイの作製のためにサイドカップル型とドロップ型の二種類の共振器とバス導波路の構成方法について設計を行い、素子作製を進めている。

#### 課題ア-2-2 高速光スイッチ技術の開発(九大)

- ・高速高集積光スイッチ構造として、モード間光スイッチを世界に先駆け新たに提案した

#### 課題ア-3-1 光電子融合型パケットルータの最適構成(阪大)

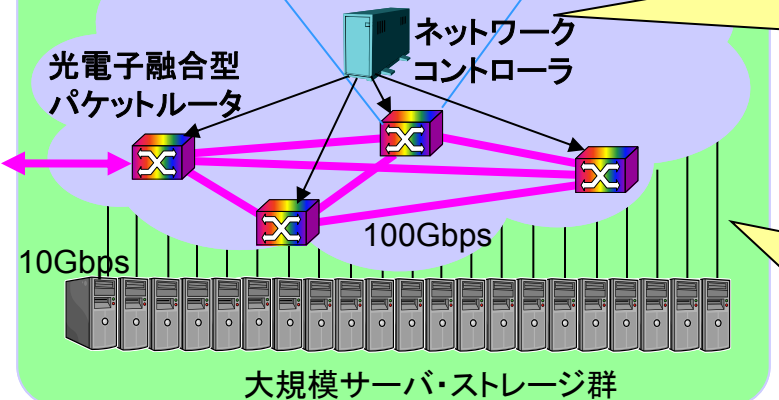
- ・光電子融合型パケットルータの広帯域とサーバーラック・光電子融合型パケットルータ間の複数の配線を効率的に利用した、低遅延の通信を達成可能なネットワーク構造の提案

#### 課題ア-3-2 光電子融合型パケットルータのプリプロトタイプ実証(NTT)

- ・プリプロトタイプ全体の基本構成に基づいて各サブシステムの制御回路等の試作を実施

### グリーンデータセンタ

光パケットスイッチ技術を用いた  
低電力・低遅延・高速かつ高機能な  
フォトニックフロー制御型ネットワーク



#### 課題ア-4-1 フォトニックフロー転送制御技術の開発(阪大)

- ・Express path導入により、パケット破棄率の低減と良好なスループット性能を確認。
- ・約900の2Dフォトニックフローラベル生成・識別が可能であることを確認した。

#### 課題ア-4-2 フォトニックフロー経路制御技術の開発(NEC)

- ・省エネルギー化を実現するフォトニックフロー経路制御の基盤技術を確立した。

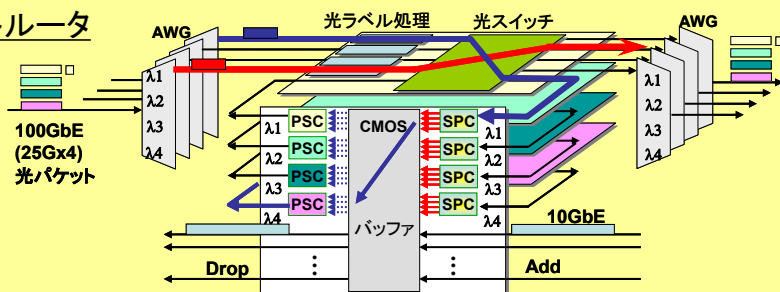
#### 課題イ 光電子融合型パケットルータの応用技術(阪大)

- ・データセンター向け仮想ネットワーク構築のもととなる、パラメータの設定によりさまざまなネットワーク構成を構築可能な構成におけるパラメータ設定手法を改善し、少ない資源でネットワークの性能目標を達成する仮想ネットワーク構築手法の提案

# ① 光電子融合型パケットルータ技術の主な成果 — その1

## 課題ア-1 100Gbps(25Gx4) 級に向けた各サブシステム技術の開発

光電子融合型パケットルータ



### 課題ア-1

～ 100G(25Gx4)動作可能とする様々な光・電子デバイスの作製・評価を実施して、各種デバイスの25G動作を実証～

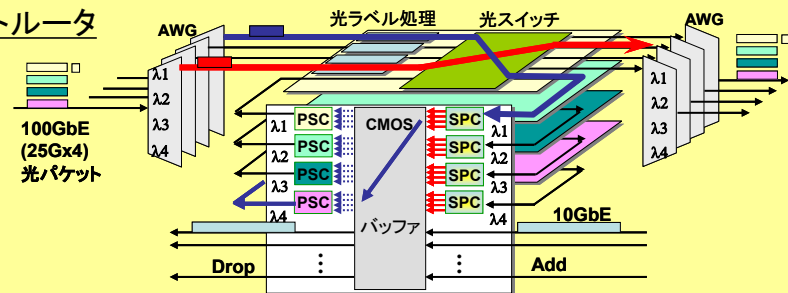
ラベル処理		OCTA	シリ・パラ変換器 自己クロック動作 超低電力、2ch集積化	
	光スイッチ		TLD+EAM	波長変換器 高出力、出力一定、超小型
		BM-APD-TIA	バーストモードTIA 高感度、即時応答	
共有バッファ			SPC	シリ・パラ変換器 25Gx2ch一括変換動作
		PSC	パラ・シリ変換器 LVDS入力、NRZ出力	
		OCPTG	光クロック発生器 自己安定動作、低電力	
周辺技術			バーストモードEDFA、ラッチ信号回路、パケット包絡線信号回路、ラベル分離回路	

## ② 光電子融合型パケットルータ技術の主な成果 — その2

### 課題ア-2-1 極低消費電力集積ナノデバイス技術の開発

### 課題ア-2-2 高速光スイッチ技術の開発

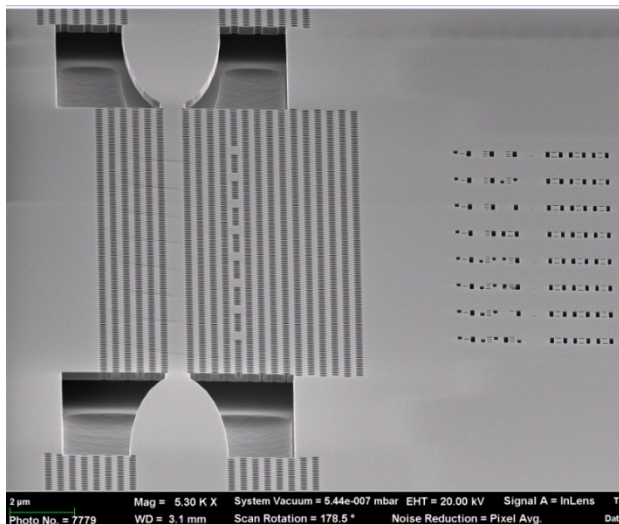
光電子融合型パケットルータ



#### 課題ア-2-1

～パタン自動設計技術の導入～

- 数百以上の多段化に向けパタン設計を自動化

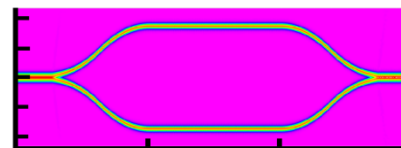
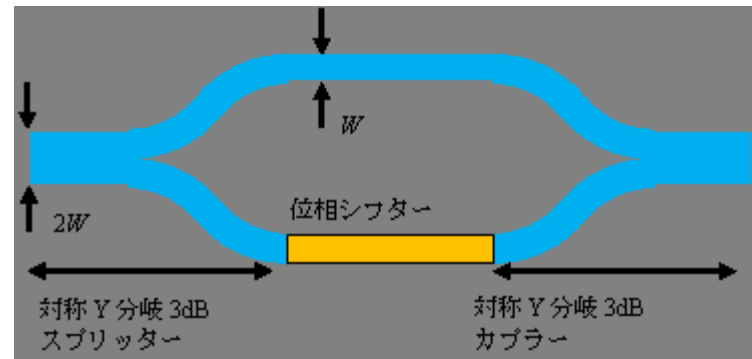


- 手動CAD設計同等のPhC性能・精度を実現
- 設計所要時間の劇的な短縮(100共振器アレイで数秒)

#### 課題ア-2-2

～高集積化に向けて新しい光スイッチ原理(光モードスイッチ)を提案～

- 導波路型での高集積可能な構造として、過剰損なく合分岐波が可能なモードを利用した光スイッチを提案。基本動作(クロス・バー型動作)を確認。



・光モードスイッチを世界に先駆け新規提案・実証



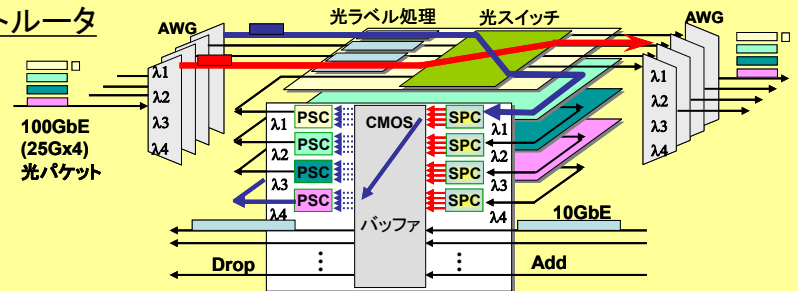
- (1) 波長変換不要
- (2) ロスレス合分波
  - 省エネ化
- (2) 入出力端面集約化
  - 小型・高集積化

# ③ 光電子融合型パケットルータ技術の主な成果 — その3

## 課題ア - 3-1 光電子融合型パケットルータの最適構成

## 課題ア - 3-2 光電子融合型パケットルータのプリプロトタイプ プ実証

光電子融合型パケットルータ



### 課題ア - 3-1

～サーバー間を低遅延で接続する光電子融合型パケットルータを用いたデータセンターネットワーク構造の構築手法を提案～

- 各サーバーラックからの複数の光電子融合型パケットルータに接続・サーバーラックの接続を考慮した光電子融合型パケットルータ間の接続を行うことにより、サーバーラック間のトラヒックを低遅延で転送可能
- 各光電子融合型パケットルータは、予め設定した経路テーブルを参照し、可能な限りバッファを使わずに転送。

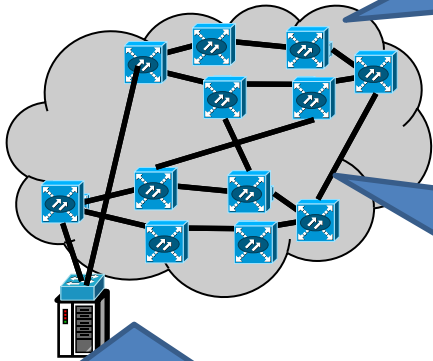
光電子融合型パケットルータ間の接続

- ToRスイッチの接続を考慮し、各リンクを流れるフロー数が小さくなるように接続

光電子融合型パケットルータは転送先候補を参照し、候補のうちその時点で利用可能なポートに転送することにより、可能な限りバッファを使わずに転送

各ToRスイッチからの光電子融合型パケットルータへの接続

- ToRスイッチ間のホップ数を小さくするように接続



### 課題ア - 3-2

～プリプロトタイプ全体の基本構成に基づいて各サブシステムの制御回路等の試作を実施～

- 課題ア-1及び本課題での全体構成を基に、光パケットの転送制御を行うスケジューラおよび各サブシステムの評価用ボードの試作を実施
- フォトニックフロー制御を実現するためのハードウェア構成と実装する機能を検討
- 今後のサブシステムおよびプリプロトタイプ評価に必須となる100G(25Gx4)での評価に向けて評価系の整備を実施

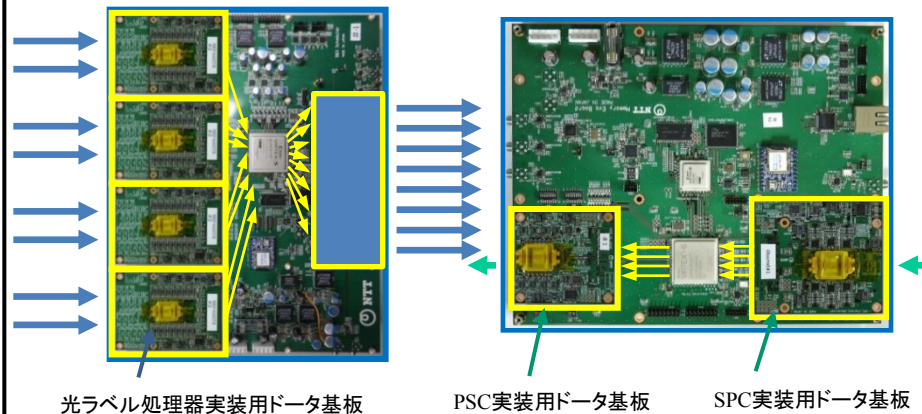
光ラベル処理

光スイッチ

バッファ

スケジューラ評価用マザー基板

バッファ評価用マザー基板



光ラベル処理実装用データ基板

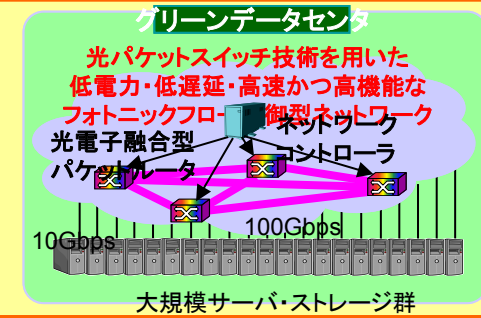
PSC実装用データ基板

SPC実装用データ基板

# ④ グリーンデータセンタ技術の主な成果 — その1

## 課題ア - 4-1 フォトニックフロー転送制御技術の開発

## 課題ア - 4-2 フォトニックフロー経路制御技術の開発

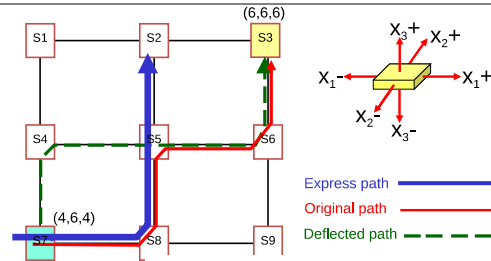


### 課題ア - 4-1

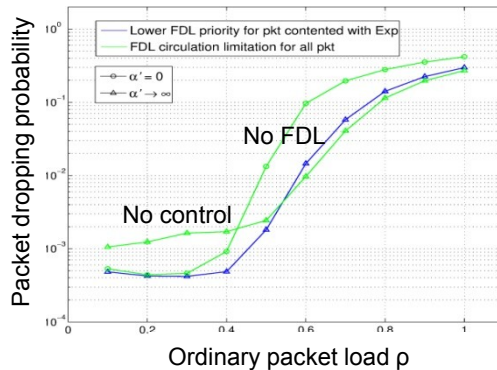
～ Express path導入によりフローとパケットのバランスを実現～

#### フロー制御性能評価

Express path負荷の最適化により、フローとパケットの性能の良好なバランスシグ



4D-torus (4096ノード)において、個別パケットの棄却率を実用レベル ( $<10^{-3}$ ) に抑え、かつ Express Pathを設定可能な転送条件を確立



#### フォトニックフローラベル

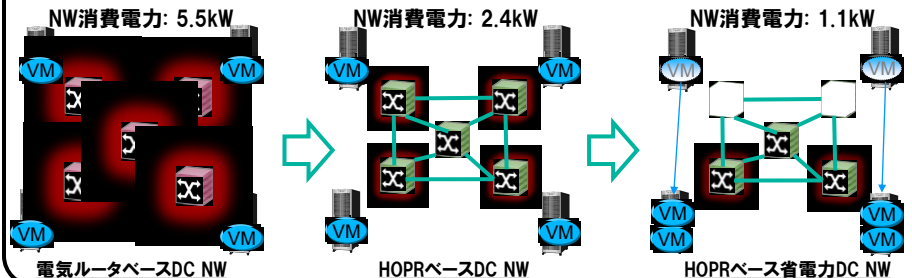
約900 (128光符号x7波長) 個の2次元フォトニックラベルの生成・識別を、試作したFPGR信号処理回路により実験的に検証

### 課題ア - 4-2

～ データセンタネットワークの省電力化を可能とする  
フォトニックフロー経路制御の基盤技術確立 ～

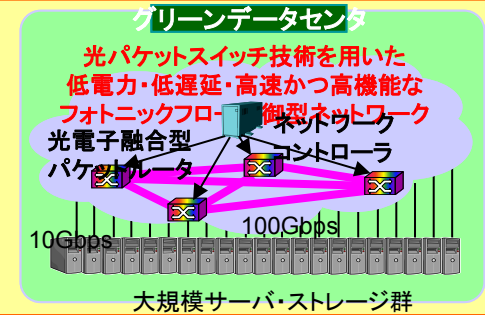
- データセンタネットワーク (DC NW) 低消費電力化方式
  - DC NW の状況を考慮しながらフォトニックフローの経路集約
  - 集約後に使用しない光電子融合型パケットルータ (HOPR) の電力を低減
  - 方式のポイント
    - ・電気バッファがHOPR内で多く消費電力を消費することに着目
    - ・経路集約のために仮想マシン (VM) を移動させ、トラフィックを收容しないHOPRの電気バッファをOFF
  - ⇒ データセンタネットワークの低消費電力化が可能
- 方式の省電力効果
  - HOPRを導入することで消費電力低減が可能
    - ・電気ルータベースと比較して約56%低減
  - HOPRベースDC NWにDC NW低消費電力化方式を導入することでさらに消費電力が低減
    - ・電気ルータベースDC NWと比較して約80%低減
    - ・HOPRベースDC NWと比較して約54%低減

※NW消費電力はサーバ台数100台、ルータ15台の環境で試算



# ⑤ グリーンデータセンタ技術の主な成果 — その2

## 課題Ⅰ 光電子融合型パケットルータの応用技術

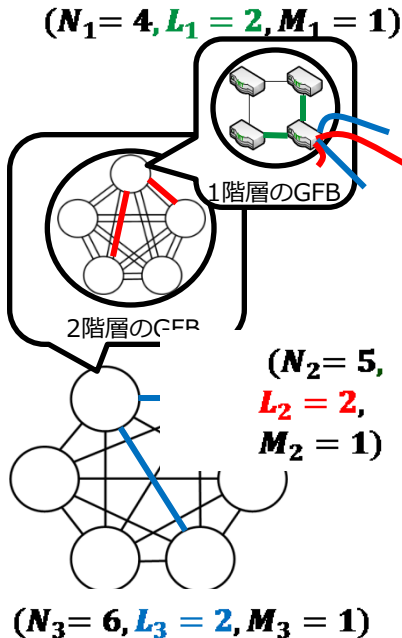


### 課題Ⅰ

～ データセンタ向け仮想ネットワークに適したネットワーク構造の検討～

- Generalized Flattened Butterfly (GFB) のパラメータ調整手法を改善し、より少ない論理リンク数で、目標を満たす仮想ネットワークを構築・制御する手法を提案

### Generalized Flattened Butterfly (GFB)



#### パラメーター

- $k$ : 階層数
- $N_k$ : 階層  $k$  で接続する  $k-1$  層の GFB の数
- $L_k$ : 階層  $k$  で利用する各ノードあたりのリンク数
- $M_k$ : 階層  $k$  で同一の  $k-1$  層の GFB 間の接続に用いるリンクの最小本数

以下の値をパラメーターから計算可能  
最大ホップ数

$$H_k = (h_k + 1)H_{k-1} + h_k$$

各リンクを経由する ToR スイッチ間フロー数

$$X_k = \frac{\sum_{i=1}^{h_k} i s_i(i)}{L_k \prod_{i=1}^k N_i}$$

- $H_k$ : 階層  $k$  の GFB における各 ToR スイッチ間の最大ホップ数
- $h_k$ : 階層  $k$  の GFB における  $k-1$  層の GFB 間の最大ホップ数
- $X_k$ : 階層  $k$  の GFB におけるリンクを経由する ToR スイッチ間フロー数
- $s_i$ :  $k-1$  層の GFB 間ホップ数が  $i$  の  $k-1$  層の GFB 間のフロー数

#### 仮想ネットワーク構築手法

- Step.1 構築するトポロジーの階層数候補の決定
- 最大ホップ数の目標値から階層数の候補を決定
- Step.2 輻輳を防止する構築パラメーター決定
- ToR スイッチ間フロー数を閾値以下に抑えるようにパラメータを設定
- Step.3 通信遅延を抑えるための構築パラメーター決定
- 最大ホップ数を閾値以下に抑えることにより、通信遅延の増大を抑制
- Step.4 使用リンク数が最小となるパラメーター候補を選択

#### 4. これまで得られた成果(特許出願や論文発表等)

※成果数は累計件数(上段)と、()内の当該年度件数(下段)です。

国内出願	外国出願	研究論文	その他研究発表	標準化提案	プレスリリース 報道	展示会	受賞・表彰
23 (4)	3 (3)	11 (7)	82 (34)	0 (0)	1 (1)	7 (3)	6 (2)

- (1)CLEO-PR&OECC/PS2013 Exhibitionsにて課題全体のブース出展を行い、国内外の研究者に対して本プロジェクトの意義を効果的にPRLした。[全課題]
- (2)OECC/PS2013にてBest Paper Award受賞(光パケットスイッチ)、ECOC2013にてTop60に選定(OEIC、Burst APD-TIA)、電気通信普及財団賞受賞(集積光スイッチ)など、高い評価を得るとともに、多くの学会等で国内外に成果を効果的にアピールした。[課題ア-1]
- (5)電子情報通信学会光エレクトロニクス研究会にて光モードスイッチを発表し、第7回(H24年度)学生研究優秀賞を受賞した。[課題ア-2-2]
- (6)微小光学研究会、及び電子情報通信学会ソサイエティ大会にて相次いで光モードスイッチの招待講演を行った。[課題ア-2-2]
- (7)国際会議における招待講演4件 [課題ア-4-1]
- (7)国内展示会FOE 2013およびInterop 2013、国際展示会iPOP2013に出展。[課題ア-4-2]
- (8)ネットワークコントローラ試作機および制御インタフェースの動態展示を実施。[課題ア-4-2]
- (9)JGN-Xテストベッドにおいて、ネットワークコントローラ試作機および制御インタフェースの実証実験を実施。[課題ア-4-2]

#### 5. 今後の研究開発計画

- 課題ア-1: 100Gbpsプリプロトタイプの実現に向けた、各サブシステムの更なる低電力化・小型化・安定動作化を推進。
- 課題ア-2-1: ナノ共振器アレイデバイスを作製し、歩留まり、特性の均一性を評価する。その結果、将来的にどの程度の集積化が可能か明らかにする。
- 課題ア-2-2: スケーラビリティの向上(対応モード数の増大手法)を検討したうえで、将来の高速・高集積化構造に向けた基本技術を確立する。
- 課題ア-3-1: ネットワーク制御についても考慮にいったトポロジの設計。
- 課題ア-3-2: 課題ア-1で開発された各種サブシステムの一連の連携動作を確認し、光電子融合型パケットルータプリプロトタイプの完成を目指す。
- 課題ア-4-1: 1000ノード程度の規模の多次元Torus型ネットワークにおいて最大転送トラヒック量を100~400Gbpsを確保するために必要とされる次元数を明らかにする。
- 課題ア-4-2: 平成26年度には、平成25年度に確立した省電力を実現する方式を実装することで、平成27年度に最終実証実験を行い、データセンタネットワークにおいて様々な通信フローを柔軟に收容しながら低消費電力化を行うフォトニックフロー経路制御を実現する。
- 課題イ: 光電子融合ルータのバッファの電力を考慮した仮想ネットワーク制御。