

平成24年度研究開発成果概要書

「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」

(1) 研究開発の目的

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。

(2) 研究開発期間

平成23年度から平成27年度（5年間）

(3) 委託先企業

日本電信電話株式会社<幹事>
国立大学法人大阪大学
国立大学法人九州大学
日本電気株式会社

(4) 研究開発予算（百万円）

平成23年度	335.0（契約金額）
平成24年度	315.0（ 〃 ）
平成25年度	296.0（ 〃 ）
平成26年度	278.2（ 〃 ）
平成27年度	261.5（ 〃 ）

(5) 研究開発課題と担当

課題ア：低消費電力・低遅延高機能光電子融合型パケットルータに必要な基盤技術の研究開発

ア-1：100Gbps(25Gbps×4)及び100Gbps/λ級に向けた、各サブシステム技術の開発（日本電信電話株）

ア-2：課題ア-1における各種サブシステムを構成するデバイス技術の開発

ア-2-1：極低消費電力集積ナノデバイス技術の開発（日本電信電話株）

ア-2-2：高速スイッチ技術の開発（九州大学）

ア-3：光電子融合型パケットルータのプリプロト実証

ア-3-1：光電子融合型パケットルータの最適構成（大阪大学）

ア-3-2：プリプロトタイプの作製と基本動作実証（日本電信電話株）

ア-4：フォトニックフロー制御による大容量データ転送技術の開発

- ア-4-1：フォトニックフロー転送制御技術の開発（大阪大学）
- ア-4-2：フォトニックフロー経路制御技術の開発（日本電気㈱）
- 課題イ：低消費電力・低遅延高機能光電子融合型パケットルータの応用技術の研究開発（大阪大学）

(6) これまで得られた研究開発成果

		(全体) 74 件	(当該年度) 56 件
特許出願	国内出願	16	15
	外国出願	0	0
外部発表	研究論文	3	0
	報道発表	0	0
	その他研究発表	51	37
	展示会	4	4
	標準化提案	0	0

具体的な成果

- 課題ア-1：100G（25G x 4）動作可能とする様々な光・電子デバイスの作製・評価を引き続き実施して、各デバイス的高速動作を実証した。
- 課題ア-2：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。また、将来の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：光電融合型パケットルータをコアネットワークに配置、サーバーラックからの複数の光電融合型パケットルータへの接続を有効に利用し、帯域の確保のみではなく、サーバーラック間を低遅延で接続するネットワーク構成を提案した。さらに、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評価用ボードの試作を実施した。
- 課題ア-4：フォトニックフロー転送制御技術では、光パケットスイッチをカットスルーする“Express path”を導入することによって、従来のパケットスイッチングに比較して、パケット／フロー棄却率および遅延特性が改善できることを、小規模な 2D-Torus ネットワークについてシミュレーションにより確認した。2D フォトニックラベル生成・識別実験のために 128 ポート光符号・復号器を試作し、約 900 のフォトニックラベルの生成・識別が可能であるとの見通しを得た。さらに、前年度試作したネットワークコントローラ基本試作機および制御インタフェース検証機の機能拡張を行い、実証実験によりフォトニックフロー制御基盤技術の確立を確認した。

課題イ：平成 23 年度に提案した仮想ネットワーク向けトポロジに対するパラメータ設定手法を改善し、より少ない仮想リンク数で目標とするホップ数を達成、トラヒックを輻輳なく収容可能な仮想ネットワーク制御手法を提案した。

(7) 研究開発イメージ図
＜別ファイル＞

平成24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

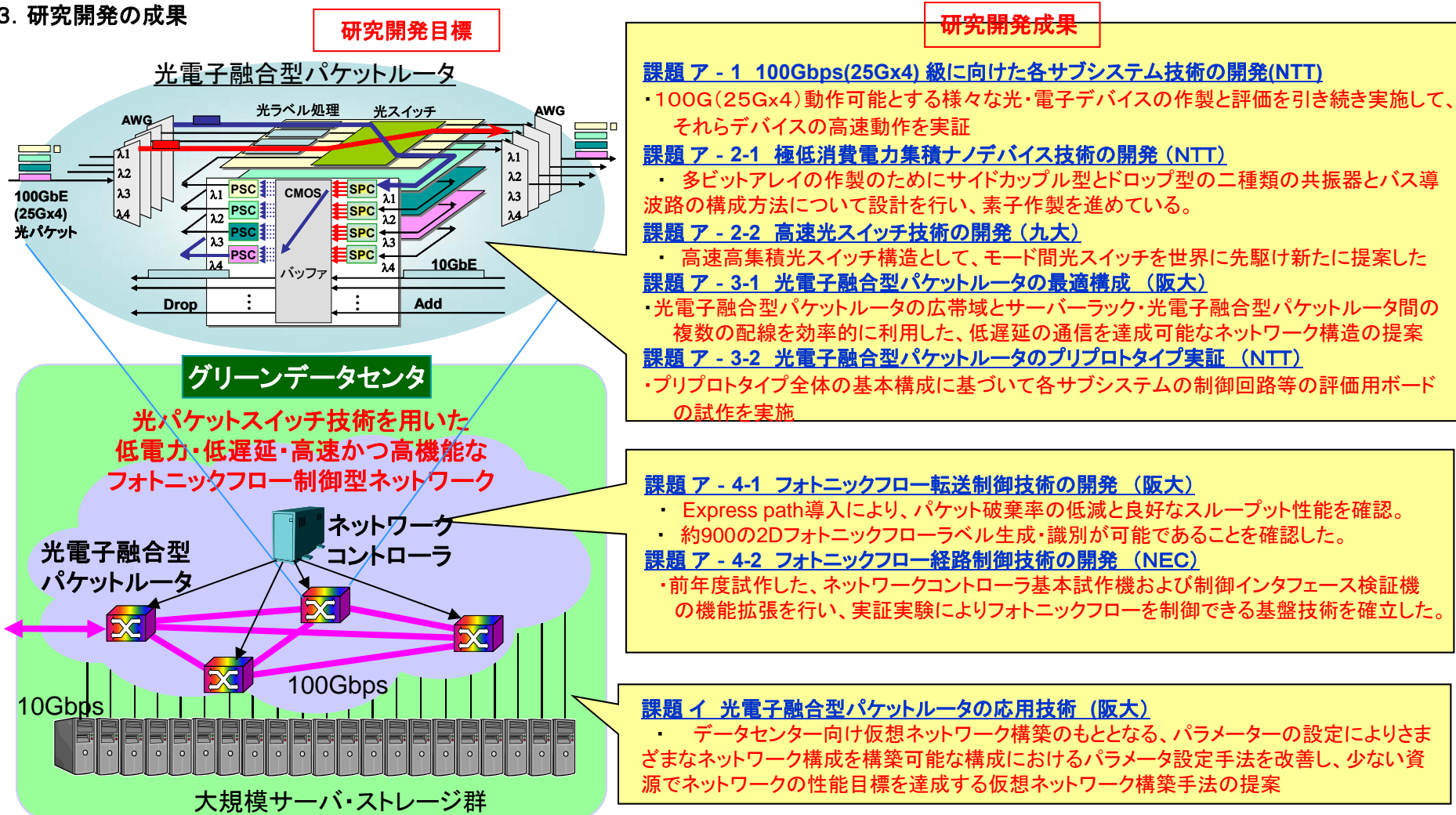
1. 実施機関・研究開発期間・研究開発費

- ◆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1,486百万円(平成24年度 315百万円)

2. 研究開発の目標

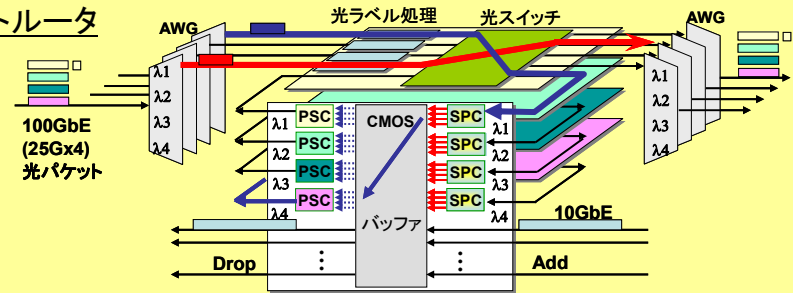
- ・低消費電力・低遅延100Gbps級フロー制御型高機能光パケットルータと、その革新的フォトニックデータセンタへの導入を目指した応用技術の研究開発を行う。

3. 研究開発の成果



① 光電子融合型パケットルータ技術の主な成果 — その1

光電子融合型パケットルータ



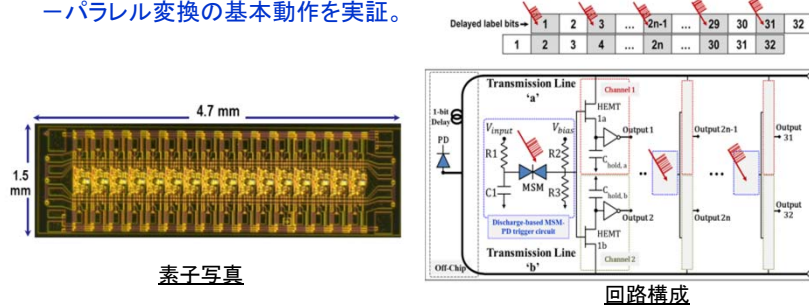
課題ア - 1 100Gbps(25Gx4) 級に向けた各サブシステム技術の開発

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・評価を引き続き実施して、各デバイスの高速動作を実証～

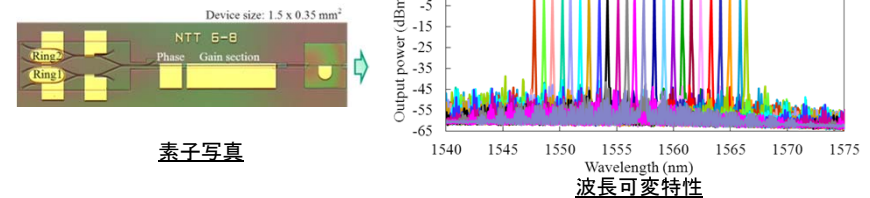
【ラベル処理用光電子集積回路】 【シリアル-パラレル変換器】

- ラベルの多ビット化を目指して、新たなラベル変換方法とトリガーを共有する新構造をもった32ビットのラベル処理器を設計、作製し、25Gbpsのラベルでシリアル-パラレル変換の基本動作を実証。



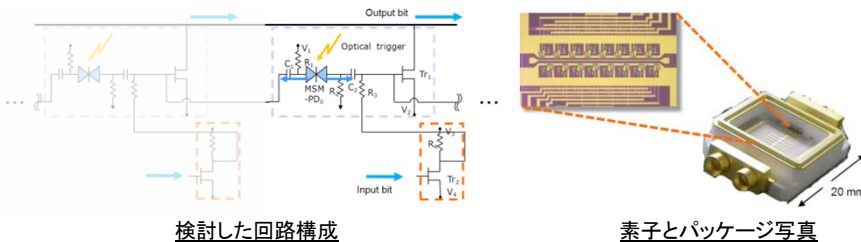
【波長変換器】

- 波長安定性と高光出力化を目指して、新たに並列DRR型構造の波長可変LDを作製し、EA変調器を集積した素子において広い波長可変範囲と共に25Gbpsの高速変調動作を実証。



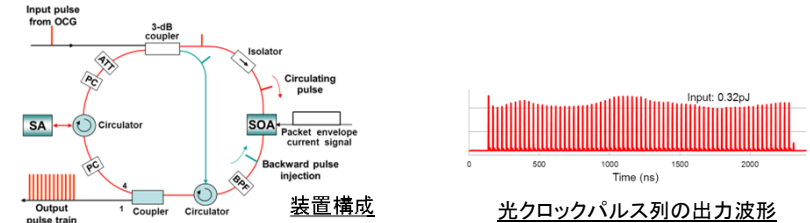
【パラレル-シリアル変換器】

- 高速動作を目指して、パラレル電気信号の差動信号を入力する素子構造を検討し、素子特性向上のための動作シミュレーションを実施。さらに高速対応モジュールの小型化に向けてパッケージの設計及び試作を実施。



【光クロック発生器】

- 高速化に伴うゲインループ短尺化と光出力安定化を目指して、新たにSOAを用いた構成を作製し、安定化回路を用いずに必要な25Gbpsの packet 長に応じたクロック列生成の高速動作を確認。さらに小型化モジュールの設計と試作を開始。



【バーストモードレシーバ】

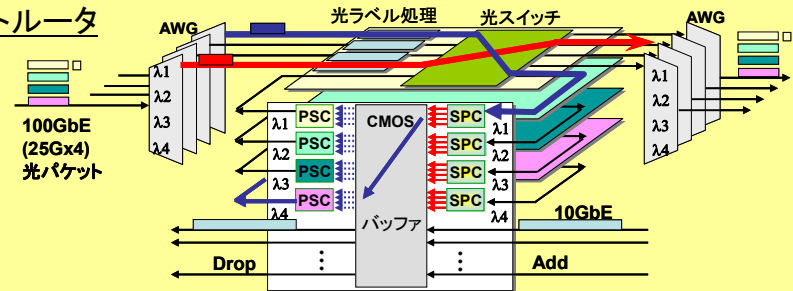
- 25Gbpsバーストモード用TIA-ICの試作を実施し、基本動作を評価

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

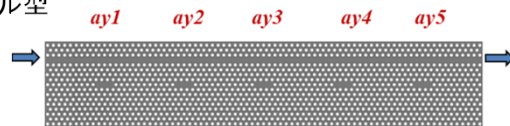


課題ア-2-1

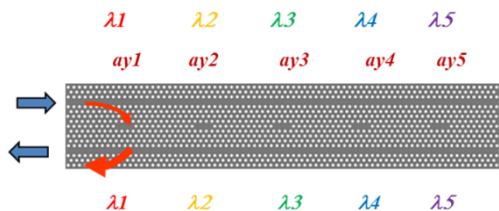
～高集積度対応化に向けて基盤を整備～

- ✓ 共振波長の異なるフォトニック結晶共振器を導波路に複数個接続することが高集積度を実現するうえでキーとなる技術である。
- ✓ そのためには共振器の設計と作製時の波長制御技術の確立が重要である。
- ✓ 今年度はサイドカップル型とドロップ型の両方の構成で設計を行った。
- ✓ 具体的には空孔を3つ除いたL3共振器において、高Q値化を実現するための共振器の設計をシステムティックに行うとともにバス導波路との結合の最適化を行った。
- ✓ 材料としてシリコンを用いて100個以上の共振器の接続、InPの埋め込みヘテロ構造を用いて32個の共振器を接続したアレイデバイスを作製し、現在評価を進めている。

● サイドカップル型



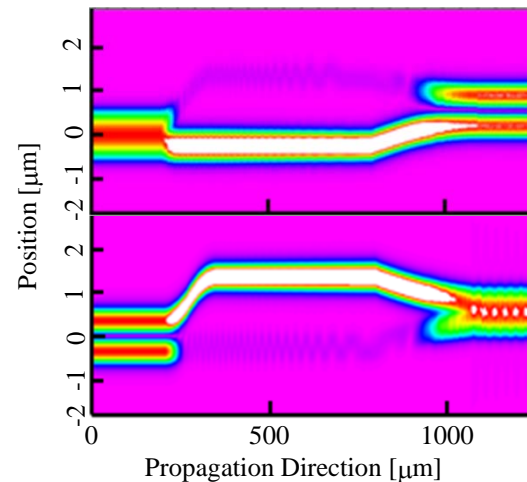
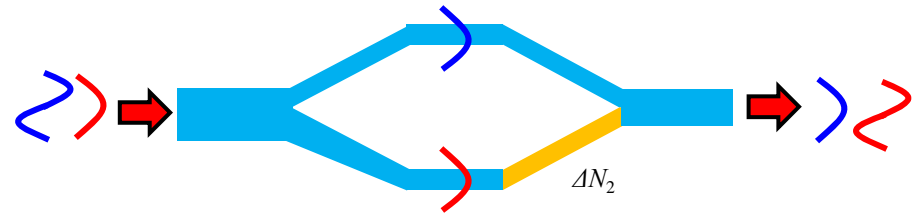
● ドロップ型



課題ア-2-2

～高集積化に向けて新しい光スイッチ原理(モード間光スイッチ)を提案～

- 導波路方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。クロス・バー型動作が可能なことをシミュレーションにより確認。



・横モード間切り替え動作の光スイッチを新規提案

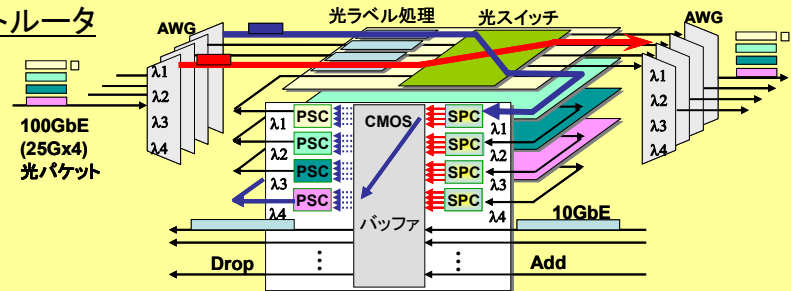
- (1) 波長変換不要
- (2) ロスレス合分波
 - 省エネ化
- (2) 入出力端面集約化
 - 小型・高集積化

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

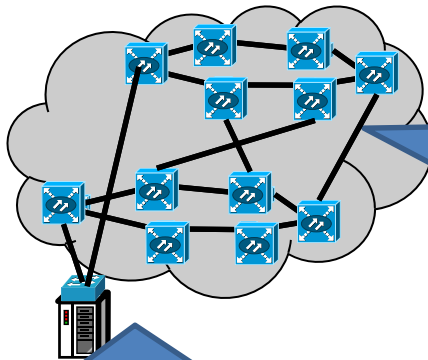
光電子融合型パケットルータ



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フィックを低遅延で転送可能



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

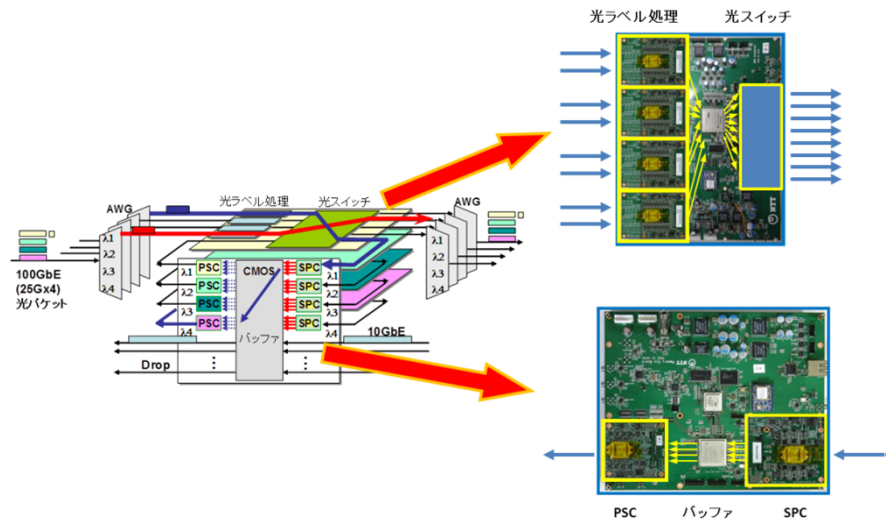
各ToRスイッチからの光電子融合型パケットルータへの接続

- 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評価用ボードの試作を実施～

- 課題ア-1及び本課題での全体の基本構成を基に、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し、現在も推進中

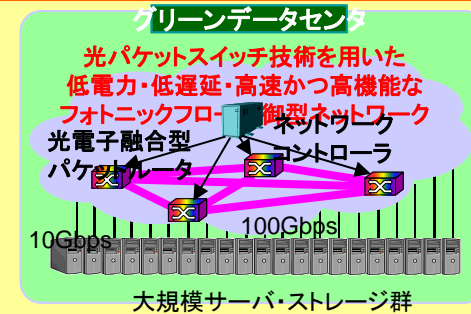


基本構成と試作した評価用ボードの写真

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

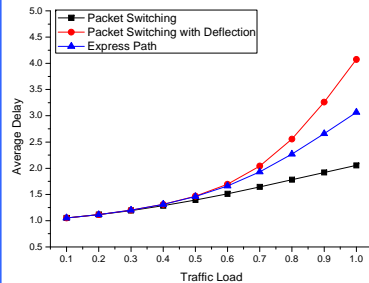
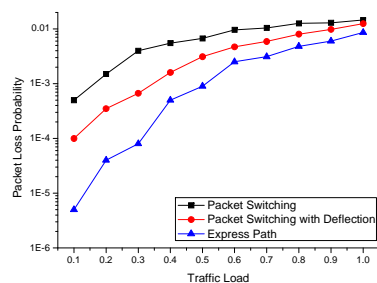


課題ア-4-1

～ Express pathおよび2次元フォトニックラベルの提案～

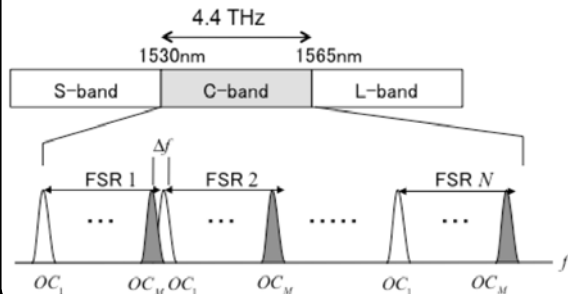
フロー制御性能評価

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。



フォトニックフローラベル

2次元 (波長, 光符号) ラベルの生成・認識



ポート数128、自由スペクトル域 (FSR) 640 GHzのマルチポート光符号／復号器の各ポートから出力される異なる128-位相レベルの光符号を生成、識別できることを確認

課題ア-4-2

～ ネットワークコントローラと制御インターフェース検証機の機能拡張試作および実証実験～

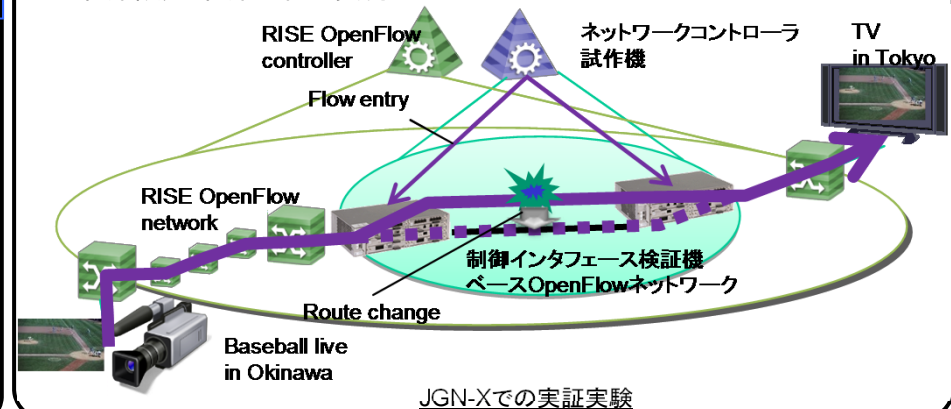
<機能拡張試作>

ネットワークコントローラ試作機および制御インターフェース検証機の柔軟性が向上

- コントローラ主導の経路切替の実現。
 - ネットワーク全体を把握しているため、柔軟な経路切替が可能
- L3,L4フローのマッチングの実現。
 - 柔軟なフロー振分、きめ細かいフロー識別が可能

<実証実験>

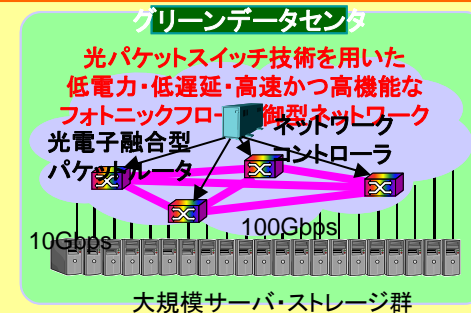
- 国際会議iPOP2012の相互接続実験でコントローラ試作機と制御インターフェース検証機ベースでOpenFlowネットワークを動態展示。
- テストベッドJGN-Xで、試作機および検証機ベースのOpenFlowネットワークの実証実験を実施。
 - 経路設定・経路切替の実現



JGN-Xでの実証実験

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



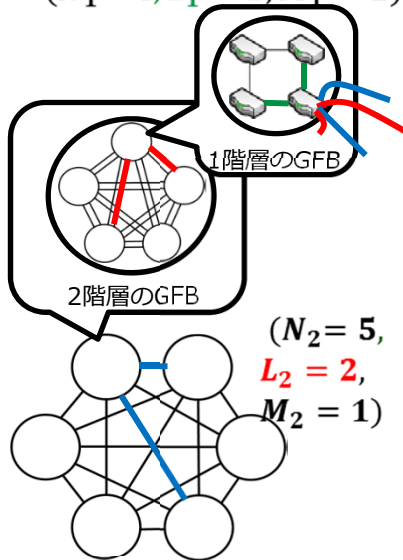
課題Ⅰ

～ 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)

$(N_1 = 4, L_1 = 2, M_1 = 1)$



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)

※成果数は累計件数と()内の当該年度件数です。

	国内出願	外国出願	研究論文	その他研究発表	プレスリリース	展示会	標準化提案
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	16 (15)	0	3 (0)	51 (37)	0	4 (4)	0

5. 研究成果発表会等の開催について

- (1) Photonics in Switching 2012にて口頭発表を行い、Best Paper Award受賞という高い評価を得るとともに国内外に成果を効果的にアピールした。
(T. Nakahara et al., "A Novel Optical Clock Pulse-Train Generator with Self-Stabilization by SOA and Saturable Absorber") [課題ア-1]
- (2) 電気情報通信学会論文誌にて論文発表を行い、論文賞を受賞という高い評価を得るとともに国内外に成果を効果的にアピールした。
(T. Segawa et al., "Monolithically Integrated Wavelength-Routing Switch Using Tunable Wavelength Converters with Double-Ring-Resonator Tunable Lasers") [課題ア-1]

6. 今後の研究開発計画

- 課題ア-1: 構成要素となる各光・電子デバイスの25Gbpsでの動作実証を引き続き行い、プリプロトタイプでの安定動作に必須となる高周波数対応のモジュール化により25Gbpsでの基本動作を実証する
- 課題ア-2-1: ナノフォトニクス技術を用いた大規模集積回路の作製のため共振器設計技術およびSiおよびInPでの作製を行う。
- 課題ア-2-2: H24年度に新たに提案したモード間光スイッチの原理実証を検討する。
- 課題ア-3-1: 平成24年度に検討を行ったネットワークポロジの構造を利用し、大規模ネットワークにおいても、適切な経路を高速に計算することができる手法、ネットワークポロジを考慮して、データセンターに適したパケットルータの構成を検討する。
- 課題ア-3-2: 光パケットの転送プロトコルやフォトニックフロー経路制御など、データセンタネットワークの実証実験に向けたネットワーク全体における光パケット転送技術・制御技術に関する基本設計を行う
- 課題ア-4-1: TORUS次数(>3)におけるExpress path導入による性能指数の改善効果を数値的に明らかにする。1000(128光符号×数FSR)個の2次元フォトニックフローラベルの生成・識別の実験を完遂し、光フロー・パケットスイッチサブシステムを構築する。
- 課題ア-4-2: 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する。具体的には、データセンタネットワークの状況を考慮して、フォトニックフローの経路集約を行い、使用しないルータの電力を低減させることでデータセンタネットワークの低消費電力化を実現する方式を提案、確立する。
- 課題イ: 環境変動に対応して、適切な仮想ネットワークにより高速に移行する手法を検討する。