

超高速・低消費電力光ネットワーク技術の研究開発
(課題 I (b) 光多値伝送向け高性能信号処理技術)
(High-performance signal processing technology
for optical multilevel transmission)

代表研究責任者 坂本 健一 株式会社日立製作所 研究開発グループ
情報通信イノベーションセンタ

研究開発期間 平成 24 年度～平成 26 年度

【Abstract】

High-speed low-power-consumption optical network technologies have been developed in this project to realize future broadband network society. In the current network, about 50-% power of communication equipment is consumed in the access-area, and optical transceivers accounts for its about 20-%. Therefore, development of high-speed and power efficient optical transceivers for the next-generation transmission standard for LAN use, such as 400GbE, is the key to substantial reduction of network power consumption and carbon dioxide emission.

In subject I(b), high-performance and power-efficient optical multilevel signal processing technologies has been studied, based on single-polarization single-wave 100-Gbit/s transmission technique (Target modulation speed: 25 GBaud, target transmission distance: 40 km). Under this concept, we develop a fully-functional FPGA-based 112-Gbit/s 16QAM/16APSK transceiver prototype using optical delay-detection to prove its feasibility, performance and power consumption. In 4-channel WDM configuration, 400 Gbit/s transmission is also demonstrated using actual installed fiber cable in the field trial experiment performed in Sapporo city.

1 研究開発体制

- **代表研究責任者** 坂本 健一 (日立製作所)
- **研究分担者** 坂本 健一 (日立製作所)
鈴木 扇太 (日本電信電話株式会社)
- **研究開発期間** 平成 24 年度～平成 26 年度
- **研究開発予算** 総額 500 百万円

(内訳)

平成 24 年度	平成 25 年度 (平成 24 年度補正分)	平成 25 年度	平成 26 年度 (平成 25 年度補正分)
250 百万円	150 百万円	36 百万円	64 百万円

2 研究開発課題の目的および意義

インターネット通信量は今後も着実な増加が予想されており、伝送する情報量の増加に比例し通信機器の消費電力も大幅に増加する。そのため、大量の情報を高速かつ低消費電力で伝送できる通信方式や通信機器が求められている。本研究の属する「超高速・低消費電力光ネットワーク技術の研究開発」は、ICT利活用の増進に伴う通信量及び消費電力の急激な増大に対応するため、伝送方式の高性能化や新型ファイバの導入等により、ネットワーク全体の超高速化、低消費電力化、耐災害性の強化を同時に実現する技術を確立し、国民生活の利便向上と地球温暖化対策に貢献することを目的とし、これらの課題を解消するため、伝送方式の高性能化により、ネットワーク全体の超高速化、低消費電力化を両立する実現する技術を平成 26 年頃までに確立し、国民生活の利便向上と地球温暖化対策に貢献することがうたわれている。通信機器の消費電力のうち 50%はアクセスネットワーク由来であり、うち光送受信機による消費電力が全体の 2 割程度を占める。このため現状の 10 倍の高速伝送で、ネットワーク全体の消費電力 30% 減を達成するためには、LAN 向け光送受信機の低消費電力化が不可欠であり、本研究では抜本的に高速・大容量かつ低消費電力の LAN 向け光伝送方式を実現することを研究の目的とする。

3 研究開発成果

3. 1 ア) 400Gbps 多値伝送技術

光信号を多値変調することにより 1 波長で 100Gbps 伝送を可能とすると同時に、加入者・局舎ネットワークの比較的短距離伝送に適した復調方式により、400Gbps リアルタイム伝送（1 波長 100Gbps×4 波長、伝送距離 40km、総消費電力（ASIC 実装時の想定）は従来比約 1/2 の 70W）を実現する技術を開発する。標準化提案については、提案先（OIF、IEEE、CFP MSA 等）の検討フェーズや市場の必要時期を勘案して提案を行う。

本サブ課題では特に上記を実現する直接検波を用いた単一偏波・単一波長 100Gbps 多値光変復調方式と信号処理アルゴリズム技術を開発、FPGA を用いた送受信器に実装し、リアルタイム動作と省電力信号処理アルゴリズムを実証する（変調速度 25GBaud、ビットレート 100Gbps、伝送距離 40km）。これを 4 並列化し、400Gbps 多値伝送技術を確立する。

本研究課題においては、短距離向け省電力 400Gbps インタフェース技術の実現に向け、1 波長 1 偏波 100G 光多値送受信器の方式設計と FPGA を用いた送受信機の試作を行い、400Gbps 光多値伝送技術を確立した。具体的には、

①光遅延検波を用いた 1 波長 1 偏波 100G 光多値送受信器とその変復調方式・信号処理アルゴリズムの設計・試作を完了した。変復調には 16QAM/16APSK 信号を用い、試作した送受信器信号処理部は、1000 万ゲート級の FPGA8 個程度（Xilinx 社 Virtex-7、送信 3 個、受信 5 個）を利用して実装した。FPGA リソースの消費量から推定した回路規模はおおよそ 29MGate となり、100G コヒーレント方式（約 100MGate）のおおよそ 1/3 に削減できた。この結果、ASIC 化時の消費電力はおおよそ 8.5W（14nm プロセス利用を想定）となり、これに光変復調部（光源 3W、ドライバ 2W、受信 1W、他 2W の約 8W）を組み合わせた総消費電力は 100Gbit/s あたり 16.5W、400Gbit/s 化時に 4 倍の約 66W となり目標を達成した。

②課題ア・イ・ウで開発した技術を相互接続して実現した、1 波長 1 偏波 100G 光送受信器のリアルタイム動作を実証した（図 1）。またこれを 4 波長に拡張した 400Gbps 光インタフェースを試作し、400Gbps 動作と光ファイバ 40km 伝送を実証した。

③本課題で試作した 400Gbps 光インタフェースと課題 c/d の試作装置の性能や接続性を実使用に近い環境で評価する現場実証試験を北海道札幌市で実施した (図 2)。本試験には実際に敷設された光ファイバ (約 20km) を利用し、本課題の 400G 光多値信号の伝送試験や他課題との接続試験を行い、信号伝送を確認することで成果目標を達成した。

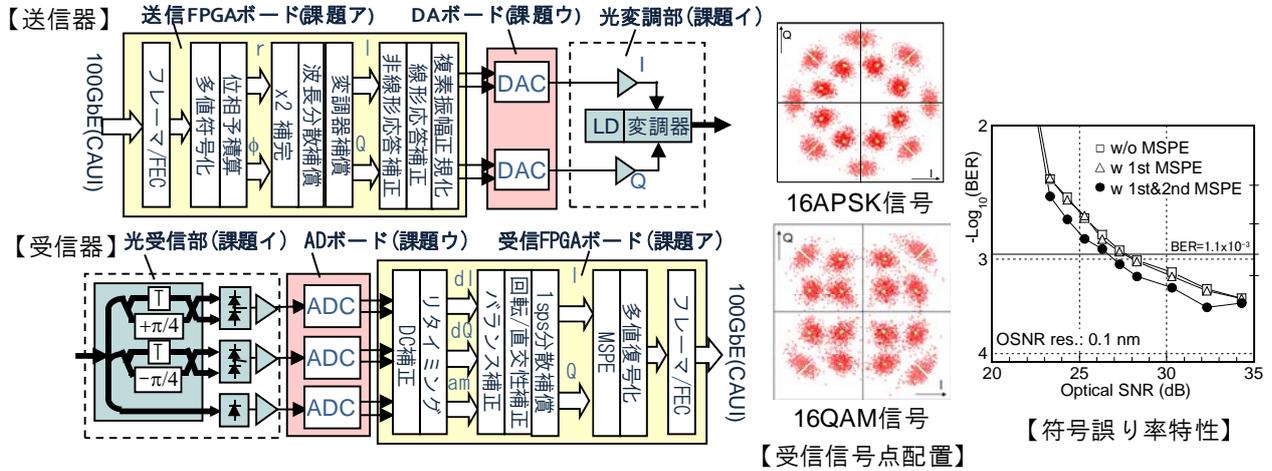


図 1. 試作した 112Gbit/sFPGA 送受信機の構成と受信信号点配置、符号誤り率特性

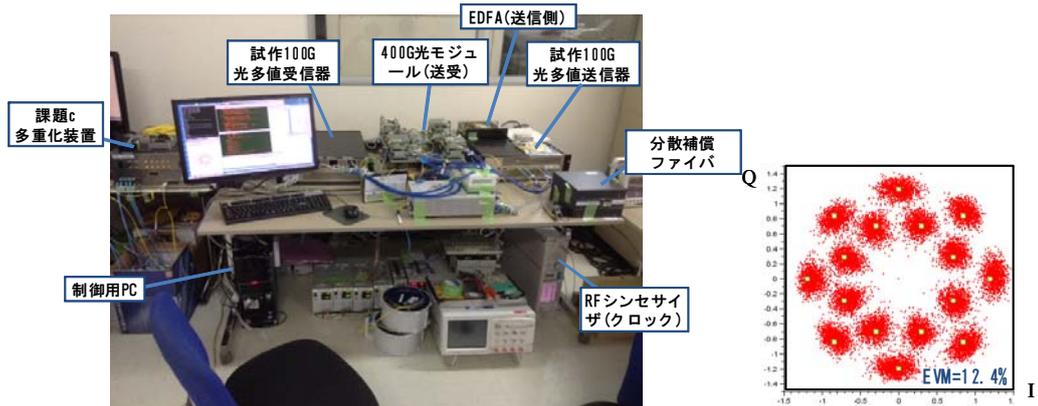


図 2. 現場実証試験における 448Gbit/s 伝送実験の様子と受信信号点配置の例

なお本研究課題では FPGA を用いて多値送受信機を試作するアプローチを用いたが、これは ASIC 化の前段階として過去にもいくつかの報告されている (表 1)。この際には FPGA は ASIC に比べて信号処理能力が大きく不足する点が課題となるため、過去の例では分散補償など規模の大きな信号処理を割愛する (表 1 の全て)、変調速度を数分の 1 に落とす (#1, #2)、サンプリング速度を落とす (#1) などで信号処理量を減らして実現するのが一般的である。しかしながら、安易に変調速度・サンプリング速度を落とすと送受信特性が変化してしまうため検証精度が大きく損なわれる危険性がある。このため数 10 個の FPGA を並列化する大規模試作 (#3/#4) も試みられているが、FPGA 間の同期や信号伝送にリソースを食われ却って信号処理アルゴリズムを替えねばならないなどの弊害も生じうる。これに対して本研究課題では、開発した省電力多値変復調方式の信号処理量の低減と実装の工夫により、100Gbit/s 光多値送受信機に必要な主信号系のデジタル信号処理をほぼそのまま全て実装することが可能となった。この結果、本課題のアプローチは検証精度が大幅に向上し、かつまた将来の ASIC 化の際に生じうる課題を網羅して解決できる効率の高いものとなったと言える。同時に本課題で提案した変復調方式・信号処理方式の回路規模が十分小さく低消費電力性を備えていること、本課題のアプローチの効率の高さを示している

考えられる。また本課題全体としては、システム・デバイスを担当する2社が分担して遂行することで、次世代アクセス向け光送受信器に必要な技術開発を漏れなくバランスよく実施できる体制であった。

表 1. FPGA を用いた過去の光多値送受信器試作報告との比較

	ビット レート	変調 速度	ADC	FPGA	機関・試作時期・実装機能など
#1	40 Gbit/s	5Gbaud PM-16QAM	10GSa/s 8bit, 4 個	Virtex-5 3 個	Alcatel-Lucent 2011 年。帯域補償(15Tap)/IQ 歪み補正、1Sa/sym 偏波分離、周波数推定/位相推定/多値判定/ BER 算出
#2	34 Gbit/s	8.5Gbaud PM-QPSK	20GSa/s 5bit, 4 個	StratixIV 4 個	Alcatel-Lucent 2012 年。2Sa/sym、偏波分離(9Tap)、周波数推定/位相推定/多値判定/ BER 算出
#3	126.5 Gbit/s	31.6Gbaud PM-QPSK	E_{NOB} 4.2bit 4 個	~100 個?	Opnext 2010 年。偏波分離(8Tap Butterfly FIR フィルタ、1.2Sa/s?)、周波数推定/位相推定/多値判定、OTU4 フレーマ+FEC 等。
#4	112 Gbit/s	28Gbaud PM-QPSK	42GSa/s 8bit 4 個	40nm 級? 48 個	NEC 2010 年。周波数推定/位相推定/多値判定、FEC/100GIF 等。
#5	112 Gbit/s	28Gbaud SP-16QAM 16PSK	56GSa/s 8bit 4 個	Virtex-7 8 個	日立 2014 年。単一偏波 16 値変調+遅延検波。分散補償/多値再生/各種補償回路/多値判定、OTU4 フレーマ+FEC/100GIF 等。

また IEEE における 400G イーサ標準化においては、長距離カテゴリ(40km)が標準化対象から外れより短距離伝送に議論が移動したため、本研究開発でも当初の方式よりさらに 1/2 程度の省電力化・小型化が期待できる新 400G 伝送方式(単一偏波ナイキスト 4 値変調+直接受信方式)を考案、追加で性能・実装検討を行い、精力的に標準化活動を実施した。標準化議論はまだ継続中であるが提案方式は主要候補の一つであり、今次ないしは数年内には採択の可能性が高い。これまでイーサネットで光多値伝送が採択された例はなく、本課題の実施内容・アプローチ及び標準化活動の方向性・タイミングについては十分に適切であったと言える。

3. 2 イ) 400Gbps 光インタフェース集積化技術

半導体変調器を用いた小型 100Gbps 光変調部(動作速度 25GBaud、変調帯域 > 17GHz)、ならびに直接検波多値受信フロントエンド(動作速度 25GBaud、受信帯域 > 17GHz)を試作し、その動作を検証する。またこれらの送信部+受信部を 4 台並列化した 400Gbps 光送信部・受信部を現状の 100Gbps 短距離用モジュールである CFP(145mm×82mm)の 2 倍程度のサイズ(現行の 100Gbps 技術のまま 400Gbps を実現した場合と比較して約 1/2 のサイズ)に実装できることを検証する。

① 光送信インタフェース集積化技術

従来の LN 変調器に比べて大幅な小型化が可能となる InP 半導体を用いた IQ 変調器チップ、及びこの試作チップを内蔵したファイバ・ピグテール付きの変調器モジュールを試作した。変調器モジュールは実装性を考慮して、表面実装型の配置を採用した。変調器モジュールの容積は約 4.2cc であり、従来の LN IQ 変調器の 12.8cc に比べて、大幅な小型化を実現した。変調器駆動用の線形ドライバ IC チップに関しては、2 回のウエハ試作を行った。一次試作では、線形ドライバとしての基本的な動作を確認した。二次試作では、外部部品を必要としない回路構成のドライバ IC を試作した。ドライバ・パッケージにおいて、多くの占有領域が必要な外部部品が不要なため、パッケージ・サイズの小型化が可能となる。一次試作チップを搭載したパッケージの実装面積は 1 チャンネルで 17 x 18 mm²であったが、二次試作チップを搭載したパッケージの実装面積は 4 チャンネルで 14 x 8 mm²であり、大幅な小型化を実現した。また、1 チャンネルあたりのドライバ IC の消費

電力は、当初目標の 1W 未満を達成した。

光送信インタフェースとしての特性を検証するために、ドライバ IC パッケージと半導体変調器モジュールを一体実装した評価ボードを試作した。(図 1) はじめに、ドライバ IC パッケージ用評価ボードと半導体変調器モジュール用評価ボードを高周波ケーブルで接続した構成により評価したが、十分な高周波帯域が得られないという課題があった。一体実装した評価ボードでは、ドライバ IC パッケージと変調器モジュール間の高周波損失を最小限に抑えることが可能となる。この結果、28Gbaud の 16QAM 変調動作を確認することができた。(図 2)

さらなる光送信インタフェースの小型化を目的として、半導体レーザ光源、半導体変調器、ドライバ IC をすべてを内蔵した一体集積モジュールの設計を行った。モジュール容積はおよそ 5cc であり、大幅な小型化が可能となる見通しを得た。

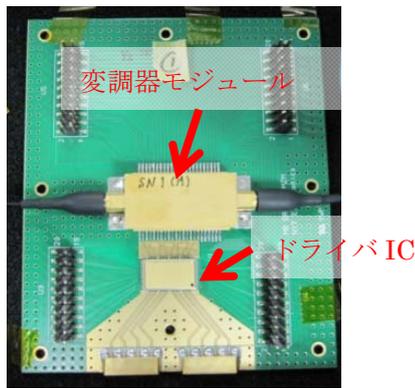


図 1 光送信 I F 評価ボード

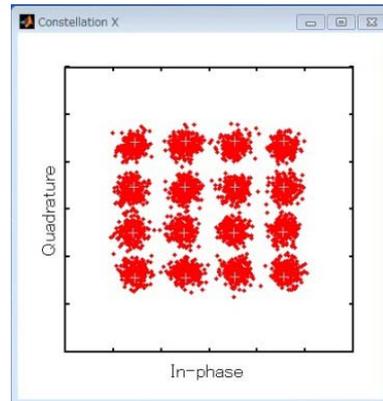


図 2 変調波形 (28Gbaud, 16QAM)

② 光受信インタフェース集積化技術

光受信インタフェースとしては、石英ガラス導波路によるプレーナ光波回路 (PLC) 技術を用い、位相復調用の遅延干渉計、強度復調用の出力導波路、両者間の可変カップラを集積化し、さらにフォトダイオード (PD)、トランスインピーダンスアンプ (TIA) を備えた一体型の受信フロントエンドの試作を行った。(図 3) 位相復調部と強度復調部を一体集積化することにより、個別構成と比べて実装面積が 43%に小型化される。最初の試作では、高周波特性の平坦性に課題があったが、2次試作ではこの課題を解決した。28Gbaud、16QAM などの多値変調光を受信できることを確認した。(図 4)

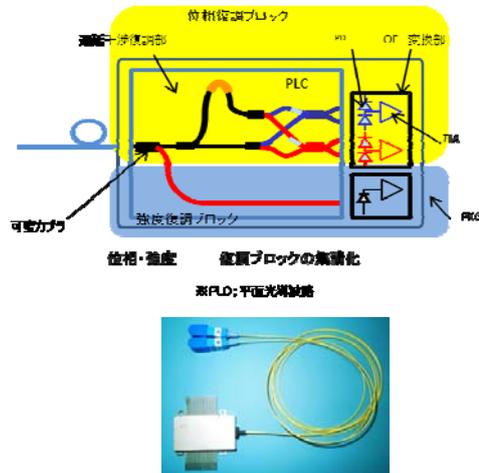


図 3 受信 F E の外観と内部構成図

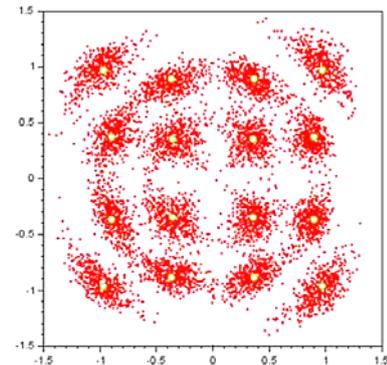


図 4 復調波形 (28Gbaud, 16QAM)

3. 3 ウ) 高速低消費電力 ADC/DAC 技術

超高速 ADC (サンプリング速度 60GSample/s、分解能 8bit、1.5W 以下)、及び DAC (サンプリング速度 60GSample/s、分解能 6bit、750mW 以下) を開発し、低消費電力化を実現する。

本課題の実施に先立ち、内外メーカーの ADC/DAC 開発状況を調査したところ、既に数社が性能的に上記に準ずる超高速 ADC/DAC の開発に着手しており、消費電力面でも将来的には 14nm などの微細プロセスの利用による上記目標を達成できる公算が高いことがわかった。一方本課題の仕様を満たす ADC/DAC が実現した場合でも、ADC/DAC を現実的な送受光デバイスに接続し本課題の光多値変復調を実現する際には、デバイスの特性補償・省電力性との両立など新たな課題が発生することが予見される。このため本課題においては超高速多値信号処理部・光デバイス及び超高速 ADC/DAC の接続する際に必要となる接続技術に注力して開発するものとした。

①数値シミュレータと変調速度 10GBaud テストベッドと、より試作機に近い変調速度 28GBaud テストベッドの構築を完了した。これを用いて課題イの試作光デバイス (半導体 I Q 変調器、リニアドライバ I C、受信モジュール)、及び高速 ADC/DAC と接続して基本評価、補償回路の考案、光多値信号の変復調試験を行った。これにより、目標とする 28GBaud 16QAM 変調の変復調動作を確認して本試作への適用性を実証した。

②省電力の半導体光多値変調器を利用において変調器の消光劣化によってクロストークが発生する問題を検討して省電力補償方式を考案し、実験によってその効果を検証した。ついで多値変調の性能の限界の究明のため市販の InP 系半導体光 I Q 変調器を用いた高次多値信号生成試験を行い、変調器の消光劣化や変調アンバランスが変調精度の制限要因となっていることを究明した。これらを補正する省電力デジタル補正回路を新たに提案し、28GBaud 64QAM 変調信号の生成と 40km ファイバ伝送実験に成功した。なお通信用レーザ光源とモノリシック集積化可能な InP 系半導体 I Q 変調器の利用、および符号誤り率が測定・光ファイバ伝送が可能な高精度 64QAM 変調信号の生成は世界初である (図 1)。

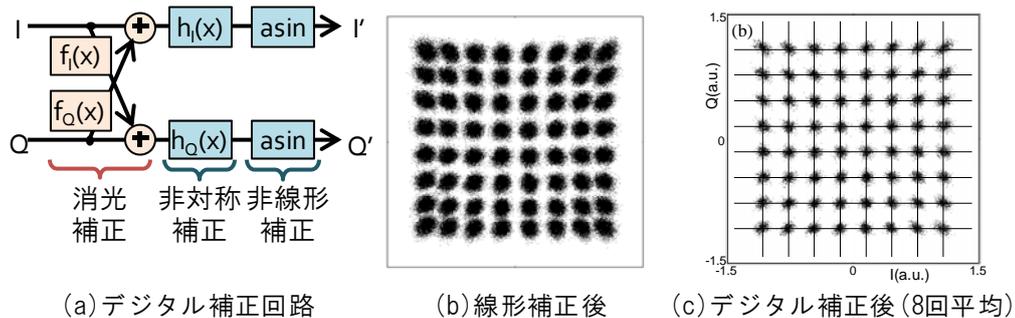


図 1. 半導体変調器を用いた 28GBaud 64QAM 信号の生成例

③課題イの二次試作光デバイスの特性評価を実施し、4 レーン分の光部品を 400G 光モジュール上に実装した。これらを課題アで試作した 1 波長 1 偏波 100GFPGA 送受信器、課題ウで試作した ADC/DAC 部と相互接続し、信号レベル・遅延差などの調整、FPGA 送受信器内に配置する補償回路を考案・実装して 100Gbit/s 光多値波形の変復調を実現する接続技術を開発した (図 2)。これにより、所期の超高速 ADC/DAC を用いて本課題の光多値変復調と省電力性が共に達成できることを実証した。

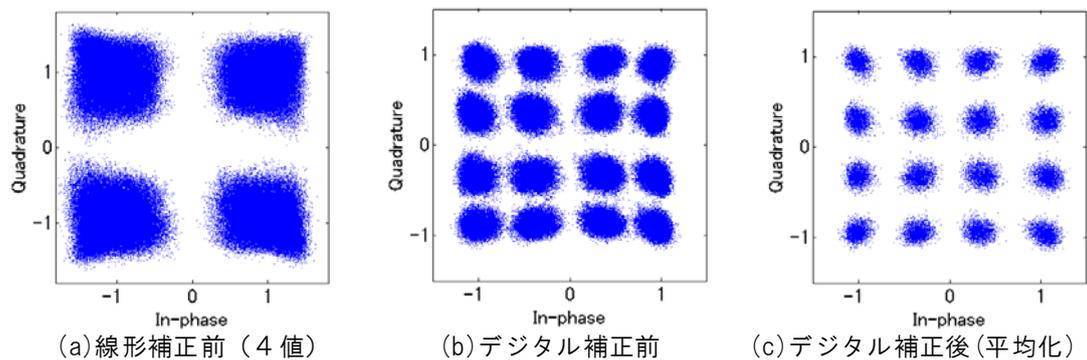


図2. 課題イの半導体変調器を用いた 28GBaud 16QAM 信号のデジタル補償

4 研究開発成果の社会展開のための活動実績

本課題では研究開発成果の普及促進に向けて、学会発表、標準化活動、現場試験、ニュースリリース発信、製品適用に向けて精力的な活動を行った。

<学会発表>

本課題の遂行で得られた研究成果については、積極的に内外の著名学会への計 32 件の学会発表を実施し積極的に成果発信と広報に努めた。

- ・国際学会においては、米国の OFC (Optical Fiber Communication Conference) と、欧州の ECOC (European Conference on Optical Communication) は光ファイバ通信分野で、それぞれ認知度・採択率・規模で上位 1 位・2 位の学会である。本研究課題では実施期間中に OFC に 4 件、ECOC に 2 件の投稿を行い全件が採択・発表された。うち OFC に投稿した一件 (半導体変調器を用いた 64QAM 変調) は、プログラムに”Top scored” と記載されるなど、質的にも高い評価を得た。他にも著名な国際会議を中心に 5 件の発表を行い、研究期間中に計 11 件の国際学会発表を実施した。

- ・国内では、電子情報通信学会の大会・研究会、セミナーなどの機会を捉えて成果アピールを実施し、計 21 件の発表を行った。

<標準化活動>

研究の対象となる中短距離光伝送分野では、開発技術の製品採用において、その前段階において標準化への採用が大きなマイルストーンとなる。そこで、本研究課題においては本分野の代表となる IEEE (The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.) 及び、OIF (Optical Internet Forum) の両標準化会合に参加して積極的に標準化提案を行うとともに、研究開発・市場・標準化動向調査を行い必要に応じて研究計画への反映を行った。

- ・OIF では、平成 25 年に省電力中距離 (500~1000km) 100G 伝送方式の標準化フレームワーク (Intermediate Reach 100G DWDM Framework) が開始された。このため本研究開発の開発技術を転用した簡易 100G 伝送方式 (単一偏波 16 値変調方式+直接検波 or コヒーレント検波) を考案し、寄書 3 件を提出した。2013 年当時は、本フレームワークへの投稿件数が少なく一旦提案活動を休止した。が、本年度より本フォーラムの議論が再燃はじめており、2015 年 4 月会合に提出されたフレームワークドキュメントには本課題で提案した単一偏波方式も候補の一つとして掲載されている。

- ・IEEE では、平成 25 年 (2013 年) の後半から 400GbE スタディグループが立ち上がり、短距離向け 400G 伝送の標準化議論がはじまった。当初は本研究課題の 40km までの伝送距離を含むべきと一部キャリアより強い意見主張があったが、技術的に難度が高いため 40km カテゴリは 400G 標準化対象から外れること

となり、平成 26 年 5 月から 400GbE タスクフォース(平成 28 年(2017 年)の標準化が目標)が開始された。

本状況の変化を受け、本研究課題では研究計画の見直しを行い、より製品化時期に近い短距離伝送に特化して、当初の方式よりさらに 1/2 程度の省電力化・小型化が期待できる第二世代新 400G 伝送方式(単一偏波ナイキスト多値変調+直接受信方式)を考案し、本課題の追加項目としてその実証と標準化活動を実施するものとした。具体的には、400GbE スタディグループ及びタスクフォースにおいて、ナイキスト変調方式の提案、市販の 100G イーサ用の半導体光源利用の実証実験や回路規模の詳細検討について 9 件の標準化寄書を提出した。また Cisco 社・Juniper 社・日本 Ocralo 社などと連携・共同提案の体制を構築し標準化採択に努めた。なお 400GbE タスクフォースの標準化議論は予定より大幅に遅延しており、担当者らを中心に本研究課題の委託期間終了後も引き続き標準化活動を継続している。

<ニュースリリースと現場試験>

・本課題では、研究成果を一般にも広く周知する社会還元の一環として研究期間中に 2 件のニュースリリースを実施した。1 件目(日立製作所、「低コストな InP(インジウムリン)系半導体光変調器を用いた 64 値の光多値伝送技術を開発」、平成 25 年 3 月 10 日)は OFC2013 の学会発表に連動し、世界初となる半導体変調器を用いた高精度 64 値信号の実現技術のアピールを行い、同内容の記事が日刊工業新聞 17 面に掲載された。

・最終年度においては、試作した 400G 光インタフェースと課題 c/d の試作装置の性能や接続性を実使用に近い環境で評価し、その実用性をアピールするための統合現場試験を北海道札幌市で実施した。本試験には実際に敷設された光ファイバ(約 20km)を利用し、本課題の 400G 光多値信号の伝送試験を行い、その結果を弊社ニュースリリース(日立製作所、「大規模・分散型データセンター向け大容量・高信頼伝送技術を開発」、平成 26 年 3 月 9 日)として発表した。本発表の内容は 3 月 10 日付けで日経新聞、日経産業新聞、化学工業日報、電波新聞の 4 紙に掲載されるなど広い反響があり、本研究開発の成果を広くアピールすることができた。

<製品適用>

・日本電信電話株式会社においては、本研究課題で開発した半導体変調器に関しては、応用展開として、グループ会社や光トランシーバメーカーと協力し、半導体変調器を用いた小型の 100G デジタルコヒーレント用光トランシーバの開発を進めている。OFC などの展示会において、CFP や CFP2 といったプラグابل・デジタルコヒーレント・トランシーバのデモを行い、普及させるための活動を行った。

5 研究開発成果の社会展開のための計画

(日立製作所)

本課題のターゲットとする IEEE の 400GbE タスクフォースにおいては標準化ベースラインの策定が予定よりも大幅に遅れている。このためまずは提案方式の策定を目指し、標準化活動の継続を予定している。また OIF においても 100G 中距離伝送方式の標準化活動が継続しており、今後の動向を注視して改めて本研究課題で提案した単一偏波光多値方式の再提案につなげたい。

一方、研究・市場動向についても本研究の実施期間中に大きな変化が生じ、現在では「短距離伝送においても将来的には光多値伝送を適用する必要がある」という認識がほぼ確立されつつある。弊社においては自社 IT 機器、及び標準化を契機とした他社連携体制を軸に、本課題の製品適用を徐々に進めていく予定である。

(日本電信電話株式会社)

光インタフェースに関しては、実用化にむけて、今後も技術開発を継続していく予定である。400G イーサの IEEE 標準化委員会に参加・情報収集し、研究開発活動を通して、光通信事業への寄与を推進する。その際、400G イーサの標準化動向を見極めて、それに適した部品開発を進めていく。一方、平成 25 年より実用化された 100G デジタルコヒーレント伝送技術の応用範囲が拡大する傾向にある。これまで、100G デジタルコヒーレント伝送技術は、長距離通信用途に限られてきたが、低消費電力な演算処理 LSI (DSP) の開発に伴い、メトロエリア等の中距離向けの光伝送装置への適用を目指す試みが急速に活発化してきている。そこでは、低消費電力かつ小型なデジタルコヒーレント用光インタフェースが求められるようになってきている。本研究課題で取り組んだ小型な半導体変調器や変調器ドライバは、小型デジタルコヒーレント用光インタフェースへの応用展開が可能である。そこで、今後は、まず 400G イーサの標準化よりも早く市場導入が進むものと予想される小型デジタルコヒーレント用光インタフェースへの半導体変調器の適用と普及を進めていく予定である。

6 査読付き誌上発表論文リスト

日立製作所

[1] 矢野隆、菊池信彦、“Bidirectional multi-symbol phase estimation scheme for optical communications”、IEICE Communications Express Vol.3 No.12 pp335-340(発表 平成 26 年 12 月 4 日) :

7 査読付き口頭発表論文（印刷物を含む）リスト

日立製作所

[1] 若山雄貴、菊池信彦、“Compensation Technique for Distorted QAM Signal Constellations Generated by Semiconductor IQ Modulators”、国際会議 CLEO-OECC/PS 2013 (The 10th Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim, the 18th OptoElectronics and Communications Conference and Photonics in Switching 2013)、MK1-8 (発表 平成 25 年 7 月 1 日) :

[2] 萬代浩平、菊池信彦、“Compensation of Constellation Distortion due to Imbalance of Delay Detection in Incoherent Optical QAM Signaling”、国際会議 CLEO-OECC/PS 2013 (The 10th Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim, the 18th OptoElectronics and Communications Conference and Photonics in Switching 2013)、MR1-3 (発表 平成 25 年 7 月 1 日) :

[3] 菊池信彦、矢野隆、“Simplified Transmitter-Side DSP Implementation for Optical Multilevel Signaling with Delay Detection”、国際会議 ECOC 2013 (European Conference on Optical Communication)、Tu.1.E.2 (発表 平成 25 年 9 月 24 日) :

[4] 菊池信彦、平井理宇、若山雄貴、“High-Speed Optical 64QAM Signal Generation Using InP-based Semiconductor IQ Modulator”、国際学会 OFC 2014 (The Optical Fiber Communication Conference and Exposition)、M2A.2 (発表 平成 26 年 3 月 10 日) :

[5] 萬代浩平、菊池信彦、平井理宇、“Constellation Distortion Monitoring for Imbalance of Balanced Detection in Incoherent Optical QAM Signaling”、国際学会 OECC/ACOFT 2014 (The OptoElectronics and Communication Conference and the Australian Conference on Optical Fibre Technology 2014)、WE9F-3 (発表 平成 26 年 7 月 9 日) :

[6] 菊池信彦、平井理宇、“Intensity-Modulated / Direct-Detection (IM/DD) Nyquist Pulse-Amplitude Modulation (PAM) Signaling for 100-Gbit/s/ λ Optical Short-reach Transmission”、国際会議 ECOC 2014 (European Conference on Optical Communication)、P.4.12 (発表 平成 26 年 9 月 24 日) :

[7] 菊池信彦、平井理宇、福井孝昌、“Practical Implementation of 100-Gbit/s/Lambda Optical Short-Reach Transceiver with Nyquist PAM4 Signaling using Electroabsorptive Modulated Laser (EML)”、国際学会 OFC 2015 (The Optical Fiber Communication Conference and Exposition)、Th3A.2 (発表 平成 27 年 3 月 26 日) :

[8] 平井理宇、菊池信彦、“Experimental Demonstration of 100G/lambda Nyquist-PAM4 Transmission with Digital Pre-Equalization of Chromatic Dispersion for Extended-Reach 400GbE”、国際学会 OFC 2015 (The Optical Fiber Communication Conference and Exposition)、Th4A.6 (発表 平成 27 年 3 月 26 日) :

日本電信電話株式会社

[1]M. Nagatani, Y. Bouvier, H. Nosaka and K. Murata, “A 3-Vppd 730-mW Linear Driver IC Using InP

HBTs for Advanced Optical Modulations,” CSICS2013 (Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium), DOI:10.1109/CSICS.2013.6659193 (発表 平成 25 年 10 月 16 日)

[2]H. Wakita, M. Nagatani, S. Yamanaka, H. Tanobe, and H.Nosaka “Ultra-Compact Quad-Channel 28-Gbaud Linear Driver Module for InP Mach-Zehnder Modulator,” APMC2014 (Asia-pacific Microwave Conference), pp.1064-1066 (発表 平成 26 年 11 月 17 日)

[3]M. Kotoku, “Compact InP-based Optical Modulator for 100-Gb/s Coherent Pluggable Transceivers,” OFC2015 (The Optical Fiber Communication Conference and Exposition), Th4F.3 (発表 平成 27 年 3 月 26 日)

8 その他の誌上発表リスト

日立製作所

[1] 豊田英弘、光野正志、菊池信彦、平井理宇、“稼ぐビッグデータ・IoT 技術徹底解説 (書籍) 3.1.5 バックエンドネットワーク処理”、日立製作所×日経エレクトロニクス、日経 BP 社、ISBN978-4-8222-7642-3 (平成 26 年 12 月 25 日) :

[2] 菊池信彦、平井理宇、“400 ギガイーサ向け 1 波長 100Gbit/s ナイキスト PAM 光変調方式”、光技術コンタクト 4 月号 (発表 平成 27 年 4 月 30 日) :

9 口頭発表リスト

日立製作所

[1] 菊池信彦、“超高速・低消費電力光ネットワーク技術の研究開発 アクセスネットワーク高速大容量化・低消費電力化技術 光多値伝送向け高性能信号処理技術”、フォトリックネットワークシンポジウム 2013 (神奈川) (発表 平成 25 年 3 月 12 日)

[2] 萬代浩平、菊池信彦、“直接受信光多値伝送におけるバランス型受信器のバランス補償”、電子情報通信学会総合大会 (岐阜)、B10-49 (発表 平成 25 年 3 月 20 日)

[3] 菊池信彦、“デジタルコヒーレント光多値伝送における位相雑音のインパクト”、光通信技術展(FOE 2013) 専門技術セミナー、FOE-4 (発表 平成 25 年 4 月 12 日)

[4] 菊池信彦、矢野隆、“遅延検波を用いた光多値伝送における送信側信号処理構成の検討”、電子情報通信学会ソサイエティ大会 (福岡)、B10-70 (発表 平成 25 年 9 月 19 日)

[5] 萬代浩平、菊池信彦、“直接受信光 QAM 伝送におけるバランス型受信器のアンバランス検出”、電子情報通信学会ソサイエティ大会 (福岡)、B10-71 (発表 平成 25 年 9 月 19 日)

[6] 菊池信彦、平井理宇、若山雄貴、“半導体 InP-IQ 変調器を用いた光 64QAM 変調信号の生成”、電子情報通信学会総合大会 (新潟)、B10-53 (発表 平成 26 年 3 月 20 日)

[7] 平井理宇、萬代浩平、菊池信彦、“遅延検波光多値受信器の位相ずれによる波形歪みの補正方式の提案”、電子情報通信学会総合大会 (新潟)、B10-80 (発表 平成 26 年 3 月 21 日)

[8] 菊池信彦、“400GbE を目指す光変調方式の技術動向”、光通信技術展(FOE 2014) 専門技術セミナー、FOE-4 (発表 平成 26 年 4 月 17 日)

[9] 中川八穂子、“科学技術イノベーションを加速する量子加速器の ICT システム”、AAA 先端加速器科学技術推進協議会講演 (発表 平成 26 年 4 月 24 日)

[10] 菊池信彦、平井理宇、若山雄貴、“半導体 InP-IQ 変調器を用いた光 64QAM 変調”、光通信システム

研究会(OCS)6月研究会(別府)(発表 平成26年6月26日)

[11] 平井理宇、菊池信彦、“ナイキスト PAM 変調およびナイキスト SCM 変調を用いた IM/DD 伝送方式の比較”、電子情報通信学会ソサイエティ大会(徳島)、B10-40(発表 平成26年9月19日)

[12] 菊池信彦、平井理宇、“ナイキスト PAM 変調を用いた IM/DD 100Gbit/s/□伝送方式”、電子情報通信学会ソサイエティ大会(徳島)、B10-41(発表 平成26年9月19日)

[13] 平井理宇、菊池信彦、“400G イーサ向け Nyquist-PAM4 光変調方式の研究”、第3回フォトニックデバイス・応用技術研究会(神奈川)、B10-40(発表 平成26年10月8日)

[14] 菊池信彦、平井理宇、“ナイキスト PAM 変調を用いた IM/DD 1 波長 100Gbit 伝送”、光通信システム研究会(OCS)11月研究会(広島)(発表 平成26年11月14日)

[15] 萬代浩平、平井理宇、菊池信彦、“遅延検波光 QAM 伝送におけるバランス型受信器のデジタルバランス補正方式”、光通信システム研究(OCS)第28回 光通信システムシンポジウム(三島)(発表 平成26年12月11日)

[16] 菊池信彦、平井理宇、福井孝昌、“100Gbit/s/波長 IM/DD ナイキスト PAM 伝送方式における変調器集積化光源の適用検討”、電子情報通信学会総合大会(滋賀)、B10-29(発表 平成27年3月10日)

[17] 平井理宇、菊池信彦、“デジタル分散予等化を用いた 1.5 μ m 帯 100Gbit/s/波長 Nyquist-PAM4 方式の 40km SMF 伝送実証”、電子情報通信学会総合大会(滋賀)、B10-30(発表 平成27年3月10日)

日本電信電話株式会社

[1] 脇田斉、長谷宗彦、武藤美和、綱島聡、福山裕之、野坂秀之、柏尾典秀、井田実、栗島賢二、“InP MZM 向け低消費電力線形ドライバモジュール”、信学会マイクロ波研究会(東京)(発表 平成26年1月17日)

[2] 金澤慈、山田英一、郷隆司、菊池順裕、柴田泰夫、伊賀龍三、神徳正樹、石井啓之、“空間光学系偏波合波器を用いた半導体 DP-QPSK 変調器モジュール”、2014年信学会総合大会、C-4-9(発表 平成26年3月19日)

[3] 長谷宗彦、ボウビア イブス、野坂秀之、村田浩一、栗島賢二、柏尾典秀、井田実、“InP HBT による低消費電力線形ドライバ IC”、2014年信学会総合大会 C-10-7(発表:平成26年3月20日)

[4] 脇田斉、長谷宗彦、山中祥吾、田野辺博正、野坂秀之、“4ch 集積ドライバモジュールにおけるコイルレス化による小型化検討” 2015年信学会総合大会、C-10-5(発表 平成27年3月10日)

10 出願特許リスト

日立製作所

[1] 菊池信彦、「光多値信号予等化回路、光多値信号予等化送信器及び偏波多重光予等化送信器」、日本、申請 平成24年11月28日

[2] 菊池信彦、「光多値信号予等化回路、光多値信号予等化送信器及び偏波多重光予等化送信器」、米国、申請 平成25年2月26日

[3] 菊池信彦、「光多値信号予等化回路、光多値信号予等化送信器及び偏波多重光予等化送信器」、欧州、申請 平成25年2月26日

[4] 菊池信彦、「光多値信号送信器、光多値信号送受信器及び光多値信号処理 IC」、日本、申請 平成25年2月20日

[5] 矢野隆、菊池信彦、「差動符号化信号の復調装置及び復調方法」、日本、申請 平成25年9月4日

[6] 若山雄貴 菊池信彦、「光多値送信器および光トランスポンダ」、日本、申請 平成25年10月31日

- [7] 菊池信彦、「省電力偏波多重光送受信器」、日本、申請 平成 25 年 11 月 21 日
- [8] 平井理宇、菊池信彦、萬代浩平、「光受信器および光信号受信方法」、日本、申請 平成 25 年 12 月 5 日
- [9] 菊池信彦、「光多値信号予等化回路、光多値信号予等化送信器及び偏波多重光予等化送信器」、米国、申請 平成 26 年 11 月 17 日
- [10] 若山雄貴 菊池信彦、「光多値送信器および光トランスポンダ」、米国、申請 平成 26 年 10 月 31 日
日本電信電話株式会社
- [1] 菊池順裕、柴田泰夫、石井啓之、「半導体光変調器」、日本、申請 平成 25 年 3 月 27 日
- [2] 長谷宗彦、野坂秀之、「出力回路」、日本、申請 平成 26 年 3 月 27 日
- [3] 菊池順裕、石井啓之、柴田泰夫、金澤慈、「半導体光変調器」、日本、申請 平成 26 年 3 月 31 日
- [4] 石井啓之、菊池順裕、金澤慈、「半導体マッハツェンダ光変調器」、日本、申請 平成 26 年 12 月 12 日

1 1 取得特許リスト

なし。

1 2 国際標準提案・獲得リスト

日立製作所

- [1] OIF・Q213 Committee Meeting、oif2013.135.03、「Proposal of Single-Polarization Multilevel Signaling for Intermediate Reach 100G Transmission」、提案 平成 25 年 4 月 24 日
- [2] OIF・Q313 Committee Meeting、oif2013.244.01、「Consideration on Single-Polarization Multilevel Signaling for Intermediate Reach 100G Transmission」、提案 平成 25 年 7 月 23 日
- [3] OIF・Q114 Committee Meeting、oif2014.041.01、「Comparison of Intermediate Reach 100G Transmission Schemes with Single-Polarization 16QAM Signaling」、提案 平成 26 年 2 月 12 日
- [4] IEEE802.3・July 13 Plenary Meeting、「Initial Thought about Modulation Format & FEC for "Long-reach" 400GbE」、提案 平成 25 年 7 月 16 日
- [5] IEEE802.3・Jan 14 Interim Meeting、「Proposal of new 400GbE Signaling Formats with 4λ x 100G Configuration」、提案 平成 26 年 1 月 10 日
- [6] IEEE802.3・May 14 Interim Meeting、「400GE 2-km and 10-km SMF PMD Proposals and Experimental Verification with Nyquist Modulation」、提案 平成 26 年 5 月 13 日
- [7] IEEE802.3・July 14 Plenary Meeting、「Proposal Updates of Nyquist Modulation」、提案 平成 26 年 7 月 16 日
- [8] IEEE802.3・Sep 14 Interim Meeting、「400GbE using Nyquist PAM4 for 2km and 10km PMD」、提案 平成 26 年 9 月 9 日
- [9] IEEE802.3・Sep 14 Interim Meeting、「Feasibility study of 100G/lambda Nyquist-PAM4 with commercially available 1.3um/1.5um EML」、提案 平成 26 年 9 月 9 日
- [10] IEEE802.3・Nov 14 Plenary Meeting、「Baseline for 400GE 2km and 10km SMF PMD」、提案 平成 26 年 11 月 4 日
- [11] IEEE802.3・Nov 14 Plenary Meeting、「Supplementary Information on Nyquist-PAM4」、提案 平成 26 年 11 月 4 日
- [12] IEEE802.3・Jan 14 Interim Meeting、「Investigation of PAPR Penalty on PAM4 Signaling」、提案

平成 26 年 1 月 6 日

1 3 参加国際標準会議リスト

日立製作所

- [1] OIF・Q213 Committees Meeting、Albuquerque、平成 25 年 4 月 23 日
- [2] OIF・Q313 Committees Meeting、Warsaw、平成 25 年 7 月 23 日
- [3] OIF・Q114 Committees Meeting、San Jose、平成 26 年 2 月 10 日
- [4] IEEE802.3 400GbE Study Group・July 13 Plenary Meeting、Geneva、平成 25 年 7 月 13 日
- [5] IEEE802.3 400GbE Task Force・Jan 14 Interim Meeting、Indian Wells、平成 26 年 1 月 14 日
- [6] IEEE802.3 400GbE Task Force・May 14 Interim Meeting、Norfolk、平成 26 年 5 月 14 日
- [7] IEEE802.3 400GbE Task Force・July 14 Plenary Meeting、San Diego、平成 26 年 7 月 14 日
- [8] IEEE802.3 400GbE Task Force・Sep 14 Interim Meeting、Kanata、平成 26 年 9 月 14 日
- [9] IEEE802.3 400GbE Task Force・Nov 14 Plenary Meeting、San Antonio、平成 26 年 11 月 14 日
- [10] IEEE802.3 400GbE Task Force・Jan 14 Interim Meeting、Atlanta、平成 26 年 1 月 14 日

1 4 受賞リスト

日立製作所

- [1] 萬代浩平、電子情報通信学会学術奨励賞、対象講演「直接受信光 QAM 伝送におけるバランス型受信器のアンバランス検出」、H26 年 3 月 19 日

1 5 報道発表リスト

日立製作所

(1) 報道発表実績

- [1] “低コストな InP(インジウムリン)系半導体光変調器を用いた 64 値の光多値伝送技術を開発”、発表 平成 25 年 3 月 10 日
- [2] “大規模・分散型データセンター向け大容量・高信頼伝送技術を開発”、発表 平成 26 年 3 月 9 日

(2) 報道掲載実績

- [1] “日立が伝送技術 InP 系変調器を利用”、日刊工業新聞 17 面、平成 25 年 3 月 10 日
- [2] “データ通信速度 4 倍に 日立製作所”、日本経済新聞、発表 平成 26 年 3 月 10 日
- [3] “毎秒 400 ギガビット高速通信技術 日立、データセンタ向け”、日経産業新聞、発表 平成 26 年 3 月 10 日
- [4] “大規模分散型データセンタ向け 日立が大容量・高信頼伝送技術”、電波新聞、発表 平成 26 年 3 月 10 日
- [5] “DC 内間を高速光伝送 日立 従来比 4 倍、高信頼性”、化学工業日報、発表 平成 26 年 3 月 10 日

1 6 ホームページによる情報提供

URL : <http://www.hitachi.co.jp/New/cnews/month/2015/03/0309.html>

掲載情報の概要 :

多拠点に分散したデータセンター間の通信や大規模データセンター内のネットワークを対象とした大容量・

高信頼ネットワーク技術を開発した。開発した技術は、(1) データセンター内のデータ回線を低遅延で省電力に集約する技術、(2) 400 ギガビット/秒級でデータセンター間の通信を実現する光多値伝送向け送受信技術、(3) 複数の伝達路を持つマルチコア光ファイバを用いたデータセンター内の装置伝送経路の冗長化技術である。実際のフィールドに敷設した 20km の光ファイバを用いた試験用プラットフォームにて、データセンターのネットワークを想定した光伝送およびシステムの連携実験を行い、その実用性を確認した

研究開発による成果数

	平成 24 年度	平成 25 年度	平成 26 年度
査読付き誌上発表論文数	0 件 (0 件)	0 件 (0 件)	1 件 (1 件)
査読付き口頭発表論文数 (印刷物を含む)	0 件 (0 件)	5 件 (5 件)	6 件 (6 件)
その他の誌上発表数	0 件 (0 件)	0 件 (0 件)	1 件 (0 件)
口 頭 発 表 数	2 件 (0 件)	7 件 (0 件)	1 1 件 (0 件)
特 許 出 願 数	5 件 (2 件)	6 件 (0 件)	3 件 (2 件)
特 許 取 得 数	0 件 (0 件)	0 件 (0 件)	0 件 (0 件)
国 際 標 準 提 案 数	0 件 (0 件)	5 件 (5 件)	7 件 (7 件)
国 際 標 準 獲 得 数	0 件 (0 件)	0 件 (0 件)	0 件 (0 件)
受 賞 数	0 件 (0 件)	1 件 (0 件)	0 件 (0 件)
報 道 発 表 数	0 件 (0 件)	1 件 (0 件)	1 件 (0 件)
報 道 掲 載 数	0 件 (0 件)	1 件 (0 件)	4 件 (0 件)

	平成 27 年度(参考)	合計
査読付き誌上発表論文数	0 件 (0 件)	1 件 (1 件)
査読付き口頭発表論文数 (印刷物を含む)	0 件 (0 件)	1 1 件 (1 1 件)
その他の誌上発表数	1 件 (0 件)	2 件 (0 件)
口 頭 発 表 数	0 件 (0 件)	2 0 件 (0 件)
特 許 出 願 数	0 件 (0 件)	1 4 件 (4 件)
特 許 取 得 数	0 件 (0 件)	0 件 (0 件)
国 際 標 準 提 案 数	0 件 (0 件)	1 2 件 (1 2 件)
国 際 標 準 獲 得 数	0 件 (0 件)	0 件 (0 件)
受 賞 数	0 件 (0 件)	1 件 (0 件)
報 道 発 表 数	0 件 (0 件)	2 件 (0 件)
報 道 掲 載 数	0 件 (0 件)	5 件 (0 件)