

# NTT

# 技術ジャーナル

## 将来の大容量通信インフラを支える 超高速通信技術

**Optical communication**  
Complementary Metal Oxide Semiconductor  
**Ultra-high-speed optical transmission**  
Orbital Angular Momentum **Digital signal processing**  
**Field Effect Transistor** **Ultra-high-speed Ethernet**  
**Frequency Doubler** **Optical parametric amplification**  
Augmented Reality **Wavelength Division Multiplexing**  
**High-symbol-rate optical transmission** **Optical frontend**  
**Nonlinear Parametric Signal Processing**  
Quadrature Phase Shift Keying **Intensity Modulation Direct Detection**  
Discrete Multi-Tone **Orbital angular momentum multiplexing**  
Signal-to-Noise Ratio **millimeter-wave transmission**  
Polarization Beam Splitter **Multiple-Input Multiple-Output** Intermediate Frequency  
**Balanced Photo Detector**  
Optical phase conjugation

### ■トップインタビュー

森林 正彰 NTTコミュニケーションズ 代表取締役副社長

### ■グループ企業探訪

NTTレゾナントテクノロジー

### ■from NTTデータ

サイバーフィジカル技術開発の取り組み——エッジAI,AR/VR技術の動向と事例

**3** 2019  
Vol.31 No.3

トップインタビュー

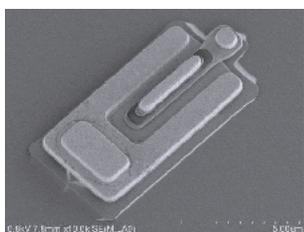


森林 正彰 NTTコミュニケーションズ 代表取締役副社長

グローバル市場で勝つために、世界基準の体制を築く ..... 4

特集

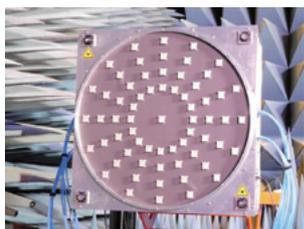
# 将来の大容量通信インフラを支える超高速通信技術 ..... 8



将来の大容量通信インフラを支える超高速通信技術 ..... 10

デジタル信号処理と回路技術を融合した超高速光通信技術 ..... 16

低雑音高出力パラメトリック増幅中継技術 ..... 22



超100 Gbaud光伝送を可能とする超高速光フロントエンド  
デバイス技術 ..... 27

テラビット級無線伝送をめざす大容量OAM多重伝送技術 ..... 32

from ★NTT DOCOMO テクニカル・ジャーナル

5G時代に相応しい8KVR映像ライブ配信・視聴システムの  
開発 ..... 36

## グループ企業探訪



NTTレゾナントテクノロジー株式会社 ..... 44

スマートフォンの実機がなくても画面確認やテストができるサービス「Remote TestKit」をコアに事業を展開

## from ◆NTTデータ

サイバーフィジカル技術開発の取り組み  
——エッジAI, AR/VR技術の動向と事例 ..... 48

## グローバルスタンダード最前線

■IEC/TC37 (避雷器) /SC37B (低圧サージ防護  
部品) /WG3の活動紹介と経済産業大臣表彰受賞 .. 52

Focus on the News ..... 55

NEWS ..... 63

特許紹介 ..... 64

イベント ..... 65

読者の声 ..... 66

4月号予定

編集後記

本誌掲載内容についての  
ご意見、ご要望、お問い合わせ先  
一般社団法人電気通信協会内  
NTT技術誌事務局  
TEL (03) 3288-0608  
FAX (03) 3288-0615  
E-mail jimukyoku2008@tta.or.jp

本誌ご購入のお申し込み、  
お問い合わせ先  
一般社団法人電気通信協会  
ブックセンター  
TEL (03) 3288-0611  
FAX (03) 3288-0615  
ホームページ <http://www.tta.or.jp/>

■企画編集 日本電信電話株式会社  
〒100-8116 東京都千代田区大手町1-5-1  
大手町ファーストスクエア イーストタワー  
NTTホームページ URL <http://www.ntt.co.jp/>

■発行 一般社団法人電気通信協会  
〒101-0003 東京都千代田区一ツ橋2-1-1  
如水会ビルディング6階  
TEL (03)3288-0608 FAX (03)3288-0615  
URL <http://www.tta.or.jp/>

©日本電信電話株式会社 2019

●本誌掲載記事の無断転載を禁じます●  
※本誌に掲載されている社名、製品およびソフトウェアなどの名称は、各社の商標または登録商標です。

■表紙デザイン：高橋デザインルーム

# トップインタビュー

森林 正彰 NTTコミュニケーションズ 代表取締役副社長



◆PROFILE：1984年日本電信電話公社に入社。2009年NTT Europe Ltd. 代表取締役社長、2016年NTTコミュニケーションズ取締役 クラウドサービス部長を経て、2018年6月より現職。

## グローバル市場で 勝つために、世界 基準の体制を築く

第4次産業革命が世界的に進行する現代、日本がイノベーションにおける国際競争力を保つためには、イノベーションの4つの類型、プロダクト、プロセス、マーケティング、組織、優位性を確立していく必要があると内閣府の平成30年度の年次経済財政報告で示されました。NTTコミュニケーションズがこの波に乗り、国際企業として確たる地位を築くには何が必要なのか、森林正彰NTTコミュニケーションズ 代表取締役副社長に伺いました。

### 変化させるのは提供方法。相手の文化や生活習慣を掴んで

◆NTTコミュニケーションズをグローバル市場で勝てる企業に押し上げるのが副社長のミッションと伺いました。すでに、十分に存在感を示していると感じていますがいかがでしょうか。

私はこれまで、NTTコミュニケーションズ（NTT Com）をグローバル市場で勝てる会社、競争力のある会社になりたいと思ってきました。それを実現する機会をいただいたと思っています。グローバル事業に関しては、今

まさに再編の時期にあり、そのステップを駆け上がっている実感があります。強みを存分に発揮し、このプロセスをどう乗り切るか、真のグローバル市場において強い企業に成長させられるようにしっかりと取り組んでいきたい、これが私に与えられた一番大きなテーマです。

グローバル市場でのビジネスは年々成長しているのですが、まだまだ日本国内の売上のほうが大きいのが実態です。海外においては同じ業界の人はNTT Comのことを知っていても、一般の人で知っている人はまだ少ないですし、ブランドイメージも浸透していません。世界各国において知名度の向上、ビジネスの拡張にもまだ大きく改善の余地があると考えています。

私は米国、香港、欧州と3カ所で15年ほど仕事をしてきたことでおおむね各地域のビジネスの特色を理解することができましたし、海外勤務で日本を外から眺めることもできました。海外にいと日本国内の状況が把握しにくいと思われるかもしれませんが、不思議と日本を離れているときのほうが日本のことがしっかりと見えてきます。この15年で日本、そしてNTTの「強み、弱み」が非常によく分かりました。日本は良い意味でも悪い意味でも非常にユニークです。例えばビジネスでいえば、日本企業の年功序列や終身雇用、採用制度等は独特です。「〇歳にならないと課長になれない」と、日本人は考えますが、日本以外の国の人にとって、これは全く理解できないことです。また、よほどのことがない限り会社を解雇されることはありませんし、昇給の交渉などしない人がほとんどではないでしょうか。しかし、日本以外の国では、一般的には給与も昇給も個人交渉ですから、プロスポーツ選手の年棒のように個人と会社の間で交渉が行われるのが通例です。

また、一般的なことでいえば、サービスの質が圧倒的に良いのが日本です。どこで食べても食事は美味しい、約束どおりに宅配便が届くなど、これだけ丁寧なサービスが受けられる国はほかにはありません。例えば、英国ではまず基本的に宅配便で時間を指定することはできませんし、たとえ時間指定ができたとしてもその時間に来ないということがよくありました。何かの修理を頼んでも時間がかかるなど、日本では当たり前のように受けていた丁寧で誠実なサービスは受けられませんでした。日本では当たり前のようなサービスの質はグローバル市場で強みにできるはずですが、しかし、日本企業全般にいえることかもしれませんが、その強みの活かし方が上手ではないと感じています。

#### ◆日本の技術やサービスの質の良さを活かし方を変えるのですね。

日本と英国の鉄道運営を例にとりましょう。日本の鉄道網の運行計画、ダイヤは1分でも遅れたら謝罪をするほど徹底管理されています。英国の地下鉄やバスには詳細な時刻表がありませんし、直前になって「〇分後に〇番ホームに列車が来ます」と駅の電光掲示板等に掲載されるだけです。それなら、英国に日本の正確なダイヤの運行を導入すれば喜ばれると考えますが、それは簡単ではありません。日本のダイヤ運行の仕組みを運用できるシステムがありませんし、そこまでコストをかけて正確なダイヤで列車を運行することを求めているなど、サービスの考え方に違いがあると思います。「その国の事情に合わせたものを売り込んでいかなければ、売れない」という教訓は、あらゆる国において当てはまると思います。NTT Comのサービスも同様です。日本の品質はとても素晴らしいので、グローバル市場に日本流のサービスを売れば良いと考える人もいますが、単純に品質や機能を訴求しても値段が高いと、「必要がない」と言われてしまいます。

少し前の米国の電子レンジの例が分かりやすいので紹



介しましょう。当時より、日本製の電子レンジは材料によって温め方を変えることができるなど高機能でしたが、米国で一般的に使われている電子レンジは温め機能のみのシンプルで安価なものでした。これは、技術の差だけの話ではなく、米国人にとって電子レンジに求めるものといえば「チンという音とともに温まっている」ことだけなのです。「チン」以外の機能を求めている彼らにとって、高機能の電子レンジは無用の長物ともいえるでしょうし、オーバースペックで高価なものとなってしまいます。この文化の違い、要求されるスペックの違いを理解しないとビジネスは成功しないのです。

私たちは、この文化の違いをしっかりと理解したうえで、まずはグローバルスタンダードなサービスを売り出すことにしました。そして、スタンダードよりも上を望むお客さまには対価を得てオプションサービスを提供するというスタンスで臨むことにしたのです。グローバルスタンダードに合わせた品質のサービスを携え、それ以上のサービスや製品を望むお客さまにもこたえられるオプションもしっかりと用意して、お客さまに選んでいただける体制が最善だと考えています。

### 「ソリューション提供」へ大きく舵切り。OJTでの試行錯誤が一番の近道

#### ◆グローバルで勝てる戦略は文化を理解する、お客さまのニーズを把握することから始まるのですね。

そのとおりです。お客さまの要望を「デザイン思考」の考え方で丁寧に把握し、極力そのご要望に合わせたサービスをいかに効率的に提供できるかがポイントだと思っています。また、私たちはどの強みを前面に押し出して戦っていくかという点についても社内で議論しています。例えば、桁違いのスケールを保有し果敢な先行投資を行っているAmazonと私たちが提供するクラウドサービスを単に機能の単品で比較するのでは分が悪くなってしまいます。お客さまが望むソリューションを提供するかたちで勝負をしていく方向に舵を切っています。分かりやすくいえば、レストランにインスタントラーメンは食べに行かないですよね？ レストランにお客さまが望むのは、食事そのものに加えて、スタッフによる充実したサービス、店のイ

ンテリアや雰囲気、心地良い環境も含め、自分たちの目的に合った食事を楽しむことです。インスタントラーメンを食べるのなら、わざわざレストランに行かなくても自宅で食べれば十分です。

話をクラウドサービスに戻しますと、インスタントラーメン（単品のリソース）のみを提供するのではなく、どのようにどんな食事（クラウドソリューション）をどのような環境で召し上がりたいか、本当に欲しいものは何かをしっかりと伺って、ふさわしいものを提案するという方法に、仕事のやり方を変えなくてはいけないと思っています。そのためには、お客さまのビジネスを理解し、技術的な知識も豊富でデザイン思考に基づいて最適な提案ができる人材が多数必要になりますが、まだまだこうした人材は足りません。しかし、ポテンシャルを持っている人は多く存在します。そうした人たちには実際のビジネスにおいてどんどん経験を積んでもらいたいと考えています。研修や座学でもある程度の知識は身につきますが、すべてを学ぶのは難しいですね。言い古されたことかもしれませんが、優秀な先輩に帯同して先輩の仕事をつぶさに見て、自分も提案をして失敗を繰り返して学ぶことが一番の近道なのです。私は欧州就任時に、現地の社員が優れた先輩社員に新人を帯同させて仕事を覚えさせていたのを目の当たりにしました。最初はおぼつかない新人も2年後にはトップセールスを記録するほどに成長しているケースもありました。このやり方を見たときにこれが一番手取り早いのだと実感しました。

◆**これまでも改革を推し進める、あるいは大きな事業に挑む等、大事な局面に臨まれたことはありますか。**

いろいろと貴重な経験を積ませていただきましたが、もっとも印象深いのは香港就任時のデータセンタ事業です。過去にデータセンタを買収、保有するも、バブル崩壊とともに無駄な資産となってしまったという失敗事例があり、周囲の反対の声の中、ほとんど使われていないデータセンタビルを保有する会社を見つけて買収し、本格的なデータセンタ事業を立ち上げました。当時、香港のNTT Com Asiaのトップだった私は、部下たちの話を聞き、絶対に成功するという確信を得ていました。ポジティブに考え、成功すると信じ切って迷わず決断しました。



上司への説明に際しては、周囲の声に惑わされず、自分の目と耳を信じて、ブレずに判断を下すという仕事のやり方をして理解を得てきました。さらに2009年に行ったNTT EuropeとNTT Europe Onlineの統合も大変貴重な経験になり、今から行うグループでのグローバル事業再編の予行演習にもなりました。今回の再編についてはこれら経験もあり、極めてポジティブに考えており、あまり心配していません。不安そうな社員を見かけた際には、前向きに考え心配しないでほしいと伝えていきます。

多くの場合、2つの企業があってそれぞれ協働せよという命を受けたとき、どうしても自分が所属している会社のことを中心に考えてしまうものです。何かのプロジェクトについて考えるとき、ミーティングで一緒に考えてきたとしても、その議案を持ち帰ってまたそれぞれの企業内で相談するという事態になります。しかし、1つの会社に統合すると帰るところが1つになりますから、おのずとまとまっていくのです。欧州での2つの会社の統合を行ったときもその経験をしました。流れをコントロールさえすれば自然に流れていきます。この流れを方向付けするのが難しいのですが、トップから明確に繰り返し戦略や方向性のメッセージを伝えていくことが大切です。すべてを向かうべき方向に設定していかなくてはなりません。今回のグローバル事業再編のミッションは大変ですがとても楽しくやりがいのある仕事です。もともとポジティブに考えるのが信条ですから、あまり悩むことはなく良い方向にしか進まないと考えています。

◆**これまで受け継がれていたDNAに加えて新しい伝統が築かれるときなのですね。**

加えて重要なのはパートナーリングです。NTTは歴史的に、「自分で何でもやりたい」「自分たちのつくったものを売りたい」という感覚を持った人が多い会社です。もちろん自前の技術や強みを持ってサービスを差別化していくことは極めて重要です。しかしながら、すべてを自社で手掛けるのではなく、優れたシステムやサービスを持った企業や人としっかりとパートナーリングして、エコシステムを築き、ソリューションを提供していくスタイルにしないと、ビジネス市場で取り残されてしまいます。競合すると考えられる企業でも、実際には競合する分野は一部分であり、別の側面から見たら手を組んだほうが良い場合もあります。「敵の敵は味方」というように、競合する企業と手を組んでビジネスを発展させるような柔軟な姿勢も大切だと思います。世の中に良いものが出てきたときに、それと同じことを後追いでやっていると手遅れです。自分たちのリソース、投資できるお金も限られていますので、すべてに自前主義の姿勢を貫くことはできません。繰り返しますが、自分たちがめざす方向、自らがすべきことはこれだと定め、同時に世の中にある優れたものを活用してサービスを提供していかないと私たちのビジネス市場では勝ち残っていきません。

この考え方はだいぶ社内に浸透してきましたが、さらに加速させたいと思っています。しかし、明確なビジョンを

持って取捨選択をしないと舵切りを誤ってしまいます。トップに課せられているのはこの裁量です。パートナーリングが重要だと話しましたが、対極にあるのが自分たちの技術をどうやって活かすかの考え方です。他社の技術を売るだけでは我々の存在意義がありません。確たる技術を持っていないと自分たちの強みが出せませんし、パートナーリングも実現しません。幸いにも私たちNTTには研究所で開発した技術があります。この技術を活かして、それを含んだソリューションを今まで以上に提供していかなくてはなりません。

## 成長のキーワードはスピード、アジャイル、そして、ポジティブ

### ◆副社長が考える研究所のあり方、そして期待を寄せている技術を教えていただけますか。

前職でクラウドサービスを手掛けていたこともあり、クラウド関連の話をさせていただくと、例えばデータの秘匿化や秘密計算といった研究所のセキュリティ関連技術には期待を寄せています。クラウドサービスを利用されるお客さまもデータのセキュリティには高い関心を持たれていますので、我々の強みの1つとしてサービス化を実現させたいと思っています。弊社の技術は世界的に競争力が高いですし、研究所も先駆的な技術を携えています。研究者の方にはどんどん新しい技術をスピーディに世の中に出してほしいと思っています。完璧な状態ではなくても良いので、新しいアイデアを早く商用として実際に使えるかたちにしていただきたい。完璧を求めると時間がかかって機を逸してしまいますから、ある程度できたら世の中に出して、フィードバックを受けながら次のステップを研究開発するという、いわゆるアジャイルな研究開発で臨んでいただければとてもありがたいです。



### ◆社員の皆さんにも一言お願いできますか。

NTT ComをはじめNTTグループには非常に優秀な社員が数多くいます。会社として、まだその人材を十分に活かできていないとも思っています。1人ひとりがもっと大きな仕事、責任のある仕事を担えるような体制、環境にしたいですし、皆さんにも自発的に動いていただきたいと思っています。もしかしたら、年功序列やヒエラルキーを意識している人がいるかもしれませんが、私たちは年齢や役職に関係なく、能力のある人、やる気のある人にチャンスを与えたいし、存分に実力を発揮できるような環境を提供したいと考えています。1人ひとりが今以上に、もっと活動の範囲を広げ、責任も持った仕事に臨むことになれば、とてつもないパワーを生み出すのではないかと期待しています。

それから、海外にいる優秀な社員も、国籍を問わず多いので、これから彼らが活躍できる環境をもっと考えていきたいと思っています。

(インタビュー：外川智恵／撮影：大野真也)

## インタビューを終えて

趣味はゴルフと旅行という森林副社長は、ここ最近日本を10年ほど離れていたこともあり、海外旅行よりも国内旅行を楽しんでいらっしゃるそうです。最近では金沢までカニを食べに行かれたとか、「旅行に行くとりフレッシュですよ。随分前に訪れたことがある金沢もまるで初めてのよう新鮮でした」と、旅の思いを馳せるようにゆっくりと語られました。食べ物や景色を楽しまれている様子を伺おうとすると「そこにゴルフが入ると最高なのですけれどね」と、休暇でさえもポジティブに挑まれている発言が飛び出しました。ゴルフのキャリアは30年以上。奥様とご一緒に、かつての職場のメンバーや海外勤務のときにお付き合いをしていた企業のトップの皆様とのコンペ等、多くの方々との交流の場としてもゴルフが使われているようです。「行けるものなら毎週ゴルフには行きたいですね」と森林副社長。公私とも何事にもポジティブに臨まれるお姿に、人生を謳歌する楽しみを教えていただいたひと時でした。



# 将来の大容量通信イ 超高速通信技術

超高速光通信

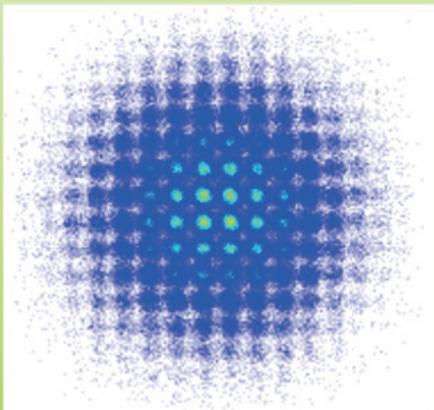
超高速イーサネット

非線形光学

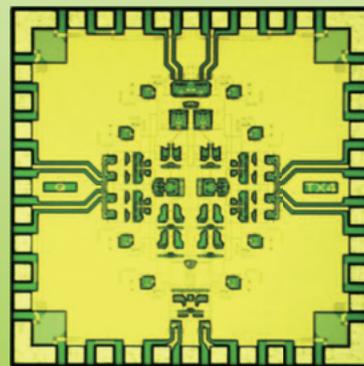
帯域ダブル技術

OAM多重ミリ波伝送

増大する通信需要に対して通信ネットワークを大容量化していくには、それを支える無線通信システム・光ファイバ通信システムにおいて、個々の伝送路の特性を最大限に引き出すための最新のデジタル変復調技術、デジタル信号処理を低減する光増幅中継処理技術、超高速フロントエンド集積技術、空間多重化技術等の密な連携が必要になる。本特集ではNTT研究所が取り組んでいる各種技術を紹介する。



シャノン限界に迫る信号点シェーピング技術を適用した超高速256 QAM光信号



シンボル速度100 Gbaudを超える電気信号生成を実現する超広帯域アナログマルチプレクサ回路

超高速通信技術

# インフラを支える

- 将来の大容量通信インフラを支える超高速通信技術** 10  
将来の需要予測を考慮し、光ファイバ通信、無線通信それぞれにおいて、搬送波当り、現在の100倍以上の1 Tbit/sを超える超高速通信の実現をめざした研究開発状況を紹介する。
- デジタル信号処理と回路技術を融合した超高速光通信技術** 16  
超情報化社会の基盤インフラとなる光ネットワークの実現に向け、デジタル信号処理と高速回路技術を融合した超高速光伝送技術を紹介する。
- 低雑音高出力パラメトリック増幅中継技術** 22  
伝送距離の制限緩和をめざすアプローチとして、低雑音増幅ならびに非線形歪み補償の可能性を持つ光パラメトリック増幅中継技術を紹介する。
- 超100 Gbaud光伝送を可能とする超高速光フロントエンドデバイス技術** 27  
高シンボルレート光伝送の実現に向けた課題解決のためにNTT研究所で取り組んでいる超高速光フロントエンドデバイス技術の最新成果を紹介する。
- テラビット級無線伝送をめざす大容量OAM多重伝送技術** 32  
28 GHz帯を用いたOAM多重伝送の実験において、世界初の120 Gbit/sのミリ波無線伝送に成功したOAM多重伝送技術について紹介する。

# 将来の大容量通信インフラを支える超高速通信技術

引き続き増大する通信需要に対して通信ネットワークを大容量化していくには、それを支える無線通信システム・光ファイバ通信システムにおいて、個々の伝送路の特性を最大限に引き出すための最新のデジタル変復調技術や伝送路の特徴を活かした種々の超高速フロントエンド集積技術、並列化技術を駆使した構成・設計が必要になります。本稿では、将来の需要予測を考慮し、光ファイバ通信、無線通信それぞれにおいて、搬送波当り、現在の100倍以上の1 Tbit/sを超える超高速通信の実現をめざした研究開発状況を紹介します。

みやもと ゆたか<sup>†1</sup> よしの しゅういち<sup>†2</sup>

宮本 裕 / 吉野 修一

おかだ あきら<sup>†3</sup>

岡田 顕

NTT未来ねっと研究所<sup>†1</sup>

NTT未来ねっと研究所 所長<sup>†2</sup>

NTT先端集積デバイス研究所 所長<sup>†3</sup>

## 大容量通信ネットワークの発展と超高速通信技術の適用領域

近年では、PCやスマートフォン等を通じた検索、動画視聴、電子決裁など日常生活になくてはならない通信サービスが世界中に普及し、それを支える大容量通信ネットワークは私たちの生活において欠くことのできない基盤になっています。モバイル通信では、第5世代移動通信システム（5G）の2019年度からの商用化開始に向けて、最大20 Gbit/sに至る広帯域の通信、自動運転や工場の自動化等をはじめとする低遅延の通信の実現に向けた精力的な取り組みが進んでいます。また、半導体・センサ技術の飛躍的な進歩によるIoT（Internet of Things）技術の普及により、さまざまな端末からの膨大なデータを蓄積し、機械学習やAI（人工知能）といった新技術により、従来では不可能であったきめ細かい気象予測や予防医療等の新しいアプリケーションも期待されています。これからの通信ネットワークは、そのような新たなアプリケーションの創造を支え、これまでよりさらに私たちの身近な社会基盤として、空気のようになく

てはならないインフラとして、ますます重要性が高くなると考えられます。

通信ネットワークの大容量化・高度化を支える超高速通信技術の適用領域を図1に示します。無線通信を用いた超高速通信技術としては、コアネットワーク用の固定マイクロ波通信に利用するデジタル変復調技術が飛躍的な発展を遂げ、光ファイバ通信が本格的な

実用化が始まる1980年代まで、長距離コアネットワークを支えていました<sup>(1)</sup>。これらの技術はさらなる発展を遂げ、有線ケーブルの敷設が難しい区間の経済的なリンクシステムとして現在でも発展を続けています。また、無線LANや携帯電話を中心とする無線・移動体通信の大容量化を支える基盤技術は、この四半世紀に飛躍的な発

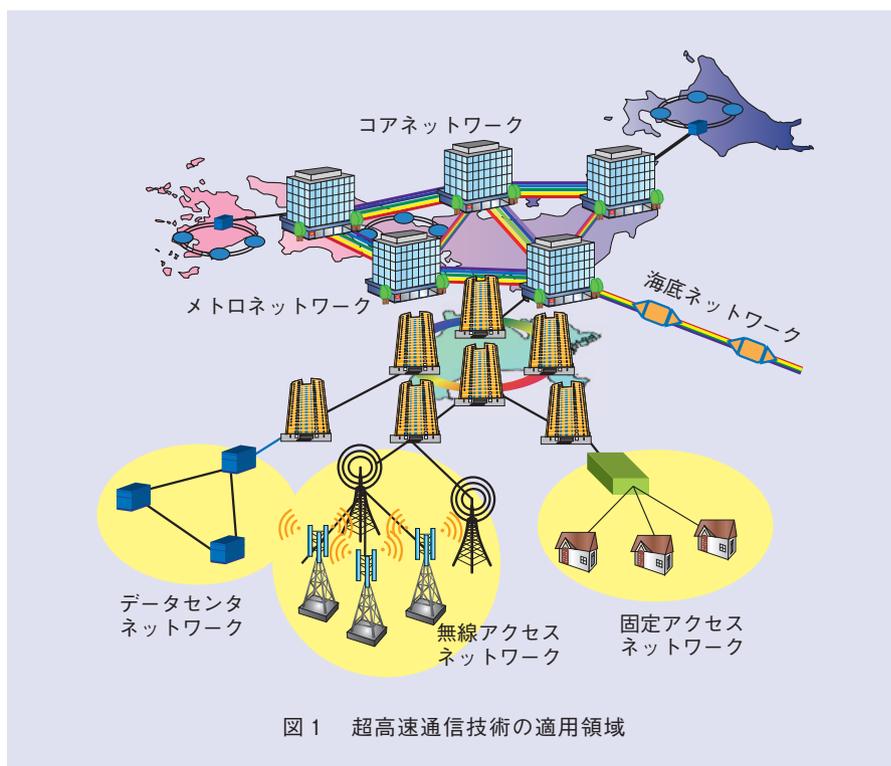


図1 超高速通信技術の適用領域

展を遂げ、現在では、PCやスマートフォン（4G）等によるモバイルブロードバンドサービスとして1 Gbit/sを超えるスループットの無線アクセスが世界中で普及しています。さらには、次世代の5Gにおいては、ミリ波等の新しい搬送波周波帯の特徴を活かした無線アクセスの高速化に加えて、自動運転や工場の自動化等の実現を想定し、高い信頼性と低遅延性の両立も求められています。

一方、光ファイバ通信を用いた超高速通信技術は、1980年代から実用化が始まり、この四半世紀で飛躍的な発展を遂げました。現在では、1万km以上の大陸間横断中継システム、国内の長距離コアネットワーク、メトロネットワーク、アクセスネットワークに至るまで、広く普及しています。最近では、データセンタ（DC）間ネットワーク、DC内ネットワークや、携帯電話の基地局を結ぶバックホール等の大容量化にもなくてはならない技術となっています。これまで、光ファイバ通信システムでは、もっぱら1本の光ファイバに光の通り道（コア）が1つで、かつ導波モードが1つになるよう設計されたシングルモードファイバ（SMF）が、基本の伝送媒体として用いられてきました。現在ではチャンネル（波長）当り100 Gbit/s容量の100チャンネル相当の波長多重伝送により、ファイバ1本当り10 Tbit/sを超える長距離ネットワークが実用化されています<sup>(2)</sup>。また、DC間ネットワークにお

いても、近年では200 Gbit/s級のチャンネル容量を持つ低電力かつ小型な超高速光通信の実用化が進んでいます<sup>(3)</sup>。

### 超高速通信技術のアプローチと技術課題

次に、無線通信、光ファイバ通信に共通した超高速通信技術のアプローチと技術課題について紹介します。システムの通信容量Cは、よく知られたシャノンの定理によって以下の式によって与えられます。

$$C = N \cdot B \cdot \log(1 + \text{SNR})$$

ここでNはチャンネル多重数、Bは信号帯域、SNRは信号対雑音比を表しています。通信システムの通信容量Cを向上させるには、式に示すとおり、大別して3つのアプローチがあります。

- ① アプローチ1は、チャンネル当りの信号帯域Bを拡大しシンボルレートの高速化を図ることです。
- ② アプローチ2はSNRを向上させるためにシステム低雑音化と信号パワーの向上を図り、2値変調に比較して多値振幅位相（QAM）\*信号等をはじめとする効率的デジタル変復調技術を採用することです。
- ③ アプローチ3は周波数あるいは空間の自由度を用いた多重化（Nを増加）を行うことでチャンネル容量を向上できます。

無線通信も光ファイバ通信も、適用領域とその時々の実用化可能な要素技術を用いて上述したいくつかのアプ

ローチを組み合わせることでチャンネル速度の高速化を進めています。

主として見通し内ミリ波無線通信と光ファイバ通信において上述した3つのアプローチ軸を組み合わせた研究開発状況と今後の技術トレンドを図2に示します。ミリ波無線通信ならびに光ファイバ通信で同じ偏波多重4値位相変調（QPSK）符号により、1 Tbit/sを超える通信容量を実現するには、例えばアプローチ1のシンボルレートの高速度のみではシンボル速度を300 Gbaud以上にすることが必要があり、フロントエンドデバイス実装や既存のDSP（Digital Signal Processing）回路のアナログ・デジタル変換回路（ADC）、デジタル・アナログ変換回路（DAC）のインタフェース速度の観点から現状の技術レベルの延長では実現が難しいことが分かります。そこで同じ帯域でより高効率な伝送を実現可能な多値QAM変復調信号等を用いるアプローチ2や、周波数軸や空間軸におけるサブキャリア多重により、シンボル速度を実用的な範囲に抑えつつ、所望のデジタル変復調性能を実現するためのデジタル信号処理技術を実現することが求められます。

最近の超高速デジタル変復調技術を用いた通信システムの具体例として、光ファイバ通信システムにおけるデジタルコヒーレント光送受信回路構成例

\* QAM：信号電界の振幅と位相を複数の信号レベルで変調することで多値符号を伝送する高効率デジタル変調方式。

を図3に示します<sup>(2),(3)</sup>。本システムでは、約100チャンネルの100 Gbit/s信号が波長多重伝送され、光増幅中継器により一括増幅されながら1000 km級の長距離伝送を実現します。個々の波長多重チャンネルの光送受信機器では、100 Gbit/sの情報ビット列を、光ファイバでの長距離伝送に適した偏波多重QPSK光信号を変復調することで長距

離伝送を実現しています。

ここで光送信器は、送信側DSP回路部と光送信フロントエンド回路部から構成され、主信号半導体レーザ(LD)から発生した同じ波長の個々の直交する偏波軸の光搬送波信号をシンボル速度32 Gbaud級のQPSK符号で変調することで1偏波当たり50 Gbit/s(符号化率 $R = 5/6$ の誤り訂正符号化

を適用しグロス容量で約64 Gbit/s)、両偏波で100 Gbit/sの超高速光信号チャンネルを生成しています。現在では、変調方式を16QAMに変更することで、同じシンボル速度でチャンネル容量を2倍の200 Gbit/s容量まで拡大できる技術が実用化されています。

光受信器では同様に受信側DSP回路部と光受信フロントエンド回路部から構成され、ほぼ数GHz内の周波数オフセット量を持つ局発可変波長LDを用いてイントラダイナ受信を行い、光ファイバ伝送中に生じた線形な波形歪の除去、偏波多重信号の分離、QPSK(16QAM)信号の復調、誤り訂正復調化を経て元の情報ビット列を受信します。この時、DSP内のデジタル信号処理回路部とDAC/ADC部のインターフェースでは、8 bit量子化、サンプリング速度2サンプル/シンボル、誤り訂正符号の符号化率 $R = 5/6$ を考慮するとチャンネル容量100 Gbit/sの場合は、DSP回路内のスループットが2 Tbit/s ( $\sim 8 \times 2 \times (6/5) \times 100$  Gbit/s)となり、膨大な並列デジタルデータ信号のリアルタイムデジタル信号処理が実現されています。

このことから、経済化・小型化に適した実用的なDSP回路を実現するためには、DAC/ADC部とデジタル信号処理回路部を大規模集積回路1チップに集積化することが望ましいことが分かります。さらに、DSP回路部とフロントエンド回路部間では、4並列の広帯域なアナログ電気信号〔各偏波軸

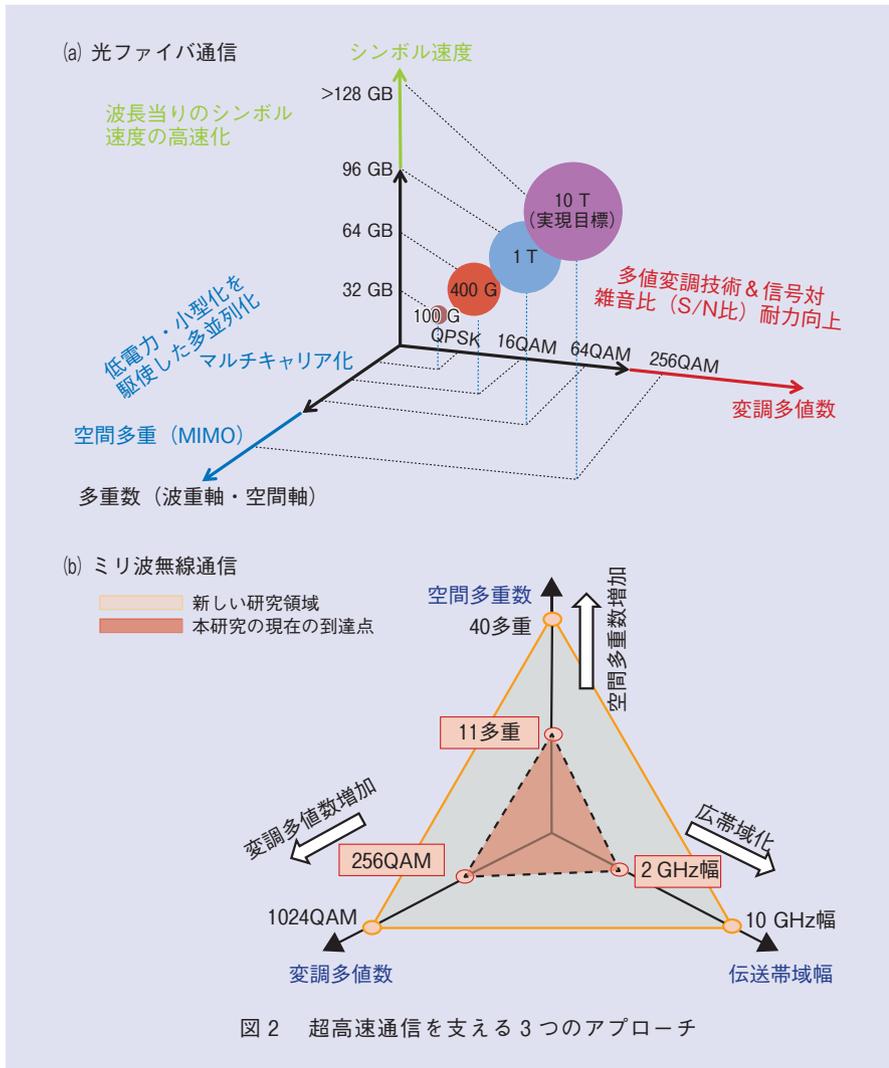


図2 超高速通信を支える3つのアプローチ

(X, Y) につき直交信号成分と同相信号成分] のお互いのスキューを抑えつつ線形な電気信号のインターコネクションを実現することが、高品質な超高速デジタル変復調に必須となります。

### 超高速通信基盤技術の要素技術

本特集では、1 Tbit/s容量を実現す

る超高速通信基盤技術の4つの要素技術(図4)に着目し、それぞれの視点から現状の研究開発の状況を概観し、今後の展望を紹介します。

### ■デジタル変復調回路の超高速技術

デジタル変復調回路の超高速技術については、光ファイバ通信システムと無線通信システムに共通の普遍的な技

術課題です。本特集記事『デジタル信号処理と回路技術を融合した超高速光通信技術』では、高速化の要求が特に厳しい光ファイバ通信システムを例に、1波長当り1 Tbit/s容量を超える超高速デジタル変復調回路の必要な機能とその実現性について最新の成果を解説します。一般に、多値QAMデジタル変復調は多値度の増加とともに高

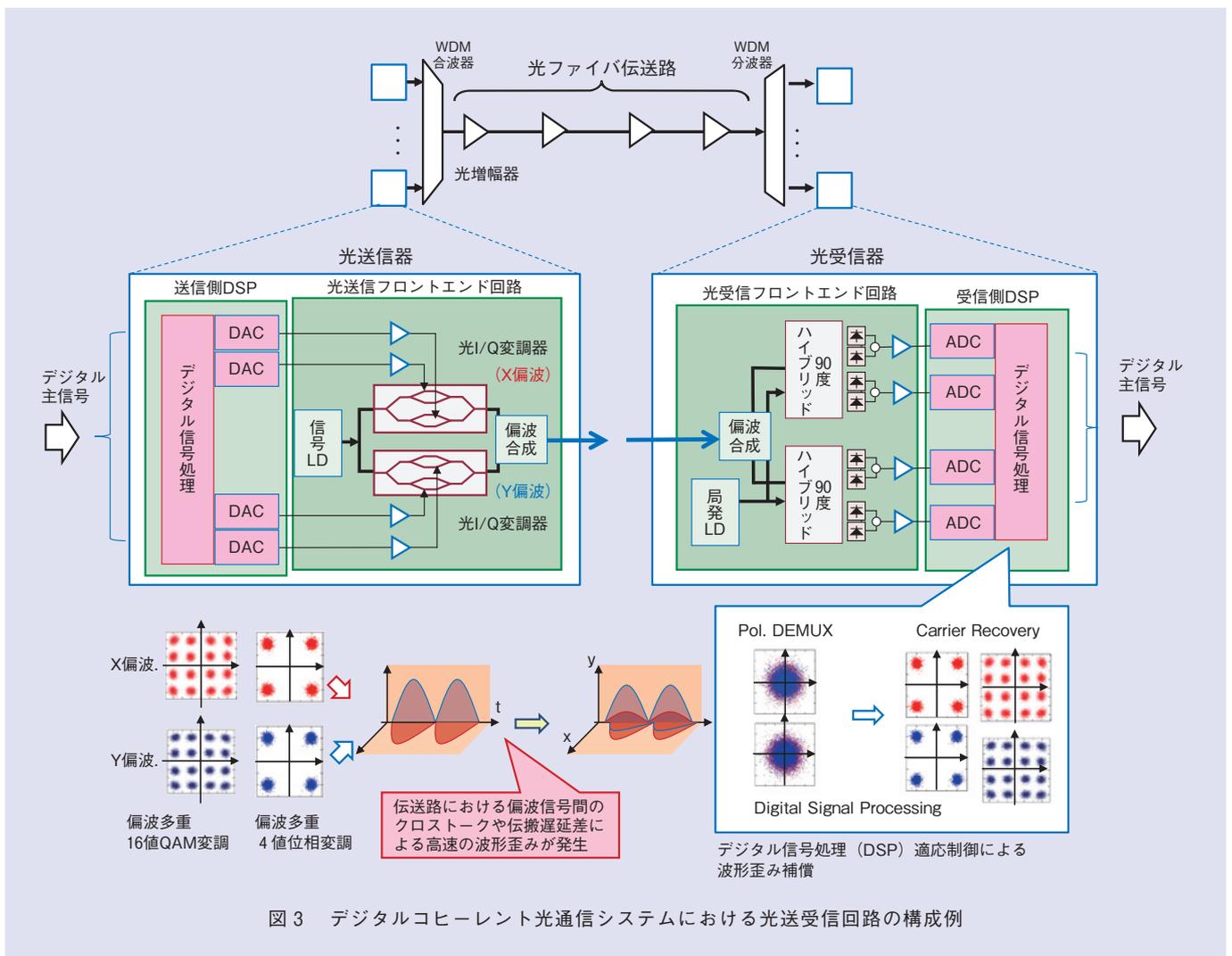


図3 デジタルコヒーレント光通信システムにおける光送受信回路の構成例

いSNRを必要とし、送受信回路全体での精緻な構成技術が必要となってきます。ここでは、多値QAMデジタル変調の特徴を活かした新しい符号化変調技術の有効性について解説します。

**■低雑音高出力パラメトリック増幅中継技術**

低雑音高出力パラメトリック増幅中継技術は、光ファイバ通信システムならではの光の波の性質を活用した新しい光増幅中継技術であり、多値QAM信号伝送に必要な光増幅中継システムの低雑音化や、高速化に伴って増大する伝送中の波形歪を光信号処理により補償することで必要なデジタル信号処理量を大幅に低減できる技術として期待されています。

CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) のFET (Field

Effect Transistor) のゲート長数nmサイズの微細化領域 (シリコン原子数10個程度) では、これまでのようなトランジスタ性能の高速化や低電力化の技術トレンドが飽和するといった技術予測もあり、チャンネル速度の高速化とともにDSPの信号処理量を抑えるための新たなシステムアーキテクチャや要素技術が必要とされています。光増幅中継ノードで光信号のまま多チャンネルのコヒーレントな光信号処理を行うパラメトリック増幅中継は、光増幅時の低雑音化を実現するとともに波形歪補償を行い、光送受信回路内で必要なデジタル変復調時の信号処理量を大幅に低減し、システム全体の消費電力を下げる事が可能となる基盤技術として期待されています。本特集記事『低雑音高出力パラメトリック増幅中継技

術』ではNTT研究所で開発を進めてきた分極反転ニオブ酸リチウム結晶 (PPLN) を用いた低雑音高效率パラメトリック光増幅中継技術、および最近の成果を紹介します。

**■超高速光フロントエンド集積技術**

本特集記事『超100 Gbaud光伝送を可能とする超高速光フロントエンドデバイス技術』では、主に光送受信装置の高性能化・小型集積化の実現に向け、搬送波とベースバンド信号帯域の光・電気変換を効率的に行うためのフロントエンド回路とデジタル信号処理回路との間の超高速デバイス・インターコネクション実装技術を紹介し、フロントエンド回路とデジタル信号処理回路間の安定な超高速インターコネクションの実現をするために、フロントエンド回路内にアナログ多重化機能を具備した集積化フロントエンド回路・実装技術の有効性を解説します。シンボル速度が100 Gbaudを超える超高速領域においても、同軸ケーブルコネクタ等の帯域限界を超えて、波形整形ならびにスペクトル整形された多値超広帯域アナログ電気信号と光信号間を歪なく安定に変換するための光ファイバ通信光フロントエンド集積技術についての最新の成果を紹介します。

**■軌道角運動量モード多重による超高速化技術**

本特集記事『テラビット級無線伝送をめざす大容量OAM多重伝送技術』

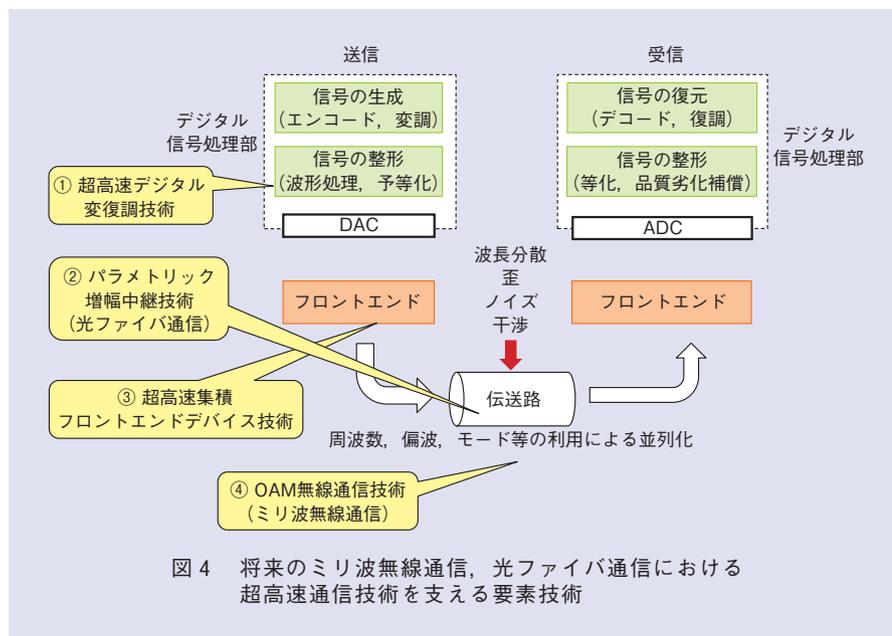


図4 将来のミリ波無線通信, 光ファイバ通信における超高速通信技術を支える要素技術

では、無線通信における新たなモード多重MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) 技術により、ミリ波搬送波帯において1 Tbit/s級の見通し内無線通信を実現するための空間多重重要素技術について紹介します。光ファイバ伝送においては、既存のSMFの物理限界を超えた大容量化に向けて、アプローチ3の空間多重光通信技術の検討、および近年、直交する複数の導波モードを用いたモード多重光通信技術の検討が進んでいます。最近では、MIMO-DSP技術の適用により6000 kmを超える長距離伝送の可能性も示されつつあり、アプローチ3のさらなるスケラビリティが注目されています<sup>(4)</sup>。

一方、伝送路が自由空間である無線通信では、一般には光ファイバのような直交導波モードが定義できませんが、最近、新たな電磁波の空間的な直交性として軌道角運動量 (OAM: Orbital Angular Momentum) を用いた空間多重無線通信が提案され、5G・ポスト5G等のミリ波を用いたバックホール無線回線の高速化技術の候補として注目されています<sup>(5)</sup>。従来の経路差を用いたMIMO空間多重技術に加え、さらに電磁波の持つ軌道角運動量の直交性を利用して空間多重度のさらなる向上を実現する最新技術について紹介します。これらのモード多重空間多重通信の実現には、各モードを分離するための大規模信号処理を有限な集積回路規模で実現するデジタル信号処理技術とともに、各伝送路 (自由

空間、光ファイバ等) の高速チャネル変動に安定に追従する信頼性を両立するDSPアーキテクチャ技術が重要となり、今後の進展が期待されます。

### 今後の展開

本稿では、将来の通信ネットワークの大容量化を支える超高速通信技術の現状の課題と今後の動向について紹介しました。時々の実用化時点で利用可能な大規模集積回路1チップ内に経済的に収容可能なデジタル信号処理量の制限の下で、高効率なデジタル信号処理の高度化は今後もさらなる発展が期待されます。ミリ波無線通信では、自由空間における電磁波の持つ軌道角運動量の自由度を導入した空間多重技術により、1 Tbit/s級のバックホール等に適用可能な超高速無線リンクの実現が期待されます。また、光ファイバ通信では、集積光フロントエンド技術や光パラメトリック増幅技術、さらには光ファイバ通信に適した空間多重技術を適切に組み合わせ、デジタル信号処理量の制限やSMFの物理限界を緩和することにより、1 Tbit/sを超える超高速チャネルの長距離伝送の実現が期待されます。これらの最新技術のタイムリーな研究開発・実用化により、Tbit/s超級の超高速信号を誰でも容易にハンドリングできるような時代の実現をめざします。

#### 参考文献

- (1) 小椋山・小牧：“64/256QAMデジタルマイクロ波伝送方式,” 信学誌, Vol.68, No.8, pp.889-895, 1985.

- (2) 鈴木・宮本・富澤・坂野・村田・美野・柴山・渋谷・福知・尾中・星田・小牧・水落・久保・宮田・神尾：“光通信ネットワークの大容量化に向けたデジタルコヒーレント信号処理技術の研究開発,” 信学誌, Vol.95, No.12, pp.1100-1116, 2012.
- (3) 木坂・富澤・宮本：“Beyond 100 G光トランスポート用デジタル信号処理回路 (DSP),” NTT技術ジャーナル, Vol.28, No.7, pp.10-14, 2016.
- (4) K. Shibahara, T. Mizuno, L. Doowhan, Y. Miyamoto, H. Ono, K. Nakajima, S. Saitoh, K. Takenaga, and K. Saitoh: “DMD-Unmanaged Long-Haul SDM Transmission Over 2500-km 12-core × 3-mode MC-FMF and 6300-km 3-mode FMF Employing Intermodal Interference Cancelling Technique,” OFC 2018, Th4C.6, San Diego, U.S.A., March 2018.
- (5) D. Lee, H. Sasaki, H. Fukumoto, Y. Yagi, T. Kaho, H. Shiba, and T. Shimizu: “An Experimental Demonstration of 28 GHz Band Wireless OAM-MIMO (Orbital Angular Momentum Multi-input and Multi-output) Multiplexing,” IEEE VTC 2018-Spring, Porto, Portugal, June 2018.



(左から) 宮本 裕 / 吉野 修一 / 岡田 顕

ネットワークを駆使した将来の新サービスや産業創生を支える社会基盤を実現するべく、NTT研究所では超高速通信技術のタイムリーな研究開発・実用化を通して、今後の大容量通信ネットワークのさらなる発展を支えていきたいと考えています。

#### ◆問い合わせ先

NTT未来ねっと研究所  
 ノンパティフオトニックネットワークセンター  
 TEL 046-859-3011  
 FAX 046-859-5541  
 E-mail pt-hosa-mirai@lab.ntt.co.jp

# デジタル信号処理と回路技術を融合した超高速光通信技術

本稿では、高度な情報化社会を支える光トランスポートネットワークにおいて基盤技術である超高速光通信技術を紹介します。データトラフィックの多くを占めるイーサネットは、400 Gイーサ（400GE）が標準化され、1 Tbit/sを超えるような信号速度の標準化議論も開始されています。本技術は、イーサネットに代表される高速クライアント信号を光ネットワーク上で経済的に伝送するための技術です。高度なデジタル信号処理と超高速回路技術を融合することにより、光信号の速度とその品質を大きく向上させることができ、1チャンネル当たり1 Tbit/sを超えるような経済的な超高速光通信の実現が期待されています。

こばやし たかゆき はまおか ふくたろう  
**小林 孝行 / 濱岡 福太郎**  
 なかむら まさのり やまざき ひろし  
**中村 政則 / 山崎 裕史**  
 ながたに むねひこ みやもと ゆたか  
**長谷 宗彦 / 宮本 裕**

NTT未来ねっと研究所

## 超高速光通信技術

超高速光通信技術は、光ネットワークの伝送性能を左右する基盤技術です。基幹ネットワークにおいては、2017年に標準化が完了した400Gイーサ（400GE）などの超高速クライアント信号を、デジタルコヒーレント伝送技術<sup>(1)</sup>に基づいた高速光チャンネルに多重収容し、さらに複数の高速光チャンネルを波長軸に多重すること（WDM: Wavelength Division Multiplexing）で長距離・大容量光ネットワークを実現しています。一方、SNSや動画配信などさまざまなサービスの基盤となっているデータセンタにおいて、内部におけるサーバ間のデータ伝送や、複数のデータセンタ拠点間の通信需要が非常に高まっています。基幹網に比べ、伝送距離は短距離となりますが経済性が求められており、シンプルな送受信機構成で実現可能な強度変調・直接検波（IM-DD: Intensity Modulation Direct Detection）方式によって、高速データ通信が実現されています。

## 光信号高速化の技術課題

1チャンネル当たり100 Gbit/sおよび

400 Gbit/s級のクライアント信号を収容可能な光通信技術が実用化されています<sup>(2)</sup>。イーサネットの標準化においては、次の伝送速度規格の議論が開始されており、その伝送速度の候補として800 Gbit/sや1.6 Tbit/sなどが挙がっています。将来的に、光ネットワークにおいては、1チャンネル当たり1 Tbit/sを超える高速なクライアント信号を収容することが期待されています。光信号の高速化を実現する3つの軸を図1に示します。従来のIM-DD方式では光の強度（on/offの2値信号）

を利用していましたが、図2に示すようなデジタルコヒーレント技術によって、光の振幅・位相を利用して1パルス当たり4値以上の信号を伝送可能になりました。加えて、送受信器内でデジタル信号処理を行うことにより、偏波の分離や光ファイバ内で生じる波長分散や偏波モード分散による波形歪みを等化・補償することが可能になり、伝送可能な情報量と伝送距離が飛躍的に向上しています。現在、実用化されている1チャンネル当たり100 Gbit/s級の光信号は、32 Gbaudの4値のQPSK

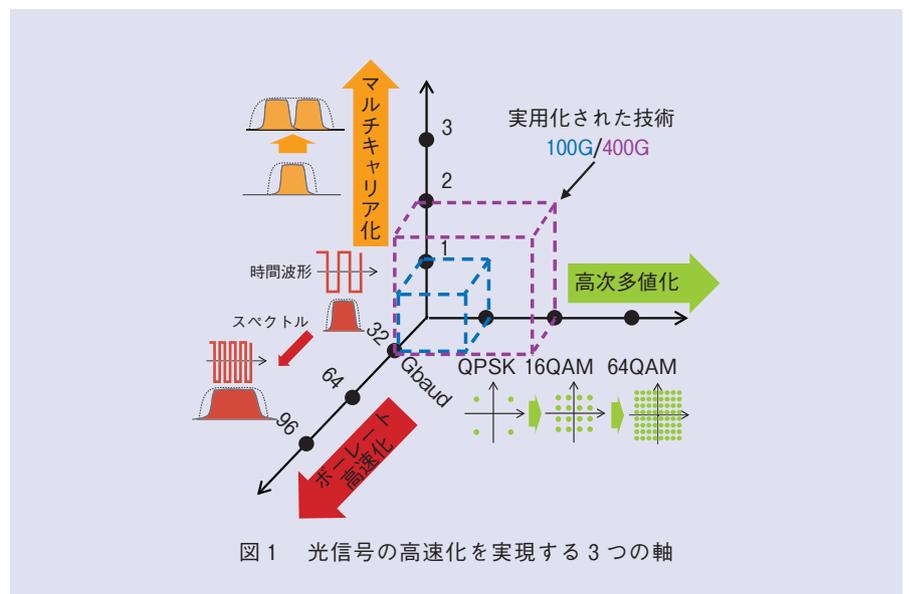


図1 光信号の高速化を実現する3つの軸

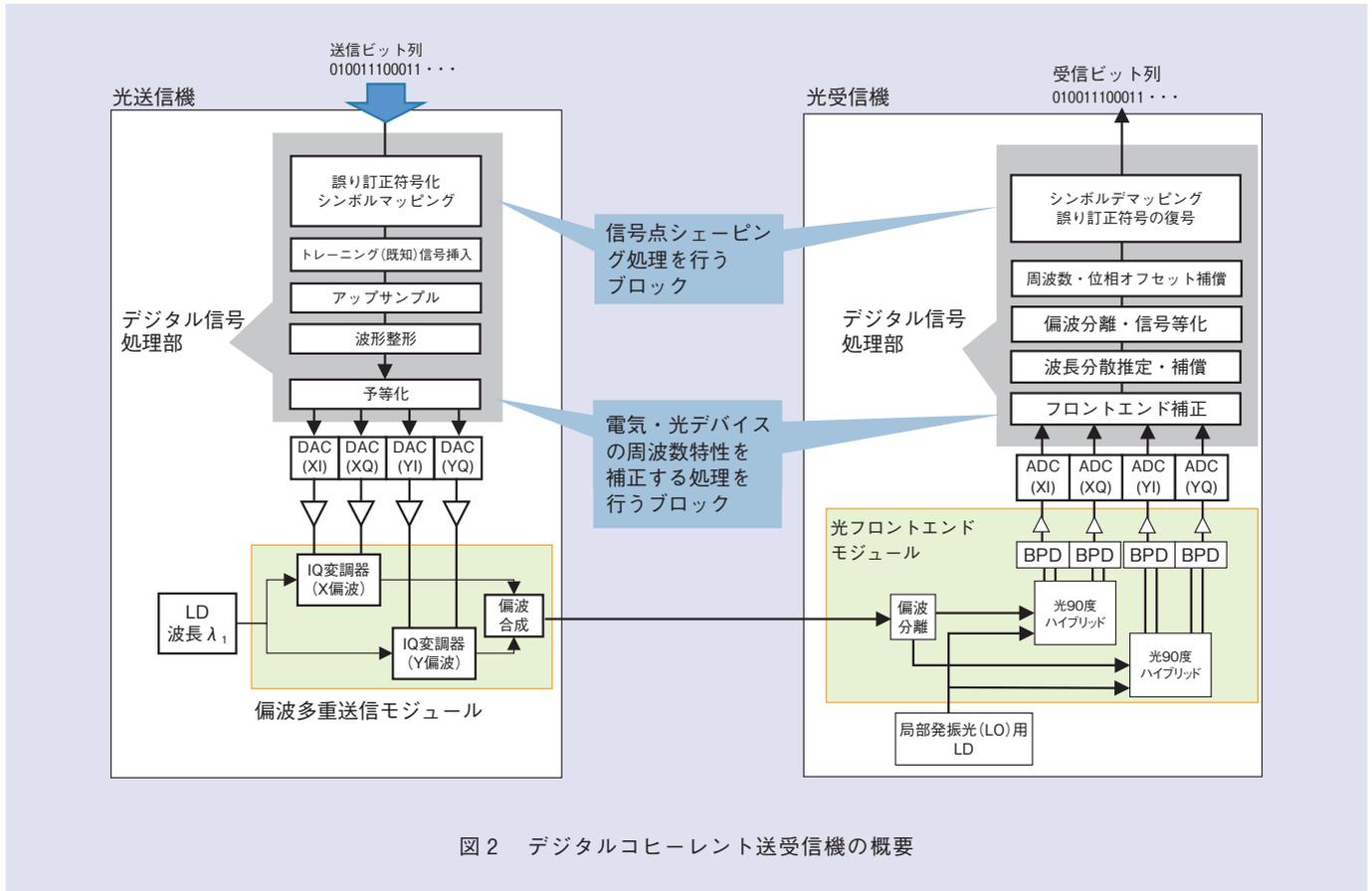


図2 デジタルコヒーレント送受信機の概要

(Quadrature Phase Shift Keying) 信号を偏波多重することによって実現されています。また、400 Gbit/s級の光信号は、32 Gbaudの16QAM (Quadrature Amplitude Modulation)<sup>\*1</sup> 偏波多重信号を2キャリア(波長)束ねて1つの伝送チャネルとすることで実現されています。さらに、光信号を高速化するためには次の3つの方向性が考えられます。

■ボーレートの高速化

ボーレート(光パルス)の速度を高速化していけば、それに比例して1波長当りの伝送速度は向上します。同じ多値度の信号であれば、ボーレートを高速化しても過剰な受信感度劣化はあ

りませんが、高速なボーレート信号を送受信するためには、それに対応した高速なDAC (Digital-to-Analog Converter)、ADC (Analog-to-Digital Converter) や変調器ドライバのような電気デバイス、光変調器、BPD (Balanced Photo Detector) 等の光デバイスが必要になります。また、周波数領域では、ボーレートに比例して光信号が占める帯域が広がり、波長多重可能な信号の数が制限されてしまうので、後述する高次多値化と併用しないと伝送システム全体の容量は増加しません。

■高次多値化

信号伝送に用いる光振幅のレベルと

位相の数を増やすことによって、1つの光パルスで伝送可能なビット数を向上させることができます。ボーレートが同じ場合、多値数に応じて伝送速度が対数的に向上しますが<sup>\*2</sup>、多値数が向上するにつれて、DAC/ADCの分解能や線形性などデバイスへの要求条件が高くなり、所要の信号対雑音比(SNR: Signal-to-Noise Ratio)も上昇するため伝送可能な距離が短くなったり、信号歪みに対する耐力も低下し

\*1 QAM: 信号電界の振幅と位相を複数の信号レベルで変調することで多値符号を伝送する高効率デジタル変調方式。  
\*2 対数的な向上: 例えば、4 (=2<sup>2</sup>) 値から16 (=2<sup>4</sup>) 値に多値度を増やすと伝送速度は2倍になりますが、16値から64 (=2<sup>6</sup>) 値に増やしても1.5倍にしかありません。

ます。現在は、正方形の信号点配置を持つQAMが用いられていますが、信号点配置を工夫することによって、所要のSNRを改善することが可能です。

### ■マルチキャリア化

1つのチャンネルを複数の波長（キャリア）の光信号で構成することで、1チャンネル当りの容量をキャリア数に比例して向上させることができます。光ネットワークにおいて論理的な高速チャンネルを構成するのに有効な手法であり、例えば、実用化されている1波長当り200 Gbit/sの光信号を5波長束ねて1チャンネルとすることで1 Tbit/sのチャンネル速度を実現することができます。しかしながら、必要な送受信機の数が増えてしまうため、上述のボーレートの向上や多値化によって、1波長当りの伝送速度を向上させながら、伝送性能や経済性を考慮してマルチキャリア技術を適用する必要があります。

以上から、1チャンネル当り1 Tbit/sを超えるような超高速光伝送の実現には、ボーレートと多値度の向上が重要

であり、高速なデバイスの開発を進めながら、デバイスの要求条件を緩和するようなデジタル信号処理技術や高感度な信号フォーマットが必要になります。

### デバイス性能を最大に引き出すデジタル較正技術と高感度化技術

高速信号を送受信するときに、電気デバイスや光デバイスの帯域が、各々要求条件を満たしていても信号が劣化する場合があります。例えば、図2に示すようにデジタルコヒーレント方式の送信機では、DACは4つ、IQ変調器は各偏波成分用に2つ必要です。受信側では、BPD、ADCそれぞれ4つが含まれています。これらのデバイスやデバイス間の結線部分の特性は製造誤差等が存在しており、すべてが接続された状態の周波数特性が均一になるとは限りません。高ボーレート信号や高次多値信号では、そのような誤差が信号品質に大きな影響を与えます。NTT研究所では、受信側におけるデバイス不完全性のデジタル補正処理に

加え、送信側でデジタル信号処理により送信機内のデバイスの周波数特性やばらつきを超精密に予等化し較正することによって、大幅な信号改善の改善に成功しています。64 Gbaud 64QAM信号の較正前・較正後の光スペクトルを図3(a)に示します。予等化処理によって、光スペクトルが平坦化し、較正前には、分離が難しかった信号点が、図示されているように64点が識別可能な品質まで改善しています<sup>(3)</sup>。

また、多値化による感度劣化に対して、信号の高感度化を信号点配置の観点から検討を進めています。従来では、QPSK、16QAM、64QAMのような多値QAM信号は、すべての信号点が確率的に等しく現れるような信号点配置になっています。多値QAM信号は、送りたいビット列から単純な信号マッピング・デマッピング処理で実現可能ですが、情報理論的な観点からは最適な信号点配置ではありません。最近では、情報理論に基づいて、最適に近い信号点配置を実現可能な、多値QAMの信号点が確率分布を持つように配置

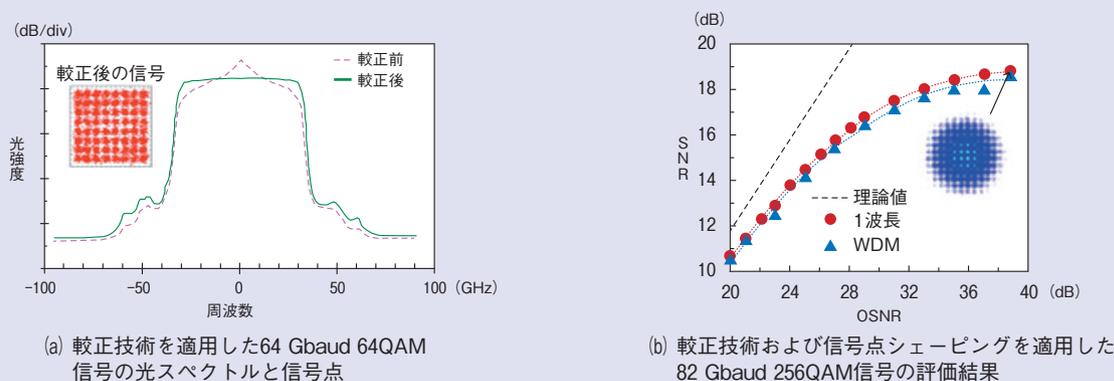


図3 較正技術およびコンスタレーションシェーピングを用いた実験結果

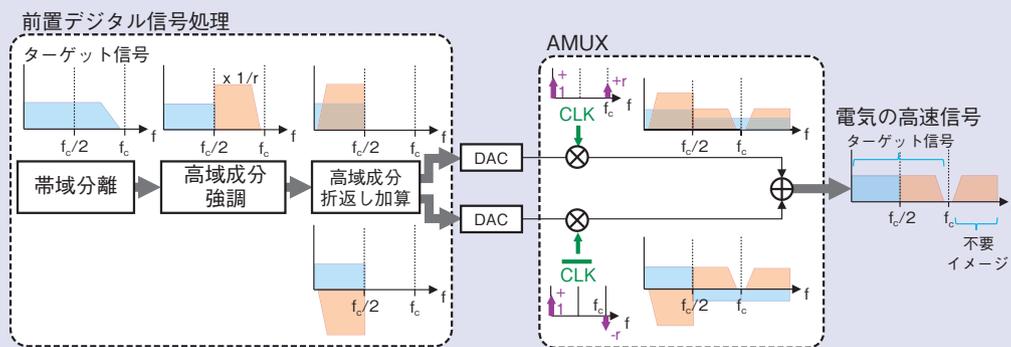
する信号点シェーピング技術が注目されています。専用のマッピング・デマッピング処理が必要となりますが、多値QAMより小さい所要SNRで同じ情報ビットを送ることが可能です。また、ベースとなる多値QAM信号を変えることなく、信号点の確率分布を変化させることで、伝送する情報ビットの数を変化させることが可能なため、変復調のための信号処理アルゴリズムの変更も不要です。NTT研究所では、前述の予等化による較正技術と256QAMベースの信号点シェーピングを適用することで、1波長当り800 Gbit/sの実証実験に成功しています<sup>(4)</sup>(図3(b))。本技術を用いれば、次世代のイーサネット規格候補である800

Gbit/sや1.6 Tbit/sのクライアント信号を1波長ないしは2波長で光ネットワークに収容することが可能になります。

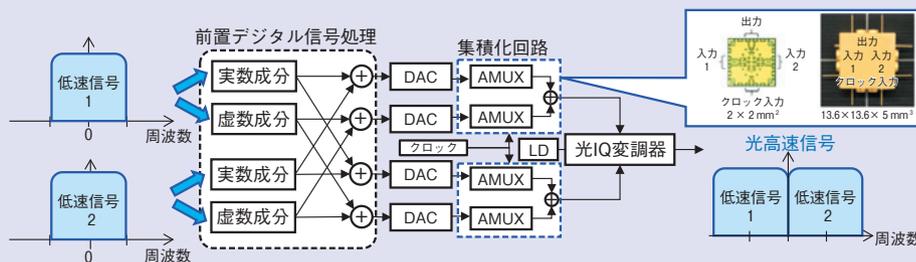
### 高速信号生成のための帯域ダブラ技術

高速な光信号を生成するうえで、重要なデバイスの1つがDACです。DACはデジタル信号処理LSI (Large Scale Integration circuit) と一体集積されますが、Si CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) を用いたDACのアナログ帯域は、現状40 GHz程度になっています。前述の較正技術によってある程度の補正が可能ですが、100 Gbaudを超えるよう

な高ボーレート化に対しては、ボトルネックとなります。NTT研究所では、DACのアナログ帯域を2倍に拡張可能な帯域ダブラ技術を提案しています。本技術は、所望の広帯域信号に対して前置信号処理を施し2つのDACから出力させて、アナログマルチプレクサ回路 (AMUX: Analog Multiplexer)<sup>(5)</sup>によって信号を合成することで、DACのアナログ帯域の2倍の帯域を持つ高速信号を生成することが可能です。私たちは、2種類の帯域ダブラ方式(図4)を提案しており、両方式ともにデジタルコヒーレント伝送技術へ適用し、32 GHzのアナログ帯域を持つDACを用いて超高速ボーレート信号の実証実験を実施しました。



(a) スペクトル折り返し処理を用いた方式



(b) 低速信号の加減算処理を用いた方式

図4 前置デジタル信号処理とAMUX回路を用いた帯域ダブラ技術

図4 (a)のスペクトル折り返しを用いた方式で生成した120 Gbaud信号の伝送実験結果を図5 (a)に示します。1波長当りネットレート<sup>\*3</sup> 600 Gbit/s信号の4000 km級の長距離伝送に成功しています<sup>(6)</sup>。また、図4 (b)の加減算処理による方式では、AMUX回路を2つ集積した回路を試作し、図5 (b)に示すように120 Gbaud QPSK信号の生成に成功しています<sup>(7)</sup>。理論的には、ボーレートの半分の帯域が必要なため、100 Gbaud以上の信号を40 GHz帯域のDACを用いて高品質に生成するのは困難です。本技術によって、既存のDACの帯域を拡張することができ、信号の高ボーレート化が可能です。また、前述の較正技術・高感度化技術を組み合わせることで、マルチキャリア技術を用いずに1波長で1 Tbit/sを超えるような超高速信号伝送の実現もみえてきています。

\*3 ネットレート：光信号として1秒間に伝送されるデータビットを表したもの。

### 超高速光通信技術の短距離通信への適用

データセンタにおけるサーバ間の通信やデータセンタ間のような特に多くのトラフィックが発生する最大数10 km程度の短距離通信向けの光通信技術として、IM-DD方式が、システム構成がシンプルで経済性が高いことから注目されています。現在標準化が完了している400Gイーサネットでは、4値パルス振幅変調 (PAM4: 4-level Pulse Amplitude Modulation) による1波長当り100 Gbit/sの信号を4並列伝送する方式が採用されており、4組の送受信機が必要となります。NTT研究所では、帯域ダブラ技術を超広帯域InP変調器<sup>(8)</sup>と併せて短距離通信に適用し、1組の送受信機を用いて、400 Gbit/sのビットレートで20 kmの伝送に成功しました<sup>(9)</sup>。これは単一の波長および偏波を用いたIM-DD方式としては、世界最高速度となります。その伝送実験結果を図6に示します。本実験では、帯域ダブラ

方式により広帯域な電気信号を生成するとともに、非常に広帯域な周波数特性を持つInP光変調器を合わせて用いることで、電気信号の広帯域性を保ったまま光信号を生成することが可能になりました。また、変調方式としては、DMT (Discrete Multi-Tone) 方式を採用し、256本のサブキャリア信号をデジタル信号処理によって生成し、電気および光デバイスの周波数特性に応じてサブキャリアごとに最適な信号ビットを割り当てることで、ほぼ最適なビット割当を実現しています。例えば、図6 (b)に示すように、SNRが高い6.96 GHzのサブキャリアには64QAM信号を、SNRが低めの79.10 GHzのサブキャリアには、16QAMを採用しています。帯域ダブラ技術と広帯域な変調器の適用によって、高い周波数領域でも16QAMのような多値数の信号を割り当てることが可能になりました。本技術により、1波長当り400 Gbit/sを超える伝送速度を経済性の高い単純な送受信器構成のIM-DD方式によって実現することが期待され

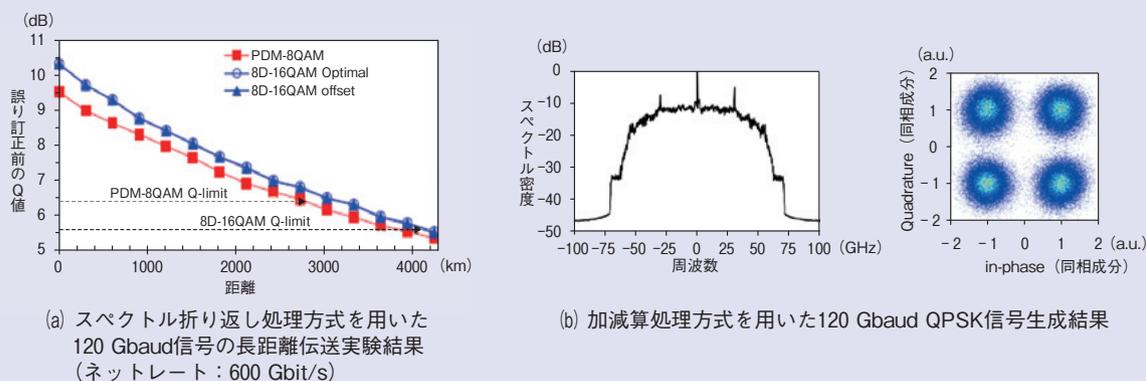
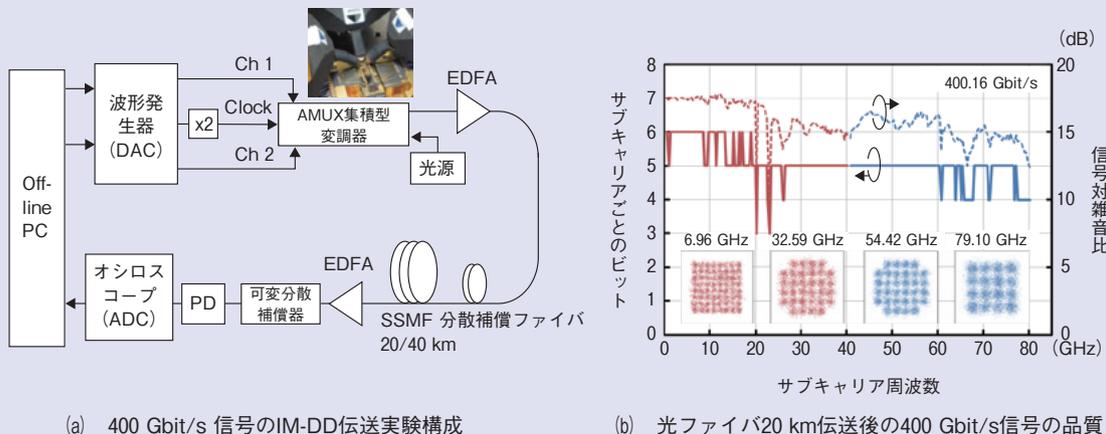


図5 帯域ダブラを用いた高速信号伝送実験



(a) 400 Gbit/s 信号のIM-DD伝送実験構成 (b) 光ファイバ20 km伝送後の400 Gbit/s信号の品質

図 6 DP-AM-DAC技術の短距離通信への応用

ます。

## 今後の展開

本稿では、超情報化社会の基盤インフラとなる光ネットワークの実現に向け、デジタル信号処理と高速回路技術を融合した超高速光伝送技術を紹介しました。本技術により、1波長当り1 Tbit/s超の超高速光伝送の実現がみえてきています。今後も、さらなる高速化を推進するとともに、本技術が高信頼な基盤技術として役立つよう引き続き研究開発を進めていきます。

### 参考文献

- (1) 宮本・佐野・吉田・坂野：“超大容量デジタルコヒーレント光伝送技術,” NTT技術ジャーナル, Vol.23, No.3, pp.13-18, 2011.
- (2) 木坂・富澤・宮本：“Beyond 100G光トランスポート用デジタル信号処理回路 (DSP),” NTT技術ジャーナル, Vol.28, No.7, pp.10-14, 2016.
- (3) A. Matsushita, M. Nakamura, F. Hamaoka, S. Okamoto, and Y. Kisaka：“High-spectral-efficiency 600-Gbps/carrier Transmission Using PDM-256QAM Format,” Journal of Lightwave Technology (Early Access), 2018.
- (4) M. Nakamura, A. Matsushita, S. Okamoto, F. Hamaoka, and Y. Kisaka：“Spectrally Efficient 800 Gbps/Carrier WDM Transmission with 100-GHz Spacing Using

Probabilistically Shaped PDM-256QAM,” Proc. of ECOC 2018, Rome, Italy, Sept. 2018.

- (5) 長谷・山崎・濱岡・野坂・宮本：“光送信器の広帯域化に向けた帯域ダブラ技術,” NTT技術ジャーナル, Vol.29, No.3, pp.62-66, 2017.
- (6) M. Nakamura, F. Hamaoka, A. Matsushita, H. Yamazaki, M. Nagatani, A. Hirano, and Y. Miyamoto：“Low-Complexity Iterative Soft-Demapper for Multidimensional Modulation Based on Bitwise Log Likelihood Ratio and its Demonstration in High Baud-Rate Transmission,” Journal of Lightwave Technology, Vol.36, No.2, pp.476-484, 2018.
- (7) F. Hamaoka, M. Nakamura, M. Nagatani, H. Wakita, H. Yamazaki, T. Kobayashi, H. Nosaka, and Y. Miyamoto：“Electrical spectrum synthesis technique using digital pre-processing and ultra-broadband electrical bandwidth doubler for high-speed optical transmitter,” Electronics Letters, Vol.54, No.24, pp.1390-1391, 2018.
- (8) 長谷・脇田・小木曾・山崎・井田・野坂：“超100 Gbaud 光伝送を可能とする超高速光フロントエンドデバイス技術,” NTT技術ジャーナル, Vol.31, No.3, pp.27-31, 2019.
- (9) H. Yamazaki, M. Nagatani, H. Wakita, Y. Ogiso, M. Nakamura, M. Ida, T. Hashimoto, H. Nosaka, and Y. Miyamoto：“Transmission of 400-Gbps Discrete Multi-Tone Signal Using >100-GHz-Bandwidth Analog Multiplexer and InP Mach-Zehnder Modulator,” Proc. of ECOC 2018, Rome, Italy, Sept. 2018.



(上段左から)小林 孝行/ 濱岡 福太郎/  
中村 政則  
(下段左から)山崎 裕史/ 長谷 宗彦/  
宮本 裕

NTT研究所では、信号処理技術およびデバイス技術の両面から研究開発を進め、今後の光ネットワークの高速化・大容量化の要求にこたえていきたいと考えています。

### ◆問い合わせ先

NTT未来ねっと研究所  
フォトニックトランスポートネットワーク研究部  
TEL 046-859-4373  
FAX 046-859-5541  
E-mail takayuki.kobayashi.wt@hco.ntt.co.jp

# 低雑音高出力パラメトリック増幅中継技術

近年、飛躍的な進歩を遂げたデジタルコヒーレント技術の持つ潜在能力を一層向上させ、電気的なデジタル信号処理 (DSP) 技術のみならず、光のコヒーレンスを駆使した革新技術でブレークスルーを生み出すことが望まれています。本稿では、ネットワークの信号対雑音比 (SNR: Signal to Noise Ratio) の劣化を最小限に抑え、伝送距離の制限緩和をめざすアプローチとして、低雑音増幅ならびに非線形歪み補償の可能性を持つ光パラメトリック増幅中継技術を紹介します。

うめき たけし<sup>†1,2</sup> かざま たくし<sup>†1</sup>

梅木 毅 同 / 風間 拓志

こばやし たかゆき<sup>†2</sup> えんぶつ こうじ<sup>†1</sup>

小林 孝行 / 圓佛 晃次

かさほら りょういち<sup>†1</sup> みやもと ゆたか<sup>†2</sup>

笠原 亮一 / 宮本 裕

NTT先端集積デバイス研究所<sup>†1</sup>  
NTT未来ねっと研究所<sup>†2</sup>

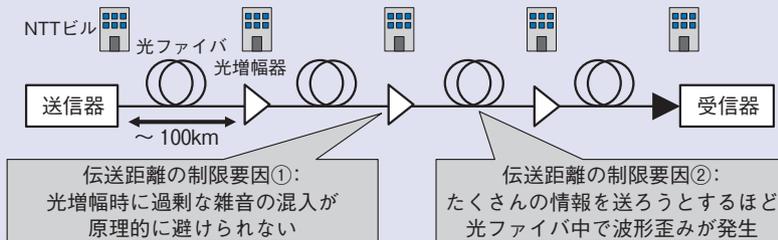
## さらなる周波数利用効率向上に向けた信号対雑音比の抜本的改善の必要性

近年、デジタルコヒーレント光通信技術は飛躍的な進歩を遂げ、周波数利用効率は向上による光通信システムの大容量化が進展しています。シャノン

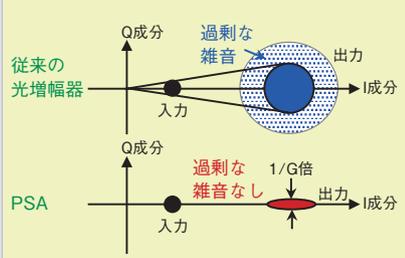
の通信理論によれば、高い周波数利用効率を得るためには高い信号対雑音比 (SNR: Signal to Noise Ratio) が必須の条件となりますが、光増幅器からの雑音の累積と伝送ファイバ自体の中で生じる非線形光学効果に起因した信号歪みにより (図1 (a)), SNRの限界

が指摘され始めています<sup>(1)</sup>。これらの原理限界を打破し光通信システムのSNRを抜本的に改善できる新たな技術の必要性が急速に高まっています。

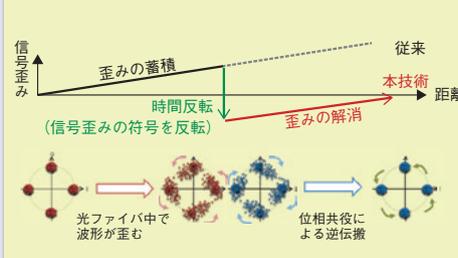
(a) 伝送距離の制限要因



(b) PSAによる低雑音増幅のイメージ



(c) OPCによる信号歪み補償のイメージ



(d) PSA/OPCを実現するためのキーデバイス：PPLN導波路モジュール



図1 PPLN導波路を用いた光パラメトリック増幅による低雑音高出力中継技術

## PPLN導波路を用いた光パラメトリック増幅による低雑音高出力中継技術

現状の光通信システムで広く用いられているEDFA (Erbium Doped Fiber Amplifier) に代表される従来の光増幅器では、標準量子限界<sup>\*1</sup>により増幅前後でSNRが必ず3 dB以上劣化し、多段に中継すると過剰な雑音が累積してしまいます (図1 (b))。信号の光位相に依存した増幅特性を有する位相感応増幅 (PSA: Phase Sensitive Amplification) を用いることができれば、理想的には雑音指数 (NF)<sup>\*2</sup>が0 dB<sup>(2)</sup>、つまりSNRの劣化のない光増幅が可能となります (図1 (b))。

また、現状のデジタルコヒーレントシステムでは、送受信回路において光ファイバ伝送後のさまざまな波形歪みを電気デジタル信号処理により補償して長距離伝送を実現していますが、今後さらなる大容量化を進めると、光ファイバ特有の信号波形の歪み (非線形歪み) が顕在化し、これが伝送距離を制限する要因となります (図1 (c))。位相共役変換 (OPC: Optical Phase Conjugation) は、時間反転波を生成させて、光をあたかも時間が逆戻りしたかのように振る舞わせる光技術で、光ファイバ伝送路の中間地点で位相共役変換を行うことで、伝送路の前半で受けた歪みを伝送路の後半で修復できます。これによって、従来よりも強い強度の光信号を光ファイバで伝送することができ、SNRを向上させることが可能になります。さらに、複数の信

号チャネル (波長) の波形歪みを一括して処理できるため、歪み補償の信号処理量、電力の大幅な削減が期待できます。

これらPSA/OPCは、非線形光学効果における光パラメトリック増幅 (OPA: Optical Parametric Amplification) による励起光からのエネルギー移行を用いることで実現できます (図1 (d))。非線形光学媒質に信号光と信号光のほぼ2倍の周波数を有する励起光を入力し、信号光と励起光の波長配置や位相関係を適切に取ることで、位相感応な光増幅や位相共役変換を行うことができます。私たちの研究グループでは、非線形光学媒質として用いる周期分極反転ニオブ酸リチウム (PPLN: Periodically Poled Lithium Niobate)<sup>\*3</sup>の結晶自体の光損傷耐性の向上と結晶の持つ耐性を損なうことのない導波路構造作製技術の開発<sup>(3)</sup>、微細導波路加工技術の高精度化<sup>(4)</sup>により、高い励起光パワーの入力を可能とし、従来に比べて極めて高い変換効率と高強度の光出力の両立に成功しました。さらに、波長の大きく異なる励起光・信号光を簡便かつ安定的に合分波するカプラとPPLN導波路を集積したOPAモジュールを実現しました (図1 (d))。モジュールは、信号光、励起光のそれぞれの波長に適したファイバからの入出力を誘電体多層膜ミラーで合分波できる構成としています。これにより、光ファイバとPPLN導波路との低損失な光結合を実現すると同時に安定性を確保しました。

## 位相感応光増幅器の高利得化と適用性拡大

OPA過程では、周波数 $2\omega$ の励起光から $\omega_1$ と $\omega_2$ の信号光とアイドログへのエネルギー移行が起きます。 $\omega_1=\omega_2$ の場合は縮退型と呼ばれ、励起光の位相を基準として、光信号の2つの直交する位相に対して一方には利得を与え、他方には減衰を与える位相感応な増幅特性を得ることができます (図2 (a))。本研究の開始当初はPPLNモジュールの増幅利得は6 dB (4倍)程度であったのに対し、PPLN導波路の効率化およびモジュールの結合損失の抜本的改善により、現在では25 dB (320倍)以上の増幅利得を実現 (図2 (b))しており、増幅媒質としてファイバ伝送路の損失補償が十分可能なレベルに達しています。

さらに、既存の光通信システムで用いられる波長多重 (WDM) 技術やデジタルコヒーレント技術との親和性の観点も極めて重要であり、デバイスとしての性能向上と同時に、PSAの適

\*1 標準量子限界：量子光学における不確定性原理に起因した制約であり、レーザ増幅器を含む従来の位相感応ではない光増幅器に課せられる理論限界です。

\*2 雑音指数：信号を増幅したときの入出力間でのSNRの劣化の度合いを示す指数。雑音指数が高いほど増幅により信号品質が劣化します。

\*3 周期分極反転ニオブ酸リチウム：異なる波長の光どうしを相互作用させることが可能な「非線形光学効果」と呼ばれる特殊な特性を持つ結晶であるニオブ酸リチウム (LiNbO<sub>3</sub>) において、自発分極と呼ばれる結晶内の正負の電荷の向きを一定の周期で強制反転させた人工結晶です。周期分極反転ニオブ酸リチウムは、元のニオブ酸リチウム結晶よりも圧倒的に高い非線形光学効果を得ることができます。

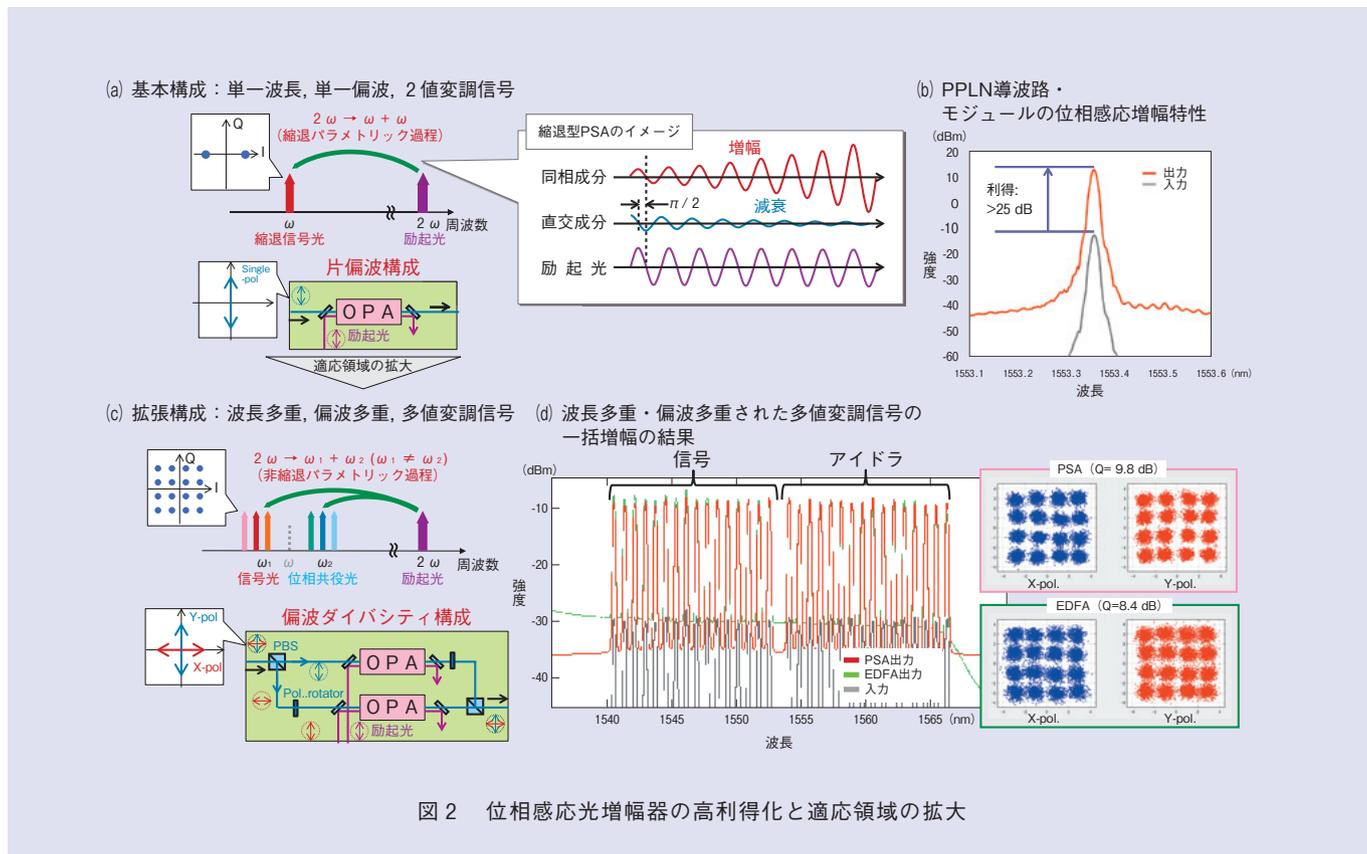


図2 位相感応光増幅器の高利得化と適応領域の拡大

応領域の拡大を進めてきました。例えば、前述の縮退型のOPAでは単一波長かつ2値の変調信号しか取り扱うことができません。また、PPLNに代表される二次非線形光学媒質には偏波依存性があるため、単一偏波しか増幅することができませんでした(図2(a))。

私たちは、OPAにおいて $\omega_1 \neq \omega_2$ の非縮退型と呼ばれるパラメトリック過程に着目し、アイドラ光を信号光の位相共役光とすることで多値変調信号の増幅(図2(c))と複数チャネルの信号の一括増幅に成功しています。また、偏波多重(PDM: Polarization Division Multiplexing)信号に対する位相感応増幅に関しても、偏波ダイバシティ構

成を用いることで可能としました。この構成では、入力信号を偏光ビームスプリッタ(PBS: Polarization Beam Splitter)で分離した後、2つのOPAを用いて独立に増幅し、PBSを用いて再合波します。

実際に、偏波ダイバシティ構成において位相共役なアイドラ光を用いた非縮退パラメトリック増幅を適用し、偏波多重および波長多重(WDM: Wavelength Division Multiplexing)された多値変調信号の位相感応増幅を行った結果を図2(d)に示します<sup>(5)</sup>。送信器では、100 GHz間隔で16波のキャリアを配置し、20 GbaudのPDM-16QAM信号の信号光・位相共役光対

を生成しました。伝送路には80 kmの分散補償伝送路を用い、受信器では光フィルタでWDM信号のうちの1波を切り出し、デジタルコヒーレントレシーバで受光し、オフラインでの信号処理により復調しました。

図2(d)の入出力の光スペクトルから分かるように、16波WDMの全波に対し、20 dB以上の利得で一括増幅できていることが確認できます。また、同図に示した、PSAを同等利得のEDFAに置き換えた場合の出力スペクトルに対して、約5 dBの明らかな光信号雑音比(OSNR: Optical Signal to Noise Ratio)の差が確認できます。図2(d)には、コヒーレントレシーバ

で受信・復調したPSAおよびEDFAそれぞれのコンスタレーションも示しています。復調した信号に対してもOSNRの差に対応した約1 dBの信号品質(Q値)の差が確認できており、PSAで増幅することで低雑音に増幅され、シンボルを明瞭に識別できることが分かります。

### 相補スペクトル反転位相共役変換器の提案と、非線形信号歪み補償

デジタル信号処理技術では非線形歪み補償が可能であり、すでに実用段階を迎えています。補償性能を向上するためには信号処理回路規模が大きくなり、消費電力が増大する課題があり

ます。電気的なデジタル信号処理を用いずに非線形歪みを補償する手段の1つとして、位相共役変換<sup>\*4</sup>を用いる方法が以前から検討されてきましたが、従来の位相共役変換では波長変換により2倍の信号チャンネルを占有し、伝送可能な帯域が半分以下に減少してしまうため大容量光通信への適用には大きな課題となっていました。このような課題を克服するため、波長多重信号の長波長側と短波長側の信号チャンネル群をいったん空間的に分離し、それぞれの信号チャンネル群に対して高効率PPLN導波路デバイスを用いて位相共役変換を行う新しい光信号処理回路を開発しました(図3(a))。これによ

て、光ファイバの大容量性を損なうことなく複数波長を一括で波形歪み補償できる相補スペクトル反転位相共役変換器を実現しました。

実際に波長多重信号の一括位相共役変換を行った結果を図3(b)に示します。22.5 Gbaudの偏波多重16QAM信号を25 GHz間隔で92波の波長多重を行い、1周320 kmの周回伝送路を12

**\*4** 位相共役変換：光は電波と同じように波としての性質を持っており、この波の振動するタイミングを位相と呼びます。位相の正負を逆転させた波は位相共役波と呼ばれ、位相を逆転させる過程を位相共役変換と呼びます。位相共役波は、動画の逆再生のように、あたかも時間をさかのぼるかのように伝わることから「時間反転波」と呼ばれることもあります。

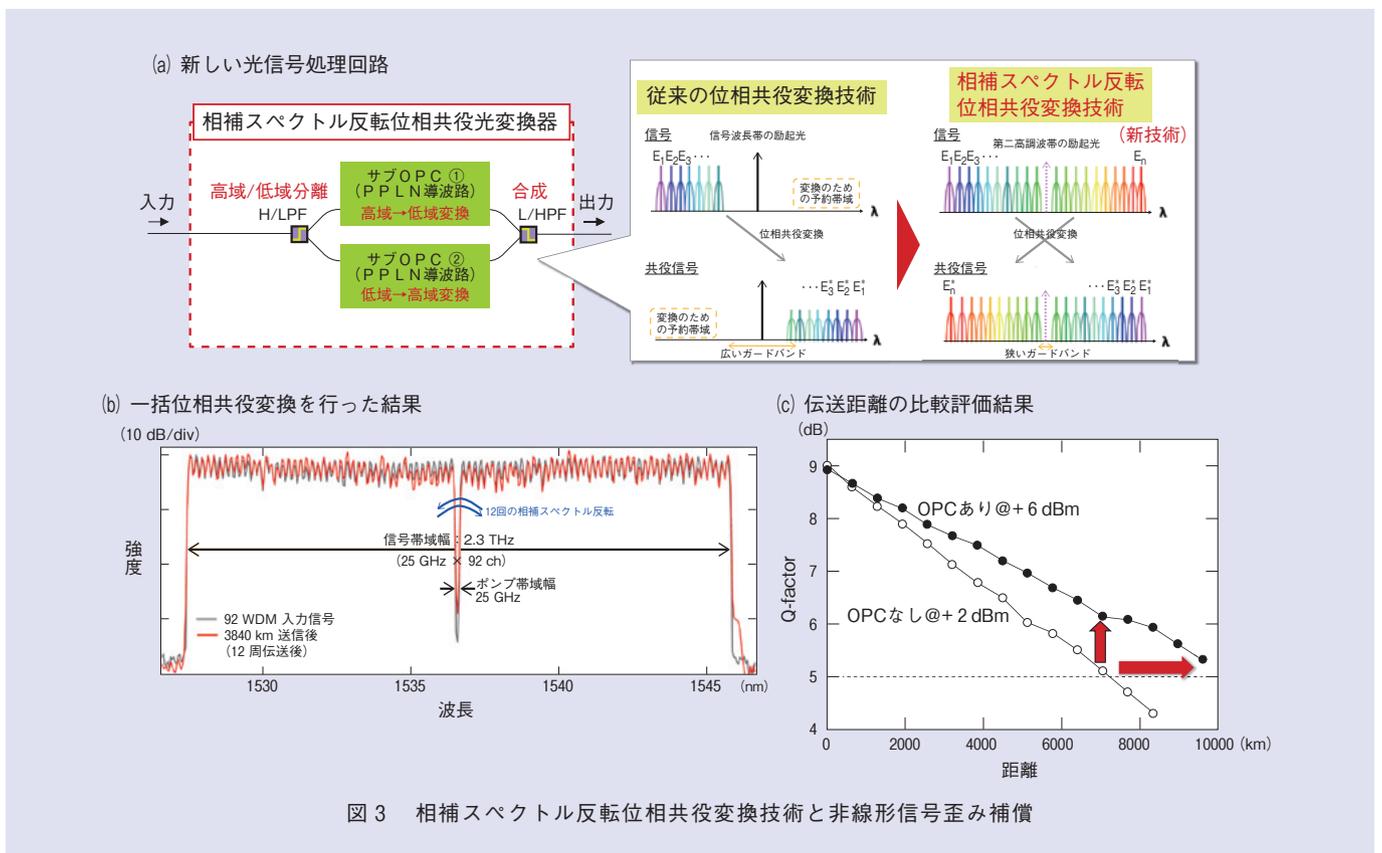


図3 相補スペクトル反転位相共役変換技術と非線形信号歪み補償

周 (3840 km) 伝送させた結果です。送信直後と、3840 km周回伝送後の光スペクトルの比較から、伝送後ではそれぞれ46チャンネル分の短波側・長波側のバンドが12回入れ替わっていますが、元の信号帯域を保持したまま変換できていることが分かります。また、励起光用の帯域である短波-長波長の間の中心の1チャンネル分を除いて、ガードバンドなしでの変換を実現することができています。これにより位相共役変換器を用いた伝送実験としては、世界一の大容量性 (13.6 Tbit/s) と高周波数利用効率 (5.84 bit/s/Hz) の両立に成功しました<sup>(6)</sup>。

さらに、1チャンネル当り400 Gbit/sの信号に対して、本方式の適用性を実証するため、96 Gbaudの偏波多重8QAM信号を用いた伝送実験も実施しました。位相共役変換を用いた場合と、用いない場合のそれぞれの最適入力パワーにおける伝送距離の比較評価結果を図3(c)に示します。変換の有/無の場合のファイバへの信号光の最適入力パワーはそれぞれ+6 dBm/+2 dBmであり、より強い光信号を用いて光ファイバで伝送でき、これにより、最大伝送距離(誤り訂正符号のしきい値Q=5 dBを用いた場合)が7040 kmから9600 kmに延伸可能なことを実証しました。これにより、位相共役変換による信号歪み補償が400 Gbit/s超級の高速ポーレート信号(100 GHz級広帯域信号)にも適用可能なことを世界に先駆けて示すことができました<sup>(7)</sup>。

## 今後の展開

本稿では、ネットワーク大容量化の鍵となる光通信システムの抜本的なSNR改善に向け、光通信への適用をめざした光パラメトリック増幅技術の研究開発について紹介しました。本技術は低雑音増幅や光信号歪み補償のほかにも、波長変換によるさまざまな波長域におけるコヒーレント光の生成・増幅応用、スクイズド光や光子対生成といった量子情報処理応用への展開が見込まれます。今後も本技術をさらに進展させ、光のコヒーレンスを駆使した革新技術の創出をめざしていきます。本研究の一部は独立行政法人情報通信機構(NICT)の高度通信・放送研究開発委託研究「光周波数・位相制御光中継伝送技術の研究開発」の一環としてなされたものです。

## 参考文献

- (1) R.-J. Essiambre, G. Kramer, P. J. Winzer, G. J. Foschini, and B. Goebel: "Capacity limits of optical fiber networks," J. Lightwave Technol., Vol.28, No.4, pp.662-701, 2010.
- (2) C. M. Caves: "Quantum limits on noise in linear amplifiers," Phys. Rev. D, Vol.26, No.8, pp.1817-1839, 1982.
- (3) Y. Nishida, H. Miyazawa, M. Asobe, O. Tadanaga, and H. Suzuki: "0-dB wavelength conversion using direct-bonded QPM-Zn:LiNbO<sub>3</sub> ridge waveguide," IEEE Photonics Technol. Lett., Vol.17, No.5, pp.1049-1051, 2005.
- (4) T. Umeki, O. Tadanaga, and M. Asobe: "Highly efficient wavelength converter using direct-bonded PPZnLN ridge waveguide," IEEE J. Quantum Electron., Vol.46, No.8, pp.1206-1213, 2010.
- (5) T. Umeki, T. Kazama, T. Kobayashi, S. Takasaka, Y. Okamura, K. Enbutsu, O. Tadanaga, H. Takenouchi, R. Sugizaki, A. Takada, R. Kasahara, and Y. Miyamoto: "Polarization-diversity In-line Phase Sensitive Amplifier for Simultaneous Amplification of Fiber-transmitted WDM PDM-16QAM Signals," Proc. of OFC 2018, paper M3E.4, San Diego, U.S.A., March 2018.

- (6) T. Umeki, T. Kazama, A. Sano, K. Shibahara, K. Suzuki, M. Abe, H. Takenouchi, and Y. Miyamoto: "Simultaneous nonlinearity mitigation in 92 × 180-Gbit/s PDM-16QAM transmission over 3840 km using PPLN-based guard-band-less optical phase conjugation," Opt. Express, Vol.24, No.15, pp.16945-16951, 2016.
- (7) T. Kobayashi, T. Umeki, R. Kasahara, H. Yamazaki, M. Nagatani, H. Wakita, H. Takenouchi, and Y. Miyamoto: "96-Gbaud PDM-8QAM Single Channel Transmission over 9,600 km by Nonlinear Tolerance Enhancement using PPLN-based Optical Phase Conjugation," Proc. of OFC 2018, paper Th3E. 4, San Diego, U.S.A., March 2018.



(上段左から)小林 孝行/ 梅木 毅伺/  
宮本 裕  
(下段左から)笠原 亮一/ 風間 拓志/  
圓佛 晃次

非線形光学デバイスを用いた光信号処理技術により光情報通信のさらなる発展へ貢献していきます。

## ◆問い合わせ先

NTT先端集積デバイス研究所  
企画担当  
TEL 046-240-2022  
FAX 046-240-4328  
E-mail sende-kensui-p@hco.ntt.co.jp

# 超100 Gbaud光伝送を可能とする 超高速光フロントエンドデバイス技術

光通信ネットワークの進展を支えるためにチャンネル容量（1波長当りの伝送容量）を拡大する検討が精力的に進められており、100 Gbaudを超えるような高シンボルレート（変調速度）での光伝送技術に近年注目が集まっています。本稿では、高シンボルレート光伝送の実現に向けた課題に触れ、それら課題解決のためにNTT研究所で取り組んでいる超高速光フロントエンドデバイス技術についての最新成果を紹介します。

ながたに むねひこ<sup>†2</sup> わきた ひとし<sup>†1</sup> おぎ そ よしひろ<sup>†3</sup>

長谷 宗彦 / 脇田 斉 / 小木曾 義弘

やまざき ひろし<sup>†2</sup> いだ みのる<sup>†1</sup> のさか ひでゆき<sup>†1,2</sup>

山崎 裕史 / 井田 実 / 野坂 秀之

NTT先端集積デバイス研究所<sup>†1</sup>

NTT未来ねっと研究所<sup>†2</sup>

NTTデバイスイノベーションセンタ<sup>†3</sup>

## 光伝送技術トレンドと光トランシーバにおける課題

高精細映像配信、クラウドコンピューティングやIoT（Internet of Things）など、新しい情報通信サービスの普及・拡大を背景として、光通信ネットワークを流れるトラフィックは急速な勢いで増え続けています。特に大容量かつ長距離伝送技術が求められる基幹系の光通信ネットワークに目を向けると、通信トラフィックの増大に対応するため、2010年以降デジタルコヒーレント光伝送技術が新たに導入され<sup>(1)</sup>、現在ではチャンネル容量400

Gbit/s（1波長当り400 Gbit/s）の光伝送システムの運用が始まろうとしています。通信トラフィックは今後も指数関数的に増え続けることが予測されており、光通信ネットワークのさらなる大容量化を持続的かつ経済的に推進していく必要があります。経済性を担保する観点においては、1対の光送受信器で伝送可能なチャンネル容量（1波長当りの伝送容量）を拡大することが不可欠であり、信号の変調多値度を上げるかシンボルレート（変調速度）を高速化するかどちらかのアプローチ、もしくはその両方のアプローチをとる必要があります。伝送距離の確保

に向けては、信号対雑音比が重要なため、変調多値度を抑えながらシンボルレートを高速化するほうが有利であることから、100 Gbaudを超えるような高シンボルレートでの長距離光伝送技術が次世代の基幹系ネットワークシステムに対するソリューションとして非常に注目を集めています。

しかしながら、高シンボルレート光伝送の実現に向けては、光トランシーバ（光送信器および光受信器）における課題も存在します。従来のデジタルコヒーレント光伝送用の光トランシーバの構成図を図1に示します。100 Gbaudを超えるような高シンボルレ

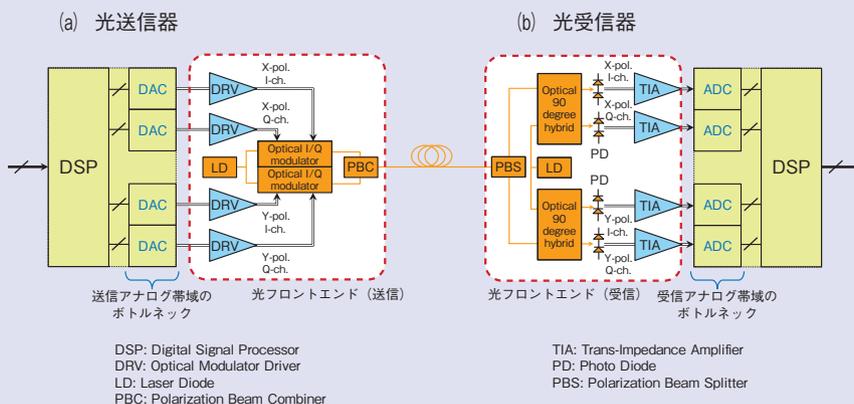


図1 従来のデジタルコヒーレント光伝送用トランシーバの構成図

ト伝送に対応しようとする、光トランシーバを構成する各デバイスには少なくとも50 GHz（シンボルレートのナイキスト周波数）以上のアナログ帯域が求められることになります。特にSi（シリコン）CMOS（Complementary Metal Oxide Semiconductor）技術で実現されるデジタル・アナログ変換器（DAC）やアナログ・デジタル変換器（ADC）が送受信器における帯域のボトルネックとなっており、最先端CMOSプロセスを用いたとしてもそれらのアナログ帯域は50 GHzには大きく届きません（図2）。今後、さらなるCMOSの微細化が進んだとしても、それらアナログ帯域性能については大幅に改善することは難しいと予測されており、いかにこれらDACやADCのアナログ帯域を拡張するかが高シンボルレート光伝送実現への大きなカギとなります。また、100 Gbaudを超えるような超高速・広帯域電気信号の取扱いは、信号配線の引き回しや

それに伴う高周波での損失増大の点で難しいことから、光フロントエンド部分、具体的には送信側では光変調器ドライバンプと光変調器、受信側では受光器とトランスインピーダンスアンプを近接配置し1つの一体集積型モジュールとして仕上げるのが必然的に求められ、その複雑さなど実装面での難しさも顕在化してきます。

### 帯域ダブラ技術の提案と有用性検証

前述のCMOS DACおよびADCのアナログ帯域限界を打ち破るべく、これまでに私たちは帯域ダブラというNTT研究所オリジナルの新しい帯域拡張技術の提案を行ってきました<sup>(2)</sup>。私たちの提案する帯域ダブラ技術を適用した光トランシーバ構成図を図3に示します。送信側では所望の信号に対して適切な前置デジタル信号処理を施

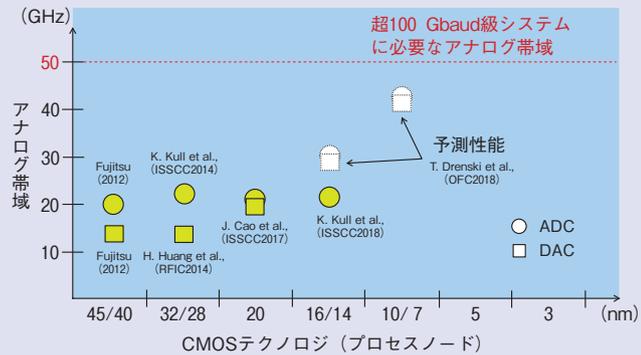


図2 CMOSテクノロジーとDAC/ADCのアナログ帯域性能

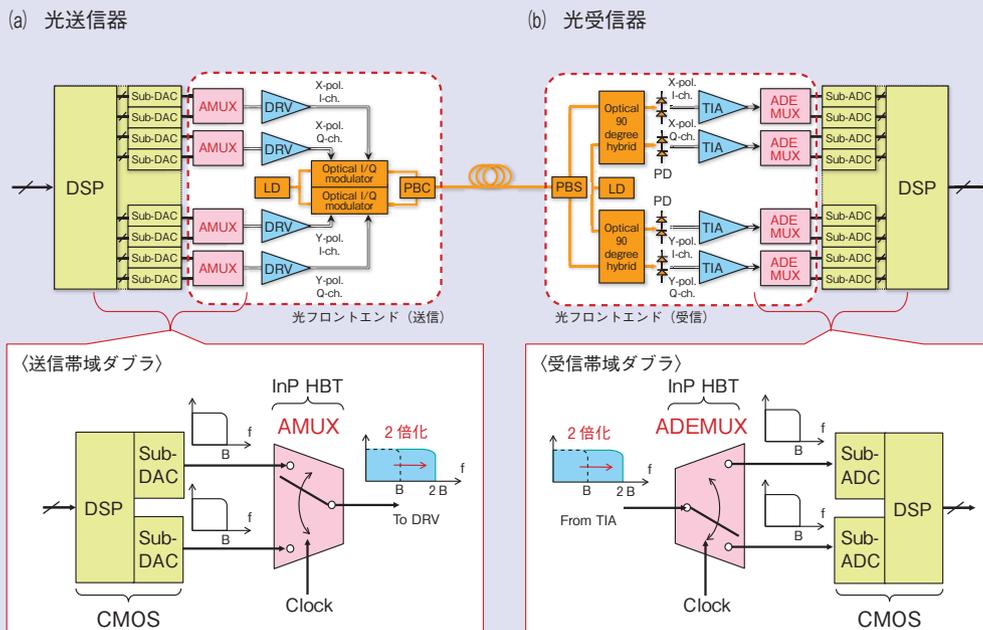


図3 帯域ダブラ技術を適用したデジタルコヒーレント光伝送用トランシーバの構成図

し、2つのSub-DACからのアナログ信号をアナログマルチプレクサ (AMUX) により合成することで2倍の帯域の信号を生成し、受信側では受光した広帯域信号をアナログデマルチプレクサ (ADEMUX) で2分の1の帯域の信号に分離し、それらを2つのSub-ADCで受けて適切な後置デジタル信号処理を施すことで所望の信号を復調するという手法です。利用可能なアナログ帯域を2倍化する手法であることから「帯域ダブラ技術」と呼んでいます。この帯域ダブラ技術で用いるAMUXおよびADEMUXについては、NTT研究所が長年培ってきた超高速トランジスタ技術であるInP (インジウムリン) HBT (InPヘテロ接合バイポーラトランジスタ) 技術<sup>(3)</sup>により実現しています。詳細な信号処理の原理説明についてはここでは割愛しますが、本技術によりCMOS DACとADCのアナログ帯域を2倍に拡張すること

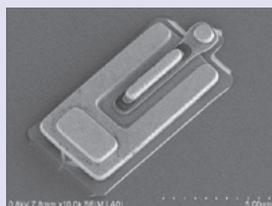
ができ、従来の2倍のシンボルレートでの信号伝送が可能となります。すでに提案原理の実証実験に成功しており<sup>(4)</sup>、さらに送信帯域ダブラ技術の適用により120 GbaudでのProbabilistically-shaped偏波多重64QAM (64値の直交振幅変調) 信号を用いた世界初の1 Tbit/sチャンネル容量での長距離波長多重光伝送にも成功しています。

### 最新AMUX ICと160 Gbaud級の変調信号生成

伝送特性をより引き上げるために、現在AMUXおよびADEMUX IC (集積回路) のさらなる高速・高性能化の検討を進めており、2018年には新たに開発した0.25  $\mu\text{m}$  InP HBT技術<sup>(5)</sup>を適用して110 GHzを上回るアナログ帯域を有するAMUX IC<sup>(6)</sup>の実現に成功しました。0.25  $\mu\text{m}$  InP HBTおよびAMUX ICの概要と基本特性を図4に示します。0.25  $\mu\text{m}$  InP HBTにつ

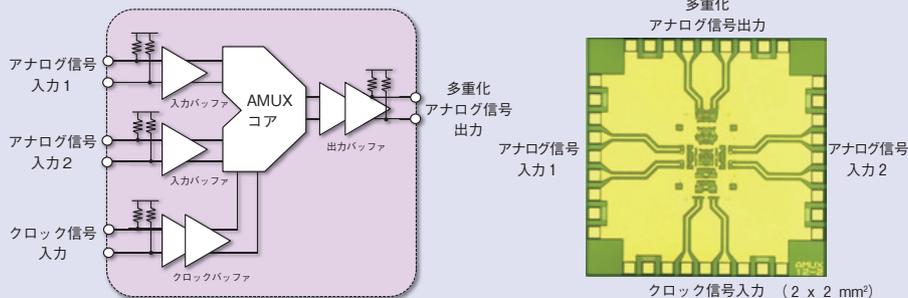
いては、トランジスタの速度性能指標である電流利得遮断周波数 ( $f_T$ )、最大発振周波数 ( $f_{\text{max}}$ ) がそれぞれ460 GHz、480 GHzと高速・高周波動作に極めて優れた特性を有しています。またAMUX ICについては、2つのアナログ入力信号をクロック信号で交互に出力する機能を有しており、2つの入力バッファとクロックバッファ、AMUXコアおよび出力バッファにて構成されます。また、本ICにはモジュール等への実装時に生じる高周波特性の劣化 (高周波での損失) を補償するため、周波数応答にブロードなピーキング特性を持たせる回路技術を提案・導入し、アナログ信号およびクロック信号経路ともに110 GHzを上回る帯域を確保しています。本AMUX ICを帯域ダブラとして用いると、原理上110 GHzアナログ帯域を有する220 GS/s級のDACを構成することが可能となります。すなわち、200

(a) 0.25  $\mu\text{m}$  InP HBT写真



電流利得遮断周波数 ( $f_T$ ): 460 GHz  
最大発振周波数 ( $f_{\text{max}}$ ): 480 GHz

(b) AMUX ICの構成およびチップ写真



(c) AMUX ICの帯域特性



図4 0.25  $\mu\text{m}$  InP HBTとAMUX ICの概要および基本特性

Gbaud級の信号生成にも対応可能なポテンシャルを持ったICです。実際に本AMUX ICを帯域ダブラに適用し、高シンボルレート信号の生成実験を実施した結果を図5に示します。本実験では、40 GHzアナログ帯域のSub-DAC（計測器）からの出力をAMUXで合成し、80 GHz信号帯域を有する160 GbaudのPAM-4（4値の振幅変調）信号を生成するデモンストレーションを実施しました。結果として、図5のアイダイアグラムに示すように160 Gbaudでの明瞭なPAM-4信号生成に成功し<sup>(7)</sup>、本AMUX ICの有用性を実証しました。この技術をデジタルコヒーレント光伝送へ適用すると、160 Gbaudでの変調信号生成が可能となり、1 Tbit/sを大きく上回るチャネル容量の実現が見込めます。

### 一体集積型光フロントエンドモジュール実現に向けた取り組み

冒頭でもう1つ課題として述べたように、100 Gbaudを超える高速・広帯域信号の取扱いは難しく、光デバイスを含むフロントエンド部での一体集積化が高シンボルレート用の光トランシーバでは重要となります。特に送信側については、AMUX、光変調器ド

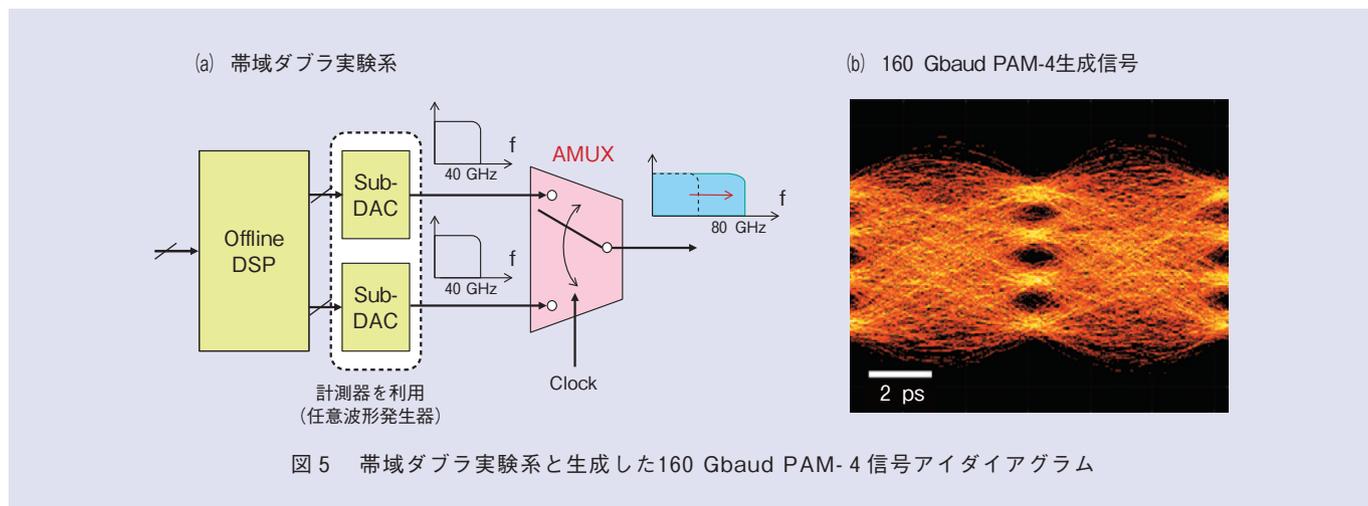
ライバンプ、光変調器を近接配置し、1つの集積モジュールとして仕上げるのが技術を実用化するうえでのポイントとなります。そこで私たちは、そのような一体集積型光フロントエンドモジュールの実現を見据えて、AMUX ICへの光変調器ドライバ機能の搭載（AMUX-DRV ICの実現）、またAMUX-DRV ICと光変調器の協調設計についても併せて検討を進めてきました。

AMUXおよび光変調器ドライバAMPについては、どちらもICにより実現されるデバイスですので、個別に実現しそれぞれを接続するよりも、一体ICとして完結させるほうが信号品質確保や消費電力低減の観点からメリットがあります。そこで、先に述べたAMUX ICに対して、出力バッファを高利得かつ大きな線形出力振幅を持ったAMPに置き換えることで、光変調器ドライバAMP機能を持ったAMUX IC、すなわちAMUX-DRV ICを実現しました。

光変調器には、NTT研究所で研究・開発を進めている80 GHz級の電気-光（EO）変換帯域を有するInPマッハツェンダー型光変調器をベースとした光IQ変調器<sup>(8)</sup>の利用を想定していま

す。出力部に設けたAMPに対して、光変調器の周波数特性を補償するように80 GHzにかけてのブロードなピーキング特性を付加し、さらに光変調器とのインピーダンス整合に配慮しながら変調に必要な駆動振幅を確保するための利得設定を行うなど、性能の最大化を図るための電気と光の協調設計を行いました。

私たちが考えるAMUX-DRVとInP光変調器の一体集積型モジュールのコンセプトと、実現したAMUX-DRV ICおよびInP光変調器のそれぞれの周波数応答特性を図6に示します。AMUX-DRV ICについては、設計のねらいどおり80 GHzにかけてのブロードなピーキング特性と変調器駆動に必要な利得特性が確認でき、InP光変調器と組み合わせた際に80 GHzまでのフラットなEO応答特性実現の見通しが得られました。また、実際に本AMUX-DRV ICとInP光変調器を近接配置したサブアセンブリを作製し、80 GHz帯域をフルに活用したDMT（Discrete Multi-Tone）変調による400 Gbit/s光伝送に成功しています<sup>(9)</sup>。これは、強度変調-直接検波（IM-DD: Intensity Modulation-Direct Detection）方式での世界記録と



一体集積型光フロントエンドモジュールのコンセプト

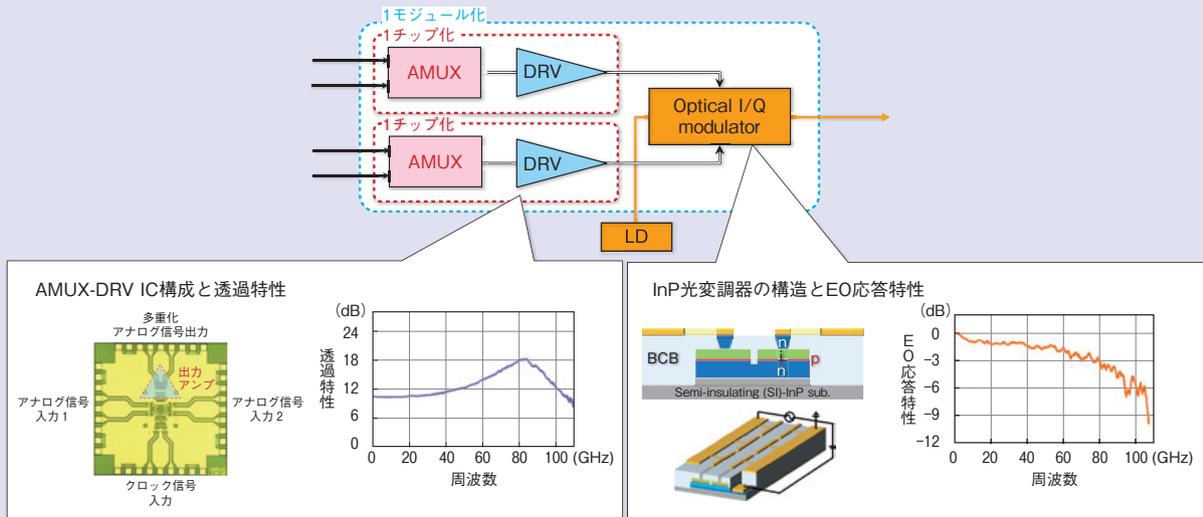


図6 一体集積型モジュールのコンセプトとAMUX-DRV ICおよびInP光変調器の基本特性

なる伝送容量です。今後は、一体集積型光フロントエンドモジュールを完成させ、デジタルコヒーレント光伝送への適用検証を進めていく予定です。

### 今後の展開

本稿では、100 Gbaudを超えるような高シンボルレート光伝送に向けた課題と、それらの解決に向けた帯域ダブラ技術、一体集積型光フロントエンドモジュール実現に向けた取り組みを紹介しました。今後も、光フロントエンドデバイスのさらなる高速・高性能化を推進するとともに、それら技術の実用化に向けた取り組みを加速していきます。

### 参考文献

- (1) 宮本・佐野・吉田・坂野：“超大容量デジタルコヒーレント光伝送技術,” NTT技術ジャーナル, Vol.23, No.3, pp.13-18, 2011.
- (2) 長谷・山崎・濱岡・野坂・宮本：“光送信器の広帯域化に向けた帯域ダブラ技術,” NTT技術ジャーナル, Vol.29, No.3, pp.62-66, 2017.
- (3) 山幡・栗島・深井・福山・平田：“高信頼InP-HBT集積回路製造技術,” NTT技術ジャーナル, Vol.19, No.11, pp.62-65, 2007.

- (4) H. Yamazaki, M. Nagatani, S. Kanazawa, H. Nosaka, T. Hashimoto, A. Sano, and Y. Miyamoto: “Digital-Preprocessed Analog-Multiplexed DAC for Ultrawideband Multilevel Transmitter,” J. Lightwave Technology, Vol.34, No.7, pp.1579-1584, 2016.
- (5) N. Kashio, K. Kurishima, M. Ida, and H. Matsuzaki: “Over 450-GHz  $f_t$  and  $f_{max}$  InP/InGaAs DHBTs With a Passivation Edge Fabricated by Utilizing SiN/SiO<sub>2</sub> Sidewall Spacers,” IEEE Trans. Electron Devices, Vol. 61, No. 10, pp. 3423-3428, 2014.
- (6) M. Nagatani, H. Wakita, H. Yamazaki, M. Mutoh, M. Ida, Y. Miyamoto, and H. Nosaka: “An Over-110-GHz-Bandwidth 2:1 Analog Multiplexer in 0.25- $\mu$ m InP DHBT Technology,” Proc. of IMS 2018, Philadelphia, U.S.A., June 2018.
- (7) H. Yamazaki, M. Nagatani, H. Wakita, M. Nakamura, S. Kanazawa, M. Ida, T. Hashimoto, H. Nosaka, and Y. Miyamoto: “160-GBd (320-Gb/s) PAM4 Transmission Using 97-GHz Bandwidth Analog Multiplexer,” IEEE Photonics Tech. Lett., Vol. 30, No. 20, pp. 1749-1751, 2018.
- (8) Y. Ogiso, J. Ozaki, Y. Ueda, N. Kashio, N. Kikuchi, E. Yamada, H. Tanobe, S. Kanazawa, H. Yamazaki, Y. Ohiso, T. Fujii, and M. Kohtoku: “Over 67 GHz Bandwidth and 1.5-V  $V_{\pi}$  InP-Based Optical IQ Modulator with n-i-p-n Heterostructure,” J. Lightwave Technology, Vol.35, No.8, pp.1450-1455, 2017.
- (9) H. Yamazaki, M. Nagatani, H. Wakita, Y. Ogiso, M. Nakamura, M. Ida, T. Hashimoto, H. Nosaka, and Y. Miyamoto: “Transmission of 400-Gbps Discrete Multi-Tone Signal Using >100-GHz-Bandwidth Analog Multiplexer and InP Mach-Zhender Modulator,” Proc. of ECOC 2018, Roma, Italy, Sept. 2018.



(後列左から)井田 実/野坂 秀之/  
山崎 裕史  
(前列左から)脇田 斉/長谷 宗彦/  
小木曾 義弘

増加の一途をたどるトラフィックに対応するために光通信ネットワークの高速・大容量化は今後も不可欠です。私たちは革新的なデバイス技術の創出により従来の限界を突破し、光通信ネットワークのさらなる発展に貢献していきます。

### ◆問い合わせ先

NTT先端集積デバイス研究所  
研究推進担当  
TEL 046-240-2022  
FAX 046-240-4328  
E-mail sende-kensui-p@hco.ntt.co.jp

# テラビット級無線伝送をめざす 大容量OAM多重伝送技術

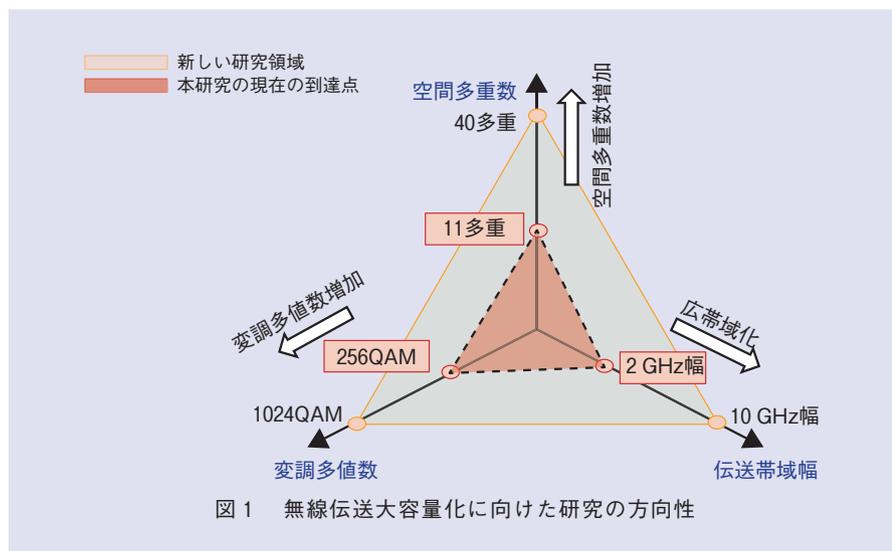
NTTは、5Gのさらに次世代を実現する革新的無線通信技術の開拓をめざし、テラビット級無線伝送の実現に向けた研究開発を進めています。同一周波数帯を用いて同時に複数の電波を送信できる新たな空間多重技術として、電磁波の軌道角運動量（OAM: Orbital Angular Momentum）を活用したOAM多重伝送技術に取り組んでいます。本稿では28 GHz帯を用いたOAM多重伝送の実験において、世界初の120 Gbit/sの伝送に成功した本技術の詳細を紹介します。

## 研究背景とテラビット級無線伝送技術への取り組み

これから実現される5Gにより、コネクティッドカー、VR（Virtual Reality）/AR（Augmented Reality）、高精細映像伝送を含むあらゆる分野で無線通信の利用は加速されます。モバイルトラフィックは、年率1.5倍で増加すると予想されており、このような傾向から、2030年代には、数百ギガビット級からテラビット級の無線伝送が必要であると考えられます。

NTTは、将来の無線通信需要に備え、テラビット級無線伝送の実現をめ

ざす研究開発に取り組んでいます。大容量無線通信の実現には、空間多重<sup>\*1</sup>数の増加、伝送帯域幅の広帯域化、変調多値数の増加の3つの方向性があります（図1）。これらのうち、変調多値数を増やす方法は、すでに限界に達しつつあります。例えば、1度に10ビットの情報を伝送する「1024QAM（Quadrature Amplitude Modulation）」の2倍の容量を得るためには、1度に20ビットの情報を伝送する100万以上の多値変調が必要になり、このアプローチでの大容量化の実現は困難です。NTTは（準）ミリ波帯<sup>\*2</sup>を用い伝送帯域幅を広帯域化す



りい どうはん<sup>†1</sup> ささき ひろふみ<sup>†1</sup>  
**李 斗煥 / 笹木 裕文**  
 やぎ やすのり<sup>†1</sup> やまだ たかゆき<sup>†1</sup>  
**八木 康徳 / 山田 貴之**  
 かほ たかな<sup>†1</sup> はまだ ひろし<sup>†2</sup>  
**加保 貴奈 / 濱田 裕史**

NTT未来ねっと研究所<sup>†1</sup>  
 NTT先端集積デバイス研究所<sup>†2</sup>

るとともに、本稿で説明する軌道角運動量（OAM: Orbital Angular Momentum）<sup>\*3</sup>の性質を持つ電波を使った空間多重数増加の研究に取り組んでいます。

## OAM多重伝送の原理とNTTが考案したOAM-MIMO多重伝送技術

### ■OAM多重伝送技術

OAM多重伝送技術とは、異なるOAMモードを持つ複数の電波にそれぞれ信号を乗せて無線伝送をすることで、同時に送信するデータ信号の数（多重数）を増加させる技術です<sup>(1), (2)</sup>。OAMとは、電波の性質を表す物理量の1つであり、電波の進行方向の垂直平面上で位相が回転しながら進行するように表されます。この位相の回転数

\*1 空間多重：複数のデータ系列を、空間的に独立な複数の電波を用いて、同時刻・同周波数帯において並列に伝送する伝送方法です。  
 \*2 ミリ波・準ミリ波：ミリ波は、波長が1~10mmと非常に短く、マイクロ波と同様に強い直進性があります。周波数帯域は30~300GHzに相当します。準ミリ波は、波長が数cm程度のミリ波に近い電波の俗称であり、10~30GHz付近の周波数帯域の電波のことをいいます。  
 \*3 軌道角運動量：電波の性質として、位置座標とそれに共役な運動量の積で表される電波の持つ角運動量の1つで、異なる軌道角運動量を持つ電波は相関がないため、重ね合わせても独立に分離できます。

をOAMモードと呼びます。OAMの性質を持つ電波は、同一位相の軌跡が進行方向に対して螺旋形状に表れます(図2)。例えば、図2(a)は、OAMモード1、OAMモード2、OAMモード3の同一位相の軌跡を表します。

OAMの性質を持つ電波は、送信時と同じ位相の回転数を持った受信機を使うことで受信することができます。また、各OAMモードを持つ電波は、互いに直交であり、異なるOAMモードを持つ複数の電波を同時に送信しても、送信時のOAMモードに合った位相の回転数を持った受信機を用意すれば、それぞれの電波を分離することができます。この特徴を利用し、複数の異なるデータを同時に送信することができます。例えば、図2(b)は、OAMモード1、OAMモード2、OAMモード3にそれぞれ異なる信号を乗せて、同時に送信する場合の例を表しています。

電波のOAMに関する研究は、20世紀初頭にさかのぼり、2010年代以降は、ミリ波帯の無線通信技術の成熟につれ、ミリ波帯での広い帯域幅を用いたOAM多重伝送が研究されてきています。近年の結果としては、米国の南カリフォルニア大学により、2014年に28 GHz帯で、2016年に60 GHz帯を用いて32 Gbit/sの伝送が報告されています<sup>(3), (4)</sup>。

■OAM-MIMO多重伝送技術

理論的には、OAMモード(位相の回転数)は無限に増やせますので、OAM多重伝送により、多重数を無限に増やすことができます。しかしながら、OAMの性質を持つ電波は、OAMモードが高くなるほど(位相の回転数が多くなるほど)、電波の進行により電力が空間的に広がる性質があり、高

いOAMモードを持つ電波を用いた伝送には、現実的な限界があります。

NTTは、このような限界を考慮しつつ効率的に多重数を増やすため、OAM多重伝送に、現在広く利用されているMIMO(Multiple-Input Multiple-Output)<sup>\*4</sup>技術を統合したOAM-MIMO多重伝送技術を考案しました<sup>(5)</sup>。実環境での送受信が可能な低いOAMモードからなるOAM多重伝送を、複数セットで同時に伝送することで、従来を凌駕する多重伝送が実現でき

ます。MIMO技術を巧みに統合することによって、異なるOAMモード間で互いに干渉しない性質を維持しつつ、複数セットの同一のOAMモード間の信号分離ができます。

OAM-MIMO多重伝送技術の構成例を図3に示します。この図は、後述する伝送実験を実施した合計11多重伝送を行う例を表します。左は、中心に

\*4 MIMO: 送信機と受信機の双方で、複数のアンテナを用いて通信品質を向上する無線信号処理技術。

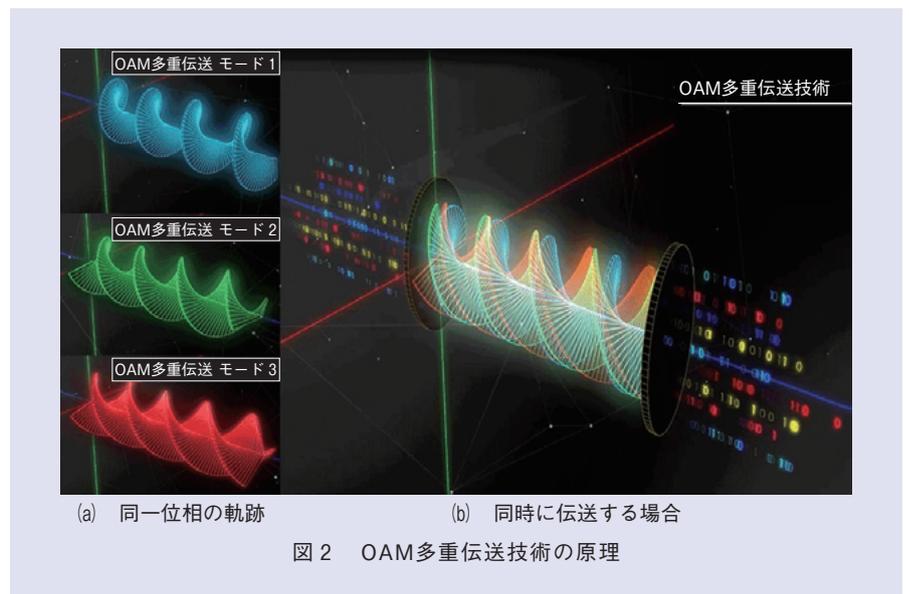


図2 OAM多重伝送技術の原理

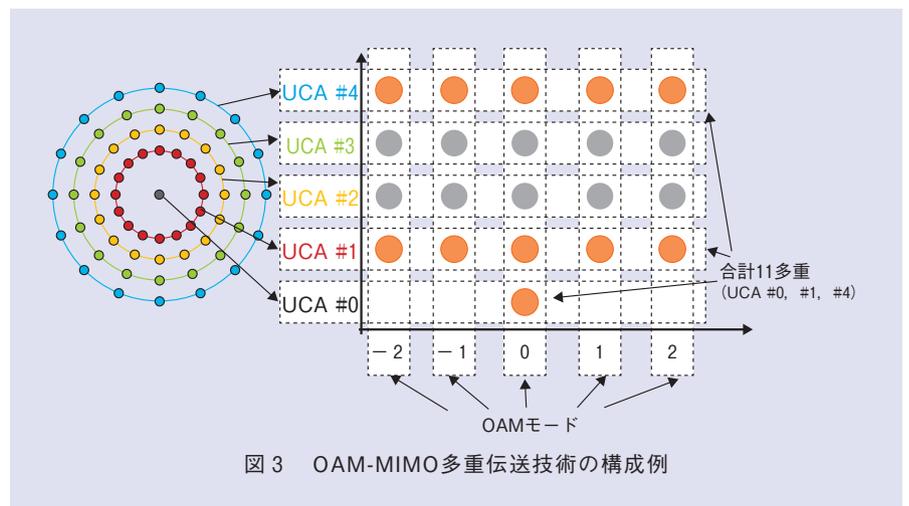


図3 OAM-MIMO多重伝送技術の構成例

1つと同心円の4つの円形アレーアンテナ (UCA) を表します。中心の1つのアンテナで構成されるUCA#0以外のUCA#1~4はそれぞれ、OAMモード-2, -1, 0, 1, 2を生成し、5つのOAMモードの電波を多重することができます。同一のモード内で多重された信号は、受信機でMIMO技術により分離します。

### 28 GHz帯を用いた実験にて、世界で初めて120 Gbit/sの伝送に成功

NTTは、OAM-MIMO多重伝送技術の有効性を示すため、28 GHz帯にて帯域幅2 GHzを使う送受信装置を試作しました (図4)。本送受信装置は、異なる半径を持つ4つの同心円状のUCAと中央に1つのアンテナで構成されています。各UCAは16個のアンテナ素子で構成され、5つのOAMモードの電波の送受信ができます。中心のアンテナは、軸合わせおよびOAMモード0の送受信に使います。これらのアンテナ素子を介して、合計21のデータ信号の同時伝送が可能です。準ミリ波以上の周波数帯でGHz級の伝送帯域

幅を使うOAMの性質を持つ複数の電波を同時に伝送できる装置は、世界初になります。

本送受信装置と実験系の構成を図5に示します。送信側では、送信信号列を生成し、デジタル-アナログ変換器として複数台の任意波形発生器を使用してアナログIF (Intermediate Frequency: 中間周波数)帯信号に変換し、送信装置に入力します。入力された信号は、28 GHz帯に変換してからOAMモード生成回路を介して各UCAにより送信されます。受信側では、各

UCAが受信した電波をOAMモード分離回路でOAMモードごとに分離してからアナログ-デジタル変換器として使用されるデジタルオシロスコープにより、デジタル信号に変換し、受信信号処理を行います。ここで、OAMモード生成回路とOAMモード分離回路は、それぞれ、 $5 \times 16$ と $16 \times 5$ の広帯域パトラーマトリクス回路を設計して実現しました。これにより、本生成回路と分離回路ごとに、5つのOAMモードの使用ができます。

本試作装置を用いて実験室において

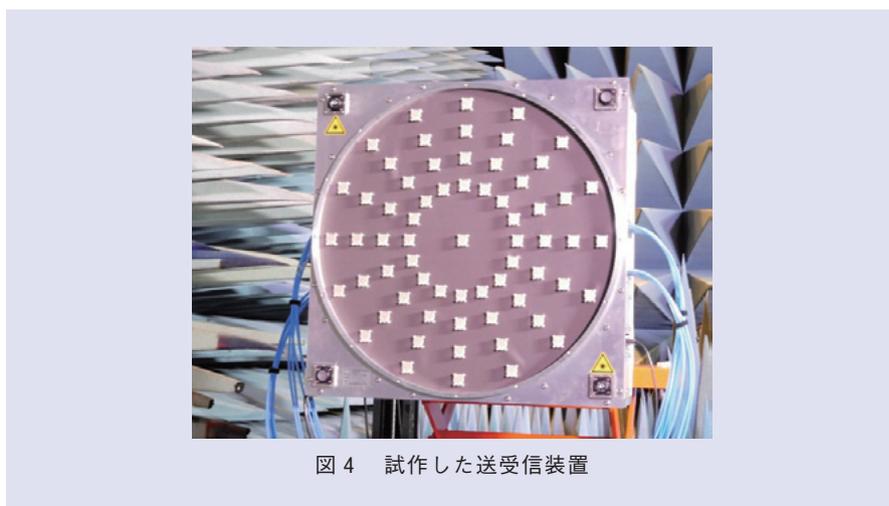


図4 試作した送受信装置

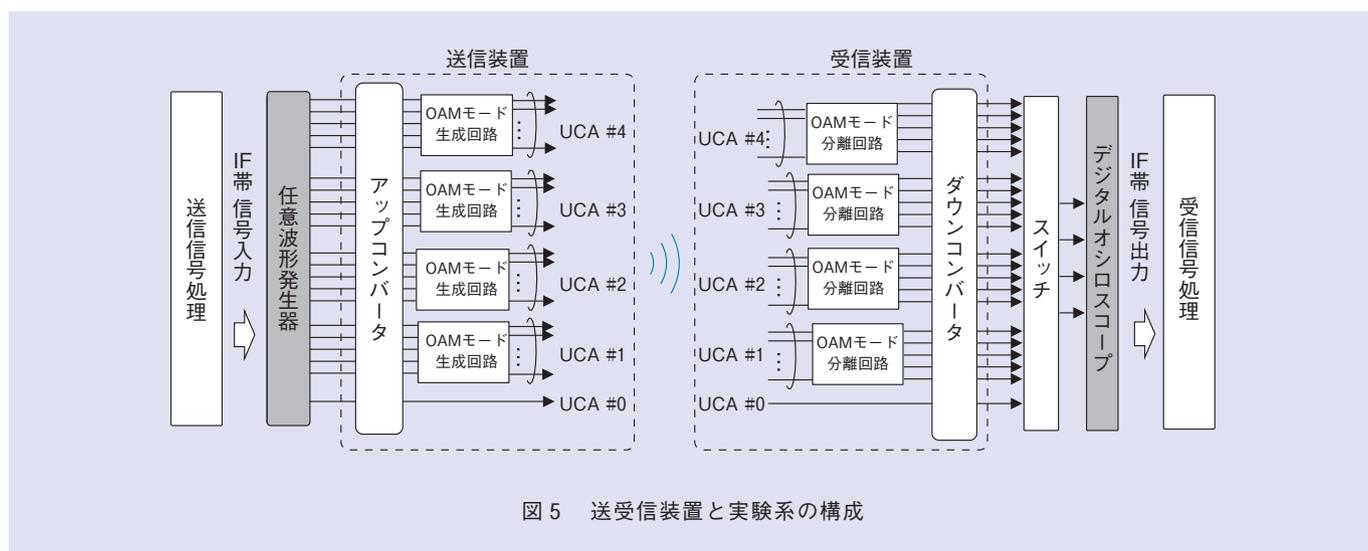


図5 送受信装置と実験系の構成

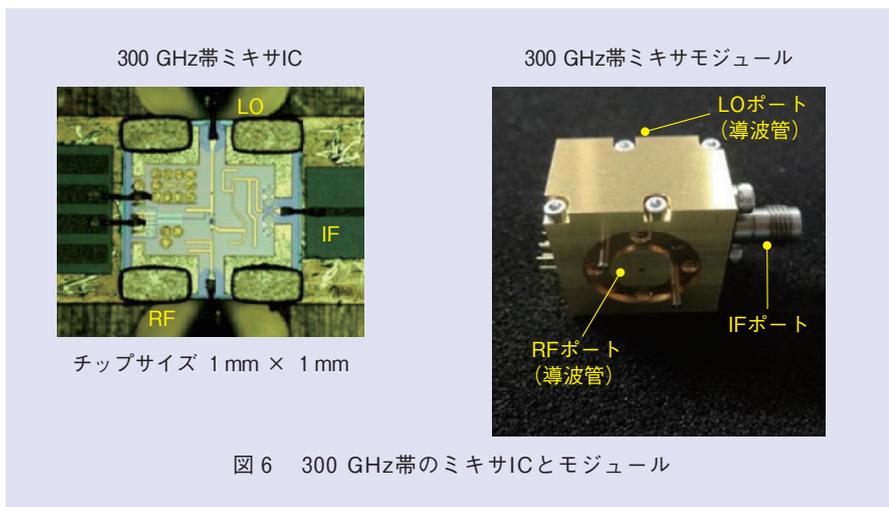


図6 300 GHz帯のミキサICとモジュール

10 mの距離で伝送実験を実施しました。OAM多重される複数の電波にデータ信号を乗せ、原理に従って無線伝送が可能であることを確認しました。さらに、9.6~13.3 Gbit/sのデータ信号11本を多重し、同時に処理できる信号処理技術を実現し、合計120 Gbit/sの大容量無線伝送に世界で初めて成功しました<sup>(6)</sup>。

### 広帯域化技術への期待

最近、広い帯域幅を活かす技術が検討されつつあります。例えば、図6で示す300 GHz帯のミキサICとモジュールは、従来の300 GHz帯無線フロントエンドで課題となっていた伝送帯域幅の拡大と信号対雑音比 (SNR) の向上とを両立させました<sup>(7)</sup>。このデバイスを用いて、25 GHzの広い帯域幅を使い、1ストリームで100 Gbit/sの伝送を実現しました。このような広帯域IC技術とOAM多重伝送技術を併用することにより、さらなる大容量への期待ができます。

### 今後の展開

今回の成果は、OAM多重の可能性

を示したのですが、実社会で利用するためには、多様な環境における大容量無線伝送の実験評価、およびそこで顕在化する課題の解決が必要です。次のステップとして、屋外での伝送実験によりフィールドでの実現性を検証する予定です。また、より広い帯域幅が使える周波数帯を活用し、テラビット級の無線通信の実現に向けた研究開発を推進していきます。

#### 参考文献

- (1) A. E. Willner: "Communication with a twist," IEEE Spectrum, Vol.53, No.8, pp.34-39, 2016.
- (2) D. Lee, H. Sasaki, H. Fukumoto, K. Hiraga, and T. Nakagawa: "Orbital angular momentum (OAM) multiplexing: An enabler of a new era of wireless communications," IEICE Trans. Commun., Vol.E100-B, No.7, pp.1044-1063, 2017.
- (3) Y. Yan, G. Xie, M. P. J. Lavery, H. Huang, N. Ahmed, C. Bao, Y. Ren, Y. Cao, L. Li, Z. Zhao, A. F. Molisch, M. Tur, M. J. Padgett, and A. E. Willner: "High-capacity millimeter-wave communications with orbital angular momentum multiplexing," Nature Commun., Vol.5, p.4876, 2014.
- (4) Y. Ren, L. Li, G. Xie, Y. Yan, Y. Cao, H. Huang, N. Ahmed, Z. Zhao, P. Liao, C. Zhang, G. Caire, A. F. Molisch, M. Tur, and A. E. Willner: "Line-of-Sight Millimeter-Wave Communications Using Orbital Angular Momentum Multiplexing Combined with Conventional Spatial Multiplexing," IEEE Trans. Wireless Commun., Vol.16, No.5, pp.3151-3161, 2017.
- (5) D. Lee, H. Sasaki, H. Fukumoto, Y. Yagi, T. Kaho, H. Shiba, and T. Shimizu: "An

- Experimental Demonstration of 28 GHz Band Wireless OAM-MIMO (Orbital Angular Momentum Multi-Input and Multi-Output) Multiplexing," Proc. of IEEE VTC 2018-Spring, Porto, Portugal, June 2018.
- (6) H. Sasaki, D. Lee, H. Fukumoto, Y. Yagi, T. Kaho, H. Shiba, and T. Shimizu: "Experiment on Over-100-Gbps Wireless Transmission with OAM-MIMO Multiplexing System in 28 GHz Band," Proc. of IEEE GLOBECOM 2018, Abu Dhabi, U.A.E., Dec. 2018.
  - (7) H. Hamada, T. Fujimura, I. Abdo, K. Okada, H. Song, H. Sugiyama, H. Matsuzaki, and H. Nosaka: "300-GHz, 100-Gb/s InP-HEMT Wireless Transceiver Using a 300-GHz Fundamental Mixer," IEEE MTT-S IMS, June 2018.



(上段左から) 李 斗煥/ 八木 康徳/  
濱田 裕史  
(下段左から) 山田 貴之/ 笹木 裕文/  
加保 貴奈

世界に先駆けてテラビット級無線を実現する新技術を確立することで、NTT研究所のCOEの地位獲得に貢献するとともに、5Gのさらに次世代の技術として、事業の優位性確保に貢献します。

#### ◆問い合わせ先

NTT未来ねっと研究所  
ワイヤレスシステムイノベーション研究部  
TEL 046-859-4778  
FAX 046-859-3351  
E-mail doohwan.lee.yr@hco.ntt.co.jp

## NTTレゾナントテクノロジー

### スマートフォンの実機がなくても 画面確認やテストができるサービス 「Remote TestKit」をコアに事業を展開

スマートフォンの実機がなくても、インターネットに接続できる環境とPCがあれば、いつでもどこからでもスマートフォンの実機をリモートで使用して検証・テストができる「Remote TestKit」。その開発を行っているNTTレゾナントテクノロジー三澤淳志社長に事業内容や今後の展開についてお話を伺った。



NTTレゾナントテクノロジー 三澤淳志社長

#### Remote TestKitサービスを軸に 新規事業、社内ベンチャーとして設立された会社

◆親会社のNTTレゾナントとは少し分野の異なる事業をされていますが、会社設立の背景と目的、事業内容を聞かせてください。

NTTレゾナントはポータルサイト「goo」の運営や、最近では「gooのスマホ」等、B2Cサービスの会社と位置付けられていますが、法人のお客さまに対して、システムインテグレーションを提供したり、クラウド上でサービスを提供するB2B事業もあります。私はNTTレゾナントのスマートナビゲーション事業部も統括しており、NTTドコモの「dメニュー検索」の運営をはじめ、「goo」で養った大規模分散処理技術や自然言語処理技術等を活用してクラウド上のサービスを提供する事業を展開しています。

あるとき、レゾナントの社員が新サービスの“ネタ”を探していたところ、久納孝治氏（現NTTレゾナントテクノロジー取締役）が個人で会社（当時カトマック社）をつくり、Remote TestKitの前身となるサービスを提供しているのを知りました。そこで、NTTレゾナントでこのサービスを提供したいと申し出て、一緒にビジネスのスキームをつくる中でNTTレゾナントテクノロジーの設立に至りました。いわば、NTTレゾナントの社内ベンチャー的位置付けの会社となります。

現在、NTTレゾナントはRemote TestKitサービスの「提供」「営業」「マーケティング」を、NTTレゾナントテクノロジーが「開発」を担当しています。法人は違い

ますが、“ワンチーム”として一体的に動いています。開発者にとって魅力あるサービスであるためにも、日本だけでなく世界の最先端技術を開拓する必要があるため、そういう意味では開発を担当する当社の位置付けはとても重要であると思っています。

Remote TestKit以外では、NTTの研究所からの開発や調査依頼に当社の技術を使って協力することもあります。これについても、NTTレゾナントとの連携で行っています。

◆Remote TestKitは具体的にどのようなサービスなのか。その特長は何ですか。

Remote TestKitは、クラウド上にスマートフォンの実機を配置し、それを遠隔でPCの画面上から操作することで、スマートフォン向けアプリやWebサイトの動作確認を行うための環境を提供するサービスです。データセンタに約750台の端末を配置しており、世の中で稼働している端末×OSのバージョンを多数カバーしております。

アプリの検証時には、世間で使われているさまざまな端末、OSバージョンで動作確認をする必要がありますが、端末1台が10万円ほどすることを考えると、それを準備するコストだけでもかなりのものになります。Remote TestKitをご利用いただくことで、このような端末を準備する必要もなく、また最新の端末にいち早く対応しているので、常に最新の検証環境をご利用いただけます。また、ソフトウェアコマンドによる検証だけでなく、ボタンの押下やスワイプといった物理的な操作ができるのも大きな特長です。このほか、簡単な検証レポートの作成機能や自動

テスト機能など、検証担当者の作業負担を軽減する機能を提供しています。

### ◆ Remote TestKitを使ってテストを自動化し、 技術者の生産性を上げる

◆非常に画期的なサービスですが、市場にコンペティタはいるのでしょうか。

日本で同じようなサービスを提供している会社がないわけではありません。しかし、当社ほどの規模で端末やOSに対応している会社はほぼないといえます。一方、世界的にみると同様のサービスを展開している企業は多く、グローバルではしのぎを削っています。とはいえ、最大のコンペティタは、端末を自社で準備して検証しているお客さまです。しかし、Remote TestKitでは最新機種を含め数多くの端末をそろえていますので、自社の端末と、Remote TestKit上の端末を複合的に活用して検証するパターンが多くなるのではないかと考えています。

また、リリース前のアプリの検証以外にも、カスタマーサポート対応としてもRemote TestKitを活用できます。例えば、提供中のアプリに対して、不具合に関する問い合わせがエンドユーザからあったとします。サービスの提供者は不具合が起こった環境を再現・検証して、ユーザへの回答やアプリの修正などの対応を行うのですが、このとき、ユーザが使っている端末やOSを自社で保有していない、ということが多々あります。Remote TestKitであれば、新機種はもちろん、古い機種・OSも取り扱っているので、このような事態にも対応が可能となります。

◆Remote TestKitの今後についてお聞かせください。

大きく分けて2つの流れがあります。

まず、2018年12月に、端末の操作履歴を自動録画する機能を追加しました。さらに、動画の1シーンをキャプチャー化し、同じく自動で記録されている操作履歴表と併せて、検証作業のレポート作成が素早く・簡単にできるようになっています。検証作業は、1つのアプリでも複数の端末で行うのがほとんどで、端末ごとにレポートを作成するのはかなりの時間を要します。そこで、この機能を通じて検証者の作業負担を大幅に軽減することができると思っています。このように、技術者に喜ばれる機能追加・サービス改善に今後も努めます。

もう1つは、「テストを自動化して技術者の生産性を上げよう」という世界的な流れとの連動性を高めていくことです。この流れを受けて、2018年にAppiumという自動テストのツールに対応しました。今後、テスト自動化のニーズは日本でも高まっていくと考え、いち早く対応しました。

前者は、Remote TestKitのサービス開始当初から大事にしているビジョンです。これからも、お客さまからの

ご意見を大切にしながら、サービス開発に取り組んでいきたいと考えています。後者は、昨年始めたばかりの取り組みです。先々の潮流をとらえるという意味でも力を入れていきたい分野です。

Remote TestKitを通じて、技術者の生産性向上を実現したうえで、生まれた時間をアイデアの創出や、開発に集中する時間に使っていただきたい、と考えています。

◆今、世の中でエンジニア不足が深刻化していますが、技術者の生産性向上はどのようなバリューがあるのでしょうか。

例えば、昨今主流となっているアジャイル開発においても、検証作業のルーチンが繰り返し発生し、クリエイティブな作業に時間をとることができない、というジレンマがあります。これが技術者のモチベーションを低下させ、ゆくゆくは離職者の増加にもつながりかねません。その意味で、自動テストは、技術者の生産性向上だけではないバリューを提供できると考えています。

一方、自動テストという何でも自動化されると思われるがちですが、自動化できることとできないことが少し複雑であったりします。お客さまへの啓蒙活動を通して理解をしていただきつつ、一緒に自動テストのこれからを考えていくべきだと思っています。我々自身も、長いレンジで取り組んでいきたいです。

### ◆ベンチャーとして活躍するには、 小さく、速く、鋭く動くことが重要

◆会社の雰囲気をお聞かせください。

私は、NTTレゾナントにも席があり、会社にはいないことも多いので、それが理由なのか定かではありませんが、皆は比較的自由に業務を行っていると思います。NTTレゾナント（田町）とは別のところに居を構えたのは、意味があったようですね。ベンチャー的に、小さく、速く、鋭く動くことができますし、この業界で勝負をかけるには、軽やかに動ける状態をつくることも重要です。ロケーションが離れていてもワンチームで動き、アジャイル開発を進める当社のやり方は、我々としても先進的だと思っています。

◆自分でやって自分で試す、環境そのものがアジャイルですね。最後に社員へのメッセージをお願いします。

いつも言っていることなのですが、仕事を速く回すことは我々自身が変化することなので、皆で相談しながら速くきちんと変化に対応していくことが成長する道だと思います。さらに、NTTグループの中において、自社社員がスクラッチ開発でサービスやシステムをつくっているところはあまりないので、それができる当社社員の技術力に期待しています。

## スマートフォンでの検証を支援する Remote TestKit

取締役 コア開発部 久納 孝治さん  
企画部長 角田 和也さん

### ◆ご担当の業務内容について教えてください。

久納：私は開発をメインで行っており、ほぼ100%プログラム開発を担当しています。Remote TestKitは課金周りなどいくつかのコンポーネントに分か



左から、久納孝治さん、角田和也さん

れているのですが、その中ではお客さまが目にするサービスの中心部分の開発を担当しています。

角田：私は企画部長として、事業計画をつくったり、経理関連の数字周りをみています。それに加え、つくられたコードの品質を上げて世に出し、サービスを運用していくという立場の統括も担当しています。また、NTTレゾナントの営業チームと話をし、お客さまが何を望んでいるかを抽出し、何をつくったら良いかを議論して、コアチームが開発するという進め方をしています。

### ◆Remote TestKitについて教えてください。

角田：Remote TestKitはアプリ開発者、サイト開発者向けにクラウド上でスマートフォンをレンタルし、実機検証を可能とするサービスです。日本・韓国・米国の3拠点でサービスを運用しています。Remote TestKitは実機で検証できるというのがポイントです。エミュレータやシミュレータと勘違いされることが多いのですが、それではハードウェアで発生した問題を抽出できず、正確なテストを行うことができません。Remote TestKitであれば実機で動かしているのだから、ある特定の機種やハードウェアに依存したような問題も抽出できます。

### ◆どのような苦勞がありますか。

久納：開発の苦勞はたくさんあります。スマートフォン向けアプリを検証するためのサービスなので、Android・iOSのバージョンアップに追従し、前のバージョンとの違いを明確にしつつ、必要な新機能を追加しなければいけないという難しさがあります。バージョン間の違いをソースコードの差分から調べるだけでなく、ソースコードそのものを調査するためのツールを自社で作り込んでいます。具体例では、Androidのソースコードを独自技術で圧縮して元の1%以下にまでサイズを落とし、開発ツール

で高速に調査や検索できる仕組みを整えたりしています。このように、時間がかかる作業をカバーする社内ツールが多く準備されていることが、当社の強みです。問題に対して直接当たるのではなく、中長期的に課題を解決するために、たとえ回り道をしたとしても最大の効果が得られるように取り組んでいます。

角田：SaaS (Software as a Service) でレンタルした端末には履歴やデータが残るため、次の人が借りる前にデータを消す作業が必要になりますが、その実現においても手間をかけています。工場出荷状態に戻すファクトリーリセットという機能が使えると楽なのですが、これは端末とサーバとの連携設定も外れて操作不能となってしまうため、この機能を使わずに初期に近い状態にもっていくのが肝です。通常のAPI (Application Programming Interface) によるコマンド操作ではクリアできない項目などのクリーニング処理も、独自の技術で自動化しています。

また、最近はOSのバージョンアップのサイクルが早まったので、その点でも苦勞しています。さらに、iOSはAndroidと違ってソースコードが公開されていないため、金鉱掘りが手近なところからひたすら掘るように、OSの機能を片っ端から調べ、前バージョンとの差分を見つけては深掘りという調査を繰り返しつつ、必要な機能を実現する地道な研究が必要です。

加えて、ソフトウェア面だけでなく、ハードウェア面での変化にも対応する必要があります。iPhoneのホームボタンがなくなったことは非常にインパクトがありましたね。

### ◆ソフトウェアだけでなくハードウェアでも苦勞があるのですね。

久納：どうしてもソフトウェアで解決できないものは、ハードウェアで解決しています。例えば、音の取り込みなどはAPIが用意されていないので、ハードウェアとソフトウェアを組み合わせで解決しています。

角田：音は、著作権の関係で簡単には取り出せないようになっています。そこで、スマートフォンのイヤホンジャックから出た音をそのままループさせて、少ない劣化でマイクからアナログ音源として取り込むことのできるハードウェアを開発しました。また別の例では、iOS端末からホームボタンがなくなったことでできなくなった操作を再現するために、物理的に画面を操作するロボットのようなハードウェアも開発しました。

久納：端末がレンタルされたときは基本的にソフトウェアで入出力を行っているのですが、シーンに応じてソフトウェアとハードウェアを組み合わせで解決しています。

**角田**：こういったハードウェアは自分たちで開発することで、販売されているものよりも一桁も二桁も安く実現できています。

#### ◆グローバルな事業環境はいかがでしょうか。

**角田**：理由は分かりませんが、海外の競合サービスは、端末のレンタル後にデータクリアしなくてもOKという文化があるようです。私たちが膨大な労力をかけている作業をやらない分、先に行くスピードは速い。対抗するには、なるべく賢くやっていく必要があります。

**久納**：端末レンタル後のデータクリアは、グローバルのコンペティタが日本に進出してきた際に、Remote TestKitの強みの1つになります。ほかにも、日本語で提供していること、日本の端末でサービスを提供しているということも私たちの強みです。

**角田**：比較的日本の文化に近いのは韓国です。レンタル後の端末のデータ消去を求められたり、アプリ市場の中でもスマートフォン向けゲームアプリが盛んな点が似ています。これまで韓国の方々と一緒にやってきた取り組みが、今花開きつつあります。

また、クラウド上の端末の操作性の高さも、他社より先へいっていると考えています。私たちは端末の操作感を重視しているので、サクサク動き、気持ち良く使えることができます。フレームレートが出るように画面の速度を上げることにも注力しており、好評をいただいております。

#### ◆今後、力を入れていく部分について教えてください。

**久納**：大きく2つ取り組んでいます。1番目は、ユーザのマニュアルテストを効率化する機能の拡充、2番目は自動

テスト環境の提供です。前者では、テストを行った後、他のメンバー間でのテスト結果の共有を効率化するための、レポート出力機能をつくり込んでいます。端末のレンタル開始直後から操作履歴が自動で保存されるので、エラー発生時に前後の作業を確認することができます。さらに、操作履歴は動画でも出力されます。

技術的な特徴として、動画再生部分はムービーファイルを再生するのではなく、差分として保存されている画像ファイルを組み合わせることで動的に表示することで実現しています。このエンコード方式は当社で特許を取りました。本機能は現在開発中ですが、次のバージョンでリリースする予定です。

**角田**：テストをしていると、エラー発生後に同じ操作をしても、エラーが出ないという場合がよくあります。“気のせいだったかな”と思っても、確かにバグは存在しています。こうした一度きりかもしれないバグも、記録に残すことができることが価値となります。

**久納**：テスト後の振り返りはもちろん、実際にテストを行ったという証跡を残すためにも、操作や画面がレポートとして出力できる機能は、お客さまに喜んでいただいております。

**角田**：日本市場は技術者目線の細かな機能追加がすごく重要です。実機のほうが便利だと思った瞬間に、お客さまはRemote TestKitの利用をやめてしまうので。

**久納**：画面上での操作だけでなく、メニューから行ったアプリのインストールなども履歴として残るため、テスト内容の再現が非常に楽になります。このように、マニュアルテストのボトルネックの解消をめざしていきます。

## NTTレゾナントテクノロジー **ア・ラ・カルト**

### ■柔軟な働き方

今回インタビューさせていただいた久納さんは大学卒業後、東京で働き、子どもが生まれたタイミングでご両親が住む実家近くの福岡へ。そこからさらに環境が良いところを探して、現在は長野県の塩尻からフルリモートで開発を行っています。一方で社内インフラのほとんどがクラウドにあるため、いつでもリモートにすることはできる環境はあるものの、角田さんはオフィスのほうが快適だといい、会社に出てきてお仕事をされています。技術だけでなく、働き方の面でも最先端をいっていました。

### ■趣味もプログラミングでツール開発

開発を行う久納さんにとって仕事がプログラミングですが、趣味もプログラミングで、正月もほぼ休まずプログラミングしていたそうです。最近では勉強を効率化するために、YouTubeにアップされている大手IT各社の講演動画を絵コンテ形式にするツールを作成しました。テキストを字幕のデータから生成する機能や動画へのリンク、翻訳機能などを実現し、個人的にも役立っているとのこと。趣味での開発がRemote TestKitに通じることもあり、自然と技術力が磨かれ、事業にも活かされていくそうです。

## サイバーフィジカル技術開発の取り組み ——エッジAI, AR/VR技術の動向と事例

IoT (Internet of Things) デバイスの普及はアクセス可能なデータの拡大という恩恵をもたらした一方、企業はその有効活用をビジネス上の重要課題として突き付けられています。近頃、IoTデバイスを通じて現実世界のデータを収集し、クラウドのような多大なリソースを持つコンピュータ上で大規模なデータ分析・活用を行い、そして現実世界へ結果をフィードバックしていき、現実世界の最適な制御を実現する仕組み（サイバーフィジカルシステム）が注目されています。ここでは、これらの仕組みを実現するNTTデータの技術開発の取り組みを事例とともに紹介します。

### サイバーフィジカルシステム

「サイバーフィジカルシステム」とは、現実世界（フィジカル空間）から得られる膨大なデータをコンピュータ（サイバー空間）上で分析し、その結果をフィードバックすることで現実世界の最適な制御を実現するシステムです。その一例として、人が持つモバイル機器の位置情報や車のプローブ情報を収集し、これらの膨大なデータをクラウド上で人流や車の混雑としてシミュレーションして、現実世界のバス等の交通機関の運行最適化を行うといったケースが考えられます。

NTTデータ技術開発本部では、サイバーフィジカルシステムを実現するための技術要素をサイバーフィジカル技術と定義し、デジタルツイン<sup>\*1</sup>、エッジ<sup>\*2</sup>AI（人工知能）、そして先進デバイス〔自律デバイスおよびAR（Augmented Reality）/VR（Virtual Reality）〕の活用をコア

技術とし、研究開発に取り組んでいます（図1）。ここではエッジAIとAR/VRにおける当社の取り組みについて紹介します。

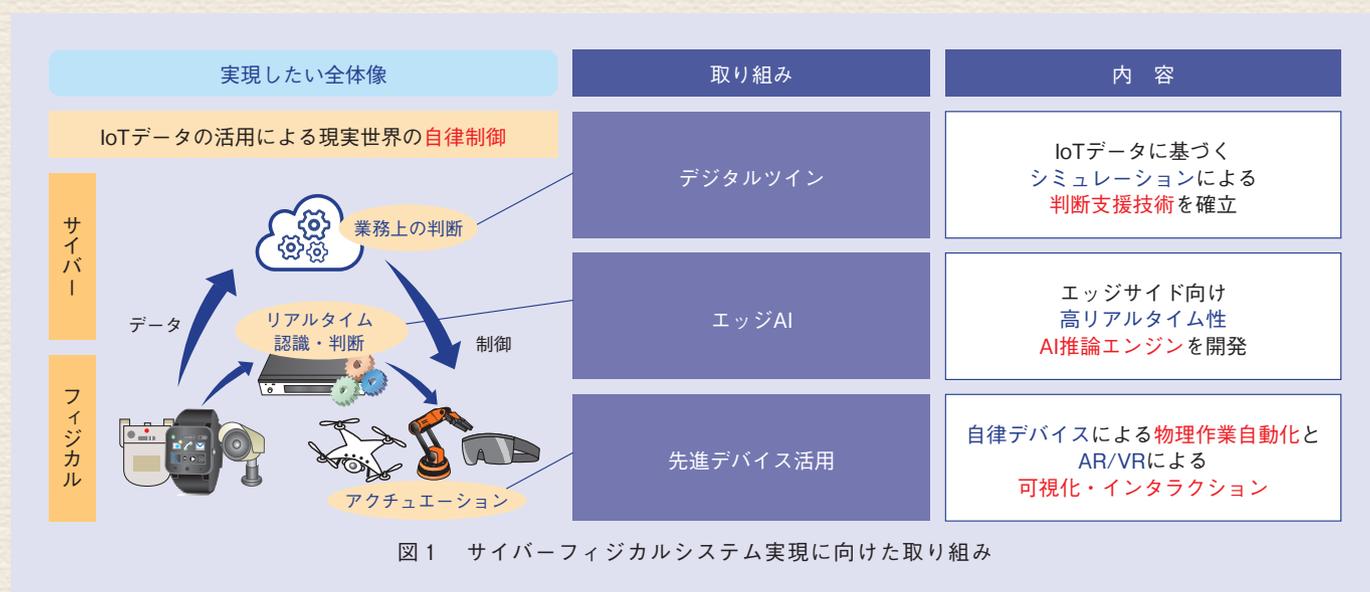
### エッジAI技術活用の取り組み

#### ■取り組みの背景

昨今、あらゆる場所であらゆるモノにAIが適用されようとしています。AIが内蔵された機器の例として自動運転車、インテリジェントカメラ、ロボット等があります。

AIが内蔵された機器が一般化する世界を実現するには、アーキテクチャ上の技術課題が存在します。これまでのク

- \*1 デジタルツイン：現実世界をサイバー空間上にツイン（双子）のように再現すること。
- \*2 エッジ：モバイル機器などのデバイスや、無線基地局、局舎など、ネットワークのユーザ側終端。



クラウドコンピューティングのような一極集中管理のアーキテクチャでは、「リアルタイム性」「通信帯域」「セキュリティ」の3つの観点から限界がみえてきています。

自動運転車を例にすると、車はトンネル等の通信圏外となる場所に移動できるため、データ転送の遅延が発生するクラウドコンピューティングの処理方式では、衝突回避のような非常にリアルタイムな応答が要求される場合において、「リアルタイム性」を確保できません。また、車のセンサ等から発生するデータは膨大であり、「通信帯域」が限られるネットワークを介してすべてのデータをクラウドに送信することが難しくなります。さらに、EU一般データ保護規則（GDPR）のように、「セキュリティ」の観点で個人情報等のデータをクラウドに出すことができないケースも出てきています。こうした技術課題がある中で、エッジ側で知的な判断を行う「エッジAI」が期待されています。

## ■エッジAI推論エンジンとモデルライフサイクル管理

当社では、あらゆるモノで知的な判断を行う世界に向けて、エッジで知的な判断を行うエッジAI推論エンジンと、モデルの精度劣化を検知してモデルの再作成・再配信を行うモデルライフサイクル管理の仕組みを開発しています。

システム全体のコストを抑えつつ大量のIoT（Internet of Things）データを分析するためには、省リソースエッジデバイス・ゲートウェイ上での処理実行が重要となります。しかし、省リソースなエッジデバイスでは、クラウドのようなリソースで動作していたディープラーニングモデルがそのまま実行できません。そのため、エッジデバイス

上で動作させるために、ディープラーニングモデルを変形し、性能を維持したまま、エッジデバイスのコンピュータリソースに合わせて、計算量の削減を行うモデル圧縮技術を活用し、省リソースのエッジデバイスでリアルタイムなデータのストリーム処理と分析を実現できるエッジAI推論エンジンの開発に取り組んでいます。

一方、大規模なデータ分析や多大なリソースを多く必要とするモデル学習は、省リソースであるエッジデバイスで処理実行することは現実的ではありません。大規模なデータ分析や膨大な教師データを用いて学習にかかる計算量が多いモデル作成は、エッジデバイスではなく潤沢なリソースを持つクラウドで行うことが最適です。エッジとクラウドの特徴に合わせた適材適所の最適な機能配置となるアーキテクチャの確立もめざしています。

さらに、エンタープライズ領域では長期的に運用されるシステムにおいて、業務の変化に伴う入力データの変更や設備劣化に伴うばらつきの変化等のデータ傾向変化に起因してモデルが陳腐化することがあります。モデルの精度をモニタリングして劣化を検知し、必要に応じてモデルを再作成し配信する仕組みも重要であり、エッジとクラウドを連動するモデルのライフサイクル管理にも取り組んでいます。

このような運用時の分析モデルのライフサイクル管理と最適な機能配置を実現するエッジとクラウドの協調分散アーキテクチャの確立をめざしています（図2）。

## ■エッジAI活用技術のユースケース

従来のクラウドサイドでの一極集中管理からエッジサイドでの分析・処理・判断、行動へユースケースもシフトしています。例えば、近い将来に目視外飛行が可能となるド

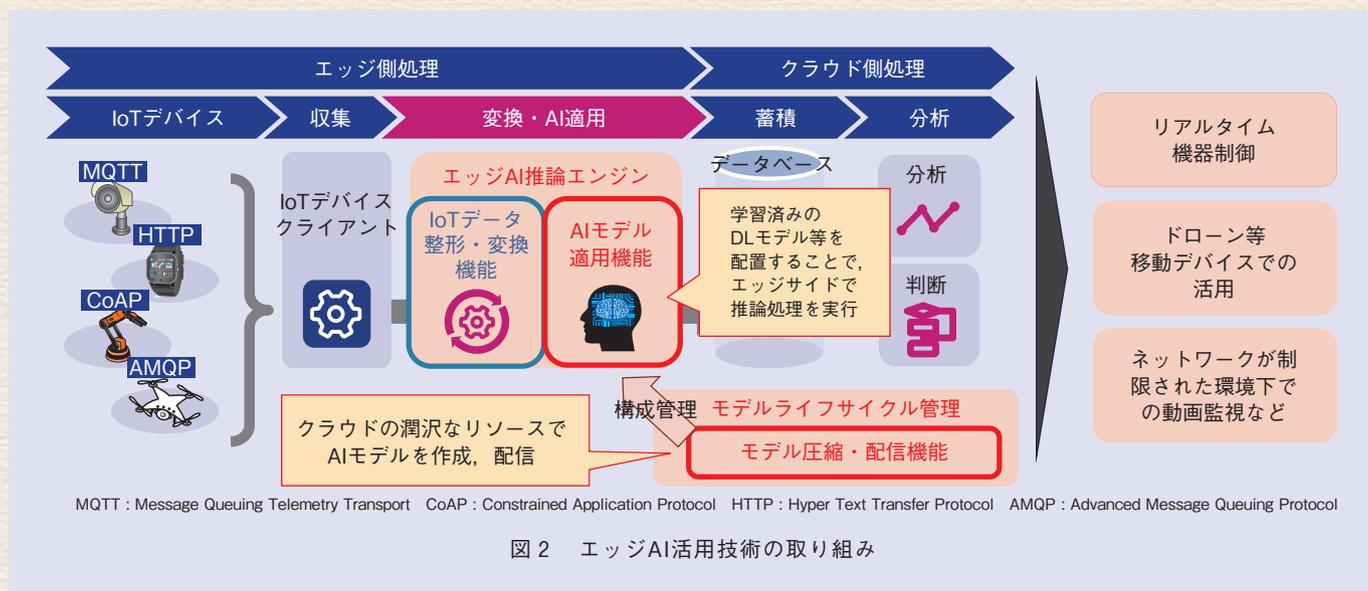


図2 エッジAI活用技術の取り組み

ローン活用において、広域なエリアでかつ通信が届きにくい場所で行うようなインフラ点検や、製造業において工場の設備監視による迅速な故障検知、故障予測への活用や、製造における不良部品の検知等に適用が見込まれています。

エッジAI技術は、リアルタイム機器制御やドローン等移動デバイスでの活用や、ネットワークが制限された環境下での動画監視等のエッジ側でのリアルタイムな判断・行動によって業務の自動化が見込まれるさまざまな分野業務での活用をめざしています。

## AR/VR技術活用の取り組み

### ■取り組みの背景

現実に仮想的な情報を重ね合わせるAR、人工的な仮想世界に人が入るVRは、サイバー世界を表現し直感的に体験することができる技術であり、エンタテインメント領域では先行して普及が進んでいます。2016年はVR元年とも呼ばれ、Oculus Rift、HTC Vive、PlayStation VRといったVR向けHMD (Head Mounted Display)<sup>\*3</sup>が登場し、アミューズメント施設への導入が進むなど、一般ユーザの目に触れる機会が増加しました。

一方でエンタープライズ領域でも、製造業、建設業等における設計段階の製品レビュー、不動産業における遠隔からの内見など、活用への期待が高まっています。当社では、エンタープライズ領域を中心にAR/VRを活用する技術の開発を進めています。ここでは新しい2つの取り組み事例

を紹介します。

### ■ARによる遠隔作業支援

設備の保守・点検等、高度なスキルを要する現場作業では熟練技術者が不足傾向にあり、その活躍機会の最大化および後継人材の育成が課題となっています。そこで当社では、ARを活用して1人の熟練技術者が遠隔から複数の現場作業員の作業を支援可能な技術を開発しました。

本技術により、現場作業員が着用したスマートグラス(メガネ型のARデバイス)上にマニュアルが表示され、ハンズフリーで効率的に作業が行えることに加え、現場のカメラ映像をリアルタイムで遠隔の熟練技術者と共有し助言を得ることができます。

現在は、作業指示や手順を対象物の該当個所に3次元的に重ね合わせることで、デバイス越しに見える作業指示のとおり操作をそのままトレースするだけで作業が可能となるような技術の取り組みを進めています。これは透過型HMDであるMicrosoft HoloLens<sup>\*4</sup>のSpatial Mapping (3次元空間を認識する技術)を活用することで実現しています(図3)。

この技術の延長として、さらに物体認識やAI技術の活用により、物体をデバイス越しに見るだけで、対象物の判別、品質評価、故障の発見などが可能になり、建設業、製造業

\*3 HMD：頭部に装着し、メガネのレンズ部分に映像を映し出す表示デバイス。  
\*4 Microsoft HoloLensは、米国Microsoft Corporationの米国およびその他の国における登録商標または商標です。

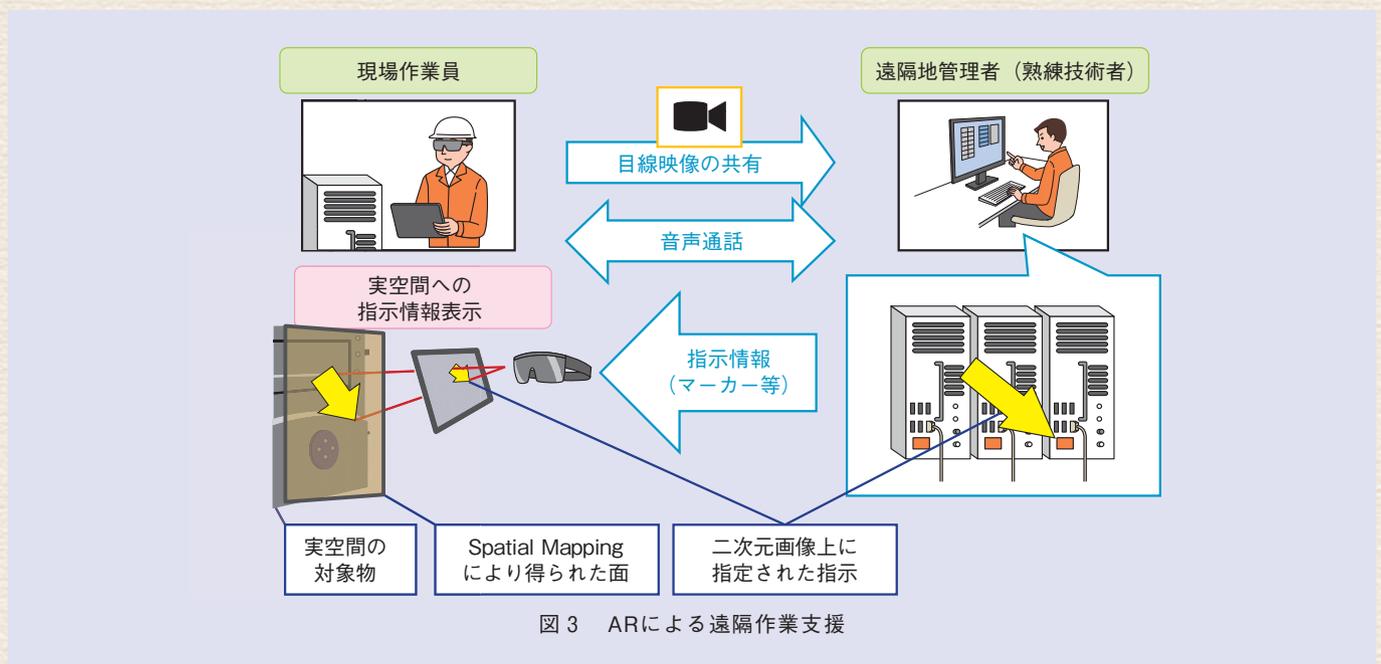


図3 ARによる遠隔作業支援



図4 VR遠隔会議

等などにおいてAR技術の適用範囲が広がると予測しています。

## ■フルデジタルオフィス

少子高齢化が進み労働力が減少していく中、デジタル技術や多様な人材を活用して生産性の高い働き方を実現することが重要となっています。この究極の姿として、当社ではオフィス業務がすべてデジタル化された状態である「フルデジタルオフィス」を具現化する取り組みを行っています。その第一弾として、当社が重点的に取り組んでいるテレワーク施策と連動するかたちで「VR遠隔会議」を開発しています。

現在のテレワーク環境は、緊密なコミュニケーションをとる作業には向いていません。電話会議、Web会議などの仕組みはありますが、特に複数人同時のコミュニケーションを行うとき、「誰が誰に話しているのか」「聞き手が資料を見ているのか話を聞こうとしているのか」など双方の雰囲気をつかむのが難しく、対面に比べて非効率と感ずる場面も少なくありません。この課題を解決するために、筑波大学との共同研究により、アバター（仮想空間内にCGで表現された参加者）を用いた対面のような臨場感の高い会議を実現する技術を開発しました（図4）。

高い臨場感を出すために、ボディーランゲージや参加者の位置関係をリアルに再現しています。ボディーランゲージについては、現実世界で本人が装着しているHMDとハンドコントローラーの動きを検知しVR内のアバターの顔・体の向き、および両手の位置を連動させることによって、参加者どうしが視線を合わせながら、身振り手振りを交えての会話が可能です。またVR内のアバターの位置関係に応じて、話している参加者の方向から声が聞こえるよ

うに再現しています。

さらにサイバー空間ならではの機能として、音声認識・翻訳により、海外との会話においてもアバターの上に自国語のテキストを吹き出し表示する機能や、議事内容の自動記録など、AIと先進デバイスを融合して、人間がコンピュータを自然に利用できる「ナチュラルインタラクション」を具現化するさまざまな機能を追加しています。

今後は、発言内容や声のトーンから参加者の感情を推定し、アバターの表情へ反映させることで表情やニュアンスを伝達する技術など、より自然なコミュニケーションの実現に向けて技術開発を進めていきます。また、会議以外の対象業務に適用を広げ、先進デバイスとAIを組み合わせることで、さらにシームレスに現実世界のモノとサイバー空間内の情報を連携させて、オフィスワーク全体の生産性を向上させる革新的な働き方を実現していきたいと考えています。

## ◆問い合わせ先

NTTデータ

技術革新統括本部 技術開発本部

エボリューションITセンター サイバーフィジカル技術担当

TEL 050-5546-9863

FAX 03-3532-0488

E-mail [iot-madoguti@kits.nttdata.co.jp](mailto:iot-madoguti@kits.nttdata.co.jp)



# IEC/TC37 (避雷器) / SC37B (低圧サージ防護部品) / WG3の活動紹介と経済産業大臣表彰受賞

さとう ひでたか  
佐藤 秀隆

NTTファシリティーズ

日本提案による通信用SIT (サージアイソレーショントランス) のIEC (International Electrotechnical Commission) 国際標準が制定されました。SITは雷サージに対して高い絶縁耐圧とインピーダンスを示し、被保護装置に影響を与えない小さなサージ電圧レベルに低減し、同時にコモンモードノイズループを遮断する部品であり、ICT機器2次側の直流SELV (安全特別低電圧) 回路の保護に優れています。ここではそのIEC国際標準化の取り組みと技術内容を紹介します。



## ■近年の新たな課題

これまでの雷害対策は、雷の過電圧・過電流サージによるICT機器や電気・電子機器内部の絶縁破壊に伴う、焼け、焦げ、熔けによる永久故障や火災を防ぐ対策が主流でした。雷害対策技術が進んだ今日、ハードウェアの過電圧破壊による機器の故障は低減してきましたが、新たな雷害として「データエラー」が顕在化してきました。ハードウェアは全く故障していないにもかかわらず、扱っているデータに誤りが発生する現象です。これが基で、原本(オリジナル)データ誤り、装置のフリーズ、ハングアップ、誤動作、暴走、システムダウンなどが発生します。これらの現象が起こった際は、装置のリセットや電源のOFF-ONの入れ直し(リブート)、OS (オペレーティングシステム) の再読み込みや破損データ

の復帰作業(サルベージ)で回復するケースが多いです。しかしその間の機会損失、直前までのデータ成果物の消失、メモリ内容のデータエラー発生が潜んだまま気付かないなどの危険があります。データ読み取りやデータ伝送中に発生するデータエラーに関しては、ECC (エラー訂正符号) による対策がなされていますが、落雷時に発生するデータエラーに対しても対策の強化が求められてきました。

## ■日本特有の分離接地環境問題

これまで日本の電源系では「耐雷トランス」の名称で広くSIT (サージアイソレーショントランス) が使われてきましたが、海外ではほとんど普及していません。その背景は、日本は分離接地であるのに対して、海外は統合接地が進んでいたため、海外は接地を基準とした等電位手法による雷防護が向いているためです。例えば通信の接地に関しては、日本

では通信用加入者保安器がすべての電話加入者宅に設置されていますが、通信用保安器だけの単独接地であり、電力系や建築物等の接地とは分離されています。このため日本の分離接地環境では、いずれか1つの接地に雷サージが流れるとその接地抵抗による地電位上昇が発生し、それが新たな過電圧サージ源となる欠点があります。IEC (International Electrotechnical Commission) では等電位手法のSPD (サージ防護デバイス) やSPC (サージ防護部品) の規格開発が主流でしたが、アイソレーション手法に関しても、IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers), ITU-T (International Telecommunication Union - Telecommunication Standardization Sector) で規格開発が進められてきました(図1)。

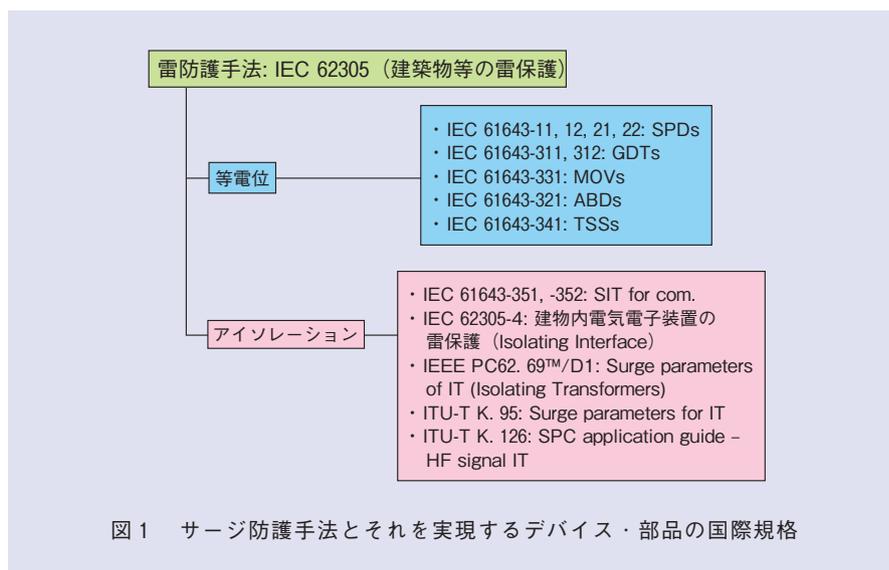


図1 サージ防護手法とそれを実現するデバイス・部品の国際規格



## IEC/SC37B/ WG3組織概要

### ■IEC/SC37B組織

IEC/TC37 (避雷器) /SC37B (低圧サージ防護部品) は、雷サージを十分小さなレベルに低減し、人体・機器を保護する個別サージ防護部品のIEC国際規格を制定するための組織です。これまでに、IEC 61643-311:GDT (ガス入り避雷管)、IEC 61643-321:ABD (アバランシブレイクダウンダイオード)、IEC 61643-331:MOV (金属酸化物バリスタ)、IEC 61643-341:TSS (サージ防護サイリスタ) の4種類の国際規格が制定されました(図1)。これらはすべて各SPCが持つ電圧非直線抵抗特性を利用して、雷等電位化手法により過電圧防護するための部品です。このような中、日本から第5のSPCとして、これまでとは全く異なるアイソレーション手法の部品である通信用SITに関して、NP(新業務項目提案)を行いました。

### ■WG3プロジェクト活動概要

初回2010年のNPおよびCD(委員会原案)は国際投票で可決されましたが、Pメンバー14カ国のうち、プロジェクト成立に必要な最低4名の海外エキスパート参加が得られなかったため、IEC新規プロジェクトの日本提案は否決されました。SITの国際的認知度が低かったことが原因でした。その後2年にわたり世界中の認知度を高めるためのプロパガンダ活動を行い、2012年の再NP提案では中国、ドイツ、英国、日本の4カ国からのエキスパート参加によりIEC 61643-351、-352プロジェクトが成立し、IEC/SC37B/WG(Working Group)3(サージアイソレーショントランス)が新規に設立され、筆者がコンビーナとなり、標準化業務を推進してきました。これと並行して、フランスと米国が反対する理

由であった「SITはSC37Bのスコープ外である」に対する取り組みを進めました。審議母体のIEC SC37Bのスコープは「SPD用部品」であり、SPDの定義が「サージ電圧を制限し、サージ電流を分流することを目的とした、1個以上の非線形素子を内蔵しているデバイス」であったため、非線形要素を持たないSITはスコープ外であることが理由でした。そのため2013年のプレナリー会議においてSC37Bスコープの見直し提案とその審議を行い、国際投票の結果、新たにスコープが「To prepare international standards for components for low-voltage surge protection. These SPCs (surge protection components) are used in power, telecommunication and/or signalling networks with voltages up to 1000 V a.c. and 1500 V d.c.」となり、サージを低減する部品はすべてSC37Bで扱えるようになり、フランス、米国もエキスパートとして加わりました。ITU-T SG5会議「ITU-T SG5 meeting in Geneva meeting from 26th April to 3rd May 2011」において、日

本からのSITに関するIEC NP活動が紹介され、ITU-TでもSITの必要性が認識されていたことから、リエゾンを取りながら進めてきました。

## 通信用SITによる ICT機器の雷防護

SPD(等電位化手法)とSIT(アイソレーション手法)の組合せによる雷過電圧サージとコモンモードノイズの対策事例を、スイッチの等価回路を用いて図2に示します。SPDとSITは排他的かつ相補型動作です。SPDは等電位化してサージ防護するために接地が必要で、雷サージが印加された場合には、速やかにスイッチONし、サージ電流をアースへと分流する経路を形成します。この際にアースを含む大面積のコモンモードループが形成され、ノイズ源になるためデータエラーの発生、および接地抵抗による地電位上昇が発生する欠点があります。一方SITは雷サージ印加時にはOFFとなり、コモンモードのサージ電流を阻止するため、EMC面からノイズ耐性を飛躍的に高めることができます。SITの絶縁耐量により1次側と2

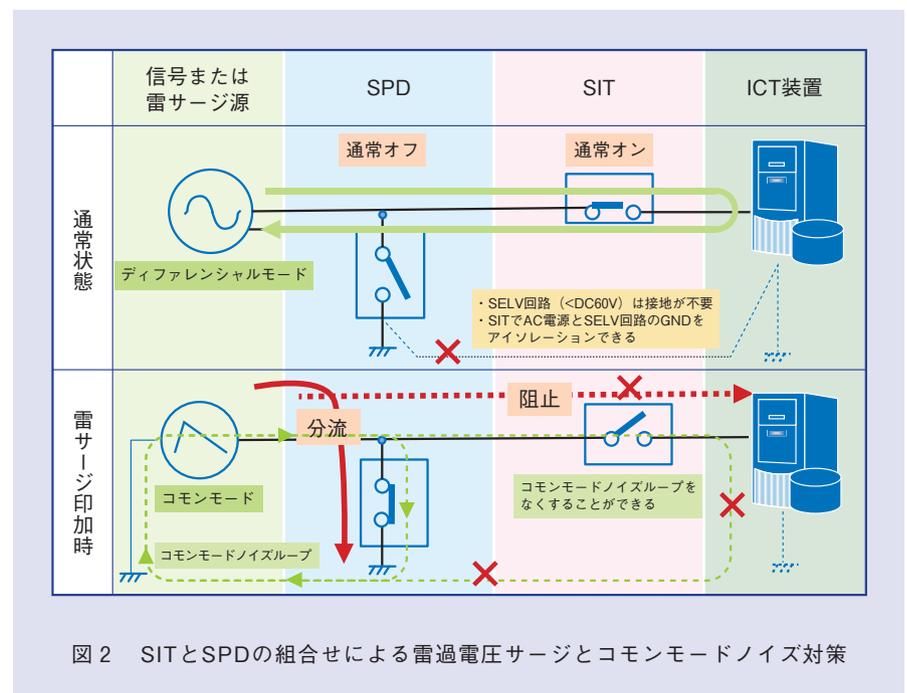


図2 SITとSPDの組合せによる雷過電圧サージとコモンモードノイズ対策



ため、雷過電圧サージおよびデータエラー両方の対策に優れています。



筆者は、平成30年度工業標準化事業表彰 経済産業大臣表彰を受賞しました。IEC/TC37/SC37B/WG3のNP日本提案とコンビーナ (WG3国際議長) を務め、IEC61643-351 (通信用SITの要求性能及び試験方法) および-352 (通信用SITの選定及び適用基準) の制定に貢献したこと、世界的に普及拡大が予想されるAI (人工知能)、IoT (Internet of Things)、ビッグデータ接続等、インターネット接続される安全特別低電圧ICT機器における雷害対策を先取りした国際規格を、我が国主導で策定し、国際産業競争力強化への貢献が評価されました。



近年は、Industry 4.0 (IoTやAIを用いることによる製造業の革新) およびISO8000 (データ品質) の国際標準化～Society 5.0ビジョン実現に向けた検討が加速されています。今後ビッグデータの利用拡大やIoT・AIの普及、工業分野、サービスや医療分野、行政や公共機関が公開する各種データベースでは、データ品質は一層の重要性が高まると予想されます。SITは雷過電圧サージ防護とデータ品質を同時に支えるだけでなく、直撃雷や雷電磁波に対しても強い実績を持つ航空機と同様のSIS (自己完結雷防護システム) 構想<sup>(1)</sup>を実現する主要部品であるため、今後は電源用SITのIEC国際標準化も進める予定です。

### 参考文献

(1) H. Sato : "Self-contained isolation system using surge mitigation components against lightning surge and EM wave for ICT and IoT equipment," ICLP 2018, Rzeszów, Poland, Sept. 2018.

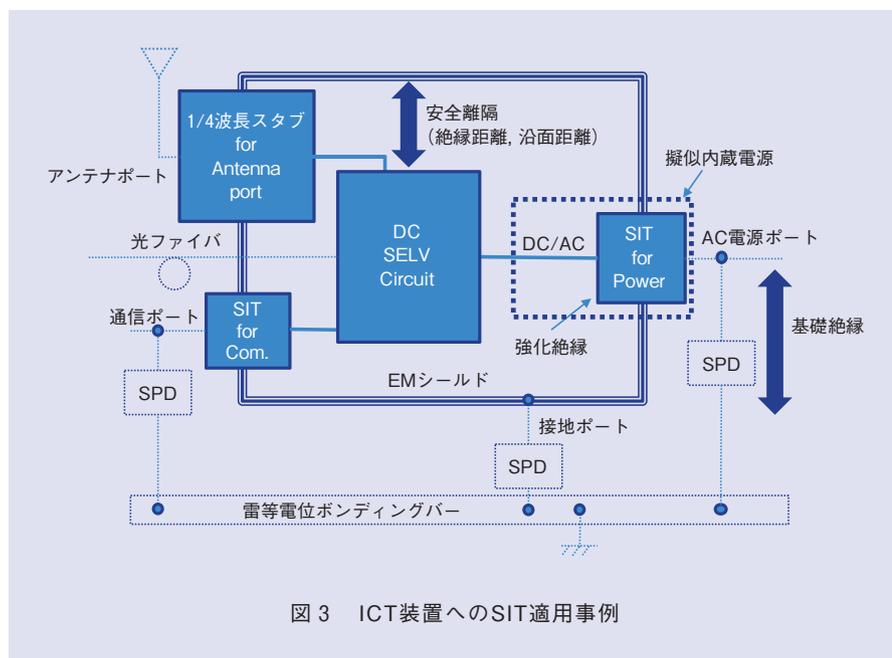


図3 ICT装置へのSIT適用事例

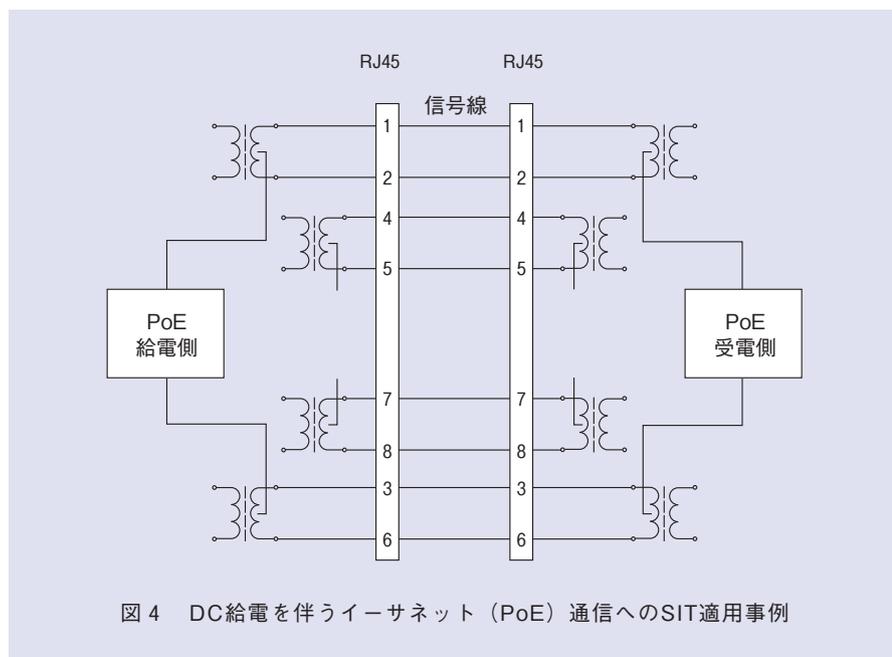


図4 DC給電を伴うイーサネット (PoE) 通信へのSIT適用事例

次側のGNDポテンシャルを異なるものとしてすることができ、GNDを分離したアイソレーション化が可能になります。ICT装置への適用事例を図3に、DC給電を伴うイーサネット通信への適用事例を図4に示します。通常ICT装置の2次側は直流SELV (Safety Extra Low Voltage: 安全特別低電圧、尖頭値42.4 V, 直流60 V以下) 回路であり、絶縁との併用で接地が不要であり、フ

ローティングポテンシャルにすることができます。従来のSPD多段防護では、SPDの協調動作のためレットスルー電流が流れ、それが強力な共通モードノイズ源になり、ICT機器のデータエラーの原因になっていました。SITとSPDの組合せは、共通モードノイズをSITがブロックし、サージ電圧移行もSPDピーク電圧の100分の1～1000分の1と非常に小さくできる

## 「少数精鋭」の衛星選択で世界最高水準のGPS時刻同期精度を実現 ——シビアな受信環境で精度を飛躍的に向上するマルチパス対策GNSSレシーバを開発

NTTと古野電気(株)は、ビル街や山間部などのシビアな受信環境においてGPSなど航法衛星（GNSS）による時刻同期精度を飛躍的に向上するGNSSレシーバの開発に成功しました。

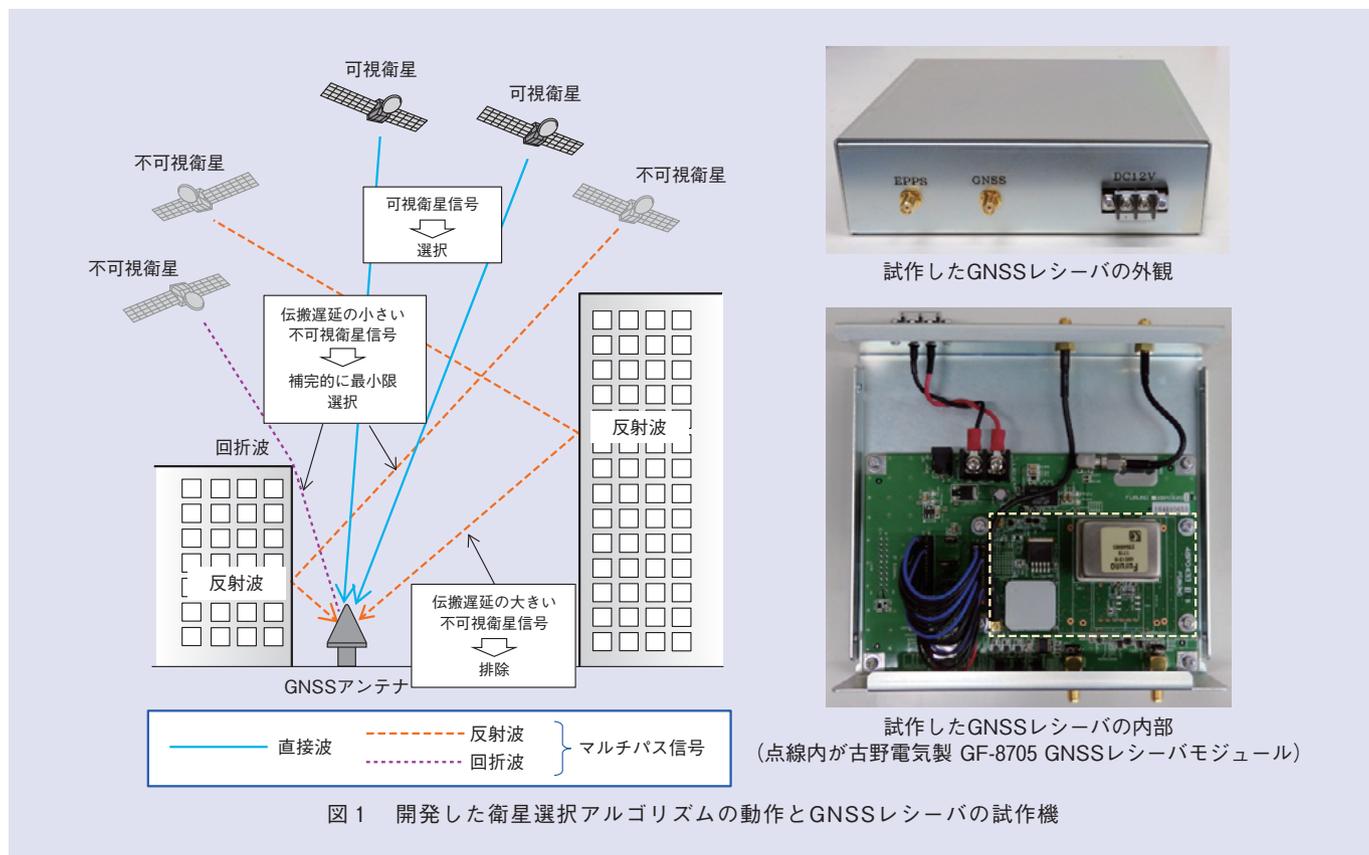
今回、NTTが独自に開発した衛星信号の選択アルゴリズムを古野電気の時刻同期用GNSSレシーバに搭載することにより、見通し状態にある衛星信号だけでなく、従来、高精度な時刻同期を阻害する要因となっていたマルチパス（ビルなど構造物に反射・回折する衛星信号）を活用することが可能となりました。実際に、マルチパスを受信する実験環境において、タイムエラー（誤差）を従来の5分の1程度に大幅に低減可能であることを確認しました。これは従来、高精度時刻同期に適さないとされていたビル街や山間部などの良好ではない受信環境

においても、遮蔽物のないオープンスカイの受信環境に近い時刻同期精度が実現できる見通しが得られたという点で画期的な成果であるといえます。

古野電気は、本技術を搭載した時刻同期用GNSSレシーバの新製品「GF-88」「GT-88」シリーズを2019年4月に販売開始する予定であり、今後は高精度な時刻同期を必要とする4G・5Gモバイル基地局、金融取引、電力グリッド等の分野やデータセンタなどに幅広く展開する予定です。

### ■背景

GPSをはじめとするGNSS（Global Navigation Satellite Systems：航法衛星システム）による協定世界時への高精度時刻同期は、モバイル基地局の時刻同期・金融取引・地震計測などの幅広い分野において活用されていま



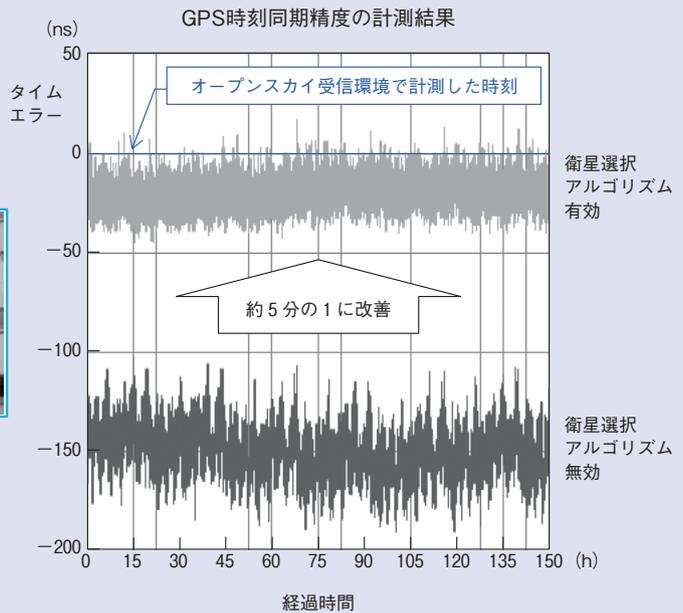
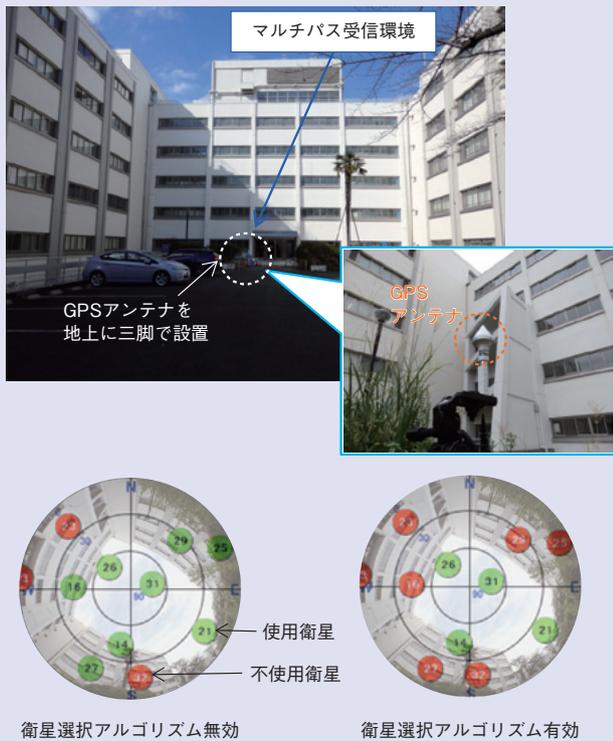


図2 マルチパス受信実験環境とGPS時刻同期精度の計測結果

## マルチパスによる時刻誤差を大幅に軽減する時刻演算アルゴリズム

パートナー  
紹介

池田 貴彦

古野電気株式会社 システム機器事業部 ITS-BU 開発部

スマートフォンやカーナビには、地球を周回している複数の人工衛星から電波を受信して、現在位置を算出するGNSSレシーバが搭載されているのはご存じかと思います。実はこのGNSS、位置を算出する際の副産物として、非常に高精度な時刻も一緒に算出できるのです。その精度はナノ（ $1 \times 10^{-9}$ ）秒のオーダーと大変細かく、また時間が経過してもずれることがありません。その有用性から多くの社会インフラで利用されています。

NTTネットワーク基盤技術研究所様では、以前からモバイル通信ネットワークにGNSS時刻を利用する研究が行われており、特にマルチパス対策については、GNSSそのものの動作を変えて試す段階まで発展しておりました。そこで、我々にお声かけいただき、掲題のアルゴリズムの実装・評価にご協力いたしました。

研究担当の吉田様が発案された本アルゴリズムは、長年GNSSに携わってきた我々からすると、「コロンブスの卵」的なもので、半信半疑で実装を進めました。当初、マルチパスを定量的に評価する環境がなく、既存のGNSSシミュレータの使い方を工夫して実験を行ったところ、極めてスマートにマルチパス（不可視）衛星を排除する動作がみられ、驚愕しました。その後、実際のマルチパス環境（NTT武蔵野研究開発センタ内）で実験を繰り返し、本アルゴリズムが実装されていないものに比べ、大幅に時刻誤差が軽減されることを確認し、その効果を確信しました。

本アルゴリズムを搭載したGNSSレシーバを世に出し、高精度な時刻を提供することで、社会のお役に立てればと願います。

す。特に近年、グローバルに展開が拡大しているTD-LTE (Time Division duplex Long Term Evolution) 方式をはじめとするTDD (Time Division Duplex) 方式のモバイル基地局では、セル間の信号干渉を抑制するために信号の送信タイミングをマイクロ秒の精度で同期させる必要があります。

しかしながら、ビル街や山間部などアンテナの周囲に構造物が存在する、理想的ではない受信環境においては、航法衛星信号を直接波として受信可能な開空間領域が制限されるだけでなく、構造物で反射・回折したマルチパス信号を受信することによって時刻同期精度が大幅に劣化することが課題となっていました。このため従来は、直接波として受信される可視衛星をより多く受信できる位置にアンテナを設置するのに加え、受信した衛星信号を仰角や信号強度のしきい値に基づいてフィルタリングするといった方法によって、受信位置から見通し状態にない不可視衛星信号を排除することにより、時刻同期精度を改善する方策が検討されてきました。それでもなお、こうした従来の方法では必ずしも十分な精度を確保できないだけでなく、信頼性の課題がありました。

そこでNTTでは受信に適した航法衛星信号を選択する、GNSSレシーバの独自のアルゴリズムを開発し、その有効性を実測評価により確認しました。

#### ■研究内容・成果

航法衛星信号により位置と時刻の4つのパラメータを算出するためには、少なくとも4つの衛星信号を受信する必要がありますが、周辺を構造物で遮られるアーバンキャニオン受信環境では常時4機以上の可視衛星信号を

受信できるとは限りません。そこで、今回検討した衛星選択アルゴリズムでは受信位置の推定と衛星信号の到達時刻に基づく衛星の選択動作を繰り返し行うことにより、時刻精度を向上するうえで適切な衛星信号を選択する独自のアルゴリズムを考案しました。

本アルゴリズムでは、**図1**に示すようにまずは可視衛星信号を確実に選択し、可視衛星信号数が4機に満たない場合には不可視衛星信号から伝搬遅延の小さい衛星信号を最小限選択する動作を行います。これは、受信環境が良好ではない場合に不適な衛星信号を大胆に「枝刈り」することにより精度を向上する、いわば「少数精鋭」的な衛星選択方式であるといえます。本アルゴリズムを古野電気製の時刻同期用GNSSレシーバ「GF-87」に搭載した試作機を開発し（**図1**）、マルチパスを受信する実験環境において性能評価を行ったところタイムエラー（時刻誤差）が従来の5分の1程度という高精度な時刻同期精度が実証できました（**図2**）。

本方式では受信環境、すなわち可視衛星の数によらず、最適な衛星信号を選択することができるため、アンテナの設置位置を慎重に選定する必要がなく、さまざまな受信環境で時刻同期精度の大幅な改善が期待できます。

#### ◆問い合わせ先

NTT情報ネットワーク総合研究所

企画部 広報担当

TEL 0422-59-3663

E-mail inlg-pr-pb-ml@hco.ntt.co.jp

URL <http://www.ntt.co.jp/news2018/1810/181023a.html>

## 高精度時刻同期を実現するGNSSレシーバの開発

吉田 誠史

NTTネットワーク基盤技術研究所

ネットワークアーキテクチャプロジェクト ネットワーク革新技術共創グループ

研究者  
紹介

通信システムのインフラにおいて高精度時刻同期の重要性が高まっています。4G・5Gのモバイル通信基地局では上り・下り方向の信号を時間軸上で交互に多重するため、信号フレームの送出タイミングを基地局間でマイクロ秒の精度で同期させる必要があります。さらに国内では周波数リソースの有効活用のため各事業者へガードバンド（干渉を防ぐための周波数の隙間）なしに帯域が割り当てられるため事業者間でも互いに同期を取ることが求められます。そのためGPS等のGNSSへ高精度に同期したタイミング信号を従属同期網により各基地局に配信するアーキテクチャが各事業者単位で採られ、時刻同期網の最上段に位置するGNSSレシーバの時刻同期精度や信頼性が極めて重要となります。とりわけGNSSレシーバチップ・モジュール部品はシステム全体の信頼性・品質を確保するうえで鍵となります。従来、私たちのような通信キャリアは装置ベンダ様との連携により装置の機能開発を行うスキームが一般的でしたが、今回、GNSSレシーバチップセットの主要ベンダである古野電気様と初めてコラボレーションを行いました。両者の密な連携により従来課題であったマルチパスの影響を排除するアルゴリズムを開発し、キャリアグレードのGNSSレシーバを実現することができました。今後は本製品が国内外の通信機器に組み込まれ、品質・性能が向上することを期待しています。

## 車いす利用者への道案内に必要なバリアフリー情報を市民参加により自動的に・持続的に収集する技術 MaPiece<sup>®</sup> (まっぴーす)を開発——「ダイバシティ・ナビゲーション」の実現に向けた研究開発の推進

NTTでは、少子高齢化や訪日外国人の増加などが進展する社会に向けて、車いすやベビーカーで移動される方や高齢者、訪日外国人などの身近な移動を安心・便利にサポートする「ダイバシティ・ナビゲーション」をコンセプトとした研究開発を推進しています。

今回、オリンピック・パラリンピック等経済界協議会の活動（国土交通大臣賞受賞）に使用されている、車いすやベビーカーで移動される方などへの道案内（ナビゲーション）に必要なバリアフリー情報の収集技術「MaPiece<sup>®</sup>（まっぴーす）」に、新しく市民参加により収集する2つの技術「歩いてMaPiece」と「みんなでMaPiece」が加わりました。

### ■開発した技術の概要

さまざまな人の移動のサポートに向けて、広範囲のバリアフリー情報を効率的に収集できることが必要です。そこで、NTT研究所が培ってきた機械学習や統計処理のノウハウを活かし、市民参加で情報収集する技術として、歩行者が携帯したり、ベビーカーに取り付けたりしたスマートフォンを活用して車いすなどが通れるルートを自動検出するクラウドセンシング技術「歩いてMaPiece」と、市民の投稿から正しいバリアフリー情報を抽出し、日常的にバリアフリー情報を収集・更新する技術「みんなでMaPiece」の2つの技術を開発しました(図)。

- (1) 通れるルートを自動検出するクラウドセンシング技術「歩いてMaPiece」  
歩行者が携帯したり、ベビーカーに取り付けたりした

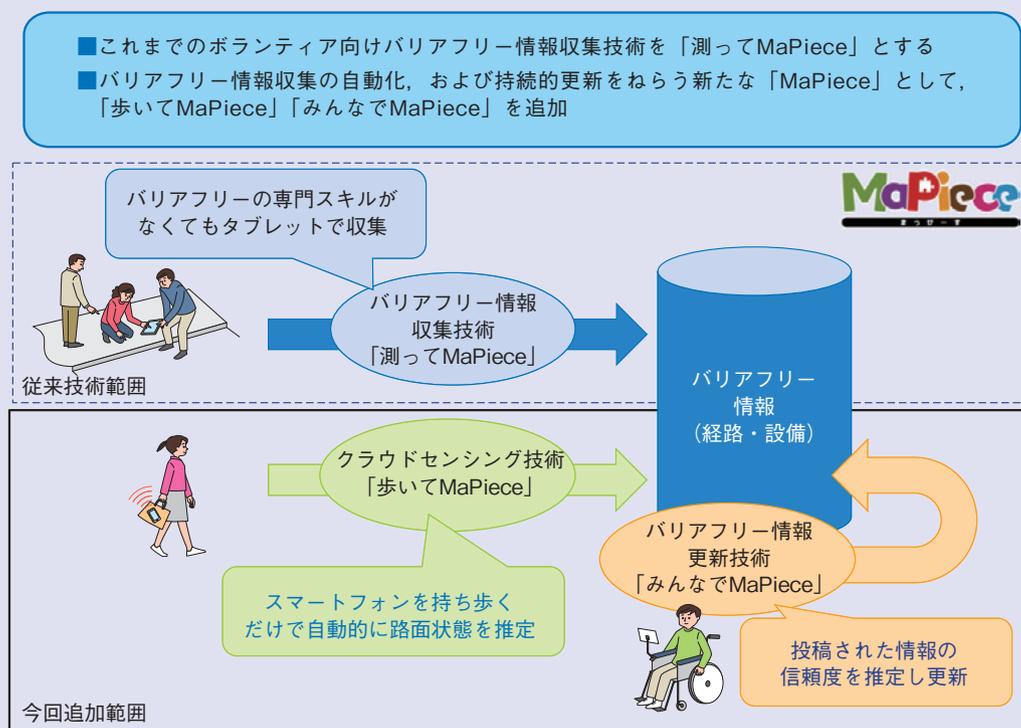


図 新しく開発した「歩いてMaPiece」「みんなでMaPiece」の位置付け

スマートフォンを活用して車いすなどが通れるルートを自動検出するクラウドセンシング技術です。本技術では、利用者がツール等に情報を入力する必要がなく、各自のスマートフォンにアプリをインストールし所持して歩くだけで、路面情報の収集に協力できます。多くの協力者からのスマートフォンのセンサ情報がサーバに送られ、サーバで分析することにより自動で路面の状態を検出することが可能になります。

(2) 市民の投稿から正しいバリアフリー情報を抽出し、日常的にバリアフリー情報を収集・更新する技術「みんなでMaPiece」

普段の移動の際に、スマートフォン上のアプリで周辺のバリアフリー情報を確認でき、さらに、地図に投稿されていない段差や階段、トイレなどの情報を自ら投稿することで、より便利な地図をみんなで創るための技術です。

従来の調査によるバリアフリー情報収集に加え、市民が日常の中で利用しながら情報を追加・更新することで、これまでの更新のコストを大幅に減らし、情報の鮮度を維持することが可能です。さらに、投稿された情報

を利用者どうして評価する機能や、投稿された情報の信頼度判定技術を加えることで、管理者の情報チェックの労力を軽減しつつ、信頼性を確保した更新を行うことが可能となっています。

国土交通省では、ユニバーサル社会の構築に向けて、例えば、車いすの方が通行できる段差等のバリアのないルートを、スマートフォンを通じてナビゲーションする等、ICTを活用した歩行者移動支援サービスの普及のための取り組みが進められており、その中で「多様な主体の参画による新たなバリアフリーデータの収集・活用による既存サービスの高度化」の検討を目的として、2018年12月に千代田区協力のもと千代田区御茶ノ水周辺にて実証実験が行われ、本技術が活用されました。

#### ◆問い合わせ先

NTT広報室

TEL 03-5205-5550

URL <http://www.ntt.co.jp/news2018/1811/181122b.html>

## 歩くだけでバリアフリー情報を収集できる「歩いてMaPiece」

### 研究者 紹介

蔵内 雄貴

NTTサービスエボリューション研究所 研究主任

車椅子を使う方が通れる段差の大きさは、2 cm以下とされています。健康な方であれば気付きもしない小さな段差で通れなくなってしまう、それが車椅子を使う方の現状です。時には頻繁に移動を妨げられる状況が、外出を減らす要因になってしまうこともあるそうです。今後ますます日本の高齢化が進んでいく中、これはとても大きな課題だと考えています。このような方たちに通れる道をご案内しようとする、どこにどんなバリアがあるかを前もって集めておく必要があります。

しかし、2 cmの段差などの詳細なバリアを見つけるのは実はとても大変です。もちろん地図には載っていませんし、測量しようにもコストがかかります。さらに、歩道の工事によってバリアに変化があるなど、常に最新に保つ必要もあります。そこでNTTサービスエボリューション研究所では、より広い範囲をより新しい情報で保つておくために、歩くだけでバリアフリー情報を収集できる仕組みを研究しています。人それぞれの歩き方の違いやスマートフォンを入れる場所の違いによらずに正しく判定するには？ ベビーカーで判定するには？ など、技術的にも奥深く、価値のある課題です。

通れる道が分からないのは高齢の方だけの問題ではありません。例えば、ベビーカーを使う方も同じ問題をかかえています。今後もバリアフリー情報を集める技術を磨くほか、さまざまな地図情報を集める技術を磨くことで、どんな方でもどんな場所でも行き方が分かり、皆が心から外出を楽しめる、そんな世界をめざして研究を進めています。



## 電力供給なしにトランジスタの電流を増幅させることに成功 ——新たな低消費電力デバイス開発に道

静岡大学電子工学研究所/創造科学技術大学院の小野行徳教授らのグループは、NTTの藤原聡上席特別研究員、北海道大学の高橋庸夫教授らの研究グループと共同で、電力供給なしにトランジスタの電流を増幅させることに成功しました<sup>(1)</sup>。

今回の電流増幅は、ノズルから高圧で水や空気を噴出させるアスピレーター\*の原理を応用したもので、従来の増幅法と異なり、電流増幅のための電力供給を必要としないため、新たな低消費電力デバイスの開発につながるものと期待されます。

### ■研究の背景

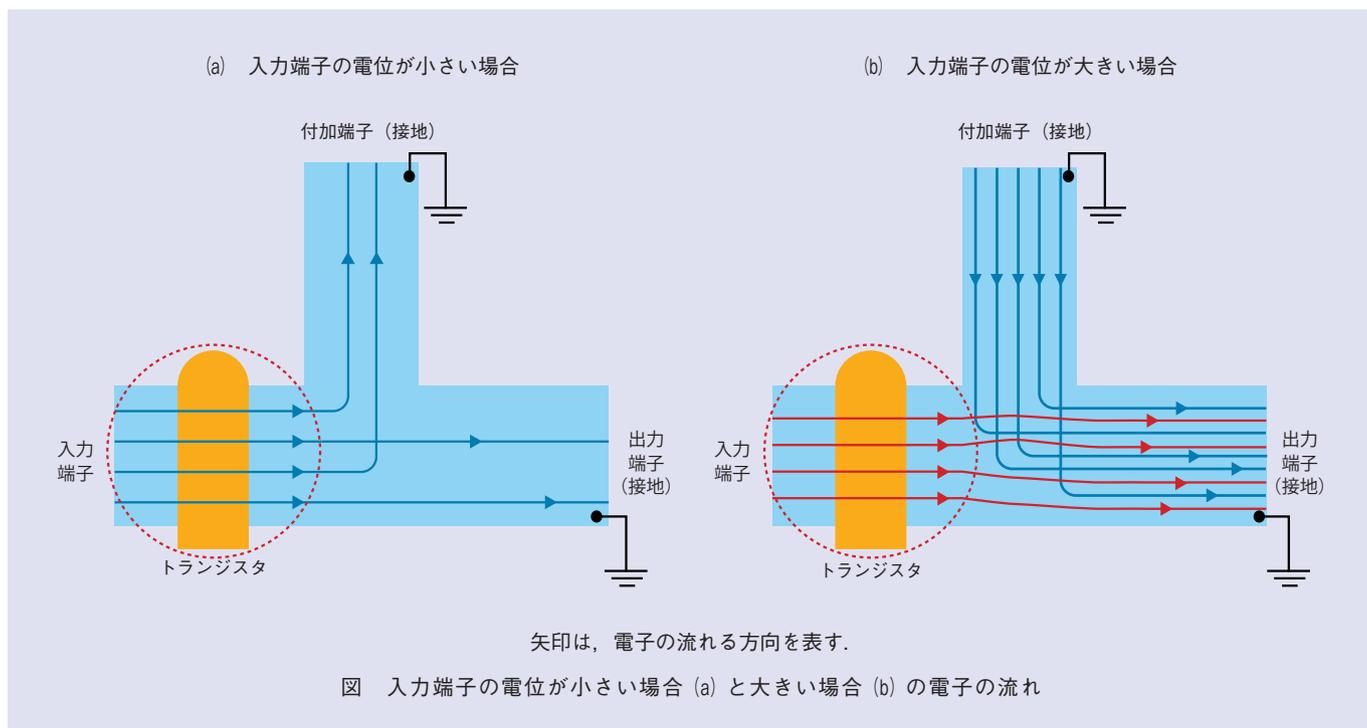
現在の情報化社会を基盤から支えるコンピュータの高性能化は、その構成部品であるトランジスタの電流を、いかに少ない電力で増大させるかに依っています。しかし、これまでの増幅法では、電力供給が不可欠であり、供給された電力が発熱の原因となるため、このことが、コンピュータの性能向上を阻害する本質的な問題となっ

ていました。

### ■研究の成果

静岡大学電子工学研究所/創造科学技術大学院と共同研究チームは、アスピレーターの原理をトランジスタに応用し、8K（ケルビン、8Kは-265.15℃）の温度において、付加的な電力を供給することなくトランジスタの入力電流を増幅させることに成功しました。今回の結果は、通常であれば電子の流れの中で熱として消費されてしまうエネルギーを用いて、新たな電子の流れをつくり出せることを実験的に示したものであり、これにより、これまで困難と考えられていた電流増幅に伴う発熱の抑制も可能となりました。

\* アスピレーター：入口と出口のほかにもう1つの吸込み口を持つT字管。入口を水道の蛇口へ、出口を排水口へ接続し、蛇口から勢いよく水を流すと、吸い込み口から液体や気体を引き込み排水口へ流すことができます。動作のための電力が不要なため、化学の実験において液体や気体をポンピングするときなどに、簡便に使用することができます。ジェットポンプとも呼ばれます。



## ■行った実験の説明

トランジスタの出力端子の横に、電流導入用の端子を付加した構造をシリコン基板上に作製し、同構造を用いて、出力端子と電流導入端子とともに接地した状態で出力端子の電流を計測しました。電子を入射させるための入力端子の電位が小さいときには、入射電子は通常見られるように出力端子と付加端子に分岐して流れたのに対し（図(a)）、電位を大きくすると電子が逆流をはじめ（図(b)）、結果として出力端子の電流増幅が観測されました。

## ■今後の展開

今回の実証実験は、90ナノメートル程度のサイズのデバイスを用いたため、8Kの低温下で行われたものですが、さらなる微細化により動作温度の向上が期待できます。今後は、実用化に向けた室温動作の実証をめざします。

## ■参考文献

- (1) H. Firdaus, T. Watanabe, M. Hori, D. Moraru, Y. Takahashi, A. Fujiwara, and Y. Ono: "Electron aspirator using electron-electron scattering in nanoscale silicon," Nature Communications, No. 4813, Dec. 2018.

## ◆問い合わせ先

NTT先端技術総合研究所

広報担当

TEL 046-240-5157

E-mail science\_coretech-pr-ml@hco.ntt.co.jp

URL <http://www.ntt.co.jp/news2018/1812/181218a.html>

## 昔の仲間との共同研究

小野 行徳

静岡大学 電子工学研究所／創造科学技術大学院  
教授

## 研究者 紹介

早いもので、NTTを退職し大学に転職してから7年の歳月が流れようとしています。NTTには24年間お世話になりました。昭和の終わり、まだバブル景気に沸いていた昭和63年にNTTに入社し、今はもうありませんがLSI研究所に配属され、その後、基礎研究所、物性科学基礎研究所と所属は変わりましたが、一貫してシリコン・ナノエレクトロニクスの分野で研究を行ってきました。

今回の論文執筆にあたり、共著者としてご参画いただいた物性科学基礎研究所の藤原さんは、当時私の後輩、北海道大学の高橋先生は私の上司でした。NTTを離れた現在でも、お二方と共同研究を行っていることは、私にとって大変有り難く、また、幸せなことです。

今回の研究は、もともと少し違う目的で始めました。当初、シリコンのナノトランジスタ中を走行する電子のエネルギー散逸過程を調べたくて、これに適したデバイス構造を模索していました。そのときふと、以前、もう20年ほど前に、藤原さんと高橋先生が作製されたデバイスのことを思い出し、そのデバイスを拝借して測定させていただきました。測定結果は、予想どおりにはなりませんでした。運良く、電流増幅効果を新たに発見し、今回の論文発表となりました。

査読者の1人のコメントが厳しく、レスポンス・レターを書くのに苦労しましたが、そのときのお2人との議論が楽しく、NTT時代の研究生活が思い出されました。今後も、さらに良い研究をすべく、また、少しでもNTTに恩返しができるように精進していこうと考えています。



## シリコンナノデバイスの魅力

### 研究者紹介

高橋 庸夫

北海道大学 情報科学研究科  
教授

今回の成果は、かつてNTT研究所に在籍していた20年ほど前に作製したデバイスを新しい視点で再評価したことにより、新しい物性が観測されたものです。当たり前かもしれませんが、20年経過しても、かつてと同じように動作します。当時の、最先端に近い加工技術を使って、原子オーダーに近いサイズまで微細化されているデバイスでもあり、1原子が移動すれば特性が変化する程度のものでつくったわけですが、20年後も安定に動作します。シリコンナノ構造デバイスの長期安定性を実証できているということです。

改めてよく考えてみると、必ずしも意図したわけではありませんでしたが、デバイス構造としても、耐久性のあるものをつくっていたことに思い当たりました。もともと、シリコンのLSI研究を目的に立ち上げられた装置群を使い、可動電荷や不純物の影響が抑えられていますし、作製プロセスの安定性を確保するために、きわどいプロセスは排除しています。同じように動作するデバイスが何個も得られることで、実験的に確認された物性そのものの信頼性も高くなります。

シリコンナノデバイスは、構造やプロセスを工夫することで、いろいろな機能や物性を引き出すことが可能で、また隣に実用化された信頼性が保証されたCMOSLSIがあって、同じ基準で信頼性の保証がなされるとともに、AIや脳型コンピューティング等の実現に向けて展開しやすいというメリットもあり、魅惑的なデバイスだと思います。



## デバイス基礎研究における連携の重要性

### 研究者紹介

藤原 聡

NTT物性科学基礎研究所 量子電子物性研究部  
上席特別研究員

今回の成果は、NTTが長年その作製技術を磨いてきたシリコンナノデバイスを用いて、電子と電子の衝突による電流の増大現象を観測したものです。NTTでは、1990年代からシリコンナノデバイスの研究開発を進めていますが、半導体業界の様相も大きく変化し、単純な微細化ロードマップは終焉を迎え、デバイスシステム一体のロードマップづくりが世界で進みつつあります。その流れの中で、beyond CMOSと呼ばれる新原理・新材料デバイスが、今後ますます重要となる低エネルギー技術の視点から研究をされていますが、その道筋はみえていません。

今回の成果は、成熟した産業材料であるシリコンでも「深堀り」をするとまだ予想外の現象が見つかる良い例であり、静岡大学の小野先生らによる緻密な測定により実現することができました。もちろん、このまますぐ現在の回路に組み込めるものではないので、電子衝突時のエネルギー移動機構の解明、適用可能な回路システムの開発など今後も幅広い検討の継続が必要です。NTTでは、今回のような新原理トランジスタ以外にも、電子1個を制御する極限エレクトロニクス技術を開発し、電流の物差しとなる高精度電流標準、高機能センサに利用する研究にも取り組んでいます。その際、基礎研究として穴を深く掘り下げる作業だけでなく、穴を広げて鉦脈がどこにつながっているのかを探る作業の両方を行うことが大切と考えており、世界の標準機関や大学などのパートナーとの連携を積極的に推進しています。

