



## 【寄稿】（新フェロー）

### 「超高速フォトダイオードとともに歩んだ 30 年」



加藤 和利（九州大学）

「超高速フォトダイオードとその通信技術への応用に関する研究」についての貢献として、電子情報通信学会フェローの称号を賜ることになりました。身に余る光栄と存じます。ご推薦いただきました方々、およびご評価いただきました方々に厚く御礼を申し上げます。また、これまでご指導いただいた先輩方、共に研究を進めてきた皆様に深く感謝いたします。

私が超高速フォトダイオードの研究を始めたのは、NTT 厚木研究所に入所して 3 年目の 1989 年でした。それまでの光通信用フォトダイオードは pn 接合面に対して垂直に光を入射する面入射型で、当時の最高動作周波数は 20GHz 程度でした。そこで将来の高速光通信用に 40GHz 以上で動作するフォトダイオードを実現しようというのが当初の目的でした。その頃すでに UCSB の John Bowers 教授がフォトダイオードを導波路型にして光を pn 接合に平行に入射することで 25GHz を超える動作を発表し始めていました。しかし導波路型フォトダイオードは入射光との光結合効率が低く、光通信用として用いるにはまだ不十分というのが一般的な認識でした。そこで光結合を向上するために、光結合構造とフォトダイオード構造を独立に設計できるマルチモード導波路型フォトダイオードを開発し、これにより 1990 年夏に 40GHz で動作する高効率なフォトダイオードを実現しました。短期間で研究が大きく進捗したのは、直接指導者であった秦進氏、アドバイザ的存在の河野健治氏、上司の吉田淳一氏（のち千歳科学技術大学教授）、永沼充氏（のち帝京科学大学教授）の諸先輩のご指導により私の個性を見極めてのびのびと活動をさせていただいたおかげだと思っています。40GHz 動作実現は当時画期的な成果で OFC'91 に高得点で採択されました。しかし 1991 年 1 月に勃発した湾岸戦争により 2 月の OFC'91 への渡航は自粛となり、発表のビデオ録画テープを送って OFC 会場で上映してもらおうという、波乱の国際会議デビューとなったことは今では懐かしい思い出です。オンライン会議が普及した現在は隔世の感があります。余談になりますが、

OFC の帰途に訪問する予定でした Bowers 教授が気の毒に思ってくれて、湾岸戦争が落ち着いた 3 月にフロリダでの会議に招待してくれました。この海辺で行われた会議は午前のセッションは 12 時まで、午後のセッションは夕食後からというもので（その間どうしていたかはご想像通りです）、その後の私的人的ネットワークの礎になったばかりでなく、研究は楽しみながらやるということを学んだ衝撃的な会議でした。

さらに研究を進めていくうちに、構造を工夫すると 100GHz も夢ではないことがわかってきました。そこでいくつかの導波路構造の改良を加え 50GHz, 60GHz と動作周波数を上げていくと、やがてこれ以上の周波数帯の測定手段がないことに行き当たりました。そんな折に同じ NTT 研究所で別の組織に所属していた永妻忠夫氏（現本学会副会長、大阪大学教授）が導波路型フォトダイオードの研究進捗を聞きつけ、共同研究の提案をいただきました。永妻氏は電気光学サンプリングによる高速電気信号測定の研究で、高速動作する被測定物が世の中にないため、高速フォトダイオードから出力される高周波信号を測定できないかというものでした。測定手段のない私にとっては願ってもない申し出であり、その後、両者を組み合わせて、私はデバイス技術という切り口で、永妻氏は測定技術という切り口で、それぞれいくつもの論文、国際会議発表を行いました。当時はまだあまり耳にしなかった Win-Win という言葉は、今考えるとまさにこのことであり、その後の私の仕事のスタイルを形成する重要な経験となりました。

その後、私はフランステレコム国立通信研究所に 1994 年から 1995 年にかけて一年間滞在し、ここで高速 MSM フォトダイオードの研究を行いました。NTT 研究所に戻ってからは動作速度が数 GHz 程度の光加入者系フォトダイオードの研究に携わることとなり、超高速からは離れた領域で長く活動することになります。一方、NTT の超高速フォトダイオード研究に関しては、石橋忠夫氏が単一走行キャリアフォトダイオード (UTC=PD) を発明し、これ

が超高速フォトダイオードのデファクトとして発展していきます。石橋氏と共同で導波路型 UTC-PD の開発なども行いましたが、私の研究の軸足は光デバイスを活用した光サブシステムの研究に移っていきました。

再び超高速フォトダイオードの分野に戻ってきたのは、NTT から九州大学へ移った 2012 年でした。着任直後でほとんど何もない研究環境でしたが、大橋弘美氏、笠谷和生氏、柴田泰夫氏の同期入社組をはじめとする元職場の諸氏からの多大な支援により、光を使ってテラヘルツ帯の超高速周波を発生させるという、超高速フォトダイオードの動作を利用した研究を目指すことにしました。まず最初に、私よりも一足早く転進して、すでにテラヘルツ波分野でご活躍されていた永妻氏に共同研究を打診し、かつてのようにデバイス研究とシステム研究との協働で新たなテラヘルツ波技術を一緒に発展させていくことにしました。また石橋氏にも協力を仰ぎ、超高速フォトダイオードを多数集積化した高出力、ビームステアリング型テラヘルツ波源の研究を進めました。この研究によりテラヘルツ波通信用のデバイス技術、送受信技術の進展に少なからず貢献できたと思っています。

その後も大阪大学とともに、テラヘルツ帯の半導体光集積デバイス、応用システムを開拓していきました。世の中では 5G の導入が開始され、研究としては Beyond 5G へ注目が集まるようになってきています。そこで開発してきたこれら技術を利用し Beyond 5G で求められる超安全な通信方式としてビームステアリングとコヒーレント検波によって特定位置でのみ信号受信を可能とする、無線方式における伝送路の脆弱性を根本的に解消しようという研究に取り組んでいます。

さて、学会活動に関しても少し触れたいと思います。学会の運営に最初に携わったのは 1998-1999 年に光エレクトロニクス (OPE) 研究専門委員会の幹事としてでした。その頃、電子情報通信学会では国際化強化が模索されていました。OPE 委員長の井筒雅之氏が積極的に国際化の検討をされており、幹事の私も自由に活動させていただいたおかげで、いくつかの国際化施策が実現できました。その一つが 1999 年ソサイエティ大会においてスイス連邦工科大学 Hans Melchior 教授をお呼びしての招待講演でした。また欧米から 3 名の講演者を迎えて OPE 研究会初の国際研究会を行いました。いずれも大勢の参加者が集い、盛況な会

となったばかりでなく、関連する方々の国際的ネットワークを築く一助になったと思っています。その後、前述のように研究分野が変わったことにより、しばらく学会活動からは離れていましたが、2012 年に九州大学に移った機に、マイクロ波フォトニクス(MWP)研究専門委員会に加えていただき、続いて OPE 研究専門委員会に復帰しました。また和文論文誌 C の編集委員長も務めさせていただきました。それまで一度も投稿する機会がなかった和文論文誌でしたが、編集に携わって初めてその意義を認識しました。和文論文誌は読者が日本人に限定されるために購読数が少なくインパクトファクターもつかず研究実績という点では不利ですが、一方で、言語の壁がないため、著者も読者も純粋に技術の議論に集中できます。日本語でしか伝わらないニュアンスもくみ取ることができ、インパクトファクターの違いだけが差別化要素となりがちな英文誌に比べて、日本人にとっては元来差別化要素を持った媒体であることを実感しました。2017 年度は OPE 研究専門委員会委員長に選出いただきました。ここでは学生教育の場としての研究会の活用を推進し、学生英語ポスター発表など、その後も継続される企画を実施しました。またそれまで懸案であったレーザ・量子エレクトロニクス (LQE) 研究会との連携強化へも大きく舵を切って、現在では総合大会、ソサイエティ大会で LQE/OPE 合同セッションが定着する礎を築けたと思っています。2020 年度は九州支部長として、支部の活性化に取り組み、ジュニア会員世代の学生教育に支部の意義を見出し、図らずもコロナ禍のもとで普及したオンライン技術を融合した新たな施策の企画などを行いました。

以上のように 30 年以上にわたり、本学会をフィールドとして研究活動、研究会組織の運営、学生教育を行い、私自身も成長させていただきました。その学会からフェローの称号を頂くことはまことに光栄なことです。今後も本学会の一層の飛躍に貢献できるよう尽力していく所存です。

著者略歴：

1987 年早稲田大学大学院理工学研究科物理学及应用物理学専攻修士課程修了、同年 NTT 厚木研究所入所。1993 年早稲田大学より博士 (工学) 授与。2012 年九州大学大学院システム情報科学研究院教授。2017 年度光エレクトロニクス研究専門委員会委員長。2020 年度九州支部長。



【寄稿】（新フェロー）

## 「波長可変半導体レーザの高性能化に関する研究」

石井 啓之（古河電気工業株式会社）



このたび電子情報通信学会よりフェローの称号を賜り、大変光栄に存じます。ご推薦頂いた方々をはじめ、研究を支えてくださった多くの関係者の方々に、深く感謝申し上げます。

さて、今回のフェロー称号の対象となりました波長可変半導体レーザの高性能化の研究に関して、振り返って述べさせていただきます。最初に半導体レーザに接したのは、学部4年生のときの卒業研究で、KDD 研究所（当時）の宇佐見氏（本学会フェロー）に、光通信用の  $1.55\mu\text{m}$  帯分布帰還型(DBF)レーザについて教えて頂いたことから始まりました。当時、米粒よりも小さい半導体レーザから発する光信号を用いて、太平洋を横断する光ファイバー通信ができるということに感銘し、また化合物半導体という特殊な物質から光を発することに非常に興味を持ったことを覚えています。修士課程では、大学の研究室の戻って別のテーマを行っていましたが、1990年にNTTに入社すると、光エレクトロニクス研究所の光通信用の半導体レーザを取り扱う部署に配属されました。最初に取り組んだテーマは、分布反射型(DBR)レーザの高性能化です。当時、前述のDFBレーザが光通信用の光源として既に使われていました。DFBレーザが利得領域部分に波長選択する回折格子が形成されているのに対して、DBRレーザは、図1(a)に示すように、レーザの利得領域とは別の領域に回折格子が形成された分布反射器(DBR)を有する構造です。このDBRレーザは、東盛氏（本学会フェロー）がNTTにて立ち上げた再成長技術を用いて作製されていました。このDBR部分の屈折率を電流注入などの方法で制御すれば、発振波長を変えられるので、波長可変レーザとして使えるのが大きな特徴です。但し、屈折率の変化量には限りがあったので、波長可変幅は10nm程度が当時の限界でした。その限界を超える方法として、位相変調の施された超周期構造回折格子(SSG)を用いて複数の反射ピークを作り出し、周期の異なる反射ピークを持つ2つの反射器を用意し、ヴァーニア目盛りの原理で波長可変を広げる方法を提

案したのが吉國氏（本学会フェロー）でした。このSSG-DBRレーザを作製したところ、100nmを超えるような発振波長の変化が得られました。当時、外部共振器型レーザではなく、半導体のみからなるレーザで、このような波長変化を得られるレーザは他になかったので、測定時に光スペクトル・アナライザーの波形をみながら、興奮したことを思い出します。SSG-DBRレーザに関して、私自身が関与したことは、反射スペクトルの最適化設計でした。当初は、広い波長可変幅は得られるものの、途中発振しない波長領域があって、これが実用上の課題でした。この原因は、反射ピークの強度が不均一であることだったので、均一な反射ピークを持つように回折格子の位相変調関数を数値計算により最適化しました。この結果、60nmを超える波長範囲をカバーする波長可変レーザを実現しました。入社して、最初にSSG-DBRレーザの研究に立ち会えたことは幸運であり、本学会の全国大会や研究会、そして国際会議、論文誌などで数多く発表することができました。

このSSG-DBRレーザを取り扱っていて大きな課題と感じたことは、波長の制御端子が3つあり、しかも縦モード跳びを伴いながら不連続に波長が変化するので、所望の波長を得るための条件の探索が難しいということでした。例えば、300点程度の波長の条件を見つけるのに、当初は手動で見つけていましたが、一週間ぐらいかかりました。その後、PCによる自動測定を導入しましたが、それでも数日かかりました。なので、モードが跳ばない制御が容易なレーザ構造はないものかと思っていました。そんな中、NECの研究グループより、選択成長技術を用いたDBRレーザで、モードが跳ばずに連続波長可変範囲を広げることができる構造が提案されました。この構造にヒントを得て、思いついたのが楕円電極構造を持つDBRレーザです。DBR領域に形成した楕円電極により屈折率変化量を調整することで、縦モードの変化量とDBR反射ピークの変化量の整合をとるというものです。この楕円電極DBRレーザで、単一の制御電極で連続的に波長を4.6nm程度変化さ

することができましたが、初期位相を制御するための電極が必要な点が今一つのところでした。連続波長可変できるレーザとしては、ジーメンス（当時）の Amann 先生が発明した TTG (Tunable Twin Guide)レーザ（図 1 (b)）の構造が優れていました。利得層の近傍に形成される波長制御層の屈折率を変化させることにより、波長が変えられる DFBレーザの一種です。波長制御層が共振器全体にあるためモードが跳ばずに波長変化します。但し、この構造の欠点としては、非常に近接した利得層と波長制御層に電流を効率よく注入するのが難しいため、光出力特性が劣る点でした。この TTGレーザと先ほどの楕円電極 DBRレーザから思いついたのが、分布活性(TDA-)DFBレーザになります。図 1 (c)に示すように、活性領域と波長制御領域を共振器方向に周期的に複数配置した構造になります。波長制御領域が共振器全体に分布しているため、モード跳びなく波長を変化させることができます。この構造のよいところは、基本的に DBRレーザと構成要素はほぼ同じで、利得層と波長制御層の配置や電極配置が異なるのみなので、作製プロセスが DBRレーザと同じで容易である点にあります。

さて、これらの研究は 1990 年代に行っていたもので、すぐに実用化とはなりません。波長多重通信システムの発展とともに、波長可変レーザが使われるようになるのは、2000 年代に入ってからとなります。SSG-DBRレーザはその高速波長切り替え特性を活かすべく、藤原氏を中心に光コヒーレントモグラフィー（OCT）用の光源として研究が進められました。一方、TDA-DFBレーザは、布谷氏を中心に特性改良され、光スイッチ用の光源として研究が継続されました。私は WDM 用光源として、DFBレーザアレイ型の波長可変レーザの開発に取り組むこととなります。実用化に際しては、チップ開発だけでなく、実装や波長ロッカーを用いた波長制御などの周辺技術の立ち上げも重要でした。その後、2010 年代に入ると、デジタル・コヒーレント通信用の光源として、狭線幅化の取り組みを行いました。28 年間、NTT 研究所にて半導体レーザ研究に関わっていたのですが、2018 年に古河電工に移った後も、データセンタ間などの比較的短距離のシステムへの適用を目指した小型波長可変光源の開発に携わっています。波長可変レーザは、光通信用の光源として欠かせ

ないものとなっており、今後も改良のための研究開発が進んでいくものと思われます。

このように長い間、波長可変レーザの研究開発に関われたことは非常に幸運でありました。また多くの関係者の皆様の協力があって、ここまで活動できたものと思っています。今後も、本学会の活動に積極的に参加し、本分野の発展に微力ながら貢献していければと思っています。

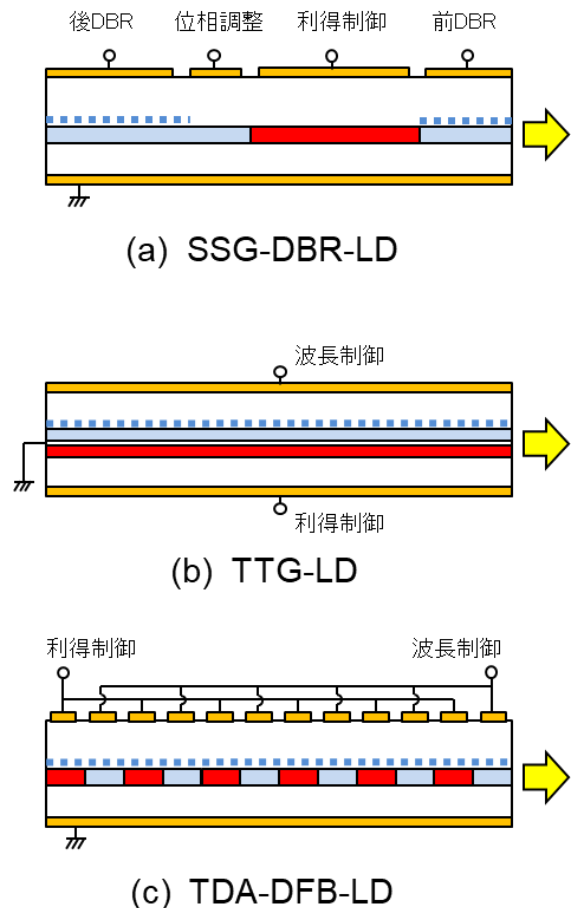


図 1 代表的な波長可変レーザの構造

著者略歴：

1990 年早稲田大学大学院電気工学専攻修士課程修了、同年日本電信電話株式会社光エレクトロニクス研究所配属、以来、光通信用半導体レーザー、光集積デバイスの研究開発に従事。1999 年博士（工学）学位取得。2018 年より、古河電気工業株式会社情報通信・エネルギー研究所に所属。1996 年信学会学術奨励賞受賞、2016 年信学会論文賞受賞。



## 【寄稿】（新フェロー）

### 「親愛なる数値計算、あなたは人間をナマケモノにしますか？」

木村 秀明（中部大学工学部情報工学科）



この度は、栄えある電子情報通信学会フェローの称号を賜ることになり、大変光栄に存じます。これも大学時代約5年間にわたりご指導頂きました北海道大学（故）深井一郎先生、（故）吉田則信先生、柏達也先生（北見工業大学教授）、NTT研究所の上司・同僚・後輩の方々および家族（真貴、笑、天）のご協力の賜物と思っております。この場を借りて、深く感謝を申し上げたいと思います。

私の表彰対象は「電磁界シミュレーションのモジュール設計応用に関する研究」です。簡単に言えば、電磁波基本方程式であるマクスウェル方程式を直接時空間で差分、リープログアルゴリズムを用いて逐次計算する数値計算法をモジュール設計に応用、コスト削減に寄与する設計製造 TAT（Turn Around Time）削減を目指した研究です。

私と電磁界シミュレーションの最初の出会いは、北海道大学工学部電気工学科 4 年時に所属していた深井一郎研究室での卒業研究テーマでした。当時、研究室では電磁界解析法として空間回路網法（Bergeron 法）の研究が盛んに行われており、企業・大学等様々な方面から注目を浴びていました。電磁界シミュレーション計算効率向上、適用領域拡大等、あくまで計算機（バーチャル空間）上での研究が主に行われていました。電磁界シミュレーションを実システム（リアル空間）へ適用、様々な領域に貢献出来ないかと考え始めた博士後期課程進学時に NTT 研究所との共同研究が始まりました。NTT 研究所での数値計算を利用した研究開発内容に衝撃（感動）を受けたのを今でも覚えています。また、「設計者の手段（ツール）として利用するだけの数値シミュレーション」に疑問を持ち始めたのもこの頃です。ターゲットとなるデバイス、モジュール等の問題、目標性能を与えるだけで自動的に計算機が解を出してくれるのも近い将来可能になると考えていました。前向きに言えば、将来の計算機性能の向上を予想していたのかも知れませんが、後向きに言えば、面倒くさいので計算機にやって欲しいという思いもあったと思います。「所詮、人間はナマケモノ」と当時から考えていました。以降、自身の歴史を振り返りながら「企業貢献」、「社会貢献」、「教育貢献」という観点から私の数値計算への想いを述べていきます。

数値計算の「企業貢献」という意味でのスタートは、1992 年に入社した NTT LSI 研究所（厚木）での柴田随道先生（東京都市大学教授）の指導のもと担当した将来の光通信中継系システムを支える「超高速・広帯域光モジュール」の研究開発でした。当時、上司であった赤沢幸雄グループリーダー（株）ファイ・マイクロテック最高顧問）から、「新婚旅行から戻ったら直ぐに実験検証できるように準備をしておくこと」と言われ、新婚旅行出発前（1992 年 9 月 12 日）までに 60GHz 以上の動作帯域性能を持つ新たなパッケージ構造を数値シミュレーションにより実現、特許出願、設計、業者発注、帰国後実験したことが懐かしく思い出されます。実装パッケージ構造に高速・広帯域アナログデバイス特性を回路モデル化、導入することでデバイスとパッケージが一体となった場合の特性を評価できる本提案は統合型電磁界シミュレーション技術として高い評価を受けました。結果として、「良いのか悪いのか」、私の超高速・広帯域光モジュールの研究はたった 1 年で終了することになりました。1993 年には、超高速・広帯域という光通信中継系システムに関する研究から低速・高感度という光アクセスシステムに関する研究にシフト、デバイス、モジュールの雑音との闘いに挑むこととなります。約 1 年間にわたる長期戦となりましたが、何とか低雑音化を実現することが出来ました。1994 年、伝送システム研究所（横須賀）に異動（2 年間）、光アクセスシステムの研究（伝送技術）がスタートしました。この 2 年間で自分にとっての技術蓄積の有意義な時間だったと思っています。配属された研究室は将来の日本の光アクセスシステムを担う組織であったため研究費が桁違いに膨大（無尽蔵）で、アイデア、やる気さえあれば何でも自由に出来るという環境でした。元々電気屋の私は、この 2 年間で様々な光デバイス設計技術、伝送技術を習得することが出来ました。また、酒を通じて研究者としての哲学を学んだのもこの時期お世話になった渡辺隆市グループリーダーのおかげと感謝しています。電気、光および通信システム関連技術の基本を学び、研究者として何か世界一を達成したいと思っていた 1996 年、通信システムの低消費電力化技術の研究をプロジェクトリーダーとして立ち上げました。今から思えば、本

研究が数値計算の「社会貢献」という意味での第1歩だったかなと思います。「地球環境負荷低減」という観点から、NTT研究所の持つ超低消費電力デバイス技術、高効率バッテリー技術、通信システム化技術と数値シミュレーション技術を連携・融合することで通信ネットワークの抜本的消費電力低減化に取り組み、光通信モジュール完全1V動作化を達成、従来では考えられないレベルの超低消費電力化を実現、国内外から高い評価を受けることが出来ました。また、同時期に並行開発していた数値シミュレータは幅広い組織で利用、研究成果創出に貢献することが出来ました。

「誰もが1度は経験する？」共通業務を担当する年頃であった1998年、プロジェクトマネージャ補佐(研究企画、予算管理、人事育成・評価等)を命ぜられました。数値計算により研究開発の徹底的な効率化(設計技術者不要)を目指していた私にとっては「最初の暗黒時代」でした(笑)。それでも数値計算への未練は消えず、何とか補佐業務に活かせないかと考え、分析学、統計確率論等を駆使、謎の「人事評価システム」を構築、プロジェクト内で運用しました。今から考えると私自身最初の人工知能(AI)技術の研究、応用展開例だったのかも知れません。当時、隣のプロジェクトマネージャであった篠原弘道(現NTT会長)から「本当にお前は面白い奴だ」と言われたことが思い出されます。

ようやくプロジェクト補佐業務があげ、新たな技術に取り組み、軌道にのり始めた2003年7月、NTT東日本への異動、人事業務を担当することになりました。これが「2回目の暗黒時代」でした(笑)。それでも、研究開発へのこだわりから、人事業務の傍ら数値計算による新たな光モジュール設計を実施、エレクトロニクスライターに投稿、採録されたことが思い出されます。この頃、日々の人事業務を通じ、「工学という観点から、何か人、社会の役に立つことが出来ないか？」と真剣に考えるようになりました。

2005年7月にNTT研究所に復帰後、最初に取り組んだのが「異分野連携技術」です。その中でも2007年に研究を開始した「光給電型停電時通信システム」は、光通信システムで困難とされていた停電時における通信ライフライン確保を可能とするシステムで、「デバイス技術」、「光通信技術」および「音源分離技術」等、異なる研究分野の技術融合「異分野連携」により実現しました。「デバイス技術」に関しては、懐かしい「ゲルマニウムラジオ」の原理を利用することで受信無給電化を実現、「音源分離技術」は時間的にランダムに多重されたユーザ分離に利用しました。「光通信技術」は、光ループバック方式による音声送信用光として利用するとともに、波長分散特性による音

源分離精度向上技術として利用しました。本研究は、2011年3月11日に発生した東日本大震災直前に開催された「総務省:第2回アクセス回線の光化に対応した重要通信の確保等に関する検討会」において「局給電型光アクセスシステムの研究概要」として紹介、議論されました。以降、研究所企画部長、プロジェクトマネージャ等を担当、研究現場から離れることになりましたが、現在も数値計算の将来像を見据えた研究構想を温め、次なるチャレンジの機会を狙っています。その1つが「数値計算と演繹の人工知能を融合した技術者不要完全自動化システム」の実現です。

一方、学会活動という点では、2001年にマイクロ波シミュレータ研究専門委員会幹事、2009年、東京支部評議員、2012年、エレクトロニクスシミュレーション研究専門委員会副委員長、2016年、同委員会委員長、2017年電磁波基盤技術領域委員会委員長等を務める等、通信関連社内業務とは異なる領域に携わることが出来ました。数値計算という分野・領域に長い間継続的に取り組むことが出来たのも電子情報通信学会における活動の賜物であると学会事務局等関係者に大変感謝しています。学会の「教育貢献」と観点からは、東京支部評議員時の「作るって面白い!みんなでも面白い!でも何でだろう?」というテーマでの夏休み子供科学教室企画が代表例として挙げる事ができます。現在も、科学の不思議さ、面白さ、皆でやることの楽しさ、モノ作りの楽しさ、考えることの大切さを子供たちに教える「一般市民向け技術教室」と「子供サイエンス教室」を実施しています。その際、「数値計算」を用いることで様々な現象を可視化、理解度を高める工夫をしています。今後も、学会活動と科学技術の意義を伝えることで将来の科学技術者の裾野拡大に努めていきたいと考えています。

現在、私は大学教員として学生に「技術の面白さ・大切さ」を「数値計算」および「経験」をベースに教えています。今後も第3の科学「数値シミュレーション技術」は進化・発展、様々分野と連携・融合することで想像も出来ない社会を実現してくれると考えています。結果として、それが「人間をナマケモノにする」ことになったとしても。

著者略歴:

1992年北海道大学大学院工学研究科電気工学専攻博士後期課程修了、同年NTT LSI研究所入所。以来、デバイス、システム、オペレーションおよび数値シミュレーションに関する研究、商用化開発に従事。2019年7月、中部大学工学部情報工学科教授。2016年エレクトロニクスシミュレーション研究専門委員会委員長。2018年度本会教育功労賞受賞。



## 【寄稿】（新フェロー）

### 「小形端末用 Si-RFIC 技術の開発とその先駆的無線システムへの応用」



末松 憲治（東北大学）

このたび、「小形端末用 Si-RFIC 技術の開発とその先駆的無線システムへの応用」における貢献に対して、電子情報通信学会フェローの称号を賜り、まことに光栄に存じます。ご推薦ならびにご評価頂きました方々には厚く御礼申し上げます。また、本研究開発を進めるにあたり、ご指導、ご協力頂きました皆様と、共に研究を進めてきた学生諸君に、心より感謝申し上げます。

フェロー称号授与の対象となりました研究開発の内容は「小形端末用 Si-RFIC 技術の開発」と「その先駆的無線システムへの応用」の 2 つに大きく分けることができます。

#### ・小形端末用 Si-RFIC 技術の開発

1990 年代に入ると、携帯電話や高度道路交通システム (ITS) などの移動体通信の普及に伴い、これら通信端末の小型化、低コスト化が求められてきました。これら端末の高周波 (RF) 部に関しては、化合物半導体を用いた回路が用いられていましたが、1990 年代半ば以降、ベースバンドアナログ回路、Phase Locked Loop (PLL) 回路、あるいはロジック回路などが集積された Si-IC との 1 チップ化を目指した小型端末用 Si-高周波 IC (RFIC) 技術が開発され、実用化されたことで、端末の小型化、低コスト化が急速に進み、これら無線システムの普及に大きく寄与しました。

私は、1987 年に企業に就職し、マイクロ波能動回路の研究開発を担当する研究部署に配属されました。当時は、マイクロ波を使った製品としては、衛星通信とレーダーが主体で、GaAs などの化合物半導体を用いた回路の研究開発に従事していました。その後、1990 年の少し前に、米国モトローラ社から小型軽量の携帯電話の原点ともいえるべきマイクロタックが発表されたことを契機に、これに対抗する研究開発が始まり、GaAs-モノリシック集積回路 (MMIC) を用いた高周波部の小型化・低コスト化が急速に進みました。しかし、第 1 世代から第 2 世代の携帯電話に進むに従い、送信増幅器に比べて価格が安い受信系に関しては、GaAs-MMIC ではコストがかかりすぎる問題[1]が発生し、この解決策が必要となっていました。

このような背景のもと、GaAs-MMIC に代わるものとして、当時  $1\mu\text{m}$  程度のプロセスルールを用いていた Si-IC の

RFIC としての将来性に着目し、1990 年半ばの黎明期に、パーソナルハンディフォンシステム (Personal Handy phone System, PHS) を想定した小型端末用 Si-RFIC の研究開発に着手することができました。この Si-RFIC 試作を行うにあたり、職場において支援・協力頂いた、素晴らしい上司や諸先輩の皆様、また、同僚の皆様に恵まれたのは非常に大きかったと思います。このおかげで、どうにか  $0.8\mu\text{m}$  BiCMOS プロセスで試作した最初の Si-RFIC が出来上がり、1996 年に IEEE MTT-S IMS、さらには、EuMC でも発表することができました。この RFIC では、高周波で問題となる低抵抗 Si 基板による誘電体損失を低減する方法として、コプレーナ線路を採用してオンチップ・リアクティブ整合 (当時は、オンチップ整合 (on-chip matching) や RFIC という言葉が現在ほどは一般的ではなかったため、論文の中では、それぞれ、内部整合 (internal matching)、Si-MMIC という言葉を使っています[2]) 回路を採用し、PHS への適用を想定した 1.9 GHz 帯の低雑音増幅器、送信増幅器、送受信スイッチ[3]を 1 チップに集積しています。この発表が注目されたことで、1997 年には、IEEE RFIC Symposium での招待講演や、UCLA Abidi 研究室での講演会など、様々な経験をさせて頂きました。国内外の学会において、温かい励ましや自身の考えの不足に対するご指摘、ご指導など、職場では得られない、グローバルな評価を頂いたことは後々の自分の研究者としての成長につながったと、大いに感謝しております。その後、2000 年代半ばにかけて、携帯電話、無線 Local Area Network (LAN)、海外デジタルコードレス電話、Electronic Toll Collection system (ETC) [4] など、おおよそ 6 GHz 帯までの各種小型無線端末用に、CMOS プロセスや SiGe を含む BiCMOS プロセスを用いた Si-RFIC の開発・製品化に携わり、喜びとともに、その実用化の難しさも経験することができました。

#### ・その先駆的無線システムへの応用

2000 年代半ば以降、CMOS プロセスの微細化とともに、トランジスタの動作周波数は 100 GHz を軽く超える領域に達し、高出力増幅器を除けば、Si-RFIC 化が可能となってきました。国内半導体業界の世界的な競争力が次第に低下していく状況において、RFIC の研究開発者としては、

海外のファンダリでの IC 製造にシフトせざるを得なくなっていました。これは、最先端のプロセスを世の中に先んじて使った研究開発が行えないということの意味しますので、プロセスに依存しない、イノベティブな回路の研究開発は何かを考えざるを得なくなってくるわけです。

そこで注目したのが、ソフトウェア無線機(Software Defined Radio, SDR)です。CMOS プロセスの微細化に伴い、高速な Analog to Digital Converter (ADC) / Digital to Analog Converter (DAC) と高速なデジタル信号処理が可能な Field-Programmable Gate Array (FPGA) が比較的容易に入手できるようになり、現在では Universal Software Radio Peripheral (USRP) による無線機の SDR 化が、盛んに行われるようになってきました。SDR は、ソフトウェアを書き換えることで、1つのハードウェアにより、複数の異なる無線システムでの通信を可能とする技術ですが、実際に複数システムを渡り歩く無線機だけではなく、製品寿命が長く寿命の途中で無線システムの更新が必要となる無線機や、生産数量が少なく個別生産となってしまう特定用途や試作品レベルの無線機など、さまざまな用途の無線機アーキテクチャとして注目されています。

RF 周波数や帯域が異なる複数の無線システムでの通信を実現する SDR 無線機の場合、RF 帯ではマルチバンド機能、ベースバンド帯ではマルチモード機能が必要とされます。1992年に J. Mitola が示した理想的な SDR 送受信機構成[5]では、ADC や DAC で RF 信号を直接サンプリングあるいは生成しています。この構成では、通常、RF 周波数は ADC や DAC のナイキスト周波数(クロック周波数の 1/2) 以下となります。CMOS 微細化が進んだとは言え、前述の市販レベルの FPGA と ADC/DAC を用いる範囲においては、数 GHz 程度のクロックしか使えず、数 GHz までの周波数帯を中心にしたアプリケーションに留まっています。より高い周波数帯での動作が必要となる場合には、ADC/DAC はベースバンド帯でのマルチモード機能の実現のみに用い、RF 帯でのマルチバンド機能は、ダイレクトコンバージョン方式などのマルチバンドに対応可能な RF アナログ回路で実現するという構成をとることが多く、実際に市販されている USRP においても、この構成となっていることが多いかと思えます。

これに対して、RF アナログ回路に頼らず、ADC/DAC 等で直接ナイキスト周波数以上の高い周波数帯の RF 信号のサンプリングや生成を行う構成として、ダイレクトデジタル RF 送受信機[6]を提案してきました。送信機においては、1-bit  $\Delta \Sigma$  変調器の出力の 1-bit DAC において、イメー

ジ成分を取り出す構成、受信機においては、アンダーサンプリング受信構成を採用することで、ダイレクトデジタル RF 送受信機を実現しています。その際、直接 RF 信号とのやりとりをし、より高い高周波性能が求められる送信側の 1-bit DAC、受信側の Sample and Hold (S/H) 回路については、これまで研究開発してきた Si-RFIC 技術に基づき、自ら設計、試作しているわけです。アナログとデジタルの境となる部分は、オーディオで言えば、アンプとスピーカー、あるいは、マイクやピックアップになります。アナログである実世界とデジタル世界をつなぐ部分こそ、今後も最も価値があり続ける場所だと信じています。

#### 参考文献

- [1] N. Suematsu, M. Shimozawa, K. Mori, Y. Nakajima, K. Maemura, O. Ishida, "Low Power Consumption RF IC's for Japanese Mobile Handset Terminals," 1995 IEEE International Topical Meeting on Normadic Microwave Technologies and Techniques for Mobile Communication and Detection, pp.39-42, 1995.
- [2] N. Suematsu, M. Ono, S. Kubo, Y. Iyama, O. Ishida, "L-Band Internally Matched Si-MMIC Front-End," IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques, Vol. 44, No. 12, pp.2375-2378, 1996.
- [3] Y. Iyama, N. Suematsu, T. Shigematsu, T. Moriwaki, T. Ikeda, "L-Band SPDT Switch Using Si-MOSFET," IEICE Trans. Electron., Vol. E79-C, No. 5, pp.636-643, 1996.
- [4] S. Shinjo, K. Tsutsumi, K. Nakajima, H. Ueda, K. Mori, M. Hieda, J. Koide, M. Inoue, N. Suematsu, "5.8GHz ETC SiGe-MMIC Transceiver Having Improved PA-VCO Isolation with Thin Silicon Substrate," 2006 IEEE MTT-S International Microwave Symposium, pp.2039-2042, 2006.
- [5] J. Mitola III, "Software Radios - Survey, Critical Evaluation and Future Directions," National Telesystems Conference (NTC-92), pp.13/15-13/23, 1992.
- [6] 末松 憲治, 本良 瑞樹, 亀田 卓, "ダイレクトデジタル RF 技術," 信学論, Vol.J102-C, No.11, pp.297-304, 2019.

#### 著者略歴:

1985年 早大・理工・電子通信卒。1987年 同大大学院博士前期課程了。同年三菱電機(株)入社。1992~1993年 英国リーズ大学客員研究員。2008年~2010年 東北大電気通信研究所客員教授。2010年 同大教授、現在に至る。2018年~ 同大電気通信研究所 21世紀情報通信研究開発センター長。博士(工学)早稲田大学。1990年度 本会篠原記念学術奨励賞。2002年 電気科学技術奨励賞(オーム技術賞)、2009年 文部科学大臣表彰科学技術賞(開発部門)、2012年 本会エレクトロニクスソサイエティ賞を受賞。