



【寄稿】（新フェロー）

「衛星通信およびレーダ用アンテナ給電回路の研究開発と実用化」



磯田 陽次（秋田県立大学）

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。推薦して頂いた方々に心より御礼申し上げます。また、これまでご指導頂いた諸先輩、共に仕事をした同僚、後輩の多くの方々に感謝いたします。

私は1979年に三菱電機（株）に入社し、14年間アンテナ給電回路の研究開発に携わりました。会社では素晴らしい先輩方に公私にわたってご指導頂きました。私が会社に入って最初に言われた仕事はL帯の導波管部品のハイパワー試験でした。ピークが1kW程度のパルスで導波管部品が絶縁破壊を起こさないかを見るものでした。試験装置全体が金網で覆われていて、ハイパワーを出す時はパトライトが点滅するような大掛かりな装置でした。最初はへっぴり腰で行っていましたが、慣れてくるとだんだん横着になり、金網を開けっ放しで実験するようになっていました。

この頃、衛星通信では回線需要増大に対応するためC帯(6/4GHz帯)およびKu帯(14/11GHz帯)での固定衛星業務に対する割当周波数帯域幅が500MHzから約1GHzに拡大され、これに対応する広帯域なアンテナ給電回路が必要になりました。今回フェローを頂くことになったテーマはこの頃の研究成果です。

Ku帯広帯域偏分波器は断面が十字型をした導波管における直交偏波の電磁界が偏波に応じてそれぞれ異なる部分に集中することに着目したものです。設計や実験が上手くいかない時上司に相談すると、まるで電磁界が見えるかのように説明やヒントを頂きました。Maxwellの方程式の重要性、美しさを感じるようになったのはこの時の仕事のおかげです。この仕事では従来の正方形導波管を用いた偏分波器より1.6倍広帯域化することが出来ました。

同様に、Ka帯広帯域分波器では使用帯域間のガードバンドの狭い隣接帯域分波器を開発しました。従来の隣接帯域分波器は比帯域幅が1%以下と狭く、このままでは適用できません。そこで、従来の隣接帯域分波器の設計で用いられる一端終端形フィルタと通常分波器の設計で用いられる両端終端形フィルタの中間の結合係数を有するフィルタを考案し、フィルタの比帯域幅2.7%と2倍以上の広帯域特性を実現しました。

上記2つの開発は導波管を用いて行いました。アンテナ

給電回路としては導波管が最も低損失であったためです。しかし最近はだんだん導波管を見なくなってきました。マイクロストリップ線路やコプレーナ線路等の伝送線路を構成する材料が低損失になってきたこともあるでしょう。これらの研究開発を行っていた頃は、ロケットや人工衛星の開発が盛んに行われ、開発費も現在よりは潤沢であり恵まれた環境にあったと思います。

これらの研究の集大成として、1993年から4年間研究所から製作所に課長として異動し、北米をカバーする静止衛星MSATを用いた移動体衛星通信端末の開発に携わりました。開発のポイントは車載用端末装置の小型化と低価格化でした。新しい部品等の開発は避けて、できるだけ市販の低価格な部品を使うこと、北米の砂漠地域や北極圏では通信の確保は命綱ですから故障しないことを大きな方針として開発しました。図1は開発した車載端末の写真です。私は主にアンテナ装置（写真では白いドームのような装置）の開発を担当しました。L帯のヘリカルアンテナを用い、アンテナ下部に送受信回路やステップモータによる衛星追尾回路を設けています。この他にも乗用車の屋根にフィットするように薄型アンテナやブリーフケース型の可搬型端末、船舶用のアンテナも開発しました（図2）。この開発では信頼性の確保も重要項目でした。高温・低温の温度試験の他、トラックの振動条件を調べての振動試験、塩水噴霧試験等、環境試験は嫌と云うほど実施しました。しかし、開発が遅れに遅れて製造現場の人達、品質管理の



図1 北米向け移動体衛星通信端末



図2 種々のアンテナ装置

人達、何より客先に多大なご迷惑をお掛けしてしまいました。なんとかハードウェアが出来あがってから、現地の北米でソフトウェアのバグ出しも兼ねて走行試験も行いました。衛星追尾試験や衛星からのビームが切り替わる地域でも通信が途切れず切り替わるか、高緯度の北極圏でも衛星が補足出来るか等、北米中をかなりの距離走行試験しました。おかげで販売後のクレームは非常に少なかったと記憶しています。

ここで開発したブリーフケース型可搬端末が米国の映画の「ジュラシックパーク」や「タイタニック」の1シーンに使われた、と開発に携わった我々の間では大きな話題になりました。ブリーフケース型可搬端末は私がこの部署を外れてからも開発が継続されて、ノートブック PC の寸法まで小型化されました。この技術は現在 NTT ドコモの衛星電話用端末（ワイドスター）に生かされています。この MSAT システムが実用化された 1995 年には北米で携帯電話のローミングサービスが低価格で利用できるように

なったため、主に長距離トラックや船舶等に使用されました。結局、予定していた程多くは出荷されず、残念ながら事業としては成功したとは言えない結果となりました。しかし、事業の厳しさやチームでの仕事の進め方、人のつながり等の得難い経験をすることができ、厳しい期間でしたが良い思い出になっています。

私は会社を辞して、2008 年から秋田県立大学に転職しました。2002～2005 年の 3 年間の東北大学への出向が大きな転機であったと思います。会社で若い技術者を育成するよりも大学でもっと若い学生を育成したいと思ったのです。しかし、現実はそのように生易しいものではありませんでした。授業に出て来ない学生のアパートまで様子を見に行ったり、親を呼んで学生と一緒に面談をしたりと、自分の学生時代には決して無かつたであろう事を行っています。研究室でもやる気の無い学生にいかにかやる気を起こさせるのが大きな課題です。卒業するまでに学生に学会で発表させることもやる気を引き出す一つの手段と考えています。東北支部大会や総合大会などで発表させることで少しでも学会が盛り上がれば良いと考えています。

技術以前のことで悩む毎日ですが、将来の日本を任せられる技術者にして世の中に送り出すことが自分の仕事だと思い、これからも頑張っていく所存です。

著者略歴：

1979 年大阪大学工学研究科修了、同年三菱電機（株）に入社。以来、フィルタや電力分配器等のマイクロ波回路、増幅器や発振器等の研究開発に従事。2002～2005 年東北大学電気通信研究所教授。現在、秋田県立大学教授。電子情報通信学会では、エレス副会長、マイクロ波シミュレータ時限研究専門委員会委員長、電子情報通信学会代議員、東北支部委員等を歴任。



【寄稿】（新フェロー）

高分子エレクトロニクスにおけるナノ界面電気化学現象と評価技術

小野田 光宣（兵庫県立大学）



このたび、電子情報通信学会から“高分子エレクトロニクスにおける界面現象の解明とその制御”における貢献に対してフェロー称号を賜りました。ご推薦いただいた方々をはじめ、この研究に携わる機会をいただき、公私ともに指導いただいている恩師吉野勝美大阪大学名誉教授（現島根県産業技術センター所長）、私のつたない指導の下で惜しみない努力と多大な貢献をしていただいた卒業生、修了生の皆様は心より深く感謝いたします。

21世紀に入り、環境・エネルギー・ライフサイエンス・バイオ・通信・ナノテクノロジーの時代と言われ、我国でも重点分野と位置づけた政策がとられている。高度映像情報化社会を取り巻く環境はますます複雑となり、多種多様化し、インターネットを中心とした情報化技術の著しい進展に伴って、次世代エレクトロニクス技術の構築が極めて重要であることが指摘されている。また、事業展開のグローバル化、ボーダーレス化および国際大競争化の時代に入り、産業界は激しい技術・価格競争にさらされているだけでなく世界的規模での組織の改編や構造改革を余儀なくされている。我国では、2000年に“産業技術力強化法案”を成立させており、産官学連携を積極的に推進し、高度先端技術に基づく産業競争力の強化が図られている。特に、環境、エネルギー、情報、福祉などの分野でより身近で質の高いエレクトロニクス技術に関心が持たれるようになってきた。いわゆるユビキタス社会からアンビエント社会になりつつある。本寄稿では、次世代エレクトロニクス技術として注目されている有機エレクトロニクスの現状と将来展望、特に機能発現の源であり、要でもある有機/無機、有機/有機界面の評価、制御技術の確立が不可欠であることを指摘したい。

少しシリコン（Si）半導体の進歩の歴史を振り返ると、1947年の米国 AT&T Bell 研究所の William Bradford Shockley Jr, Walter Houser Brattain, John Bardeen らの点接触型トランジスタ（最初のトランジスタ）の発明以来、デバイス物理の徹底した解明が発展の大きな支えとなっている。Si 半導体産業は、リソグラフィ技術の改良による素子の微細化が進展すると、スケーリング側による高速化、低消費電力化、高集積化が同時に達成され、優れた技術革

新を生み出し、情報化社会に恩恵を与えている。21世紀に入り、半導体エレクトロニクスの最先端 driving technology の「物理的」な限界、例えば、薄いゲート絶縁膜のためトンネル電流の抑制が困難、不純物濃度の制御困難による素子特性のばらつき、スケーリング側が不適用、さらにはリソグラフィ技術の極短波長光源の問題など、これまでの半導体エレクトロニクスの魔法の技術革新の陰りが指摘されているが、プロセス微細化などの限界説がごとごとく打ち破られ現在も進展が続いている。

一方、界面とは、気体、液体、固体のいずれか二つの相が互いに接触している境界面のことである（余談だが、相の一方が気体の場合には通常、表面と呼んでいる）。電極/無機半導体の界面を正しく理解することは古くて新しい問題で、その界面に生ずる Fermi 準位のエネルギー差（真空準位シフト）を見積る議論はいまだに続いている。少し古いと言われるかも知れないが、R.T.Tung は電極と半導体の構成元素の物理定数から一般的に真空準位を導く手法を報告している。

有機半導体とは、半導体としての性質を示す有機材料のことで、低分子有機半導体としてペンタセン、アントラセンなど、高分子有機半導体としてポリチオフェン、ポリ(p-フェニレンビニレン)などが知られている。これらは p 型有機半導体あるいは n 型有機半導体と呼ばれることが多々あるが、これは正孔を注入しやすい、電子を注入しやすいという意味であり、無機半導体のように多数キャリアとして正孔や電子を半導体中に有しているという意味ではない。Si 半導体デバイスでよく理解されている動作原理を有機半導体デバイス（例えば、最近、有機薄膜材料をデバイスの活性層とする有機電界発光素子、有機薄膜トランジスタ、有機薄膜太陽電池など次世代エレクトロニクスの開発競争が活発になされている。）へ適用しようとしたとき、充分理解できないことが多い。例えば、有機電子光機能デバイスの界面における空間電荷の存在が素子特性に大きく影響するため、界面現象の評価、界面の制御など手法の確立が強く望まれる。無機半導体デバイスと同様に、有機半導体においてもデバイス物理は重要であり、特に有機半導体と形成する界面の理解は極めて重要な課題である。

このような背景の中、これまで Si をはじめとする無機半導体を中心に発展してきたエレクトロニクスの世界が、有機材料を中心とするエレクトロニクス(有機エレクトロニクスと呼ぶ。)に変わろうとする**パラダイムシフト**が現実味を帯びてきた。言い換えれば、21 世紀では、現在の技術の限界、資源、環境、エネルギーなどの制約を考えると、新しい概念の材料、素子、デバイスが不可欠で、特に炭素、水素、窒素などを主成分とする有機物質の特性を生かした有機エレクトロニクス、オプトエレクトロニクスが極めて重要となり、社会を支える基盤材料、基盤技術の中核となると考えられる。有機材料は多くの場合ファンデルワールス力で結合しているため、柔軟性に富み、軽く、薄く、曲げられることから、半導体の性質を示す柔構造有機半導体 (Flexible Organic Semiconductor) を基本とする有機エレクトロニクスは、**フレキシブル・エレクトロニクス (Flexible Electronics)** あるいは**プラスチック・エレクトロニクス (Plastic Electronics)** とも呼ばれている。また、印刷技術を用いて製膜できるので大面積化や低価格化が可能なことから、**プリンティッド・エレクトロニクス (Printed Electronics)** とも呼ばれ、柔構造有機半導体材料を活性層とする有機電界発光素子、有機トランジスタ、有機太陽電池などをはじめとする有機電子素子の開発研究が極めて活発に展開されている。

一方、ライフサイエンスやバイオでは、生体機能を電子工学的に研究するバイオエレクトロニクス、更には生物の持つさまざまな働きを上手に利用し、我々人間の生活や環境保全に役立たせようという技術としてバイオテクノロジーが注目されており、界面制御技術が要であることは言うまでもない。例えば、バイオセンサの応用分野は、“医療、健康分野”、“食品、発酵分野”、“環境分野”および“セキュリティ分野”に大別される。

次世代素子として提案された分子素子の概念は、“電子の流れを制御する機能を個々の分子に持たせ、分子サイズの電子素子を実現する。”と言うもので、エレクトロニクス素子機能を分子で代行させようとする考えである。分子素子を実現するためには、①機能分子の材料化、②機能分子の集積化、③電子遷移を制御する分子系の組立、④分子レベルでの構造制御などの克服が極めて重要となる。これらの主たる機能源は、 π 電子、双極子、スピンおよび異性化、相転移などが考えられ、分子設計、合成技術などの進歩や有機/有機あるいは有機/無機界面における電子現象の解明によってこの分野の大きな発展が期待される。有機エレクトロニクスを目指した有機誘電体、半導体、導電体材料や有機分子素子材料の持つ性質と特徴を電気電子工学分野で活用するために必要となる界面の理解と評価、制御を中心とする工学体系として「有機分子素子工学」への展開を図ることが不可欠である。

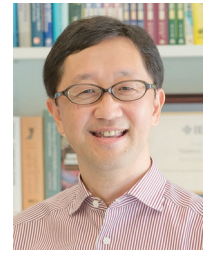
著者略歴：

1977 年兵庫県立姫路工業大学大学院工学研究科修士課程修了。1979 年姫路工業大学助手、助教授を経て 2000 年同大学教授。2004 年兵庫県立大学教授。1984 年工学博士(大阪大学)。1994 年～1995 年米国ペンシルバニア大学化学科客員研究員として Alan G. MacDiarmid 教授(2000 年“導電性高分子の発見と開発”でノーベル化学賞受賞、2007 年 2 月 7 日逝去)の指導を受ける。主として、導電性高分子の電気化学的機能と生体エレクトロニクス技術の研究開発に従事。電子情報通信学会和文論文誌、英文論文誌編集委員など各学会委員を多数歴任。2011 年電気材料技術懇談会優秀論文賞。著書 高分子エレクトロニクス(コロナ社、1996 年)、有機電子デバイスのための導電性高分子の物性と評価(シーエムシー出版、2012 年)など多数。



【寄稿】（新フェロー）

「VLSI 回路の研究：課題解決から未来創造へ」



黒田 忠広（慶應義塾大学）

このたび伝統ある電子情報通信学会より、「VLSI 回路の低電力高速化に関する先駆的研究開発」の功績に対してフェローの称号を賜り、大変光栄に存じます。推薦していただいた方々、関係者の皆さま、研究を支えてくださった多くの方々に深く感謝いたします。

CMOS LSI は、指数関数的な量的拡大を遂げ、社会の隅々に浸透してきました。集積化の最大の壁は発熱であり、低電力化技術なくして今日の VLSI はあり得ません。1990 年代、私は低電力回路技術の研究に取り組みました[1, 2]。2000 年代になりムーアの法則の終焉が議論される中で、集積の対象範囲はチップからパッケージやモジュールへと拡大しました。私は、近接場無線接続技術の研究に取り組みました[3, 4]。更に 2010 年代になると、VLSI が創る知能は一部ヒトの脳に迫る水準になりました。私は認識や人口知能への応用研究に着手しました[5]。このように VLSI の急速な発展に応じて私の研究も展開してきました。

加速度的な進歩をとげるこのテクノロジーは、近い将来、人類の営みさえも変える潜在能力を秘めています。人類社会を変革する力は沸点に達しつつあります。この量的拡大から質的発展への変化に伴い、求められる研究力は、技術ロードマップを実現する課題解決力から、未来社会を創り出す創造力へと変わります。量的拡大・課題解決から質的発展・未来創造へと変革する技術の踊り場において、過去を振り返り将来を展望することは、読者の皆さまにとっても興味のあることかと考え、以下に管見を申し述べます。

まずは過去から現在までを簡単に振り返りましょう。量的拡大の象徴であるムーアの法則を可能にした技術開発は、高速化から低電力化、エネルギー効率化へと推移しています。その背景には、ダウンサイジングするアプリケーションの要求とデバイスの課題があります。1980 年から 2005 年の四半世紀は、PC 市場が半導体技術を牽引しました。80 年から 95 年は、高速化の時代でした。デバイスの微細化により、プロセッサのクロック周波数は 2 年で 2 倍高速になりました。しかし、動作電力は 3 年で 4 倍増え、15 年間で 3 桁増えました。消費電力の増大に伴い、チップの冷却や給電のためのコストが急増し、動作電力の削減が危急の課題となりました。95 年から 2005 年は、低電力

化の時代でした。電源電圧 (VDD) としきい値電圧 (V_{th}) の低電圧化と制御により、動作電力の増大は 3 年で 1.4 倍に抑制されました。当時、私は V_{th} を基板バイアスで制御する回路技術「VTCMOS」や VDD をチップに搭載した DC-DC コンバータで制御する回路技術「VS 方式」を考案し研究していました。1996 年に V_{th} を回路で制御した世界初の画像処理プロセッサを ISSCC で発表しました[1]。また、1997 年に VDD と V_{th} を回路で制御した世界初の RISC プロセッサを CICC で発表しました[2]。これらの功績に対して、2006 年に IEEE Fellow、2009 年に電子情報通信学会業績賞をいただきました。

2005 年以降半導体市場の中心は携帯電話に移り、積極的な低電力化の時代になりました。デバイスの微細化は限界に近づき、量子効果によるリーク電流が顕在化しました。そこで、電源電圧を限界まで下げる回路技術を追究する NEDO の「極低電力回路・システム技術開発」プロジェクトに私も参加しました。また、ムーアの法則の終焉が議論される中で、VLSI の対象はチップ (SoC) からパッケージ (SiP) へと拡大しました。私は、パッケージ内に積層されたチップ間を磁界結合で高速・低電力にデータ通信する技術を考案し研究しました。2004 年に世界で初めて磁界結合を用いた積層チップ間通信技術「TCI」を ISSCC で発表しました[3]。以来、ISSCC で 16 件の論文を VLSI 回路シンポジウムで 8 件の論文を発表しています。これらの功績に対して、2011 年に電子情報通信学会エレクトロニクスソサイエティ賞をいただきました。また、2010 年代に入ると、電磁界結合を用いた非接触コネクタの研究を始め、集積の対象をモジュールに広げました。2011 年に伝送線路結合を用いた非接触コネクタ「TLC」を ISSCC で発表しました[4]。接続距離が長くなるにつれて接続のダイペンダビリティが新たな研究課題になっています。

次に今後の 10 年間で展望しましょう。携帯電話の次は、センサーネットワークが大きな市場を創ると期待されています。センサーが集めたビッグデータを解析して、健康増進や環境保全、老朽化が進むインフラの維持管理などに役立てることが、高齢化社会を迎える先進国の課題です。たくさんのセンサーが生活や環境に溶け込むためには、セ

ンサー端末の小型化が必要です。また、電源資源の制約は更に厳しくなるので、エネルギー効率化の追求が必須です。今後はエネルギー効率化の時代になるでしょう。低エネルギー技術は、センサーネットの小型化と保守コストの削減、更にはエレクトロニクス環境親和（ユビキタス化）に寄与します。1959年のリチャード・ファインマンの言葉（There's plenty of room at the bottom.）を繰り返すまでもなく、革新的なナノエレクトロニクスによる3ケタ以上低エネルギーなデバイスの出現が期待されます。同時に、極低電圧技術と3次元集積技術が追求されるでしょう。

さて、その先はどうなるのでしょうか？ 2025年には、30兆個のトランジスタを集積したチップを多数パッケージ内に積層し、更にそのパッケージを搭載したモジュールを複数無線接続できるようになるでしょう。一人が1,000個のプロセッサと1,000チャンネルのワイヤレス接続を無意識のうちに利用できるようになるとの予測もあります。そして、やがてヒトの脳に近い人口脳が実現されるでしょう。ヒトの脳は、15Wの消費電力で60PFLOPSの演算性能と言われます。一演算あたりのエネルギー消費は0.25fJです。一方、効率の良いプロセッサでも演算あたりのエネルギー消費は0.3nJ程度で、ヒトの脳よりも6桁も効率が悪いです。ヒトの脳に近いエネルギー効率を追求する必要があります。ヒトの脳は約220億個の神経細胞を集積していますが、ICの集積度はこれをはるかに超えます。1個の神経細胞の消費電力は0.7nW程度ですが、1個のトランジスタの消費電力も1nW程度でそれ程変わりません。脳波の周波数成分は1~100Hzで、信号電圧は0.1mV程度であるのに対して、ICのクロック周波数と電源電圧は明らかに高いです。CMOS回路のエネルギー消費は電源電圧の2乗に比例するので、電源電圧を1Vから1mVに下げるとエネルギー消費は6桁低くなります。しかし現実には、デバイスにサブスレッショルドの傾きや素子ばらつきがあり、回路にノイズや帯域があるので、電源電圧を下げるのは困難です。こうした中で低電圧化の限界を追究することになるでしょう。

VLSIが人類社会を変革する力は沸点に達しつつあります。今後重要となるのは、未来を創造する力です。新たな四半世紀は、課題解決だけでなく、未来創造がテーマになるでしょう。学際的な研究、総合的な人材育成、産学のイノベーション創出が鍵です。電子情報通信学会の役割は今後ますます重要になると思います。

主な論文：

- [1] "A 0.9V 150MHz 10mW 4mm² 2-D Discrete Cosine Transform Core Processor with Variable-Threshold-Voltage Scheme," ISSCC'96, pp. 166-167, Feb. 1996. (世界で初めてVthを回路で制御した画像処理プロセッサ)
- [2] "A 300MIPS/W RISC Core Processor with Variable Supply-Voltage Scheme in Variable Threshold-Voltage CMOS," CICC'97, pp. 587-590, May 1997. (世界で初めてVDDとVthを回路で制御したRISCプロセッサ)
- [3] "A 1.2Gb/s/pin Wireless Superconnect Based on Inductive Inter-chip Signaling (IIS)," ISSCC'04, pp. 142-143, Feb. 2004. (世界で初めて磁界結合を用いた積層チップ間通信)
- [4] "A 12Gb/s Non-Contact Interface with Coupled Transmission Lines," ISSCC'11, pp. 492-493, Feb. 2011. (世界で初めて電磁界結合を用いた非接触コネクタ)
- [5] "A Versatile Recognition Processor Employing Haar-Like Feature and Cascaded Classifier," ISSCC'09, pp. 148-149, Feb. 2009. (世界で初めて画像・音・加速度を共通に扱える汎用認識プロセッサ)

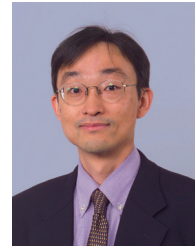
著者略歴：

1982年東京大学工学部電気工学科卒。工学博士。同年東芝入社。2000年に慶應義塾大学に移り、2002年より教授。2007年にカリフォルニア大学バークレイ校客員教授。35件のISSCC論文を含む200件以上の技術論文を発表。IEEEフェロー。電子情報通信学会フェロー。電子情報通信学会業績賞、エレクトロニクスソサイエティ賞を受賞。



【寄稿】（新フェロー）

「波長多重伝送用 AWG 波長フィルタの研究開発を振り返って」



高橋 浩（上智大学）

このたび電子情報通信学会より「アレイ導波路回折格子型光フィルタの先駆的研究と実用化」に対しましてフェローの称号を賜りました。ご推薦いただいた関係者の皆様方、ご指導頂いた NTT フォトニクス研究所の諸先輩方、ともに努力していただいた同僚の皆様がこの場を借りて感謝申し上げます。特に、私が NTT 研究所に入所した際に新人の研究テーマとしてアレイ導波路回折格子のアイデアを与えていただいた西功雄氏、直接研究指導をして頂いた加藤邦治氏と鈴木扇太氏には深く感謝いたします。

アレイ導波路回折格子 (arrayed-waveguide grating: AWG) は長さの異なる多数の光導波路アレイからなる分光素子で高密度の波長分割多重 (WDM) 伝送において異なる波長の光を分波するフィルタ (分波器) です。回折格子とレンズを光学定盤上に配置する通常の分光系と基本原理は同じですが、平面光波回路 (Planar Lightwave Circuit: PLC) 技術を用いて数 cm 角のシリコンチップ上にモノリシック形成されるのが特徴です。超小型で安定性、量産性に優れており、世界中の WDM 伝送システムでキーデバイスとして使われるようになりました。WDM の実用化には、AWG 以外に可変波長光源や EDFA (エルビウム添加ファイバ増幅器) などそのほかの技術も重要でしたが、自分の研究したデバイスにより従来 10Gb/s だった伝送容量が一挙に 80 倍の 800Gb/s に拡大され、現在の ICT 社会を支えていることは、研究者冥利に尽きます。この機会をお借りして研究の経緯を振り返り、特に若い研究者の方々に研究の楽しさややりがいや伝われば幸いです。

大学時代は LiNbO₃ などの誘電体結晶の表面を伝搬する表面弾性波を超音波顕微鏡で測定することにより、結晶の特性を評価する方法を研究していました。超音波トランス

デューサの作製のための薄膜形成や超音波計測などの実験に加え、顕微鏡のレンズと被測定物との関連性を知るためにフーリエ光学を勉強したこと、LiNbO₃ が光通信用変調器として使われていることから、光通信にも少しだけ興味を持っていました。1988 年に修士の学位を取り、NTT 光エレクトロニクス研究所 (現フォトニクス研究所) に採用されました。当時、光デバイス関係の花形研究は半導体レーザでしたが、私はバンドギャップを理解するというギャップを飛び越えておりませんでした。そこで、パッシブ光デバイスなら自分にもできるかも知れないと思い、この部署を志望しました。場所は茨城県東海村ですし花形研究でもないのに、都内で一緒に入社研修を受けた同僚からは「東海村に行っても気を落とさずがんばって」と慰めの言葉を頂きましたが、当の本人は第一希望の部署だったので大喜びでした。採用理由は知る由もありませんが、薄膜堆積などの実験と理論計算 (波動方程式やデータ解析) の両方の経験が光導波路デバイスの研究に役立つと見られたのかも知れません。現在大学で教鞭を取っておりますが、「ある分野の基本方程式は他の分野でも使えるから、しっかり理解するように！」と伝えています。

当時、導波路で分波器を作るため、スラブ導波路端にドライエッチングで凹面回折格子を形成する方法が検討されていました。光学定盤上の分光計と同じものを導波路チップに再現した構成です。残念ながら、エッチングで作られる格子の反射特性が不十分で暗礁に乗り上げていました。そこで先述の西氏は長さの異なる導波路アレイが回折格子と同様の機能を持つことを思い付き、新人である私の研究テーマとして準備していました。

後になって分かったことですが、オランダの Delft 工科大学の Smit 氏が類似アイデアを提案しており、(私の入社前日である) 1988 年 3 月 31 日発行の Electronics Letters で公表していました。この論文では多数の円弧状の導波路を平行に配置した構造がレンズと同様の機能を有することを He-Ne 光を透過させた顕微鏡写真で示してはいましたが、幸いにも、5 波を分波するデバイスも作ったと最後の 1 文に記載はあったものの、分波動作の実証データは記載されていませんでした。そこで、我々は、球面波のよう

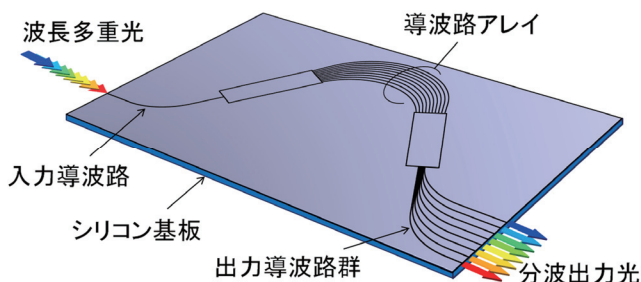


図1 AWG 波長合分波器の概略図

に広がる入射光をコリメートせずそのまま受けるように熊手状に導波路を配置、導波路長差を意図的に大きくとり高次回折光を利用、ローランド円を基本とした集光系の採用などの工夫で、モノリシックの波長分波器を世界で最初に実現して挽回することにしました。

当初「数百本もある導波路からの放射光が位相誤差なく設計通りに集光するのか？」という懸念も聞かれましたが、1989年に入力波長を変えると集光位置が移動する分波動作の確認に成功しました。Electronics Lettersの1990年1月号に掲載され、これが世界初のAWGの回折格子としての原理確認報告となりました。同年には入出力導波路、集光系などすべてを含むモノリシック分波器として動作確認に成功しました。しかし、他機関が追従する恐れがあるとして所長が発表を許可せず、翌1991年の4月にIntegrated Photonics Researchという国際会議にPostdeadline paperとしてエントリー第1位で採択されました（発表は別論文発表で渡米していた西氏）。

Bell研でもAWGの研究を開始しており、この年の秋にDragone氏がPhotonics Technology Letterで発表しました。この論文は我々にとって衝撃的でした。彼らは光ファイバとの整合性の良い石英導波路でAWGを作っていたのです。我々は小型化を優先し多成分ガラスでAWGを作製していました。当然のことながら、石英導波路を研究していた隣の研究グループの協力を得て石英導波路でもAWGの作製に成功していたのですが、発表していなかったのです。（幸いにも？）石英導波路の場合、基板からの応力の影響で偏波依存性が問題となっていたので、AWGの中間点に波長板を差し込んで偏波を90度回転させ偏波依存性を解消する手法を考案・実証してOptics Lettersで発表しました（'92年4月）。これで石英のAWGの実用性が明確になりました。

このころになるとAWGは有名になり、多くの研究機関から導波路材料を変えての追試や、特性改良の論文が発表されるようになりました。また、電子メールの利用が始まり電話以外の通信トラフィック増大が見え、AWGの実用化の機運が高まりました。多数の導波路をナノメートルの精度で配置する必要があることから、当初から導波路パターンをFortranプログラムで設計し、フォトマスクメーカーの描画機が理解できる形式でデータを吐き出す手法を取っていました。また、プログラムは細かく階層化（サブルーチン集を整備）し、自分以外の研究者が改良しやすく、また、数値を変えて計算すれば瞬時に新しいAWGのフォトマスクができるようになっていました。さらに、実

用化を重んじる東海村の研究所では、石英導波路に光ファイバを接続する実装技術も検討されており、出来上がったAWGに光ファイバを付けて波長多重伝送の研究をしている横須賀のグループに迅速に提供することができました。また、透過スペクトルの平坦化（岡本勝就氏）、温度無依存化（井上靖之氏）、導波路開口部の低損失加工（杉田彰夫氏）など多くの特性向上の検討が組織を上げて進みました。研究者はオリジナリティを主張するのが仕事ですから、一般的に連携を遠慮しがちな気質を持つこともありますが、東海村のチームには団結して研究する雰囲気があったのも幸いし、急速度で実用化のための技術が立ち上がりました。

その後1997年に、私はNTTエレクトロニクス社に出向し、AWGの製品化と北米の伝送装置メーカー向けの技術営業を担当しました。英語での製品プレゼンや顧客との仕様交渉（特性とコストのバランス）は大変でしたが、若手技術者が歩留まり向上に努力してくれたおかげで、2000年に受注・量産に至りました。その後、インターネットが一般家庭に普及し始めて通信トラフィックが激増したため、AWGが大量に使用されるようになりました。

数式を整えてわかりやすいモデルを作るのが私の趣味(?)だったことや、研究開始当時波長多重導入は不透明でその時期はかなり先だと予想されていたことから、理論や設計手法の確立を丁寧に行い基礎を固めたこと、90年代後半にいわゆる「死の谷」を組織を結集して乗り越えたことが、タイミングよく2000年の波長多重導入開始時に先頭を切って商品化できた理由だと思えます。そういう意味で、AWGの実用化成功は私の研究だけでなく、組織力、タイミング（時の運?）がそろった結果だと言えます。

若手研究者の皆さんには、「今の研究が成功したら同僚の手に渡り開発され、その後商用化されるかも知れない」と考え、多くの方が理解し活用できるよう丁寧な研究をすることをお勧めします。競争の激しい現在において基本検討に時間を割くことは難しいかも知れませんが、いつ商用化のチャンスが来ても良いように基礎を固めておいて下さい。皆さんの活躍により情報通信分野が益々発展することを祈念いたします。

著者略歴：

1988年東北大学大学院修了、同年NTT入社。AWGをはじめとする各種平面光波回路の研究開発に従事。2013年4月より上智大学理工学部。1997年IEE Electronics Letters Premium、2000年全国発明表彰通商産業大臣賞、2010年本会エレクトロニクスソサイエティ賞、2013年本会業績賞などを受賞。IEEEフェロー、博士(工学)。



【寄稿】（新フェロー）

「不規則系の電磁波散乱理論」



中山 純一（京都工芸繊維大学）

このたび、電子情報通信学会よりフェローの称号を賜りました。ご多用中にもかかわらず、ご推薦いただいた方々、業績評価をしていただいた方々、お世話になった諸先輩の皆様、お付き合い頂いた研究者・同僚の皆様深く感謝いたします。この機会に「昔ばなし」を含めた雑感を述べたいとおもいます。

この世に導電体である金属が存在しなければ、電気・通信工学も発展せず、電子情報通信学会も存在しないのでは、と思います。固体金属は周期構造であるため、バンド構造をもち、バンドに電子が充填される状況によって絶縁体・半導体・導電体に分類できるとされています。しかし、水銀などの液体金属も導電体です。液体は周期構造をもち、ランダム構造になります。そこで、「ランダムポテンシャルをもつシュレディンガー方程式を確率過程論による新しい方法で解くこと」。これが1970年ごろ小倉久直先生から指示された修士研究の課題であり、不規則系の波動現象の研究の始まりでした。そこで、確率過程論、Wienerの非線形汎関数の理論（Wiener展開）などを勉強しましたが、この問題は解けませんでした。しかし、ランダムポテンシャルの場合、波動関数は非定常確率過程になること、そのような非定常確率過程は定常確率過程を合成すれば構成できることが試行錯誤により分かりました。これは、エルゴード性（定常確率過程の統計的移動不変性）を基礎とする D^a フーリエ逆変換の原形でした。このような非定常確率過程の新しい数学表現が得られたことは、ビッグブレークでした。その後、 D^a フーリエ変換は、不規則な薄膜による散乱問題、エッジをもつランダム平面によるエッジ回折と散乱の相互作用の問題などに応用されました。一方、周辺の研究者からは、「難しすぎて、さっぱり分からん」との酷評が今でもあります。その原因は、数に関する肌感覚にあると感じています。工学計測では有効数字が6桁程度、計算機の64ビット実数型は数学的には有理数、しかし、エルゴード定理は実数（桁数無限大の数）を前提とするからです。このあたりの事情を詳しく説明するべきだったと反省しています。

修士修了後、沖電気工業に職を得てミリ波帯の導波管回

路の開発に従事し、電磁波の実際を体験しました。

その後、大学に職をえて、1978年頃から、不規則表面による電磁波散乱理論の研究に取り組みました。この問題の起源は、第2次大戦中に開発されたレーダーを海面に向けたところエコーが受信されたことです。このエコーの原因が海面の凹凸による乱反射であることが分かり、その解明のため散乱理論の研究が始まりました。理論研究には大別して2つの古典的アイデアがあります。第一は、表面凹凸は空間的に緩やかに変化すると仮定の下で、キルヒホッフ近似を用いるもの、第二は不規則表面上での境界条件を解いて散乱波を求めるものです。後者は、Rayleighによる回折格子の理論（1907年）にその起源があります。周期格子の場合（図1(B)）、入射平面波は離散的な方向に回折されます。そこで、Rayleighは電磁界を

入射平面波+全ての次数の回折波の和 (1)

の形に表現し、「回折問題とは各次数の回折波振幅を境界条件から決定することである」と問題を設定しました。この問題設定はその後100年以上使われましたが、難点がありました。入射角 θ が0となる水平入射のとき、回折特性が計算できないのです。この難点は、後述の影理論により解決できました。さて、Rayleighは摂動法を用いて、回折波振幅を決定しました。ディリクレ条件の場合の近似解を得ましたが、ノイマン条件の場合には、水平方向への回折波が発生する入射角（臨界入射角）では非物理的に無限大になります。次に、Rice（1951年）は、Rayleighの理論を不規則表面の電磁波散乱に拡張しました（図1(A)）。Riceは、まず周期的不規則表面をランダムなフーリエ係数をもつフーリエ級数として定義します。Rayleighの方法で散乱・回折波を定めた後、平均値・自乗平均値などの統計量を計算し、最後に周期を無限大として定常確率過程としての不規則表面からの散乱に関する統計量を求めました。周期が無限大の極限では、(1)式の和（第2項）は積分となります。しかし、完全導体の場合、どの入射角に対しても散乱波の自乗平均値が発散し、物理的に意味のある近似解は得られませんでした。完全導体による散乱問題は簡単であるとの誤解がありますが、実際には表面に沿って自由伝搬する導波モードが存在するため、難問になります。

研究開始時に、不規則表面による平面電磁波散乱の解表現は、周期系のフロケの解表現における周期関数を定常確率過程に置き換えたもの（確率論的フロケの解表現）になることに気づきました。「不規則表面による散乱問題とは、境界条件からそのような定常確率過程を決定することである」。これが我々の問題設定になりました。ガウス過程の不規則表面に対しては、Wiener 展開を用いれば、多重散乱効果を繰り込んだ近似解が代数的計算により容易に得られました。散乱波の平均値、自乗平均値、散乱断面積、交差偏波断面積などの近似公式が得られ、計測関係で利用して頂きました。また、この計算法は、後年の多重繰り込み理論への糸口になりました。さらに、異常散乱現象や表面プラズモンの励振問題なども解析できました。近年、CDのように2値的情報を表面の凹凸として記録する技術が定着しています。これに対応するため、2値確率系列の非線形確率汎関数の計算式を作り、2値的な不規則表面による散乱問題も研究しました。表面形状の見本過程がランダムであっても相関関数が周期的であれば、離散的な方向への回折が発生することが理論的に分かりました。

これらの研究は国際的にも知られるようになりましたが、確率汎関数を用いた解析が成功したのは表面粗さが波長に比べて小さい場合だけです。波長程度の表面粗さにも対応できる理論に関しては、ディリクレ条件の場合には幾つかの成功例があります。しかし、ノイマン条件の場合には、世界的にも未解決であるのが現状です。Wiener 展開は本質的にエルミット多項式展開なので、表面粗さ大きい場合への対応は困難です。多項式に代わる確率特殊関数が定義できないかと考えましたが、その手がかりも得られないまま30年が過ぎました。

確率過程論の観点から研究をしていましたが、2000年頃から研究の視点を変えました。不規則な現象を不規則関数として数式表現し計算する我々の方法は、確定系・周期系の解析とも親和性が高い利点があります。つまり、不規則系の解析の基礎であるアイデアを、確定系・周期系にも適用することが出来ます。その成果の第一が周期フーリエ変換です。これは、 D^a フーリエ変換のアイデアを確定系に応用したもので、任意の関数を周期関数に分解します。この理論は、有限サイズの周期構造による散乱や伝搬問題

に応用されています。成果の第二が、移動不変性のある系における低入射角散乱の問題です。低入射角散乱はレーダーリモートセンシング分野で重要です。図1(A)の不規則表面は統計的な意味での移動不変性、図1(B)の周期表面は周期的移動に関する不変性、また、図1(C)の2媒質平面境界は明らかに移動不変性があります。これらの系では、入射角 θ が0になるとき、乱反射成分も回折波も消滅し、反射係数-1をもつ反射だけになります。そのような反射波は入射波を打ち消すため、全電磁界は消滅し物理的には影になります。この性質を用いると、フレネル反射係数の新しい数学表現、Rayleighの表現式(1)に代わる新しい表現式、不規則表面に関する確率論的フロケの解表現の新しい表現、が得られました。この表現を影理論と呼んでいます。水平入射($\theta=0$)における従来の理論の難点が影理論により解消できました。また、周期表面・不規則表面上の波源からの輻射界(グリーン関数)の新たな表現式も得られました。しかし、リモートセンシングの問題を解決するには、地球が大気をもつ球体であることを取り入れた理論を今後研究する必要があります。

その一方、未解決の問題も多く残りました。粗さが大きい不規則表面による散乱界を求めること、揺らぎがある周期構造においてはバンドエッジ(通過域と遮断域の境界)での伝搬特性を求めること、不規則な完全導体表面上を自由伝搬するモード(ランダム固有関数)を求めること、などは未解決のままです。これらの解決には、新たな切り口、単純な原理の発見が必要であると思われます。現状を述べれば、大先輩の言葉「結局力が足りないのである。まだまだ努力が必要である」(難波捷吾, 前田憲一共著, 電波傳播)の通りです。「ローマは一日にしてならず」です。まだまだ努力が必要です。

著者略歴:

1968年京工織大電気卒。1971年京大大学院修士了。同年沖電気工業(株)入社。1975年京工織大助手。同大学助教授・教授を経て2009年定年退職。現在同大学名誉教授。2000年から2008年までWaves in random and complex mediaのEditorial Board Member。2012年電子情報通信学会エレクトロニクスソサエティ招待論文賞受賞。Institute of Physics フェロー。IEEE 会員。

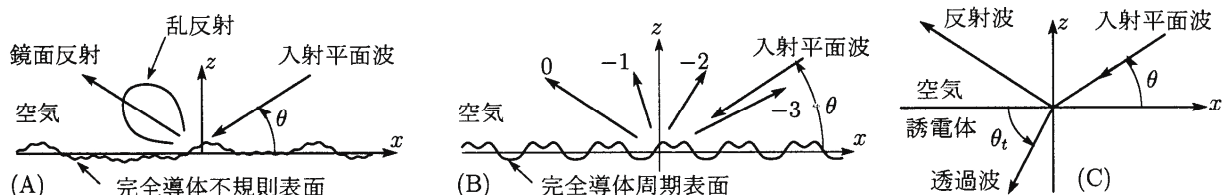


図1



【寄稿】（新フェロー）

「微細 CMOS デバイスの高性能化技術開発と実用化」

最上 徹（技術研究組合 光電子融合基盤技術研究所）



このたび、電子情報通信学会よりフェロー称号を賜り、大変光栄に存じます。推薦して頂いた方々、これまで共に研究開発を推進して頂いた方々、また、この研究開発に携わる契機やアドバイスを与えて頂いたすべての方々に、心より感謝申し上げます。

私は、1982年に日本電気(株)に入社し、最初に担当した開発テーマは、層間絶縁膜平坦化技術の開発でした。当時は、LSIにおける多層配線はまだ導入初期の時代であり、層間絶縁膜の平坦化技術については、主としてBPSG膜のリフロー技術等が検討、開発されていました。一方、私が担当した開発技術は、バイアスパッタ法という成膜技術であり、絶縁膜を堆積しながらその堆積膜の一部をエッチングするという技術でした。新人で苦労しながらも、周囲の先輩諸氏に助けられて、多層平坦化配線を試作できました。この研究開発で厳しく教育された点は、現象のメカニズム解明の重要さと開発技術の限界を見極めることでした。後に実施する様々の事業化を見据えた技術開発では、こうした視点が大いに役立つことになりました。上記の研究開発は、当時の三次元LSI開発プロジェクトのもとで実施されました。当時研究開発された三次元LSIに関する様々の開発技術は、現在実用化が進められている三次元LSIのさきがけとなっているものであり、多くの基礎研究が現在の実用化技術に役立っていると思うと感慨深いものがあります。

その後、1989年に米国のスタンフォード大学に1年間訪問研究員としてJ. Plummer教授のもとで、新しいシリコンデバイスの基礎技術を学ぶ機会を得ることができました。これを機に、日本電気(株)に戻ってからは、ロジックCMOSデバイス開発に携わることになりました。

1990代前半は、ちょうど、ロジックCMOSデバイスの微細化を進める為に、シングルゲート構造からデュアルゲート構造に切り替わる時期であり、世代毎に新しい技術を次々に導入することが求められる時代でした。

0.25 μ m CMOS 開発では、デュアルゲート電極構造(nFETはn型ポリシリコンゲート電極、pFETはp型ポリシリコンゲート電極とする構造)の開発に挑戦しました。それまでは、シングルゲート構造と言われるリンドープシ

たn型ポリシリコンをnFETとpFETの両方に用いていましたが、同一の仕事関数を用いる為、pFETは埋め込みチャンネル構造となってしまう、微細化を進める場合に、短チャンネル効果を制御することが困難となりつつありました。そこで、pFETのゲート電極だけをp型ポリシリコンとすることで、仕事関数を変えることで、表面チャンネル構造とすることができるのです。デバイス基本構造としては、CMOSの両デバイスを表面チャンネル構造とすることは利点が多いのですが、実際にこうしたデバイス構造を集積化するためには、別の多くの課題がありました。まず、ポリシリコン電極をp型とするには、ボロンあるいはBF₂というドーパントをポリシリコンに導入する必要がありますが、n型ポリシリコンゲート/ゲート酸化膜構造の場合と違い、p型ポリシリコンゲート/ゲート酸化膜構造ではボロン突き抜けと言う現象が生じる課題がありました。これは、ボロンを活性化する熱処理中にボロンがゲートポリシリコン中に留まらず、ゲート酸化膜を突き抜けて、シリコン基板まで拡散してしまう現象でした。これが発生すると、チャンネル注入で設定するデバイスのしきい値がずれてしまうという課題が発生すると共に、ボロン突き抜けが生じたゲート酸化膜の信頼性劣化が懸念されていました。そこで、我々のチームでは、ボロン突き抜けのデバイス信頼性への影響を評価し、デバイス寿命とボロン突き抜けとの関係を定式化しました。また、ボロン突き抜けによるしきい値変動とゲート空乏化との相互関係が最小となる領域を突き止め、デバイス集積化の基礎を築きました。

次の課題としては、シングルゲート構造で採用されていたポリサイド構造(シリサイド/ポリシリコン積層構造)がデュアルゲート構造では使用できなくなる為、ポリサイド構造に代わる低抵抗ゲート/ソース・ドレイン構造の構築が必要とされました。その為に開発された構造が、サリサイド構造でした。サリサイド構造とは、自己整合的に低抵抗シリサイド膜をゲート/ソース・ドレイン上に形成する構造を指します。サリサイド構造では、シリサイド膜の自己整合形成がポイントになるのですが、微細デバイスでは、この自己整合形成というのが、大きな課題でした。特に、サリサイド構造で最初に使用されたチタンシリサイド膜

では、ゲート幅が狭くなると、十分に低抵抗なチタンシリサイド膜がポリシリコン膜上に形成されにくいという課題があり、集積化の大きな壁となっていました。もちろん、当時シリサイド形成に関しては膨大な研究報告はありましたが、微細シリコン領域でのシリサイド化反応については、あまり詳しく分かっていませんでした。

そこで、我々のチームでは、まず、なぜポリシリコン細線上で低抵抗なチタンシリサイド膜が形成困難であるのかを調べました。その結果、ポリシリコン中の不純物がチタンシリサイド形成を阻害していて、不純物をドーピングしていないポリシリコン細線では、低抵抗なチタンシリサイド膜が均一に形成できることを明らかにできました。こうした解析を基礎として、 $0.25\ \mu\text{m}$ ゲート細線でも均一な自己整合シリサイド膜の形成が可能となりました。自己整合シリサイド形成技術は、その後、CMOS 微細化と共に低抵抗化とプロセス低温化の要請に応えるために、シリサイド材料がチタンから、コバルト、ニッケルと変遷していき、その度に、新しい自己整合シリサイド形成技術の構築が求められて行くことになりました。

さらに、CMOS デバイスの微細化に伴い、ボロン突き抜けの課題は深刻となりました。これは、微細化と共に、ゲート酸化膜が薄膜化されることで、ボロン突き抜けがより顕著に生じる事とゲート空乏化をできるだけ抑制する要請の為でした。ボロン突き抜け抑制とゲート空乏化抑制は、ちょうど二律背反の事柄でした。すなわち、ボロン突き抜け現象をできるだけ抑制しようとすると、ゲートポリシリコン中のボロン拡散を抑制する為に、デバイス熱処理を最小限に抑えることが要求されます。一方、デバイス性能をできるだけ向上させる為には、ゲートポリシリコンをゲート絶縁膜界面まで金属化することが必要であり、その為にできるだけ多くのボロンがゲート絶縁膜界面まで拡散させることが要求されます。この二律背反の要求を満足する為に開発された技術が、酸窒化ゲート絶縁膜でした。従来の酸化膜に比べて、酸窒化膜では、ボロン突き抜けを大幅に抑制できる効果があり、ボロン突き抜けとゲート空乏化を一挙に解決できる可能性がありました。但し、その当時の酸窒化膜では、MOSFET デバイス特性が劣化するという課題がありました。この課題を克服するためには、ゲート電極中の窒素の位置を制御する技術が必要でした。我々のチームでは、デバイス性能を維持しつつボロン突き抜けを抑制する為には、ゲート電極側に窒素を導入する酸窒化

膜構造が有効であることを原理的に示すことができ、酸窒化ゲート絶縁膜の実用化に役立てることができました。さらに、ゲート絶縁膜技術では、次世代技術である高誘電率ゲート絶縁膜の先駆的開発にも貢献することができました。

私と電子情報通信学会との出会いは、1990 年代初めにおける、シリコンデバイスに関わる国内有数の研究会であるシリコン材料・デバイス研究会での講演会でした。さらに、2000 年に京都大学の松波弘之教授から同研究会の委員長職を引き継ぎ、2 年間同職を務めさせて頂きました。その間尽力した仕事としては、他に先駆けて研究会の WEB 立上げを実施したことです。当時は、まだ電子情報通信学会の各研究会でも WEB は利用されておらず、研究会の連絡などが不便な状況でした。シリコン材料・デバイス研究会では、委員の皆さんと協力し 2000 年に研究会の WEB を立ち上げ、毎月の講演会などの運営を効率化することができました。当時、一緒に研究会を運営し、活動を盛り上げて頂きました委員の皆様に感謝する次第です。

シリコン LSI の将来は、今後は微細化だけでなく、アプリケーション的観点から、異種デバイス集積化がますます進むと予測されます。そして、いつの日か、人間の脳機能に匹敵する LSI が実現されるようになるかもしれません。若い研究者、技術者の皆さんにも、ぜひ大きな夢を持って、この分野に挑戦してもらいたいと期待しています。

著者略歴：

1982 年東北大学大学院工学研究科電気・通信工学専攻修士課程修了、同年、日本電気(株)に入社。1982 年から 2005 年まで、同中央研究所にて、シリコン LSI デバイス・プロセス研究開発、CMOS デバイス集積化研究開発に従事。2006 年から 2011 年まで、(株)半導体先端テクノロジーズに出向し、MIRAI プロジェクトを担当し、最先端 CMOS デバイス技術及び新概念 LSI 配線技術の研究開発に従事。2012 年より、技術研究組合・光電子融合基盤技術開発研究所に出向し、シリコンフォトニクス技術の研究開発に従事し、現在に至る。

学会関連：シリコン材料・デバイス研究会委員長 (2000~2002 年)、Symposium on VLSI Technology Symposium Chair (2009)。IEEE EDS Japan Chapter Vice Chair (2012~現在)。工学博士。IEEE Fellow (2012)、応用物理学会フェロー (2010)。



【寄稿】（論文誌技術解説）

ELEX「ワイヤレス給電に関するレビュー論文紹介」 (ELEX 編集委員会)

ELEX 編集幹事 佐々木 愛一郎 (NTT)



オンラインレター誌 Electronics Express (通称 ELEX)では、3ヶ月ごとにエレクトロニクス分野における注目のテーマを1つ選び、数篇のレビュー論文を掲載しております。幅広い分野をカバーするエレクトロニクスの領域で、ホットな研究分野の理解を含めて頂くために2011年に開始した本企画も、今回でちょうど10回目を迎えます。おかげさまで数多くのご支持を頂き、人気の高い企画となっております。これまでに取り上げたテーマは、テラヘルツ技術、光通信技術、メタマテリアル、不揮発性メモリ、超伝導エレクトロニクス・フォトニクス、受動マイクロ波回路、フォトニック結晶、パワー半導体デバイス、太陽電池の9項目で、いずれも各分野の第一人者による力作揃いです。これらレビュー論文に限らず、ELEXに掲載される全ての論文は、Webサイト(<http://www.elex.ieice.org/>)から無料でダウンロードできますので、お気軽にアクセス頂きたいと存じます。専門外の方にはもちろんのこと、専門家にとっても有益な情報が満載です。

記念すべき10回目に当たる今回は、注目のテーマとして「ワイヤレス給電」を取り上げ、この分野を先導される3名の方にご執筆頂きました。1件目は、2006年のMITによる発表以来活発な研究開発が続いている共鳴型電力伝送の正しい理解について、リューテックの栗井郁雄先生に解説して頂きました。2件目は、近年では産業への幅広い用途に向けて活発な研究開発が行われているマイクロ波給電に関する論文で、本技術の要となるレクテナの基本的な考え方から最近の進展まで、京都大学の篠原真毅先生にわかりやすく解説して頂きました。3件目は、すでに実用化されている携帯端末へのワイヤレス給電を取り上げ、NTTドコモの竹野和彦様に電磁誘導方式のワイヤレス給電について解説して頂きました。ワイヤレス給電は、様々な目的や方式が混在する分野ですが、本特集はワイヤレス給電に関するまとまった情報源として、多くの皆様にご活用頂けるものかと思えます。以下で、簡潔に内容を紹介いたします。

栗井先生の論文では、共鳴型電力伝送を理解する上で陥りやすい誤解と正しく理解するためのポイントが、切れ味鋭い表現で解説されています。慣例的に、共鳴型電力伝送

は磁気結合モデルで説明されることが多いのですが、実は電界結合の寄与が無視できないことが示されます。また単純なモデルを使って、伝送効率と伝送電力の特性が「同じでない」ことを明解に示すと共に、両者を向上するには内部インピーダンスの小さな信号源が有効であることが力説されます。さらに、伝送電力を最大化するための調整法についても詳しく解説されており、理論的な話題から実用的な手法まで、盛り沢山の内容となっております。

篠原先生の論文では、はじめにマイクロ波を直流に変換するレクテナの動作原理が、論理的かつ直観的にわかりやすく説明されています。「理論的なRF-DC変換効率は100%である」という主張が印象的で、門外漢である筆者も大変勉強になりました。また、1960年代に始まったレクテナ研究の歴史をたどり、現在までに提案された様々な技術を紹介して頂きました。さらに、近年流行のセンサネットワークやエネルギーハーベスティングに適した、小電力用レクテナに関する話題もレビューして下さいました。

竹野様の論文では、ワイヤレス給電の王道である電磁誘導方式を利用した携帯電話への給電について解説して頂きました。給電回路の動作に関する丁寧な説明と共に、装置へのコイルの実装法が豊富な図面や写真を使ってわかりやすく示されています。性能を改善するための取り組みや構造を具体的に説明して下さいましたので、ワイヤレス給電の研究開発に携わる専門家にとっても、得られる情報が少なくないと思われれます。

ご多忙中にも関わらず、それぞれが個性的で素晴らしい論文を執筆頂きました。栗井先生・篠原先生・竹野様に、深く御礼申し上げます。

ELEXでは今後も、会員の皆様にとって魅力あるテーマを取り上げていきます。ご期待下さい。

著者略歴：

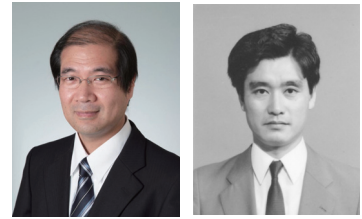
1996年東京理科大学理学部応用物理学専攻卒業。1998年東京理科大学大学院理学系研究科物理学専攻修士課程修了。同年、日本電信電話株式会社に入社。2002年よりNTTマイクロシステムズインテグレーション研究所。これまでに、マイクロ波フォトニクス、近距離無線通信などの研究に従事。



【寄稿】（論文誌技術解説）

英文論文誌小特集号「Special Section on Recent Progress in Electromagnetic Theory and Its Application」によせて ゲストエディタ（電磁界理論研究専門委員会）

西本 昌彦（熊本大学）、白井 宏（中央大学）



電磁界理論研究専門委員会では電磁波（電波、光波、X線）に関する基礎理論から実用に直結した応用研究まで、広範にわたる研究を取り扱っています。ご存知のように、電磁界理論研究の歴史は大変古く、本研究専門委員会も電子情報通信学会の中でも古参の研究専門委員会の一つとして、長年にわたり活動を続けています。一方、社会基盤を支える ICT の根幹をなす情報伝送技術、安全・安心、防災・減災を目的としたセンシングやモニタリングのためのリモートセンシング技術、エネルギー分野における無線電力伝送技術など、電磁波の応用はますます広範に、また高度になってきています。このような現状を踏まえ、本研究専門委員会では、電磁界理論の進展とその応用に関する最近の新しい研究成果を総括することを目的として、毎年、英文論文誌Cの特集企画「電磁界理論の進展とその応用」小特集“Special Section on Recent Progress in Electromagnetic Theory and Its Application”を発行しています。今回の論文誌（2014年1月発行）では、平成24年11月15日（木）～17日（土）に熊本県阿蘇市で開催された「第41回電磁界理論シンポジウム」で発表された研究内容を中心に論文募集していますが、それに限らず、2012年に開催された電磁界理論関連の国際会議（例えば、PIERS 2012-Kuala Lumpur, PIERS 2012-Moscow, IEEE AP-S/URSI 2012, ISAP 2012-Nagoya 等）での発表成果を発展させた内容についても、幅広く受け付けています。

今回は、総数16件（招待論文1件、ペーパー8件、ブリーフペーパー7件）の投稿があり、慎重な査読審査の結果、最終的に5件のペーパーと2件のブリーフペーパーが採録となりました。採録論文の内容としては、光導波路の電磁界解析、アンテナ技術、電磁界の数値解析法、周期構造やグレーティングによる電磁波散乱解析、電磁界の時間領域解析など、さまざまな分野への応用を目指した電磁界解析に関する研究成果が含まれています。これらは電磁界理論研究会の扱う内容のごく一部ではありますが、電磁界に関する広範な内容が含まれており、本研究会の取り扱う分野が広範にわたっていることをご理解いただけることと思います。電磁界の理論解析および数値解析をはじめ、

時代のニーズにあった最先端の研究成果も含まれています。いずれの論文も2012年度にまとめられた最新の研究成果が記載されていますので、電磁界関連の研究開発に携わる多くの技術者・研究者の皆様にご覧いただき、今後の研究の発展に役立てていただければと思っています。

最後に、本特集号発行の機会を与えていただいたエレクトロニクスソサイエティの関係の皆様、貴重な研究成果を原稿にまとめて投稿いただいた著者の皆様、公正な判定と適切なコメントをいただいた査読者の皆様に、この場を借りてお礼申し上げます。また、本特集号の編集にあたっては、2名の編集幹事と15名の編集委員の協力をいただきました。特に、編集幹事には論文募集から査読、発行に至る全体の編集作業の調整と取りまとめにご尽力いただきました。記して謝意を表します。

編集幹事：安藤芳晃（電通大）、平山浩一（北見工大）

編集委員：稲沢良夫（三菱電機）、上田哲也（京都工繊大）、大久保寛（首都大）、大貫進一郎（日大）、柏 達也（北見工大）、木寺正平（電通大）、黒田道子（東京工科大）、佐藤亮一（新潟大）、田中雅宏（岐阜大）、中嶋徳正（福工大）、平野拓一（東工大）、藤崎清孝（九大）、森本健志（近畿大）、横田光広（宮崎大）、渡辺仰基（福工大） [敬称略]

著者略歴：

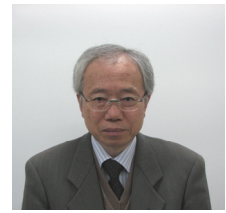
西本 昌彦 1982年熊本大・工・電子卒、1987年九大・院・博士了、1987年熊本大学工学部助手、助教授を経て、2004年熊本大学大学院自然科学研究科教授、現在に至る。工博。2008年本会エレンソ活動功績表彰。2009～2010年IEEE AP-S Fukuoka Chapter Chair、電磁界理論研究専門委員会前委員長。信学会、IEEE、電気学会各会員。

白井 宏 1980年静岡大・工・電気工卒業、82年同大学院工学研究科電気工学専攻修了、86年米国 Polytechnic 大学大学院博士課程修了。Ph.D. 同大学ポスドクトラル研究員を経て87年から中央大学理工学部。専任講師、助教授を経て現在教授。同大学理工学部長補佐を併任中。信学会フェロー、電磁界理論研究専門委員会委員長。IEEE シニア会員、電気学会、ASA、日本音響学会各会員。



【寄稿】(論文誌技術解説)

英文論文誌小特集号「超伝導大規模集積回路の最前線」発行によせて ゲストエディタ



中島 康治 (東北大学)

一昨年超伝導発見 100 周年を、さらにはジョセフソン効果の理論発表から 50 年以上を経てこの量子現象は身近なものとなっています。これまで単一磁束量子を核とした様々なアプリケーションが提案され、1 万接合を越える大規模集積回路による各種信号処理用マイクロチップも構成されています。しかし実用化という観点からは今一歩という感じは拭えません。シリコンデバイスの頭打ち感も最終段階になりつつある、この時期こそ超伝導大規模集積回路が実用化という点で飛躍する可能性が高まっていると判断して、その最前線と題する小特集「超伝導大規模集積回路の最前線 “Leading-Edge Technology of Superconductor Large-Scale Integrated Circuits”」平成 26 年 3 月号を企画いたしました。

本小特集号では、超伝導デジタル回路とシステム、超伝導薄膜とジョセフソン接合の製作技術、超伝導デジタル並びにアナログ回路の設計方法、超伝導検出器と SQUID のためのアナログシグナル信号処理、さらにシステム集積化技術などの超伝導集積回路に関連する総てのトピックスを対象として論文を募り、ピアレビューを行いました。その結果を受けて編集委員会では慎重に審査した結果、以下の 4 件の招待論文、5 件の投稿論文、1 件のショートノート投稿論文の全 10 編が採録の予定となっております。

- 1) Nb 9-layer Fabrication Process for Superconducting Large-Scale SFQ Circuits
- 2) A Reconfigurable Data-Path Accelerator based on Single Flux Quantum Circuits
- 3) Circuit Description and Design Flow of Superconducting SFQ Logic Circuits
- 4) Large-Scale Integrated Circuit Design Based on the Nb 9-Layer Structure for Reconfigurable Data-Path Processors
- 5) High-Speed Operation of 0.25-mV RSFQ Arithmetic Logic Unit Based on 10-kA/cm² Nb Process Technology
- 6) Design and Evaluation of Magnetic Field Tolerant Single Flux Quantum Circuits for Superconductive Sensing Systems

- 7) Neuron Circuit using Coupled SQUIDs Gate with Flat Output Characteristics for Superconducting Neural Network
- 8) Design and Demonstration of a Single-Flux-Quantum Multi-Stop Time-to-Digital Converter for Time-of-Flight Mass Spectrometry
- 9) Design and High-Speed Demonstration of Single-Flux-Quantum Bit-Serial Floating-Point Multipliers Using a 10 kA/cm² Nb Process
- 10) Demonstration of 6-bit, 0.20-mVpp Quasi-Triangle Voltage Waveform Generator Based on Pulse-Frequency Modulation

これらは最先端の研究成果であり、今後の超伝導エレクトロニクスの方を明確な形で指し示す内容です。

本小特集号編集委員会は

編集幹事：小野美 武(東北大学)

編集委員：吉川 信行(横浜国立大学)、明連 広昭(埼玉大学)、水垣 義直(電気通信大学)、佐藤 茂雄(東北大学)、山田 隆宏(産総研)、猪股 邦宏(理研)の方々により構成されています。

最後になりますが、本小特集号に有益な最先端技術のご投稿をいただいた総ての皆さま、鋭意ご査読いただいた査読委員の皆さま、そして本小特集号の編集のためにご貢献いただいております本小特集号編集委員会編集委員の皆さまに心より感謝いたします。ありがとうございます。

著者略歴：

1972 年東北大学・工学部・電気工学科卒。1978 年同大学院電気及び通信工学博士課程了。工博。同年東北大電気通信研究所助手。この間 1983 年から 1984 年、カリフォルニア大学パークレー校研究助手。1988 年東北大電気通信研究所助教授、1995 年 同教授。集積化ブレインコンピュータ並びにジョセフソン集積回路のデジタル応用の研究に従事。IEICE フェロー、応用物理学会、電気学会、日本神経回路学会会員。