



【寄稿】（新フェロー）

「超高速化合物半導体集積回路の可能性」

榎木 孝知 (NTT エレクトロニクス(株))



このたび、本学会フェローの称号を賜り、大変光栄に存じます。評価頂いたのは「光及び無線通信用化合物半導体超高速集積回路製造技術の研究開発」と大変範囲の広い表現になっており恐縮ですが、共に研究開発及び研究マネジメントに携わった NTT の諸先輩方をはじめ、同僚や研究者の皆様方に、深く感謝申し上げます。また、本学会の学会活動を通じて交流した企業・大学の研究者の方に多くのご指導と刺激を頂いて参りました。今年度の新フェロー 25 名を加えた 889 名の歴代フェローの方々とともに、100 周年を迎える本学会と情報通信業界のさらなる発展に微力ながら貢献してゆきたいと思ひます。

研究業務の出発点は、1984 年の日本電信電話公社厚木研究開発センタ（当時）で、立場は変わりましたが研究成果の実用化を目指している現在を開発業務とすると、研究開発への取り組みは、今年で 33 年目となります。入社時、「新材料研究をやりたい」との希望をもって、化合物半導体デバイス研究・開発の研究室に配属され、振り返ると、継続して通信用送受信器の高速化・高周波化に携わっていました。

シャノンの法則によれば、一定の利用可能な帯域を使って伝送できる情報量には上限があります。大容量化には、帯域拡大が必要であり、高周波化は必須且つ効果的な大容量伝送の手法です。周波数資源の開拓は、情報通信の発展に依存してきた人類にとって重要なテーマです。また、一定の帯域でも情報の符号化や SN により伝送可能な情報量が変わり、周波数利用効率の高い伝送方式が求められます。限られた通信資源の有効活用は、やはり人類の重要な責務であると言えます。研究開発を始めた頃は、実験やデバイスプロセスの面白さに魅了され、上述の本質的な課題認識を十分に理解していたとは言えず、高周波化、高機能集積化、低雑音化、高出力化のキーワードでデバイス研究開発を行ってきたのが正直なところでした。

図 1 に、論文等で発表されたトランジスタの最大発振周波数 (f_{max}) と増幅器等の集積回路の動作周波数の推移を示します。私が、研究開発を始めた 1980 年代は、GaAs 電界効果型トランジスタにより、 f_{max} として 100GHz を超える特性が報告されていたものの、素子特性のばらつきも

大きく、GHz 帯以上では、個別部品のハイブリッド実装による回路の方が、特性が良いとされていました。当時、スーパーコンピュータ用の高速低消費電力集積回路の実現を目指して開発段階だった GaAs MESFET 集積回路製造技術を元に、無線通信や光通信用のモノリシックマイクロ波集積回路 (MMIC) を開発するのが私の最初のテーマでした。当時の研究室には、材料研究者、回路研究者、プロセス研究者がいて、一体となって集積回路の研究・開発を進めており、いまから考えると大変恵まれた環境でした。そのなかで、アナログ特性を左右する最大発振周波数や雑音指数の向上を実現するデバイス構造を検討し、試作により確認するのが私の役割でした。

試作で素子性能の向上が達成できると、研究開発は一気に加速します。トランジスタの f_{max} は、論文のトップデータには及ばない 40GHz 程度でしたが、それでも、その特性の素子を集積化した分周器回路を実現することで、10GHz の分周動作を初めて達成しました。この試作はビギナーズラックの要素もあり、信学会学術奨励賞を頂いたものの、その工程の再現性を上げて回路試作を行なうのに大変苦労しました。プロジェクトメンバーの粘り強い協力なくしては前進・継続は無かったと思います。回路試作を重ねて、材料・プロセス・回路技術の完成度が上がるのを、皆で握手して喜んだことを鮮明に記憶しています。また、Si-LSI に比べれば簡素な半導体プロセス工程ですが、その工程設計の重要性を学びました。

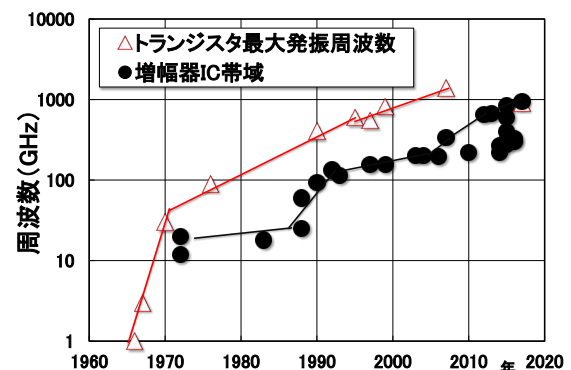


図 1 トランジスタ及び集積回路の高周波化推移

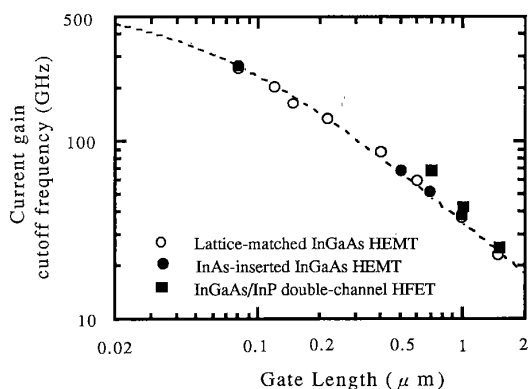


図2 電流利得遮断周波数のゲート長依存性⁽¹⁾

1990年から更なる高速化・高周波化を目指して、InP系ヘテロ構造デバイスの研究開発を担当しました。移動度や電子飽和速度の高いInGaAsをチャンネルに利用することでトランジスタの高周波特性は向上しますが、本来の材料特性を十分にトランジスタ性能と集積回路特性として引き出せているかを自問自答することにしていました。図2に試作したトランジスタの電流利得遮断周波数のゲート長依存性を示します⁽¹⁾。当時としては、各ゲート長で最高値に匹敵する遮断周波数を実現でき、その依存性からデバイス内の電子速度の議論をすることができました。

InP系ヘテロ構造トランジスタによる高速・高周波集積回路の研究では、トランジスタパラメータ、配線構造等、回路動作の限界論を回路研究者と議論しながら、120～300GHz帯MMIC、100Gbps級高速デジタル回路、OEICの動作実験に取り組みました。システム研究者により、光伝送や無線伝送での伝送方式実験に応用して回路動作を確認することができたことは、デバイス研究者としては目標達成までの距離間を認識できて大変恵まれていました。

研究マネージャとして化合物半導体デバイス研究を推進する立場では、「化合物半導体だからこそできること」を目指し、徹底した高周波アナログ性能の追求、光電子融合技術、結晶成長制御の追求等の研究計画の重点化に腐心しました。直接経験のないSiテクノロジーについては、学会研究会等を通じて多くのSi系研究者から技術の深化や手法を学んだことは、大変有意義で、結果として目標設定の見直しも必要でした。

また、NTT研究所では、世界中の大学や企業との共同研究やポスドクの受入れに対し、継続的且つ積極的なマネジメントが行なわれてきており、私自身、貴重な経験と成長の機会を頂けました。今後も、時代に即したオープンな

研究開発体制の実現を期待しています。

化合物半導体高周波集積回路の応用市場は、一定規模まで成長するとSiデバイスに置き換わり、さらに成長してきました。Si-LSIは、動作周波数の向上にデジタル制御機能を集積化して付加価値を高めます。化合物半導体ICは、動作周波数に高出力性・低雑音性・光融合等のアナログ性能を伴って付加価値を高めます。デジタル化の現エレクトロニクス時代には、そのアナログ性能の付加価値は、一定の規模に限定されていますが、伝送品質の差別化の要素であることには変わりありません。とは言え、私の研究結果の普及側面を振り返ると、まだ化合物半導体産業には貢献できていません。その時代の技術動向と需要に即して、一定の期間に化合物半導体ならではのターゲット設定を行ない、機動力をもって新分野を開拓してゆくことで、技術普及を追及してゆきたいと考えています。

以前、本NewsLetter⁽²⁾でも述べましたが、研究開発には、

- ① 「社会的課題を正しく認識」し、「高い専門知識」「適正な体制と環境」をもつこと
- ② 「適正な手段で、的確な技術課題」を「効率よく解決」すること
- ③ 「成果の普及」と「更なる可能性を示す」ことの要素が求められていると思います。常に①②を見直して軌道修正しつつ、③の実現を継続して目指したいものです。

(1) T. ENOKI et al., "Novel Channel Structures for High Frequency InP-Based HFETs," IEICE TRANS. ELECTRON., VOL., E76-C, No.9, 1993.

(2) 榎木, "研究者・技術者のためのエッセイ", NEWS LETTER Vol.158 (2014年10月).

著者略歴:

1984年東京工業大学・大学院修士課程修了し、同年、日本電信電話公社(現NTT)入社。光通信・無線通信用化合物半導体超高速集積回路技術の研究開発に従事。2012年よりNTTエレクトロニクス株式会社に移り、ブロードバンドシステム・デバイス事業本部副本部長(現職)。1986年信学会学術奨励賞。1996年博士(工学)学位取得。2003～2004年本会電子デバイス研究専門委員会委員長、2009～2010年本会東京支部役員(会計幹事)。2012～2013年エレクトロニクスソサエティ会長。



【寄稿】（新フェロー）

「電磁界 3 次元時間領域解析手法の基礎と応用に関する研究」



柏 達也（北見工業大学）

本学会よりフェローの称号を賜り大変光栄に存じます。推薦者、評価者の方々、及び、これまで様々な事でご指導ご協力頂いた全ての方々にこの場を借りて厚く御礼申し上げます。

私がフェローとして評価頂いた内容は厳めしい標題にあるように電磁界解析における時間領域 3 次元解析手法の発展とその応用という事です。今の若い方から見れば市販の CAD を買えば済むのではないかと云う話ですが、この様な時代に至るまでには長くみれば 70 年、短くみれば 50 年程時間が掛かっております。これは数限りない研究者の数限りない研究成果の結果として達成されたものです。私もその中の一人であり、以下に標題に関して紹介させていただきます。

研究者としての始まり

私は地元が札幌で近くの高校、近くの大学と何も考えず進学し、何故か物理学で習った電波に興味があったので電波の研究をしている研究室を選んで入りました。元々実験メインの研究をさせてくれるような話だったのですが、実際には電磁界の 3 次元時間領域解析という聞いた事もインパクトもなさそうな研究テーマでどうしようかと思った記憶があります。しかし、何事もやって居るうちに面白くなってきて、そのまま大学院の博士課程にまで進学してしまいました。その間に助手のポストが空いたのでそのまま助手として採用されました。今から思うと長閑な時代でした。私は丁度そのような時代に大学院生や助手をやって居たので電磁界シミュレーション技術の基礎から応用までを研究テーマとして論文を発表できた時代に居りました。

研究内容とその歴史的背景

1980 年代のその当時、マイクロ波回路を解析する時に 3 次元構造を考慮して解析する事は不可能な時代でした。数値解析手法で最もメジャーな有限要素法は機械工学では実用化されておりましたが、電磁波問題となると非物理現象の発生などにより適用が困難な時代でした。当然今ではその問題は克服されております。それに対して本研究室でメ

インに研究していた差分法の一つである時間領域 3 次元解析法ではそのような問題はなくマイクロ波回路を 3 次元で正確に解く事が可能でした。その部分においては時代の最先端を行って居た事になります。また、この時代、コンピュータが急速に発展し、理論のみならず電磁界シミュレーションが産業界で実用性を帯びようになってきました。また、電磁界シミュレーション法やその応用に関する論文が劇的に増加した時代でもありました。

電磁界の 3 次元時間領域解析は大きく分けると

- 1) 基礎的研究
- 2) 軍事的な研究
- 3) 民生目的の研究

の 3 つの時代に分けられると思います。当たり前ですが、最初の研究は純粋に概念的な物であり、その中には当時（1944 年）東北大学に在職していた岡田幸雄先生もおられます。電磁波はステルス技術を含めてレーダ探知や核爆弾による EMP（電磁パルス）による EMI（電磁干渉）問題に関係しており、特に米ソ冷戦下では軍事的に非常に重要な研究分野でした。1980 年代からマイクロストリップ基板などの民生問題に適用されるようになってきました。国際会議に行っても電磁界シミュレーションに関するセッションは非常に多く盛んでした。兎に角、やるべきことが沢山あったのです。また、計算機の性能の向上が著しく最近では GPU 技術の発達も目覚ましく、アルゴリズムが並列計算に向いている 3 次元時間領域解析法は GPU などのアーキテクチャーとの相性が非常に良い所があり、そのシミュレーション法としての威力を更に発揮しています。

ところで、企業の寿命は 30 年と言われておりますが、特定の研究分野の寿命も 30 年かと思えます。国際会議に行っても今では電磁界シミュレーションは市販 CAD を使ったものが一般的になってきております。ただ、私は市販 CAD を使わず辛い所に手が届く自作 CAD で計算しております。そして、この分野の基礎的な研究テーマは永遠に続くと思えます。

現在では、研究の主体が解析という行為から最適設計、さらには人工知能と産業として重要な分野が移ってきています。解析と人工知能技術の融合で更なる生産性の向上

が期待されます。

今後のこの国の有り方について

いつの時代にも言える事ですが、次世代に重要となる技術は最初の頃はあまり評価を受けない場合が多いように思われます。これは3次元電磁界解析の分野においても言える事かと思えます。時代が後から追いかけてくる事が多いようです。高度成長の時代は先が見えて日本経済もJapan as No.1と言われておりましたが、最近の日本の電気メーカは経営的に厳しい所が多いようです。過去や現在に囚われず、例えその時代に評価を受けることがなくてもgoing my wayと失敗を恐れないチャレンジ精神が科学技術の発展の上では重要かと思えます。最近、大学も文科省指導を含めて管理業務の増加や成果主義の導入による副作用が出てきており、また、少子化と都会への人口移動が激しく、特に地方大学は大変ですが、東京一極集中が良いかと言えばそれも如何なものかと思えます。研究には実用を目的として明確な目標を持った選択と集中も必要ですが、これとは別に今後日本という国が独創性溢れる国で

有り続けるためには自由で興味を中心とした多様性を認める事も必要かと感じるこの頃です。

最後に北大在学中ご指導頂いた故深井一郎教授(在職中ご逝去)、故吉田則信助教授に厚く御礼を申し上げます。このお二人の先見の明が無ければ今日の私の研究人生は無かったと思えます。

著者略歴：

1984年北大・工・電気卒。1986年同大大学院修士修了。1988年同博士課程中退。同年同大・工・電気・助手。1996年北見工大・電気電子・助教授。2008年同大教授。電磁界及び音響問題の数値解析、最適設計に関する研究に従事。2014～2015年本会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。共著「Handbook of Microwave Technology」(Academic Press), 「Antennas and Associated Systems for Mobile Satellite」(Research Signpost), 「マイクロ波シミュレータの基礎」(コロナ社), 「計算電磁気学」(培風館)等。工博。IEEE, IEEJ各会員。



【寄稿】（新フェロー）

「高出力半導体励起レーザ開発と光通信の大容量化」を振り返り

粕川 秋彦（古河電気株式会社）



この度電子情報通学会から「高出力半導体励起レーザ開発と光通信の大容量化」における貢献に対しフェロー称号を賜り、大変光栄に存じます。推薦頂きました方々、また審査頂きました方々に心より御礼申し上げます。また、古河電気(株)で共に研究開発を行なってきた諸氏に心より感謝致します。

今回のフェローの対象となった「高出力半導体励起レーザ開発と光通信の大容量化」ですが、今思い起こせば 1987 年 6 月に遡ります。電線メーカであった当社が通信用半導体レーザの研究開発を開始してから 2 年、主に当時主流であった液相エピタキシャル (LPE) 法で従来型の半導体レーザの研究開発を行っていましたが、今後のレーザ設計の自由度が期待できる有機金属気相成長法 (Metal Organic Chemical Vapor Deposition; MOCVD) についての検討も行っていました。材料系も当時 MOCVD 法では成長すら困難であった InP 系への挑戦でありました。MOCVD 法の可能性に賭け、LPE から MOCVD による半導体レーザの研究開発に主軸を移しました。当時は MOCVD による GaInAsP 混晶の組成制御、界面制御、量子井戸といった結晶成長に関する報告が主流でありました。レーザ特性では MOCVD 法により作製した波長 1.3~1.5 μm 帯のレーザ特性が LPE のそれと同程度になったという報告はあったものの、薄膜成長が得意の MOCVD 法の特徴が活かせる量子井戸レーザの特性に関する報告は理論予想される特性には遥かに及ばないものでありました。GaAs 系の量子井戸レーザでは従来の厚膜の活性層に対して大きな特性改善が報告されていましたが、InP 系ではバンド構造の違い (InP 系では伝導帯/価電子帯での比率が GaAs 系と異なり、有効質量の軽い電子に対して量子障壁が小さくなる)、損失メカニズム (価電子帯間吸収、オージェ) 等がその理由として考えられていました。このような背景の下、GaAs 系レーザの特性向上を実現してきた GRIN-SCH (Graded-Index Separate-Confinement-Heterostructure) 構造 (この構造は、組成の異なる (従って、屈折率の異なる) GaInAsP 層を多数積層する。量子井戸活性層を頂点として、屈折率が徐々に (ここでは階段的) 減少させる) をこの材料系で作製しようと考えました。今思えば当時は単層

での組成制御や界面制御でさえ困難であった GaInAsP 系で GRIN-SCH 構造を作製しようとしたのは大きな挑戦であり、後発の会社であればこそ出来たのではないかと感じています。

研究開始当時は、装置構成上、この試みは困難を極めました。やはり無謀な試みではないかと頭を過ぎったこともありましたが。途中、装置改造やガスフローの工夫、成長条件の最適化を行い、漸く 1987 年 6 月最初に“それらしい構造”の成長が可能になるようになりました。初めて電子顕微鏡写真でその構造を見たときには欣喜雀躍の思いであったのを鮮明に記憶しています。その後さまざまな改良を重ねて理想に近いレーザ構造が実現できるようになりました (図 1; 作成したウエハの断面透過電子顕微鏡 (TEM) 写真とその構造模式図)。

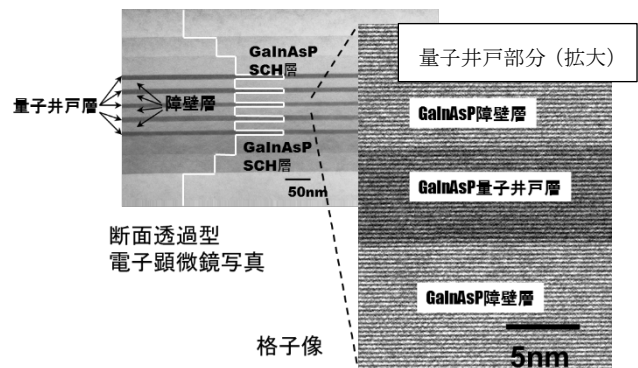


図 1. 作製した GRIN-SCH-MQW の TEM 写真

異なる組成の GaInAsP の界面も原子層レベルで平坦に積層できるまでになりました。また、CAT (composition analysis by thickness-fringe) 法 (写真上部) や SIMS プロファイル (写真下部) により、組成 (屈折率) 制御の様子を観察し (図 2)、組成が設計通り変化しており GRIN-SCH 構造が作製できていることを確認できました。この GaInAsP/InP 系での GRIN-SCH 構造が古河電気の高出力レーザで傑出した特性を実現していく上での端緒となりました。低しきい値電流密動作が Electronics Letters へ掲載されました。当時、低しきい値電流特性が示されたものの、高効率特性についての特性実証には多少の時間が必要で

した。この構造では、光とキャリアの活性層への閉じ込めが有効に行なわれるため、この材料で問題となっていたキャリアの光閉じ込め (SCH) 層への漏れ出しが抑制され、その結果、レーザの内部損失が低減され高効率特性に結びつくということもわかりました。これを武器に、関係者一同、黎明期であった EDFA (Erbium-doped fiber amplifier) 用励起用高出力レーザの開発に目標を定め、取り組みました。

我々の発表後、当時半導体レーザの研究で世界を牽引していた米国ベル研究所、オランダ Philips、イギリス BT&D 等がこの構造を追試し、良好な結果を報告しました。

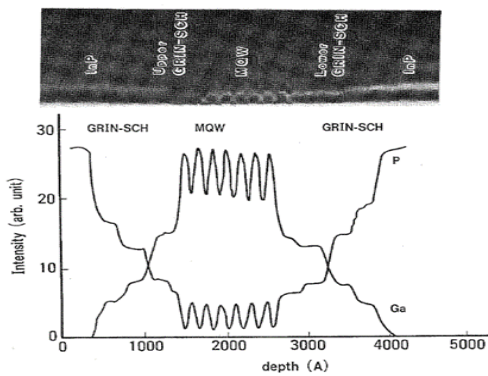


図 2. GRIN-SCH-MQW 構造の CAT 像と SIMS プロファイル

実用化のためには、この活性層周りの構造検討だけでなく、単一モード光ファイバへの高結合のための出射ビームプロファイル制御や単一横モード動作での高出力動作達成のための埋め込み技術が重要になります。これら周辺技術の開発を行なうことにより、1991 年に 360mW の光出力を、EDFA 励起用波長の 1480nm 帯で達成することができました (図 3)。これは当時の世界最高出力でありました。会社全体での取り組みの甲斐があり、WDM 通信方式にとって不可欠である EDFA 励起用レーザ製品、そして EDFA 製品として米国を中心に大きなシェアを持つようになりました。

入社して、自身が中心的に研究開発を行なった製品が広く社会で使われるようになったこと、当時インターネットを中心とする ICT 社会の実現に大きな貢献ができたこと、会社業績に貢献できたことで大きな満足感がありました。また、当時、この業界では全くの門外漢であった古河電工が半導体レーザのメーカーとして広く認識されるようになったことに大きな喜びを感じました。この後は、この

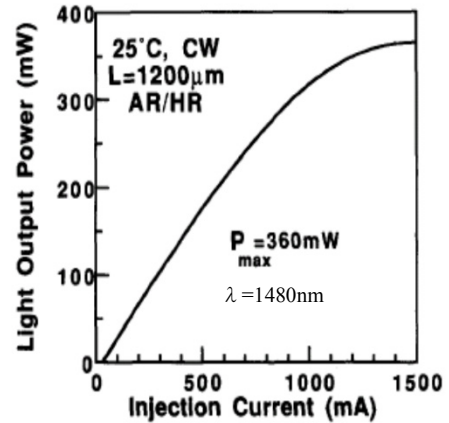


図 3. 作製した 1480nm 帯高出力レーザの特性

高出力レーザ作製の技術を、WDM 通信システムにとって不可欠であった信号光源 (DFB レーザ) や広帯域波長可変レーザへ展開し、光通信の大容量化に貢献しました。1990 年に WDM 方式の幕開け当時米国ベルコアに赴任の機会を得て半導体レーザの研究を行なった身として、励起用レーザの後、是非とも商品化したい思いがあった広帯域波長可変レーザを開発しました。良好な特性は得られたものの、残念ながら 2000 年初頭の IT バブル崩壊のため注目を浴びることはありませんでした。

WDM 用の広帯域波長可変レーザとして開発を行いましたが、現在は、大容量通信をサポートするデジタルコヒーレント通信システムで不可欠となっている狭線幅特性を有する高出力レーザとして広く世界に認知されるようになってきました。

今後は、電子情報通信学会フェローとして当該領域での活性化のために微力ながら貢献して行きたいと思っております。最後に、長らく当該領域の研究開発をサポートし、暖かく見守ってくれた柴田光義 古河電工取締役会長 (当時横浜研究所 所長) に感謝致します。

著者略歴 :

古河電工(株) シニアフェロー。1982 年東工大 電気電子工学科卒、1984 年東工大 電子物理修士課程修了、古河電工入社。1990～1991 年米国ベル通信研究所 客員研究員。2000 年電子情報通信学会業績賞。2001 年桜井健二郎賞。2015 年本会エレクトロ副会長 (研究技術会議担当) IEEE および応用物理学会フェロー、工博。



【寄稿】（新フェロー）

「通信用光コネクタ技術の先駆的研究開発と標準化」



長瀬 亮（千葉工業大学）

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。ご推薦いただきました方々、ご指導いただいた諸先輩方、共同研究者および標準化委員の皆様深く感謝申し上げます。

光コネクタは光通信ネットワークを構築する上で必須の部品でありながら、空気のように透明で無反射、かつタダで手に入ることを求められ、その性能を主張することはありません。ただし、それなしではネットワークが生きていけないところも空気たる所以です。光コネクタの開発は1980年代初頭に始まる光通信システムの実用化に伴い、様々なシステム側からの要求条件に応える形で進められてきました。その歴史を簡単に振り返ってみましょう。

[基本原理の確立（1970～1985）]

シングルモード光ファイバを接続するためにはモードフィールドを整合させる必要があるため、バット・ジョイントと呼ばれる、光ファイバ同士を直接突き合わせる接続手法が最も低損失化できる可能性を持っています。ところがモードフィールド直径が約 10 μm 以下であるため、軸ずれに対する許容量が 1 μm 程度しか許されません。1 μm を超える精度で永久固定するのはさほど難しくはありませんが、コネクタには着脱を繰り返しても同じ特性を再現できることが求められる上、光コネクタに繋がっている光ケーブルには外力が作用するため接続部にひずみが発生します。オペレータによる作業中に発生し得る数 10 N レベルの力であっても、部品の変形量は数 10 μm におよび、軸ずれ許容量の 1 μm をはるかに超えてしまいます。

これら光コネクタが抱える根本的な難しさを解決したのが、電電公社の鈴木信雄氏らによる FC 形光コネクタ（1979）⁽¹⁾です。繰り返し再現性の点で有利な円筒フェルールと割りスリーブによる整列機構をプラグハウジングからフロートさせる 2 重かん合構造を採用することにより、基幹回線に求められる高度な接続安定性を実現することに成功しました。この基本構造は、現在に至るまで光コネクタ構造の主流として生き続けています。

[基盤技術開発（1985～1995）]

私は 1985 年に NTT に入社し、武蔵野電気通信研究所に

配属され、杉田悦治氏（現株式会社白山）をリーダーとする SC 形光コネクタの開発チームで研究者としてのスタートを切りました。当時プッシュプル結合構造として新しく考案された機構では結合強度が足りないことが問題となっていました。チーム構成員の中で唯一機械系出身であったため、力のつり合いだけでなくひずみのつり合いに配慮する感覚が役に立ち、この問題を解決したのが私の初仕事となりました⁽²⁾。

同じころ、フェルール端面を凸球面研磨することにより、ファイバ端面同士が接触してフレネル反射を抑制し、高い反射減衰量が得られる PC 接続方式が前出の鈴木信雄氏によって見いだされました。しかしながらフェルールとファイバは異種材料のため温度変化によって端面は球面を維持できず、ファイバ引込みが生じて PC 外れを起こすことが分かり、その信頼性が問題となりました。そこで私はフェルール、ファイバと接着剤のヤング率の違いから、引込んだファイバが端面の接触圧によってせり出してくる変形が起きていると直感し、詳しい解析を提案しました。先輩の助けを借りながら有限要素解析と実験結果の整合が取り、フェルール端面の微小変形を明らかにした結果を最初のレターとして発表することができました⁽³⁾。

1980 年代後半には通信装置の高度化に伴い高密度実装が可能な小型の光コネクタが求められたため、SC 形光コネクタ用に開発されたジルコニアフェルールをどこまで細くできるかを検討することとなりました。フェルールを細径化すると割りスリーブの変形量が小さくなって安定な接続が難しくなり、長くすると強度が不足することから、いろいろな径のフェルールを試作して実験を繰り返し、割りスリーブ微小変形の解析とともに最適解を求め、1.25 mm フェルールと MU 形光コネクタを提案することができました⁽⁴⁾。

1985 年からの 10 年間は、その後の標準コネクタとなる SC 形光コネクタの開発と PC 接続条件の最適化による信頼性の確立、同じく標準となった 1.25 mm フェルールの開発を通じて高性能化、高信頼化、小型化に関する開発とともに NTT における事業導入を進め、光コネクタ基盤技術が確立した時代ということができます。

[FTTHの実現に向けて(1995~2000)]

1995年ころからFTTH実現に向け、光部品の抜本的な低コスト化が大きな課題となりました。PC接続に関する力のつり合いを確保しながら、対称構造が常識だった接続点を非対称にすることにより大幅に部品点数と組立て工数を削減した簡易レセプタクル構造を実現した結果⁽⁵⁾、光加入者系に全面導入されました。2,800万加入までFTTHが普及した背景にほんの一部ながら貢献することができたのは感慨深いものがあります。

[標準化活動(1983~)]

光コネクタはインタフェース部品のため、標準化が非常に重要です。前出の杉田氏が中心となって早い段階にIEC等において積極的な標準化提案を始め、私も2001年よりIEC TC86/SC86B国内委員会幹事やJIS光コネクタ標準化委員長などとして関与することができました。光コネクタ技術は世界でも日本が先行していたためにSC形、MU形等のかん合標準、PC接続条件をベースとした光学互換標準、基盤技術開発の段階で開発した様々な試験・測定方法を標準化することができました。

[これからの課題]

光通信ネットワークを構築するための光ケーブル用シングルモード光コネクタ技術については成熟し、今後もSC形光コネクタを中心とする現在の基本構造が使われていくでしょう。一方、シングルモードファイバの容量の上限(1本あたり100Tb/s)が明らかになったことから空間多重伝送(SDM)の研究が盛んに行われており、ひとつの候補としてマルチコアファイバ(MCF)が検討されています。MCFを接続するためには軸ずれだけでなく軸回り角度を精密に合わせる必要があり、これは光コネクタの基本である2重かん合構造と矛盾します。これを解決するため、フェルールとプラグハウジングの間にオルダム・カップリング機構を取り入れ、角度ずれを起こさずにフロートできるMCF用MU形光コネクタを考案しました⁽⁶⁾。ランダム接続による測定結果と各コア軸ずれ実測値から予測される損失分布の一致を確認し、2重かん合構造が設計通りに機能していることが確認されています。

また、取り扱う信号の高速化に伴ってボード上光インタコネクション技術が注目され、ボード上で使いやすい新たな小型多心光コネクタが求められています。多心化が進むとゴミによるPC接続不良が発生する確率の上昇が懸念されることから、損失を多少犠牲にしてもPC以外の接続方

法が検討され始めています。ゴミに対する耐性は専用のコネクタクリーナを持たない一般ユーザが光コネクタを扱う場合にも必須の特性であり、光コネクタに対する新たな市場を作るための要件となります。

さらに、自動運転の実現に向けて自動車内信号伝送容量が飛躍的に増大しており、光信号伝送への移行が盛んに検討されています。長距離、大容量を前提とした光通信技術と異なり、ごく短距離ながら過酷な環境で信頼性を求められる車載用光伝送システムにはこれまでとは異なる技術が必要です。この領域では新たな光ファイバ、接続部品や試験・測定方法の標準化が重要になってくるでしょう。

NTTが全国縦貫光ファイバ伝送網を完成させた1985年からFTTHが導入された2000年まで、最も環境変化と技術進歩の著しかった時代に光コネクタ基盤技術開発に携わることができたのは本当に幸運でした。これまでの経験を生かし、今後も新たな挑戦を続け、さらなる発展を目指す所存です。

参考文献：

- (1) N. Suzuki et al, Electron. Lett., vol. 15, no. 25, pp. 809-811, 1979.
- (2) E. Sugita et al, IEEE JLT, vol. 7, no. 11, pp. 1689-1696, 1989.
- (3) R. Nagase et al, Electron. Lett., vol. 23, no. 3, pp. 103-105, 1987.
- (4) R. Nagase et al, Trans. IEICE, vol. E81-C, no.3, pp.408-415,1998.
- (5) 長瀬他,信学論文誌 C-II, vol. J79-C-II, no. 11, pp. 641-648, 1996.
- (6) R. Nagase et al, Trans. IEICE, vol. E96-C, no. 9, pp.1173-1177, 2013.

著者略歴：

1985年東北大学大学院工学研究科精密工学専攻修士課程修了、同年日本電信電話(株)入社。NTT研究所において光コネクタの研究開発に従事。1998年博士(工学)(東北大学)。1998年NTTコミュニケーションズ(株)国際事業部、2000年NTT研究所において光接続および光配線技術の研究開発に従事。2009年千葉工業大学工学部教授(現在に至る)。2008年~2010年機構デバイス研究専門委員長。現在IEC TC86/SC86B国内委員会主査。1992年学術奨励賞、2005年関東地方発明表彰、2006年精密工学会技術賞、2011年IEC 1906 Award等受賞。



【寄稿】（新フェロー）

「本格的な光集積回路の実現を目指して」



山田 博仁（東北大学）

このたび、電子情報通信学会から「シリコン細線光導波路素子の先駆的研究」によりフェロー称号を賜り、大変光栄に存じます。ご推薦をいただきました方々、これまでご指導を賜りました先生方、諸先輩方に深く感謝します。

大学の卒業研究で、半導体レーザの動作原理に魅せられ、大学院の修士・博士課程では、その半導体レーザなどの光デバイスを集積化するための半導体微細加工プロセスや、面出射型半導体レーザの研究によって学位を取得しました。NEC に入社後も光デバイス、主に通信用半導体レーザの研究開発に携わってきました。NEC での後半生は、フォトニック結晶やシリコン細線光導波路デバイスなど、より先進的な光デバイスの研究にも携わることとなりました。そして、約 10 年前に大学に戻ってきてからは、主にシリコン微細光導波路による光集積化デバイスの教育・研究に携わっております。

学生時代の研究から企業での仕事を通じて、そして再び大学に戻ってきてからの研究・教育でも一貫していたのは、光集積回路の実現に向けた研究だったと言えます。

光集積回路の概念自体は古くからあり、電子デバイスの集積回路とほぼ同時期の 1960 年代には着想されておりました。しかし、電子デバイスの集積化技術が、その後ムーアの法則に従って過去半世紀の間、IC から LSI へと大規模化して行ったのに比べると、光集積回路は、素子数でも機能面でも未だ小規模の集積化に留まっております。

その理由として挙げられるのは、電子デバイスの場合は、Tr や FET 等のアクティブ素子から抵抗やキャパシタ等のパッシブ素子まで、シリコンウエハ上に同一の製造プロセスによって形成することが可能ですが、光デバイスを集積化する場合、LD や LED 等の発光素子は、GaAs や InP 等の直接遷移型の化合物半導体を用いる必要があります、シリコンに比べて化合物半導体ウエハはサイズの大型化が難しく、また化合物半導体プロセスはシリコンに比べると制御性に難がありました。化合物半導体基板による集積回路は、電子デバイスでも検討されてきたが、シリコン基板上での集積回路に比べると小規模なものに留まっております。

シリコンをベースとした近赤外域で動作する所謂 SOI 光導波路素子は、80 年代後半から、R. A. Soref らによって

研究されてきましたが、90 年代後半に、シリコンからなる極微細コアをシリカやエアによってクラディングする High- Δ シリコン光導波路の概念が、MIT の L.C Kimerling 教授や和田一実教授らによって提唱されたことにより、シリコン細線光導波路による通信用高密度光集積回路の実現可能性が見えてきました。この場合勿論、発光素子はシリコンでは実現困難なので、マトリクス光スイッチ等のパッシブ光素子のみによって構成される光集積回路です。

当時私は NEC でフォトニック結晶素子の研究を行っておりましたが、その研究で用いていた電磁界解析のツールを用いて計算してみると、従来からある石英系の光回路 (PLC) に比べてシリコン細線光導波路による光回路は、面積比で 1/1,000 以下の大幅な小型化が可能であることが分かりました。フォトニック結晶素子もそうですが、個々の光導波路素子のサイズを大幅に小型できる High- Δ のシリコン細線光導波路に、光集積化の新たな可能性を感じて、私も研究を開始しました。

最初に試みたのは SOI ウエハ上にシリコン細線光導波路パターンを EB 露光により描画し、そこに波長 1.55 μm の光を通してみて、ちゃんと導波されるかどうかを確認することでした。極微小なコアに光を入射させるのは容易ではありませんが、フォトニック結晶スラブ導波路を扱っていたため、比較的簡単に導波路に光入射させることができました。小さな渦巻状のテストパターンを光が通って反対側の端面からちゃんと光が出てきたことを確認した時は、少なからず感動しました。

それからはさらに、Y 分岐や方向性結合器、光合分波器など、単純な機能の光導波路素子も試作し、設計通りに動作することを確認していきました。

シリコン細線光導波路素子による大規模な光集積回路の実現に向けて、最初に着目したのは熱光学(TO)効果による光スイッチでした。シリコンの熱光学定数はシリカに比べて約 1 桁大きいことが分かっておりましたので、シリコン細線光導波路によって TO 光スイッチを構成すれば、大幅な小型化が可能になると思います、MZ 型の光スイッチ素子を試作してみました。実際にシリカ系光導波路による TO 光スイッチに比べて、電極パッド部分を除けば、面積比で

2桁以上の小型化が可能であることを実証し、そればかりでなく、スイッチ動作に必要な電力は1/10以下にできることも確認しました。さらに、スイッチ動作の応答速度はマイクロ秒オーダーで、TO効果による動作としては比較的速い動作が得られる点も意外な発見でした。従って、シリコン細線光導波路によるTO光スイッチ素子を複数集積化することにより、1×Nマトリクス光スイッチを数mm角の超小型のチップに実現できることも実証しました。

このようにシリコン細線光導波路を用いれば、様々な光デバイスを超小型に実現できることが分かった訳ですが、その反面、シリコンコアへの強い光閉じ込めによる悪影響も懸念されました。その一つが非線形光学効果であり、シリコン細線光導波路にモード同期半導体レーザーからの数W級の高いピーク強度の超短光パルスを入射されてその挙動を観測してみたところ、やはり二光子吸収や自己位相変調の効果が顕著に表れ、強度の強い光を入射させる場合に問題となることも分かりました。しかし、テレコム用或いはデータコム用として通常用いられる光出力レベルにおいては、それらの効果はそれほど問題とはなりません。

2006年7月に、縁あって私は出身大学に戻ることとなりましたが、大学でもシリコン細線光導波路素子による本格的な光集積回路の実現を、研究と教育目標に掲げることにしました。これまでにリング共振器波長フィルターによる波長可変レーザーや、グレーティングカップラ、光スイッチなど、光集積回路を構成するためのシリコン光デバイスの研究を学生や教員仲間と行ってきました。途中、東日本大震

災などもありましたが、大学での研究生活も早いもので10年が経過しました。

世の中では、CMOSプロセスに準拠した製法で作製可能なシリコン光導波路デバイスは、合分波器やシリコンによる高速の光変調器など、シリコンフォトンクスとして、既に様々な機能を有する光集積回路を実現できるようになりました。ウエハ上にGeやSiGeを結晶成長することにより、受光素子も形成できるようになり、さらにウエハ張り合わせやフリップチップ実装により、LDなどの発光素子も搭載できるようになったことで、実現可能な機能の幅も広がりつつあります。現時点では未だ、電子デバイスのLSIには及びませんが、数千から数万個の光素子を集積化する本格的な光集積回路が実現される日もそう遠くはないと確信しております。

本格的な光集積回路の実現に向けた研究は未だ道半ばですが、残りの研究生活もそれに捧げたいと考えております。今後とも、ご指導ご鞭撻のほど、どうぞよろしくお願い致します。

著者略歴：

東北大学 大学院工学研究科 通信工学専攻 教授。1981年 金沢大学 工学部電子工学科卒。1987年 東北大学 工学研究科 博士課程修了。同年日本電気(株)入社。以来、通信用長波長半導体レーザー、フォトリソ結晶デバイス、シリコン光導波路デバイス等の研究に従事。2016年より東北大学で現在に至る。



【特別寄稿】

「アレイ導波路回折格子の研究を振り返って」

和文論文誌 C 分冊編集委員会委員長

高橋 浩 (上智大学)



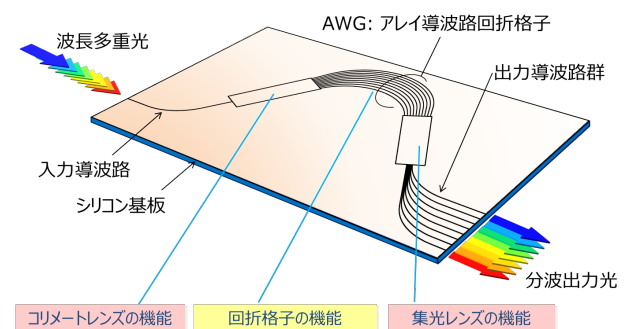
筆者は 29 年にわたり光導波路およびそれを用いた光回路、またその応用先である光ファイバ通信の研究開発に従事してきた。幸運にも以前所属していた NTT 研究所の諸先輩方の指導、充実した研究環境、活発な議論や苦勞を共にしてくれた同僚や後輩に恵まれ、アレイ導波路回折格子 (arrayed waveguide grating: AWG) 型の波長フィルタ、光スイッチ、コヒーレント受信復調回路などの誘電体光導波路デバイスの実用化に携わることができた。インターネットを支えている世界中の光通信システムの中に自分がかかわったデバイスが使われていて、研究者冥利に尽きる。また、本会と IEEE のフェローの称号や、文部科学大臣賞、前島密賞、全国発明協会通産大臣賞、本会の業績賞、エレクトロニクスソサイエティ賞、英国 Rank 財団の Rank 賞など数々の賞をいただき、自分を育ててくれた関係者の方々に感謝しきれない思いでいっぱいである。今回、寄稿の機会を頂いたので、過去の研究を振り返りながら、(有難迷惑な話かもしれないが) 研究がうまく行くとこんなに素晴らしいことがあると若手研究者にエールを送りたく、筆を取らせていただくことになった。

学生時代は東北大学の中鉢憲賢・榎引淳一両先生の指導で誘電体結晶表面を伝搬する弾性表面波を使って結晶を評価する研究を行っていた。表面波速度を自動計測し、多量のデータから弾性率テンソルを逆計算で求めるため、波動の勉強だけでなく PC を用いた測定系の制御やデータ処理、数値計算のため UNIX マシン上での FROTRAN プログラムと格闘したが、予定していた成果は出せず 7 割くらいの完成度で修士課程を終えてしまった。ただし、苦勞して大きなプログラムを作ったのでプログラムの効率的な書き方や数値計算の基礎を体で覚えることができたので、今それが役に立っている。最近の学生は市販シミュレータを使って効率よく研究を進められるが、出てきた結果はスプリアス解ではないのか？、計算精度は十分なのか？など、確認しながら進めているのか少々心配である。

縁あって波動および誘電体との付き合いは継続し、就職した NTT 研究所で石英ガラス光導波路の研究をさせてもらった。入所早々上司である西功雄さんに導波路群を使った多光束干渉計で透過型回折格子と同じ機能が実現でき

そうだから研究してはどうかと提案され、AWG の研究を開始した。大学時代の研究で超音波を誘電体サンプルに照射するために音波のレンズを使っていたのだが、その基礎知識としてゼミで J. W. Goodman の Introduction to Fourier Optics を読んでいたので、AWG の設計理論を定式化するのに大変役に立った。超音波の研究室でなぜ光学を勉強しなくてはならないのかと思っていたが、研究者になって大学時代の基礎の大切さを実感した。なお、この教科書は 2 度改版され、第 3 版では私の名前を挙げて AWG の紹介が追加されており、おとなげない理由で恐縮だが大変感動している。

さて、下図の通り AWG 型波長フィルタは入力光をスラブ導波路で回折させて長さの異なる数百本の導波路群に導き、そこを伝搬後、レンズの役割を持つ出力側スラブ導



AWG 型波長フィルタの構成と動作

波路で集光させる。光学構成はモノクロメータと同じであり、集光位置が波長によって異なるので波長フィルタとして利用できる。モノクロメータとの違いは導波路技術で作製されるため小型 (数 cm 角) で量産性に優れること、そして通常の回折格子では実現が難しい高い次数を使えるため波長分解能が高い点あげられる。そのため、波長間隔が 1nm 以下の高密度の波長分割多重 (wavelength division multiplexing: WDM) 伝送システムにおいて、波長多重光を分離するための波長フィルタとして用いられている。

多光束干渉が設計通りに動作するためには、導波路長の誤差は目安として波長の 1/100 以下 (すなわち、10nm 以下) であることが求められる。AWG はブーメランの形をしており、導波路長の所望値から逆算して曲げ部分の半径

と開き角を設計する必要があるが、逆関数は解析的に求められないため、導波路1本ごとにニュートン法を使って数値解を求め位置と長さを決定してゆく。この方法も大学時代に行っていたのですんなり導入できた。

どうせコンピュータを使うのだから座標計算だけでなく光回路全体をすべてプログラムで記述してしまう方法を取ることにし、また導波路の位置座標をそのままフォトマスクメーカーの描画機が理解できるデータに変換するためのライブラリの構築なども自前で行った。この仕事は、AWGを1つだけ設計するだけならそれほど必要性は高くなく、当初AWG設計プログラムの完成度を上げることは社内ではあまり歓迎されていなかった(高橋の趣味と思われていた)。しかし、研究が進み部署全体で開発する時に大変役に立った。プログラムを読めば他の研究者でもAWGの設計が簡単にできるし、何よりも、特性(例えば透過波長など)が少しだけ違うAWGが必要な時に、初期設定値を書き換えてプログラムを走らせれば瞬時に設計が終わるので、開発に要する時間を短縮できる。プログラムによる光回路設計法はその後汎用性を持つように同僚の皆さんによって改良・発展され、マッハツェンダー干渉計を多数集積した大規模光スイッチなどほとんどの光回路デバイスで使われている。

しばしば「同じようなことを考える人は世界に3人いる」と言われるようにAWGの初期の研究では、オランダのDelft工大(現在はEindhoven工大)のSmit先生、ベル研のDragone氏、と高橋が競争していた。導波路群による回折/分光の可能性を最初に提案したのがSmit先生で、Dragone氏は複数入力ポートの周回性利用などの提唱をした。高橋は、波長多重通信で使える特性を最初に実現・報告するとともに、一般の回折格子の理論を拡張してAWGの設計理論を確立した。AWGの研究を始める以前、Smit先生とDragone氏はマイクロ波、高橋は超音波の研究をしており、3人ともバックグラウンドは光導波路ではなかった点は興味深い。異分野からの参入が新しい研究の端緒となるのかもしれない。

研究を始めた1988年ごろは、現在とは異なりIPパケットのトラフィックは少なくWDMは本当に必要なのかという懐疑的な意見もあったが、偏波依存性解消方法、信頼性確認など実用化へ向けた開発が進むのと同時に、一般ユーザーがインターネットを使いはじめ、トラフィックが徐々に増え始めた。シーズとニーズの時期が一致して90年代半ばからAWGの本格的な開発が始まった。NTT研究所では子会社のNTTエレクトロニクスへ研究者を外向させ、

関係者が一丸となって開発を進めた。私もその中の一人であり、開発の他に技術営業も担当し北米の通信装置メーカーに対して製品説明、仕様交渉、試作品の特性説明などを行った。売り込みに行った大半の会社はITバブル崩壊時に消滅し私の努力の大半は無駄になってしまったが、当時シェアNo.1のメーカーに採用され実際のWDM伝送装置に導入されたこと、そしてペアを組んでいた商社の人と一緒に飛行機とレンタカーであちこちを旅したのは良い思い出となっている。また、大きな通信システムの中のたった1つの光学部品を納めるだけでも多くの人の労力が必要であり、ものづくりの大切さを身に染みて感じる事ができた。

当時AWGの製造を行う会社は世界に10社以上あったが、我々が常に先頭を走っていた。これもひとえにチームワークの賜物である。20名以上の研究者がプロジェクトチームを作って多くの開発課題を分担した。特性劣化原因の解明や仕様を満たすために損失を0.3dB減らすような重箱の隅をつつく検討であり論文など書けない。それでも、皆が文句を言わずに(痴愚は言ったが・・・)続けられたのは、大会社にしては珍しく少人数の組織(私の同期入社の人5人)で、かつ茨城県東海村という田舎にあった研究所ゆえ、連携する雰囲気職場にあったためである。加えて、多くの先輩研究者が築いたノウハウの蓄積があった。石英ガラス光導波路の研究を始めてその後全体の指揮を執った河内正夫さん、導波路作製プロセスをまとめていた大森保治さん、光ファイバや導波路の理論の大家で先頭を切って新しい光回路設計を行った岡本勝就さんなど枚挙に暇がない。また、年の近いところでは導波路作製や光学実験の指導してくれた鈴木扇太さん、温度無依存化法を考案した井上靖之さんなど数多くの同僚やNTTエレクトロニクスの若手技術者とのチームワークのおかげでもある。

CMOSのLSIのように集積度に関心が集まりがちだが、アナログ回路である光集積回路の最大の特徴は、フォトリソグラフィにより光導波路をナノメートルの位置精度で配置でき所望の干渉動作が実現できることにある。この特徴はAWGだけでなく、コヒーレント受信用の復調光回路などでも生かされている。今後、若手研究者の努力により研究がさらに活発になり、光回路技術が光通信だけでなくその他の分野にも応用されることを期待する。

著者略歴:

1988年東北大学大学院博士前期課程修了、同年NTT研究所入所。以来、光導波路、光回路、光ファイバ通信の研究に従事。2013年より上智大学理工学部。本会およびIEEEフェロー。