

○「スピントロニクス技術で半導体にパラダイムシフトを起こす」
○「日本にはブレークスルーを生み出す力がまだ残っている」

国立大学法人東北大学 国際集積エレクトロニクス研究開発センター (CIES)
センター長 遠藤 哲郎氏
一般社団法人 日本半導体製造装置協会 (SEAJ) 会長 牛田 一雄氏



SEAJ 牛田会長 (以下、牛田氏) 2022年、あけましておめでとうございます。東北大学は国立大学のなかでも特に民間企業の研究開発活動とともに歩み、川上である材料から川下となるシステムまで一貫した産学共創に取り組み、半導体・エレクトロニクス業界にも多くの優秀な人材を育成して輩出し続けています。そのなかで今回、新春対談のパートナーとして、3D-NAND メモリーの開発者として知られ、最近ではスピントロニクス半導体の研究開発を精力的に進められている遠藤哲郎教授を国際集積エレクトロニクス研究開発センター (CIES) にお訪ねしました。スピントロニクス技術を活用した次世代メモリーのMRAMをはじめとする最新の研究成果や製造装置業界への今後の期待などについて忌憚のないご意見を伺いたと思います。どうぞよろしくお願いいたします。

東北大学 遠藤教授 (以下、遠藤氏) 遠路お運びいただき、誠にありがとうございます。今回の対談では、少しではありますがありますが半導体産業に貢献してきた小職の研究活動をご紹介するなかで、日本の技術開発能力はいまだトップレベルにあることを発信するとともに、これらの革新技術創出ができたのも、製造装置企業との共同研究あつての成果ですので、

モノづくりの重要性をお伝えしたいと思います。また、半導体の社会的価値を学生など若手エンジニアに理解してもらえるような機会にもしたいです。よろしくお願いいたします。

牛田氏 遠藤先生は1987年に東芝に入社され、その年からスタートした NAND の開発に従事されました。当時は東芝に限らず、国内半導体メーカーは DRAM 量産の全盛期で、新メモリーだった NAND メモリーは顧客のいない状況だったと思います。当時の私は g 線露光装置のレンズ設計をほぼ任されており、DRAM 事業に少しは貢献できたのではと思っておりますが、現在の NAND 市場を見ると、遠藤先生は新規事業をどう育成するかにも豊富な知見をお持ちではないでしょうか。

遠藤氏 東芝では当時、半導体に分かる人はすべて DRAM をやっていました。私は理学部物理学科の出身で、半導体のことは全く分かっておらず、試作担当の技官含め非常に少人数で、しかも事業部での見通しも見えない状況で NAND メモリーの開発をスタートしました。フローティング2層ゲートのエッチング、TEG 設計、テストプログラムの開発などすべて自分たちでやり、露光装置は DRAM 部隊のお下がりでした。DRAM 部隊が使い古した g 線露光装置で64M を作らなければいけなかったため、知恵を使い、初めてダブルパターンングをやったり、サイドウォールを作り込んだりしました。その後は量産の立ち上げで事業部に配属され、北上工場や大分工場での量産立ち上げや一部営業活動を担当させていただきながら、東芝ではとにかく半導体事業のすべてを経験させていただきました。そのなかで私が学んだことは、理学部出身であろうと工学部出身でなかろうと、考える力があれば半導体分野には活躍できる場があるということですね。

牛田氏 東北大学は工学と医学などの発展に向けて設立された国内3番目の帝大で、実学を尊重し、産業界とともに発



展してきた歴史があります。だから第二次大戦時には空爆を受けましたし、有名なアンテナ、半導体や光通信に加えて電子レンジなども東北大学発の技術だと聞いています。そうした流れを汲んで、このCIESも自立経営で世界最大規模の産学コンソーシアムを構築していますね。改めてCIESのミッションやビジョンを教えてくださいませんか。



遠藤氏

遠藤氏 東京エレクトロン様を中心とした国内初の100%民間拠出によるサイエンスパーク型産学連携拠点で、文科省からの資金は入っていません。東日本大震災で学内のクリーンルーム（CR）がすべて壊れたため、東北大学での半導体の研究・教育の灯を消さないで、被災地東北から新しい光を発信するという志で、CIESは東京エレクトロンの支援を受けて2012年10月に設置されました。先端企業と互換性のある研究開発環境である300mmプロセスでスピントロニクス集積回路の開発実証が可能で、大学が運営する世界唯一の拠点であり、民間の技術者70人以上が次世代集積エレクトロニクスに資する革新的技術を開発しています。こうした活動が認められ、平成28年度の産学官連携功労者表彰で内閣総理大臣賞を、東京エレクトロン様とキーサイトテクノロジー様と一緒に受賞しています。

やはり、半導体は実際にモノを作って、動かしてこそ価値がある。シミュレーションに逃げるのではなく、実際にモノを作ることが大事だと考え、大学内にCRを持ってモノづくりをやってきました。MRAMをやると最初から決めていたわけではないのですが、とにかく半導体を作ることだけは決めていました。東北大学の生い立ちと同じ歴史を持つセンターであり、こうした活動ができるのも製造装置・製造技術があってこそ、と感謝しています。

牛田氏 CIESには装置メーカー8社が入居して、アーリーステージの段階から共同開発しているそうですね。マイクロエレクトロニクス分野の世界的な研究機関としてはベルギーのimecがあり、ASMLと微細化技術を開発していますが、imecは素子の開発に特化しており、東北大学のように集積回路化することはできません。そうした意味でも、CIESを中心としたコンソーシアムの活動は非常にユニークです。

また、MRAMに関してですが、東北大学の東野英男総長がスピントロニクスの研究から半導体化に適した鉄ボロン（Fe-B）や鉄コバルトボロン（Fe-Co-B）といった材料を開発され、それを受けて遠藤先生がLSI化を進めてこられた。16年間にわたって一緒に研究なされ、お二人はとても良いパートナーなのだとお見受けします。

遠藤氏 CIESコンソーシアムのユニークな特徴の1つが、材料メーカーやシステムの設計・製造企業、ITソリューション企業、カーエレクトロニクス企業といった様々な応用電子機器メーカーが参画していることです。ユーザーの立場から半導体に対するリクエストをいただいております、大学を介した企業間連携によって研究開発効率の向上や技術バリューチェーンの構築につながっています。

また、MRAMに関してですが、東野先生から「材料はできたから、LSI化は遠藤さんの領域だ」と言っていました。当初は、シリコンに鉄やニッケルなどを混ぜるのは筋が良くない、要するに鉄は磁石だからコンタミだと言われ、新材料の研究にはネガティブでした。3D-NANDメモリーにしろ、MRAMにしろ、アイデアはある。だが、どうやって作るのか。試作ができて、仮に性能が出たとしても、それに装置が付いてきて効率よく製造できるようにならないと、出口のない開発になってしまう。私がずっと経験して学んできたことは、研究開発と装置技術のレビューが同期しないとダメ、プロセスと装置のコラボレーションが非常に大事だということです。

牛田氏 電子のスピン向きを記憶情報に用いるスピントロニクス技術から誕生したSTT-MRAMは、電源を切ってもデータを保持できる不揮発性を持つため、エンベデッドメモリーとして利用することでロジックLSIの消費電力を画的に低減できる技術として期待されています。すでに、これを搭載したスマートウォッチやIoT向けキットなどに搭載実績も出てきましたが、改めてMRAMの現在地を教えてくださいませんか。



牛田会長

遠藤氏 メモリーを書き換え速度で比べると、NANDメモ



リーはHDDより10倍速く、DRAMはNANDより10万倍速いのですが、STT-MRAMはDRAMより3倍～10倍高速ですし、不揮発性メモリーであるNANDメモリーと比較すると100万倍高速なのです。例えば、パソコンがスリープモードに入ったり、スリープモードから復帰する際、若干のタイムラグが発生するのをみなさんご経験されていると思いますが、不揮発性のSTT-MRAMは動作がきわめて速いためスリープモードをすばやく切り替えることができ、結果としてパワーセーブにつなげることができます。また、現在のCPUは3GHzくらいの速度で動作するのですが、エンベデッドメモリーを動作の速いSTT-MRAMにするとCMOSベースに比べてロジックLSIの消費電力を1/100に低減することができます。また、最近、CPUと完全同期して動作できるSOT-MRAMの開実証にも世界に先駆けて成功しています。ここまでの省エネが実現できるのは、CMOSと磁気トンネル接合素子（MTJ）のハイブリッド技術のみであり、消費電力が実用化の壁になっているAIプロセッサやIoTデバイスの圧倒的な差別化技術になります。

主要ファンドリーでもCMOS技術との融合が進んでいます。例えば、TSMCが公開しているロードマップで、ロジック向けMRAMは16nm FinFET世代で21年第4四半期からFlash-like MRAM、22年第4四半期からはRAM-like MRAMの量産適用を開始することを公表しています。これにより混載メモリーを含むロジック半導体の消費電力、混載メモリーの面積、配線遅延といった問題の解決を図る考えで、スタンダード技術として定着してきたと言ってよいでしょう。

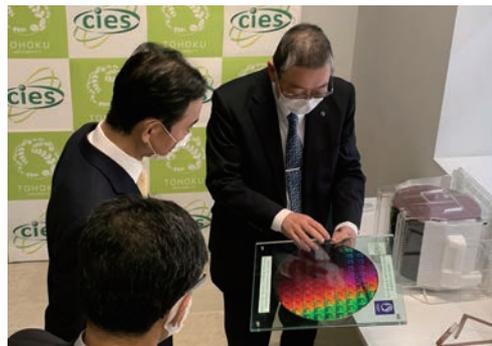
ファンドリーの標準プロセスに組み込まれることには、大きな意義があります。それは、現在の半導体市場のドライブ役であるスマートフォン用デバイスに使われやすくなるからです。スマートフォン用は市場規模が大きいので、大きな金額を生み出します。ここに使われることで技術がさらに成熟すればコストが下がり、センサーやロボット、3Dパッケージングといった用途にも広がることにつながります。

こうしたスピントロニクス関連特許の出願件数について、東北大学CIESは大学では世界トップ、世界の企業を含むランキングでも3位に位置します。東北大学が生み出してきた知財と革新的技術や基本特許を管理するためのスタートアップ企業としてパワースピン(株)が設立されており、私も創業者兼CTOの職を担っています。

牛田氏 これは画期的です。データを保持するところをパワーダウンできるのですね。メモリーが不揮発性であることのすごさを改めて実感しますが、単なる省エネ技術ではなく、半導体の使われ方が根本から変わるかもしれません。消費電力が下げられるということは、発熱も劇的に小さくなります。露光装置などの精密機器を製造するうえで半導体は不可欠ですが、半導体からの発熱の影響で精度が変わっ

てしまうケースがあるため、どう冷却するかがとても重要になります。スピントロニクス技術をうまく活用することで、水冷を空冷に変更できたり、従来はモジュール同士を離して配置する必要があったケースが、実装密度を高くすることで小型化できることにつながるかもしれません。

遠藤氏 CIESで開発したスピントロニクス技術による画像認識AIプロセッサは、90nmのCMOSプロセスと70nmのMTJを組み合わせたものですが、グーグルのTPUと同一演算性能で比較した場合、 $30\mu\text{W}/\text{MHz}$ と消費電力を1/2000に低減することができました。また、エナジーハーベスティングで駆動するIoTマイコンの開発にも成功しています。これは $47\mu\text{W}/\text{cm}^2$ で駆動するスピントロニクス不揮発性マイコンなのですが、人間の指先から出ているエネルギーが $60\mu\text{W}/\text{cm}^2$ ありますので、つまむだけで指紋認証ICカードを動作させることも可能なのです。



牛田氏 デジタル庁の新設にも見るとおり、日本は今後、国民の隅々までデジタルトランスフォーメーション（DX）を行き渡らせなくてはなりません。そのためには電源インフラをどうするかがネックになると考えていたのですが、人体も電源の1つになるのであれば、ラストワンマイルにDXを届ける大きな手段になり得ます。再生可能エネルギーのさらなる普及・拡大にもつなげやすいですから、カーボンニュートラルの実現やグリーン化に向けた将来の展望がさらに広がりますね。

遠藤氏 もう少し紹介させていただくと、スピントロニクス半導体は高温下や放射線環境下で誤作動が少ないことが分かっており、宇宙航空研究開発機構（JAXA）との共同研究によって従来デバイスに比べて放射線耐性を2桁向上できることを実証済みです。宇宙空間や地底・海底といった未踏空間でも正常に動作するのです。さらに、温度特性の良さから次世代の光電融合システムを支える省電力アクセラレーターや不揮発性メモリーとして貢献できる見込みであり、NTTが主導するオールフォトリクス・ネットワーク構想「IOWN Global Forum」のアカデミックメンバーにもなっています。



こうした性能から、日本政府が主導している半導体戦略のなかでも期待をされています。デジタル投資の加速と先端ロジック半導体の設計・開発強化という施策において、東北大学はスピントロニクス省電力ロジック半導体開発拠点に指定され、グリーンロジック半導体やAIプロセッサの設計・試作実証・評価とそのシステム開発を一気通貫で手がける拠点に位置づけられています。

牛田氏 世界各国が経済安全保障の名のもと半導体産業の支援に力を入れており、日本ではTSMCが熊本県にロジック半導体の前工程工場、つくば市に3Dパッケージの開発拠点をそれぞれ整備することが決まりました。日本が保有するロジックプロセスは現状で40nmが最先端ですが、TSMC熊本工場では22/28nmロジックを量産する予定です。日本政府にとっても、TSMCにとっても、地政学リスクを回避するため、まずはそこを相互に確保する狙いもあったのだろうと想像していますが、遠藤先生はこうした動きをどうご覧になっていますか。日本はどこまでを国内に閉じ、どこで価値を生み出すのかを議論することはとても大事ではないかと思うのですが。

遠藤氏 半導体の一連の流れを①研究開発&設計、②前工程、③後工程（組立&テスト&パッケージング）に分けた場合、どの国も①②は国内にとどめたいと思いますが、私は少なくとも①だけ、とりわけ次世代技術と次世代人材を生み出す研究開発は自国にしなければダメだと思います。例えば、Intelは異なる大陸プレートの上にファブを分散するために世界各国で②を運営していますが、研究開発はやはり米国国内に集中させています。ご質問のTSMCにとっては、22/28nmは他国に出して問題ないプロセスなのでしょうが、最先端の研究開発は決して台湾から外に出しません。また、MRAMを搭載するロジックプロセスも外には出さないと聞いています。

次世代の省エネロジック半導体のキーテクノロジーとなるMRAMの①研究開発を日本の地で、半導体製造装置企業様含め産学連携事業でやったことに意義がある。ただし、①の次には、製品に搭載して実証する作業が不可欠で、エンジニアリングサンプルを作って、応用特許まで押さえて技術パッケージにしてしまう。この後の事業拡大の流れはワールドワイドのサプライチェーンに任せて、日本が世界の輪の中の一角のポジションをキープした形で進められればよいと考えます。

牛田氏 バリューを付け加えること、リターンを生み出すシステムを構築していくことは大変重要ですね。遠藤先生はそうした部分にも尽力されていることがよく分かりました。日本が今から半導体市場で世界シェアの30%を再び獲

得しようとするのは、とても大変な作業です。日本がいまだに強いところとして、アイデアがあり、製造装置がある。これが両方揃っているあいだに、次世代の技術やビジネスの種を生み出し、産業を残していくスキームをつくるべきだと改めて強く感じます。



遠藤氏 半導体産業は、製造装置産業から、材料、設計、評価装置産業、さらには半導体ユーザーとなる種々のシステム企業からなる巨大産業です。ですから、半導体工場が建ったか建っていないかで、日本の半導体産業がまるで終わったかのような議論がなされることには違和感を覚えます。日本企業はこれまで、新しいビジネスを生み出し続けてきました。その一方で、日本が生み出してきた技術をもとに、他国は投資競争をうまくやってきました。日本にはブレークスルーを生み出す力がまだ残っている。アイデアがあり、製造装置は強く、半導体ユーザーとしても自動車をはじめとする多様な企業があって、モノづくりの技術があります。

半導体無くして、社会の変革はありえない。半導体がないと、何事も自国で決めることができません。私は産と学の力、理工学と社会科学の力を結集して、革新的コア技術群と高度人材を創出し、これを産業界による本格的な研究開発につなげ、世界と戦えるスピード感を持って、日本の産業競争力強化とイノベーション創出につなげていきます。いかに実業へ早く展開できるか、そして産業界が必要とする人材を潤沢に育成することも大事なミッションと理解しています。そのためには、いかに産業界と大学がともに歩めるかが大切だと思っていますので、今後ともご支援・ご指導のほどよろしくお願い申し上げます。

牛田氏 今日は日本からパラダイムシフトが起きるかもしれないという可能性を大いに感じさせていただくことができました。日本は今、分岐点にあるのだと思っています。産学共創システムの重要性が今ほど大きく認識されたときはないでしょう。今がチャンスだと思います。スピントロニクス技術は日本のグリップが利く分野であり、これを上手に活用してエコシステムを創出していく必要性を強く認識いたしました。装置業界として、引き続き遠藤先生の研究開発はもちろん、日本の学術界からの要望に全力で応えていきたいと思っています。本日はどうもありがとうございました。