



寄稿文

若き日の思い出

－ 学生時代の不揮発性メモリの発明 －

株式会社 半導体エネルギー研究所 山崎 舜平



1) はじめに

半導体 LSI 時代の黎明期を開墾した研究者の物語である。時は 1968 年、わが母校同志社大学にも、赤ヘルブンド(社学同)と共産党系の黄ヘル民青派との権力闘争と、「安保反対闘争」の嵐が吹きすさんでいた。もうじき博覧館の研究室も机や長椅子で封鎖されることがわかり、谷ロー一郎教授、ト部泰正先生と「何とかこのまま半導体の研究を続けられないか」と知恵を絞った結果、父が郷里の静岡で経営していた会社の倉庫(8m×7m)に「疎開」しようということになった、明日はいよいよ建物の封鎖が行われるという前日の夜中、まさに戦争中の「疎開」よろしく、運輸会社を営んでいた弟に応援を頼み、実験装置の電気炉、配管、純化装置等々をトラックに積み込み、一路郷里の倉庫に向かった。

もちろん倉庫であるから土間はコンクリート閑々としている。父に頼み込んで床に木を貼り、一連の実験装置を配置して、窒化珪素膜、酸化珪素膜、シリコン膜等を作る体制を整えた。足りない箇所の工事を発注し、1969 年 6 月、グルノーブルでの半導体国際会議への参加を兼ねた世界一周の研究所巡りに旅立った。

2) 初の国際会議発表を兼ねて世界の研究所を訪問

最初に訪問したのはオランダ・アイントフォーヘンにあるフィリップスの E.S. コーイ博士の研究室だった。博士は巨人のように大柄で少し猫背、落ち着いた物腰の方で、初めて訪問した学生であっても、一人前の研究者として接して下さった。

窒化珪素の中にシリコンのクラスター(今でいう量子ドット)ができる。当時はシリコン LSI(111)の時代で、日立の大野稔さんが(100)を発明し、NEC の松倉保夫・羽田祐一両博士が(100)の持つ素晴らしい特性を JJAP に発表(1969 年)していた。私も、当時東京大学で毎月一度行われていた菅野卓雄先生の「酸化膜研究会」の末席を汚していた。ここには榊裕之先生(豊田工業大学学長)もいらしており、この最先端の情報は得ていた。酸化膜研究会に関係された方々の多くは既に定年でご退職、ご隠居、またはご逝去されてしまい、今お目に掛かれるのは菅野先生、榊先生だけになってしまった。その頃、研究会では(111)、(110)、(100)の熱酸化膜で何が違うかが論題の一つになっていた。私は酸化メカニズムの違いを想定し、(111)では局部酸化が起きて Si クラスターが形成され、そこに電荷がたまり不安定になる、という仮説を立て、論文投稿していた。当時は電子顕微鏡も不十分であったため、熱酸化処理をした酸化珪素膜(111)や CVD(化学気相成長法)により形成した窒化膜中に観察される、丸く、黒いまたは白いものの材料を特定するま

では至らなかった。そこで、「えいや」と、その丸い白いものがシリコンクラスターの溶けだした跡であり、黒い粒が膜中のシリコン粒であると仮定した。それまでにショックレイ・リードモデルの理論で言われていた原子レベルの電荷捕獲中心と異なり、「粒に電荷がたまる」という説を唱えたが、あちこちから総スカンをくらってしまっていた。

このことをフィリップスでコーイ博士にプレゼンをしたところ、彼は頷いて、「有り得る」ことだと理解を示してくれた。コーイ博士は現在でも Si LSI で用いられている LOCOS(選択酸化)、すなわち窒化珪素でマスクをして Si ウエハを局部酸化させる技術を発明した人物である。彼の理解を受けて、私は飛び上がるように嬉しかった。その晩夕食に招待され、食事をしようとする、彼は下を向いてひたすらお祈りをしておられた。びっくりしたが、私も祈りに参加させていただいた。後日談だが、彼がシグネティックス社の社長をしておられた時に訪問する機会があった。「良いものを見せてやる」とおっしゃるのでついでに、廊下に A3 版くらいの大きな TEM の断面写真が飾ってあり、「この Si-SiO₂ 界面を見ろ、お前が言っていたように Si クラスターが見える」と説明してくれた。本当に感激した。肩幅が広くて背も高く、低い声で話をする見事な紳士で、誠実な研究者とはかくあるべし、と私の憧れの師の一人であった。

フランス・グルノーブルの国際会議は参加者が 50 人ほどで、日本人としては上智大学の田中利雄先生がいらした。会議はさておき、会期中の休みの日を利用して、ケーブルカーで先生と近くの山の山頂に行って、エーデルワイスを摘んだ記憶がある。後年、先生が経営する日本プレジジョン・サーキット(NPC)には東芝から移籍された大和田敦之さんもいらしたこともあって 3 年ほどお世話になり、半導体製造現場とはいかなるものかを学び、「品質管理はかくあるべし」を徹底的に叩き込まれた。

グルノーブルでの国際会議を終えたあとは、IBM 社のチューリッヒ研究所を訪問した。化合物半導体の研究が盛んな研究所で、所長に館内を案内していただいた。非常にこじんまりした研究所だという印象しか受けなかったが、後年、Cu 系超伝導や CT スキャンの研究でノーベル物理学賞受賞者が輩出され、まさに加藤与五郎先生がおっしゃっていたように「研究は規模ではない」。

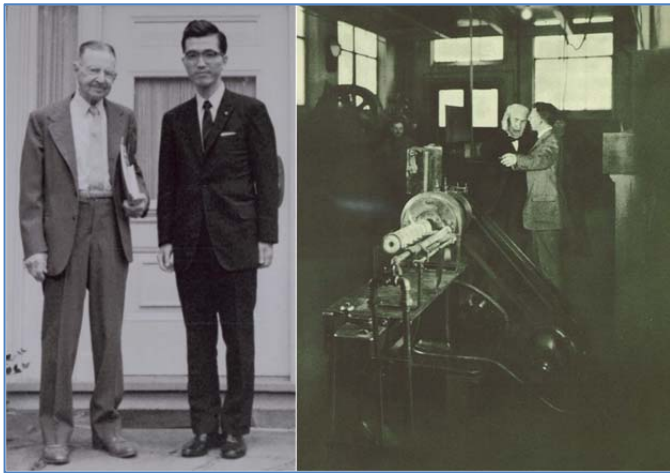
本当に独創的な研究に的を絞っており、「人・質こそ最重要である」とはこういうことなのだとつくづく思った。スイスでは CMOS 水晶時計の研究をしているのではと考え、時計のオメガ社にも行った。日本のオメガ社の総代理店の紹介で行ったため、VIP として扱ってくださったが、当時は油だらけの機械工場があるのみであった。

その後、イタリアを経由して米国に渡り、マサチューセツ

ツ工科大学(MIT)、ハーバード大学を訪問した。

シュネクタディのゼネラルエレクトリック(GE)社の二代目所長で加藤与五郎先生の親友だった、W.D.クーリッジ博士を訪問したことも思い出深い(図 1)。当時クーリッジ博士は 80 歳を超えておられたが、博士は、加藤与五郎先生こそ無二の親友だと語っておられた。博士はドイツのレントゲン博士(1901 年、第 1 回ノーベル物理学賞受賞)のところに、師のアーサー・アモス・ノイス(A.A.ノイス)博士とともに留学した経験をお持ちである。GE R&D センターの創立 50 年を記念して出版された書籍(Adventure into the Unknown)には、耳の遠くなった T.エジソンの耳元で、水素中でタングステンを還元してタングステンフィラメントを作った時の写真がある(図 2)。加藤与五郎先生も、立て梯子を登った 2 階の実験室で、クーリッジ博士のタングステン線を作った電気炉を何回かご覧になったという話を、学生だった私も聞いていた。ちなみに京都の竹を使った電球はエジソンの発明、そして世に長く使われているタングステンフィラメントの白熱電球はクーリッジ博士の発明である。余談になるが、第二次世界大戦直後、クーリッジ博士は GHQ の要請で日本の科学教育をどうしてゆくべきかの調査団の長として来日された。その時、加藤与五郎先生と荻窪の「近衛文麿の別邸」でいろいろ話し合いをされた。奥様のトラ様によると、食べ物の心配はないか等の話題が出たそうだ。

加藤与五郎先生も米国の教育の効率の良さを認識されており、同様の制度が良いだろうとおっしゃったことで、今の 6・3・3・4 制が定められたと聞き及んでいる。



(左)図 1 1969 年クーリッジ博士宅前にて

(右)図 2 T.エジソンが GE R&D センターを訪問(1914 年)。クーリッジ博士がタングステンをどのようにしてダクトイル(引き延ばせる状態)にしたかの説明をしている。(出典: Laurence A. Hawkins, “Adventure into the Unknown”)

世界最大の電気会社である GE 社の R&D センターでは、入口頭上の約 2m×1m の大きなガラスに、初代所長 W.ホイットニー博士、2 代目所長クーリッジ博士、今一人の 3 博士の顔写真がはめられていた。入口の左隅にはエジソンが使った大きな木の机と椅子がドカンと置いてあり、1 分ほど私も座らせていただいた。世界一の GE R&D センター前所長のクーリッジ博士の親友の弟子が来るということで、ビーカー博士(後に所長に就任された)をはじめとする超 VIP たちが集まって下さった。クーリッジ博士には、記念にサイ

ン入りのご本人の伝記をいただいた(図 3)。私も色々話をしようとしたのだが、英語がつかないため上がってしまった。「この旅が終わったらどこに行くのか」と聞かれナイアガラ滝を見に行くかと答えたところ、20 人ほどの人に大笑いされてしまった。当時「そこは新婚さんが行くところだが、お前は一人だろう」と…。また、センターの案内の希望を聞かれ、P.V.グレイ博士、D.M.ブラウン博士のラボを見せていただき議論したいと答えたところ、びっくりされてしまった。測定温度を極低温まで変化させて「フェルミレベルをシフトさせつつ Si MOS の界面欠陥準位を測る方法」を見つけた、という彼らの研究について突然訪問した青二才が話題にしたため、両博士らには喜ばれたりムッとされたりだった。

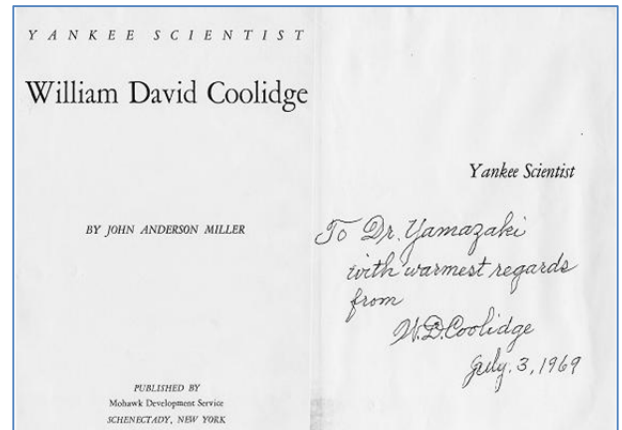


図 3 クーリッジ博士から頂いたサイン入りの本

GE のセンターの後はベル研究所を訪問した。バベル型のアルミナ膜を CVD で作る装置を見せていただいた。アルミナ膜と窒化珪素膜のどちらが良いかという議論になり、Si 半導体の大敵である Na イオンをブロックするにはどちらも有効だ、しかしどちらも電荷捕獲中心があり不安定性が残る、まだ使えない、という結論に至った。後日談だが当時 SONY の青木昭明博士と庄野克房上智大学教授と面会した際、このベル研究所の CVD のアルミナ膜の作り方を聞かれた。私はその目的も分からずありのままを話した。後日 SONY の方々も訪問したと青木さんはおっしゃっていた。

Si 半導体の大敵の Na イオン退治と言え、IBM のイーストフィッシュキルラボで「リン・ゲッタ」現象を発見され、精力的に Na ゲッタの研究開発をされていた D.R.カー博士のところへニューヨークから鉄道を乗り継いで訪問した。リンがあると酸化珪素が高温で溶けたときに Na を吸い取る、という Na とリンの関係について聞いてみると、アニール炉と、わずかな実験設備しかなく驚いた。どうして Na イオンがリンでゲッタすることを見つげられたのかを伺い、やはり物性物理学を極めないと研究は出来ない、とガツンとやられた一日であった。このリン・ゲッタ効果は後年フェアチャイルド社がプレーナ型バイポーラートランジスタを完成し、NEC とともにバイポーラートランジスタ時代の世界をリードした。

次にイリノイ大の N.ホロニアック博士を訪問した。イリノイの飛行場に朝到着し、飛行機のタラップを降りた時、地平線の向こうまで一面の麦畑で、その麦畑から日が昇り、帰る頃には同じ麦畑に日が沈んで、アメリカの凄さを見せつけられた。ホロニアック博士は半導体レーザーを始めて開発した方である。

テキサス・インスツルメンツ(TI)社には元東芝の大和田敦之さんがおられ、彼の友人達と2日にわたって色々な学問的な議論ができた。友人の家も訪問し、さらにモトローラ社では不良のシリコンウエハ(直径1インチレベルのトランジスタが埋め込まれたもの)を頂き、大変嬉しかった。夕食は街道の交差点にある、開拓時代にはホロ馬車隊が休んだという家がレストランになっており、拳銃を帯びたカウボーイの料理したTボーンステーキを食した。学生の身には本当に宝物に出会った気分であった。フェアチャイルド セミコンダクター社ではB.E.ディール博士、E.H.スノー博士、E.マケンナ博士たちと窒化珪素膜の議論をすることができ、更に憧れのスタンフォード大学を訪問した。大学のステンドグラスのチャペルとその前の巨大な庭は本当に美しかった。この世界一周60日間の旅は、加藤先生が言う研究開発で身を立てようと考えた私の人生の方向を決める意味でも、学問的にも、本当に実りある旅だった。

最後に、A.A.ノイズ博士の弟子であり、ノーベル賞を2回受賞しているL.ポーリング博士に会うべく、カリフォルニア工科大学に赴こうとしたが、手紙を頂きつつも残念ながら日程調整が出来なかったことが、この旅行での心残りである。

3) 倉庫での半導体研究の始まり

日本に帰国し、8m×7mのコンクリートの床だった「倉庫」は、大工さんが床を貼っている最中であつた。一緒に手伝いながら、大学封鎖中ということもあり、学友が何人も来て早速実験を始めた。父に助手の女性を一人頼み、杉村ゆり子さんという方にタイピスト・実験助手として来ていただいた。現在も弊社(SEL:半導体エネルギー研究所)の社員として仕事をお願いしている。また、後年富士通の役員になられた和田邦彦さんもいらした。

この倉庫で、その後のLSIの発明に欠かせないものがいっつも生まれている。一つは、ゲート電極を直接ソース又はドレインに連結するSiコンタクト技術である。1970年初旬当時は、MOS FETが離陸したばかりでPMOS Alゲートの時代であつた。そこに、Siの抵抗があるのにゲート電極の提案があり、そんなもので作れるのかと議論が沸騰した。しかし私は、このドーパドSiがゲート電極に使えるのであればソース・ドレインの電極・配線にも使えるのではと、Siゲート・リードMOS FETを考えついた。これはEDMOSでゲートをドレインに直接つなぐために極めて重要で、インテル社も同様の特許を出願していたが、私の方が13日早く出願していた。

4) 制御電極付Siフローティングゲートメモリ(フラッシュメモリ)の発明

二つ目は、制御電極付きSiフローティングゲート電極の不揮発性メモリ(現在はフラッシュメモリと言われているため、以後その名称も用いる)の発明である(図4)。博士論文の窒化珪素中のSiクラスターがトラップセンターになり、不安定性を誘発するのであれば、逆にそれを利用しない手はないと「Siクラスターを用いたメモリ」、さらにSi基板からゲート電極に流れる電流を100%捕まえるには、「いっそのことSi膜を作り、それを絶縁物でくるんでしまえばよいのではないかと、大きい人工的なクラスター(薄膜)を作って試した。1970年10月の事である。夜22時を超える頃、C-V特性

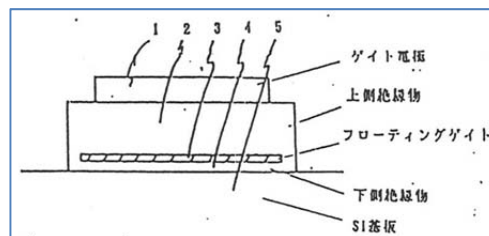


図4 制御電極付フローティングゲート型不揮発性メモリ(フラッシュメモリ)。

特公昭50-36955(1970年10月27日出願、特願昭45-94482)

を調べたところ、とてつもなく大きなヒステリシス(図5)が現れて、大喜びした。当時お付き合いしていたTDK(当時東京電気化学工業株式会社)の平賀貞太郎取締役のご自宅にすぐに電話をして、「かくかく

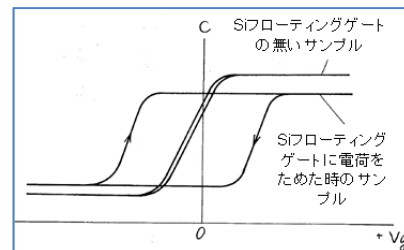


図5 取得したC-V特性(1970年10月測定)

しかじかのものができました」とお話ししたところ、寝ぼけながらも「それは良かった」と喜んで下さった。これが縁で後年TDKに就職することとなり、恩師加藤与五郎先生の発明されたフェライトを用いたコア磁気を用いた不揮発性メモリの向こうを張って、半導体の不揮発性メモリの研究開発ができたことを嬉しく思う。ちなみに、この特許が面白い、邪魔だと思ったのか、フローティングゲートのある時とない時とでY軸(C値)の値がずれている(図5)ことについて、当時、田無にあった電気試験所の垂井康夫さんより本当に実験した値なのかを尋ねられた。「フローティングゲートのあるサンプル、無いサンプルの、異なるサンプルで得た測定値をそのまま記載した」ことをお答えしたことを覚えている。

不揮発性メモリは一般に1.EPROM、2.EEROM、3.フラッシュ(多数のROMを一度に消費する論理性ROM)に分類される。私は独立発明で1970年3月31日にSiクラスターメモリの特許を出願・特許取得したが、インテルのF.ベンチュコフスキー博士もわずか3か月後の1970年6月15日にアバランシェプラズマを用いた制御電極の無い構造の不揮発性メモリの特許を出願している。さらに私は4ヶ月後の1970年10月27日、制御電極付Siフローティングゲート構造の特許を前述した構造で出願した。1971年2月には、フロイマンがISSCC(International Solid-State Circuit Conference)でアバランシェ型EPROMを発表し、論文賞を受賞している。さらに3か月後の1971年5月には私がECS(The Electrochemical Society)ワシントン会議にて発表を行っている[1]。大学封鎖中に郷里の倉庫で生まれた成果で、世界のインテルとつばぜり合いをした、不思議な青春であつた。

5) 不揮発性メモリの発表のため米国へ

1971年ECSワシントン会議参加途中の5月には1968年創立(創業3年目)のインテル社を訪問した(図6)。以来、半導体の神様とも言えるノイズ博士(インテル社創立の一人)とは色々な話をさせて頂き、特に「書き換えを繰り返しても劣化しないフラッシュメモリが作れないか」の宿題を頂戴

した。当時も今もフラッシュメモリは $10^3 \sim 10^4$ 回書き換えると劣化してしまう。“劣化しないフラッシュメモリ”はそれから数十年を経て現在に至るまで私の大きなテーマである。

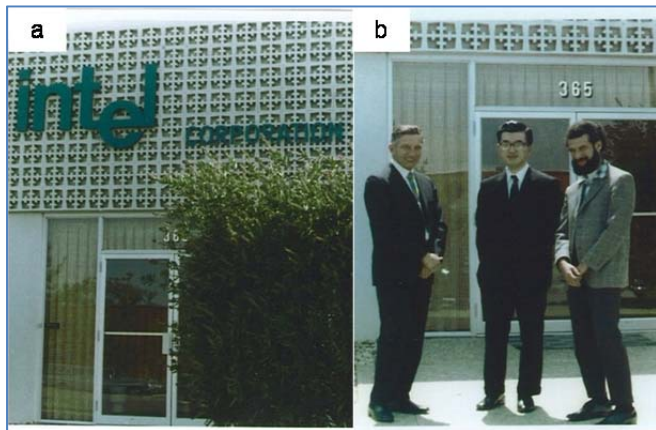


図6 1971年5月 ECSワシントン会議での講演前にインテル社訪問。

(b)左:R.N.ノイス博士、右:F.ベンチュコフスキー博士

1971年当時のインテル社の建物は、今から見ると本当に貧弱で、「なぜフェアチャイルド社のような大きな会社の専務を辞めて、こんな小さな会社をつくるのか」と博士に質問したところ、「例えばフットボールの世界一のチームに挑戦するとする。その挑戦こそが重要で、それで“インターナショナル”という意味でインテルと名付けた」とおっしゃっていた。当時28歳の学生には「なんでそんな危険な道を…」と不思議に思ったものだった。狭い社内では、今では神様とも言えるG.ムーア博士、グローブ博士が忙しそうにいられた。ベンチュコフスキー博士にもお目に掛かり、クラスタの話をした。そこで、フローティングゲートという名前は1967年のベル研究所のD.カーン博士とS.シー博士の発明であり[2]、彼らが名付けたと教えていただいた。早速ECS講演の後に訪問アポを取った。ECSでは300人くらい聴講者がいたが、私の講演が終わってからフェアチャイルド社のB.ディール博士が立って「素晴らしい講演だった」と賛美のコメントを下さり、皆の拍手を浴びた。本当にありがたいことであった(図7)。

このあとベル研究所のカーン博士を訪問した。ベル研究所では金属ジルコニウムのフローティングゲートを使った不揮発性メモリを、私のクラスタメモリの発明よりも3年前の1967年に発明し、開発しておられた。

6) TDK 株式会社に入社

半導体の研究をするのに倉庫ではあまりにもお粗末だということで、1971年7月に研究設備と共にTDK開発研究所に移り、研究者も3人から開発研究所では5人、最後には10人まで増強していただき、フラッシュメモリをさらに発展させた。3000万円の予算で始めたが、それを使い果たしてもTDK本社からは研究成果に好ましい評価が無かった。なぜならコアメモリでは“0”、“1”がN、Sとはっきりしており、スレッショールドが明確にあって安定して動作する。一方、Siフローティングゲートは電荷を任意にチャージアッ

ブしてしまう。加えて絶縁物に強電界を加えて電荷を通過させるため、フローティングゲートと絶縁物との界面がどうしても劣化してしまう。このころ、取得特許数は学生時代からの発明を含め100件を越えたが、実用化できるレベルにはどうしてもならなかった。このため入社から3年後、TDKとフェアチャイルドとの合弁会社(TDK フェアチャイルド)が設立された時、一緒に取り組んでいた研究者ともども私自身もテーマを中止して、社命で移籍することとなった。現在ではDRAM、SRAM等の全てのメモリの中で最大のシェアを誇るフラッシュメモリの研究開発も、入社後3年間で数十件の特許を残したまま中止となってしまった。TDK研究所での3年間の成果をIEDM(International Electron Device Meeting)で発表するための海外出張も許可が下りず、富士通の方に代理発表をお願いした。その頃NECではアルミナ膜を用いたMAS構造の、SONYではMAOS構造の不揮発性メモリの研究開発が進められていたが、特性が不安定でその後、両社とも開発中止となり、残ったのは東芝のみであった。制御電極付Siフローティングゲート構造の不揮発性メモリの発明から10年、15年後の1980年、1986年に舩岡富士雄氏が論理回路(NAND、NOR)へ適用し、フラッシュメモリが開発された。これらの発明への敬意をこめて、インテル社が東芝の名付けた「フラッシュ」という名称を一般に普及させた。当時のフラッシュメモリは1bitあたり多数個のトランジスタが必要であったため実用化が出来なかった。のちに1bitあたり1つのトランジスタとなり、2015年現在、世界の最先端企業ではすでにギガビット(Gb)レベルを達成している。これらに共通して現在でも私の発明した制御電極付Siフローティングゲートの不揮発性メモリが採用されている。

この話には後日談がある。後年、舩岡富士雄氏と当時の勤務先の東芝とが職務発明論で訴訟になってしまった。「自分が育てられた会社とそこまで争うか」、の是非は別として、東芝の知財担当者より何時間にもわたる「どうしよう」との相談があった。「彼の発明は全く価値が無い」「その根拠として、(山崎の)数十件の発明を利用させて欲しい。」しかし、そのことは第三者には伏せておき、舩岡氏の発明の特許は東芝特許として有効に使いたい。「知恵を貸して欲しい」というものだった。製品との関連で、知財の方の大変なご苦労を見ながら、私も舩岡氏の特許を色々調べさせていただいた。1bitにつき多数個のトランジスタを使用しているため、その後発展した「製品に対する抵触性は低く、価値は無い。しかし、NAND、NORの論理化回路の概念は素晴らしい。」というのが私の結論であった。あとから、「おかげでまるく収まった」と深く頭を下げられた。特許料をいただきこちらが感謝すべき立場であるが、逆に感謝されてしまった。

一緒に不揮発性メモリの研究をしていた関係者とは今でも、テーマの中止がとても残念だったと話している。一連の研究から30年以上を経て、2006年にはカナダで開催されたセラミック協会(1st International Congress on Ceramics)の招待講演“Nonvolatile Memory and Recent News of RFCPU on Glass Substrate”[3]、2007年には奈良で開催されたIEEE International

シリコントランジスタの山崎博士

すばらしい研究だ

電機化学協会、半導体一般協会
で発表する山崎博士



この協会は、年に二回開かれて
いるが、世界中から有名な研究者
が集まり、電機化学界では最も
権威あるものといわれている。こ
れは百三十九回目の総会で、米
国の学者を中心に、約八百人が出
席した。

ことし三月、愛知県新川の山崎工業研究所長、山崎昇
平工博士と、同じく四人の研究スタッフが、シリコン
トランジスタや I/O (集積回路) の画期的改良研究に成
功、電機化学界に大きな話題を巻き起こした。山崎博士は十
日から米ワシントン市で開かれた国際電機化学協会の
総会に出席、このほど帰国した。山崎博士は、この総会で
改良研究を発表、世界の研究者から大きな拍手を受け、
また、旅行中にレントゲン実用化で有名なクリッソン
博士や I/O の世界的権威といわれる R.N. ノイス博士ら
に招かれ、歓迎されるなど、若手博士の研究成果は、外
国でも高く評価された。

米国で世界の学者称賛
「若い学徒」の成果に驚く

山崎博士は、この世界のシリ
コントランジスタの発表され
ていた界面発生電荷、半導体の本
質と電機化学の境界に立脚して、シリ
コントランジスタの改良研究を知っ
ている人が多かったが、「すばらしい
研究だ」と改めて称賛の拍手を
送っていた。

また、山崎博士は総会出席前の
四月二十九日、I/O の権威を表明
した世界の第一人者、R.N.
ノイス博士と世界的に有名な半導
体メモリ研究、製造会社、イン
テル社社長や、毎週の五月十七
日、レントゲンの実用化で世界的
に有力な W.D. クリッソン博士
に招かれた。

九十七歳という高齢で、ほとん
ど人におなじみというクリッソン
博士が、わざわざ山崎博士を食卓
に招待、「もう私たちの時代は終わ
った。これからは若い担い手の時
代だ。がんばらない」と激励、
ノイス博士も「君の若くは若い研
究成果が、こんなにすばらしい
研究をしているとは驚いた。われ
われの研究分野もこのままだと近
い将来、日本の方がすぐれたもの
になるだろう」とほめた。

帰国した山崎博士は、こんどの
研究発表旅行について「この研究
がこんなに厚い賛賞を受けるとは思わな
かった。この改良研究はシリコン
トランジスタや I/O の改良研究の一
部で過ぎぬが、これからはもっと
もっとが、半導体メモリと銘を自
らつけている。

図 7 ECS ワシントン会議での講演が取り上げられた
(1971/05/30 毎日新聞、静岡版)

Symposium on the Applications of Ferroelectrics の
基調講演 “History and Future Perspective of
Nonvolatile Memory” [4] といった名誉な機会を頂いた。

約 45 年前私が博士課程 2 年の 28 歳の時に発明したデ
バイス構造(下記に特許(特公昭 50-36955、登録 886343)
の請求項を記載する)が、LSI メモリ市場に最も多く出て
フラッシュメモリに、現在も採用されている。

1. 半導体基板上に絶縁物でくもまれた少なくとも 1 層の
半導体膜を有し、かつ前記絶縁物上に半導体または導
体からなる制御用電極が設けられたることを特徴とする
半導体メモリ装置。
2. 絶縁物でくもまれた半導体膜は P または N 型の導電を
示すことを特徴とする特許請求の範囲第 1 項記載の半
導体メモリ装置。」

USB メモリ、携帯電話、PC 等の応用商品を数え上げれ
ばきりが無い。

フラッシュメモリの研究開発に携わったご存命のキーマン
3 名は、元ベル研究所でフローティングゲートという概念を
提唱したシー博士、論理回路を提唱した舩岡氏、そして、
「制御電極付 Si フローティングゲート構造を発明したのは
私自身だ」と言ったとしても、否定する人は多くはないと信じ
たいが…。

7) R.N. ノイス博士宅に招かれて

このフラッシュメモリには後日談がある。1980 年に R.N. ノ
イス博士のご自宅にお招きいただいた(図 8)。R. ボロボイ氏
の車で連れて行っていただいたところ、大邸宅で、奥さん、
お母さん、お嬢さんまでがフラッシュメモリの発明者として大
いに歓迎して下さいましたことを思い出す。お嬢さんはラドクリフ
大学に通っておられる超美人で、奥さんと博士とは本当に

良き夫婦であった。「この人は色々ベンチャービジネスに投資しているが一向に当たらない。リターンが無い。」とおっしゃっていた。博士はにこにこ笑っているのみであった。博士からは直接聞いていなかったが、博士が投資をした1人がアップル社の創業者の S.ジョブズ氏であったことを氏の伝記で知った。

邸宅裏のバルコニーから階段を降りてゆくと庭があり、3m ぐらいの大きな人工の滝にひょうたん型のプールが繋がっていた。スゴイ家に住んでいるものだな、という印象を強く受けた。後年、「シリコンバレーの歴史的な建物として永久保存しておくべきだ」とボロボイ氏に申し上げたところ、「プールでノイス博士が亡くなられたので、奥さんが大変悲しまれ、すべてブルドーザーで壊してさら地にしてしまった」とのことだった。

R.N.ノイス博士に、加藤与五郎先生とその師であるアーサー・アモス・ノイス(A.A.ノイス)博士、クーリッジ博士の話をした時のことである。R.N.ノイス博士の家系を遡ると、アメリカ建国の歴史に出てくるメイフラワー号の 2 回目の航海の時にアイルランドから移住した兄弟に至るといふ。博士によると兄はボストンに残ってノイス家を継ぎ、その子孫が A.A.ノイス博士、そして弟は分家として宣教師となってソルトレイクにゆき、その末裔がご自身だとおっしゃっていた。そのため NOYES(本家)、NOYCE(分家)と末尾のスペルを少し変えてある、と説明して下さった。

ちなみに A.A.ノイス博士は物理化学の概念を提唱した方である。MIT の学長代理を務められ、現在のカリフォルニア工科大学を R.A.ミラン博士(ノーベル物理学賞受賞)とともに創立された。カリフォルニア工科大学には非常に大きな物理化学の建物があり、入口に A.A.ノイス博士の横顔の大きなレリーフがはめられている。今でも大学が敬意を尽くしている様子が分かる。加藤先生によると A.A.ノイス博士の晩年に入院中2週間ほどを付き添ったが、「A.A.ノイス先生に、治ったら自動車旅行をしようと言われた」と何回も懐かしそうに慕っておられた。博士は自動車好きなことでよく知られ、かつ独身主義であった。



図 8 1980 年
R.N.ノイス博士宅にて
(左:R.ボロボイ氏、
中:山崎、右:ノイス博士)

物半導体の結晶の CAAC(c-axis aligned crystal)構造を

ポーリング博士は、伝記 Biographical Memories Vol. XXXI (National Academy of Science) の中で、師を想う気持ちを 20 ページ近くにわたって記している。ポーリング博士をはじめ、A.A.ノイス博士が推薦した何人もがノーベル賞を実際に受賞しておられる。

「何度書き換えても劣化しない不揮発性メモリを作る」という、R.N.ノイス博士からの宿題がまだ残っている。40 年を経て、酸化

発見した。CAAC-IGZO 膜を用いた OS-FET ではオフ電流が 85°C で $10^{-24}\text{A}/\mu\text{m}$ ($\text{yA}/\mu\text{m}$) レベル以下になり得ることを見出した。それを用いてスイッチトランジスタを作れば、フローティングノードからのリークを極限にまで減らす事ができる[5]。これは現在の SEL のメインテーマの 1 つになっており、今やノイス博士より頂いた「劣化しないフラッシュメモリを作れないか」という宿題を解くヒントを得た。まさに神様から授かったチャンスである。

8) J.キルビー博士と

若き日の思い出にもう一つ加えさせていただきたいことがある。TI 社との特許交渉である。当時、コンピューター部門を売却し大変苦しい状況であった TI 社へ、SEL の維持費を入手するため、特許交渉に行った。その結果交渉はまとまったが、実はその後が大変だった。TI 社が正月の休みを利用して、ファーストクラスのフライトチケットを用意してくれて、本社に私を招いてくださった。その夕方、ノーベル賞を受賞した背の高い J.キルビー博士がホストとして迎えて下さり、食事にご招待していただいた。Dr. S. Yamazaki と金色の刻印がされたマッチを記念に頂いた。「もしノイス博士がご存命ならば、2 人でノーベル賞を受賞しただろう」とノーベル委員会のインターネットページに出ていたことを思い出す。翌日は、F.ビューシー社長を始めとした TI 社の幹部が出迎えてくれた(図 9)。発明に対するマナーとしてアメリカはさすがだと感激した。創造性豊かなアメリカの底力が見えた気がした。

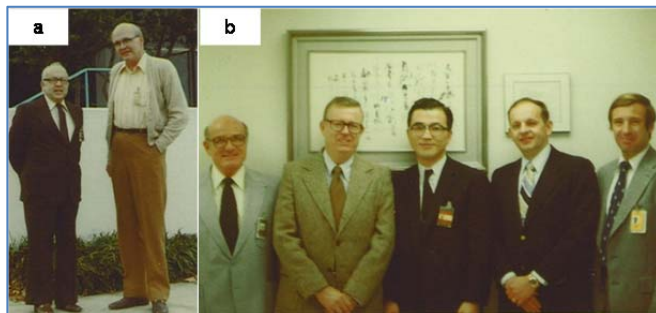


図 9 1986 年 TI 社訪問。(a)右:J.キルビー氏、
(b)左 2 人目:F.ビューシー氏

今年 2015 年、日本の半導体は見る影も無く、日米半導体戦争に敗れ、その漁夫の利を三星電子が得た。しかし今でも、イメージセンサでは SONY が、NAND フラッシュメモリでは東芝が、そしてルネサスが、世界の超 LSI 会社と果敢に戦っている。勝ち続けてくれるよう、エールを送り、祈り続ける次第である。

引用文献

- 1) S. Yamazaki and Y. Sugimura, Electrochemical Society Ext. Abstr. Spring Meeting, p. 218 (1971).
- 2) D. Kahng and S. M. Sze, The Bell System Technical Journal Briefs, p. 1288 (1967).
- 3) S. Yamazaki, Proc. of the 1st Int. Cong. on Ceramics: A Global Roadmap, p. 311 (2006).
- 4) S. Yamazaki, Proc. of the 2007 16th IEEE Int. Symp. on Appl. of Ferroelectrics, p. 1 (2007).
- 5) H. Inoue, et al., IEEE J. Solid-State Circuits, 47, p. 2258 (2012).