

最終講義

雑感モノローグ：シリコンサイクルの波に揉まれて

Miscellaneous Thoughts and Monologue: Being Tossed about in Storms of Silicon Cycle

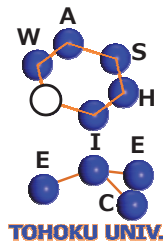
鷺尾 勝由

Katsuyoshi WASHIO



最終講義は一期一会の放談の機会であると捉えて話しましたので、本稿は最終講義内容の一部を割愛し編集しましたこと、ご容赦ください。また本稿は、30年間の企業の研究所での研究開発と、11年間の東北大での教育研究を通した経験や感想を述べたに過ぎませんので、愚生の放談・独白・戯言とお考えください。

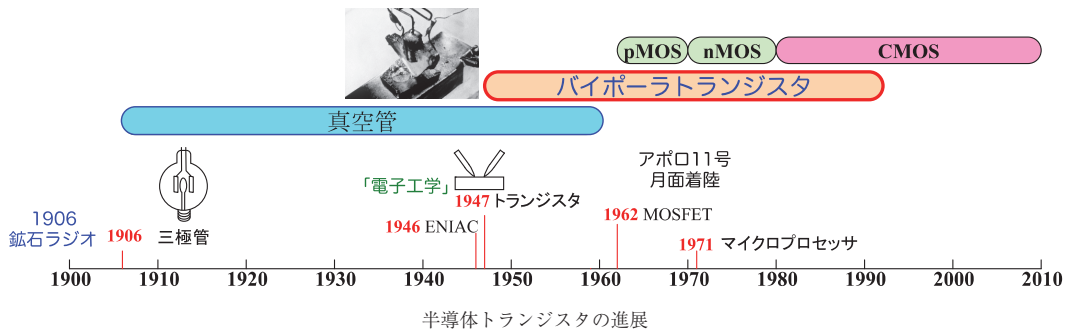
企業での研究では、一貫してシリコン系半導体を扱ってきました。それゆえ、ダイヤモンド構造のテトラポットが頭の中にありました。東北大に赴任した2011年に西條先生から共同研究のお誘いをいただき、未経験の六方晶系構造の材料に手を染めることになりました(未経験の材料研究への展開により脳を大いに刺激する機会を与えて頂きました)。そこで、学生諸君の研究へのモチベーション向上を図りたいと考え、テトラポットと六角形を組み合わせた研究室のロゴを作りました。少しは役に立ったでしょうか？



ご存知の方も多いと思いますが、初めに半導体の進展を短く説明しておきます。真空管(三極

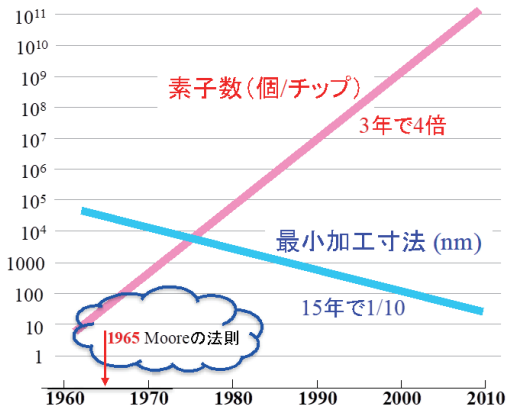
管)発明同年の1906年に鉱石ラジオ(ダイオードを使って検波回路を組んだラジオ)が発明されました。小学生の頃に、雑誌付録の1石ラジオ(ダイオード1個とトランスのみで構成)を作り、イヤホンから音が聞こえた瞬間が電子工学との出会いでした。ただ説明通りに組み上げただけですが、その時に感じた喜びや驚きがその後の進路に影響したかも知れないと感じています。

三極管発明から40年後の1946年に世界初のコンピュータ(ENIAC)がアメリカのペンシルバニア大学の電子工学部で作られました。60畳ほどの部屋を占め、約2万本弱の真空管を用い、電力消費が15万ワット(1人が1ヶ月で使う電力量に相当)の大きな装置です。その翌年の1947年に半導体トランジスタが発明されました。点接触トランジスタと呼ばれる極めて単純なバイポーラ型のトランジスタで、これが今や産業の米となった半導体工学の緒です。さらに、1962年に現在の半導体産業を支えているMOSFETが発明されました。その7年後の1969年7月20日、アポロ11号が初めて月面着陸しました。これは当時中学生の自分にとって、技術の進歩によって大きな夢が実現されることを実感した出来事でした。このビッグイベント



の達成を支えた技術の1つが半導体ですが、当時の半導体の性能は現在に比べて1億分の1程度です。思い返すと、鉱石ラジオで発芽した電子工学への無意識の志向が、この月面着陸によって意識下に入ったように感じています。

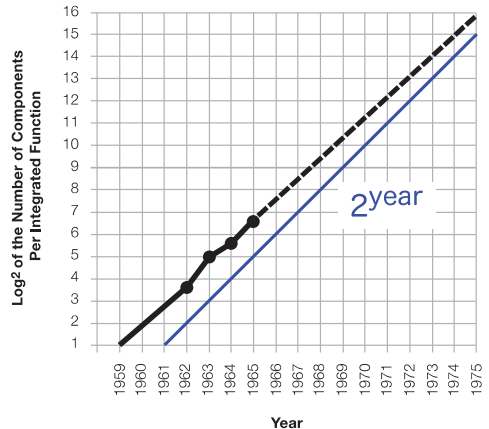
1960年代の中頃から急速に半導体技術が進展し、1971年にインテル社から4004と呼ばれるマイクロプロセッサIC（半導体トランジスタで構成された回路が複数集積されて信号処理機能を有する半導体チップ：チップとは大きさが数mm～数cmの小片）が開発され、ENIACと同じ機能が僅か1ワットで実現されました。半導体技術の進展はチップに集積されたトランジスタの数と加工寸法で表現されます。その年次推移を見ると、チップ当たりのトランジスタ数は大体3年で4倍の割合で増え、50年間で100億倍以上になりました。その間に、最小加工寸法は1000分の1程度に小さくなっています（現在の最先端の加工寸法はウィルスと同程度です）。初のマイクロプロセッサ開発から41年後の2012年には信号処理能力が500万倍のプロセッサチップが発売され、手のひらのスマートフォンで60置のENIAC 500万台分の計算を行えるようになりました。



チップに集積されたトランジスタの数と加工寸法の年次推移

半導体集積回路の発展は、1965年にインテルの共同創設者だったゴードン・ムーアさんが提唱した「ムーアの法則」に則って推移しました。論拠（過去4年間の集積度の増加割合が2のn乗に依存）が乏しい予測のようなものだったのですが、いつからか「法則」と呼ばれるようになってとともに、その法則通りに技術を進展させるという「呪縛」が始まりました。これによって、半導体技術の研究開発者は過酷なタスクを自らに課し、疲弊し、淘汰される、という経過を辿るのですが、別

の見方をするると研究開発者を鼓舞してくれた指標でもあったと感じています。その良し悪しは別にして、技術を急速に進展させるには、「ムーアの法則」のような「呪縛」が必要なかもしれない、と感じています。

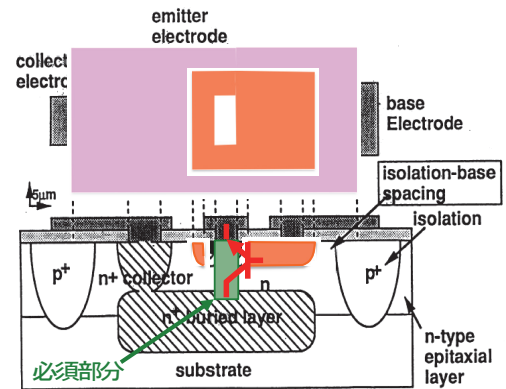


“Cramming more components onto integrated circuits”  
Electronics Magazine, v.38, n.8, 19 April, 1965

「ムーアの法則」と呼ばれる半導体集積度の年次推移予測

余談になりますが、1930年から発行されている Electronics (Magazine) に使われている Electronics (日本語訳は電子工学) というワードは造語で、この雑誌で初めて使われたと言われています。また、電子工学という言葉は、東北大学の八木先生が1940年に初めて講演タイトルで使われたことが発端のようです。

30年間の企業での研究開発で携わってきたバイポーラトランジスタについて、少し説明したいと思います。トランジスタを構成する必須部分は緑で塗った領域で、表面から基板方向にn型とp型の半導体層（n<sup>+</sup>（エミッタ）、p<sup>+</sup>（ベース）、

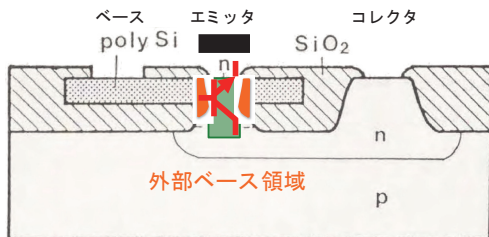


Junction Isolated Structure (npn)

バイポーラトランジスタの構造

$n^-$ と $n^+$ (コレクタ)の3つの層)です。しかしながら、実際のトランジスタでは、それ以外に非常に大きな領域(紫で塗った領域で必須部分の面積の約50倍)があり、その中でも橙で塗った外部ベースと呼ばれる部分がトランジスタの動作速度に大きく影響するため、トランジスタを高速化するには外部ベースの縮小が課題です。

この課題を克服する独創的な構造のトランジスタが私が配属された研究室の先輩によって提案・開発されていました。その特徴から側壁ベース電極型構造と呼ばれており、半導体のオリンピックと称されている国際会議ISSCCで発表された研究成果は社内外から高く評価されていました。必須部分(緑で塗った部分)は従来のトランジスタと同じですが、動作速度の低下を引き起こす外部ベース(橙で塗った部分)が非常に小さくなっています。さらに、トランジスタの主要部分が1つのマスクパターンで決まる他に類を見ない特長があり、トランジスタを小さくできるメリットもあります。



T. Nakamura et al., "Self-Aligned NPN Bipolar Transistors", ISSCC, 1981

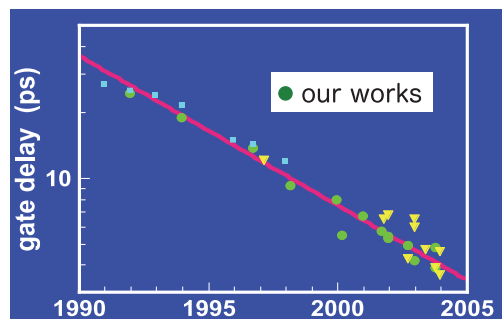
側壁ベース電極型構造のバイポーラトランジスタ

しかしながら、独創性と生産性は互いに相容れない、という現実が立ちはだかりました。性能がピカイチでも工場で量産できなければ、企業では研究成果として認められません。現在の半導体プロセス技術をもってすれば難しくありませんが、今から40年ほど前なので、当時のプロセス技術では再現性が得られないばかりか、結晶欠陥の発生や工程管理の困難さのために、社内外から「性能は良いけど製品化できない」と思われていました。私も研究グループに参加させてもらい、製品化するために解決策を提案し試行錯誤を繰り返しました。その過程は苦しいものでしたが、解決策を考案し課題の克服に挑戦することが「面白い」という気持ちが強かったと思ひ返しています。さほど負けず嫌いではないのですが、「無理と言われるほどに、できることを見せたい」という思いが強くなる、つむじ曲がりだったのかも知れません。

試行錯誤というのは正直言って失敗の繰り返しでした。制御性を上げるために部分的な改良プロセスを提案して試作しても、量産に適用できるレベルに至らない、と判断せざるを得ない状況が続きました。何とか打破したいと、計算機シミュレーションや関連モデルの構築などによって、トランジスタ性能に影響する構造パラメータを詳細に検討しましたが、全くもって答えが見つかりませんでした。この時の自分は、まさに「固定概念に縛られていた」状態であったことを後になって自覚しました。

ここでの固定概念は、側壁ベース電極型構造のトランジスタだから「ベース電極は側壁に設けなくてはならない」でした。実験で失敗を繰り返しているうちに、失敗と考えていた実験結果が解決策を与えてくれました。答えは「ベース電極は側壁ではなく、表面の角に設ける」でした。分かっただけで極めて簡単なことで、何故気付かなかったのだらうと猛省するばかりでした。英語にSerendipityという表現があります。これは「偶然に拾った幸福」という意味ですが、個人的には「一所懸命やっていたら、必ずそれなりの見返りを得ることができる」と解釈しており、山積みの失敗から解を見出した経験は自分にとってのSerendipityだったと思っています。

その後も、トランジスタの高速化を目的とした研究と開発を継続し、世界最高速の性能や製品を実現しました。参考までに、ECL論理回路のゲート遅延時間の年次推移でバイポーラトランジスタの高速化を見てみると、5年で動作速度が2倍になるような性能向上を実現してきました。ちなみに、緑色の丸は当時日立製作所の中央研究所のグループで得た研究成果です。この分野にムーアの法則は当てはまらないのですが、トレンドのような性能向上目標を自分たちで設定し、それをクリアする努力を継続してきました。



バイポーラトランジスタの高速化の推移

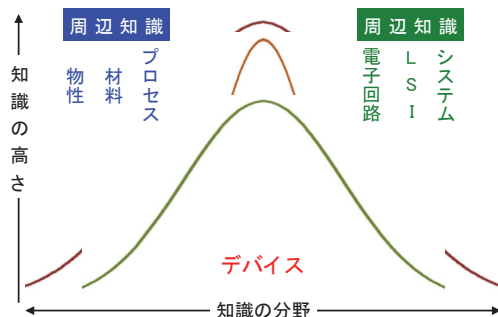
このように後からふり返ると得られるべき結果を追求し、淡々と実現しただけのように思われるかもしれませんが、実態はもがき苦しむ日々の連続でした。競合メーカーに負けるわけにはいかないので研究目標はもちろん世界一で、日々の研究開発への取り組みも常に全力投球です。すなわち、考えうる全てのアイデアを投入し、性能の限界を追求し続けていました。さて、努力が報われて目標通りの研究成果が得られた後、喜びや達成感とともに覆い被さってくるのは、「次は？」です。出し切ってしまった自分に、なぜ少しぐらい余力を残しておかなかったのか？と後悔しても、既に手遅れ。そこで、始めなくてはいけないのが現状破壊と自己否定です。理由は現状の延長線上に解がないことが分かっているからです。苦心惨憺の末に積み上げたトランジスタを「ご破算で願いますは～」と壊して再構築するプロセスに入ります。これは、過去の成功例やアプローチに拘束されないために、ゼロから構築した方がうまく行くことを経験で学んだからですが、その度に苦業を覚悟しなくてはならず、自虐への耐性が必要であると言えます。しかしながら、これこそが研究者の冥利であり最高の楽しみだったと振り返っています。

さて、後半には研究や開発に携わる上で大切だと考えていることや心得の類いを整理しましたので、少しでも参考になれば幸いです。まず必要なのは、専門知識です。誰にも負けたいと思えるくらいに専門知識を身につけて下さい。しかし、それだけではうまく行かないタスクに必ず出くわすことになります。そこで必要になるのは、専門分野の周辺の知識です。私の場合は専門分野が半導体デバイスでしたので、周辺知識としてデバイス作製に必要な物性、材料、プロセスなどの知識を、またデバイスを応用する電子回路、LSI、システ

ムなどの知識を少しずつ修得するように心掛けました。専門知識だけを思いっきり尖らせるという選択肢もあるのですが、専門知識をピークに、周辺知識を裾野に持つような富士山型にバランスすると専門分野での成功に繋がりがやすいように思います。

自分の拙い経験から、専門のデバイスの知見を回路設計に生かした例を紹介します。それはISSCCで発表した当時世界最高性能の分周器です。回路そのものは一般的なものですが、デバイス特性から予測される性能を大幅に超えており、電子回路に精通した専門家が設計しても成し得ないものでした。電子回路はデバイスモデルを用いシミュレーションを経て設計されます。デバイスモデルはデバイス屋が作成し回路設計者に渡しますが、モデルには表現し切れていない項目があります（念のため補記しておきますが、通常そのような項目を含めなくても大規模な回路の設計で問題になることはありません。）。この分周器の性能はデバイスの専門家しか知らない項目を加えて設計し得られた成果でした。研究や開発において、課題を克服するために多方面からの視点と観点でアプローチすることが必要になることがあるので、専門知識の周辺を高めることは必ず役に立ちます。また、時にいくつかの知見が繋がって思わぬ成果を生むこともあります。こういうことも研究に従事する醍醐味かもしれません。

研究開発に従事される方にお勧めしたい論理的・構造的な思考について、触れたいと思います。御存じの方もいると思いますが、皆さんはCritical Thinkingという言葉聞いたことがあるでしょうか？日本語で「クリティカル」というと「批判的な」というあまり良い印象ではない意味に捉えがちですが、このCritical Thinkingは客観的・分析的に振り返って、論理的な正しさと物事の妥当性を判断する手段もしくは考え方を示したもので、ビジネス用語として使われることが多いです。そのうち、研究開発に当てはまる部分を抜粋すると、「前提を意識化し疑問視する」「疑問と目的を明確化し、それらを意識し続ける」「様々な手段や選択肢を試みる」「多重人格の視点で自問自答する」などがあります。一般的に、物事の捉え方や考え方として最もポピュラーなのは、「根拠や筋道を立てて結論に導く」というLogical Thinkingで、学生諸君を指導する際の基本になっています。しかしながら、このLogical Thinkingには一つ問題があります。それは、論理的整合性



研究開発を遂行する上で身に付けたい周辺知識



が取れていても、Logical Thinkingでは思考の偏りを検証できないことです。そのため、間違っただけに進んでしまうと、仮に筋道が全て正しくても間違っただけの結論に到着してしまいます。そのため未知のことについて研究する場合、過去の成功例を引きずって失敗することがあります。Critical Thinkingはこのリスクを低減してくれる考え方で、与えられた前提条件を検証し、さらにそれ以外の情報の有無などをチェックして、間違っただけの方向に進むことを抑制してくれる思考パターンです。

Critical Thinkingの説明で出てきた「疑問」について、もう少し触れたいと思います。言い換えると、物事や事象を真摯に受け止めて考えるとはどういうことか？ということになるのでしょうか。江戸時代後期の儒学者である海保青陵は、当時としては非常に客観的経験的に社会現象を観察して論理的に答えを導き出した人です。彼の書「養蘆談」に「疑うは美德なり」という部分があります。

疑うべきことを疑わず、疑わぬは疑う智なき故なり  
疑えば考えるはずなり

(中略)

どこまでも疑いの解けるまでは疑うべきなり

『疑うことなければ考えることなし』

考えることなければ智の増えることなし

長い文章なので要約すると、「誰かに何か言われて、ああ、そうかと思った瞬間には何も考えていない」ということで、そんなことではこれ以上は伸びないと切々と書いています。これは研究に取り組むに当たっての心得と全く同じだと考えています。論文を読んで鵜呑みにして理解しては駄目で、これ間違っているのでは？と疑いを持たなければならぬという教えです。人としては何でも疑うのは好ましくないのですが、研究においては何事にも「ほんまかいな？」と思うところからスタートしなさいと師事しています。

同じような内容を、福沢諭吉の「学問のすすめ」に見ることができます。「ガリレオの地動説やニュートンの万有引力の法則は、物事の事象を疑うことから出発して真理にたどり着いている」というようなことが書かれており、また表現を変えて「詮索して真実を発明することが文明の進歩である」とも言われています。これらは、福沢諭吉自身の見識ですが、海保青陵の考えに賛同していると回想されているそうです。これらのことから、研究に携わる者は素直では駄目なのかということになってしまっているのですが、物事に対して「ほ

んまかいな？」と一呼吸置くよう自分に問いかけることが肝要であるという教えであると思っています。

研究に取り組み上で難題に面した時に“All things are possible until they are proved impossible.”という格言で自分を鼓舞してきました。「不可能を証明できないまではできる」という意味ですが、「できないことの証明」は非常に難しく、証明できても何も得ることがないので、「できると信じて取り組み」と後ろ向きになりかける自分の姿勢を戒めてきました。この言葉を学生諸君にも教えたのですが、学生の研究成果が芳しくなかった時に、少し日和見的研究アプローチを提示したら、学生から「先生に教えてもらった格言に従ってトライしたい」と言われたことがあります。自分を恥じるとともに学生の頼もしさに感心し、色々教えても学生はほとんど覚えていないと思っていたことを猛省したことを思い出します(似たような意味のフレーズとして、ハリウッド女優のオードリー・ヘップバーンの名言があります。全文はNothing is impossible, the word itself says, I'm possible. ですが、Impossible, I'm possible. と略してユーモラスな名言として知られています。)

30年間以上のAppleユーザーだからという訳ではないですが、独創性の面ではSteve Jobs氏を尊敬して止みません。彼がスタンフォード大学の卒業式で行った伝説のスピーチの締め括りに使った言葉として有名な名言が、Stay Hungry. Stay Foolish. です。この解釈は人によってまちまちだと思うのですが、自分勝手な解釈は次の通りです。

Stay Hungry : 「過去の成功を捨てよ。身軽で居よ。心から好きなことを見つけたまで立ち止まるな。自分には何もないと自覚せよ。」など。本稿の趣旨的には「現状に満足せず、こだわり続けよ」。

Stay Foolish : 「多数意見に反して自分の心に従え。ゼロからやり直せ。他人の人生を生きるな。」など。本稿の趣旨的には「前例や常識に縛られるな」。

さて振り返って、自分はHungryであり続けられたらどうか？ Foolishに研究に取り組めたかどうか？と自問自答が尽きませんが、何かを成し遂げる上で心掛けるべき言葉と思っています。

半導体の世界に限らず、技術の壁とか性能の壁という言葉の研究開発でよく耳にします。知識や

経験が豊富になった研究開発者は、しばしば限界論を論じるようになります。若い研究者諸君は、そのような見解をあまり気にせず研究に邁進してほしいと考えています。識者の見識には参考になる部分が多いですが、長く専門分野を経験し精通すると積み上げてきた知見や思考パターンに縛られて、「固定観念の殻」を離脱できないためにできた壁や限界であるからです。少し脱線しますが、「壁は悲観的な研究者が作るもので、それを壊すのは楽観的な研究者だ」に近い表現を聞くことがあります。厳密に物事を追求するばかりではなく、不確定な部分に対して「何とかなる」と思って取り組むことも研究者の資質として必要なかも知れません。あくまで私見ですが、ふり返って見ると、適度に曖昧さを残しておいた場合の方がうまく行ったように感じています。

最後になりますが、スマートフォン（スマホ）は最も進化した電子機器のひとつで、電気系3専

攻・通研で教育研究している電気、通信、電子工学の集大成であると思います。まだ高性能化できる余地を残していますが、スマホも将来に渡っていつまでも存在するものではありません。過去を振り返ってみてください。音楽メディアはレコード、テープ、CD、MDと変遷し、今やクラウド上のデータが主流です。このことは、あるフェーズで研究が遅れたり開発を失敗したとしても、必ず挽回の機会があるということです。ですので、若人諸君には恐れることなく研究の世界に入って欲しいと思っています。ただし、目標を見失わないための俯瞰力、要点を見定め入り込んでいく没入力、物事の本質を正確に見極める力の向上を心がけて欲しいです。

企業での研究開発と大学での教育研究を通じて、多くの方々から教をいただきました。心から感謝申し上げます。