

工学の研究について



鎌倉 良成*

Reserch on Engineering

Key Words : LSI, research, engineering

私は、大阪大学大学院電子工学専攻の修士課程を終了後、大手の半導体メーカーの研究所に勤務し、今から約2年半前、大阪大学大学院電子情報エネルギー工学専攻に助手として採用されました。その間一貫して半導体大規模集積回路の構成要素であるトランジスタの電気的特性とその長期信頼性を、主に計算機シミュレーションを駆使して予測する技術の開発に従事してきました。今のパソコンで用いられているマイクロプロセッサやメモリは、シリコン基板上に形成した金属・酸化膜・半導体電界効果トランジスタ(MOSFET)で構成されています。このデバイスが初めて発表されたのが1960年、今からもう40年も前のことです。ちょうど私の生まれる頃には1キロビットのICメモリが登場したそうですが、現在でもなお私がこの分野を研究テーマに選んでいることから分かります。LSIはそのすさまじい成長の勢いを驚くほど長きにわたって持続させています。最新鋭のDRAM容量は256メガビット、2014年頃にはさらに3桁増しの256ギガ(!)ビットメモリができるとのアグレッシブな予測が米国半導体工業会から出ています。まさにハイテク産業の典型ともいえる半導体、たいそう厳密な科学理論に基づいた開発が行われているのか、というところもすべてがそういうわけではなく、実際は原理のよく分からないまま、技術者の経験と勘そして泥臭い試行錯誤に

よって前進していく場合が多々あるようです。本稿では、学生時代から数えると足掛け8年間、半導体に関わってきた研究生活を振り返り、これまで企業研究所や大学で感じてきたことを綴っていきたいと思います。

子供のころ、ドラえもんを観て育った私は、将来科学者になるのが夢でした。小学校のときの作文を読み返してみますと、大人になったらタイムマシンを作りたい云々などと、若気の至りと申しましょるか、かなり大それたことを書いています。中学くらいになると科学に関する解説書をたくさん読むようになり、一時は物理学者になりたいと考えるようになりました。ところが、いざ大学受験の時になって自分の将来をまじめに考えてみると、急に現実的な心境になってしまいました。果たして物理学で将来飯食っていけるのか、とかなり真剣に悩んだ挙げ句、就職のよさそうなそれでいてなんとなく物理の香りの高そうな工学部の電気系を受験します。ということで、学部学生ときは工学的な授業にはあまり興味もなく、まあそこそこにしておいて、基礎的な物理ばかり勉強していました。研究室配属の際も固体物理学をやっておられる電子工学科の浜口智尋先生の講座を希望し、そのころ助教授をされていた谷口研二先生のご指導の下で、私の研究生活がスタートしたわけです。

*Yoshinari KAMAKURA

1969年9月9日生

1994年大阪大学・工学研究科・電子修了

現在、大阪大学大学院・工学研究科・電子情報エネルギー工学専攻・量子デバイス工学講座、助手、工学修士、半導体工学

TEL 06-6879-7731

FAX 06-6879-7792

E-Mail kamakura@eie.eng.

osaka-u.ac.jp



ここで、当時の私の研究テーマについて簡単に説明を加えたいと思います。半導体中を流れる電流を電圧によって制御するのが、トランジスタの役割といえます。したがって、与えられた電位分布の中で電子がどのように運動するか、きっちりと把握することはデバイス技術者にとり重要な課題です。数値シミュレーションでは通常、電子の集団を流体とし

て捉え、その濃度や温度等の保存則を記述する偏微分方程式を解く方法が採られますが、この場合どうしても精度に制限が生じます。特に最近のトランジスタ内部のように空間的にポテンシャルが激しく変化する状況下での電子の運動は複雑であり、その際に非常に強力な手法となるのがモンテカルロ法です。これは、電子の運動、すなわち電界による加速と結晶の乱れによる散乱の繰り返し、を一個一個計算機上で追跡するもので、何十万という多数の粒子の平均から我々が実際に観測する電流を予測することができます。直感的に分かりやすい上、かなり高精度なのですが、計算時間がやたらとかかりすぎることが最大の難点でした。ところが、私の学生時代ころには、ちょうどコンピュータの性能も上がり出し、それなりに重い計算も何とかこなせるようになってきました。とにかくすべての物理メカニズムを近似無しにプログラムに組み込もうとする「第一原理モンテカルロシミュレータ」を開発しようとする気運が世界的に高まってきたのです。結晶中の電子の有効質量、格子振動や結晶欠陥などポテンシャルの乱れによる電子散乱確率、などすべて量子力学による電子状態計算の結果のみから抽出し、フィッティングパラメータを一切持たない(正確に言うと電子輸送特性と比較して調整するパラメータを持たない)電子輸送シミュレータを、私の所属した研究グループでも目指していました。

このように、シリコン中の電子輸送特性に関するさまざまな実験結果を、パラメータ調整なしに定量的にシミュレートしようとする壮大な計画に、私は当初大きな興味を抱きました。ところが、実際研究を始めてみるとかなり大変だということに気づきます。安易にパラメータを調整できないということは、結果が合わなかった場合の逃げ道が全くないことを意味していたのです。何か足りない物理モデルがあるのか、根本的な近似が間違っているのか、「なんで合わんのやろう？」と悩みつづける毎日が続きました。当時恐いもの知らずだった私は、何とか解決してやろうと自分なりの努力を試みるのですが、世界中の一流の研究者でも苦勞している課題を大して冴えない大学院生がたやすく解けるはずがありません。うまくいかないことの連続で、今だに実験との大きな開きの理由の良く分からない問題もたくさん残ったままです。当時この分野をリードしていたの

は、IBMのFischetti博士の研究グループでしたが、彼らのバイタリティーといえますか、研究のスピードは私にとって信じられないほどでした。ようやく追いついたと思ったら実は彼らは遙か先、といった感じで、この研究は結局二番煎じなのでは、と研究意欲を失いかけたこともあります。それでも、彼らが見落とした点や、やり残した仕事、というものが結構あるもので、そのうちの一つを論文にまとめさせていただくことができました。それが出版されたとき、さらにFischetti博士の論文に私の関わった計算結果が引用されているのを発見したときの感激は今でも忘れられません。

そうこうしているうちに、私も学会発表の機会を与えて頂いたのですが、その際企業の方々に次のような質問を受けかなり戸惑った経験があります。「そこまで厳密にやる必要があるのか？それに実際、計算時間がかかりすぎて使い物にならないのでは？」純粹に物質中の電気伝導の本質を研究しているつもりだった私にとってこのコメントの意味はいまいちピンときませんでした。ところが、その後実際に企業の研究所に勤めるようになってきたのです。先ほどのFischetti博士が、今からちょうど10年前のApplied Surface Science誌に「誰が病んだMOSFETを救えるか？」と題した図面を掲載しています¹⁾。じつはこれ、まじめな学術論文中の図面といっても完全に漫画であります。絵の真ん中には「病気のMOSFET」がベッドに横たわり見るからに苦しそう、周りには二人の人物が立っています。一人は、とても堅物そうな「第一原理物理学者」、もう一人は、仮想的なフォノン放出が電子正孔対と結合して高温超伝導状態をシリコン酸化膜界面で形成し... NSFへの申請はどう書いたら有利だろうか...」と私にはさっぱり理解できないけれども何やらすごそうな文句を呟いています。一方の一人は、未開のジャングルの原住民の格好をした「技術屋モデラー」です。「窒化膜のピンチだぞ、少々フッ素を加えて、このモデルのパラメータをちょいといじれば... うまく行くことを祈ろう... イッ、イッ...」。ここで実はFischetti博士は、「もし第1原理物理学者が酸化過程を理解するのを待っていたなら、我々は未だに真空管を使っているだろう。」と述べています。厳しい開発競争に追われている技術者が1回の計算に

数日もかかるようなプログラムを道具として使うのは現実的ではありません。少々怪しい、すなわち物理的な厳密性を犠牲にしたモデルのフィッティングパラメータを最適に調整することで、より高速な、そしてより実験値を再現する(あくまでパラメータ調整時に比較した実験条件の範囲の話ですが)シミュレータが得られます。それでも、実際にはある世代のトランジスタの開発が終了した時点で、ようやくその世代に対応したシミュレータが完成するといったこともありがちで、この種のシミュレータでさえ素子開発の現場では脇役です。結局、試作と実測の繰り返しを主体にトランジスタの開発は進んでいる、というのが企業での私の印象でした。物理的に何が起きているのかよく分からないことが多くても、トランジスタは上手く作製され、良好に動作するのです。ある大学の先生がサイエンスとエンジニアリングは水と油のようなものだとおっしゃられていましたが、まさにこういうことなのかなという気がしました。

ところが、根本的な科学的な理解が重要でないかというところというのは全くないはずで、今トランジスタのテクノロジーはかなり成熟してきており、今後更にその性能を向上させるためには、物質が本来持っている性質を最大限引き出すぎりぎりの努力が必要となります。こういった課題に対しては、物理過程の基礎的なイメージを完全に理解した上での開発が非常に重要で、まさに大学が保有している基礎知識が生かされる機会だと思います。私が企業研究所にいた際、日本の大学は使えないという意見を良く耳にしました。ところが、大学にいますと、企業が現在何を求めているかということが、なかなか分からないのも事実です。私も入社前の会社訪問の際、「シリコン半導体の研究はもう終わりで、もはや開発しかやることはない」と生意気な口を叩いてしまい、その後数時間に渡って、延々とそうじゃな

いんだというお説教(?)を頂いた思い出があります。実はシリコン半導体の分野は基礎領域において、まだまだ重要で、かつ面白い研究課題が山積です。それに、これを解決することにより今後ますますの発展が望めます。現在、企業は昨今の不況下で基礎研究の圧縮を余儀なくされ、大学との連携を強く求めるようになってきていますが、大学側も企業とのつながりを密にすることで研究費などのメリットが望めます。

民間ではやれない純粋に基礎的な研究は大学の重要な役割の一つですし、私自身憧れも感じます。ただ企業との繋がりの中で行う工学の研究も大変魅力的です。目的意識をしっかりとった企業研究者の方々との交流は大変刺激的ですし、なにより、実際に世の中に出回っているLSIの成長を目の当たりにしつつ、私の研究が巨大産業に大きなインパクトを与える可能性もある、と考えることは研究意欲を掻き立てるきっかけとなります。企業と同じ分野で研究競争を行うには、研究費や設備の面に於いてかなりのハンデが存在するのは事実です。ただ、大学には、研究テーマの選択や、タイトな期限に束縛されず長期的展望に立った研究計画を立てる自由があります。それに、固定概念にとらわれない若い学生たちとの共同作業で生まれる自由な発想も大きな強みの一つだと思います。これらを生かしつつ、時代にマッチした工学研究者になりたいと思う今日このごろであります。

参 考 文 献

- 1) M. V. Fischetti, S. E. Laux, and D. J. Di-Maria, "The Physics of Hot-Electron Degradation of Si MOSFET's : Can we understand it?" Applied Surface Science 39 (1989) 578-596.

