



# アドバンス・シミュレーション・ニュース

## No.2 (2023年7月10日発行)

### 第2回アドバンス・シミュレーション・セミナー2023 開催報告

### IEEE LIFE FELLOW 広島大学 名誉教授 角南 英夫 様

### 「半導体デバイスの歴史と展望」

アドバンス・シミュレーション・ニュースは、アドバンスソフト株式会社が2021年度から、我が国における計算科学技術の振興を目的として、幅広い分野の最先端研究を対象として開催している「アドバンス・シミュレーション・セミナー」の開催報告と今後の開催予定をご案内するサービスです。

本セミナーで紹介される多種多様な最先端研究をきっかけに、企業の研究開発を担う技術者の方が新たな視点を持つこと、最先端研究を産業に応用する起点となること、長期的には計算科学シミュレーション分野の裾野が広がること等を期待しています。

#### 開催概要

- 日時：2023年5月19日（金）14:00～15:30
- 開催方法：オンラインセミナー（Zoomにて開催）
- 主催：アドバンスソフト株式会社 出版事業部
- 講演概要

第二次世界大戦の終戦後まもなく1948年に固体による増幅素子の発明としてトランジスタが発表された。この素子は当時の電子機器を構成していた真空管を徐々に置き換え始め、特に1970年代初頭に発売された集積回路としての汎用プロセッサ、メモリ、撮像素子はその後著しい発展を遂げ、あらゆる電子機器を高性能化させ続けている。この「産業の米」と



も称される半導体デバイス発展の原動力は素子の微細化でもたらされる高集積化・大規模化である。

一方高電圧・大電力を制御するパワー素子の用途も拡大し続けている。それと同時に、素子の最適化と性能予測を行うシミュレーションの重要性も増している。

本セミナーはそれらのトレンドを俯瞰し、将来を展望する。

#### ご講演内容

本稿は、2023年5月19日に開催した「アドバンス・シミュレーション・セミナー2023」において、角南 英夫 様にご講演いただいた内容をアドバンスソフトがまとめたものです。

#### 1. 講演内容

##### 1.1. 時代の背景

「人」の社会を動かしているのは「人」自身ではあるが、その道具としてIT(Information Technology)：情報技術の発展が目覚ましい。中でもAI(Artificial Intelligence)：人工知能の適用は人間の思考により近い結果を提供している。身近な例としては、インターネット環境の充実、スマートフォンの多機能化があげられよう。これらのソフトウェア面を支えるのはハードウ

ェアとしての半導体デバイスである。とくに素子の微細化を伴った高集積化デバイス(集積回路)であり、主にプロセッサとメモリがそれに相当する。AI といえども、プロセッサとそれを動かす OS/アプリケーションソフトの作業に外ならない。

他方、地球温暖化の弊害が声高に叫ばれるようになり、国際的な SDGs(Sustainable Development Goals)のかけ声の下、様々な取り組みが始まっている。化石燃料を使わずに自然のエネルギーで電力を生み出し、その電力で自動車を動かす EV 化は世界的に大きな取り組みの一つである。この電力を制御するのはパワー半導体であり、より高電圧、より大電力へのトレンドを生み出している。未だ集積回路が Si に限定されているのに比べると、パワー半導体では SiC、GaN など、より高温、高電圧に強い材料が使われ始めた。集積回路とは異なる方向へトレンドを伸ばしている。

## 1.2. 半導体の基本

半導体デバイスを作成するためには極めて高純度な Si を精製する必要がある。半導体グレードの純度は 11N (イレブンナイン) と呼ばれ、99.999999999%の純度が求められる。つまり、 $10^{11}$  個の Si 原子に対して 1 個の不純物原子しか許容することができない。11N の超絶性の例として、例えば、 $100\text{m} \times 100\text{m} \times 10\text{m}$  の巨大なプール ( $10^5$  トンあるいは  $10^5 \text{ m}^3$ ) に角砂糖 1 個 (約 3g) 含まれるだけで純度不足に陥ることになる。

主要な半導体デバイスは MOS トランジスタであり、金属(Metal)、酸化膜(Oxide)、半導体(Semiconductor)で構成されている。つまり、地球の地殻上層部に存在する元素の中で最も量が多い上位 3 元素 (クラーク数 1 位: 酸素 49.5%、2 位: シリコン 25.8%、3 位アルミニウム 7.56%) で半導体デバイスを作成することができるということになる。この点からも、半導体デバイスは大変恵まれたデバイスであることが分かる。

## 1.3. コンピュータ

半導体を最も有効に使っているのはコンピュータである。現在のほぼ全てのデジタルコンピュータはノイマン型コンピュータである。ノイマン型コンピュータは主にプロセッサとメモリで構成されている。また、メモリにプログラムとデータを内蔵して (プログラム内蔵方式)、プログラム命令を順番に読み取って処理が実行される (逐次処理)。従って、プロセッサとメモリが最も重要な半導体デバイスとすることができる。

現在のスーパーコンピュータの性能ランキングでは 1 位は米オークリッジ国立研究所と HPE の「Frontier」であり、1102PFLOPS の演算速度を誇る (FLOPS は 1 秒間に処理できる浮動小数演算の回数を表す指標)。2 位は理化学研究所と富士通の「富岳」(442PFLOPS) である。「富岳」によるマスク着用時と非着用時のときの咳の飛沫シミュレーションは記憶に新しい。

## 1.4. マイクロプロセッサ

1971 年に最初の汎用プロセッサ Intel4004 が発表された。このプロセッサでは、2025 個のトランジスタ、

加工寸法は 10 ミクロンノード、クロック周波数は 500kHz だった。一方、2000 年に発表されたプロセッサ Intel Pentium IV Willamette では、4200 万個のトランジスタ、加工寸法は 180nm ノード、クロック周波数は 1.3-3.8GHz であり、最初の汎用プロセッサと比べて、それぞれ 21000 倍 (トランジスタ数)、1/55 (加工寸法)、2600-7600 倍 (クロック周波数) となっている。

2015 年の時点で、その 20 年前に予想された以下のテクノロジーをほぼ実現している状況である。

- ・三次元バーチャルリアリティシステム
- ・顔認証による認証、セキュリティシステム
- ・瞬時動体認識による自動運行システム
- ・人間に近い動作・判断をする知能ロボット
- ・仮想現実を駆使した教育システム

これはまさに連綿と続けられている半導体デバイスの技術進展の賜物であると言える。この半導体技術の成長について、フェアチャイルドの創始者の一人ゴードン・ムーアは、1965 年に集積回路あたりの部品数が毎年 2 倍になると予測し、この成長率は少なくともあと 10 年は続くと予測した。1975 年には、次の 10 年を見据えて 2 年ごとに 2 倍になるという予測に修正した。彼の予測は 1975 年以降も維持され、それ以来「法則」として知られるようになった。

## 1.5. メモリ

メモリデバイスは記憶する物理量によってさまざまなデバイスが提案されている。例えば、電荷 (DRAM、EPROM、EEPROM)、電位 (SRAM)、強誘電体分極 (FeRAM)、磁気 (MRAM)、相変化 (PRAM/PCM)、抵抗 (ReRAM)、スピン (SPRAM) などがある。この中で、電荷を制御するタイプのメモリである DRAM と EEPROM (フラッシュメモリ) が最も経済的規模の大きなメモリである。

最初の DRAM は 1970 年に発表されたインテルの i1103 である (1K ビット DRAM)。この DRAM の 1 メモリセルは 3 つのトランジスタと 1 つのキャパシタで構成されていた (4K ビットからは 1 トランジスタ + 1 キャパシタ)。最初の 1K ビットから 15 年後には 1000 倍の 1M ビット DRAM が開発され、さらにその 15 年後にはさらに 1000 倍の 1G ビットが開発されている。一方、最小加工寸法を見てみると、1970 年の 1K ビット DRAM は 12 ミクロンだったものが、15 年後の 1M ビットでは 1/10 (約 1.2 ミクロン) になり、さらにその 15 年後の 1G ビットではさらに 1/10 (約 120nm) になっている。これに伴い DRAM 製品のチップサイズは縮小し、かつ製品単価も下がり続けている。

これまでの DRAM 市場の動向としては、インテルの 1K ビット DRAM から 16M ビットまでは 1 世代ごとにトップシェアを獲得した企業が入れ替わる状況で激しい競争を繰り広げていた。この間、日立、NEC、東芝など日本の企業が躍進していた時代である。16M ビット DRAM でサムスンがトップシェアを取ってから、今日までサムスンがトップを取り続けている。一方、日本企業は、1985 年頃に 80% のシェアを取ってから、衰退

の一途を辿っている。今日では、DRAM 市場はサムスン（韓国）、SK hynix（韓国）、Micron（米国）の3社のみが生き残っている状況である。

電氣的消去・書き込み可能な ROM として EEPROM がある（一括消去できる EEPROM をフラッシュメモリと呼ぶ）。フラッシュメモリでは絶縁膜のトンネル現象を介して浮遊ゲートあるいは  $\text{Si}_3\text{N}_4$  膜に電子を蓄積する。しかし、現実には書き込み回数の制限が生じることから、確率的には絶縁膜を破壊しているといえる。従って、フラッシュメモリは常時書き込みをするような用途には向いていない。フラッシュメモリの規模を拡大する方法の一つとして、多値レベルセル（MLC: Multi-level Cell）がある。一つのセルに複数のしきい電圧を設定する方法であるが、動作マージンは狭くなるので、SLC(Single-level Cell)に比べて信頼性は低下する。その他のメモリ規模拡大策として、二次元フラッシュメモリを三次元化する方法がある。

### 1.6. 微細加工・集積化技術

集積回路の製造には、回路設計、マスク作成、基板作成、製造工程、実装工程などがある。それぞれ不可欠な工程だが本講演では半導体デバイスを作成する製造工程について述べる。前述のように今日まで素子の微細化が行われてきたが、これは世代ごとに提案された微細加工とそれに伴う構造・材料の技術革新の成果である。微細加工の胆となるのが、リソグラフィの露光装置（ステッパー、スキャナーなどとも呼ばれる）である。露光装置は用いる光の波長によって加工寸法が決まる。従って、これまで露光装置では光源の短波長化が行われて半導体デバイスの寸法サイズを縮小してきた。一方、短波長化だけではデバイスの加工寸法縮小要求を満たせなくなってきてからは、さまざまな技術が取り入れられてきた。例えば、超解像技術、超解像技術+液浸技術、位相シフト、極端紫外線（EUV: Extreme Ultra Violet）の利用などが挙げられる。中でも、現在 7nm 以下の最小加工を実現する EUV 露光装置はオランダ ASML のみが開発している状況である。最先端の加工精度を誇る EUV 露光装置の大きさと価格は驚異的なものとなる。特に価格は 250 億円以上と推定され、半導体デバイスを製造する企業にとっては膨大な投資額となる。

### 1.7. パワーデバイス

電気製品の発展と共にパワートランジスタの用途が多様化してきた。これまでは Si をベースとした様々なデバイス構造（Si DMOS、Si Super-Junction MOS、Si IGBT など）が提案され、Si パワーデバイスが実用化されてきたが、SiC や GaN を用いることによって、高性能なパワーデバイスを作成することができる。これは、物性上バンドギャップが大きいため、絶縁破壊電圧が高くなり、高電圧を扱うデバイスでの利用に向いているからである。高温においてもドーピング密度に比べて真性キャリア密度が十分に小さく、pn 接合が問題なく動作する。つまり、高温動作を求める用途に適しており、パワー半導体としてとても魅力的な存在になって

いる。

既に SiC や GaN では、300~500°C という高温での動作が確認されている。しかし従来の Si パワーデバイスでは 200°C を超える温度での動作を想定していないので、高温動作に向く半導体パッケージの技術的な蓄積が遅れている。このため、SiC や GaN といえども、当面は 200~250°C 程度の接合温度で利用している。

このため SiC や GaN の特長が十分活かされていない。しかし、例えばハイブリッド車（HV）では、Si IGBT（Insulated Gate Bipolar Transistor）を冷却するための専用冷却水系（60°C）が必要で、SiC パワー半導体で 200°C の接合温度が達成できれば、エンジン用冷却水系（120°C）と共用できる。それにより冷却装置 1 系統分（ポンプやラジエータなど）が不要となる。これによりコスト削減と車体軽量化が同時に実現できる。

### 1.8. MEMS

半導体製造技術は、MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) にも利用されている。MEMS (メムス) とは「微小な電気機械システム」という意味の英語の略称で、半導体のシリコン基板、ガラス基板、有機材料などに機械要素部品のセンサ・アクチュエータ・電子回路などをひとまとめにしたマイクロレベル構造を持つデバイスを指す。日本では「マイクロマシン」と呼ばれることもあり、MEMS 機器の大きさは、一般的には全長が mm 単位で、その部品は  $\mu\text{m}$  単位という極小の世界である。MEMS は小型化、省電力化、高機能化、低コスト化が必要な機器には欠かせないデバイスといえよう。世の中には半導体が至る所に利用されている。MEMS も同様に、あらゆる製品の中に存在している。例えば、加速度センサーに MEMS 技術が使われていて、車体制御などで自動車に多用されている。その他に、DMD (Digital Micromirror Device) を取り上げる。この DMD では何百万個の微少ミラーアレイを個別に駆動制御することにより超小型プロジェクタとして利用することができる。

### 1.9. 今後の展望

今後も、あくまで微細化、高集積化のトレンドは技術が飽和するまでは続くと考えられる。では最小チャンネル長の限界はどこか、5nm、4nm、3nm か。Si を置き換える半導体材料は何か。また、現在の最先端微細加工は EUV 技術であるが、その後はどうなるであろうか。等倍 X 線、あるいは電子線などの技術を使うことによってさらに微細な加工をすることができるが、スループットやコスト面で、実用化することができるかが決まる。1970 年に集積回路が出現してから 50 年以上の年月が経つが、いよいよ最後の壁に直面しつつあるというのが現状と思われる。

今年官民挙げての最先端集積回路の開発・製造を目指したラピダスが発足した。ロジックを中心とした最先端集積回路（おもにプロセッサ、マイコン）では、日本は少なくとも数世代遅れており、自力でそのギャップを埋めることはできないと思われた。そこでラピダスは起死回生の手段として 2nm までメドをつけた IBM

の技術の提供を受けることになった。提携内容の詳細や提供額は発表されていないが相当なものになるであろう。

IBM は研究開発では世界の最先端を走っているグループのひとつであるが、製造規模や製造コストの面では課題があり、2015年に製造を放棄している。そのため、開発技術の有償提供は研究開発費の回収という意味でも、また世界に冠たる IBM 計算機の要である CPU のサプライチェーンの分散という意味でも望ましいと考えたのではないだろう。

現在でも半導体装置と半導体材料では日本企業は強い。半導体装置メーカーとして、アプライドマテリアル (米)、ASML (蘭)、ラムリサーチ (米)、東京エレクトロン (日)、KLA (米) がトップ4としてシェアを分け合っている。日本の半導体材料メーカーは特に強い。半導体材料として、シリコンウェハ、フォトレジスト、フォトマスク、スラリー、スパッタターゲット、高純度ガス、化学薬品などがあるが、世界の7-8割のシェアを日本の材料メーカーが持っている。このような状況の中で、国内の半導体メーカーと強い連携が生まれることによって、よい相乗効果が得られることを期待している。

TCAD を活用することにより、デバイス特性の理解を深め、最適な構造を探索することができる。これによって、試作規模の大幅な削減と開発期間の短縮が実現できる。また、既存製造技術では実現するのが困難な複雑な構造を机上で実現し、性能解析を行う。たとえば、Si、SiC、GaN のパワーデバイスの複雑な構造をシミュレートし最適な構造を得る。さらには、新規半導体基板を用いた新規デバイスの性能予測を行う。これによって、新たな市場を開拓できる可能性が生じる。

### 1.10. 終わりに

事実上1970年から始まった集積回路の革新は、規模や処理能力、さらにはコストの面でも1億倍に達する向上をもたらした。しかしその向上分は、肉眼の認識限界に達した動画の精細度、より人間の思考に近づくAIの出現、ストレスのない超高速通信手段の充実などに費やされ、それほどの恩恵を感じていないのは贅沢としかいいようがない。

そしてデバイスの寸法が原子十個分の大きさに近づき、否応なく物理限界が見え始めた。また、コスト面からもDRAMに代表される大規模化は1Gビットから鈍化し始めている。

今後10年間にブレークスルーは出現するであろうか。出現するとすればそれはシリコンの延長上にあるのかどうか、とても興味深い。

## 2. 聴講における感想 (アドバンスソフト)

本講演では、1947年の最初のトランジスタの発明、1970年の1KビットDRAMの開発のところからご説明頂き、その後、半導体技術の進展に伴い15年ごとにチップあたりの素子数は1000倍になり、素子寸法は1/10になり、半導体デバイスは高集積化の一途を辿ってきたことをお示し頂いた。この高集積化の間、世代ごとに様々な技術革新があったこと、世界の半導体企業間で熾烈な覇権争いが繰り広げられたこと、また、その間に半導体技術に関わるホットなテクノロジーが世の中を賑わせてきたこと、など多方面からお話し頂いた。

将来展望の内容では、官民挙げて発足した最先端集積回路の開発・製造を目指すラピダスのお話と、日本の半導体装置メーカーと半導体材料メーカーは現在でも大きな存在感を持っているというお話があった。この2つの内容は、当時世界トップのシェアを誇っていた日本の半導体産業を、再び盛り上げるための希望であり、今後の動向を見守っていきたい。

## ご経歴 (<http://www.suna.cc/>)

1969年 東北大学 工学部 電子工学専攻 修士課程修了。  
1969~98年 日立製作所勤務。  
1973~74年 米国スタンフォード大学 客員研究員。  
1980年 東北大学より工学博士授与。  
1998年 広島大学 ナノデバイス・システム研究センター 教授。  
2007年 広島大学 名誉教授。  
2016年 IEEE Life Fellow。

## 参加者

申込者は87名、参加者は71名であった。参加者の内訳は、企業が50名、公的機関が10名、教育機関が11名であった。主な企業の業種は、半導体関連メーカーが19名、素材メーカーが8名、機器・エレクトロニクスメーカーが5名であった。

## 公開資料

ご講演のYouTube動画は、右のQRコードからご覧いただくことができます。



### 【お問い合わせ先】

アドバンスソフト株式会社 出版事業部  
〒101-0062 東京都千代田区神田駿河台四丁目3番地 新お茶の水ビルディング17階西  
TEL : 03-6826-3971 FAX : 03-5283-6580 E-mail : office@advancesoft.jp  
<https://www.advancesoft.jp/>

当社では随時人材の募集も行っております。

<https://www.advancesoft.jp/recruit/>

AdvanceSoft

