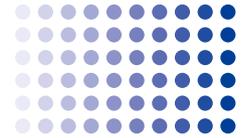




未来予測



半導体が演出する未来世界を予測する

今回 SEAJ ジャーナル30周年記念号ということで未来世界について想像してみた。

20周年記念誌にも半導体が演出する10年後の社会を予測する取り組みを行ったが、当たった事であればスマホのような爆発的な普及を予測できなかったこともある。未来世界については科学者、技術者よりも SF 作家、映画監督の方がより面白い予測や新しい世界観が出されると思うが、今回本項に参加されている方々は作家でもなければ映画監督でもないの、一技術者の視点からの未来予想となっている。

今回複数の方に原稿を依頼したため重複する箇所もあるかとも思うがご了承頂きたいと思う。

尚、今回の内容が実現するかは保証の限りではありません。(SEAJ 技術部会)

インフラ

未来の都市空間におけるエネルギー、インフラ、交通手段、については地球環境も考え今後劇的な変化が予想される。CO₂排出の削減が叫ばれて久しいが、すでに再生可能エネルギー、電気自動車、燃料電池自動車等が開発され、より一層の環境対応が進むものと思われる。

「人口構成の変化でインフラ産業が活発化」

2030年までに、世界の都市人口率（都市に住む人の割合）は6割に達するとみられている。現在の世界人口は72億人で、そのうち5割の36億人が都市部に居住している。2030年には世界人口83億人、都市人口は約6割の49億人と変わる。1950年の世界では、人口全体25億人に占める都市人口の割合は3割（7.5億人）程度だった。世界中でいかに急速に都市化が進んでいるのかが分かる。

現在、人口が1,000万人を超える巨大都市（メガシティ）は世界に27都市あり、今後もこうした既存のメガシティへの人口流入が続くが、土地不足やインフラの老朽化などがさらなる拡大の妨げとなる可能性が高くなる。国家にとって、都市は経済成長のエンジン役という大切な役割を果たして、経済成長の約8割は都市部が担っているといわれている。

人口が増えれば、食糧や水、エネルギーが不足するというのは必然の流れで、大半の専門家が、今後15～20年間で世界のエネルギー需要が約50%増えるという結論で合意している。一方で、エネルギー生産も増えると見込まれており、米エネルギー省の試算では、2035年まで世界のエネルギー生産は増え続ける。石油輸出国機構（OPEC）に所属する主な産油国による増産だけでなく、新しい形のエネルギー生産が増えていることが、エネルギー不足の解消に貢献する見通しとなっている。

天然ガスの生産量が増えることで、2030年までに石炭から天然ガスへの切り換えが進む。これは二酸化炭素の排出量を減らすうえで絶大な効果をもたらす。しかしながら、安くて豊富にある天然ガスの普及により、水力や風力、太陽光などの再生可能エネルギーに対する注目はかすみがちになる。国際エネルギー機関（IAE）は、2007年～2050年の間にエネルギー全体に占める再生エネルギーの割合は4%しか増加しないと見積もられている。

人間の暮らしを大きく変えるテクノロジーとして「情報技術」がある。2030年の世界に影響を与える3つの注目トレンドは、「データ処理」「ソーシャルネットワーク（人脈・交流サイト）」「スマートシティ」である。

「スマートシティ」とは、最新の情報技術（IT）を導入して経済効率や市民生活の質を高める一方で、エネルギー消費や環境破壊は最小限に留めるように工夫された大都市環境の事である。そのためには、交通・通信網や浄水・下水網、省エネ対策から災害対策までを、最新のIT技術で一括管理することがカギとなる。これからはスマートシティ的な発想で都市開発を進めていかないと、今後の人口爆発で誕生するメガシティの生活環境は守れない。発展途上国を中心に、今後20年間に世界の都市開発に投資される金額は35兆ドルに達する。これはIT関連企業にとっては大きな商機となり、スマートシティに関連した技術革新は、アフリカやラ

情報社会

インターネットが普及する前の世界からみたら、現代のネットワーク環境は映画の中のように思うかもしれない。ちょっと前ならユビキタス、現在ならIoTにより個人と世界との距離感が変わり情報量は格段に上がる。情報端末についてもスマホに変わるツールもでてくるだろう。

「2030年の情報通信」

情報通信は、社会の仕組みに合わせて、通信方式、通信媒体の変化を伴いながら発展を遂げてきた。今後の10年がどのように発展していくかを正確に予想することは非常に難しいが、今の進展を元に、2030年の情報通信の世界を考えてみる。

日本における大きな流れとしては、2020年の東京オリンピックを一つの節目に急速なインフラの発展を経て、その後の高齢化社会を支えるサステナブルな社会を目指した社会構造を支える技術が求められていくと考えられる。固定通信・音声サービスは100年の時間を掛けて普及したのに対して、移動体通信・データ通信サービスは、わずか30年足らずで急速に広まった。SEAJが20周年を迎えた2005年には、ADSL(Asymmetric Digital Subscriber Line)サービスやFTTH(Fiber To The Home)サービスが既に始まっており、情報通信の急速な拡大を後押しした。情報通信の進展のスピードは、今後ますます早まっていくと思われる。

従来は、人間同士の通信か人と機器との通信がほとんどであったが、今後はIoT (Internet of Things) のように、“モノ”が直接インターネットに接続されていくと考えられる。そのためには、2030年には非常に多くのデバイスとの接続が可能なネットワーク構成技術確立する必要がある。コンテンツとして流通するデータの量は、2000年では6.2EB (エクサバイト)であったが、2010年には988EBまで増加しており、2020年には44ZB (ゼタバイト)になると見込まれている。*

2015年時点のネットワークにおいても、LTE (Long Term Evolution) の普及により情報通信量が飛躍的に拡大している。今後のネットワーク構成技術は、大容量かつ超大量のデバイス接続が可能で、人とモノ・ロボットを接続可能で、エンドユーザーへの幅広いサービス提供に柔軟に対応可能で、かつ甚大災害などの非常時の対応も可能になると考えられる。大容量光トランスポートシステムとしては、1波長当り100Gbps、1ファイバー当り8~10Tbpsの大容量化を可能にした現在主流のデジタルコヒーレント光伝送方式から、2020年以降には100Tbpsを超える大容量化が可能な空間多重光通信技術 (SDM: Space Division Multiplexing) に移行すると考えられる。

2030年には、スマートフォンの総数が40億台に達す

るのに対して、知能を持って機械学習アルゴリズムによる事象の高度予測・検知が可能なCPUを搭載したセンサーが1000億個に達すると予想されている。社会は、多種多様かつ膨大な数のセンサーに無意識に囲まれており、安全性がセンサー技術により支えられるようになると考えられる。耐用年数を迎える高度成長期に建設されたビルや橋などの建築物は、個々にセンサーネットワークで監視して、強度劣化を早期に発見することで、大きな被害を未然に防ぐことが進められていくであろう。IEEEは、2040年頃までには自動車の7割が自動運転になるという予想をしており、2030年には、自動車の完全自動走行がメーカーにより実用化されると想定される。業種の境界が一層曖昧になり、業種を超えたイノベーションにつながる可能性がより高くなる。

増大する情報を貯めるストレージ技術は、主流であった磁気ハードディスクは容量増大のペースが鈍化し、技術開発の主流は不揮発半導体メモリの改良に移っている。今後の半導体メモリは、プロセスノードのスケールダウンと回路の工夫により、更なる密度向上が続き、その後は抵抗変化型メモリの実用化に進むことで、2030年には1 Tb以上の記憶容量を実現していると考えられる。一方、データセンターにおける大容量アーカイブとしては磁気テープが復活してきている。ストレージ技術は、今後使用目的によって使い分ける時代となっていくであろう。

2030年の日本では、インターネットサービスプロバイダーが誕生した1992年以降に生まれたITに親和性のある世代が総人口の1/3となり、彼らはネットワークを使ったヘビーユーザーとなっているであろう。ネットワークがこれまで以上に一体化し、ユーザーはどのようなアクセス手段であるかを気にせずにサービスを受けられるようになっていくと考えられる。リアルな世界とサイバーの世界の融合が進み、ネットワークを介した様々なサービスが起点になって、過疎化や超高齢化など種々の社会の課題も解決していることを期待したい。2030年においても、半導体デバイスはコモディティ化していくサービスやアプリケーションを支えていくために、依然として重要な役割を果たしていると考えられる。

「セキュリティが支える未来の社会」

未来のスマート社会を快適に暮らすには、安心安全の確保が重要である。「IoT」を基盤にネットワーク化によるスマート社会が構築されるが、不正アクセスによる遠隔操作や情報漏洩の危険性が懸念としてあり、セキュリティと耐災害性の強化が課題とされている。未来のキーワードとして挙げられている「自動走行車」、「ヘルスケア」、「ロボット」においても、セキュリティ対策による安全確保は必須である。

自動走行はIoTの普及を背景に、車載ICT端末と自動走行に必要なビッグデータをベースにしたクラウドサービスとのネットワークにより可能となるが、安全運転にはネットワークのセキュリティは勿論、レスポンスの遅延は事故に繋がるため、リアルタイム性も重要とされる。

ヘルスケアの分野においても、医療機器や医療技術の進化、生体情報や医療機器とのネットワーク化により新たな健康管理サービスや遠隔医療が可能となるが、患者のプライバシー保護と安全を確保するにはセキュリティが重要である。

ロボットは産業用ロボット、自動運転ロボット、医療ロボットから家事支援や介護支援等の日常生活を支援するパートナーロボットに至るまで、社会・生活のあらゆる場面での利用が期待されるが、ロボットが高品質で安全なサービスを提供するにはセキュリティの強化が必須である。

これらの技術の進化に大きく関わるのが「人工知能」であり、情報収集、整理・分析、行動生成に知能処理が加わることにより、各段の進化を遂げることになる。

ネットワークのセキュリティ対策としては、現在のコンピュータによる暗号セキュリティに代わり、光の量子力学的性質を直接操る量子暗号による量子ICTのセキュリティネットワークが実現するであろう。量子ICTにより大容量化も可能となるが、ネットワークでのデータ流通量は増加しており、IoTの更なる普及で情報量は爆発的な増加をするため、端末側でのデータ処理が必要とされている。同様にセキュリティ対策もネットワークシステムだけではなく端末側での対応も必要となる。端末機器やロボットへの人工知能搭載によるインテリジェント化が進むことにより、迅速かつ正確なデータ分析と処理、外部からの攻撃に対するセキュリティ対策も端末側での対応が可能となる。人工知能によるセキュリティ対策はネットワークインフラでも整備され、より強固なシステムが構築される。

安心安全はIoT化による安全インフラが整備され、防犯対応、地域のセキュリティが強化される。また、災害に対しても情報ネットワークのデータベースと

スーパーコンピュータによる解析技術や予知・予測技術の進化により安全を確保することができる。

安心安全で住みやすい未来社会を構築するには、セキュリティに関連する技術の進化と発展が不可欠であり、IoT、自動走行車、ヘルスケア、ロボット、人工知能は何れも半導体に関わる技術であり、半導体デバイスの進歩こそが未来社会を支える鍵となる。

「人工知能が使われる10年後の未来」

人工知能の話になると「シンギュラリティ」という言葉が必ずでてくる。技術の進歩からくる人類を超える知性の誕生や、自己学習により自らの能力を自ら超えることにより加速度的に能力が向上する人工知能の出現を意味しており、2045年に到達すると予想されている。

では現時点はどうであろうか？単純にデータや情報の記録量を比べれば既にコンピュータは人間の能力を超えているが、蓄積だけでは知能とはいえない。しかし、データや情報を引き出し、結び付け、そして何かに利用すると、知能の意味合いを含み始める。莫大な量の中から必要とされる画像を取り出したり、前後の文脈や時系列的な情報により文章を適切に翻訳したり、多数ある情報から危険性を判断し警告や制御を行えば、それは知能であろう。その方法が、単に言われた事（プログラムされた事）を実行するだけではなく、最適なアプローチを自ら見極め、その結果も経験として蓄積して行くことができれば、成長そのものであり、現在多くの取り組みがされている。

それでは10年後の社会で、人工知能がどの様に使われているか予想してみよう。一つ目は、何か特定の目的を賢く行うための人工知能である。特に、自動運転、医療診断や防犯といった健康や安全に関する用途でかなり深く使われる。初期の自動運転ではぶつからない事、医療診断では特定の病気を見つける事のように正しいとされる答えが比較的明確なため、目的に合わせて急速に発達する。人間が行うよりも正確で、安定してスムーズに仕事がこなされるので、今は人間の補助的な役割だが10年後からは主たる役割へと徐々に移り始める。整った高速道路では車が運転を担当する状態となり、人間は手を離して座り、何かあった時に手を貸すようになり始めるであろう。

二つ目は、目的は特定だが使われ方に汎用性を持つ用途である。例えば、需要と供給のマッチングがあげられ、Uberの様に今まで活用されていなかった資源（自家用車）を利用し、提供側と利用側をマッチさせるシステムにおいては特に力が発揮される。現在でも、天候やイベントにより需要が供給を上回る時には設定料

金が高くなり、それによりインセンティブが増えるため車をだす人が増え、逆に乗るのをためらう人もおり、一定の時間がたつとバランスが取れる仕組みとなっている。今後は人工知能により、この様な調整を後追いではなく先回りや予測に基づき行えば、より最適にバランスが保たれる事になるであろう。同様に物流においても、需要と供給を考えられた上で、今まで活用されてない資源を使い、物が届けられる。10年後は、荷物も手紙も、夕食の食材も、まとめて誰か（何か）が運んで来てくれているかもしれない。

三つ目は、コミュニケーションを目的した用途である。ソフトバンクの pepper の様に日常に溶け込み、会話をしたり皆をなごませたりする。この用途は対応が必要な範囲が広く、また人間的な要素を多く含むため、何が正しいかの判断がとても難しい。例えば、仕事が失敗した時に“何でうまくいかないんだ？”と質問した場合、理由を分析してほしいのか、自分の駄目なところを教えてほしいのか、それとも励ましてほしいのかは、その時のケースや人の性格で異なるであろう。同じく、電話対応や受付、営業もこの様な要素が相当含まれる。まずは、感情的な要素が絡まない質問に対し、前後関係や背景を理解し適切に会話することが、この10年で行われるのではないと思われる。それでも、日常において何割かは人工知能と会話しているという生活になっているかもしれない。

上記の様に使われる人工知能は、半導体にとって大いに期待される分野である。非常に大量な情報を超高

速で処理するためのチップとメモリ及びサーバー側記憶媒体を始めとし、生体と同じレベルで情報を捉えるためのイメージャーやセンサー類、そしてフレキシブルでウェアラブルなデバイスが今後も伸びるであろうと思われる。また、人の脳の情報伝達を模した新しい概念のチップの研究も進むと思われる。

IoT フレキシブルデバイス市場

フレキシブルデバイスは、フィルム上に装着した柔軟なデバイスで、曲面や袋などに貼れる点が大きなメリットとして、IoT 用途での利用拡大が期待されており、品質管理、荷物追跡、在庫管理、検品、万引き防止、住宅管理、インフラモニタリング、チケットなど多様な用途で拡大することが見込まれている。IoT 用途におけるフレキシブルデバイス（センサー、IC タグ）市場は、2020年までに3,410億円まで拡大することが予測される。プリンタブル技術を活用することで、薄さ、柔軟性、耐振動衝撃性などの特性をより一層引き立たせることができる。

フレキシブルセンサの需要として期待できるのは、大面積、多点のセンシングである。社会インフラモニタリングなど屋外用途でも活用が期待できる。課題としては通信機能、バッテリー、メモリ容量、センシング精度、寿命、耐候性などがある。これらをクリアすることにより、新たなニーズも生まれる可能性が高い。

生活環境

みんなが生活する職場、学校、各家庭においても IoT の発達によって現在とは変わってくる。医療、介護においてもセンサー技術の進化で自宅にしながら症状をモニターし、iPS 細胞等新しい治療方法の確立によりさらなる超高齢化社会となるだろうと言われている。

今後の医療

総務省統計局によると、世界人口は2030年には80億人を超え、65歳以上の割合（高齢者割合）が10%を超える。日本は世界に先駆けて超高齢化社会になっており、2030年における日本の高齢者割合は30%を超えている。世界的にも高齢者の割合が増加し、一人あたりの医療費は増大する一方で、医療的な QoL（Quality of Life）の維持・向上とともに、医療費を抑制することが求められる。

それでは20年後の医療を想像してみよう。医療には診断と治療の側面がある。診断に関しては、現在の年1回の定期健康診断、いわゆる人間ドックで採用され

ているものだけでも、簡単な装置での伸長・体重、血圧測定、X線による肺の検査、内視鏡検査による胃の内側からの観察、MRIによる脳のCT検査など多岐にわたっている。これらの診断手法・装置は、極めて高精度化されているだろう。画像診断を例にとると、高解像度で複数の角度・条件で撮影が行われ、対象部位は立体的に再構築される。そして、前回との差が大きな箇所、あるいはビッグデータから抽出された正常範囲からはずれた箇所が自動的に異常と判断され、最終的な判断を人間に頼るようになっていくであろう。

一方、治療に関しては、化学合成により作られた低分子医薬品では効果的に対処できなかった病気のいく

つかに対してはバイオ医薬品によって効果的な治療が施されていよう。また、薬による治療では対処できない病気・怪我のいくつかに対しては、再生医療による治療が浸透しているであろう。

診断・治療以外の医療はどのように進化するだろうか。これまでは、なんらかの症状が現れてから対処療法的に治療するのが主体であった。最近は徐々に予防に力を入れるようになってきている。予防により深刻な症状が出にくくすることが、症状が現れてからの治療・アフターケアよりもQoLの維持・向上につながりやすいためである。また、医療費抑制という見地からも予防がこれまで以上に注力されるであろう。たとえば、一人暮らしのお年寄りがロボット（たとえばPepper）と触れあい、会話することで、いつのまにか体温・血圧・心拍数などがデータとして蓄積され、症状が深刻になる前にお医者さんに行くように勧めてくれる。2030年には、センサーがあらゆるところに設置されており、望むと望まないに拘わらず、顔色、体温、音声などは常時モニターされている。プライバシーの問題が解決されているとして、常時モニターされている体調データを積極的に活用すれば、人手をわずらわせることなく基礎的な体調管理が実現可能である。これは必ずしも病気の予防ではないが、少なくとも体調を数値で見せられると、健康への意識が強まるであろう。

さて、直近の学会活動を見てみよう。2015年の機械学会のテーマとして、健康・医療・バイオが取り上げられている。また、2015年の応用物理学会秋季学術講演会では「プラズマ医療科学の最前線」がひとつのセッションとなっている。このように従来は医療に直接関係しないと思われていた分野が密接に医療に関わるよ

うになっている。

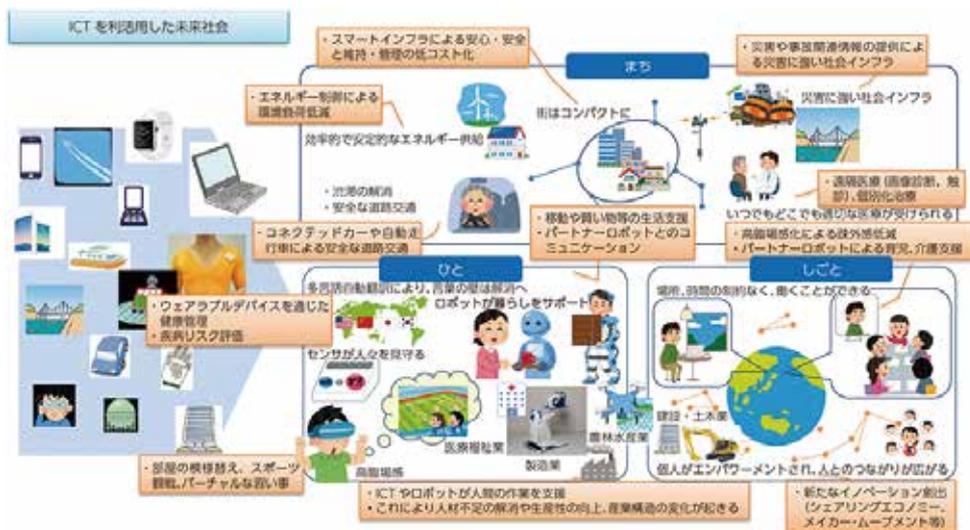
経済産業省は2030年の再生医療市場は17兆円になると予想している。つまり、バイオ医薬や再生医療では、低コストで大量に細胞を培養する必要がある。半導体デバイス製造と細胞培養は、プロセス条件を高度に制御すること、極めてクリーンな環境を維持すること、全数検査が必要なこと類似点が多い。半導体製造装置メーカーが本業以外でも成長していく姿が目につく。

2030年有機エレクトロニクスの世界市場は7兆円超

機能性有機材料を用いた電子デバイス「有機エレクトロニクス」。その特徴は軽く、薄く、柔軟性に富むことから曲げられるディスプレイや太陽電池、半導体を作ることができる。また、基板上に塗布や印刷によって素子形成が可能であるため、低価格かつ大面積化が可能となる。これらの特徴を生かして、様々な用途展開が期待されている。

代表的な有機エレクトロニクスとしては有機ELデバイス、有機半導体や有機太陽電池などがある。2030年の世界市場はディスプレイや照明の拡大と有機系の太陽電池や半導体などが本格化し、2012年比12倍の7兆円が予測される。有機半導体は有機TFTアレイ、有機メモリ等がある。有機TFTアレイは2011年から電子ペーパーで採用がはじまる。その後、有機センサーやICタグへの展開が期待され、ウェアラブルへの展開へ進む。有機メモリはカードや流通管理などのRFタグなどの低容量アプリが中心。最後に有機太陽電池市場で、屋外照明、窓ガラスなどの建材向けと補助電源デバイスとして需要が高まるとみられる。

出典：富士経済



出典：「平成27年度版情報通信白書」（総務省）

<http://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/h27/html/nc262000.html>

20yy年mm月dd日、ある埼玉県在住の家族 —ママの朝—

5:30に起きて、テレビをつけると今日の家族のスケジュールボードがでてきた。

半導体製造装置メーカー勤務のエンジニアのパパは、今日は東京本社出勤の日。6:30に自動運転タクシーが迎えに来る。東京本社に行くのは週2日、Meetingと業務調整の日。フェース・ツー・フェースじゃないと進まない上司からの指示、微妙な質問、みんなで開発スケジュールの調整とかをやる日だと言ってた。本社へ行くのは週2日になり、あとは自宅、または他社とも共用の近くのサテライトオフィスに行って仕事をしてよくなった。インフラの整備による仕事の効率化と社員の健康、エネルギーの節約のための一石三鳥の政策が浸透し、都市部への移動は大幅に減った。でも企業機密モードとかで東京に行った日は帰ってくるまでどこにいるか表示されないのよね。週2回の東京だからまた飲んで遅く帰ってくるのかしら。

そろそろ起きてくるからご飯用意しなくちゃ。ウェアラブル端末で目覚まし鳴るから勝手に起きてくれるのはいいんだけど、せっかくご飯作ってもウェアラブル端末からカロリー調整要って表示がでて、食事の量減らされちゃうのよね。

小学5年生の長男は自宅学習日。進捗度に合わせて学習し、個性を伸ばす日。全国から似たようなレベルの人を選び出し、教科書タブレット越しに授業を行い、テストをし、理解度により次の四半期の授業のレベルと人が決まる。学校は週2日、みんなでやる共通授業、体育、音楽、そしてグローバルコミュニケーションという他の国の子供とネットでつないでお互いの国や文化を紹介しあったりする授業が中心。勉強が効率的になった気はするんだけど、子供のコミュニケーション能力が心配。学校に行ってもみんな教科書タブレットに向かって個々に何かやっているというし。

そろそろ幼稚園の長女のお弁当を作らなきゃ。隣の席の男の子のお弁当がかわいって言われるんだけど、聞いてみたらその方仕事忙しい人でお料理ロボットがお弁当を作っているらしい。好きなキャラクターを選んでボタンを押すとプロセスフードで作ったかわいいお弁当がでてくるみたいなんだけど、私は手作り。絶対手作りのお弁当の方がおいしいと思うんだけど、子供にはかわいいキャラクターのお弁当の方がいいのかしら。料理の微妙な味加減はまだロボットには難しいと思うんだけど。パパがおいしい手作りのご飯を食べたいっていうからお料理ロボット買ってもらえないし。

少し離れて住んでいるおばあちゃんはデイサービスの日、ロボットがそろそろ起こしてくれるかしら。最初はいろいろ言われたけど、結局毎日相手をして助けてくれるロボットが気に入ってくれて、薬の管理もしてくれるし、どっかに行く日はちゃんと起こしてご飯食べさせてくれ、掃除や洗濯もしてくれる。認知症のおじいちゃんもおじいちゃんのロボットが辛抱強く会話してくれる。2人用のロボットが2人がケンカしそうになった時にうまく間に入ってくれるのも助かる。2人の予定も居場所うちのテレビから見れるし、ウェアラブル端末から二人の体調がアップロードされ、ちょっとおかしい時はこちらにアラートが来る。そういえば昨日おじいちゃんちょっと体調が悪いってデータだったので、私は今日は自宅で仕事日だから、時間作って午後顔ださなきゃいけないかな。

未来予測はあたらないものといいますが、一つ一つの予測は当たらなくても、これからつながる社会が発展し、より便利な社会になっていくことが想定できます。エネルギー、環境、高齢化等いろいろ解決しなければならない課題は将来に向かって山積みですが、それらをポジティブに乗り越えて世界が発展していることに期待します。そして、そこには、技術、半導体の進化はなくてはならないものと思っています。

うーん、でも人からウェアラブル端末他経由で体調、位置、勉強の進捗などいろいろなデータがクラウドに上がり、シミュレーション結果として、より良くなるためにフィードバックが戻ってくるのはいいんだけど、便利という名でちょっとコンピュータに管理されているかな？でも人間性は失いたくないですよね。そのための選択肢がきちんと残っているのが「幸せな未来の社会」なのでしょうか。

成長産業を支え続ける半導体製造装置

当協会は半導体製造装置を中心とした関係企業の団体である。半導体製造の各プロセスに於ける技術者が集まり将来のデバイス製造とその製造装置、半導体製造工場の将来像について考えてみた。

リソグラフィ技術の今後

<過去10年、微細化はロードマップ以上に進行>

半導体の微細化（スケールング）は、高速化・低消費電力化といった性能と経済性を同時に向上する強力な推進役として機能してきた。いわゆる Moore の法則は今日まで維持されている。

10年前と現在とで、微細化の見通しはどう変化しただろうか。最新版の ITRS ロードマップ2013年版に対して、10年前の2003を併記したのが図1である（FLASHについては独立したロードマップが初めて示された ITRS2005を参照している）。これによると、MPU/ASIC、DRAM については、概ね10年前の予想上にあると言えそうだが、FLASH についてはおよそ4年も前倒して微細化が進んでいる。

<リソグラフィ技術は予想外の展開>

ところが、この微細化の実現手段は、10年前に予想されていたものとは大きく異なっている。ITRS2003でリソグラフィ技術候補の中で最上位に挙げられていたのは、Half Pitch (hp) 90~65nm 世代では193nm (ArF エキシマレーザ) +RET、45nm 世代では157nm (F2 エキシマレーザ) +RET、32nm 世代から EUV、22nm 世代には EUV に加えて EPL であった。しかしこの10年間に渡り、先端リソの主役を担ってきたのは2003年版

では2番手以下の候補と見られていた ArF 液浸露光(超純水を利用する)なのである。この分野の予測が非常に難しくなってきたことを端的に現していると言えよう。実際、有力候補と目されながらも、この10年のうちに消えていった技術に、F2エキシマレーザや高屈折率の媒質を利用する液浸技術などがあつた。一方 ArF 液浸露光技術の利用がここまで延伸されてきたのは、多重露光やスペーサー・パターニングなどのマルチプル・パターニング技術に負っている。これらは既存の ArF 液浸露光と組み合わせながら、経済的に微細化を進める推進役であった。特に、微細化で先行している NAND FLASH では、スペーサーによるパターニングを2回繰り返す SAQP が既に投入されている。

<この先のリソグラフィ技術>

今後の半導体の開発が、従来の速度のままの微細化を継続した場合、最も微細なパターンは10年後には10nmを下回ることになる。この時代を担うリソグラフィ技術は何だろうか。

ArF 液浸露光は、スペーサーによるマルチプル・パターニングを3回繰り返す SAQP との組み合わせで、10nmを下回る hp を実現できることが示されている。10年後もリソグラフィの中で一定の役割を果たしていることだろう。更に夢のような話だが、4回の繰り返

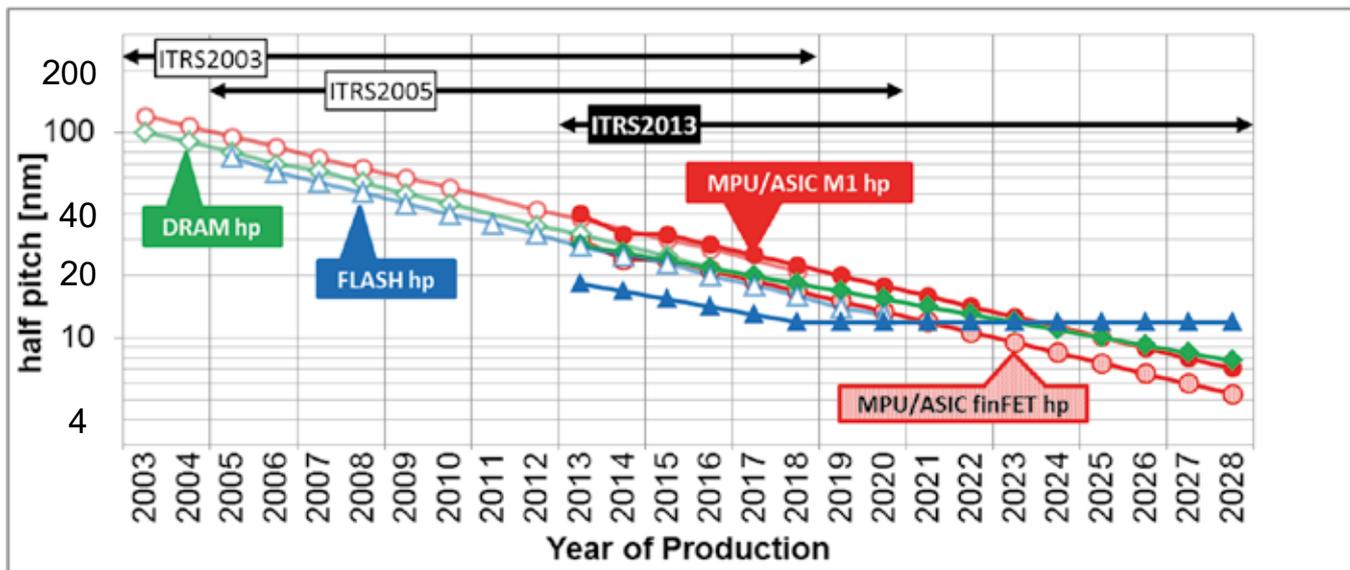


図1 半導体素子微細化のトレンド (ITRSより)

し技術 SAHP (Self Aligned Hexadecuple Patterning!?) も開発され、更なる微細化への道を拓いているかもしれない。

EUVL は、昨年来光源出力の向上が著しく、フィールドでの実績も着実に積み上げられている。しかし現在の解像度のままでは10年後の微細化には対応することはできず、NA の拡大、光源波長の更なる短波長化などの開発が必要であろう。マルチプル・パターニングとの組み合わせも有望である。

NIL (Nano Imprint Lithography) は、欠陥の密度が課題だったが、1～1.5年毎に1/10というペースで改善が進んでおり、数年以内のFLASHの生産への導入を目指している。

DSA (Directed Self Assembly) は、既存のパターニング技術で生成されたガイドをもとに、パターンのピッチを分割したり、形状精度を向上したりすることができる。10nmを下回るパターニングには、新たな材料開発が必要とされるが、コンタクト・ホール寸法・形状を改善する用途には、比較的早期に導入される可能性もある。

ML2 (Mask-less Lithography) は、EBを使用した露光方法だが、量産用の主力技術として導入するにはスループットに課題がある。しかしマスク不要という特性を活かして、少量の生産を行ったり、他のパターニング技術ではカッティング用に多数のマスクを要する Complementary Lithography においては、存在意義が認められるかもしれない。

以上、現在開発が進んでいるどの技術も、現時点では課題を抱えている。このまま微細化が進むとしても、複数の装置や技術が組み合わせられ、また用途に応じて使い分けられているのではないだろうか。

<微細化はどこまで>

この先の微細化はどこまで進むのか。近年、ITRSのロードマップ上にも微細化の限界点が示されるようになってきた。2011年版では NAND FLASH の限界は hp 8 nm と示されていたが、2013年版では hp 12nm を下限としている。各社からの3D-NANDの発表もあり、NAND FLASHの集積度の向上は水平方向の微細化よりも垂直方向の積層化に軸足を移しつつある。MPUについては引き続き微細化が続くロードマップが示されているが、2015年版に向けて見直す動きもあるようだ。

このように CMOS 素子の微細化の限界が迫るなか、Mooreの法則に従って微細化を追求し続ける“More Moore”技術のロードマップの他に、機能的多様化で付加価値を高める“More than Moore”技術の開発ロードマップを定めようという活動がITRSでも進められている。

製造装置も、More Moore=微細化路線から、More than Mooreにも対応した多様化が進んでゆくことになる。

ウェーハプロセス

<振り返り：ウェーハプロセスへの要求変化>

2005年の10年後未来予測“半導体が切り拓く未来技術”で既に、“アプリケーションが主役となり、技術開発も質的に変化”との予見の通り、大口径化と微細化一辺倒の技術指向が大きく変化してきている。

先行するロジックメーカーに於いては、設計レイアウトの変更、ウェーハプロセス及び露光技術に親和性の高いレイアウトが適用され、設計、生産(ウェーハプロセス)の融合が具現化されている。性能向上に於いては3次元トランジスタの実用化、3次元積層技術が初期量産に迫り着き、微細化に頼らない性能向上を実現してきた。450mmは未だ道半ばであるが、これら新たな技術指向は、多様化する半導体及び応用素子が大きく社会に浸透する肝の技術となってきた。

<今後10年、求められるウェーハプロセス>

今後も新構造・新材料を触媒とする技術革新は継続する。その革新推進役であるムーアの法則は、高速化・低消費電力化、高生産性という性能と経済性を両立させてきたが、Si原子間距離に最少寸法が近づく中、その周期は2年毎から、2～3年に緩やかになり、その継続には等価的微細化の実現という尺度の変更を伴い継続していくと考える。それは最少寸法からSRAM面積の縮小率で定義、3D-NANDに代表されるチップ内積層技術、及びHMC、HBMなどDRAM積層技術がその技術指向を示している。

既存メモリ(DRAM、NAND)ロードマップは、今後5年程度は見えているといえるが、各種新型メモリが2020年に向けて登場してくる。これらは全ての既存メモリを代替するものではなく、SCM(Storage Class Memory)、一部SRAMキャッシュ置き換えなど電子機器全体最適を図るものと考えられる。その実現には、今までの電荷蓄積によるキャパシタ構造より、新しい抵抗素子材料の導入が必須である。(表1)

ロジックデバイスは、アプリケーション用途により更に細分化されていくが、高速化の追求、低リーク特性すなわち低消費電力デバイス、双方を融合・積層した高機能化などに分かれる。その実現のためには、トランジスタ構造の3次元化、新規チャネル材料、低コスト3次元チップ積層技術が必要となる。(図2)

共通技術である露光技術に関して、詳細はリソグラフィ技術予測に譲るが、現在量産技術に使われている

Memory	SRAM	DRAM	NAND	FeRAM	PCM	ReRAM	MRAM
Type	Charge	Charge	Charge	Polarization	Phase	Filament / Bridge	Spin
Read Time	◎	△	×	△	△	○~△	○~△
Program Time	◎	△	×	△	△	○~△	○~△
Cell Size	130~180F ²	6F ²	4F ²	11F ²	4F ²	4~6F ²	6F ²
Typical Materials	---	ZrO, AlO	Poly-Si, MONOS	Pb(Zr,Ti)O ₃	GeSbTe	HfO, TaO ₂ /Ta ₂ O ₅ , GdO/Cu-Te	CoFeB/Mg O/CoFeB

表1

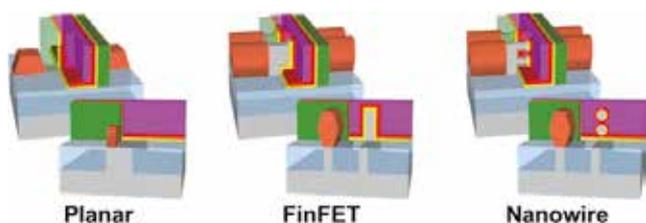


図2 新構造トランジスタへの挑戦

ダブルパターニングの一つ側壁転写プロセス、その延長技術（Pitch Quadrupling）では、微細化を露光機に頼るだけではなく、成膜・加工・洗浄など複数プロセスインテグレーションで実現している。個別プロセスでの性能・制御性を向上させ、また複数プロセスを跨って全体最適を進めることにより、2020年以降の微細化への対応を可能とする。今後もダブルもしくはマルチパターニング技術は継続使用されるが、相間合わせ精度の向上のために、自己整合リソ（DSA）やボトムアップリソ（選択成膜）の実現が必要になる。

メモリ・ロジック技術、露光技術を含め、大枠は10年前の未来予測にも綴られており、その実現が次の10年で成されていく。以下は、2005年に作成された予測の一部抜粋になる。

“Si系デバイスの製造は、基本的にはトップダウン方式に従いリソグラフィを中心とした超微細加工で、そのトレンドは2010年から2020年までは変わらないであろう。

一方、有機デバイス、超小型センサー、ナノメータデバイスなどの製造やこれらに必要な新機能性材料の創成には、ボトムアップ技術が積極的に使われるようになるだろう。原子操作技術や、分子やナノ粒子の自己集合、自己組織化を使って原子や分子を積み上げながらトランジスタや回路パターンを作るようになるかもしれない。”

<装置技術ロードマップの多角化>

この10年で微細化進展は露光技術一辺倒の方向から、

成膜・加工・洗浄を含めたマルチパターニングが重要となり、今後は、計算機リソ、SMO、DSAなど複数プロセス技術に跨る開発が必要になる。これはEUVL導入でも大きな変化なく、EUVL+DPなどにより微細化実現をしていく。この様にパターニング技術だけではなく、トランジスタ、メモリ、配線、実装技術それぞれにアプリケーションにより多種多様な技術要求があり、ロードマップの多角化は避けられない。（図3）

今後10年、更なる微細化、3次元構造化に重要なものは、原子レベルの制御、ALD(Atomic Layer Deposition)、ALE (Atomic Layer Etch)、SPD (Solid Phase Doping) などの新規技術であり、より高品質な薄膜成膜、精密加工が今後の半導体製造に不可欠になる。

ESH (Environment Safety Health) は、各国で規格化されているが、新材料としてIII-V族材料など装置・オペレーション安全性を確保した装置開発・装置製造が更に重要になってくる。環境に考慮した消費エネルギー低減では、生産性向上によるウェーハ1枚当たりの消費エネルギーを抑えるだけではなく、アイドリングストップ、ガス、薬液の循環・再利用技術が求められてくる。

450mmへの大口径化も多角化要素の一つであり、

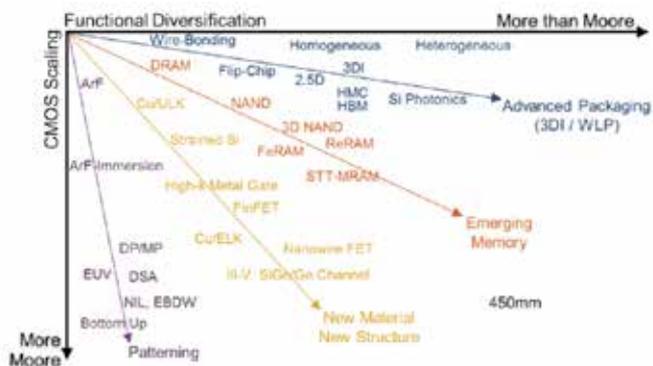


図3 装置ロードマップの多角化

2025年に向けて留意しておくべき大型開発案件である。

10年後以降の未来工場と製造装置

10年前、「半導体工場の装置は様々な機能拡張が施され、この中でも EES (Equipment Engineering System) への対応が完全に一般化し、これを後押しするのが、IT 技術の発展である」ということを予測していた。現実には EES は主要装置で一般化された位置付けとなっている。装置を制御する事象が判るパラメータはケースによっては時間分解能が ms オーダーで収集され、装置内もしくは工場内データサーバーへ汎用高速ネットワーク (ギガ bps 以上) にてストレージへ記録、これらを短時間に様々な解析ツールにてオンライン/オフラインで解析され、この結果が反映されることにより製品の歩留まりや装置の生産性改善、ダウンタイムの軽減などに活用されているのは事実である。これらについては工場の生産規模や品種、装置種別により異なる部分はあるにせよ、ほぼ予想通りになっていると考えられ、M2M (Machine to Machine) と言われてきた技術が発展してきている証拠である。また、この中でデータを収集するフィールドバスなどのネットワークやセンサー、制御プラットフォームなども進化してきている。

では10年後以降の工場や製造装置はどうなっていくだろうか。

まず、IoT と言われている IT 技術が進歩し一般化していくことに伴い、センサーの IoT 対応、インテリジェント化が加速する。これにより単なる測定値を出力するセンサーではなく、様々な解析を動的に行った結果も発信するコンポーネント化されたモノとなり装置に搭載される。加えて個々のパーツには RFID などによる個別の製造情報や使用情報が出荷時や稼働時に記録され、装置内で管理される事も当たり前となる。よって装置内の今までに無かった価値のある情報 (データ) は飛躍的に多くなる。この情報が現在より一桁以上高速でリアルタイムな装置内フィールドバスなどのネットワークや無線センサーネットワークを介し、装置コントローラで管理されると共に、工場のシステムでも収集されるようになると考えられる。これにより、装置コントローラにて装置内の状態を把握した異常検知や予測が高度化され、これまで以上に実現出来るようになることが予想される。これらの情報は工場のシステムにも収集されるため、自動的に部品交換のためのアクションが装置メーカーやコンポーネント、パーツメーカーへインターネット経由で行われるメンテナンスシステムも稼働するであろう。

一方、得られた価値のある情報 (データ) の増加によって装置のモデル化の精度が上がり、3D 化され制御

情報と連動した仮想環境でのシミュレーションによる稼働状態の可視化や解析も普通に行われるようになる。通信のセキュリティ技術も標準化が進み、現在は限られた範囲で行われている装置メーカーによるリモートメンテナンスも工場との接続が最新のセキュリティ技術で守られ、情報 (データ) がインターネット経由で提供されたり、装置へのアクセスが標準化された形で実現していると考えられる。実機レスでの調査、トラブルシューティングなども当たり前になっているだろう。

得られる情報 (データ) が増加し装置のモデル化の精度が上がる効果はこれに留まらない。装置の故障や経時変化などの予測が今まで以上に高精度に出来るようになり、メンテナンスシステムとの連携もなされるため、自動でパーツが準備されるなど究極の自動化が見えてくる状況となる。また製造時に使われているレシピという管理形体がパラメータ (温度や圧力値など) 指定ではなく、加工対象の出来栄えスペック (膜厚、線幅値など) を指定することで自動的に最適パラメータを算出し処理を行うようになってきているのではないだろうか。

また、IoT の進歩により先に述べた通信のワイヤレス化が進み、装置内の配線が一部のパワーラインを除いて省配線化され、様変わりしていることも想像される。

NEDO、JEITA においても CPS/IoT (サイバーフィジカルシステム) 時代に向けた検討、標準化を提案する活動を活発に行っており、半導体製造工場、装置においても多大な変化があるであろう。

<参考文献>

米国国家情報会議 (谷町真珠 訳) : 2030年世界はこう変わる アメリカ情報機関が分析した「17年後の未来」NTT 出版 : 2030年の情報通信技術-生活者の未来像

* 総務省 : 平成27年版情報通信白書

国土交通省 : 超小型モビリティ導入にむけたガイドライン
インテリジェンス化が加速する ICT の未来像に関する研究会 報告書2015

NEDO フォーラム : 「IoT 時代に向けた電子デバイス産業の動向と戦略」

NEDO ホームページ、<http://www.nedo.go.jp/>

JEITA ホームページ、<http://www.jeita.or.jp/>

<http://www.softbank.jp/robot/special/pepper/>

http://www.hitachihyeron.com/jp/pdf/2015/09/2015_09_00_view.pdf

http://www.tel.co.jp/news/2014/1001_001.htm

http://www.nikon.co.jp/ir/individual/growth_strategy/

http://www.jpma.or.jp/medicine/bio/pdf/bio_01.pdf

http://www.ihico.jp/ihico/all_news/2015/press/2015-8-12/