

次世代機械学習チップの勢いが加速

日本の視点

はじめに

半導体業界は今、活況である。とある大手半導体企業の経営者は確信をもって「シリコンサイクルは消えた」と言う。そう言わしめるほど、半導体市場は中長期的な成長トレンドにある。実際、2016～2017年の市場成長は半導体市場で20.6%^{*1}、SPE（半導体製造装置）市場では35.6%に及ぶ^{*2}。そして、この成長の牽引役の1つが、本編で取り上げられている機械学習（以下、ML:Machine Learning）/AIである。本稿では、「ML/AI×半導体」をテーマに、5つのKey Questionに沿って国内半導体業界での技術トレンドに触れつつ予見を述べていきたい。

1.ML/AI用半導体が進化するのはCloudかEnd Pointか?

ML/AIというと、デジタル/IoT技術により集められた多種多様のBig DataをCloudで集中的に解析する集中型コンピューティングモデルが大半になるという印象を持たれるかもしれないが、実際には、今後ML/AIに求められるコンピューティングパワーのうちCloudとEnd Pointとの比率は、半々ぐらいになると考えられる。

まずCloud側についてであるが、最大のML/AI事業機会として目されるHPC（High Performance Computing、スパコン等）、Fintech、インフラ監視（画像解析含む）、コールセンターなどの領域は、Cloud側にコンピューティングパワーが求められるモデルだ。例えば、GMOインターネットなどが参入する仮想通貨マイニングはFintechの先駆的な取り組みと言える。そこでは、7nmの最新鋭CPUを搭載したSoC開発が急がれており、ソフトウェアプログラムでロジックを更新可能にするFPGA（本編で紹介：XilinxとAlteraの2社が市場を独占）の適用により開発スピード・コストを極小化しつつ、機械学習で重要になる推論プロセスも実現する^{*3}。処理スピードを速めるため、並列処理のアクセラレータであるGPU（本編で紹介：NVIDIAとAMDの2社が市場を独占。1GPUあたり3,000-4,000コア^{*4}）を併用することで圧倒的な処理スピード早期化も狙う^{*5}。

マイニングマシンが消費する大量の電気をいかに省電力化できるかについても半導体技術革新に期待される。また、長時間連続稼働による熱の影響からSoCを含むボードが数か月ごとに消耗・リプレイスする必要が生じているため、抜本的な熱対策が必要だ。こうしたHPC/Fintech領域では、日本勢として唯一スパコン市場で生き残る富士通と理化学研究所が、ポスト「京」の一環での次世代チップ開発、更なる省電力設計、及び、耐熱性強化のための液浸冷却技術の研究を進めている^{*6}。

次にEndpoint側であるが、同様にML/AI事業機会として注目されるスマートデバイス（スマートフォン・ゲーム・AR/VR機器、等）、自動車、コミュニケーションロボット（旅行者用、等）、顔認証・虹彩認証・セキュリティ、半導体製造装置・医療研究装置などの領域は、Endpoint側の搭載が中心となる。集中型のCloudに対し、Endpointは分散型と言える。例えば、スマートフォンの年間出荷台数は15億台^{*7}、自動車は年間1億台^{*8}。更に、スマートフォンは平均3年間、自動車は5～7年間利用され続けることを想定すると、ML/AI搭載機器の市場の裾野は果てしなく広い。こうした領域においてML/AI用半導体として進化が求められるのは、主に対話型サービス（Cognitive）、自動運転、画像認識・認証の3つの分野に集約されるであろう。

CognitiveではApple、Google、AmazonといったICTプレイヤーが垂直統合型での半導体開発に取り組む中、日本勢は残念ながら後塵を拝している^{*9}。ただ、2020年の東京オリンピックに向けて、海外からのインバウンド顧客へのおもてなしサービスの一環で、多言語通訳機能やAR/VRを含む映像機能を持つコミュニケーションロボット等の開発・導入の

機会は広がる。外国人観光客のCX（カスタマーエクスペリエンス）をML/AI技術によりどこまで高められるサービスを開発できるか、期待が高まる。自動運転では、国内ではトヨタ自動車「Concept-愛i」の発表などで先行^{*10}し、ルネサスエレクトロニクスの車載SoC・制御マイコン^{*11}とNVIDIAのGPUを採用^{*12}、更なる技術開発を進めている。画像認識・認証では、ADAS（先進運転支援システム）向けのイメージセンシング・画像認識やセキュリティ用途での顔認証・虹彩認証において、ソニーセミコンダクターソリューションズ、東芝デバイス&ストレージが更なる技術開発を進めている。

2.ML/AIを実現する半導体として進化するのはロジック系のみか?

この問いに対する答えはもちろん「ノー」である。人間の機能に例えるとロジック系半導体は頭脳（なかでも思考力）だが、勉強であれスポーツであれ、パフォーマンスを高めるためには頭の回転だけ速くすれば良いというものではない。記憶力と記録・読出力を高めること、情報を正確に読み取る力を養うこと、効率的に体のエネルギーを伝達することと相まって思考力も活きる。本稿ではML/AI用半導体の定義をCPU/GPU等のロジック系に閉じず、ML/AIの能力をトータルで高めるために必要となるメモリ、センサ、パワー半導体も含めて進化の方向性を探る。

ロジック系では、ML/AI用搭載が本格化するにつれて更なる微細化と1チップ（SoC）化が進んでいくことは間違いないだろう。昨今、インテルの10nm CPUのリリース時期が何度も見直されてきているように^{*13}、次世代開発の技術的難易度が高まり、ムーアの法則がスローダウンし、開発期間長期化とコスト増大を招いていることは事実である。そのため、技術革新の方向性としても「More Moore（微細化の追求）からMore than Moore（多様化・機能統合）へ」という議論・実例も多数ある^{*14}。ただ、より高度なML/AIを機能させるためには、集積度向上、低消費電力化、高速動作化、低コスト化の4つをバランス良く進化させる微細化（More Moore）の追求が不可欠である。

シンギュラリティ（2045年にコンピュータの計算能力が全人類の脳力（Brain Power）を超えるとされる^{*15}）というML/AIのランドマーク的なゴール達成への期待もかかる。HPC/Fintechでは前述の通り富士通・理化学研究所がポスト「京」の一環で7nm CPUの開発を進めている^{*16}。インテル・クアルコムの独壇場となっているスマートデバイスでは10nm CPUの開発が遅延しているが、2018年2月時点ではインテルから一部サンプル出荷が始まっており、量産も近づいている^{*17}。車載では、車載半導体市場でNXPと首位争いをするルネサスエレクトロニクスが、自動運転時代に向けた28nmの車載マイコンを世界で初めて開発し、既にサンプル出荷を開始しており、2020年の量産開始見込みである^{*18}。

こうしたCPU/MPUコアの微細化追求と並行して、並行処理のアクセラレーション（GPU）、推論ロジックの実装（FPGA）はそれぞれML/AIには欠かせない技術である^{*19}。将来的には、プログラマブルなFPGAの性質を活かして、チップレベルで制御ロジックを成長させていけるML/AIモデルの実現を期待したい。

メモリでは、先ほどの「More MooreからMore than Mooreへ」のシフトが進んでいる。メモリの主要タイプであるDRAM^{*20}、SRAM、フラッシュ^{*21}のいずれも微細化の追求をいったん緩め、3次元実装（積層型に積み上げる方式）が現在の技術の主流となっている^{*22}。IoT/Big Dataによるデータ蓄積量の爆発的増加、ミッドレンジサーバーのHDDからフラッシュへの移行が始まったことなどにより、メモリ大手のSamsungと東芝メモリはともに拠点新設・ファブ増設を急いでいる^{*23*24}。

ML/AIへの活用に向けては、より大容量、早い読み書きスピード、低消費電力、耐熱性などが重要となる。その観点では、インテル・マイクロンが開発した3D XPointは東芝メモリなどが手掛ける3D NANDフラッシュの性能を理論上は上回るとされる*25。他にも、ML/AIチップのメモリ機能としての適用が期待されるOxRAM(耐熱性にも優れるため車載用としても期待が高い)、SRAMの代替として見込まれるMRAM、DRAM代替として見込まれるSTT-MRAM/FeRAMなど、様々な次世代メモリが開発されている*26。3D NANDの好調*27で存在感を増す東芝メモリが技術開発中である。

センサは種類が多いため、ここではCMOSイメージセンサに絞って話を進める。この領域では、事実をきれいに映すことに加え、人間の目には見えない情報も取得することで、自動運転や認証・セキュリティといった領域での活用が期待される。例えば、夜間の風景を昼間と同じくクリアに捉える、数百メートル先に人がいることを察知するなどといった機能は、自動運転を実現するために重要なテクノロジーとなる。また、顔認証・虹彩認証や画像解析など、認証・セキュリティ×ML/AIでの適用機会も広がる。IRDS(国際デバイスおよびシステムロードマップ)によると、CMOSイメージセンサの微細化は2024年には終息するとされているため*28、より多様な実装方式や機能統合などを組み合わせた性能向上が試みられていくと考えられる。この領域では、裏面照射(光の入射の邪魔になっていた配線と基板の位置を反転、シリコン基板の裏側から光を照射することで高感度を実現)、積層センサ(裏面照射型CMOSとロジック回路との組み合わせ型)などの工夫により世界シェアトップを走るソニーセミコンダクターソリューションズが更なる技術革新中だ*29*30。

最後にパワー半導体についてであるが、自動運転・EV化といった車載市場のトレンドにより、今後10年ほどでほぼ市場が倍増するほどに急拡大するとみられている。現状のパワー半導体は99%がSi(シリコン)ベースの製品が主体だが、200°C以上での耐熱性にも優れ、電力変換の高速スイッチングが可能なSiC(炭化ケイ素)、GaN(窒化ガリウム)、Ga₂O₃(酸化ガリウム)といった素材の半導体活用が広がっていくと考えられる*31。特に、大量の電力を必要とするML/AI時代においては、こうした新素材の有効性が増すであろう。国内では、ローム、富士電機、三菱電機の各社が既に製品化を進めている*32。

3. チップレベルでのセキュリティをいかに確保するか?

ここまではML/AIによる半導体の進化(攻め)について取り上げてきたが、一方で、ML/AI搭載機器が進化すればするほど、その挙動をコントロールするSoC及び、事実データを正しく収集するセンサなどのチップレベルでのセキュリティ(守り)を担保できることが絶対条件になる。例えば、自動運転車両のSoCがハッキングされてしまったら、自動車が兵器と化してしまうであろう。また、人間がいることをイメージセンサが察知していても、そのデータが書き換えられてしまったら、人命にかかわる事故につながるだろう。前述した1チップ化(SoC化)のトレンドも、セキュリティリスクを増幅させているとも言える。

こうしたチップレベルでのセキュリティ担保のための対策は、暗号化技術を中心に各社各様に進められている*33。ただ、ML/AIがハッキングされた場合のクリティカルティを想定すると、いくら高度な暗号化技術を開発したところで、それが破られた後のリスクは残る。こうした観点から、ここでは、ドイツのInfineon Technologiesの「Integrity Guard」という技術を例示したい。このIntegrity Guardは、外部刺激から遺伝情報を守るDNAの2重らせん構造から学んだ技術とのことで、チップの内部に2つ

著者



貴名 聡
Nukina, Satoshi

デロイト トーマツ コンサルティング
合同会社
執行役員

グローバルコンサルティングファームを経て現職。電機製品業界、半導体/電子部品業界ともに10年ずつ経験。デロイトでは電子部品業界(半導体含む)の責任者、及び、IoT関連サービス責任者(Global IoT Community Japan Lead)を兼任。電子デバイス業界向けに事業戦略立案、開発戦略、PMI、BPR/IT導入、アウトソーシングなど幅広い経験を持つ。

のプロセッサコアを搭載、同じデータを同じアルゴリズムで処理できる構造になっている。そして、常にお互いの動作を比較・監視しながら処理を進め、仮に1つのコアがハッカーの攻撃を受けた場合には、もう1つのコアが異常を察知、直ちに阻止・機能停止を実行するという仕組みである*34。この事例からの学びは、ML/AI時代においては、単に個々のチップのファームウェアレベルでの暗号化技術の高度化にとどまらず、各チップの挙動をシステム全体にわたって監視し異常時には停止処置を含めた制御を可能とする機能が必要とされるという点である。

また、こうしたセキュリティ対策の可能性も踏まえると、半導体事業のビジネスモデルそのものも変わっていくであろう。例えば、前述の監視・制御システムによる各半導体チップの稼働データに基づき正しく稼働したコンピューティングパワー分を課金・請求するなどの新たなビジネスモデルも含め、チップレベルでのセキュリティを担保するための技術開発・検討の余地は大きい。

4. ML/AI用半導体の成長により進化するプロセスは?

前述の通り、今後高度なML/AIを実現するための半導体技術開発が進むことは間違いないが、その製造プロセスの中長期的な進化のあり方を見通すことはなかなか難しい。ここでは、前述の半導体の進化の方向性から現在認識されている進化トレンドを記す。

まず、先端プロセス開発により更なる微細化 (More Moore) を追求していく必要があるロジック系 (ML/AIの頭脳にあたる) では、露光工程の更なる進化が求められる。ここでは、7nmなどのプロセス実現に向け、既存のArF (フッ化アルゴン) 液浸露光方式からEUV (Extreme Ultra Violet, 極端紫外線) 方式への移行が進んでいる。インテル、サムスン、TSMC、グローバルファウンドリーズの4社が採用を検討中で、この1~2年で導入される見込みだ*35。

ただ、EUV方式が進むと、現行のArF液浸露光方式で発生する多重パターンニングや成膜・エッチングの繰り返しプロセスが不要となる*36ため、これらの領域の設備投資は控えられる構図になり、Applied Materials、Lam Research、東京エレクトロンなどの事業に影響を及ぼす可能性がある。露光装置ではかつて世界1位・2位であったニコン・キヤノンがシェアを大きく落とし、ASMLの独壇場となっている*37。ただ、キヤノンはナノインプリント・リソグラフィを手掛けるMolecular Imprintsを買収*38、東芝メモリのNAND量産ラインに次世代装置を導入するなど、独自路線で先端プロセス向け露光装置事業を追求している*39。当市場での日系プレイヤーの復活を願い、見守っていきたい。

一方、3次元実装が主流となっているメモリ領域では、露光工程の付加価値はむしろ下がり (最先端プロセスである必要はないため)、成膜とエッチングのプロセスが成長している。例えば、東芝メモリのBiCSは64層を実現しているが、ウエハから垂直方向に半導体素子を積み上げるプロセスが求められる*40。これに伴い、成膜を何重にもわたって正確に積み重ねる技術、積み上げられた膜が搬送中にズレないようにするための制御、仮にズレが生じた場合にも補正しながら削るエッチング技術などが、成膜・搬送・エッチングそれぞれのプロセスで進化していると聞く。成膜では東京エレクトロン、エッチングでは東京エレクトロン、SCREEN、日立ハイテクノロジーズ*41、搬送では川崎重工、安川電機、平田機工、日本電産サンキョー、ローツェなど、日系メーカーのプレゼンスが高い*42。

また、1チップ化 (SoC化)、3次元化、積層化 (例: CMOSイメージセンサとロジックICの貼り合わせ等)、素材の多様化など、チップの構造が複雑化・多様化するトレンドから、検査プロセスも進化している。特に、ML/

AI搭載チップの検査においては、更に複雑で徹底したテストが求められることが想定される。試験・検査装置市場においては、測長SEMでは日立ハイテクノロジーズ*43が、ウエハプローバ (ウエハの電気的検査装置) では東京精密と東京エレクトロン*44、テスタ (ロジック・メモリ・ミックスシグナル) とハンドラーではアドバンテスト*45*46などが、最先端技術開発を進めている。

5. ML/AI普及時代のコンピューティングの在り方とは?

シンギュラリティが起こるとされる2045年、ML/AIの活用がいたるところで広がり、人とコンピュータとの関わり方も大きく変わっていることであろう。例えば、こんな姿はどうだろうか。いつでもどこでも、必要なコンピューティングパワーはオンデマンドで提供される。そのため、コンピューティングパワーのもととなる半導体素子は壁や道路などの至る場所に埋め込まれており、リクエストすれば必要なコンピューティングサービスを得られる。

それはまるで、スターウォーズでジェダイの騎士が万物からフォースを借りて力に変える姿に似ているため、このモデルを仮に「フォースコンピューティング」と名付けることにしよう。そこでは、情報のインプット/アウトプットのためのインターフェースは、メガネでも壁面でも未来のスマートデバイスでも、自由に選べる。自動車、電車、ドローンなど、モビリティデバイスは全てAIによる自動運転・運航、まるで生き物のように判断しながらしなやかに活動している。朝晩のラッシュアワーやイベント開催などによる人の増減を、その日の天候や諸々の状況からML/AIが正確に予測し、運航計画・配車計画とその実行を管理している。日の光、雲の流れと影、そよぐ風、木の葉の揺れ、微妙な湿度の変化などが時々刻々と読み取られ、ロケーションごとの天気予報が常時最新化されている。

シンギュラリティ時代に世の中がフォースコンピューティングに向かうとすれば、コンピューティングパワーは大きく4層に分かれて進化していくと考えられる。1つ目は神羅万象の情報から判断・最適化・管理を行う中央脳神経系、2つ目はモビリティデバイスを生き物のように動かすモビリティ脳神経系、3つ目は末端にちりばめられた感覚神経・運動系、そして最後に、フォースコンピューティング全体の安全性・道徳性・公平性を司る「心」の系統だ。前述のセキュリティ機能はこの「心」に含まれていくだろう。ML/AIの発展的活用のためには、この「心」をいかに実現できるか?にかかっていると考える。ここでは多くを記さないが、ML/AI時代の半導体の活躍の場の1つとなっていくことを期待したい。

最後に

産業のコメと呼ばれ、様々な用途に活用されてきた半導体にとって、ML/AIはその集大成とも言える活躍の場である。一方で、ML/AIが求める更なるハイパフォーマンスの実現のためには、先端半導体開発の技術的な壁により、量子コンピューティングへとその役割をバトンタッチしていくこともあり得るであろう。半導体によってML/AI実現が可能となり、そのML/AIの要求レベルに応えられず次の技術に座を明け渡す…。そう考えると何とも皮肉である。更なる技術革新によってML/AI時代のコンピューティングにおいても主役であり続けてほしい。筆者は陰ながら、半導体にエールを送り続けている。

- *1 2017年の半導体市場、4000億ドル超で過去最高か、EE Times Japan, 2017/12/7: <http://eetimes.jp/ee/articles/1712/07/news077.html>
- *2 世界半導体製造装置の年末市場予測を発表2017年の半導体製造装置販売額は559億ドルで過去最高を更新、首位は韓国市場、SEMI, 2017/12/12: <http://www.semi.org/jp/node/80141>
- *3 世界初7nm半導体が武器に、ビットコイン採掘事業の競争力、日経コンピュータ, 2017/10/19: <http://tech.nikkeibp.co.jp/dm/atcl/mag/15/398081/101100106/>
- *4 ディープラーニングに必須のGPUって何なの? NVIDIAでいろいろ聞いてきた、Ledge.AI, 2016/8/30: https://ledge.ai/vidia_gpu/
- *5 AMDがGPUマーケットでのシェアを拡大、VR Inside, 2017/6/26: <https://vrinside.jp/news/amd-is-expanding-in-gpu-market/>
- *6 富士通のHPCの取り組み、富士通株式会社, 2018/2/16: https://www.pccluster.org/ja/event/2018/02/180215_pccWS_fujino.pdf
- *7 17年の世界スマホ出荷、初の減少 米IDC調べ買い替えサイクル長期化日本経済新聞, 2018/2/2: <https://www.nikkei.com/article/DGXMZO26460710S8A200C1EAF000/>
- *8 2016年の世界全体の四輪車販売台数は9,385万6千台、一般社団法人日本自動車工業会: <http://www.jama.or.jp/world/world/index.html>
- *9 Wintelのくびきは消失、独自チップ開発を阻む要因はもはやない、日経クロステック, 2018/3/14: <http://tech.nikkeibp.co.jp/atcl/nxt/column/18/00065/00018/>
- *10 Concept-愛i, トヨタ自動車: http://www.toyota.co.jp/jpn/tech/smart_mobility_society/concept-i/
- *11 ルネサスは、トヨタ、デンソーと自動運転車の早期普及を強力に推進 へトヨタが2020年に実用化を目指す自動運転車に、ルネサスのR-CarSoCとRH850マイコンが採用、ルネサス エレクトロニクス株式会社, 2017/10/31: <https://www.renesas.com/ja-jp/about/press-center/news/2017/news20171031c.html>
- *12 トヨタが頼った謎のAI半導体メーカー日経ビジネス, 2017/5/22: <http://business.nikkeibp.co.jp/atcl/report/17/ai/051700001/?P=1>
- *13 ムアの法則は揺るがない、Intelが公表した10nmのプロセス技術、PC Watch, 2017/4/14: <https://pc.watch.impress.co.jp/docs/column/semicon/1054832.html>
- *14 知っておきたいキーワード More Than Moor, 「映像情報メディア学会誌 Vol.70, No.2 (2016)」: https://www.jstage.jst.go.jp/article/itej/70/3/70_324/_pdf
- *15 “The Singularity Is Near: When Humans Transcend Biology”, Ray Kurzweil, 2006
- *16 次世代スパコンポスト京のARMプロセッサ、TSMCが7nmで受注、EMSOne, 2016/8/23: <http://www.emsodm.com/html/2016/08/23/1471920962680.html>
- *17 “Intel @ 2018 CES: Day 1 Summary”, Intel, 2018/01/09: <https://newsroom.intel.com/news/intel-2018-ces-day-1-summary/>
- *18 ルネサスとTSMCが次世代エコカー、自動運転時代を牽引する28nmマイコンの開発で協業、ルネサス エレクトロニクス, 2016/9/1: <https://www.renesas.com/ja-jp/about/press-center/news/2016/news20160901.html>
- *19 Ibid.
- *20 超高速DRAM技術HBMの基礎、EE Times Japan, 2016/3/25: <http://eetimes.jp/ee/articles/1603/25/news029.html>
- *21 アナリスト・機関投資家向け四日市工場見学, 株式会社 東芝 ストレージ&デバイスソリューション, 2016/12/07: https://www.toshiba.co.jp/about/ir/jp/pr/pdf/opr20161207_3.pdf
- *22 2017年第3四半期のNAND市場はスマホ/サーバの需要増で前四半期比14.3%、マイナビニュース, 2017/11/28: <https://news.mynavi.jp/article/20171128-548704/>
- *23 サムスン西安工場の弱点をつけ! 東芝メモリ、3Dメモリーの増産戦略、ニュースイッチ, 2018/3/21: <https://news.switch.jp/p/12361>
- *24 サムスン、西安NANDフラッシュ工場18年3月末着工へ、EMS One, 2018/3/16: <http://emsodm.com/gotonewsDetail.do?method=gotonewsDetail&id=05728212621a668801622c993142001e>
- *25 いまさら聞けない次世代メモリ技術3D XPointとは、TechTarget ジャパン, 2017/8/24: <http://techartarget.itmedia.co.jp/tt/news/1708/24/news06.html>
- *26 次世代メモリの本命は何なのか?, マイナビニュース, 2017/7/6: <https://news.mynavi.jp/article/imec14nm-4/>
- *27 株主通信, 東芝, 2017/11/9: <http://www.toshiba.co.jp/about/ir/jp/library/or/or2017/wi/or2017wi.pdf>
- *28 CMOS微細化は2024年までに終息する見込み、EE Times Japan, 2017/3/27: <http://eetimes.jp/ee/articles/1703/27/news079.html>
- *29 ソニー復活を支えるイメージセンサー、スマホ依存に課題も、ロイター, 2017/12/20: <https://jp.reuters.com/article/sony-image-sensor-id/1PKBN1EE0QE>
- *30 第一線で活躍中のエンジニアが明かす“ソニー イメージセンサーの強み”, EE Times Japan, 2017/11/13: <http://eetimes.jp/ee/articles/1711/01/news006.html>
- *31 SiC/GaNパワー半導体に加えて長期的には酸化ガリウム系にも注目 次世代パワー半導体の世界市場を調査、富士経済, 2017/3/21: http://www.group.fuji-keizai.co.jp/press/pdf/170321_17026.pdf
- *32 各社ウェブサイトより
- *33 “Security of Things (モノのセキュリティ)の時代 第二回 IoTをセキュアにする、あの手この手”, テレスコープマガジン, 2016/3/1: http://www.tel.co.jp/museum/magazine/communication/160229_report02_02/02.html
- *34 Ibid.
- *35 EUVは今後2-3年以内に4社が生産適用計画、マイナビニュース, 2017/4/4: <https://news.mynavi.jp/article/20170404-a266/>
- *36 Ibid.
- *37 Ibid.
- *38 キヤノンによるモレキュラーインプリント社の完全子会社化について、キヤノン株式会社, 2014/2/14: <http://global.canon/ja/news/2014/p2014feb14j.html>
- *39 東芝メモリら4社連合、ナノインプリントでNANDを19年にも量産へ、日経クロステック, 2017/4/11: <http://tech.nikkeibp.co.jp/dm/atcl/mag/15/320925/040600148/>
- *40 アナリスト・機関投資家向け四日市工場見学, 東芝ストレージ&デバイスソリューション, 2016/12/7: https://www.toshiba.co.jp/about/ir/jp/pr/pdf/opr20161207_3.pdf
- *41 Ibid.
- *42 「2017 ワールドワイドロボット市場の現状と将来展望」, 富士経済, 2017
- *43 Technavio, 「GLOBAL SCANNING ELECTRON MICROSCOPE MARKET 2017-2021」
- *44 Technavio, 「GLOBAL SEMICONDUCTOR CAPITAL EQUIPMENT MARKET 2017-2021」
- *45 Technavio, 「GLOBAL SEMICONDUCTOR TEST SYSTEMS MARKET 2017-2021」
- *46 Technavio, 「GLOBAL SEMICONDUCTOR CHIP HANDLER MARKET 2016-2020」