

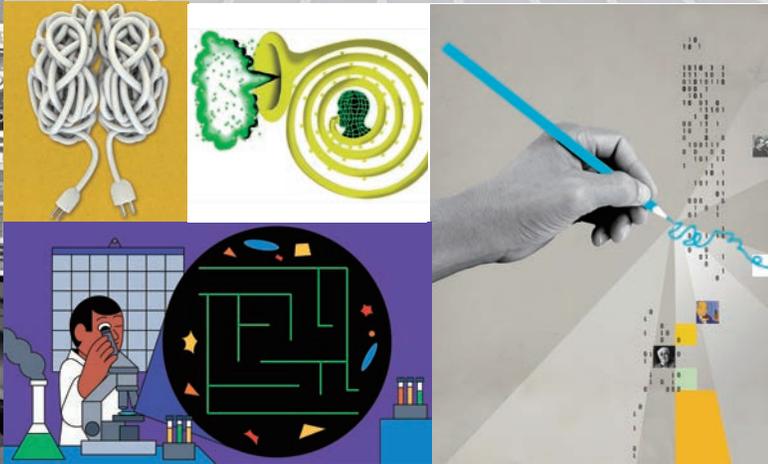
# MIT Technology Review

Published by KADOKAWA / ASCII



## Future of computing

「ポスト・ムーア」のコンピューター



# CONTENTS

- 001 コンピューティングはどこに向かうのか？  
米国史から考える未来
- 014 グーグル最新 AI スマホに見る、  
コンピューター「再発明」の方向性
- 019 CG は世界をどう変えたのか  
ピクサー共同創業者の考え
- 030 スパコンで作った  
「本物の楽器の音」が開いた音楽の新境地
- 034 最新スパコンで変わる天気予報、  
ハリケーンの進路や強さも分かる
- 039 「脳」とコンピューターは似ている？  
違う？ 専門家に見解を聞いた
- 046 「細胞超越性」への一歩か？ 迷路を解く、  
大腸菌の分散コンピューティング
- 054 DNA、スピントロニクス……  
ムーアの法則後のコンピューターの未来
- 060 「ムーアの法則」救う世界唯一の EUV 装置企業  
ASML の苦難と挑戦

「集積回路上のトランジスタ数は2年ごとに2倍に増え続ける」という、経験則に基づく「ムーアの法則」は、ある種の業界目標として50年以上にわたって半導体産業の成長を牽引してきた。コンピューターの能力が向上し、安価になるにつれて、コンピューターは職場や家庭に広く普及し、自動車からキッチン家電に至るまで、あらゆる機械のデジタル化が進んだ。だが、そのムーアの法則の限界が囁かれる今、コンピューターの未来はどこに向かっていくのだろうか？ MITテクノロジーレビューから、「ポスト・ムーア」時代を予測する記事を集めた。



# コンピューティングはどこに向かうのか？ 米国史から考える未来

by Margaret O'Mara

コンピューティングが今後、どこに向かうのかを予測するには、テクノロジーの歴史を振り返るのが役に立つかもしれない。

テクノロジーの進歩には常に人間が関与しており、コンピューティングの歴史は米国史のミニチュア版なのだ。

コンピューティングの未来がわずかでも過去と似た道をたどるとすれば、その道を左右するのは、コンピューティングそのものとはほぼ無関係の事柄だろう。

テクノロジーは何もないところから降って湧くわけではない。テクノロジーの起源は、時間、場所、機会にある。島のように孤立した研究所など存在しない。機械の能力と制約を決定するのは、物理化学の法則だけではない。機械のテクノロジーを支援する者、テクノロジーを構築する者、テクノロジーが成長する場所にもよる。

コンピューティングを取り上げた一般書では、この分野の奇才や天才に焦点を当てて、独自の方法で運営される型破りな世界を描写するのが長年

の通例になっている。シリコンバレーの推進者や支援者は、ガレージ・スタートアップや向こう見ずな資本家が活躍するイノベーションの地という神話を不朽のものにした。だが、現実は異なる。コンピューティングの歴史は、近代史、特に米国史のミニチュア版なのだ。

第二次世界大戦中に米国が核兵器などの武器の開発を空前の勢いで推進したことから、科学とテクノロジーに対する公的支出が急増した。その資金を利用した取り組みは、一世代のテクノロジストを養成し、1946年に完成した世界初の完全デジタルコンピューター「ENIAC（エニアック）」をはじめとする複数のコンピューティング・プロジェクトを発展させた。この資金の流れは最終的

に、多くが永続的なものとなり、戦前には想像もつかなかった規模の基礎研究や応用研究の資金源となった。

冷戦の戦略的優先事項となったことから、鉄のカーテンの両側でトランジスターを利用したテクノロジーの開発が急ピッチで進められた。科学の進歩に対して楽観的な時代のさなかに核の優位性を高めるための熾烈な競争が繰り広げられ、政府はコンピューティングの最大の研究スポンサーかつ最大の単一の顧客となった。単科大学も総合大学も工学者や科学者を大量に輩出した。電子データ処理は、米国の「組織人間 (Organization man)」の時代と、パンチカードによって構築され、分類された国家を特徴付けた。

特に、1957年10月にソ連がスプートニク衛星を打ち上げて米国を出し抜いた後には、宇宙開発競争によって北カリフォルニアののどかな農業地帯でシリコン半導体産業が急速に発展し、最終的にテック起業家の中心地は東海岸から西海岸へ移動した。白いワイシャツに細いネクタイを締めた細身で背の高いエンジニアたちが、米国人宇宙

飛行士を月に送った巨大な機械を、小型の電子機械に変えたのだ（あまり知られていないが、アポロ計画にはもちろん重要な役割を果たした女性もいる）。

ショックレー・セミコンダクター (Shockley Semiconductor) で上司だったウィリアム・ショックレー (トランジスターの発明者の一人) に反旗を翻し、同僚と共に新しい会社を興した半導体の先駆者、ゴードン・ムーアは、1965年、集積回路のトランジスターの数は毎年2倍に増えるものの、コストはほぼ変わらないだろうと予測した。この「ムーアの法則」は的中した。コンピューティング能力が向上し、安くなるにつれて、車からコーヒーメーカーに至るほぼすべてのものの内部機構が機械からデジタルに置き換わった。

戦後の米国の空前の繁栄の受益者でありながら、米国の戦争に反対し、米国の文化に苛立ちを覚えていた新世代のコンピューティング・イノベーターたちがシリコンバレーに押し寄せた。彼らは髪を長く伸ばし、シャツをズボンから出して歩いた。メインフレーム・コンピューターは体制

側の道具と見なされ、宇宙にロケットを飛ばすことよりも地上で偉業を成し遂げることのほうが重視された。小さいことが美しいとされた。

笑みを浮かべた若者が自作のデスクトップ端末の上にかがみ込み、ガレージでマザーボードを組み立てた。スティーブ・ジョブズという新たに大富豪の仲間入りを果たした人物が、パーソナルコンピュータは知性の自転車のようなものだと説明した。周囲に漂わせるカウンターカルチャーの雰囲気とは裏腹に、彼らは情け容赦なく商売敵と戦う経営者でもあった。政府の投資が減少し、民間の富が増大した。

米国防総省の高等研究計画局（ARPA）が資金を提供して構築した「アーパネット（ARPANET）」は、商用インターネットになった。ダイヤルアップ・モデムのピーガー音により、何百万台ものホームコンピュータがワールド・ワイド・ウェブ（WWW：World Wide Web）に接続されるようになり、以前は政府の資金援助を受けた研究者だけがアクセスできた壁に囲まれたネットワークが、通信やビジネスのための壮大な新しいプラッ

トフォームとなった。この奇妙で刺激的な世界を実現したのが、ネットスケープ、イーベイ、アマゾン・ドット・コム、ヤフーなどの奇妙な名前を持つ非常に若い会社だった。

2000年の節目の前には、大統領が「大きな政府の時代は終わった。未来はインターネット上に広がる広大な世界にある」と宣言した。ウォール街はテック企業の株に殺到したが、間もなくそれをやめた。数カ月の間に巨万の富が築かれ、失われた。バブルが崩壊した後には、新たな巨人たちが出現した。コンピュータは小さくなり、ポケットにスマホが入り、キッチンに音声アシスタントが置かれるようになった。デバイスの数は増加し、それらが生成するデータは巨大なデータバンクや、増大するクラウドのサーバー・ファームに格納された。

海のように膨大なデータを与えられ、ほとんど規制に束縛されることもなく、コンピュータはどんどん賢くなった。自律自動車が市街地を走り回り、ヒューマノイドロボットが研究室から研究室へ飛び回った。アルゴリズムがソーシャルメ

ディアのフィードを調整したり、顧客とギグワーカーのマッチングをしたりした。データとコンピューティング能力の爆発的な増大に後押しされて、人工知能（AI）が「先の先を行くもの（new new thing）」になった。シリコンバレーは、もはやカリフォルニア州内の単なる地名ではなく、グローバル産業の代名詞となっていた。テック業界の富と力は、米国を本拠地とする5社の企業に、かつてないほど密に集中し、合計時価総額は日本のGDPを上回った。

それが進歩と富の創造がたどった軌跡だった。それを必然的な結果として、羨望の対象と考える人もいた。そして2年前、再興したナショナリズムと経済を破壊する新型コロナウイルス感染症のパンデミックが始まった。サプライチェーンは混乱に陥り、人と資本の移動は制限され、世界の秩序が再編成された。スマホが路上で起こった殺害事件と米国連邦議会で発生した暴動を記録した。AIを搭載したドローンが上空から敵を探査し、地上の敵に戦争を仕掛けた。テック企業の大御所たちは、議会の委員会で厳しい表情を浮かべて証言し

たが、最近になって疑念を抱くようになった議員たちの耳に彼らの主張は空々しく響いた。

人間とコンピューティングとの関係は突然変化してしまった。

この70年で科学と工学は驚異的なブレークスルーを遂げた。その変化の速さと規模を知ったら、20世紀半ばに生きた祖先たちは驚嘆しただろう。しかし、全員のデスクにネットワーク接続コンピューターが置かれることで社会に有益な影響がもたらされるとする技術楽観主義的（テクノ・optimism）な確信は、悲劇的と言えるほど見通しが甘かったことがすでに判明している。最近の情報化時代は、啓発を促進するよりも、不和を煽動すること、社会格差や経済格差をなくすどころかむしろ悪化させている。

テクノロジー産業は、コンピューティングの長足の進歩によって生みだされ、富を獲得した。しかし、人類にとって最も深刻な健康面の課題や気候変動の問題に対処できるほど力強く、実用的な未来の選択肢を提示できていない。シリコンバレーのリーダーたちは、スペースコロニーを約束

すると同時に海面下に巨大な本社を建設し、未来はメタバースやブロックチェーン、国家全体のエネルギー需要を上回るエネルギーを消費する暗号通貨にあると主張している。

情報と混乱の海の真っ只中であって、コンピューティングの未来はより不透明になり、未来像を描くことはより困難になっていると感じられる。かといって、予測が役に立たないわけでもないし、テクノロジーを構築し、使用する人々はコンピューティングが次に行くべき場所をまったくコントロールできないというわけでもない。逆に、個人や集団の行動が社会的結果や政治的結果を変えた例は歴史上枚挙にいとまがない。ただし、政治、市場、文化といった現実の課題を克服するテクノロジーの力には限界がある。

コンピューティングの未来を理解するには、機械の先にあるものを見る必要がある。

### 1. 多様性の欠如

まず、コンピューティングの未来を構築する役

割を担うのは誰かに注目しよう。

テック業界は、技術的なノウハウと創造的な閃きがあれば誰でも出世できる実力主義の社会だと長年にわたって自画自賛してきた。しかし、近年、特に業界のトップ階層に根強く存在している人種やジェンダーの著しい偏りは、この主張が虚構だったことを示している。テック企業の経営幹部や上級技術職を務める男性の数は、同じ職位に就いている女性の数よりいまだに圧倒的に多い。ベンチャーキャピタル投資家やベンチャーキャピタルの支援を受けている起業家は、相変わらず大半が白人男性だ。性別を問わず、黒人とラテン系のテクノロジストの数は、恥ずべきほど少ない。

現代のコンピューティング・イノベーションの多くはシリコンバレーが発祥の地だ。過去の歴史を振り返ると、テック業界の実力主義的な考え方がどこから来ているのか、多様性の問題の解決がなぜ難しいのかが理解しやすくなる。

かつてのシリコンバレーは実際に、家庭が裕福でない人やコネを持っていない人でも出世でき、運が良ければ財産を築ける場所だった。

1950年代から1960年代のシリコンバレーの宇宙開発時代に活躍した、細身で背の高いエンジニアたちは、中流階級育ちの中部地域出身男性であることが多かった。そうした人々は、第二次世界大戦が終結した後の豊かだった四半世紀の間は、彼らのような白人男性向けに用意された、社会階層を上っていける特殊なエスカレーターに乗ることができた。

多くの人々が復員軍人援護法を利用して単科大学に行き、成績優秀者に与えられる奨学金を得てスタンフォード大学やマサチューセッツ工科大学(MIT)に入学したり、最小限の授業料を支払ってカリフォルニア大学バークレー校のような州立大学に通ったりできた。国防契約がエレクトロニクス産業の成長を後押ししたため、卒業後のエンジニアリングの仕事はよりどりみどりだった。ほとんどのエンジニアは妻帯していて、専業主婦の妻の無給労働に支えられた夫は、新製品の開発、新会社の設立、新市場の開拓に存分にエネルギーを注ぐことができた。郊外のインフラに対する公共投資があったため、生活費は妥当な金額に抑え

られ、通勤は楽で、地元の学校も文句なしの素晴らしさだった。法律と市場における差別によって、これらの郊外では一貫して人口のほぼすべてを白人が占めていた。

しかし、ここ半世紀の間の政治的変化や市場の再編によって、社会的階層を上っていけるエスカレーターの速度は大幅に減速した。ちょうどその頃、女性や人種的マイノリティはようやくエスカレーターに乗る機会を得た。2000年代初頭までに、テック製品の開発者や出資者の間に同質性が確立されたことから、一定の思い込みが定着した。その思い込みとは、女性は科学に向いていないこと、テック系の人材は常にパーカーを着て面接に来て、卒業したかどうかに関係なく、エリート大学に通っていたことだ。この思い込みがあったため、解決すべき問題、構築すべきテクノロジー、販売すべき製品について考えることがおろそかになった。

多くのテクノロジーが、高学歴、西海岸、そして白人、男性、若者に不均衡に偏った狭い範囲の属性を持つ人々によって構築された。そのこと

は、産業と製品が成長し、グローバル化するにつれて、特に問題となっている。例えば、無人乗用車に対し、走行する道路や都市に十分な注意を払うことなく多額の投資をする事態を招いた。データに含まれる人種的バイアスに十分な注意を払うことなく、ビッグデータの活用を推進する動きにもつながった。国内外で政治的分断や暴力を助長するソーシャルメディア・プラットフォームも生み出した。その結果、広範な研究分野や潜在的に大きい市場機会が顧みられることなく放置されている。

コンピューティングにおける多様性の欠如は常に問題だったが、それが公の場の会話で話題になったり、企業改革の対象になったりするようになったのはここ数年のことだ。これは明るい兆しだ。シリコンバレーに蓄積された巨万の富はまた、女性や人種的マイノリティを含む新世代の投資家も生み出した。そうした人々は、自分たちと外見の似た人が経営する企業を時間と手間をかけて選んで資金を投じている。

だが、変化の速度はひどくゆっくりしている。

市場は、それ自身に内在する不均衡には対処しないだろう。

より多様性に富んだ人々やアイデアをコンピューティングの未来に組み込むには、社会的階層を上っていける新たなエスカレーターが必要だ。そのエスカレーターの役割を果たすのは、宇宙開発時代の第一世代のエンジニアが享受したのと同じ支援を新しい世代に与える、研究、人的資本、コミュニティへの包括的な投資だ。そのエレベーターを単独で構築することはできない。

## 2. 頭脳集団の独占

次に、業界の顧客は誰で、業界はどのように規制されているのかに注目しよう。

コンピューティングが初めて全面的にデジタル化されてからの数十年を支えた軍事投資の影響はいまだに尾を引いている。ベイエリア、ボストン、シアトル、ロサンゼルスなど、現在の主要なテックハブは、すべて冷戦時代の研究と軍事支出の中心地に端を発している。1970年代から1980年

代にかけて業界の商業化がさらに進展するにつれて、国防活動は公の場から姿を消したが、決して消滅したわけではない。記憶に残る「スターウォーズ計画」の異名を持つコンピューター支援ミサイル防衛システムである戦略防衛構想などのレーガン政権時代の計画を皮切りに、ペンタゴン（米国防総省）は学術的なコンピューター科学にとってそれまで以上に大きな後援者となった。

2000年代初頭に短期間の停滞期を経た後、テクノロジー業界とペンタゴンの関係は、この10年で再び強化された。シリコンバレーには戦争ビジネスへの関与に反対の声をあげる者もいるが、そうした声には、数十億ドル規模のクラウド・コンピューティングやサイバー兵器の契約の増加に歯止めをかける効果はほとんどない。これではシリコンバレーが原点回帰しているようなものだ。

国防関連の仕事は、次第に目立つようになり、新たな議論の火種となるテック業界と米国政府の間のもつれた関係の1つの側面となっている。もう1つの問題は、新たなテクノロジーの規制や反トラスト法の執行を求める声が高まっていること

だ。このことは、技術的研究の資金調達を巡る問題や、それが誰の利益にかなうのかなどの問題に大きな影響を与える可能性がある。

テクノロジー分野における前代未聞の富と権力の集中と、デマを拡散したり政治的分断を煽ったりするうえで業界が果たした役割は、連邦議会議員によるテック業界へのアプローチに劇的な変化をもたらした。20年前に司法省がマイクロソフトを提訴して以来、米国はテックビジネスを規制する意欲をほとんど示さなかった。だが、超党派の蜜月状態と自由放任主義に根差す寛容さが何十年も続いた後、現在議会では反トラスト法案とプライバシー法案が審議されている。バイデン政権は、業界で最も影響力のある一部のテック評論家を規制当局の要職に任命し、規制執行の大幅な強化を推進している。

予想される規制の形に影響を及ぼすことを目指して、現在、アマゾン、アップル、フェイスブック、グーグル、マイクロソフトの5大企業は、銀行、製薬会社、石油コングロマリットと同等、あるいはそれ以上に活発なロビー活動をワシントン

D.C. で実施している。テック業界のリーダーは、大企業の解体が中国企業による世界市場の支配を招き、規制による介入はそもそもシリコンバレーを大きな存在に押し上げたイノベーションを押しつぶすと警告している。

長期的視野で見れば、巨大テック企業の力に対する政治的な抵抗は驚くにあたらない。契機になったのは 2016 年の米国大統領選挙と EU 離脱 (Brexit) の国民投票で、ソーシャルメディアのデマ・キャンペーンが果たした可能性がある役割だ。この政治的ムードは 1 世紀以上前に見られたものと同じである。

私たちは、20 世紀半ばのテクノロジーと通信の巨大企業（後述する AT&T はその 1 社）に匹敵する、規制下にあるにもかかわらず規模が大きいままの未来のテック企業を見ているのかもしれない。このモデルはテクノロジーのイノベーションを押しつぶすことはなかった。むしろ実際には現在、テック企業の成長を助けて、新しいテクノロジーの共有を促進している可能性がある。

1980 年代初頭に最終的に解体されるまで 70

年にわたって規制下の独占企業だった AT&T の例を見てみよう。米国政府は、AT&T にユニバーサル電話サービスの提供を許可する代わりに、他の通信事業に関わらないよう AT&T に要求した。まず電信子会社を売却させ、その後、コンピューティングから手を引かせた。

1940 年代にコンピューティング分野が成長期に入った後は特にそうだったが、他の営利企業と同様に、規則を守ることは AT&T にとって至難の業だった。その規則違反の 1 つが 1956 年の同意判決を招くことになった。その判決で政府は AT&T に対し、工業研究部門であるベル研究所から生まれた発明品の使用許可を他社に与えるよう要求した。その発明品の 1 つがトランジスターだった。AT&T がトランジスターとそれに関連するテクノロジーのブレークスルーを他の研究所や企業と共有することを強制されていなかったら、コンピューティングがたどった軌跡は大きく異なっていただろう。

現在、工業的な研究開発活動は再び異様なまでの集中を見せている。テック企業があらゆる犠牲

を払って成長を追求し、大企業が競争相手の小規模な企業の買収に明け暮れる間、過去 20 年にわたって規制当局はほぼ見て見ぬふりをしていた。第一線の研究者が学术界を去ってテック大企業で報酬の高い仕事に就く例が増えるにつれて、この分野に携わる膨大な頭脳がわずか数社に集中する結果となった。

旺盛な起業家精神にあふれるシリコンバレーの歴史上のどの時点を見ても、新規参入者やそのテクノロジーが有意なマーケットシェアを維持することが今ほど困難を極めたことはない。ほとんどの場合、大規模で十分な資本を持つ市場支配的な企業に吸収されたり潰されたりしてしまっている。その結果、こうしたコンピューティングの素晴らしいアイデアが、一握りの企業の研究所で生まれるようになり、当然のことながら、選ばれた少数のテック大企業のビジネス優先事項を反映している例が次第に増えている。

テック企業は、自分たちのイノベーションの妨げになるとして政府の介入を非難するかもしれない。だが、資金や規制の行方を追えば、コ

ンピューティングの新技术の発見を支援し、その技術を中心とする新しい市場を構築するうえで、公共部門が当初から重要な役割を果たしたことは明らかだ。

### 3. 場所、場所、場所

最後に、コンピューティングのビジネスがどこで生まれるかを考えてみよう。

「次のシリコンバレー」はどこで生まれるかという問いは、想像を絶するほど長い間、世界中の政治家やビジネス戦略家をとりこにしてきた。フランスのシャルル・ド・ゴール大統領は 1960 年にシリコンバレーを視察し、秘密を解明しようとした。それから数十年にわたって、世界の多くの指導者が同じことを試みた。

世界を駆け巡る能力を引き付け、新たなテック起業家を育成するように作られた立派なリサーチパークやカリフォルニア・スタイルの分譲地を備えた「シリコン何とか」が多くの大陸に出現した。だが、多くは、スタートアップの夢を叶えること

**eムックは、MITテクノロジーレビュー  
有料会員限定サービスです。  
有料会員はすべてのページ（残り68ページ）を  
ダウンロードできます。**

**ご購入はこちら**



**<https://www.technologyreview.jp/insider/pricing/>**

No part of this issue may be produced by any mechanical, photographic or electronic process, or in the form of a phonographic recording, nor may it be stored in a retrieval system, transmitted or otherwise copied for public or private use without written permission of KADOKAWA ASCII Research Laboratories, Inc.

本書のいかなる部分も、法令または利用規約に定めのある場合あるいは株式会社 角川アスキー総合研究所 の書面による許可がある場合を除いて、電子的、光学的、機械的処理によって、あるいは口述記録の形態によっても、製品にしたり、公衆向けか個人用かに関わらず送信したり複製したりすることはできません。