

## 柔らかいエレクトロニクスの研究開発と未来



研究室紹介

関谷 毅\*

Research and future of flexible electronics

Key Words : Flexible electronics, Sticking electronics device,  
Having excellent flexibility and stretchability sensors

### 初めに

エレクトロニクスは近年急速な進化が進んでおり、その最先端技術でさえ日常生活への浸透が極めて早い。当研究室では、フレキシブルエレクトロニクスを中心とした研究開発と社会実装を行っている。この研究開発を行う上での背景、研究室の取り組み、展望などについて紹介したい。

### 背景

「シンギュラリティ」という言葉を頻繁に耳にする。「技術的特異点」と訳され、エレクトロニクスがヒトを介することなく、エレクトロニクス自身で開発し、進化を始める“特異点”と認識されている。エレクトロニクスがヒトの手を離れて、独自の進化を始める大きなターニングポイントとなる。最近、技術の進化、とりわけエレクトロニクスの進展はすさまじいことを肌で実感する。

例えばエレクトロニクスにより構築される「人工知能 (AI)」は、多くの大学入試で合格できるほど進化している。人工知能で有名な Alpha 碁は、囲碁対局サイトのあらゆる対局を記憶し、さらにヒトが強い手を教え、学習し、囲碁での勝ち方を習得した。そうするとある時、どうすれば「勝てる」かに気付

く。そこから先は、ヒトを介することなく、Alpha 碁と Alpha 碁の対局となる。休憩することなく、学習を続け、進化できる。休憩や食事時間を必要とするヒトと比べて、効率よく短期間に学習できることは間違いない。そしてついに先日、Alpha 碁は圧倒的な実力を身に着けてしまったことから、ヒトとの対局を卒業すると発表した。これは、囲碁という厳密なルールがある状況における AI (特化型 AI) の進化であり、特殊な環境ともいえるが、エレクトロニクスの急激な進化を世界が再認識することとなった。

ヒトは増加現象を「線形的」増加に考えてしまいがちで、「指数関数的」増加を想像するのが得意ではない。例えば、厚さ 0.1mm の紙を 42 回折ると月に到達することを、にわかには受け入れ難い。テクノロジーの進化は「指数関数的増加」であることは歴史が示している。つまり、テクノロジーの進化は、ヒトの想像を超えて起こる。

これまでのエレクトロニクスの進化は、「トランジスタ構造の微細化」、「トランジスタの高度集積化」の歴史である。トランジスタ構造加工技術であるフォトリソグラフィープロセスは 5nm の微細加工を実現し、1cm 角に 10 億個以上のトランジスタを高密度に集積化することを可能にした。このような微細加工、高度集積化技術の進化は、インテル社長のムーアが提唱した「ムーアの法則」に沿っている。「1.5 年で 2 倍の集積密度を実現してきた歴史」であり、この進化の速度は人類が経験したことがないほどに凄まじい。「1.5 年で 2 倍?」。一見するとその凄まじさは感じられにくいですが、実際に、2 年後には 2.52 倍、5 年後には 10.08 倍、7 年後には 25.4 倍、10 年後には 101.6 倍、15 年後には 1024.0 倍、20 年後には



\* Tsuyoshi SEKITANI

1977年1月生まれ  
大阪大学基礎工学部卒業 (1999年)  
東京大学大学院工学系研究科博士課程短縮修了 (2003年)  
現在、大阪大学 産業科学研究所 第一研究部門 (情報・量子科学系) 教授  
大阪大学栄誉教授 工学博士 固体物理学、電気電子工学、回路システム工学  
TEL : 06-6879-8400  
FAX : 06-6879-8404  
E-mail : sekitani@sanken.osaka-u.ac.jp

10321.3 倍にいたる。この歴史こそ、指数関数的進化である。例えば、指数関数的進化を、「自動車の速度」に当てはめると面白い。自動車に「ムーアの法則」と同じスピードの技術革新が起きていたら、1909年に誕生したT型Fordは、現在、光速の100,000倍の速さで走る自動車になっている。さすがに実社会における自動車ではこの「進化」は起こりえないが、エレクトロニクスは電子の世界でこれを実現してきた。

微細化と並んでエレクトロニクスに大きな進化をもたらしているのが、「フレキシブル化」であると感じる。最近、新しいiPhoneが登場したので、これを例に考えてみる。登場ごとに、高機能化、高速動作化、低消費電力化、軽量化されてきたiPhoneであるが、厚みだけはほとんど変わらない。硬いものは、薄くなればなるほど、割れやすく、まさにガラスを持ち歩いているかのような危うさがあるためだ。一方、これがフレキシブル化されたら、割れることを気にする必要がなくなる。すなわち再び薄くするチャンスが得られることになる。フレキシブル化により、エレクトロニクスはさらに薄くなり、携帯性が増す可能性が高い。大型化しても置く場所にも困らず、設置する際にも困らない。

スーパーハイビジョンテレビに代表される大型・高精細ディスプレイは臨場感を生み出し、人々を魅了している。スーパーハイビジョンにかかわらず、近年のディスプレイは低コストでありながら大画面かつ、高精細になっている。その一方、大きくなりすぎると、置く場所などに困る。設置するときも、よほど大きな家でなければ、エレベーターに入らず、窓から入れるのに苦労するかもしれない。柔らかければ、丸めて持ち運べるなど、これらの課題を一気に克服できる可能性があり、大きな期待がある。唯一の課題は、機械的柔軟性と電気的性能の両立にあり、優れた研究活動によりそれさえも克服しつつある。

エレクトロニクスのフレキシブル化は、ディスプレイにとどまらない。例えば、ウェアラブルセンサーに代表される「ヒトの状態」計測では、柔らかいセンサーで肌をとらえなければ、違和感、装着感が生

じるため使いにくい。すなわち、エレクトロニクスの「柔らかいこと」が大きな価値を生み出す。

超少子高齢化が進む我が国では、一人一人の健康意識が高まっており、今年4月には「遠隔医療に対する医療報酬制度改革」がなされた。自宅で手軽に生体計測できることが直接的に医療につながる社会的仕組みができたといえる。IoT・AI・ICTの進化も進み、低コスト化により社会に浸透しているため、生体情報を正確に取得し、遠くにいる医師に診断してもらえ環境が整った。柔らかい生体センサーが医療を変える時代に突入した。

### 研究室のめざしていること

エレクトロニクスは機能によりはじめて人へ価値をもたらしてくれる。形ができただけでは意味をなさず、また材料やデバイス単体を示すだけの研究では十分とは言えない。我々の研究室では、真のモノづくり、価値づくりを目指して、材料、プロセス、回路・システムが融合したチーム編成となっており、現在43名の教員、職員、研究員・技術員、学生が在籍している。(図1)

ここで我々の研究室概要と構成について紹介したい。大阪大学産業科学研究所の中にある研究室で、分野名は「先進電子デバイス研究分野」である。名前の通り、人類未踏の先進的な電子デバイスを研究開発する研究室である。“電子”のみならず、“光”技術なども融合することで、世界にない新しいデバイスを開発している。関谷研究室は、以下の3グループから構成されている。(図2)

1. 【材料・実装・集積化グループ】
2. 【デバイス・プロセス・物性グループ】
3. 【回路・システム・情報処理グループ】

この3つのグループはそれぞれの強みを持ち、緊密連携しながら一つの目標に向かって研究活動している。この3つの不可欠な要素が密接につながって、調和し、協働することで現代社会、さらには未来社会の課題を解決するための研究を続けている。



図1：研究室の集合写真



図2：各グループの取り組み

(左) 材料・実装・集積化グループ：化学材料の持つ優れた機能を利用して、新しい現象を創る。これにより新しい材料機能、電子デバイスを開拓している。  
(中央) デバイス・プロセス・物性グループ：ふにゃふにゃの薄膜フィルム上にナノメートルの機能性材料を多層に製膜することで、トランジスタやセンサーを作製している。  
(右) 回路・システム・情報処理グループ：柔軟なエレクトロニクス技術を高度に集積することで、システムとして機能する集積回路を創り上げている。次世代医療システム、ヘルスケアシステムから、社会システムに及ぶ広範な応用展開を進めている。

### 【材料・実装・集積化グループ】

化学、電気、物理などそれぞれの知識を活用・融合して、柔らかい電子材料と印刷形成技術の開発を行っている。例えば、ゴムのように伸び縮みできるセンサー材料を開発することで、凹凸のある人や植物、構造物などの健康診断を試みている。一方で、実装・集積化技術として新聞を刷るように材料を印刷形成する技術を用いて、大面積性・デザイン性・コスト効率など産業界のニーズに対応する。材料・実装・集積化グループでは、様々な領域と調和できる新しい素材と新しい材料構造の開発を行い、常に社会実装を目指した研究を行っている。

### 【デバイス・プロセス・物性グループ】

薄膜を作り出す技術、印刷プロセス技術、物性評価技術を駆使して、先進的な電子デバイスの研究開発を行っている。開発するデバイスは、柔らかく、薄くて軽い、シート状の電子デバイスである。本グループでは、有機材料等の先進材料を使いこなすことで、このような特徴のある電子デバイスを実現している。開発した電子デバイスは、生体や構造物など世の中のあらゆる表面に違和感なく溶け込み、社会を豊かにする仕組み作りに役立たせている。

### 【回路・システム・情報処理グループ】

新しいデバイスの特長を生かした、低消費電力な電

子回路設計・アナログ信号をデジタル信号へ繋ぐシステム基盤開発・生体やインフラから取り出した情報を適切に抽出する信号処理技術の開発を行っている。IoT (Internet-of-things) の時代では、あらゆるものがセンサーとなり情報の発信源となる。本グループの特徴は、この情報を取得する「センサー」の開発と、センサーから得た情報を処理する「信号処理技術」の開発を同時に手がけている。本研究室で開発された、世界でも競争力のある「柔らかなデバイス」に最適なセンサーを開発し、必要な情報を抽出する信号処理を施す事で、社会に役立つモノづくりを目指している。

### 具体的取り組みの一例

我々の研究室では、柔軟なエレクトロニクス技術を用いて、違和感なく人の肌に貼り付けられるシート状の脳波センサー（パッチ脳波センサー）を開発した（図3）。見た目には「熱を下げるための冷却ジェルシート」に見えるが、おでこに貼り付けるだけで、1千万円以上する従来の医療用脳波計測機と同じ脳波を得ることが出来る。計測精度を確保しながらも、手軽さが最大の特徴であり、フレキシブル化によりもたらされたといえる。

脳活動電位（ニューロンの電氣的活動）は微弱である。例えば、頭蓋骨の外では、脳波は数マイクロボルト程度であり、筋電や心電と比べて3桁から4桁

小さい。そのため、正確な脳波計測には大型増幅器を搭載した医療機器を必要とした。ところが、エレクトロニクスの劇的進化により、アンプ、ADコンバータ、CPU、電池、無線技術が高性能化とともに小型化した。パッチ脳波センサーは厚さ5mm、大きき2cm×7cmにCPU、ワイヤレス通信技術、電池から電源回路まですべてのシステムを搭載しても重さ20gである。さらに、15年前のスーパーコンピュータの性能は、今やスマートフォン内にて、手のひらサイズで実現されている。このように、おでこには医療機器（パッチ脳波センサー）、胸元にはスーパーコンピュータ（スマートフォン）を持ち運んでいる我々は、極めて簡単に、自然な脳波を計測できる。微細化とフレキシブル化による進化が生んだ医療のパラダイムシフトといえる。

装着していることを感じさせず、手軽に脳活動を計測できると様々なことに気づかされる。自身の睡眠の深さ、心地よい場所や照明空間はどこか、など。その中でも特に面白いのが、7～12Hz（アルファ波）の計測であり、リラックス時に強く出る。目を閉じるだけで、強いアルファ波が出るヒトもいれば、まったく出ないヒトもいる。目を閉じることで得られるリラックス度がヒトそれぞれであるように感じられた。

手軽な脳波計測により、「目で見るもの、目に飛び



図3：パッチ式脳波センサー



込む映像や情景」、が脳（ヒト）に絶大な影響を与えていることを定量的に実感できる。百聞は一見に如かず、と言われているが、「見ること」は本当にヒトに大きな影響を与える。発生医学の観点から、目は脳の一部とされ、目に入る光情報は、視神経を刺激し、直接脳に伝わる。信号伝達メカニズムが脳に直接つながっているため、見たものが脳裏に強く焼き付けられる理由なのではないかと感じる。

脳の活動を装着感、違和感なく直接計測できることで、大面積・高精細で臨場感のあるディスプレイが、どれほど人を興奮させられるか、など、人の感性に迫れる可能性がある。人を豊かにしたり、励ましたり、言葉が話せない乳幼児に寄り添ったディスプレイや映像コンテンツの開発につながるかもしれない。

本取り組みを通して、手軽に脳活動を測ることの価値が見いだされ、2016年9月に大阪大学発ベンチャーPGV株式会社が発足した。これまでは手軽に計測することが困難であった脳波を手軽に計測できることから「感性を利用した商品開発」、「睡眠や注意力のモニタリング」、「脳をセルフケアする健康機器」などへの応用が広がっている。シート型センサ

ーシステムの開発と社会実装を果たした一例である。(図4)

#### おわりに

柔らかいエレクトロニクスを中心に活動している当研究室のビジョンや現在の取り組みをご紹介してきた。エレクトロニクスは人の生活を豊かにする社会基盤であり、今後もこの思いをしっかりと持ち、取り組んでいきたい。

そして、エレクトロニクスにはもう一つ大きな注目すべき点がある。それが冒頭に申し上げた「技術的特異点」である。ヒトの起源である生命誕生から約40億年、ヒトの一生は100年。すなわちシンギュラリティを目の当たりにできる可能性のある人類は「0.0000025%」の奇跡にいる。本当にシンギュラリティが起きるか、議論は尽きないが、超少子高齢化により労働人口が圧倒的に不足する中で経済力を落とすことなく激動の時代を生き抜くためには、テクノロジーの進化と共存は絶対不可欠である。この時代を人類がどのように生き抜くか、エレクトロニクスの想像を超えた進化に期待したい。そして、そこに貢献していきたい。



図4：脳波ビジネスを展開する大阪大学発ベンチャーPGV株式会社