

# スマート・コミュニティーと アンビエント・エレクトロニクス

東京大学 生産技術研究所  
教授 桜井 貴康

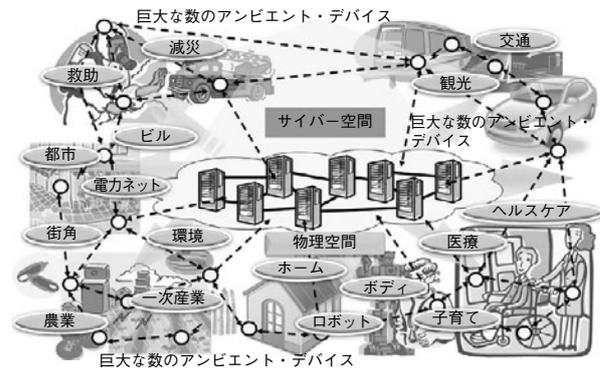


## 1 スマート・コミュニティーへの流れ

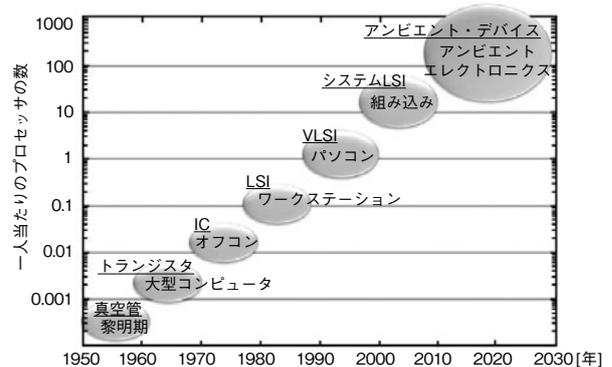
エレクトロニクスはムーアの法則を追い風に、ここ50年急速な発展を遂げてきた。その間、通信やコンピュータへの応用を足掛かりに、インターネット、パソコン、デジタル家電、スマートフォンへと着実に人々の間に浸透していった。特に、産業に応用され、生産効率の向上に寄与したり、生活の利便性を高めたことは記憶に新しい。ここにきて、より安心・安全で豊かな生活を実現するために情報技術（IT）をより積極的に生かしていこうという考え方がクローズアップされてきた。スマート・コミュニティーへの流れである。スマート・ホーム、スマート・シティー、スマート農業、減災、子育て、ヘルスケア、ビルや施設の維持管理からロボットに至るまで、その適用範囲は幅広い。人々のリアルな生活の質の向上をITが応援するスマート・コミュニティー。このようなスマート・コミュニティーを実現する上で、エレクトロニクスにも従来とは異なった切り口が求められるようになってきている。

通信やコンピュータ、デジタルメディア応用などサイバー空間が主な活躍の場だったエレクトロニクスではあるが、スマート・コミュニティー実現には、よりリアルな世界、物理空間とのつながりが要求される。1995年にネグロポンテ氏が「アトムからビットへ」という流れを看破したが[1]、このところ、「ビットとアトムの融合」がテーマになり始めたとも言えよう。第1図のように、クラウドやインターネットに代表されるサイバー空間から、より人々の生活に密着した物理空間へとエレクトロニクスが浸透し、新しいサービスを提供するプラットフォームを作り出しつつある。

少し、違う観点からこのトレンドを見たのが第2図である[2]。一人当たりが使用するプロセッサの数は100を超え始めているが、こうなるとそれぞれのプロセッサを意識しながら使い分けるわけにはいかない。多すぎるからだ。エレクトロニクスが環境の中に溶け込んで、人々の生活のインフラを形づくり、意識しなくてもエレクト



第1図 安心・安全で豊かな生活を実現するスマート・コミュニティー。それを支えるアンビエント・エレクトロニクスは物理空間に多数のアンビエント・デバイスやネットとして分散し、環境に溶け込む形で、新しいサービスのプラットフォームを形成する。



第2図 多数のデバイスが環境の一部に溶け込んで人々の生活の質を高めるアンビエント・エレクトロニクス

ロニクスが人々の営みを守る、いわゆるアンビエント・エレクトロニクスの世代に入る。ここで、アンビエントというのは環境や雰囲気の意味だ。このようなプラットフォームではプロセッサのみならず各所にセンサやアクチュエータ、ディスプレイなどが環境に溶け込み、人々が意識しなくても安心・安全で質の高い生活を下支えし

てくれる。エレクトロニクスの性能や機能、信頼性が高まってきたため、ようやく、そのような期待に応えられる状況になったという背景がある。

桁違いに多くのアンビエント・デバイスから、ひっきりなしにデータが上がってくるので、これらの巨大な量のデータ、いわゆるビッグデータに対応して、サイバー空間も量的、質的ともに進化を遂げる必要がある。その進化がますますアンビエント・デバイスを強力にサポートし新しいサービスを生み出す、というポジティブ・サイクルが期待される。

## 2 アンビエント・エレクトロニクスの特徴

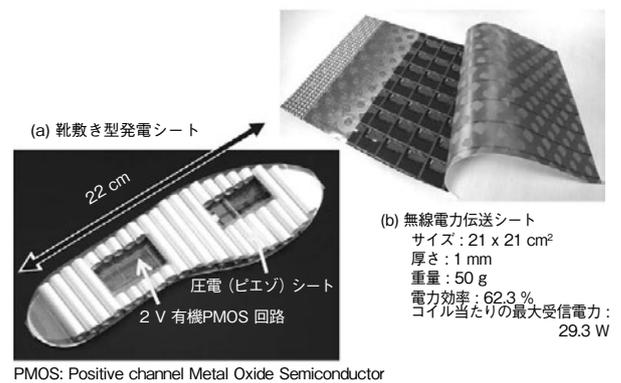
さて、このようなアンビエント・エレクトロニクスには技術的にいくつかの新しい特徴がある。データとエネルギーの2つの観点からそれらをまとめると以下になるだろう。

### 2.1 物理空間とのインターフェース

サイバー空間と実空間とのインタラクション、つまり、センサやアクチュエータがより重要になってくることは想像に難くない。センサに限って言えば、日本は、センサの世界年間販売量170億個のうち47億個を占める[3]と言われるセンサ大国である。アクチュエータでも国内に小型モータなど世界に冠たる技術も多い。したがって、日本で技術を展開するのに適した分野と言えよう。次の技術として世界的にホットになっているのはバイオ・センシングの領域で、脳とのインターフェースなど、夢のような技術が一步一步実現に近づいている[4]。

次に、エネルギーに関して実空間とのインターフェースを考えてみよう。まず、エネルギーの取り込み応用だが、これにはエネルギー・ハーベスティングと呼ばれる自然環境エネルギーを利用するようなデバイスや回路の発展が望まれる。第3図 (a) には、そのような1つの例として、半導体のオリンピックと呼ばれるISSCC (International Solid-State Circuits Conference: 国際固体回路会議) で2012年2月に発表された靴敷き型発電シートを示した[5]。この発電シートは、印刷技術で作られた有機トランジスタ回路で構成されている。このようなプリンタブル・エレクトロニクスは、将来の薄くて曲がる、大面積なエレクトロニクスを実現するのに、シリコン技術と相補的に使うことのできる技術体系を提供することが期待されている。また、追加外付け部品なしに80 mV という世界最低電圧から起動できるエネルギー・ハーベスター向きの電源チップも日本から発表されている[6]。

エネルギーの流れを制御するというのもアンビエン



第3図 (a) 圧電 (ピエゾ) シートと有機トランジスタ回路を利用した靴敷き型発電シート[5]

(b) 有機トランジスタ回路を利用した無線電力伝送シート[8]

ト・エレクトロニクスの大きな使命である。そこでは、パワー・エレクトロニクスが鍵を握るが、パワー・エレクトロニクス・デバイスは日本の強い分野であることは注目すべきである。エネルギーを扱う上では、高性能コイルも欠かせない。マグネティックス材料も日本が進んでおり、高性能コイルや磁気による障害防止などは優位性が期待できる。

### 2.2 いつでも、どこでも

どこでもサイバー空間とつながるためには、ワイヤレス化は必須である。多くのアンビエント・デバイスがあるので、極近距離でもよいから低電力な無線通信手段が必要となってくる。2011年のISSCCでIMEC (Interuniversity Microelectronics Centre) とパナソニックから共同で発表された無線チップ[7]は、近距離ならば1ビット無線伝送するのに0.3 nW程度というような極低電力となっており、この分野も着実に進展している。

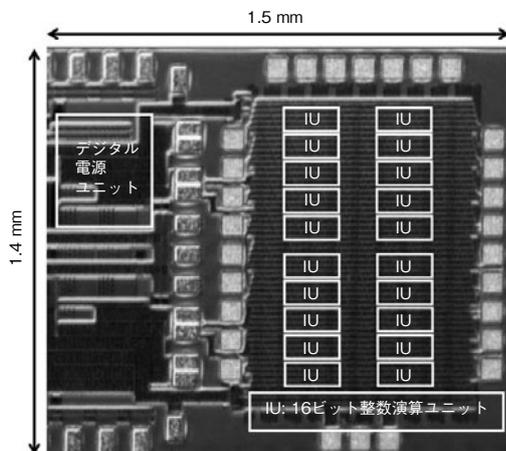
「いつでも」というキーワードからはリアルタイム性の重要さが浮かび上がる。いちいちクラウドまで持ち上げては機械などの応答に間に合わないことも多い。リアルタイム性保証に関してはカー・エレクトロニクスや家電などで日本に大きな技術の蓄積がある。この強みの生かせる技術領域である。

一方、エネルギーの観点からは、「いつでも、どこでも」使えるエネルギー源が必要となる。上述のエネルギー・ハーベスティングなど希薄エネルギーの利用も1つではあるが、第3図 (b) のような無線給電技術にも期待が高まる。この給電シートはアレイ状に給電コイルを配置してあり、受電コイルがあるところだけ給電コイルを活性化するというアプローチによって、薄いシートによる「どこでも給電」を目指している[8]。

### 2.3 巨大な数

その場その場で空間とのインタラクションが必要になるため、アンビエント・デバイスを1箇所にまとめるわけにはいかず、超分散的に、巨大な数のデバイスが存在することになる。また、それらをつなぐアンビエント・ネットも必要だ。そのため、一つ一つのノードやネットには極低電力性が要求される。活用できるエネルギーが極めて限られている環境も多いし、数が多いので全体でのエネルギー消費が問題となるからである。日本の低電力集積回路技術はレベルが高い。その1つが極低電圧で動作するシリコンチップだ。第4図は、直近2012年のISSCCで日本から発表された20の演算コアをもつチップで、自動電源調整や独自の動作余裕度検出技術などを利用して内部は0.39 Vという低電圧で動作し、0.1 mWで毎秒200万回の演算をこなせる[9]。

システムの多様性が大きくなることも注目値する。情報処理だけでなく、各種の情報の入出力を異なる環境下で行わなければならないからである。それを実現するためには、いろいろなセンサやアクチュエータ、電源、アナログ機能、無線機能、デジタル機能を、柔軟に素早く組み合わせることが要求される。したがって、単にリコンフィギュラブルなロジックで構成するのが良いというような単純な話ではない。ロジックだけが問題ではないからだ。超量産された異種デバイスを3次元集積技術や光、MEMS (Micro Electro Mechanical Systems)、無線などを利用して、多様なシステムを俊敏に組み上げる「アジャイル集積技術」が望まれることになる。単に、ハードウェアの技術にとどまらず、多くの異なったリソースをダイナミックに選択しながら、所定のサービスを提供すると言ったswarm OS (オペレーティング・システム)



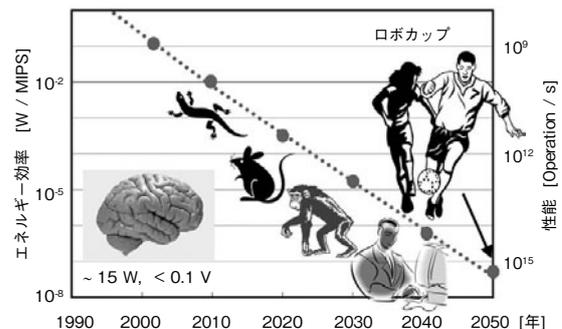
第4図 40 nm CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) で作られた20コア構成の16ビット整数演算ユニット

も提唱されている[10]。インフラに入りこんだシステムは、一度すべての動作を止めて、システムの総取り換えをするというわけにはいかない。ライフラインもあるからだ。部分的な交換やハードウェア・ソフトウェアの追加、改良なども行えないと実用上は困る。アジャイル集積技術はこのような要求にも応えるものでなくてはならない。

### 3 低消費エネルギー化と新しいスイッチ

エレクトロニクスの消費エネルギーを下げることは、アンビエント・エレクトロニクスのみならず、クラウドやインターネットでも同様に大切である。性能の向上はプロセッサを並列に何万个も使えば達成されるが、何万个ものプロセッサを長い配線をつないでおくと、通信遅延が大きくなって性能が上がらない。したがって、性能向上には何万个ものプロセッサを小さな空間にコンパクトに集積することが望まれる。しかし、一つ一つのプロセッサの消費エネルギーが大きいと、膨大な熱が発生してコンパクトにできない。このため、アンビエント・エレクトロニクスにもサイバー空間用のエレクトロニクスにも今後ともますますの低エネルギー化が欠かせない。

第5図のように2050年にロボットと人間がスポーツ競技をする「ロボカップ」が計画されている。夢のある話だが、その実現のためには、人間の脳と同等の性能が必要になるため、プロセッサはあと4桁以上の低エネルギー化を進めなければならないと言われている[11]。消費エネルギーを下げるのには動作電圧を下げるのが有効だ。しかしながら、現在1 V程度である集積回路の動作電圧を下げて低エネルギー化を達成しようとしても、動作電圧0.3 V程度で低エネルギー化は打ち止めであることが知られている[12]。0.3 V以下の電圧では、現在の集積回路の基礎となるトランジスタのリーク電流成分が邪



第5図 2050年にロボットと人間がスポーツ競技をする「ロボカップ」実現のためには、エレクトロニクスはあと4桁以上のエネルギー率の改善が必要となる。

魔をして、もはや低エネルギーにはならないのだ。

ここでは、あと1桁程度の低エネルギー化しか望めず、微細化による容量低減を通じての低エネルギー化と合わせても、とても4桁の低下は望めそうもない。この状況は、トランジスタの構造や材料を変えても変わらず、新しい動作原理で動くスイッチの導入が不可欠となる。このところ、トンネル・トランジスタという新しい低リークデバイスが有望視され始めた。このスイッチ・デバイスの実現には、物理に立ち戻った研究開発と、回路やシステム科学が連携することが必要となっている。異分野連携によって、エレクトロニクスの新しい基盤技術を作る努力が現在世界中で行われ始めている。

#### 4 今後の持続可能な発展に向けて

今まであまり意識されてこなかった人的資源や物的資源の限界が、少子高齢化や石油資源、レアメタル資源の枯渇などで、このところ強く意識されるようになった。これは、日本だけに限ったことではなく、世界的にも差し迫った課題である。限られた人的資源や物的資源という条件の中で、単に「量」を求めることは持続可能ではなくなってきた。しかし、人々の生活の「質」を持続的に向上させ、発展し続けることはIT技術を駆使することによってかなえられる。それが、スマート・コミュニティだ。そのスマート・コミュニティを支えるアンビエント・エレクトロニクスという新しいプラットフォーム。日本の先進的な課題を解きながら、新たなビジネスやサービスを生み、将来、新興国へソリューションを提供する。日本の強い分野を連携させながら、その進展が期待される。

#### 参考文献

- [1] N. Negroponte, "Being digital," 1995.
- [2] T. Sakurai, "Perspectives of low-power VLSI's, (invited)," IEICE Transactions, vol.E87-C, no.4, p.429-437, Apr. 2004. <http://news.mynavi.jp/articles/2004/01/01/moore/index.html>, 参照 Mar. 5, 2012. (桜井, ムーアの法則の限界とその先: パーチャルからフィジカルへ)
- [3] 富士キメラ総研調べ
- [4] J. Rabaey, "Brain-machine interfaces as the new frontier in extreme miniaturization," ESSCIRC'11, pp.19-24, Sept. 2011.
- [5] K. Ishida et al., "Insole pedometer with piezoelectric energy harvester and 2V organic digital and analog circuits," IEEE ISSCC, paper#18.1, Feb. 2012.
- [6] P. H. Chen et al., "A 80-mV input, fast startup dual-mode boost converter with charge-pumped pulse generator for energy harvesting," A-SSCC 2011, paper#1.1, pp.33-36, Nov. 2011.

- [7] M. Vidojkovic et al., "A 2.4 GHz ULP OOK single-chip transceiver for healthcare applications," IEEE ISSCC, paper#26.3, Feb. 2011.
- [8] M. Takamiya et al., "Design solutions for a multi-object wireless power transmission sheet based on plastic switches," Proc. IEEE ISSCC, pp.362-609, Feb. 2007.
- [9] K. Hirairi et al., "13% power reduction in 16b integer unit in 40nm CMOS by adaptive power supply voltage control with parity-based error prediction and detection (PEPD) and fully integrated digital LDO," IEEE ISSCC, paper#28.5, Feb. 2012.
- [10] J. Rabaey, "The swarm at the edge of the cloud – A new face of wireless," VLSI Circuit Symp., Plenary, June 2011.
- [11] T. Makimoto et al., "Evolution of low power electronics and its future applications," ISLEPD, Plenary, Aug. 2003.
- [12] H. Fuketa et al., "Device-circuit interactions in extremely low voltage CMOS designs (invited)," IEDM, paper#25.1, Dec. 2011.

#### 《プロフィール》

桜井 貴康 (さくらいたかやす)

1976	東京大学 工学部電子工学科 卒業
1981	東京大学院 博士課程修了 工学博士
1981-1996	(株) 東芝
1988-1991	カリフォルニア大学 バークレー校 客員研究員
1996-現在	東京大学 教授
2009-現在	VLSIシンポジウム エグゼクティブ委員会 チェアマン
2009-現在	IEEE A-SSCC ステアリング委員会チェアマン

専門技術分野：

高速・低電力集積システムの設計