

まえがき

本書は、CQ 出版社の電子・組み込み技術の総合サイトである『Tech Village』(<http://www.kumikomi.net/>) に、筆者が 2009 年 3 月から毎月 1 回執筆しているコラム「デバイス古今東西」のおよそ 4 年分を加筆・修正し、1 冊の本としてまとめたものです。当初は 1 回か 2 回の掲載と思っていたのですが、頭の中にいろいろなアイデアが浮かんできた結果、連載は今も継続しています。エレクトロニクス魅力をたくさん皆さまに伝えたい、という気持ちがあったからだと思います。

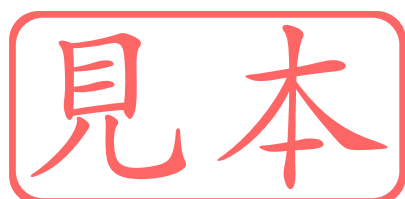
この「デバイス古今東西」を執筆するにあたり、注意した点が幾つかありました。一つは古今東西のストーリーを重視したことです。振り返れば、筆者はこのエレクトロニクス産業にいろいろな形で 30 年以上も携わってきました。この経験を通じて得られた物語、ノウハウ、ハウツー的な要素を盛り込むことで、今までの専門家や業界関係者向けのエレクトロニクス書にはなかったお話しが共有できれば、と思い執筆しました。もう一つは専門用語です。一般にエレクトロニクスという領域では難解な専門知識や専門用語が必要と言われます。ですので、できるだけ専門用語をかみくだきながら一般の方々にも分かりやすくお伝えすることを心がけました。

本書では、エレクトロニクスの実際の現場で起きている、たゆまぬ多発的イノベーション、新ビジネス・モデルの駆け引きと起業、常に生み出されているユニークな技術経営、これからの商売流通の新展開、という観点から 4 編に整理しています。目次内容から興味のあるコラムだけでも、あるいはどこからご覧になっても構いません。

最後に、本書の執筆にご協力いただいた友人、大学のゼミ仲間、仕事仲間、一期一会の出会いを通じてお付き合いさせていただいているお客さま方と、この本の編集のためにお骨折りいただいた CQ 出版社の編集者の方々にお礼を申し上げます。

2013 年 5 月 16 日

山本 靖



第1章 「イノベーション論」編

1.1 スマート・グリッド時代のグリーン・デバイス再考

2011年3月11日の東日本大震災の影響による電力供給問題は長期化しそうな気配です。個々のエレクトロニクス商品に省エネの強みを発揮してきた日本のメーカーには、現状に照らして自社の製品開発を見直す動きがあります。それは個別デバイスごとの低消費電力の追求とか、企業ブランド向上のみを目的とするのではなく、社会全体に配慮したグリーン・デバイスの開発、そしてそれを応用した「もの作り」です。ここでは、まずスマート・グリッドとスマート・メータについて述べ、環境負荷低減につながるグリーン・デバイスについて考えます。

● スマート・グリッドは巨大な市場

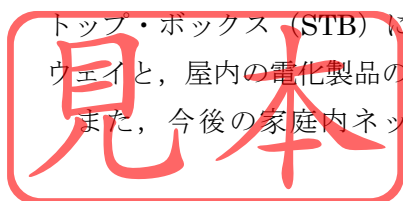
スマート・グリッドとは、双方向の情報通信技術を駆使して電力供給者から電力需要者（ならびに一般消費者）へ電力を提供する「次世代送電網」を意味します。商業施設や一般消費者宅にある電化製品のエネルギーを節約し、コストを低減し、そして信頼性を向上させることが目的です。次世代送電網は、情報ネットワークならびに後述する「スマート・メータ」にも照準を当てています。スマート・グリッドへの移行は、地球温暖化とエネルギーの独立性に対処する方法として多くの国で進められています。ここで言うエネルギーの独立性とは、従来の発電方法に加えて、地域ごとに太陽光発電や風力発電などを組み合わせることで電力を効率良く利用することを指します。

2011年、米国 Cisco Systems 社は、全世界のスマート・グリッドのハードウェアとソフトウェア、通信インフラ（社会インフラを含む）からの総収入が、2015年までに年間で200億米ドルに達すると推定しています。このようにスマート・グリッドは、とても巨大な市場となる可能性があります。

● スマート・メータにつながる Zigbee と PLC の可能性

スマート・グリッドで重要な領域の一つは、家庭内ネットワーク（HAN : Home Area Network）です。つまり、電力供給・制御のためのネットワーク（送電網）だけでなく、情報通信のためのネットワークにも対応していることが必要です。この二つのネットワークに対応し、それぞれ双方向でやり取りする機能を持った次世代電力計がスマート・メータです。スマート・メータは、インテリジェント化された電力計として、ルータやセットトップボックス（STB）に代表されるインターネット・サービス・プロバイダのゲートウェイと、屋内の電化製品の双方に接続されます。

また、今後の家庭内ネットワークは、無線および電力線通信（PLC : Power Line



Communication) によって形成されることでしょう。家電向けの短距離無線通信規格である ZigBee は、その候補の一つです。Zigbee は低価格と低消費電力を実現できます。しかし低速で転送距離が短い上、コンクリート壁の透過が困難という問題があります。そのため電力線を使った PLC でそれを補完する方法が考えられています。電力線搬送通信の業界団体である HomePlug Powerline Alliance は、スマート・グリッド向けのホームプラグ規格「HomePlug Green PHY」の標準仕様書を発表しています。チップの製造コストを安くできる仕様で、低消費電力、かつ IP ネットワークを PLC で実現でき、IEEE 1901 として標準化されたパナソニックの PLC 技術とも相互運用可能になっています。

米国の取り組みは日本よりはるかに先行しています。それは 2000 年の米国カリフォルニア州で頻繁に停電が発生して以来、電力問題に対する人々の意識が高まってきたからです。

● 電力供給・制御と情報通信を見据えた家庭内ネットワークの将来

スマート・メータは電力会社から見ると、家屋や工場の使用電力量をリアルタイムに把握でき、検針業務の自動化や柔軟な課金設定も容易になります。例えば、夏場の昼間、電力のピーク時の需要を抑える方法として、「ピークロード料金」という混雑料金を設定する方法があります。ピーク時の需要をオフピークにシフトさせることができれば、極論ですが、計画停電などを実施しなくても、各家庭や各工場への電力供給量をある一定値に抑えることが可能です。つまり、電力供給だけでなく電力需要もある程度管理できるので、電力量の需給ギャップを調整しやすくなります。

スマート・グリッドは消費者にもメリットをもたらします。消費者は、各家庭内の使用電力量をチェックでき、それを制御できます。スマート・グリッドにおける将来の家庭内ネットワークの概念図を図 1.1.1 に示します。家庭内の電気コンセントにつながっているあらゆる電化製品（炊飯器、電気ポット、エアコン、冷蔵庫など）が制御の対象となります。外出先からでもインターネットを介してリアルタイムにさまざまな設定を行えます。

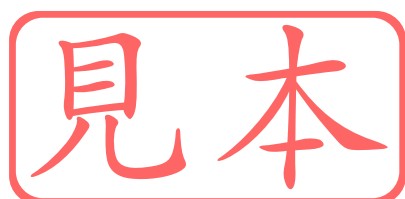
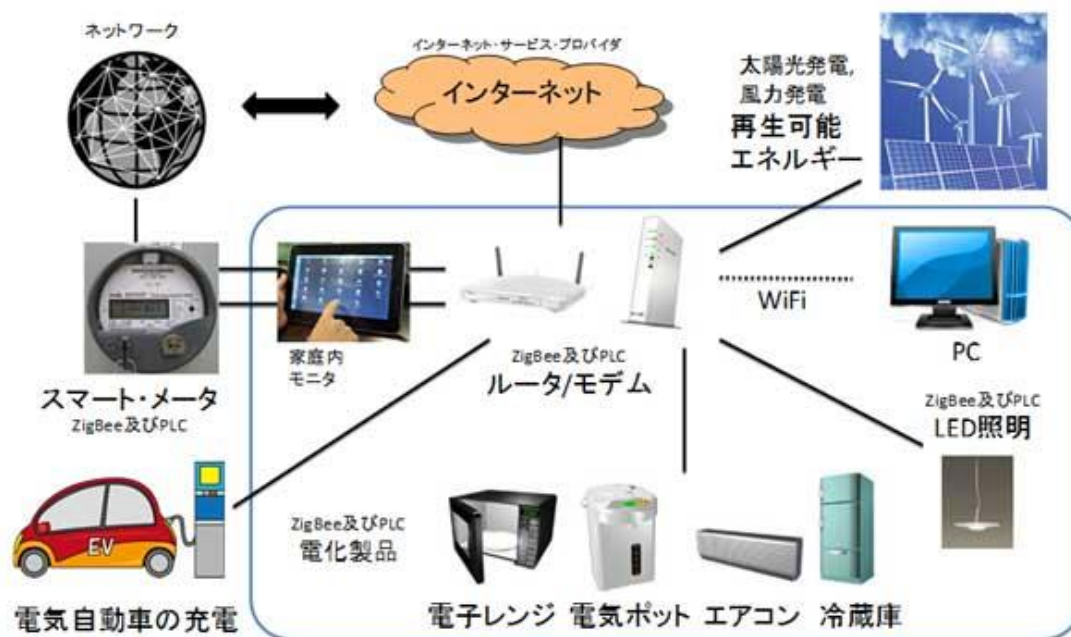


図 1.1.1 スマート・グリッドにおける家庭内ネットワークの将来



スマート・グリッドのもう一つのメリットとして、LED（発光ダイオード）照明を効果的に使うことが挙げられます。LED 照明は白熱電灯による照明に比べて低消費電力ですが、メリットはそれだけではありません。ネットワークを介して LED 照明を制御することで、特定の時間に特定の場所にある照明の明るさを調整したり、点滅させたり、消灯させたりできます。故障した照明の発見も容易です。物理的なスイッチを利用せずに制御できるので、膨大な数の照明機器を持つオフィスや工場では設定が従来よりも簡単になります。

今後、太陽光発電や風力発電を備える消費者や企業が多くなると思います。自然現象を利用した再生可能エネルギーの電気を売る際にも、スマート・メータは活躍します。さらに将来は電気自動車（EV）の普及も進むでしょう。例えば、自宅の駐車場に停めた友人の電気自動車に蓄電したい場合、友人の固有 ID のクレジット・カードに課金することが可能となります。

米国では、そういったことが一般消費者のレベルで現実的に語られています。

● これからの「グリーン・デバイス」に求められるもの

上述したスマート・グリッドを中核とした家庭内ネットワークにつながる機器には、それを構成するエレクトロニクス・デバイスが不可欠です。日本のメーカは個別デバイスごとの低消費電力の追求とか、企業ブランドの向上ばかりを目的とするのではなく、社会全体に配慮したグリーン・デバイス開発とそれを応用したもの作りの見直しを始めています。グリーン・デバイスには、今まで一方向しかサポートしていなかった電力エネルギー転送機能を双方向化させ、環境負荷を低減する役割が期待されています。

見本

1.2 スーパーコンピュータ「京」をチップ・レベルの視点で考察

2011 年に世界最高性能を達成したスーパーコンピュータ「京」は 10 ペタフロップス（毎秒 1 京回の浮動小数点演算処理）の性能を実現しています。ここでは、コンピュータの性能に大きな影響を及ぼすプロセッサと相互接続技術について考えます。

● スーパーコンピュータ「京」を支える富士通の自社開発プロセッサ

2011 年 6 月 20 日の理化学研究所と富士通の共同プレス・リリースによると、この時点で世界最高性能を達成したスーパーコンピュータ「京」は 672 台の計算機筐体（CPU 数は合計 68,544 個）の構成で、ベンチマークは 8.162 ペタフロップス（毎秒 8,162 兆回の浮動小数点演算処理）だったそうです。2012 年 6 月の完成時には 864 台の計算機筐体（CPU 数は合計 88,128 個）の構成となり、10.51 ペタフロップスの性能を実現しました。

筆者は、これらのニュースの前に発表された 2011 年 4 月 25 日の理化学研究所と富士通の共同プレス・リリースに注目していました。次世代スーパーコンピュータ「京」向け超高性能 CPU（Central Processing Unit）「SPARC64 VIIIfx」が、日本産業技術大賞 文部科学大臣賞を受賞したというものです。この CPU は、1 チップ内に 8 個の CPU コアを搭載し、汎用 CPU として世界最高クラスを実現したと主張しています。

CPU は、コンピュータの性能を決める重要なデバイスです。富士通はコンピュータの黎明期から CPU 開発に取り組んでいました。今回のスーパーコンピュータ「京」の開発が、日本の情報技術の発展に貢献したことは言うまでもありません。

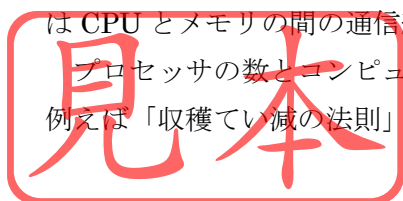
● CPU をやみくもに増やしても性能は頭打ち

1990 年前後に、筆者が VHDL シミュレータの事業に携わっていたころ、シミュレータ開発者たちはシミュレーションの実行速度を引き上げる工夫に取り組んでいました。ハードウェア面では、従来型の CISC プロセッサに替わり、RISC プロセッサを搭載した高速コンピュータを用いるようになりました。ゲート・レベルの論理シミュレーションについては、専用のハードウェア・アクセラレータを併用していました。ソフトウェア面では、言語処理系がインタープリタ型からコンパイル型に移行しました。

1995 年前後には、エンジニアリング・ワークステーション上で複数のプロセッサを用いる並列処理方式が使われるようになりました。いわゆる SMP（Symmetric Multi-processing；対称型マルチプロセッシング）です。

SMP は高速化手法の主流として広く普及しました。ただし、プロセッサの数を増やしても、それに比例して処理性能が向上するわけではありません。隣り合う CPU 同士、あるいは CPU とメモリの間の通信経路に制約があるからです。

プロセッサの数とコンピュータの処理性能の関係は、比較的簡単なモデルで表されます。例えば「収穫てい減の法則」のモデルです。CPU の数を 1 個から 4 個に増やすと性能は 2



倍程度、9個に増やすと3倍程度になります。つまりCPUの数をやみくもに増やしても、性能は頭打ちになるのです。

● プロセッサを自社開発しているのは富士通とIBMだけ

現在のスーパーコンピュータの性能も、エンジニアリング・ワークステーションの場合と同じように、プロセッサ単体の性能とプロセッサの数、そしてプロセッサやメモリの間の相互接続技術の性能に大きく支配されています。スーパーコンピュータ「京」は、システム・アーキテクチャの研究開発の成果はもちろんですが、国内で設計・製造されたプロセッサと相互接続技術の研究開発の成果なしには実現できなかったでしょう。その点でも富士通は賞賛されるべきだと思います。

2011年にスーパーコンピュータ「京」は、世界で最も高速なコンピュータ・システムの上位500位までを定期的にランク付けしているTOP500で1位になりました。当時のTOP500の上位10位までのコンピュータを、それらが内蔵しているCPUに着目して、表1.2.1に整理します。10位以内のコンピュータのプロセッサについては、汎用CPUの代表である米国Intel社の「Xeon」や米国AMD（Advanced Micro Devices）社の「Opteron」が多く搭載されているのが分かります。これらを搭載したコンピュータの性能はほぼ拮抗しており、たとえCPUの数を増やしたとしても、大きな性能の向上は見込めません。

表 1.2.1 TOP500 の上位 10 位 (2011 年 6 月 16 日時点)

TOP500 の Web 情報を筆者が加筆。

順位	名称	設置場所	性能 *e+06 (GFlops)	コンピュータ・ベンダ	相互接続技術	主たるプロセッサの名称	プロセッサ・ベンダ
1	Komputer	理化学研究所	8.162	富士通	特注	SPARC64 VIIIfx 2000MHz	富士通
2	Tianhe-1A	中国	2.566	中国 NUDT	独自	Intel Xeon X5670	米国 Intel
3	Jaguar	米国	1.759	米国 Cray	独自	AMD x86_64 Opteron Six Core 2600MHz	米国 AMD
4	Nebulas	中国	1.271	中国 Dawning	InfiniBand	Intel EM64T Xeon X56xx (Westmere-EP) 2660MHz	米国 Intel
5	TSUBAME 2.0	東京工業大学	1.192	NEC 米国 HP	InfiniBand	Intel EM64T Xeon X56xx (Westmere-EP) 2930MHz	米国 Intel
6	Cielo	米国	1.110	米国 Cray	特注	AMD x86_64 Opteron 8 Core 2400MHz	米国 AMD
7	Pleiades	米国	1.088	米国 SGI	InfiniBand	Intel EM64T Xeon E54xx (Harpertown) 3000MHz	米国 Intel
8	Hopper	米国	1.054	米国 Cray	特注	AMD x86_64 Opteron 12 Core 2100MHz	米国 AMD
9	Tera-100	仏国	1.050	仏国 Bull SA	InfiniBand	Intel Xeon 7500	米国 Intel
10	Roadrunner	米国	1.042	米国 IBM	InfiniBand	PowerXCell 8i 3200MHz	米国 IBM

かつて米国 Cray 社や米国 SGI (Silicon Graphics, Inc.) はプロセッサを自社開発していましたが、現在は汎用 CPU を採用し、システム・アーキテクチャで勝負する企業になっています。表 1.2.1 のコンピュータ・ベンダの中でプロセッサを自社開発しているのは富士通と米国 IBM 社だけです。

● 相互接続技術がコンピュータの性能を左右

スーパーコンピュータの性能は、隣り合う CPU 同士、あるいは CPU とメモリの間の通信経路に左右されます。現在の相互接続技術は、複数の転送レートをサポートするほか、複数のチャネルを束ねて広帯域を実現できるようになっています。表 1.2.1 の相互接続技術を見ると InfiniBand (インフィニバンド) という汎用の技術がよく利用されており、この方式は費用対効果が高いと考えられます。

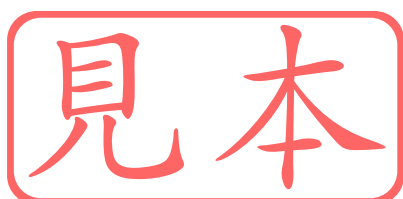
富士通の場合、「6 次元メッシュ/トーラス」ネットワーク技術を開発し、「京」に採用しています⁽¹⁾。「6 次元メッシュ/トーラス」は隣り合う CPU との通信経路が多く、CPU 間のデータ通信を最短ルートで短時間に実行できるように設計されているそうです。これらの特徴により、8 万個以上の CPU の持つ計算パワーを有効に引き出しています。

* * *

富士通の会長である間塚 道義氏は、「京の 100 倍の計算能力を持つエクサフロップス級の開発競争は始まっている。安全保障や産業競争力の観点から、世界の最先端を目指さなければ競争力は維持できない。日本のために開発を続けていく」とコメントしています⁽²⁾。米国 IBM 社は、コンピュータそのものの研究はもちろん、プロセッサや相互接続技術の研究も進めているでしょう。地位が低下しつつある日本の半導体産業の競争力向上の観点から、半導体領域においても世界最先端を目指すことが求められています。

● 参考文献

- (1) Yuichiro Ajima et al. ; “Tofu: A 6D Mesh/Torus Interconnect for Exascale Computers”, Computer 42 (11), pp.36-40, IEEE Computer Society, 2009.
- (2) 「スパコン世界一どう生かす：シェア、IBM 追撃へ一歩——富士通会長間塚道義氏」, 日本経済新聞 朝刊, 2011 年 6 月 26 日.



1.3 ミニマル・ファブでシステム LSI を製造できるのか

2010 年 5 月 19 日付けの日本経済新聞の朝刊 1 面トップに、「半導体設備 投資 1/100: 少量生産向け 超小型システム」という記事が掲載されていました。その内容は、「日立製作所、東芝、オリンパスなど国内の半導体関連企業約 30 社が、超小型の半導体生産システムを共同開発し、2014 年までに実用化する。デジタル製品や自動車で使う LSI など特定用途半導体の少量生産に適しており、1 ライン当たりの設備投資は約 5 億円で済む。LSI の生産ラインには通常、500 億円規模の設備が必要。超小型生産システムを使えば低予算で多様な半導体が生産でき、国内ハイテク産業の競争力を底上げする」というものです。

このプロジェクトの特徴としては、「約 15 種類の卓上型装置を組み合わせ一つの工場とする」、「クリーン・ルームを必要としない」、「設置面積は先端工場の 1/20 で、バスケット・コート半面の敷地に収まる」、「超小型生産システムでは直径 12.7mm の極小サイズのシリコン・ウェハを使用する」といったことが挙げられていました。

このプロジェクトは「ミニマル・ファブ」と呼ばれています。独立行政法人 産業技術総合研究所によって 2010 年 1 月に設立されたコンソーシアム「ファブシステム研究会」が、その具現化の活動を行っています。ここでは、ミニマル・ファブ構想とその適用システムが何かを概観します。

● ミニマル・ファブ構想とは

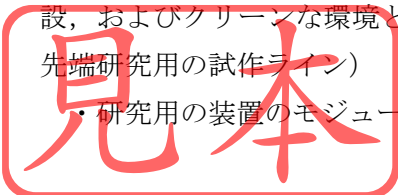
ミニマル・ファブは、ナノテクノロジーの基幹技術を応用して実現する廉価版の超小型生産システムです。「必要なものを、必要なときに、必要なだけ」生産するオンデマンド生産方式に向いています。

ミニマル・ファブは半導体の製造工程に応用できると言われています。ミニマル・ファブによって最先端プロセスを扱うことが可能となり、かつ低価格の開発費用を実現できるのであれば、チップ価格が多少高くても少量多品種で高機能、そして低消費電力の用途に利用される可能性は高いと思います。

● システム LSI や MEMS, ナノテク試作などに適用可能

ミニマル・ファブに適したシステムとして、以下の五つの領域が想定されています。

- ・システム LSI や化合物半導体などの半導体集積回路ファブ・システム
- ・ハード・ディスク・ヘッド製造ファブ・システム
- ・MEMS (Micro Electro Mechanical System) 製造ファブ・システム
- ・ナノテク試作ライン (ナノテクノロジーの基幹技術である超微細加工・造形・計測の施設、およびクリーンな環境と高価な装置が求められるナノプロセスの施設を必要とする最先端研究用の試作ライン)
- ・研究用の装置のモジュール化 (臨機応変に製造を変更できるオンデマンド製造装置)



● 「必要なものを、必要なときに、必要なだけ」という生産方式

ミニマル・ファブが言う「必要なものを、必要なときに、必要なだけ」とは、どのような生産方式なのでしょう。

製品を生産する際に使用する生産工程の基本方式を大まかに整理すると、「ライン生産方式」、「セル生産方式」、そして「ジョブ・ショップ生産方式」の三つに分類できます。以下にそれらを簡単に説明します。

1) ライン生産方式

ライン生産方式は、単一の加工品がそのために専用に設計された生産設備の間を流れます。逆行や飛び越しを行うことなく直線的に流れる傾向にあります。多くは高額の初期投資を必要とし、他の製品の生産に切り替える自由度は小さいことが知られています。大量少品種生産に向いています。

2) セル生産方式

組み立て製造業において、1人～数人の作業員が部品の取り付けから組み立て、加工、検査までの全工程、あるいは多工程を担当する生産方式のことです。この方式は、工程の段取り替え、コストの削減、および生産可能量の向上が期待できます。そして加工品をより速く生産し、仕掛かり在庫を削減するメリットもあります。中量中品種生産に向いています。

3) ジョブ・ショップ生産方式

加工品が、生産機械の機能別に分類されたグループとして設定された異なる工程を経る生産方式です。例えば塗装を含んでいる全ての生産は一つにグルーピングし、塗装部門を形成します。その場合、加工品はさまざまな部門の間を流れることとなります。大量生産のようなベルト・コンベアやラインとは異なり、工程経路は自由に選択できます。顧客の注文数に柔軟に応じてバッチ処理することが可能です。個別受注生産工場で見受けられます。初期投資は低く抑えることができますが、加工品の滞留時間は長くなります。少量多品種生産に向いています。

上記をまとめると、各生産方式は図 1.3.1 のように表すことができます。

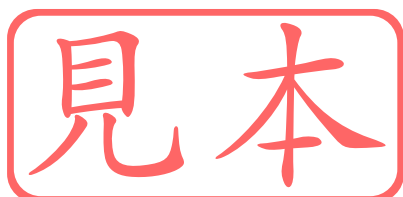
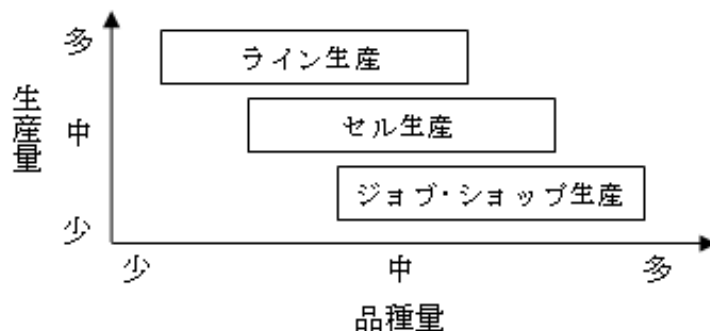


図 1.3.1 製品の量・品種と生産方式の関係



ミニマル・ファブは、「オンデマンド方式」とか「必要なものを、必要なときに、必要なだけ」に対応した生産方式と言われています。明らかにライン生産方式ではありません。ミニマル・ファブは、セル生産方式あるいはジョブ・ショップ生産方式、あるいはその組み合わせをイメージしていると考えられます。

● 資本集約の進展過程において見過ごされつつある少量多品種のニーズ

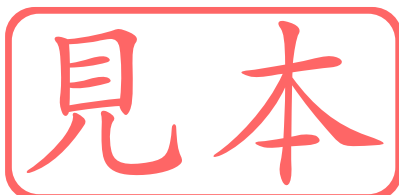
半導体産業における製造は、資本集約型の工業社会へ進展しています。つまり資本を投下すればするほど、単位資本当たりに生産される半導体の原価が下がっていく競争事業です。従って半導体の製造事業では巨額な規模の資本を投下し続ける企業だけが勝ち残ります。

これは需要者側に、大規模で複雑な半導体チップを、大量にしかも低価格で購入したいという強いニーズが常にあることも背景にあります。この需要者側とは主に、パソコン、携帯電話、デジタル民生機器などのメーカです。

こうした資本集約の進展過程の中で見過ごされてきたことは、少量多品種のニーズです。半導体ユーザにとって少量多品種のニーズが存在しないわけではありません。半導体メーカの側が、少量多品種の生産に全く対応できなくなっているのです。

ロジック LSI の場合であれば、少量多品種の用途としては FPGA が現実的な選択です。しかし ASIC と比較して、FPGA にはどのような設計回路も簡単に手元でプログラムできる柔軟性があるものの、ロジック密度と性能を犠牲にせざるを得ません。すなわち FPGA チップの単価は高く、機能や消費電力の点でも ASIC にはかないません。そもそも FPGA は半導体メーカにとっては少量多品種ではなく、メモリやプロセッサと同じ汎用製品です。

ミニマル・ファブが、(例えば現時点なら) 40nm のプロセスを扱うことができ、低価格の開発費用を実現できるのであれば、チップ価格が多少高くても、少量多品種で高機能、そして低消費電力のロジック LSI の製造に利用される可能性は高いと思います。



1.4 「ユニバーサル（万能）」と呼ばれる次世代メモリ ReRAM の開発動向

ここでは、ReRAM（Resistance Random Access Memory；抵抗変化式メモリ）の開発動向について紹介します。多くの大手半導体企業、そしてベンチャ企業がその実用化に向けて活発に研究・開発を進めています。ReRAM はその単純な構造ゆえに、さまざまな課題がまだ残っています。例えば、「最適なメモリ・セルに対する新素材は何か」、「材料系の均一性をいかに制御するか」、「歩留まりや信頼性をどうやって向上させるか」などです。最適な材料の発見に向けて数多くの試行錯誤的な検証、ならびに検証に要する時間を短縮するための研究が行われています。

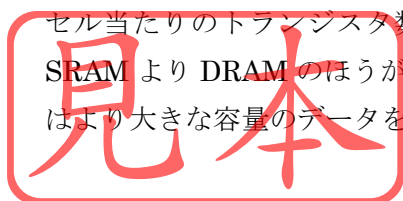
● エルピーダメモリが開発に成功

すでに会社更生手続きを進めていたエルピーダメモリは、2012 年 5 月 10 日、米国 Micron Technology 社がスポンサとなり、エルピーダメモリを支援する方向で交渉を始めると発表しました⁽¹⁾。「Micron 社がエルピーダメモリの買収を決断した理由の一つは、実用化が迫る次世代メモリの技術を手に入れたと考えたから」、「(DRAM やフラッシュ ROM の) 次世代メモリは既存のメモリに置き換わる形で 2015 年ころから普及し、市場規模は現在の約 1.5 倍の 10 兆円になると期待される」、「Micron 社が注目したのはエルピーダメモリが注力してきた ReRAM という技術だった」⁽²⁾、などと報道されています。エルピーダメモリは DRAM の開発・設計・製造・販売を行っている企業ですが、ReRAM 開発の成功を発表しています。エルピーダメモリが破たんする前の 2012 年 1 月 24 日のことです。

メモリには、揮発性メモリと不揮発性メモリの 2 種類があります。電源を切ったときに記憶したデータが失われるのが揮発性メモリ、失われないのが不揮発性メモリです。ReRAM は不揮発性メモリの一種で、データの読み書きが高速、かつ消費電力が少ないのが特徴です。これは、揮発性メモリの代表である DRAM と、不揮発性メモリの代表であるフラッシュ ROM の両方のメリットを兼ね備えている、ということもできます⁽³⁾。その意味で、ReRAM を「ユニバーサル・メモリ（万能メモリ）」と呼ぶ人もいます。

● 「ユニバーサル（万能）」と呼ばれるゆえん

揮発性メモリには、SRAM と DRAM があります。SRAM のメモリ・セル（単一の記憶素子）はフリップフロップなどの順序回路を用いてデータを格納し、読み出しと書き込みを行います。通常、データを格納する回路は四つのトランジスタ（4T）で構成され、読み出しと書き込みは二つのトランジスタ（2T）で実現します（合計 6T）。一方、DRAM のメモリ・セルは一つのトランジスタと一つのキャパシタ（1T1C）から構成されます。メモリ・セル当たりのトランジスタ数が少ないほど個々のセルを小さくできることを考えると、SRAM より DRAM のほうが低コストで実現できることになります。そして、チップ全体ではより大きな容量のデータを格納できます。ただし、データの出し入れの速度は DRAM よ



り SRAM の方が高速です。つまり、SRAM と DRAM は容量とアクセス速度で一長一短があります。

不揮発性メモリには、EEPROM (Electrically Erasable Programmable Read Only Memory) とフラッシュ ROM があります。フラッシュ ROM の場合、1 回保持された電荷は何もしなければ 10 年以上そのままです。また、100 万回程度の再書き込みにも耐えられます。MOS (Metal Oxide Semiconductor ; 金属酸化膜半導体) の間にフローティング・ゲートを入れた構造で、その電荷の蓄積で ON/OFF を切り替えます。他のメモリと比べると、製造コストは割高です。

ReRAM のメモリ・セルは一つのトランジスタと一つの抵抗 (1T1R) で構成され、セル面積は小さくなります。このメモリ・セルの中の抵抗値を変化させることで、データを書き込みます。高密度化が可能であり、チップの低コスト化を図れます。つまり、優れたスケーリング (微細化に向けた、設計ルールと比例した優れた縮小可能性⁽⁴⁾) を実現できるわけです。

整理すると、ReRAM には「DRAM 相当の大きな記憶容量」、「DRAM 以上 SRAM 以下の高速動作 (数 ns レベルの読み出し/書き込み時間)」、「他のメモリより低い消費電力」といった特徴があります。そして、電源を切ってもデータは消えません。データの再書き込み可能回数はフラッシュ ROM 並みとされています。これが、ReRAM が「ユニバーサル・メモリ」と呼ばれ、将来性を期待されているゆえんです。

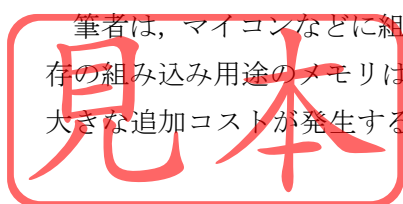
● マイコンなどへの組み込み用途の実用化は早い

上記のエルピーダメモリの開発事例は、回路線幅が 50nm で容量は 64M ビットです。これは DRAM で考えると、1999 年ころの製品に相当します。ReRAM を回路ブロックとして LSI の中に組み込む (Embedded) 用途としては十分な容量ですが、単一チップの用途としてはまだ不十分です。

パナソニックが 2012 年 2 月 23 日に発表した ReRAM のメモリ・セルは、1T1R ではなく、多層クロスポイント構造を採用しています。つまり、トランジスタを用いていません⁽⁵⁾。高速大容量の ReRAM を実現するだけでなく、待機時電力ゼロを目指そうという取り組みです。ただし、この時点で実証されている容量は 8M ビットで、これはエルピーダメモリが開発した ReRAM の 1/8 程度です。

続いて 2012 年 5 月 15 日に、パナソニックは ReRAM 内蔵マイコンを発表しています⁽⁶⁾。0.18 μ m の CMOS プロセスに、128K バイト相当 (およそ 1M ビット) の ReRAM ブロックを組み込んでいます。これは、フラッシュ ROM 内蔵マイコンの置き換えを狙っています。この ReRAM ブロックは、多層クロスポイント構造ではなく、1T1R 構造です。

筆者は、マイコンなどに組み込む用途では、ReRAM の実用化は早いと考えています。既存の組み込み用途のメモリは、40nm より小さいプロセス・ノードでは製造が困難、または大きな追加コストが発生すると見られているからです。つまり、この用途での研究開発投



資は、先を見越した商品戦略と考えられます。

最後に米国の事例を一つ紹介します。2012年2月6日に米国 Rambus 社が、米国 Unity Semiconductor 社を 3500 万米ドルで買収すると発表しました⁽⁷⁾。Unity 社の設立は 2002 年で、同社は 2014 年に 1T（テラ）ビットの ReRAM を量産化することを目指していたベンチャ企業です。エルピーダメモリを支援する協議を進めている Micron 社も Unity 社に株式投資を行っており、Unity 社は Micron 社の 300mm（12 インチ）ファブを利用していました。

この Unity 社に株式投資していた米国のベンチャ・キャピタリストの話によると、総額で 2.5 億米ドルを調達し、テーク・アウトの回数は 5 回だったそうです。つまり数多くの材料と技術で構築して最適と考えられた独自の仮説を検証する実験が、単純計算で 2 年に 1 回実施され、1 回当たり 5000 万米ドルかかったことになります。

海外では ReRAM の実用化を目指すベンチャ企業は 10～30 社ほどあり、その多くはとん挫しているということです。多大な投資が必要な ReRAM の開発は、ファブレス半導体ベンチャ、あるいは半導体 IP ベンチャにはとてもハードルが高いものとなっているようです。

● 参考文献

- (1) エルピーダメモリ；「マイクロンとの協議開始に関するお知らせ」，2012 年 5 月 10 日，<http://www.elpida.com/pdfs/pr/2012-05-10j.pdf>
- (2) 日本経済新聞，「米マイクロン エルピーダ買収，次世代型再編の呼び水」，2012 年 5 月 9 日朝刊。
- (3) エルピーダメモリ；「新メモリ（高速不揮発性抵抗変化型メモリ，ReRAM）の開発に成功，64M ビット メモリセルアレイ動作を確認」，2012 年 1 月 24 日，<http://www.elpida.com/ja/news/2012/01-24r.html>
- (4) 宮本 恭幸；電子デバイス（電子情報工学ニューコース），培風館，2009 年 2 月（多くの一般工科の教科書が物理現象を中心とした内容であるのに対して，本書には競争社会に身を置く技術者や実務者が必要としている重要な時事ネタが散りばめられている。ユニークで一般人にも分かりやすく，役に立つ）。
- (5) パナソニック；「業界最高速，ReRAM の書込み速度 443MB/s を実現，2 層構造のクロスポイント型で新 ReRAM を開発，待機電力ゼロの実現に一步前進」，2012 年 2 月 23 日，<http://panasonic.co.jp/corp/news/official.data/data.dir/jn120223-1/jn120223-1.html>
- (6) パナソニック；「業界トップの低消費電力を実現，業界初，新不揮発性メモリ ReRAM 内蔵マイコンを開発，2012 年 5 月より評価用スタータキット提供開始」，2012 年 5 月 15 日，<http://panasonic.co.jp/corp/news/official.data/data.dir/jn120515-1/jn120515-1.html>
- (7) Rambus；「Rambus Acquires Unity Semiconductor」，2012 年 2 月 6 日，http://www.rambus.scs9h.com/us/news/press_releases/2012/120206.html



1.5 日本の産業競争力強化の観点で注目が集まっているパワー・デバイス

「電力供給の全体最適化」という視点に立つと、多数の電子機器を連携・協調運用することが不可欠となります。そして、これを実現するために電力制御ツールの高機能化と大量導入が求められています。ここで重要な構成要素となるのがパワー・デバイス（パワー半導体）です。

以下では、パワー・デバイスを取り巻く状況と、現在パワー・デバイスに注目が集まっている理由について述べます。

● 日本企業にも競争力を伸ばせるチャンスがある

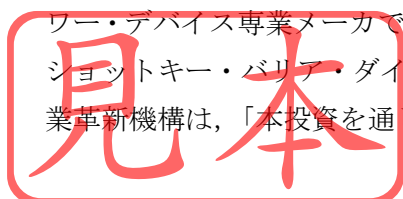
デジタル信号を処理する LSI は、スケーリングによる低電圧化が進んでいます⁽¹⁾。しかし現実には、高い電圧と大きな電流を必要とする機器がまだまだあふれています。例えば、多くの電化製品の AC アダプタにはインバータが入っています。日本では 100V の電圧を取り扱わなければなりません。液晶パネルのバックライト照明の冷陰極管は 1kV 程度の電圧が必要です。そして大音量用アンプが必要なら、そしてモータを力強く回すことが必要なら、やはり高電圧・大電流が求められます。

高電圧を取り扱う半導体はパワー・デバイスと呼ばれています。よく用いられるのが、制御信号に応じて ON 状態と OFF 状態を切り換えるスイッチング機能です。ON 状態では ON 時の抵抗値が、そして OFF 状態では OFF 時の耐圧が選定基準となります。バイポーラ・トランジスタや MOSFET などのパワー・トランジスタが数多く利用されています。パワー・デバイスにはダイオードもあり、これは整流が主用途です。このほか、IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) や GTO (Gate Turn-off Thyristor)、トライアック、サイリスタなどがあります。

パワー・デバイスは、その他の LSI と比べると世の中の認知度は高くありません。矢野経済研究所の統計によれば、パワー・デバイスの世界市場の規模は 2008 年で約 150 億米ドルだそうです。同年の全 LSI (MOS メモリ、MOS プロセッサ、コントローラ・システム LSI、アナログ系 LSI の合計) の売上高がおよそ 2,000 億米ドルなので、全 LSI 市場の約 1/13 程度の規模ということになります。認知度が低いことにも、納得がいきます。

重要な点は、この分野で日系のメーカーのシェアが高いということです。上位 10 社中 4 社が日系企業（東芝、三菱電機、ルネサス エレクトロニクス、富士電機）です。ただしどのメーカーも 10%以上のシェアを持っているところはなく、今後競争の激化が予想される分野とされています⁽²⁾。

また、日本の産業競争力強化につながる戦略的な投資を行っている産業革新機構は、パワー・デバイス専門メーカーである日本インターへの投資を行っています⁽³⁾。日本インターのショットキー・バリア・ダイオードのシェアは、世界第 2 位です (2010 年 11 月時点)。産業革新機構は、「本投資を通じて、最先端設備の増強、製品ラインナップの拡充、先端技術



製品の共同開発に必要な資金を供給します。また、外部人材活用などを通じてマネージメント体制を強化します。中長期的には、本事業を起点として、国内外のパワー・デバイス・メーカーとの段階的な再編を目指します」と述べており、パワー・デバイス領域の戦略的な合従連衡を目指しているようです⁽⁴⁾。

ここで注目していただきたいのは、パワー・デバイスの世界はいまだ合従連衡がそれほど展開されていない領域であること、そして日本企業にもまだ競争力を伸ばせるチャンスが残されていることです。

● 1980 年代から日本企業の十八番（おはこ）だった

昔の話ですが、筆者は 1980 年代初めに老舗の米国メーカーが製造したパワー・トランジスタにかかわる大きな商売に携わりました。米国 IBM 社の大型コンピュータ用電源の製造を、日本の大手部品メーカー（フェライト等磁性材料、コイル、トランス、セラミック・コンデンサで有名な企業）がサブコントラクター（下請け）として受注したのです。当時は、多くの米国メーカーが日本企業に組み立てを委託していました。為替レートが 1 米ドル 200 円を超えていた時代です。それこそ地方の工場はどこもフル稼働でした。これは、台湾の Hon Hai Precision Industry 社（鴻海精密工業）、シンガポールの Flextronics International 社、米国 Jabil 社といった EMS（Electronics Manufacturing Service）事業の原型のような商売でした。

IBM 社が設計した電源には、バイポーラ型と MOSFET 型のパワー・トランジスタが多数搭載されていました。もちろん設計や図面製作のほか、BOM（Bills of Materials；部品表）の指定も IBM 社が行いました。

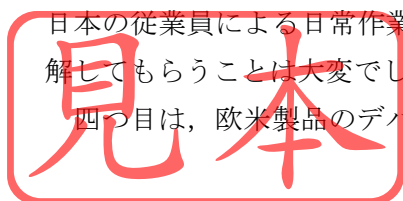
当時は米国製のパワー・トランジスタを日本メーカーが購入するのは希有なことでした。その理由はいくつか考えられます。

一つ目は、パワー・トランジスタの事業は当時も日本の大手電機メーカーの十八番（おはこ）だったことです。日本電気（NEC）、東芝、日立製作所、三菱電機、富士電機をはじめ、参入企業が多かったのです。

二つ目は、米ドル/円の為替レートの関係で輸入品の価格競争力が現在より低かったことです。半導体市場の秩序を維持するという目的で、「最低価格の設定」、「第三国での価格監視」、「日本市場への米国メーカー製半導体の参入拡大」を約束した日米半導体協定締結後の 1980 年代は、日本市場における外国製半導体のシェアは 20%にも達していませんでした。1998 年には 34%になり、2006 年時点では 43%を超えたそうです⁽⁵⁾。現在の状況を見ると、隔世の感があります。

三つ目は、日本のユーザの受け入れ検査において米国製品の不良率が高かったことです。日本の従業員による日常作業の改善や進歩が品質の向上に貢献していることを米国人に理解してもらうことは大変でした。

四つ目は、欧米製品のデバイスの信頼性の問題です。米国半導体メーカーの多くは、信頼



性試験や材料の品質についての意識があまり高くありませんでした。場合によっては市場で不具合が発生し、賠償問題を引き起こしていました。

五つ目は、パワー・トランジスタのパッケージの対応です。JEDEC で規定されているパワー・トランジスタのパッケージは樹脂モールドされています。パッケージの片方から端子が出る一方、放熱のためのネジ穴付き金属タブが一体となっています。当時はネジ穴付き金属タブも含めて樹脂モールドで覆ったパッケージを、日本企業が先行して市場投入していました。これにより、絶縁や放熱のためのシートが不要になる、というメリットがありました。この対応でも米国のメーカーは出遅れました。

● 産業界はパワー半導体の先端研究開発に注目

日本の産業競争力の強化に関心を持つ産業界の有志企業（大手製造企業）が集まる産業競争力懇談会は、2020 年代を見据えた二つの基盤技術構築を提言しています⁽²⁾。一つは高性能半導体で、もう一つはパワー半導体の先端研究開発です。

後者は、電力の安定供給や省エネルギーのために電力の運用を管理するエネルギー管理システム（EMS：Energy Management System）への波及効果が期待されています。例えばスマート・グリッドやスマート・コミュニティの技術です（1.1 節を参照）。また、現行の Si（シリコン）材料では実現できない大幅な効率改善に向けた新材料にも大きな期待が寄せられています。

パワー・デバイスはニッチな市場であるがゆえに見過ごされがちですが、産業機器や鉄道、EV（電気自動車）、家電機器、太陽光発電、風力発電など、底堅い数多くの用途が存在します。身の回りのエネルギーの高効率化に貢献するパワー・デバイスは、省エネルギーのキー・デバイスと言えます。

● 参考文献

- (1) 宮本 恭幸；電子デバイス（電子情報工学ニューコース），培風館，2009 年 2 月。
- (2) 産業競争力懇談会（COCN）；半導体戦略プロジェクト ― 産業競争力強化のための先端研究開発，2012 年 3 月 6 日，<http://cocn.jp/common/pdf/thema41-L.pdf>
- (3) 日本インター；第三者割当増資の実施に関して，2010 年 11 月 1 日，<http://www.niec.co.jp/company/pdf/greeting.pdf>
- (4) 産業革新機構；「パワーデバイス専業メーカーである日本インター株式会社への投資」を決定，2010 年 11 月 1 日，http://www.incj.co.jp/investment/deal_015.html
- (5) 豊崎 禎久；シリーズ 2：日本半導体産業復活のソリューションと警鐘（9），2010 年 6 月 17 日，http://a-gd.blogspot.jp/2010/06/2_2362.html

