

解説

デジタル・ノマドの時代

— CMOS 革新のインパクト —

牧本次生

半導体産業人協会 (SSIS)

はじめに

本文は IEEE Solid State Circuits Magazine (固体素子回路誌、2013年冬号) に掲載された論文をベースに、CMOS 革新によって拓かれた新しいライフスタイルについて述べたものである。私は1997年に英国の友人デビッド・マナーズとの共著で「デジタル・ノマド」(英文版)を上梓した。翌年には中国語版「遊牧上班族」に続いて日本語版「デジタル遊牧民」が出版された。この本では、半導体の技術革新が続くことによって、近い将来にポケットに入るくらいの万能情報端末が出現し、我々は時間や場所の制約を受けることなく、そのライフスタイルは大きく変わるであろうことをのべたものであった。「デジタル・ノマド」の出版からちょうど10年が経過した2007年にアップルから iPhone が発売され、それを契機に万能端末の時代が始まっている。人々は電車の中や空港などでスマホやタブレットを自在に操って、仕事や遊びを享受できるようになってきた。2010年ころからは「ノマド」関連の多くの本が出版され、街には「ノマド・カフェ」が現れた。今はまさにデジタル・ノマドの時代と呼ぶことができる。このような大きな社会的変革を可能にしたのは半導体革新の威力であり、その中心的な役割を果たしたのは CMOS 革新であった。

なお、本論文が掲載されたIEEE固体素子回路誌(2013年冬号)はローパワーICに関する小特集であり、ゲスト・エディターは増原利明氏(LEAP 専務理事)である。私の論文は増原氏からの招待によって執筆したものである。締切が2012年の9月であったため、夏の暑いさなかで辞書を片手に英文と苦闘しながら論文をまとめたことが思い起こされる。

以下の記述は原文の逐語的な翻訳ではないが、おおむね原文に沿っての内容の解説である。

ライフスタイルの変化

「デジタル・ノマド」はモバイル情報端末や高速通信網の進歩によってもたらされた、人々の新しいライフスタイルを象徴する言葉である。このような技術革新によって、人々は時間や場所の制約から解放されたのだ。「デジタル・ノマド」と題する本はデビッド・マナーズとの共著として1997年に出版さ

れた。最初のもは英語版であり、翌年には中国語版に続いて日本語版も出版された。図—1は本の写真と二人の著者の写真である。

余談になるが、日本語版が結果的に最後になったのは出版社が中々決まらなかったためであった。英語版の出版と並行して日本語版の出版の準備が始められ、いくつかの出版社への打診を始めたのであるが、引き受けてくれるところは見つからなかった。その主たる理由は「デジタル・ノマド」という言葉は聞いたこともなく、日本人には馴染みがない、というものである。そのような間に台湾の出版社が英語版の原書を見つけて、中国語に翻訳して出版したいとの申し入れがあり、当方からの承諾を得て走り始めてしまったのである。ある日、偶然にも工業調査会の志村幸雄社長(当時)にお会いして、この話をしたところ、即座に「それは面白いコンセプトだ。わが社で引き受けましょう」ということで話がまとまった。その後急ピッチで出版作業を進めたのであるが、結果としては中国語版の次になったのである。しかし、志村さんのご英断がなければ、日本語版の出版はさらに遅れることになったことは間違いないところである。



Fig. 1 “Digital Nomad” published in 1997 and picture of co-authors

図—1 1997年発行の「デジタル・ノマド」及び共著者の写真

10年ほど前から、我々のライフスタイルは少しずつ変化してきた。即ち、伝統的なスタイルから遊牧民的なスタイルへの変化である。今世紀に入る前のことを振り返るに、多くの人々が都会の中心地にある会社に向かって朝早く出勤し、夕方には帰路につくのが普通であった。電車か車を使って午前9時または10時までには会社に着かなければならない。また、午後5時または6時にはそろって退社する。そのような人々のきわめて規則的な移動が交通渋滞や電車のラッシュアワーの大きな原因となったのである。

「デジタル・ノマド」が出版された1990年半ばには、携帯電話がようやく立ち上がり始めていたが、その機能は「通話のみ」に限られていた。今では個人持ちの高性能モバイル端末の出現によって状況は全く異なっている。即ち、モバイルPC、タブレットPC、さらにはスマートフォンの登場だ。ほとんどの人が何らかの形でノマド・スタイルを享受しているのである。例えば電車の中の乗客の多くがスマホを片手に操作している情景はごく普通のことになっている。

図—2は「デジタル・ノマド」の概念的なイメージである。高性能のモバイル情報端末さえあれば、ネットワークを通じて世界中の情報にアクセスすることが可能である。会社のオフィスに午前9時きっかりに行く必要はなく、時間や場所からの制約から逃れられるのだ。このような快適なノマド・スタイルを可能ならしめるには三つの必須要件がある。第1には高性能のモバイル端末であり、第2に高速の通信網であり、第3にはクラウド・コンピューティングである。このような近代的なインフラストラクチャーがなければ、我々のライフスタイルの変革は極めて難しかったであろう。図内にはアップルのスティーブ・ジョブズの写真があるが、ジョブズは「デジタル・ノマド」の時代を開くに際しての最大の貢献者である。

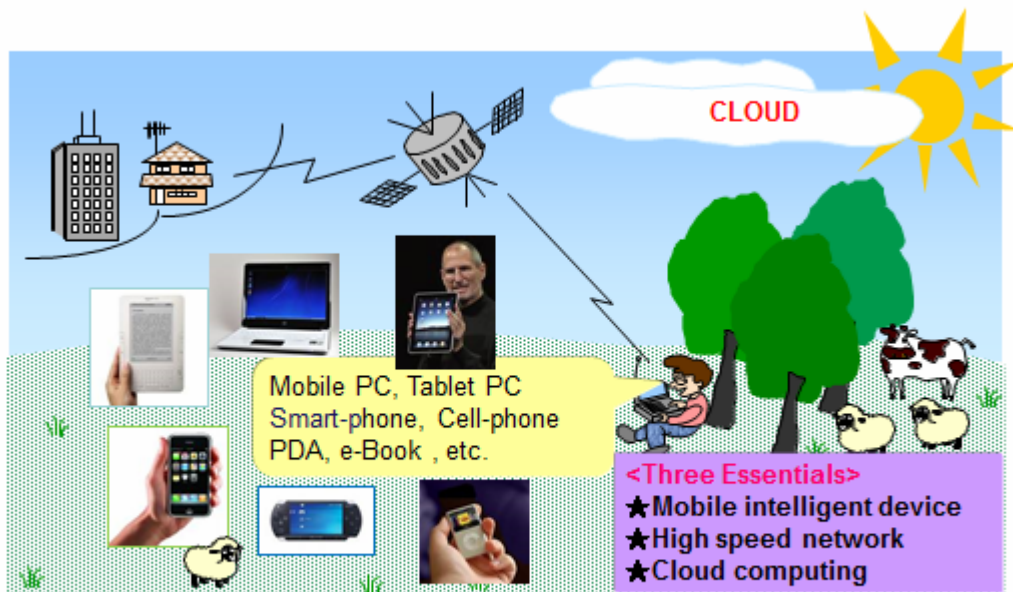


Fig. 2 Conceptual image of “Digital Nomad”

図—2 「デジタル・ノマド」の概念的なイメージと三つの必須インフラストラクチャー

図—3には電子機器が全体として小さく、賢くなることによって「ノマディック・ツール」へと収斂していく状況を示している。コンピュータ製品、民生電子機器、通信機器はそろって「デジタル・コンシューマ製品」と総称される高性能モバイル情報端末に融合していきつつある。以前には、コンピュータ分野、民生品分野、通信分野には明確な市場の境界があったが、その境界は次第に消滅しており、市

場融合が始まっている。このような市場融合を進めているのは次の二つの力だ。第一に情報のデジタル化であり、第二にはCMOS革新である。この論文においてはCMOS革新の歴史と共にそれに伴う社会へのインパクトについて、技術論的な視点からでなく、マクロな観点から述べることにしたい。



Fig. 3 Market convergence driven by digitalization of information and CMOS innovation

図—3 情報のデジタル化とCMOS革新によって進められる市場の融合

さてここで、電子機器の歴史的な発展の過程を振り返ってみよう。その進歩は次のような四つの要求を満足させる方向に向かってきたことが分かる。

- 1) より賢い方向(即ち、より高い情報処理能力。指標としてはMIPSまたはFLOPSなど)
- 2) より小さな方向(携帯性を高めるため。指標としては機器の体積または重量)
- 3) より低い電力消費の方向(バッテリー・ライフの長寿命化のため)
- 4) より安いコスト(個人が購入しやすいように)

このような四つの要求は電子機器の「Figure of Merit=よさの指数」として次のような式にまとめられる。

$$\text{Figure of Merit} = \frac{(\text{Intelligence})}{(\text{Size}) \times (\text{Cost}) \times (\text{Power})}$$

この式の中で(Intelligence)は個々の電子機器について定義がなされなければならない。たとえば、汎用コンピュータの場合は「MIPS値」、信号処理システムでは「MOPS値」、数値計算主体のコン

コンピュータでは「FLOPS 値」を用いるのが適している。その他のパラメータについては自明であり、説明を要しないであろう。ここで注意しなければならないのは (Size) は小さければ小さいほどよいということとは言えず、そこには限界がある。それは使う人とのインタフェイスの問題であり、そのよい例が電卓である。電卓は60年代に製品化され、80年代まで小型化が進められたが、クレジットカードサイズのカード電卓が出た時点でその進歩は止まった。これ以上さらに小さくすることは技術的には可能だとしても、使う人にとってはかえって使いにくくなるからである。

しかし、一般的に言えば Figure of Merit が高ければ高いほど「ノマディック・ツール」としての価値は高くなるということができよう。半導体技術はこの Figure of Merit の値をできるだけ高くする方向に進歩してきたのである。そしてこの点において、CMOS 革新はもっとも大きな役割を果たしてきた。CMOS 革新こそが世の中をノマディック・スタイルに変えるための中心的な力だったのである。

なお、Figure of Merit の定量的な推移については牧本資料室第4展示室をご参照ください。

CMOS 革新の歴史

CMOS は長い歴史をたどって今日に至っている。これを発明したのは当時フェアチャイルドの技術者の F.M. ワンラスであり、彼はそのアイデアを1963年の ISSCC で発表した。それから5年後の1968年に初めての CMOS IC が RCA によって市場導入されたのである。この時の CMOS は低消費電力の面では他のデバイス(たとえば、バイポーラ、PMOS、NMOS など)よりはるかに優れていたが、スピードは遅く、値段は高く、集積度は低かったのである。そのような状況は1970年代まで変わることはなかった。この時代の業界常識即ちインダストリー・コンセンサスは次のように要約することができる。

- 1) 半導体の主流デバイスは将来にわたって NMOS である
- 2) バイポーラはアナログや高速の応用分野で使われていけよう
- 3) PMOS は次第に消えていけよう
- 4) CMOS は低消費電力が必須のニッチ市場向けの特殊デバイスとして残るだろう

このような状況に劇的な変化が起こったのは1976年に日立の酒井芳男と増原利明(当時、日立の中央研究所)によって「ツインウエル CMOS」が発明され、CMOS のリエンジニアリングが始まってからである。日立の中央研究所と半導体事業部の技術者チームは、この新技術 CMOS をベースとして、当時最速を誇っていたインテルの4K スタティック RAM2147に匹敵するデバイスを作ることに挑戦したのである。数々の困難を克服しながら、当初の目標を達成することができた。その成果は78年の ISSCC においてチームのリーダーであった増原によって発表されたのである。

表-1は4K SRAM の NMOS 版と CMOS 版についてその諸元を比較したものである。当時世界最速であったインテルの2147は NMOS 技術で作られており、アクセスタイムは55-70nsであった。これに対して日立の6147はインテルの製品と機能、ピン配置ともにコンパチブルであったが、技術的には新開発の CMOS 技術が使われていた。6147はインテルの2147と同等の速度を達成したばかりでなく、その消費電力は動作モードで1/8、スタンバイ・モードでは1/15, 000と圧倒的な改善がなされたのである。日立の6147はまさに画期的なデバイスとして、学会における注目を浴びた。

	2147 / Intel (1977)	6147 / Hitachi (1978)
Product	HMOS 4K Static RAM	HiCMOS 4K Static RAM
Technology	NMOS	Twin-Well CMOS
Speed	55 / 70 ns	55 / 70 ns
I _{Active} /I _{Standby}	110 mA / 15 mA	15 mA / 0.001 mA
Chip Size	16.2 mm ²	11.5 mm ²

Table 1 Comparison of parameters for NMOS and CMOS 4K SRAM

表-1 4K SRAM の NMOS 版と CMOS 版の諸元の比較

私はこの当時、日立半導体事業部のメモリ部門の責任者であったが、私にとっての課題はこの新しい CMOS 製品を事業として如何にして成功させるかということであった。どんな新技術についてもいえることであるが、その技術が事業として成功するためには三つの大きな山を越えなければならない。第1にはその技術を使った強い製品の開発であり、第2には価格に見合ったコストでの大量生産であり、そして第3には売上・収益につなげるための有効な販売活動である。この三つの山はそれぞれに性格の異なる活動であり、そこに携わっているのはすべて異なるタイプの人々である。携わるすべての人が同じ方向に向かい、考え方とミッションを共有するような形に組織的な運営がなされなければならない。これが当時の私の役割だったのである。

日立の最初のCMOS製品であった6147の第一の目的は、CMOSがNMOSに対して技術的に優れていることを示ことであったが、研究者・技術者の目からすればそれは大成功であった。この開発によって日立は1979年のIR-100賞を受賞した(図-4)。IR-100賞はその年に商品化された製品の中から選ばれた100の優れた製品に与えられる賞である。4KSRAMの6147は半導体

技術の方向をNMOSからCMOSに変えたという意味において、明確なマイルストーンを記すことになったのである。

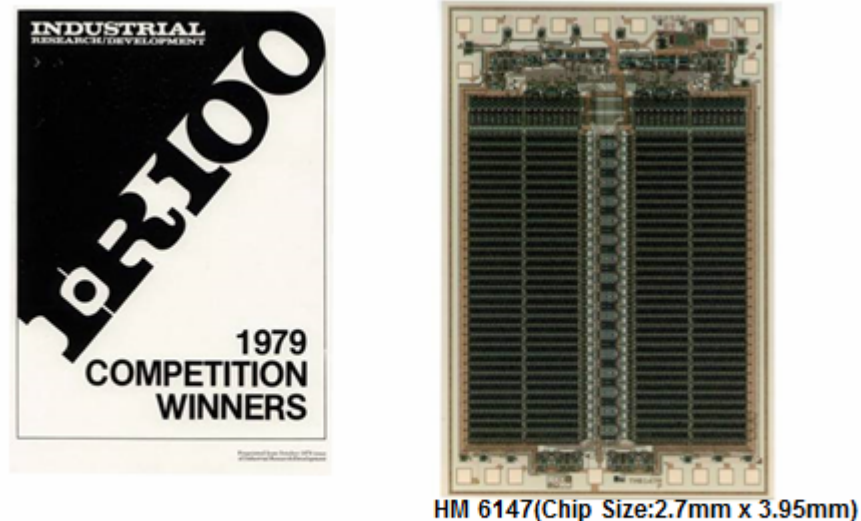


Fig.4 1979 IR-100 awarded to CMOS 4K SRAM (left), and chip photo of HM6147(right)

図—4 CMOS 4KSRAM に与えられた1979年のIR—100賞(左)と6147のチップ写真(右)

この時点において、4Kビット製品の市場規模は限られていたので、商品としての成功のためには、4KSRAM よりもはるかに大きな市場規模の製品を市場に出さなければならなかった。それは16KSRAM であった。この当時、16KSRAM は集積度の面でも最先端であり、その市場規模は4K に比べてはるかに大きいと予想された。この製品を開発し、生産し、そして販売するために研究所・事業部が一体となった大プロジェクトが組織された。プロジェクトの目標はこのデバイスで世界のトップ・ポジションを取ることである。プロジェクトチームのメンバーは、この共通の目標を目指して、それぞれの持ち場においてベストを尽くしがんばった。16KSRAM のプロジェクトは順調に推移し、商用サンプルが作られ、そして有望な顧客向けに評価用サンプルとして出荷された。

ある意味で、このプロジェクトは1970年代末の「業界常識(インダストリー・コンセンサス)」に対する挑戦でもあった。この当時NMOSこそ半導体の主流デバイスであると信じられていたのである。プロジェクトの途上、我々にはコンペチタからの声もそれとなく聞こえてきたのだが、典型的なコメントは次のようなものであった。即ち、「日立の新型CMOSチップは、もし量産ができるなら凄い製品だ」。裏を返せば、サンプルはできるかも知れないが、量産は難しいだろうとみられていたのである。先に

述べたことだが、開発と製造とは全く異なる面がある。従って、優れたデバイスが開発されたとしても、それが大量に生産できなければその価値は大いに減殺されてしまうのだ。従って、我々は何としても新型CMOS製品はコマーシャル・ベースに乗るような価格で量産できることを証明しなければならなかったのである。

顧客サイドにおいても我々のCMOS製品に対してある種の懸念を抱いていた。それは他の企業が日立と同じ道を歩いていないので、いわゆる「セカンドソース」がなかったからである。従って私は直接顧客を訪問して、CMOS化の基本的な考え方を説明し、供給能力や将来計画についても詳しく言及した。顧客とのこのような直接的な接触によって、私は大量の在庫を持てば顧客側の懸念は消えるであろうと確信するに至った。なぜなら、大量の在庫が持てるということは、この製品が大量生産可能であることを、間接的ながら、意味するからである。しかしながら、半導体事業部全体としては在庫のレベルは厳しく管理されており、大量の在庫を持つことは難しかった。そこで一計を講じて、この在庫を「戦略在庫」と名付け、通常の在庫とは異なるものであることを説明して、管理部門の了解を取り付けたのである。

生産は極めて順調に立ち上がり、「戦略在庫」は私の予想を上回る形で積みあがって行った。16KSRAMの新製品をいくらでも出荷できる体制が出来上がったのである。しかしながら、顧客からの注文は一向に入ってこなかった。そのような間にも在庫レベルは積み上がって危険レベルに達し、事業部のトップが目をつけるまでになった。トップからは我々が業界常識を無視して、CMOSに指向していることに対して、大きな疑問符が付けられた。CMOSからNMOSに方向転換すべしというトップからのアクションが、まさにとられようとしていた。ちょうどそのようなタイミングにおいて、幸運の女神がほほ笑んだのだ。顧客からの大きな注文が舞い込んだのである。その後16KSRAMの売れ行きは順調に立ち上がり、1981年に日立はこのデバイスで世界のトップになったのである。

16KSRAMの商用化に成功したことで、日立社内ではCMOSに対する自信が深まった。次の戦略はこの技術をSRAM以外の製品、即ちマイクロプロセッサ、マイクロコントローラー、ロジック製品、DRAMなどに展開していくことであった。この中で、まず8ビット・マイクロプロセッサが選ばれた。こうして、最初の8ビットMPUのHD6301は1981年に市場に導入された。表—2は8ビットMPUのCMOS版とNMOS版を比較したものである。NMOS版は以前に開発され、すでに量産中のものであった。この表からわかるように、CMOS版のスピードはNMOS版より2倍も早く、消費電力は動作モ

ードで1/30、スタンバイ・モードでは1/7000と桁違いに小さかった。この8ビット製品の成功はMPUやロジック製品についてもCMOSが進むべき方向であることを明示することになったのである。

		6801 / Hitachi (1979)	6301 / Hitachi (1981)
Product		8bit MPU	8bit MPU
Technology		4 Micron NMOS	3 Micron CMOS
Speed		1 MHz	1 MHz, 1.5MHz, 2MHz
Power	Active	900 mW	30 mW (f = 1MHz)
	Standby	70 mW	0.01 mW
Pin Count		40 Pins	40 Pins

Table 2 Comparison of parameters for NMOS and CMOS 8bit MPU

図—2 8ビットMPUのNMOS版とCMOS版についての諸元の比較

日立のCMOS版8ビットMPUの発売開始直後から、エプソン(当時は信州精器)ではこのCPUを2個使った「オールCMOSコンピュータ」の開発プロジェクトがスタートした。このプロジェクトは大成功を収め、HX-20と名付けられた新製品は1982年に市場導入となったのである。同社によればこの製品は世界初のハンドヘルド・コンピュータであり、同社の「マイルストーン製品」の一つに挙げられている。これはノマディック・ツールの先祖と呼ぶのが適当であろう。

半導体の学会や業界においては、1980年代の初めから半ばにかけて、「半導体の主流はNMOSかCMOSか」という議論が多くなされた。このテーマを最初に取り上げたのは1981年のISSCCパネル・ディスカッションである。「VLSIはCMOSかNMOSか」といったタイトルで、主としてデジタルICを対象にしたものであった。そして80年代半ばにかけて、デジタルICの分野では次第にCMOS派が勢いを増していった。80年代の半ば以降では、CMOSへのシフトがアナログICや通信用ICでも進められたが、この場合はバイポーラからBiCMOSへ、そしてCMOSへというパターンであった。また、同じような時期にDRAMやフラッシュ・メモリもCMOS化が進められた。さらに1990年以降にはサーバー向けなどのハイエンド・プロセッサについてもCMOSへのシフトが進んだ。最終的にはRFデバイスについてもCMOS化が進められ、2001年のISSCCパネル・ディスカッションにおいては「RF-CMOSの時代」というテーマが採用され、CMOS時代の幕開けを告げたのである。

図—5は半導体デバイス構造が次第にCMOSに収斂していく状況を示したものである。端的に言えば、過去の数十年は「CMOSへの収斂の時代」と呼ぶことができよう。RCAが商用化した最初のCMOS製品は軍需向けなどの超ローパワー機器向けであり、スピードはこの次であった。次に開かれた大きな市場は時計と電卓であるが、そのいずれも高速性能は必要としなかった。

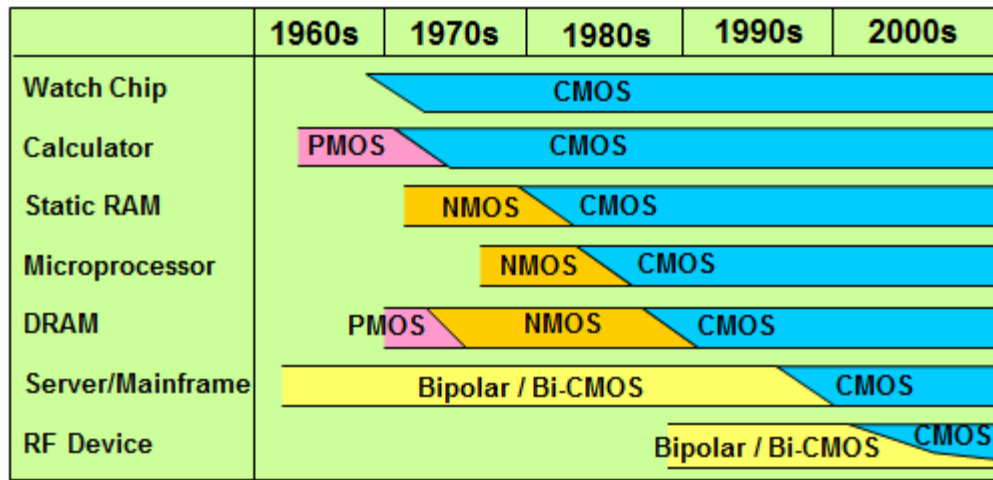


Fig. 5 Evolution of device technology converging to CMOS

図—5 CMOSへ収斂する半導体デバイス構造の変遷

日立が1970年代末に導入した高速 CMOS SRAM、6147(4K)と6116(16K)とはCMOSが、そのローパワー特性を保ったままでNMOSと同等のスピードを出すことができることを業界で初めて示すものであった。その他のデバイス、即ちMPU, DRAM, フラッシュ・メモリなどは図—5に示すような形でCMOSに追随したのである。さらに、このような技術シフトはこれまでバイポーラやBiCMOSを使っていたメインフレームにも及んだ。この点について、コンピュータ界の巨人IBMの元会長ルイス・ガスナーの面白い証言を紹介しよう。これは彼の自伝「巨像も踊る」からの引用であるが、CMOSがいかにIBMのメインフレーム事業にインパクトを与えたかについて触れた1節である。

- IBMのメインフレームの売上はマーケットシェアの低下によって低減傾向であった
- ここで技術陣は大胆な戦略を取り、全く異なるアーキテクチャの採用に踏み切った：
バイポーラからCMOSへの転換である
- もしこのときCMOSへシフトしなければ、メインフレーム事業は1997年には消えていただろう

サーバーやメインフレームの技術がCMOSにシフトしたことによって、ほとんどの電子機器は、小さいものから大きいもの、モバイルから据え置きまで含めて、CMOSで作られるようになってきている。高速CMOSは今日の文明の基盤を築いたといっても過言ではない。

将来展望

<技術面の動向>

これからの半導体分野において予想されていることの一つは「技術方向の多様化」である。一つの方向はムーアの法則の延長に沿ってデバイスの性能を上げ、集積度を高める方向であり、これはモア・ムーアの方向と呼ばれている。これに対し、デバイスの微細化に依存せず、物質のもつ基本的な性質を活用する製品群が立ち上がっている。即ち、センサー、MEMS、ディスプレイ製品、パワーデバイス、バイオチップなどの新顔である。これらはモア・ザン・ムーア(MTM)と呼ばれており、これから立ち上がるロボット分野、医療・健康分野、スマートグリッド応用、センサーネットワークなどのマーケットに対して大きな貢献をすることが期待されている。

モア・ムーアの方向では予見できる将来においてCMOSがデバイス構造の主流として残るだろう。現在のところ、CMOSに置き換わるような新型デバイスは見当たらないからである。IC技術の中でのCMOSの強みは数多くの機能を具現できる点にある。例えば、デジタル論理、メモリ、バッファ、クロックツリー、アナログ、RF、電源、温度補償、ESD保護などの機能が含まれる。しかし、将来は過去の単純な延長ではない。以下に述べるようにCMOSはいくつかの異なった道筋のイノベーションを辿ることになるだろう。

微細化によってチップ上の集積度は増加を続けるが、これまでとは異なる材料や、FinFETと呼ばれる新しいデバイス構造の採用が必要になるだろう。しかしながら、チップ上の集積度を上げることはますます難しくなる。その理由は第一にデバイスのサイズが、物理的な限界のみならずリーク電流の増大、特性バラツキといった実用的な問題によって次第に限界に近づいていくこと、そして第二にデバイス開発や製造のための投資が巨大になっていくからだ。このような難問があるために、ムーアの法則をチップ上で延長させることは以前と比べて難しくなっていくであろう。

このような問題への対策の一つはチップの3次元集積である。TSV(Through Silicon Via)などの新技術が開発されており、それは3次元集積の実現に効果を上げるだろう。TSVはシリコン・チップに穴を開けることによってチップとチップとを結ぶ技術である。図—6はムーアの法則を延長させてきたデバイス構造の変遷を示している。1980年以降では、このトレンドを延長する上で、CMOSが主役を果たしてきたことをこの図から読み取ることができる。CMOSの3次元集積は今後十年以上にわ

たつてムーアの法則を延長させ、その結果として電子機器の Figure of Merit の増大に寄与するだろう。

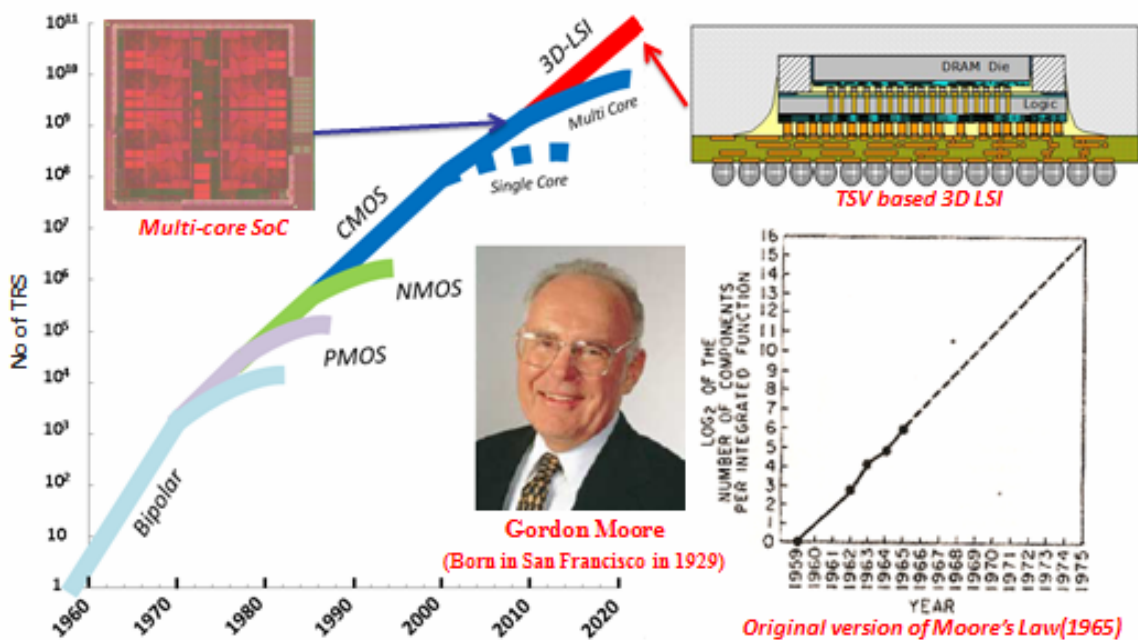


Fig. 6 Device evolution to extend Moore's Law

図—6 ムーアの法則の延長を支えるデバイスの変遷

<応用面の動向>

半導体技術のさらなるイノベーションによって、新しいマーケットが開けるだろう。現在はスマートフォンやタブレット PC に代表されるデジタル・コンシューマ製品が半導体市場の牽引役となっている。次に来るのは何であろうか？ 2000年の ISSCC において「クリスマスのギフトとしてディック・トレーシーの時計を買えるのはいつか？」というタイトルの面白いパネル討論が行われた。ここでは究極のノマディック・ツールはいつごろ入手できるのかがテーマであった。技術的な観点からすれば、Figure of Merit がもう少し上がれば、クリスマス向けにディック・トレーシーの時計を買うこともそう遠い将来ではないであろう。

図—7は過去数十年にわたっての半導体市場の変遷であり、デジタル・コンシューマ分野のさらに先に向けての予測を示している。これからの新市場としては EV や HEV を含む新型の自動車、ロボット、健康・医療など多くの分野が含まれている。

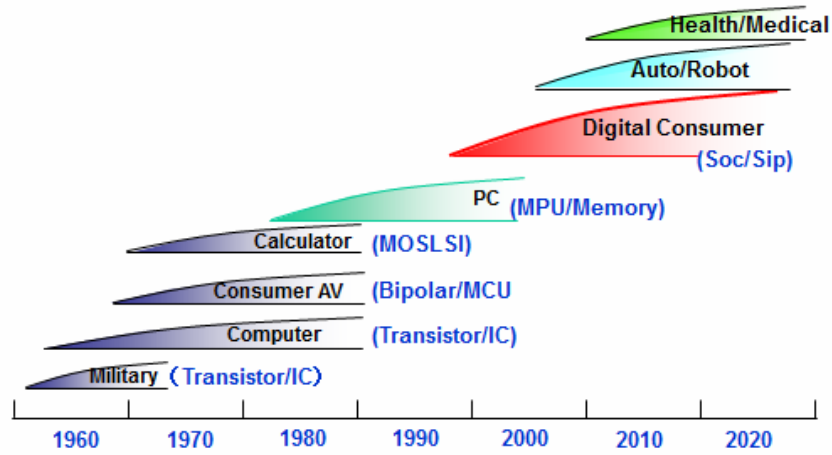


Fig. 7 Evolution of application market

図一七 応用分野市場の変遷

上記のような応用分野の中で、ロボットは半導体技術にとってもっともチャレンジングな分野であり、半導体産業の新しいテクノロジー・ドライバーになるだろう。図一八はカーネギーメロン大学のハンス・モラベックによるロボット知能の将来予測である。一般的に言って、今日のロボットは、特にパターン認識や言語理解の領域において、人間よりもはるかに劣っている。

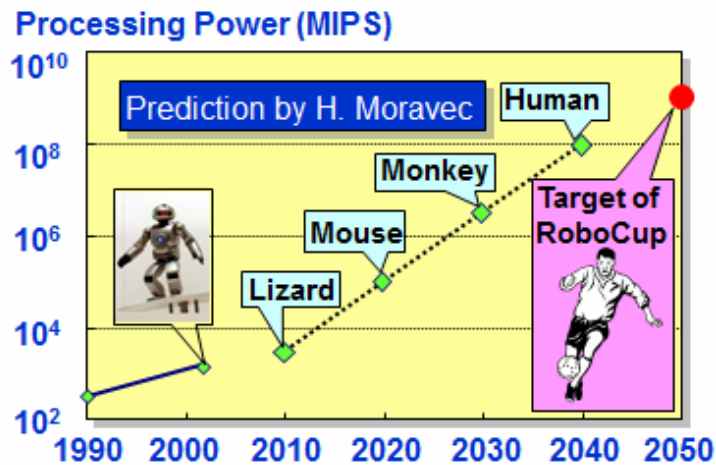


Fig. 8 Rise of robot intelligence towards RoboCup in 2050

図一八 2050年のロボカップに向けてロボット知能の立ち上がり予測

しかしながら、今後数十年の間にロボット知能は劇的に改善されるだろう。それを中心になって支えるのは高性能でローパワーの CMOS 技術と3次元集積技術との組み合わせである。もちろんロボ

ットと人間の知能を比べることは単純ではないが、一つの見方は図—8に示すように、2040年ころには両者の間には知能レベルの違いがなくなるだろうと見られている。このような点を考慮すれば、ロボカップの目標達成を2050年としていることは興味深いところである。ロボカップは大変野心的なプロジェクトだ。その目標は2050年にロボットのサッカーチームが人間のチームと試合をして勝つことである。そのようなことが本当にできるだろうか？ 膨大な量のパターンの処理、マッチングや認識がロボット本体またはデータセンターに蓄えられたビッグデータへのアクセスによってなされなければならない。いずれにしても、今日では実現できないような高い集積度を有し、高い電力効率が必要となる。このようなことが可能かどうかは誰にもわからないが、一つだけ確かなことは、その成否が半導体技術の進展にかかっていることである。そのためには、許容される電力消費の範囲内で、人間と同じレベルの知能を達成しなければならないということだ。

我々の前途にはわくわくするような、チャレンジングな将来が広がっているのである。

以上

(参考文献は原論文をご参照ください)