

牧本ウエーブとは何か？

Implications of Makimoto's Wave
(IEEE Computer, Dec., 2013)

牧本次生

半導体産業人協会(東京)

解説

本文は IEEE Computer 誌の2013年12月号に掲載された論文 (Implications of Makimoto's Wave) についての解説である。この号はコンピュータの技術予測に関連した法則を集めた特集号であり、次の5件の論文が掲載されている(掲載順)。

- 1) メトカルフの法則・・・ネットワークの価値はユーザー数の二乗に比例して増大する
- 2) 牧本ウエーブ・・・半導体分野では標準化とカスタム化のトレンドが10年ごとに入れ替わる
- 3) アムダールの法則・・・パラレル・コンピューティングの性能に関する法則
- 4) ムーアの法則・・・チップ上の素子数は1.5年または2年ごとに倍増する
- 5) グローシュの法則・・・計算コストを1/10にするには100倍の能力が必要(クラウドへの道)

上記の中で「牧本ウエーブ」や「ムーアの法則」は半導体分野における法則であるが、このような法則がコンピュータ関連の専門誌で取り上げられたことは、半導体とコンピュータとが不可分の形でつながっていることの証左でもある。

なお、「ムーアの法則」と「牧本ウエーブ」とはそれぞれに独立した法則とみられがちだが、両者は密接な関係で結ばれている。「ムーアの法則」は半導体技術の量的な進歩の側面を表現したものであるが、集積度が十倍、百倍、千倍、一万倍・・・と増大するにつれて、そこには必然的に質的な変化が出てくる。「牧本ウエーブ」はそのような質的な変化の側面を表現したものである。両者を合わせてみることで、半導体の将来に対するよりよい展望が開けるだろう。

以下の文章は必ずしも原文の逐語訳ではないが、原文の順序に沿って主たる内容を説明したものである。

<論文要旨>

この論文は牧本ウエーブがどのような形で生み出されたかに始まり、1991年に公表されて以降の出来事について記述したものである。また、半導体技術とコンピュータ革命の相乗的な関係についても触れている。牧本ウエーブで表現されていることは「半導体分野においては標準化指向とカスタム化指向とが10年ごとに入れ替わる」ということであり、このコンセプトによって、将来の半導体技術トレンドを予測することが可能となる。1991年公表のオリジナル版では1957年から2007年までの50年間がカバーされていたが、本論文において2027年まで延長した予測が提示されている。

はじめに

トランジスタ式コンピュータが開発された1950年代以降、半導体とコンピュータとは相乗的な発展を続けてきた。半導体がコンピュータあるいはIT全般を駆動するもっとも強力なエンジンであることは将来的にも疑いのない所である。一方、コンピュータの分野は半導体のマーケット・ドライバーであるとともに、テクノロジー・ドライバーの役目をも担ってきた。このようにして、半導体とコンピュータは相乗的な発展を進めてきたのである。その過程をマクロな視点から眺めてみることにする。

私は1959年に日立製作所に入社して以来、半世紀以上にわたって半導体一筋の道を歩いてきた。最初の仕事はゲルマニウム・トランジスタの歩留改善であった。それ以来、最近のSoCやSiPの時代に至るまで、様々なタイプのデバイスに関わってきた。このような広い経験を通じて1987年に発見したのが、半導体分野の標準化・カスタム化のサイクル現象であり、それを図1に示すようなサインカーブで表現したのである。この発見からしばらくして、英国のデビッド・マナーズ記者のインタビューを受ける機会があった。彼はこのコンセプトに大変興味を示し、エレクトロニクス・ウィークリー誌にその関連記事を掲載した(1991年)。その記事を見て自分でも驚いたのであるが、何と「牧本ウエーブ」という名前が付けられていたのである。それから約1年後、IEEE Spectrum誌の年度レビュー特集号(1992)でも紹介され、半導体業界においては技術の将来動向に対する道標として関心が広まっていった。

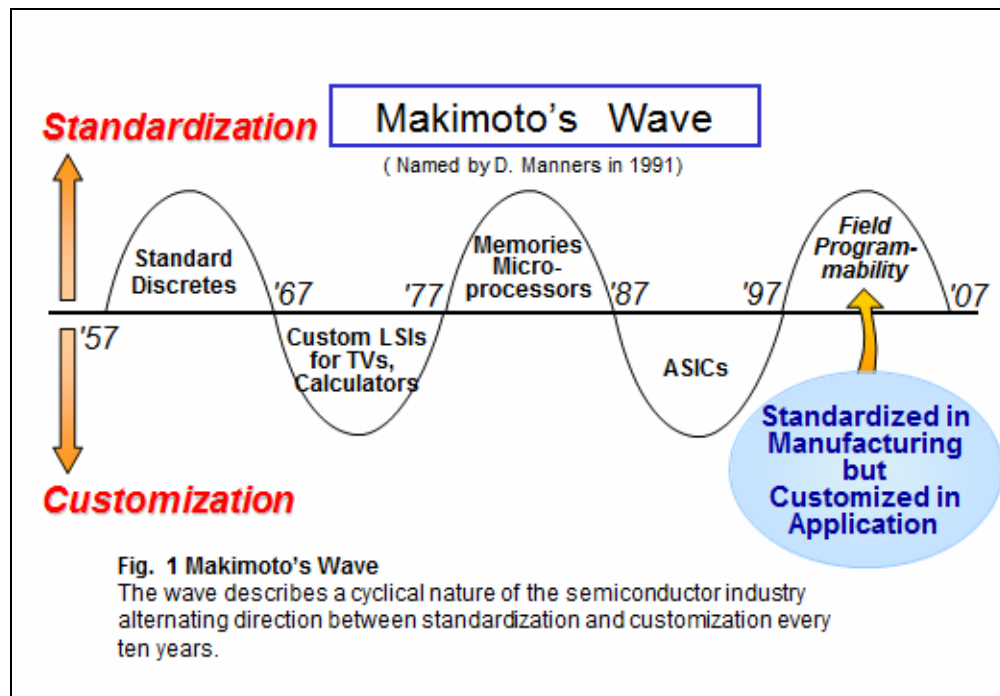


図-1: 牧本ウエーブ

この波形は標準化とカスタム化のトレンドが10年ごとに入れ替わる半導体産業のサイクル性を表現している

21世紀に入るとともに、この「ウエーブ」はコンピュータ関連の学会や業界でも興味を示されるようになり、各種の会合において招待講演の依頼をいただいた。最初の公演はオーストリアのフィラハにおけるFPL(Field Programmable Logic) 2000での講演であり、タイトルは「立ち上がるフィールド・プログラマブル技術の波」であった。この時期には牧本ウエーブが予測したような形でフィールド・プログラマブル・デバイス(FPGAなど)が立ち上がっており、各種応用分野におけるコンピュータ性能の向上に貢献していた。招待公演は2006年のタンパ(米)におけるスーパー・コンピュータ学会や2007年のドレスデン(独)における国際スーパー・コンピュータ学会でも行われた。

牧本ウエーブの基本コンセプトは現在でも生きており、将来に向けての技術開発の方向性について深い洞察を与えるものである。

ここで牧本ウエーブの見方、即ちその解釈についての注意を喚起しておきたい。

牧本ウエーブは半導体分野における標準化／カスタム化の動向をきわめて単純な図式で表現しているが、単純化のあまり、誤解を招きやすい面もある。誤解の典型的な例は、ウエーブの縦軸を「新分野製品の市場規模」としてとらえることである。即ち、「新分野製品は立ち上がってから5年後にピークに達し、その後は次第に勢いを失って10年で消え去ってしまう」という解釈である。しかし、

この解釈は明らかに間違っている。例えば、メモリ・マイクロプロセッサは77年から立ちあがったが、10年後の87年で消え去ったわけではない。むしろ今日でも半導体市場の主要な部分を占めている。ウエーブが表現しているのは10年後にはすでに「新分野製品」のカテゴリーに入らなくなったことを表現している。これに代わって87年から立ちあがった新分野製品は ASIC の形でカスタム化を指向したということである。

もし、市場規模に関係づけるとすれば、ウエーブの縦軸は「新分野製品の市場規模が定常状態になるまでの微係数を表現している」という方が実際に近い。これでも現実との乖離は避けられないものの、イメージ的にはより近いものになる。即ち、定常状態に達したのちはその製品の持つ潜在力によって独自の盛衰をたどるのであって、消え去ることではない。その結果、一つの時点で市場を観察すれば過去に立ち上がった複数の製品群が共存していることになる。

デジタル技術の革新

1947年のベル研究所(米)におけるトランジスタの発明以来、デジタル技術にはいろいろな革新があった。最初のトランジスタは点接触型であったが、その不安定な構造のため実用には向かず、産業化のためにはさらなる革新が必要であった。

半導体技術革新のプロセスは大変に複雑であるが、三つの基本的なパターンに分けることができる。第一のカテゴリーは「破壊的革新」(Disruptive Innovation)であり、突然変異的に生み出されて、古い世代のものを陳腐化に導くような革新だ。この中にはいくつもの事例があるが、中でも重要なイノベーションとしては、前述の「トランジスタの発明」の他にはキルビー(1958)とノイス(1959)による「集積回路の発明」、さらにはインテルによる「マイクロプロセッサの開発」(1971)が挙げられる。第二のカテゴリーは「指数関数的な革新」(Exponential Innovation)であり、ムーアの法則として知られている。これはゴードン・ムーアが1965年に雑誌エレクトロニクスに寄稿した論文において発表したものである。「チップ上の集積度は18ヶ月から24ヶ月で倍増する」という経験法則である。第三のカテゴリーは「周期性を伴う革新」(Cyclical Innovation)であり、1991年に牧本ウエーブと命名されたものであるが、これが本文の主要テーマである。

半導体産業の周期性

まず、半導体産業の歴史を「標準化」と「カスタム化」という視点で、10年単位で振り返ってみよう。

トランジスタの発明(1947)から最初の10年間(1947~57)は半導体産業の揺籃期と位置づけられる。この時期にいろいろな革新が行われたが、中でも接合トランジスタの発明は大変重要なものであった。

第二の10年間(57～67)でトランジスタの生産が始まり、半導体産業は離陸の時を迎えた。当時のトランジスタは標準化されており、相互に差し替え可能であった。これはトランジスタの生産者が真空管の生産者でもあり、真空管の標準化に習ったものである。この10年は「標準化指向」としてとらえられる。

IC/LSIの生産が立ち上がったのは第三の10年間(67～77)である。この時期に電卓や電子時計のような大量生産品の市場が立ち上がった。この時期のLSIの設計において、もっとも大事なことは「チップサイズを小さくする」ということである。LSIの歩留がチップサイズに大きく依存するためである。従って、この時期には必然的に「カスタム化指向」となったのである。

1971年に開発されたMPU(マイクロプロセッサ)は第四の10年間(77～87)に立ちあがった。MPUの出現によってシステム設計の方法は抜本的に見直されることになる。従来のカスタム方式からMPU ベースの設計に移り変わったのだ。その理由はカスタム品の設計コストがあまりにも高く、タイム・ツー・マーケットがあまりにも長すぎるからだ。これは特に少量生産品にとっては致命的なことであった。この10年は「標準化指向」となったのである。

私がこのようなサイクル性に気が付いたのは、第四の10年間が終わる1987年であった。これまでの経過を踏まえて、この傾向はさらに将来に向けて延長できるだろうと考えた。87年から20年間延長して2007年までのトレンドを予測したのが牧本ウエーブのオリジナル版である。

この予測に沿うような形で、第五の10年間(87～97)では「カスタム化指向」のASIC(Application Specific IC)の生産が立ち上がった。このトレンドを駆動したのは次の二つの大きな要因である。一つはゲートアレイやセルベースICと呼ばれる新しい設計手法が出現し、カスタム設計がやりやすくなったことだ。もう一つはASICの方がMPUベースのアプローチに比べて、はるかに性能は高く消費電力は小さくすることができたのだ。ASICを先導した企業として、ゲートアレイでは LSI Logic 社、セルベースICでは VLSI テクノロジー社を挙げることができる。

ASICはいろいろな応用分野において活用されたのであるが、やはり万能とは言えない。開発コストは無視できないし、市場導入の時間は長く、仕様変更に対応したフレキシビリティにも欠けている。このような問題点を除く方法として第六の10年間(97～07)に立ち上がったのが、いろいろなタイプのフィールド・プログラマブル(FP)製品である。FPデバイスの特徴は「製造段階では標準品であるが、応用段階ではカスタム化する」といったことに要約される。もっとも早く立ちあがったFPデバイスの一つは日立のZTATマイコンである。ZTATは“zero turn-around time”、即ちTATがゼロの意味であり、ユーザー側でプログラム可能なFPデバイスの特徴をこのように表現したものである。このデバイスは大ヒットとなり、TAT短縮や仕様変更への迅速対応が可能となった。今日ではMCUの大半はFP方式に代わっている。

この時期に立ちあがったもう一つのFPデバイスの本命製品はFPGA(フィールド・プログラマブル・ゲート・アレー)であり、ザイリンクスやアルテラがそのリード役を果たした。この時期において、FPデバイスはコンピュータ分野にも大きなインパクトを与えた。リコンフィギュラブル・コンピューティングの波が広がったのだ。フレキシビリティの高いFPデバイスを使うことによって、医療画像解析用、高速科学計算用、高速分析応用などの特定応用分野に対応できるようになったのである。

半導体の振子

あらゆる産業に共通したことであるが、半導体産業においても「ユーザーに対する最高の顧客満足」を提供することを狙いとして進歩を続けてきた。「お客様は王様である」と言われるように、互いに矛盾するような難題にも拘わらず、供給者に厳しい要求を突きつける。半導体についてみれば顧客からの要求は次の二つに分けられる。

- (1) 高い性能、低消費電力、安い単価、差別化
- (2) 安い開発コスト、短い市場導入期間、高いフレキシビリティ

(1)の要求に応えるためには「カスタム化方式」が向いているし、(2)の要求に応えるためには「標準化方式」が向いている。即ち、カスタム化も標準化のいずれも、完全には顧客満足を提供することはできないのである。牧本ウエーブが意味していることは、カスタム化方式がいいか、標準化方式がいいかは時間と共に変わることであり、それは技術の動向や市場の要求によって影響されるということである。あるときにはカスタム化への方向に働く力があり、別の時には標準化に向かう力が働く。このような動きを示したのが図-2の「半導体の振子」である。

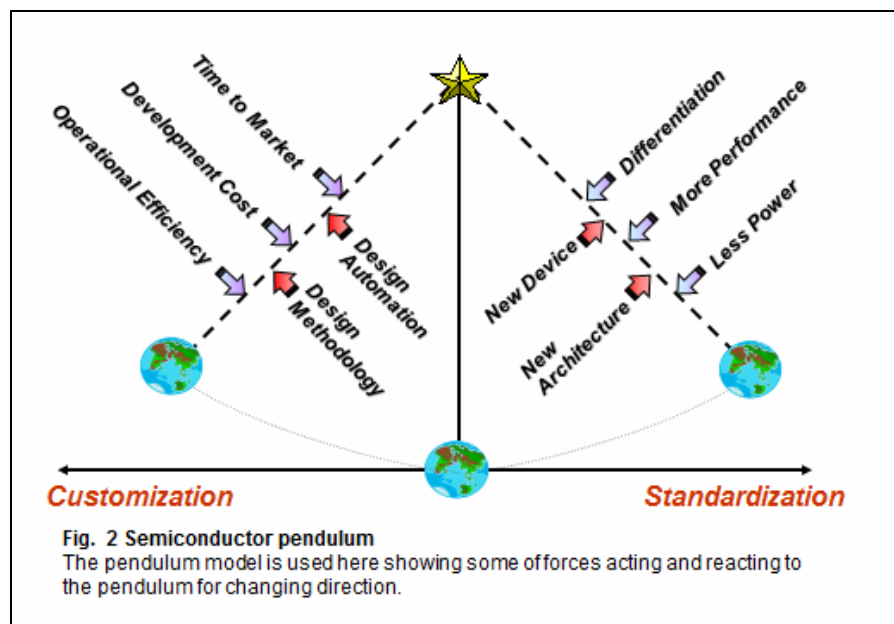


図-2 半導体の振子

振子にはいろいろな力が働き、作用と反作用によって振子の方向が変わる

半導体分野における周期性のメカニズムを説明するのに使われるのが「半導体の振子」モデルである。長い振子が「カスタム化」と「標準化」の方向を揺れ動いていると考えて欲しい。振子には図のように各種の力が働いている。ある時点で、FPGAのような新デバイス、あるいはMPU/DSPのような新アーキテクチャが現れると、振子は「標準化」の方向に押しやられる。しかしながら、その方向に行き過ぎてしまうと、「差別化したい」、「もっと性能を上げたい」、「もっとパワーを減らしたい」という力が強く働き、振子は反対方向に押し戻される。

これと反対に、設計自動化の進歩や新しい設計方式が出てくると、カスタム化がし易くなるので、これは振子をカスタム化の方向に押しやる。しかし、これが行き過ぎると次のような反作用の力が出てくる。即ち、「タイム・ツー・マーケットを短縮したい」、「開発コストを安くしたい」といった力によって振子は反対側に押し戻される。このようにして、カスタム化と標準化とは10年おきに入れ替わってきたのだ。

コンピュータ「民主化」の広がり

ここではコンピュータ革命と半導体技術革新の関係をマクロ的な観点で見よう。ここで「民主化」とはコンピュータが広く一般の人にも使えるようになったことを指している。世界で初めて電子式デジタルコンピュータの基本を発明したのはアイオワ州立大学のアタナソフであり、1939年のことである。ベリーの協力を得て1942年に完成したコンピュータは両者の名前を取ってABC (Atanosoff-Berry Computer) と呼ばれる。広く世に知られたENIACは1946年にペンシルベニア大学で開発されたものである。

そのような初期の時代から今日に至るまでコンピュータはいろいろな方向に発展を続けた: スーパー・コンピュータのような高性能の方向、広い応用分野をカバーするためのリコンフィギュラブル・コンピ

ユーティリティの方向、さらには普通の人でも使える「民主化」の方向である。中でも、コンピュータの「民主化」は社会生活に大きな影響を与え、今日のライフスタイルを変えるまでになっている。

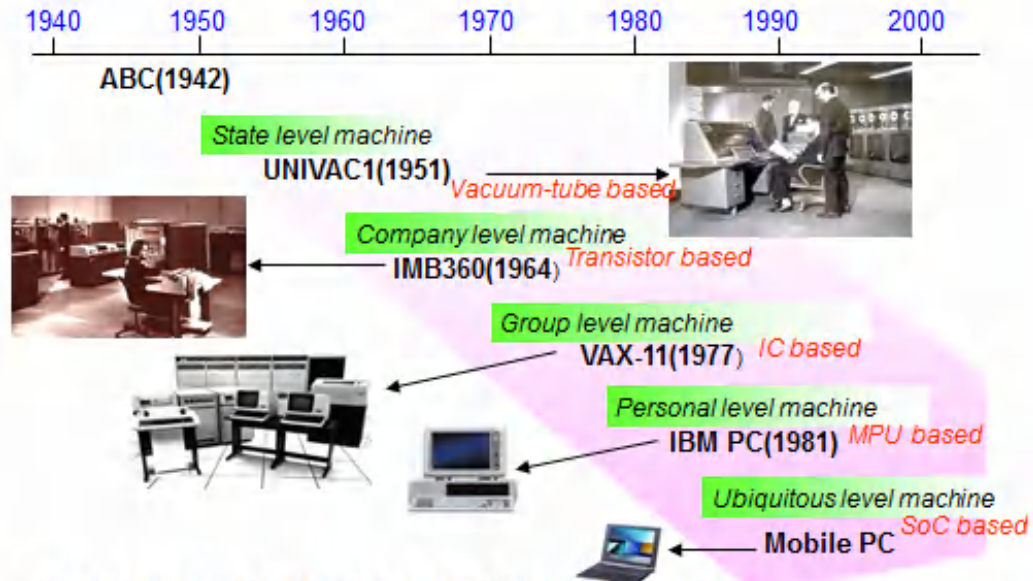


Fig. 3 Evolution of the democratization level of computing
The democratization started from State level and reached to Personal level, and finally to ubiquitous level driven primarily by chip innovations.

図-3 コンピュータの民主化の広がり

民主化は「国のレベル」から始まって「個人のレベルに」至り、「ユビキタス・レベル」に達している。これは半導体革新によるものだ。

図-3はコンピュータ民主化の歴史的な推移を示している。世界で初めて一般に公開されたENIACは米国の陸軍向けであったが、価格は50万ドルであった。このコンピュータは約1万8千本の真空管で構成され、重量は30トンもあり、「巨大な頭脳(ジャイアント・ブレイン)」と呼ばれた。富裕国しか持てなかった代物であり、「国のレベル」の機械だったのである。最初の商用機は1951年のユニバック1であるが、この場合も最初のユーザーは米国の政府機関(統計局、空軍、陸軍など)であった。

1964年にIBMはトランジスタを使ったシステム360を売り出した。実装技術としてはソリッド・ロジック・テクノロジー(SLT)と呼ばれるハイブリッド構造が使われていた。このシステムは上位から下位に至る互換機種を揃えており、大きな人気を博して、産業界に「コンピュータリゼーションの波」が広がっていった。ここにおいてコンピュータは「企業レベルの機械」になったのだ。

1960年代から70年代になるとICが容易に入手可能となったため、DECなどからミニコンが売り出された。ヒット製品のの一つは1977年にDECから発表されたVAX-11であり、TTL ICが使われていた。こうして、大学の研究室においても1台のコンピュータを持つことが可能となり、コンピュータは「グループ・レベルの機械」になったのだ。

次の民主化のステップはアップル(1977)やIBM(1981)によって導入されたPCによって進められたが、これはMPU(マイクロプロセッサ)の出現によって可能となったものである。こうしてコンピュータは「個人レベルの機械」として広がった。さらなる半導体の革新によって、コンピュータはモバイルPCやタブレットPCのようなモバイル機器となった。即ち「ユビキタス・レベル」に到達したのである。これを可能にした半導体の革新デバイスはSoC(システムオンチップ)である。

民主化は真空管時代の「国のレベル」に始まり、トランジスタ時代に「企業レベル」となり、IC時代には「グループ・レベル」に達し、MPU時代には「個人レベル」、さらにSoC時代になると「ユビキタス・レベル」まで到達した。言うまでもなく、このような革命的な民主化の広がりには、数々の要因が関わっているが、中でも半導体革新はもっとも重要な推進役を果たしたといえよう。

FoM(フィギュア・オブ・メリット)

コンピュータの民主化の足跡をたどってみると、次の四つの方向にそって進歩がなされたことが分かる：

- 1) より高い知能(例えばMIPS値など)、
- 2) より小さなサイズ、
- 3) より安いコスト、
- 4) より低い消費電力

このような四つの進歩の方向を次のような式で表して、FoM(フィギュア・オブ・メリット)とすることができる。

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

この中で(Intelligence)は情報の処理能力であり、例えば汎用コンピュータではMIPS値で置き換えることができる。その他のパラメータは自明であるが、物理的な大きさを示す(Size)としては体積または重量を使うのが適当である。

仮定としての表現であるが、「コンピュータの進歩はFoMを最大化する方向に進み、半導体はその進歩を促進する方向での革新が進められた」ということができよう。図-4は1951年のユニバツ

ク1と2006年のモバイルPCについてFoMを比較したものである。55年の間にFoMの値は 1.5×10^{17} に増大した。これをCAGR(年間平均伸び率)に換算すれば105%であり、別の言い方をすれば「毎年約2倍」のペースで進歩したことになる。



	 UNIVAC-1 (1951)	 Mobile PC (2006)	Ratio
Performance (MIPS)	0.1	2,300	2.3×10^4
Size (cc)	7.4×10^8	1.7×10^3	2.3×10^{-6}
Power (W)	1.3×10^6	52	4.2×10^{-5}
Price (\$)	9×10^5	1,500	1.6×10^{-3}
Figure of Merit (relative)	1	1.5×10^{17}	1.5×10^{17}

Fig. 4 Comparison of Figure of Merit of Univac 1 and Mobile PC
The comparison shows that the Figure of Merit increased 1.5×10^{17} times during the period of 55 years.

図-4 ユニバック1とモバイルPCのFoMの比較
FoMは55年間で 1.5×10^{17} 倍になったことを示す

コンピュータのFoMとそれを構成する他のパラメーター(MIPS、体積、コスト、パワー)の推移を図-5に示している。FoMのトレンドについてはいくらかのバラつきがあるものの、おおむね直線に沿っており、前節の仮説を裏付けている。直線の勾配は進歩の速さを示しているが、それは「10年で1000倍」となっている。これは図-4で述べた「1年で2倍」のペースと符合している。FoMはコンピュータと半導体技術の発展についての大まかな指針を与えるものであり、コンピュータと半導体の世界をつなげる一つの道でもある。従って、両方の分野に従事している研究者には、開発プロジェクトにおいて双方がFoMの目標を共有する事を薦めたい。

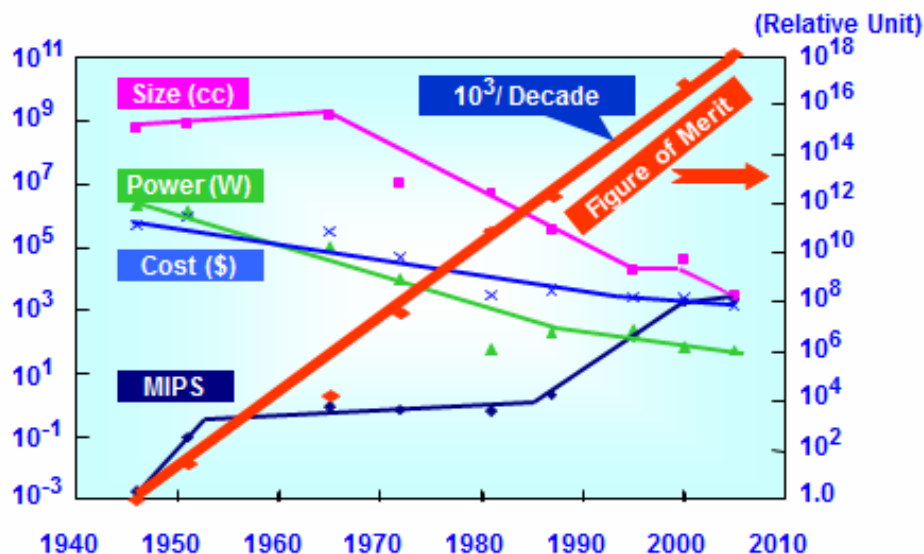


Fig. 5 Evolution of Figure of Merit of computer
 The gradient of the red bold line shows that the rate of progress is estimated as "1000 times per decade".

図-5 コンピュータのFoMの推移

赤の太線の勾配は進歩の速さを示すが、おおむね「10年で1000倍」となっている。

将来に向けてのチャレンジ

図-1に示した牧本ウエーブのオリジナル版は1957年から2007年までの50年間をカバーしていたが、2007年はすでに過ぎ去ってしまっている。図-6はこのオリジナル版をさらに20年間延長したものであるが、半導体のカスタム化／標準化のサイクル性は依然として続いていることが分かる。今日の大きなトレンドはSoCとSiPに代表されるものであり、これはカスタム化を指向している。SoCとSiPは単なる部品（コンポーネント）ではない。むしろシステムの心臓部にあたる製品であるので、汎用品ではなく特定応用分野を指向するか、特定顧客向けとなるのが普通である。

この点に関しての最適の事例はアップル社のアプリケーション・プロセッサA5、A6であり、これらは同社のiPadとiPhone向けにカスタム設計されたものである。このようなカスタム指向を選ぶことによってアップルはローパワーで高性能なモバイル製品の開発に成功した。こうして「デジタル・ノマド」時代の幕を開くことに成功したのだ。サムスンもアップルと同様のアプローチをとっており、タブレットPCやスマホ向けには自社で開発したプロセッサが使われている。一方、クワルコムの場合は同一市場の複数の顧客をターゲットにしている。このような製品はASSP（応用特化型標準化製品）と呼

ばれており、今日では大きな勢いを得ている。このような戦略によってクワルコムは2011年に半導体業界で第6位であったが、2012年には第3位まで躍進したのである。

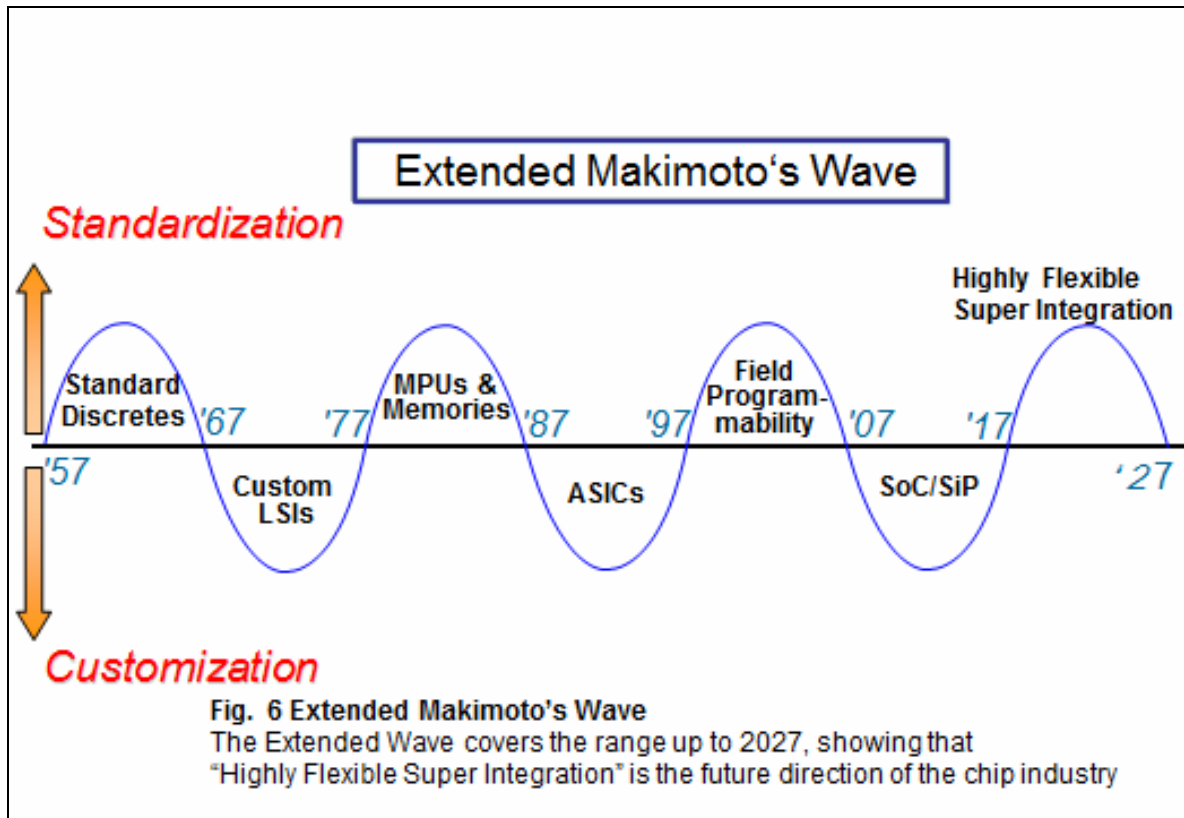


図-6 牧本ウエーブの延長版

牧本ウエーブの延長版は2027年までをカバーしており、HFSI(Highly Flexible Super Integration: きわめてフレキシブルな超高集積IC)が半導体の将来方向であることを示している

さて、次の10年(2017~2027)は現在のトレンドとは全く別のものになるだろう。集積度が非常に高くなるために、多くの場合カスタム化のアプローチは難しくなるからだ。広い分野をカバーできるような、フレキシブルな製品を開発すべく多くの努力が払われるだろう。狙いはフレキシブルでありながら、高性能、ローパワー、ローコストを併せ持つような製品の開発である。このような新しいトレンドの製品をHFSI(Highly Flexible Super Integration)と呼ぶことにする。このチップの中に含まれるのは複数のファンクショナル・ブロック(MPU、DSP、FPGAなど)であるが、集積度が高いためにこのようなことが可能になる。カスタム設計のコストの増大を考えれば、このようなアプローチはチャレンジすべき大事な方向であろう。

HFSIの実現に貢献するもう一つの要因は「不揮発性RAM」(略称、NV-RAM)の登場だ。簡単に言えばNV-RAMはDRAMのようなランダム・アクセス・メモリとフラッシュ・メモリのような不揮発性メモリを組み合わせた特性をもっている。もし、このようなメモリが入手可能となればチップ設計もシステム設計も大きな変化を遂げるだろう。まず、メモリの階層構造が変わってくる。それは、NV-RAMがSRAM、DRAMやフラッシュ・メモリをすべて置き換えることができるからだ。これによって性能は向上し、消費電力は削減されるだろう。さらに、ロジック機能はNV-RAMのアレーによって構成され、フレキシビリティは大いに高まるだろう。

これまでに、多くのNV-RAMが提案され、開発されてきた。すでに、FeRAMのように量産化に入ったものもあるが、今後さらに有望な製品の登場が待たれている。中でも大きな期待がかかるのはReRAM(Resistive RAM)、STT-RAM(Spin Transfer Torque Magnetic RAM)、CNT-RAM(Carbon nanotube based RAM)である。夫々に長所・短所があるが、新規参入のCNT-RAMはその動作機構の故に、85° Cの放置で1000年のデータ保持特性や無限の読出し／書き込みサイクルなど、極めて高い信頼性を特徴としている。NV-RAMの登場はHFSIを実現させる上での強力な手段であり、コンピュータ／ITの進歩に大きく貢献することであろう。

今後の半導体革新によってコンピュータ技術はいろいろな方向に激しい革新を遂げるであろう。たとえば、IoT(Internet of Things)の中に埋め込まれる極小のコンピュータから、エクサ(10の18乗)FLOPSまたはそれ以上の性能を持つスパコン、あるいはロボットに代表されるような高い知能を持つAI製品などだ。カーネギー大学のハンス・モラベックによれば、半導体の技術革新によって、ロボットは今後数十年にわたって目覚ましい進化を遂げるだろう。2020年にはロボット知能は鼠のレベルであるが、2030年には猿のレベルに達し、2040年には人のレベルまで達すると推測されている。

ロボット技術の開発を世界的に推進することを目的としたロボカップ(RoboCup)の活動は1997年に名古屋でスタートした。これは毎年行われるロボット・コンペティションであるが、ターゲットとしているのは、2050年にロボットのチームがワールドカップで優勝した人間のチームに勝利を収めるこ

とだ。ロボカップの最終段に至る過程で開発されるいろいろな技術は我々の社会や日常生活に大きな影響を与えることになるだろう。

2050年までにロボカップの目標は本当に達成されるであろうか？ もちろん、確かなことは誰にもわからない。しかし、その成功の鍵を握っているのは半導体技術とコンピュータ革命である。我々の眼前にはわくわくするような挑戦的な未来が広がっているのだ。

(参考文献については原論文を参照してください)

以上