

Chip Innovations and Computer Revolution

Supercomputer Conference, November 16, 2006, Tampa Florida

Invited Speech

解 説

SC(Supercomputer Conference)は例年11月に米国で開かれるスパコン関連の学会であり、欧州で例年6月に開かれるISC(International Supercomputer Conference)と共に世界最大規模の学会である。両学会においてスパコンの性能ランキング(TOP500)が発表されるので、コンピュータ関連の研究者・技術者にとっては大きな関心の的となる。

コンピュータ学会においては半導体の技術革新がどのように起こるかについての関心が非常に強い。今回は「牧本ウエーブ」の紹介を交えて、半導体の話をしてほしいとの依頼をいただいたのであった。

まず、エレクトロニクスにおけるパラダイム転換について触れた後、「コンピュータ革新」について述べた。その中心となるテーマは以前に提唱した「Figure of Merit」のコンセプトである。このデータを基にして「コンピュータの良さの指数は10年で1000倍になる」とした。しかるべきコンピュータ学会においては初めての発表であった。

続いて「半導体の技術革新」、「牧本ウエーブ」に触れた後、将来はロボットがエレクトロニクス全体を牽引するドライバーになるだろうと結んだ。

この講演においては思い出に残ることがある。図12(コンピュータ革命の歴史)において、「世界初のコンピュータはENIAC」と表現したのであるが、講演の直後に一人の方が近づいて「世界初のコンピュータはABC(Atanasoff Berry Computer)である」との指摘をいただいた。帰国後の調査でそのことを確認し、その方とは今でも交流が続いている。

◆
SC 2006
November 16, 2006

Chip Innovations and Computer Revolution

Tsugio Makimoto, Ph. D.

President, TechnoVision Consulting

Former Corporate Advisor, Sony Corporation

SC(スパコン関連の最大規模の学会)における講演テーマのほとんどはコンピュータ関連のものであるが、私の講演は半導体の窓から見たコンピュータ進化の展望であり、ユニークな内容になっていた。この講演が終わった直後に、翌年ドイツで行われるISCの主催者からコンタクトがあって招待講演の打診があり、後に正式招待をいただいたのであった。

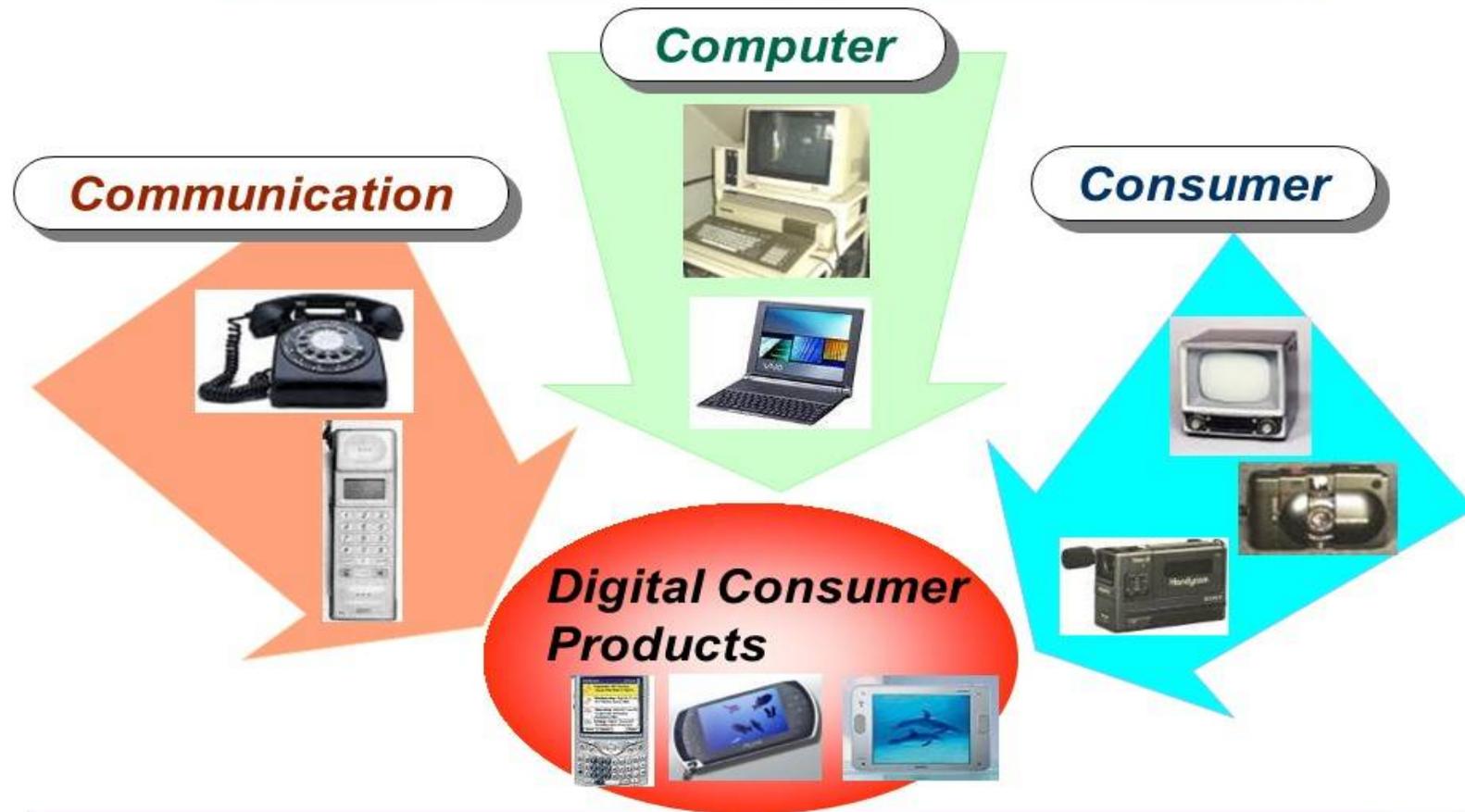
Outline

- **Changing Paradigm in Electronics**
- Computer Revolution
- Chip Innovations
- Implications of Makimoto's Wave
- Future Outlook

● **エレクトロニクスのパラダイム転換**
● 半導体技術革新
● 将来展望

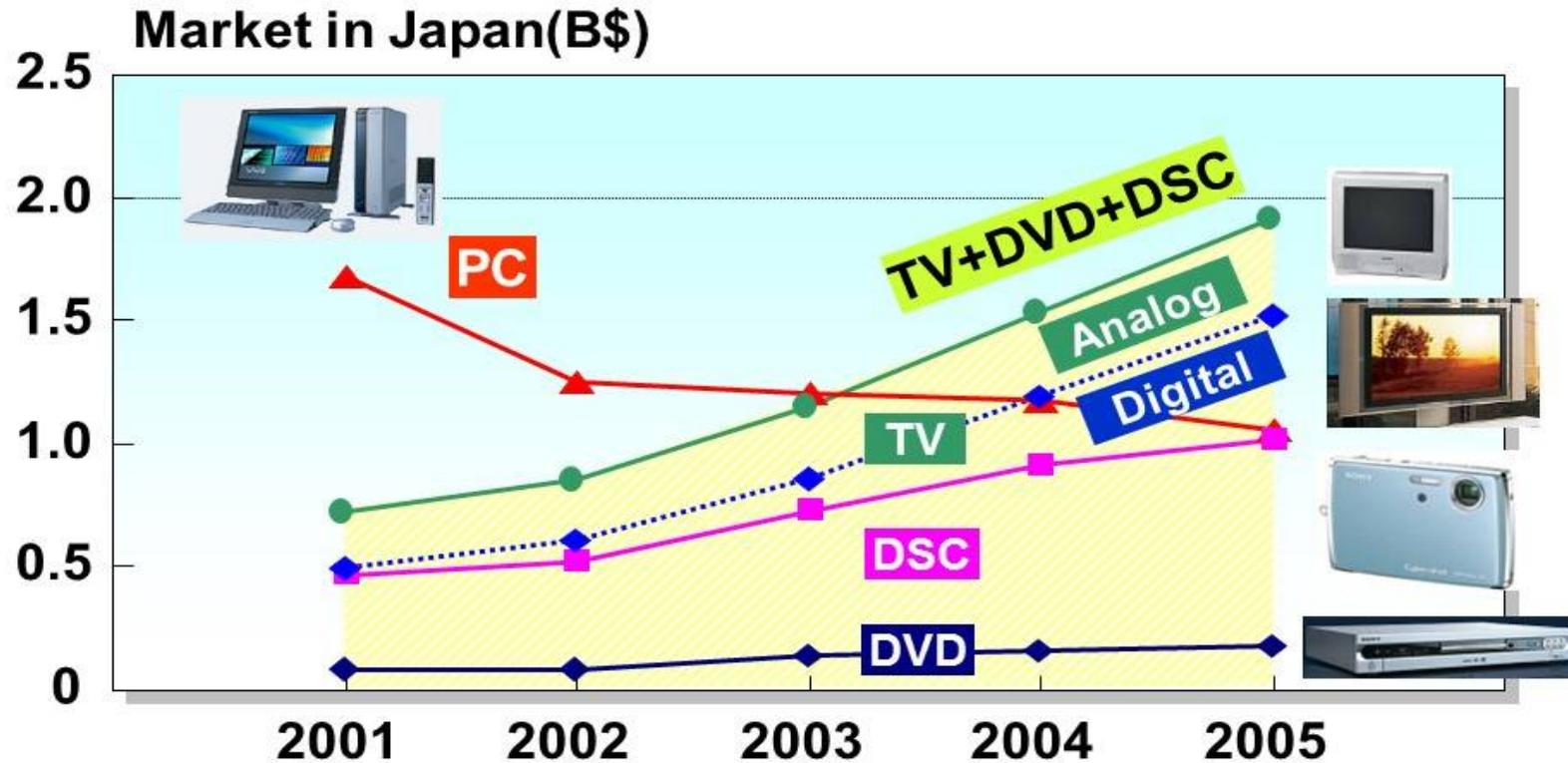
● コンピュータ革命
● 牧本ウエーブとは何か

Market Convergence



これまで通信・コンピュータ・民生の市場には明確な境界があった。今日その境界は薄れ、多くの電子機器は「デジタル・コンシューマ製品」に収斂しつつある。そのような市場融合をもたらした大きな要因は第一に情報のデジタル化であり、第二には半導体技術革新、特にCMOS革新である。

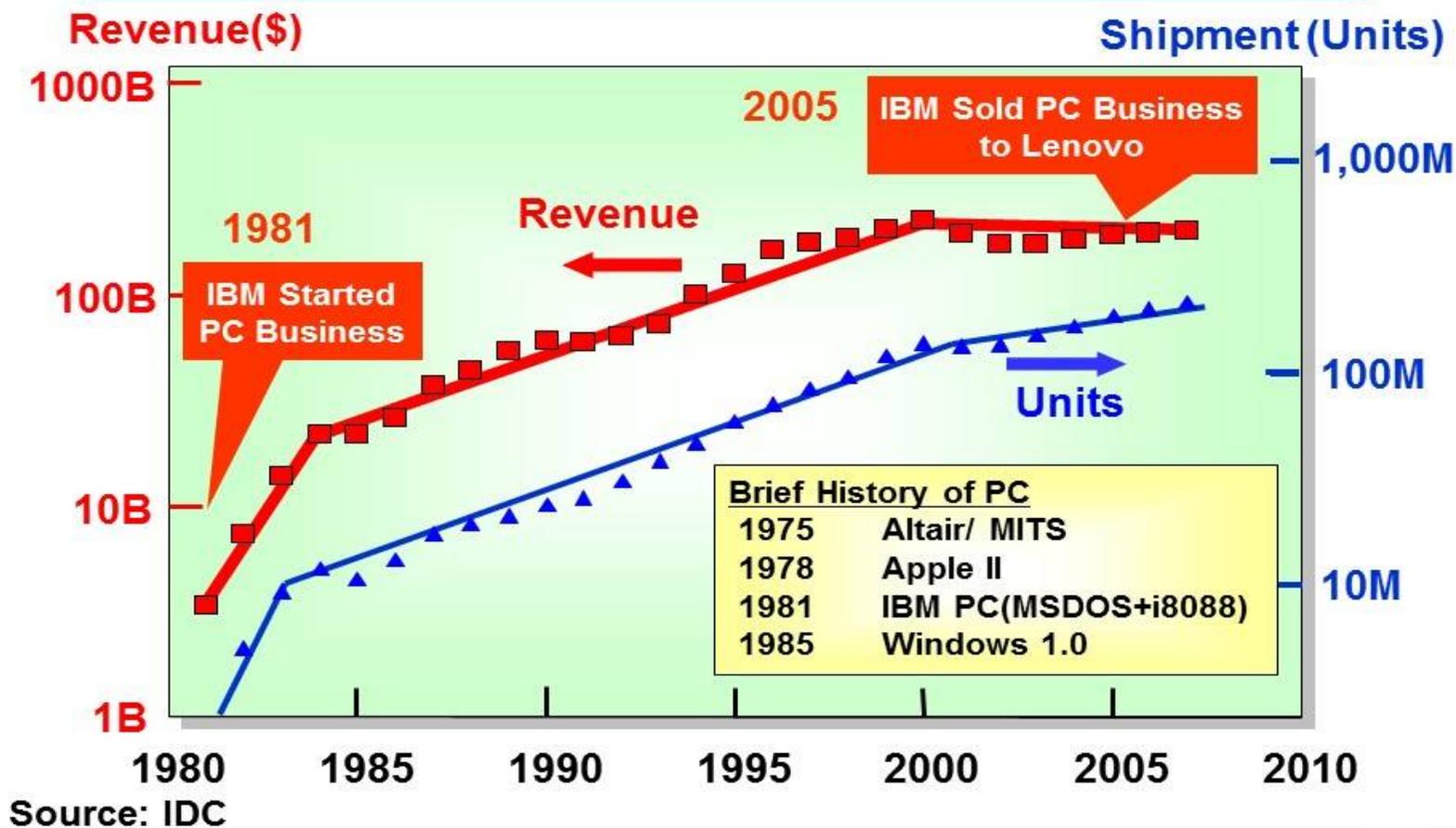
PC vs. Three Big CEs



Source: JEITA

日本においてはPCはすでにピークを過ぎており、デジタルコンシューマ製品に主役の座を譲っている。2004年にはテレビ、デジカメ、DVDの3つを合わせた市場がPCの市場を凌駕した。パラダイム転換の象徴である。

Evolution of PC Industry



赤い線は1980年以降の世界のPC市場規模を示すが、2000年頃まで順調に成長していたものの、それ以降はほぼ横ばいの傾向である。青い線は台数の推移であるが、今日でも成長を続けている。台数が伸びた分だけ、価格が低下したことを示している。PCはすでに成熟産業になったと見るべきであり、エレクトロニクスの成長エンジンではありえない。

Changing Aspects of Computer Companies

- ★ Apple's iPod Opened the New Trends of Portable Music Players
- ★ Microsoft Started Game Business
- ★ Dell Started Flat Panel TV Business
- ★ IBM Supplying Game Chips to Three Majors
- ★ IBM Sold PC Business to Lenevo



(Source: Apple's web site)

コンピュータの会社がどのように変貌しつつあるかの事例を示す。アップルはiPodを発売して、携帯型音楽プレイヤーの新ジャンルを開いた。マイクロソフトはゲーム市場に参入した。デルはフラットパネルTVの商売を始めた。IBMはゲーム機用の半導体を供給しており、PC部門はレノボ(中国)に売却した。いずれの会社も様変わりして、民生分野を指向している。

December 1, 2003 –Start of TDTV--

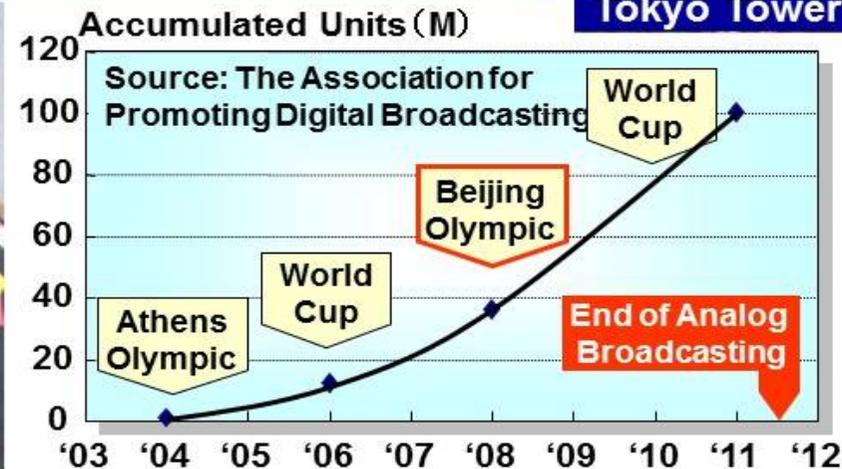
- Terrestrial Digital Broadcasting to Start in Tokyo, Osaka and Nagoya, Japan
- 100M TVs to be Digitalized by 2011
- \$2,000B of Economic Effect



Tokyo Tower



Prime Minister Mr.Koizumi



日本では地上波デジタル放送が始まり、大きな経済効果を生むと予想されている。2003年12月1日の放送開始セレモニーには小泉首相も出席して祝杯をあげた。2011年にはすべてのアナログ放送が終わり、1億台のデジタルTVが普及すると予測されている。



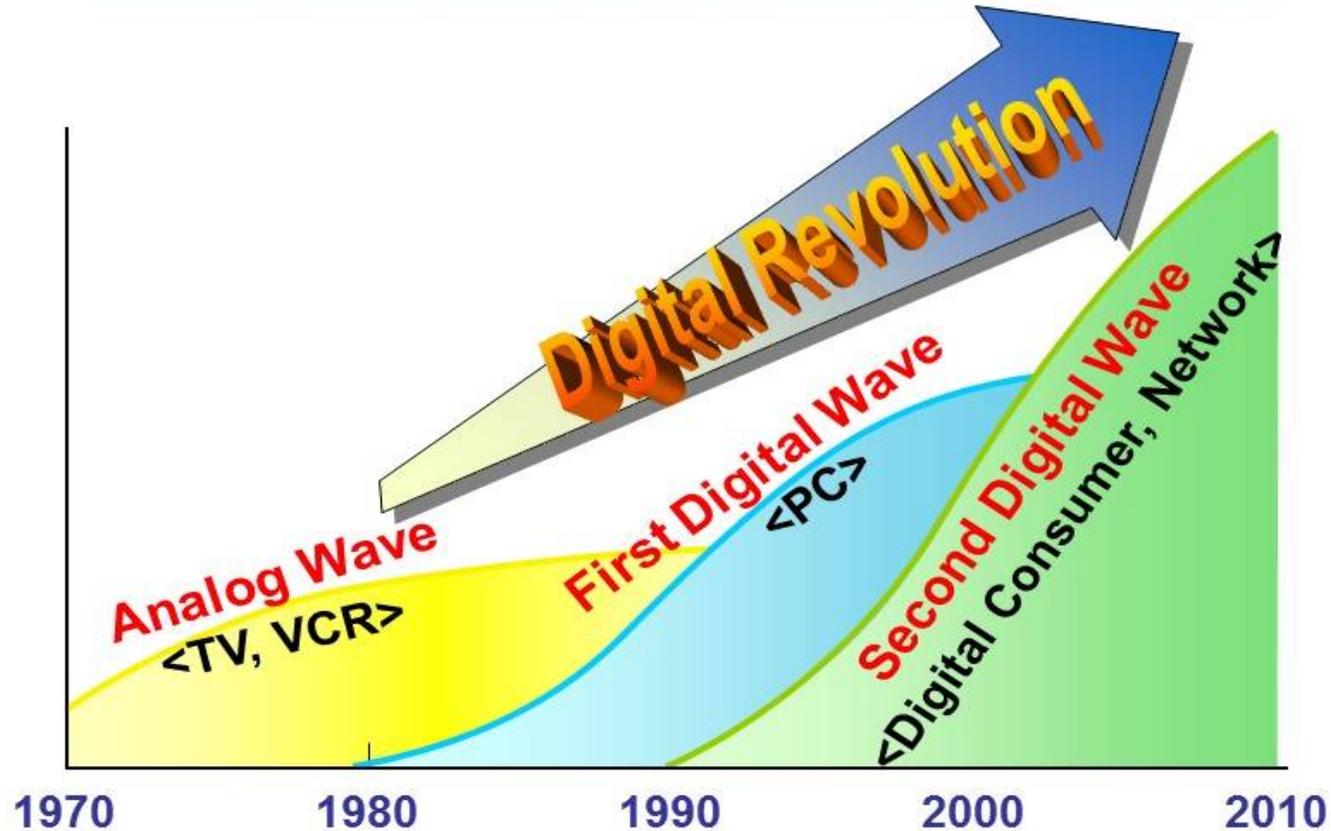
**A Cat is
excited
at Digital
HD TV**

**Photo taken
by Y.Sakai**

7

皆さん、なぜテレビはアナログからデジタルに変わるかご存知ですか？ この写真は私の友人がデジタルテレビを買った日に撮ったものです。彼の家猫はアナログテレビには何の関心も示さなかったのですが、デジタルになると、画面の小鳥を追いかけて大喜びしたのです。つまり、アナログとデジタルの違いは猫にもわかるということなんです。・・・ここで会場には爆笑。

Three Big Waves of Electronics



エレクトロニクスのパラダイム転換を三つの波として表現している。最初の波はテレビ、VTRなどのアナログ中心の波、80年代からはPCが牽引するデジタル第1波、90年代以降は、デジタル・コンシューマ製品がネットワークでつながるデジタル第2波である。今はPC中心からデジタル・コンシューマ中心へのパラダイム転換が進行中である。

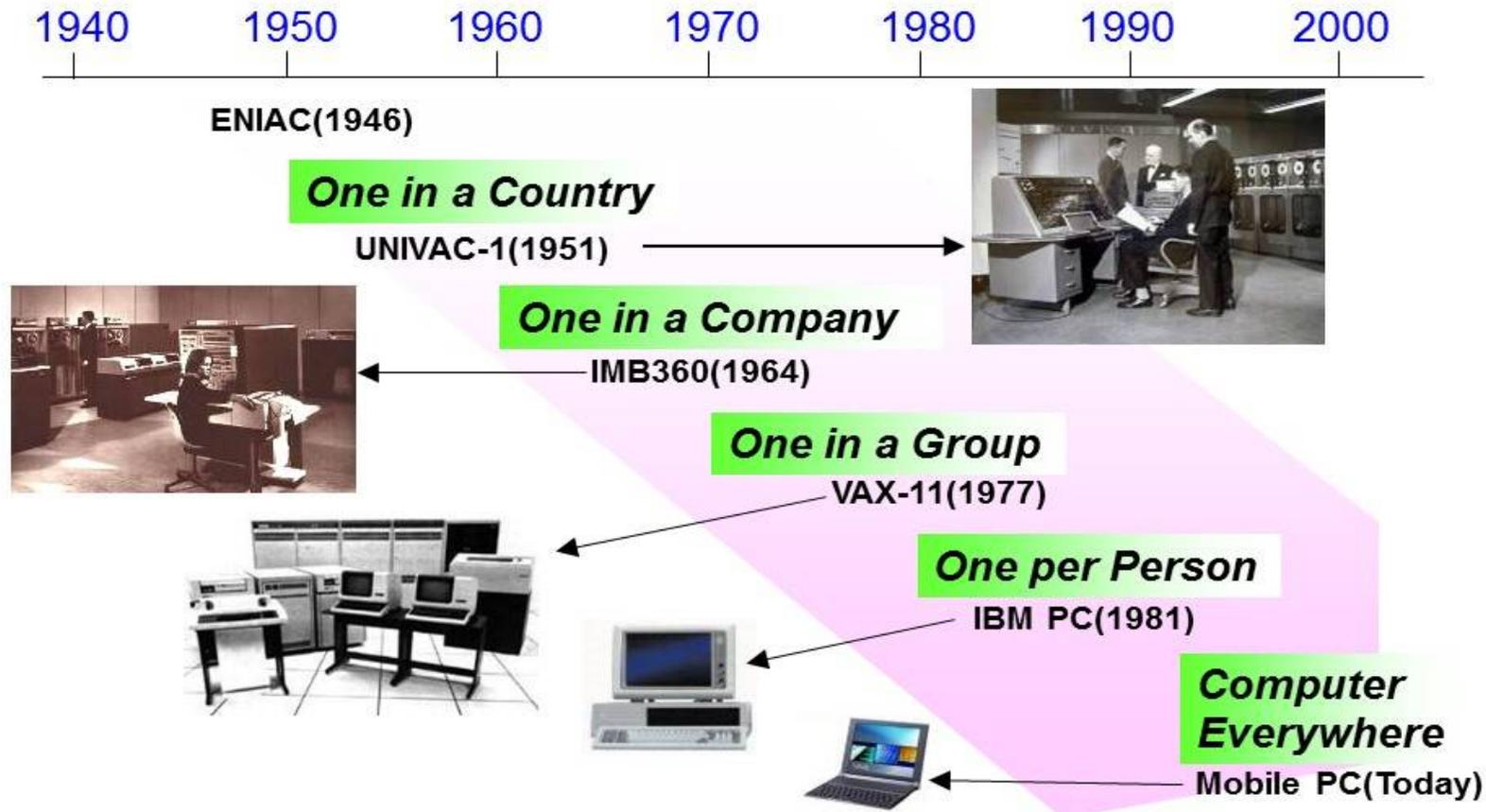
Outline

- Changing Paradigm in Electronics
- **Computer Revolution**
- Chip Innovations
- Implications of Makimoto's Wave
- Future Outlook

- エレクトロニクスのパラダイム転換
- 半導体技術革新
- 将来展望

- **コンピュータ革命**
- 牧本ウエーブとは何か

Brief History of Computer Revolutions



初めてのコンピュータは1946年のENIACであり、その技術は最初の商用機UNIVAC-1に継承された。この時代は「国に1台」の虎の子であった。トランジスタを使ったメインフレームは「会社に1台」まで普及、ICを使ったミニコンはグループに1台、MPUを使ったPCは「1人に1台」まで普及した。現在は「コンピュータはどこにでもある」レベルまで普及が進んでいる。

Comparing UNIVAC-1 vs Mobile PC

	UNIVAC-1 (1951)	Mobile PC (Today)	Ratio
Performance (MIPS)	0.1	2,300	2.3×10^4
Size (cc)	7.4×10^8	2.0×10^4	2.7×10^{-5}
Power (W)	1.3×10^6	52	4.2×10^{-5}
Price (\$)	9×10^5	1,500	1.6×10^{-3}

この表はUNIVAC-1と当時のモバイルPCとの諸元(性能、容量、パワー、価格)を比較したものである。55年間における進歩は、いずれのパラメータをとっても3桁から4桁のレベルであり、まさに目を見張るものがある。このように大きな進歩を成し遂げた最大の要因は半導体の技術革新である。

Figure of Merit of Electronic Equipment

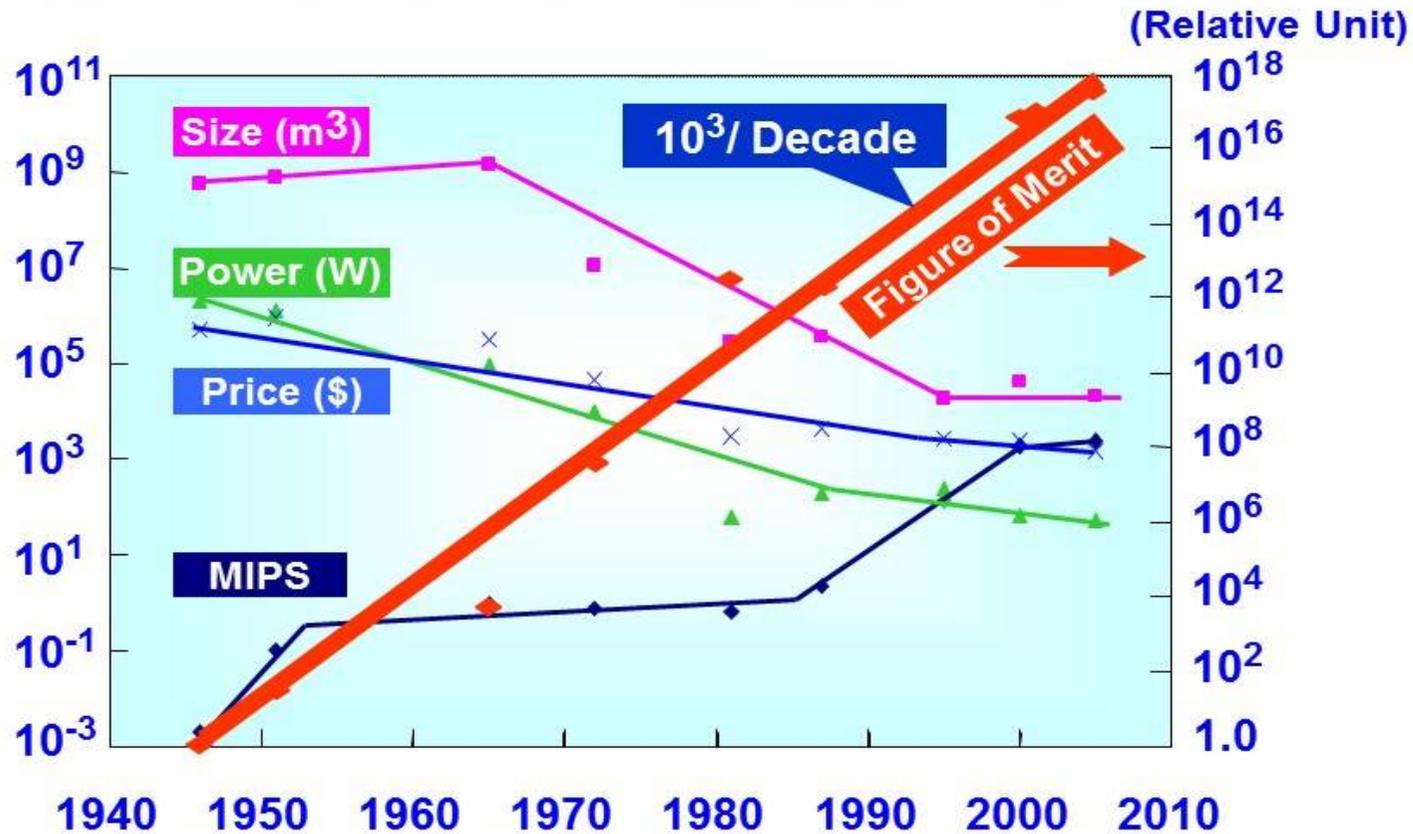
$$\star \text{ Figure of Merit} = \frac{(\text{Intelligence})}{(\text{Size}) \times (\text{Cost}) \times (\text{Power})}$$

★ Indicator of the technological progress in the long range

★ Guiding principle for the future direction of development

ここでコンピュータを含む電子機器の良さの指数 (Figure of Merit: FoM) の定式化を提唱する。FoMは長期における技術進歩を示す指標であり、開発にあたっての指針ともなる。即ち、あらゆる開発はFoMを最大化する方向を目指して行われる。このコンセプトは以前の講演においても触れたことがあるが、大きなコンピュータ学会での提唱はこれが最初であった。

Evolutions of Figure of Merit



コンピュータについてのFigure of Meritの推移を示す。細い線で表示しているのは、式の四つのパラメータであり、赤の太線はFoMを示す。個々のパラメータの変化は必ずしもスムーズではないが、FoMの値はほぼ直線上に分布している。直線の勾配は「10年で1000倍」となっており、これはマクロ的に見た「コンピュータの進歩のスピード」である。

Some Images of Future PC

● Case 1

Same performance, 1/10 times lower cost,
1/10 times smaller size,
1/10 times lower power



One Laptop
per Child for
\$100.
Initiated by
N. Negoroponte

● Case 2

10 times Performance, Same cost,
1/10 times smaller size, 1/10 times lower power

● Case 3

100 times performance, Same cost
1/10 times smaller size, Same Power

前ページの結論をベースにして、「10年後のPC」をイメージしてみよう。ケース1は性能据え置きで、小型・低価格・低電力のPCであり、「100ドルPC」の方向。ケース2は価格据え置きで、高性能・小型・低電力指向のタブレットPCの方向。ケース3は超高性能デスクトップPCの方向。いずれ場合もFOMは10年で1000倍であり、これを可能にするのは半導体の進化である。

Outline

- Changing Paradigm in Electronics
- Computer Revolution
- **Chip Innovations**
- Implications of Makimoto's Wave
- Future Outlook

●エレクトロニクスのパラダイム転換
●半導体技術革新
●将来展望

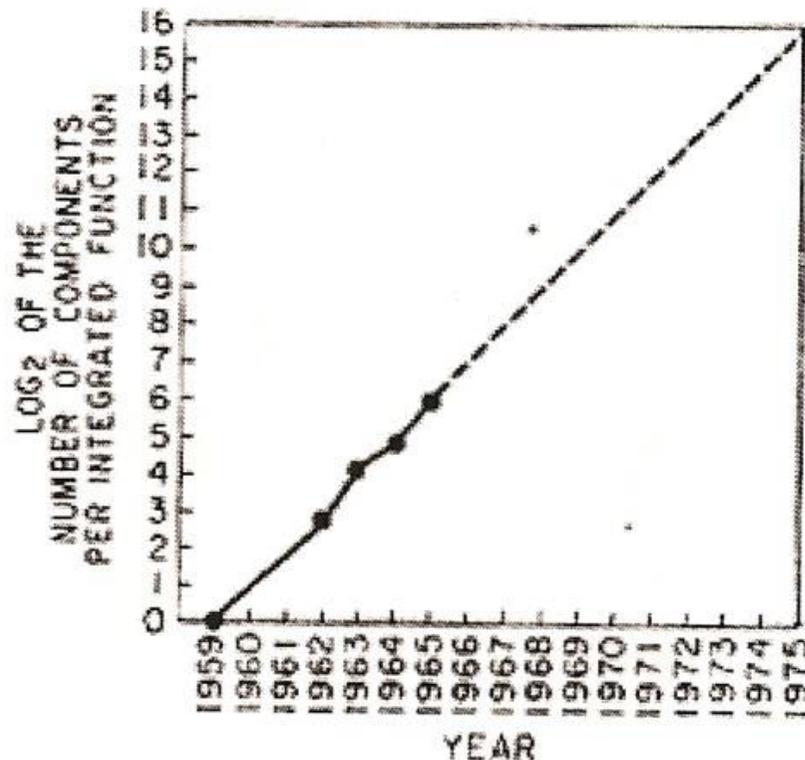
●コンピュータ革命
●牧本ウエーブとは何か

Major Events for Chip Innovations

- **Invention of Transistor**
Shockley, Bardeen, Brattain (1947)
- **Invention of IC**
Kilby (1958), Noyce (1959)
- **Moore's Law**
Moore (1965)
- **Introduction of Microprocessor**
Intel (1971)

これは半導体技術革新に関する重要な出来事である。第1は1947年のトランジスタの発明、第2は1958年／1959年のICの発明、第3は1965年のムーアの法則の発見、第4は1971年のマイクロプロセッサの製品化である。これらの出来事によって半導体は飛躍的な進化を遂げてきた。

Origin of Moore's Law



Gordon Moore
"Cramming more Components
into Integrated Circuits"
Electronics (April 15, 1965)

ゴードン・ムーアが作成したこのグラフは1965年、雑誌エレクトロニクスに掲載された。縦軸はチップ内の素子数であるが、2を底とする対数目盛でプロットされている。ムーアはこの傾向から「チップ内の素子数は1年ごとに倍増する」ことを見出した。これが「ムーアの法則」の原点である。また、10年後には現状の1000倍の集積が可能であると予測した。

Evolution of Chips for PS-2

FY99	FY00	FY01	FY02	FY03	FY04
0.25um	0.18um	0.15um	0.13um	90nm	90nm

EE (Emotion Engine)



240mm²



224mm²

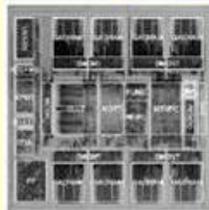


110mm²



73mm²

GS (Graphic Synthesizer)



279mm²



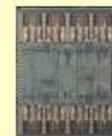
188mm²



108mm²



96mm²



83mm²



73mm²

EE+GS



86mm²

半導体技術革新の一つの例として、ソニーのゲーム機PS-2のチップの進化を見てみよう。99年には0.25μm技術で240mm²と279mm²の2チップが使われていた。その後毎年のようにチップ・シュリンクが進められ、04年には90nm技術でついにワンチップに集約された。このような進化によって、低価格化、高性能化、低電力化が可能となったのである。

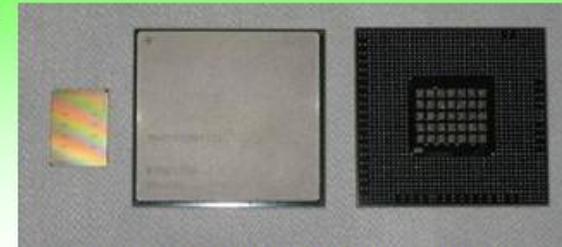
Outline of CELL Processor

★ Joint Project of IBM, Toshiba & Sony Started in March, 2001

★ Five Papers Presented at 2005 ISSCC

★ Multi Core Architecture:

- One RISC Type 64bit CPU Core
- 8 Signal Processor Core
- Operating Frequency : 4GHz
- Performance : 256G FLOPS



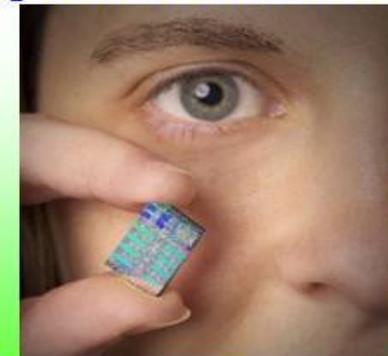
CELL Chip(221mm²) & Package(1236 Terminals)

★ Technology

- 90nm SOI
- Gate Length 46nm
- Low K
- Cu 8Layers
- 234M Transistors



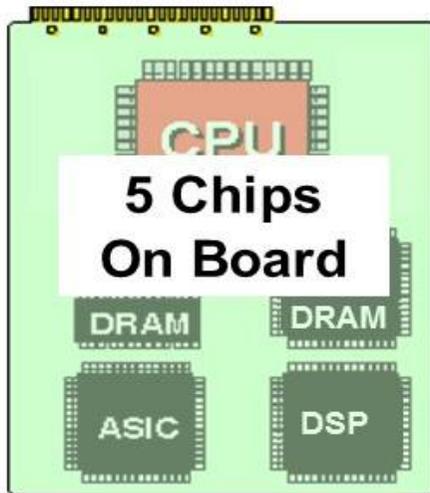
300mm Wafer



セル・プロセッサはソニーの次世代ゲーム機（PS-3）に使われた画期的なMPUである。2001年以降、IBM、東芝、ソニーが共同で開発を進め、2005年のISSCCでその全貌が発表された。マルチコア方式のアーキテクチャを採用し、その性能は256GFLOPSと報告された。90nmSOI技術が使われ、素子数は2億3千万という最先端製品であった。

Impact of SoC

System on Board



Hand
held
Engine



System on Chip



Performance x 4
Power Dissipation
MPEG4 Decoding x 1 / 3.5
PIM (Scheduler) x 1 / 9



Source: M. Nakai et al. IEEE JSSC Vol. 40, No. 1, Jan. 2005

これはSoCのインパクトを簡潔に表現したものである。左の図はボード上に搭載された半導体デバイス (SoB) を示す。右はSoBの5個のデバイスを一つのチップ内に集積したものである (SoC)。これによって性能は4倍となり、消費電力はタスクによって異なるが、1/3.5ないし1/4程度に減少している。「ローパワーで高性能」を可能にするのがSoCの力である。

Major Issues of SoC

- ★ Design Productivity is Lagging
- ★ Process Machines Getting Expensive
- ★ Tooling Cost is Escalating
- ★ Testing is Complex and Expensive

Will SoC be Profitable?

- 🎲 Yes in Some Cases, but Not Always
- 🎲 SiP Will Supplement SoC
- 🎲 Field Programmability to Play Important Role

SoCは良いことばかりでなく課題もある。その主なものは ☆設計生産性の遅れ、☆前工程製造装置の高騰、☆ツリーリング・コスト（マスク代など）の高騰、 ☆テストが複雑で高くなることである。従ってSoCが必ずしも利益を上げるとは限らない。それを補完するのがSiPであり、さらにフィールド・プログラマビリティが重要になる。

Outline

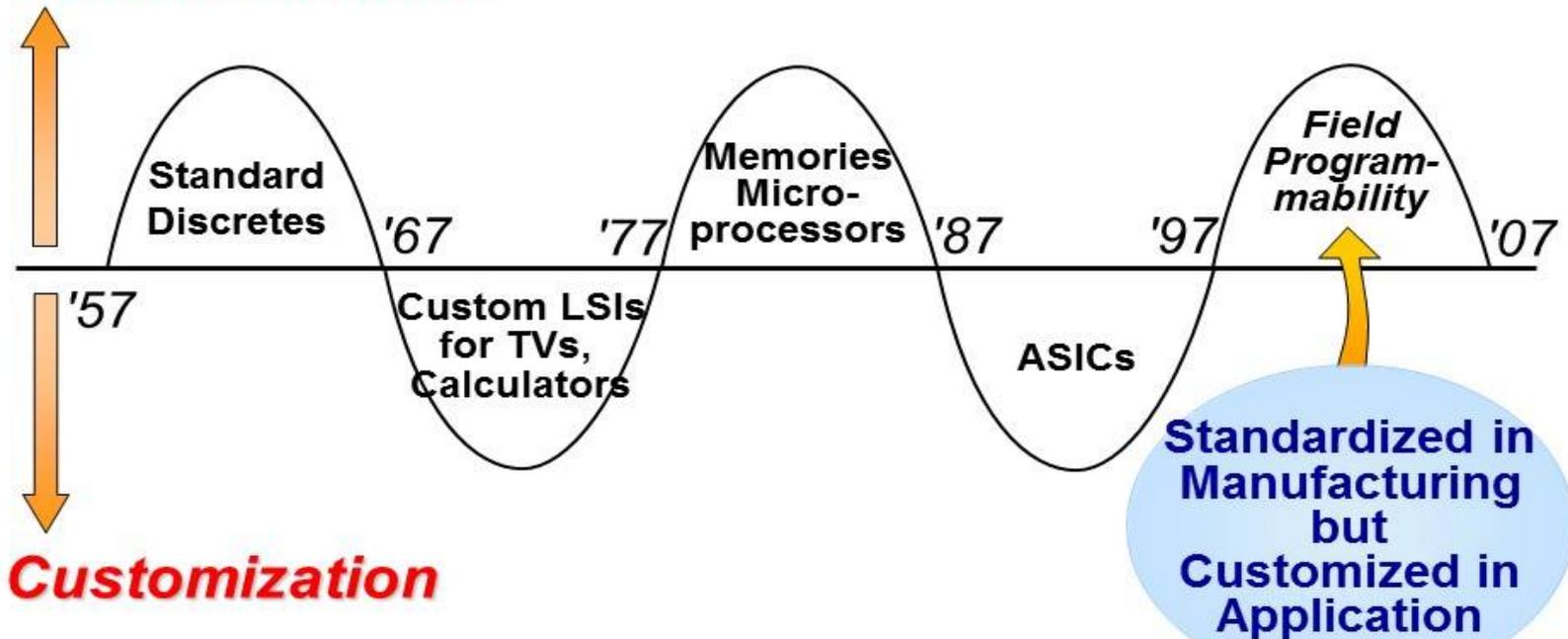
- Changing Paradigm in Electronics
- Computer Revolution
- Chip Innovations
- **Implications of Makimoto's Wave**
- Future Outlook

●エレクトロニクスのパラダイム転換
●半導体技術革新
●将来展望

●コンピュータ革命
●牧本ウエーブとは何か

Makimoto's Wave

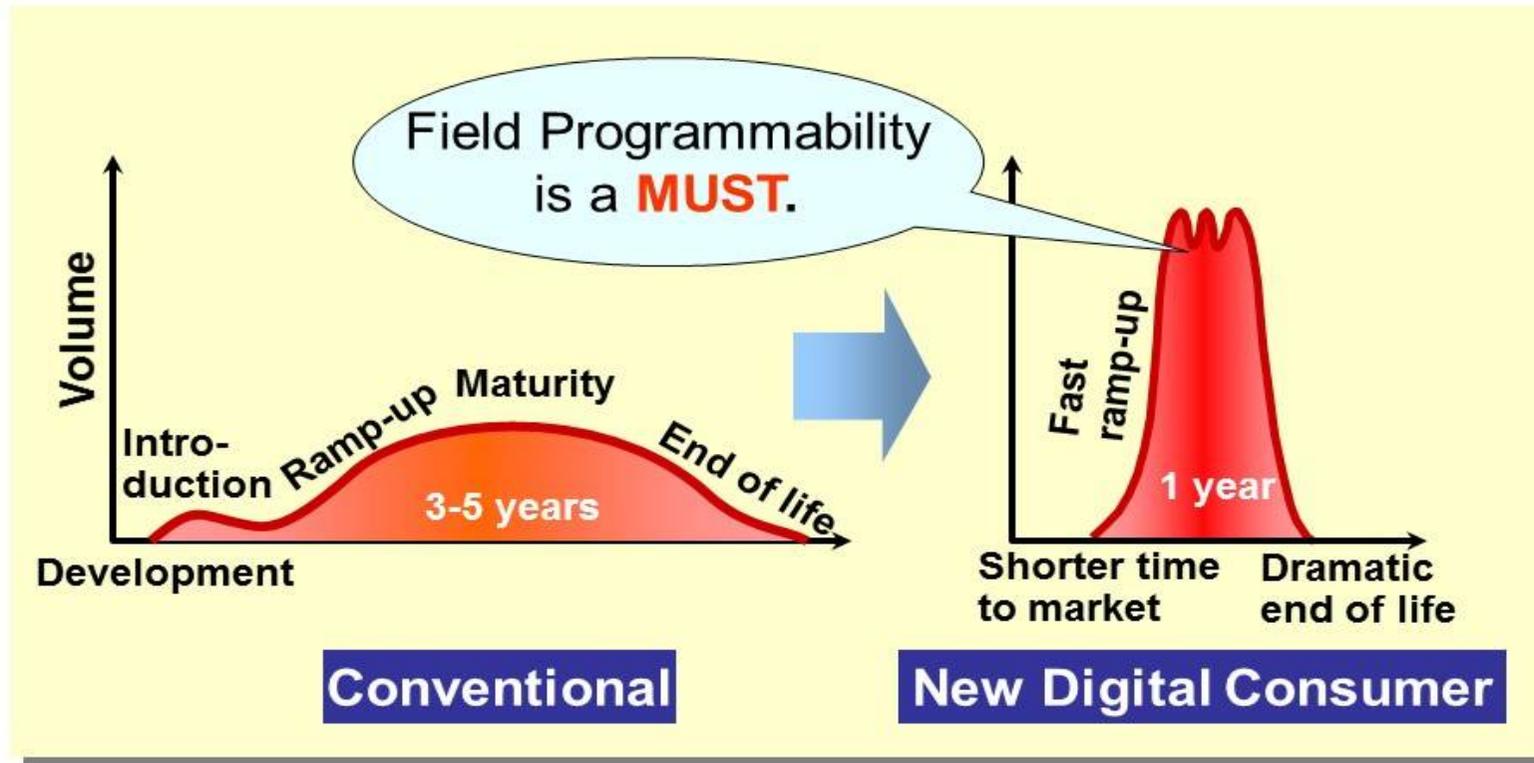
Standardization



Source: Electronics Weekly, Jan. 1991

半導体産業では標準化指向とカスタム化指向とがほぼ10年に入れ替わるという現象がみられる。これは1991年、デビッド・マナーズ氏によってエレクトロニクス・ウィークリー誌上において、「牧本ウエーブ」と命名された。講演の時点においては、フィールド・プログラマブル・デバイスが広がっており、リコンフィギュラブル・コンピューティングの基盤となっていた。

Dramatic Change in Product Lifecycle



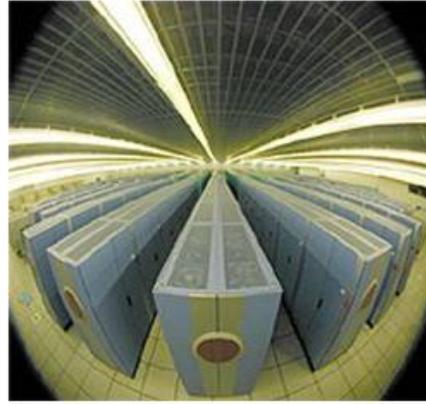
なぜ、フィールド・プログラマビリティが必要になるのか？ それは製品のライフサイクルが劇的に変化しているからだ。アナログ時代の製品寿命は3～5年であった。デジタル・コンシューマ製品の場合は、市場が急速に立ち上がり、ピーク期間は短く、ある日突然に終末がやってくる。このような変化に対応するにはフィールド・プログラマビリティがMUSTである。

Wide Spread Applications of FPGA



Medical Imaging

- Toshiba
- GE Medical
- Siemens
- Phillips



High Performance Computing

- Cray
- SGI
- Mercury
- Linux NetworX



Data Analytics

- Netezza
- Teradata
- Exegy
- XtremeData

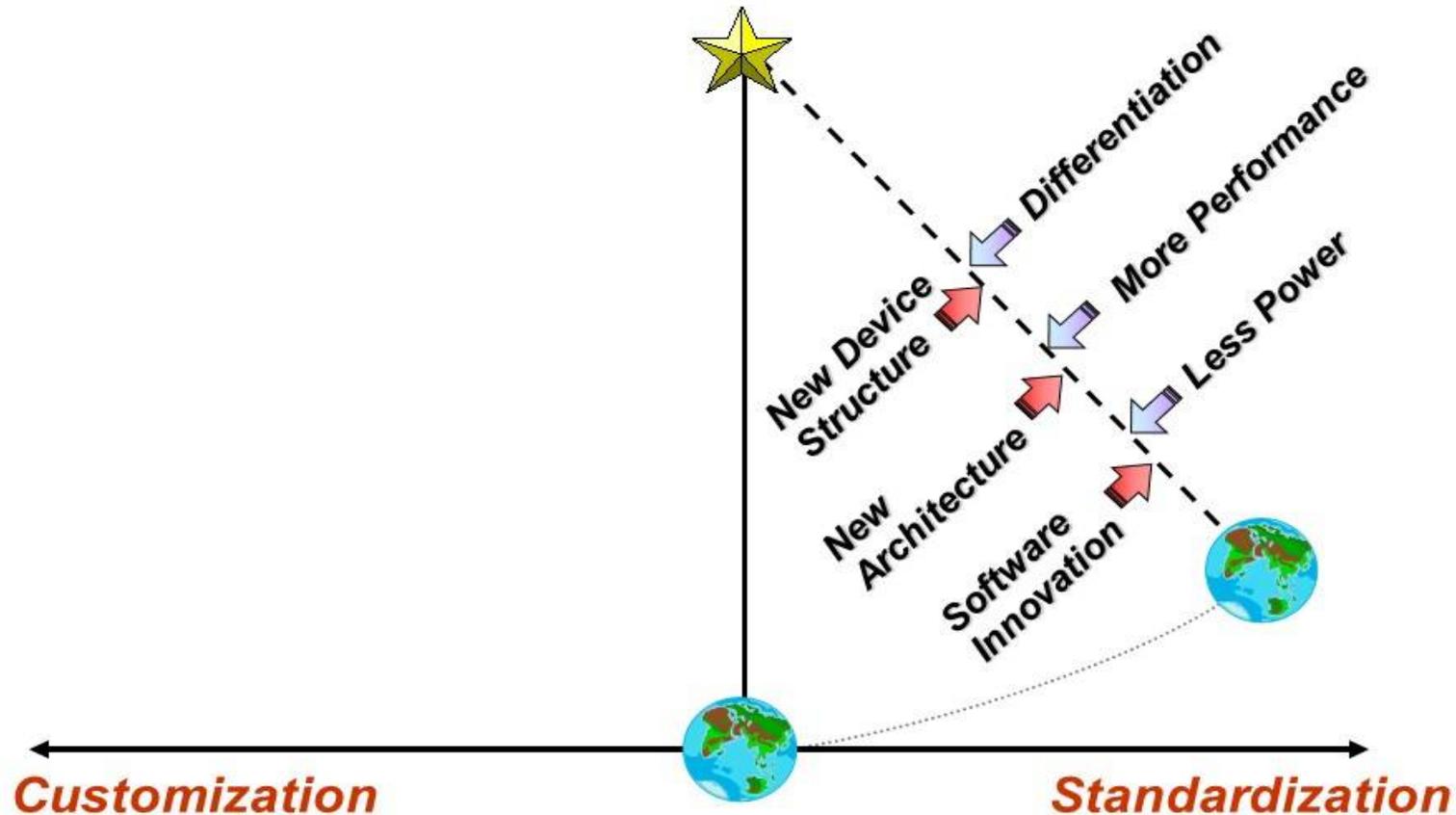
Many of these are using FPGAs today:

Cray, SGI, Mercury, LinuxNetworX offer x86 platforms with FPGA accelerators

Source: Altera

FPGAはフィールド・プログラマブル・デバイスの代表であり、その用途は急速に広がっている。ここに代表的な事例を示す。医療用画像処理（東芝、GE、シーメンス他）、高性能計算機（クレイ、SGI、マーキュリー他）、高速データ分析（テラデータ、エクストリーム・データ他）。FPGAの採用によって応用特化型のシステム最適化が可能となるのである。

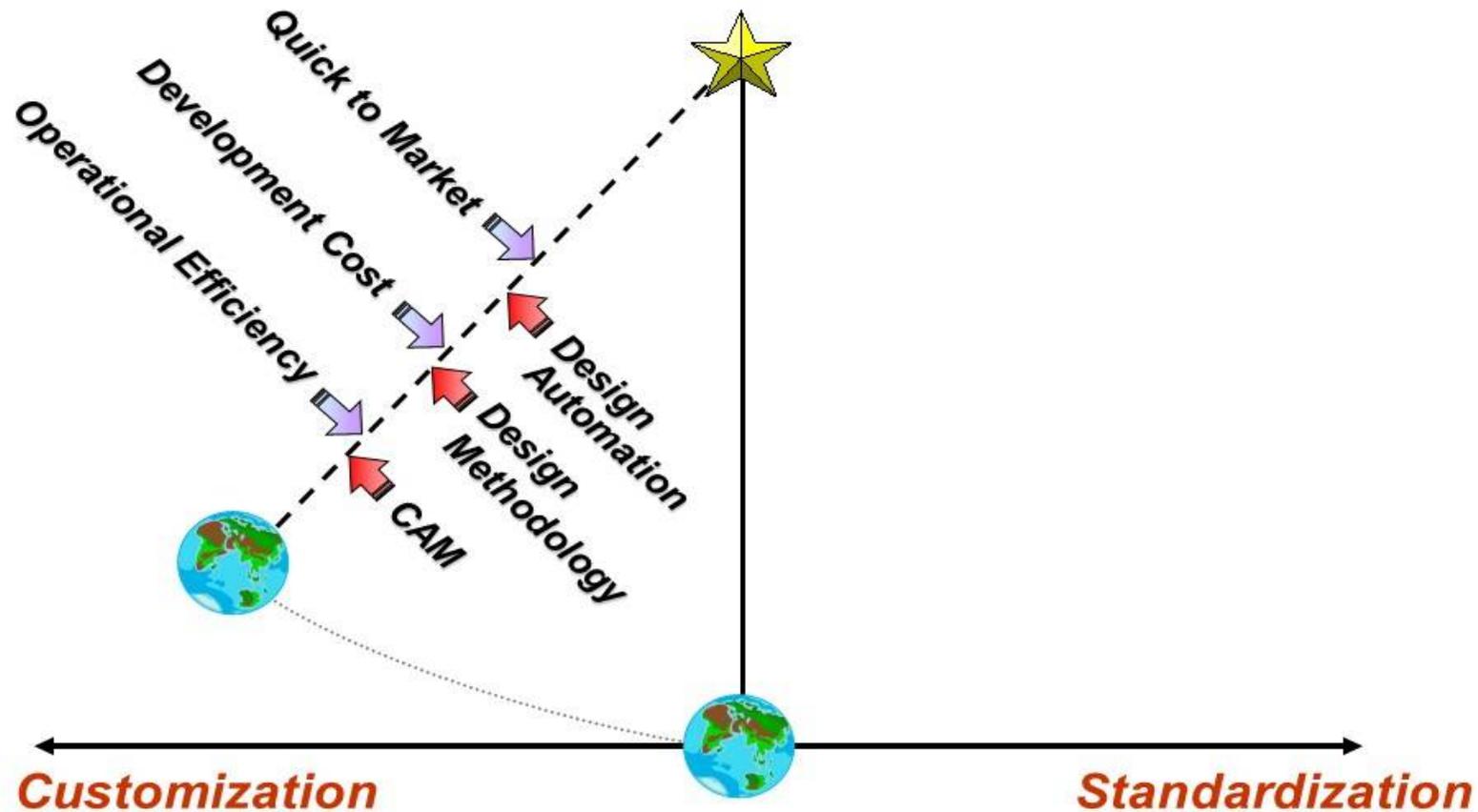
Pendulum Swinging to Standardization



26

半導体産業において、なぜ標準化とカスタム化の方向が入れ替わるのかを考えるために、左右に揺れる長い振子を想像してもらいたい。FPGAのような新デバイスや、MPUなどの新しいアーキテクチャはこの振子を標準化の方向に押す。しかし行き過ぎると、「差別化を図りたい」、「性能を高く、パワーを低くしたい」という顧客ニーズから振子は反対側に戻される。

Pendulum Swinging to Customization



27

設計の自動化が進み、新しい設計手法によってカスタム化が容易になると振子は左側に揺れる。しかし、行き過ぎると「早く市場に導入したい」、「開発の初期コストを安くしたい」という顧客ニーズによって反対側に戻される。この振子は「顧客満足を最大にする」ことを目指して、左右に揺れ動いてきたのである。今後とも、「顧客満足」は尽きることのない目標である。

Quiz

How long is the Semiconductor Pendulum?

- A: Less than 1 km
- B: Between 1 km to 1,000 km
- C: Between 1,000 km to 1,000,000 km
- D: More than 1,000,000 km

[Suppose classical kinetic model is valid]

ここでクイズの時間です。「半導体の振子の長さはいくらか？ A～Dの四つの中から選んでください。古典力学のモデルが成立するものと仮定します」。
固い話の途中で、いくらか時間を空けると、会場の雰囲気や和らげる効果がある。

Answer

Basic Equation

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g}}$$

$$g = 9.8 \text{ m/s}^2$$

$$T = 20 \text{ years}$$

$$\begin{aligned} L &\cong 10^{14} \text{ km} \\ &= 10 \text{ light years} \end{aligned}$$

クイズの回答を示しましょう。これは振子の等時性の式です。この式に重力の加速度(g)と周期($T=20$ 年)を入れて解くと、長さ L は10の14乗となります。これは約10光年ですね！

Answer

Basic Equation

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g}}$$

$$g = 9.8 \text{ m/s}^2$$

$$T = 20 \text{ years}$$

$$L \cong 10^{14} \text{ km}$$
$$= 10 \text{ light years}$$

Reference

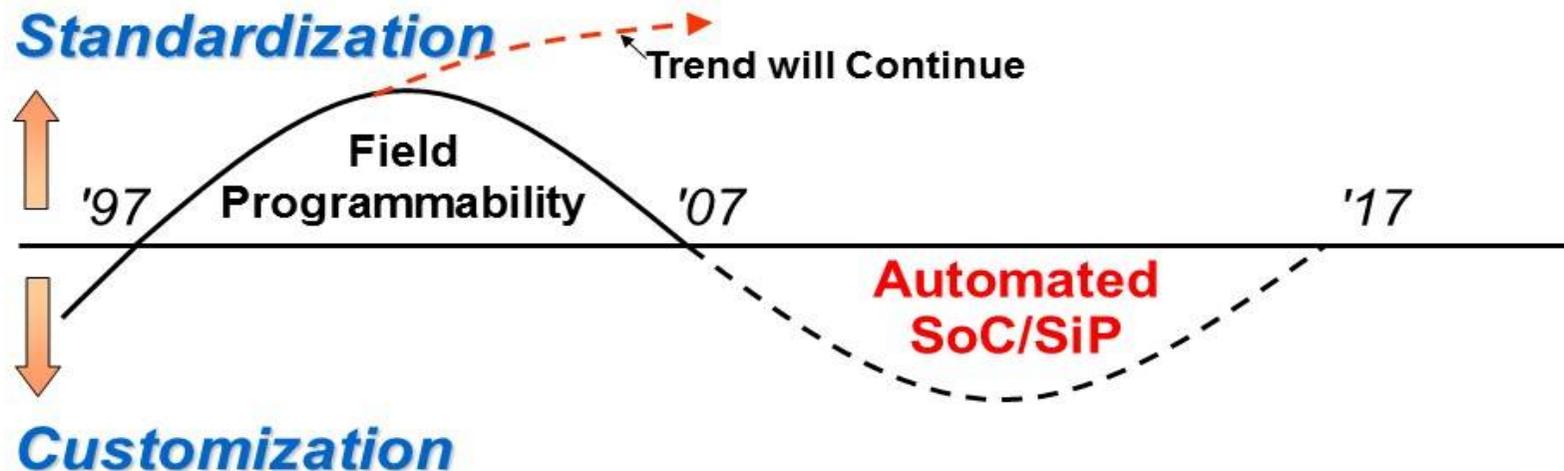
Sirius: 8.6 light years

Procyon: 11.4 light years

参考までに、地球からの距離は大犬座のシリウスまでが8.6光年、小犬座のプロキオンまでが11.4光年なので、半導体振子の長さと比べてみてください。

コメント:このクイズは全くのナンセンスであるが、知的好奇心を刺激するらしく、講演の後では「大変面白かった」とのコメントをいただくことが多かった。

Next Wave



New Design Methodology for SoC

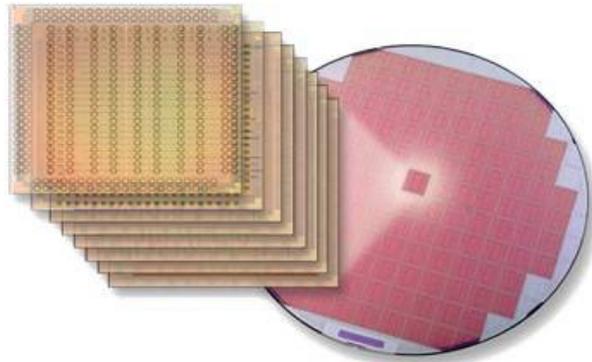
- ASIC logic with more regularity and predictability
- Address mfg & design cost while providing ASIC- like performance

Source: CSSI/Carnegie Mellon University

さて、牧本ウエーブのオリジナル版は2007年で終わっている。その先の見通しを2017年までの「カスタム指向サイクル」として示している。主役はSoC/SiPである。SoC向けの新しい設計手法が必要であり、設計や製造のコストを抑えながらASICに近いような性能を達成することができるだろう。なお、SoCでヒットした最大の商品はアップルのスマホ/タブレットである。

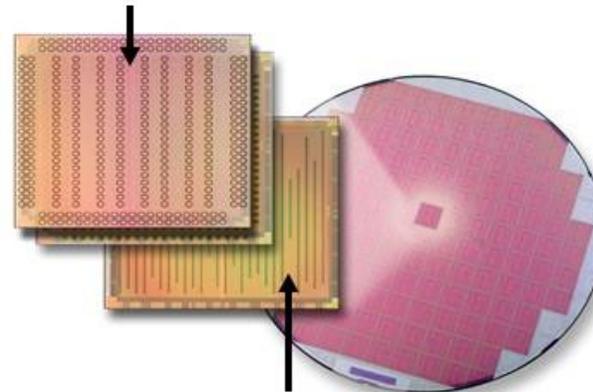
Standard Cell vs. Structured ASIC

Standard Cell ASIC:
All Layers Are Custom



**Full Set of Masks
for Standard-Cell ASIC**

Structured ASIC:
Customization Through Top Layers



Base Layer

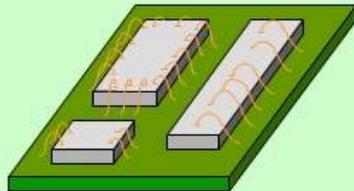
***Structured ASICs Minimize
NRE & Turnaround Times***

Source: Altera

SoCにおいては、新しい手法の導入により「設計は簡単でも性能はカスタム品に近い」ことを目指す必要がある。この事例はAltera社のStructured ASICを示す。通常のスタンダードセル方式では全層がカスタムとなるが、新手法ではトップの配線層のみがカスタムとなる。設計費は大幅に低減され、TATも最小となる。

Examples of SiP

Multi-Chip Wire Bonding Type



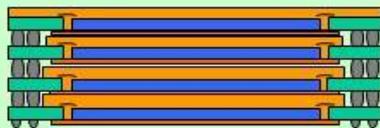
Chip Stacked Type



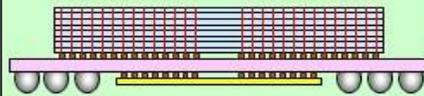
Chip on Chip Type



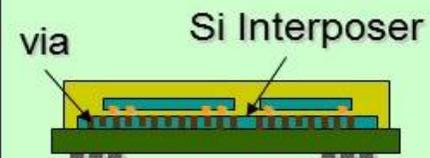
Package Stacked Type



Through Si Via Type



Interposer Type



SiPの事例を示す。左上から時計回りに、ワイヤボンディングのマルチチップ型、チップ積層型、チップオンチップ型、インターポザ型TSV積層型、パッケージ積層型。いずれも一長一短があり、用途、コスト、性能、TATなどを勘案して選択される。

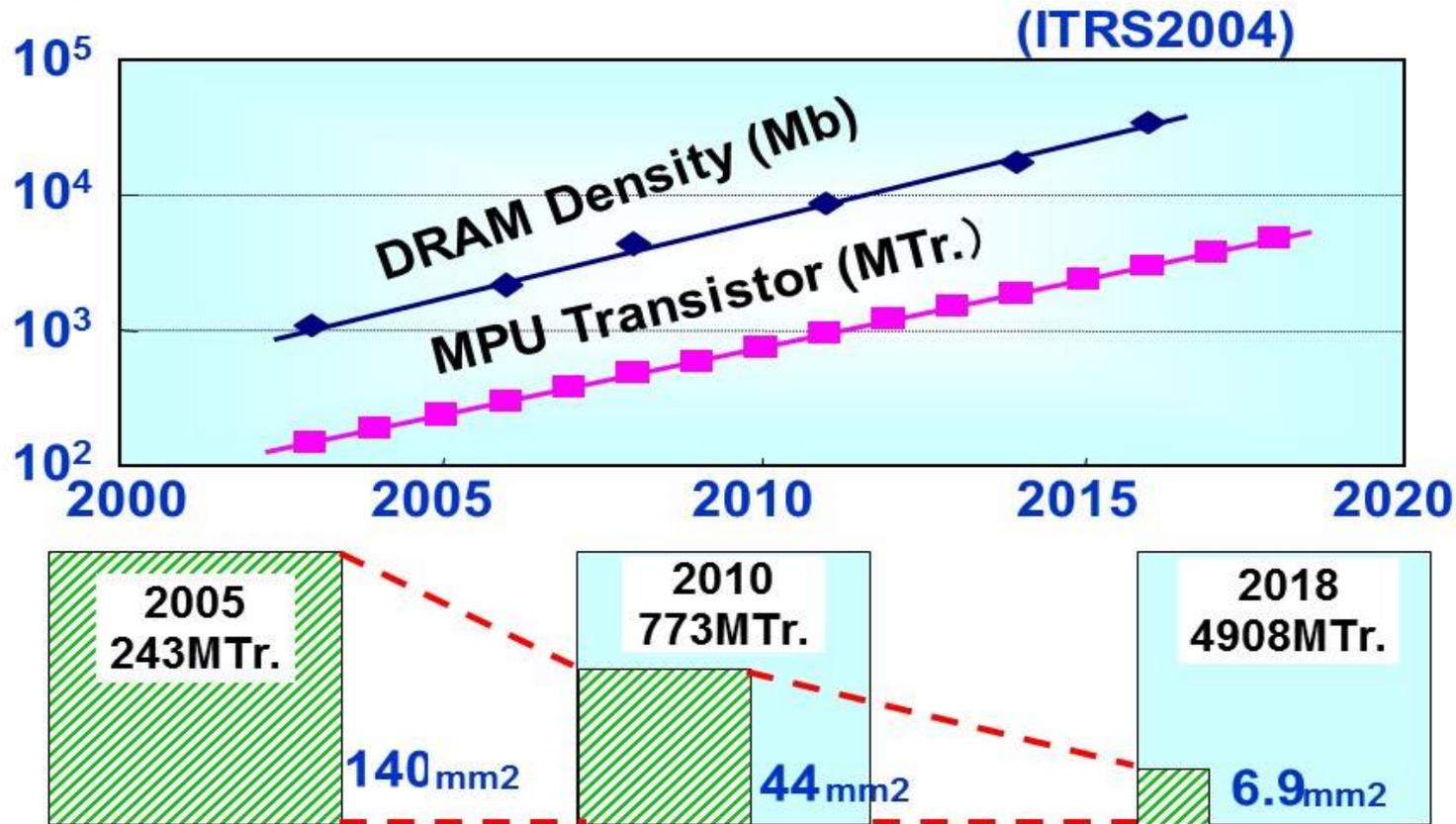
Outline

- Changing Paradigm in Electronics
- Computer Revolution
- Chip Innovations
- Implications of Makimoto's Wave
- **Future Outlook**

●エレクトロニクスのパラダイム転換
●半導体技術革新
●将来展望

●コンピュータ革命
●牧本ウエーブとは何か

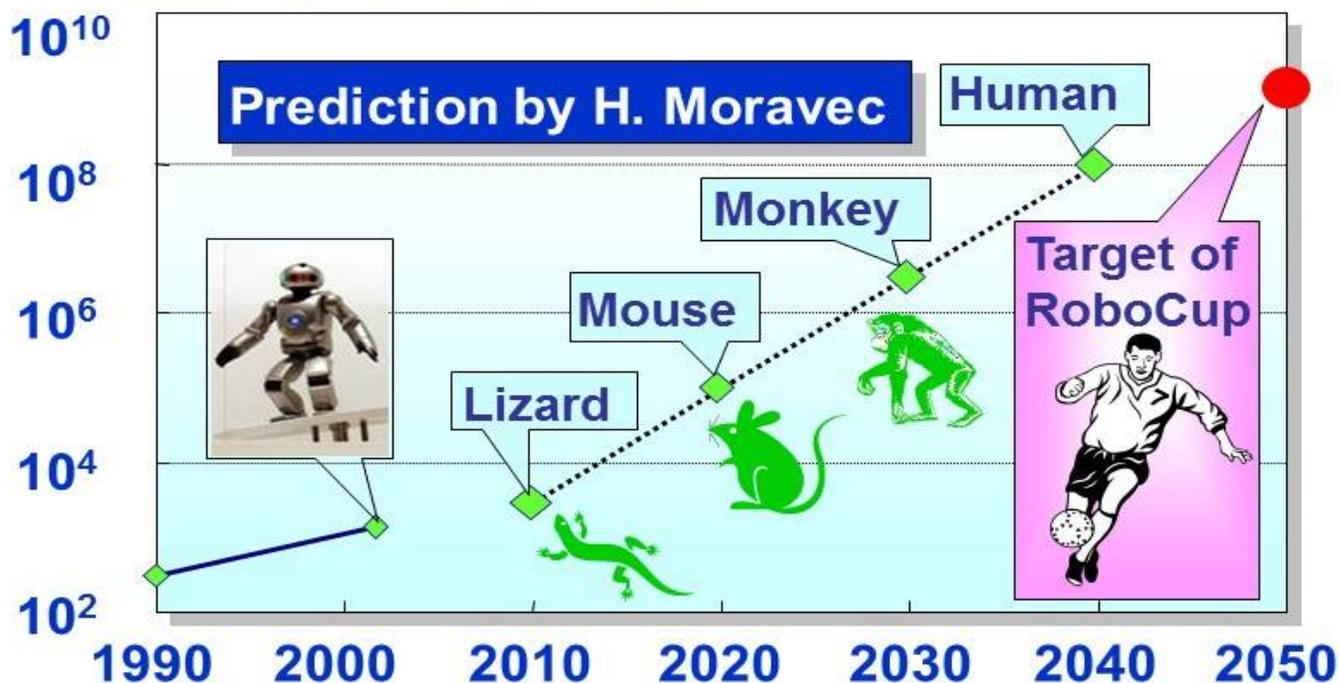
Integration Density of Future Chip



ITRSによればチップ内の集積度は今後も指数関数的に高くなる。グラフはDRAMのビット数とMPUのトランジスタ数である。これを視覚的にとらえると、2005年のチップサイズ 140mm^2 は2018年には 6.9mm^2 に相当する。チップサイズが同じと仮定すればトランジスタ数は約20倍になる。今日の20倍もの機能がチップ内に集積できるようになるのだ。

Evolution of Robot Intelligence

Processing Power (MIPS)



Source: H. Moravec of Carnegie Mellon University

前頁に示すような大きな機能を必要とする用途は何であろうか？超大型のシステムを除けば、PCやスマホではそのようなニーズはない。これから期待が持てるのはロボットである。講演の当時、ロボットの知能はトカゲにも及ばないが、2030年には猿のレベル、2040年には人のレベルに達する。ロボットの場、チップに集積できる機能はすべて使いつくされるだろう。

Chips & Sensors for Robots

VLSI chips

64bit CPU x 3
16bit MCU x 29
DRAM 192MB
Flash 16MB

CCD color camera x 2

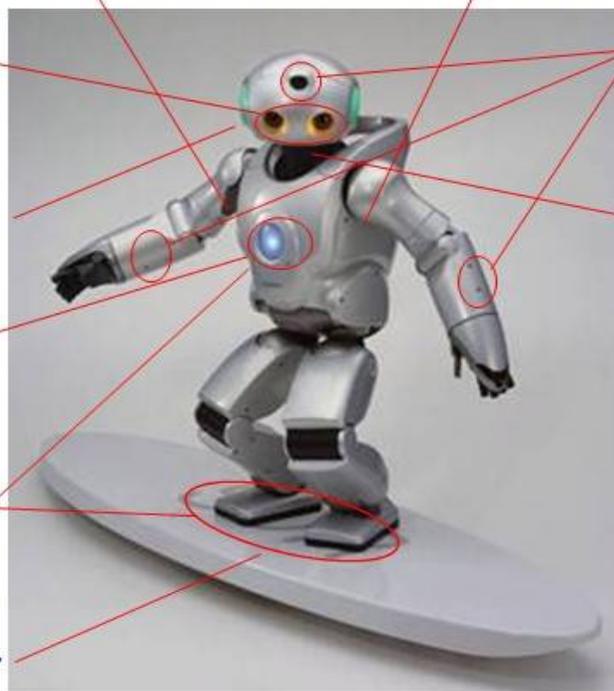
Microphones x 7

Angular rate sensor x 1

Acceleration sensor x 3

Force sensor x 8

Pinch Detection Sensor x 18



IR distance sensor x 3

Speaker x 1

Thermo sensor x 28

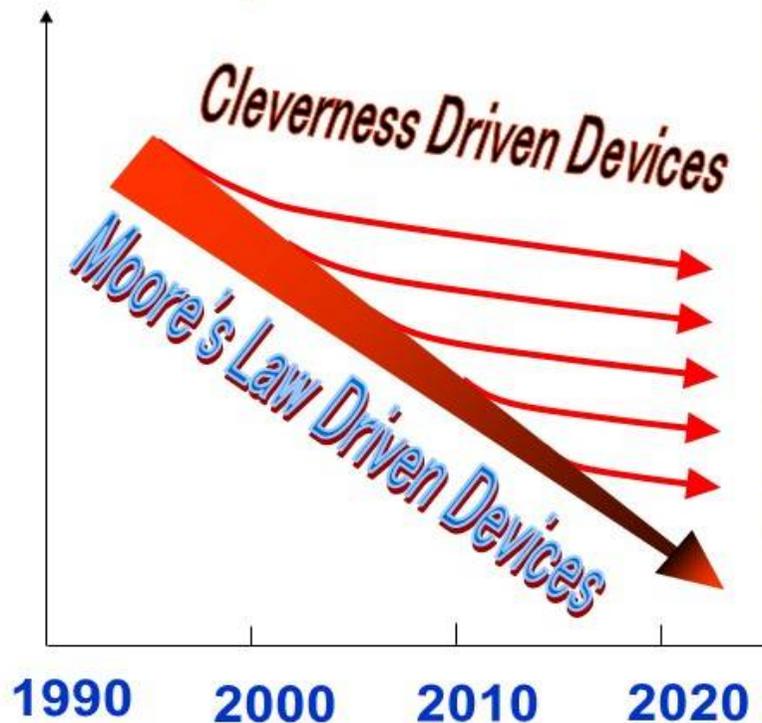
Touch sensor x 8
head,
hands,
shoulders

(QRIO)

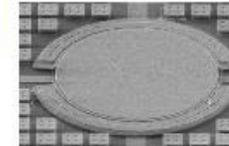
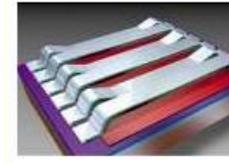
ソニーのロボットに使われているLSIとセンサーを示す。自律型ロボットでは周囲の状況をセンサーで把握した上で、適格に判断することが要求される。このロボットでは全部で79個のセンサー類が使われている。また、LSIの処理能力は当時のPCと同等以上である。ロボットは電池動作のため、ローパワー化は必須であり、これからのテクノロジー・ドライバーになるだろう。

Diversifying Directions of Chip Technologies

Geometry of Devices



- Optical Sensors
- Inertial Sensors
- Force Sensors
- Display Devices
- Actuators
- RF Devices etc.



Source: Analog Devices, UC Berkeley

半導体技術が多様化して行くことを世界で初めて明快に表現したものである。太い赤線で示す微細化路線がこれまでの技術の中心であったが、今後は微細化に依存しないセンサーなどの機能デバイスの重要性が増し、多様化が進む。このコンセプトは2002年のIEDMで発表したのが、2005年のITRS以来 "More Moore" と "More than Moore" と呼ばれるようになっている。

Summary

- ★ Digitalization of Consumer Electronics Getting Momentum Resulting in the Market Convergence
- ★ Chip Innovation Boosting Figure of Merit; 3 Orders of Magnitude in the Next Decade
- ★ Programmability/ Configurability Becoming Key For Future Architecture
- ★ Next Cycle of Makimoto's Wave: Automated SoC and SiP
- ★ Robotics to Provide New Opportunities

★コンシューマ製品のデジタル化が進展、市場融合が進む ★半導体革新によって、電子システムの Figure of Merit は10年間で1000倍になる ★将来のシステム設計においてはプログラマビリティ/コンフィギュラビリティが鍵である ★牧本ウエーブの次のサイクルの中心は自動化SoC・SiPである
★これからの新しい機会ロボット分野にある。