

# コンピュータ科学技術の最前線

～情報化社会を支えるコンピュータの科学と工学

---

現代社会と集積回路(2)

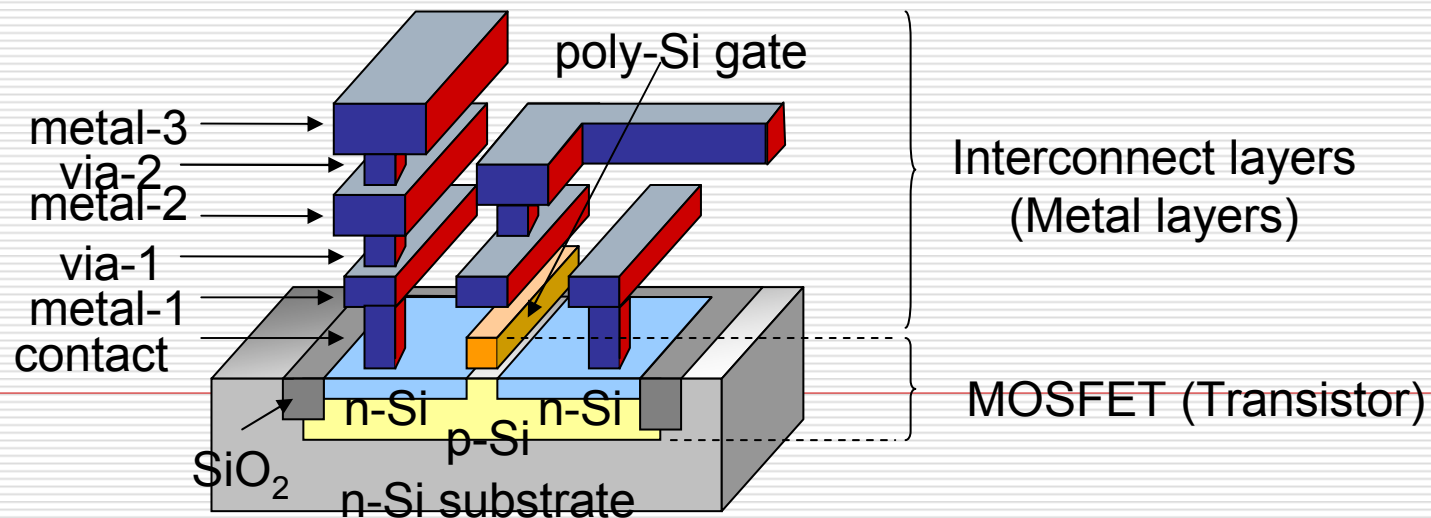
「集積回路の歴史と今後とコンピュータ」

秋田純一

akita@merl.jp, <http://merl.jp/>

# 集積回路とは・・・？

- VLSI = Very Large Scale Integration  
(大規模集積回路)
- 集積回路＝「集積」された「回路」
  - 素子(トランジスタ、抵抗、・・・)＋配線
  - 通常はシリコンなどの中に作りこまれる

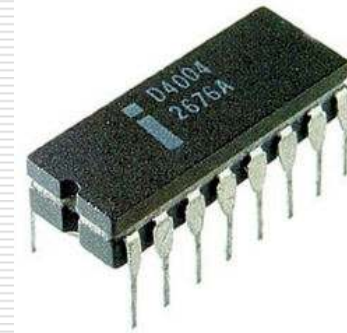


# 集積回路の歴史(プロセッサ)

---

## □ マイクロプロセッサ(MPU)

- i4004(1970, Intel)
- i8008(1972, Intel)
- i8086(1978, Intel)
- 68000(1979, Motorola)
- Pentium(1993, Intel)



f=714kHz, 2300Tr.



f=66MHz, 3,100,000Tr.

---

# 集積回路の歴史(メモリ)

---

- メモリIC (DRAM)
  - 1kb (1972, Intel)
  - 4kb (1975, Texas Inst.)
  - 16kb (1977, Mostek)
  - 64kb (1980, Hitachi)
  - 256kb (1983, Fujitsu)
  - 1Mb (1986, Toshiba)
  - 4Mb (1989, Hitachi)
  - 16Mb (1991, Hitachi)
  - 64Mb (1994, NEC, Samsung)
  - 256Mb (1997, Samsung)
  - 512Mb (2003, Samsung)
  - 1Gb (2004, Samsung)

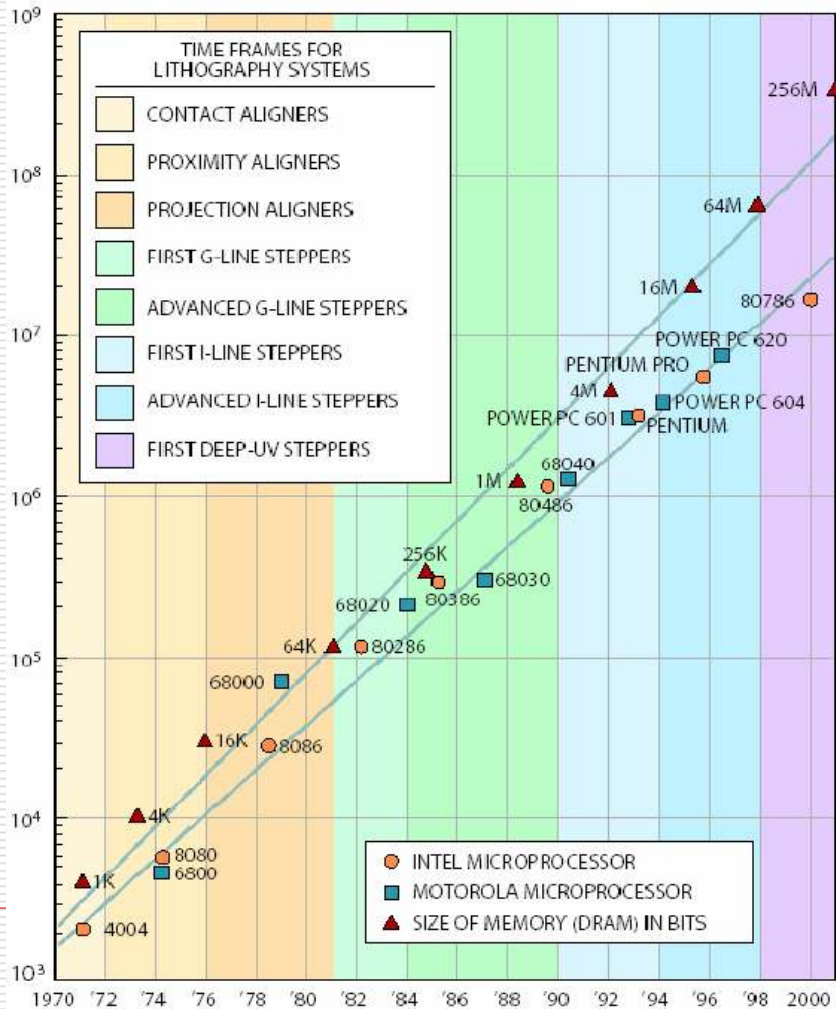


メモリ容量:  
3年で4倍  
32年で1,000,000倍

---

# ムーアの法則

チップあたりトランジスタ数

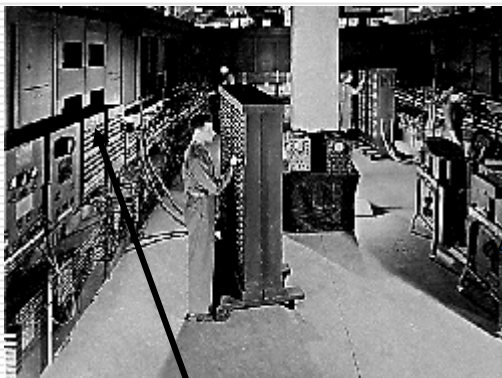


年率59%=4/3yearsで集積度増大  
 (「3年で4倍」)

傾き:  
 プロセッサ: 1.5/years  
 メモリ: 1.6/years

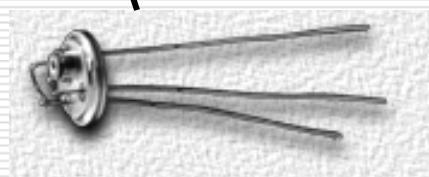
# コンピュータの進化の歴史

## □ 高性能化／小型化／低価格化



(1946)  
真空管: 18,000本  
消費電力: 140kW  
サイズ: 30m × 3m × 1m  
演算性能: 5,000加算/s

(ENIAC: 世界最初のコンピュータ)



(2007)

最小加工寸法:  $0.065 \mu\text{m}$  (65nm)

素子数:  $\sim 50,000,000$

消費電力: 100W $\sim$ 数mW

サイズ: 10mm × 10mm程度

演算性能: 10,000,000,000演算/s



# こんなところでも・・・



DEC VAX(1976)  
1MIPS



(世界最初のスーパーコンピュータ)

Cray-1 (1978)  
100MIPS



1000MIPS



100MIPS



300MIPS



20MIPS



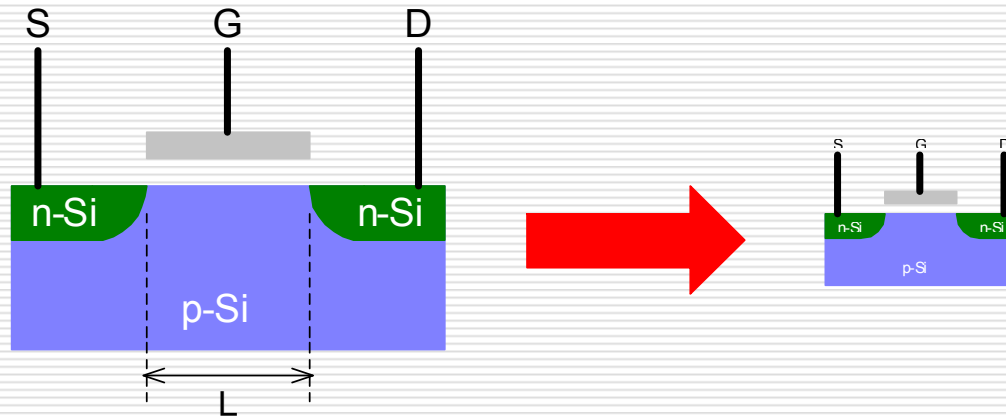
10MIPS

MIPS: Million Instruction Per Second (1秒間に実行できる命令数)

# 集積回路の進化の源: スケーリング則

□ MOSTランジスタを、より小さく作ると・・・？

- 寸法:  $1/\alpha$
- 不純物濃度:  $\alpha$
- 電源電圧:  $1/\alpha$





# スケーリング則の効果(その1)

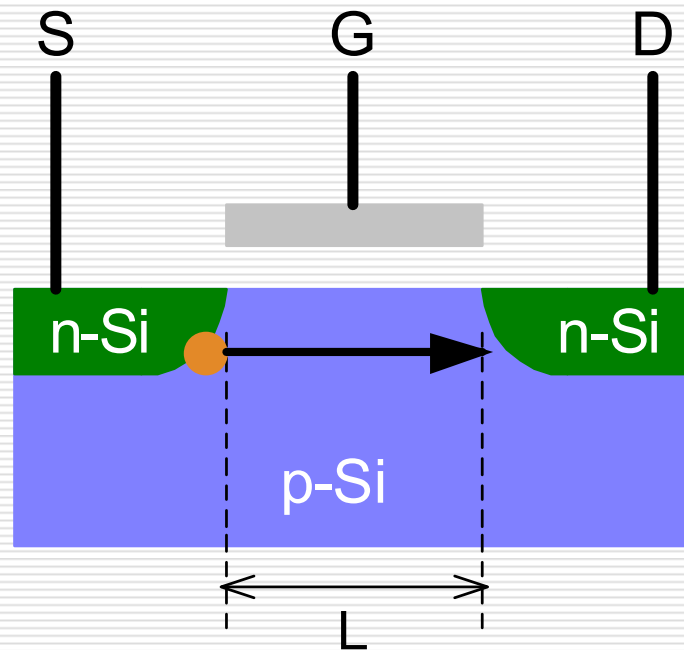
---

- 消費電力が $1/\alpha^2$ になる
    - $V:1/\alpha$  &  $I:1/\alpha \rightarrow P=VI \rightarrow 1/\alpha^2$
    - 電池が長持ち、ということ
-

## スケーリング則の効果(その2)

---

- 性能(情報処理速度)が $\alpha$ 倍になる
  - $L \downarrow$ : 電子の移動距離が短くなる



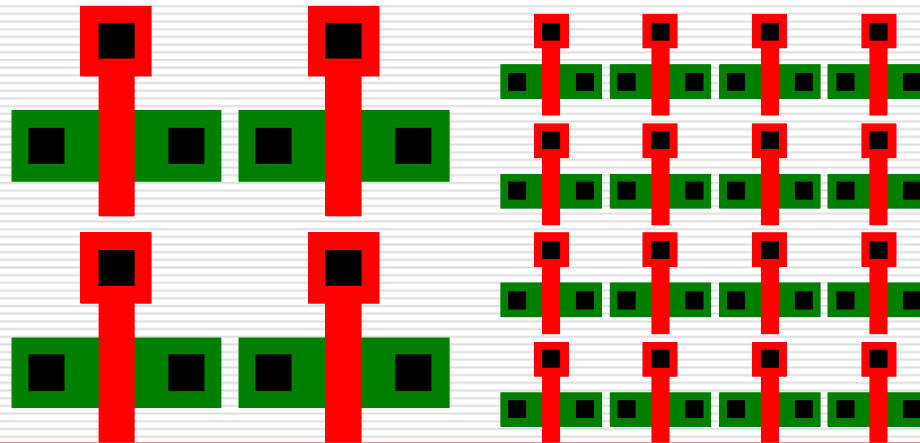
# スケーリング則の効果(その3)

---

## □ 高機能化(機能が $\alpha^2$ 倍)

- $L \downarrow \rightarrow$  MOSTランジスタの面積: $1/\alpha^2$   
 $\rightarrow$  同じ面積に入るMOSTランジスタ数: $\alpha^2$

- $\alpha^2$ 倍のMOSTランジスタを使って、コンピュータを作ることができる／メモリの容量が増える



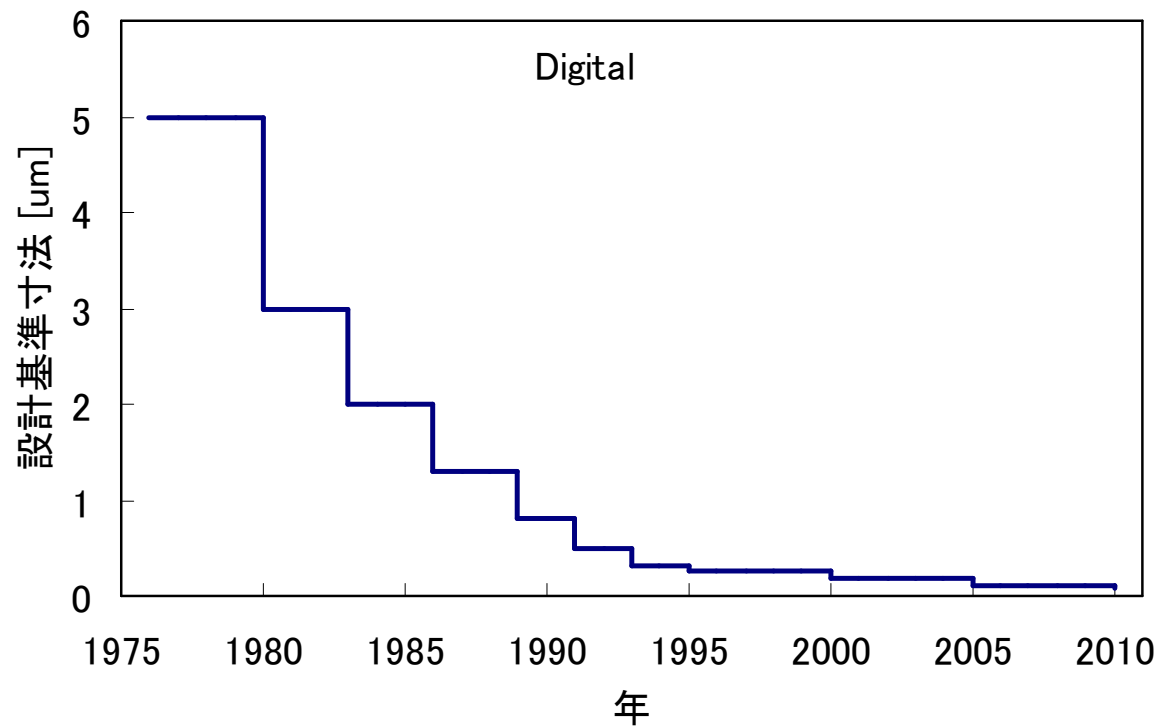
# スケーリング則の効果(まとめ)

---

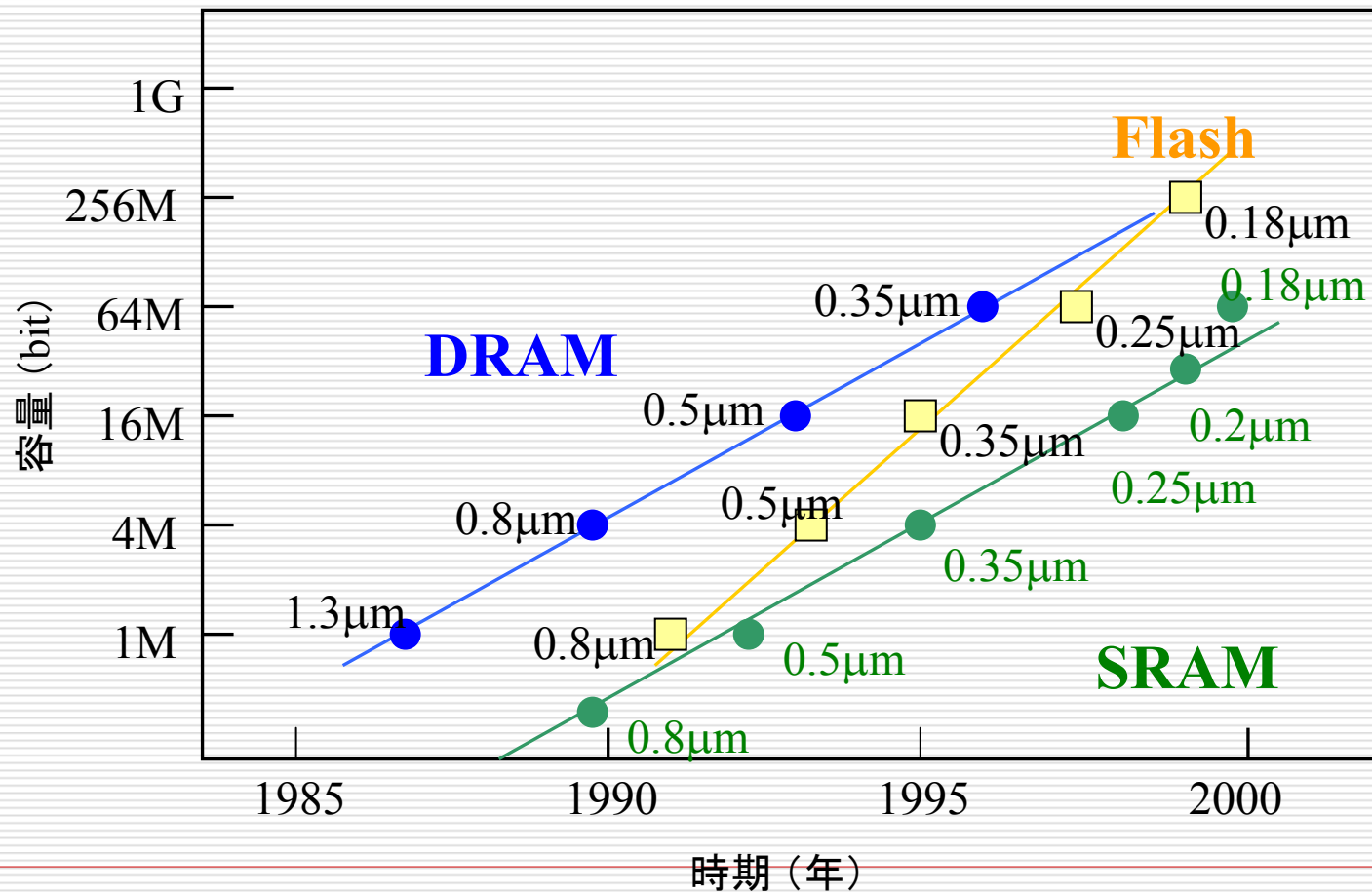
- 低消費電力化
  - 高速化
  - 高機能化
  - スケーリング則にしたがって微細化すればするほど、いいんじゃない？  
＝技術開発の明確な方向性
-

# MOSTランジスタ微細化の歴史

---



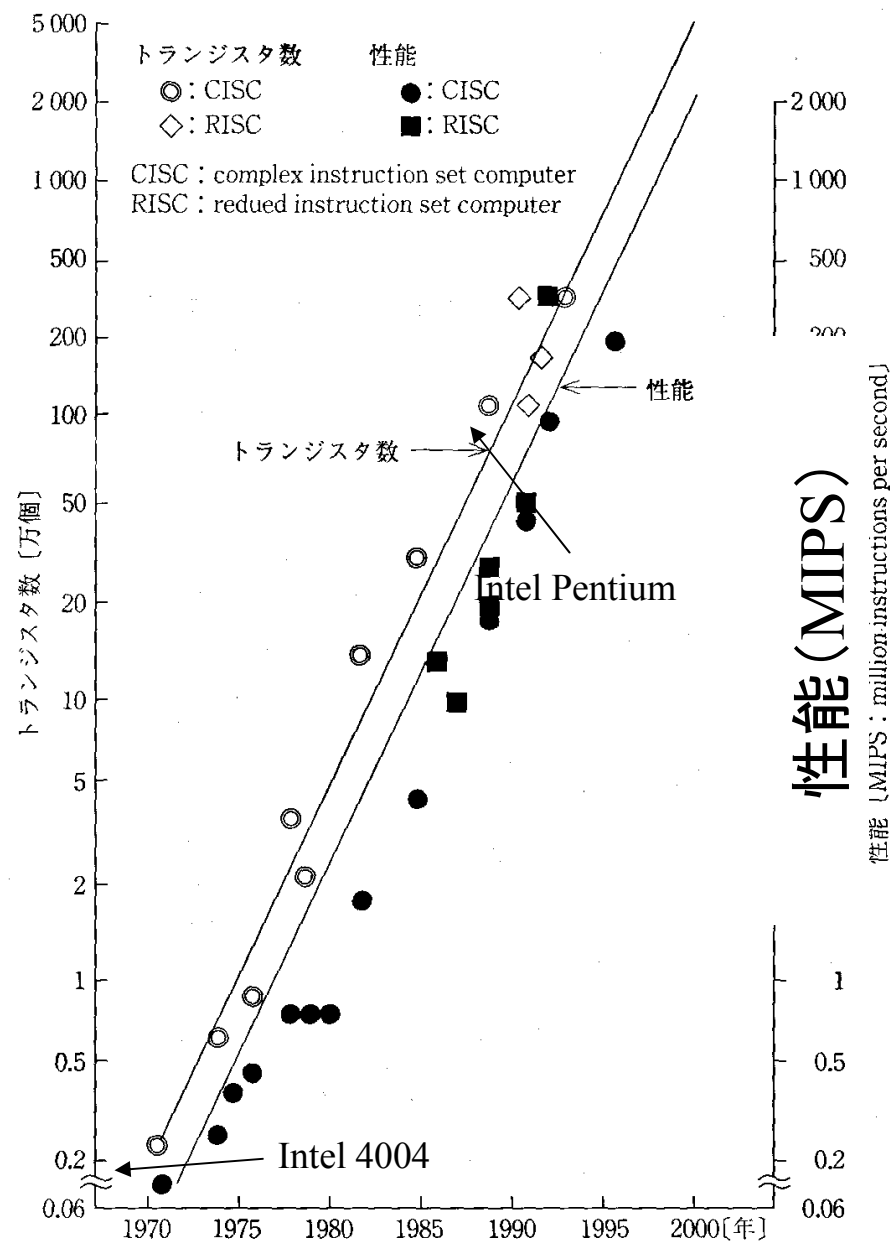
# メモリICの開発動向



# 高性能化の歴史

## □ プロセッサの規模と性能の推移

トランジスタ数(10<sup>4</sup>個)



## スケーリング則のもたらすもの(別の観点)

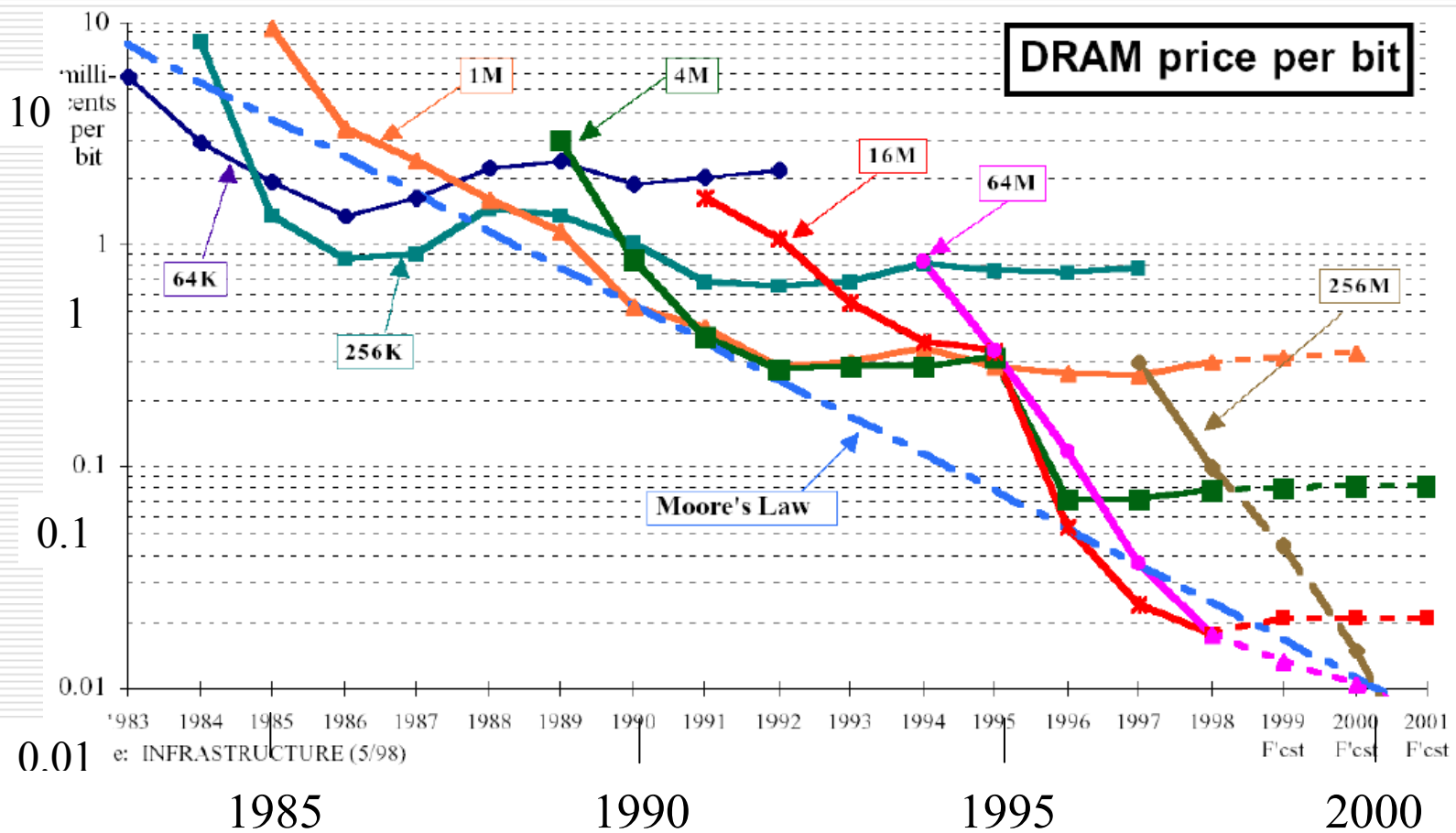
---

- 機能単価:「価格／機能」
    - スケーリングにより継続的な機能向上が可能
    - 他の産業では見られない特異性
-

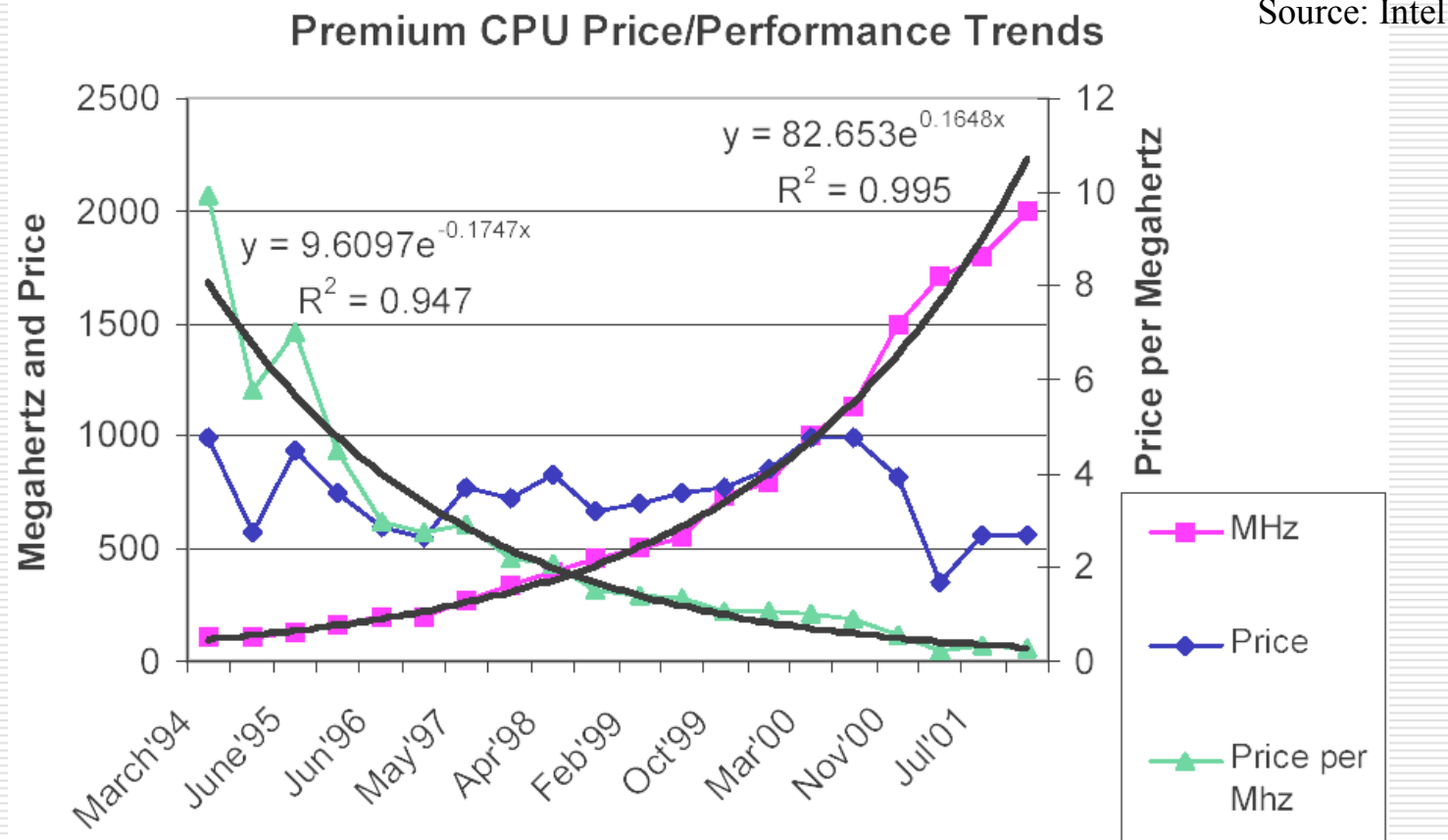


# 低コスト化(その1:DRAMのビット単価)

Source: IC knowledge



# 低コスト化 (その2:クロック周波数あたりのプロセッサ価格)



# スケーリングの市場的意義

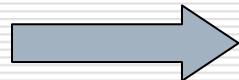
---

## □ 「機能単価」の継続的な低下

- 「機能単価」: 単位価格あたりの性能 = 「お買い得感」  
(例: 10万円で買えるPCの性能)
- スケーリングによる「機能単価」の低下  
= 性能向上 + 価格維持 or 価格低下 + 性能維持



(30万円)



(30万円)

or



(5万円)

# 半導体産業の特異性・・・？

---

- 機能単価の継続的な低減（半導体産業）
  - 他の産業では見られない、半導体産業に特異的な現象
  - 例：100万円で買えるクルマの性能・・・？
  - 例：クルマの性能あたりの価格・・・？



# 機能単価の低減のみでよいか？

---

- 否。
  - 「機能飢餓」が必要
    - 「より高性能なものが求められている」状態
    - 電子産業は長年この状態にある
  - シーズとニーズの両立
    - ユーザ側：機能飢餓
    - メーカー側：スケールリング則によるメリット
-

# 集積回路の世界の今後は・・・？

---

## □ ポイント:

- 「機能飢餓」は続くのか？
  - スケーリングなどの技術的実現性は続くのか？
-

# Moore's Lawの終わり: 技術面

---

## □ MOSTランジスタの微細化の限界

- MOSTランジスタは原子よりは小さくならない
  - $L: \sim 0.1\mu\text{m}(=100\text{nm})$   
←→ Si原子 $\sim 1\text{nm}$
  - その他の制限要因
    - 消費電力の増加(もれ電流)
    - 回路規模の増大と設計技術の乖離
  - $L: \sim 0.01\mu\text{m}(=10\text{nm})$  (めどはたっている)
-

# Moore's Lawの終わり: ニーズ面

---

- 果たして、Moore's Lawによる高性能な集積回路は必要なのか？
    - 例) PCの性能？
    - 例) 携帯電話の機能？
    - 技術的要因だけでは決まらない
    - ……これ以上の技術の進歩は必要なのか……？
-



# 集積回路の今後に対する別の見方

---

- 集積回路の製造・設計技術の成熟
    - 高性能な集積回路(MPU, メモリ, ...)
    - 低価格な集積回路(性能はそこそこ)
  - 高性能な集積回路:
    - = 最先端の製造技術(工場)  
→ (~1000億円以上)
  - 低価格な集積回路
    - 性能はそこそこ。しかし...
-

# これからの情報技術と集積回路

---

## □ 「道具」としての集積回路

- 設計技術・製造技術の成熟
- 敷居が下がってきている

## □ 情報技術の実現方法としての集積回路

- パソコンを使ってプログラム：  
できることは、たかが知っている  
(パソコンの枠の中だけの世界)
  - 面白いもの・作りたいものを実現したいときに、  
道具として活用する(実世界とのつながり)
-

# 集積回路の今後に対する別の見方

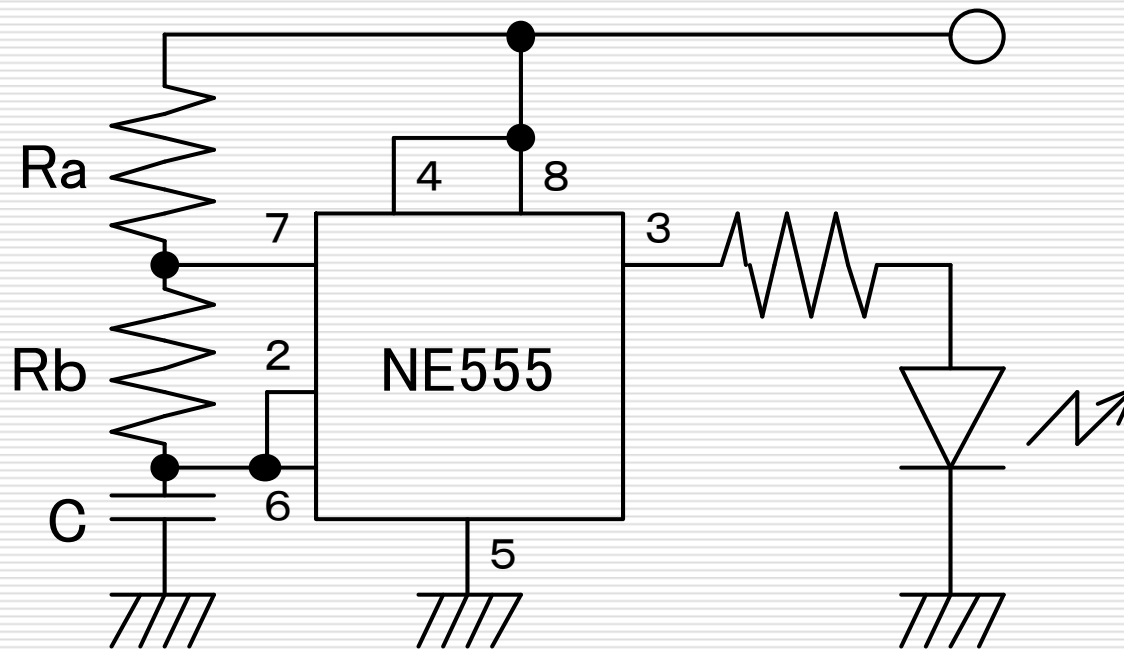
---

- 集積回路の製造・設計技術の成熟
    - 高性能な集積回路(MPU, メモリ, ...)
    - 低価格な集積回路(性能はそこそこ)
  - 高性能な集積回路:
    - = 最先端の製造技術(工場)  
→ (~1000億円以上)
  - 低価格な集積回路
    - 性能はそこそこ。しかし...
-

# 「LEDを点滅させる回路」(1)

---

## □ 普通的设计方法: 発振回路

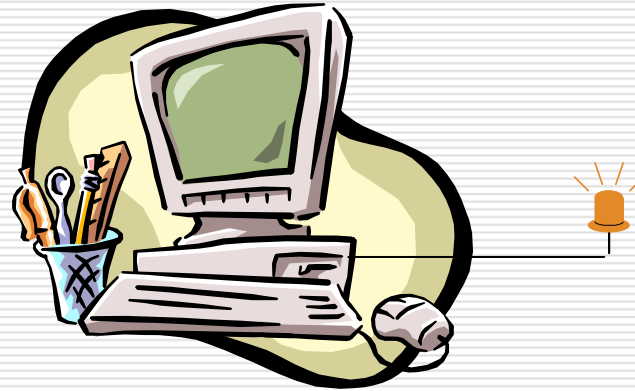


# 「LEDを点滅させる回路」(2)

---

- PCを使ってもできる…？
  - 可能だが、非現実的…か？

```
while(1){  
    a = 1;  
    sleep(1);  
    a = 0;  
    sleep(1);  
}
```



# マイクロコントローラ(MCU:マイコン)

---

## □ マイクロコントローラ (MCU)

- CPU+RAM+ROM+周辺回路を1つのチップに
- CPU: 1~100MIPS
- RAM: 1K~10KB
- ROM: 1K~100KB
- Cost: ~100円程度
- 製造技術は、「非常に」枯れた技術



# 「LEDを点滅させる回路」(3)

---

## □ 発振回路

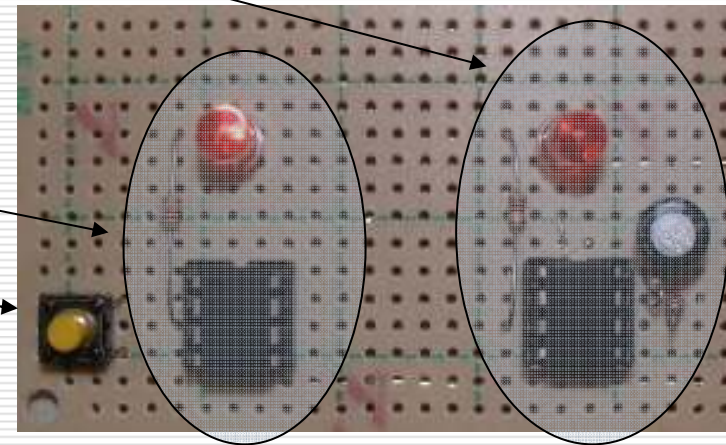
- $IC(8p) + C \times 1 + R \times 2 = \$2$

## □ MCU

- $IC(8p) = \$1.5$

- 多機能

- 点滅速度、点滅パターンなどの変更が容易



# MCUを使ったLED点滅回路

---

- 価格・性能の両面で、現実的な選択肢
  - 性能面では、実は高機能にもできる
    - コンピュータを使う！
-



## 集積回路を「道具」にするためには・・・

---

- 「作りたいもの」を設計しなければいけない
  - 1億個のトランジスタが「使える」(available)
  - ……どうやって設計するのか？
-

# さて、次回は・・・

---

- 集積回路を「道具」にするための方法
    - 回路の設計方法の変化と実例
-