

2011年度

電子回路I（昼間コース） シラバス

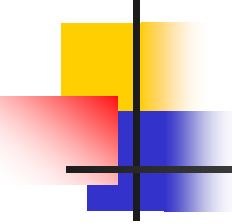
小林春夫（電気電子工学科）

k_haruo@el.gunma-u.ac.jp

<http://www.el.gunma-u.ac.jp/~kobaweb/>

● キーワード

アナログ回路、デジタル回路、
CMOSトランジスタ、
バイポーラ・トランジスタ、
集積回路、LSI

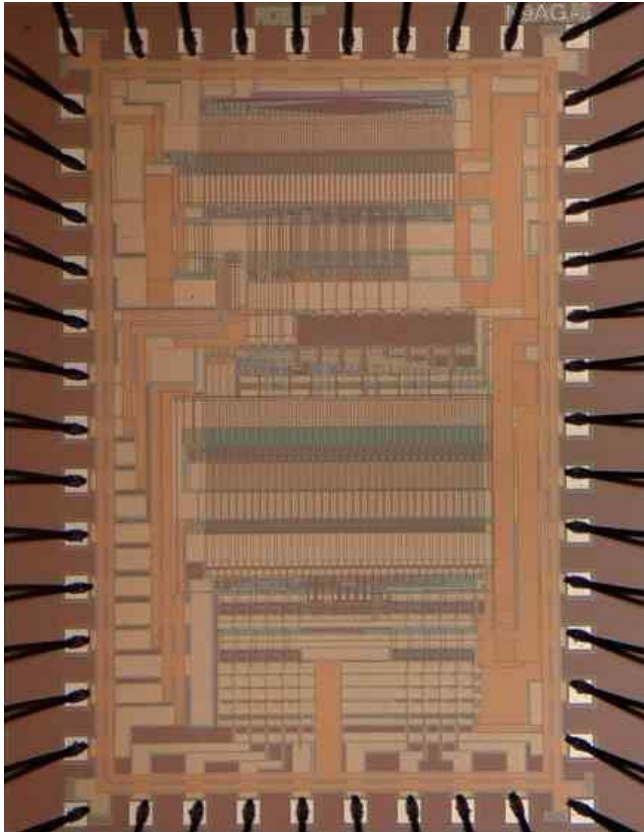


授業の目標および期待される学習効果

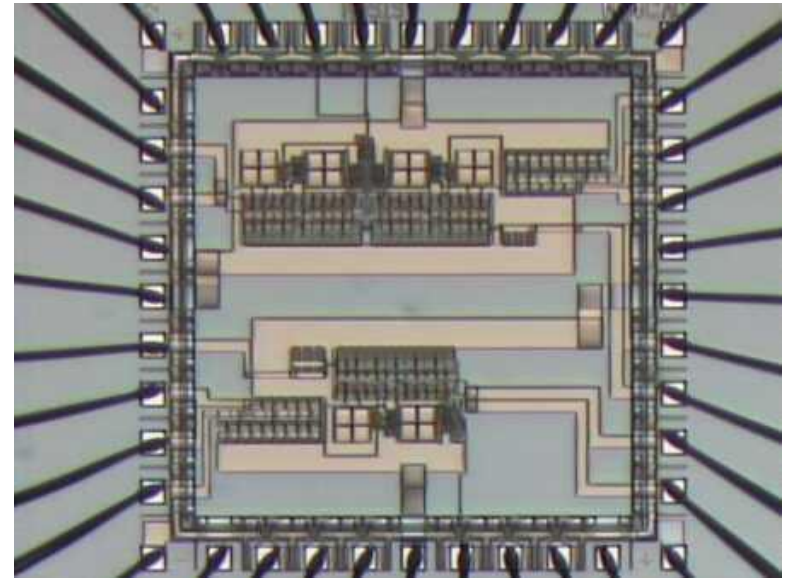
- トランジスタ・レベルからの
アナログ回路、デジタル回路の
設計と解析の基礎を学ぶ。
- トランジスタは現在主流の
CMOS FETトランジスタを中心に、
バイポーラトランジスタによる回路も扱う。

学習目標

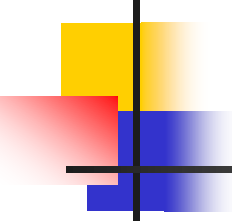
下記のようなチップが設計できるようになる。



高速CMOS AD変換器



高速CMOS
トラック・ホールド回路

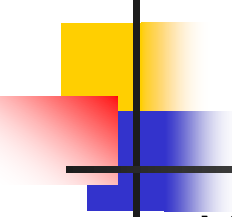


学習効果

- CMOS回路、バイポーラ・トランジスタ回路の基本概念の知識を得る。
- 基本回路を理解できるようになる。
- 基本回路を設計できるようになる。
- 回路技術の現在の世の中の動向を理解する。

成績評価

中間試験, 期末試験



授業内容のレベル

教養課程の物理をある程度理解していれば
理解できる初・中級レベルである。

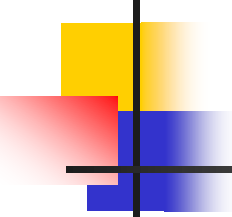
この授業の基礎となる科目： とくになし

次ぎに履修が望まれる科目：

集積回路システム工学、電子回路II、制御工学I

関連授業科目：

電子回路II, 電気回路I, II, 制御工学I,
集積電子回路工学、電子デバイス工学
デジタル信号処理、計算機工学I



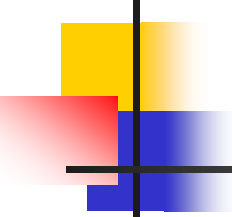
講義資料、参考書

- 必要な資料はコピーを配布する。
- **授業の形式、視聴覚機器の活用:**
板書とPowerPoint使用をする講義形式。
- 参考書(学部、大学院レベルの最も良い
電子回路の教科書、ただし購入は必須ではない)

松澤昭,

「基礎電子回路工学－アナログ回路を中心に」

電気学会(オーム社・コロナ社・電気書院) (2009年)

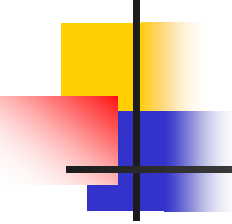


メッセージ

- エレクトロニクス産業、半導体産業は
好不況の波(**シリコン・サイクル**)を繰り返しながら、右肩上がりで成長してきている。
- その中で**回路設計技術**は現在および近未来の日本で付加価値を産む技術、国際競争力を高める技術としてきわめて重要視されている。
- 電気電子系の技術者には
必須の学問・技術である。

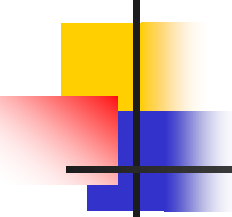
エレクトロニクスの歴史

- 電子の発見から110年
- トランジスタの発明から60年
ベル研究所 ウィリアム・ショックレイ氏 ら
- 集積回路の発明から50年
インテル社 ロバート・ノイス氏
テキサス・インスツルメンツ社 ジャック・キルビー氏
- 物理学の一分野にすぎなかったエレクトロニクスは
学問的・技術的および産業的に急速に発展してきた。



エレクトロニクスと産業

- 多くのものは 価格は年々上昇
- 値段が変わらないのは卵
- 半導体、エレクトロニクス製品は
年々性能が急速に向上し、
かつ値段が下がっている。
- 半導体、エレクトロニクス製品の良悪は、
子供、主婦等でも判定できる。



半導体産業の状況

- **米国：** 90年代になり復権
マイクロ・プロセッサ技術、アナログ回路技術
- **欧州：** 携帯電話関係で生き返る。
- **アジア諸国：**
韓国、台湾、シンガポール等の急成長
- **日本：** 90年代になり競争力低下。
復権・生き残りをかけて様々な施策。

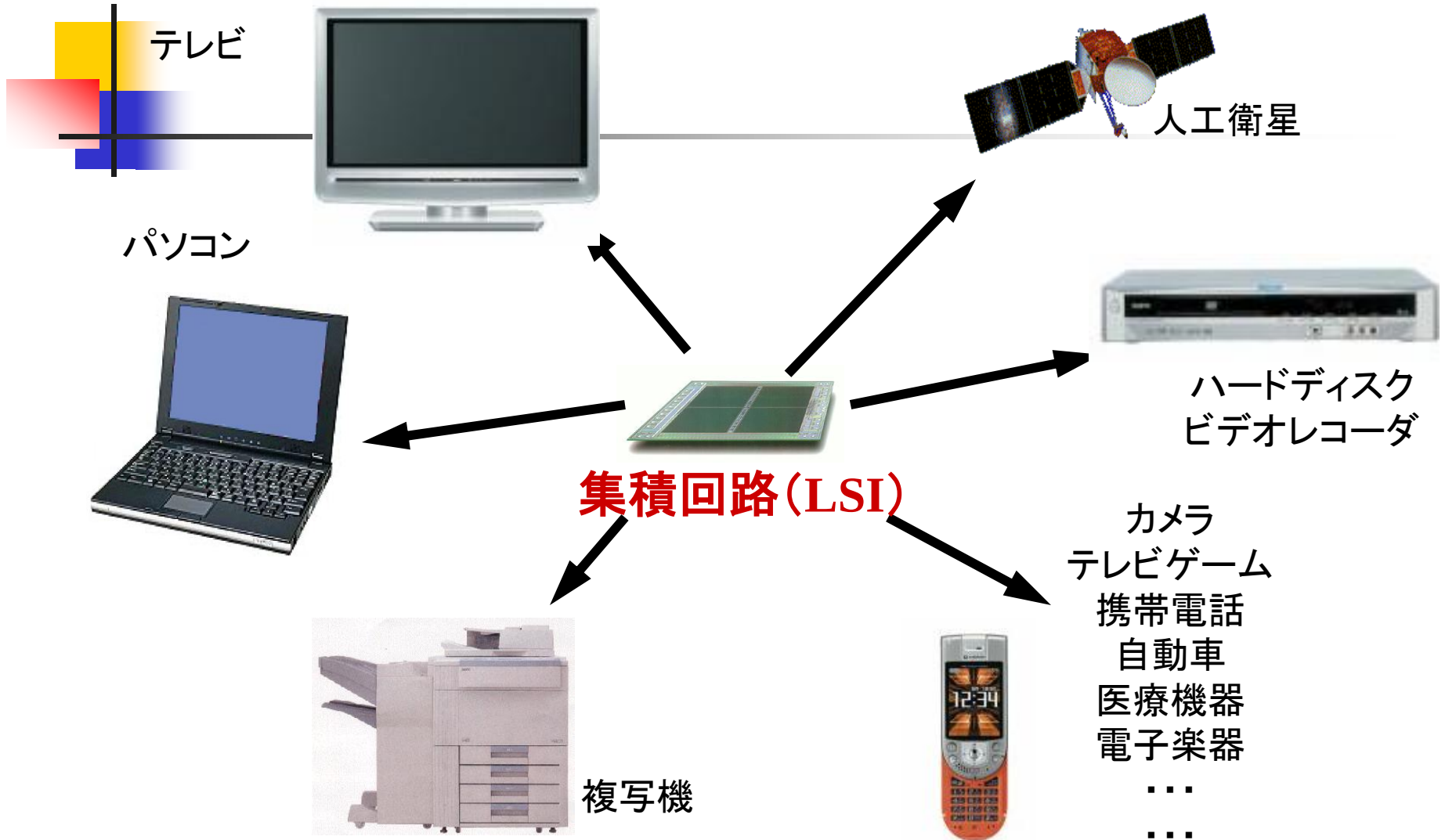
システムソリューションを支える 半導体技術

高機能化・小型化



年代

集積回路のアプリケーション(1)



集積回路のアプリケーション(2)

携帯電話機器

■ 多機能化

- 表示のカラー化
- PDA(情報アシスト機能)
- MP3(音楽・オーディオ)
- CCD(デジカメ機能・画像伝送)
- GPS(位置情報、特定場所での特定情報)
- ゲーム(通信ネット対戦ゲーム)
- BlueTooth(他のデジタル情報機器との通信)
- E-Commerce(キャッシュカードの代替)

■ LSIへの要求項目

- 超省電力化 ⇒ Run mode(typical): 300mW Sleep mode: 3mW
- 低電圧駆動 5V → 3V → 1.5V
- 小型・薄型・大容量メモリ ⇒ 例: 3次元メモリPKG
- 半導体PKGの薄型化 PKG厚 0.8mm^t → 0.5mm^t
- CCD内蔵LSI(画像処理の1チップ化)
- 新機能のスピーディな取り込み(ソフトIPの充実)
- 低コスト化 現在 100% → 2005年 70% → 2010年 50%

(出典: SIRIJ (STRJ) WS 10/2000)

集積回路のアプリケーション(3)

リストタイプウェアラブル機器



■ LSIへの要求項目

- 超省電力化 ⇒ 現状の 1/5 ~ 1/7 消費電力
- ベアチップによる小型化・薄膜化
- ミドルウェアASICと Bluetooth はワンチップ化
- SIPモジュール化
- 3次元LSIパッケージ
- CCD内蔵LSI

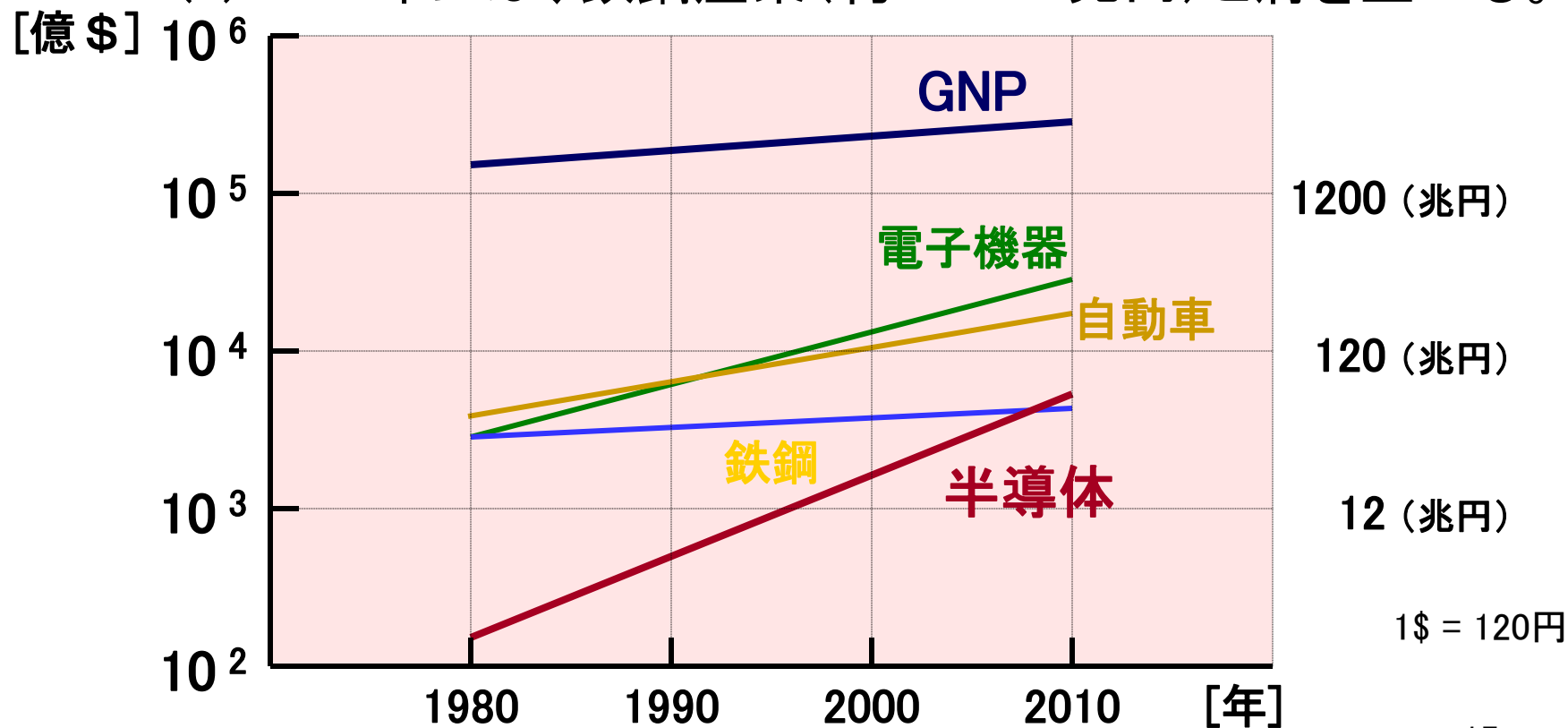
SOCへの期待
大きい

(出典: SIRIJ (STRJ) WS 10/2000)

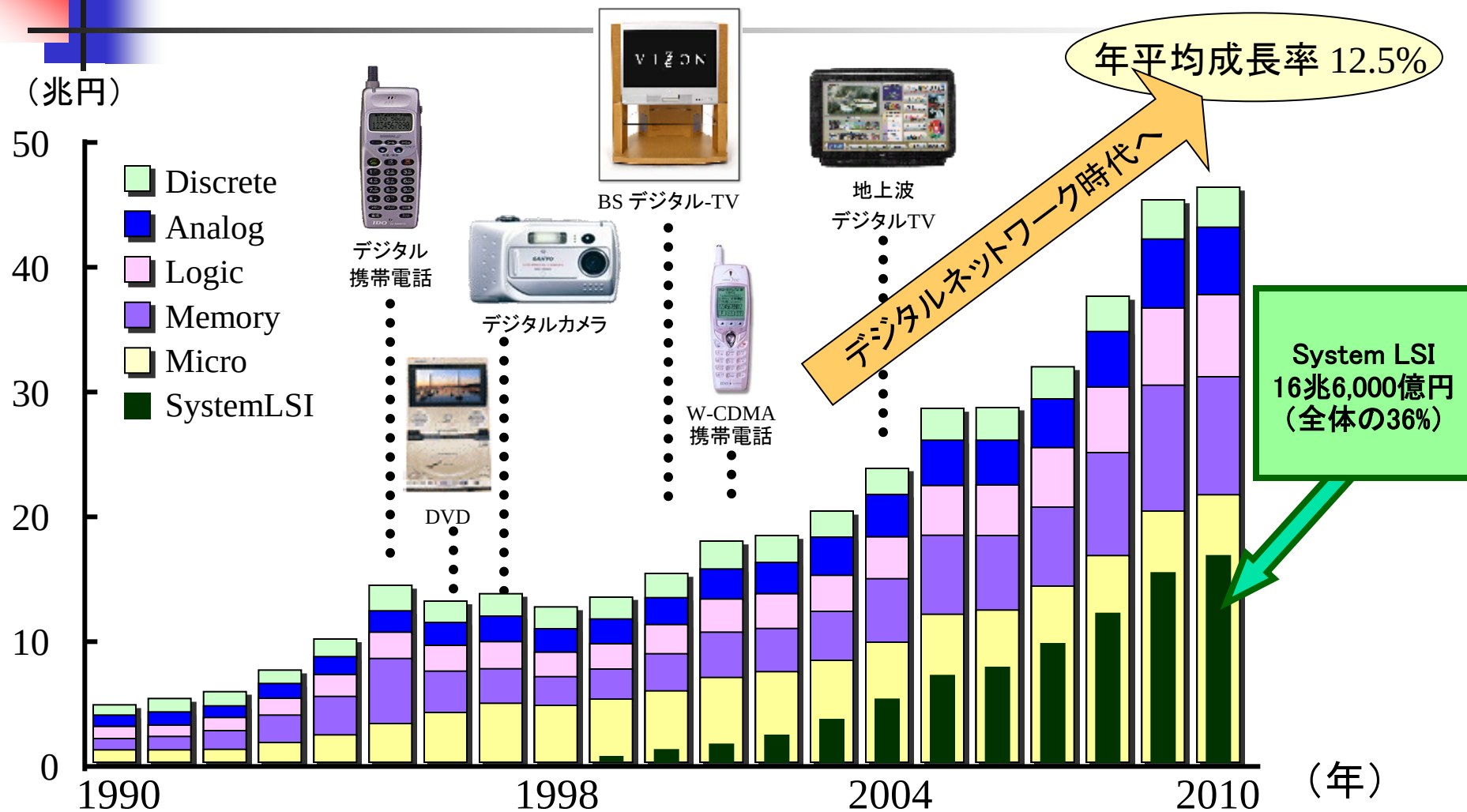
半導体はビッグ産業

(1) 半導体の市場は、2000年で20兆円規模になった。

(2) 2010年には、鉄鋼産業(約40~50兆円)と肩を並べる。

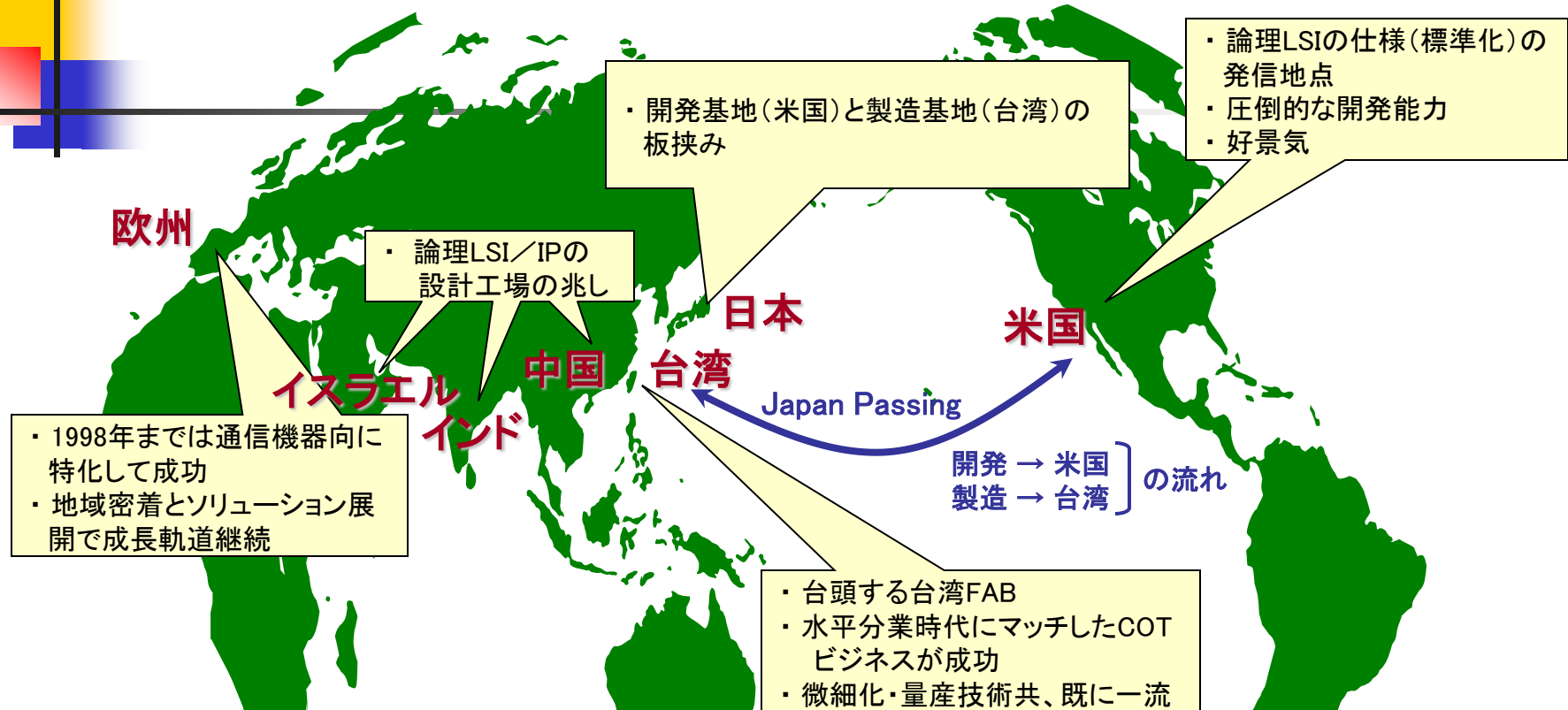


インターネット普及やデジタル化の進行 によりエレクトロニクス市場は活性化



半導体産業の熾烈な国際競争

国際競争時代と台湾・中国FABの台頭等



世界の論理LSIに関する潮流

- ・ W/WなDFS製品のみが生き残る — 製品の寡占化
- ・ 莫大な投資に耐える企業規模拡大の兆候
- ・ システムLSI時代を迎えてより重要な開発地域との密着体制
- ・ IP(技術資産)の流動化

マイクロプロセッサの性能向上

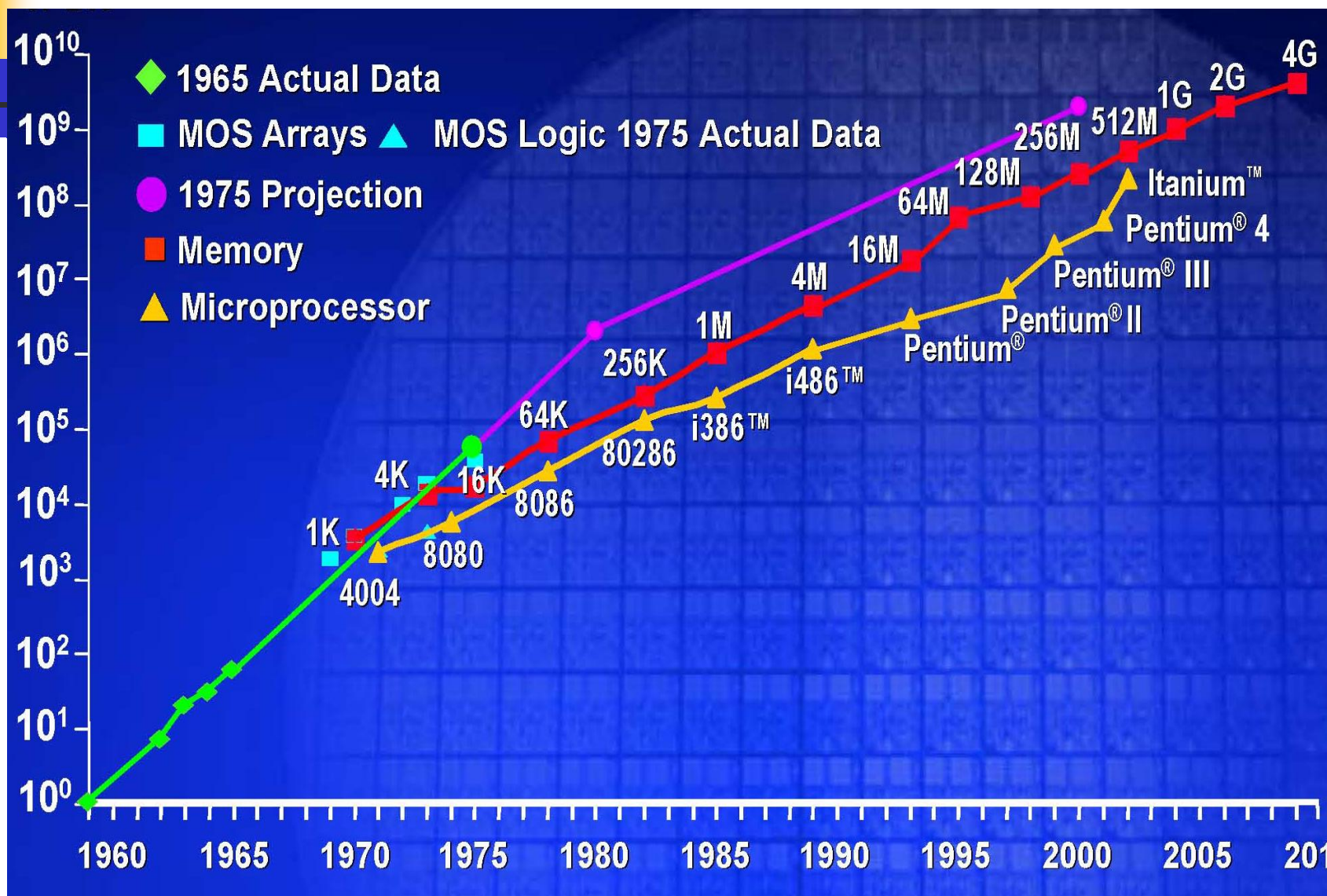
Processor Performance [MIPS]



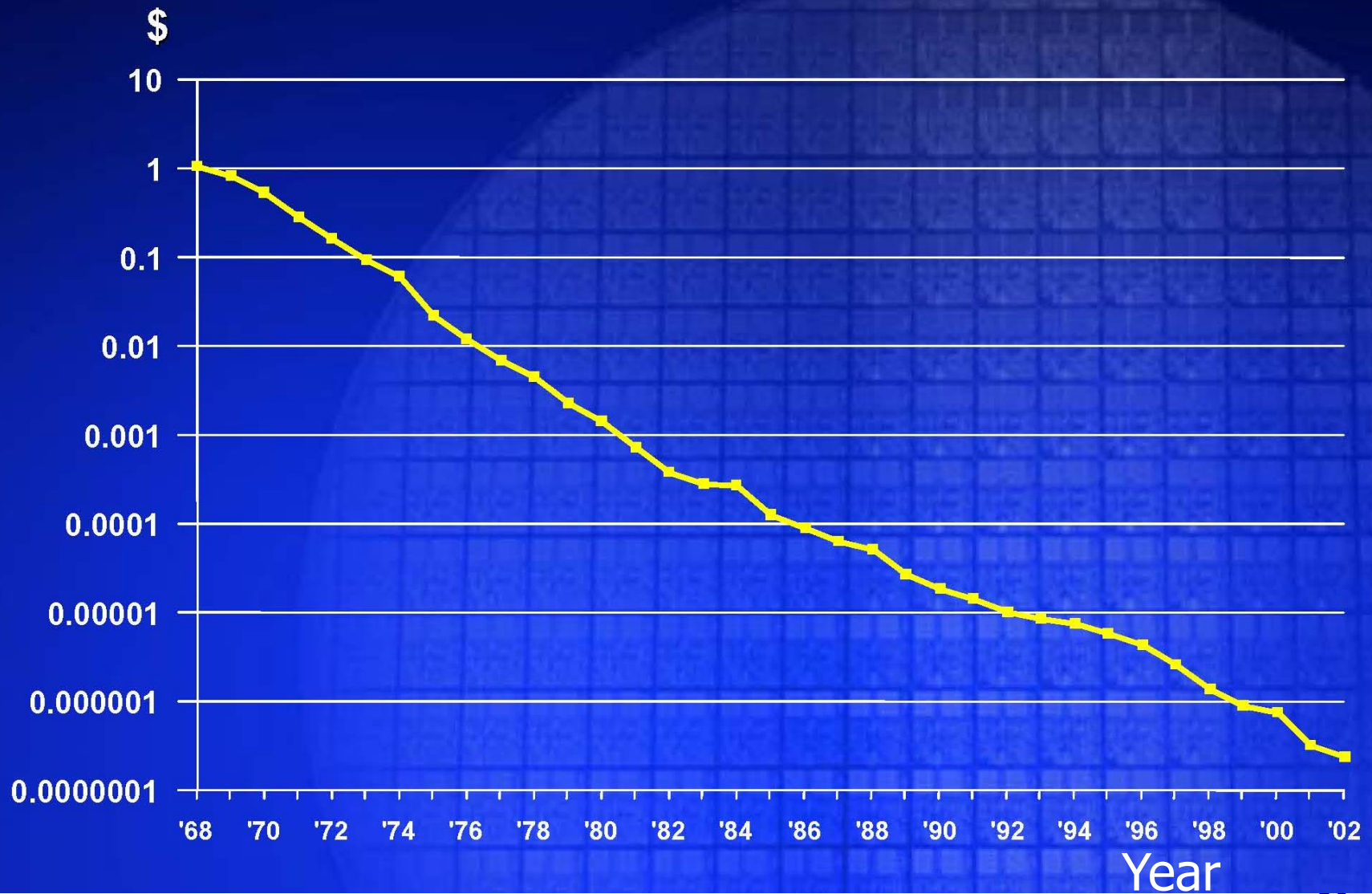
MIPS: Million Instruction Per Second (1秒間に何百万回命令を実行できるか)

集積回路内のトランジスタ数

集積トランジスタ数

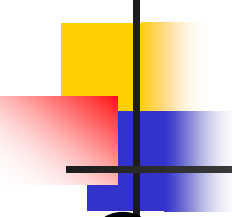


トランジスタ1個あたりの価格



大学での集積回路設計の研究・教育の 世界の状況

- **米国：** 世界をリード
- **欧州：** オランダ、ベルギー、スイス、
北イタリア、フィンランド、デンマーク等
携帯電話関係の回路技術
- **アジア諸国：** 韓国、台湾、香港、中国、
シンガポール、タイ等 急速な伸び
- **日本：** 世界の中で取り残される危機感
→ 産官学で様々な施策。



なぜ回路技術か

● プロセス、デバイス技術

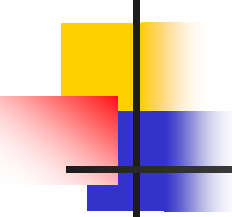
技術者・研究者の能力のみならず、
莫大な設備投資が必要。

コスト競争、装置産業の側面あり。

台湾、韓国に移りつつある。

● 回路・システム設計技術

技術者・研究者の能力のみで勝負できる。
現在の日本の半導体産業界の要請が強い。



アナログ信号とデジタル信号

アナログ信号

連続的な信号

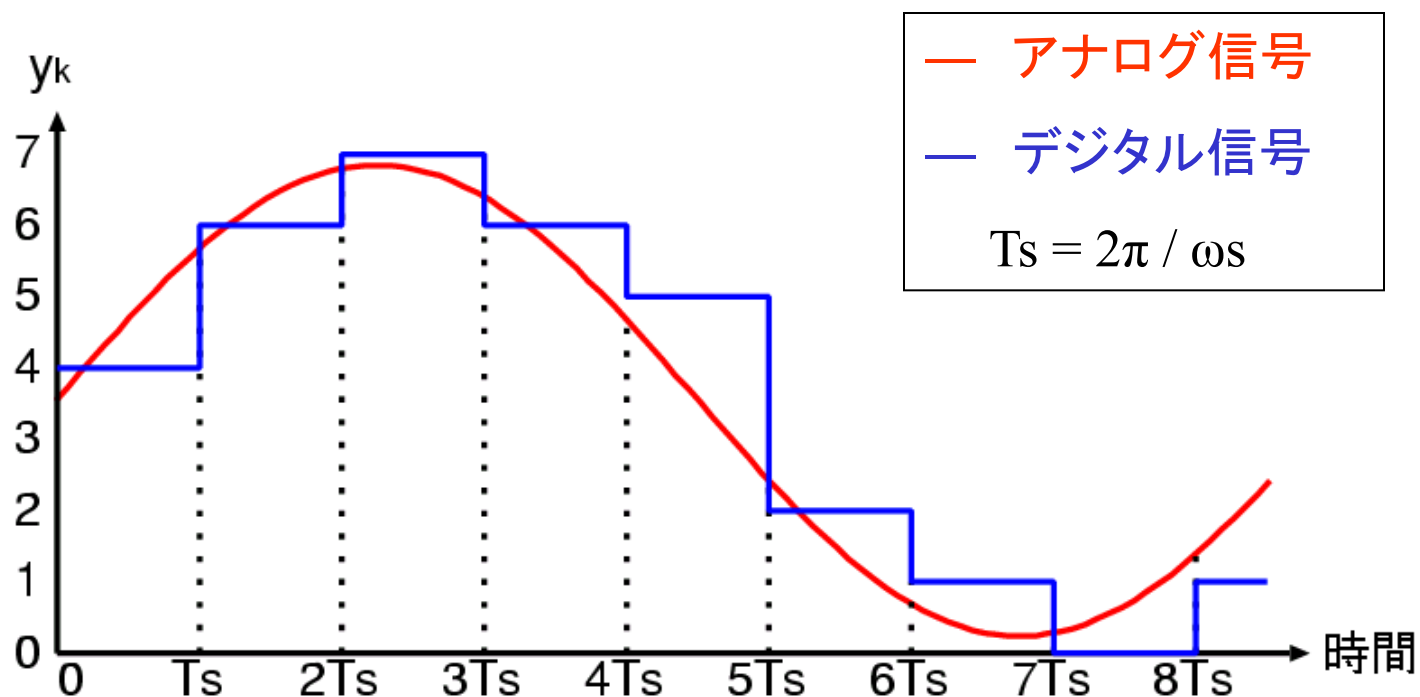
例：自然界の信号（音声、電波）、アナログ時計
「坂道」

デジタル信号

離散的・数値で表現された信号

例：コンピュータ内での2進数で表現された信号
デジタル時計
「階段」

アナログ信号とデジタル信号



デジタル信号はアナログ信号レベルを
四捨五入（または切り捨て）

アナログとは？ デジタルとは？



速度



音



色、光



風

気温

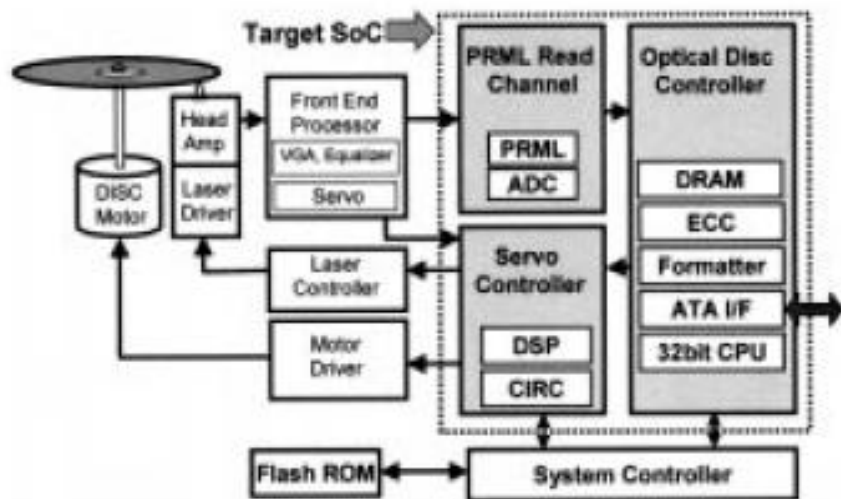


自然界の事象は
アナログ

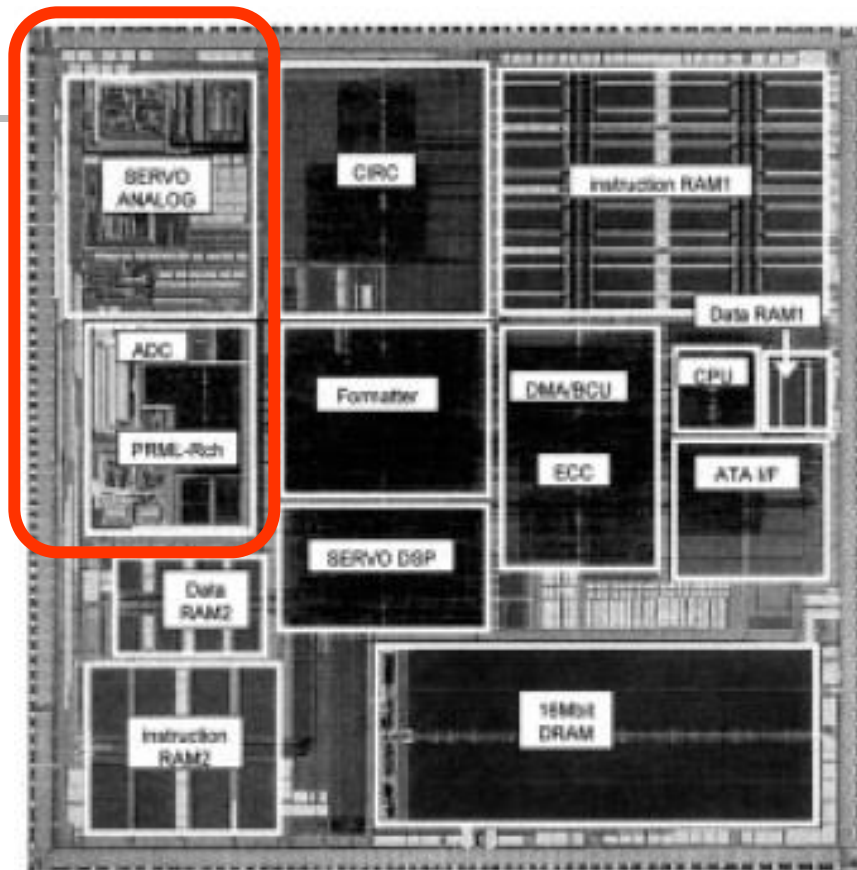
自然界 — 連続量
アナログの世界
例) 音、光、温度、圧力

計算、メモリの世界 — 離散量
デジタルの世界
例) パソコン、CD、DVD、デジカメ

アナログ・デジタル混載システムLSI例 (DVDシステム)



アナログ領域



Read Channel Maximum Operating speed	432Mbps (DVD 16x playback)
Package	208 pin LQFP
Process technology	0.18um triple-metal CMOS
Power supply	5.0V $\pm$ 0.5V (ATA I/F) 3.3V $\pm$ 0.3V (Analog) 1.8V $\pm$ 0.15V (Digital)
Built-in DRAM (read/write buffer)	16Mbit
Die size	144mm ² (12.0mm x 12.0mm)
Number of transistors	24M
Power Dissipation	1.2 W@432Mbps (DVD 16x playback)

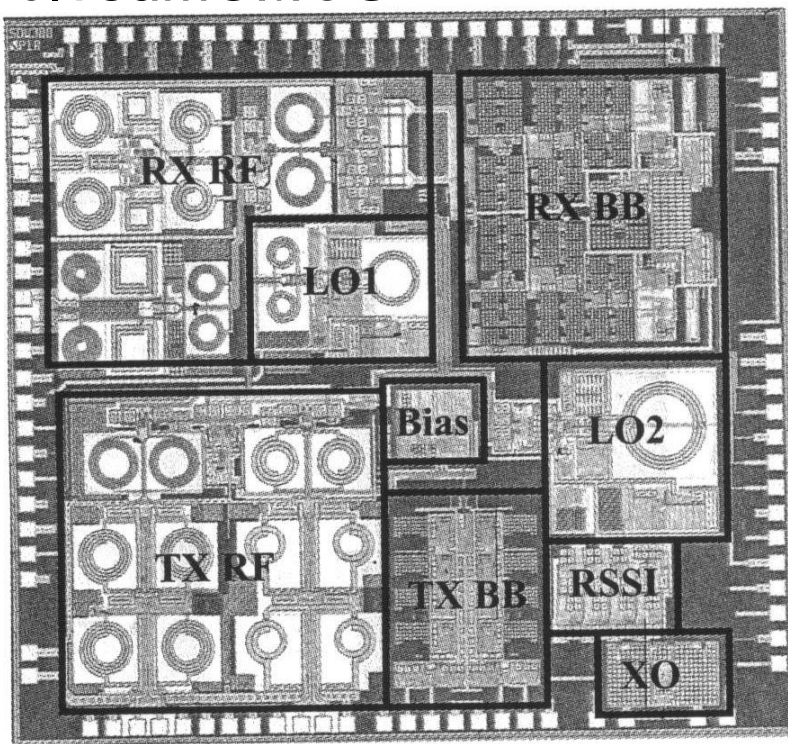
出典: T.Yamamoto, et al (松下電産)

“A Mixed-Signal 0.18um CMOS SoC for DVD Systems with 432Mbps PRML Read-channel and 16Mb Embedded DRAM”
IEEE, JSSC Vol.36, No11, 2001, pp1785-1794

アナログ・システムLSI例(WLAN トランシーバ)

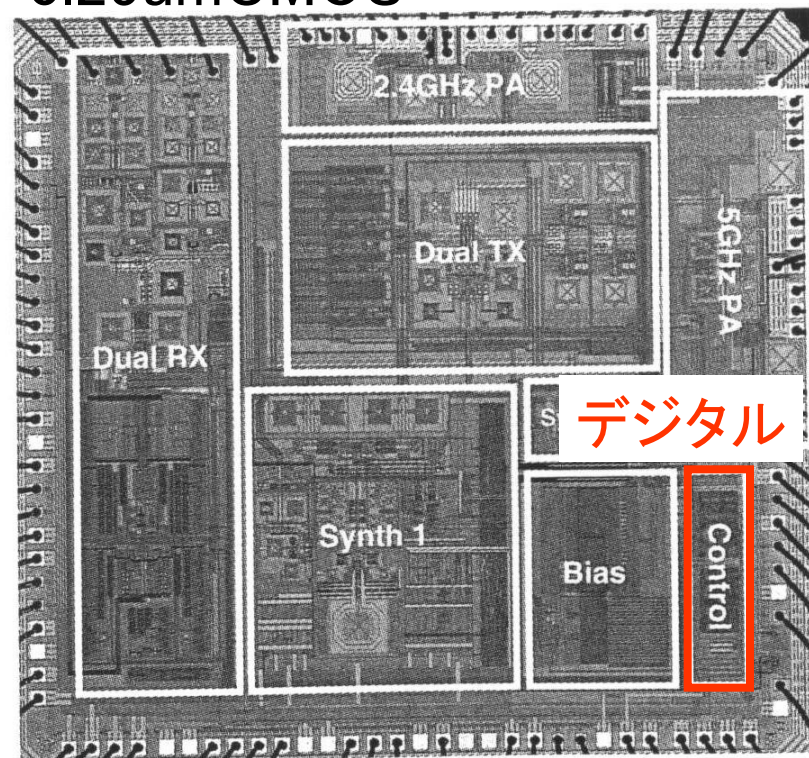
GHz帯の超高周波用アナログLSIもCMOSで実現

0.18 μ m CMOS

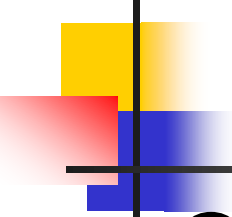


出典: R.Ahola, et al (Spirea, Finland)
“A Single-Chip CMOS Transceiver for 802.11a/b/g WLANs”
ISSCC2004, 5-2, pp92-93 (2004.2)

0.25 μ m CMOS

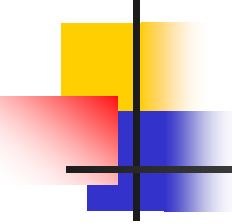


出典: M.Zargan, et al (Atheros, USA)
“A Single-Chip Dual Band Tri-Mode CMOS Transceiver for IEEE
802.11a/b/g WLAN” ISSCC2004, 5-4, pp96-97 (2004.2)



デジタル回路 (1)

- 0, 1の世界
- 多くの計算・信号処理はアナログからデジタルへ移行。**デジタル計算機**全盛。
- **長所**:
 - ソフトウェアによるプログラマビリティ
 - 高精度**、ノイズに強い。
 - 大容量メモリをもてる。
 - LSIの微細化の恩恵を受ける。
 - 回路設計が比較的容易。



デジタル回路(2)

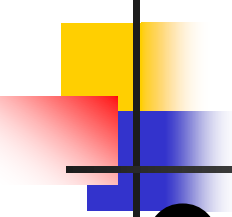
- 短所:

- 回路規模が大きくなりやすい。

- 消費電力が比較的大きい。

- ほとんど全てのデジタルLSIは
CMOSで作られている。

- ex. マイクロコンピュータ、
スーパーコンピュータ

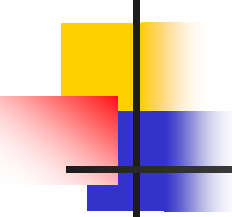


アナログ回路

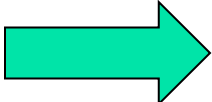
- **長所**： 高速処理が可能
- **短所**： 低精度
- 自然界の物理的信号はアナログであるので、デジタルとのインターフェースのアナログ回路がなくなることはない。むしろより高性能なアナログ回路が要求されている。

例： 携帯電話の送受信回路

- 米国ではアナログ回路技術者の給料はデジタル回路技術者の1.2－1.5倍

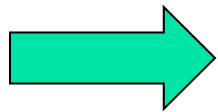


半導体デバイス

- バイポーラ・トランジスタ: 現在は一部でのみ使用
高速・高精度回路設計に適している。
高コスト、消費電力大
- CMOS トランジスタ: 現在の主流のデバイス
低コスト、低消費電力、
最近バイポーラに迫る高速化
デジタルはほとんど全てCMOS化されている。
すべてのデバイスはCMOSに収束する。
 CMOS は究極のデバイス

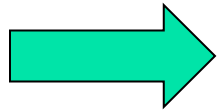
デジタル回路と2進数

- 人間はなぜ10進数を使うか？



手の指が10本あるから。

- デジタルではなぜ2進数を使うか？

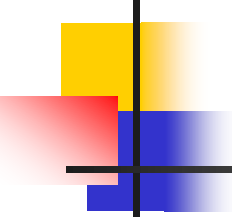


2つの状態は技術的に容易かつ
安定して実現可能。

例： 電圧の高いと低い

電流の流れる状態と流れない状態

パルスのあるとなし。



今から320年前、1692年のパリ

哲学者、数学者、科学者 ライプニッツ

(Gottfried Wilhelm Leibniz)

「全ての数を1と0によって表す驚くべき表記法」
を提案。

王立科学アカデミーに理解されず
学会誌にも掲載されなかった。

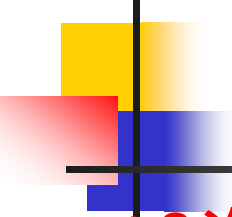
「誰も予想しなかった卓越した用途がありはずだ」
と語る。（慶応義塾大学 青山友紀先生講演資料より）

ゴットフリート・ヴィルヘルム・ライプニッツ

(Gottfried Wilhelm Leibniz,
1646年 - 1716年)

ライプニッツは哲学者、数学者、科学者など幅広い分野で活躍した学者・思想家として知られているが、また政治家であり、外交官でもあった。17世紀の様々な学問(法学、政治学、歴史学、神学、哲学、数学、経済学、自然哲学(物理学)、論理学等)を統一し、体系化しようとした。その業績は法典改革、モナド論、微積分法、微積分記号の考案、論理計算の創始、ベルリン科学アカデミーの創設等、多岐にわたる。ライプニッツは稀代の知的巨人といえる。





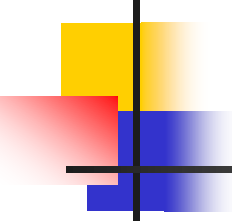
10進数と2進数

10進	2進	10進	2進
0	0000	8	1000
1	0001	9	1001
2	0010	10	1010
3	0011	11	1011
4	0100	12	1100
5	0101	13	1101
6	0110	14	1110
7	0111	15	1111

例 2進数 1011 を

10進数に変換

$$1 \times 2 \times 2 \times 2 + 0 \times 2 \times 2 + 1 \times 2 + 1 = 11$$



2進数

$$2^0 = 1$$

$$2^1 = 2$$

$$2^2 = 4$$

$$2^3 = 8$$

$$2^4 = 16$$

$$2^5 = 32$$

$$2^6 = 64$$

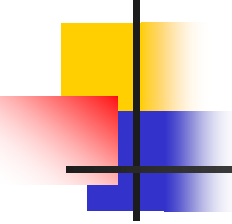
$$2^7 = 128$$

$$2^8 = 256$$

$$2^9 = 512$$

$$2^{10} = 1,024 = 1K$$

(参考 1,000=1k)



デジタル加算

2進数の加算

$$\begin{array}{r} 0011 \quad (3) \\ +) 1011 \quad (11) \\ \hline 1110 \quad (14) \end{array}$$

10進数の加算

$$\begin{array}{r} 437 \\ +) 258 \\ \hline 695 \end{array}$$

2入力2進加算

$$0+0=00$$

$$0+1=01$$

$$1+0=01$$

$$1+1=10$$

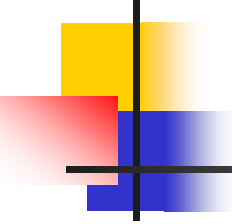
3入力2進加算

$$0+0+0=00$$

$$0+0+1=01$$

$$0+1+1=10$$

$$1+1+1=11$$



ブール代数 (2進数のための数学)

- 論理変数 $A, B, C, \dots, Z$
- 値は 1 または 0 をとる。(2値変数)
 - 1: 真 (true)
 - 0: 偽 (false)

キーワード:

論理否定、論理積、論理和、排他的論理和、
真理値表、
ド・モルガンの法則

ブール代数の創始者

George Boole (1815-1864、英)

コンピュータを理論的に支えるブール代数を提唱。

デジタル回路の設計には必須の知識。

デジタル回路は、電圧の High, Lowのみで
情報を演算するため、**組み合わせ回路**は
ブール代数での**論理式**で書き表わせる。

「記号の操作は計算の明白な要素として取り扱え
数量から切り離すことができる」

論理否定 (NOT)

論理変数 A, Z

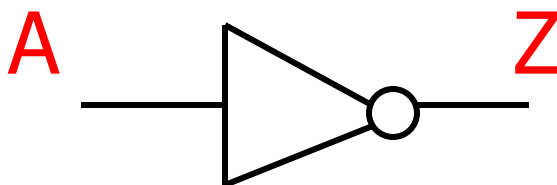
A : 入力, Z : 出力

$$Z = \overline{A}$$

真理値表

A	Z
0	1
1	0

NOT を実現する回路  インバータ回路



論理積 (AND)

論理変数 A, B, Z

A, B : 入力, Z : 出力

$$Z = A \cdot B$$

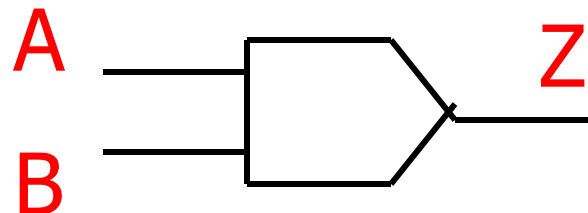
A	B	Z
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

真理値表

ANDを実現する回路



AND回路



論理和 (OR)

論理変数 A, B, Z

A, B : 入力, Z : 出力

$$Z = A + B$$

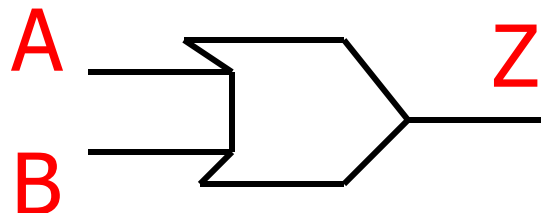
A	B	Z
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

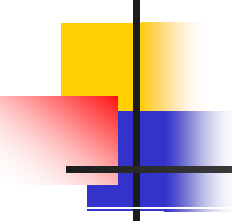
真理値表

ORを実現する回路



OR回路





論理和と2進数の加算

論理和 $Z = A + B$

右の真理値表は

論理和の定義

A	B	Z
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

真理値表

論理和 $1 + 1 = 1$

2進数の加算 $1 + 1 = 10$

同じ記号 $+$ でも意味が異なることに注意。

NAND

(NAND = AND + NOT)

論理変数 A, B, Z

A, B : 入力, Z : 出力

$$Z = \overline{A \cdot B}$$

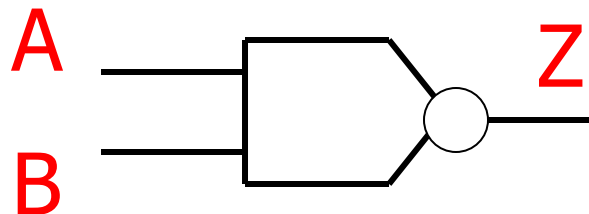
A	B	Z
0	0	1
0	1	1
1	0	1
1	1	0

真理値表

NANDを実現する回路



NAND回路



NOR

(NOR = OR + NOT)

論理変数 A, B, Z

A, B : 入力, Z : 出力

$$Z = \overline{A+B}$$

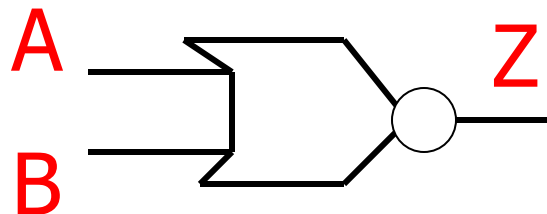
A	B	Z
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	0

真理値表

NORを実現する回路



NOR回路



排他的論理和 (EXOR)

論理変数 A, B, Z

A, B : 入力, Z : 出力

$$Z = A \oplus B$$

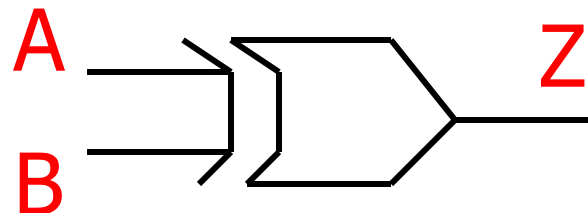
A	B	Z
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0

真理値表

EXORを実現する回路



EXOR回路



デジタル加算器の実現(1)

(半加算器; Half Adder)

2入力2進加算

A	0	1	0	1
B	0	0	1	1
+) B	+) 0	+) 0	+) 1	+) 1
Co S	0 0	0 1	0 1	1 0

真理値表

A	B	Co	S
0	0	0	0
0	1	0	1
1	0	0	1
1	1	1	0

1ビット加算器の実現

$$S = A \oplus B$$

$$Co = A \cdot B$$

デジタル加算器の実現(2)

(全加算器; Full Adder)

3入力2進加算

A 入力1

B 入力2

+ Cin 下からの繰り上がり

Co S

$$S = A \oplus B \oplus \text{Cin}$$

$$\text{Co} = B \cdot \text{Cin} + A \cdot \text{Cin} + A \cdot B$$

(Co は A, B, Cin の
多数決)

真理値表

A	B	Cin	Co	S
0	0	0	0	0
0	0	1	0	1
0	1	0	0	1
1	0	0	0	1
0	1	1	1	0
1	0	1	1	0
1	1	0	1	0
1	1	1	1	1

全加算器 (Full Adder) の補足説明

Cin: Carry in (下位の桁からの繰り上げ)

S: Sum (加算結果)

Cout: Carry out (上位の桁への繰り上げ)

$$\begin{array}{r} 0 \quad 1 \\ +) \quad 1 \quad 1 \\ \hline 1 \quad 0 \quad 0 \end{array}$$

を考える。



全加算器
の演算

$$\begin{array}{r} \text{全加算器} \\ \text{の演算} \\ \text{1} \\ 0 \quad 1 \\ +) \quad 1 \quad 1 \\ \hline 1 \quad 0 \quad 0 \end{array}$$

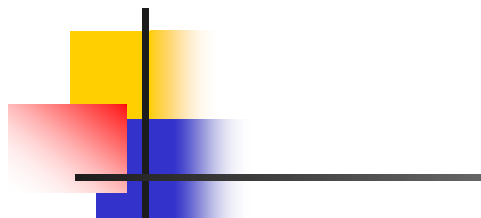
The diagram shows the same addition problem as the first, but with a green box highlighting the first column (1 + 1). A large green curved arrow points from the top of this box to the '1' in the carry-in position above the second column, illustrating the carry-in operation.

全加算器の補足説明(続き)

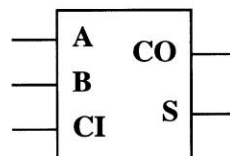
$$\begin{array}{r} 0 \quad 1 \quad 0 \quad 1 \quad (5) \\ +) \quad 0 \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad (7) \\ \hline 0 \quad 1 \quad 1 \quad 0 \quad 0 \quad (12) \end{array} \quad \text{を考える。}$$



$$\begin{array}{r} \boxed{1} \quad \boxed{1} \quad \boxed{1} \quad \text{Carry (桁上げ)} \\ \boxed{0} \quad \boxed{1} \quad \boxed{0} \quad 1 \\ +) \quad \boxed{0} \quad \boxed{1} \quad \boxed{1} \quad 1 \\ \hline 0 \quad 1 \quad 1 \quad 0 \quad 0 \quad \text{Sum (加算結果)} \end{array}$$



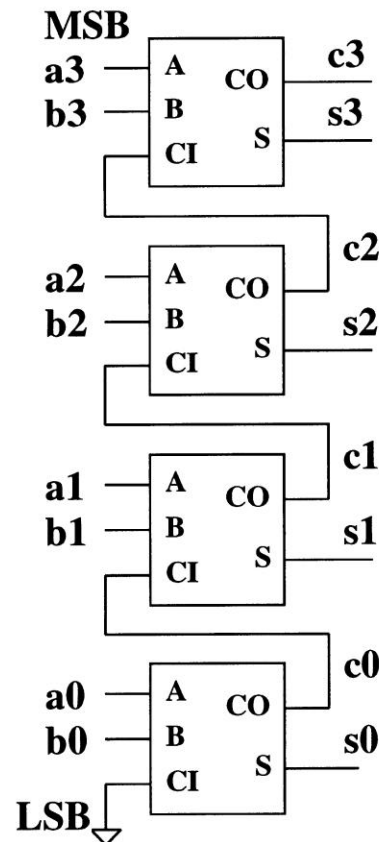
Full Adder



CI Carry In
CO Carry Out
S SUM

A	B	CI	S	CO
0	0	0	0	0
0	0	1	1	0
0	1	0	1	0
1	0	0	1	0
0	1	1	0	1
1	1	0	0	1
1	0	1	0	1
1	1	1	1	1

Adder & Carry Propagation



Full Adderで、A, B, CIの値が確定し
から COの値が確定するまでの遅延時
間をTとする。

左図で、a3~a0, b3~b0の値が
確定しから

c0の値が確定するまで

C1 T

C2 2T

C3 3T

→ Carryの伝播がスピードのネックになる。
4T かかる。

Example :
$$\begin{array}{r} 0111 \\ + 0101 \\ \hline 1100 \end{array}$$

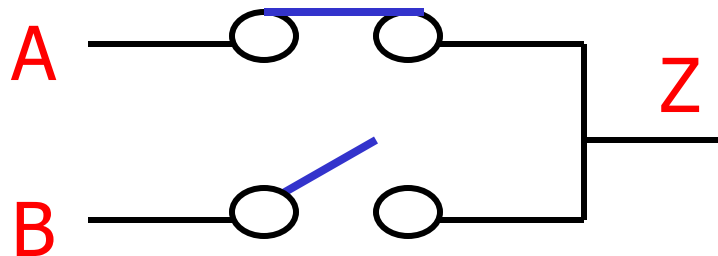
↓ ↓
(a3 a2 a1 a0) = (0 1 1 1)
(b3 b2 b1 b0) = (0 1 0 1)
(s3 s2 s1 s0) = (1 1 0 0)
(c3 c2 c1 c0) = (0 1 1 1)

マルチプレクサ

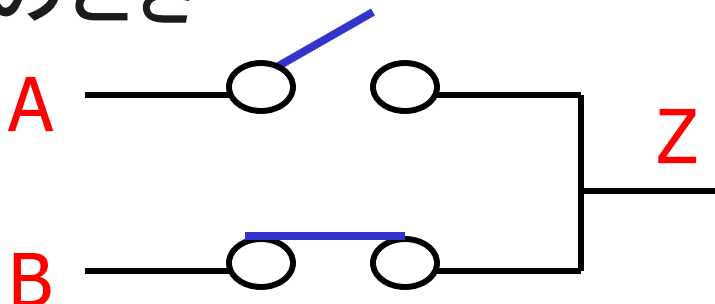
論理変数 A, B, S, Z

A, B, S : 入力, Z : 出力

$S=0$ のとき



$S=1$ のとき



S	Z
0	A
1	B

真理値表

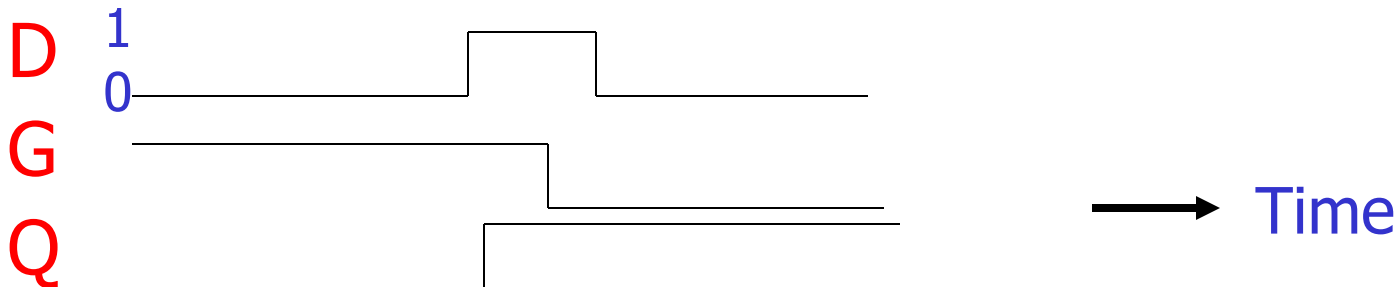
情報記憶素子(ラッチ)

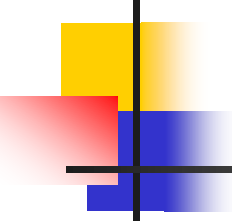
論理変数 D, G, Q

D, G : 入力, Q : 出力

$G=1$ のとき $Q=D$

$G=0$ のとき Q は G が1から0になる瞬間の
 D の値(1 or 0) を保持(記憶)している。





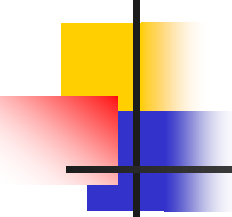
ブール代数 演習問題 (1)

次の式を証明せよ。(ヒント: 真理値表を書いて
左辺と右辺が等しいことを証明せよ。)

$$A + \bar{A} = 1, \quad A + A = A, \quad A + 1 = 1,$$

$$A \cdot A = A, \quad A \cdot 1 = A, \quad A \cdot 0 = 0, \quad A \cdot \bar{A} = 0,$$

(二重否定) $\bar{\bar{A}} = A$



ブール代数 演習問題 (2)

(交換則) $A+B=B+A, \quad A \cdot B=B \cdot A$

(分配則) $A+(B \cdot C) = (A+B) \cdot (A+C)$

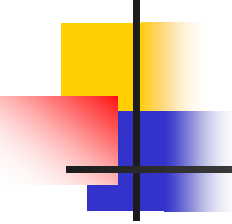
$$A \cdot (B+C) = (A \cdot B) + (A \cdot C)$$

(結合則) $(A+B)+C = A+(B+C)$

$$(A \cdot B) \cdot C = A \cdot (B \cdot C)$$

(ド・モルガンの法則)

$$\overline{A+B} = \overline{A} \cdot \overline{B}, \quad \overline{A \cdot B} = \overline{A} + \overline{B}$$

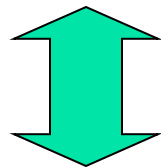


オーガスタス・ド・モルガン

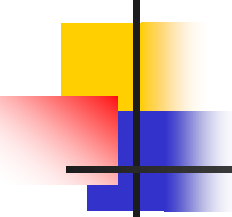
Augustus De Morgan, 1806-1817

インド生まれのイギリスの数学者
ド・モルガンの法則を発案した。

「私の身長は 160 cm 以上であり、
かつ私の体重は 50 kg 以上である」ではない。



「私の身長は 160 cm 未満であるか、
または私の体重は 50 kg 未満である」



16進数、8進数とデジタル

10進	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
8進	0	1	2	3	4	5	6	7	10	11	12	13	14	15	16	17	20	21	22	23	24
16進	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	A	B	C	D	E	F	10	11	12	13	14

- 人間はなぜ10進数を使うか？



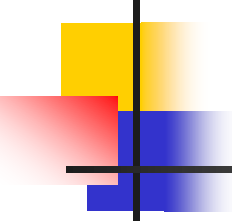
手の指が10本あるから。

- デジタルコンピュータは2進数が基本。

ではなぜ16進数、8進数を使うか？



2進数と16進数、8進数は相性がよいから。



8進数と2進数の変換

8進 2進

4 2 1

0 0 0 0

1 0 0 1

2 0 1 0

3 0 1 1

4 1 0 0

5 1 0 1

6 1 1 0

7 1 1 1

例 8進4桁 3724

● 10進に変換

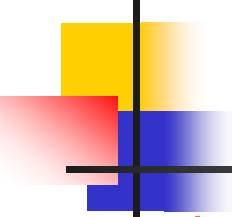
$$3 \times 8 \times 8 \times 8 + 7 \times 8 \times 8 + 2 \times 8 + 4$$

計算が必要。

● 2進に変換

011 111 010 100

右表から機械的に得られる。



16進数と2進数の変換

16進	2進	16進	2進
0	0000	8	1000
1	0001	9	1001
2	0010	A	1010
3	0011	B	1011
4	0100	C	1100
5	0101	D	1101
6	0110	E	1110
7	0111	F	1111

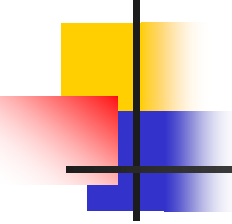
例 16進で3桁

A46

2進数に変換

1010 1000 0110

左表から機械的に得られる。



デジタル乗算

2進数の乗算

$$\begin{array}{r} 0101 \quad (5) \\ \times) 1011 \quad (11) \\ \hline 0101 \\ 0101 \\ 0000 \\ 0101 \\ \hline 0110111 \quad (55) \end{array}$$

10進数の乗算

$$\begin{array}{r} 437 \\ \times) 258 \\ \hline 3496 \\ 2185 \\ 874 \\ \hline 112746 \end{array}$$