

デジタルシステム設計 および演習

2020年度 第1回

予定

- 第 1回 (9/24) デジタルシステム設計の概要および現状について
- 第 2回 (10/ 1) 組み合わせ論理回路の復習、同期式順序回路
- 第 3回 (10/ 8) フリップフロップと同期式順序回路の解析および設計
- 第 4回 (10/15) 同期回路による耐ハザード設計
- 第 5回 (10/22) HW/SW協調・システムレベル設計
- 第 6回 (11/ 5) テスト容易化・低消費電力設計
- 第 7回 (11/12) 総合演習、学力考査 (第1回～第6回の範囲)
- 第 8回 (11/19) ハードウェア記述言語 (演習1)
- 第 9回 (11/26) ハードウェア記述言語 (演習2)
- 第10回 (12/ 3) ハードウェア記述言語 (演習3)
- 第11回 (12/10) ハードウェア記述言語 (演習4)
- 第12回 (12/17) ハードウェア記述言語 (演習5)
- 第13回 (12/24) ハードウェア記述言語 (演習6)
- 第14回 (1/ 7) 学力考査および問題解説 (全体)

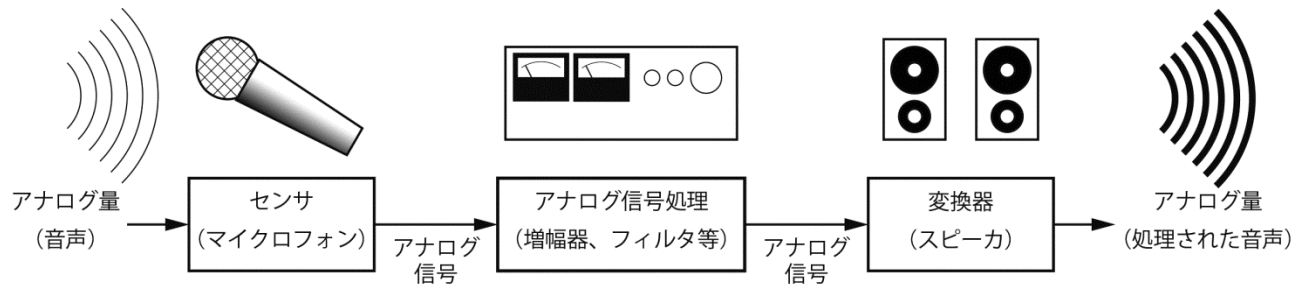
本日の内容

- イン트로ダクション

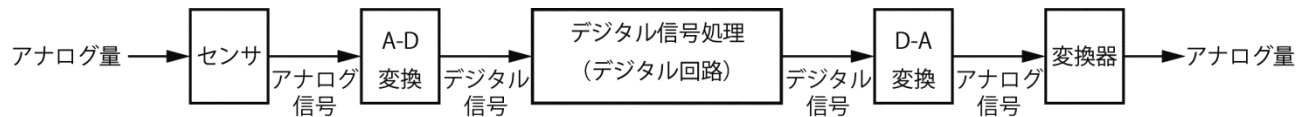
- (デジタル技術と半導体集積回路)

- アナログからデジタルへ
 - デジタルとは言いつつも
 - 基本論理素子の実現
 - 半導体集積回路のいろいろ
 - 半導体メーカーのビジネスモデル
 - デジタルシステム設計とは？
 - 仕様とバグ

アナログシステムとデジタルシステム



アナログシステム



デジタルシステム

アナログからデジタルへ

- A(analog)－D(digital)変換の意味

アナログ信号



標本化



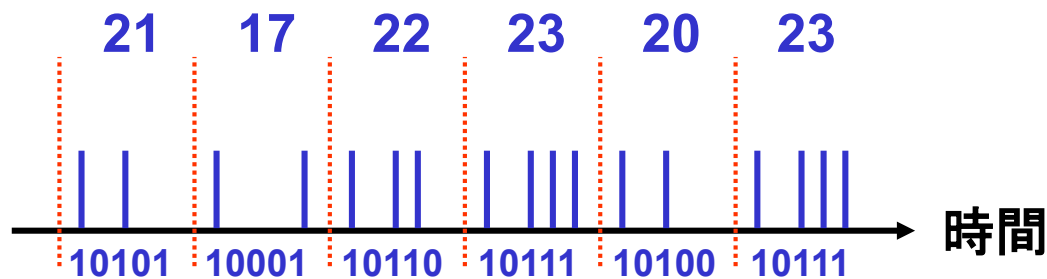
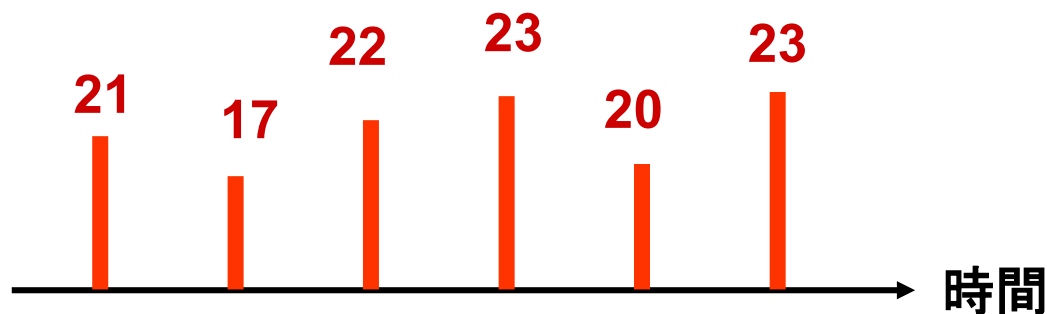
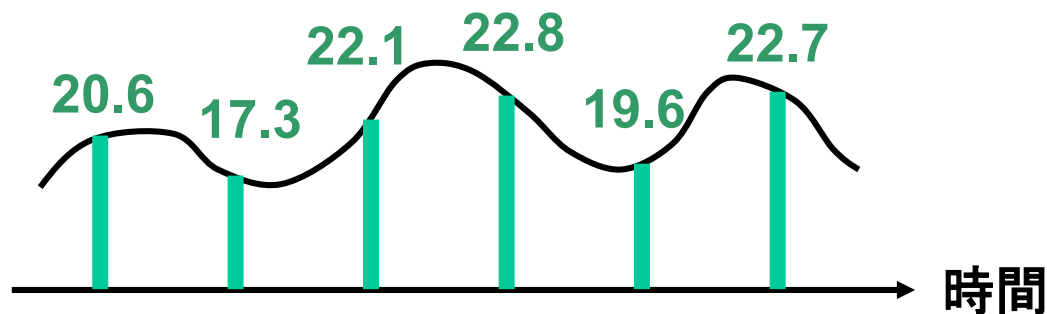
量子化



符号化

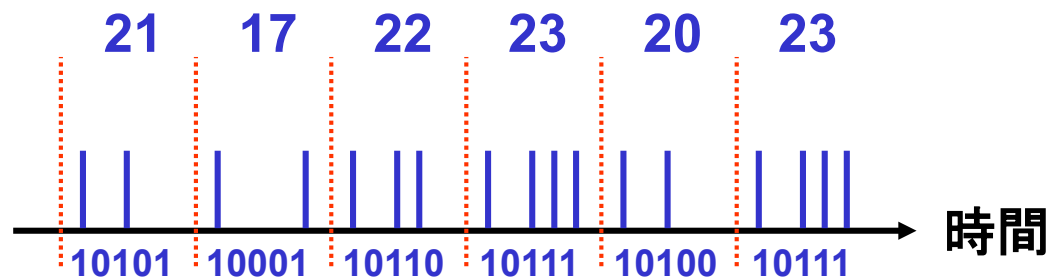


デジタル信号



デジタルとは言いつつも

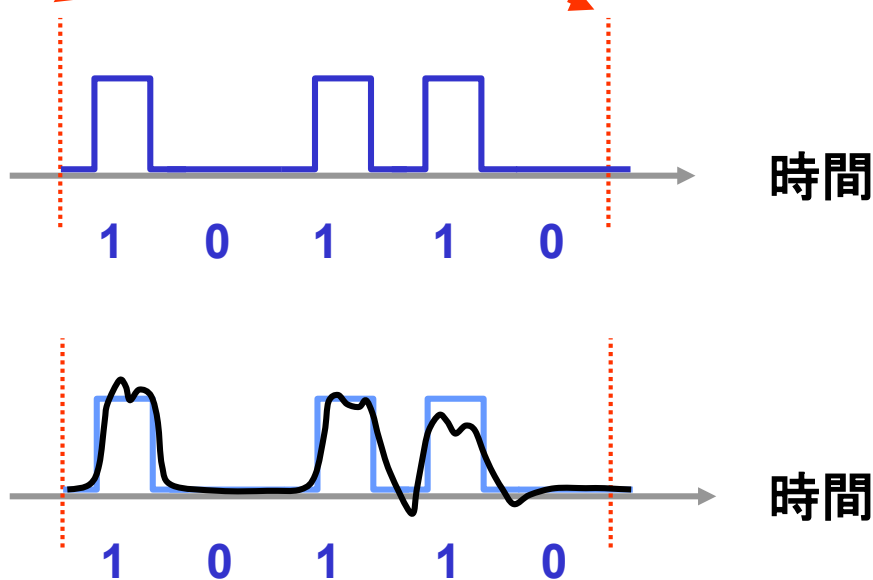
- 信号の High を 1、Low を 0 と表す(正論理)



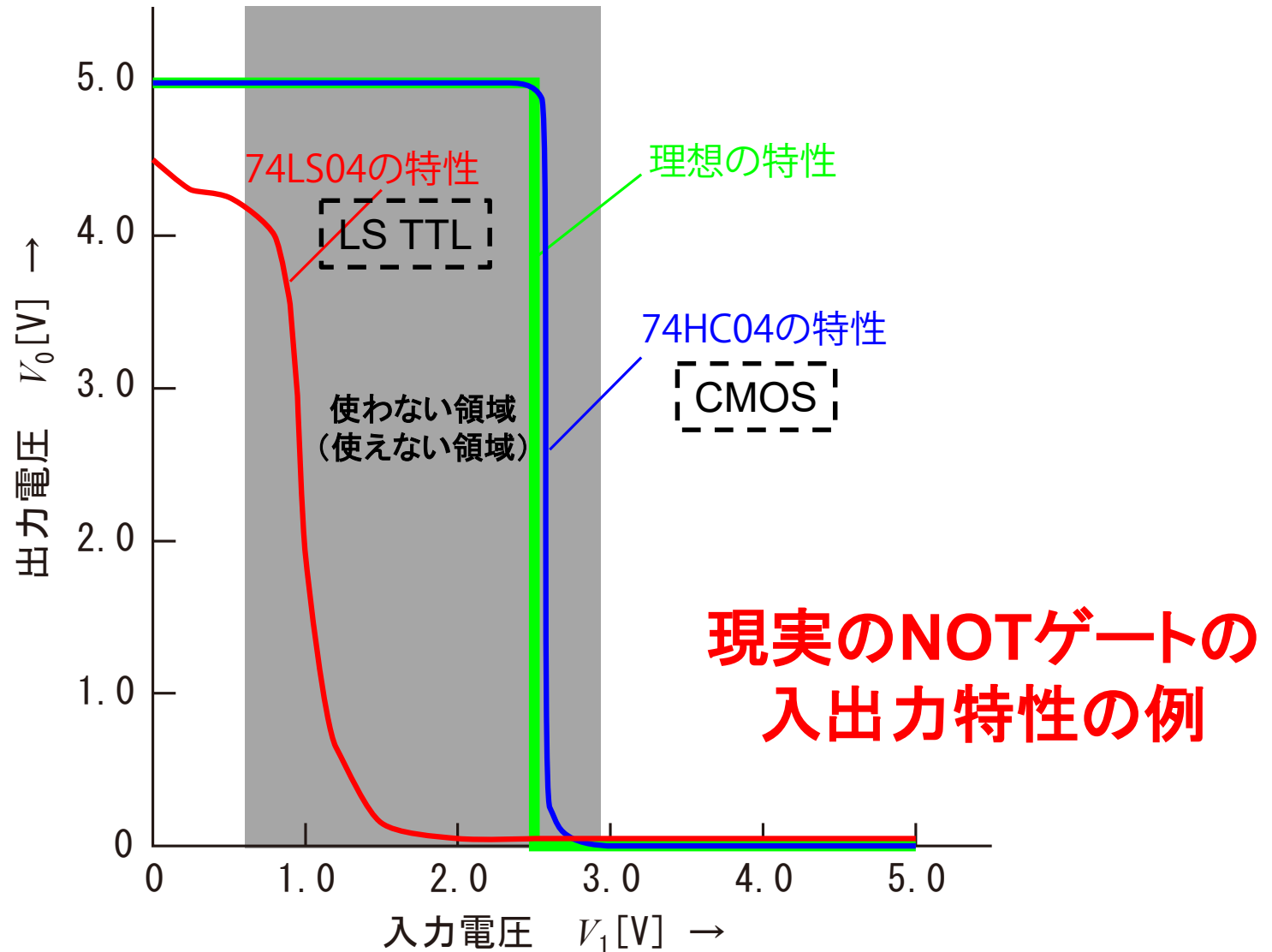
High/Low で表現



実際の信号波形



デジタルとは言いつつも



デジタルとは言いつつも

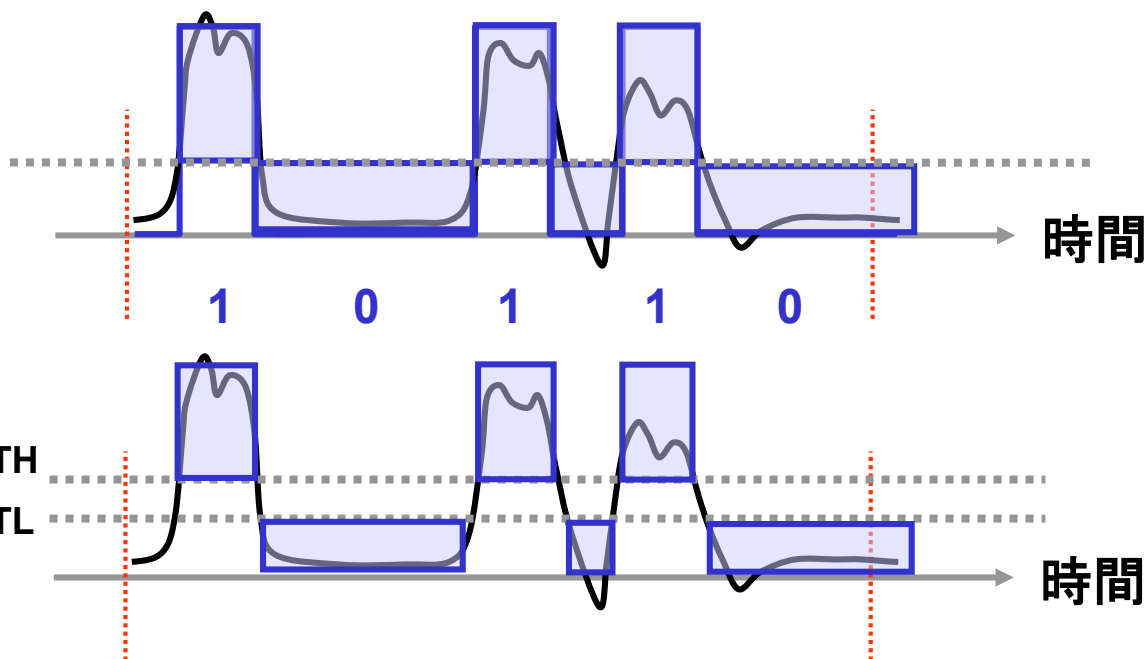
- 閾値を設ける

これより上が High,
下が Low



閾値を上下に設け,
 V_{TH} より上が High,
 V_{TL} より下が Low

V_{TH}
 V_{TL}

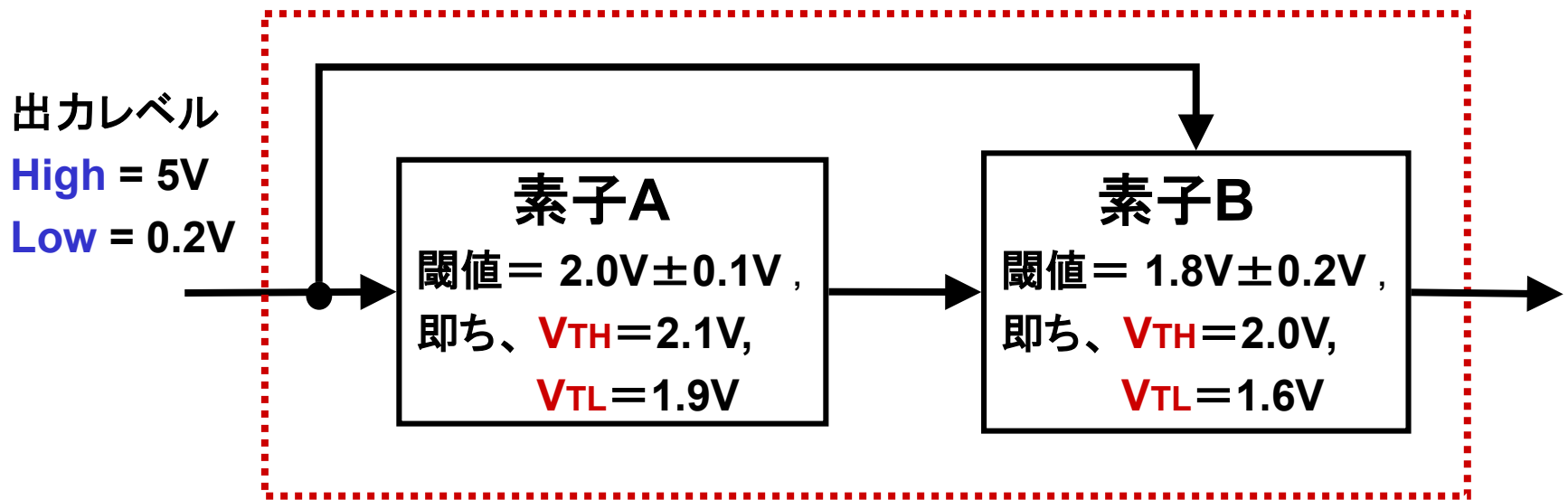


素子の種類の違いや同じ素子でも 個体差 によって、 V_{TH} および V_{TL} が異なる

閾値: Threshold level

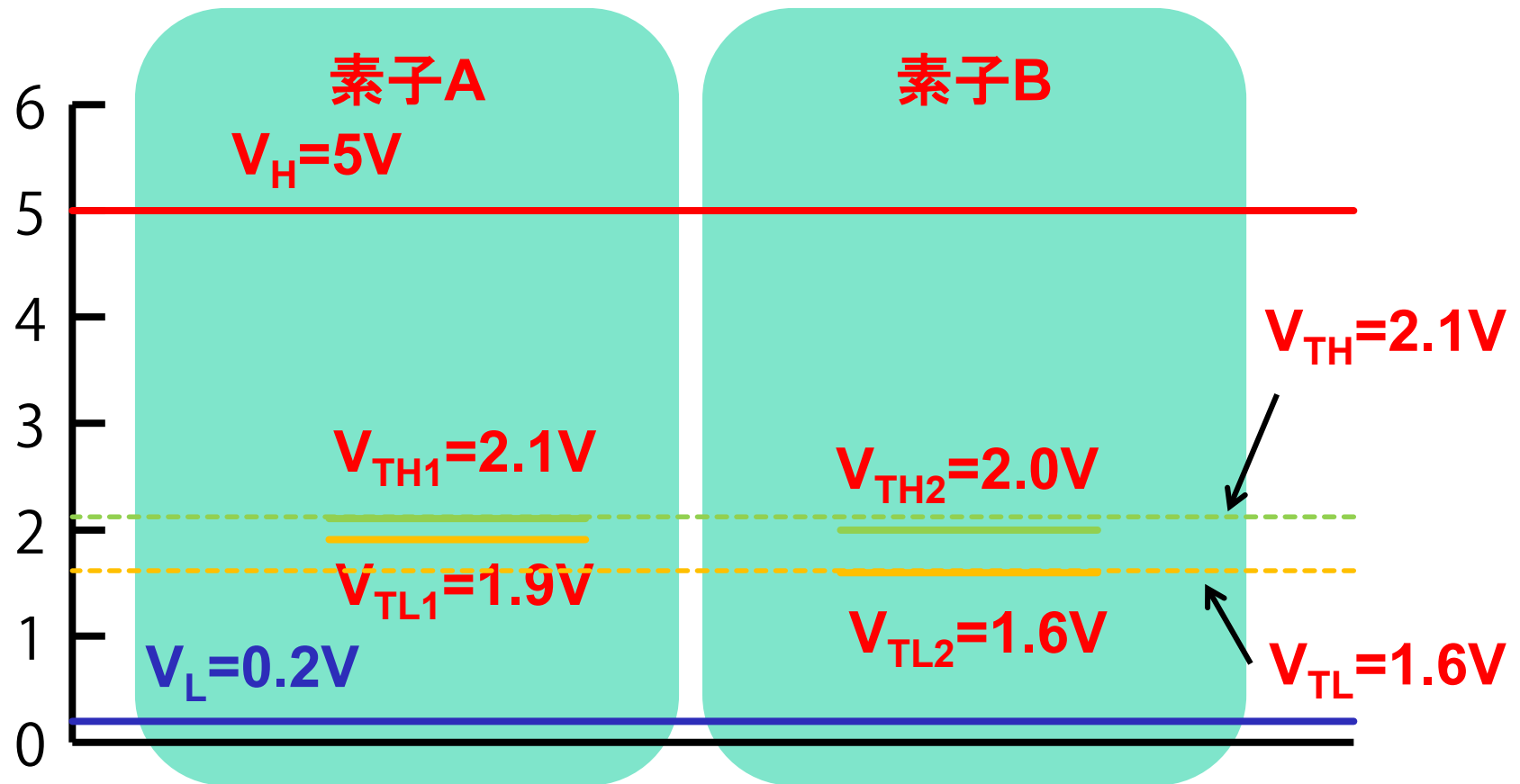
デジタルとは言いつつも

- **High** の出力レベルを V_H , **Low** の出力レベルを V_L とすると、 $V_H - V_{TH}$ 、 $V_L - V_{TL}$ をそれぞれ **ノイズ・マージン** という。
- 閾値の異なる素子を組合せる場合、全体の**ノイズ・マージン**はもっとも**マージン**の少ない素子のものに等しい

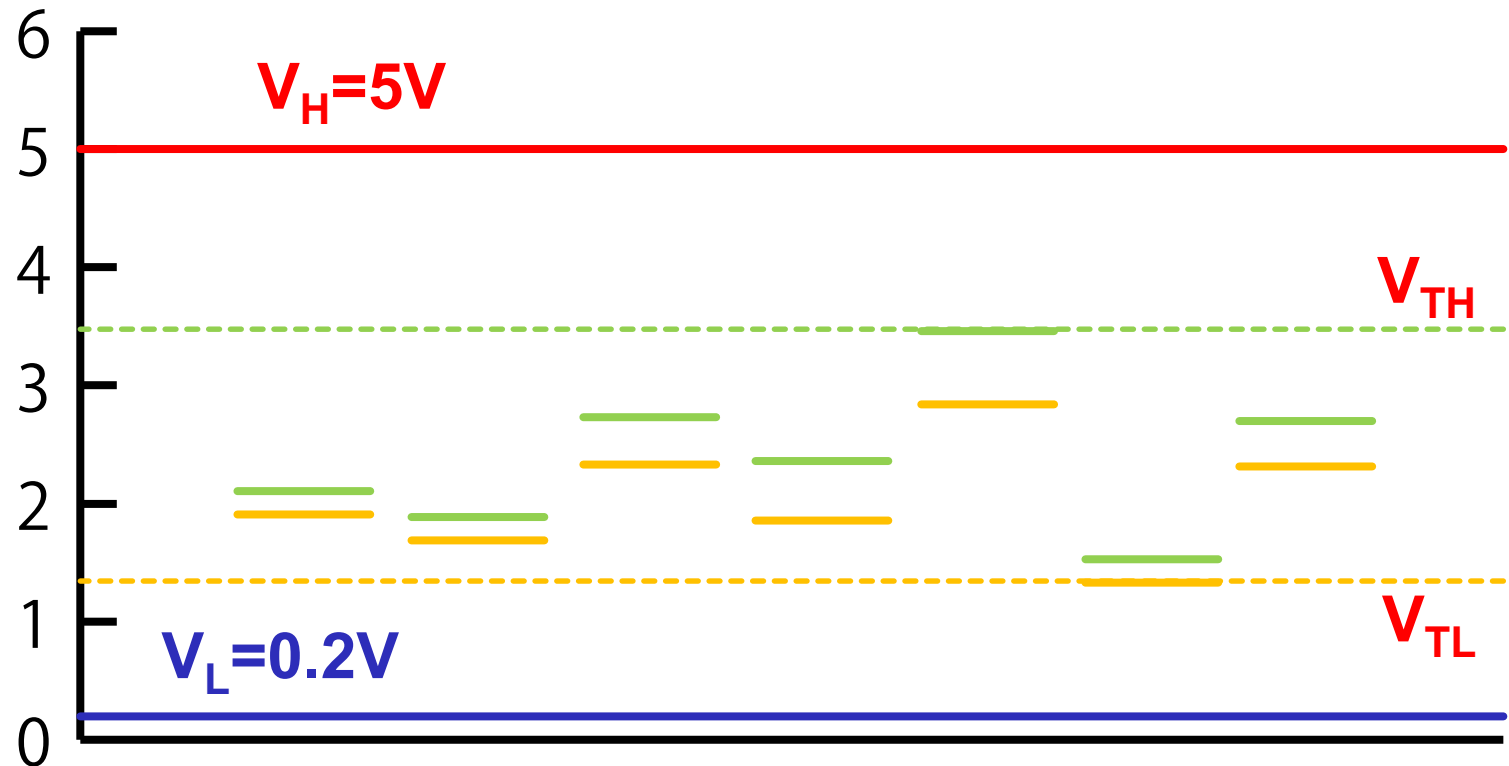


この回路の**ノイズ・マージン**は **High**側**2.9V** と **Low**側**1.4V**

ノイズマージン



ノイズマージン



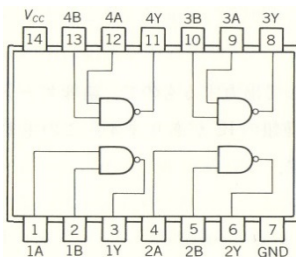
デジタルとはいっても

● 演習1:

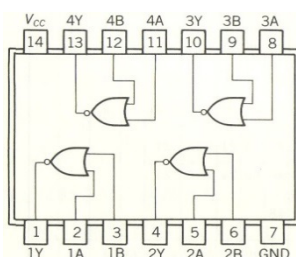
- 閾値が、 $2.0V \pm 0.1V$ 、 $1.8V \pm 0.15V$ 、 $2.3V \pm 0.1V$ 、 $2.2V \pm 0.2V$ 、 $1.6V \pm 0.05V$ の5つ素子でデジタル回路を組みたい。
- **H**(High)および**L**(Low)の出力レベルをそれぞれ5V, 0.2V とした時、**H**側および**L**側のノイズ・マージンはそれぞれ幾らか？

論理回路(概論) ... デジタルIC

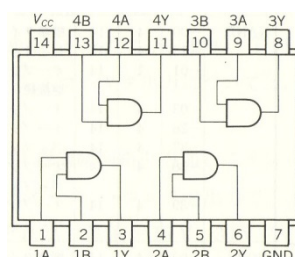
● TI社74シリーズ SSI (Small Scale IC)



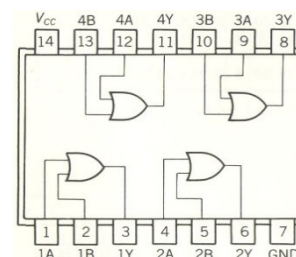
74HC00



74HC02

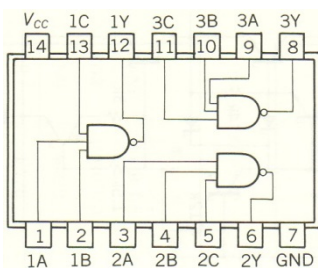


74HC08

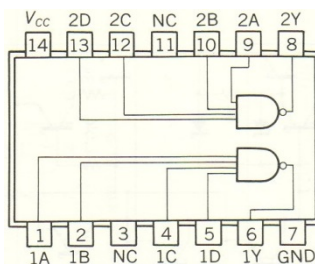


74HC32

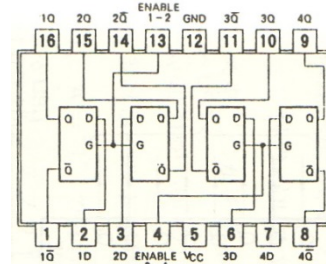
● TI社74シリーズ SSI/MSI (Middle Scale IC)



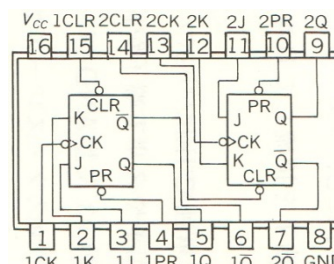
74HC10



74HC20



74HC75



74HC112

SSI (Small Scale Integrated):

MSI (Middle Scale Integrated):

LSI (Large Scale Integrated):

VLSI (Very Large Scale Integrated):

ULSI (Ultra Large Scale Integrated):

小規模IC、概ね100素子以下

中規模IC、100～1000素子程度

大規模IC、1000素子以上～10万素子程度

超大規模IC、10万～1000万素子程度

超々大規模IC、1000万素子～

論理回路(概論) ... デジタルIC

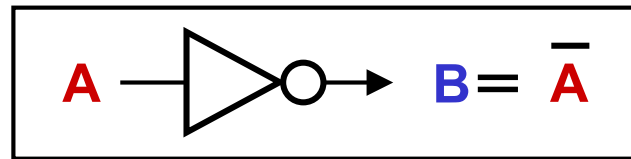
- 74シリーズファミリー
 - 無印(standard)
 - 最初に作られた製品群。後に主流になったLSやHCに比べ、動作は決して遅くはないが、消費電力が大きく、今や新規設計で指定されることはない。しかし過去に極めて大量に使用されたため、保守などを通じて今でもよく見かける。
 - H(high speed)
 - 無印版の内部回路の定数に手を入れ、高電力消費と引き換えに(少しだけ)高速化したもの。絶滅種。
 - L(low power)
 - Hとは逆に、(大幅な)低速化と引き換えに低電力化したもの。Hよりも使用例は更に少ない。当然ながら絶滅種。
 - S(schottky-diode-clamped)
 - ショットキー・ダイオードを用い、Hより一段と高速化したもの。消費電力はHと同等か、やや少な目。特定の高速ICや、パスドライバなどで今でも使われることがある。
 - F(fast)
 - Fairchild社がオリジナルの高速版だが、後にはTI社も供給するようになった。後発だけに、平均的にSよりも高性能。また、出力の電流ドライブ能力が高い品種が多い。
 - LS(Low power Schottky)
 - 無印版並の速度とL並の消費電力を達成し、TTLの新標準となったもの。TTL扱いするのが普通だが、内部の回路は実はDTLに近い。
 - ALS(Advanced Low-power Schottky)
 - LSの改良版。CMOSが高性能化してTTLに競合してきたことと、割高感があることからLSほどには使われていない。
 - AS(Advanced Schottky)
 - Sの改良版。SやFと同様の分野で使用されている。
 - C(CMOS)
 - まだCMOSといえばRCAの創設した4000シリーズしかなかったような時代に、National Semiconductor社が74シリーズをCMOS化したもの。絶滅種。
 - HC(high speed CMOS)
 - Cに代わる高速なCMOS。これの普及によりCMOSも一気に74シリーズ化が進み、4000シリーズが劣勢に立つこととなる。但し動作電圧範囲は4000シリーズのようには広くない。
 - AC(advanced CMOS)
 - HCよりも更に高速なCMOS。LSやALSTTLシリーズと競合する高速性能と電流ドライブ能力を持つ。しかも静止状態では殆ど電力を消費しない特徴は紛れもなくCMOSである。

論理回路(概論) ... デジタルIC

●4000/4500シリーズ(RCA→HS → TI)

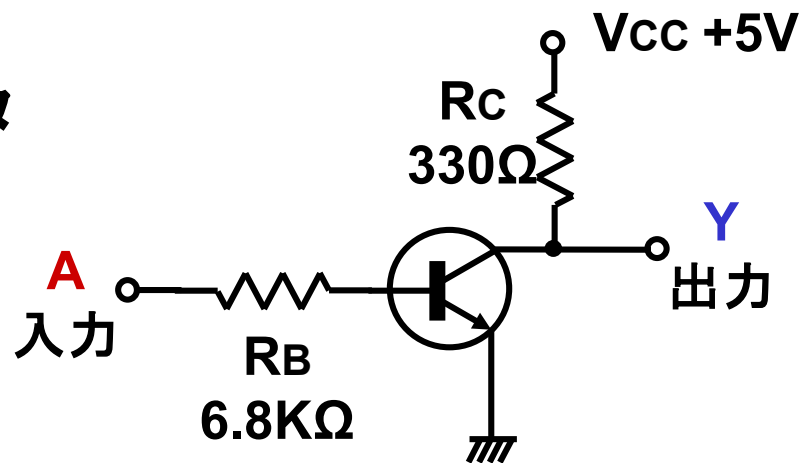
- 電源電圧が広い(3~18V)
- (CMOSなので)消費電力が少ない
- 遅い(~数MHz程度)
- 74シリーズとピンの互換性が無い
- 74シリーズより集積度の高い回路が多い
- 74HCの普及により、減少傾向

基本論理素子の実現



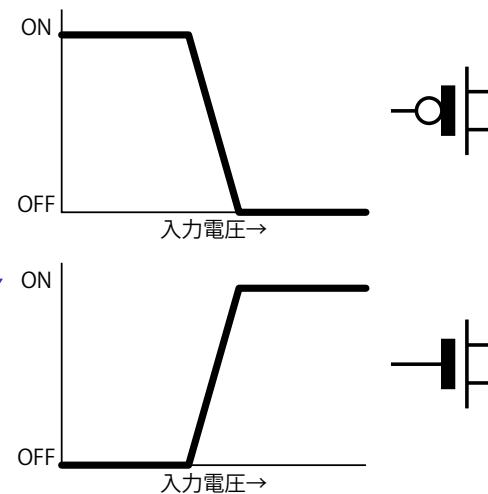
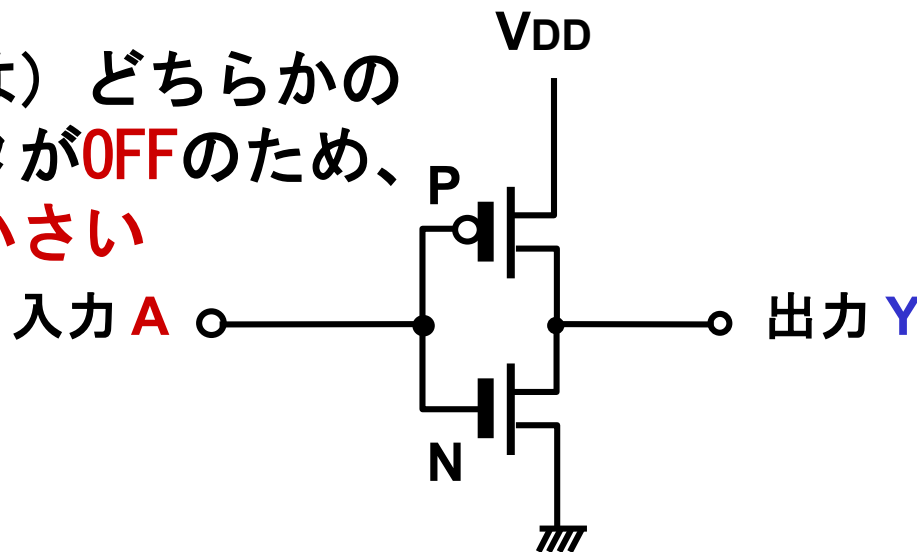
● インバータ(否定)

－トランジスタ・インバータ



－CMOSインバータ

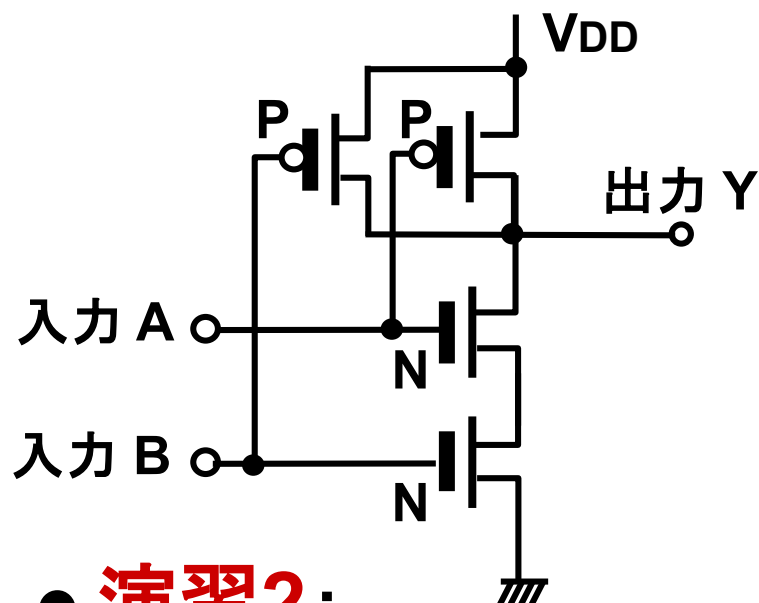
(定常的には) どちらかの
トランジスタがOFFのため、
消費電力が小さい



基本論理素子の実現

- (2入力)NAND

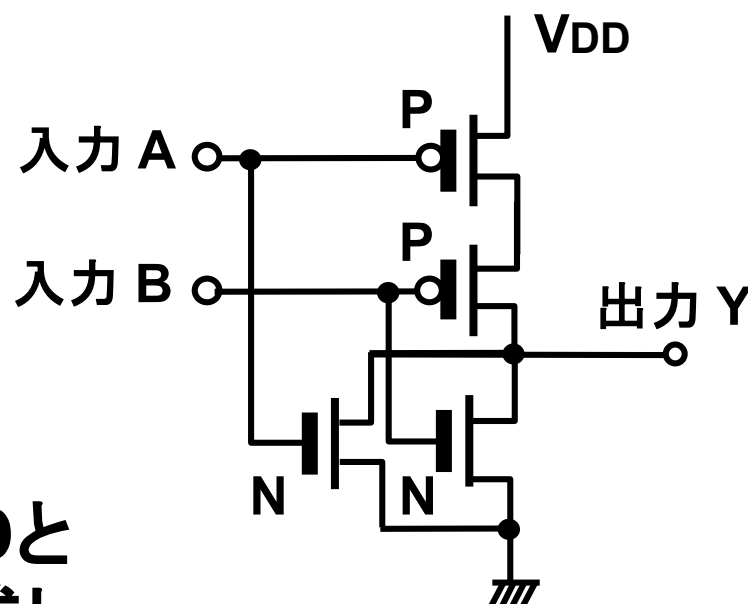
- CMOS・(2入力)NAND



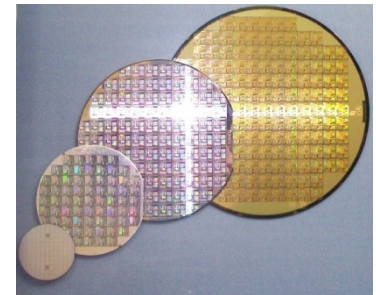
- 演習2:

- 3入力のCMOS・NANDとNORの等価回路を記述しなさい。

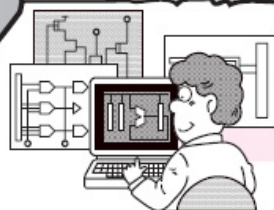
- CMOS・(2入力)NOR



シリコンインゴットとウェハー

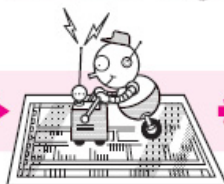


LSIの製造工程



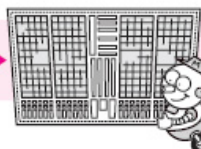
論理回路設計

LSIづくりはまず回路設計から。



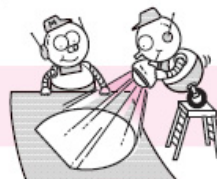
パターン設計

CADを使って、コンピュータの画面上で図面化。



フォトマスク作成

できあがった図面をガラス基板に作りこみ。



マスク合わせ

マスクとウェハを重ねて焼き付け。



現像・エッチング

現像・エッチングして、感光部分の酸化膜に孔(あな)をあけます。



イオン注入

酸化膜の孔からイオンを注入すると、その部分が活発な半導体になります。



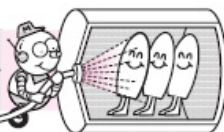
切 断

シリコンの棒をスライスしてウェハ作り。



ウェハ研磨

シリコン・ウェハの表面を鏡のように磨く。



酸 化

高温の拡散炉で、表面に酸化膜を作る。



フォトレジスト塗布

特殊な感光材を薄く塗ります。

にが生れるまでにいろいろなお工程があるのね!!

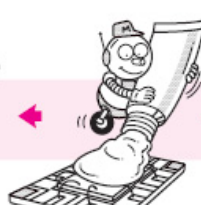
メタライズ

ウェハの表面にアルミニウムで配線をしします。



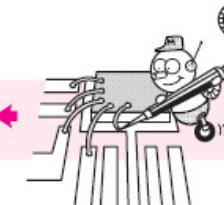
ファイナルテスト

最終テストに合格するとLSIの完成です。



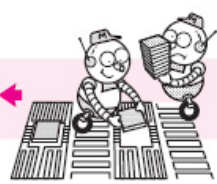
モールド・マーキング

パッケージに封入、メーカー名などを印刷。



ワイヤボンド

チップとリードフレームの電極を接続します。



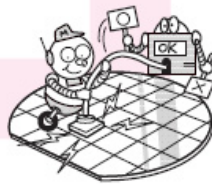
ダイボンド

チップをリードフレームの中央部に固定。



ダイシング

LSIチップを、1つずつ切り離します。



ウェハテスト

ウェハに作られたLSIをテスト。

こうして半導体ができるんだ。



株式会社ルネサステクノロジ
提供の原画から

半導体集積回路のいろいろ

- 半導体集積回路(LSI)の種類

- 汎用IC ... 標準論理IC, CPU(MPU)、RAM

- ASIC(Application Specific IC)

- ... フルカスタムLSI

- ディスク制御用LSI, モデム用LSI etc.

- ⇒ ASSP(Application Specific Standard Product)

- ... セミカスタムLSI

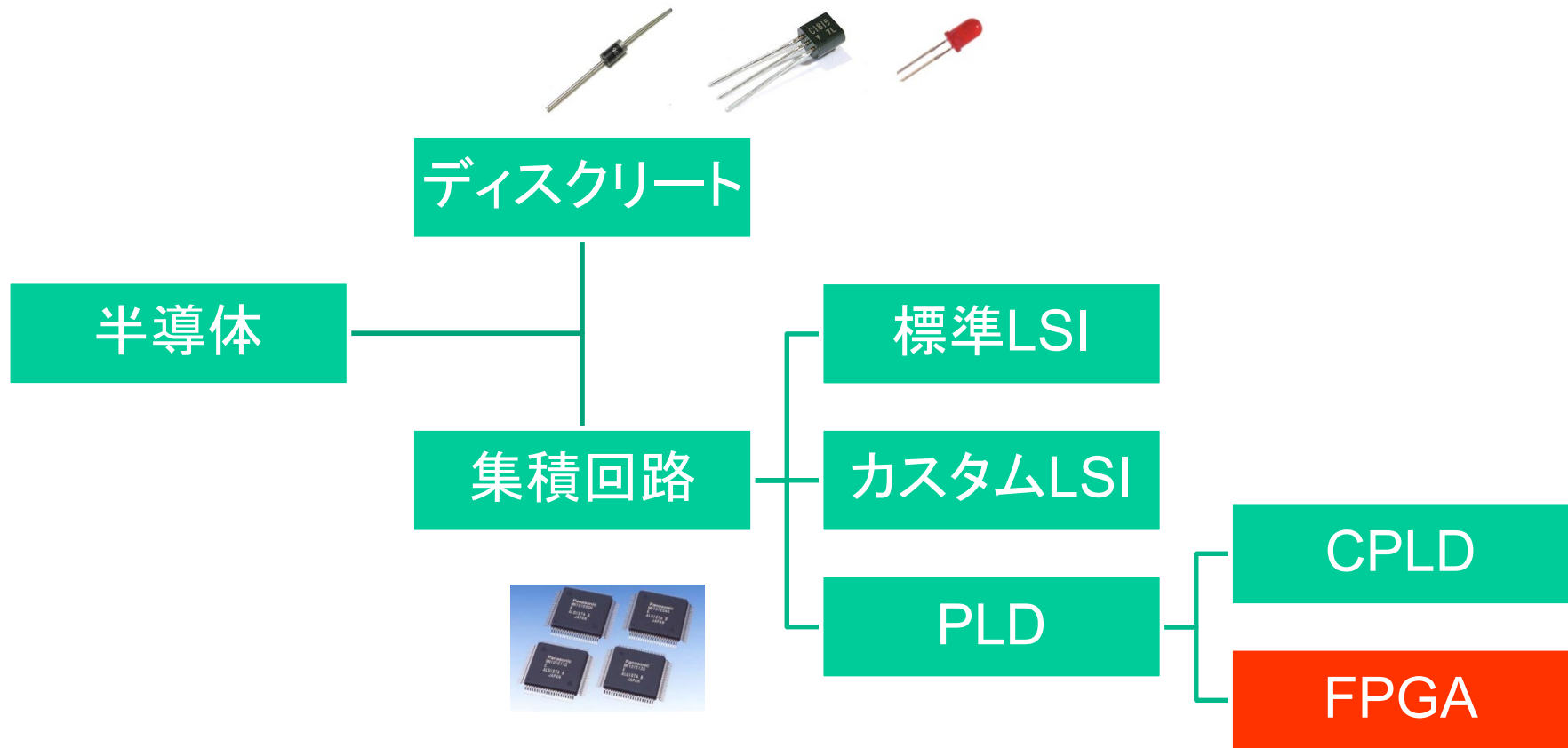
- Gate Array, Embedded Array, Standard Cell

- ⇒ ASCP(Application Specific Custom Product)

- CPLD(Complex Programmable Logic Device)／

- FPGA(Field Programmable Gate Array)

半導体集積回路のいろいろ

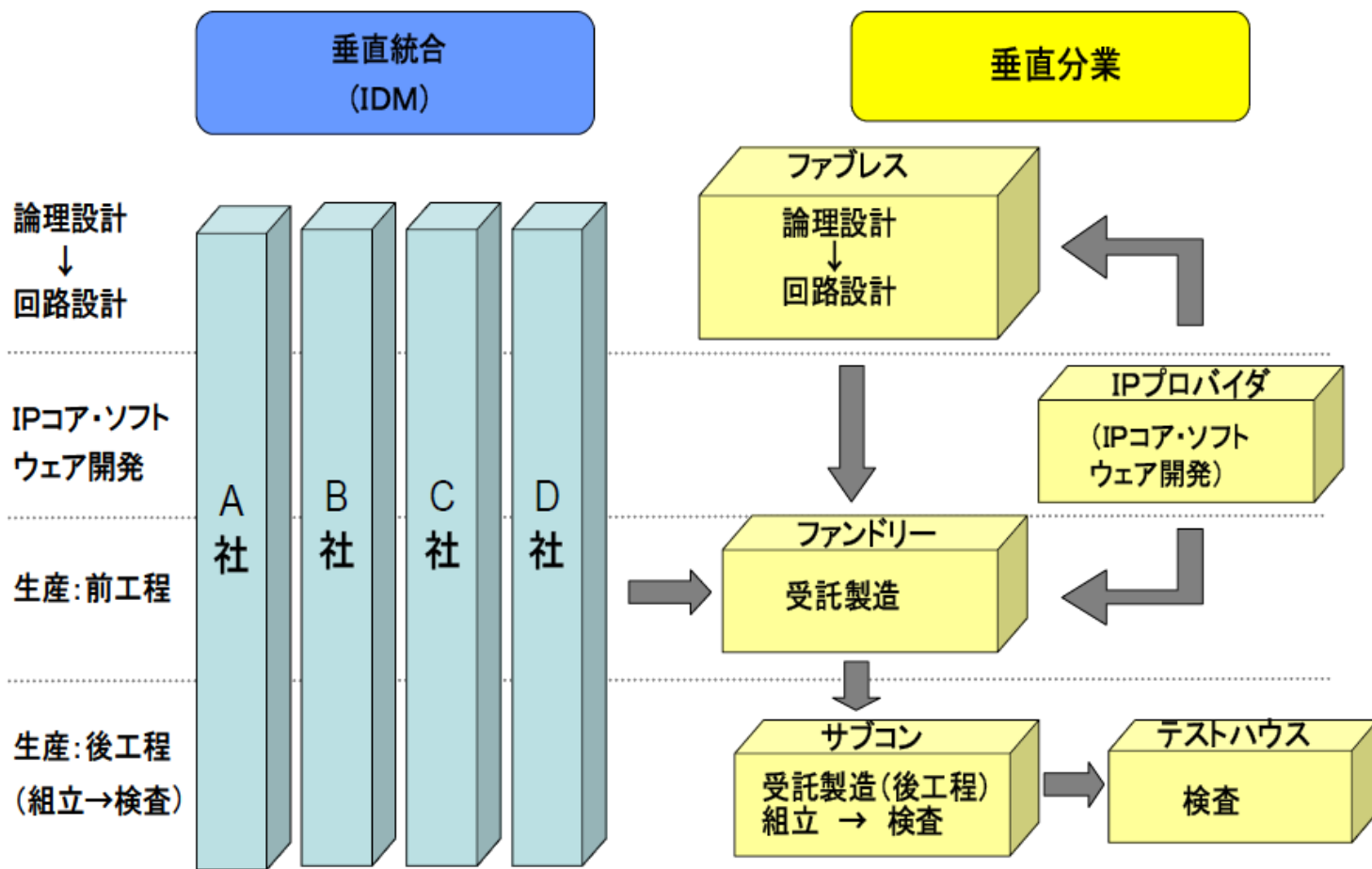


FPGAはプログラム可能なLSI

半導体メーカー

- **IDM: Integrated Device Manufacturer**
 - 半導体の設計→製造→販売を一貫して行う(intel, NEC, 東芝, Samsung,)
- **ファブレス: fabless**
 - 製造は他社に委託し、設計と販売だけを行う (AMD, Altera,
- **ファウンドリ: foundryまたはfab**
 - 他社から委託されて製造だけを行う
 - 建設に数千億円規模の設備投資が必要(半導体製造装置、クリーンルーム等)
- **IPプロバイダ**

半導体メーカーのビジネスモデル



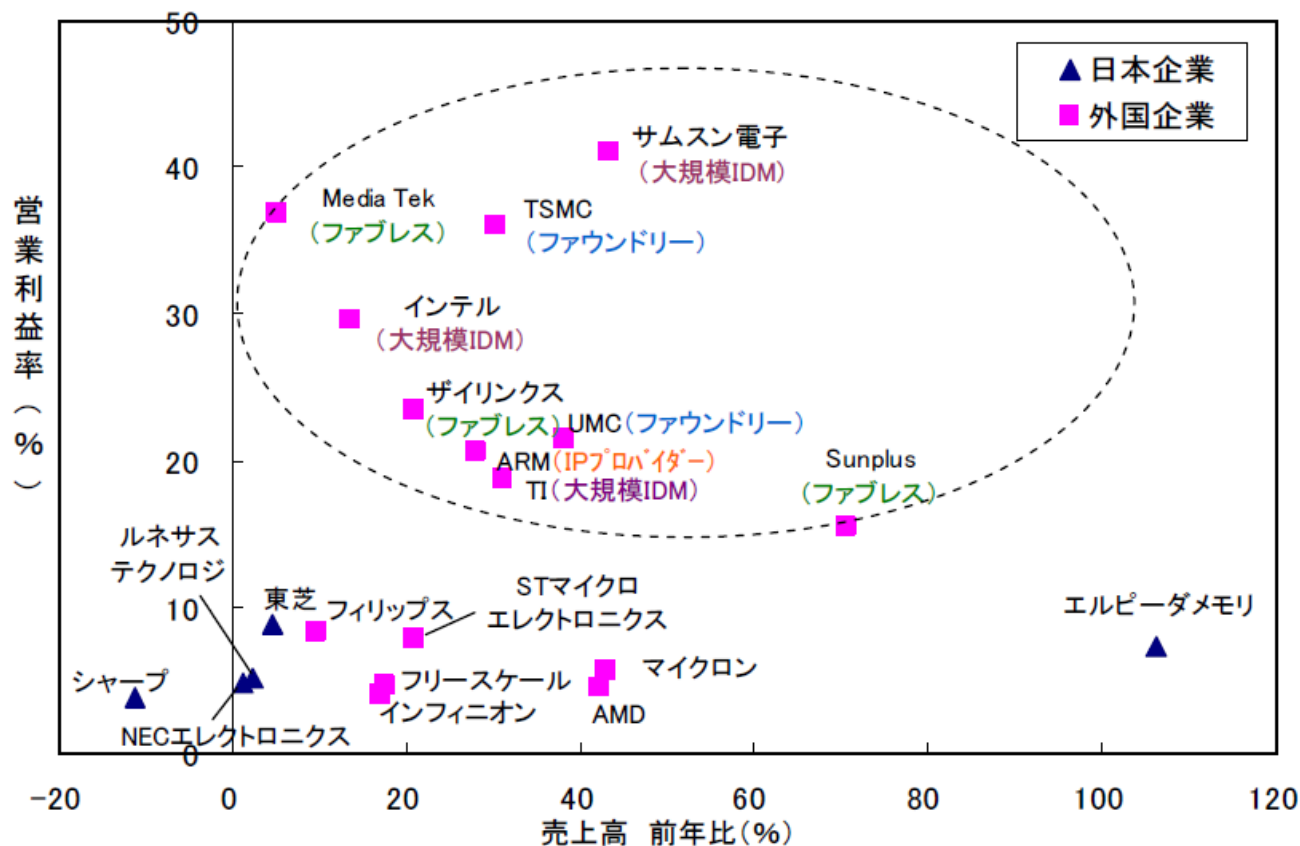
(注) IDM: Integrated Device Manufacturer

(出所) 電子情報技術産業協会「ICガイドブック」、ヒアリングにより本行作成

半導体メーカーのビジネスモデル

- ブロントザウルスやティラノサウルスなどの大型恐竜 = 国内の半導体メーカー
- 恐竜や始祖鳥から進化した鳥類 = 台湾や中国などの半導体ファウンダリ専門メーカー
- 弱いが小さくてすばしっこい哺乳類 = シリコンバレーや台湾のファブレス半導体メーカー

国内外の半導体メーカ収益力比較(2004年度)



(注1) 日本メーカーは3月期決算、海外メーカーはマイクロン(8月期)、インフィニオン(9月期)を除き12月決算

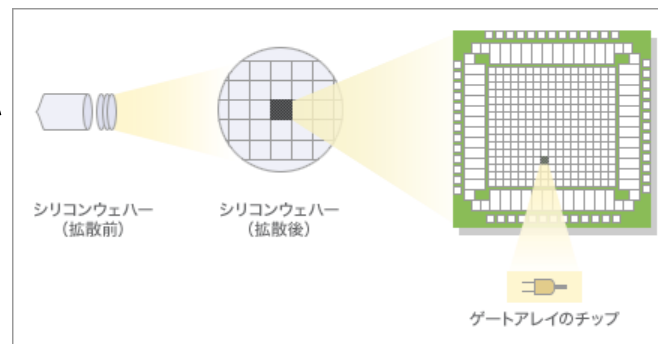
(注2) 日本の半導体メーカーの売上高は生産額

(出所) 半導体産業新聞、各社ホームページより作成

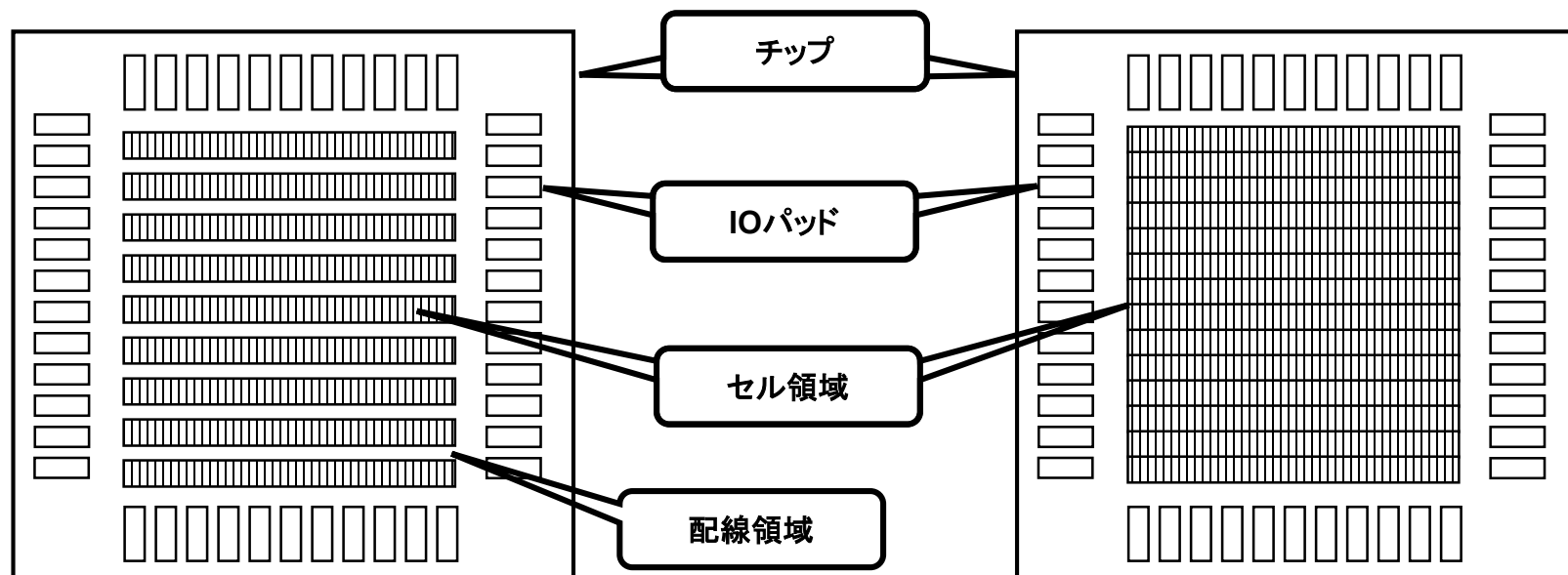
半導体集積回路のいろいろ

● Gate Array (ゲートアレイ)

- **NANDゲート**あるいは**NORゲート**のいずれかになり得る基本ハードウェア部品を**IC**の中に規則正しく敷き詰めたもの
- 未配線の**ゲートアレイ**を予め大量生産しておき、配線情報は回路設計者が**後で指定**する
- **注文生産**と比較して**短期間**かつ**安価**に希望する論理回路を入手できる



GAは、「拡散工程」を終えた(同じ)マスタ・ウェハーを大量に用意しておくことができるので、製造コストを抑制することができる



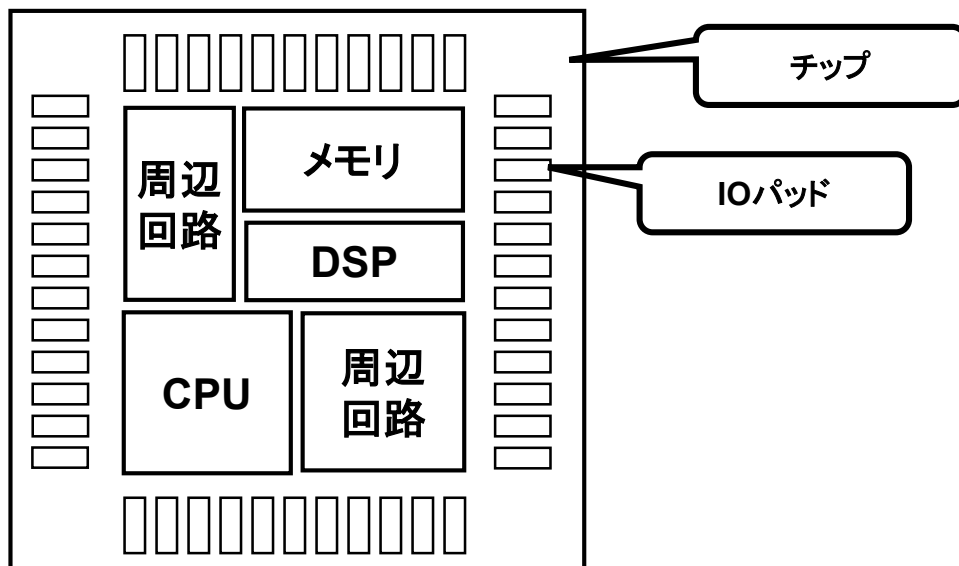
チャンネル型Gate Array

チャンネルレス型Gate Array

半導体集積回路のいろいろ

● Standard Cell

- 用意されたセルを組合せて各種回路ブロックを設計
- CPUやDSP (Digital Signal Processor) やメモリなどもコア・ブロックとして予め設計
- 全ての製造工程を経て固有なLSIを作成するため、集積度と性能面で最適化できる

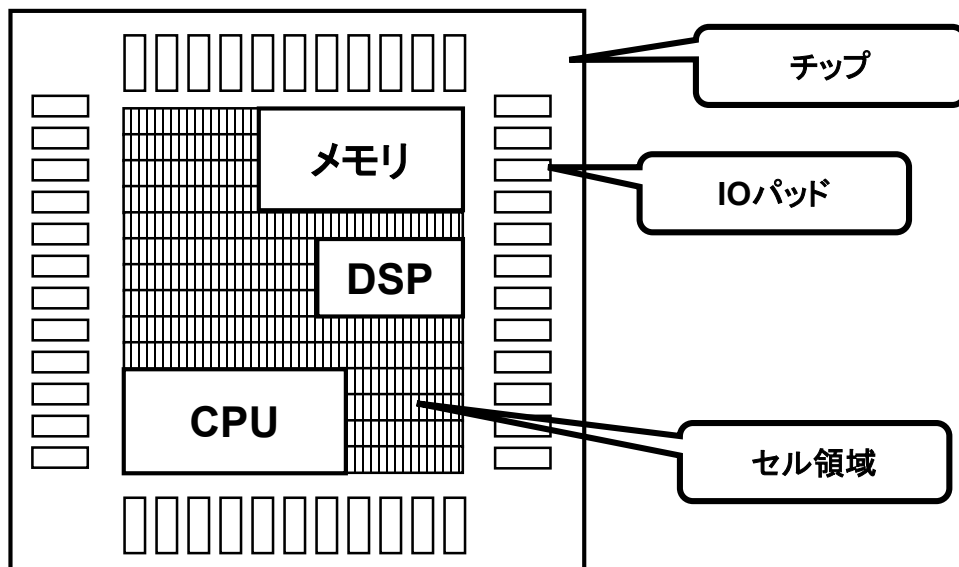


Standard Cell

半導体集積回路のいろいろ

● Embedded Array

- CPUやDSP(Digital Signal Processor)やメモリなどのコアを予めチップに埋め込み、残りの周辺回路をGate Arrayで作成する
- 集積度と性能は Standard Cell に匹敵し、製造期間は Gate Array なみ

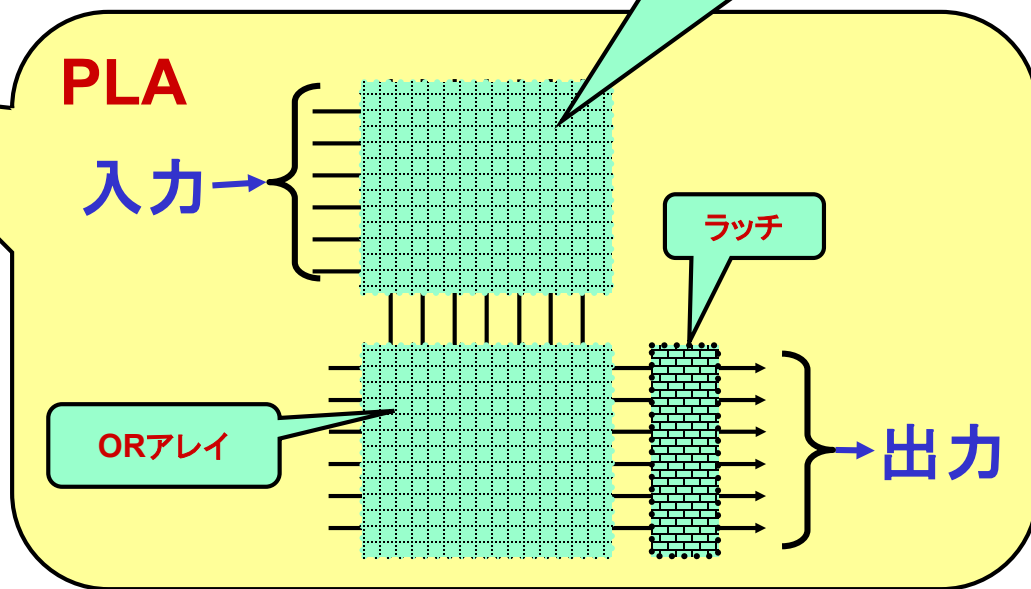
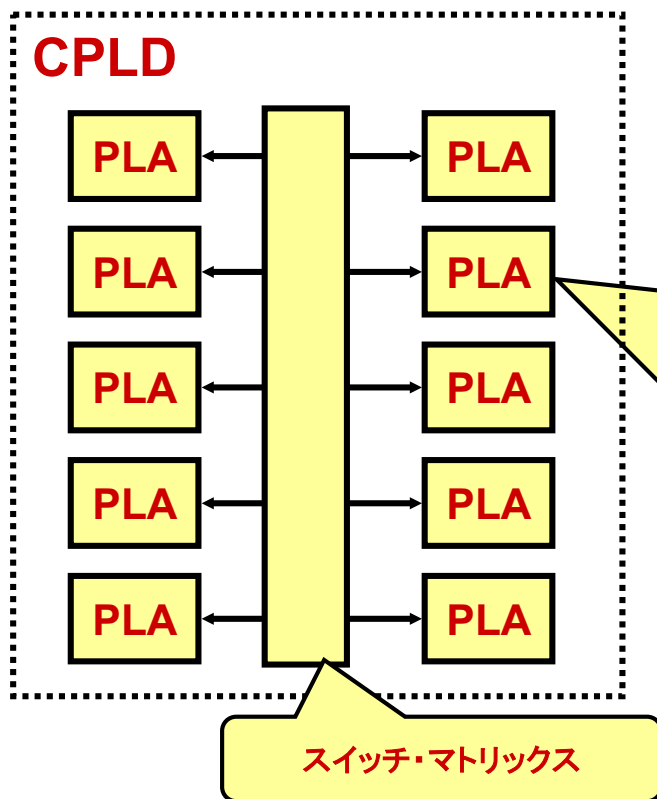


Embedded Array

半導体集積回路のいろいろ

- **CPLD (Complex Programmable Logic Device)**

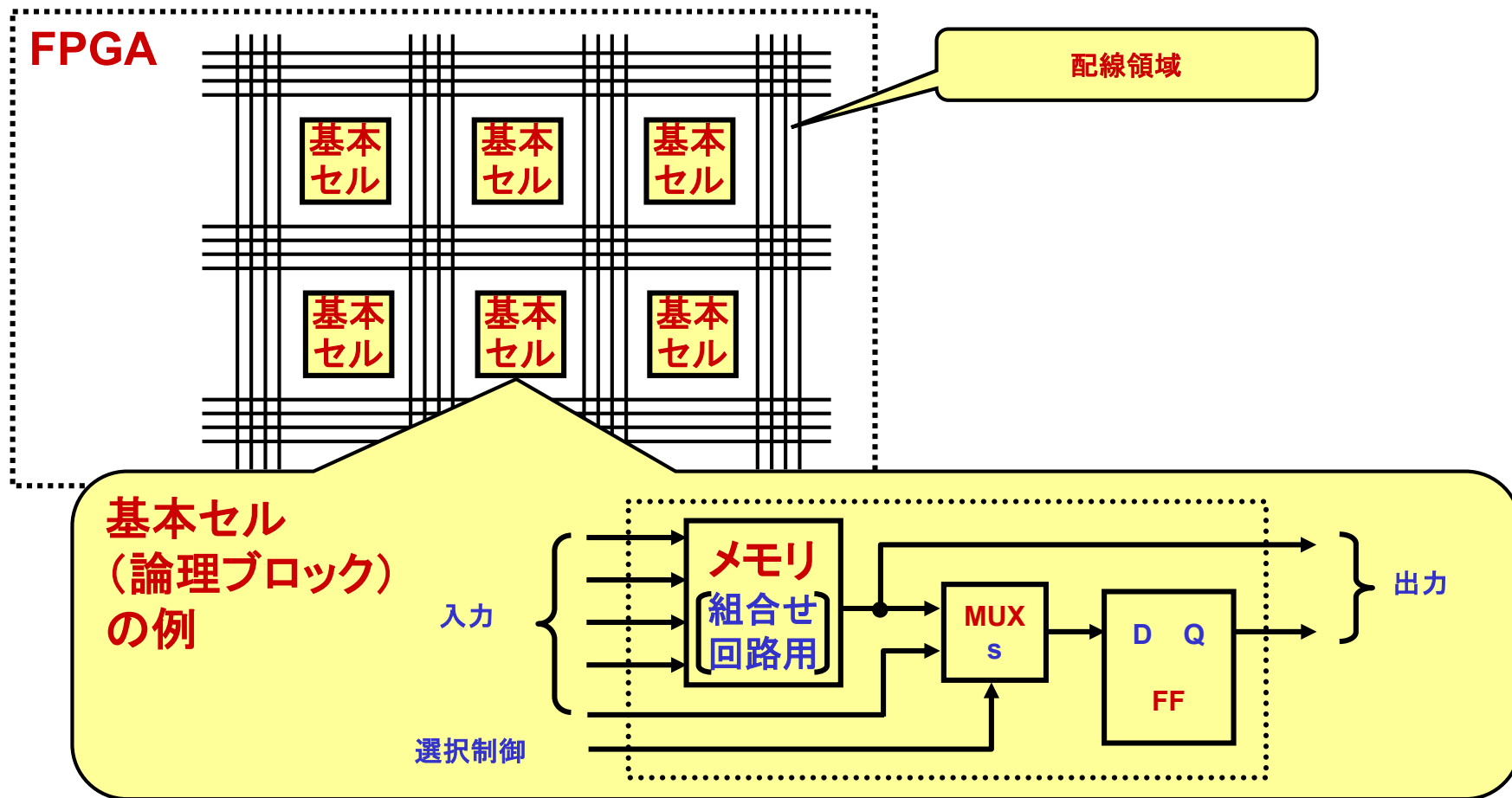
- **PLA (Programmable Logic Array)**
を敷き詰めたもの



半導体集積回路のいろいろ

● **FPGA** (Field Programmable Gate Array)

- 小規模な基本セル(論理ブロック)を格子状に敷き詰めたもの
- **CPLD**よりも論理の実装効率は低いが自由度は高い

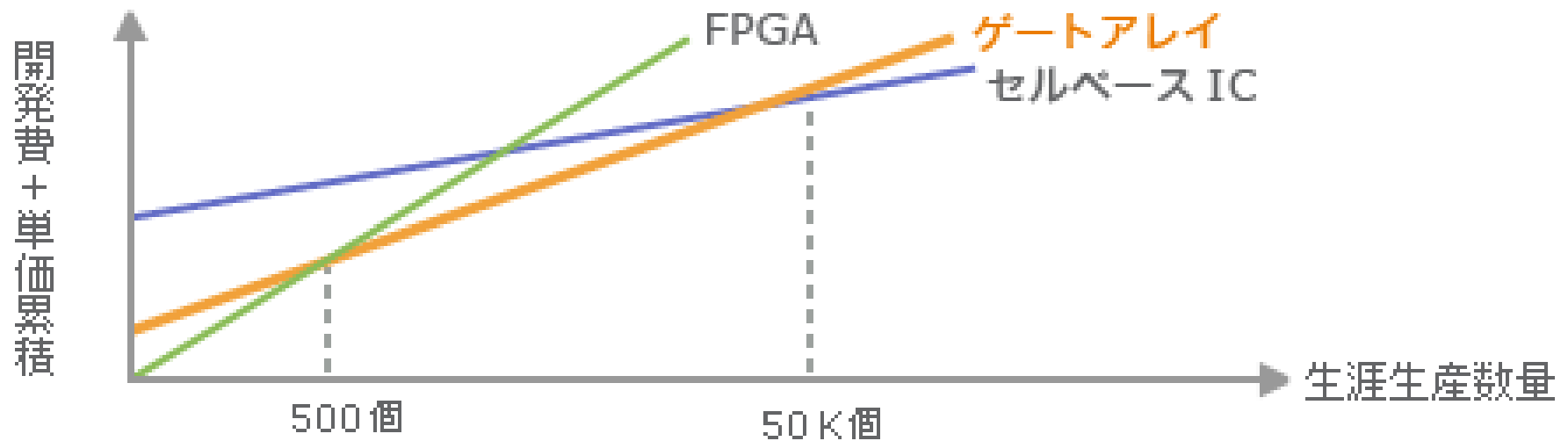


半導体集積回路のいろいろ

● 半導体集積回路 (LSI) のカスタマイズに関する比較

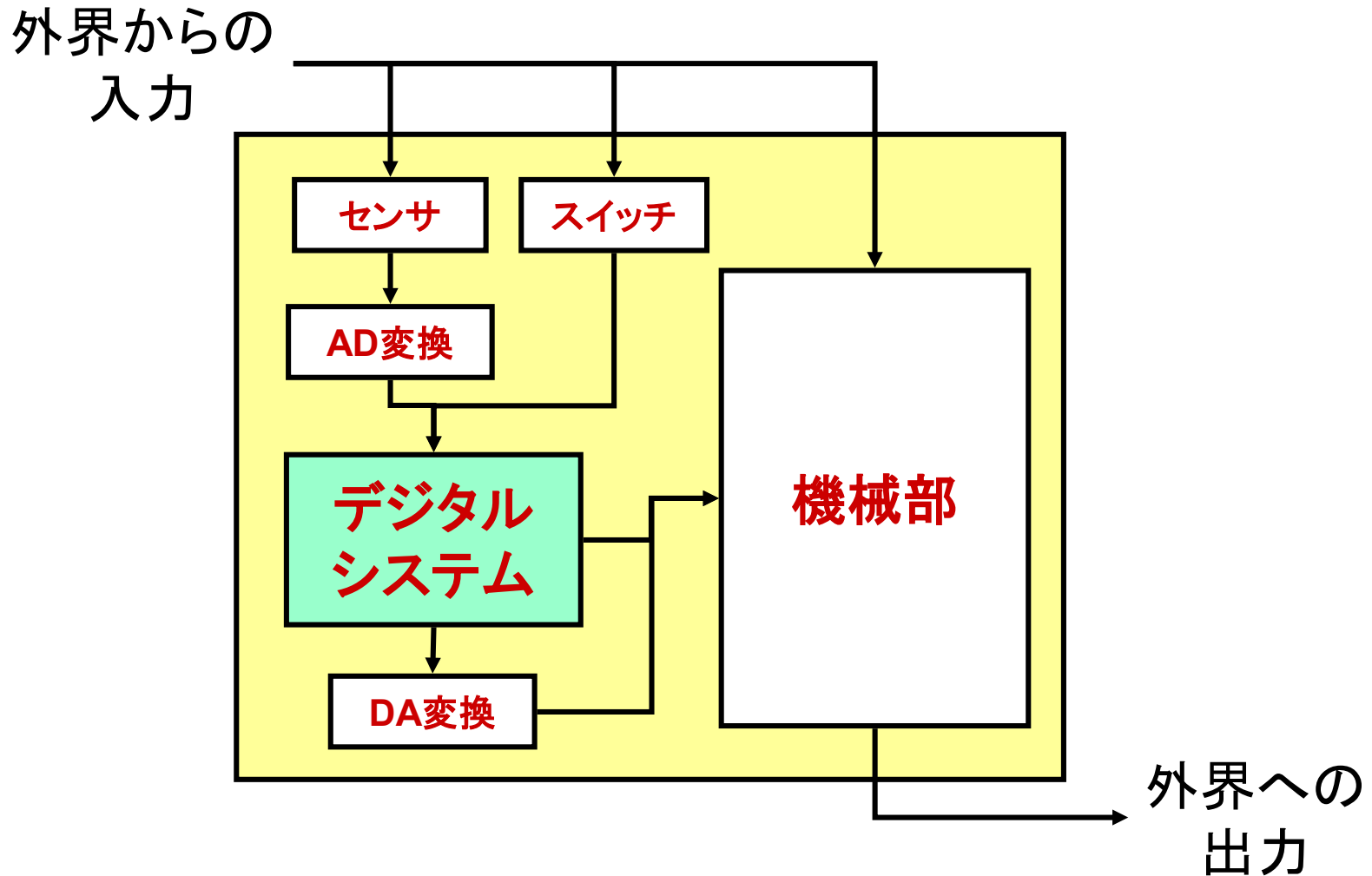
種類	カスタマイズ性	LSI単価	カスタマイズ前の プロセス工数	カスタマイズ プロセス工数
汎用IC／フル カスタムASIC	なし	小		
セミカスタム ASIC Std. Cell Emb. A. G.A.	大 中 大	小 中 中	なし 中 大	大 小 小
CPLD／ FPGA	中～ 大	大	小 (汎用品)	なし

半導体集積回路のいろいろ



デジタルシステム設計とは？

- 本講義でいう「デジタルシステム」とは下記



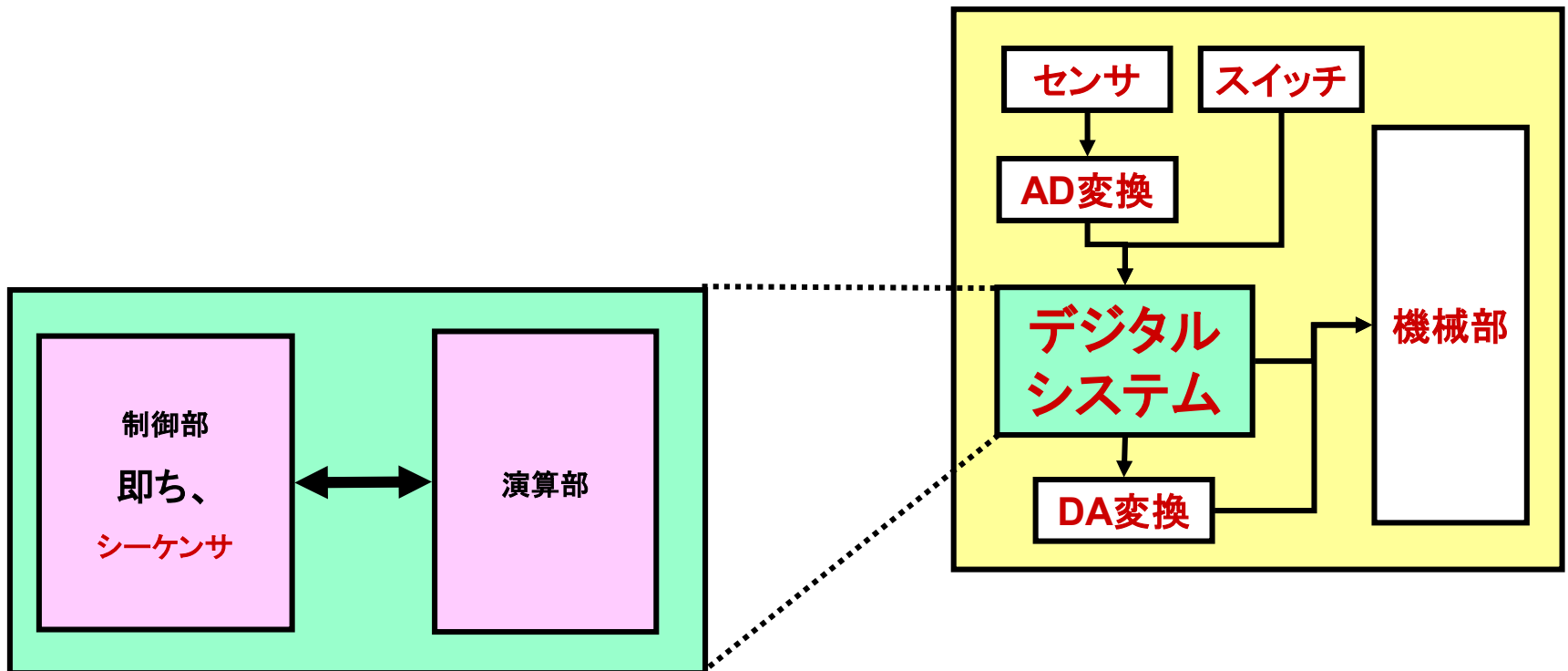
デジタルシステム設計とは？

- デジタルシステム設計でのポイント

- バグのない／故障診断の容易な大規模

- デジタルシステムの設計手法

- 誤動作しにくいシーケンサの設計手法



シーケンサ

- **シーケンサ**とは

- 定義された一連の仕事を実行する機械
- 外部信号を契機に動作
- 途中に外部状況等に伴う「デシジョン」を含む
(含まなければ、ただの「カウンタ」)

- **ハードウェア・シーケンサ**

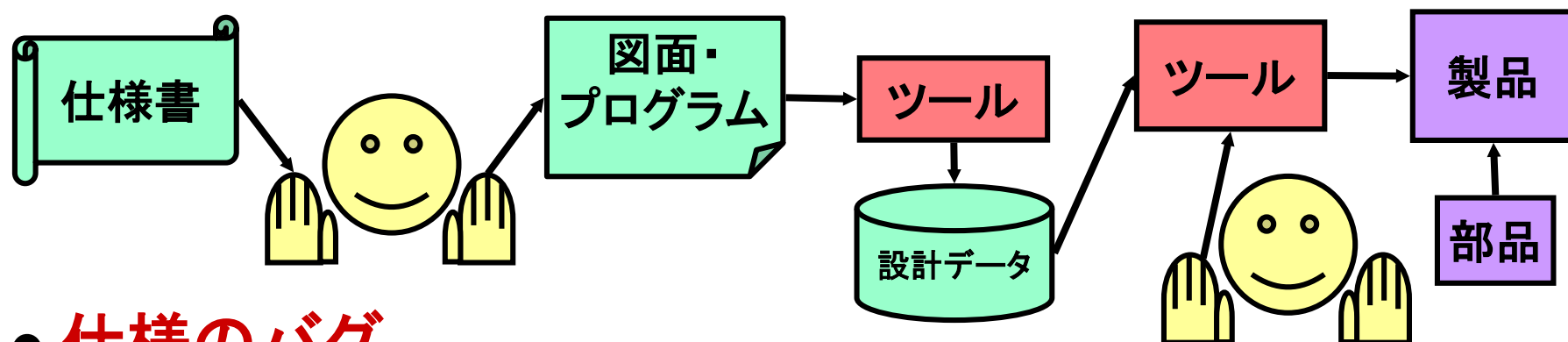
- プログラムを使用しない電気回路だけで組んだもの
- 単に「**シーケンサ**」と言うとこちらを指す

- **プログラム・シーケンサ**

- **マイクロプロセッサ**上のプログラムにより仕事を実行
- 柔軟性があり、複雑なシーケンスを実現することが容易
- メモリからプログラムを取り出して解釈実行するため、**ハードウェア・シーケンサ**に比べて2桁程度低速

仕様とバグ

- 仕様通りに作ったが動かない **原因**はどこに？



- **仕様のバグ**
 - － 記述されたバグ、記述されていないことのバグ
- **設計者のミスによるバグ**
 - － 見落とし、解釈ミス、入力ミス、論理ミス
- **ツールでのバグ**
 - － ツール自身のバグ、使用ミス
- **使用部品・製品自身の不具合(バグとは言わない)**
 - － (初期)不良、故障、(外乱による)動作不良

仕様とバグ

- **仕様のバグ**

- 記述されたバグ、記述されていないことのバグ

- **設計者のミスによるバグ**

- 見落とし、解釈ミス、入力ミス、論理ミス

- **ツールでのバグ**

- ツール自身のバグ、使用ミス

- **使用部品・製品自身の不具合(バグとは言わない)**

- 際どい設計が原因の場合もある
- (初期)不良、故障、(外乱による)動作不良

順序回路設計

HDL設計

CADによるシステム設計
への理解

耐ハザード設計・同期式順序回路設計

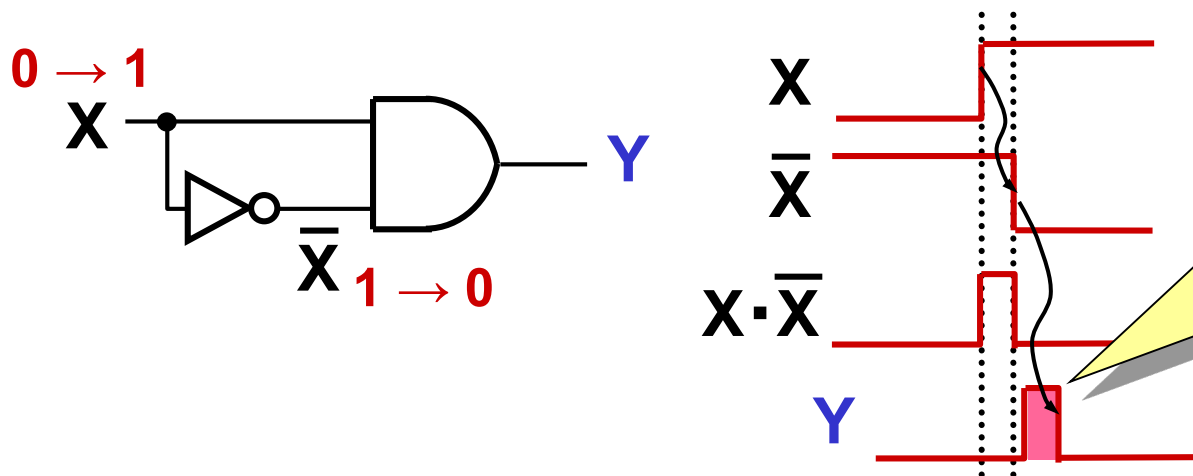
テスト容易化設計

高信頼化設計

- ハザードの例

$$Y = X \cdot \bar{X} = 0$$

論理的には正しい(間違いがない)筈なのに、
不具合(期待と異なる動作)が生じる代表例



上図では NOTゲートの伝播遅延時間幅のハザードが
 Y に現れる

宿題

- 演習1と演習2の答えを紙に記述し、次回の授業開始時に提出しなさい。
- 半導体メーカーのうち、IDM、ファブレス、ファウンドリ、IPプロバイダの例を調べてみなさい。