

# 第1章

## CMOSデバイスの現状

### 1-1 半導体デバイスの分類

半導体デバイスは、電子部品の一つです。数マイクロメートル( $\mu\text{m} : 10^{-6} \text{m}$ )～数十ナノメートル( $\text{nm} : 10^{-9} \text{m}$ )という微細なデバイス製造技術とデザイン・ルールを駆使し、世の中のありとあらゆる電子機器の集積化、多機能化、高品質化、小型化、低価格化に貢献しています。この半導体技術の発展は、より高度な電子機器を必要とする市場がある限り、留まることを知りません。

半導体デバイスは、表1.1のように分類することができます。これらの半導体デバイスの集積度を表す指標として、素子数(トランジスタ数)が用いられます。数百万の素子が一つのデバイス(LSIチップ)に集積されたシステムLSI/マイクロプロセッサ/メモリ/カスタムLSIから、数万～数百万素子の専用IC/LSI、数十～数千素子の汎用ロジックIC/汎用リニアIC、そして数百素子以下のディスクリート・デバイス/光半導体素子などがあります。

半導体デバイスの中でも、数多くの回路を集積したものを集積回路/集積素子といい、IC(Integrated Circuit)とかLSI(Large Scale Integrated Circuit)と呼ばれます。図1.1に、半導体デバイスの集積化トレンドを示します。

半導体デバイスには、大きく分けて二つの回路・製造技術があります。

- (1) バイポーラ回路・製造技術
- (2) MOS回路・製造技術

この二つの技術は、バイポーラからMOSに置き換わっていく傾向にあります。それは、電气的特性(消費電力、低電圧動作など)や製造コスト、回路・製造技術の標準化のしやすさ(異品種を大量生産可能)などが理由になっています。

見本

表1.1 半導体デバイスの種類

システム LSI (SoC)	マイクロプロセッサ, メモリ, アナログ, ロジックなど, さまざまな半導体デバイスを一つのチップ上に実現し たもの
マイクロプロセッサ (デジタル LSI)	CISC(複合命令セット・コンピュータ) RISC(縮小命令セット・コンピュータ)
メモリ	RAM(Random Access Memory) ROM(Read Only Memory)
カスタム LSI (デジタル LSI)	フルカスタム ゲート・アレイ PLD(Programmable Logic Device)
専用 IC/LSI (アナログ・デジタル LSI)	映像用 IC 音響用 IC 通信用 IC 特定用途 IC
汎用ロジック IC(デジタル IC)	TTL, CMOS
汎用リニア IC (アナログ IC)	OP アンプ コンパレータ レギュレータ ドライバ IC
光半導体デバイス	LED 半導体レーザ フォト・カプラ CCD, CMOS センサ
トランジスタ(ディスクリート)	バイポーラ・トランジスタ FET GaAs トランジスタ
ダイオード(ディスクリート)	整流用ダイオード ショットキー・バリア・ダイオード 定電圧ダイオード

集積度の高いデバイスは、デジタル信号の高速信号処理や演算処理、多くの情報量を記憶するメモリなどに用いられます。また、集積度の低いディスクリート・デバイスは、高い電気エネルギーを処理する電源や保護回路、高い効率とノイズ特性を必要とする電波を発生し、受ける高周波回路、さらにセンサや光源などに用いられます。

これら二つの狭間には、センサなどからのアナログ信号を受けてデジタル信号で処理・出力するアナログ-デジタル変換デバイス、逆にマイクロプロセッサなどからのデジタル信号をアナログ信号に変換し、モータやリレーなどを制御するデジタル-アナログ変換デバイスがあります。これらは一般的に、汎用化・標準化することが難しく、顧客の要求にフィットさせるため、カスタム LSI

見本

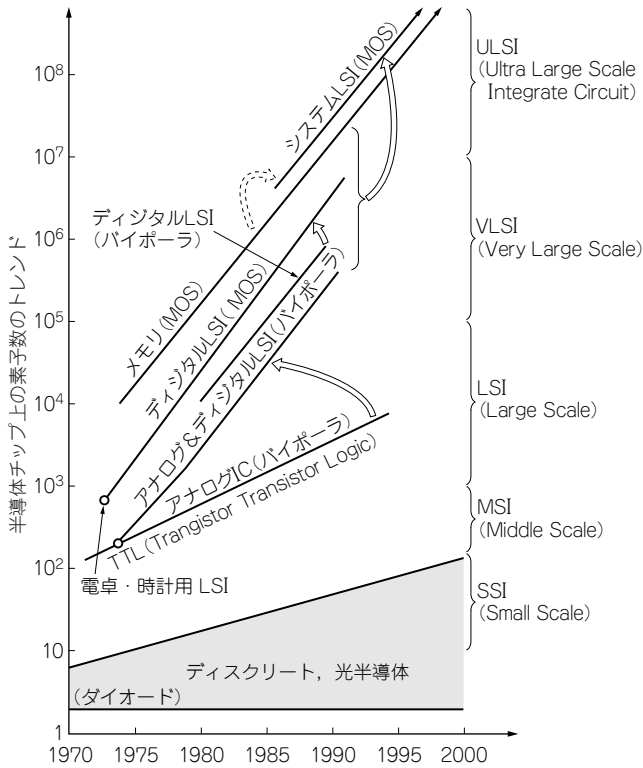


図1.1 半導体デバイスの集積化トレンド

になっている場合が多くなります。

さて、半導体デバイスは、図1.2に示すデバイス構造(プロセス)によっても分類できます。半導体デバイスの元となる基板材料には、大きく分けてシリコン半導体と化合物半導体があります。シリコン半導体は半導体デバイスの大部分を占めており、CMOS、バイポーラ、Bi-CMOSといった製造技術で分類できます。一方、GaAsなどの化合物半導体は、シリコン半導体より高速な信号処理が可能ですが、基板材料が高価です。そのため、電波を発信したり受信したりする特殊なデバイスなどに使われるのが一般的です。

見本

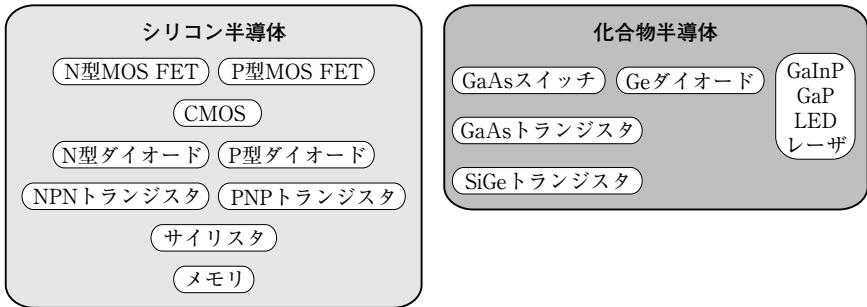


図1.2 半導体デバイスのプロセス分類

## 1-2 CMOSデバイスの特徴

CMOSデバイスは、消費電力が小さく、低電圧動作が可能で、雑音余裕が大きいといった特長があり、いまや半導体デバイスの発展はCMOSデバイスの技術の進歩に委ねられています。図1.1に示したように、CMOSデバイスの前身であるMOSデバイス(N-MOS, P-MOS)が誕生した1970年頃は、液晶表示による電卓や時計に採用されていました。乾電池で長時間駆動できる電子機器が初めて世の中に登場したのです。

その後、MOSデバイスはCMOSに進化し、電池やバッテリーを用いるポータブルな電子機器の発展と密接な関係を築いてきました。1980年になると、ワープロやコードレス電話、ビデオ・カメラに使用されるようになり、1990年にはノート・パソコン、2000年にはシステム・オン・チップ(SoC)が登場し、携帯電話やデジタル・カメラをはじめとして、ポータブル機器だけでなくあらゆる電子機器に採用されるようになりました。

写真1.1は、ノート・パソコンを分解し、使用されているプリント基板を取り出したものです。(a)マイコン/コア・プロセッサ、(b)メモリ、(c)カスタムLSI、(d)専用LSI、(e)標準ロジック、(f)トランジスタ、ダイオード(ディスクリット)、(g)電源ICなどで構成されています。

**見本**写真を見るとわかるように、半導体デバイスは黒い樹脂で覆われ、いくつかの足/リード(電極)が出ています。最近の超小型パッケージでは、リードは上面か

- (a) マイコン/コア・プロセッサ
- (b) メモリ
- (c) カスタムLSI
- (d) 専用LSI (グラフィック, オーディオ信号処理など)
- (e) 標準ロジック
- (f) トランジスタ, ダイオード
- (g) 電源IC

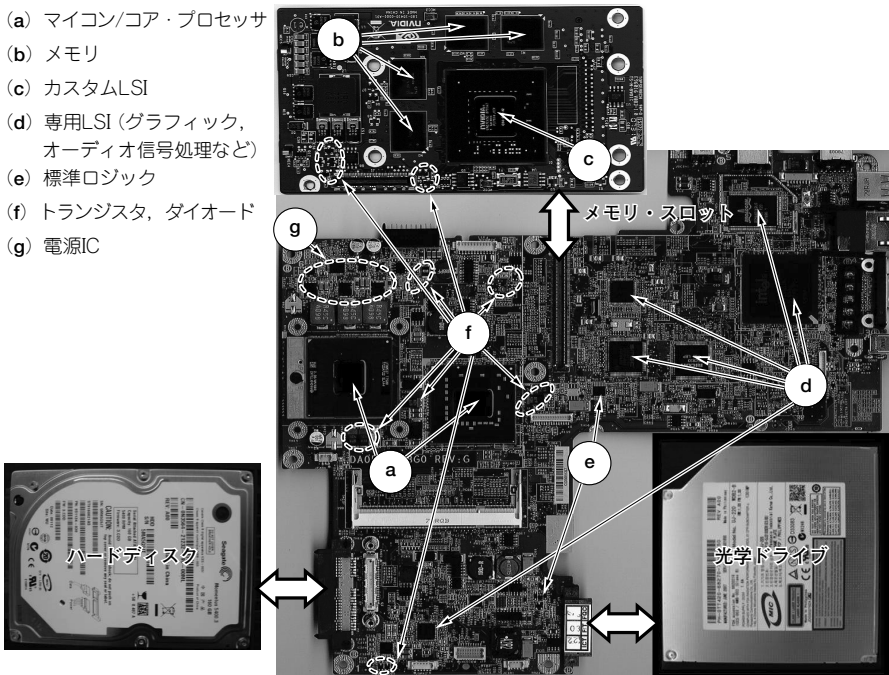


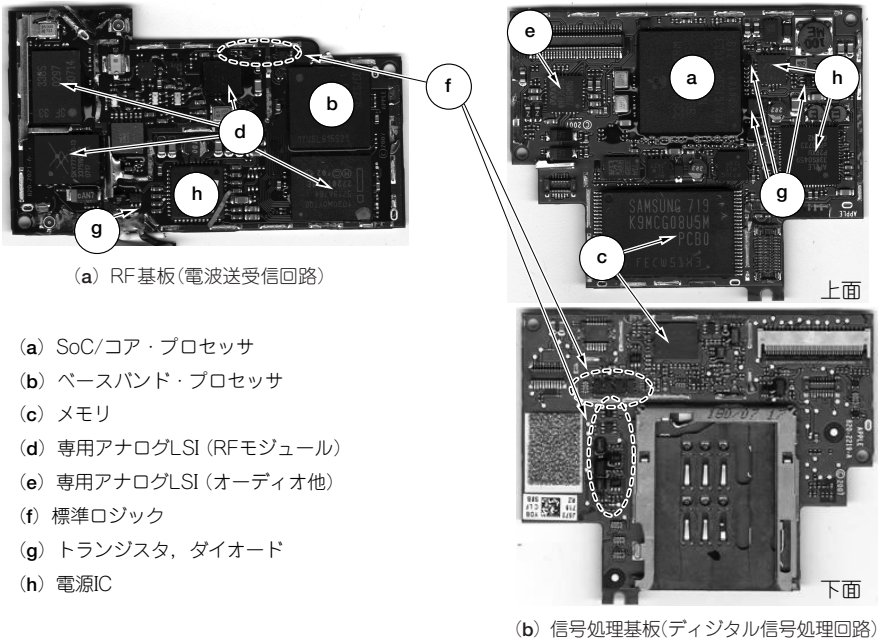
写真1.1 パソコンのプリント基板の例

からは見えず、樹脂の下面に潜り込んでいます。

写真1.2は、アップル社の携帯電話iPhoneのプリント基板を取り出したものです。(a) システム・オン・チップ(SoC)/コア・プロセッサ、(b) ベースバンド・プロセッサ、(c) メモリ、(d) (e) 専用アナログLSI、(f) 標準ロジック、(g) トランジスタ(ディスクリート)、(h) 電源ICなどが搭載されています。

この基板を見ると、電波を発信/受信する回路ブロックと、アナログ/デジタル信号処理を行う回路ブロックに分かれています。細かな電子部品がところ狭しと配置されているのがわかります。ノート・パソコンと比べると、より集積化、小型パッケージ化が進んでいます。しかしながら、標準ロジックやディスクリートも相変わらず使用されています。

**見帯電本**は小型化が必須であり、半導体デバイスへの要求も究極の小型・薄型化が求められます。使用されている半導体デバイスの大部分は、電極/リードは



- (a) SoC/コア・プロセッサ
- (b) ベースバンド・プロセッサ
- (c) メモリ
- (d) 専用アナログLSI (RFモジュール)
- (e) 専用アナログLSI (オーディオ他)
- (f) 標準ロジック
- (g) トランジスタ, ダイオード
- (h) 電源IC

写真1.2 携帯電話のプリント基板の例

上面からは確認できず，樹脂の下面に潜り込んだリードレス・パッケージやボール・グリッド・アレイ (BGA)が採用されています。

CMOSデバイスの長所と短所を，表1.2にまとめました。第一の長所は省電力です。電源を投入しても，動作していないときの消費電流(静的消費電流)が非常に少なく，動作電源電圧が低くても高速応答性を備えており，ノート・パソコンや携帯電話のマイクロプロセッサをはじめとする大規模集積回路では，1.8V以下という低電圧動作が一般的になりましたが，高速データ処理も平行して進んでいます。

表1.2 CMOSデバイスの特徴

長 所	短 所
低消費電力(省電力)	静電気に弱い
低電圧動作	サイリスタ現象(ラッチアップ)
雑音余裕度(ノイズ耐性)	
高集積化・標準化(品質, コスト)	

見本

CMOSデバイスは雑音余裕度(ノイズ・マージン)も大きく取れるため、外来ノイズで誤動作しにくいという特長があります。したがって、信頼性が極めて重要な産業用機器や交通分野、生活インフラ分野での採用は、1980年頃から加速的に増えています。

一方、製造メーカからの視点も重要です。CMOSデバイスはデジタル信号処理を得意とし、その論理回路部分は、製造技術の微細化が進んでも過去の資産を活かすことができます。また、設計基準や製造技術の要素技術が固まると、さまざまな機能・性能を一気に広げることが可能であり、世の中の標準化や、半導体メーカ間の提携・協業にも効果的に働きます。またこれは、安定供給とコストの追求という形で、市場に還元されています。

短所は、CMOSデバイス誕生当時から静電気破壊、サイリスタ(ラッチアップ)現象、高速応答性に劣る、などが挙げられていました。これらの課題は、回路設計/レイアウト技術、製造技術、保護回路技術など多方面から克服されています。近年では、高速デバイス特有のノイズ発生、ノイズによる誤動作(敏感)が大きな課題として浮上しています。

また、デザイン・ルールの微細化に伴って、デバイスの耐圧が低下しています。1.8V駆動のLSIでは、一般的な電子機器で使われてきた5V電圧でさえ、直接印加するとデバイスの劣化や破壊につながります。これらの新たな弱点は、CMOSデバイスの性能向上に反し、デバイスを使用するユーザがしっかりと認識し、使いこなしていく大事なルールとなっています。

## 1-3 CMOS製品の種類と特徴

CMOS製品は、図1.3に示すように、ロジックIC、アナログ(リニア)IC、メモリ

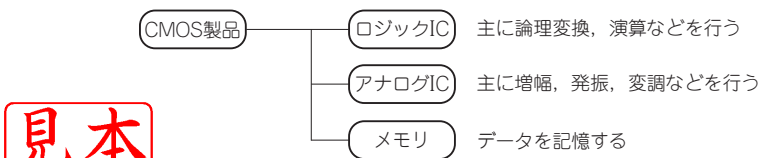


図1.3 CMOS製品の大分類

**見本**

に大別することができます。ロジックICには、標準ロジックIC、PLD(Programmable Logic Device)、ASIC(Application Specific IC) /カスタムLSI、専用IC、マイクロプロセッサ、DSP(Digital Signal Processor)、そしてシステムLSIなどが含まれます(図1.4)。

また、アナログICには、OPアンプ、コンパレータ、A-D(Analog/Digital)変換、D-A変換、電源回路などの単体の汎用アナログICと、デジタル回路を組み合わせた専用アナログICがあります。メモリは、不揮発性メモリ(ROM: Read Only Memory)と、揮発性メモリ(RAM: Random Access Memory)に大別でき、さらに機能・性能によって小分類されます。

ここではロジックICとメモリを取り上げ、機能・性能による分類を説明します。アナログICについては、汎用IC、専用ICを問わず、用途や仕様が固別化/特定化/専用化されるため、本書では詳しく触れません。ただし、ロジックICの中で、DSP(Digital Signal Processor)と呼ばれるアナログ信号をデジタル化し、信号処理するICについては代表的な製品を取り上げます。

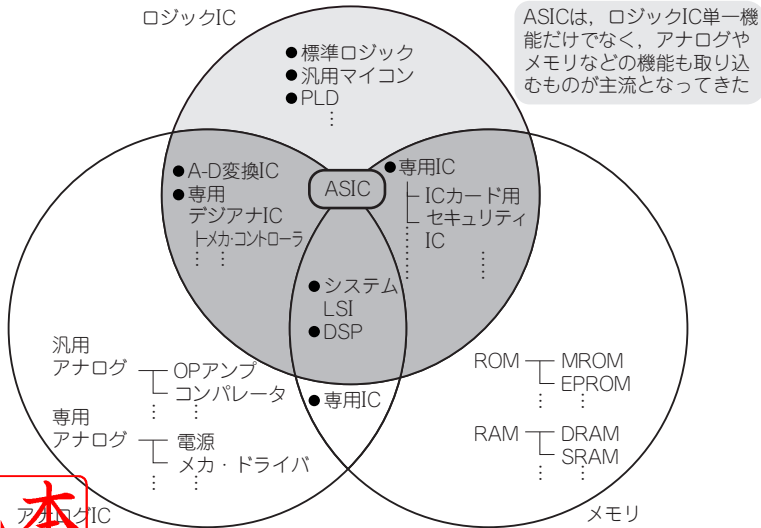


図1.4 CMOS製品の小分類

### ● ロジックICの分類

ロジックICは、図1.5に示すように標準品とセミカスタム、そしてフルカスタムに分類できます。すなわち、ASICと定義できる製品の領域は非常に広がっています。ASICという呼称が誕生したときは、ゲート・アレイやセルベース

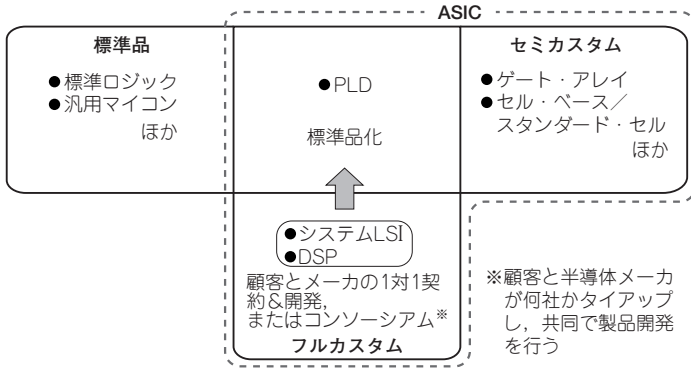
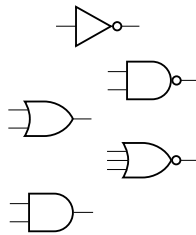
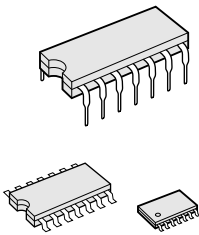
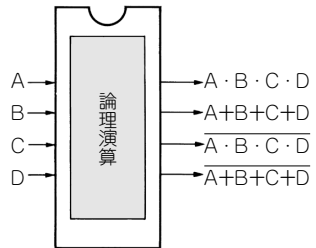


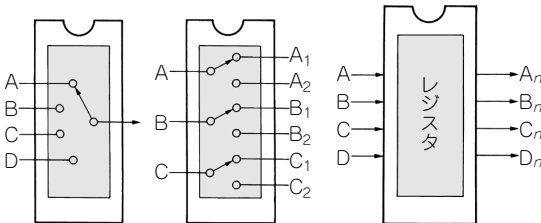
図1.5 ロジックICの分類



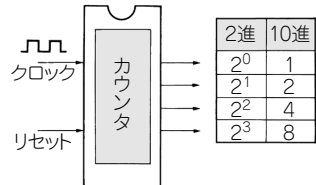
(a) パッケージと回路記号



(b) 論理演算(ゲート回路)



(d) データの保持機能 (フリップフロップ, ラッチなど)



(e) カウント/分周機能

**見** c) フラッシュ機能 (メモリ、デコーダなど)

図1.6 標準ロジックICの機能

(スタンダード・セル、IPコア・セル)で開発された製品を指していましたが、今ではDSPやシステムLSIまで含んでいます。

標準ロジックは、その名のとおり、シンプルな論理回路を製品化したものです(図1.6)。インバータ、NAND、AND、NOR、ORなどの最小論理構成となるゲート製品、また、これらを組み合わせてできるデコーダ、マルチプレクサなどの組み合わせ論理回路があります。さらに、単体のフリップフロップ(記憶回路)とゲート回路を組み合わせたカウンタ、シフトレジスタなどの順序回路も製品化されています。マイコンもシステムLSIも、この標準ロジックを何十万個、何百万個と組み合わせることで作ることができます。もちろん、機能的に実現することができても、性能や品質、コストを考えると割に合いません。

最近の標準ロジックは、ASICやマイコンの周りに用いて、周辺ICとの接続や論理の小変更・追加などに使用することが多いようです(図1.7)。もちろん、設計する製品の回路規模が数百ゲート以下であれば、標準ロジックを数個~十数個使って設計が完了することもあります。

最近の製品の開発サイクルやモデル・チェンジは非常に速く、かつヒット商品になるか否か、高いリスクを抱えています。このような環境で、製品の開発費を抑えリスクを軽減するために、汎用化されたシステムLSI+標準ロジック/PLD+ほかの汎用デバイスという組み合わせにより、まず製品の機能・性能を

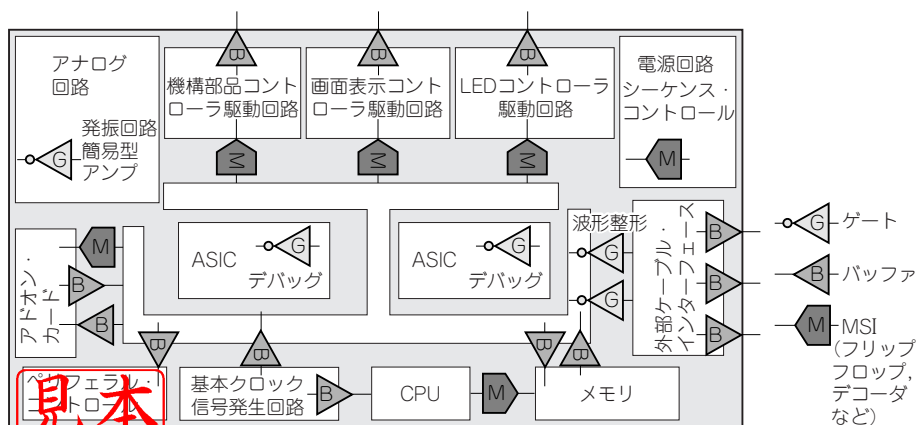
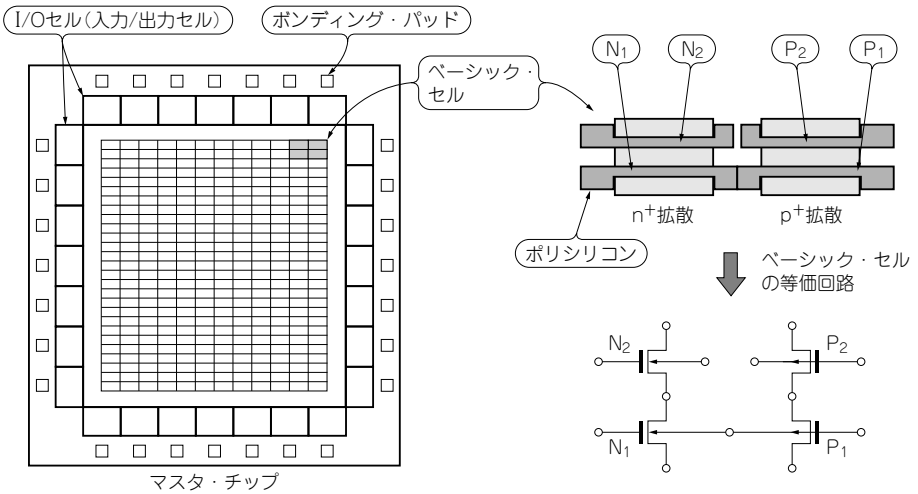


図1.7 標準ロジックICの代表的な使用例

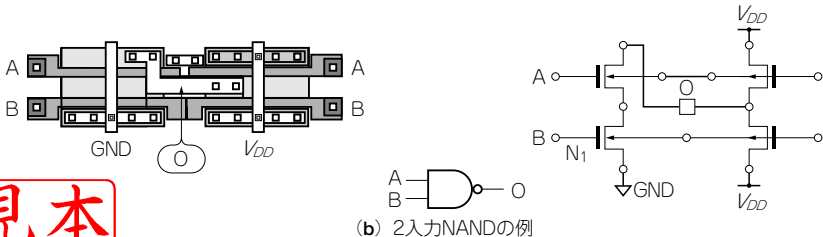
実現し、誰よりも早く市場に投入する必要があります。その上で、製品が間違いなくヒットするとわかった時点から、デバイスの集積化やフルカスタムIC化を具体的に進めるのです。少し遠回りのような気もしますが、実は設計者にとっても半導体メーカーにとっても、デバイスの開発費を軽減する有用な手法として定着しています。

セミカスタムICは、ゲート・アレイ (Gate Array)、セルベース、スタンダード・セル、ECA (Embedded Cell Array)、IPコア・セルなど、多数の呼び方があります。製品開発の手法は、開発環境の違いに現れます。一つはゲート・アレイ、もう一つは広義のスタンダード・セル (セルベース、ECA、IPコア・セルなどを含める) です。

ゲート・アレイは、**図1.8**に示すように、マスタと呼ばれるウエハ/チップが



(a) マスタ・チップとベーシック・セル



(b) 2入力NANDの例

**見本**

図1.8 ゲート・アレイの構成

あらかじめ用意されています。マスタは、MOSトランジスタをアレイ状/格子状に敷き詰めた構造となっています。ゲート・アレイで作り上げるLSIは、論理設計終了後、このマスタにトランジスタ間、電源(GND)間をつなぐ配線を施して完成します。このため、開発期間が短いという特長があります。

スタンダード・セルは、図1.9のように、最適設計されたマイコンなどのロジック、メモリ、アナログ、インターフェース、電源の各回路をあらかじめ準備しておき、これらをゲート・アレイのある領域に埋め込み、組み合わせることによりLSIを実現するものです。スタンダード・セルの発展系として、IPコア・セルと呼ばれるDSPやマイコン、画像処理コア・チップといった設計資産を、メーカを超えた提携で入手し組み込むこともあります。

システムLSI(SoC)の発展に伴い、回路規模の増大化、超高集積化というトレンドになり、ある特定の半導体メーカが最初からSoCすべての開発を担うには、時間、開発費、品質どれをとってもリスクが高くなっています。最近では、半導体メーカどうしが提携し、各メーカが提供するIPコアをIPバンクに登録し、必要なIPコアの設計情報を引き出して組み合わせ、所望のSoCを開発することが増えてきました(図1.10、図1.11)。

ASICの裾野は多岐にわたり、分類が年々複雑化しています。きっかけは、ある特定の電子機器用途・特定顧客向けに開発されたフルカスタムであっても、後の大量生産を視野に入れた低コスト化を考慮し、ユーザとメーカの合意によって

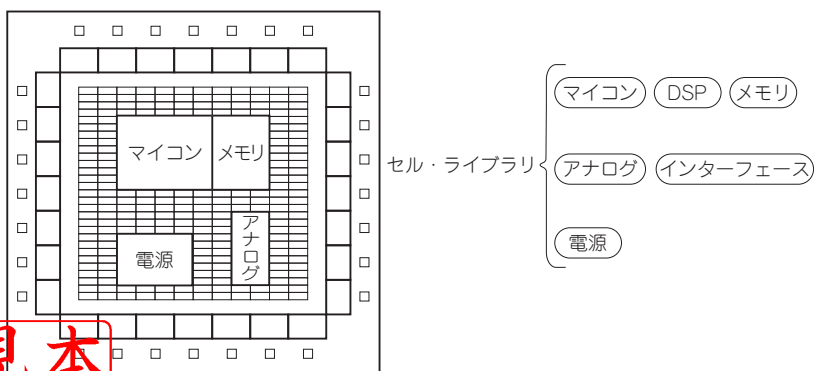


図1.9 スタンダード・セルの構成例

標準品化される製品が誕生しています。

たとえば、DSP(Digital Signal Processor) やシステムLSIの一部が、これに相当します。デジタル信号の論理変換・処理，記憶を一つのチップで賄うことは容易になりました。しかし，アナログ信号の処理については，設計の標準化が難航していました。利得(ゲイン)，ノイズ，干渉(クロストーク)，温度ドリフト，性能の再現性(歩留まり)などが，設計者のスキル(回路パターン)やプロセスの精度・安定度，そして要求されるデバイスの特性などのために，ピン・ポイント設

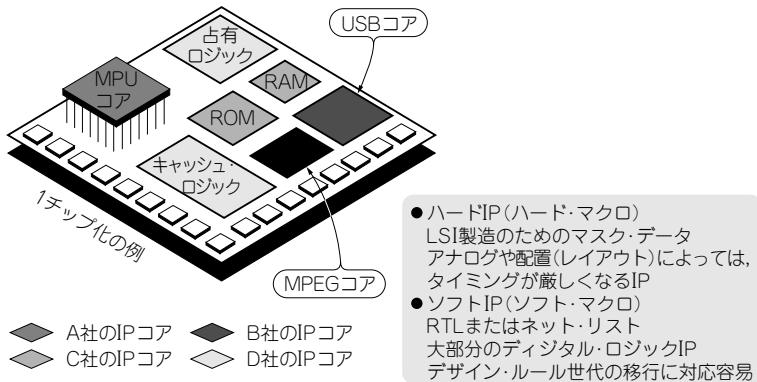


図1.10 IPコアを集めてカスタムICを作る

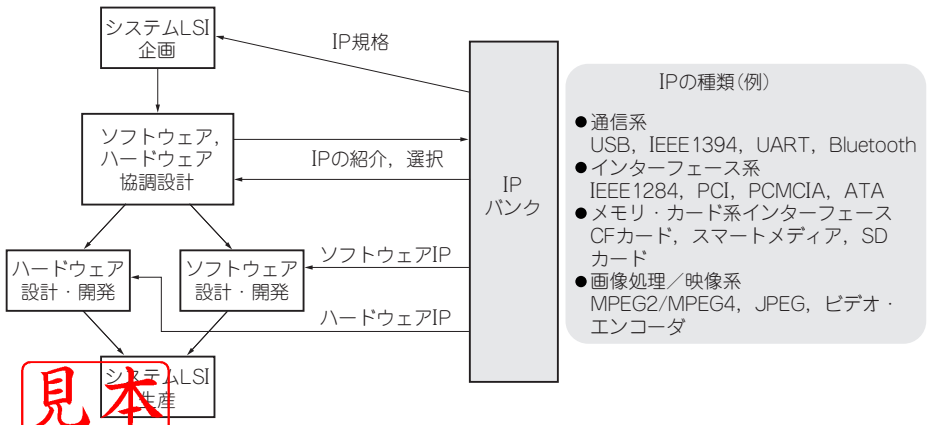


図1.11 IPコア活用の開発フロー

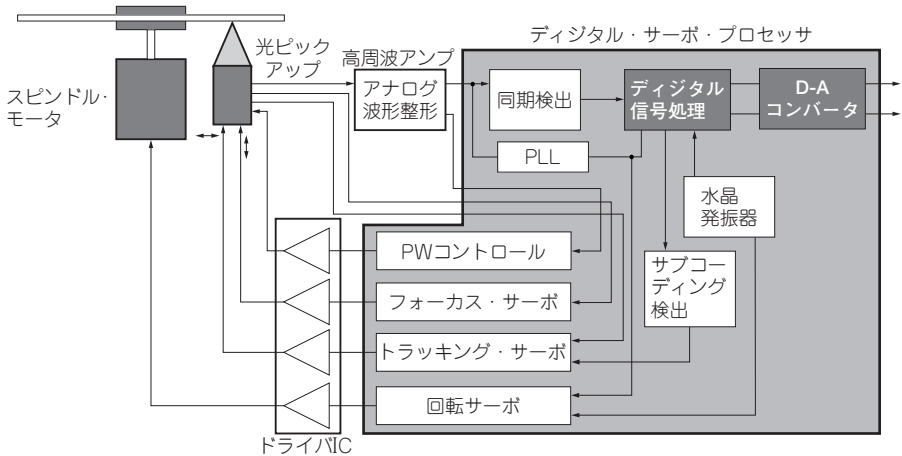


図1.12 光ディスク・プレーヤ用DSPの構成例

計になり、常にカスタム対応とならざるをえなかったからです。そこで、必要最低限の回路のみアナログで残し、残りは極力デジタル化(デジタル補償)しようとするDSPが登場しました。

DSPの特徴は、

- ▶ 高速乗算器、累積加算機能をもつ
- ▶ プログラム系とデータ系に複数の専用バスをもつ
- ▶ プログラム・メモリとデータ・メモリを分離、独立してもつ
- ▶ 高速化データ・アドレス計算ユニットをもつ
- ▶ 応用によりA-D変換器をもつ

つまり、マイコンの一種と言えます。DSPは、最終的に必要な信号(入力/出力)はアナログですが、信号処理速度の向上、CMOSデジタル(補償)化による信号品質の向上、アナログ特性の安定性・再現性、単一アナログICでは困難な低電圧・省電力動作、微細化CMOSプロセスを適用した低コスト/高集積化、などの長所を活かしたデバイスです。

DSPが実現化され、標準化されることによって、音声信号処理や画像処理を1チップで実現することができ、携帯電話やさまざまなメディア・プレーヤの小型化や高機能化、低コスト化に貢献しています。DSPが実現化され、その後システム

見本

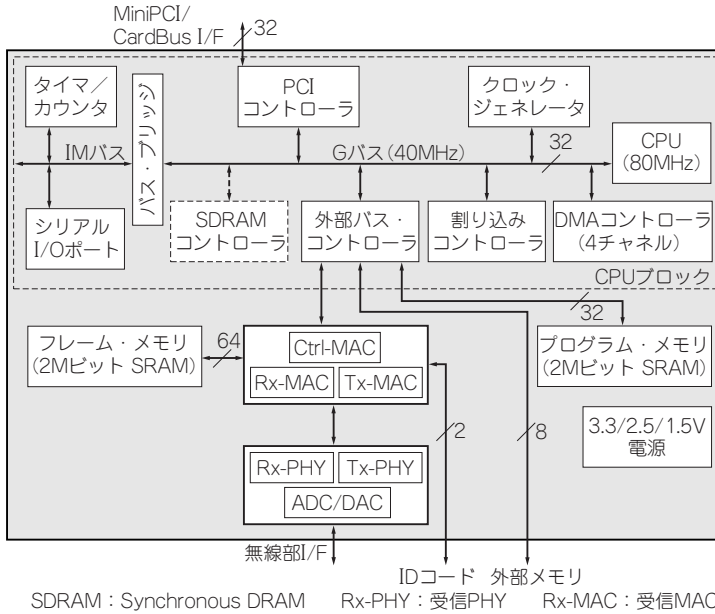


図1.13 無線LANベースバンドLSIのブロック図

LSIへと進展してきたといえます。図1.12に、DVDなどの光ディスク・プレーヤ用に開発されたDSPの回路構成例を示します。

システムLSIは半導体チップの一つで、対象とする電子機器のすべての制御を司ることを目的としたデバイスです。つまり、CMOSロジックICの範囲を飛び越え、アナログ回路、メモリ回路、電源回路なども集積されることを意味します。システムLSIでは、100万トランジスタを超える集積度も珍しくはありません。例として、図1.13に無線LAN用SoC(ベース・バンドLSI)の機能ブロックを示します。0.18  $\mu\text{m}$ のCMOS6層配線デザイン・ルールを適用し、11mm $\square$ のチップ・サイズに約3000万トランジスタを集積しています。

見本