

# 第1章 アナログ集積回路の 予備知識

## 1.1 アナログ回路設計者の心構え

10年ほど前までは「アナログ回路はもちろんバイポーラ・MOS(metal oxide semiconductor)素子なんて使えないよ」という回路設計者が大勢いました。アナログ回路設計者にとっては、性能が劣るとされている MOS 素子を使ってアナログ回路を設計するのは邪道という意識が強かったのでしょうか。今日でも MOS 素子を用いたアナログ回路の日本語の教科書は限られています。

その一方で、アナログ回路を MOS 素子で設計する機会が最近では圧倒的に増えてきました。この背景には、CMOS LSI の製造コストが安くなったことがあります。安価な CMOS のメリットを生かして、アナログ回路とデジタル回路を1チップに組み込んだ「アナ・ディジ混載 LSI」が盛んに設計・製造されています。

ひと昔前はアナログ・バイポーラ LSI とデジタル LSI は別々に製造され、1枚のプリント基板に搭載することでシステムを構成するのが普通でした。しかし最近の LSI は、製造技術の向上に伴って集積化が進み、ひと昔前のボード上の LSI をすべて一つのチップに組み込むことができるようになってきました。少ない部品でシステムを組み上げることは、製造コストを下げる近道だからです。このような LSI の低コスト化の流れに沿って、バイポーラ素子を使わない CMOS アナログ・デジタル混載(ミックスド・シグナル)集積回路が全盛になっているのです。

ただし、アナログ・デジタル混載集積回路では、アナログ回路の天敵であるデジタル回路(ノイズ発生源)が同一シリコン基板上にあるので、細心の注意を払ってデジタル・ノイズの影響を回避する設計が必要となります。このノイズ

に関する詳しい話は、第5章「アナログ回路のノイズ」や第9章「レイアウトと素子マッチング」の章で説明します。

### 1.1.1 デジタル回路でもアナログの知識が要求される

1980年代の後半でしょうか、デジタル回路が爆発的に広がったところで、「これからはデジタルの時代、アナログ回路設計者はもういない」とまで言われ、多くのアナログ回路技術者はデジタル回路の設計に転向させられました。ところが、デジタル回路も最先端の性能を引き出すにはアナログ回路設計の知識が必要であることがわかってきました。しかし、過去にデジタル回路設計に転向させられた設計者が今ごろになってアナログ回路設計に戻ろうとする場合、MOSの勉強から始めなくてはなりません。そのため、バイポーラ素子でベテランの域に達した設計者は、CMOSのアナログ回路設計には手を出したがりません。一方、若手技術者はアナログ回路を設計した経験がほとんどありません。さらにCMOSのアナログ回路設計教育を行っている国内の大学がきわめて少ないので、新人にも期待できないという八方ふさがりの状況が続いています。

欧米でもCMOSのアナログ回路を設計する人が極端に不足しており、CMOSのアナログ回路が設計できるというだけで高給で迎えられています。読者のみなさんもぜひアナログ回路設計をマスタして、企業で重宝される人材になってください。

### 1.1.2 アナログ回路設計に適した人とは

アナログ回路を理解するには電気回路、電磁気学、半導体物性など、かなり広い技術分野の知識が必要となります。その意味では電気系の学部教育を受けた人がアナログ回路設計で優位に立てることは事実です。しかし、それが必要十分条件ではありません。電気系の教育を受けた人でもアナログ回路の設計には適さない人が大勢います。その逆に、まったく電気系の教育を受けてこなかった若手技術者が突然アナログ回路設計に目覚めることもあります。

筆者のアナログ回路教育の経験からわかったことは、アナログ回路設計に適した人とは、

1) 枝葉末節に目を奪われないバランス感覚に優れ、

2) あらゆる可能性に対して細かく気配りができる，  
技術者であると言えます．

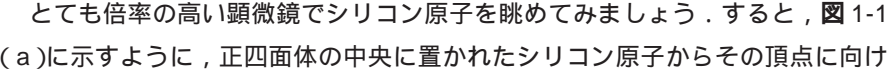
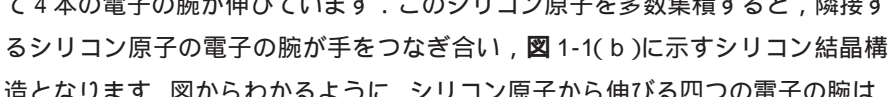
ところが，そのような人が設計したアナログ回路でも，たまに予想外の動作をすることがあります．しかし，そんなときにも泰然自若とし，アナログ回路には「不思議」はないはずだと思える人がアナログ回路の設計に向いているようです．設計に失敗してもその原因を理詰めで究明し，次回の設計では同じ失敗を再び繰り返さない地道な努力の積み重ねが，アナログ回路の設計にはとても重要なのです．

## 1.2 シリコン基板を理解する

CMOS アナログ回路設計を学ぶ前に，その素材となるシリコンについて考えてみましょう．

「そんな泥臭いことはやめて，電気回路くらいから始めてよ…」と言われる方もいらっしゃるかもしれませんが，アナログ回路が組み上げられるシリコン基板の性質を理解することはアナログ集積回路設計にとって必須事項です．

### 1.2.1 シリコン結晶の構造

とても倍率の高い顕微鏡でシリコン原子を眺めてみましょう．すると， 1-1 (a)に示すように，正四面体の中央に置かれたシリコン原子からその頂点に向けて4本の電子の腕が伸びています．このシリコン原子を多数集積すると，隣接するシリコン原子の電子の腕が手をつなぎ合い， 1-1(b)に示すシリコン結晶構造となります．図からわかるように，シリコン原子から伸びる四つの電子の腕は，隣のシリコン原子を結び付ける接着剤の役目を担っています．この接着剤の役目を果たす電子を「価電子」と呼びます．

シリコン結晶中に含まれる原子の数がどれほど膨大な数であるかを知るために，ここで簡単な計算をしてみましょう．化学の教科書には，シリコンの原子量は28と書かれています．これは，シリコン原子をアボガドロ数( $6 \times 10^{23}$ 個)だけ集めたとき，重量が28gになることを意味しています．シリコン結晶の比重は2.3 g/cm<sup>3</sup>なので，

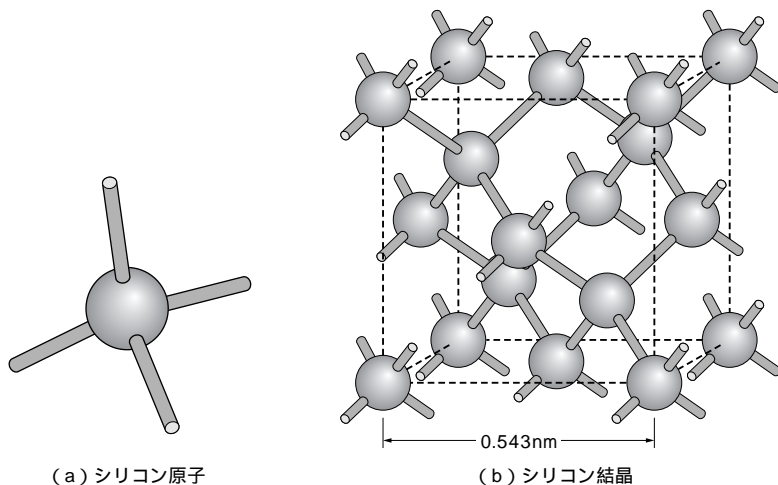


図 1-1 シリコン結晶の構造

正四面体の中央に置かれたシリコン原子からその頂点に向けて4本の電子の腕が伸びている。このシリコン原子を多数集積すると、隣接するシリコン原子の電子の腕が手をつなぎ合い、シリコン結晶構造となる。

$$\frac{2.3}{28} \times 6 \times 10^{23} \approx 5 \times 10^{22} \text{ 個/cm}^3$$

1 cm 角(1 cm<sup>3</sup>)のシリコン中には5 × 10<sup>22</sup> 個もの原子がぎっしりと詰まっていることが、計算からわかります。

### 1.2.2 ドナーとアクセプタ

次に結晶中の一つのシリコン原子をリン原子に置き換えてみましょう。周期律表を参照すると、リン原子は5価であることがわかります。つまりリン原子の最外殻には5個の電子があります。正四面体構造の中央にあるシリコン原子をリン原子に置き換えると、4個の電子が隣接するシリコン原子と化学結合をするために使用され、余った1個の電子がリン原子から離れてシリコン結晶中を動き回るようになります。これが半導体デバイスの電気伝導を司る伝導電子で、前述の価電子とはまったく違った性質を持っています。

このように5価のリン原子は、シリコン結晶の中に入ると電子を提供( donate )することからドナー( donor )と呼ばれています。電子が離脱したドナー不純物原