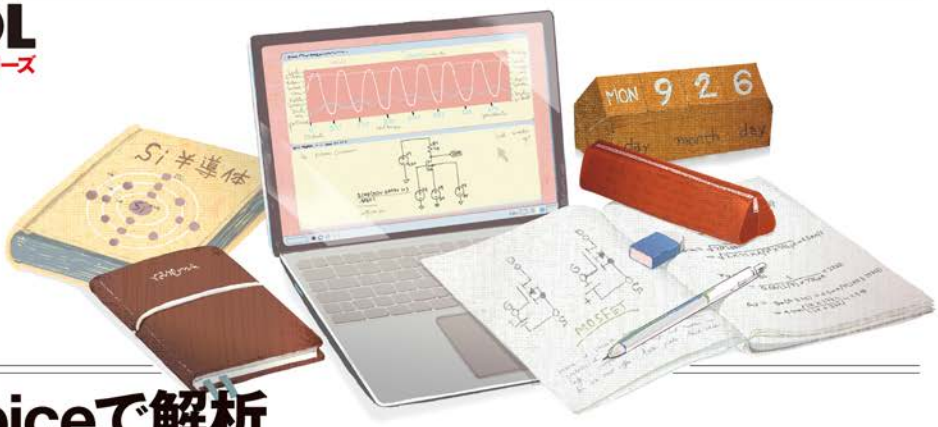
TOOL
ツール活用シリーズ



LTspiceで解析 CMOS回路入門

［理解度チェック演習問題付き］

シリコン構造から超基本アナログ回路まで

長野英生 著
Hideo Nagano

このPDFは，CQ出版社発売の書籍
「LTspiceで解析 CMOS回路入門［理解度チェック演習問題付き］」の一部見本です．
内容・購入方法については，下記のWebサイトをご覧ください．
内容：https://shop.cqpub.co.jp/hanbai/books/49/49561.html

見本

CQ出版社

本書を読む前に

(1)本書は，シリコンの構造から，MOSトランジスタの増幅回路，カレント・ミラー，差動増幅，バンドギャップ…今更聞けない基本アナログ回路までを，しっかり解説する常識ハンドブックです．これからCMOSアナログ回路を学ぼうとする新人エンジニアや学生，既存の専門書を読んだけれどよく分からないので，もう一度学習し直したいエンジニアにお勧めです．

(2)本書で使用する電子回路シミュレータ「LTspice」，および第9章で示したシミュレーション・データは，インターネットを使用してダウンロードする必要があります．インターネット環境が整っていない方はご注意ください．

(3)本書を読んだだけでは，CMOSアナログ回路の設計はできません．本書で示すのは，設計時に必要な前提知識となる基礎技術のみです．本書で基礎技術をしっかり理解した後に，参考文献に示した書籍などを読み，設計技術を身に付けてください．

(4)本書と連動したセミナを企画しています．セミナに関する情報は，CQエレクトロニクス・セミナのWebサイト(https://seminar.cqpub.co.jp/)をご覧ください．

(5)本書籍に掲載された技術情報を利用して生じたトラブルについて，筆者ならびにCQ出版株式会社は責任を負いかねますので，ご了承ください．

見本

はじめに

現在のSoC(System on Chip)はCMOS(Complementary Metal Oxide Semiconductor)プロセスで設計されており，A-D/D-Aコンバータや高速インターフェース回路など，多数のアナログ回路が1チップに集積されています．これらのアナログ回路の性能が最終製品の性能を決めてしまう場合も多く，CMOSアナログ回路の知識は今や半導体開発に従事するエンジニアのみならず，セットメーカでSoCを扱うエンジニアまでもが身に付ける必要が生じています．

CMOSアナログ回路はディジタル回路と異なり，半導体物理，トランジスタの動作原理，小信号解析，交流理論，制御理論などの広範な知識が必要で，その回路動作は初学者にとって難解です．

これまでCMOSアナログ回路関連の良書が多数出版されていますが，半導体物理から難解なスイッチド・キャパシタ，フィルタ，PLL(Phase Locked Loop)，A-D/D-Aコンバータ，オペアンプまでの非常に広い範囲を1冊でカバーしようとするものがほとんどでした．そのため，基本回路の理解が不十分なまま，難解な回路の説明を読み進めた場合，最後まで読んでも結局よく分からなかったり，前提としている電気回路の予備知識のレベルが違うため理解が進まなかったり，紙面の都合上，式の導出が省略されているためどうやって結論が導かれるのかよく分からないという，初学者の声が多く聞かれました．

上記のような消化不良を起こす原因を考えてみますと，複雑なCMOSアナログ回路も，基本となるトランジスタ回路とその組み合わせで構成されているものがほとんどですが，この基本トランジスタ回路の動作理解が不十分なまま，高度なアナログ回路を理解しようとしていることだと思われます．

本書では，基本となる3つのトランジスタ回路とその組み合わせ回路の動作解説，およびその演習に多くのページを割き，しっかりと基礎力を身に付けられるように心掛けまし

見本

た．また，その回路動作の説明には，簡単な方程式で解くことができる小信号解析を用い，その計算過程を省略することなく丁寧に導出することで，最終結果をしっかり理解できるように紙面を割きました．

また，MOSトランジスタのアナログ的な電圧電流の挙動の理解が不十分なまま高度なアナログ回路を読み込むことも，消化不良を起こす原因の1つと思われます．本書では，半導体物理の初歩から分かりやすく解説し，トランジスタの電圧電流式を丁寧に導出することで，3つの基本トランジスタのアナログ的挙動をより深く理解できるように心掛けました．

そして，アナログ回路を学習していくと，周波数特性でつまずくことがしばしば見受けられます．直流特性と異なり，周波数特性の理解には，複素数，交流理論，ラプラス変換，ポール，ゼロなどの基礎知識が必要です．これらは昔に学んだが忘れてしまったということが多く，これらの基本事項について初歩から復習することで，周波数特性を理解しやすいように工夫しました．本書は，簡単な微積分や三角関数，および複素数とラプラス変換の初歩以外の予備知識はなくとも理解できるように構成しています．

本書は，これからCMOSアナログ回路を学ぼうとするエンジニアや，既存の専門書を一度読んだがよく分からないので，もう一度学習し直したいというエンジニアを対象に，トランジスタの基礎部分にのみフォーカスし，前提となる基礎知識から丁寧に説明し，図表を多用することで基本技術を学べるようにまとめました．さらに，巻末にLTspiceによる演習問題を提示しており，本書で学習した知識をシミュレーションで確認できるようにもしました．本書でトランジスタ回路をしっかり学んだのちに，本格的な専門書を読んでいただけるようになることを希望します．

本書がこれからCMOSアナログ回路を学ぶエンジニアや，大学の電気電子系学生の理解の一助になれば幸いです．

最後に，本書を詳細かつ分かりやすく編集いただきましたCQ出版社の高橋 舞氏に心から感謝します．

2020年8月　長野 英生

見本

第 1 章

電子回路シミュレータの準備

トランジスタの動作理論を理解し，それを自分のものにして高度なアナログ回路を設計していくためには，実際に手を動かして演習することが必要です．本章では，その助けとなる電子回路シミュレータについて説明します．

なお，電子回路シミュレータを使った演習の重要性を示すため，本内容を第1章としましたが，トランジスタの動作理論を解説している第2章から第8章を先に読んでいただき，その後，本章に戻っていただいても結構です．

1.1 ―― シミュレータの活用

● 演習は大切

第2章から第8章までの解説を読むことで，CMOSトランジスタの動作理論を理解できます．しかし，CMOSトランジスタの回路動作の理解を深めるため，実際に手を動かして計算することが必要です．第9章に演習問題を掲載しています．この問題を解くことにより，理論と回路動作の確認ができます．

見本

第 2 章

半導体物理の基礎知識

1か0かの論理演算で答えが出るディジタル回路とは異なり，アナログ回路は連続的に変化する電圧と電流を取り扱います．よって，アナログ的な電圧と電流の挙動を理解することは回路動作の理解を深めるために大変重要です．

本章では，CMOSアナログ回路の説明をする前に，CMOSデバイスの材料である半導体の物性の基本事項について解説します．

2.1 ―― 半導体とは

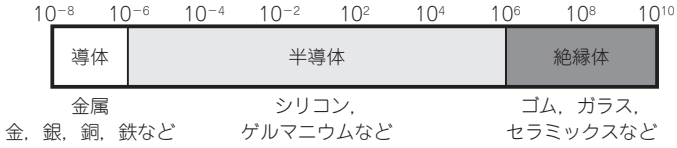
● 特徴

物質には金属のように電気をよく通す「導体」と，ゴムやプラスチックのように電気をほとんど通さない「絶縁体」以外に，その中間の性質を備えた物質「半導体」が存在します．

図2.1に物質の抵抗率を示します．半導体は中間的な電気伝導性が特徴です．

金属は温度が上がるほど電気抵抗が大きくなり，電流が流れにくくなります．これは，温度が上がると金属の原子核の振動が激しくなり，振動により自由電子の流れを妨げるからです．

半導体は温度が上がると電気抵抗が小さくなり，電流が流れやすくなります．これは，後述のホールや自由電子というキャリアによって電流が流れて温度が上がると，価電子が熱励起されキャリア自体の数が増加し，電流が流れやすくなるからです．また，半導体は微量な不純物[P(リン)，B(ホウ素)など]を混ぜることで，電流の流れる量を調整できることも特徴の1つです．



〈図2.1〉物質の抵抗率［Ω・m］
金属と絶縁体の中間の電気抵抗を有するのが半導体の特徴

見本

Appendix 1
バイポーラ・トランジスタ

昔は，アナログ回路はバイポーラ，ディジタル回路はCMOSという時代がありました．現在は，CMOSプロセスの目覚ましい進化とSoC化が一気に進み，多くのアナログ回路がCMOSプロセスに集積されるようになりました．しかし，第6章で解説するバンドギャップ・リファレンス回路のように，CMOSプロセスでも寄生バイポーラ・トランジスタを使用することがあります．

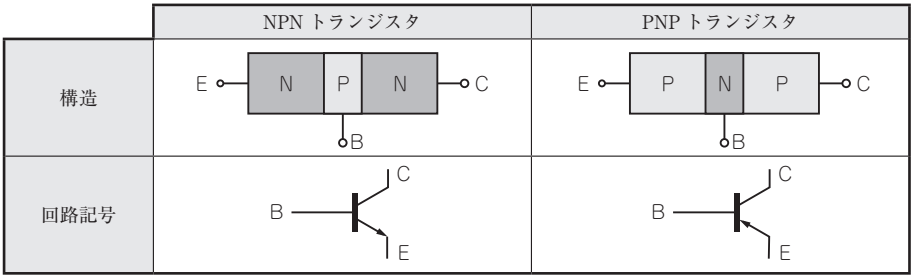
本書はCMOSの書籍のため，バイポーラ・トランジスタの動作を細かく説明はしませんが，簡単に動作原理については示しておきたいと思います．

A1.1 —— 構造

バイポーラ・トランジスタの構造と回路記号を**図A1.1**に示します．

バイポーラ・トランジスタは，3つの層で構成されています．中央部がベース(B)で，その両側にあるのがエミッタ(E)とコレクタ(C)です．ベース領域は薄く，不純物濃度が極めて低く，エミッタ領域は不純物濃度が高くなっているのが特徴です．

3つの層の作り方で，NPNトランジスタとPNPトランジスタの2種類あります．NPNトランジスタはNMOSトランジスタ，PNPトランジスタはPMOSトランジスタと比較すると理解しやすいです．



〈図A1.1〉バイポーラ・トランジスタの構造と回路記号

見本

第4章

小信号解析

第3章で学んだMOSトランジスタの電圧電流式は2次式になっています．この数式を用いて，実際のアナログ回路の電流や電圧を机上計算すると大変煩雑になります．本章ではアナログ回路の信号振幅が小さいことを利用して，電圧電流式を1次式に線形近似することで計算を簡単にする方法を説明します．

4.1 ―― 小信号と大信号

大信号とは振幅の大きい信号のことで，小信号とは振幅の小さい信号のことです．**図4.1**に大信号と小信号の違いを示します．

● 大信号で解析する

大信号ではDCバイアス点が決まっておらず，振幅が大きい信号が入力されます[**図4.1(a)**]．MOSトランジスタは，非飽和領域と飽和領域のそれぞれで電圧電流が2次式で定義されています．そのため，入力電圧のバイアス状態に応じて非飽和領域と飽和領域を使い分け，それぞれの電圧電流式に入力電圧を入力し，出力電圧を求めることが必要です．大変面倒な計算になります．

● 小信号で解析する

小信号ではDCバイアス点が決まっており，信号振幅が小さい信号が入力されます[**図4.1(b)**]．例えば，SoCに入力されるA-Dコンバータの電圧，USBやPCI Express，SATA，HDMI，DisplayPortなど高速インターフェースにおいても，伝送信号は小振幅が使われています．

アナログ回路において，MOSトランジスタの電圧電流式は2次式になります．2次式だと入力に対して出力が非線形になり計算が煩雑になります．しかし，入力の信号振幅が小さい場合は，比例係数(g_mなど)を使って1次式に近似できるため，入力に対して出力が線形(直線)とみなせて計算が簡単になります．回路の主要特性である増幅率を導く際は，

見本

第 5 章

3つの基本トランジスタ回路

複雑なCMOS回路も，本章で示す基本トランジスタ回路とその組み合わせで構成されており，基本回路の動作をしっかり理解することがCMOS回路の理解のために大変重要になります．

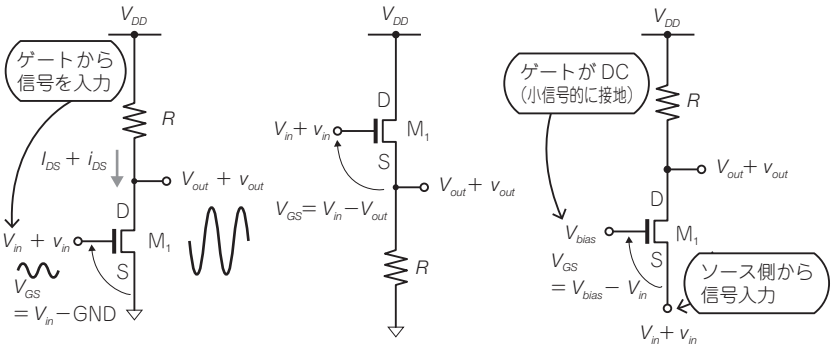
本章では3つの基本回路の特性と，その組み合わせ回路の動作を繰り返し演習しながら習得します．動作の説明には第4章で解説した小信号解析を使いますので，その使い方にも慣れていってください．

5.1 ―― 3つの接地回路

トランジスタは，どのピンを接地させるかによってその特性が異なります．**図5.1**に，CMOSアナログの3つの基本回路である，ソース接地回路，ドレイン接地回路(ソース・フォロア)，ゲート接地回路を示します．

ソース接地回路の特徴は，大きな電圧利得にあります．高周波信号のゲイン・ステージなど，小振幅信号を増幅したい用途に使われます[**図5.1**(a)]．

ドレイン接地回路の特徴は，低い出力インピーダンスと1倍に近い(約0.7)電圧利得に



(a) ソース接地回路　(b) ドレイン接地回路　(c) ゲート接地回路

〈図5.1〉3つの基本トランジスタ回路

見本

Appendix 2

電圧利得，出力インピーダンス，入力インピーダンスの重要性

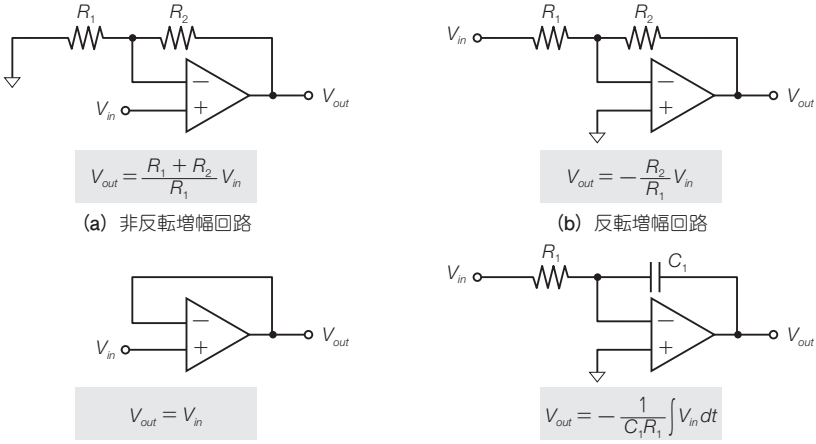
本書では，基本回路の電圧利得，入力インピーダンス，出力インピーダンスを繰り返し示しています．これらがなぜ必要なのか，オペアンプと高速インターフェースを例に説明します．

オペアンプの例では動作周波数が十分低速であることを前提に，高速インターフェースの例では信号周波数が高いことを前提に，電圧利得，入力インピーダンス，出力インピーダンスの必要性を示します．動作周波数が高い場合は，オペアンプとは違った見方が必要になります．

A2.1 —— オペアンプを例に考える

● オペアンプとは

オペアンプは，非反転入力端子(＋)と反転入力端子(－)と，1つの出力端子を備えた差



〈図 A2.1〉オペアンプ回路の例

見本

第 6 章

応用① 定電流 / 定電圧回路

実際のCMOSアナログ回路では，回路に印加するバイアス電圧やバイアス電流を生成する回路が必要です．高精度なアナログ回路ではカスコード回路が用いられます．

本章ではバイアス回路，カレント・ミラー回路，カスコード回路について学びます．これらの回路にも基本トランジスタ回路が使われています．

6.1 ―― 定電流回路

● オーバ・ドライブ電圧と飽和ドレイン電圧

飽和領域で動作するMOSトランジスタは，電圧電流式の2乗則に従うため，ドレイン電流は$V_{GS} - V_{th}$の2乗に比例します．

第3章で説明したようにMOSトランジスタは，$V_{DS} > V_{GS} - V_{th}$なら飽和領域で動作します．$V_{GS} - V_{th}$は飽和領域にバイアスするための最小のV_{DS}になり，飽和ドレイン電圧V_{DSat}といいます．また，$V_{GS} - V_{th}$はV_{th}を超えて実効的に働くゲート電圧を意味し，オーバ・ドライブ電圧V_{OD}といいます．CMOSアナログ回路で頻繁に使う重要なパラメータになります．

MOSトランジスタの電圧電流式の2乗則は，式(6.1)になります．

$$I_{DS} = \frac{\beta}{2}(V_{GS} - V_{th})^2 \quad \cdots\cdots (6.1)$$

よって，オーバ・ドライブ電圧V_{OD}は式(6.2)になります．

$$V_{OD} \equiv V_{GS} - V_{th} = \sqrt{\frac{2I_{DS}}{\beta}}$$

$$V_{GS} = V_{th} + V_{OD} \quad \cdots\cdots (6.2)$$

図6.1に示すように，V_{OD}は飽和領域で動作するために，V_{th}に対して余分に印加する必

見本

第 7 章

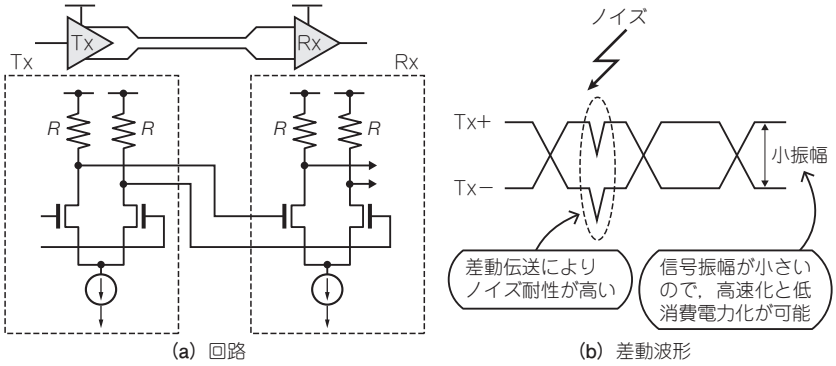
応用② 差動増幅回路

本章では，基本トランジスタ回路の組み合わせで構成される差動増幅回路について解説します．差動増幅回路は2つの入力信号の差分を増幅する回路であり，オペアンプやフィルタ，高速インターフェース回路などに広く利用されています．

7.1 ―― 差動増幅回路とは

● 用途

図7.1に示すように，差動増幅回路は2つの入力信号の差電圧を増幅するため，外来ノイズが入っても差動電圧は一定に保つことができ，ノイズに強くすることが可能です．この差動増幅回路を応用した差動伝送回路は信号振幅が小さいので，信号を高速に伝送できます．さらに，信号振幅が従来の3.3V伝送時と比べて1/10程度になるため，消費電力も低減できます．このような利点から差動伝送回路は，機器間および機器内の高速インターフェース回路などに広く使われています．



〈図7.1〉機器間で使用される高速差動伝送回路
外来ノイズに強いため，機器間の高速・長距離伝送に広く用いられている

見本

第 8 章

周波数特性

これまで学んだ回路は，周波数依存性を考慮しないDC（直流）レベルでの動作でした．実際のCMOSアナログ回路は高速で動作するものも多数あり，周波数特性を理解することが求められます．

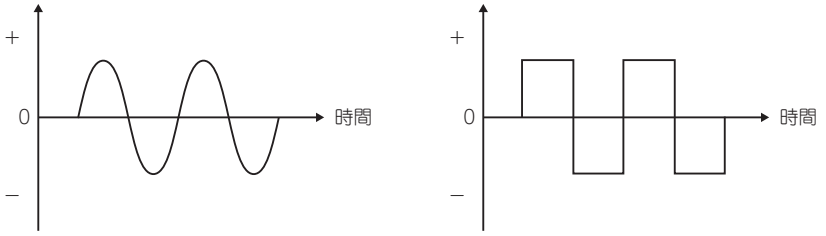
本章では交流理論の基本から復習することで，基本トランジスタ回路の周波数応答を分かりやすく解説します．

8.1 —— 周波数特性を理解するための基礎知識

● 正弦波交流

交流とは，電圧あるいは電流の大きさと方向（＋／－）が一定周期で繰り返す信号のことです（図8.1）．

代表的な交流信号に正弦波交流があります．図8.2に示すように，正弦波交流は，原点を中心に一定速度で円周上を回転する点の軌跡をプロットとしたもので，三角関数で表されます．



（a）正弦波　　（b）矩形波

〈図8.1〉交流信号の例
周期的に大きさとその正負が変化する電圧・電流信号を交流という

見本