１．　電子回路とその学び方

この章では電子回路とは何か、アナログ回路とデジタル回路、連続時間型回路と離散時間型回路、周波数領域と時間領域での解析などの基礎概念について簡単に述べ、その理解に必要な知識体系について概説する。

1.1　電子回路とは

電子回路とはトランジスタやダイオードなどの半導体による能動素子、もしくはこれら能動素子と抵抗、容量、インダクタなどの受動素子から成る回路を指す。

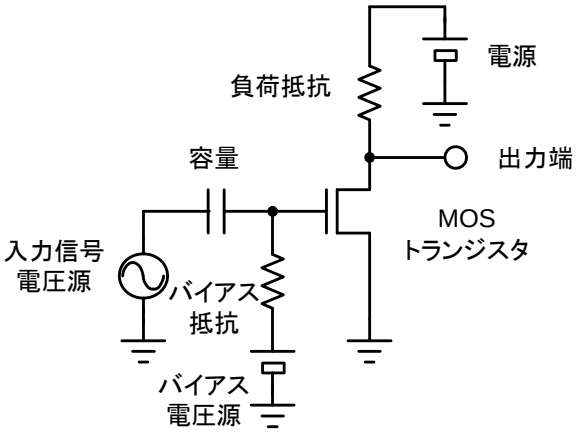

図 1.1 電子回路の一例

例えば、図 1.1 は MOS トランジスタを用いて交流電圧を増幅する最も簡単な電子回路を示しており、出力端には入力信号電圧源の電圧の数倍の電圧が得られる。トランジスタのような能動素子と受動素子を適切に結合することで、受動素子のみで構成される電気回路では実現できない増幅、変調、発振、周波数選択、整流、アナログ・デジタル変換、デジタル・アナログ変換などの各種機能を実現できる。

1.2　アナログ回路とデジタル回路

アナログ回路とは電圧、電流、もしくは電荷などの電気量を連続的に扱う回路であり、デジタル回路とはこれら電気量を[1]もしくは[0]のように離散的に扱うものである。値を離散化することで電気量を抽象化することができるため、ブール代数のように、物理的な制約を離れて、より汎用的な抽象化された表現を獲得することができる。このため雑音や温度変動などの物理的な変動を受けにくい強固なシステムを構築することができる。

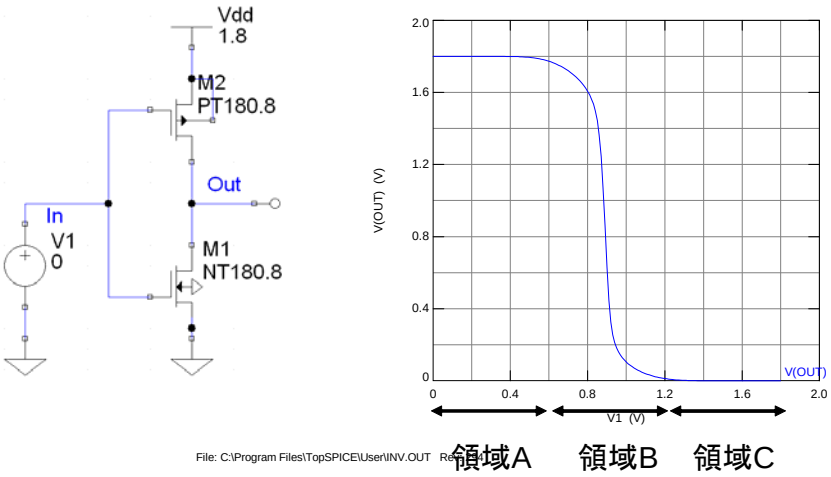

図 1.2 CMOS インバータとその入出力特性

例えば、図 1.2 に示す CMOS インバータにおいてはその入出力特性は入力電圧が 0V から 0.6V 程度では出力電圧は 1.8V で一定である。領域 B の 0.6V から 1.2V ではインバータの出力電圧は 1.8V から 0V 付近まで大きく変化する。領域 C の 1.2V から 1.8V では出力電圧は 0V で一定である。

したがって、領域 A と領域 C を用いることで雑音や温度変動に対して変化が少ないデジタル回路が実現できる。

しかしながら、この回路をアナログ回路として用いることもできる。例えば変化の大きい領域 B を用いることで増幅器を実現できる。

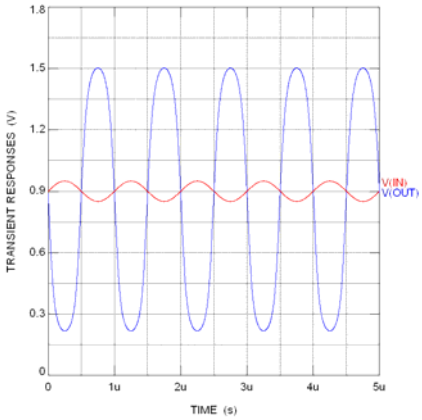

図 1.3 CMOS インバータの入出力波形

図 1.3 は図 1.2 に示した CMOS インバータに 0.9V を中心に 100mV$_{pp}$ の 1MHz の正弦波を入力したときの出力波形を示している。約 1.3V$_{pp}$ の出力信号が得られているので、約 13

倍の利得がある増幅器となる。

このように、アナログ電子回路とデジタル電子回路は回路の構成ではなく、その動作状態により区分される。

1.3 アナログ電子回路とデジタル電子回路の使い分け

現代の電子機器はアナログ電子回路とデジタル電子回路の両方の回路が用いられる。

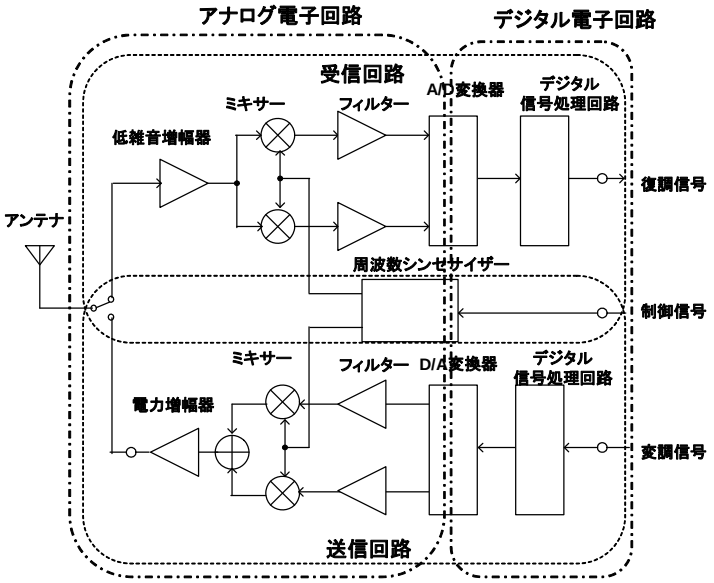

図 1.4 無線通信システムの構成

図 1.4 に無線通信システムの構成を示す。現代の無線通信システムはデジタル情報を高周波信号を用いて送受するが、入出力信号はデジタル信号であっても、送信においては D/A 変換器により一旦アナログ信号に変換されてからミキサーで高周波信号に重畳されて電波となって遠方に伝わり、受信においては微弱な高周波信号を低雑音増幅器で増幅し、ミキサーでより低い周波数のアナログ信号に変換され、A/D 変換器によりデジタル信号に変換されて復調信号が取り出される。したがって、アナログ電子回路とデジタル電子回路の両方の回路が必要である。また A/D 変換器、D/A 変換器、周波数シンセサイザーなどの本質的にアナログ電子回路とデジタル電子回路の混合した回路も必要である。

1.4 連続時間信号と離散時間信号

電子回路で取り扱う信号には連続時間信号と離散時間信号があり、それらの信号を処理する回路を連続時間信号処理回路と離散時間信号処理回路という。連続時間信号とは図 1.5 (a)に示すように時間的に連続な信号であり、通常のアナログ回路の信号がこれに相当する。これに対し、図 1.5 (b)に示すように信号を標本化し、一定周期 T_s で信号を抜き取ると図 1.5 (c)に示すように一定周期 T_s のタイミングエッジにのみに信号が存在するか、もしくは一定

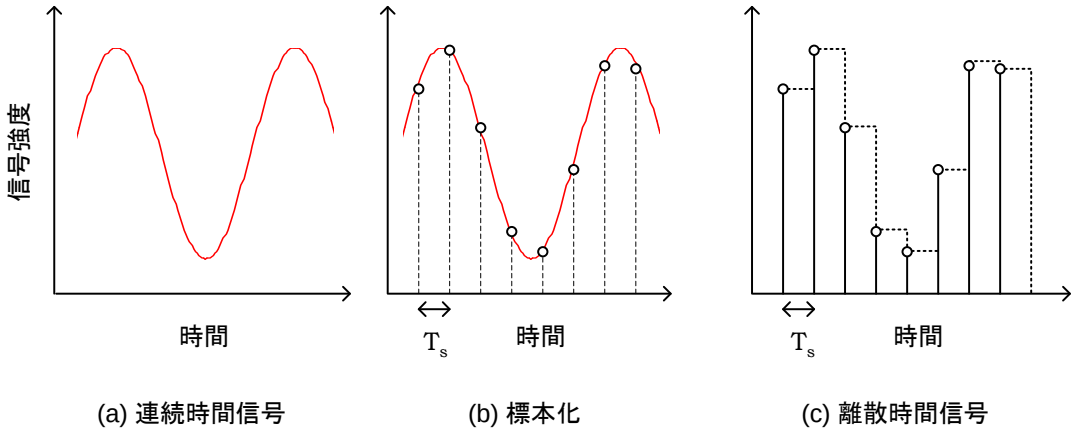

図 1.5 連続時間信号、標本化、離散時間信号

周期の間同一の信号値を保持する信号を時間軸が離散化していることから離散時間信号と呼び、この信号を処理する回路を離散時間信号処理回路と呼ぶ。

デジタル信号処理回路がその代表であるが、アナログ信号に対しても離散時間信号処理回路があり、スイッチトキャパシタ回路がその代表的な回路である。ただし、アナログ離散時間信号は電圧や電流、電荷などの信号量は連続であるのに対しデジタル離散時間信号は信号量が有限語長に離散化されており、この作用を量子化という。A/D 変換回路により連続な信号量は量子化される。

1.4 電子回路設計に必要な基礎知識

電子回路は図 1.6 に示すようにダイオードやバイポーラトランジスタ、MOS トランジスタなどの能動素子、抵抗、容量、インダクタなどの受動素子から成る回路であり、電圧源もしくは電流源などの信号源による入力信号に対してどのような出力信号特性になるかが設計・解析上重要である。

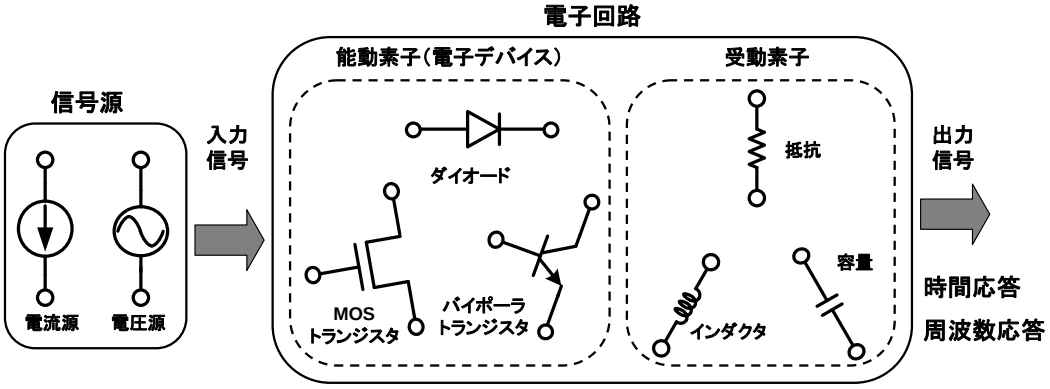

図 1.6 電子回路とその基本構成要素

電子回路の応答は図 1.7 に示すように時間応答と周波数応答がある。

時間応答とは時間的に変化する入力信号に対して、電子回路からのどのような出力信号波形が得られるかということであり、周波数応答とはある周波数の入力正弦波に対する出力正弦波の利得や位相を示すものであるが、周波数応答の場合は実際の正弦波を入力した応答ではなく、伝達関数から求められる。

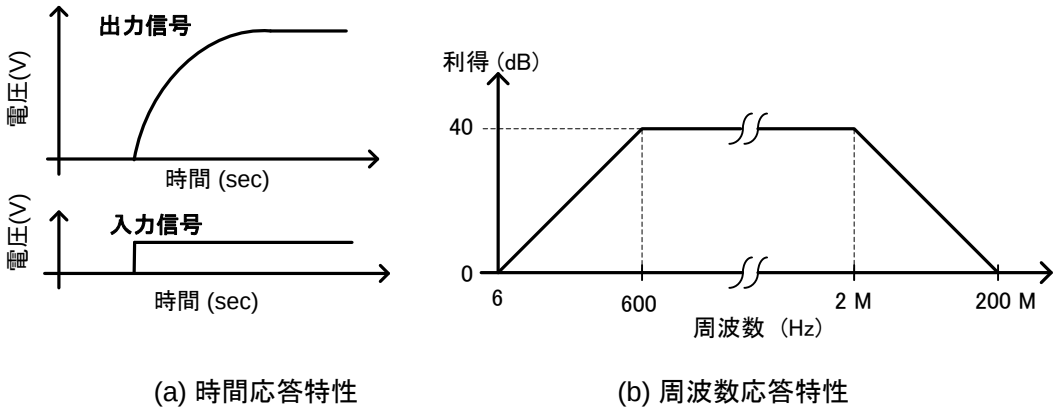

図 1.7 時間応答特性と周波数応答特性

このような応答特性を得るには、まず電子デバイスの動作原理とそれに基づく能動素子の電圧・電流特性を求めることが必要だが、能動素子は非線形なのでアナログ回路の解析においてはバイアス状態を設定し、そのバイアス状態における微少な電圧もしくは電流変化を線形近似することが良く行われる。

例えば、図 1.8 を能動素子の電圧・電流もしくは電流・電圧特性をだと仮定すると、その関数 f(x)をテイラー展開を用いて次式のように近似して線形化することが一般的である。

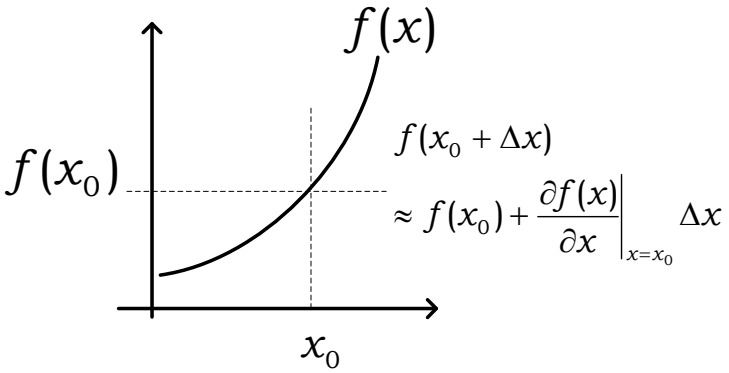

図 1.8 テイラー展開を用いた能動素子の線形化

つまり、バイアス状態の入力変数を x0 とするとこの値近傍の出力 y は、

$$y = f(x_0 + \Delta x) \approx f(x_0) + \left.\frac{\partial f(x)}{\partial x}\right|_{x=x_0} \Delta x \quad (1.1)$$

出力 y において y のバイアス点からの変化Δy は、

$$\Delta y = \left.\frac{\partial f(x)}{\partial x}\right|_{x=x_0} \Delta x \, (1.2)$$

となるので入力変化に対する出力変化の入出力関係は線形近似できる。

能動素子はこのような線形近似を行うと受動素子としての取り扱いが容易になり、キルヒホッフの法則を用いて回路網方程式を立てることができる。ただし、容量やインダクタの電圧・電流式は微分方程式になる。この微分方程式は線形であるので連立方程式を解くことで電圧や電流を求めることができるが、このままでは取り扱いがやっかいなのでラプラス変換を用いて微分方程式を線形化する。

ラプラス変換後は入出力伝達関数 H(s)、インピーダンス関数 Z(s)、アドミッタンス関数 Y(s)は複素周波数 s の関数になり、一般に次式のように表現できる。

$$N(s) = H\frac{(s - z_1)(s - z_2)\ldots\ldots(s - z_n)}{(s - p_1)(s - p_2)\ldots\ldots(s - p_m)} \quad (1.3)$$

ここで、z_i をゼロ、p_i をポールと呼ぶ。

このような関数が得られると、これよりヘビサイドの展開定理を用いることでラプラス逆変換が容易になり、ラプラス逆変換から時間応答が求められる。周波数応答は $s \to j\omega$ と変換することにより得られる。したがって連続時間信号処理回路においては回路網方程式からラプラス表記の各種関数を求めることにより時間応答、周波数応答を求めることができる。

離散時間処理回路においては標本化関数をラプラス変換することで得られる z 変換が用いられる。ラプラス変換と同様に z 用いて伝達関数を算出することで時間応答、周波数応答を求めることができる。