



第2章 2入力NANDを手作りして デジタル動作を理解する

トランジスタで作る NAND ゲート回路とその動作

藤平 雄二
Yuji Fujihira

この章では、実際に論理回路をトランジスタで製作します。論理回路を確実に理解するには、実際に製作してみるのが何といても一番です。

なお、今回製作する TTL NAND は、現代ではほとんど使用されていません。しかし **TTL NAND を確実に理解しておく**と、**CMOS などのほかの論理素子を理解するのは容易**です。TTL NAND は論理素子の基本だからです。

● DTL と TTL

もっとも基本的な NAND に DTL NAND があります。DTL は Diode - Transistor Logic の略で、ダイオードとトランジスタによる論理回路という意味です。

一方、TTL は Transistor - Transistor Logic の略で、トランジスタとトランジスタによる論理回路という意味ですが、何とも奇妙な名称です。実は、DTL のダイオードをトランジスタに置き換えて TTL ができています。そのためにこのような名称になったのです。

TTL は DTL を改良したものです。ですから、TTL を理解するためには、まず DTL を理解する必要があります。

ダイオードとトランジスタの 基本動作

● ダイオードのふるまい

ダイオードは単方向にしか電流を流しません。図 2-1(a) のようにアノード (Anode ; A) をプラス、カソード (Cathode ; K) をマイナスにしたときだけ電流

が流れます。このとき、ダイオード両端の電圧 (順方向電圧、以降 V_F で表す) がどうなるかが非常に重要です。図 2-1(b) に小信号用ダイオード 1S2076A の V_F の特性を示します。この図から、電流が流れているときは V_F が 0.6 ~ 0.7 V でほぼ一定であり、 V_F が 0.5 V 以下ではほとんど電流が流れないことがわかります。

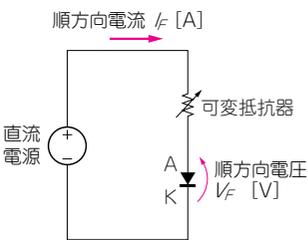
以降、DTL などの動作を解析するときは、 V_F 以下の電圧ではダイオードに電流が流れず、また電流が流れているときは $V_F = 0.6$ V で一定とします。このようにダイオードの特性を単純化しても、実際の動作をほぼ正しく解析できます。実際の動作の解析を簡単にするために、このように特性を単純化して考えることは重要です。

● トランジスタのふるまい

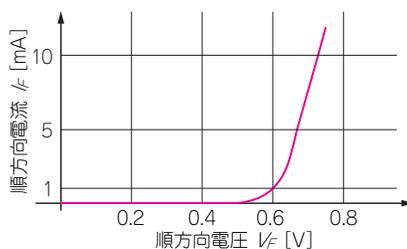
トランジスタのベース-エミッタ間もダイオードですので、ダイオードと同じ電流-電圧特性です。ベース-エミッタ間電圧 (V_{BE}) はダイオードの V_F に対応します。ただし、電流はコレクタ電流なので注意してください。厳密にいうとベース電流とコレクタ電流の合計ですが、ベース電流はコレクタ電流に比べて非常に小さいので、コレクタ電流だけで考えて十分です。

ダイオードと同様に単純化して、以降では、 V_{BE} が 0.6 V 以下ではベース電流とコレクタ電流が流れず、ベース電流とコレクタ電流が流れているときは $V_{BE} = 0.6$ V で一定とします。

図 2-2 にトランジスタの三つの動作状態を示しま



(a) 測定回路



(b) 順方向特性

図 2-1
ダイオードの順方向特性

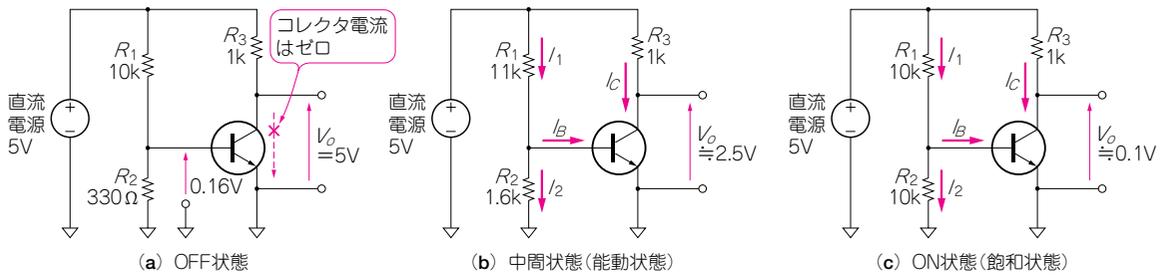


図2-2 トランジスタの三つの状態 ($V_{BE} = 0.6\text{ V}$, $h_{FE} = 100$ としたとき)

す。同じ回路構成ですが、抵抗の値によってトランジスタの動作状態が異なります。本当に図のようになるか実際に確かめてみましょう。

▶ OFF 状態 [図2-2(a)]

ベース電流 I_B が流れていないときの R_2 の両端電圧は、次のように計算できます。

$$5\text{ V} \times \frac{R_2}{R_1 + R_2} = 5 \times \frac{330}{10 \times 10^3 + 330} = 0.16\text{ V}$$

この値は 0.6 V 以下なので、トランジスタのベース電流 I_B が流れません。よって、コレクタ電流 I_C は流れません。出力電圧 V_O は、

$$V_O = 5\text{ V} - R_3 I_C$$

で表されます。ここで $I_C = 0$ なので、 $V_O = 5\text{ V}$ となります。この状態が OFF 状態です。

▶ 中間状態 [図2-2(b)]

まず、ベース電流 I_B が流れていないとしたときの R_2 両端電圧は、先と同様に計算できます。

$$5\text{ V} \times \frac{R_2}{R_1 + R_2} = 5 \times \frac{1.6}{11 + 1.6} = 0.63\text{ V}$$

この値は 0.6 V 以上なので、トランジスタのベース電流 I_B が流れます。そこで、次にベース電流 I_B を求めます。

$$I_1 = \frac{5\text{ V} - V_{BE}}{R_1} = \frac{5 - 0.6}{11 \times 10^3} = 0.4\text{ mA}$$

$$I_2 = \frac{V_{BE}}{R_2} = \frac{0.6}{1.6 \times 10^3} = 0.375\text{ mA}$$

$I_B = I_1 - I_2$ です、

$$I_B = 0.4\text{ m} - 0.375\text{ m} = 0.025\text{ mA}$$

となります。

コレクタ電流 I_C は、次のように計算できます。

$$I_C = h_{FE} I_B = 100 \times 0.025 \times 10^{-3} = 2.5\text{ mA}$$

ここで h_{FE} は直流電流増幅率であり、ここでは 100 と仮定しています。

$$V_O = 5\text{ V} - R_3 I_C$$

ですので、

$$V_O = 5 - 1 \times 10^3 \times 2.5 \times 10^{-3} = 2.5\text{ V}$$

となります。この値は電源の中間値であり、能動状態です。増幅器などの回路を構成するときのトランジスタの動作状態です。ここでは V_{BE} や h_{FE} を一定と仮定

しましたが、これらの値は温度などで変動します。したがって実際の増幅器などでは、このままの回路では使用できず、負帰還により動作点を安定させた回路が必要です。

▶ ON 状態 [図2-2(c)]

この回路も図(b)と同じくベース電流 I_B が流れます。

$$I_1 = \frac{5\text{ V} - V_{BE}}{R_1} = \frac{5 - 0.6}{10 \times 10^3} = 0.44\text{ mA}$$

$$I_2 = \frac{V_{BE}}{R_2} = \frac{0.6}{10 \times 10^3} = 0.06\text{ mA}$$

$$I_B = 0.44\text{ m} - 0.06\text{ m} = 0.38\text{ mA}$$

となります。

よって、この回路のコレクタ電流 I_C は、

$$I_C = h_{FE} I_B = 100 \times 0.38 \times 10^{-3} = 38\text{ mA}$$

となります。

ところで、トランジスタのコレクタ-エミッタ間電圧 (V_{CE}) が 0 V のときにコレクタ電流 I_C が最大値になりますが、その値は、

$$I_C = \frac{5\text{ V} - V_{CE}}{R_3} = \frac{5 - 0}{1 \times 10^3} = 5\text{ mA}$$

です。すなわち、 I_C として 38 mA 流せるだけのベース電流が流れているのですが、回路上で I_C の最大値が 5 mA に制限されています。このときのトランジスタの V_{CE} は 0 V 近くになり、 $V_{CE(\text{sat})}$ と呼ばれています。sat は saturation (飽和) の略です。たとえば、2SC1815 の $V_{CE(\text{sat})}$ は標準で 0.1 V ($I_C = 100\text{ mA}$, $I_B = 10\text{ mA}$) です。以上の状態が ON 状態です。

* * *

以上、図2-2の各状態を実際に確認しました。デジタル回路では、(a)のOFF状態と(c)のON状態を使用します。

DTL NANDゲートのトランジスタ回路

● DTLのNANDゲートの動作

図2-3(a)にDTL NANDの回路を示します。ここで V_{CC} とありますが、これは図2-2の回路のように電圧 V_{CC} の直流電源がこのラインと三角形で示されるグラウンド (GND) の間に接続されていることを示し