

・フリップフロップ

これまでの講義で扱ってきたデジタル回路は、その時点の入力の状態のみから出力状態が決まった。このような回路を組み合わせ回路と呼ぶ。

一方で、現在の入力状態のみでは出力状態が決まらず、過去の入力状態の記憶が出力状態に影響するタイプのデジタル回路もある。このような回路を順序回路と呼ぶ。

フリップフロップ(FFと略す)とは、1ビットの情報を記憶する、もっとも基本的な順序回路で、RSフリップフロップ、Dフリップフロップ、JKフリップフロップ、Tフリップフロップなどの、いくつかの種類がある。

・RSフリップフロップ

図1に示すように、NOR回路を2個使えば、1ビットの情報を記憶する回路ができる。これをRSフリップフロップ(RS-FF)と呼ぶ。

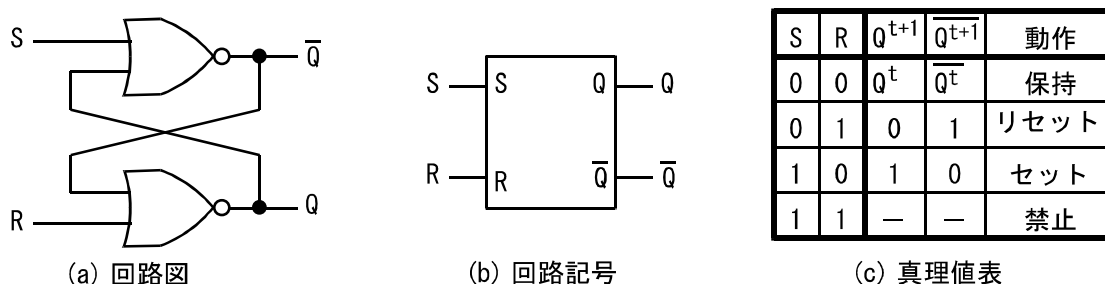


図1、NOR回路を2つ用いたRS-FF

この回路の動作を考えてみる。

まず $S=1$ かつ $R=0$ の状態について考える。図1(a)の回路図において、 $S=1$ より上の NOR 回路の出力が 0 となり、 $\overline{Q}=0$ となる。また $\overline{Q}=0$ かつ $R=0$ より下の NOR 回路の出力が 1 となり、 $Q=1$ となる。この様に $S=1$ かつ $R=0$ の入力状態は、出力 Q を 1 にする作用があり、これを「出力 Q をセットする」という。

次に $S=0$ かつ $R=1$ の状態について考える。 $R=1$ より下の NOR 回路の出力が 0 となり、 $Q=0$ となる。また $Q=0$ かつ $S=0$ より上の NOR 回路の出力が 1 となり、 $\overline{Q}=1$ となる。この様に、 $S=0$ かつ $R=1$ の入力状態は、出力 Q を 0 にする作用があり、これを「出力 Q をリセットする」という。

次に $S=R=0$ の状態について考える。図2(a)に示すように、NOR回路の片側の入力に0を加えると、NOT回路となる。よって、この時、図1(a)の回路は、図2(b)の右側のように、NOT回路2つをリング状に接続した回路と等価となっている。

図2(b)の右側の回路は、安定状態が2つある。

まず $Q=0$ であると仮定すると、上側の NOT 回路の出力は 1 となり、 $\overline{Q}=1$ となる。この $Q=0$ かつ $\overline{Q}=1$ という状態は、下側の NOT 回路の真理値表も満たし、安定状態になる。

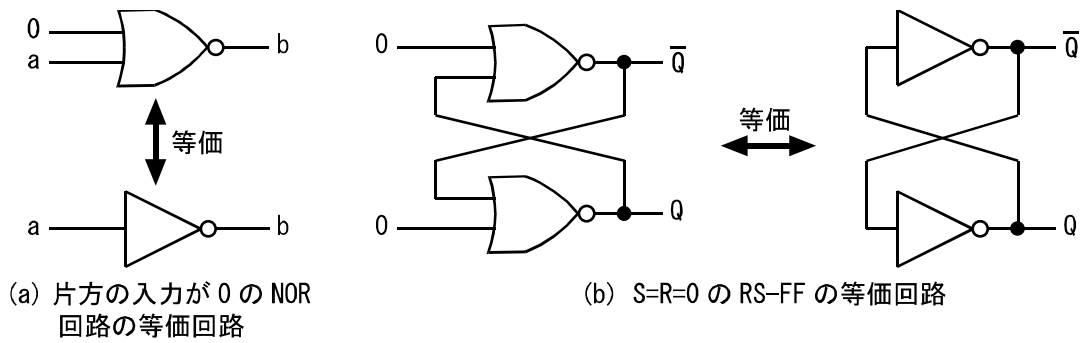


図 2、RS-FF に $S=R=0$ を加えた場合の動作

逆に $Q=1$ であると仮定すると、上側の NOT 回路の出力は 0 となり、 $\bar{Q}=0$ となる。この $Q=1$ かつ $\bar{Q}=0$ という状態は、下側の NOT 回路の真理値表も満たし、安定状態になる。

この様に、 $S=R=0$ の状態では 2 つの安定状態があるが、どちらの安定状態が実現するかは、その直前の入力状態による。直前が $S=1$ かつ $R=0$ の場合は、 $Q=1$ かつ $\bar{Q}=0$ の状態を継続する。また直前が $S=0$ かつ $R=1$ の場合は $Q=0$ かつ $\bar{Q}=1$ の状態を継続する。

この様に、 $S=0$ かつ $R=0$ の場合は直前の出力状態を保持する働きをする。図 1(c)の真理値表では、状態を保持する事を、 Q^{t+1} は Q^t となる、あるいは \bar{Q}^{t+1} は \bar{Q}^t となると表現している。 Q^{t+1} および \bar{Q}^{t+1} は、それぞれ Q および \bar{Q} の現在の値であり、 Q^t および \bar{Q}^t は Q および \bar{Q} の、直前の値である。

最後に $S=R=1$ の場合について考える。図 1(a)において、NOR 回路の一方の入力端子に 1 が入力されると、もう一方の入力端子の状態がどうであれ、出力は 0 に決まる。よってこの場合、出力状態は $Q=\bar{Q}=0$ となる。この場合は他の入力状態の場合と異なり、 Q と \bar{Q} が逆の論理にならない。この状態で、 $S=R=0$ に遷移すると、 $Q=0$ かつ $\bar{Q}=1$ の安定状態に移行するか、 $Q=1$ かつ $\bar{Q}=0$ の安定状態に移行するかは 2 つの NOR 回路の微妙な伝播遅延時間の違いなどに影響されて決まるので、非常に不安定になる。よって、RS-FF では S と R とを同時に 1 にする事を禁止している。

以上の様な性質により、RS-FF のタイミングチャートは、例えば図 3 の様になる。

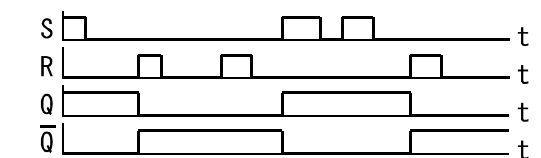


図 3、RS-FF のタイミングチャートの例

・特性方程式

ここで現在の出力 Q^{t+1} を、現在の入力 S および R と直前の出力 Q^t より求める論理式を作ってみよう。図 1(c)の真理値表より、次の 2 つの式ができることがわかる。

$$Q^{t+1} = \bar{S} \cdot \bar{R} \cdot Q^t + S \cdot \bar{R} \quad \dots (1) \quad (\text{保持、リセット、セットの条件より})$$

$$S \cdot R = 0 \quad \dots (2) \quad (\text{禁止条件より})$$

このような式をフリップフロップの特性方程式と呼ぶ。式(2)より $S \cdot R = 0$ であるから、 $S \cdot R$ を式(1)の右辺に足すと、次の様に式が簡略化できる。

$$\begin{aligned} Q^{t+1} &= \bar{S} \cdot \bar{R} \cdot Q^t + S \cdot \bar{R} + S \cdot R = \bar{S} \cdot \bar{R} \cdot Q^t + S \cdot (\bar{R} + R) = \bar{S} \cdot \bar{R} \cdot Q^t + S = \bar{S} \cdot \bar{R} \cdot Q^t + S \cdot (1 + \bar{R} \cdot Q^t) \\ &= S + (\bar{S} + S) \cdot \bar{R} \cdot Q^t = S + \bar{R} \cdot Q^t \quad \dots (1)' \end{aligned}$$

・クロック入力端子つき RS-FF

順序回路では、回路全体の動作の足並みをそろえるために、クロックと呼ばれる一定周期の信号を用いる場合が多い。RS-FF にクロック入力端子を追加し、クロックのタイミングに合わせて出力信号が更新されるようにしたものを、クロック入力端子付き RS-FF とよぶ。

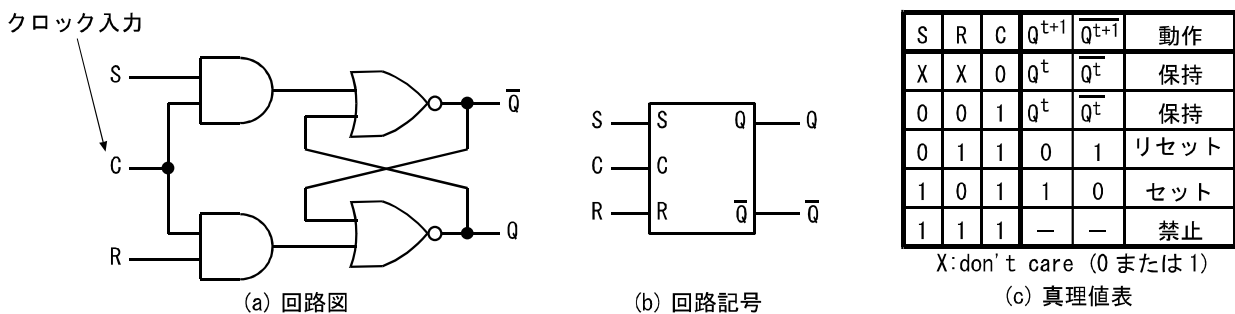


図 4、クロック入力端子付き RS-FF (正論理クロック)

図 4 に、回路構成の理解しやすい正論理クロックの RS-FF を示す。この図をみると、RS-FF の前段に 2 つの AND 回路が挿入されている事が分かる。

$C = 1$ の時は S と R の信号は、後段の RS-FF にそのまま伝わる。

一方で $C = 0$ の場合、 S と R の信号の状態にかかわらず、後段の RS-FF には 0 と 0 が入力される。

この場合、RS-FF は保持動作をする。

以上の様に、正論理クロック入力のある RS-FF は、 $C = 1$ の場合にのみ出力値の更新が行われる。この様子をタイミングチャートで表したのが図 5 である。

クロック入力のあるフリップフロップでは、図 6 に示すように、クロック信号のどのタイミングで動作するか

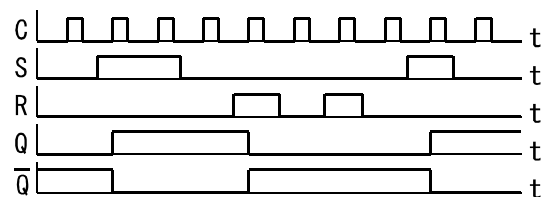


図 5、正論理クロック RS-FF のタイミングチャートの例

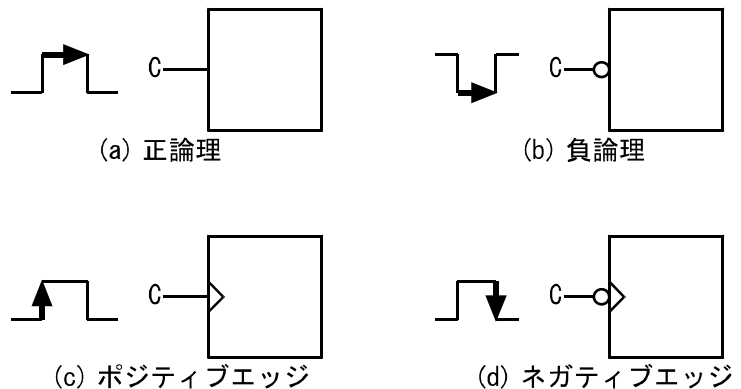


図 6、クロック入力付き FF の動作タイミングと回路記号

よって、4種類に分類できる。

正論理型と負論理型は、ある程度の時間範囲で動作するのに対して、ポジティブエッジ型とネガティブエッジ型はそれぞれクロック信号の立ち上がりと立ち下りの一瞬のみ動作する。

ネガティブエッジ型とポジティブエッジ型を、合わせてエッジトリガ型という。エッジトリガ型のフリップフロップは、正論理型や負論理型よりも回路構成が複雑にはなるが、利用のしやすさから、今日では一般的に使用されるようになっている。

・D フリップフロップ

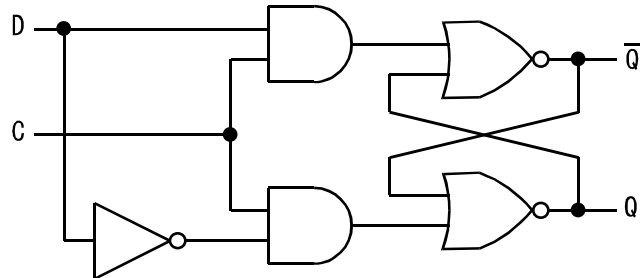
図7に示す正論理クロック D フリップフロップ(D-FF)は、 $C=1$ の時に、入力端子 D からデータを取り込んで、出力端子 Q に出力する。

図7(c)の真理値表より、この回路の特性方程式は次のようになる。

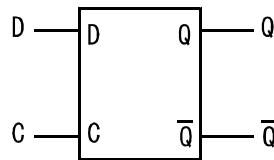
$$Q^{t+1} = \bar{C} \cdot Q^t + C \cdot D \quad \dots (3)$$

図8にポジティブエッジトリガのD-FFを示す。図8(a)はその回路図であるが、動作が若干複雑なので、詳しい説明はしないことにする。図8(c)の真理値表中の上矢印(↑)は、信号の立ち上りを、下矢印(↓)は信号の立ち下りを意味する。

図8(c)の C の立ち上がり(↑)になっている2行から、ポジティブエッジトリガ D-FF の特性方程式を求めると、次の式になる。



(a) 回路図



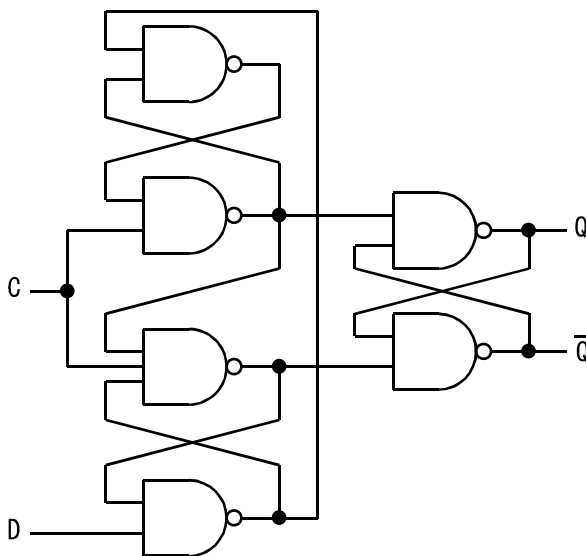
(b) 回路記号

D	C	Q^{t+1}	\bar{Q}^{t+1}	動作
X	0	Q^t	\bar{Q}^t	保持
0	1	0	1	リセット
1	1	1	0	セット

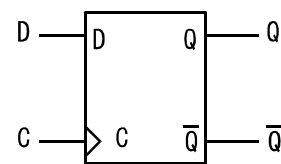
X: don't care

(c) 真理値表

図7、正論理クロック D フリップフロップ



(a) 回路図



(b) 回路記号

D	C	Q^{t+1}	\bar{Q}^{t+1}	動作
X	0	Q^t	\bar{Q}^t	保持
X	1	Q^t	\bar{Q}^t	保持
0	↑	0	1	リセット
1	↑	1	0	セット
X	↓	Q^t	\bar{Q}^t	保持

X: don't care

(c) 真理値表

図8、ポジティブエッジトリガ D-FF

$$Q^{t+1} = D \quad \dots (4)$$

図9のタイミングチャートに、正論理クロック D-FF と、ポジティブエッジトリガ D-FF の動作の違いを示す。

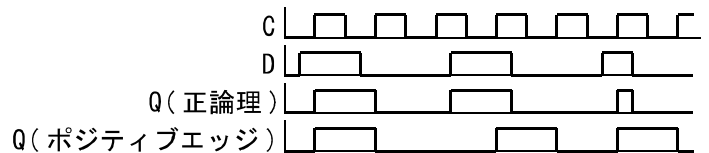


図9、正論理クロック D-FF とポジティブエッジトリガ D-FF の違い

・JK フリップフロップ

RS-FF では、2つの入力 S と R を同時に 1 にする事は禁止されていたが、JK フリップフロップ(JK-FF)はその難点を改良し、2つの入力を 1 にすると、出力を反転させるようにしたものである。改良に伴い、入力信号名を S から J、R から K に変えている。

図10に、ポジティブエッジトリガ JK-FF を示す。

図10(b)の C が立ち上がり(↑)になっている4行に注目して特性方程式を立ててみると、次の式になる。

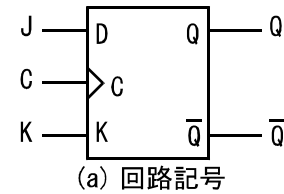
$$\begin{aligned} Q^{t+1} &= \bar{J} \cdot \bar{K} \cdot Q^t + J \cdot \bar{K} + J \cdot K \cdot \bar{Q}^t \\ &= \bar{J} \cdot \bar{K} \cdot Q^t + J \cdot \bar{K} \cdot (Q^t + \bar{Q}^t) + J \cdot K \cdot \bar{Q}^t \\ &= \bar{K} \cdot Q^t \cdot (\bar{J} + J) + J \cdot \bar{Q}^t \cdot (\bar{K} + K) \\ &= \bar{K} \cdot Q^t + J \cdot \bar{Q}^t \quad \dots (5) \end{aligned}$$

・T フリップフロップ

入力端子 T にパルスが入るたびに出力が反転するフリップフロップを T フリップフロップ(T-FF)と呼ぶ。図11にポジティブエッジトリガ T-FF を示す。

図11(b)の T が立ち上がり(↑)になっている1行に注目して特性方程式を立ててみると、次の式になる。

$$Q^{t+1} = \bar{Q}^t \quad \dots (6)$$

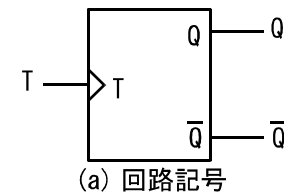


J	K	C	Q^{t+1}	\bar{Q}^{t+1}	動作
X	X	0	Q^t	\bar{Q}^t	保持
X	X	1	Q^t	\bar{Q}^t	保持
0	0	↑	Q^t	\bar{Q}^t	保持
0	1	↑	0	1	リセット
1	0	↑	1	0	セット
1	1	↑	\bar{Q}^t	Q^t	反転
X	X	↓	Q^t	\bar{Q}^t	保持

X: don't care

(b) 真理値表

図10、ポジティブエッジトリガ JK-FF



T	Q^{t+1}	\bar{Q}^{t+1}	動作
0	Q^{t+1}	\bar{Q}^{t+1}	保持
1	Q^{t+1}	\bar{Q}^{t+1}	保持
↑	\bar{Q}^{t+1}	Q^{t+1}	反転
↓	Q^{t+1}	\bar{Q}^{t+1}	保持

X: don't care

(b) 真理値表

図11、ポジティブエッジトリガ T-FF