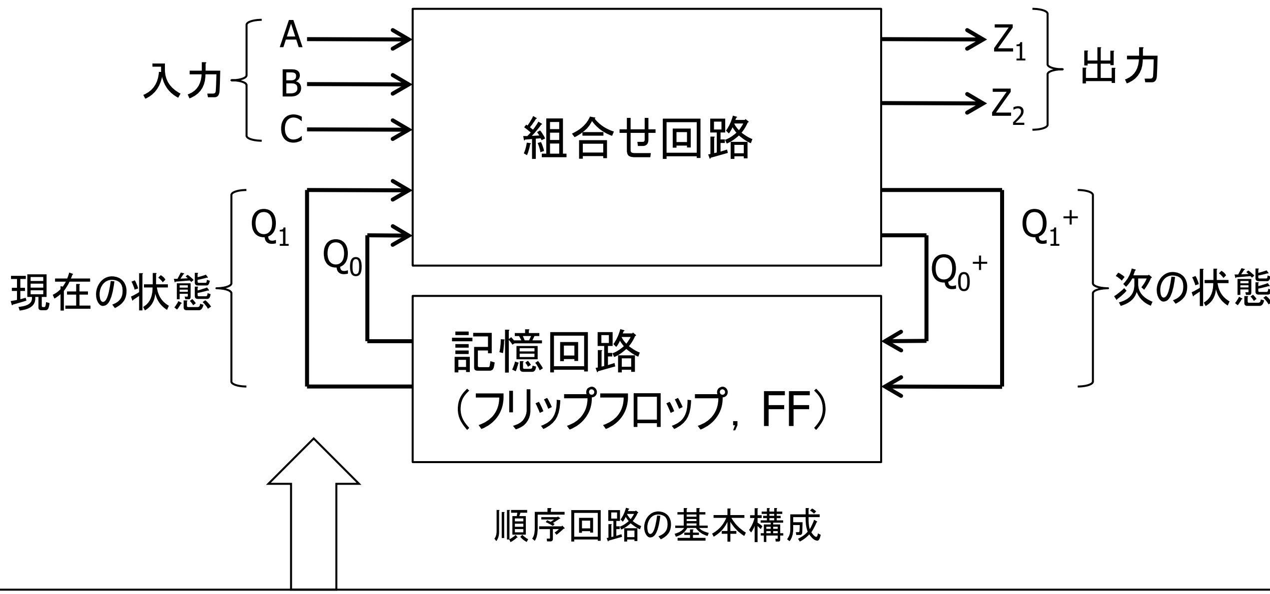
５. 順序回路

５－１　順序回路とは

組合せ回路：出力がその時点の入力の組合せだけで決まる回路
順序回路　：出力がその時点の入力の組合せと過去の出力状態で決まる回路

フリップフロップ
レジスタ
カウンタ



順序回路の基本構成

同期式：　「現在の状態」を入力するタイミングを外部のクロックパルスで制御
非同期式：「現在の状態」を入力するタイミングは，素子の伝搬遅延時間で決まる（無制御）

５－２　状態遷移表と状態遷移図

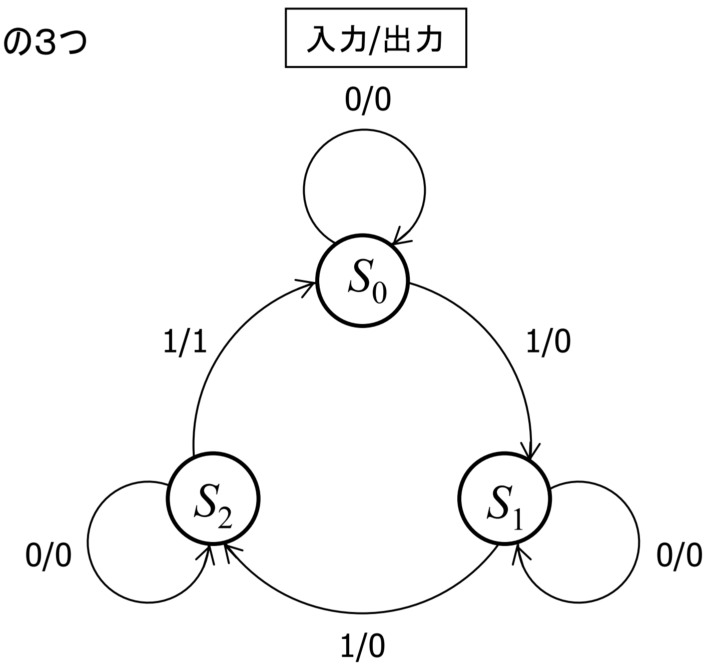
組合せ論理回路 → 真理値表　⟷　順序回路 → 状態遷移表 →(図示) 状態遷移図

３進カウンタの状態遷移表と状態遷移図　（教p. 95 例題5. 1）

記憶すべき状態数は,「0（S_0）」,「1（S_1）」,「2（S_2）」の3つ

３進カウンタの状態遷移表

入力	現在の状態	次の状態	出力
0	S_0	S_0	0
1	S_0	S_1	0
0	S_1	S_1	0
1	S_1	S_2	0
0	S_2	S_2	0
1	S_2	S_0	1



状態遷移図

状態割り当て：順序回路で記憶すべき状態を符号化

記憶すべき状態の数をNとすると，状態割り当てに必要なビット数nは

$$n = \log_2 N \quad \Leftarrow \quad \left(N = 2^n\right)$$

３進カウンタの場合，記憶すべき状態の数は３
　→　記憶に必要なビット数は2ビット
　　「必要な記憶回路（FF）の数は2個」

３進カウンタの状態割り当て

FFの出力 / FFの入力

	現在の状態		次の状態	
	Q_1	Q_0	Q_1^+	Q_0^+
S_0	0	0	0	0
S_1	0	1	0	1
S_2	1	0	1	0
S_3	1	1	×	×

状態割り当てをした遷移表

	入力	現在の状態		次の状態		出力
	A	Q_1	Q_0	Q_1^+	Q_0^+	Z
S_0	0	0	0	0	0	0
S_0	1	0	0	0	1	0
S_1	0	0	1	0	1	0
S_1	1	0	1	1	0	0
S_2	0	1	0	1	0	0
S_2	1	1	0	0	0	1
S_3	0	1	1	×	×	×
S_3	1	1	1	×	×	×

課題5. 1　状態割り当てに必要なビット数

A \ Q_1Q_0	00	01	11	10
0		1	×	
1	1		×	

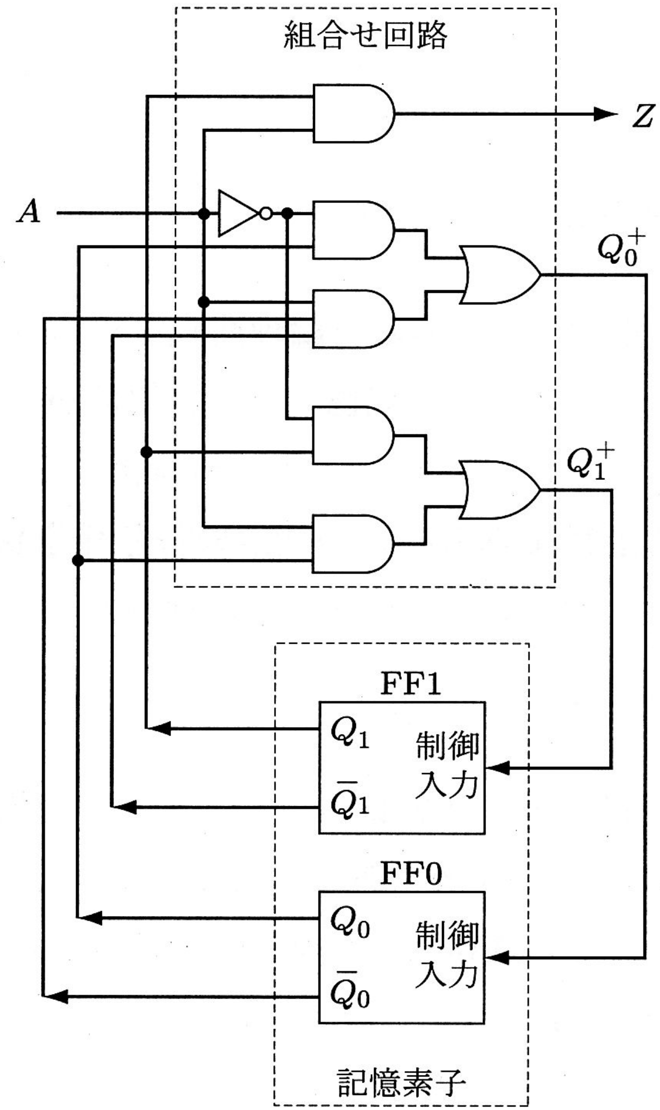
$$Q_0^{\ +} = \overline{A}Q_0 + A\overline{Q_0}\,\overline{Q_1}$$

A \ Q_1Q_0	00	01	11	10
0			×	1
1		1	×	

$$Q_1^{\ +} = AQ_0 + \overline{A}Q_1$$

A \ Q_1Q_0	00	01	11	10
0			×	
1			×	1

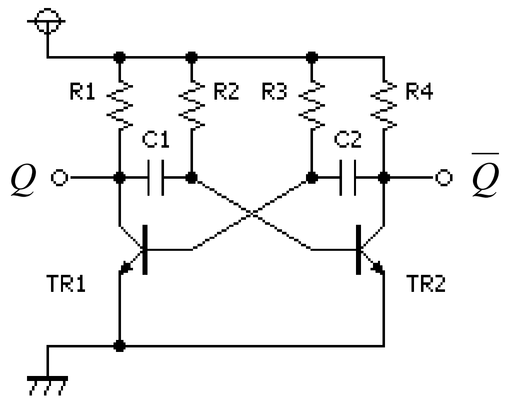
$$Z = AQ_1$$



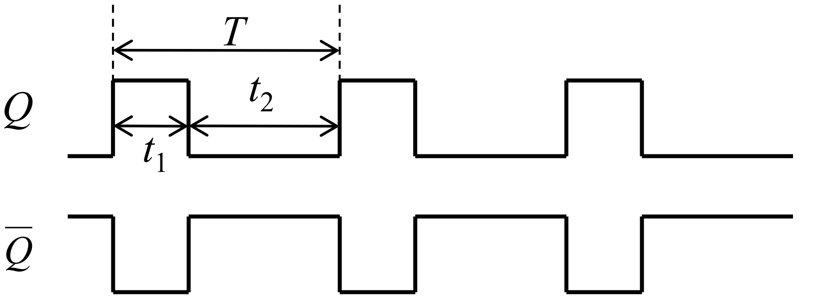
３進カウンタの構成

５－３　マルチバイブレータ

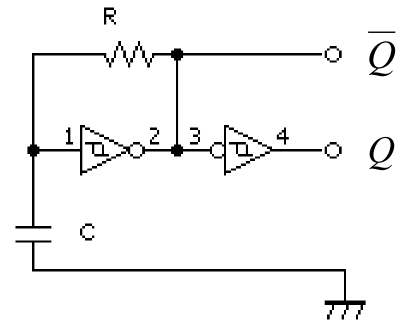
（１）　無安定マルチバイブレータ（astable multivibrator）



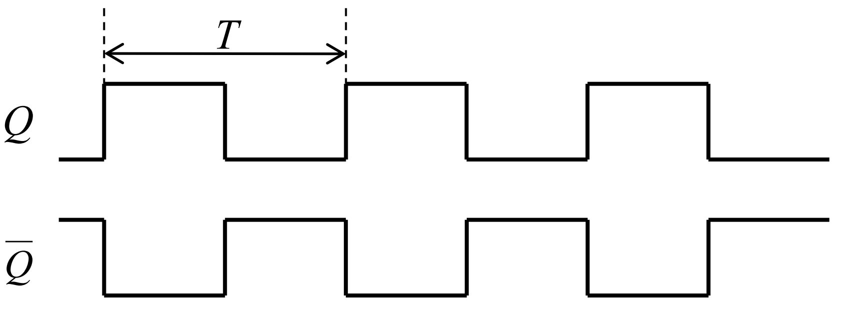
無安定マルチバイブレータの回路構成
（トランジスタタイプ）



$$T = t_1 + t_2 = \ln(2)\, C_1 R_2 + \ln(2)\, C_2 R_3$$

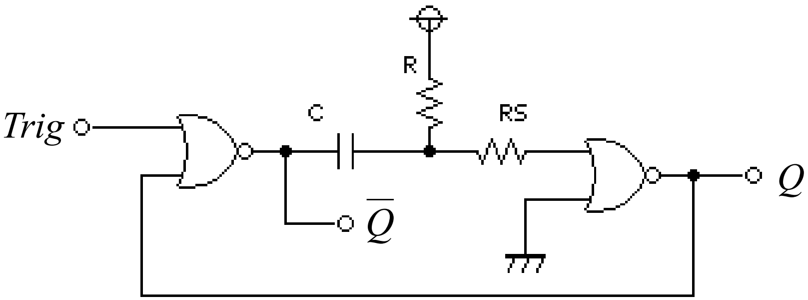


無安定マルチバイブレータの回路構成
（ICタイプ）

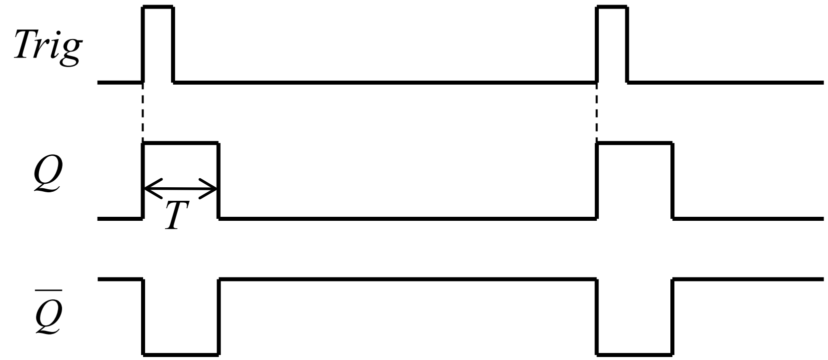


$$T = C\, R$$

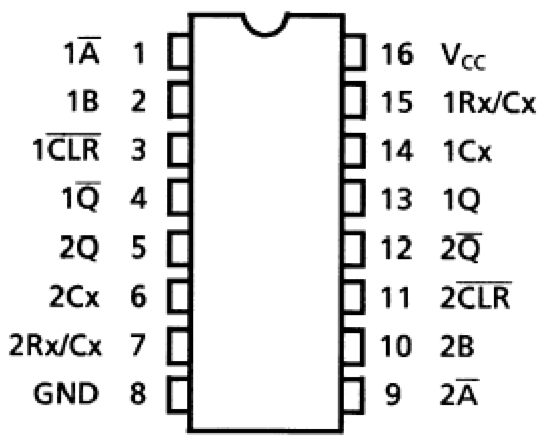
（2） 単安定マルチバイブレータ（monostable multivibrator）

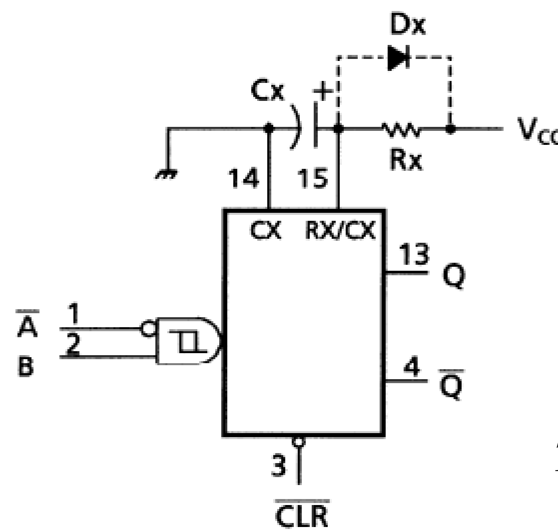


単安定マルチバイブレータの回路構成
（ゲートICタイプ）



$$T = \ln(2)\, CR = 0.69\, CR$$



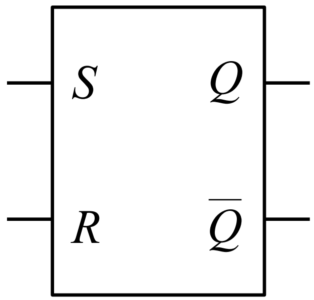


$$T = C_X R_X$$

単安定マルチバイブレータ用IC（74HC123）

５－４　フリップフロップ（FF）

（１）　RS-FF（双安定マルチバイブレータ）



RS-FFの表記

$\overline{Q}$ からは，Qの反転が出力される

「１」を記憶

R=0のとき，　S=1（セット）で$Q=1,\ \overline{Q}=0$

S=0のとき，　R=1（リセット）で$Q=0,\ \overline{Q}=1$

「０」を記憶

$S=R=1$の入力は禁止（$SR=0$）

順序回路の設計 → 動作特性を論理関数（特性方程式）で表す

RS-FFの特性方程式 （教p. 99 例題5. 2）

RS-FFの遷移表

入力		現在の状態	次の状態	
S	R	Q	Q^+	
0	0	0	0	現在の状態を保持
0	0	1	1	
0	1	0	0	リセット
0	1	1	0	
1	0	0	1	セット
1	0	1	1	
1	1	0	×	入力禁止
1	1	1	×	

SR \ Q	0	1
00		1
01		
11	×	×
10	1	1

$\overline{S}\,\overline{Q}$　$\overline{R}Q$　R　S

RS-FF (Q^+)のカルノー図

RS-FFの特性方程式

$$Q^+ = S + \overline{R}Q$$

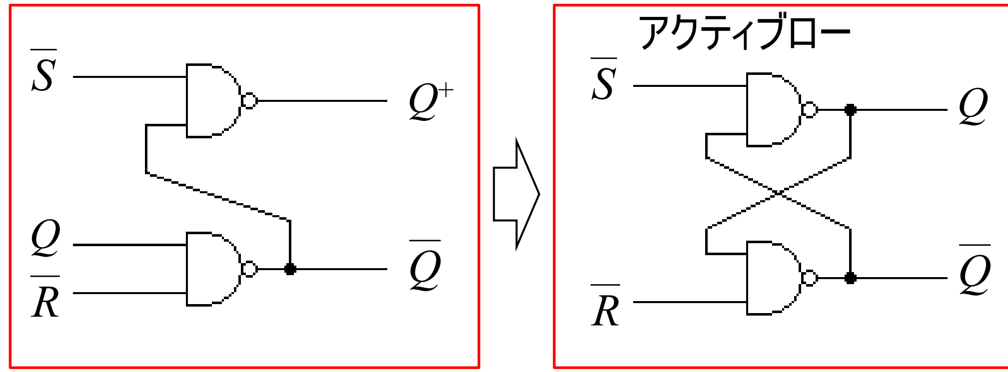
ただし, $SR = 0$

RS-FFをNANDまたはNORのみで構成せよ （教p. 100 例題5. 3）

NAND構成

SR-FFの特性方程式を2重否定

$$Q^+ = \overline{\overline{Q^+}} = \overline{\overline{S + \overline{R}Q}} = \overline{\overline{S}\cdot\underbrace{\overline{\overline{R}\cdot Q}}_{\overline{Q}}}$$



NANDで構成したSR-FF

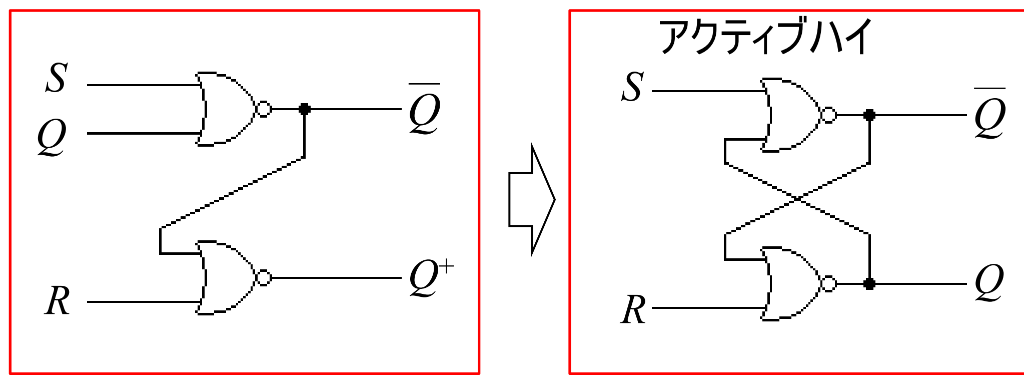
NOR構成

$Q^+ = 0$ に着目し, $\overline{Q^+}$ の加法形を求める（前ページカルノー図参照）

$$\overline{Q^+} = R + \overline{S}\,\overline{Q} = R + \overline{S + Q}$$

上式の否定式を求めると、

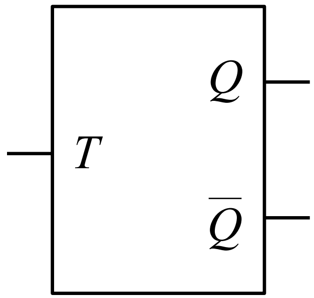
$$\overline{\overline{Q^+}} = Q^+ = \overline{R + \underbrace{\overline{S + Q}}_{\overline{Q}}}$$



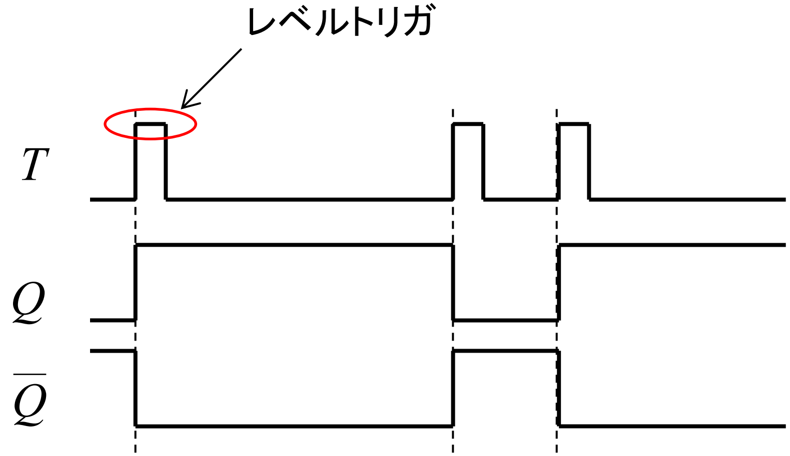
NORで構成したSR-FF

課題5. 2　RS-FFのタイミングチャート

（2） T−FF（Toggle−FF）



T-FFの表記



T-FFのタイミングチャート

T入力があるたびに、Q出力が反転する
（1ビットの2進カウンタ）

ゲートで構成したT−FFの場合，出力が入力にフィードバックされる構成となっている。出力が入力にフィードバックされる前（伝搬遅延時間内）に、T入力が0に戻っていないと発振する

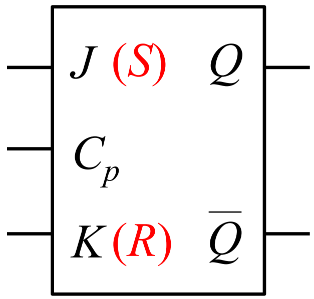
T−FFの遷移表

入力	現在の状態	次の状態	
T	Q	Q^+	
0	0	0	
1	0	1	← 反転
0	1	1	
1	1	0	← 反転

T−FFの特性方程式

$$Q^+ = T\overline{Q} + \overline{T}Q$$

（3） JK−FF



JK-FFの表記

JはS，またKはRに対応し，C_p に同期して，RS－FFと同じ動作をする

$J = K = 1$のときC_p が入ると現在の状態が反転して出力される）

ゲートで構成したJK−FFの場合，T−FF同様出力が入力にフィードバックされる構成となっている。J=K=1のときは，Cpが十分に短くないと発振する

課題5. 3　JK-FFのタイミングチャート

JK-FFの特性方程式

JK-FFの遷移表

入力		現在の状態	次の状態		
J	K	Q	$Q^{+}(C_p=1)$	$Q^{+}(C_p=0)$	
0	0	0	0	0	現在の状態を保持
0	0	1	1	1	
0	1	0	0	0	リセット
0	1	1	0	1	
1	0	0	1	0	セット
1	0	1	1	1	
1	1	0	1	0	反転
1	1	1	0	1	

$(S \quad R)$

JK \ $Q\,C_p$	00	01	11	10
00			1	1
01				1
11		1		1
10		1	1	1

$C_p = 1$の場合のみ動作するので

$$Q^{+} = \overline{K}Q + \overline{C_p}Q + JC_p\overline{Q}$$
$$= \left(\overline{K} + \overline{C_p}\right)Q + JC_p\overline{Q}$$

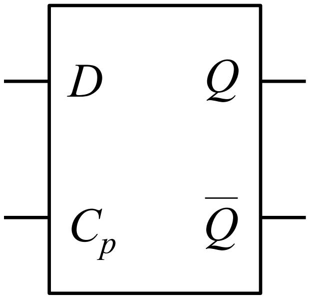
JK-FFの特性方程式

$$Q^{+} = \overline{K}Q + J\overline{Q}$$

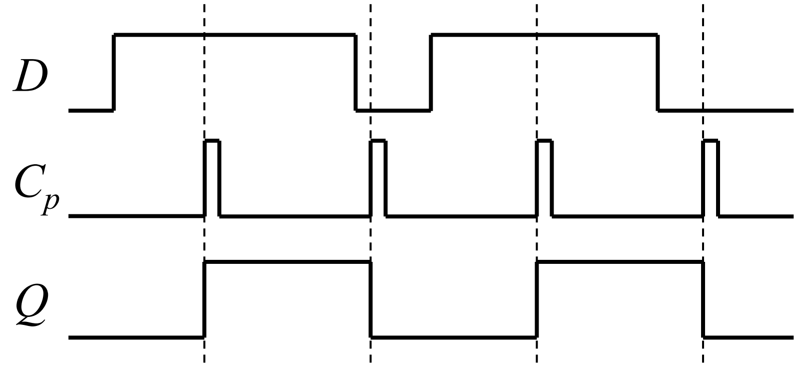
C_pに同期して動作

J=K=1の時T-FF

（4） D−FF（Data latch−FF）



D-FFの表記



D-FFのタイミングチャート

D−FFの遷移表

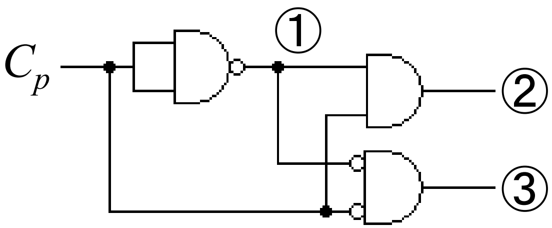
入力	現在の状態	次の状態
D	Q	Q^+
0	0	0
0	1	0
1	0	1
1	1	1

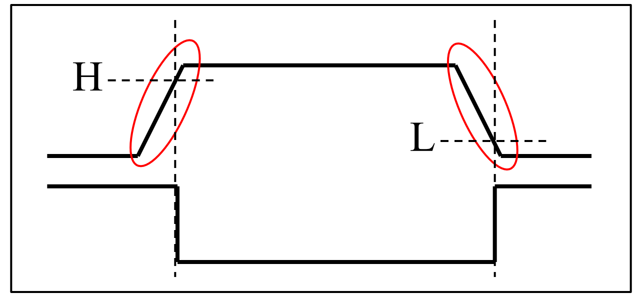
D−FFの特性方程式

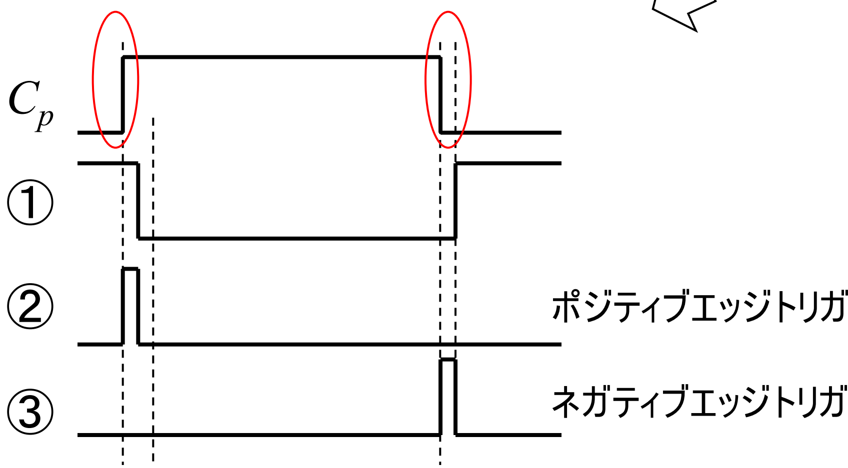
$$
\begin{aligned}
Q^+ &= D\overline{Q} + DQ \\
&= D\left(\overline{Q} + Q\right) \\
&= D
\end{aligned}
$$

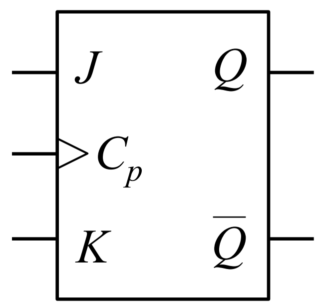
（5） エッジトリガ動作

長いパルス幅のC_pを短いパルス幅に変換

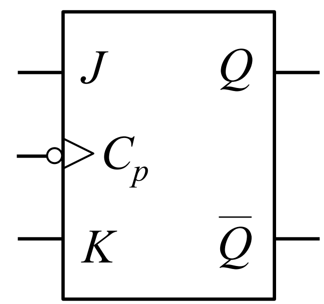








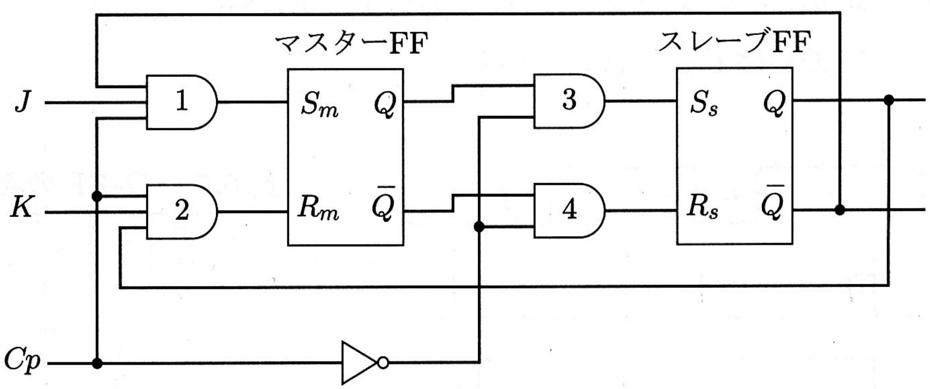
ポジティブエッジトリガ
タイプのJK-FFの表記



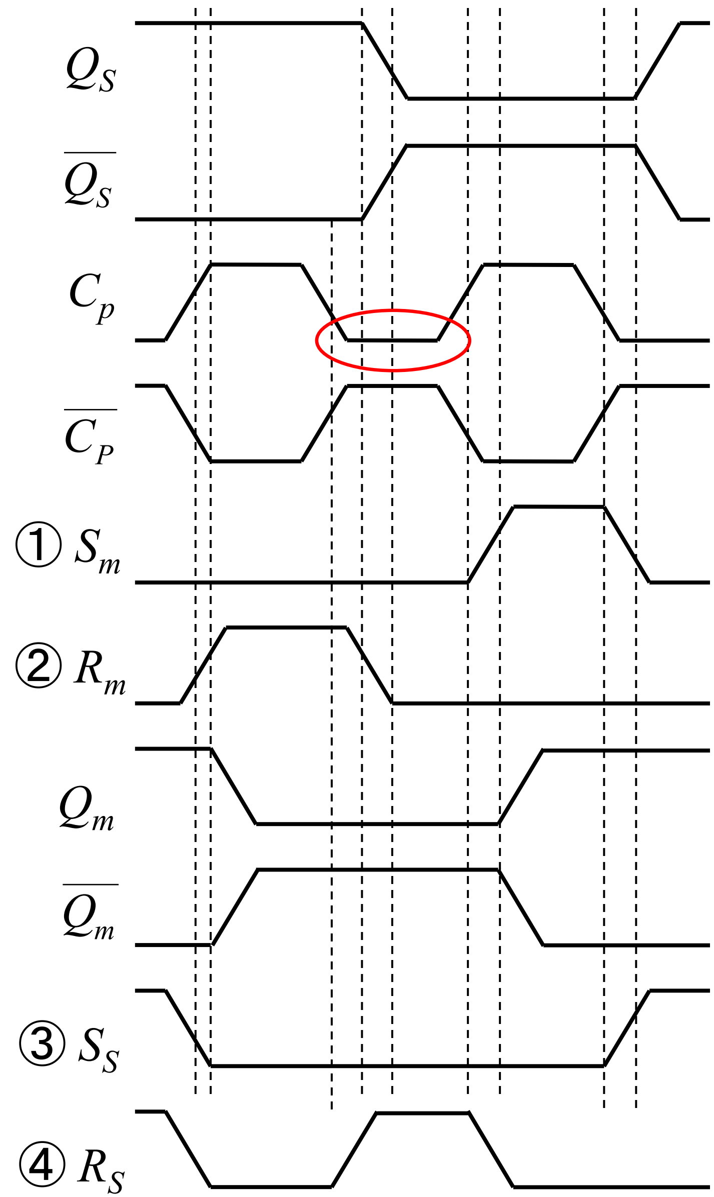
ネガティブエッジトリガ
タイプのJK-FFの表記

（6） マスタースレーブ動作

Q_S

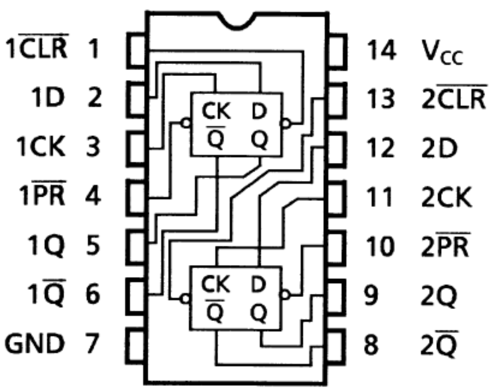


Q_Sが変化する前に，C_pが「L」になるため，発振が生じない

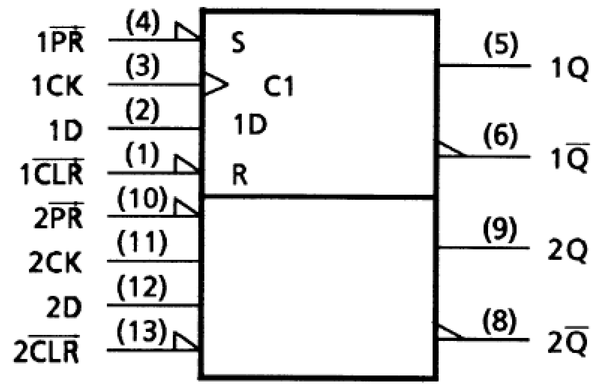


マスタースレーブ動作のタイミングチャート（ $J = K = 1$ ）

（7） 実際のIC

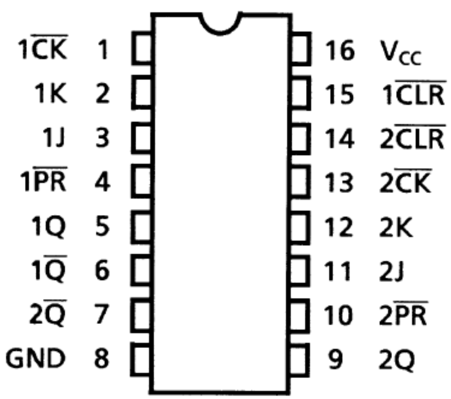


(a) ピン配置図

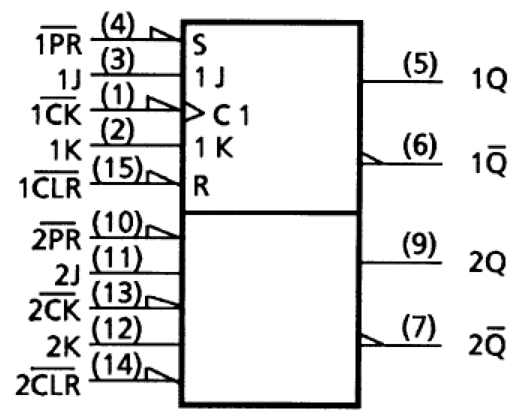


(b) 機能図

D-FF (74)



(a) ピン配置図



(b) 機能図

JK-FF (112)

５－５　順序回路の設計

（１）　順序回路の応用方程式

FFにおける
- 現在の状態 : $Q, \overline{Q}$
- 次の状態　: Q^+
- 入力

特性方程式

$$Q^+ = S + \overline{R}Q \quad \text{:RS-FF}$$

$$Q^+ = T\overline{Q} + \overline{T}Q \quad \text{:T-FF}$$

$$Q^+ = \overline{K}Q + J\overline{Q} \quad \text{:JK-FF}$$

$$Q^+ = D \quad \text{:D-FF}$$

・・・FFの動作を規定

実現すべき順序回路における
- 現在の状態 : $Q, \overline{Q}$
- 次の状態　: Q^+

応用方程式

$$Q^+ = g_1 Q + g_2 \overline{Q}$$

・・・現在の状態と
次の状態の関係を表す式

実現すべき順序回路における
FFの入力に関する論理関数

入力方程式

・・・特性方程式と
応用方程式から求める

課題5. 4　順序回路の設計に用いる関係式

SR-FFの入力方程式を求めよ（教p. 107 例題5. 4）

$$Q^{+} = S + \overline{R}Q \quad \text{ただし，} \; SR = 0$$

応用方程式				SR-FFの特性方程式				
g_1	g_2	Q	Q^{+}	S	R	Q	Q^{+}	
0	0	0	0	0	×	0	0	Q=0 → S= 0 → R= × (0 or 1)
0	0	1	0	0	1	1	0	リセット：R=1
0	1	0	1	1	0	0	1	セット：S=1
0	1	1	0	0	1	1	0	リセット：R=1
1	0	0	0	0	×	0	0	
1	0	1	1	×	0	1	1	Q=1 → R= 0→ S= × (0 or 1)
1	1	0	1	1	0	0	1	セット：S=1
1	1	1	1	×	0	1	1	

g_1g_2 \ Q	0	1
00		
01	1	
11	1	×
10		×

g_1g_2 \ Q	0	1
00	×	1
01		1
11		
10	×	

S入力　　R入力

入力方程式・・・ $S = g_2\overline{Q}$　　$R = \overline{g_1}Q$

すべての順序回路について共通

同じ値

応用方程式における、「現在の状態 Q」から「次の状態 Q^{+} 」への遷移を SR-FFの2入力（R , S) を用いて、実現することを考える。

JK-FFの入力方程式を求めよ （教p. 108 例題5.5）

$$Q^{+} = \overline{K}Q + J\overline{Q}$$

$SR = 0$ の制限なし

g_1	g_2	Q	Q^+	J	K	
0	0	0	0	0	×	ホールド（セットではない）：J=0
0	0	1	0	×	1	リセット：K=1
0	1	0	1	1	×	セット： J=1
0	1	1	0	×	1	リセット：K=1
1	0	0	0	0	×	
1	0	1	1	×	0	
1	1	0	1	1	×	セット： J=1
1	1	1	1	×	0	

応用方程式

特性方程式

g_1g_2 \ Q	0	1
00		×
01	1	×
11	1	×
10		×

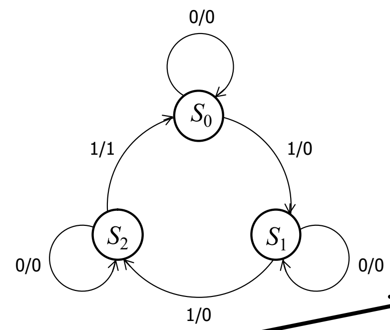
J入力

g_1g_2 \ Q	0	1
00	×	1
01	×	1
11	×	
10	×	

K入力

入力方程式・・・ $J = g_2$　　$K = \overline{g_1}$

（2） 順序回路の設計手順と設計例



状態遷移図で遷移状態を確認し，記憶すべき状態数とFFの個数を求める

状態数を符号化し，状態割り当てを行う

	FFの出力		FFの入力	
	現在の状態		次の状態	
	Q_1	Q_0	Q_1^+	Q_0^+
S_0	0	0	0	0
S_1	0	1	0	1
S_2	1	0	1	0
S_3	1	1	×	×

状態遷移表を作成する

入力		現在の状態	次の状態
S	R	Q	Q^+
0	0	0	0
0	0	1	1
0	1	0	0
0	1	1	0
1	0	0	1
1	0	1	1
1	1	0	×
1	1	1	×

カルノー図を描き，特性方程式を求める

$S\ R$ \\ Q	0	1
00		1
01		
11	×	×
10	1	1

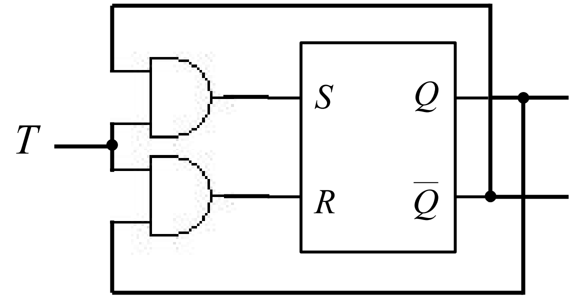
特性方程式と応用方程式を連立させてg_1，g_2を求める

使用するFFの種類を決め，その入力方程式にg_1，g_2を代入して論理関数を求める

論理関数をもとに，順序回路を構成する

SR−FFを用いてT−FFを設計せよ （教p. 109 例題5. 6）

状態遷移図で遷移状態を確認し，
記憶すべき状態数とFFの個数を求める



状態数を符号化し，状態割り当てを行う

状態遷移表を作成する

カルノー図を描き，特性方程式を求める

特性方程式と応用方程式を連立させて
g_1，g_2を求める

T−FFの特性方程式　$Q^{+} = T\overline{Q} + \overline{T}Q$

応用方程式　$Q^{+} = g_1 Q + g_2 \overline{Q}$

係数比較

$g_1 = \overline{T}$，$g_2 = T$

代入

使用するFFの種類を決め，その入力方程式にg_1，g_2を代入して論理関数を求める

SR−FFの入力方程式

$$\begin{cases} S = g_2 \overline{Q} \\ R = \overline{g_1} Q \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} S = T\overline{Q} \\ R = TQ \end{cases}$$

論理関数をもとに，順序回路を構成する

SR−FFを用いてJK−FFを設計せよ（教p. 110 例題5. 7）

状態遷移図で遷移状態を確認し，
記憶すべき状態数とFFの個数を求める

状態数を符号化し，状態割り当てを行う

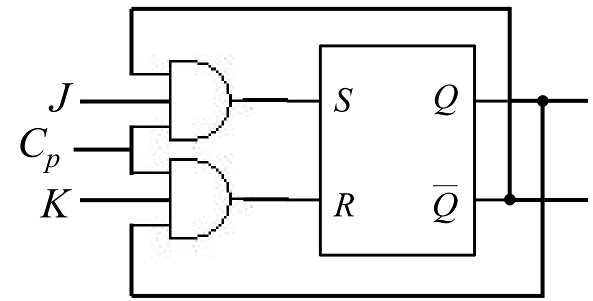
状態遷移表を作成する

カルノー図を描き，特性方程式を求める

特性方程式と応用方程式を連立させて
g_1，g_2を求める

使用するFFの種類を決め，その入力方程式にg_1，g_2を代入して論理関数を求める

論理関数をもとに，順序回路を構成する



JK−FFの特性方程式 $Q^+ = \overline{K}Q + J\overline{Q}$

応用方程式 $Q^+ = g_1 Q + g_2 \overline{Q}$

系数比較

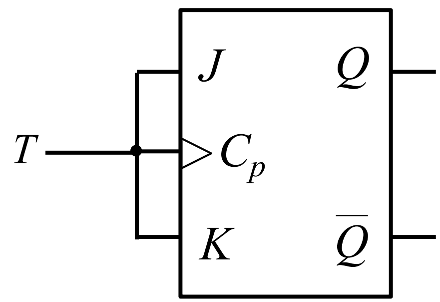
$g_1 = \overline{K}$, $g_2 = J$

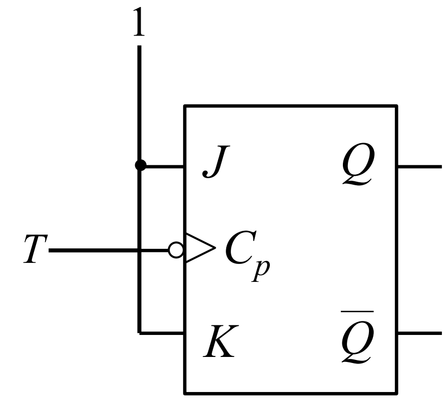
代入

SR−FFの入力方程式

$$\begin{cases} S = g_2\overline{Q} \\ R = \overline{g_1}Q \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} S = J\overline{Q} \\ R = KQ \end{cases}$$

JK−FFを用いてT−FFを設計せよ（教p. 110 例題5. 8）





実用回路

状態遷移図で遷移状態を確認し，記憶すべき状態数とFFの個数を求める

状態数を符号化し，状態割り当てを行う

状態遷移表を作成する

カルノー図を描き，特性方程式を求める

特性方程式と応用方程式を連立させて g_1，g_2を求める

使用するFFの種類を決め，その入力方程式にg_1，g_2を代入して論理関数を求める

論理関数をもとに，順序回路を構成する

T−FFの特性方程式　$Q^+ = \overline{T}Q + T\overline{Q}$

応用方程式　$Q^+ = g_1 Q + g_2 \overline{Q}$

系数比較

$g_1 = \overline{T},\ g_2 = T$

代入

JK−FFの入力方程式

$$\begin{cases} J = g_2 = T \\ K = \overline{g_1} = T \end{cases}$$

下に示す遷移表を満足する順序回路をJK-FFを用いて設計せよ（教p. 111 例題5. 9）

状態遷移図で遷移状態を確認し，
記憶すべき状態数とFFの個数を求める

記憶すべき状態数は「1」 → 必要なJK-FFの個数は「1」個

状態数を符号化し，状態割り当てを行う

状態遷移表を作成する

→

入力		現在の状態	次の状態
A	B	Q	Q+
0	0	0	0
0	1	0	1
1	0	0	0
1	1	0	0
0	0	1	0
0	1	1	0
1	0	1	1
1	1	1	1

カルノー図を描き，特性方程式を求める

	$\overline{Q}$	Q
$A\ B$ \ Q	0	1
00	0	0
01	1	0
11	0	1
10	0	1

$$Q^{+} = AQ + \overline{A}B\overline{Q}$$

特性方程式と応用方程式を連立させてg_1, g_2を求める

特性方程式 $Q^+ = AQ + \overline{A}B\overline{Q}$

応用方程式 $Q^+ = g_1Q + g_2\overline{Q}$

系数比較

$g_1 = A,\ g_2 = \overline{A}B$

代入

使用するFFの種類を決め，その入力方程式にg_1, g_2を代入して論理関数を求める

JK–FFの入力方程式

$$\begin{cases} J = g_2 = \overline{A}B \\ K = \overline{g_1} = \overline{A} \end{cases}$$

論理関数をもとに，順序回路を構成する