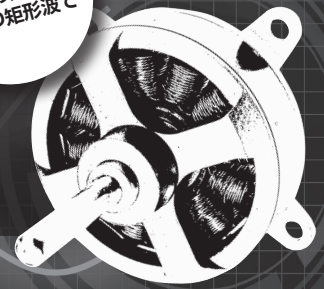


初めての方向け...  
基本の矩形波で

# ブラシレス・モータを回す プログラム書き方講座



第8回 レジスタで直接マイコンの周辺機能を設定する その2...PWM 大黒 昭宣

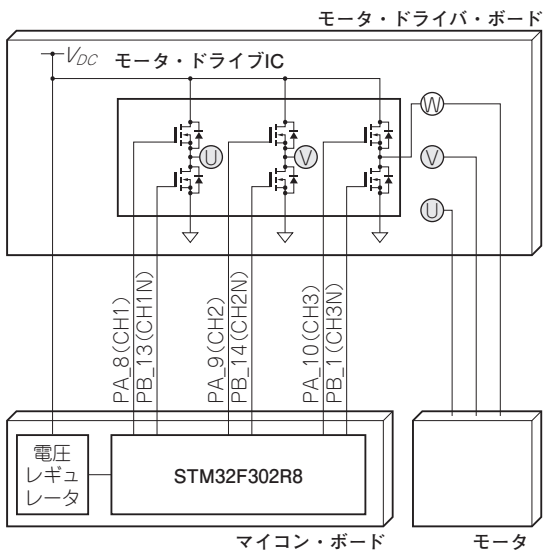


図1 タイマ(TIM1)関連の信号

連載では、モータとマイコン・ボードがセットになったキットP-NUCLEO-IHM001 (STマイクロエレクトロニクス) を使ってDCブラシレス・モータを矩形波駆動で制御する方法を解説します。

プログラムは主にMbedで開発します。連載で紹介したプログラムはダウンロード・データとして提供します。  
<https://www.cqpub.co.jp/interface/download/2022/6/IF2206A.zip>

Mbedは手軽ですが、A-D変換などの実行効率は良くありません。そこで、マイコンの実力を発揮するために、直接レジスタを設定する方法を紹介します。

前回(2022年7月号)のクロック設定に続き、A-D変換に必要なタイマ、PWM関係の設定を行います。

## ● モータは3相PWMで駆動する

図1にタイマ(TIM1)にもとづいて動作するPWM信号を示します。マイコンSTM32F302R8 (STマイクロエレクトロニクス) のポートPA8, PA9, PA10をモータ・ドライバ基板内のハーフ・ブリッジ(パワー

31	30	...	17	16
MODER15[1:0]		...	MODER8[1:0]	
rw		...	rw	
15	14	...	1	0
MODER7[1:0]		...	MODER0[1:0]	
rw		...	rw	

- 00: 入力モード(リセット状態)
- 01: 汎用出力モード
- 10: オルタネート機能モード
- 11: アナログ・モード

図2 各ポートのモードを設定するポートモード・レジスタ

MOSFET)の上側および下側へ接続します。これによってPWM駆動で相補出力し、モータを駆動します。一般的にインバータのパワー・トランジスタを駆動する場合、上側トランジスタと下側トランジスタが同時にONしないようデッド・タイムを設けた相補出力の駆動にします。

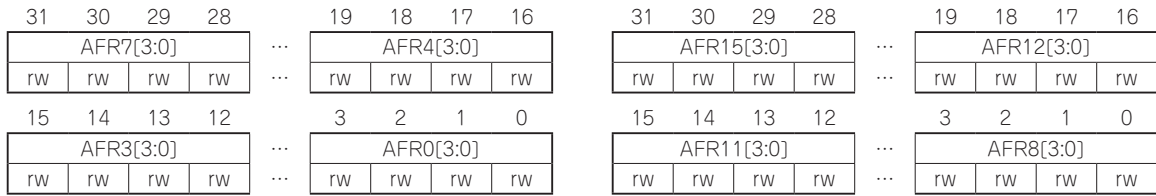
## PWM出力先ポートの設定

図2に相補出力のためのレジスタ設定値を示します。リスト1のようにPA8とPB13を相補出力する設定を考えます。まずPA8のMODER 17ビットを1,

リスト1 タイマ(TIM1)ポート・レジスタ設定

```

/*****PWM Port Setting*****/
GPIOA->MODER |= (0b10 << 16);
// PA8 Alternate TIM1_CH1 U相上側
GPIOA->MODER |= (0b10 << 18);
// PA9 Alternate TIM1_CH2
GPIOA->MODER |= (0b10 << 20);
// PA10 Alternate TIM1_CH3
GPIOB->MODER |= (0b10 << 26);
// PB13 Alternate TM1_CH1N
GPIOB->MODER |= (0b10 << 28);
// PB14 Alternate TM1_CH2N
GPIOB->MODER |= (0b10 << 2);
// PB1 Alternate TM1_CH3N
GPIOA->AFR[1] |= 0b0110 << 0; //PA8 CH1
GPIOA->AFR[1] |= 0b0110 << 4; //PA9 CH2
GPIOA->AFR[1] |= 0b0110 << 8; //PA10 CH3
GPIOB->AFR[1] |= 0b0110 << 20; //PB13 CH1N
GPIOB->AFR[1] |= 0b0110 << 24; //PB14 CH2N
GPIOB->AFR[0] |= 0b0110 << 4; //PB1 CH3N
    
```



(a) 下位レジスタ (AFRL) (b) 上位レジスタ (AFRH)

図3 ポートにどのペリフェラル機能を割り当てるかを定める GPIO オルタネート機能レジスタ (GPIOx\_AFR)

ポートAのオルタネート機能									
ポートおよび端子名	AF0	AF1	AF2	AF3	AF4	AF5	AF6	AF7	AF15
SYS_AF		TIM2/ TIM15/ TIM16/ TIM17/ EVENT	I2C3/ TIM1/ TIM2/ TIM15	I2C3/ TIM15/ TSC	I2C1/I2C2/ TIM1/ TIM16/ TIM17	SPI2/I2S2/ SPI3/I2S3/ Infrared	SPI2/I2S2/ SPI3/I2S3/ TIM1/ Infrared	USART1/ USART2/ USART3/ CAN/ GPCOMP6	EVENT
PA0	-	TIM2_CH1/ TIM2_ETR	-	TSC _G1_IO1	-	-	-	USART2 _CTS	EVENT OUT
PA1	RTC_ REFIN	TIM2_CH2	-	TSC _G1_IO2	-	-	-	USART2 _RTS_DE	EVENT OUT
PA2	-	TIM2_CH3	-	TSC _G1_IO3	-	-	-	USART2 _TX	EVENT OUT
PA3	-	TIM2_CH4	-	TSC	-	-	-	USART2	EVENT OUT
PA4	-	-	設定用のソースコードは次の通り GPIOA-> AFR[1]  = 0b0110 << 0; // PA8 TIM1_CH1 GPIOA-> AFR[1]  = 0b0110 << 4; // PA9 Alternate TIM1_CH2 GPIOA-> AFR[1]  = 0b0110 << 8; // PA10 Alternate TIM1_CH3 前回はコメントアウトする //GPIOA-> AFR[1]  = 0b0000 << 0; // PA8 MCO						EVENT OUT
PA5	前回は クロック 出力設定 でこれを 選択して いた	TIM2_CH1/ TIM2_ETR							EVENT OUT
PA6	-	TIM16 _CH1							-
PA7	-	TIM17 _CH1	-	TSC _G2_IO4	-	-	TIM1 _CH1N	EVENT OUT	
PA8	MCO	-	-	I2C3_SCL	I2C2_SMBAL	I2S2_MCK	TIM1_CH1	USART1 _CK	EVENT OUT
PA9	-	-	I2C3_SMBAL	TSC _G4_IO1	I2C2_SCL	I2S3_MCK	TIM1_CH2	USART1 _TX	EVENT OUT
PA10	-	TIM17_BKIN	-	TSC _G4_IO2	I2C2_SDA	SPI2_MISO/ I2S2ext_SD	TIM1_CH3	USART1 _RX	EVENT OUT
PA11	-	-	-	-	-	SPI2_MOSI/ I2S2_SD	TIM1 _CH1N	USART1 _CTS	EVENT OUT
PA12	-	TIM16_CH1	-	-	-	I2SCKIN	TIM1 _CH2N	USART1 _RTS_DE	EVENT OUT
PA13	SWDAT- JTMS	TIM16_CH1N	-	TSC _G4_IO3	-	IR-OUT	-	USART3 _CTS	EVENT OUT
PA14	SWCLK- JTCK	-	-	TSC _G4_IO4	I2C1_SDA	-	TIM1_BKIN	USART2 _TX	EVENT OUT
PA15	JTDI	TIM2_CH1/ TIM2_ETR	-	TSC_SYNC	I2C1_SCL	-	SPI3_NSS/ I2S3_WS	USART2 _RX	EVENT OUT

図4 PWM 相補出力 (上側) のピンの割り当て

16ビットを0にします。PB13についても同様にポートBのポートモード・レジスタの27ビットと26ビットをオルタネート機能モードにします。オルタネートとは本来交互という語感ですが、ここではペリフェラル動作に応じた入出力を実現する意味合いになります。

次にペリフェラルの動作を設定します。今回は、タ

イマ (TIM1) をもとにしてPWM動作の出力ポートを設定するためAFRレジスタの設定を行います。

図3に示すレジスタは、マイコンの各ポートをどのペリフェラル機能に割り当てるかを定めるものです。各ポート群 (A, B, C など) のポート0~7はAFRL、ポート8~15はAFRHに対応しています。

ポートPA8はAFRHになります。次のように6を

ポートBのオルタネート機能									AF15
ポートおよび端子名	AF0	AF1	AF2	AF3	AF4	AF5	AF6	AF7	AF15
	SYS_AF	TIM2/ TIM15/ TIM16/ TIM17/ EVENT	I2C3/ TIM1/ TIM2/ TIM15	I2C3/ TIM15/ TSC	I2C1/I2C2/ TIM1/ TIM16/ TIM17	SPI2/I2S2/ SPI3/I2S3/ Infrared	SPI2/I2S2/ SPI3/I2S3/ TIM1/ Infrared	USART1/ USART2/ USART3/ CAN/ GPCOMP6	EVENT
PB0	-	-	-	TSC _G3_IO2	-	-	TIM1 _CH2N	-	EVENT OUT
PB1	-	-	-	TSC _G3_IO3	-	-	TIM1 _CH3N	-	EVENT OUT
PB2	-	-	-	TSC _G3_IO4	-	-	-	-	EVENT OUT
PB3	JTDO- TRACE SWO	TIM2_CH2	-	TSC _G5_IO1	-	-	SPI3-SCK/ I2S3_CK	USART2 _TX	EVENT OUT
PB4	JTRST	TIM16 _CH1	-	TSC _G5_IO2	-	-	SPI3_MISO/ I2S3_SD	USART2 _RX	EVENT OUT
PB5	-	TIM16 _BKIN	-	-	I2C1 _SMBAI	-	SPI3_MOSI/ I2S3ext_SD	USART2 _CK	EVENT OUT
PB6	-	TIM16 _CH1N	-	TSC _G5_IO3	I2C1_SCL	-	-	USART1 _TX	EVENT OUT
PB7	-	TIM17 _CH1N	-	TSC _G5_IO4	I2C1_SDA	-	-	USART1 _RX	EVENT OUT
PB8	-	TIM16 _CH1	-	TSC _SYNC	I2C1_SCL	-	-	USART3 _RX	EVENT OUT
PB9	-	TIM17 _CH1	-	-	I2C1_SDA	-	IR-OUT	USART3 _TX	EVENT OUT
PB10	-	TIM2_CH3	-	TSC _SYNC	-	-	-	USART2 _TX	EVENT OUT
PB11	-	TIM2_CH4	-	TSC _G6_IO1	-	-	-	USART2 _RX	EVENT OUT
PB12	-	-	-	TSC _G6_IO2	I2C2 _SMBAI	SPI2_NSS/ I2S2_WS	TIM1 _BKIN	USART3 _CK	EVENT OUT
PB13	-	-	-	TSC _G6_IO3	-	SPI2_SCK/ I2S2_CK	TIM1 _CH1N	USART3 _CTS	EVENT OUT
PB14	-	TIM15 _CH1	-	TSC _G6_IO4	-	SPI2_MISO/ I2S2ext_SD	TIM1 _CH2N	USART3 _RTS_DE	EVENT OUT
PB15	RTC _REFIN	TIM15 _CH2	TIM15 _CH1N	-	TIM1 _CH3N	SPI2_MOSI/ I2S2_SD	-	-	EVENT OUT

GPIOB-> AFR[1] |= 0b0110 << 20; //PB13  
 GPIOB-> AFR[1] |= 0b0110 << 24; //PB14  
 GPIOB-> AFR[0] |= 0b0110 << 4; //PB1

図5 PWM 相補出力(下側)のピンの割り当て

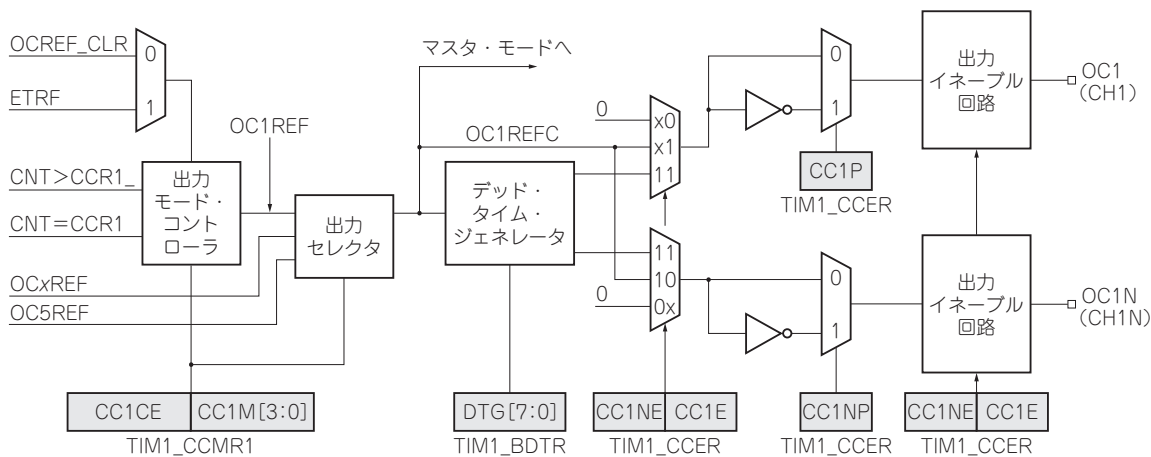


図6 PWM ブロック図(CH1)

- 第4回 ボリュームの位置を読み取って正転/逆転を切り替える (2022年4月号)
- 第5回 負荷が変わっても回転速度を一定に保つ (2022年5月号)
- 第6回 電流PI制御を使ってモータ負荷に対する応答性を向上させる (2022年6月号)

リスト2 タイマ (TIM1) を使ったPWMの設定コード

```

/*****PWM Timer Setting*****/
TIM1->CR1 = 0; // make sure Counter is disabled
                before changing configuration
TIM1->CR2 = 0;
TIM1->PSC = 1;
// Enable channel 1 and its complimentary output
TIM1->ARR = PWM_freq; //PWM 周期
TIM1->CCMR1=0x6060; // Ch1,Ch2アクティブ設定
TIM1->CCMR2=0x0060; // Ch3アクティブ設定
TIM1->CCER |= 0x0111;

//相補出力設定 0x0111相補無し 0x0555同相 0xDDD逆相
TIM1->BDTR |= 0x800a; // Dead Time
TIM1->SR = 0; // Clear flags.
TIM1->CR1 |= 0x0021;
// enable counter Center Align
//TIM1->CR1 |= TIM_CR1_CEN | TIM_CR1_ARPE;
// Timer enable, ARR auto-preload enable
TIM1 ->DIER |= TIM_DIER_UIE;
TIM1->DIER |= TIM_DIER_CC1IE | TIM_DIER_CC2IE |
                TIM_DIER_CC3IE;
    
```

15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
				UIFRE MAP		CKD[1:0]		ARPE	CMS[1:0]		DIR	OPM	URS	UDIS	CEN
				rw		rw	rw	rw	rw	rw	rw	rw	rw	rw	rw

センタ・アライン・モードに設定する

図7 タイマ制御レジスタ1 (TIMx\_CR1)

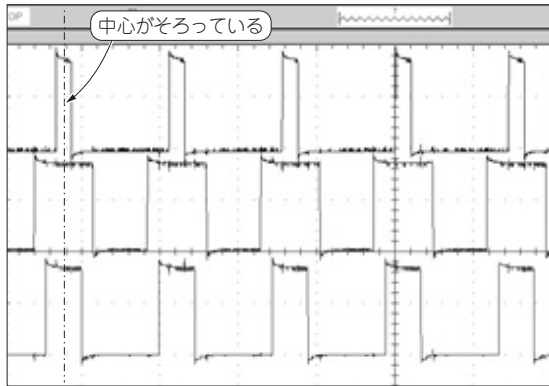


図8 センタ・アライン・モードにしたときのPWM波形 (2V/div, 20 μs/div)

設定するとTIM1\_CH1 (PWM相補出力の上側として使う)になります(図4).

```
GPIOA-> AFR[1] |= 0b0110 << 0;
```

PB13はAFRHになります。次のプログラムによって6に設定するとTIM1\_CH1N (PWM相補出力の下側として使う)になります(図5).

```
GPIOB-> AFR[1] |= 0b0110 << 20
```

同じようにCH2, CH3も設定します。

### タイマのPWM設定

図6にPWM CH1のブロック図を示します。相補出力が可能なタイプになります。CH2, CH3も同じです。塗りつぶし部が動作設定レジスタの各ビット対応になります。タイマ1 (TIM1) をPWM出力に使うための主な設定を見ていきます(リスト2)。

#### ● アライン・モードの設定

図7はタイマ1制御レジスタになります。CENビットを1にするとタイマ・カウンタ・スタートになります。PWMはセンタ・アライン・モードにするためCMSを10に設定します。

図8にセンタ・アライン・モードのPWM波形を示します。PWMの矩形波はCH1, CH2, CH3の中心で変調しているのが見て取れます。

相対するエッジ・アラインはCH1, CH2, CH3の立ち上がり変化が同時になると、急激な電流変化となりノイズが増えます。センタ・アラインにすることでこの同時変化を防ぎノイズ低減につながります。

31	30	29	28	27	26	25	24	23	22	21	20	19	18	17	16
							OC2 M[3]								OC1 M[3]
							rw								rw
15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
OC2 CE	OC2M[2:0]			OC2 PE	OC2 FE	CC2S[1:0]		OC1 CE	OC1M[2:0]			OC1 PE	OC1 FE	CC1S[1:0]	
	IC2F[3:0]			IC2PSC[1:0]					IC1F[3:0]			IC1PSC[1:0]			
rw	rw	rw	rw	rw	rw	rw	rw	rw	rw	rw	rw	rw	rw	rw	rw

図9 タイマ (TIM1) キャプチャ/比較モード・レジスタ1 (TIMx\_CCMR1)

31	30	29	28	27	26	25	24	23	22	21	20	19	18	17	16
										CC6P	CC6E			CC5P	CC5E
										rW	rW			rW	rW
15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
CC4NP		CC4P	CC4E	CC3NP	CC3NE	CC3P	CC3E	CC2NP	CC2NE	CC2P	CC2E	CC1NP	CC1NE	CC1P	CC1E
rW		rW	rW	rW	rW	rW	rW	rW	rW	rW	rW	rW	rW	rW	rW

図10 タイマ (TIM1) キャプチャ/比較有効レジスタ (TIMx\_CCER)

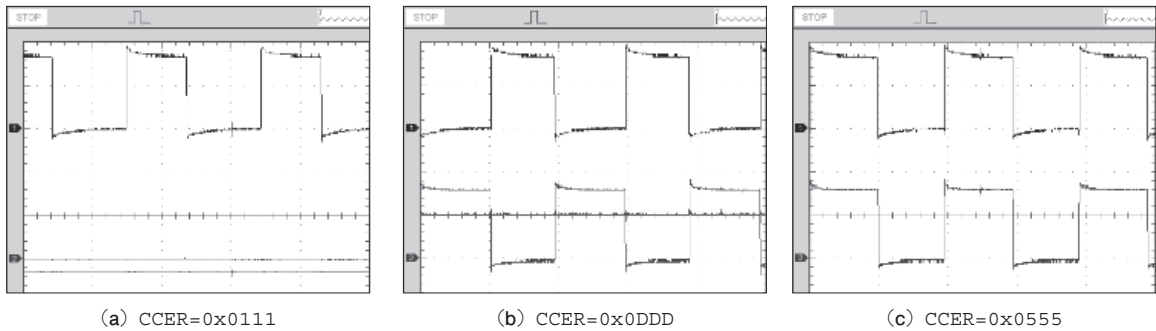


図11 CH1とCH1NのPWM出力 (2V/div, 10 μs/div)

● PWM出力をアクティブにするタイミング

あるタイミングにおける、PWM出力値のアクティブ/非アクティブを設定します。

▶ PWMモード1

OC1M = 110にするとPWMモード1になります (図9)。この設定の場合、カウント・アップ時に、チャンネル1 (CH1, CH1N)は、

$TIMx\_CNT < TIMx\_CCR1$

の場合はアクティブに、そうでない場合は非アクティブになります。カウント・ダウン時、チャンネル1は、

$TIMx\_CNT > TIMx\_CCR1$

の場合はインアクティブ (OC1REF=0)に、そうでない場合はアクティブ (OC1REF=1)になります。今回はこの設定です。

▶ PWMモード2

OC1M = 111にするとPWMモード2になります。この場合、カウント・アップ時、チャンネル1 (PWM\_U)は、

$TIMx\_CNT < TIMx\_CCR1$

で非アクティブに、そうでない場合はアクティブになります。

カウント・ダウン時、チャンネル1は、

$TIMx\_CNT > TIMx\_CCR1$

でアクティブに、そうでない場合は非アクティブになります。TIMx\_CCR1はPWMのデューティを設定する数値になります。

PWM\_V用のチャンネル2もOC2Mレジスタを同じように設定します。

● PWMの相補出力の設定

図10に相補出力の設定をするTIMx\_CCERレジスタを示します。今回は相補出力をしないので、CC1E, CC2E, CC3Eだけを1にします。そのときのPWM波形を図11(a)に示します。相補出力で同相にした場合の波形を図11(b)に、相補出力の逆相の波形を図11(c)に示します。

アクティブなときに“H”レベルになるか“L”レベルになるかも、このレジスタで設定します。次に各ビットを詳細に説明します。

● ビット3: CC1NP

CC1チャンネルが出力として設定されている場合、

0: OC1Nはアクティブ“H”になります。

1: OC1Nはアクティブ“L”になります。

● ビット2: CC1NE

0: OC1NのレベルはTIM1\_BDRTレジスタのMOE, OSSI, OSSR, OIS1, OIS1N, CC1Eビットによって決まります。

1: OC1NはMOE, OSSI, OSSR, OIS1, OS1N, CC1Eビットによって、対応する出力ピンに出力されます。

● ビット1: CC1P

CC1チャンネルが出力として設定されている場合は次の通りになります。

0: OC1はアクティブ“H”になります。

1: OC1はアクティブ“L”になります。

● ビット0: CC1E

CC1チャンネルが出力として設定されている場合は次の通りになります。

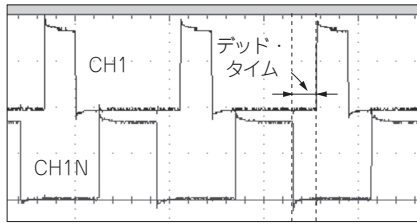


図12 2つの信号が同時にONにならないように設定されるデッド・タイム (2V/div, 20μs/div)

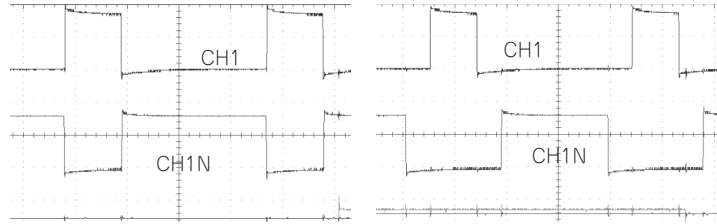


図14 デッド・タイムの測定例 (2V/div, 5μs/div)  
(a) ほぼ0μs (b) 2.3μs

31	30	29	28	27	26	25	24	23	22	21	20	19	18	17	16	
							BK2P	BK2E	BK2F[3:0]			BKF[3:0]				
							rw	rw	rw	rw	rw	rw	rw	rw	rw	
15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0	
MOE	AOE	BKP	BKE	OSSR	OSSI	LOCK[1:0]	DTG[7:0]									
rw	rw	rw	rw	rw	rw	rw	rw	rw	rw	rw	rw	rw	rw	rw	rw	

図13 デッド・タイム設定レジスタ (TIM1\_BDRT)

表1  
デッド・タイム設定レジスタの使い方

DTG [7:5]	デッド・タイムの範囲*	設定分解能	デッド・タイム設定値
0xx	0~15875ns	125ns	DTG [7:0] × t <sub>DTG</sub> (tdtg = t <sub>DTS</sub> )
10x	16μ~31750ns	250ns	64 + DTG [5:0] × t <sub>DTG</sub> (t <sub>DTG</sub> = 2 × t <sub>DTS</sub> )
110	32μ~63μs	1μs	32 + DTG [4:0] × t <sub>DTG</sub> (t <sub>DTG</sub> = 8 × t <sub>DTS</sub> )
111	64μ~126μs	2μs	32 + DTG [4:0] × t <sub>DTG</sub> (t <sub>DTG</sub> = 16 × t <sub>DTS</sub> )

\* t<sub>DTS</sub> = 125ns (8MHz) の場合

0: OC1はアクティブではありません。OC1のレベルは、MOE, OSSI, OSSR, OIS1, OIS1N, CC1NEビットによって決まります。

1: OC1はMOE, OSSI, OSSR, OIS1, OS1N, CC1NEビットの設定に従って、対応するピンに出力されます。

CC1チャンネルが入力として設定されている場合は、このビットによって、キャプチャ/比較レジスタ1 (TIMx\_CCR1) へのキャプチャが実際に行われるかどうかが決まります。

0: キャプチャは無効になります

1: キャプチャは有効になります

### ● デッド・タイムの設定

図12はPWMにおけるデッド・タイムの定義です。上側PWMであるCH1と下側PWMであるCH1Nがともに0になる期間を設け駆動するパワーMOSFETに貫通電流が流れるのを防ぎます。

#### ▶ デッド・タイム・ジェネレータのセットアップ

相補出力の間に挿入されるデッド・タイムの長さを指定します。デッド・タイムの設定は、デッド・タイム設定レジスタにあるDTGの0~7ビットで設定します(図13)。上位3ビット(DTG[7:5])でデッド・タイムの設定範囲と分解能を指定します(表1)。次に

設定例を示します。

#### ● デッド・タイムの設定例①

例えば、

$$BDTR = 0x800a;$$

とした場合のデッド・タイムは、DTG[7:5]=0xxになりますので、分解能は125nsになります。設定値(DTG[7:0])は0x0aなので10 × 125ns=1250ns=1.25μsとなります。

#### ● デッド・タイムの設定例②

もう1例を紹介します。BDTR = 0x80ca;とした場合、DTG[7:5]=110になりますので、分解能は1μsです。設定値は0xcaなので、(32 + 10) × 8 × 125ns = 42000ns = 42.0μsになります。

図14に①、②の設定において実際のデッド・タイムの測定画面を示します。①の場合はほぼデッド・タイムはゼロに近い値です[図14(a)]。②の場合は2.3μsになっています[図14(b)]。これはt<sub>DTS</sub>=125ns(8MHz)の場合の計算では42.0μsよりかなり速いです。t<sub>DTS</sub>=6.94ns(144MHz)で②を計算し直すと、(32 + 10) × 8 × 6.94ns = 2332ns = 2.33μsとなり図14の②の実測値とほぼ合致します。このことからタイマ(TIM1)へのクロックは144MHzになっていることが分かります。

おおぐろ・あきよし