

●●●● サウンド機構

FM 音源とサンプリング (ADPCM) 音源の両方を標準で搭載した X 68000 のサウンド機構は、効果音から音声出力までを幅広くサポートしています。ここでは、X 68000 のサウンド機構について説明します。

●1 X 68000のサウンド構成

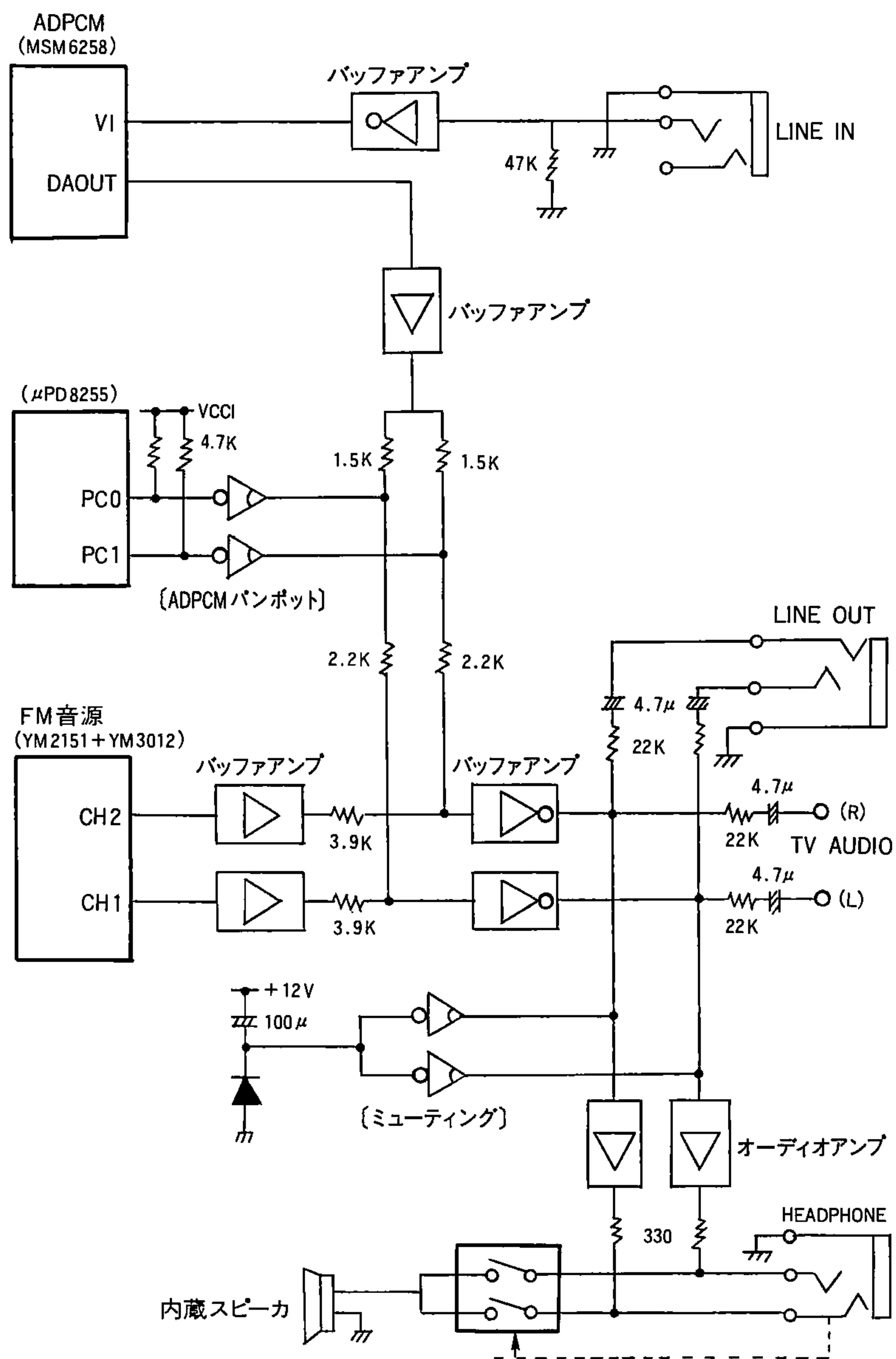
X 68000 のサウンドシステムのブロック図を 260 ページの図 1 に示します。X 68000 は、音声の取り込みや再生を行う ADPCM 音源と、正弦波を基本として純粋に演算処理で音を作成する FM 音源の 2 つの音源用 LSI を内蔵しています。

ADPCM の出力は、バッファアンプを通した後、左右に振り分けられて、FM 音源 IC の出力と合成されます。振り分けた後にある、 μ PD 8255 の出力と接続されている部分はパンポット制御回路で、ADPCM の出力を右、左、中央のいずれに出力するか(あるいは、出力しないか)を決定する部分です。PC 0 が左チャンネル、PC 1 が右チャンネルに対応していて、出力が '1' (=High レベル) になっていると、該当するチャンネルへの出力が OFF にされます。両チャンネルとも ON になっていると、聴感上、中央から出力されているように聞こえます。

ハードウェアリセット後は 8255 の I/O ピンはすべて入力となるため、ADPCM の出力は両方とも OFF に、8255 のイニシャライズ直後は出力ピンはすべて '0' (=Low レベル) となるため、ADPCM 出力は両チャンネルとも ON になります。

オーディオアンプの前にも似たような回路が組んであります。これはどうやらミューティン

●図…… 1 サウンド系のブロック図



グ回路（電源投入時に「ボコッ」と大きな音が出てしまうのを防ぐ回路）のようです。

●2 FM音源

X 68000 では FM 音源 LSI としてヤマハの YM 2151 を使用しています。ヤマハでは、いくつも FM 音源 LSI を製造していますが、それぞれに愛称がついています。YM 2151 は OPM (Fm Operator Type-m) という名称になっています。この名称は Human 68 K などでも使用されているため、ご存じの方も多いでしょう。本書でも FM 音源 LSI の名称として OPM を使用することにします。

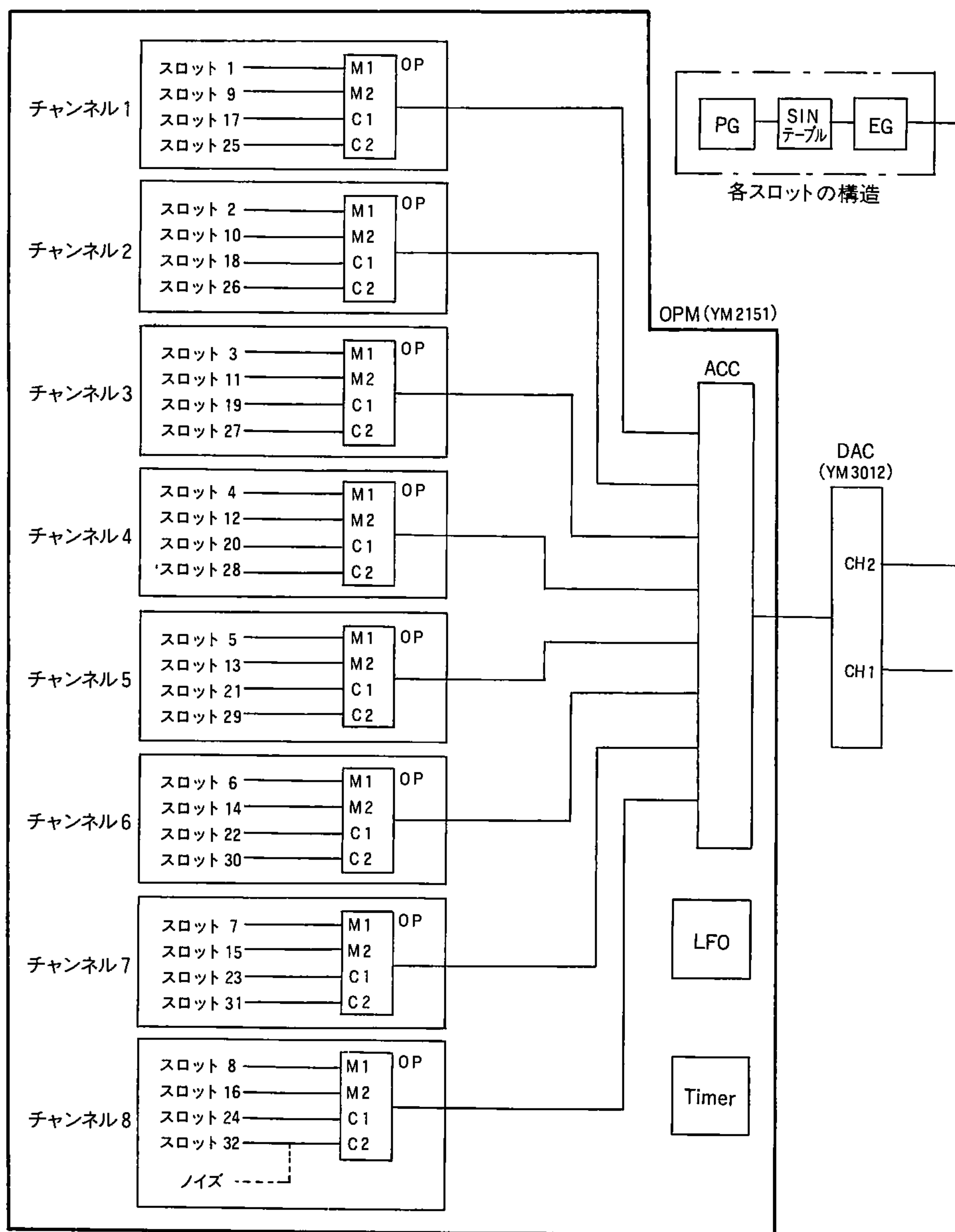
2.1 OPMの内部ブロック

OPM の内部ブロック図を 262 ページの図 2 に示します。OPM は 8 つの音声出力回路を持っており、それらの出力がミックスされて出力信号として取り出されます。それぞれのチャンネルは、チャンネル 1 からチャンネル 8 まで番号が振られており、通常の音楽演奏などでは、このチャンネル 1 つが楽器の 1 音に対応します。たとえば、ドミソの和音が必要なときはチャンネル 1 でド、2 でミ、3 でソの音を出力させるようにするわけです。

各チャンネルは 4 つのスロットと呼ばれる正弦波発振器からなっており、それぞれ M1 (モジュレータ 1)、M2 (モジュレータ 2)、C1 (キャリア 1)、C2 (キャリア 2) と名称がつけられています。これらを直列や並列につなぎあわせることで複雑な波形をつくり出すわけです。

OPM にはこのほか、音が出始めてから消えるまでのレベル変化(立ち上がりの強弱や余韻の長さなど)を制御するエンベロープジェネレータ (EG と略されます) や、ブルブルといった感じになる音の大きさの変化や、ワウワウといった周波数の変化 (ビブラート) をつけるための LFO (Low Frequency Oscillator)、あらかじめ設定した時間がくると CPU に割り込みをかけたり、全部のスロットを一度に発声開始させることができるタイマ、「ザー」や「シー」といった音をつくるノイズ発生器 (スロット 32 と切り替えて使用します) などが組み込まれています。

●図…… 2 OPM 内部ブロック図



M1: Modulator 1 OP : FM Operator
M2: // 2 LFO: Low Frequency Oscillator
C1: Carrier 1 ACC: Accumulator
C2: // 2 PG : Phase Generator
EG : Envelope Generator

2.2 | スロットの基本構造

OPM の発声単位であるスロットの基本構造と、それぞれを制御しているパラメータを 264 ページの図 3 に示します。

スロットの中心をなすのは SIN 波形テーブルです。SIN 波形テーブルは、角度データを与えると、それに対する sin 値が出力として取り出されるテーブルです。このテーブルの入力として、0 から 2π まで直線的に変化し、次にふたたび 0 に戻るような、鋸波のデータを入力すれば、出力はきれいなサインカーブとなり、入力波形を歪めると、出力波形は大きく歪むことになります。OPM ではスロットの入力に与える波形として、鋸波と他のスロットからの入力 (M1 スロットは自分自身の出力) を加算したものを与えることができるようになっています。たとえば、他のスロットからサイン波を与えると、SIN 波形テーブルの出力 A_{\sin} は、

$$A_{\sin} = \text{SIN}(\omega t + \alpha \text{SIN}(\psi t))$$

t : 時刻

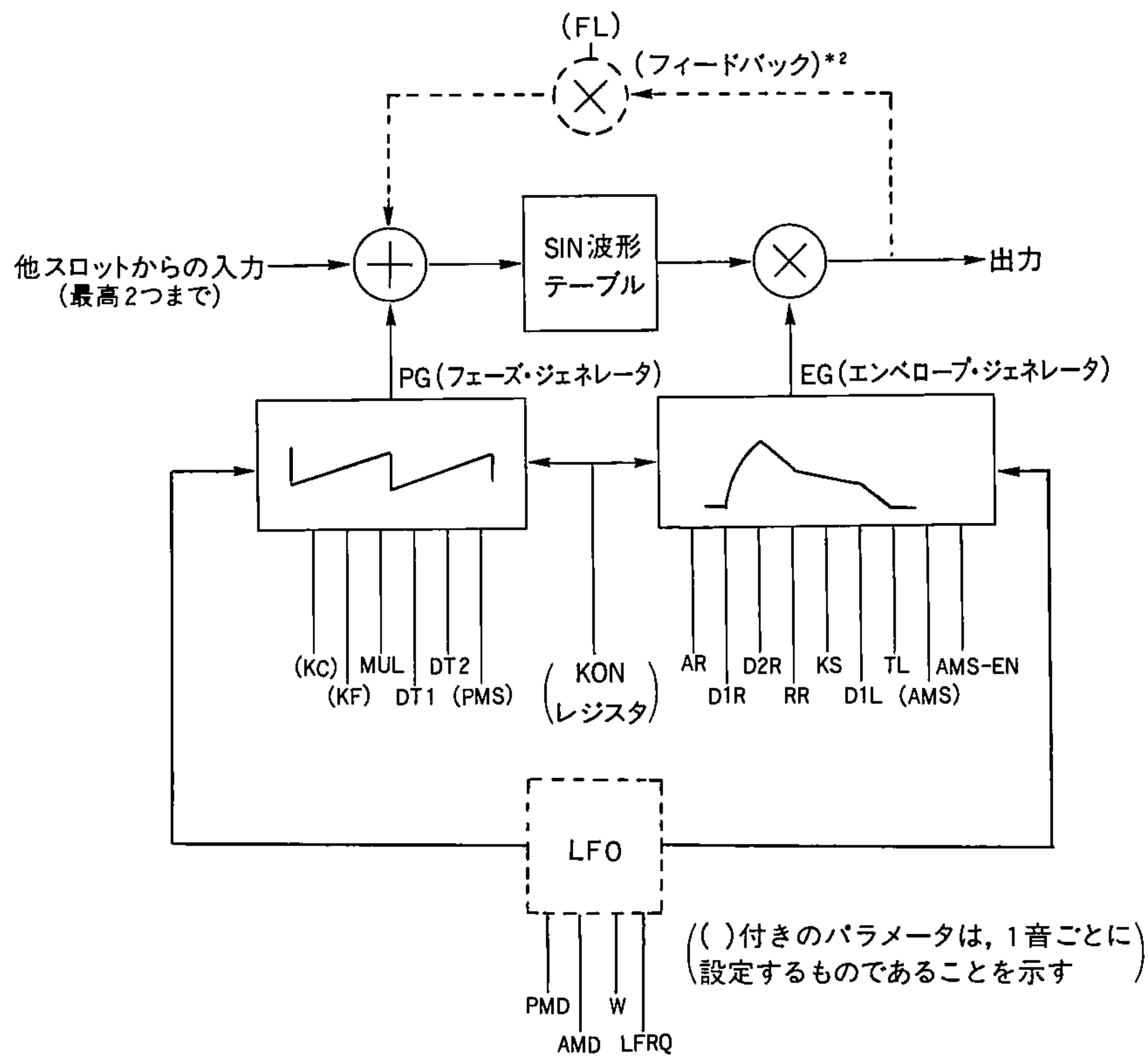
ψ, ω : 角振動数

α : 初段のスロットの出力レベルを決める値

となるわけです。先ほど触れた鋸波は、この式の中の ωt , ψt の部分に相当します。OPM ではこの信号を作成している部分をフェーズジェネレータ (PG) と呼んでいます。フェーズジェネレータを訳すと「位相生成器」となりますが、たんに「鋸波発振器」と考えておいてよいでしょう。フェーズジェネレータが発生する鋸波の基本周波数は、OPM のレジスタ中の KC, KF, MUL, DT1, DT2 といったパラメータで決定され、さらに LFO (後述します) による変化の影響度を PMS で決定します。

さて、この SIN テーブルの出力に実際に楽器を演奏したときに起こるような出力の時間的な変化を与えるのがエンベロープジェネレータ (EG) です。EG の波形は、アタック、ファーストディケイ、セカンドディケイ、リリースの 4 段階に分けられます (シンセサイザの世界などではファーストディケイの部分をたんにディケイ、セカンドディケイをサスティンと呼ぶのが一般的なようですが、ここではメーカーのアプリケーションマニュアルに従った名称にしています)。これらを鍵盤楽器の場合にあてはめると、アタックはキーを押した直後の音の立ち上がり、ファーストディケイはアタックで行きついたところから少し戻るところ、セカンドディケイはキーを押し続けている間、音量が少しずつ下がっていくところ、リリースはキーから手を離れた後の余韻に相当します。先ほどの式でいうと、初段のスロットの出力にかけ算されている α が初段スロットの EG の出力に相当します。当然、次段も独立した EG を持っていますか

●図…… 3 スロットの基本構造



*1: フィードバックは、M1 スロットだけにある

KC : Key Code	PMD : Phase Modulation Depth
KF : Key Fraction	AMD : Amplitude Modulation Depth
MUL: Phase MULtipl	W : Waveform
DT1: De Tune 1	LFRQ: Low FReQuency
DT2: De Tune 2	
PMS: Phase Modulation Sensitivity	
AR : Attack Rate	
D1R : 1'st Decay Rate	
D2R : 2'nd Decay Rate	
RR : Release Rate	
KS : Key Scaling	
D1L : 1st Decay Level	
TL : Total Level	
AMS: Amplitude Modulation Sensitivity	
AMS-EN: AMS Enable	

ら、出力 Aout は EG の出力 β を使って、

$$A_{out} = \beta \sin(\omega t + \alpha \sin(\psi t))$$

と表すことができます。

EG の出力波形は、OPM のレジスタ中の AR, D1R, D2R, RR, KS, D1L, TL といったパラメータで決定され、さらに LFO による出力レベル変動の ON/OFF や変動の度合を AMS-EN や AMS で決定しています。

図 3 の PG, EG のパラメータのうち、() でくくったものは 1 チャンネルごとに設定するものであることを、くくっていないものは 1 スロットごとに設定するものであることを示します。

図 3 の、点線で示された LFO というブロックは、PG や EG の出力を低い周波数でふらつかせるための信号発生器です。OPM ではチップ内に 1 つだけ持っており、この出力をすべてのスロットが共通で使用しています。LFO は PG 用と EG 用の 2 つの出力を持っており、それぞれの出力レベルを PMD, AMD というパラメータで指定します。LFO の出力波形の種類、周波数はそれぞれ W, LFRQ というパラメータで決定されます。

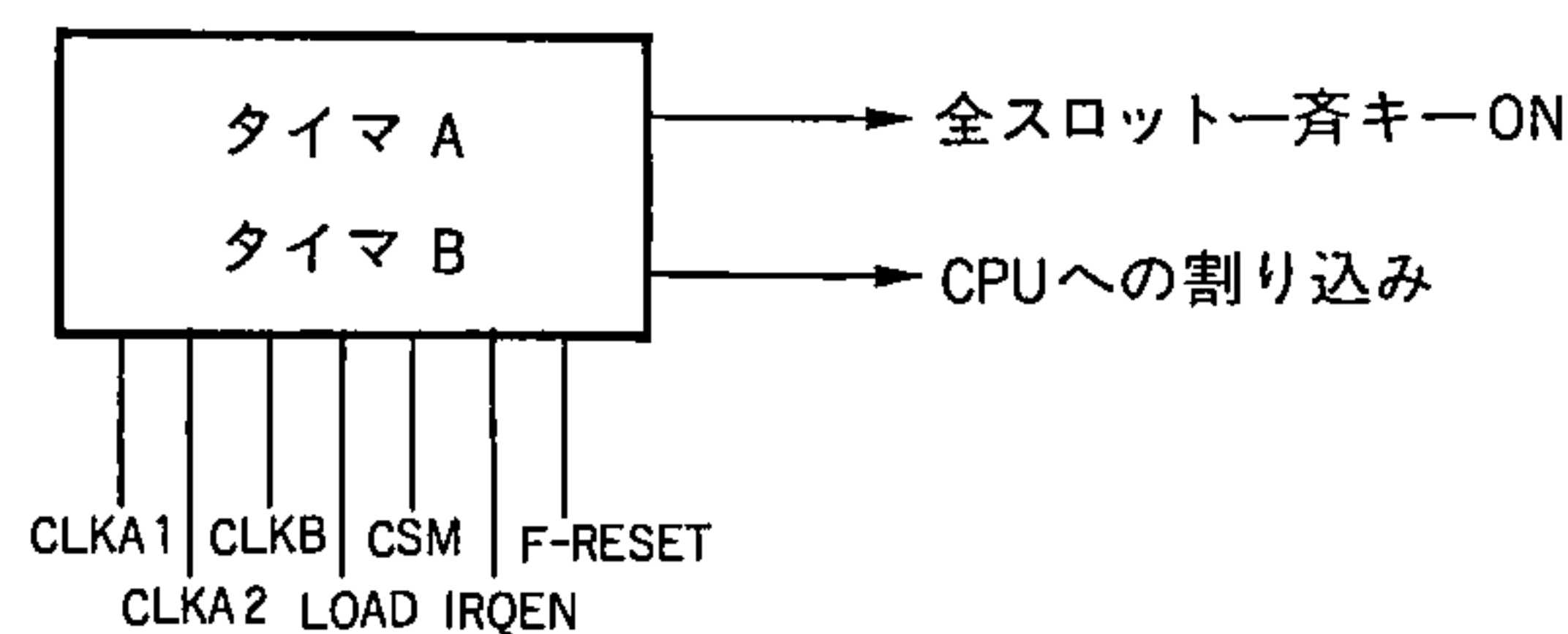
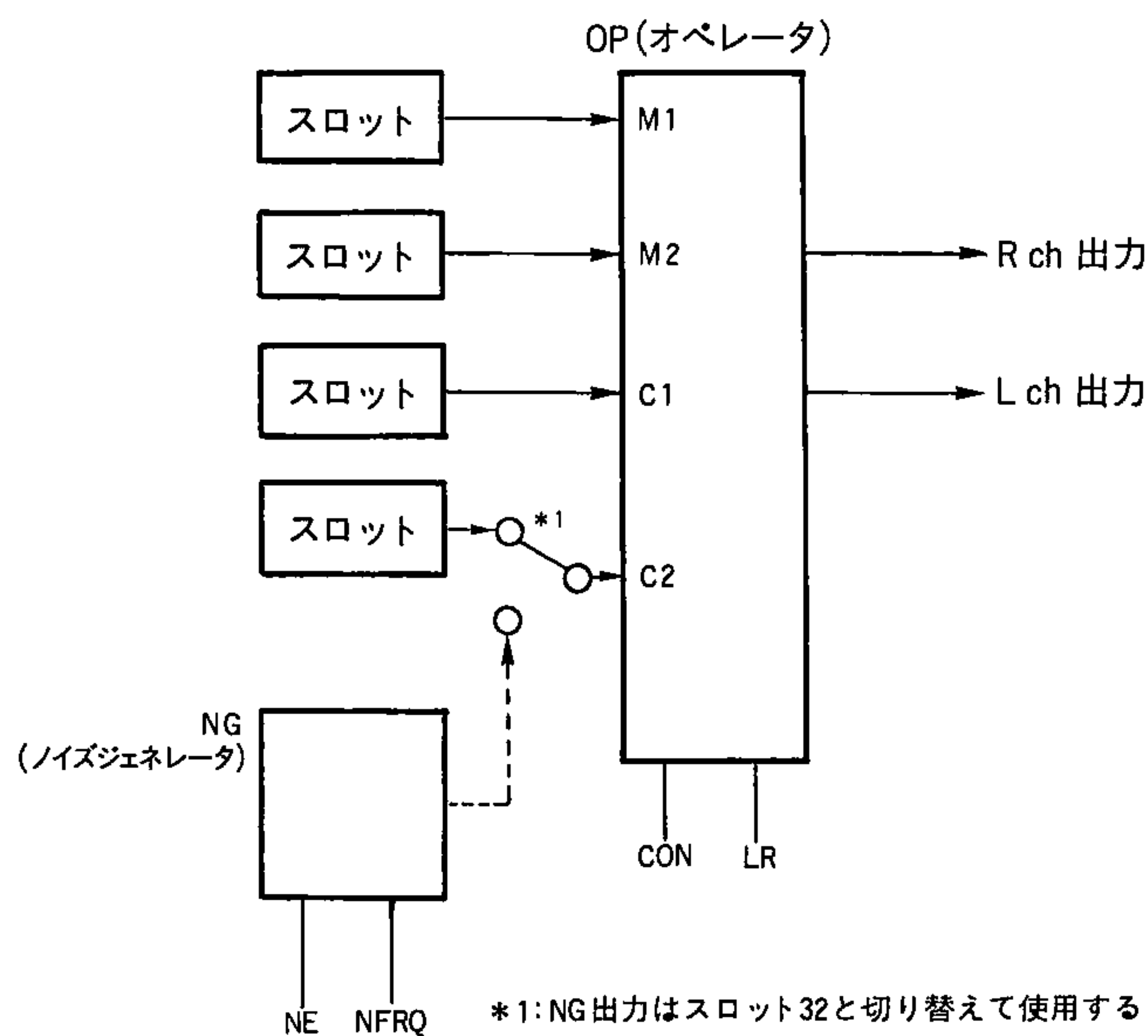
M1 スロットだけは自分自身の出力を自分の入力信号とするフィードバック回路を持っており、このフィードバック量を FL パラメータで指定するようになっています

2・3 | その他の部分の基本構造

OPM のスロット以外の部分の基本構造を 266 ページの図 4 に示します。オペレータには、スロットの組み合わせを指定する CON, チャンネルの音を左右, 中央のいずれから出力するかを指定する LR パラメータが入力されます (メーカーが公表している OPM のブロック図では、LR はアキュムレータの部分に入力されているのですが、感覚的にはオペレータに効いていると考えるほうがわかりやすいので、ここではオペレータに入力されるものとしています)。

ノイズジェネレータは OPM 内に 1 つだけあります。ノイズ出力の ON/OFF は NE, 音質を NFRQ で指定します。ノイズ出力が ON されると、スロット 32 の SIN 波形テーブルの出力がノイズジェネレータの出力と置き換えられます (図では表しにくいので、スロットの出力と切り替えるように書いています)。

●図…… 4 スロット以外の部分の基本構造



NE: Noise Enable
 NFRQ: Noise FReQuency
 CON: CONnection
 LR: Left channel Enable/
 Right channel Enable

2・4 OPMのアドレス配置

OPM のポートアドレスを図 5 に示します。

CPU は、\$E90001 番地にレジスタ番号を設定した後、\$E90003 番地のデータポートを使って、これらのレジスタにアクセスします。OPM は内部に多くのレジスタを持っていますが、音作りに関係するレジスタはすべて書き込み専用であり、リード時はレジスタ番号の設定に関係なく、つねにステータスレジスタが読み出されます。

●図…… 5 OPM のポートアドレス

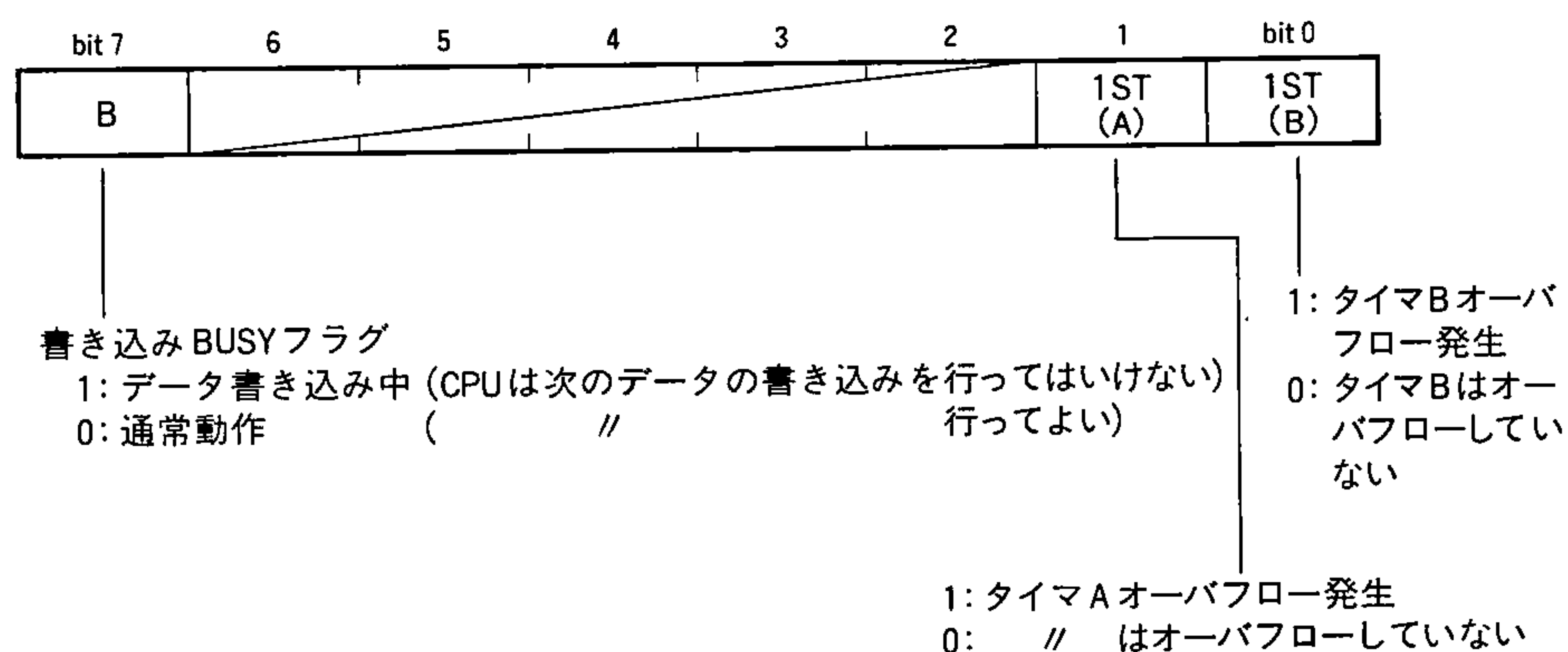
アドレス	データ								内 容
	D ₇	D ₆	D ₅	D ₄	D ₃	D ₂	D ₁	D ₀	
\$E 90001									レジスタ番号設定ポート
\$E 90003									データRead/Writeポート

2.5 OPMのリードレジスタ

OPM からのリードを行うと、つねにステータスレジスタの内容が読み出されます。このレジスタのビット配置を図 6 に示します。ビット 7 は OPM の書き込み BUSY フラグで、OPM が CPU から次のアクセスを受け付けられない状態であることを示しています。OPM への書き込みを行う場合は、このビットが '0' になっていることを確認してから行わなければなりません。

ビット 0 とビット 1 は、OPM 内部の 2 つのタイマのうち、いずれがオーバーフローしたのかを示すビットです。OPM のタイマは、あらかじめ設定した時間が経過した後に CPU に割り込みをかけたり、全スロットに一斉にキーオンを与えることができます。このビットはおもに CPU に割り込みをかけるような使い方をしたとき、割り込みがいずれのタイマによるものであるかを CPU が判断できるようにするために使用します。

●図…… 6 OPM ステータスレジスタ



2.6 OPMのライトレジスタ

OPMの書き込みレジスタの配置を図7と図8に示します。レジスタ番号が\$00から\$1Fまでのレジスタはノイズ、タイマ、LFOなど、OPM内部に1つしかないものの設定、\$20から\$3Fがチャンネル単位で指定するもの、\$40から\$FFはスロット単位で指定するものが配置されています。次に、これらのレジスタをアドレス順に説明していくことにしましょう。

●図……7 OPMのレジスタ一覧（その1）

レジスタ 番号	bit 7	bit 6	bit 5	bit 4	bit 3	bit 2	bit 1	bit 0	備 考
\$00									
\$01			'0'				LFO Reset	'0'	テスト用レジスタと兼用なので、bit1以外のビットを'1'にしないこと
\$02 } \$07									
\$08				KON (C2), (C1), (M2), (M1)			(CH No)		Key ON/OFF 制御
\$09 } \$0E									
\$0F	NE						NFRQ		$f_{noise}(\text{Hz}) = \frac{4000}{32 \times \text{NFRQ}}$ (ノイズ制御)
\$10				CLKA (上位)					$T_A(\text{ms}) = \frac{64 \times (1024 - \text{CLKA})}{4000}$ (タイマA)
\$11							CLKA (下位)		
\$12				CLKB					$T_B(\text{ms}) = \frac{1024 \times (256 - \text{CLKB})}{4000}$ (タイマB)
\$13									
\$14	CSM		F-RESET (B), (A)		IRQEN (B), (A)		LOAD (B), (A)		タイマ動作制御
\$15 } \$17									
\$18				LFRQ					LFO周波数設定
\$19	F			PMD/AMD					F = 1: PMD = 0: AMD
\$1A									
\$1B	CT1	CT2						W	汎用出力制御 (CT1/CT2) LFO出力波形選択 (W)
\$1C } \$1F									

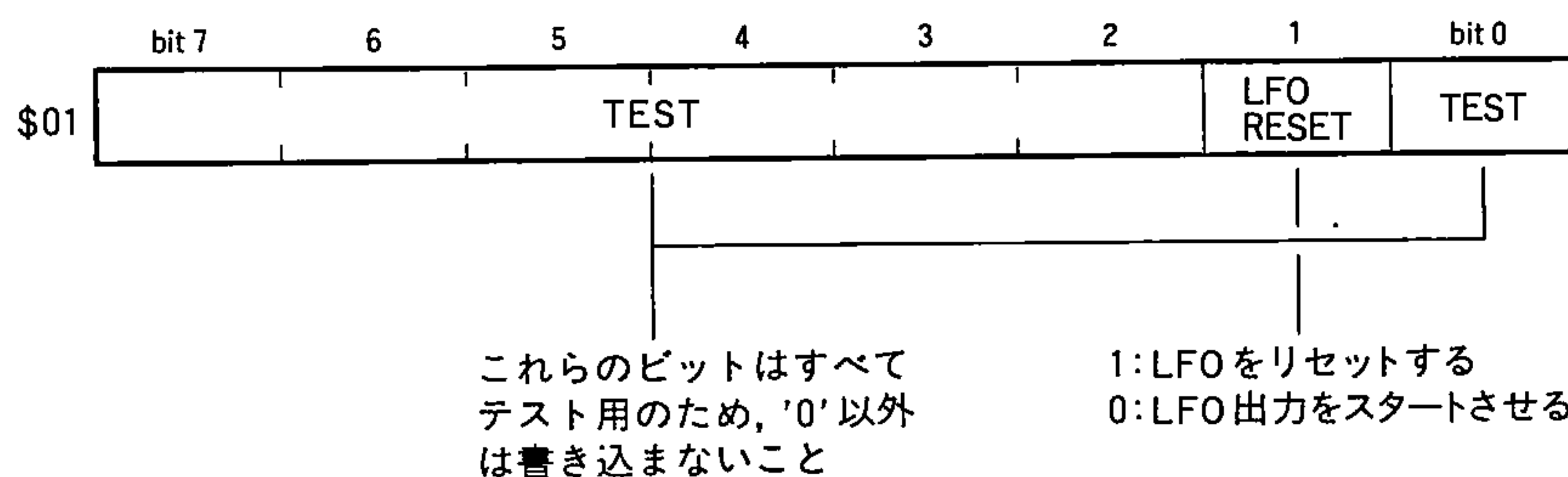
●図…… 8 OPM のレジスタ一覧 (その2)

レジスタ 番号	bit 7	bit 6	bit 5	bit 4	bit 3	bit 2	bit 1	bit 0	備 考	
\$20 } \$27	R-ch EN	L-ch EN		FL		CON			R/L出力イネーブル(チャンネルの出力ON/OFF) FL: Feedback Level(MIのフィードバック量制御) CON: Connection (スロットの結合方式選択)	1 音ごとに設定
\$28 } \$2F					KC				音階選択	
\$30 } \$37									音階微調整	
\$38 } \$3F									PMS: Phase Modulation Sensitivity AMS: Amplitude Modulation Sensitivity	
\$40 } \$5F									DT1: Detune 1 (周波数微小変化) MUL: Phase Multiply(周波数倍率設定)	1 スロットごとに設定
\$60 } \$7F									TL: Total Level(出力レベル設定)	
\$80 } \$9F									KS: Key Scaling(EGの各レートのKCへの依存度 選択) AR: Attack Rate	
\$A0 } \$BF									AMS EN: AMS Enable D1R: 1'st Decay Rate	
\$C0 } \$DF									DT2: Detune 2 (周波数大変化) D2R: 2'nd Decay Rate	
\$E0 } \$FF									D1L: 1'st Decay Level RR: Release Rate	

2・61 | テストレジスタ

テストレジスタのビット配置を図9に示します。

●図…… 9 テストレジスタ



このレジスタは、メーカーの出荷検査時に使うのがおもな目的です。公開されているのはビット1だけで、これ以外のビットはすべて'0'で使うようにしてください。ビット1を'1'にするとLFOがリセットされ、'0'に戻すとLFOがスタートします。他の音とLFOを同期させて動かしたいような場合に有効です。

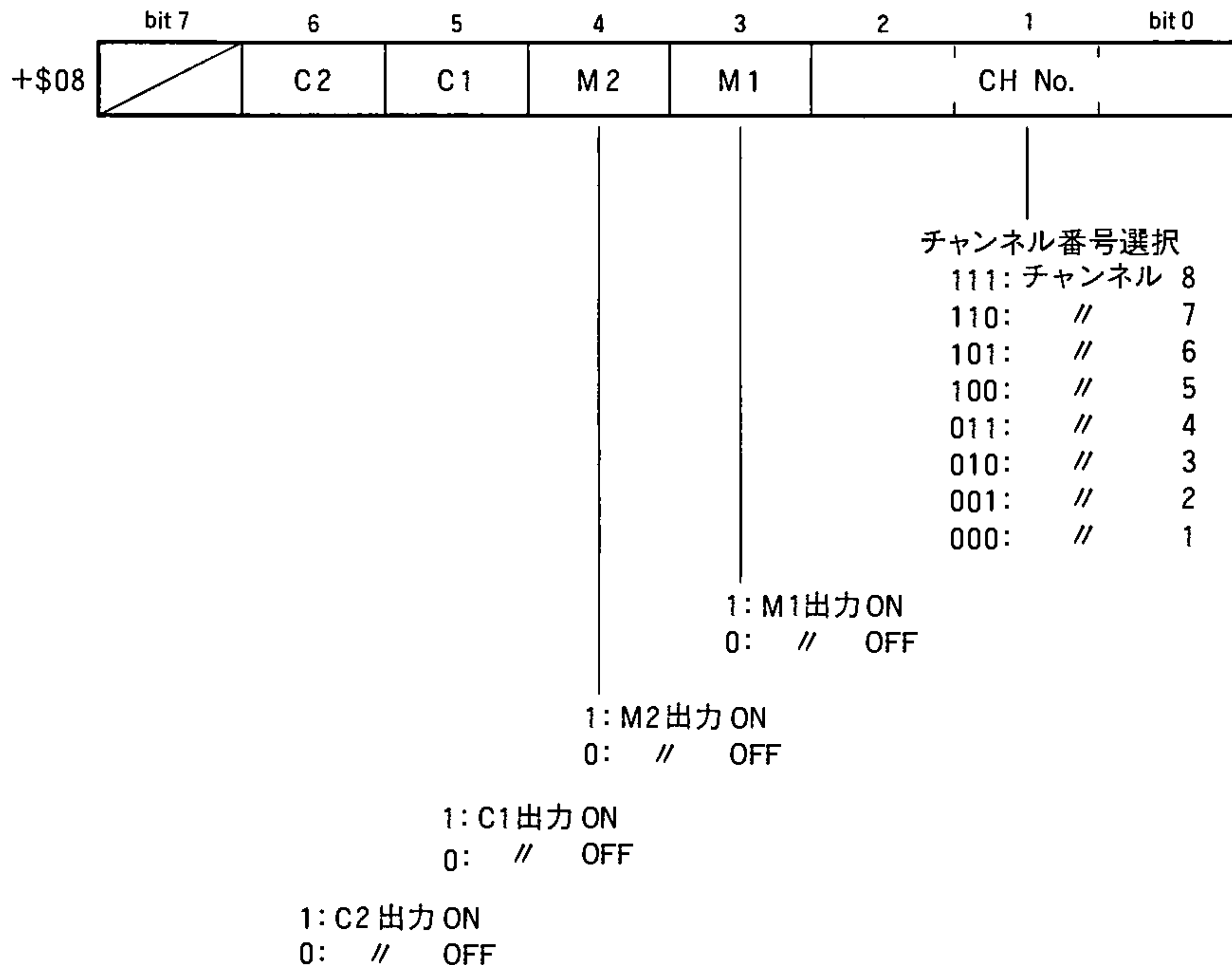
2.6.2 KONレジスタ

キーオン/キーオフの制御を行うレジスタです。ビット配置を図10に示します。音のON/OFFを制御するもので、鍵盤楽器でいうと、鍵盤を押したときがキーオン、鍵盤から指を離れたときがキーオフとなります。

KONレジスタの下位3ビットで制御したいチャンネルを、ビット3～6で、そのチャンネルの各スロットをキーオンするか、キーオフするかを決めます。該当するビットが'1'のときにキーオン、'0'のときにキーオフになります。

KONレジスタでは1チャンネルずつしかONできないため、複数のチャンネルをキーオン

●図……10 KON

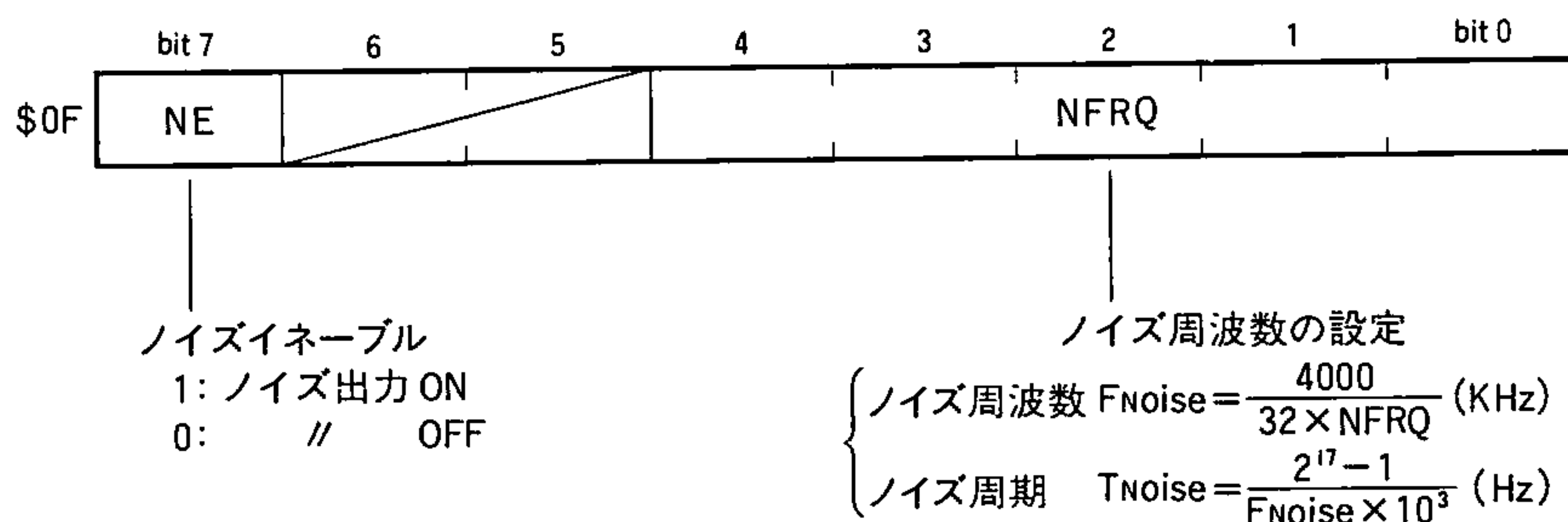


させたときは、当然のことながら、それぞれのチャンネルの出力波形の位相はあわなくなります。位相を確実にあわせてスタートさせたいときはタイマAによるキーオン機能を利用します。

②・⑥ 3 ノイズジェネレータ制御レジスタ

OPM 内部のノイズジェネレータの ON/OFF 制御やノイズ周波数の制御を行うレジスタです。ビット配置を図 11 に示します。下位 5 ビットでノイズ周波数を、ビット 7 でノイズジェネレータの ON/OFF 制御を行います。ビット 7 が '1' だとノイズジェネレータがイネーブルになり、スロット 32 がノイズと入れ替わります。エンベロープジェネレータはスロット 32 のものがそのまま使用されますが、エンベロープのカーブはアタックがエクスポネンシャル、それ以外はすべて直線的に変化するようになります。

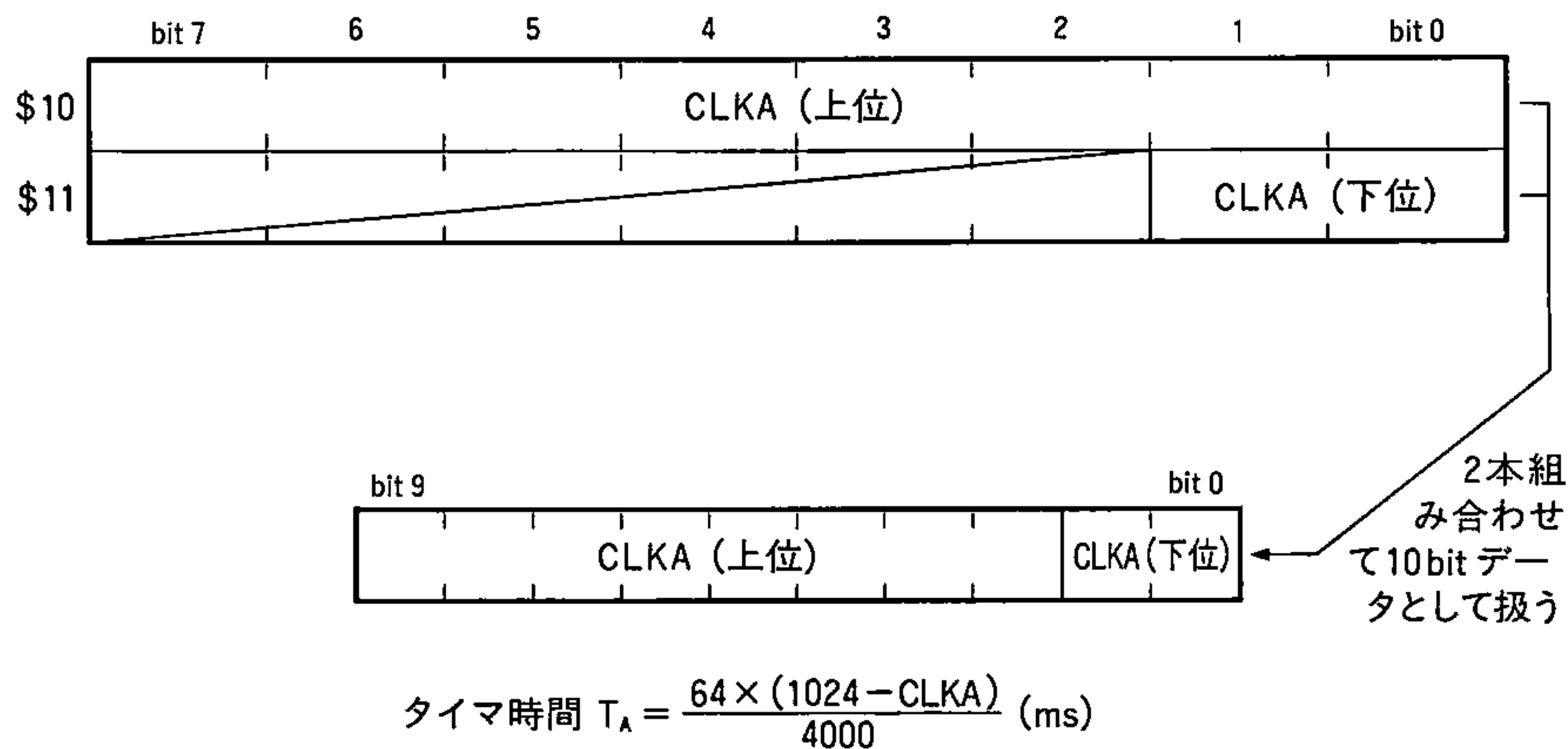
●図……11 ノイズジェネレータ制御



②・⑥ 4 タイマ A 設定レジスタ

OPM が持っている 2 本のタイマのうち、タイマ A に時間設定を行うレジスタです。ビット配置は 272 ページの図 12 のようになっています。データ長が 10 ビットあるので、上位 8 ビットをレジスタ番号 \$10 に、下位 2 ビットを \$11 に割り付けています。このレジスタに設定した値を CLKA とすると、 $64 \times (1024 - \text{CLKA}) / 4000$ (ms) 後にオーバフローを起こします。CPU に割り込みをかけたり、全スロットに一斉にキーオンを与えることができます。

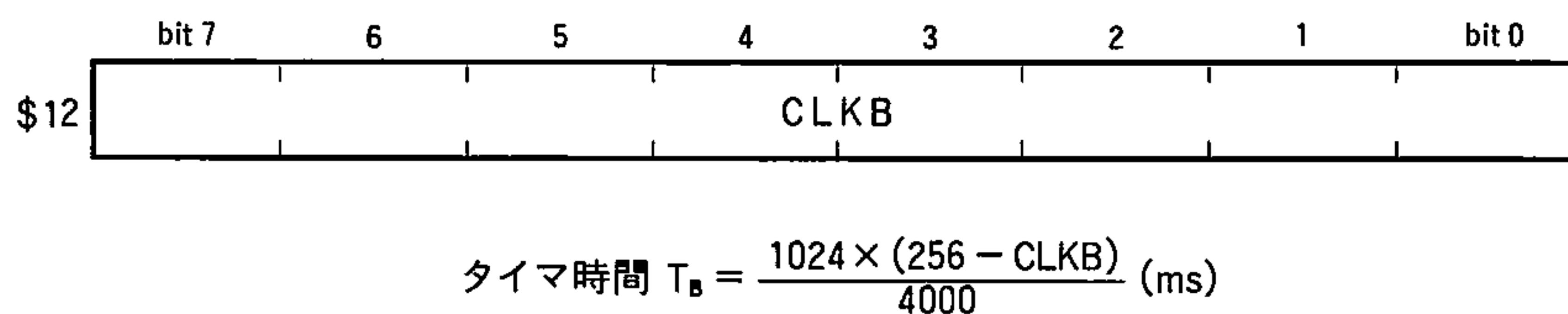
●図……12 タイマ A 設定



2.6.5 タイマ B 設定レジスタ

タイマBに時間設定を行うレジスタです。ビット配置は図 13 のようになっています。タイマBはビット長が8ビットであるため、レジスタ番号\$12だけでカウント値が設定できます。このレジスタに設定する値を CLKB とすると、 $1024 \times (256 - \text{CLKB}) / 4000$ (ms)後に CPU に割り込みをかけることができます。

●図……13 タイマ B 設定

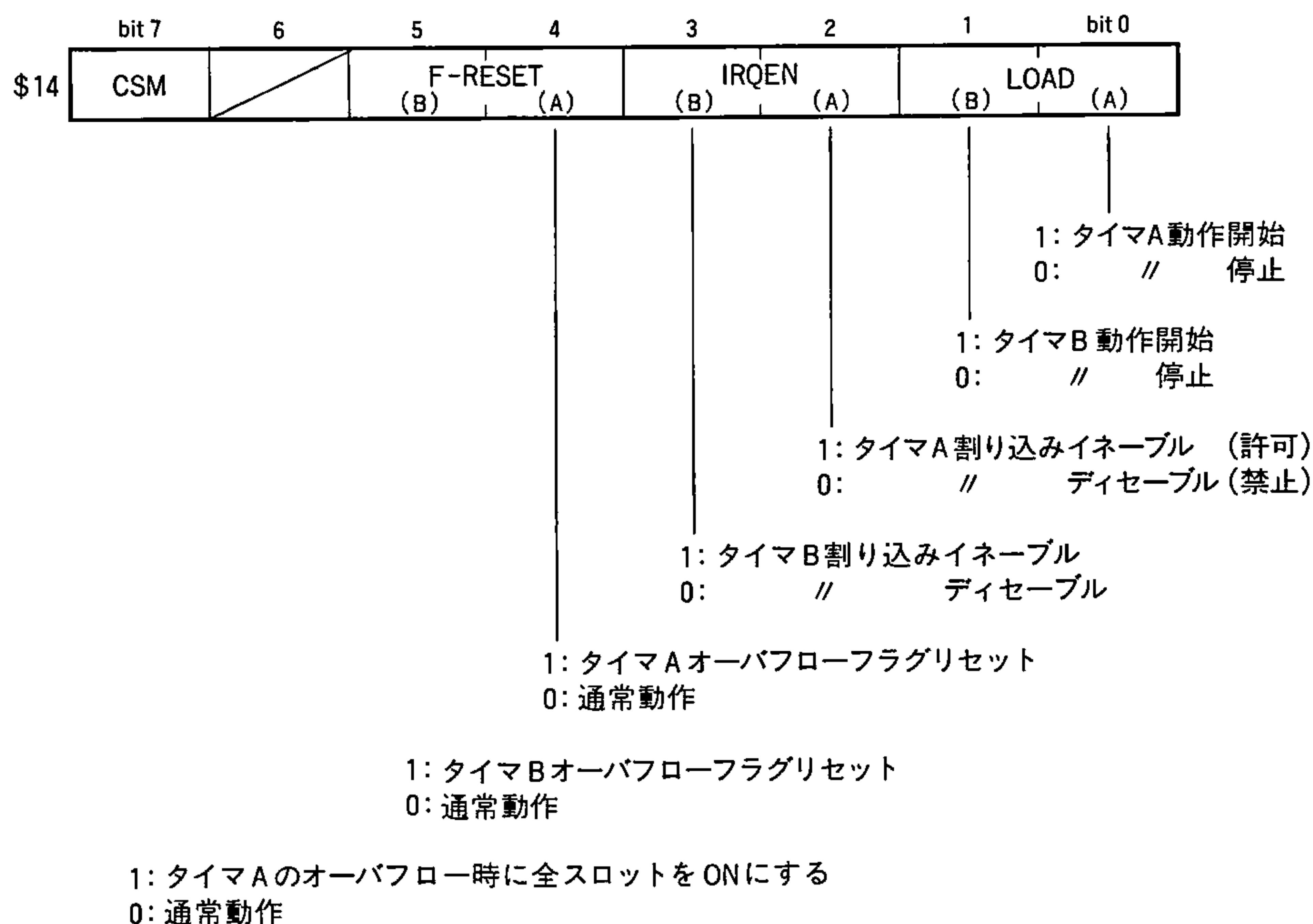


2.6.6 タイマ制御レジスタ

タイマ制御レジスタのビット配置を図 14 に示します。このレジスタは、タイマの動作 ON/OFF 制御や割り込みを発生するか否かなどを指定するものです。

ビット 0, 1 はタイマ動作の ON/OFF を制御するもので、ビット 0 がタイマAに、ビット 1 がタイマBに該当し、'1'でタイマが始動、'0'で停止します。

●図……14 タイマ制御



ビット 2, 3 は、タイマがオーバーフローしたときに CPU に割り込みをかけるか否かを設定するもので、ビット 2 がタイマ A 用、ビット 3 がタイマ B 用です。このビットを '1' にしておくと、オーバーフロー発生時に CPU に割り込み発生を許可するとともに、ステータスレジスタの 1 ST ビットを '1' にセットします。

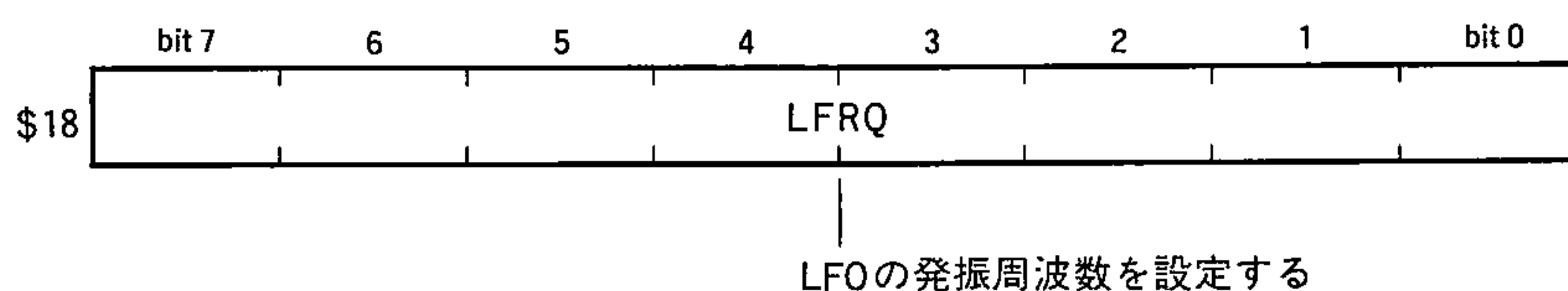
ビット 4, 5 はステータスレジスタの 1 ST ビットをクリアするための制御ビットで、ビット 4 がタイマ A、ビット 5 がタイマ B の 1 ST ビットクリアに使用されます。このビットを '1' にすると、該当する 1 ST ビットがクリアされます。

ビット 7 はタイマ A による一斉キーオン機能を使うか否かを指定するもので、'1' を設定しておくと、タイマ A のオーバーフローが発生したときに自動的に全スロットがキーオンされます。

②・⑥ 7 LFO 周波数設定レジスタ

274 ページの図 15 にビット配置を示します。ビブレードなどをかけるための LFO の周波数を決定します。設定値と周波数の関係を表 1 に示します。

●図……15 LFO 周波数設定



●表…… 1 LFRQ の設定値と LFO の発振周波数の関係

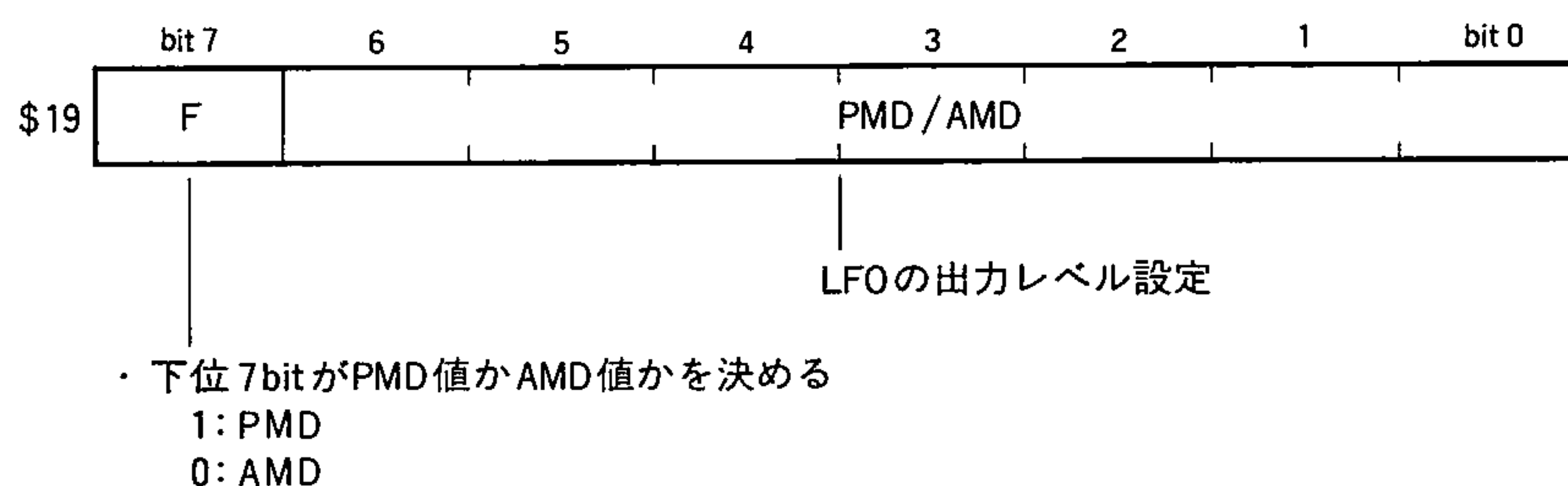
DATA (HEX)	FREQ. (Hz)	DATA (HEX)	FREQ. (Hz)	DATA (HEX)	FREQ. (Hz)	DATA (HEX)	FREQ. (Hz)
FF	59.1278	BF	3.6955	7F	0.2310	3F	0.0144
FE	57.2205	BE	3.5763	7E	0.2235	3E	0.0140
FD	55.3131	BD	3.4571	7D	0.2161	3D	0.0135
FC	53.4058	BC	3.3379	7C	0.2086	3C	0.0130
FB	51.4984	BB	3.2187	7B	0.2012	3B	0.0126
FA	49.5911	BA	3.0994	7A	0.1937	3A	0.0121
F9	47.6837	B9	2.9802	79	0.1863	39	0.0116
F8	45.7764	B8	2.8610	78	0.1788	38	0.0112
F7	43.8690	B7	2.7418	77	0.1714	37	0.0107
F6	41.9617	B6	2.6226	76	0.1639	36	0.0102
F5	40.0543	B5	2.5034	75	0.1565	35	0.0098
F4	38.1470	B4	2.3842	74	0.1490	34	0.0093
F3	36.2396	B3	2.2650	73	0.1416	33	0.0088
F2	34.3323	B2	2.1458	72	0.1341	32	0.0084
F1	32.4249	B1	2.0265	71	0.1267	31	0.0079
F0	30.5176	B0	1.9073	70	0.1192	30	0.0075
EF	29.5639	AF	1.8477	6F	0.1155	2F	0.0072
EE	28.6102	AE	1.7881	6E	0.1118	2E	0.0070
ED	27.6566	AD	1.7285	6D	0.1080	2D	0.0068
EC	25.7029	AC	1.6689	6C	0.1043	2C	0.0065
EB	25.7492	AB	1.6093	6B	0.1006	2B	0.0063
EA	24.7955	AA	1.5497	6A	0.0969	2A	0.0061
E9	23.8419	A9	1.4901	69	0.0931	29	0.0058
E8	22.8882	A8	1.4305	68	0.0894	28	0.0056
E7	21.9345	A7	1.3709	67	0.0857	27	0.0054
E6	20.9808	A6	1.3113	66	0.0820	26	0.0051
E5	20.0272	A5	1.2517	65	0.0782	25	0.0049
E4	19.0735	A4	1.1921	64	0.0745	24	0.0047
E3	18.1198	A3	1.1325	63	0.0708	23	0.0044
E2	17.1661	A2	1.0729	62	0.0671	22	0.0042
E1	16.2125	A1	1.0133	61	0.0633	21	0.0040
E0	15.2588	A0	0.9537	60	0.0596	20	0.0037
DF	14.7820	9F	0.9239	5F	0.0577	1F	0.0036
DE	14.3051	9E	0.8941	5E	0.0559	1E	0.0035
DD	13.8283	9D	0.8643	5D	0.0540	1D	0.0034
DC	13.3514	9C	0.8345	5C	0.0522	1C	0.0033
DB	12.8746	9B	0.8047	5B	0.0503	1B	0.0031
DA	12.3978	9A	0.7749	5A	0.0484	1A	0.0030
D9	11.9209	99	0.7451	59	0.0466	19	0.0029
D8	11.4441	98	0.7153	58	0.0447	18	0.0028
D7	10.9673	97	0.6855	57	0.0428	17	0.0027
D6	10.4904	96	0.6557	56	0.0410	16	0.0026
D5	10.0136	95	0.6258	55	0.0391	15	0.0024
D4	9.5367	94	0.5960	54	0.0373	14	0.0023
D3	9.0599	93	0.5662	53	0.0354	13	0.0022
D2	8.5831	92	0.5364	52	0.0335	12	0.0021
D1	8.1062	91	0.5066	51	0.0317	11	0.0020
D0	7.6294	90	0.4768	50	0.0298	10	0.0019
CF	7.3910	8F	0.4619	4F	0.0289	0F	0.0018
CE	7.1526	8E	0.4470	4E	0.0279	0E	0.0017

CD	6.9141	8D	0.4321	4D	0.0270	0D	0.0017
CC	6.6757	8C	0.4172	4C	0.0261	0C	0.0016
CB	6.4373	8B	0.4023	4B	0.0251	0B	0.0016
CA	6.1989	8A	0.3874	4A	0.0242	0A	0.0015
C9	5.9605	89	0.3725	49	0.0233	09	0.0015
C8	5.7220	88	0.3576	48	0.0224	08	0.0014
C7	5.4836	87	0.3427	47	0.0214	07	0.0013
C6	5.2452	86	0.3278	46	0.0205	06	0.0013
C5	5.0068	85	0.3129	45	0.0196	05	0.0012
C4	4.7684	84	0.2980	44	0.0186	04	0.0012
C3	4.5300	83	0.2831	43	0.0177	03	0.0011
C2	4.2915	82	0.2682	42	0.0168	02	0.0010
C1	4.0531	81	0.2533	41	0.0158	01	0.0010
C0	3.8147	80	0.2384	40	0.0149	00	0.0009

②・⑥ 8 PMD/AMD設定レジスタ

LFOが出力するPG用の出力, EG用の出力それぞれの出力レベルを設定するものです。このレジスタのビット配置を図16に示します。ビット7で書き込む値をPMDとするかAMDとするかを決定します。ビット7が'1'だと下位7ビットはPMD, '0'だとAMDとして扱われます。この値が大きくなるほど, 出力レベルが大きくなり, 深い変調がかかるようになります。

●図……16 PMD/AMD 設定

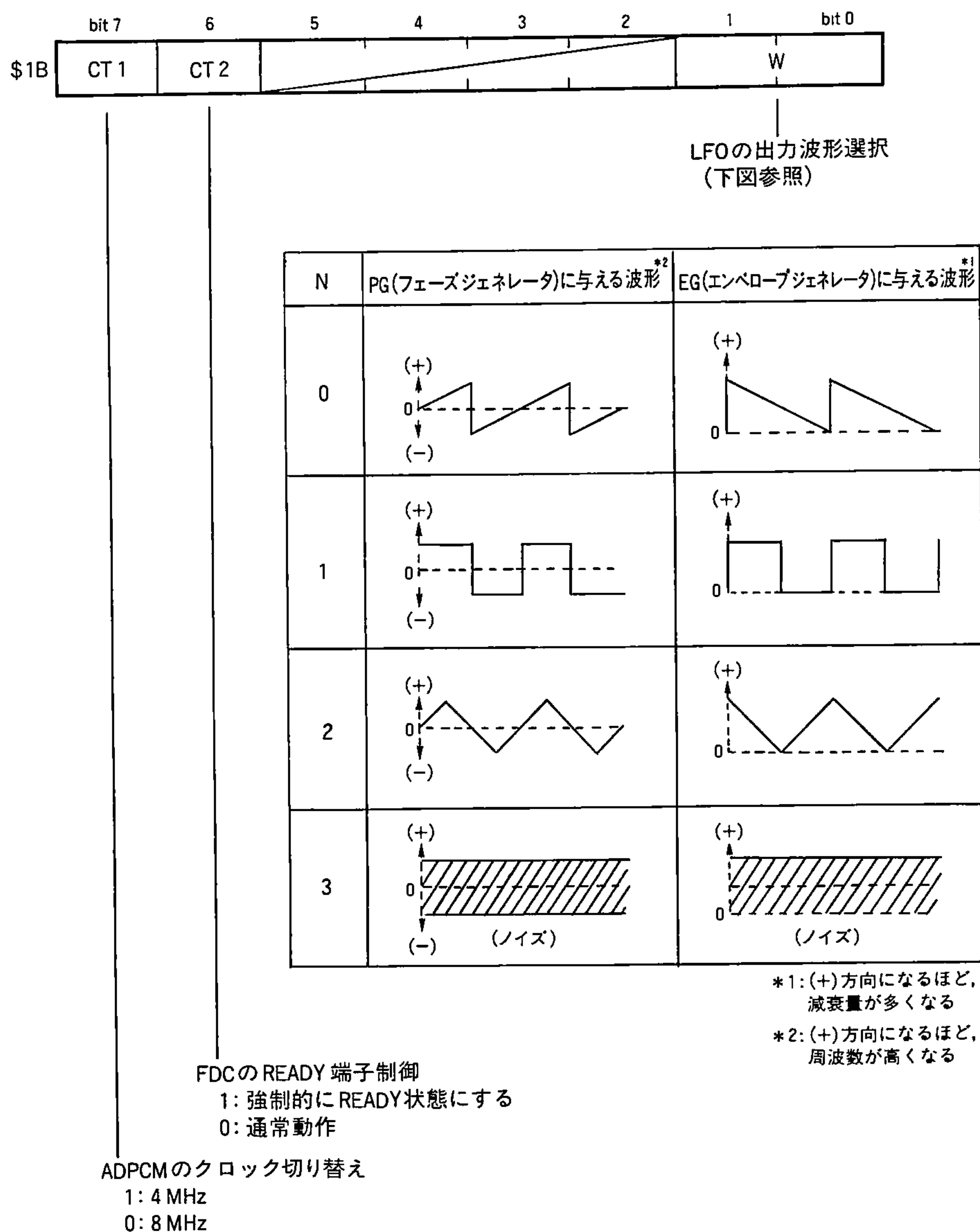


②・⑥ 9 汎用出力/LFO出力波形制御レジスタ

ビット配置を 276 ページの図 17 に示します。OPM は各種の用途に使用できる汎用の出力端子を 2 つ持っていますが, X 68000 では, これを FDC (フロッピーディスクコントローラ) の READY 端子を強制的に READY 状態にする信号, および ADPCM のクロック切り替え信号として使っています。

レジスタの下位 2 ビットは LFO の出力波形を選択するもので, 図にあるような 4 種類の中

●図……17 汎用出力/LFO 出力波形制御



から選択することができます。Wを'11' (=3) に設定すると、LFOの出力はノイズ波形になり、EGやPGをランダムに振ることができるようになります。ノイズジェネレータが独立したノイズ音であるのに対し、LFOのノイズ出力は基本音の周波数や出力レベルをランダムに振るという点が異なります。

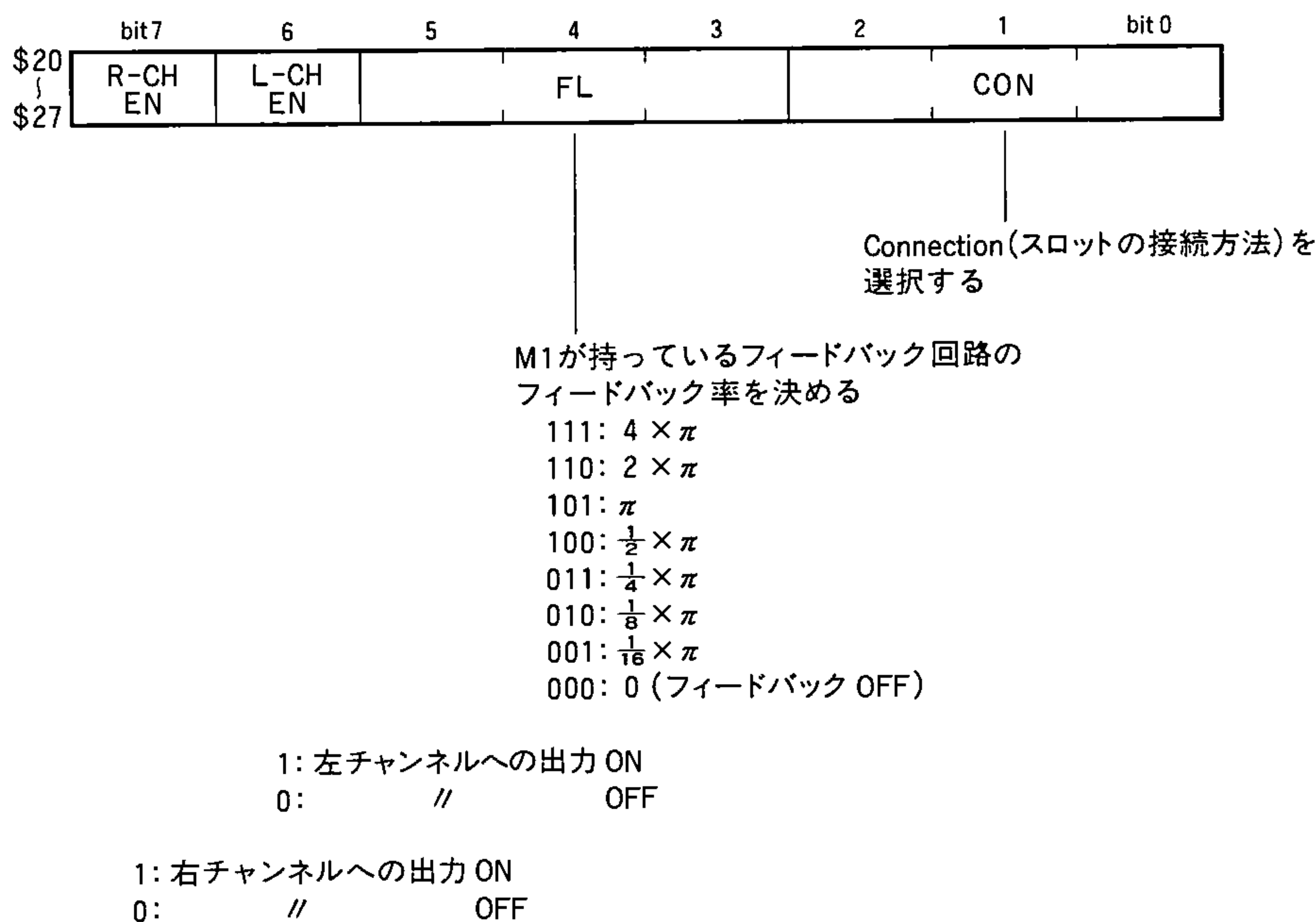
②・⑥10 | チャンネル構成, 出力制御レジスタ

スロットの接続方法や, M1 スロットのフィードバック率, 左右チャンネルへの出力選択を行うレジスタです。ビット配置は図 18 のようになっています。ビット 6, 7 はそれぞれ左チャンネル, 右チャンネルへの出力の ON/OFF を制御するもので, '1' を書き込むとそれぞれのチャンネルへの出力が ON に, '0' を書き込むと OFF になります。片方だけを ON にするとそちら側から, 両方 ON にすると中央から音が出ているように感じます。

ビット 3 ~ 5 は, M1 スロットが持っているフィードバック回路を通して帰還させる比率の選択を行うものです。選択するフィードバック率は, スロットの出力レベルにかけ算されるため, 出力レベルが下がると, フィードバックされる量も少なくなります。

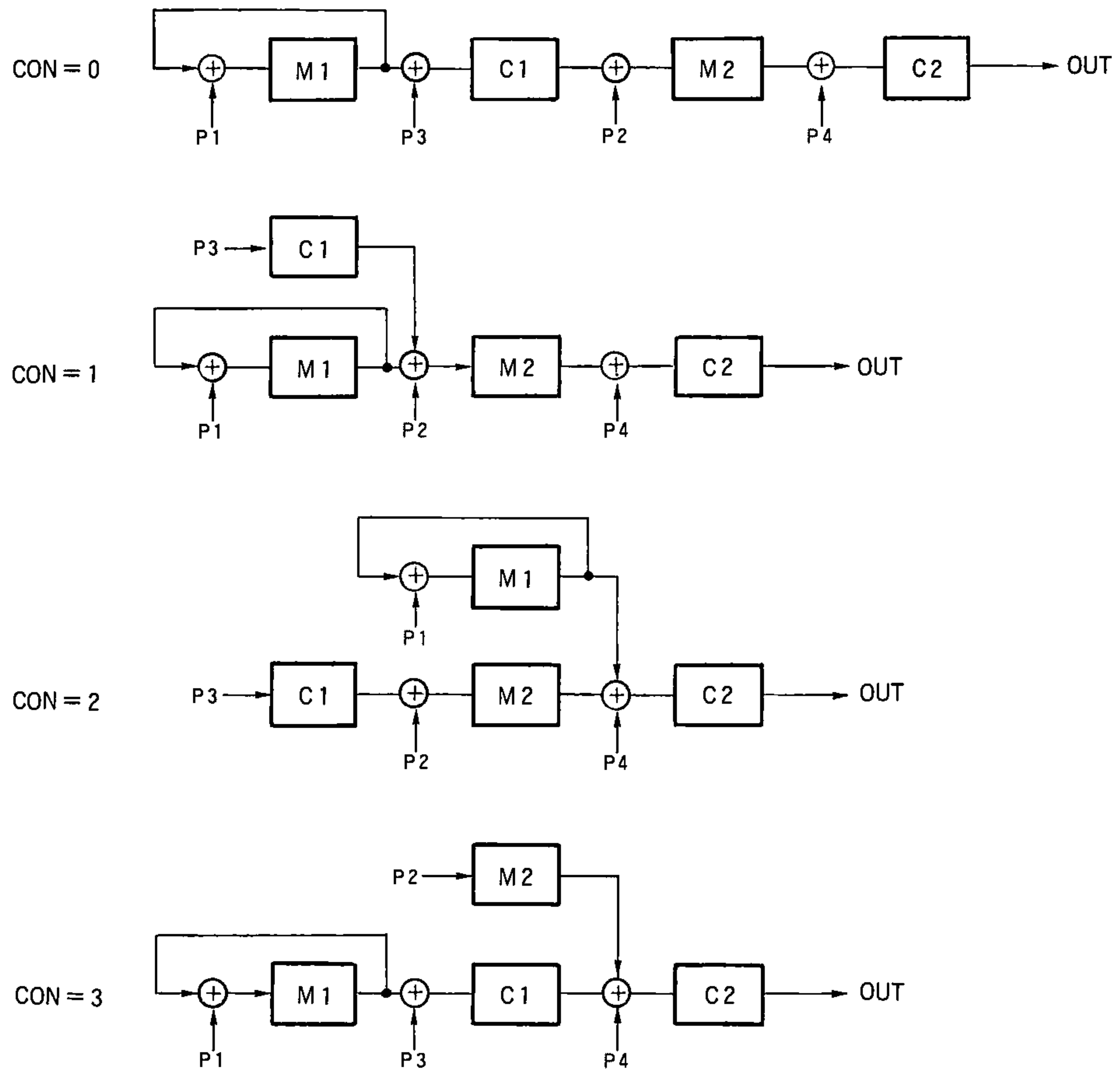
ビット 0 ~ 2 の 3 ビットはスロットの接続方法を決めるものです。スロットの接続形態は図 19 と図 20 に示すような 8 種類があり, この中からどれを使用するかを決めるわけです。

●図……18 チャンネル構成, 出力制御 (チャンネルごとに設定)

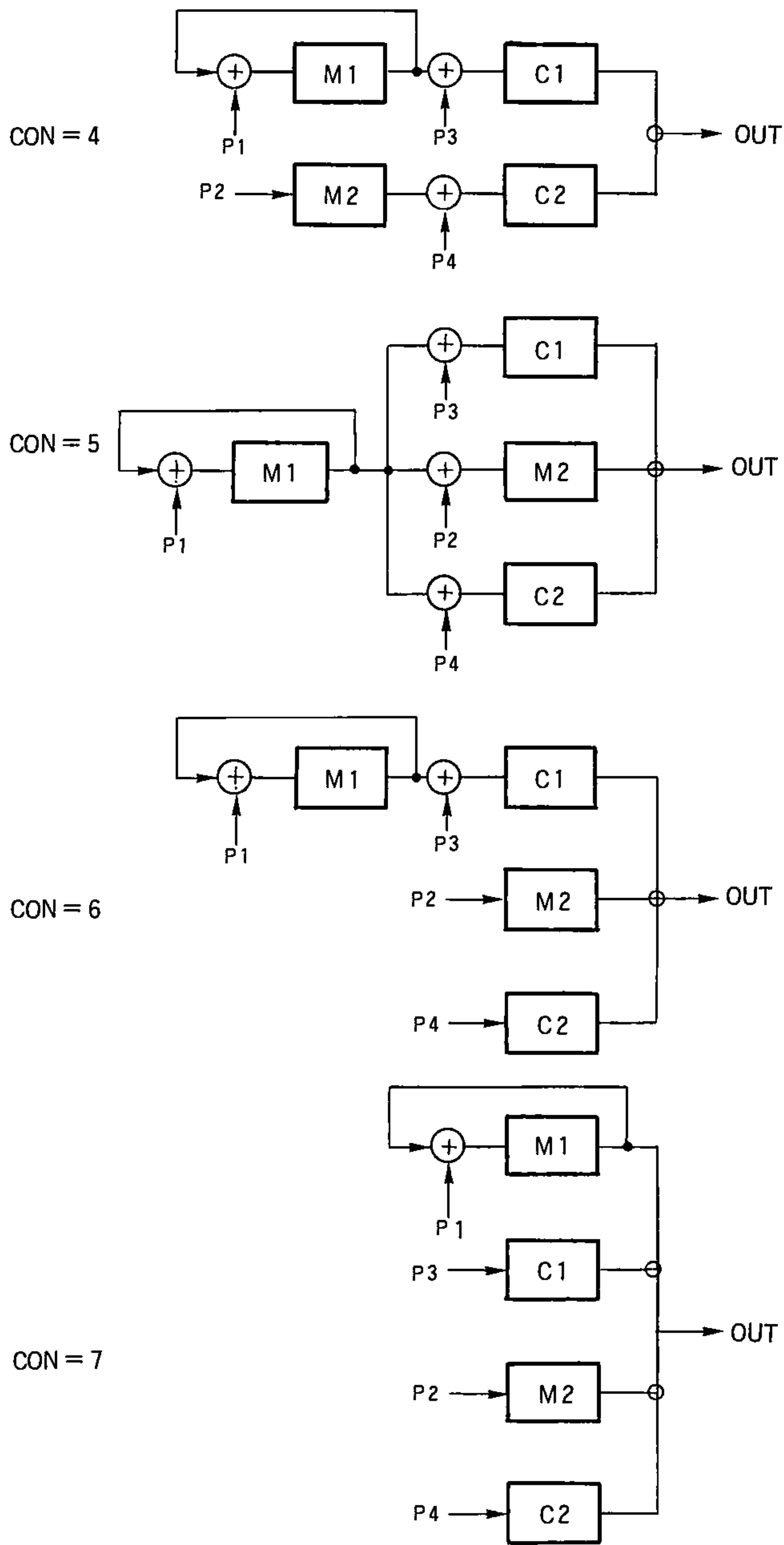


●図……19 コネクションの種類（その1）

P1～P4:PG(フェーズジェネレータ)の出力信号



●図……20 コネクションの種類 (その2)

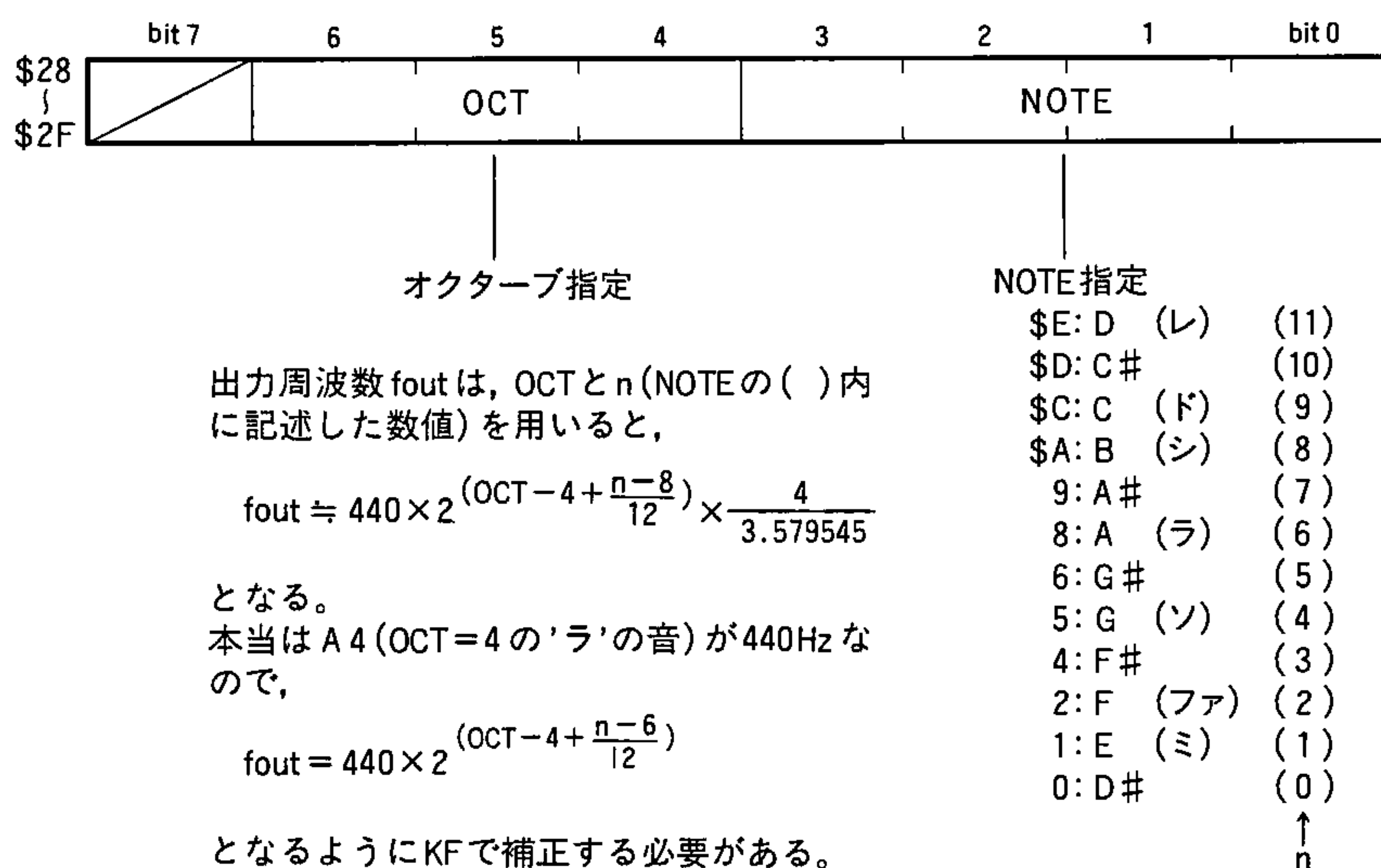


②・⑥11 KC (キーコード)レジスタ

KC レジスタはチャンネルが動作する基本周波数を音階単位で選択します。ビット配置は図 21 のようになり、何オクターブ目の、何の音であるのかという設定を行います。OPM はクロック周波数として 3.579545 MHz が与えられたときにもっとも誤差が少なくなるような音階テーブルを持っているのですが、X 68000 ではクロックとして 4 MHz を与えているため、約 1 音 (192.27 セント) 高い音が出てしまいます。このため、OPM のマニュアルでは NOTE が \$A のときに A の音となるところが、X 68000 では B の音になります。

音のずれが 200 セントぴったりではないため、気になる方は誤差分を KF レジスタで調整するようにしてください。

●図……21 KC (キーコード) (チャンネルごとに設定)



②・⑥12 KF (キーフラクション)レジスタ

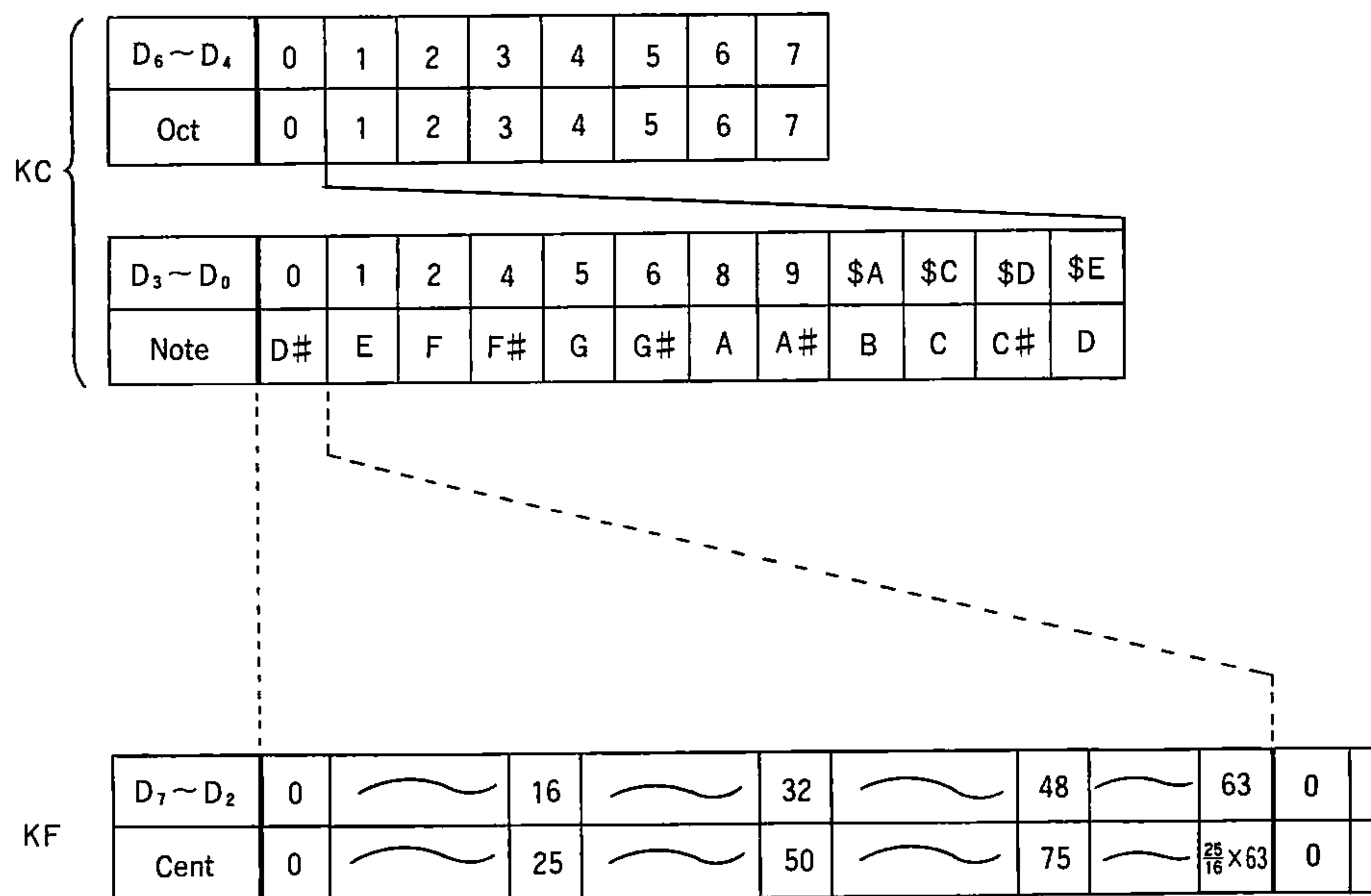
レジスタのビット配置を図 22 に示します。

上位の 6 ビットだけが使用され、この値によって KC で設定した周波数に約 1.6 (=100/64) セント単位の微調整を加えます。KC と KF の関係を図 23 に示しますので参考にしてください。

●図……22 KF(キーフラクション) (チャンネルごとに設定)



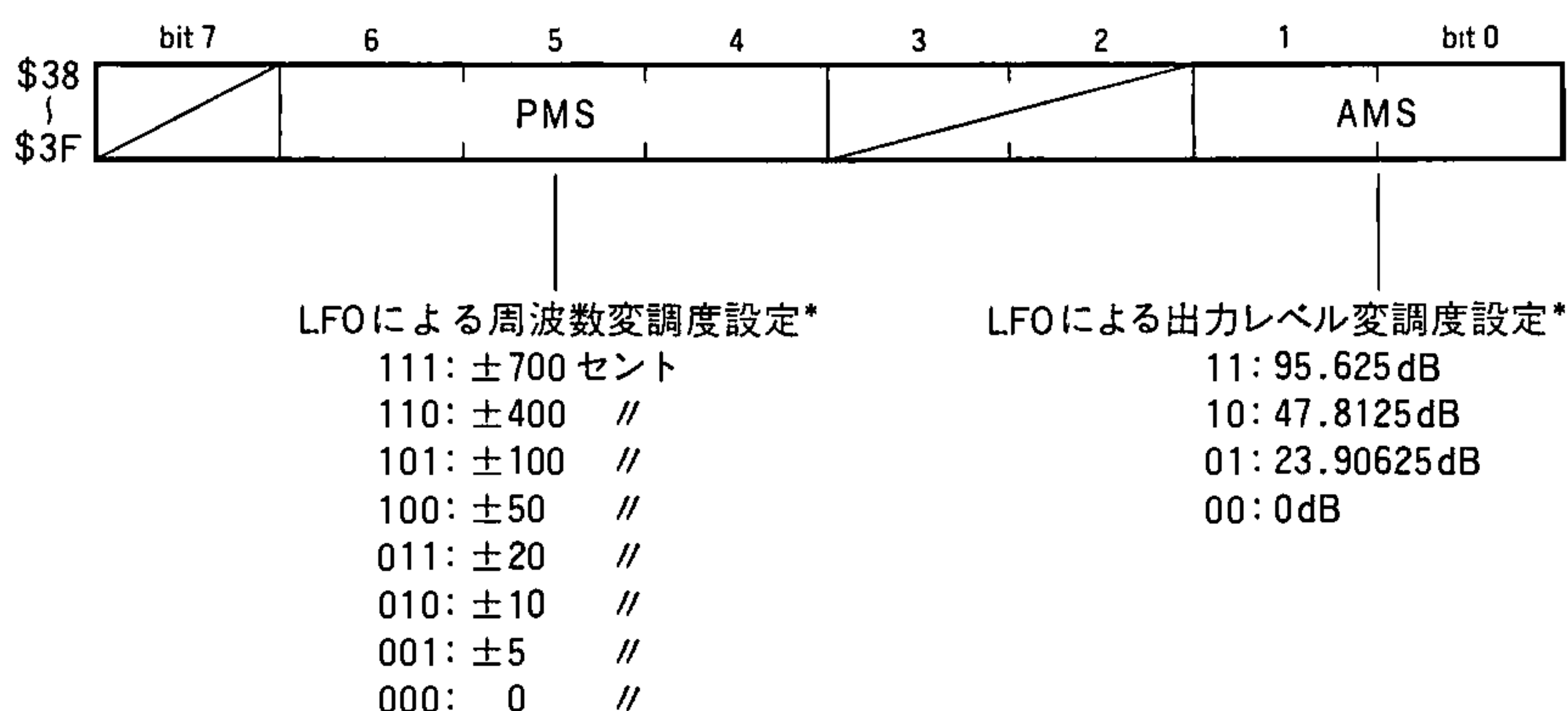
●図……23 KC, KF による音程指定



②・⑥13 PMS/AMS設定レジスタ

PMD/AMDがLFOの出力レベルを設定するのに対し、PMS/AMSはチャンネルごとにLFOの効きぐあいを設定するものです。レジスタのビット配置は282ページの図24のようになっています。ビット4～6はPGへの効き方を、ビット0, 1はEGへの効きぐあいを設定します。図の中に書いた数値は、LFOの出力が最大レベルになったときの値を示しています。

●図……24 PMS/AMS (チャンネルごとに設定)



* 値はいずれも LFO の出力レベルが最大の際の値

2・6 14 DT1/MUL 設定レジスタ

ビット配置を図 25 に示します。MUL, DT 1 および DT 2 (\$C 0~\$DF にあります) は, KC や KF で与えた周波数(仮りに基本周波数と呼ぶことにします)をもとにスロットごとに異なる周波数をつくり出すもので, MUL が 1/2~15 倍までの倍率設定, DT 1 が数セント程度の微調整, DT 2 が数百セントレベルの大きなずれをつくるのに使用されます。

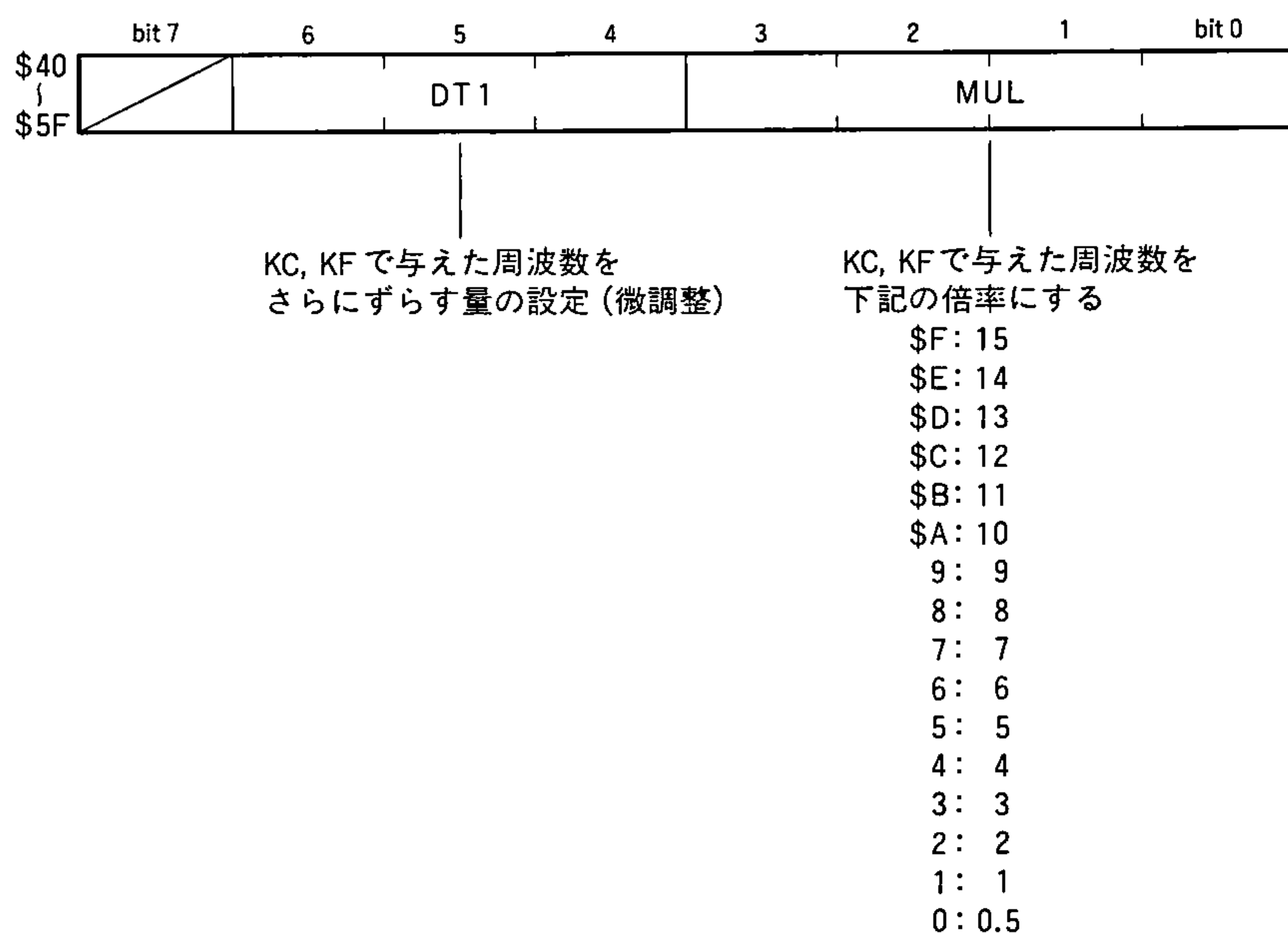
ビット 0~3 の 4 ビットは倍率設定で, 0 のときには基本周波数の 1/2, 1 以上のときには基本周波数の設定値倍の周波数が PG から出力されます (DT 1=DT 2=0 のとき)。

DT 1 による周波数変動は KC の値によって変わります。この関係を表 2 に示しますので参考にしてください。

2・6 15 TL (トータルレベル) 設定

TL はスロットの出力レベルを制御するもので, EG で計算した出力に, このレジスタで決めた減衰量をかけて実際の EG の出力としています。レジスタのビット配置を 284 ページの図 26 に示します。TL レジスタは下位 7 ビットだけが有効で, 減衰量は $0.75 \times \text{TL (dB)}$ となります。TL が 0 のときがもっとも出力信号レベルが大きくなり, \$7 F のときにもっとも小さくなります。

●図……25 DT1/MUL (スロットごとに設定)

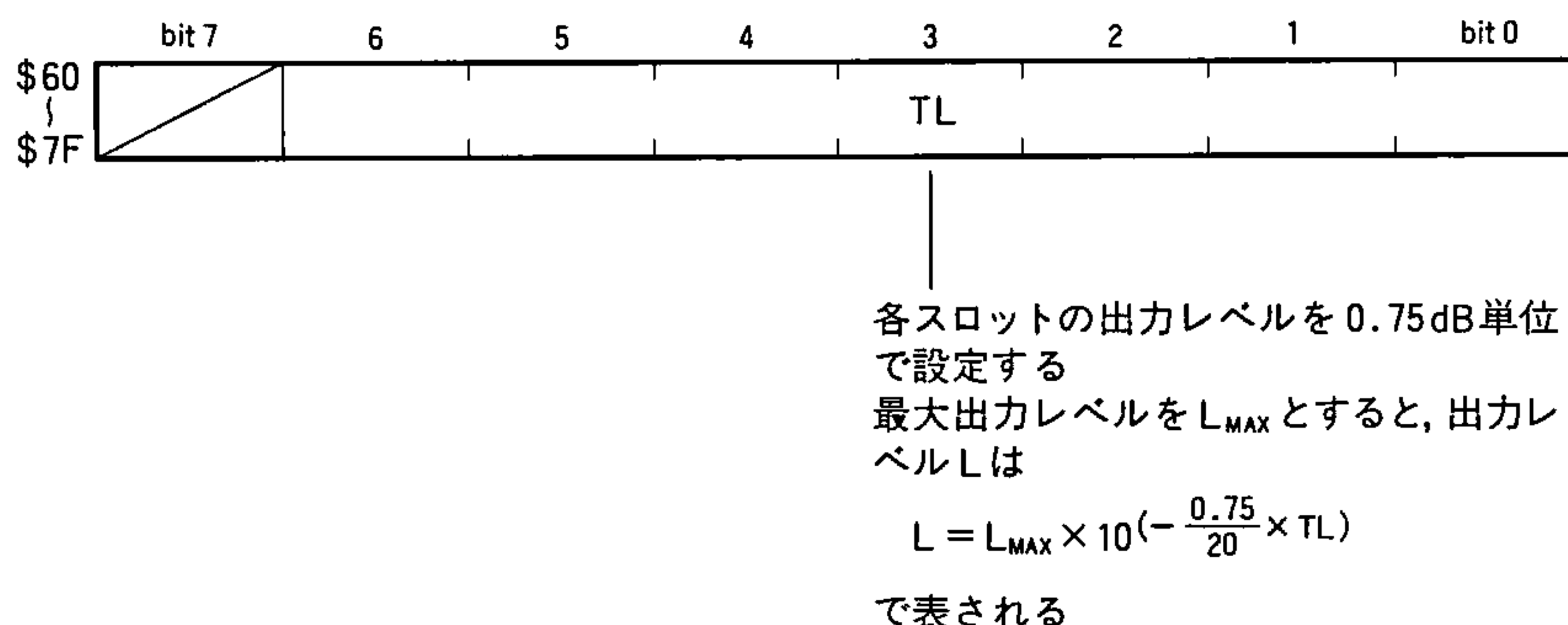


●表…… 2 DT 1 の設定値と周波数のずれ方

OCT	NOTE	周波数のずれ(セント)				周波数のずれ(Hz)			
		DT1=0	DT1=1	DT1=2	DT1=3	DT1=0	DT1=1	DT1=2	DT1=3
0	0	0.000	0.000	5.025	10.036	0.000	0.000	0.053	0.107
0	1	0.000	0.000	4.228	8.445	0.000	0.000	0.053	0.107
0	2	0.000	0.000	3.559	7.110	0.000	0.000	0.053	0.107
0	3	0.000	0.000	2.993	5.980	0.000	0.000	0.053	0.107
1	0	0.000	2.515	5.025	5.025	0.000	0.053	0.107	0.107
1	1	0.000	2.115	4.228	6.338	0.000	0.053	0.107	0.160
1	2	0.000	1.778	3.555	5.330	0.000	0.053	0.107	0.160
1	3	0.000	1.496	2.990	4.483	0.000	0.053	0.107	0.160
2	0	0.000	1.258	2.515	5.025	0.000	0.053	0.107	0.213
2	1	0.000	1.057	3.170	4.225	0.000	0.053	0.160	0.213
2	2	0.000	0.889	2.667	3.555	0.000	0.053	0.160	0.213
2	3	0.000	0.748	2.242	3.735	0.000	0.053	0.160	0.267
3	0	0.000	1.258	2.515	3.143	0.000	0.107	0.213	0.267
3	1	0.000	1.057	2.114	3.170	0.000	0.107	0.213	0.320
3	2	0.000	0.889	1.778	2.667	0.000	0.107	0.213	0.320
3	3	0.000	0.748	1.869	2.615	0.000	0.107	0.267	0.373
4	0	0.000	0.629	1.572	2.515	0.000	0.107	0.267	0.427
4	1	0.000	0.793	1.586	2.114	0.000	0.160	0.320	0.427
4	2	0.000	0.667	1.334	2.001	0.000	0.160	0.320	0.480
4	3	0.000	0.561	1.308	1.869	0.000	0.160	0.373	0.533
5	0	0.000	0.629	1.258	1.729	0.000	0.213	0.427	0.587
5	1	0.000	0.529	1.057	1.586	0.000	0.213	0.427	0.640
5	2	0.000	0.445	1.001	1.445	0.000	0.213	0.480	0.693
5	3	0.000	0.467	0.935	1.308	0.000	0.267	0.533	0.747

6	0	0.000	0.393	0.865	1.258	0.000	0.267	0.587	0.853
6	1	0.000	0.397	0.793	1.123	0.000	0.320	0.640	0.907
6	2	0.000	0.334	0.723	1.056	0.000	0.320	0.693	1.013
6	3	0.000	0.327	0.654	0.935	0.000	0.373	0.747	1.067
7	0	0.000	0.315	0.629	0.865	0.000	0.427	0.853	1.173
7	1	0.000	0.315	0.629	0.865	0.000	0.427	0.853	1.173
7	2	0.000	0.315	0.629	0.865	0.000	0.427	0.853	1.173
7	3	0.000	0.315	0.629	0.865	0.000	0.427	0.853	1.173

●図……26 TL (トータルレベル) (スロットごとに設定)



2・6 16 KS/AR設定レジスタ

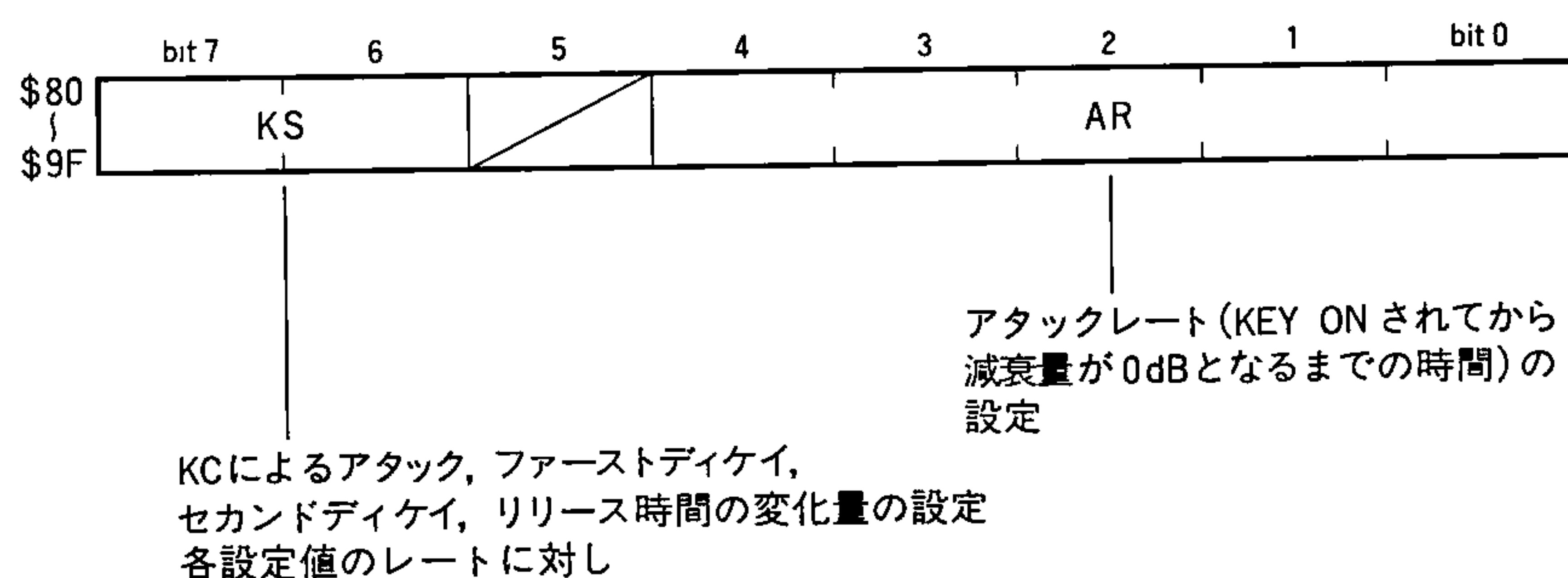
ビット配置を図 27 に示します。楽器の場合、音が高くなるほど音の立ち上がりや余韻の時間が短くなる傾向があります。この効果を得るためにあるのが KS で、AR や後述する D1R, D2R, RR などにはすべて KS による補正がかけられます。この補正量は、KC (キーコード) に依存し、 $(KC \% 4) \% (2^{(3-KS)})$ (% は整数除算, ^ はべき乗を表す) となります。

AR はアタックレートで、キーオンした直後の音の立ち上がりを決めるものです。値が大きいほど立ち上がりが鋭くなります。

具体的な数値は、音量が最小 (0% : -96 dB) から最大 (100% : 0 dB) になるまでの時間と、10% から 90% になるまでの時間の 2 通りについて、それぞれ 289 ページ以降の表 3 と表 4 に示しておきましたので参考にしてください。

なお、この表の RATE の値は、RR の場合は $RR \times 4 + 2 + KS$ 、それ以外のものの場合はレジスタへの設定値を XR とすると、 $XR \times 2 + KS$ で算出される値を使用し、計算値が 63 以上になった場合には RR が 63 のときの値を適用します。表の左端は RR の計算値、その右の 2 つの数値は、RR を上位 4 ビットと下位に分けたときの値を示しています。

●図……27 KS/AR



$$\frac{\frac{KC}{4}}{2^{(3-KS)}} \quad (\text{ただし, 除算時の小数点以下はすべて切り捨て})$$

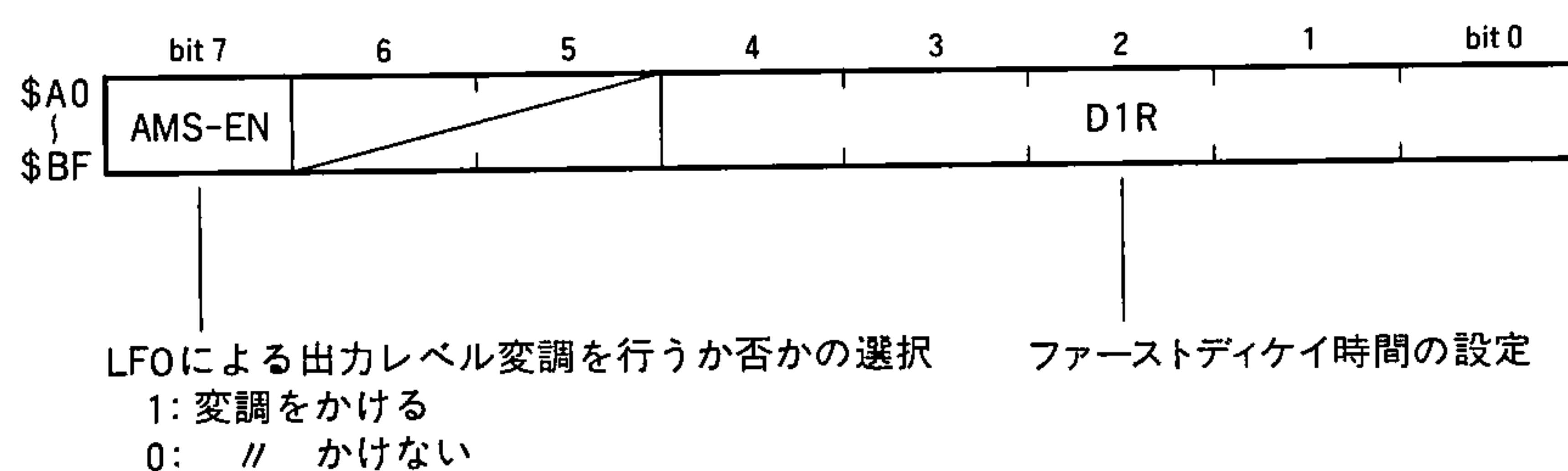
を加える

2・617 AMS-EN/D1R設定レジスタ

ビット配置を図 28 に示します。AMS-EN は LFO による EG の変調をかけるか否かを決めるものです。'1'を書き込むと変調がかかるようになり、'0'で通常どおりの動作となります。PG への変調は、チャンネル単位で決められてしまいますが、EG への変調は、このビットを使ってスロットごとにかけるか否かを決定できます。

D1R はファーストディケイからセカンドディケイに移るまでの時間を決めるもので、KS によってスケーリングされます。AR と同様、表にまとめておきましたので参考にしてください。

●図……28 AMS-EN/D1R (スロットごとに設定)

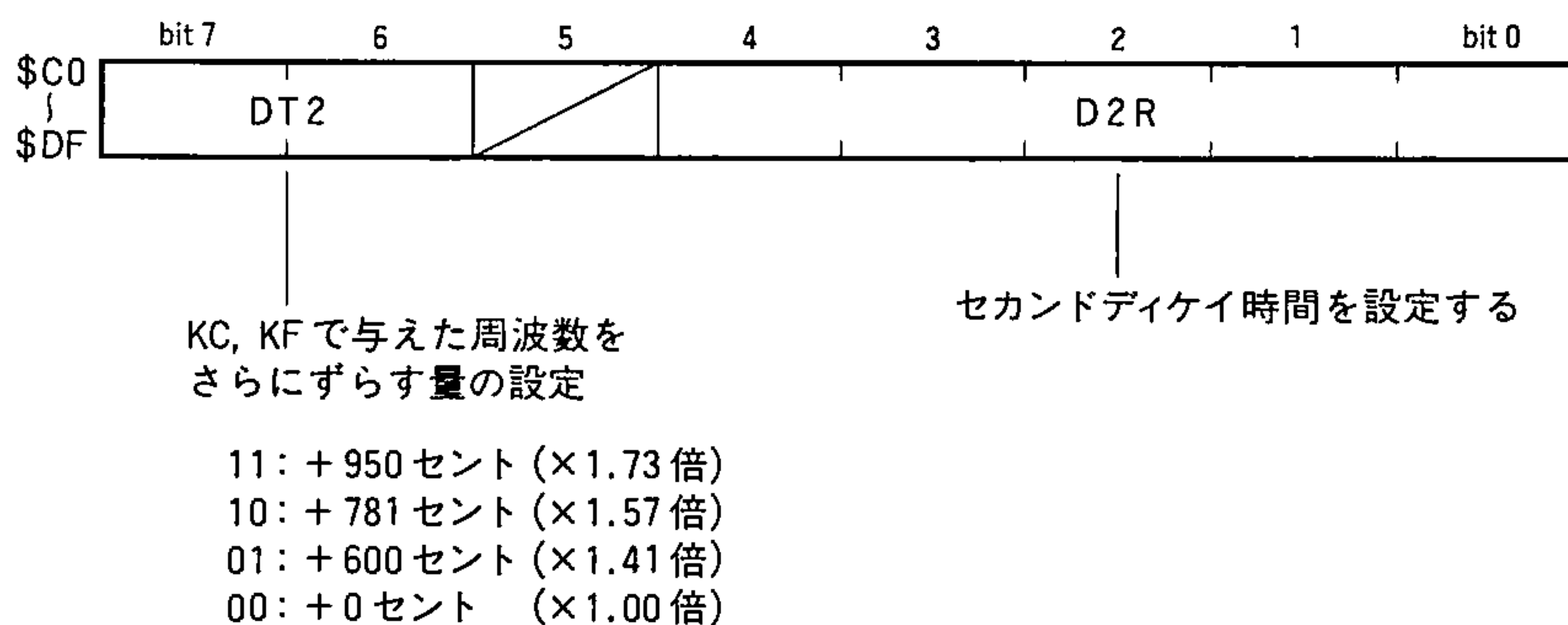


②・⑥18 DT2/D2R設定レジスタ

このレジスタのビット配置は図 29 のようになっています。DT 2 は DT 1/MUL のところでも触れたように、KC, KF で決まる周波数に数百セントという、大きめの変化を与えるものです。

D 2 R はセカンドディケイレートで、キーオンしたままにしたとき、ファーストディケイからセカンドディケイに移った時点から音が完全に消えるまでの時間を設定します。この時間も D 1 R 同様、KS によってスケーリングされます。

●図……29 DT2/D2R (スロットごとに設定)



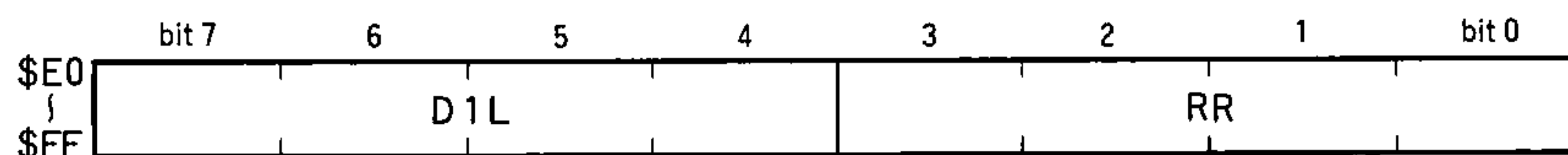
②・⑥19 D1L/RR

ビット配置を図 30 に示します。上位 4 ビットが D1L, 下位 4 ビットが RR になっています。D1L はファーストディケイからセカンドディケイに移るときのレベルを決定するもので、値が 0~\$E のときには、このレベルは $-3 \times D1L$ (dB), \$F のときには $-3 \times D1L - 48$ (dB) で表されます。

RR はリリースレートで、キーオフしてから音が消えるまでの時間の設定を行います。RR も AR, D1R, D2R などと同様、KS によってスケーリングされます。

EG の出力波形と、レジスタへの設定値の関係を図 31 に示しておきましたので参考にご覧ください。なお、この図では KS によるスケーリングは考慮していません。

●図……30 D1L/RR (スロットごとに設定)



リリース時間の設定

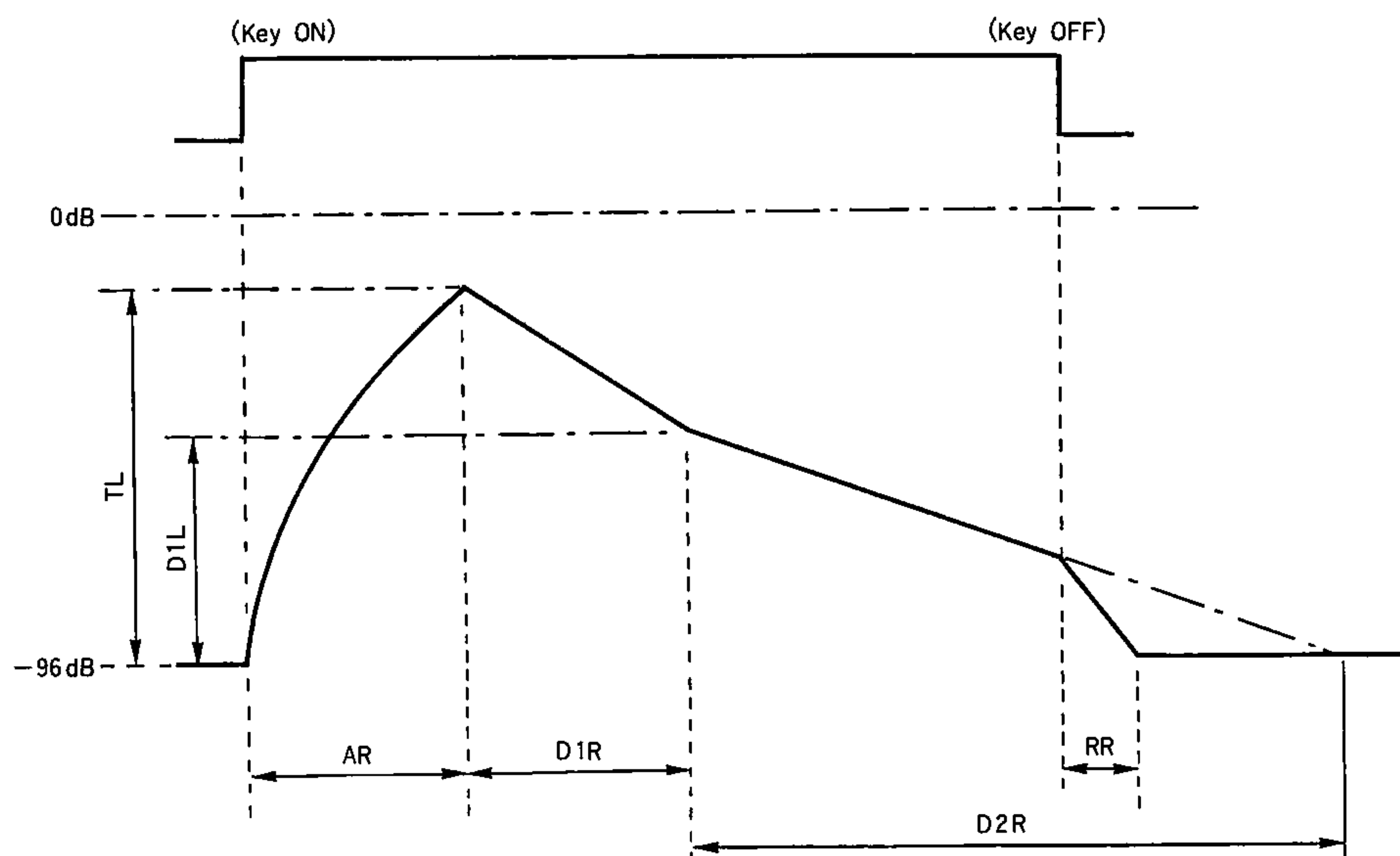
ファーストディケイからセカンドディケイに移るときのレベルを決定する
このレベルを L_{D1} とすると

$$L_{D1} = -3 \times D1L \text{ (dB)} \quad : 0 \leq D1L \leq \$E \text{ のとき}$$

$$L_{D1} = -3 \times D1L - 48 \text{ (dB)} : D1L = \$F \text{ のとき}$$

となる

●図……31 エンベロープジェネレータの出力波形と設定値の関係



2.7 設定値とOPMの動作の関係

OPM の設定値が実際の音声出力波形にどのように影響するかを数値で示した資料は、残念ながら公開されていません (メーカーでも公表する予定はないとのことでした)。たしかに、音作りの面から見ると、パラメータの調整はあくまでも耳で聴きながら行うものであって、出力波形を見ながら行うようなものではありませんが、X 68000 のように、ADPCM も搭載しているマシンでは、FM 音源用のパラメータを使って ADPCM から出力するなどの使い方も考えら

れますので、音作りの基本であるオペレータの直列接続と、EG の各レートの計算方法を個人的に調べてみました。

以下に示す式は、あくまでも筆者が個人的に（シンクロで波形を見ながら）調べた近似式であり、OPM がこのとおりにつくられているということではありませんので、注意してください。

②・⑦ 1 | オペレータを直列接続したときの出力波形

オペレータを 2 つ直列に接続したときの SIN 波形テーブルの出力 A は、

$$A = \sin(\omega t + \alpha \sin(\psi t))$$

のように表されます。 ψt , ωt は、要するに周波数ですから、これはかんたんに求められますが、 α の求め方が公開されていないので、このままでは出力波形がわかりません。実験の結果、各スロットの出力が TL だけで決まるとき（AR が 0、D1R、D2R などが最大値のとき）には、

$$\alpha = 10^{(-0.75/20 \times TL + e/2)}$$

ここで、 e は自然対数の底（ $=2.71828\cdots$ ）、 $^{\wedge}$ はべき乗を示す

とし、 $\alpha \sin(\psi t)$ の計算結果の数値をラジアン単位の角度データとみなして ωt と足すと、かなりよい感じになることがわかりました。

M1 のフィードバック量はよくわかりませんでした。TL が 0 dB のときに 1（ラジアン）とみなしてフィードバックするとよいようです。たとえば、FL=3 なら $0.7853 (=3.14159/4)$ をかけ算した値をフィードバックすると、近い波形が得られます。

②・⑦ 2 | EG の RATE と時間の関係

EG の表の値はほぼ指数関数となっています。0 ~ 100% のアタック時間 t は、RATE の上位 4 ビットと下位 2 ビット（表の 2 番目、3 番目の数値）を使って計算されます。上位 4 ビットを RATE_H、下位 2 ビットを RATE_L とすると、

$$t = (10^{4.202682}) / (2^{\text{RATE}_H}) \times (1 / (1 + 0.25 \times \text{RATE}_L)) \times 3.58 / 4.00$$

で表されます。その他の時間は、この値にたんに係数をかけるだけで算出することができます。
OPMの時間の分解能の限界のために、 t が小さくなってくると、この式で計算した値からずれてしまいますので注意してください。

●表…… 3 EGの各レート設定値と時間（0～100％）

アタック		ファーストディケイ/セカンド ディケイ/リリース	
AR×2+KS	時間 (ms)	XR×2+KS RR×4+2+KS	時間 (ms)
0 : 0 0	無限大	0 : 0 0	無限大
1 : 0 1	無限大	1 : 0 1	無限大
2 : 0 2	無限大	2 : 0 2	無限大
3 : 0 3	無限大	3 : 0 3	無限大
4 : 1 0	7136.33	4 : 1 0	98637.69
5 : 1 1	5709.06	5 : 1 1	78910.15
6 : 1 2	4757.55	6 : 1 2	65758.46
7 : 1 3	4077.90	7 : 1 3	56364.40
8 : 2 0	3568.16	8 : 2 0	49318.84
9 : 2 1	2854.53	9 : 2 1	39455.07
10 : 2 2	2378.78	10 : 2 2	32879.23
11 : 2 3	2038.95	11 : 2 3	28182.20
12 : 3 0	1784.08	12 : 3 0	24659.42
13 : 3 1	1427.27	13 : 3 1	19727.54
14 : 3 2	1189.38	14 : 3 2	16439.61
15 : 3 3	1019.48	15 : 3 3	14091.09
16 : 4 0	892.04	16 : 4 0	12329.71
17 : 4 1	713.63	17 : 4 1	9863.77
18 : 4 2	594.69	18 : 4 2	8219.81
19 : 4 3	509.74	19 : 4 3	7045.55
20 : 5 0	446.02	20 : 5 0	6164.86
21 : 5 1	356.82	21 : 5 1	4931.89
22 : 5 2	297.35	22 : 5 2	4109.90
23 : 5 3	254.87	23 : 5 3	3522.77
24 : 6 0	223.01	24 : 6 0	3082.42
25 : 6 1	178.41	25 : 6 1	2465.94
26 : 6 2	148.68	26 : 6 2	2054.95
27 : 6 3	127.43	27 : 6 3	1761.38
28 : 7 0	111.51	28 : 7 0	1541.22
29 : 7 1	89.20	29 : 7 1	1232.97
30 : 7 2	74.34	30 : 7 2	1027.48
31 : 7 3	63.72	31 : 7 3	880.59
32 : 8 0	55.75	32 : 8 0	770.60
33 : 8 1	44.60	33 : 8 1	616.48
34 : 8 2	37.16	34 : 8 2	513.74
35 : 8 3	31.86	35 : 8 3	440.35
36 : 9 0	27.88	36 : 9 0	385.31
37 : 9 1	22.30	37 : 9 1	308.25
38 : 9 2	18.58	38 : 9 2	256.83
39 : 9 3	15.93	39 : 9 3	220.17
40 : 10 0	13.94	40 : 10 0	192.65
41 : 10 1	11.15	41 : 10 1	154.12
42 : 10 2	9.29	42 : 10 2	128.43
43 : 10 3	7.97	43 : 10 3	110.09
44 : 11 0	6.97	44 : 11 0	96.33
45 : 11 1	5.58	45 : 11 1	77.06
46 : 11 2	4.65	46 : 11 2	64.22
47 : 11 3	3.98	47 : 11 3	55.04
48 : 12 0	3.48	48 : 12 0	48.16
49 : 12 1	2.78	49 : 12 1	38.53
50 : 12 2	2.33	50 : 12 2	32.11
51 : 12 3	1.99	51 : 12 3	27.52
52 : 13 0	1.91	52 : 13 0	24.08
53 : 13 1	1.53	53 : 13 1	19.27
54 : 13 2	1.27	54 : 13 2	16.06
55 : 13 3	1.09	55 : 13 3	13.77

56 : 14 0	1.00	56 : 14 0	12.04
57 : 14 1	0.81	57 : 14 1	9.63
58 : 14 2	0.67	58 : 14 2	8.03
59 : 14 3	0.57	59 : 14 3	6.88
60 : 15 0	0.47	60 : 15 0	6.02
61 : 15 1	0.47	61 : 15 1	6.02
62 : 15 2	0.47	62 : 15 2	6.02
63 : 15 3	0.00	63 : 15 3	6.02

●表…… 4 EG の各レート設定値と時間 (10～90 %)

アタック		ファーストディケイ/セカンド ディケイ/リリース	
AR×2+KS	時間 (ms)	XR×2+KS RR×4+2+KS	時間 (ms)
0 : 0 0	無限大	0 : 0 0	無限大
1 : 0 1	無限大	1 : 0 1	無限大
2 : 0 2	無限大	2 : 0 2	無限大
3 : 0 3	無限大	3 : 0 3	無限大
4 : 1 0	4008.07	4 : 1 0	19942.60
5 : 1 1	3206.45	5 : 1 1	15954.08
6 : 1 2	2672.05	6 : 1 2	13295.07
7 : 1 3	2290.32	7 : 1 3	11395.78
8 : 2 0	2004.04	8 : 2 0	9971.30
9 : 2 1	1603.23	9 : 2 1	7977.05
10 : 2 2	1336.02	10 : 2 2	6647.53
11 : 2 3	1145.16	11 : 2 3	5697.88
12 : 3 0	1002.02	12 : 3 0	4985.65
13 : 3 1	801.62	13 : 3 1	3988.52
14 : 3 2	668.01	14 : 3 2	3323.77
15 : 3 3	572.59	15 : 3 3	2848.95
16 : 4 0	501.01	16 : 4 0	2492.83
17 : 4 1	400.81	17 : 4 1	1994.26
18 : 4 2	334.01	18 : 4 2	1661.88
19 : 4 3	286.29	19 : 4 3	1424.47
20 : 5 0	250.50	20 : 5 0	1246.41
21 : 5 1	200.40	21 : 5 1	997.13
22 : 5 2	167.01	22 : 5 2	830.94
23 : 5 3	143.15	23 : 5 3	712.23
24 : 6 0	125.26	24 : 6 0	623.21
25 : 6 1	100.20	25 : 6 1	498.57
26 : 6 2	83.50	26 : 6 2	415.47
27 : 6 3	71.57	27 : 6 3	356.12
28 : 7 0	62.62	28 : 7 0	311.60
29 : 7 1	50.10	29 : 7 1	249.28
30 : 7 2	41.75	30 : 7 2	207.74
31 : 7 3	35.78	31 : 7 3	178.04
32 : 8 0	31.32	32 : 8 0	155.80
33 : 8 1	25.05	33 : 8 1	124.64
34 : 8 2	20.87	34 : 8 2	103.86
35 : 8 3	17.89	35 : 8 3	89.03
36 : 9 0	15.65	36 : 9 0	77.90
37 : 9 1	12.52	37 : 9 1	62.32
38 : 9 2	10.44	38 : 9 2	52.83
39 : 9 3	8.95	39 : 9 3	44.52
40 : 10 0	7.83	40 : 10 0	38.95
41 : 10 1	6.27	41 : 10 1	31.16
42 : 10 2	5.22	42 : 10 2	25.96
43 : 10 3	4.48	43 : 10 3	22.26
44 : 11 0	3.91	44 : 11 0	19.48
45 : 11 1	3.13	45 : 11 1	15.58
46 : 11 2	2.61	46 : 11 2	12.98
47 : 11 3	2.24	47 : 11 3	11.12
48 : 12 0	1.96	48 : 12 0	9.74
49 : 12 1	1.57	49 : 12 1	7.79
50 : 12 2	1.31	50 : 12 2	6.49
51 : 12 3	1.12	51 : 12 3	5.57
52 : 13 0	0.98	52 : 13 0	4.87
53 : 13 1	0.78	53 : 13 1	3.89

54 : 13 2	0.65	54 : 13 2	3.26
55 : 13 3	0.55	55 : 13 3	2.78
56 : 14 0	0.52	56 : 14 0	2.43
57 : 14 1	0.42	57 : 14 1	1.95
58 : 14 2	0.36	58 : 14 2	1.62
59 : 14 3	0.30	59 : 14 3	1.39
60 : 15 0	0.24	60 : 15 0	1.22
61 : 15 1	0.24	61 : 15 1	1.22
62 : 15 2	0.24	62 : 15 2	1.22
63 : 15 3	0.00	63 : 15 3	1.22

●3 ADPCM

③・1 ADPCMの概要

OPM (FM 音源) が SIN カーブやノイズなどをもとに演算で波形を作成するのに対し、ADPCM のほうは自然音の取り込みや再生を行うものです。

入力波形を定期的にサンプリングして、その時点での電圧を、そのままデジタルデータに変換するのが、CD などでも採用されている PCM 方式と呼ばれるものです。PCM 方式ではサンプリング周波数のほかにはなんら制約はありませんから、波形の再現性はよいのですが、メモリを大量に食うという問題があります。たとえば、CD と同様にすると、1 回分のデータが 16 ビット、サンプリング周波数 44.1 KHz ですから、1 秒で 88.2 K バイトも使ってしまいます。

なんとか、この量を減らそうと考えられた方法に、前回の電圧との差分をデータ化する Δ PCM 法、前回の变化から次のデータを予測し、そのデータとの差分をデータ化する DPCM (Differential-PCM) 法などがあります。ADPCM (Adaptive Differential PCM) は DPCM をさらに改良して、大きな電圧の変化にも対応できるようにし、音質を改善したものです。前回の变化が大きいときには次の変化の幅も大きく、小さいときには変化幅も小さいものと考え、前回の变化の大きさから求められる定数を、予測値との変化にかけた値をデータ化しようというものです。

X 68000 では、入力波形から ADPCM データへの変換や ADPCM データから出力波形の再現を行う LSI として、沖電気の MSM 6258 V という LSI を使用しています。この LSI は、入出力ともモノラルであるため、X 68000 ではパンポット制御 (右, 左, 中央のいずれから出力するかを選択する) 回路を付加しています。

次に MSM 6258 V の特徴をかんたんにまとめておきます。

③・① 1 | ADPCMデータ

MSM 6258 V は、ADPCM データとして 3 ビットまたは 4 ビットのデータを作成し、サンプリング 2 回分のデータをまとめて 1 バイトデータにして CPU とやりとりするようになっています。3 ビット ADPCM とするか、4 ビット ADPCM とするかは、LSI のピンで切り替えられるのですが、X 68000 では 4 ビット ADPCM モードに固定して使用しています。

③・① 2 | サンプリング周波数

サンプリング周波数は、LSI のクロック周波数の $1/512$ 、 $1/768$ 、 $1/1024$ のいずれかから選択可能です。X 68000 ではクロックとして 4 MHz と 8 MHz を切り替えられるようにしているため、3.9 KHz、5.2 KHz、7.8 KHz、10.4 KHz、15.6 KHz の 5 種類を選択できます (4 MHz で $1/512$ のときと、8 MHz で $1/1024$ のときはどちらも 7.8 KHz になるため、1 種類減ります)。1 秒あたり使用するメモリ量は、サンプリング周波数の半分 (15.6 KHz なら 7.8 K バイト) になります。

③・① 3 | A/D, D/Aコンバータ

MSM 6258 V に内蔵されている A/D コンバータ (入力電圧からデジタルデータへの変換器) は 8 ビット、D/A コンバータ (デジタルデータから出力電圧への変換器) は 10 ビットの精度を持っています。MSM 6258 V は、入力データを 8 ビットの PCM データに直した後、ADPCM 変換を行い、また ADPCM データを 10 ビットの PCM データに変換した後、音声信号として出力しているわけです。

③・2 | ADPCM関係のレジスタ

ADPCM の制御に関係するレジスタの一覧を図 32 に示します。MSM 6258 V が持っているレジスタには最低限のステータスやコマンドしかないため、X 68000 ではサンプリングレートや ADPCM の出力切り替えを PPI (8255) のポート C で、ADPCM の基本クロックの選択を OPM の汎用出力端子 CT 2 で行えるようにしています。

●図……32 ADPCMの動作に関するレジスタ

ADPCM(MSM6258V)

アドレス	READ/ WRITE	bit 7	6	5	4	3	2	1	bit 0	備 考
\$E92001	R	PLAY /REC	'1'			'0'				ADPCMステータス
	W			'0'			REC ST	PLAY ST	SP	// コマンド
\$E92003	R/W		Data _{n+1}			Data _n				データ入出力

PPI(i8255)ポートC/コントロールワードレジスタ

アドレス	READ/ WRITE	bit 7	6	5	4	3	2	1	bit 0	備 考
\$E9A005	R/W	IOA6	IOA5	PC5	PC4	Sampling RATE	PCM	PAN		ADPCMサンプルレート/ 出力制御
\$E9A007	W	'0'				Bit Sel			Data	ポート C のビット単位での制御

OPM(YM2151)レジスタNo.=\$1B(\$E90001に\$1Bを書き込んでからアクセスする)

アドレス	READ/ WRITE	bit 7	6	5	4	3	2	1	bit 0	備 考
\$E90003	W	CT2	CT1						W	ADPCM基本クロック切り替え

なお、ADPCMのデータ転送はDMACで行うほうが便利なので、X 68000ではDMACのチャンネル3をADPCM用に割り付けています。DMACの設定方法などについてはDMAの章を参照してください。

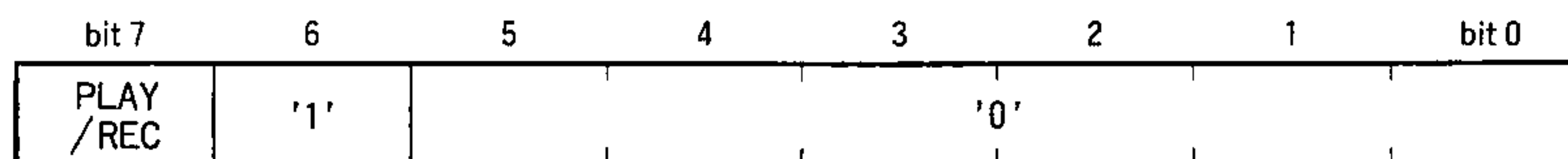
③・②1 ADPCMステータスレジスタ

ADPCMステータスレジスタのビット配置を294ページの図33に示します。ビット7は、ADPCMが録音（音声データ入力）ないしスタンバイ中であるか、再生（音声データ出力）中であるのかを示すビットです。'1'のとき録音中/スタンバイ状態、'0'のときは再生中であることを示しています。

③・②2 ADPCMコマンドレジスタ

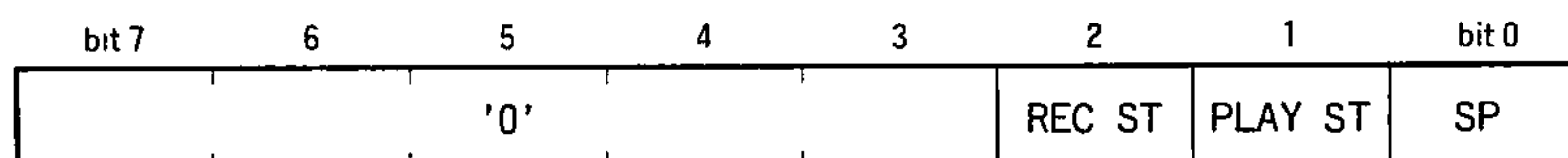
ADPCMの動作開始/停止制御を行います。ビット配置は294ページの図34のようになっています。ビット2が録音開始、ビット1が再生開始の制御を行い、ビット0は録音/再生動作の停止を指示するビットです。再生動作が終了したときはコマンドレジスタで停止を指示しないと、ADPCMは最後に与えたデータを繰り返し使用して音声出力を行ってしまいますので、

●図……33 ADPCM ステータスレジスタ (\$E92001)



1: 録音中/スタンバイ中
0: 再生中

●図……34 ADPCM コマンドレジスタ (\$E92001)



1: 録音/再生動作停止
0: // しない

1: ADPCM再生開始
0: // しない

1: ADPCM録音開始
0: // しない

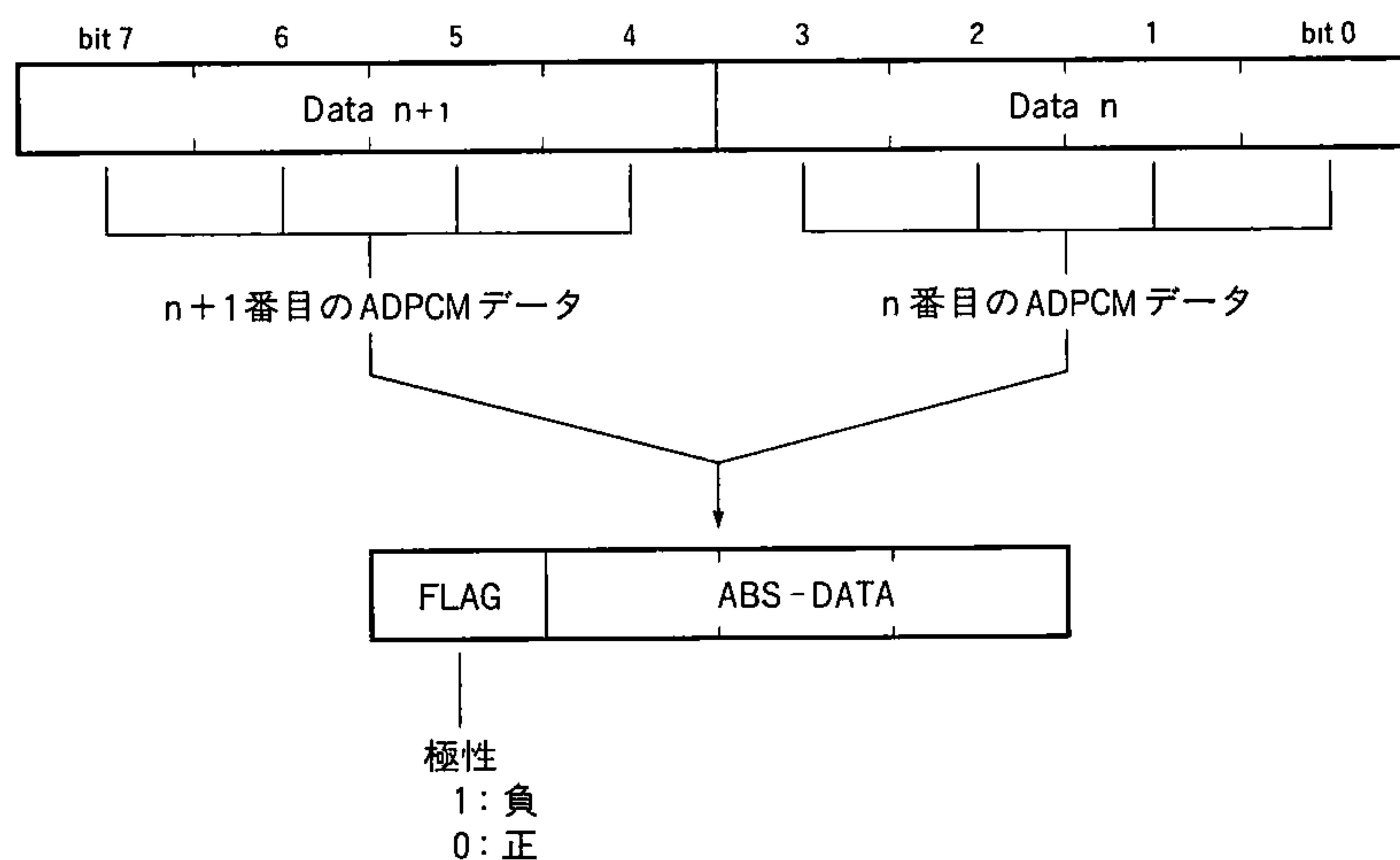
必ず停止コマンドを書き込むようにしてください。

また, 停止コマンドを書き込んだとき, ADPCM の出力レベルは最後の状態のまま保持され, 次の再生開始コマンドを受け取ったときに 1/2 VDD (最大振幅の半分) に戻されるため, 最後の出力レベルが 1/2 VDD 近辺でないと, 開始コマンドを与えた直後に「ボツッ」という音が出る場合があります。

③・② 3 ADPCMデータレジスタ

ADPCM データの入出力を行うレジスタです。ビット配置は図 35 のようになります。ADPCM データは 2 サンプル分ずつまとめて転送を行いますので, 図のように, 上位 4 ビットと下位 4 ビットに分かれており, 下位 4 ビットが先, 上位 4 ビットが後のサンプリングで作成されたデータになっています。それぞれの 4 ビットデータは最上位ビットが符号, 下位 3 ビットが絶対値となっています。

●図……35 ADPCM データレジスタ (\$E92003)



③・② 4 PPI(8255) ポートC

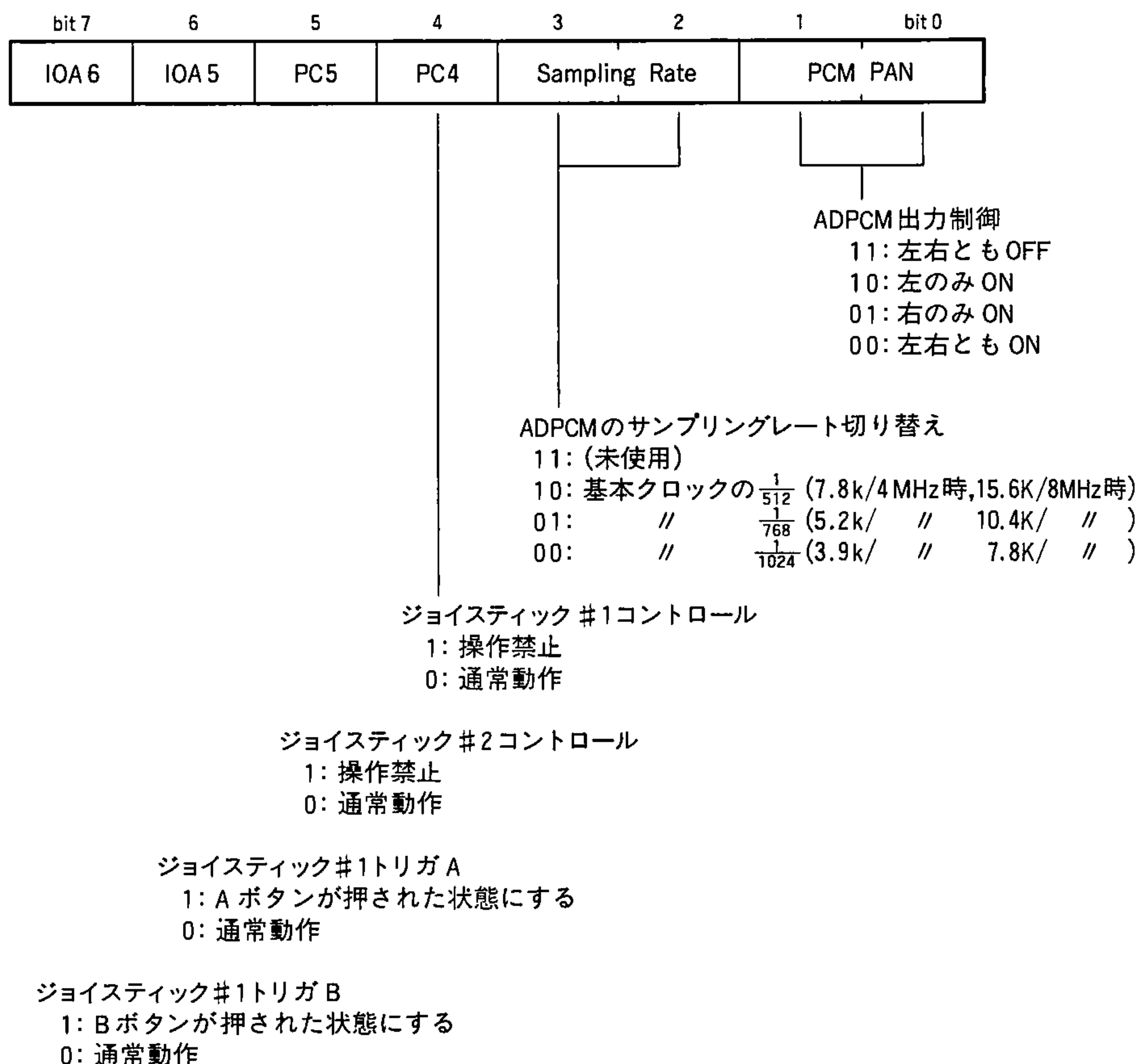
ジョイスティック用に使用している PPI の空きビットを使用して, サンプリングレートの選択や ADPCM のパンポット制御に使用しています。このポートのビット配置を 296 ページの図 36 に示します。

ビット 3 とビット 2 は, ADPCM のサンプリングレートを基本クロックの 1/512, 1/768, 1/1024 のいずれにするかを選択します。2 ビットが '11' のパターンは未使用扱いになっています。実際に設定してみると, '01' のときと同じ結果になるようです。

ビット 1 とビット 0 はパンポット制御で, ビット 0 が左チャンネル, ビット 1 が右チャンネルの制御用となっており, それぞれ '1' にすると出力が OFF, '0' にすると ON になります。片チャンネルだけ ON にすればそちらから, 両方とも ON にすると中央から音が出ているように聞こえます。

なお, X 68000 では 8255 のポート C を出力ポートとして使用していますが, 8255 の特性上, 出力ポートを読み出すと, 出力されているデータがそのまま読み出せますので, 現在設定されているデータを読み出して必要なビットだけを変更することができます。

●図……36 8255 ポート C (\$E9A005)

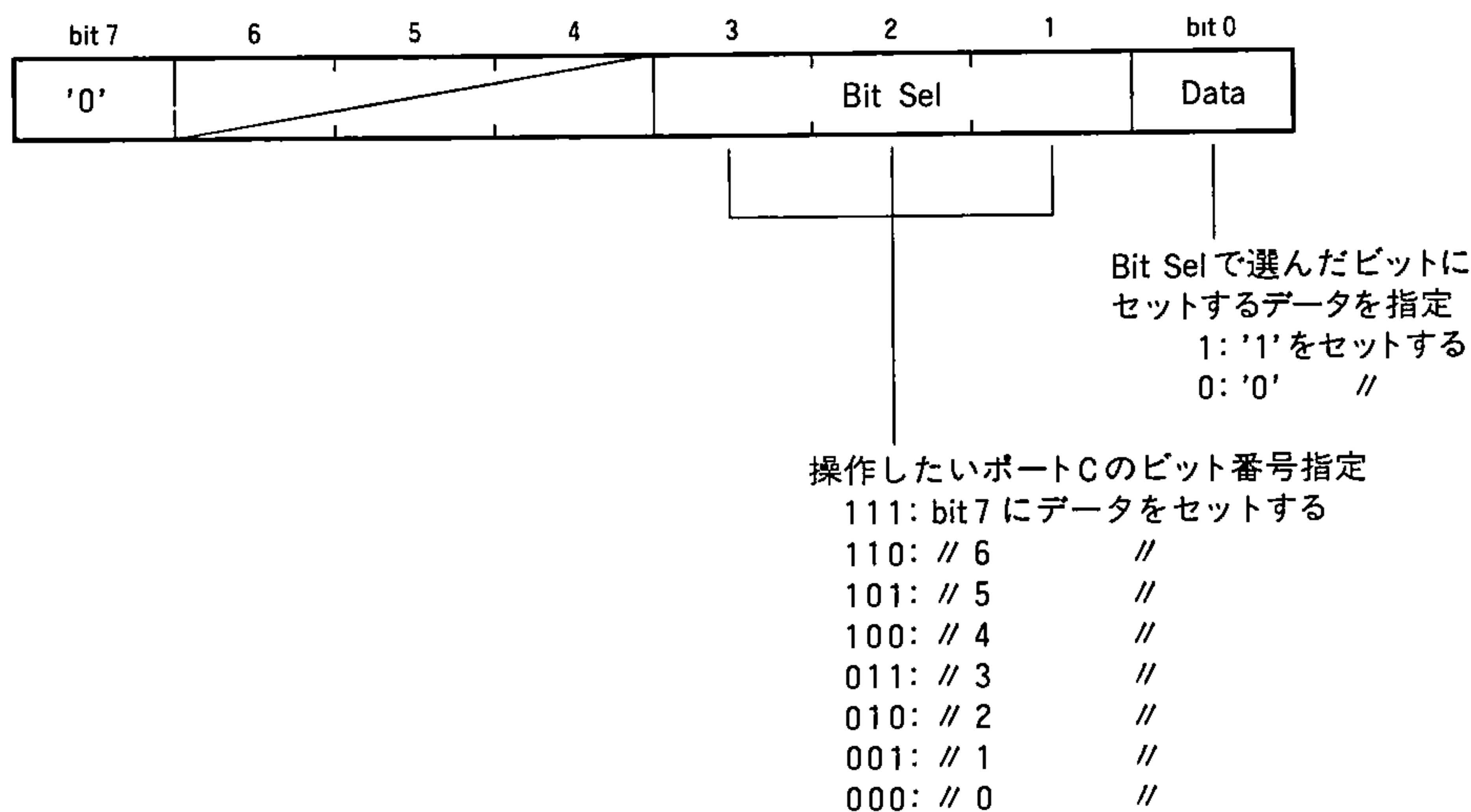


③・② 5 PPI (8255) コントロールワードレジスタ

PPI は、特殊機能として、ポート C の任意のビットを操作するビットセット/リセット機能を持っています。この操作は PPI のコントロールワードレジスタで行います。ビットセット/リセットコマンドのビット配置を図 37 に示します。ビット 7 が '0' であるとき、8255 はビットセット/リセットコマンドと認識し、ビット 1 からビット 3 を操作したいポート C のビット位置、ビット 0 をセットしたいデータとみなして、指定されたビットだけを与えられたデータに変更します。

むろん、ポート C はリード/ライト可能ですから、いったんセットされているデータを読み出してから AND や OR などのビット演算を行い、再度書き込んでもかまわないのですが、操作

●図……37 8255 コントロールワードレジスタ (\$E9A007)



するビットが1つだけであるような場合にはビットセット/リセット機能を使うほうがかんたんだと思われるので、この機能を説明しておきました。

③・② 6 | OPMレジスタ\$1B

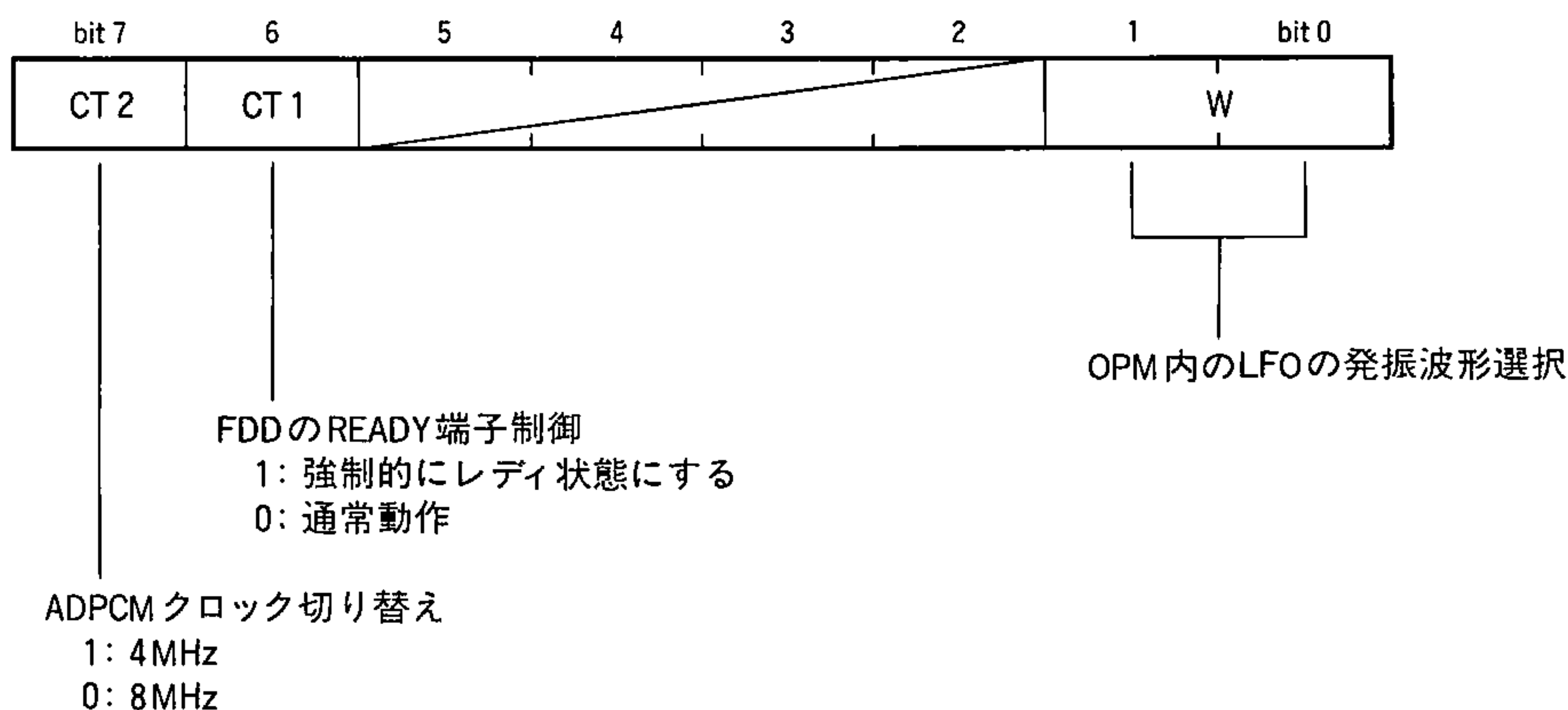
X 68000 では、ADPCM のクロックの切り替え信号として OPM (FM 音源 LSI) の汎用出力端子 CT 2 を使用しています。このビットは OPM 内の番号\$1 B のレジスタで行います。レジスタのビット配置は 298 ページの図 38 のようになっています。このレジスタのビット 7 がクロック選択用のビットで、'0' のとき 8 MHz、'1' のとき 4 MHz になります。

このレジスタは書き込み専用で、読み出すことができないため、システムの使用する場合には、ほかのビットの値に気を配る必要があります。

③・3 | サンプルプログラム

ADPCM の操作を行うサンプルプログラムを作成してみましたので参考にしてください。この例では、\$1F の連続データの再生を行わせています。起動時のオプション指定で、第1引き数が PPI のパンポット制御ビット(ビット 0, 1)にセットする値、第2引き数が PPI のサンプリングレート選択ビット(ビット 2, 3), 第3引き数が ADPCM の基本クロック選択(OPM

●図……38 OPM レジスタ (レジスタ No.=\$1B)



のレジスタ\$1B) に設定する値です。

このサンプルでは PPI の制御にビットセット/リセット機能を使ってみましたので、あわせて参考にしてください。

●リスト…… 1 ADPCM の操作 (\$1F の連続データの再生)

```

/*
 * A D P C M動作テスト
 *
 * XC ではvolatile がサポートされていないため、
 * 次の1行を入れてvolatileを無効にしてください
 * #define volatile
 */

#include <doslib.h>

struct DMAREG {
    unsigned char    csr;
    unsigned char    cer;
    unsigned short   spare1;
    unsigned char    dcr;
    unsigned char    ocr;
    unsigned char    scr;
    unsigned char    ccr;
    unsigned short   spare2;
    unsigned short   mtc;
}

```



```

    unsigned char    *mar;
    unsigned long    spare3;
    unsigned char    *dar;
    unsigned short   spare4;
    unsigned short   btc;
    unsigned char    *bar;
    unsigned long    spare5;
    unsigned char    spare6;
    unsigned char    niv;
    unsigned char    spare7;
    unsigned char    eiv;
    unsigned char    spare8;
    unsigned char    mfc;
    unsigned short   spare9;
    unsigned char    spare10;
    unsigned char    cpr;
    unsigned short   spare11;
    unsigned char    spare12;
    unsigned char    dfc;
    unsigned long    spare13;
    unsigned short   spare14;
    unsigned char    spare15;
    unsigned char    bfc;
    unsigned long    spare16;
    unsigned char    spare17;
    unsigned char    gcr;
} ;

```

```

volatile struct DMAREG *dma;
volatile unsigned char *ppi_cwr; /* 8255コントロールワードレジスタ*/
volatile unsigned char *opm_regno; /* OPMレジスタ番号設定レジスタ */
volatile unsigned char *opm_data; /* OPMデータレジスタ */
volatile unsigned char *adpcm_command; /* ADPCMコマンドレジスタ */
volatile unsigned char *adpcm_status; /* ADPCMステータスレジスタ */
volatile unsigned char *adpcm_data; /* ADPCMデータレジスタ */

```

```

#define BUFSIZE 0x400
unsigned char  pcmbuf[BUFSIZE];

```

```

void main();
void create_adpcmdata();
void adpcm_outsel();

```

```

void adpcm_sample();
void adpcm_clkssel();
void adpcm_stop();
void adpcm_start();
void dma_setup();
void dma_start();
void wait_complete();
void clear_flag();

void main(argc, argv)
    int argc;
    char    *argv[];
{
    unsigned int    i, pan, sample, clk;
    if (argc >= 2)
        pan = atoi(argv[1]);
    else    pan = 0;
    if (argc >= 3)
        sample = atoi(argv[2]);
    else    sample = 0;
    if (argc >= 4)
        clk = atoi(argv[3]);
    else    clk = 0;
    SUPER(0);
    dma          = (struct DMAREG *)0xe840c0;
    ppi_cwr       = (unsigned char *)0xe9a007;
    opm_regno     = (unsigned char *)0xe90001;
    opm_data      = (unsigned char *)0xe90003;
    adpcm_command = (unsigned char *)0xe92001;
    adpcm_status  = (unsigned char *)0xe92001;
    adpcm_data    = (unsigned char *)0xe92003;

    adpcm_stop();
    create_adpcmdata(pcmbuf, BUFSIZE);
    adpcm_outsel(pan);    /* Panpot Control    */
    adpcm_sample(sample); /* Sampling rate    */
    adpcm_clkssel(clk);   /* ADPCM Clock      */
    clear_flag();
    dma_setup();
    dma_start();
    adpcm_start();

```

```

    wait_complete();
    adpcm_stop();
    clear_flag();
}

void create_adpcmdata(buf, length)
    unsigned char    *buf;
    unsigned int     length;
{
    while(length--)
        *buf++ = 0x1f;
}

void adpcm_outsel(sel)
    unsigned int     sel;
{
    *ppi_cwr = (0 << 1) | ((sel >> 1) & 1); /* Left    */
    *ppi_cwr = (1 << 1) | (sel & 1);      /* Right   */
}

void adpcm_sample(rate)
    unsigned int     rate;
{
    *ppi_cwr = (2 << 1) | ((rate >> 1) & 1);
    *ppi_cwr = (3 << 1) | (rate & 1);
}

void adpcm_clkssel(sel)
    unsigned int     sel;
{
    *opm_regno = 0x1b;
    *opm_data  = (sel & 1) << 7;
}

void adpcm_stop()
{
    *adpcm_command = 0x1;
}

void adpcm_start()
{
    *adpcm_command = 0x2;
}

```

```

void dma_setup()
{
    dma->dcr = 0x80;
    dma->ocr = 0x32;
    dma->scr = 0x04;
    dma->ccr = 0x00;
    dma->cpr = 0x08;
    dma->mfc = 0x05;
    dma->dfc = 0x05;

    dma->mtc = BUFSIZE;
    dma->mar = pcmbuf;
    dma->dar = (unsigned char *)adpcm_data;
}

void dma_start()
{
    dma->ccr |= 0x80;
}

void wait_complete()
{
    while(!(dma->csr & 0x90) && !(*adpcm_status & 0x80))
    }

void clear_flag()
{
    dma->csr = 0xff;
}

```

③・4 ADPCMデータ

ADPCM データへの変換アルゴリズムが具体的にどのようなになっているかについて調べたのですが、メーカー（沖電気）のノウハウに該当するものであることから非公開ということでした。このため、X 68000 の ADPCM データがどのようなになっているかは不明です。

ADPCMについて調べているときに見つけたヤマハの音源LSI, YM2608 (OPNA) に内蔵されているADPCM音源のアルゴリズムをコラムに載せておきますので参考にしてください。

C O L U M N

ADPCM のアルゴリズム (ADPCM 音声分析の手順)

- ① A/D 変換 … 音声をサンプリングレートごとに 8 bit の PCM データに変換します
- ② $8 \rightarrow 16$ …… 得られた PCM データを 256 倍して 16 bit のデータ； X_n に変換します
- ③ dn の算出 … この X_n を予備値 x_n と比較して、その差分； dn を求めます
- ④ ADPCM データの決定
 …… dn が正のときは ADPCM のデータの MSB (L 4) を '0'，負のときは '1' にします
 差分の絶対値； $|dn|$ と量子化幅； Δn の関係から、ADPCM データの残り 3 bit (L 3, L 2, L 1) を決定します
 ADPCM データの符号化は表 A に示すとおりです

●表……A ADPCM データと量子化変化率 (f)

L4		L3	L2	L1	f	条 件 ($1n=1 dn 1/\Delta n$)
$dn \geq 0$	$dn < 0$					
0	1	0	0	0	57/64	$ln < 1/4$
		0	0	1	57/64	$1/4 \leq ln < 1/2$
		0	1	0	57/64	$1/2 \leq ln < 3/4$
		0	1	1	57/64	$3/4 \leq ln < 1$
		1	0	0	77/64	$1 \leq ln < 5/4$
		1	0	1	102/64	$5/4 \leq ln < 3/2$
		1	1	0	128/64	$3/2 \leq ln < 7/4$
		1	1	1	153/64	$7/4 \leq ln$

以上の操作で、音声データから ADPCM データへの変換は終わりです

⑤ 予測値と量子化幅の更新

……ADPCM データが得られると、次ステップの予測値； x_{n+1} と量子化幅； Δn_{n+1} の更新を行います

$$X_{n+1} = (1 - 2 \times L4) \times (L3 + L2/2 + L1/4 + 1/8) \times \Delta n + x_n$$

$$\Delta n_{n+1} = f(L3, L2, L1) \times \Delta n \quad : \Delta n_{\min} = 127, \Delta n_{\max} = 24576$$

* 初期設定：予 測 値 $X_1 = 0$

量子化幅 $\Delta 1 = 127$

以下、①～⑤の操作を各サンプリングタイムごとに繰り返して音声分析が行われます