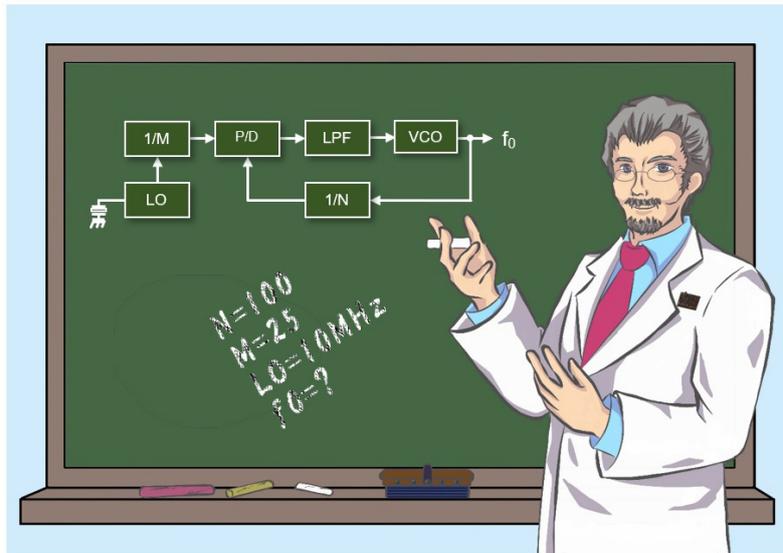


## 第二十四回 今さら PLL の原理について



Dr. FB

ちょっとした電子工作や無線機の調整には SG(Signal Generator) が役に立ちます。市販の SG なら出力レベルも正確ですが、自作派の SG ならアッテネーターの製作もありますのでそう簡単にいきません。無線機のテストに SG が欲しいと思いその製作を考えているうちに PLL(Phase Locked Loop) の原理に行きつきました。今回は 1 アマの試験でもたいへんよく出題されている PLL の原理について簡単に説明します。

### まずは 1 アマの過去問出題から

図 1 に掲載した問題は、第 1 級アマチュア無線技士の工学に出題された問題です。これに類似する PLL の問題は、平成 16 年から令和 3 年までの 18 年間になんと 13 回も出題されています。結構出題頻度の高い問題です。

A - 12 図に示す位相同期ループ(PLL)回路を用いた周波数シンセサイザ発振器において、可変分周器の分周比( $N$ )が 100 のときの出力周波数  $f_0$  の値として、正しいものを下の番号から選べ。ただし、基準発振器の出力周波数は 10 [MHz] 及び固定分周器の分周比( $M$ )は 25 とし、PLL はロックしているものとする。

- 1 10 [MHz]
- 2 20 [MHz]
- 3 40 [MHz]
- 4 80 [MHz]
- 5 100 [MHz]

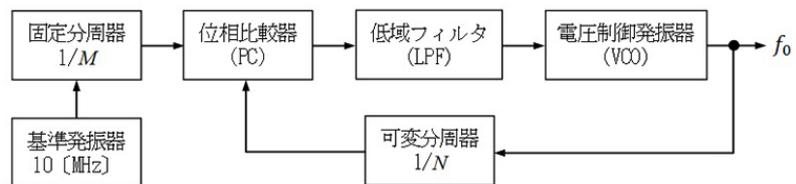


図 1 第 1 級アマチュア無線技士工学の問題 (平成 29 年 4 月実施 日本無線協会)

<解答>

$$\begin{aligned}
 f_0 &= \frac{N}{M} \times f_r \text{ (Hz)} \\
 &= \frac{100}{25} \times 10 \times 10^6 \\
 &= 4 \times 10 \times 10^6 \\
 &= 40 \text{ (MHz)}
 \end{aligned}$$

## PLL 導入の時代背景

PLL の原理を説明する前に、(1) 水晶振動子を使ったトランシーバーを簡単に説明してから (2)PLL の概要を説明します。そして、それ以降は各々のブロックの説明を行います。

### (1) 水晶振動子を使ったトランシーバー

図 2 を参照してください。図 2 は、1976 年に発売されたアイコム IC-212、144MHz 15 チャンネル FM ポータブルトランシーバーです。

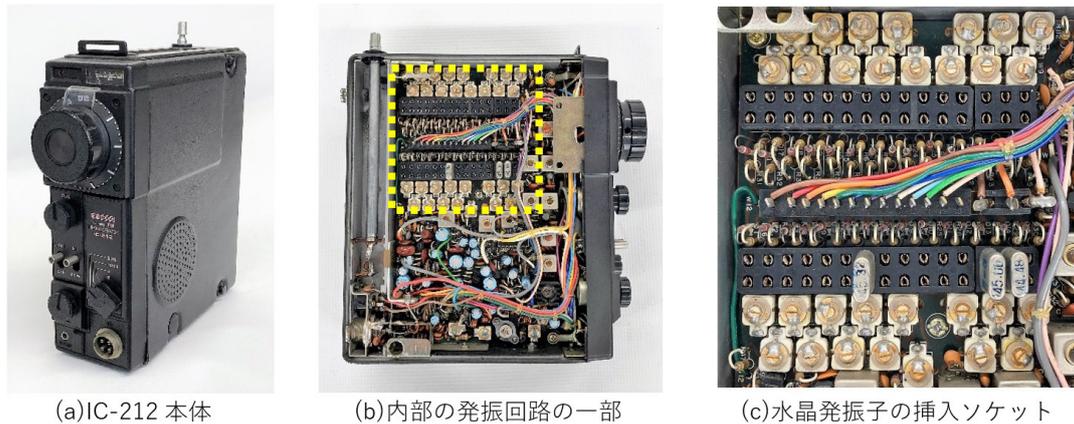


図 2 IC-212 15 チャンネル FM ポータブルトランシーバー

ケースを開けると図 2(b) に 15 チャンネル分の水晶振動子 (クリスタルともいいます) を挿入するソケットが点線の部分に見ることができます。図 2(c) はその拡大図です。15 チャンネル分の水晶振動子はそれぞれ送信、受信が必要となり、フルチャンネルを装備しようとするると 30 個もの水晶振動子が必要になります。

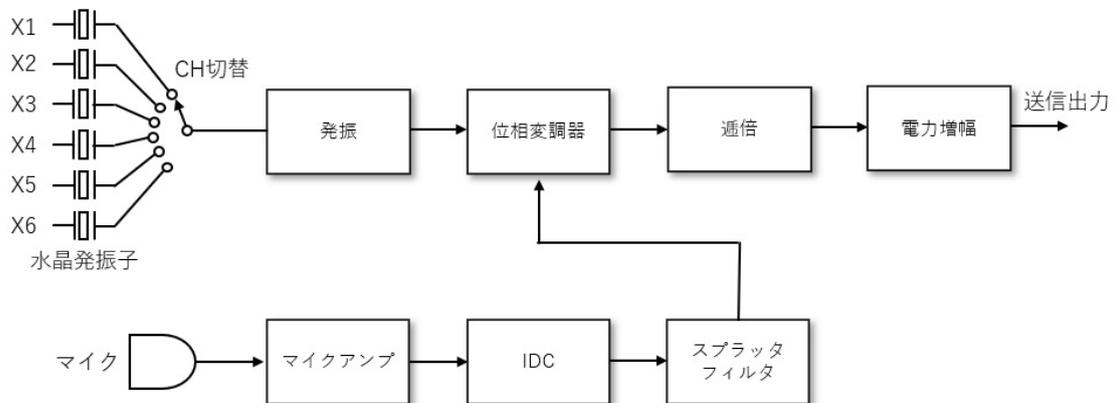


図 3 6 チャンネル FM トランシーバーの送信部のブロックダイアグラム

図 3 の X1 ~ X6 は水晶振動子です。今でこそ、トランシーバーを購入するとどの周波数でもダイヤルを回すと送受信できます。上記の IC-212 が発売された頃は、希望の周波数で送受信しようとするると希望の周波数の水晶振動子無線機に挿入しなければなりません。例えば 2 メーターバンドであれば、145.00MHz ~ 145.98MHz までの FM 20kHz ピッチのチャンネルは 50 チャンネルあります。好きなチャンネルで QSO をしようと思えば 100 個の水晶を予め準備しておく必要があります。水晶振動子も物理的な大きさが存在しますので、100 個もの水晶振動子無線機に全部挿入しようとするると、これも物理的なスペースが必要になります。そうなる無線機もたいへん大きなものとなってしまいます。必然と大きさを選ぶか、チャンネル数を選ぶかといった問題にあたります。



## (2) 固定分周器 (1/M)

これは、入力された周波数を整数分の 1 にする回路です。たいていは分周専用の IC を用います。冒頭に示した 1 アマの問題では  $M=25$  となっています。つまり、入力された 10MHz の信号を 25 分の 1、つまり 400kHz にして出力する回路です。

## (3) 可変分周器 (1/N)

プログラマブル・ディバイダーとも呼ばれます。任意の分周比を外部端子で設定することができます。CPU と組み合わせることで、無線機のダイヤルを回すと分周比が変化し、可変分周器 (1/N) から出力される信号の周波数を変えることができます。

## (4) 位相比较器 (Phase Detector)

位相の比較とは、別の言い方をすれば周波数の比較をするという意味です。位相比较器に入力される 1 つの信号  $f_r/M$  は、元は水晶振動子の発振ですから抜群の安定度を持っています。その周波数にもう一つの VCO の信号  $f_o/N$  がぴったり合致すれば図 5 の二つの正弦波は重なり、位相差がなくなります。つまり、2 つの周波数は合致したことになります。

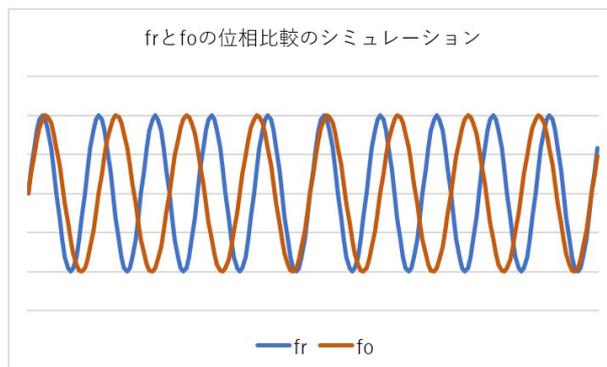


図 5  $f_r$  と  $f_o$  の位相比較

位相比较器にはいろいろな方式があるようですが、例えば、古い方式ですと  $f_r$  と  $f_o$  の信号のビート (うなり) の周波数を取り、そのビート周波数に沿った電圧を出力する位相比较器もあるようです。つまり  $f$ - $V$  変換です。ビート周波数が 0 のときは位相比较器の出力電圧は 0(V)。ビートが発生するとそれに応じた電圧を出力するといった具合です。

図 6 は、アイコム IC-2N(1980 年発売) に使われていた PLL の回路の一部です。IC2(TC5081) がその位相比较器の IC です。すでにこの IC は製造中止となり流通在庫しか残ってないようですが、自作派には使いやすい IC です。

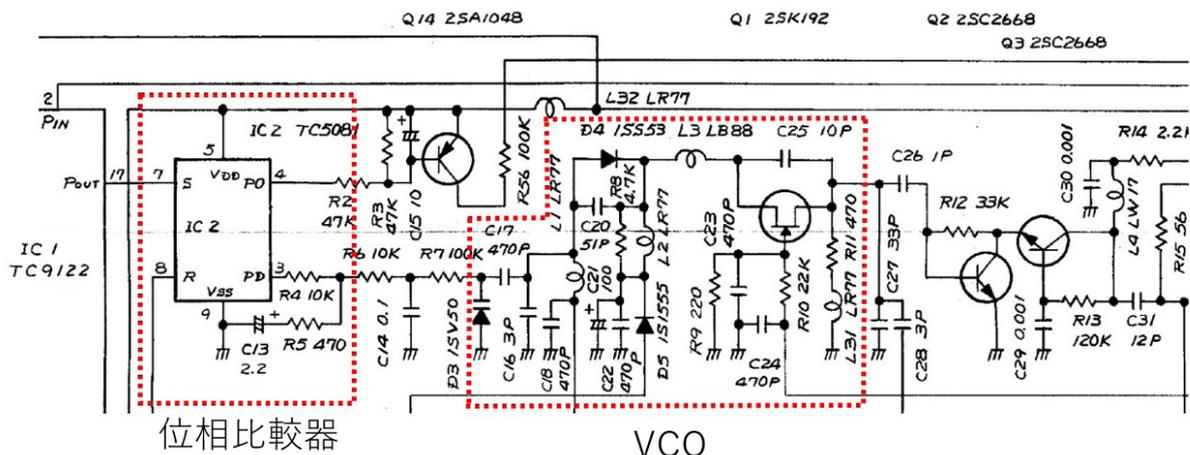
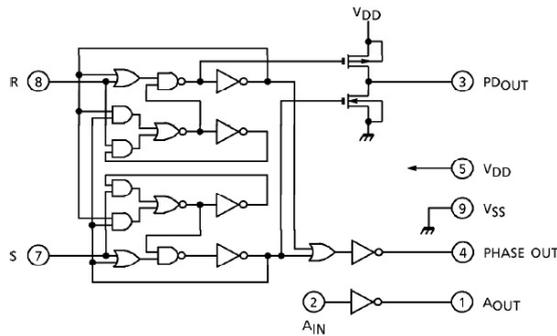
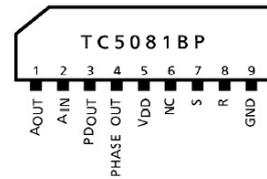


図 6 IC-2N の位相比较器と VCO 周辺の回路 (アイコム IC-2N の回路図より抜粋)

### LOGIC DIAGRAM



### PIN CONNECTION (SIDE VIEW)



### PHASE COMPARATOR TIMING CHART

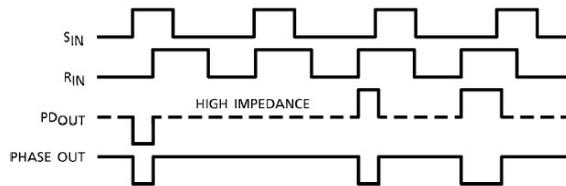


図7 IC-2N に使われていた位相比較器 IC の内部回路とそのタイミングチャート (TOSHIBA TC5081 のデータシートより引用)

### (5) 低域フィルタ (Low Pass Filter)

ループフィルタ (Loop Filter) とも呼ばれます。図6の回路図では R4、R5、R6、C13、C14 で構成されています。位相比較器の出力には雑音や高周波成分が含まれていますからそれらを取り除き VCO の D3 に供給する DC 成分の信号を作ります。

### (6) 電圧制御発振器 (VCO)

図6の Q1 (2SK192) とその周辺回路で構成された回路が VCO (Voltage Controlled Oscillator) の回路です。コルピッツ発振回路でキーパーツが D3 (1SV50) のバラクターダイオードです。

VCO は、L と C で構成された発振回路であると述べましたが、その部品の一部にバラクターダイオードが使われているところがミソです。バラクターダイオードとは、ダイオードの一種ですが、逆方向に電圧を印加することでアノード、カソード間の静電容量が変化するという特性を持ったダイオードです。つまり、このバラクターダイオードの C (静電容量) を LC の発振回路に用い、この C の静電容量の変化で VCO の発振周波数を可変しています。

位相比較器で比較した  $f_r$  と  $f_o$  に位相差が発生するとき、その位相差が大きい時には位相比較器から出力される電圧が大きく、逆のときは低い電圧となります。その電圧を VCO 内のバラクターダイオードに加えることで、VCO の発振周波数を可変させ基準周波数  $f_r$  と同じ周波数になるようにするのが PLL です。

## fr と fo の関係

基準周波数発振器 (RO) で発振した信号を固定分周器 (1/M) で分周した周波数を  $f_1$  とします。また、VCO の出力信号 ( $f_o$ ) を可変分周器 (1/N) で分周した周波数を  $f_2$  とします。PLL は、 $f_1$  と  $f_2$  の間の関係を  $f_1=f_2$  とする一種の帰還を掛けた自動制御の回路です。 $f_1=f_2$  となったとき、我々は「PLL はロック (Lock) した」と言います。反対に何らかの原因で  $f_1=f_2$  となっていない場合、「PLL はアンロック (Unlock) の状態」といいます。

基準周波数発振器 (RO) の周波数は、図 8 では  $f_r$  です。 $f_r$  の周波数は、MHz オーダーの高い周波数ですから、それを低い周波数にするために分周器 (1/M) で分周します。その分周した固定分周器の出力周波数  $f_1$  は、 $f_1=f_r/M$  となります。VCO の発振周波数を予め希望目的周波数として LC 回路で設計しておきます。希望目的周波数  $f_o$  は、無線機の回路の局部発振回路 (LO) 等に使われる信号ですので、無線機のダイヤルを回すと周波数が変わります。そのため可変分周器 (1/N) を外部からプログラムで絶えず  $f_1$  の周波数となるように分周比を決めます。つまり、 $f_2$  は、VCO の出力周波数 ( $f_o$ ) を N 分の 1 した周波数ですので、 $f_2=f_o/N$  となります。

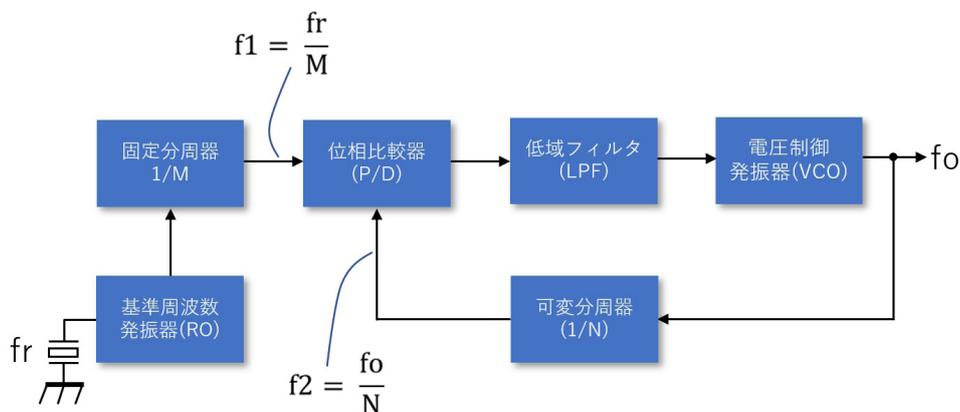


図 8  $f_r$  と  $f_o$  の関係

先にも説明しましたように、 $f_1=f_2$  が PLL のロック状態の条件ですから  $f_1$  と  $f_2$  の関係式から VCO の出力周波数を求めると下のようになります。

$$f_1 = \frac{f_r}{M} \quad f_2 = \frac{f_o}{N}$$

$$f_1 = f_2 \quad \text{より} \quad \frac{f_r}{M} = \frac{f_o}{N}$$

$$f_o \times M = f_r \times N$$

$$f_o = \frac{f_r \times N}{M}$$

$$\therefore f_o = \frac{N}{M} \times f_r$$

## IC-2N の PLL 回路

IC-2N の PLL 回路では、 $f_r=5.12\text{MHz}$  の水晶振動子が使われています。その  $5.12\text{MHz}$  を固定分周器 (1/M) で 1024 分周しており、 $5\text{kHz}$  の信号を  $f_1$  として位相比較器に入力しています。位相比較器に入るもう一つの信号  $f_2$  は、VCO の出力周波数を分周して  $5\text{kHz}$  を得ています。ここで、M、 $f_r$  は一定ですので分周比 N を可変することで VCO の出力周波数 ( $f_o$ ) が変わることが理解できます。

## FBDX

< 参考とした資料 >

公益財団法人日本無線協会 平成 29 年 4 月実施の無線工学過去問

産報出版株式会社 電子科学シリーズ PLL-IC の使い方

誠文堂新光社 わかる半導体シリーズ PLL 活用ガイド

TOSHIBA TC5081 データシート