

3-2.位相形発振部の設計

増幅器の出力側から入力側にキャパシタ 3 個と抵抗 3 本で帰還回路を組み、発振させる。参考文献 2) によれば、増幅度が 29 倍以上でないと発振しないことが記載されている。Fig.3-2 で、C と R がそれぞれ 3 個共同値の場合、発振周波数は以下の式で表せる。

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{6}CR} \dots\dots\dots 3-5$$

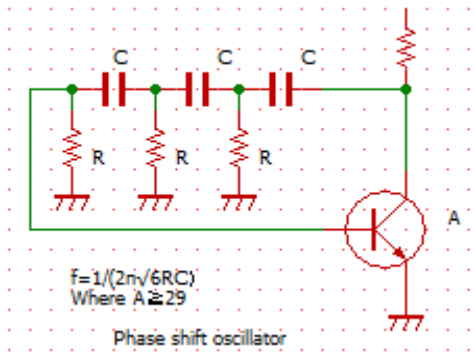


Fig.3-2 位相形発振器概念図

手元にある部品で構成することにし、0.001 μF と 68 kΩ で

$$f = 1 / (2\pi\sqrt{6} \times 0.001 \times 10^{-6} \times 68 \times 10^3) \\ = 1 / (2\pi\sqrt{6} \times 68 \times 10^{-6}) \approx 955.51 \text{ Hz}$$

と約 1 kHz を発振させる。

このタイプの発振器には全く経験がなく、きれいな正弦波になるのか気になり、シミュレーションを繰り返した。

回路は FET とトランジスタ(NPN-PNP)で構成し、上記 CR の他にフィードバックをかけて安定させ、更に電位補正と出力インピーダンスを下げるため (約 50 Ω にする)、PNP のエミッタホロワを追加した。

途中経過ではやはり歪みが生じ、トランジスタの hfe も関わるので動作点と増幅度を調整し、漸く所望の正弦波が得られた。

3-2-1.FET 動作点 (詳細は後述)

手持ちの 2SK19-BL の I_{DSS} が大きいことが分かったので、当初考えていたソース電圧 0.9 V は無理と判明した。最終的にソース抵抗を 1.2 k とし、ソース電圧を 3 V にせざるを得なかった。

3-2-2.トランジスタ増幅器

NPN-PNP 構成で初段 40 倍、次段 2 倍で約 80 倍とし、これにフィードバックをかけて安定させる。フィードバック量が多いと増幅度が低下し発振しない恐れがあるため、56 kΩ + 2.2 μF とした。

初段エミッタ抵抗を 68 Ω としたのでフィードバック量は 0.0015 となり、総合増幅度は 68 倍 (約 36 dB) である。初段・総合ともバラツキを考えて増幅度は問題ない。

3-2-3.PNP エミッタホロワ

定数の関係で前段のコレクタがマイナス電位となるので、出力電位を 0 V 付近に戻し、かつインピーダンスを下げることにした。これを電解キャパシタで更に 0 V 電位で送出する。

3-3.位相形発振器の組立て・検討

シミュレーションによると歪みの少ない正弦波を 5 Vp-p 発生させるには、3.6 kΩ及び 390 Ω並びに 820 Ωなど（個人的には好みでない）定数になってしまう。手持ち定数を組合せて組上げてみたが、これが**全く発振しない**。そこでの検討経過を以下に示す。

a) Q1;2SK19-BL のソース電位が 3 V 以上出ている。

Idss がかなり大きい（データシートでは BL ; 12 mA min~24 mA max）。ドレイン-ソース間電圧は 8 V だが、ソース抵抗 1.5 kΩで 3 V も出るので特性上 Idss はほぼ 24 mA に近い。抵抗を減らして Id を増やしソース電位を下げて良いが、電源に負荷がかかる。結果、3 V は容認して 1.2 kΩとし、2 mA 台にした。これにより次段の定数が全く変わるようになった。

b)増幅段 Q2;2SC828-S-Q3;2SA838, Q4; 2SA872 エミッタホロワ

a)により、表 3-1 のように諸定数の変更・追加を行った。

表 3-1 定数の設計変更

		設計時	変更後	理由等
Q2	ゲイン抵抗	82 Ω	68 Ω	手持ちに変更
	エミッタ抵抗	820 Ω	1.89 kΩ	390 Ω+1.5 kΩ, ソース電位に因る電流調整
	コレクタ抵抗	3.6 kΩ	3.2 kΩ	1 k+2.2 kΩ, ゲイン調整
Q3	エミッタ抵抗	2.56 kΩ	1.65 kΩ	150 Ω+1.5 kΩ, 電位とゲイン調整
	コレクタ抵抗	3.6 kΩ	3.7 kΩ	1.5 kΩ+2.2 kΩ, 電位調整
Q4	ベース抵抗	なし	47 Ω	Q2 発振防止, インピーダンス・電位調整
	エミッタ抵抗	2.2 kΩ	2.2 kΩ	変更なし, ダイオード追加 (出力電位調整)
	トランジスタ	2SA838	2SA872	A838 ; hfe ≒ 100, A872 ; hfe ≒ 160
フィードバック定数		56 kΩ+2.2 μF	変更なし	47 k でも良。5.6 kΩなど一桁はゲイン不足
発振周波数定数		0.001 μ, 68 kΩ	変更なし	計算値 ; 955.5 Hz 結果 ; 1.143 kHz

以上により、Q2 が正常動作し発振も安定するようになった。更に微調整していくと発振出力は最大 7.5 Vp-p, 周波数は 1.14 kHz となった (Fig.3-2 参照)。

諸量の計算を以下に示す。

$$\text{発振周波数 ; } f = 1/(2\pi\sqrt{6CR}) = 1/(2 \times 3.1415 \times \sqrt{6} \times 0.001 \times 10^{-6} \times 68 \times 10^3) = 955.5 \text{ Hz}$$

$$\text{Q2 ゲイン ; } A_{v1} \cong (1 \text{ k} + 2.2 \text{ k}) / (68 + 14) = 39.02 \text{ 倍} \quad \text{但し } 10 \mu\text{F} = 14 \Omega \text{ at } 1.14 \text{ kHz, } h_{fe2} \gg 1$$

$$\text{Q3 ゲイン ; } A_{v2} \cong (1.5 \text{ k} + 2.2 \text{ k}) / (150 + 1.5 \text{ k}) = 2.24 \text{ 倍} \quad \text{但し } h_{fe3} \gg 1$$

$$\text{帰還量 ; } \beta = (68 + 14) / (56 \text{ k} + 63.45 + 68 + 14) = 0.00146 \quad \text{但し } 2.2 \mu\text{F} = 63.46 \Omega \text{ at } 1.14 \text{ kHz}$$

$$\text{増幅段ゲイン ; } A_v = A_{v1} \times A_{v2} = 39.02 \times 2.24 = 87.4 \text{ 倍}$$

$$\text{フィードバック後のゲイン ; } A' = A_v / (1 + \beta A_v) = 87.4 / (1 + 0.00146 \times 87.4) = 77.51 \text{ 倍}$$

$$\text{総合ゲイン ; } A = 0.9 \times 77.51 \times 0.9 = 62.78 \text{ 倍} \quad \text{但しソースホロワ=エミッタホロワの補正=0.9 倍}$$

表 3-2 に計算値と実測値を示す。

表 3-2 計算値と実測値

		計算値	実測値	備考
Q1 K19BL	ゲート	0 V	0 V, 110 mVp-p	
	ソース	3 V	2.9 V	計算値；IDSS から推定
	ドレイン	8 V	8 V	ソースホロワ
	ゲイン	(0.9 倍)	0.93 倍	計；経験則値
Q2 C828	ベース	3 V	2.9 V, 130 mVp-p	計算値；IDSS から推定
	コレクタ	4.07 V	4.3 V, 3.83 Vp-p	
	エミッタ	2.4 V, 1.2 mA	2.3 V, 100 mVp-p	実測値；1.17 mA
	ゲイン	39.02 倍	38.3 倍 ¹⁾	実測値；3.83 V/100 mV
Q3 A838	ベース	4.07 V	4.3 V	
	コレクタ	-2.1 V	-1.1 V, 8.4 Vp-p	
	エミッタ	4.7 V, 1.75 mA	5.0 V, 3.9 Vp-p	
	ゲイン	2.24 倍	2.15 倍 ¹⁾	実測値；8.4 V/3.9 V
Q4 A872	ベース	-2.1 V	-1.2 V, 8.4 Vp-p	
	コレクタ	-8 V	-8 V	
	エミッタ	-1.5 V, 3 mA	-0.6 V, 8.35 Vp-p	実測値；3.3 mA
	ゲイン	(0.9 倍)	≥ 0.95	計算値；経験則値
追加ダイオード		-	K; -0.6 V, A; $\cong 0$ V	K;カソード, A;アノード
増幅段ゲイン		87.4 倍	82.3(84)倍 ¹⁾	実測値；84=8.4 V/100 mV
総合ゲイン		62.78 倍 ²⁾ , -	68.2 倍, 7.5 Vp-p	実測値；Q1 gate~Q4 emitter 間 68.2 倍=7.5 V/110 mV

1) |計算値-実測値| $\leq 10\%$ ；誤差内と判断。 2) Q1 FET 及び Q4；0.9 倍による。

ほぼ一致が見て取れるが、総合ゲインについてはフィードバックを掛けぬと Q1 ゲートが歪のない正弦波にならないので、位相形発振特有のものか不明である。後日検討したい。

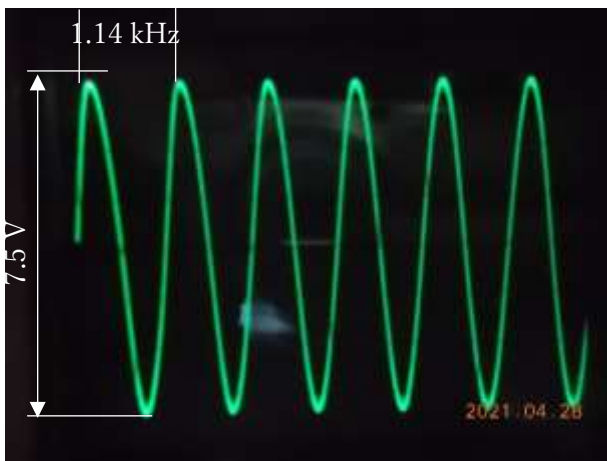


Fig.3-3 位相形発振器発振出力波形

エミッタホロワ Q4 には、ベース側に発振防止を兼ねて $47\ \Omega$ を入れ、エミッタ側から見て $\cong 3.7\ \text{k}\ \Omega + 47\ \Omega$ としておき、2SA838 よりも hfe の高い hfe ≥ 160 で手持ちの 2SA872 に変更しカップリングキャパシタ $10\ \mu\text{F}$ ($15.9\ \Omega$ ；1 kHz) とで出力インピーダンスが約 $50\ \Omega$ になるようにした。

また、表 3-1 にあるように出力電位調整用にダイオードを追加、エミッタに挿入している。最終的には、Fig.3-3 のように出力波形には歪みがないように見える。

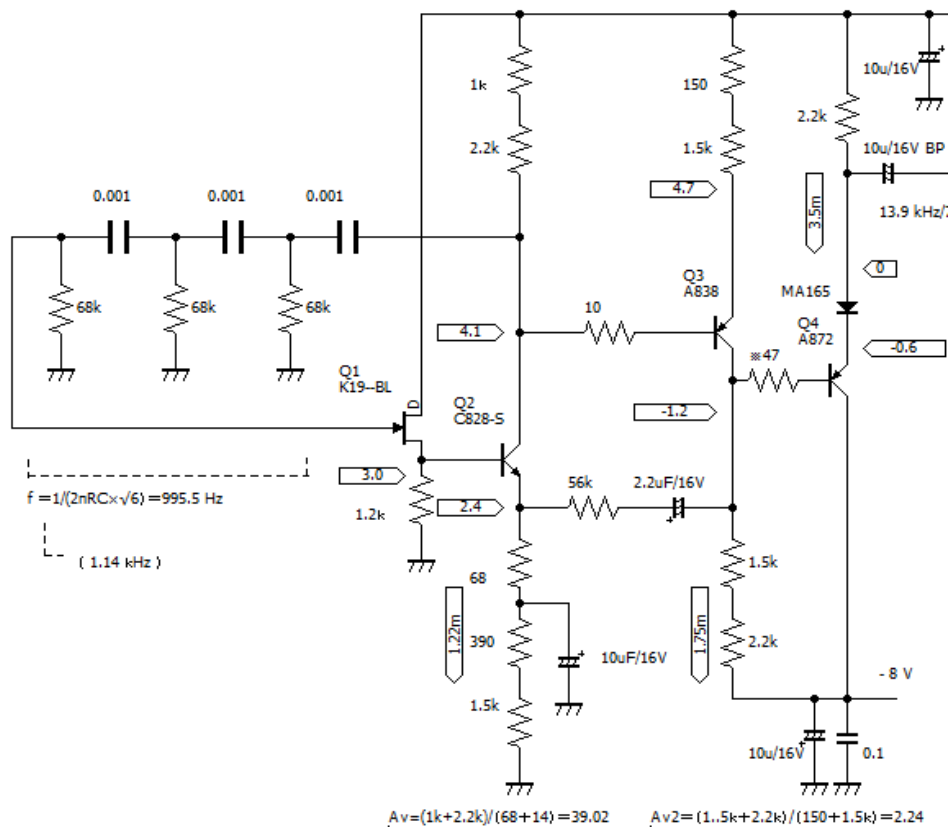


Fig.3-4 位相形発振回路

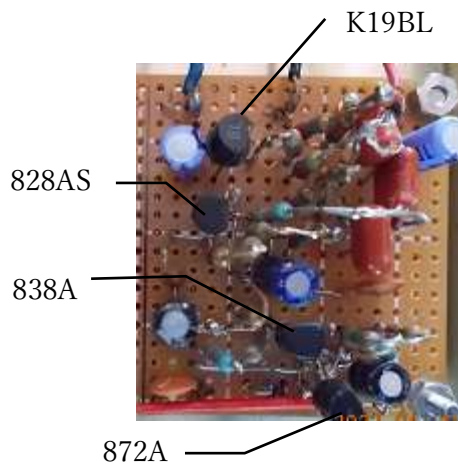


Fig.3-5 発振回路実装状態

- ・ 向かって右側，茶色の部品が 0.001 μF。
- ・ 主増幅の 2SC828A-S は $h_{fe} \geq 260$ 。