

基本回路10選！ブレッドボード実験室

確認テスト解答集

令和4年1月10日

古橋 武

トラ技 Jr. 2022 冬号（通巻 48 号）に特集記事「基本回路 10 選！ブレッドボード実験室」を掲載しました。本稿は同記事内の確認テストに対する解答を示します。

●位相差を理解する RC 直列回路

問題 v_C の v_s に対する位相差を理論と実験から求めてください。

解答

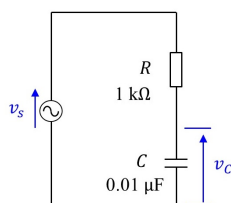


図 1: $R - C$ 直列回路

図 1 において以下の式が成立します。

$$\begin{aligned} V_C &= \frac{\frac{1}{j\omega C}}{R + \frac{1}{j\omega C}} V_s \\ &= \frac{1}{1 + j\omega CR} V_s. \end{aligned} \quad (1)$$

これより、 v_C の v_s に対する位相差を φ_{Cs} とすると、

$$\varphi_{Cs} = -\tan^{-1} \omega CR \quad (2)$$

です。 $f = 10[\text{kHz}]$, $R = 1[\text{k}\Omega]$, $C = 0.01[\mu\text{F}]$ なので、

$$\begin{aligned} \varphi_{Cs} &= -\tan^{-1}(2\pi \times 10 \times 10^3 \times 1000 \times 0.01 \times 10^{-6}) \\ &= -32[^\circ] \end{aligned} \quad (3)$$

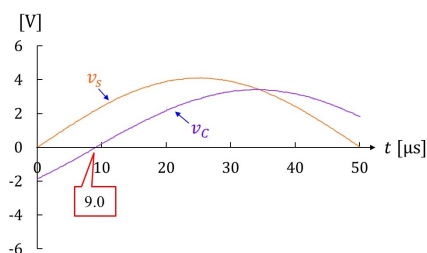


図 2: $R - C$ 直列回路の実験波形例

図 2 は実験波形例です。ADALM2000 のオシロスコープ波形を Export して，Excel により描いた波形です。横軸が時間 $t[\mu s]$ ，縦軸が電圧 $[V]$ です。橙線が v_s ，紫線が v_C です。実験データでは v_C は v_s に対して $9.0[\mu s]$ 遅れていました。 $25[\mu s]$ で $90[^\circ]$ なので，

$$\begin{aligned}\varphi_{Cs} &= -\frac{9.0}{25} \times 90 \\ &= -32[^\circ]\end{aligned}\tag{4}$$

でした。

●共振現象が学べる RLC 直列共振回路

問題 コイルの両端電圧を v_L とします．共振時における v_C と v_L の振幅差および位相差を理論と実験から求めてください．

解答

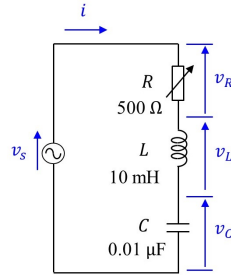


図 3: RLC 直列共振回路

図 3 の回路において流れる電流を I とすると，

$$\begin{aligned} V_L &= j\omega LI \\ V_C &= -j\frac{I}{\omega C} \end{aligned} \quad (5)$$

なので，共振時に限らずいつでも v_L の v_C に対する位相差は $180[^\circ]$ です． v_C の v_L に対する位相差は $-180[^\circ]$ とも言い換えられます．

また，共振時には

$$\omega L = \frac{1}{\omega C} \quad (6)$$

なので

$$|V_L| = |V_C| \quad (7)$$

です．共振時には v_L と v_C の振幅差は 0 です．

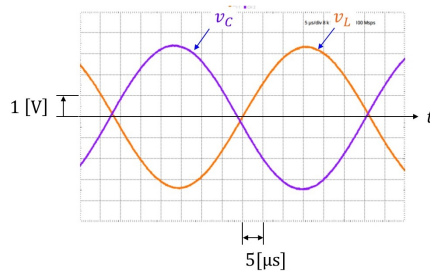


図 4: RLC 直列共振回路の v_L, v_C 実験波形例

図 4 は共振時の v_L, v_C の波形例です。オシロスコープ画面のスナップ・ショットです。振幅差はほぼ 0 で，位相差はほぼ $180[^\circ]$ です。子細に見ると位相差は $180[^\circ]$ からわずかにずれています。インダクタ内の抵抗成分のずれが主な要因です。

拙著 [2] では，ADALM2000 とブレッドボードを使って，座学と実験により電気回路論を学べます。

●信号増幅の基本を学べるエミッタ接地増幅回路

問題 $R_L = 1\text{k}\Omega$ として、ゲイン G の周波数特性を求めてください。

解答

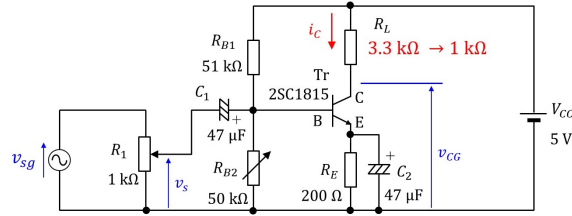


図 5: エミッタ接地増幅回路の電圧増幅実験回路

図 5 のエミッタ接地増幅回路において、 R_L を $3.3\text{[k}\Omega\text{]}$ から $1\text{[k}\Omega\text{]}$ に取り替えます。このとき、比較のためにコレクタ電流 i_C の平均値を同じにします。それには、 R_L を $3.3\text{[k}\Omega\text{]} \rightarrow 1\text{[k}\Omega\text{]}$ としたときに、 R_{B2} を変えないでおきます。 i_C の平均値はほとんど変わりません。もう少し詳しく述べると、 $R_L = 3.3\text{[k}\Omega\text{]}$ のときの調整手順 1 にて、 v_{CG} の平均値 \bar{v}_{CG} を 3[V] にしました。この結果、 i_C の平均値 \bar{i}_C は

$$\begin{aligned}\bar{i}_C &= \frac{V_{CC} - \bar{v}_{CG}}{R_L} \\ &= \frac{5 - 3}{3300} \\ &= 0.606\text{[mA]}\end{aligned}\quad (8)$$

となります。 $R_L = 1\text{[k}\Omega\text{]}$ にて、 $\bar{i}_C \approx 0.6\text{[mA]}$ とするには、 \bar{v}_{CG} を

$$\begin{aligned}\bar{v}_{CG} &= V_{CC} - R_L \bar{i}_C \\ &\approx 4.4\text{[V]}\end{aligned}\quad (9)$$

とします。

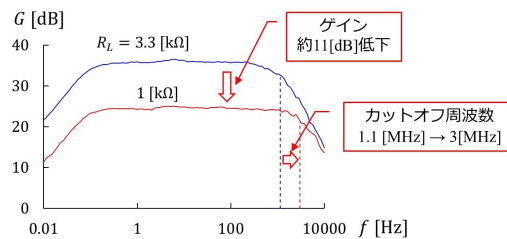


図 6: エミッタ接地増幅回路のゲイン特性

図 6 が得られた周波数特性です。ゲインは約 11[dB] 低下します。そしてカットオフ周波数が $1.1\text{ [MHz]} \rightarrow 3.3\text{ [MHz]}$ と高くなります。これは R_L を小さくしたことでミラー効果の影響およびプローブの静電容量の影響が小さくなったことによります。興味のある方は拙著 [3] [4] を参照してください。

● OP アンプの基本を学べる反転増幅回路

問題 非反転増幅回路を作成し，入出力波形を観測してください。

解答

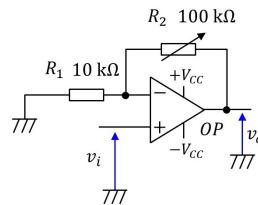


図 7: 非反転増幅回路

図 7 が解答の非反転増幅回路です．この回路の電圧増幅度 A_v は

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = 1 + \frac{R_2}{R_1} \quad (10)$$

です． v_o の極性は v_i と同じ（非反転）です．

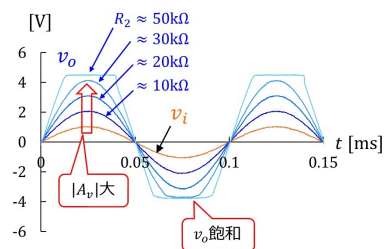


図 8: 非反転増幅回路の入出力電圧波形例

図 8 は非反転増幅回路の入出力電圧波形例です． v_i の振幅が 1 [V] です． $R_2 \approx 10, 20, 30, 50[\text{k}\Omega]$ と変えて， v_o の波形を計測しました． A_v がほぼ 2, 3, 4, 6 と変化しました． $R_2 \approx 30, 50[\text{k}\Omega]$ の場合では， v_o に飽和が見られました．

● OP アンプの応用例：ロー・パス・フィルタ

問題 ハイ・パス・フィルタを作成し，周波数特性を観測してください。

解答

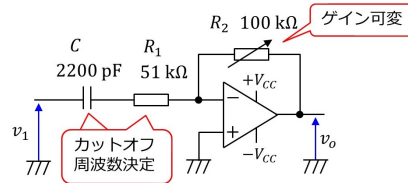


図 9: ハイ・パス・フィルタ

図 9 がハイ・パス・フィルタです． v_i, v_o の複素数表示をそれぞれ V_i, V_o とすると，

$$V_o = -\frac{R_2}{R_1} \frac{j\omega C R_1}{1 + j\omega C R_1} V_i \quad (11)$$

となります．ゲイン G は

$$G = 20 \log_{10} \frac{R_2}{R_1} \frac{\omega C R_1}{\sqrt{1 + (\omega C R_1)^2}} \quad (12)$$

です．また，カットオフ周波数 f_c は

$$\begin{aligned} f_c &= \frac{1}{2\pi C R_1} \\ &= \frac{1}{2\pi \times 2200 \times 10^{-12} \times 51 \times 10^3} \\ &= 1.4[\text{kHz}] \end{aligned} \quad (13)$$

です． $f \gg f_c$ にて，

$$G \approx 20 \log_{10} \frac{R_2}{R_1} \quad (14)$$

と近似されます．

図 10 がハイ・パス・フィルタのゲイン特性です．カットオフ周波数 $f_c \approx 1.4[\text{kHz}]$ (一定) でした． $R_2 \approx 10,50100[\text{k}\Omega]$ と変えることでゲイン $G \approx -14,0,6[\text{dB}]$ の結果を得ました．

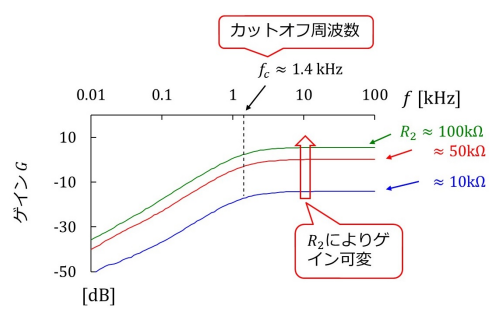


図 10: ハイ・パス・フィルタのゲイン特性

● デジタル回路の基本が学べる論理ゲート

問題 ド・モルガンの式 $\overline{X_1 X_0} = \overline{X_1} + \overline{X_0}$ の両辺それぞれの論理回路を作成し、両回路の出力が一致することを確認してください。

解答

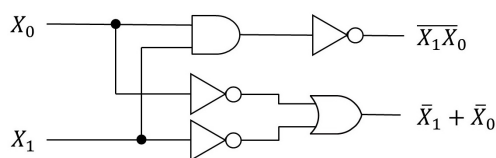


図 11: ド・モルガン式の論理回路

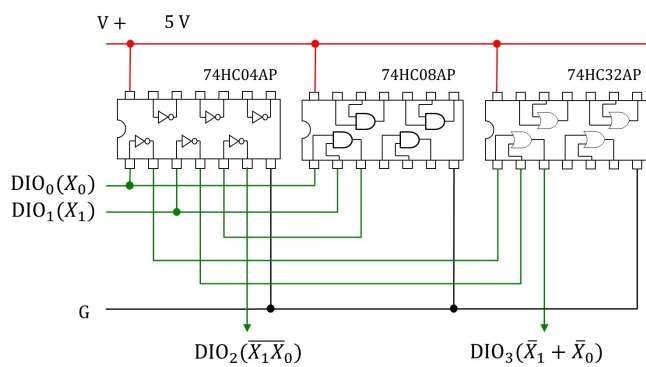


図 12: ド・モルガン式の論理回路の配線図

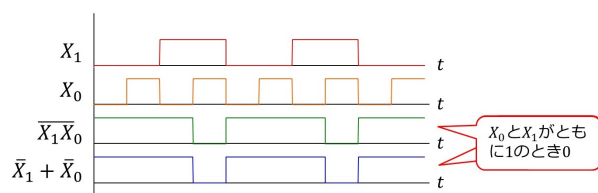


図 13: ド・モルガン式の論理回路の実験波形

●デジタル回路の応用：カウンタ

問題 JK フリップ・フロップを用いて 16 進カウンタを作成してください。

解答

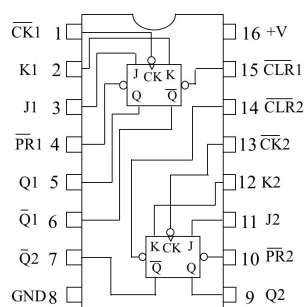


図 14: JK フリップ・フロップ

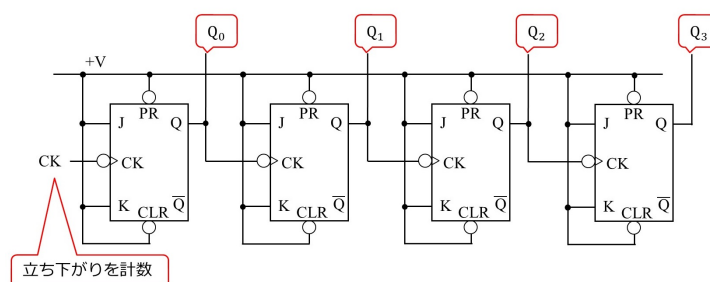


図 15: 16 進カウンタの回路図

JK フリップ・フロップはクロック CK の立ち下がりエッジを捉えるように作られています。

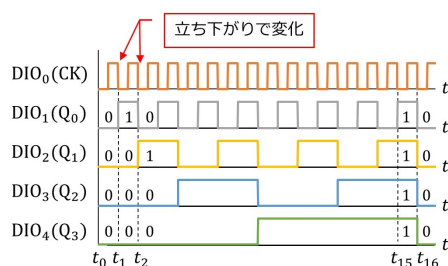


図 16: 16 進カウンタの実験波形

クロック CK の立ち下がりのタイミングでカウント・アップがなされています。

拙著 [5] では、ブレッドボードを使って、設計・製作を通してデジタル回路を学べます。現在（令和 4 年 1 月時点），ADAL2000 とブレッドボードを用いて，設計・実験を通して「デジタル回路」が学べるテキストを執筆中です。

●チョップパの応用：DC モータの回転数制御回路

問題 PI 制御回路のコンデンサ C_1 を短絡して、 $v_{\Omega COM}$, v_{Ω} を計測してください． $v_{\Omega COM} \neq v_{\Omega}$ となります．なぜでしょうか？

解答

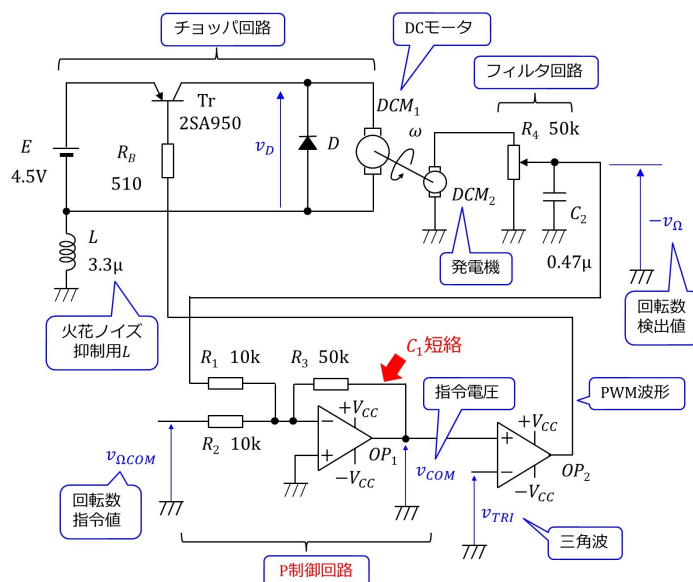


図 19: P 制御による DC モータの回転数制御回路

コンデンサ C_1 を短絡すると v_{COM} と $v_{\Omega COM}$ の関係は

$$v_{COM} = -\frac{R_3}{R_1}(v_{\Omega COM} - v_{\Omega}) \quad (15)$$

となり，積分項が無くなります．ただし， $R_1 = R_2$ です．PI 制御回路は P 制御回路になります．図 19 が P 制御回路による DC モータの回転数制御回路です．

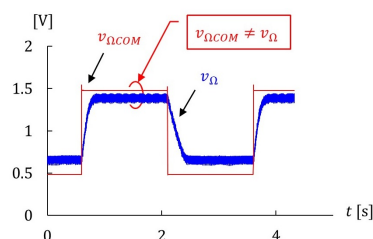


図 20: P 制御による回転数制御結果例

図 20 が P 制御による回転数制御結果の例です．PI 制御と異なり， $v_{\Omega COM} \neq v_{\Omega}$ です．理由は (15) 式により説明できます．この式において $v_{\Omega COM} = v_{\Omega}$ のとき $v_{COM} = 0$ です． $v_{COM} = 0$ のとき，ダイオード両端電圧 v_D の平均値 $\bar{v}_D \approx E/2$ となり，この電圧ではほとんど全ての $v_{\Omega COM}$ に対して $v_{\Omega COM} = v_{\Omega}$ を維持できません．詳しくは拙著 [6] [7] [8] を参照してください．

関連図書

- [1] 古橋武「トラ技 Jr. 特集記事 基本回路 10 選！ブレッドボード実験室」 2020 年冬号（通巻 48 号）
- [2] 古橋武「電気回路論 座学・実験一体型教科書シリーズ」 Kindle 本, Amazon.
- [3] 古橋武「電子回路の基礎Ⅰ 同調回路，高周波増幅回路 改訂 2 版」 Kindle 本, Amazon.
- [4] ラジオノート
- [5] 古橋武「デジタル回路：理論と設計・製作」 Kindle 本, Amazon.
- [6] 古橋武「モータドライブノート II」 Kindle 本, Amazon.
- [7] 古橋武「パワーエレクトロニクスノート II：製作演習付き講義の実践記録」 Kindle 本, Amazon.
- [8] モータドライブノート

著者

古橋 武
名古屋大学名誉教授
furuhashi.takeshi*

*に @gmail.com を付けてください.