

トランジスタの動作について

栗木江一

はじめに

本原稿執筆のきっかけ

一般社団法人日本自動車整備振興会連合会が実施する登録試験には、図1に示すようなトランジスタを用いた回路の計算問題がある。このような図に関しては、二級ガソリン・二級ジーゼルエンジン編のテキストに解説があり、可変抵抗からトランジスタのベースへ電流を流すことによ

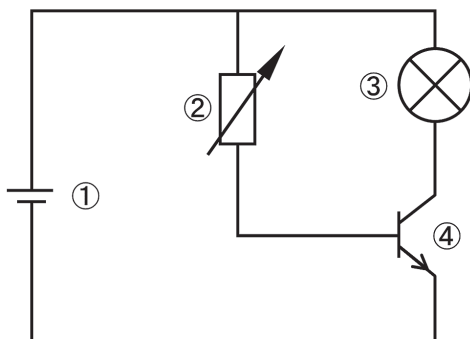


図1 トランジスタを用いた回路図

り、コレクタ電流が流れランプが点灯するとある。また、トランジスタのベース電流 (I_B) とコレクタ電流 (I_C) の比率、電流増幅率 (h_{FE}) は10~300程度であるとの説明がされている。

このようなトランジスタの作動について、以前から興味があり、ベース電流 (I_B) の大きさに応じて、コレクタ電流 (I_C) が変化する現象と、電流増幅率 (h_{FE}) がどの程度であるか確認するため当実験を行うことにした。

実験の概要

実験に使用した器具と部品は以下のとおりである。

① 電源

ランプ用とベース電流用として2台の安定化電源を使用した

② 可変抵抗

ベース電流の大きさを調整するため、5 k Ω のものと250 k Ω を使用した。

③ ランプ

ハロゲン・ランプ12V/35W を使用した。

④ トランジスタ

NPN 型バイポーラトランジスタ 2SC5200N を使用した。データシートは表1に示す。



図2 実験に使用した器具と部品

表1 2SC5200N データシート (抜粋)

絶対最大定格 (注) (特に指定のない限り, $T_c = 25^\circ\text{C}$)

項目	記号	定格	単位	
コレクタ・ベース間電圧	V_{CBO}	230	V	
エミッタ・コレクタ間電圧	V_{ECO}	230		
エミッタ・ベース間電圧	V_{EBO}	5		
コレクタ電流 (DC)	I_C	15	A	
ベース電流	I_B	1.5		
コレクタ損失	P_C	150	W	
接合温度	T_j	150	$^\circ\text{C}$	
保存温度	T_{stg}	-55~150		
特性	測定条件	最小	最大	
直流電流増幅率	$V_{CE} = 5\text{V}, I_C = 1\text{A}$	h_{FE}	80	160
	$V_{CE} = 5\text{V}, I_C = 7\text{A}$	h_{FE}	35	—

実験の概要図は図3に示す。可変抵抗に3Vの電源を使用したのは、ランプの定格電圧12V、消費電力35Wで使用する場合、約2.9Aの電流が流れる計算になり、トランジスタの電流増幅率(以下 h_{FE}) を最低値の10と仮定した場合に、約

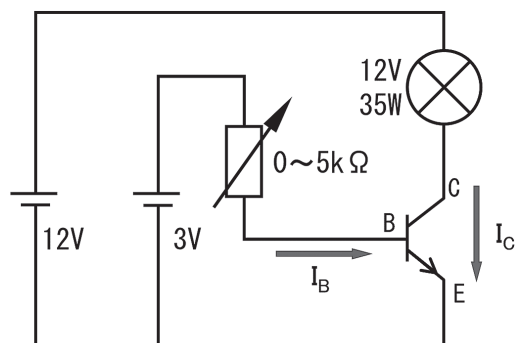


図3 実験の概要図

約290mAの比較的大きな電流が必要があること、可変抵抗の抵抗値が0Ωに近くの際に、容量を超えた電流でトランジスタを焼損させる可能性(実際焼損させてしまった)があるためである。以上のことから安定化電源で可変抵抗への電圧3Vにし最大電流値を制限して実験を行うことにした。

当初はベース電流(以下 I_B) とコレクタ

電流（以下 I_C ）のみの計測を行う予定であったが、計測中トランジスタ発熱が大きいことを確認したため、エミッタ・ベース間電圧（以下 V_{EBO} ）、エミッタ・コレクタ間電圧（以下 V_{ECO} ）を計測項目に加え、トランジスタ C-E 間におけるコレクタ損失（以下 P_C ）を調べた。

電流の計測は、サンワ製デジタルマルチメータ PC5000を、電圧の計測は、HIOKI 製デジタルマルチメータ 3256-50を使用した。

当初は、可変抵抗を使用し I_B を変化させ、データの取得を試みたが、微小な I_B の調整が困難であったため、 I_C の 0.1A 毎の変化に対して、 I_B の電流値を取得することにした。

計測結果について

表 2 に計測と計算の結果を示す。

表 2 計測結果

I_B (mA)	I_C (A)	V_{EBO} (V)	V_{ECO} (V)	h_{FE}	$P ※ 1$ (W)	$P_C ※ 2$ (W)	$※ 3$ (%)
8.7	1.6	0.440	7.81	183.91	19.2	12.50	65.08%
9.4	1.7	0.455	7.30	180.85	20.4	12.41	60.83%
10.0	1.8	0.466	6.78	180.00	21.6	12.20	56.50%
10.7	1.9	0.478	6.23	177.57	22.8	11.84	51.92%
11.4	2.0	0.501	5.50	175.44	24.0	11.00	45.83%
12.2	2.1	0.518	5.03	172.13	25.2	10.56	41.92%
13.2	2.2	0.543	4.44	166.67	26.4	9.77	37.00%
14.1	2.3	0.569	3.77	163.12	27.6	8.67	31.42%
15.5	2.4	0.599	3.18	154.84	28.8	7.63	26.50%
17.8	2.5	0.629	2.44	140.45	30.0	6.10	20.33%
21.3	2.6	0.688	1.74	122.07	31.2	4.52	14.50%

※ 1 ランプとトランジスタの C-E 間における消費電力（電源電圧 12V に I_C を乗じた値）

※ 2 コレクタ損失（ V_{CBO} に I_C を乗じた値） コレクタ・エミッタ間の電力損失

※ 3 損失した電力の割合（P に対する P_C の % 値）

図4に、 I_B に対して h_{FE} とコレクタ損失 (%) の変化をグラフで示す。

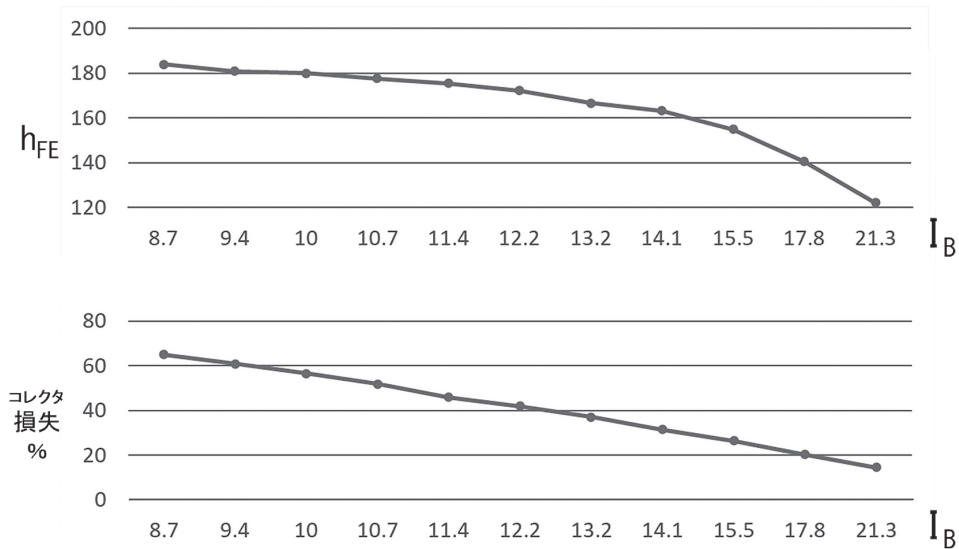


図4 グラフ： I_B に対する h_{FE} とコレクタ損失の変化

計測結果より以下のことを確認した。

1. h_{FE} は、最大で約183, 最小で約122の間で変化した。
2. h_{FE} は、一定の値とはならず、 I_B が大きくなるほど減少した。
3. コレクタ損失は、 I_B が小さいほど大きく、それに伴いトランジスタの発熱量が多くなった。

ダーリントン接続について

ダーリントン接続のイメージを図5に示す。

h_{FE} は、小さいトランジスタでは10程度, 一般的なものでは100~500程度, 大きいものでは1000とされており, それ以上の h_{FE} を求める場合, ダーリントン接続が方法の一つとして挙げられる。

同接続では二個のトランジスタを接続することにより, 一つのトランジスタとして機能させることができる。その場合, 等価的な h_{FE} はそれぞれのトランジスタの h_{FE} の積となり, 非常に大きな h_{FE} 値が得られる。

図5に示すように, Tr1のエミッタとTr2のベースを接続し, 次にTr1とTr2のコレクタ同士を接続する。Tr1とTr2のコレクタ同士の接続部をダーリントン接続のコレクタとし, 接続されていないTr1のベース部をベース, Tr2のエミッタをエミッタとすることで一つのトランジスタとして使用する。

ダーリントン接続の実験概要図を図の6に示す。

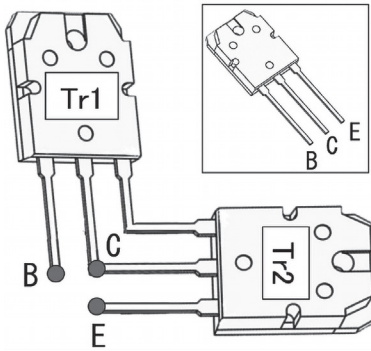


図5 ダーリントン接続

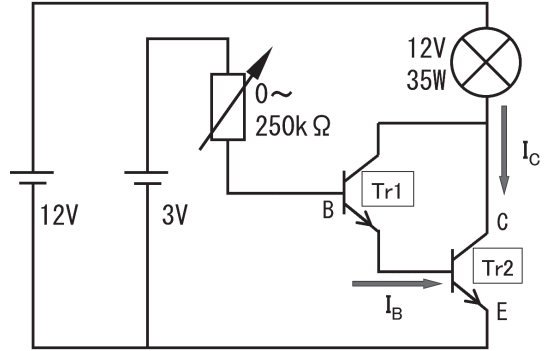


図6 実験の概要図

ダーリントン接続の計測結果について

表3に計測と計算の結果を示す。

表3 計測結果

I_B (mA)	I_C (A)	V_{EBO} (V)	V_{ECO} (V)	h_{FE}	P (W)	P_C (W)	損失 (%)
66	1.6	0.94	0.48	24242	19.2	0.768	4.00%
71	1.7	0.95	0.48	23943	20.4	0.816	4.00%
75	1.8	0.96	0.49	24000	21.6	0.882	4.08%
78	1.9	0.96	0.49	24358	22.8	0.931	4.08%
83	2.0	0.98	0.50	24096	24.0	1.000	4.17%
90	2.1	1.05	0.53	23333	25.2	1.113	4.42%
96	2.2	1.05	0.54	22916	26.4	1.188	4.50%
103	2.3	1.07	0.56	22330	27.6	1.288	4.67%
118	2.4	1.08	0.59	20338	28.8	1.416	4.92%
148	2.5	1.12	0.62	16891	30	1.550	5.17%
191	2.6	1.18	0.67	13612	31.2	1.742	5.58%

図7に、 I_B に対して h_{FE} とコレクタ損失 (%) の変化をグラフで示す。

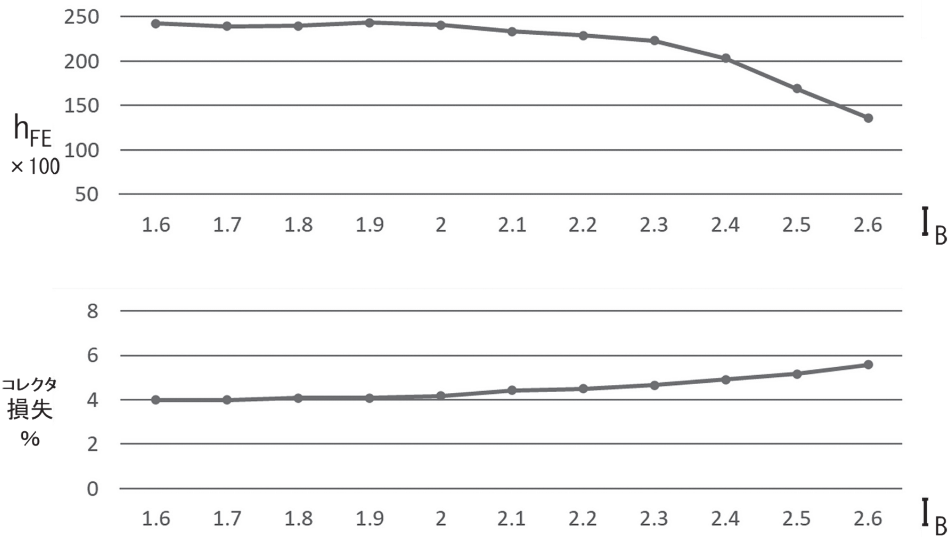


図7 グラフ： I_B に対する h_{FE} とコレクタ損失の変化

計測結果より以下のことを確認した。

1. h_{FE} は、最小で約13000、最大で約24000の間で変化した。
2. h_{FE} は、一定の値とはならず、 I_B が大きくなるほど減少した。
3. コレクタ損失は、 I_B が大きくなるほど増加した。
4. トランジスタ1個の時と比較して、全体的にコレクタ損失が小さく、トランジスタの発熱が小さかった。

おわりに

NPN型バイポーラトランジスタ1個を使用し、ベース電流によるコレクタ電流を制御できることを確認する過程で、ベース電流が小さいほどトランジスタが発熱する現象が確認できた。当初はそのような現象が起こることは知らず、発熱のためトランジスタを故障させてしまった。また、ベース電流を大きくしていけば、コレクタ・エミッタ間の電力損失は減少するが、それでも10%を超える大きな損失があるため、ベース電流でコレクタ電流の大きさを制御するのは実用的ではないといえる。デューティ制御を用いるのは必然である。

ダーリントン接続については、1個の時と比較するとコレクタ・エミッタ間の電力損失が大幅に少なく、また、電流増幅率も1万倍を超えていることが確認できた。

常識的な事象を確認したに過ぎないが、二級ガソリン・二級ジーゼルエンジン編のテキストに記述されていない部分为本実験で確認できたことは、筆者にとって有意義であり授業において本学学生に還元できるものであった。

今後は、電圧による制御を行うMOSFET（金属酸化膜半導体電界効果トランジスタ）使用し、

栗木江一：トランジスタの動作について

本件と同様の実験を行い比較したいと考えている。

参考 URL

- (1) 日経クロステック ものづくり用語 ダーリントン接続
<https://xtech.nikkei.com/dm/article/WORD/20060620/118334/>
- (2) アナデジ太郎の回路設計
<https://ana-dig.com/darlington/>

