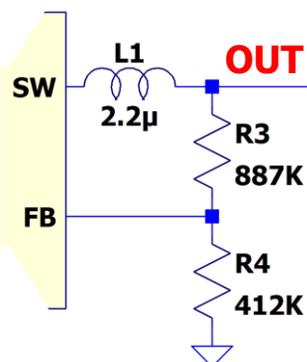


## 定電圧電源の電圧設定抵抗を 精度よくE24系列で決めるには・・・



定電圧電源回路では、基準電圧と、帰還電圧（FB端子電圧）を等しくなるように制御する。この例（左図）では内部基準電圧が0.8VのICを利用しているので、OUTの電圧は、 $0.8 \times (887 + 412) / 412 = 2.522[V]$ になる。

この例に示す抵抗値はE96系列（1%誤差）の値を使っているが、日本国内ではE96系列よりもE24系列の値で1%誤差の部品が入手しやすいので、この電圧設定の抵抗値の組み合わせを、E24系列の中から選びつつ、出力電圧の誤差をできるだけ小さくしたい。

ここでは、完全に自動的に決定する方法ではないが、設計者の判断の助けを借りながら、これらの抵抗値を決定する方法のアイデアを紹介する。

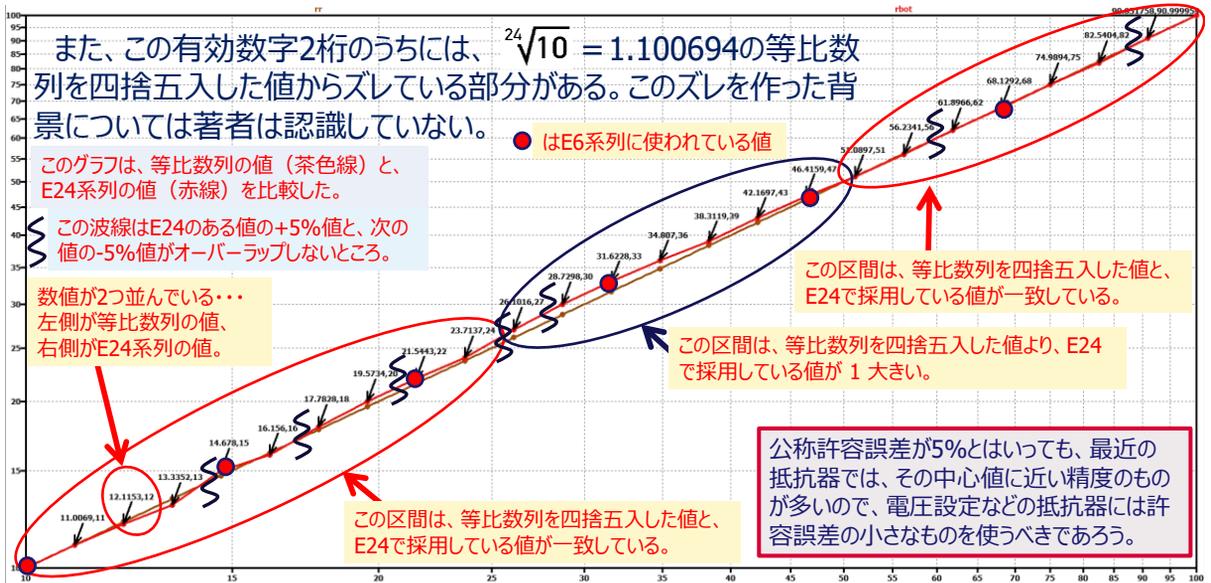
## E24系列の意味（1）

そもそも、E24系列の有効数字2桁の数値列はどのようなものか？

抵抗値の1桁の区間（たとえば10から100までの間）を誤差5%で埋め尽くすには・・・、等比数列で1.1倍ずつの値を中央値になるように作ればよい。しかし出発点を10とすると、次の値は11、その次は12.1、13.31・・・と続いていく。5%の許容誤差といいながら、有効数字の桁数が増えていくのは不都合なので、有効数字2桁に丸めることになる。また、10から始めて1.1倍の等比数列を順に進めていくと、24回目には約98.5、25回目には約108.3になる。

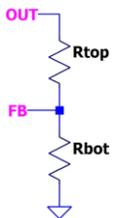
10から100までの1桁の区間を等比で分割するには、24か25分割がよさそうである。算術的に細かく計算するなら・・・ $1 / (\log(1.1)) = 24.1588579$ 分割・・・ということになるが、分割数は整数でなければならず、そうすると24分割では1桁を隙間なく埋められないところが生ずることになる。しかし、歴史的な背景を考えると、E12系列（許容誤差10%）やE6系列（許容誤差20%）に相当するものが存在していたため、許容誤差5%に対して、「6・12・・・」の延長線上に「24分割」を採用したものと解釈できる。

# E24系列の意味 (2)



## グラフを使い 設計者の判断力を借りて 電圧設定抵抗の最適値を求める (例題)

### E24系列を計算し 出力電圧の分圧抵抗を計算する シミュレーション回路



左図のように、OUTの電圧をRtopとRbotで分圧し、FBの電圧を所定の値になるように決めるとき、これらの2つの抵抗値をE24系列になるように計算する回路を考える。

初めに与えるパラメータは、出力電圧と、内部の基準電圧（FBに等しい）で、Rbotの値がE24系列の値に一致するように設定する。このE24系列の計算は、1桁（decade：10から100までの区間）を24分割で「.STEP」シミュレーションをし、四捨五入とずれの部分の補正を行うことで実現する。

計算結果は「.meas」を使って、Logファイルに残し、その値を目視で検討し、最適値を判断する。

出力電圧の計算値の誤差を求める

まず、E24系列でRbotを決める

Rbotに対してRtopを決める

出力電圧の計算値の誤差を求める

```

.tran 1m
.step dec param RR 10 100 24

.param FB 0.8
.param Vout=2.5
.param RK=1

.meas Rbot find V(RX) at 0.5m
.meas Rtop find V(RT) at 0.5m
.meas error find V(ERROR) at 0.5m
    
```

.STEPで10から100までの区間を24ポイント（等分割）でパラメータ(RR)掃引する

初期値の設定。この例題では・・・FB=0.8V、Vout=2.5V

抵抗値の位取りの係数（10のべき乗で設定）・・・10や100など。計算結果に位取りをつければよいので通常は1でよい

E24系列の値になるように補正を組み入れた式

これら3行の「.meas」で、Logファイルに、分圧抵抗の値と、設定電圧からの誤差を、計算結果として書き込む。

$$V = \text{int}(\text{RR} + (\text{if}(\text{RR} < 25, 0.6, \text{if}(\text{RR} < 46, 1.6, \text{if}(\text{RR} < 56, 0.6, 0.4)))) * \text{RK}$$

$$V = \text{int}(\text{Vout} / \text{FB} * \text{V}(\text{RX}) / \text{RK} - \text{V}(\text{RX}) / \text{RK} + 0.5) * \text{RK}$$

$$V = \text{Vout} - \text{FB} * (\text{V}(\text{RX}) + \text{V}(\text{RT})) / \text{V}(\text{RX})$$

## グラフを使い 設計者の判断力を借りて 電圧設定抵抗の最適値を求める (結果の判断)

シミュレーションが終わったら、ホット・キー [ctrl]+L でerror Log ファイルを開くと、.meas による一連の測定結果が表示される。そのファイルの中から、Rbot (E24系列) ・・左、Rtop ・・中央、目標値との誤差 ・・右、を、それぞれ示す。

この中から、まず、Rtopが3桁以上のところは除外する (E24系列は有効数字が2桁だから)。

目視で、Rtopの中からE24系列の数値のところを探す ( — 下線部分)。

最後に、該当するステップの中で、一番誤差 (右の表) が一番小さな組み合わせを選ぶ。抵抗値には10の倍数の適当な位取りを施す。

この例では、Rbot=240kΩ、Rtop=510kΩの組み合わせにすると、目標の2.5Vに誤差なく設定できることがわかる。また、220kと470kや、430kと910kの組み合わせでも、出力電圧誤差は1mV以下であることがわかる。

Measurement: rbot			Measurement: rtop			Measurement: error		
step	v(rx)	Rbot	step	v(rt)	Rtop	step	v(error)	誤差
1	10		1	21	0.0005	1	0.02	0.0005
2	11		2	23	0.0005	2	0.0272727	0.0005
3	12	0.0005	3	26	0.0005	3	-0.0333333	0.0005
4	13	0.0005	4	28	0.0005	4	-0.0230769	0.0005
5	15	0.0005	5	32	0.0005	5	-0.00666667	0.0005
6	16	0.0005	6	34	0.0005	6	0	0.0005
7	18	0.0005	7	38	0.0005	7	0.0111111	0.0005
8	20	0.0005	8	43	0.0005	8	-0.02	0.0005
9	22	0.0005	9	47	0.0005	9	-0.00909091	0.0005
10	24	0.0005	10	51	0.0005	10	0	0.0005
11	27	0.0005	11	57	0.0005	11	0.0111111	0.0005
12	30	0.0005	12	64	0.0005	12	-0.00666667	0.0005
13	33	0.0005	13	70	0.0005	13	0.0030303	0.0005
14	36	0.0005	14	77	0.0005	14	-0.0111111	0.0005
15	39	0.0005	15	83	0.0005	15	-0.0025641	0.0005
16	43	0.0005	16	91	0.0005	16	0.00697674	0.0005
17	47	0.0005	17	100	0.0005	17	-0.00212766	0.0005
18	51	0.0005	18	108	0.0005	18	0.00588235	0.0005
19	56	0.0005	19	119	0.0005	19	0	0.0005
20	62	0.0005	20	132	0.0005	20	-0.00322581	0.0005
21	68	0.0005	21		0.0005	21	-0.00588235	0.0005
22	75	0.0005	22		0.0005	22	0.004	0.0005
23	82	0.0005	23		0.0005	23	0.00243902	0.0005
24	91	0.0005	24	193	0.0005	24	0.0032967	0.0005
25	100	0.0005	25	213	0.0005	25	-0.004	0.0005

## 出力電圧誤差の考察 (A-1)

ここまでで、出力電圧の設定のための分圧抵抗器の組み合わせを決定できた。

さらに、出力電圧の設定 (目標) 値に対する誤差は、どのような要素で決まるかを検討する。最も根本にある誤差要因は、当然だが、ICの内部基準電圧のバラツキによる誤差である。分圧抵抗器の公称許容誤差精度を上げて、出力電圧誤差の要因として避けられないが、許容誤差とそれぞれの分圧抵抗値の組み合わせが、出力電圧誤差にどのように影響するか、以下に計算を試みる。

出力電圧の目標値を  $V_0$ 、許容誤差の大きさを  $\varepsilon$ 、出力電圧設定抵抗のGND側の値を  $B$ 、出力側を  $T$  とし、誤差のある出力電圧を  $V_e$  と置き、内部の基準電圧を  $V_{FB}$  とすれば、

$$V_0 = V_{FB} \times \frac{B+T}{B} \quad \text{および} \quad V_e = V_{FB} \times \frac{B(1+\varepsilon) + T(1-\varepsilon)}{B(1+\varepsilon)}$$

と書くことができるので・・・

(ここでは一方がプラスに偏差があれば、他方がマイナスに偏差があるときに、誤差が最大化する・・・と考えている)

## 出力電圧誤差の考察 (A-2)

また、誤差(error)は以下のように定義されるから、

$$\text{error} = \frac{V_e}{V_o} - 1$$

$V_o$ と $V_e$ を代入すると、

$$\begin{aligned}\text{error} &= \frac{\frac{B(1+\varepsilon)+T(1-\varepsilon)}{B(1+\varepsilon)}}{\frac{B+T}{B}} - 1 \\ &= \frac{1}{(1+\varepsilon)} \frac{(B(1+\varepsilon)+T(1-\varepsilon))}{B+T} - 1 \\ &= \frac{B+T \frac{1-\varepsilon}{1+\varepsilon}}{B+T} - 1 \\ &= \frac{1}{B+T} (B+T(1-\varepsilon)(1+\varepsilon)^{-1}) - 1\end{aligned}$$

ここで  $\varepsilon \ll 1$  とすれば  
 $(1+\varepsilon)^{-1} \approx 1-\varepsilon$  と書けるので

$$\begin{aligned}&= \frac{1}{B+T} (B+T(1-\varepsilon)^2) - 1 \\ &= \frac{1}{B+T} (B+T(1-2\varepsilon+\varepsilon^2)) - 1 \\ &\quad \varepsilon^2 \ll 1 \text{ とすれば} \\ &= \frac{1}{B+T} (B+T(1-2\varepsilon)) - 1 \\ &= \frac{B+T}{B+T} - \frac{T}{B+T} \times 2\varepsilon - 1 \\ &= -2\varepsilon \times \frac{T}{B+T} = -2\varepsilon \frac{\frac{T}{B}}{1+\frac{T}{B}}\end{aligned}$$

となる。

1%の許容誤差の抵抗器を2つ使うので、出力電圧の最大誤差は単純に2%にはならない点に注意。

## 出力電圧誤差の考察 (A-3)

ここで、

$$\text{error} = -2\varepsilon \frac{\frac{T}{B}}{1+\frac{T}{B}}$$

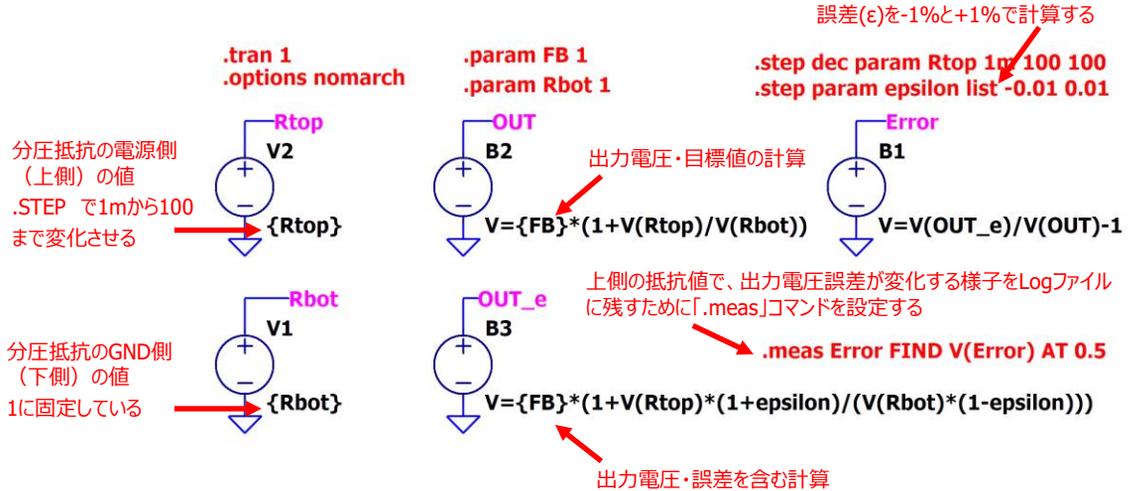
の意味を考えてみる。マイナス符号は、抵抗器の誤差が  $B$  の方がプラス偏差で  $T$  の方がマイナス偏差だった・・・すなわち出力電圧は目標値よりも低くなっていることを示している。また、 $B$  がマイナス偏差で  $T$  がプラス偏差だった場合には、この符号はプラスになる。

$T$  が 0 に近づくと・・・つまり、出力電圧が  $V_{FB}$  に近い設定になると、抵抗値の許容誤差よりも出力電圧誤差は小さくなり、 $V_o = V_{FB}$  では抵抗値の誤差には無関係になる。 $B=T$  のところで許容誤差と同じ誤差（1%誤差の抵抗器を2本使って分圧しても最大の偏差は1%になる）となり、出力電圧が  $V_{FB}$  よりもはるかに大きくなると、出力電圧誤差（の絶対値）は、1本の許容誤差の2倍（2本分）になる。

これを、シミュレーションで確かめてみる（ただし、近似計算ではない）。

# 出力電圧誤差の考察 (A-4)

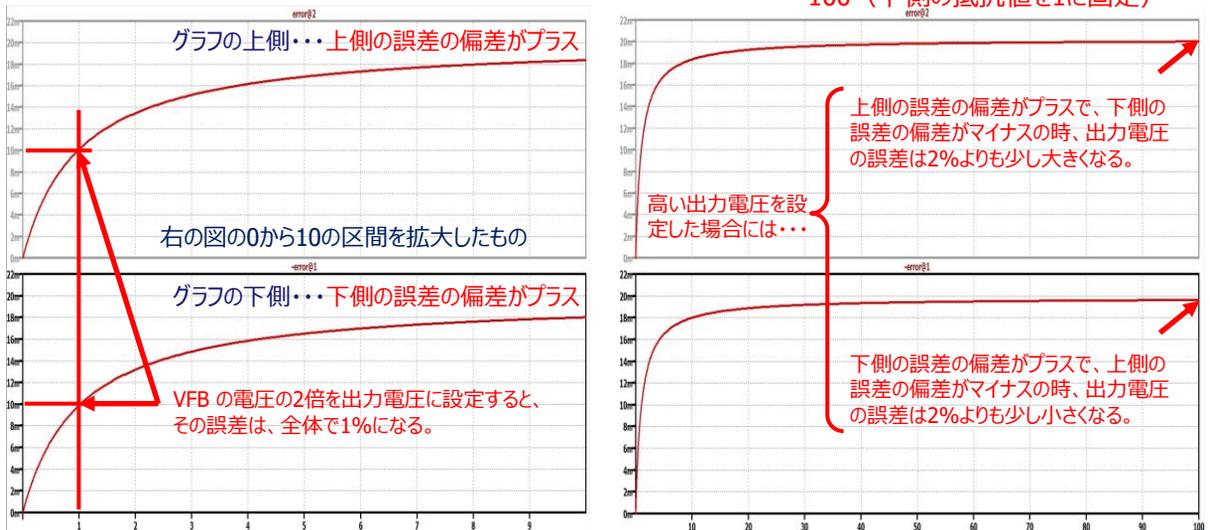
シミュレーションに使う回路図を示す。



# 出力電圧誤差の考察 (A-5)

ε = 0.01で計算した、シミュレーション結果を示す。

右図：上側の抵抗値(Rtop)が0から100 (下側の抵抗値を1に固定)



## 出力電圧誤差の考察 (B-1)

ここまでの議論だけでは、電圧設定の分圧抵抗器の組み合わせが・・・

22Ω と 43Ω、  
220kΩ と 430kΩ  
2.2MΩ と 4.3MΩ

・・・と（どの組み合わせでも出力電圧の設定は正しく行われそうだが）、その位取りについて、議論をしていなかった。

これらの抵抗器には、電源電圧をこれらの「抵抗値の和」で割った大きさの電流が流れる。あまり抵抗値を小さくしすぎると、負荷に与える電力以上に、これらの消費電力が大きくなってしまい、大きすぎると、FBピンに流れるリーク電流によって、設定電圧の誤差を生ずる。もし、FBピンに流れるリーク電流が0.1μAとすると、1%の設定精度で分圧抵抗を決めるなら、少なくとも抵抗を流れる電流はこの100倍以上・・・データシート上の最悪値で考えると、10μAは流しておかなければならない。もし、出力設定電圧が2.5Vだとすると、抵抗値の合計が250kΩより大きくなってはいけなくなる。初めの例題でいうと43kΩと91kΩが要求される。このときの分圧抵抗の消費電力は46.6μWと十分に許容できる電力消費であると判断できる。

感覚的な判断で、むやみに大きな抵抗値を使ってこの部分の消費電力を低減させようとしなくても、通常によくある抵抗値の範囲で選択肢があることを、計算やシミュレーションで確かめてほしい。

## 出力電圧誤差の考察 (B-2)

LTC3561を使って、2.5Vを出力する例題をシミュレーションしてみる。

このスイッチング電源のFB電圧は0.8V(tpy)である。

