

実験用可変電圧電源 単電圧 & 正負トラッキング

勉強嫌いな人間が知識を得るには
ひたすら経験しかない。
前の製作のおかげで、少しは自信を持って
可変三端子を触れるようになった。
今度は本命のトラッキングレギュレータ。
それも、誤差増幅など使わずに実現。
世の常識が最善とは限らない？



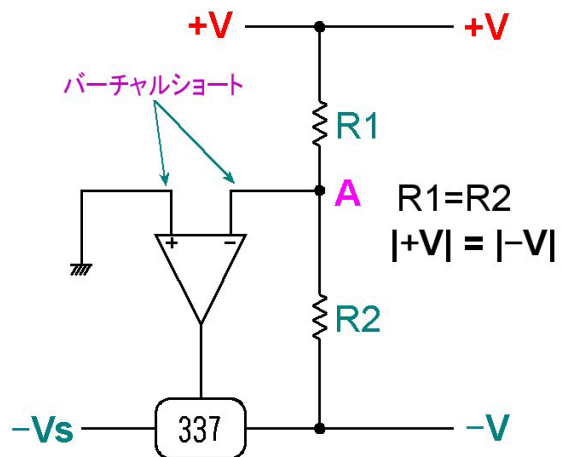
■ ホントに最良？ ■

世界の三大珍味のうちフォアグラとキャビア、たいして旨くない。っていうか、「どうしてこれが絶品なの？」と大疑問。吉野家の並盛りのほうが百倍も美味しく感じるのは貧乏人の所以か。残ったトリュフは死ぬまで食べないだろう。もちろん、どーもくんは全然かわいくなって、今でも見る度に気持ち悪い。

世渡りのために他人と調子を合わせるのは仕方ない。でも、自分で自由に決断できる部分では、自分とだけ調子を合わせれば済む（それさえ放棄している人民のなんと多いことよ）。

で、まずもって、トラッキング電源では定番の誤差増幅への懸念を表明しよう。ダメと言っているのではなく、どことなく脆弱っぽく、リスク要因が多すぎる気がするのだ。

誤差増幅とはオペアンプの魔術のひとつで、下ののような仕組み。R1 と R2、同じ値の抵抗でプラスラインとマイナスラインをつなぐ。中点の A には「ある電圧」が発生する。それがオペアンプの反転入力につながり、



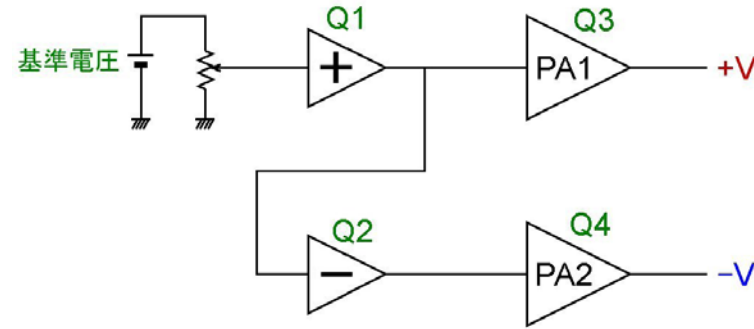
非反転入力はアース (0V) につながっている。オペアンプの反転入力と非反転入力にはバーチャルショート（イマジナリショート）によって「同電位」だから、中点 A の「ある電圧」も 0V になる。というか、A 点が 0V になるようにオペアンプが 337（マイナスの三端子なら何でもいいはず）を制御する。結果として +V と -V は極性だけ違う同じ電圧になる。トラッキング電源の完成だ！

わかる？ 信じなさい。本当にそうなるのだから。と言われて、素直に信じる人がうらやましい。私は「たしかにそうだろうが、どこかが狂うとすべてが破綻」みたいに感じる。つまりリスク管理ゼロみたいな。

何故そう感じるのか考えてみた。要するにオペアンプに過剰な期待をしているのではないか。バーチャルショートの完璧性、帰還回路を完全にドライブする能力、これらを神格化すればこの回路への疑念は消えるがオペアンプを神とは思えない。だから信じられない。

ただし、誤差増幅は回路技術としてワールドワイドに確立されていて、普通の三端子レギュレータの内部回路にも使われている。あるいは疑う方がおかしいのかもしれない。私の杞憂は非常に個人的なもの。笑ってくださっても構わない。フォアグラとキャビアを旨いと感じないのと同じだ。

左図は面白い応用も示唆している。たとえば +V は安定化されていなくても、もっと言えば低周波信号でもいいはず。マイナス側の三端子が十分に速ければ逆相の電力信号を得られる。もしかして BTL にも使える？ やってみる人、いるかな？



■ 別の方式は…… ■

そうそう、話を進める前に、一体どんな電源に仕上げたのかを書いておかなきゃ。扉の写真でもわかるように、可変電圧の単電源と可変電圧のトラッキング正負電源がひとつのケースに入ったものを作った。単電源は最大で 25V1.5A くらいまで出せる。正負電源は前回と同じ ± 0.3A で、できれば最大 ± 22V にしたかったけれど、トランスと IC の定格から ± 18V 強になった。それでもオペアンプ回路の実験ならまず充分。

みなさんが何故か気にするトラッキング精度。良いに越したことはないが、あまり重要だとは思っていない。1%もあれば上々だ。2%だって悪くない。78/79 を無選別で使えば 5%狂っても不思議はない。5%より良ければ私はハッピー。特に精度を求める場合は前回の電源で合わせ込めば済むし、一時的にバラックで作る手もある。

さらに実情を書けば、前回の電源の元になった「気に入らない」電源、平易に言えば失敗した電源のケースを、パネルデザインもそのまま流用したため基板面積が限定され、回路規模にも限界があったのだが、まあそれは私の事情。なんの言い訳にもならない。

元に戻って、誤差増幅回路を使わずに、なるべく斬新なトラッキング電源を作るには……最初に思い付いたのは上図の構成。三端子レギュレータさえ追い出し、代わりにパワーアンプを使う。PA1 と PA2 はパワーオペアンの LM675 でもいいし普通のオペアンプ+ブースタでもいい。これらを電流増幅段というか直流出力段として使う。元になる電圧はツェナダイオードなどの基準電源で得る。Q1 と Q2 には、なるべく電源電圧レンジの広いオペアンプ、5532 が適している。Q1 の「+」というのは非反転増幅のこと。基準電圧から VR で分圧した電圧を Q3 の PA1 に供給し、同時に Q2 にも加える。Q2 は反転増幅でゲインは 1 倍。この出力で PA2 を動かす。

PA1 と PA2 のゲインが同じなら立派なトラッキング電源になるはず。LM675 をノーマルで使う場合、ゲインが 10 (+20dB) 以上でなければ発振するけれど、

それなら基準電圧を 1/10 にすれば済む。また、ナショセミのアプリケーションには反転／非反転ともヴォルテージフォロワの回路例もあるので、それを使ってもいい。

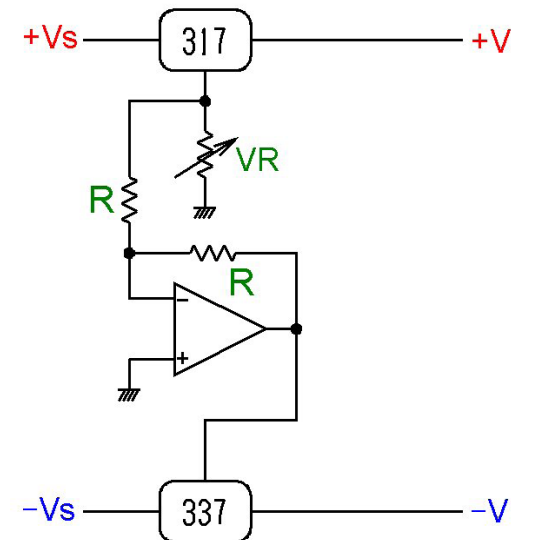
よし、これで行こう、と決心し LM675 のアプリケーションノートで特性図類をもう一度見直したところ、大きな制約に気付いた。まず出力電圧が ± 20V くらいまでしか振れないこと。また、最大出力電圧時にはでかい放熱器を付けても 2A くらいしか電流が取れない。安全を見れば 1A だ。あんまりメリットないなあ。

LM675 が 1 個 100 円なら試していただろうが、いずれ超ヒマなときに実験するとして、今回この構成はボツにした。（ボツ例まで書くのだ。小人閑居だから）

675 に比べて三端子は安い。1 個燃したところで夕飯のおかずは減らない。で、やっぱり三端子を使うことにした。

前回、オレンジ色で囲ったコラムで書いたとおり、三端子は基準になるピン (COM か Adj) をゼロ電位として動くという大前提に立ち返る。正電源 317/ 負電源 337 でトラッキングするには、317 の Adj の電圧を極性反転して 337 の Adj に加えればいい。誤差増幅を利用した回路でも結果としてそうになっているはず。じゃ、誤差増幅なんてしないで、ストレートにオペアンプの反転バッファを入れたらどうだろう。で、出てきたのが下の構成。

出力電圧は 317 で決める (337 で決めても同じ)。Adj ピンの電圧を反転回路で極性をひっくり返して 337 に加える。とても簡単だ。精度を決める要素は 2 本の R の誤差とオペアンプのオフセット、それから 317/337 のリファレンス電圧の差だけ。できれば事前に 317/337 を選別しておけば、オペアンプ周辺はどうにでも対応できる。R の値を VR より 1 桁以上大きくすると 317 から R に流れる電流は無視できるはず。VR=5k、R=100k といったところか。これでいいじゃん。



■ さらに単純化 ■

どうせデュアルオペアンプを使うなら片ユニットを余らせるのはもったいない。両方使えば上のような構成にもできて回路は一層わかりやすくなる。基準電圧はツェナ+オペアンプで作り、三端子にはレギュレータとしての働きしかさせない。見た目も明瞭だ。

Qa は非反転アンプ。ボツのパワーアンプ版と同じで、ツェナで発生させた電圧を必要なだけ増幅して 317 の制御電圧にする。Qb は正確に 1 倍の反転アンプ。これで 337 を制御する。シンプルでしょ？

この回路の最大出力電圧はツェナの電圧を Q_a で何倍にするかで決まる。ただ電源電圧定格が大きい 5532 でも最大出力は $\pm 21V$ くらいだから、それに 317/337 のリファレンス電圧 $=1.25V$ を加えた値が回路の最大出力電圧になる。317/337 に抵抗でゲタを履かせればもっと上げられるけれど、最小電圧も上がってしまう。

前述したように、5532を選んだのは最大電圧が±22Vだから。普通のオペアンプは±18Vが限界。この電源のような20V近い電圧は扱えない。近年、電源電圧は下がり続け、±18Vでも「高電圧」の部類に入るらしい。いいのかねえ。オーディオ的にはDレンジやらヘッドルームやらを考慮すれば電源電圧は高いほどいい。オーディオ用を謳う超高級MUSESシリーズなんか±16Vしかない。生音のベースやキックが入れば、すぐにアタマ打つけどなあ。

電源電圧が高いという意味では NJM2114 も同じで、そのまま置き換えられる。もっと高電圧はというと NJM2147 という電話交換機用の特殊石があり ±28V (最大定格は ±30V) まで動く。入手は難しいが、是非に、という人は探してみる手だ。オーディオ的には使えそうもないけれど電源なら大丈夫だろう。

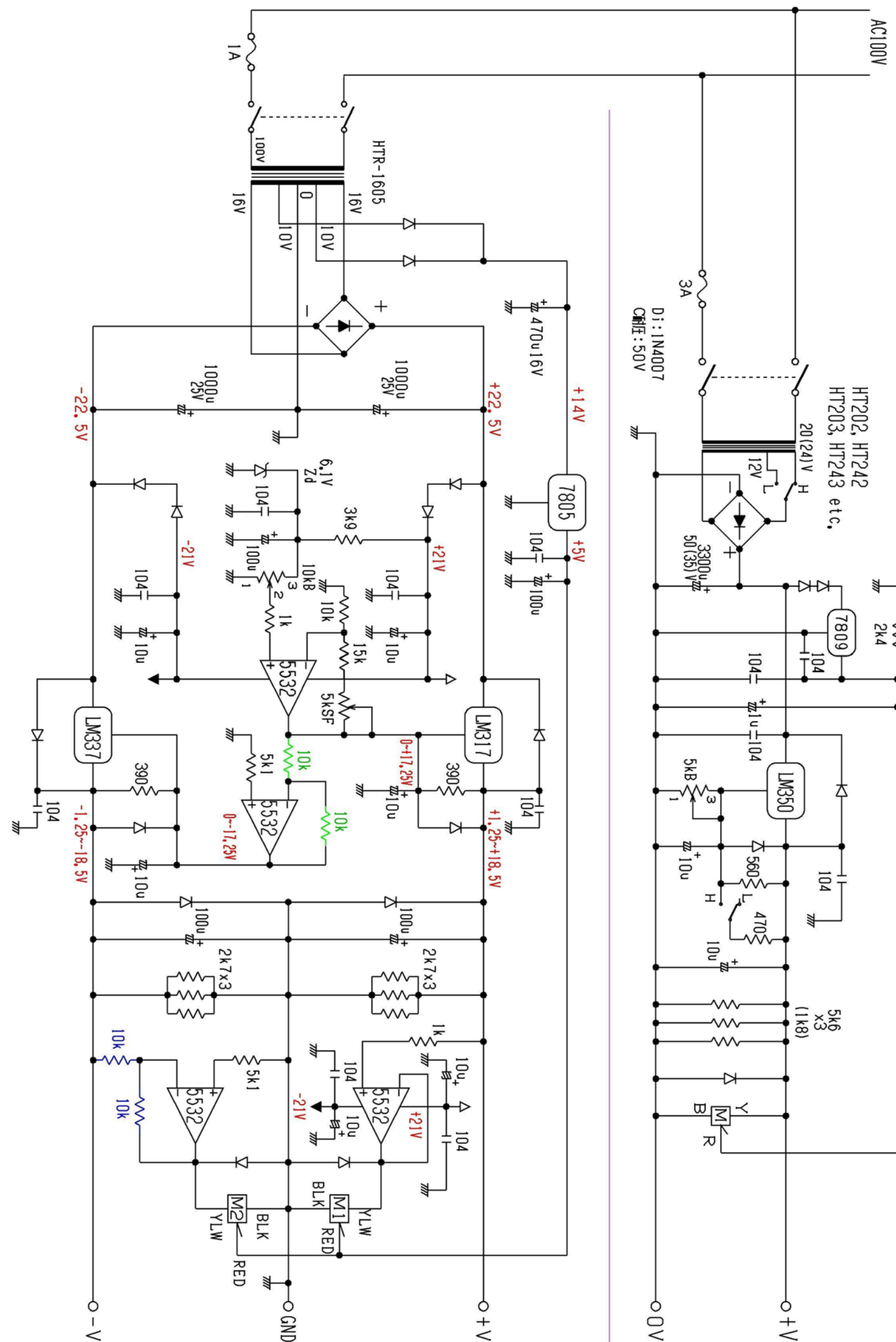
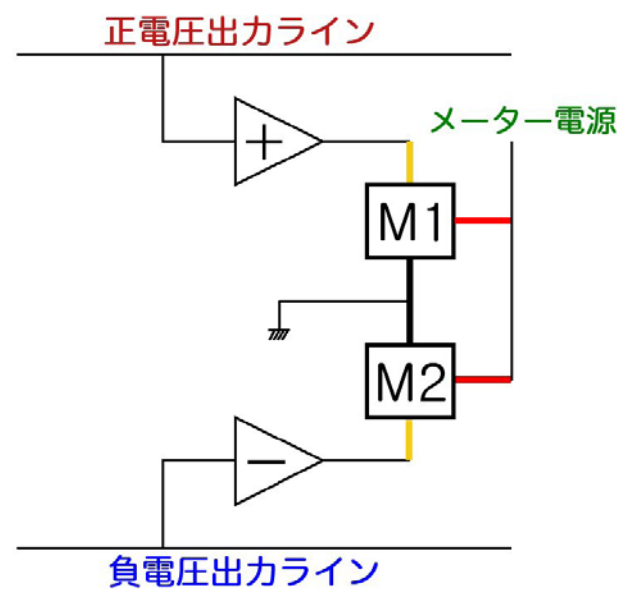
今回のトランスは HTR-1605 だから、整流 / 平滑後に $\pm 22V$ 強しか出ない。少しか落とせば 5532 は死なないで済む。左図、Qa・Qb の正負電源には、平滑出力からそれぞれダイオードを 2 本直列にして約 1.2V 落としたものを加え、ほぼ $\pm 21V$ になった。

一方、平滑出力を $\pm 22V$ とすると、317/337の最大出力は $\pm 19V$ になる。3V落ちるからだ。このときのQa・Qbの出力電圧、つまり317/337のAdjピンは、出力電圧から1.25V引いて $\pm 17.75V$ くらい。電源が $\pm 21V$ の5532ならラクに出せる。めでたしめでたし（こーゆー計算、面倒だな）。でも、あまりギリギリもいやだから、今回の電源の最大出力は $\pm 18.5V$ にする。この最大電圧は基板上に1個ある半固定で簡単にセットできるようにした。

もうひとつの単純化は China 電圧計の扱い方。どうしてこれに気付かなかったのだろう。下図ですべて解決だ。プラス側は正電圧出力からオペアンプのバッファ(なるべく正確に 1 倍)を通して電圧計に加える。マイナス側は反転バッファ(これも 1 倍)で極性をひっくり返して電圧計に加える。これで電圧計がいくら暴れてもノイズはオペアンプを逆流しないから出力ラインに影響しない。電圧計の電源は前回と同様、別の三端子、今回は 7805 を使う。電源端子が反乱を起こしても 7805 を逆流することはない。電圧計を完全鎮圧！

手を抜くなら正電圧側の非反転バッファはなくしてもいい。電圧計を直接出力ラインにつないでも、ほぼ問題ないからだ。電圧計の測定線の入力インピーダンスは 100k くらいある。つまり黄色い線から流れ込む電流は極めて小さい。この電流がいかに変動しようと、まったくもって無力だ。国政選挙における私の一票程度だろう。

ここに使うオペアンプも 5532。出力ラインの電圧（最大± 18.5V）を出力させるからだ。



■ 単電源ユニットの回路 ■

トラッキングについてばかり書いていて単電源側は放置していた。でも能書きがまったく無いわけじゃない。ここでまとめて書こう。このユニットだけ独立して作っても意義あるし。

目指すは 1.25V ~ 25V くらいの可変電圧安定化電源。最大出力電流は 1.5A くらい。「くらい」というのは使うトランスで変わるからだ。しかし最初に断っておけば、電圧・電流を大きくすると、それだけ放熱が厄介になる。あまり欲張らない方がいい。

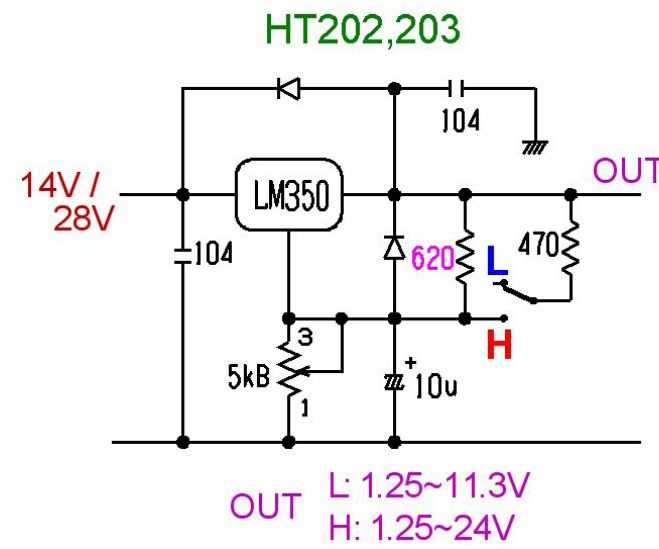
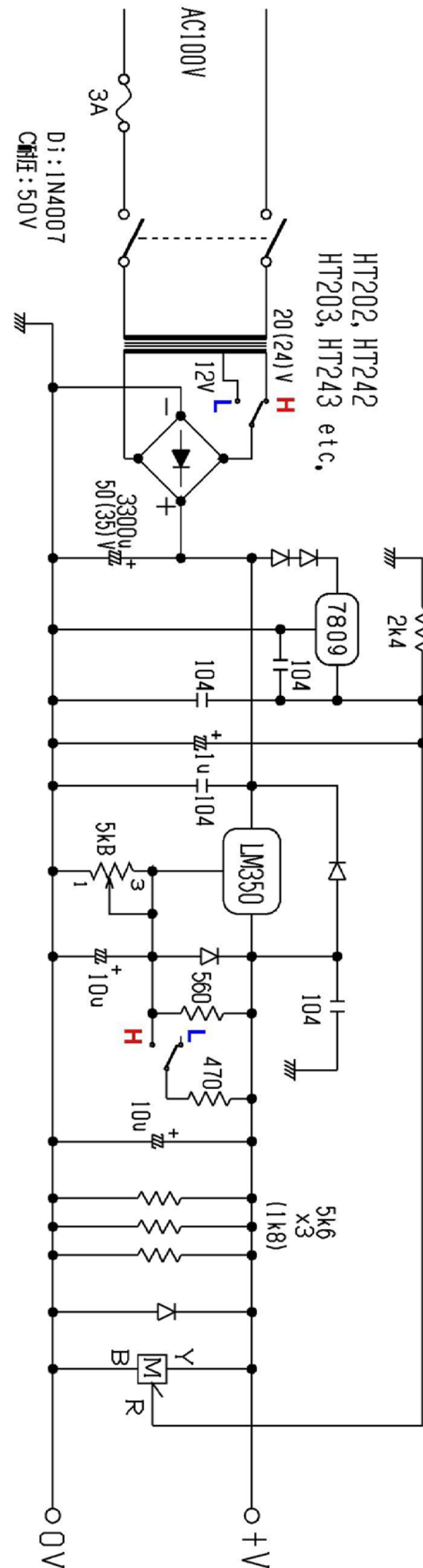
私が使ったのはヤフオク出身の「DC13V 1.5A」なるもの。直流出力を書かれてもなあ。実測したら、要は 10.5-0-10.5 で、トランス容量の表記から電流は 2A ちょっととわかった。今回これを 0-10.5-21 として使う。市販品で近いのは HT202 あたり。少しの変更で置き換えられるだろう。もっと電流が欲しければ HT203 を選べばいい。電圧がほしければ HT242 か 243 に。ただし平滑コンの耐圧は 50V にする。

基本的な回路は前回の電源の正出力側と同じ。電流が大きいので、317ではなくLM350を選んだ。350は理想状態では3Aの出力が可能。1.5Aなら充分動いてくれる（かなり熱くはなる）。

素子の発熱対策として出力電圧を H と L の 2 段階切り替えにする。トランス端子近くと LM350 近くの SW は連動。トランスのタップを切り替えると同時に LM350 の Adj に流す電流を切り替えて最大電圧を抑えている。右図はヤフオクのトランスを使った例で、L レンジでは 1.25 ~ 12V、H では 1.25 ~ 25V になる。H だけでもいいように思えるだろう。でも、たとえば H レンジで出力を 2V にしたとき、LM350 は 28V も電圧をドロップさせなければならない（平滑回路の出力が 30V 近くなるため）。このとき出力電流が 1A だと、350 では 28W もの大損失が生じる。むちゃくちゃ熱くなること必至だ。

Lレンジなら 350 の入力が 15V 程度のため損失は 13W で済む。つまり、低電圧で使う場合は L で、それでは間に合わないときだけ H にする。私の製作機では L は 1.25 ~ 12V、H は 1.25 ~ 25V になった。

トランスに HT202 など 20V のものを使う場合、右図の定数ではどちらのレンジでも上の方が出ないかもしれない。で、次ページに HT202 (203) と HT242 (243) を使った際の最適と思われる定数を載せておく。もちろんこれ以外でもいいけれど自己責任で(ま、自作はすべて自己責任なんだけどね)。留意すべきは右図の 560R と 470R。これらをパラにしたとき、絶対に 220 Ω 以下にはしてはいけない。VR が発熱する。

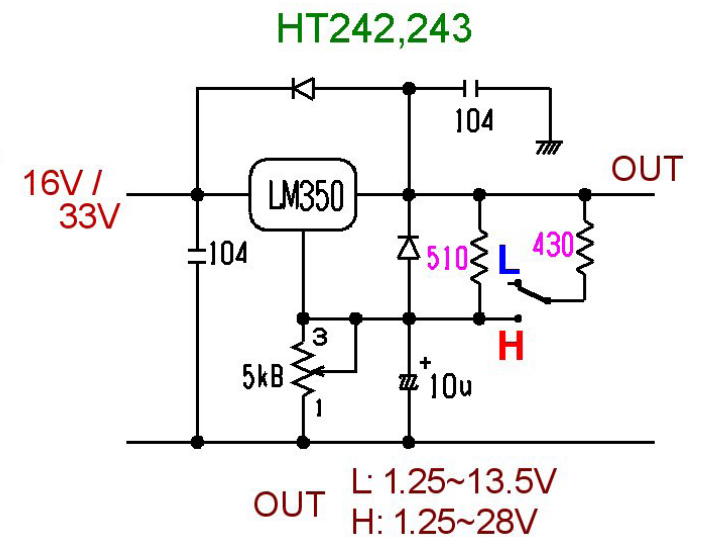


上図でピンクに変えた定数が変更点。出力電圧は目安で、多分ぴったりにはない。5kB の VR が本当に 5k あるとしての計算なので秋月 VR を無作為に使うと上の方が出ないだろう。選別しよう。

電圧計の駆動電源には 7809 を使った。この選択はちょっと難しい。HT242 (243) では、この三端子の入力電圧は最大で 33V 以上。もし 7805 を使うと、入出力電圧差が 28V にもなる。定格内だがこれじゃヒータと同じだ。できれば 7815 でも使いたい。一方、HT202 (203) だと最小入力電圧は 14V。7812 でも足りない。そこで、どんな条件でも使えるのが 7809、というわけ。いずれにしても放熱器は必須だ(無しで試したら 30 秒もたずに沈黙した)。

残りの回路は前回のプラス電源側と同じだから、ここでは説明しない。

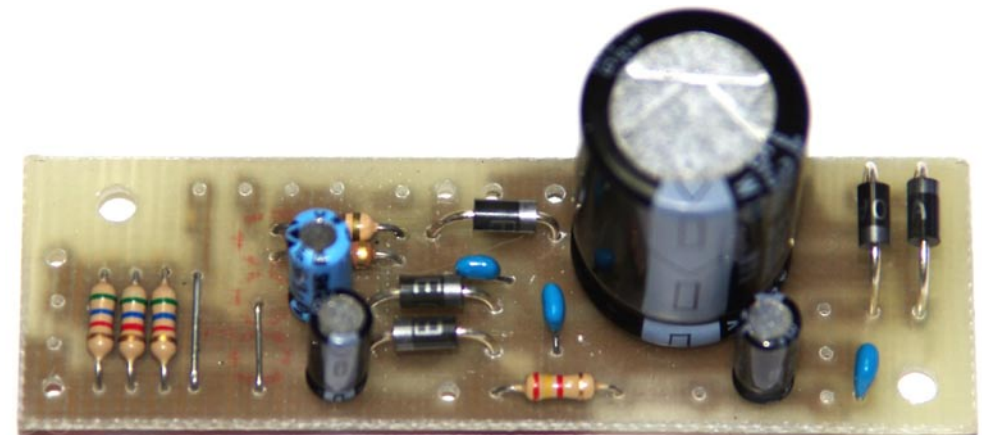
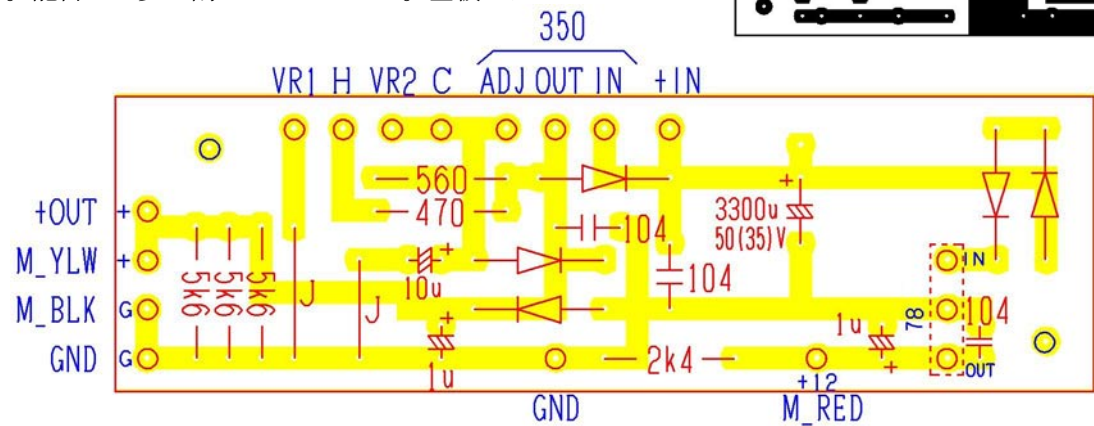
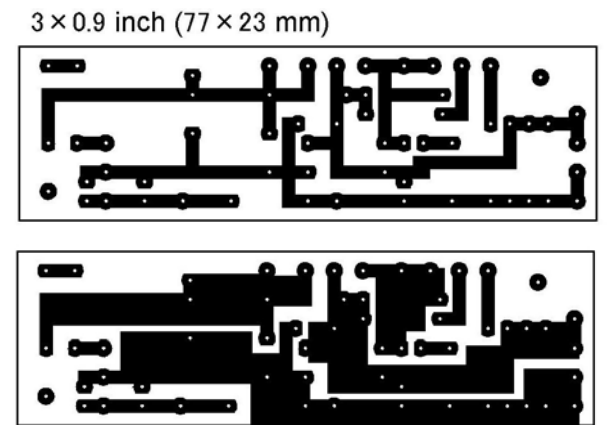
右と下が基板パターン（原寸）とパーツレイアウト。能書きが多い割にはシンプルだ。基板パターンが



2種類あるのは、実際には下のように描いてね、ってこと。電源のランドは太いほどいい。

整流用のブリッジは基板には無い。放熱を考慮して外付けにした。5A クラスを、シリコングリスを塗ってケースに直留めする。

基板がガラスなのは手元にちょうどいいサイズがあったから。紙エポで充分だ。



■ 正負電源ユニットの回路 ■

これまで書いてきた説明（になってるか？）の集大成が右図。出力電圧は± 1.25 ～ 18.5V。最大出力電流は± 300mA。出力に含まれるノイズは固定電圧の 78/79 と同程度だから実用性は充分ある。

トラッキングするなら電圧計はプラスかマイナスの片方でいいだろう？ たしかに。ただ、実験用電源を使うシーンでは何が起きるかわからない。マイナス側だけ異常電流が流れて電圧低下、なんてこともある。だから正負両方に電圧計があれば安心。China 製の 1 デジット誤差付き電圧計でも異常は発見できる。

使用トランスは HTR-1605（または同等品）限定。電流をもっと欲しい人は HTR-161 に置き換えてもいいかもしれないけれど、317/337 のスペックと見ると入出力の電圧差が大きい場合には 0.4A 程度しか出せなくなる（理想的放熱状態で）。今回は 300mA で我慢しておこう。

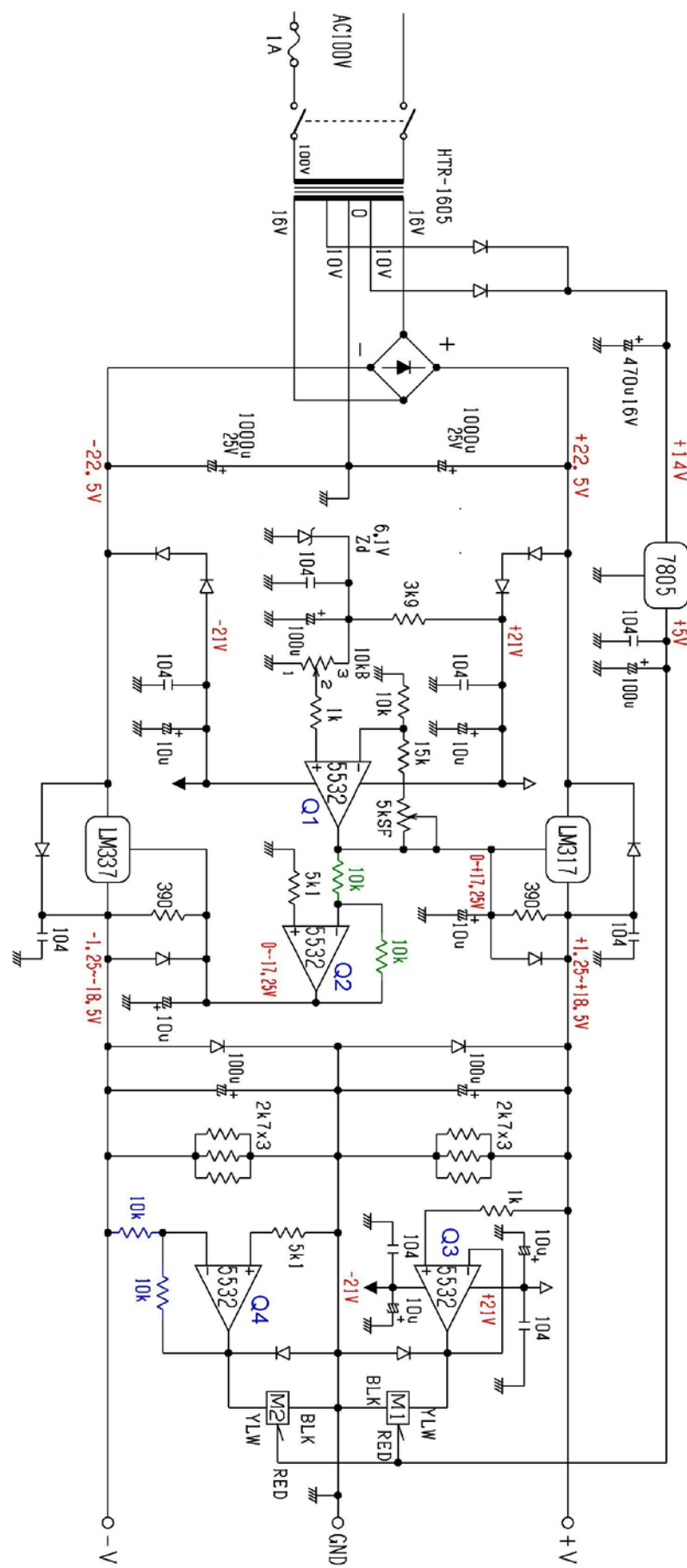
図中には標準的な電圧を書いておいた。これから大きく（± 20%以上）外れるようなら要注意。どこかへんだ。

で、回路。トランスの 16V 端子からメインのラインが始まる。10V 端子からは電圧計の電源を取る。整流の段階から分離してしまえば、さすがの電圧計もノイズを撒き散らせないだろう。

16V 端子につながるブリッジダイオードは 4A くらいのもので足が一杯に並んだ、よくある製品を使う。これは基板上に載る。平滑コンは、実はスペース的に基板設計がどうにもならず、1000u25V を使うしかなかった。本当はもう少し大きい方がいい。直径 10 ミリで 2200u25V があれば、迷わず置き換えてほしい。電圧計の電源は 470u16V で充分。多少リプルがあっても 5V の三端子で切り取られてしまうから。

5532 の電源には正負のメインラインから 2 本のダイオードで電圧を落として使う。1 本でもギリギリどうにかなるけれど、5532 を必要以上に熱くすることはない。そもそも 5532 はじめ高級オーディオ用のオペアンプは、そろって低インピーダンス設計で電流をガバガバ流す。つまりノーマルな使い方でも驚くほど熱くなる。他の一般的なオペアンプと同じつもりで触ると「これ、壊れてる！」と思うだろう。それで正常。薄い銅板で放熱フィンを付けたくなるくらい熱い。

回路全体を制御する元は 6.1V のツェナ。Zd と書いたダイオードだ。右図では 7805 の下にある。ツェナはアノードとカソードの間が一定の電圧になる便利なダイオードだが、使い方を間違えると盛大なノイズ発生器にもなる。ノイズを少なくするには、安全な範囲



でなるべく多くの電流を流せばいい。電流の計算は、今回のように負荷電流が極めて小さくて無視しても構わない場合は右図のようになる。要するに LED の電流計算と同じだ。

加えられる 21V はツェナの 6.1V と抵抗の 14.9V に分圧される。今回 R が 3k9 なので電流は約 3.8mA になる。でもこれは単なる検算で、実際にはツェナのカソードをオシロで見ながら、我慢できる程度にノイズが小さくなるように R を選んだ。R を 10k くらいから少しずつ小さくして行き（VR + 固定抵抗を使ってもいい）ノイズが減ったら、そこがポイント。

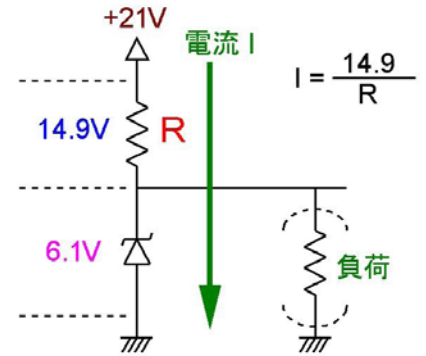
今回の負荷は VR の 10k だから、ここに流れる電流は無視しても構わない。負荷電流が大きいときには、それも勘定に入れる必要があって、計算はもう少し複雑になる（ヘビの足参照）。

使えるツェナは 6.1V だけに限らない。6V ならこのままで OK。もっと違う電圧のツェナだったら Q1 の帰還抵抗を換えて、半固定が中央あたりで Q1 の出力に 17V 強が出るようにすればいい。たとえば 5V ツェナの場合、帰還抵抗の 15k を 22k に変更する。

Q2 の入力抵抗と帰還抵抗は極力同じ値に。回路図では緑色にした抵抗 2 本だ。私は手元にあった 1% の 10k を選別して使った。1% 抵抗でも結構誤差があるから無選別ではダメ。1% を無選別で使うなら 5% を選別した方がずっといい。基板上、すぐ近くに配置されるために温度変化は同じと考えられる。とすれば 5% カーボンだって問題ない。

Q2 の反転入力からアースには 10k2 本パラ相当の抵抗を入れる。つまり 5k。オペアンプのドリフト（温度変化などで出力の直流成分が勝手に動くこと）を最小にする効果がある。この値はそんなにシビアではない。だから 5k1 にした。

以上は Q4 のマイナス電圧計用の反転アンプでもまったく同様。2 本の青色の抵抗は合わせ込んで使う。なお、Q2・Q4 とも 10k が 2 本でなくてもまったく構わない。抵抗値さえ同じなら 10k ～ 100k くらいの



範囲で何でも構わない。たとえば 47k が 2 本でもいい。入力抵抗と帰還抵抗の値が同じなら、反転増幅のゲインは常に 1 になる（わかったますよね）。

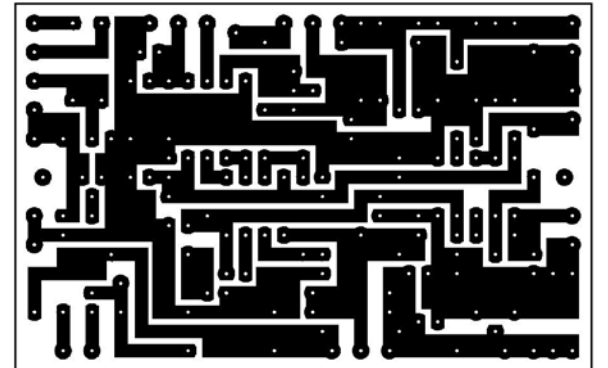
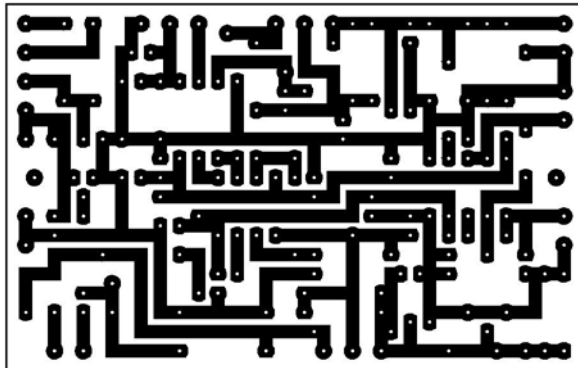
そのときには非反転入力からアースに落ちている抵抗を、帰還回路に使った抵抗の 1/2 に近い値にすること。47k を使ったら 24k だ。

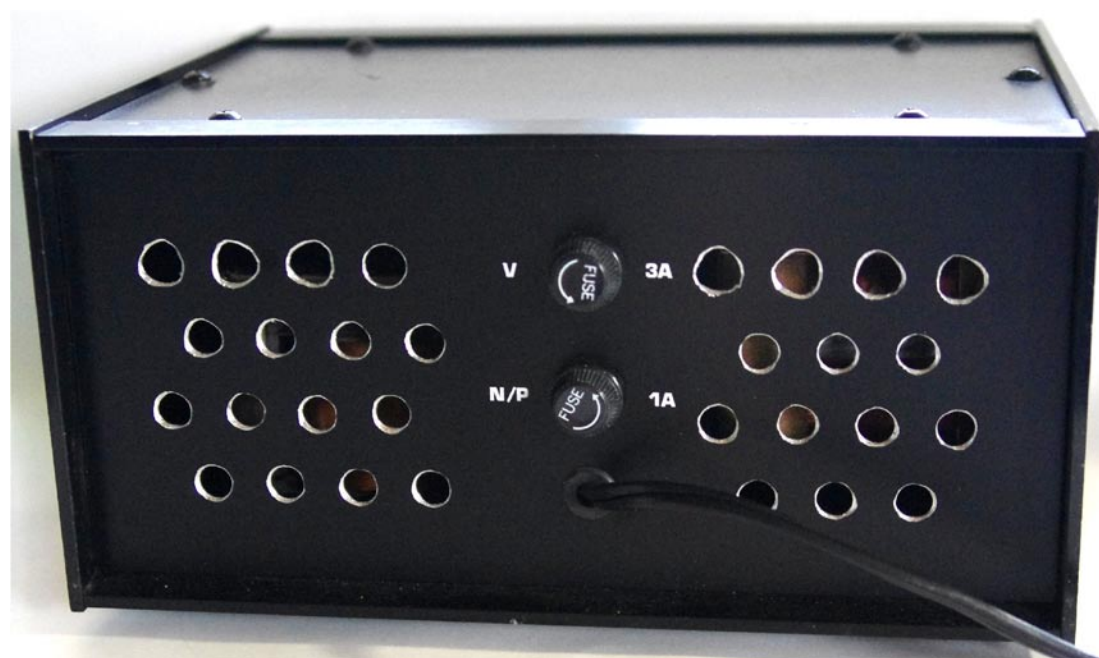
317/337 の出力がそのまま出力ラインになる。出力ラインからアースへは、それぞれダイオードと 100u の C が落ちている。ダイオードは保護用。外部から逆極性の電圧が加わったときに働く。100u は 317/337 の発振止めと出力電圧がリプルみたいに小刻みに動くのを防ぐ。世の中の一部では 337 は容量負荷特性が良くなく、大容量の C をかませると発振する、という伝説もあるが、まずウソだ。だって、電源の出力に大容量の C が入ることもあるから。それで発振していたら実験用電源ではない。

誤差増幅を使わずにオペアンプだけで制御する回路なので、安定性や精度はすべてオペアンプをどれだけ正しく動かせるかにかかっている。5532 は音だけではなく、こうした用途でも十分に優秀だと信じる。あとは設計が妥当かどうかだが、所詮は私の仕事。私自身と同程度にボケている可能性もある。

下に基板パターンを 2 種類。どちらも同じだが、とりあえず電源なので右の方がいい。コピーするときには左右をよく比べて同じなのを確認してほしい。できれば回路図からパターンを追い、事前に間違いがないのを確かめる。製作記事データを 100% 信じてはいけない。本人が言うのだから確かだ。

3 × 1.9 inch (77 × 48 mm)



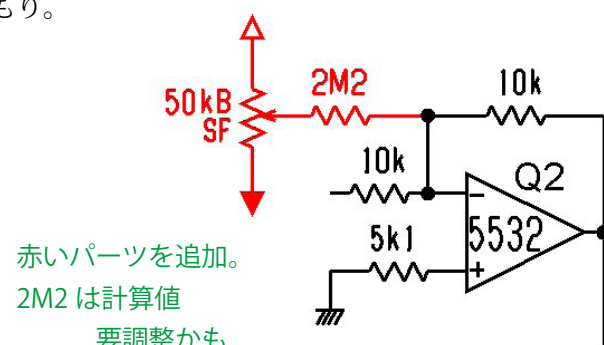


■ 使用結果など ■

ごく普通に使えている。単電源、正負電源ともコレといった問題はない。もう少し使い慣れたら 30 年選手の古い電源をお役御免にして置き換える予定だ。

気になるとすればトラッキングエラーかもしれないが、プラス側が常に 30mV 程度高く出ているだけだから、通常の測定にはまったく支障はない。もしこれを FIX するなら右図のような半固定と抵抗 1 本で可能。というのは、トラッキング誤差が常に一定ということは、Q2 の反転回路のオフセットか 337 のリファレンス電圧が低いことが原因だろう。Q2 出力をほんの少し動かせば直るはず。でもなあ、30mV だと小手術も億劫だし、とりあえず放置。

もうひとつ、正負電源を使っている単電源をオンすると一瞬正負電源の電圧が乱れる。大きなトランスの突入電流が影響するのだろう。大きい方のトランスの一次側にスパークキラーでも入れればいいのかも知らない。これもとりあえず放置。気が向いたら対策するつもり。



長らく行方不明になっていたヘビ君の画像ファイル、突然出てきたので久しぶりにヘビの足。

夜明けに眠ろうとしていると、いろんなアイデアが浮かんでくる。回路構成、新しいエフェクタと波形、文章の断片、合理的なプリントパターン、メロディーや和音、その他なんでも。大体において「これは傑作だ」と思い、朝まで覚えていようと決意する。憶えていられるのは 10 個に 2 個くらい。朝、勇んで紙に書いてよく見れば、凡才の凡作なのが 99%。でも 100 に 1 つくらいは本当に使えそうなものもある。

下図は明け方に睡魔の力を得て、自然と浮かび上がったトラッキング電源回路。すべて固定電圧三端子で構成され、± 0V ~ ± 20V を出力する。リクツではきちんと動くはず。まだ作っていないので本当に動くかどうかは保証しない。

Q5・Q6 はオペアンプ。この定数なら 5532 でなくてもよく、4558 や 358 で充分だ。Q5 の「+1」とは非反転増幅でゲインは 1 倍の意味。Q6 は反転増幅、ゲイン 1 ということ。

Q1・Q2 はオペアンプ電源のためのレギュレータ。15V に LED のゲタを履かせて ± 16.5V を出す。オペアンプの最大出力電圧が ± 15V だから、これで間に合う。

Q7・Q8 が心臓部のレギュレータ。COM 端子の電圧を動かして可変電圧出力にしている。Q7 の正電圧

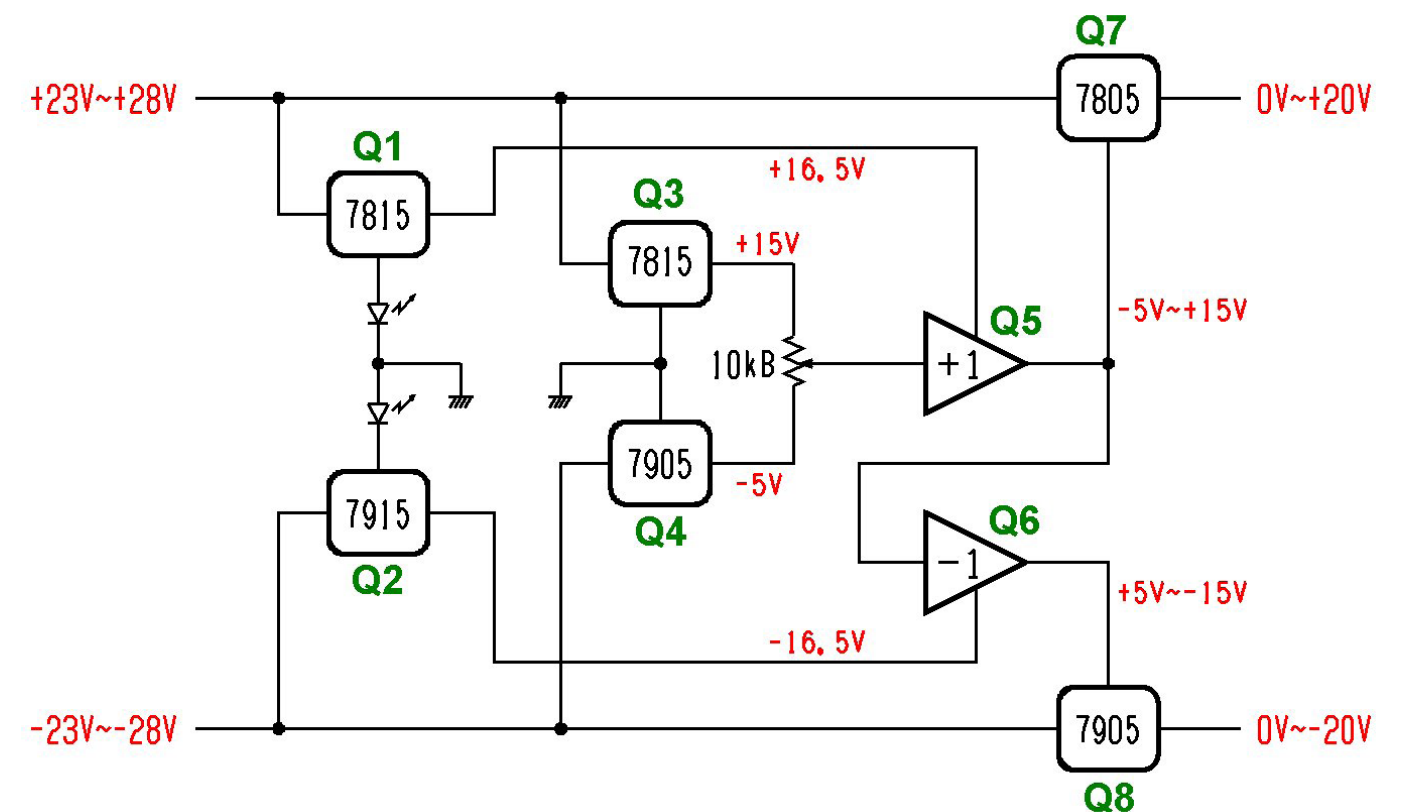
側でいえば、COM を -5V ~ +15V で動かす。すると、-5V 時には Q7 の出力は 0V になり、+15V では出力 +20V というわけ。

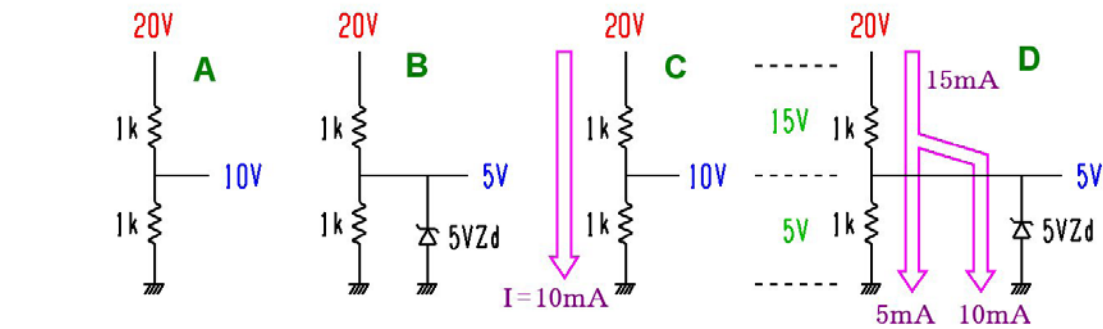
Q8 には -5V ~ +15V の COM 電圧を反転して +5V ~ -15V にして与える。そうすると出力は 0V ~ -20V になる。

COM 電圧を作るのが Q3 と Q4。これらの出力を VR でつないで任意に分圧して Q5 に加える。

Q7・Q8 から ± 20V を得るには、Q7・Q8 の入力には ± 23V 以上が要るが、最大でも ± 28V 程度の抑えないと Q7・Q8 が死ぬ。というのは Q7・Q8 の出力が 0V のとき、もし入力が ± 30V だと 7805/7905 の定格目いっぱいになるから（最大入力の定格は 35V）。これは三端子の入力と COM の間の電圧だ。定格ギリギリ状態で使えば、三端子は自分を守るため(?) に出力電流を制限する。つまり電流はほぼ取れない。必ず余裕を持たせねばならず、その点から入力電圧は ± 24V あたりがベストだろう。

使用する 7805/7905 の出力が ± 5V ピッタリなら苦労はいらない。また Q5・Q6 の出力オフセットがゼロなら、さらに苦労はいらない。実際にはどちらも狂う。どっちをどれだけ、どのように補正するかのアテカンが、いわゆる設計技術というもの。もし China 電圧計を付けるなら駆動用の三端子が 1 個要り、マイナス側も表示するなら 5532 も要ります。





久しぶりなのでへび2匹。ツェナの説明のところで「負荷がある場合はこの限りにあらず」みたいなことを書いてお茶を濁した。これ、しょうがなかったのよ。あそこでツェナの説明を始めると話が前に進まなくなる。でも、ネットで調べてみると、よくわかるようにツェナの使い方を書いているサイトって無いんだね。どーして？ みんなテキトーに使ってるからじゃない？ 当たらずとも遠からず（だろう）。

そこで自己流ながら、私はこう解釈して使ってます、みたいなのをやってみよう。話は思いっきり基礎から。

上図Aから始める。20Vとアースの間に直列にした1kが2本。抵抗の接合点は当然10Vになる。分圧、わかるでしょ？ わからない人は実用講座をどうぞ。

しかし、本当はここから5Vを出したい。是非とも5V、妥協できないっ！なら、上の抵抗を3kにすれば5Vじゃん。えっ、それもイヤですか。じゃ、奥の手でBのように5Vのツェナを入れたらどうだろう。はい正解、これで5Vになる。

パテレンの妖術かエレキの魔法、ではなくて、ツェナというものは、電流が流れ込むと両端（カソードとアノードという。普通のダイオードと同じ名前）の電圧が一定になるようにできている。仕組み？ 難しいのでWikiで調べて。

仕組みはともかく、使う分にはそう難しくない。CはツェナをつながないAの状態の電流。20Vからアースに2本の抵抗を通して10mAの電流が流れている。オームの法則だからわかるでしょ。これが10mAである限り、中点は10V以外にはならない。

ツェナを足したのがD。ツェナは自分の両端の電圧を強制的に5Vにしたがる。電圧が決まっていなくてイヤなのだ（血液型は多分Aだろう）。そのため、電流を変えてしまう。まず20Vから流れ出る電流を15mAにして、上の1kで15V落ちるようにする。そうしないと自分の両端の電圧が5Vにならないから強引にそうする。すると下の1kでは5Vの電圧降下しか起きず、ここに流れる電流は5mAになる。残った10mAはツェナ自身が引き受けてアースに流す。……というような現象をツェナは勝手に惹き起こすのだ。

信じようと信じまいと、このようにツェナは働く。自分にかかる電圧を決めて自己主張するなど、並みのパーツではできない。

Dの別の面から見てみよう。この状態でのツェナは500Ωの抵抗に化けている、ともいえる。だって電圧を5Vかけると10mA流れるなら、それは500Ωの抵抗と同じ。この視点は時に役に立つので憶えておこう。

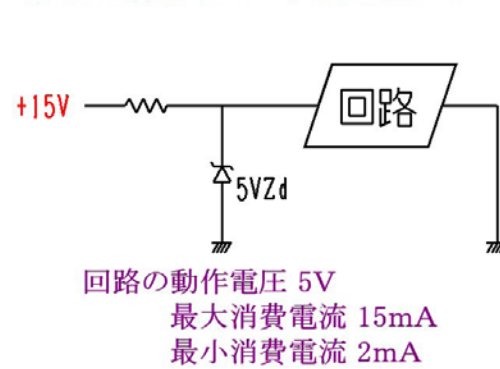
5Vツェナばかり書いてきたが、ツェナには電圧によって、また流せる電流（後述）によって、いろいろな種類がある。比較的低電圧（おおむね20V以下）なら、ほとんどの電圧が揃っていて安い（1本10円くらいから）。用途に合わせて使いこなせば便利なパーツだ。高い電圧のツェナはあまり見かけない。40Vくらいまでならチラホラある程度。三端子レギュレータを使うまでもない箇所には最適だが、電圧が三端子ほど安定しないし（電流が変わると少し変動する）ノイズも発生する。だから私はツェナをレギュレータとは違うパーツと認識している。あくまでも「電圧を下げて、そこそこ一定にする」パーツだと思っている。

昔話をひとつ。下の写真は真空管時代にツェナと同じ役割をしていた定電圧放電管というタマ。写真のものはVR105MTという型番で、ツェナと同じように電圧をかけて電流を流してやると105Vが得られる。これは厳密には真空管ではなく、中は真空ではなくガスが入っている。それにヒータも無い。働かせるとガスの中で放電が起き、105Vのタマは白く輝いた。未熟な私にはうまく使いこなせなかったが、放電を見たいばかりにラジオやアンプに付けて無駄に光らせた。

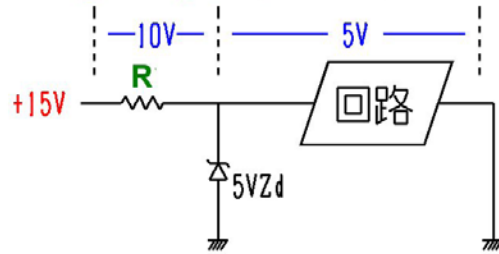
105Vの他に150Vと75Vがあって放電の色が違った。また意味なく光らせてみようか。



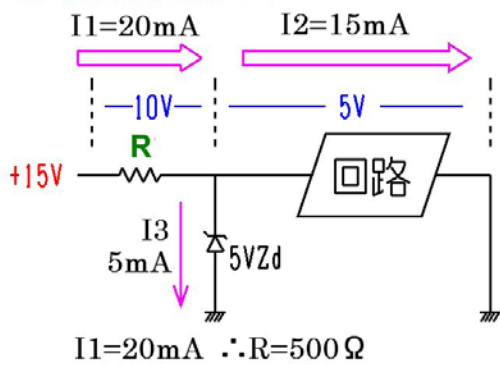
① 15V電源で5Vの回路を動かす



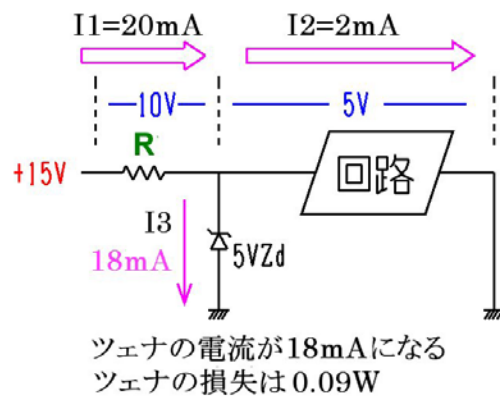
② Rで落とせばいいのだが？



③ 消費電流最大時



④ 消費電流最小時



ツェナの続き。ここまでの図A～Dは、いわば基礎編。負荷が一定（下側の1k）なら、ここまでの説明だけで済む。現実の回路では負荷電流が一定とは限らない。それでも定電圧を保つのがツェナだ。

上の①を例にとろう。15Vの電源で、動作電圧5Vの回路を動かしたい。回路の仕様は図中のとおり。紛らわしいので図中の回路を「負荷回路」と呼ぼう。なに？三端子を入れるって？ 正論だけど今はツェナの話。図のように入れればいいのは何となくわかるはず。

このとき②の電圧構成になっていればいい。つまり抵抗Rに10V受け持たせて、残りの5Vで負荷回路を動かす。んじゃ、Rの値は？ ポーッと見てるだけじゃわからない。まず電卓を用意して計算の準備。

5Vのツェナにも電流は流れる。まずこれを決める。一般的なツェナなら3～5mAでいいようだ。ケチるとノイズが出から、ここでは5mAとしておこう。心配な人は実験電源と抵抗で使用するツェナに5mA流し、カソードをオシロで見る。モアモアしたノイズが出ていなければOK。出ているようなら電流を増やしてノイズが減るところを探る。納得したら、その電流値をツェナに流す電流と決めればいい。

これが決まれば③が計算の元になる。この例ではツェナに5mA、負荷回路には最大で15mA流れる。ということは、Rにはその合計の20mAが流れることになる。ここまでのいい？

あとはオームの法則だ。20mA流れたとき10V電圧ドロップする抵抗値は？ $R=V/I$ で500Ωとわかる。

つまりRに500Ωを使うと、とにかく最大電流時には負荷回路には正しく5Vが加わるわけ。500Ωという抵抗はないので470Ωか510Ωと使おう。1kを2パラにする？ いいけどね、あまりシビアに考えることはない。5%抵抗には最大で5%の誤差があるし（当たり前だが忘れやすい）、電流は変動するから。

ここで抵抗のワッテージを確認。500Ωに20mA流れるのだから、消費される電力は $P=I^2R$ で0.2W。1/4W型でもギリギリ収まるがスペースに余裕があれば1/2Wを使いたい、とわかる。

次に負荷回路の電流が最小になった場合を考える。④がその様子。Rで10V落ちて負荷回路に5V、という電圧配分は変わらない。変わったら困るでしょ。負荷回路には5Vしかかけられないんだから。ということとは、③で負荷回路に流れていた15mAのうち、減った分の13mAをツェナが引き受けていることになる。そう、このときツェナには $5+13=18(\text{mA})$ が流れなる。早い話が、負荷に流れる電流の変動分をツェナが吸収し、自分の中に流しているわけだ。こうして負荷に加わる電圧を一定にするのがツェナダイオード。

一応④でツェナが消費する最大電力も計算してみよう。またオームの法則、 $P=IV$ 、 $5 \times 0.018 = 0.09 (\text{W})$ が最大値とわかる。これなら市販で一番安い500mWタイプで充分間に合う。

上記の他にも計算方法はいろいろあるはず。ツェナは必ず計算して、安心して使おう。経験や見当だけで定数を決めると想定内（外じゃない）の痛い目に逢う。