

電子ピアノの作成

福井善朗@TEPICOB

0. はじめに

どうも、TEPICOB の福井です。今大学 4 年生で、来年から大学院生になろうとしております。院試がひと段落ついたので、TEPIC の技術力が向上の一助になればいいな—ということで、TEPIC 原稿を書いてみました。

私が聞く限り、TEPIC ではトランジスタにはこれこれこんな働きがあるだの、オームの法則がどうのこうのだの、電子工作の素子の勉強会を開いて勉強してはいるみたいですが、じゃー実際にトランジスタを使って NOT 回路を書いてみろといわれると、「え・・・？」といったかんじで、「こーゆーことが出来るのはわかっているけど、実際に設計はできない」という状況だと見ています。電子工作の楽しいところは、結構しんどい理論の勉強が使えるようになり、理論を目の前にある回路に実装・応用して、自分なりにアレンジできるようになることだと思います。そこで、本原稿では理論が非常に簡単な、シュミットトリガを使った方形波出力回路と、オペアンプの加算回路を少しいじくったミキサー (和音生成機) を設計し、それを組み合わせた電子ピアノの設計を紹介したいと思います。そして、1 から回路を設計することは出来なくても、与えられた回路の理論を理解し、抵抗等の数値をいじることで、おお、確かに理論どおりの動きするじゃん！という喜びを感じてもらえればと思います。

しかし、理論を考えることは難しいし、面倒くさいし、これを読むであろう読者は中学 1 年生～高校 3 年生まで幅広く、中学 1 年生には全てを理解するのは難しいと思います。(でも中学 3 年生以上は全部理解してほしいものです) ですので、本原稿では、最初は誰でも理解できるよう、理論は抜きに書きます。そして、だんだんと、理論の解説を詳しくしていこうと思います。

具体的に言えば、本原稿の構成は次のようになっています。「0. はじめに」は本章のことであり、本原稿の概要について述べています。「1. とりあえず作成」は作成する電子回路を示し、回路図の説明しています。電子回路は方形波出力回路とミキサー回路で成り立っています。「2. 方形波出力回路」は、C と R、シュミットトリガを使った方形波出力回路について解説します。「3. ミキサー回路」では、オペアンプの基本的な動作と、それを応用したミキサーについて説明します。「4. 参考文献」は本原稿を書くにあたって参考にした文献を記しています。非常に分かりやすいので、是非読んでみることをお勧めします。

1. とりあえず作成

1.1 今回作成する回路

さて、前章で、理論を分かった上で、ものを作ると楽しいよ、理論が分かっていると回路図をアレンジ出来て楽しいよ、何てことを言いましたが、「そんな理論なんぞどーでもいいねん、とりあえずはんだ小手握らせろ！」方のために、とりあえず今回つくる回路を見せちゃいましょう。動くものがとりあえず作りたいだけの方はとりあえず本章の回路図を組み立てて、他は無視して OK です。図 1 を見てください。これが今回作成する電子ピアノです。では、さくっとそれぞれの部品について解説していきましょう。

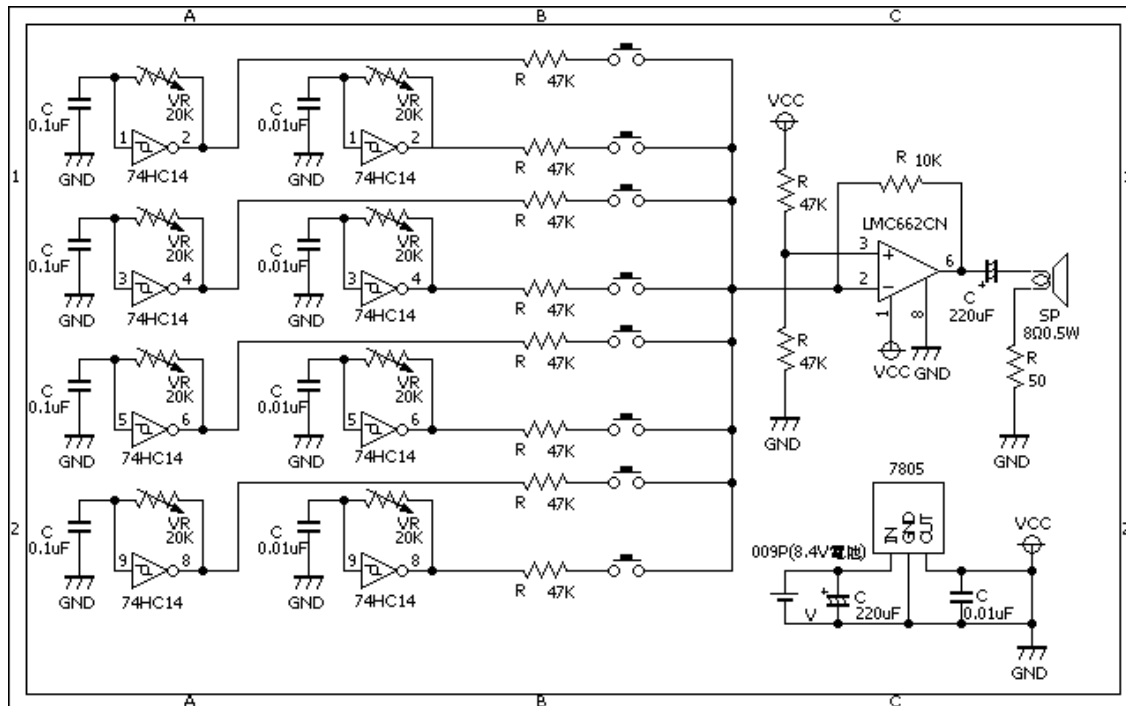


図 1. 今回作成する電子ピアノの回路図

1.2 部品の説明

74HC14 はシュミットトリガ機能付き NOT ゲート IC であり、0V を入力すると 5V を、5V を入力すると 0V を出力する IC です。2 個使います。どこでも売っていますが、購入するときには、74HC14 か 74AC14 を買いましょう。74LS14 等他シリーズの IC ではピン配置が違う、回路をいじる必要が出る等の理由でやめておいたほうがいいです。部室に転がっているかもしれません。7 番ピンを GND に、1 4 番ピンを 5V に繋げることを忘れずに。

LMC662CN はオペアンプであり、詳しくは「3. ミキサー回路」で説明します。基本的にオペアンプなら何でもいいのですが、コンパレータ等、他 IC と間違えると悲劇なので、型番通りに買ってくることをお勧めします。LMC662CN はシリコンハウスや秋月電子で売られています。74HC14 でもいえることですが、使わないピン（今回の回路でいえば、5,6,7 番ピン）はフリーにしておいてください。厳密には GND につないだほうがいいとか、プルアップ・ダウンしたほうが良い等、適切な端子処理方法があるのですが、よく分からないならフリーでいいと思います。データシートを見た上で、適切に使わないピンは処理すべきで、素子について理解していないのに GND につないで処理することは危険です。4 番ピンを GND に、8 番ピンを 5V につなげることを忘れないで下さい。

7805 はレギュレーターであり、ノイズが乗ったりして不安定な電源を、安定した 5V を出力する 3 本足の IC です。78L05、78M05、7805 等色々な種類があり、78 部分はシリーズを表しており、78 なら正電源を 79 なら負電源を作るという意味です。L や M 部分は出力可能な電流を表しています。L なら 100mA、M なら 500mA、記号なしなら 1000mA 出力できます。05 部分は出力電圧を表しており、09 なら 9V、12 なら 12V を出力してくれます。例えば 78L05 なら +5V 100mA を出力しますし、7912 なら -12V 1A を出力してくれます。基本的に入力電圧は 7800 シリーズの場合「出力したい電圧 + 1.5V 程度」が推奨されており、低すぎると安定した 5V を出力できませんし、高すぎると熱で IC が壊れてしまいます。よくわからなかったら 7805 を使って、入力には回路図右下のように、7 ~ 9V くらいをつっこ

んでおきましょう。基本的にどこでも売られています。

SP はスピーカーのことであり、壊れたラジオ何かをぶっ壊すか、50 円くらいのジャンク売り場から図 2 のようなものを GET してきてください。パソコンのスピーカーを使ってもいいですよ？発振回路が内臓されているブザーと間違わないように注意してください。



図 2：スピーカー

VR は可変抵抗のことであり、パーツ屋さんの抵抗コーナーあたりで買ってきてください。20K です。この値を調整することで、出力される音が変わります。どのような抵抗値に調整すれば、どのような音出力されるかは「2. 方形波出力回路」で説明します。セラミックコンデンサは $0.1\mu\text{F}$ (記号 104) を使ってください。他の値を使うと思った通りの音が出ません。電解コンデンサは値が大きければ基本的に何でも構いません。とりあえず私は手持ちの $220\mu\text{F}$ を使いました。47K と 10K をミキサー回路用に使っています。50Ω はスピーカーの出力調整用で、大きすぎるとスピーカーの音が小さくなりますし、小さすぎるとオペアンプが出力可能な電流を超えた電流を出力してしまい、オペアンプを壊してしまう恐れがあります。大音量を出そうとすると、アンプ回路を追加する必要がありますが、今回はとりあげません。

1.3 組み立て

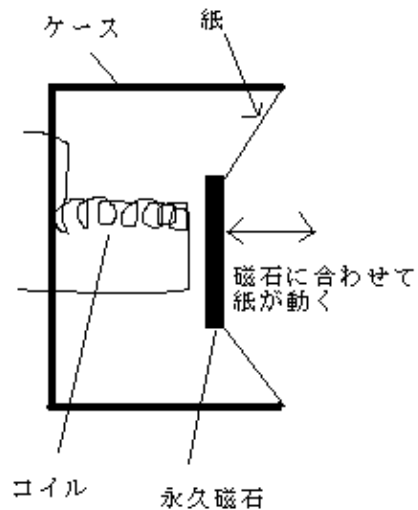
さて、以上のような部品を買い集め、ちゃちゃっと組み立ててください。可変抵抗をいじると音の高さが変わり、2 つ以上のボタンを押すと和音が出てくるはずですが、5 個とか同時押しすると音がひずみます。何故でしょうね。じゃ一次の章でそのへんを理論的に考えていきましょうか。

2. 方形波出力回路

さて、本章では方形波回路を作成する回路部分について説明しましょう。方形波って何？ごもっとも。てゆーか何でそんなもんつくらにゃなんの？という感じだと思いますので、まずはスピーカーから音を鳴らせるにはどうするのか、という話から入りたいと思います。

2.1 スピーカーって何よ？

音を人は何故聞くことが出来るのでしょうか。空気が振動して、それを耳の鼓膜でキャッチしているからですね。じゃー人工的に音を出すにはどうしたらいいかというと、人が聞くことが出来る 20-20Khz くらいの空気の振動を作れば、それが「音」です。振動の大きさが強ければ「大きい音」と聞こえるし、振動の周波数が高ければ（1 秒間あたりの、空気の振動回数が多ければ）高い音に聞こえます。じゃーどうやってスピーカーは空気を振動させているのでしょうか。図 3 を見てください。非常に乱暴な解説になってしまい、厳密性にかけてしまうかもしれませんが、スピーカーの中身は電気回路から見ればコイルです。アマチュアムセンの時に習ったと思いますが、コイルに電流を流せば電磁石になります。で、電流を流していない状態から流している状態へすると、電磁石の近くにある永久磁石が電磁石にくっついて、それにあわせて永久磁石にくっついていてる紙が動きます。電流の向きを反対に



すれば、今度は永久磁石がコイルから離れようとして、それにつられて紙も動きます。つまり、コイルに交流の電流を流せば、紙が前後に動き、空気を振動します。この空気の振動が「音」として我々の耳に「聞こえる」訳ですね。電流の波を物理的な波に変換する装置であると、かつよく言っておきましょうか。

ここで重要なのが、スピーカーの中身は「コイル」であり、銅線を巻いたものにすぎません。そのため、直流電流を流すと、コイルが焼き切れてしまいます。電池のプラスとマイナスを銅線でつなぐと、銅線が焼き切れることをイメージしてもらえると分かりやすいと思います。この話は「3. ミキサー回路」でももう少し取り上げることにしますが、ここでは「スピーカーには交流を流さないといけない」ということだけ覚えておいてください。

図3：スピーカーの概念図

さて、例えば「ラ」の音をスピーカーから流したいと思います。コイルにかかる電気の波の動きがそのまま紙の動きになるので、表1のように、440Hzの交流をスピーカーに流せば「ラ」が出ることになります。さて、もうお気づきでしょうか？音を鳴らすためには、希望する音に対応する周波数をもつ交流電流を作ってあげないといけないということですね。

周波数[hz]	262	294	330	349	392	440	494
音	ド	レ	ミ	ファ	ソ	ラ	シ
周波数[hz]	523	587	659	699	784	880	988
音 (1 オクターブ上)	ド	レ	ミ	ファ	ソ	ラ	シ

表1：周波数と音の関係

2.2 交流電流をどうやって作るんだ？

音を鳴らすためには希望する音の周波数に合わせた交流電流を作らなければならないと前節で説明しました。そのためにはどのような回路を作らなければならないのでしょうか。答えだけ先に言っておきます。図4左のような回路を作ればよく、Cの値は100pF以上、抵抗の値は1K以上になるように（74HC14の素子の限界、ノイズの影響等の理由）設定します。この回路からは図4右のような2.5Vのバイアス¹がかかった交流の方形波（四角い波）が出力されます。出力される交流電流の周波数fは、式(1)のようになります。式(1)(2)を導出しようとすると、微分方程式を解かないといけないので、「この回路だったらこんな関係があるんだー」と単純に思っておいてください。これで、和音を鳴らさず、単音を鳴らすだけであれば、図5左のような回路にして、「コンデンサは直流を通さず、交流のみ通す」性質を利用して、図5右のようにバイアスが除去された「純粋な」交流をスピーカーに流せば音は出るようになります。

例えば「ラ」を出したいとしましょう。「ラ」の音は表1より440Hzなので、周波数f=440になるように、RとCをどのように設定すれば良いのか計算します。logの意味は高校

¹ バイアスとは「底上げ」のことです。交流とは図5右のように、平均が0Vのようなものですが、これの全体を「2.5V底上げ」すれば図4右のようになりますね？

生の先輩に聞いてください。74HC14 のデータシートを見ると、 $thh=2.7$ $thl=1.6$ と書いてあります。電源電圧 V は $5V$ なので、これを式(2)にぶちこむと、 $A=-2.602$ になります(式(3))。これを式(1)に代入して計算すると、式(4)のように、 $CR=8.7*10^{-4}$ です。コンデンサ C と抵抗 R の値の掛け合わせた値がこの値になれば、どんな値を選んできても「ラ」が出ます。さて、何でもいいのでとりあえずコンデンサは(作成時手持ちだった) $0.1\mu F$ を使っておきましょう。すると、式(5)のように、 $R=8.7K$ の値が出てきて、この値の抵抗をつければ、「ラ」が出るのが分かります。このようにして、低い「ド」から高い「ド」まで出るように、 C と R を調整すれば、電子ピアノが出来るということがイメージできたでしょうか？実際には、 C を調整するのはちょっと面倒なので、 R を可変抵抗にすることで、 CR 値を調整します。

$$\text{周波数} f = \frac{1}{-CRA} \quad \dots (式1)$$

$$\text{ただし、} A := \log_e \frac{thl(V - thh)}{thh(V - thl)} \quad \dots (式2)$$

V : 74HC14の電源電圧

thh, thl : 74HC14のしきい値 (データシートに記載されています)

※「ラ」を出したい時の CR 値の計算例

74HC14のデータシートより $thh = 2.7V, thl = 1.6V, V = 5V$ を式(2)に代入

$$A = \log_e \frac{1.6(5 - 2.7)}{2.7(5 - 1.6)} = -2.602 \quad \dots (式3)$$

$f = 440, A = -2.602$ を代入

$$440 = \frac{1}{440 * 2.602 * CR}$$

$$CR = 8.7 * 10^{-4} \quad \dots (式4)$$

C に $0.1\mu F$ 、つまり $0.1 * 10^{-6} F$ を代入(μ は 10^{-6} という意味です。)

$$R = 8.7 * 10^3 = 8.7K\Omega$$

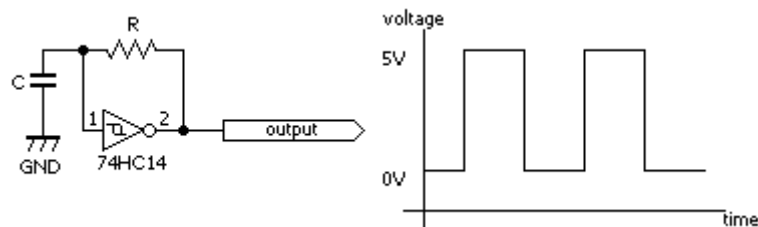


図4：方形波出力回路とその出力波形

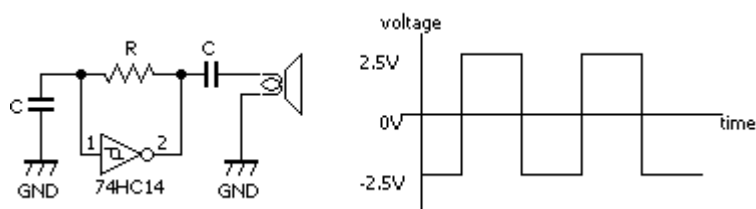


図5：単音を鳴らす回路とスピーカーに実際にかかる電圧

3. ミキサー回路

以上までの知識を使えば、単音を出すピアノは作れます。(自由自在に音量を調整したいなら、アンプ回路を作る必要があります。あくまで、音量は気にせず、とりあえず音が鳴れば良いなら作れるという意味です。)しかし、和音となるとどうでしょうか？残念ながら、方形波出力回路の出力をくっつけただけでは和音を奏でることは出来ません。そこで、本章では、和音って何よ？なところから、ミキサー回路について説明したいと思います。

3.1 和音って何？

さて、音とは空気の振動だと前章では述べました。では、和音とは、何なのでしょう？高さの違う図 6、図 7 のような 2 つの波をどのようにあわせると、和音のように聞こえるのでしょうか。答えは図 8 のように、「高さを足し合わせる」ことです。例えば時間 0～1 において、音その 1 は電圧 2、音その 2 は電圧 3 なので、和音において、時間 0～1 では $2+3=5$ の電圧がかかります。もう一例あげると、時間 5～6 は音その 1 は電圧 -2、音その 2 は電圧 3 なので、和音において、時間 5～6 では $-2+3=1$ の電圧がかかります。このようにして音を「足し合わせる」と和音に聞こえる波を作れます。しかし、出力をくっつけるだけでは、このような「足し合わせる」ことは実現できません。出力をくっつけるだけでは回路同士がお互いに影響し合うからです。そこでオペアンプという素子を使って、「音を足し合わせる」ことを実現する回路、「ミキサー回路」を作ろうと思います。それでは、そもそもオペアンプとは何かということを次節で説明しましょう。

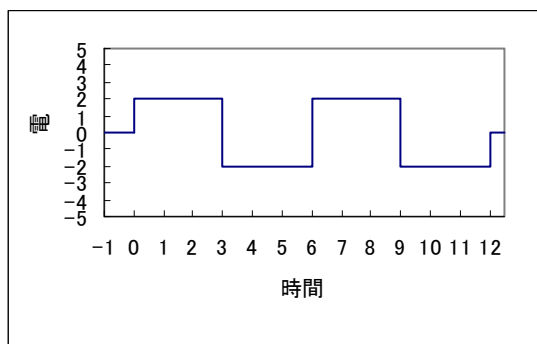


図 6：足し合わせる音その 1

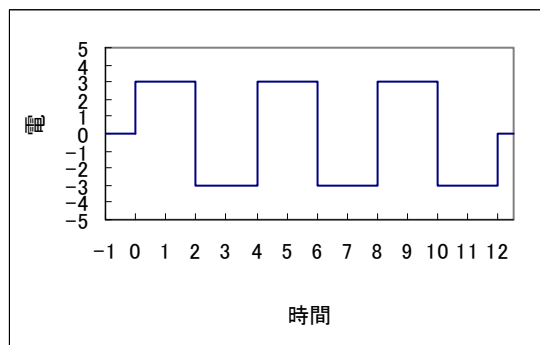


図 7：足し合わせる音その 2

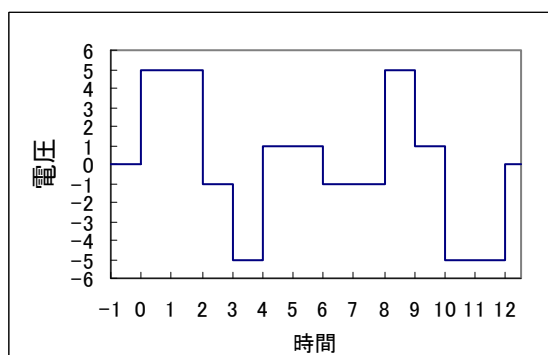


図 8：その 1 とその 2 を「和音」にした図

3.2 オペアンプってどんな素子？

さて、ミキサ回路を作るためにオペアンプを使うと前節で述べましたが、そもそもオペアンプって何でしょうか。端的に言えば、オペアンプはアナログ信号を増幅するための基本的な IC です。OP アンプと略されたりもします。増幅回路・発振回路・インピーダンス変換回路等アナログな回路でかなりお世話になる素子です。

参考文献[2]より、図9を引用します。図9はオペアンプの基本を表した図です。オペアンプの基本動作は、「+入力端子」にかかる電圧と「-入力端子」にかかる電圧の差を無限大に増幅して出力するという動作を行います。入力電圧と出力電圧の関係を数式で表すと、次のようになります。(数式で物事の関係を表す事は重要です。中学生は馴染みが薄くて戸惑うかもしれませんが、数式の流れを丁寧に読み取ってみてください。新しい世界が見えますよ。)

$$V_{out} = (V_+ - V_-)\alpha \quad \dots \text{式(5)}$$

V_+ : +入力端子にかかる電圧

V_- : -入力端子にかかる電圧

V_{out} : 出力される電圧

α : 理想的OPアンプなら無限大

(実際は 10^5 とかの値、OPアンプによって違う)

ただし、 V_{out} が正電源電圧より高ければ正電源電圧が出力され、

V_{out} が負電源電圧より低ければ負電源電圧が出力される。

例えば、+入力端子に 5 V，-入力端子に 4V の電圧がかかっていれば、出力は $(5 - 4) \times \infty = \infty \text{V}$ の電圧を出そうとしますが、正電源以上の電圧は出力できないので、正電圧にかかる電圧を出力します。もう 1 例あげると、+入力端子に 3 V，-入力端子に 4.2 V の電圧がかかっていれば、出力は $(3 - 4.2) \times \infty = -\infty \text{V}$ の電圧は出力できないので、負電源にかかる電圧を出力します。

さて、このままじゃー出力される電圧はどうみても正電源端子にかかる電圧 (今回使う回路なら 5 V)、もしくは負電源端子にかかる電圧 (今回使う回路なら 0 V) しか出力されないように見えます。前節述べたように、ミキサは「足し合わせる」ことが求められており、出力が + 5 V か 0 V に振り切れるような素子は使えないじゃないか、ってことになりますよね。そこで、普通の回路では、「ネガティブフィードバック」つまり、出力と入力端子を抵抗等を挟んでつなぐことをやります。それでは次節で、ネガティブフィードバックを使った簡単な例をあげてみましょう。

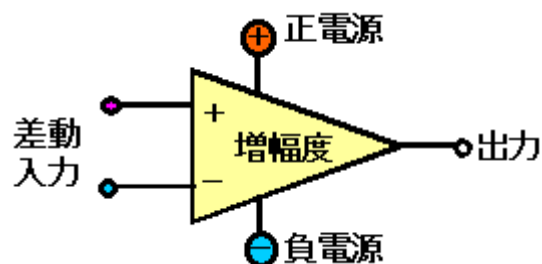


図9：オペアンプの基本図(参考文献[2]より引用)

3.3 オペアンプの回路例-反転増幅回路-

さて、オペアンプの簡単な回路例である反転増幅回路について紹介してみましょう。図 10 を見てください。これが反転増幅回路です。この回路の動作について考えてみましょう。実はオームの法則 $E = I R$ と前節で述べたオペアンプの基本動作式（式(5)）で、入力電圧 V_{in} と出力電圧 V_{out} の関係を導くことが出来ます。ではやってみましょう。

$$V_- = V_{out} + \frac{(V_{in} - V_{out})R_2}{R_1 + R_2} \quad (\text{オームの法則より、} V_{in} \sim V_- \sim V_{out} \text{ は分圧の関係})_*$$

$$V_+ = 0 \quad (\text{GND つまり } 0V \text{ につながっているから})$$

この 2 式を OP アンプの基本的な式(式(5))

$$(V_+ - V_-)\alpha = V_{out}$$

に代入

$$-(V_{out} + \frac{(V_{in} - V_{out})R_2}{R_1 + R_2})\alpha = V_{out}$$

V_{out} について解くと、

$$V_{out} = -V_{in} \frac{R_2}{R_1 + \frac{R_1 + R_2}{\alpha}}$$

$$\text{ここで、} \alpha = \infty \text{ なので、} \frac{R_1 + R_2}{\alpha} = 0$$

$$\text{よって、} V_{out} = -V_{in} \frac{R_2}{R_1} \quad \dots \text{式(6)}$$

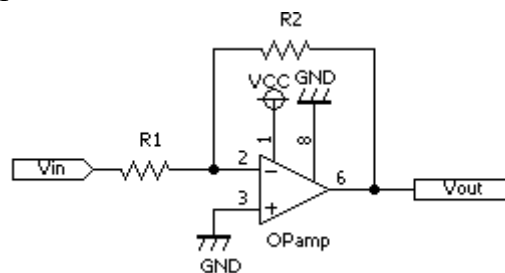


図 10:反転増幅回路

さて、 V_{out} と V_{in} の関係がこれで分かりました。式(6)より、入力を $-R_2/R_1$ 倍したものが出力されるそうです。このように、オペアンプの回路はオームの法則と、基本的な式(5)で、オペアンプの動作を解析しちゃうことが出来ます。この反転増幅回路の場合、特定の信号を定数倍にする動きがあるようです。図 10 の回路のままでは、例えば 2 V を入力すれば、 $-2R_2/R_1$ を出力しようとはしますが、負電源が 0 V なので、0 V を出力するだけの無意味な回路ですが、（負電源を $-5V$ とかにすれば、きちんと $-2R_2/R_1 V$ が出力されて、意味がありますよ？）ネガティブフィードバック（出力端子と入力端子をつないであげることで、オペアンプは入力信号を定数倍等のアナログ信号に対して演算が出来る素子になるんだよってことが分かりました。しかも、「 $E = I R$ と OP アンプの基本的式だけで回路の意味が解析できる！」ってあたりも、わかりやすくいいと思いませんか？次節でミキサ回路の一手前、加算回路について説明します。

3.4 オペアンプの回路例-加算回路-

さて、我々がやりたいのは「音をたしあわせる」ことです。つまり足し算がやりたいのです。オペアンプを使って足し算をする回路を本節で紹介しましょう。図 11 を見てください。これが加算回路です。それでは、オームの法則と、オペアンプの基本的な式を使って、この回路の意味、入力電圧 V_1 - V_3 と出力電圧 V_{out} の関係を考察してみましょう。

R_1 に流れる電流と、 R_2 に流れる電流、 R_3 に流れる電流の和は、
 R_f に流れる電流と等しいので、

$$\frac{(V_1 - V_-)}{R_1} + \frac{(V_2 - V_-)}{R_2} + \frac{(V_3 - V_-)}{R_3} = \frac{(V_- - V_{out})}{R_f} \quad \dots \text{式(7)}$$

オペアンプの基本的な式より、

$$(V_+ - V_-)\alpha = V_{out}$$

変形して、 $V_- = -\frac{V_{out}}{\alpha}$ (V_+ はGNDにつながっているから $V_+ = 0$)

よって、 $V_- = 0$ ($\alpha = \infty$ より)

これを式(7)に代入して、

$$\frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} + \frac{V_3}{R_3} = -\frac{V_{out}}{R_f}$$

特に、 R_1 と R_2 と R_3 が等しい場合は

$$V_{out} = -\frac{R_f}{R_1}(V_1 + V_2 + V_3) \quad \dots \text{式(8)}$$

どうです？これでぐっと足し算が出来るようになりましたね？この加算回路のすばらしいところは、式の形から想像できると思いますが、 $R_4, R_5, R_6 \dots$ と、入力部分の抵抗を並列に増やしていくことで、10個の入力を加算することだろうが、20個の入力の加算することだろうが出来てしまうことです。

さらに都合がいいことがあります。それは、式(8)右辺の R_f/R_1 部分です。音を足し合わせるということを思い出してください。例えば3音の和音を出したいとします。ある時間において、音1は5V、音2も5V、音3も5Vだったとします。すると、和音を出すためにはその時間 $5 + 5 + 5 = 15$ Vを出力しないと和音に聞こえません。しかし、オペアンプの正電源は5Vなので、15Vなんて出力できません。純粋に「音をたす」だけでは、和音の数倍、高い電源電圧を容易しなければなりません。それは結構初心者にはめんどいです。電池が8.4Vとかなのに、どうやって15Vも用意せいちゅーんだって話です。

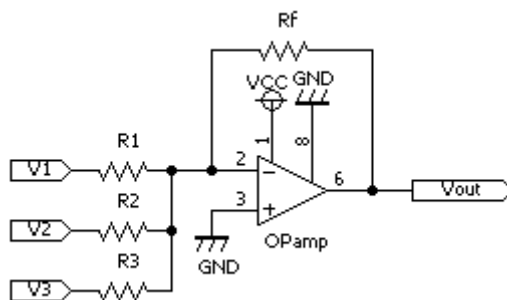


図 11:加算回路

そこで、 R_f/R_1 部分が生きてきます。例えばこれを $1/5$ になるようにすればどうでしょう？ ($R_1=47K^2, R_2=10K$ とかにすると大体 5 分の 1 になりますね。) 音 1～音 3 のそれぞれ単体で鳴らした時の音量は 5 分の 1 になりますが、音 1～3 が全て 5 V の時でも、出力は $1/5 \times (5 + 5 + 5) = 3 V$ なので、先ほどの問題は起こりませんね。しかし、5 音以上鳴らそうとすると、正電源電圧である 5 V 以上を出力しなければならないので、和音の一部が理論とはかけはなれた波形になり、和音がおかしく聞こえる（ひずんで聞こえる）ことになります。これが、1 章で紹介した「ひずみ」の原因です。和音をひずまず、きれいに鳴らそうと思えば、 R_f/R_1 をさらに小さくすればよいのですが、それでは、音をそれぞれ鳴らした時の音量が小さくなってしまいます。しかし、3 和音以上和音をならさないだろうということで余裕を持って図 1 の回路では $1/5$ に設定しています。 R_f の値をいじって、小さくすればたくさんの音をひずみなしで、鳴らせるけど、音単体の音量は小さくなる。逆に大きくすれば和音がひずむようになるが、音単体の音量は大きくなるということを、実際に図 1 の回路で確かめてみると面白いかもしれません。さらに、 $R_1 \sim R_3$ の値を変えることによって、特定の音を強調することも出来ます。実験してみたら面白いかも？音を強調するには $R_1 \sim R_3$ をどういじればよいかは・・・自分で考えてみてください。式(7)あたりをよーくみなおすとすぐ分かるはずですよ。

さて、脱線してしまいましたが、この回路、都合のいいことばかりではありません。このままではミキサー回路としては使えないのです。式(8)の右辺を見てください。マイナスがついています。入力に 0 V と 5 V をいったりきたりする交流（厳密言えば、振幅が 2.5 V の交流に 2.5 V のバイアスがかかったもの）です。このままでは、 V_{out} は常時 0 V 以下になってしまいます。負電源を -5V が使えるオペアンプを使えば、このままでも良いのですが、-5V を作る専用の回路をつくらにやなりません。で、これが面倒です。なので、負電源は 0 V にしたいです。そこで、この足し算という都合のいい特性を生かしつつ、負電源が 0 V でも使える工夫をしなければなりません。では、次節でその工夫を紹介しましょう。

3.5 加算回路を使ったミキサー回路

加算回路で何とか足し算できそうだけど、あと一歩及ばずというところまで来ました。ここで、どのような足し算を行えば、正電源 5 V、負電源 0 V でも、音の足し合わせが出来るようになるのか考えてみましょう。

今回作成した方形波回路から出力される波形は図 4 右や図 12, 図 13 のように、平均値が 0 V と 5 V の中間の 2.5 V で、振幅³が 2.5 V ある波です。これに対して「足し合わせる」だけでは図 16 のように、オペアンプの負電源と正電源を -10V～10V の範囲にする必要があります。今回使うオペアンプの負電源と正電源の範囲は 0 V～5 V なので、「足し合わせた結果」を 0 V～5 V に収める必要があります、それをどうやって実現するかを考えます。結論を言ってしまうと、まず、2.5 V を中央として、音の振幅を減らします。(図 14, 図 15) そして、2.5 V を中心部と見て、足し算を行うと、図 17 のように、確かに音を足すことも、0 V～5 V に収めることができます。音の振幅を減らすことは、すでに前節で述べたようにできていますから、後はいかにして、「2.5 V を中央とした」演算を行うかがポイントです。

² $R_f/R_1=1/5$ にするためには、 R_2 を 10K にしたら R_1 は 50K なんじゃないの？と思う方もいらっしゃるかと思います。しかし 50KΩ の抵抗は普通の電子工作やさんには売られていないので、その値に近い 47K の値をここでは挙げました。

³ 振幅とは、交流の波の平均値から最大値までの幅のことです。

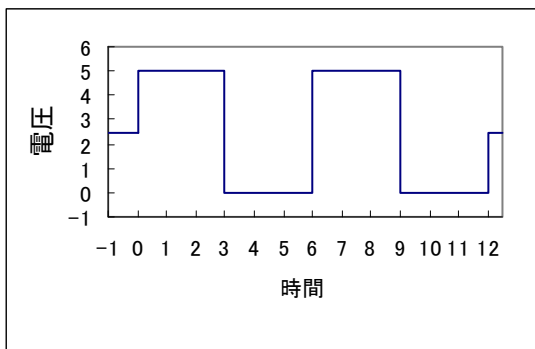


図 12: 方形波回路からの出力その 1

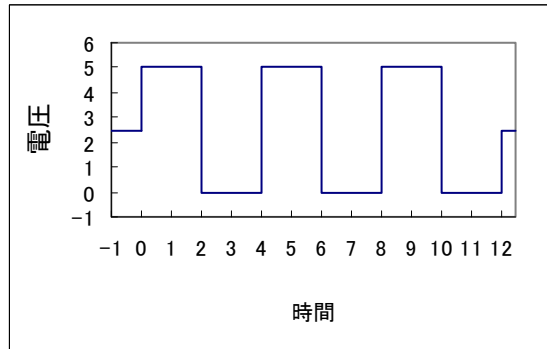


図 13: 方形波回路からの出力その 2

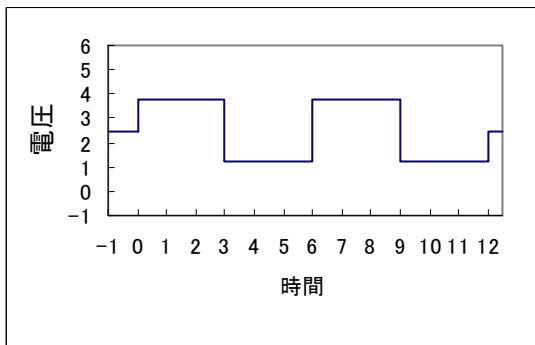


図 14: 出力その 1 の振幅を半分にした図

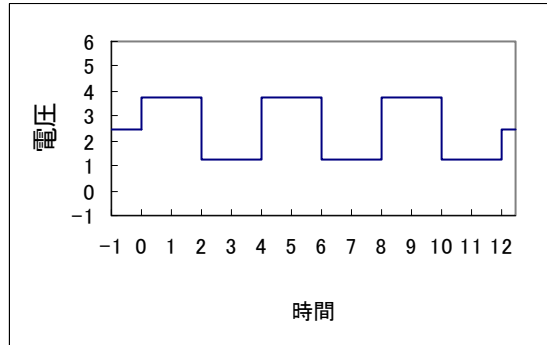


図 15: 出力その 2 の振幅を半分にした図

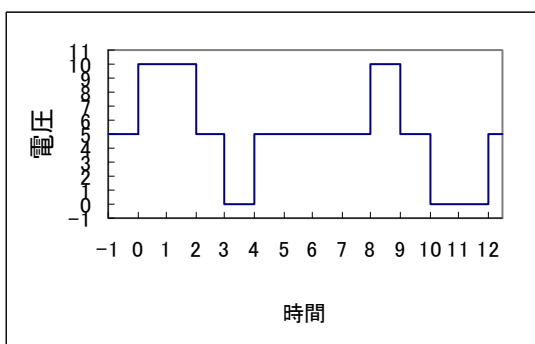


図 16: 単純に加算のみを行った場合の図

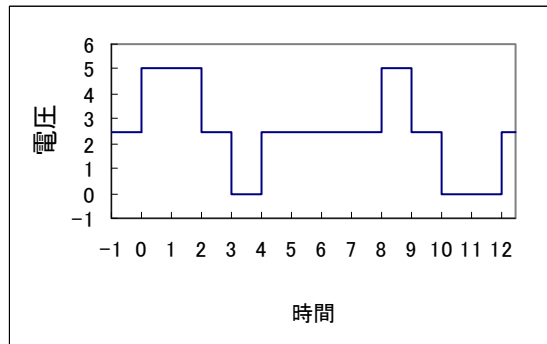


図 17: 0V～5V に収まるよう工夫した場合の図

このような、「2.5V 部分を中心として加算演算が行われるようにする」には図 11 の加算回路をどのように工夫したらいいのかというと、+入力端子部に細工をすることで、実現ができます。それが、図 18 の回路です。本当に「2.5V 部分を中心として加算演算が行われる」ようになっているか、数式で確認してみましょう。相変わらず使う式はオームの法則 $E = IR$ と、オペアンプの基本的な式の 2 つだけです。しかも、よく見ると、加算回路の関係の導出とほとんど同じです。では、式を見てみてください。

$R1$ に流れる電流と、 $R2$ に流れる電流、 $R3$ に流れる電流の和は、
 Rf に流れる電流と等しいので、

$$\frac{(V1 - V_-)}{R1} + \frac{(V2 - V_-)}{R2} + \frac{(V3 - V_-)}{R3} = \frac{(V_- - Vout)}{Rf} \quad \dots \text{式(7)}$$

オペアンプの基本的な式より、

$$(V_+ - V_-)\alpha = Vout$$

$$\text{変形して、} V_- = V_+ - \frac{Vout}{\alpha}$$

よって、 $V_- = V_+$ であり、これを式(7)に代入して、

$$\frac{(V1 - V_+)}{R1} + \frac{(V2 - V_+)}{R2} + \frac{(V3 - V_+)}{R3} = -\frac{(Vout - V_+)}{Rf}$$

特に、 $R1$ と $R2$ と $R3$ が等しい場合は

$$Vout - V_+ = -\frac{Rf}{R1}((V1 - V_+) + (V2 - V_+) + (V3 - V_+)) \quad \dots \text{式(9)}$$

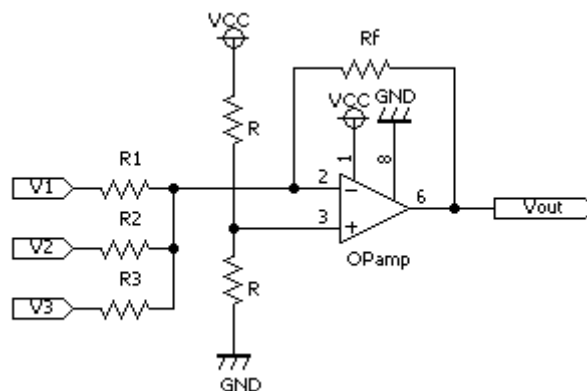


図 18:加算回路を改良した回路

最後に出てきた式を良く見てみると、全ての演算が V_+ だけ並行移動した世界で行われていることがわかります。つまり、 V_+ を2.5Vに設定すれば、前述した「2.5Vを中心とした」演算が行えることがわかります。ですので、VCCとGNDで同値の抵抗を使って分圧をしてあげること、オペアンプの+入力端子に2.5Vの電圧をかけているわけです。

以上のようにして、音の足し合わせが、負電源が0V、正電源が5Vのオペアンプで出来るようになりました。出力される波形は2.5Vを中心とした交流、つまり平均値が0の交流+2.5Vの直流という波形なので、そのままスピーカーにつなぐと、2.5Vの直流成分がスピーカーのコイルを焼ききってしまいます。ですので、図1のように、オペアンプの出力先に、値の大きめのコンデンサをかますことで、「コンデンサは直流を通さず交流のみ通す」性質を使い、スピーカーに「純粋な」交流を流すことで、音を鳴らします。

4.参考文献

本原稿を書くにあたって参考にした文献を紹介します。

[1]超初心者向け電子工作入門講座です。本原稿は2章「9. 桁がずいぶん違うぞ」ページ程度までは基礎知識として、理解していることを前提に理論を書かれていますので、本原稿の意味がまったく分からなかった方は、一通り読んでみることをお勧めします。[2]はAVRを勉強する人も是非読んでみるべきだと思います。マイコンの基本的な知識が分かりやすく書いてあります。PICやAVRに限らず、デジタル回路入門書としても非常にお勧めです。[3]、[4]、[5]はオペアンプの他回路例等、オペアンプについてさらに詳しく紹介してあります。オペアンプに興味を持ち、もうすこし詳しく知りたい方は見るとよいと思います。なお、[4]、[5]は中学生には少し難しい内容かもしれません。[6]、[7]、[8]は方形波出力回路を記すにあたって参考にしました。[7]、[8]は難しく、かなり真剣に読まないで理解しづらいですが、 $E = IR$ と基本的な式だけで、トランジスタの動作を厳密に理解することが出来るようになります。ですので、がんばって読む価値はあります。

[1]智玄 電子技術の本を読む前に読む本 (ver.1)

<http://www.chigen.ne.jp/elebook1/p000.html> 2007/07/30 アクセス

[2]fitDESIGN 超初心者向けPICハードウェア・マニュアル

<http://www001.upp.so-net.ne.jp/FITDESIGN/manual.htm> 2007/07/30 アクセス

[3]後閑哲也 電子工作の実験室 <http://www.picfun.com/partops.html> 2007/7/30 アクセス

[4]ひなたふ ひなたふ電子情報

<http://www.nahitech.com/nahitafu/mame/mame3/mame3.html> 2007/7/30 アクセス

[5]山形孝雄(2000)トランジスタ技術 SPECIAL71 CQ 出版社

[6]マスカット 水位報知器 http://zea.jp/audio/fbeep/frob_01.htm 2007/07/30 アクセス

[7]鈴木雅臣(1991) 定本トランジスタ回路の設計 CQ出版社

[8]鈴木雅臣(1992) 定本続トランジスタ回路の設計 CQ出版社