

OP アンプ回路に「はまりすぎる」重ね合わせの理…… それを「ディファレンス・アンプ」で考えてみる

著者：石井 聡

はじめに

今回の技術ノートは回路の基本に戻って、「重ね合わせの理 (Superposition Theorem)」という基本的な定理を、OP アンプ回路でどのように活用するかという視点で進めていこうと思います。

ポロディン：歌劇「イーゴリ公」より「韃靼人の踊り」

私は、TV ドラマは見ません。それこそ「琴線に触れない」からなのか、それとも「事実ではないから興味がない」からなのか。ともあれそのため、飲み会に行っても、女性陣との共通の話題がありません (笑)。

しかし、それでもたったひとつだけ、これまでの人生の中で、超**はまった**ドラマがあります。それは「のだめカンタービレ」。結局 DVD フルセットを購入してしまいました。つづいてドラマ終了後の翌年始めに TV で放映された特番、「ヨーロッパ編」も、その DVD を購入してしまいました！

私は 25 年ほど前からクラシックを聞くようになり、たまにコンサート・ホールに行く (図 1)、ファンといえるほどでもないファンという感じです。だから「のだめカンタービレ」にはまったのかもしれないし、シリアスとギャグが絶妙にミックスされたストーリー展開に魅了されたのかもしれないし、実は不思議なラブストーリーに惹かれたのかもしれない (笑)。

このドラマの中で忘れられない美しい旋律の曲がありました。それは「韃靼 (だつたん) 人の踊り」。この曲以外にも「のだめカンタービレ」はそれぞれの選曲がすばらしく、クラシック・ファンも感動するものが多数ありました。

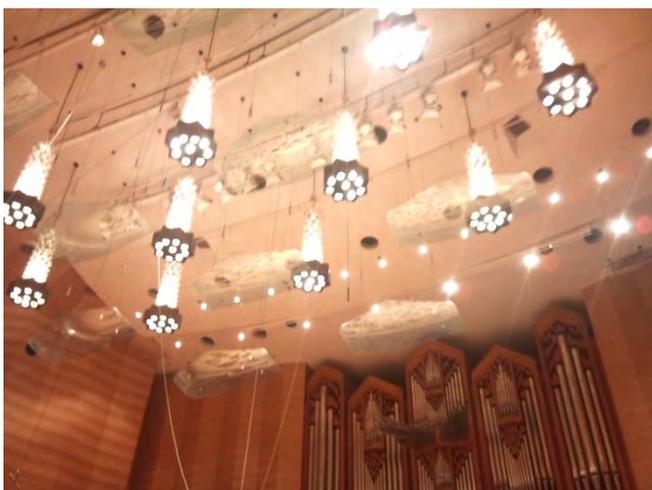


図 1. たまに行くクラシック・コンサート・ホール
(サントリーホールの天井の音響反射板)

この「韃靼人の踊り」は、その源をネットでサーチしていくと本当に迷路に迷い込むような話題になってきます。韃靼人とはタタール人のことを指すようですが、そのタタール人は中国、ロシアなどでそれぞれ「異なる意味」をもつようです[1]。

「韃靼」自体は、中国ではモンゴルの一部を指すようですが、ロシアでの「タタール」はより広域であり、さらにそれはトルコ系を指す場合と、モンゴルを指す場合があるようです。結局「韃靼／タタール」をいろいろ調べていくなかでは、どうも判然としません。

「韃靼人の踊り」という曲に関しては、原題は「ポロヴェツ (ポロヴェッツ) 人の踊り」というようで[2]、曲名を日本語に翻訳するときに「韃靼」という言葉を使ったようです。

さらに「ポロヴェツ人」でサーチすると、Wikipedia の「キプチャク」というページに到達します[3]。ここでの説明には、「ウクライナからカザフスタンの広域草原地帯に存在した遊牧民族のことを、ルーシという部族が『ポロヴェツ人』と呼ぶ」とあります。「ウクライナからカザフスタン…」これって相当な距離がありますよね。

それからこれらでもよい話ですが、「韃靼そば」という苦みの強いそばがあるそうですね。これもモンゴルの遊牧民族 (タタール人) が好んだことから、名づけられたとされるようです[4, 5]。

何がしたいの？「あ、すいません…重ね合わせ」です

あ、すいません…。重ね合わせの理を説明するのに、オーケストラをたとえの例に出そうと思い、「そういえば…」という感じで「韃靼人の踊り」についてのヨタ話をしてしまいました (汗)。また「**はまる**」というのを、この技術ノートのタイトルとひっかけてみました (笑)。

それでは本題に参りましょう…。

電子回路で重要な定理「重ね合わせの理」をイメージする

電気回路理論 (という大げさですが) で「重ね合わせの理」というものがあります。電気工学科・電気科や電子工学科・電子科で電気回路理論を学んだひと、また Web などでも電気回路理論を学んだひとは、「重ね合わせの理」はほぼ間違いなく聞いたことがあるものでしょう。しかし実回路での必要性がイメージできずに、「そのまま置き去り」というひとも多いのではないかと思います。



図 2. オーケストラはそれぞれソロで演奏しているものが重なり合って全体の曲として聞こえている

その「重ね合わせの理」は、電子回路、とくに OP アンプ回路あたりを設計したり解析したりするとき、「テブナンの定理（これも基本的かつ重要な定理）」とあわせて便利に使える、非常に重要な定理なのです。

オーケストラで重ね合わせの理をイメージする

「重ね合わせの理」は非常にアタリマエのことをいっています。たとえば図 2 のようなオーケストラの演奏を考えてみましょう。ひとつひとつの楽器は、それぞれソロで演奏していますが、それらが重なり合って全体のオーケストラの音として聞こえている…、ということは直感的に理解できると思います。

「重ね合わせの理」的にいい直してみると、ひとつの楽器がソロで演奏され他の全ての楽器が休止している状態、それが全ての楽器でそれぞれソロとして演奏され、（論理的にはおかしい表現ですが）全てのソロ演奏を足し合わせる、つまり「重ね合わせ」すれば、全体のオーケストラの音として聞こえるわけです。これを電気的におこなうものが、電子回路のうごきであり、重ね合わせの理となります。

重ね合わせの理とは

電気回路理論で重ね合わせの理は、Wikipedia の記事[6]を引用すると、図 3 のように説明されます。

『電源を複数持つ線型回路において、任意点の電流および任意点間の電圧は、それぞれの電源が単独に存在していた場合の和に等しい。なお、電圧源・電流源をそれぞれ取り除く場合は、前者は短絡、後者は開放したものとして考える。』

もう少し簡単にいい直すと、

- ① 電圧源／電流源を 1 個ずつ取り付け
- ② 取り付けた以外の電圧源はその点をショート
- ③ 取り付けた以外の電流源はその点を開放
- ④ これで各点の電流、電圧をそれぞれ測定する
- ⑤ すべての電圧源／電流源を取り付けたときは、それぞれの測定値の和に等しい

というものです。結局、Wikipedia の記事と同じことをいっているのですが…（汗）。なお一般的な電子回路という視点では、電流源を考慮することは稀ですので、上記の②だけを考慮すればよいといえるでしょう。

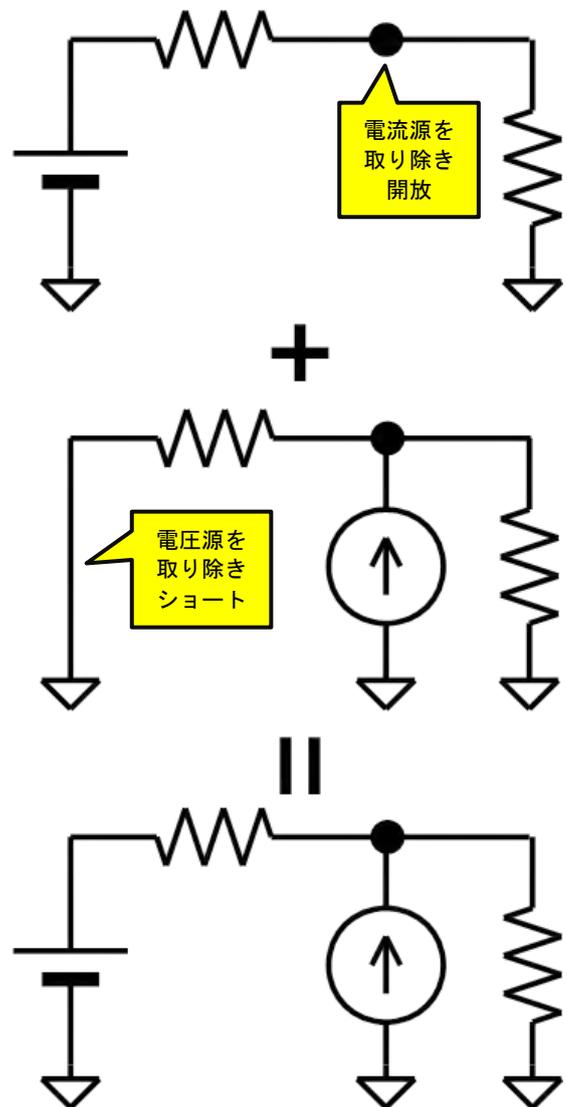


図 3. 重ね合わせの理の基本的な考え方

中心電圧をオフセットさせるにはどうすればよいか

図 4 のようなレベル変換+電圧オフセットをおこないたいとします。入力信号の交流成分の振幅は 1Vp-p で中心電圧は 1V。この振幅を 4 倍（4Vp-p）にして、中心電圧を+2.5V にしたいとします。

思えば、15 年近く前になるかと思いますが、私はこのレベル変換をおこなうべく、図 5 の回路の抵抗値と電圧値を算出しようと「あがいて」いました。どうもうまく式を立てることができなかったのです。もう少しいうと、以下に示すような洞察ができずに、適切なモデル化ができなかったのです。当時は（当然ながら）重ね合わせの理は知ってはいましたが、そのときにそれが使えることに気がつかなかったのです。

それからだいぶ経った後に、「そうだ、重ね合わせの理だ」と気がつきました。

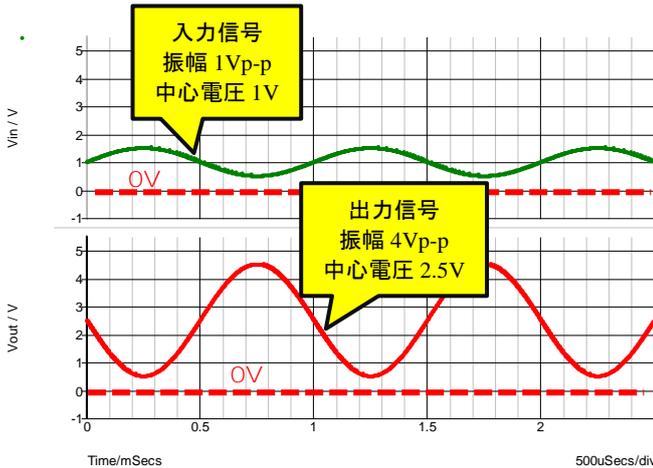


図 4. こんなレベル変換+電圧オフセットをおこないたい

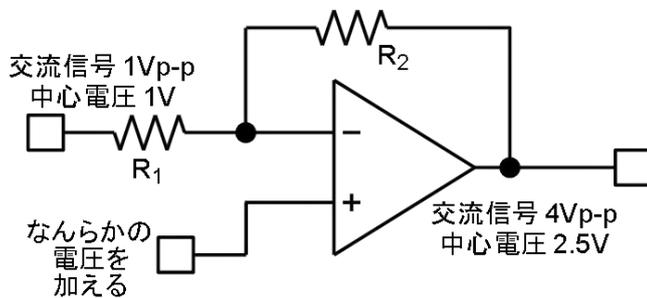


図 5. 図 4 の動作を実現する OP アンプ回路

重ね合わせの理を使ってまずは入力信号の増幅率を考える

さて図 5 の回路で、少なくとも交流成分の振幅を 4 倍 (4Vp-p) にしたいのであれば、 R_1 と R_2 の比を 1 対 4 にすればよいだろうことは最初に気がつくでしょう。つまり

$$A_{INV} = -\frac{R_2}{R_1} = -\frac{4k}{1k} = -4$$

この考え方は、実は重ねあわせの理を応用しており、もともとの入力信号を、その交流成分 (1Vp-p) と直流 (+1V) に分けているのです。1Vp-p の交流成分だけが回路に加わっていることでまず考えているわけです。

重ね合わせの理で重要なポイントは、「その他の電圧源は電圧ゼロ V」だと考えることです。図 5 の回路ではとくに、非反転入力端子の電圧をゼロ V にすることが重要です。

しかしここでの問題は、中心電圧つまり直流成分を +1V から +2.5V にシフトするには「非反転入力端子に何 V を加えればよいか？」ということです。ここに重ね合わせの理が「**はまりすぎ**る」ように活用できます。詳しくは次の節で説明します。

ところで回路理論では電圧源を「抵抗ゼロの素子」として考えます。これも回路理論でよく出てくる基本的な決まりごとですが、重ねあわせの理でもこの考え方が用いられています。重ねあわせの理では「電圧源を取り除いた箇所はショート」としますが、「その端子間がショートされた状態」というのは、ゼロ V の電圧源が接続されたのと同じなわけです。まさしく基本は同じなわけです。

なお重ね合わせの理として取り除くものが電流源なら、そのポイントは開放です (図 3 のとおり)。

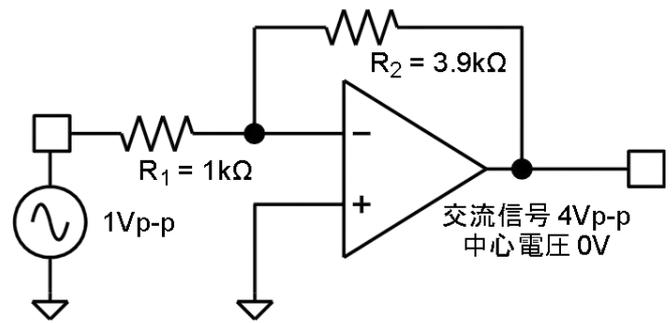


図 6. 図 5 の回路で重ね合わせの理を基本に 1Vp-p の交流成分だけで考える

実際に回路を製作して 1Vp-p の交流成分だけを加えてみる

「1Vp-p の交流成分だけ」を考えれば、図 5 の回路を図 6 のように考えることができます。この図 5 / 図 6 に相当する回路を、手持ちの OP アンプ AD8666 を使って実際に製作してみました。この AD8666 とは

AD8666: オペアンプ, デュアル, 16V 4MHz, レール to レール出力

<http://www.analog.com/jp/ad8666>

【概要】

AD866x ファミリーは、最大 16V の電源電圧と拡張動作範囲を特長とする単電源動作の低ノイズ、レール to レール出力アンプです。低入力バイアス電流、広信号帯域幅、低入力電圧 / 電流ノイズといった特長も備えています。オフセット電圧を低くしたい場合は、AD8661 / AD8662 / AD8664 ファミリーを選択してください。低オフセット、超低入力バイアス電流、広い電源電圧範囲を併せもつこのアンプは、通常は高価な JFET アンプが利用されている、コストに敏感な各種低価格アプリケーションに最適です。

(後略)

最近の技術ノートは理論ネタが多かったので、**今回は実際に回路を製作して実動作で確認しようと思ったわけです** (笑)。抵抗は 3.9kΩ と 1kΩ でほぼマイナス 4 倍の増幅率になっています。

図 6 の実際の回路に、1Vp-p の交流成分だけを加えてみると、図 7 のように、たしかにほぼ 4Vp-p に増幅された信号が得られています。図 7 の上側の波形が入力の 1Vp-p の信号、下側の波形が出力の 4Vp-p の信号です。これはアタリマエな回路動作ですね。

実際の回路にプラス 1V の直流電圧だけを加えてみる

つづいてこの回路に、プラス 1V の直流電圧「だけ」を加えてみます。このとき図 5 の回路は図 8 のように考えることができます。

製作した AD8666 の OP アンプ回路に、図 8 に相当する +1V の直流成分だけを加えてみると、図 9 のようにたしかに -4V の電圧が得られています。図 9 の上側の波形が入力の +1V、下側の波形が出力の -4V です。反転増幅なので当然ながら「マイナス」4V が得られています。

目的としてはこの -4V が、目的の中心電圧である +2.5V になるように、図 5 の回路の非反転入力端子に電圧を加えればよいわけです。そうするとここで「非反転入力端子に何 V を加えればよいのか？」と最初の話しに戻るわけです。

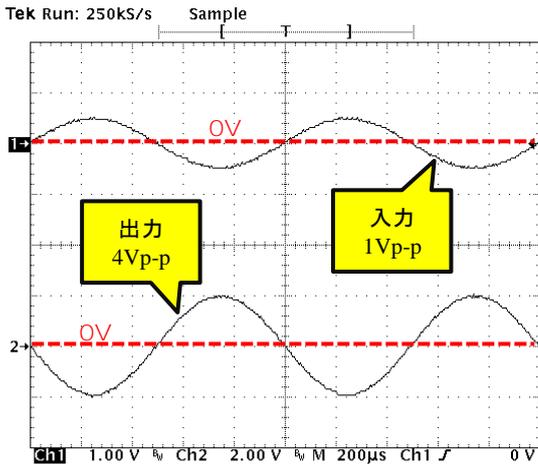


図 7. 図 5 の回路に 1Vp-p の交流成分「のみ」が加わったときの波形 (上：入力、下：出力)

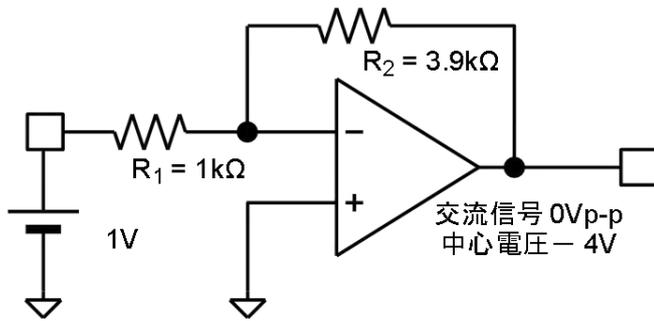


図 8. 図 5 の回路で重ね合わせの理を基本に 1V の直流成分だけで考える

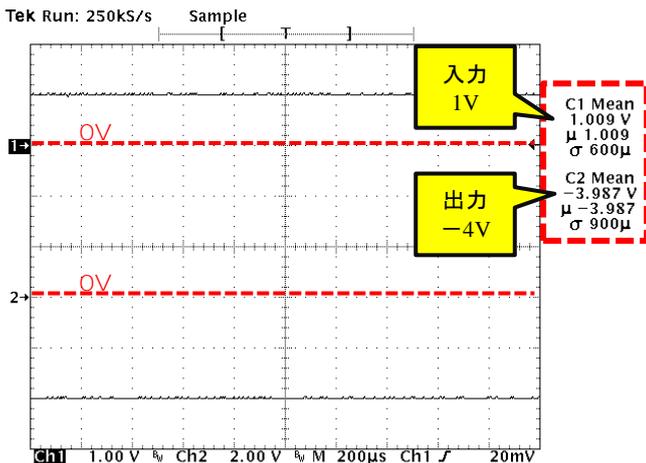


図 9. 図 5 の回路に +1V の直流成分「のみ」が加わったときの波形 (上：入力、下：出力)

非反転入力端子に何 V を加えればよいのか

この「非反転入力端子に何 V を加えればよいのか？」というのが、重ね合わせの理の真骨頂といえるでしょう。もともとの中心電圧であるプラス 1V を入力に加えて得られる出力電圧レベル -4V が、「非反転入力端子にも電圧を加える」ことによって +2.5V になるようにすればよいわけですから、この変化量は +6.5V となります。

つまり非反転入力端子になんらかのプラス極性の電圧を加えて、これが非反転増幅 (その増幅率がどれほどかは続いて考えると) された結果が +6.5V となればよいわけですね。

非反転入力端子に加わる直流電圧だけを考えてみる

ここでも重ね合わせの理を用います。図 5 において非反転入力に加える電圧以外の他の電圧源は電圧ゼロ V だと考えます。ここで非反転入力になんらかの電圧を加え、出力が +6.5V になる条件を考えます。

この状態の回路は図 10 のようになります。この回路はホントに **基本的な非反転増幅回路** ですね。

抵抗値は $R_1 = 1k\Omega$ 、 $R_2 = 3.9k\Omega$ で、出力を +6.5V とするための入力電圧を V_{IN} とすれば、

$$6.5V = A_{NONINV} \cdot V_{IN} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \cdot V_{IN}$$

$$= \left(1 + \frac{3.9k}{1k}\right) \cdot V_{IN} \cong 5 \cdot V_{IN}$$

となり (3.9/1 を 4 として計算しています)、

$$V_{IN} = \frac{6.5}{5} = 1.3V$$

と計算できます。ここで A_{NONINV} はこの回路の非反転増幅率で

$$A_{NONINV} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)$$

つまり +6.5V の出力を得るためには、回路を **非反転増幅回路と** **考え**、非反転入力に 1.3V を加えればよいことが分かります。

これと、反転入力に加わる +1V が出力に現れる -4V とが「重ね合わせり」、-4V + 6.5V = 2.5V が得られることになるわけですね。

実際の回路で重ね合わせを確認してみる

図 6 の回路を修正して、図 10 にしてみました。反転入力端子に接続されている R_1 の入力はグラウンドに落として、ゼロ V としてあります。非反転入力に 1.3V を加えたときの波形を図 11 に示します。たしかに出力が +6.5V になっています。

つづいてこのままで、 R_1 の入力に、本題のお題である「中心電圧 1V の交流 1Vp-p」を加えてみます。いよいよ、これこそ「**重ね合わせ**」ですね。波形を図 12 に示します。得られた出力は 4Vp-p で目的の振幅であり、中心電圧もめでたく +2.5V になっていることが分かります。

ところで図 5 の回路では、交流成分の極性が逆転してしまいます。これが嫌な場合は、この回路の前に増幅率マイナス 1 倍の反転増幅回路を挿入し、非反転入力の電圧を計算しなおします。

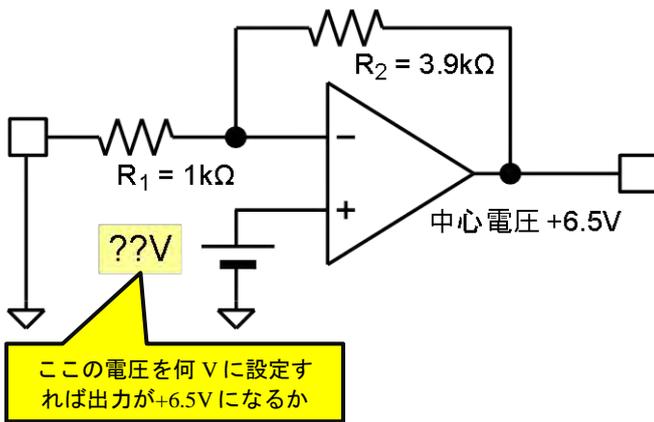


図 10. 非反転増幅回路で出力が+6.5V になるときの入力電圧は？

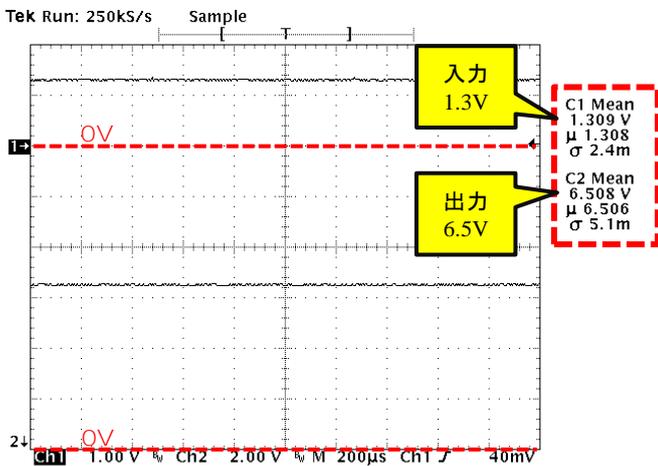


図 11. 図 10 の状態に相当する条件での実回路の波形（上：入力、下：出力）

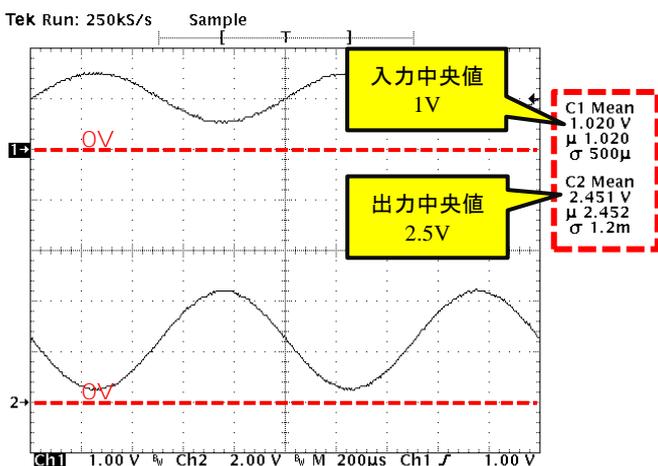
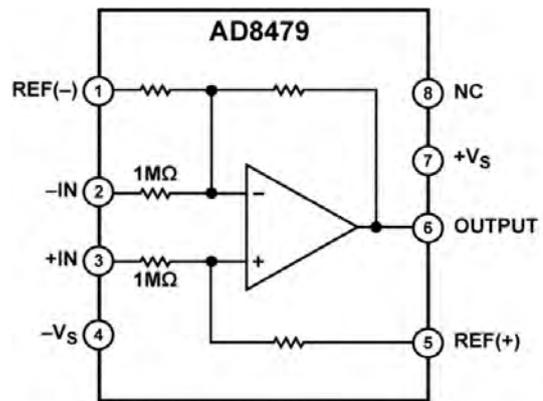


図 12. 全ての入力信号を加えたとき（出力が+2.5V を中心とするように非反転入力端子に+1.3V を加えたとき）の波形（上：入力、下：出力）



NOTES
1. NC = NO CONNECT. DO NOT CONNECT TO THIS PIN.

図 13. ディファレンス・アンプの一例 AD8479 のコンセプト図

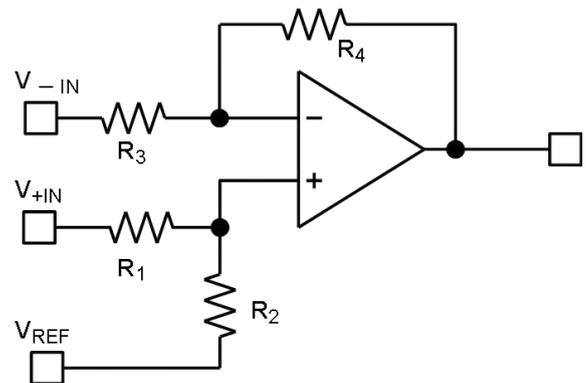


図 14. ディファレンス・アンプの接続

ディファレンス・アンプ（差電圧アンプ）というアンプがある

アナログ・デバイスでの製品カテゴリーのなかに「**ディファレンス・アンプ** (Difference Amp; 差電圧アンプ)」というものがああります。ディファレンス・アンプのカテゴリページに記載してある説明文を引用してみますと、

ディファレンス・アンプは差動信号を測定するために開発された特殊なアンプで、減算器とも呼ばれます。ディファレンス・アンプの大きな特長は、同相ノイズ除去 (Common-Mode Rejection: CMR) と呼ばれる方法で不要な同相信号を除去できることです。他のほとんどのタイプのアンプと異なり、ディファレンス・アンプは一般的に電源レールを超える電圧を測定でき、大きな DC または AC 同相電圧が存在するアプリケーションに使われます。アナログ・デバイスは、低歪み、低消費電力、あるいは高電圧などの性能を実現できるように最適化された、さまざまなディファレンス・アンプを提供しています。

というものです。文章だけだと理解しづらいと思いますので、そのひとつ **AD8479** という製品のコンセプト図を図 13 にご紹介しておきます。この接続は電子回路分野の一部では「差動アンプ」と紹介されていますが、アナログ・デバイスでは（基本

的に) 出力も差動出力になっているものを「差動アンプ」と呼び、反転入力側と非反転入力側が対称にバランスしている構成が主です。図 13 のような構成は、それらとは別モノとして「ディファレンス・アンプ」と呼んでいます。ディファレンス・アンプはシングルエンド出力になっていることもポイントです。

ディファレンス・アンプを重ね合わせの理の視点で考える

図 13 (AD8479) にも紹介したディファレンス・アンプは、図 14 のような基本回路で、「ディファレンス (Difference; 差分)」のとおり、入力端子間の差分量、差電圧を検出できるものです。増幅率は抵抗の比で決まりますが、これは以降で重ね合わせの理の応用として詳しく説明していきます。

また REF 入力端子というものもあり、ここに加える電圧で出力電圧にオフセットをかけることができます。

具体的に重ね合わせの理を使ってみる

ディファレンス・アンプの入力間の差電圧が出力に現れるしくみも、重ね合わせの理を使えば、簡単かつ適切に解析できます。まずはグラウンド基準で各入力端子の電圧を考え、非反転入力端子 V_{+IN} [V]、反転入力端子 V_{-IN} [V] としてみます。REF 入力端子の電圧も V_{REF} [V] としてみます。これらの電圧値に相当する記号も図 14 に表記しています。

前半の話と同じストーリー展開ですが、重ねあわせの理をもちいて、まずは図 14 の回路の反転入力端子に電圧 V_{-IN} だけが加わっていることを考えます。繰り返しになりますが、重ね合わせの理で考えるときの重要なポイントは、他の電圧源は電圧ゼロ V だと考えることです (ショート状態と同じです。なお電流源なら開放です)。つまり非反転入力端子の電圧 V_{+IN} と REF 入力端子の電圧 V_{REF} はゼロ V にします。

それでは実際に計算してみましょう。 V_{-IN} のみが加わっている状態で出力に現れる電圧 V_{-O} は

$$V_{-O} = -\frac{R_4}{R_3} V_{-IN} = -\frac{3.9k}{1k} V_{-IN} = -3.9V_{-IN}$$

です。出力の極性が反転しています。また数字は抵抗に $R_3 = 1k\Omega$ と $R_4 = 3.9k\Omega$ が使用された一例です。さきほどは「ざっくり」と -4 倍としてしまいましたが、ここでは精度が重要なので真面目に 3.9 として計算しています (笑)。

つづいて V_{+IN} のみが加わっている状態では (他の電圧源は取り除き、ショートして)、まず OP アンプの非反転入力端子では V_{+IN} が抵抗 R_1 と R_2 で分圧され

$$\frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{+IN}$$

これが非反転増幅回路の帰還抵抗 R_3 と R_4 で

$$\frac{R_4}{R_3} + 1$$

倍に増幅されます。これにより出力に現れる電圧 V_{+O} は

$$V_{+O} = \left(\frac{R_4}{R_3} + 1\right) \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{+IN} = \frac{R_4 + R_3}{R_3} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{+IN}$$

です。ディファレンス・アンプとしては

$$R_1 = R_3, R_2 = R_4$$

として構成しますので、

$$V_{+O} = \frac{R_4 + R_3}{R_3} \cdot \frac{R_4}{R_3 + R_4} V_{+IN} = \frac{R_4}{R_3} V_{+IN}$$

ここに $R_3 = R_1 = 1k\Omega$ と $R_4 = R_2 = 3.9k\Omega$ の抵抗が使用されれば、出力には反転入力に V_{-IN} が加わったときと同じ増幅率 $= 3.9$ 、かつ極性が反対の (入出力間が反転しない) 電圧 V_{+O} が得られます。

このふたつ V_{+O} と V_{-O} とが重ねあわせると、

$$V_{+O} + V_{-O} = \frac{R_4}{R_3} V_{+IN} - \frac{R_4}{R_3} V_{-IN} = \frac{R_4}{R_3} (V_{+IN} - V_{-IN})$$

となり、入力端子間の差電圧 (Difference) が得られることがわかります。答えは「差電圧の 3.9 倍 (さきの抵抗値の場合)」です。なるほど、ここでも「重ね合わせの理」ですね。

REF 端子も重ね合わせの理を使ってみる

つづいて REF 端子の影響を見てみましょう。重ね合わせの理の考え方から、OP アンプの REF 端子にのみ V_{REF} が加わっているとします。他の電圧源は取り除き、ショートします。REF 端子の電圧 V_{REF} は抵抗 R_1 と R_2 で分圧されますが、 V_{+IN} の場合と異なり、 R_1 の両端の電圧として電圧値が決まります。そのため、

$$\frac{R_1}{R_1 + R_2} V_{REF}$$

これが非反転増幅回路の帰還抵抗 R_3 と R_4 で

$$\frac{R_4}{R_3} + 1$$

倍に増幅されます。これにより出力に現れる電圧 V_{REFO} は

$$V_{REFO} = \left(\frac{R_4}{R_3} + 1\right) \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_{REF} = \frac{R_4 + R_3}{R_3} \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_{REF}$$

です。さきと同じでディファレンス・アンプとしては

$$R_1 = R_3, R_2 = R_4$$

として構成しますので、

$$V_{REFO} = \frac{R_4 + R_3}{R_3} \cdot \frac{R_3}{R_3 + R_4} V_{REF} = \frac{R_3}{R_3} V_{REF} = V_{REF}$$

となり、出力には REF 端子の電圧 V_{REF} がそのまま得られることがわかります。結局これが「重ね合わせの理」で、他の電圧源ごとから得られる出力電圧と足し算されて、実際の出力が得られるわけです。

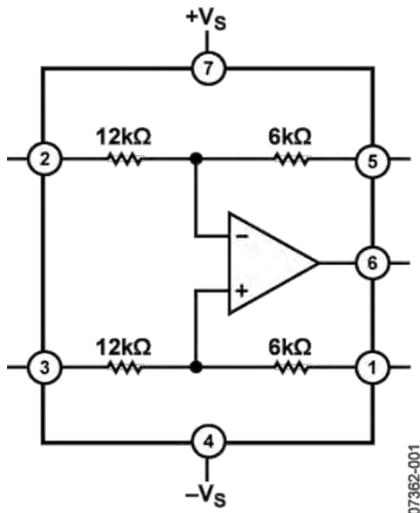


図 15. ちょっと面白い構成ができるディファレンス・アンプ AD8274 のコンセプト図

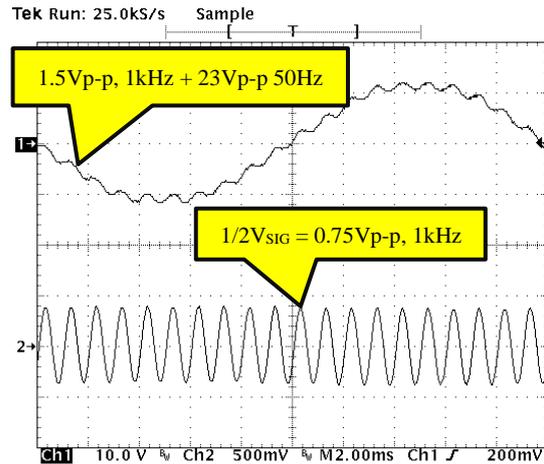


図 17. AD8274 を用いた実験回路で得られた波形

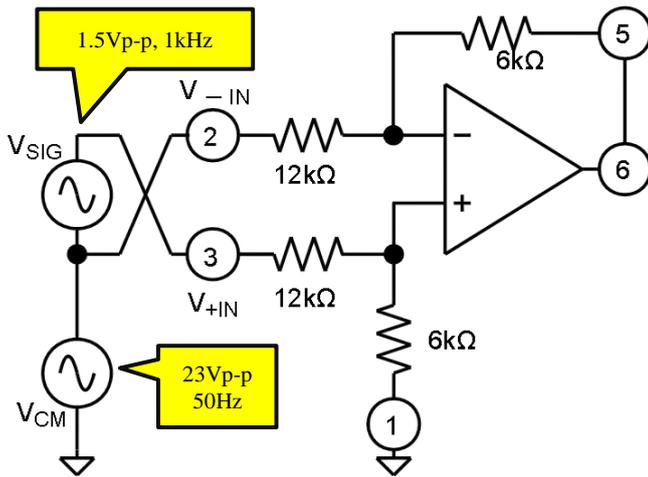


図 16. AD8274 を用いた実験回路 (G = 1/2)

この回路で V_{CM} は (よくディファレンス・アンプが応用される例としての) 「不要信号」に相当します。そこで誘導による不要信号の原因になることの多い商用電源 100V を、トランスで 23Vp-p に電圧降圧して、 V_{CM} として利用してみました。「この回路で商用電源の誘導がキャンセルできます」というイメージです。この話題は TNJ-024 に「コモンモード・ノイズ」というかたちで説明されているので、ご参考にしてください。

さて実験により得られた波形を図 17 に示します。上が入力 2 番ピンの $V_{SIG} + V_{CM}$ 、下が 6 番ピン (出力) の信号です。 V_{SIG} の 1.5Vp-p の振幅が 1/2 で出力に現れ、23V の V_{CM} はキャンセルされて出力に出ていません。この結果から回路がここまでの説明のとおり動いていることがわかりますね。

実は各端子の駆動には注意が必要

信号源側から見ると入力抵抗が異なっているので駆動には注意が必要

図 14 や図 16 の回路で注意すべき点は、 V_{+IN} 入力と V_{-IN} 入力をそれぞれ電圧源 (信号源) 側から見ると、入力抵抗 (入力インピーダンス) が異なっていることです。信号源インピーダンスが大きい場合とか、信号源が差動出力かつアンバランスになっている場合に問題が生じる可能性があります。

図 14 で考えると V_{+IN} 入力を見た入力抵抗 R_{+IN} は

$$R_{+IN} = R_1 + R_2$$

となり、図 16 の AD8276 の回路では 18kΩ です。

いっぽう V_{-IN} 入力を見た入力抵抗 R_{-IN} は

$$R_{-IN} = R_3$$

で、図 16 の回路では 12kΩ です。それぞれ大きさが違いますね。 $R_{-IN} = R_3$ として計算できるのは、OP アンプの非反転入力端子の電圧がゼロだとすると、フィードバックでできる仮想シヨートにより反転入力端子の電圧もゼロとなり、 V_{-IN} はすべて R_3 に加わると考えることができるからです。

ピンを切り替えてゲインを切り替えられるディファレンス・アンプ AD8274 で実験してみる

面白い製品として図 15 の AD8274 というものがあります。これは入力側に 12kΩ を配置すれば 1/2 倍のゲイン、逆に 6kΩ を配置すれば 2 倍のゲインを実現できるという、ちょっとした可変ゲインを実現できるものです。データシートを見てみると、ディファレンス・アンプの使用方法以外にも、反転アンプや非反転アンプの例も載っています。内部抵抗はレーザトリムされた高精度薄膜抵抗なので、それこそ意外かつ多岐な「高精度増幅」としての活用方法が考えられそうです。

このディファレンス・アンプ AD8274 の回路のうごきを、**ここでも実際に回路を製作して実動作で確認してみます**。実験回路は図 16 のとおりです。G=1/2 倍のゲインとしてみました。それぞれの信号レベル、電圧レベルも回路図中に記載しました。

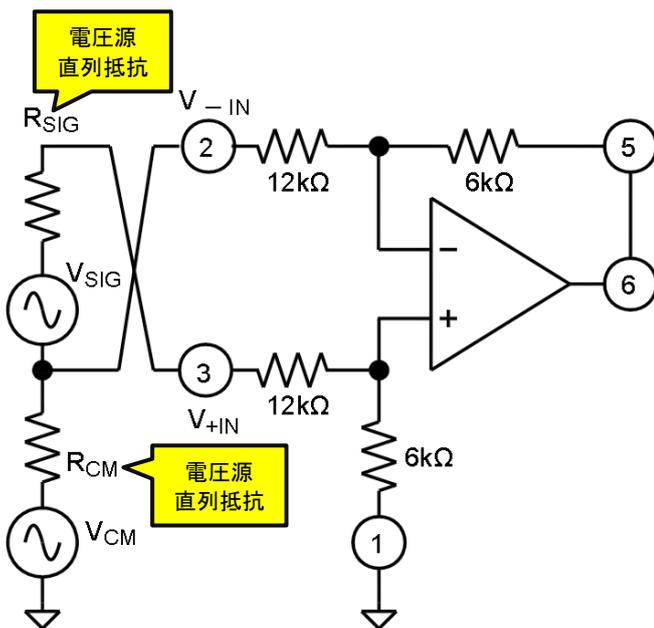


図 18. 電圧源直列抵抗があると入力抵抗のアンバランスにより得られる結果に誤差が生じる

ここで図 18 のような電圧源 V_{SIG} , V_{CM} にそれぞれ直列抵抗 R_{SIG} , R_{CM} があつた場合は、

- ① R_{+IN} と R_{-IN} の大きさが異なること
- ② R_{SIG} , R_{CM} が非反転回路系統、反転回路系統それぞれの増幅率に異なる影響度を与えてしまうこと

から「 V_{SIG} を正確な増幅率で増幅できない」、「本来増幅率ゼロであつてほしい V_{CM} が出力に現れてしまう」などの問題が生じてしまいます。

この辺の話は長くなりそうなので、次の技術ノート TNJ-036 の話題として取り上げてみたいと考えています。今回はともあれ、「このような問題があるんだ」とご理解いただければと思います。

REF 端子の駆動には特に注意が必要

上記と同じことが REF 端子にもいえます。図 19 のようなかたちで、抵抗分圧により REF 端子の電圧を安易に決めてしまうケースがあるのではないのでしょうか。

図 19 のように書かれていれば、「影響しそうだ」と直感的にも考えるでしょうが、図 13 のように図が描かれ、また図に内部回路が表記されていない場合などにけっこう「やっけてしまいがちなこと」でしょう。

またディファレンス・アンプ回路が内蔵されている「計装アンプ」にもこの REF 端子があり、全く同じように誤差原因を生じます。計装アンプをお使いになるケースのほうが多いと思いますので、十分にご注意いただきたいと思います。

さて、ここでも AD8274 を例にして考えてみます。図 19 の接続は図 16 と同じで、入力側を $12k\Omega$ にして $1/2$ のゲインのディファレンス・アンプにしてあります。

この場合は図 20 のような等価回路になります。AD8274 の REF 端子から見ると REF 端子電圧を作る抵抗分圧回路は、「テブナンの定理」という回路理論計算により、 $5V$ の電圧源と $5k\Omega$ の直

列等価抵抗 R_{SER} となります。この等価抵抗 R_{SER} の計算は、二つの分圧抵抗 $10k\Omega$ の並列接続に相当します。

この「テブナンの定理」も重ね合わせの理とならぶ、OP アンプ回路で活用できる重要定理です。機会があればこの技術ノートでも紹介したいと思いますし、是非どんなものかご確認いただければと思います。

こうなると！なんと！図 14 において REF 端子である R_2 に、直列に R_{SER} が接続されてしまうのです！この等価抵抗 R_{SER} がディファレンス・アンプにおいて誤差になります。

この R_{SER} が、先の V_{+0} の計算式に追加されることにより

$$V_{+0} = \frac{R_4 + R_3}{R_3} \cdot \frac{R_2 + R_{SER}}{R_1 + R_2 + R_{SER}} V_{+IN}$$

となり誤差が生じ、その結果、出力電圧にも誤差が生じることになってしまいます。また「不要信号」に相当する V_{CM} も正しくキャンセルできなくなってしまいます。これは大きな問題ですね。

この誤差をなくすためには、 R_{SER} をゼロ（もしくは他の抵抗値から無視できるほど小さく）にすればよいわけです。ベストな方法は REF 入力端子を OP アンプなどのバッファで駆動すること、もしくは十分に低い抵抗値（誤差を無視できるまで小さく）で分圧回路を構成することです。

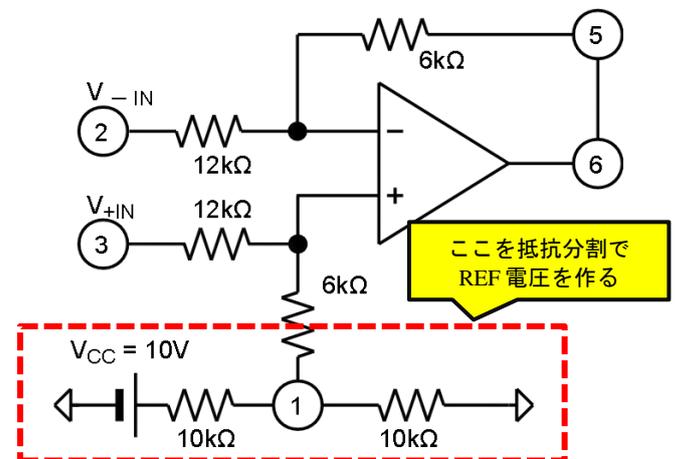


図 19. AD8274 の REF 端子の駆動電圧を安易に抵抗分圧で設計してしまうことがある

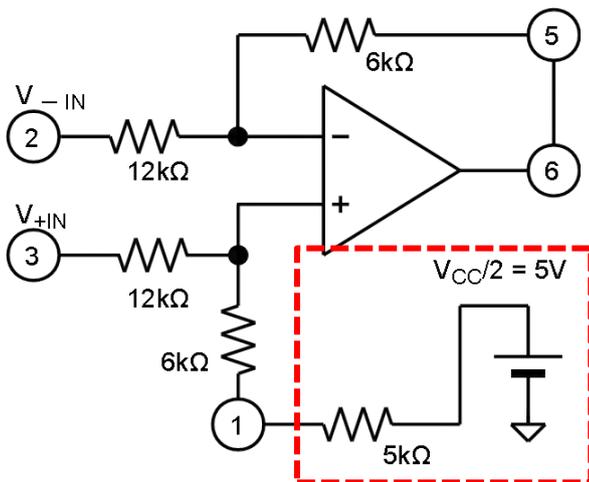


図 20. REF 端子の駆動電圧を抵抗分割で作ると
テブナンの定理で増幅回路の抵抗成分となり誤差が生じる

まとめ

今回の技術ノートでは「重ね合わせの理」が OP アンプ回路で活用できるというお話をいたしました。学校で（電気・電子系の学科の人は）実用的な意味もわからず（という人もいらっしゃるかな…。という意味です…）習った「重ね合わせの理」が、現実の回路でもとても便利に使えることがお分かりいただけたかと思います。

その「重ね合わせの理」の使いみちの一例として、ディファレンス・アンプ（Difference Amp; 差電圧アンプ）を考察してみました。それぞれの電圧源ごとに分割して考えていくことで、見通しのよい回路解析が可能なお分かりいただけたのではないのでしょうか。

またディファレンス・アンプを使用する場合の実務上の注意点として、信号源そして REF 端子の駆動源に存在する、信号源インピーダンス（出力インピーダンス／電圧源直列抵抗）について、十分に考慮すべきということもお分かりいただけたかと思えます。よくお使いになる計装アンプも、REF 端子の構成はここで示したものと同じですので、計装アンプで設計する場合も同様に注意が必要です。

次回は、ここまで解析できるようになったこのディファレンス・アンプの電圧源（信号源）直列抵抗による生じる誤差や、周波数特性など、より深いところに踏み込んでみたいと思います。

参考・引用文献

- [1] http://www.y-history.net/appendix/wh0904-116_10.html
- [2] <http://www.nhkso.or.jp/library/kaleidoscope/3778/>
- [3] <https://ja.wikipedia.org/wiki/キプチャク>
- [4] <https://ja.wikipedia.org/wiki/ダットンソバ>
- [5] http://www.maff.go.jp/j/heyu/annai/tusin/pdf/tusin_0908.pdf
- [6] [https://ja.wikipedia.org/wiki/重ね合わせの原理_\(電気回路\)](https://ja.wikipedia.org/wiki/重ね合わせの原理_(電気回路))