

第 1 章

見
本

計装アンプ

Walt Kester, Walt Jung / 訳：細田裕司

特定用途向けの増幅器のなかで最もよく使われるものと言えば、おそらく計装アンプ (instrumentation amplifier) になるでしょう。計装アンプはノイズの多い環境や、大きな同相信号 (通常は交流電源周波数によるもの) がある環境下でも、直流精度と正確なゲインを維持しなければならない産業用計測アプリケーションの多くで広範囲に使用されています。

1-1 OP アンプと計装アンプの機能の違い

計装アンプは非常に重要な点で、OP アンプ (operational amplifier) との相違があります。OP アンプとは、抵抗、キャパシタ、場合によってはインダクタからなる外付け部品による帰還回路を使うことで、ユーザがさまざまに特性を変更できる、汎用のゲイン・ブロックにほかなりません。OP アンプを使った回路の構成と機能は、まさに設計者自身が決めるものなのです。

これとは対比的に、計装アンプは機能と動作ゲインの許容範囲という点で制約があるデバイスです。そして多くの点で、計装アンプは OP アンプより、求められる用途に特化したものとなっています。ただ皮肉なことに、現実には計装アンプは複数の OP アンプを使って構成されます。その機能のせいで、計装アンプを誤って OP アンプと呼ぶことはよくあることですが、その逆はめったにありません。計装アンプとは OP アンプの特別なタイプではなく、両者の機能は根本で異なっていることを理解しておかなければなりません。

これら二つのデバイスを区別するには、OP アンプでは帰還回路の柔軟性によって、多種多様な目的に向けて回路を構成できるということを覚えておけばよいでしょう。一方、計装アンプではそうはいきません。計装アンプは、特定の動作範囲内でゲインが設定できるだけです。OP アンプの動作は外付け部品により規定されますが、計装アンプでは一つ

の抵抗か、あるいはピンの選択によりタップを選ぶことで動作ゲインを設定します。

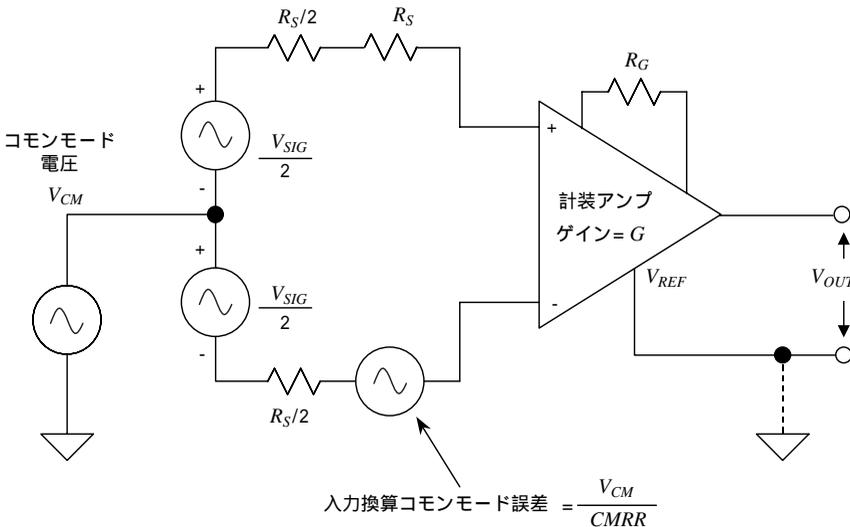
●計装アンプの定義

計装アンプとはループの閉じた精密ゲイン・ブロックです。それは図1-1のように、一対の差動入力端子と、基準端子(V_{REF})を電位基準とするシングルエンド出力をもっています。入力インピーダンスは平衡していて、標準値で 10^9 ほどの高い値になっています。繰り返しになりますが、OPアンプとは異なり、計装アンプでは内蔵する帰還抵抗ネットワークと(通常は)1個のゲイン設定抵抗 R_G を使います。さらに異なる点として、内蔵する抵抗ネットワークと R_G が入力端子から切り離されているという点があります。また、デバイスのピンを選ぶことで(このピンは信号入力とは切り離されている)、内蔵の R_G をプリセットしてゲインを設定できる計装アンプもあります。標準的な計装アンプのゲインは1~1000の範囲になります。

通常、計装アンプは、REFERENCEあるいは V_{REF} と名付けられるピンを基準として、出力電圧を発生します。多くのアプリケーションでは、このピンは回路のグラウンドに接続されますが、定格範囲にあるかぎり、それ以外の電位に接続することもできます。この特徴は、電源の中間電位(5V単一電源なら2.5V)を基準にして出力を発生する単一電源動作のアプリケーションで特に有用と言えます。

計装アンプが機能するには、入力のパルト・オーダの同相(コモンモード; CM)電圧

図1-1 計装アンプの原理図



を除去しつつ、マイクロボルト・レベルの信号の増幅ができなくてはなりません。これは、計装アンプには同相信号除去 (common mode rejection ; *CMR*) 能力が必要であるということを示しています。計装アンプの *CMR* 値は 70 dB ~ 100 dB 以上あるのが普通で、ゲインを高くすれば一般に *CMR* はさらに良くなります。

ほとんどの実用的なアプリケーションでは、DC 入力での *CMR* 仕様だけでは不十分であることを知ることが大切です。産業用途において最も一般的な外部からの妨害といえば、高調波を含めた 50/60 Hz の AC 電力線からのノイズになります。差動測定においては、このタイプの妨害は計装アンプの二つの入力端子の双方に同等に発生するので、これを同相の入力信号であると見ることができます。そのために、DC での値と同様に各周波数における *CMR* の仕様が重要になります。計装アンプによっては、二つの信号源インピーダンス間に不平衡があると、*CMR* が劣化することがあるので注意が必要です。アナログ・デバイセズ社の計装アンプでは、信号源のインピーダンスに 1k Ω の不平衡がある条件で、50/60 Hz での *CMR* を規定しています。

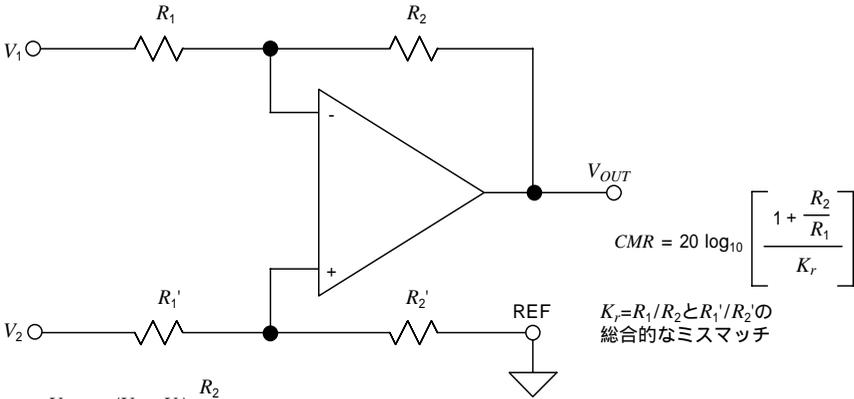
●減算器/差電圧アンプ

図 1-2 のように、4 本の抵抗と 1 個の OP アンプによって、簡単な減算器 (subtractor) または差電圧アンプ (difference amplifier) と呼ばれる回路を作ることができます。前項で解説した定義によれば、これは真の計装アンプとは言えないことに注意が必要ですが、差動出力からシングルエンド出力へ簡単に変換したい用途では、よく使われる回路です。多用される回路ですので、真の計装アンプのアーキテクチャについて解説するまえに、この回路について詳しく調べて、その根本的な限界について理解しておくことにしましょう。

この簡単な回路には、根本的な問題点がいくつかあります。まず第一に、 V_1 と V_2 から見た入力インピーダンスが平衡していません。 V_1 から見た入力インピーダンスは R_1 ですが、 V_2 から見た場合は $R_1' + R_2'$ になっています。この回路構成は *CMR* の観点からしても、大きな問題を含んでいます。なぜなら、信号源のわずかなインピーダンスの不平衡によって実際の *CMR* が劣化してしまうのです。この問題は、それぞれの入力に (たとえば高精度のデュアル OP アンプなどを使うことで) 特性のよく一致したバッファを直列に入れることで解決が可能です。しかし、これでは回路が複雑になり、またオフセットの変動や直線性の劣化を招くかもしれません。

この回路の第二の問題は、各抵抗の比のマッチングの程度により *CMR* が一義的に決定され、OP アンプ自体が決めるのではないという点です。同相ノイズを除去するためには、 R_1/R_2 と R_1'/R_2' の抵抗比は、少なくとも一般的な OP アンプの 100 dB を越す *CMR* と同程度に、厳密にマッチングしていなくてはなりません。ここで、抵抗の絶対値そのものは、さほど重要でないことにも注意しておきましょう。

図 1-2 OP アンプによる減算器(差電圧アンプ)



$$CMR = 20 \log_{10} \left[\frac{1 + \frac{R_2}{R_1}}{K_r} \right]$$

$K_r = R_1/R_2$ と R_1'/R_2' の総合的なミスマッチ

$$V_{OUT} = (V_2 - V_1) \frac{R_2}{R_1}$$

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{R_2'}{R_1'} \quad \text{高い CMR には厳密なマッチングが必要}$$

信号源インピーダンスの影響を受ける

R_1 と R_2 の 0.1 % のミスマッチは 66 dB の CMR となる

同一ロットから 4 本の 1 % 許容誤差の抵抗を選ぶことで、正味の抵抗比のマッチングとして 0.1 % を得ることが可能かもしれませんが、これは ($R_1 = R_2$ と仮定して) 66 dB の CMR に相当します。しかし、1 本の抵抗が他の抵抗より 1 % 値が異なっているとしたら、CMR はわずか 46 dB に低下してしまいます。明らかに、この回路で通常の個別部品の抵抗を使おうとすれば(手作業で合わせ込まないかぎり)、極めて限定された性能しか得ることができません。なぜなら、一般に入手可能な最良の標準 RNC/RNR 型の抵抗器でも、その許容誤差は 0.1 % のオーダに過ぎないからです[参考文献(1)を参照]。

一般的に、このタイプの回路の CMR の最悪値は次式によって与えられます[参考文献(2)および(3)を参照]。

$$CMR [dB] = 20 \log \left(\frac{1 + R_2 / R_1}{4K_r} \right) \dots\dots\dots (3-1)$$

ここで K_r は、4 本の個別の抵抗器が使われている場合の個々の抵抗の許容誤差です。この式から、同一公称値の 1 % 誤差の抵抗を無選別で 4 本使うことで累積される許容誤差に対する CMR は最悪の場合、34 dB 以上にはならないことがわかります。

この回路に、実際のマッチングの許容誤差が K_r である単一のネットワーク抵抗を使う

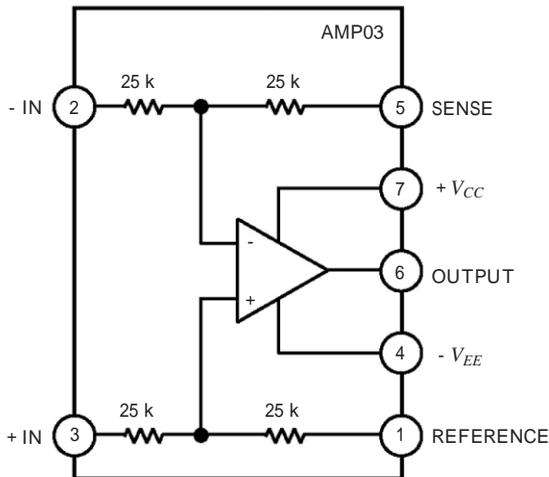
と、先の式は次のようになります。

$$CMR [dB] = 20 \log \left(\frac{1 + R_2 / R_1}{K_r} \right) \dots\dots\dots (3-2)$$

抵抗比の実際のマッチング許容誤差が 0.1 % として、式 (3-2) において $R_1 = R_2$ とすることで、直流での CMR の最悪値として 66 dB が得られます。どちらの場合でも、アンプ自体の CMR は遥かに高いもの (100 dB 以上) であると仮定しています。これで明らかのように、このような回路において高い CMR を得るためには、絶対値ならびに温度係数が極めてよく一致している同一サブストレート上に構成された 4 個の抵抗が必要になります。そのようなネットワーク抵抗として、厚膜あるいは薄膜技術を用いた、抵抗比マッチングが 0.01 % やそれ以上に良い抵抗を Caddock 社や Vishay 社といったメーカーから入手することができます。

簡単な差電圧アンプを実装する場合に、高精度 OP アンプと外付けの抵抗ネットワークを使うことによる高コストと基板上に占める面積の増加に甘んじるより、完全モノリシック IC による解決策を探るほうが一般には得策であると言えます。AMP03 はまさにそのような目的のための高精度差電圧アンプであり、チップ上にレーザ・トリムされた精密薄膜抵抗ネットワークを搭載しています。この IC の構造を図 1-3 に示します。AMP03F の標準的な CMR は 100 dB であり、小信号帯域幅は 3 MHz となっています。

図 1-3 AMP03 高精度差電圧アンプ



AMP03に類似した機能をもつデバイスがいくつかあります．たとえば，SSM2141/SSM2143 差分増幅器です．これらはオーディオ帯域のライン・レシーバとして設計された姉妹品で(図1-4を参照)，低歪みと(あらかじめ微調整された)高いCMR特性をもっています．SSM2141/2143の正味のゲインは，それぞれ1と0.5になっていて，600 Ω 平衡のオーディオ信号源に使用するよう設計されています[第4巻(原著ではChapter-6)のオーディオ・アンプの章では，このデバイスに関連してさらに詳しく解説されているので参照のこと]．

図1-4 SSM2141/SSM2143 差電圧アンプ(オーディオ・ライン・レシーバ)

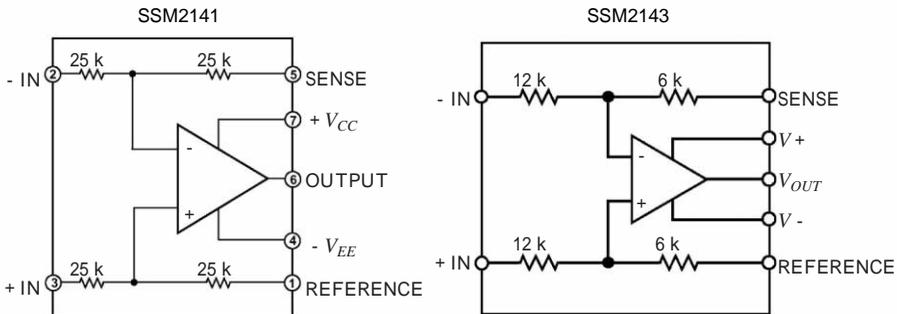
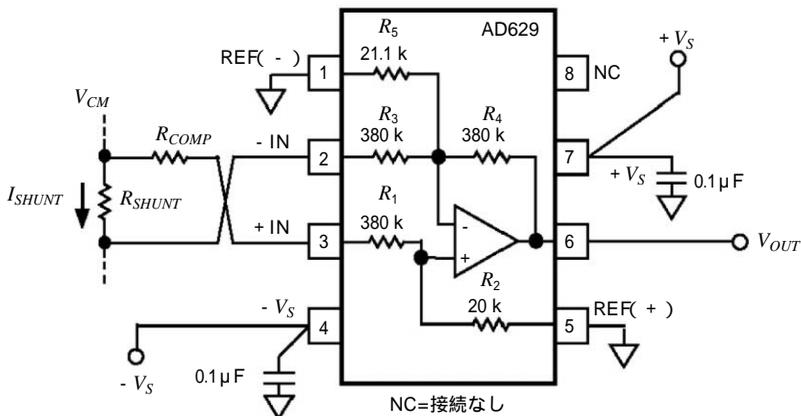


図1-5 高い同相電圧を取り扱えるAD629 差電圧アンプを使った電流検出回路



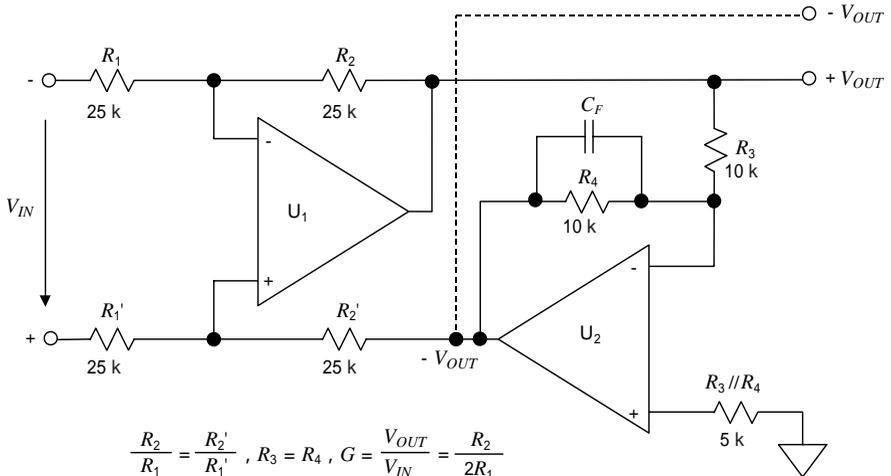
$$V_{CM} = \pm 270 \text{ V} (V_S = \pm 15 \text{ V})$$

単純な構成の差電圧アンプの興味深い派生品として、高い同相入力電圧に対して最適化された AD629 差電圧アンプがあります。これを電流検出に使った代表的な回路を図 1-5 に示します。AD629 はゲイン 1 の差動・シングルエンド増幅器です。電源電圧 ± 15 V で、 ± 270 V の同相電圧を扱うことができ、小信号帯域は 500 kHz となっています。

高い同相電圧レンジは、 R_1 と R_2 の分圧器により非反転入力 (3 番ピン) を 20 分の 1 に減衰することで得られています。反転入力部では、抵抗 R_5 は R_5 と R_3 の並列合成値が R_2 と等しくなるように選ばれています。回路のノイズ・ゲインは $20[1 + R_4/(R_3//R_5)]$ で与えられ、差動入力電圧に対するゲインを 1 にしています。 R_1 から R_5 の薄膜抵抗器をレーザによってウェハ・トリミングすることで、AD629B では 500 Hz で最小でも 86 dB の CMR を得ています。アプリケーションにおいて、両入力での信号源インピーダンスを平衡させるのは有効な手法であり、ダミー抵抗 R_{COMP} を電流検出シャント抵抗 R_{SHUNT} の値に等しくなるように選びます。

BBC のデビッド・パート (David Birt) は、信号源に対する負荷効果について、簡単なライン・レシーバ回路の解析を行いました [参考文献 (4) を参照]。そこで、図 1-6 に示すように変更を加えた平衡回路形式を提案しています。ここで、 U_1 の増幅段は図 1-2 と同様に 4 本の抵抗ネットワークを使っていますが、一方でゲイン 1 の反転アンプ U_2 経由で帰還される信号が、従来はグラウンドに接続されていた R_2' のリファレンス点を駆動しています。このことには二つの効果があります。それは、非反転と反転入力部分での入力

図 1-6 プッシュプル・フィードバックを用いた平衡型差電圧アンプ



電流の大きさが等しくなり、ゲインが半分になることです。

図1-2と比較して抵抗比を見るとわかるように、図1-6の回路の V_{IN} から V_{OUT} へのゲインは $1/2$ 、つまり -6 dB です。しかしながら、新しい回路形式では U_2 から反転した出力 $-V_{OUT}$ も得られます。

この回路の同相信号範囲は図1-2と同様ですが、すべての抵抗値が等しければ(片方の出力に対して測ったとして)CMRはおよそ2倍になります。反転増幅器の抵抗比 R_3/R_4 は出力バランスに影響しますが、CMRには影響しません。図1-2と同様に、この回路では精密な抵抗比を必要としますので、ゲインを変更するのは容易ではありません。

この回路は、二つあるフィードバック経路によって、差動入力信号に関して U_1 の入力をゼロに保持するように動作します。しかし、同相信号は U_1 に印加され、回路の同相信号範囲は $[1 + (R_2'/R_1')] \times V_{CM(U_1)}$ となります。また、差動入力抵抗は $R_1 + R_1'$ となります。

図1-6を見てわかるように、この回路は左側の簡単なライン・レシーバと、右側に付け加えられた反転増幅器に分けることができます。このように、図1-2のような既存のライン・レシーバは適当な反転増幅器 U_2 を付け加えるだけで、完全に平衡した回路構成に変換することができるのです。これによって、入力電流をバランスさせるだけでなく、平衡した出力信号も得られます。

たとえば、SSM2141ライン・レシーバとOP275は、この手法を試すのによい組み合わせになります[参考文献(5)参照。この回路に関するより詳細な解説は第4巻(原著ではChapter-6)にあるオーディオ増幅器の章を参照のこと]。

1-2 計装アンプの回路構成

先に述べた簡単な差電圧アンプは非常に有用(とりわけ高い周波数において)ですが、大部分の高精度な用途において必要とされる性能はありません。多くの場合、平衡した高入力インピーダンスと高いCMRの点で、真の計装アンプを使うほうがはるかに適切です。

● 2個のOPアンプを使った計装アンプ

はじめに述べたように、計装アンプはOPアンプを利用したものであり、よく使われる2種類の基本的な回路構成があります。一つは2個のOPアンプを用いたものであり、もう一つは3個のOPアンプを用いたものになります。図1-7に示す回路は、2個のOPアンプを使った計装アンプとして広く知られているものです。ほとんどの場合、マッチングが良好であることからOP297やOP284といったデュアルOPアンプICが使われます。抵抗には、通常は同一チップ上のレーザ・トリミングされた薄膜抵抗が使用されます。計装