

演算増幅器

星 貴之

平成 21 年 11 月 12 日

1. はじめに

演算増幅器 (Operational Amplifier, オペアンプ) はアナログ回路のあちこちに出没しては様々な機能を実現する、重要な素子である。使用例が多過ぎて丸暗記に走ってしまいがちであるが、それではためにならない。本稿では基本的な構成を例にとり、オペアンプの考え方と関連事項をまとめる。

2. 演算増幅器

オペアンプは、非反転入力 V_+ と反転入力 V_- の差を A 倍して出力する差動増幅器である (式 (1))。

$$V_{out} = A(V_+ - V_-) \quad (1)$$

理想的には以下の性質を持つとされる。

1. 差動利得と帯域が無限大: $|A(\omega)| = \infty$
2. 入力インピーダンスが無限大: $Z_{in} = \infty$
3. 出力インピーダンスがゼロ: $Z_{out} = 0$

他に、同相利得ゼロ、位相遅れゼロ、内部雑音ゼロ、などもあるが、とりあえずは気にしなくてよい。実際の素子では、上記は近似的に実現される。例えば市販の汎用オペアンプ LF356 は、 $|A(\omega)| = 2 \times 10^5$ 、帯域幅 5 MHz、 $Z_{in} = 10^{12} \Omega$ 、 $Z_{out} < 50 \Omega$ である [1]。

回路記号を Fig.1 に示す。オペアンプが動作するためには電源が必要である。通常は両電源 ($\pm 15 \text{ V}$)、状況によっては単電源 ($15 \text{ V} - \text{GND}$) で用いる。オペアンプを安定に動作させるため、電源と GND の間には必ず「バイパスコンデンサ (パスコン)」を入れる [2]。

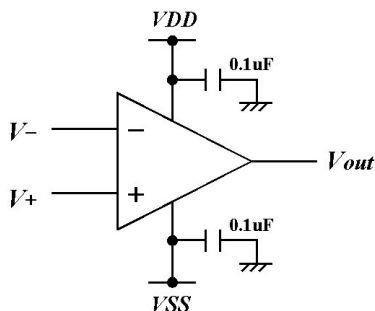


Fig.1 オペアンプの回路記号。電源 VDD , VSS とパスコン ($0.1 \mu\text{F}$) は回路図に描かないことが多い。

3. 基本構成 (反転入力)

式 (1) によると、出力電圧 V_{out} は 0 または $\pm\infty$ になる (実際には出力が飽和して電源電圧に張り付く)。このままでは使いようがないが、負帰還 (ネガティブフィードバック) をかけることによって劇的に応用が広がる。

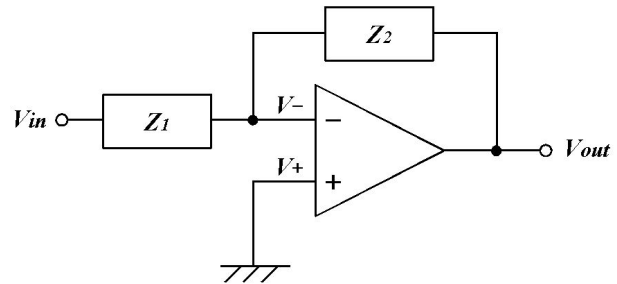


Fig.2 反転入力を用いる基本構成。

基本となる構成を Fig.2 に示す。性質 2 より反転入力には電流が流れ込まないので、インピーダンス Z_1 を流れる電流 I はすべてインピーダンス Z_2 を流れる。これは次のように表される。

$$I = \frac{V_{in} - V_-}{Z_1} = \frac{V_- - V_{out}}{Z_2} \quad (2)$$

式 (1), (2) より、次の関係式が得られる。

$$V_+ = \left(1 + \frac{Z_1 + Z_2}{AZ_1}\right) V_- - \frac{Z_2}{AZ_1} V_{in} \quad (3)$$

したがって $V_+ = V_-$ ($A \rightarrow \infty$) が導かれる。これは「仮想接地 (仮想短絡) の原理」と呼ばれる。

一方、式 (2) と仮想接地の原理 ($V_- = V_+ = 0$) から次のような入出力関係が得られる。

$$V_{out} = -\frac{Z_2}{Z_1} V_{in} \quad (4)$$

3.1 反転増幅回路

$Z_1 = R_1$, $Z_2 = R_2$ とおくと $V_{out} = -(R_2/R_1) V_{in}$ 。これは入力信号を (R_2/R_1) 倍して正負を反転する回路である。 $R_1 > R_2$ の場合には減衰器としても働く。

実際に回路を設計するときは、オペアンプの入力インピーダンスより十分小さく、出力インピーダンスより十分大きい R_1 , R_2 を選ぶ。大抵は $1 \text{ k}\Omega \sim 100 \text{ k}\Omega$ 周辺。

3.2 微分 / 積分回路

$Z_1 = C$, $Z_2 = R$ とおくと $V_{out} = -j\omega CR V_{in}$ 。これは入力信号を微分して反転する回路である。また、 $Z_1 = R$, $Z_2 = C$ とおくと $V_{out} = -(1/j\omega CR) V_{in}$ 。これは入力信号を積分して反転する回路である。

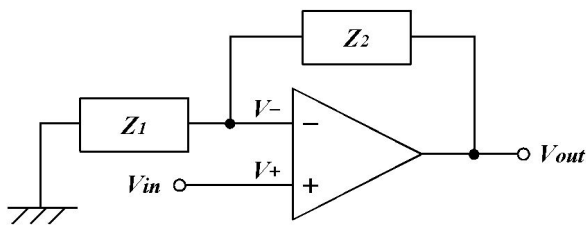


Fig.3 非反転入力を用いる基本構成.

4. 基本構成 (非反転入力)

前章では反転入力 V_- に入力信号を入れたが、非反転入力 V_+ に入力信号を入れる回路構成もある (Fig.3). Z_1, Z_2 を流れる電流が共通であることと、仮想接地の原理 ($V_- = V_+ = V_{in}$) から、

$$\frac{V_{in}}{Z_1} = \frac{V_{out} - V_{in}}{Z_2} \quad \therefore V_{out} = \left(1 + \frac{Z_2}{Z_1}\right) V_{in} \quad (5)$$

4.1 非反転増幅回路

$Z_1 = R_1, Z_2 = R_2$ とおくと $V_{out} = (1 + R_2/R_1) V_{in}$. これは入力信号を $(1 + R_2/R_1)$ 倍する回路である. 抵抗の値によらず 1 倍以上の利得になる.

4.2 電圧フォロウ

$Z_1 = \infty, Z_2 = 0$ とおくと $V_{out} = V_{in}$. これは入力信号をそのまま出力する回路 (バッファ) である (Fig.4). 入力インピーダンスが大きく出力インピーダンスが小さいため、前段と後段の回路を切り離す効果がある.

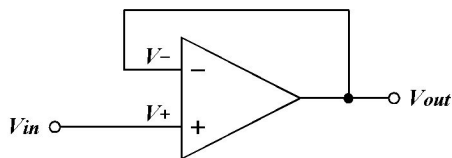


Fig.4 電圧フォロウ. インピーダンス変換を行なう.

5. おわりに

本稿で紹介した以外にも、能動フィルタ (LPF, HPF, BPF), 差動増幅, 加算, 電流電圧変換, 発振, 波形整形などオペアンプは様々な機能を実現する. それらの回路については専門書 (例えば文献 [3]) やネット検索で調べていただきたい.

参考文献

- [1] LF356 データシート, <http://www.national.com/JPN/ds/LF/LF356.pdf>
- [2] 岡村 逸夫: アナログ回路はどうすれば理論どおりに働くか, 日刊工業新聞社, 1990.
- [3] 安藤 繁: 電子回路 — 基礎からシステムまで, 培風館, 1995.

A バイパスコンデンサ

回路の理論的動作には関与しないが、実際の回路素子を理想に近づける役割を果たす. これを電源 - GND 間に入れることは、オペアンプに限らず電源を必要とする素子一般に通用する作法である.

回路基板への電源の入り口 (素子から離れた場所) に数 $10 \mu\text{F}$ 程度の電解コンデンサを、素子のすぐ近くに

$0.1 \mu\text{F}$ 程度の積層セラミックコンデンサやチップコンデンサを入れる. これらは、電源ラインの寄生インピーダンスや電源の周波数特性が理想的でないことの影響を低減する働きがある. 大きくて低周波が得意なコンデンサは電源ラインの低周波ノイズを抑え、小さくて高周波特性のよいコンデンサはあらかじめ蓄えた電荷を必要ときに素早く供給する高速な電源として働く、という役割分担になっている.

余談だが、Figs.2, 3 において、非反転入力に直列に抵抗 $R_3 = \text{Re}\{Z_1 Z_2 / (Z_1 + Z_2)\}$ を入れることがある [3]. これはオペアンプの入力バイアス電流を相殺するためのものであり、やはり理論的動作には関与しない.

B 仮想接地の原理

2 つの入力の間が電気的には切れている (入力インピーダンス無限大) にもかかわらず、あたかもつながっているかのように同電位が保たれるため「仮想」と言う. また $V_+ = \text{GND}$ とすることが多いため「接地」と言う. もし仮に V_- を直接 GND につないだとしても、電流が GND へと流れてしまい、 V_{in} と V_{out} の関係が定まらない. 電流を逃がさず電圧だけ制御することが仮想接地の意味である. オペアンプの働きは式 (1) で定義されるが、とりあえずは「オペアンプは仮想接地を実現する素子」と覚えてもよい.

なお、簡易的には次のように仮想接地の原理を導出することもできる. 式 (1) において V_{out} が有限の値をとる (= 負帰還がかかっている) とき、

$$V_+ - V_- = \frac{V_{out}}{A} \rightarrow 0 \quad (A \rightarrow \infty) \quad \therefore V_+ = V_- \quad (6)$$

C 入力 / 出力インピーダンス

出力インピーダンス Z_{out} とは、あるシステムの出端子に付いているインピーダンスである (Fig.5 (a)). これはシステムのドライブ能力や配線の寄生インピーダンスなどによって決まる. システムが単体で動作しているとき、 Z_{out} はフロートなので信号電圧 V_s には関係せず、 $V'_s = V_s$ である. しかし計測器を取り付けると、計測器の入力端の入力インピーダンス Z_{in} を介して GND につながる (Fig.5 (b)). このため、 $Z_{out} + Z_{in}$ を流れる電流によって V_s が変化する恐れがあり、さらにそれを Z_{out}, Z_{in} で分圧した電圧 V'_s が観測される.

計測においては、対象になるべく変化を与えないようハイインピーダンス (理想的には $Z_{in} = \infty$) で受けるのが望ましい. センサなどからの信号は、とりあえず電圧フォロアで受けておくと安心である.

余談だが、電力を伝える場合には異なる考え方を. 対象の出力インピーダンスの複素共役 ($Z_{in} = Z_{out}^*$) で受けると Z_{in} での消費電力が最大となり、最も効率が良い (インピーダンスマッチング).

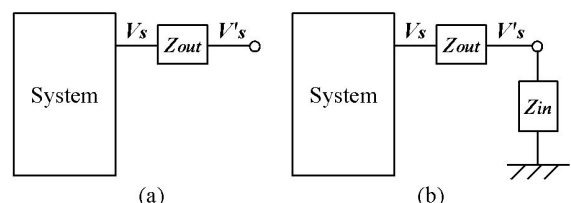


Fig.5 出力インピーダンスと入力インピーダンス.