

TOSHIBA

e-ラーニング

オペアンプの基礎

2章 オペアンプの使い方

東芝デバイス&ストレージ株式会社

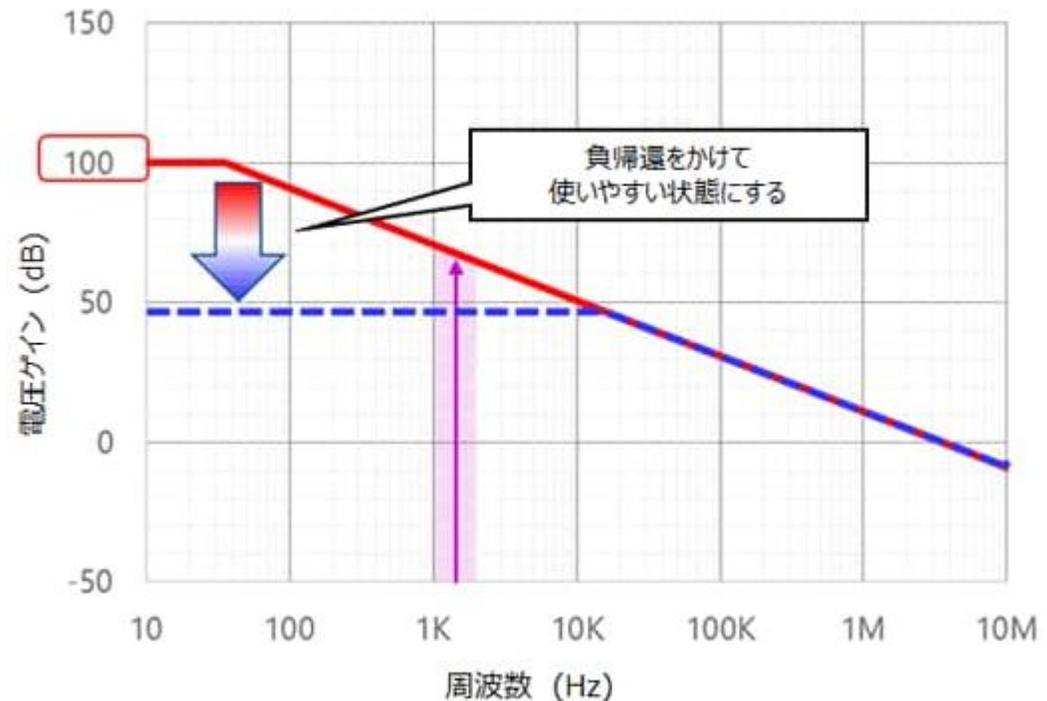
2章 オペアンプの使い方

オペアンプの使い方

オペアンプは図に示すように高いゲインを持ちますが、周波数特性を持ちます。また、素子のバラツキや温度などの環境条件の影響を受けます。このため一般的には負のフィードバック（負帰還）をかけて使用します。負帰還が条件によっては正帰還化し異常発振が生じることもあります。

2章ではこれらの説明と、基本的な増幅回路、増幅回路を考える上で重要な概念（仮想短絡）について説明をします。

1. フィードバック（正帰還と負帰還）
2. 開ループゲインと閉ループゲイン
3. 発振
4. 基本的な回路
5. 仮想短絡（仮想接地）



1. フィードバック（正帰還と負帰還）

オペアンプは負のフィードバック（負帰還）をかけて使用することが一般的です。

ここではフィードバックについて簡単に説明します。フィードバックは日本語では帰還と呼び、正のフィードバック（正帰還）と負のフィードバック（負帰還）があります。

例えば、以下のような例があります。

- ① 勉強して成績が上がった
- ② 成績が上がることで勉強が楽しくなり、更に勉強する
- ③ 更に成績が上がる

これは正帰還の例です。つまり出力の変化を更に加速させる動きをするものが正帰還になります。

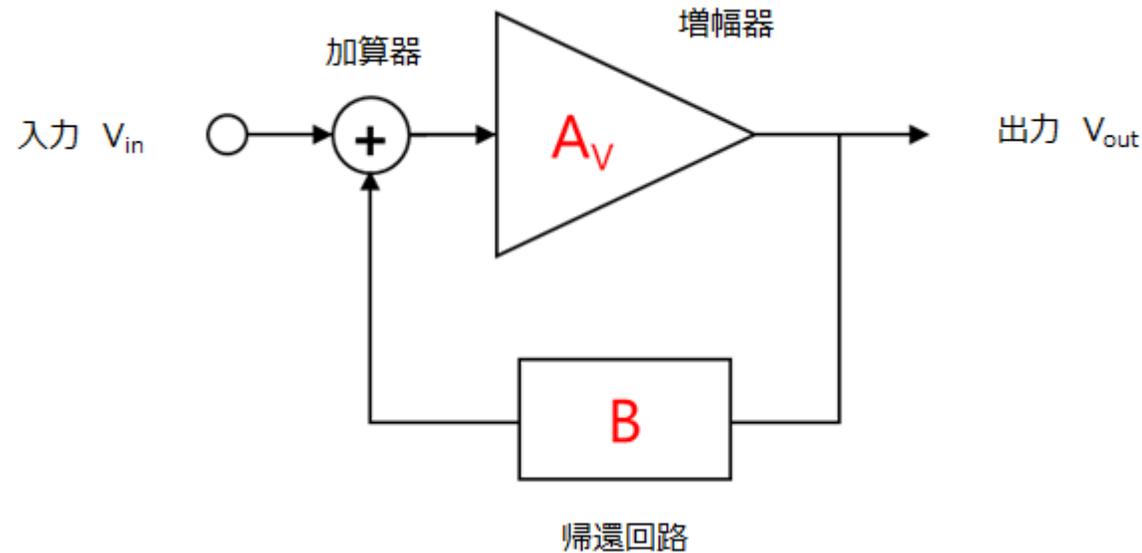
これに対し、

- ① 勉強して成績が上がった
- ② 勉強を少し減らして、余暇を作る
- ③ 勉強が減ったので、少し成績が下がった
- ④ 余暇を減らして勉強の時間を増やす
- ⑤ 成績が元に戻る

このように結果（この場合は成績）を一定に保つフィードバックを負帰還と言います。

1. フィードバック（正帰還と負帰還）

帰還を掛けたアンプ回路を図に示します。増幅器と帰還回路、加算器（減算器）により構成されます。図中の A_V は増幅器の開ループ利得、 B は帰還率です。



入力された信号は増幅器により増幅され出力されます。出力の一部は帰還回路を通して加算器により入力に戻されます。入力が変化した場合に、入力の变化を打ち消す方向に増幅器の入力を変化させる戻し方を負帰還、変化を増大させる戻し方を正帰還と呼んでいます。

1. フィードバック（正帰還と負帰還）

入力と帰還回路を通った信号を加算し、増幅器の開ループゲインを掛けたものが出力なので

$$V_{out} = A_V \times (V_{in} + B \times V_{out})$$

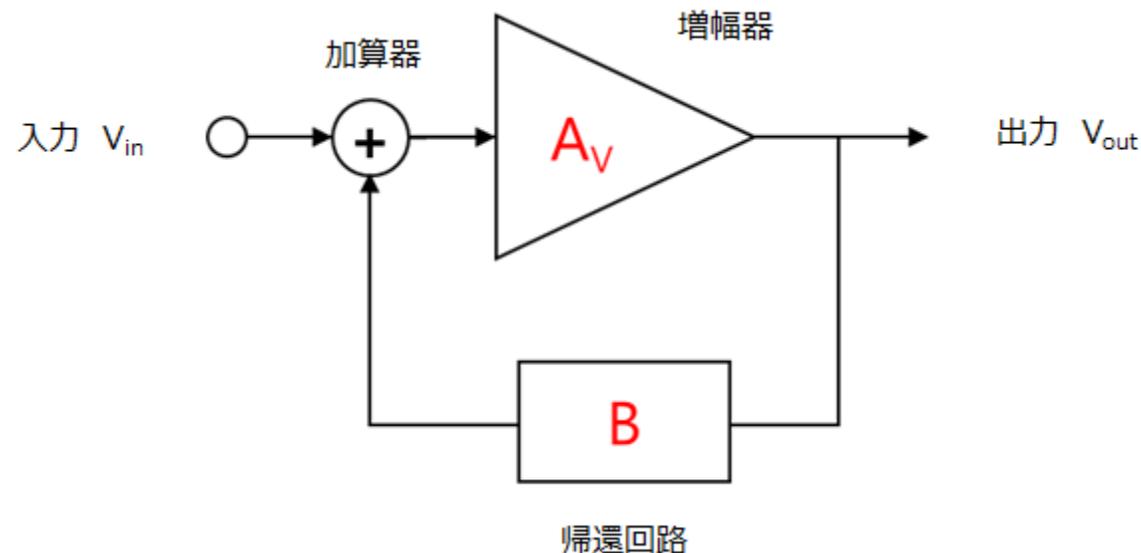
整理すると

$$V_{out} = A_V \times V_{in} / (1 - A_V \times B)$$

この式で、負帰還回路を通った信号 $A_V \times B \times V_{out}$ が入力信号に対し同相であれば正帰還、逆相であれば負帰還となります。

$$\text{正帰還} : V_{out} = A_V \times V_{in} / (1 - |A_V \times B|)$$

$$\text{負帰還} : V_{out} = A_V \times V_{in} / (1 + |A_V \times B|)$$

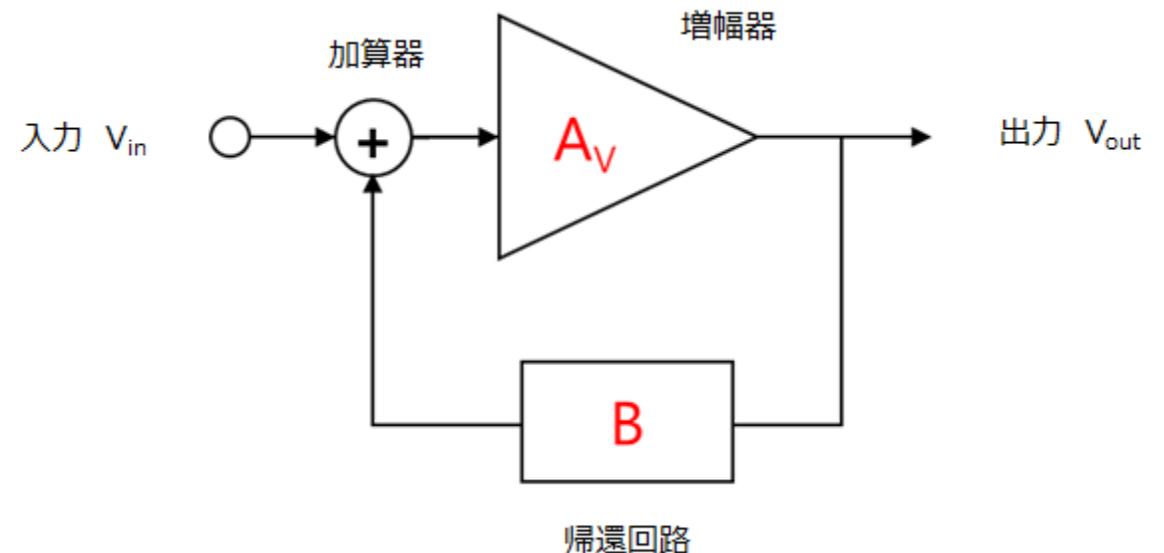


1. フィードバック（正帰還と負帰還）

オペアンプの単体は非常に高いゲイン（開ループ利得）を持ちますが、周波数特性（2項 開ループゲインと閉ループゲイン 参照ください）を持つため扱いにくい素子となっています。このため、一般的には負帰還をかけて使用します。負帰還をかけて使用すると増幅器の利得は大幅に低下しますが、使用帯域（ゲインがフラットな帯域）は広がり、出力インピーダンスが低下します。また、ゲインバラツキも吸収され扱いやすい増幅器を構成することが可能となります。

なお、一般的に正帰還はアンプとしては通常使用されません。発振器やコンパレータ（比較器）にヒステリシスを持たせる時などで使用されます。

（FAQに“コンパレータにヒステリシスを持たせる方法”がありますので興味のある方は参照ください）



2. 開ループゲインと閉ループゲイン –使用帯域幅の拡大–

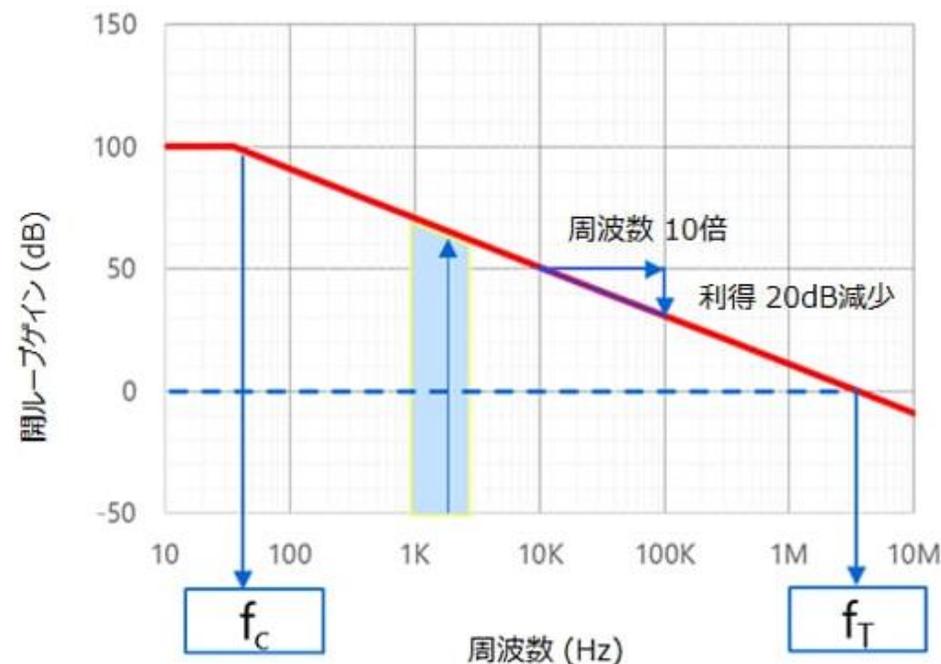
オペアンプの開ループゲイン G_V は図のように1次のRCローパスフィルターと同じ周波数特性を持ちます。DCゲインより3dB低下するコーナー周波数 f_c 以上では6dB/Oct (20dB/Dec)で減少します。この6dB/Octで減少している周波数帯域では、周波数 f が2倍になればゲイン G_V は6dB下がり、開ループ利得 A_V は1/2になるので、次の関係が成り立ちます。

$$f_c \times A_V = \text{constant}$$

1倍のゲイン (0dB) となる周波数 f_T をしゃ断周波数と呼んでいます。このため、先ほどの式は以下に書き換えることができます。この積のことをゲイン・帯域幅積 (GB積) と呼びます。

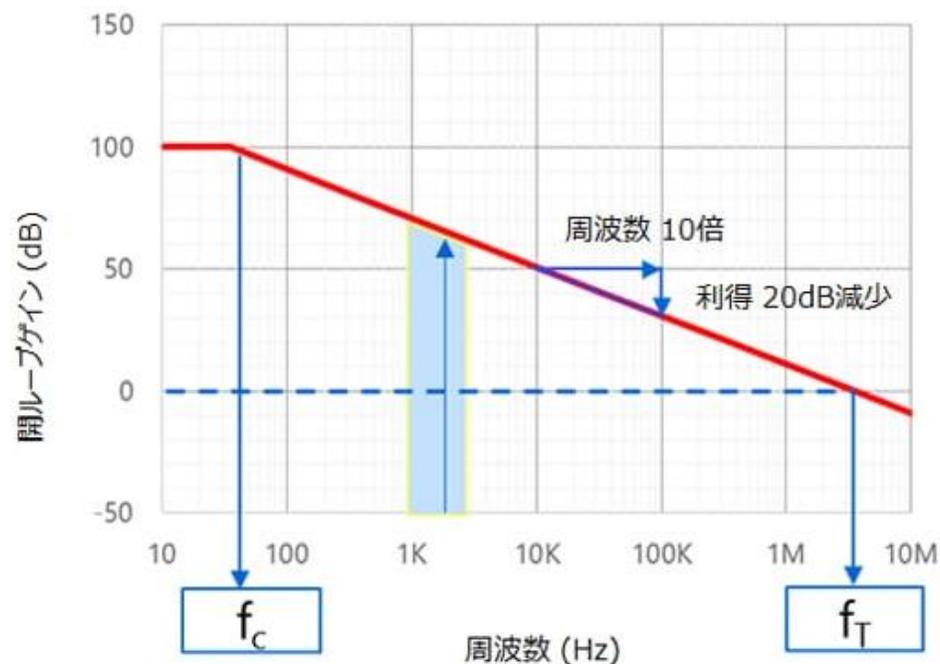
$$f_c \times A_V = f_T$$

但し、この式が成り立つのは6dB/Octの変化をする範囲内であることに注意が必要です。



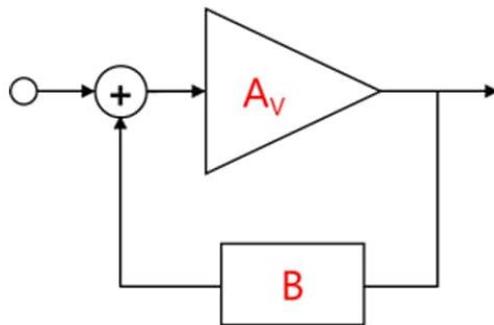
2. 開ループゲインと閉ループゲイン –使用帯域幅の拡大–

ここで、図の特性を持つオペアンプに、仮に $2\text{kHz} \pm 1\text{kHz}$ の信号を入力する場合があります。オペアンプ単体で使用すると、グラフから 1kHz と 3kHz で約 10dB のゲイン差が出てしまいます。通常このままでは使用できません。この問題を解決する手法が負帰還です。



2. 開ループゲインと閉ループゲイン –使用帯域幅の拡大–

オペアンプは増幅器として使用する場合、通常負帰還をかけて使用すると1項で述べました。図に帰還をかけたアンプ回路を示します。



入力 V_{in} と出力の関係は、以下の式で表されます。この関係は閉ループゲイン G_{CL} （閉ループ利得 A_{CL} ）と呼ばれます。なお、利得 A とゲイン G の関係は、 $G = 20 \times \log A$ です。

$$\begin{aligned} V_{out} / V_{in} &= A_{CL} = A_V / (1 + A_V \times B) \\ &= 1 / \{B (1 + 1 / A_V \times B)\} \end{aligned}$$

A_V は増幅器の開ループ利得、 B は帰還率、 $A_V \times B$ をループ利得と呼びます。分母の $(1 + A_V \times B)$ は帰還量と呼ばれます。負帰還の場合 $A_V \times B < 0$ です。またオペアンプの場合 A_V は非常に大きく $|A_V \times B| \gg 1$ です。従って、先ほどの帰還量は $(1 + A_V \times B) \doteq A_V \times B$ （ループ利得）となります。また、このことから上式は下記のように簡略化することもできます。

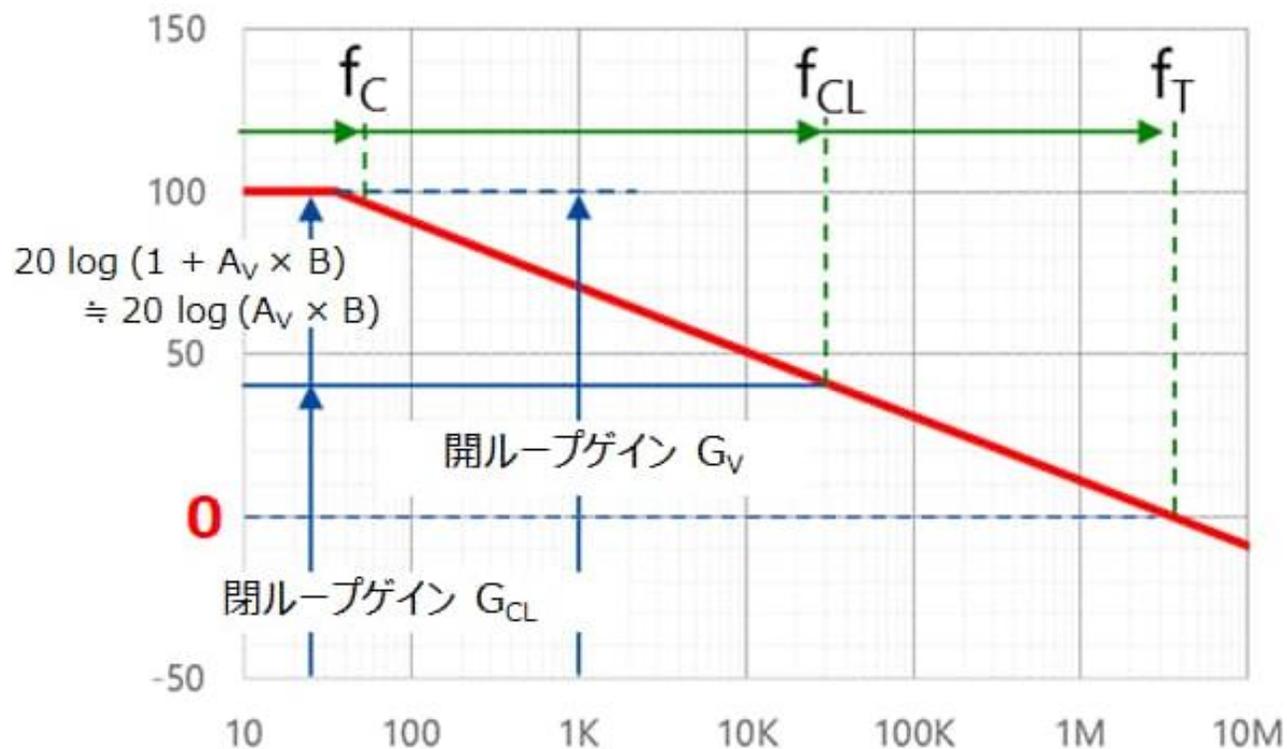
$$V_{out} / V_{in} = A_{CL} = 1/B$$

2. 開ループゲインと閉ループゲイン –使用帯域幅の拡大–

この関係を図で表すと下の図のようになります。オペアンプ単体での帯域幅は f_C でしたが、負帰還アンプでは閉ループ帯域幅は f_{CL} まで広がっていることがわかります。 f_{CL} はGB積の考え方から、以下になります。

$$f_{CL} = f_T / A_{CL}$$

閉ループゲイン G_{CL} や帯域 f_{CL} が不足する場合は、より f_T の高い製品を選択する必要があります。



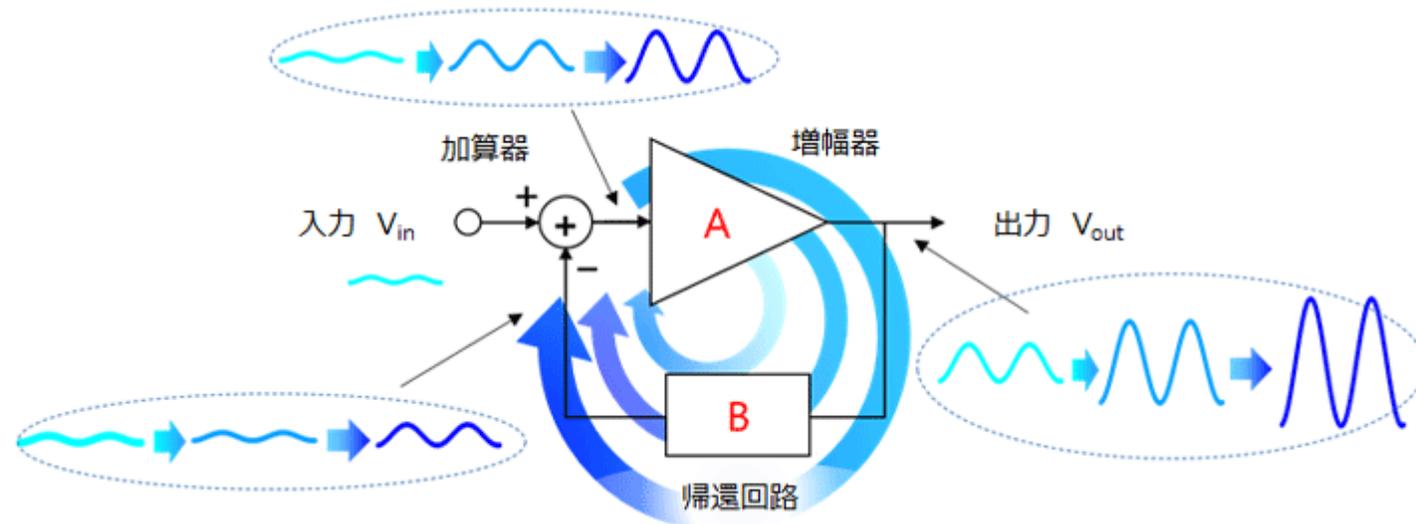
3. 発振

オペアンプは通常図に示す帰還回路を用いて使用されます。1項で説明をしましたが、帰還（フィードバック）には正帰還と負帰還があり、オペアンプを増幅で使用する場合には負帰還が使用されます。帰還回路を使う場合、発振に気を付ける必要があります。

ここで発振について少し説明します。発振は発振の種となる信号やノイズが成長することによって生じます。

まず、入力された発振の種が増幅器・帰還回路を通り加算器で加算され、加算器の出力が初期の状態より大きくなります。これが繰り返されることによって、発振の種が成長していきます。これが発振です。これはまさに正帰還そのものです。

使用するのは負帰還回路だから関係ないと思われるかもしれませんが、主に増幅する信号では負帰還であっても、より高い周波数では正帰還になってしまうことがあります。



3. 発振

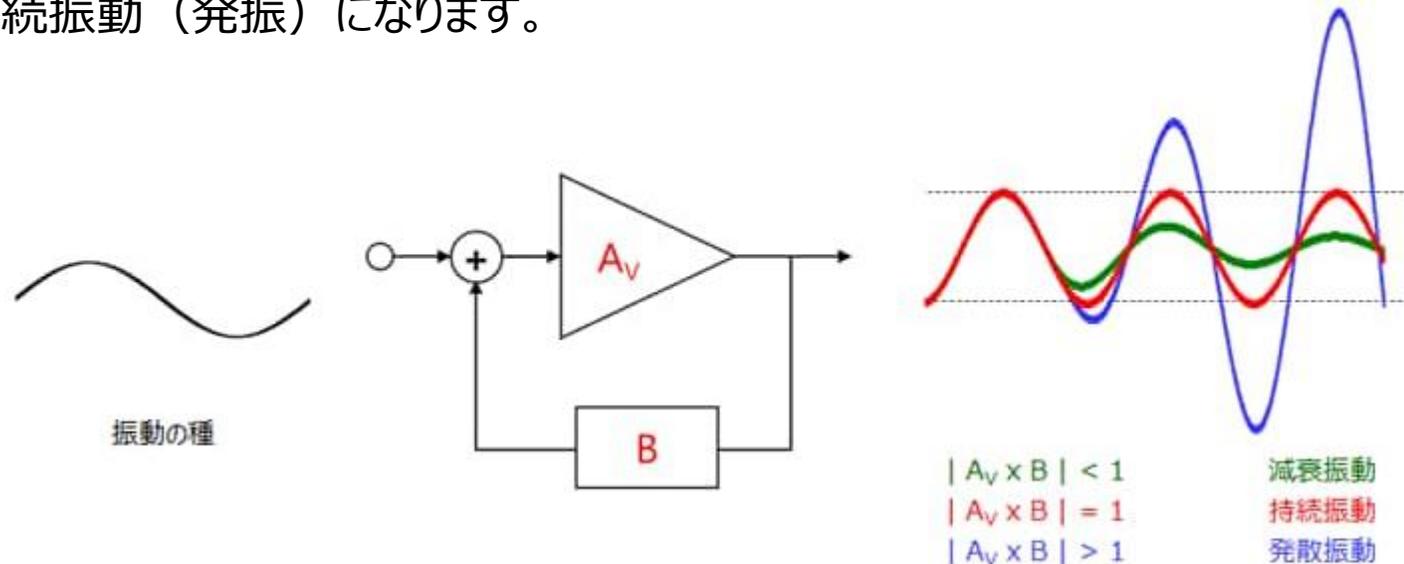
帰還回路の伝達関数は以下になります。 A_V はオペアンプの開ループ利得、 B は帰還ループの帰還率です。 $A_V B$ はそれぞれ複素数です。

$$V_{out} = A_V / (1 + A_V \times B) \times V_{in}$$

負帰還回路の場合、 $A_V \times B = + |A_V \times B|$ となり、1項で説明したように V_{out} は安定な出力を得ることができます。しかしながら全ての回路は遅延を持つので、周波数が高くなると入力に対して位相遅れが生じます。

この帰還回路の位相遅れにより位相が180度ずれると正帰還となります。

正帰還（帰還回路を通った信号の位相が同相）におけるループゲインの大きさ $|A_V \times B|$ による出力 V_{out} のイメージを以下に示します。振動の種が入力されると、その周波数における $|A_V \times B|$ の大きさによって、減衰振動・持続振動・発散振動が生じます。持続振動が発振と呼ばれる現象です。ただし、発散振動は最終的には増幅器のダイナミックレンジなどにより開ループ利得 " A_V " が制約され持続振動（発振）になります。



3. 発振

ループゲイン ($A_V \times B$) が下記の条件 (伝達関数の分母がゼロになる条件) が満たされる時に持続振動 (発振) が生じます。この条件をバルクハウゼンの発振条件 (または単に発振条件) と呼びます。

$$\text{振幅条件 } R_e (A_V \times B) = -1$$

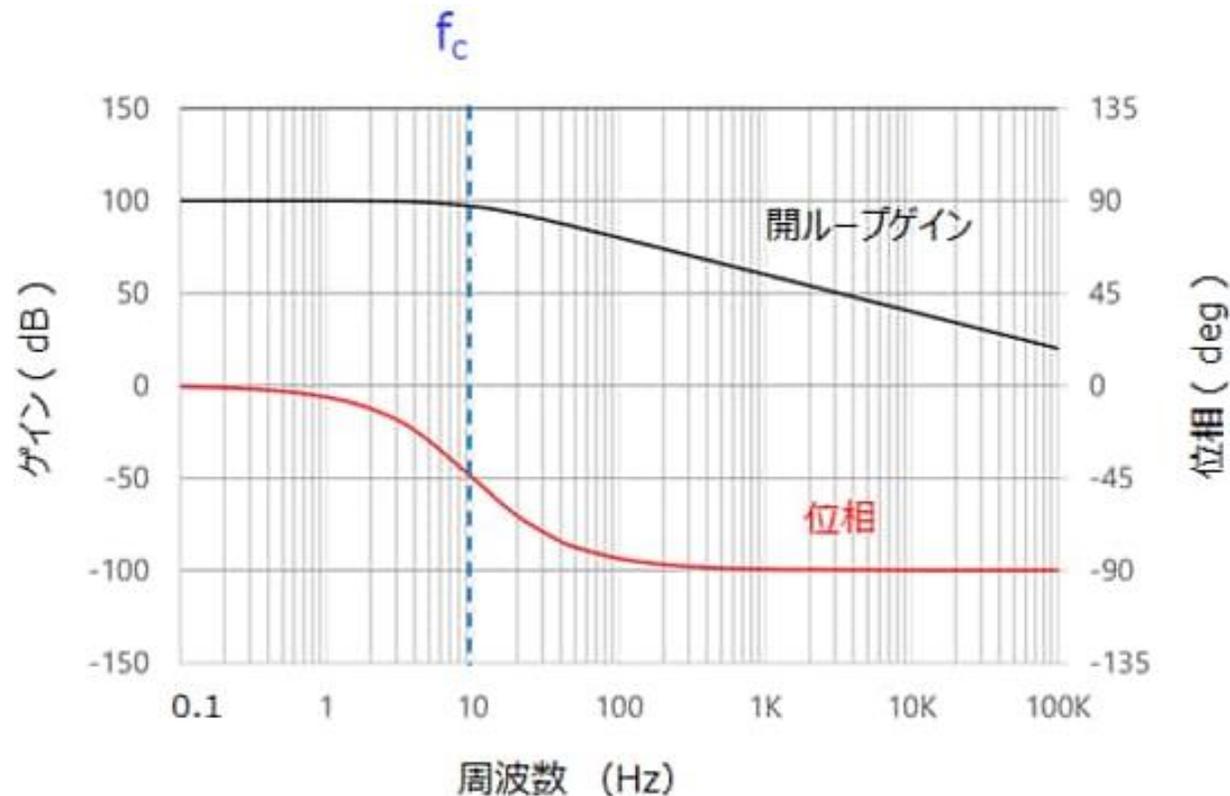
$$\text{位相条件 } I_m (A_V \times B) = 0 \quad (\text{入力信号と同位相})$$

ただし、既に記載したように発散振動も最終的には発振になります。従って、異常発振が生じる振幅条件は以下になります。

$$\text{振幅条件 } R_e (A_V \times B) < -1$$

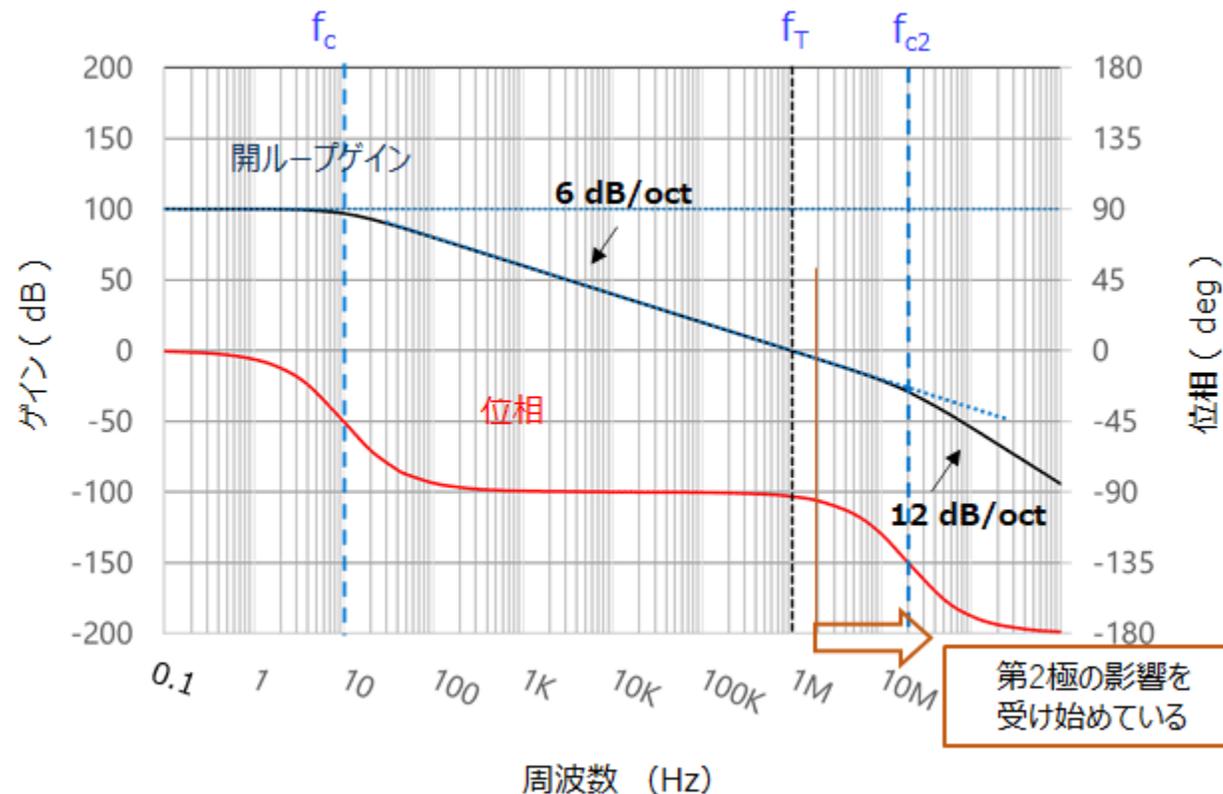
3. 発振

オペアンプは内部に持つ寄生容量などにより、図に示す1次遅れ（1次のLPFと同じ）要素を持ちます。一般的なオペアンプは図に示すように開ループゲインのカットオフが10Hz～100Hz程度になります。このカットオフ周波数で位相は45度遅れます。オープンループ利得 A が6dB/Oct で減少する周波数では90度遅れます。このような特性（主極しかない特性）であれば、360度の位相に対し90度余裕があるので、発振は起こりにくいと考えることができます。



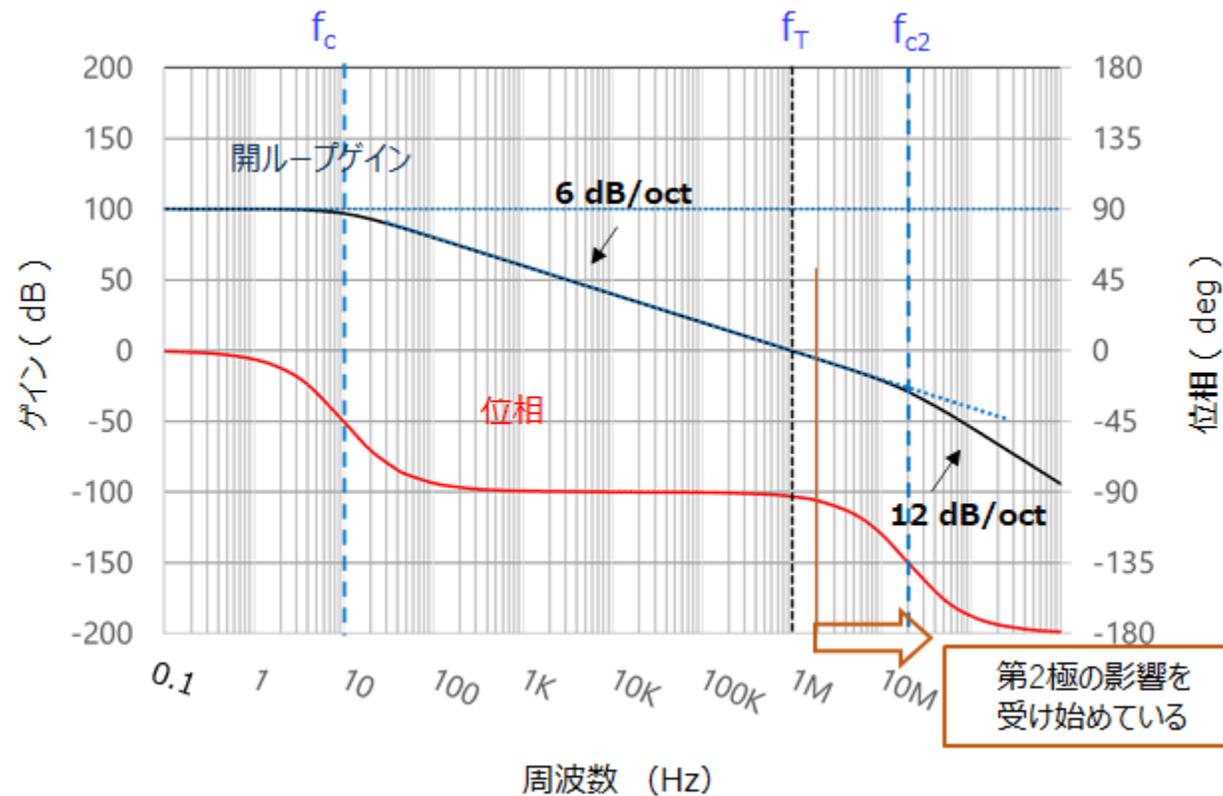
3. 発振

実際には、オペアンプには複数の極が存在します。図に示すカットオフ周波数 f_c は主極と呼ばれ、しゃ断周波数 f_T の近傍に存在する周波数 f_{c2} の極を第2極と呼んでいます。もっと高い周波数にこれ以外の極もありますが、実使用上問題なることはほとんどありません。



3. 発振

図に示すように、 f_{c2} より高い周波数でのオープンループゲインの傾きは6dB/Octから12dB/Octに変わります。また、 f_{c2} で位相は更に45度遅れることとなります。この遅れも f_{c2} がしゃ断周波数 f_T より高い周波数に存在する場合は問題になりませんが、低い場合でボルテージフォロワーなどのユニティゲインで使用する場合に注意が必要です。（ f_T 以上の周波数に第2極が存在するオペアンプにのみユニティゲインで使用可能とデータシートに記載しています。）

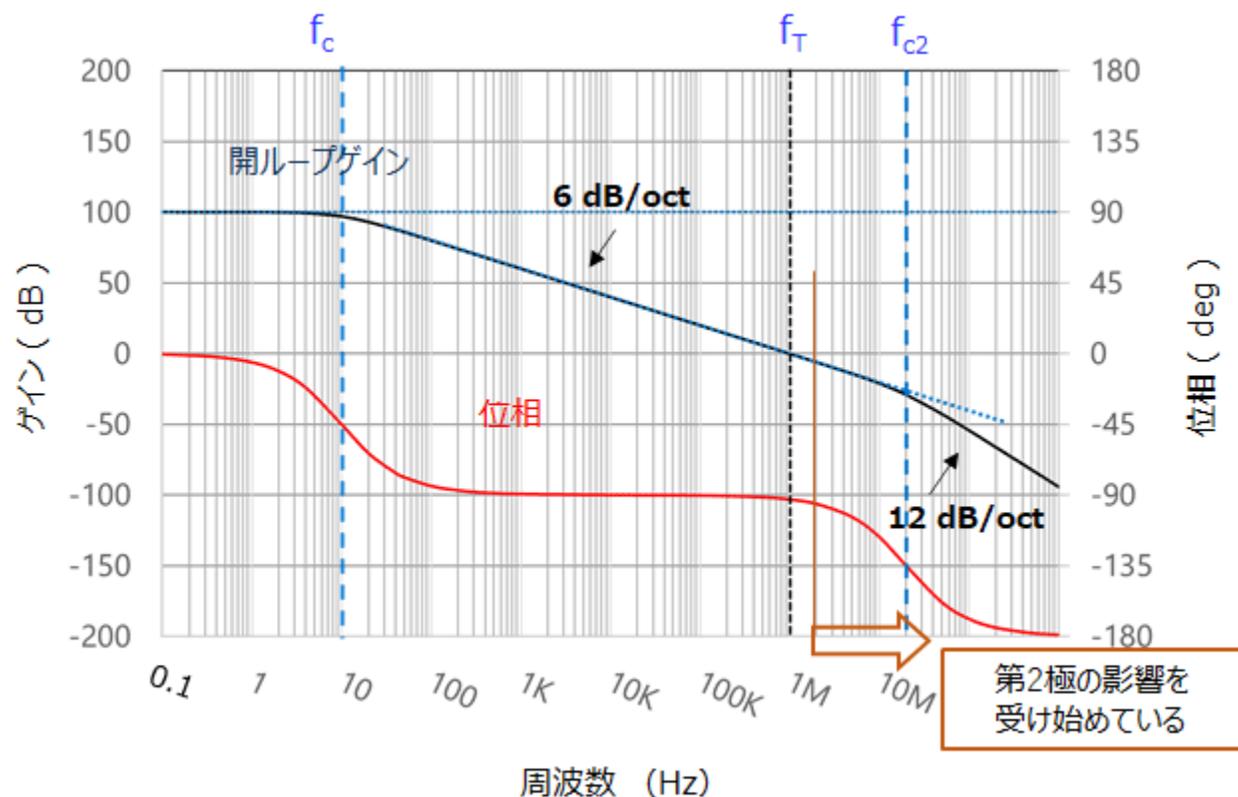


3. 発振

異常発振を避けるためにオペアンプは6dB/Octの範囲内 ($f_c \sim f_{c2}$) で使用するようにしてください。但し、 f_{c2} 近傍では既に第2極の影響を受けており、ロス・位相曲がりがあります。この影響を完全に避けるためには閉ループ帯域幅 f_{CL} を f_{c2} の1/5以下の周波数にする必要があります。

またノイズゲインやループゲインも発振と関係してきます

詳細は、当社アプリケーションノート“オペアンプ・コンプレーターの基礎”をご覧ください。



3. 発振

ここまではオペアンプ単体での発振の可能性を述べてきました。

外部回路でも発振（位相曲がりなど）が生じないように気を付ける必要があります。

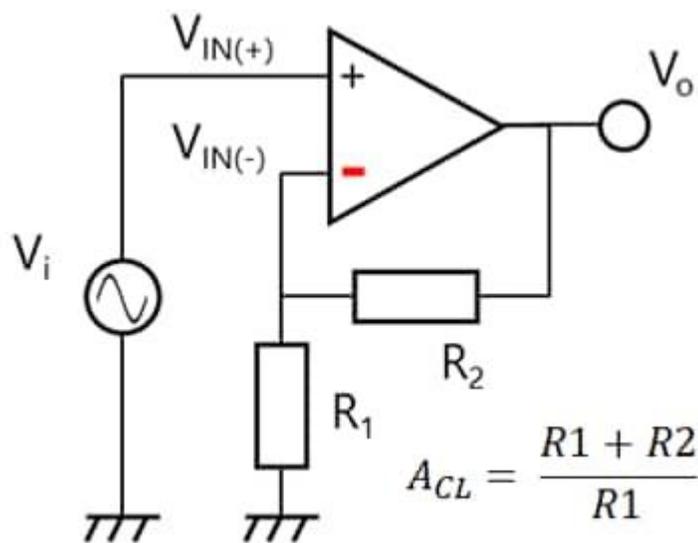
例えば、容量負荷をオペアンプで駆動する場合も同じことが言えます。ループゲインが 1 より大きな範囲内に容量負荷によるカットオフ周波数があれば、同様に発振することになります。容量に直列に抵抗を挿入するなどの対策が必要になります。また、負荷を接続していなくても、配線などの容量にも注意が必要です。オペアンプの出力に接続された次段への配線、帰還ループの配線は可能な限り短く配線してください。

4. 基本的な回路

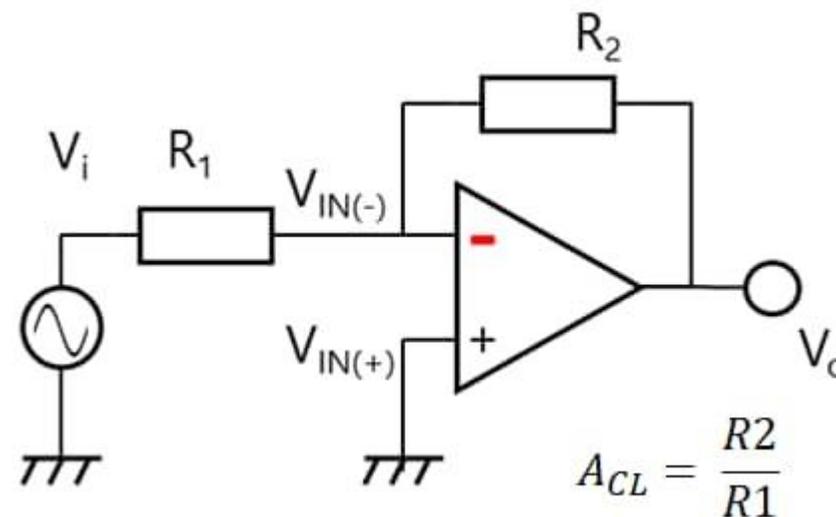
オペアンプの最も基本的な回路は、非反転増幅回路との反転増幅回路です。いずれの回路も負帰還（出力を $V_{IN(-)}$ に戻す）を使用しています。

これら回路のゲイン（閉ループゲイン） A_{CL} を図の下に記載します。ゲインの求め方に関しては、この後説明する仮想短絡（仮想接地、イマジナリーショートとも呼ばれます）の考え方をを用いると簡単に求められます。

非反転増幅回路の入カインピーダンスはオペアンプに直接入力しているため非常に高くなります。これに対し反転増幅回路では、仮想短絡の考え方から、 $V_{IN(-)}$ 端子が $V_{IN(+)}$ 端子と同値になり、 R_1 が入カインピーダンスとなるため、非反転増幅回路ほど高くない。



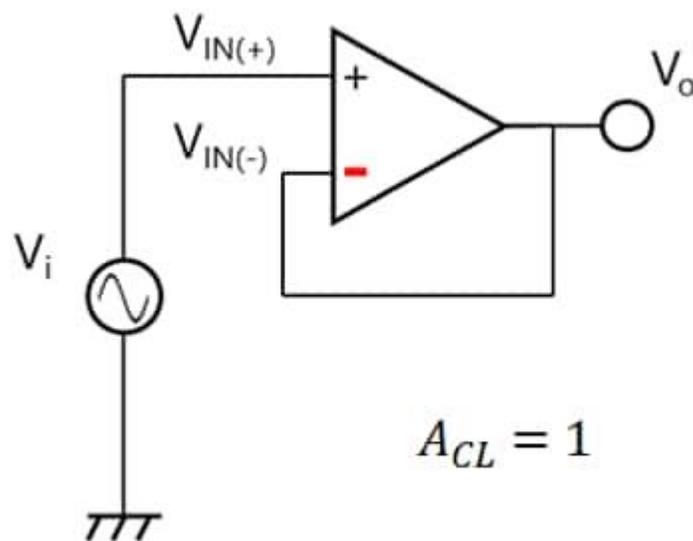
非反転増幅回路



反転増幅回路

4. 基本的な回路

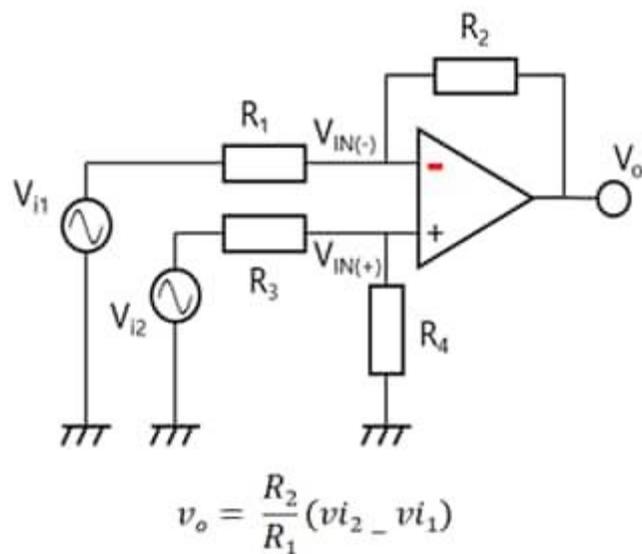
ボルテージフォロワーを図に示します。この回路は非反転増幅回路の抵抗値を $R_1 = \infty$ 、 $R_2 = 0$ とした回路と考えることができます。この回路はゲインが低い（ユニティゲイン $A_V = 1$ ）ため、帯域が広く、3項発振で説明した第2極の影響を受けることがあります。発振に気を付ける必要があります。ほとんどのオペアンプの第2極はしゃ断周波数 f_T に対して充分大きくなっており、ユニティゲインで使用可能です。ただし、配線容量や負荷容量などがあると発振することがあります。データシートにユニティゲインで使用可能と記載のある製品はボルテージフォロワーで使用可能です。それ以外の製品をこの用途で用いる場合はお手数ですが、担当営業にお問い合わせください。



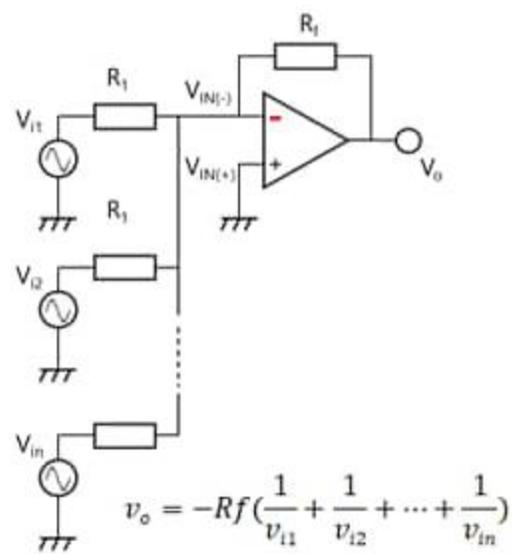
ボルテージフォロワー

4. 基本的な回路

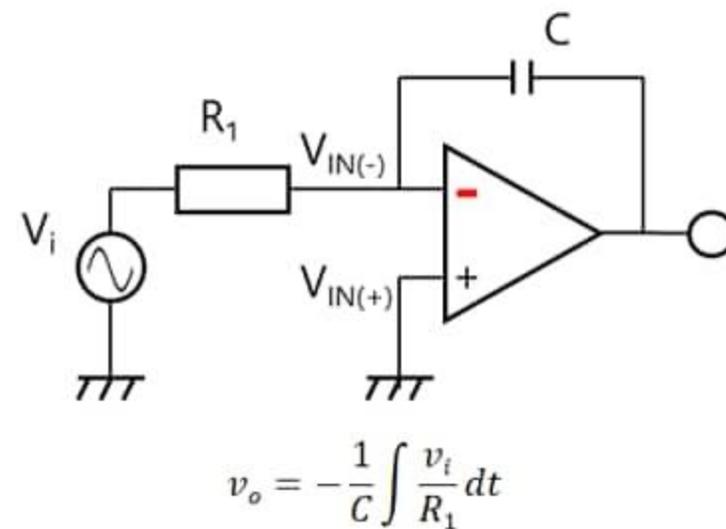
これ以外にも、非反転増幅回路と反転増幅回路を混載した差動増幅器（減算回路）、反転増幅回路を応用した加算回路や積分回路などの応用回路があります。



差動増幅器（減算回路）



加算回路



積分回路

5. 仮想短絡（仮想接地）

オペアンプの負帰還アンプの閉ループゲインを考えると、仮想短絡（バーチャルショート、仮想接地*、バーチャルグランド*などとも呼ばれることもあります）の考え方をすると簡単にゲインを求めることができます。

この考え方は、開ループゲインの大きな負帰還回路では入力信号に関係なく $V_{IN(+)}$ 端子と $V_{IN(-)}$ 端子はほぼ同じ電圧になるというものです。

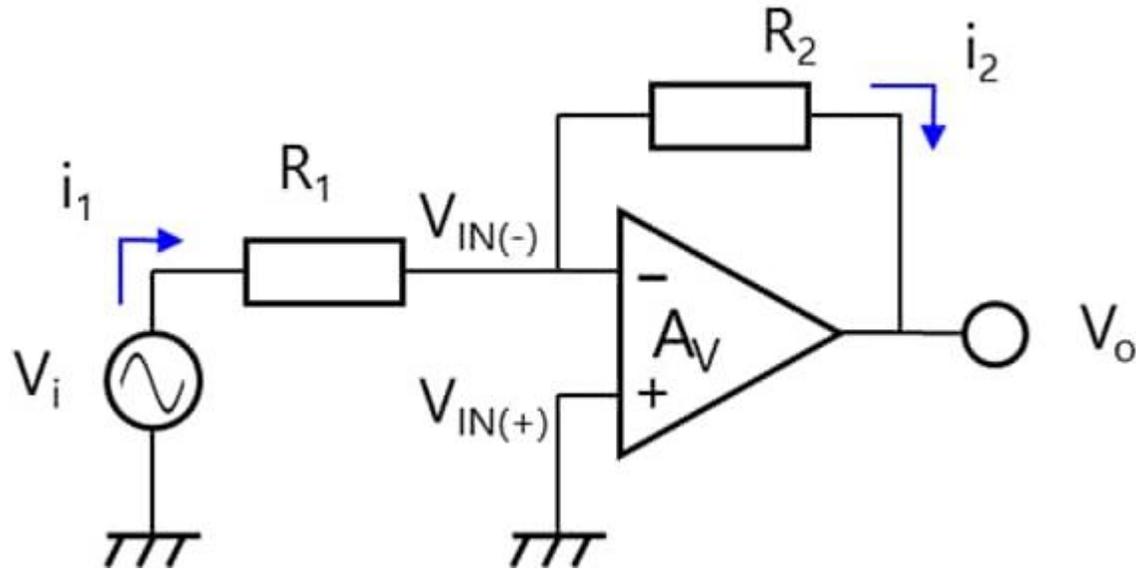
以下のように考えると感覚的に理解できます。

オペアンプは $V_{IN(+)}$ と $V_{IN(-)}$ の差分を増幅し、そのゲイン（開ループゲイン）は10万倍程度あります。ただし、現実のオペアンプでは出力は有限です。従って負帰還の無い回路で、仮に差分の電圧が正弦波で $1V_{pp}$ であれば出力は10万 V_{pp} になるはずですが、一般的に出力は電源電圧とグランドで制限されています。このことから電源電圧・グランド間の電圧で飽和した矩形波となります。従って、オペアンプを使ったアンプで歪の無い出力（例えば正弦波）を得る場合、入力 $V_{IN(+)}$ 端子と $V_{IN(-)}$ 端子間の電位差は無視できるほどわずかとなります。

*：仮想接地（バーチャルグランド）は、広義の意味では電源やGNDと直接接続されていない安定したノードを指します。オペアンプでは $V_{IN(-)}$ がGNDに見えることから仮想接地と呼ばれています。

5. 仮想短絡（仮想接地）

図の負帰還アンプ（反転増幅回路）の場合、出力信号は入力信号を下げる方向に働きます。このことで、出力は電源・グラウンド間に収まる信号となります。（例えば入力 1 Vpp で3倍のアンプ ($R_2 = 3 \times R_1$) であれば 3Vpp の出力となります。）このときオペアンプ自身の増幅率（開ループゲイン）は10万倍で働いています。出力が3Vpp ですので、入力は $3\text{Vpp} / 10\text{万} = 30\mu\text{Vpp}$ です。従って、 $V_{\text{IN}(-)} \doteq V_{\text{IN}(+)}$ と言えます。



5. 仮想短絡（仮想接地）

オペアンプを理想オペアンプと考えると以下の考え方ができます。

- ① 開ループ利得 A_V が無限大
- ② 入力インピーダンスが無限大
- ③ 出力インピーダンスがゼロ

R_1 を流れる電流 i_1 は条件②により全て R_2 を流れます。

$$i_1 = (V_i - V_{IN(-)}) / R_1 = (V_{IN(-)} - V_o) / R_2 \quad \dots(1)$$

$$\text{オペアンプの基本式は } V_o = A_V \times (V_{IN(+)} - V_{IN(-)}) \quad \dots(2)$$

(1)式と(2)式から $V_{IN(+)}$ を求めると

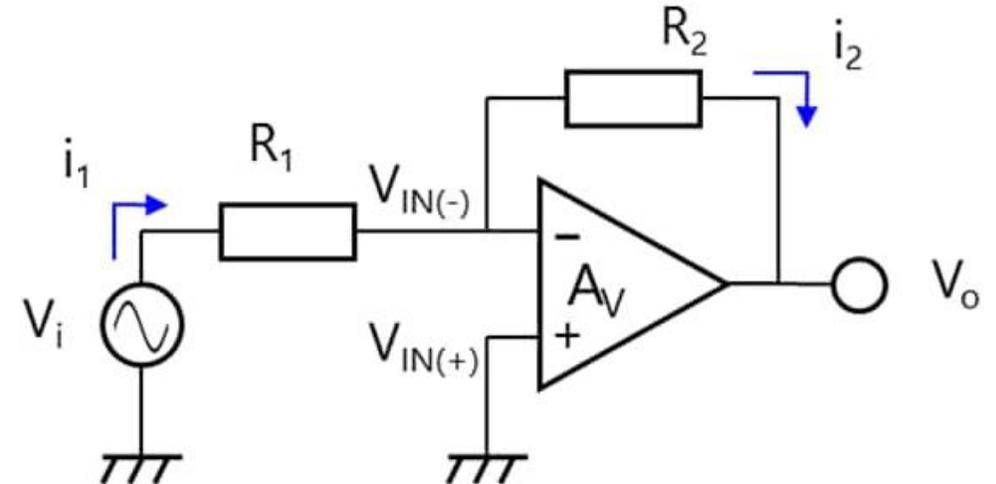
$$V_{IN(+)} = \{1 + (R_1 + R_2) / (A_V * R_1)\} * V_{IN(-)} - R_2 * V_i / (A_V * R_1) \quad \dots(3)$$

$$\underbrace{\{1 + (R_1 + R_2) / (A_V * R_1)\}}_{\approx 0} * V_{IN(-)} - \underbrace{R_2 * V_i / (A_V * R_1)}_{\approx 0} \rightarrow \infty$$

条件①と(3)式から $V_{IN(+)} = V_{IN(-)}$ を導くことができます。

このことからマイナス側の入力 $V_{IN(-)}$ の電圧は接地している $V_{IN(+)}$ の電圧 GND に等しいことが分かります。

この $V_{IN(-)}$ 端子の状態を仮想短絡と呼びます。



5. 仮想短絡（仮想接地）

仮想短絡と理想オペアンプを用いて、非反転増幅回路の A_V を求めてみます。出力電圧 V_o を V_i で表します。仮想短絡の考え方から $V_{IN(-)} = V_{IN(+)} = V_i$ と考えることができます。従って R_1 を流れる電流 I_1 は以下になります。

$$I_1 = V_{IN(-)} / R_1 = V_i / R_1$$

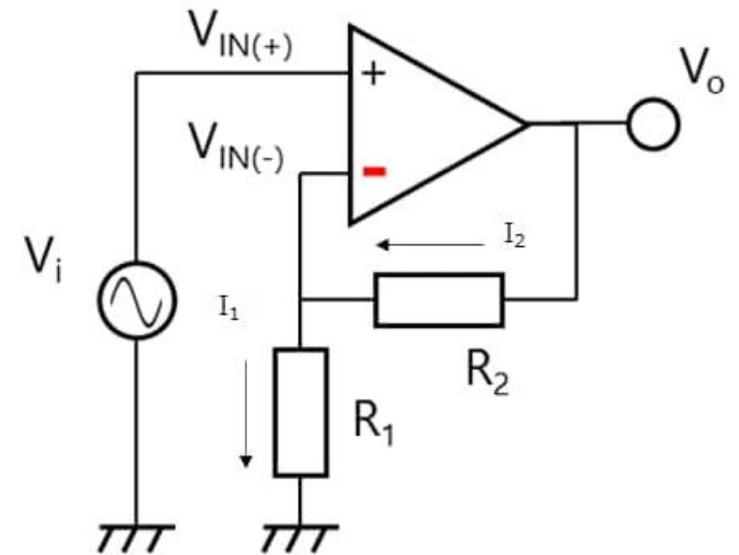
オペアンプの入力端子のインピーダンスは無限大ですので電流は流れ込まないので、 R_2 に流れる電流 I_2 に対し $I_1 = I_2$ が成り立ちます。従って R_2 の両端の電位差 V_{R2} は以下になります。

$$V_{R2} = R_2 \times I_2 = R_2 \times V_i / R_1$$

従って、 V_o は以下になります。

$$\begin{aligned} V_o &= V_{R1} + V_{R2} \\ &= V_i + R_2 \times V_i / R_1 = V_i \times (R_1 + R_2) / R_1 \\ A_V &= V_o / V_i = (R_1 + R_2) / R_1 \end{aligned}$$

このように簡単に求めることが可能です。



非反転増幅回路

5. 仮想短絡（仮想接地）

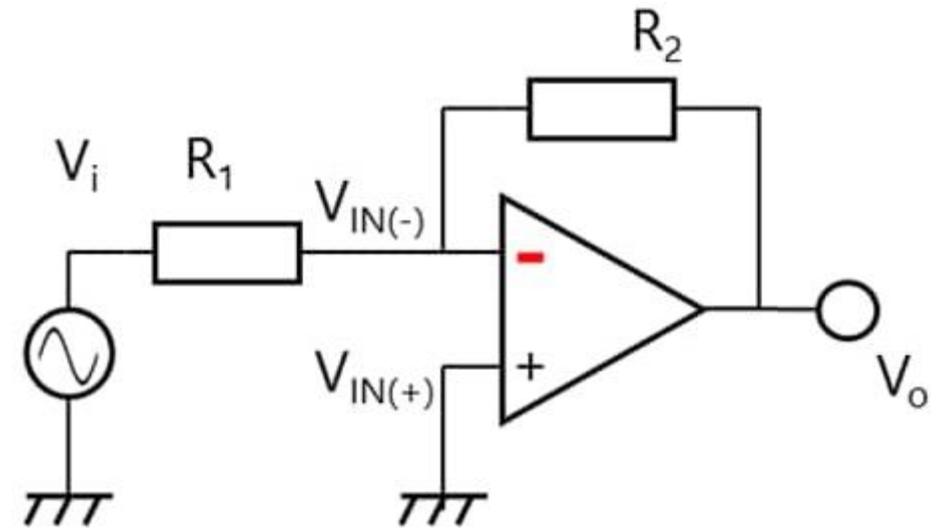
反転増幅回路についても同様に求めることができます。

$$\begin{aligned}V_{IN(-)} &= V_{IN(+)} = 0 \text{ V (GND)} \\I_1 &= V_1 / R_1 = I_2 \\V_o &= V_{R2} = R_2 \times I_2 = R_2 \times V_1 / R_1\end{aligned}$$

従って、閉ループゲインは以下になります。

$$A_V = V_o / V_i = R_2 / R_1$$

このように仮想短絡の考え方と理想オペアンプの考え方を利用すれば簡単に閉ループ利得を求めることができます。



反転増幅回路

TOSHIBA