オペアンプシリーズ

オペアンプの容量負荷による発振について

目次：

1．オペアンプの周波数特性について
2．位相遅れと発振について
3．オペアンプの位相遅れの原因
4．安定性の確認方法(増幅回路)
5．安定性の確認方法(全帰還回路/ボルテージフォロア)
6．安定性の確認方法まとめ
7．容量負荷による発振の対策方法(出力分離抵抗 1)
8．容量負荷による発振の対策方法(出力分離抵抗 2)

1. オペアンプの周波数特性について

用語の説明

・利得周波数特性：

増幅回路の利得は周波数特性を持っています。
オペアンプ内部の位相補償容量や端子容量、基板の寄生容量、回路定数により決定されます。

・位相周波数特性：

オペアンプの入力波形と出力波形の位相差を表しています。利得と同様にオペアンプの特性や回路定数、寄生容量の影響を受けます。

・開放利得 Av：

オープンループ利得とも言い、直流に対する電圧利得を表します。

・単一利得周波数 f_T：

利得が 0dB(1 倍)となる周波数を単一利得周波数と呼びます。

・利得帯域幅積 GBW：

増幅回路の周波数特性は極(ポール)一つにつき-6dB/oct で減衰します。-6dB/oct で減衰する領域における利得と任意の周波数の積を利得帯域幅積と言います。これは小信号におけるオペアンプの使用可能な周波数帯域を表しています。

利得帯域幅積[Hz] = 周波数[Hz] × 利得[倍]

・1st ポール：

1 つ目の極のことで、1 つのポールから振幅は-6dB/oct で減衰しポールの 1/10 倍の周波数から位相遅れがはじまりポールの周波数で 45deg、10 倍の周波数で 90deg 位相が遅れます。

・2nd ポール：

2 つ目の極のことで、振幅の減衰量は-12dB/oct となり位相はさらに 45deg 遅れ、さらに 10 倍の周波数で 90deg 位相が遅れます。

注)-6dB/oct=周波数が 2 倍になった時に-6dB 下がることを意味しています。(oct = octave)

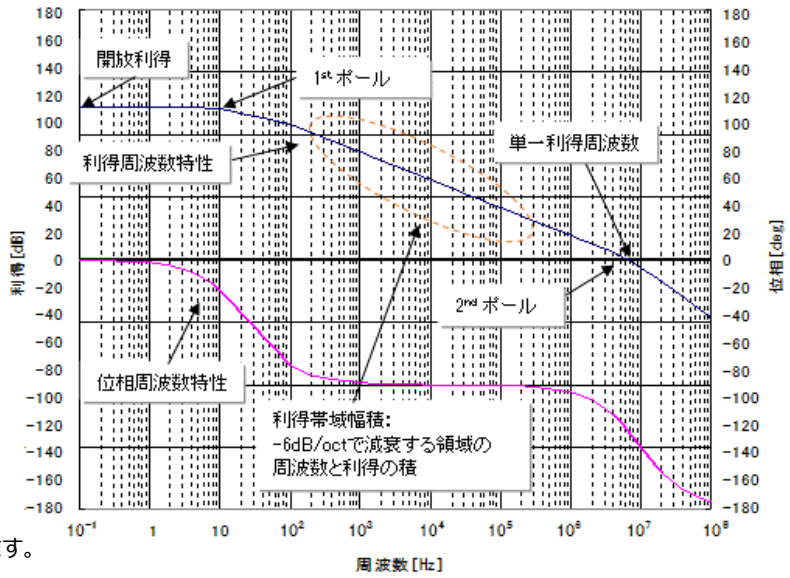


Figure 1. オペアンプのオープンループ周波数特性例

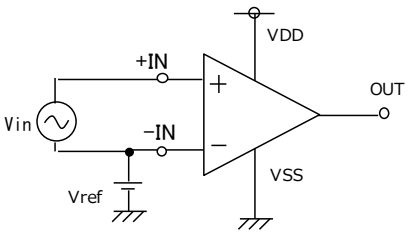


Figure 2. 測定回路（概念図）

© 2017 ROHM Co., Ltd.

位相余裕：

利得が 0dB(1 倍)になる周波数における入出力信号の位相差を位相余裕と呼びます。位相余裕は発振への余裕度を表す指標の一つで、通常 40deg～60deg 程度に設計されています。

反転増幅回路はθ1、入出力の位相差がそのまま位相余裕となり、反転増幅回路の位相が 180deg から始まることによります。

非反転増幅回路は位相が 0deg から始まるため位相余裕は 180deg からの余裕度ということで、180+θ2 となります。

反転増幅回路　位相余裕：θ1

非反転増幅回路　位相余裕：180+θ2

ゲイン余裕：

位相遅れが 180deg となった周波数における利得の 0 dB までの余裕度です。通常は-7dB 以下で設計されており、位相余裕と同様に発振に対する余裕度として使用されます。

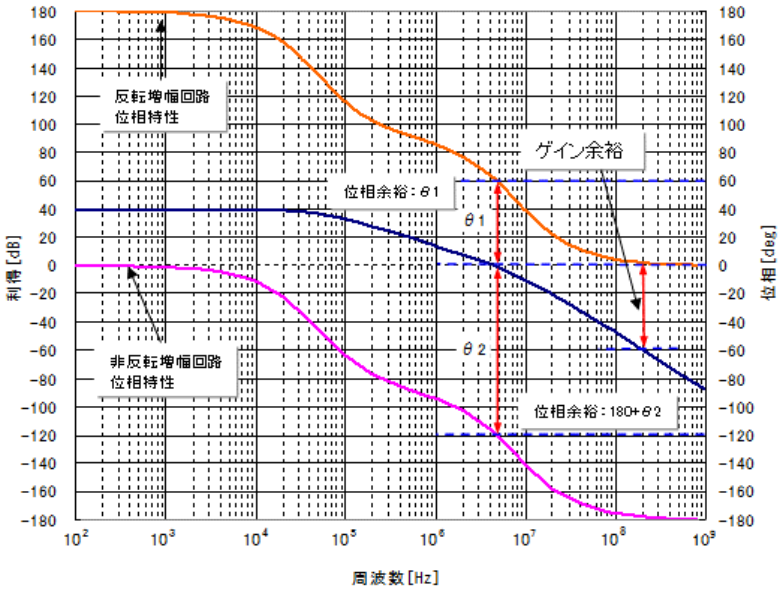


Figure 3. 反転(非反転)増幅回路 40dB*(100 倍)の周波数特性例

*オペアンプの直流付近の開放利得は 100dB 以上と非常に大きく、出力から抵抗で直流帰還をかけることで出力直流電圧が安定します。利得周波数特性を測定する場合、反転または非反転増幅回路で 40dB 程度に設定し安定に測定します。1st pole 周波数領域より高い周波数の特性は同等となるため、位相余裕やゲイン余裕はこのグラフから読み取ることができます。

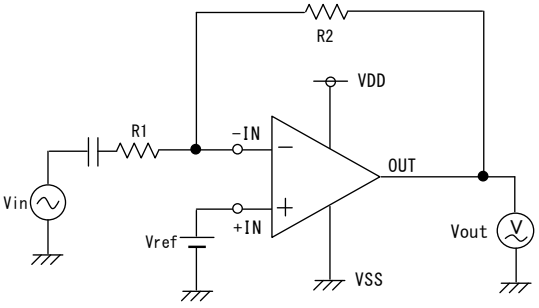


Figure 4. 反転増幅回路

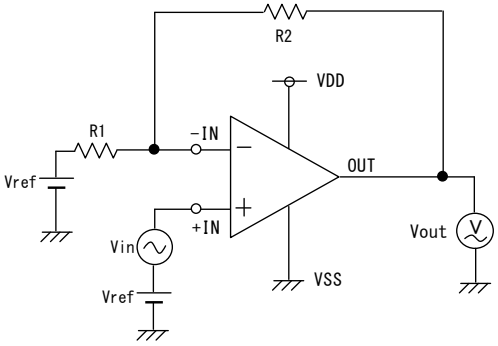


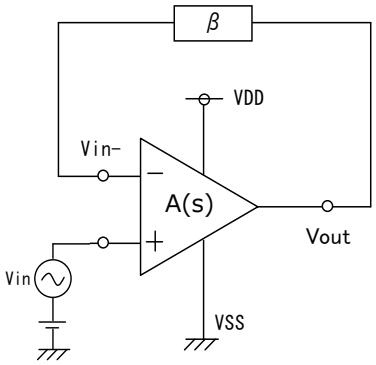
Figure 5. 非反転増幅回路

© 2017 ROHM Co., Ltd.

2. 位相遅れと発振について

位相遅れによる発振の概念について最も一般的な
バルクハウゼンの定理を示します。
負帰還回路、Figure 6.の伝達関数を求めます。

$$A(s)(V_{in} - V_{in-}) = V_{out}$$
$$V_{in-} = \beta V_{out}$$



A(s)：オペアンプの伝達関数
s= j ω、ω=2π f 、
f ：周波数、β：ループ利得

Figure 6. 負帰還回路

上記の二つの式から伝達関数を求めると以下のようになります。

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{A(s)}{1 + \beta A(s)}$$

ポイント
・位相が 180deg 遅れると正帰還がかかっている状態
と同じ条件になるため発振が起きる。

伝達関数の分母 1+βA(s)に注目します。
β・A(s)＝-1 の時、分母は 0 となり利得は無限大となることがわかります。つまりβ・A(s)＝-1 の時、伝達関数は発散します。
言い代えるとβ・A(s)＝-1 とは、負帰還を介して戻った信号が反転(位相遅れ 180deg)となることを意味しており、正帰還が
かかっている状態と同等になります。そのため回路は不安定となり発振が起きます。

以下にループ利得を 1 として発振条件をまとめます。(ループ利得 1 とは全帰還を表します)

$$|\beta A(s)| = 1$$
$$\angle \beta A(s) = -180\text{deg}$$

この条件において∠βA(s)は位相遅れを表し、 s=jω1 とすると、ループ利得βA(ω1)=1 の時、位相が 180deg 遅れると、ω1 の角周波数で発振することを表します。

ポイント
安定性の指標として、位相余裕、ゲイン余裕の 2 種類がある。位相余裕は利得が 1 倍(0dB)になった時に位相遅れ 180deg から
どの程度余裕があるかを表し、ゲイン余裕は位相遅れが 180deg（位相余裕が 0deg）になった時、利得がどの程度 1 倍から下がっ
ているかを表す。

© 2017 ROHM Co., Ltd.

位相が遅れる原因はポール(極)が存在するためです。RC フィルタの周波数特性を例に示します。

Figure 7.の RC フィルタの伝達関数より、Figure 8.を見るとキャパシタンスにより伝達関数に 1 つのポールが生じていることがわかります(1 次特性)。このポールにより位相はポールの周波数：fc で 45deg 遅れが生じ、10 倍付近の周波数では約 90deg 位相が遅れます。

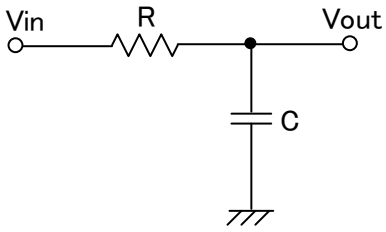


Figure 7. RC フィルタ回路

ポイント
・ポール 1 つで 90deg 位相が遅れる。
・キャパシタンスの容量によりポールの周波数は変わる。
・ポールの位置の周波数が高い場合でも、ポールの 1/10 倍の
周波数から位相が遅れ始める。

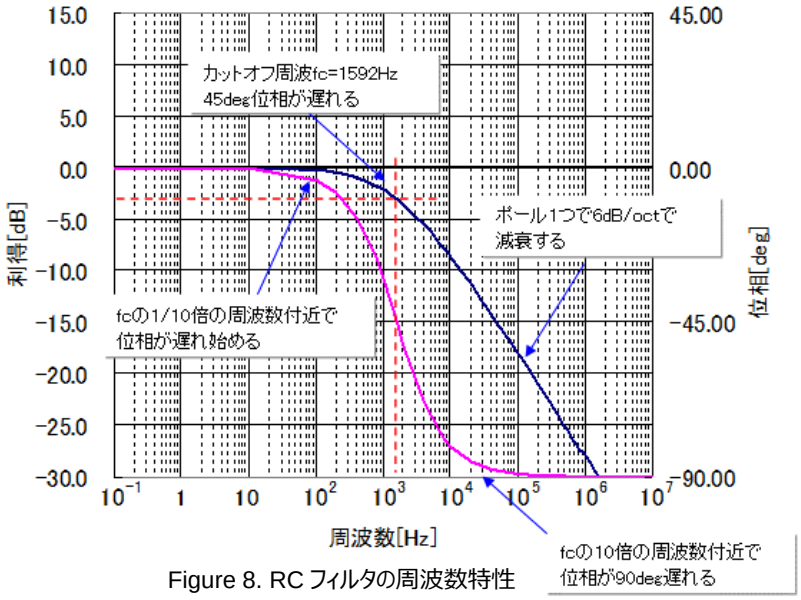


Figure 8. RC フィルタの周波数特性
R=1kΩ、0.1μF、fc＝1592Hz

RCフィルタの 伝達関数

$$\frac{V_{out}(j\omega)}{V_{in}(j\omega)} = \frac{1}{1+j\omega RC}$$

信号振幅

$$H(\omega) = \frac{1}{\sqrt{1+(\omega RC)^2}}$$

位相

$$\theta = -ArcTan(\omega RC)$$

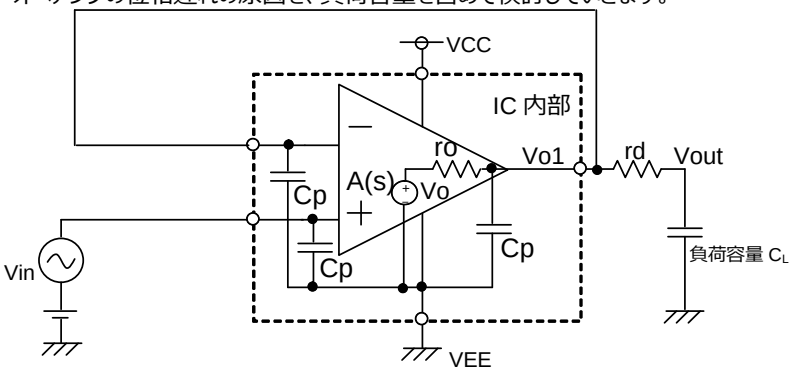
RCフィルタの 伝達関数より、
ポールとカット オフ周波数は
次のようにあらわされる。

$$\omega_0 = \frac{1}{RC} \quad f_c = \frac{1}{2\pi RC}$$

© 2017 ROHM Co., Ltd.

3. オペアンプの位相遅れの原因

オペアンプの位相遅れの原因を、負荷容量を含めて検討していきます。



ポイント
・出力インピーダンスと端子寄生容量によるポール
・出力インピーダンスと負荷容量によるポール
(意図して付けたもの)
・増幅回路を構成した際に帰還抵抗と入力端子寄生容量により発生するポール

A(s):オペアンプの伝達関数 s= j ω、ω=2π f
f：周波数、ro：出力インピーダンス、Cp：端子寄生容量、C_L：負荷容量

Figure 9. 全帰還回路

最も発振が起きやすい全帰還回路(ボルテージフォロア)について位相遅れの原因を Figure 9.の回路の伝達関数より示します。

$$A(s)(V_{in}-V_{o1})=V_o$$

$$V_{o1}=\frac{\frac{1}{sC_p}}{r_o+\frac{1}{sC_p}}=\frac{1}{1+r_oC_ps}V_o$$

上記より、出力インピーダンス(ro)と端子容量を考慮した伝達関数（寄生容量はまとめて Cp としています）は、

$$\frac{V_{o1}}{V_{in}}=\frac{A(s)}{1+r_oC_ps+A(s)}=\frac{1}{1+\frac{1+C_pr_os}{A(s)}}$$

Cp と ro によりポールが形成されています。
オペアンプはこの影響を考慮して設計されています。

上記の式で Cp = Cp + C_L とすると負荷容量を接続した際の伝達関数は、

$$\frac{V_{o1}}{V_{in}}=\frac{A(s)}{1+r_o(C_p+C_L)s+A(s)}=\frac{1}{1+\frac{1+(C_p+C_L)r_os}{A(s)}}$$

Cp+C_L と ro によりポールが形成されています。
Cp は IC 内部の寄生容量のためほとんど変化はありませんが、負荷容量 C_L が大きいとポールの発生する周波数は低くなります。

と、なります。

© 2017 ROHM Co., Ltd.

4. 安定性の確認方法(増幅回路)

実例として BA2904 の負荷容量 C_L の値による位相と周波数特性の変化を示します。

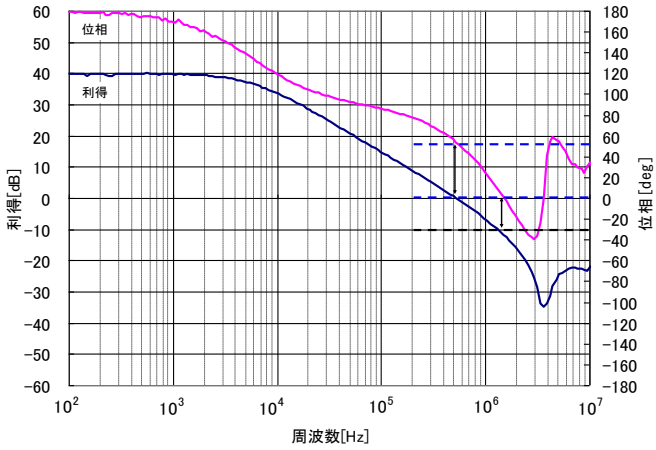


Figure 10. BA2904 周波数特性(C_L=25pF)

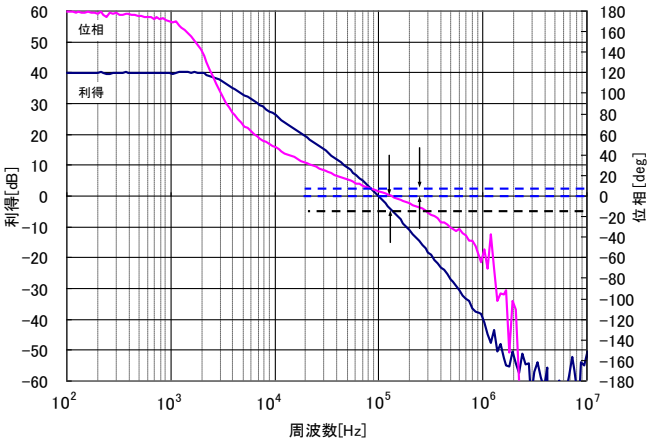


Figure 11. BA2904 周波数特性(C_L=0.01μF)

・C_L=25pF の時

位相余裕：55deg→利得が 0dB になる時の位相

ゲイン余裕：-10dB→位相が 0deg になる時の利得

・C_L=0.01μF の時

位相余裕：7deg →利得が 0dB になる時の位相

ゲイン余裕：-5dB→位相が 0deg になる時の利得

位相余裕度は小さいが発振は生じていません。

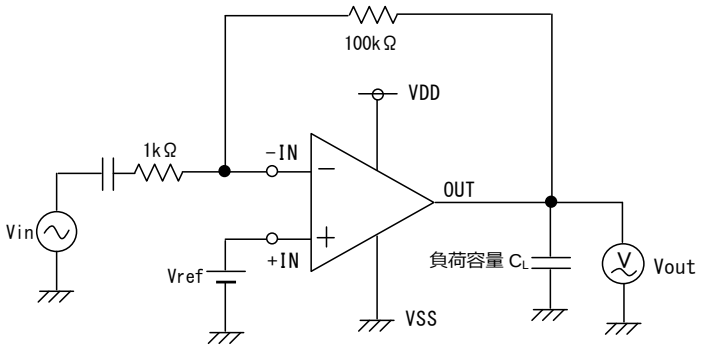


Figure 12. 反転増幅回路 40dB(100 倍)

ポイント

・増幅回路の発振安定性の確認は位相余裕とゲイン余裕で行う。

・反転増幅回路は位相が 180deg から始まるため位相余裕は利得 0deg の位相になる。

・非反転増幅回路の位相は 0deg から始まるため位相余裕は 180deg から利得 0dB 時の位相の値の差分になる。

・バラツキや温度変化などを考慮し位相余裕は 35deg 以上、ゲイン余裕は-7dB 以下になるように設計を行う。

© 2017 ROHM Co., Ltd.

5. 安定性の確認方法(全帰還回路/ボルテージフォロワ)

位相余裕の考え方を再確認します。

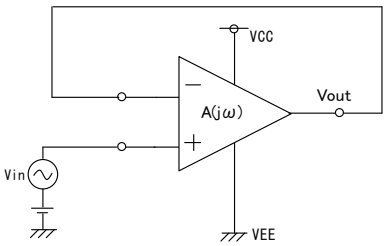


Figure 13. 全帰還回路

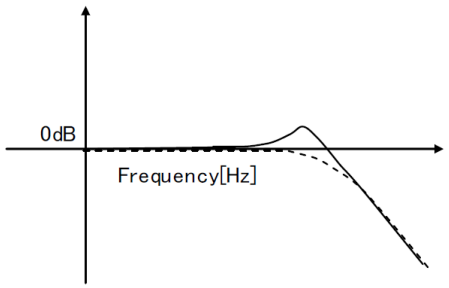


Figure 14. 測定結果

・位相余裕は利得が 1 倍(0dB)になった時に位相遅れ 180deg からどの程度余裕があるか。
・ゲイン余裕は位相遅れが 180deg(位相余裕が 0deg)になった時、利得が 1 倍からどの程度、下がっているか。

今まで説明した方法では全帰還回路（利得 0dB）の位相余裕は確認できません。安定性が低下すると、Figure 14.に示すように周波数特性に利得のピークが発生します。伝達関数を用いて発生するピーク量から位相余裕を計算します。

ボルテージフォロア(全帰還回路)の伝達関数

$$\frac{V_{out}}{V_{in}}(j\omega)=\frac{A(j\omega)}{1+\beta A(j\omega)}$$

A(jω)を複素表示し伝達関数に代入します。

$$A(j\omega)=\exp(j\theta)$$

$$\frac{Vout}{Vin}(j\theta)=\frac{\frac{1}{\beta}\exp(j\theta)}{\frac{1}{\beta}+\exp(j\theta)}=\frac{\frac{1}{\beta}(\cos\theta+j\sin\theta)}{\frac{1}{\beta}+\cos\theta+j\sin\theta}$$

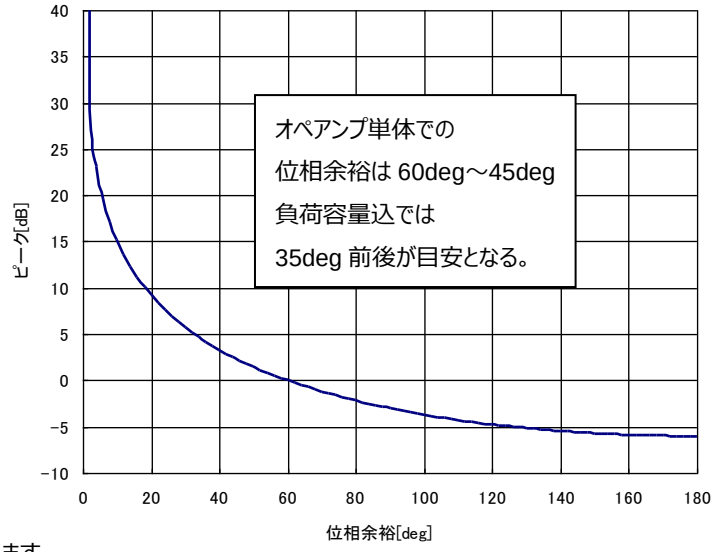


Figure 15. 利得ピーク計算結果

上記の式に以下の値を代入し計算を行った結果を Figure 15.に示します。
θ(ω1）=-175deg(5deg)、θ(ω2)=-135deg(45deg)、θ(ω3)=-120deg(60deg)
β=1、Figure 15.の結果のように位相余裕 60deg の時、ピークは 0dB となり最適であるということが分かります。

位相余裕	計算結果[倍]	ピーク[dB]
5deg	11.5	21
45deg	1.3	2
60deg	1	0

ポイント
・ボルテージフォロアの周波数特性を測定し利得のピークから位相余裕を算出できる。
・一般的なオペアンプ全てに適用できる。
・位相余裕が小さい時は実際にオシロスコープ等で発振の有無を確認する。

© 2017 ROHM Co., Ltd.

6. 安定性の確認方法まとめ

増幅回路を構成した場合

・増幅回路の発振の確認は位相周波数特性を測定し、位相余裕とゲイン余裕の確認を行います。

・反転増幅回路は位相が 180deg から始まるため位相余裕は利得 0deg の時の位相が読み値になります。

・非反転増幅回路は位相が 0deg から始まるため、位相余裕は 0dB 時の位相の 180deg との差分になります。

・バラツキや温度変化などを考慮し、位相余裕は 35deg 以上を目安に、またゲイン余裕は-7dB より低くなるように設計を行います。
（一般的に、オペアンプ単体で位相余裕は 60deg～40deg 程度で設計されています。）

全帰還回路(ボルテージフォロア)を構成した場合

・入出力間の周波数特性を測定し利得のピークを確認することで、本資料の Figure 15 より位相余裕を見積もることができます。

・Figure 15 は一般的なオペアンプ全てに適用できます。

・位相余裕が小さい時に実際に発振の有無を確認します。

・位相余裕はバラツキや温度変化などを考慮し、35deg 以上を目安に設計を行います。

以上の発振の確認は計算では複雑になるため、実験により確認することが一般的です。

© 2017 ROHM Co., Ltd.

7．負荷容量による発振の対策方法(出力分離抵抗 1)

基本的には前項までの発振を回避する条件を満足することにより発振を防ぐことが可能ですが、出力端子に大容量のコンデンサを接続する場合の発振対策を示します。

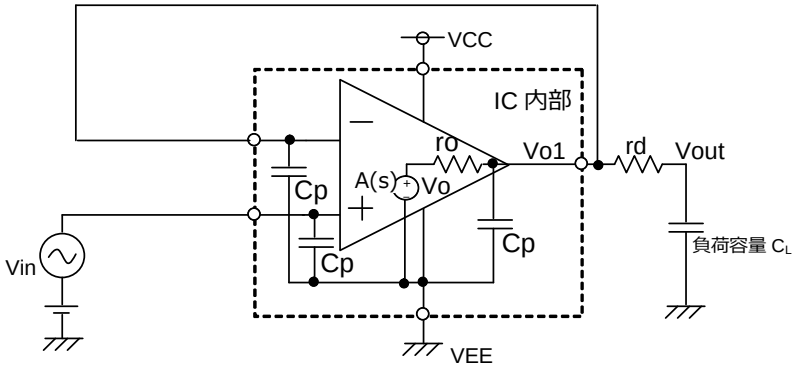


Figure 16. 出力分離抵抗接続例 1

ポイント
・分離抵抗の値は容量と必要な周波数帯域幅に応じて 50Ω～数百 Ω 程度に設定する。
・rd と C_L でローパスフィルタを構成するため負荷容量が大きいと回路の帯域が狭くなる。

Figure 16.の伝達関数を計算します。

$$A(s)(V_{in}-V_{o1})=V_o$$

$$V_{o1}=\frac{\frac{1}{sC_p}}{r_o+\frac{1}{sC_p}}=\frac{1}{1+r_oC_ps}V_o$$

$$\frac{V_{o1}}{V_{in}}=\frac{A(s)}{1+r_oC_ps+A(s)}=\frac{1}{1+\frac{1+C_pr_os}{A(s)}}$$

$$\frac{V_{out}}{V_{o1}}=\frac{1}{1+r_dC_Ls}$$

$$\frac{V_{o1}}{V_{in}}\frac{V_{out}}{V_{ol}}=\frac{A(s)}{1+r_oC_ps+A(s)}\frac{1}{(1+r_dC_Ls)}$$

$$\frac{V_{out}}{V_{in}}=\frac{A(s)}{(1+r_oC_ps+A(s))}\frac{1}{(1+r_dC_Ls)}$$

これに対し、Figure 9 で計算した分離抵抗の無い伝達関数は

$$\frac{V_{o1}}{V_{in}}=\frac{A(s)}{1+r_o(C_p+C_L)s+A(s)}$$

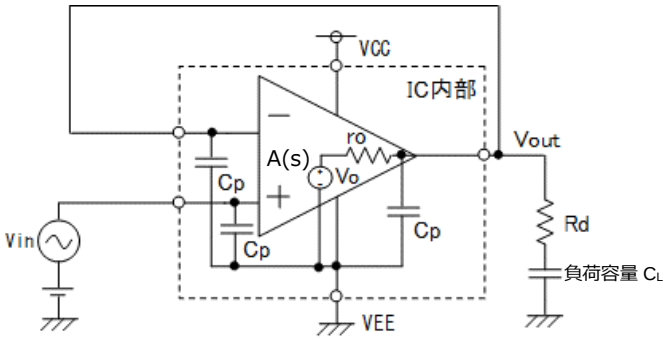
と、なります。

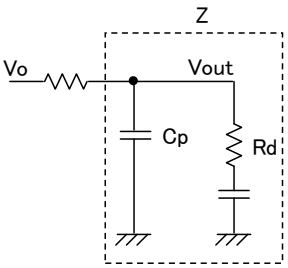
二つの伝達関数を比較すると出力に接続した容量 C_L が分離抵抗 rd により別の伝達関数に分離されていることがわかります。

© 2017 ROHM Co., Ltd.

8. 負荷容量による発振の対策方法(出力分離抵抗 2)

前項で述べた出力分離抵抗を挿入する方法では、出力にローパスフィルタが構成されるため使用方法によっては不都合が出る可能性があります。容量と直列に抵抗を挿入することにより、利得のピークを下げます。





$$Z=\frac{1}{sC_p+\frac{1}{R_d+\frac{1}{sC_L}}}$$

$$=\frac{R_d+\frac{1}{sC_L}}{1+sC_p(R_d+\frac{1}{sC_L})}$$

Figure 17. 出力分離抵抗接続例 2

Figure 17.の伝達関数を計算します。

$$A(s)(V_{in}-V_{out})=V_o \qquad V_o=A(s)V_{in}-A(s)V_{out} \qquad V_{out}=\frac{Z}{r_o+Z}V_o$$

$$(1+\frac{r_o}{Z})V_{out}=A(s)V_{in}-A(s)V_{out} \qquad (A(s)+1+\frac{r_o}{Z})V_{out}=A(s)V_{in}$$

$$\frac{V_{out}}{V_{in}}=\frac{A(s)}{A(s)+\frac{1}{Z}r_o+1} \qquad \frac{V_{out}}{V_{in}}=\frac{1}{A(s)+\frac{1+sC_p(R_d+\frac{1}{sC_L})}{R_d+\frac{1}{sC_L}}r_o+1}$$

$$\frac{V_{out}}{V_{in}}=\frac{1}{A(s)+r_o\frac{C_L+C_p(sC_L+1)}{sC_LR_d+1}s+1} \quad \cdots A$$

伝達関数のこの部分が異なります。

これに対し、Figure 9 で計算した分離抵抗の無い伝達関数は

$$\frac{V_{o1}}{V_{in}}=\frac{A(s)}{1+r_o(C_p+C_L)s+A(s)}$$

式 A の下線部分の周波数特性を解析します。 s=jω=j2πf とします。

$$X=\frac{C_L+C_p(sC_L+1)}{sC_LR_d+1}$$

f→ 0 の時 s→ 0, X→ C_L+Cp

f→∞ の時 s→∞, $sC_LRd >> 1$, $C_L << Cp(sC_L+1)$,$sC_L >> 1$ より X→ Cp/Rd に収束します。

以上より負荷容量 C_L の影響が除去できていることが分かります。

ポイント
・分離抵抗の値は容量と必要な周波数帯域幅に応じて 50Ω～数百 Ω 程度に設定する。

© 2017 ROHM Co., Ltd.

ご 注 意

1) 本資料の記載内容は改良などのため予告なく変更することがあります。

2) 本資料に記載されている内容は製品のご紹介資料です。ご使用に際しては、別途最新の仕様書を必ずご請求のうえ、ご確認ください。

3) ロームは常に品質・信頼性の向上に取り組んでおりますが、半導体製品は種々の要因で故障・誤作動する可能性があります。
万が一、本製品が故障・誤作動した場合であっても、その影響により人身事故、火災損害等が起こらないようご使用機器でのディレーティング、冗長設計、延焼防止、バックアップ、フェイルセーフ等の安全確保をお願いします。定格を超えたご使用や使用上の注意書が守られていない場合、いかなる責任もロームは負うものではありません。

4) 本資料に記載されております応用回路例やその定数などの情報につきましては、本製品の標準的な動作や使い方を説明するものです。
したがいまして、量産設計をされる場合には、外部諸条件を考慮していただきますようお願いいたします。

5) 本資料に記載されております技術情報は、製品の代表的動作および応用回路例などを示したものであり、ロームまたは他社の知的財産権その他のあらゆる権利について明示的にも黙示的にも、その実施または利用を許諾するものではありません。上記技術情報の使用に起因して紛争が発生した場合、ロームはその責任を負うものではありません。

6) 本製品は、一般的な電子機器（AV機器、OA機器、通信機器、家電製品、アミューズメント機器など）および本資料に明示した用途への使用を意図しています。

7) 本資料に掲載されております製品は、耐放射線設計はなされておりません。

8) 本製品を下記のような特に高い信頼性が要求される機器等に使用される際には、ロームへ必ずご連絡の上、承諾を得てください。
・輸送機器（車載、船舶、鉄道など）、幹線用通信機器、交通信号機器、防災・防犯装置、安全確保のための装置、医療機器、サーバー、太陽電池、送電システム

9) 本製品を極めて高い信頼性を要求される下記のような機器等には、使用しないでください。
・航空宇宙機器、原子力制御機器、海底中継機器

10) 本資料の記載に従わないために生じたいかなる事故、損害もロームはその責任を負うものではありません。

11) 本資料に記載されております情報は、正確を期すため慎重に作成したものですが、万が一、当該情報の誤り・誤植に起因する損害がお客様に生じた場合においても、ロームはその責任を負うものではありません。

12) 本製品のご使用に際しては、RoHS 指令など適用される環境関連法令を遵守の上ご使用ください。
お客様がかかる法令を順守しないことにより生じた損害に関して、ロームは一切の責任を負いません。
本製品の RoHS 適合性などの詳細につきましては、セールス･オフィスまでお問合せください。

13) 本製品および本資料に記載の技術を輸出又は国外へ提供する際には、「外国為替及び外国貿易法」、「米国輸出管理規則」など適用される輸出関連法令を遵守し、それらの定めにしたがって必要な手続を行ってください。

14) 本資料の一部または全部をロームの許可なく、転載・複写することを堅くお断りします。

ローム製品のご検討ありがとうございます。
より詳しい資料やカタログなどご用意しておりますので、お問合せください。

ROHM Customer Support System

http://www.rohm.co.jp/contact/

© 2015 ROHM Co., Ltd. All rights reserved.