



電圧帰還型オペアンプのゲインと帯域幅

はじめに

このチュートリアルでは、オペアンプのゲインと帯域幅を規定する一般的な方法について考察します。考察の対象は電圧帰還型 (VFB) オペアンプであり、電流帰還型 (CFB) オペアンプについては、以降のチュートリアル ([MT-034](#)) で取り上げます。

オープンループ・ゲイン

理想的なオペアンプと異なり、実際のオペアンプのゲインには限界があります。オープンループの DC ゲイン (一般に A_{VOL} と呼ばれる) とは、帰還ループが接続されていないアンプ (したがって「オープンループ」と呼ばれる) のゲインのことです。高精度のオペアンプの場合、このゲインは 160dB (1 億倍) 以上の大きな値とすることが可能です。このゲインは、DC から「ドミナント・ポール (主極) のコーナー周波数」と呼ばれる周波数までフラットです。この周波数から、ゲインは 6dB/オクターブ (20 dB/ディケード) で低下して行きます。オクターブとは周波数が 2 倍変化することで、ディケードとは周波数が 10 倍変化することです。オペアンプのポールが 1 つの場合、図 1A に示すように、オープンループ・ゲインはこのレートで低下し続けます。図 1B に示すように、実際のオペアンプは 2 つ以上のポールを持ちます。2 つ目のポールで低下のレートが 2 倍になり、オープンループ・ゲインは 12dB/オクターブ (40dB/ディケード) の割合で低下して行きます。2 つ目のポールの周波数に達する前に、オープンループ・ゲインが 0dB (ユニティ・ゲイン) 未満に低下していれば、オペアンプはどのゲインでも無条件に安定になるはずですが。このことは、一般にデータシートの「ユニティ・ゲインで安定」という記述を指します。クロズドループ・ゲインが 1 (0dB) より大きい周波数で 2 つ目のポールに達すると、アンプが不安定になる可能性があります。オペアンプによっては高いクロズドループ・ゲインのときだけ安定するように設計されているものもあり、これらは「非補償」オペアンプと呼ばれています。

周波数が高くなると、オペアンプに寄生ポールがさらに追加される可能性があります、一般に最初の 2 つのポールが最も重要です。

アナログ・デバイセズ社は、提供する情報が正確で信頼できるものであることを期していますが、その情報の利用に関して、あるいはその利用によって生じる第三者の特許やその他の権利の侵害に関して一切の責任を負いません。また、アナログ・デバイセズ社の特許または特許の権利の使用を明示的または暗示的に許諾するものでもありません。仕様は予告なく変更される場合があります。本紙記載の商標および登録商標は各社の所有に属します。日本語データシートは REVISION が古い場合があります。最新の内容については、英語版をご参照ください。

©2013 Analog Devices, Inc. All rights reserved.

Rev. 0, 10/08, WK

アナログ・デバイセズ株式会社

本社 / 〒105-6891 東京都港区海岸 1-16-1 ニューピア竹芝サウスタワービル
電話 03 (5402) 8200
大阪営業所 / 〒532-0003 大阪府大阪市淀川区宮原 3-5-36 新大阪トラストタワー
電話 06 (6350) 6868

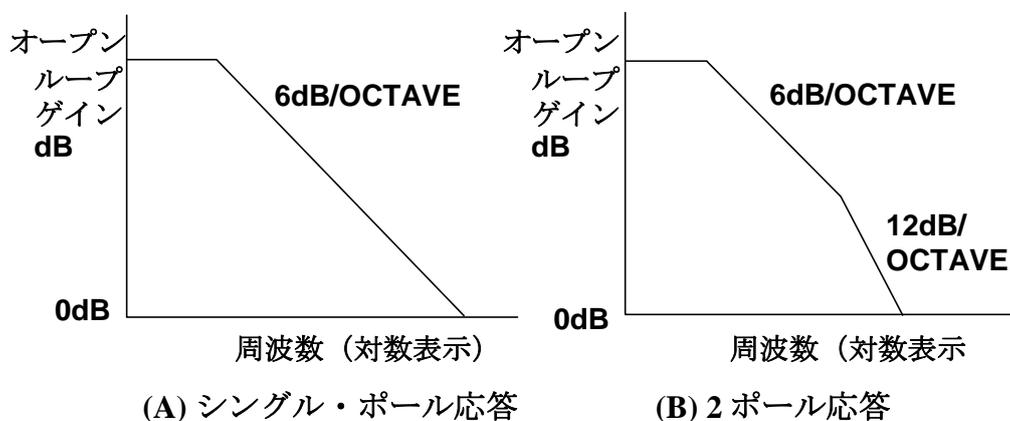


図 1. オープンループ・ゲイン (ボード線図)

ここで「オープンループ・ゲイン」、「クロズドループ・ゲイン」、「ループ・ゲイン」、「信号ゲイン」、「ノイズ・ゲイン」の違いを理解することが重要です。これらは根本的には似ており、相互に影響を与えますが、それぞれ異なります。このチュートリアルでは、これらすべてを詳細に説明します。

オープンループ・ゲインは厳密に規定された仕様ではありません。オープンループ・ゲインは比較的範囲が広く、ほとんどの場合、仕様では最小／最大値ではなく、代表値 (Typ) が用いられています。場合によって、例えば高精度オペアンプに代表されるように、最小値が用いられることもあります。

また、オープンループ・ゲインは出力電圧レベルと負荷によって変化する可能性があります。これは「オープンループ・ゲインの非直線性」と呼ばれています。オープンループ・ゲインは温度にも多少依存します。一般に、これらの影響は非常に小さく、ほとんどの場合、無視することができます。実際、オペアンプにも依りますが、データシートにオープンループ・ゲインの非直線性が必ず記載されているとは限りません。

クロズドループ・ゲイン

オープンループ・ゲインは帰還ループが接続されていない場合のゲインであるのに対し、クロズドループ・ゲインは帰還ループが接続されている場合のゲインです。クロズドループ・ゲインには「信号ゲイン」と「ノイズ・ゲイン」の 2 種類があります。これらのゲインとそれぞれの違いについて以下に説明します。

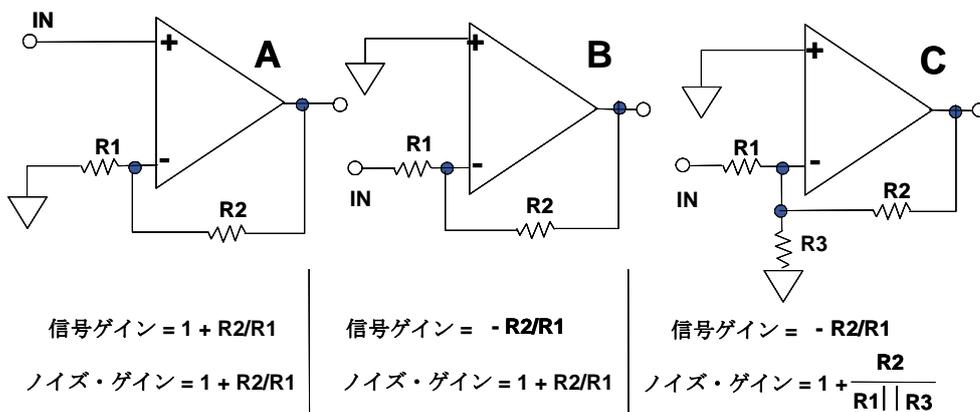
クローズドループ・アンプのゲインの典型的な式には、オープンループ・ゲインの項が含まれています。 G を実際のクローズドループ・ゲイン、 N_G をノイズ・ゲイン（以下参照）、 A_{VOL} をアンプのオープンループ・ゲインとすると、 G は次式で表すことができます。

$$G = \frac{N_G}{1 + \frac{N_G}{A_{VOL}}} \quad \text{式 1}$$

この式から、オープンループ・ゲインが非常に大きい場合（一般的な場合）、回路のクローズドループ・ゲインは簡略化され、ノイズ・ゲインにほぼ等しくなります。

信号ゲインとノイズ・ゲイン

「信号ゲイン」とは、帰還ループが接続された回路の入力信号に適用されるゲインのことです。[チュートリアル MT-032](#) では、反転回路と非反転回路のゲインについての説明部分で、実際にクローズドループの信号ゲインについて、より詳細に説明しています。信号ゲインは正（非反転モード）または負（反転モード）が可能です。反転モードの場合にはユニティ・ゲインより小さくすることもできます。信号ゲインは、信号パス内の構成要素として設計する際に、最も関心の対象とすべきゲインです。さまざまなゲインの詳細を図 2 に示します。



- オペアンプの電圧ノイズとオフセット電圧は、ノイズ・ゲインによって出力に反映されます。
- 安定性の決定に影響するのは、信号ゲインではなくノイズ・ゲインです。
- 回路 C では、信号ゲインは変化しませんが、ノイズ・ゲインが大きくなるため、安定性が向上する一方で、ノイズが増え、出力オフセット電圧が大きくなります。

図 2. 信号ゲインとノイズ・ゲイン

反転アンプ段の信号ゲインは次式のとおりです。

$$\text{信号ゲイン} = -\frac{R2}{R1}, \quad \text{式 2}$$

そして、非反転アンプの信号ゲインは次式のとおりです。

$$\text{信号ゲイン} = 1 + \frac{R2}{R1}. \quad \text{式 3}$$

「ノイズ・ゲイン」とは、オペアンプ入力に直列接続されたノイズ源（入力電圧ノイズ）または電圧源（入力オフセット電圧）から見たゲインのことです。ノイズ・ゲインは次式で表すことができます。

$$\text{ノイズ・ゲイン} = 1 + \frac{R2}{R1}. \quad \text{式 4}$$

ノイズ・ゲインは非反転アンプの信号ゲインに等しくなります。また、反転回路におけるノイズ・ゲインも、図 2B に示すように非反転回路と同じ値となります。

オペアンプの安定性を決めるのに用いられるのがノイズ・ゲインです。ノイズ・ゲインは、ボード線図に使用されるクロズドループ・ゲインに等しくなります。ノイズ・ゲインを求めるために、図 2 に示されている式では純抵抗が使用されていますが、通常のアプリケーションでは、これらは実際には実数成分と虚数成分を持つ複素インピーダンスとして扱われます。

ループ・ゲイン

図 3 に示すように、オープンループ・ゲインとクロズドループ・ゲインの差がループ・ゲインとして知られています。ループ・ゲインは、所定の周波数でアンプに適用可能な負帰還の大きさを示します。

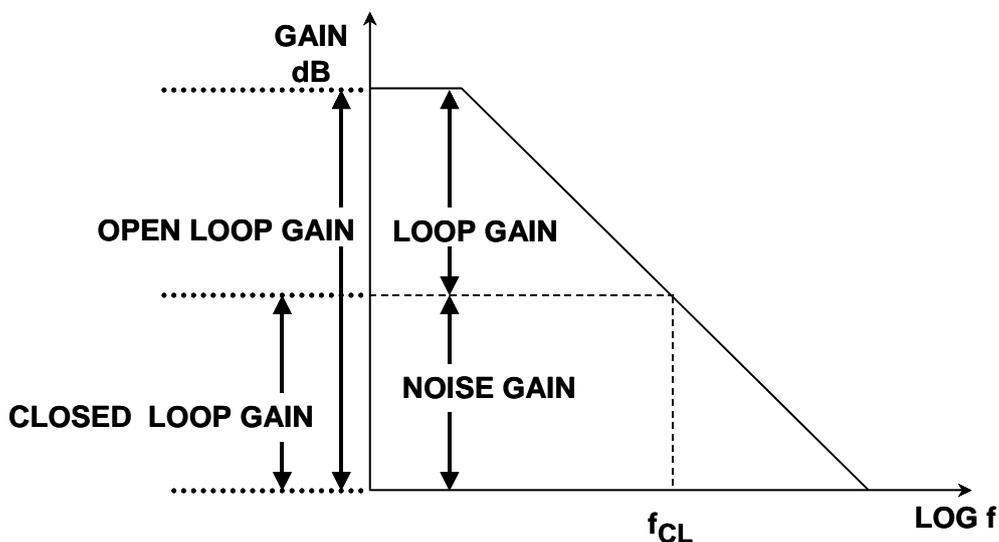


図 3. ゲインの定義

ボード線図：漸近応答と実応答

オープンループ・ゲインの値を対数スケールとし、周波数特性も対数スケールとしたグラフが、いわゆるボード線図です。ボード線図は、オペアンプが特定のアプリケーションに適しているかを評価するときの主要なツールの1つです。

図4に示すように、ボード線図にオープンループ・ゲインをプロットしてからノイズ・ゲインをプロットすると、これらが交差するポイントにより、アンプ・システムの最大クローズドループ帯域幅が求められます。このポイントは、一般にクローズドループ周波数 (F_{CL}) と呼ばれています。実際には、交差ポイントでの実応答は、漸近応答（直線による近似線）の値から 3dB 低下している点に注意してください（図4参照）。一方で、 F_{CL} より1オクターブ上の周波数と、1オクターブ下の周波数では、漸近応答と実応答の差は 1dB 以下となります。

ボード線図は安定度を求めるのにも便利です。上記のように、クローズドループ・ゲイン（ノイズ・ゲイン）のラインが 6dB/オクターブ（20dB/ディケイド）より大きい勾配のオープンループ・ゲインのラインと交差すると、位相余裕によってはアンプが不安定になる可能性があります。

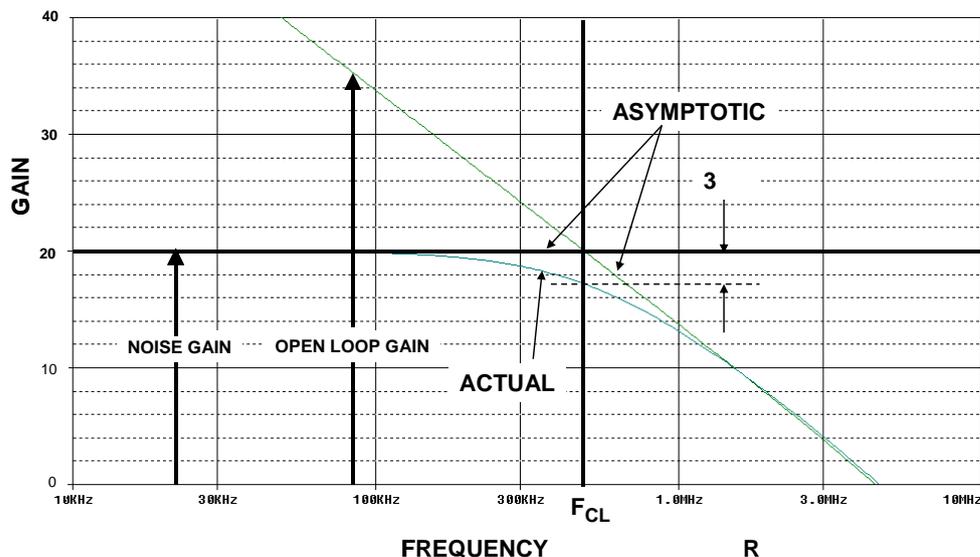


図 4. 漸近応答と実応答を示すボード線図

ゲイン帯域幅積

シングル・ポール応答の場合、オープンループ・ゲインは 6dB/オクターブで低下します。これは、周波数を 2 倍にすると、ゲインが 1/2 に低下することを意味します。これとは逆に、周波数を半分にすると、図 5 に示すように、オープンループ・ゲインは 2 倍になります。これにより、いわゆる「ゲイン帯域幅積」が得られます。任意のポイントでオープンループ・ゲインに周波数を掛けたときの積は常に一定になります。この関係は、ボード線図が 6dB/オクターブで低下するスロープ部分にのみ適応されることに注意してください。ゲイン帯域幅積は、特定のオペアンプが個々のアプリケーションに使用可能かどうかを決定するのに用いる、便利な性能指数として使うことができます。ゲイン帯域幅積は電圧帰還 (VFB) オペアンプに対してのみ意味があることに注意してください。電流帰還 (CFB) オペアンプの帯域幅の説明については、[チュートリアル MT-034](#) を参照してください。

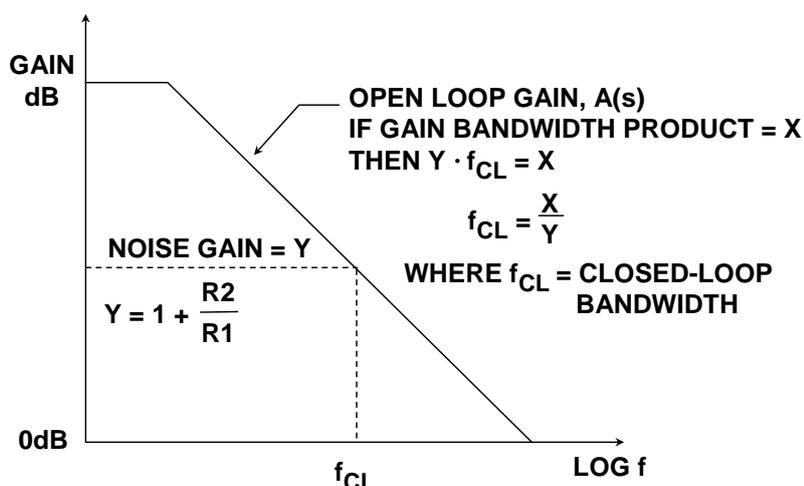


図 5. ゲイン帯域幅積

たとえば、クローズドループ・ゲインが 10 で 100kHz の帯域幅を必要とするアプリケーションの場合、ゲイン帯域幅積として、最低 1MHz のオペアンプが必要です。ただし、ゲイン帯域幅積にばらつきがあることと、クローズドループ・ゲインがオープンループ・ゲインと交差するポイントの実応答が漸近応答に対して 3dB 低下するという事実から、これは余りにも単純化しすぎです。従って、ある程度の余裕度を持たせる必要があります。

前記のアプリケーションでは、ゲイン帯域幅積が 1MHz のオペアンプが最低限必要です。期待する性能を達成するための保険として、5 以上の安全係数が望ましいので、ゲイン帯域幅積が 5MHz のオペアンプを選択することとします。

安定性の基準

帰還システムの安定性に関する理論では、システムを無条件で安定させるため、クローズドループ・ゲインのラインが、オープンループ・ゲインの 6dB/オクターブ（シングルポール応答）より大きくなならない勾配部分で交差する必要があるとされています。応答が 12dB/オクターブ（2 ポール応答）の場合、オペアンプは発振します。これを最も容易に理解するには、ポールひとつにつき 90°の位相シフトが追加されると考えると良いでしょう。つまりふたつのポールによって 180°の位相シフトが生じ、この 180°の位相シフトにより、負帰還が正帰還に変わります。これは発振を意味します。

ユニティ・ゲインで安定しないアンプがなぜ製品として存在するのか、と問われるかもしれません。その答えは、所定のアンプ回路に対して、アンプのユニティ・ゲインが安定

しないように設計すると、ゲインを大きくした場合、帯域幅を増加させることができるからです。このタイプのオペアンプは「非補償オペアンプ」と呼ばれることもあります。ただし、安定性の基準は満たしていなければなりません。この基準は、クローズドループ・ゲインの直線が 6dB/オクターブ（シングルポール応答）の勾配部分でオープンループ・ゲインと交差しなければなりません。この基準を満たしていないと、アンプは発振します。そのため、非補償オペアンプは、データシートで規定された最小ゲインより大きいときだけ安定動作します。

例として、図 6 のオープンループ・ゲインのグラフを比較します。示された 3 つのデバイス [AD847](#)、[AD848](#)、[AD849](#) は、内部補償の量は異なりますが基本設計は同じです。AD847 はユニティ・ゲインで安定し、規定されたゲイン帯域幅は 50MHz です。AD848 はゲイン 5 以上で安定し、ゲイン帯域幅は 175MHz です。AD849 はゲイン 25 以上で安定し、ゲイン帯域幅は 725MHz です。この図は、同じ基本設計を持つオペアンプに対して、オペアンプの内部補償をどう変更すると、異なるゲイン帯域幅積と最小安定ゲインとの関係が得られるかを示しています。

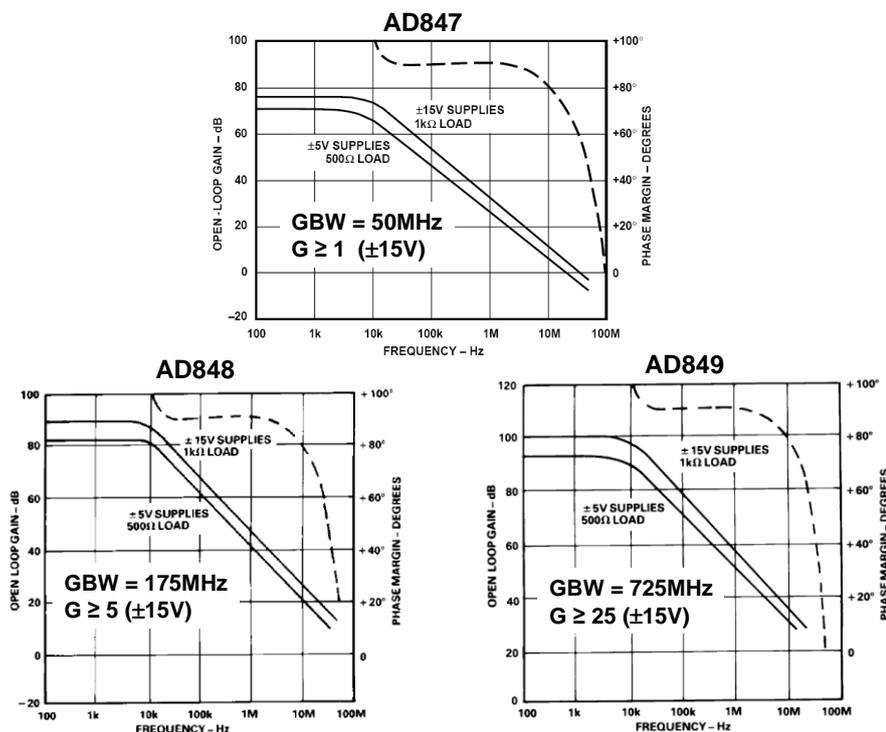


図 6. AD847、AD848、AD849 のオープンループ・ゲイン特性、ゲイン帯域幅、および最小安定クローズドループ・ゲイン

およ

位相余裕

安定性の指標の1つに「位相余裕」があります。振幅応答が平坦ではなく変化するのと同様に、位相応答もコーナー周波数より約1桁手前から徐々に変化します。位相余裕とは、位相が 180° に達するまでにどの程度余裕があるかを示した位相の量で、クローズドループ・ゲインとオープンループ・ゲインとが交差する周波数で測定されます。

位相余裕が小さいと、クローズドループ・ゲインがオープンループ・ゲインと交差する周波数の直前のゲインのピークが大きくなります。[AD8051](#) オペアンプのゲインと位相応答を図7に示します。この場合、ユニティ・ゲインの周波数での位相余裕は 45° です。

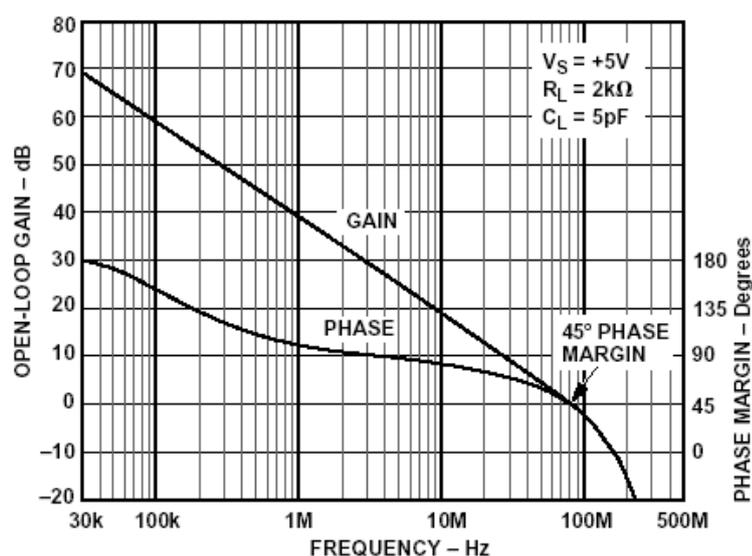


図7. AD8051の位相余裕

参考資料

1. Hank Zumbahlen, *Basic Linear Design*, Analog Devices, 2006, ISBN: 0-915550-28-1. Also available as [Linear Circuit Design Handbook](#), Elsevier-Newnes, 2008, ISBN-10: 0750687037, ISBN-13: 978-0750687034. Chapter 1
2. Walter G. Jung, *Op Amp Applications*, Analog Devices, 2002, ISBN 0-916550-26-5, Also available as [Op Amp Applications Handbook](#), Elsevier/Newnes, 2005, ISBN 0-7506-7844-5. Chapter 1.