

位相・ゲイン余裕の小さいオペアンプの使用の注意点

山内 淳

Field Applications & Solutions, Analog Signal Chain

アブストラクト

本アプリケーションノートは、位相・ゲイン余裕の小さいオペアンプを使用する際に、必要な注意点と回路設計方法について実例を挙げて、解説したものです。

第1章では、オペアンプを使用する際に、位相・ゲイン余裕がない場合に生じる問題について述べています。

第2章では、位相・ゲイン余裕、それぞれの余裕がない場合に生じる、発振現象について述べています。

また、OPA830を例として、問題事例を挙げています。

第3章では、特に問題となる非反転増幅回路のGain=1の場合について、その問題と解決方法について、OPA830を例として説明しています。

第4章では、反転増幅回路において、第3章までに述べた問題が起きる場合について、その問題と解決方法について説明しています。

目次

1. はじめに	2
2. 非反転増幅回路における不安定動作の要素	2
2. 1 発振の原理	2
2. 2 ゲイン余裕・位相余裕	3
2. 3 OPA830の周波数特性	3
2. 4 OPA830のボルテージフォロワ回路特性	4
3. 非反転増幅回路 Gain = 1での使用方法	5
3. 1 ノイズゲインを上げてピークを低減する	5
3. 2 入力端子間で位相補償する	5
3. 3 発振する周波数付近の信号のGainを下げる	6
4. 反転増幅回路での使用方法	7
4. 1 反転増幅回路における発振例	7
4. 2 反転増幅回路における発振への対策	7
5. まとめ	8
6. 参考文献	8

この資料は日本テキサス・インスツルメンツ(日本TI)が、お客様がTIおよび日本TI製品を理解するための一助としてお役に立てるよう、作成しております。製品に関する情報は随時更新されますので最新版の情報を取得するようお勧めします。TIおよび日本TIは、更新以前の情報に基づいて発生した問題や障害等につきましては如何なる責任も負いません。また、TI及び日本TIは本ドキュメントに記載された情報により発生した問題や障害等につきましては如何なる責任も負いません。

1. はじめに

オペアンプは非常に多くの種類が存在し、それぞれの持つ諸特性に応じて、多くの用途に用いられています。ただし、その選択や使い方によっては、所望の特性が得られなかったり、問題が生じることもあります。位相・ゲイン余裕について、考慮しない場合では、最悪発振する可能性があります。

特に、高速・広帯域のオペアンプでは、周波数特性を伸ばすために、位相余裕を十分に取ることができないことが多く、使い方には注意が必要となります。

2. 非反転増幅回路における不安定動作の要素

非反転増幅回路において、Gain=1で使用する場合には、一般的にボルテージフォロワ回路を用います。一般的にオペアンプは、入力インピーダンスが高く、出力インピーダンスが低いいため、この回路は、前段・次段を分離するバッファ回路として用いられます。

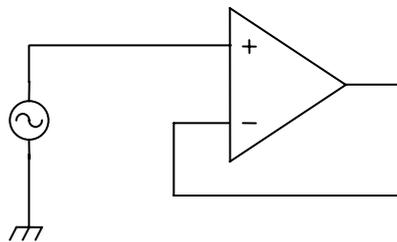


図1 ボルテージフォロワ回路

ただし、用いるオペアンプによっては、Gainにピークを持ち、位相が回転して最悪発振します。まず、なぜ発振が起きるのかについて実際のオペアンプ（OPA830）を例に挙げて説明します。

2. 1 発振の原理

一般的な発振の原理について、以下に述べます。

オペアンプの負帰還回路を図2に示します。この回路において、出力信号が入力信号のレベルと等しくかつ位相が同じときに発振が起きます。

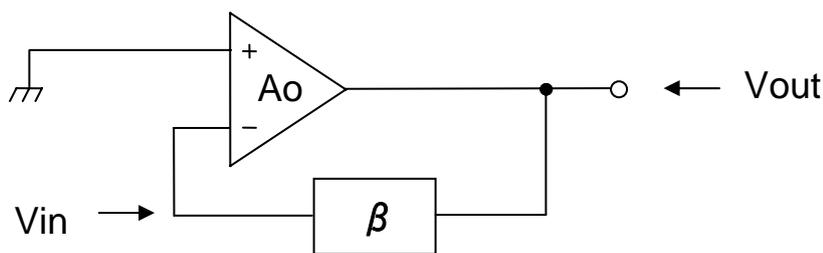


図2 オペアンプ 負帰還回路

図2において、出力電圧・入力電圧は下記のようになります。

$$V_{out} = -A_o \cdot V_{in}$$

$$V_{in} = \beta \cdot V_{out}$$

つまり、 $A_o \beta = 1$ が成り立つときに、発振することとなります。これは、ループゲイン ($A_o \beta$) が1で、位相が 180° 回転した時に発振することを示しています。

2. 2 ゲイン余裕・位相余裕

オペアンプが発振に対して、どの程度の余裕があるかを判断するために、ゲイン余裕・位相余裕があります。図3に、増幅回路を構成した際の利得・位相特性を示します。

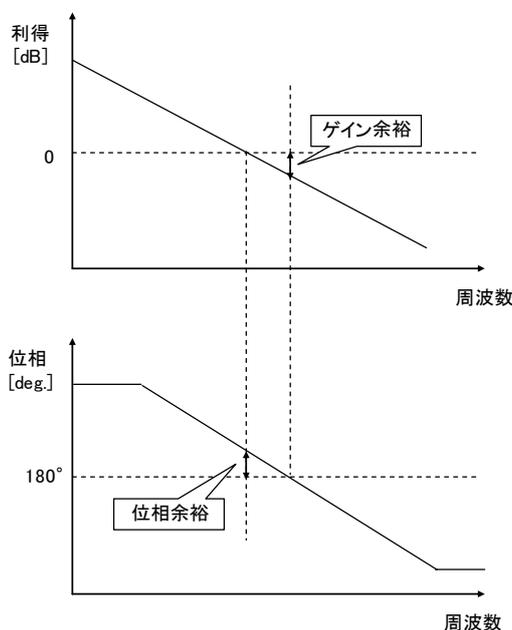


図3 増幅回路の利得・位相特性

ゲイン余裕は、位相が -180° の時に、利得が 0dB よりどの程度小さくなっているかを示しています。また、位相余裕は、利得が 0 の時に、位相が -180° よりどの程度の余裕があるかを示しています。このため、位相が -180° で利得が正である場合・利得が 0dB で位相が -180° より回転している場合、動作が不安定で発振する可能性があります。

一般的には、位相余裕は $45^\circ \sim 60^\circ$ 、ゲイン余裕 $7\text{dB} \sim 10\text{dB}$ 以上であることが目安となります。ただし、高速・広帯域のオペアンプでは、この値より小さくなることが多くなります。

2. 3 OPA830の周波数特性

次に、OPA830を実例として、実際の回路ではどのような挙動を示し、どのような対策が必要であるかについて、説明します。

OPA830は、ローパワー、単電源、広帯域の電圧帰還型のオペアンプです。また、データシート内には、“unity-gain stable”の表記があり、ボルテージフォロワ回路においても、安定して動作するように思われます。

ただし、実際には非反転入力での $\text{Gain}=1$ において、発振の対策が必要となります。このことについては、OPA830のデータシート SBOS263Eの21ページに記載されています。

このように、必ずしも“unity-gain stable”であっても、単純にボルテージフォロワ回路を作成してしまうと、 $\text{Gain}=1$ で安定して動作せず、発振してしまうものがあります。安定して動作するかどうか、 $\text{Gain}=1$ での周波数特性を見るとわかります。

図4にOPA830の非反転入力での周波数特性を記します。

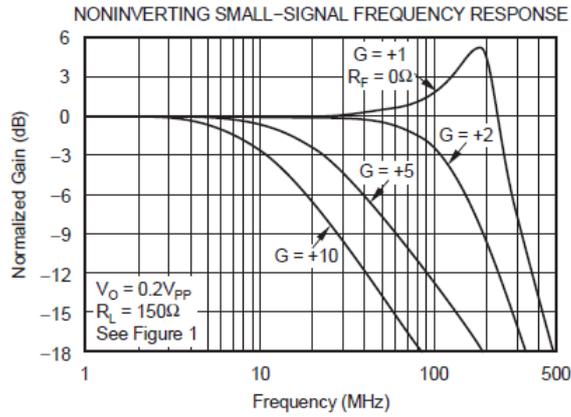


図4 OPA830非反転増幅回路 小信号周波数特性（電源電圧=5V）

Gain=2以上においては、ピークがなく安定して動作していることがわかります。ここで、Gain=1の場合について見ますと、周波数200MHz付近で約5dBのピークが見られます。このゲインピークと位相余裕の関係を図5に示します。

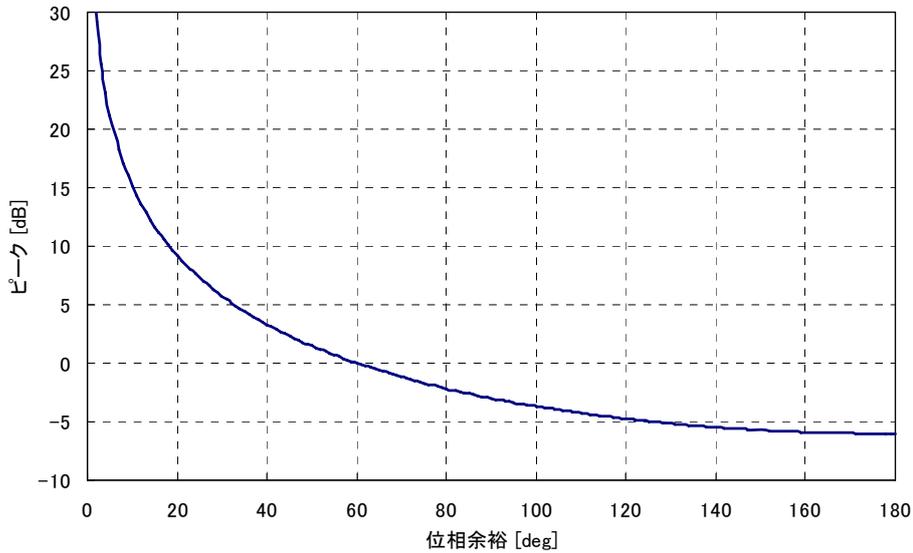


図5 位相余裕とゲインピークの関係

図5を観ると、5dBのゲインピークを持つ場合、約30°の位相余裕であることがわかります。一般的に、位相余裕の目安は45°～60°以上と言われており、OPA830についてはその半分程度の位相余裕しか持っていません。このため、回路構成・寄生素子・温度等により、位相が-180°より多く回転した場合、発振が起こります。

2. 4 OPA830のボルテージフォロワ回路特性

ここではまず、OPA830を用いて、ボルテージフォロワ回路を作成した場合にどのような特性が得られるか確認します。以下に、ボルテージフォロワ回路とそのシミュレーション結果を示します。

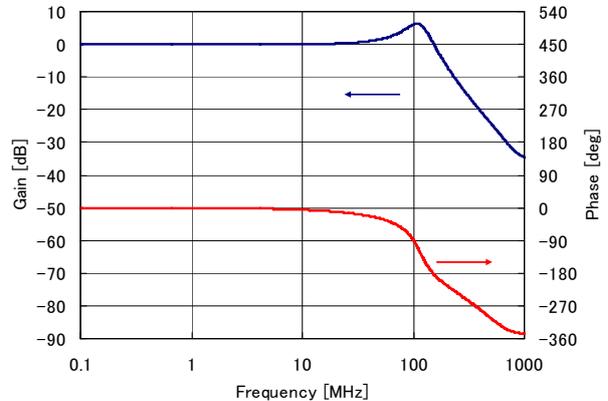
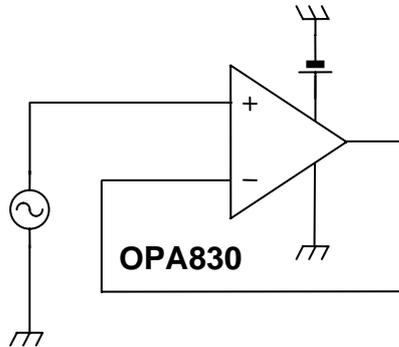


図4 ボルテージフォロワ回路 (OPA830使用) 図5 OPA830ボルテージフォロワ回路周波数特性

この結果を見ると、データシートと同様に、100~200MHz付近で、ピークを持ち、動作が不安定であることがわかります。

3. 非反転増幅回路 Gain=1での使用方法

非反転入力、Gain=1で使用するには、上記のようなボルテージフォロワ回路を使用することが多いですが、OPA830のように位相・ゲイン余裕の小さいオペアンプでは発振してしまいます。このため、ノイズゲインを増やす・位相補償を行う等の工夫が必要となります。以下に、その方法と特性を示します。

3. 1 ノイズゲインを上げてピークを低減する

ボルテージフォロワ回路において、そのピークを低減させるには、まずノイズゲインを上げる方法があります。図6、7にその回路例と周波数特性を示します。

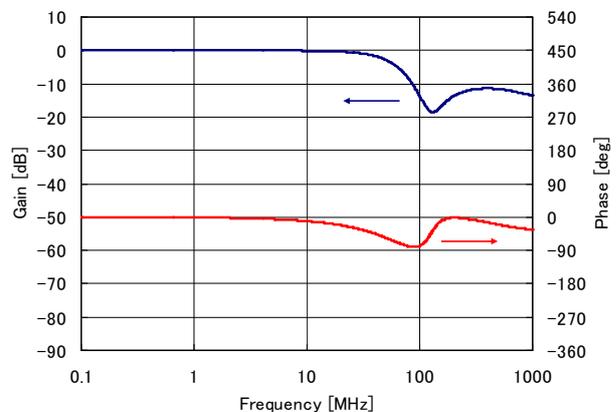
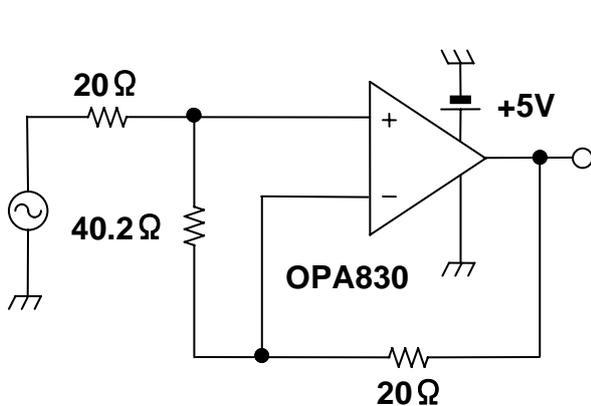


図6 入力端子間に抵抗を接続 (ノイズゲインを上げる) 図7 周波数特性

ボルテージフォロワ回路でのノイズゲインは1です。この場合には、図2のGain=1と同じ周波数特性を持つこととなります。このため、ここでは、ノイズゲインを上げてピークをなくすようにします。

図5の場合では、ノイズゲインが2となり、ほぼフラットな特性を得ることができます。入力端子間抵抗を小さくして、ノイズゲインを上げていくと、より安定になりますが、帯域が狭くなります。

また、この場合においては、オフセット電圧や入力換算電圧ノイズもノイズゲイン倍されますので、ローノイズ回路を設計する際には、注意が必要です。

3. 2 入力端子間で位相補償する

この方法は、位相余裕を大きく取る場合に入力端子間で位相補償を行います。図8、9に回路とそのシミュレーション結果を示します。

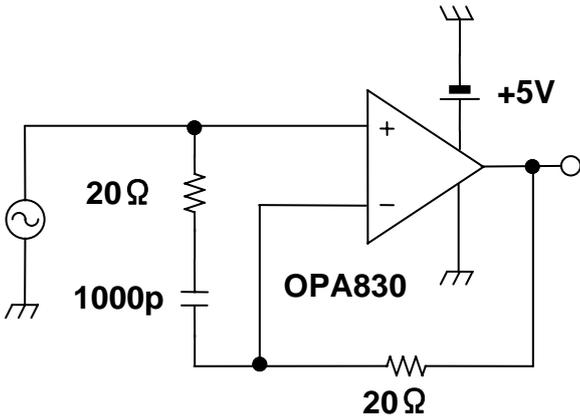


図8 入力端子間で位相補償

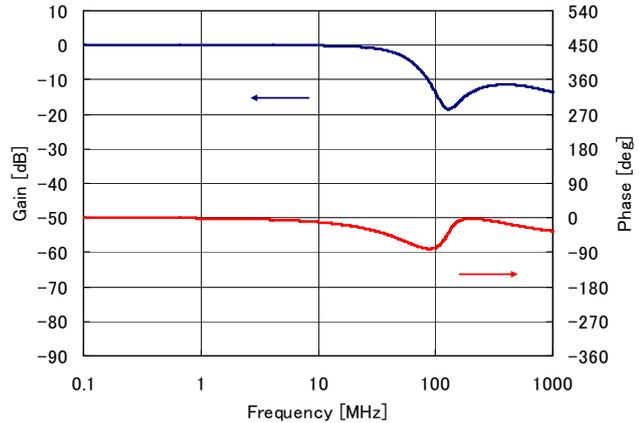


図9 周波数特性

非反転・反転入力間にCRを接続して、ポールとゼロ点を設定して、位相補償します。このため、ピークはなくなり、発振することがなくなります。また、この方法では、容量を接続しているの直流的にはオープンとなり、オフセット電圧の影響は受けません。ただし、スルーレート・セトリング時間については、注意が必要です。

3. 3 発振する周波数付近の信号のGainを下げる

ボルテージフォロワ回路が発振する原因は、Gain特性でピークを持ち、位相が回転してしまうことです。このため、そのGainピークを下げるため、出力にCRを直列接続させます。図10、11にその回路およびシミュレーション結果を示します。

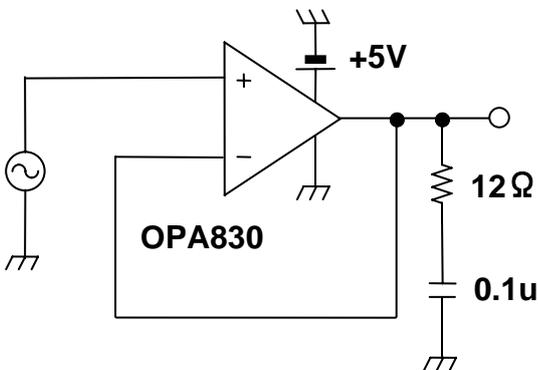


図10 出力に抵抗・容量を直列接続

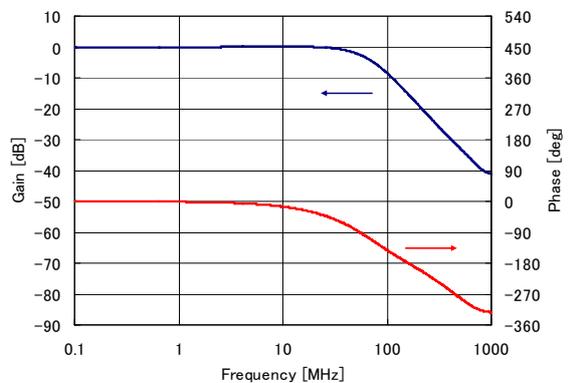


図11 周波数特性

Gainのピークがなくなり、発振する可能性はなくなります。抵抗・容量値については、シミュレーションや実験により、決定します。

各方法とも、周波数特性が低域側にシフトするため、もともとの周波数帯域ではなくなってしまいます。このため、実際に使用する信号の周波数を考慮して、使用する必要があります。

4. 反転増幅回路での使用方法

ボルテージフォロワ回路では、発振条件を満たすことにより、発振が起こりますが、反転入力で使用した場合、発振の条件が $A0\beta=1$ で位相回転が 180° 以上であることから、発振しないように考えられます。

しかし、反転入力の場合においても、ノイズゲインを考えた場合には、非反転入力の場合で考える必要があります。

4. 1 反転増幅回路における発振例

図 1 2 は、Gain=-2 (-6dB) で構成されています。反転増幅回路であるため、一見すると発振する可能性がないように見えます。図 1 3 にこの回路のシミュレーション結果を示します。この結果を見ると、100MHz付近でGainのピークと位相回転が見られます。このような状況においては、最悪の場合発振が起こってしまいます。

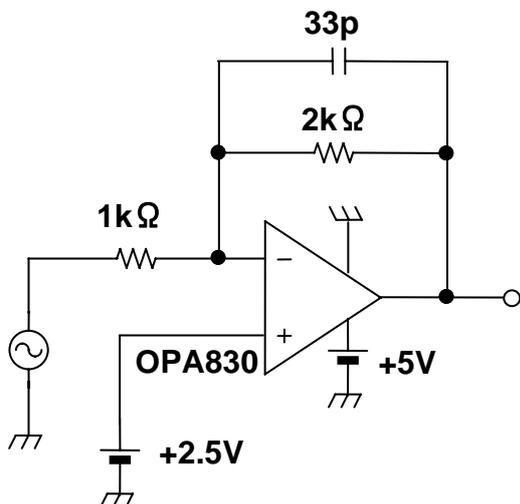


図 1 2 Gain=-2 反転増幅回路

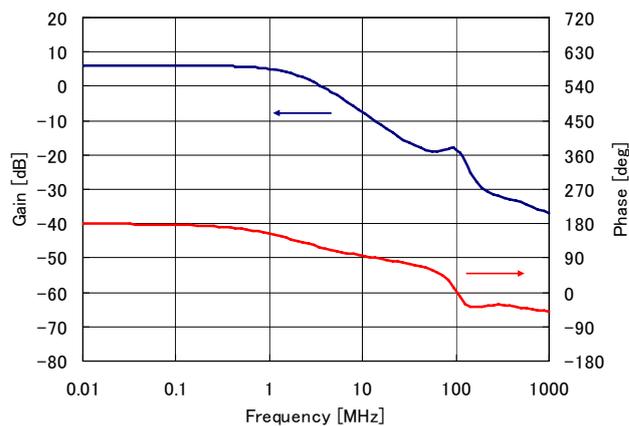


図 1 3 周波数特性

ここで、非反転入力側から見た場合について考えます。高周波領域においては、容量はショートと同じになりますので、非反転入力から見たとき、高周波領域ではノイズゲインが 1 となってしまいます。OPA830では、非反転入力・Gain=1において、5dB程度のピークを持つことにより、位相・ゲイン余裕が小さく、発振が起こる可能性があります。

4. 2 反転増幅回路における発振への対策

4. 1 に示した回路において、Gainのピークをなくし、安定した動作をさせるため、反転入力に容量を接続します。図 1 3 に回路図、図 1 4 にそのシミュレーション結果を示します。

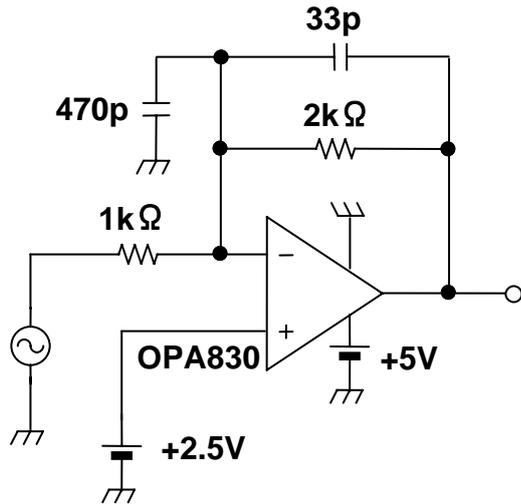


図 1 3 容量 (470pF) を接続

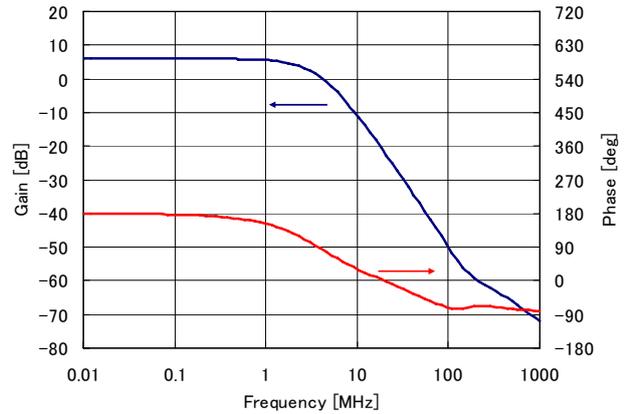


図 1 4 周波数特性

反転入力からGNDに470pFの容量を接続しています。この容量により、AC的にみたノイズゲインを上げて (ノイズゲイン=1+(470pF/33pF))、高周波領域での安定動作を行うこととなっています。

5. まとめ

本アプリケーションノートでは、位相余裕の小さいオペアンプを使用した場合の問題について述べました。また、その問題を解決するための対策について、回路例を挙げて解説しました。

位相・ゲイン余裕が小さいオペアンプを使用する際には、非反転増幅回路においてGain=1で使用する場合には、発振をしないようにするため、回路の検討が必要です。

また、反転増幅回路においても、ノイズゲインの視点から、非反転入力側から見て、問題がないかどうか確認が必要となります。反転増幅回路であるから、発振が起きないということではありませんので、問題が起きる前に確認して下さい。

“unity-gain stable”であっても、Gain=1でピークを持ち位相余裕が小さいオペアンプにおいては、データシートの中に、Gain=1での使用の注意点が記載されておりますので、参照して下さい。

6. 参考文献

- (1) OPA830 data sheet: SBOS263E, revised Aug. 2007
- (2) 岡本 勉夫：定本OPアンプ回路の設計 1993

ご注意

日本テキサス・インスツルメンツ株式会社(以下TIJといたします)及びTexas Instruments Incorporated(TIJの親会社、以下TIJないしTexas Instruments Incorporatedを総称してTIJといたします)は、その製品及びサービスを任意に修正し、改善、改良、その他の変更をし、もしくは製品の製造中止またはサービスの提供を中止する権利を留保します。従いまして、お客様は、発注される前に、関連する最新の情報を取得して頂き、その情報が現在有効かつ完全なものであるかどうかをご確認下さい。全ての製品は、お客様とTIJとの間に取引契約が締結されている場合は、当該契約条件に基づき、また当該取引契約が締結されていない場合は、ご注文の受諾の際に提示されるTIJの標準販売契約約款に従って販売されます。

TIJは、そのハードウェア製品が、TIの標準保証条件に従い販売時の仕様に対応した性能を有していること、またはお客様とTIJとの間で合意された保証条件に従い合意された仕様に対応した性能を有していることを保証します。検査およびその他の品質管理技法は、TIが当該保証を支援するのに必要とみなす範囲で行なわれております。各デバイスの全てのパラメータに関する固有の検査は、政府がそれ等の実行を義務づけている場合を除き、必ずしも行なわれておりません。

TIJは、製品のアプリケーションに関する支援もしくはお客様の製品の設計について責任を負うことはありません。TI製部品を使用しているお客様の製品及びそのアプリケーションについての責任はお客様にあります。TI製部品を使用したお客様の製品及びアプリケーションについて想定される危険を最小のものとするため、適切な設計上および操作上の安全対策は、必ずお客様にてお取り下さい。

TIJは、TIの製品もしくはサービスが使用されている組み合わせ、機械装置、もしくは方法に関連しているTIの特許権、著作権、回路配置利用権、その他のTIの知的財産権に基づいて何らかのライセンスを許諾するということは明示的にも黙示的にも保証も表明もしていません。TIが第三者の製品もしくはサービスについて情報を提供することは、TIが当該製品もしくはサービスを使用することについてライセンスを与えるとか、保証もしくは承認をすることを意味しません。そのような情報を使用するには第三者の特許その他の知的財産権に基づき当該第三者からライセンスを得なければならない場合もあり、またTIの特許その他の知的財産権に基づきTIからライセンスを得て頂かなければならない場合もあります。

TIのデータ・ブックもしくはデータ・シートの中にある情報を複製することは、その情報に一切の変更を加えること無く、かつその情報と結び付けられた全ての保証、条件、制限及び通知と共に複製がなされる限りにおいて許されるものとします。当該情報に変更を加えて複製することは不正で誤認を生じさせる行為です。TIは、そのような変更された情報や複製については何の義務も責任も負いません。

TIの製品もしくはサービスについてTIJにより示された数値、特性、条件その他のパラメータと異なる、あるいは、それを超えてなされた説明で当該TI製品もしくはサービスを再販売することは、当該TI製品もしくはサービスに対する全ての明示的保証、及び何らかの黙示的保証を無効にし、かつ不正で誤認を生じさせる行為です。TIJは、そのような説明については何の義務も責任もありません。

TIJは、TIの製品が、安全でないことが致命的となる用途ないしアプリケーション(例えば、生命維持装置のように、TI製品に不良があった場合に、その不良により相当な確率で死傷等の重篤な事故が発生するようなもの)に使用されることを認めておりません。但し、お客様とTIの双方の権限有る役員が書面でそのような使用について明確に合意した場合は除きます。たとえTIJがアプリケーションに関連した情報やサポートを提供したとしても、お客様は、そのようなアプリケーションの安全面及び規制面から見た諸問題を解決するために必要とされる専門的知識及び技術を持ち、かつ、お客様の製品について、またTI製品をそのような安全でないことが致命的となる用途に使用することについて、お客様が全ての法的責任、規制を遵守する責任、及び安全に関する要求事項を満足させる責任を負っていることを認め、かつそのことに同意します。さらに、もし万一、TIの製品がそのような安全でないことが致命的となる用途に使用されたことによって損害が発生し、TIないしその代表者がその損害を賠償した場合は、お客様がTIないしその代表者にその全額の補償をするものとします。

TI製品は、軍事的用途もしくは宇宙航空アプリケーションないし軍事的環境、航空宇宙環境にて使用されるようには設計もされていませんし、使用されることを意図されていません。但し、当該TI製品が、軍需対応グレード品、若しくは「強化プラスチック」製品としてTIJが特別に指定した製品である場合は除きます。TIJが軍需対応グレード品として指定した製品のみが軍需品の仕様書に合致いたします。お客様は、TIJが軍需対応グレード品として指定していない製品を、軍事的用途もしくは軍事的環境下で使用することは、もっぱらお客様の危険負担においてなされるということ、及び、お客様がもっぱら責任をもって、そのような使用に関して必要とされる全ての法的要求事項及び規制上の要求事項を満足させなければならないことを認め、かつ同意します。

TI製品は、自動車用アプリケーションないし自動車の環境において使用されるようには設計されていませんし、また使用されることを意図されていません。但し、TIJがISO/TS 16949の要求事項を満たしていると特別に指定したTI製品は除きます。お客様は、お客様が当該TI指定品以外のTI製品を自動車用アプリケーションに使用しても、TIJは当該要求事項を満たしていなかったことについて、いかなる責任も負わないことを認め、かつ同意します。

Copyright © 2009, Texas Instruments Incorporated
日本語版 日本テキサス・インスツルメンツ株式会社

弊社半導体製品の取り扱い・保管について

半導体製品は、取り扱い、保管・輸送環境、基板実装条件によっては、お客様での実装前後に破壊/劣化、または故障を起こすことがあります。

弊社半導体製品のお取り扱い、ご使用にあたっては下記の点を遵守して下さい。

1. 静電気

素手で半導体製品単体を触らないこと。どうしても触る必要がある場合は、リストストラップ等で人体からアースをとり、導電性手袋等をして取り扱うこと。

弊社出荷梱包単位(外装から取り出された内装及び個装)又は製品単品で取り扱いを行う場合は、接地された導電性のテーブル上で(導電性マットにアースをとったもの等)、アースをした作業者が行うこと。また、コンテナ等も、導電性のものを使用すること。

マウンタやはんだ付け設備等、半導体の実装に関わる全ての装置類は、静電気の帯電を防止する措置を施すこと。前記のリストストラップ・導電性手袋・テーブル表面及び実装装置類の接地等の静電気帯電防止措置は、常に管理されその機能が確認されていること。

2. 温・湿度環境

温度: 0~40、相対湿度: 40~85%で保管・輸送及び取り扱いを行うこと。(但し、結露しないこと。)

直射日光があたる状態で保管・輸送しないこと。

3. 防湿梱包

防湿梱包品は、開封後は個別推奨保管環境及び期間に従い基板実装すること。

4. 機械的衝撃

梱包品(外装、内装、個装)及び製品単品を落下させたり、衝撃を与えないこと。

5. 熱衝撃

はんだ付け時は、最低限260以上の高温状態に、10秒以上さらさないこと。(個別推奨条件がある時はそれに従うこと。)

6. 汚染

はんだ付け性を損なう、又はアルミ配線腐食の原因となるような汚染物質(硫黄、塩素等ハロゲン)のある環境で保管・輸送しないこと。はんだ付け後は十分にフラックスの洗浄を行うこと。(不純物含有率が一定以下に保証された無洗浄タイプのフラックスは除く。)

以上