東芝半導体アプリケーションノート

# オペアンプ・コンパレータの基本回路

## 1. はじめに

オペアンプ・コンパレータは、アナログ回路の基礎とも言える製品です。昨今の電子機器はほぼすべての制御がデジタル化していますが、自然界はアナログ世界であり、それら機器へのインターフェースはアナログ信号で処理されています。また段階的な制御を行う場合でも、アナログ信号での処理が必要となります。電子機器のデジタル化に伴ってアナログ信号処理の重要性も高まっているとも言えると思います。

オペアンプは正式名称を演算増幅器(Operational Amplifier)と言い、特に微小信号の増幅に便利なデバイスです。例えば自然界の微弱な変化をセンシングする高精度センサの後段に使用し、より扱いやすい信号レベルに増幅する事ができます。またその増幅度を外付け抵抗で簡単に制御できることも利点です。

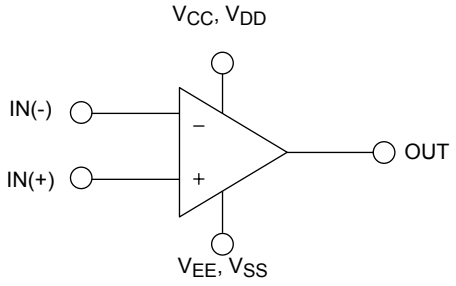
コンパレータはオペアンプの派生製品の一つであり、二つの入力端子の電圧を比較し、その結果に応じて、出力端子の電圧を変化させるデバイスです。比較機能に特化したオペアンプと言いかえる事もできます。コンパレータ(Comparator)の語源は「比較(Compare)」から来ており、日本語で比較器と呼ばれるケースもあります。入力端子の一方の電圧をコントロールする事により、比較する値を任意に変化させる事ができますので、精密な電圧比較が可能です。

このアプリケーションノートでは、オペアンプ・コンパレータの基本的な回路をご紹介すると共に、注意すべきポイントについて一般的な情報を提供いたします。アナログ回路設計への入り口としてご活用いただければ幸いです。

## 2. オペアンプ・コンパレータの基礎知識

オペアンプ・コンパレータは、周辺部品を変える事によって、様々な機能を実現する事ができます。まずは簡単にオペアンプ・コンパレータの単体特性について説明します。

オペアンプ・コンパレータは Fig.1 の回路記号で表現されます。




| | |
|---|---|
| VCC, VDD: | 正電源端子 |
| VEE, VSS: | 負電源端子 |
| IN(-): | 反転入力端子 |
| IN(+): | 非反転入力端子 |
| OUT: | 出力端子 |

Fig.1 オペアンプ・コンパレータの回路記号

VCC, VDD 端子は正電源を印加する端子です。VEE, VSS 端子は負電源を印加する端子ですが、単電源でオペアンプ・コンパレータを動作させる場合は、GND に接続する事になります。東芝オペアンプ・コンパレータの場合、端子の名称はバイポーラ型の場合は、VCC/VEE、CMOS 型の場合は VDD/VEE と表記されています。

オペアンプ・コンパレータには二つの入力端子が存在します。IN(-)端子は反転入力端子で、入力端子に印加された信号の極性が、出力端子に反転(位相が-180°)して出力されることを意味します。IN(+)端子は非反転入力端子で、入力端子と極性の同じ信号が出力されます。要するにオペアンプ・コンパレータの二つの入力端子は差動増幅回路の入力になっていると言う事です。

この事はオペアンプ・コンパレータを理解する上で非常に重要なポイントです。差動増幅回路とは、二つの入力端子に入力された電圧の差分のみに感応し、二つの端子の電圧がまったく同一の場合は、何も増幅しません。実際のオペアンプ・コンパレータの入力端子は、バイポーラ型であればトランジスタのベース、CMOS 型であれば、MOSFET のゲートで構成されています。各トランジスタはまったく同じ設計で作られていますが、実際には素子のバラツキは避けられず、二つの入力端子の電圧はまったく同一となる事はごくまれです。これをオフセット電圧と言います。このオフセット電圧はあらゆる回路において重要なファクターとなります。

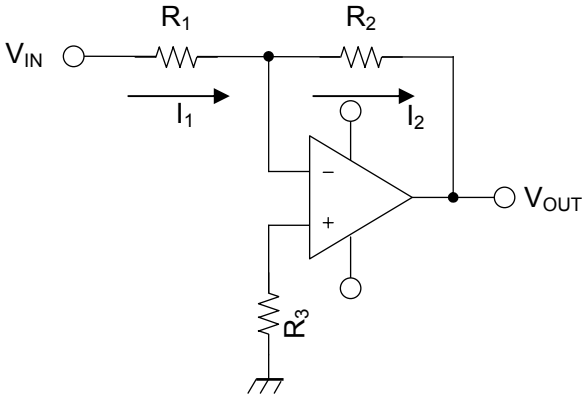
その他のポイントとしては、オペアンプ・コンパレータ単体での利得が無限大である点も重要です。

オペアンプ・コンパレータは差動増幅回路を始めとする回路の性質を元に周辺部品の組み合わせで様々な機能を構成する事ができます。増幅回路は元より、フィルタ回路、発振回路等を実現する事ができますが、ここでは基本的な増幅回路である、反転増幅回路、非反転増幅回路や、コンパレータの使用方法について説明していきます。

## 3. オペアンプの基本回路

●反転増幅回路

オペアンプを使用して実現できる最も簡単な増幅回路です。回路例を Fig.2 に示します。




反転増幅回路の利得計算式

$$A_V = -\frac{R2}{R1}$$

回路設計のヒント
R1、R2 の値は出来るだけ小さく
できるだけ利得は小さく

Fig.2 反転増幅回路例

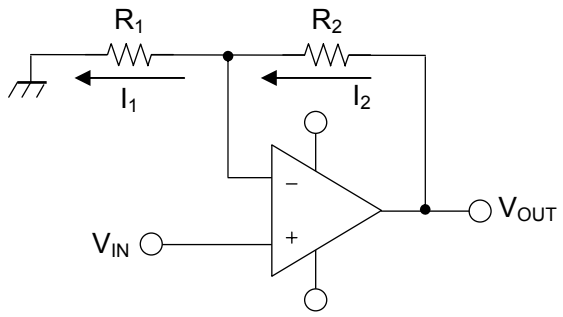
利得計算式から明らかなように、この増幅回路の利得は外付けの抵抗値だけで決まってしまいます。これだけ見るとオペアンプの特性は関係無いように思えますが、外付け抵抗だけで利得が決められるところにオペアンプの特性が生かされています。

この回路では、オペアンプの入力インピーダンスが無限大である事を前提にしています。反転入力端子には R1 を通じて信号源 VIN が接続されています。この場合、R1 には I1 = VIN / R1 の電流が流れます。オペアンプの入力インピーダンスが無限大であれば、R1 を流れる電流はそのまま R2 に流れ込みます。よって I2=I1 となり、VOUT 端子は VOUT = R2 x I2 の電圧となります。またオペアンプの反転入力端子を基準とすると、VIN と VOUT は極性が逆になっています。これが反転増幅回路と呼ばれる所以です。

すでにお気づきと思いますが、現実のオペアンプの入力端子はバイポーラ型であればトランジスタのベース端子、CMOS 型であれば MOSFET のゲート端子であり、実際の入力インピーダンスは無限大ではありませんので、入力端子に流れ込む電流の分だけ利得は計算からずれる事になります。この回路では負帰還(Negative Feedback)がかかっていますので、二つの入力端子間は同じ電圧になろうとします。この現象をバーチャルショート(Virtual Short)と呼びます。その結果、非反転入力端子から GND へも電流が流れようとしますので、それを抑える目的で R3 を使用する場合もあります。利得誤差を抑えるためには、入力端子に流れ込む電流よりも R1 及び R2 に流れる電流をじゅうぶんに大きくしておく必要がありますので、R1 と R2 はできるだけ小さな値にするほうが有利です。またこの回路の場合、先に説明したオフセット電圧もそのまま増幅する事となりますので、あまり高い利得設定も誤差を大きくする原因となります。実際の抵抗値設定に際してはブレッドボード等で事前によく検討する事が利得誤差を少なくするためには重要です。

●非反転増幅回路

非反転増幅回路は代表的なオペアンプを使用した増幅回路です。回路例を Fig.3 に示します。




非反転増幅回路の利得計算式

$A_V = 1 + \frac{R2}{R1}$

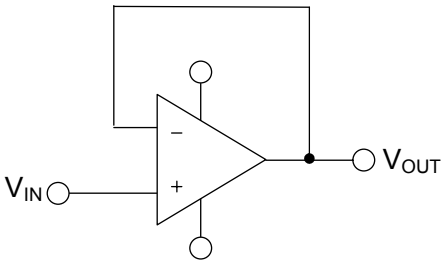
回路設計のヒント
R1、R2 の値は出来るだけ小さく
できるだけ利得は小さく

Fig.3 非反転増幅回路例

反転増幅回路と同様に入力インピーダンスを無限大として考えてみます。この回路でもオペアンプに負帰還がかかっているために、非反転入力端子に入力された信号 VIN はそのまま反転入力端子に現れ、R1 と R2 の中間電圧は VIN となり、その結果 R1 には I1 = VIN / R1 の電流が流れます。オペアンプの入力端子には電流供給能力はありませんので、この電流は R2 を通じて出力端子から供給される事になります。また R1 と R2 は出力端子から見て直列に接続されており、それ以外に電流の逃げ道はありませんから、R2 には I1 同じ電流 I2 が流れます。I2 によって R2 の両端には電位差が発生します。GND からみた出力端子は、R1 と R2 によって決定される利得に従って、VIN と同じ極性の電圧となります。

●ボルテージフォロワ回路

非反転増幅回路を簡略化した回路にボルテージフォロワ回路があります。回路図を Fig.4 に示します。




ボルテージフォロワ回路の利得計算式

$A_V = 1$

回路設計のヒント
同相入力電圧範囲に注意

Fig.4 ボルテージフォロワ回路例

非反転入力端子に入力された信号はバーチャルショートで反転入力端子に現れ、反転入力端子は出力端子に直結されているため、出力電圧は入力電圧と等しくなります。インピーダンス変換に非常に効果的な回路です。この回路で使用する場合、入力電圧がそのオペアンプの同相入力電圧範囲(CMVIN)を超えると正常に動作しなくなりますので注意が必要です。この回路の入出力特性を Fig.5 に示します。

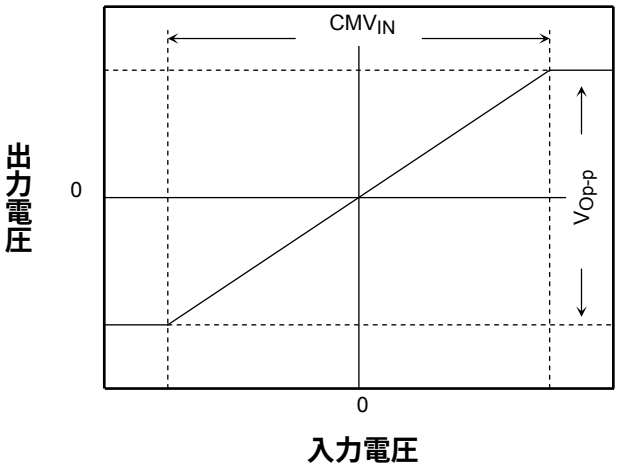



Fig.5　ボルテージフォロワ回路の入出力特性図

同相入力電圧範囲は、そのオペアンプの二つの端子に入力してもよい最大の電圧です。オペアンプ内部回路の構成や特性によって異なりますので、使用に際してはデータシートを良く確認する事が重要です。特に低電圧でオペアンプを動作させる必要がある場合、入力信号と電源電圧が非常に近くなる可能性が高くなります。そのような場合同相入力範囲の狭いオペアンプだと、実際に使用できる電圧範囲が狭くなり、実用的で無い場合もあります。そのような場合には、電源電圧まで同相入力電圧範囲を広げてあるフルレンジ入力タイプの使用が最適です。

ボルテージフォロワ回路で使用する場合、同相入力電圧範囲は電源電圧に対してだけ注意しがちですが、オペアンプの同相入力電圧範囲には負電源側も当然影響されます。特に単電源でオペアンプを使用し、ボルテージフォロワ回路を構成する場合には、GND に対して出力が浮く現象が見られる事になります。一部のオペアンプ製品では単電源での使用を想定して、その現象を避けるために、特別な回路を出力段に付加して、負電源側だけ同相入力電圧範囲を GND レベルまで広げた製品もあります。

ボルテージフォロワ回路は利得が 1 に設定されています。それはオペアンプから見た場合、大きな負帰還をかけている事となります。オペアンプによっては大きな負帰還をかけると発振に至る可能性もあります。

ボルテージフォロワ回路は、高出力インピーダンスの信号源からの入力をそのまま出力することができ、インピーダンスを下げることにより、電流ドライブ能力を上げる事ができる非常に使いやすい回路で、あらゆるアナログ信号処理において有益ですが、上記に述べたように気をつけなければならないポイントもいくつかあります。事前にデータシートでボルテージフォロワ回路での使用可否を確認しておいた方が安心です。

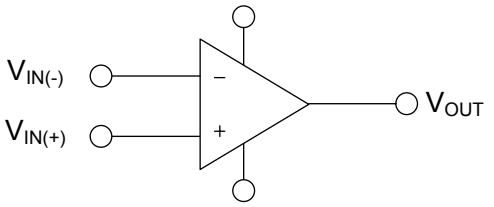
東芝製の CMOS タイプオペアンプシリーズは基本的にすべて単電源での使用を考慮していますので、ボルテージフォロワで安心してお使いいただく事が可能です。

## 4. コンパレータの基本回路

コンパレータは、電圧比較機能に特化したオペアンプの一種です。オペアンプをコンパレータとして使用する事は可能ですが、コンパレータをオペアンプのように負帰還をかけて利得を調整する事はできませんのでご注意ください。

●基本的なコンパレータ回路

基本的なコンパレータ回路を Fig.6 に示します。




回路動作
VIN(+) > VIN(-)の場合: 出力 High
VIN(+) < VIN(-)の場合: 出力 Lo

回路設計のヒント
オフセット電圧に注意

Fig.6 基本的なコンパレータ回路例

コンパレータは二つの入力端子に印加された電圧を比較して出力することが出来ます。非反転入力端子の電圧が反転入力端子よりも高い場合の出力は High、逆の場合の出力は Lo となります一見すると CMOS ロジックでも実現できそうな機能ですが、コンパレータの場合は、実際に印加された電圧を比較して出力していますので、固定された Vth に依存する CMOS ロジックとはまったく違う IC とお考えください。またどちらかの端子に印加する電圧を基準電圧として固定設定することができますので、他方の端子の電圧に応じて出力の High/Lo を回路的に選択する事が可能となります。当然ですがどちらの端子にも可変電圧を印加してダイナミックに電圧比較をする事も可能です。

コンパレータにも先にオペアンプの項で説明したオフセット電圧が存在します。コンパレータは感度良く二つの端子間の電圧差を比較しますが、オフセット電圧も電圧差に含まれます。現象としては二つの入力端子にまったく同じ電圧を印加した場合でもオフセット電圧分は端子間の差分として比較されてしまうため、予期せぬ出力レベルとなってしまうと言う事です。コンパレータによる電圧比較の際には、オフセット電圧を確認の上、それより大きな電圧差で比較できるようにする事が重要です。単純な二値比較であればあまり問題になることはないですが、多値比較の回路構成を取る場合には、データシート上のオフセット電圧最大値にさらに余裕を持った設計が求められます。

## 5. オペアンプ・コンパレータの使用上の注意点

ここではオペアンプ･コンパレータをご使用になる際に注意すべき点についてデータシートの読み方と実際の回路で起こりうる問題を説明します。

●データシートの読み方

オペアンプ・コンパレータはその応用範囲の広さから、特殊な用途向け以外は、データシートも特定の用途を想定して書かれているわけではなく、汎用性の高い内容になっています。ここでは電気的特性ににについて、東芝 TC75S54FU 及び TC75S101FU を例にとり項目別に説明します。

1) 入力オフセット電圧 ＜記号：VIO＞

オペアンプ・コンパレータの二つの入力端子間に発生する電圧です。

東芝 TC75S54FU では最大値 10mV、TC75S101FU では最大値 3mV と規定されています。

先に説明したように、増幅回路の利得にはオフセット電圧も含まれますので、高精度な増幅を求める場合はなるべくオフセット電圧の低い製品を選択すべきです。要求される利得誤差にもよりますが、特に入力信号の振幅に対しオフセット電圧の最大値を比較するとよいでしょう。

2) 入力オフセット電流、入力バイアス電流 ＜記号：IIO、II＞

入力端子に流れ込む電流に関する規格です。通常標準値表記のみとなっています。CMOS 型の場合は、バイポーラ型と比較して構造上入力端子に流れる電流が非常に小さくなっています。言いかえれば入力インピーダンスが高いと言う事であり、特に出力インピーダンスを高くしなければ精度が発揮されないセンサ等の後段で使用する場合には、CMOS 型を選択するとよいでしょう。

3) 同相入力電圧 ＜記号：CMVIN＞

ある電源範囲でオペアンプ･コンパレータを動作させた際に入力端子に印加しても構わない最大電圧範囲です。TC75S54FU、TC75S101FU では Fig.7 のように規定されています。

| 電源電圧(V) | TC75S54FU | | TC75S101FU | |
|---|---|---|---|---|
| | 最小値(V) | 最大値(V) | 最小値(V) | 最大値(V) |
| VDD = 3V | 0.0 | 2.1 | 0.0 | 3.0 |
| VDD = 1.8V | 0.0 | 0.9 | 0.0 | 1.8 |

Fig.7 同相入力電圧(CMVIN)の規格

TC75S54FU は電源電圧に対して最大値側が 0.9V 幅が狭くなっています。このため 1.8V 動作の際には入力電圧を 0.9V 以下にする必要があります。TC75S101FU は電源電圧と同じ電圧まで入力しても構わない仕様となっています。どちらのオペアンプも最小値が 0.0 となっていますが、これはボルテージフォロワで使用可能であることを意味しています。

4) 電圧利得(開ループ) ＜記号：Gv＞

開ループ、すなわち負帰還をかけていない場合でのオペアンプの利得です。

5) 最大出力振幅電圧 ＜記号：VOH、VOL＞

規定の電源電圧で使用した際に最大の取りうる出力電圧の範囲です。CMOS 型の場合は通常電源電圧範囲とほぼ等しくなります。測定条件として負荷抵抗が規定されていますが、これは出力端子の電流ドライブ能力を規定する事が目的であり、この条件で無ければ使用してはいけない訳ではありません。ただし出力電流を出力端子のドライブ能力ギリギリまで使用すると、出力電圧の安定性が損なわれる可能性がありますので、利得に誤差が生じます。安定的な出力を得るためには、ドライブ能力に余裕を持たせた設計とする事が重要です。なお出力電流に関しては、7)ソース電流、シンク電流の項目で説明します。

6) 電源電流 ＜記号：IDD＞

VDD 端子から VEE 端子に流れる消費電流です。

7) ソース電流、シンク電流 ＜記号：ISOURCE、ISINK＞

ソース電流、シンク電流はオペアンプ・コンパレータの出力端子の電流ドライブ能力を規定しています。ソース電流はオペアンプ・コンパレータから流れ出る電流の規格で、シンク電流はオペアンプ・コンパレータに流し込む電流の規格です。

ソース電流、シンク電流は出力が High レベルの時にその抵抗に流せる電流であり、出力電圧と負荷抵抗値によって決定されます。ソース電流はオペアンプ・コンパレータの出力ドライブ能力によって変わってきますので、データシートで必ず確認の上、負荷抵抗を設定する必要があります。出力ドライブ能力は電源として考えたときの電源容量に相当しますので、ドライブ能力に対して大きな電流を流す抵抗値設定にした場合には、安定的な出力が得られない可能性もあります。ソース電流、シンク電流は、データシート上の標準値に近い値となるように抵抗値を選択するのがよいでしょう。

シンク電流は出力が Lo レベルの時にオペアンプ・コンパレータに流し込む事ができる電流であり、一般的にはソース電流よりも大きな電流を流す事が可能です。またシンク電流を流すためにはオペアンプ・コンパレータの出力端子を抵抗を介して電源にプルアップする必要があります。

なおオープンコレクタ、オープンドレインタイプのコンパレータは出力回路の構成上、ソース電流の規定がありません。

8) スルーレート ＜記号：SR＞

スルーレートはオペアンプの出力追従性能を表す規格で、単位は V/us です。1us の間に何 V 出力を上げる事ができるか、と言う指標です。数値が大きければ信号追従性が良いと言う意味で、高い周波数の信号を扱う事ができます。実際に DC 信号のみを扱う場合でも入力信号の変化に対して、出力はスルーレートの値でしか立ち上がりませんので、信号入力の際の追従性

がシステムで求められるタイミングに合致しているか確認しておくことが重要です。コンパレータの場合は、スルーレートの代わりに、伝搬遅延時間、応答時間で表現しますが、オペアンプと異なり非常に早いスピードです。

●実際の回路で起きる問題点

1) 出力波形にノイズが出る

オペアンプを使用していると、DC 入力で使用していても出力にノイズ波形が見える事があります。要因はいくつか考えられますが、最も多いのが電源の安定性です。昨今の電子機器は電源管理が非常にシビアになってきており、電源 IC も統合化の流れが加速しています。その場合電源分配の都合上、リップルが多く乗っている電源を使用せざるを得ない事もあり、その電源のリップルがオペアンプの出力に見えるケースがあるのです。アナログ回路の基本として、電源端子にはバイパスコンデンサを挿入するのはもちろんですが、どうしてもリップルの影響が除去できないときには、東芝 TCR シリーズの CMOS 型 LDO を使用する事も効果的です。

また統合電源 IC は内部に DC-DC コンバータを内蔵しているケースが多く、効率改善のために動作周波数を高くする事がトレンドとなっています。その場合 EMI として周辺の電子回路に悪影響を与える事もあります。

また見逃されがちですが GND 配線に EMI が乗っているケースもあります。特に多層配線基板の場合に多く見られます。その場合は GND 配線の引き回しや、配線幅を太くして配線インピーダンスを下げる等の対策を試してみるとよいでしょう。

2) 出力波形が発振している

出力波形にノイズが出るケースと非常に似た現象に見える事もありますが、電源周辺や EMI 対策を実施しても出力波形に異常がある場合は発振しているケースが考えられます。オペアンプが発振に陥る原因で最も多いのが、位相余裕が足りない事です。汎用タイプのオペアンプではあまり見られませんが、高性能タイプでは位相余裕に制限のあるオペアンプが多くあります。

オペアンプに負帰還をかけた状態で入力信号の周波数を上げていくと、入力信号に対する出力信号の位相ずれが大きくなっていきます。このずれがどんどん大きくなり、180°を超え、かつその時の利得が 1 以上の場合、オペアンプに正帰還がかかり発振に至る可能性があります。実際に使用する周波数に対応したオペアンプの選択が肝要です。

なおコンパレータは負帰還をかけずに使用する事が前提で設計されていますので、コンパレータに帰還をかけることは絶対に避けてください。

3) 計算通りの利得が出ない

反転増幅回路、非反転増幅回路の項でも説明しましたが、入力電流、入力オフセット電圧の影響が考えられます。入力電流は CMOS 型を使用し、入力インピーダンスを上げる事で回避可能なケースがほとんどですが、入力オフセット電圧については影響を完全に取り除く事はできません。システムに求められる利得の精度や入力電圧値、周波数によって必要なオフセット電圧レベルは変化しますので、事前の検討が重要です。特に周波数は先の発振現象に至らなくても利得の低下が起きているケースもありますので要注意です。

## 製品取り扱い上のお願い

- 本資料に掲載されているハードウェア、ソフトウェアおよびシステム（以下、本製品という）に関する情報等、本資料の掲載内容は、技術の進歩などにより予告なしに変更されることがあります。
- 文書による当社の事前の承諾なしに本資料の転載複製を禁じます。また、文書による当社の事前の承諾を得て本資料を転載複製する場合でも、記載内容に一切変更を加えたり、削除したりしないでください。
- 当社は品質、信頼性の向上に努めていますが、半導体製品は一般に誤作動または故障する場合があります。本製品をご使用頂く場合は、本製品の誤作動や故障により生命・身体・財産が侵害されることのないように、お客様の責任において、お客様のハードウェア・ソフトウェア・システムに必要な安全設計を行うことをお願いします。なお、設計および使用に際しては、本製品に関する最新の情報（本資料、仕様書、データシート、アプリケーションノート、半導体信頼性ハンドブックなど）および本製品が使用される機器の取扱説明書、操作説明書などをご確認の上、これに従ってください。また、上記資料などに記載の製品データ、図、表などに示す技術的な内容、プログラム、アルゴリズムその他応用回路例などの情報を使用する場合は、お客様の製品単独およびシステム全体で十分に評価し、お客様の責任において適用可否を判断してください。
- 本製品は、一般的電子機器（コンピュータ、パーソナル機器、事務機器、計測機器、産業用ロボット、家電機器など）または本資料に個別に記載されている用途に使用されることが意図されています。本製品は、特別に高い品質・信頼性が要求され、またはその故障や誤作動が生命・身体に危害を及ぼす恐れ、膨大な財産損害を引き起こす恐れ、もしくは社会に深刻な影響を及ぼす恐れのある機器（以下“特定用途”という）に使用されることは意図されていませんし、保証もされていません。特定用途には原子力関連機器、航空・宇宙機器、医療機器、車載・輸送機器、列車・船舶機器、交通信号機器、燃焼・爆発制御機器、各種安全関連機器、昇降機器、電力機器、金融関連機器などが含まれます。本資料に個別に記載されている場合を除き、本製品を特定用途に使用しないでください。
- 本製品を分解、解析、リバースエンジニアリング、改造、改変、翻案、複製等しないでください。
- 本製品を、国内外の法令、規則及び命令により、製造、使用、販売を禁止されている製品に使用することはできません。
- 本資料に掲載してある技術情報は、製品の代表的動作・応用を説明するためのもので、その使用に際して当社及び第三者の知的財産権その他の権利に対する保証または実施権の許諾を行うものではありません。
- 別途、書面による契約またはお客様と当社が合意した仕様書がない限り、当社は、本製品および技術情報に関して、明示的にも黙示的にも一切の保証（機能動作の保証、商品性の保証、特定目的への合致の保証、情報の正確性の保証、第三者の権利の非侵害保証を含むがこれに限らない。）をしておりません。
- 本製品、または本資料に掲載されている技術情報を、大量破壊兵器の開発等の目的、軍事利用の目的、あるいはその他軍事用途の目的で使用しないでください。また、輸出に際しては、「外国為替及び外国貿易法」、「米国輸出管理規則」等、適用ある輸出関連法令を遵守し、それらの定めるところにより必要な手続を行ってください。
- 本製品の RoHS 適合性など、詳細につきましては製品個別に必ず弊社営業窓口までお問合せください。本製品のご使用に際しては、特定の物質の含有･使用を規制する RoHS 指令等、適用ある環境関連法令を十分調査の上、かかる法令に適合するようご使用ください。お客様がかかる法令を遵守しないことにより生じた損害に関して、当社は一切の責任を負いかねます。