

第 1 章

【成功のかぎ1】 繊細なアナログICとの接し方 OPアンプ利用のコモンセンス

OPアンプは、もっともよく利用される代表的なアナログICです。アナログICはデジタルICと異なり繊細なデバイスですから、注意深く取り扱わないと性能が出なかったり、異常な動作をしたりします。

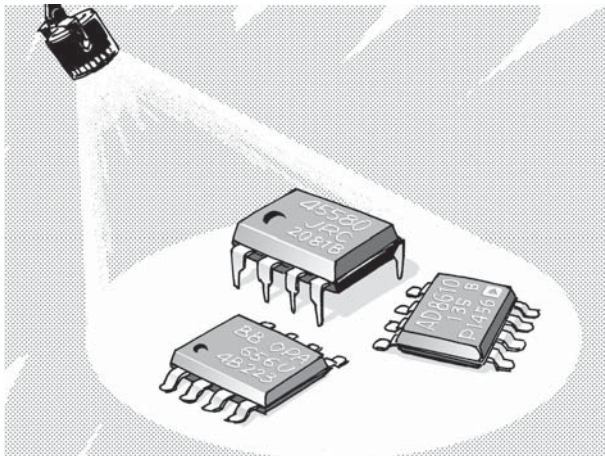
OPアンプの性能を引き出すためには、アナログ回路の必要性や性質を理解しておく必要があります。

1-1

アナログとデジタルは二人で一つ

● 敏感で弱いアナログと鈍感で強いデジタル

薄型テレビやDVDレコーダなど、最近の電子機器の多くがデジタル技術を利用しています。それにしてもなぜ、これほどまでにデジタル技術は広く利用され



OPアンプの外観

見本

るようになったのでしょうか？

理由の一つは、デジタル回路は雑音に強く、確実に情報を伝達できるからです。デジタルにはこの素晴らしいメリットがあるため、情報社会に欠かせない数値の演算や保存、長距離伝送まで幅広く利用されています。「雑音に弱いアナログ回路の時代は終わった、これからはデジタルだけで十分じゃないの？」という声が聞こえてきそうですが、雑音に反応しないデジタル回路は、温度センサや圧力センサが出力する微小信号を拾うこともできません。

たとえば、体重計を例にしてみましょう。体重が50kgのとき0.1V、60kgのとき0.2Vを出力する圧力センサをマイコンのI/O端子に直結すると、マイコンはこの二つの電圧値をどちらも“L”という同一の信号であると判定し、50kgと60kgの重量差を認識しません。これでは製品になりません。

一方アナログICは敏感で、微小な電圧変化に反応します。温度センサや圧力センサが出力する信号の細かい電圧変化を捉えることができます。しかし、雑音にも敏感に反応するため、アナログICの出力信号を雑音の多い環境中で遠方まで伝えるのは苦手です。

● アナログが欠けてもデジタルが欠けても良い製品にはならない

図1-1と図1-2に示すのは、体重計と携帯音楽プレーヤの内部ブロック図です。これらは一般に、デジタル技術の応用製品として認知されていますが、蓋を開けてみるとどちらも、内部はアナログ回路とデジタル回路のハイブリッドになっています。

図1-1に示す体重計には、重さによって抵抗値が変化する素子(ひずみゲージ)を使った圧力センサ「ロードセル」が内蔵されています。ロードセルが出力する微小信号を拾って増幅するのは、本書の主役「OPアンプ」で作られたアナログ回路です。また、体脂肪率に相当するインピーダンスを測定するのもアナログ回路です。デジタル回路は、アナログ回路が出力する信号を演算してディスプレイに表示する役割を担っており、これは全体の一部分にすぎません。

図1-2に示す携帯音楽プレーヤも同様です。フラッシュ・メモリやパソコンとのインターフェース(USBなど)、そしてディスプレイなどに使われているのはデジタル回路です。しかし、これらのICが出力するデジタル・データをアナログ信号に変換し、ヘッドホンを駆動するのはアナログ回路です。

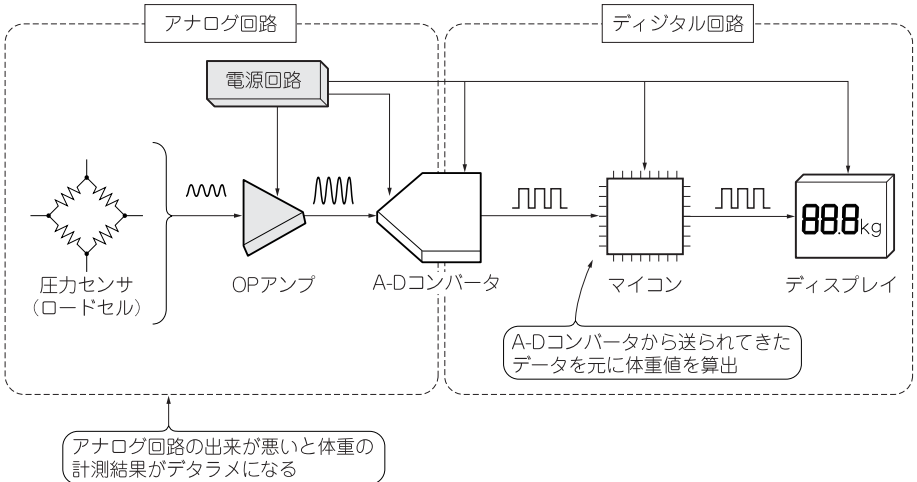
見本 体重計の内部のアナログ回路の出来が悪いと、いい加減な体重値が表示されます。デジタル回路の出来が悪いと、体脂肪率表示機能など、便利な機能を利用できま

せん。また、携帯音楽プレーヤの内部のアナログ回路が貧弱であれば、雑音の多いひずんだ音が再生されます。デジタル回路が貧弱であれば、音質調整機能やランダムプレー機能のないつまらない製品になります。

この例からわかるように、レベルの微小な信号を増幅できるOPアンプ、そして増幅されたアナログ信号をデジタル信号に変換できるA-Dコンバータなどのア



(a) 外見はデジタルっぽいけれど…



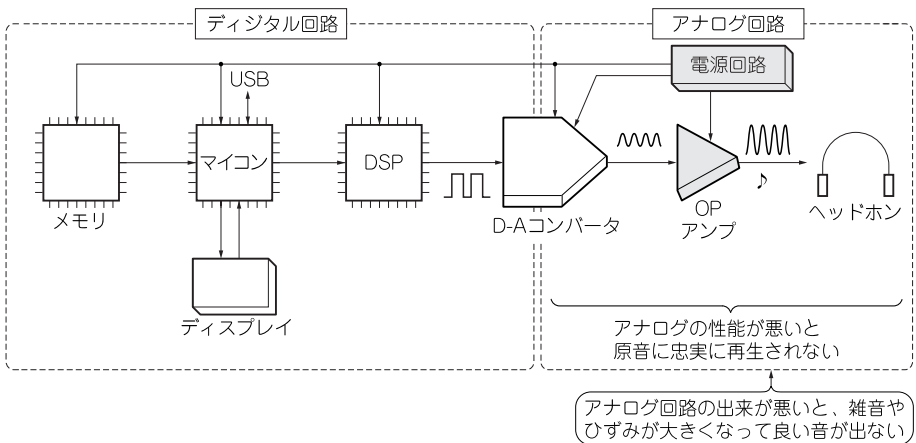
(b) 内部にはアナログ回路が入っている

見本

【図-1】 デジタル表示の体重計の内部はアナログ回路とデジタル回路のハイブリッド



(a) 携帯音楽プレーヤも見た目はデジタルだけど…



(b) 内部にはアナログ回路が入っている

[図1-2] 携帯音楽プレーヤの内部もアナログ回路とデジタル回路のハイブリッド

アナログICがあって初めて、デジタル回路は良い仕事をすることができます。そして、良いデジタル回路は機能を充実させるために、良いアナログ回路は性能や品質という付加価値を高めるために必須です。

1-2

OPアンプの基本機能「信号増幅」の冥利

● 増幅すると雑音に強くなる

増幅とは、信号の振幅を大きくすることです。

工事現場などの騒々しい場所で会話するとき、周囲の音に負けじと声を張り上げ

見本

ます(図1-3)。増幅が必要な理由はこれと同じです。増幅回路は、次の回路、例えばA/Dコンバータに伝えたい信号が雑音に埋もれないように、受け取ったセンサ



【図1-3⁽¹⁾】 次の回路に信号を確実に伝えるには増幅が有効
騒々しいところでは声を張り上げないと(増幅しないと)会話にならない

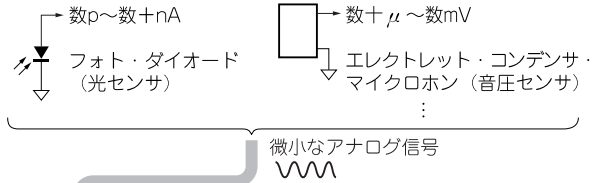
の出力信号の振幅を大きくするときに利用する回路で、しばしばOPアンプが利用されます。

図1-4に示すように、光の検出に利用されるフォト・ダイオードの出力は数p～数nA程度の微弱な電流信号です。音声(音圧変化)を検出するマイクロホンの出力も数十μ～数mVと、これもまた微弱な電圧信号です。

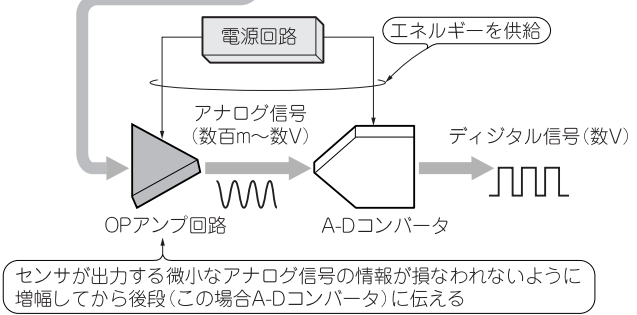
OPアンプは、センサが出力する微弱信号を受け取ると、電源回路から増幅に必要なエネルギーを取り出して信号に加え、レベルの大きい力強い信号を出力します。信号が増幅されて、外部から混入する雑音のレベルに対してその振幅が相対的に大きくなれば、雑音の影響を受けにくくなり、次段のA-Dコンバータ回路に確実に情報が伝わります。

● A-D変換後に失われる情報が少なくなる

見本 ほかにも増幅する理由があります。図1-5に示すのは、8ビットの理想A-Dコンバータによる変換前後の信号です。Excelでツールを作りシミュレーションしました。



[図1-4] OPアンプは電源からのエネルギーをセンサが出力する微弱な信号に供給して力強い信号に変える
センサの出力信号はOPアンプで増幅されることによって、雑音の中を確実に伝わるようになる



入力信号の振幅を $4V \rightarrow 0.4V \rightarrow 0.04V$ と小さくしていくと、A-Dコンバータが離散化(デジタル化)した信号の波形が正弦波状から階段状に変化していきます。センサが出力したのは、微小な連続的に変化するアナログ信号ですが、A-Dコンバータによってガタガタの信号に変換されます。

この階段状の信号は、元のアナログ信号に雑音(量子化雑音)が加わった信号といえることができます。A-Dコンバータが出力するデジタル信号を受け取るDSPやマイコンは、その雑音まみれの情報がセンサの出力した情報であると信じて処理します。

階段状の信号は、A-D変換前に振幅を大きくすればするほど波形は滑らかになり、入力信号に忠実なデジタル・データが得られます。

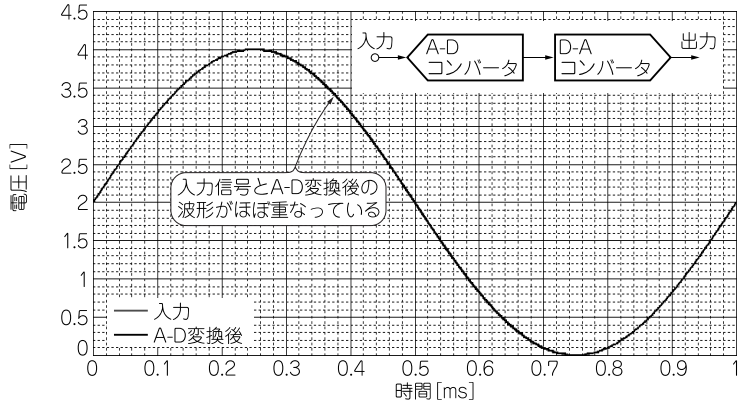
● 理想的なアンプの出力波形と入力波形は相似

図1-4に示したように、OPアンプは外部(電源)から供給されたエネルギーを利用して、電圧や電流が微小な入力信号の振幅を大きくして出力します。良いアンプは、入力信号の波形が崩れないように振幅を大きくしてくれます。

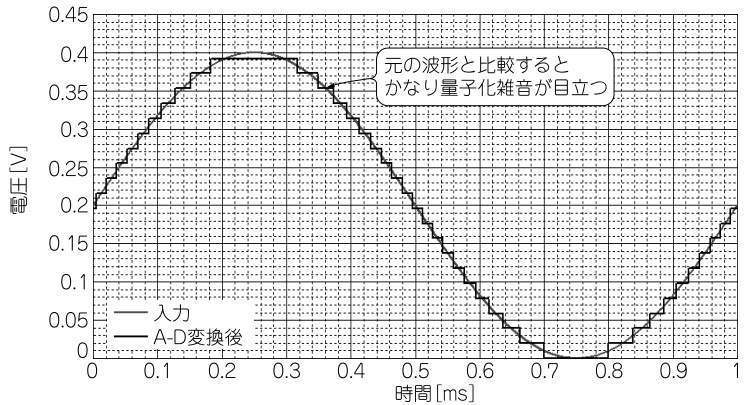
図1-6に示すのは、中学生のときに数学の授業で習った互いに相似な図形です。



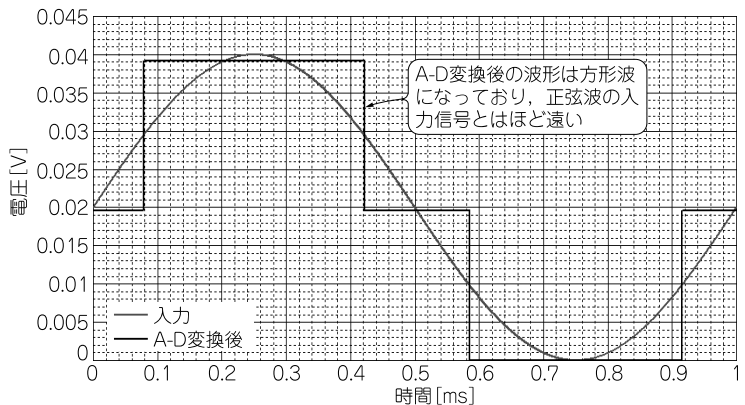
この図形は、辺の長さが1:2で、対応する角の大きさは同じです。拡大後の図形(信号)が元の図形(信号)と相似であるためには、対応する辺の比や角度がすべて



(a) A-Dコンバータの入力信号の振幅(ピーク)が4Vのとき



(b) A-Dコンバータの入力信号の振幅(ピーク)が0.4Vのとき

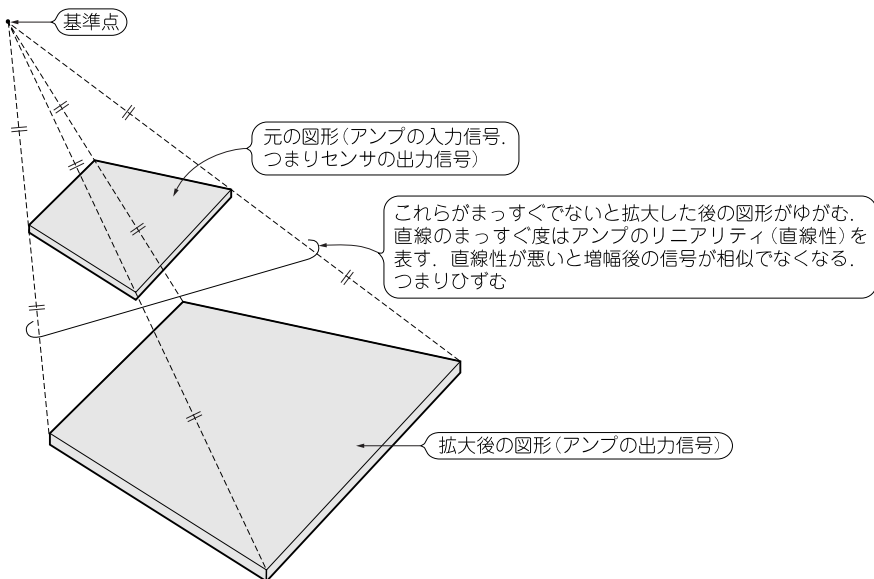


(c) A-Dコンバータの入力信号の振幅(ピーク)が0.04Vのとき

[図1-5⁽¹⁾] アナログ信号のレベルが大きいほどA-D変換後に元信号に忠実なデジタル信号が得られる(縦軸のレンジの違いに注意)

A-D変換後のデジタルデータをアナログ信号に戻して観測

見本



【図1-6⁽²⁾】 アンプには元信号と相似の信号を出力する能力が求められる(理想的な増幅のイメージ)
理想的なアンプは、元信号(入力信号)の波形を崩さず振幅だけを正確に大きくすることができる

保たれなければなりません。どこかの辺が短くなったり、角度が違ったりしてはいけません。

同じように、アンプは入力信号の波形や周波数スペクトラムなどを変化させず振幅だけを大きくする性能が求められます。

1-3	OPアンプの分類
------------	-----------------

● 用途別の分類

OPアンプにはいろいろなタイプがあり、プロの設計現場では回路の要求性能に応じて適切なものを選んでいきます。

表1-1は、用途という観点でOPアンプを分類したものです。直流信号を高精度に増幅する回路では高精度型OPアンプが、ビデオ信号や通信機器などでは高速型

見本 OPアンプが使われます。産業用ロボットなどのモータ/アクチュエータ制御には高電圧/大電流対応の高出力型OPアンプが利用されています。

[表 1-1] OPアンプを用途で分類

種 類	特 徴	応用製品
汎用型	価格優先の普及型。性能は良くもなければ悪くもない	オーディオなどの民生用電子機器など
高精度型	オフセット電圧が小さく、その温度ドリフトも小さい。高精度直流回路用	センサ機器、FA(ファクトリ・オートメーション)機器など
高速型	ゲイン・バンド幅積(<i>GB積</i>)やスルー・レート(slew rate)が大きく、高速/高周波信号を扱うために最適化されている。オフセット電圧は汎用型と同等	DVDプレーヤやパソコンのビデオ信号回路、計測機器、携帯電話の基地局など
低雑音型	内部雑音を小さくしたタイプ。オフセット電圧が小さく抑えられたタイプもある	高級オーディオ、計測機器など
低電圧・低消費電力型	低電圧動作/低消費電流を実現したバッテリ動作機器用のOPアンプ。汎用型～低雑音型まで各種ある	携帯音楽プレーヤ、携帯電話などのポータブル機器
高出力型(パワー型)	高電圧/大電流出力が可能なOPアンプ	産業用機器、ロボットのアクチュエータやモータ制御回路

● 電源電圧による分類

OPアンプの動作電源電圧は、内部にある半導体でできたチップの製造方法(プロセス)に依存します。電源電圧でOPアンプを分類すると次のようになります。

- タイプ1：±15V動作が可能なOPアンプ
- タイプ2：1.8V程度から動作可能な低電圧OPアンプ
- タイプ3：±5V電源で動作させる高速OPアンプ
- タイプ4：その他

表1-2に示すのは、電源電圧で分類した代表的なOPアンプです。

表中の「動作電源電圧範囲」の上限値は、データシートに記載されている「絶対最大定格」に相当します。実際に動作させるときは、信頼性を上げるためにこの値よりも低い電圧を供給します。上限値が40Vであれば実使用時は最大36V、上限が36Vであれば実使用時は最大32Vといったぐあいです。このような設計操作のことを「ディレーティング」と言います。

表に示された動作電源電圧範囲は、片電源で使うことを想定した値です。動作電源電圧範囲の上限が36VのOPアンプを両電源で使う場合は、動作電源電圧を「±18V」と読み換えてください。デバイスによっては、表中の数値がパッケージや製品ランクで異なるので、詳細はメーカー提供のデータシートをチェックしてください。

▶ タイプ1

見本 OPアンプ回路を通過する信号の振幅が大きい場合は、タイプ1が使いやすいです。身の回りの製品で言えば、オーディオ機器(プリメイン・アンプなど)がこ

[表 1-2] 用途で分類した市販のOPアンプ

型名	メーカー名	用途・特徴など	動作電源電圧範囲 [V]
LM358	NS	汎用, 単電源	3 ~ 32
LF411	NS	汎用, JFET入力	10 ~ 36
AD822	AD	JFET入力, 0V入力可, RRO	3 ~ 36
OP07	AD	汎用, 高精度	6 ~ 44
TL072	TI	汎用, JFET入力	7 ~ 36
OPA132	TI	JFET入力, オーディオ用	5 ~ 36
OPA627	TI	JFET入力, 高精度	9 ~ 36
THS3001	TI	CFB, 低ひずみ	9 ~ 33
NJM4558	JRC	汎用, 低コスト	8 ~ 36
NJM2068	JRC	低雑音, オーディオ用	8 ~ 36
μPC812	NEC	汎用, JFET入力	10 ~ 36
LME49720 ⁽¹⁾	NS	低ひずみ, オーディオ用	5 ~ 36
NJM2729 ⁽¹⁾	JRC	高精度	6 ~ 40
OPA211 ⁽¹⁾	TI	低雑音, 低ひずみ, RRO	4.5 ~ 40

(a) ±15V電源で動作可能なOPアンプ(タイプ1)

(1)▶最新デバイス(2008年7月時点)

LMP2231	NS	低電圧/低消費電流, 0V入力可, RRO	1.6 ~ 6
LT6004	LT	低電圧/低消費電流, RRIO	1.6 ~ 18
OPA350	TI	高速, RRIO	2.7 ~ 7
OPA365	TI	入力クロスオーバーひずみなし, RRIO	2.2 ~ 5.5
OPA376	TI	低雑音(低周波雑音が小さい), RRIO	2.2 ~ 7
OPA333	TI	低ドリフト, チョップ安定化, RRIO	1.8 ~ 7
THS4281	TI	高速, RRIO	2.7 ~ 16.5
NJU7098	JRC	低ドリフト, チョップ安定化, 0V入力可, RRO	3 ~ 11

(b) 低電圧・単電源で動作可能なOPアンプ(タイプ2)

LMH6702	NS	CFB, 低ひずみ, 低雑音	10 ~ 13.5
LT1818	LT	低消費電流	10 ~ 12.6
MAX4104	MAXIM	低ひずみ, 低雑音	7 ~ 12
ADA4857-1	AD	低ひずみ, 低電圧/低消費電流	4.5 ~ 11
OPA695	TI	CFB, 低ひずみ, 低雑音	10 ~ 13
OPA656	TI	高速, JFET入力	10 ~ 13
NJM2722	JRC	パルス応答特性が良い	5 ~ 11

(c) 基本的に±5V電源で動作させる高速OPアンプ(タイプ3)

LM2904	NS	単電源	3 ~ 26 (±15では使えない)
LMC662	NS	汎用CMOS, 0V入力可, RRO	5 ~ 16 (低電圧で動作しない)
AD8610	AD	JFET入力	10 ~ 27.3 (推奨電源電圧は±13)
THS3201	TI	CFB, 超高速スルー・レート, 低ひずみ, 低雑音	6.6 ~ 16.5 (推奨電源電圧は±7.5)
OPA727	TI	高精度CMOS, 0V入力可, RRO	4 ~ 13.2 (低電圧で動作しない)

(d) 上記以外の特殊なOPアンプ(タイプ4)

メーカー名▶NS: ナショナルセミコンダクター, LT: リニアテクノロジー, AD: アナログ・デバイセズ, MAXIM: マキシム, TI: テキサス・インスツルメンツ, NEC: NECエレクトロニクス, JRC: 新日本無線

静止時消費電流 [mA] (最大値/ch)	入力オフセット 電圧 [mV] (最大値)	入力バイアス 電流 [A] (最大値)	入力換算 雑音電圧密度 [nV $\sqrt{}/$ Hz] (代表値)	ユニティ・ゲイン 周波数 [MHz] (代表値)	スルー・レート [V/ μ s] (代表値)
2	7	250n	40	1	0.1
3.4	2	0.2n	25	4	15
1.8	2	25p	16	1.9	3
5	0.15	7n	11.5	0.6	0.3
2.5	10	0.2n	18	3	13
4.8	2	0.05n	8	8	20
7.5	0.25	10p	5.6	16	55
9	3	10 μ	1.6	420	6500
2.9	6	500n	9.5	3	1
4	3	200n	7.6	27	6
3.4	3	0.2n	19	4	15
6	0.7	72n	4.7	55	20
2	0.06	2.8n	8	1.1	0.3
4.5	0.125	175n	1.1	80	27

16 μ	150 μ	1p	60	0.13	48m
1.2 μ	500 μ	1.4n	325	0.002	0.8m
7500 μ	500 μ	10p	7	38	22
5000 μ	200 μ	10p	4.5	50	25
950 μ	25 μ	10p	7.5	5.5	2
25 μ	10 μ	200p	55	0.35	0.16
900 μ	2500 μ	0.8 μ	12.5	90	31
1200 μ	15 μ	50p	120	3	3

16.1	4.5	15 μ	1.83	1700	3100
10	1.5	8 μ	6	400	1800
27	8	70 μ	2.1	625	400
5.5	4.5	3.3 μ	4.4	850	2800
13.3	3	30 μ	1.8	1700	4300
16	1.8	20p	7	500	290
25.5	28	70 μ	20	170	1000

2	7	250n	40	1	0.1
0.8	6	2p	22	1.4	1.1
3.5	0.25	10p	6	25	60
18	3	35 μ	1.65	1800	9800
6.5	0.3	0.5n	6	20	30

見本

格号▶RRL: 入力レール・ツェー・レール, RRO: 出力レール・ツェー・レール, RRIO: 入出力レール・ツェー・レール, VFB: 電圧帰還型, CFB: 電流帰還型, 0V入力可: 単電源使用時に0V入力可能

れに該当します。産業機器でも、4-20mA電流ループ回路では最終的に+10V程度の信号を扱うため、±15V動作のOPアンプが利用しやすいでしょう。

▶タイプ2

電池1本当たりの出力電圧は、ニッケル水素2次電池の終止電圧で約0.9V、リチウム・イオン電池の満充電時で約4.2Vと高くありません。このような応用ではタイプ2が便利です。

携帯電話にはリチウム・イオン2次電池が組み込まれており、標準のバッテリー電圧は約3.7Vです。このような携帯機器には、タイプ2に該当する低電圧動作可能なOPアンプが適します。このタイプは加えられる電源電圧の上限も低く、一般に+5V程度しかありません。

OPアンプ回路とマイコンを組み合わせる場合、+5Vや+3.3Vの単電源だけですめば、電源の数が少なくてすみます。OPアンプ回路のために±15Vや-5Vを別途用意するのは、できれば避けたいところです。このようなときは、タイプ2を選択します。

▶タイプ3

高速OPアンプの多くはタイプ3に該当し、その動作電源電圧の推奨値は±5Vです。

表1-2(a)に示すように、高速OPアンプでありながら±15V動作可能なもの(THS3001)や、±2.25V～±18Vまでの幅広い電源電圧範囲で動作可能なもの(OPA211)もあります。「高速OPアンプだから電源電圧は±5Vまでだろう」とか、「±15V動作可能な製品は低電圧では使えない」といった先入観はもたないほうがよいです。

▶タイプ4

動作電源電圧は、内部の半導体チップを製造するプロセスを変えることで、自由にコントロールできます。表1-2(d)に示すように、

- 動作電源電圧の下限値が低いCMOS型(LMC662, OPA727)
- ±7.5Vを推奨動作電圧としている高速型(THS3201)
- ±15Vで動作させるには少し耐圧が不足するタイプ(LM2904, AD8610)

などさまざまなOPアンプがあります。

● 入出力可能な電圧範囲での分類

表1-3に示すのは、入出力電圧範囲による分類です。

見本 両電源型OPアンプは、正と負の二つの電源を加えて使うことを前提に設計されています。単電源型OPアンプは、正と負の電源を加える必要はなく、正電源だけ

で動作するように設計されています。

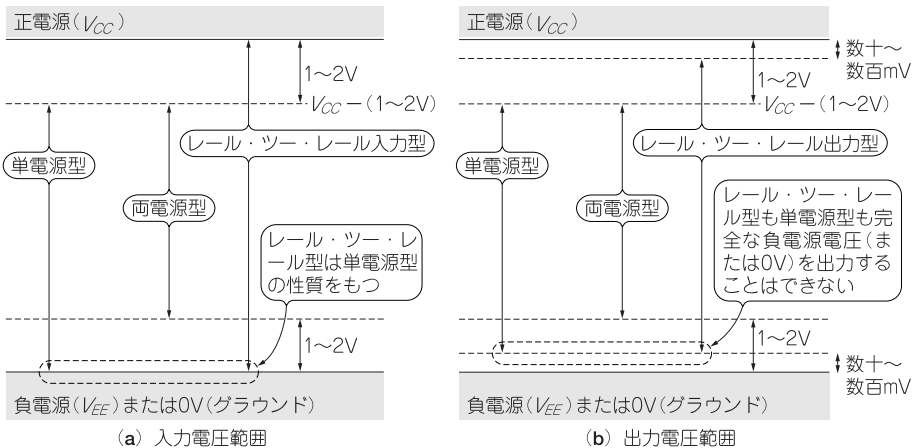
じつは、表 1-3 に示す「単電源型」「両電源型」という表現はあまり正確ではありません。というのは、両電源型を単電源で動かすこともできるし、単電源型を両電源で動かすことも可能だからです。

図 1-7 に示すのは、下記の各 OP アンプが取り扱える入力電圧や出力電圧の範囲です。

- 両電源型
- 単電源型
- 入力レール・ツー・レール型
- 出力レール・ツー・レール型

[表 1-3] 入出力電圧範囲で分類した OP アンプのいろいろ

種類	特徴
両電源型	正負電源で動作させることを想定して設計されている。使い方次第で単電源でも動作させることが可能。トラディショナルな OP アンプは、ほとんどこのタイプ
単電源型	両電源型は、単電源で動作させる場合、0V 付近の電圧を入力することができない。この問題を解決し、0V 入力を可能にしたタイプ
レール・ツー・レール型	入力電圧範囲や出力電圧範囲を電源電圧(電源レール)付近まで拡大させている。仕様書に「単電源型」と書かれていなくても、単電源で動作させることができる



見本

ここで言う入力電圧範囲は、正確には同相入力電圧範囲のこと

[図 1-7] OP アンプが対応できる入力信号や出力信号の電圧範囲

▶負電源付近の信号を入力できない両電源型の欠点を克服した単電源型

両電源型は、負電源付近の電圧を入力することができません。単電源で使用している場合、つまり V_{CC} 端子に正電源を加え、 V_{EE} 端子をグラウンドに接続して動作させる場合は、0V 付近の電圧を入力することができません。「入力できない」とは、OP アンプが期待どおりの動作をしないという意味です。

単電源型は、負電源付近の電圧を入力することができます。これが両電源 OP アンプと単電源 OP アンプの大きな違いです。

▶レール・ツー・レール型

負電源だけではなく、正電源付近の電圧も入出力可能にしたのがレール・ツー・レール型です。レールとは「電源」を意味しています。電源電圧いっぱいまで電圧が振れる信号を入力したり出力したりできるタイプです。

負電源電圧から正電源電圧いっぱいまで入力できるタイプを入力レール・ツー・レール、負電源電圧から正電源電圧いっぱいまで出力できるタイプを出力レール・ツー・レールと呼びます。レール・ツー・レール型は、両電源でも単電源でも使うことができる使いやすいタイプです。

▶完全な出力レール・ツー・レール型は存在しない

入力レール・ツー・レール型は、正電源電圧と負電源電圧いっぱいまで振れる信号を入力することができます。しかし、完全に負電源または正電源いっぱいまで出力することができる OP アンプは存在しません。特別な工夫をしないかぎり、完全に 0V を出力する単電源動作の OP アンプ回路を作るとはできません。

1-4

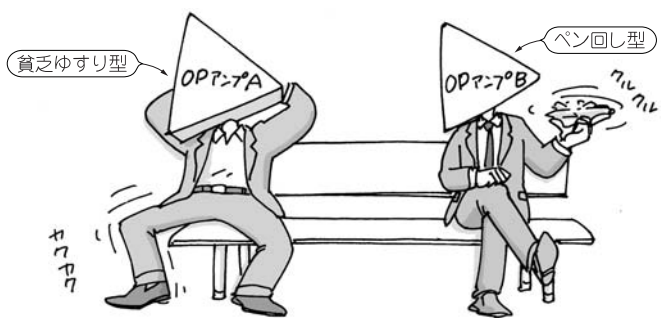
OP アンプの癖を見破る

● データシートには肝心なことが書かれていない

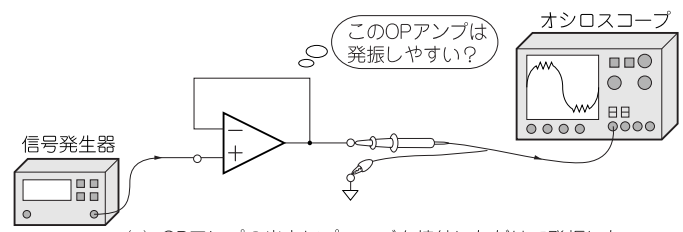
OP アンプ回路は、出力信号の質、例えば「雑音」「ひずみ」「周波数特性」など、多くの項目でその良し悪しが評価されます。そして OP アンプ回路の性能は、OP アンプ IC の質や使用条件によって大きく変わります。

皆さんは、どのようにして OP アンプを選んでいますか？ メーカーが提供するデータシートや仕様書を参考にするだけではだめです。というのは、データシートに示されているスペックはどれも、「ある特定の条件で取得した値」でしかなく、皆さんが必要とする回路と同じ使用条件でのスペックは示されていません。

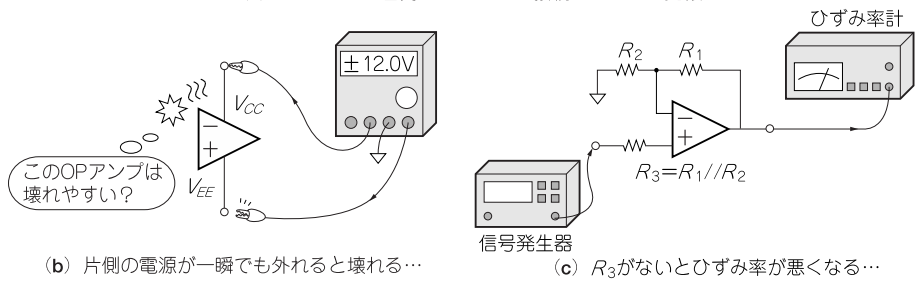
見本 どんなアナログ IC にも癖がありますが(図 1-8)、データシートには示されていません。OP アンプを選ぶときは、必ず評価サンプルを入手して実験回路を組み立



【図1-8】 どんなOPアンプにも癖がある



(a) OPアンプの出力にプローブを接続しただけで発振した…



(b) 片側の電源が一瞬でも外れると壊れる…

(c) R_3 がないとひずみ率が悪くなる…

【図1-9】 OPアンプの癖は実験で見つかる
データシートに癖は書かれていない

て、実際の使用条件で動かしてその性能や安定性を確かめなければなりません。図1-9に示すように、オシロスコープのプローブを接続しただけで発振するOPアンプもあれば、片電源になった瞬間に壊れるOPアンプもあります。OPアンプの+入力端子と-入力端子から見たインピーダンスを等しく合わせ込まないと、高調波ひずみ率が急激に悪化するOPアンプもあります。

見本

写真1-2に示すのは、図1-10のような回路で高速OPアンプを動作させたときのゲインの周波数特性です。図1-10に示すように、+入力端子に抵抗 R_C を挿入し