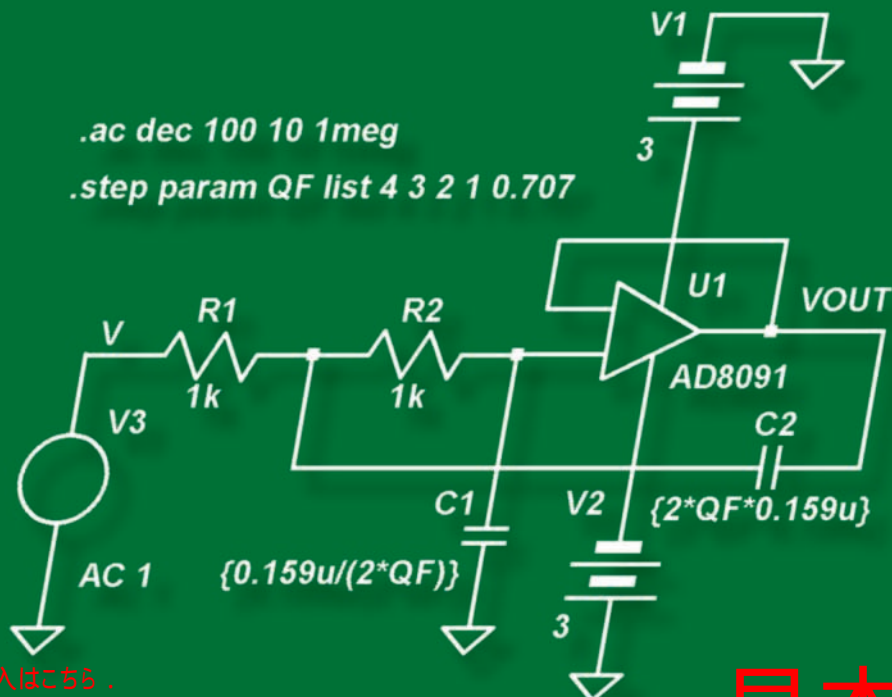


ハイ・パフォーマンス・ アナログ回路設計 理論と実際

高安定/ロー・ノイズ/低歪み…計算と実験で高性能を追求する



アナログ・デバイス株式会社
石井 聡 著



ご購入はこちら。

<http://shop.cqpub.co.jp/hanbai/books/42/42831.htm>

CQ出版社

見本

第1章

アナログ回路動作の理論と実践 シミュレーションを活用した回路動作の解析

この章では手始めに、回路シミュレータであるSPICEを活用しながら、いくつかのアナログ回路の基本的な動作について解説していきます。SPICEをはじめとする回路シミュレータは、現代の回路設計において必要不可欠なツールとってよいと思います。

1-1 ウィーン・ブリッジ発振器

ウィーン・ブリッジ発振器(Wien bridge oscillator)という低周波発振回路があります。お遊びがてらにウィーン・ブリッジ回路の製作と、発振原理の解説を(こちらはまじめに)してみましょう。

ウィーン・ブリッジ発振器は音楽の都ウィーンで作られたものではなく、Max Wienが最初に開発したのだそうです。これを、ヒューレット・パッカード社の創設者の一人であるWilliam Hewlettが修士論文で研究し、それが同社の最初の製品になったそうです⁽¹⁾。

■ ランプを使って発振を安定化させる

後で詳しく説明しますが、この回路では発振を安定化させるためにランプ(電球)を使います。「なぜLEDでなくランプを使うのか?」と思うかもしれませんが、ランプなのです。

現代の実際の回路設計では、ランプを使わずに、FETなどによる発振安定化策を用います。この回路では、簡便に実現できること、原理を説明するという趣旨から、ランプを使っています。

● ランプの電圧対抵抗特性

ランプは図1のように、加える電圧に応じて抵抗値が変化します。このデータは、目的の電圧で目的の抵抗値が得られそうなランプを買ってきて、うち2つを測定したものです。

見本

図1 ランプに加える電圧と抵抗値の特性

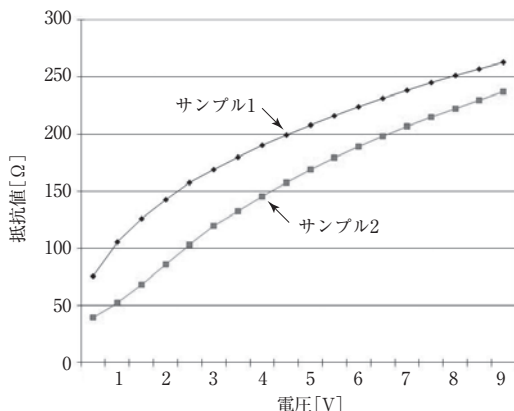
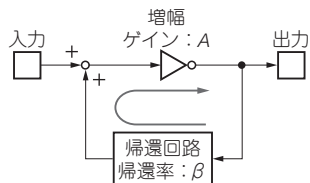


図2 正帰還で発振させるフィードバック系



■ フィードバック(帰還)による発振原理

図2は正帰還で発振させるフィードバック系です。ウィーン・ブリッジ発振回路も、この系と同じかたちで動作します。「ブロック線図はよく書籍とかに出てくるけど、嫌いだなあ」と思われる方もいるかもしれませんが、以降に回路図を示していくのでご勘弁いただくとして、まずはシステム(系)としてどのように動くかを、このブロック図で理解してみましょう。

OPアンプなどは「負帰還」が用いられますが、発振させるためには「正帰還」としてフィードバックを構成して、振幅変化を増長させるように回路を動かします。発振させるには、図2の左側の入力(+)は不要になります。正帰還の発振条件は、次式で表せます。

$$A\beta = 1$$

$$\text{ANGLE}(A) + \text{ANGLE}(\beta) = 0^\circ / 360^\circ$$

A : ゲイン

β : 帰還率

この正帰還の発振条件を満足すれば、安定して発振が継続することになります。

$$A\beta > 1$$

であることが必要です。発振開始時は、内部ノイズとか、電源ON時のスパイクなどが発振の「種」となって、発振が開始します。また、系を1周したときに位相が 0° (もしくは 360°)になることが発振条件になる点も重要です。あとで回路図を示しますので、具体的に実際のOPアンプ回路で理解してみましょう。

見本

第2章

アナログ回路のノイズ特性の理論と実践 抵抗やアンプのノイズをシミュレーションと試作で検証する

アナログ回路では、ノイズ (noise ; 一般には「雑音」) が問題となることが多くあります。ここでは、回路で発生するさまざまなノイズのうち、抵抗やアンプ入力部で発生するノイズについて、考察していきます。

2-1 抵抗のサーマル・ノイズをSPICEで解析する 基本的な考えかた

ここでは、なかなか理解が難しい「ホワイト・ノイズ」のふるまいに関して、その基礎的なことと、NI Multisim Analog Devices Edition (注1) でシミュレーションしたようすについて、それぞれの関係を考えてみます。

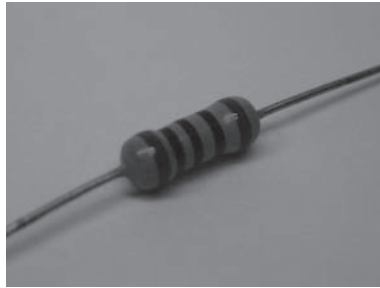
● 抵抗からサーマル・ノイズが発生する

抵抗からノイズが発生します(写真1)。電源を接続していなくてもです。これをサーマル・ノイズ (thermal noise ; 熱雑音) とかジョンソン・ノイズ (Johnson noise) とかいいます。これ以外にも半導体では、PN接合をキャリアが通過するときにショット・ノイズ (shot noise) という電流性ノイズが発生します。また、 $1/f$ ノイズというものもあります。これらについては、ここでは深く取り扱わないことにします。

さてここでは、抵抗から発生するノイズをどう考えるかを、まず示します。そしてそれが電子回路として、OPアンプと組み合わせられることで、OPアンプの内部ノイズと合成され、どのようにノイズがOPアンプ出力に現れるかを考えてみたいと思います。

注1 : 執筆当時はNational Instruments社のNI Multisimをベースにしたものがアナログ・デバイセズの製品評価用SPICEシミュレータだった。以降、SIMetrixをベースにしたADIsimPEを経てLTspiceに至っている。SPICEシミュレーションとしての基本的な考えかたはシミュレータに依存せず、すべて同じとなる

写真1 電源を接続しなくても抵抗からはノイズが発生している(金属皮膜抵抗の例)



● OPアンプ内部ノイズも外部ノイズ源で表せる

OPアンプ内部にも電圧性/電流性ノイズがあります。電流性のショット・ノイズもその一部に変換されます。そしてそれらは等価的に、外部接続されたノイズ源として表すことができます。結果的にそれらはすべて、この章で説明することと結びつけることができます。

● 参考になるアプリケーション・ノート

この章に関連した資料としては、アナログ・デバイセズの以下のアプリケーション・ノートが参考になると思います。

AN-358 ノイズとOPアンプ回路

AN-940 最適ノイズ性能を得るための低ノイズ・アンプ選択の手引き

■ ここでの「ノイズ」とは「ホワイト・ノイズ」

ノイズといってもいろいろなノイズがあります。デジタル回路からの混入ノイズ、スイッチ切り換えで生じるノイズなどもあります。ここでは周波数に依存しない「ホワイト・ノイズ (white noise)」というものを考えます。これはロー・ノイズ・システムでは重要な概念です。

プリズムで白色光を見てみると、広い帯域のスペクトルを均一にもっています。これから説明するノイズが「ホワイト・ノイズ」と言われるゆえは、「周波数に依存せずと同じレベルである」というものなので、白色光(ホワイト)に合わせるように呼ばれます。

● いろいろな呼びかたがあるが同じもの

抵抗から発生するノイズとして主に使われる用語(種類)に、サーマル・ノイズ(熱雑音)とか、ジョンソン・ノイズとか、ナイキスト・ノイズと呼ばれるものがあります。しかし実際はすべてホワイト・ノイズで、同じものです。「なぜJohnson, Nyquistの、ノイズの別名

見本

第 3 章

アナログ回路のレイアウト・テクニック プロトタイプ製作やプリント基板で実験しながら検証する

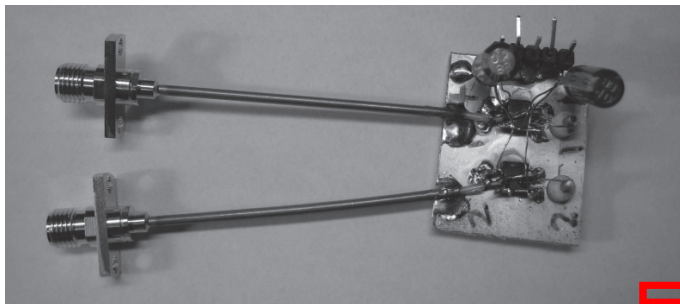
アナログ信号の増幅回路では、回路のレイアウト…部品配置や配線の引き回し方法によって、所望の性能が引き出せるかどうかが決まります。ここでは、「デッド・バグ方式」という、バラックで製作したプロトタイプ回路での不具合と、プリント基板の不適切なレイアウトによる迷結合の問題について、事例を挙げて解説します。

3-1 低入力容量アンプ回路を実現する OPアンプの選定と試作

AD8021という高速なOPアンプを使って、入力容量の非常に小さい2チャンネルの低入力容量アンプ回路を作ってみました。AD8021はアンプ自体の入力容量がかなり小さく、一方で電源電圧範囲が最大 $\pm 12\text{V}$ ととても広い「稀有なアンプ」です。

おいしい特性は評価するとして、汚いですが、実験した基板や実験のようすを写真1～写真3に紹介しておきます。写真3では、はんだくずが飛び散っていますが、現場らしいなあとご賢察を…。

写真1 AD8021を使った低入力容量アンプの全景



見本

写真2 AD8021を使った低入力容量アンプの基板部

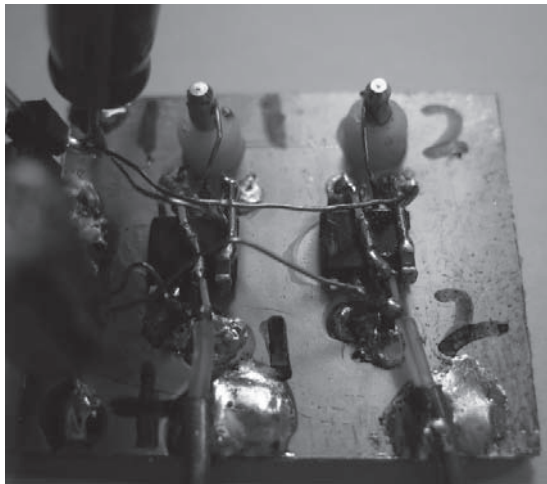
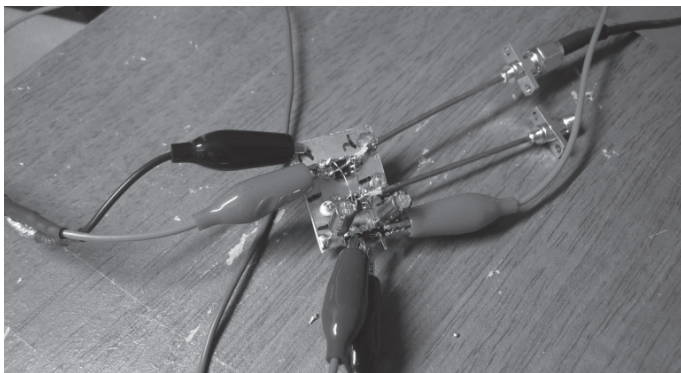


写真3 AD8021を使った低入力容量アンプの実験のようす



■ 最終的にできあがった回路

写真1のように、出力はSMAコネクタにセミリジッド・ケーブル(MKTタイセー、片側CON1563BG/片側カット/ $\Phi = 0.063$ inch/ $L = 150$ mm)なのですが、入力には写真3を見ていただくとわかると思いますが、なんと5 cmくらいの長さのみのむしクリップで信号を与えています。いわゆる「超アンバランス」な設定です。

本来はこのような測定は行ってはいけませんが、今回は「どんなモノかな？」というところ

見本

第 4 章

差分電圧の検出とその限界

ディファレンス・アンプや計装アンプによる差動回路

本章では、コモンモード・ノイズが発生する原因からはじめ、 $CMRR$ の考えかたについて説明し、ディファレンス・アンプや計装アンプで $CMRR$ を高く維持するためにはどのようにすればよいかについて考察していきます。

4-1 電子回路で生じるコモンモード・ノイズと差動回路の活用

「コモンモード (common mode)」は同相モードとか同相成分とも呼びます。一方、「ノーマルモード (normal mode)」は一般的な電圧 (電位差) の考えで、対グラウンド (対地) を基準として電圧がどれだけあるかを示すものです。一般に、コモンモードはちょっとイメージが掴みにくいものかもしれません。

■ コモンモード電圧は2点間のグラウンド電圧の差異

コモンモード電圧は、異なる2点間のグラウンド電位が異なるために生じるものです。図1にそのしくみを示します。回路の動きとしては、信号源 V_S (V_S のSはSource；源のS) に対して、付加電圧 V_C (V_C のCはCommon；共通/同相のC) が直列に接続されたものとして考えることができます。つまり、 V_S のプラス側とマイナス側が同じ電圧 V_C ぶんだけオフセットして動いていると考えることができます。

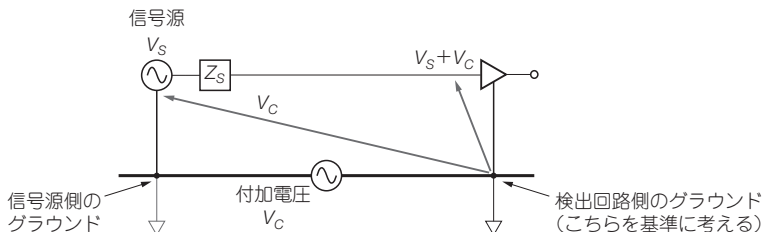
このように、 V_S の端子両端が同じ電圧、同じ方向に動くことで「コモン (共通/同相)」な「モード」という感じで、コモンモード電圧を考えることができます。そして、これが回路に対しては「コモンモード・ノイズ」となって悪影響を与えることになります。

図1の回路はシングルエンドですが、負荷端 (一般的にはOPアンプなどのアナログ信号処理回路部分) で、 V_C がノイズとなって検出されてしまうという問題があります。

「こんなノイズ (電圧)、どうすれば発生するの?」と思われる方も多いかと思いますが、一般的にふたつの原因が主として考えられます。

見本

図1 コモンモード電圧は異なる2点間のグラウンド電位が異なるために生じるもの



● ひとつめの原因…鎖交磁束による起電力

ひとつは図2のように、2点間のグラウンド配線と信号配線とでできる、広いループの面積 S の中を変動磁界 $B(t)$ が通り抜け(これをより専門的には「鎖交磁束」と呼ぶ。なお $B(t)$ は厳密には「磁束密度」)、それが電磁誘導で、以下の式で電圧 V_{emf} として現れるものです。

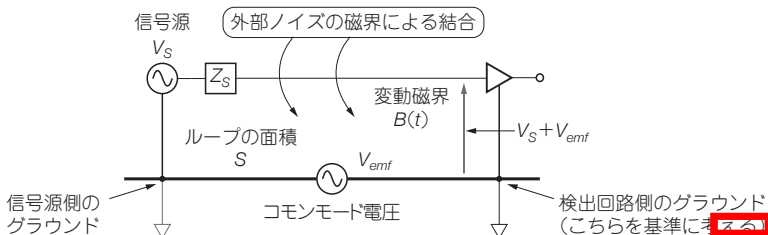
$$V_{emf} = \mu_0 S \frac{dB(t)}{dt}$$

ここで、 μ_0 は真空の透磁率、 t は時間です(ガラス・エポキシ誘電体や銅パターンの比透磁率 μ_r は約1なので、 μ_0 のままで計算できる)。この V_{emf} は、回路がオープンになっているときに回路端子に現れる電圧で、閉回路一巡がインピーダンス Z をもっている場合(もっと簡単にいうと「回路内に抵抗やインダクタンスが接続されている場合」)には、電磁誘導による回路全体の電流 I が、

$$I = \frac{V_{emf}}{Z}$$

のように決定すると考えることができます。回路のインピーダンス Z には、 V_{emf} を生じる相互インダクタンス、もれ磁束による自己インダクタンスも含まれます。

図2 2点間のグラウンド配線と信号配線の広いループの中を変動磁界が通り抜け、それがコモンモード電圧として現れる



見本

第5章

アクティブ・フィルタの ノイズ特性について考察する

LTspiceによるノイズ・シミュレーション技法を活用して

OPアンプを利用したアクティブ・フィルタは、さまざまな応用で利用されることの多い回路です。本章ではLTspice^(注1)を活用して、いくつかの回路のシミュレーションを行いながら、アクティブ・フィルタのノイズ特性について考察していきます。

5-1 ノイズ特性のシミュレーション方法と アクティブ・フィルタのノイズ源

とある日、とある方と、とあるメールのやりとりをしていました。その話題は「アクティブ型のロー・パス・フィルタのノイズ特性」についてでした。「アクティブ・フィルタにはいろいろな方法がありますよね。代表的なものがサレン・キー型や多重帰還型ではないかと思います」「しかし改めて考えてみると、それぞれでノイズ特性はどうなるのでしょうかね」…そんなメールのやりとりでした。

フィルタは余計な信号を除去するものですが、OPアンプでアクティブ・フィルタを構成した場合に、OPアンプ自体からノイズ、そして使用する抵抗素子からもノイズ(サーマル・ノイズ；熱雑音)が発生し、それが結果的にフィルタ特性に影響を与えることがあります。フィルタすべきフィルタさんが、自分でノイズを出してはいけません…

そこで、LTspiceを使ってそれぞれのノイズ特性について考察してみたくなりました。

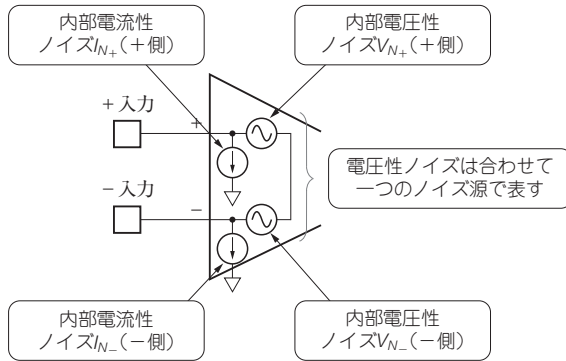
■ OPアンプ回路でのノイズ解析の考えかた

● OPアンプ自体のノイズ・モデル

OPアンプのノイズ解析の考えかたについては、第2章の第2-2節でも紹介していますが、ここでも改めて詳解してみたいと思います。

注1：これまで各章の脚注で示してきたように、アナログ・デバイズのSPICEシミュレータはNI Multisim、つづいてSIMetrixをベースにしたADIsimPE、そしてLTspiceと変遷してきました。

図1 OPアンプのノイズ・モデル(第2章, 第2.2節の図15を再掲)



まず, OPアンプ自体のノイズ・モデルについて説明します. OPアンプは, 図1のように非反転入力(+)と反転入力(-)の2入力になっています.

- 電圧性ノイズは, + (もしくは-) の端子に直列に接続される電圧源としてモデル化
- この2つの電圧性ノイズは合わせて1つのノイズ源で表す
- 電流性ノイズは, + と - のそれぞれの端子からグラウンドに並列に接続される電流源としてモデル化

つまり, モデル化されたOPアンプのノイズ源は, 同図のように3つあり, 下記のようになります.

- (1) 電圧性ノイズ
- (2) 非反転入力(+)に流れる電流性ノイズ
- (3) 反転入力(-)に流れる電流性ノイズ

この(1)~(3)は, それぞれ「無相関」の電圧/電流の変化です. 無相関とは, それぞれの信号波形形状がまったく関係なく変化していることを言います.

● 抵抗からはサーマル・ノイズが生じる

第2章でも述べましたが, 空気中に抵抗を置いておくだけで, 抵抗器内で生じるブラウン運動(微粒子が温度でランダムに振動する振る舞い. 運動変位量は絶対温度に比例する)によって, サーマル・ノイズ(電圧)が生じます. これはジョンソン・ノイズとも呼ばれます. サーマル・ノイズ電圧 V_N は, 次式で表すことができます.

$$V_N = \sqrt{4kTBR}$$

ここで,

k : ボルツマン定数 (1.38×10^{-23} J/K)

見本

ハイパフォーマンス・
アナログ回路設計
理論と実際

ISBN978-4-7898-4283-9

C3055 ¥2700E

CQ出版社

定価：本体2,700円(税別)



9784789842839



1923055027008

見本