

## 第1章 回路素子の動作と特性

1 - 1	E 系列標準数	1
1 - 2	デシベル	2
1 - 3	抵抗の特性と種類	5
1 - 4	キャパシタ(コンデンサ)の特性と種類	8
1 - 5	インダクタ(コイル)の特性と種類	12
1 - 6	トランスとその特性	13

## 第2章 電子回路を扱うための基礎知識

2 - 1	電圧源と電流源	19
2 - 2	定在波とインピーダンス・マッチング	20
2 - 3	ケーブル容量の計測への影響と電圧プローブ	22
2 - 4	パルス波形観測と電圧プローブ	24
2 - 5	出力ケーブルと浮遊インダクタンス	26

## 第3章 OPアンプの動作と取扱方法

3 - 1	OPアンプの基本動作と形状	28
3 - 2	非反転増幅器	29
3 - 3	反転増幅器	30
3 - 4	OPアンプの基本特性	31
3 - 5	バーチャル・ショート(イマジナリ・ショート)	41
3 - 6	OPアンプを使いこなすために	47

## 第4章 雑音とその対策

4 - 1	雑音の分類	56
4 - 2	熱雑音	57
4 - 3	OPアンプで発生する雑音	59
4 - 4	コモンモード雑音	61
4 - 5	雑音対策	62
	(1) シールド(遮蔽)	62
	(2) 差動増幅器	64
	(3) 絶縁増幅器	65
	(4) コモンモード・チョーク	66
	(5) ライン・フィルタ	67
	(6) ノイズ・フィルタ・トランス	68

# 第1章 回路素子の特性と種類

## 1-1 E系列標準数

抵抗やコンデンサ等の素子の値はJISのE系列標準数から決められています。

E系列標準数は下記に示すように等比数列で、E3 E6 E12 E24 E48 E96 E192の7種類があります。

基本的には等比数列なのでたとえばE6系列では、 $10^{(0/6)} = 1$ 、 $10^{(1/6)} = 1.46\cdots$ 、 $10^{(2/6)} = 2.15\cdots$ 、 $10^{(3/6)} = 3.16\cdots$ 、 $10^{(4/6)} = 4.64\cdots$ 、 $10^{(5/6)} = 6.81\cdots$ 、で決定される数値を2桁で丸めたものになります。しかしどういう訳か $10^{(3/6)} = 3.16\cdots$ が3.3になっています。

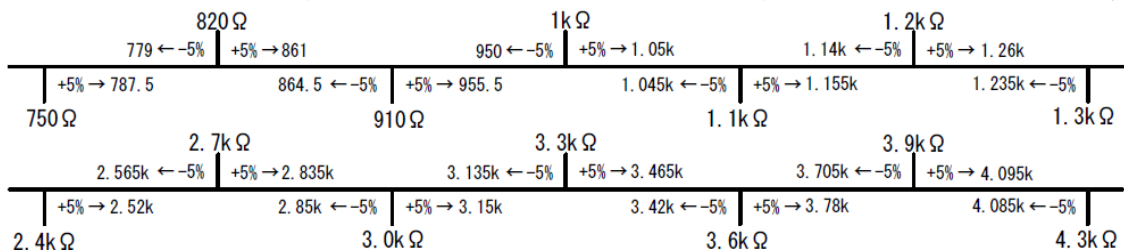
JISでは「等比数列の各項の値を実用上便利な数値に整理したもの」となっています。

部品の種類が増えると在庫管理のコストがかさむため、コンデンサではE6、抵抗ではE12系列程度までに抑えて設計することが多いようです。

したがって電子回路設計を始めるには下記のE系列表が必須です。

E3 数列	E6 数列	E12 数列	E24 数列	E48数列						E96数列					
1.0	1.0	1.0	1.0	1.00	1.47	2.15	3.16	4.64	6.81	1.00	1.47	2.15	3.16	4.64	6.81
		1.1	1.1							1.02	1.50	2.21	3.24	4.75	6.98
		1.2	1.2							1.05	1.54	2.26	3.32	4.87	7.15
	1.5	1.5	1.5	1.05	1.54	2.26	3.32	4.87	7.15	1.07	1.58	2.32	3.40	4.99	7.32
		1.6	1.6							1.10	1.62	2.37	3.48	5.11	7.50
		1.8	1.8							1.13	1.65	2.43	3.57	5.23	7.68
		2.0	2.0							1.15	1.69	2.49	3.65	5.36	7.87
2.2	2.2	2.2	2.2	1.10	1.62	2.37	3.48	5.11	7.50	1.18	1.74	2.55	3.74	5.49	8.06
		2.4	2.4							1.21	1.78	2.61	3.83	5.62	8.25
		2.7	2.7							1.24	1.82	2.67	3.92	5.76	8.45
		3.0	3.0							1.27	1.87	2.74	4.02	5.90	8.66
	3.3	3.3	3.3	1.15	1.69	2.49	3.65	5.36	7.87	1.30	1.91	2.80	4.12	6.04	8.87
		3.6	3.6							1.33	1.96	2.87	4.22	6.19	9.09
		3.9	3.9							1.37	2.00	2.94	4.32	6.34	9.31
		4.3	4.3							1.40	2.05	3.01	4.42	6.49	9.53
4.7	4.7	4.7	4.7	1.21	1.78	2.61	3.83	5.62	8.25	1.43	2.10	3.09	4.53	6.65	9.76
		5.1	5.1												
		5.6	5.6												
		6.2	6.2												
	6.8	6.8	6.8	1.27	1.87	2.74	4.02	5.90	8.66						
		7.5	7.5												
		8.2	8.2												
		9.1	9.1												

E系列は等比数列のため、E24系列を±5%の誤差で並べると、ほぼ全域をカバーします。



## 1 - 2 デシベル

アナログ電子回路では回路の特性等を表すのにdB(デシベル)と呼ばれる単位が頻繁に使用され、重要な単位です。

dBのBベルは電話を発明したグラハム・ベルの名前から由来する単位です(人名から由来する単位は大文字で書き表します)。

Bベルは基準となる量に対する比を常用対数で表したものです。

したがって基準量をR、比較したい量をA、とするとX(B)は下式から求められます。

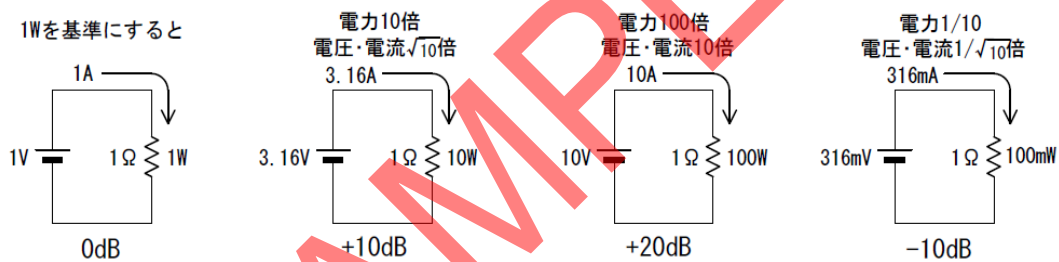
$$X(B) = \log_{10} \frac{A}{R}$$

Bベルで表した量を10倍したものがdBデシベルです。この単位は音量や電力量などのエネルギーを比で表すのに使用されます。10dl(デシリットル)が1l(リットル)ですから10dB(デシベル)が1B(ベル)です。電子技術の分野ではB(ベル)の単位は使われません。

基準電力R(W)に対する、比較したい量をA(W)とするとX(dB)は下式から求められます。

$$X(dB) = 10 \log_{10} \frac{A}{R}$$

下記に示すように、1Ωの抵抗に1Vを印加し、1Wを基準にすると、電力が10倍になったとき1Ωに印加された電圧と流れる電流は3.16…V, 3.16…Aになります。負荷抵抗が同じ値で電力が10dB(10倍)増加すると電圧と電流の値は10倍ではなく10倍になります。



このことから電圧や電流の比をdBで表すとき、電圧や電流が10倍になったとき+10dBとします。したがって電圧や電流の比をdBで表すと下式になります。

$$X(dB) = 20 \log_{10} \frac{A(V)}{R(V)}$$

電圧が10倍になったときは+20dBで負荷抵抗が同じなら電力は100倍になり、電力の100倍は20dBなので電力と電圧は同じdBになります。

一般的な増幅器等の場合、その利得(Gain:ゲイン)は入出力の電圧比で表すので、電圧利得100倍の増幅器では40dBの利得になります。

dB(XdB)の電力比からリニアな電力比(Kp倍)への変換は下式から算出します。

$$Kp(\text{倍}) = 10^{\left(\frac{XdB}{10}\right)}$$

電圧比のdB(XdB)からリニアな電圧比(Kv倍)への変換は下式から算出します

$$Kv(\text{倍}) = 10^{\left(\frac{XdB}{20}\right)}$$

例えば+15dBならば  $10^{\left(\frac{+15dB}{20}\right)} \approx 5.62$ 倍 になります。

エンジニアの会話では dB デシベルを デービー あるいは デシ と呼んだりします。  
 エンジニア間で会話するためには下記のdB値程度は直感的にその量が解る必要があります。

0dB	1	同量			
0.1dB	約1%増	正確には 1.011...	-0.1dB	約1%減	正確には 0.9885...
1dB	約10%増	正確には 1.122...	-1dB	約10%減	正確には 0.9812...
3dB	約 2倍	正確には 1.412...	-3dB	約1/ 2	正確には 0.7079...
6dB	約2倍	正確には 1.995...	-6dB	約1/2	正確には 0.5011...
10dB	10倍	3.162...	-10dB	1/ 10	0.3162
20dB	100倍		-20dB	1/100	
30dB	1000倍	31.62...	-30dB	1/(1000)	0.0316...
40dB	10000倍		-40dB	1/10000	0.01
60dB			-60dB		0.001
80dB			-80dB		0.0001

dBは基本的には比を表しますが派生した下記の単位では絶対量を表します。

dBm : 1mWを0dBとして表す単位です。基準にする抵抗値を明確にする必要がありますが、高周波では記載がないと暗黙の了解で50Ωになります。

従って高周波の世界では 0dBm 1mW 約0.224Vrms 約4.47mA

低周波では600Ωが使われていましたが最近では低周波でdBmの単位を見ることが少なくなりました。

従って低周波の世界では 0dBm 1mW 約0.775Vrms 約1.29mA

dBV : 1Vrmsを0dBとして電圧の絶対値を表します。 20dBV = 10Vrms

dBμ : 1μVを0dBとして電圧の絶対値を表します。 120dBμ = 1Vrms

下記のdBを使用した単位は高周波の分野で使用されます。

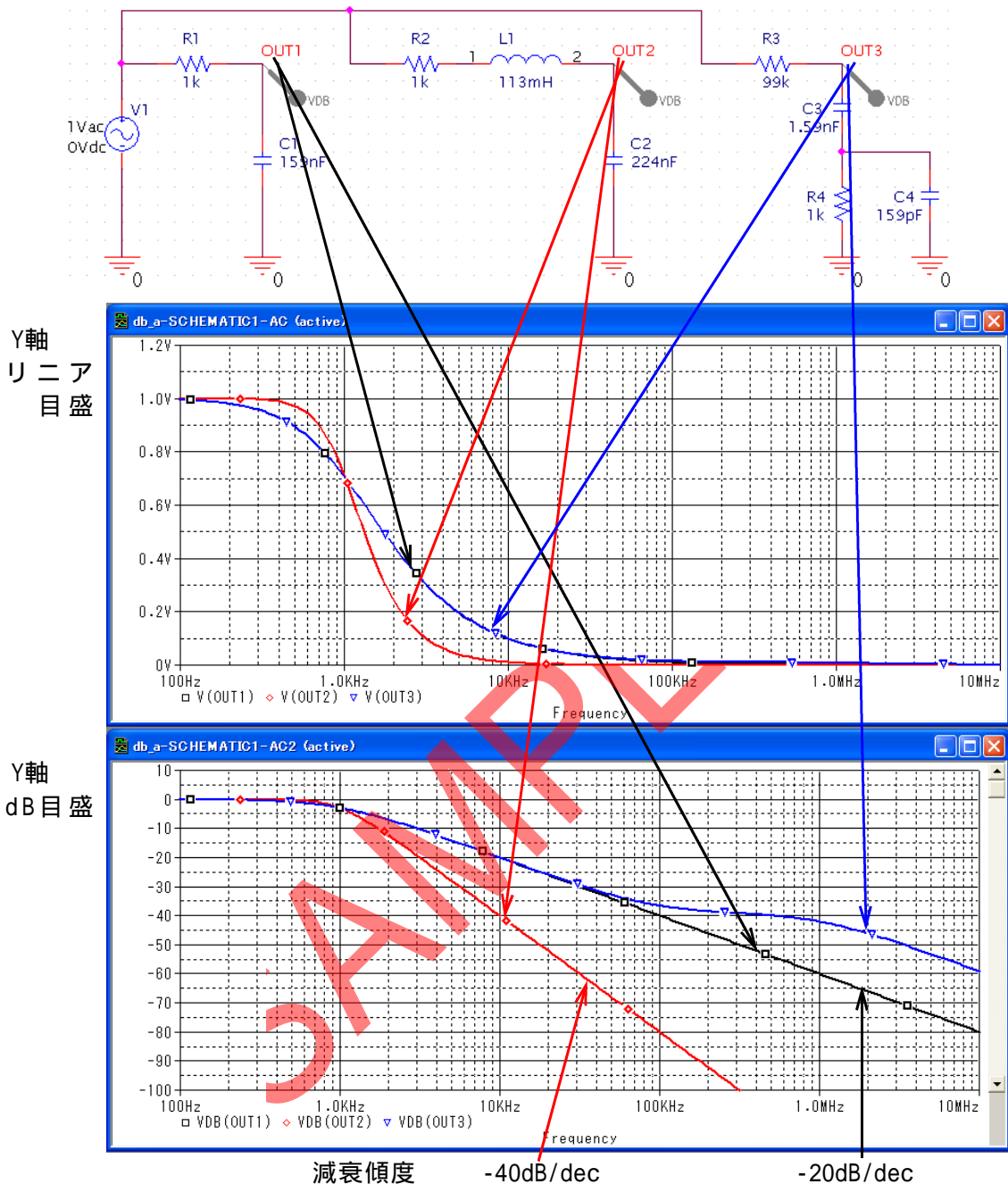
dBc : 基本波(または搬送波:Carrier)の大きさに比較した不要周波数成分(スプリアス)の大きさ

dBc/Hz : 基本波周波数から一定周波数だけ離れた周波数での雑音電圧密度(帯域幅1Hz相当の雑音電圧)と基本波の大きさの比。

慣れないと初めは面倒に感じるdBですが、下記に示す便利な点等があり、アナログ電子回路の理解には欠かせません。

- ・乗算が加算になる 10倍 × 1000倍 = 10000倍 20dB + 60dB = 80dB
- ・少ない桁数で大きな量を表せる 1,000,000倍 120dB
- ・広範囲の量をグラフで表せる
- ・負帰還で使用するポード線図にはdBが不可欠
- ・音に対する人間の耳の感度など人間の感覚量は刺激量の対数に比例するので感覚値の評価単位として適している。

## 回路の利得 - 周波数特性をリニア目盛りとdB目盛りで比較してみる



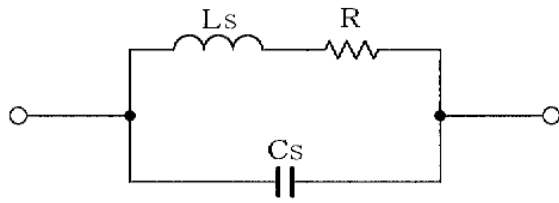
1kHz以下の変動が少ない周波数範囲ではリニア目盛りのほうが変化の様子が良く解ります。逆に100kHzでの減衰量を見るにはリニア目盛りでは無理です。dB目盛りでは、のOUT1が-40dB(1/100)、のOUT2では-80dB(1/10000)、のOUT3では約-37dB(約1/70.8)であることが読み取れ、**各回路の高域減衰特性の違いがグラフで明確に解ります。**

OUT1、OUT2では周波数に逆比例して直線的に減衰しているのに対し、OUT3は100kHzから1MHzの間で一旦平坦になりかけ、また減衰するといううねりがあることが解ります。

OUT1では10kHzから100kHzの周波数が10倍(1decade)になる間に利得が-20dBから-40dBになり1/10減衰しています。この減衰の度合い(**減衰傾度**)を-20dB/decまたは-6dB/octと呼びます。(oct:octave 鍵盤で8度音程、周波数では2倍の周波数)

OUT2では-40dB/decまたは-12dB/octの減衰傾度になっています。

### 1 - 3 抵抗の特性と種類

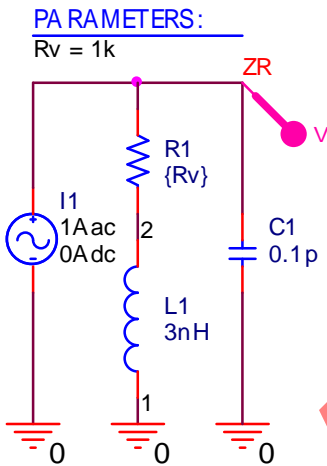


受動素子にはLCR(コイル、コンデンサ、抵抗)の3種がありますが、そのなかで一番特性が安定しているのが抵抗です。しかし現実の抵抗には理想を妨げるパラメータがあり左図に現実の抵抗の等価回路を示します。

Rは理想抵抗で周波数によらず一定の抵抗値を示します。Csは抵抗の浮遊容量(寄生容量)で、プリント基板に実装するとさらに増加します。Lsは抵抗体に含まれるインダクタンス成分や抵抗のリード線によって生じる浮遊インダクタンス(寄生インダクタンス)です。

電力用に用いられる巻き線抵抗などは特に浮遊インダクタンスが多く、数kHz以上の周波数を扱う回路では使用しません。

下図は各抵抗値でのインピーダンスを示すシミュレーションです。1Aの一定電流を流し、発生した電圧がインピーダンスとして読めます。



L1の3nHという値は抵抗の両端のリード線の長さが数mmあると生じてしまう極小な値です。

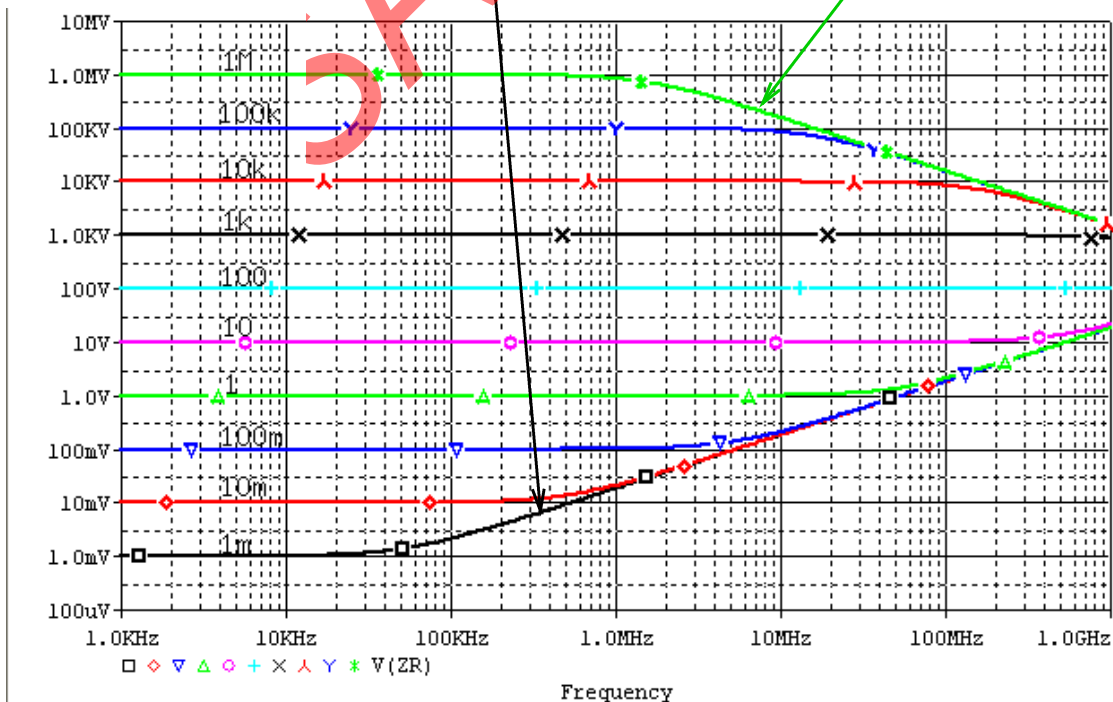
周波数1MHzでは  $Z_L = 2 \times 1\text{MHz} \times 3\text{nH} = 18.8\text{m}$

C1の0.1pFという値は両面プリント基板の銅箔が数mm<sup>2</sup>対向していると生じてしまう微小容量です。

周波数1MHzでは  $Z_C = 1 / (2 \times 1\text{MHz} \times 0.1\text{pF}) = 1.59\text{M}$

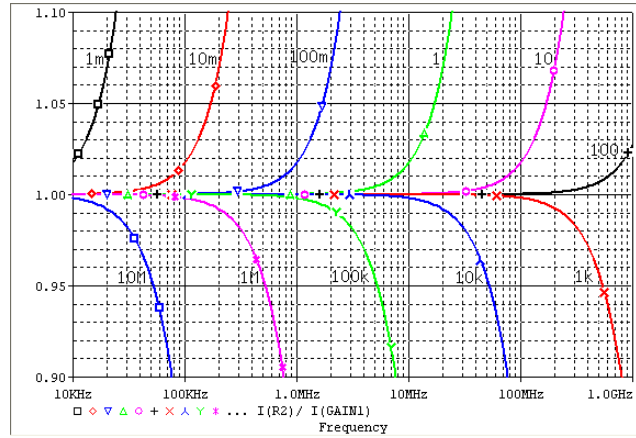
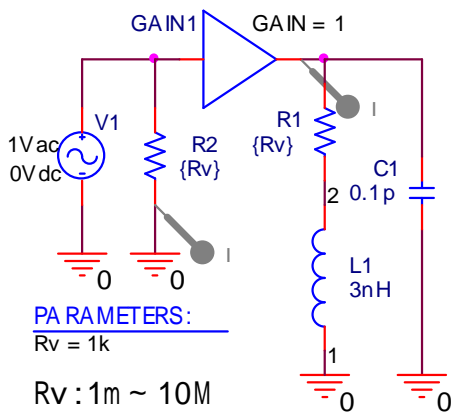
したがってプリント基板等を実装した際にはパターンの影響が大きくL1, C1はもっと大きな値になることが多くなります。

以上のことから周波数が高くなると1M のように抵抗値が高いとC1の影響でインピーダンスが下がってしまい、逆に抵抗値が1m のように低いとL1の影響でインピーダンスが上がってしまいます。



下図は各抵抗値での浮遊容量と浮遊インダクタンスによる誤差の発生する割合を示すシミュレーションです。グラフの上限が+10%の誤差、下限が-10%の誤差です。

理想抵抗と現実の抵抗のインピーダンスの比を表すためGAIN1から流れ出す電流の逆数とR2に流れる電流の逆数の比をとり正規化グラフにしています。

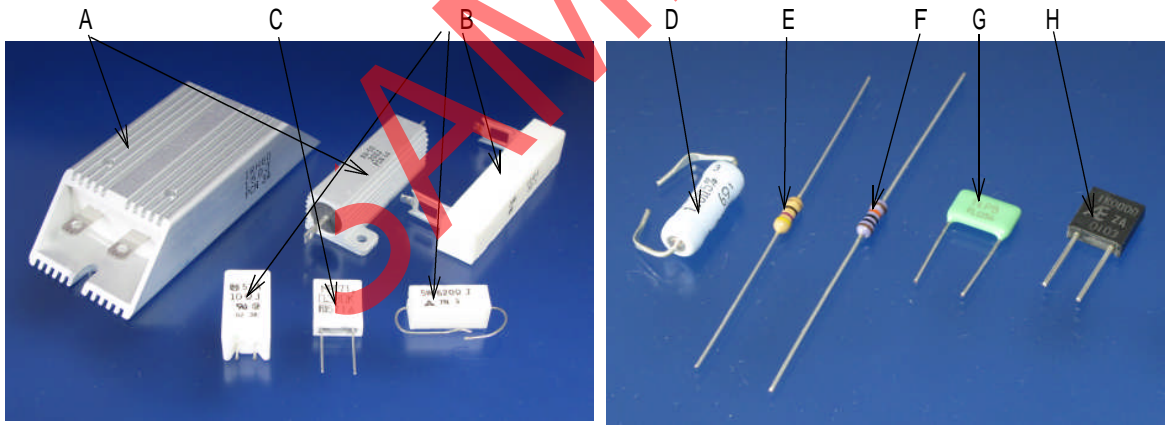


このように大きな抵抗値や小さな抵抗値の場合、周波数が高くなると平坦な周波数特性にするのが難しくなります。

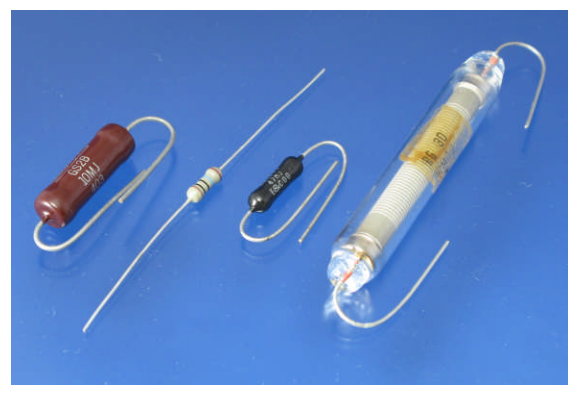
高周波回路で50 や75 のインピーダンスが用いられるのは浮遊容量や浮遊インダクタンスの影響を受けにくいインピーダンスのためです。

高圧回路では高抵抗が使用されることが多く、周波数範囲広げるためには浮遊容量の少ない部品や部品配置に注意が必要です。

大電流回路では電流検出のためシャント抵抗として極低い抵抗値が使用されますがこのような場合は浮遊インダクタンスの少ない抵抗を選択しなくてはなりません。



- A: メタルクラッド抵抗
- B: 巻線(セメント)抵抗
- C: 金属板抵抗 数百ppm程度
- D: 金属酸化皮膜抵抗 数百ppm程度
- E: カーボン抵抗
- F: 金属皮膜抵抗 数十ppm程度
- G: 金属薄膜抵抗 数ppm ~ 数十ppm程度
- H: 金属箔抵抗 0.15ppm ~ 15ppm程度



## 第2章 電子回路を扱うための基礎知識

### 2 - 1 電圧源と電流源

検出する物理量に比例した電圧を発生するセンサ - 電圧源 熱電対、マイクetc

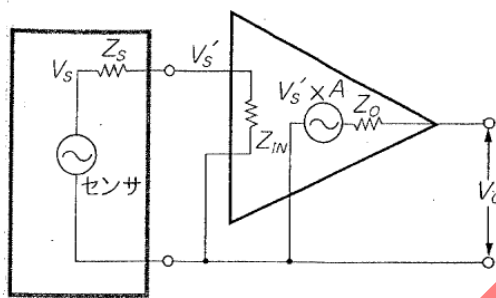
検出する物理量に比例した電流を発生するセンサ - 電流源 CT、フォトダイオードetc

信号源には必ず出力インピーダンスが存在します。

下記に示すように、等価回路では電圧源では直列に、電流源では並列に出カインピーダンスが配置されます。

センサで発生した信号を効率よく増幅するために、電圧源では入力インピーダンスの高い電圧入力増幅器を、電流源では入力インピーダンスの低い電流入力増幅器を使用します。

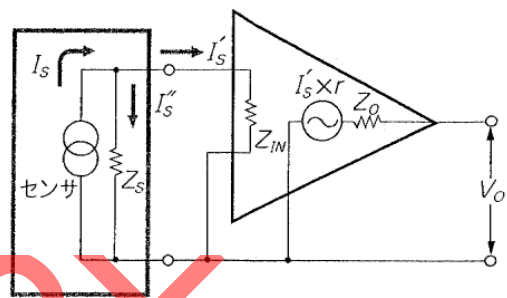
電圧出力タイプのセンサの接続



$$V_s' = V_s \times \frac{Z_{IN}}{Z_s + Z_{IN}}$$

$Z_s \ll Z_{IN}$  のとき  $V_s' \approx V_s$

電流出力タイプのセンサの接続



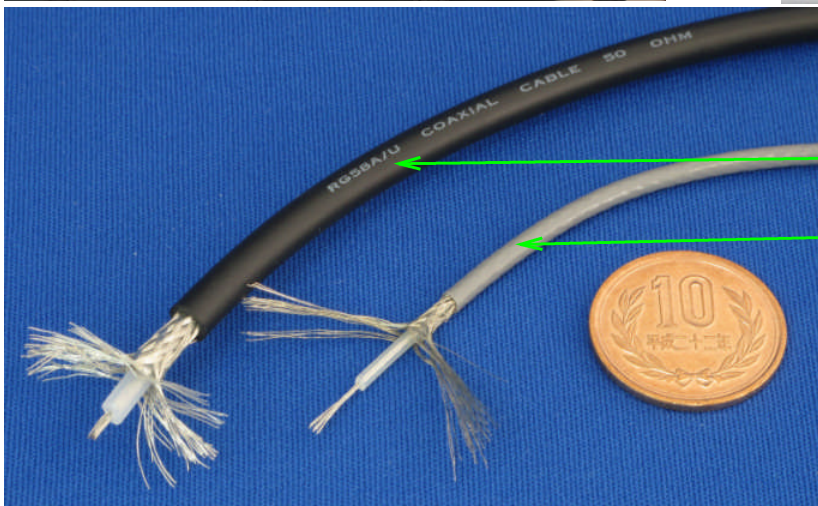
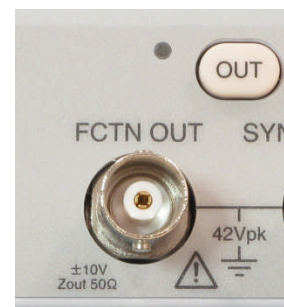
$$I_s' = I_s \times \frac{Z_s}{Z_s + Z_{IN}}$$

$Z_s \gg Z_{IN}$  のとき  $I_s' \approx I_s$

オシロスコープの入力部分 1M 11.5pF



発振器の出力部分 50



同軸ケーブル

RG58A/U

1.5D-XV



### 第3章 OPアンプの動作と取扱方法

#### 3 - 1 OPアンプの基本動作と形状

OPアンプは1938年フィルブリック(G.A.Philbrick)氏によって発明されました。

OPアンプは最初、真空管で構成され、アナログ計算機の基本素子として、信号の増幅だけでなく 加算・減算・乗算・除算 等の演算機能を実現していました。

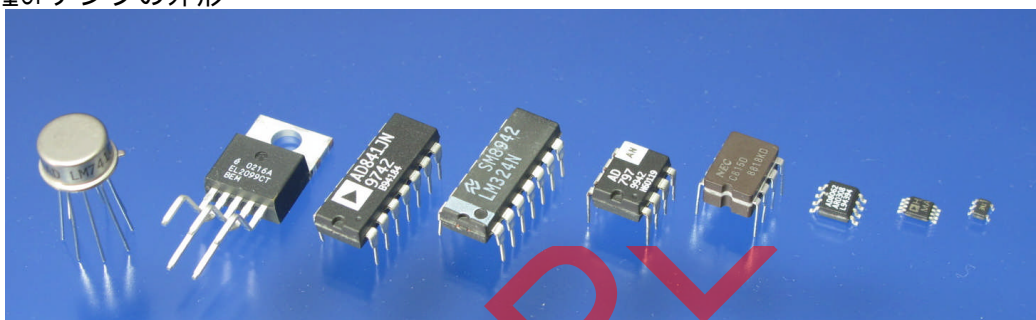
このためOPアンプの日本語の正式名称は「**演算増幅器**」になっています。

演算機能を高精度で実現するためには、「負帰還」が不可欠です。そして負帰還を安定に施すには、増幅器の利得・位相 - 周波数特性に一定の条件が必要になります。

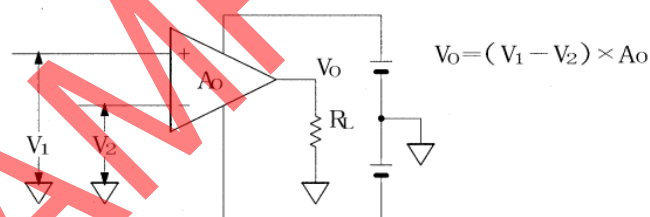
したがって、OPアンプとは

**安定に負帰還が施せるよう、周波数特性が工夫された、反転と非反転の差動入力を持った直流増幅器** と定義できます。

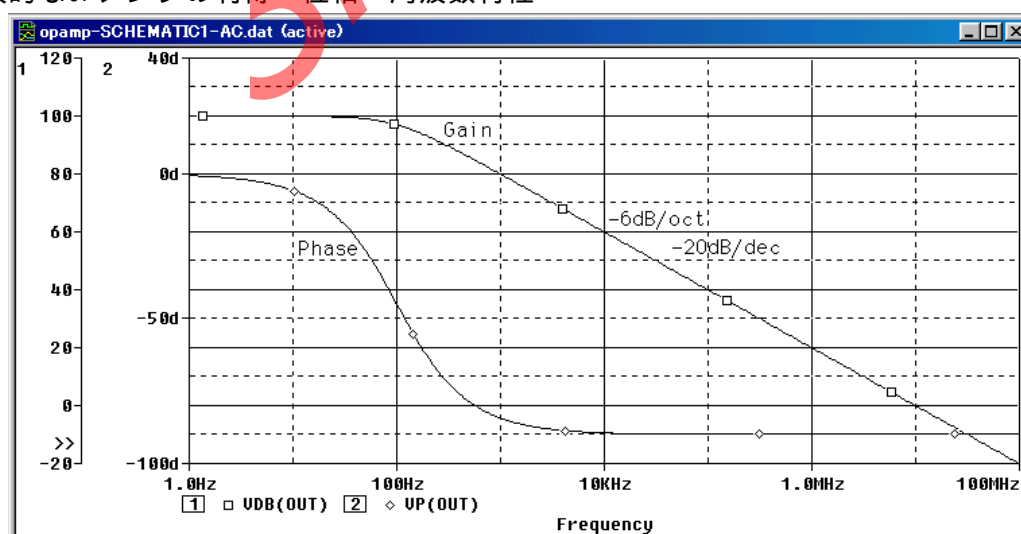
#### 各種OPアンプの外形



#### OPアンプの動作



#### 一般的なOPアンプの利得・位相 - 周波数特性

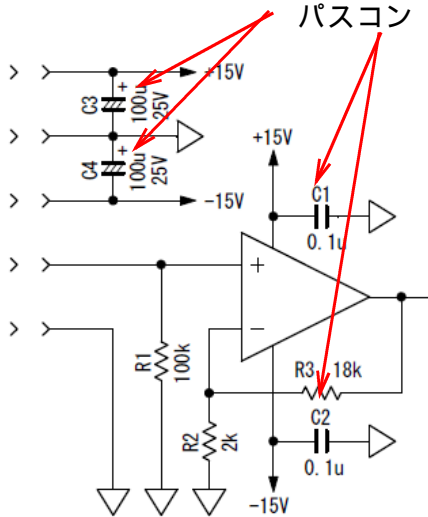


直流利得が100dB(100000倍)前後と高く、100Hz程度から利得が-6dB/octで低下していく。

### 3 - 6 OPアンプを使いこなすために

#### ・電源

OPアンプには**PSRR(Power Supply Rejection Ratio)**という電源変動に対する耐性が有ります。しかし電源変動の速度が $\mu\text{sec}$ オーダになるとPSRRも極小さな値になってしまうため、電源の高速変動を押さえるために電源ラインとグラウンドとの間コンデンサを挿入します。



このコンデンサをパスコンと呼び、OPアンプの電源供給端子の直近に $0.1\mu\text{F}$ 程度の高周波特性のよいセラミック等のコンデンサを挿入します。

このパスコンがないとOPアンプの高速応答が不安定になり、場合によってはOPアンプが発振してしまうこともあります。

このパスコンはOPアンプ1個に1個ずつ必ず付加しなくてはならないというものではなく、プリントパターンの形状やOPアンプの動作速度によって必要な数が異なります。

低速のOPアンプの場合は数個に1つ程度で済みますが、GBWが $10\text{MHz}$ 以上の高速OPアンプの場合にはパスコンの位置や量に十分な配慮が必要です。

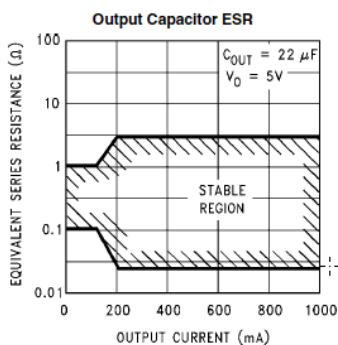
また他の基板から電源が供給される場合にはOPアンプが実装される基板の電源ラインに $100\mu\text{F}$ 程度の電解コンデンサを付加します。この電解コンデンサは電源供給ケーブルの大きな高速電流変化を防ぎ、他の基板への電源変動の影響を少なくします。

OPアンプの低域のPSRRは非常に優れているので低域の電源変動を極端に小さくする必要はありませんが整流しっぱなしの電源は避け、三端子レギュレータ等で安定化した直流電源を使用します。

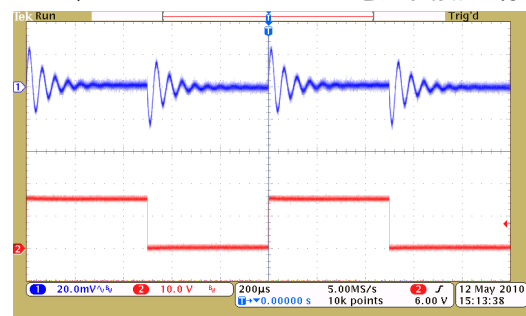
三端子レギュレータのなかには入出力電位差が $1\text{V}$ 以下でも動作するLDO(Low Drop Out)の三端子レギュレータがあり電源効率を上げることができます。ただしLDO三端子レギュレータは出力のコンデンサのESRの値の範囲を規定したものがありこれを無視すると特定の変動速度のとき大きな電源変動が現れたり、最悪発振してしまいます。

LDOを使用するときにはデータシートを詳細に検討する必要があります。

LM2940のデータシートに記載されたESRの規定値と低ESRのコンデンサをつけたときの変動の様子。



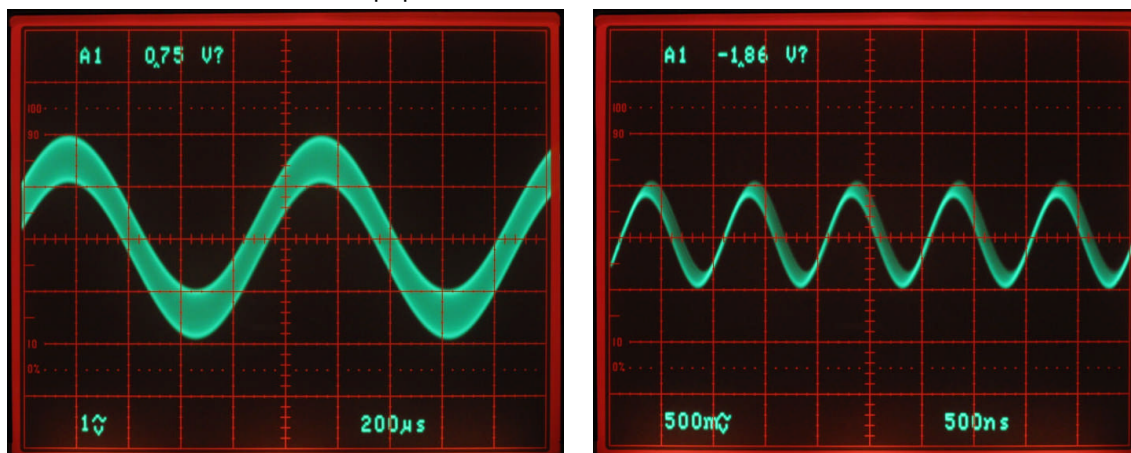
33 $\mu\text{F}$ 、ESR:20m のときの電圧変動の様子



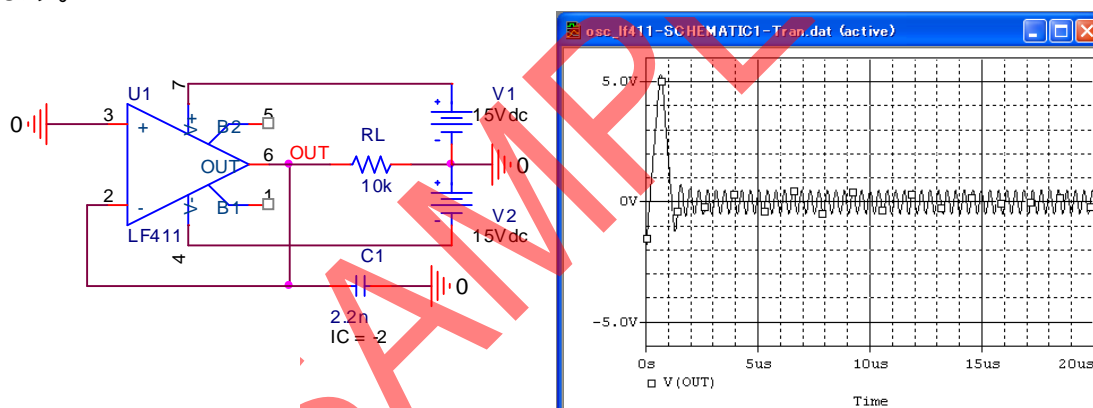
## 容量負荷による発振対策

下の写真は NJM4580 を使用して利得3倍の非反転増幅器を試作し、1kHzの正弦波を入力し、出力に2200pFのコンデンサを接続したときの出力波形です。

1kHzの正弦波に約1MHz、1Vp-pの発振波形が重畳しています。



下はLF411をバッファ接続にし、出力に2200pFのコンデンサを接続したときのシミュレーションです。入力信号を加えていないのに出力に約3MHzの発振波形が連続して発生しています。



上の例に示すようにOPアンプ増幅器の出力にコンデンサを付加するとOPアンプの出力インピーダンスと付加したコンデンサによりLPFが構成され、位相遅れが生じます。このため負帰還の項で説明した負帰還が切れる $A_o \cdot \beta = 1$ になる周波数での位相が $180^\circ$ 遅れてしまい発振してしまいます。

この発振はOPアンプの特性によって異なり最近では容量負荷では発振しないと明示されているOPアンプもあります。

しかし発振しなければよいというものではなく容量負荷により高域に利得のピークがで、計測誤差や雑音の増加といった不具合が発生します。

## 第4章 雑音とその対策

### 4 - 1 雑音の分類

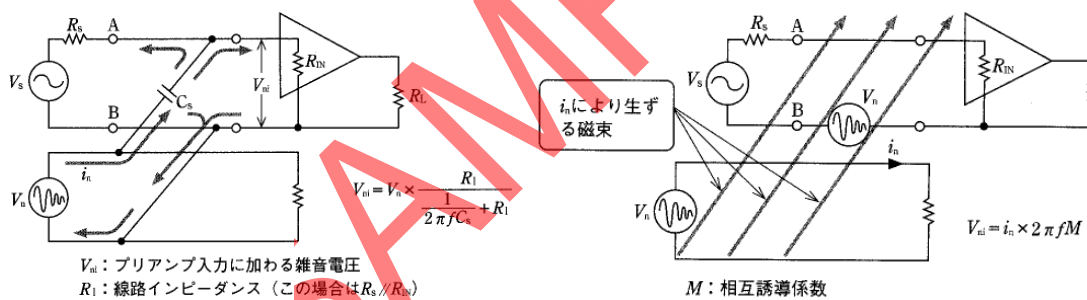
雑音といっても実に様々で、電気的なものだけではなく、振動・熱・光・音といった物理量も電子デバイスで電気に変換され、雑音になってしまうことがあります。要は、検出したい目的信号以外のものは全て雑音です。

電子デバイスで発生する雑音：

- 熱雑音**：導体(抵抗)発生する原理的な雑音。周波数スペクトラムが平坦。
- 1/f雑音(フリッカ雑音)**：2つの異導体の不完全な接触により発生するため、接触雑音とも呼ばれる。半導体素子の低域でも発生し、周波数に反比例。
- ポップコーン雑音(バースト雑音)**：半導体素子の製造上の欠陥により発生する雑音。音に変換するとポップコーンを炒った時のような音がします。
- ショット雑音**：半導体をキャリアが移動するときに発生し、半導体雑音の中域周波数を占める。熱雑音と同じような特性を持っています。
- 分配雑音**：トランジスタのベースとコレクタに電流が分けられるときに生じる雑音で高周波における支配的な雑音

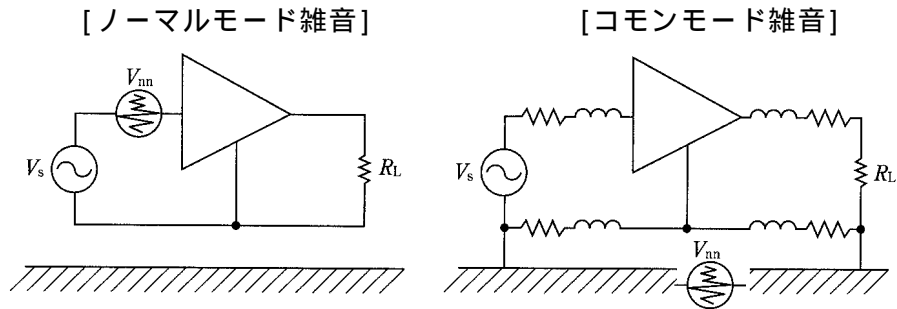
空間を伝わって混入する雑音

- 電界(静電結合)**：雑音源と浮遊容量で結合し、雑音が混入します。
- 磁界(電磁誘導)**：雑音源から発生した磁束が回路をよぎり、雑音電圧が発生します。
- 電波**：雑音発生源から[波長/2]以上離れると電波としての性質が強くなります。



導電体を伝わる、混入経路による分類

- ノーマルモード雑音**：静電結合や電磁誘導によって、信号線路に雑音が混入する
  - コモンモード雑音**：2本の信号線路以外の経路によって雑音が混入する。
- コモンモードの雑音電流が信号系のアンバランスによってノーマルモードに変換され雑音となって信号に混入します。



## 4 - 2 熱雑音

自然界の不規則運動を R.Brown氏が1817年に発見し、ブラウン運動と名付けました。この考えから Schottky氏が導体内部の自由電子が同様な運動をするために雑音(熱雑音)が生じることを発表して今日の雑音理論の基礎となりました。

導体 R( )から発生する熱雑音電圧は

$$v_n = \sqrt{4kTRB} \quad k: \text{ボルツマン定数}(1.38 \times 10^{-23}\text{J/K})$$

T: 絶対温度(K) R: 抵抗値( ) B: 帯域幅(Hz)

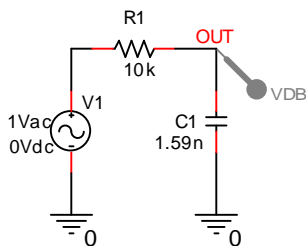
$$\text{温度 } T = 300\text{K}(27 \text{ }^\circ\text{C}) \text{ とすると } v_n = 0.126 \sqrt{R(\text{k}) \times B(\text{kHz})} \text{ (}\mu\text{Vrms)}$$

上式が示すように導体抵抗から発生する熱雑音は、温度・抵抗値・周波数帯域幅の3つのパラメータの積の平方根に比例します。

熱雑音の周波数スペクトラムは平坦で、同じ帯域幅であれば、どの周波数においても同じ振幅になります。したがって単位周波数あたりの雑音電圧がわかれば、任意周波数帯域での雑音電圧が計算できます。

例えば1Hz帯域幅での雑音が 10nVrms とすると 20kHz の帯域幅では  
 $10\text{nVrms} \times \sqrt{20000} = 1.41\mu\text{Vrms}$  の雑音電圧になります。

単位帯域幅(1Hz)での雑音電圧を[雑音電圧密度]といい、単位を[V/ Hz]で表します。



以上のことから、左図では R1 から熱雑音が(約13nV/ Hz)発生し、R1とC1でLPFを構成しているため、高域の熱雑音は減衰し、低域の熱雑音が出力に現れます。  
 のデータがLPFの利得 - 周波数特性です。10kHzで-3dBの利得低下になっています。

のデータがマーカ点に現れた雑音電圧密度です。低域の平坦な部分では、10k から発生した熱雑音、12.875nV/ Hzの値になっています。

実効値は右式から求められます  $V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int f(t)^2 dt}$  下図は周波数で積分しています

のデータは低域からその周波数までの雑音電圧のトータル(実効値を求めるため自乗し、積分し、平方根を取った)です。R1とC1のLPFのため、高域の雑音が減衰しており、高域で一定の値 1.6141uVrms に収束しています。

