

0 . 負帰還を理解するための基礎知識	
0 - 1 デシベル	1
0 - 2 RCL回路の応答特性	8
1 . 負帰還(Negative Feedback)	
1 - 1 負帰還が使われ始めた頃	2 2
1 - 2 負帰還の概要	2 3
1 - 3 負帰還の動作を数式で表す	2 4
1 - 4 シミュレーションで負帰還を検証する	2 5
1 - 5 負帰還方式のまとめ	3 2
1 - 6 安定な負帰還を施すために	3 3
1 - 7 スタガ比を確保して負帰還設計	3 5
1 - 8 ステップ特性を利用して負帰還設計	3 8
1 - 9 回路に位相進み補正をする負帰還設計	4 1
2 . OPアンプ増幅回路の容量負荷対策	
2 - 1 容量負荷の影響	4 2
2 - 2 一番簡単な容量負荷対策	4 4
2 - 3 ベータ回路に位相進みコンデンサを付加する	4 5
2 - 4 出力インピーダンスを低く保って容量負荷対策を行う	4 6
2 - 5 容量負荷を保証したOPアンプでも容量負荷対策は必要	4 9
3 . 2つのOPアンプに渡り負帰還を施す	5 1
4 . ディスクリート・パワーアンプとOPアンプを組み合わせる	5 4
5 . F Vコンバータを使用したDCモータの回転速度制御	
5 - 1 概 要	6 4
5 - 2 回路図	6 5
5 - 3 負帰還設計	6 6
5 - 4 負帰還設計のシミュレーション検証と実測	6 8

6 . PLL回路と負帰還

6 - 1	PLLの概要	7 1
6 - 2	PLL回路と非反転増幅回路	7 3
6 - 3	PLL回路の伝達特性とループフィルタの設計順序	7 4
6 - 4	PLLのセトリング時間と位相余裕	7 5
6 - 5	PLLのスプリアスと位相余裕	7 6
6 - 6	ループ・フィルタの設計法	7 7
6 - 7	74HC4046を使ったPLLクロック・シンセサイザ	7 9

7 . PLL回路を使ったモータの回転制御

7 - 1	概 要	8 3
7 - 2	遅れた位相を進ませるラグ・リード・リード・フィルタ	8 4
7 - 3	ラグ・リード・リード・フィルタの正規化グラフ	8 5
7 - 4	フォトエンコーダ付きDCモータを500rpm～5000rpmに制御する	8 8

SAMPLE

0. 負帰還を理解するための基礎知識

0 - 1 デシベル

負帰還を理解するために最も重要な単位が dB デシベル 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。

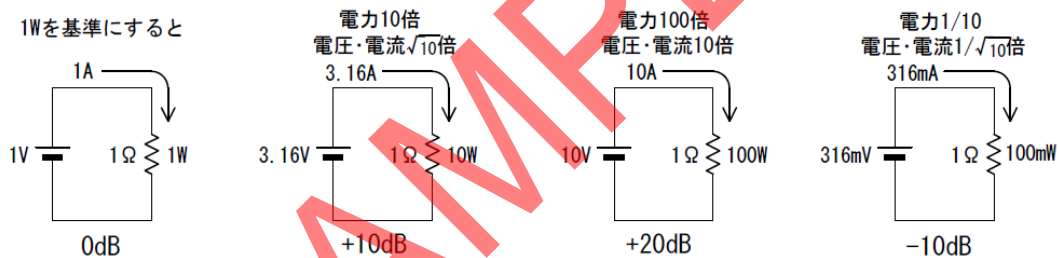
$$X(B) = \log_{10} \frac{A}{R}$$

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、1 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1 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。
 エンジニアどうして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	10倍		-20dB	1/10	
30dB	10 10倍	31.62...	-30dB	1/(10 10)	0.0316...
40dB	100倍		-40dB	1/100	0.01
60dB	1000倍		-60dB	1/1000	0.001
80dB	10000倍		-80dB	1/10000	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50 Ωになります。

従って高周波の世界では 0dBm 1mW 約0.224Vrms 約4.48mArms

低周波では600 Ω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1.29mArms

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。

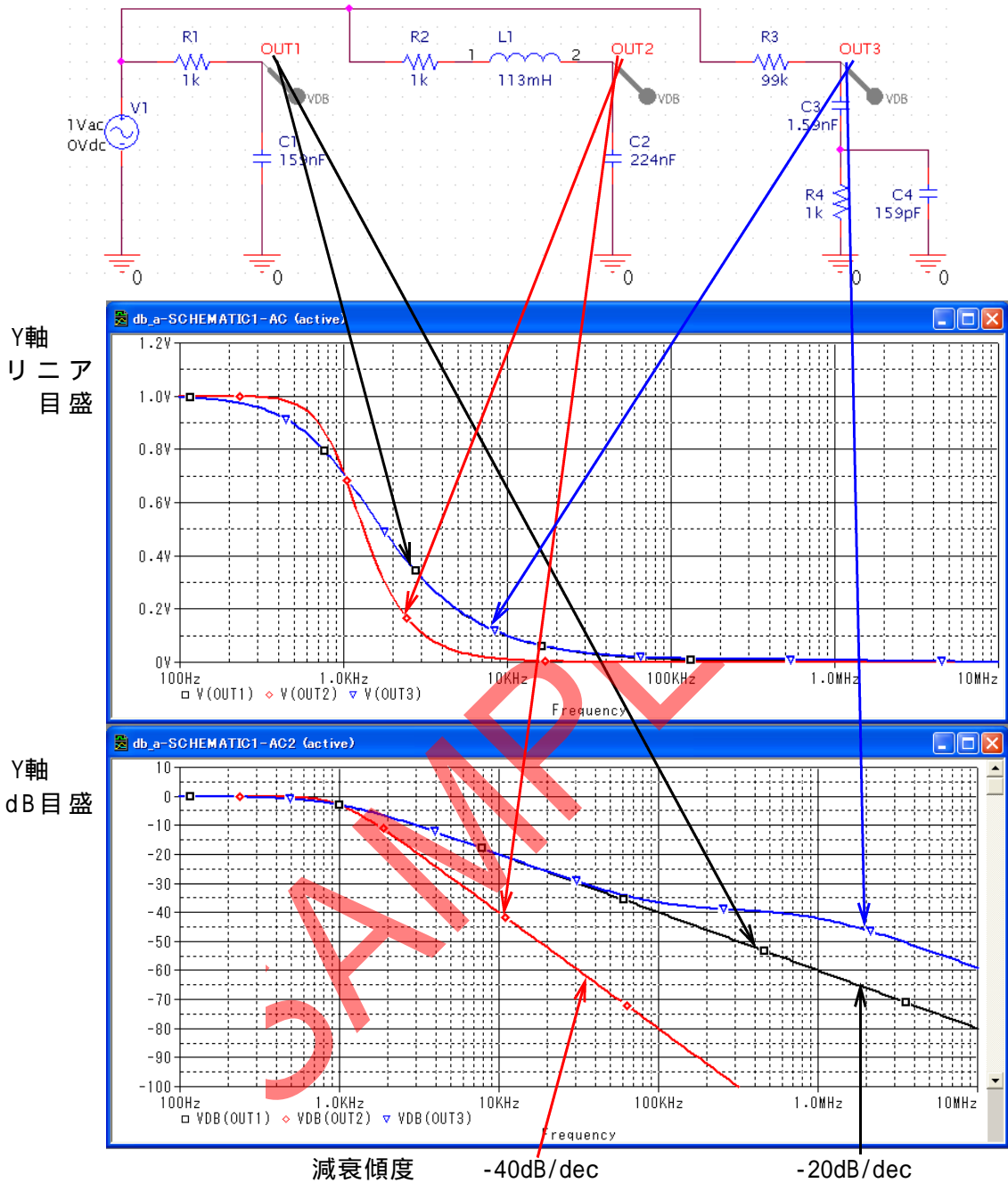
dBc : 基本波(または搬送波:Carrier)の大きさに比較した不要周波数成分(スプリアス)の大きさ

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、OUT1が-40dB(1/100)、OUT2では-80dB(1/10000)、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。

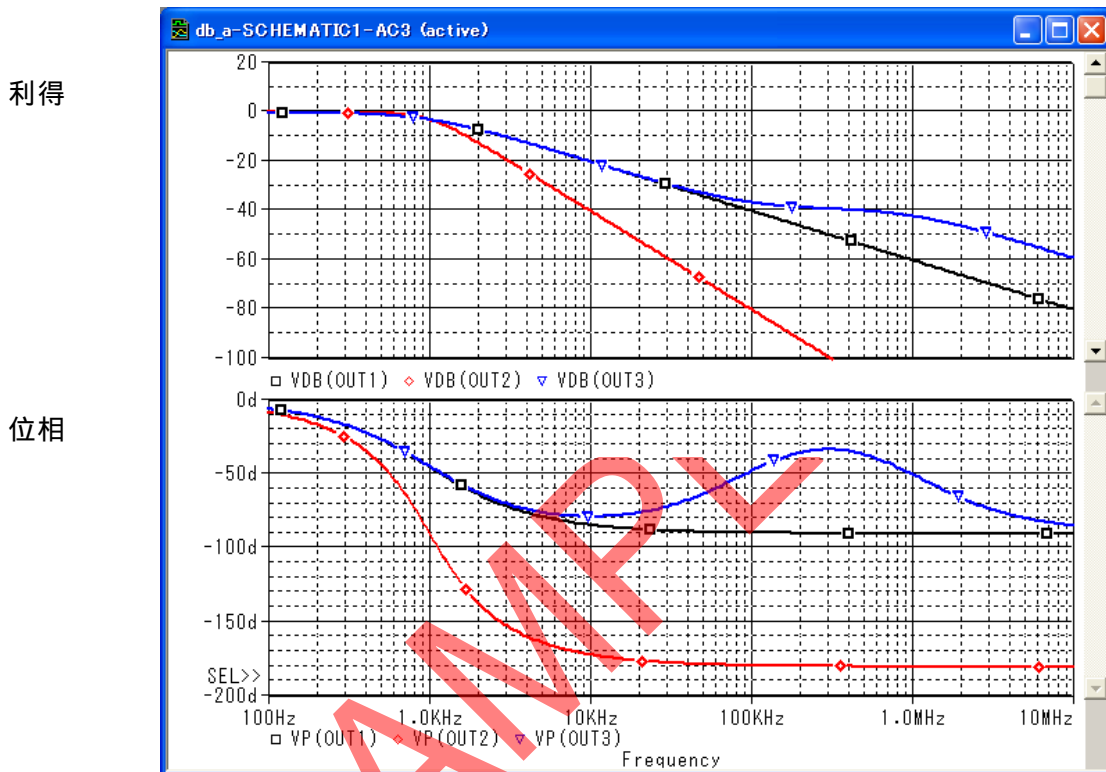
ボーデ線図(ボード線図とも言う Bode plot)

ボーデ線図は負帰還の普及に貢献した Hendrik W.Bode にちなんだ名前です。

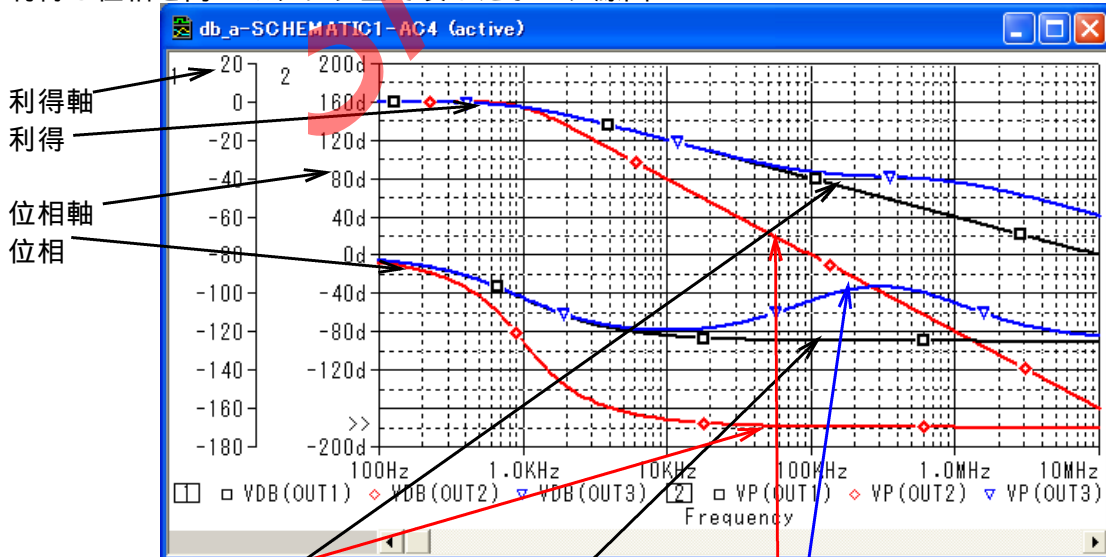
X軸を周波数軸(対数)とし、回路の利得と位相の変化の様子を1枚のグラフに表しています。このとき、利得はdBで表し、位相は度(degree)で表します。

負帰還では利得と位相の関係により回路が安定になったり不安定になったりするため、ボーデ線図によりその程度を判別することができます。詳しくは後の項で説明します。

利得と位相を別々のグラフ上で表したボーデ線図



利得と位相を同一のグラフ上で表したボーデ線図



OUT1の減衰傾度が -20dB/dec では位相が 90° 遅れ、OUT2の減衰傾度が -40dB/dec では位相が 180° 遅れていることが解ります。OUT3では位相が一度戻っています。

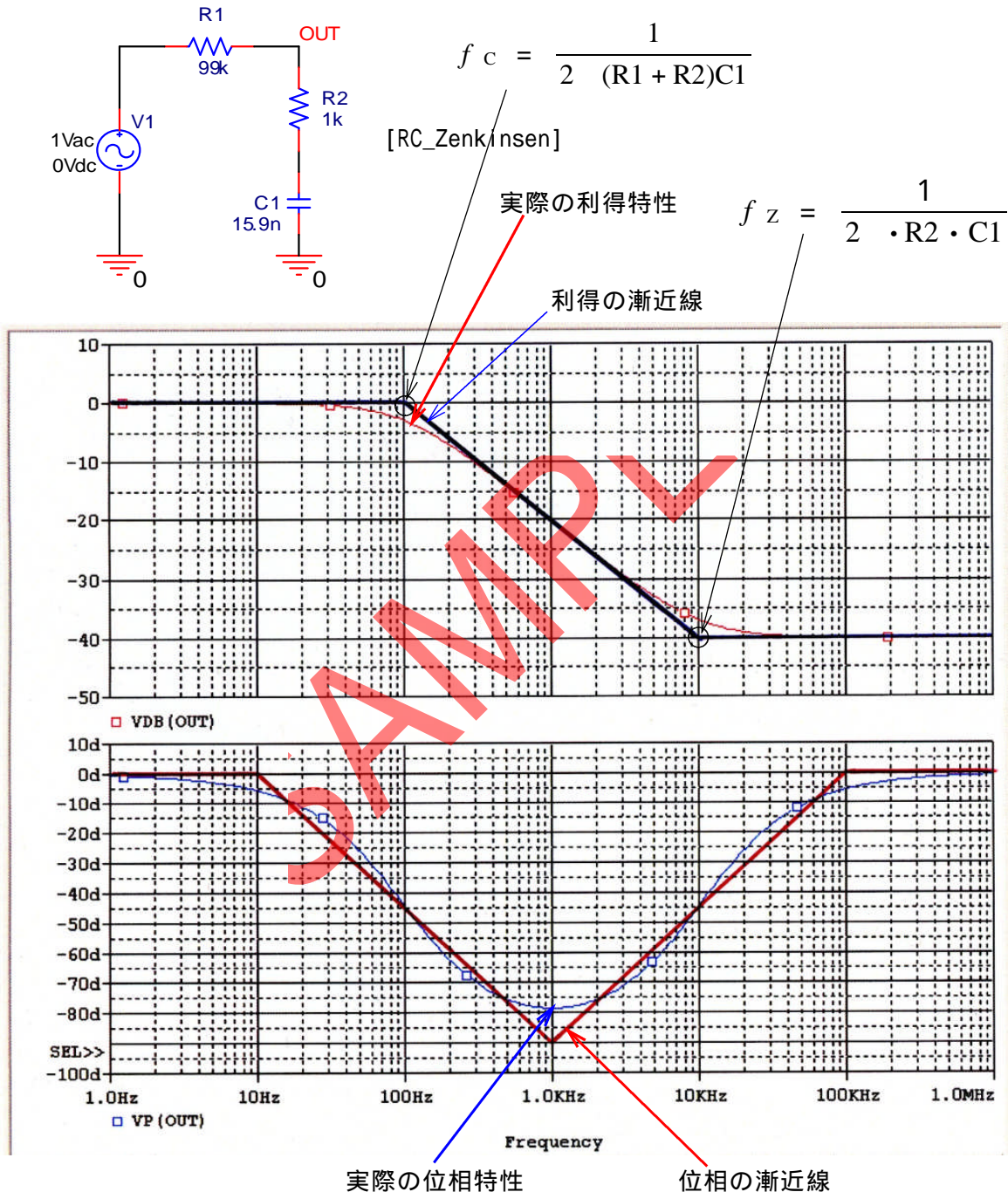
このようにdBによる利得の傾きと位相遅れには一定の規則があり、後の項で説明します。

利得・位相 - 周波数特性を漸近線で表す

RCL回路の利得・位相 - 周波数特性は緩やかな曲線を描き、設計しづらいものです。

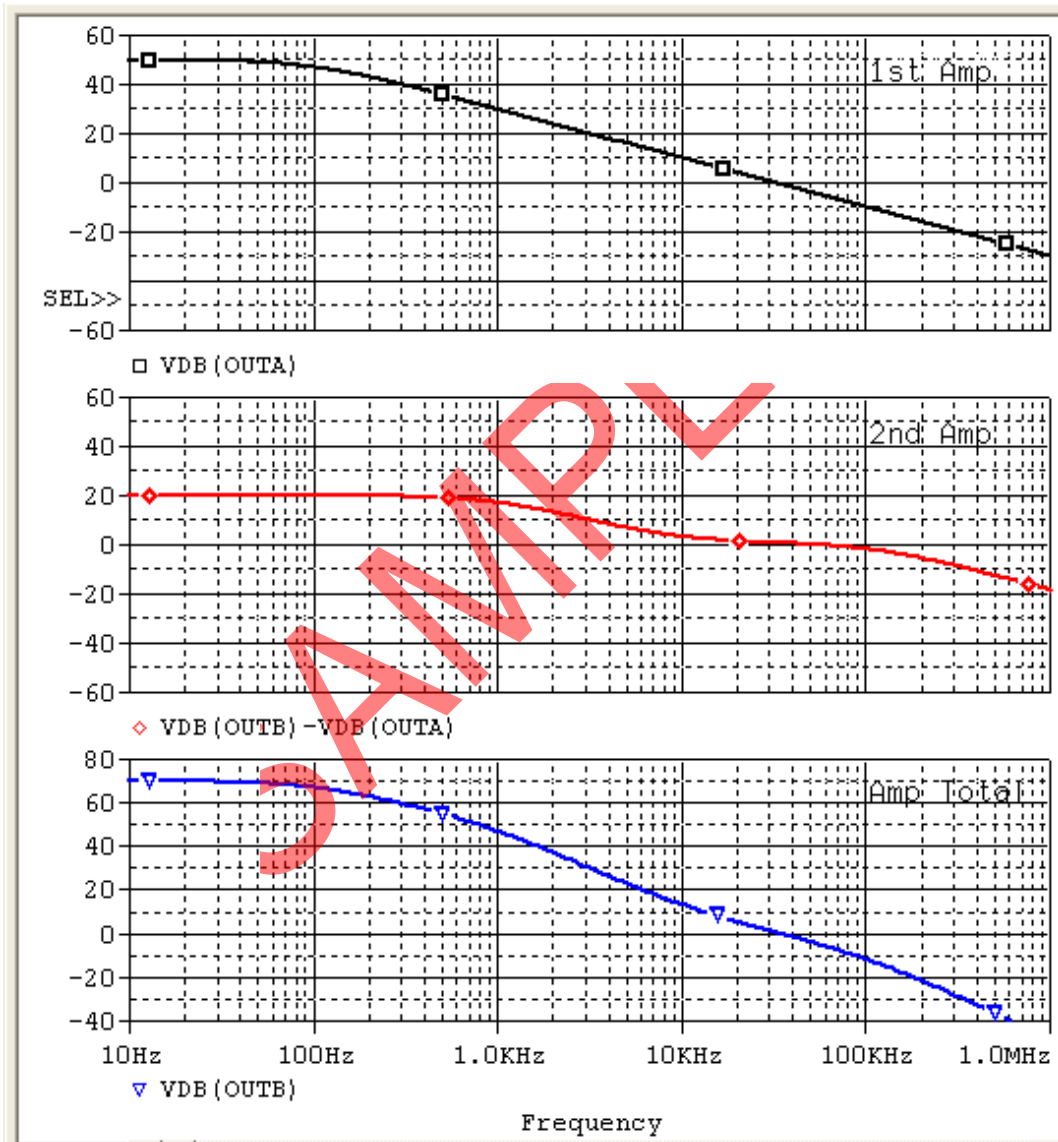
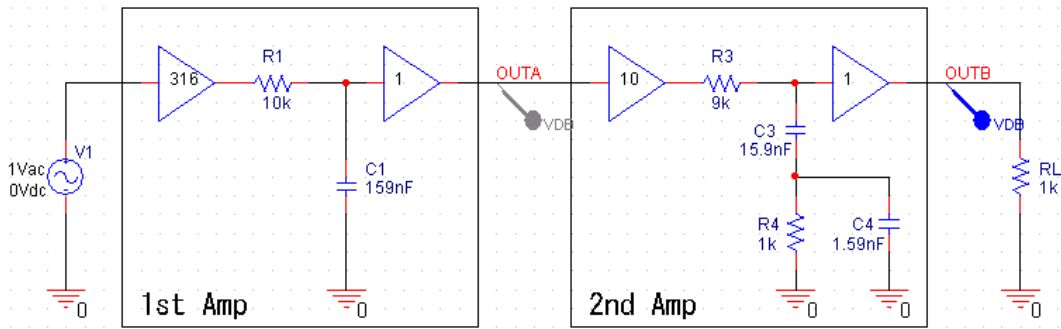
そこで下図に示すようにこの曲線を直線の組み合わせの**漸近線**で表し、その変曲点を数式で明らかにすると複数の周波数特性の合成が簡単に行えます。

したがってボデー線図も漸近線で表すことが出来、負帰還設計のさいに漸近線で描いたボデー線図を使用すると視覚的に解りやすくなります。



fcとfzの間隔が狭いと漸近線からのずれが大きくなってしまいます。シミュレータが自由に使用できる現在ではラフな設計を漸近線で行い、正確にはシミュレーションで追い込んでいくのが現実的です。

複数の増幅器の利得特性を合成する



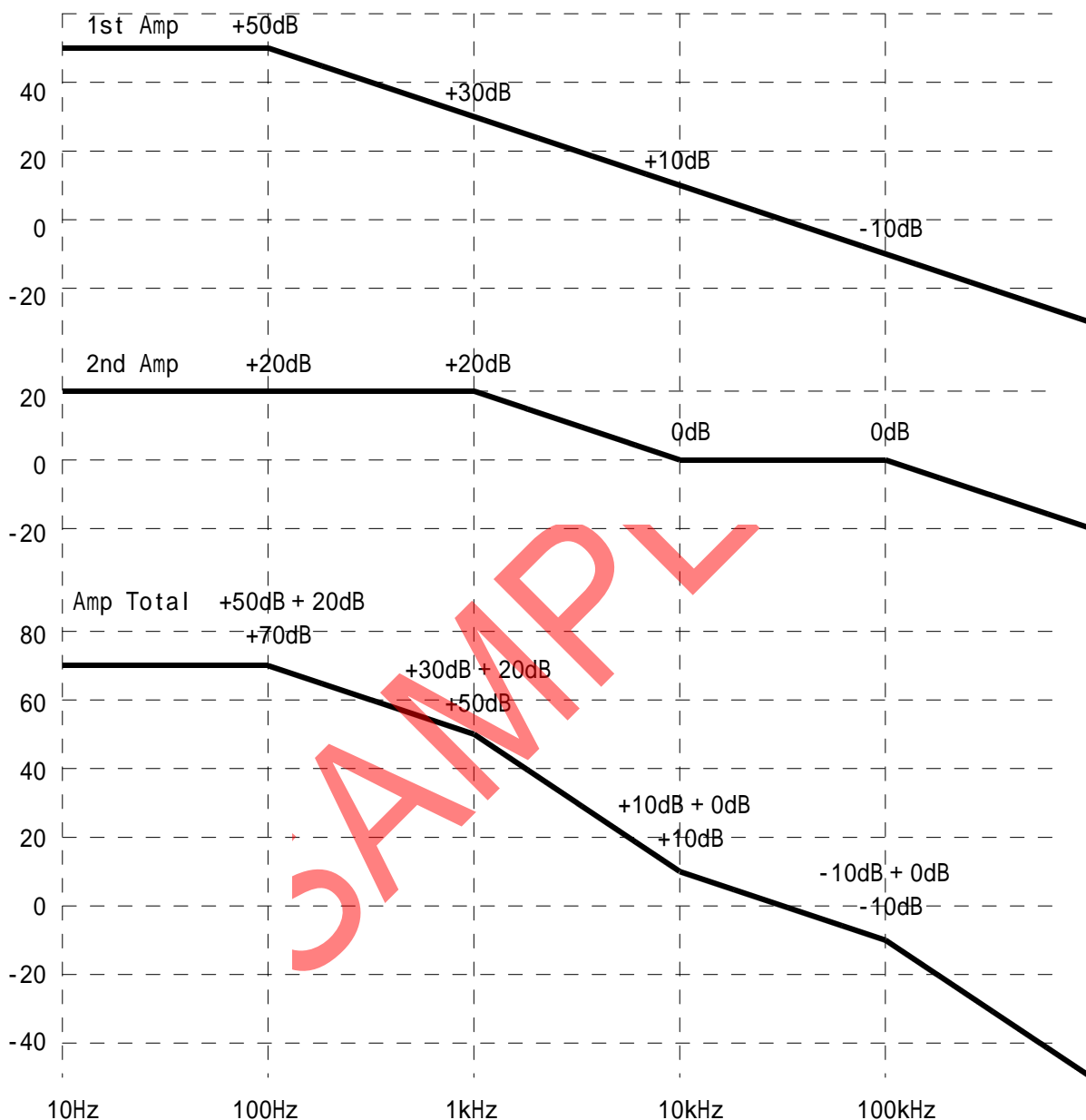
上図の1stAmpは直流利得が50dB(316倍)で100Hzから -20dB/decで減衰していきます。

2ndAmpは直流利得が20dB(10倍)で1kHzから -20dB/decで減衰し、10kHzで平坦に戻り、再び100kHzから -20dB/decで減衰していきます。

この2つの増幅器の利得合成をdBで考えると、利得は加算になり、減衰傾度が周波数に反比例した傾きになることから合成特性が簡単に求められます。直流では50dB+20dB = 70dBの利得。100Hzから -20dB/decで減衰し、1kHzからは -40dB/decで減衰し、10kHzからは -20dB/decの減衰傾度に戻り、100kHzからは再び -40dB/decで減衰するということになります。

増幅器の利得を合成する場合、シミュレーションで示したように実際の特性はなめらかな曲線を描き、計算しづらいものです。このため利得を直線の組み合わせとして考えると変曲点が明確になり、計算し易くなります。この直線の組み合わせで描いたものを漸近線による利得特性と言います。

下記に前ページの利得合成を漸近線で描いたものを示します。



このように利得をdBで表すと利得の合成が加算で行え、そして減衰傾度が直線になることから利得の合成が非常に解りやすくなります。

合成利得が0dBになる点は減衰傾度が-20dB/decになる中心(約30kHz)になっています。

負帰還の設計では合成後の利得特性が0dBをよぎる周波数で減衰傾度を-20dB/decにするには1stAmpの特性、または2ndAmpの特性をどう設計するかという、逆なことが課題になり、dBで漸近線を頭に描き、設計を進めます。詳しくは後の項で説明します。

1 . 負帰還 (Negative Feedback)

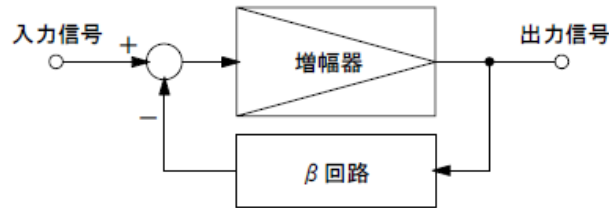
1 - 1 負帰還が使われ始めた頃



- 1927年 ハロルド・S・ブラック氏がウエスタンエレクトリック社への通勤途中のフェリーの船上で負帰還のアイデアを考えつく。
- 1934年 ハロルド・S・ブラック氏がベル研の Bell System Technical Journal 誌の1934年1月号に「安定化負帰還増幅器」の論文を発表する。
- 1938年 G・A・フィリブリックが演算増幅器(OPアンプ)を発明する。
- 1939年 ベル研でボーデ氏による負帰還の時間外講習会が行われる
- 1945年 ボーデ氏による「Network Analysis and Feedback Amplifier Design」が刊行される。
- 1955年 エヌエフ回路の北野会長がラジオ技術誌に負帰還理論の連載を始める。
- 1955年 ボーデ氏の著書が喜安善市氏により「回路網と帰還の理論」として翻訳される。
- 1957年 北野会長らによる「電蓄の回路設計と製作」がラジオ技術社から発行される。
- 1959年 斉藤彰英氏による「負帰還増幅器」が発行される。
- 1959年 エヌエフ回路設計ブロック創立される。
- 1971年 エヌエフ回路設計ブロック金井常務が負帰還の解説を主題とした「トランジスタ回路設計演習」の連載を電子技術誌に開始する。

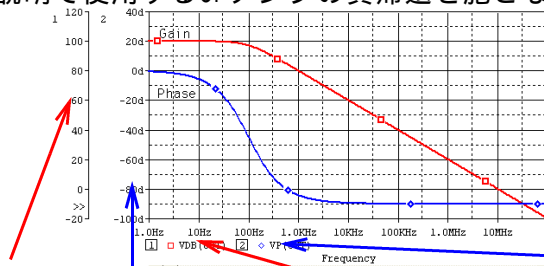
1 - 2 負帰還の概要

負帰還は下図に示すように増幅器の出力信号を **回路**を通して入力に戻し、入力信号との差を増幅し、増幅器の出力波形を入力波形により忠実に増幅する手法です。



この負帰還をOPアンプを使って実際の回路に書き直したのが下図の非反転増幅器と反転増幅器です。このように通常 回路は抵抗等の受動素子による分圧回路で構成されます。

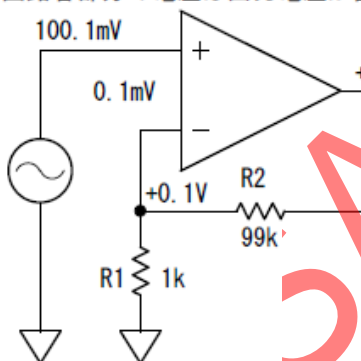
説明で使用するOPアンプの負帰還を施さないときの裸利得 - 周波数特性



直流利得 100dB 100,000倍
 -3dB低下周波数 100Hz
 1kHzでの利得 80dB 10,000倍
 100kHzでの利得 40dB 100倍
 GainBandWidth(利得周波数積) 10MHz

利得目盛り 位相目盛り VDBは1Vを0dBとしたdB目盛りを示す VPは電圧位相を示す
 非反転増幅器 反転増幅器

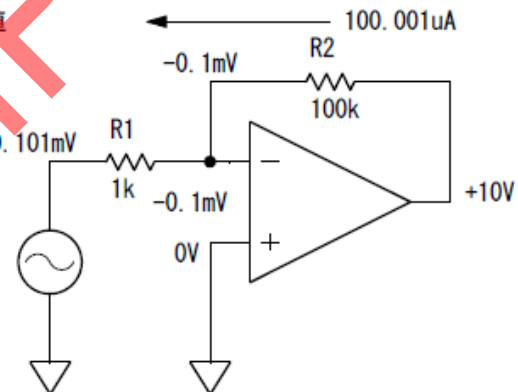
回路各部分の電圧は出力電圧が直流+10Vのときの値



出力電圧を利得で割ったのが+-入力間の電圧

$$\text{利得} = \frac{+10V}{100.1mV} = 99.9000999$$

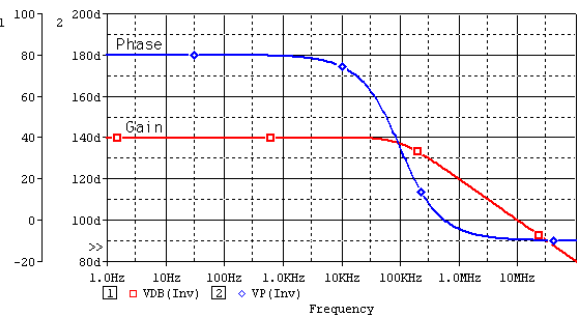
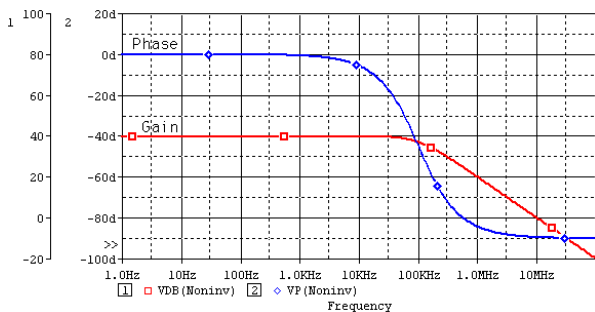
$$\cong 100 = \frac{R1+R2}{R1}$$



$10V \div 100,000 = 0.1mV$

$$\text{利得} = \frac{+10V}{-100.101mV} = -99.89910191$$

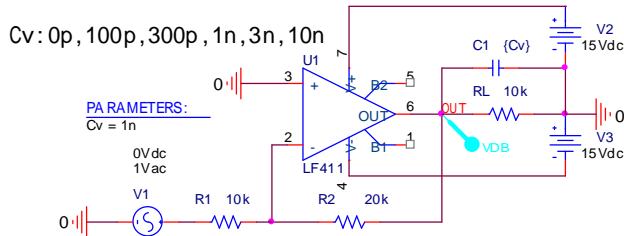
$$\cong -100 = -\frac{R2}{R1}$$



2 . OPアンプ増幅回路の容量負荷対策

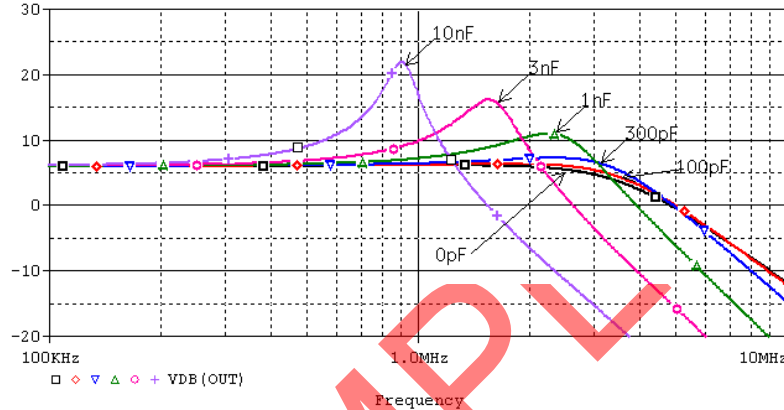
2 - 1 容量負荷の影響

OPアンプを使用した増幅回路のトラブルで比較的多いのが増幅器の出力にシールド・ケーブル等を接続したときに異常発振してしまう等の容量負荷によるトラブルです。

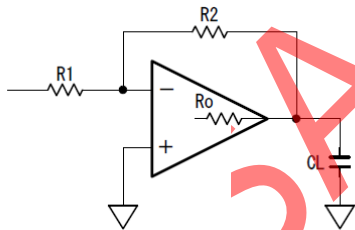


[C_Load_1]

左図はLF411を使って利得2倍の反転増幅器の負荷に100pF, 300pF, 1nF, 3nF, 10nFのコンデンサを接続したときのシミュレーションです。



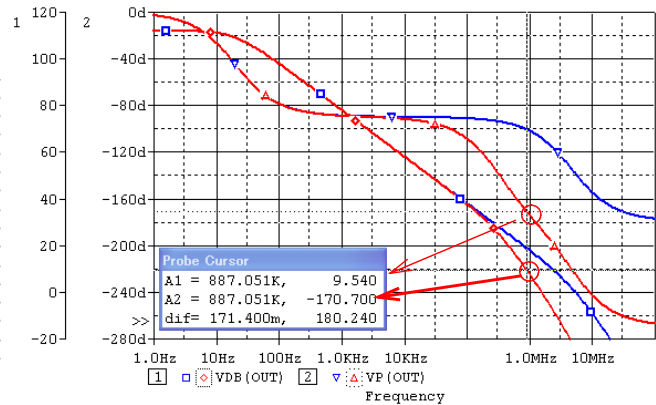
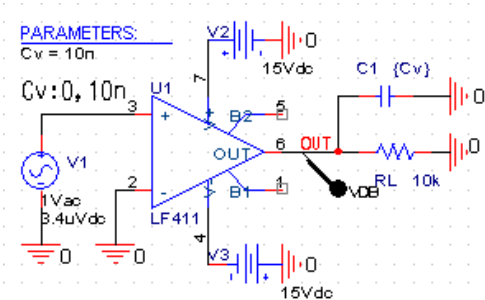
容量が増加するにつれ周波数特性のピークが大きくなり、10nFでは20dB以上のピークが発生しています。この程度になると現実にはOPアンプが異常発振してしまいます。



この容量負荷による周波数特性のピーク発生の原因は左図に示すようにOPアンプの出力抵抗 R_o と容量負荷 C_L によってLPFが形成されてしまい、位相が遅れ、負帰還の位相余裕が少なくなってしまうためです。

下記はLF411に10nFの容量負荷が有無のオープン・ループ特性です。利得2倍の反転増幅器では、裸利得3倍(9.54dB)のときループ利得が1になります。シミュレーション結果ではこのときの位相遅れが約170°、位相余裕が10°と危ない特性です。

[LF411_OL]

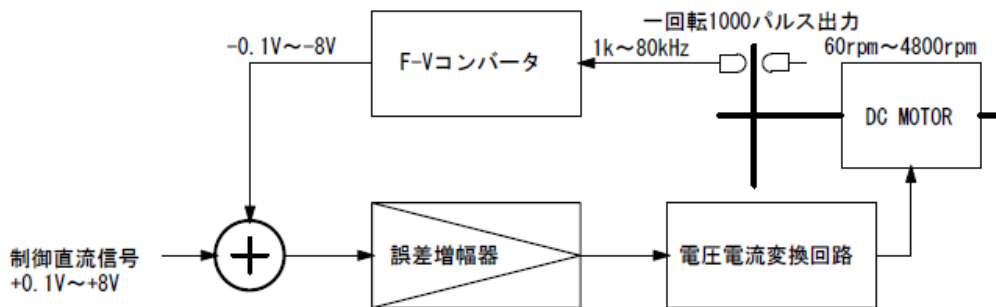


5 . FVコンバータを使用したDCモータの回転速度制御

5 - 1 概 要

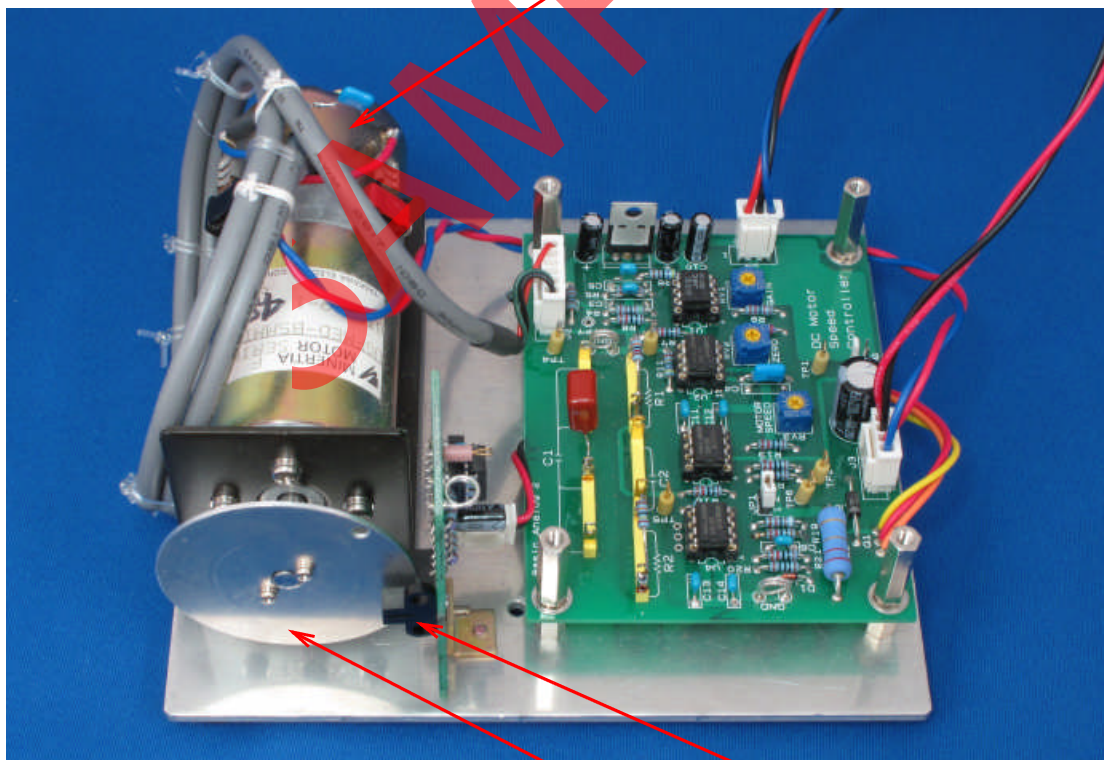
DCブラシモータは印加電圧を上げると回転数が早くなります。しかし印加電圧の調整だけで一定回転数に制御しようとする、モータの巻き線抵抗の温度変化やモータ負荷の変動等により安定な回転数制御はできません。

下図は直流入力電圧に正確に比例したモータ回転数が得られる制御ブロック図です。回転数に比例したパルス数出力が得られるフォト・エンコーダが取り付けられたDCブラシモータを使用します。このパルス出力をF-Vコンバータで直流電圧に変換し、入力電圧と等しくなるように負帰還を施すことにより正確な回転数が得られます。



F-Vコンバータを使用したモータの回転数制御のセミナー用教材

1回転1000パルス発生するエンコーダが入っている



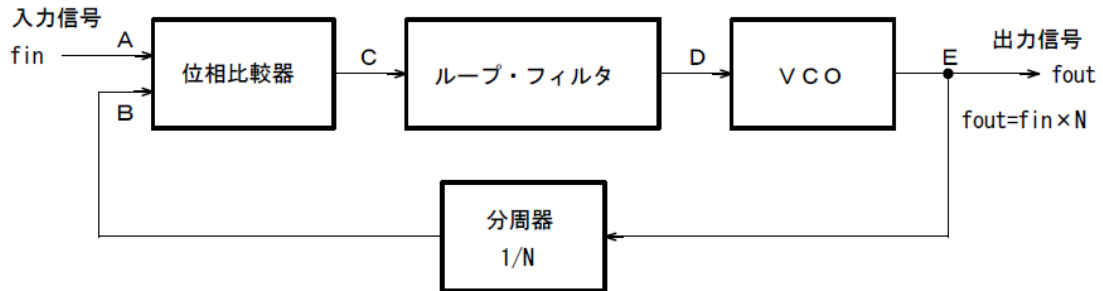
1回転1パルスを発生するための円盤とフォトインタラプタ

6 . PLL回路と負帰還

6 - 1 PLLの概要

PLL回路は内部発振器 (VCO) の発振周波数を外部信号に同期させ、必要な周波数に制御する自動制御回路です。

下図がPLL回路の一般的な基本ブロック図で、4つのブロックから構成されています。



・ **位相比較器** (Phase Detector or Phase Comparator) : 位相比較器は2つの入力信号の位相差を検出し、位相差に比例した直流電圧を出力します。次ページの写真はデジタル方式の位相比較器で2つの信号A,Bの立ち上がりの差を検出し、その時間差に等しいパルス信号を出力します。そしてこのパルス信号をローパスフィルタで直流に変換すると位相差に比例した直流電圧になります。この他にアナログ方式の位相比較器もあります。

・ **ループフィルタ** (Loop Filter) : 位相比較器からのリップルを含んだ直流信号を平均化し、交流成分の少ない、きれいな直流信号に変換するローパスフィルタです。

ループフィルタにはこのリップルを取り除く機能の他にPLLのループ制御を安定にするための伝達特性を決定するという大事な役目があります。

・ **VCO** (Voltage Controlled Oscillator) : 入力の直流信号によって発振周波数が制御できる、可変周波数発振器です。

・ **分周器** (Divider) : VCOで発振した信号を任意の数で分周します。

このPLLのブロックでは入力信号Aと分周器の出力信号Bの位相が比較され、この2つが同位相になるように制御されます。2つの入力信号が同位相、したがって周波数も当然同一に制御されることになります。VCOの発振した信号周波数の分周周波数が入力周波数に等しくなるのでVCOの発振周波数は入力信号の分周数倍した発振周波数に制御されます。

このときのVCOの周波数変化はループフィルタの時定数によって決定され、時定数が長ければ(遮断周波数が低い)ゆっくりと、短ければ(遮断周波数が高い)すばやく、VCOの発振周波数が入力信号に追従していきます。