

報告書
実験番号：2
テーマ：微分・積分回路

©MOOMOO

2003 年 5 月 8 日

1 目的

- オペアンプの基本的性質を実験で確認する。
- オペアンプを使用した微分・積分回路の周波数特性などを測定し, その原理を理解する。

2 原理

2.1 オペアンプとは

今回の実験では, 「オペアンプ (operational amplifier, 演算増幅器)」と呼ばれる素子を使用する。オペアンプは, もともとアナログ・コンピュータのために考案されたアナログ信号の演算・増幅をする回路で, その働きから “operational amplifier” と名付けられている。現在使用されているものは, IC として1つの素子になっている。

普通, 反転入力, 非反転入力, 出力, 電源 (+, -) の5つの端子を持ち, 回路図記号では三角形 (図.1) で表す。このとき, 電源端子は省略する事が多い。

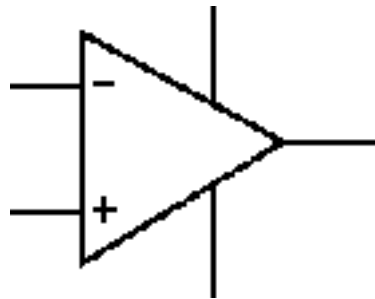


図 1: オペアンプの回路図記号

理想的なオペアンプは次のような特性を持つ。

- 入力インピーダンスは無限大。
- 出力インピーダンスは0。
- 利得は無限大。
- 2つの入力端子間の電位差は0。
- 周波数に関係なく使用できる。

しかし, このようなことはあり得ないため, 実際には, 様々な特性のものの中から用途に応じて使い分ける必要がある。

2.2 反転増幅回路と非反転増幅回路

オペアンプを使用したもっとも基本的な回路としては, 反転増幅回路と非反転増幅回路が挙げられる。

反転増幅回路は、入力信号と出力信号で正負が逆になる (位相が π ずれる) が、倍率の絶対値が 1 以下の増幅 (これを減衰という) が出来るという特徴がある。

図.2 のような反転増幅回路において、オペアンプの 2 つの入力端子の電位は等しいため (イマジナル・ショートという)、接地により常に 0[V] である。よって、 R_S による電圧降下は V_S 、そのとき流れる電流 I_S は、

$$I_S = \frac{V_S}{R_S}$$

となる。

また、端子間の抵抗値は非常に大きく電流 I_S は反転入力端子には流れ込まないので、 R_S と R_F に流れる電流は等しい。このとき、 R_F での電圧降下から、出力電圧 V_o は次のように表せる。

$$V_o = -I_S R_F$$

まとめると、

$$\begin{cases} V_S = I_S R_S \\ V_o = -I_S R_F \end{cases}$$

つまり、回路全体の電圧増強度 A_{vf} は、

$$A_{vf} = \frac{V_o}{V_S} = -\frac{R_F}{R_S}$$

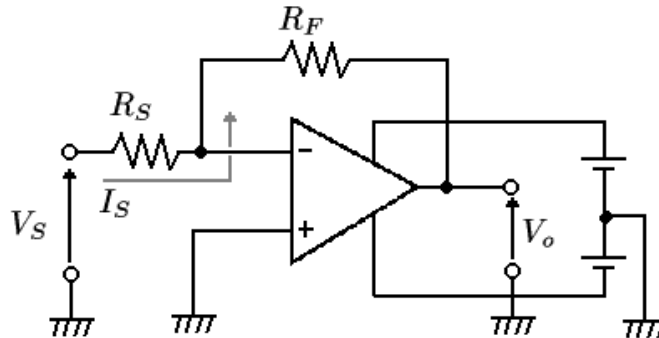


図 2: 反転増幅回路

逆に、非反転増幅回路では、入力信号と出力信号で正負が反転しないが、1 倍以上の増幅しかできない。

図.3 のような非反転増幅回路において、イマジナル・ショートにより反転入力端子と非反転入力端子の電位は等しく、 V_S 。よって、 R_S による電圧降下は V_S 、そのとき R_S に流れる電流 I_S は、

$$I_S = \frac{V_S}{R_S}$$

となる。

また、反転入力端子からは電流が流れ出ないので、 R_S と R_F に流れる電流は等しい。このとき、出力電圧 V_o の、 R_S と R_F による電圧降下による表現は、

$$V_o = I_S (R_S + R_F)$$

まとめると,

$$\begin{cases} V_S = I_S R_S \\ V_o = I_S (R_S + R_F) \end{cases}$$

つまり, 回路全体の電圧増強度 A_{vf} は,

$$A_{vf} = \frac{V_o}{V_S} = 1 + \frac{R_F}{R_S}$$

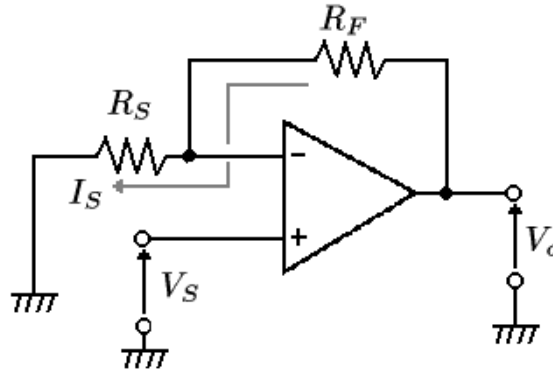


図 3: 非反転増幅回路

3 実験方法

3.1 使用器具

表 1: 使用器具

器具名	メーカー・型番
オペアンプ	UA714CP(専用の実験装置に組み込み済み)
ファンクション・ジェネレータ	KENWOOD, FG-272
直流電源装置	METRONIX, MTR18-2, 207853
デジタル・オシロスコープ	YOKOGAWA, DL1520, MODEL 701505, SUFFIX -1-M-C1/B5, NO. 26WZ0493M
デジタル・マルチメータ	Tektronix, CDM250, SERIAL NO. CDM-250TW51216

3.2 反転増幅回路・非反転増幅回路の実験

$R_S = 10[\text{k}\Omega]$, $R_F = 10[\text{k}\Omega]$ として, 反転増幅回路には図.2 の回路, 非反転増幅回路には図.3 の回路を用いる。

測定は、オペアンプの電源を先に入れてから、オペアンプの入力端子に $-15 - 0, 0 - 15[\text{V}]$ の直流電圧をかけ、出力電圧を記録する。このとき、入力電圧の変化の幅は変化の様子を見ながら決める。

3.3 積分回路の周波数特性と入出力波形の観測

1. $R_1 = 10[\text{k}\Omega]$, $R_2 = 100[\text{k}\Omega]$, $R_C = 9.1[\text{k}\Omega]$, $C = 0.1[\mu\text{F}]$ として、図.4 のような回路を作る。
2. この回路に、 $V_{PP} = 2[\text{V}]$ を入力しているときの、 $10 - 100[\text{kHz}]$ での周波数特性を測定する。
3. 同じ回路に、 $V_{PP} = 2[\text{V}]$, $1[\text{kHz}]$ の方形波を入力したときの入・出力波形を観測する。

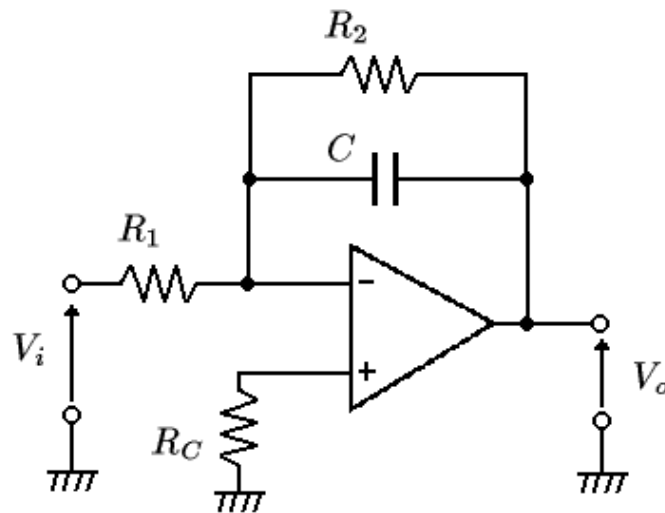


図 4: 積分回路

3.4 微分回路の周波数特性と入出力波形の観測

1. $R = 10[\text{k}\Omega]$, $R_x = 100[\text{k}\Omega]$, $C = 0.01[\mu\text{F}]$ として、図.5 のような回路を作る。
2. この回路に、 $V_{PP} = 2[\text{V}]$ を入力しているときの、 $10 - 100[\text{kHz}]$ での周波数特性を測定する。
3. 同じ回路に、 $V_{PP} = 2[\text{V}]$, $1[\text{kHz}]$ の方形波と三角波をそれぞれ入力したときの入・出力波形を観測する。

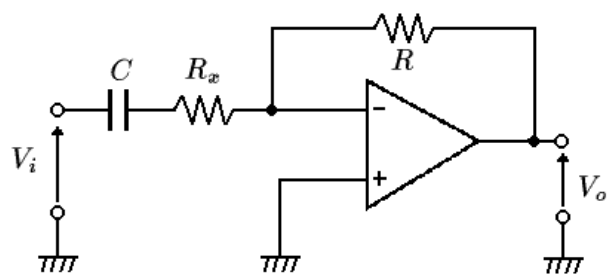


图 5: 微分回路

4 実験結果

表.2 と表.3 は,それぞれ反転増幅回路と非反転増幅回路の測定結果である。

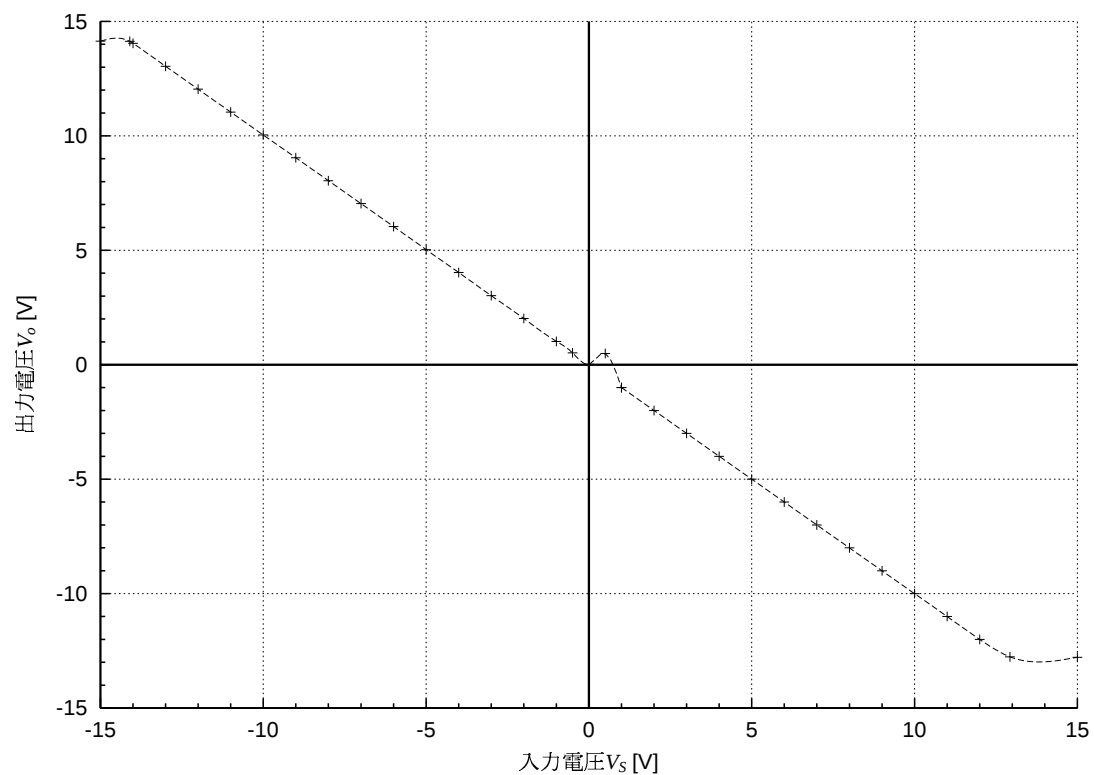


図 6: 反転増幅回路の実験結果

また, 表.4・図.9 は積分回路の, 表.5・図.8 は微分回路の周波数特性である。
ただし, 利得 (gain) G は次のようにして計算によって求めた。

$$G = 20 \log (V_o : \text{出力電圧}) / (V_s : \text{入力電圧})$$

表 2: 反転増幅回路の実験結果

V_s [V]	V_o [V]
15.00	-12.78
12.93	-12.76
12.00	-12.00
11.00	-11.00
10.00	-10.00
9.00	-9.00
8.00	-8.00
7.00	-7.00
6.00	-6.00
5.00	-5.00
4.00	-4.00
3.00	-3.00
2.00	-2.00
1.00	-1.00
0.50	0.49
0.00	0.02
-0.50	0.52
-1.00	1.02
-2.00	2.02
-3.00	3.02
-4.00	4.03
-5.00	5.03
-6.00	6.04
-7.00	7.04
-8.00	8.04
-9.00	9.04
-10.00	10.04
-11.00	11.04
-12.00	12.04
-13.00	13.04
-14.00	14.04
-14.10	14.13
-15.00	14.14

表 3: 非反転増幅回路の実験結果

V_s [V]	V_o [V]
15.00	14.25
8.00	14.25
7.00	14.03
6.00	12.04
5.00	10.03
4.00	8.03
3.00	6.03
2.00	4.03
1.00	2.03
0.50	1.02
0.00	0.01
-0.50	-1.00
-1.00	-2.00
-2.00	-4.00
-3.00	-6.00
-4.00	-8.00
-5.00	-10.00
-6.00	-12.00
-6.55	-12.91
-7.00	-12.92
-15.00	-12.92

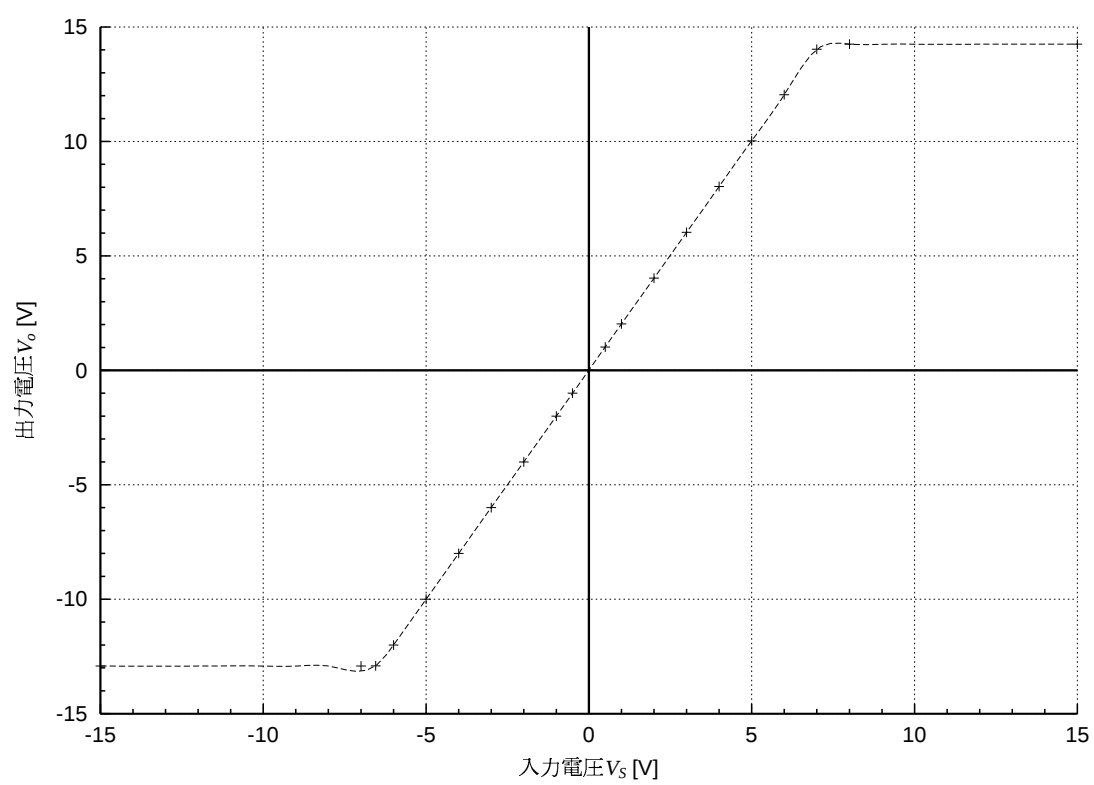


図 7: 微分回路の周波数特性

表 4: 積分回路の周波数特性

周波数 [Hz]	出力電圧 [V]	利得 [dB]
10	17.20	18.69
20	12.48	15.90
40	7.360	11.32
80	3.840	5.666
100	3.200	4.082
200	1.576	-2.069
400	0.8160	-7.787
800	0.4200	-13.56
1k	0.3400	-15.39
2k	0.1700	-21.41
4k	0.09400	-26.56
8k	0.05600	-31.06
10k	0.04920	-32.18
20k	0.03200	-35.92
40k	0.02560	-37.86
80k	0.02800	-37.08
100k	0.03500	-35.14

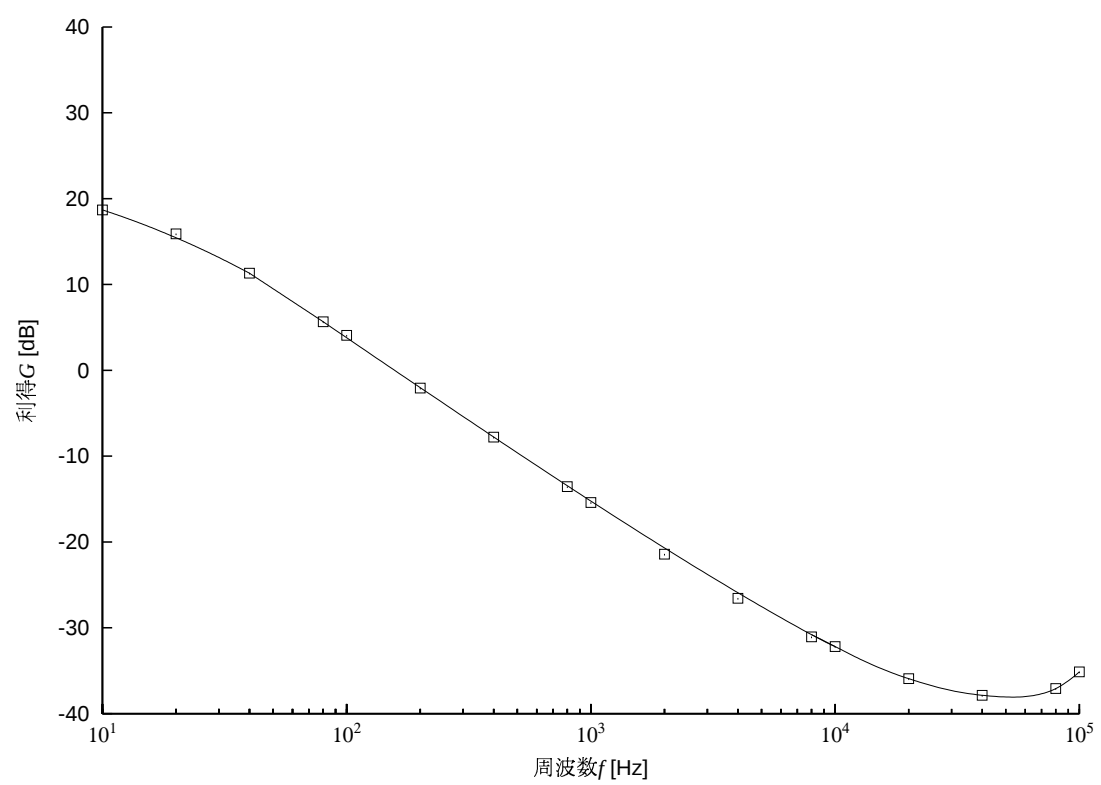


図 8: 積分回路の周波数特性

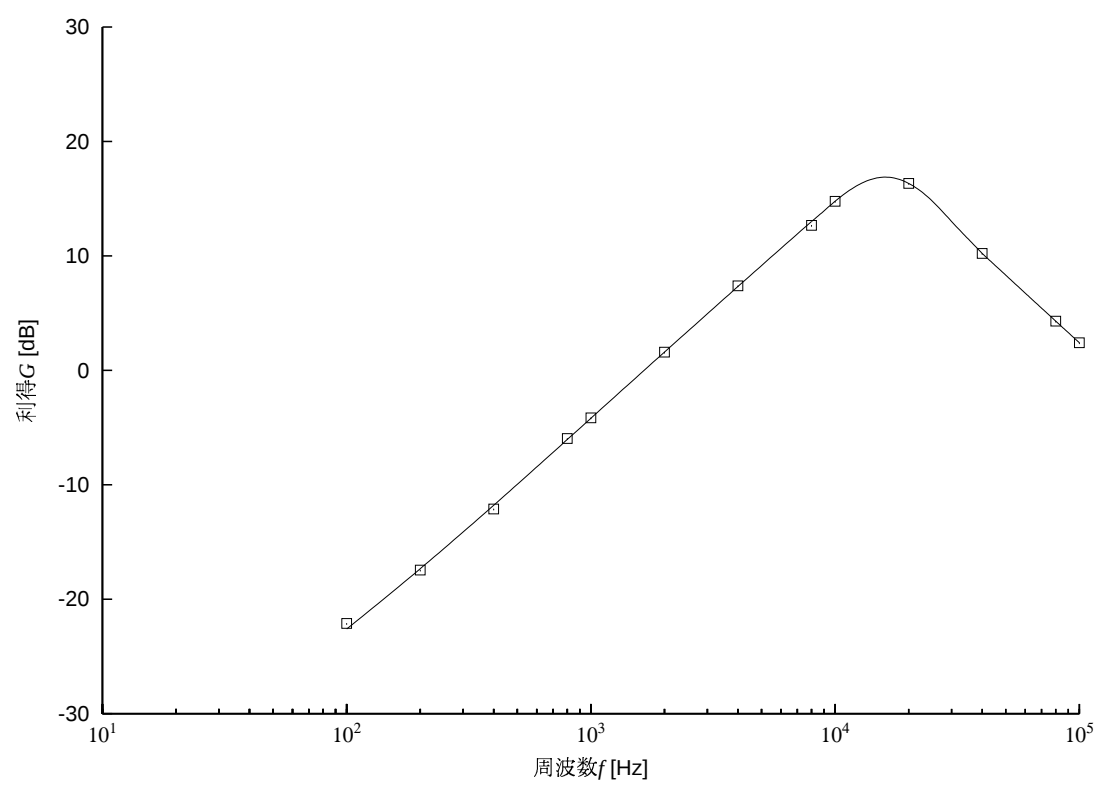


図 9: 微分回路の周波数特性

表 5: 微分回路の周波数特性

周波数 [Hz]	出力電圧 [V]	利得 [dB]
10	-	-
20	-	-
40	-	-
80	-	-
100	156.8m	-22.11
200	268.0m	-17.46
400	496.0m	-12.11
800	1.008	-5.951
1k	1.240	-4.152
2k	2.400	1.584
4k	4.680	7.384
8k	8.600	12.67
10k	10.96	14.78
20k	13.12	16.34
40k	6.480	10.21
80k	3.280	4.297
100k	2.640	2.411

5 考察

5.1 反転・非反転増幅回路の実験

出力電圧は、ある値を超えると入力電圧が高くなっても変化しなくなる。そして、オペアンプの構造上、その最大値は電源電圧より少し低い値になる。

この状態を飽和と呼び、反転増幅回路の実験では入力電圧が $-14[\text{V}]$ 付近より低いときと $13[\text{V}]$ 付近より高いとき、非反転回路の実験では入力電圧が $-6.5[\text{V}]$ 付近より低いときと $7[\text{V}]$ 付近より高いときに起きている。

5.2 積分回路の周波数特性

5.2.1 グラフの傾き

積分回路の周波数特性のグラフは図.9 である。

グラフは、見た目はほぼ直線になっているが、周波数の目盛りは対数であるから、傾きの単位は $[\text{dB/oct}]$ か $[\text{dB/dec}]$ を使わなければならない。

今回、単位は $[\text{dB/oct}]$ を使用する。この“oct”は対数目盛上での、ある値とその2倍の値との間隔を表す。よって、このグラフの長い方の直線部分 (10^2 から 2×10^2) で傾きを調べると、

$$(\text{傾き}) = \frac{-2.069 - 4.082}{\frac{2 \times 10^2}{10^2}} = -6.151[\text{dB/oct}]$$

5.2.2 利得最小時の周波数

素子の定数から計算すると、利得が $0[\text{dB}]$ になる周波数 f_T は、

$$f_T = \frac{1}{2\pi CR_1} = 159.15[\text{Hz}]$$

となる。

しかし、グラフでは、入力周波数が $60[\text{kHz}]$ 付近のときに利得が $0[\text{dB}]$ に近づくが、その後再び上昇しはじめるので結局利得は $0[\text{dB}]$ にはならない。

原因は、上記の計算式は、「時定数 τ を $\tau = CR_2$ とおいたとき、 $\omega\tau \ll 1$ であれば」という条件が付いている近似式のようなので、周波数が高く、 $\omega\tau \ll 1$ という条件が満たされない場合では R_2 などの無視していたものの影響が大きくなり計算結果に誤差が出るためと思われる。

ただし、この部分で利得が $0[\text{dB}]$ にならないことの原因として、利得が小さいため、商用電源などに由来するノイズの影響も考えられる。

5.2.3 最大利得

最大利得 G_{max} は、計算によって求めると、

$$G_{max} = 20 \log \frac{R_2}{R_1} = 20[\text{dB}]$$

となり、実験結果とほぼ同じ値である。

5.3 微分回路の周波数特性

微分回路の周波数特性は図.8 のようになった。

5.3.1 グラフの傾き

積分回路と同様に、グラフの長い方の直線部分の傾きは、

$$(\text{傾き}) = \frac{1.584 - (-4.152)}{\frac{2 \times 10^3}{10^3}} = 5.736[\text{dB/oct}]$$

また、一度上昇した利得が周波数が高い部分で直線的に下がり始めている。これは、実験で使った回路では、 R_x によって共振を抑え安定化していることにより、開放利得が周波数に反比例して下がっていくためである。

5.3.2 利得最小時の周波数

利得が 0[dB] になる周波数 f_T は、計算で求めると、

$$f_T = \frac{1}{2\pi CR} = 1.592[\text{kHz}]$$

この計算値と実験結果との間ではとくに大きな誤差はなかった。

5.3.3 最大利得と、その時の周波数

最大利得 G_{max} は、

$$G_{max} = 20 \log \frac{R}{R_x} = 20[\text{dB}]$$

最大利得が得られる周波数 $f_{G_{max}}$ は、

$$f_{G_{max}} = \frac{1}{2\pi CR_x} = 15.92[\text{kHz}]$$

この計算値と実験結果との間ではとくに大きな誤差はなかった。

5.4 方形波・三角波の入力時

2つの実験でそれぞれ最後に方形波や三角波を入力してみたが、出力はどちらも正負が反転していた。これは、積分回路と微分回路は、負帰還をかけているので反転増幅が行われるためである。

また、方形波を微分回路に入力したとき、本来の微分ならば無限大に発散するべき部分でも有限の値になったが、これは、飽和が起きてしまうので決まった電圧までしか出力できないためである。

参考文献

[1] 『微分・積分回路』(指導書), 2003

[2] 佐藤一郎『図解 半導体素子と電子部品』(日本理工出版会), 1996

- [3] 宮田武雄『速解 電子回路—アナログ回路の基礎と設計—』(コロナ社), 1991
- [4] NEC Electronics Corporation 『製品情報—リニア IC—FAQ—オペアンプ』
(URL:http://www.necel.com/linear/faq/op_amp_q.html)
- [5] 信州大学工学部情報工学科基礎研究室『Markun Bear サーバー—Let's Learn—オペアンプ』
(URL:<http://markun.cs.shinshu-u.ac.jp/>)