

# AM ラジオ

4322 竹中公材 4329 野村泰平 4410 片田悠李

2023 年 11 月 3 日

## 1 目標

今回我々が目指したのは、以下の項目を満たす AM ラジオである。

1. 最低限のゲルマニウムラジオが機能している（アンプなしで稼働させることができる）。
2. アンプを用いてスピーカーで大きい音量で聞けることができる。
3. ノイズが少ない音声でクリアに聞けることができる。
4. バリابلコンデンサを用いて選局を行うことができる。
5. 可変抵抗（ボリューム）を用いて音量調整を行うことができる。
6. 壁などの障害物があっても受信できる。
7. 持ち運びできるサイズである。

## 2 原理・設計

図 1 に今回作った AM ラジオの全体図を示す。今回作った AM ラジオは、大きく分けてラジオ回路と増幅回路からなる。ラジオ回路は、電波から音声信号を取り出す回路である。増幅回路は、取り出した音声信号を増幅する回路である。

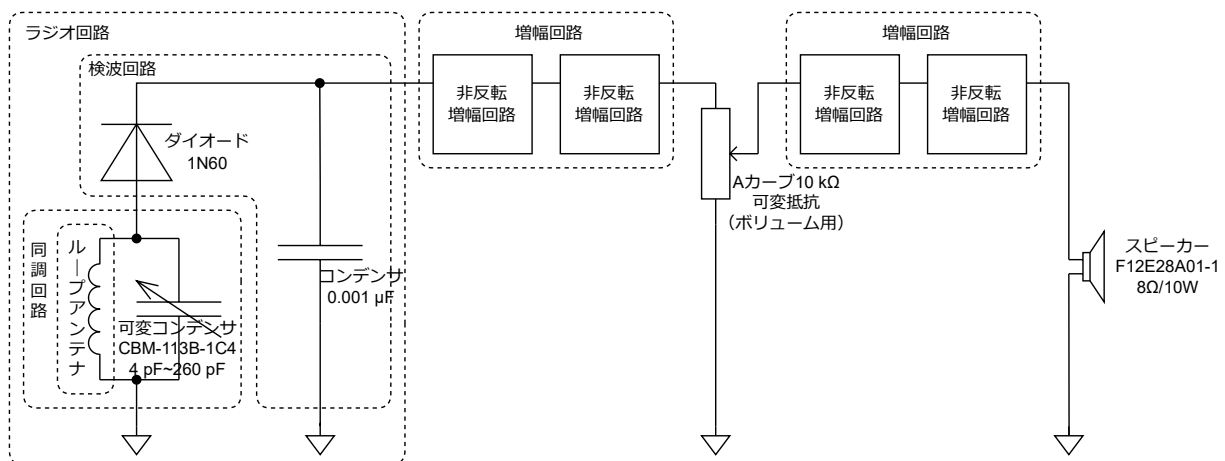


図 1: 全体

## 2.1 ラジオ回路

図2にラジオ回路を示す。ラジオ回路は、電波を受信するループアンテナ、受信した電波から取り出したい周波数を選択する同調回路、受信した電波から音声周波数を取り出す検波回路からなる。

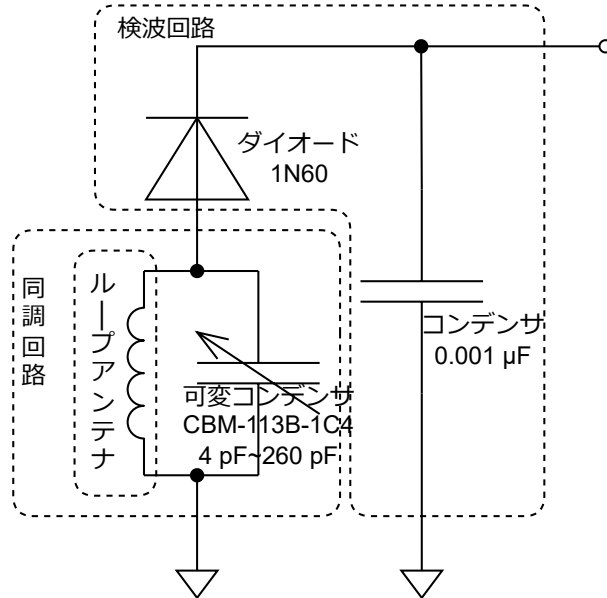


図 2: ラジオ回路

### 2.1.1 ループアンテナ

図2で用いられているアンテナは、エナメル線をループ状に巻いたループアンテナである。電波の磁界成分がループアンテナを貫くと誘導起電力（誘導電圧）を引き起こし、電流が流れる。この電流を誘導電流という。ループアンテナの誘導起電力の大きさは、式 (1) より求めることができる。ここで、 $N[\text{turn}]$  はループアンテナの巻数、 $\Phi[\text{Wb}]$  は磁束、 $V[\text{V}]$  が誘導起電力である。式 (1) は、ファラデーの法則（電磁誘導の法則）に巻数  $N$  倍したものである [?]

$$V = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad (1)$$

磁束  $\Phi$  は、式 (2) より求めることができる [?]。ここで、 $B[\text{T}]$  は磁束密度、 $S[\text{m}^2]$  はループアンテナの面積、 $\hat{n}$  はループアンテナの面積の法線ベクトルである。式 (2) のままだと難しいため、式 (3) のように単純化して考える。

$$\Phi = \int_S \mathbf{B} \cdot \hat{n} dS \quad (2)$$

$$\Phi = BS \quad (3)$$

磁束密度  $B$  は、式 (4) より求めることができる。ここで、 $\mu[\text{H/m}]$  は透磁率、 $H[\text{A/m}]$  は磁界の強さである [?]

$$B = \mu H \quad (4)$$

式 (1)、式 (3)、式 (4) を組み合わせると、式 (5) のようになる。式 (5) より、ループアンテナの誘導起電力は、磁界の強さの変化率、ループアンテナの面積、ループアンテナの巻数、透磁率に比例することがわかる。

$$V = -\mu NS \frac{dH}{dt} \quad (5)$$

### 2.1.2 同調回路

同調回路は、受信したい周波数の電波を取り出す回路である。同調回路を用いらないと、図 3 のように、受信したい周波数の電波以外の電波も取り出してしまう。しかし、同調回路を用いると、図 4 のように、受信したい特定の周波数の電波のみを取り出すことができる。

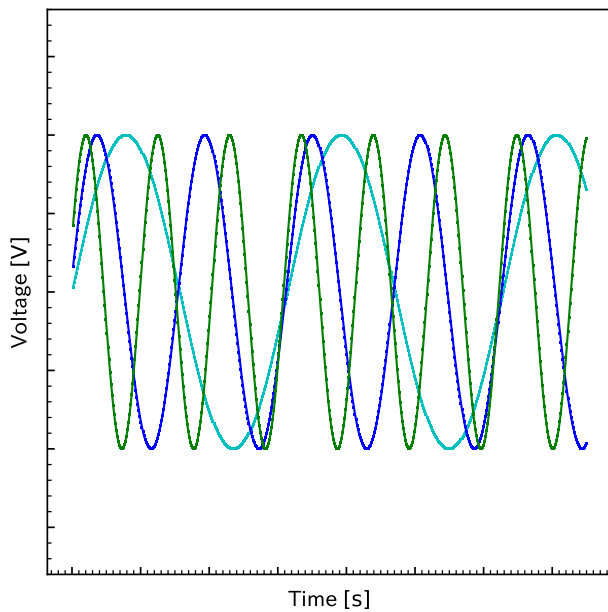


図 3: 同調回路を用いなかった場合

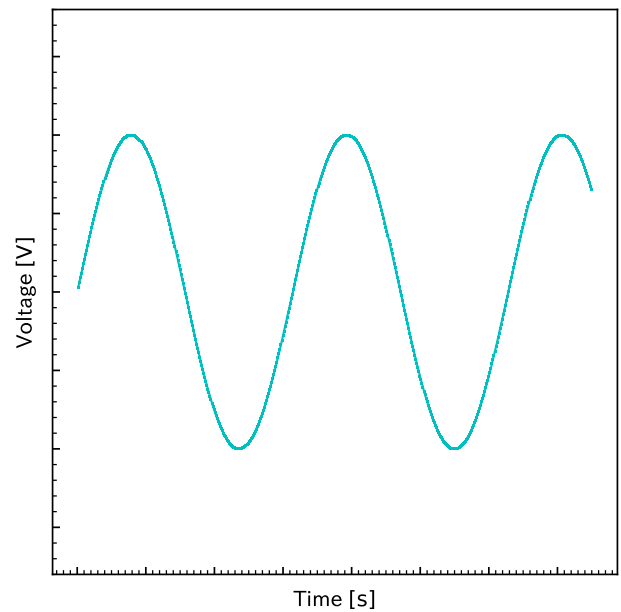


図 4: 同調回路を用いた場合

図 2 の同調回路は、ループアンテナとバリャブルコンデンサを並列につなげている。ループアンテナのインダクタンスを  $L$ 、バリャブルコンデンサのキャパシタンスを  $C$  とすると、この並列回路のインピーダンス  $\dot{Z}$  は、式 (6) のようになる。

$$\dot{Z} = \frac{j\omega L \times \frac{1}{j\omega C}}{j\omega L + \frac{1}{j\omega C}} = \frac{j\omega L}{1 - \omega^2 LC} \quad (6)$$

ここで、 $\omega^2 LC = 1$  と仮定すると、インピーダンス  $\dot{Z}$  は無限大となる。この時の周波数  $f[\text{Hz}]$  は式 (7)～式 (9) のようにして決定することが出来る。

$$\omega^2 LC = 1 \quad (7)$$

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (8)$$

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (9)$$

図??では、ループアンテナのインダクタンス  $L$  を変更することができない。そのため、バリアブルコンデンサのキャパシタンス  $C$  を変更することで、受信したい周波数を選択する。

### 2.1.3 同調回路の性能

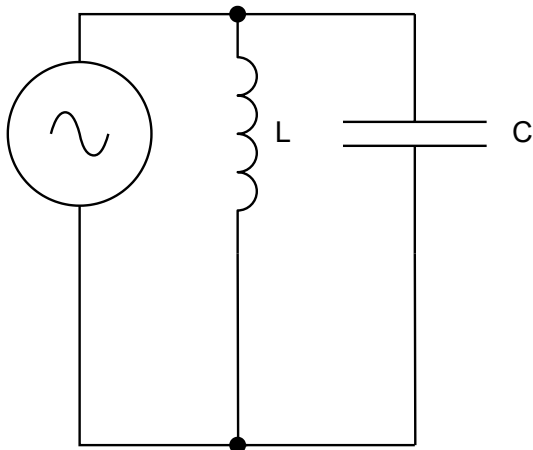


図 5: 理想的な同調回路

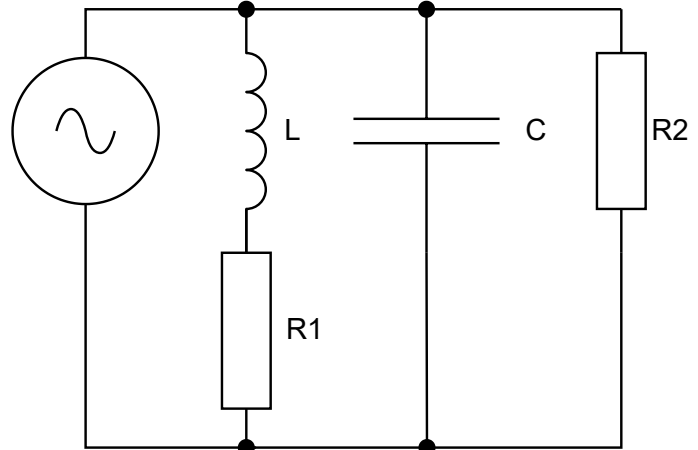


図 6: 現実的な同調回路

めんどくさい

### 2.1.4 選択する周波数

図 7 に AM ラジオの送信所を地図にそれぞれ示したものを示す。表 1 に AM ラジオの送信所の一覧とその周波数、送信出力、学校までの距離、地図上の色（数字）を示す。ここで、図 7 の黒と桃色で作られた四角形は、受信場所である学校の大まかな場所を示している。（受信をテストした教室を基準に考えると）黒は壁でかこまれ、桃色は窓である。図 7 でピンが刺さっている場所は、AM ラジオの送信所でそれぞれ表 1 に対応している。



図 7: AM ラジオの送信所の地図

表 1: AM ラジオの送信所（東京で受信できると考えられる局）

放送局	周波数 [kHz]	送信出力 [kW]	学校までの距離 [km]	地図上の色（数字）
NHK 第 1	594	300	約 52.6	赤（1）
NHK 第 2	693	500	約 52.6	赤（1）
AFN	810	50	約 22.4	黄緑色（2）
TBS ラジオ	954	100	約 23.6	黄色（3）
文化放送	1134	100	約 24.3	橙色（4）
ニッポン放送	1242	100	約 31.8	水色（5）
ラジオ日本	1422	50	約 7.8	緑色（6）

### 2.1.5 検波回路

検波回路は、電波から受け取った信号から音声信号を取り出す回路である。今回作ったラジオは、振幅変調波（AM）を受信する回路である。振幅変調波は、図 8 のような搬送波と、図 9 のような信号波を用いて、図 10 のような波を電波として送信される。仮に、搬送波  $v_c$  の振幅を  $V_{cm}$ 、周波数を  $f_c$ 、信号波  $v_s$  の振幅を  $V_{sm}$ 、周波数を  $f_s$  とすると、それぞれ式 (10) 式 (11) のように表すことができる。

$$v_c = V_{cm} \sin(2\pi f_c t) \quad (10)$$

$$v_s = V_{sm} \sin(2\pi f_s t) \quad (11)$$

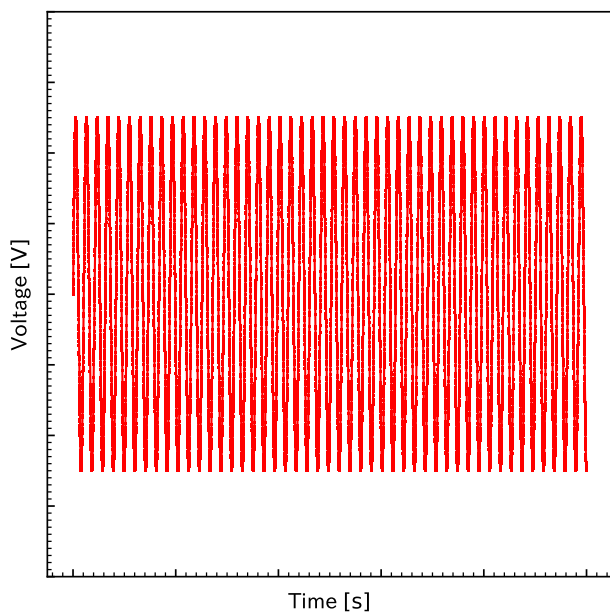


図 8: 搬送波

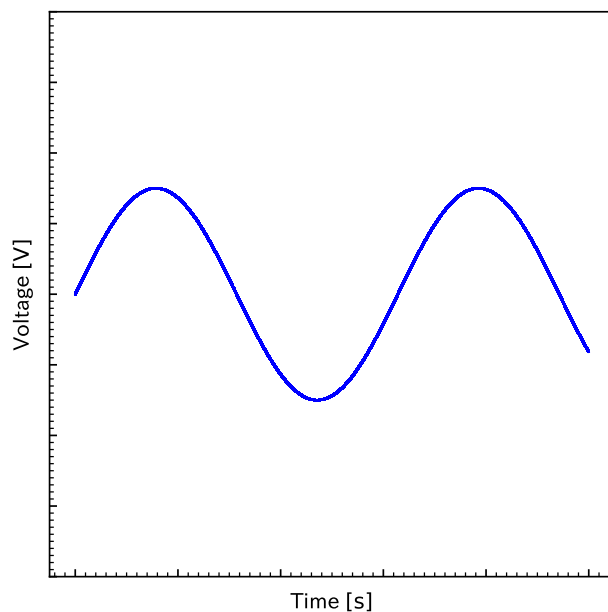


図 9: 信号波

振幅変調波  $v_o$  は、式 (12) で表すことができ、図 10 のような波形になる。

$$v_o = (V_{cm} + V_{sm} \sin(2\pi f_s t)) \sin(2\pi f_c t) \quad (12)$$

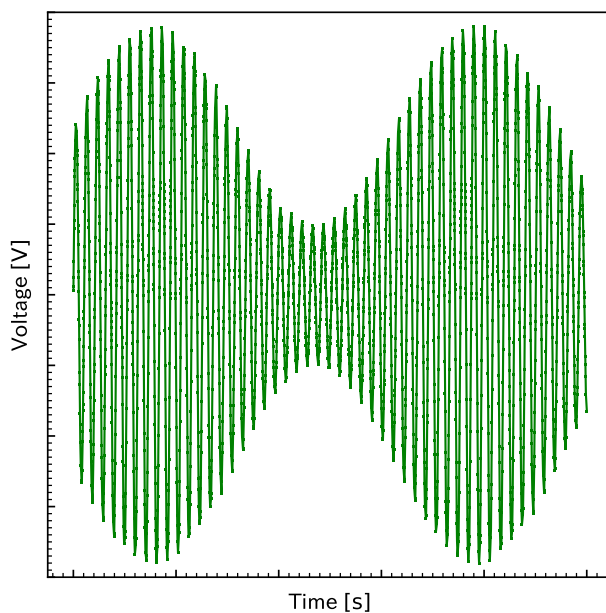


図 10: 電波から受信された信号（振幅変調波）

図 2 の検波回路ではまず、ゲルマニウムダイオードを用いて、図 10 から図 11 のような波形にする。ダイオードには、順方向特性（逆方向に電圧がかからない）があるため、電圧がマイナスになっている部分はカットされる [?]

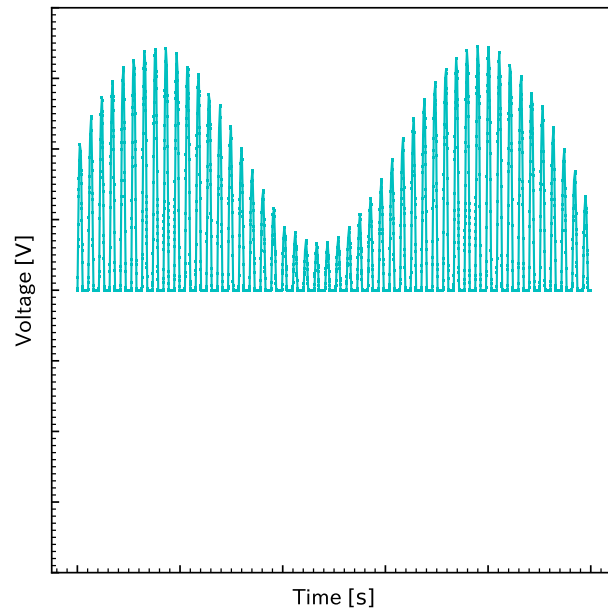


図 11: ダイオードで逆方向電圧を取り除いた信号

また、 $0.001\mu\text{F}$  のコンデンサを用いて、搬送波部分を取り除く。キャパシタンスは、搬送波のような高い周波数に対しては、インピーダンスが小さくなる。逆に、信号波のような低い周波数に対しては、インピーダンスが大きくなる。そのため、図 11 から図 12 のように搬送波が取り除かれて、信号波のみが残る。この時、多少バイアス電圧がかかっている。

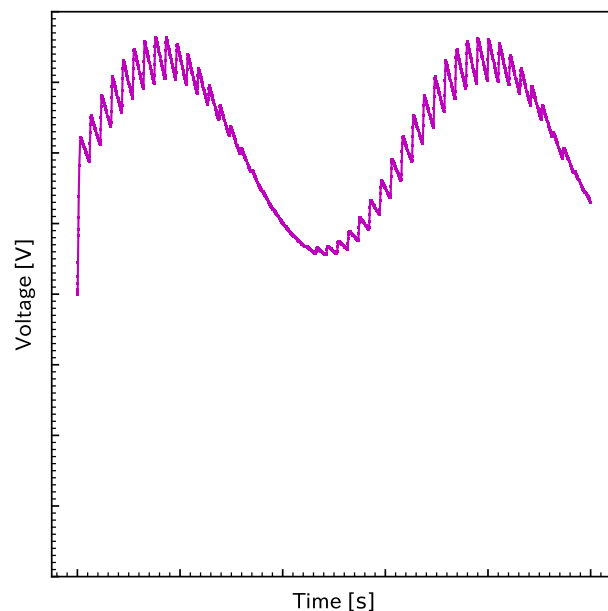


図 12: キャパシタンスで搬送波部分を取り除いた信号

## 2.2 増幅回路

図 13 に実際に作成した増幅回路を示す。図 13 は、図 14 のような非反転増幅回路をベースにして設計されている。

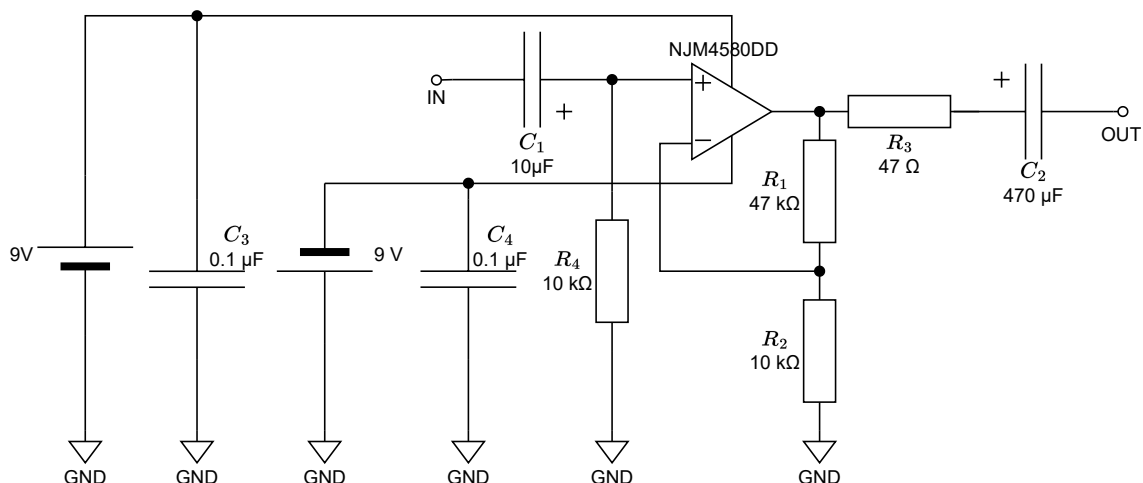


図 13: 実際に作成した増幅回路

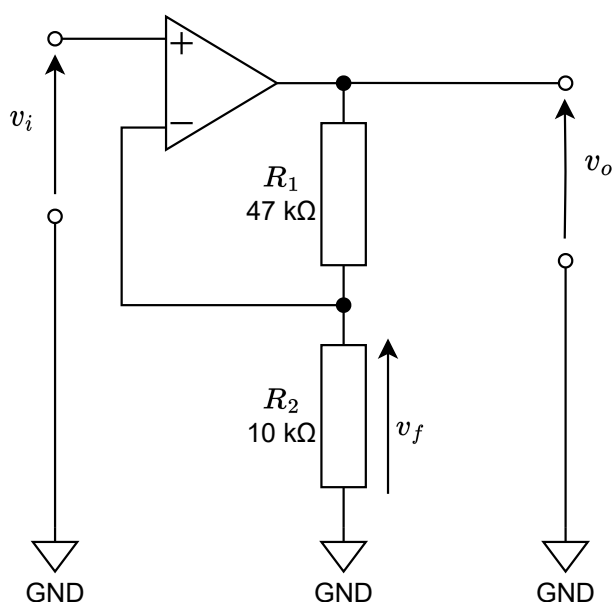


図 14: 非反転増幅回路

### 2.2.1 非反転増幅回路

図 14 を用いて増幅度を考える。まず、オペアンプ（演算増幅器）の入力インピーダンスは、無限大であると仮定する（つまり理想的なオペアンプ）。差動入力電圧は、 $(v_i - v_f)$  である。そのため、出力電圧  $v_o$  は式 (13) のようになる。この時、 $A_v$  はオペアンプの増幅度を示す。

$$v_o = A_v(v_i - v_f) \quad (13)$$

帰還電圧  $v_f$  は、 $R_1$  と  $R_2$  の分圧により式 (14) のようになる。

$$v_f = \frac{R_2}{R_1 + R_2} v_o \quad (14)$$

式 (13) に式 (14) を代入すると、式 (15)～式 (17) のようになる。



$$v_o = A_v \left( v_i - \frac{R_2}{R_1 + R_2} v_o \right) \quad (15)$$

$$v_o = \frac{A_v}{\frac{A_v R_1}{R_1 + R_2}} v_i \quad (16)$$

$$v_o = \frac{1}{\frac{1}{A_v} + \frac{R_1}{R_1 + R_2}} v_i \quad (17)$$

ここで、 $A_v = \infty$  であると仮定すると、式 (18) のようになる。

$$v_o = \frac{R_1 + R_2}{R_1} v_i \quad (18)$$

式 (18) から、電圧増幅度  $A_{vf}$  を求めると式 (19) のようになる。

$$A_{vf} = \frac{v_o}{v_i} = \frac{R_1 + R_2}{R_1} = 1 + \frac{R_2}{R_1} \quad (19)$$

よって、図 14 の電圧増幅度は、式 (20) のようになる。

$$A_{vf} = 1 + \frac{47\text{k}}{10\text{k}} = 5.7 \text{ 倍} \quad (20)$$

### 2.2.2 実際に作成した増幅回路

図 13 は、図 14 にいくつか素子を加えている。まず、図 13 の  $C_1$  と  $C_2$  は、直流電圧をカットするためのカップリングコンデンサである。コンデンサは、高周波数に対してはインピーダンスが小さくなるため、直流は通さない。カップリングコンデンサをつける理由として、交流成分に直流成分が含まれてしまうと、オペアンプの電源として用いてる 9V よりも最大電圧が高い電圧 (-9V よりも最低電圧が低い電圧) を出力しようとしてしまうことがよくある（直流がない場合でもあるが可能性的直流がある場合と比較して低い）。正弦波を入力していたと仮定すると、上半分（もしくは下半分）だけが方形波のようになってしまい、波形が歪んでしまう。また、スピーカーに直流成分をかけてしまうと、スピーカーが壊れてしまうことがある。 $C_3$  と  $C_4$  は、オペアンプの電源として用いている電池から発生するノイズをカットするためのバイパスコンデンサである。 $R_3$  の抵抗は、短絡してはいけない部分（電源やグラウンドなど）が短絡して過電流が流れないようにするための保護抵抗である。 $R_4$  の抵抗は、オペアンプを正常に動作させるためのバイアス抵抗である。 $R_4$  の抵抗を挿入することによって、無信号時に入力を GND に固定することができる。また、 $R_4$  の抵抗がオペアンプの入力インピーダンスの代わりになってくれるためバイアス電流が流れやすくなる。

### 2.3 可変抵抗（ボリューム）

可変抵抗には、主に A カーブと B カーブと C カーブなどの種類がある。図 15 にそれぞれのカーブの特性を示す。A カーブは、回転角度に対して、抵抗値が指数関数的に上昇する。B カーブは、回転角度に対して、抵抗値が比例的に上昇する。C カーブは、回転角度に対して、抵抗値が対数関数的に上昇する。人間の耳は、オーディオの出力信号に対して比例的に感じることはなく、その対数に比例して感じる（小さい音に敏感に反応する）。そのため、オーディオの音量調節には、A カーブの可変抵抗を用いるのが良い。

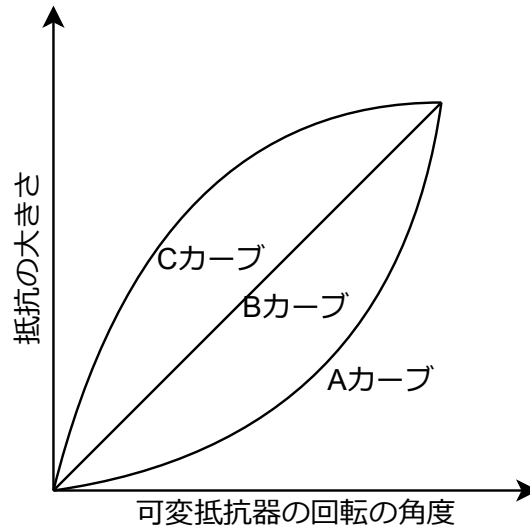


図 15: 可変抵抗のカーブ

### 3 性能評価

今回製作できたラジオは、以下のような仕様となった。

1. クリスタリヤホンを用いてアンプなしでラジオを聞くことができた。
2. 4 段のアンプを用いてスピーカーを駆動することができた。
3. 多少の雑音はあるが、何を話しているのかを聞き取ることができた。
4. 一号機は、ニッポン放送と TBS ラジオと文化放送を受信することが出来たが複数の放送局が同時に聞こえるようになってしまった。二号機は、一号機とほぼ同じ性能だが、音が一号機と比べて小さい。三号機は、全く動作しなかった。
5. 可変抵抗を用いて音量調整を行うことができた。
6. 教室（CAD 室）内のどこでも受信できたが（TBS ラジオと文化放送）、ニッポン放送は窓側でないと聞き取れなかった。
7. 一号機は、直径 24cm、高さ 38cm のループアンテナを用いているため、持ち運びが困難であった。二号機は、直径 6.5cm、高さ 16.5cm のループアンテナを用いているため、持ち運びが容易であった。三号機は、一号機二号機と比べるとかなり小さいが、受信できなかったため使えない。

#### 3.1 アンテナ

今回は合計で 3 つのアンテナを用意した（1 号機と 2 号機は製作したもの、3 号機は既製品）。それぞれの仕様を表 2 に示す。また、それぞれの写真を図 16、図 17、図 18 に示す。

表 2: アンテナの各パラメータ

名称	直径 [mm]	巻き数 [turn]	抵抗 [ $\Omega$ ]	長さ [mm]	コア材質	コア長 [mm]
1 号機	240	24	4.6	11	空気	-
2 号機	65	135	0.5	50	空気	-
3 号機	10	70	28.0	12	フェライト	42