

エレクトロニクス基礎講座(1)

ゲルマニウム・ラジオから始める 無線通信技術

2020. 6.21

那須科学歴史館

講師: 田澤 勇夫(館長)

- ゲルマニウム・ダイオードとゲルマニウム・ラジオの基礎
- 那須地区でゲルマニウム・ラジオを聞くことができるか？
- ゲルマニウム・ラジオを高感度ラジオに変身するためのロードマップ
- ラジオの科学・技術の歴史
- ラジオを通じた無線通信技術教育の今後

鉱石検波器(1874:最初の半導体)

1874年、ブラウンにより鉱石の整流作用(一方方向のみ電流が流れる)が発見された。

半導体の性質を有する鉱石(黄鉄鉱、方鉛鉱など)に金属針を接触させ、ショットキー障壁を利用して整流作用を行う。

鉱石検波器はショットキー障壁の発見により、その動作の一端は解明された。しかし、ショットキー障壁の原理は未だ不明であり、安定したショットキー障壁の製造は難しく、製造においては現在に至るも未完成の部分がある。工業的に安定したショットキー障壁の製造が容易となれば、多くの半導体部品の飛躍的な能力の向上や、**新たな半導体素子の発明につながる**ことが期待できるため、**鉱石検波器の発明にはじまったその研究、開発は現在も半導体の最先端分野として進められている。**



黄鉄鉱(FeS_2)



方鉛鉱(PbS)

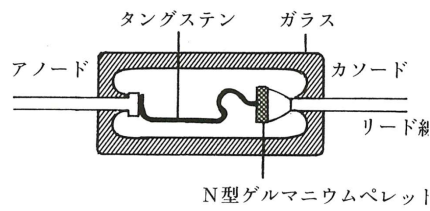
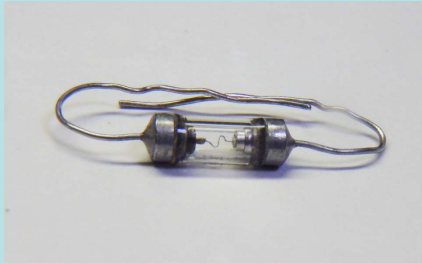


鉱石検波器

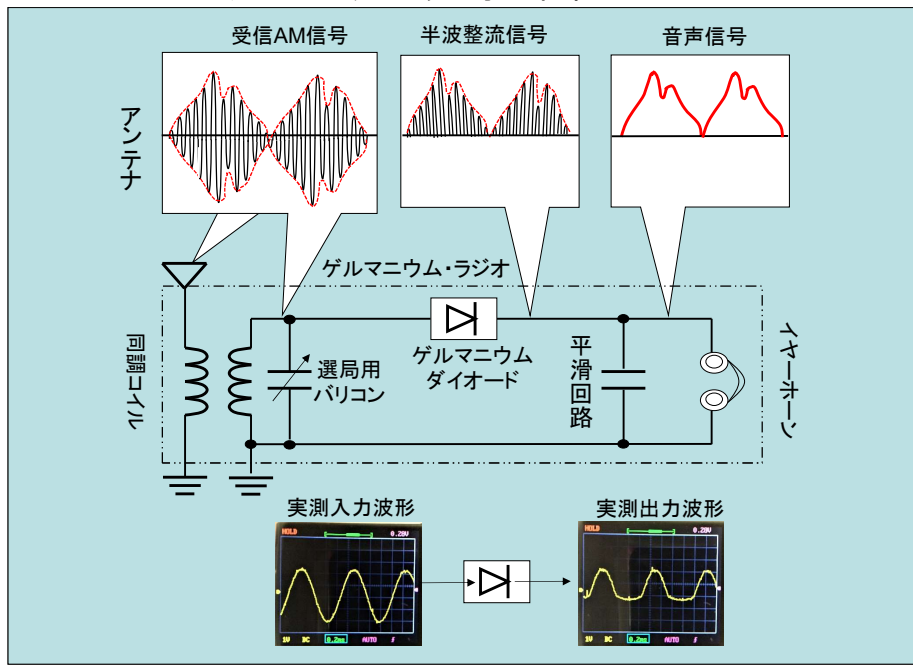
点接触ゲルマニウム・ダイオードの発明(1939)

鉱石検波器は動作が不安定であるという問題があったが、ウインクラー(ドイツ・鉱山学校の先生)がゲルマニウムとシリコンを使うと良い特性の鉱石検波器ができることを発表。

1939年、ラッセルによりゲルマニウムを使ったダイオードが発明されて、この問題が解決された。



ゲルマニウム・ラジオの仕組み



那須地区の電波の強さは？

各ラジオ局の仕様

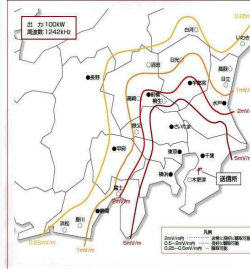
放送局	送信所所在地	周波数	出力	距離
NHK第1	埼玉県久喜市	594kHz	300kW	146km
NHK第2	埼玉県久喜市	693kHz	500kW	146km
栃木放送	那須塩原市	864kHz	1kW	16km
TBSラジオ	埼玉県戸田市	954kHz	100kW	175km
文化放送	埼玉県川口市	1134kHz	100kW	167km
ニッポン放送	千葉県木更津市	1242kHz	100kW	210km

送信出力と受信電界強度の関係

$$E \approx 0.39 \frac{\sqrt{P}}{r}$$

E : 受信電界強度 (m), P : 送信出力 (W), r : 距離 (m), α : 定数
周波数による影響は無視

ラジオ局のサービスエリア・データによる電波の強さ



理論上での電波の強さ

放送局	電界強度
NHK第1	1.5mV/m
NHK第2	1.9mV/m
栃木放送	0.8mV/m
TBSラジオ	0.7mV/m
文化放送	0.7mV/m
ニッポン放送	0.6mV/m

↓ 那須地区の電界強度は ↓

TBSラジオで約0.7mV/m ニッポン放送で0.6mV/m

那須地区の電波の強さを実測してみると

実際の測定による電波の強さ

放送局	アンテナ起電圧	電界強度
NHK第1	55dBuV (0.6mV)	1.2mV/m
NHK第2	60dBuV (1.0mV)	2.0mV/m
栃木放送	54dBuV (0.5mV)	1.0mV/m
TBSラジオ	50dBuV (0.3mV)	0.6mV/m
ニッポン放送	55dBuV (0.3mV)	0.6mV/m

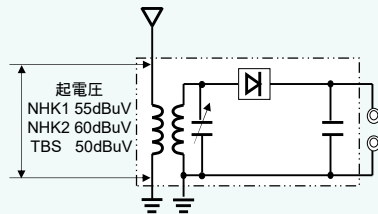
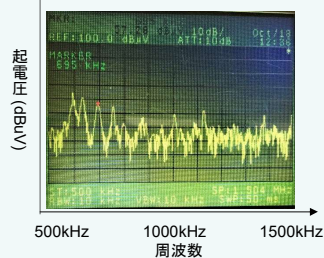
理論上での電波の強さ

放送局	電界強度
NHK第1	1.5mV/m
NHK第2	1.9mV/m
栃木放送	0.8mV/m
TBSラジオ	0.7mV/m
ニッポン放送	0.6mV/m

≒
ほぼ一致

実効長 $h_e=0.5m$ のアンテナで測定

スペクトル・アナライザーで アンテナ起電圧を実測



$dB\mu V = 20\log(\mu V)$
例えば、 $1mV$ は $60dB\mu V$ 、 $0.1mV$ は $40dB\mu V$
 $0.1mV$ に対し $1mV$ は $20dB$ 大きい。
 $dB = 20\log 10^3 + 20\log 10^2 = 20$

那須地区でゲルマニウム・ラジオで放送を聴くことができるの？

標準アンテナでの受信可能なラジオの方式
(参考資料によると)

電界強度	アンテナ起電圧	ラジオの方式
0.02mV/m以上	0.13mV以上	6球スーパーでないとは不可
0.1 mV/m以上	0.64mV以上	5球スーパーが適当
0.5 mV/m以上	3.2mV以上	高一で聞こえる
2 mV/m以上	12.8mV以上	ゲルマニウム・ラジオで聞こえる

標準アンテナ: 高さ8m, 長さ12m, 実効長 $h_e=6.4$ mの逆L型アンテナ

標準アンテナを用いれば、NHK2のみ辛うじて聞くことができるかもしれない。

一般的にゲルマニウム・ラジオで放送を聴くにはアンテナには13mV以上の電圧が必要

例えば、実効長 $h_e=2$ mのアンテナでは6.5mV/mの電界強度が必要であり

那須地区ではどの放送も聞くことが出来ない。

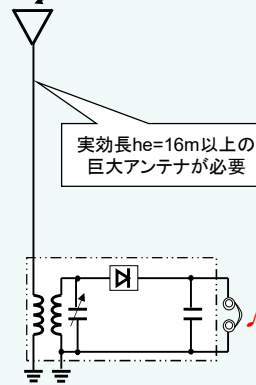
那須地区でNHK1, NHK2, 栃木放送を受信するには
 $h_e=13(\text{mV})/0.8(\text{mV/h})\div 16.3(\text{h})$
即ち、実効長16m以上の巨大アンテナが必要になります。

アンテナの起電圧 V_A

$$V_A = h_e \cdot E_A$$

E_A : 受信電界強度
 h_e : アンテナの実効長

NHK1, NHK2, 栃木放送
0.8~1.9mV/h



ラジオの基本構成

ストレート方式

(鉱石/ゲルマニウム・ラジオ)

(感度が悪く、あまり存在しない)

(高周波1段ストレート)

(高周波2段ストレート)

レフレックス方式

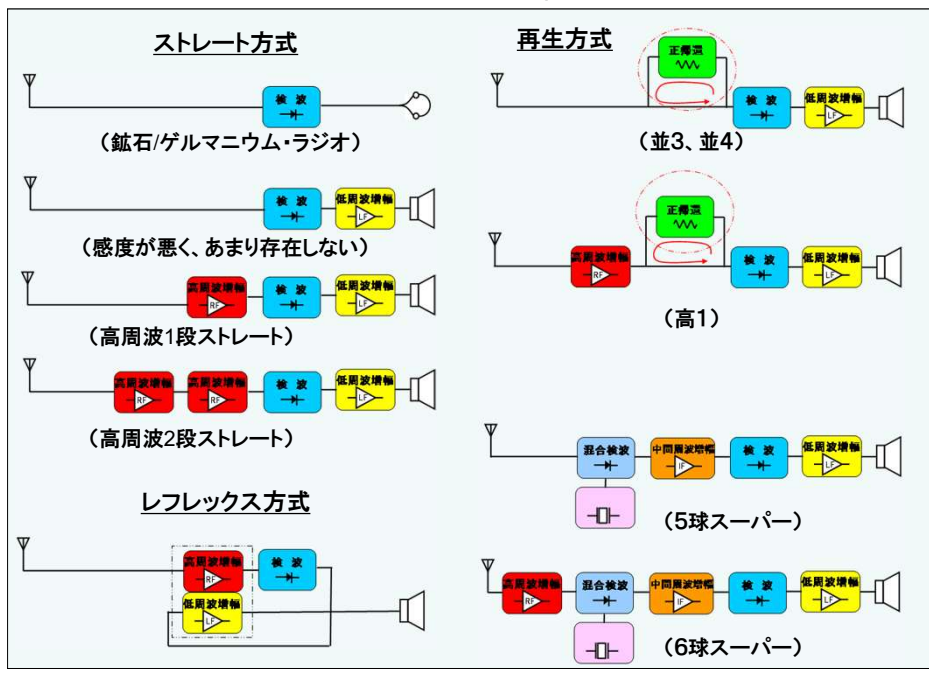
再生方式

(並3、並4)

(高1)

(5球スーパー)

(6球スーパー)



実際のゲルマニウム・ラジオの感度をSGを用いて測定すると

SG (信号発生器)
1MHz 1kHz30%変調

同調コイル
検波方式
ダイオード
イヤホン

感度を定める要素

スペクトルアナライザ
信号強度の周波数分布

SG用いた実測では

古典ラジオ・ヘッドフォン: 15mV
セラミック・イヤホン : 50mV

文献によるラジオの感度

アンテナ起電圧	ラジオの方式
12.8mV以上	ゲルマニウム・ラジオで聞こえる
3.2mV以上	高一で聞こえる
0.64mV以上	5球スーパーが適当
0.13mV以上	6球スーパーでないとは不可

ほぼ一致

ゲルマニウム・ラジオは V_A 10mV以下の電波を受信しているか？
(高感度イヤホンや地獄耳があれば聞こえるかも？)

SG

受信限界は 3mV

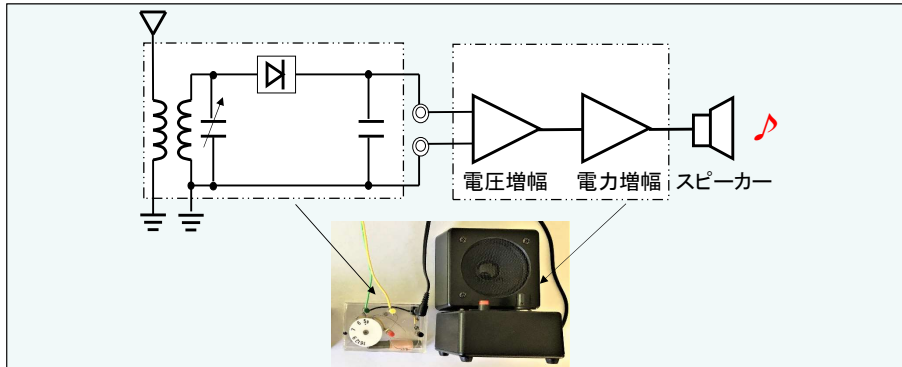
音響結合器

イヤホン マイク

マイク アンプ

ゲルマニウム・ラジオの感度限界はアンテナ起電圧 3mV

ゲルマニウムラジオの出力(音声信号)を増幅してみると



SGで実測した可聴限界

古典ラジオ・ヘッドフォン : 15mV
 低周波増幅機付きスピーカー : 3mV

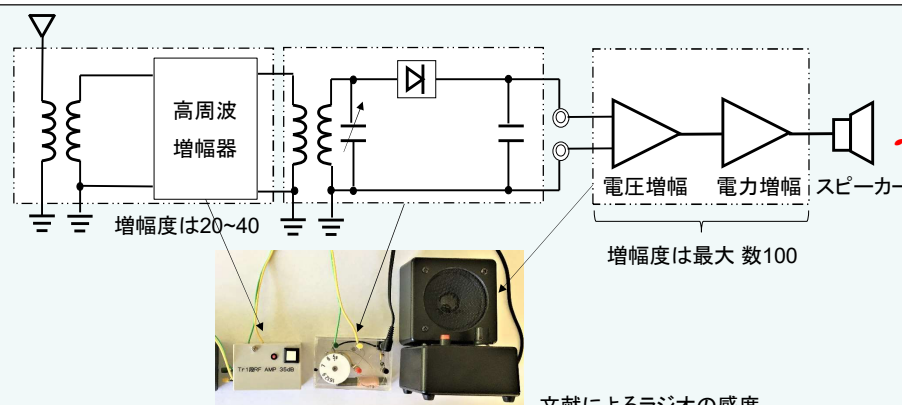
文献によるラジオの感度

アンテナ起電圧	ラジオの方式
12.8mV以上	ゲルマニウム・ラジオで聞こえる
3.2mV以上	高一で聞こえる
0.64mV以上	5球スーパーが適当
0.13mV以上	6球スーパーでないとは不可

≒
 ほぼ一致

戦前の高性能ラジオの高一ラジオ並みの感度に
 実効長 $h_e = 3\text{m}$ 以上のアンテナを用いれば、NHK1, NHK2, 栃木放送が受信可能に

更に高感度にするため高周波増幅を追加すると



SGで実測した可聴限界

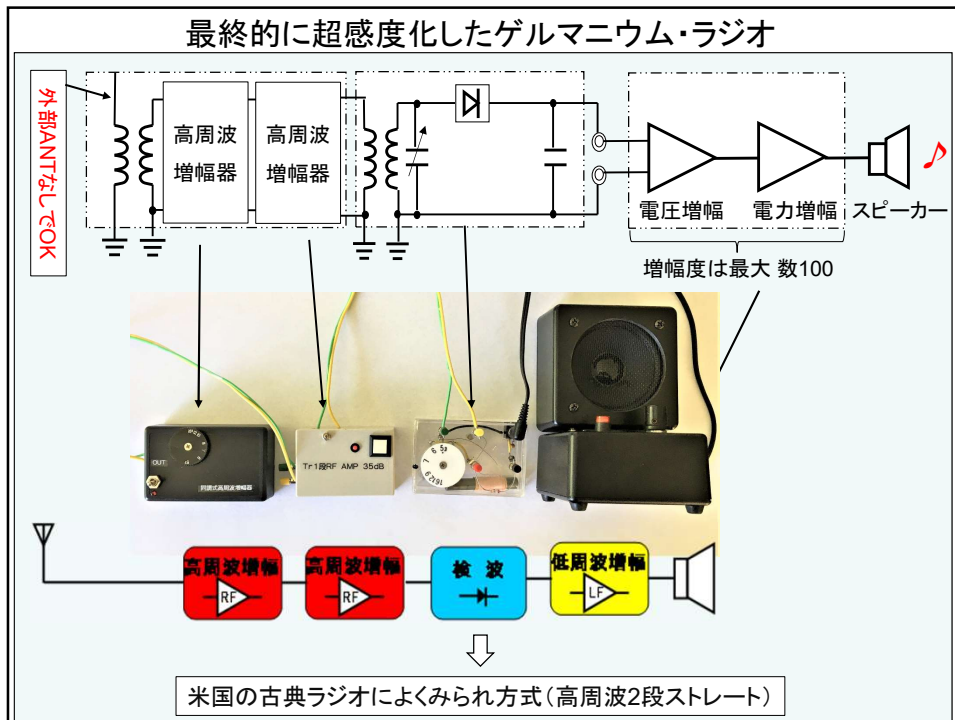
古典ラジオ・ヘッドフォン : 15mV
 低周波増幅機付きスピーカー : 3mV
高周波増幅+低周波増幅 : 0.1mV以下

文献によるラジオの感度

アンテナ起電圧	ラジオの方式
12.8mV以上	ゲルマニウム・ラジオで聞こえる
3.2mV以上	高一で聞こえる
0.64mV以上	5球スーパーが適当
0.13mV以上	6球スーパーでないとは不可

≒
 ほぼ一致

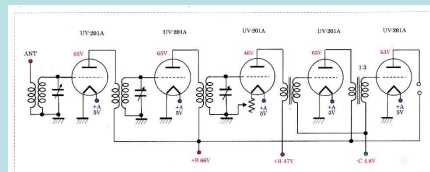
6球スーパー・ラジオ並みの感度に



Beckley Ralston(高周波2段ストレート方式)(1926)

ラジオ放送の最初期の1920年代、ストレート方式(ニュートロダインなど)で高周波増幅段を増やして受信感度を上げる古典ラジオが次から次へと登場し、最高は4段の高周波増幅段を持つ高性能ラジオが登場しました。

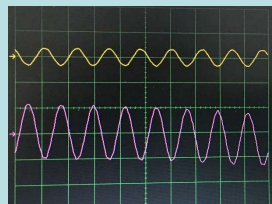
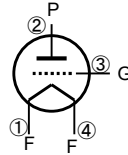
高周波増幅段を増やすには高度な技術が必要であり、当時のアメリカの無線通信技術の高さを示しているということが出来ます。



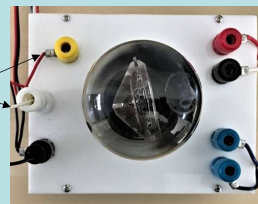
真空管 UX-201A(01A)



1920年代、検波・増幅用として
古典ラジオに多用された。
フィラメント電圧・電流 5V 0.25A
プレート電圧 45V~180V



電圧増幅度5~7位しかない



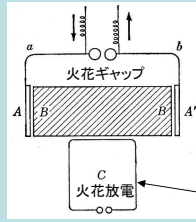
ラジオ関連技術史の年表

1888年	電磁波の発見(ヘルツ)
1899年	大西洋横断無線通信実験に成功(マルコニー)
1902年	AM,ヘテロダイン検波を發明(フェッセンデン)
1903年	40kmの音声通信に成功(フェッセンデン)
1905年	二極真空管の發明(フレミング)
1906年	三極真空管(オーディオン)の發明(ドフォーレ) 世界初のラジオ放送(フェッセンデン) 鉱石検波器を發明(ダンウッディー)
1912年	3極真空管の増幅作用の発見(ドフォーレ) 再生方式の發明(アームストロング)
1914年	4極真空管の發明(シヨットキー)
1917年	スーパーヘテロダイン方式の發明(アームストロング)
1920年	世界初の公共ラジオ放送(ピッツバーグKDKA局)
1925年	東京放送局(JOAK)の中波放送開局 八木アンテナの發明(八木、宇田)
1929年	5極真空管の發明(フィルップ社)
1933年	FM方式の發明(アームストロング)
1939年	ゲルマニウム・ダイオードの發明
1948年	接合型トランジスタの發明(シヨックレー)
1957年	東京通信工業(現在のソニー)の国産第1号のトランジスタ・ラジオ

ヘルツの実験 電磁波の発見 (1888年)

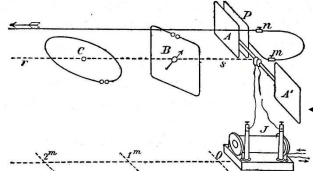


H. R. Hertz
1847-1894



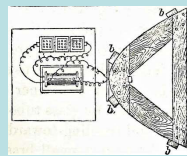
1879年、ヘルツは恩師ヘルムホルツより電磁波証明の研究を勧められたが、なかなか良い成果を得られないでいた。ところが、導線ループに取付けた火花ギャップにより磁場の強さを測ろうとした時、磁気誘導で考えられるより離れた距離にループを置いても火花放電することに気付く。また、その時に用いた誘導コイルによる高電圧発生装置が電磁波発生装置になることも気付く。

↓
ループ・アンテナ、連続電磁波発生



そして、コイルLのインダクタンスと先端の板C,C'のコンデンサによる共振周波数が放射されていることにも気付く、更に、受信ループ・アンテナの傾きにより受信状態が変化することも気づく。

↓
同調回路、偏波



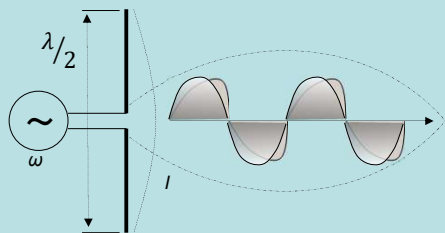
更に、電磁波は光と同じなので反射鏡を置けば、一方方向に電磁波を放射できると考えた。

↓
指向性アンテナ(パラボラなど)

↓
電磁波の発見だけでなく、現代でも最も重要な無線技術の発明を行う

ヘルツの送信アンテナはアンテナの基本

↓
λ/2ダイポールアンテナ

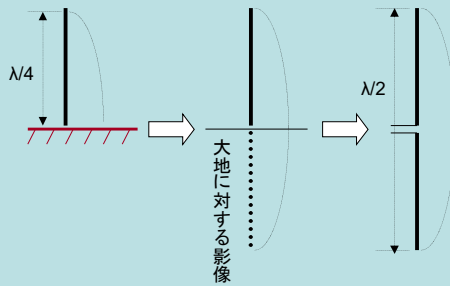


$$\text{実効長 } h_e = \lambda / \pi$$

$$f = 1000\text{kHz} (\lambda = 300\text{m}) \rightarrow h_e \approx 95\text{m}$$

$$f = 600\text{kHz} (\lambda = 500\text{m}) \rightarrow h_e \approx 160\text{m}$$

テスラ、マルコニ-のアンテナは $\lambda/4$ 垂直接地アンテナの原型

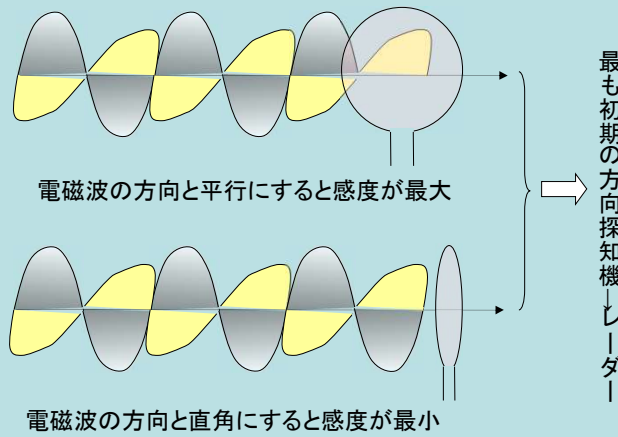


実効長 $h_e = \lambda/2\pi$

$f = 1000\text{kHz}(\lambda = 300\text{m}) \rightarrow h_e \approx 48\text{m}$

$f = 600\text{kHz}(\lambda = 500\text{m}) \rightarrow h_e \approx 80\text{m}$

ヘルツの受信アンテナはループ・アンテナの原型



実効長 $h_e = \pi^2 a^2 N / 2\lambda$

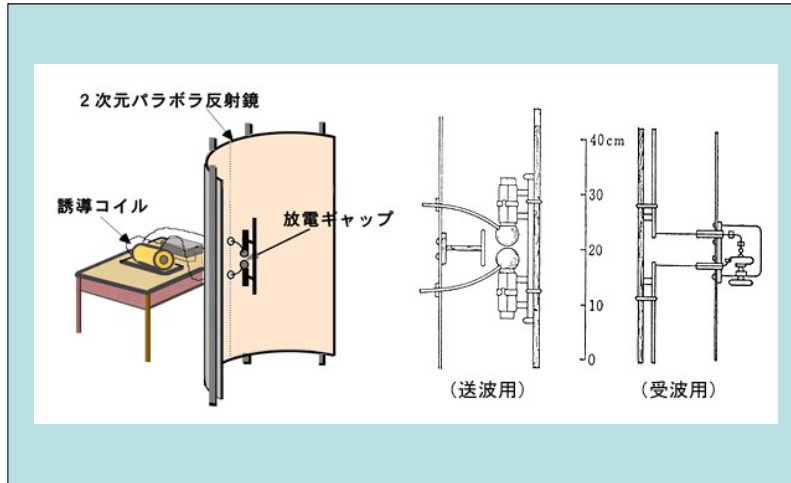
$a = 0.3\text{m}, N = 40$ の場合

$f = 1000\text{kHz}(\lambda = 300\text{m}) \rightarrow h_e \approx 0.05\text{m}$

$f = 600\text{kHz}(\lambda = 500\text{m}) \rightarrow h_e \approx 0.03\text{m}$

ヘルツはパラボラアンテナで実験していた。

通信距離を2m位から20m位まで伸ばした。



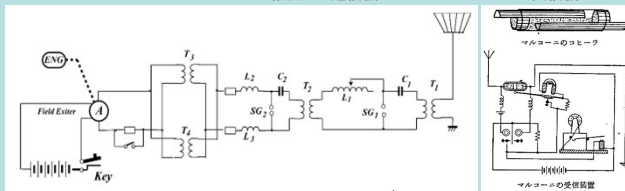
マルコニーの大西洋横断通信実験(1899)



G. Marconi
1874-1934

1899年、マルコニーはフレミングが設計した送信機により大西洋横断通信に成功した。その際、電波検知にコヒーラを用いた。

フレミングが設計した送信機

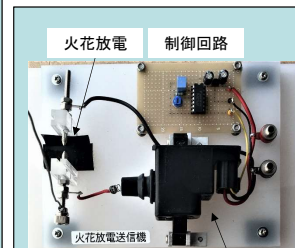


コヒーラー 電波検知器



絶縁管中の電極間に金属粉を入れ、電極と金属粉、金属粉と金属粉の間は点接触しているが、金属粉の表面は酸化皮膜で覆われているので電波を受信しない状態では高抵抗を示す。電波を受信する点接触状態の薄い酸化被膜に電圧が加わるため絶縁破壊が起きて低抵抗になる。

ヘルツの電磁波実証再現実験装置



火花放電送信機

誘導コイル

ヘルツの電磁波の発見(1888)再現実験



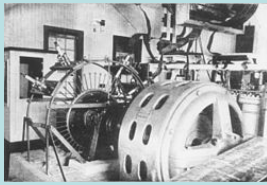
コヒーラ

コヒーラ受信機

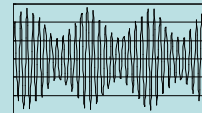
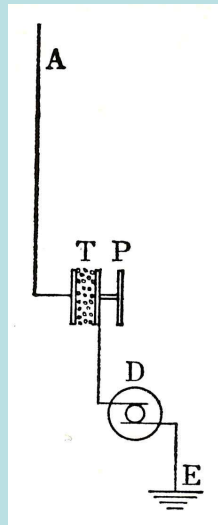
フェッセンデンによるAMの発明(1902)、ラジオ放送開始(1906)



Reginald Fessenden
1866-1932



高周波発電機 D

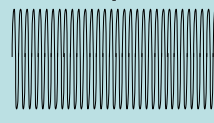


AM(振幅信号)波



音声信号

+



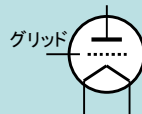
高周波(搬送波)

ド・フォーレの三極真空管(1906)と増幅作用の発見(1912)

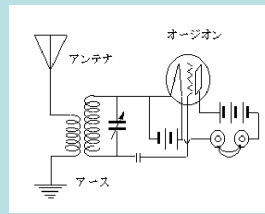
1906年、ドフォーレは三極真空管の特許を申請。プレートとカソードの間にグリッド(ジグザグの金属線)を入れたもので、単なる検波管として考えていたが、1912年に増幅作用があることが発見された。



L. De Forest
1873-1961



三極管の記号 ドフォーレ3極管の外観



ドフォーレの特許

1922年製造の古典真空管 UX-201A(01A)

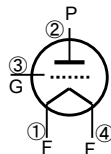


仕様

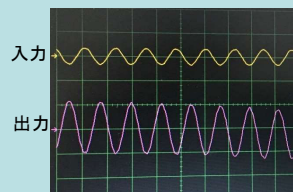
1920年代、検波・増幅用として
古典ラジオに多用された。

フィラメント電圧・電流 5V 0.25A

プレート電圧 45V~180V



入出力特性の実測

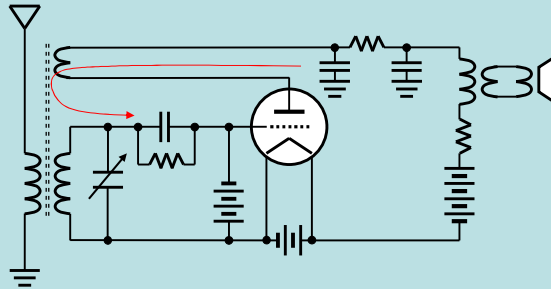


受信回路方式の改良(1) - 再生方式(1912)



E. H. Armstrong
1890-1954

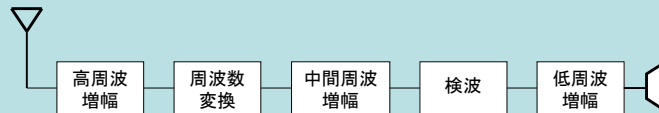
1912年、アームストロングは増幅した出力信号の一部を入力側に戻し(正帰還)、受信機の感度を上げる再生方式を発明する。



感度が大幅に向上し、少ない真空管で安価なラジオを作れるという利点はあったが、すぐに発振して妨害電波を出すという欠点があった。

スーパーヘテロダイン受信方式の発明(1917)

受信した電波を、一旦、低い周波数(中間周波数)に変換してから増幅するので、増幅度を高くすることができるので、感度が向上し混信も少なくなる。



当時は非常に高価なラジオ方式であった。
21世紀の現在においても、大半のAMラジオの基本構成である。

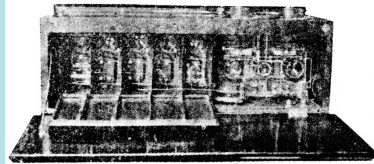
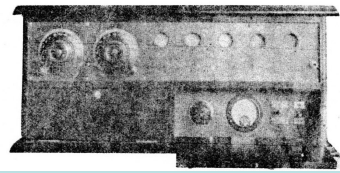
アームストロング、スーパーヘテロダインに関する記事。(1924年)



此機器にて専らに岸辺のサービスマンが
聴き居てんし衆てい聞み衆音響録にてつ押



右中に器機
左手にラッ
パンを携へて
バムビロ
テへ行く處



中間周波増幅5段で増幅率
数1,000~10,000

ラジオ放送と古典ラジオの時代遍歴

- 1906年 世界初のラジオ放送(実験段階)
- 1914年 第1次世界大戦
- ~18年
- 1919年 RCA設立 ※
- 1920年 世界初の公共ラジオ放送
- 1922年 RCA Radiola III 誕生
- 1924年 Atwater Kent Model 10A 誕生
Crosley Model 51 誕生
- 1925年 東京放送局(JOAK)の放送開局(日本初)
- 1926年 RCA Radiola 26 誕生
Beckly Ration 誕生
- 1927年 Atwater Kent Model 33 誕生
日本製ラジオは再生式中心
- 1939年 第2次世界大戦
- ~45年
- 1947年 GHQによる再生式の製造中止令



RCA Radiola III
2球再生式(1922)



Crosley Model 51
2球再生式(1924)



Atwater Kent Model 10A
高周波増幅2段6球のストレート方式(1924)



RCA Radiola 26
6球スーパーヘテロダイ
ン(1926)



Beckly Ration
高周波増幅2段5球の
ストレート方式(1926)



Atwater Kent Model 33
高周波増幅3段6球のストレート方式(1927)

※ RCA(Radio Corporation of America)はラジオなどの無線通信の
技術と事業の支配のため作られた国策会社。また、RCA/GE連合を
結成し、最初に誕生した真空管はUV-200, 201

戦前日本のラジオ放送とラジオの時代遍歴

- 1925年 東京放送局(JOAK)の放送開局(日本初)
ほとんどのラジオは鉱石検波方式
- 1928年 エリミネータ※式ラジオの登場
- 1932年 スピーカー一体型のラジオの登場
- 1934年 並四ラジオ(再生式)が主流に
- 1939年 第2次世界大戦
～45年
- 1947年 GHQによる再生式の製造中止令
スーパーヘテロダイン方式が主流に



鉱石ラジオの試聴風景(1926年頃)

※ 最初期の真空管ラジオの電源は電池であったが、不便であったので、電灯線から電源を取るエリミネータ(電池を排除)式ラジオが誕生した。



日本初の鉱石検波ラジオ(Sharp 1925)



日本初の真空管ラジオ(Toshiba 1925)



真空管ラジオの試聴風景(1928年頃)

外観から見た真空管ラジオの時代遍歴

1920年代(古典ラジオ) 1930～1940年代(並三、並四、高一)



1940～1950年代(スーパーヘテロダイン方式)



ST管



MT管

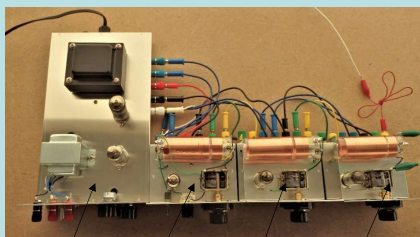


電池管

ラジオの科学・実験機1(真空管による構成)

初心者が効率的、且つ具体的に高周波・ラジオ技術を学習することを目的に作られた教材
4つの回路ブロックから構成され、その組み合わせにより複数のラジオとアンプの回路を比較学習することができる。

現代のラジオ以上に超高感度ラジオ



電源アンプ 真空管再生・検波 高周波増幅 高周波増幅

並四ラジオ

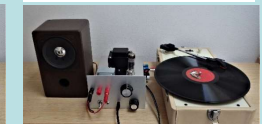


電源アンプ 真空管再生・検波 電源アンプ 真空管再生・検波 高周波増幅

CDプレイヤー用アンプ



レコードプレイヤー用アンプ



ラジオの科学・実験機2(トランジスタによる構成)

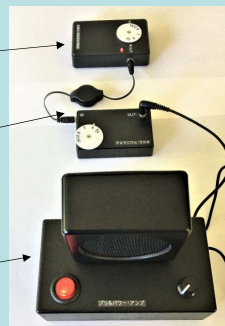


高周波アンプ内蔵ループアンテナ

2段高周波アンプ
パーアンテナ内蔵

ゲルマニウムラジオ

プリ・パワーアンプ



ループアンテナ+1段高周波アンプ型

2段高周波アンプ型

手作りのゲルマニウム・ダイオード

