

AIとの新科学対話 ②

資料 「無線通信とラジオの歴史」

那須科学歴史館

館長 田澤勇夫

2023/07/07

AIとの新科学対話②のための参考資料です。

- 無線通信の基礎知識
- 電磁波発見への道
- 無線通信技術の基礎の確立への道
- ラジオ・真空管技術の発展への道

無線通信の基礎知識

Maxwellの予言－光もγ線も電磁波

真空中の電磁波の速度は $C = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \approx 2.998 * 10^8 (m/s)$

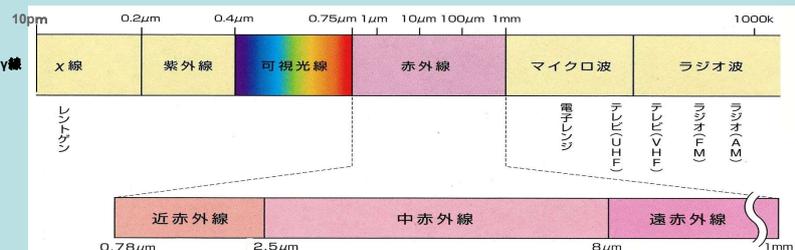
真空中の誘電率 $\epsilon_0 \approx 8.854 * 10^{-12} (C^2 / Nm^2) (C^2 s^2 / kgm^3)$

真空中の透磁率 $\mu_0 \approx 1.257 * 10^{-6} (kgm / C^2)$

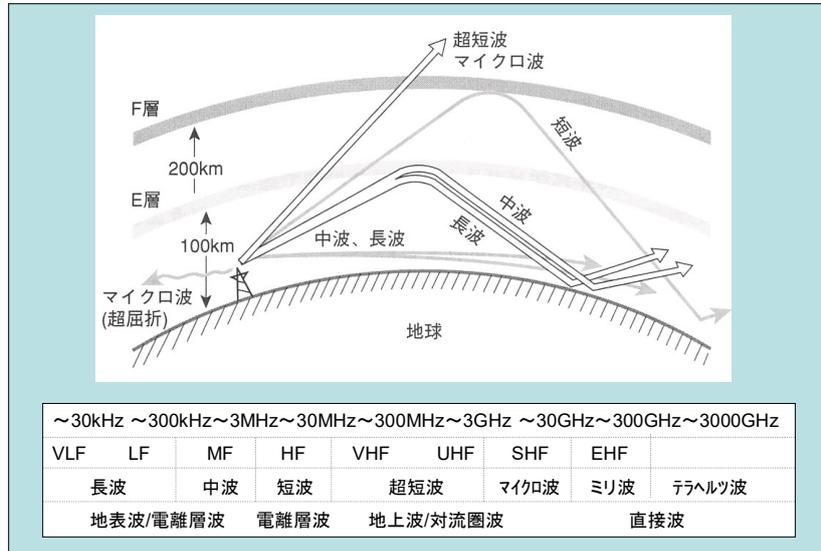
(速度)=(周波数)*(波長) $C = f * \lambda$

Ff=1000kHzのラジオ波はλ=300m, f=300MHzのTV-UHFはλ=1m

携帯の電波はλ=10cm, f=3GHz, 近赤外線はλ=1μm, f=3*10¹⁴GHz



電波の周波数と電波伝搬路



電磁波の割り当て

VLF (100~10km)	電波航法、潜水艦通信	地表に沿って低い山も越える。 水中でも伝わる。
LF (10km~1km)	船舶無線、電波時計、ICタグ	長距離通信用
MF (1k~100m)	AMラジオ、船舶気象通報、無線航法	電離層(E)反射で安定した長距離通信
HF (100~10m)	遠洋船舶、短波ラジオ、ラジコン	電離層(F)反射を繰り返し地球の反対側に。季節や時間帯により変動
VHF (10~1m)	FMラジオ、TV、ワイヤレスマイク	直線性が強くなる。 建物の裏側に廻り込む。
UHF (1m~10cm)	デジタルTV、携帯電話、無線LAN 電子レンジ、航空・列車無線	伝送量大、小型アンテナでの送受。 建物に少しだけ廻り込む。
SHF (10cm~1cm)	衛星通信、衛星TV、無線LAN	高速データ伝送
EHF (1cm~1mm)	レーダー、衛星通信	
ミリ波 (1mm~0.1mm)	電波天文、非破壊検査	

電磁波の発見への道

火花放電による電磁波発生を試み(1824年: Maxwell以前)

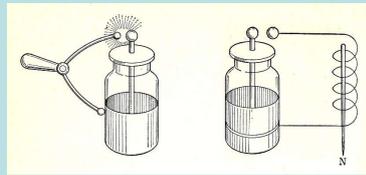
マクスウェルが予言した電磁波をどのようにして発生させるかが課題であった。
要は振動(変動)電流を発生さえればよいのであるが、
そのヒントはライデン瓶の放電現象にあった。



1842年、F. サバルはライデン瓶の火花放電が点滅、振動し、
また、ソレノイドを通じて放電させるとその中の鉄片が磁化されることを観察。

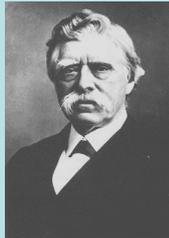


何らかの方法で効果的な振動電流を生じれば電磁波が発生するだろう。



Maxwell以前でも電磁波の現象は確認されているが、
再現性が不十分につき、その存在を発見するに至らなかった。

隠れた電磁波の発見者 ヒューズ(1879年)



David Edward Hughes
1831-1900

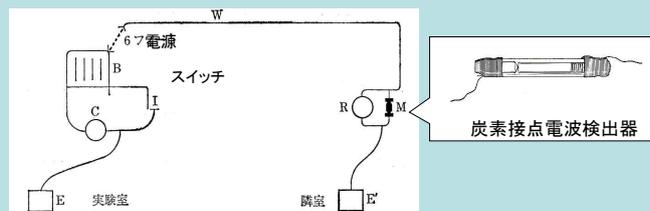
マイクロフォンと
印刷電信の発明者

炭素マイクの研究中、電気火花の影響を受けて誤動作していることに気付く。

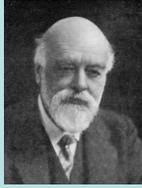
1879年、炭素棒を用いた電波検出器を発明し、隣室で火花信号を受信することに成功した。

1880年 専門家を呼んで公開実験を行ったが、単なる誘導ということで片付けられてしまった。

- その理由は
- ・ 参加した学者たちが電磁波の専門家ではなかった。
 - ・ もともとは、ヒューズは音楽教授であったこと。
 - ・ 数学にあまり興味を示さなかったこと。
 - ・ 論文として発表しなかったこと。
 - ・ ということで、ヘルツの蔭に埋もれてしまった。



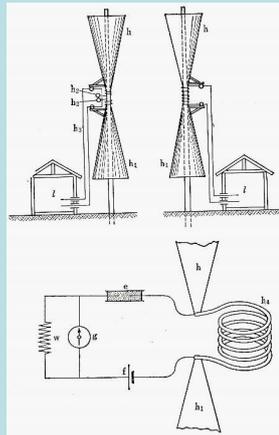
ロッジによる電磁波の研究(1884年～)



Oliver Lodge
1851-1940

火花放電ギャップは強い電磁波しか検出しないが、1884年、ロッジは好感度な電波検出器のコヒーラを再発見した。

また、1898年、静電容量を調整する共振アンテナを発明したが、ロッジは学者であったため、無線通信の実用化にあまり興味がなかった。



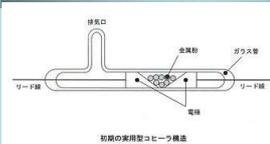
コヒーラー電波検知器の発明(1884年)

絶縁管中の電極間に金属粉末を入れ、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。

- ・1879年、ヒューズの炭素接点電波検出器
- ・1884年、ロッジとブランリーの金属粉末
- ・1896年、マルコニーの性能改善



比較的弱い受信電界でも電磁波を検知



初期の実用型コヒーラ構造



ニッケルの粉末と銀の粉末を混ぜたもの

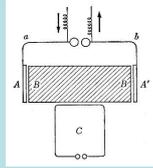


幅1cmのアルミ箔(長さは底まで)

Herzの実験（1888年）



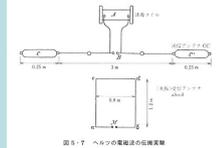
H. R. Hertz
1847-1894



1879年の電磁波証明の懸賞問題への取組を恩師ヘルムホルツより勧められヘルツは取り組んだが、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。

ループアンテナ



また、その時、用いた誘導コイルを用いた高電圧発生装置が電磁波発生装置になることも気付く。

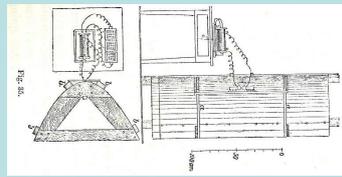
連続電磁波発生

そして、コイル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づく。

同調

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）

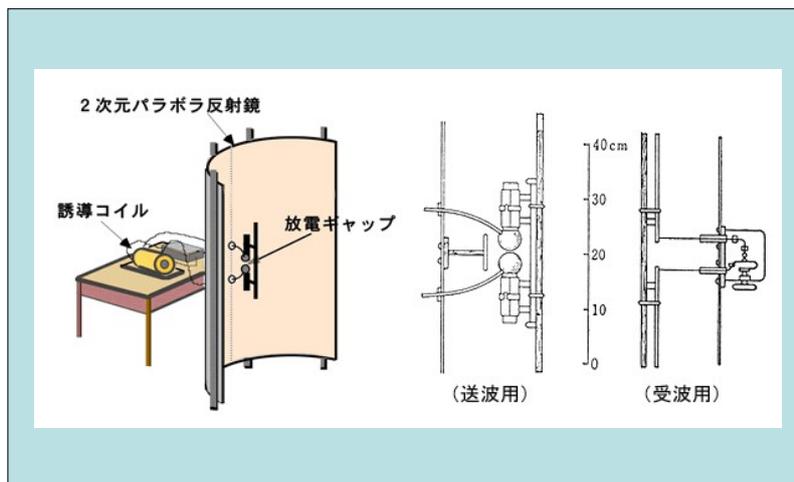


電磁波の発見だけでなく、現代でも最も重要な無線技術の発明を行う。

ヘルツはパラボラアンテナで実験していた。



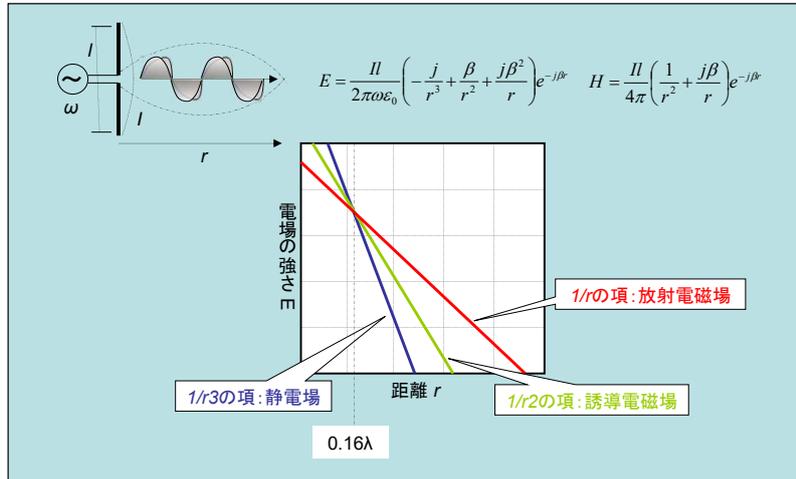
通信距離を2m位から20m位まで伸ばした。



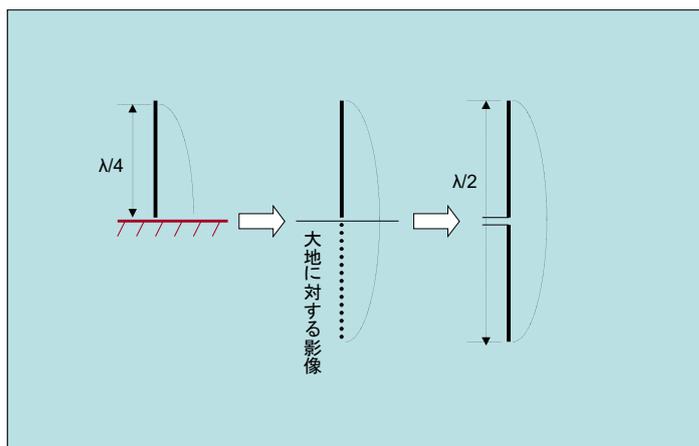
ヘルツの送信アンテナはアンテナの基本



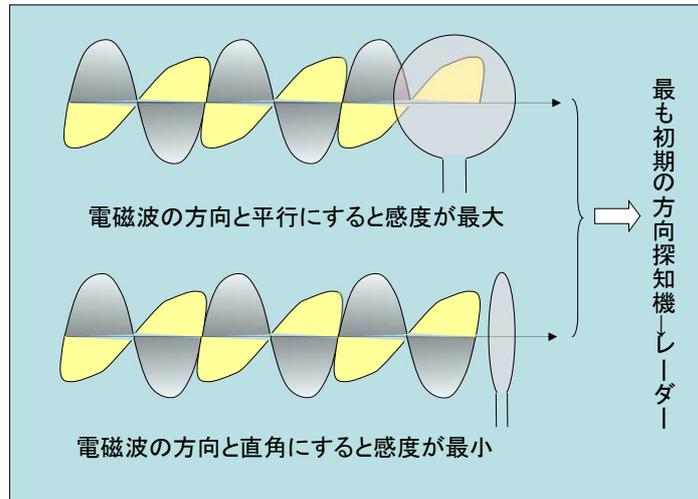
λ/2ダイポールアンテナ



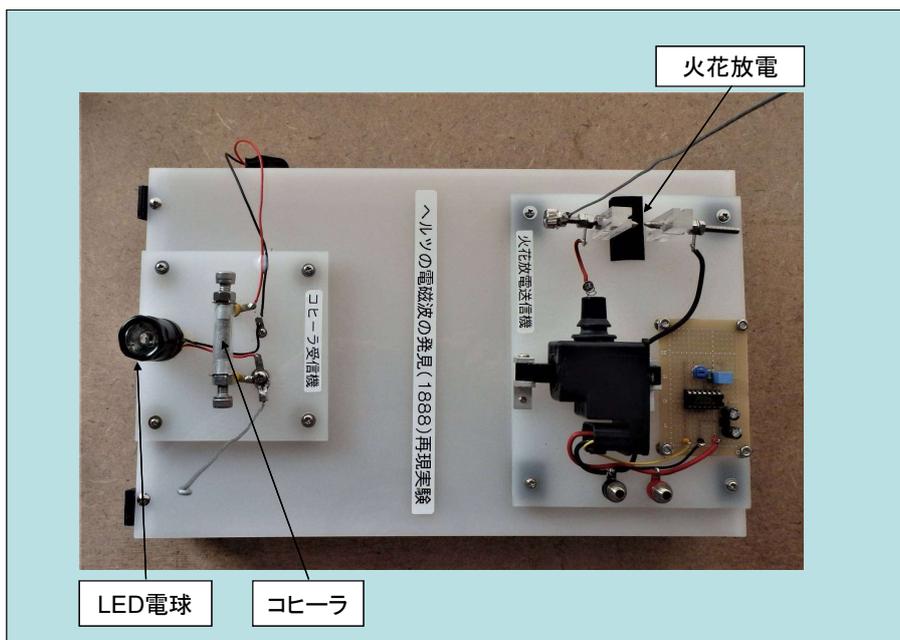
テスラ、マルコニ-のアンテナはλ/4垂直接地アンテナの原型



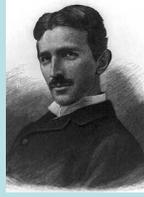
ヘルツの受信アンテナはループ・アンテナの原型



ヘルツの電磁波の発見の再現実験装置(那須科学歴史館製)



テスラの無線電力伝送実験(1893年)



N Tesla
1856-1943

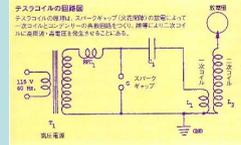
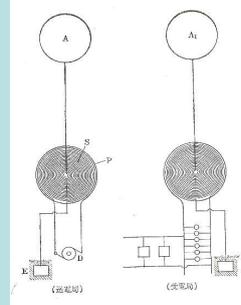
1893年、無線電力伝送を試みて失敗するが、その着想は非常に優れていた。



- ・実用的な交流発電機
- ・アースの概念
- ・コイルと静電容量による共振
- ・2次コイル
- ・アンテナの概念
- ・長距離無線通信



- ・現在の交流電力送電を確立。
- ・現代のワイヤレス・エネルギー伝送技術につながる。



マルコニーの大西洋横断通信実験の成功(1899年)

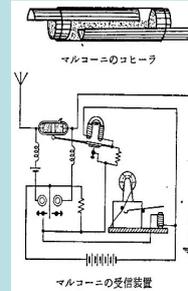
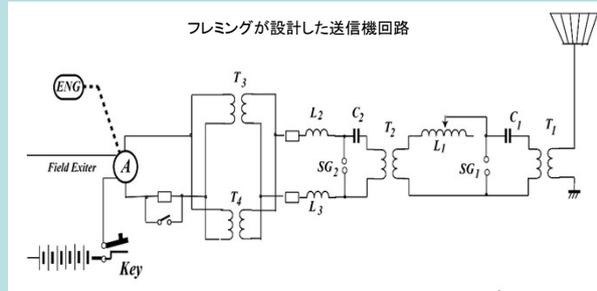


G. Marconi
1874-1934

1899年、フレミングが設計した送信機により、当時、予想していなかった長距離の大西洋横断通信に成功した。



マルコニーの技術の基礎の多くはテスラー、ロッジ、フレミングらによるものであり、電離層により長距離伝送の認識もなかった。



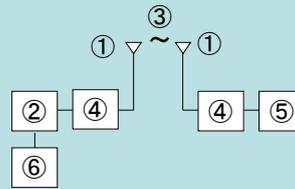
無線通信技術の基礎の確立への道

より実用的な無線通信システムにするための基本的な改良

通信距離をのばす
通信回線の信頼性の向上
音声通信、情報伝送



- ① アンテナの改良
- ② 電磁波発生方法の改良
- ③ 電磁波伝播路の研究
- ④ 同調回路の改良
- ⑤ 電波受信器の感度向上
- ⑥ 変調方式の発明



フェッセンデンの音声信号送信機(1902年)

不連続な火花放電によるデジタル通信からアナログ(音声)通信へ



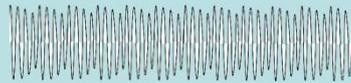
Reginald Fessenden
1866-1932

火花送信機の不連続な波形では音声信号を送れないが



1902年、連続波を使えば振幅が変化することで、
音声通信が可能と考える。

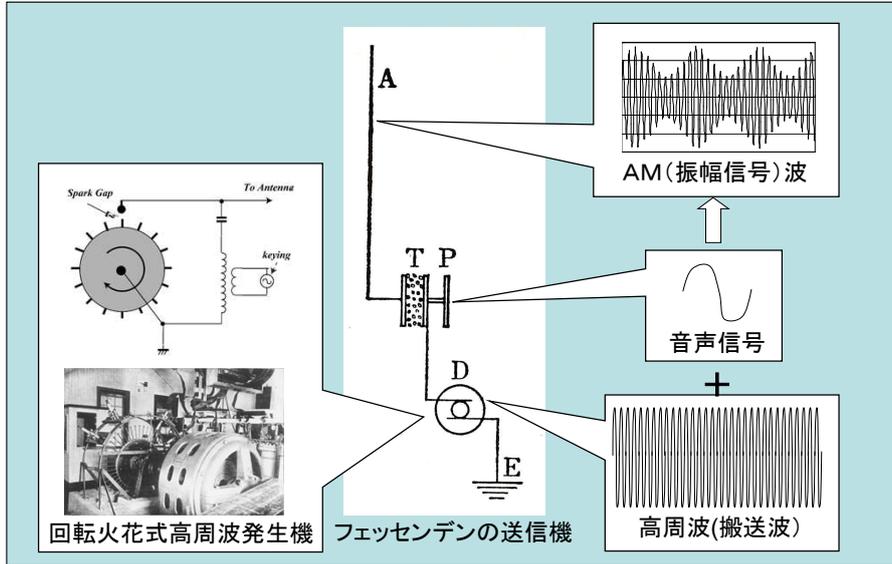
↓
AM変調の発明



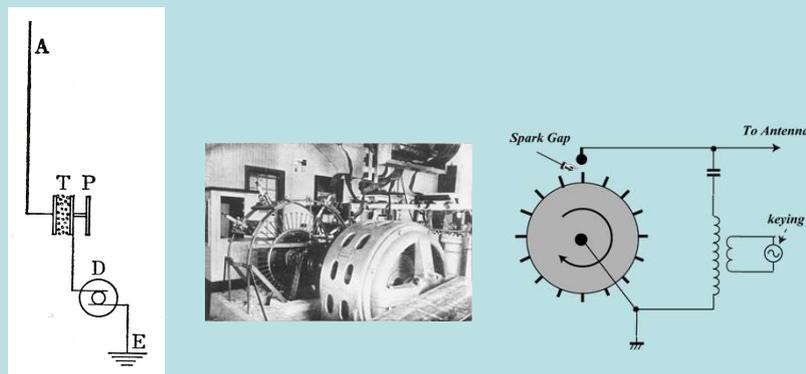
テスラの高周波発電機に目を付ける。

ラジオ・真空管技術の発展への道

フェッセンデンによるAMの発明(1902)、ラジオ試験放送開始(1906)

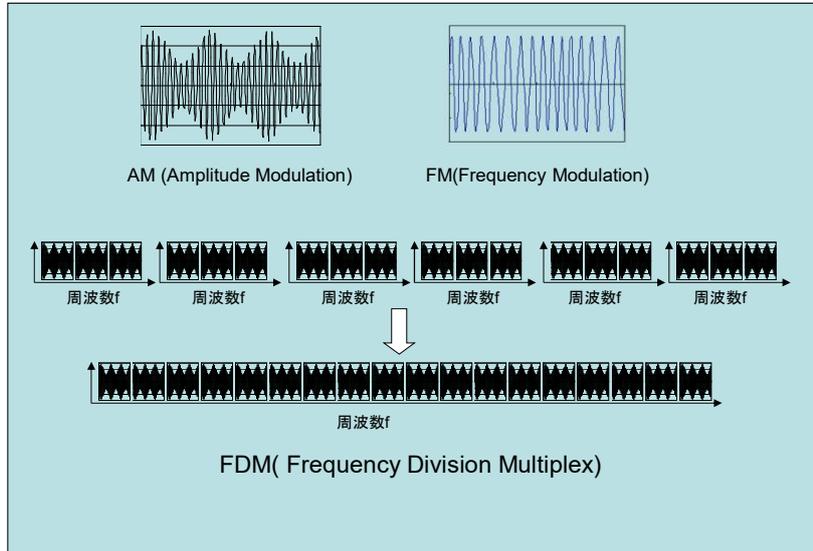


回転式火花式音声信号送信機—AM変調の始まり(1906年)

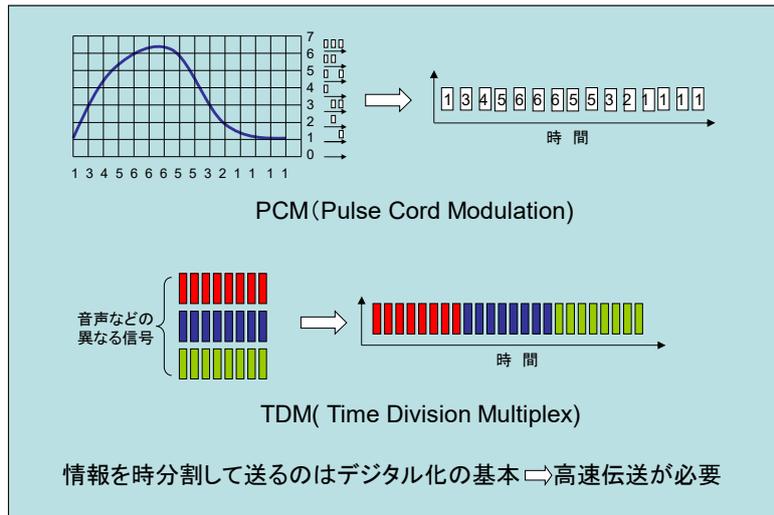


フェッセンデンはこのような送信機でラジオ試験放送を始めた。

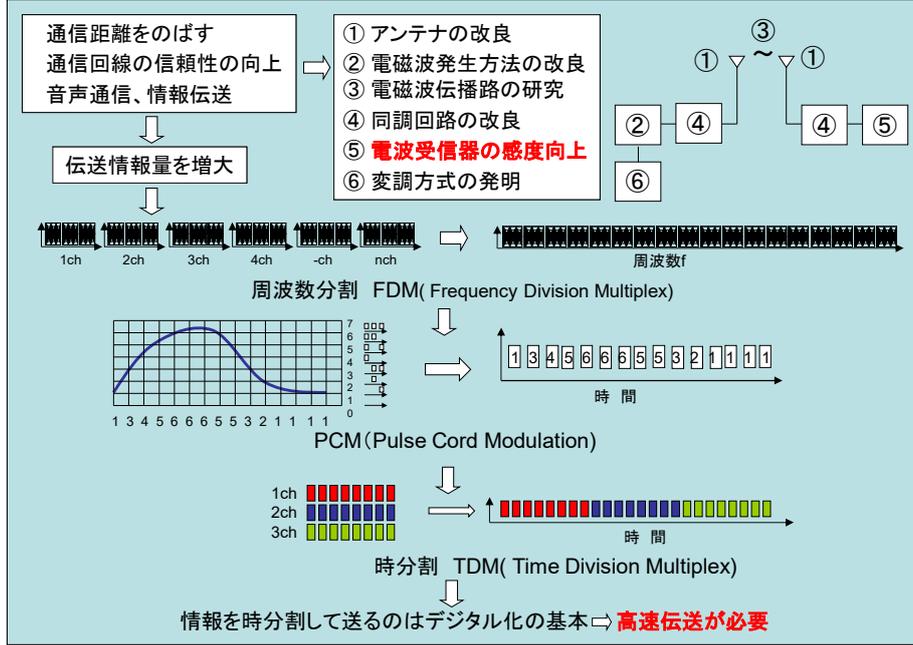
現代の無線通信技術(1)一周波数分割多重



現代の無線通信技術(2)PCM、時分割多重



無線通信システムの改良の流れ(但し、基本は1900年前後に既に確立)



八木アンテナ(1925)

1925年、東北大学において八木、宇田がダイポールアンテナの実験をしていたところ、近くに置いた金属棒の位置により受信電界が著しく変化する現象を発見する。

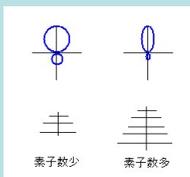
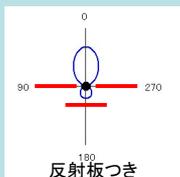
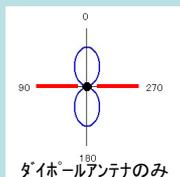
1926年、八木アンテナの特許出願

1928年、八木が米国で講演し、高い評価を受ける。

1930年、米国で八木アンテナは飛行機の誘導装置に応用する。

1940年、米国はレーダーに八木アンテナを使用。

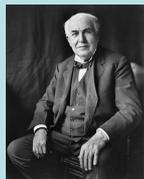
1942年、八木アンテナ・レーダーによる米国の奇襲攻撃により、日本はミッドウエー海戦で大敗。その後、戦局が大きく変わる。



ラジオ関連技術の年表

1855年	ガイスラー管(真空放電管)の発明(ブリュッカー、ガイスラー)	
1859年	陰極線の発見(ブリュッカー)	1864年 電磁場理論(マクスウェル)
1874年	鉱石検波の発見(ブラウン)	
1875年	電磁場による帯電粒子の曲りの発見(クルックス)	
1879年	実用的な炭素電球を開発(エジソン)	
1883年	2極真空管の発明(エジソン)	1888年 電磁波の発見(ヘルツ)
1896年	ブラウン管を発明(ブラウン)	1899年 大西洋横断通信(マルコ)
1902年	ヘテロダイン検波の発明(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	2極真空管の整流作用の発見(フレミング)	
1906年	3極真空管(オーディオン)の発明(ドフォーレ) 世界初のラジオ放送(フェッセンデン) 鉱石検波器を発明(ダンウッド)	
1912年	3極真空管の増幅作用の発見(ドフォーレ) 再生方式の発明(アームストロング)	
1914年	4極真空管の発明(ショットキー)	
1916年	2極マグネトロン(ハル)	
1917年	スーパーヘテロダイン方式の発明(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)の中波放送開始 八木アンテナの発明(八木、宇田)	
1926年	電子式テレビジョンで「イ」の字の伝送に成功(高柳)	
1929年	5極真空管の発明(フィルップ社)	
1933年	FM方式の発明(アームストロング)	
1940年	進行波管の発明(コンプナー)	
1953年	日本でテレビの本格放送開始	
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	

エジソンの電球(1879)とフレミングの二極真空管(1905)



Edison
1847-1931

- 1878年 イギリスの化学者スワンは木綿糸を炭化したフィラメントを作り、ガラス管の真空処理を行った炭素電球を作ったが寿命は2~3時間しかなかった。
- 1879年 エジソンは真空ポンプの改良と炭素繊維の選定、炭化法の改良を行い、40時間点灯できる実用的な炭素電球の開発に成功。
- 1883年 電球表面が次第に黒化することを防ぐため、電球中に金属板を入れ、金属板にプラス、フィラメントにマイナスの電圧を加えると金属板からフィラメントに電流が流れることを発見。(エジソン効果)
しかし、この現象そのものには興味をもたなかった。

技術とは、自然の事物を巧みに改変・加工し、実用のための手段であり、その知識体系そのものが研究対象ではなかった。



Fleming
1849-1945

- 1905年 フレミングはエジソン効果の試験を行い、整流器としての性能が得られたため、フレミング・バルブ(二極管)の特許を申請し、無線受信回路の検波器として用いる。

科学とは、自然の法則性を明らかにする(=自然哲学)ことを目的とし、その知識体系そのものが研究対象であった。



科学と技術とは？

科学とは、自然の法則性を明らかにする(=自然哲学)ことを目的とし、その知識体系そのものが研究対象であった。近代科学は17世紀に誕生。

技術とは、自然の事物を巧みに改変・加工し、実用のための手段であり、その知識体系そのものが研究対象ではなかった。
(科学と技術の融合以前は匠の技が最高の技術であった)

近代科学はデカルトとニュートンより始まる

デカルト(Rene Descartes, 1596-1650)

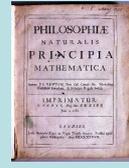
方法序説(1637)



対象を構成する要素に分解し、各要素の性質を解明することが重要で、その要素の性質を総合すると対象の性格も分かる。
(要素還元論)

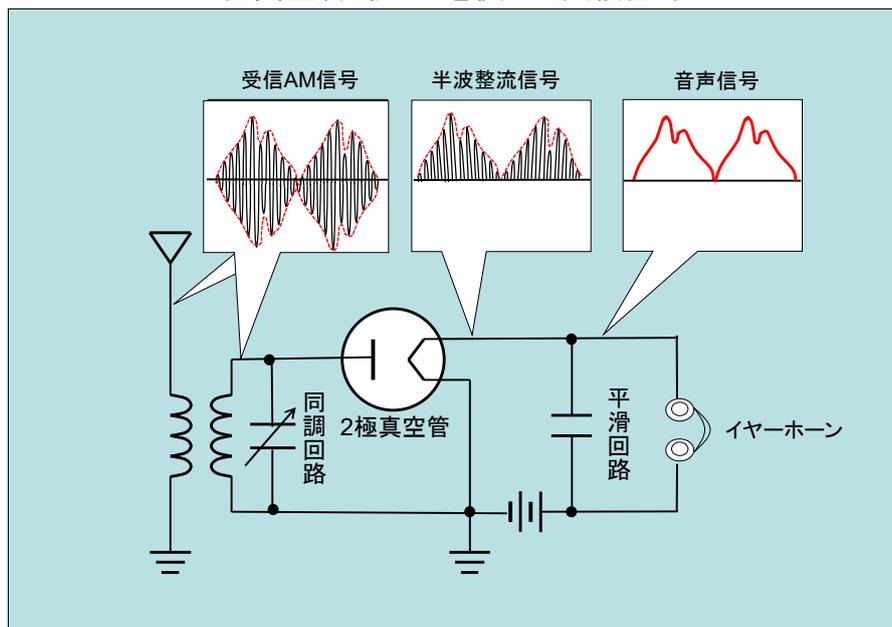
ニュートン(Issac Newton, 1642-1727)

自然哲学の数学的的原理(1687)



運動の3つの基本法則より、ユークリッド幾何学的論理構成により力学現象を説明。
質点、直線運動、遠隔作用というモデルの導入
(機械的運命論)

二極真空管(検波)を使った受信回路



ド・フォーレの三極真空管(1906)と増幅作用の発見(1912)

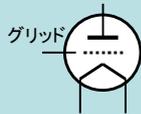


L. De Forest
1873-1961

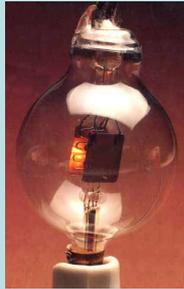
1906年、ドフォーレは三極真空管の特許を申請。
プレートとカソードの間にグリッド(ジグザグの金属線)
を入れたもので、単なる検波管として考えていたが、
1912年、増幅作用があることが発見された。



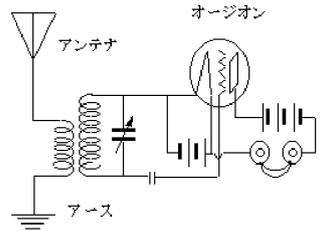
科学とは、自然の法則性を明らかにする(=自然哲学)こと
を目的とし、その知識体系そのものが研究対象であった。



三極管の回路記号

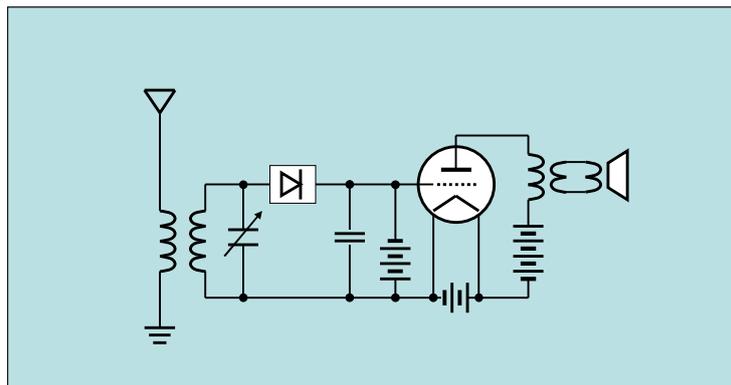


ドフォーレ3極管の外観



ドフォーレの特許

三極真空管の増幅作用でスピーカーを鳴らす 初期(古典)ラジオ(ストレート方式)



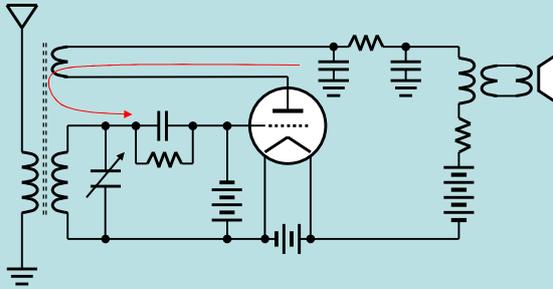
鉱石ラジオに比べて改善されたとはいえ、
十分な感度と音量があるとは言えない状態であった。

受信回路方式の改良(1)－再生方式(1912)



E. H. Armstrong
1890-1954

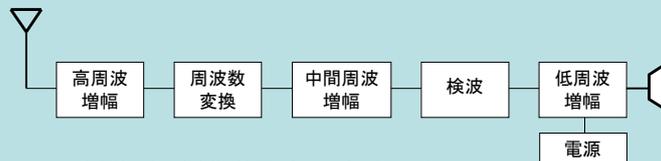
1912年、アームストロングは増幅した出力信号の一部を入力側に戻し(正帰還)、受信機の感度を上げる再生方式を発明する。



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。



各回路に専用真空管が必要であり、日本においては初段に高周波増幅回路がある場合、6球スーパーと呼び、高周波増幅回路がない場合、5球スーパーと呼んだ。



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。

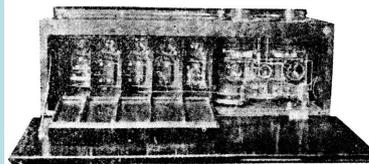
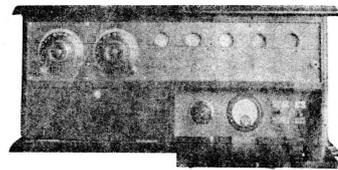
アームストロング、スーパーヘテロダインに関する記事。(1924年)



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てつ押



右中に巻録
左手にラッ
パンを携へて
バムビ
テへ行く處



中間周波増幅5段で増幅率
数1,000~10,000



最初期のラジオ放送と古典ラジオの歴史の概要

- | | |
|---------------|--|
| 1906年 | 世界初のラジオ放送(実験段階) |
| 1914年
~18年 | 第1次世界大戦 |
| 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 Model10A 誕生
Crosley Model51 誕生 |
| 1925年 | 東京放送局(JOAK)の放送開局(日本初) |
| 1926年 | RCA Raiola26 誕生
Beckly Ration 誕生 |
| 1927年 | Atwater Kent Model33 誕生
日本製ラジオは再生式中心 |

※ 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連合を結成した。



ラジオの基本技術・性能は1920年代でほぼ確立。

真空管の時代遍歴

1905年	二極真空管の発明(整流器として)(フレミング)
1906年	三極真空管(オーディオン)の発明(ドフォーレ)
1912年	三極真空管の増幅作用の発見(ドフォーレ)
1914年	四極真空管の発明(ショットキー)
1922年	真空管UV-201Aの登場
1929年	五極真空管の発明(フィルップ社)
1939年	MT管1R5,1T4,1S5,3S4などが登場
1948年	双三極管12AT7,12AU7,12ATX7などが登場

1910年

1920年

1930年

1940年

1950年



初期の球形



ナス管



ST管



MT管

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