

エレクトロニクス科学史

那須科学歴史館 館長 田澤勇夫

「無線通信技術の歴史」

- 電磁波の発見への道
- 無線通信技術の基礎の確立への道
- 実用的な無線通信システムへの改良への道
 - ・ アンテナの改良
 - ・ 電磁波発生方法の改良と変調・復調方式の発明
 - ・ 受信機の感度向上への道
- 現代の無線通信技術

Maxwellの予言－光もγ線も電磁波

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

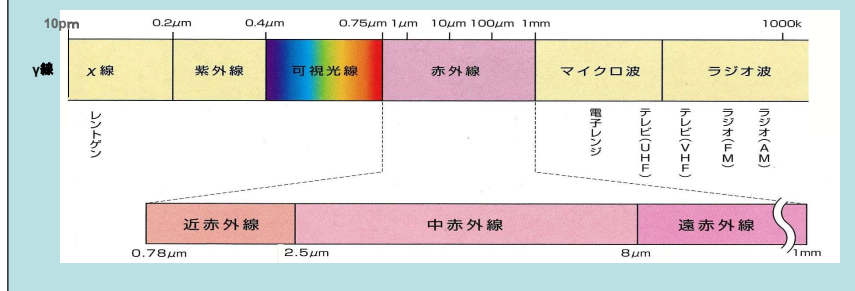
真空中の誘電率 $\epsilon_0 \approx 8.854 * 10^{-12} (C^2 / Nm^2) (C^2 \cdot s^2 / kgm^3)$

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

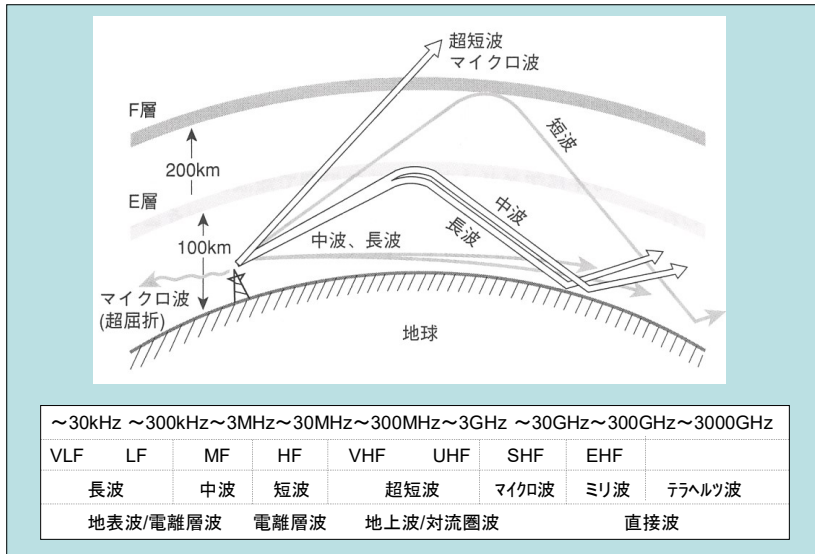
(速度)=(周波数)*(波長) $C = f * \lambda$

F=1000kHzのラジオ波は $\lambda=300m$, f=300MHzのTV-UHFは $\lambda=1m$

携帯の電波は $\lambda=10cm$, f=3GHz, 近赤外線は $\lambda=1\mu m$, f=3*10¹⁴GHz



電波の周波数と電波伝搬路



電磁波の割り当て

VHF (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	

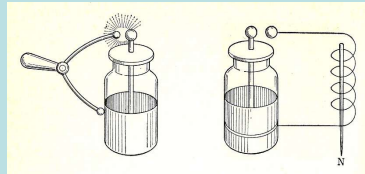
電磁波の発見への道

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。

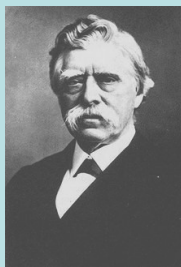
1824年、F. サバルはライデン瓶の火花放電が点滅、振動し、
また、ソレノイドを通じて放電させるとその中の鉄片が磁化されることを観察。

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)



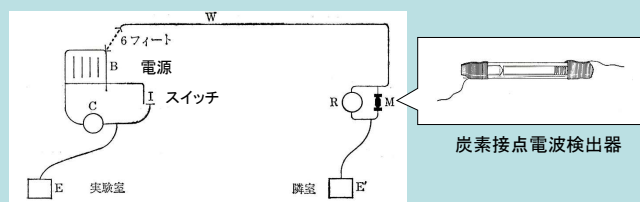
David Edward Hughes
1831-1900

マイクロフォンと
印刷電信の発明者

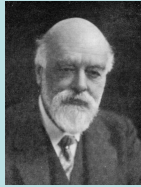
炭素マイクの研究中、電気火花の影響を受けて誤動作していることに気付く。
1879年、炭素棒を用いた電波検出器を発明し、隣室で火花信号を受信することに成功した。

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こと。
 - もともと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、ヘルツの陰に埋もれてしまった。

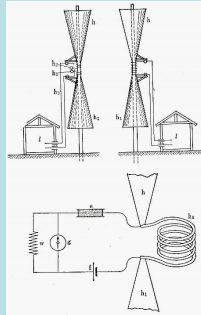


ロッジによる電磁波の研究(1884年～)



Oliver Lodge
1851-1940

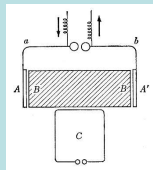
火花放電ギャップは強い電磁波しか検出しませんが、1884年、ロッジは好感度な電波検出器のコヒーラを再発見した。また、1898年、静電容量を調整する共振アンテナを発明したが、ロッジは学者であったため、無線通信の実用化にあまり興味がなかった。



Herzの実験 (1888年)



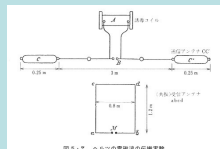
H. R. Hertz
1847-1894



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。

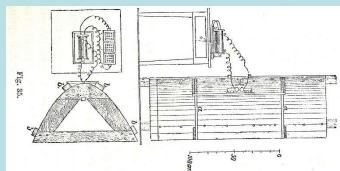
連続電磁波発生

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。

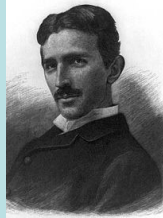
指向性アンテナ(パラボラなど)



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。

無線通信技術の基礎の確立への道

テスラの無線電力伝送(1893年)



N Tesla
1856-1943

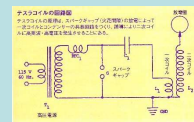
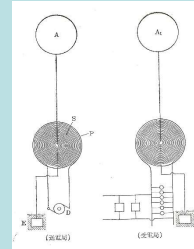
1893年、無線電力伝送を試みて失敗するが、その着想は非常に優れていた。



- ・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・エネルギー伝送につながる。



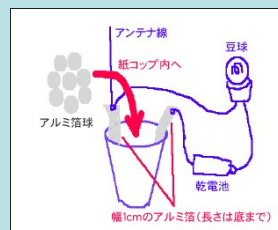
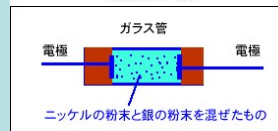
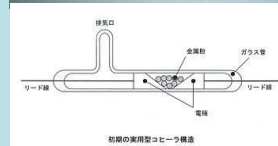
コヒーラー電波検知器

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



マルコニーの大西洋横断通信実験

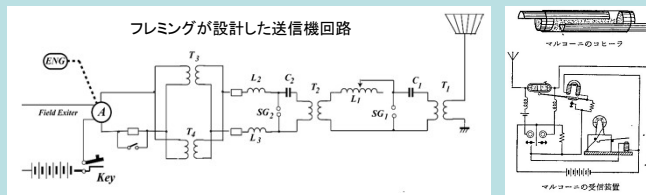


G. Marconi
1874-1934

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。

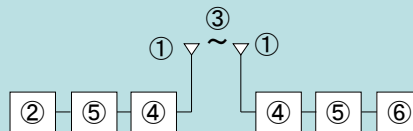


実用的な無線通信システムへの改良への道

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

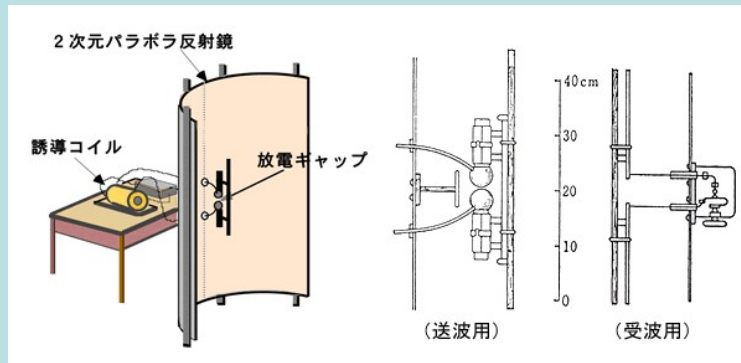


- ① アンテナの改良
- ② 電磁波発生方法の改良
- ③ 電磁波伝播路の研究
- ④ 同調回路の改良
- ⑤ 受信器の感度向上
- ⑥ 変調/復調方式の発明

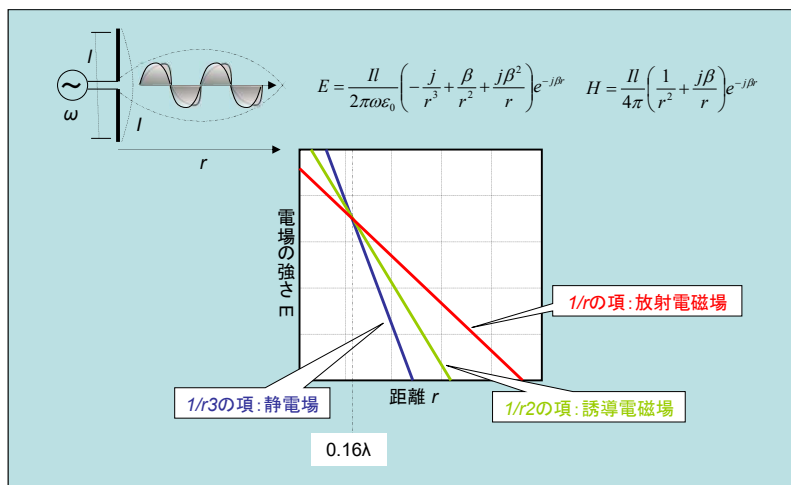


アンテナの改良

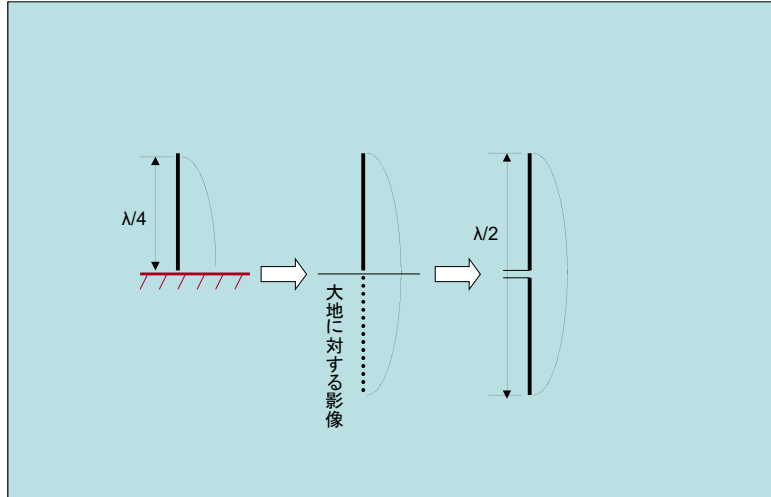
ヘルツはパラボラアンテナで実験していた。
 ↓
 通信距離を2m位から20m位まで伸ばした。



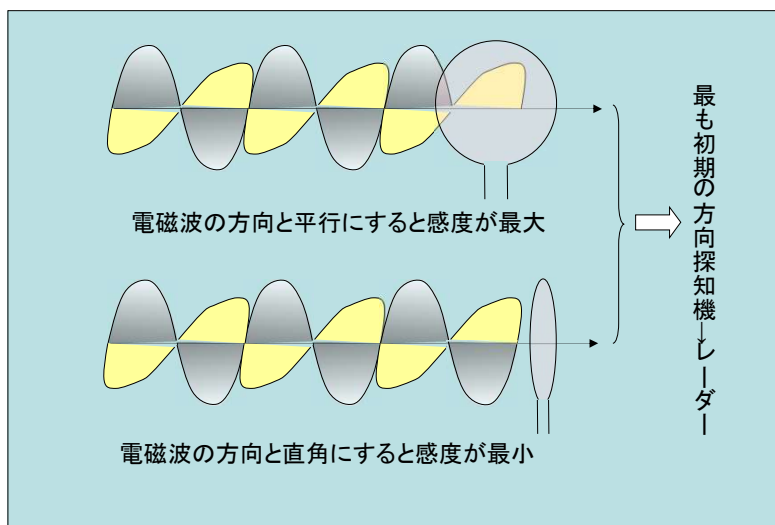
ヘルツの送信アンテナはアンテナの基本
 ↓
 $\lambda/2$ ダイポールアンテナ



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



ヘルツの受信アンテナはループ・アンテナの原型



アンテナの特性向上には

効率よく電磁波を遠くまで飛ばすには、アンテナの

- ・共振現象
- ・指向特性
- ・放射抵抗

の概念を確立する必要があった。

電磁波発生方法の改良と変調・復調方式の発明 フェッセンデンの音声信号送信機



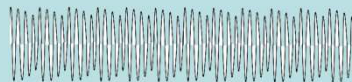
Reginald Fessenden
1866-1932

火花送信機の不連続な波形では音声信号を送れないが



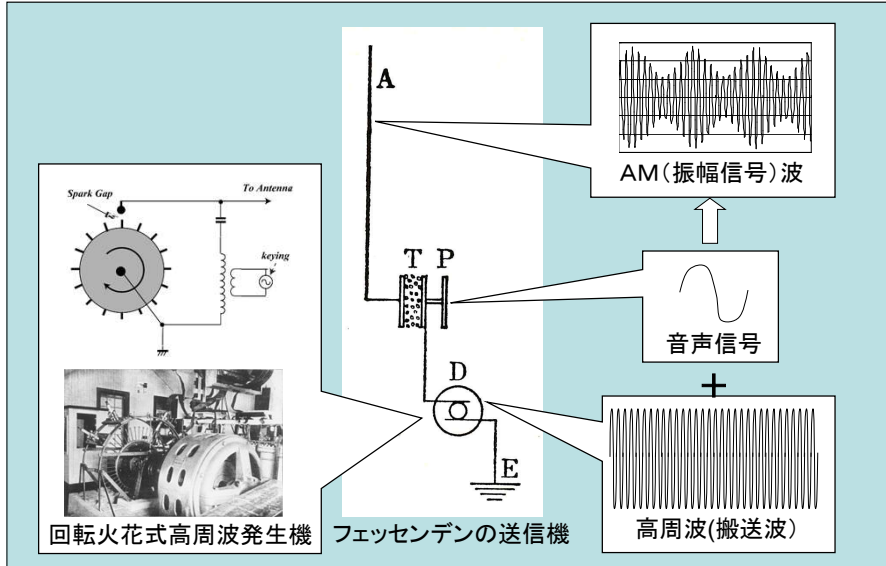
1902年、連続波を使えば振幅が変化することで、
音声通信が可能と考える。

↓
AM変調の発明

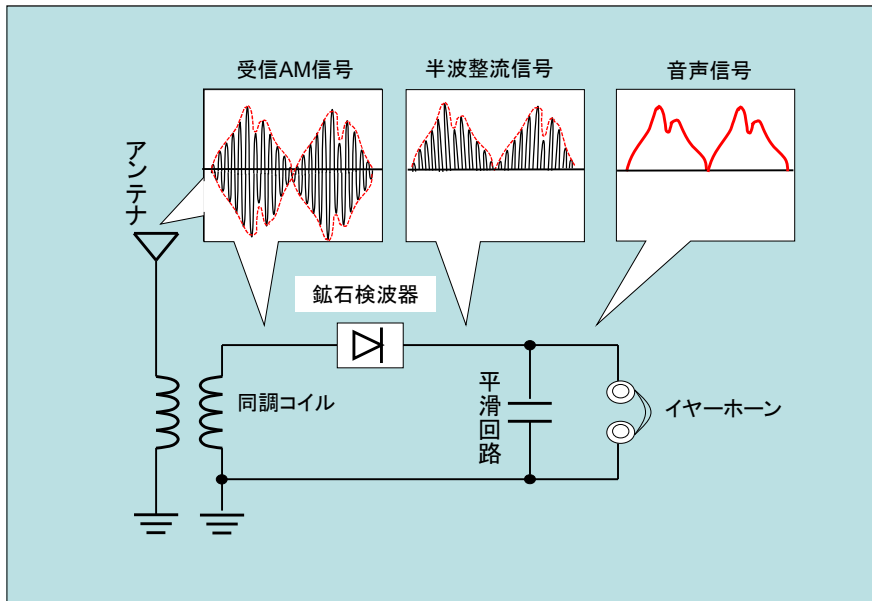


テスラの高周波発電機に目を付ける。

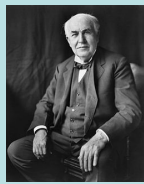
フェッセンデンによる振幅変調AMの発明(1902) ラジオ試験放送開始(1906)



鉱石検波器を使った受信回路の仕組み



エジソンの電球(1879)の発明と二極真空管



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。

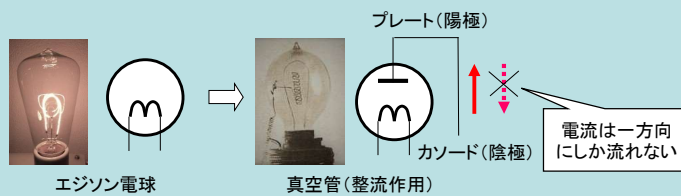
1879年 エジソンは真空ポンプの改良と炭素繊維の選定、炭化法の改良を行い、40時間点灯できる実用的な炭素電球の開発に成功。

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。

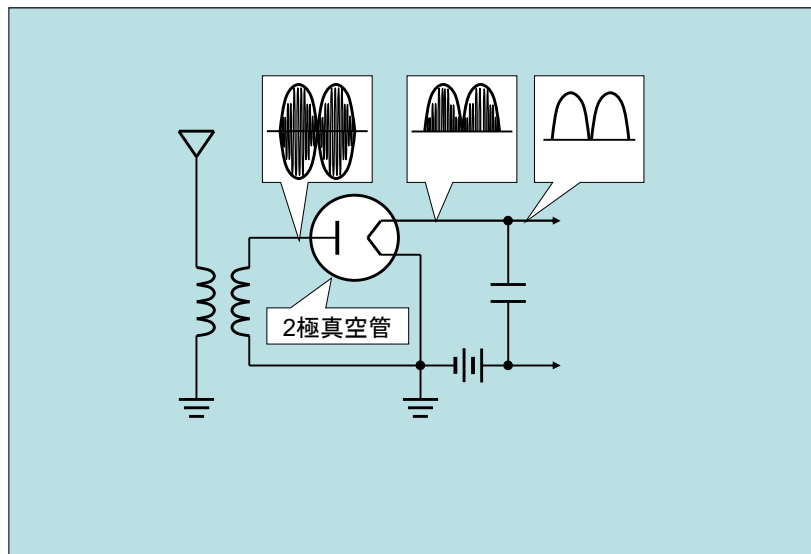


Fleming
1849-1945

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。



二極真空管(検波)を使った受信回路



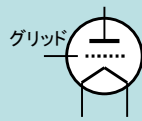
受信機の感度向上への道 ド・フォーレの三極真空管(1906)と増幅作用の発見(1912)



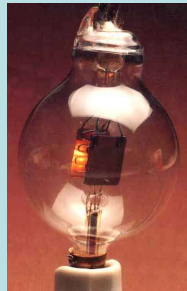
L. De Forest
1873-1961

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。

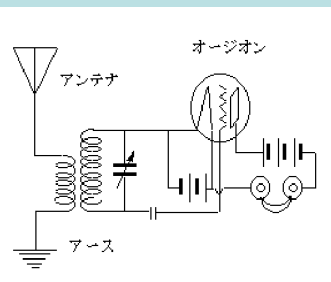
1912年、増幅作用があることが発見された。



三極管の回路記号

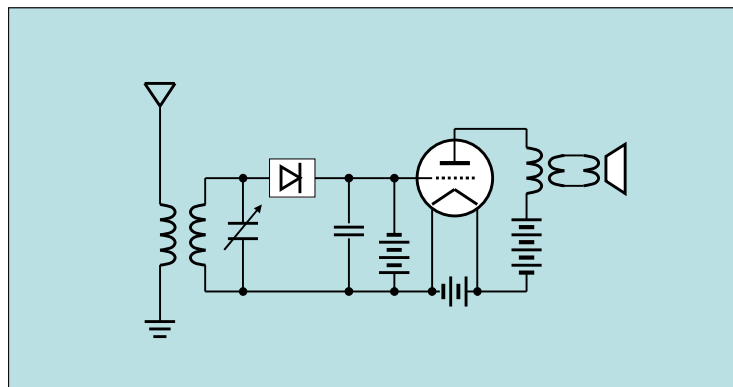


ドフォーレ3極管の外観



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)



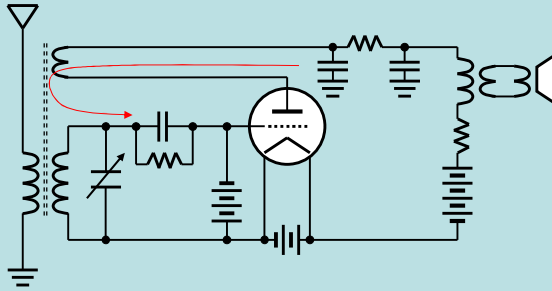
鉱石ラジオに比べて改善されたとはいえ、
十分な感度と音量があるとは言えない状態であった。

受信回路方式の改良(1)－再生方式(1912)



E. H. Armstrong
1890-1954

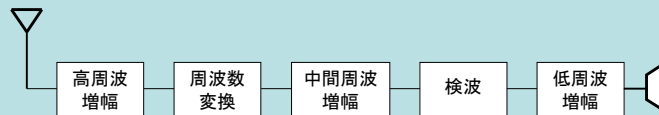
1912年、アームストロングは増幅した出力信号の一部を入力側に戻し(正帰還)、受信機の感度を上げる再生方式を発明する。



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。

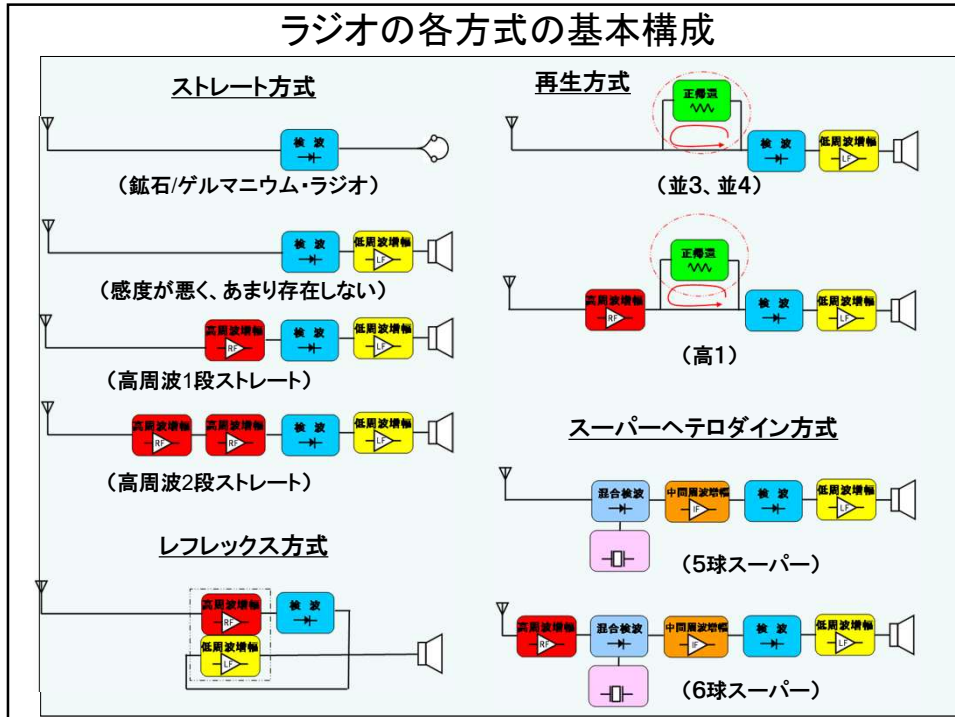
スーパーヘテロダイン受信方式の発明(1917)

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。



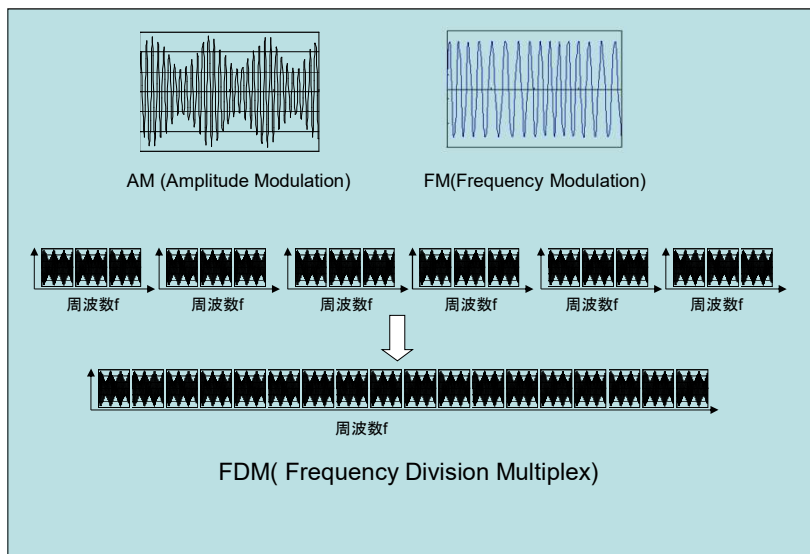
当時は非常に高価なラジオ方式であった。
21世紀の現在においても、大半のAMラジオの基本構成である。

ラジオの各方式の基本構成

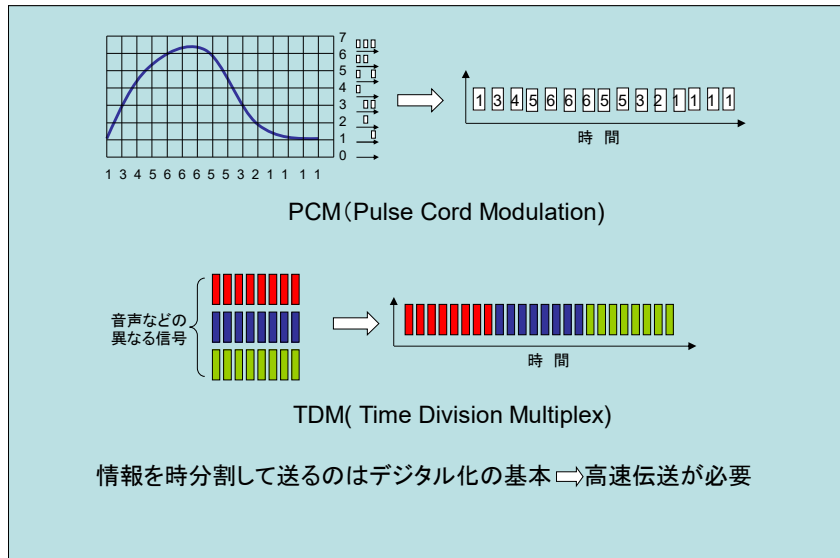


現代の無線通信技術

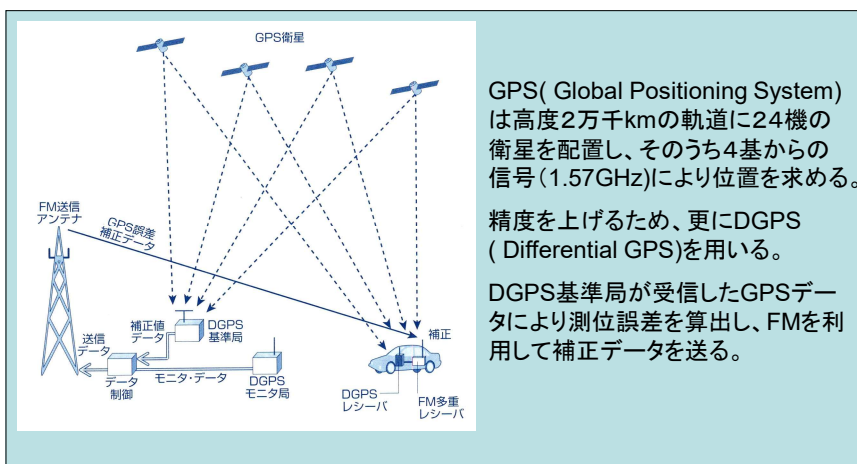
現代の無線通信技術(1)一周波数分割多重



現代の無線通信技術(2)ーPCM、時分割多重



現代の無線通信技術(3)ーGPS



無線LANルータ

アクセスポイントは有線LANと無線LANを相互変換し、ルータはその機能の上に、家庭内LANとインターネットを仲立ちするセキュリティー機能などを持っている。



■無線LAN部	
規格	IEEE802.11n/IEEE802.11g/ IEEE802.11b/ARIB STD-T66
周波数帯域	2.412~2.472GHz(中心周波数)
チャンネル	1~13ch
伝送方式	11n: OFDM方式 11g: OFDM方式 11b: DS-SS方式
データ転送速度 (理論値)	11n: 最大300Mbps(MIMO使用時) 11g: 54/48/36/24/18/12/9/6Mbps 11b: 11/5.5/2/1Mbps
アクセス方式	インフラストラクチャ(親機)
アンテナ方式	所蔵アンテナ/アダプタ付(種類別2本、MIMO対応)
セキュリティー	SSID(ステルス設定可)、マルチSSID、 WEP(64/128ビット)、 WPA-PSK(TKIP)、WPA2-PSK(AES)、 MACアドレスフィルタ
設定方式	WPS(ボタン搭載)

Wi-Fi(Wireless Fidelity)
国際規格IEEE802.11aの愛称
MIMO(Multiple-Input and
Multiple-Output)
送・受信機に複数のANTを設け通信
品質の向上を図る。
OFDM(Orthogonal Frequency
Division Multiplexing)
直交周波数分割多重(デジタル変調)
DS-SS(Direct Sequence Spread
Spectrum)
直接拡散スペクトル拡散
Mbps: デジタル信号の伝送速度

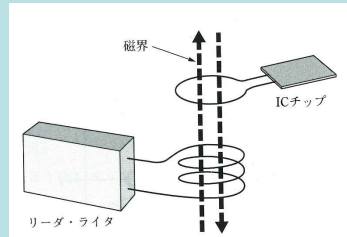
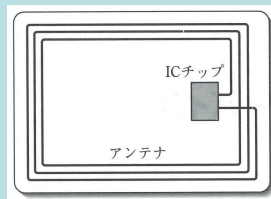
WiFi(無線LAN)IEEE802.11は基本的に免許不要

世代	規格	策定時期	二次変調方式	周波数帯	公称速度	空間ストリーム	チャンネル幅	備考(日本国内)
1	IEEE 802.11	1997年6月	DSSS	2.4 - 2.5GHz	2Mbps	1	22MHz	免許不要
2	IEEE 802.11b	1999年10月	DSSS/CCK	2.4 - 2.5GHz	11Mbps / 22Mbps	1	22MHz	免許不要
3	IEEE 802.11a	1999年10月	OFDM	5.15 - 5.35GHz 5.47 - 5.725GHz	54Mbps	1	20MHz	5.15 - 5.35GHz: 屋内の利用に限り 免許不要 5.47 - 5.725GHz: 屋内外に問わず 免許不要
	IEEE 802.11g	2003年6月	OFDM	2.4 - 2.5GHz	54Mbps	1	20MHz	免許不要
	IEEE 802.11j	2004年12月	OFDM	4.9 - 5.0GHz 5.03 - 5.091GHz	54Mbps	1	20MHz	要免許、電力など 一定制限内の端末 のみ免許不要

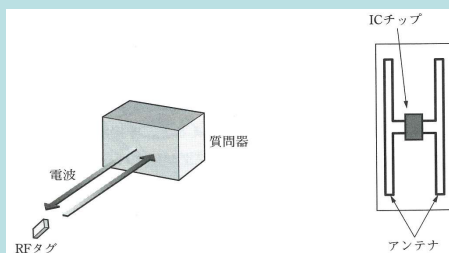
現代の無線通信技術(5)－ICカード



ICカードの1次側コイルとリーダ・ライタの2次側コイルの電磁誘導(ファラデー)を利用

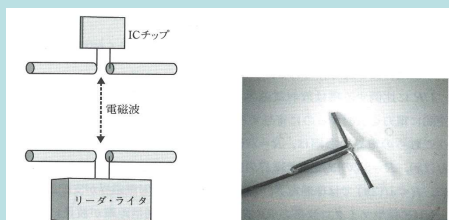


現代の無線通信技術(6)－RFタグ



質問器(リーダ・ライタ、など)からの要求に応じて、RFタグ(応答器)に情報を書込んだり、情報を読出したりする。

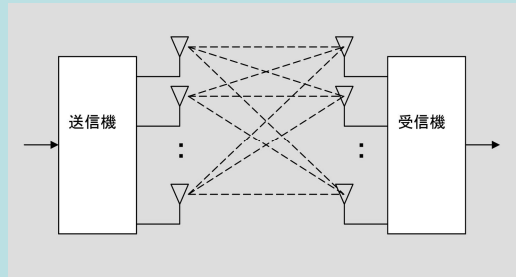
アンテナにはダイポール・アンテナが用いられている。



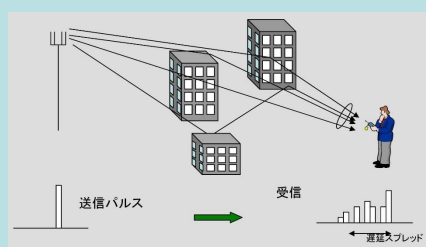
現代の無線通信技術(7)ーソフトウェア・アンテナ

送信と受信側に複数のアンテナ素子と送受信回路をもつことにより、安定した高速化通信が可能になる。

これをMIMO(Multi-Input Multi-Output)と言う。



フェージング対策

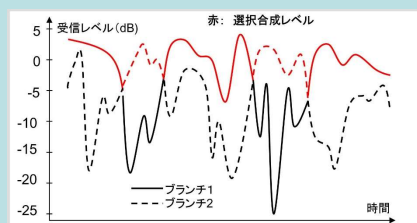


携帯基地局と計端末の間に建物などの障害物が多いと複数の伝搬路が存在する。(マルチパス)

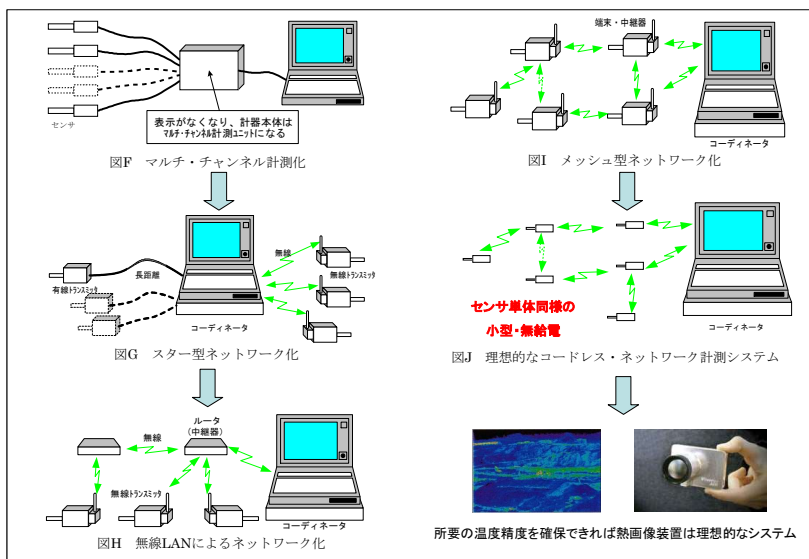
各伝搬路からの電磁波の干渉により受信強度は大きく変動する。(フェージング)

その対策として複数のアンテナを設けて、その出力を合成することにより安定した受信強度を得る。

(ダイバシティ)



現代の無線通信技術(8) - センサ・ネットワーク



計測のネットワーク化、データベース化

各社から農業用無線センサ・ネットワークが続々登場

<h3>NECなどのField Server</h3>	<h3>クロスボアの 農業用センサネット「eKo」</h3> <p>ハイテク農業・屋外環境モニター用無線センサネット</p> <p>☆☆☆☆☆</p> <p>信頼性に優れ リーズナブルなコストであり</p> <p>YouTube</p>	<h3>ティアンドディの 無線ネットワーク</h3> <p>食品工場内の温度・湿度・電圧などを記録</p> <ul style="list-style-type: none"> - 無線によるデータ伝送 - 無線LANに接続して無線LANルーターを介して - 無線LANルーターの無線LAN機能で無線LANを構築 - パソコン上で専用監視ソフトウェアをインストール - パソコン上で専用監視ソフトウェアをインストール - 農業用無線LANに接続してデータ伝送 <p>ビニールハウス内の温度・湿度記録</p> <p>無線LAN 無線LANルーター パソコン</p>
-----------------------------	--	---