

電磁波と現代生活

電気電子工学科助教授

柏 達也

1. はじめに

電磁波（電波とも呼ばれる）は現代生活の至る所で用いられています。通信、放送、計測、加熱分野という現代的な工学分野で用いられています。電磁波は直接には目で見えないので、その実体が分かりづらく、この分野を敬遠する学生も多いようです。電気工学は土木や建築といった古代からある分野と異なり現代になって現れた工学分野です。電気工学の一分野である電磁気学としては静電気や磁気は古くから知られていましたが、振動する場である電磁波は約100年程前にやっと知られる様になりました。電磁波は1864年頃にイギリスのマクスウェルによって予言され、1888年頃にドイツのヘルツにより実証され、1896年頃、イタリアのマルコーニにより工学への応用の初めとして無線通信への応用がなされた極めて新しい分野です。本講座では電磁波とは何か、電磁波の工学への応用について講演を行います。また、光は電磁波の一種であり、日常目にする光に関する自然現象についても説明し電磁波そのものが如何に身近な存在であるかを示そうと思います。

2. 電磁波とは？

2.1 電磁界方程式

いきなり、難しい式を使いますが、正しく理解をするにはやはり数式を用いざるを得ないので。分からなくて結構ですが頭の片隅に置いて戴ければ結構です。

電磁波はマクスウェルの電磁方程式で記述されます。

マクスウェルの方程式

$$\text{rot } \mathbf{E} = - \frac{\mathbf{B}}{t} \quad (1) \text{ (ファラデーの電磁誘導則)}$$

$$\text{rot } \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\mathbf{D}}{t} \quad (2) \quad (\text{D}/t=0\text{の時、アンペールの回路則})$$

$$\text{div } \mathbf{D} = \rho \quad (3) \quad (\text{電界に関するガウスの定理})$$

$$\text{div } \mathbf{B} = 0 \quad (4) \quad (\text{磁界に関するガウスの定理})$$

$$\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E}, \mathbf{B} = \mu \mathbf{H}, \mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \quad (5)$$

divはベクトルの発散、rotは回転を表す空間微分演算子です。 $\frac{\partial}{\partial t}$ は時間変化を表す微分演算子です。ここで、E:電界、H:磁界、D: 電束密度、B:磁束密度、J:電流、 ρ :電荷という物理量です。また、 ϵ :誘電率、 μ :透磁率、 σ :導電率という媒質固有の定数です。真空中においてマクスウェルの方程式は次式のように簡単な形に書き表されます。

$$\text{rot } \mathbf{E} = - \mu \frac{\mathbf{H}}{t} \quad (6)$$

$$\text{rot } \mathbf{H} = \frac{\mathbf{E}}{t} \quad (7)$$

上記の式は波動の性質を持った式です。通常、電波あるいは電磁波と言われるのはにこの式によって運ばれる波のことです。即ち、電磁波は電界と磁界によって運ばれる波であることが理解できます。ニュートン力学では物体を叩くと物体は叩いた方向に動き人間の直感に馴染みますが、電磁波は電界を振動させると磁界が電界を取り巻くように渦を形成します。その磁界が振動すると今度は電界が磁界を取り囲むように渦を作ります。この辺が人間の直感に馴染まず、初心者には分かりづらい所であります。

マクスウェルはアンペールの式が不完全である事を見い出しました。アンペールの式に $\frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$ の項を追加すると電氣的現象と磁氣的現象の対称性が現れることを発見しました。このことにより、世界で初めて電波の存在を予言したのでした。

2.2 物理的説明

さて、次に物理的に分かり易く考えてみましょう。電極を高周波電圧源Vで励振します。すると、回路に交流電流Jが流れます。この時、電極間は

真空ですから電極間には伝導電流 J は流れることは出来ません。そこで、マクスウェルは電極間に変位電流 D / t と云う新しい種類の電流を定義して回路中で電流が連続的に流れていると解釈してみました。この変位電流の存在を考慮することにより電磁波の存在を予言する事が可能となりました。変位電流を考えることにより波の性質を持った電気的かつ磁氣的な波、即ち電磁波が発生するのです。電極間で発生した電磁波は遠方まで伝わります。電磁波は真空中でも伝わるので宇宙の彼方まで伝わります。一方、音波は空気など媒質がなければ伝わらないので宇宙では伝わりません。

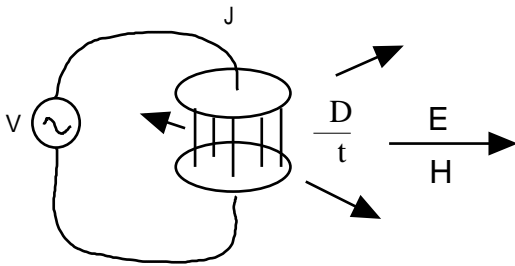


図1 変位電流の発生

電極で発生した電磁波は遠方では下図のように電界と磁界がそれぞれ直交する面内で振動しながら伝搬します。音波が波の進行方向に振動しながら伝わるの対し、電波は進行方向に直角な方向に振動しながら伝わります。この波は $3 \times 10^8 \text{ m/s}$ の速さで伝わります。光速も $3 \times 10^8 \text{ m/s}$ で同じであることより、マクスウェルは光は電磁波であることも予言しました。

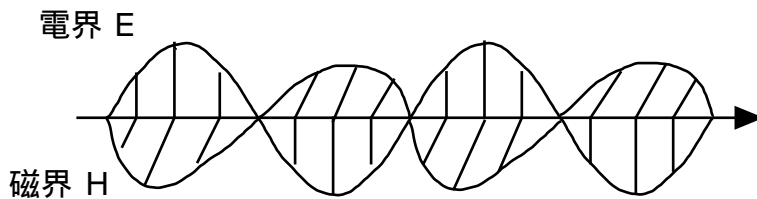


図2 電磁波の伝搬

テレビや無線機に届く電波は送信局より十分遠いので図2のような状態で

届いています。

3. 電磁波の周波数による性質の違い

電磁波に限らず波は周波数によりその性質が異なってきます。ここで、周波数とは電磁波が一秒間に何回振動するかを表す量で、単位はHz（ヘルツ）を用います。周波数とその性質は下記のようになります。

高い周波数	直進性、光の性質
中間的周波数	回折（直進性と波動性）
低い周波数	波動

例として今、山があると考えてみます。左側から電波が到来しています。周波数が低いと山陰への回折があり、山陰にある家でも放送波を受信することが出来ます。それに対し周波数が高くなると光のように直進性が強くなり、山陰の家では放送波が届かなくなります。テレビやラジオのVHF帯以下の周波数では山の大きさに対して回折現象が起こるので一般的に山陰でも放送波が受かるのです。

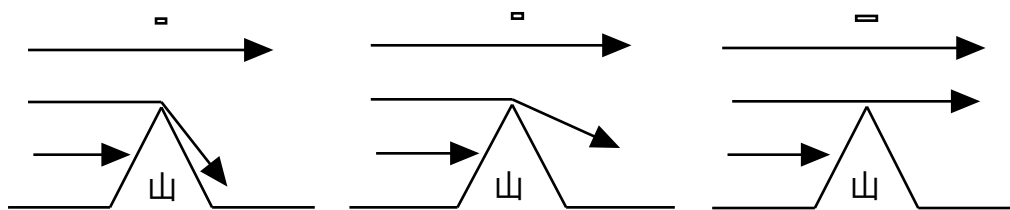


図3a 低い周波数

図3b 中間的周波数

図3c 高い周波数

4. 電磁波の周波数の分類と利用形態

電波は様々な周波数で様々なサービスに用いられています。電磁波はその周波数により伝搬特性が大きく異なります。図4に電波の周波数による分類を示します[2]。なお、正確には電波とは電磁波のうち周波数が3000GHz（3THz）以下のものを言います。

図4 電磁波の周波数による分類

興味のある部分をもう少し具体的に説明します。

MF (中波) AM放送 (電離層で反射、長距離伝搬可能)
HF (短波) 短波放送 (電離層で反射、長距離伝搬可能)
VHF (超短波) FM放送、TV放送 (中距離、長距離での利用)
UHF (極超短波) TV放送 (中距離、短距離での利用)
SHF (センチ波) 衛星放送 (光の性質に近づく)

ここで、電離層とは上空100km付近に存在する気体が電離している層のことで低い周波数の電波を反射する性質を持っています。以上のことを図にすると図5の様になります。

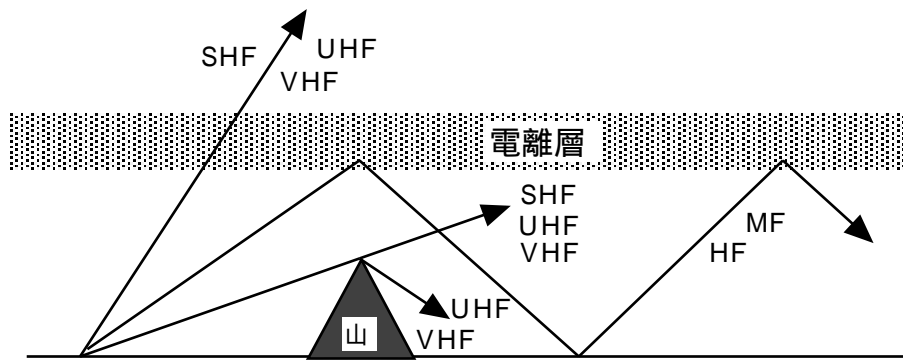


図5 電波伝搬特性の周波数による違い

5. 光

前章で説明したように光は電磁波の一種です。周波数が3THzから30000THz位の電磁波です。通常の放送や通信に使う電磁波が目に見えないのに対し、光の周波数帯の電磁波は人間の目に色として認識されます。また、周波数が相当異なるためその物理的性質が異なります。そのため、電波と光は別物と感じられますが、基本的には同じ電磁波です。

先ほど説明したように電磁波が波としての性質が強くなるか、光としての性質が強くなるかは電磁波の波長と作用する物体の大きさに依存します。日常目にするものとしては気象現象があります。太陽からの光が大気中の水滴や氷晶、ちりなどにぶつかり様々な現象が起こります。

5.1 幾何光学

波長に比べて物体の大きさが非常に大きい場合におこります。反射、屈折などはこの領域でおこります。例えば、雨の日には光の波長に比べ非常に大きな雨粒が存在します。この場合、光の性質が強くなり反射現象や屈折現象が起こり虹となって現れます。雨粒でなく氷の結晶の場合は幻日という現象がおこります。

5.2 波動光学

物体の大きさが波長と同程度以下の場合におこります。大気中には光の波長に比べて小さなちりが沢山浮いています。この時、太陽光は波として

の性質が強くなります。これを数学的に解析すると周波数の高い光は強く散乱され、周波数の低い光はあまり散乱されないと云うことがわかります。青色の光は赤色の光にくらべ周波数が高いので、太陽光の内、青色の光が強く散乱されることがわかります。この青色光の散乱が空の色々な所で起こるので、空が青く見えるのです。即ち、この現象は電磁波の解析によって初めて解明された現象なのです。1897年頃イギリスのレイリーによって解明されました。

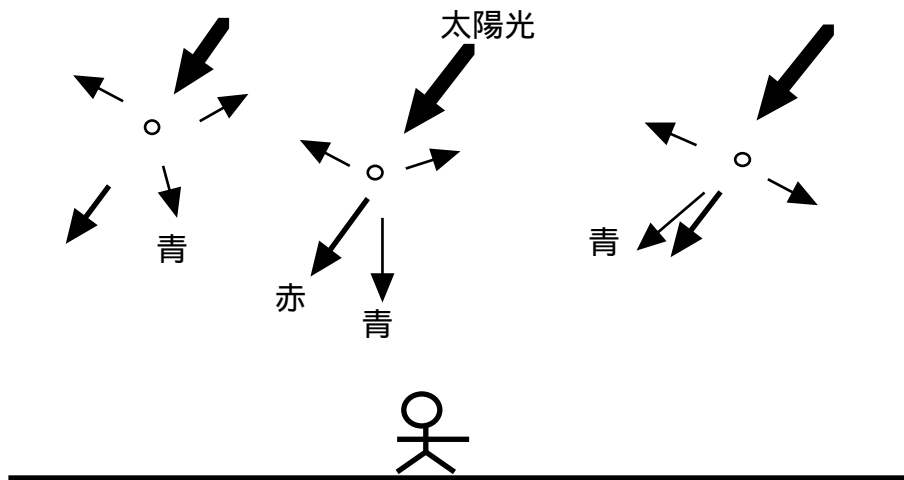


図6 空が青く見える理由

6. 通信、放送

電波が最も身近に感じられる分野だと思います。テレビ、ラジオ、携帯電話、PHSなど現代生活の必需品です。周波数帯は以下のようになっています。送信周波数（これを搬送波と呼びます。）に情報信号を載せて送信します。

テレビ	VHF (90MHz-222MHz)	UHF (470MHz-770MHz)
ラジオ	AM (525KHz-1600KHz)	FM (76MHz-90MHz)
携帯電話	800 MHz帯 , 1.5GHz帯	
PHS	1.9GHz	

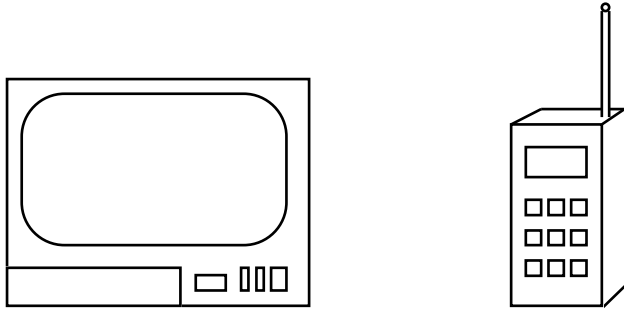


図7 テレビ、携帯電話

6.1 情報伝送の方法

周波数が高いほど情報伝送量が多くなります。

AM(amplitude modulation、振幅変調)

搬送波の振幅を変化させて情報を伝送する方式。

FM(frequency modulation、周波数変調)

搬送波の周波数を変化させて情報を伝送する方式。

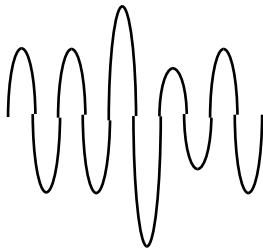


図8 AM波形

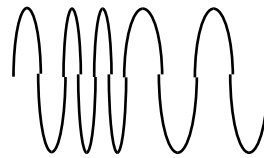


図9 FM波形

6.2 アンテナ

電波を送信即ち空間に放射するため、及び受信即ち空間から電波を受け取る時に必要な物がアンテナです。これが無ければ無線技術は成り立ちません。色々な種類のアンテナがありますが、身近なものとしては以下の

3つが挙げられます。

ダイポールアンテナ :

電磁波の波としての性質を利用しています。具体的には共振現象を利用しています。一般にはアンテナの長さが電波の半分の波長になる状態で使用します。携帯無線機で見かけるモノポールアンテナはダイポールアンテナの上半分を利用したものです。

パラボラアンテナ :

電波の光としての性質を利用したものです。アンテナ正面から到来した電波はパラボラ面（おわんの部分）で反射され正面に付いている小さなアンテナで受信機に送られます。

八木・宇田アンテナ :

アンテナを複数並べると指向性を鋭くすることが可能です。1926年頃に東北大学の八木秀次、宇田新太郎両氏によって考案されたアンテナであり、現在でも我々の家で良く見かける画期的なものです。

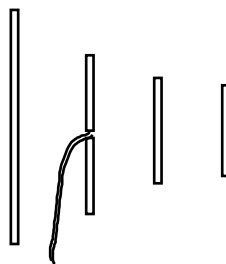
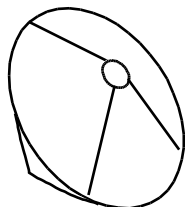
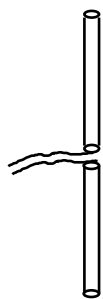


図10 ダイポールアンテナ 図11 パラボラアンテナ 図12 八木・宇田アンテナ

7. 計測

電波は計測の分野でも良く利用されています。物体との距離や速度を計るレーダ、人工衛星から地球に電波を照射して地球環境を計るリモートセンシング、宇宙から到来する電波を受信して宇宙を研究する電波天文学など様々な所で用いられています。ここでは、最も身近な例としてレーダを取り上げます。レーダよりパルス状に変調した電波を物体に向かって発射します。発射された電波は物体で反射されてレーダに戻ってきます。この時、電波が戻って来る時間を計測することにより物体との距離を計ることが出来ます。

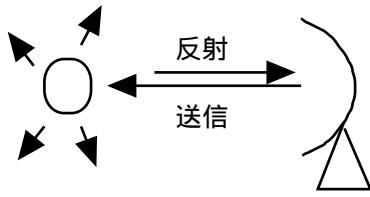


図13 レーダ

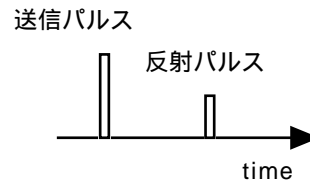


図14 送信波と反射波

8. 電磁波加熱

電磁波を媒質に照射すると電磁波が分子内に摩擦を引き起こし、発熱します。この時、電磁波のエネルギーが分子内の熱エネルギーへ変化します。この現象は特に水分子で強く起きます。また、周波数的にはマイクロ波帯で特に顕著となります。電子レンジの使用周波数はこのマイクロ波帯の周波数である2.45GHzであり、一般に食品に含まれる水分子を過熱して食品を暖めています。ガスを用いた調理が食品を外から暖めているのに対して、マイクロ波を用いた加熱は電磁波が食品内部まで浸透するので内部から過熱される特徴を持ちます。また、電子レンジの設計においては電波が外に洩れないように十分考慮して設計されています。因に、電子レンジは本場アメリカではMicrowave Oven（マイクロ波オーブン）と呼ばれております。マイクロ波を用いたオーブンなので、この名称の方が正しい呼び方ですね。

電磁波加熱は身近に見かける電子レンジの他、工業用として様々な所に用いられています。癌細胞が41度以上で死ぬ事を利用した癌の温熱療法（ハイパーサーミア）や木材の乾燥及び加工などに用いられています。

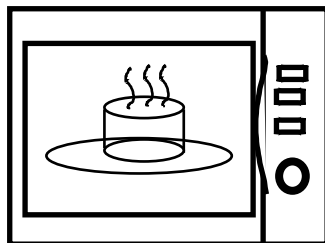


図15 電子レンジ

9. 電磁波と安全性

最近、電磁波の人体への影響が騒がれています。特にマスコミ、および関係企業が電磁波が人体に有害なのではないかと言及しています。しかしながら、現在のところ、真偽の程ははっきりしていないのが現状であり、各国で安全性に関する研究が盛んに行われている所です。一部には安全であることを証明せよという方々もいますが、完全に安全であると云うことを証明することはこの分野のみならず、非常に難しいことです。もう少し冷静に考えこの地球に多くの人間が住んでおり、基本的には高度な技術を用いることにより豊かな社会が形成されているということも考える必要があります。

実は、安全性という現実にとりましてそれ以上に問題なのが周囲の電磁波が自動車やロボットの電気回路に入って誤動作を引き起こし人身事故になる場合があることです。また、携帯電話を持った人がペースメーカーをつけた人のそばによるとペースメーカーが正常に働かない場合もあるようです。このように電磁波は空間中を自由に伝搬するので、不要電磁波による誤動作を無くするために不要な電波を出さない研究、また、逆に不要な電波を機器に入れない研究が盛んに行われています。

10. むすび

以上、電磁波についてその正体と応用について説明を行って来ました。電磁波が至る所で用いられていること、および如何に身近なものであるかを説明してきました。近年の高度情報社会の構築により電磁波の工学的研究の重要性は益々高くなっています。

参考文献

- [1] 電波技術への招待、徳丸仁、Blue Backs、1978、講談社。
- [2] 電磁波工学、稲垣直樹、1980、丸善。