

(a) 電流の断絶による磁場の変化

(b) 磁石の移動による磁場の変化

図 1-21 ファラデーの電磁誘導の法則

再び近接作用論

17 世紀にニュートン力学が完成することになり、Aristoteles 以来の近接作用論にもとづく自然観は幕を閉じ、代わって、遠隔作用論にもとづく自然観が 17・18 世紀を支配した。例えば、2つの荷電粒子の間に働く電氣的な力 (クーロン力) は、2つの荷電に対し直接的に働くと考えてよい (図 1-22)。

ところが 19 世紀に登場したイギリスの Faraday や Maxwell の考えは違っていた。彼等は、2つの荷電粒子に互いに力が働き合うのは、次のようなことのためと考えた。彼等は、空間のあらゆる場所に「電場 (電界)」と呼ばれるモノが存在していると考えた。一方、荷電粒子がその電氣的な力の性質を自分の回りの電場に伝える。その場所の電場が、そのまた隣の点に存在する電場へとその力を伝える。このようにして、他方の荷電粒子を取り巻く電場にまで伝えられた力は、最後にその電場と荷電との相互作用の結果として、他方の荷電粒子に働く力となって現れる。即ち、荷電粒子に働く力は、2つの荷電の間に直接的に働くのではなく、荷電と電場との相作用を通じて現れると考える。この考えは、まさに、近接作用論の復活である (図 1-23)。

$$\begin{array}{ccc}
 q_1 & F & F & q_2 \\
 \oplus \implies & & \longleftarrow \ominus & \\
 & F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} & &
 \end{array}$$

図 1-22 遠隔作用論の立場から見たクーロン力：2つの力は互いに相手の荷電から直接的に受ける。

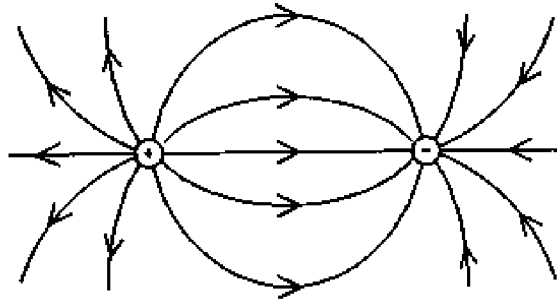


図 1-23 Faraday と Maxwell の考えかた：⊕ 荷電から電場，電場から電場，そして電場から ⊖ 荷電へと，力は伝わって行く。なお，図に示された ⊖ から出て ⊖ へ入る流線は，「電気力線」と呼ばれ，電場の強さと方向を表すために描かれた。

[参考] 「電場」とは，大きさと方向を持つ物理量である：そこに $+q$ の荷電を置いたとき，それに F ニュートンの力が働くなら，その場所の電場の強さ E は， $E = F/q$ で，また，電場の方向は，力 F の働く方向で，それぞれ定義する．この電場の様子を図示するには，「電気力線」なるものを考えることが便利である．電場の強さ E に対しては電気力線の密度を，また，電場の方向には，電気力線の走る方向を，それぞれ対応させる．電気力線は，決して途中で途切れることなく，また，互いに交することなく，⊕ 荷電から出て ⊖ 荷電へと走る．電気力線のこのような性質は，実は，クーロンの法則で，電気力が (1.9) 式のように距離の 2 乗に反比例して与えられることから出てくる．(証明略．)

電気力と同様に，磁気力についても，近接作用論の考えが適用される．即ち，磁石の磁極 (N 極や S 極) の間に働く力は，直接それらの磁極に働くのではなく，一方の磁極が自分の周りの「磁場」に磁気力を伝達し，それが空間の磁場の中を次々に伝わって，他方の磁極の周りの磁場へと辿り着き，最後に磁場からその磁極へと力を生じさせると考える．

「電場」を図的に表現するために電気力線が用いられたのと同様に，「磁場」を図的に表現するのに「磁力線」が用いられる．

[参考] 磁力線は、あくまで磁場を図的に理解するための手段として、考えだされたものである。実際に、このような「線」が N 極から S 極へと走っているわけではない。よく小・中学校の理科の教科書で、磁石の回りに鉄粉を撒くことによって作られた磁力線にお目にかかることがある。これは、小磁石化した鉄粉が、空間各点の磁場の強さと方向に対応して連なって並ぶことにより、あたかも磁力線と同じような図を描いてくれるからである。

このような電場や磁力の存在を仮定する近接作用論の考え方は、電荷どうしの間の力や、磁力どうしの間の力を考察している限りは、どちらでもよいように思われる。むしろ、遠隔作用論の立場に立った方が、すっきりしていると言える。それにもかかわらず彼らは、電場や磁場の存在を仮定し、それは電荷や磁荷の存在の有無とは関係なく、それ自身実在する物理的実体であると考えた。

例えば、「電流」という現象は、荷電粒子が導線の中を流れる (\oplus 電荷が流れる方向を電流のプラスの方向と約束) 現象であるが、これは、運動する \oplus 荷電粒子がどこか導線の遠方に \ominus 荷電があつてそれに引っ張られているためと考えなくても、導線のなかに電場が発生しており (即ち、電気力線が導線に沿って走っている)、それによって電荷が力を受けると考えればよい (図 1-24)。

また、コイルに電流を流すと、コイルの中の鉄心が磁石となる。その磁石の周りにはむろん磁場が発生する (図 1-25 (a))。しかし、もし鉄心がなくとも、そのコイルの周辺の空間は、やはり磁気的な性質を示すことが、知られている。その磁場の様子は、例えば、図 1-25 (b) のようになり、この磁力線はどこかに N 極があつてそこから出てどこかの S 極に入るといったものではない。

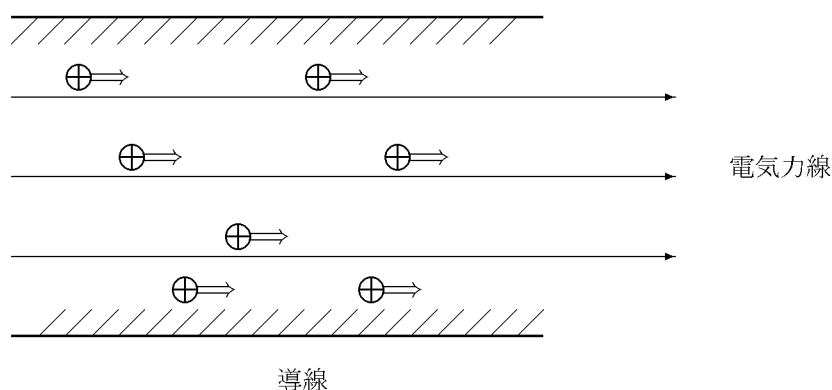
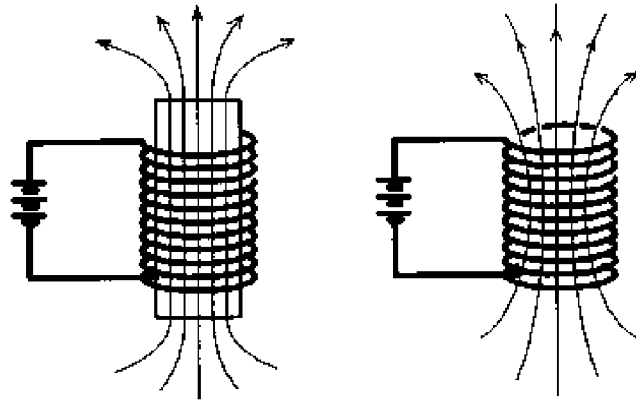


図 1-24 電流 : 導線の中の電場によって、荷電粒子が力を受けて、流れる。



(a) 鉄心がある場合

(b) 鉄心がない場合

図 1-25 コイルに発生する磁力線.

電場や磁場が、単に電荷どうしの間力や磁荷どうしの間力の説明のための便宜的な仮想物ではなく、実際に重要な物理的振舞いをする存在物であるということは、次に延べる Maxwell の電磁気学の完成とそれによる電磁波の予言、そしてその実験的確認によって、明らかとなる。

マックスウェルの電磁波の基礎方程式

1864 年、Maxwell は、今までの電磁気現象から得られた諸法則を整理して、「電磁場の基礎方程式」として、次の 4 つを提案する。(以下には、その考え方のみを紹介する。式そのものは、必要なら、後の [参考] を見よ。)

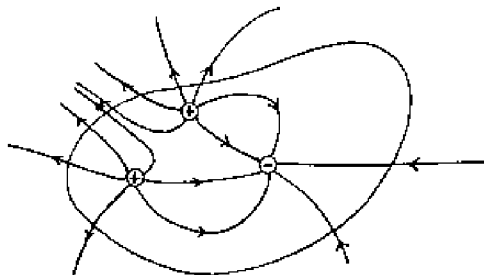


図 1-26 マックスウェルの方程式その 1 : 電気についてのクーロンの法則 : 閉曲面を貫く電気力線の数 (出る数をプラス, 入る数をマイナスに数える) = 内部の荷電の総数.

(1) 電気についてのクーロンの法則「場」の言葉で法則を言い替えると、「任意の閉じた曲面において、それを貫く電気力線の数合計すれば、その曲面の内部にある荷電の総量が得られる。」となる(図 1-26)。

(2) 磁気についてのクーロンの法則：電気の場合とほぼ同様だが、唯一異なる点は、電気では \oplus 荷電や \ominus 荷電が空間に単独で存在できたが、磁気では、 N 極と S 極は必ず対で存在し、どのような任意の閉曲面を考えようと、その中に含まれる N 極の磁荷(プラス磁荷)と S 極の磁荷(マイナス磁荷)との合計はゼロとなる(図 1-27)。(ある大きさの磁石を、任意の所で2つに切っても、その切り口には再び N 極・ S 極が現れる。従って、有限の大きさの磁石は、無限に小さな磁石の集まりからできていると考える。)

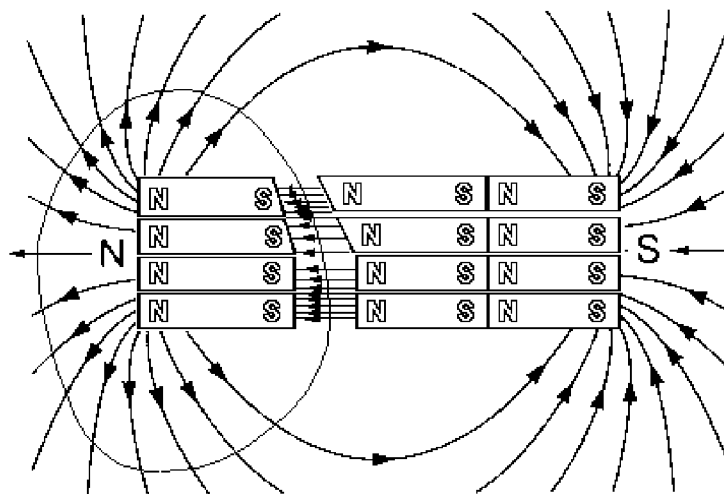


図 1-27 マックスウェルの方程式その2：磁気についてのクーロンの法則：閉曲面を貫く磁力線数の合計 = ゼロ。

(3) アンペールの法則の拡張：図 1-20 に示されたアンペールの法則は、「場」の立場から見れば、電流が流れるということは、導線に沿って電気力線が走るということであり、それを取り巻いて磁力線が発生するということを意味する。Maxwell は更に考えを進め、導体がなくとも、空間中の電場が時間的に変化する時には、その電気力線を取り巻くように、磁力線が発生すると考えた(図 1-28)。

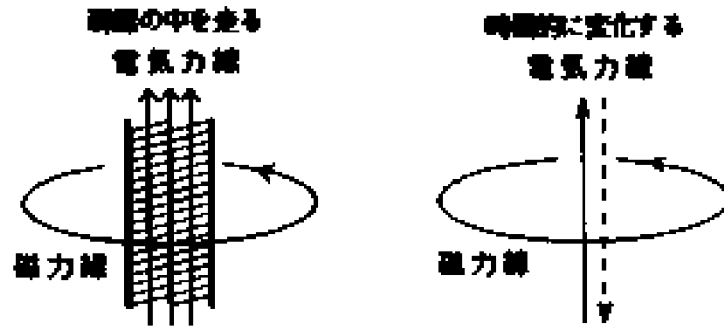


図 1-28 マックスウェルの方程式その 3 : 拡張されたアンペールの法則.

(4) ファラデーの法則の拡張: 図 1-21 に示されたファラデーの法則は, 「場」の立場から見れば, 磁場 (磁力線) が変化すると, そこにある導線の中に電場 (電気力線) が発生する現象 (図 1-29 (a)) と言える. Maxwell は, 更に考えを進めて, 空間に変化する磁場のあるとき, 導線がなくともそこに電場が発生する (図 1-29 (b)) と考えた.

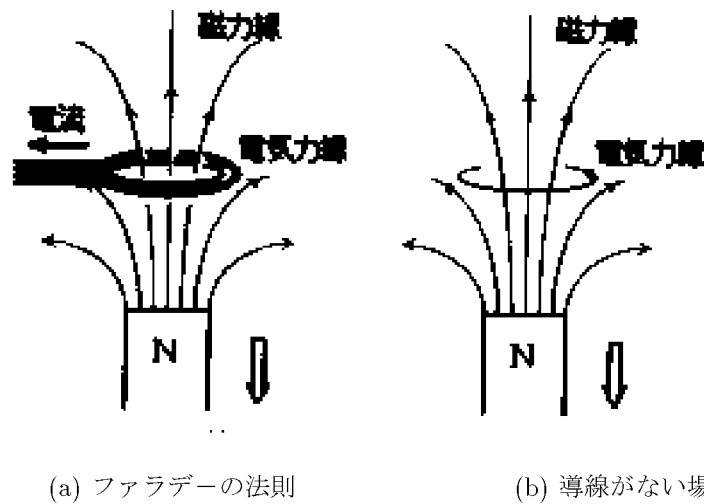


図 1-29 マックスウェルの方程式その 4 : 拡張されたファラデーの法則.

[参考] マックスウェルの方程式

$$(1) \quad \int D_n dS = Q$$

ここで, D_n は微小面積 dS を貫く電気力線の密度であり, その閉曲面全てにわたって行われる積分 $\int D_n dS$ は, 閉曲面を貫く電気力線の総数を与える. 厳密な物理用語の使い方に従えば, D は方向を持った量で, 「電束密度」 \vec{D} と呼ばれ, 電場 \vec{E} とは $\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E}$ の関係がある.

$$(2) \quad \int B_n dS = 0$$

ここで、 B_n は微小面積 dS を貫く電気力線の密度に対応する。方向をも含めた量 \vec{B} は、「磁束密度」と呼ばれ、磁場 \vec{H} とは $\vec{B} = \mu_0 \vec{H}$ の関係がある。

$$(3) \quad \int (i_n + \frac{\partial D_n}{\partial t}) dS = \oint H_s ds$$

ここで、 i_n は微小面積 dS を貫く電気力線の密度を表す。記号は $\partial D_n / \partial t$ 、電束密度（の面 dS の法線方向の成分）を時間 t で微分することを意味する。微分記号に d を使わないで ∂ を使うのは、 D_n が時間 t のみの関数ではなく、位置座標 x, y, z の関数でもあり、そのような場合に、特定の変数のみについて微分をするときに、記号 ∂ が使われる。（微分 $\partial y / \partial x$ は「偏微分」と呼ばれる。積分 $\int dS$ は、任意の閉曲線 C を縁とする面 S について行われる。また、積分 $\oint H_s ds$ は、その閉曲線 C に沿って磁場 H のその方向の成分を積分することを意味する。(3) 式の左辺第1項のみの場合は、アンペールの法則を表す。第2項の必然性は、Maxwell によって見いだされた。

$$(4) \quad \int \frac{\partial B_n}{\partial t} dS = - \oint E_s ds$$

積分 $\int dS$ は任意の閉曲線 C を縁とする面 S について、また、積分 $\oint ds$ はその閉曲線 C に沿って、それぞれ行われる。

以上の方程式は、比較的数学の予備知識のない人にもイメージがつかめるように、積分形で紹介したが、普通、マックスウェルの方程式は、微分形で書かれることが多い。参考までにそれを掲げる。但し、数学的記号の説明は省略する。

- (1) $\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho$,
- (2) $\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$,
- (3) $\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{i} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$,
- (4) $\vec{\nabla} \times \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$.

電磁波の予言

マックスウェルの方程式 (3) と (4) とから、電磁場の重要な振舞が予言される。

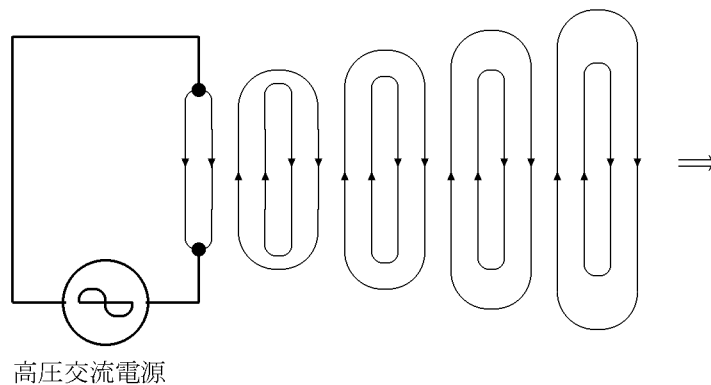


図 1-30 電磁波の発生：大きさと方向とが変化する電気力線が次々と発生する。(磁力線は図の電気力線に直交する方向に誘発される。図 1-31 を参照。)

このような電磁場の中を伝わる波の存在は、Maxwell によって予言され（1861 年）、「電磁波」と呼ばれる。

今、空間のある点で、時間的に大きさ・方向が変化する電場を作り出したとしよう。方程式 (3) によって、その変化する電気力線の近傍に、磁力線が発生する。このようにして発生した磁場は、時間的に変化する電場から誘発されて生じたので、この電場もまた時間的に大きさ・方向を変化させる。そのような磁場の存在に対しては、方程式 (4) は、その近傍に電場が発生すべきことを主張する。この電場もまた時間的に変化するのので、再び方程式 (3) に従って、時間的に変化する磁場が発生する。このような繰り返りで、結局、電場と磁場の振動が、次々と空間を伝わって行くことになる（図 1-30）。

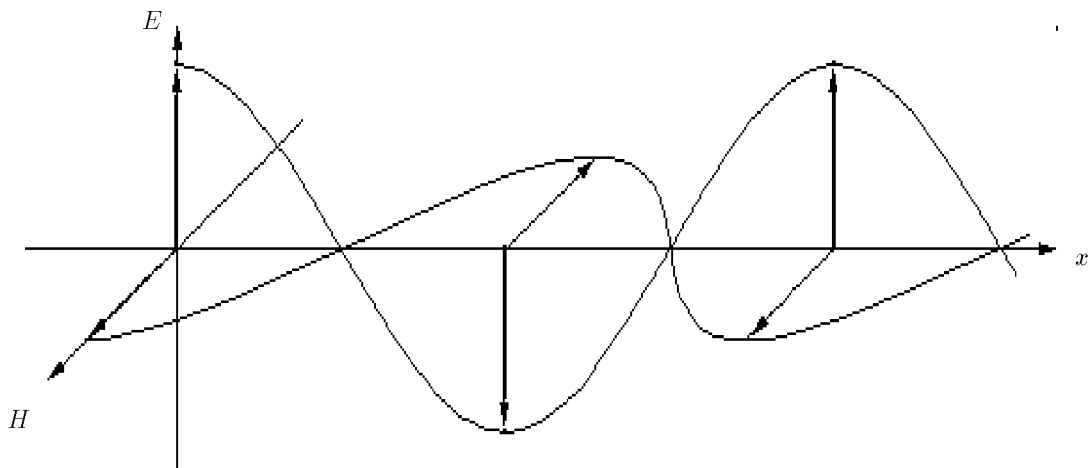


図 1-31 電磁波における電場と磁場の振動方向。

光の電磁波説

マックスウェルの方程式 (3)・(4) から、電磁波の性質として、(a) 横波、(b) 速さ $v = 1/\sqrt{\epsilon_0\mu_0}$ なることが、導かれる。この 2 つの性質は、その当時の実験から知られていた光の性質 (a) 横波、(b) 速さ $c \approx 3 \times 10^8$ m/sec と各々ぴったり一致した。このことから、Maxwell は、光は電磁波の一種であると主張した（1861 年）。（当時の誘電率 ϵ 及び透磁率 μ の測定技術はあまり正確ではなかった。しかし、その値を用いての $\sqrt{\epsilon\mu}$ の計算値は、幸運にも、その当時の光速の測定値とうまく一致していた。）

電磁波の実験的検証

Maxwell の予言した「電磁波」なるものの検証は、1888 年、ドイツの Hertz によってなされた。彼は、図 1-32 に示したような装置を用いて、電磁波を人工的に発生することに成功し、それが横波であり、かつ、光と同じく、反射や屈折の法則に従うということも、確かめた。（光の波長は、約 10^{-6} m 程度である。これに対して、彼の人工的に作り出した電磁波の波長は約 1 m 程度のものであった。）

これによって、Maxwell 理論は正しいことが実証され、従って、光の電磁波説もまたその正さが確立される。

光は、「電磁場」の中を伝わる波長の非常に短い（約 10^{-6} m）「電磁波」と呼ばれる波であることが、確立した。しかしながら、この「横波」である光を伝える「電磁場」なるものは、一体どのような物質なのであろうか。偏光現象の発見以来なぞとされてきた光を伝える物質の正体については、単に「エーテル」を「電磁場」と言い替えただけに過ぎず、依然としてよく分からないまま 19 世紀の幕をとじることとなる。その問題の解答は、まもなく 20 世紀に入って、Einstein の登場によって与えられる。

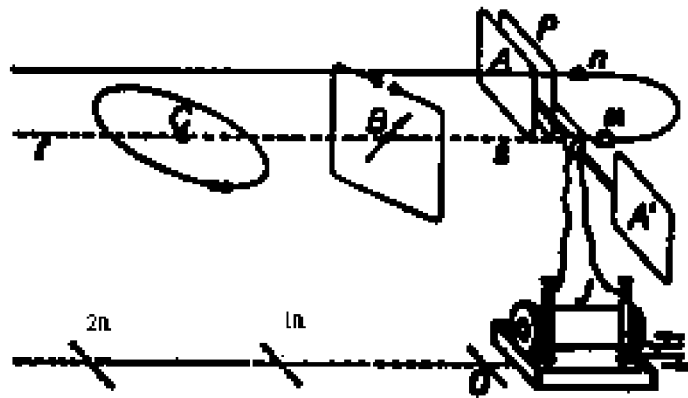


図 1-32 Hertz が用いた装置：誘導コイルからの高圧電流は、板 A, A' の間にある火花間隙に火花を飛ばす。これによって（電場の変化から）生じた電磁波は、ループ B で捕らえられ、その間隙に火花を飛ばす。

(図を見やすくするため、原図を多少修正してある。Hertz の論文の原図は、例えば、広重徹著「物理学史 II」(培風館), p.35 に与えられている。)

[参考] 電磁波の種類

その波長の違いによって、下記のような名称が与えられている。

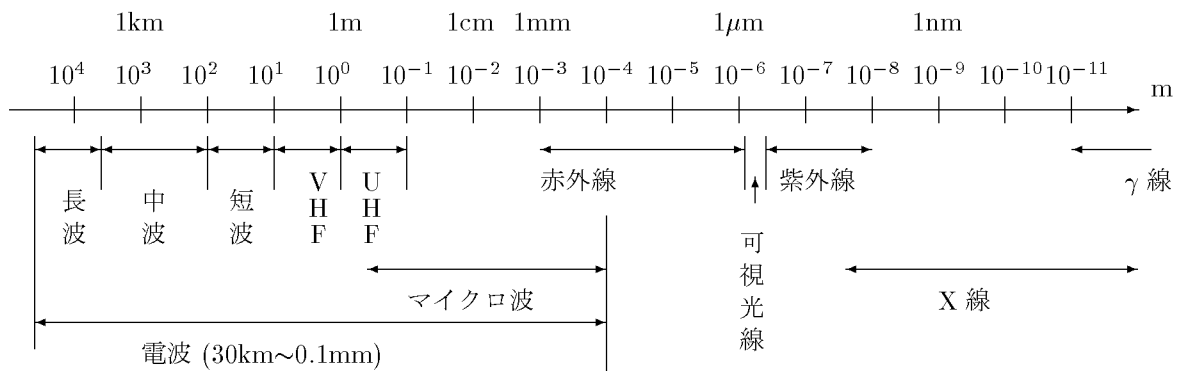


図 1-33 電磁波の名称と波長

[参考] 電波の伝わり方

波長の違いによって、電波の性質は大きく異なる。同じ「電波」と呼ばれるものの間においてすら、その性質は大きく異なる。

無線通信初期の頃は、回折能力の一番大きな「長波」が最重要視され、これはもっぱら軍事目的などに使われていた。短波などは、役立たない電波と思われて、一般の人々（アマチュア）に開放されていた。

ところが、この短波は、地球大気圏上空にある「電離層」によって反射され、それこそ地球の裏側にまで到達する能力があることがアマチュアによって発見されると、今後は、短波が遠距離通信の主役となった。（これに対して、長波では、地上を這って電波が伝わるため、波のエネルギーの衰退が激しく、長距離通信を行うためには、とてつもない大電力の送信所を必要とする。）

現在は、特定の方向にのみ電波ビームを絞って送ることのできるマイクロ波が、通信の主役になっている。これだと、電離層を突き抜けて進むことができ、例えば、人工衛星などによる反射を利用した通信が可能となる。

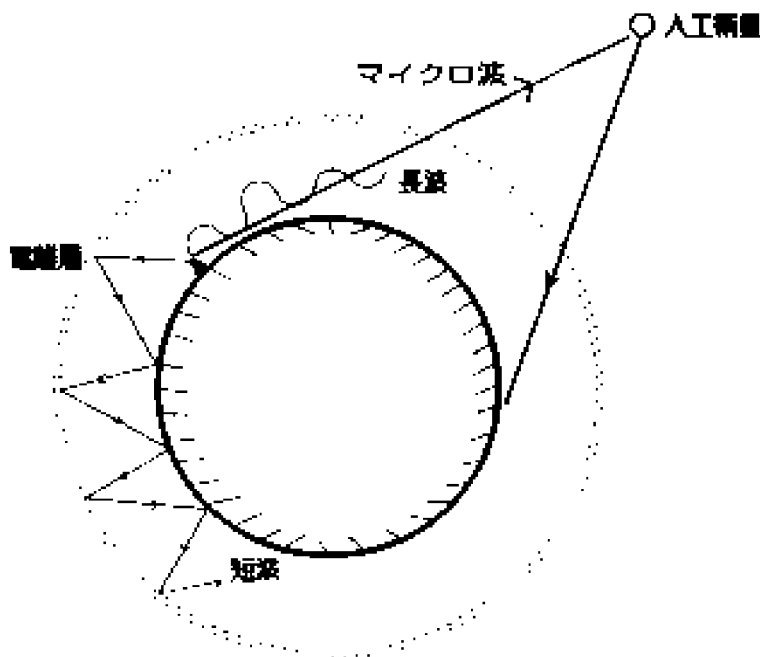


図 1-34 電波の伝わり方.