

－ 技術小話 －

電磁波世界への誘い^{いざな}

2026年1月14日 初版

 総合電子株式会社

お願い：

- ・本資料の著作権は総合電子株式会社および波動システム研究所にあります 個人としての活用以外での使用には、著作権上、総合電子株式会社の方に相談されるようお願い申し上げます
- ・本資料の利用により何らかの弊害が生じても、当方では一切の責任は取りませんので、その旨ご承知おきください

👉 第1回目(2024.12)と2回目(2025.6)の小話では、各々アンテナとMIMOについて解説しました

CLICK HERE

<https://www.sogoel.co.jp/technical/>

👉 第3回目となる今回は、電磁気学とその帰結となる電磁波(もしくは、電波)などの基礎的な話題について誘い(いざない)ます

… 先に波動について少しまとめておきます …

👉 波動現象は媒体によって現れ方が異なる

- ・音が伝わる、物が見える、物が振動する、海の波が押し寄せる …
- ・機械的振動、電氣的振動、振動を通してエネルギーが伝わる
- ・振動は媒体によって種類が異なり、伝わる速さも異なる
- ・時間の变化でみると、電波(電磁波)は加速度を以て変化している … 静電磁界、準定常界は?

👉 電波と光は同じ仲間、波長が違っただけ

- ・電磁波の電界と磁界が交互に振動し、直交する方向に波動が伝播する
- ・媒体は空気、真空が代表的、媒体が一様るとき波動は直進、物体があると反射、透過、回折等が発生
- ・遠方まで伝わる大きな特徴がある … 電磁波は横波、音波は縦波
- ・振動数のことを周波数というが、電波はこのうちの MHz(メガヘルツ)- GHz(ギガヘルツ)帯を指す
- ・1対多数、遠方通信の唯一の方式、この電波の出入り口のデバイスをアンテナという

👉 電磁波現象は周波数(波長)に大きく依存

- ・小型アンテナは動作波長程度、大型では数十波長以上あるいは低周波数での数波長以上
- ・同様に、電磁波散乱も対象媒体のサイズ(電気長)、電氣的特性等に大きく依存

☞ 電波は横波、音波は縦波

- ・電磁波と電波という名称の違いは、電波が主としてVHF、UHF帯あるいはマイクロ波、ミリ波帯を指すのに対し、電磁波はもっと広い意味を持たせています
- ・例えば、光領域の可視光および赤外線などは電磁波といってもいいですが、電波とはいいません
- ・また、音波あるいは超音波に関しても、これを電波とはいいません、音波と電波には本質的な違いがあります
- ・音波は縦波のスカラー波であるのに対し、電磁波は横波であってかつ偏波面が保存されるベクトル波です
- ・電磁界とは電磁波の個々の局所的な近接場の総称であり、これを扱う分野を電磁界理論、少し巨視的にみた分野を電波工学といいます
- ・近年では波動による諸現象の応用的な面を特に扱う分野として、波動情報工学という表現もあります
- ・電磁界の個々の緒量は電界、磁界等のベクトル量で表現されます
- ・電磁波はその波動性を強調した言葉ですが、電磁界には波動以外にも静電磁界、定常磁界などを扱う(狭義の)電磁気学という基礎分野があります、時間変化のない電圧を印加したコンデンサの電位であるとか、コイルの磁気作用などです
- ・基本的な物理現象を考えると、これらの電流には熱作用と化学作用、そして前述した磁気作用が大きな特徴として挙げることができます
- ・電波は現在、様々な情報を伝達する重要な手段として、我々の日常生活に深く関与しています
- ・第一の理由は情報の送信点と受信点との間を電線とか光ファイバーのような伝送線で結ぶ必要が無いからです
特に移動体通信の分野では、電波による情報伝達が唯一の方法となっています
- ・また、ラジオ、テレビジョンのように同一の情報を多数の受信者に送る場合も電波が広く用いられています
- ・電波には遠方まで伝搬する性質があり、光と同じように電磁波の一部であって、波動としての直進性、あるいは干渉、回折など共通の性質を持っています

👉 波の重ね合わせ

- ・波の伝搬はそれ自体が非常に興味深い現象です、水面に二つの石を投げ込むと、石の落下した所からは円形の波紋が伝わっていきます、この場合、二つの波は互いに影響することなく素通りして、遠くまで波紋を崩すことなく伝搬することが観測されるはずです、これは水面の波が重ね合わせの原理を満たしていることを示していることに他なりません
- ・ある媒質の中を二つの波が伝わる時互いに独立して伝搬し、そのときの媒質の運動は各々の波が単独に伝わる時の媒質の運動を合成したものになります、これが重ね合わせの原理です
- ・この原理はフーリエ理論そのものの性質ともみることができます、我々がある人物の声だけを聞き分け、かつその人物を明確に区別できるのも、音や光が重ね合わせの原理に従う波の性質を備えていることによります
- ・全ての音の速度は同じ速さです、音の違いで速さが異なると、我々が日常耳にする会話は成立しません
- ・従って、同じ方向に進む振動数(あるいは周波数)の違う波をいろいろに重ね合わせると、それに応じた様々な波形の波ができ、時間が経過しても同じ速さと波形で伝搬します、ただ、時間あるいは伝搬距離に応じて波は減衰し、最後は消滅します
- ・異なる方向に進む波を重ね合わせすることもできます、この場合は、媒質内の各点は二つの波による変位をベクトル的に加え合わせたように伝わります、一般に干渉と言われる現象です
- ・重ね合わせの原理を満たす波は小さい振幅で、力がずれに比例する場合に相当します(速さが同じであるから)
- ・重ね合わせの原理によると、二つの波があるとき、媒質はこれが単独に伝わる時の運動を合成したものなので、波の交差するところで山と山が出会えば、その場所の振動は大きくなります、つまり、二つの波が行き会うところでは、波は互いに強めあったり弱めあったりして見えるようになります

二つの円筒波(線状波源)の干渉計算：波源モデルは第2種ハンケル関数 $H_0^{(2)}(kr)$



- ・大洋における三角波は、二つの方向から来る大きなうねりが重なり合って高い山と深い谷をつくる現象です、これは波に特有の現象であって、粒子の流れには見られない特徴でもあります
- ・この波の干渉性は光が波であると結論付ける一番重要な現象となります

👉 波の回折現象

- ・波がある物体で遮られたとき、物体の後ろの方まで波が伝わって行く現象を波の回折と呼んでいます
- ・衝立の後ろ側でも音が聞こえるのは、音波の回折によるものです
- ・衝立で遮れば、後方の物体は見えなくなります、これは光がほとんど物体の後ろの方に回っていかないで、物体の影をつくるからです
- ・ところがよく観察すると、この影の境界ははっきりしたものではなく、境界はボケていたり薄い縞ができていたりします、光も波動の回折として説明できる現象となっています
- ・音波が光波よりも回折現象が顕著であるのは、波長の違いによります、音波の波長は数mであるのに、光波の波長は音波の1,000万分の1ほどであることに起因しています

海岸沖にスリット状に設けられた防波堤により通り抜けた
海洋回折波が原因で生じた砂浜の侵食



A1. 電波の伝搬現象

- ・発振器などで生成された電波は目的に応じて変調され空間に放射されます
- ・空間内での振る舞いは、周波数、中途の構造物等により、反射、屈折、回折、干渉、多重反射等の現象を呈して受信に至ります
- ・また気温による大気状況によるフェーディング、他システムとの電磁干渉による影響も見逃せません

A2. 虹の仕組み

- ・電磁波の範疇である可視光も電波と同じ伝搬現象を呈します
- ・例えば虹、これは空中内の微小な雨滴に照射した光の反射と屈折の周波数特性のなせる業に他なりません

A3. 電磁波放射のメカニズム

- ・放射にはいろいろの説明法がありますが、ここではマックスウェルが取り入れたコンデンサ高周波がダイポールで作る電気力線によります
- ・電圧という電気力が絶えずダイポールに注がれるので、否応なく電磁エネルギーが空間に放射されます

A4. 電磁波のカテゴリー

- ・波動には機械的なもの電気的なもの、そして後者にも音波などの縦波のもの電磁波などの電氣的振動が横方向のものなどがあります
- ・横波の電氣的振動は電界を基準にして、これを偏波方向と呼んでいます いわば方向が偏極しているベクトル波になります
- ・電波応用には、通信などの“1-way”と対象物からの反射散乱波を受信する“2-way”システムが考えられます

A5. 電磁波スペクトラムと波長

- ・電磁波の周波数スペクトラムを対応する波長と身近な構造物で比較しています
- ・これを見ると、非常に高い周波数領域の波長は非常に短く、物質を通過する特性があります
- ・波長の短い電磁波を光線とか放射線とかで“線(Ray)”と付けるのは、粒子性も呈することの名残りかもしれません

A6. 通信/レーダの周波数バンド

- ・電磁波の中で波長が cm から mm ぐらいを特に電波と呼んでいます 前者はマイクロ波とも呼ばれており、大戦後急速に発展しました
- ・マイクロ波帯のデバイスは手のひらサイズであり、開発製造が比較的容易であったという理由があります
- ・光速は 3×10^8 m/s なので 1GHz の自由空間波長は 30cm です
- ・これを下限周波数として矩形導波管内の基本モードだけを伝搬させるため、上限周波数を 2GHz ぐらいに設定
- ・こうして戦前の米国レーダ技術者は、Lバンドは 1~2GHz としたのかもしれませんが：これは想像です

A7. 電磁界分野での電気量

- ・電磁界分野では、普段の現場では使わない諸量、単位系を使います この際、その定義とか単位を理解されたい

A8. 主に電気回路系での電気量

- ・一方、電気回路分野では、聞きなれた諸量です
- ・電磁界での微視的な諸量にはこだわらないで、素子の大きさを考慮せず電気量だけで目的の回路を設計します
- ・この大前提には、周波数つまり波長と回路サイズの相対比があります
- ・低周波での波長はメートル以上の大きさなので素子内での電圧電流はほぼ一定 … 周波数が上がると設計通りに動かないことに、

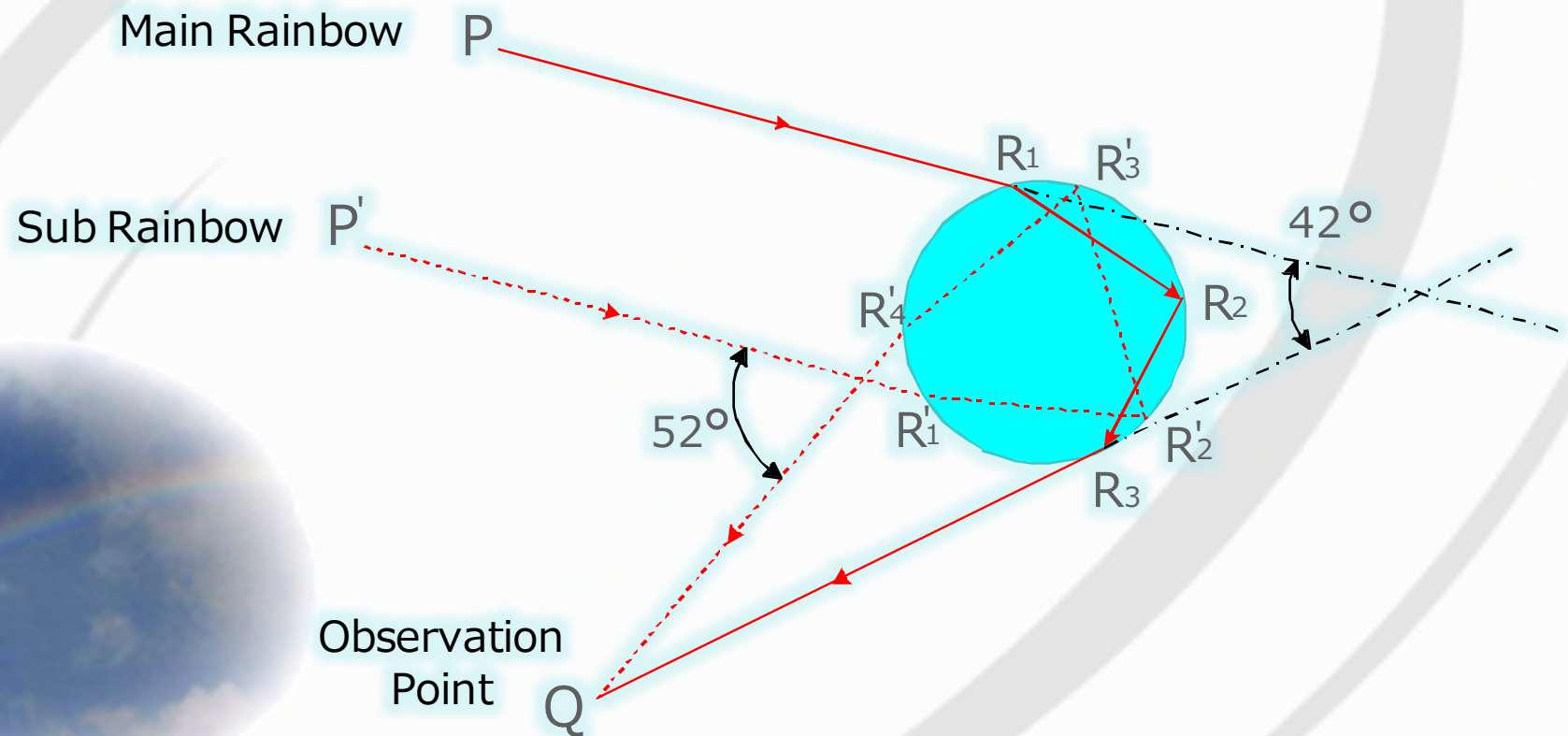
A1. 電波の伝搬現象

放射(Radiation), 反射(Reflection), 屈折(Refraction), 回折(Diffraction), 干渉(Interference), 散乱(Scattering), 多重反射(Multiple--), フェーディング(Fading), 電磁干渉(EMI), 電磁適合(EMC), ...



A2. 虹の仕組み (可視光の反射と屈折)

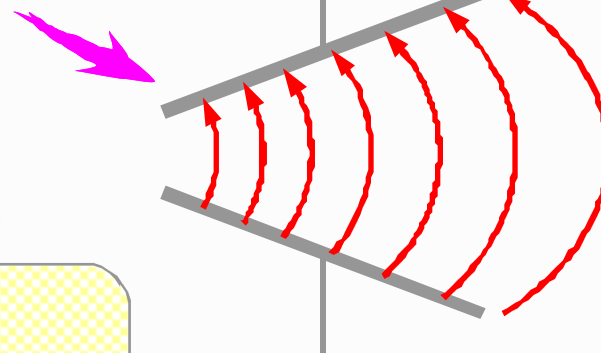
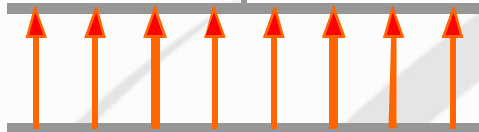
- 虹は水蒸気や雲などの反射が原因ではなく、個々の雨滴による反射と屈折によって生成される (デイトリッヒ, 1304年)
- その300年後、デカルトは光線追跡により主虹の張る半頂角は42度、副虹は52度となることを示した
- 虹の色については ニュートン のプリズムによるスペクトル分解の実験(1666年)で説明される



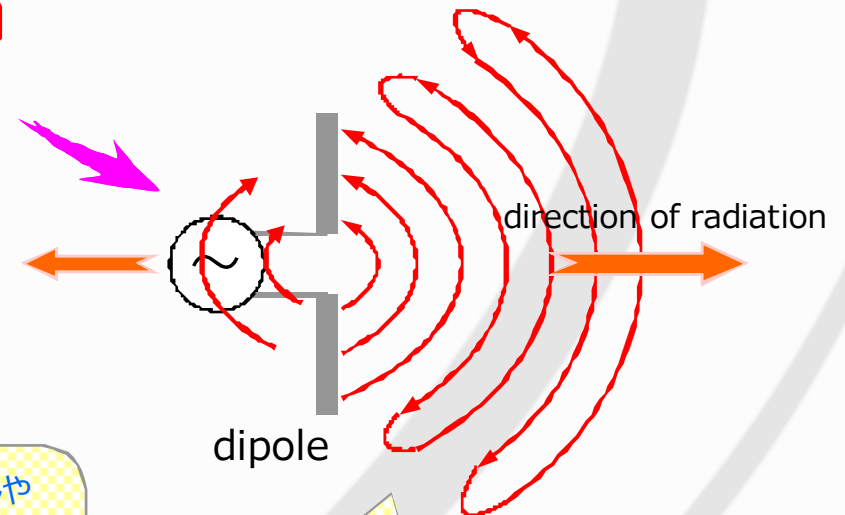
・屈折インデックス $n=1.337$ と反射屈折の法則を使えば、42度と52度は誘導可能です
 ・さらに、虹が弧を描くことも説明できます

A3. 電磁波放射のメカニズム

電極面積: S
電極間距離: d



as if shabon-dama

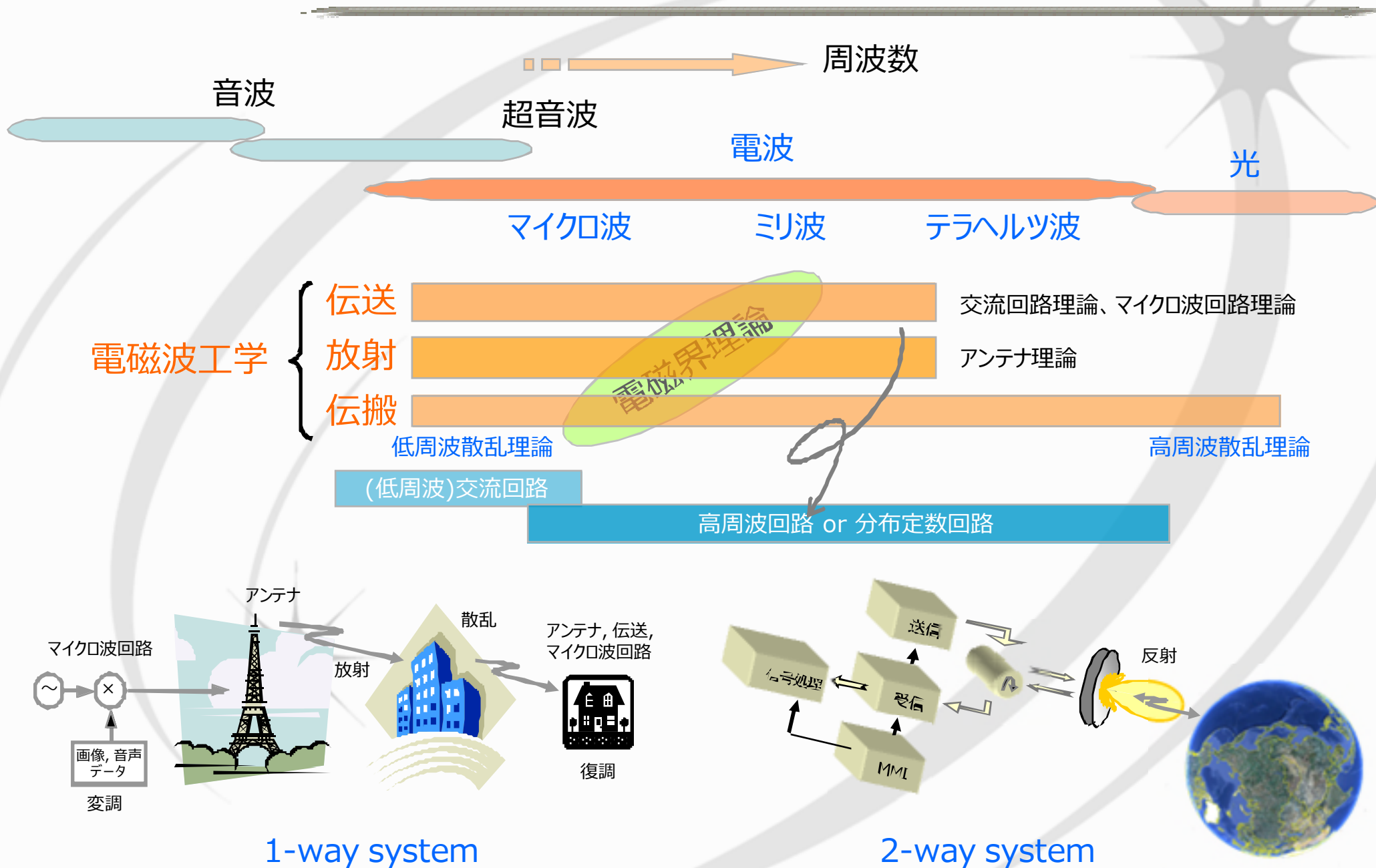


- 2枚の導体板に交流を印加
電荷 $Q=CV$
電流 $I=CdV/dt$
容量 $C=\epsilon S/d$
- 電流 I は周波数(dV/dt)と面積 S に比例

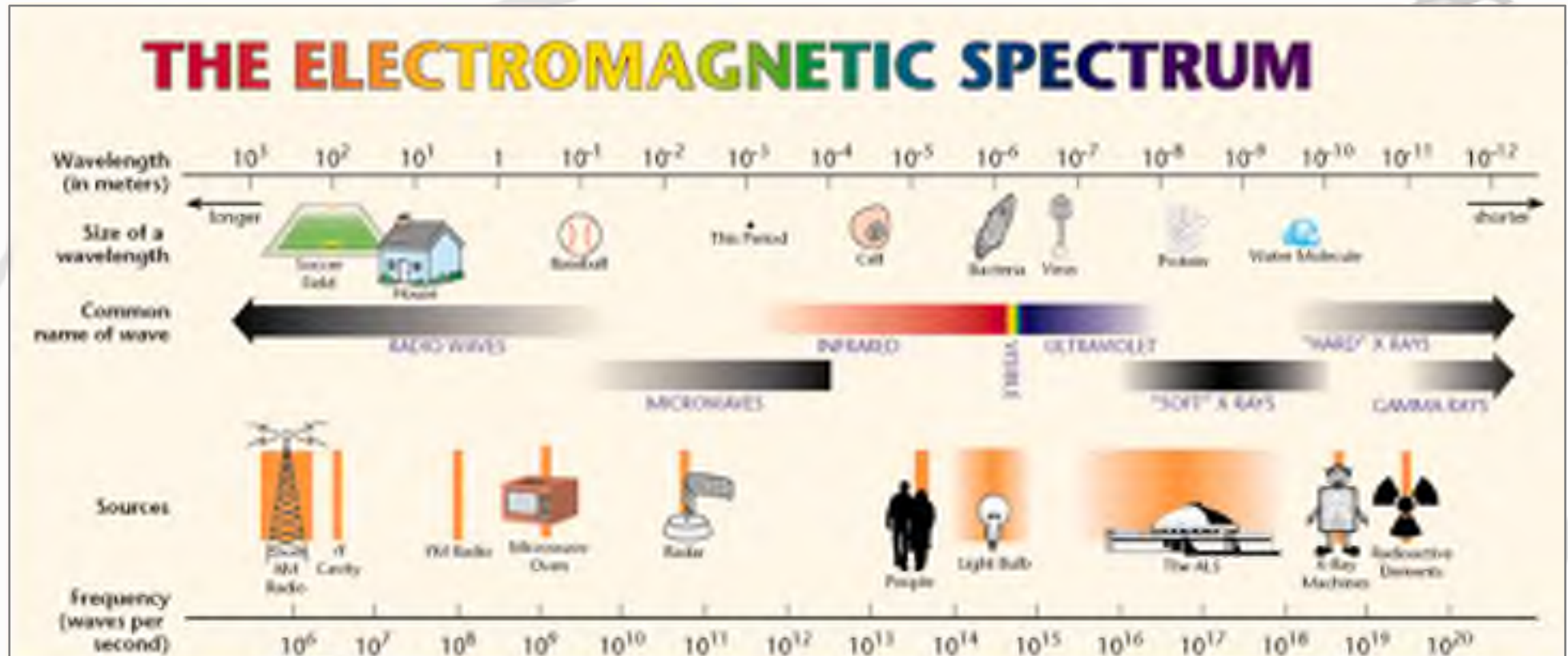
- コンデンサ電極の外側に電流が放射しやすいようにする
 - 導体板を開く
 - 板を細い棒状にする
 - 周波数を高くする

- 何もない導体板の間を電流が流れ、高周波電流である電波も空間にエネルギーを伝搬させる <インピーダンス変換器> として動作
- 電圧という電気力が絶えず注がれるので、電磁エネルギーが空間に押し出される

A4. 電磁波のカテゴリー



A5. 電磁波スペクトラムと波長



← レーザ周波数 →

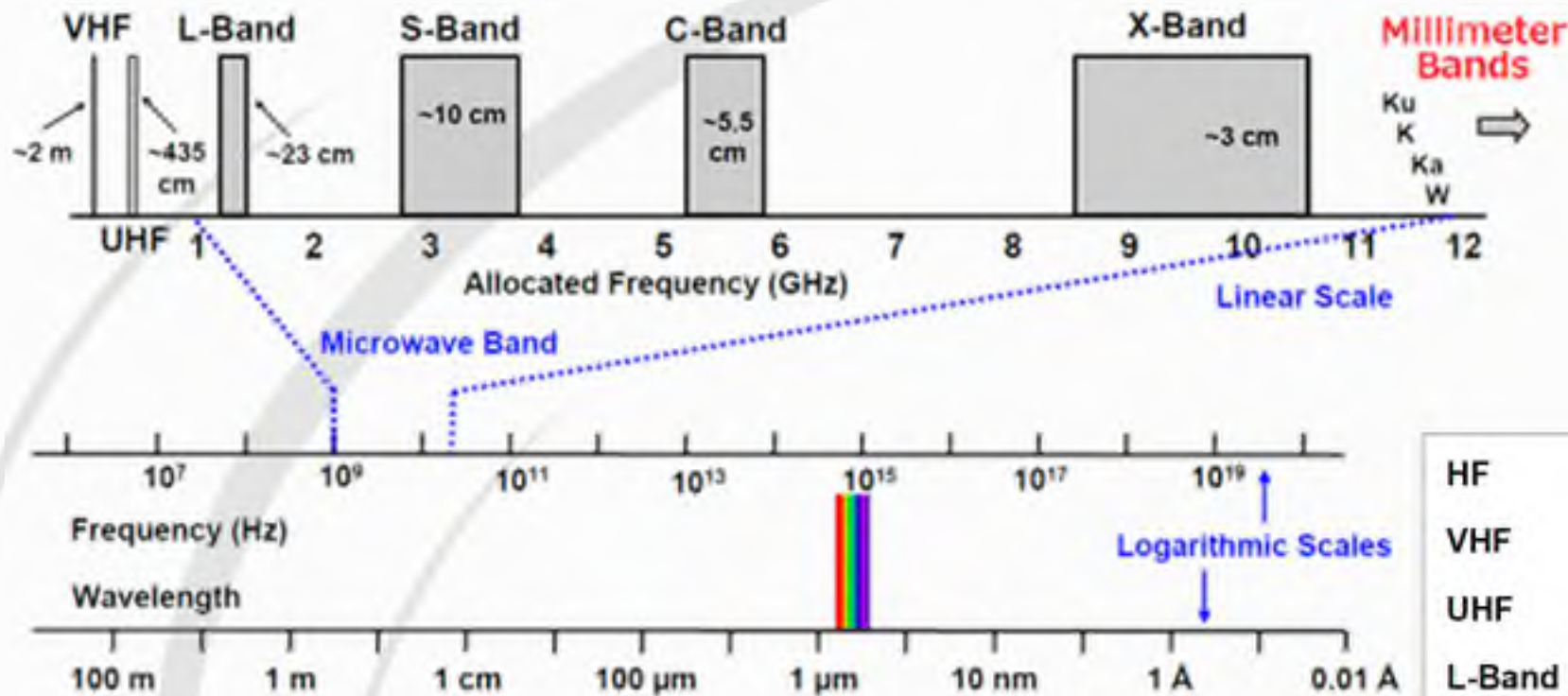
ミリ波帯 30-300GHz

← →

ミリ波帯 30-300GHz

引用元 : Courtesy Berkeley National Laboratory

A6. 通信/レーダの周波数バンド



HF	3 – 30 MHz
VHF	30 – 300 MHz
UHF	300 MHz – 1 GHz
L-Band	1 – 2 GHz
S-Band	2 – 4 GHz
C-Band	4 – 8 GHz
X-Band	8 – 12 GHz
Ku-Band	12 – 18 GHz
K-Band	18 – 27 GHz
Ka-Band	27 – 40 GHz
W-Band	40 – 100+ GHz

A7. 電磁界分野での電気量

基本電気量

E : 電界強度

D : 電束密度

H : 磁界強度

B : 磁束密度

J : 電流密度

-- 時間と空間のベクトル変数 --

(V/m)

(C/m²)

(A/m)

(Wb/m² or T)

(A/m²)

構成パラメータ

$$D = \epsilon E$$

誘電率 $\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$

$$B = \mu H$$

透磁率 $\mu = \mu_0 \mu_r$

オームの法則

$$J = \sigma E$$

導電率 σ

A8. 主に電気回路系での電気量

基本パラメータ

－直流/準定常回路－

V : 電圧 (V)
I : 電流 (A)
R : 抵抗 (Ω)
C : 容量 (F)
L : 誘導 (H)

Γ : 反射係数 (H)
C : 伝達係数 (L)
B : 伝達係数 (M)

－交流回路－

インピーダンス	$Z = R + jX$
リアクタンス	$X = \omega L - 1/\omega C$
アドミタンス	$Y = 1/Z$
コンダクタンス	$G = 1/R$
サセプタンス	$B = 1/X$
虚数単位	$j = \sqrt{-1}$
角周波数	$\omega = 2\pi f$
周波数	$f \text{ (Hz)}$

B1. クーロンの法則

- ・ニュートン提唱の万有引力則(物体はその質量に比例、距離の2乗に反比例する引力を持つ)と類似の電気版となります
- ・電荷が1点に集中しているとして2つの電荷間に働く遠隔作用の力を表しています 比例定数から媒質の誘電率が決まります

B2. 電界(場)の導入

- ・クーロンの法則は電荷に作用する力だけに注目しており、電荷間の空間での力の説明は不明です
- ・そこで、ファラディは“場”あるいは“界”という空間を考案しました 近接作用といわれる電界/磁界の概念になります

B3. 電界と電気変位

- ・電界は電荷があれば発生し、電気力線として視覚的に表現することができます
- ・一方、複数の媒体にまたがる場合は、それぞれの電気定数により電界が変化しますので、電気変位という考えが導入されました

B4. 誘電体の境界条件

- ・異なる媒質の境界では、境界の接線成分と法線成分で電界と電気変位の連続性が異なります

B5. 静電容量と静電エネルギー

- ・2つの荷電体間の電位差と電荷量は比例関係にあります この比を静電容量と呼んでおり、コンデンサの選定指標となります
- ・場と電荷の間で力が及ぼし合っているため、コンデンサ内ではエネルギーが蓄えられています

B6. 定常電流とオームの法則、電荷保存則

- ・導電率が有限な材料に電界が印加されると、(局所的に)電流が流れます この微視的な関係がオームの法則となります

B7. 電流密度と電気変位のアナロジー

- ・多くの媒質において、定常電流密度と電気変位は電界に比例しており、その数学的な表示も同じ形をしています

B8. アンペアの力の法則

- ・電流が流れている回路が2つ以上あるとき、これらの間には力が働きます これはクーロンの法則からも推測できます

B9. 磁界：ビオとサバルの法則

- ・磁束密度の方向を向いた力線を磁力線といいますが、これからベクトル場とかソレノイダルな閉じた場が想像できます

B10. 磁束密度とベクトルポテンシャル

- ・ベクトルの回転および勾配演算に関連して、電界の勾配の場合、スカラーポテンシャルが存在(静電界ではこれは電位に相当)
- ・磁束密度の回転の場合、ベクトルポテンシャルと呼ばれる架空的な場の存在が想像できます

B11. 磁界とアンペアの周回積分

- ・ある領域に電流が流れると磁界が発生し、それを表す定量的な関係式が成立します

B12. ファラディの電磁誘導の法則

- ・電界と磁界の関係を定量的に結び付けた実験法則であり、1981年ころファラディが発見しました

B13. インダクタンス

- ・2つのコイルが接近すると、一方のコイルに流れる電流の時間変化により他方のコイルに起電力が生じます

B14. 拡張したアンペアの法則

- ・アンペアの法則では、時間的に変化する磁界の回転は流れる電流に等しい しかし、電流・電荷の連続の式に矛盾します
- ・そこで、マクスウェルは変位電流を考案し、これを導電流と同じ振舞いをすると仮定、従来のアンペアの法則に補正項を加えました

☞ 時間的に変化している電磁界は全て(広義の)電磁波となる

・実験的に発見した電磁気的な諸法則をマックスウェルが理論的に統一

- ✓クーロンの法則
- ✓ビオとサバールの法則
- ✓アンペアの法則
- ✓ファラディの法則



これら法則の相互矛盾を是正するため、
変位電流
という新しい量を導入し、電磁波の存在を理論的に予測

■ 巨視的にみると、物質には力を及ぼし合う2種類の基本量がある

- ✓質量 --- 重力場の源
- ✓電荷 --- 電磁場の源 ---

静電場：電荷の移動がない状態、
定常電流：電荷の移動が一定速度
電磁波：電荷が加速度をもって移動する場合

☞ クーロンの法則：荷電体の電荷を1点に集中した点電荷を想定し、2点の電荷間で、

- ・力の大きさは点電荷の大きさに比例し、荷電体の間の距離 r の2乗に反比例 (球面の表面積は $4\pi r^2$)
- ・力は電荷を結んだ直線の方法に作用し、異種の電荷に働く力は引力、同種では斥力
- ・以上の数学的な表現：

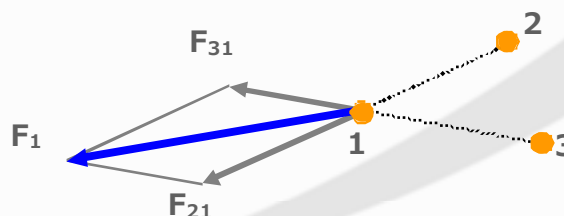
$$\mathbf{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} \mathbf{i}_r \text{ [N]}$$

$$\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} \text{ [Farad/m]}$$

- ・クーロン力：電荷と線形関係(ベクトル演算が可能)、電荷と非接触で影響し合う遠隔作用
- ・3個以上の点電荷 \Rightarrow ベクトル加算



Charles-Augustin de Coulomb
1736年-1806年



$$\mathbf{F}_1 = \mathbf{F}_{21} + \mathbf{F}_{31}$$

☞ クーロン力による遠隔作用では直観性に欠ける：“場 (field)” という概念を導入

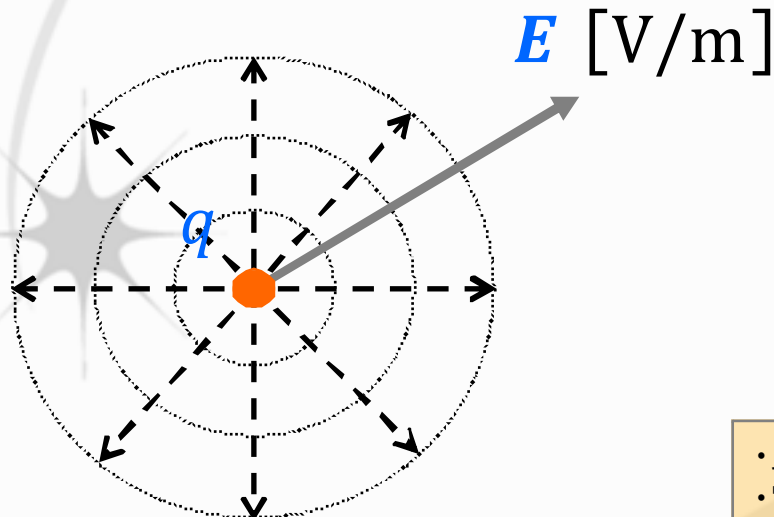
- ・ 荷電体が存在すると、その周囲には“電界”が生じ、その“場”の中に荷電体があると、その“場”から力を受ける
- ・ “場”の代わりに“界”という表現も多用されている（場：理学系；界：エンジニアリング, 工学系）
- ・ 電界 Electric field の定義

✓ q_1 に働く力
$$\mathbf{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} \mathbf{i}_r \rightarrow \mathbf{F} = q_2 \mathbf{E}, \quad \mathbf{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1}{r^2} \mathbf{i}_r$$

✓ q_1 によって元々の界 \mathbf{E} を乱すことはないとする
$$\mathbf{E} = \lim_{q \rightarrow 0} \frac{\mathbf{F}}{q}$$

✓ 複数の電荷が分布 --- 各々の点電荷による電界のベクトル的な和

--- 電荷の密度を ρ とすると、 $q = \rho dV$
$$\mathbf{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \frac{\rho}{r^2} \mathbf{i}_r dV$$



- ・ 比誘電率を導入して、電界を表示してください
- ・ 電界の単位はMSKで [V/m] ですが、これを誘導してください

- 電磁界とベクトル演算は密接な関係にある
- ベクトル場 \Rightarrow その回転 ($\text{rot}, \nabla \times$) と発散 ($\text{div}, \nabla \cdot$) が決まると、ベクトル場は一意に決定される
- ガウスの定理：ある閉じた曲面 S を通過する電界の力線の総量は S 内の全電荷の $1/\epsilon_0$ に等しい

・数学的表現 ---

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}, \quad \int \nabla \cdot \mathbf{E} dV = \int \mathbf{E} \cdot \mathbf{n} dS = \frac{1}{\epsilon_0} \int \rho dV$$

- 電界ベクトル \mathbf{E} の回転の意味は ---

$$\nabla \times \mathbf{E} = \nabla \times \left\{ \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \frac{\rho}{r^2} \mathbf{i}_r dV \right\} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \rho \nabla \times \left(\nabla \frac{1}{r} \right) dV = 0$$

- ・ $\nabla \times \mathbf{E} = \nabla \times (\nabla \phi) = 0$ を満足するような ϕ があるはず
- ・ これをスカラーポテンシャルという
- ・ 電界ベクトルの場合、この ϕ は電位となる： $\mathbf{E} = -\nabla V$
- 分極：誘電体内部に電界が印加された場合、その電子と原子核は互いに反対方向に微小変異する
このとき、誘電体は"分極"したという
- 電気変位：物質の内部では、外部からの電界と分極による電界の和で場が与えられる
電気変位 \mathbf{D} は誘電体の種類に関係なく、分極の効果 \mathbf{P} も組み入れた電気量となる

$$\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E} = \epsilon_0 \epsilon_r \mathbf{E} = \epsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P}$$

- 誘電率：物質内部に含まれている電荷が外部の電荷(電界)に対し、どれほど敏感に反応するか目安
- 誘電体の境界条件：対象となる領域に異なった物質による境界が存在

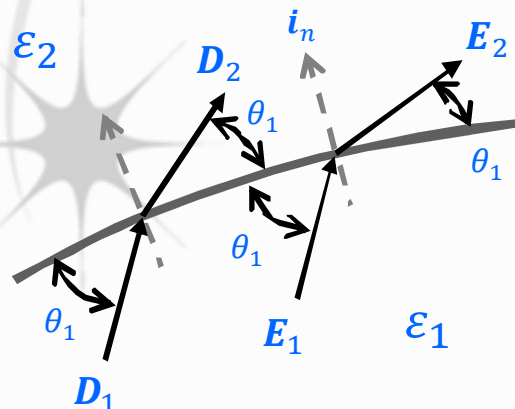


電気ベクトルは急激に変化する可能性があり、電磁界成分が境界上で満足すべき関係を調べておく必要がある

- 境界条件：点で成立する微分形より領域で成立する積分形でガウスの法則を適用

	接線成分	法線成分
電界	<連続>	不連続
電気変位	不連続	<連続>

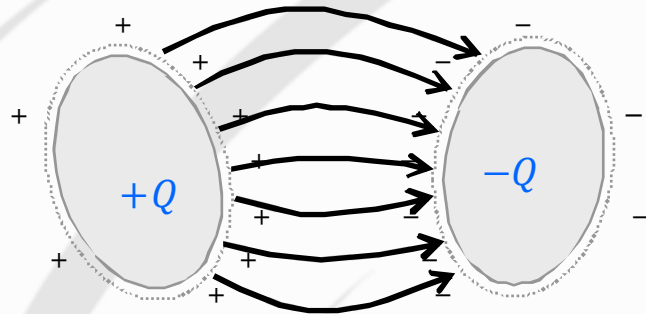
- ・ 例題： 屈折現象



$$\begin{aligned}
 D_{n1} &= D_1 \sin \theta_1, D_{n2} = D_2 \sin \theta_2 \\
 &\rightarrow D_1 \sin \theta_1 = D_2 \sin \theta_2 \\
 E_{t1} &= \frac{E_1}{\epsilon_1} \cos \theta_1, E_{t2} = \frac{E_2}{\epsilon_2} \cos \theta_2 \\
 &\rightarrow \frac{D_1}{\epsilon_1} \cos \theta_1 = \frac{D_2}{\epsilon_2} \cos \theta_2
 \end{aligned}$$

$$\epsilon_1 \tan \theta_1 = \epsilon_2 \tan \theta_2$$

■ 静電容量：二つの荷電体間の電位差と電荷量の比



・ 導体表面近傍の電界： $E_n = \rho_s / \epsilon_0$

・ $E = -\nabla V$ より

$$V = V_1 - V_2 = -\int E \cdot dl \propto Q$$

$$Q = CV$$

C : 静電容量 [F], Q : 電荷量 [C], V : 電位差 {V}

■ 場と電荷の間では力が及ぼし合っているので、場が存在している空間はエネルギーを蓄えている

■ 単位電荷 ($Q = 1$) を場 E の中で移動 ($A \rightarrow B$) させたときの仕事量： $F = QE$

$$W = \int F \cdot dl = \int_A^B E \cdot dl = -\int \nabla V \cdot dl = V(A) - V(B)$$

・ $W > 0$ その場にエネルギーを与える、 $W < 0$ その場からエネルギーを受ける

■ 静電エネルギー：何も無い状態から電荷を分布させるのに要したエネルギー

$$W = \frac{1}{2} \int \epsilon |E|^2 dV$$