

## 平成21年度電磁気学A

担当:鳥井 寿夫 (とりのい よしお) 居室:16号館224 A  
tel: 03-5454-6757 (内線46757)  
e-mail: ytorii@phys.c.u-tokyo.ac.jp  
http://maildbs.c.u-tokyo.ac.jp/~torii

授業毎週火曜 2限 (10:40 ~ 12:10 )  
10/06 ~ 12/22, 1/12 ~ 1/26 (計13回)  
11月24日は、駒場祭のため休講日:

## 講義資料

<http://maildbs.c.u-tokyo.ac.jp/~torii/lectures/EM/index.htm>  
(東京大学教養学部HP > 大学院総合文化研究科 > 相關基礎科学系 > 教員 研究室 > 鳥井寿夫 > 教員ホームページ > 電磁気学)  
にて  
・レジュメ (講義で配ったもの)  
・スライド資料 (講義で使用したもの)  
過去問題を公開しています。

## 評価

レポート点 (30%) + 期末試験 (70%)

レポートの提出期限 次回の授業の開始前。教室にて回収。

## 注意!

レポートは決して他人のものを写してはならない。  
教科書は見てもよいが、自分の言葉で解答を表現すること (教科書の丸写しはカンニングとみなす)。

## Clicker Questions

雷が落ちそうなときは、車の中にい  
れば安全である

A はい  
B いいえ

雷が落ちそうなときは、車の中にい  
れば安全である

A はい  
B いいえ

ウランの原子力エネルギーは「核力」という非電氣的な力のエネルギーである

- A はい
- B いいえ

ウランの原子力エネルギーは「核力」という非電氣的な力のエネルギーである

- A はい
- B いいえ

電子が発見されたのは、電磁気学の基本法則 (マクスウェル方程式) が発見された1864年の

- A 前
- B 後

電子が発見されたのは、電磁気学の基本法則 (マクスウェル方程式) が発見された1864年の

- A 前
- B 後

原子には大きさが

- A ある
- B ない

原子には大きさが

- A ある
- B ない

原子核には大きさが

- A ある
- B ない

原子核には大きさが

- A ある
- B ない

電子には大きさが

- A ある
- B ない

電子には大きさが

- A ある
- B ない

質量は

- A 保存する
- B 保存しない

質量は

- A 保存する
- B 保存しない

電荷は

- A 保存する
- B 保存しない

電荷は

- A 保存する
- B 保存しない

人間の両手間の抵抗の値は

- A 100 くらい
- B 1M くらい

人間の両手間の抵抗の値は

- A 100 くらい
- B 1M くらい

触ると危ないのはどっち

- A 1000V,1mAの電源
- B 1mV、1000Aの電源

触ると危ないのはどっち

- A 1000V,1mAの電源
- B 1mV、1000Aの電源

30Wの電球と2つ、または3つを直列につなぐ。全体として明るいのは

- A 2つ直列
- B 3つ直列

30Wの電球と2つ、または3つを直列につなぐ。全体として明るいのは

- A 2つ直列
- B 3つ直列

30Wの電球と、100Wの電球を直列につなぐ。明るいのは

- A 30W電球
- B 100W電球

30Wの電球と、100Wの電球を直列につなぐ。明るいのは

- A 30W電球
- B 100W電球

お疲れ様でした

電磁気学のセンスと数学的能力は別物である

## この講義の目標

### 電磁気学の基本法則の理解

時間変化しない電磁場 (静電場、静磁場)

$$F(r) = q(E(r) + v \times B(r)) \quad (\text{ローレンツ力})$$

$$E(r) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \frac{r(r')}{|r-r'|^3} e_{r-r'} dV' \Leftrightarrow \begin{cases} \oint_S E(r) \cdot dS = \int_V \rho(r) dV & (\text{電場のガウスの法則}) \\ \oint_C E(r) \cdot dr = 0 & (\text{循環電位の法則}) \end{cases}$$

$$B(r) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{j(r') \times e_{r-r'}}{|r-r'|^3} dV' \Leftrightarrow \begin{cases} \oint_C B(r) \cdot dr = \mu_0 \int_S j(r) \cdot dS & (\text{アンペールの法則}) \\ \oint_S B(r) \cdot dS = 0 & (\text{磁場のガウスの法則}) \end{cases}$$

時間変化する電磁場

$$F(r) = q(E(r) + v \times B(r))$$

$$\begin{cases} \oint_S E(r) \cdot dS = \int_V \rho(r) dV \\ \oint_C E(r) \cdot dr = - \int_S \frac{\partial B(r)}{\partial t} \cdot dS \\ \oint_C B(r) \cdot dr = \mu_0 \int_S \left( j(r) + e_0 \frac{\partial E(r)}{\partial t} \right) \cdot dS \\ \oint_S B(r) \cdot dS = 0 \end{cases}$$

しかし、これらの基本方程式を知っていることは、物理を理解したことにならない

## この講義の目標 電磁現象の定性的理解

電磁気学を学べば、例えば次のようなことが理解できます

車の中は落雷に対して安全である (静電遮蔽)

ウランの核分裂で放出されるエネルギーは原子核の静電エネルギー (原子力エネルギーはウランの場合、実は電気エネルギー)

磁気力とは、クーロン力と相対論的効果の現れである (磁気力は座標系によってはクーロン力とみなせる)

光は電磁場である

## 教科書

特に指定しない。以下に参考書を挙げる (読み物と思えばよい)。

加藤正昭著・電磁気学 (東京大学出版会)

本の薄さの割には教養で習うべき電磁気学をすべて要領よままとめてあるスタンダードな教科書。具体例や補足説明、演習問題も多い。

ファイマン物理学III 電磁気学 (岩波書店)

ファイマン (1965年 ノーベル物理学賞) が実際にカリフォルニア工科大学で行った講義をまとめたもの。物理現象の本質を簡易な言葉で説明する能力において、彼を上回る人はいないであろう。不朽の教科書。

太田浩一著・電磁気学の基礎、(シュプリンガー・ジャパン)

「すべての法則や公式の原論文を読むまで書かない」というポリシーのもとに執筆されたマニアックな教科書。電磁気学の歴史書とも言える。記述は極めて丁寧だが、内容は高度である。ベクトル解析に慣れてから読むとよい。

## 電磁気学、(太田浩一著)



## 太田先生の本に書いてあること

- 磁場の変化が電場を作り、電場の変化が磁場を作る、というのは間違い (エーテルの亡霊)。電磁波の源は全て電荷の振動である。
- ある物理学者が電気力 (クーロンの法則) は知っているも磁気力は知らなかったとする。その物理学者はクーロンの法則と相対論だけからマクスウェル方程式を全て導くことができる。
- $B$  (磁束密度) でなく  $H$  (磁場) を実在とする立場は認める訳にはいかない。Hは便宜的 (人工的) に定義された物理量である (ファイマンも同様)。

## 古典物理 (~ 1905) の全て

マクスウェルの方程式

$$\begin{aligned} \nabla \cdot \mathbf{E} &= \frac{\rho}{\epsilon_0} && (\text{閉局面を通る電束}) = (\text{内部の電荷})/\epsilon \\ \nabla \times \mathbf{E} &= -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} && (\text{ループをめぐり } \mathbf{E} \text{ の線積分}) = -\frac{d}{dt}(\text{ループを通る } \mathbf{B} \text{ の流束}) \\ \nabla \cdot \mathbf{B} &= 0 && (\text{閉局面を通る } \mathbf{B} \text{ 流束}) = 0 \\ \epsilon^2 \nabla \times \mathbf{B} &= \frac{\mathbf{j}}{\epsilon_0} + \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} && \epsilon^2(\text{ループをめぐり } \mathbf{B} \text{ の線積分}) = (\text{ループを通る電流})/\epsilon_0 \\ &&& + \frac{d}{dt}(\text{ループを通る電束}) \end{aligned}$$

力の法則

$$\mathbf{F} = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B})$$

運動の法則

$$\frac{d\mathbf{p}}{dt} = \mathbf{F} \quad \text{ただし、} \quad \mathbf{p} = \frac{m\mathbf{v}}{\sqrt{1-v^2/c^2}} \quad (\text{アインシュタインの修正によるニュートンの法則})$$

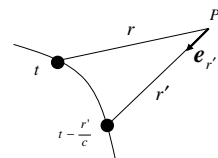
万有引力

$$\mathbf{F} = -G \frac{m_1 m_2 (\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2)}{|\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2|^3} \quad \text{ファイマン物理学 電磁気学 第18章 マクスウェル方程式より}$$

## 任意の運動をする点電荷のつくる電場 リエナール-ヴィーヒルトポテンシャル (ファイマン物理学 3章、20章)

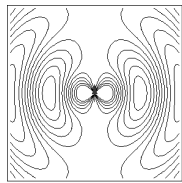
$$\mathbf{E} = -\frac{q}{4\pi\epsilon_0} \left[ \frac{\mathbf{e}_r'}{r'^2} + \frac{r'}{c} \frac{d}{dt} \left( \frac{\mathbf{e}_r'}{r'^2} \right) + \frac{1}{c^2} \frac{d^2}{dt^2} \mathbf{e}_r' \right]_{t-r'/c}$$

$$\mathbf{B} = -\frac{\mathbf{e}_r' \times \mathbf{E}}{c}$$



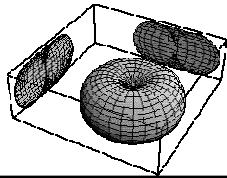
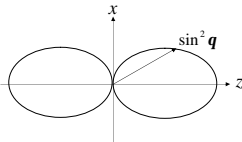
これを重ね合わせることで、世の中全ての電磁現象を説明できる

# 振動する電荷の輻射パターン

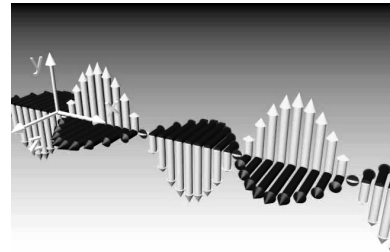


双極子アンテナから放射される電気力線

放射強度の方向依存性

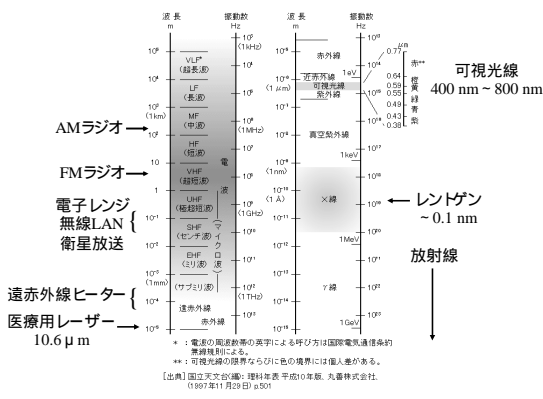


# + x方向に進行する電磁波



<http://web.mit.edu/8.02t/www/>

表1 電磁波の波長と振動数



# 第0章 単位系

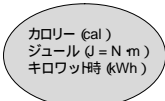
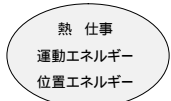
## 物理量の次元と単位

- 物理量 (physical quantity) : 測定によって定量化される量
- 単位 (unit) : 各物理量の基準となる大きさ
- 次元 (dimension) : 物理量の質的違いを表す概念 (足すことに意味がある物理量は同じ次元を持つ)

(例)

エネルギーの次元を持つ物理量

エネルギーの単位



## 国際単位系 (SI) (基本単位)

	物理量	単位の名称	記号
基	長さ	メートル	m
	質量	キログラム	kg
本	時間	秒	s
	電流	アンペア	A
単	温度	ケルビン	K
	物質量	モル	mol
位	光度	カンデラ	cd
補助単位	平面角	ラジアン	rad
	立体角	ステラジアン	sr

MKSA 単位系

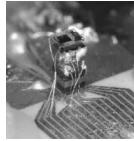
\* その他の単位は、上の基本単位の乗除のみで表現できる (組立単位)

## 国際単位系 (SI) (組立単位)

	物理量	記号	単位の名称	SI基本単位による表現
組	周波数 (1 / 時間)	Hz	ヘルツ	$s^{-1}$
	力 (質量 × 加速度)	N	ニュートン	$m \cdot kg \cdot s^{-2}$
立	圧力 (力 / 面積)	Pa	パスカル	$N/m^2 = m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2}$
	エネルギー (力 × 距離)	J	ジュール	$N \cdot m = m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$
単	仕事率 (仕事 / 時間)	W	ワット	$J/s = m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}$
	電気 (電流 × 時間)	C	クーロン	$A \cdot s$
位	電圧 (エネルギー / 電気量)	V	ボルト	$J/C = m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-1}$
	静電容量	F	ファラッド	$C/V = m^{-2} \cdot kg^{-1} \cdot s^4 \cdot A^2$

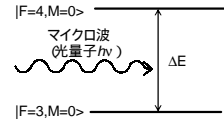
## 時間の単位 (セシウム原子時計)

1 sは、 $^{133}\text{Cs}$ の基底状態の二つの超微細構造準位 ( $F=4, M=0$ および $F=3, M=0$ )の間のマイクロ波遷移に対応する放射の9,192,631,770周期の継続時間



米国立標準技術研究所が開発した超小型原子時計の心臓部 (2004年9月2日朝日新聞より)

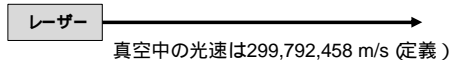
<  $^{133}\text{Cs}$ , 6S軌道のエネルギー準位 >



マイクロ波がCs原子と共鳴 ( $\Delta E = h\nu$ ) するときの周波数を9,192,631,770Hzと定義

## 長さの単位

1mは、光が真空中を1/299792458秒間に進む距離 (1905年にアインシュタインが提唱した光速不変の原理を信じ、光速は299792458 m/sであると定義)



## 質量の単位

1kgは、キログラム原器 (直径、高さとも39mmの円柱形で、白金90%、イリジウム10%の合金) の質量



## 電流の単位

1Aは、真空中に1 mの間隔で平行に置かれた無限に小さい円形断面積を有する無限に長い2本の直線状導体のそれぞれを流れ、これらの導体に1 mごとに  $2 \times 10^{-7}$  Nの力を及ぼし合う一定の電流

