

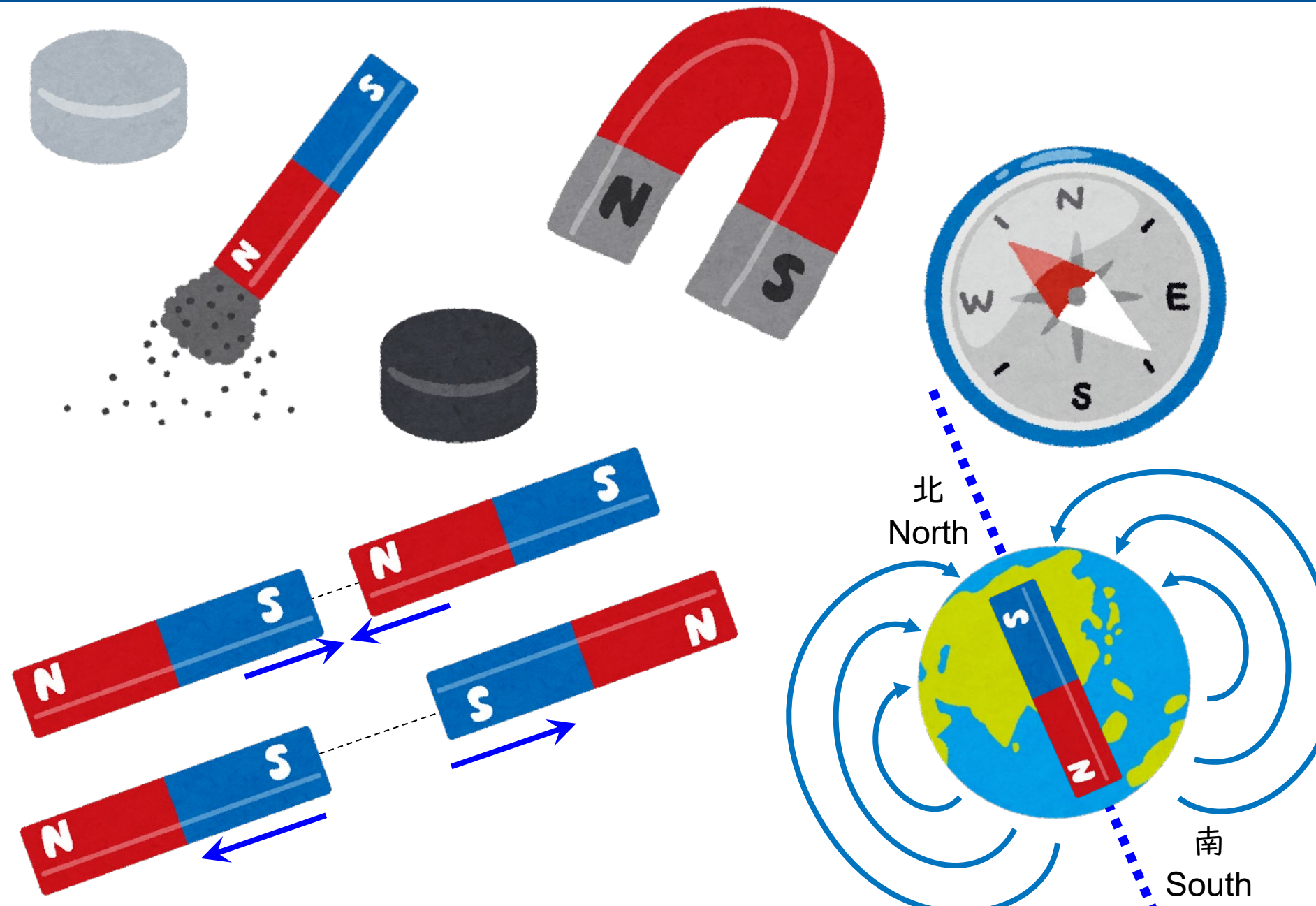
# 基礎物理学 II

## (第7回) 磁場

### 【今日の内容】

- 磁力
- 磁場

# 磁石と磁力



# (復習) クーロンの法則

力学との対応

静電気力 - 万有引力

復習

## クーロンの法則

「2つの電荷は互いに力を及ぼし合い、その大きさ  $F$ [N] は、それぞれの電荷量  $q_1$ [C],  $q_2$ [C] の積に比例し、物体間の距離  $r$ [m] の2乗に反比例する」

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} \cdot \frac{r}{r}$$

ここで  $\epsilon_0$  は真空の誘電率で、

$$\epsilon_0 \cong 8.85 \times 10^{-12} \text{ [C}^2\text{/(N} \cdot \text{m}^2\text{)]}$$

復習

## 万有引力の法則

「2つの物体は互いに引力を及ぼし合い、その大きさ  $F$ [N] は、それぞれの質量  $M$ [kg],  $m$ [kg] の積に比例し、物体間の距離  $r$ [m] の2乗に反比例する」

$$F = G \frac{Mm}{r^2} \cdot \frac{r}{r}$$

ここで  $G$  は万有引力定数といい、

$$G \cong 6.673 \times 10^{-11} \text{ [N} \cdot \text{m}^2\text{/kg}^2\text{]}$$

# 磁気に関するクーロンの法則



電荷



単独でも存在できる

(磁氣的)

「2つの磁荷は互いに力を及ぼし合い、その大きさ  $F$  [N] は、<sup>ウェーバ</sup>それぞれの磁荷  $m_1$  [Wb],  $m_2$  [Wb] の積に比例し、物体間の距離  $r$  [m] の2乗に反比例する」

$$F =$$

ここで  $\mu_0$  は \_\_\_\_\_ で、

$$\mu_0 \cong 1.26 \times 10^{-6} \text{ [Wb}^2 / (\text{N} \cdot \text{m}^2)]$$

現在のところ、N極だけS極だけという磁極 (モノポール) は発見されていない  
(理論的には首都大の多々良グループにより示されている)

復習

クーロンの法則

「2つの電荷は互いに力を及ぼし合い、その大きさ  $F$  [N] は、それぞれの電荷量  $q_1$  [C],  $q_2$  [C] の積に比例し、物体間の距離  $r$  [m] の2乗に反比例する」

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} \cdot \frac{r}{r}$$

ここで  $\epsilon_0$  は真空の誘電率で、

$$\epsilon_0 \cong 8.85 \times 10^{-12} \text{ [C}^2 / (\text{N} \cdot \text{m}^2)]$$

# 磁荷と透磁率

$$F = \frac{1}{4\pi\mu_0} \frac{m_1 m_2}{r^2} \cdot \frac{r}{r}$$

磁荷 2つの等しい磁荷が1m離れている場合にはたらく力が

$$6.33 \times 10^4 [\text{N}] \left( = \frac{1}{4\pi\mu_0} \right)$$

となるときの磁荷を 1 Wb と定義する。

透磁率 その物質、もしくは空間がどれだけ磁力をはたらかせやすいかを表す指標。真空の透磁率を基準に比透磁率を使って比較する。

正確な定義はもう少し進んでから

$$\mu = \mu_r \mu_0$$

$$\mu_0 \cong 1.26 \times 10^{-6} [\text{Wb}^2 / (\text{N} \cdot \text{m}^2)]$$

物質	比透電率
高純度鉄	200000
パーマロイ	100000
純鉄	5000
ニッケル	100-500
ネオジウム磁石	1.05
アルミニウム	1.000022
空気	1.00000037
真空中	1
銅	0.999994
水	0.999992

# 例題Ⅰ [透磁率]

透磁率の単位は  $[\text{Wb}^2/(\text{N} \cdot \text{m}^2)]$  であるが、 $[\text{N}/\text{A}^2]$  と書くこともできる。このことから磁荷の単位  $[\text{Wb}]$  をSI単位系 ( $[\text{m}]$ ,  $[\text{kg}]$ ,  $[\text{s}]$ ,  $[\text{A}]$ だけを使って) で表わせ。

$$[\mu] = \left[ \frac{\text{Wb}^2}{\text{N} \cdot \text{m}^2} \right] = \left[ \frac{\text{N}}{\text{A}^2} \right]$$

$$[\text{Wb}^2] = \left[ \frac{\text{N}}{\text{A}^2} \cdot \text{N} \cdot \text{m}^2 \right] = \left[ \frac{\text{N}^2 \text{m}^2}{\text{A}^2} \right]$$

$$F = ma \text{ より } [\text{N}] = \left[ \text{kg} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right] \text{ だから}$$

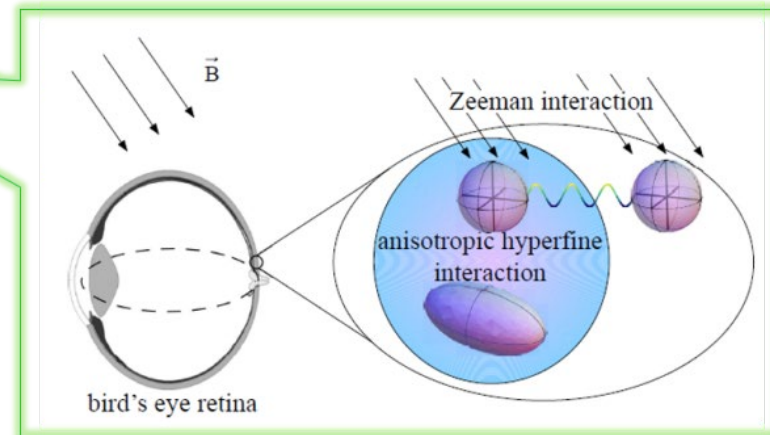
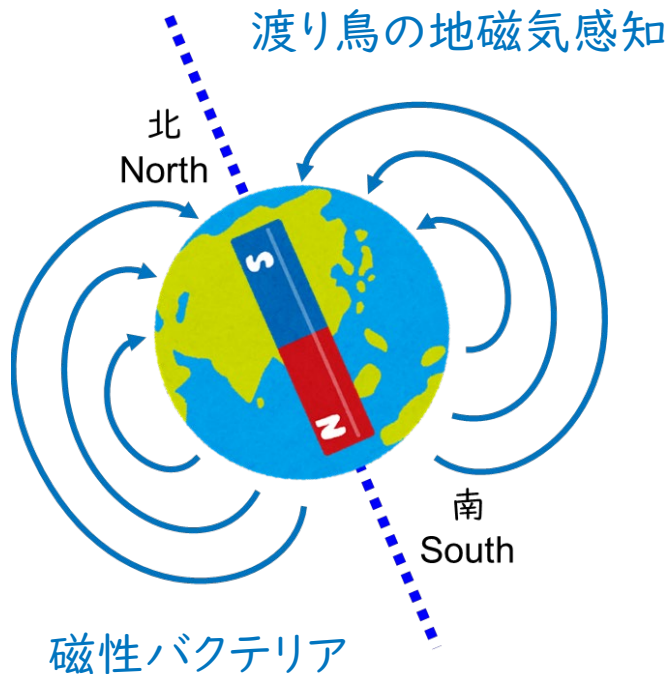
$$[\text{Wb}^2] = \left[ \text{kg}^2 \cdot \frac{\text{m}^2}{\text{s}^4} \cdot \frac{\text{m}^2}{\text{A}^2} \right] = \left[ \text{kg}^2 \cdot \frac{\text{m}^4}{\text{s}^4 \text{A}^2} \right]$$

$$\therefore [\text{Wb}] = \left[ \text{kg} \cdot \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2 \text{A}} \right] = \underline{\underline{[\text{m}^2 \cdot \text{kg}^1 \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{A}^{-1}]}}$$

# 演習1 [透磁率]

例題1の結果を用いて透磁率の単位をSI単位系 ( $[m]$ ,  $[kg]$ ,  $[s]$ ,  $[A]$ だけを使って) で表わせ。

# [閑話] 磁力を感じられる生物



光励起された2つの電子スピンと1つの核スピンを表す

<https://www.chem-station.com/blog/2021/07/compass.html>  
Gauger, EM., et al., PRL **106**, 040503 (2011).



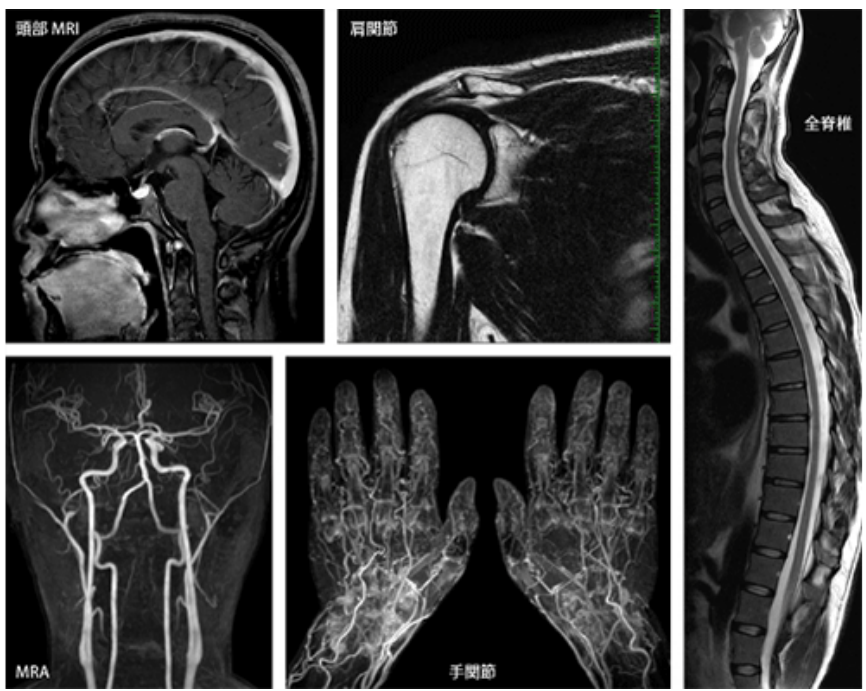
体内に 40nmほどの小さなマグネタイト ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) の粒が並ぶバクテリア

北半球では地磁気の磁力線は北方向の斜め下を  
おいている。

微好気性(酸素濃度が低いところを好む)である  
ため、水中の酸素濃度が低いより深いところを目  
指して進んでいく



# [閑話] 生体磁気



2023年 第70回応用物理学会春季学術講演会 シンポジウム

## スピントロニクス・マグネティクスによる 微弱生体信号計測技術の進展

Progress of the feeble biological signal measurement  
technique by spintronics and magnetics

2023年 3月 18日 (土) 13:30 ~ ハイブリッド開催予定

近年、様々なタイプの磁気センサの高感度化が進んでおり、微弱な生体磁場信号が高精度に検出可能になっています。本シンポジウムでは各種磁気センサの開発において世界的な第一人者の先生方に最近の技術の進展についてご講演いただきます。

【プログラム (招待講演者分)】 講演者/講演題目 (敬称略、仮題)

- 大兼 幹彦 (東北大) TMRセンサによる生体磁場計測の進展
- 荒井 慧悟 (東工大) ダイヤモンド量子イメージングによる心磁計測
- 千葉 大地 (大阪大) フレキシブル磁気抵抗素子による生体力学情報センシング
- 藪上 信 (東北大) 磁気センサによる微生物検出
- 足立 善昭 (金沢工大) 神経磁場計測システム
- 伊藤 陽介 (京都大) 光ポンピング磁気センサの生体磁場計測への応用

企画: 応用物理学会スピントロニクス研究会 <http://annex.jsap.or.jp/spintro/>  
世話人: 西沢望 (北里大) 西谷雄 (パナソニック) 野村光 (阪大) 池添泰弘 (日本工大)

# 磁場 (磁界)

磁極の周りの空間が他の磁極に力を及ぼす場を  
 という (電場(電界)に対応)

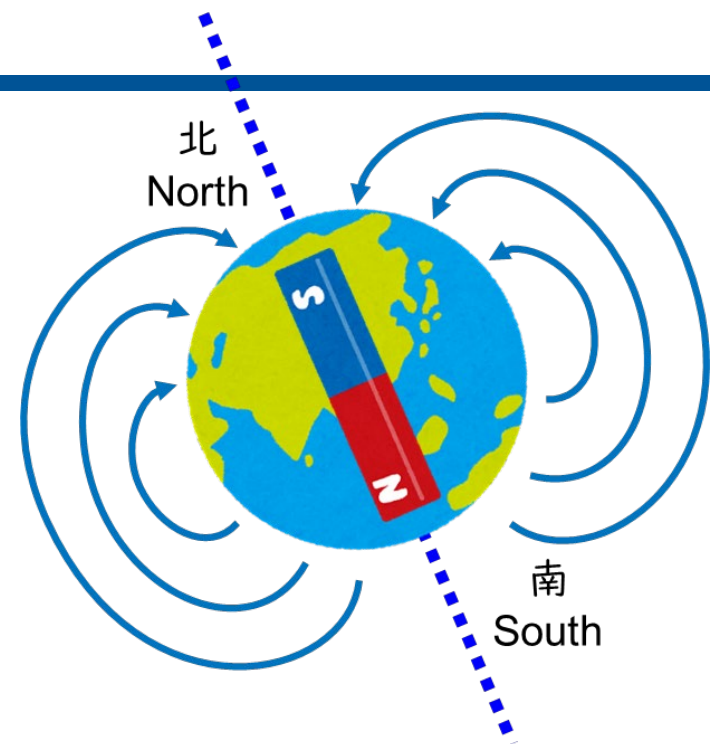
(磁界の向き)

N極にはたらく力の向きを+

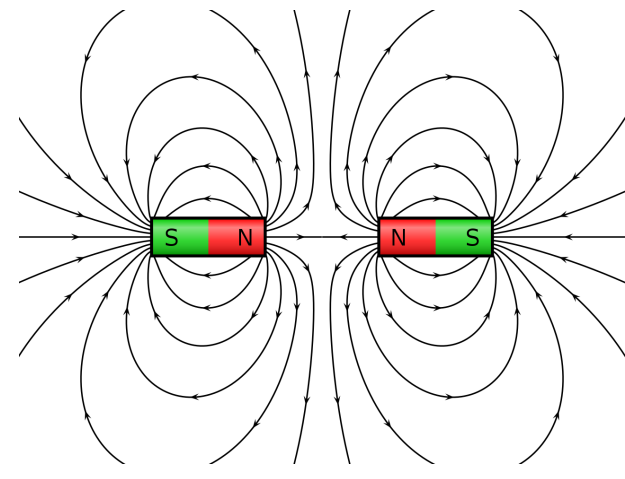
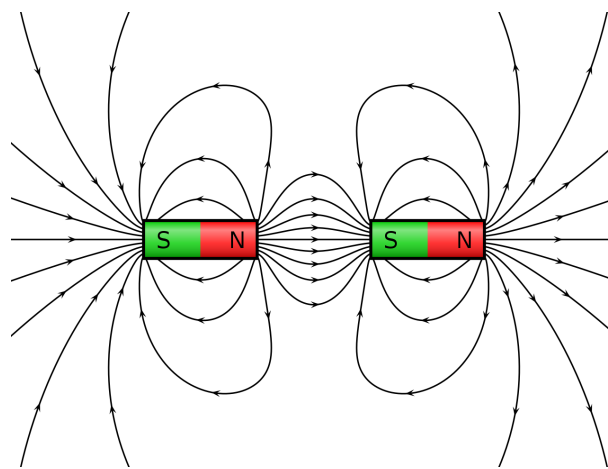
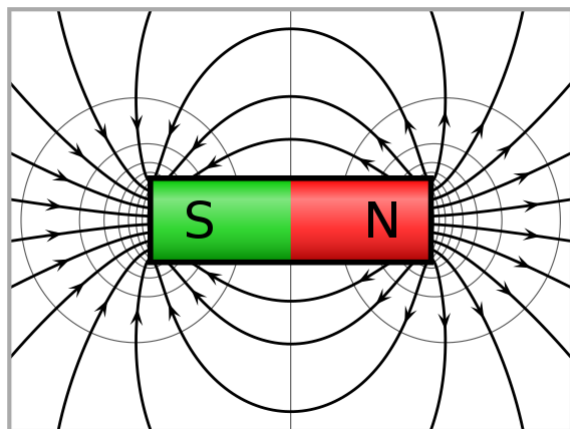
(磁場の大きさ)

1 Wb あたりの力で表す

単位は [N/Wb]



磁場を見えるように表現したい →



# (復習) クーロンの法則と電場

## 力学との対応

静電気力 - 万有引力

### クーロンの法則

「2つの電荷は互いに力を及ぼし合い、その大きさ  $F[\text{N}]$  は、それぞれの電荷量  $q[\text{C}]$ ,  $q_0[\text{C}]$  の積に比例し、物体間の距離  $r[\text{m}]$  の2乗に反比例する」

$$F = k \frac{qq_0}{r^2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qq_0}{r^2} \quad k \cong 9.0 \times 10^9 \text{ [N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2\text{]}$$

$$F = q \cdot \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_0}{r^2} \cdot \frac{\mathbf{r}}{r} = q \cdot \mathbf{E} : \text{電場}$$

多くの電荷から電場を受ける時は

$$\mathbf{E}(\mathbf{x}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_i \frac{q_i}{|\mathbf{x} - \mathbf{r}_i|^2} \frac{(\mathbf{x} - \mathbf{r}_i)}{|\mathbf{x} - \mathbf{r}_i|}$$

大きさ
方向の  
単位ベクトル

### 復習

### 万有引力の法則

「2つの物体は互いに引力を及ぼし合い、その大きさ  $F[\text{N}]$  は、それぞれの質量  $M[\text{kg}]$ ,  $m[\text{kg}]$  の積に比例し、物体間の距離  $r[\text{m}]$  の2乗に反比例する」

$$F = G \frac{Mm}{r^2} \quad G \cong 6.673 \times 10^{-11} \text{ [N} \cdot \text{m}^2/\text{kg}^2\text{]}$$

$$F = m \cdot G \frac{M}{r^2} \cdot \frac{\mathbf{r}}{r} = m \cdot \mathbf{g} : \text{重力場}$$

多くの物体(天体)から重力場を受ける時は

$$\mathbf{g}(\mathbf{x}) = G \sum_i \frac{M_i}{|\mathbf{x} - \mathbf{r}_i|^2} \frac{(\mathbf{x} - \mathbf{r}_i)}{|\mathbf{x} - \mathbf{r}_i|}$$

大きさ
方向の  
単位ベクトル

## (磁氣的)クローンの法則

「2つの磁荷は互いに力を及ぼし合い、その大きさ  $F$ [N] は、それぞれの磁荷  $m_1$ [Wb],  $m_2$ [Wb] の積に比例し、物体間の距離  $r$ [m] の2乗に反比例する」

$$F = \frac{1}{4\pi\mu_0} \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

$$\mu_0 \cong 1.26 \times 10^{-6} \text{ [Wb}^2\text{/(N} \cdot \text{m}^2\text{)]}$$

$$F = m \cdot \frac{1}{4\pi\mu_0} \frac{m_0}{r^2} \cdot \frac{\mathbf{r}}{r} = m \cdot \underline{\mathbf{H}} :$$

多くの電荷から電場を受ける時は

$$\mathbf{H}(\mathbf{x}) = \frac{1}{4\pi\mu_0} \sum_i \underbrace{\frac{m_0}{|\mathbf{x} - \mathbf{r}_i|^2}}_{\text{大きさ}} \underbrace{\frac{(\mathbf{x} - \mathbf{r}_i)}{|\mathbf{x} - \mathbf{r}_i|}}_{\text{方向の単位ベクトル}}$$

## クローンの法則

「2つの電荷は互いに力を及ぼし合い、その大きさ  $F$ [N] は、それぞれの電荷量  $q$ [C],  $q_0$ [C] の積に比例し、物体間の距離  $r$ [m] の2乗に反比例する」

$$F = k \frac{qq_0}{r^2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qq_0}{r^2}$$

$$k \cong 9.0 \times 10^9 \text{ [N} \cdot \text{m}^2\text{/C}^2\text{]}$$

$$\epsilon_0 \cong 8.85 \times 10^{-12} \text{ [C}^2\text{/(N} \cdot \text{m}^2\text{)]}$$

$$F = q \cdot \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_0}{r^2} \cdot \frac{\mathbf{r}}{r} = q \cdot \underline{\mathbf{E}} : \text{電場}$$

多くの電荷から電場を受ける時は

$$\mathbf{E}(\mathbf{x}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_i \underbrace{\frac{q_0}{|\mathbf{x} - \mathbf{r}_i|^2}}_{\text{大きさ}} \underbrace{\frac{(\mathbf{x} - \mathbf{r}_i)}{|\mathbf{x} - \mathbf{r}_i|}}_{\text{方向の単位ベクトル}}$$

# 磁場の単位

## (磁氣的)クローンの法則

「2つの磁荷は互いに力を及ぼし合い、  
その大きさ  $F$  [N] は、  
それぞれの磁荷  $m_1$  [Wb],  $m_2$  [Wb] の積に比例し、  
物体間の距離  $r$  [m] の2乗に反比例する」

$$F = \frac{1}{4\pi\mu_0} \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

$$\mu_0 \cong 1.26 \times 10^{-6} \text{ [Wb}^2 / (\text{N} \cdot \text{m}^2)]$$

$$F = m \cdot \frac{1}{4\pi\mu_0} \frac{m_0}{r^2} \cdot \frac{\mathbf{r}}{r} = m \cdot \underline{\mathbf{H}} : \text{磁場}$$

多くの電荷から電場を受ける時は

$$\mathbf{H}(\mathbf{x}) = \frac{1}{4\pi\mu_0} \sum_i \frac{m_0}{\underbrace{|\mathbf{x} - \mathbf{r}_i|^2}_{\text{大きさ}}} \frac{(\mathbf{x} - \mathbf{r}_i)}{\underbrace{|\mathbf{x} - \mathbf{r}_i|}_{\text{方向の単位ベクトル}}}$$

磁場の単位は

$$F = m \cdot H$$

から

$$[\text{N}] = [\text{Wb}] \cdot [H]$$

なので、 $[H] = [ \quad ]$  となる。

# 磁束密度

## (磁氣的)クーロンの法則

「2つの磁荷は互いに力を及ぼし合い、その大きさ  $F$  [N] は、それぞれの磁荷  $m_1$  [Wb],  $m_2$  [Wb] の積に比例し、物体間の距離  $r$  [m] の2乗に反比例する」

$$F = \frac{1}{4\pi\mu_0} \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

$$\mu_0 \cong 1.26 \times 10^{-6} \text{ [Wb}^2 / (\text{N} \cdot \text{m}^2)]$$

$$F = m \cdot \frac{1}{4\pi\mu_0} \frac{m_0}{r^2} \cdot \frac{\mathbf{r}}{r} = m \cdot \mathbf{H} : \text{磁場}$$

多くの電荷から電場を受ける時は

$$\mathbf{H}(\mathbf{x}) = \frac{1}{4\pi\mu_0} \sum_i \frac{m_0}{\underbrace{|\mathbf{x} - \mathbf{r}_i|^2}_{\text{大きさ}}} \frac{\underbrace{(\mathbf{x} - \mathbf{r}_i)}_{\text{方向の単位ベクトル}}}{|\mathbf{x} - \mathbf{r}_i|}$$

区別のため、真空中の磁場を  $H_0$  とすると

$$H_0 = \frac{1}{4\pi\mu_0} \frac{m_0}{r^2} \cdot \frac{\mathbf{r}}{r}$$

真空ではない場合(物質中)は、真空の透磁率  $\mu_0$  の部分が物質の透磁率  $\mu$  に置き換わる。物質中の磁場の強さ  $H$  は

$$H = \frac{1}{4\pi\mu} \frac{m_0}{r^2} = \frac{\mu_0}{\mu} \frac{1}{4\pi\mu_0} \frac{m_0}{r^2}$$

$$= \frac{1}{\mu} \mu_0 H_0$$

この空間によらない部分を磁束密度  $B$  と呼ぶ。

$$B = \mu_0 H_0$$

なぜ磁束密度と呼ぶのかは次回以降

物質中の磁束密度は

$$B = \mu_0 H_0 = \frac{1}{4\pi} \frac{m_0}{r^2} \cdot \frac{\mathbf{r}}{r} = \underline{\hspace{2cm}}$$

## 演習2 [磁場の単位]

例題1、演習1の結果と用いて磁束密度の単位をSI単位系 ([m], [kg], [s], [A]だけを使って) で表わせ。