

平成22年度 エV系(社会環境工学科) 第12回 電磁気学 I
天野 浩

項目

ローレンツ力 磁性体 磁界と磁束密度

•本日は、磁界中を運動する荷電粒子が受ける力、磁気を帯びる磁性体 磁界と磁束密度に関する定義について学習します。

中国の四大発明 紙・火薬・印刷・羅針盤



中国の方位磁石 指南(司南)
紀元前200年ころ

歴史的背景 地磁気に関する最初の学術的説明

1269年 ペトルス・ペレグリヌス(Petrus Peregrinus)
「磁気書簡」： 磁気の引力、磁化作用、南北極の区別

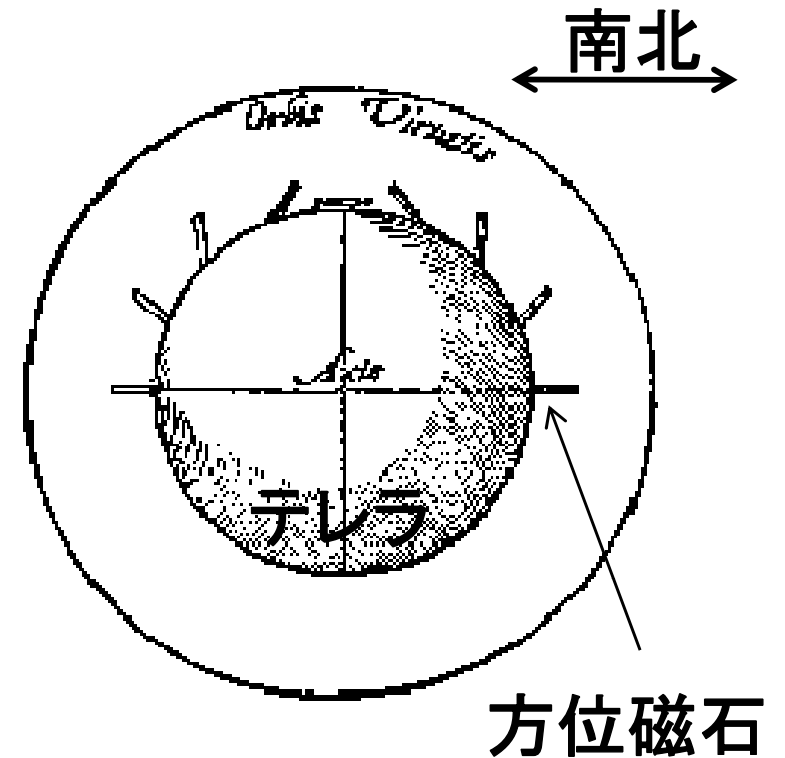
1600年 ウィリアム・ギルバート (William Gilbert)

”磁石について”(De magnetete) :

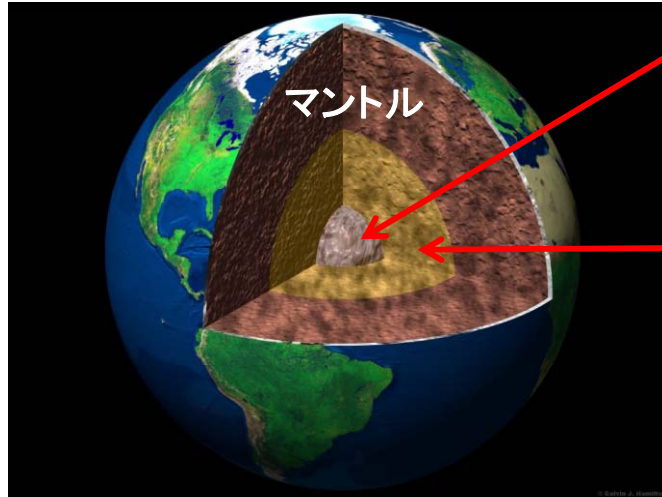
- * 磁針が北を向く理由
- * 同極は反発、異極は引合による 極性判別法
- * 磁石を半分に折っても1つの極だけの磁石を作ること
はできないこと。
- * 天然磁石製の地球の模型”テレラ”を作製、地球は大
きな磁石であることを実験的に証明。



William Gilbert
(1540-1603、英)

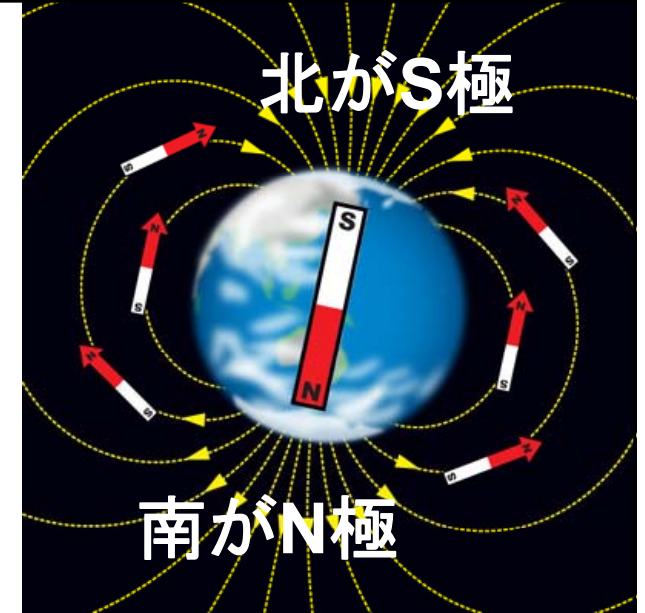


ギルバートによる
地磁気の説明



コア内殻

コア外殻
(液体鉄)

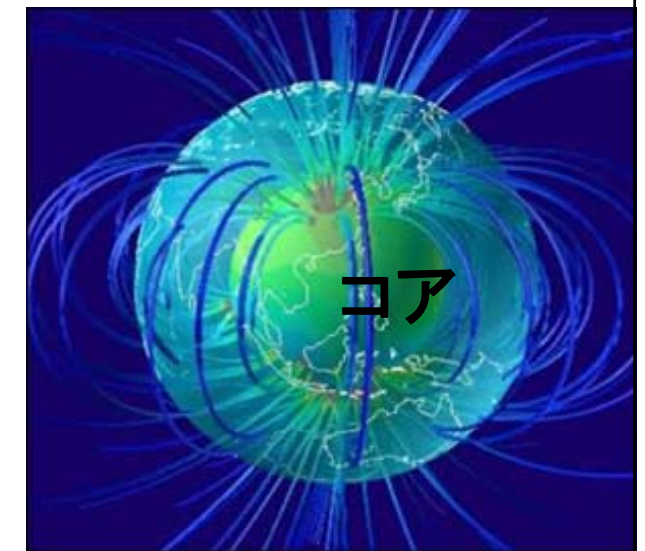


* コアに初期電流が流れる。→電流は周囲に磁界をつくる。→その磁界中で、液体鉄が熱対流運動し、誘導起電力を生じる。→その起電力により、電流が流れる。(自励ダイナモ) 数十億A、数mA/m² 程度

* 磁界中を電流が流れるとローレンツ力が発生し、熱対流を妨げる向きに働くので、電流と対流とは適当にバランスし、ある大きさに保たれる。

コアの熱対流は46億年前の高温状態から、地球が冷えて行く途中であることが原因

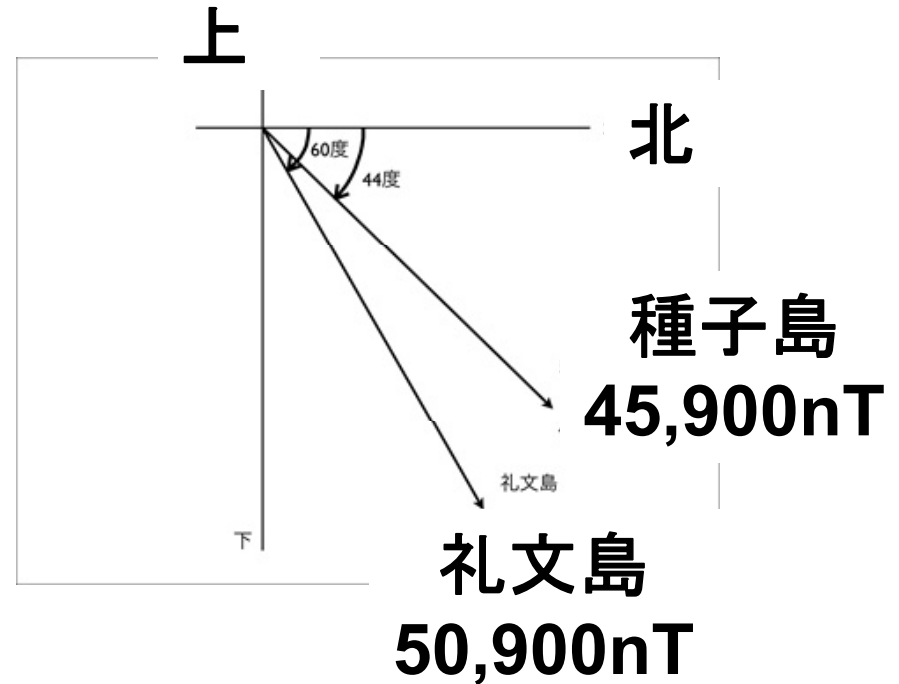
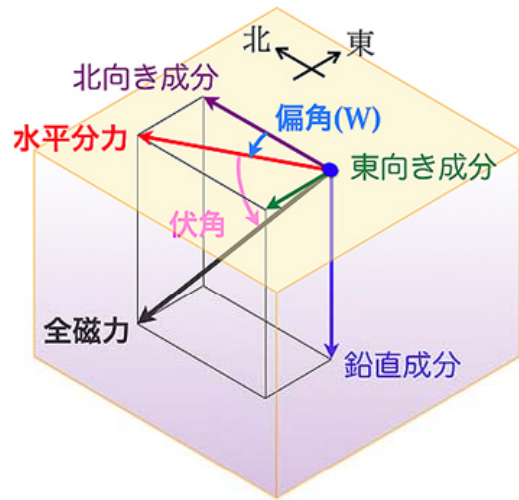
地球は宇宙から見ると大きな磁石



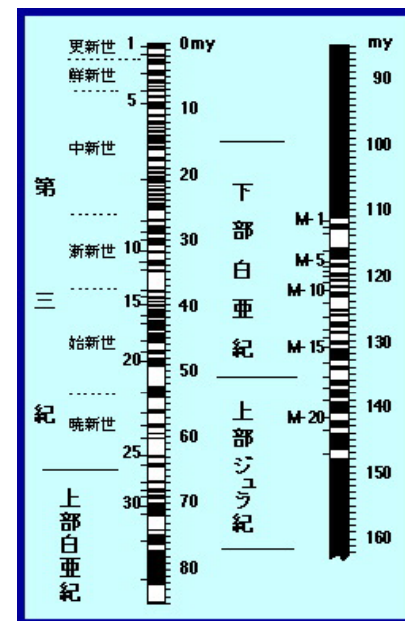
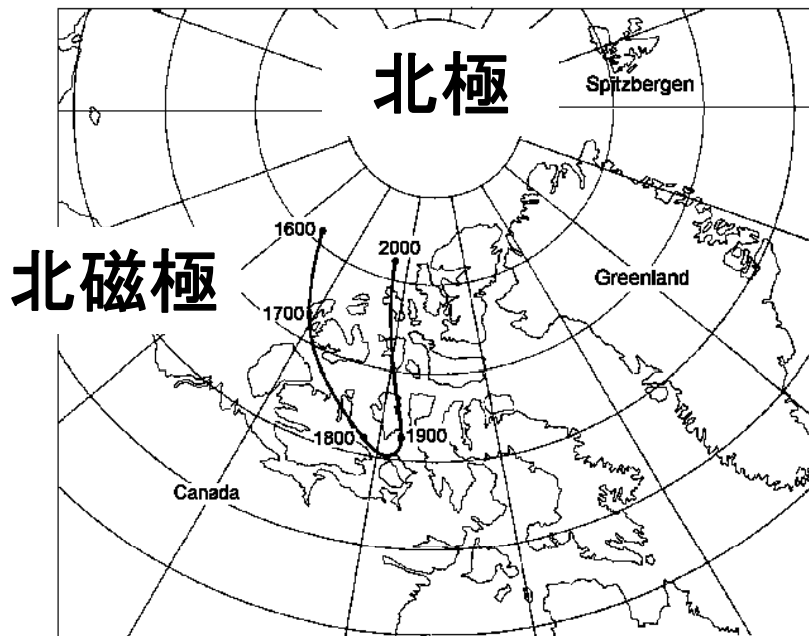
磁力線の計算例

地磁気の知識

地磁気の傾き 鉛直方向 伏角



地磁気の傾き 水平方向 偏角



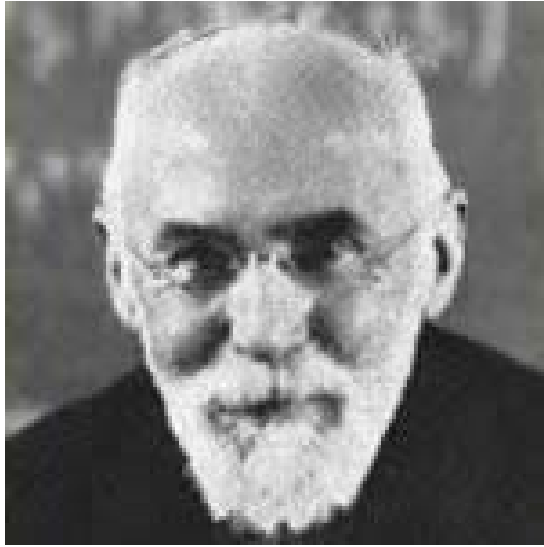
黒が現代と同じ地磁気の向き

http://www.rikanenpyo.jp/kaisetsu/chigaku/img/003_1.jpg

<http://geo.phys.uit.no/articl/roadto.html>

<http://www.s-yamaga.jp/nanimono/chikyuu/kotaichikyunorekishi.htm>

運動する電荷の受ける力



1853-1928
Hendrik Antoon Lorentz

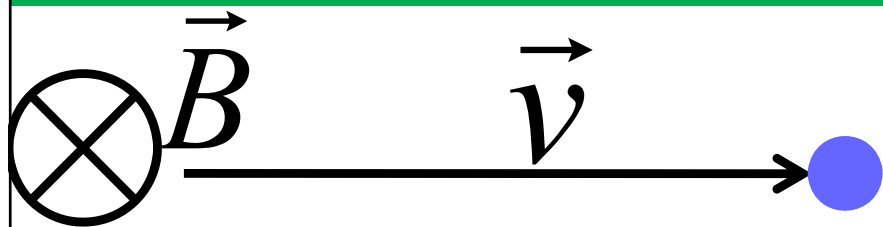
磁束密度 B の磁界中を速度 v で運動する電荷 q の物質に加わる力

$$\vec{f} = q\vec{v} \times \vec{B}$$

さらに電界 E が加わると、

$$\vec{f} = q\vec{E} + q\vec{v} \times \vec{B}$$

Q12-1 図のように、磁束密度 B の磁界の中に、垂直に速度 v で入射した電子の軌道を求めなさい。

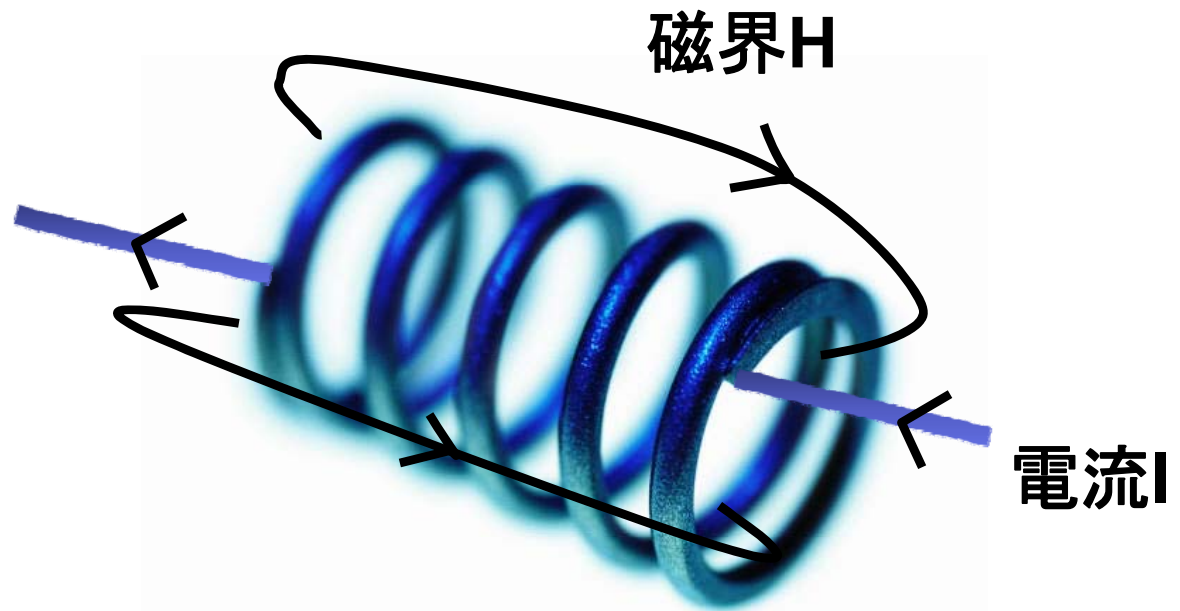
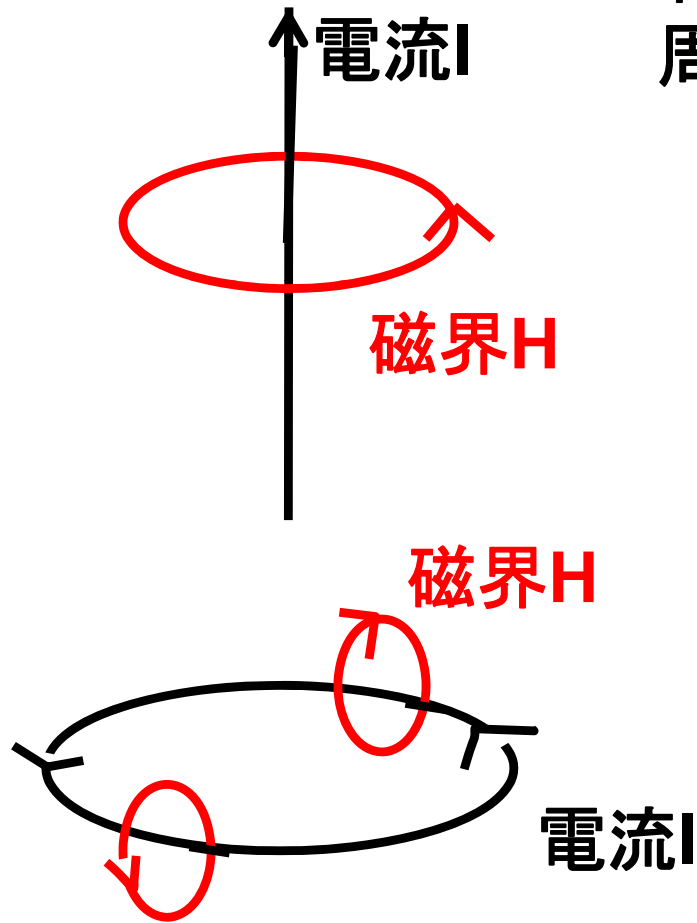


磁界Hの定義

磁界Hと磁束密度Bの関係

アンペアの右ねじの法則

右ねじの進行方向に電流が流れると、その周りにねじの回転方向に磁界が生じる。

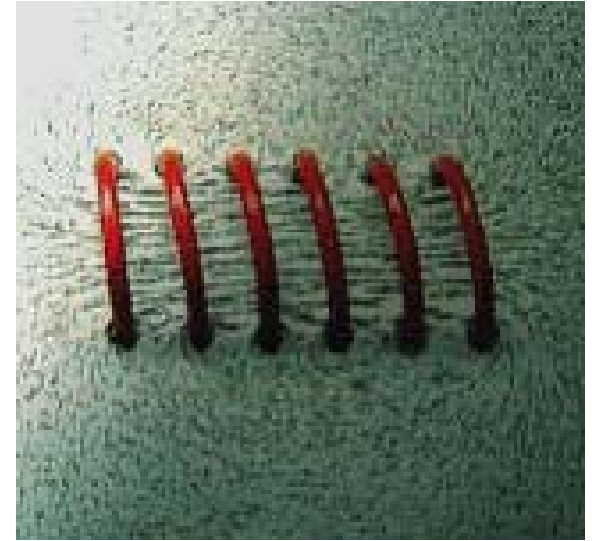




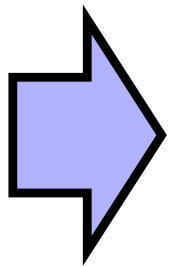
導線を流れる電流
が作る磁界



円形電流が作る磁界



ソレノイドが作る磁界



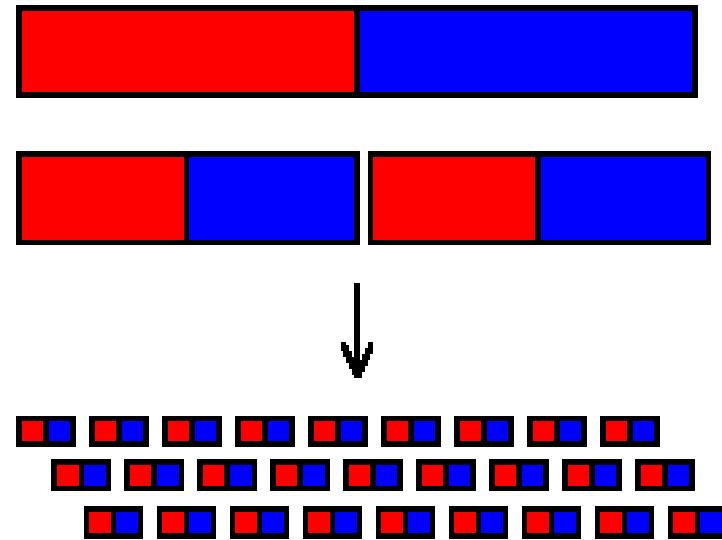
磁界、磁束、電流と磁界の関係を定式化する

電気と磁気の違い

単電荷はあるが、単磁荷は存在しない！

磁石を切るとどうなる？

- 磁石は分割しても小さな磁石ができるだけ。
- 両端に現れる磁極の大きさ(単位Wb/cm²)は小さくしても変わらない。
- N極のみ、S極のみを単独で取り出せない。



岡山大のHPより
(<http://www.magnet.okayama-u.ac.jp/magword/domain/>)

農工大 佐藤勝昭先生のHPより

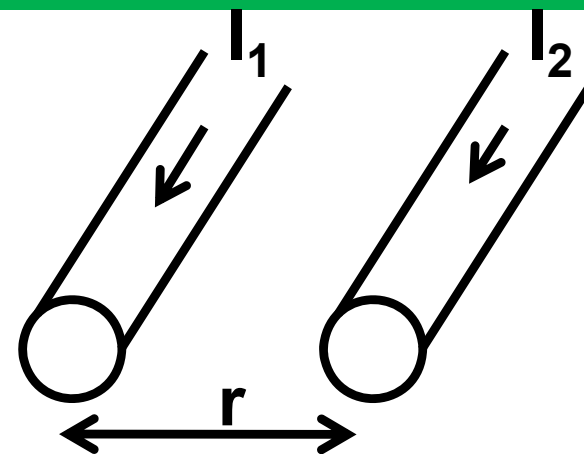
アンペールの実験

2本の平行導線に電流が流れていると力が働く。

$$f = k \frac{I_1 \cdot I_2}{r} \quad k \text{は比例定数}$$

$$k = \frac{\mu_0}{2\pi} \quad \text{と決める。}$$

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$$



➡ 1[A]とは、2本の導線に同じ電流を流し、その導線に働く力が 2×10^{-7} [N]となる電流の大きさ。 → **AのSI単位系の定義**です。

μ_0 : 真空の透磁率 単位は **[N/A²]** または **[H/m]**

$$f = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{I_1 \cdot I_2}{r} [N] = I_1 \times \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{I_2}{r} = I_1 \times B_2 [N]$$

➡ 電流 I_2 の周りには磁束密度 B_2 の磁界ができると考える。

$$B_2 = \frac{\mu_0}{2\pi r} I_2$$

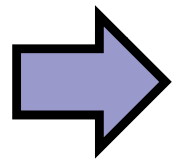
磁束密度Bとは？

速度 v で運動する電荷 q に対して、 $F=qv \times B$ の力(ローレンツ力)を与える磁気的な場を表す。

単位 = [T](テスラ) = [Wb/m²]

[Wb]ウェーバー: 磁束の単位

磁束密度に関するガウスの法則(微分形)



単磁荷は存在しない $\rightarrow \nabla \cdot \vec{B} = 0$

ガウスの定理

$$\iiint_V (\nabla \cdot \vec{B}) dV = \oiint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0$$

磁界Hと磁束密度Bの関係

$$B = \mu H : \mu \text{は透磁率}$$

Q12-2 磁束密度Bの単位は[Wb/m²]、透磁率 μ の単位は[N/A²]である。磁界Hの単位は何か？ 因みに磁束の単位[Wb]=[Nm/A]である。

電氣的量と磁氣的量の比較

電氣的量		磁氣的量		
記号		記号		単位
E	電界	H	磁界	A/m
p	電気双極子モーメント	m	磁気モーメント	A·m ²
P	電気分極	M	磁化	A/m
D	電束密度 $D = \epsilon_0 E + P$	B	磁束密度 $B = \mu H = \mu_0 (H + M)$	T = Wb/m ²
Φ	電束 $\Phi = \int_S \vec{D} \cdot d\vec{S}$	Φ	磁束 $\Phi = \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S}$	Wb
χ	電気感受率 $\vec{P} = \chi \epsilon_0 \vec{E}$	χ	磁化率 $\vec{M} = \chi \vec{H}$	無次元
ϵ	誘電率 $\vec{D} = \epsilon \vec{E}$ $\epsilon = \epsilon_0 (1 + \chi)$	μ	透磁率 $\vec{B} = \mu \vec{H}$ $\mu = \mu_0 (1 + \chi)$	H/m
ϵ_r	比誘電率 $\epsilon_r = 1 + \chi$	μ_r	比透磁率 $\mu_r = 1 + \chi$	無次元

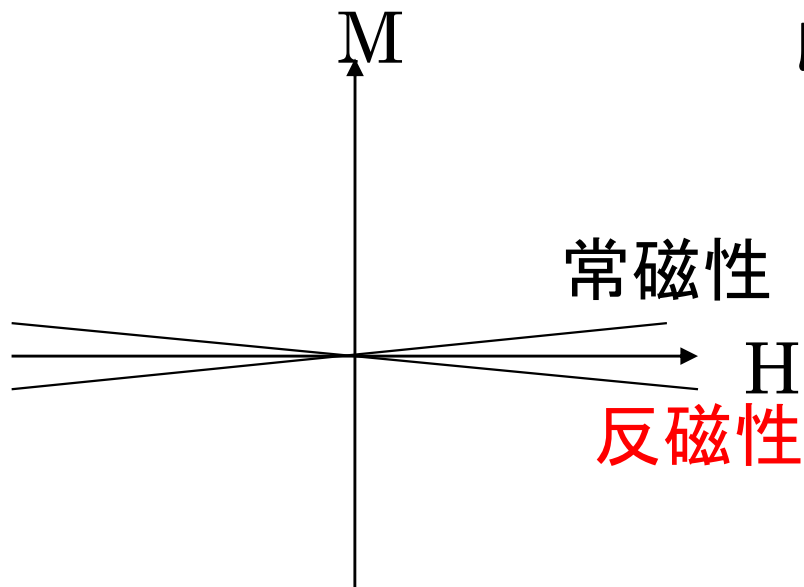
磁化に関しては、 $B = \mu H = \mu_0 H + M$ の M と定義する場合もある。
その場合、 M の単位は [T] である。

磁化Mと磁化率 χ について

$$\vec{M} = \chi \vec{H}$$

物質	磁化率 χ (無次元なので単位はない)
銅 (Cu)	-9.4×10^{-6}
水	-8.3×10^{-6}
空気	3.7×10^{-7}
アルミニウム (Al)	2.1×10^{-5}
白金	2.4×10^{-4}

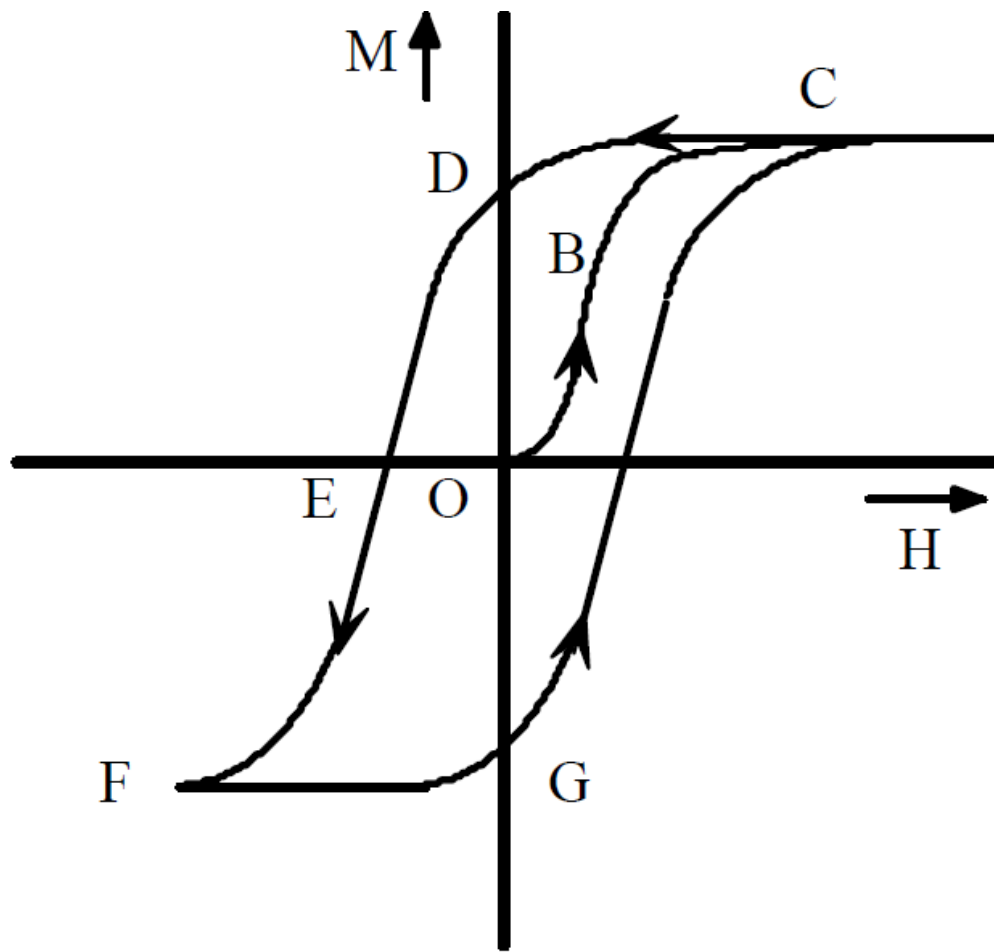
$$\mu = \mu_0 (1 + \chi) \rightarrow \text{透磁率はほぼ } \mu_0$$



磁化率がマイナス \rightarrow 反磁性体

磁化率がプラスで小さい \rightarrow 常磁性体

強磁性



磁化Mが非線形，飽和する

$$\mu = \mu_0 (1 + \chi)$$

物質	磁化率 χ
軟鉄	$\sim 10^4$
パーマロイ (Fe-Ni)	$\sim 10^5$

(1)常磁性 (paramagnetism) Al, Pd など

外部磁界Hによって磁界の方向にわずかに磁化するような, 弱い磁性。磁化率は正。

ランジュバン型常磁性: 原子磁気モーメント m [Am^2]が磁界により配向し, 単位体積あたりの磁化 M [A/m]を発生する。

$$\chi^{para} = \frac{\mu_0 N \mu_B^2}{3k_B T}$$

と表され, 温度 T に逆比例する。→キュリーの法則という。

パウリ型常磁性: フェルミ面近傍のエネルギーをもつ電子は, 磁界の方向にスピンの向きを変えることができる。

$$\chi_P = \frac{3 n_e \mu_B^2}{2 k_B T_F} \quad \text{温度に無関係}$$

(2) 反磁性 (diamagnetism) Cuなど

加えた磁場とは逆向きに磁化して、磁化率は負である。

* 渦電流と同じ原理。

$$V = -\frac{d\Phi}{dt}$$

: Φ は磁束 起源は抗磁力と同じ考え

* 温度にあまり依存しない。

* 完全反磁性→超伝導 マイスナー効果と呼ぶ。

* 磁石を近づけると反発する。

→ただし、絶対値は小さいので、ほとんどわからない。(Cuに磁石を近づけると反発する?)

* 常磁性か反磁性か？

渦電流分が大きいのか、磁気モーメントがそろっているのが大きいかにより決まる。

ただし、常磁性の場合は金属の自由電子の効果の場合もある。

(パウリの常磁性)

強磁性

	1族	2族	3族	4族	5族	6族	7族	8族	9族	10族	11族	12族	13族	14族	15族	16族	17族	18族
1	1 H 1.008 水素		(原子番号) (原子記号) (原子量) (原子名)															2 He 4.009 ヘリウム
2	3 Li 6.941 リチウム	4 Be 9.012 ベリリウム											5 B 10.81 ホウ素	6 C 12.01 炭素	7 N 14.01 窒素	8 O 16.00 酸素	9 F 18.998 フッ素	10 Ne 20.18 ネオン
3	11 Na 22.99 ナトリウム	12 Mg 24.31 マグネシウム											13 Al 26.98 アルミニウム	14 Si 28.09 ケイ素	15 P 30.97 リン	16 S 32.07 硫黄	17 Cl 35.45 塩素	18 Ar 39.95 アルゴン
4	19 K 39.10 カリウム	20 Ca 40.08 カルシウム	21 Sc 44.96 スカンジウム	22 Ti 47.87 チタン	23 V 50.94 バナジウム	24 Cr 52.00 クロム	25 Mn 54.94 マンガン	26 Fe 55.85 鉄	27 Co 58.93 コバルト	28 Ni 58.69 ニッケル	29 Cu 63.55 銅	30 Zn 65.41 亜鉛	31 Ga 69.72 ガリウム	32 Ge 72.64 ゲルマニウム	33 As 74.92 ヒ素	34 Se 78.96 セレン	35 Br 79.90 臭素	36 Kr 83.80 クリプトン
5	37 Rb 85.47 ルビジウム	38 Sr 87.62 ストロンチウム	39 Y 88.91 イットリウム	40 Zr 91.22 ジルコニウム	41 Nb 92.91 ニオブ	42 Mo 95.94 モリブデン	43 Tc (98) テクネチウム	44 Ru 101.1 ルテチウム	45 Rh 102.9 ロジウム	46 Pd 106.4 パラジウム	47 Ag 107.9 銀	48 Cd 112.4 カドミウム	49 In 114.8 インジウム	50 Sn 118.7 スズ	51 Sb 121.8 アンチモン	52 Te 127.6 テルル	53 I 126.9 ヨウ素	54 Xe 131.3 キセノン
6	55 Cs 132.9 セシウム	56 Ba 137.3 バリウム	57-71 ランタノイド ↓	72 Hf 178.5 ハフニウム	73 Ta 180.9 タンタル	74 W 183.8 タングステン	75 Re 186.2 レニウム	76 Os 190.2 オスmium	77 Ir 188.9 イリジウム	78 Pt 195.1 白金	79 Au 197.0 金	80 Hg 200.6 水銀	81 Tl 204.4 タリウム	82 Pb 207.2 鉛	83 Bi 209.0 ビスマス	84 Po (210) ポロニウム	85 At (210) アスタチン	86 Rn (222) ラドン
7	87 Fr (223) フランシウム	88 Ra (226) ラジウム	89-103 アクチノイド ↓	104 Rf (261) ラファエルシウム	105 Db (262) ドブニウム	106 Sg (266) シーボグニウム	107 Bh (264) ボーリウム	108 Hs (265) ハッシウム	109 Mt (268) マイトリウム									

※原子記号の青色は人工原子

3d

4f

ランタノイド	57 La 138.9 ランタン	58 Ce 140.1 セリウム	59 Pr 140.9 プロメチウム	60 Nd 144.2 ネオジム	61 Pm (145) プロメチウム	62 Sm 150.4 サマリウム	63 Eu 152.0 ユウロピウム	64 Gd 157.3 ガドリニウム	65 Tb 158.9 テルビウム	66 Dy 162.5 ジスプロシウム	67 Ho 164.9 ホルミウム	68 Er 167.3 エルビウム	69 Tm 168.9 ツリウム	70 Yb 173.0 イットルビウム	71 Lu 175.0 ルテチウム
アクチノイド	88 Ac 227.0 アクチニウム	89 Th 232.0 トリウム	90 Pa 231.0 プロトアクチニウム	91 U 238.0 ウラン	92 Np 237.0 ネプツニウム	93 Pu (244) プルトニウム	94 Am (243) アメリシウム	95 Cm (247) キュリウム	96 Bk (247) バークリウム	97 Cf (251) カリフォルニウム	98 Es (252) アインシュタイン	99 Fm (257) フェルミウム	100 Md (258) メンデルビウム	101 No (259) ノーベリウム	102 Lr (260) ローレンシウム

(3) 強磁性 (ferromagnetism)

原子が大きな磁気モーメントを持っており、ある温度範囲では整列して、磁界をかけなくても全体で磁化を生じる。温度が十分高くなると常磁性になる。

例: Fe, Co, Niなどの3d遷移金属およびそれらの合金

- ・常磁性の配列秩序が強いものと考えられることができる。
- ・磁気モーメント同士の相互作用が強く、それぞれがポジティブフィードバックして揃う。
- ・キュリー温度以上では、常磁性になる。

磁化率

$$\chi = \frac{M}{H} = \frac{N\mu_B^2}{k_B(T - T_c)} \quad T_c: \text{キュリー温度}$$

(3) 強磁性 (ferromagnetism)

3d遷移金属: Sc, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni

- Arの閉殻($1s^2 2p^6 3s^2 3p^6$) + $3d^n 4s^2$
- 3d軌道には5個の軌道があり, スピンまで入れて10個の状態がある。
 - 遷移金属では3d軌道を部分的にしか満たさずに, 4s軌道を占有する。(不完全内殻)
- このため, 不対スピンの生じ原子磁気モーメントをもたらす。

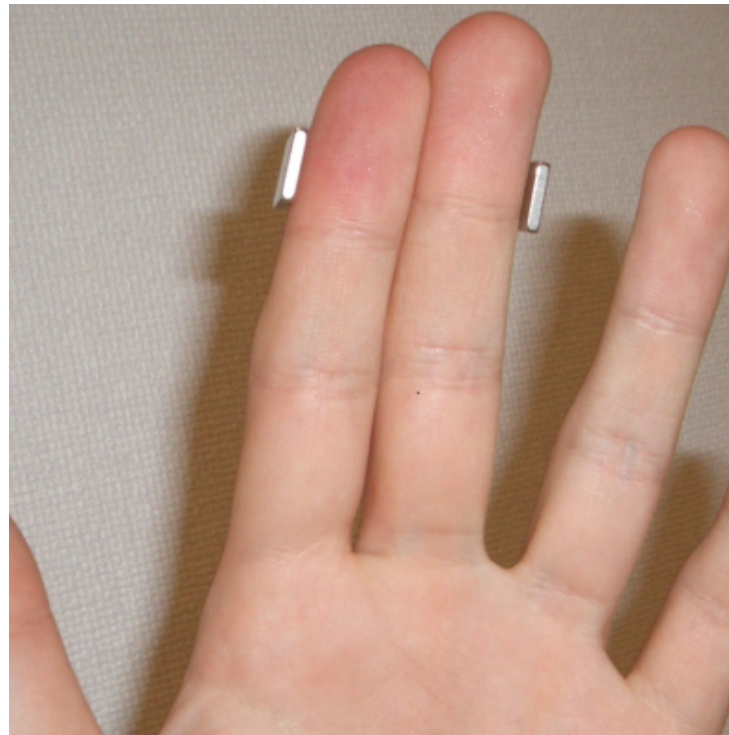
室温で強磁性を示すのは, Fe, Co, Niの3つのみ。

(3) 強磁性 (ferromagnetism)

La(ランタン), Ce(セリウム), Pr(プラセオジウム), Nd(ネオジウム), Pm(プロメチウム), Sm(サマリウム), Eu(ユーロピウム), Gd(ガドリニウム), Tb(テルビウム), Dy(ジスプロジウム), Ho(ホフニウム), Er(エルビウム), Tm(ツリウム), Yb(イッテルビウム)

- 不完全4f殻を有している。
- 遷移金属と組み合わせると磁石材料になる

–例: SmCo
Nd₂FeB₁₄



ネオジウム磁石 http://seoi.net/magnet/ot_ques.shtml

磁束密度 B と磁界 H と磁化 M と透磁率 μ の関係

磁化 M と磁界 H と磁化率 χ の関係

磁化率 χ と透磁率 μ の関係

Q12-4

(1)常磁性 (paramagnetism) など

外部磁界Hによって磁界の方向にわずかに磁化するような, 弱い磁性。磁化率は正。

(2)反磁性 (diamagnetism) など

加えた磁場とは逆向きに磁化して, 磁化率は負である。

(3)強磁性 (ferromagnetism)

原子が大きな磁気モーメントを持っており, ある温度範囲では整列して, 磁界をかけなくても全体で磁化を生じる。温度が十分高くなると常磁性になる。

例: などの3d遷移金属およびそれらの合金

- 不完全4f殻を有している。
- 遷移金属と組み合わせると磁石材料になる

本日のまとめ

- 4問中、何問正解したか？
- 磁界の単位は何か？
- 磁束密度の単位は何か？
- 透磁率の単位は何か？
- 磁束密度と磁界の関係式を書きなさい。
- 磁性体の種類とそれぞれの性質を書きなさい。
- 電流1[A]の定義は何か？