

[電氣・電子材料目次]

第1章	磁気現象	1
第2章	磁気特性	6
第3章	磁気材料	26

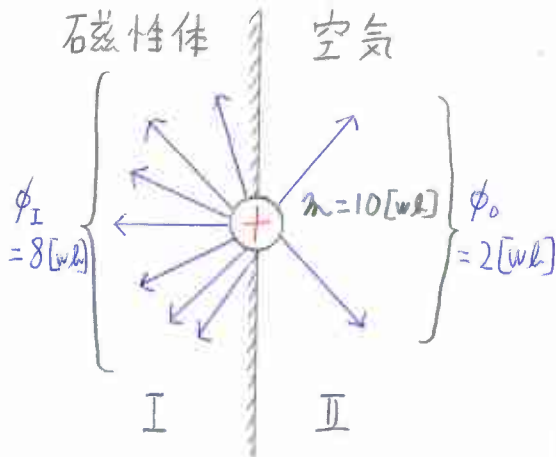
科目名	電気・電子材料／Materials for Electrical Engineering
単位数	2単位
配当期	後期
時間数	2時間
担当者	難波 典之
教科書	一ノ瀬昇編著「電気・電子機能材料」オーム社
参考書	
講義のねらい	材料を有効に利用するには、物質の示す現象を理解した上でその現象を利用するのに便利な形で特性を表示しなければならない。いくつかの現象に対し、特性表示の基本を示し、次に応用例について材料のもつ電磁気特性がどのように生かされているかを示す。さらに、応用上重要と思われる特性と物質の微視的構造との関連を示し、組成や製造法にその関連性がどのように生かされているかを示す。以上のように、材料をいたずらに羅列するのではなく、材料に対する考え方を話すのが本講義のねらいである。
講義内容	従って、講義は以下のように導電材料・抵抗材料・半導体材料・誘電体材料・磁性体材料について特性を柱として進める。 (1) 現象と特性 (2) 特性と応用 (3) 特性と物性
成績評価方法	試験(1回)、演習レポート(1~2回)、および出席を加味して評価する。
関連科目	電気・電子物性、電子工学
質問受付時間・場所	
電子メールアドレス	

第1章 磁気特性

1-1. 透磁率 (Permeability)

(a) 電磁気学的意味(定義)

磁束を通す割合(通しやすさ)



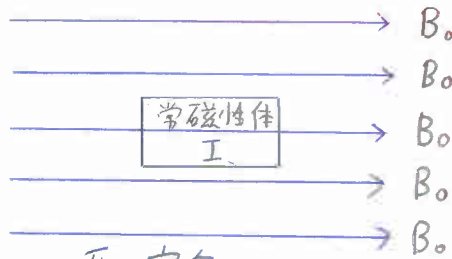
$\mu_I = 4\mu_0$

(空気の4倍)

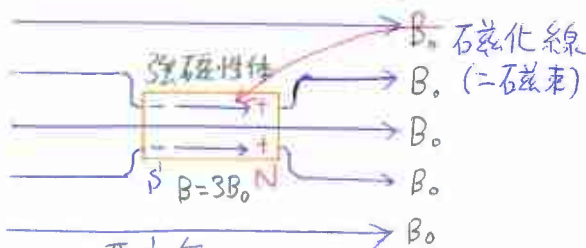
空気の透磁率

$\mu_{II} = \mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} [\text{H/m}]$

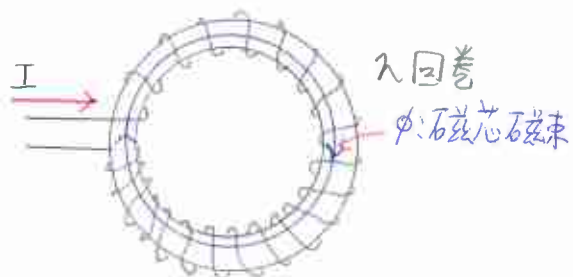
磁極と磁束模様



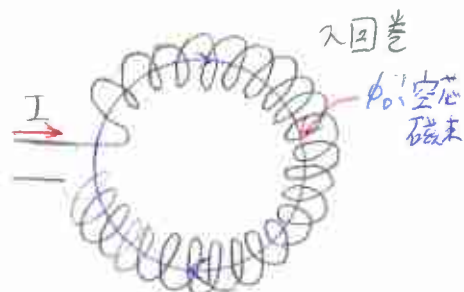
常磁性体の磁束分布 ($\mu_I = \mu_0$)



強磁性体の磁束分布 ($\mu_I = \mu_0$)



磁芯ソレノイド



空芯ソレノイド

$$\frac{\phi}{\phi_0} = \text{比透磁率} = \frac{L}{L_0}$$

L : 磁芯インダクタンス [H], L_0 : 空芯インダクタンス [H]

$$LI = n\phi \quad \text{: 磁芯}$$

$$L_0 I = n\phi_0 \quad \text{: 空芯}$$

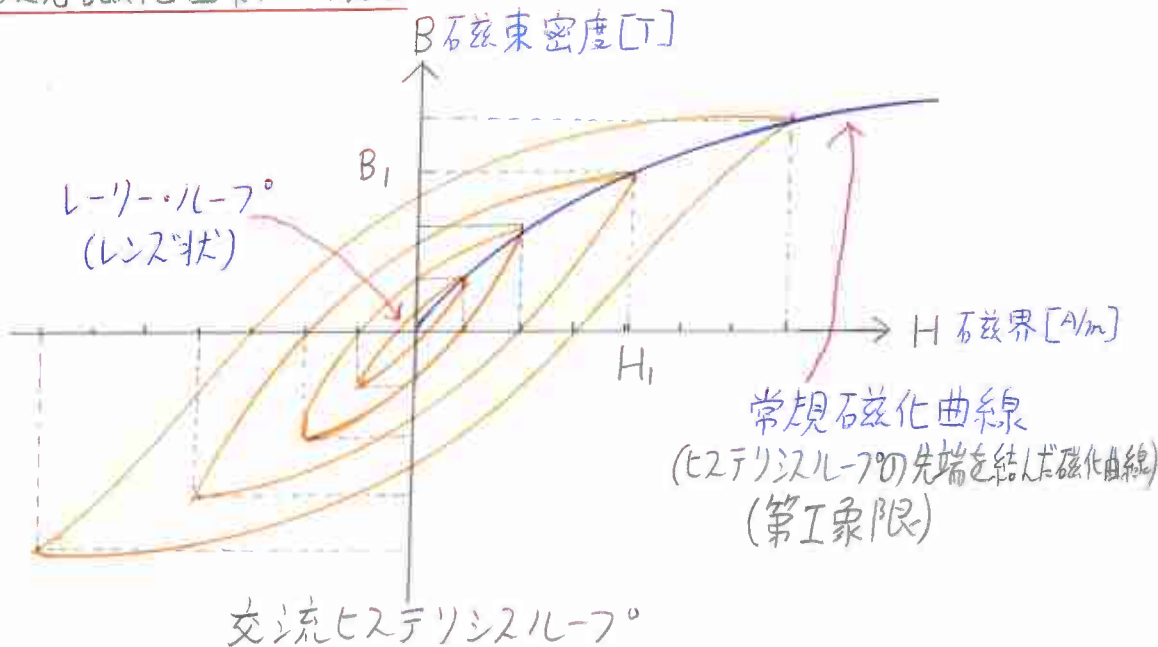
(b) 透磁率の種類

(1) 磁芯(コア)用透磁率

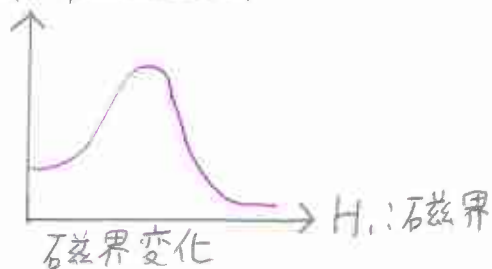
(i) 常規透磁率

$$\mu_1 = \frac{B_1}{H_1} [H]$$

常規磁化曲線の傾き



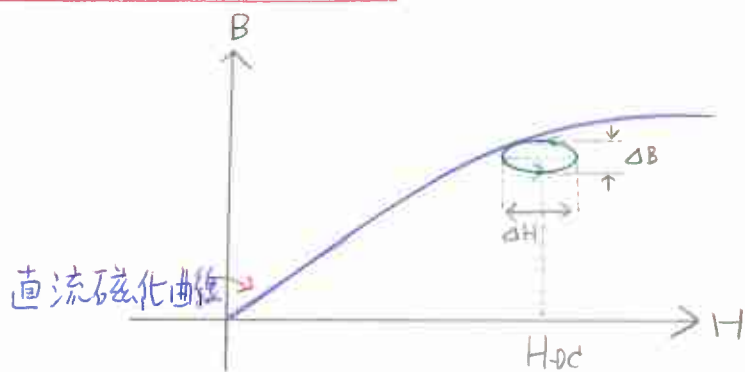
μ_1 : 常規透磁率



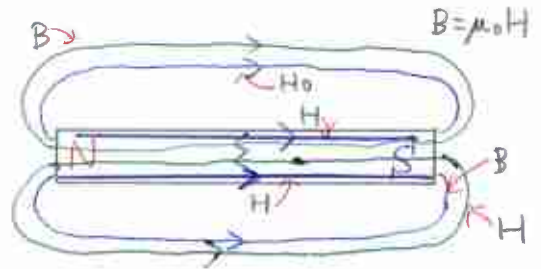
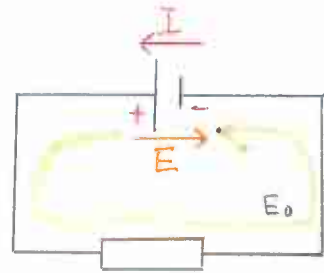
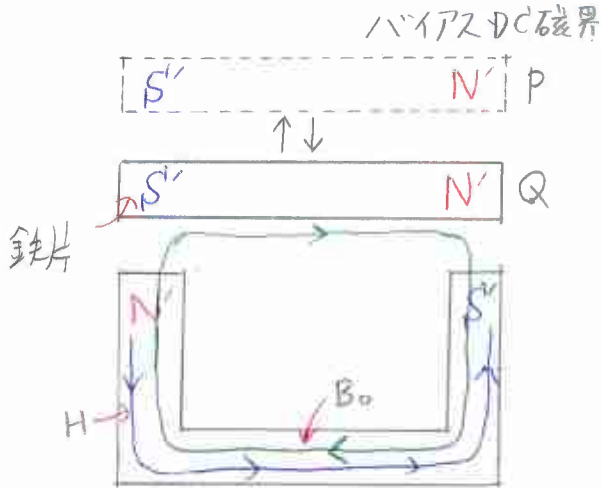
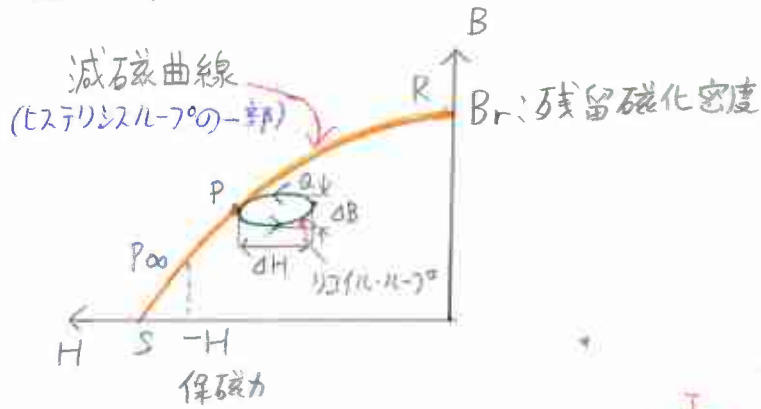
(ii) 増分透磁率

$$\mu_d = \frac{\Delta B}{\Delta H}$$

マイナー-7°の傾き



(2) 石磁石用透磁率



磁石中はBとHは互いに逆向き

反転(リコイル)透磁率

$$\mu_t = \frac{\Delta B}{\Delta H} \text{ [H/m]}$$

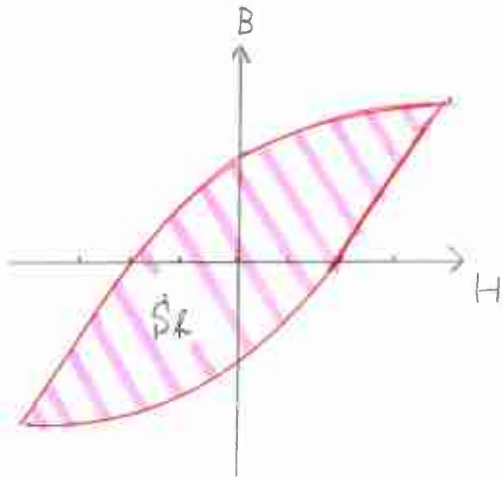
リコイルループの傾き, ΔB : 磁界密度の傾き, ΔH : 反磁界の変化 [A/m]



1-2. 磁気損失と損失係数

(a) 磁気損失 (熱に変換)

(1) ヒステリシス損失



$$P_R = f S_h V \text{ [w]}$$

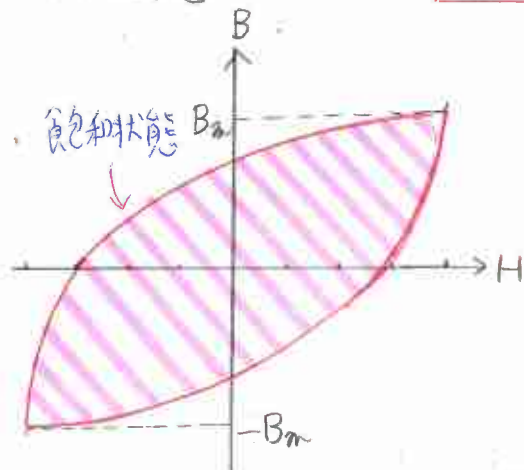
P_R : 損失電力 [w], f : 周波数 [Hz]

S_h : ヒステリシス・ループの面積 [J/m^3]

V : 磁性体の体積 [m^3]

(i) 強電

$$S_h = \eta B_m^n \quad \text{スタインメッツの式}$$



B_m : 最大磁束密度 [T]

η : 定数

n : 指数 (1.5 ~ 2.5)

(ii) 弱電

$$S_h = \eta B_m^2$$

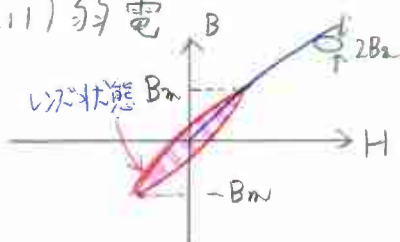
μ_Δ : 増分透磁率 [H/m]

μ_0 : 空気透磁率 [H/m]

η : 定数

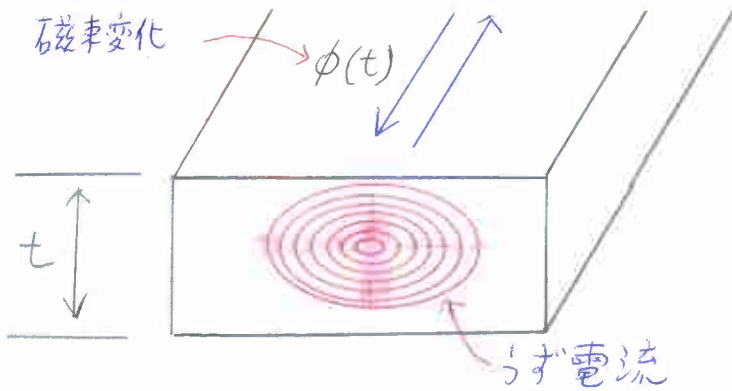
B_m : 最大磁束密度 [T]

$$\Delta B = 2B_m$$



$$\eta = \frac{4\eta\mu_0}{3\mu_\Delta^3}$$

(2) うず電流損



$$P_e = \frac{\pi^2 f^2 t^2}{6\rho} \cdot B_m^2 \cdot V \text{ [W]}$$

P_e : 損失電力 [W], f : 周波数 [Hz]

ρ : 電気抵抗率 [$\Omega \cdot m$], B_m : 最大磁束密度 [T]

V : 体積 [m^3], t : 厚さ [m]

うず電流損は、周波数の2乗に比例し、周波数が高くなると急激に大きくなる。うず電流損は材料の抵抗率 ρ に反比例するので、抵抗率の高い材料ほど、うず電流損は小さい。

(2) 残留損 (ヒステリシス損失を除いた残りの損失)

• 高周波による損失

損失の原因

- 磁気余効... 強磁性体に磁場変化を与えたとき磁化の変化が多少遅れをもつて現れる現象

- 鉄中炭素の拡散

- フェライト中 Fe^{2+} (価電子拡散) の拡散。 $Fe^{2+} \leftrightarrow Fe^{3+}$

- 磁気共鳴... 磁気モーメントをもつ粒子が特定の周波数の電磁波や振動磁場を共鳴吸収する現象

- 形状共鳴

- 磁壁共鳴

- スピン共鳴

- バイス磁界による共鳴

• 磁気損失電力 $P_m = P_h + P_e + P_r [w]$

P_h : ヒステリシス損失 [w], P_e : 渦電流損失 [w], P_r : 残留損失 [w]

• 鉄損 (周波数) $P_i = P_e + P_h [w]$

(2) 損失係数

(1) 高周波用磁芯の特徴

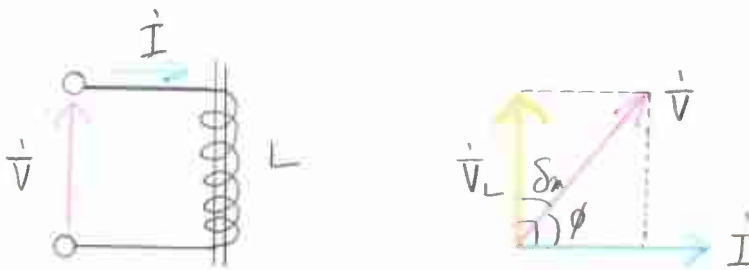
$$\tan \delta_m = \frac{P_m}{\omega L I^2} = \frac{P_R + P_e + P_r}{\omega L I^2}$$

$\tan \delta_m$: 損失係数, P_m : 磁気損失電力 [W]

ω : 角周波数 ($2\pi f$) [rad/s], L : コイルリアクタンス [H]

I : 電流 (実効値) [A], P_R : ヒステリシス損失電力 [W]

P_e : 渦電流損失電力 [W], P_r : 残留損失電力 [W]



磁芯入りコイル

I : コイルの電流, V : コイルの電圧

ϕ : I と V の損失角 (90° より小)

δ_m : 損失角

$$V_L = j\omega L I, \quad |V_L| = \omega L |I|$$

損失電力 $P = |I| |\dot{V}| \cos \phi = |I| |\dot{V}| \sin \delta_m$

$$|\dot{V}| \cos \delta_m = |\dot{V}_L| \leftarrow \text{磁気エネルギー}$$

より

$$P = |I| |\dot{V}| \frac{\sin \delta_m}{\cos \delta_m} = |I| |\dot{V}| \tan \delta_m = \omega L |I|^2 \tan \delta_m$$

$$P = P_m \text{ とすると}$$

$$\tan \delta_m = \frac{P_m}{\omega L I^2}$$

$\tan \delta_m$: 熱エネルギー, P_m : 有効電力 [W], $\omega L I^2$: 無効電力 [var]

(2) ヒステリシス損失係数

$$\tan \delta_R = \frac{P_R}{\omega L}$$

P_R : ヒステリシス損失電力 [W], ωL : コイルインダクタンス [H]

$$\tan \delta_R = k_1 \sqrt{\frac{L}{V}} \cdot I \leftarrow \text{電流に比例}$$

k_1 : ヒステリシス定数 (透磁率の $\frac{3}{2}$ 乗に比例)

L : コイルインダクタンス [H], V : 磁芯体積 V [m^3],

I : コイル電流 (実効値) [A]

(3) うず電流損失係数

$$\tan \delta_e = \frac{P_e}{\omega L}$$

P_e : うず電流損失電力, ωL : コイルリアクタンス

$$\tan \delta_e = e_1 f \leftarrow \text{周波数に比例}$$

e_1 : うず電流定数, f : 周波数

(4) 残留損失係数

$$\tan \delta_r = \frac{P_r}{\omega L}$$

P_r : 残留損失 [W]

$$\tan \delta_r = C_1$$

C_1 : 残留定数

(1)~(4)の係数から損失係数 $\tan \delta_m$ は

$$\tan \delta_m = \tan \delta_e + \tan \delta_c + \tan \delta_r$$

電流や周波数によって変化する。

1-3. 磁歪率と電気機械結合係数

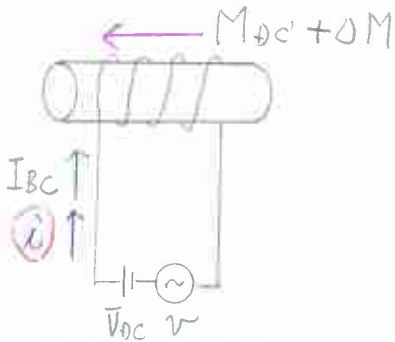
(a) 磁歪率

$$\rho = \frac{\Delta \sigma}{\Delta M} \quad [\text{N/wm}]$$

強磁性体に磁界をかけた磁化せると、磁性体の寸法が変化する。この現象を、磁歪^{じかい}（磁歪）という。このときの ρ は磁歪率と呼ばれ、磁歪現象を利用するときの基本となる量である。

$\Delta \sigma$: 磁性体の弾性応力の交流成分 $[\text{N/m}^2]$ (超音波領域)

ΔM : 磁化の強さの交流成分 $[\text{w/m}^2]$



磁歪現象の現理図

$$\Delta \sigma = Y \Delta \epsilon \quad [\text{N/m}^2]$$

Y : ヤング率 (弾性体) $[\text{N/m}^2]$

$\Delta \epsilon$: 磁性体のひずみの変化分

$$\rho = Y \cdot \frac{\Delta \epsilon}{\Delta M} \quad [\text{N/wm}]$$

磁歪率は静磁歪特性の $M = M_{dc}$ における曲線の傾きから求めることが出来る。

(b) 電気・機械結合係数 (変換効率の平方根)

磁気ひずみ現象を利用するときに重要な目安となる係数。

$$k = \sqrt{\frac{W_m}{W_e}} = \sqrt{\frac{\chi_0 \rho^2}{Y}}$$

磁歪材の良否の目安としている。高周波になると磁界変化に磁化が追従できず、 χ_0 は実数ではなく、複素数になる。超音波領域で実用されるので、実用に際しては k よりも磁歪活性度とよばれる $\chi_0 \rho^2$ が重視される。

W_e : 電氣的入力 (磁気エネルギー)

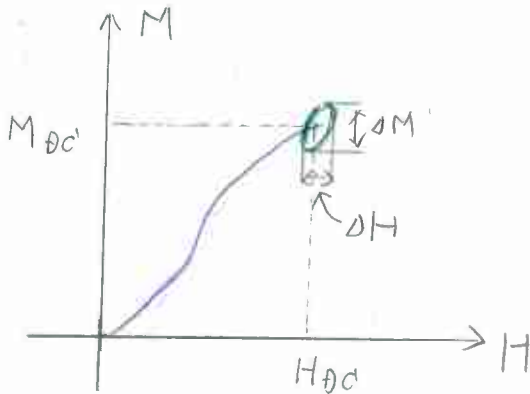
W_m : 機械的出力 [W]

χ_0 : 増分磁化率 [H/m]

ρ : 磁歪率 [m/W^{1/2}]

Y : ヤング率 [N/W^{1/2}]

また、強磁性体棒において、交流 I_{AC} による変動磁界を ΔH とし、 ΔH による変動磁化の関係を



$$\chi_0 = \frac{\Delta M}{\Delta H}$$

χ_0 はマクスウェル-フの傾きであり、増分透磁率 μ_d との間には

$$\chi_0 = \mu_d - \mu_0$$

の関係がある。

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} [\text{H/m}]$$

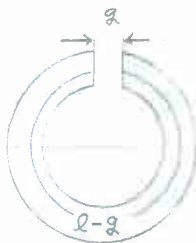
2-4 特性の改善と空隙

(a) 実効透磁率



1.2.9.2.2

$$L = \lambda^2 \mu_s \mu_0 \frac{S}{l} \quad [\text{H}]$$

閉路磁芯
(コア)透磁率 $\mu_s \mu_0$ 開路磁芯
(コア+ギャップ)透磁率 $\mu_s \mu_{\text{eff}}$ 

1.2.9.2.2

$$L_{\text{eff}} = \lambda^2 \mu_0 \mu_{\text{eff}} \frac{S}{l} \quad [\text{H}]$$

 μ_s : 磁芯(コア)個有の比透磁率 μ_{eff} : 実効透磁率(空隙を含む透磁率) l : 磁芯全体の平均長[m] g : 空隙長[m]

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \quad [\text{H/m}]$$

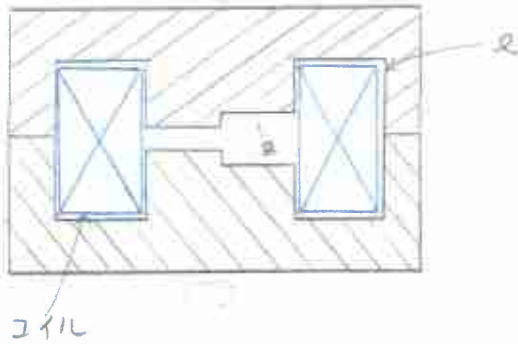
$$\frac{l}{\mu_{\text{eff}}} = \frac{l-g}{\mu_s} + g$$

$$\mu_{\text{eff}} \approx \frac{l}{g}$$

$$\text{ただし } l, \mu_s \gg \frac{l}{g}$$

磁芯の透磁率を空隙長によつて調整

実用例：コイル形磁芯



例1. (1) $l = 2$ [cm], $g = 1$ [mm] の開路磁芯の実効透磁率を求め

よ。ただし, $\mu_s = 1000$ とする。

(2) $l = 2$ [cm], $g = 0.1$ [mm] の開路磁芯の実効透磁率を求め

よ。ただし, $\mu_s = 10000$ とする。

(3) $l = 2$ [cm], $g = 1$ [mm] の開路磁芯の実効透磁率を求め

よ。ただし, $\mu_s = 10000$ とする。

<解答>

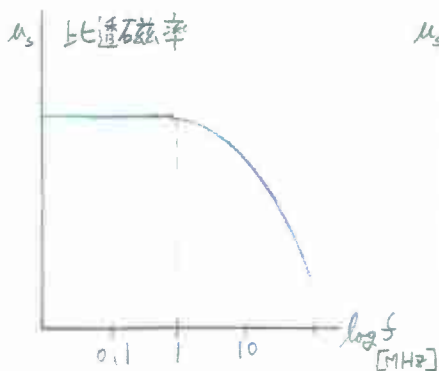
$$(1) \quad \frac{l}{\mu_{\text{eff}}} = \frac{l-g}{\mu_s} + g \quad \therefore \mu_{\text{eff}} = \frac{l}{\frac{l-g}{\mu_s} + g}$$

$$\therefore \mu_{\text{eff}} = \frac{2}{1 - \frac{1 \times 10^{-3}}{2 \times 10^{-2}} + \frac{1 \times 10^{-3}}{2 \times 10^{-2}}} \doteq 19.6 \doteq 20$$

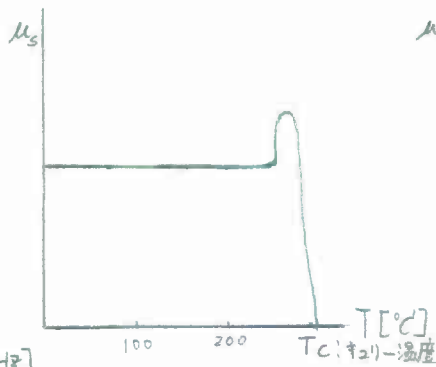
$$(2) \quad \mu_{\text{eff}} = \frac{2}{\frac{1 - 0.1 \times 10^{-3}}{10000} + \frac{0.1 \times 10^{-3}}{2 \times 10^{-2}}} \doteq 196.1 \doteq 200$$

$$(3) \quad \mu_{\text{eff}} = \frac{2}{\frac{1 - 1 \times 10^{-3}}{10000} + \frac{1 \times 10^{-3}}{2 \times 10^{-2}}} \doteq 19.96 \doteq 20$$

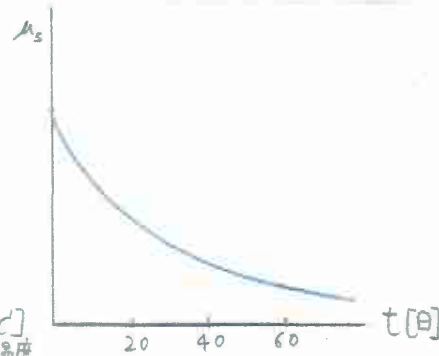
* (1) ~ (3) は $\mu_{\text{eff}} = \frac{l}{g}$ で求まる ($\because \mu_s \gg \frac{l}{g}$)



(i) 周波数特性



(ii) 温度特性



(iii) 経時変化

(i) 周波数变化率

$$\frac{\Delta \mu_{\text{eff}}}{\Delta f} = \frac{\Delta \mu_s}{\Delta f} \cdot \frac{\mu_{\text{eff}}^2}{\mu_s^2}$$

(ii) 温度变化率

$$\frac{\Delta \mu_{\text{eff}}}{\Delta T} = \frac{\Delta \mu_s}{\Delta T} \cdot \frac{\mu_{\text{eff}}^2}{\mu_s^2}$$

(iii) 経時变化率

$$\frac{\Delta \mu_{\text{eff}}}{\Delta t} = \frac{\Delta \mu_s}{\Delta t} \cdot \frac{\mu_{\text{eff}}}{\mu_s}$$

例2. $l = 2$ [cm] のリング状磁性体 ($\mu_s = 10000$) に $g = 1$ [mm] の空隙を設けたとき、開路磁芯の周波数変化率_(i)、温度変化率_(ii)、経時変化率_(iii)は何分の1になるか。

<解答>

$$\mu_{\text{eff}} \approx \frac{l}{g} = \frac{2 \times 10^{-2}}{1 \times 10^{-3}} = 20$$

(i) と (ii) については

$$\frac{\mu_{\text{eff}}^2}{\mu_s^2} = \frac{20^2}{10000^2} = 4 \times 10^{-6} = \frac{1}{2.5 \times 10^5}$$

∴ (i) と (ii) については 25万分の1

(iii) については

$$\frac{\mu_{\text{eff}}}{\mu_s} = \frac{20}{10000} = 2 \times 10^{-3} = \frac{1}{500}$$

∴ (iii) については 500分の1

(b) 実効損失係数

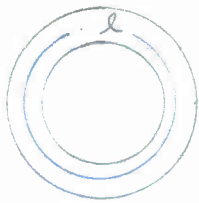
$$\frac{\tan \delta_m}{\mu_s - 1} = \frac{\tan \delta_{eff}}{\mu_{eff} - 1}$$

μ_s : 磁性体の比透磁率

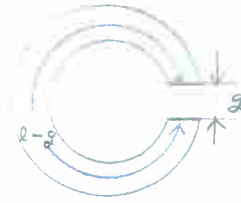
$\tan \delta_m$: 磁性体の磁気損失係数

μ_{eff} : 実効透磁率

$\tan \delta_{eff}$: 実効損失係数



$\mu_s, \tan \delta_m$



$\mu_{eff}, \tan \delta_{eff}$

$$\tan \delta_{eff} = \frac{\mu_{eff} - 1}{\mu_s - 1} \cdot \tan \delta_m \approx \frac{\mu_{eff} - 1}{\mu_s} \cdot \tan \delta_m$$

例. $\mu_s = 10000$, $\tan \delta_m = 0.02$ の磁性体を用いた $l = 4$ [cm] の
 リングコアに $g = 2$ [mm] の空隙を設けた。このカットコアの μ_{eff} および $\tan \delta_{\text{eff}}$ を求めよ。

<解答>
 $\mu_s \gg \frac{l}{g}$ より

$$\therefore \mu_{\text{eff}} \sim \frac{l}{g} = \frac{4 \times 10^{-2}}{2 \times 10^{-3}} = 20$$

$$\therefore \tan \delta_{\text{eff}} \sim \frac{\mu_{\text{eff}} - 1}{\mu_s} \cdot \tan \delta_m = \frac{20 - 1}{10000} \times 0.02 = 3.8 \times 10^{-5}$$

第3章 磁気材料

3-1. 分類

(i) 用途(特性)

透磁率材: 高磁化強度, 高キリ-温度, 温度変化, 経時変化少
 (コア用としては特に, 高透磁率, 低保持力, 低損失係数)

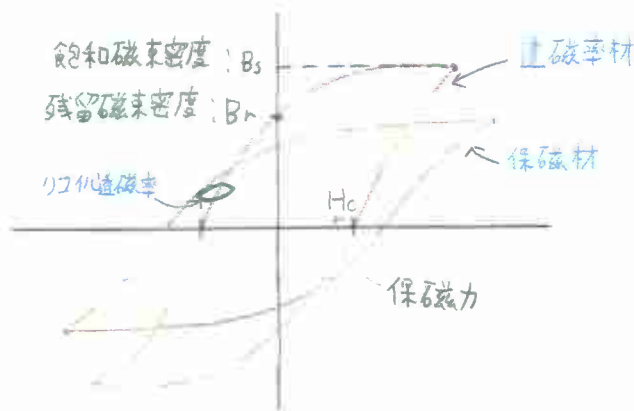
保磁材: 高残留磁気, 高保磁力, 低い透磁率,
 高最大(磁気)エネルギー積 $(BH)_{max}$

(ii) 材質

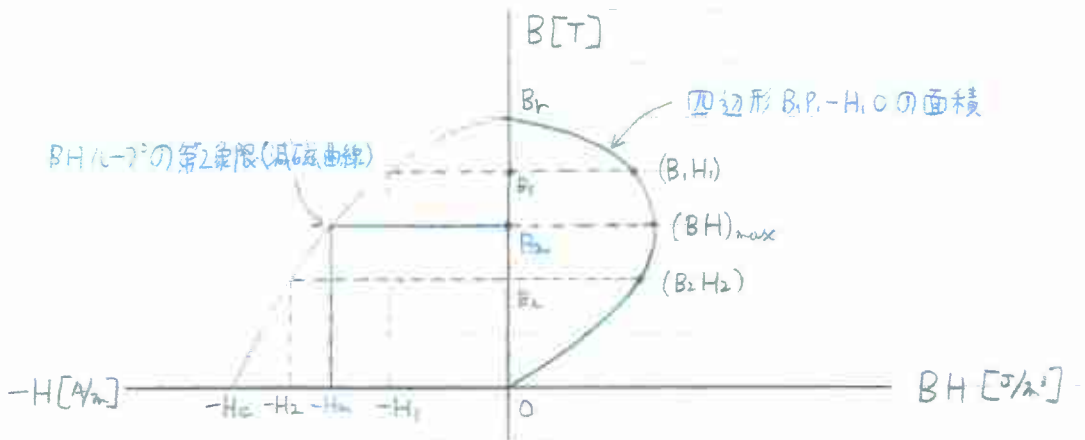
金属: Ni-Fe合金, けい素鋼, Al-Ni-Co-Fe合金 保磁材

セラミック
 酸化物: Ni-Zn-Fe系酸化物, Mn-Zn-Fe系酸化物 透磁率材

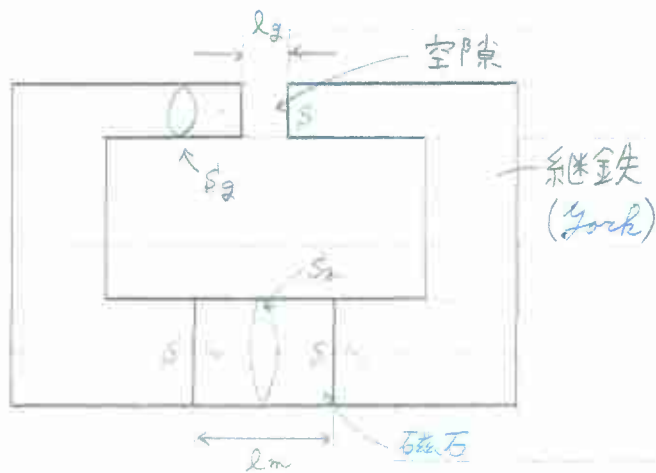
Ba-Fe系酸化物,



B-Hル-7°

3-2. 最大磁気エネルギー積 $(BH)_{max}$ の説明

減磁曲線に内接する長方形の面積： (BH) 積の最大値
(四辺形 $B_m P_m - H_2 O$ の面積)



磁気回路例

S_m : 磁石の断面積 [m^2], l_m : 磁石の長さ [m]

S_g : 空隙の面積 [m^2], l_g : 空隙間隔 [m]

磁石の磁気エネルギー

$$E_m = \frac{1}{2} B_m H_m \cdot V_m = \frac{1}{2} (BH)_{\max} V_m \text{ [J]}$$

ただし, $V_m = S_m l_m \text{ [m}^3\text{]}$ (磁石の体積)

空隙中の磁気エネルギー

$$E_g = \frac{1}{2} (B_g H_g) \cdot V_g = \frac{B_g^2}{2\mu_0} V_g \text{ [J]}$$

ただし, $V_g = S_g l_g \text{ [m}^3\text{]}$ (空隙の体積)

$$\begin{aligned} B_g &= \mu_0 H_g \\ \text{空隙中} \\ \mu_0 &: \text{空気の透磁率} \\ &4\pi \times 10^{-7} \text{ [H/m]} \end{aligned}$$

$E_g \approx E_m$ より

$$\frac{1}{2} (BH)_{\max} V_m = \frac{B_g^2}{2\mu_0} V_g$$

$$\therefore B_g = \sqrt{\mu_0 \frac{V_m}{V_g} (BH)_{\max}} \text{ [T]}$$

同体積で大きな B_g を発生させる。

または,

$$V_m = \frac{V_g B_g^2}{\mu_0 (BH)_{\max}} \text{ [m}^3\text{]}$$

磁石の体積は少なくてよい。

3-3 金属磁気材料

(a) 保磁材

(i) アルニコ磁石

• アルニコ3

成分: Ni 25 [%], Al 15 [%], Co 6 [%], Fe 54 [%] (E/C比)

特性: $H_c = 3.7 \times 10^4$ [A/m], $B_r = 0.69$ [T], $(BH)_{max} = 1.4 \times 10^4$ [J/m³]

• アルニコ5

成分: Co 24 [%], Ni 14 [%], Al 8 [%], Cu 8 [%], Fe 46 [%]

特性: $H_c = 4.6 \times 10^4$ [A/m], $B_r = 1.25$ [T], $(BH)_{max} = 5.0 \times 10^4$ [J/m³]

(ii) キュ = 7E1

成分: Cu 60 [%], Ni 20 [%], Fe 20 [%]

特性: $H_c = 4.7 \times 10^4$ [A/m], $B_r = 0.58$ [T], $(BH)_{max} = 1.9 \times 10^4$ [J/m³]

(e) 透磁率材

(i) パーマロイ

Ni 78 [%], Fe 22 [%], 通信機器用

比初透磁率 $\mu_{si} = 100000$

(ii) けい素鋼

Si 5 [%] 以下, C 1 [%] 程度, 強電機器用
鉄損抑制 機械強度

最大比透磁率 $\mu_{sm} = 3.8 \times 10^5$

3-4 酸化磁気材料

(a) 保磁材料

- バリウム・フェライト $\text{BaO} \cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$

$$H_c = 20 \times 10^4 \text{ [A/m]}$$

$$B_r = 0.39 \text{ [T]}$$

$$(BH)_{\max} = 3.8 \times 10^4 \text{ [J/m}^3\text{]}$$

- ストロンチウム・フェライト $\text{SrO} \cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$

$$H_c = 30 \times 10^4 \text{ [A/m]}$$

$$B_r = 0.38 \text{ [T]}$$

$$(BH)_{\max} = 3.8 \times 10^4 \text{ [J/m}^3\text{]}$$

(b) 透磁率材料

(i) Mn-Zn系フェライト $Mn_{1-x}Zn_xFe_2O_4$ ($0 < x \leq 0.25$)(1 [MHz] 以下)
 $x \sim 0$: 損失係数比初透磁率 $\mu_{si} = 20000 \sim 30000$ (ii) Ni-Zn系フェライト $Ni_{1-x}Zn_xFe_2O_4$ ($0 < x \leq 0.35$)(10 [MHz] 以上 \sim 1 [GHz] 以下)
 $x \sim 0.1$ 以上比初透磁率 $\mu_{si} = 200 \sim 300$