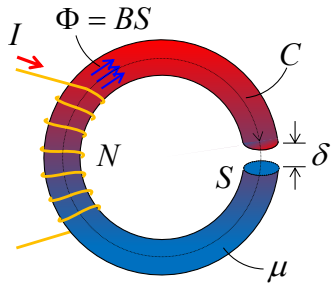
磁気回路

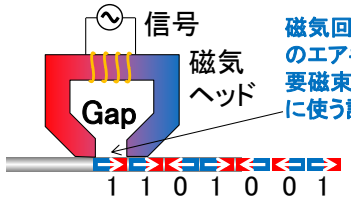
1st. 2011/04/01
Lst. 2023/11/10

磁気回路



I : Conduction current	伝導電流
Φ : Magnetic flux	磁束
N : Coil turns	巻き数
C : Integration path	積分路
S : Cross setion	断面積
μ : Permeability	透磁率
μ_0 : Permeability in vacuum	真空の透磁率
δ : Gap width	ギャップ幅

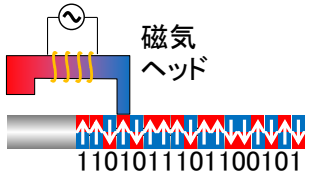
磁気記録　例）磁気記録に必要な磁場の強さはどれくらいか？



磁気回路は、磁気ヘッドのエアギャップ部分の必要磁束密度を求めるために使う計算方法の1つ。

長手記録方式

同極の磁極を対向させたまま放置すると減磁する。



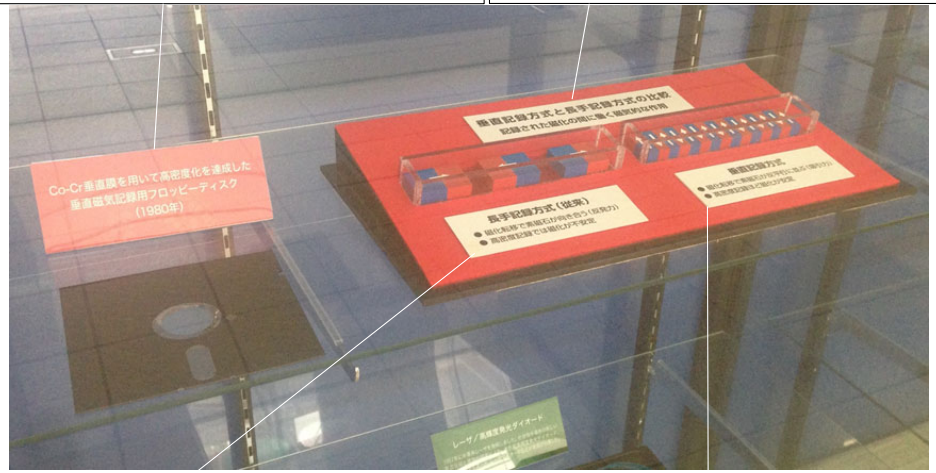
垂直記録方式

エイトハカセ p.33 理化学研究所 Spring 8

磁気記録方式

Co-Cr垂直膜を用いて高密度化を達成した垂直磁気記録用フロッピーディスク（1980年）

垂直記録方式と長手記録方式の比較
記録された磁化の間に働く磁気的な作用



長手記録方式（従来）
- 磁化転移で素磁石が向き合う（反発力）
- 高密度記録では磁化が不安定

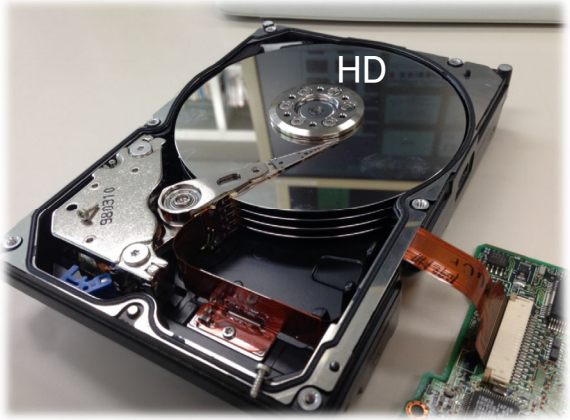
垂直記録方式
- 磁化転移で素磁石が反平行に並ぶ（吸引力）
- 高密度記録ほど磁化が安定

東北大学 青葉山キャンパス 電子情報システム・応物系1号館 展示資料

磁気記録媒体

① フロッピーディスク 2HD　1.44 MB　（磁力のみ・水平記録）
PCが一般家庭に普及し始めた1990年頃

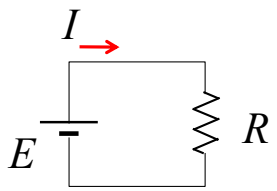
② 光磁気ディスク（MO）の一つであるミニディスク（MD）　1 GB
（レーザー光による熱と磁力）携帯音楽プレーヤーが普及した2000年頃



磁気ヘッドと高速回転するディスクの関係は、ジェット旅客機が地表すれすれを巡航速度で飛行するようなイメージ。衝撃には注意。

③ HDD 8 GB（2 GB×4枚）
ディスク1枚あたり 2 GB = 1 GB ×表裏2面　（磁力のみ・垂直記録）
ノートPCが個人レベルで普及し始めた2010年頃

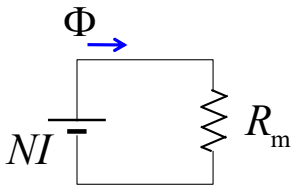
電気回路と磁気回路の対応



E : Electro motive force (emf)

I : Conduction current

R : Electric resistance



NI : Magnetic motive force (mmf)

Φ : Magnetic flux

R_m : Magnetic resistance (Reluctance)

磁気回路版オームの法則

$$\Phi \underbrace{\oint_C \frac{1}{\mu S} dl}_{\text{磁気抵抗}} = \underbrace{NI}_{\text{起磁力}}$$

磁束　巻数　伝導電流

積分路上でμとSが一定で、積分路Cの長さがl [m]のとき

$$\Phi \frac{l}{\underbrace{\mu_0 \mu_r S}_{\text{磁気抵抗}}} = NI$$

磁路長　真空の透磁率　磁路断面積　比透磁率

ノート　https://www.kusamalab.org/lecture/em2/B6_magnetic_circuit.pdf

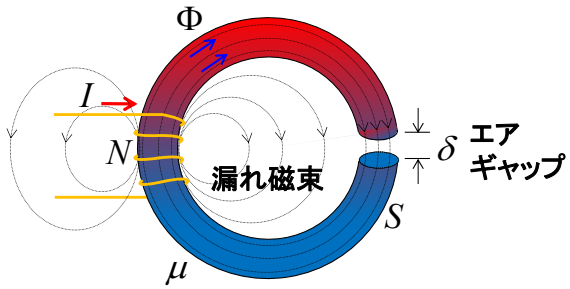
導電率σと透磁率μの類似性

	起電力 [V]	電流 [A]	抵抗 [Ω] = [1/S]
電気回路	E	I	$R = \rho \frac{l}{S} = \frac{1}{\sigma} \frac{l}{S}$ $\sigma = 10^{-15} \leftrightarrow 10^{7}$ 空気　銅
	絶縁体の空気と導体の導電率の差は10^{22}程度あり漏れない。		
	起磁力 [A]	磁束 [Wb]	磁気抵抗 [1/H]
磁気回路	NI	Φ	$R_m = \oint_C \frac{1}{\mu S} dl = \frac{1}{\mu} \frac{l}{S}$ $\mu = 10^{-6} \leftrightarrow 10^{-3}$ 空気　鉄
	空気と磁性体の透磁率の差は10^3程度しかないため漏れる。		

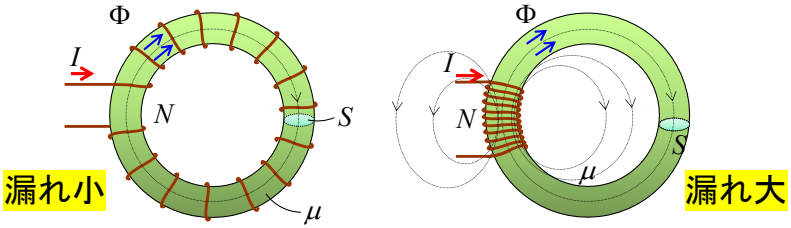
※ 透磁率は電気回路における導電率のようなもので、磁束の通しやすさを表す指標になる。

https://www.kusamalab.org/lecture/em1/D1_current_slide.pdf

漏れ磁束とは？



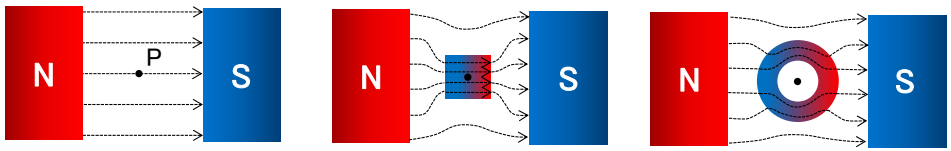
漏れ磁束の影響により、同じ起磁力（巻き数はともにN巻で同じ）でも、鉄心の中の磁束密度および磁界の大きさに差が生じる。



急に巻いて急に止めるのはエネルギー漏れを増大させる。慣性の法則と同じで自然界が嫌う性質の一つ。

磁気遮蔽（シールド）のイメージ

【例題】図のような高透磁率の磁性体を磁石の中心に配置した場合、中心点Pにおける磁束密度はどのように変化するか。



(1)　(2)　(3)

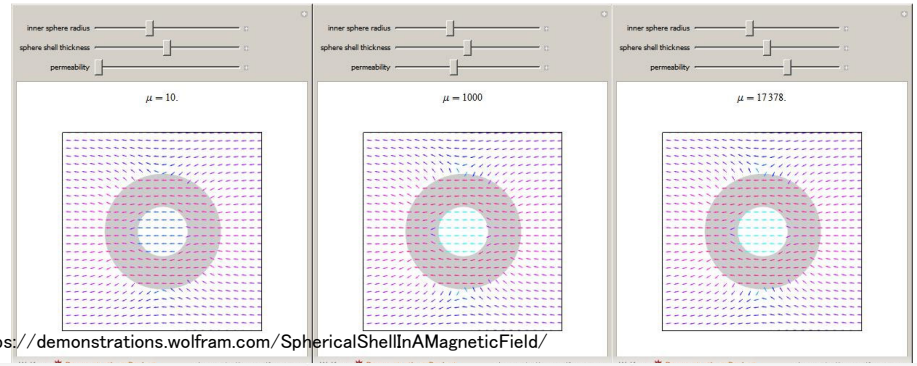
【解答】

透磁率 μ の高い磁性体は磁力線を吸い込む（磁場を通しやすい）作用を有する。しかし、空気との透磁率の差は10^3程度で、空気と導体の導電率の差10^{22}程度に比べると圧倒的に小さく、磁気の完全な遮へいは難しい。従って、実用上の磁気シールドは分厚い鉄板を使った重量のあるものになる。なお、完全な磁気シールドには超伝導（完全反磁性）を使う方法もある。

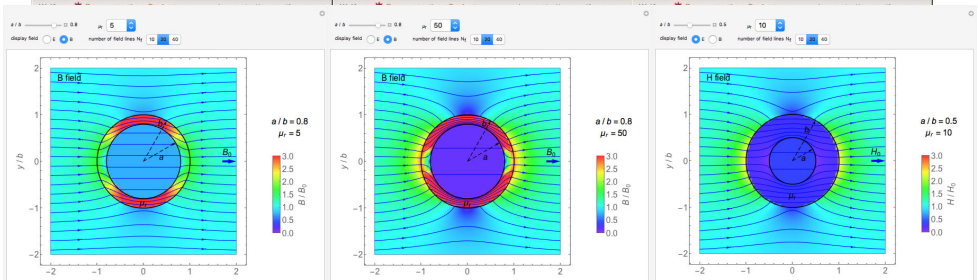
堀田他，電気基礎1 新訂版，p.140，実教出版

答え　$B_2 > B_1 > B_3$

磁気シールドのシミュレーション



https://demonstrations.wolfram.com/SphericalShellInAMagneticField/



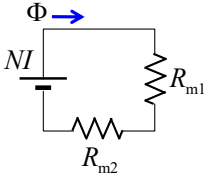
https://demonstrations.wolfram.com/MagneticShieldingEffectOfASphericalShell/

磁気回路①

【演習】 図の磁気回路においてエアギャップの磁束密度を求めよ。ただし、ギャップ以外からの漏れ磁束は考えないものとする。(1) 磁気回路を用いる方法 (2) アンペアの法則を使う方法と両方の解法で解答し、両者を比較せよ。（教科書 p.106）

【解答】 (1) 磁気回路より

$$\begin{cases} R_{m1} = \dfrac{l}{\mu S} \\ R_{m2} = \dfrac{\delta}{\mu_0 S} \end{cases}$$



磁気オームの法則より

$$\Phi = \frac{NI}{R_{m1} + R_{m2}}$$

$$= \frac{NI}{\dfrac{l}{\mu S} + \dfrac{\delta}{\mu_0 S}} = \frac{\mu\mu_0 SNI}{\mu_0 l + \mu\delta}$$

従って、磁束密度は

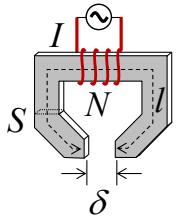
$$B = \frac{\Phi}{S} = \frac{\mu\mu_0 NI}{\mu_0 l + \mu\delta}$$

【別解】 (2) アンペアの法則より

$$\oint_C \vec{H} \bullet d\vec{l} = NI$$

$$\int_{C_1} H_1 dl + \int_{C_2} H_2 dl = NI$$

$$\int_{C_1} \frac{B_1}{\mu} dl + \int_{C_2} \frac{B_2}{\mu_0} dl = NI$$



磁性体の境界条件より、$B_{1n}=B_{2n}=B$であるから

$$B\left(\int_{C_1} \frac{1}{\mu} dl + \int_{C_2} \frac{1}{\mu_0} dl\right) = NI$$

$$B\left(\frac{l}{\mu} + \frac{\delta}{\mu_0}\right) = NI$$

添え字n: normal（法線、垂直）

従って、磁束密度は

$$B = \frac{\mu\mu_0 NI}{\mu_0 l + \mu\delta}$$

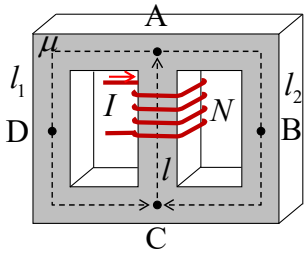
磁気回路を使った方が計算量が少ない。

答え　$B = \dfrac{\mu\mu_0 NI}{\mu_0 l + \mu\delta}$

磁気回路②

【例題】 図の鉄心コイルにおいて、ACの磁路の長さが ℓ [m]、ADC、ABC部分の磁路の長さが ℓ_1、ℓ_2 [m] である。巻数Nのコイルに電流 I [A] を流したとき、次の問いに答えよ。ただし、磁路の透磁率は μ [H/m] である。磁路の断面積はどこでも一定で S [m^2] である。また、漏れ磁束はないものとする。（教科書 例題7.3）

(1) 磁気等価回路を描け。
(2) 各部の磁気抵抗 R_m, R_{m1}, R_{m2} を求めよ。
(3) 各部の磁束 Φ、Φ_1、Φ_2 を求めよ。



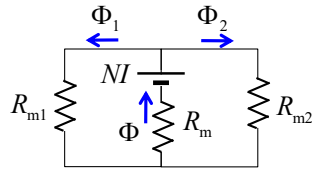
【解答】

(2) 磁気抵抗

$$\begin{cases} R_m = \dfrac{l}{\mu S} \\ R_{m1} = \dfrac{l_1}{\mu S} \\ R_{m2} = \dfrac{l_2}{\mu S} \end{cases}$$

(3) 磁束は磁気オームの法則より

$$\begin{cases} \Phi = \dfrac{NI}{R_m + \dfrac{R_{m1}R_{m2}}{R_{m1} + R_{m2}}} \\ \Phi_1 = \dfrac{R_{m2}}{R_{m1} + R_{m2}}\Phi \\ \Phi_2 = \dfrac{R_{m1}}{R_{m1} + R_{m2}}\Phi \end{cases}$$



(1) 磁気等価回路

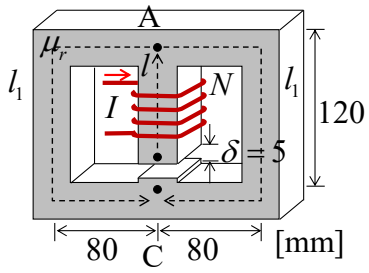
磁気回路③

【演習】図に示す μ_r=200, N=200 の鉄心コイルにおいて、磁路の断面積はどこでも一定で 4 cm² である。漏れ磁束はないとして次の問いに答えよ。(教科書 章末7.6)
(1) 磁気等価回路を描け。
(2) 空隙部分の磁束密度を 0.5 Tにするために、コイルにいくら電流を流せばよいか。

【解法】

磁気抵抗

$$\begin{cases} R_{mg} = \dfrac{\delta}{\mu_0 S} \\ R_m = \dfrac{l}{\mu S}, \quad R_{m1} = R_{m2} = \dfrac{l_1}{\mu S} \end{cases}$$



空隙の磁束

$$\Phi = \frac{NI}{R_m + R_{mg} + \dfrac{R_{m1}R_{m1}}{R_{m1}+R_{m2}}} = \frac{\mu SNI}{\mu_r\delta + l + \dfrac{l_1}{2}}$$

空隙の磁束密度

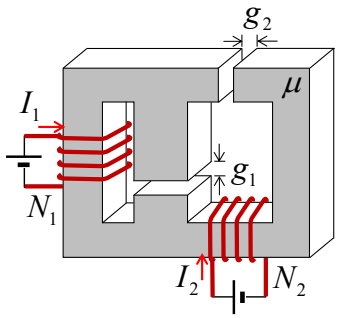
$$B = \frac{\Phi}{S} = \frac{\mu NI}{\mu_r\delta + l + \dfrac{l_1}{2}}$$

答え $I = \dfrac{B\left(l + \mu_r\delta + \dfrac{l_1}{2}\right)}{\mu_0\mu_r N} = 12.5\ \mathrm{A}$

磁気回路④

【演習】 図の磁気回路において各エアギャップの磁束密度を求めよ。
ただし、磁性体の透磁率 μ を無限大と仮定する。

【解法】 磁性体の透磁率 μ が無限大なので、ギャップ g_1, g_2 の磁気抵抗だけを考えればよい。あとは重ね合わせの原理を適用して各ギャップの磁束を求める。



磁気抵抗

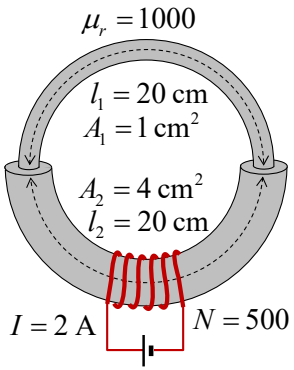
$$\begin{cases} R_m = \dfrac{l}{\mu S} \simeq \dfrac{l}{(\infty)S} = 0 \\ R_{g1} = \dfrac{g_1}{\mu_0 S}, \quad R_{g2} = \dfrac{g_2}{\mu_0 S} \end{cases}$$

答え
$$\begin{cases} B_1 = \dfrac{N_1 I_1}{g_1}\mu_0 \\ B_2 = \dfrac{N_1 I_1}{g_2}\mu_0 + \dfrac{N_2 I_2}{g_2}\mu_0 \end{cases}$$

湯本, 電気磁気学の基礎, p.130, 数理工学社, 2012

磁気回路⑤

【演習】図に示すような断面積が異なる鉄心を用いて磁気回路を作った。
漏れ磁束はないものとして次の問いに答えよ。
(1) 起磁力はいくらか。
(2) 回路の磁気抵抗はいくらか。
(3) 鉄心を通る磁束はいくらか。



【解答】

起磁力

$$F = NI$$

磁気抵抗

$$\begin{cases} R_{m1} = \dfrac{l_1}{\mu S_1}, \quad R_{m2} = \dfrac{l_2}{\mu S_2} \\ R_m = R_{m1} + R_{m2} \end{cases}$$

磁束

$$\Phi_m = \frac{NI}{R_m}$$

堀田, 電気基礎1 新訂版, p.147, 実教出版, 2007

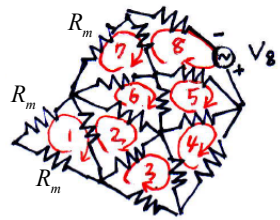
答え : (1) 10^3, (2) 1.99×10^6, (3) 5.03×10^{-4}

磁気抵抗回路網の環路解析

【演習】図のような一辺が R_m [Ω]からなる立体磁気抵抗回路において、8個のループに流れる磁束を求める方程式を導出せよ。

【解答】K. V. L. より以下の8元連立一次方程式が得られる。

$$\mathbf{R_m}\ \begin{bmatrix} 3R_m & -R_m & & & & & & \\ -R_m & 3R_m & -R_m & & & -R_m & & \\ & -R_m & 3R_m & -R_m & & & & \\ & & -R_m & 3R_m & -R_m & & & \\ & & & -R_m & 3R_m & -R_m & & -R_m \\ & -R_m & & & -R_m & 3R_m & -R_m & \\ & & & & & -R_m & 3R_m & -R_m \\ & & & & -R_m & & -R_m & 3R_m \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Phi_1 \\ \Phi_2 \\ \Phi_3 \\ \Phi_4 \\ \Phi_5 \\ \Phi_6 \\ \Phi_7 \\ \Phi_8 \end{Bmatrix}_{\mathbf{\Phi}} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ NI_8 \end{Bmatrix}_{\mathbf{F}}$$



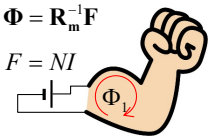
任意形状の磁気抵抗体(磁性体)では、メッシュ解析が有効。

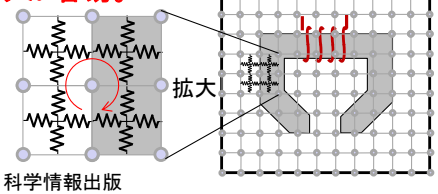
マトリクスに規則性があるので、プログラミングが容易。

入力ベクトルFを変更するだけで、起磁力印加点を変更できる。

$$\mathbf{\Phi} = \mathbf{R_m}^{-1}\mathbf{F}$$

$$F = NI$$





一ノ倉, 田島, 中村, 吉田, 磁気回路法によるモータの解析, p.71, 科学情報出版