

第4講 磁性体

教科書 p.139~



ここをダブルクリック
すると読み上げ原稿が
表示されます。

磁性体材料とは

磁界中に物質を入れたときに磁気モーメントを生じる材料と定義される。

おさらい

磁界の強さを H , 磁束密度を B とするとき、真空中では次式の関係がある。

真空の透磁率
 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$

$$B = \mu_0 H \quad (5 \cdot 1) \text{式}$$

[T] [A/m]

磁性体材料は磁界 H によって材料中に磁気モーメント(磁気分極)を生じる \Rightarrow 磁化されたという

単位体積中に発生した磁気モーメント M は磁化の大きさを表す。

$$B = \mu_0 (H + M) \quad (5 \cdot 2) \text{式}$$

磁化率

教科書 p.81~

$$\mu_0 M = J \quad \text{とおくと} \quad B = \mu_0 H + J \quad (5 \cdot 3) \text{式}$$

J : 磁気分極

材料の透磁率 μ , 比透磁率 μ_r , および磁化率 χ を用いると

$$B = \mu H = \mu_0 \mu_r H \quad (5 \cdot 4) \text{式}$$

$$M = \chi H \quad (5 \cdot 5) \text{式}$$

(5・2)式、(5・4)式、(5・5)式より

$$\mu = \mu_0 \mu_r = \mu_0 (1 + \chi) \quad (5 \cdot 6) \text{式}$$

磁化率 は物質の磁性を特徴づける

$$\mu_0 M = J$$

磁性の根源／磁性体の種類

1. 電子の軌道運動による磁気モーメント
2. 電子のスピンによる磁気モーメント
3. 原子核の磁気モーメント



表5・1' 磁性体の名前

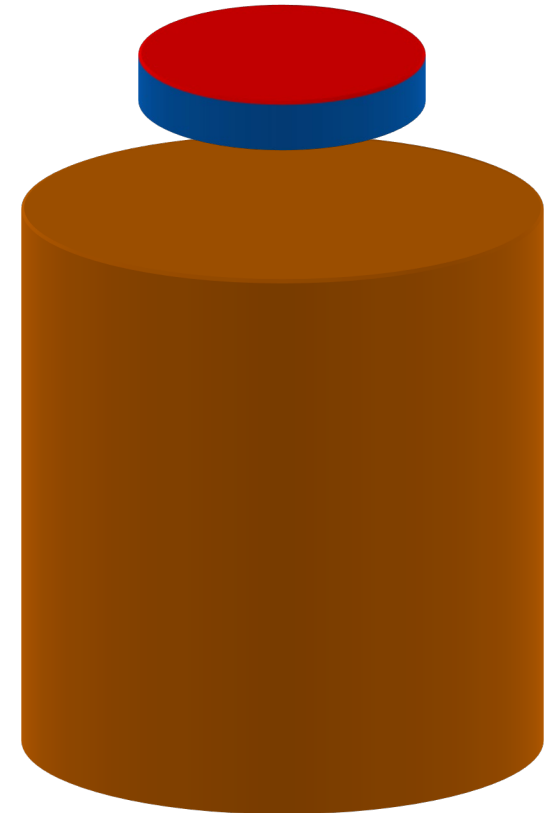
反磁性
常磁性
反強磁性
フェロ磁性体
フェリ磁性

スライド問題4-1

銅製のパイプに、上から平型磁石を落としてみた。どのように落ちていくか？



- 1) 入っていけない
- 2) 真ん中で止まる
- 3) ゆっくり落ちていく
- 4) 普通に落ちる (自由落下)



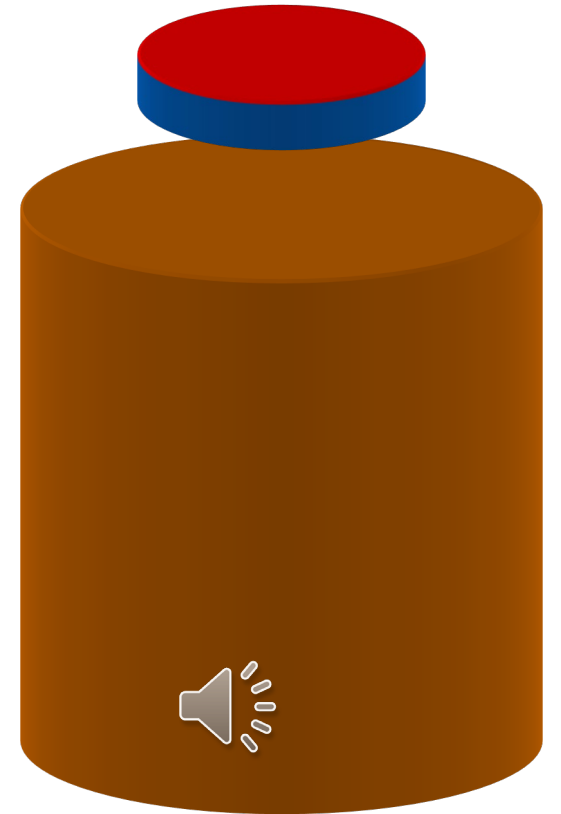
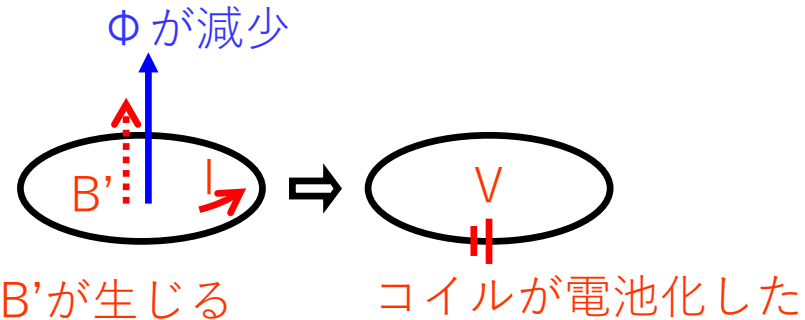
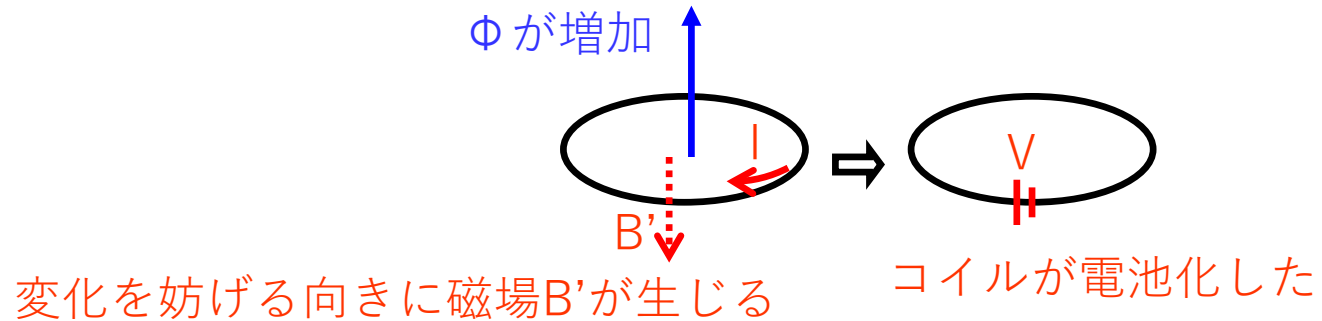
00 : 00

その根拠も考えなさい。

スライド問題4-1 解答例

3) ゆっくり落ちていく (**レンツの法則**)

磁束 Φ が変化する場合には、その変化を妨げる方向に電流を流そうとする起電力が誘起される



電子の軌道運動による磁気モーメント

教科書 p.140

反磁性体

軌道磁気モーメントが原因 → レンズの法則を思い出そう

だから負の磁化率を示す

温度に依存しない

$I = -\frac{e\omega}{2\pi}$. . . 単位時間に $e[\text{C}]$ の電荷が通った

$M = \mu_0 I S$ より

$$M_l = -\mu_0 \frac{e\omega}{2\pi} \times \pi r^2$$

$$= -\mu_0 \frac{e}{2} r^2 \omega$$

$$= -\frac{\mu_0 e}{2m_e} L$$

(5・7)式

S は黄色の面積

「ノート取ろうね」
のアイコンです！

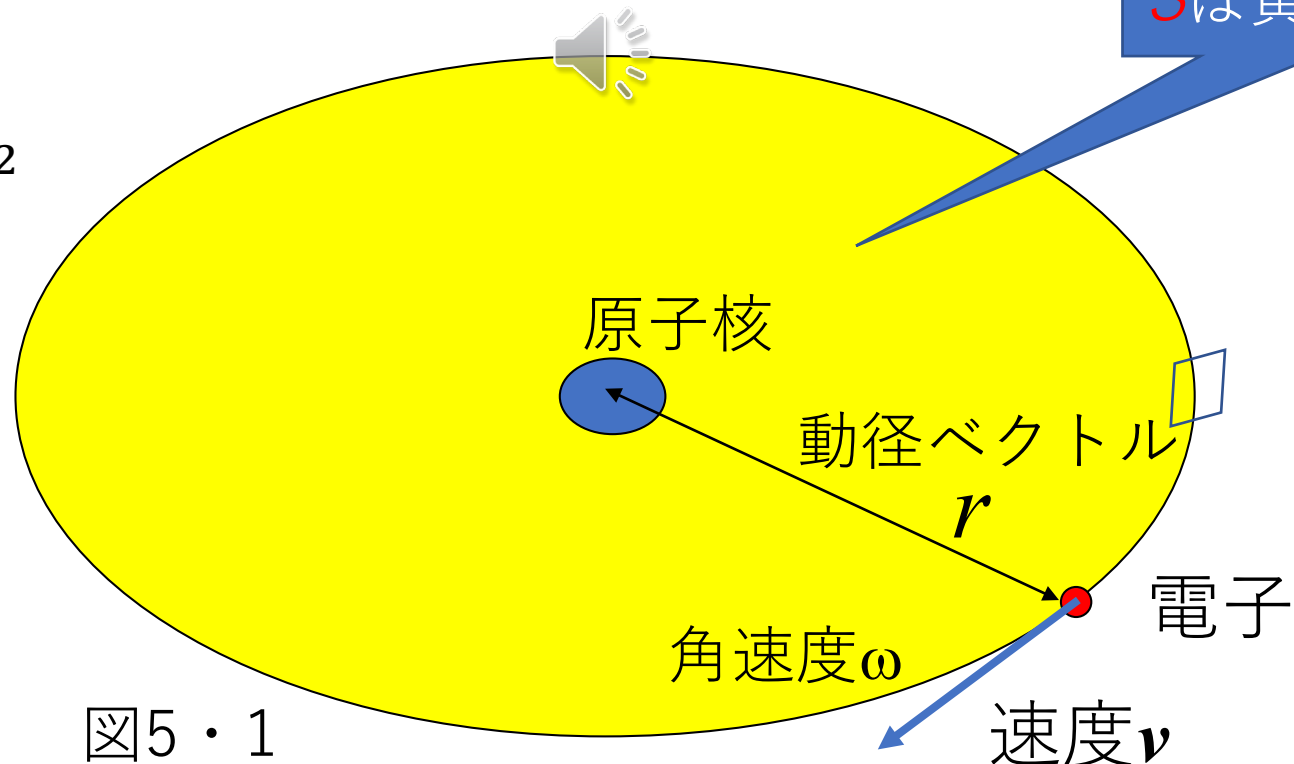


図5・1

電子の軌道運動による磁気モーメント

教科書 p.140

反磁性体

軌道磁気モーメントが原因 → レンズの法則を思い出そう

角運動量

$$\mathbf{L} = \mathbf{r} \times \mathbf{p}$$

運動量の大きさ

$$|\mathbf{p}| = m_e |\mathbf{v}| = m_e r \omega$$

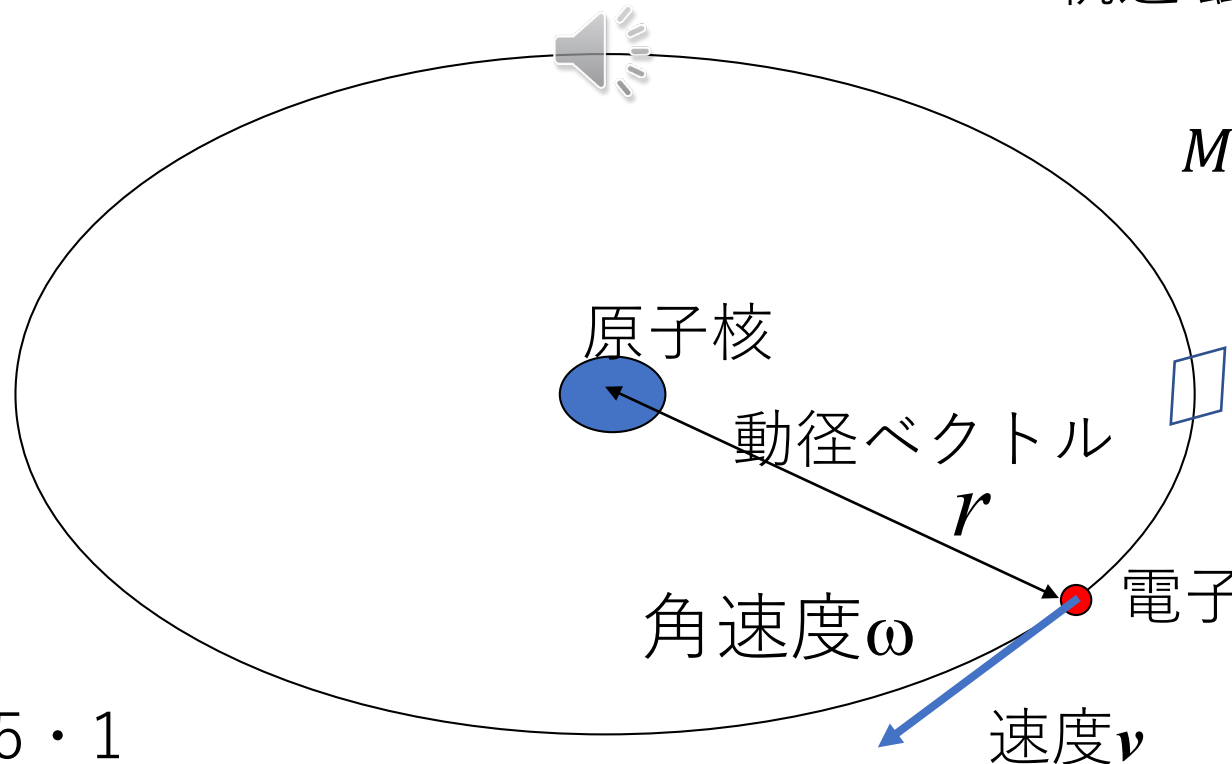
$$|\mathbf{L}| = |\mathbf{r} \times \mathbf{p}| = m_e r^2 \omega$$

だから負の磁化率を示す

温度に依存しない

軌道磁気モーメント

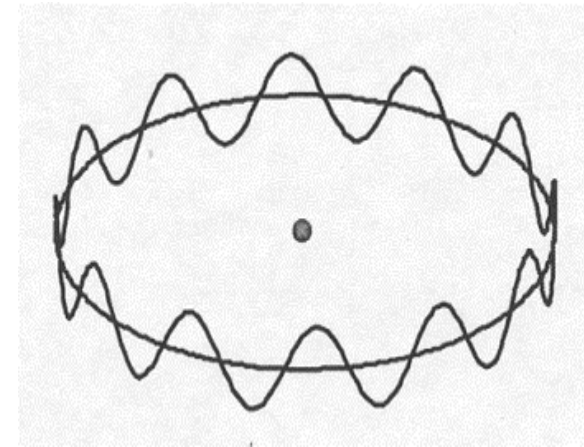
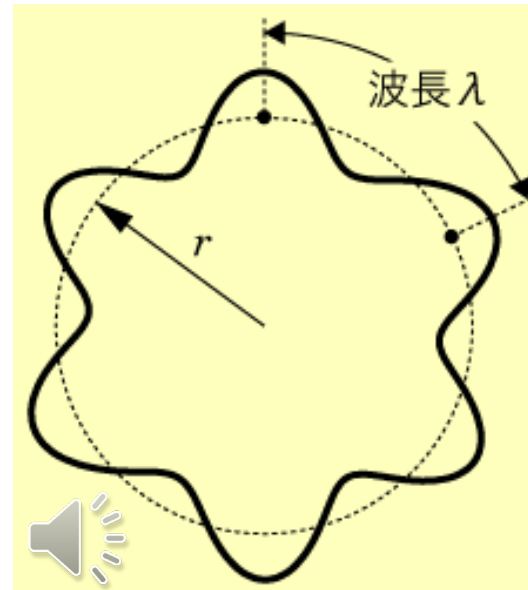
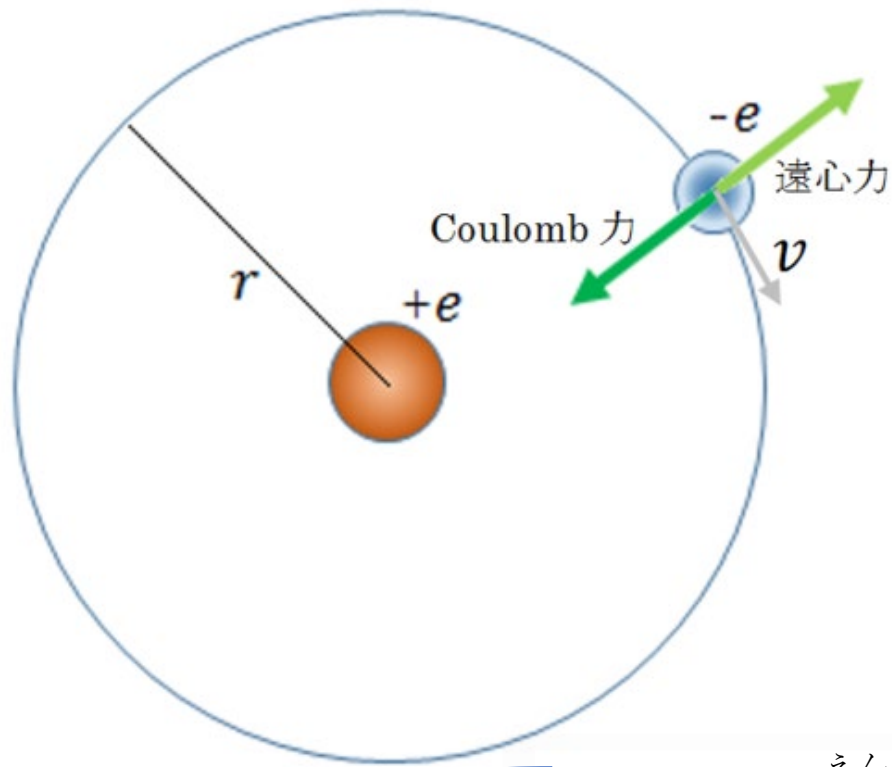
$$M_l = -\frac{\mu_0 e}{2m_e} L \quad (5 \cdot 7) \text{式}$$



電荷 $-e$ 質量 m_e

図5・1

ド・ブロイ波（物質波）



$$\lambda = \frac{h}{mv} = \frac{h}{p}$$

h ：プランク定数

$$6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$$

すなわち、円運動の電子の^{えんうんどう}角運動量の^{かかうんどうりょう} 2π 倍がプランク^{ばい}

^{ていすう}定数 h の^{せいすうばい}整数倍の^{あた}値しか取り得ない。これは^{かかうんどうりょう}角運動量の

^{りょうしか}量子化と呼ばれ、^{せいすう}整数の値は^{りょうしすう}量子数と呼ばれる。

電子の軌道運動による磁気モーメント

教科書 p.140

反磁性体

軌道磁気モーメントが原因 → レンズの法則を思い出そう

ここまでに“量子”って語が無かったね？
何が飛び飛びの値になるのだろうか？

角運動量

$$|L| = |\mathbf{r} \times \mathbf{p}| = m_e r^2 \omega$$

が飛び飛びの値をとる。

電子の角運動量は

$$\hbar = \frac{h}{2\pi}$$

の整数倍しかとらない。



だから負の磁化率を示す

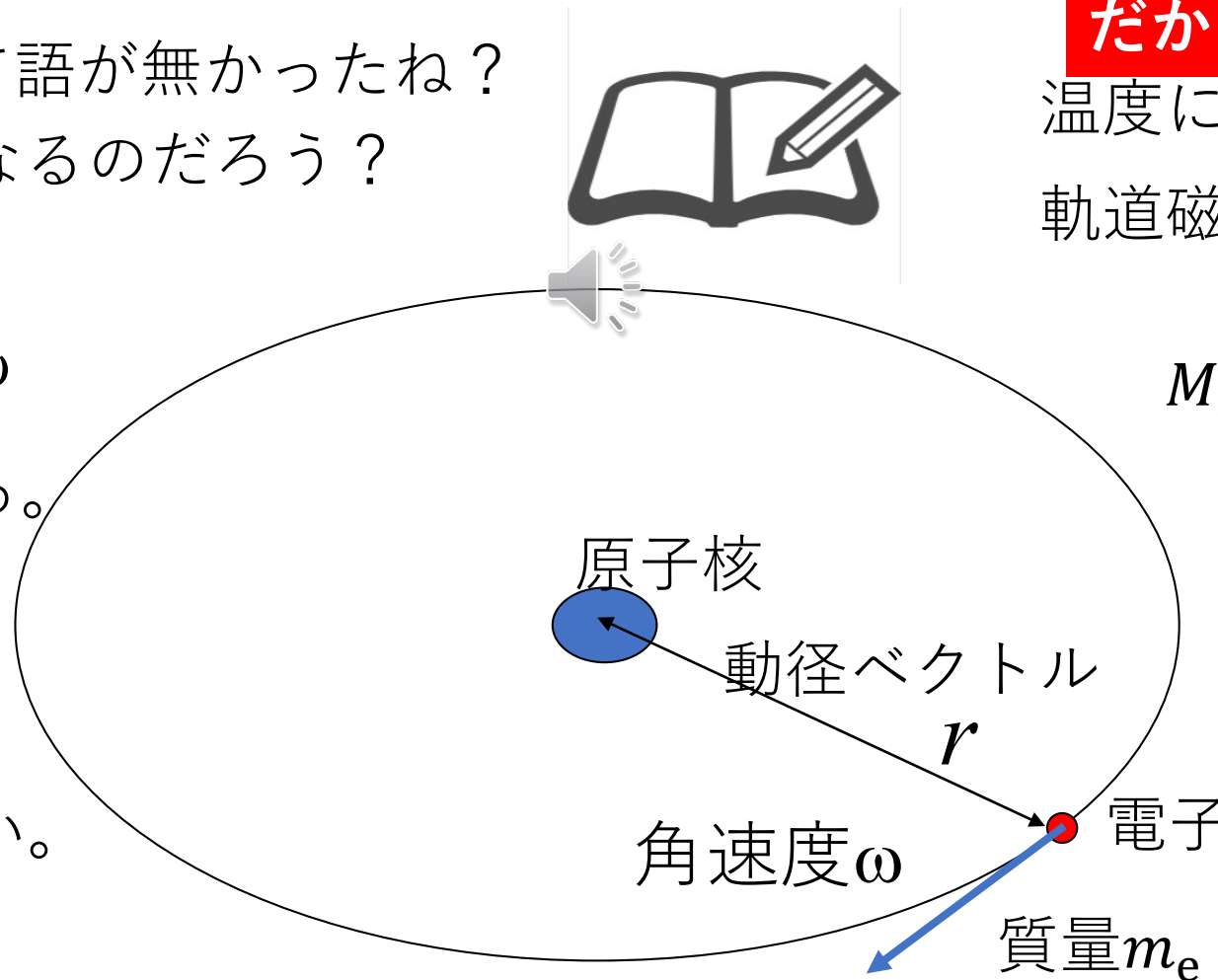
温度に依存しない

軌道磁気モーメント

$$M_l = -\frac{\mu_0 e}{2m_e} L \quad (5 \cdot 7) \text{式}$$

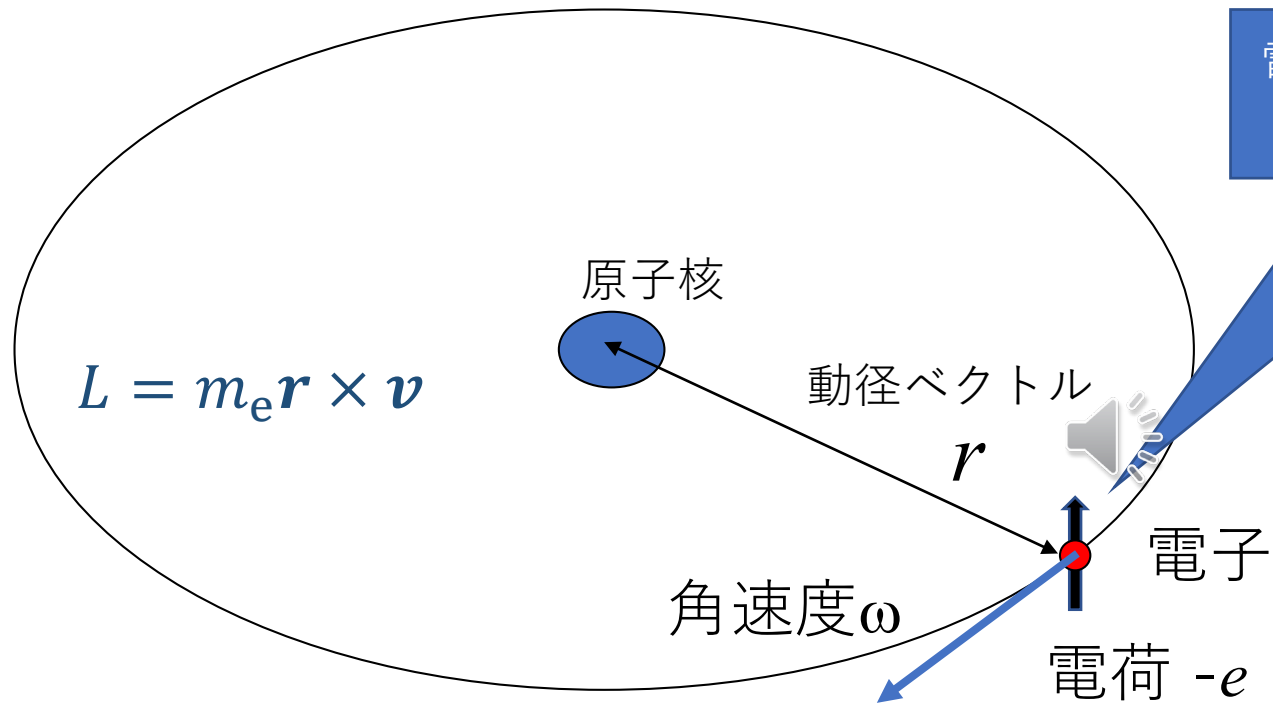
$$\mu_B = \frac{e\mu_0 \hbar}{2m_e}$$

ボーア磁子



電子のスピンによる磁気モーメント

教科書 p.141



$$M_s = -\frac{\mu_0 e}{m_e} L \quad (5 \cdot 8) \text{式}$$

$$M = -g \frac{\mu_0 e}{m_e} L \quad (5 \cdot 9) \text{式}$$

と書くことにします。

原子核による磁気モーメント


教科書 p.142

$1.77 \times 10^{-32} \text{ Wb} \cdot \text{m}$ 程度と小さい。
(電子の約1/660)



長岡日赤病院の
ホームページより

フントの規則 (発展講義)

原子核の周りには原子番号と等しい数の電子が存在する。これらの多電子系について角運動量の合成を考える。まず、すべての電子について軌道角運動量およびスピン角運動量の総和を求め、それぞれを L および S とする。次に両者を用いて、全角運動量 J を求める。この結合方式は LS 結合と呼ばれる。
 LS 結合は、次に述べるフントの規則に従う。

- 1) 各電子のスピンは加算されて、パウリの排他律に矛盾しない最大可能な S の値を作る。
- 2) 各電子の軌道角運動量は結合して1)と矛盾しない L の最大値を作る。
- 3) 不完全殻に LS 結合がある場合は、内部量子数 J は次のようになる。

殻の半分以下しか電子が満たされていないとき : $J = |L - S|$

殻の半分以上電子が満たされているとき : $J = L + S$

この LS 結合によると、全磁気モーメント μ_m は内部量子数 J によって

$$\mu_m = g\mu_B\sqrt{J(J+1)}$$

で与えられる。

遍歴電子モデル(発展講義)

更に、鉄などの金属で、この後説明する「強磁性」が発現する理由は、金属のバンドモデルについて、もう一層深い理解が必要となります。



スライド問題4-2



今年の教科書では、電流の磁気モーメントは

$$M = \mu_0 I \textcolor{red}{S}$$

と書いてあるが、シラバスに挙げてあった参考書[1]（去年使った教科書）では

$$|m| = |I| \times \pi r^2$$

と、表記が異なる（ μ_0 の有無）。
何故か？ （どちらかが誤記？）

スライド問題4-2 解答例

電界 E に磁場 H を対応させる扱い方を $E - H$ 対応と呼び、
 E に磁束密度 B を対応させる扱い方を $E - B$ 対応と呼ぶ。

再掲
$$B = \mu_0 H \quad (5 \cdot 1) \text{式}$$

 ↑ ↑
 [T] [A/m]

この教科書はMKSA 単位系の $E - H$ 対応で書かれた式で統一されている。
なので、

$$\mu_B = 1.165 \times 10^{-29} \text{ Wb} \cdot \text{m}$$



と書いてあるのに対し、

$$\mu_B = 9.284 \times 10^{-24} \text{ J/T}$$

他の参考書を読む際には、注意を払おう。



磁性体の種類と性質（重要）

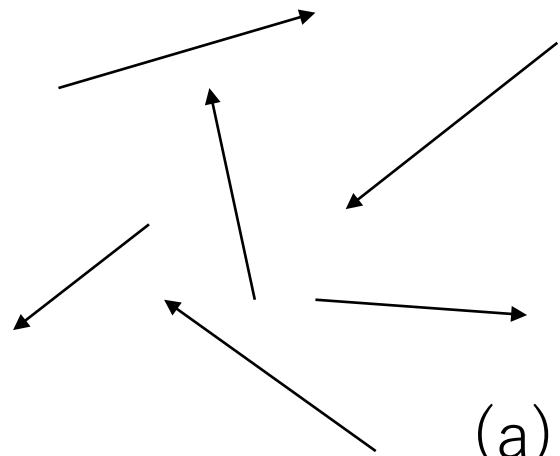
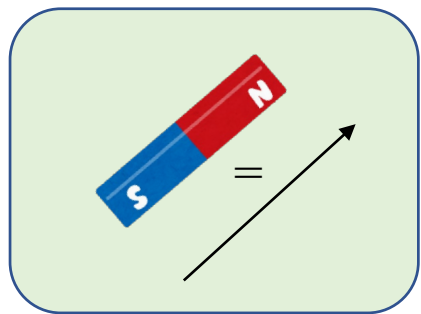
18:30



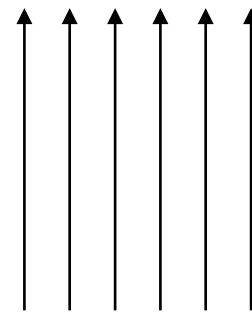
強磁性

	磁化率 χ_m	永久磁気双極子	J - H 特性	温度依存性	物質例
フェロ磁性	正で大、磁界に依存	等しい双極子の平行配列			Fe, Ni, Co, Gd, Sm-Co合金, Nd-Fe-B合金
フェリ磁性	正で大、磁界に依存	異なる双極子の交互逆平行配列			フェライト, Fe3O4, MnO, Fe2O3
反強磁性体	$10^{-3} \sim 10^{-5}$	等しい双極子の逆平行配列			FeO, CoO, MnO, MnF2
常磁性	$10^{-3} \sim 10^{-5}$	無秩序			Al, Cr, Mn, Pt, O2
反磁性	-10^{-6} 程度	無し			Cu, Ag, Hg, Bi, He, Ne

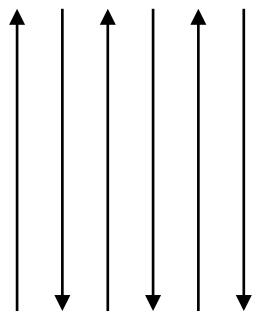
磁気モーメントの配列 (重要)



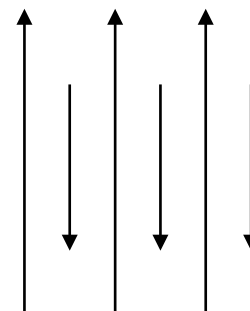
(a) 常磁性



(b) フェロ磁性

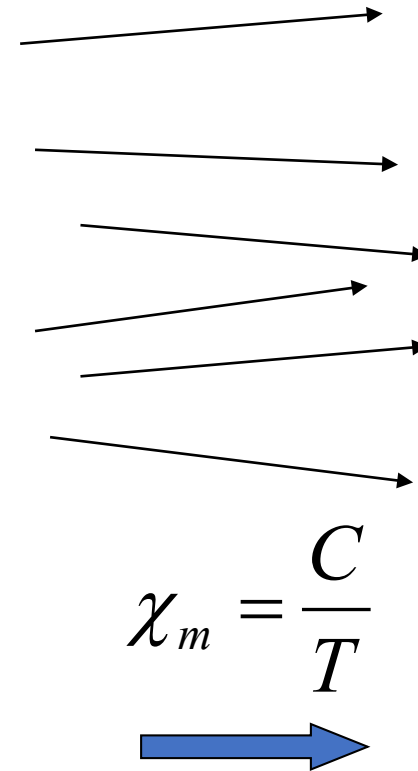
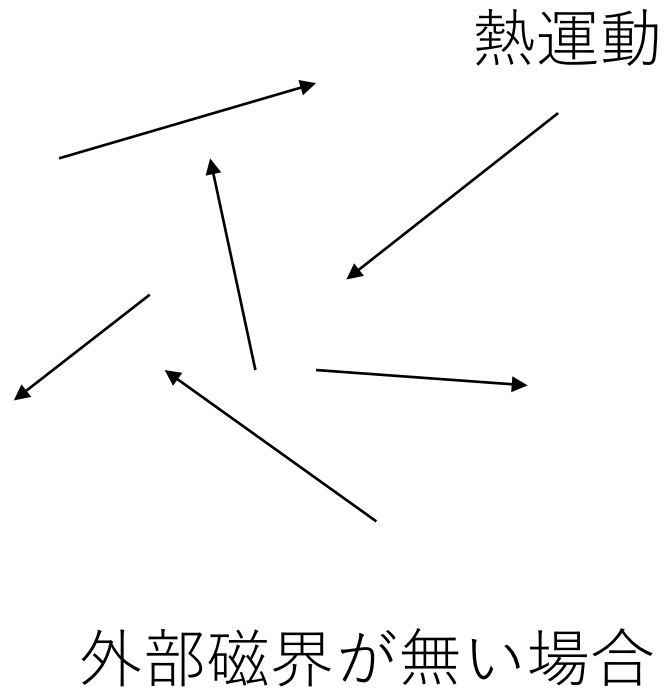


(c) 反強磁性



(d) フェリ磁性

常磁性体

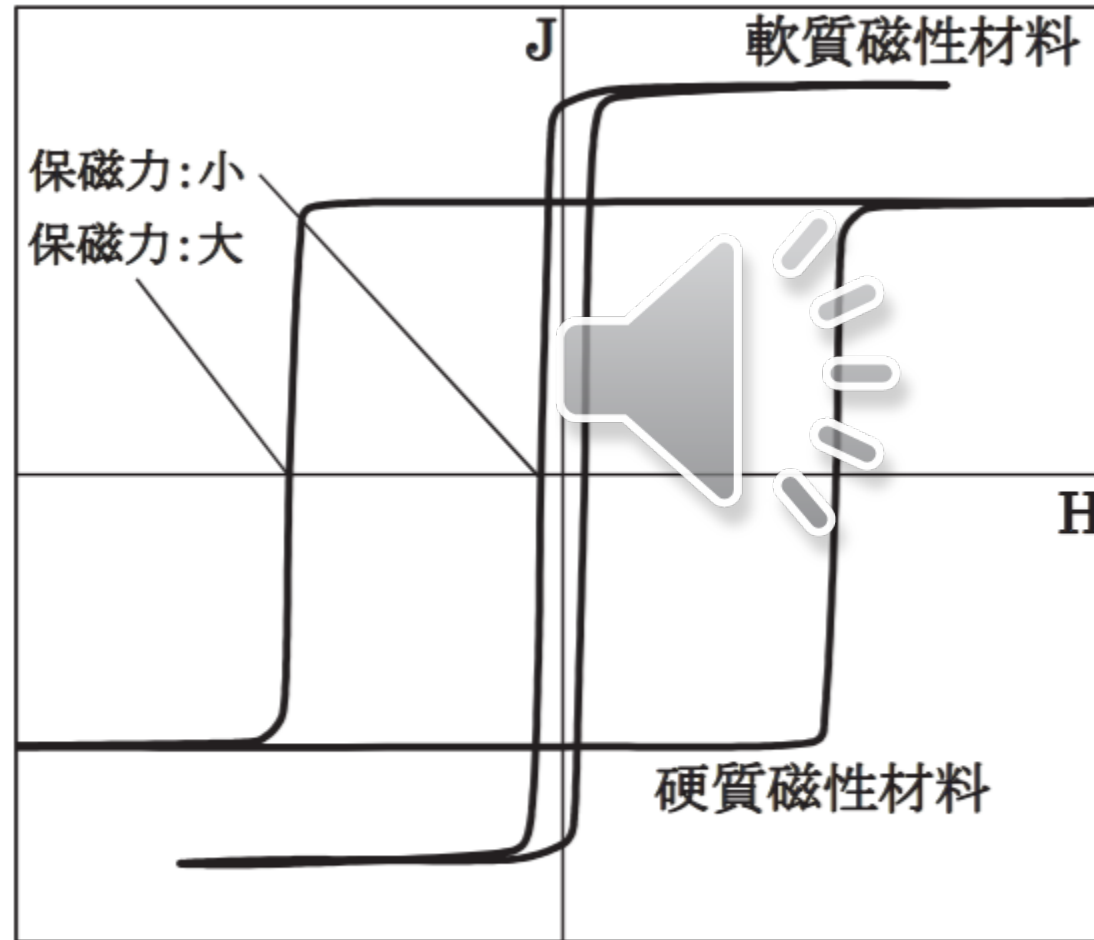


外部磁場がある場合



軟質/硬質磁性材料

教科書 p.143



軟質磁性材料と硬質磁性材料の磁化曲線

23:00

福田方勝: “2.磁性材料を理解するために”より引用 (図1)
一般社団法人 特殊鋼倶楽部 機関誌 特殊鋼 Vol.63 No.5 (2014)



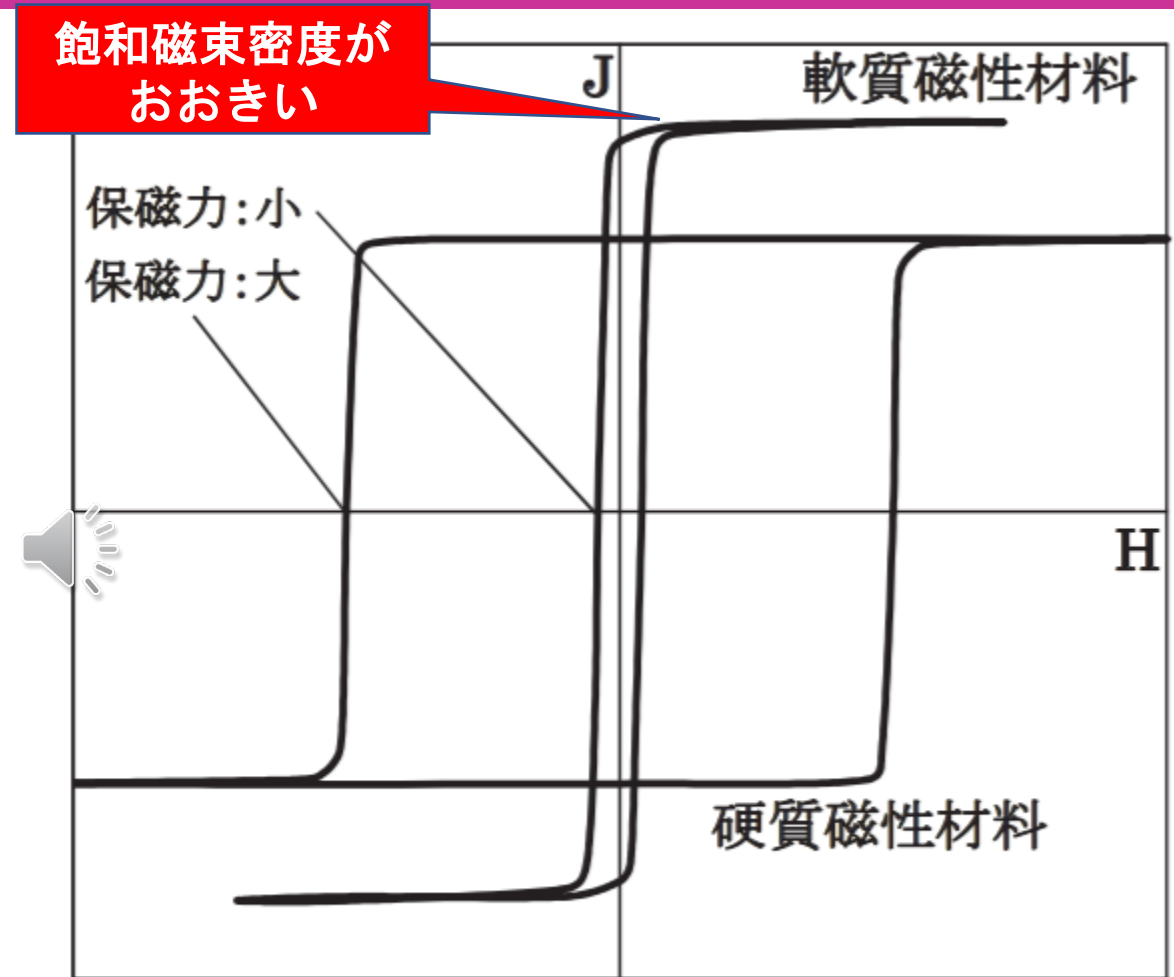
軟質磁性材料

教科書 p.143



軟質磁性材料の特徴と要求される特性

- 1 飽和磁束密度 B_s が大きいこと
- 2 初透磁率 μ_i が大きいこと
- 3 ヒステリシス損失やうず電流損失が小さいこと
- 4 保磁力が小さいこと
- 5 抵抗率が大きいこと



軟質磁性材料と硬質磁性材料の磁化曲線

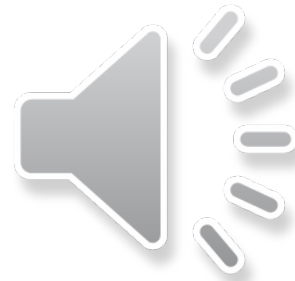


高透磁率材料とも呼ばれる

教科書 p.144

透磁率を高めるには、

- 1.飽和磁束密度 B ,が大きい
- 2.結晶磁気異方性定数 K が小さいこと
- 3.内部応力および磁気歪みが小さいこと
- 4.気泡,不純物,析出物が少ないこと
- 5.結晶粒が小さいこと





透磁率が高い金属はFe, Ni, Co

教科書 p.144

酸化物系ではフェライト（次のスライドで）。

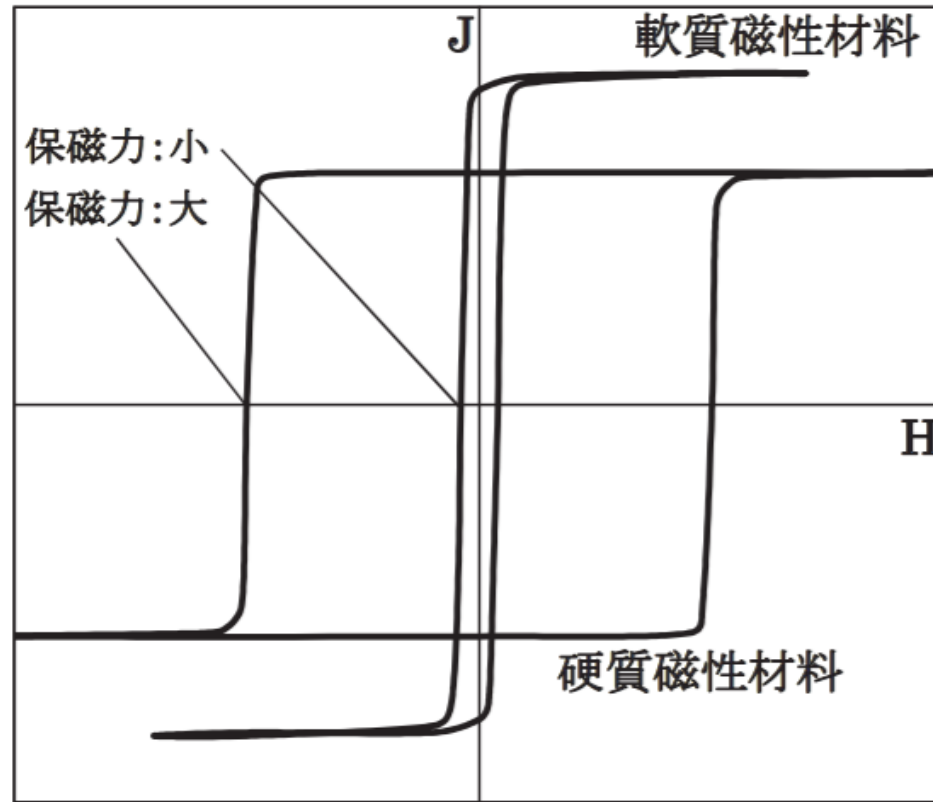
金属系材料は、磁束密度と透磁率は大きいが、
金属だけに抵抗率は小さい。低周波用磁性部品



酸化物系材料は、磁束密度は小さいが抵抗率は大
きい。高周波用磁性部品



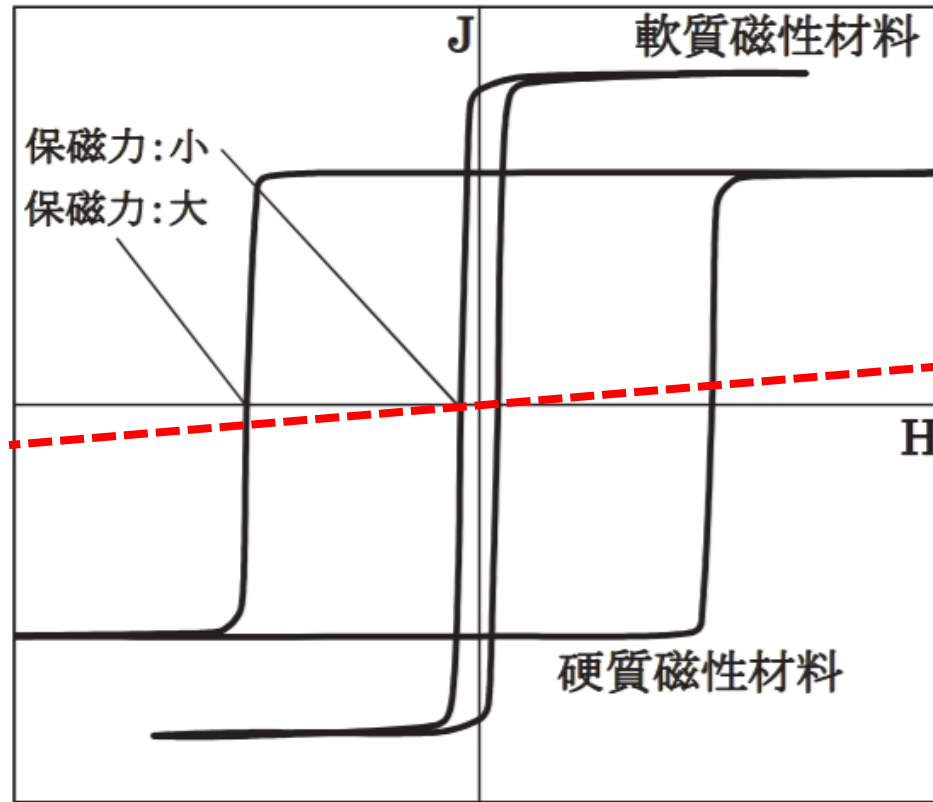
スライド問題4-3



軟質磁性材料と硬質磁性材料の磁化曲線

常磁性体の H - J 曲線を、この図に上書きしてみよう。

スライド問題4-3 解答例

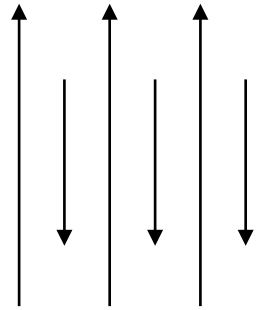


軟質磁性材料と硬質磁性材料の磁化曲線

常磁性体のH-J曲線を、この図に上書きしてみよう。



フェリ磁性体



大きな磁気モーメントを持つ
絶縁体である

矢印は、磁気双極子の
向きと大きさを示す



スライド問題4-4

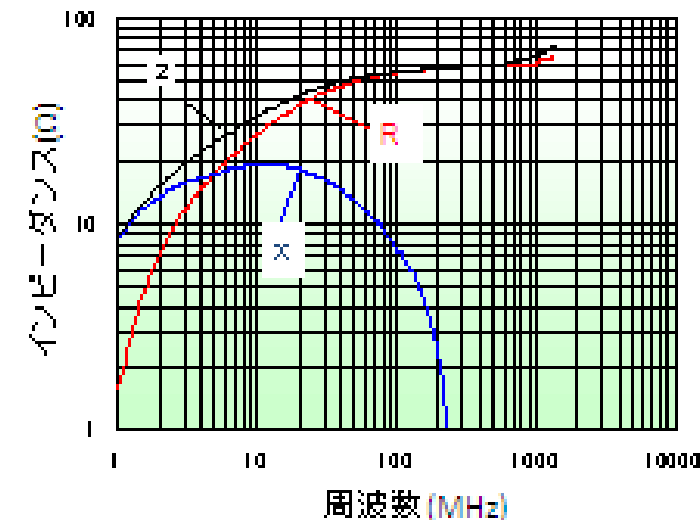
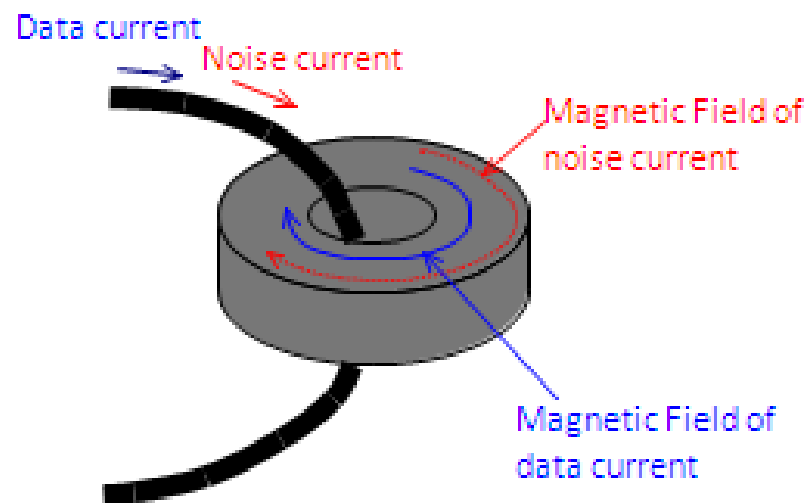


このリング状のフェライトに電線をくぐらせるだけで、ノイズフィルターとして働く理由を説明して下さい。



スライド問題4-4

電気が専門ではない



1. 高インピーダンスにより電流を制限する効果
(インピーダンスのZ成分の効果)
2. フェライトの磁気損失によってノイズのエネルギーを消費する効果
(インピーダンスのR成分の効果)



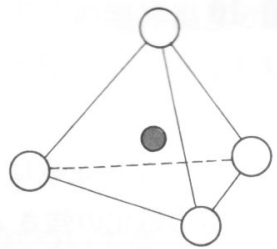
フェライトのミクロな構造

教科書 p.145

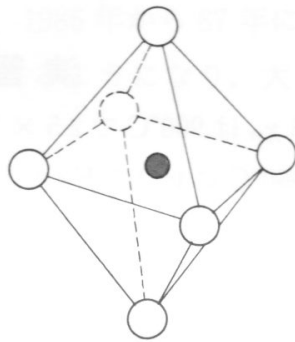
スピネル構造

Aサイト遷移金属イオン

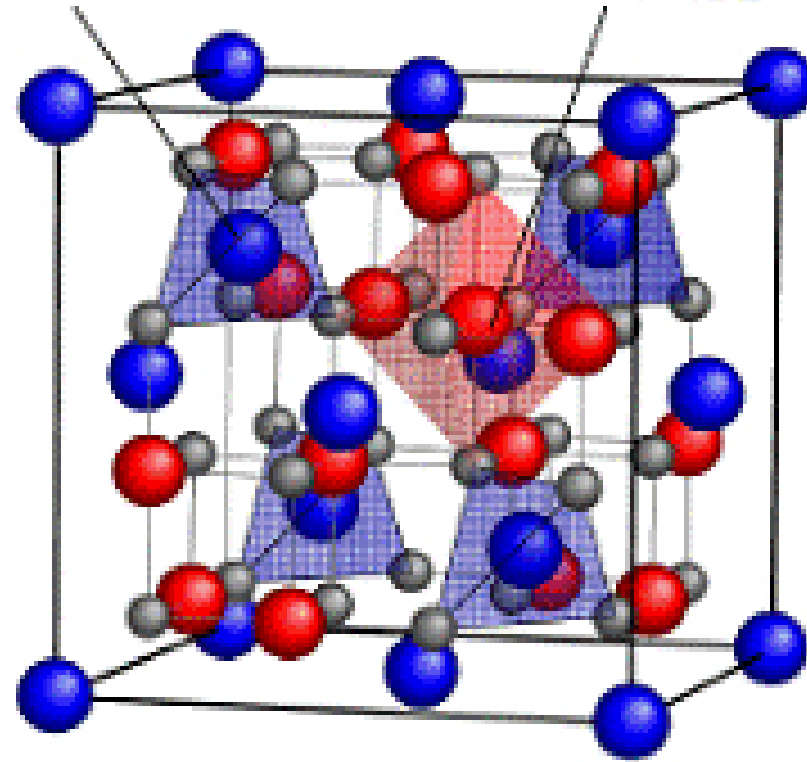
Bサイト遷移金属イオン



(a) A-site



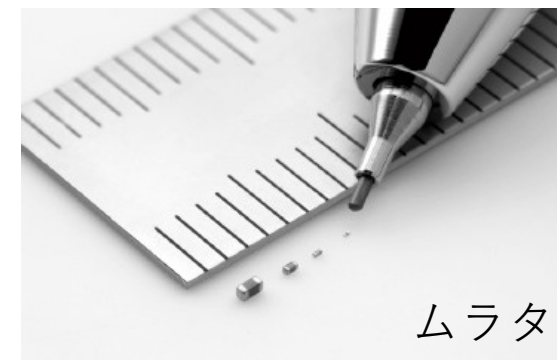
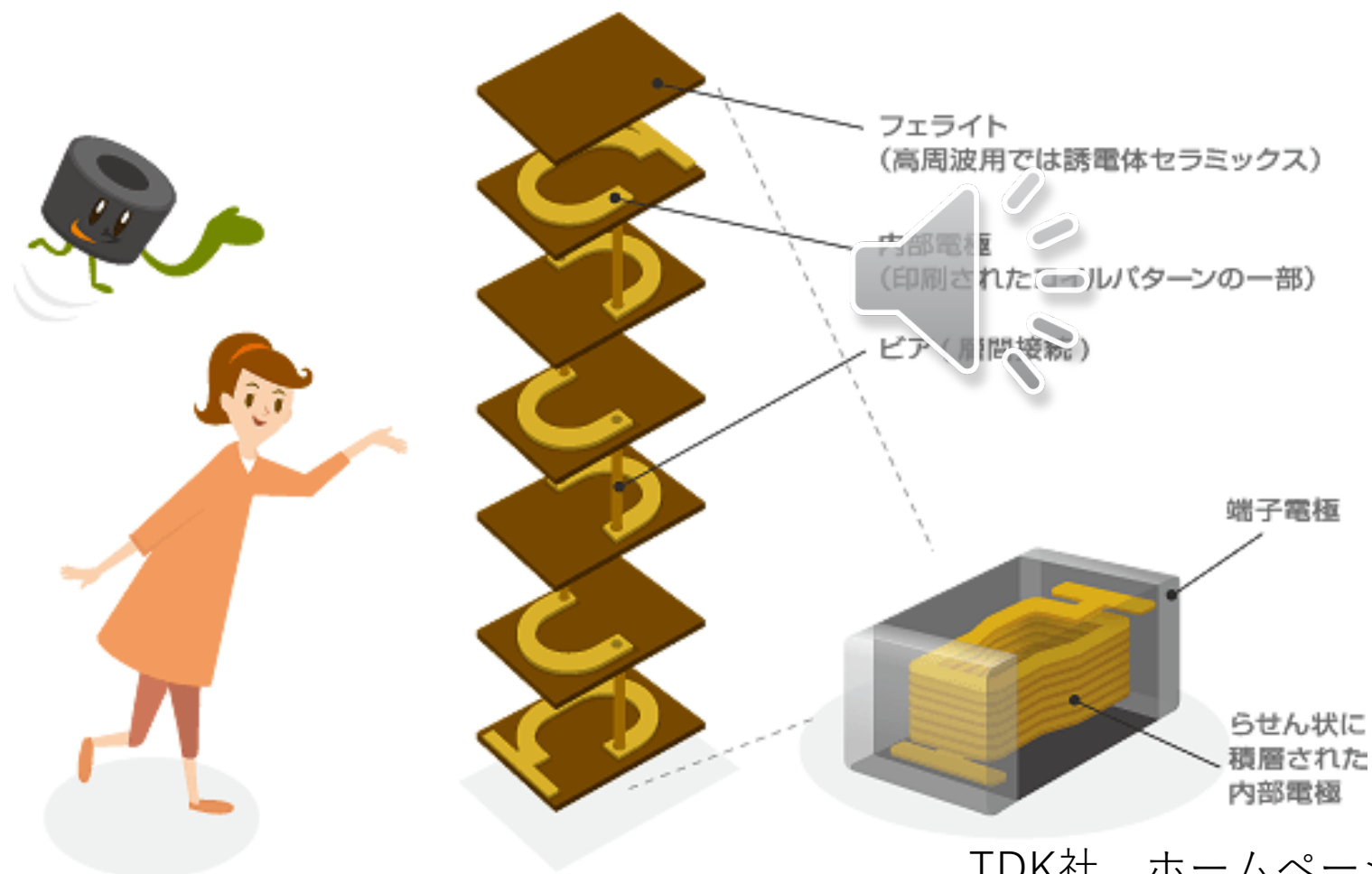
(b) B-site



積層チップインダクタ

教科書 p.151

積層チップインダクタの構造



TDK社 ホームページ、フェライト・ワールド
第10回 積層技術・薄膜技術とフェライト より
<https://www.jp.tdk.com/tech-mag/ferrite02/010>

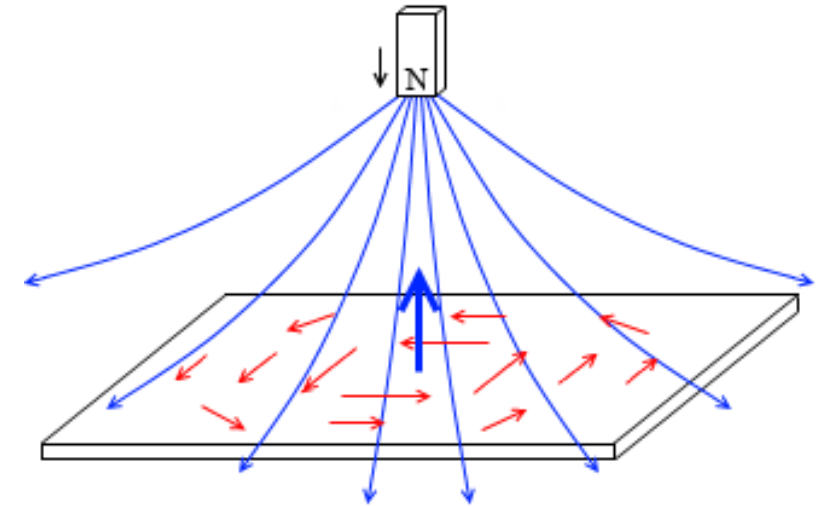
スライド問題4-5



渦電流とは？

スライド問題4-5 解答例

またしてもレンツの法則のお話です。
導体の近くで磁石を動かす（すなわち、磁場が変化する）と、電磁誘導により、導体内の自由電子が動き（すなわち電流が発生し）、円環状の電流が流れます。渦電流が新たな磁場をつくり、この新たな磁場が元々の磁場と反発し合います。この反発力が原因で、磁石を導体に近づけようとするとき、抵抗を感じるのです。



図は、わかりやすい高校物理の部屋より引用。

<https://wakariyasui.sakura.ne.jp/p/elec/dennji/uzu.html>



電磁軟鉄

教科書 p.151

<図F 渦電流損と成層鉄心>



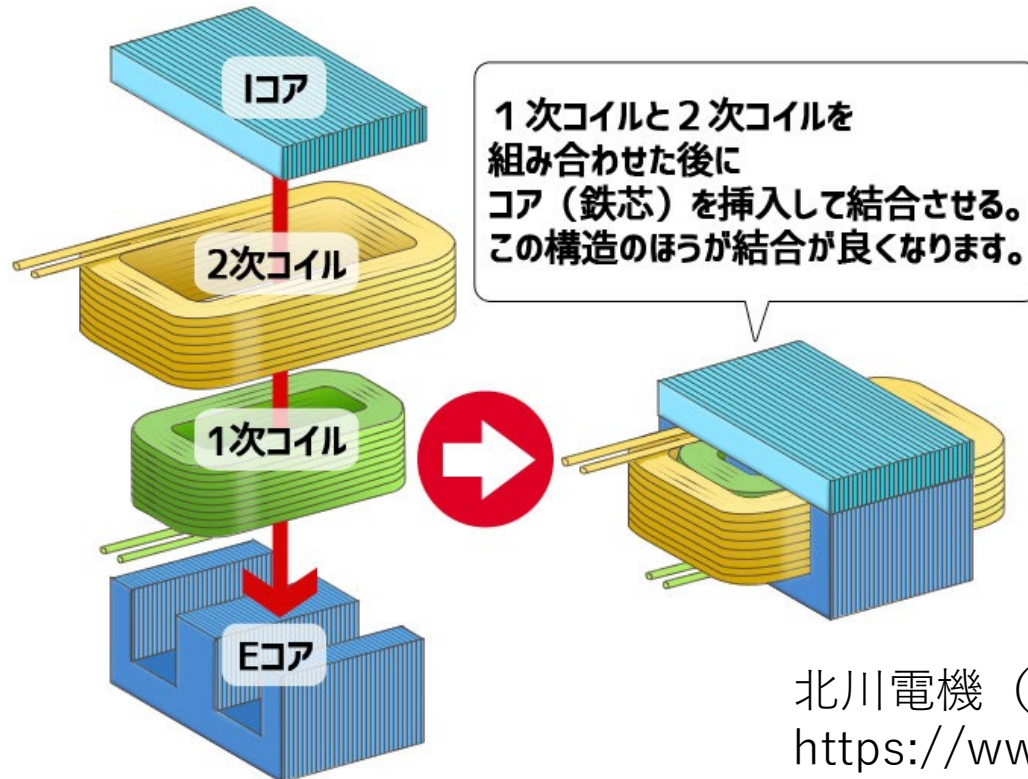
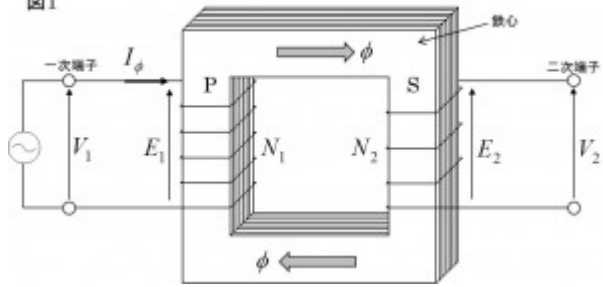
発電機の電機子や変圧器(トランス)の鉄心など、コイルに交流が流される鉄心では、磁束変化による渦電流損(発熱)が発生する。渦電流損は鉄心の厚さの2乗に比例するので、電氣的に絶縁して成層した鉄心を用いると、渦電流損を大幅に低減できる(鉄心の損失には、渦電流損のほかにヒステリシス損も関係するため、ケイ素鋼など、透磁率の高い材料が用いられます)。



ケイ素鋼

教科書 p.152-153

図1



北川電機（株）・加美電子工業（株）ホームページより引用
<https://www.kitagawa-denki.co.jp/products/about/material/>
<https://www.kamidenshi.co.jp/magazine/1594/>

パーマロイ (Fe-Ni系合金)

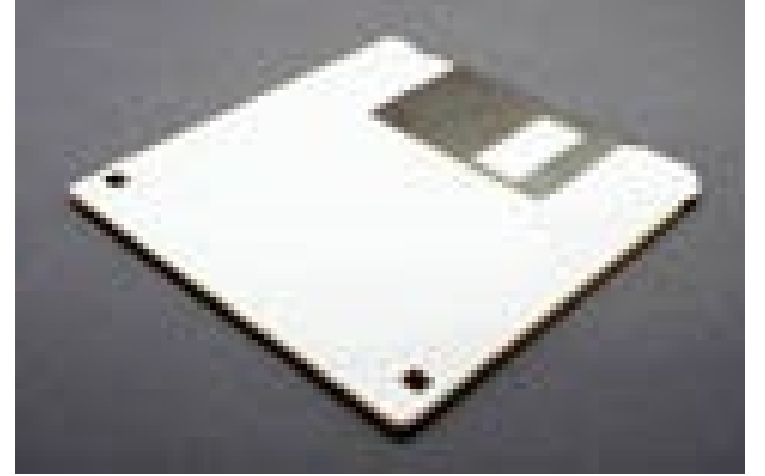
教科書 p.154

Permalloy

透磁性が非常に高い (1×10^5)

用途：

インダクター
磁気シールド
磁気センサー

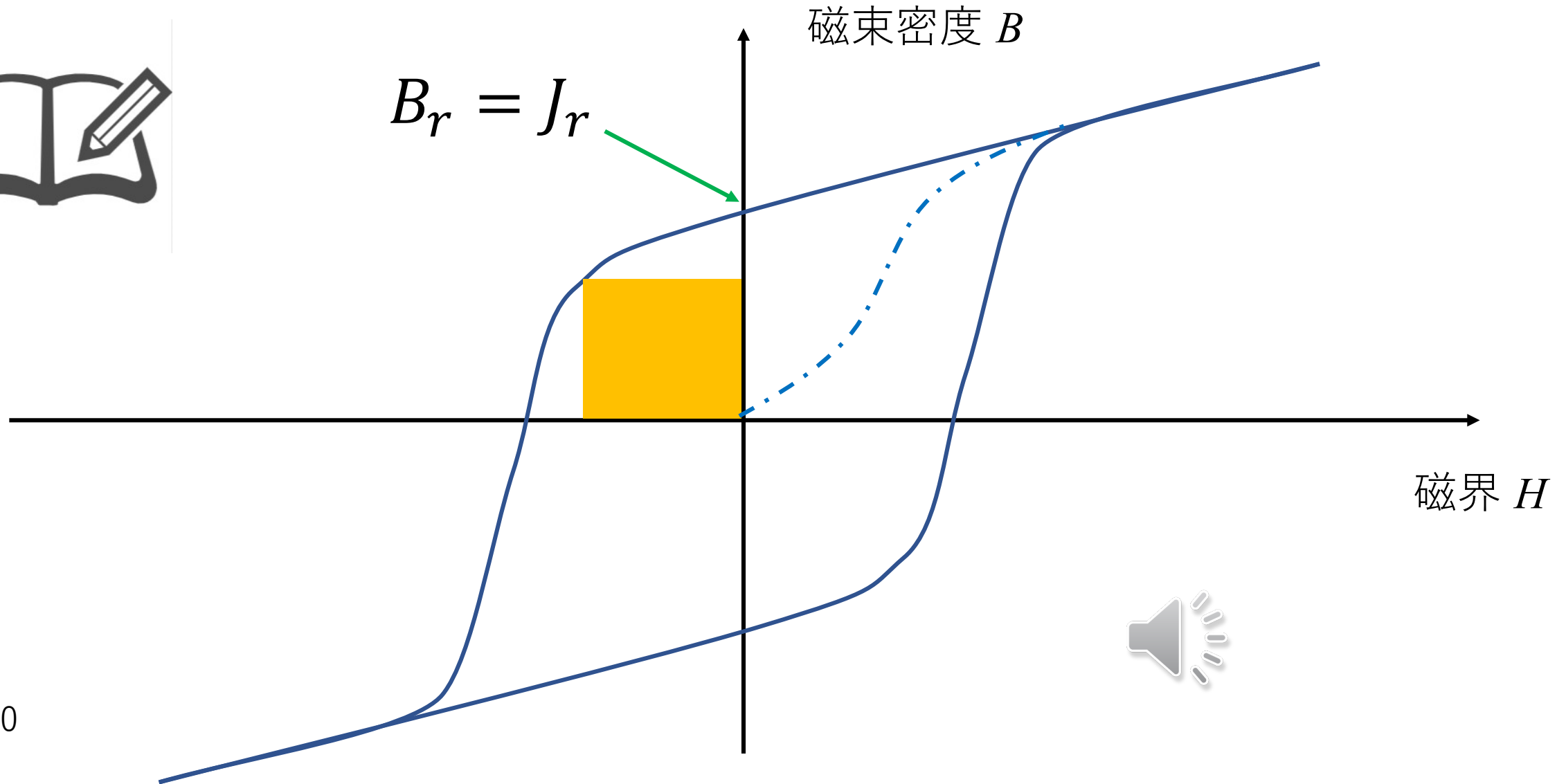


このほかにも、アモルファス磁性材料がある



硬質磁性材料(永久磁石材料)

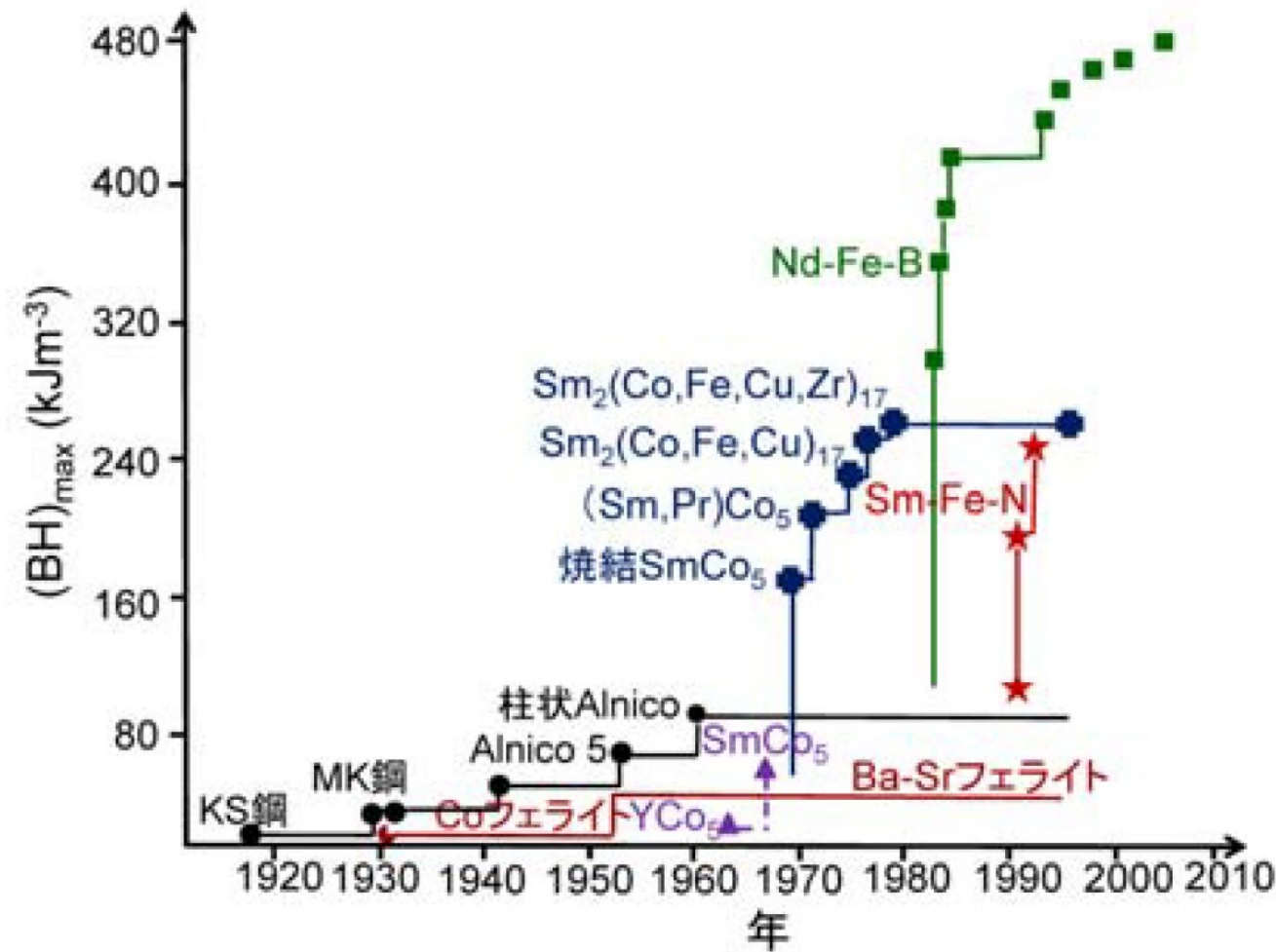
教科書 p.156-157



45:00

硬質磁性材料の変遷

教科書 p.143



マクソンジャパン株式会社
ホームページより。
直径6mmのモーター。

46:00

宝野和博 "我が国で発明された世界最強の磁石-ネオジム磁石",
化学と教育 Vol.59, No. 12 (2011) pp. 618-619



フェライト磁石

教科書 p.158

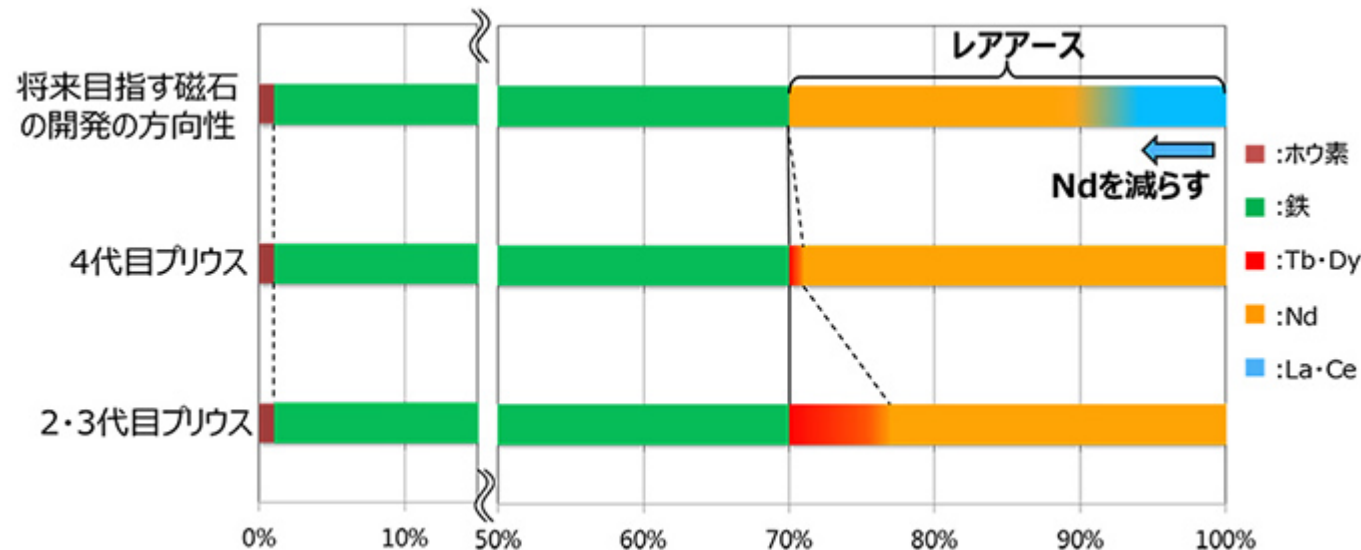


酸化鉄を用いて製造される磁石。
コストパフォーマンスに優れる。
原料となる酸化鉄は腐食に強い。
安定した磁気特性を持っているため、屋外などの過酷な状況や高温下でも磁力が弱まることがない。
プラスチックやゴムに混ぜて練ることで、ステッカーなどが作れる。

低温にはやや弱く、 -30°C を下回る環境下では磁力が低下する。

ネオジム磁石

教科書 p.164-168



日立オートモティブシステムズ
<https://www.hitachi-automotive.co.jp/products/electricps/index.html>

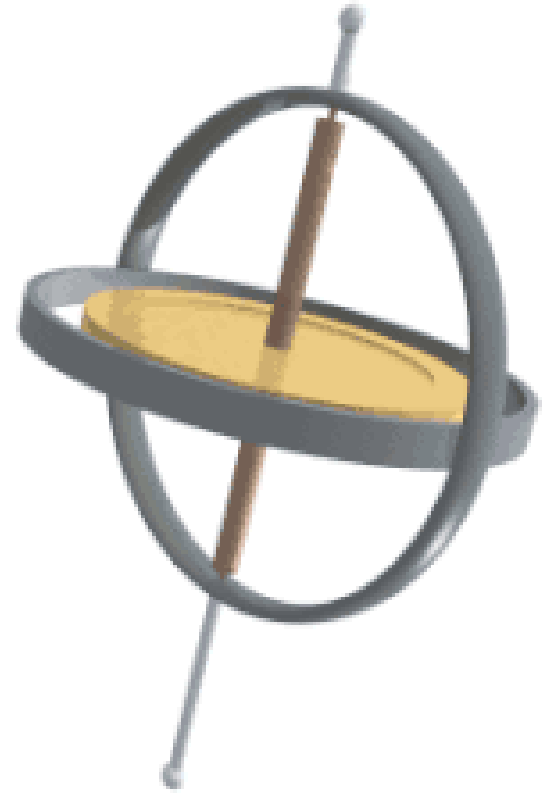
プリウスにおけるネオジム磁石におけるレアアース使用状況

<https://global.toyota/jp/newsroom/corporate/21137873.html>



スピントロニクス

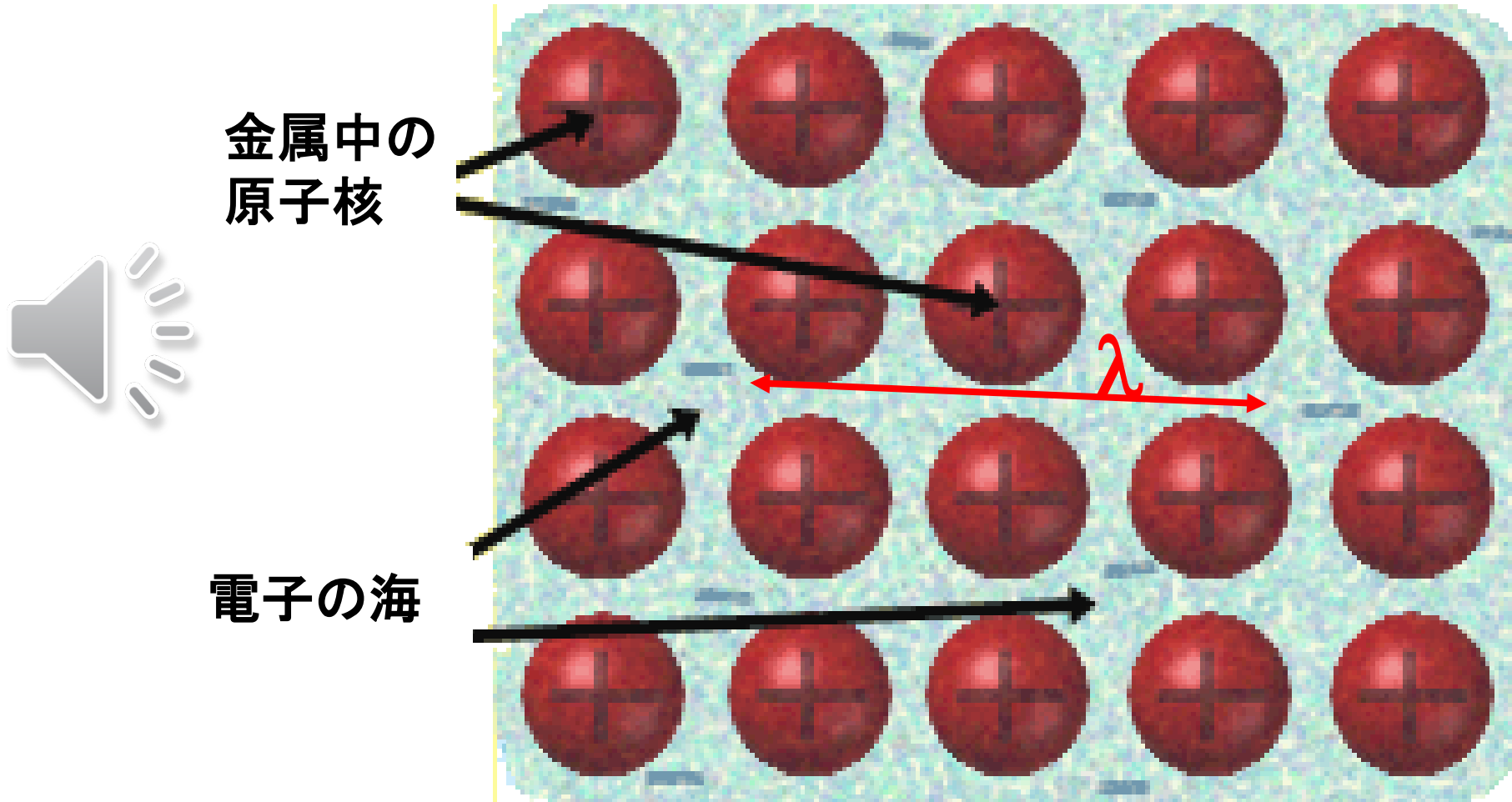
電子スピンの依存した機能も取り入れることで、新しいデバイスを実現しようというものです。
ハードディスクの記憶容量を3桁も引き上げたのも、スピントロニクスです。



不純物や格子欠陥による電子の散乱

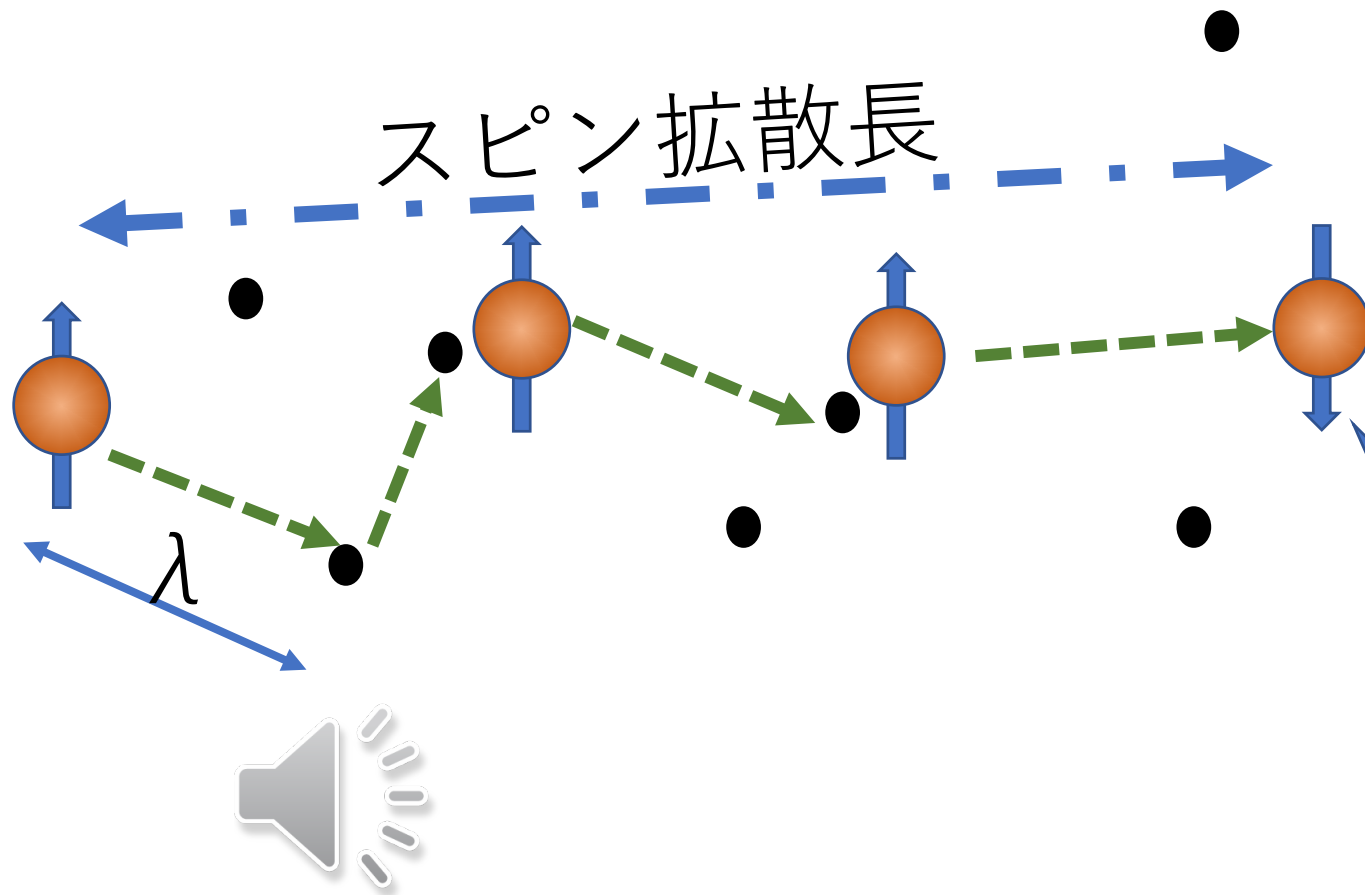
電子の平均速度 $v = \frac{\lambda}{\tau}$

平均衝突時間(平均緩和時間)



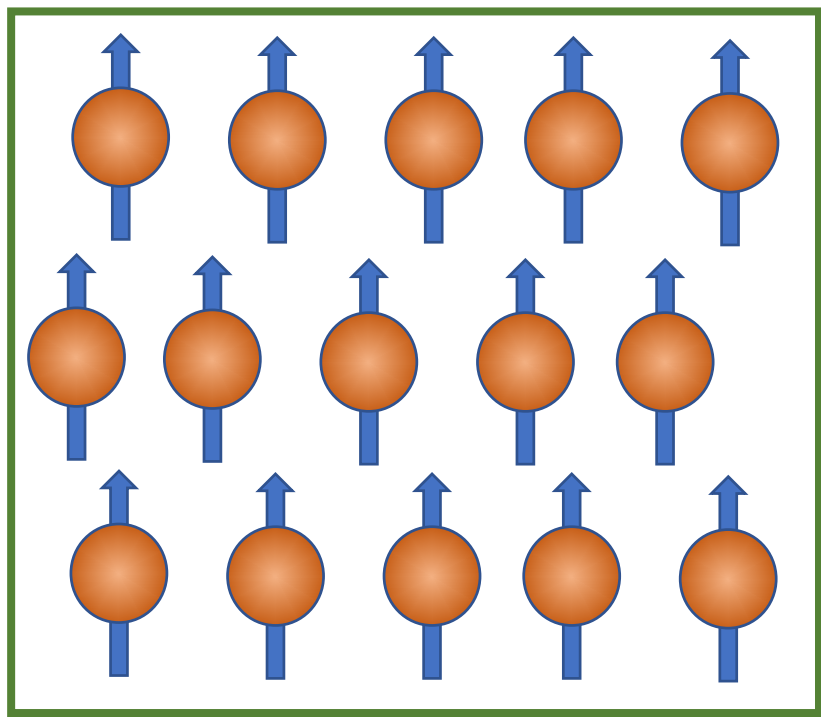
λ 平均自由行程(衝突と衝突の間に電子が進む平均的距離)

スピン流

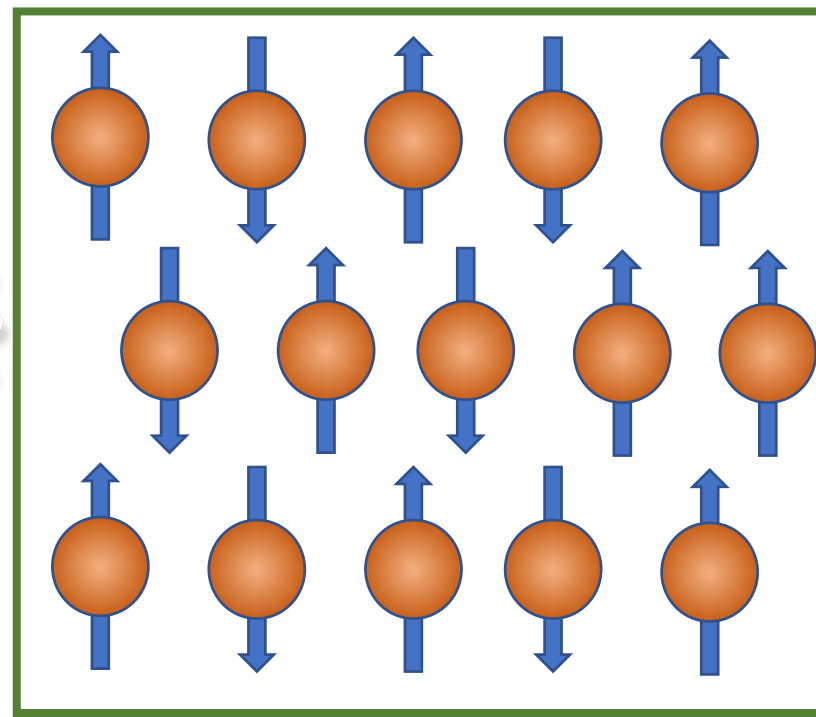


スピンが上下
ひっくり返っている

強磁性体と非磁性体のスピン

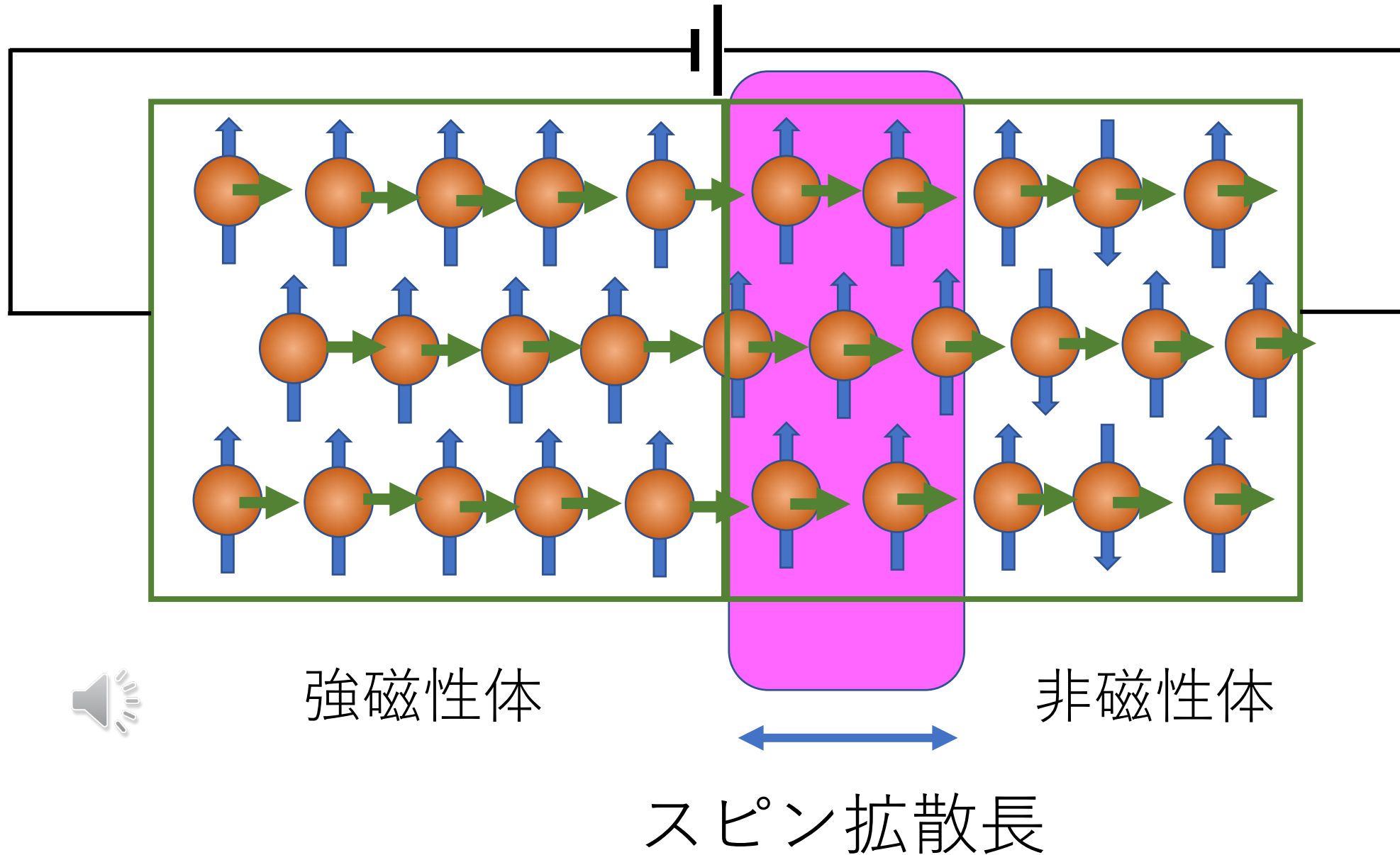


強磁性体



非磁性体

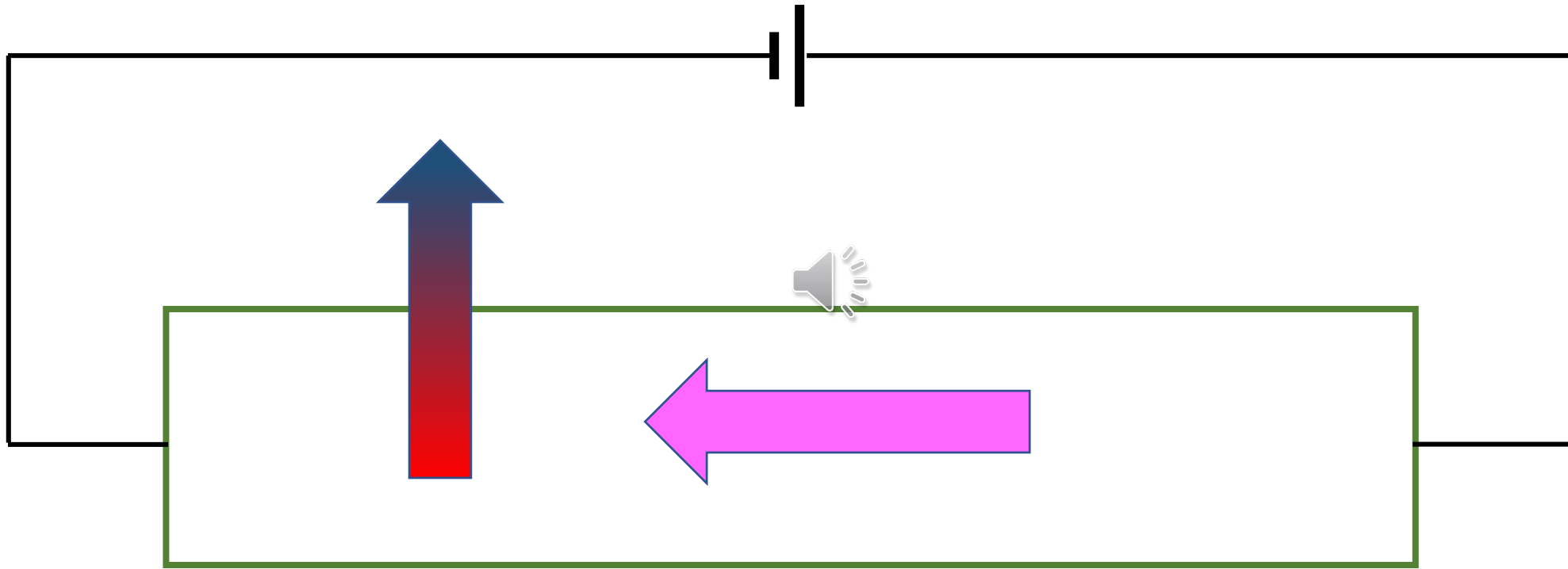
スピンの注入



磁気抵抗効果

教科書 p.171

MR:magnetoresistance



MR 比

$$\Delta R = \frac{R(H) - R(0)}{R(0)} \times 100 \quad [\%] \quad (5 \cdot 12) \text{式}$$

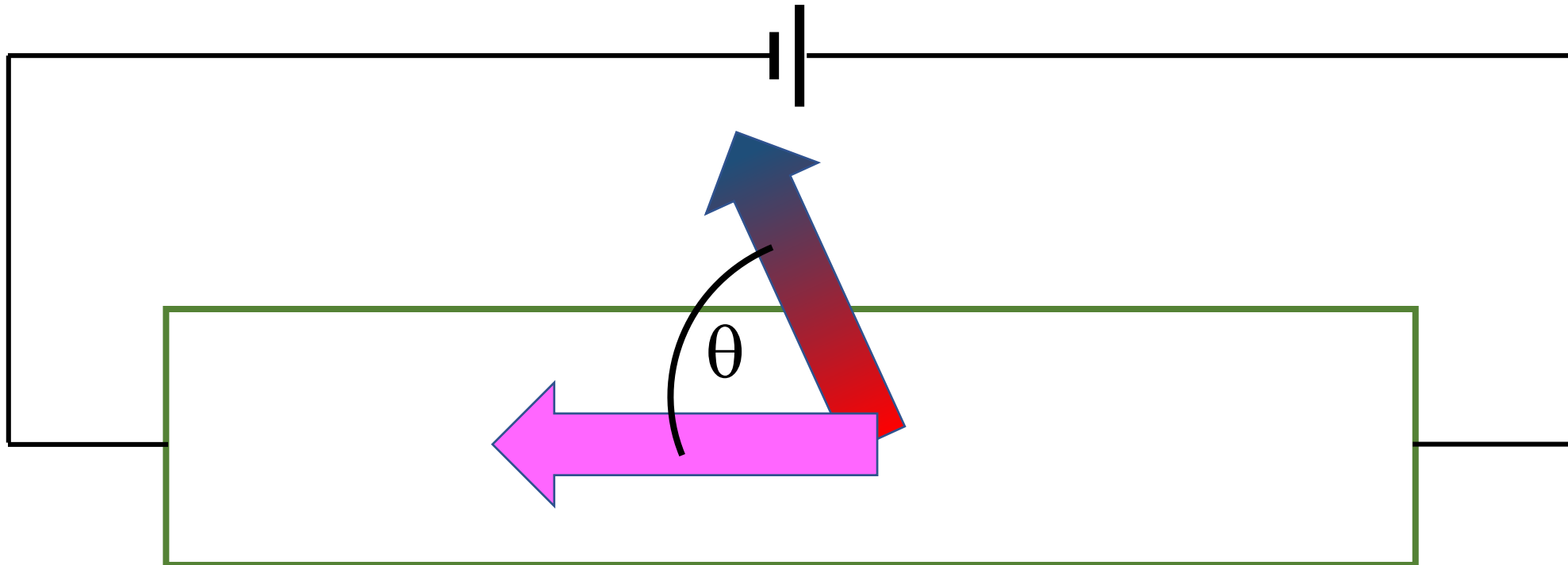
$R(0)$: 零磁界での電気抵抗

$R(H)$: 磁界 H を印加したときの電気抵抗

異方性磁気抵抗果

教科書 p.171

AMR: anisotropic magnetoresistance



$$\rho = \rho_0 + \Delta\rho \cos^2 \theta$$

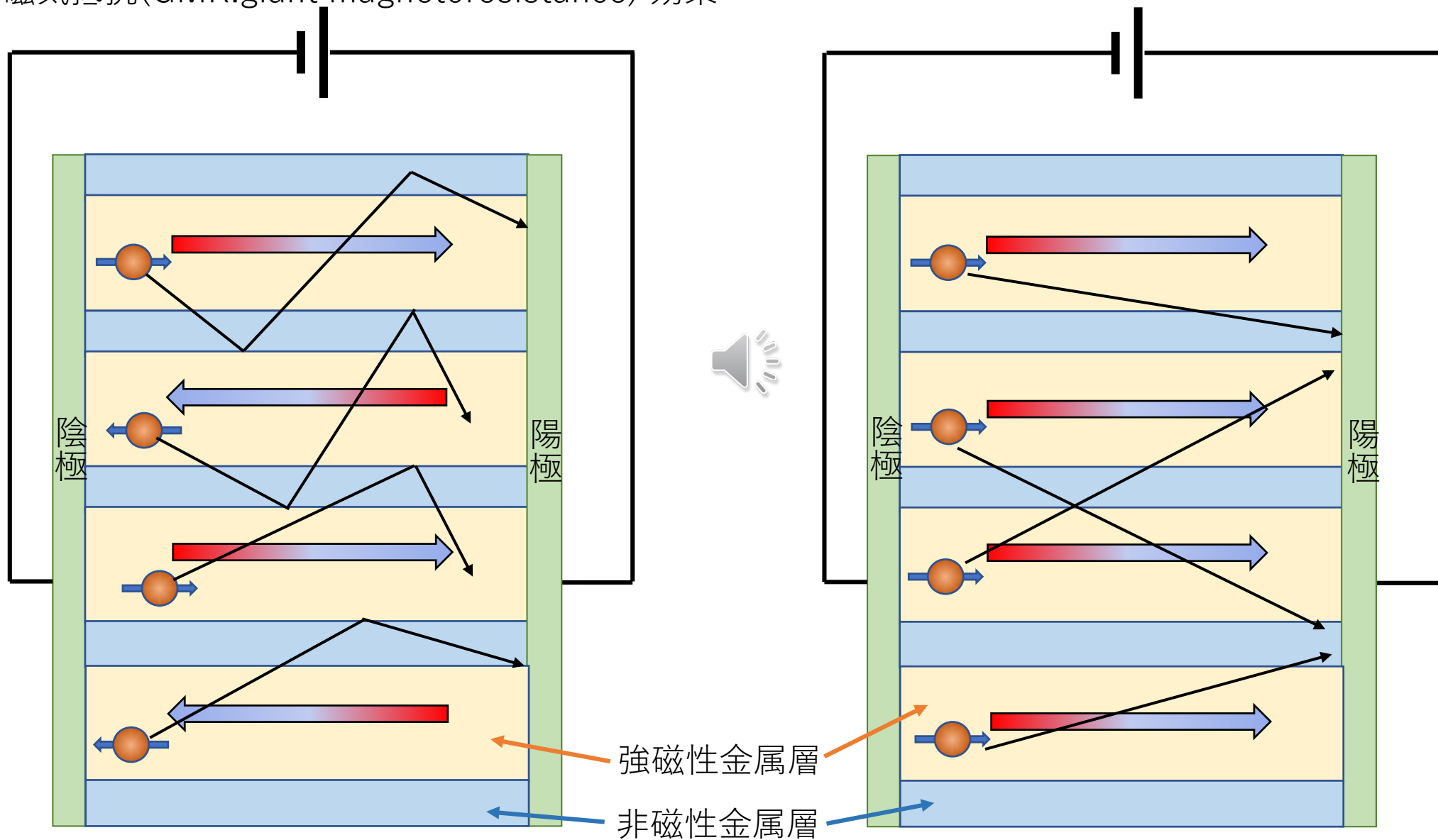
(5 · 13)式



伝導電子のスピンの依存散乱

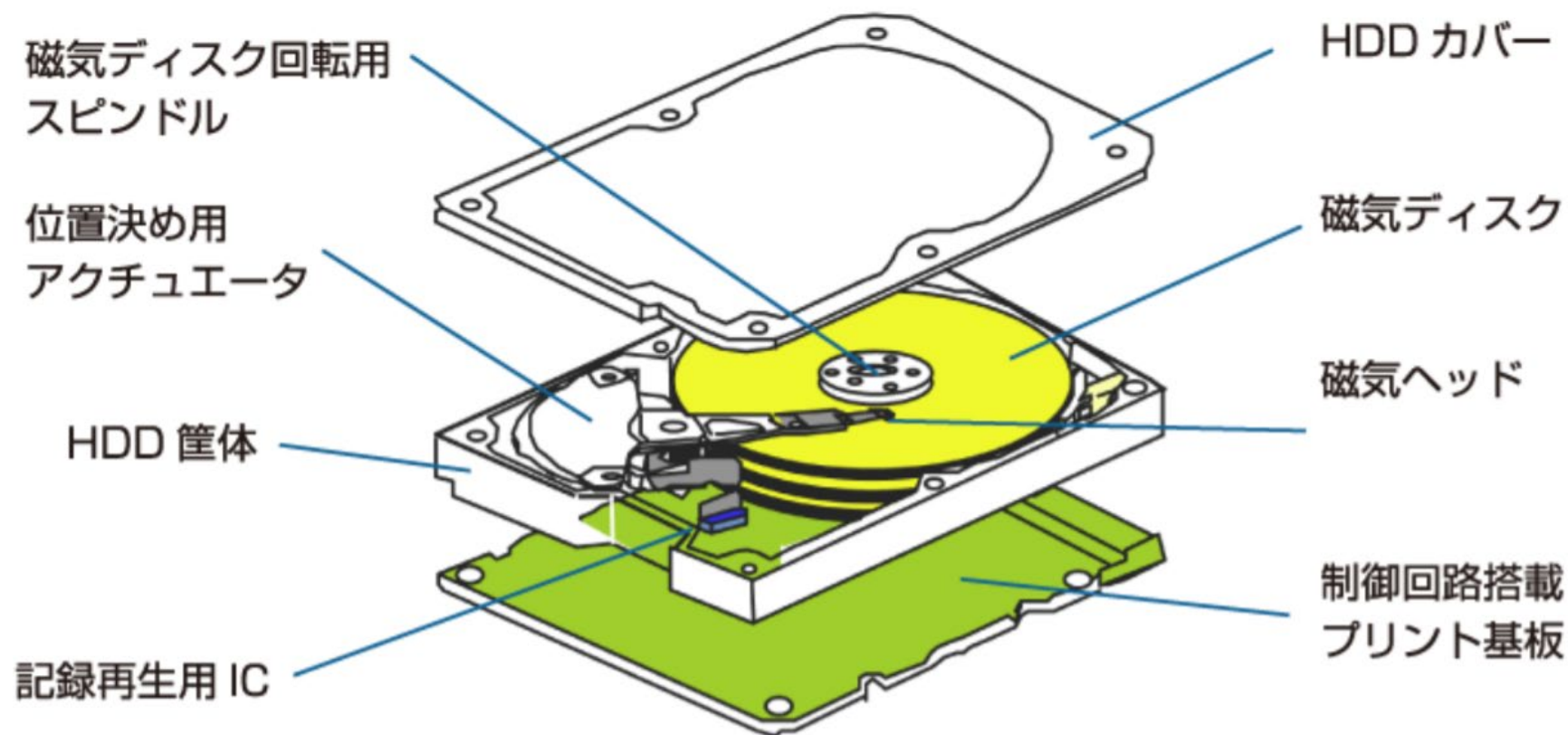
教科書 p.172

巨大磁気抵抗(GMR:giant magnetoresistance) 効果



ハードディスクの構造

教科書 p.177-178

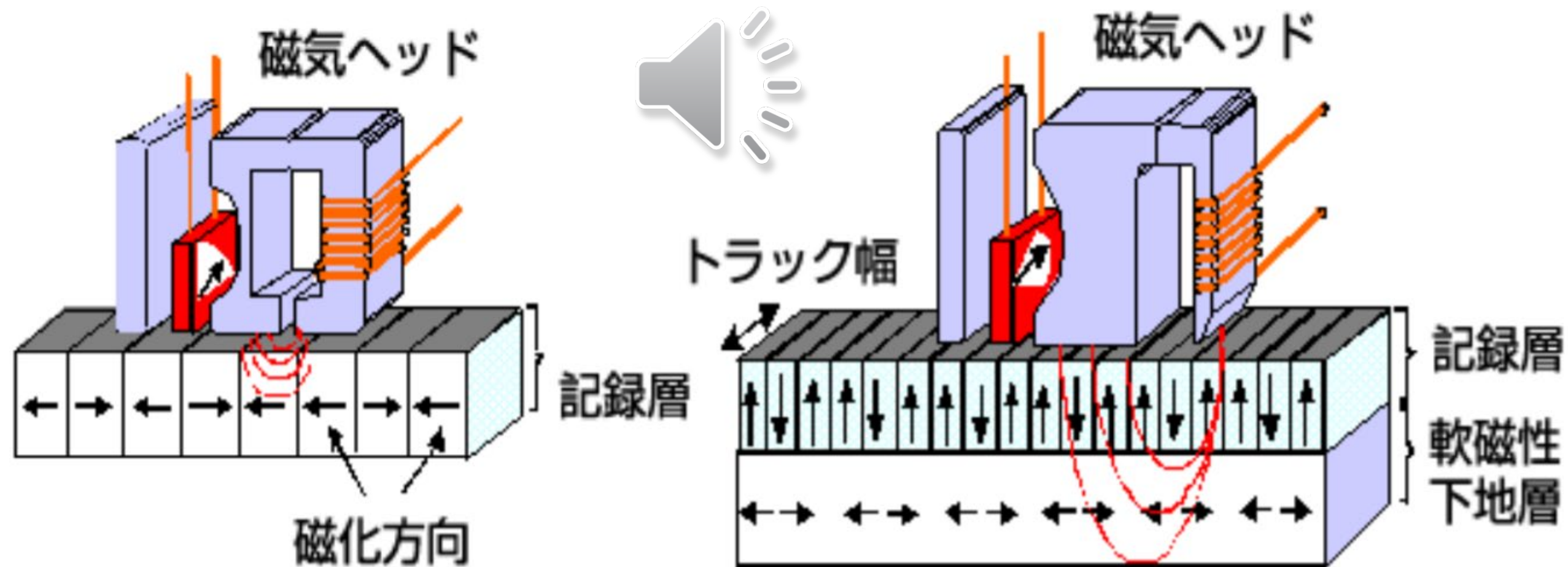


プラッターと磁気ヘッドの隙間は10数nm！！

NEDO「HDD の高密度化・高信頼化を実現する、垂直磁気記録方式を製品化」ホームページより
https://www.nedo.go.jp/hyoukabu/articles/201005hitachi/pdf/hitachi_f.pdf

垂直記録方式構造

教科書 p.177-178



NEDO「HDD の高密度化・高信頼化を実現する、垂直磁気記録方式を製品化」ホームページより
https://www.nedo.go.jp/hyoukabu/articles/201005hitachi/pdf/hitachi_f.pdf

課題レポート (Homework)

以下のレポートを作成し、ILIASを使って提出してください。

MSWordで作成すること。テンプレートはILIASに置いてあります。提出期限は5月31日(日)13時JST.

ファイル名は、必ず学籍番号の数字を含めて「例： 20310185-HW03.docx」のような名前にして提出すること。

課題 1 (字数は1000字程度。適宜、図も入れて下さい)

スライド # 9 とスライド # 10 で「ボーア磁子 μ_B 」を説明しました。これは1原子の周りの1個の軌道電子について説明しています。スライド # 28 のスピネル構造の MnFe_2O_4 の状況を考えてみましょう。Aサイトの磁気モーメントは $5 \mu_B$ でBサイトの磁気モーメントは $10 \mu_B$ だとします。 MnFe_2O_4 1分子の磁気モーメントはいくらになりますか？ この分子が1モル集まったら、磁気モーメントはいくらになるか、単位も含めて説明して下さい。さらに、飽和磁化がいくらになるか、講義スライドを基に説明して下さい。最後に、実際に使われている（製造されてこの世にある）フェライト磁石と比べて、この課題1で見積もった値は妥当ですか？ 議論して下さい。

課題 2 (字数は1000字程度)

講義の中で「スピン」というのが何回も出て来ましたが、結局スピンってなんですか？ あなたが理解したところのスピンを図を使いながら説明して下さい。

