

# 磁性工学特論

## 第1回 磁気に親しもう

非常勤講師

佐藤勝昭(東京農工大学)

# シラバス

- この講義では、磁性学の基礎と応用および磁気光学効果の基礎と応用について学ぶ。
- 以下にシラバスを示す。

# 第1部 磁性

- 第1回 2005.4.14(木) 磁気に親しもう
  - 磁石、HDD、MD、モーター、磁場、磁束密度、磁化、磁気モーメントとは何か、磁化曲線、反磁界、ヒステリシス、軟質磁性体、硬質磁性体
- 第2回 2005.4.21(木) 磁石をどんどん微細にする
  - マクロの磁性(cm)→メゾスコピックの磁性( $\mu\text{m}$ )→ミクロの磁性( $\text{\AA}$ )、環状電流と磁気モーメント、原子の磁気モーメントの起源、磁気モーメントと角運動量、スピンと軌道、フントの規則
- 第3回 2005.4.28(木) 鉄はなぜ磁気をおびる？
  - 秩序をもった磁性(強磁性、フェリ磁性、反強磁性)、なぜ自発磁化が生じるか、分子場理論と磁化の温度変化、キュリーワイスの法則、交換相互作用、キュリー温度、絶縁物の磁性と金属の磁性

# 磁性(続き)

- 第4回 2005.5.12(木) 磁気ヒステリシスはなぜ生じる
  - 方位で異なる磁化曲線(磁気異方性)、磁区、磁壁、磁壁移動、磁化回転、マイクロマグネティズム、なぜ軟質磁性体・硬質磁性体の違いが生じるか、軟質・硬質磁性体の使い道、反強磁性も役に立つ
- 第5回 2005.5.19(木) 弱い磁性も使いよう
  - 反磁性(強磁界で水が空中に浮かぶ)、常磁性(極低温では酸素が磁石につく)、MRI(核スピンの常磁性共鳴)、EPR(電子スピンの常磁性共鳴でみる半導体の欠陥)
- 第6回 2003. 5.26(木) 磁気と電気伝導;MR効果
  - 磁気抵抗(MR)効果が高密度HDDとMRAMを支える

## 第2部 磁気光学効果

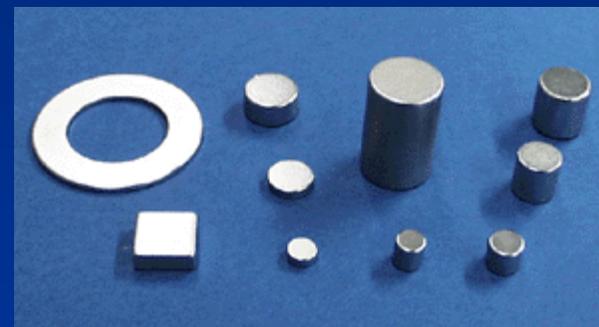
- 第7回 2005.6.9(木) 光と磁気入門
  - 光と磁気の相互作用にはどのようなものがあるかを学ぶ
- 第8回 2005.6.16(木) 電磁気学と光の伝搬
  - マクスウェル方程式にもとづいて光の伝搬を学ぶ
- 第9回 2005.6.23(木) 磁気光学効果の現象論
  - 誘電率テンソルを用いて磁気光学効果を説明する
- 第10回 2005.6.30(木) 磁気光学効果の電子論
  - 古典的な電子論にもとづいて磁気光学効果を説明する
- 第11回 2005.7.7(木) 磁気光学効果の応用

# 身近な磁性

- 磁石(永久磁石)は何で出来ている？
    - 鉄？
    - 磁石を販売しているある会社のHPによると、ネオジウム $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 、サマコバ $\text{SmCo}_5$ 、フェライト( $\text{BaFe}_2\text{O}_4$ )、アルニコ( $\text{AlNiCo}$ )というのが書かれている。\*
    - 黒板用のボタン磁石：ほとんどがフェライトのボンド磁石(磁性粉と樹脂を混合し成形した磁石)
    - 曲げられる磁石：ラバー磁石(磁性粉をゴムに混合して成形した磁石)
- (\*<http://www.seikosg.com/>)

# 磁性体の用途

- 磁気記録、光磁気記録→IT
- 光アイソレータ→光ファイバ通信
- 永久磁石→モータ、アクチュエータ
- 変圧器、インダクター用磁心



# コンピュータと磁気記録



写真1 スタックメモリ

半導体メモリ

ディスク媒体



ロータリー・  
アクチュエーター

磁気ヘッド

ハードディスクドライブ

- コンピュータのプログラムやデータを格納しておくのがハードディスクHDと呼ばれる磁気記録装置である。
- 画面からプログラムを起動すると、そのプログラムがHDから半導体のメモリに転送される。CPUは、メモリ上の各アドレスに置かれた命令を解読して、プログラムを実行する。

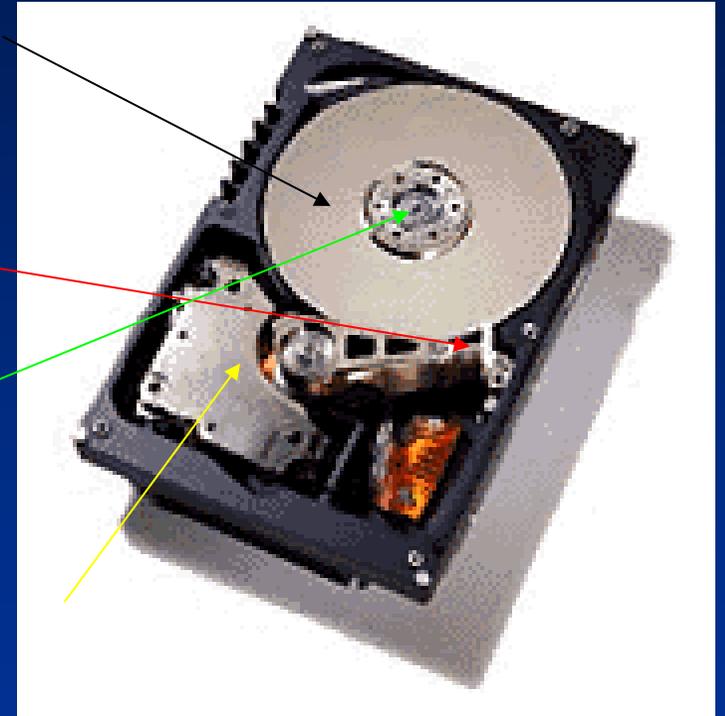
# ハードディスクのどこに磁性体 が使われているか

ディスク媒体：CoCrTaなど硬  
質磁性合金が使われている

磁気ヘッド：Ni<sub>80</sub>Fe<sub>20</sub>など軟  
質磁性体が使われている

スピンドルモータ：ネオジム磁石と  
電磁石の組み合わせ

ロータリー・アクチュエータ：  
ネオジム磁石と電磁石



# ハードディスク分解のサイト紹介

- おもしろ分解博物館  
<http://www.gijyutu.com/ooki/bunkai/8inch-HDD/8inch-HDD.htm>
- 桜井式モノ分解教室パート2  
<http://www2.hamajima.co.jp/~elegance/senet/jikken/HDD.htm> (浜島書店のサイト)
- ハードディスク分解絵巻  
<http://cobweb.tamacc.chuo-u.ac.jp/chitta/works/>

# ハードディスク媒体

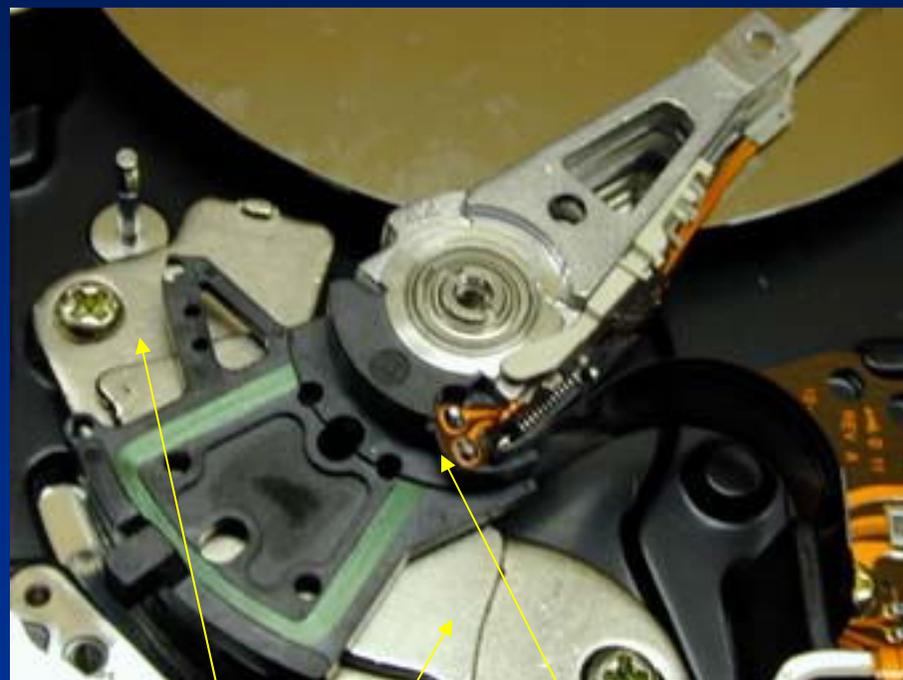
- ディスク媒体は記録用の半硬質磁性体膜を堆積したアルミ円板である。



- [桜井式モノ分解教室パート2](http://www2.hamajima.co.jp/~elegance/se-net/jikken/HDD.htm)  
<http://www2.hamajima.co.jp/~elegance/se-net/jikken/HDD.htm> (浜島書店のサイト)

# 磁気ヘッドアクチュエータ

- 磁気ヘッドは、ジンバルと呼ばれるヘッドアセンブリに搭載され、ロータリーアクチュエータで駆動される。



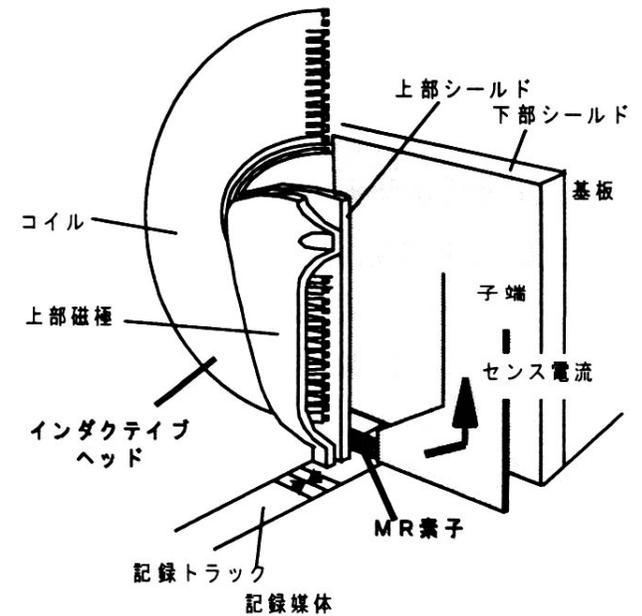
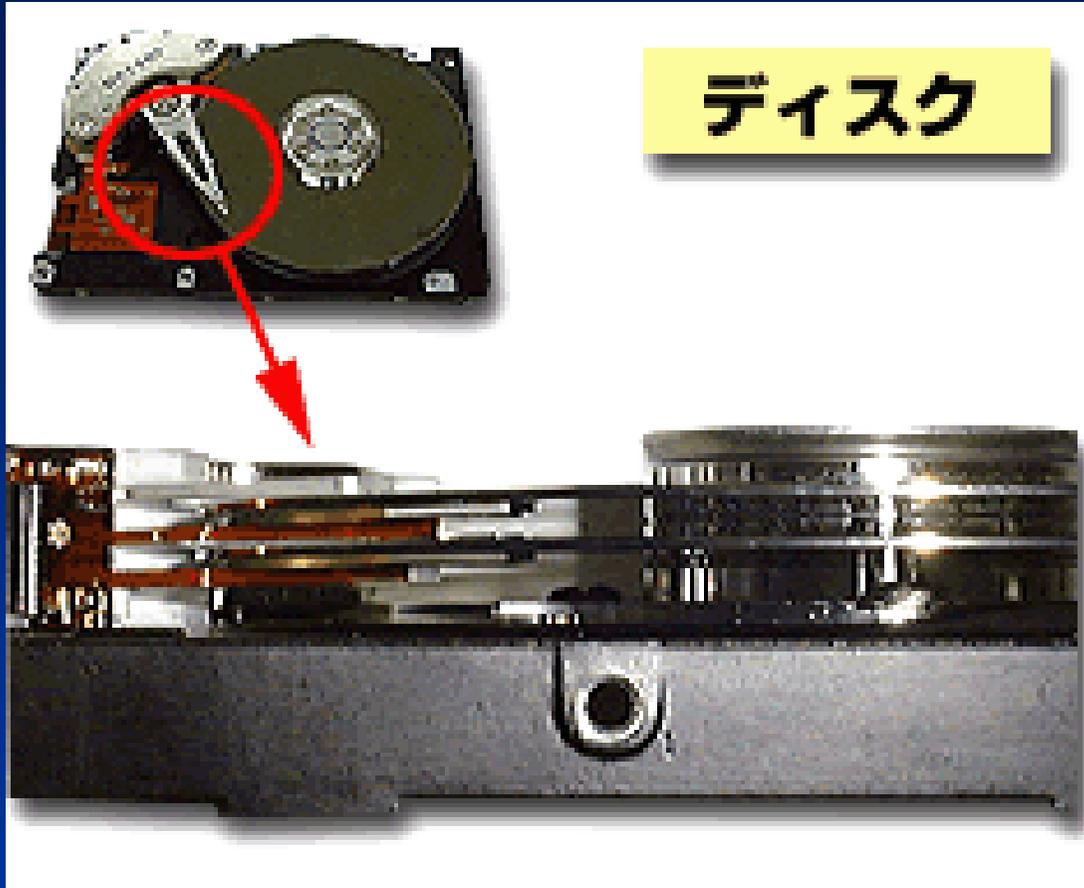
桜井式モノ分解教室パート2

<http://www2.hamajima.co.jp/~elegance/senet/jikken/HDD.htm>

強力な磁石      ムービングコイル

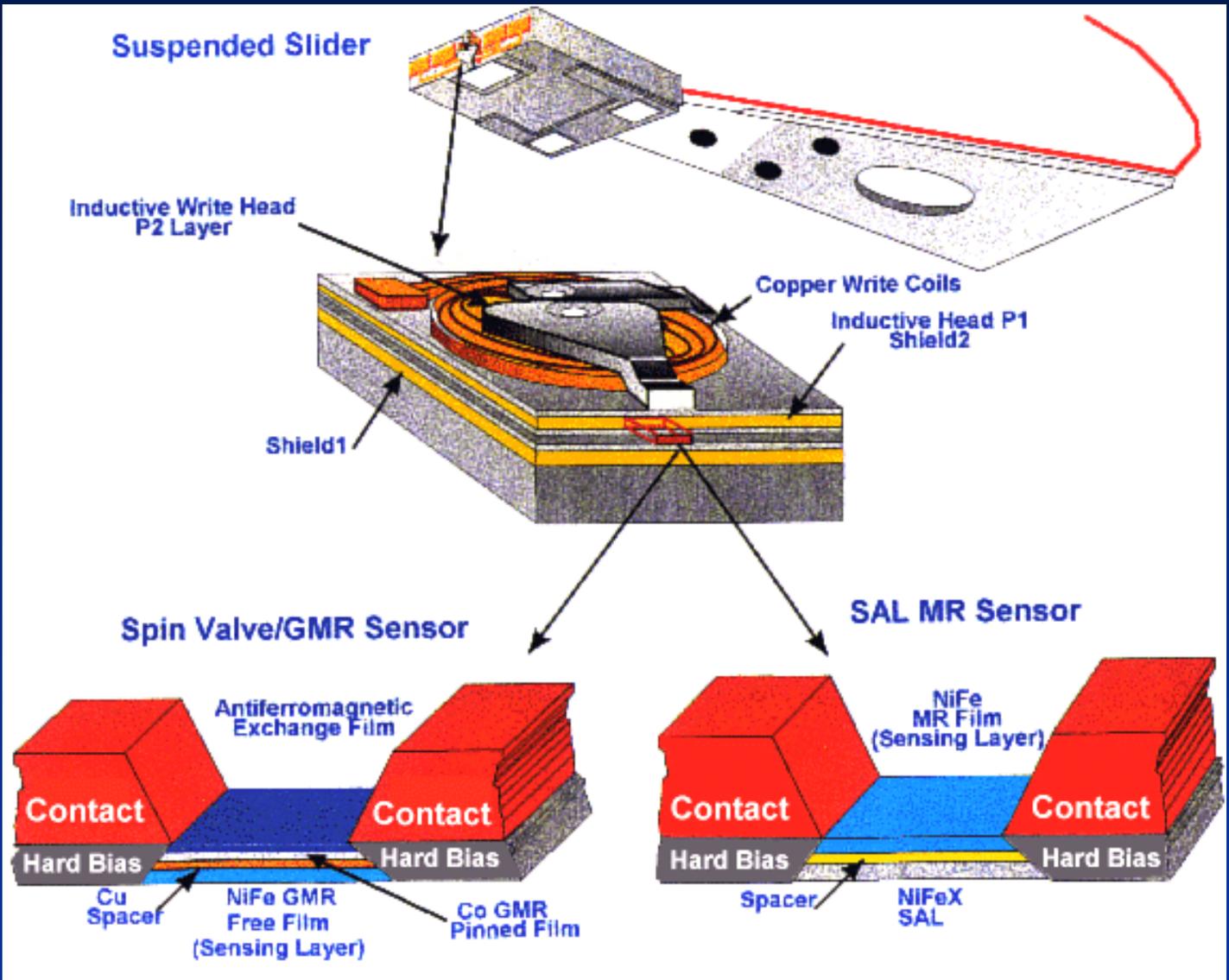
# 磁気ヘッド拡大図

ディスク



IODATAのHPより

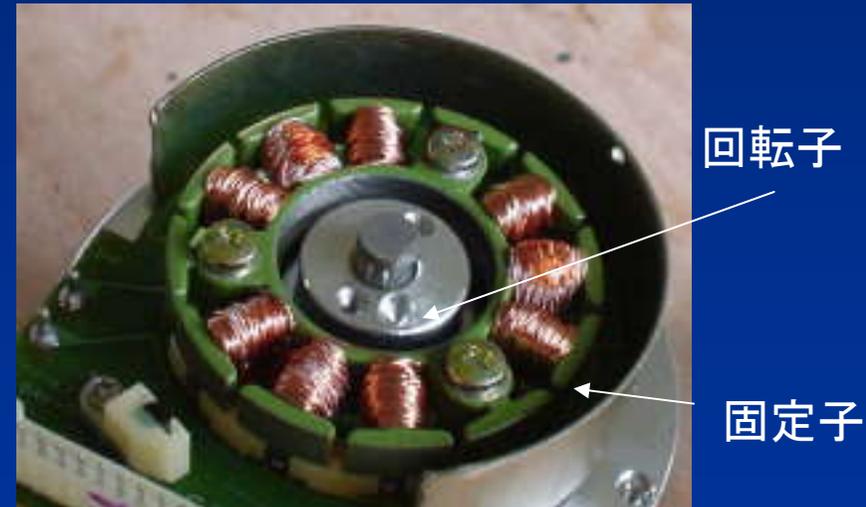
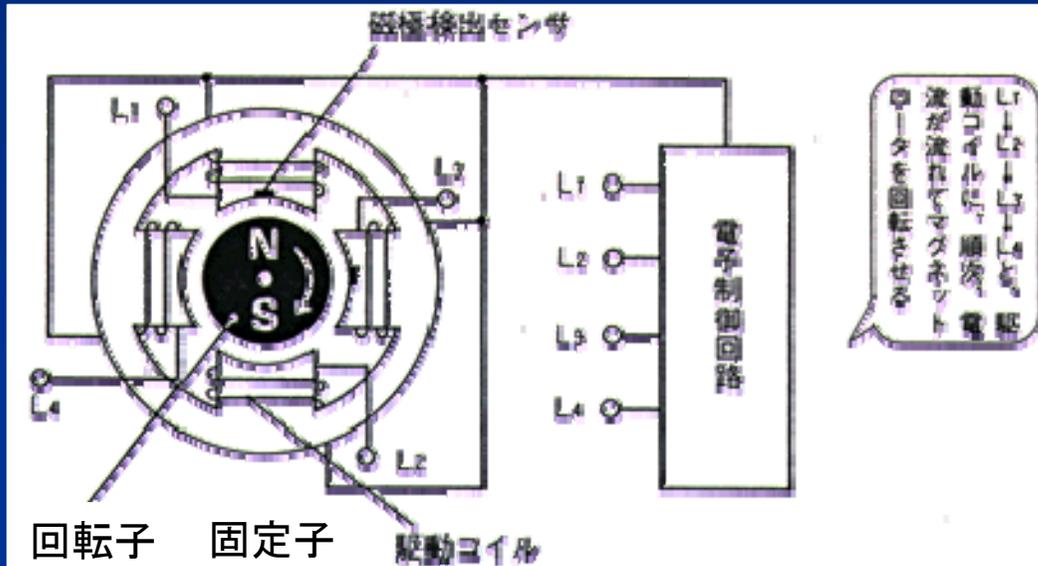
# 磁気ヘッド



IBMのHPより

# モーターと磁石

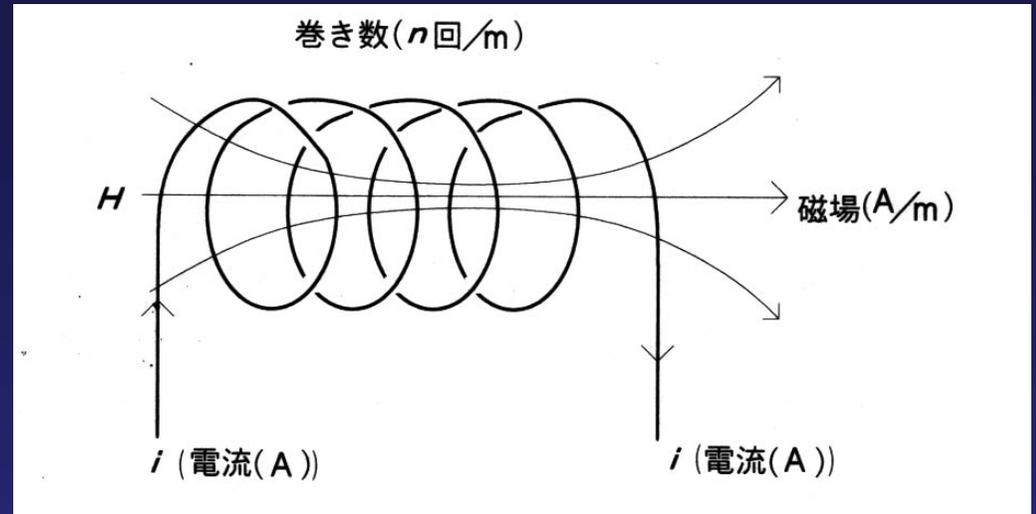
- 直流モーターは、回転子と称する磁石が、固定子と称する電磁石の中に置かれている。磁極の位置をホール素子で検出し、分割された電磁石に流される電流を順次切り替えることにより、磁界の回転を生じ、回転子に運動を与える。
- 固定子のコイルの磁心には軟質磁性体が使われている。



おもしろ分解博物館

<http://www.gijyutu.com/ooki/bunkai/JV-1500/jv-1500.htm> より

# 磁界の定義(1)

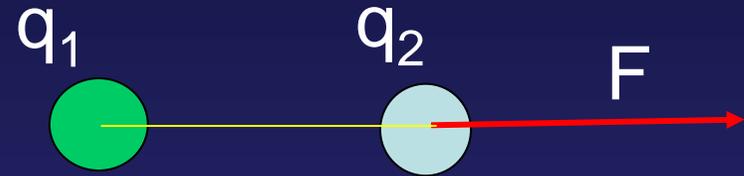


## 1. 電流による定義

- 単位長さあたり  $n$  ターンのソレノイドコイルに電流  $i$  [A] を流したときにコイル内部に発生する磁界\*の強さ  $H$  [A/m] は  $H=ni$  であると定義する。

\*応用磁気系用語では磁界、物理系用語では磁場という。  
いずれも英語ではmagnetic fieldである。

# 磁界の定義(2)

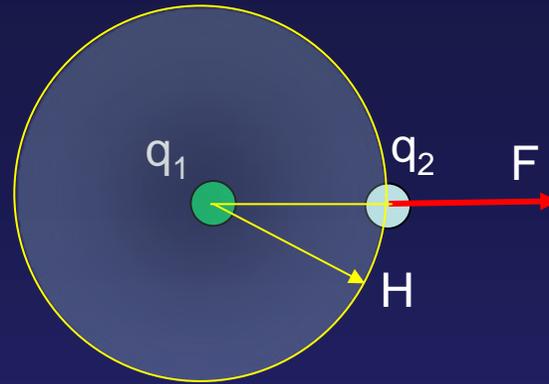


## 2. 力による定義

・距離  $r$  だけ離れた磁極  $q_1$  [Wb] と磁極  $q_2$  [Wb] の間に働く力  $F$  [N] は、磁気に関するクーロンの法則  $F = kq_1q_2/r^2$  で与えられる。  $k$  は定数。

磁極  $q_1$  がつくる磁界  $H$  中に置かれた磁極  $q_2$  [Wb] に働く力  $F$  [N] は  $F = q_2H$  で与えられるので、磁界の大きさは  $H = kq_1/r^2$  で表される。

## 2つの定義をつなぐ



- 一方、 $q_1$ から磁束が放射状に放出しているとして、半径  $r$ の球面を考える。
- ガウスの定理により $4\pi r^2 B = q_1$ であるから $B = q_1 / 4\pi r^2$
- 磁束密度 $B$ [T=Wb/m<sup>2</sup>]と $H$ を結びつける換算係数 $\mu_0$ を導入すると $B = \mu_0 H$ となる。
- すると $H = q_1 / 4\pi \mu_0 r^2$ .  
となり、これよりクーロンの式の係数 $k$ は $k = 1 / 4\pi \mu_0$ となる。
- 従って、クーロンの式は $F = q_1 q_2 / 4\pi \mu_0 r^2$

+ [T]はテスラ、[Wb]はウェーバーと読む。

cgs-Gauss系の単位[G](ガウス)との関係は、 $1\text{[T]} = 10000\text{[G]}$

真空の透磁率 $\mu_0$ は、 $4\pi \times 10^{-7}\text{[H/m]}$  ここに[H]はヘンリーと読む。

# SI単位系とcgs-emu単位系

- 磁界Hの単位: SIではA/m、cgsではOe(エルステッド)
  - $1[\text{A/m}] = 4\pi \times 10^{-3}[\text{Oe}] = 0.0126[\text{Oe}]$
  - $1[\text{Oe}] = (4\pi)^{-1} \times 10^3[\text{A/m}] = 79.7[\text{A/m}]$
- 磁束密度Bの単位: SIではT(テスラ)、cgsではG(ガウス)
  - $1[\text{T}] = 1[\text{Wb/m}^2] = 10000[\text{G}]$
- $B = \mu_0 H + M$ ; cgsでは $B = H + 4\pi M$   
 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}[\text{H/m}]$ ;  
真空中で $H = 1[\text{A/m}]$ の磁束密度は  $4\pi \times 10^{-7}[\text{T}] = 1.256[\mu\text{T}]$   
cgsで測った $H = 1[\text{Oe}] = 79.7[\text{A/m}]$ ;  $B = 100[\mu\text{T}] = 1[\text{G}]$
- 磁化M: 単位体積 $[\text{m}^3]$ あたりの磁気モーメント $[\text{Wb} \cdot \text{m}]$   
 $M = 1[\text{T}] \rightarrow M = (10000/4\pi)[\text{emu}] = 796[\text{emu}]$

# 磁界の発生

- 電磁石

- 空心電磁石  
ソレノイド

1cmあたり100ターン  
1Aの電流を流すと  
10000A/m、磁束密度は  
 $4\pi \times 10^{-7} \times 10^4 = 12.6\text{mT}$

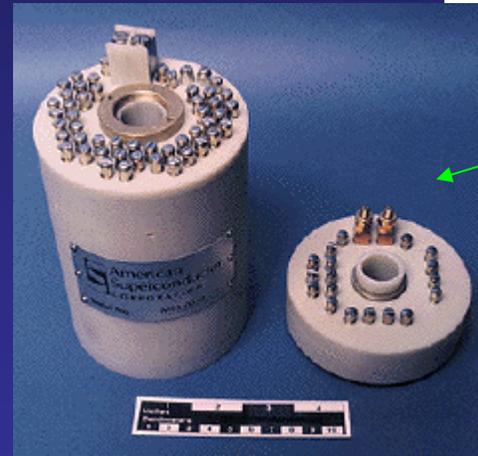
- 超伝導電磁石

10cmに1000ターン、  
100A流すと $10^6\text{A/m}$ ;1.26T

- 鉄心電磁石

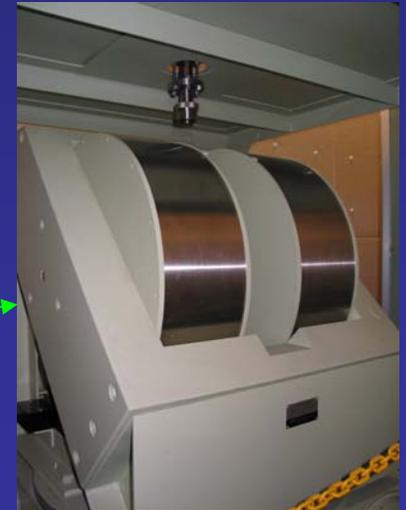
約 $B=2\text{T}$ 程度  
水冷コイル

空心ソレノイドコイル  
せいぜい10mT →



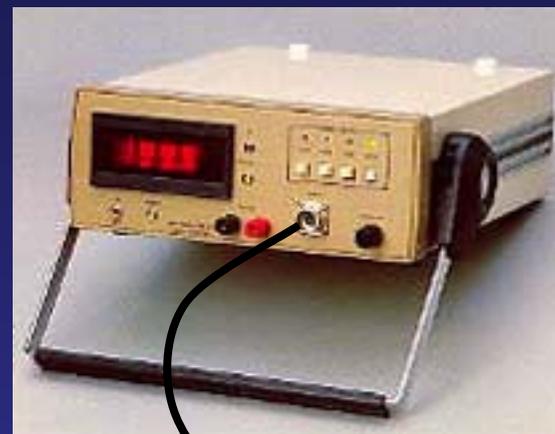
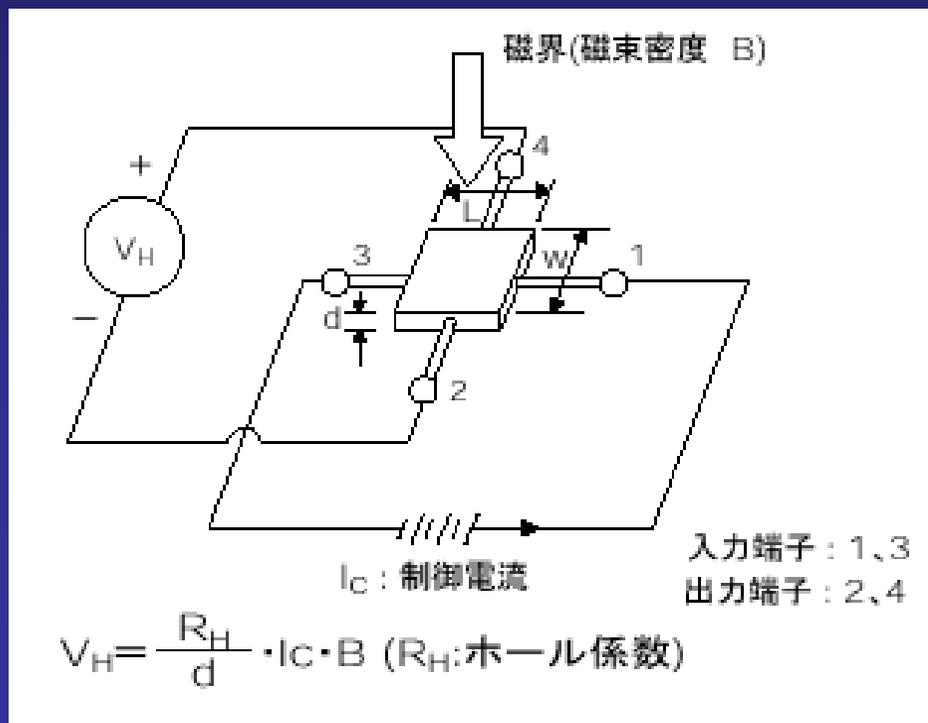
超伝導コイル  
最大10T

鉄心電磁石 →



# 磁界の測定

- ガウスマータ  
ホール素子で測定



ホール素子

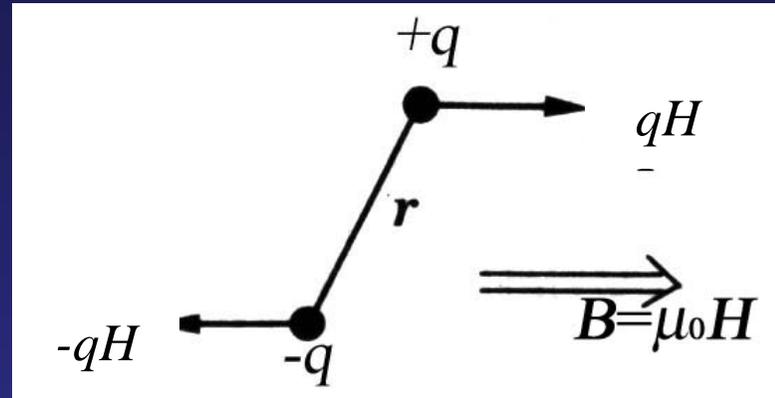
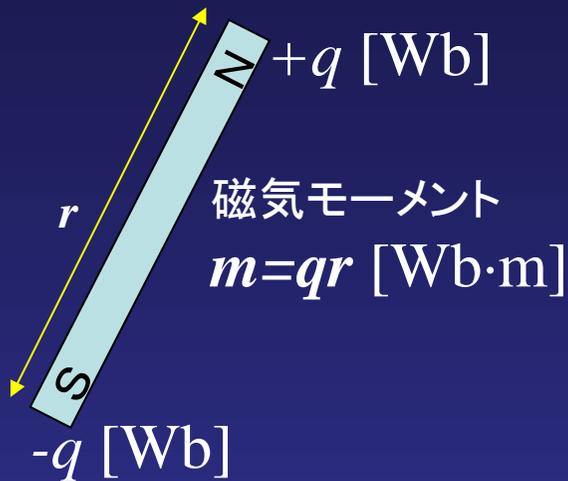


ホール・プローブ

# 磁極と磁気モーメント

- 磁石には、N極とS極がある。
- 磁界中に置かれた磁性体にも磁極が誘起される。磁極は必ず、NSの対で現れる。(単極は見つかっていない)
- 磁極の大きさを $q$ [Wb]とすると、磁界によってNSの対に働くトルクは $-qHd\sin\theta$ [N·m]=[Wbm][A/m]
- 必ずNSが対で現れるなら $m=qr$ を磁性を扱う基本単位と考えることが出来る。これを磁気モーメントという。単位は[Wbm]

# 磁気モーメント



- 一様な磁界  $H$  中の磁気モーメントに働くトルク  $T$  は

$$T = qH r \sin \theta = mH \sin \theta$$

- 磁気モーメントのもつポテンシャル  $E$  は

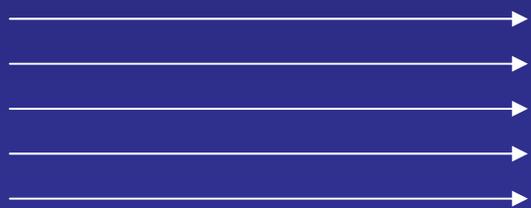
$$E = \int T d\theta = \int mH \sin \theta d\theta = -mH \cos \theta \longrightarrow E = -m \cdot H$$

単位:  $E[\text{J}] = -m[\text{Wb} \cdot \text{m}] \cdot H[\text{A/m}]$ ;

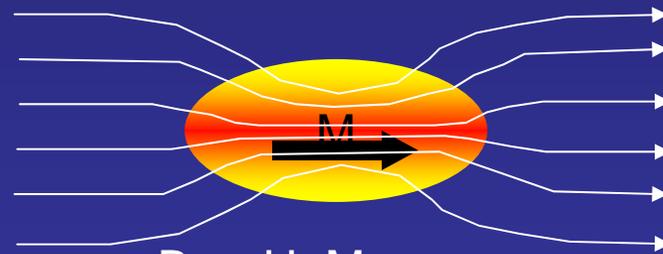
(高梨: 初等磁気工学講座)より

# 磁界(磁場) $H$ 、磁束密度 $B$ 、磁化 $M$

- 磁界 $H$ 中に置かれた磁化 $M$ の磁性体が磁束密度は、真空中の磁束密度に磁化による磁束密度を加えたものである。すなわち、 $B = \mu_0 H + M$



$$B = \mu_0 H$$

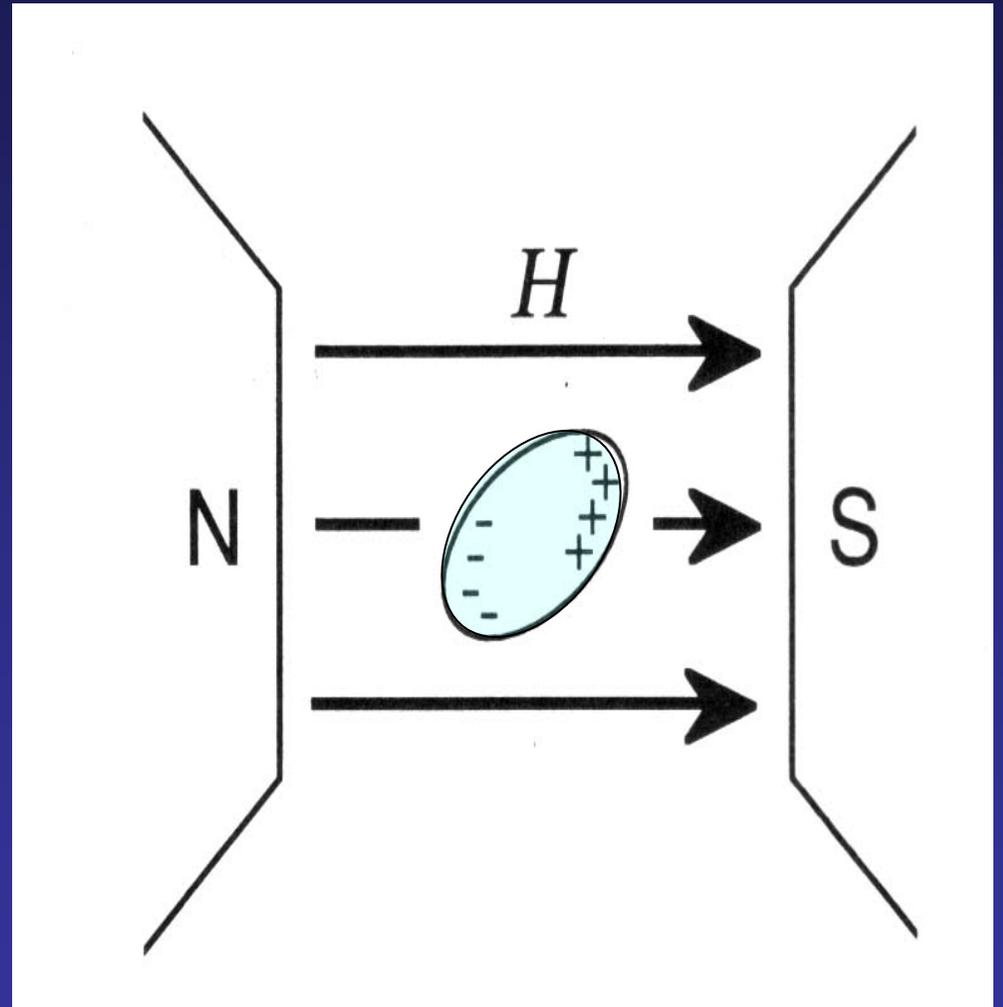


$$B = \mu_0 H + M$$

磁性体があると磁束密度が高くなる。

# 磁化

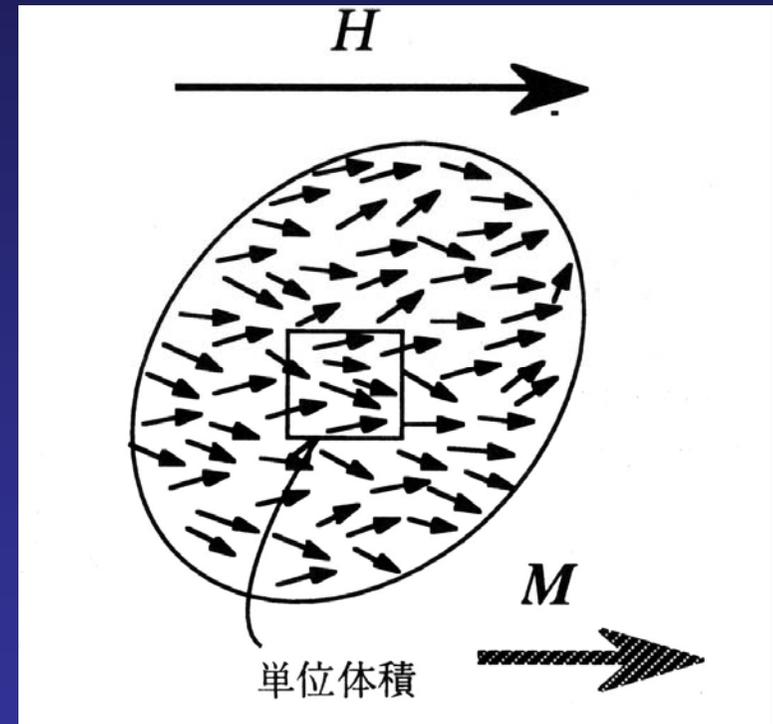
- 磁性体に磁界を加えたとき、その表面には磁極が生じる。
- この磁性体は一時的に磁石のようになるが、そのとき磁性体が磁化されたという。



(高木・初等磁気工学講座)より

# 磁化の定義

- ミクロの磁気モーメントの単位体積あたりの総和を磁化という。
- $K$ 番目の原子の1原子あたりの磁気モーメントを $\mu_k$ とすると、磁化 $M$ は式 $M = \sum \mu_k$ で定義される。
- 磁気モーメントの単位は $\text{Wb}\cdot\text{m}$ であるから磁化の単位は $\text{Wb}/\text{m}^2$ となる。



# 磁化曲線

- 磁性体を磁界中に置き、磁界を増加していくと、磁性体の磁化は増加していき、次第に飽和する。
- 磁化曲線は磁力計を使って測定する。



## VSM:試料振動型磁力計

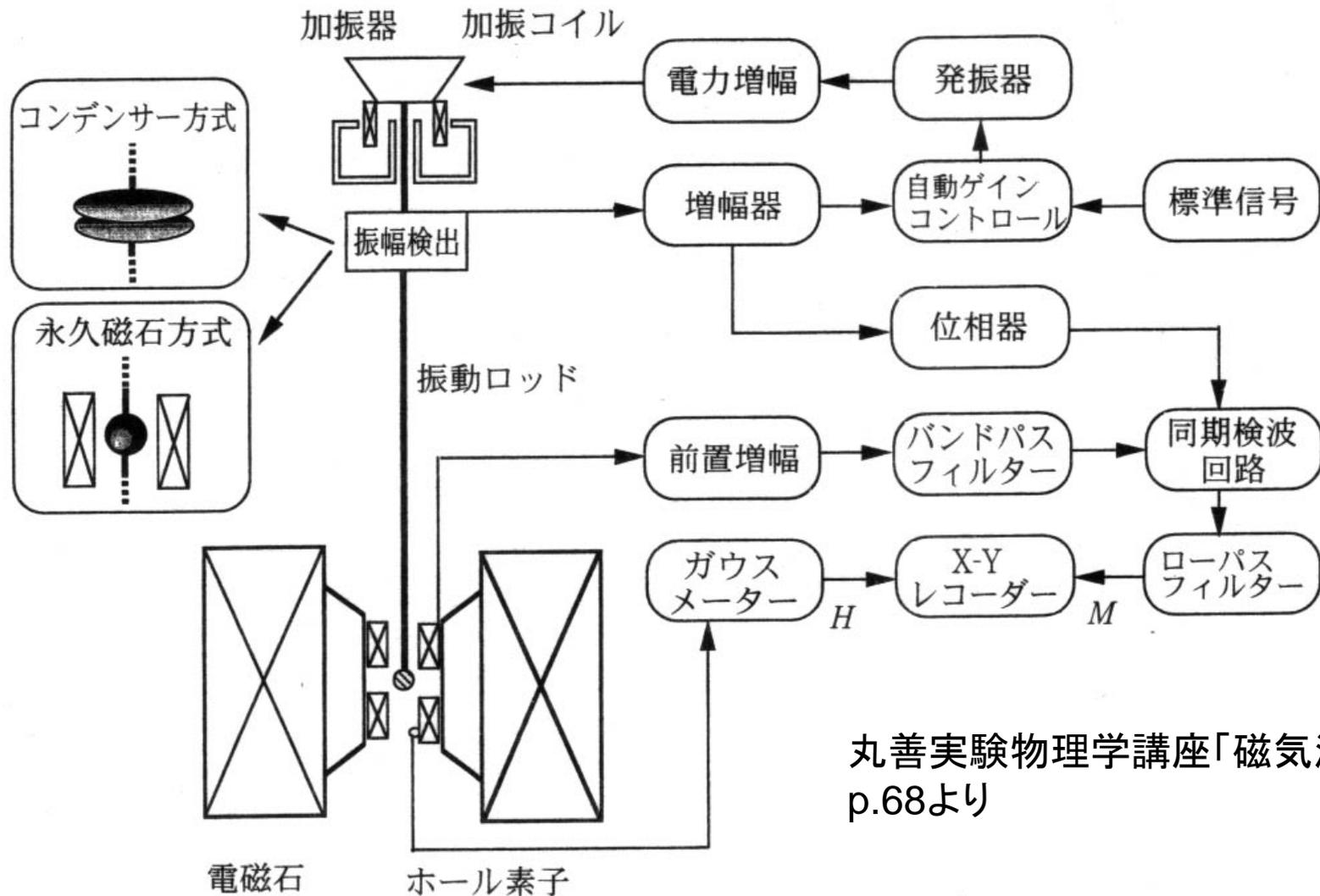
試料を0.1~0.2mm程度のわずかな振幅で80Hz程度の低周波で振動させ、試料の磁化による磁束の時間変化を、電磁石の磁極付近に置かれたサーチコイルに誘起された誘導起電力として検出する。誘導起電力は試料の磁化に比例するので、磁化を測定することができる。

スピーカーと同じ振動機構

磁極付近に置いたサーチコイル

電磁石

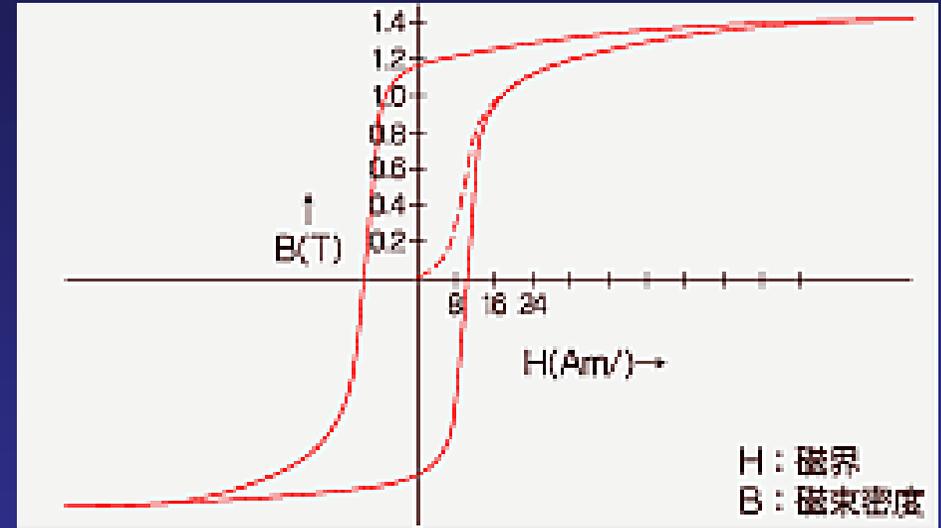
# VSMブロック図



丸善実験物理学講座「磁気測定」  
p.68より

# ソフト磁性

- パーマロイ\*に磁界を加えると磁化は急に増大しわずか40[A/m](地磁気程度)の磁界で飽和する。
- 保磁力が10[A/m]と小さいので非常に小さな磁界で磁化反転する。
- 磁化しやすく、磁界の変化によく追従する磁性をソフト(軟らかい)磁性とよび、このような磁性体を軟質磁性体と称する。



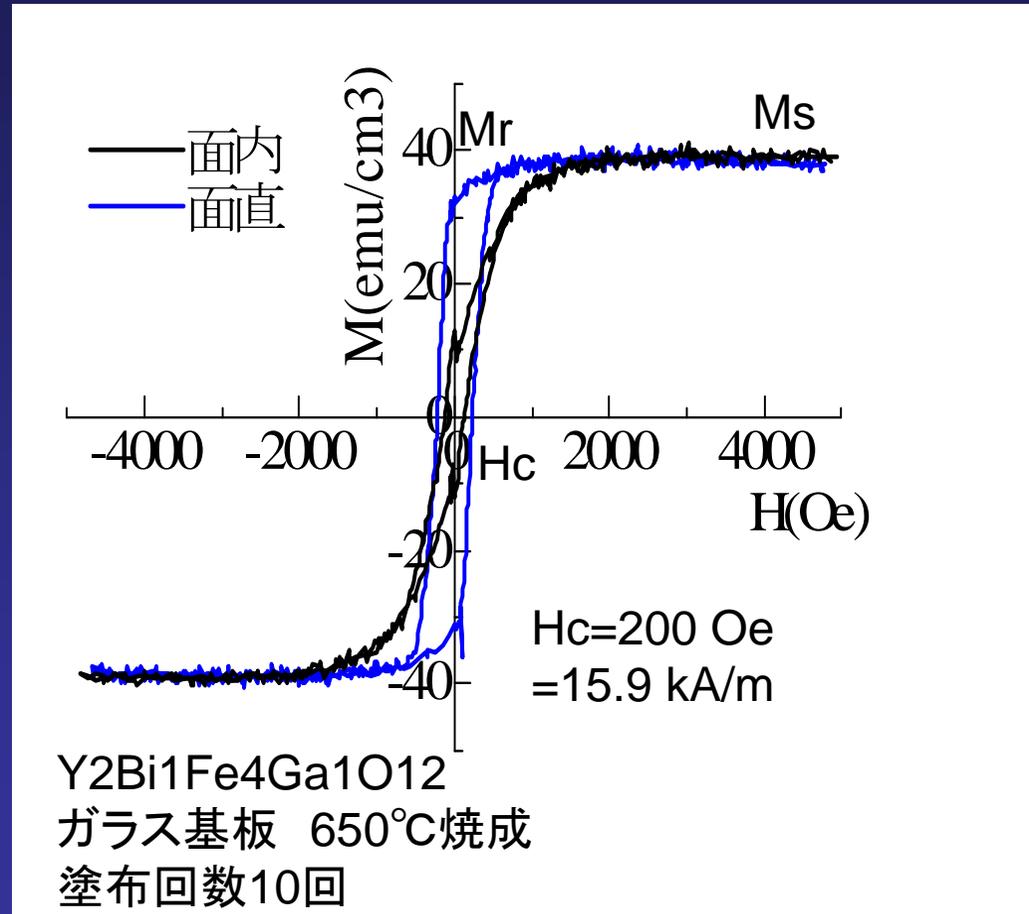
$$H_c = 10 \text{ A/m} = 0.126 \text{ Oe}$$

- 中野パーマロイのHP  
[http://www.nakano-permalloy.co.jp/j\\_permalloy\\_pb.html](http://www.nakano-permalloy.co.jp/j_permalloy_pb.html)より

\*permalloy(パーマロイ)とは、Ni:Fe=80:20程度のNi-Fe合金

# セミハード磁性

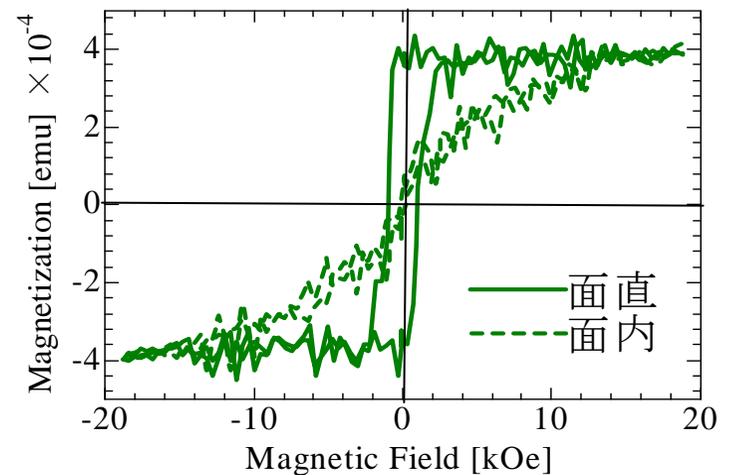
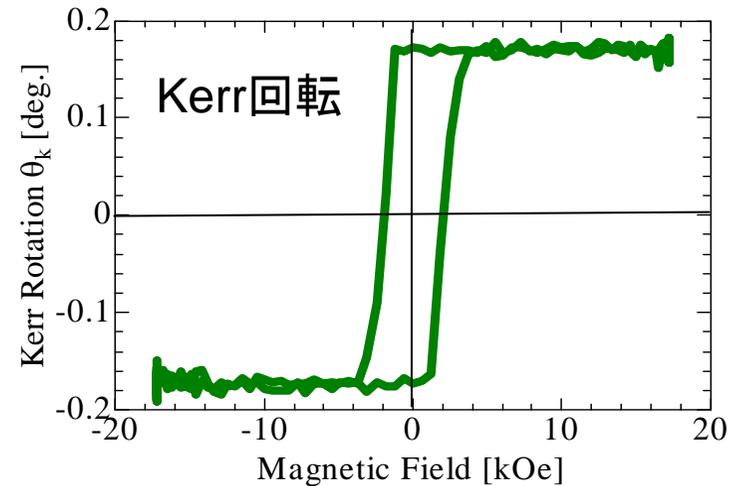
- 物理システム工学実験「磁性」で作製している  $\text{Y}_2\text{BiFe}_4\text{GaO}_{12}$  の磁化曲線は、膜面に垂直な磁界に対し明瞭なヒステリシスを示す。
- 1つの向きに強い磁界を加えていったん飽和磁化  $M_s$  に達した後、磁界を取り去っても、残留磁化  $M_r$  が残る。
- 磁化を反転させるには、保磁力  $H_c$  より大きな磁界を加えなければならない。



測定：  
佐藤研M1水澤

# ハード磁性: $\text{Co}_{66}\text{Cr}_{17}\text{Pt}_{17}$

- 次世代ハードディスクは垂直磁気記録になるといわれている。
- 垂直媒体としては、CoCrPt系の薄膜が検討されている。



佐藤研 寺山(OB)、細羽(OB)、清水(M2)が測定

# 磁石のいろいろ

[www.26magnet.co.jp/webshop/top\\_menu.html](http://www.26magnet.co.jp/webshop/top_menu.html)より



フェライト磁石



ネオジム磁石



サマコバ磁石



アルニコ磁石



ラバー磁石



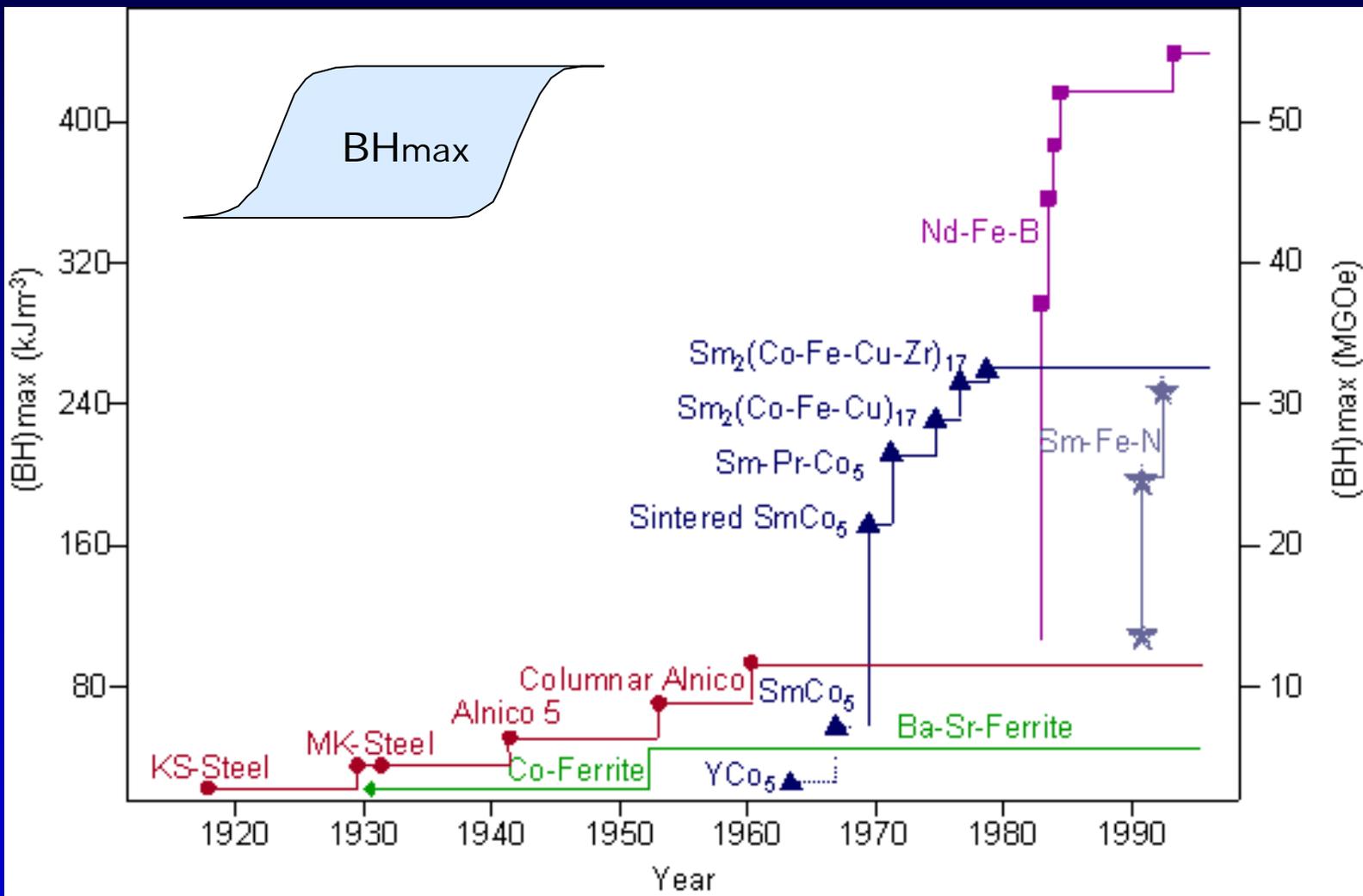
キャップ磁石



磁石応用製品

# 永久磁石の最大エネルギー積(BH)max の変遷

([http://www.aacg.bham.ac.uk/magnetic\\_materials/history.htm](http://www.aacg.bham.ac.uk/magnetic_materials/history.htm))



# 第1回の問題

- 10cmあたり1000巻きのコイルに1Aの電流を流したときの磁界の強さはSI単位ではいくらか。cgs単位ではいくらか。
- ホール素子によって磁界測定をできる理由について述べよ。