

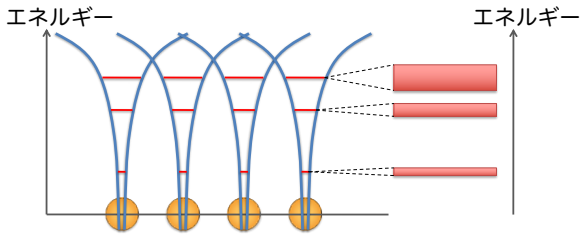
材料の機能と利用: 電氣的・磁氣的性質

- 1) 物質の電氣的性質
 - a. 電気伝導
 - b. 誘電体
- 2) 物質の磁氣的性質
 - a. 磁性の起源
 - b. 磁性材料入門の入門
- 3) 材料の機能と利用方法

1) 物質の電氣的性質/ a. 電気伝導

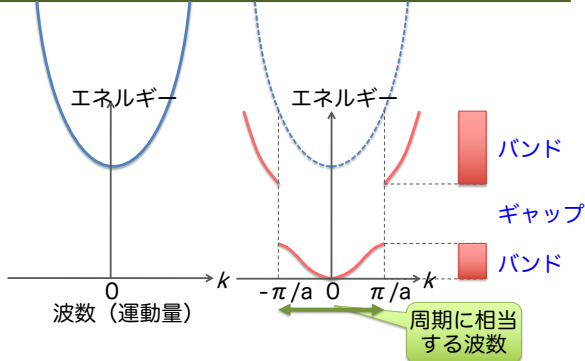
原子をならべる

隣接原子の電子雲の重なり合いによって電子の跳び移りが起こり、電子は結晶全体を動き回る



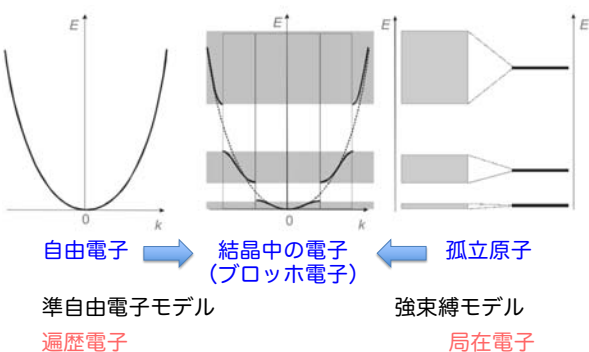
原子の電子エネルギー準位が、電子の跳び移りによって、それぞれ広がってバンドを形成する

ブラッグ反射によるバンドとギャップの形成

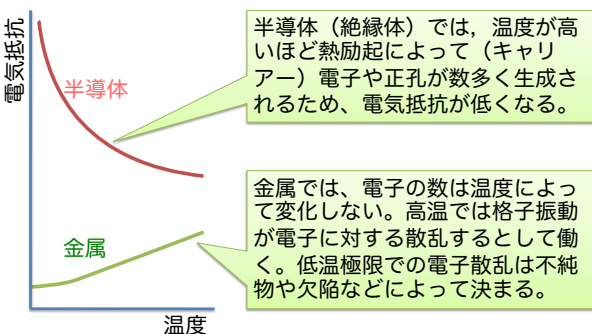


電子がとり得るエネルギー範囲 (バンド) と、とり得ないエネルギー範囲 (ギャップ) ができる

ブラッグ反射によるバンドとギャップの形成



電気抵抗の温度変化



金属の電気抵抗率

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Li 9.32	Be 3.25											B 2.74	C 3.5	N 5.0	O 4.5	F 1.8	Ne
Na 4.7	Mg 4.30											Al 2.74	Si 3.5	P 5.0	S 4.5	Cl 1.8	Ar
K 7.19	Ca 3.35	Sc 46.8	Ti 47	V 19.8	Cr 12.9	Mn 136	Fe 9.8	Co 5.8	Ni 7.04	Cu 1.70	Zn 6.17	Ga 14.8	Ge 29	As 29	Se 4.5	Br 1.8	Kr
Rb 12.5	Sr 21.5	Y 45	Zr 14.5	Nb 5.33	Mo 7.37	Tc 10.6	Ru 4.78	Rh 1.61	Pd 7.28	Ag 10.6	Cd 7.28	In 8.75	Sn 11	Sb 41.3	Te 4.5	I 1.8	Xe
Cs 19.9	Ba 39	Ln	Hf 30.6	Ta 13.1	W 5.44	Re 18.6	Os 9.13	Ir 5.07	Pt 10.4	Au 2.20	Hg 95.9	Tl 16.4	Pb 21.0	Bi 116	Po 46	At	Rn
Fr	Ra	An															

単位: $10^{-8}\Omega\text{m}$

金属の熱伝導率

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Li 0.82	Be 2.2											B 2.35	C 3.5	N 5.0	O 4.5	F 1.8	Ne
Na 1.25	Mg 1.53											Al 2.35	Si 3.5	P 5.0	S 4.5	Cl 1.8	Ar
K 1.09	Ca 2.01	Sc 0.22	Ti 0.22	V 0.51	Cr 1.35	Mn 4.01	Fe 0.84	Co 1.51	Ni 4.28	Cu 0.98	Zn 1.19	Ga 0.87	Ge 0.67	As 0.26	Se 4.5	Br 1.8	Kr
Rb 12.5	Sr 21.5	Y 45	Zr 0.22	Nb 0.51	Mo 1.35	Tc 4.01	Ru 0.84	Rh 1.51	Pd 4.28	Ag 10.6	Cd 7.28	In 8.75	Sn 11	Sb 41.3	Te 4.5	I 1.8	Xe
Cs 19.9	Ba 39	Ln	Hf 30.6	Ta 13.1	W 5.44	Re 18.6	Os 9.13	Ir 5.07	Pt 10.4	Au 2.20	Hg 95.9	Tl 16.4	Pb 21.0	Bi 116	Po 46	At	Rn
Fr	Ra	An															

単位: $\text{W}/\text{cm} \cdot \text{K}$

金属の熱伝導

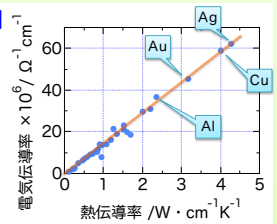
熱伝導 = 格子熱伝導 + 電子熱伝導

電子数が多い⇒電子熱伝導が大きい

Wiedeman-Franzの法則

$$\kappa / \sigma = LT$$

κ : 熱伝導率
 σ : 電気伝導率
 L : ローレンツ数
 T : 絶対温度



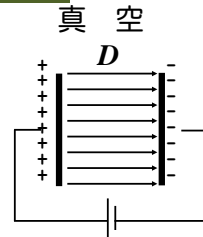
[注] 熱伝導がよいからといって電気伝導率が高いとは限らない。
 例) ダイヤモンド
 導電率 $10^{-10} \Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$ 、熱伝導率 $10 \sim 20 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-1}\text{K}^{-1}$

b. 誘電体

誘電体とは

導電性より誘電性が優位な物質直流電圧に対して電流を流しにくい絶縁体

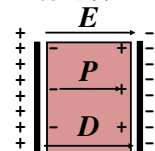
誘電分極



D : 電束密度
 E : 電場 (電界)

$$D = \epsilon_0 E$$

誘電体



電気感受率: χ
 分極: P

$$D = \epsilon_0 E + P$$

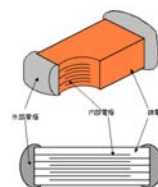
$$P = \epsilon_0 \chi E$$

$$D = \epsilon_0 (1 + \chi) E$$

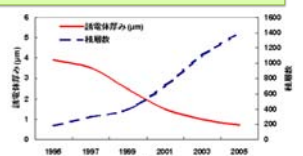
$$= \epsilon_r \epsilon_0 E \quad \text{比誘電率: } \epsilon_r$$

強誘電体のように線形関係にない場合は成立しない

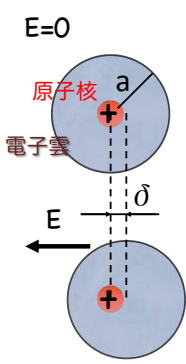
積層セラミックコンデンサー



$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{d} = n \epsilon_0 \epsilon_r \frac{S}{L/n}$$



誘電体の分極の機構 (電子分極)



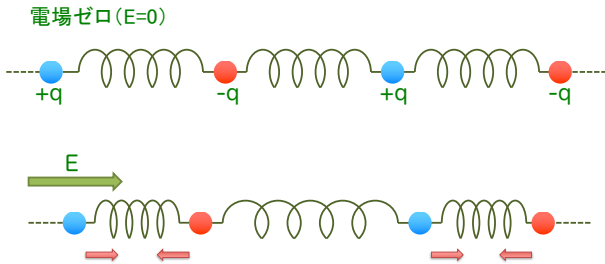
電気双極子モーメント: μ_e
 $\mu_e = \alpha_e E$
 電子分極率: α_e
 $\alpha_e = 4\pi \epsilon_0 a^3$
 ⇒ 原子体積に比例

単原子イオンのイオン分極率 (10^{-24} cm^3)

Li ⁺	Be ²⁺	B ³⁺	C ⁴⁺	O ²⁻	F ⁻	Ne
0.029	0.008	0.003	0.0013	3.88	1.04	0.390
Na ⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	Si ⁴⁺	S ²⁻	Cl ⁻	Ar
0.179	0.094	0.052	0.0165	10.2	3.66	1.62
K ⁺	Ca ²⁺	Sc ³⁺	Ti ⁴⁺	Se ²⁻	Br ⁻	Kr
0.83	0.47	0.286	0.189	10.5	4.77	2.46
Rb ⁺	Sr ²⁺	Y ³⁺	Zr ⁴⁺	Te ²⁻	I ⁻	Xe
1.40	0.86	0.55	0.37	14.0	7.10	3.99
Cs ⁺	Ba ²⁺	La ³⁺				
2.42	1.55	1.04				

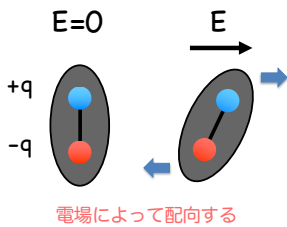
Pauling's values

誘電体の分極の機構 (イオン分極)



誘電体の分極の機構 (配向分極)

- 正負電荷の重心がずれた分子や基は永久双極子モーメント μ をもつ
- ◆ μ は熱運動により無秩序な方向分布
 - ◆ 電界 E により配向



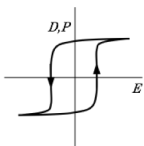
誘電体の特殊な性質



圧電性: 応力を加えることにより分極 (および電圧) が生じる。逆に電圧を印加することで応力および変形が生じる。

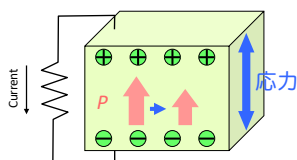
焦電性: 自発分極を有しており、(微かな) 温度変化に応じて分極 (およびそれによる電圧) が生じる。

強誘電性: 外部からの電界によって自発分極の方向を反転させることのできるもの分極が外部電界に対するヒステリシス特性を示す。



圧電性

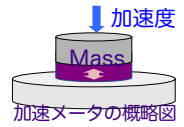
圧電性 (Piezoelectricity): 圧力 (力) を加えると、圧力に比例した分極 (表面電荷) が現れる現象



圧電体の応用例

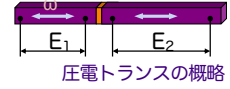
ガス圧センサ, 加速メータ

応力 → 電気信号



圧電トランス

外部電界 → 応力 1
 → 応力 2 → 出力電圧

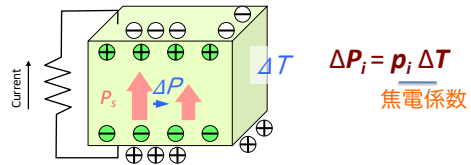


圧電アクチュエータ・超音波モータ

電界 → 応力 (変系)

焦電性

焦電性 (Pyroelectricity): 自発分極が温度に依存

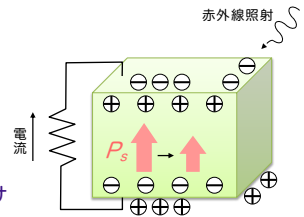


焦電性を発現する結晶は、単位格子セルに双極子を有し、自発分極が生じる

焦電センサ

赤外線センサの種類

- ◆ 半導体型
→ 映像用、画像解析
- ◆ 焦電型
→ 人検知センサ、家庭用機器の温度センサ



焦電型センサの特徴

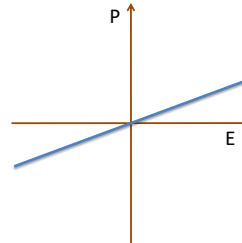
- ◆ 応答周波数が高い
- ◆ 室温での使用
- ◆ 応答性が高い
- ◆ 低コスト

焦電センサの原理

赤外線による温度上昇
 ⇒ 自発分極の減少
 ⇒ 電荷の変化
 ⇒ 電流 (電気信号)

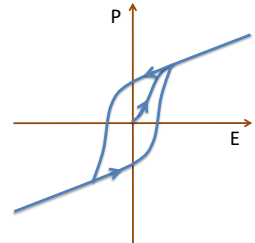
強誘電性: 分極反転(分極スイッチング)

常誘電性



線形的な応答

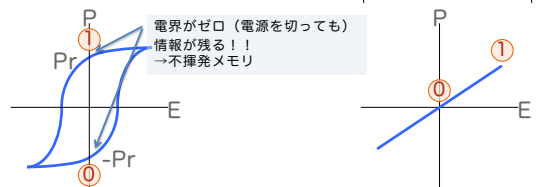
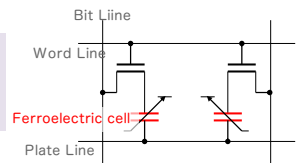
強誘電性



電場に対して非線形な応答
 ⇒ ヒステリシス曲線

メモリデバイス

FeRAM (FRAM)
 不揮発メモリデバイス
 (cf. MRAM, PRAM)



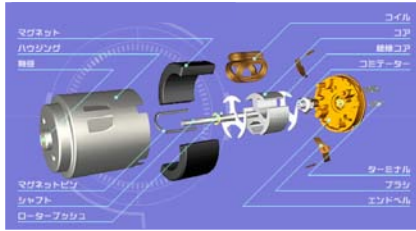
強誘電材料のメモリセル (FeRAM) 常誘電材料のメモリセル (DRAM)

2) 物質の磁氣的性質/ a. 磁性の起源

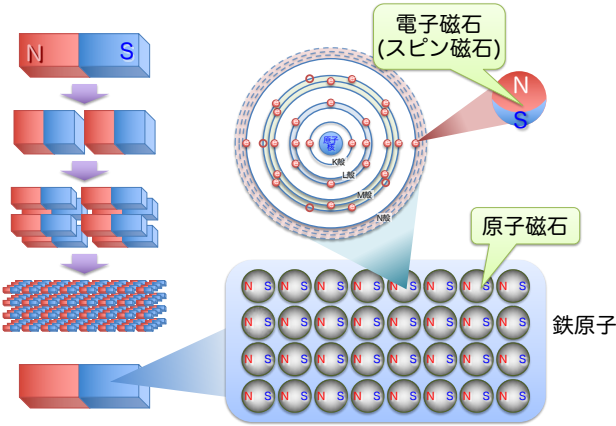
強磁性を発現する原子の電子構造は？

磁石材料の応用例：
 ◆ モーター
 ◆ センサー
 ◆ 文具など、

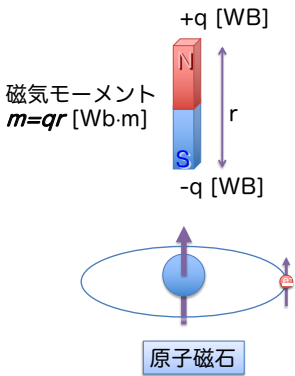
磁心材料の応用例：
 ◆ モーター
 ◆ 電磁石のコア（磁心）
 ◆ 磁気ヘッド



磁石を次々に分割していくと...



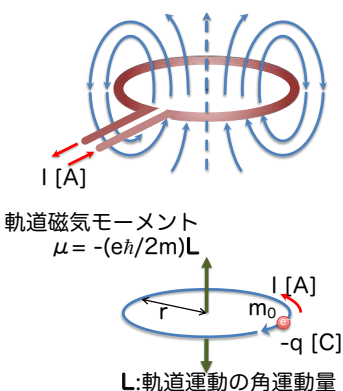
磁気の起源 ~原子磁石~



- ◆ 磁石の分割を繰り返して原子レベルに達しても磁極はペアで見れる。=磁気双極子
- ◆ この究極のペアにおける磁極の大きさと間隔の積を磁気モーメントとよぶ。
- ◆ 原子においては、主に(*)
 電子の軌道運動による電流と
 電子のスピンによって磁気モーメントが生じる。

※原子核の核磁気モーメント等を加えて議論することもあるが、このほかバンド構造など議論していくと、きりがないので、「主に」上述の2つとした。

電子の軌道運動によって生じる軌道磁気モーメント



軌道磁気モーメント：

$$\mu = -(eh/2m)L = -\mu_B L$$

h : プランク定数
 量子力学によると(*)、軌道角運動量Lの大きさ

$$L = \sqrt{\ell(\ell+1)} \hbar$$

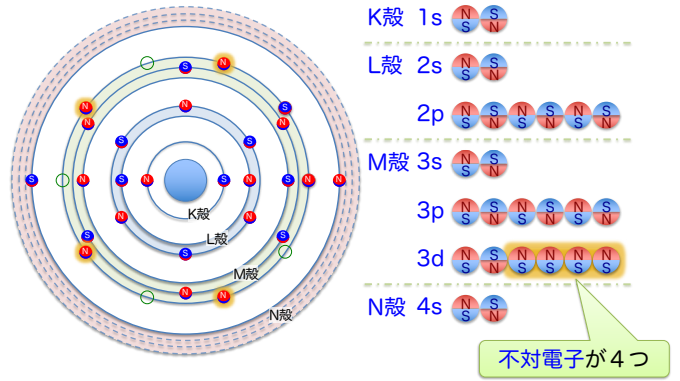
ℓ : 方位量子数
 ボーア磁子

$$\mu_B = eh/2m = 9.27 \times 10^{-24} [\text{J/T}]$$

単位について：
 $[\text{J/T}] = [\text{Wb}^2/\text{m}] / [\text{Wb}/\text{m}^2] = [\text{Wb}\cdot\text{m}]$

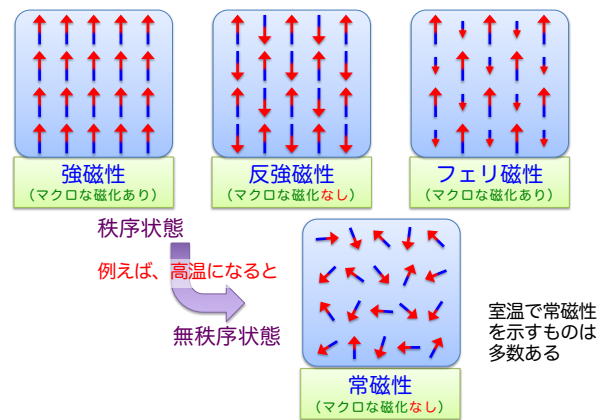
※詳細は、本講義「材料学入門」では取り扱わない。量子力学入門(3セメ)、物性学基礎(4セメ)、固体物性論(5セメ)、磁性材料学(6セメ)で議論される予定。

強磁性を発現する原子の電子構造は？

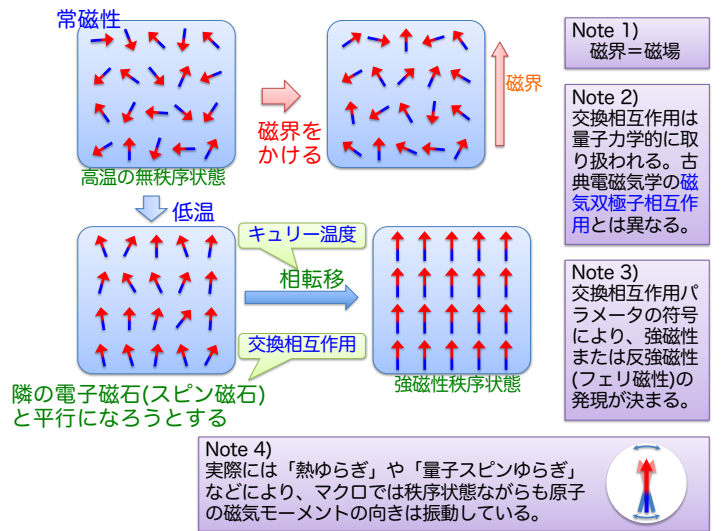


b.磁性材料入門の入門

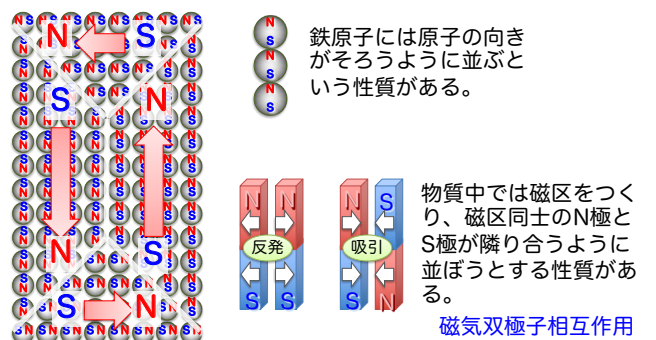
磁性体のいろいろ



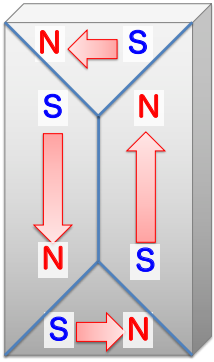
磁気秩序 (交換相互作用)



磁区構造

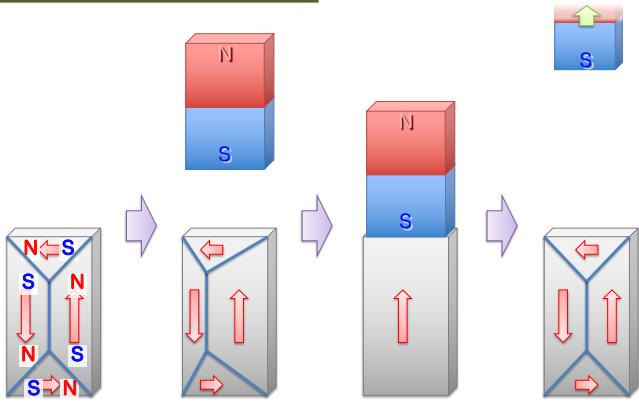


磁区構造 (磁区と磁壁)

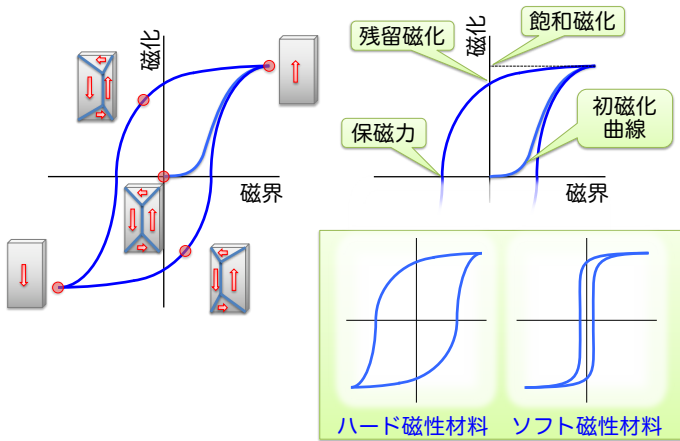


磁区：磁気双極子の集まりで、磁気モーメントが一方にそろっている小さな領域
 磁壁：磁区と磁区の間境 90° 磁壁、180° 磁壁

純鉄の磁化過程と磁壁移動



磁気ヒステリシス

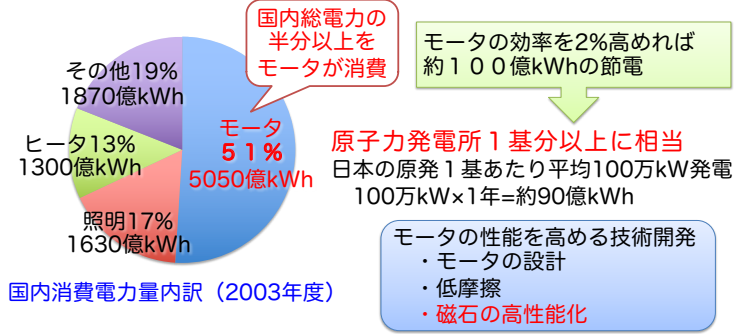


物質が強磁性材料であるためには

1. 原子 (あるいは分子) が磁気モーメントをもつ 「原子の磁気モーメント」
2. それらの磁気モーメントが同じ向きにそろおう 「交換相互作用」
3. マクロな材料が全体として磁化をもつ 「磁区と磁壁」

磁場がなくてもマクロに磁化があれば→磁石材料 **ハード磁性材料**
 マクロに (ほとんど) 磁化してなくても、磁場のもてで磁化すれば→磁心材料 **ソフト磁性材料**

たとえば磁石などを高性能化する社会的インパクト



各種メモリデバイスと等価回路

	DRAM	Flash EEPROM	FeRAM	MRAM	PRAM
Equivalent Circuit					
Memory State	1				
	0				

3) 材料の機能と利用方法

材料の機能 (効果)

入力 → 材料・デバイス → 出力

出力	電荷・起電力 電流	磁化	ひずみ	温度	光
電界	誘電率 導電率	電気磁気効果 電流磁気効果	逆圧電効果 電歪効果	電気熱量効果	電気光学効果
磁界	磁気電気効果 磁気抵抗効果	透磁率	磁歪効果	磁気熱量効果	磁気光学効果
応力	圧電効果	圧磁効果	弾性定数		光弾性効果
熱	焦電効果 熱電効果	熱磁気効果	熱膨張	比熱	
光	光起電力効果		光歪効果		屈折率

センサ アクチュエータ

材料の機能・性質と応用

光学的性質	高反射率材料	断熱材、光ディスクや太陽電池の反射層
	蛍光材料	LED(光発光ダイオード)、増感剤、蛍光灯
	非線形光学材料	YAGレーザー結晶
	光電変換材料	液晶、光シャッター、光導波路
電氣的性質	透明材料 (透過材料)	窓材料
	導体 (金属)	電線
	イオン導電体	電池用固体電解質、燃料電池セル
	半導体材料	半導体
	絶縁材料	ガイシ、コンデンサー、強誘電素子
	誘電材料 (強誘電材料)	コンデンサー、メモリ、圧電素子、焦電素子
	超伝導材料	電線、リニアモーターカー
磁氣的性質	(強)磁性材料	モーター (磁石、磁心)、磁気記録媒体
	光磁気材料	光磁気ディスク
	磁歪材料	圧力センサー、ソナー