

# 環境調和材料工学概論

## 第5回 環境調和材料 永久磁石材料, 誘電体材料

Permanent Magnets & Dielectric Materials

希土類材料研究センター  
亀川 厚則  
Atsunori Kamegawa



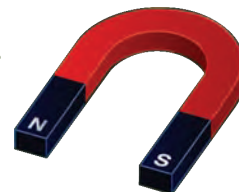
# 環境調和材料工学概論

## 講義計画（亀川担当分）

1. エネルギー概論
  - ・一次エネルギー、二次エネルギー
  - ・国内外で顕在化するエネルギー問題
  - ・カーボンニュートラル
2. 再生可能エネルギー、機能性材料、  
環境調和材料工学に対する社会的要求、水素エネルギー
3. 水素エネルギーとサプライチェーン技術
4. 環境調和材料①：水素吸蔵合金
5. 環境調和材料②：磁石材料  
環境調和材料③：誘電体材料
6. 環境調和材料④：未利用熱エネルギー活用材料  
エネルギーハーベスティング

# 環境調和材料材料： 永久磁石材料

# 永久磁石、磁石材料



## 永久磁石 (permanent magnet)

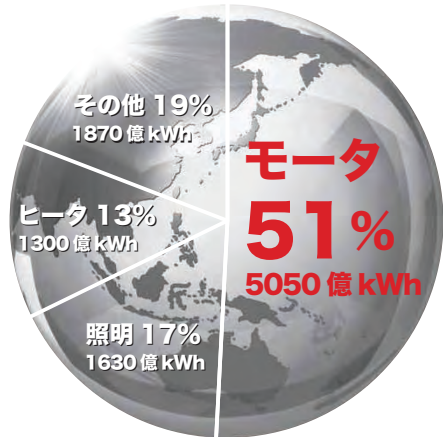
外部から磁場や電流の供給を受けることなく磁石としての性質を比較的長期にわたって保持し続ける物体。

磁性材料なかでも永久磁石となる特性（ハード磁性）を持ち、応用されるものを**永久磁石材料（磁石材料）**と呼ぶ。

機能	原理	応用例
電気エネルギー ⇒機械的エネルギー	直交する磁束と電流との間の力を利用 (フレミングの左手の法則)	モータ、スピーカ、ヘッドホン
	ローレンツの法則	進行波管、マグネトロン
機械的エネルギー ⇒電氣的エネルギー	磁束と交差する導体に誘起する電圧を利用 (フレミングの右手の法則)	発電機、マイク、ピックアップ
機械的エネルギーの交換		コンパス、ガウス計器、磁気軸受、文房具など
そのほか	磁場(磁力線)の発生	MRI、磁気ネックレス、センサ

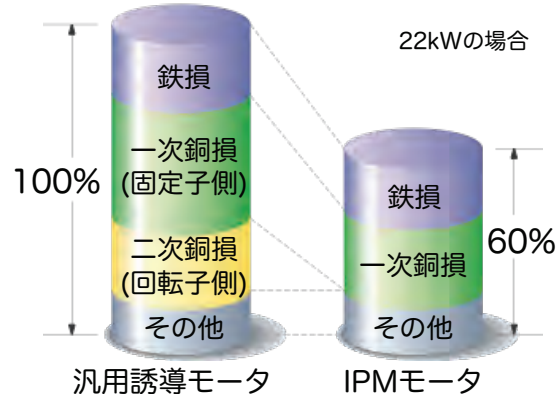
# 日本の総消費電力量約10,000億kWh<sup>5</sup> の半分以上をモータが消費

国内総電力の半分以上を  
モータが消費



国内電力消費量内訳 (2003年)

高効率なマグネットモータ



モータ発生損失比較 (三菱電機)

国内使用の75%以上が産業用の汎用誘導モータ

モータの効率  
1%向上すれば  
50.5億kWh

泊原発3号機\*  
年間発電量  
56億kWh\*\*に相当

汎用モータの高効率化

IPMモータへの置換

HEV, EVなど環境対応車

DCマグネットモータ

マグネットモータの高効率化への期待

\* 1,2号機は36億kWh/年 \*\* 稼働率70%で計算

# モータの分類

直流駆動  
(DCモータ)

巻線界磁式

永久磁石界磁式

→EV, 家電製品

直巻式, 分巻式

他励式

正弦波駆動  
(ACモータ)

誘導機 (IM)

同期機 (SM)

整流子機 (CM)  
(ユニバーサル-M)

巻線界磁式

永久磁石界磁式 (PM)

かご形

巻線形

表面磁石形 (SPM)

埋込磁石形 (IPM)

非正弦波駆動  
(ACモータ)

永久磁石界磁式 (ブラシレスDC-M)

リラクタンス式 (SRM)

ステッピングモータ

永久磁石形(PM型)

可変リラクタンス型(VR型)

→EV, 家電製品

→情報機器, 家電製品

→時計, 精密機器

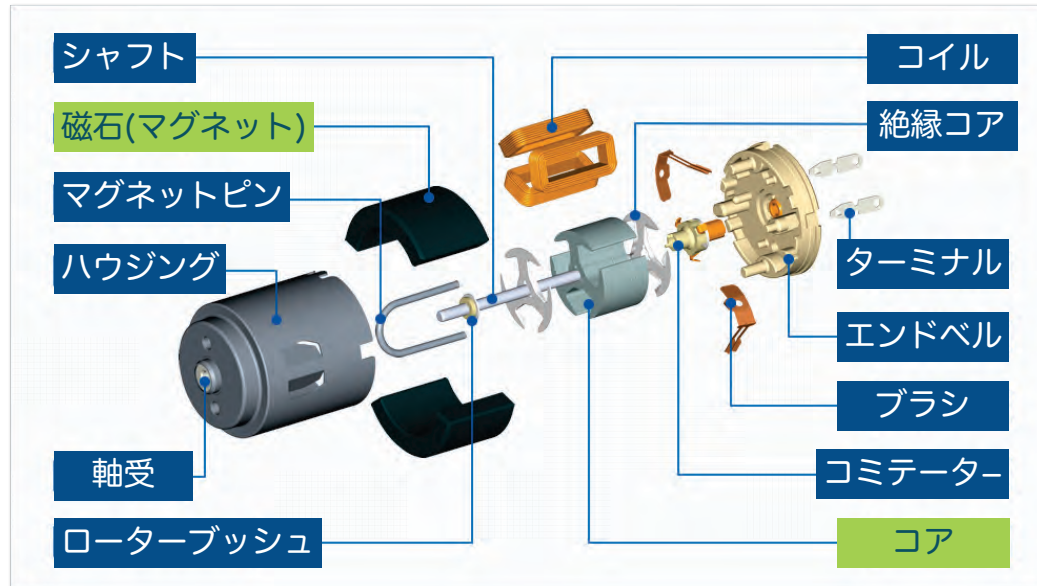
# 磁石材料・磁心材料

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



DCマグネットモータの構造

# 磁性材料の特性による区分

(簡単な表現で：学術的にはちょっと雑です。)

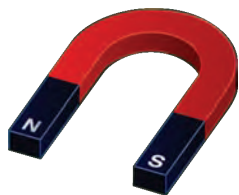
磁石になる

磁性材料

磁石材料  
(ハード磁性)

磁気記録材料  
(セミハード磁性)

磁心材料  
(ソフト磁性)



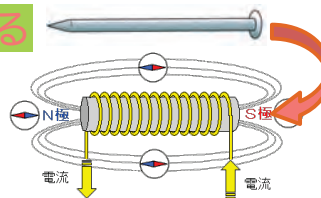
強磁性体、  
フェリ磁性体

磁石につく

磁石につかない

非磁性材料

磁心になる

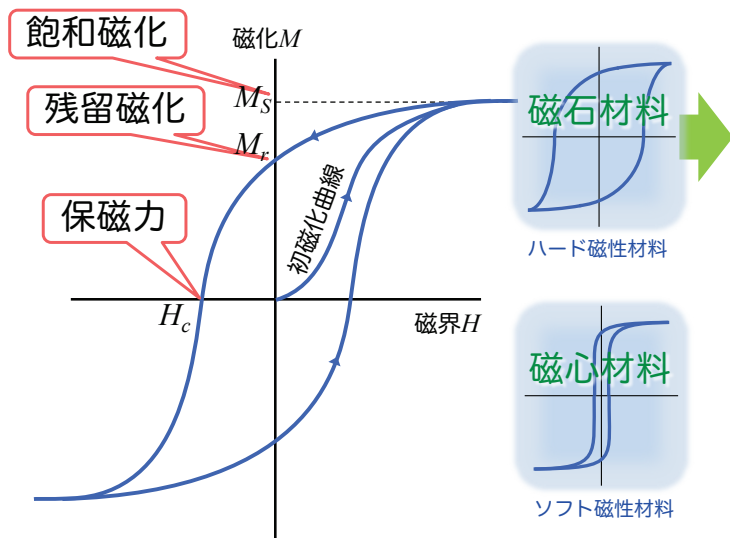


磁心にならない

常磁性体、  
反強磁性体



# 磁石の性能と開発の歴史

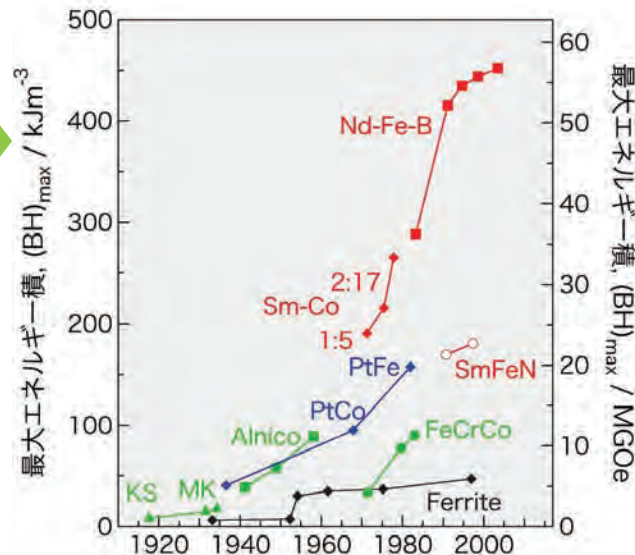


磁気ヒステリシス ( $M-H$  曲線)

高飽和磁化

高保磁力

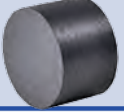



永久磁石材料の高性能化：高い  $(BH)_{\max}$



磁石開発の歴史と性能,  $(BH)_{\max}$

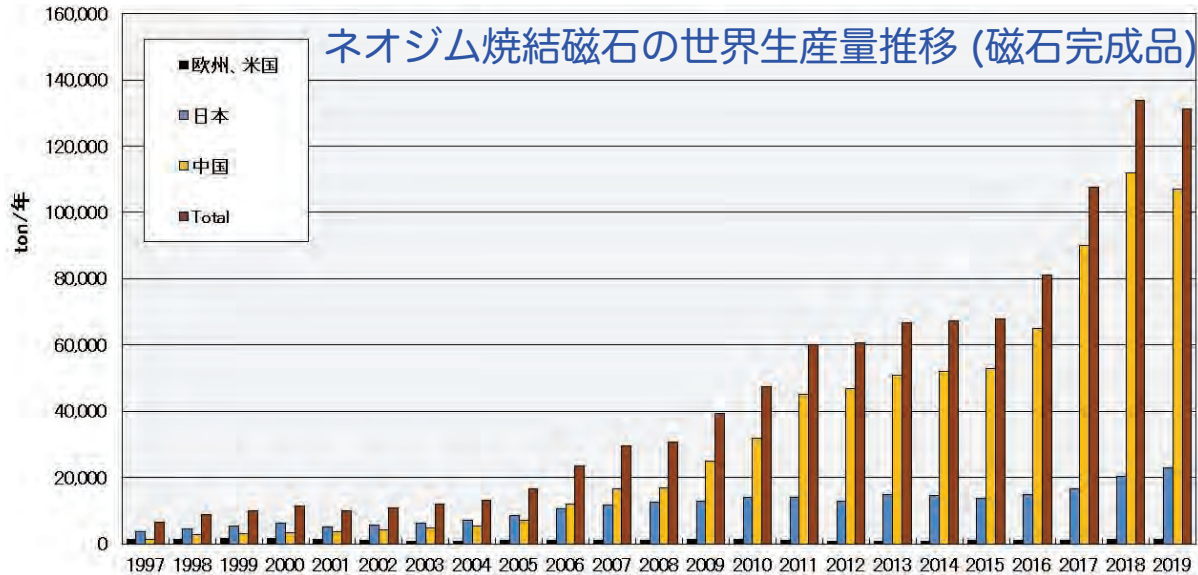
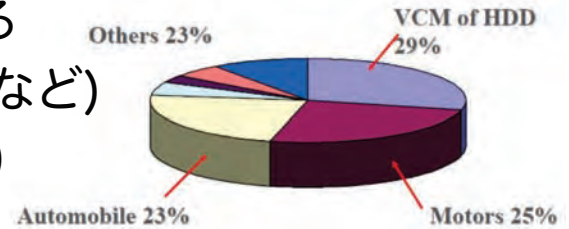
現用最強の磁石は  
ネオジム磁石 (Nd-Fe-B)

# 永久磁石材料の種類

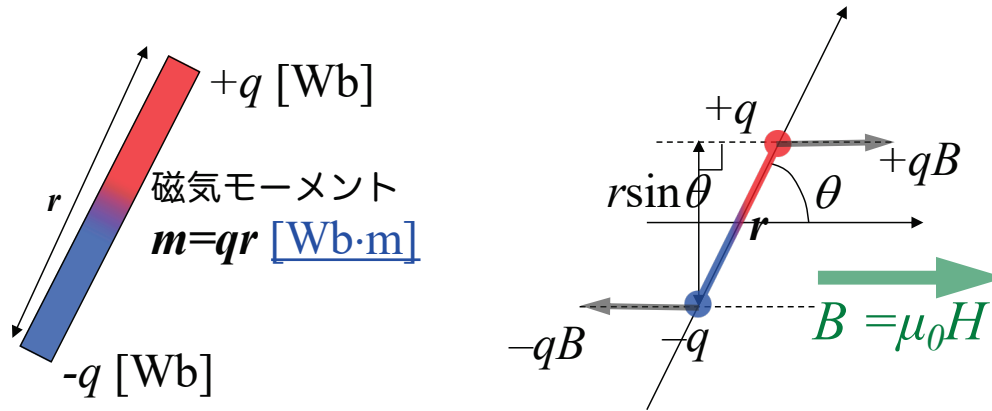
種類	種類	主な特徴	主な用途
フェライト磁石 	Ba フェライト Sr フェライト	低コスト、高耐食性、 比較的高保磁力、 (BH) <sub>max</sub> 小さい、低温度特性	スピーカー、汎用 モータ、文具、玩具
合金磁石 	Al-Ni-Co (アルニコ磁石) Fe-Cr-Co	高磁束密度、温度依存性が小 さい、高いTc(約850°C)、 高強度、塑性加工可(FeCrCo)	計測機器（電圧計、 Wメータ）、制御 機器（リレー）
規則合金磁石	Fe-Pt, Co-Pt	主に薄膜法などで作製、 原料にPt	磁気記録メディア
希土類磁石 	Sm-Co系 (サマコバ磁石)	高保磁力・高い(BH) <sub>max</sub> 、 Tcが高く（約700°C）使用温 度可能も高い、耐食性良	モータ、発電機、 計測機器、セン サー
	NdFeB系 (ネオジム磁石)	高保磁力・現用最高 (BH) <sub>max</sub> 、 Tcが低く（約300°C）熱に弱 い、錆びやすい	HV, EVなど駆動 モータ、MRI、 HDDなど小型機器

# Nd-Fe-B系磁石のメリットと用途

- 小型磁石でも強い磁場を発生できる
- 応用機器の小型化が可能(携帯電話など)
- モータの鉄損が小さくなる(省エネ)
- 電磁鋼板の磁気損失が小さくなる



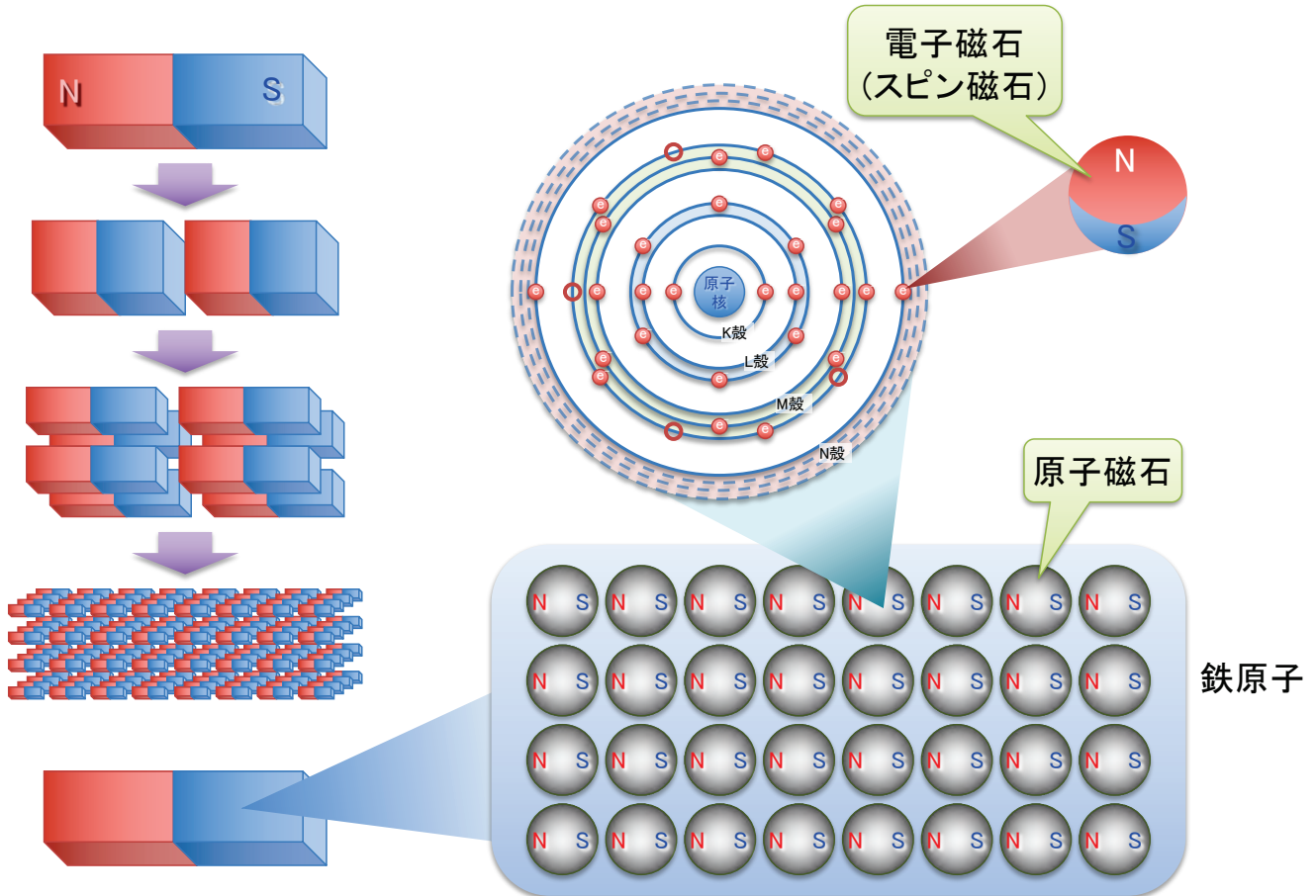
# 磁気モーメント



- 一様な磁界  $B$  中の磁気モーメントに働くトルク  $T$  は  
 $T = qB r \sin \theta = mB \sin \theta$
- 磁気モーメントのもつポテンシャル  $E$  は  
 $E = \int T d\theta = \int mB \sin \theta d\theta = -mB \cos \theta \quad \rightarrow \quad E = -\mathbf{m} \cdot \mathbf{B}$

単位：  $E[\text{J}] = -m[\text{Wb} \cdot \text{m}] \cdot B[\text{Wb}/\text{m}^2]$ 、  $[\text{J}] = [\text{Wb}^2/\text{m}]$

# 磁石を次々に分割していくと...



# 原子の磁性

- ◆ 磁性体の磁化の担い手は、磁性原子の磁気モーメントである。
- ◆ この原子の磁気モーメントは、主に  
電子の軌道運動による電流  
と  
電子のスピン  
によるものである。。

軌道磁気モーメント

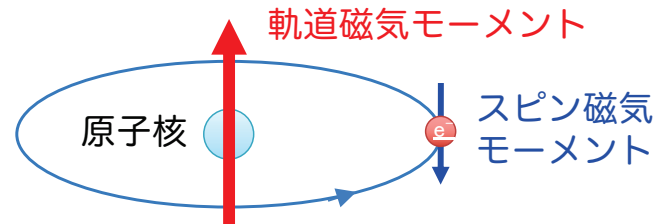
$$\mu_L = -(e\hbar/2m)\mathbf{L} = -\mu_B\mathbf{L}$$

スピン磁気モーメント

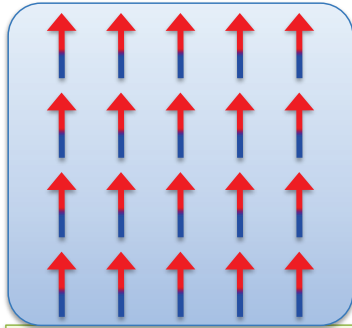
$$\mu_S = -(e/m)\hbar\mathbf{S} = -2\mu_B\mathbf{S}$$

$\mathbf{L}$ : 軌道角運動量量子数

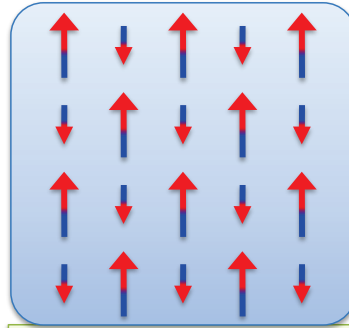
$\mathbf{S}$ : スピン角運動量量子数



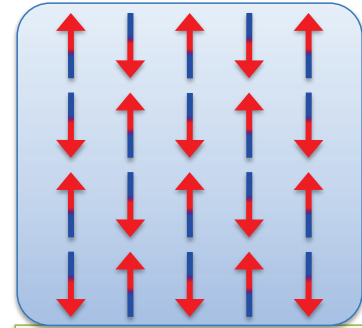
# 磁性体と原子モーメントの構造



**強磁性**  
(マクロな磁化あり)

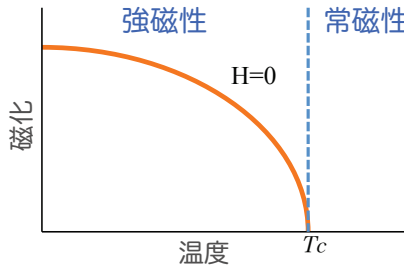


**フェリ磁性**  
(マクロな磁化あり)



**反強磁性**  
(マクロな磁化なし)

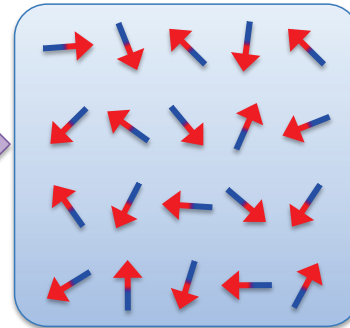
秩序状態



磁化の温度依存性とキュリー温度  $T_c$

例えば、  
高温になると

無秩序状態



**常磁性**  
(マクロな磁化なし)

室温で常磁性  
を示すものは  
多数ある

# 強磁性(Ferromagnetism)

- 自発磁化を有する物質のことを強磁性体と呼ぶ。
- 外部磁界を印加しなくても物質中の原子の磁気モーメントの方向がそろっており、磁化をもつことを自発磁化を有すると言う。

- 強磁性体の例：

遷移金属：Fe, Co, Ni,

遷移金属合金： $\text{Fe}_{1-x}\text{Ni}_x$ ,  $\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x$ ,  $\text{Co}_{1-x}\text{Cr}_x$ ,  $\text{Co}_{1-x}\text{Pt}_x$

金属間化合物： $\text{PtMnSb}$ ,  $\text{MnBi}$ ,  $\text{NdFe}_2\text{B}_{14}$

酸化物・カルコゲナイド・ニクタイト、ハライド：

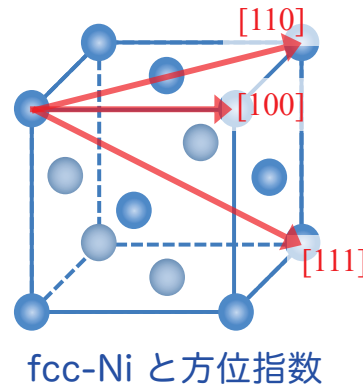
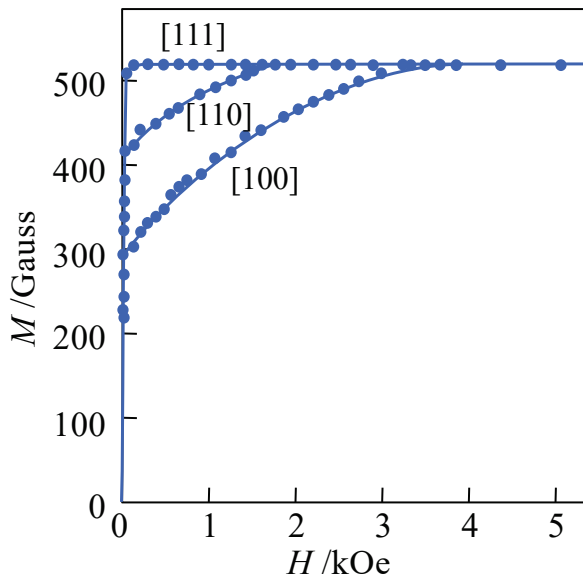
$\text{SrO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ ,  $\text{CdCr}_2\text{S}_4$ ,  $\text{Cr}_3\text{Te}_4$ ,  $\text{MnP}$



# 結晶磁気異方性

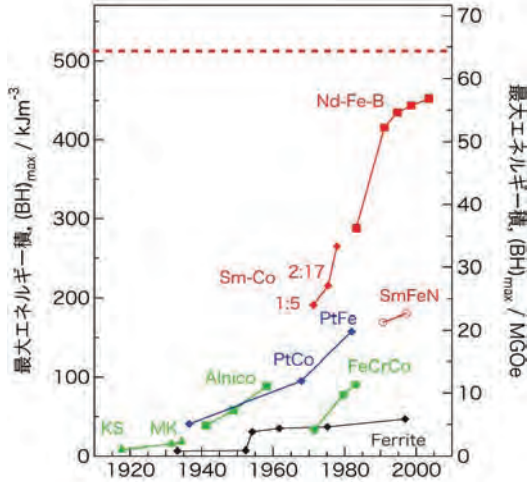
結晶において、特定結晶軸が磁化容易方向になる性質を結晶磁気異方性という。

Ni（面心立方晶）の磁化について、結晶方位によって異方性を持ち、 $[111]$ が磁化容易方向、 $[100]$ が磁化困難方向となる。



Niの磁化曲線の結晶方位依存性

# 希土類-遷移金属永久磁石材料：希土類磁石

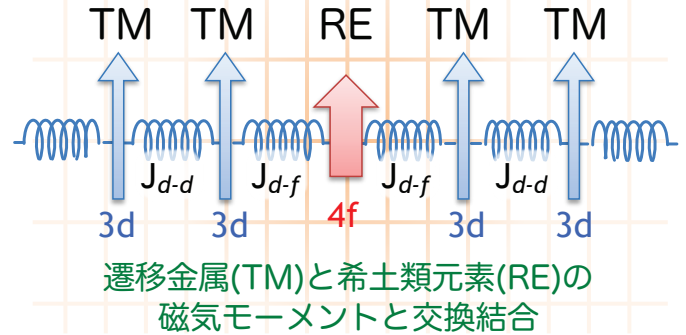


磁石開発の歴史

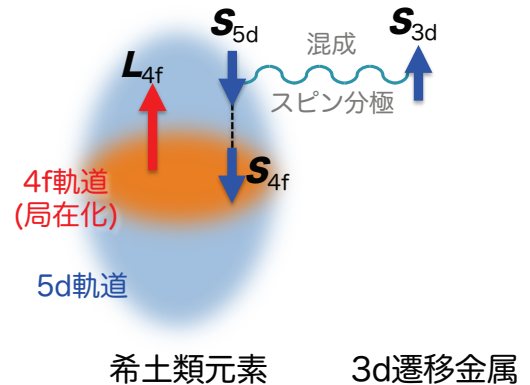
磁石化合物の磁性

	キュリー温度 $T_C$ (K)	飽和磁化 $J_s$ (T)	異方性磁場 $\mu_0 H_A$ (T)
Co	1390	1.81	0.76
SmCo <sub>5</sub>	998	1.07	39
Sm <sub>2</sub> Co <sub>17</sub>	1193	1.22	6.5
Nd <sub>2</sub> Fe <sub>14</sub> B	585	1.61	3.9

4f電子軌道が希土類磁石の大きな磁気異方性の起源



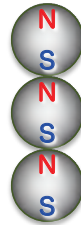
遷移金属(TM)と希土類元素(RE)の磁気モーメントと交換結合



# 磁区構造

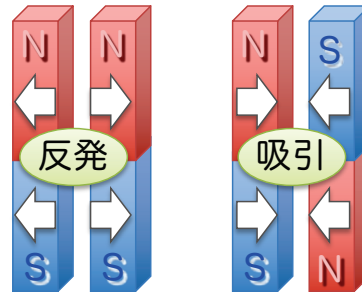


## 交換相互作用



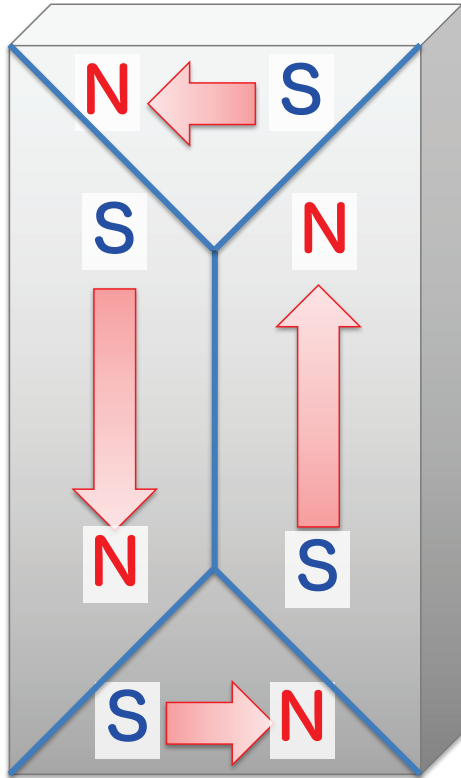
鉄原子には原子の向きが  
そろおうように並ぶという  
性質がある。

## 磁気双極子相互作用



物質中では磁区をつくり、  
磁区同士のN極とS極が隣  
り合うように並ぼうとす  
る性質がある。

# 磁区構造 (磁区と磁壁)



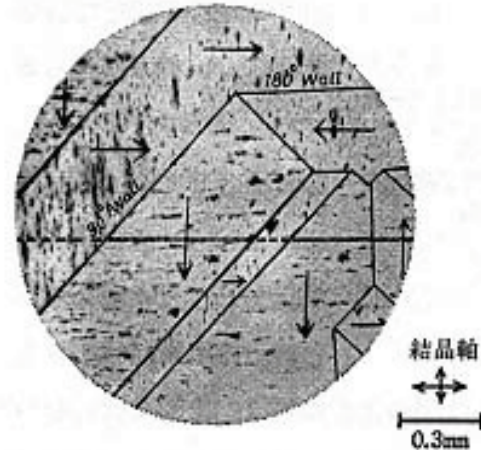
磁区 (domain) :

磁気双極子の集まりで、磁気モーメントが一方向にそろっている小さな領域

磁壁 (domain wall) :

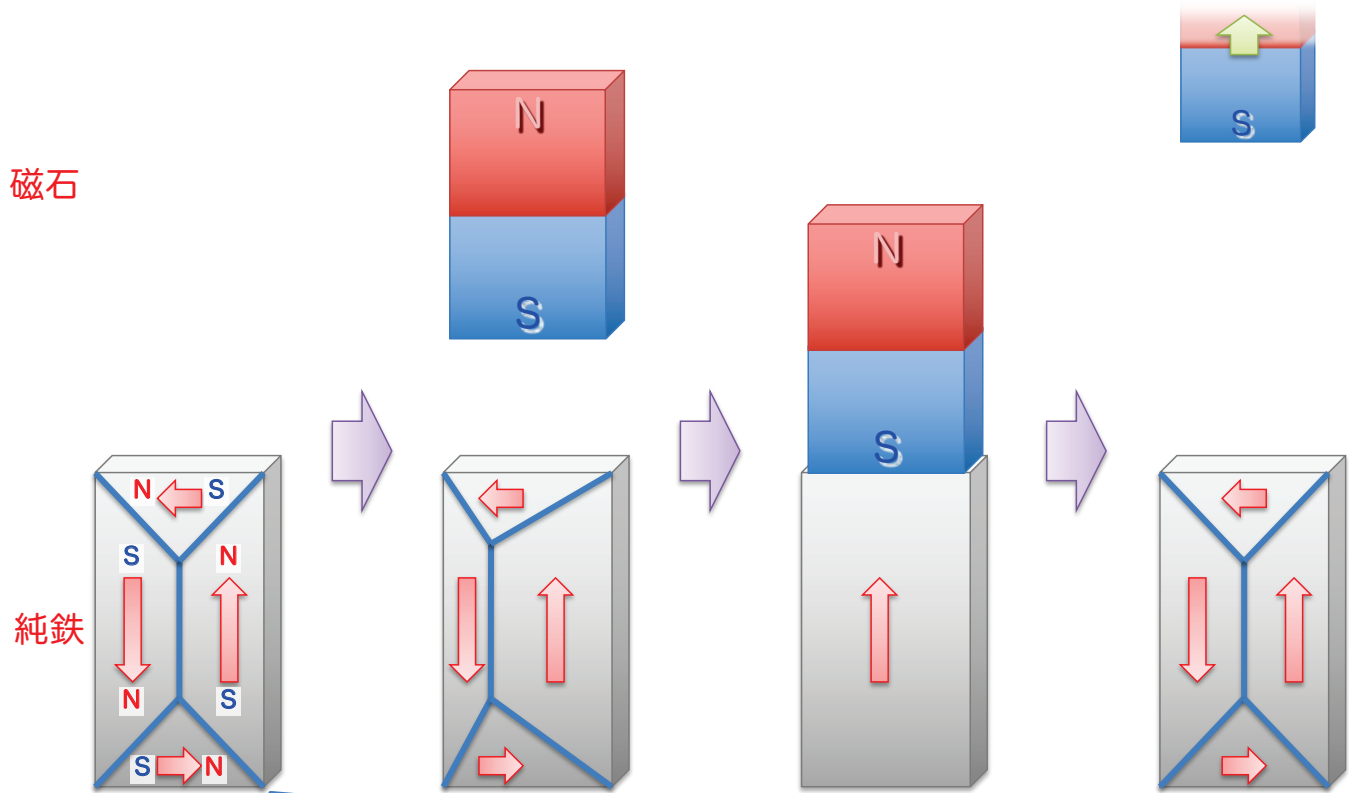
磁区と磁区の境界

90° 磁壁、180° 磁壁

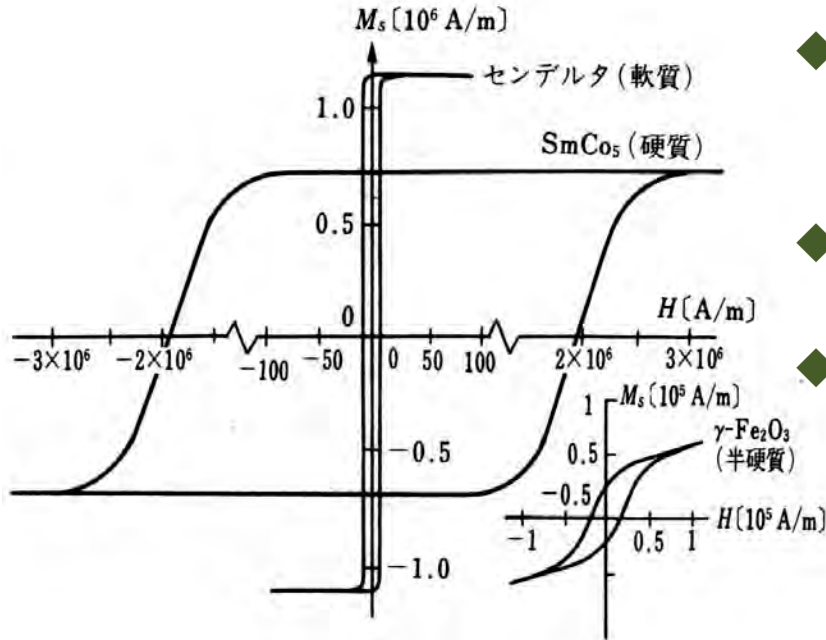


珪素鋼(4%SiFe)の磁区像のビッターパターン

# 純鉄の磁化過程と磁壁移動



# 保磁力 $H_c$ による強磁性体の分類



- ◆  $H_c$ 小：ソフト磁性体  
磁気ヘッド、変圧器鉄心、  
磁気シールド
- ◆  $H_c$ 中：セミハード磁性体  
磁気記録媒体
- ◆  $H_c$ 大：ハード磁性体  
永久磁石

10e=80A/m

1T=8x10<sup>5</sup>A/m

→10<sup>5</sup>A/m=1.3kG

佐藤編著：応用物性(オーム社)より

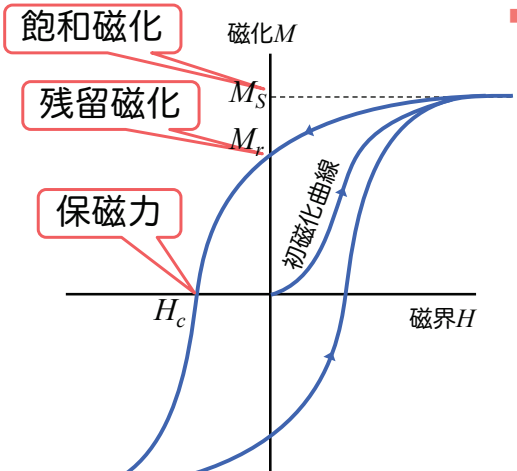
# 保磁力

永久磁石の3大特性：

- ◆ 飽和磁化(M) → 強い磁場を生み出す
- ◆ 保磁力(Hc) [磁気異方性(K<sub>u</sub>)] → 磁化反転のしにくさ
- ◆ キュリー温度(T<sub>c</sub>) → 高温までの磁性

物質の性質

材料の特性



**保磁力**（「抗磁力」ともいう）

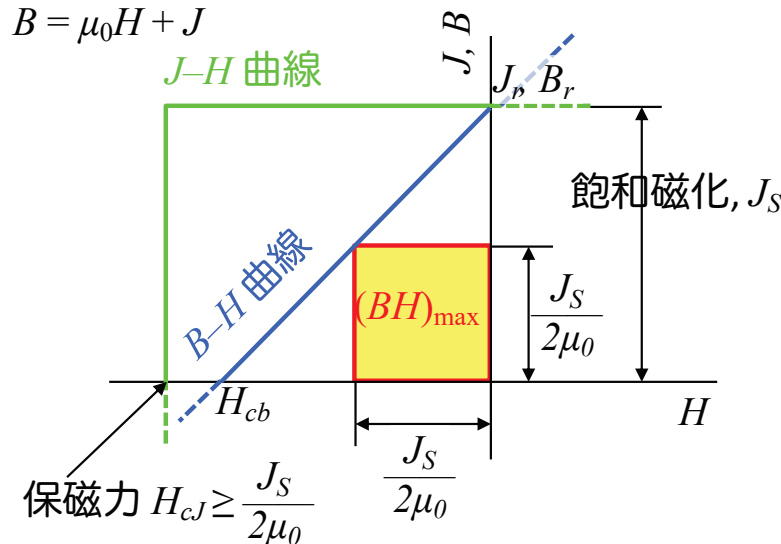
➡ 反対磁場や、磁気モーメントの熱揺らぎに対する磁化反転させない強さ。

理論最大値は磁気異方性の大きさに決まるが、材料の微細組織、結晶のひずみなど状態による、**材料の特性**。

高性能な磁性化合物が磁石となり得るかどうかが決まる。

# 最大エネルギー積（磁石の強さ）

磁石が持つエネルギーの大きさは、第3象限のB-H曲線上（B-H減磁曲線）の磁束密度 $B$ と磁場 $H$ の積に比例する。この最大値を**最大エネルギー積 $(BH)_{\max}$** と呼び、単位に $\text{kJ/m}^3$  (MGOe)を用いる。



最大エネルギー積の理論値

→飽和磁化の値で決まる。

$$(BH)_{\max(\text{theo})} = \frac{J_S^2}{4\mu_0}$$

保磁力の理論値 = 異方性磁場  $H_A$

→磁気異方性の値で決まる。

$$H_A = \frac{2K_u}{J_S} \quad K_u : \text{結晶磁気異方性定数}$$

$J$ - $H$  曲線,  $B$ - $H$  曲線の第3象限の模式図

実際の材料として最大エネルギー積は、**飽和磁化（残留磁化）**と**保磁力**の大きさに依存。



# 強磁性金属・化合物の磁性

	crystal structure	Tc (°C)	J <sub>s</sub> (T)	K <sub>1</sub> (MJ/m <sup>3</sup> )	$\kappa = \sqrt{(K_1 \mu_0 J_s^2)}$	J <sub>s</sub> <sup>2</sup> /4μ <sub>0</sub> (kJ/m <sup>3</sup> )
<b>Fe</b>	<b>bcc</b>	<b>771</b>	<b>2.15</b>	<b>0.048</b>	<b>0.12</b>	-
FeCo	B2	937	2.45	0.2	0.06	-
<b>Fe<sub>16</sub>N<sub>2</sub></b>	<b>tetragoal</b>	<b>537</b>	<b>2.41</b>	<b>1</b>	<b>0.43</b>	-
CoPt	L1 <sub>0</sub>	567	1.01	4.9	2.47	199
FePt	L1 <sub>0</sub>	477	1.43	6.6	2.02	405
FePd	L1 <sub>0</sub>	476	1.38	1.8	1.1	381
MnAl	L1 <sub>0</sub>	377	0.75	1.7	1.95	95
Co <sub>3</sub> Pt	L1 <sub>2</sub>	917	1.4	0.6	0.71	-
Ni <sub>3</sub> Mn	L1 <sub>2</sub>	477	1	0.03	0.19	-
MnBi	B81 (hcp)	360	0.72	0.9	1.5	103
<b>SmCo<sub>5</sub></b>	<b>hexagonal</b>	<b>747</b>	<b>1.08</b>	<b>17.2</b>	<b>4.3</b>	<b>219</b>
<b>Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B</b>	<b>tetragonal</b>	<b>315</b>	<b>1.61</b>	<b>4.9</b>	<b>1.54</b>	<b>516</b>
Dy <sub>2</sub> Fe <sub>14</sub> B	tetragonal	598	0.72	15	>5	103
<b>Sm<sub>2</sub>Fe<sub>17</sub>N<sub>3</sub></b>	<b>rhombo</b>	<b>476</b>	<b>1.54</b>	<b>8.6</b>	<b>2.13</b>	<b>472</b>

キュリー温度 飽和磁化 磁気異方性 最大エネルギー積の理論値

# 磁石の製造工程（ネオジム焼結磁石）



# 永久磁石の世界市場

## 永久磁石の世界市場

207億4000万ドル(2019) → 396億7000万ドル(2027予測)

## 用途の拡大

- 電気自動車 (EV, HEV, FCV) 用モータ
  - 環境対応自動車の需要拡大
- 電子機器 (コンピューター、ラップトップ、スマートフォン、テレビ、など)
  - 高解像度テレビ (4K, 8K)の製造拡大

永久磁石の応用市場



磁心材料の応用市場

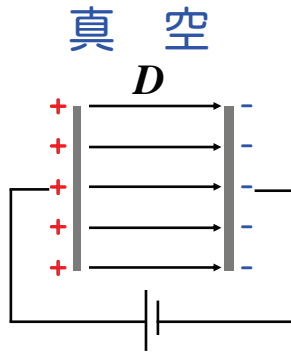
新しい、高性能磁石開発に大きな期待

# 環境調和材料材料： 誘電体材料

# 誘電分極

## DIELECTRIC POLARIZATION

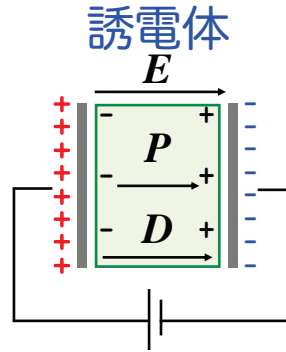
誘電現象：物体に対し外部から電場をかけたとき、(大小の差はあれ) ほとんどの物体では表面に誘導された電荷 (誘導分極) が 現れる「電場に対する応答」。



$$D = \epsilon_0 E$$

$D$ : 電束密度

$E$ : 電場 (電界)



$$D = \epsilon_0 E + P$$

$$P = \epsilon_0 \chi E$$

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

$$= \epsilon_r \epsilon_0 E$$

電気感受率:  $\chi$

分極:  $P$

強誘電体のように  
線形関係にない場合  
は成立しない

比誘電率:  $\epsilon_r$

# 誘電材料

## Dielectric Materials

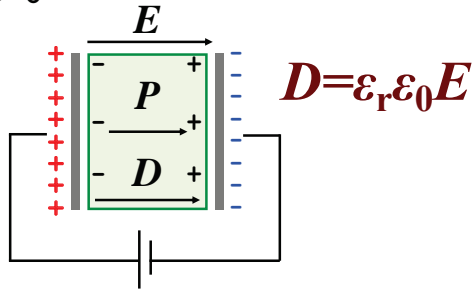
各種材料・物質の比誘電率,  $\epsilon_r$

### 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

一般に、

誘電率の小さい材料を絶縁材料  
誘電率の大きな材料を誘電材料  
と称す。

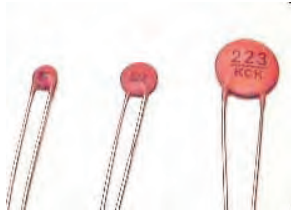


	物質名	$\epsilon_r$
気体	空気@0°C	1.00059
	水素@0度	1.000264
	二酸化炭素	1.000985
液体	水	81
	エタノール	25.8
	アセトン	26.6
固体	ポリエチレン	2.2-2.4
	氷	4.2
	雲母	5.6-6.0
	石英ガラス(SiO <sub>2</sub> )	4.0
	シリコン	11.8
	酸化チタン	80-160
	チタン酸バリウム	1200-3000

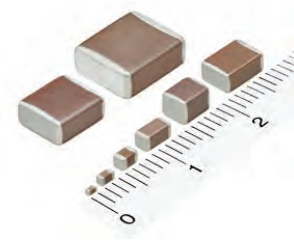
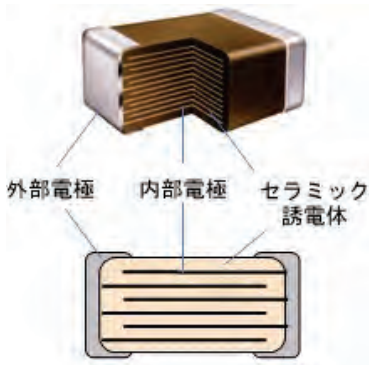
# コンデンサー

## CAPACITOR

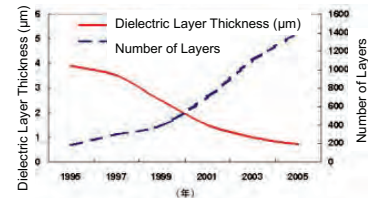
### 種々のコンデンサー



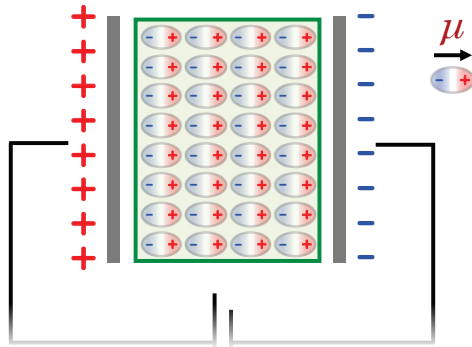
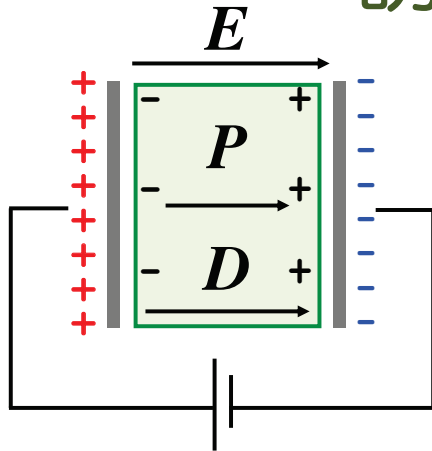
### 積層セラミックスコンデンサー Multilayer Ceramic Capacitor (MLCC)



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



# 誘電分極の機構



誘電体内の様子

$\mu$  : 電気双極子モーメント

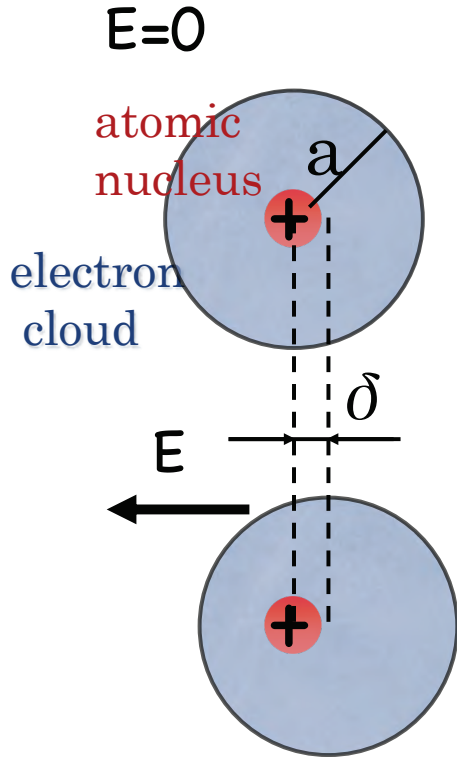
誘電分極：

正負電荷の対（電気双極子）が材料内に一様に分布しており、この正負電荷が変位している状態。

1. 電子分極 ( $\sim 10^{15}$  Hz)かなり速い  
原子・分子内の電子が外部電場に引っ張られ、その位置がズれる事で分極する
2. イオン分極 ( $\sim 10^{13}$  Hz)速い  
固体中のイオンが電場によってズレ、分極を生じる
3. 配向分極 ( $10^6 - 10^9$  Hz)遅め。  
双極子をもつ分子が電場により回転し、分極を生じる
4. 空間電荷分極 ( $\sim 10^4$  Hz)かなり遅い  
イオンが大きく移動し分布を変え、分極を生じる



# ~電子分極 (ELECTRONIC POLARIZATION) ~



電気双極子モーメント:  $\mu_e$

$$\mu_e = \alpha_e E$$

電子分極率:  $\alpha_e$

$$\alpha_e = 4\pi \epsilon_0 a^3$$

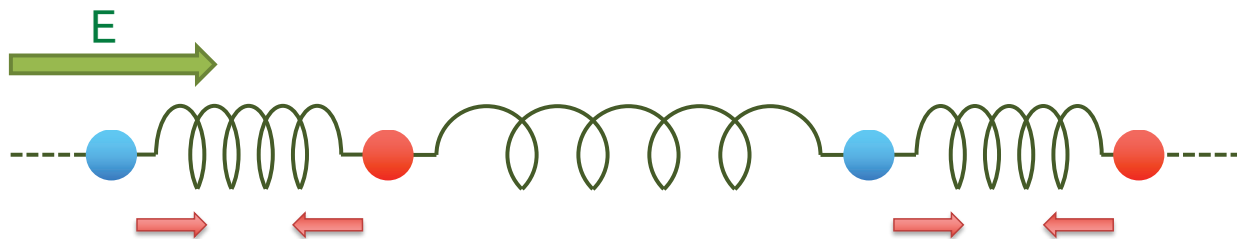
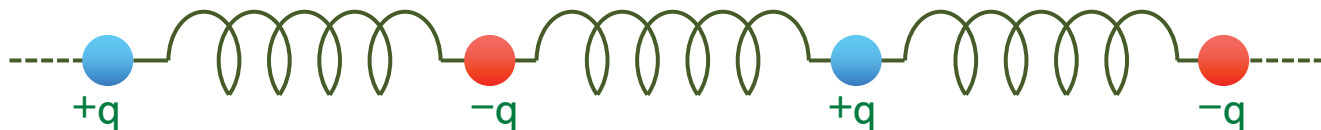
⇒原子体積に比例

単原子イオンのイオン分極率( $10^{-24} \text{ cm}^3$ )

Li <sup>+1</sup>	Be <sup>+2</sup>	B <sup>+3</sup>	C <sup>+4</sup>	O <sup>-2</sup>	F <sup>-1</sup>	Ne
0.029	0.008	0.003	0.0013	3.88	1.04	0.390
Na <sup>+1</sup>	Mg <sup>+2</sup>	Al <sup>+3</sup>	Si <sup>+4</sup>	S <sup>-2</sup>	Cl <sup>-1</sup>	Ar
0.179	0.094	0.052	0.0165	10.2	3.66	1.62
K <sup>+1</sup>	Ca <sup>+2</sup>	Sc <sup>+3</sup>	Ti <sup>+4</sup>	Se <sup>-2</sup>	Br <sup>-1</sup>	Kr
0.83	0.47	0.286	0.189	10.5	4.77	2.46
Rb <sup>+1</sup>	Sr <sup>+2</sup>	Y <sup>+3</sup>	Zr <sup>+4</sup>	Te <sup>-2</sup>	I <sup>-1</sup>	Xe
1.40	0.86	0.55	0.37	14.0	7.10	3.99
Cs <sup>+1</sup>	Ba <sup>+2</sup>	La <sup>+3</sup>				
2.42	1.55	1.04				

Pauling's values

## ～イオン分極 (IONIC POLARIZATION)～

電場ゼロ ( $E=0$ )電気双極子モーメント:  $\mu_i$ 

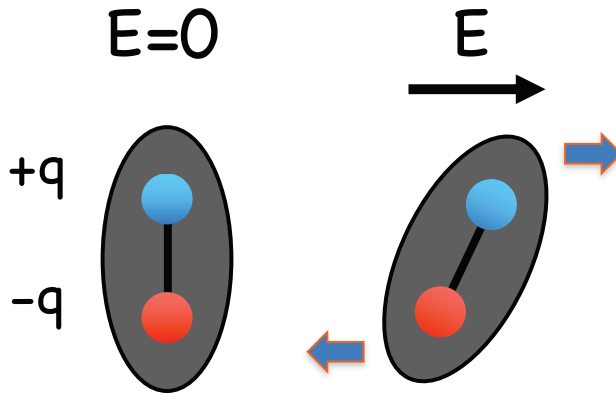
$$\mu_i = \alpha_i E$$

電子分極率:  $\alpha_i$

## ~配向分極 (DIPOLAR POLARIZATION) ~

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  $\mu$  をもつ

- ◆  $\mu$  は熱運動により無秩序な方向分布
- ◆ 電界  $E$  により配向



電場によって配向する

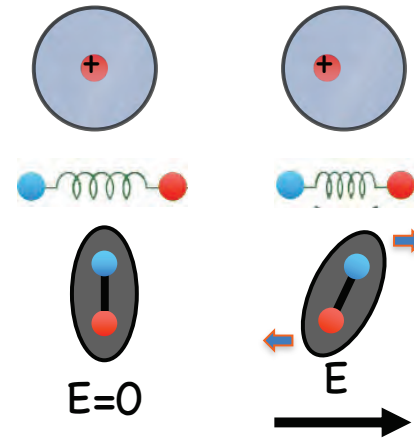
双極子モーメント  $\mu$  と電場  $E$  は古典統計力学的 (Boltzmann 分布則) に整理される

$$\alpha_p = \frac{\mu}{3kT}$$

⇒ 温度が高いほど、熱振動により分極はそろいにくい

# 分極の機構 (ORIGINS OF POLARIZATION)

- 電子分極,  $\alpha_e$
- イオン分極,  $\alpha_i$ 
  - Ionic Crystals, NaCl
- 配向分極,  $\alpha_o$ 
  - Polar Molecules, HCl
- 空間電荷分極,  $\alpha_s$



各分極機構による分極率の総和：

$$\alpha = \alpha_e + \alpha_i + \alpha_o + (\alpha_s)$$

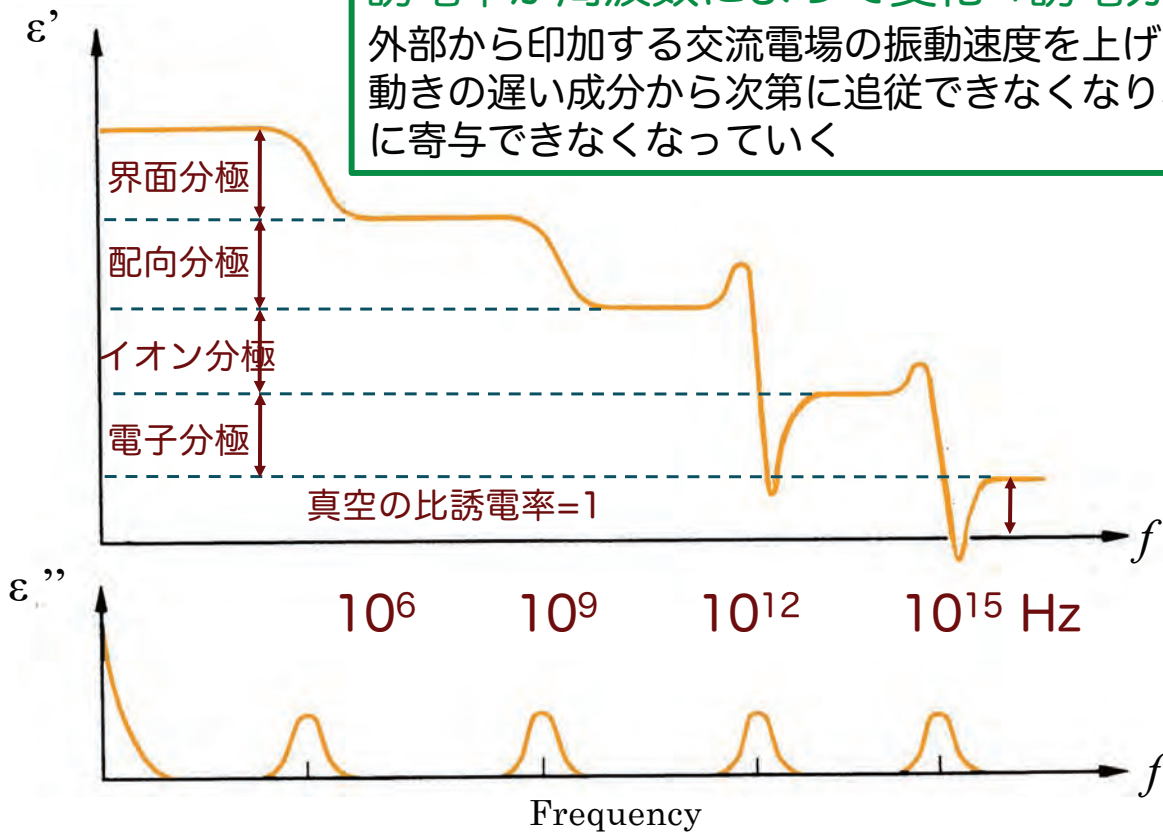
$$\alpha = \alpha_e + \alpha_i + \frac{\mu}{3kT}$$

# 誘電分散

## DIELECTRIC DISPERSION

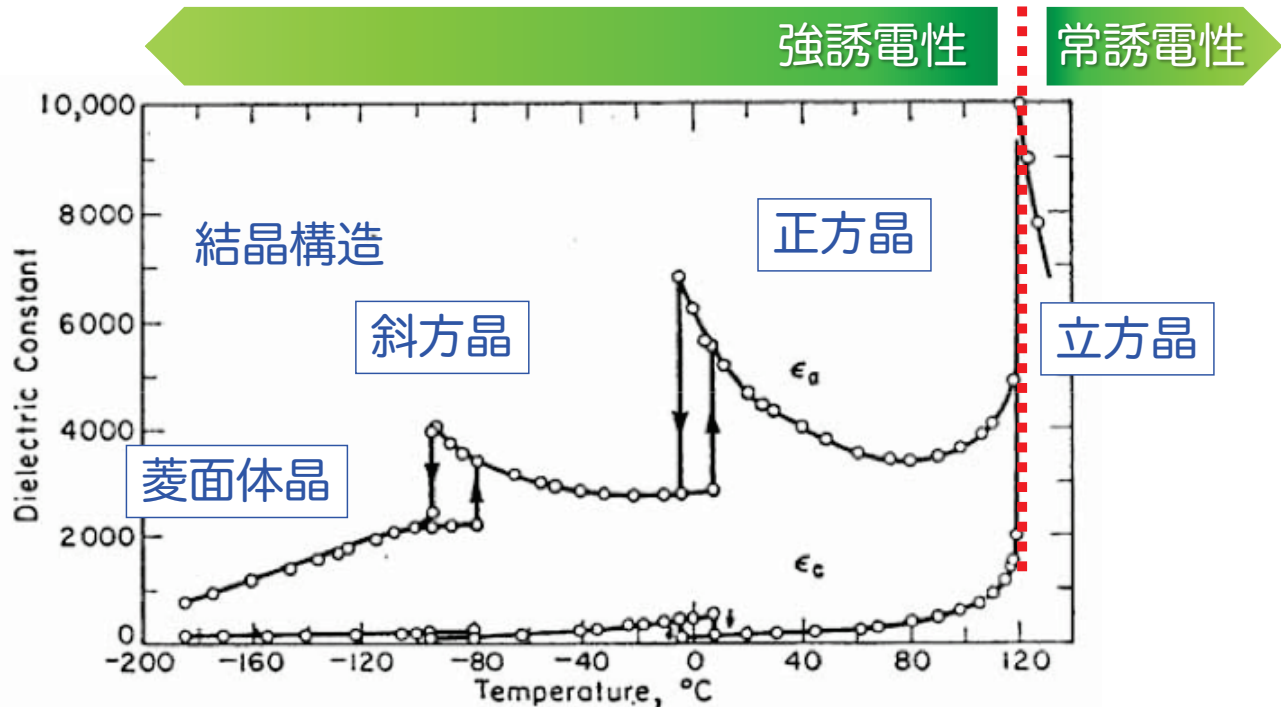
誘電率が周波数によって変化⇒誘電分散

外部から印加する交流電場の振動速度を上げていくと、動きの遅い成分から次第に追従できなくなり、誘電率に寄与できなくなっていく





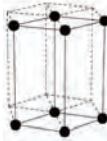

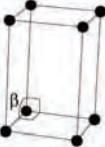

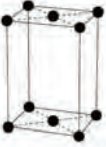

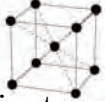
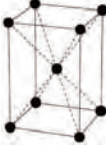
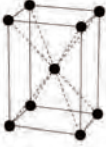

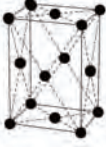
# 固体物質の結晶構造と誘電性

誘電体の結晶構造と誘電特性には大きな関係がある。  
特に構造におけるイオンの配向性が分極の状態に強く関与



チタン酸バリウム (BaTiO<sub>3</sub>) の結晶構造と誘電率の温度依存性

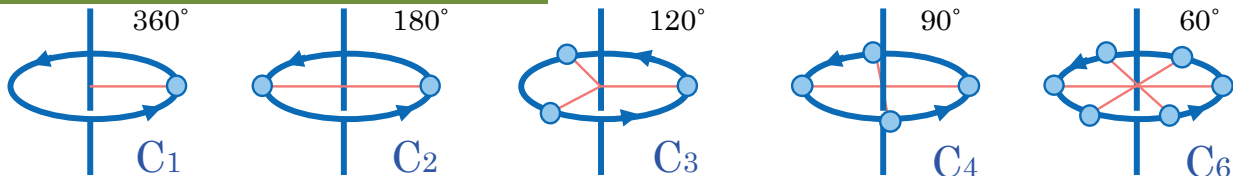
# 7つの晶系と14のブラベー格子

	cubic	tetragonal	hexagonal rhombohedral (trigonal)	orthorhombic	monoclinic	triclinic
<b>P</b> Primitive						
<b>C</b> Base-centered						
<b>I</b> Innenzentrierte						
<b>F</b> Face-centered						
	立方晶	正方晶	六方晶	菱面体晶	斜方晶	单斜晶
						三斜晶

# 対象操作 (SYMMETRY OPERATIONS)

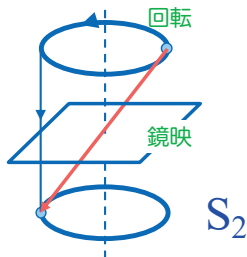
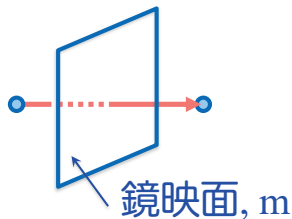
回転 (rotation),  $C_n$  ( $n=1, 2, 3, 4, 6$ )

結晶構造には13種類の対称要素がある。



鏡映 (reflection),  $m$  (or  $\sigma$ )

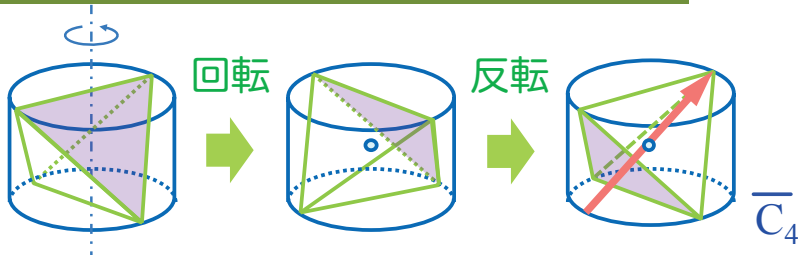
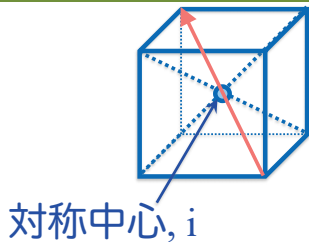
回映 (Rotatory reflection),  $S_n$  ( $n=3, 4, 6$ )



- $S_1 = m$
- $S_2 = i$
- $S_3 = C_3 + m$
- $S_6 = C_6 + i$

反転 (inversion),  $i$

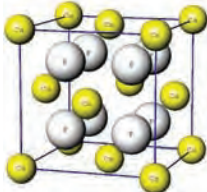
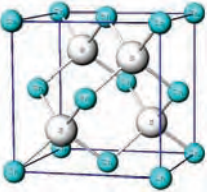
回反 (Rotatory inversion),  $C_n$  ( $n=3, 4, 6$ )





# 立方晶の晶族

結晶に現れる対称性は、**対称要素の組合せ32種類**であり、これを**晶族**（または**点群**）という。点群はSchönfliesの記号、あるいはHermann-Maugumの記号で表す。

	Schönflies Notation	Hermann -Maugum	
	$O_h$	$m\bar{3}m$	 <p>CaF<sub>2</sub> <math>F_{m\bar{3}m}</math></p>
Cubic	$O$	$4\bar{3}2$	
	$T_d$	$\bar{4}3m$	 <p>ZnS <math>P_{4\bar{3}m}</math></p>
	$T_h$	$m\bar{3}$	
	$T$	$2\bar{3}$	

周期性をもつ隣の単位格子への平行移動を考えに入れると、新しい対称要素の螺旋軸と映進面がある。

結晶系、点群、ブラベ格子、螺旋軸、映進面の結晶構造において許される組合せは**230種**に限定され、**空間群**とよばれる。

# 誘電体の性質と結晶の対称性

## 誘電体

**圧電体** 中心対称性を持たない20晶族(0族(432群)を除く)

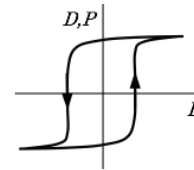
応力を加えることにより分極（および電圧）が生じる  
逆に電圧を印加することで応力および変形が生じる

**焦電体** 極性ベクトルを持つ10晶族(自発分極を有する)

自発分極を有する。  
(微小な) 温度変化に応じて分極（および電圧）が生じる

## 強誘電体

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  
分極が外部電場に対するヒステリシス特性を示す



# 圧電性・焦電性と結晶の対称性 (晶族)

極性	対称中心	晶族数	結晶形										
			立方		六方		正方		菱面体 (三方)		斜方	単斜	三斜
非極性結晶 (22)	有 (11)	11	$O_h$	$T_h$	$D_{6h}$	$C_{6h}$	$D_{4h}$	$C_{4h}$	$D_{3d}$	$C_{3i}$	$D_{2h}$	$C_{2h}$	$C_i$
	無 (21)	22	$O$ $T_d$	$T$	$D_6$ $D_{3h}$	$C_{3h}$	$D_4$ $D_{2d}$	$S_4$	$D_3$		$D_2$		
極性結晶 (10)		10			$C_{6v}$	$C_6$	$C_{4v}$	$C_4$	$C_{3v}$	$C_3$	$C_{2v}$	$C_2$ $C_6$	$C_1$

圧電性結晶

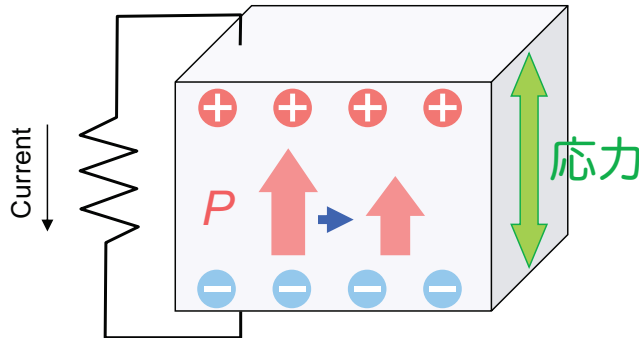
焦電性結晶

➡ 極性ベクトルを持つ

# 圧電性と圧電体

## PIEZOELECTRICITY AND PIEZOELECTRIC MATERIAL

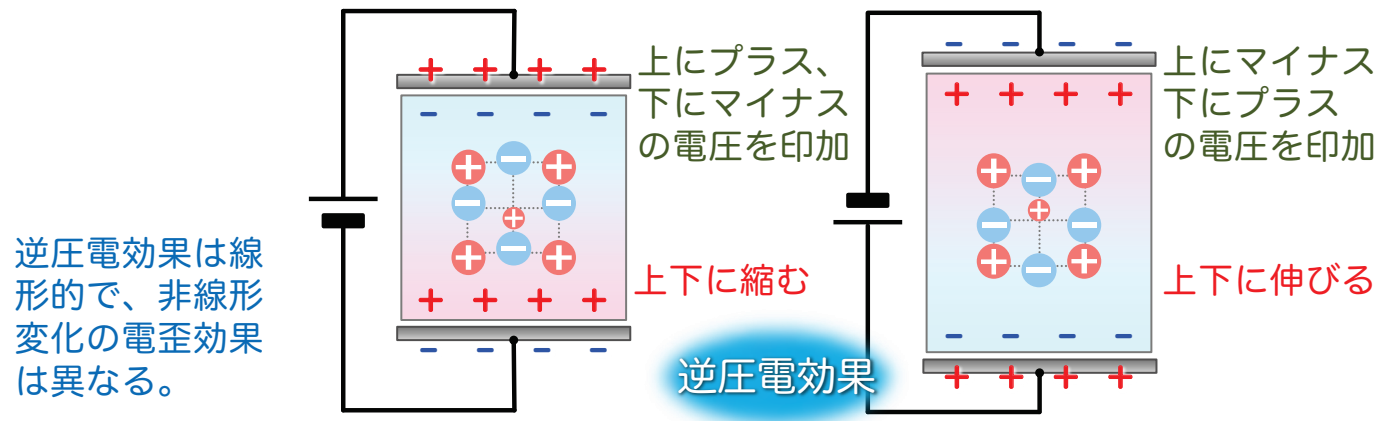
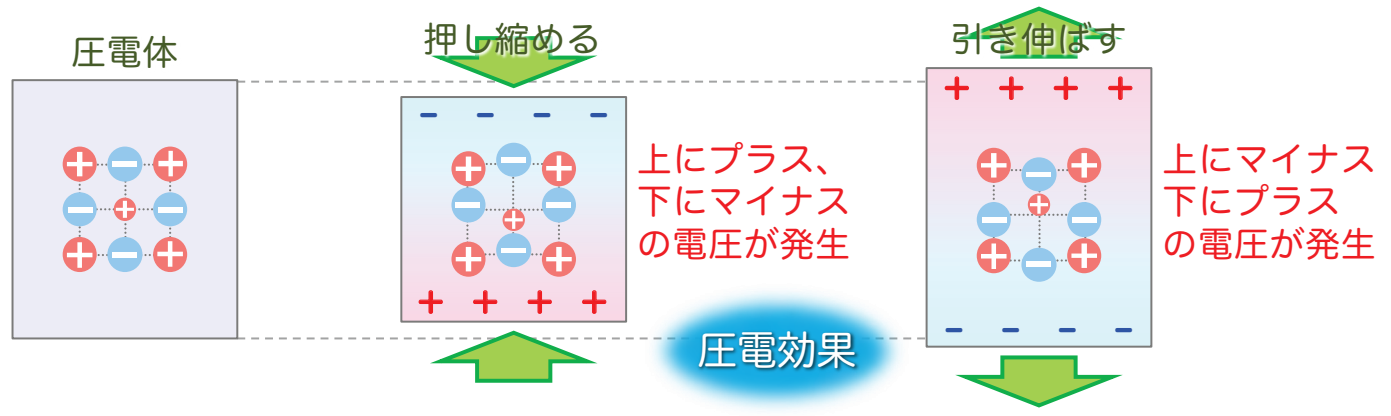
圧電性 (Piezoelectricity) : 圧力 (力) を加えると、  
圧力に比例した分極 (表面電荷) が現れる現象



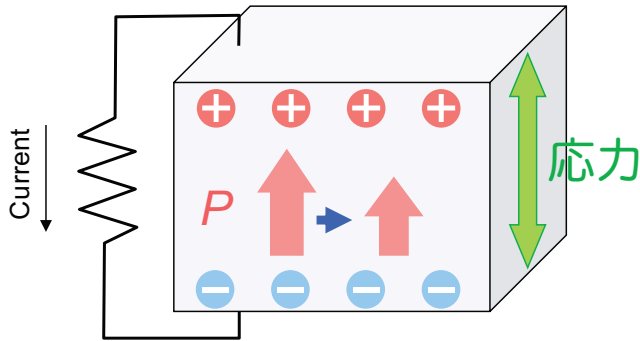
Notice : 圧電効果は  
応力に対する線形効果であり、非線形の  
電歪とは異なる。

結晶構造に中心対称性をもたないため、応力 (ひずみ)  
により結晶における電荷移動が起こる

# 圧電体の変形と電圧の関係



# 圧電効果の線形性



Relationship of polarization  
and piezoelectric strain

$$P = \epsilon_0 \epsilon(X) E$$

圧電基本公式：

$$x = c(E)X + dE$$

$$P = dX + \epsilon_0 \epsilon(X)E$$

external  $E=0$   
 $P=dX$

$$E = \frac{P}{\epsilon_0 \epsilon(X)} = \frac{dX}{\epsilon_0 \epsilon(X)}$$

Therefore  $g = \frac{d}{\epsilon_0 \epsilon_r}$

圧電効果の線形性

圧電歪み定数:  $d$

$$x = dE$$

印加電界  $E$ ,  
誘起歪み:  $x$

アクチュエーターとして重要な関係式

圧電電圧定数:  $g$

$$E = gX$$

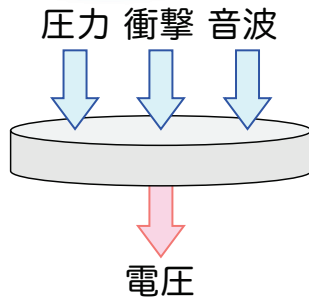
印加応力:  $X$ ,  
誘起電圧:  $E$

センサーとして重要な関係式

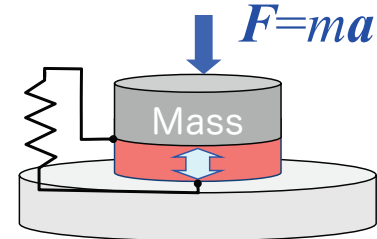
If external  $X=0$

# 圧電体デバイス

圧電効果 機械エネルギー → 電気エネルギー

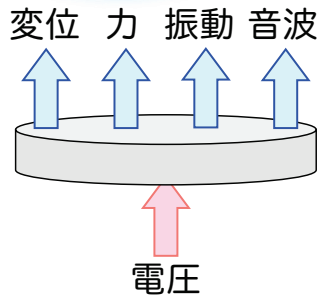


- ◆ カセンサ
- ◆ 圧力センサ
- ◆ 加速度センサ
- ◆ ジャイロセンサ
- ◆ 圧電式マイク

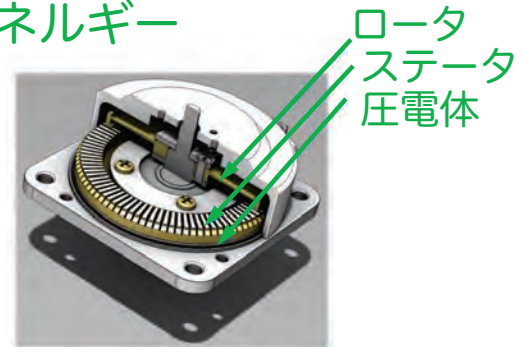


加速度センサの原理

逆圧電効果 電気エネルギー → 機械エネルギー

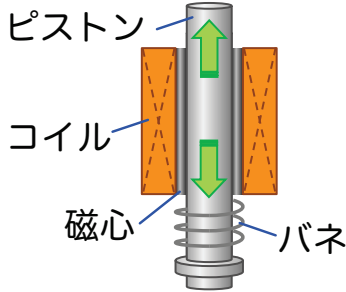
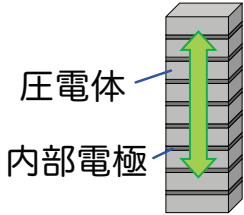


- ◆ 圧電アクチュエータ
- ◆ 超音波モータ
- ◆ 超音波振動子
- ◆ 圧電スピーカ



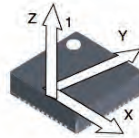
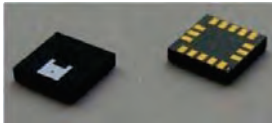
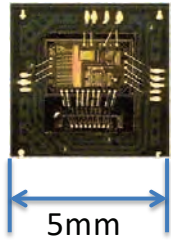
超音波モータの構造

# アクチュエータの性能比較

	電磁式		圧電式	
	 <p>ピストン コイル 磁心 バネ</p>		 <p>圧電体 内部電極</p>	
駆動方式	電磁力による関節駆動		逆圧電効果による個体変形	
変位量	○		×	1/10~1/100
発生力	×		○	固体の剛性利用
変位精度	×	>0.1mm	○	0.01mm~0.1mm
応答速度	×	>1msec.	○	0.1~1msec.
エネルギー効率	×	巻き線損失	○	巻き線なし
騒音	×	ピストン摺動音	○	ピストンなし
比例制御	×	ON/OFF制御	○	電圧比例特性
駆動電圧	○		×	数100V/mm

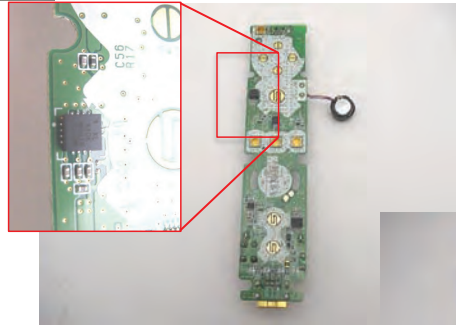


# 圧電体を使った加速度センサ



DIRECTIONS OF THE  
DETECTABLE  
ACCELERATIONS

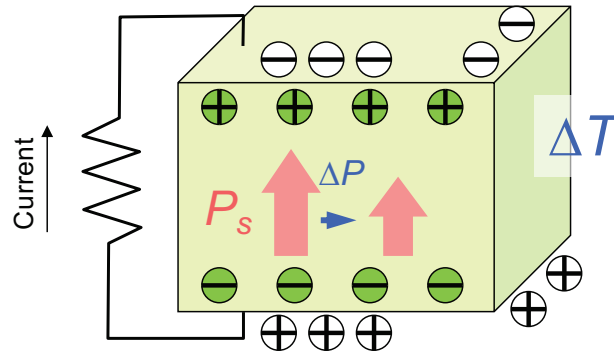
加速メータ素子



# 焦電性と自発分極

## PYOELECTRICITY AND SPONTANEOUS POLARIZATION

焦電性：自発分極が温度に依存



$$\Delta P_i = p_i \Delta T$$

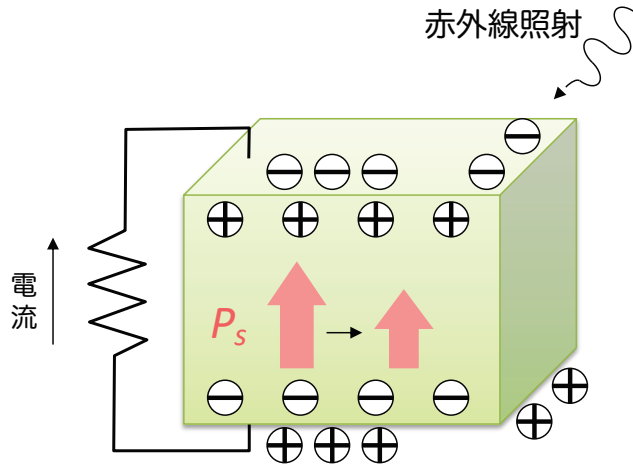
焦電係数：  
pyroelectric coefficient

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



結晶における自発分極の起源：極性（ベクトル）

# 焦電センサー

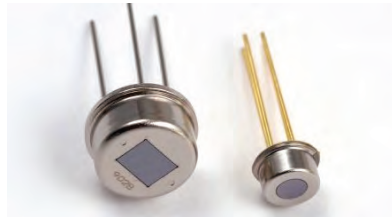


焦電センサーの原理

## 焦電型センサーの特徴

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

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)



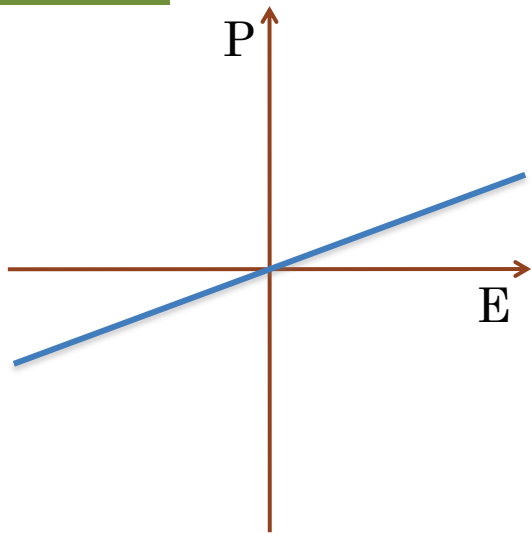
焦電センサー素子



人感センサー

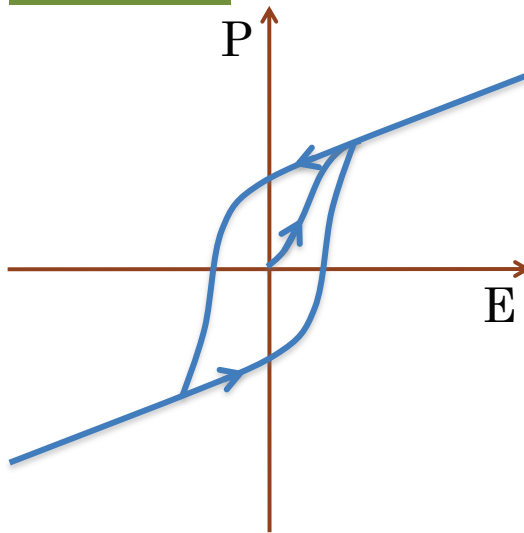
# 強誘電性: 分極反転(分極スイッチング)

常誘電性



線形的な応答

強誘電性



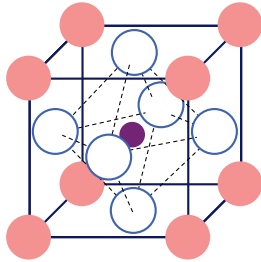
電場に対して非線形な応答  
⇒ ヒステレシス曲線

# 強誘電体の相転移

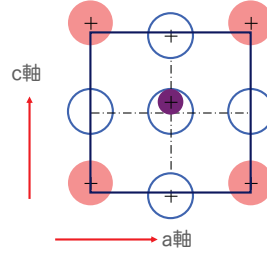
## 変位型強誘電体相転移

## Displacive Type

常誘電相( $O_h$ )



強誘電相( $C_{4v}$ )

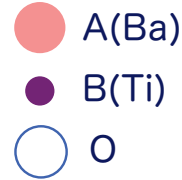


自発分極変位

(010) 面からの投影図

ペロブスカイト酸化物,  $ABO_3$

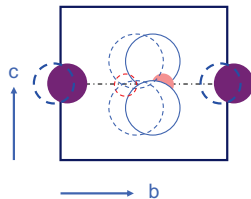
ex)  $BaTiO_3$ ,  $PbTiO_3$



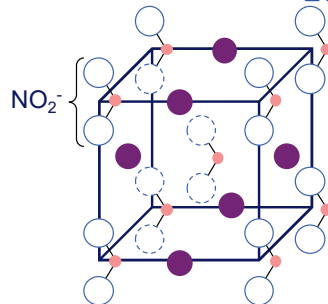
## 規則不規則型強誘電体相転移 (秩序無秩序型)

## Order-Disorder Type

常誘電相( $D_{2h}$ )



強誘電相( $C_{2v}$ )



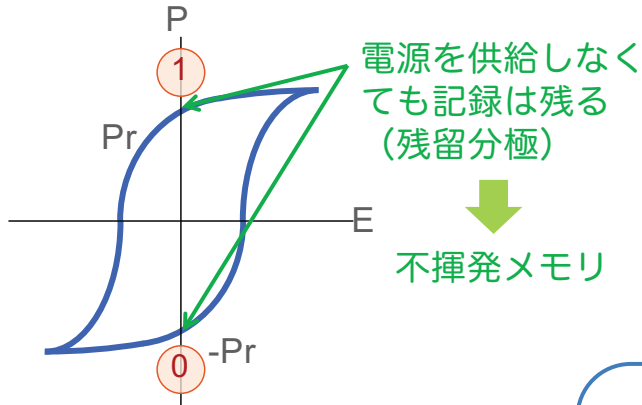
亜硝酸ナトリウム,  $NaNO_2$



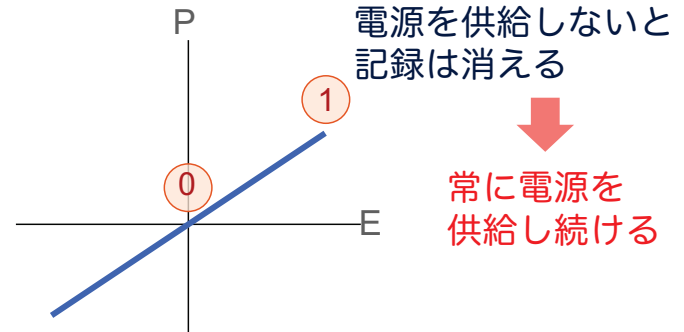
# 強誘電体メモリデバイス

## FERROELECTRIC MEMORY DEVICES

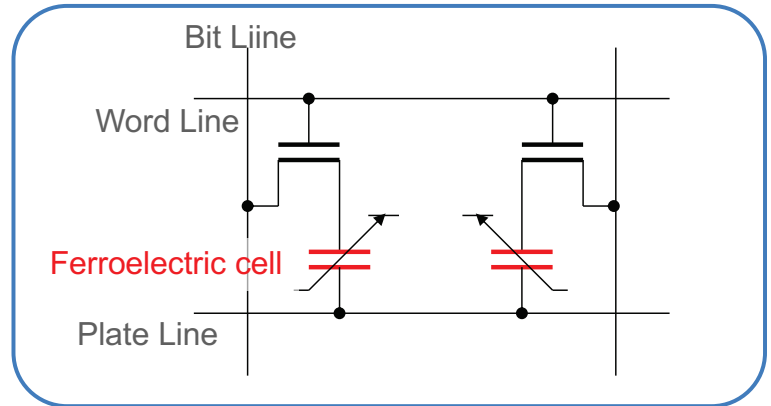
### 強誘電体メモリ (FeRAM)



### 従来のメモリ 常誘電体(DRAM)



- ◆ 低電力なメモリ
- ◆ DRAMに似た構造
- ◆ 読み出し時間もDRAMに迫る速度
- ◆ 記録が不揮発  
→PCの立ち上げ時間短縮



# DRAMと不揮発メモリとの比較

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

# FeRAMの応用例



ICカードの低消費電力FeRAM

## オーディオ、ゲーム

レジュームデータ

- ①電源 OFF 直前のデータの書き込み
- ②電源立ち上げ後のデータの読出し



## OA 機器

カウンタ、印刷管理  
通信履歴管理



## デジタルカメラ

初期値設定、補正值設定、  
故障履歴



## SSD、通信機器

ログ管理



## 金融端末、発券機

取引履歴  
バックアップ



## 計測機器、分析装置

パラメータ設定、  
補正值設定、ログ



## 映像装置

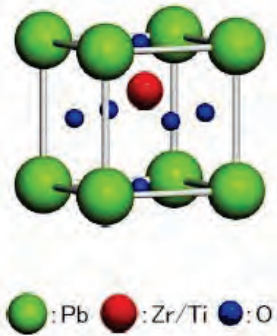
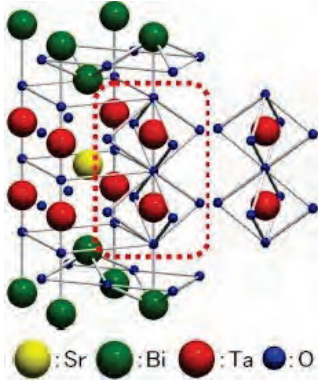
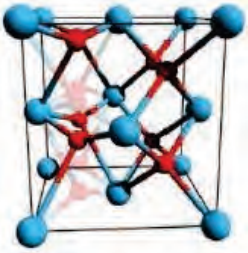
セットデータ



期待されるFeRAMの応用用途



# 強誘電体メモリ材料の比較

強誘電体	PZT [Pb(Zr, Ti)O <sub>3</sub> ] (チタン酸ジルコン酸鉛)	SBT [SrBi <sub>2</sub> Ta <sub>2</sub> O <sub>9</sub> ] (タンタル酸ビスマス酸ストロンチウム)	HfO <sub>2</sub> (酸化ハフニウム)
結晶構造	 <p>●: Pb ●: Zr/Ti ●: O</p>	 <p>●: Sr ●: Bi ●: Ta ●: O</p>	 <p>● O ● Hf</p>
メリット	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 低温プロセスが可能</li> <li>• 量産性が高い (富士通で量産中)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 反転電圧が1.8V以下</li> <li>• 電圧が低い為、疲労特性が向上する。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 膜厚20nm以下でも強誘電性を失わない。</li> <li>• 超微細化が可能で多値メモリの可能性</li> </ul>
デメリット	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 反転電圧がやや高い (メリット：データ化けしにくい)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• QSWが小さい</li> <li>• プロセスが高温</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 書き換え寿命の課題が大きい</li> <li>• 微細化機構など基礎的に未解明課題多い</li> </ul>

# まとめ

## 永久磁石材料

- ◆ 高効率なマグネットモータへの置換えは省エネルギーへの鍵  
→国内消費電力の約半分がモータによる。(うち70%が誘導モータ)
- ◆ 磁性材料には、「磁石材料」や「磁心材料」などがある。
- ◆ 磁石材料の開発のために、高性能な磁性材料(磁性化合物)の開発が必要であるが、さらに材料として保磁力が発現するかによる。

## 誘電体材料

- ◆ 誘電材料には、更に得意な性質をもった「圧電体」「焦電体」「強誘電体」などがあり、その機能が応用されている。
- ◆ 「圧電体」は主に、機械エネルギー⇔電気エネルギーの変換機能を利用して、アクチュエータやセンサなどに利用されている。  
微小発電への期待→次回解説
- ◆ 「焦電体」は熱エネルギー⇔電気エネルギー変換能  
→人感センサなど
- ◆ 「強誘電体」外部電場による分極スイッチング →不揮発メモリ