

以下の問題について、途中経過も含めて解答を書け。必要に応じて図等を加え、対応した説明と共に解答すること。図を用いるよう指示されている場合は、必ず図を描いて説明すること。解答は講義で紹介した範囲の説明で構わないが、もちろんより深い理解の立場から解答しても構わない。

(1) (ア)～(カ)に当てはまる用語を選択肢から選び、正しい文を完成させ「(ア) 位相」のように解答せよ。(12 点)

結晶学や分子分光学では対称性に対する理解が重要である。対称性が成り立っている場合、ある ア を行う前後で形状や配列に変化が見られない。例えばある直線を軸として イ させることで生じる対称性を イ 対称性と言い、このように イ させることを一般に対称 ア、イ に用いた線のことを一般に対称 ウ と呼ぶ。ベンゼン分子では最大の値を持つ イ 軸は、エ 回 イ 軸である。結晶のように原子やイオン、分子などが周期的に配列している場合には空間的な対称性が成り立ち、特定の方向に 1 周期分ずらしたときに成り立つ対称性を オ 対称性と言う。実際に得られる結晶はこれらの対称性の組み合わせにより特徴づけることができ、特定の空間群に分類することができるが、この空間群の種類は カ 存在する。

用語の選択肢：1、2、3、4、5、6、7、8、9、10、位相、映進、回転、回反、鏡映、群、恒等、振幅、操作、単位、波長、反転、並進、面間、面内、要素、らせん、限られた数だけ、無数に

「結晶学や分子分光学では対称性に対する理解が重要である。対称性が成り立っている場合、ある (ア) 操作 を行う前後で形状や配列に変化が見られない。例えばある直線を軸として (イ) 回転 させることで生じる対称性を (イ) 回転対称性 と言い、このように (イ) 回転 させることを一般に対称 (ア) 操作、(イ) 回転 に用いた線のことを一般に対称 (ウ) 要素 と呼ぶ。ベンゼン分子では最大の値を持つ (イ) 回転軸 は (エ) 6 回 (イ) 回転軸 である。結晶のように原子やイオン、分子などが周期的に配列している場合には空間的な対称性が成り立ち、特定の方向に 1 周期分ずらしたときに成り立つ対称性を (オ) 並進対称性 と言う。実際に得られる結晶はこれらの対称性の組み合わせにより特徴づけることができ、特定の空間群に分類することができるが、この空間群の種類は (カ) 限られた数だけ 存在する。

(ア) 操作、(イ) 回転、(ウ) 要素、(エ) 6、(オ) 並進、(カ) 限られた数だけ

(2) イオン結晶、共有結合性結晶、金属結晶、分子性結晶の伝導性は、一般的に金属的か半導体的か分類し、「金属的：イオン結晶」のように解答せよ。また半導体的な伝導性に分類されたものの中から具体的な化合物を挙げ、金属伝導性を付与する方法を説明せよ。(15 点)

金属的：金属結晶

半導体的：イオン結晶、共有結合性結晶、分子性結晶

共有結合性：ダイヤモンドへのホウ素ドーピングなど

イオン性：酸化物への金属ドーピングなど

分子性：有機物への臭素ドーピングや、ヨウ素の加圧など

- (3) 強磁性体における自発磁化とはどのような現象か説明せよ。また反強磁性体における磁気異方性はどのような特徴を持つか説明せよ。(15 点)

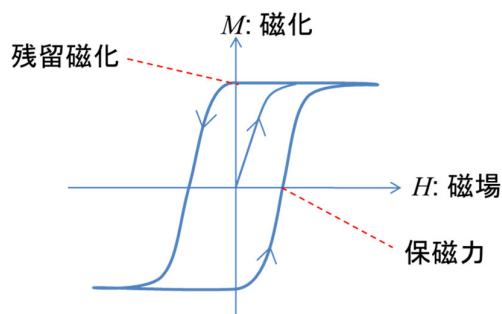
強磁性体に磁場をかけると、一般的には図のように磁場をかける向きに依存した磁化が発生し、ある磁場範囲では、同じ磁場に対して複数の磁化の値を取り得る双安定性を示す。この時、磁場 0 でもスピン同士の相互作用によって磁化が保持されており、これを自発磁化と呼ぶ。

より正確には、強磁性転移温度における磁化率は無限大に発散することから、磁化率の定義が

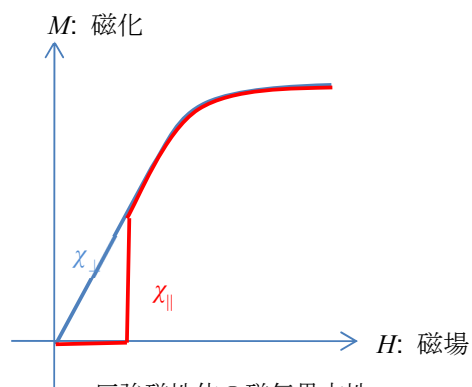
$$\chi = \left(\frac{\partial M}{\partial H} \right)_{H \rightarrow 0}$$

であることを考えると、無限小の磁場極限でも磁化が発生することを意味しており、これを外部磁場がなくても磁化を生じるという意味で自発磁化という。

一方、半強磁性体では、隣接スピンサイト同士の磁気モーメントは互いに反平行に配列するが、そのスピンと垂直に外部磁場をかけた際には、隣接スピンが共に外部磁場の方向に向こうとして、徐々に隣接スピン間の相対角度が小さくなり、結果的に磁場に比例した磁気モーメントを生じる。それゆえ、磁化率も右図 $\chi_{\perp}$ のように、外部磁場が小さいときは磁場に比例した磁化率を生じ、やがて飽和する。一方スピンと平行に磁場をかけると、不安定な配置のスピンは磁場の方向に向こうとするが、安定配置のスピンはそのままの方でエネルギー的に安定するため、それらの作用が相殺して、低磁場領域では磁気モーメントが生じず、磁化率も 0 のままととなる (右図 $\chi_{\parallel}$)。ところが、ある程度外部磁場が強くなると、反平行配置のスピンが共に磁場に垂直に転倒して、さらに磁場方向の成分を生じる、スピントロップ転移 (右図 $\chi_{\parallel}$ が急激に増加する部分) が起こる。その後は $\chi_{\perp}$ と同様の挙動を示す。このように半強磁性体のスピンの整列している向きに対して、外部磁場を垂直にかけるか平行にかけるかによって磁化率の挙動が異なる現象を半強磁性体における磁気異方性という。



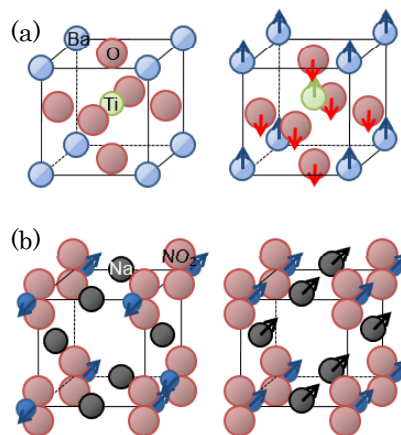
強磁性体の磁気ヒステリシス



反強磁性体の磁気異方性

- (4) 強誘電性を示す 2 種類の機構を各々説明し、そのうちのどちらがより高い周波数の振動電場に応答するか、理由と共に説明せよ。(15 点)

酸化物などで、陽イオンと陰イオンの重心位置がずれて生じる両イオン間の分極が整列することによる変位型と、永久双極子モーメントを持つ分子が配向を揃えることで、その分子分極を結晶全体にわたって整列させる秩序・無秩序型の強誘電性がある。分子の回転を伴う秩序・無秩序型よりも、イオンの重心がずれる変位型の方が小さなエネルギーで生じて応答性もよいので、高周波数の振動電場に応答する。



(a) 変位型と (b) 秩序・無秩序型の強誘電体

- (5) 超伝導体の振る舞いを説明する理論の一つに BCS 理論がある。この理論はクーパー対と言って、2 つの電子が引力的に相互作用し、対を形成する機構が重要な要素である。クーパー対形成の機構を図を用いて説明せよ。(8 点)

1 つ目の電子が結晶中を移動する際に正電荷を持つ結晶格子点を引きつけ、局所的に正電荷密度の高い状態を形成する。そこに 2 つ目の電子が近づくと、正電荷密度の高くなっている点に引きつけられる効果が現れるため、あたかも 1 つ目の電子が 2 つ目の電子を引きつけているかのような現象が観測される。このようにして形成される電子の対をクーパー対と呼び、本来フェルミ粒子である電子が、ボーズ粒子のように振る舞うことができるようになり、全ての電子が同じ量子状態を占める現象が見られる。

