

1. 磁化とは

図1左に示すように原子核^{*1}の周囲を回る電子は負の電荷を帯びているので、電子の公転方向と逆向きに等価的な軌道電流 I_{orb} が流れていると考えられる。このループ電流によって軌道磁気ダイポールモーメント (単に磁気モーメントとも呼ぶ) \vec{m}_{orb} が発生する。さらに電子は軌道上で自転もしており、自転の方向^{*2}により2種類のスピンの電流 I_{spin} を考えることができる。この原子レベルの電流^{*3}によってスピン磁気ダイポールモーメント \vec{m}_{spin} が発生する。即ち、原子1つあたりには次式 (1) に示す磁気ダイポールモーメント \vec{m} が発生している。

$$\vec{m} = \vec{m}_{orb} + \vec{m}_{spin} \quad (1)$$

通常の物質は図1右に示すように磁気ダイポールモーメント \vec{m} の方向が原子レベルでランダムな方向を向いているが、外部から磁場を加えるとトルクによって磁気ダイポールモーメント \vec{m} の方向が揃うようになる。するとこの物質は自発的に強い磁場を発生するようになる^{*4}。この状態を磁化 (magnetization) されたという^{*5}。実際の原子は、より沢山の電子が複数の軌道上を運動していると考えられるので、原子1つあたりの磁気ダイポールモーメントを等価な微小ループ電流 (面積 Δs) に置き換えて考えると次式 (2) のように置ける。

$$\vec{m} = I_b \Delta \vec{s} \quad (2)$$

ただし、 I_b は微小ループを流れる等価束縛電流である。

2. 磁化電流

次に図2左に示すような厚み t で断面積 S の薄い板状の磁化物質を考える。この物質から原子1つあたりを取り出して考えると、その磁気ダイポールモーメントは式 (2) で与えられるので、板全体では

$$\vec{m} = \sum_i \vec{m}_i = \sum_i I_b \Delta \vec{s} = I_b \sum_i \Delta \vec{s} = I_b \vec{S} \quad (3)$$

の磁気ダイポールモーメントが存在することになる。これは図2右上に示すように、厚み t で断面積 S の板状物質の側面だけに束縛電流 I_b が流れているときの磁気ダイポールモーメントに等しい。なぜならば、同じ方向を向いた無数の微小ループ電流は、隣り合う電流が互いに逆向きで相殺されるので、物質側面だけに電流が流れるのと等価になるためである。ここで、式 (4) に示すような単位体積あたりの磁気ダイポールモーメントまたは磁化 (magnetization)

$$\vec{M} = \frac{\sum_i \vec{m}_i}{V} \quad [\text{Am}^2/\text{m}^3] = [\text{A}/\text{m}] \quad (4)$$

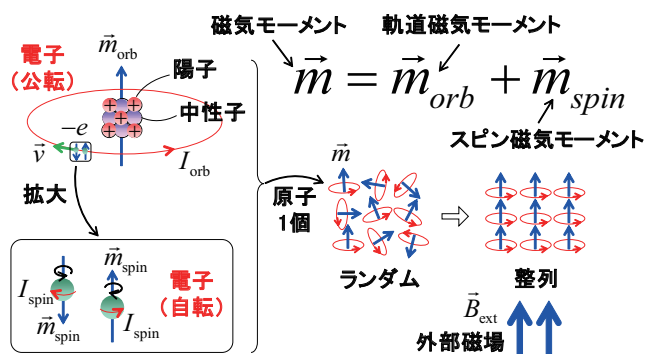


図1 原子レベルの磁気モーメント

*1 陽子は正の電荷を帯びているのでクーロン力でお互いに反発しあうが、陽子がバラバラにならないように中性子が糊の役割を果たしている。

*2 電子は負の電荷を帯びているので自転とは逆方向に電流が流れる。

*3 電流計で取り出して測定できないため、導体や抵抗体を流れる通常の伝導電流 (conduction current) と区別して束縛電流 (bound current) と呼ぶ。

*4 原子1つ1つの電流は弱いですが、集合・結晶化すると無視できない強さの電流になるため、磁石と同じ性質を持つようになる。

*5 同じような言葉に「感化された」という言葉がある。もともと能力 (モーメント) を持っている人がそれを発揮しないでいて、誰か他の人からの促しによってその能力を発揮するようになる場合に使われる。朱も交われれば赤くなる。

を使って式 (3) を表現すると

$$\vec{m} = \vec{M} S t = M \vec{S} t \quad (5)$$

と書けるので、式 (3)(5) より

$$I_b = M t \quad (6)$$

となり、式 (6) の両辺を厚み t で割ると

$$J_{sb} = M \quad (7)$$

となる。式 (7) は面電流密度 $[\text{A}/\text{m}^2]$ の単位に等しいので、磁化面電流密度 (magnetization surface current density) または束縛面電流密度 (bound surface current density) もしくは単に磁化電流 (magnetization current) と呼ぶ。いま、磁化物質の側面を内側から外側に貫く単位ベクトルを \hat{n} とおくと、 \vec{J}_{sb} と \vec{M} には

$$\vec{J}_{sb} = \vec{M} \times \hat{n} \quad (8)$$

の関係があることが分かる。以上まとめると、物質が磁化されるということは、物質の側面に束縛電流が流れていることと等価であり、その電流の大きさ J_{sb} は磁化の大きさ M に等しい。この電流は導体を流れる伝導電流、即ち導体中の自由電荷の移動による電流とは異なり、電流計で測定することができない。

3. 電気分極との類似性

同様の議論は誘電体の分極についても行うことができる。図3に示すように、誘電体が分極すると誘電体内部の電荷は互いに相殺するので、上下面だけに束縛電荷 (bound charge) または分極電荷 (polarization charge) が発生することと等価である。このとき物質上下面に発生する束縛電荷面密度 σ_b $[\text{C}/\text{m}^2]$ と分極 \vec{P} には

$$\sigma_b = \vec{P} \cdot \hat{n} \quad (9)$$

の関係がある。ただし、 \vec{P} は単位体積あたりの電気ダイポールモーメントのことで分極 (polarization) と呼び

$$\vec{P} = \frac{\sum_i \vec{p}_i}{V} \quad [\text{Cm}/\text{m}^3] = [\text{C}/\text{m}^2] \quad (10)$$

で表わされる。磁性体側面に流れる束縛電流の式 (8) と誘電体表面に発生する分極電荷の式 (9) の比較から、磁気と電気の間には $\vec{J}_{sb} \Rightarrow \sigma_b$ と $\vec{M} \Rightarrow \vec{P}$ といった類似の対応関係があることが分かる。

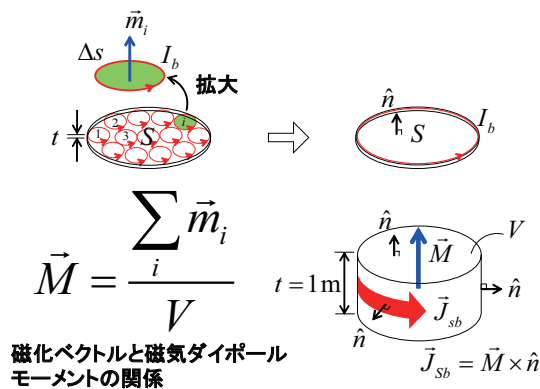


図2 表面束縛電流のイメージ

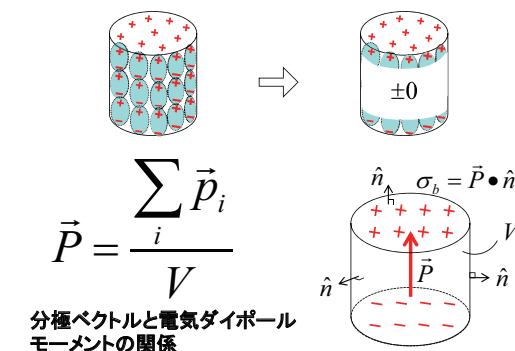


図3 束縛電荷のイメージ