

ヘリカル構造に基づく Magnetoelectricity によるキラル認識

Chiral Recognition by Magnetoelectricity Provided by Helical Structure

京大¹, 広大² ○木村恒久¹, 木村史子¹, 岩坂正和²

Kyoto Univ.¹, Hiroshima Univ.², Tsunehisa Kimura¹, Fumiko Kimura¹, Masakazu Iwasaka²

E-mail: tkimura@kais.kyoto-u.ac.jp

Magnetoelectricity (ME)とは磁場と電場が相互にカップリングする性質で、キラリティーと深い関係にある。本発表では、物質内のヘリカルな構造と ME 及び Pasteur medium との関連を考察し、キラル認識についてエネルギー論的に検討する。

Maxwell 方程式によれば、振動磁場 $\dot{\mathbf{H}}$ は電場を誘起する： $\text{rot} \mathbf{E}_{\text{ind}} = -\mu_0 \dot{\mathbf{H}}$ 。誘起電場 $\mathbf{E}_{\text{ind}}$ はループ状で、 $\text{rot} \mathbf{E}_{\text{ind}}$ と直交するので $\mathbf{E}_{\text{ind}} \cdot (-\mu_0 \dot{\mathbf{H}}) = \mathbf{E}_{\text{ind}} \cdot \text{rot} \mathbf{E}_{\text{ind}} = 0$ となり、誘起電場 $\mathbf{E}_{\text{ind}}$ と振動磁場 $\dot{\mathbf{H}}$ は相互作用しない。もし誘起電場が $\text{rot} \mathbf{E}_{\text{ind}} = k^{-1} \mathbf{E}_{\text{ind}}$ という性質をもつならば、 $\mathbf{E}_{\text{ind}} \cdot (-\mu_0 \dot{\mathbf{H}}) = \mathbf{E}_{\text{ind}} \cdot \text{rot} \mathbf{E}_{\text{ind}} = \mathbf{E}_{\text{ind}} \cdot k^{-1} \mathbf{E}_{\text{ind}} \neq 0$ となり、振動磁場 $\dot{\mathbf{H}}$ と相互作用する。方程式 $\text{rot} \mathbf{A} = k^{-1} \mathbf{A}$ を満たす電場は Beltrami 場[1]と呼ばれ、ヘリカルな形を取る。固有値 k^{-1} はヘリックスの掌性により符号が異なる。磁場についても同様の議論が成り立つ。要約すると、分子あるいは固体中に Beltrami 場を誘起するようなヘリカル構造をもつ場合、誘起電場 $\mathbf{E}_{\text{ind}}$ は印加した振動磁場 $\dot{\mathbf{H}}$ と、誘起磁場 $\mathbf{H}_{\text{ind}}$ は印加した振動電場 $\dot{\mathbf{E}}$ と相互作用することが可能である。

ヘリカル構造をもつ物質の電磁応答に対する構成方程式 (Pasteur medium)は、

$$\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E} - \kappa \varepsilon_0 \mu_0 \dot{\mathbf{H}} \quad \text{and} \quad \mathbf{B} = \mu \mathbf{H} + \kappa \varepsilon_0 \mu_0 \dot{\mathbf{E}}.$$

で表わされる[2]。 ε_0 及び μ_0 は真空の誘電率及び透磁率、 κ はキラル強度である。この構成方程式は、物質中の電束密度 $\mathbf{D}$ が $\mathbf{E}$ のみならず $\dot{\mathbf{H}}$ にも依存し、また、磁束密度 $\mathbf{B}$ が $\mathbf{H}$ のみならず $\dot{\mathbf{E}}$ にも依存するということを示している。この物質と印加磁場・電場との相互作用は次式で与えられる：

$$U = \kappa \varepsilon_0 \mu_0 \dot{\mathbf{H}} \cdot \mathbf{E} - \kappa \varepsilon_0 \mu_0 \dot{\mathbf{E}} \cdot \mathbf{H}$$

但しここでは、 κ が関与する項のみを取り上げている。 $\dot{\mathbf{H}} \cdot \mathbf{E}$ 及び $\dot{\mathbf{E}} \cdot \mathbf{H}$ の項は前段で論じたヘリカル構造に起因する。非ゼロの κ をもつ物質（キラル物質）に対して有限な U を得るためには、印加する $\mathbf{E}$ 及び $\mathbf{H}$ に束縛が課せられる。例えば、 $\mathbf{E} \parallel \mathbf{H}$ の条件下で、(i) $\mathbf{E}$ 及び $\mathbf{H}$ が同位相で振動している場合には $U = 0$ 、(ii) 位相が $\pi/2$ ずれて振動している場合には $U \neq 0$ である。この他にも(iii) 位相が互いに $\pi/2$ ずれて回転する電場、磁場も $U \neq 0$ を与える[3]。(i)の場合にはキラルが認識されないが、(ii)、(iii)の場合にはキラルが認識される。

キラルが認識できる場をキラル場と呼ぶことにすると、(ii)、(iii)はキラル場である。Barron による True Chiral の基準[4]によれば、(iii)は True Chiral であるが、(ii)はそうではない。Barron の条件はよりきつい条件のように思われる。実際、スピン分極を用いたキラル分離[5]においても Barron の条件を満たしていない。

参考文献：[1] Don Reed, viXra:1207.0080. [2] E. U. Condon: *Rev. Mod. Phys.*, 9, 432-457 (1937). [3] 木村他, 第 13 回日本磁気科学会年会 (東北大) 要旨集, p.27. [4] L. Barron: *Chirality*, 24, 879-893 (2012). [5] K. Banerjee-Ghosh et al., *Science*, 10.1126/science.aar4265 (2018).