

磁石に魅せられて—磁場の不思議な作用—

谷本 能文

キーワード：

磁気科学、磁場効果、ラジカル対、ローレンツ力、磁気力、磁気配向、磁気浮上、無重力

1.はじめに

1.1.磁石の歴史

天然の磁石は紀元前十数世紀の中国に遡るといふ。たまたまこの講演の十日ばかり前に中国西安の大学で集中講義に訪れる機会があった。空き時間を利用して、紀元前数世紀に秦の始皇帝が作った兵馬俑を見学したところ、指南車を見ることができた(図1)。戦陣において指揮官が指南車に乗り、全軍の進退を指揮する。そのために野外において正確な方位を知る必要がある。指南車にはその方位を知るための道具が備え付けられていたといわれている。一般的には歯車仕掛けの装置であったように言われているが、それならばなぜ“指南”とよぶのだろうか?“指東”、“指西”ではいけないかという疑問がわく。一説には、方位針を持っていたのではということである。南北を指し示すので“指南”、“指北”という言葉が最もよくあてはまるような気がした。ということは、天然の磁石で作った方位針が指南車に搭載されていたのではと想像を膨らませた。



TSS文化大学で講演する筆者



図1 指南車

1.2.磁石の魅力

磁石の魅力を端的に知るには、例えば英和辞書で「magnet」を引いてみるとよい。1番目の意味はもちろん「磁石」であるが、2番目の意味は「(固有の魅力で)人を引きつける人(物、動物、場所)」とある(小学館英和中辞典(1980)。古より磁石がいかに魅力的だったかを明確に示している。私自身は、大学院生の頃の研究に磁場を使ったのがきっかけである。大学院修了後、当時まったく未知の領域であった「光化学反応の磁場効果」の研究にチャレンジした。以来数十年にわたり化学反応・物理変化・生物現象に対する磁場の影響の研究に邁進し、ますますその魅力のとりことなっている。

2.磁気科学の基礎

磁気科学とは、化学現象・物理現象・生物現象に対する磁場の影響を研究する古くて新しい自然科学の研究分野の一つである。実験結果を紹介する前に、理解に役立つと思われる事項について二三簡単に説明する。

2.1.なぜ物質は磁場にくっついたり反発したりするか(磁性の起源)

物質を小さくしていくと分子になる。その分子は原子からできている。さらに、原子は電子と原子核からできている。物質の持つ磁性は、この電子の運動により生じる。すべての物質は原子やイオンからできているので、すべての物質はそれぞれ固有の磁氣的性質(磁性)を持っている。すなわち、ほとんどの物質は磁場に反発する力を受ける性質(反磁性)をもつが、一部の物質では磁場に引き寄せられる性質(常磁性、強磁性)をもつ。磁場に対する感受性の大きさを表す量として磁化率(χ 、カイ)がある。反磁性磁化率は負の値を、常磁性磁化率は正の値をとる。例えば、空気は窒素ガスと酸素ガスの混合物であるが、窒素ガスは反磁性、酸素ガスは常磁性である。したがって、程度の大きさに違いはあるものの、すべての物質は磁場の影響を受ける。

2.2.磁場・磁石について

磁場の強さは、通常 Gauss(G) や Tesla(T) で表される。1 T = 10,000 G の関係がある。磁場の種類には、時間的な変動のない静磁場、時間的に変動する交流磁場などがあるが、ここでは静磁

場の影響について説明する。静磁場は通販でも容易に購入できる永久磁石(フェライト磁石、ネオジウム磁石)や電磁石・超電導磁石を用いて発生する。フェライト磁石の表面磁場は最大約 0.4 T、ネオジウム磁石の表面磁場は最大約 1 T である。卓上型電磁石の最大磁場は約 0.8 T、超電導磁石の最大磁場が約 20 T である。

2.3.磁場の安全性について

磁場を用いた医療機器 MRI の普及やスマートフォンなどの電子機器が身近に多用されるようになり、磁場の安全性が話題になることがある。[ICNIRP ガイドライン\(2009\)](#)によれば、一般公衆の静磁場(静磁界)の暴露限度値は、身体の任意の部分で 0.4 T となっている。ちなみに私の使っているスマートフォンでは、音の聞こえてくるスピーカーの付近で約 0.008 T である。

3.磁気科学—磁場効果の仕組みと実験例—

これまでの研究から磁場の化学反応・物理変化・生物現象に対する影響の仕組みは、(1)ラジカル対機構、(2)異方的磁気エネルギー、(3)ローレンツ力、(4)磁気力、の4つに大別される。以下、順を追ってこれらの仕組みと研究例の幾つかを簡単に紹介したい。

3.1.ラジカル対機構による磁場効果

光反応や熱反応の際、反応の過程で短寿命反応中間体として1対のラジカル(ラジカル対)が生成することがある。そのラジカル対の一重項—三重項電子スピン状態間の遷移は核スピンによる内部磁場により起こり、外部磁場の影響を受ける。その結果生成物の収量が大きな磁場の影響を受ける。

例：1,3-Diphenylisobenzofuran (DPBF)の光増感酸化反応の磁場効果

DPBF と anthraquinone (AQ)の空気飽和界面活性剤水溶液に紫外線を照射すると、DPBFが酸化され o-dibenzylbenzene (DBB)が生成する。この光反応を、フェライト磁石を使って 0.2 T の磁場中で行ったところ、反応の収量は約 60%増加した。

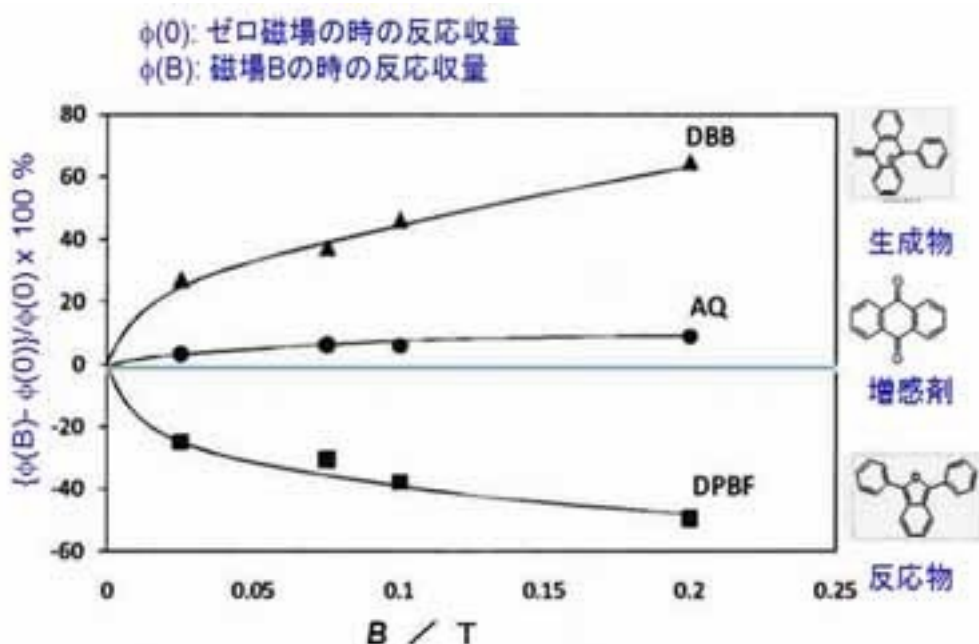


図2 DPBF の光増感酸化反応の磁場効果

磁場効果は、光増感剤である AQ から生じるラジカル(DPBF 酸化反応の反応開始剤)の収量が磁場により増加したためと説明された。

3.2.異方的磁気エネルギーによる磁場効果(磁気配向)

物質を磁場中に置くと、磁気エネルギー E を得る。

$$E = -(1/2\mu_0)\chi B^2 \quad (1)$$

ここで、 μ_0 は真空の透磁率、 χ は物質の磁化率、 B は磁場の強さ(磁束密度)である。結晶などの多くの固体は一般的には磁氣的性質は均一ではない。そのため結晶などを磁場中に置くと、その磁気エネルギーは結晶の向きにより異なる。その結果、結晶は磁気エネルギーが最小になるように向きを変える(磁気配向)。

例：カーボンナノチューブの磁気配向

カーボンナノチューブ(直径約 50 nm ×長さ数 μ m)を四塩化炭素に懸濁し、8 T の水平磁場中で四塩化炭素を蒸発させたところ、カーボンナノチューブは磁場と平行に配向した。この磁気配向はカーボンナノチューブの磁氣的異方性によることが分かった。ナノサイズの微小な物体でも磁場配向させることができる。

3.3.ローレンツ力による磁場効果

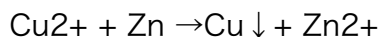
運動する電子やイオンを磁場中に置くと、電子やイオンは運動の方向と磁場の方向に直角にローレンツ力 F_L を受ける。

$$F_L = qv \times B \quad (2)$$

ここで、 q は電子やイオンの電荷、 v はその速度である。このため、電気化学反応などの不均一反応では、溶液中のイオンや電子が反応サイトに供給される過程が大きな影響を受ける。

例：銅の析出反応の磁場効果

硫酸銅水溶液に亜鉛版を入れると、イオン化傾向の違いにより亜鉛は溶け出し金属銅が析出する。



25mm×25 mm の亜鉛板の入った直径 50 mm のシャーレに、0.5 M の硫酸銅水溶液を注ぎ、水溶液の動きを観察するために紙の小片を加えた(図3)。磁場のないとき、顕著な液の動きは観られなかったが(図3の各左側の写真)、シャーレを永久磁石の上に置き 0.4 T の磁場を印加したところ(図3の各右側の写真)、水溶液はぐるぐると回り始めた。1周5秒程度の速さである。磁石を裏返しにして同じ実験をすると水溶液の回転方向は逆になった。これらの実験からローレンツ力により液の対流が引き起こされたことが示された。

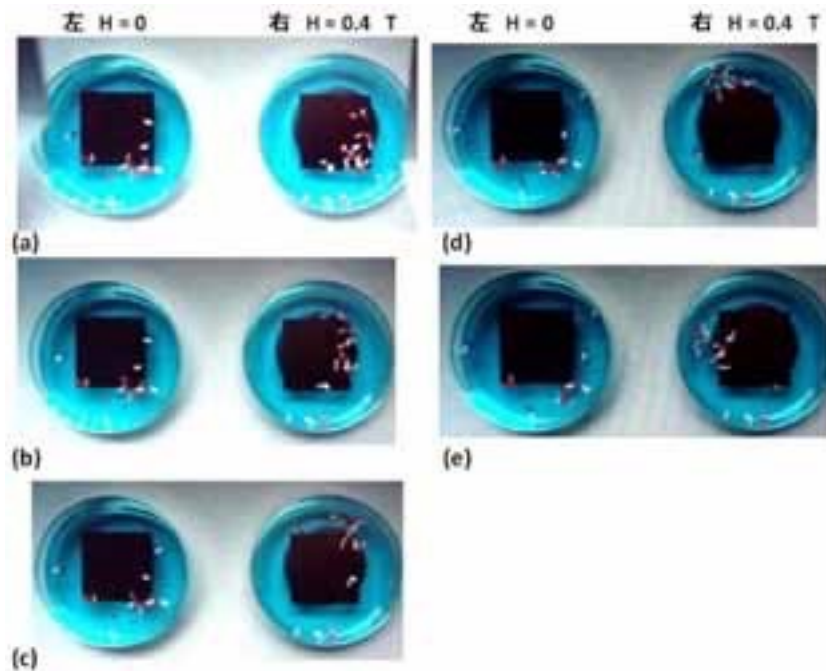


図3 ローレンツ力による水溶液の対流

図左側は磁場のないとき、右側は磁石の上で実験したときである。水溶液上に浮いているのは紙の小片。時間の経過は(a)→(b)→(c)→(d)→(e)の順。紙の小片がシャーレを1周するのに約5秒かかる。

3.4.磁気力による磁場効果

3.4.1.磁気力による磁場効果

物質を磁場勾配のある所に置くとその物質は磁気力 F_m を受ける。

$$F_m = (1/\mu_0) \chi B \partial B / \partial z \quad (3)$$

ここで、 $B \partial B / \partial z$ はある方向 z における磁場の勾配である。このため、常磁性イオンを含む不均一反応では、溶液中のイオンや電子が反応サイトに移動する過程が大きな磁場の影響を受ける。

例：ローソクの炎に対する磁場の影響

誕生日祝いのケーキの上に立てるローソクの炎に対する磁場の影響について調べた(図4)。卓上型電磁石(最大 0.6 T)を使い、炎に水平方向の磁場を印加したところ、磁場のない時にはいわゆる涙形だったものが(a, e)、磁場の印加条件の違いにより傘形(b)、ドーナツ形(c)、ラッパ形(d)と変化した。炎は反磁性であるが、炎の周りには常磁性の酸素を含むため常磁性である。図に示した炎の形の変化は、炎の周りの空気の流れが磁場の影響を受けたためと推定された。

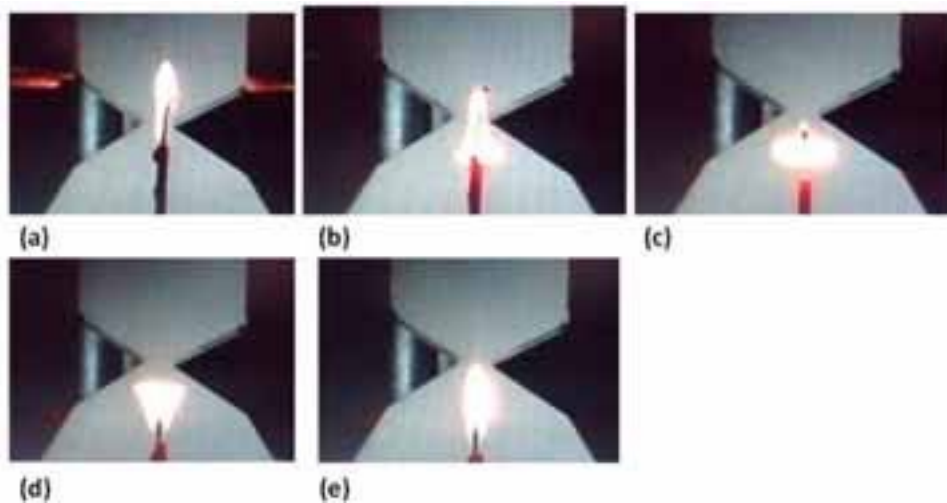


図4 ローソクの炎に対する磁場の影響 (a)磁場なし、(b)~(d)磁場中、(e)磁場なし

3.4.2.磁気浮上

すべての物質は重力により地球に引き寄せられている。そこで、重力と反対方向に重力と等しい大きさの磁気力を作用させると物体を空中に浮かせることができる(磁気浮上)。

$$F_m = mg \quad (4)$$

ここで、 m は物質の質量、 g は重力加速度である。

例：糸ミミズの磁気浮上

図5は、糸ミミズを入れた水滴を磁気浮上させた様子を、側面から見た写真である。

磁場を使うことにより、純水の大きな薄膜を地上で作るなど宇宙の無重力と類似した現象(疑似無重力)を地上でも簡単に作り出すことができ、いろいろな応用が期待される。



図5 糸ミミズの入った水滴の磁気浮上 横から撮った写真、水滴の直径は約 7 mm

4.生物の運動に対する磁場の影響

いろいろな生物に対する磁場の影響について試みているが、ここでは2つの例について紹介したい。

例：ミドリムシ(ユーグレナ)に対する磁場の影響

最近栄養補助食品としてミドリムシが話題になっているようであるが、直径30mmのシャーレにミドリムシ(体長約 $100\mu\text{m}$)の入った水溶液を入れ、ミドリムシの運動に対する磁場の影響について調べてみた(図6)。磁場のないとき、生きたミドリムシはシャーレ全体に均一に広がった。シャーレをしばらく磁場中に置くと、生きたミドリムシはシャーレの左側、磁場の強い方に集まった。しかし死んだミドリムシでは、逆に右側、磁場の弱い方に集まった。死んだミドリムシが磁場の弱い方に集まることから、ミドリムシは反磁性と考えられる。ではなぜ生きたミドリムシは強い磁場側に集まるのか? 一般に生物は磁氣的に均一ではない。そのためミドリムシに異方的な磁気力が働き、強い磁場の方に移動したのではないかと推察している。

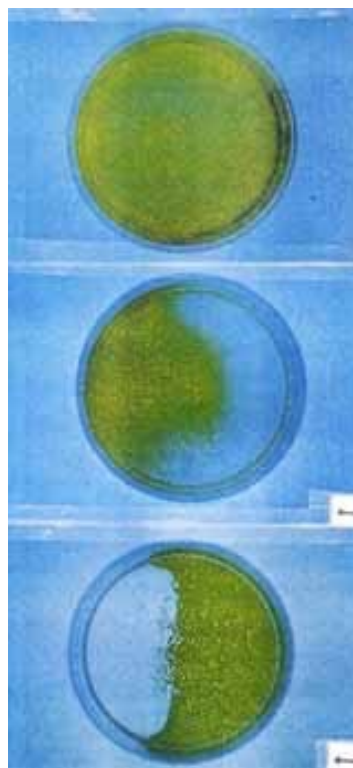


図6 ミドリムシに対する水平磁場の効果

(上) 生きたミドリムシ、磁場なし、(中)生きたミドリムシ、8 T の勾配磁場中、
(下)死んだミドリムシ、8 T の勾配磁場中

例：ゾウリムシに対する磁場効果

繊毛をもつゾウリムシ(体長約 $100\mu\text{m}$)の泳ぐ様子を顕微鏡により観察した。磁場がないときゾウリムシはランダムな方向に泳いだり、磁場中では磁場に平行に泳ぐことが観察された。ゾウリムシの体表面は繊毛に覆われている。この繊毛が磁場配向することから、泳ぎに対する磁場の影響は、繊毛の磁場配向が原因でないかと考えている。

5.まとめ

以上簡単に紹介したように、磁場にはいろいろな不思議な作用があることがわかっていただけたことと思う。これまでに報告されている磁場効果の90%程度は3で説明した4つの磁場効果の機構で説明される。これらの磁場効果を応用することにより、新しい性質を持つ機能性材料の創製が期待される。また、今後さらに新しい磁場効果の発見も期待され、これからの発展が楽しみである。

最後に、[日本磁気科学会ホームページ](#)に磁場効果の動画が多数紹介されているので、興味のある方はぜひご覧になってください。

(本稿は2015年12月8日に行われたTSS文化大学における講演の概要です)