

# マイクロ波化学を楽しもう！ 第五章

## ——電氣的加熱現象，マイクロ波誘電加熱と物質の電子状態——

岸原 充佳\*・松村 竹子\*\*

四章ではマイクロ波による加熱の仕組みについて、溶液を中心にマイクロ波の誘電加熱の重要なパラメータについて、測定法やその数値の意味について述べてきましたが、この章ではまず、電氣的な物質の加熱についてその基本的な仕組みを考えてみましょう。

### 1. 電気による現象<sup>1)</sup>

現代社会では、電気は非常に身近で広く利用されています。一度立ち返って、電気によって生じる様々な現象を押さえておきましょう。

#### 1.1. 正電気と負電気に働く電気力

世の中に正（プラス）と負（マイナス）の電気があるということは、恐らく皆さんが知っていることでしょう。ではなぜ、正と負の電気があるのかという話になると、量子論や素粒子論の話になって来ますので、ここでは述べません。

正電気と負電気の間には、図1に示すように引き合う力（電気力）が働きます。同じ正電気同士や負電気同士の場合は、互いに反発する斥力が生じます。この電気力の性質はクーロンにより定量的に調べられ、距離の2乗に反比例することやプラスとマイナス電荷の積に比例することが分かりました。今日では、クーロンの法則として知られています。距離の2乗に反比例して電気力は弱まりますが、ある場所で正電気（や負電気）を移動させれば、それに応じて宇宙の端まで電気力の変化が及ぶことになります。（ただし、瞬時に及ぶのではなく、場の変化が伝わる速さ（光速）の時間が必

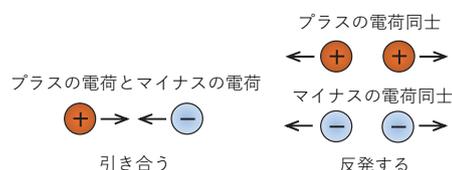


図1. 電気力

要です。)例えば、アンテナの中で電荷が上に動けば、遠く離れたアンテナでも電荷が動くということになり、通信等にも利用できるという話になります。

#### 1.2. 電流が作る磁気力（磁場）

正電荷の移動は電流を意味します。実際の電気回路ではマイナス電荷の電子が移動することで電流が生じるため、電流の向きと電子の移動は逆になっています。

さて、導線に電流を流すと磁気力が発生することは、小学校の理科で電磁石の実験を通して習ったことでしょう。電流の流れている導線の周りには、図2のように右回りに磁場が発生し、近くに置いた磁石には磁気力が働きます。このことは、エルステッドの実験によって確かめられました。磁場は閉曲線になっているのが特徴です。生じる磁場の強さは電流と関係します。これはビオ・サバールの法則やアンペールの法則で説明することができます。スピーカーで音が鳴るのも、電流が作る磁気力のお陰です。

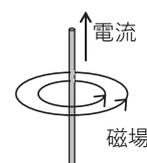


図2. 電流が作る磁場

\*岡山県立大学准教授

\*\* (有) ミネルバライトラボ

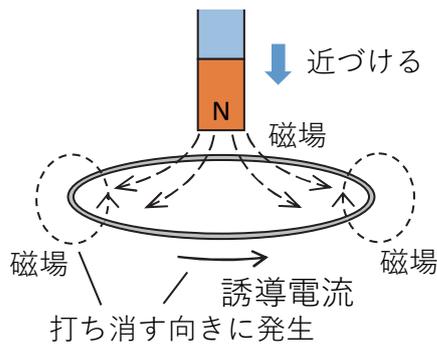


図3. 電磁誘導の説明

### 1.3. 電磁誘導

電流が磁場を生み出すなら、反対に磁場から電流は生じないだろうか？多くの人たちがこの疑問に取り組むも、どれも成功しませんでした。その中でファラデーは、電磁石のスイッチを入れた瞬間に電流計の針が動くことに気づきました。

図3に示すように、ループ状の導線に磁石を近づけると、その磁場の変化を打ち消すように誘導電流が生じます。ファラデーの誘導法則では、磁束（透磁率×磁場×面積）の変化で誘導起電力が発生すると説明されます。

この電磁誘導の発見により世界が変わったと言っているでしょう。発電機で電気が作れるようになったことは勿論、マイクなどもこの現象を利用しています。電子マネーなど非接触ICカードへの電源供給も電磁誘導で行われています。

## 2. 電気による加熱

### 2.1. 抵抗加熱

図4に示すような電気抵抗  $R$  を持った導線に電流  $I$  を流すと、電流の2乗と抵抗に比例したジュール熱が発生します。これはジュールの法則として知られています。

$$Q = I^2 R t \quad (1)$$

$t$  は電流が流れる時間です。電気ストーブや電熱器による加熱は、この原理を利用しています。抵抗体に電流を流すと、電子が抵抗体を構成する原

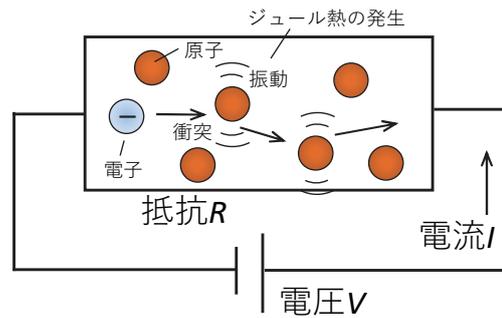


図4. 抵抗加熱の説明

子に衝突しながら移動することになり、衝突を受けた原子が振動することでジュール熱が発生します。抵抗加熱 (resistance heating) は、この熱により加熱が行われます。

### 2.2. 誘導加熱

コイルに電流を流すと磁場が発生して電磁石になります。このとき、図5のようにコイルの中に金属を置くと、磁場の変化をさまたげようとする方向に渦電流が流れます。渦のように輪を描いた形で電流が流れるため、渦電流と呼ばれています。電池などの直流電源を接続した場合には、磁場が一定になれば渦電流は消えます。いま、交流電源でコイルに電流を流すと、向きが交互に変わりながら磁場が発生します。すなわち、向きが交互に変わりながら渦電流が発生し続けます。

抵抗成分を持った金属に渦電流が流れると、抵抗加熱と同じ原理で電流の2乗と抵抗に比例したジュール熱が発生します。誘導加熱 (induction heating) は、この熱により加熱が行われます。IH 調理器などは、この原理を利用しています。

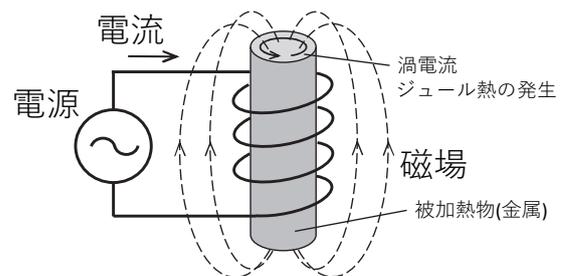


図5. 誘導加熱の説明

### 2.3. 誘電加熱, マイクロ波加熱

水  $H_2O$  や塩化水素  $HCl$  などの分子は、分子を構成する原子や電子の正負電荷の中心が一致していないため、有極性分子と呼ばれています。このような物質は、図6に示すように正電荷と負電荷が極めて短い距離を隔てて置かれた状態になっており、電気双極子を作り出しています。

水などのように各々が拘束されていない分子は、図7のように無電場の状態ではそれぞれの電気双極子がばらばらの向きを向いています。ここにマイクロ波などの高周波電場を加えると、電気双極子は電場から力を受けて電場の向きに揃おうとします。

各双極子が何の抵抗も受けずに向きを反転できればよいのですが、通常は周囲の分子との間で摩擦が生じて分子に振動を起こします。このときの摩擦によるエネルギーが熱となります。電場の変化に対して、どの程度追従が遅れが生じるかが損失(熱)の度合いに関係します。誘電加熱(dielectric heating)やマイクロ波加熱(microwave heating)は、この熱により加熱が行われます。

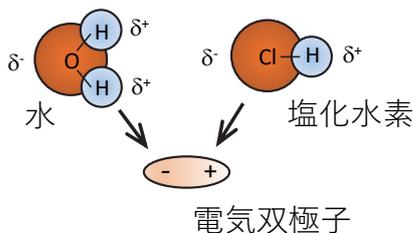


図6. 有極性分子と電気双極子

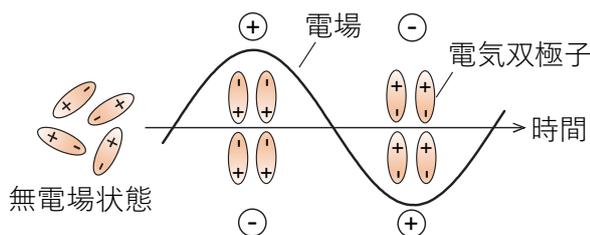


図7. 誘電加熱の説明

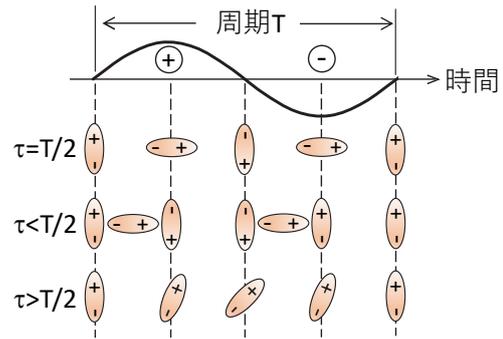


図8. 分極と誘電緩和時間の説明

### 2.4. 分極と誘電緩和時間

水などの有極性分子は、電場が加えられると電気双極子の向きが加えられた電場の方向に揃おうとすると説明しました。また、電場を切ったときにはランダムな状態へと戻っていきませんが、このとき電気双極子は、電場の変化に遅れを伴って追従して新しい向きに落ち着きます。これに要する時間は分子によって違う値を持ち、誘電緩和時間と呼ばれます。

いま、図8のように、周期  $T$  で変動する電場中に緩和時間  $\tau$  の有極性分子が置かれたとします。 $\tau = T/2$  の場合は、電場の振動周期と緩和時間が一致した状態で、分子は常に摩擦して誘電損(熱)を発生させます。 $\tau < T/2$  の場合は、電気双極子の向きはすぐに変化してしまうため、摩擦の生じる時間も減り誘電損は小さくなります。また、 $\tau > T/2$  の場合には、電場の変化に追従できず、ほとんど動きません。そのため発熱も小さくなります。

### 2.5. 固体のマイクロ波加熱

マイクロ波による加熱は水や有機物、溶液のような液体だけでなく、固体物質でも生じます。固体のマイクロ波加熱について考えてみます。

固体物質のマイクロ波加熱について、四章で述べた誘電パラメーターとマイクロ波エネルギー  $P$  との関係式について考えてみます<sup>2)</sup>。

$$P = 1/2\sigma|E|^2 + \pi f \epsilon_0 \epsilon'' |E|^2 + \pi f \mu_0 \mu'' |H|^2 \quad (2)$$

マイクロ波加熱では、極性のない有機物の加熱の際、炭素粒を入れて加熱することがよくあります。また、SiC（炭化ケイ素）もよく用いられます。炭素の電子構造を考えると、多くの炭素は単体物質として、sp<sup>2</sup>混成軌道をもつグラファイト（図9）、sp<sup>3</sup>混成軌道をもつダイヤモンド（図9）が安定物質として存在しています。

ダイヤモンド以外の炭素は導電性でマイクロ波を吸収します。SiCもこれらの炭素に構造が似ており、マイクロ波をよく吸収し、マイクロ波加熱によって高温になります。これらの導電性物質は、導電損失σによって（2）式中の $1/2\sigma|E|^2$ に相当する発熱を起こすと考えられます（例：ガラス細工用キルン）<sup>4)</sup>。

また、マイクロ波は、図10のように電気的な成分と磁気的な成分を有しており、電気的成分（赤色）と磁気的成分（青色）から構成されています。

磁気的な成分を有する固体では

$$P=1/2\sigma|E|^2+\pi f\epsilon_0\epsilon''|E|^2+\pi f\mu_0\mu''|H|^2 \quad (2)$$

の式中の $\pi f\mu_0\mu''|H|^2$ の項の寄与が生じます。

したがって、磁気的な性質を有する物質は、マイクロ波によって加熱されます。

磁性を有する金属を磁性体といいます。例えば、Fe、Co、Niは鉄族金属と呼ばれ<sup>5)</sup>、最外殻のd軌道の電子配置がそれぞれ、6、7、8個で、高スピン配置を取るため、強い磁性（強磁性）を示します。これらの金属やその化合物は、マイクロ波により、磁気的成分（2）式 $\pi f\mu_0\mu''|H|^2$ に相当す

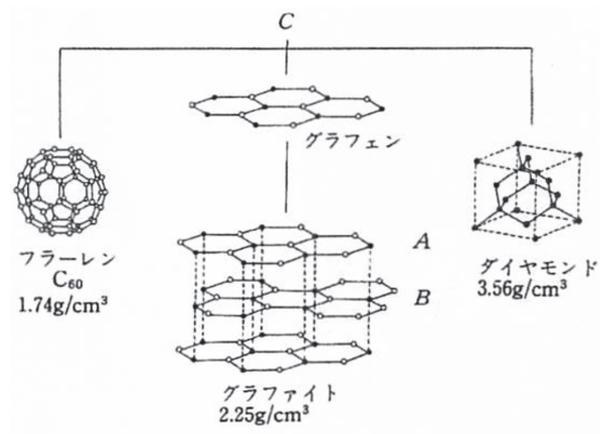


図9. 種々の炭素固体<sup>3)</sup>

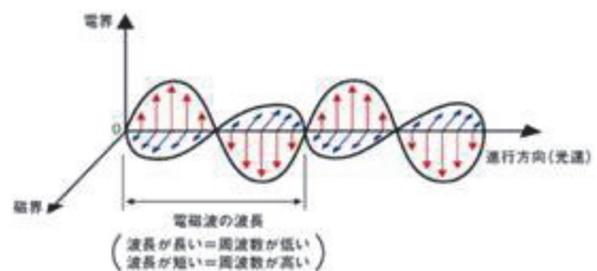


図10. マイクロ波（電磁波）の成分

る発熱が生じます。このようにマイクロ波加熱の様子が物質の電子構造によって異なることが理解できます。

## 参考文献

- 1) 中山正敏, 電磁気学, 裳華房, 1992
- 2) 海洋化学研究 Vol.33, 76-79, 2020
- 3) 榎敏明, 電学誌 114 卷1号, 1994
- 4) 海洋化学研究 Vol.32, 56, 2019
- 5) [http://sekigin.jp/science/chem/chem\\_02\\_6\\_60.html](http://sekigin.jp/science/chem/chem_02_6_60.html)