

材料プロセスの基礎

Basics of microwave material processing

東北大学 吉川 昇

1. 電磁波と物質の相互作用

1.1 マイクロ波の浸透距離

マイクロ波は電磁波であり、電場と磁場を有している。電磁波は空間を伝播して物質に照射されると、物質により一部は反射され、一部は内部に浸透する（図1）。この際、物質内部ではマイクロ波エネルギーが吸収され、電磁波強度が減衰する。マイクロ波の浸透距離は、物質の物性値（誘電率 ϵ 、透磁率 μ 、導電率 σ ）により決定される。これらの物性値を有する物質内の電場（ \mathbf{E} ）と磁場（ \mathbf{H} ）は、Maxwell 方程式より Eq. 1 のように同じ形の微分方程式で表され、その解 $\mathbf{E}(z, t)$ は $\mathbf{H}(z, t)$ と同様に、Eq. 2 のように同じ形で表される。

$$\nabla^2 \mathbf{E}(\mathbf{H}) - \mu\sigma \frac{\partial \mathbf{E}(\mathbf{H})}{\partial t} - \mu\epsilon \frac{\partial^2 \mathbf{E}(\mathbf{H})}{\partial t^2} = 0 \quad (1)$$

$$\mathbf{E}(\mathbf{H}) = \mathbf{E}(\mathbf{H})_0 e^{-\alpha z} \cdot e^{i(\omega t - \beta z)} \quad (2)$$

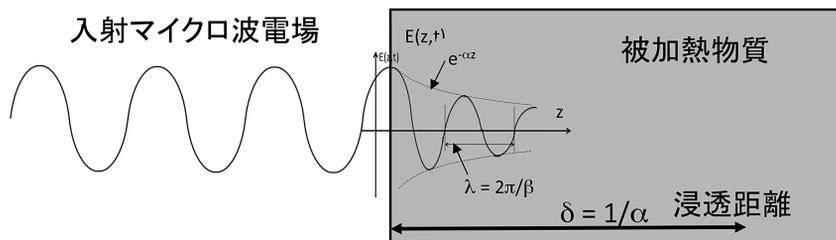
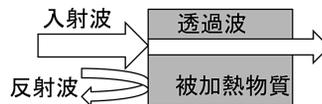


図1 物質へのマイクロ波浸透と浸透距離

マイクロ波加熱装置の設計を司る 基礎理論および装置構成

Basic theory and configuration governing the design of microwave heating apparatus

京都大学 三谷 友彦

1. 電磁波伝搬に関する基礎方程式

マイクロ波加熱応用に関連する電磁波伝搬の基礎的な方程式、および方程式から導かれるマイクロ波加熱の原理やマイクロ波加熱の指標となる式について述べる。なお、本稿で記載する方程式は一般的なマイクロ波工学の教科書等でも確認できるため、式の導出等に関する詳細については、参考文献¹⁻⁵⁾を確認されたい。

1.1 マクスウェル (Maxwell) 方程式および電磁波のエネルギー保存則

マイクロ波加熱応用に限らず、電磁波の振る舞いは以下のマクスウェル方程式に従う。ただし、 E は電界ベクトル (大きさの単位は V/m)、 B は磁束密度ベクトル (大きさの単位は T もしくは Wb/m²)、 H は磁界ベクトル (大きさの単位は H/m)、 D は電束密度ベクトル (大きさの単位は C/m²)、 J は電流密度ベクトル (大きさの単位は A/m²)、 ρ は電荷密度 (単位は C/m³) を表す。また t は時間を表し、 ∇ はベクトル微分演算を表す演算子である。

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (3.1)$$

$$\nabla \times H = \frac{\partial D}{\partial t} + J \quad (3.2)$$

$$\nabla \cdot D = \rho \quad (3.3)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (3.4)$$

式(3.1)はファラデー (Faraday) の電磁誘導の法則を表しており、ある場所での磁束密度の向きや大きさが時間変化をした場合、その変化を打消す方向に電界が発生することを表している。式(3.2)はアンペール-マクスウェル (Ampère-Maxwell) の法則と呼ばれる。アンペール (Ampère) の法則は、式(3.2)の左辺および右辺第2項により構成される法則であり、電流が流

第2章 化学分野への応用

1 節 マイクロ波化学プロセスの現状と特殊効果

Microwave chemistry processing and its specific effects

東京工業大学 羽石 直人、和田 雄二

1. はじめに

頻繁に化学者は、化学反応がマイクロ波照射により促進される事象に遭遇する。彼らは、反応が完了するまでに必要な反応時間の短縮や、化学反応の進行に要求される反応温度の低減が、マイクロ波により達成されるという結果を得てきた。マイクロ波照射下のそれらの独特な現象はしばしば『マイクロ波特殊効果』や『マイクロ波非熱的效果』などと呼ばれる。しかしながら、これらの特殊効果の起源はいまだよくわかっていない。それらの特殊効果の存在についてすら懐疑的な化学者がいる一方で、これらの特殊効果の詳細を明らかにするために研究を行っている化学者もいる。“マイクロ波化学”を牽引する化学者の一人である Kappe は、特に均一系有機合成反応において、“反応系の正確な温度測定”の重要性を指摘しており¹⁾、たしかにその指摘には同意すべきである。本章においては、固体界面で進行する化学反応系において、マイクロ波照射を適用した際に生じる特別な反応場の観察とその利用について紹介する。この特別な反応場の形成は、“マイクロ波熱的特殊効果”の一つとして認識されるべきであり、マイクロ波と反応基質との相互作用によって発現するために、通常の加熱方法では決して得られない現象である。

固体界面で反応が進行する化学反応をマイクロ波照射下で行ったいくつかの研究の例を見てみよう。例えば、メタノール改質²⁾、チオフェンの水素化脱硫反応および硫化水素の分解³⁾、エチルベンゼンの脱水素⁴⁾、メタンのドライリフォーミング^{5,6)}、NOの分解⁷⁾、スチーム-カーボン反応⁸⁾、TiO₂の還元⁹⁾、ヘマタイトの炭素還元¹⁰⁾、CuOの還元^{11,12)}などが挙げられる。

固体界面を含む反応系においては、温度分布の存在に目を向けることは自然なことである。Perry らは、メタノール改質反応のような吸熱反応に用いる触媒に対して、マイクロ波加熱が熱を供給する手段として効率的かつ効果的であることを示した²⁾。Zhang らは、MoS₂/Al₂O₃ 触媒を用いた発熱反応（チオフェンの水素化脱硫反応）および吸熱反応（硫化水素の分解反応）にマイクロ波加熱を適用したところ、発熱反応においては好ましくない方向へ、吸熱反応に対しては

* Naoto Haneishi and Yuji Wada, Tokyo Institute of Technology

第9章 自動車分野への応用**マイクロ波プロセスと将来の自動車への応用****Microwave processing and its applications to the future automobile**

株式会社豊田中央研究所 福島 英沖

マイクロ波加熱は、省エネルギー技術や環境負荷低減プロセスとして期待されている。マイクロ波プロセスは従来の方法に対して、急速加熱、選択的加熱、内部加熱など、多くの利点を有している。当所で開発したキャビティ（空洞共振器）と新規なマイクロ波吸収材を使用することにより、多孔質セラミックを100℃/sという超高速な加熱が達成された。マイクロ波加熱を利用した自動車への応用として、マイクロ波によるエタノール水蒸気改質を行い、急速始動と500℃の低温改質で、ほぼ100%の変換効率で水素製造が行えた。マイクロ波では、従来の加熱方法に比べて活性化エネルギーを大幅に低減することが可能であった。次に、マイクロ波照射下で固体酸触媒を用いた木質系バイオマスの新しい糖化を試みた。炭素系粉末の触媒を用いることにより、短時間で高い糖化率が得られた。この方法は高価な酵素を用いずに、通常必要な前処理なしで糖化処理が行えた。さらに、金属粉末のマイクロ波加熱について詳細に検討し、加熱機構を明らかにした。AlやCuなどの非磁性粉末でも、微細粒子を用いて表面酸化を行うと磁場中で急速に加熱される。また最近注目されている、LEDなどの半導体材料の選択加熱、CFRP複合材の異方性加熱についても紹介する。

1. マイクロ波の可能性と自動車への応用

マイクロ波加熱は、マイクロ波電力を材料に吸収させて材料内部から自己発熱させる方法である。そのため、加熱速度は従来の外部加熱方式（熱伝導やふく射など）に比べて極めて高くなる。マイクロ波プロセスは従来法に比べて消費エネルギーを1桁ほど低減できるため、将来の省エネルギー技術として期待されている。マイクロ波加熱のキーポイントは、加熱室であるキャビティの設計と、マイクロ波によって吸収される材料の選択にある。単一モードのエネルギー集中型のキャビティを使用することにより、新規な特性を有する先進的な材料を創成するだけでなく、新しい自動車用電源としての可能性もある。最初に、新たに開発した加熱システムとマイクロ波吸収材を用いて多孔質セラミックスのマイクロ波加熱を行い、急速加熱の可能性を試みた¹⁾。

※ Hideoki Fukushima, Toyota Central R&D Labs.