

マイクロ波化学を楽しみ，本質を理解しよう！ —第1章 電気化学から見たマイクロ波化学—

松村竹子*

【初めに】

電子レンジで食物が早く温まる現象は日々の生活の中で活用されている。この作用の原理はマイクロ波（周波数 2.45 GHz, 波長 12.2 cm の電磁波）照射下で物質がその誘電的性質によって発熱する，誘電加熱に基づいている。化学合成では，外部から熱を与えて反応を促進して新たな物質を合成するのが一般的であるが，マイクロ波加熱により，迅速に合成するマイクロ波合成法は，1986 年初めて有機合成化学に適用されて^{1, 2)} から世界的に発展してきている。著者は，電子レンジに穴をあけて還流管を取り付けた反応装置を開発し，合成に長時間を要する貴金属の錯体合成に適用した（1989 年日本化学会，1995 年環太平洋国際科学会議）。通常では，数時間を要する錯体合成が 15 分程度で完結することを見出した^{3, 4)}。その後，マイクロ波反応装置（グリーンモティーフ I）の共同開発や“化学を変えるマイクロ波熱触媒”の発刊⁵⁾などの活動を通して，マイクロ波化学の普及に努めた。2005 年より，マイクロ波電源に半導体を用いる半導体マイクロ波装置の開発を行い^{6, 7)}，更に精密なマイクロ波反応装置を開発し

てきた。このような開発経験をもとに，マクロ波化学の基本的性質を述べる。また，次章では，機能性錯体（白金族発光錯体）の迅速・高純度合成法や，小中学生を対象に毎年行っている“ひらめきときめき”，電子レンジ de サイエンス！についても述べる。

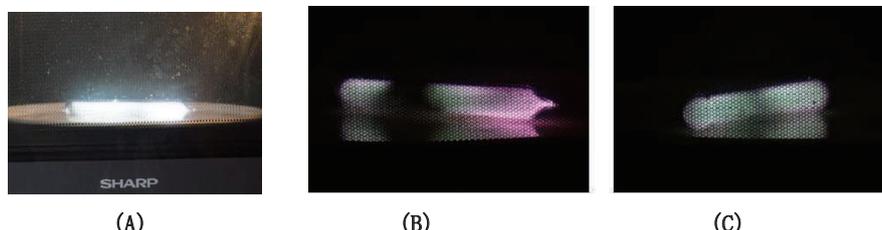
・電子レンジの中で何が起きているか？

電子レンジの中で壊れた蛍光灯が光る！プラズマが見える！電子レンジの中に電気（電磁波）がいっぱい！（図 1）

【マイクロ波化学をその電気的性質から理解してみよう】

日常生活で用いる電気には直流と交流がある。直流は電池で供給され，電気器具に流れる。コンセントから通電する交流は周波数が静岡より東では $f=50$ Herz で，西では $f=60$ Herz である。周波数 f の様々な値に対応していろいろな機能を有する電気的な装置が作られている。

マイクロ波は波長 1 m から 1 mm，周波数 300 MHz から 300 GHz の電磁波で，このうち，工業



(A) N₂ とナノカーボンを封入したガラス管のプラズマ放電

(B) 減圧したガラス管を電子レンジに入れたとき見られるプラズマ放電

(C)

図 1. 実験例：電子レンジ中でのプラズマの発生⁸⁾

*ミネルバライトラボ取締役

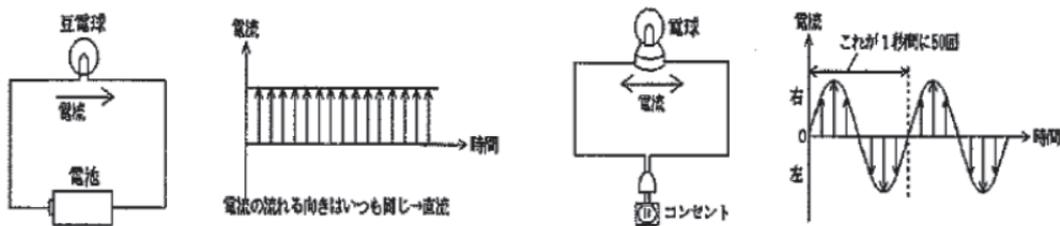


図2. 直流と交流の比較

【マイクロ波化学の基本】

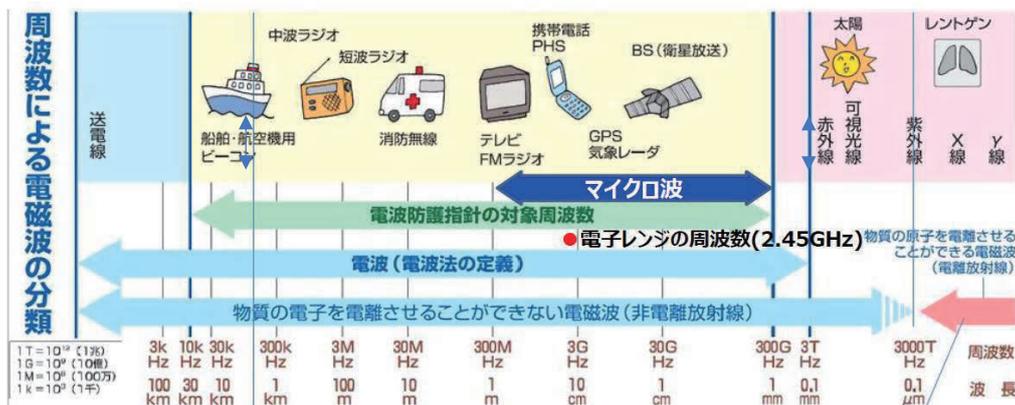


図3. いろいろな周波数 (f) で働く様々な装置

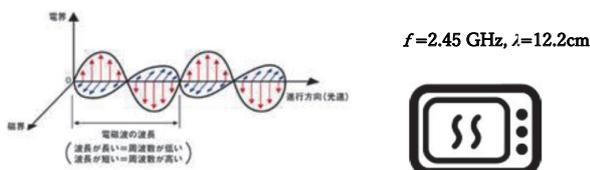


図4. 電磁波 (交流) の電氣的、磁氣的成分と電子レンジに用いられる周波数、波長

用, 化学用, 医療用を目的として割り当てられている周波数 (ISM 周波数) には, 915 MHz, 2.45 GHz, 5.8 GHz, 9 GHz, 24.5 GHz がある. この中で 2.45 GHz のマイクロ波が電子レンジをはじめ, 乾燥, 化学合成, 抽出などの化学分野, あるいは医療の領域に幅広く用いられている.

マイクロ波で, 食べ物が温まることは電子レンジの普及で周知の事実になっているが, マイクロ波による加熱の原理は誘電加熱とよばれ, 物質のミクロナ電氣的性質に依存する. 例えば, 水分子 (H₂O) を例にとると, 水分子は双極子を有する. 分子双極子をマイクロ波の電界のもとに置くと生じる電気分極が電界の動きに追従できず, 熱エネルギーとして放出される. この現象は誘電損失と

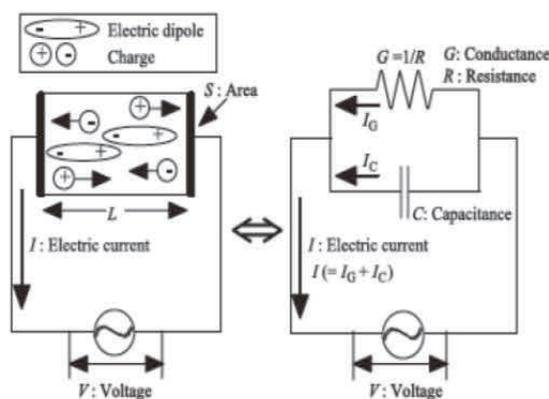


図5. イオンや双極子に電圧が付加されたモデル (左) と電気回路の等価回路 (右) の比較

呼ばれる. また, 正負のイオンも電気伝導率を示し, 電界中で発熱する. 図4に示したように交流電場には磁気成分も含まれているため, 磁性を有する物質も誘電加熱が著しい.

図5は誘電加熱のイメージを物質中のイオンや双極子に電圧が付加されたモデル (左) と電気回路の等価回路を比較したものである⁹⁾. この回路で交流インピーダンスを測定すると, 誘電加熱の情報を得ることが出来る. 物質に電気エネルギー

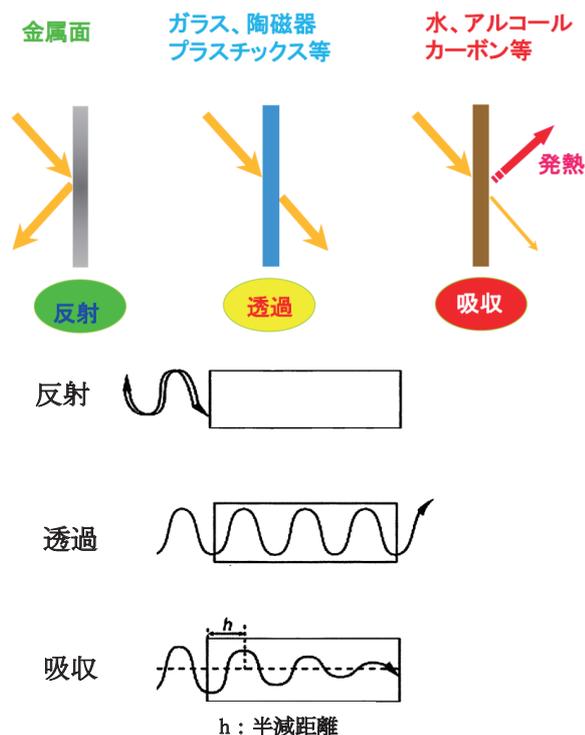


図6. マイクロ波と物質の関係(光の関係と類似させて)を与えると、交流インピーダンスの変化が生じる。この原理を化学物質に適用したのがマイクロ波加熱といわれる方法である。

電界 E および磁界 H と誘電加熱による発熱 P の関係は次の式で与えられる。

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

P[W/m³]: 単位体積当りの発熱量, |E|[V/m]: 電界の電気量, |H|[A/m]: 磁界の磁気量, f[1/sec]: 周波数, σ [S/m]: 導電率, ϵ_0 [F/m]: 真空中の誘電率, ϵ'' : 誘電損失率, μ_0 [H/m]: 真空中の透磁率, μ'' : 磁気損失率

物質とマイクロ波の相互作用は、反射、透過、吸収という物質と光の相互作用との類似で考えると理解しやすい。すなわち、金属はマイクロ波を反射する。したがって、マイクロ波で加熱されない。石英やドライアイスがマイクロ波を透過する。

表2. 固体のマイクロ波加熱

物質	温度 (°C) / 分
C	1283/1
CuO	701/0.5
NiO	1305/6.25
Fe ₃ O ₄	510/2
Fe ₂ O ₃	88/30
NaCl	83/7

一方、水やアルコールはマイクロ波を吸収する。このため、これらの物質はマイクロ波で急速加熱が可能になり、誘電加熱による分子レベルでの迅速な反応が生じる。

表1にマイクロ波照射による液体の温度上昇の実験結果とその誘電特性を示す。表中の ϵ' は液体物質の比誘電率を示し、 ϵ'' は複素誘電率で誘電損失率と呼ばれ、電気エネルギーが熱に代わる際の有用なパラメーターである。この表から ϵ'' が最も大きいエチレングリコールの温度上昇度が高く、最も小さいトルエンでは温度上昇が殆ど無いことが分かる。表2には固体のマイクロ波加熱を示している。温度上昇が著しい物質とあまり上昇しない物質が示されている。固体酸化物の温度上昇は物質の磁性と深い関係があり、マイクロ波の磁氣的成分に関係している。

これまで述べたように、マイクロ波化学はマイクロ波と分子(物質)のコラボレーションの結果、分子(物質)自身の発熱により反応が加速されることにより、通常の加熱反応に比べて、反応時間が短縮される(1/20~1/100)現象である。現在は、マイクロ波化学の領域は実験室レベルの反応から、生産レベルの反応へと対象が広がってきている。

その展開範囲は・食品の乾燥(工業規模)・マイクロ波有機合成(実験室、工業的規模)・薬品、溶媒などの乾燥(実験室工業的規模)・表面処理

表1. マイクロ波加熱による液体の温度変化と誘電特性

溶媒	°C / 30 秒	°C / 60 秒	誘電率 ϵ'	誘電損失率 ϵ''	沸点°C
エチレングリコール	134	176	37	49.95	198
エチルアルコール	81	85	24	22.87	78
水	62	104	80	9.9	100
トルエン	20	23	2.4	0.1	111

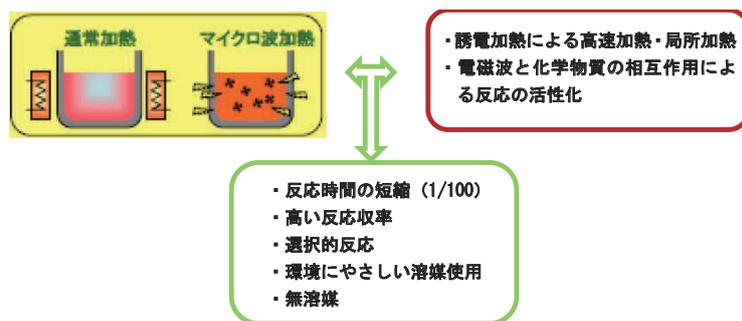


図7. マイクロ波熱触媒反応の特徴

(プラズマ)・無機材料の乾燥, 焼結, 窯業 (工業的規模)・ナノテクノロジー実験室, 工業的規模)・環境, バイオマス, リサイクル等, 広範囲の化学分野に広がっている。

【文献】

- 1) R. Gedye, F. Smith, K. Wastway, A. Humera, L. Baldisera, L. Labergeand, J. Rousell, *Tetrahedron. Lett.*, **27**, 279-282 (1986).
- 2) R. J. Giguere, T. L. Bray, S. M. Duncan, G. Majetich, *Tetrahed. Lett.*, **27**, 4945-4948 (1986).
- 3) 新居敏男, 松村竹子, 岡俊博, *化学と教育* **41**, 278-279.
- 4) T. Mastumura-Inoue, M. Tanabe, T. Minami, T. Ohashi, *Chmem. Lett.*, 1994, 2443-2446.
- 5) 柳田祥三, 松村竹子, “化学を変えるマイクロ波熱触媒” *化学同人* (2004).
- 6) 松村竹子, 藤井知, 福岡隆夫, 栗原英紀, 矢島龍彦, *ケミカルエンジニアリング*, **51**, 590, (2006).
- 7) 松村竹子, 間山暢郎, 小野英世, 藤井知, 福岡隆夫, *海洋化学研究* **21**, No. 1, 3-9.
- 8) S. Yanagida, T. Kida, T. Matsumura, IMPI (International Microwave Power Institute) **49**, 2015.
- 9) 熊谷仁, *日本食品工学会誌*, **9**, 123-134, 2008.