

# マイクロ波化学を楽しもう！第七章

## ——マイクロ波発振器について——

岸原 充佳\*・松村 竹子\*\*

これまでマイクロ波が化学物質に及ぼす様々な現象について述べてきましたが、この章では、マイクロ波発振の基本について、広く使われて来ているマグネトロン発振器と、最近開発が進む半導体発振器について述べてみます。マグネトロンは電子レンジに代表されるようなマイクロ波加熱機器の電源として既に広く使われています。一方、半導体発振器は、当初は通信技術への応用が中心でしたが、近年ではマイクロ波加熱機器の電源としての利用も研究されています。

### 1. マグネトロンとは

マグネトロンとは、円筒形の陽極の中心軸に陰極を置き、軸方向に強い磁界を加えてマイクロ波を発振させる二極真空管のことです。電子レンジ・レーダーなどに使用されています。磁電管とも言われます。

マグネトロンの原型は、1921年頃アメリカのHullによって発明されました<sup>1)</sup>。図1(a)は、

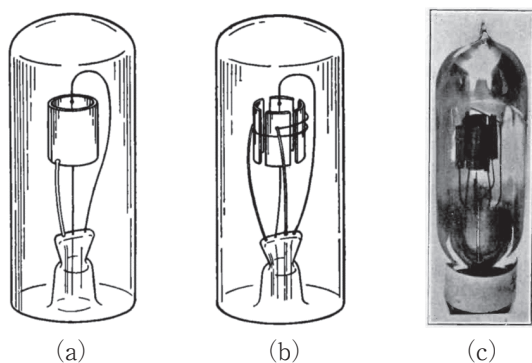


図1. 初期のマグネトロン  
(a) Hullの二極真空管、(b) 岡部の4セグメントアノード（陽極）タイプと (c) その写真<sup>3)</sup>

Hullがマグネトロン動作の研究に使った二極真空管を示しています<sup>2)</sup>。中心軸の陰極（カソード）とその周りに円筒状の陽極（アノード）があります。陰極を加熱することで電子が放出され、電圧の高い陽極へと引き寄せられることで整流作用が発現されますが、この時軸に平行な方向へ磁場が印加されていると、電子は磁場からローレンツ磁気力を受けてサイクロイド状の軌跡を描く運動を始めます。

図2は、軸方向（紙面垂直方向）に磁場を掛けた時の二極真空管内の電子の運動と、それに働く力を示しています。外周の陽極（アノード）から中央の陰極（カソード）に向けて存在する電場  $E$  によって、電子  $e$  は  $F_e = -eE$  の力を外向きに受けます。また磁場  $B$  の中を速度  $v$  で運動する電子は  $F_m = -ev \times B$  の力を受け、進行方向が曲がっていくことになり、図中点線で描かれたサイクロイド状の軌跡を描くことになります。その際、電場や磁場の強さ、円筒の径サイズによっては、電子がアノードに到達せずに戻る場合や、アノードに達して導電電流となる場合が考えられます。

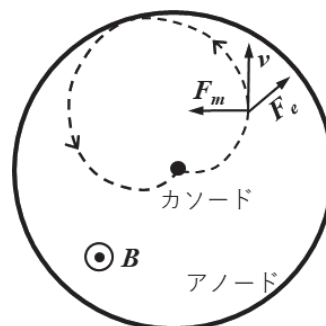


図2. ローレンツ力による電子の運動

\*岡山県立大学准教授

\*\* (有)ミネルバライトラボ

その境目の状態をカットオフ（臨界）と呼び、電子の振動を引き起こし、結果として高周波信号が発生します。実際のマグネトロンでは、電子が外向きに運動する時の半径と戻る時の半径に差異があり、これが電子に濃淡を生じさせて風車が回転するような運動になります。

もっとも、初期の二極真空管では、マイクロ波帯などの高い周波数を得るには至らないものでした。ただ、電子的な振動を発生させること自体は難しくはなく、図1 (b) (c) のようにアノードを分割すると高い周波数での発振が可能になります<sup>3)</sup>。実際、マグネトロン研究で知られる岡部金治郎が兎に角高電圧を与えれば発振すると記し<sup>4)</sup>、1927年に日本で強力なマイクロ波を発生させる分割陽極型マグネトロンを開発しました。更に欧米で改良が進められ、軍用レーダー・電子レンジなどとして実用化されました。なお、文献3)では、図1 (c) のマグネトロンについて、各セグメントに接続したリード線とアノードが共振回路を形成しているようだと言われています。

そして、より高い周波数、より高い出力を得るために、空洞共振回路を埋め込んだ多セグメント・アノード型へ発展していきました。図3 (a) は、AleksereffとMalearoffによる内部に空洞共振器を配置したマグネトロンの構造を示しています<sup>2,5)</sup>。大きなアノードに円筒空洞が4つ設けられているのが分かります。このようなマグネトロンの典型的な断面構造を図3 (b) に示しています。

マグネトロンは直流からマイクロ波帯の交流出

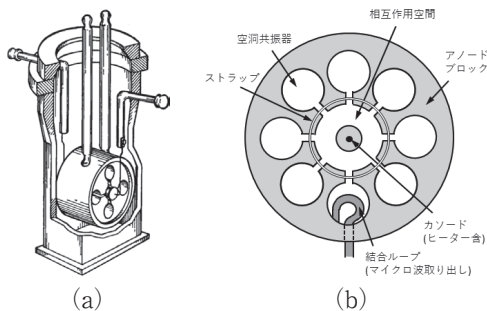


図3. 内部に共振器を持つマグネトロン  
(a) Aleksereffらのマグネトロン (b) 典型的なマグネトロンの断面

力を得るものですが、この変換は柱状カソード（陰極）とアノードブロック（陽極）の間の相互作用空間で行われます。なお、図には描かれていませんが、通電中に均一な磁場が円筒の軸方向に保持されています。アノード（陽極）には円筒状の空洞共振器が軸対称に配置され、細いギャップを介して相互作用空間に面しています。図3 (b) では、共振器間の結合を補強するために導体のストラップが追加されています。マイクロ波出力は、9つある共振器の中から一つの共振器につながれた結合ループを通じて取り出すことができます。この結合ループは、金属ワイヤで作った結合ループを介して取り出すことができます。共振器にスロットを設けて取り出すこともできます。共振器を設けることで、共振周波数付近の電子の振動がマイクロ波として効率よく選択的に出力されることとなります。

## 2. マグネトロンの応用：電子レンジ

マグネトロンは、測距レーダーや気象レーダー装置、身近なものとしては電子レンジのマイクロ波源として応用されています。図4は、市販の電子レンジ（Haier製）のカバーを外した写真になります。中央上部にマグネトロンが設置されています。

電子レンジは食品などに含まれる水分がマイクロ波で振動されることにより生じる誘電加熱（マイクロ波加熱）を利用していますが、この効果を化学反応の促進に用いることで、本シリーズでも取り上げてきたような材料合成の迅速化や効率化

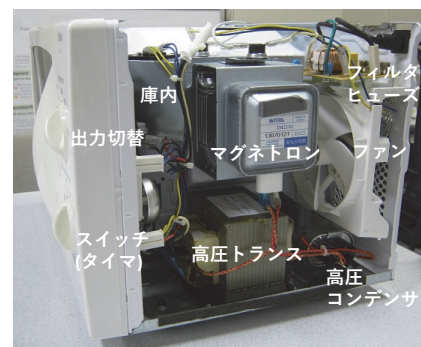


図4. 電子レンジの内部とマグネトロン

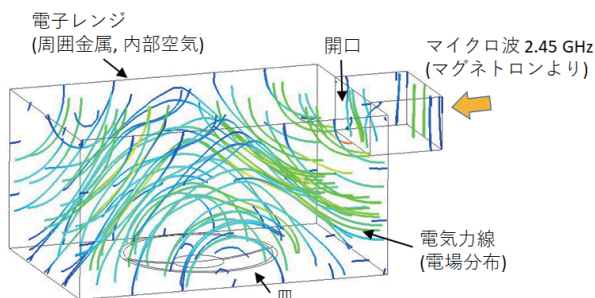


図5. 電子レンジ庫内のマイクロ波分布の様子

が期待できます。

図5は、有限要素法シミュレータ Femtet を用いて描いた電子レンジ庫内のマイクロ波分布の様子を示しています。幅30 cm 高さ15 cm 奥行20 cm の庫内において、右上の側方からマイクロ波が入る構造としています。一般的な電子レンジではこのような配置が多いようです。マグネトロンから発生した2.45 GHz のマイクロ波は、導波管を通して開口部分から庫内へ照射され、シミュレーション結果からは、図のような電気力線（電場分布）を描くことができます。図では描き切れていませんが、黄緑色が電気力線の集まる場所（電場の強いところ）を表します。庫内で、不均一ながらも全体に分布していることが読み取れます。このモデルには皿のみを置いています。料理用に用いられる電子レンジでは、回転するガラス円盤の上に、食材入れた容器を置いて、マイクロ波が均一に照射されるようになっています。これで、電子レンジでチン！が完成します。

マイクロ波を使った化学合成が試みられた初期に筆者（松村）は図6に示すように電子レンジの上部に穴をあけ、還流管を取り付けた加熱・反応させる装置を試作しました。当時の、電子レンジ

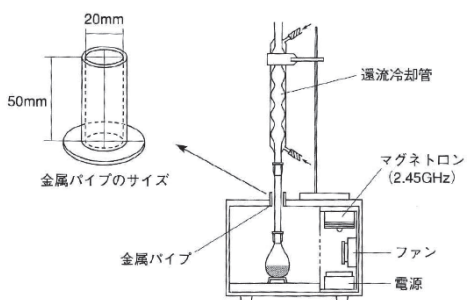


図6. 電子レンジを用いたマイクロ波合成装置<sup>6)</sup>

技術者の助言の下、マイクロ波が漏洩しないように十分な遮へいを考えて設計しました。ちなみに、機外への漏れはマイクロ波チェッカーで簡単に調べることができます。また、市販されている、専用のマイクロ波合成装置も基本的には類似の構造で、マイクロ波の照射量を調節しながら、温度調節を自動的に行えるような仕様になっています。

### 3. 半導体発振器, 半導体増幅器の利用

近年では、マグネトロンに代わって、マイクロ波トランジスタを用いるマイクロ波合成装置に関心が持たれています。一般的に、図7に示すような構成を取ります。この方法は、マイクロ波発振器で生成された微弱なマイクロ波信号をトランジスタで増幅して高出力を得ますが、周波数や出力の制御を行い易いことが特徴です。マイクロ波発振器としては、Gunn ダイオードなどがよく用いられていましたが、昨今は既に無線LAN子機や携帯電話などに広く使われる出力周波数が入力電圧に比例する電子発振器回路電圧制御発振器（VCO）が非常に安価なマイクロ波源として注目されています。これはバラクタダイオードと呼ばれる電圧によって静電容量Cの変化する素子を用いてLC発振などの発振周波数を変化させるものです。

増幅器としては、GaAs や LDMOS, GaN HEMTなどを部材とするマイクロ波用トランジスタが用いられます。このマイクロ波トランジスタは、以前に比べて安価になってきていますが、まだ高価であることが難点です。なお、増幅器で増幅した後はアイソレータ（一方向にのみマイクロ波を通し、逆流を防ぐ）などの部品を置き、増幅器を保護する仕組みが備わります。必要に応

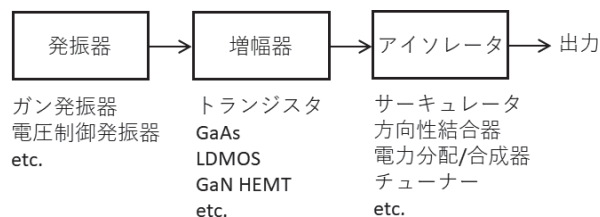


図7. 半導体方式のマイクロ波源

じて、電力分配器やチューナー（インピーダンス整合器）などの部品も用いられます。

### 3. ダイレクト・デジタル・シンセサイザ (DDS)

上述の電圧制御発振器（VCO）など（マグネトロンも）は、いわゆるアナログ方式の電子回路に分類されます。今日では、コンピュータの動作クロックが数GHzになって久しいですが、デジタル信号処理の行える周波数もGHzオーダーの高い回路が可能になってきました。発展途上ではありますが、数GHz程度までであれば、ダイレクト・デジタル・シンセサイザ（DDS）によって、正弦波その他の高周波波形を数値的に直接合成して出力することができるようになってきています<sup>7)</sup>。これは、デジタル音楽プレーヤーがデジタルデータからアナログの音声信号をDA変換により再生するように、正弦波などの数値データから直接時間波形を合成して出力するという方式です。正弦波一周期分の振幅をsin関数より求めてデータ化しておけば、図8で示されるように微小時間 $\Delta t$ 毎に正弦波の振幅を出力していくことで、離散的な正弦波波形が生成されることになります。

これにより周波数を1 Hz単位で制御することや、振幅や位相を直接指定することも可能となり、

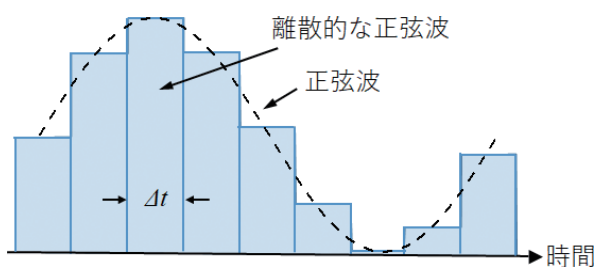


図8. DDSによる正弦波生成の原理

非常に有用な発振器となり、マイクロ波化学も飛躍的に発展することになるでしょう。

### 参考文献

- 1) A.W. Hull, "The effect of a uniform magnetic field on the motion of electrons between coaxial cylinders," Phys. Rev. **18**, 31, July 1921.
- 2) G.B. Collins, Microwave Magnetrons, McGraw-Hill Book Company, 1948.
- 3) H. Yagi, "Beam transmission of ultra short waves," Proceedings of the IRE, **16**, 715, June 1928.
- 4) 岡部金治郎, "マグネトロン等による超短波長電波の発生に就て", 電気学会雑誌, pp. 860-864, Aug. 1927.
- 5) N.T. Aleksereff and D.E. Malearoff, Jour. Tech. Phys. USSR, **10**, 1297, 1940. English translation in "Generation of high-power oscillations with a magnetron in the centimeter band", Proc. I.R.E., **32**, 136 (1944).
- 6) 電子レンジを用いる化学実験 (II) 新居敏男, 松村竹子, 岡俊博, 化学と教育, 278-279, 1993.
- 7) <https://www.analog.com/jp/products/ad9164.html>

**真空管** 内部を高度に真空にし、電極を封入した中空の管流。陰極から陽極に流れる電子を制御することによって増幅・検波・整流などはばひろくもちいたが、現在は、トランジスター・ICなどの半導体にその座を譲り、一般用にはほとんど使われない。マイクロ波管、X線管など、特殊用途のものが残っている。