

## 半導体レーザーの登場前、 マイクロ波の分子発振器が作られた メーザーとレーザーは こうして発明された

霜田 光一  
Koichi SHIMODA

ブルーレイ・ディスクやDVD, CD, レーザー通信, レーザー加工, レーザー・ポインタなどに使われているレーザーの母が「メーザー」です。

1954年に発明されたアンモニア分子メーザーは、24 GHz(波長1.25 cm)の発振器でした。やがて同じ原理で、より短波長の赤外線や可視光線を発振するメーザーが研究され、1960年にルビーを使った光メーザーが発明されました。引き続いて気体や半導体の光メーザーも発明され、光メーザーは「レーザー」と呼ばれるようになりました。

本稿では、それらの発明の歴史をたどってみましょう。

### マイクロ波分光学の始まり

#### ■ 短波長の電波による、 原子や分子のスペクトル研究の始まり

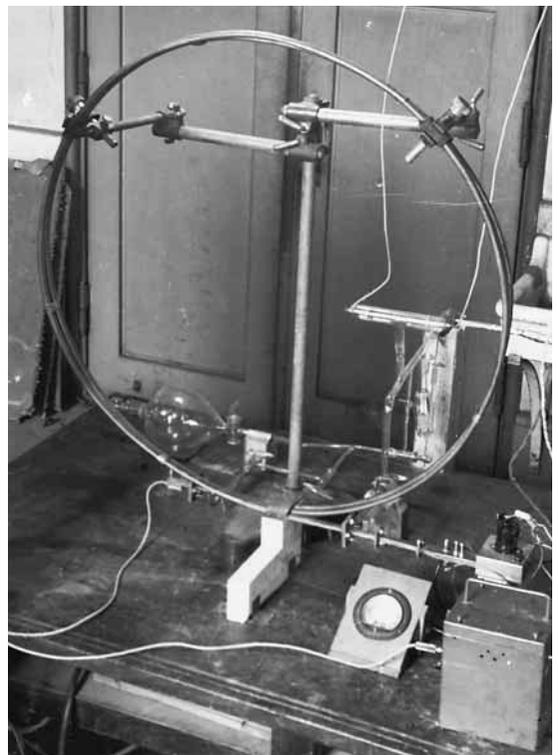
第2次世界大戦では、米英をはじめ日独でもレーザーの高性能化のため、メートル波(VHF)からデシメートル波(UHF)、さらにセンチメートル波(SHF)へと、より短波長の電波技術が開発されました。そして戦後になって、このような短波長の電波を使って、原子や分子のスペクトルの研究が始まりました。これがマイクロ波分光学です。

まずアンモニア分子の24 GHz付近の多数のスペクトル線、次に水分子の22.235 GHzのスペクトル線が観測されました。原子ではナトリウムで1.772 GHz、水素では1.420 GHzのスペクトルが観測されたのです。

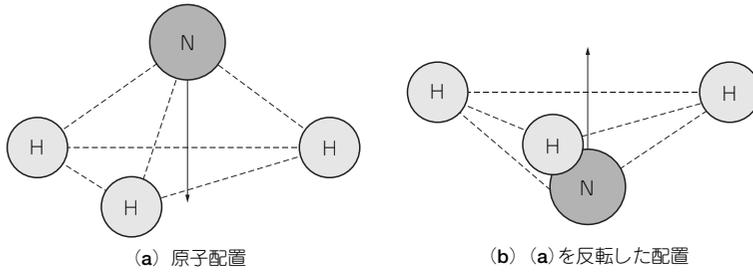
写真1は、私の研究室で最初に作ったマイクロ波分光計です。環状にした導波管吸収セルに低圧のアンモニアを入れ、吸収セルの一端からマイクロ波を送り込み、他端で検出します。マイクロ波の周波数を変えると、周波数が分子の共鳴周波数と一致したときに透過マイクロ波パワーが減少し、写真2のようにスペクトルが観測されます。これはアンモニアの回転状態 $J=K=1$ のスペクトルで、中心周波数は23.6945 GHzです。

#### ■ アンモニア分子の反転スペクトル

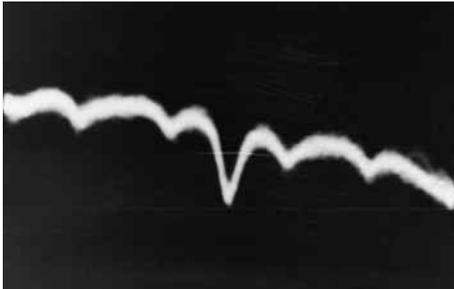
アンモニアの分子 $\text{NH}_3$ は図1に示すように、N原子を頂点とするピラミッド形をしており、図の(a)から(b)に、また(b)から(a)に、ピラミッドを裏返す振動があります。これを反転振動(inversion)といい、そのポテンシャルには図2のように二つの谷があります。分子は振動の基底状態にあっても、量子力学的トンネル効果によって、二つの谷の間を移り変わることができます。これが(a)と(b)の間の反転振動で、アンモニアはその周波数がおおよそ24 GHzです。このときアンモニア分子の基底状態のエネルギー準位は、反転二重項という上下二つの準位に分かれているのです。



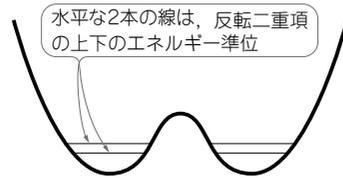
〈写真1〉1949年に手作りした波長1~2 cmのマイクロ波分光計



〈図1〉アンモニア分子の形



〈写真2〉アンモニアのマイクロ波スペクトル( $J=K=1$ で周波数23.6945 GHz)



〈図2〉反転振動のポテンシャル

アンモニア分子は、量子数 $J$ と $K$ で表される飛び飛びの量子状態をもち、反転スペクトルの周波数は回転状態によって異なります。アンモニアの反転スペクトルの中で最も強いのは $J=K=3$ のスペクトルで、その周波数は24.870 GHzです。

■ 吸収スペクトルと放出(発光)スペクトル

一般に原子や分子は飛び飛びのエネルギー単位をもち、下の準位から上の準位に遷移するときに光を吸収し、上の準位から下の準位に遷移するときに光を放出します。下の準位のエネルギーを $E_1$ 、上の準位のエネルギーを $E_2$ とすると、この2準位の間の遷移で吸収または放出される光の周波数 $\nu$ は、

$$\nu = (E_2 - E_1) / h \dots\dots\dots (1)$$

で与えられます。ここで $h = 6.626 \times 10^{-34} \text{Js}$ はプランク定数です。1個の原子や分子は、光のエネルギー $h\nu$ を吸収したり放出したりするので、これを光量子または光子(photon)と呼んでいます。

● 自然放出と誘導放出

アインシュタイン(A. Einstein)は1916年の論文<sup>(1)</sup>で、光の放出には外部からの光と無関係に起こる自然放出と、外部からの光の強度に比例して起こる誘導放出があることを理論的に示しました。

図3は二つのエネルギー準位と、それによって吸収・放出される光子を表します。

1個の原子による誘導放出の確率(毎秒誘導放出さ

れる光子数)は吸収の確率と等しく、アインシュタインの $B$ 係数で表されます。自然放出の確率はアインシュタインの $A$ 係数です。そこで、下の準位に $N_1$ 個の分子があるときに吸収されるパワーは、

$$P_{ab} = nBN_1 h\nu$$

上の準位にある $N_2$ 個の分子が放出するパワーは、

$$P_{em} = (A + nB)N_2 h\nu$$

で与えられます。ここで $n$ は光子数を表します。

● マイクロ波のスペクトルが吸収スペクトルとして観測されるわけ

理由は省略しますが、マイクロ波では自然放出確率 $A$ は非常に小さいので無視できます。そうすると下の準位の分子数が $N_1$ で、上の準位の分子数が $N_2$ のとき、正味の吸収パワーは、

$$\Delta P = P_{ab} - P_{em} = (N_1 - N_2)nBh\nu \dots\dots\dots (2)$$

となります。

分子が温度 $T$ で熱平衡状態にあるとき、上下準位の分子数はボルツマン定数 $k = 1.38 \times 10^{-23} \text{J/K}$ を使って、

$$N_2 = N_1 \exp\left(-\frac{h\nu}{kT}\right) \dots\dots\dots (3)$$

になります。負の指数関数は1より小さいので $N_2$ は $N_1$ より小さく、誘導放出パワー $P_{em}$ は必ず吸収パワー $P_{ab}$ より小さいのです。そこで、マイクロ波のスペクトルはいつでも吸収スペクトルとして観測され、放出スペクトルを観測することはできません。

しかし、マイクロ波分光学的の研究が進むにつれて、マイクロ波スペクトルの誘導放出を観測しようという研究が始まり、それがレーザーとレーザの発明につながりました。