

## 1 序論

### 1-1 核磁気共鳴(Nuclear Magnetic Resonance)について

核磁気共鳴とは、静磁場中に置かれた原子核がある固有の周波数の電磁波と相互作用する現象の事である。

核磁気共鳴は今日、医療をはじめとして幅広い分野に応用されている。

### 1-2 実験の目的

今回の実験では、硫酸銅水溶液を試料として用い、CW-NMR（詳細は後述）と呼ばれる方法で $^1\text{H}$ の核磁気共鳴を測定する。

その後、試料を消しゴムに変え、同じく $^1\text{H}$ の核磁気共鳴を測定し、液体と固体という状態の違いによる信号の変化をみる。

最後に、試料をテフロンに変えて $^{19}\text{F}$ の核磁気共鳴を測定し、 $^1\text{H}$ のものと比較する。

一連の実験を通して、核磁気共鳴に触れ、その原理を理解することが今回の目的である。

## 2 核磁気共鳴の原理

### 2-1 磁場中孤立スピン系の運動と共鳴吸収

核磁気共鳴は磁場中での磁気モーメントの運動として理解することができる。

多くの原子核は固有核運動量或いはスピンと呼ばれる量を持っている。そのため、核磁気モーメントを持ち、磁場と相互作用する。

核スピンの振る舞いは量子力学によって記述される。ただ、核スピン同士が独立に振る舞う場合には、磁場中の磁気モーメントの運動として古典電磁気学で記述でき、古典論で核磁気共鳴が理解できる。

以下、古典的に核磁気共鳴の原理を述べる。

#### 2-1-1 古典的考察

スピンを持つ粒子は、磁気モーメント $\vec{\mu}$ を持ち、それと平行な角運動量 $\vec{J}$ で回転する棒磁石に置き換えて考えることができる。つまり、

$$\vec{\mu} = \gamma \vec{J} \quad (2-1)$$

と表記できる（ $\gamma$ は、磁気回転比と呼ばれるそれぞれの原子核固有の値である）。

磁気モーメントの磁場中での運動を考える。角運動量の時間変化はトルクに等しく、磁場  $\vec{H}$  中で磁気モーメントに働くトルクは  $\vec{\mu} \times \vec{H}$  と書けるから、

$$\frac{d\vec{J}}{dt} = \vec{\mu} \times \vec{H} \quad (2-2)$$

である。式(2-1)と併せて、

$$\frac{d\vec{\mu}}{dt} = \gamma \vec{\mu} \times \vec{H} \quad (2-3)$$

の関係が導かれる。この関係式は、 $\vec{\mu}$  の時間変化が  $\vec{H}$ 、 $\vec{J}$  双方に垂直であることを意味する。磁場  $\vec{H}$  が時間によらないとき、 $\vec{\mu}$  は  $\vec{H}$  との角度  $\theta$  を一定に保ちながらその周りで歳差運動する。

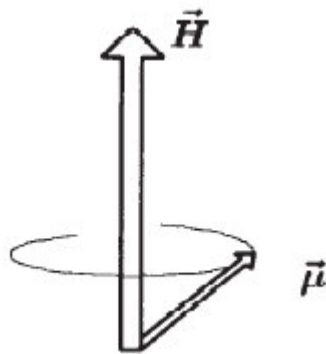


図1  $\vec{H}$  周りでの  $\vec{\mu}$  の歳差運動

今、z 軸方向に時間によらない磁場  $\vec{H}_0$  をかける。これまでの議論から、このとき磁場  $\vec{H}_0$  中にある磁気モーメント  $\vec{\mu}$  は、 $\vec{H}_0$  を軸として歳差運動を行う。

以降、それに加えて、この系に x-y 平面内で回転する磁場  $\vec{H}_1$  をかけたときの磁気モーメントの振る舞いを考える。 $\vec{H}_1$  の回転角速度を  $\omega$  とすると、

$$\vec{H}_1 = H_1(\vec{e}_x \cos \omega t + \vec{e}_y \sin \omega t) \quad (2-4)$$

以下、見通しをよくするために、回転磁場と同じ角速度  $\omega$  で回転する回転座標系で考えることにする。その回転座標系から見たとき、磁気モーメントを  $\vec{\mu}_r$  と書くと、式(2-3)は次のように書き換える事ができる。(演習問題3参照)

$$\frac{\delta \vec{\mu}_r}{\delta t} = \gamma \vec{\mu} \times \left( \vec{H} + \frac{\omega \vec{e}_z}{\gamma} \right) \quad (2-5)$$

この式に、 $\vec{H} = \vec{H}_0 + \vec{H}_1$  を代入すると、

$$\frac{\delta \vec{\mu}_r}{\delta t} = \gamma \vec{\mu} \times \left[ \left( H_0 + \frac{\omega}{\gamma} \right) \vec{e}_z + H_1 \vec{i} \right] \quad (2-6)$$

ここで、 $\vec{H}_{eff} = \left[ \left( H_0 + \frac{\omega}{\gamma} \right) \vec{e}_z + H_1 \vec{i} \right]$  とおくと、式(2-6)は

$$\frac{\delta \vec{\mu}_r}{\delta t} = \gamma \vec{\mu} \times \vec{H}_{eff} \quad (2-7)$$

と書ける。式(2-7)は、回転座標系で見た場合、磁気モーメントは静磁場  $\vec{H}_{eff}$  を受けているような振る舞いをするを示している。さらに、先に行った議論と同様に考えると、 $\vec{\mu}_r$  は  $\vec{H}_{eff}$  まわりに歳差運動する。

(2-6)式を考察する。実際には、 $H_0 \gg H_1$  の条件下で実験を行うため、 $H_0 + \frac{\omega}{\gamma} \neq 0$  の時、

磁気モーメントは  $\vec{H}_0$  周りで歳差運動を行う。(このとき、固定座標系で見ると  $\vec{H}_1$  はある時

は  $\vec{H}_0$  と  $\vec{\mu}$  の角度  $\theta$  を増大させる傾向、またあるときは減少させる方向に働き、長時間平均をとると何の効果もない事が分かる。そのため、磁気モーメントは独楽の首振り運動の様に振る舞う。)

$H_0 + \frac{\omega}{\gamma} = 0$ 、つまり、 $\omega = -\gamma H_0$  の時は、右辺第一項が落ち、



## 2-1-2 量子論的考察

次に、2-1-1 節の議論を簡単に量子論に対応させておく。

ここで、磁気モーメント  $\vec{\mu}$ 、核運動量  $\hbar\vec{I}$  を持つ原子核を考える。

スピンを持つ粒子は角運動量とそれに平行な磁気モーメントを併せ持つ。

これを、 $\vec{\mu} = \gamma\hbar\vec{I}$  の様に表記する。

外部静磁場  $\vec{H}$  に対する相互作用のエネルギーは  $U = -\vec{\mu} \cdot \vec{H}$

ここで、 $\vec{H} = H_0\vec{e}_z$  とすると

$$U = -\mu_z H_0 = -\gamma\hbar H_0 I_z \quad (2-9)$$

となる。

$I_z$  としてとり得る値は  $m_I = I, I-1, \dots, -I$  であるから、

ここで、 $I = \frac{1}{2}$  の原子核を考えると、 $m_I$  は  $m_I = \frac{1}{2}$  (いわゆるスピン上向き。磁場と平行

方向) と  $m_I = -\frac{1}{2}$  (同下向き。磁場と反平行。) をとることができ、外部磁場中でそれぞれ

に対応して二つのエネルギー準位 ( $\mp \frac{1}{2}\gamma\hbar H_0$ ) を持つことが分かる (ゼーマン分裂)。この

とき、準位間のエネルギー差  $\Delta E$  は  $\gamma\hbar H_0$  である。

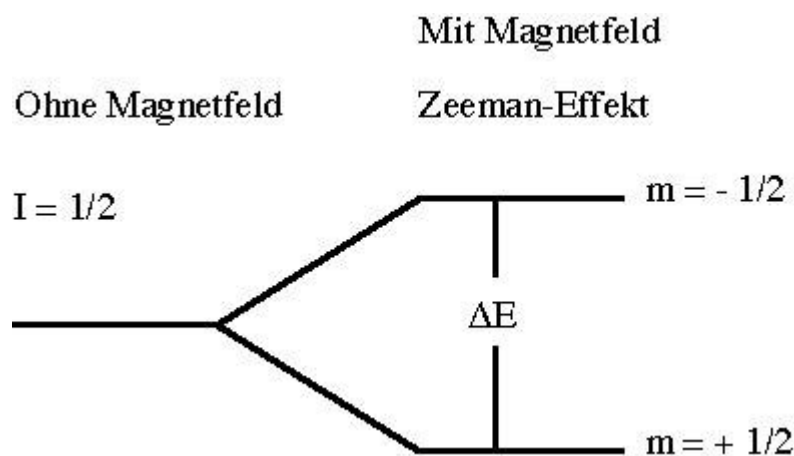


図3 ゼーマン効果

系は、このエネルギー差と同じエネルギーを持つ電磁波を吸収し得ると考える。  
電磁波のエネルギーを  $\varepsilon = \hbar\omega_0$  とすると、次の関係が導かれる。

$$\omega_0 = \gamma H_0 \quad (2-10)$$

これは、前節での考察と一致している。

## 2-2 緩和とブロッホ方程式

電磁波によって励起された原子のエネルギーは、時間と共に電子スピンや他の核スピン、格子振動といったものに流れ、原子は次第に元の状態に戻る。(つまり、電磁波のエネルギーによって外部磁場と反平行な向きを向いた磁気モーメントが、磁場の向きに戻っていく。) これを緩和と呼ぶ。

前節と同じように、 $z$  方向に静磁場  $\vec{H}_0$  がかかっている状況を考える。

その状況で  $M_z$  が平衡にない場合は、 $M_z$  は平衡状態での値  $M_0$  からの差に比例した早さで平衡状態に近づくと考えられる。つまり、

$$\frac{dM_z}{dt} = \frac{M_0 - M_z}{T_1} \quad (2-10)$$

ここで、 $T_1$  は縦緩和時間、あるいはスピン-格子緩和時間と呼ばれる。

また、磁化の構成成分  $M_x$  と  $M_y$  が 0 でないとき、その  $M_x$   $M_y$  は 0 に向かって減衰する。

上記のことを考慮して式(2-3)を書き直すと、次のように書ける。

$$\frac{dM_z}{dt} = \gamma(\vec{M} \times \vec{H})_z + \frac{M_0 - M_z}{T_1} \quad (2-11a)$$

$$\frac{dM_x}{dt} = \gamma(\vec{M} \times \vec{H})_x - \frac{M_x}{T_2} \quad (2-11b)$$

$$\frac{dM_y}{dt} = \gamma(\vec{M} \times \vec{H})_y - \frac{M_y}{T_2} \quad (2-11c)$$

なお、 $T_2$  は収束時間の目安であり、横緩和時間あるいはスピン-スピン緩和時間と呼ばれる。

(2-11)の三つの方程式をブロッホ方程式と呼ぶ。

式(2-3)・式(2-8)で行った議論では、 $\theta$  は連続・周期的に変化する。しかし、式(2-11)のよう

に緩和を考えることで、磁気モーメントは $\theta$ が一定となる定常状態をとりうる。

(この後の議論は、一部演習問題で扱っている)

## 3 実験方法

### 3-1 CW-NMR

今回は、連続波法 NMR (Continuous Wave NMR 以下、CW-NMR) と呼ばれる方法で核磁気共鳴の実験を行う。

CW-NMR は、外部静磁場中の試料に周波数を連続的に変化させながら電磁波を当て、吸収を測定する方法である。また、逆に周波数を固定し、磁場を連続的に変化させる方法もある。一般的に、後者の方が精度の高い測定ができるとされているが、今回用いる方法は前者の方である。

(いずれにしてもこの方法は NMR 実験のうちでも初期に用いられた方法で、現在はあまり行われてはいないらしい。)

### 3-2 実験装置

今回使った実験装置の概要を図 4 に示す。

試料を中に入れた検出コイルを永久磁石 (公称 3800G) の間にセットする。

検出コイルは可変コンデンサとともに LC 共振回路を構成している。

コイルが永久磁石による磁場に垂直な振動磁場を発生させるため、LC 回路の周波数が共鳴周波数と一致したとき、磁気共鳴が起こる。

280Hz 正弦波発信器はロックインアンプと磁場変調用コイル電源に繋がっている。そして磁場変調用コイル電源が磁場変調用コイルと繋がっている。この装置によって、永久磁石による磁場を振動させることができる。この電圧は備え付けのテスターによって随時得られる。

周波数可変電源と可変コンデンサによって共振回路の振動数は調整が可能である。共振回路の周波数の情報は周波数カウンター、電圧の情報は増幅検波器、ロックインアンプを経てコンピューターに送られる。

実際の実験では、振動数を徐々に上げていく。ある振動数で共鳴吸収が起こったとき、LC 回路の電力が変化する (詳細は 3-3 節で述べる。)。これをロックインアンプで発振器の電圧の変化として捉え、コンピューターに送られたその出力情報をもとに、試料の核磁気共鳴を考察する。

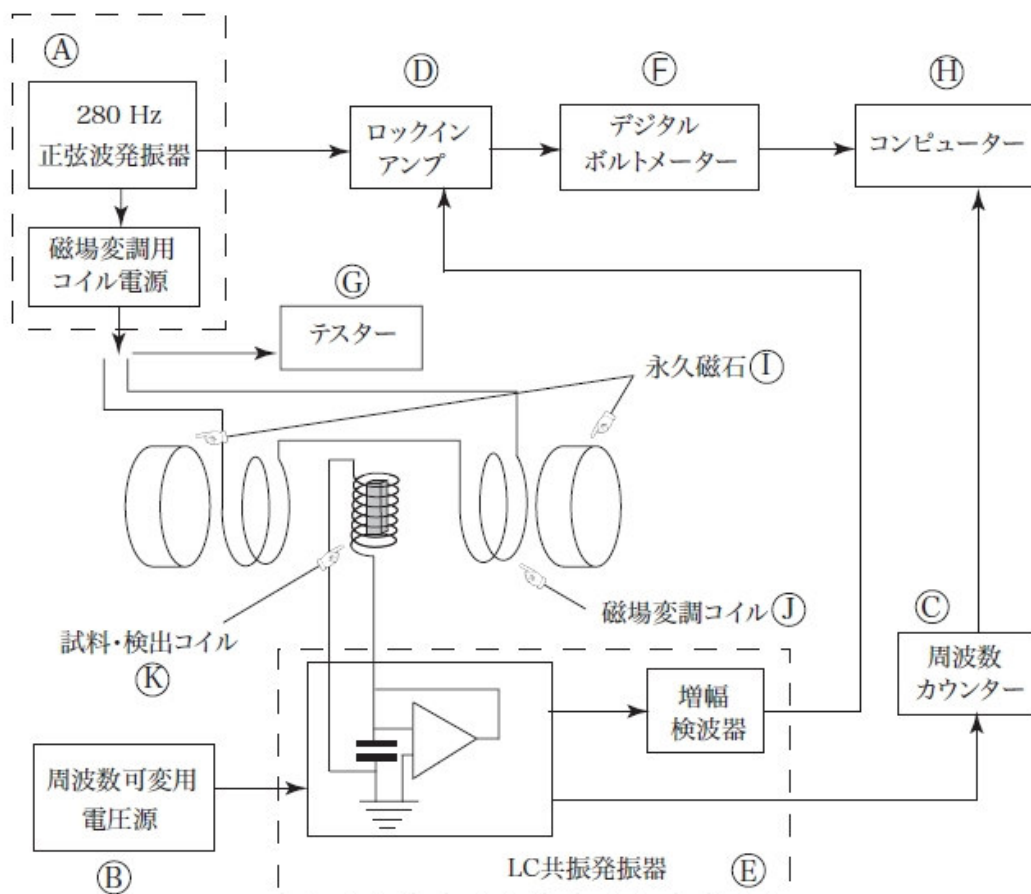


図4 実験器具の概要

### 3-3 出力

今回の実験で得られるのはロックインアンプの出力信号であり、共鳴吸収線を直接得ることはできない。しかし、あくまでも得るべきは共鳴吸収曲線である。

以降、実験装置それぞれの働きから、出力信号と吸収曲線がどのように関係しているかを考察する。

磁場変調コイルを使うことで、試料に加わる磁場は時間によって振動する。

このとき、振動数  $f_0$  にピークを持つ吸収曲線は、 $f_0$  を中心に  $\pm \Delta f$  だけ振動する (図 5①参照。)

磁場の振動に対応して、共鳴吸収強度は図 5②の様に振動する。この信号がロックインアンプに送られる。ロックインアンプは、参照信号の周波数と同じ周波数で振動する成分の振幅を出力する。図 4 から、参照信号として磁場の振動と等しい周波数が送られているので、ロックインアンプの出力は  $\Delta V$  となる。そのため、周波数を連続的に上げていくと図 5③の



下の様な出力信号が得られる。

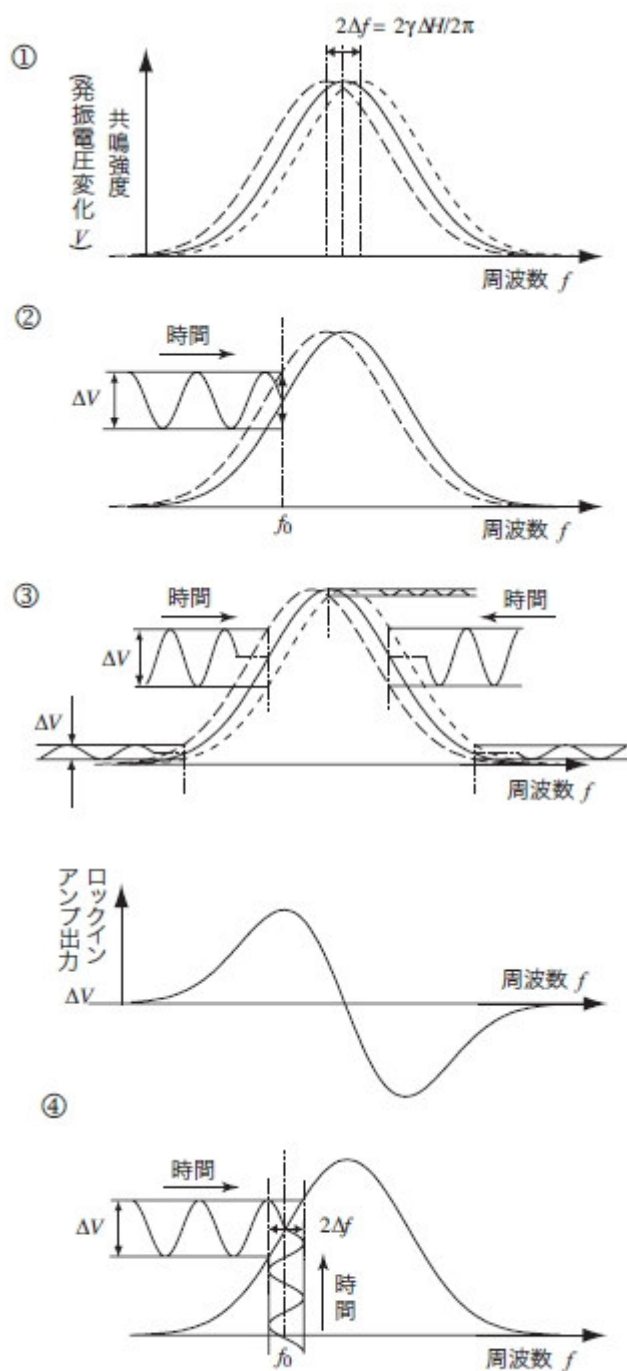
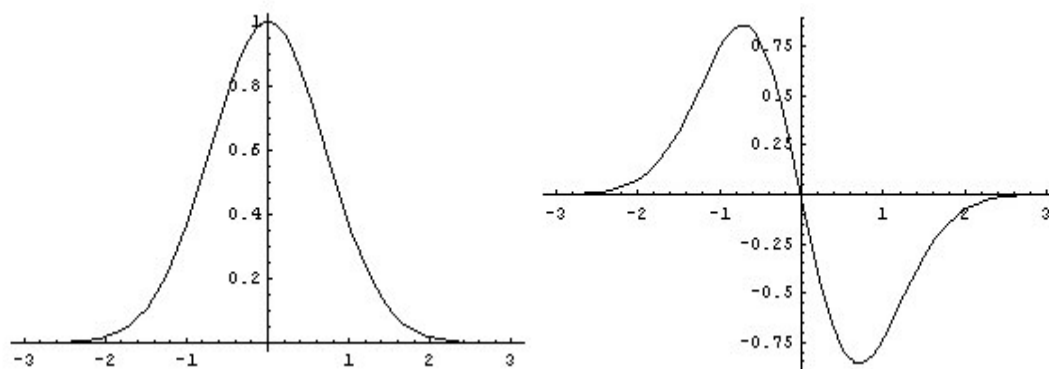


図 5 磁場変調コイルの働きとロックインアンプの出力

この様に考えると、 $\Delta H$  が小さいときはロックインアンプの出力波形が共鳴曲線の微分となる事が分かる。

図 5④は、そのことを表している。

c.f  $e^{-x^2}$ とその微分



後にこの事を用いてロックインアンプの出力信号から元の共鳴吸収線の概形を考察する。  
尚、この実験を行う上で、ロックインアンプの出力信号の各点・特徴を以下のように呼ぶ事とする。

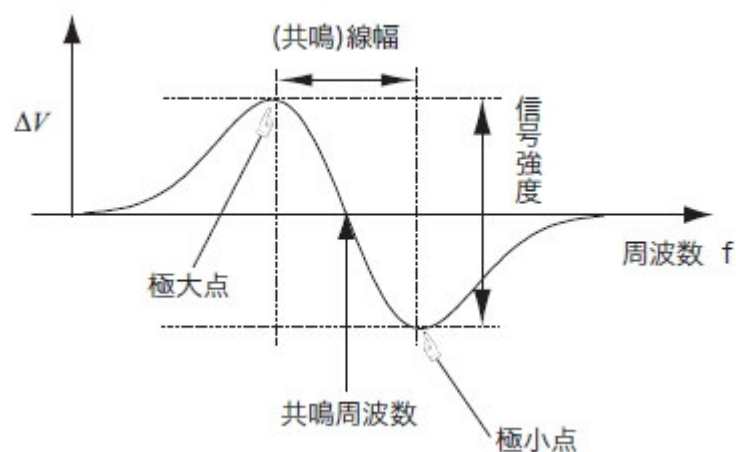


図 6 共鳴線と呼称の定義。

それぞれの測定について、共鳴周波数・共鳴線幅・信号強度を読みとり、記録・考察する。  
なお、今回の実験は、

- ① 何らかの正確な値を得る目的で行う性格をもつ実験ではないこと
  - ② ノイズ・読みとり誤差等による誤差が非常に大きいと考えられること
- 上記の理由から、誤差の議論を省いた。

## 4 硫酸銅水溶液による $^1\text{H}$ -NMR

試料として硫酸銅水溶液をつかい、その水の中にある水素の NMR により  $^1\text{H}$  の吸収線を測定する。

### 4-1 磁場強度分布の測定

測定装置内の適当な位置に原点をとり、その周辺で硫酸銅水溶液を CW-NMR で測定、その出力信号から共鳴周波数、共鳴線幅、信号強度を測定する。

$^1\text{H}$  は  $H_0 = 1\text{T}$  のとき  $f = 42.5759\text{MHz}$  で共鳴する。

$2\pi f = \omega = \gamma H_0$  から  $f \propto H_0$  の関係が導かれ、この関係を利用することで、共鳴周波数から磁場強度が計算できる。

この実験では、上記のことを利用し測定装置内の磁場強度分布を測定する。また、共鳴線幅、信号強度の位置依存性も調べ、考察する。

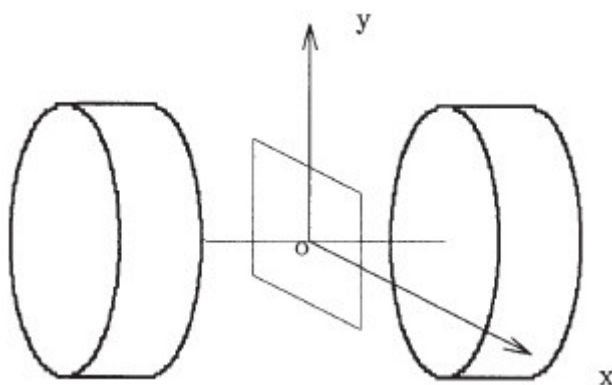


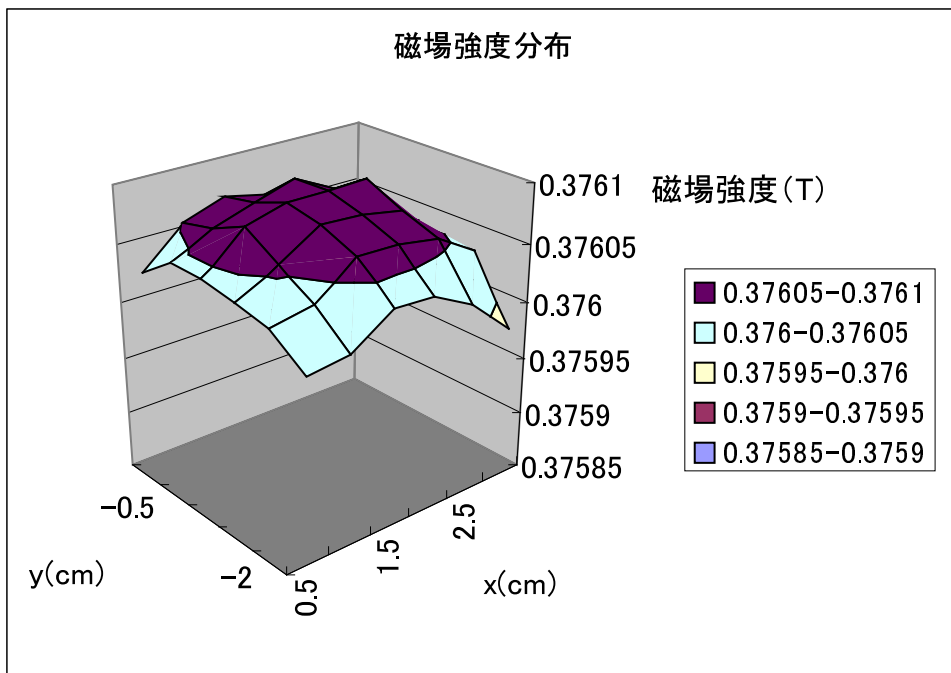
図 7 測定装置内の軸のとり方

尚、今回は予め数カ所測定し、磁場が最も強いと思われる部分を予測、その地点を中心に、そこから x 方向 y 方向共に  $0.5\text{cm}$  毎  $\pm 1.5\text{cm}$  の範囲でデータをとった。

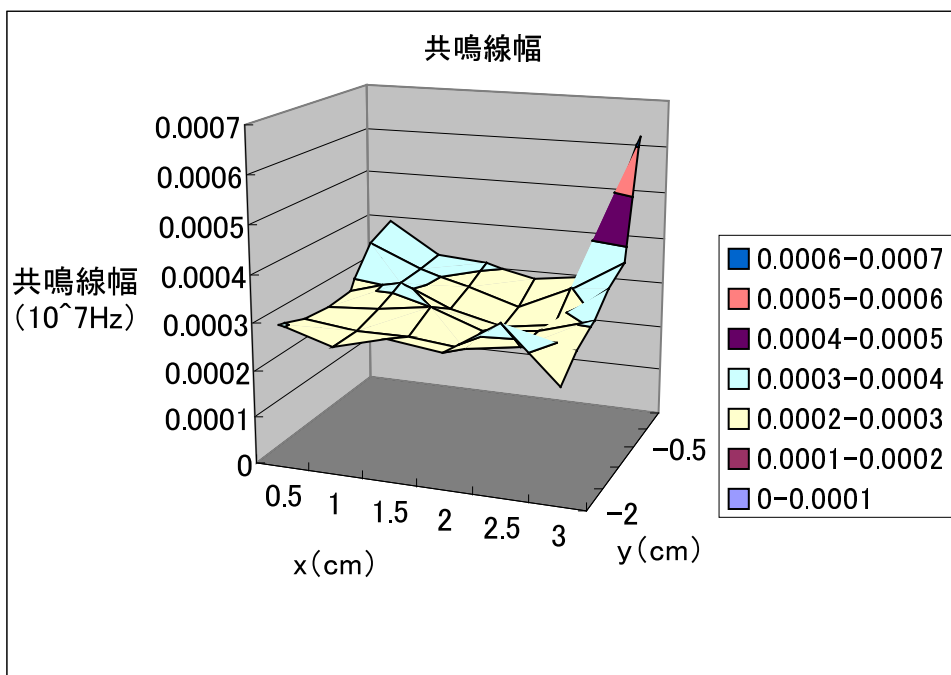
また、テスターの電圧（磁場変調コイルにかける電圧）は、 $1.3\text{V}$  で固定した。

#### 4-1-1 測定結果

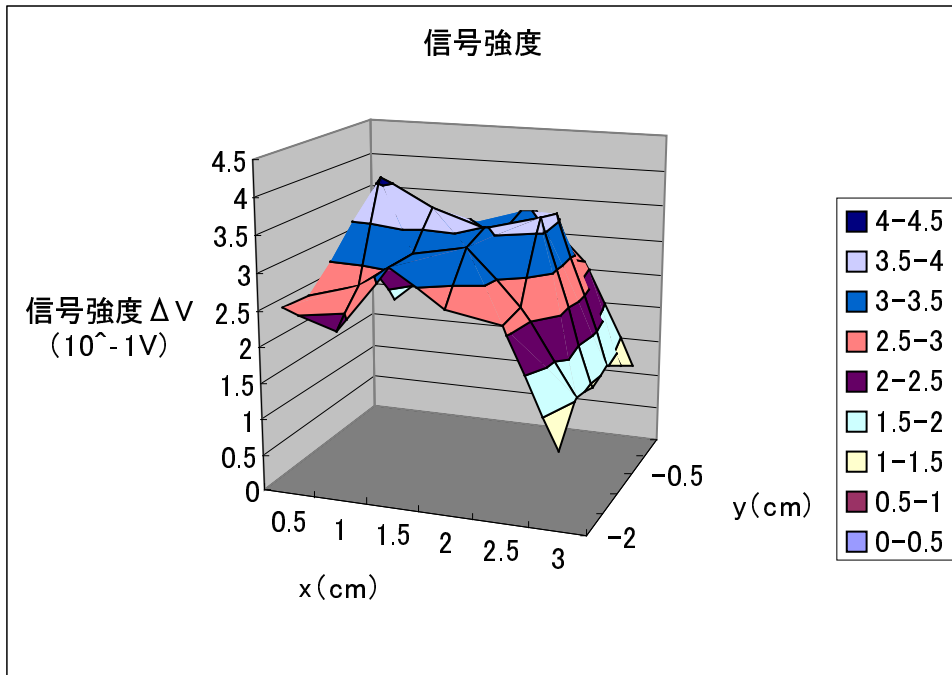
測定結果は次の様になった。



グラフ 1 試料の位置による磁場強度の変化



グラフ 2 試料の位置による共鳴線幅の変化



グラフ 3 試料の位置による信号強度の変化

#### 4-1-2 測定結果の考察

磁場強度分布は、3760G でほぼ一定とみなせるものの、若干中心部が強く、そこから遠ざかるにつれてだんだんと弱くなる傾向にある。この事は実際の感覚とも一致している。共鳴線幅は一点大幅に他とは異なる値となった地点があるが、この測定結果を棄却すれば、中心部は線幅が狭く、外にいくに従って広がる傾向にあると言える。また、信号強度に関しては、多少ばらついてはいるものの、磁場強度の強い中心部分で大きく、外側にいくにつれて減少する傾向が見られる。これは、中心部に置かれた試料にはほぼ均一な磁場がかかるのに対し（図 8 の②参照）、外部に置かれた試料はその箇所によって磁場の強さが異なる（同①参照）事に起因していると考えられる。

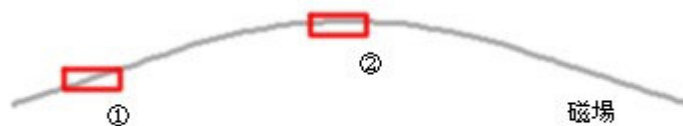


図 8 試料が受ける磁場

この場合、①の試料ではそれぞれの箇所での共鳴周波数が異なるため、共鳴吸収線の幅が広くなり、ピークの高さが低くなることが予想される。出力信号をその微分形であると考えれば、共鳴線幅が広がり、傾きの減少によって出力信号が小さくなることが予想され、今回の実験結果が説明できる。

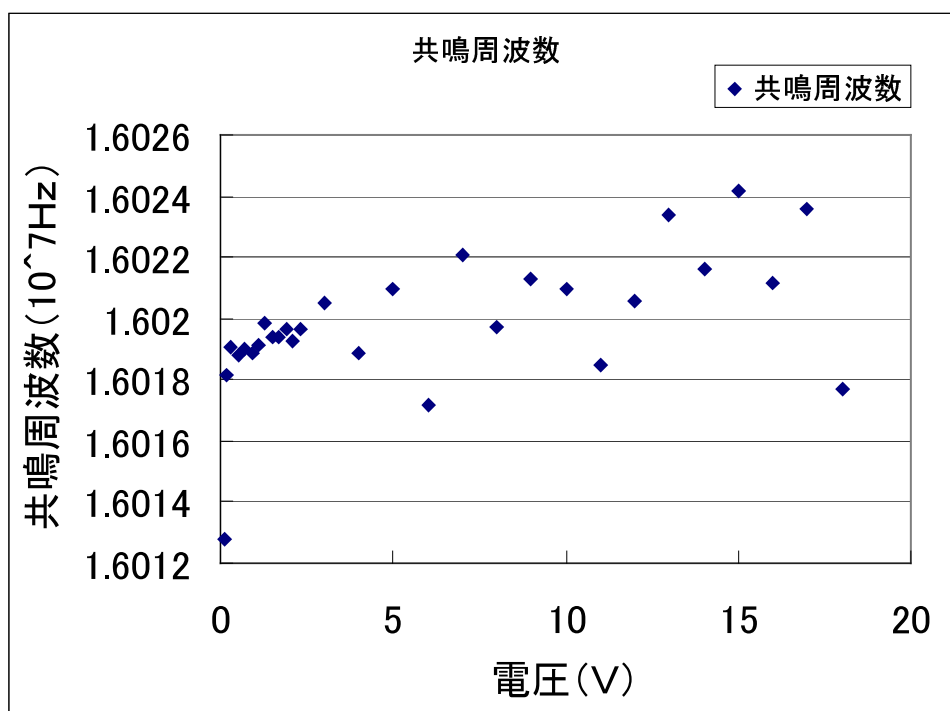
以上の考察から、より精度の高い実験を行いたい時や、今回の試料よりも大きなものを測定するには、より広範囲で均一・安定した磁場を作り出せる磁石が必要不可欠であると言える。

## 4-2 振動振幅の変化による信号の変化

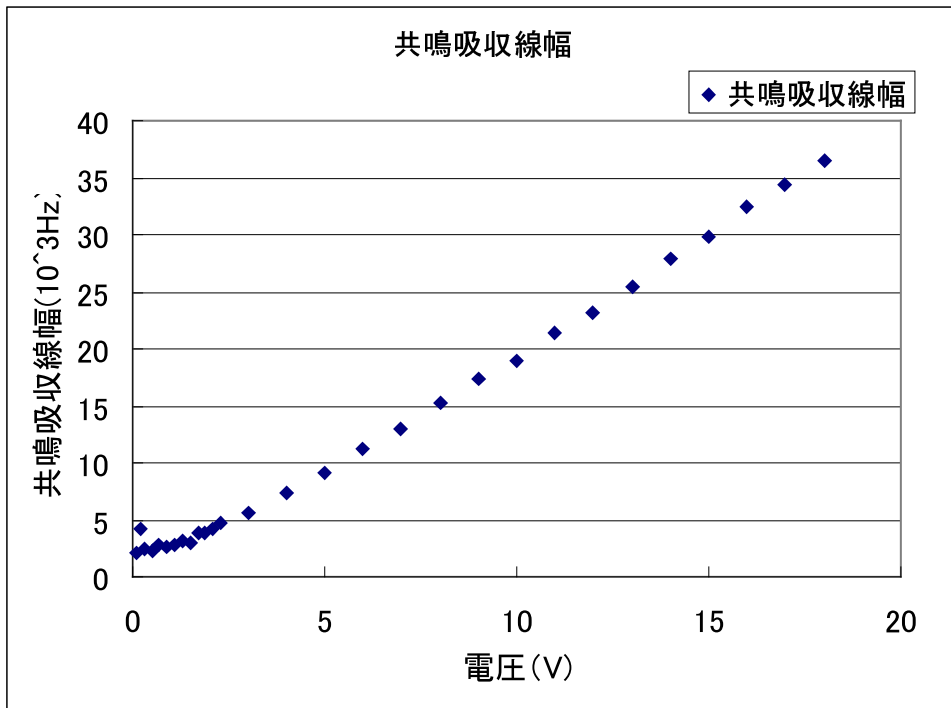
磁場変調コイルにかかる電圧（テストに表示される電圧）を変化させる事で、出力信号がどのように変化するかを調べる。その際、試料として硫酸銅水溶液を用い、その位置を 4-1 の実験で得られた最大磁場の位置に固定する。

### 4-2-1 測定結果

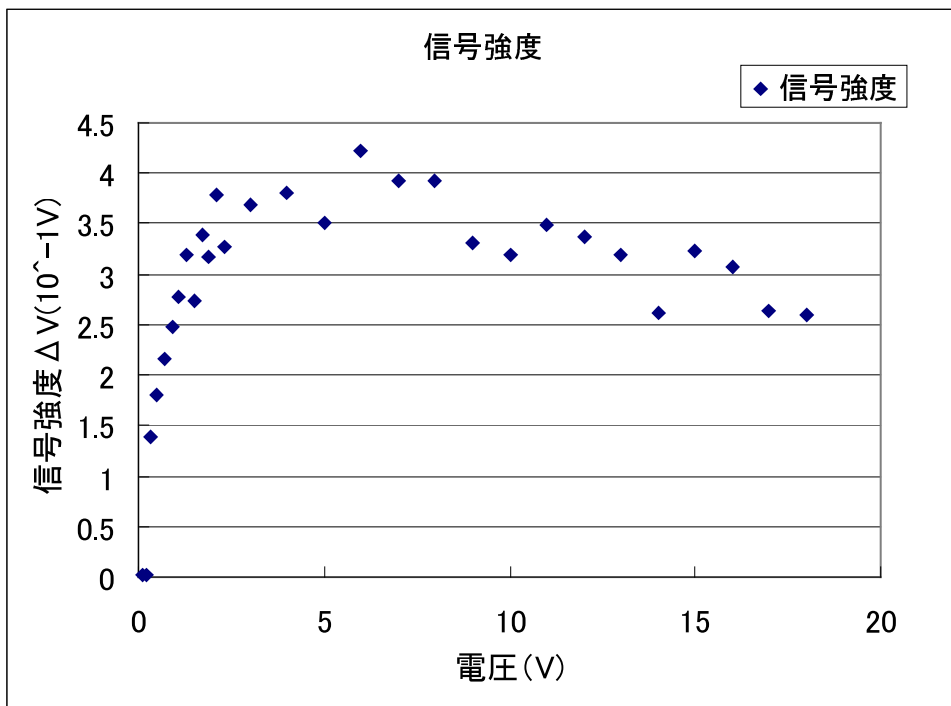
測定結果は次の様になった。



グラフ 4 振動振幅に対する共鳴周波数の変化



グラフ 5 振動振幅に対する共鳴吸収線幅の変化



グラフ 6 振動振幅に対する信号強度の変化

共鳴周波数は、 $16.012 - 16.024\text{MHz}$  で推移している。共鳴吸収線幅は第一に一定の切片を持ち、さらに、電圧をあげるにつれて広がる傾向が見て取れる。

信号強度に関しては、低電圧領域では電圧の増加に対して非常に大きい増加を見せ、 $5\text{V}$  を越えたあたりからやや減少に転じる傾向がつかめる。

#### 4-2-2 測定結果の考察と共鳴吸収線の推測

共鳴線幅に関しては、3-3 節の議論から振動振幅が大きくなるにつれて線幅が広がることが理解できる（図 9 も併せて参照）。

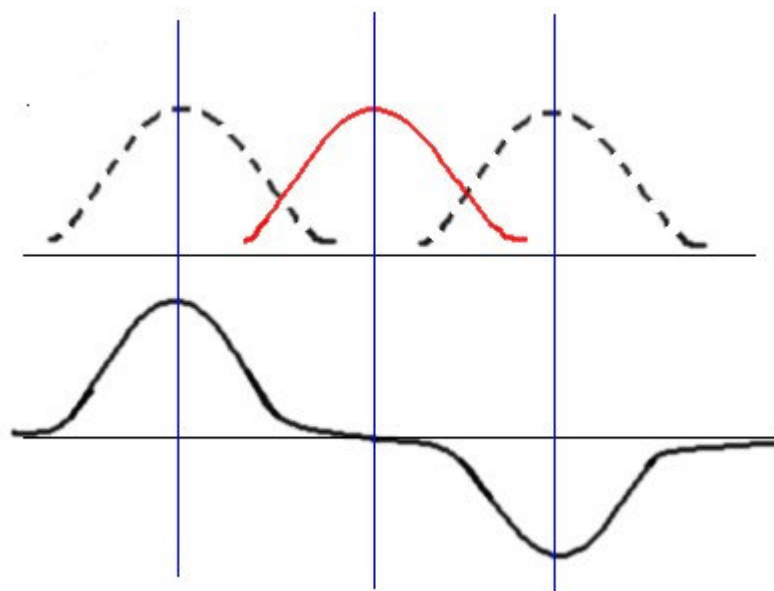


図 9 振動振幅が広いときの共鳴線幅の広がり

実際、 $10\text{V}$  を越える電圧をかけた際は、出力に図 9 の下の絵にあるような、極大点と極小点の間に“踊り場”のような領域が顕著に現れる。

比較的高い電圧領域で共鳴周波数が大きく振動しているような振る舞いをみせるのは、極大点と極小点の間隔が大きくなり、このような“踊り場”が広がる事で、読みとり誤差が大きくなったためであると考えられる。そのことを差し引けば、共鳴周波数は振動磁場の振幅によらないと言える。

また、“切片”をもつのは、3-3 節から、共鳴吸収線の変曲点の間隔以上極大点と極小点が近づけない（逆に言えば、変曲点の間隔が最小値）である為と考える。

さらに、信号強度を考える。その振る舞いを説明するには、

i 低電圧領域では振動振幅の増加に対して、非常にすどく増加



- ii 5V 付近で増加が頭打ちになる
  - iii その後は緩やかに減少する
- この三点を説明する必要がある。  
まず i に関しては 3-3 節から説明がつく。

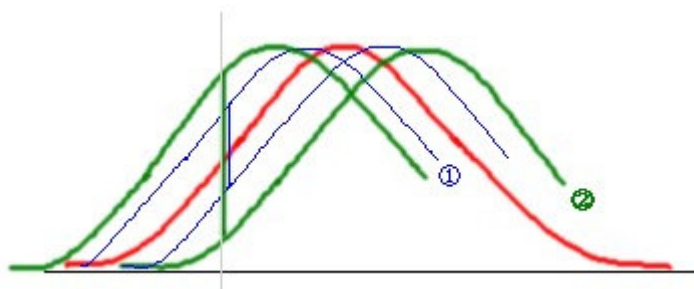


図 10 振動振幅の変化による信号強度の変化

図 10 は、振動振幅の小さい場合の吸収線の振動①とそれに比べて大きい場合の振動②を併記したものである。振動振幅の小さい①に比べて、大きな振幅を持つ②の方が  $\Delta V$  の値が明らかに大きくなる事が分かる。

図 10 は同時にその増加に上限があることを示している。図において  $\Delta V$  は同色二本のグラフの差となっている。そのため、もともとの共鳴吸収線のピーク値を越えることはない。これが ii の原因と考えられる。

また、振動振幅が十分大きくなったとき、ロックインアンプの出力は、図 11 のようになる。

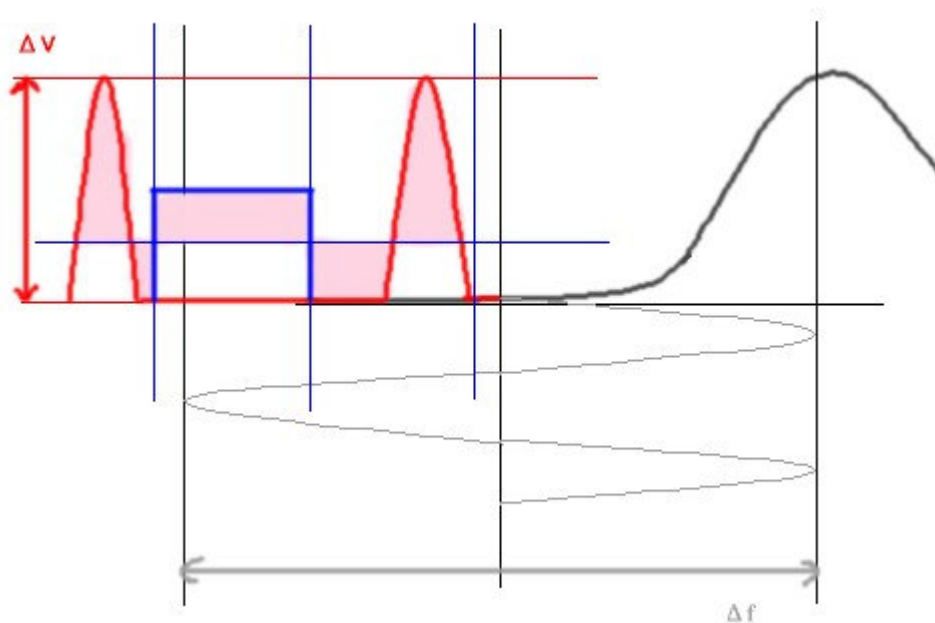


図 11 振動振幅が十分大きいときのロックインアンプの出力

この積分（ピンク色の部分（白黒だと分からないかも知れませんが…））は、正弦関数の場合のものと比べて明らかに小さい。

そのためピーク値付近で正弦関数に近く、振動振幅が大きくなるにつれて図のような形に崩れていく、と考えることでiiiは説明できる。

これまでの議論から、最後に共鳴吸収線の概形を考察する。

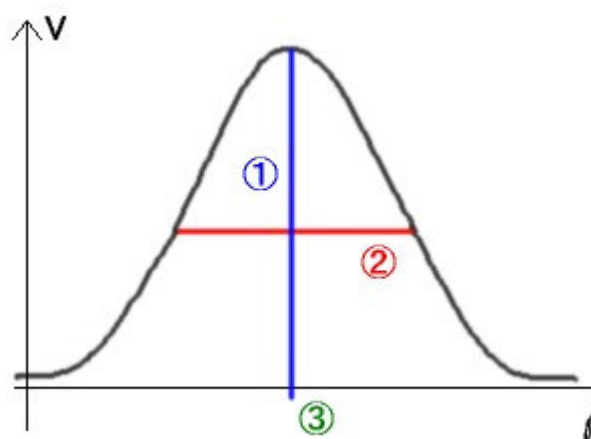


図 12 振動振幅が十分大きいときのロックインアンプの出力

図 12 にあるように、①ピーク値 ②線幅 ③共鳴周波数の三カ所の大まかな数値を求めることで、概形を決める。①に関しては図 11 を用いて説明したように、信号強度のピーク値で置き換えられる。②は共鳴吸収線幅の説明の際触れたように、その”切片”と考えられる。③は（誤差を少なくするため）振動振幅電圧が低い領域の共鳴周波数に置き換える。

以上の考察から、①②③のだいたいの値として。

- ①  $2.3 \times 10^{-1} V$
- ②  $2.5 \times 10^3 Hz$
- ③  $1.602 \times 10^7 Hz$

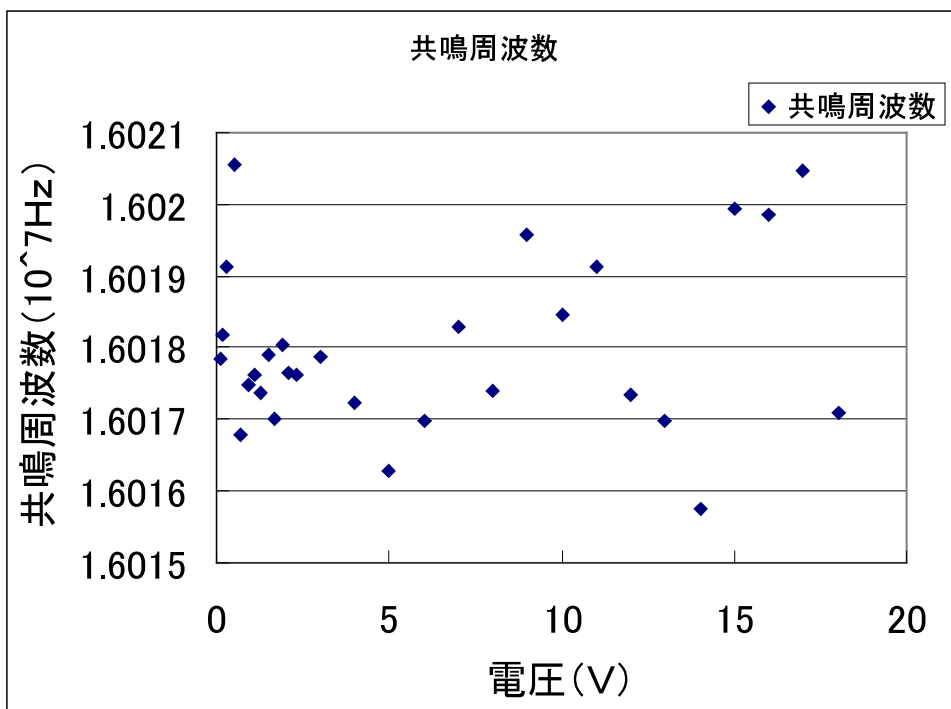
が予測される。

## 5 種々の試料を用いた測定

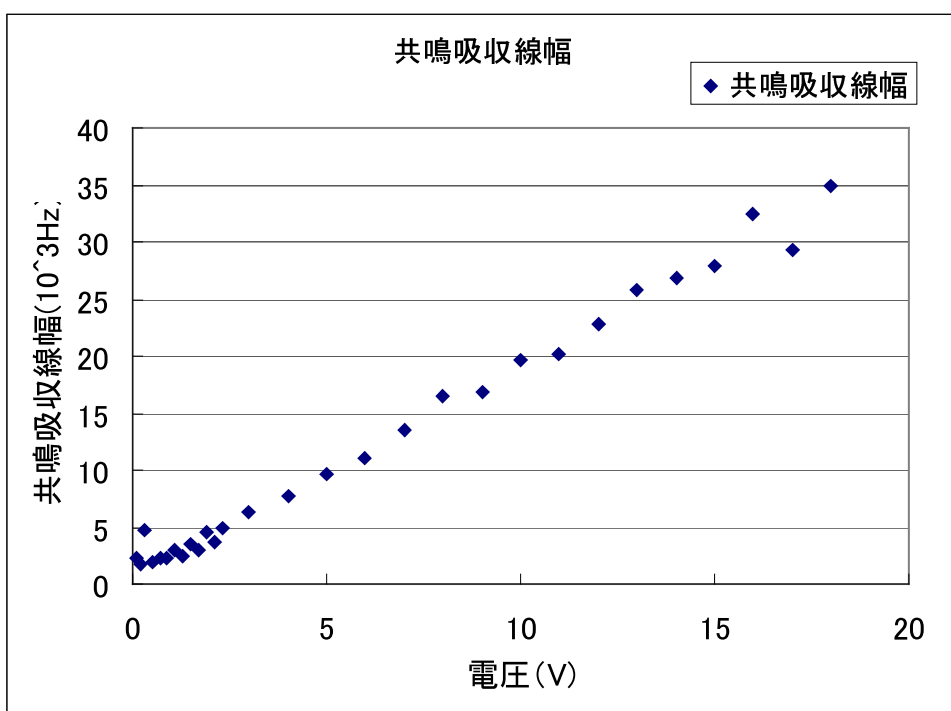
### 5-1 消しゴムを用いた $^1H$ -NMR

44-2 節、5 節と同様の実験を、試料を消しゴムに変えて行う。

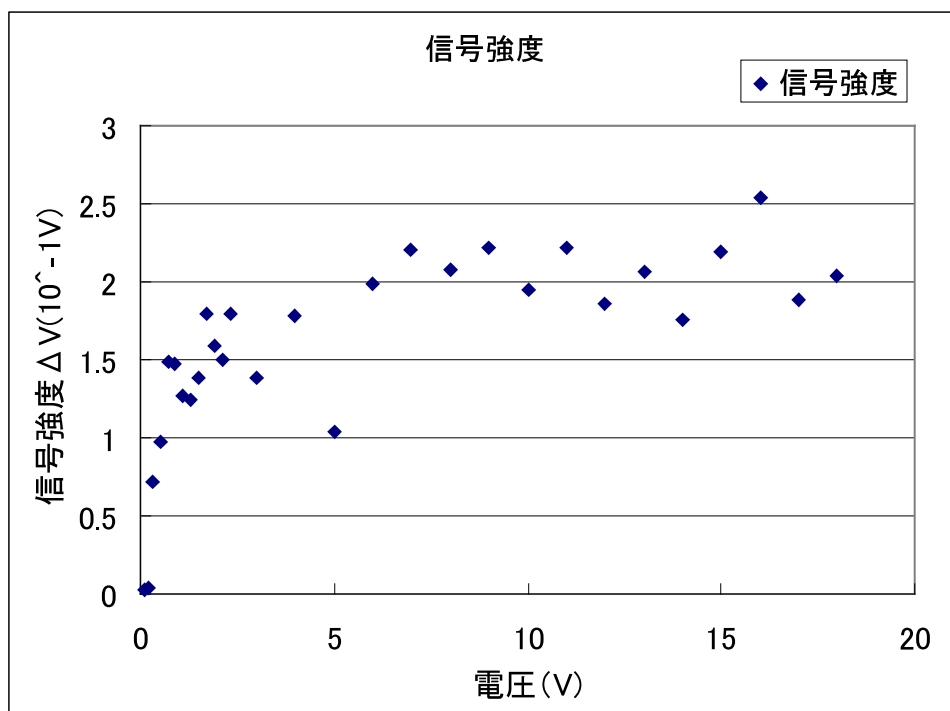
測定結果は次の様になった。



グラフ 7 振動振幅に対する共鳴周波数の変化



グラフ 8 振動振幅に対する線幅の変化



グラフ 9 振動振幅に対する信号強度の変化

共鳴周波数は、 $16.015-16.021MHz$ で推移している。

この値は、硫酸銅水溶液を試料として用いた場合の共鳴周波数とほぼ一致しており、試料の違いによって $1H$ の共鳴周波数は変動しないと言える。

共鳴吸収線幅は硫酸銅水溶液と同様、電圧をあげるにつれて広がる傾向が見て取れる。

消しゴムは硫酸銅水溶液と違い固体であるため、 $1H$ の動きは制限される。そのため、液体の水に比べて緩和時間が長くなり、線幅が広がる…といった影響が出るはずで、現に水の線幅は氷の線幅に比べて $10^{-5}$ 程度であるらしい。

しかし、今回の実験では線幅に顕著な差は認められなかった。

信号強度に関しては、その傾向は硫酸銅水溶液の場合と一致している。しかし、消しゴムと比べてピーク値の値が約 $1/2$ となっている。短絡的に考えれば、消しゴムの方がより $1H$ が少ないとすればこの問題は回避できる。

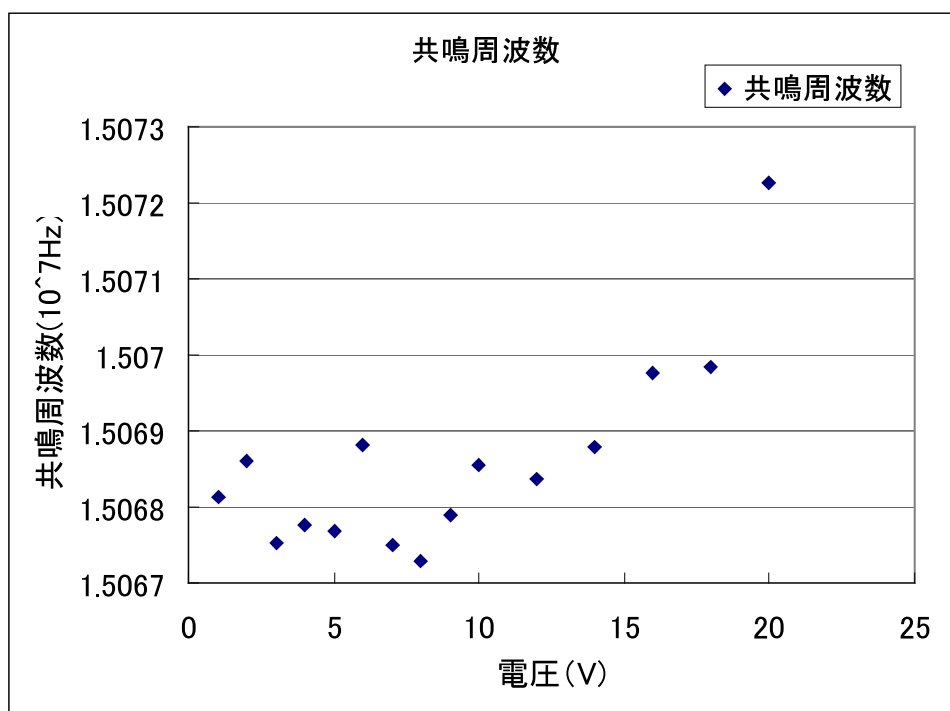
ただ、線幅に硫酸銅との差が見られなかったこと、そして信号強度の違い、この2点の詳細を理解するには、やはり硫酸銅水溶液と消しゴムの構造を理解する必要があると思われる。

最後に、共鳴吸収線の概形を考える。4-2-3 節同様、図 12 で言うところの①、②、③の値を求めると、

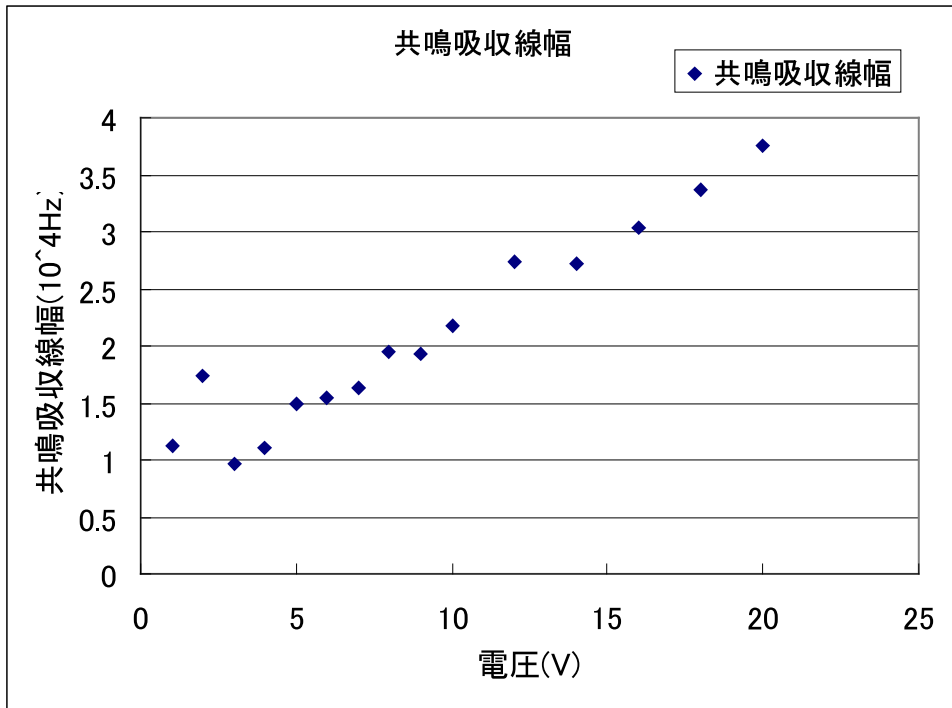
- ①  $2.3 \times 10^{-1} V$
- ②  $2.5 \times 10^3 Hz$
- ③  $1.602 \times 10^7 Hz$  となる。

## 5-2 テフロンを用いた $^{19}F$ -NMR

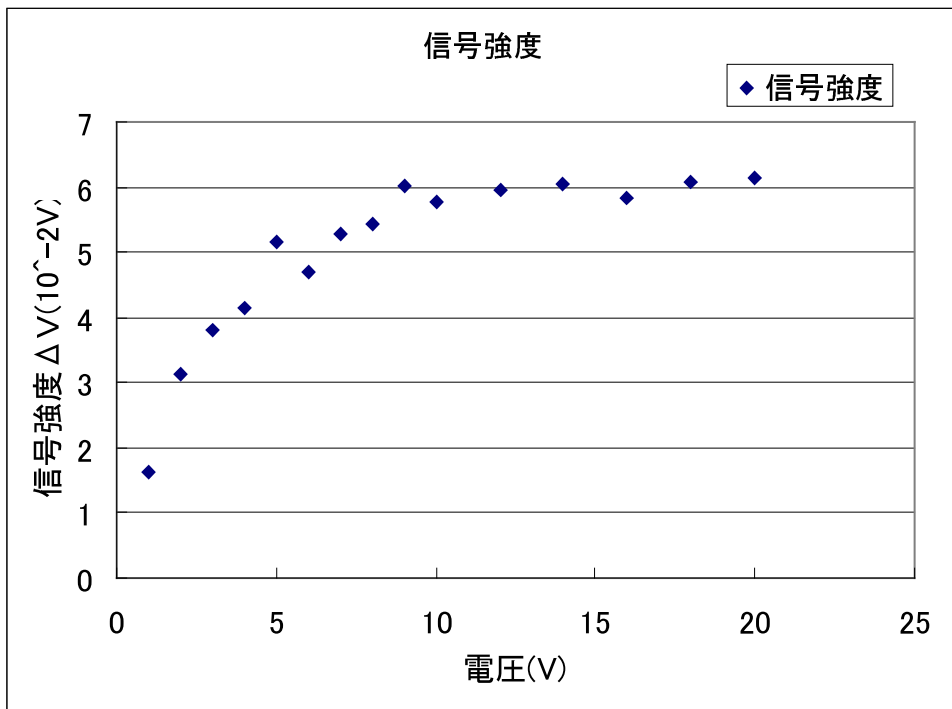
4-2 節、5-1 節と同様の実験を、今度は試料をテフロンに変えて行う測定結果は次の様になった。



グラフ 10 振動振幅に対する共鳴周波数の変化



グラフ 11 振動振幅に対する線幅の変化



グラフ 12 振動振幅に対する信号強度の変化

共鳴周波数は、 $15.067 - 15.073 \text{MHz}$  で推移している。

$^{19}\text{F}$  が  $1\text{T}$  で  $f = 40.055 \text{MHz}$  で共鳴し、測定器の磁場が  $3760\text{G}$  としたときに得られる理論値は  $f = 15.061 \text{MHz}$  である。このことから、共鳴周波数に関しては、おおむね妥当な実験結果であると言える。

共鳴吸収線幅は硫酸銅水溶液・消しゴムと同様、電圧をあげるにつれて広がる傾向が見て取れる。

信号強度の振る舞いも他二試料と同じ傾向にある。

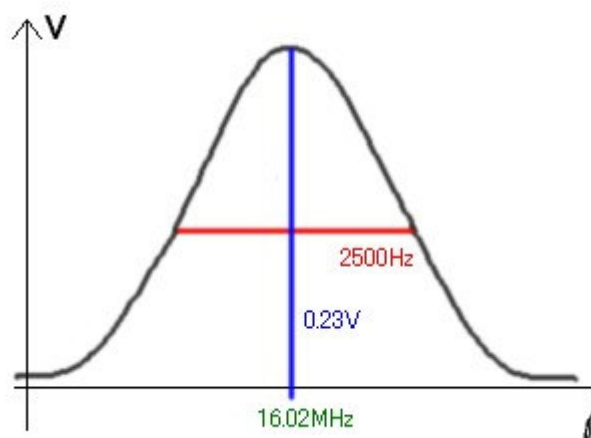
これまで同様、共鳴吸収線の概形を考える。実験結果から①、②、③の値を求めると、そのだいたいの値は

- ①  $6.0 \times 10^{-2} \text{V}$
- ②  $1.0 \times 10^4 \text{Hz}$
- ③  $1.507 \times 10^7 \text{Hz}$

となる。

## まとめ

試料として硫酸銅水溶液を用い、 $3760\text{G}$  の磁場をかけて  $^1\text{H-NMR}$  を行った場合の共鳴吸収線は次のようになる。



また、試料として消しゴムを用いた場合、硫酸銅水溶液を用いた場合と比較して、共鳴周波数・共鳴吸収線の線幅は変化しないがピークはおおよそ半分となる。

さらに、試料としてテフロンを用いた場合には、共鳴周波数は  $1.507 \times 10^7 \text{Hz}$  となり、共鳴吸収線の概形は硫酸銅水溶液を用いた場合と比較して線幅は 50 倍、ピークはおおよそ 10 分の 1 となる。

## 参考文献

- [1] 物理学実験 2005 年度版 名古屋大学理学部
- [2] セグレ 原子核と素粒子 上 丸善
- [3] キッテル 固体物理学入門 下 丸善
- [3] Wikipedia