

平成 19 年度 卒業論文

# 音速測定による $\text{He}3/4$ 比の決定

山形大学理学部物理学科 4 年

クォーク核物理学研究室

熊田宏毅

高橋利弥

平成 20 年 3 月 13 日

## 概要

現在、核子スピンの起源を解明するために行われてきた高エネルギー散乱実験により、多くの実験事実が得られている。また、この実験はQCD理論の検証にも大きく貢献している。

山形大学では、この高エネルギー散乱実験で使用する偏極ターゲットの開発を行っているわけだが、核子スピンを偏極させる方法としては動的核偏極法(DNP)を用いている。この方法を用いた偏極ターゲットシステムは主に6つに分かれ、

1. 電磁石系.....高磁場 (2.5T) を作り出す
2. 真空ポンプ・冷却系...高真空・極低温を作り出す
3. 温度測定系.....極低温の温度を測定する
4. マイクロ波系.....マイクロ波を供給する
5. NMR系.....偏極度を測定する
6. ESR系.....ターゲットに混入された電子の分布状態を調べる

がある。これらのシステムを踏まえて初めて核子スピンを偏極できる。また、偏極度を上げるためには、1つひとつのシステムをを丁寧に機能させることが求められる。特に、偏極の最終段階で極低温環境を維持することは重要である。

一般に、ターゲットの冷却には希釈冷凍法 (*Dilution refrigeration*) を用いる。高い偏極度を得るためには、ターゲットを冷却することはもちろん重要である。しかし、ターゲットを冷却すればするほどクーリングパワーは落ちてしまう。つまり、ターゲットの温度調節をすることとクーリングパワーを調節することは相反する関係にある。また、偏極の最終段階では、ターゲットにマイクロ波を照射するのだが、マイクロ波照射によりターゲットの温度が上昇してしまうため、上昇した分ターゲットを冷却しようとしてクーリングパワーが更に落ちてしまう。そのため、クーリングパワーを維持しながらターゲットを冷却することが求められる。

これを実行するには、ポンプを循環する  $^3\text{He}/^4\text{He}$  混合ガスの濃度を測定し、ガス濃度の変化がターゲットの温度にどう影響してくるのかを知る必要がある。この実験を繰り返すことで、仮に希釈冷凍法を効率よく行うことができる  $^3\text{He}/^4\text{He}$  の最適比を知ることができれば、今までの実験にはなかった高い偏極データが得られる可能性がある。

一般に、ガス濃度を測る機器として、質量分析器 (*Mass spectrum meter*) を用いる。しかし、この機器は、 $^3\text{He}/^4\text{He}$  比を測定しようとするたびにガス循環系ポンプに組み込んでガスの採取をしなければならないため、手間が多いこと、貴重なガスをロスしてしまうという2つの欠点がある。

そこで私たちはこの欠点を埋めるべく、音速測定 (*Sound velocity measurement*) によってガス濃度を測定できるシステムの構築を試みた。このシステムが完成すれば、超音波距離計を元に作成した機器を、一度だけガス循環系ポンプに組み込むことで、常時ガス濃度を測定することができるようになる。

ここでは、システムの詳細を説明し、得られた実験データと構築したシステムの評価、これからの見通しを報告したい。

# 目次

第1章 序論	7
1.1 希釈冷凍法 ( <i>Dilution refrigeration</i> )	7
1.2 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 希釈冷凍器 ( <i>Dilution CRYOSTAT</i> )	9
1.3 循環系 $^3\text{He}/^4\text{He}$ ガスの濃度測定	11
1.3.1 質量分析器 ( <i>Mass spectrum meter</i> )	11
1.3.2 音速測定 ( <i>Sound velocity measurement</i> )	11
第2章 超音波理論	12
2.1 はじめに	12
2.2 周波数による分類	12
2.2.1 分解能 ( <i>Resolution</i> )	13
2.2.2 指向性 ( <i>Directivity</i> )	13
2.2.3 媒質による超音波エネルギーの吸収	14
2.2.4 最適なトランスジューサー (変換器) の開発	14
2.3 超音波の特徴	15
2.3.1 媒質を問わない	15
2.3.2 波長が短い	18
2.3.3 伝播速度が遅い	19
2.4 超音波発生原理	19
第3章 超音波センサーの構造と原理	20
3.1 超音波距離計	20
3.2 圧電効果	22
3.2.1 圧電逆効果	22
3.2.2 圧電直接効果	23
3.3 超音波センサーの構造	24
3.4 超音波距離計回路の動作原理	25
3.5 アナログ IC	27
3.5.1 信号増幅回路	27
3.5.2 検波回路	28
3.5.3 信号検出回路	29
3.6 デジタル IC	30
3.6.1 AND 回路	30
3.6.2 フリップフロップ回路	32

第 4 章	音速理論	33
4.1	音速式の導出	33
4.2	湿度を考慮した空気中の音速	35
4.3	様々な気体中の音速値	35
第 5 章	実験方法及び測定結果	37
5.1	測定装置概要	37
5.1.1	実験機器	37
5.1.2	測定装置の構造	40
5.2	測定方法	42
5.3	空気中の音速測定による測定器の性能評価	43
5.3.1	圧電素子間の距離の変化に伴う音速の測定値と理論値の比較	44
5.3.2	オフセットの値の決定	45
5.3.3	圧力の変化に伴う伝播時間の測定	46
5.4	混合ガスの音速測定	46
5.4.1	$O_2/N_2$ 混合ガスにおける伝播時間の測定結果	47
5.4.2	$Ar/^4He$ 混合ガスにおける伝播時間の測定結果	47
5.4.3	測定結果に対する考察	49
5.4.4	受信シグナルによる問題点とその考察	50
5.4.5	超音波エネルギーによる測定結果の考察	51
5.4.6	$^3He/^4He$ 混合ガスにおける時間分解能と周波数	52
第 6 章	まとめとこれからの展望	54
	謝辞	56

# 目 次

1.1	$^3\text{He}$ - $^4\text{He}$ 液の相図	7
1.2	希釈冷凍法	8
1.3	$^3\text{He}/^4\text{He}$ 希釈冷凍器の構成	9
1.4	山形大学で使用している <i>CRYOSTAT</i>	10
1.5	質量分析器の外観写真	11
2.1	超音波応用技術の使用周波数による分類	13
2.2	超音波反射界面	15
2.3	固体、液体あるいは気体における音波の強度	17
2.4	固体、液体あるいは気体における音波の波長	18
3.1	超音波距離計の外観写真	20
3.2	圧電逆効果の原理図	22
3.3	圧電直接効果の原理図	23
3.4	超音波センサーの構造図	24
3.5	超音波距離計回路の概略図	25
3.6	回路図のタイミングチャート	25
3.7	信号増幅回路	27
3.8	検波回路	28
3.9	信号検出回路	29
3.10	AND 回路	30
3.11	真理値表と電球回路の関係	31
3.12	<i>R-S-FF</i> の動作と記号	32
5.1	測定装置	37
5.2	デジタルオシロスコープと真空ポンプの外観写真	38
5.3	ブルドン管と <i>RPT</i> の示す数値の比較	39
5.4	蛇腹状パイプ内の構造	40
5.5	実験器具接続部写真	41
5.6	測定装置写真	41
5.7	測定装置の原理図	42
5.8	送信シグナル、受信シグナルの画像	43
5.9	測定値と理論値のデータの比較	44
5.10	圧力変化に対する超音波伝播時間のグラフ	46
5.11	$\text{Ar}/^4\text{He}$ 混合ガスの測定結果	48
5.12	データの比較	48
5.13	$^4\text{He}$ 濃度に対する受信電圧の変化	50

5.14	空気中と <sup>4</sup> He 中でのシグナルの比較 . . . . .	51
5.15	<sup>3</sup> He/ <sup>4</sup> He 混合ガスの音速と濃度 . . . . .	53
6.1	国際シンポジウムにおける写真 . . . . .	57
6.2	超音波距離計 A キットの回路 . . . . .	60
6.3	超音波距離計 A キットの概略図 . . . . .	61

# 表 目 次

4.1	気体の性質 . . . . .	36
4.2	様々な気体中の音速 . . . . .	36
4.3	湿度別大気中の音速 . . . . .	36
5.1	1atm の単位に変換したブルドン管と <i>RPT</i> の示す数値の比較 . . . . .	39
5.2	理論値と測定値のデータの比較 . . . . .	44
5.3	$O_2/N_2$ 混合ガスの測定結果 . . . . .	47
5.4	$Ar/^4He$ 混合ガスの測定結果 . . . . .	47

# 第1章 序論

我々はターゲットの高偏極度を得るために、ターゲットを極低温にしなければならない。この極低温を得るための機械として希釈冷凍器を使用している。ここでは、希釈冷凍法の原理と実際に使用している希釈冷凍器について記す。また、循環系  ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$  ガスの濃度測定をするためのシステムについても記す。

## 1.1 希釈冷凍法 ( *Dilution refrigeration* )

希釈冷凍法とは  ${}^3\text{He}$  液と  ${}^4\text{He}$  液の混合熱を利用して極低温を得る方法である。これはまた、 $100\text{mK}$  以下の極低温を連続的に生成する唯一の方法でもある。

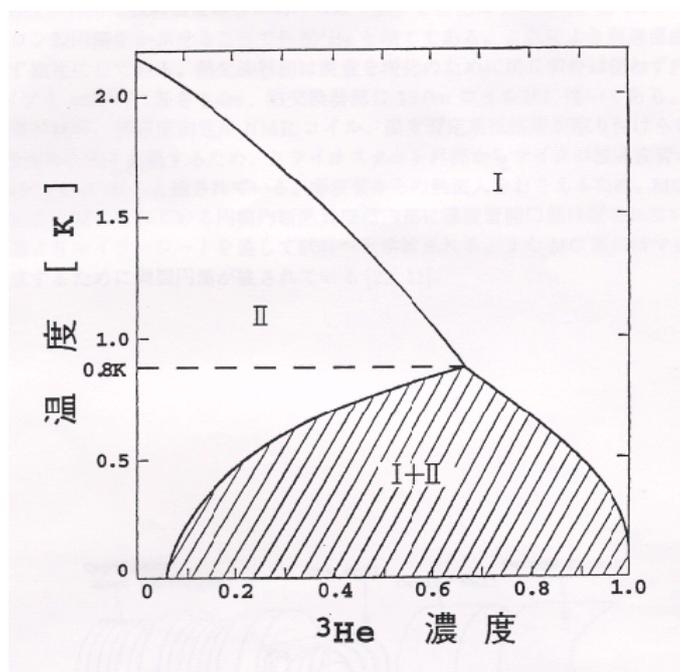


図 1.1:  ${}^3\text{He}$ - ${}^4\text{He}$  液の相図

純粋な液体  ${}^4\text{He}$  は  $2.17\text{K}$  以下で超流動状態を示す。 ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$  混合液の場合では、 $0.87\text{K}$  より大きい温度で  ${}^3\text{He}$  液と  ${}^4\text{He}$  液が程よく混ざり合った状態をとる。(図 1.2 の + は  ${}^3\text{He}$  原子、- は  ${}^4\text{He}$  原子を表す。) しかし、 $0.87\text{K}$  以下になるとこの系は  ${}^3\text{He}$  濃厚相と  ${}^3\text{He}$  希薄相の 2 つの相へと分離する。図 1.2 を見れば分かります。

おり、軽い $^3\text{He}$ 濃厚相が重い $^4\text{He}$ を多く含む $^3\text{He}$ 希薄相の上部に浮く形となる。(ちなみに相の境目では、 $^4\text{He}$ が *Bose Einstein* 凝縮を起こし、すべてがコヒーレントな状態にあるため、力学的真空を形成している。そのため、 $^4\text{He}$ は $^3\text{He}$ と相互作用しない。) また、温度が下がれば下がるほど、上部は $^3\text{He}$ 濃度が高くなり、下部では $^3\text{He}$ 濃度が低くなる。温度が $0\text{K}$ に達すると上部は $^3\text{He}$ 濃度 $100\%$ をとり、下部は $^4\text{He}$ 液に $6.4\%$ の $^3\text{He}$ を含む状態で平衡状態をとる。この2相間の相平衡状態が起こるまで希釈過程による冷却効果は続く。

ここで、 $^3\text{He}$ 希薄相に含まれるわずかな $^3\text{He}$ を強制排除すると、系の平衡状態を保とうとして上部から下部へ $^3\text{He}$ の拡散が起こる。一方 $^4\text{He}$ は超流動状態になっているため、 $^3\text{He}$ は真空中に蒸発していくかのように $^4\text{He}$ と混合する。このとき $^3\text{He}$ は混合熱を奪うので、系全体の温度を下げるができる。(混合熱は真空に排気される液体の蒸発潜熱に例えられる。)

つまり希釈冷凍法とは、どんなに極低温でも $^4\text{He}$ 中に一定量の $^3\text{He}$ が含まれるという性質を利用した画期的な方法なのである。

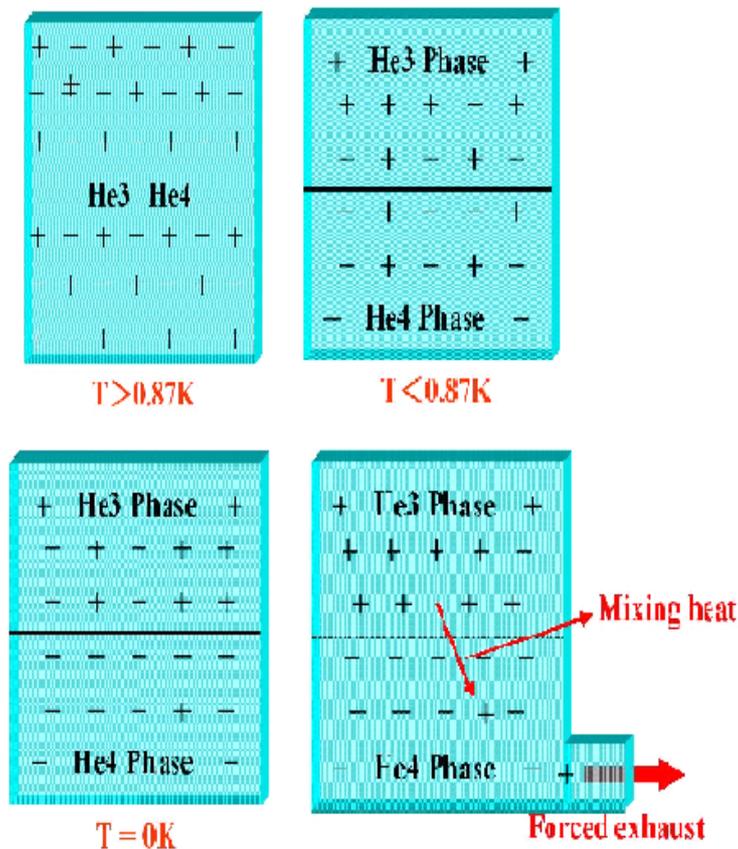


図 1.2: 希釈冷凍法

## 1.2 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 希釈冷凍器 (Dilution CRYOSTAT)

希釈冷凍法を行うために、 $^3\text{He}/^4\text{He}$  希釈冷凍器を用いている。このCRYOSTAT内は2冷却系に分けられる。一方は $^3\text{He}/^4\text{He}$  混合ガスが循環する冷却回路で、他方は $^3\text{He}/^4\text{He}$  混合ガスを予備冷却するための液体 $^4\text{He}$ の冷却回路である。それぞれ簡単に $^3\text{He}$ 系、 $^4\text{He}$ 系と呼ばれている。ここでCRYOSTATの構成図を図1.3に示す。

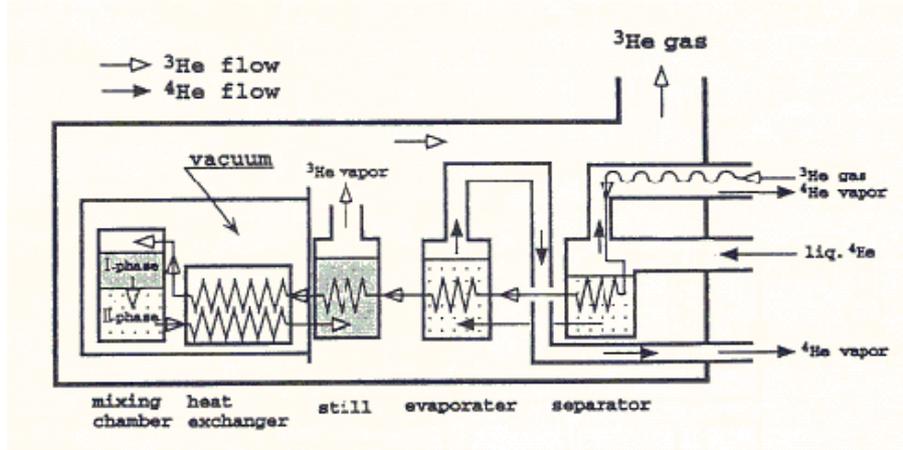


図 1.3:  $^3\text{He}/^4\text{He}$  希釈冷凍器の構成

$^4\text{He}$ 系はSeparatorとEvaporatorの2つの部屋から構成されている。Separatorは $^4\text{He}$  Dewarから液体 $^4\text{He}$ が供給されて4.2Kまで冷却される。するとSeparator内の $^4\text{He}$ がガス相と液相の2つに分離するため、ガス相を外部に排気しなければならない。Separatorの排気ラインはTube in Tube構造を持ち内側のチューブに導入された $^3\text{He}/^4\text{He}$ 混合ガスを予冷するようになっている。Separatorから導入された液体 $^4\text{He}$ はEvaporatorに溜められ、これをポンプで排気することで蒸発潜熱を奪う。するとEvaporator内は2.0K程度まで冷却される。同時に、Evaporator内を通過する $^3\text{He}/^4\text{He}$ 混合ガスラインも2.0K程度まで冷却され、 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 混合ガスは液化される。

$^3\text{He}$ 系はstill、Mixing Chamberから構成されている。液化された $^3\text{He}/^4\text{He}$ はstill、heat exchanger、Mixing Chamberの順に導かれていく。stillでの温度は0.7Kまで達しているため、Mixing Chamberでは前述した2相分離が起こる。下部に含まれる微量の $^3\text{He}$ は $^3\text{He}$ 系ポンプによって選択的に取り出され、強制排気される。するとMixing Chamber内では希釈冷凍が起き、0.1K程度の極低温を得ることができる。排気されていく $^3\text{He}$ は再度heat exchangerを通過する際に、これからMixing Chamber内に入ろうとしている $^3\text{He}$ のラインと熱交換を行い、わずかに暖められてからstillへ戻り、強制排気される。

図1.4は山形大学で使用しているCRYOSTATである。資料装着時における取

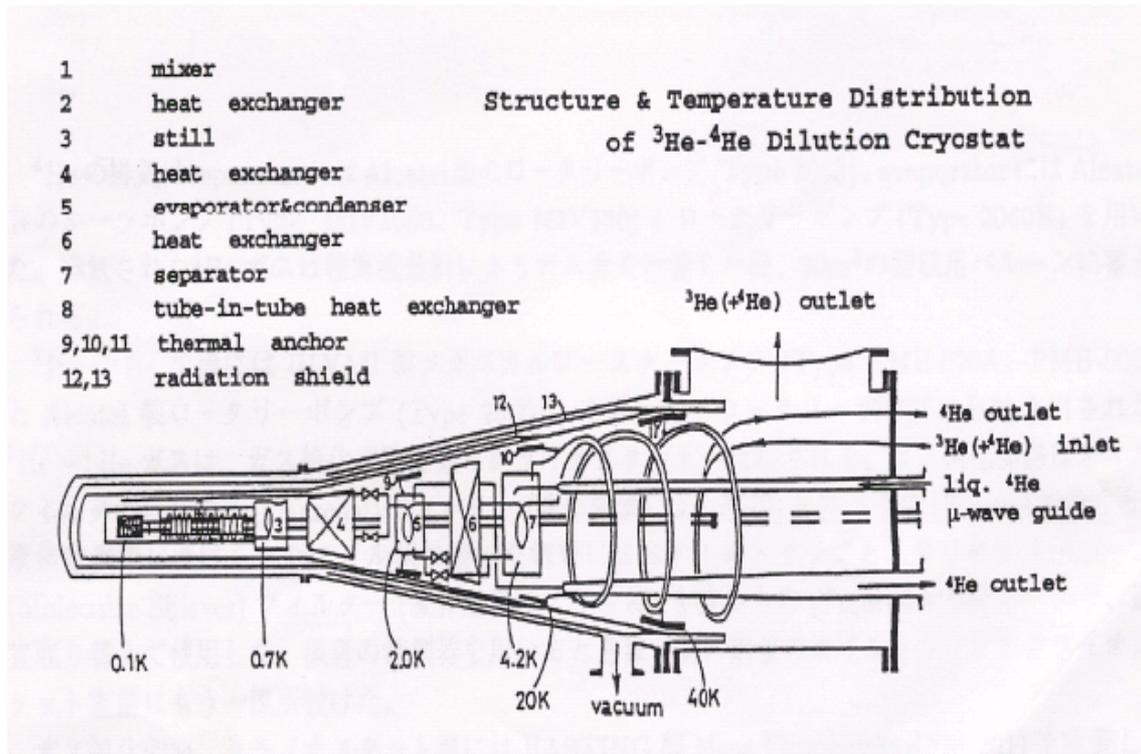


図 1.4: 山形大学で使用している CRYOSTAT

り扱いを容易にするため、*heat exchanger*、*Mixing Chamber* は、真空槽の代わりにテフロン製円筒をかぶせることで外部  $^3\text{He}$  と隔ててある。これによって到達温度と冷却能力は少なからず犠牲にされる。*Mixing Chamber* 内には、偏極ターゲット資料、偏極度測定用 *NMR* コイル、温度測定用抵抗などが取り付けられている。また、動的核偏極法を実現するために、*CRYOSTAT* 外部からマイクロ波導波管が *heat exchanger* の円筒内部へ通されている。導波管からの熱流入を抑えるため、導波管開口部は、マイラーシートにより *Mixing Chamber* と隔てられている円筒内断熱真空槽内部に置かれている。この開口部からマイクロ波はマイラーシートを通して資料へと供給される。また、*Mixing Chamber* にはマイクロ波キャビティを形成するための銅製円筒が被せられている。

## 1.3 循環系 ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$ ガスの濃度測定

### 1.3.1 質量分析器 (*Mass spectrum meter*)

${}^3\text{He}$  系ラインを通過する  ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$  混合ガス濃度を測定する方法としては、一般に質量分析器を使用する。これは  ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$  混合ガス濃度を知りたいときに、 ${}^3\text{He}$  系ラインに組み込み、循環しているガスを機械の中に取り込んで、その中に含まれているガスの成分を調べるものである。しかしこの方法は、ガス濃度を調べようとする度に、機械を  ${}^3\text{He}$  系ラインに組み込まなければならないという手間があるため、非常に不便である。また、一般的に  ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$  混合ガス濃度は常時観察したいものなのだが、それもこの方法では不可能である。



図 1.5: 質量分析器の外観写真

### 1.3.2 音速測定 (*Sound velocity measurement*)

そこで我々は前述した質量分析器が持つ2つの欠点を埋めるべく、 ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$  混合ガス濃度を測定するための新しい方法を編み出した。それが音速測定による方法である。後に詳しく説明するが、音は媒体としての気体の種類、温度、湿度などによって伝わる速さを変える。この音の性質を利用して、 ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$  混合ガス濃度を知ろうというのである。音波を発信する機械としては超音波距離計を使用する。この超音波距離計をベースにして作成した機器を一度  ${}^3\text{He}$  系ラインに組み込んでしまえば、そこから常時  ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$  混合ガス濃度を測定することが可能になる。今回の研究では、音速測定による混合ガス濃度決定システムを構築し、その性能を評価する。

## 第2章 超音波理論

今回の研究では超音波を使用するため、ここでは超音波についてまとめる。最初に超音波の概略を記し、それから周波数別の超音波の性質の違い、超音波の主な特徴を記す。また、少し話を掘り下げて超音波発生原理についても記す。

### 2.1 はじめに

近頃、超音波を応用したいろいろな計測技術が最先端技術として脚光を浴びている。具体的に挙げると、医用超音波診断装置、魚群探査機・海底探査などのソナー技術、超音波顕微鏡などによる新しい非破壊探査手法の開発などである。

これらの技術の多くは、音源から発射された超音波が対象物にぶつかって戻ってきた音波の中に、対象物の様々な情報が含まれているということに着目し、これを解析して、居ながらにして遠くにあるものの情報を獲得するという基本原理をベースにして発展してきた。

自然界に着目すると、イルカやコウモリは既にこの原理にのっとり、水中で獲物を追いかけたり、暗闇の中の障害物にぶつかることなく飛び回ったりしており、彼らにとって超音波は生きていく上で最も重要な位置を占めている。また、彼らは獲物の逃げる方向とその速さを瞬時に把握し、時々刻々の変化に対してためらうことなく追跡する能力を持っている。これらの能力は計算機によるものでなく、生体内の一器官として体内に組み込まれていることから、その能力に対する器官の大きさの比率は実に素晴らしく、現在人類が保有する計算機が次第に小型化・高性能化されているとはいうものの、いまだに自然界の動作機構から学ぶべきことは多いといえる。

### 2.2 周波数による分類

我々が聞くことのできる音の周波数範囲は限られている。低い周波数では  $30\text{Hz}$  の音を聞ける人は極まれで、通常は  $40\text{Hz}$  以上と考えてよい。一方、高い周波数とはいうとこれも個人差があり、耳のよい若い人であれば  $20000\text{Hz}$  を聞くことができる。年輩の人はというと  $7000 \sim 8000\text{Hz}$  以上の音が聞こえないという人が多い。しかし、一般に可聴域は  $30 \sim 20000\text{Hz}$  としてよく、それより高い周波数の音波、「人間の聴覚器官では捉えられない周波数の高い音波」のことを超音波という。逆

に、可聴周波より低い周波数の音波、つまり「人間の聴覚器官では捉えられない周波数の低い音波」のことを低周波という。

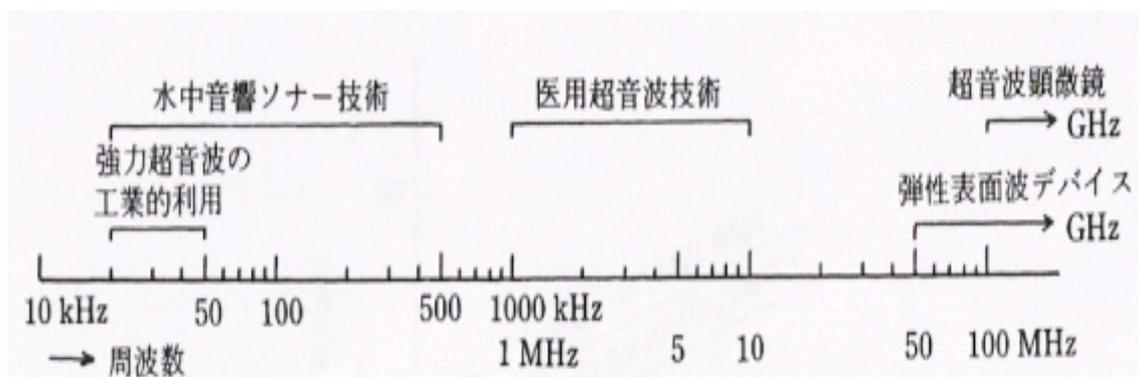


図 2.1: 超音波応用技術の使用周波数による分類

一概に超音波応用技術といっても使用目的や媒質、すなわち固体中か液体中か、または空気中かによって、更には様々な技術上の制約などの条件によって最適な周波数範囲というものとは決まってくる。図 2.1 に超音波応用技術の使用周波数による分類を示す。

技術的制約条件をおおまかに分けると次のようになる。

### 2.2.1 分解能 (*Resolution*)

対象となる物体の情報を正確に抽出しようとした場合、更にそれを映像化しようとした場合、対象物としてはどの程度の大きさのものまでが対象物として限界であるかが問題である。分解能をよくするためには高い周波数の超音波を用いることが有利である。

### 2.2.2 指向性 (*Directivity*)

超音波を音源から発信した場合、あらゆる方向に波が広がってしまうと、対象物の反射波だけではなく、周辺の様々な障害物からの反射波も受信されてしまう。そのため、受信波形から必要な信号を識別することが大変難しくなる。したがって、超音波の指向特性は出来るだけ鋭いほうがよい。指向性を制御するには、分解能と同じく、周波数が高い超音波を用いる。低い周波数では指向角が大きくなってしまふ。指向角 は

$$ka \sin \theta = 3.83 \quad (2.1)$$

で与えられる。 $k$  は波数、 $a$  は音源の半径である。

### 2.2.3 媒質による超音波エネルギーの吸収

情報を得たい物体が遠距離にある場合、伝播途中において媒質によって吸収される超音波エネルギーの量が問題となる。一般に吸収係数(単位長さあたりの媒質によって吸収される超音波エネルギーの割合)によって異なるが、これは周波数の2乗に比例する。また、減衰による受信レベルの変化が誤差につながる。したがって、低い周波数の超音波の方が有利になる。しかし、これは後で詳しく説明するが、様々な困難が生じてしまう。ちなみに、空気中でも高い周波数の超音波の減衰は大きいので、空気を媒体とするときは、超音波発信器の周波数は40kHz前後を用いる。超音波エネルギーの減衰の量は以下の式で与えられる。

$$\Delta P = \mu L f \quad (2.2)$$

$P$  は超音波エネルギーの減衰量、 $\mu$  は吸収係数、 $L$  は音源から対象物までの距離である。

### 2.2.4 最適なトランスジューサー(変換器)の開発

水中音響のように遠距離にある物体を対象とする場合、伝播途中における吸収によって生じる減衰を補償する意味で、音源の大出力化あるいは低周波化の問題がある。生体内では、生体の超音波障害を避ける意味で低い強度の超音波を用いるが、その代わりに、対象物を映像化するために高い周波数の超音波を使用し、ビームを左右に振って電子的にスキャンする必要がある。超音波顕微鏡の場合、対象物上でビームを1  $\mu\text{m}$ 程度の大きさまで焦点を結ぶ必要があるため、GHz単位の超高周波超音波を用いる。

このように、図2.1に示すような技術分野ではそれぞれの応用目的に応じて独自の技術開発が成されてきた。応用目的に合った周波数を発信するトランスジューサーを開発することはとても重要である。

## 2.3 超音波の特徴

### 2.3.1 媒質を問わない

一般に音波は気体、液体、固体を問わず伝搬することができる。しかし、媒質の種類によってその伝搬の仕方は異なる。すなわち、固体・液体中の音速は気体中に比べて速い。また、音波のエネルギーも固体・液体中では気体中に比べて圧倒的に大きくすることができる。このような音響的な性質の違いを表す定数が固有音響インピーダンス  $Z$  であり、

$$Z = \rho c \quad (2.3)$$

で与えられる。  $\rho$  は媒質の密度、 $c$  は音速である。音速  $c$  は、空気中で 340m/秒、水中で 1500m/秒、金属中で 6000m/秒前後である。また、 $Z$  の値は空気は 42、水で  $1.5 \times 10^5$ 、鉄では  $5 \times 10^6$  (いずれも CGS 単位) で、水や金属は空気と比べて圧倒的な値をもつ。ちなみに、情報を得たい対象物の境界における反射の大きさもこの固有音響インピーダンスで決まり、音波の振幅の反射率  $r$  は

$$r = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_2 + Z_1} \quad (2.4)$$

で与えられる。超音波の反射界面を図 2.2 に示す。

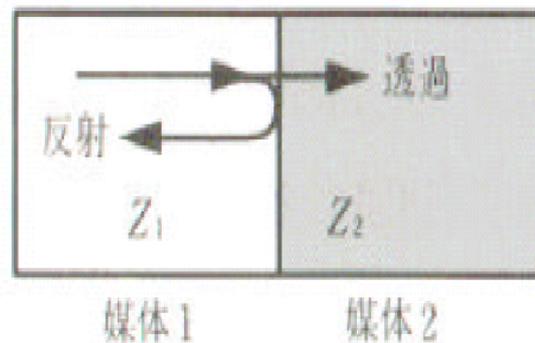


図 2.2: 超音波反射界面

固有音響インピーダンスは、基本的には音圧  $P$  と粒子速度  $u$  (媒質の振動速度であり、音波の伝搬速度とは違う。) との比、すなわち

$$\frac{P}{u} = \rho c \quad (2.5)$$

で与えられる。この式より、同じ粒子速度に対して水中または金属中では、空気中より音圧が圧倒的に大きくなるのが分かる。音波の強度  $I$  (媒質の単位面積当たり毎秒通過する音のエネルギー) は

$$I = \frac{Pu}{2} = \frac{\rho c u^2}{2} \quad (2.6)$$

で与えられるため、音源での振動速度が一定であれば、水中や金属中で容易に大出力の音波を放射することができる。ちなみに、密度  $\rho$  の媒質中での振動による単位体積中のエネルギー  $E$  は

$$E = 2\pi^2 A^2 f^2 \rho \quad (2.7)$$

で与えられるのだが、この式より、超音波エネルギーはその振幅と周波数、媒質の密度によって大きく左右されることが分かる。また、この式を使うと前述した音波の強度は

$$I = 2\pi^2 A^2 f^2 \rho c \quad (2.8)$$

と表すことができる。

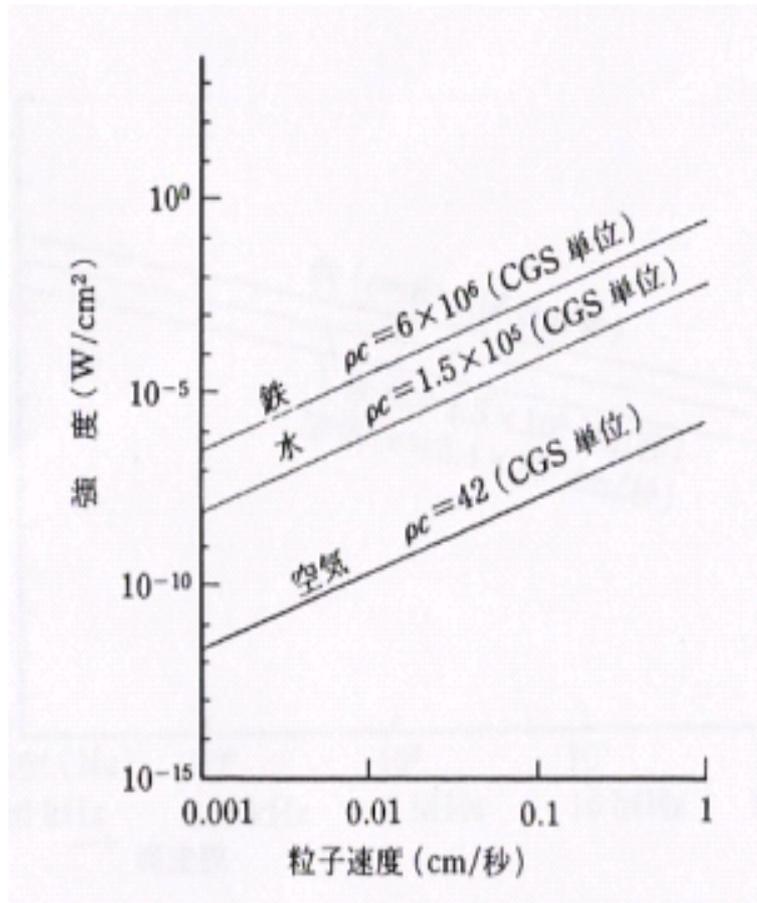


図 2.3: 固体、液体あるいは気体における音波の強度

図 2.3 は固体、液体あるいは気体における音波の強度を示す。横軸の粒子速度に注目すると、粒子速度一定値に対して縦軸の音波の強度は、固体・液体の場合、気体より 3~5 桁ほど大きい。

このように、音波は気体・液体・固体のどの媒質中でも透過することができるため、情報探査を実行するには大変有利であるといえる。ちなみに、光・電磁波は水中や物質内部では透過しにくく、また伝搬による減衰も大きい。したがって、海洋観測や生体内検査には超音波が欠かせないことがよく理解できる。

### 2.3.2 波長が短い

超音波を用いて対象物を映像化しようとした場合、超音波の波長は対象物の大きさと同程度のものが限度であり、これより長い波長では分解能は急速に劣化する。したがって、対象物の大きさに応じて波長を適当に選択する必要がある。図2.4によれば、水中音響鎖ソナーでは10~100kHzの超音波が使用されているが、波長でいえば数mm~数cmであり、医用超音波診断装置では1~10MHzが使用されているので、波長は0.1~1mmの程度となる。生体内の含水率は90%であるから、生体内の音速は水中のものと同様と見てよい。固体中で1GHzの超高周波になれば、波長は実に10μm以下になる。

このように、超音波技術は幅広い周波数域の選択が可能であり、様々な目的で有効に使用することが出来る。

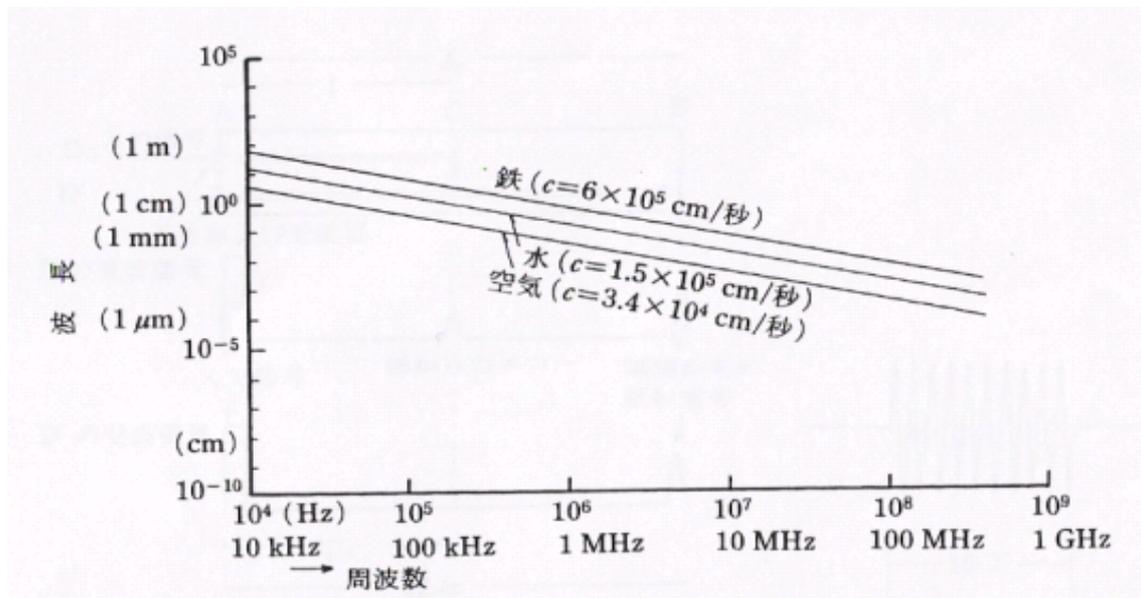


図 2.4: 固体、液体あるいは気体における音波の波長

### 2.3.3 伝播速度が遅い

音波の伝搬速度は光や電磁波の場合と比べて十分遅いので、短距離の情報探査に適している。すなわち、光や電磁波は伝搬速度が速いので、送信波と受信波を時間的に分離させることが困難であるが、超音波では短距離で十分に分離し得る。また、超音波は比較的簡単な発信器で発射させることができるため、テレビのチャンネルの切り換えや、自動車の前方及び後方の監視用センサーその他に利用されている。しかし、音速が遅いという制約により、1つの方向の送信と受信にある程度の時間を必要としてしまうため、全走査範囲の検出と画像の抽出には、光の場合に比べて時間を要してしまうことを考慮しなければならない。

## 2.4 超音波発生原理

超音波は媒体を振動させ、波動を発生させているもので、超音波の発信は1種の振動子による。基本的には、媒体の振動を受けて振動する素子を受信で使用し、送信は受信の素子と同じものを使用する。

媒体を振動させるためには、振動素子と媒体が接触している必要がある。しかし、接触することが難しいとされる対象も多いため、非接触による送受信も研究されている。すなわち、送受信方法を大きく分けると、接触型と非接触型がある。

超音波の素子において、送信時はトランスジューサーで電気信号を超音波に変換している。逆に受信時は超音波を電気信号に変換している。この変換の方法は以下の4つに分かれる。

1. 圧電系:誘電体などの圧電効果を用いる。
2. 磁歪系:磁気による歪み(磁歪効果)を用いる。
3. 動電系:電磁誘導による磁気力を用いる。
4. 静電系:平行電極板間の静電力を用いる。

このうち、一般に使用されているのが圧電系である。圧電系が一般的に使用される理由を以下に記す。

1. 非常に質の高い音源が安価で手に入れることができる。
2. 周波数と振幅を自在に制御することが可能で、安定した正弦波音波を効率よく発信することができる。
3. 連続波以外にパルス波や様々な変調波を得ることができる。
4. 材質である圧電セラミックは、任意の形状のものを大量に生産することができる。

## 第3章 超音波センサーの構造と原理

ここでは超音波センサーの構造と原理を説明する。最初に今回使用する超音波距離計の特性を記し、次に圧電効果の原理と超音波センサーの構造を記す。また、超音波距離計回路の動作原理を説明した後で、測定上で重要な役を担うアナログICとデジタルICについて記す。

### 3.1 超音波距離計

今回使用するのは、ジャパンエレキットの超音波距離計Aキットである。その外観写真を図3.1に示す。

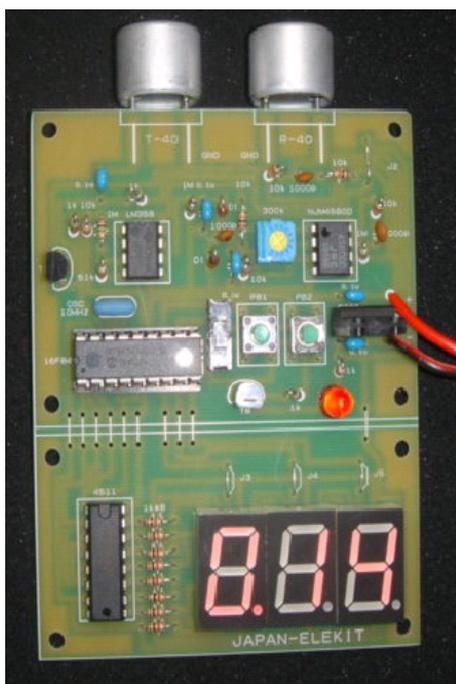


図 3.1: 超音波距離計の外観写真

この距離計の主な特性を述べると以下ようになる。

- 超音波トランスジューサー部(送信スピーカー/受信マイク)を個別利用し、高感度・高角度測定を可能にする。

- 圧電素子は日本セラミック株式会社の  $T40-16$ (送信スピーカー)、 $R40-16$ (受信マイク) を使用する。
- 計測表示には超高感度赤色 7 セグメント  $LED$  を 3 個利用している。
- 電源電圧は  $DC9V \sim 12V$  を用意する。  $AC$  アダプタ等でもよい。
- 標準計測距離は  $0.1 \sim 3m$ 。しかし、 $0.5m$  以下になるとセンサーの検出誤差が大きくなる。
- 測定不能距離になると 999 表示になる。
- 最小分解能は  $1cm$  である。
- 測定誤差は  $\pm 1cm$  以内である。
- 音波の空中伝搬時間は、温度依存性を持っているため、温度一定の条件を満たしている必要がある。
- 温度による係数補正により、音速の温度補正が可能である。

また、距離計の測定原理を簡単に説明すると以下のようなになる。

1. 周波数  $40kHz$  の超音波は  $PIC16F84$  によって正確に反射される。
2. 対象物で反射して受信される信号は非常に弱いため、オペアンプ 2 段で増幅する。
3. 増幅された受信波はコンパレータに入力、HI・LO の信号に変換され、 $PIC16F84$  に入力される。
4.  $PIC16F84$  によって、内部カウンター動作からコンパレータ信号入力までの時間を計算する。
5. 時間データを距離データに変換し、4511 にセグメント表示データを送る。
6. 測定距離と設定距離を比較して結果を  $LED$  に出力する。

## 3.2 圧電効果

### 3.2.1 圧電逆効果

物質に電場を印加するとき、電場に比例したひずみが生じる現象を圧電逆効果という。これは送信スピーカーで応用されている原理である。

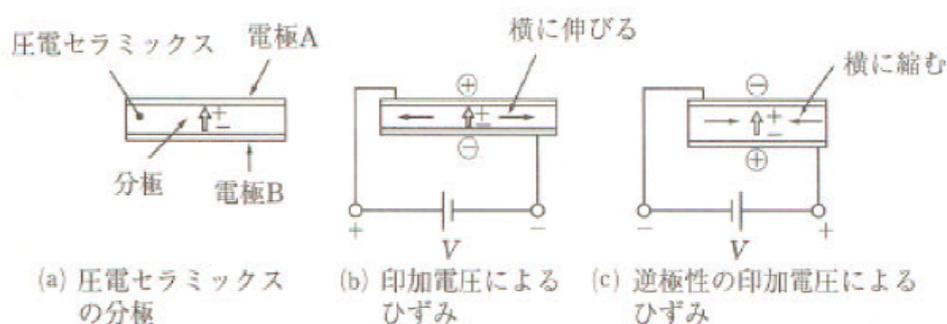


図 3.2: 圧電逆効果の原理図

図 3.2(b) のように分極した圧電セラミックに極性の電圧をかけると、外部電荷のプラスと圧電セラミックの分極のプラスが反発する。それと同時に、外部電荷のマイナスと圧電セラミックの分極のマイナスが反発する。この電荷の反発により、セラミックは厚さ方向に縮み、その結果として長さ方向に伸びる。

印加電圧の極性が逆になると、図 3.2(c) のように外部電荷のマイナスと圧電セラミックの分極のプラスが引き合う。それと同時に、外部電荷のプラスと圧電セラミックの分極のマイナスが引き合う。この電荷の引き合いにより、セラミックは厚さ方向に伸び、結果として長さ方向に縮む。すなわち、分極した圧電セラミックに、極性を周期的に変える交流電圧をかけることで、圧電セラミックは周波数に応じて歪みを起こし、超音波が発生するのである。

### 3.2.2 圧電直接効果

物質の特定の方向に力を加えるとき、応力に比例した電気分極が発生する現象を圧電直接効果という。これは受信マイクで応用されている原理である。

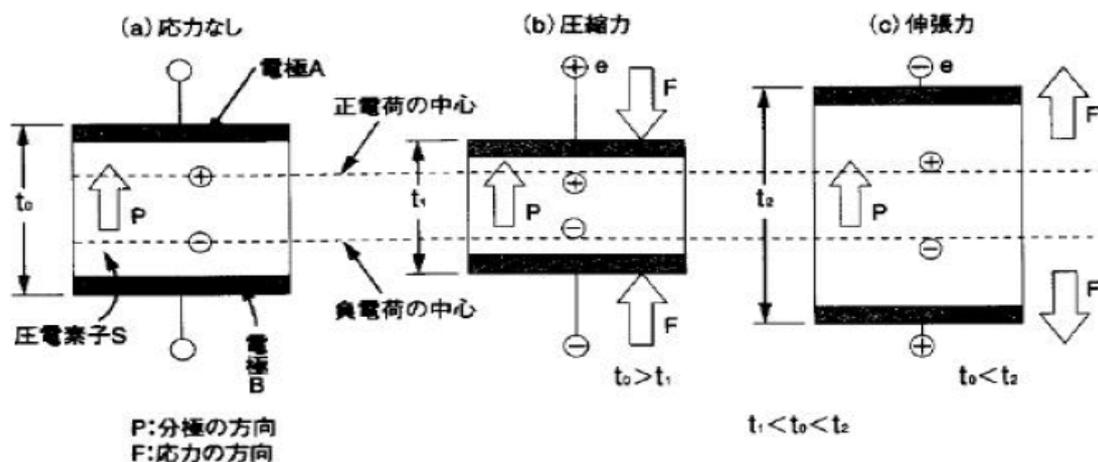


図 3.3: 圧電直接効果の原理図

図 3.3(a) のように分極した圧電セラミックの両極板には、それぞれリード線が取り付けられている。この場合、圧電セラミックに外部応力  $F[N]$  が与えられていないため、出力電圧  $e[V]$  は発生しない。

図 3.3(b) のような状態に図のような圧縮力  $F[N]$  を加えると、上側の電極にプラス、下側の電極にマイナスの電荷が発生し、圧電セラミックは圧縮される。

一方、図 3.3(c) のように伸張力  $F[N]$  を加えると、上側の電極にマイナス、下側の電極にプラスの電荷が発生し、圧電セラミックは伸長する。

ここで圧縮力や伸張力などの外部応力  $F[N]$  を超音波エネルギーに置き換えれば、受信マイクとして利用することが可能になるのである。

### 3.3 超音波センサーの構造

図 3.4 は超音波センサーの構造図である。a、b 2 枚の圧電セラミックの分極方向を互いに逆に貼りあわせ、長さ方向に一方が伸びると他方が縮むように形成された振動子を使用する。このような振動子をバイモルフ振動子という。

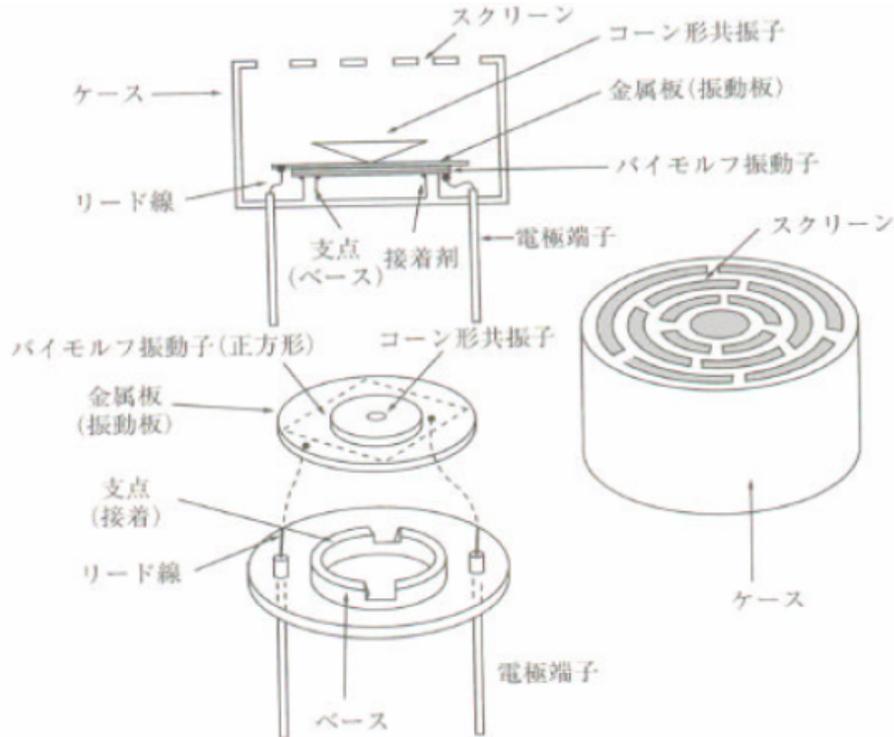


図 3.4: 超音波センサーの構造図

バイモルフ振動子の両面には薄膜の電極があり、上面は金属板からリード線で電極端子に接続されてある。下面は直接リード線で電極端子に接続されてある。バイモルフ振動子の形は正方形で、正方形の左右の2辺あたりが円弧形のベースの突起によって支えられている。この2ヶ所の支点が振動の節点となる。

送信時には、高周波電圧をバイモルフ振動子に加えると、圧電セラミックは電圧の極性に応じて伸長と圧縮を繰り返す、その振動により超音波が発生する。

受信時には、送信機で発生した超音波がくると、その周波数に応じた応力が圧電セラミックにかかり(周波数に応じた振動が圧電セラミックに生じ)、交流電気信号が発生する。

金属板の中心にあるコーン形共振子は、送信時には指向性を良くし、効率よく超音波を発生させ、受信時には超音波の振動をバイモルフ振動子の中心に集め、効率よく高周波電圧を発生させるためである。

### 3.4 超音波距離計回路の動作原理

図 3.5 は超音波距離計回路の概略図、図 3.6 は回路図のタイミングチャートを表す。

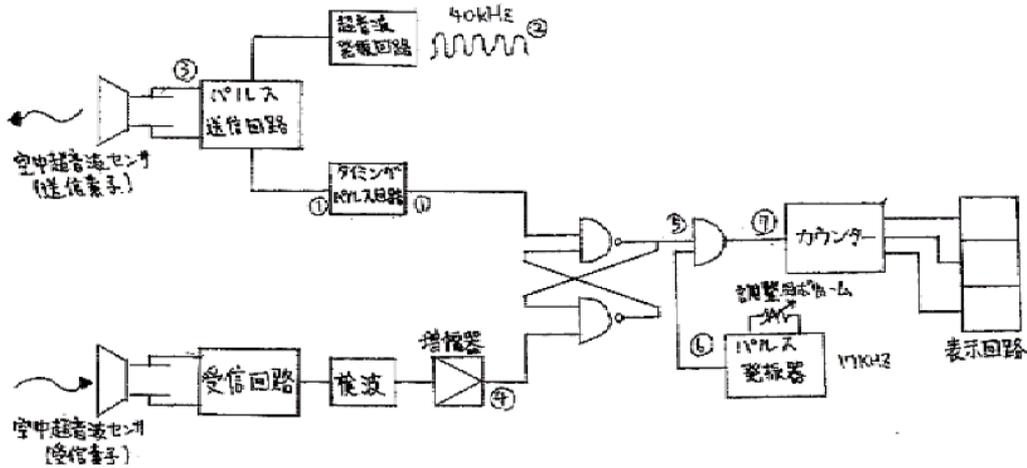


図 3.5: 超音波距離計回路の概略図

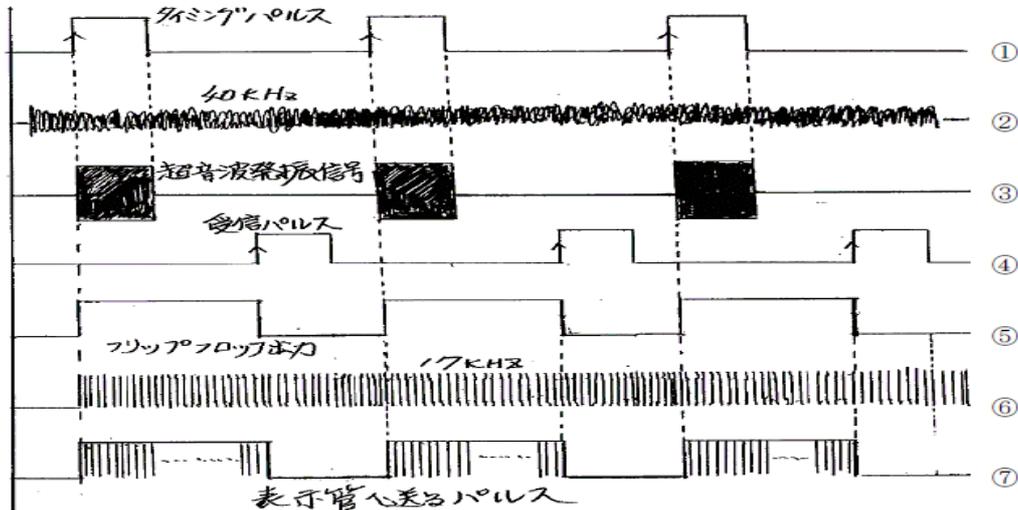


図 3.6: 回路図のタイミングチャート

超音波距離計回路の動作は以下のように説明できる。

1. 超音波発振回路から [2] のような超音波パルス ( $40kHz$ ) がパルス送信回路に送られる。また、それと同時にタイミングパルス回路から [1] のようなタイミ

ングパルスもパルス送信回路に送られる。この2つのパルス波はパルス送信回路で積 (AND) を成し、増幅されて [3] のような送信パルスになる。

2. 送信パルスは送信スピーカーによって発射され、前面に位置する対象物に反射される。それを受信マイクで拾う。
3. 受信された信号は、検波された後にオペアンプによって増幅され、[4] のようなパルスに整形、出力される。そしてこれは、フリップフロップ回路の片方の入力端子に送られる。もう片方の入力端子には、タイミングパルス回路からのタイミングパルスが送られる。
4. フリップフロップ回路では、[1] のタイミングパルスで立ち上がって [4] の受信パルスで立ち下がるような、[5] の形をしたパルスが生成される。
5. 検出された [5] のパルスと基準パルス発信機からくる [6] のパルス ( $17.2kHz$ ) が積 (AND) を成すと [7] のようなパルスが現れる。[7] のパルスの数が距離に相当するように、基準パルス発信機の周波数は設定してあるため、そのパルス数をカウンターで数え、LED に表示する。

### 3.5 アナログ IC

ここでは、受信回路に組み込まれている信号増幅回路、検波回路、信号検出回路について記す。

#### 3.5.1 信号増幅回路

受信マイクで拾った超音波信号は、オペアンプ増幅器を2段使用して1000倍の電圧に増幅される。1段目で100倍、2段目で10倍の増幅を行う。

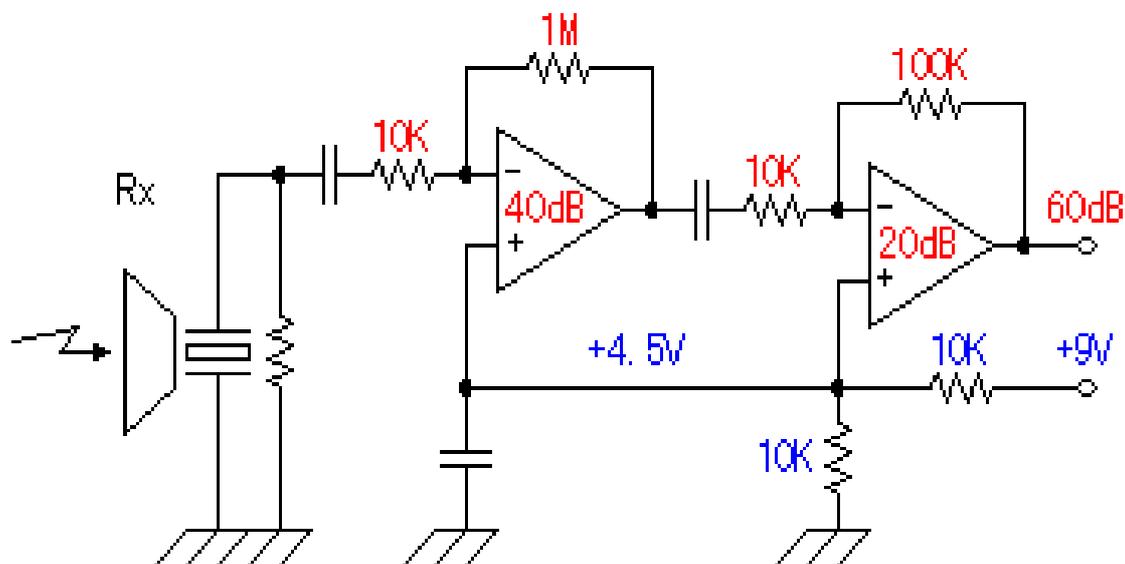


図 3.7: 信号増幅回路

オペアンプは通常プラスとマイナスの2電源を使用するが、今回の回路では+5Vの単電源で動作させてある。そのため、オペアンプのプラス入力に、電源電圧の半分(2.5V)の電圧をバイアス電圧として加え、増幅する交流信号の中心電圧を2.5Vにしている。オペアンプを負帰還で使用した場合、プラス入力端子の電圧とマイナス入力端子の電圧がだいたい等しくなるため、バイアス電圧によって交流信号のプラス側とマイナス側を均等に増幅することができる。このバイアス電圧を加えないと交流信号に歪みが生じてしまう。この方法は2電源用のオペアンプを単電源で動作させ、交流信号を増幅させる場合に用いられる。

### 3.5.2 検波回路

受信した超音波信号を検出させるには検波を行う必要がある。図3.8はショットキー・バリア・ダイオードを使用した半波整流回路である。コンデンサで平滑することで、検出信号の信号レベルに沿った直流電圧を得ることができる。ショットキー・バリア・ダイオードを使用する理由は、高周波特性が良いからである。

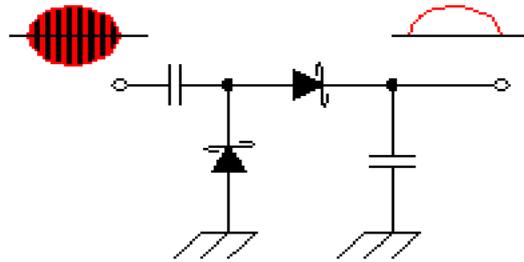


図 3.8: 検波回路

### 3.5.3 信号検出回路

これは対象物で反射された超音波を検出、整形する回路である。まず、前述した検波回路の出力をコンパレータで検出する。今回の回路では、コンパレータの代わりに単電源のオペアンプを使用する。オペアンプは、プラス入力端子の電圧とマイナス入力端子の電圧の差を増幅して出力する。

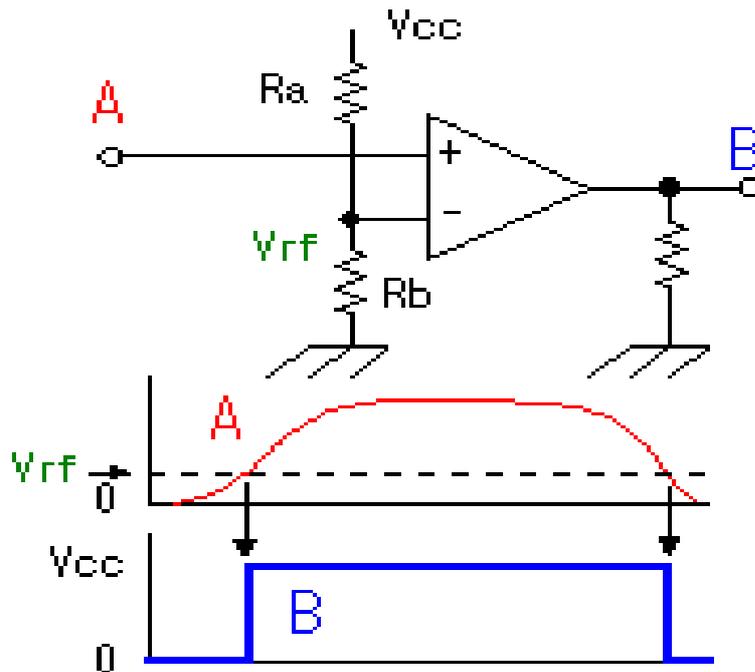


図 3.9: 信号検出回路

通常オペアンプは負帰還をかけて使用するが、負帰還をさせない場合、少しの入力電圧の差でも出力は飽和状態になる。その増幅率は数万倍に及ぶため、プラス入力電圧がマイナス入力電圧より少しでも高くなると、その差は数万倍に増幅され、出力は電源電圧とほとんど等しくなる。逆に、プラス入力電圧がマイナス入力電圧より少しでも低くなると、その差は数万倍に増幅され、出力はほとんど  $0V$  になる。この動作はコンパレータの動作そのものである。ただ、コンパレータとオペアンプの内部構造は違うため、コンパレータをオペアンプとして使用することはできない。

今回の回路では、検波回路の出力を信号検出回路のプラス端子に入力し、マイナス端子の入力電圧は一定にしてある。

### 3.6 デジタル IC

いろいろな電圧を出せるアナログ IC とは違い、デジタル IC は基本的に 2 種類の電圧しか出すことができない。大方のデジタル IC は出力として、 $0V \sim 5V$  の 2 通りの電圧しか出せない。このような IC はコンピューター回路やトリガー回路で頻繁に応用されている。

ここでは、AND 回路、フリップフロップ回路について記す。

#### 3.6.1 AND 回路

AND 回路 (論理集積回路) は OR 回路、NOT 回路と並ぶ基本論理回路である。AND 回路には 2 つの入力と 1 つの出力があり、すべての入力端子に 1 が入力された場合にのみ 1 を出力する。この回路は送信パルスとタイミングパルスの合成に応用されている。

論理回路の入力信号の組み合わせによって出力信号がどう変わるかを示したものを「真理値表」という。AND 回路の場合、出力が 2 つあるため、入力信号の組み合わせの数は 4 種類である。

AND 回路の動作は、図 3.10 に示すような回路で例えることができる。真理値表には、スイッチ A、B と電球の点滅 X の関係をまとめる。

スイッチのオフと電球の消灯を 0、スイッチのオンと電球の消灯を 1 と考えれば、真理値表と電球回路はまったく同じであることが分かる。

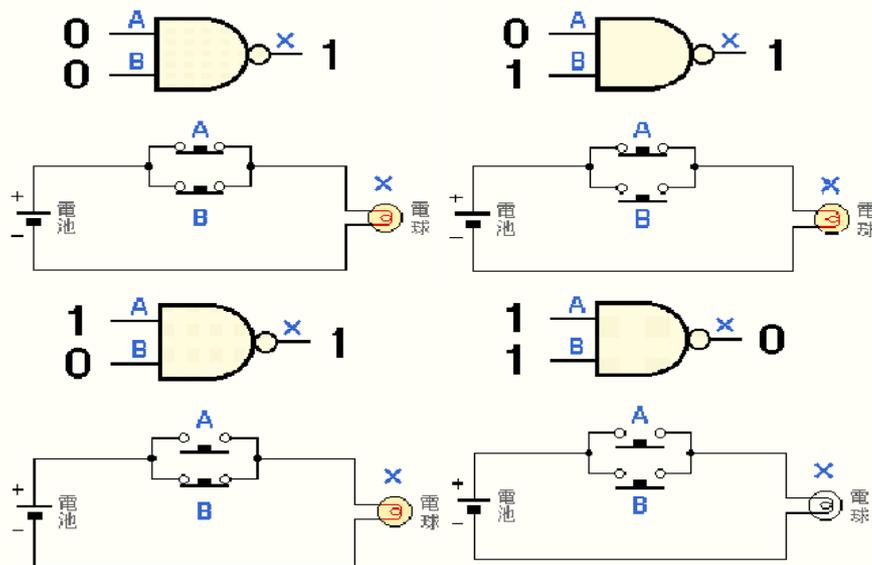


図 3.10: AND 回路

### 真理値表

A	B	X
0	0	1
0	1	1
1	0	1
1	1	0

### 電球回路

A	B	X
OFF	OFF	点灯
OFF	ON	点灯
ON	OFF	点灯
ON	ON	消灯

図 3.11: 真理値表と電球回路の関係

### 3.6.2 フリップフロップ回路

この回路は1及び0の2つの安定状態を持ち、外から与えられた入力条件によってそのどちらかに決められ、新しい入力条件が与えられるまでその状態を保持する機能を持つ。その動作はシーソーの上がり下がりに似ている。ちなみに、この回路によって作られるパルスは、送信信号の立ち上がりから受信信号の立ち上がりまでの時間を周期とする。

今回の実験では、 $R-S-FF$ (リセット・セット・フリップフロップ)を使用する。図3.12に示す回路を見れば分かるのだが、このフリップフロップは2本の入力端子  $S$ 、 $R$  と2本の出力端子  $Q$ 、 $\bar{Q}$  を持つ。 $S$  に1が加えられると  $Q$  が1になり、 $R$  に1が加えられれば  $Q$  は0になる。1度入力端子に電圧が加えられると、その電圧がなくなった後も1または0になった出力はその状態を保持し、次の新しい入力電圧が  $S$  または  $R$  に加えられるまで変化しない。

そろばんのタマを上にはじく動作を  $S$  入力、下にはじく動作を  $R$  入力とし、 $Q = 1$  の状態をタマが上がっている状態、 $Q = 0$  の状態をタマが下がっている状態とする。1度はじかれたタマは次にはじかれるまでそのままのまである。また、上にはじかれたタマがもう1度上にはじかれても変化しないのと同じように、フリップフロップでも同じ入力は何回続けて入ってきても、一番最初に変化するだけで後は変化しない。

$\bar{Q}$  出力は  $Q$  出力を反転させたもので、これらはいつでも互いに反対の関係を保っているのので、インバーターを使わずに  $Q$  の反対の出力が得ることができ、回路設計に便利である。

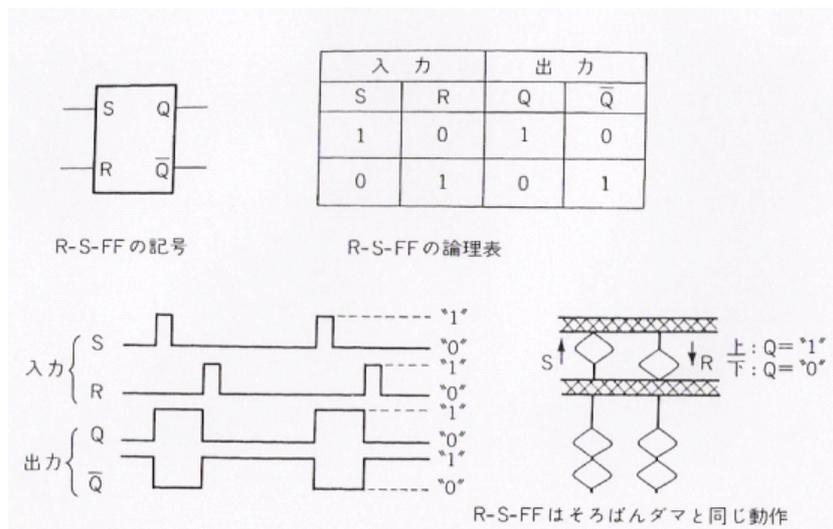


図 3.12:  $R-S-FF$  の動作と記号

## 第4章 音速理論

設計した音速測定システムの性能評価の手段として、音速の測定値と理論値の比較を行う。ここでは、その際に使用した音速の理論値の導出について説明する。

### 4.1 音速式の導出

音速を表す式は、次の流体の波動方程式から導出される。

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = \frac{\chi}{\rho} \left[ \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} \right] \quad (4.1)$$

ここで、 $p$  は音波による流体の圧力の変化分（音圧）を示し、 $\rho$  は流体の密度（気体の密度）を示している。また、 $\chi$  は流体の体積弾性率を表す。

平面音波が  $x$  軸方向に進む場合、波面は  $x$  軸に対して垂直方向にある。音圧は 1 つの波面上で等しい値をもつため、音圧の空間的变化は  $x$  の値だけに依存する。よって、その場合の波動方程式は次式のようなになる。

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = \frac{\chi}{\rho} \left[ \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} \right] \quad (4.2)$$

音波が  $x$  方向に一定の速さ  $V$  で進むとき、音圧の変化を表す関数  $p(\quad) = p(x, t)$  について考える。ある距離  $x$  における音圧  $p(x)$  が与える時間による変位は次のように示される。 $t=0$  秒で  $p(x)$  を示す音圧は、任意の時間  $t$  において  $p(x - Vt)$  と表すことができる。よって、音圧の関数は  $p(\quad) = p(x - Vt)$  と示される。

$p(\quad)$  は、どのような形であっても  $V = \sqrt{\frac{\chi}{\rho}}$  であれば、(4.2) 式を満たす。これは波動方程式の一般解である。つまり、(4.2) 式は、速さ  $\sqrt{\frac{\chi}{\rho}}$  で進む波を表していることが分かる。更に、一般的な波動方程式 (4.1) 式においても、同じことがいえる。以上より、流体中を伝わる音速は

$$V = \sqrt{\frac{\chi}{\rho}} \quad (4.3)$$

と示される。

次に、流体の圧力変化について示す。音圧  $p$  は、音波による流体の圧力の変化分であるため、音波によって変化した後の流体の圧力を  $P(x, y, z, t)$ 、音波が来る前の流体の圧力を  $P_s$  とすると、音圧は  $p = P(x, y, z, t) - P_s$  と表すことができる。したがって、流体の微小体積  $v$  は音波から受ける音圧により変化する。

音波による体積の増加分を  $\Delta v$  とすると、流体の圧縮度は  $-\Delta v/v$  となる。これは、音圧  $p$  に比例した値であるため、その関係式は比例定数である体積弾性率  $\chi$  を用いて、

$$p = -\chi \frac{\Delta v}{v} \quad (4.4)$$

と示される。

また、この微小体積  $v$  の体積変化は断熱過程によるものである。このとき、気体の比熱比を  $\gamma$  とすると、体積変化の前後における関係式は、

$$P_S v^\gamma = (P_S + p)(\Delta v + v)^\gamma \quad (4.5)$$

となる。(4.4) から体積弾性率は  $\chi = -\frac{p}{(\frac{\Delta v}{v})}$  となり、それを (4.5) 式と照らし合わせると  $\chi = \gamma P_S$  となる。したがって、音速式は (4.3) 式より

$$V = \sqrt{\frac{\gamma P_S}{\rho}} \quad (4.6)$$

となる。

気体の分子量を  $M$  として、微小体積部分の気体の量を  $n$  モルとすると、密度は

$$\rho = \frac{n M \times 10^{-3}}{v} \quad (4.7)$$

となり、また、気体の状態方程式より  $P_S v = nRT$  であるので、結果として音速の式は

$$\sqrt{\frac{\gamma P_S}{\rho}} = \sqrt{\frac{\gamma R}{M \times 10^{-3}} \times T} = \sqrt{\frac{\gamma R}{M \times 10^{-3}} \times 273.15 \left(1 + \frac{t}{273.15}\right)^{\frac{1}{2}}} \quad (4.8)$$

となる。ここでは、温度の単位を  $T$  (K) から  $t$  ( ) に変換している。(4.8) 式に対して、 $(1+x)^n \approx 1+nx$  という近似を行うと、

$$V_0 \left(1 + \frac{t}{273.15}\right)^{\frac{1}{2}} \approx V_0 (1 + 0.00183t) \quad (4.9)$$

と簡略化できる。ここでは、 $t=0$  における音速の値、つまり  $\sqrt{\frac{\gamma R}{M \times 10^{-3}} \times 273.15}$  を  $V_0$  としている。

この式から分かるように、音速は温度に依存し、圧力に依存しない。

## 4.2 湿度を考慮した空気中の音速

前述したの音速式は、気体が静止乾燥している場合にのみ用いられる。したがって、一般的なガスの音速値を計算する場合は、(4.8)式または(4.9)式に値を代入すればよい。

しかし、空気という媒質を考えた場合は他のガスと異なり、空気中に含まれる水蒸気についても考慮しなければいけない。ここでは、湿度補正された空気中の音速について説明する。

気圧を  $P$ 、水蒸気分圧を  $P'$  としたときの、空気の密度を  $\rho$ 、その空気を等温圧縮して気圧が  $P$  になったときの空気の密度を  $\rho_1$  とすると次式が成り立つ。

$$\frac{P - P'}{\rho_1} = \frac{P}{\rho} \quad (4.10)$$

また、温度  $t$ 、圧力  $P$  の水蒸気の密度を  $\rho_2$ 、水蒸気の圧力を  $P$  に等温圧縮したときの密度を  $\rho'$  とすると、

$$\frac{P'}{\rho_2} = \frac{P}{\rho'} \quad (4.11)$$

が成り立つ。等圧  $P$  での水蒸気と空気の密度比は  $\rho'/\rho = 5/8$  であるため、(4.10)(4.11)式から空気と水蒸気の混合気体の密度は

$$\rho_1 + \rho_2 = \rho \left( 1 - \frac{P'}{P} \right) + \frac{5}{8} \rho \frac{P}{P'} = \rho \left( 1 - \frac{3}{8} \frac{P'}{P} \right) \quad (4.12)$$

と示される。したがって、湿度を考慮した空気中の音速は

$$\sqrt{\frac{\gamma P}{\rho_1 + \rho_2}} = \sqrt{\frac{\gamma P}{\rho} \left( 1 + \frac{t}{273.15} \right)^{\frac{1}{2}} \left( 1 - \frac{3}{8} \frac{P'}{P} \right)^{-\frac{1}{2}}} = \sqrt{\gamma} \left( 1 + 0.00183t \right) \left( 1 + \frac{3}{16} \frac{P'}{P} \right) \quad (4.13)$$

と示される。

(4.13) 式の近似式の項の中で、左の2項は(4.9)式で示されている。つまり、乾燥空気中の音速に対し、 $\left( 1 + \frac{3}{16} \frac{P'}{P} \right)$  をかけたものが湿度補正された音速である。

## 4.3 様々な気体中の音速値

今回、実験に使用する気体は、酸素、窒素、 $Ar$ 、 $He$ 、そして空気である。それぞれの特性、音速の値については表 4.1 にまとめた。最初にそれぞれの特性について示す。

	<b>O<sub>2</sub></b>	<b>N<sub>2</sub></b>	<b>Ar</b>	<b><sup>4</sup>He</b>	<b><sup>3</sup>He</b>	<b>空気</b>
<b>原子量M</b>	<b>32</b>	<b>28</b>	<b>40</b>	<b>4</b>	<b>3</b>	<b>平均分子量28.9</b>
<b>比熱比γ</b>	<b>1.4</b>	<b>1.4</b>	<b>1.66</b>	<b>1.66</b>	<b>1.66</b>	<b>1.4</b>

表 4.1: 気体の性質

これらの値と気体定数  $R = 8.3145(\text{J K}^{-1}\text{mol}^{-1})$  を (4.9) 式に代入し、計算した音速値を表 4.2 に示す。

音速の理論値として、温度は  $t = 22 \pm 2$  を採用している。これは、室温 22 状況下で音速測定実験を行うためであり、その際に得られた測定値との比較に用いるためでもある。

<b>音速(m/s)</b>	<b>O<sub>2</sub></b>	<b>N<sub>2</sub></b>	<b>Ar</b>	<b><sup>4</sup>He</b>	<b><sup>3</sup>He</b>
<b>t=20°C</b>	<b>326.42</b>	<b>349.02</b>	<b>318.04</b>	<b>1005.743</b>	<b>1161.33</b>
<b>t=22°C</b>	<b>327.53</b>	<b>350.2</b>	<b>319.13</b>	<b>1009.17</b>	<b>1165.28</b>
<b>t=24°C</b>	<b>328.64</b>	<b>351.02</b>	<b>320.21</b>	<b>1012.58</b>	<b>1169.23</b>

表 4.2: 様々な気体中の音速

表 4.3 は湿度、温度別の空気中の音速理論値である。これらは (4.13) 式を用いて計算した。水蒸気分圧  $p'$  に関しては、湿度の数値から算出した。また、大気圧  $P$  は 1013hpa の値を使用している。

<b>湿度(%)</b>	<b>0(乾燥)</b>	<b>10</b>	<b>20</b>	<b>30</b>	<b>40</b>
<b>20°C</b>	<b>343.7</b>	<b>343.84</b>	<b>343.9</b>	<b>344.14</b>	<b>344.29</b>
<b>22°C</b>	<b>344.92</b>	<b>345.08</b>	<b>345.25</b>	<b>345.42</b>	<b>345.59</b>
<b>24°C</b>	<b>346.14</b>	<b>346.33</b>	<b>346.52</b>	<b>346.71</b>	<b>346.86</b>
<b>湿度(%)</b>	<b>50</b>	<b>60</b>	<b>70</b>	<b>80</b>	
<b>20°C</b>	<b>344.44</b>	<b>344.59</b>	<b>344.74</b>	<b>344.88</b>	
<b>22°C</b>	<b>345.76</b>	<b>345.93</b>	<b>346.1</b>	<b>346.26</b>	
<b>24°C</b>	<b>347.09</b>	<b>347.28</b>	<b>347.47</b>	<b>347.66</b>	

表 4.3: 湿度別大気中の音速

これらの表より次のことがいえる。

温度が 1 異なると、音速は約 0.7 m/s 異なる。また、湿度が 10 % 異なると、音速は約 0.1 m/s 異なる。

## 第5章 実験方法及び測定結果

本章は、実際に設計、製作した測定装置を用いた音速測定実験の内容についてまとめたものである。今回の実験の目的は、私達が製作した装置の性能評価と、*He* ガス混合比を測定できる機械として実用化するための課題を見つけることである。

### 5.1 測定装置概要

図 5.1 は、測定装置の大まかな全体図を示している。

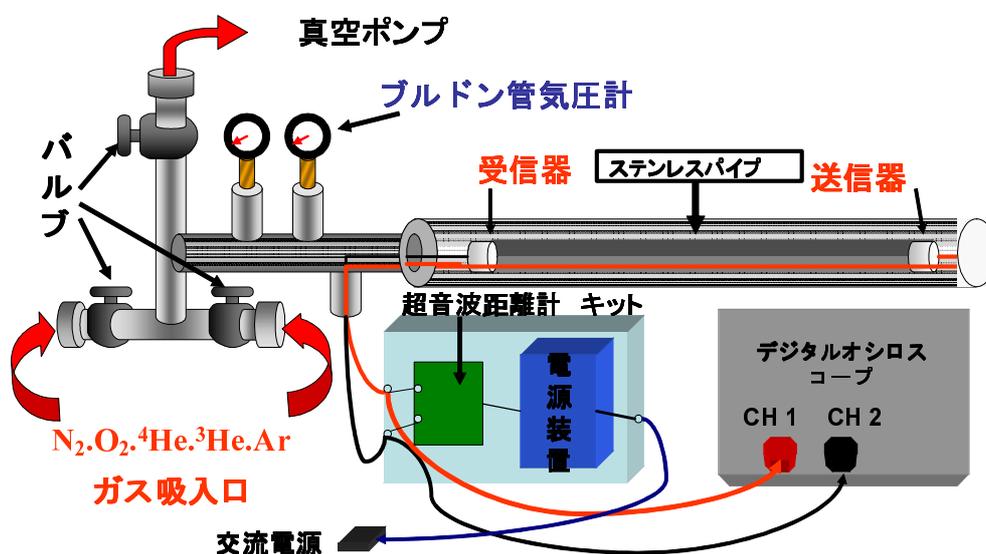


図 5.1: 測定装置

まず、装置を構成している実験機器に関して述べる。

#### 5.1.1 実験機器

今回製作した測定装置は、主として以下の機器を用いている。

##### 1. 超音波距離計

実際に超音波を発信、受信している、測定装置の核となる部分である。詳しくは3章で説明している。また、発信機が与える回路の時間分解能は $\Delta T=1/f$ で与えられ、その値は $25 \mu s$ である。

## 2. 電源装置 (安定化電源)

超音波距離計に接続し、回路に電源を供給するために用いる。

入力電圧 AC 100V

出力電圧 DC 5V 12V

この測定装置では、12V の電圧を回路に供給している。

## 3. デジタルオシロスコープ (Tektronix TDS2024)

回路の送信シグナルと受信シグナルを表示し、その時間差を観測するために用いられる。

入力結合 AC、DC、GND

垂直軸感度 2mV ~ 5V/div

時間軸 2.5ns ~ 50sec/div

時間軸確度 50ppm

4チャンネル入力可能

周波数帯域 200 MHz

## 4. 真空ポンプ

測定装置内を真空状態にするために用いる。



図 5.2: デジタルオシロスコープと真空ポンプの外観写真

## 5. ブルドン管気圧計

これは、気圧の測定をしたり、適当な混合比をもったガスを作り出すために使用する。ブルドン管気圧計は、*RPT* などの気圧センサーに比べて、やや精度は低めである。しかし、気体中で抵抗の熱伝導が起こり、気圧を測定する気圧センサーが気体の違いによって誤差をうむため、様々なガスを扱う今回の測定には不向きである。一方、ブルドン管気圧計は気体の違いによる影響を受けず、一定した値をとるため有用である。今回は気圧測定をより正確に行うため、2つのブルドン管を使用する。

しかし、ブルドン管気圧計は、気圧センサーに比べて精度に不安な点がある。そこで、密封された管の中を真空引きしながら、今回気圧測定に使用す

るブルドン管気圧計と *RPT* メーターで同時に圧力を測定し、ブルドン管圧力計の精度を確かめた。それぞれのブルドン管気圧計が示す数値と、*RPT* メーターが示す数値の関係は以下のグラフに示す。

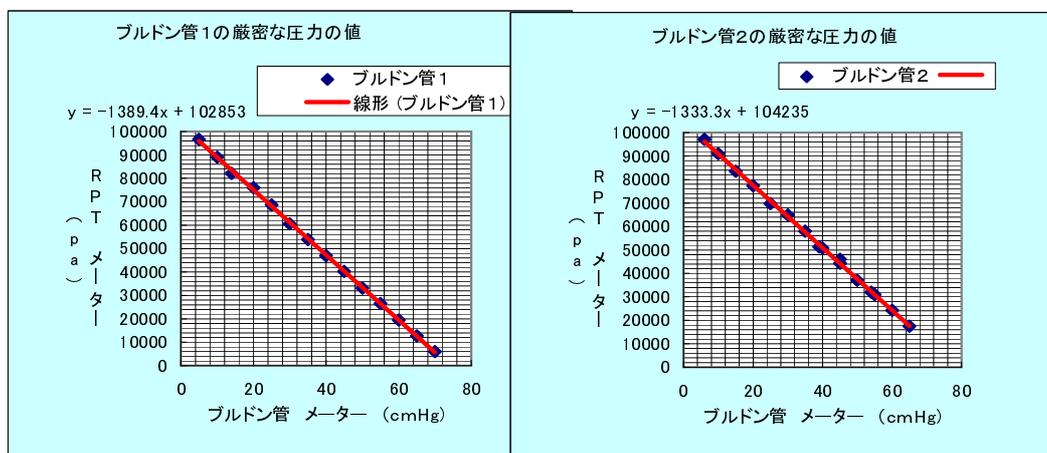


図 5.3: ブルドン管と *RPT* の示す数値の比較

ブルドン管メーターが示す値は、減少した気圧の量を表示している。したがって、ブルドン管から現在の気圧を読み取るには、 $76\text{cmHg}$  から表示されている値を引かなければならない。グラフには、ブルドン管が示す気圧の値  $X$  と *RPT* メーターが示す気圧の値  $Y$  の関係をデータから近似した直線で示し、その関数も一緒に示している。近似直線から得られる数値をもとにして、両軸とも  $1\text{atm}$  の単位に変換し、ブルドン管 1.2 と *RPT* メーターが示す圧力の数値を比較したのが下表に表 5.1 である。*RPT* メーターが示す値を基準にして、2 つのブルドン管気圧計が示す値と比較している。

気圧 (atm)					
<i>RPT</i>	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5
ブルドン管1	0.89	0.79	0.69	0.59	0.49
ブルドン管2	0.87	0.77	0.67	0.57	0.47
<i>RPT</i>	0.4	0.3	0.2	0.1	
ブルドン管1	0.39	0.29	0.19	0.09	
ブルドン管2	0.37	0.27	0.17	0.07	

表 5.1:  $1\text{atm}$  の単位に変換したブルドン管と *RPT* の示す数値の比較

表 5.1 から読み取れるように、ブルドン管気圧計の示す値は、より精度のよい RPT メーターが示す値とほぼ一致しているのので、このブルドン管気圧計の精度は問題がないといえる。したがって、音速測定実験では、この 2 つのブルドン管気圧計を測定装置に組み込み、これらの気圧計が示す値を読んだ。

### 5.1.2 測定装置の構造

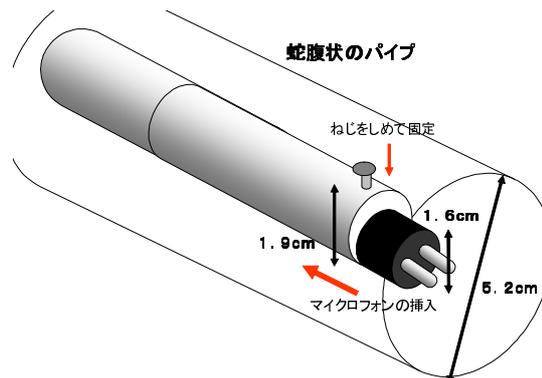


図 5.4: 蛇腹状パイプ内の構造

超音波距離計から送信スピーカーと受信マイクはコードで伸ばし、装置の中に通してある。また、その 2 つの圧電素子は向かい合わせになるようにステンレスパイプの両端に固定されている。圧電素子をステンレスパイプの両端に固定することで、送信機から発せられた超音波はパイプ中を伝わり、ダイレクトに受信機に伝えることができる。超音波をパイプの中に通すことは、超音波の散乱を減少させ、受信マイクが拾う外部からのノイズを減らすこともできるため、超音波の指向性を高める上で有効な手段である。

ステンレスパイプは、長さが 0.91 m、厚さ 0.1cm、内径 1.9 cm である。圧電素子はステンレスパイプの中に入れ、上からビスでねじ止めすることで固定されている。圧電素子の直径は 1.6 cm で、ステンレスパイプにはめ込んでも隙間があるため、ステンレスパイプ中にガスを満たすことができる。

固定された圧電素子間の距離は 0.88 m である。これが、今回の実験で超音波が伝播する距離である。超音波距離計の時間分解能が与える誤差の割合を減らすため、できるだけステンレスパイプ内の圧電素子間の距離を長くとした。

ステンレスパイプは測定装置の蛇腹状のパイプの中に入れ、固定する。固定方法として、やわらかい鉄製の金属繊維でステンレスパイプを包み込み、蛇腹パイプの中に通したときに金属繊維で圧迫する形をとる。鉄製の金属繊維は構造上隙間があるため、十分にガスを満たすことができる。

圧電素子から伸びるコードは、装置の一端にある電極により、超音波距離計から伸びる装置外部のコードとつながっている。(図 5.5 左 参照)

デジタルオシロスコープは、超音波距離計につながれた導線と回路装置上部にあるコード固定器具によりつながれているため、簡単に測定装置本体から取り外すことができる。(図 5.5 右 参照)

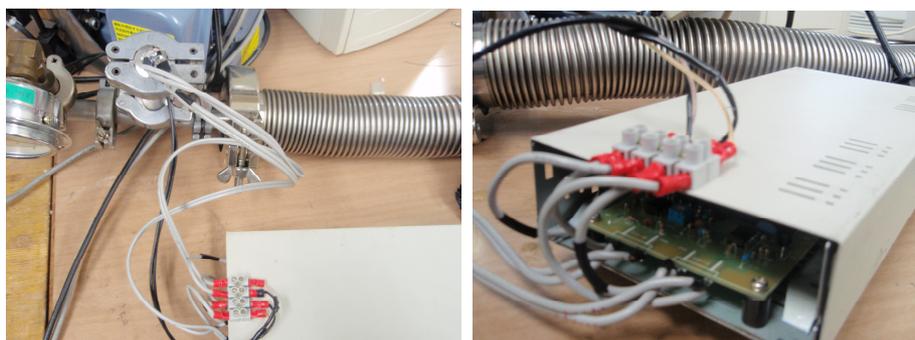


図 5.5: 実験器具接続部写真

図 5.6 は、実際の測定装置の写真である。



図 5.6: 測定装置写真

測定装置右側に蛇腹状のパイプが確認できる。そのパイプ中に、前述したステンレスパイプと送信スピーカ、受信マイクが固定されて入れてある。また、写真の中央下部に超音波距離計、電源装置が一体となった回路装置が見える。

## 5.2 測定方法

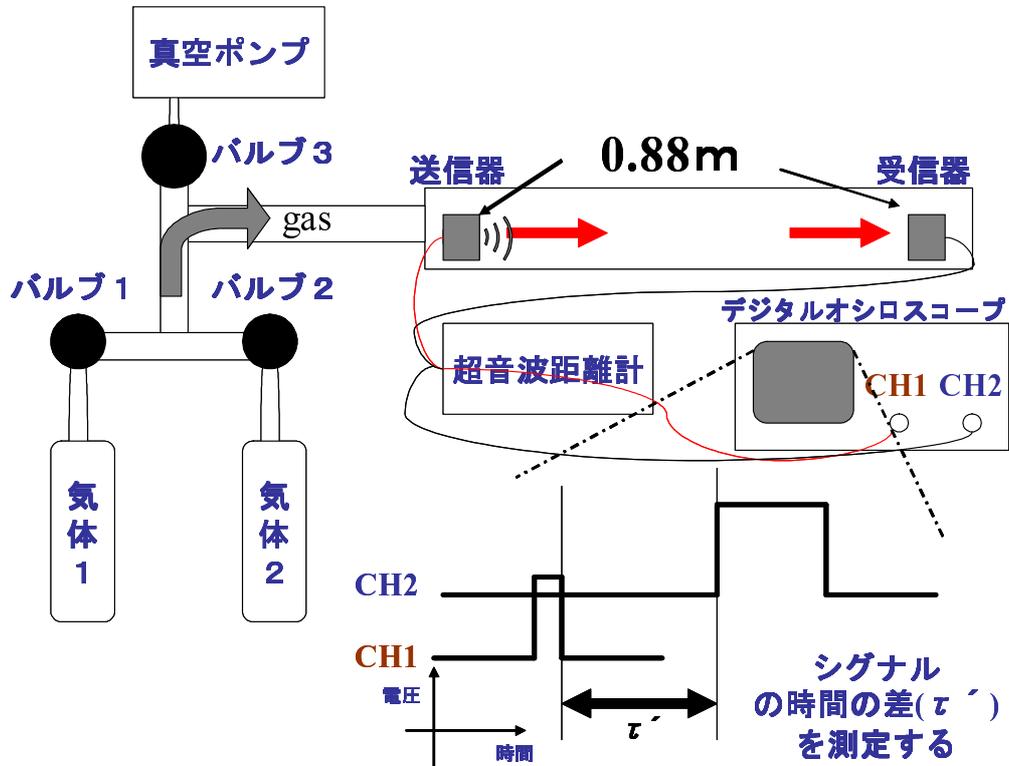


図 5.7: 測定装置の原理図

この測定装置を用いた混合ガスの測定方法について説明する。

1. 測定装置についている3つのバルブと、図 5.7 に示すような気体ボンベ、真空ポンプを装着する。そして、バルブ 3 を開け、真空ポンプを動かして装置内を真空状態にする。
2. 真空状態になったことをブルドン管気圧計で確認する。
3. 適当な比をもつ混合気体を作り出すため、気体 1 と気体 2 を混合して装置内に入れる。混合の方法として、ブルドン管気圧計を活用する。温度一定の状況下では、混合気体の気圧比は、混合気体のモル比に等しい。

例えば、全体として 1 気圧ある中、0.2 気圧を気体 1 が占め、0.8 気圧を気体 2 が占めれば、この混合気体のモル比は、気体 1 : 気体 2 = 1 : 4 となる。したがって、ブルドン管気圧計を用いて気体の入れる量を調節することで、装置内に測定したい比をもつ混合気体を作ることができる。

実際の作業の説明をする。最初にバルブ 1 を開けて気体 1 を入れ、測定したい割合に達したらバルブ 1 を閉める。次に、バルブ 2 を開けて気体 2 を入れ、同様に気圧計で気体の量を確認し、バルブ 2 を閉める。

4. 超音波距離計、デジタルオシロスコープのスイッチを入れる。
5. 送信シグナル受信シグナルの時間差をデジタルオシロスコープにより測定する。気体の種類や混合比が異なると音速の値に変化が生じるため、時間差に変化が現れる。

以上より、本実験では2つの信号の時間差  $\Delta t$  を測定し、混合比による測定値の違いを調べる。なお、この実験は温度一定のもとで行う。本実験における温度は、22℃である。

図5.8は、実際にデジタルオシロスコープに信号が映し出されている画像である。これは空気中におけるシグナルである。CH1で送信シグナルをトリガーし、CH2で受信シグナルを同期する。画像に映し出された黄色い信号が送信シグナル、青い信号が受信シグナルである。

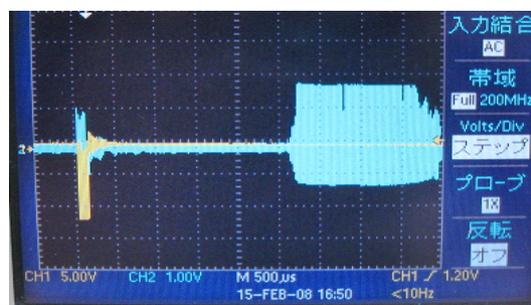


図 5.8: 送信シグナル、受信シグナルの画像

### 5.3 空気中の音速測定による測定器の性能評価

製作した測定装置の精度を調べるために、まず空気中で音速測定を行う。

(空気中の音速の理論値について)

日本の冬の室内における湿度は一般には40%前後である。冬期は室内で暖房を使用しているため、乾燥してこのような低めの値を示す。そこで今回の実験では、温度22℃、湿度40%の実験室環境が与える音速値を、音速の理論値として採用する。その値は、345.59m/sである。

### 5.3.1 圧電素子間の距離の変化に伴う音速の測定値と理論値の比較

測定装置からステンレスパイプと圧電素子を取り出す。ステンレスパイプに入れた受信機を動かし、圧電素子間の距離を変えて、それぞれの場合における、音速の理論値から求められる超音波の伝播時間（つまり、音速の理論値を距離で割った値）と、実際に観測した2つのシグナルの時間差（測定時間）を比較した。

その結果を表 5.2 に示す。

距離(m)	時間( $\mu$ s)	理論値( $\mu$ s)
0.88	2700	2546
0.8	2500	2315
0.7	2200	2026
0.6	1900	1736
0.5	1650	1447
0.5	1600	1447
0.4	1350	1157
0.4	1300	1157

表 5.2: 理論値と測定値のデータの比較

測定時間に多少のふれ幅がみられる箇所 (0.5,0.4m) では、その幅として2つの数値を表に採用した。

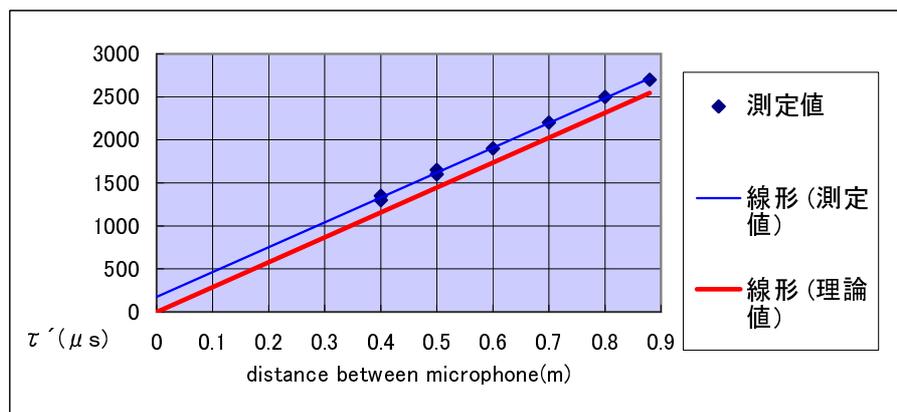


図 5.9: 測定値と理論値のデータの比較

図 5.9 は、表の数値をグラフ化したものである。青のラインは測定値を線形近似した直線である。理論値を示す直線とほぼ一定の差が見られる。

この原因は、図 5.7 から分かるように、私たちは実際に超音波が伝播している時間を測定していないことにあると考えられる。

私達が測定した時間は、送信パルスをおシロスコープが捉えて出力したシグナルと、受信機で受け取ったパルスを増幅し、更にそれをオシロスコープで捉えて出力したシグナルの時間差である。つまり、この測定時間  $t$  は、超音波の伝播時間に加え、装置の回路全体のオフセットを含んでいる。よって、理論値としての伝播時間より長く測定される。

したがって、正しい伝播時間を得るためには、このオフセットの値を調べ、測定時間  $t$  から引く必要がある。

### 5.3.2 オフセットの値の決定

個々の値と理論値の差にはばらつきがある。そこで、全ての測定データを元に得られる近似直線を利用する。

この近似直線が示す関数は、測定時間  $t$  を  $Y$ 、圧電素子の距離を  $X$  として、 $Y=2885.9+175.66X$  で与えられる。この関数から得られる、ある距離  $X$  における測定時間  $Y$  は、全ての測定データを考慮した値である。

今回は  $X=0.88\text{m}$  における測定時間  $Y$  と、 $X=0.88\text{m}$  における理論値の伝播時間を比較し、その差を回路のオフセットとして用いる。0.88m における時間差を用いる理由は、実際の測定装置の圧電素子間の距離が 0.88m であり、この位置での時間差が、音速測定実験中のオフセットとして最も適切であるからである。

近似直線による測定時間(0.88m)	理論値による音波伝播時間(0.88m)	差(オフセット)
2715 $\mu\text{s}$	2546 $\mu\text{s}$	169 $\mu\text{s}$

表より、オフセットの値を 169  $\mu\text{s}$  とする。今後の実験では、測定時間  $t$  から 169  $\mu\text{s}$  をひいた値を実際に測定される超音波伝播時間  $t_{\text{prop}}$  として採用する。

### 5.3.3 圧力の変化に伴う伝播時間 の測定

次に、測定装置を元の通りにセットし、真空ポンプを使って圧力の値を変えながら伝播時間 を測定する。その結果を次のグラフに示す。

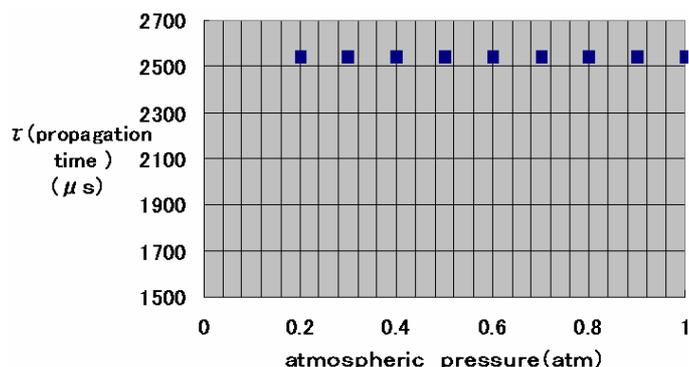


図 5.10: 圧力変化に対する超音波伝播時間 のグラフ

グラフから、伝播時間の値は気圧の変化に対して不変であり、音速は圧力に依存しないことが読み取れる。しかし、0.2 気圧以下の測定では、受信シグナルを確認することができなかった。このことから、音波は媒介物質がないと伝播できないことが理解できる。

## 5.4 混合ガスの音速測定

まず、 $O_2/N_2$  混合ガスで伝播時間の測定を行い、次に  $Ar/{}^4He$  混合ガスで伝播時間の測定を行う。

表 4.1、表 4.2 のデータからわかるように、 $O_2/N_2$  混合ガスでは、分子量の差が小さいため、混合比による音速、伝播時間の差が小さい。一方で、 $Ar/{}^4He$  混合ガスでは分子量の差が大きいため、混合比による音速、伝播時間の差が大きい。

### 5.4.1 $O_2/N_2$ 混合ガスにおける伝播時間の測定結果

測定結果を以下の表に示す。また、その数値を右図においてグラフ化した。赤い線が理論値、青い線が測定値である。表に注目すると、値が埋まっていない箇所がある。これは、濃度10%の変化に対して測定時間はあまり変化せず、正確に10%毎の値を読み取ることができなかつたため記録していない。

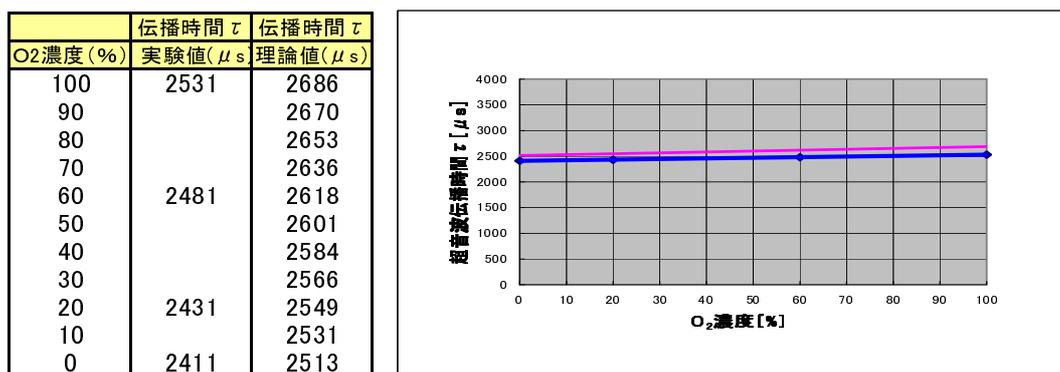


表 5.3:  $O_2/N_2$  混合ガスの測定結果

### 5.4.2 $Ar/^4He$ 混合ガスにおける伝播時間の測定結果

次に、 $Ar/^4He$  混合ガスの濃度別伝播時間の変化を表に示す。この実験は2回行っている。

1回目の測定結果を左の表に、2回目の測定結果を右の表に示す。こちらも、 $O_2/N_2$  混合ガスと同様に、理論値としての伝播時間と測定値としての伝播時間を比較する。

測定1 He濃度 (%)	伝播時間 $\tau$	
	実験値 ( $\mu s$ )	理論値 ( $\mu s$ )
100	1131	870
90	1631	1201
80	1831	1457
70	1931	1673
60	2131	1868
50	2331	2042
40	2431	2200
30	2531	2353
20	2631	2493
10	2731	2627
0	2731	2750

測定2 He濃度 (%)	伝播時間 $\tau$	
	実験値 ( $\mu s$ )	理論値 ( $\mu s$ )
100	1131	870
90	1381	1201
80	1831	1457
70	1831	1673
60	2031	1868
50	2131	2042
40	2331	2200
30	2481	2353
20	2631	2493
10	2631	2627
0	2731	2750

表 5.4:  $Ar/^4He$  混合ガスの測定結果

この結果を以下のグラフで示す。赤い線が理論値、青い線が測定値である。

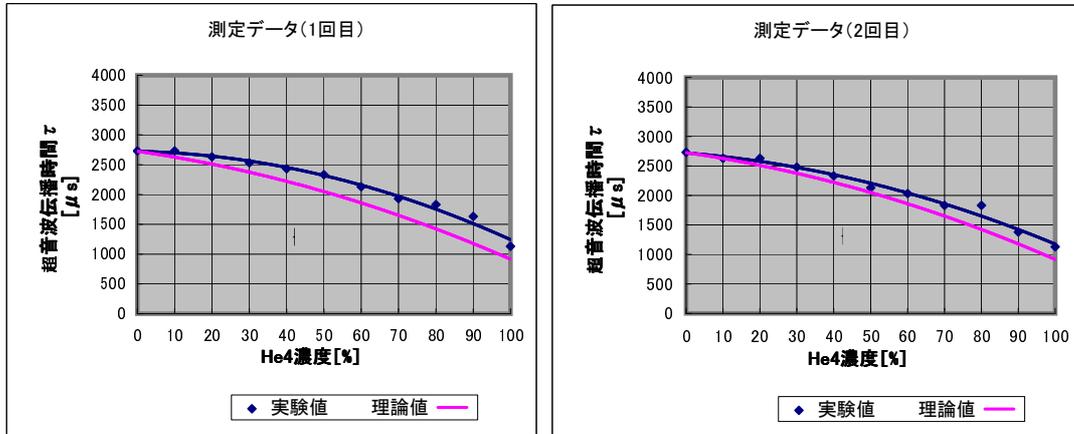


図 5.11:  $Ar/{}^4He$  混合ガスの測定結果

そして、1, 2回目のデータを総合したデータを図5.13に示す。

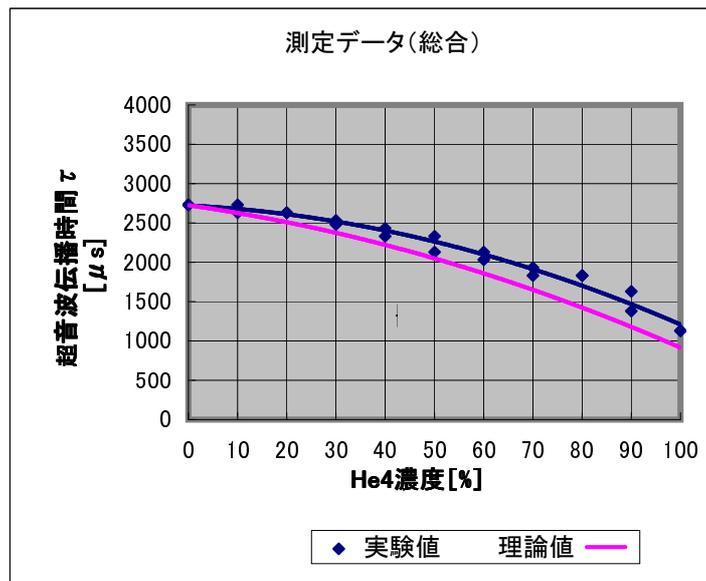


図 5.12: データの比較

### 5.4.3 測定結果に対する考察

混合ガスの測定結果において、未だ測定値と理論値に差が見られる。この原因について、現段階では以下のようなことが考えられる。

- 私達は送信シグナルが大きく立ち上がっている所から、受信シグナルが大きく立ち上がっている所までの時間差を観測している。(図 5.8 参照)しかし、混合ガスの比が変わると受信シグナルが変動する場合がある。例えば、Ar/<sup>4</sup>He 混合ガスでは、<sup>4</sup>He 濃度が高くなると、受信シグナルの立ち上がりが小さくなり、その波形は凸形から山形になってしまう。よって、測定を通して受信シグナルが一定ではないため、読み取る時間差に多少誤差が生じていると考えられる。この受信シグナルが小さくなる問題点については後で詳しく述べる。
- 温度による誤差を考察する。室温 22 度に保たれた実験室環境で音速測定を行っているが、測定装置内部の温度を常に計測しているわけではない。測定装置に気体を充填させた後、シグナルを測定する前に少し時間を置いているため、室温と測定装置内部の温度はほぼ等しいと考えられるが、温度の変化により、測定値と比較している理論値の値が多少ずれているかもしれない。しかし、1 度の温度変化が与える伝播時間の変化量は 3 ~ 4 μs に過ぎず、温度の変化による大きな影響は考えられない。
- オフセットの値が、超音波が伝播する気体の種類に依存する可能性がある。圧電素子が媒質中に超音波を発信、または受信して電気信号に変換する際、媒質の種類によって何か影響があるかもしれない。
- 酸素と窒素のような、音速値の差が小さい場合における混合ガス中の音速測定では、濃度変化に対する伝播時間の変化が小さいため、回路の時間分解能が与える誤差の影響が大きいと考えられる。また、濃度の変化に対する測定時間の変化が乏しいため、デジタルオシロスコープに映されたシグナルから細かい時間の変化を読み取ることが難しい。そのため、測定値に読み取りの誤差が含まれていることも否めない。したがって、分子量の差が小さな気体同士では、より正確な値を読み取るために回路の時間分解能を上げることが望ましい。また、正確にシグナルの時間差を読み取る方法として、シグナルの計測箇所別に別の回路を接続することが望ましい。その回路では、あらかじめしきい値の電圧が設定してあり、送信機から発信されるパルスの電圧を感知してから、更に受信機でその設定した電圧を感知すると、2 つの電圧の時

間差を正確に計測することができる。回路のつくり自体は簡単であり、入手しやすい回路であるので、それによる計測も有効な手段である。

しかし、この測定データから得られるグラフを用いることで、混合ガスの比を調べることは可能である。そして、更により多くのデータを測定することで、統計的に考えて信頼性のあるグラフを作成することができる。

#### 5.4.4 受信シグナルによる問題点とその考察

測定器の受信シグナルの問題点について説明する。先ほど述べたように、 ${}^4\text{He}/\text{Ar}$  濃度測定においては  ${}^4\text{He}$  濃度が上がるにつれて、受信シグナルが小さくなっている。受信シグナルの電圧と  ${}^4\text{He}$  濃度の関係を示すグラフを次に示す。

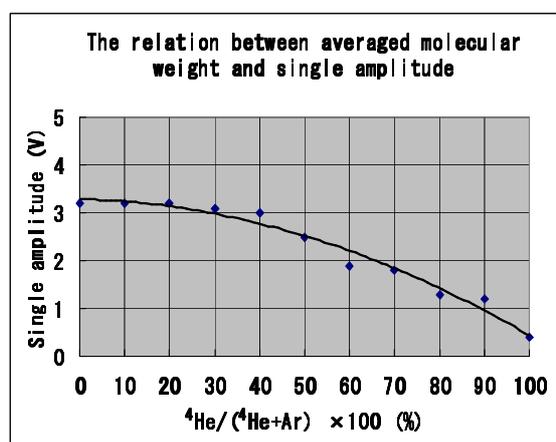


図 5.13:  ${}^4\text{He}$  濃度に対する受信電圧の変化

上のグラフから分かるように、濃度が上がるにつれて受信シグナルの電圧は減少していく。一方、 $\text{O}_2/\text{N}_2$  混合ガス測定においては、濃度の変化に対する受信シグナルの電圧の変化はほとんど見られなかった。

下に、空気中での送受信シグナルの画像と、 $^4\text{He}$  中での送受信シグナルの画像を並べて示す。

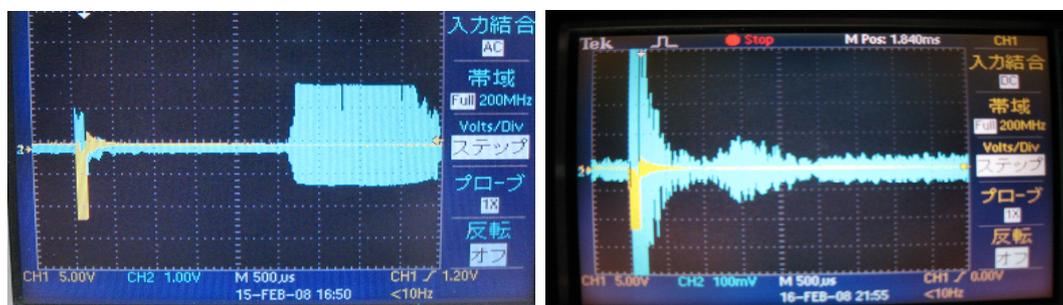


図 5.14: 空気中と  $^4\text{He}$  中でのシグナルの比較

左が、空気を媒質とした時のシグナルの画像であり、右が  $^4\text{He}$  のみを媒質とした時の信号の画像である。 $^4\text{He}$  中のシグナルの画像において、受信電圧の前後に伸びている信号は、ノイズである。これは、測定装置外部から与えられる様々な要因による。あまり目立たないが、これは左の画像でも確認できる。ただし、そのピークは  $70\text{mV}$  程度で、大きな受信電圧を観測している場合には気にならない。空気中での受信シグナルの電圧が最大  $1.7\text{V}$  を示すのに対し、 $^4\text{He}$  中では最大電圧が  $150\text{mV}$  に留まる。これでは、受信シグナルの立ち上がりも非常に分かりづらく、ノイズに埋もれてしまいうので、 $^3\text{He}/^4\text{He}$  混合ガスを用いた実験は困難である。

このようなことが起こる原因として、私たちは混合ガスの平均分子量に着目した。 $\text{O}_2$ 、 $\text{N}_2$ 、 $\text{Ar}$  など比較的大きな分子量を持つ気体中での測定では、受信シグナルは小さくならなかった。しかし、 $^4\text{He}/\text{Ar}$  混合ガス中の測定では、 $^4\text{He}$  の占める割合が増加すると、それに反比例してシグナルは小さくなる。

$^4\text{He}$  の占める割合が増加するという事は、言い換えれば、平均分子量が減少するという事である。したがって、超音波が伝わる媒質中の平均分子量の減少が、超音波のエネルギーの減少につながり、結果として、受信シグナルが小さくなっているのだと考えられる。

#### 5.4.5 超音波エネルギーによる測定結果の考察

上述の考察の裏づけとなる、媒質を伝わる超音波の単位体積中のエネルギーの理論式は、2章の2.7式に示してある。この式を用いて、私達はこの受信シグナルの減少に対する改善策として次のように考えた。

超音波の単位体積中のエネルギーの式を改めて記述する。

$$E = 2\pi^2 A^2 f^2 \rho \quad (5.1)$$

ここで、上式の分子量、つまり密度の項  $\rho$  に着目する。

${}^3\text{He}$ 、 ${}^4\text{He}$  の密度は空気の密度に対して、それぞれ約 1/10, 1/7 にすぎない。よって、He を媒質とした超音波のエネルギーは、空気に比べてその割合だけ減少している。媒質中のエネルギー密度が小さい分、超音波が媒質中を伝播している間に受けるエネルギー減衰の影響が大きくなり、受信器に到達した際には微弱な電圧にしか変換されないため、測定されたような受信シグナルが観測されたのだと考えられる。He など分子量の小さい気体を媒質とした音速測定を行うには、上記のエネルギーを空気の場合と同じだけ増幅させる必要がある。その方法として、幾つか考えられる。

1. A(音波の振幅) を大きくする。

${}^3\text{He}$  の気体に対して、空気と同等のエネルギーを得るためには、音波の振幅を  $\sqrt{10}=3.16$  倍増幅させなければならない。音波の振幅を大きくするという事は、音圧を上げることと同等である。音圧を上げるためには、回路全体の電圧を上げる必要がある。ここで、音圧と電圧の関係式を下に示す。

$$\text{電圧アップ後の音圧 (dB)} = \text{元の音圧 (dB)} + 20 \text{Log} \frac{V_2}{V_1} \quad (5.2)$$

$V_2$ : 電圧アップ後の電圧

$V_1$ : 元の電圧

この式にしたがうと、音圧を 3.16 倍にするためには、非常に高い電圧を供給しなければならないため、音圧を上げる方法は有用ではない。

2. f(周波数) を上げる。

発信器の周波数を 3.16 倍増幅させる。

今、測定装置で使用している回路の周波数は 40kHz であるので、理論上最低でも 126kHz の周波数の発信器を用いれば、He 中であっても、私達が空気中で観測した受信シグナルと同等のデータが得られるはずである。このように考えると、周波数は大きければ大きいほど良いと考えられるが、周波数が高すぎると媒質によるエネルギー吸収量が増加してしまう。よって、あまり高い周波数では、エネルギーの大きな減衰が生じるため、逆効果である。

#### 5.4.6 ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$ 混合ガスにおける時間分解能と周波数

ここで、 ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$  混合ガスの比を正確に知るという観点から振動数の値を評価する。発信器の周波数が与える回路全体の時間分解能は  $\Delta T = 25 \mu\text{s}$  である。 ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$  混合ガスにおいて、この誤差が与える音速の精度は  $\Delta V/V_0 = 3\%$  である。

これは、 ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$  混合ガス中の音速測定において、時間分解能の誤差を含んだときの音速

$$V_0 + \Delta V = \frac{L = 0.88m}{T_0 + \Delta T} \quad (5.3)$$

と、誤差を考えない音速

$$V_0 = \frac{L = 0.88m}{T_0} \quad (5.4)$$

を比較し計算される。 ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$  混合ガスの平均音速は 1,080 m/s である。上の式において、この平均音速を  $V_0$  として、計算している。

この平均音速の 3% だけ、測定値に誤差を与えるということはすなわち、この装置による音速測定において、32.4 m/s の誤差を与えるということになる。これは混合気体の濃度 20% の誤差を与えることを意味する。(図 5.16 参照)

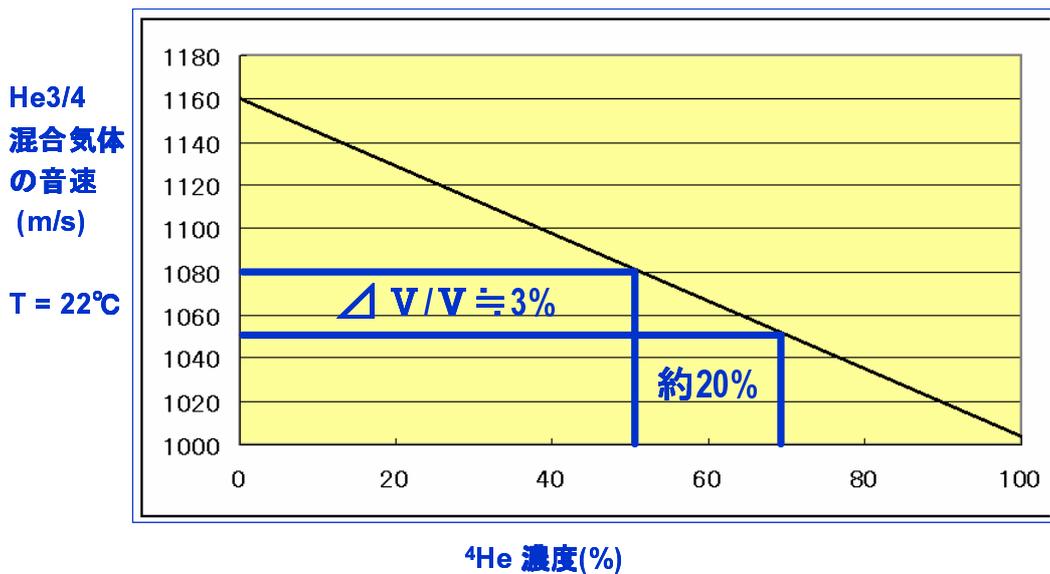


図 5.15:  ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$  混合ガスの音速と濃度

測定濃度誤差を 5% 以内に抑えるためには、 $\Delta V/V = 0.7\%$  以内、時間分解能は最低でも  $6 \mu\text{s}$  以下である必要がある。つまり、 ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$  混合ガスの比を正確に知るといふ観点から考えると、必要な周波数は 167 k Hz である。

以上より、超音波のエネルギーを増幅する、 ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$  混合ガスにおける濃度測定の精度を上げる、という 2 点から考えてこの測定装置の周波数を上げることが、今後測定装置の性能を上げると考えられる。

## 第6章 まとめとこれからの展望

音速測定システムにおける研究結果をまとめ、今後の展望を記す。

市販の超音波距離計キットを用いて、混合ガス中での音速測定ができる装置の設計、製作を行った。また、様々な気体で音速測定を試み、測定装置の性能評価を行った。

### 装置の設計

超音波距離計キット、電源装置の再利用など安価な機材を組み合わせることで、混合気体の比を測定できる装置を作り上げることができた。

### 実験結果

測定装置の性能評価として、 $O_2/N_2$  混合ガス、 $Ar/{}^4He$  混合ガス中で、混合比による超音波の伝播時間の変化を測定した。その結果として、気体の種類、また混合比によって異なる値を示すことを確認できた。また、理論値との誤差は見られたが、測定データをもとにして、混合気体の比を求めることができた。

今回の実験を通して分かったことなのだが、 ${}^3He/{}^4He$  混合ガスの比を測定する装置として実用化するためには幾つか課題がある。ここで、その課題と今後の対策を示す。

${}^4He$  中で実験を行った際、受信シグナルが極めて小さくなった。これは超音波の伝播エネルギーの減少によるものだと考えられる。 ${}^4He$  中でも、はっきりとした受信シグナルを表示させ、測定時間を正確に測定するためには、超音波のエネルギーを少なくとも空気中と同じ強さにする必要がある。エネルギーを高める方法として、発信機の周波数を上げることが最も効率的である。

$O_2/N_2$  混合ガス中で実験を行った際、分子量の比が7:8と比較的小さい値であったため、伝播時間から比を測定することが困難であった。また、 ${}^3He/{}^4He$  混合ガスでも分子量の比が3:4と小さいため、測定時間を正確に読み取る必要がある。それから、様々な要因からくる誤差の影響をできるだけ小さくして、測定精度を上げることも重要である。測定時間を正確に読み取る方法として、5.4.3で示した計測回路を用いることが考えられる。

より正確な測定精度を得るには、時間分解能を上げることが望ましい。つまり、発信機の周波数を上げればよい。また、時間分解能による誤差の影響を減らし、測定精度を上げる方法として、圧電素子間の距離を伸ばすことや、装置管内の圧力を上げることが挙げられるが、距離に比例した音波の減衰、ガス循環系システムに組み込むことを考慮すれば、この装置の改良手段として超音波の周波数を上げることがまず第1に望まれる。以上を総合すると、発信機の周波数を170 k Hz以上の物に変更、また発信機に付随した回路の変更、それを用いた測定実験が今後必要であるだろう。

$^3\text{He}/^4\text{He}$  混合ガスの測定には現在このような課題があるが、測定装置を今後改良していくことで実用化できる可能性は大いに考えられる。完成することができれば、偏極実験に留まらず、様々な場面で有効活用することができるだろう。測定装置の完成に向け、これからも引き続きクォーク核物理学研究室で、測定研究を続けていただくことを願う。

## 謝辞

卒業研究を行うにあたり、多くの方からお力添えをいただきました。この場を借りて感謝を申し上げます。

岩田高広教授には卒業研究における丁寧な助言を幾度となくいただきました。理論や実験で行き詰ったときに、問題を解決するためのヒントを投げかけてくださったり、私たちが気づかないような点を指摘してくださったりしたことで、より深い知識や実験技術を身に付けることができました。また、国際シンポジウムで卒業研究を発表するという貴重な場も提供していただき、私たちも大変勉強になりました。世界を舞台にして研究を行っていくことの偉大さを実感したような気がします。また、本研究者の一人、熊田に関しましては、教員採用試験提出用の人物証明書を丁寧に書いていただいたことにも感謝を申し上げます。現役合格は、岩田教授の元で地道に勉学に励んだ結果であると考えています。本当に担当教官が岩田教授でよかったと心から思います。私たちも岩田教授のように全身全霊を込めて研究に没頭できる、真摯な人間でありたいです。

加藤静吾教授、吉田浩司准教授、田島靖久助教には、ゼミや講義をはじめ、様々な場面でご指導をいただきました。特に田島助教にはKEK ツアーの引率をしていただき、現地で世界最先端の研究を紹介していただきました。日本最大の加速器を間近に見ることで日本の科学者の情熱が伝わり、なんだか私たちも熱い気持ちになれました。貴重な体験を提供していただき、誠にありがとうございました。

Bochum 大学 (現山形大学) の堂下典弘さんには、国際シンポジウムの発表に際して貴重な助言を何度もいただきました。堂下さんの的確な助言により、納得できる資料を作ることができ、発表も大成功に収めることができました。また、堂下さんの研究に対する誠実な態度を見て、私たちも卒業研究に対するモチベーションを大いに上げることができました。心より深く感謝申し上げます。

山形大学大学院ベンチャービジネスラボラトリーの足立和成教授には、測定システムを構築する上で貴重な助言をいただきました。お忙しい中、山形大学まで足を運んでいただき、興味深い電子回路の講義をしていただいたことに感謝を申し上げます。

同研究室の偏極ターゲットグループメンバーである田中昴さん、外山幸太さん、植松秀章さんには偏極実験について詳しく教えていただきました。私たちがしつこいくらい質問しても、嫌な顔をせずに丁寧に教えてくださったことには頭が下がる思いです。そのおかげで、卒業論文の作成もスムーズに行うことができました。

た。また、田中さんにはライブでお世話になりました。田中さんほどギターの演奏が素晴らしい人はこの世にいないと思います。ぜひ、将来はプロのミュージシャンになっていただきたいです。ありがとうございました。

同研究室の加藤泉さん、上林智亮さん、奥山皓君、榊原久志君、本田城正君、須田真博君には、日々の学生生活を楽しくする上で大変お世話になりました。特に、榊原君にはプライベートで4年間交流していただき、楽しい思い出を作ることができました。来年度からは働く場所が違いますが、お互いに一生懸命頑張ることができたらよいと思います。

最後に、4年間の学生生活においてお世話になった方々に心より御礼申し上げます。



図 6.1: 国際シンポジウムにおける写真

## 関連図書

- [1] 道上琢磨, 修士論文, ”液体  $^3\text{He}$  の能動核偏極の試み”, 山形大学 理工学研究科 2005 年度修士論文
- [2] 穴戸智浩, ”Zeolite 細孔中での液体  $^3\text{He}$  の核偏極の研究”, 山形大学 理工学研究科 2006 年度修士論文
- [3] 田中昴, ”能動核偏極による液体  $^3\text{He}$  偏極ターゲットの開発”, 山形大学 理工学研究科 2007 年度修士論文
- [4] 宮地義之 他, 原子核研究 Vol.41 No.6 ”ポリエチレン偏極標的の開発” (1997)
- [5] 中村昭, ”音の科学”, 朝倉書店
- [6] 芝大和, ”超音波距離計の製作と実験”, 高知工科大学 知能機械システム工学科 2001 年度学士論文
- [7] 郡司修一 ”測定回路の基礎と応用 (大学院講義用テキスト)”, 山形大学 理工学研究科 (2004)
- [8] 佐井篤儀 ”医用超音波技術学 (4 年次講義用スライド)”, 新潟大学 医学部保健学科 (2007)
- [9] 白土義男 ”オペアンプ回路の手ほどき”, 日本放送出版協会 (1984)
- [10] 白土義男 ”デジタル回路の手ほどき”, 日本放送出版協会 (1984)
- [11] 趣味の電子回路工作  
<http://www.hobby-elec.org/>
- [12] 啓林館 ユーザーの広場 第1節 音波  
<http://www.keirinkan.com/>

[13] 物理の部屋 波動

*[http://www15.wind.ne.jp/Glauben\\_eben/Buturi/Hadou/Hadoubase1.htm](http://www15.wind.ne.jp/Glauben_eben/Buturi/Hadou/Hadoubase1.htm)*

[14] 圧電発音部品 村田製作所

*<http://www.murata.co.jp/catalog/p43j7.pdf>*

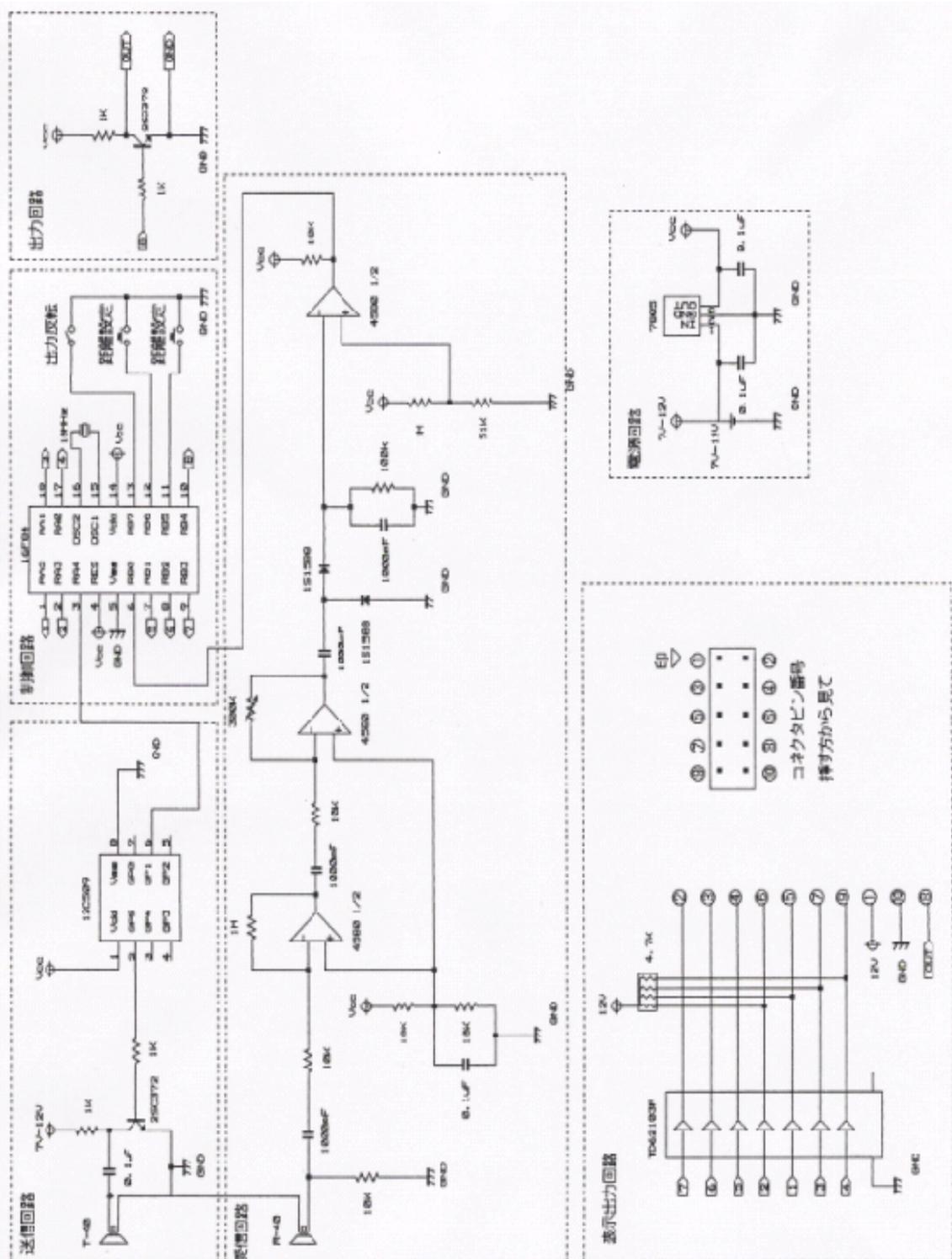


図 6.2: 超音波距離計 A キットの回路

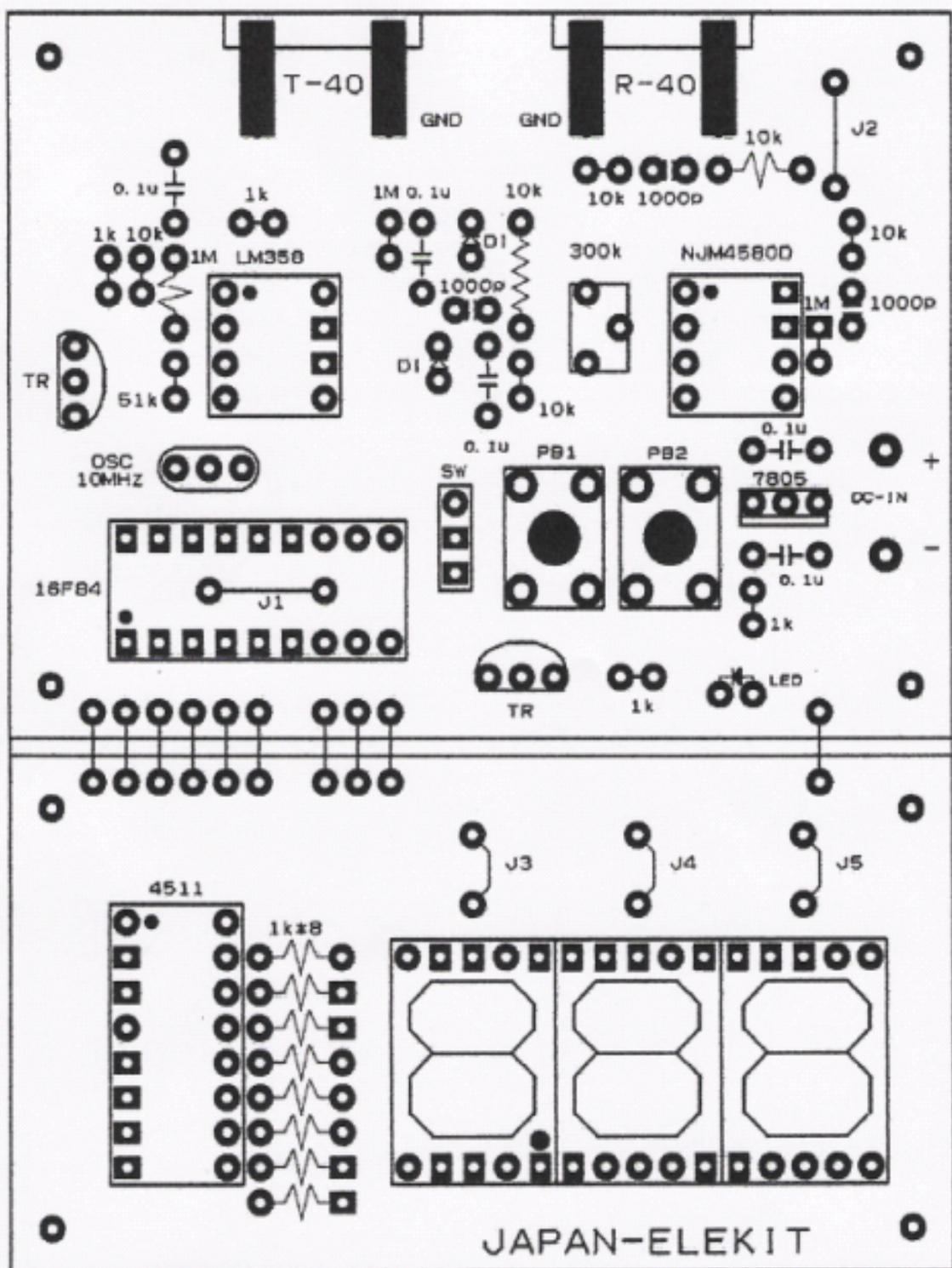


図 6.3: 超音波距離計 A キットの概略図