

ナノテクノロジーによる機能的・構造的生体代替デバイスの開発
I バイオニックナノメディスンによる循環器調節機能デバイスの開発研究
生体内無線通信に関する研究

分担研究者 小久保 優(日立製作所中央研究所情報システム研究センタ主任研究員)

研究要旨

本研究の目的は、人体に埋め込んで使用する超小型医療機器に必要な要素技術の1つとして、生体内で使用可能な無線通信手段を開発することにある。当面の目標は、心臓内部に分散配置した複数の素子を互いに協調動作させペースメーカとして作用する装置の素子間通信技術を開発することにある。

血液で満たされた環境での無線通信手段として、電波を用いる方法と超音波を用いる方法が考えられるため、H14年度の本補助金を活用してそれぞれの基礎データを取得するための実験装置を作成し、H15年度にはこの装置を用いた実験を行なった。電波については、技術的に使いやすい周波数帯では高出力の違法無線局等が存在する。本目的では一時的にでも混信が起きると人命にかかわる可能性が高く、これを避けるため2GHz以上の周波数帯の使用を検討した。しかしながら、水中に電波を伝播させると2.45GHz、5.20GHz、7.35GHzのいずれの周波数でも減衰が大きく、血液中での無線通信には使いにくいことが判明した。一方、超音波については、20MHz付近での水中伝播特性が良好であることが判明した。そこで、超音波を用いた無線通信装置の開発を優先し、FSK方式で変調する通信実験装置を試作した。

A. 研究目的

本研究の目的は、超小型心臓ペースメーカに必要な体内無線通信技術を開発することにある。そこで、信号伝達手段として超音波を用いることを想定し、心臓内の血液中を伝搬する際の減衰特性を理論式によって推定した。また、計算結果の検証を目的とした基礎実験を行うため、必要な実験機材を設計し製作した。

B. 研究方法

B-1. はじめに

無線通信手段として電波を用いた場合、900MHz付近にはパーソナル無線の周波数帯があり、この無線機を違法改造し周波数および出力を変えて送信していると見られる移動無線局の電波が時々観測される。これより低いUHFおよびVHFの周波数帯では、違法ではないが高出力のテレビ放送局や、アマチュア無線局などがある。これらの電波と混信して一時的に使用できなくなった場合、通常の無線通信ではその場から離れるか相手が遠

ざかるのを待てば再び使用可能になる。しかし医療機器に使用する場合には、混信している間の誤動作が人命にかかわることも十分に考えられる。従って、これらの周波数帯を避け2GHz以上の周波数帯を使用することを検討した。

電波の水中伝播特性を測定した結果を図B-1～図B-3に示す。図B-1は2.45GHzの場合、図B-2は5.20GHzの場合、図B-3は7.35GHzの場合である。この測定は、シールドケース内に設置した2本のアンテナの一方をパルスジェネレータに接続し、他方をスペクトラムアナライザに接続し、両アンテナ間に厚さ2cmまたは10cmの水の層を設けることにより行なった。水が有る場合と無い場合の受信電力の差を各図に示す。この図からわかるように、2cmの水の層を通した時の減衰は約30～55dB、すなわち電波のパワーで約1000分の1～30万分の1に減衰する。従って、この周波数帯では水による電波の吸収が大きく無線通信には使いにくいと考えられる。

また、100kHz以下の長波では他の無線局からの

混信の可能性は小さいが、波長が長いためアンテナの小型化が難しいことや、伝送容量を大きくできないという欠点がある。

以上のことから、H15 年度は超音波を用いた方式の開発を優先した。

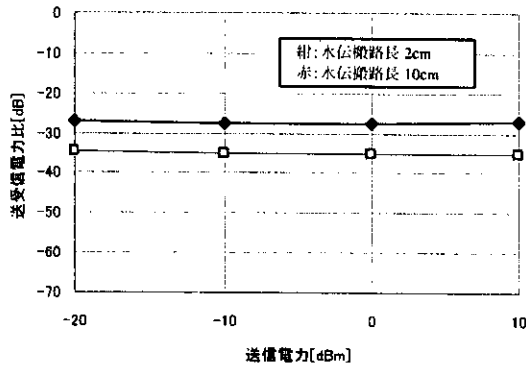


図 B-1 周波数 2.45GHz の電波の水中伝搬の減衰量

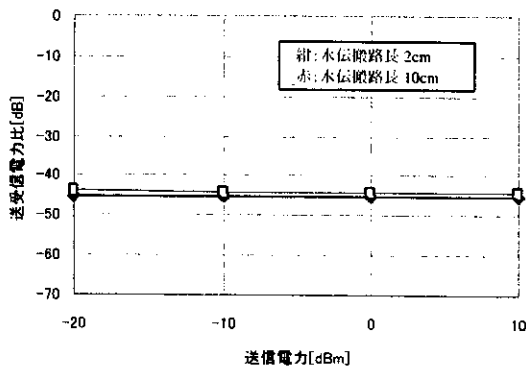


図 B-2 周波数 5.2GHz の電波の水中伝搬の減衰量

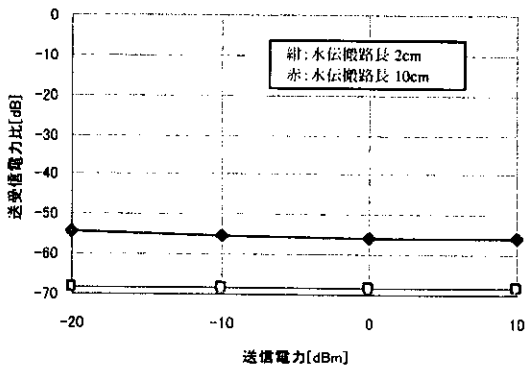


図 B-3 周波数 7.35GHz の電波の水中伝搬の減衰量

B-2. 超音波方式の基礎実験

B-2-1. 供試振動子の仕様

体内に装着したときに人体に無害であることが必須条件であることから、超音波を発生する圧電物質の中でも、その成分に鉛を含まないニオブ酸リチウム(LiNbO3)単結晶を振動子材料として選択した。

振動子が送信/受信を行う超音波の基本共振周波数は振動子の厚さに反比例する。実験を行う超音波の周波数帯は以下の観点から決定した。

- ① 体内に装着したときに、人体に与える負担を小さくするために振動子の厚さは最大でも 1mm 程度であると予想されること。
- ② 超音波が血液中を伝搬するときの減衰量を理論式から算出した結果、最大伝搬距離を 10cm と仮定した場合、3~10MHz 程度の周波数では問題ないと推察されたが[B-1]、振動子の厚さをより薄く出来るという観点から、30MHz 付近まで周波数を拡張して特性を検証する。

実験で使用した 3 種類の厚みの振動子の仕様を表 B-1 に示す。尚、今回の実験は超音波の基本特性を検証することを目的としているため、扱い易さの観点から断面積 1cm²と大きめの振動子を使用した。振動子の概観を図 B-4 に示す。

図 B-4 に示すように、振動子の両断面の全面には厚さ 0.2μm の金電極が蒸着されている。この電極間に振動子の共振周波数で変動する電圧を印加することによって、振動子の両断面から垂直方向に縦波の超音波を放射することができる。

表 B-1 供試振動子の仕様

材料	断面	厚さ	基本共振周波数(設計値)
ニオブ酸リチウム(Zカット)	1cm□	0.121mm	29.9MHz
		0.362mm	10MHz
		1.207mm	3MHz

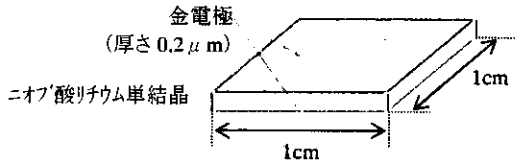


図 B-4 振動子の概観

B-2-2. 振動子の共振周波数の確認

実験で使用する振動子の特性が設計通りであることを確認するために、振動子が超音波を放射／受波する共振周波数付近では振動子の電気的なインピーダンスの大きさが極小点と極大点を有する性質に着目して、インピーダンスアナライザを用いて各振動子のインピーダンス特性を空气中で実測した。

図 B-5 に示すように、測定は振動子に 2cm 程度のリード線を取り付けた状態の物をインピーダンスアナライザに直接接続して行い、振動子単体のインピーダンス特性が測定されるようにした。

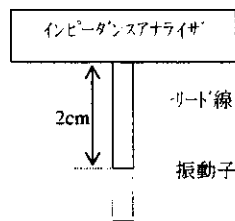


図 B-5 振動子のインピーダンス測定系の概観

基本共振周波数の設計値が 3MHz である 1.207mm 厚の振動子の測定結果を図 B-6 に、基本共振周波数の設計値が 10MHz である 0.362mm 厚振動子の測定結果を図 B-7 に、基本共振周波数の設計値が 29.9MHz である 0.121mm 厚振動子の測定結果を図 B-8 に示す。各グラフ内には、振動子の研磨誤差 ($\pm 10 \mu\text{m}$) によって生じる基本共振周波数の誤差範囲も併せて示した。

図 B-6 から、1.207mm 厚振動子に関しては、ほぼ設計通りの基本共振周波数(3MHz)及び 3 次共振周波数(9MHz)、5 次共振周波数(15MHz)・・・で極めて良好な共振現象が観測される。従って、実験で使用した振動子は設計通りの周波数付近で

共振(超音波放射／受波)する物となっていることが確認された。

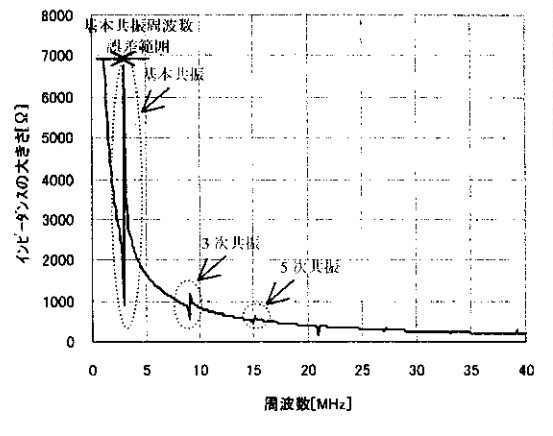


図 B-6 1.207mm 厚振動子のインピーダンス特性の測定結果

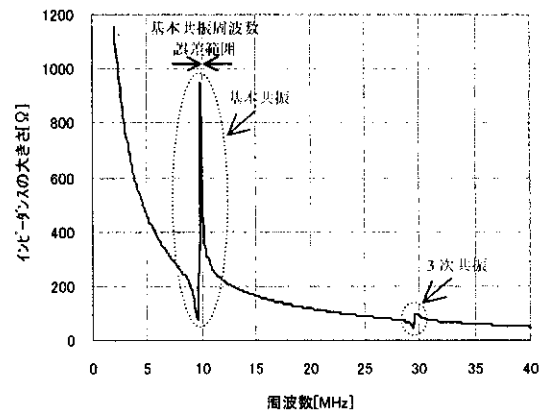


図 B-7 0.362mm 厚振動子のインピーダンス特性の測定結果

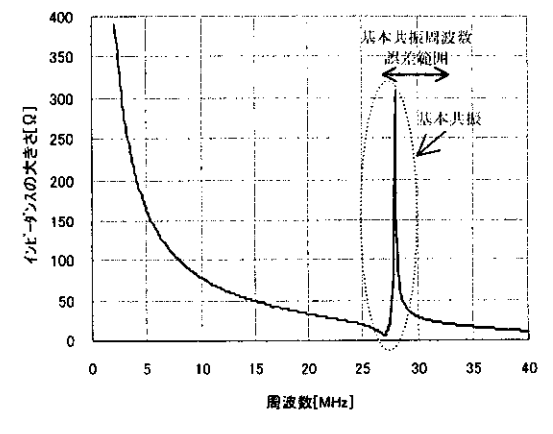


図 B-8 0.121mm 厚振動子のインピーダンス特性の測定結果

同様に、図 B-7 と図 B-8 から 0.362mm 厚振動子と 0.121mm 厚振動子に関しても、先の 1.207mm 厚振動子の場合と同じく、設計通りの周波数付近で共振(超音波放射/受波)する物となっていることが確認される。

B-2-3. 実験系での振動子の共振周波数の測定

振動子をフリーな状態で空气中に放置して、次章で記述する超音波の伝搬特性を検証するのと同じ実験系で、各振動子の共振周波数を測定した。

測定方法を図 B-9 に示す。測定は正弦波発振器の周波数を変えながら、入力電圧 V_1 の値が 0.35Vrms 一定となるように出力を調整し、振動子に印加される電圧 V_2 を測定した。

また、図 B-10 に示すように空洞を空けた配線基板を用意し、図 B-4 に示した振動子の片面(信号電極面)の四隅の極僅かな部分をこの空洞の四隅に通した細い釣り糸に接着固定して、送信側振動子、受信側振動子が共に、ほぼフリーな状態で振動できるようにして実験を行った(次章の水中伝搬特性の測定も同様)。

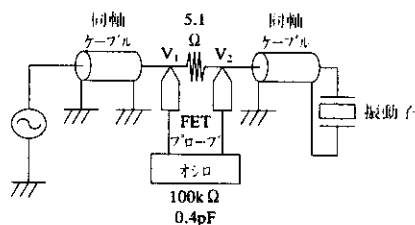


図 B-9 共振周波数の測定方法

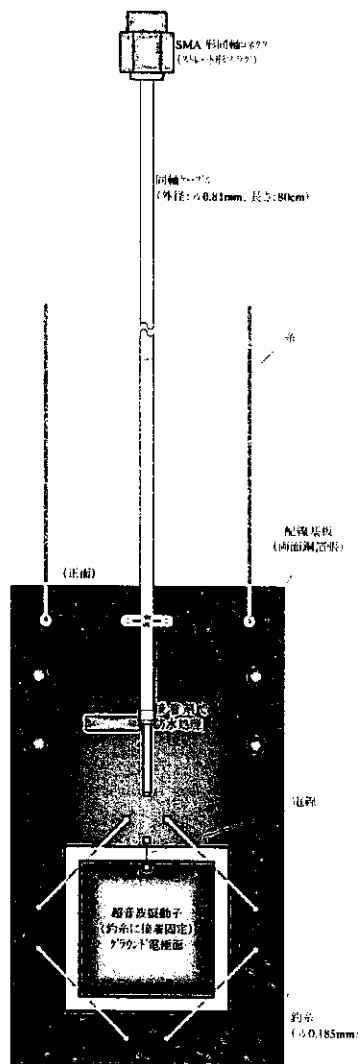


図 B-10 振動子を配線基板に実装した概観

0.121mm 厚振動子の測定結果を図 B-11、図 B-14 に、0.362mm 厚振動子の測定結果を図 B-12、図 B-15 に、1.207mm 厚振動子の測定結果を図 B-13、図 B-16 にそれぞれ示す。尚、5.1Ωのダミー抵抗に印加される電圧(V_1-V_2)^{*}は次の計算式から算出した(次章の水中伝搬特性の測定も同様)。

$$(V_1 - V_2)^* = \sqrt{V_1^2 + V_2^2 - 2V_1V_2 \cos \varphi} \quad \text{数式 B-1}$$

(φ は V_1 と V_2 の位相差)

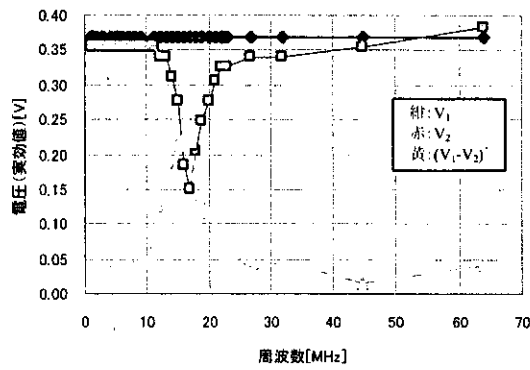


図 B-11 0.121mm 厚振動子:
 V_1 、 V_2 、 $(V_1-V_2)^*$ 測定結果

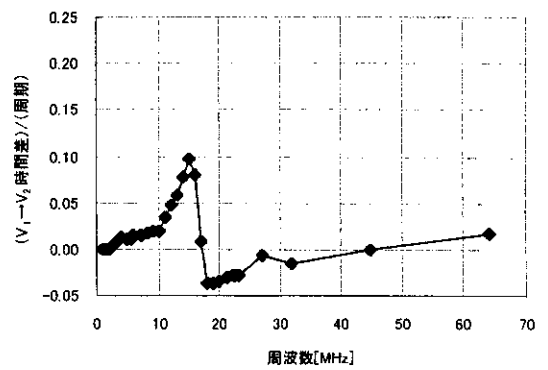


図 B-14 0.121mm 厚振動子:
 $(V_1 \rightarrow V_2 \text{時間差}) / (\text{周期})$ 測定結果

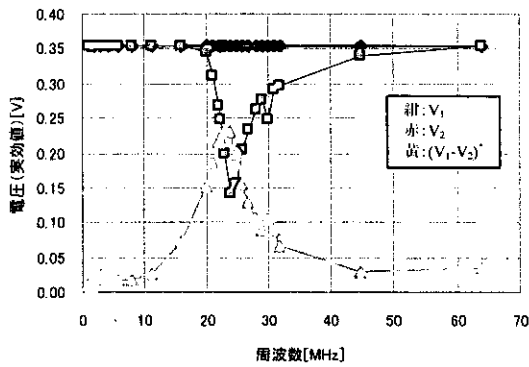


図 B-12 0.362mm 厚振動子:
 V_1 、 V_2 、 $(V_1-V_2)^*$ 測定結果

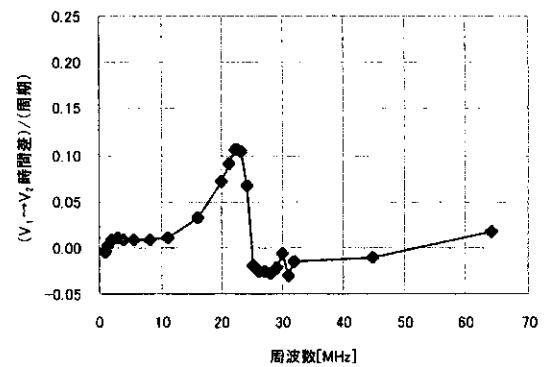


図 B-15 0.362mm 厚振動子:
 $(V_1 \rightarrow V_2 \text{時間差}) / (\text{周期})$ 測定結果

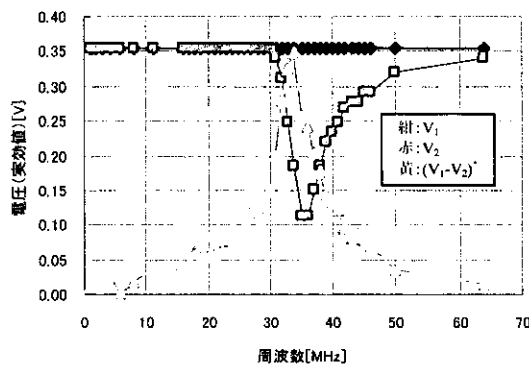


図 B-13 1.207mm 厚振動子:
 V_1 、 V_2 、 $(V_1-V_2)^*$ 測定結果

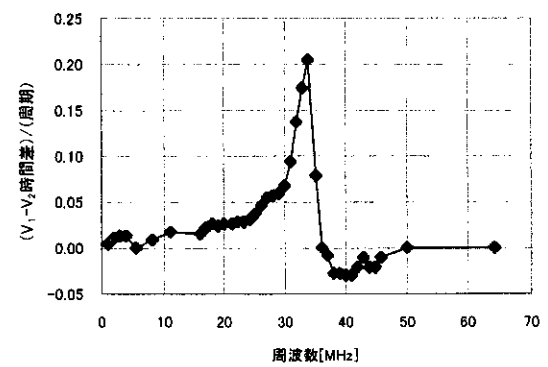


図 B-16 1.207mm 厚振動子:
 $(V_1 \rightarrow V_2 \text{時間差}) / (\text{周期})$ 測定結果

振動子の簡易等価回路を図 B-17 に示す。振動子が共振状態にあるときは、図 B-17 中の L と C、 C_d 成分が互いに打ち消し合うように作用し、外部からは R 成分のみが見えるようになりインピーダンスが低下する。この結果、共振状態では振動子に印加される電圧 V_2 が低下すると考えられる。この観点から図 B-11～図 B-13 のグラフを参照し、各振動子の共振周波数を読み取った結果を表 B-2 示す。

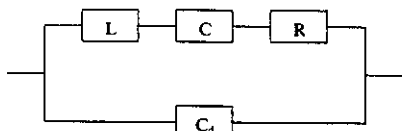


図 B-17 振動子の簡易等価回路

表 B-2 各振動子の共振周波数の測定結果

振動子種別	共振周波数
0.121mm 厚	17MHz
0.362mm 厚	24MHz
1.207mm 厚	36MHz

B-2-4. 超音波の水中伝搬特性の測定

B-2-4-1. 実験方法

超音波の基本動作を確認することを目的として、送信側振動子と受信側振動子をそれぞれ水に浸し対面させた状態で、水中における超音波の伝搬特性を実験により検証した。

本研究の成果を心臓ペースメーカに応用する場合、無線通信としての伝搬路は主に心臓内の血液になると予想されるが、血液の約 50% は水分であることと、先に述べたように、本実験では液体中を伝搬する超音波の基本的な特性を検証することを目的としているため、伝搬路媒体として水を使用して実験を行った。

測定方法を図 B-18 に示し、測定系の概観を図 B-19 に示す。測定は前章の実験と同様に、正弦波発振器の周波数を変えながら、入力電圧 V_1 の値が一定となるよう出力を調整し、送信側振動子に印加される電圧 V_2 を測定することによって送信側振動子の共振現象を確認しながら、受信側振動子の

電極間に発生する電圧 V_3 を測定し、最終的には送信側から受信側へ信号が伝搬される際の信号の伝送係数(減衰率)を求めた。

尚、電流や電波による信号の伝搬が測定結果に影響を及ぼすことを避けるために、送受双方の振動子のグラウンド電極面が対向するように配慮した。

実験は上記の条件で以下の事柄を実施した。

- ① 伝搬距離が 4cm の条件で送信側と受信側の振動子を切り替えて測定を行った。
- ② 伝搬距離を 4cm、10cm と変えて測定を行った。
- ③ 伝搬距離が 10cm の条件で V_1 の値を 0.35Vrms 一定から 0.11Vrms 一定に切り替えて測定を行った。

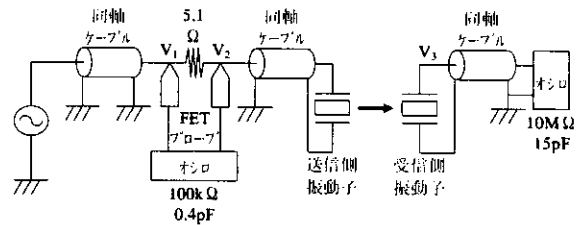


図 B-18 水中における超音波の伝搬特性の測定方法

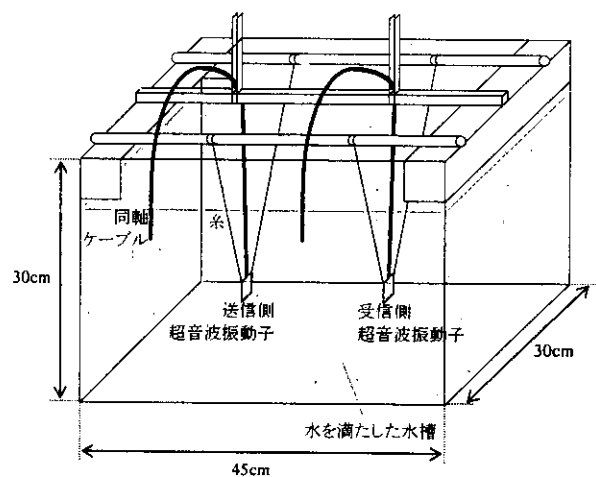


図 B-19 水中における超音波の伝搬特性の測定系の概観

B-2-4-2. 0.121mm 厚振動子を使った実験

0.121mm 厚振動子を使って行った、各種実験の測定結果を以下に示す。

(1) 実験条件が、

- 送信側振動子と受信側振動子の間隔 4cm
- $V_1=0.35V_{rms}$ 一定

の場合の測定結果を図 B-20～図 B-22 に示す。

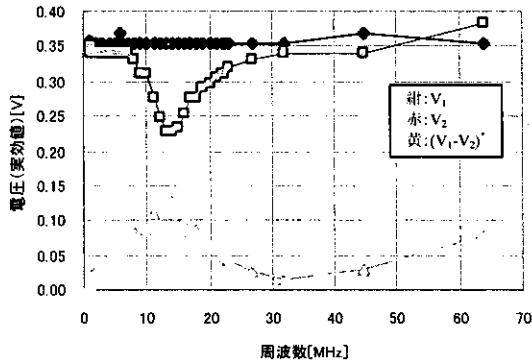


図 B-20 0.121mm 厚振動子、伝搬距離 4cm、 $V_1=0.35V_{rms}$: V_1 、 V_2 、 (V_1-V_2) 測定結果

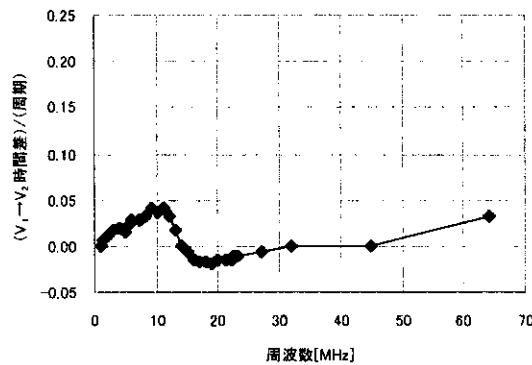


図 B-21 0.121mm 厚振動子、伝搬距離 4cm、 $V_1=0.35V_{rms}$: $(V_1 \rightarrow V_2)$ 時間差 / (周期) 測定結果

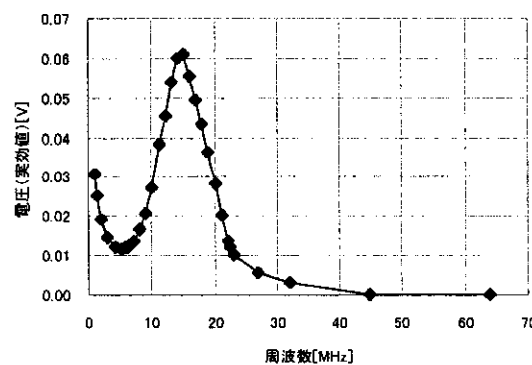


図 B-22 0.121mm 厚振動子、伝搬距離 4cm、 $V_1=0.35V_{rms}$: V_3 測定結果

(2) 実験条件が、

- 送信側振動子と受信側振動子の間隔 4cm
- $V_1=0.35V_{rms}$ 一定
- 送信側と受信側の振動子を切り替え

の場合の測定結果を図 B-23～図 B-25 に示す。

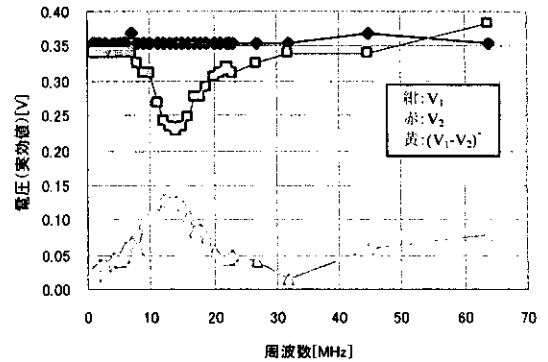


図 B-23 0.121mm 厚振動子、伝搬距離 4cm、 $V_1=0.35V_{rms}$ 、送受切り替え:
 V_1 、 V_2 、 (V_1-V_2) 測定結果

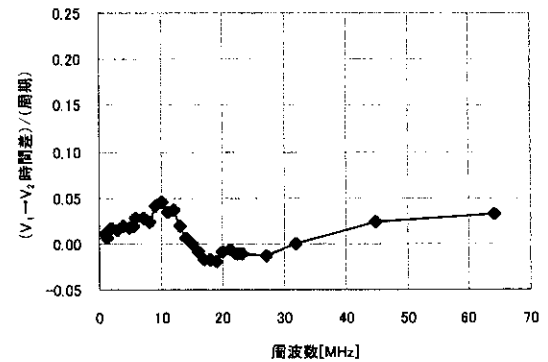


図 B-24 0.121mm 厚振動子、伝搬距離 4cm、 $V_1=0.35V_{rms}$ 、送受切り替え: $(V_1 \rightarrow V_2)$ 時間差 / (周期) 測定結果

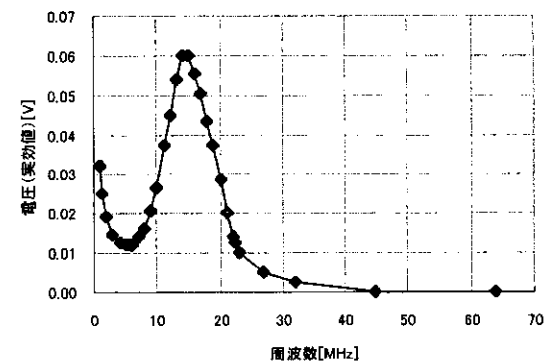


図 B-25 0.121mm 厚振動子、伝搬距離 4cm、 $V_1=0.35V_{rms}$ 、送受切り替え: V_3 測定結果

(3) 実験条件が、

- 送信側振動子と受信側振動子の間隔 10cm
- $V_1=0.35V_{rms}$ 一定

の場合の測定結果を図 B-26～図 B-28 に示す。

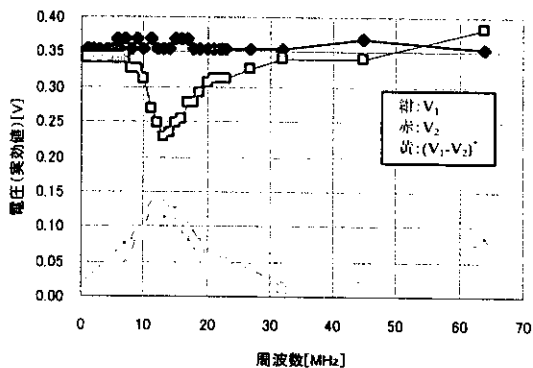


図 B-26 0.121mm 厚振動子、伝搬距離 10cm、 $V_1=0.35V_{rms}$: V_1 、 V_2 、 $(V_1-V_2)^*$ 測定結果

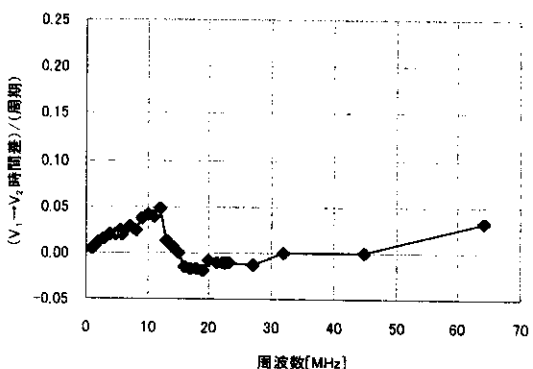


図 B-27 0.121mm 厚振動子、伝搬距離 10cm、 $V_1=0.35V_{rms}$: $(V_1 \rightarrow V_2 \text{ 時間差}) / (\text{周期})$ 測定結果

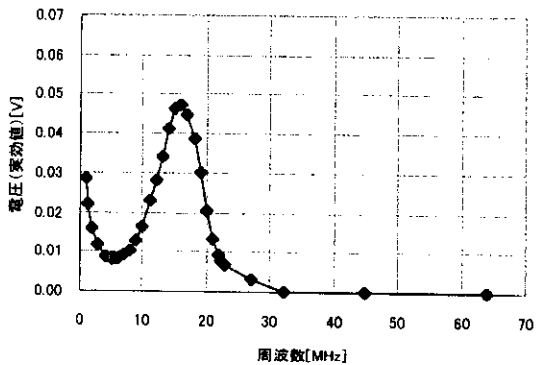


図 B-28 0.121mm 厚振動子、伝搬距離 10cm、 $V_1=0.35V_{rms}$: V_3 測定結果

(4) 実験条件が、

- 送信側振動子と受信側振動子の間隔 10cm
- $V_1=0.11V_{rms}$ 一定

の場合の測定結果を図 B-29～図 B-31 に示す。

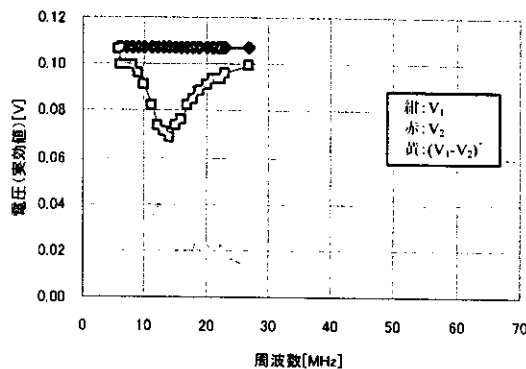


図 B-29 0.121mm 厚振動子、伝搬距離 10cm、 $V_1=0.11V_{rms}$: V_1 、 V_2 、 $(V_1-V_2)^*$ 測定結果

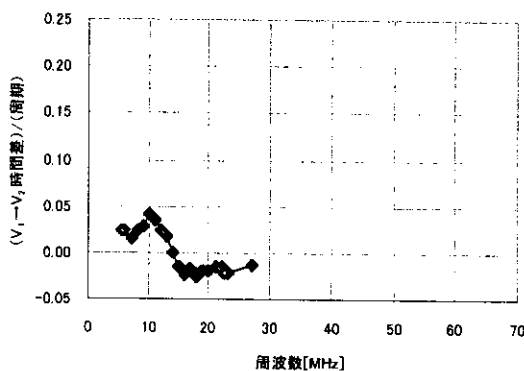


図 B-30 0.121mm 厚振動子、伝搬距離 10cm、 $V_1=0.11V_{rms}$: $(V_1 \rightarrow V_2 \text{ 時間差}) / (\text{周期})$ 測定結果

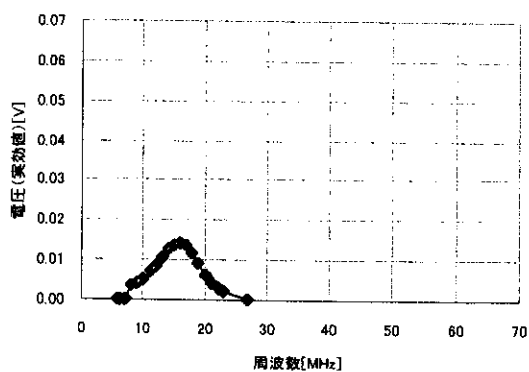


図 B-31 0.121mm 厚振動子、伝搬距離 10cm、 $V_1=0.11V_{rms}$: V_3 測定結果

最後に、本実験の目的である各実験条件での伝送係数(受信側検出電圧 V_3 / 送信側印加電圧 V_2)を計算して纏めた結果を図 B-32 に示す。

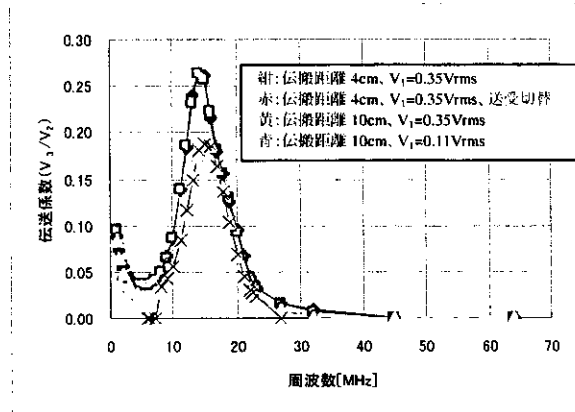


図 B-32 0.121mm 厚振動子:
伝送係数 (V_3/V_2) 測定結果

B-2-4-3. 0.362mm 厚振動子を使った実験

0.362mm 厚振動子を使って行った、各種実験の測定結果を以下に示す。

(1) 実験条件が、

- 送信側振動子と受信側振動子の間隔 4cm
- $V_1=0.35Vrms$ 一定

の場合の測定結果を図 B-33~図 B-35 に示す。

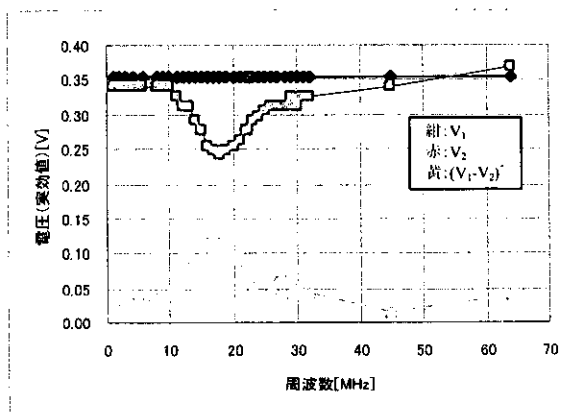


図 B-33 0.362mm 厚振動子、伝搬距離 4cm、 $V_1=0.35Vrms$: V_1 、 V_2 、 $(V_1-V_2)^*$ 測定結果

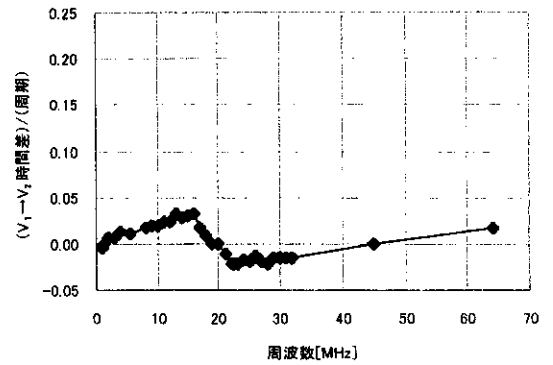


図 B-34 0.362mm 厚振動子、伝搬距離 4cm、 $V_1=0.35Vrms$: $(V_1 \rightarrow V_2$ 時間差)/(周期) 測定結果

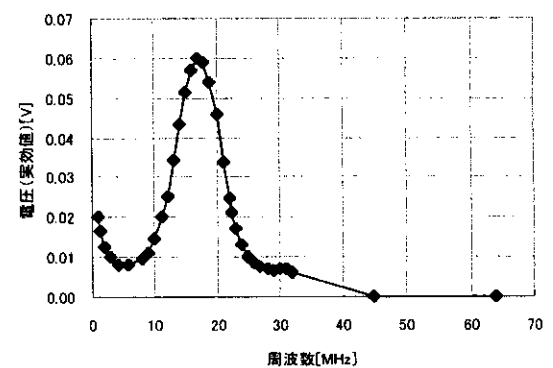


図 B-35 0.362mm 厚振動子、伝搬距離 4cm、 $V_1=0.35Vrms$: V_3 測定結果

(2) 実験条件が、

- 送信側振動子と受信側振動子の間隔 4cm
- $V_1=0.35Vrms$ 一定
- 送信側と受信側の振動子を切り替え

の場合の測定結果を図 B-36~図 B-38 に示す。

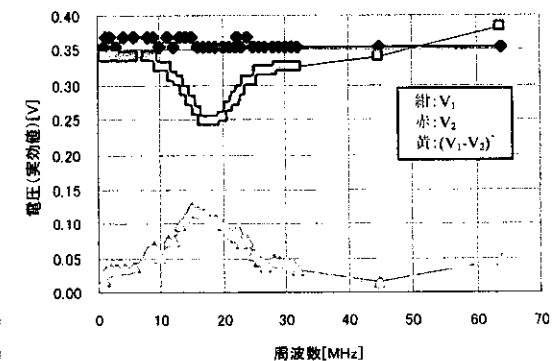


図 B-36 0.362mm 厚振動子、伝搬距離 4cm、 $V_1=0.35Vrms$ 、送受切り替え: V_1 、 V_2 、 $(V_1-V_2)^*$ 測定結果

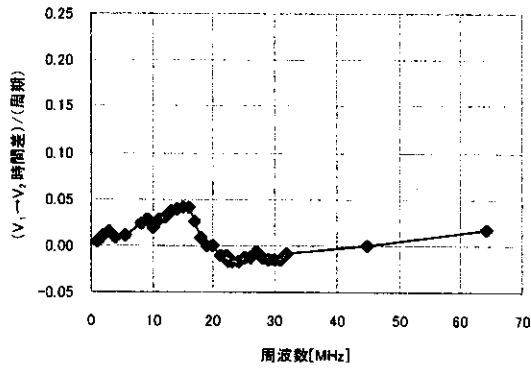


図 B-37 0.362mm 厚振動子、伝搬距離 4cm、 $V_1=0.35V_{rms}$ 、送受切り替え： $(V_1 \rightarrow V_2)$ 時間差 / (周期) 測定結果

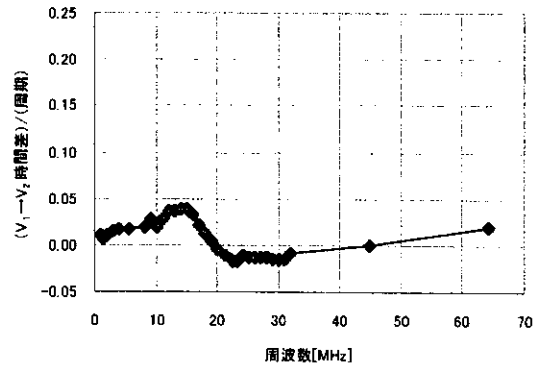


図 B-40 0.362mm 厚振動子、伝搬距離 10cm、 $V_1=0.35V_{rms}$ ： $(V_1 \rightarrow V_2)$ 時間差 / (周期) 測定結果

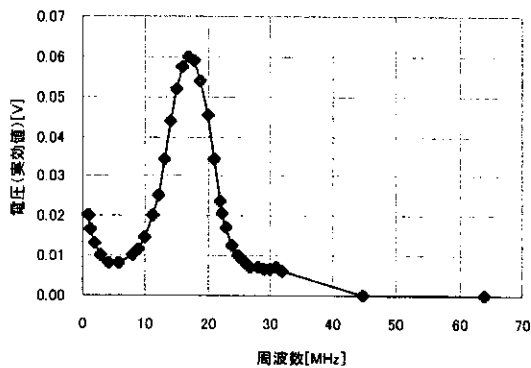


図 B-38 0.362mm 厚振動子、伝搬距離 4cm、 $V_1=0.35V_{rms}$ 、送受切り替え： V_3 測定結果

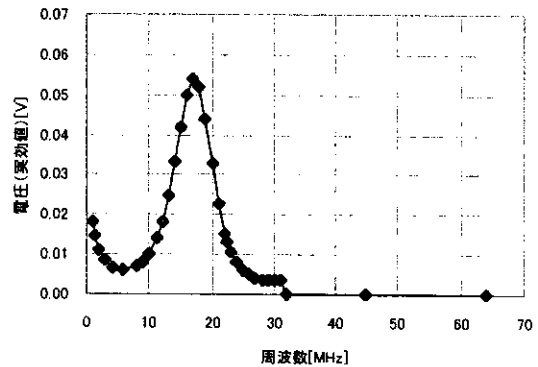


図 B-41 0.362mm 厚振動子、伝搬距離 10cm、 $V_1=0.35V_{rms}$ ： V_3 測定結果

(3) 実験条件が、

- 送信側振動子と受信側振動子の間隔 10cm
- $V_1=0.35V_{rms}$ 一定

の場合の測定結果を図 B-39～図 B-41 に示す。

(4) 実験条件が、

- 送信側振動子と受信側振動子の間隔 10cm
- $V_1=0.11V_{rms}$ 一定

の場合の測定結果を図 B-42～図 B-44 に示す。

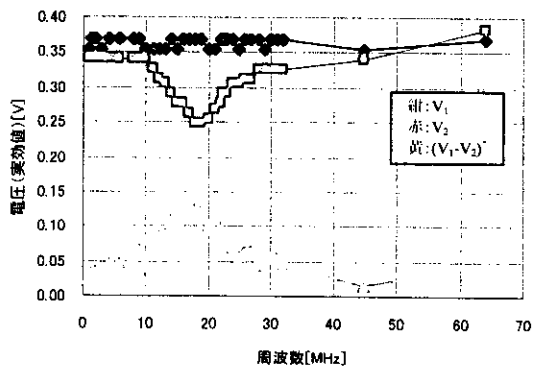


図 B-39 0.362mm 厚振動子、伝搬距離 10cm、 $V_1=0.35V_{rms}$ ： V_1 、 V_2 、 $(V_1-V_2)^*$ 測定結果

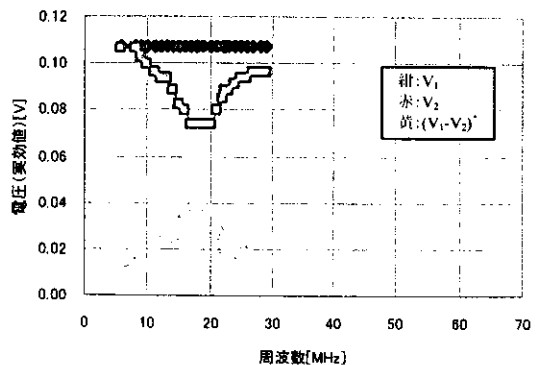


図 B-42 0.362mm 厚振動子、伝搬距離 10cm、 $V_1=0.11V_{rms}$ ： V_1 、 V_2 、 $(V_1-V_2)^*$ 測定結果

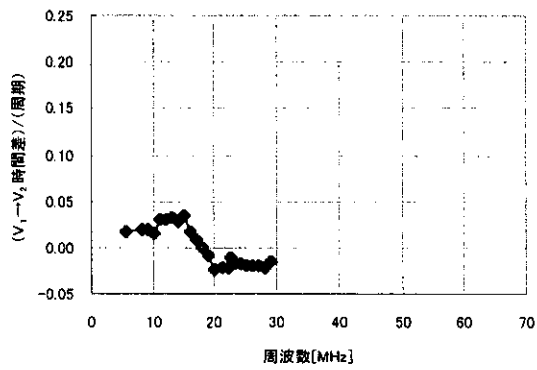


図 B-43 0.362mm 厚振動子、伝搬距離 10cm、 $V_1=0.11V_{rms}$: $(V_1 \rightarrow V_2 \text{時間差}) / (\text{周期})$ 測定結果

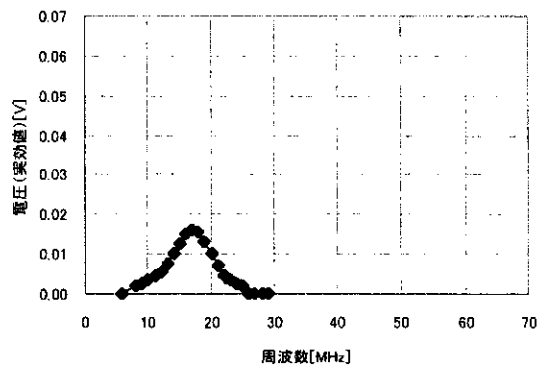


図 B-44 0.362mm 厚振動子、伝搬距離 10cm、 $V_1=0.11V_{rms}$: V_3 測定結果

最後に、本実験の目的である各実験条件での伝送係数(受信側検出電圧 V_3 / 送信側印加電圧 V_2)を計算して纏めた結果を図 B-45 に示す。

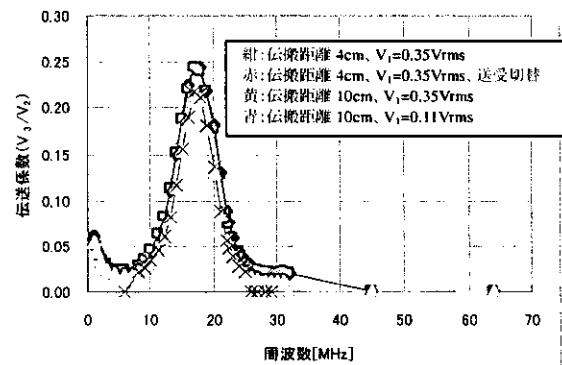


図 B-45 0.362mm 厚振動子: 伝送係数 (V_3/V_2) 測定結果

B-2-4-4. 1.207mm 厚振動子を使った実験

1.207mm 厚振動子を使って行った、各種実験の測定結果を以下に示す。

(1) 実験条件が、

- 送信側振動子と受信側振動子の間隔 4cm
- $V_1=0.35V_{rms}$ 一定

の場合の測定結果を図 B-46～図 B-48 に示す。

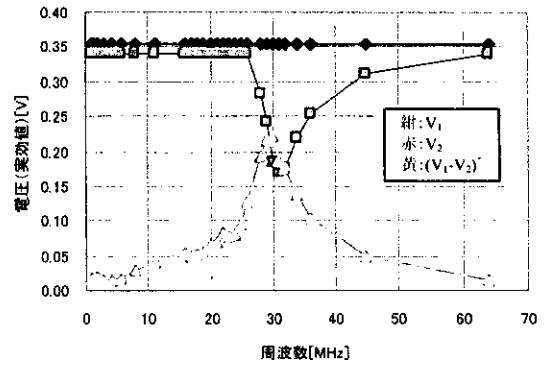


図 B-46 1.207mm 厚振動子、伝搬距離 4cm、 $V_1=0.35V_{rms}$: V_1 、 V_2 、 (V_1-V_2) 測定結果

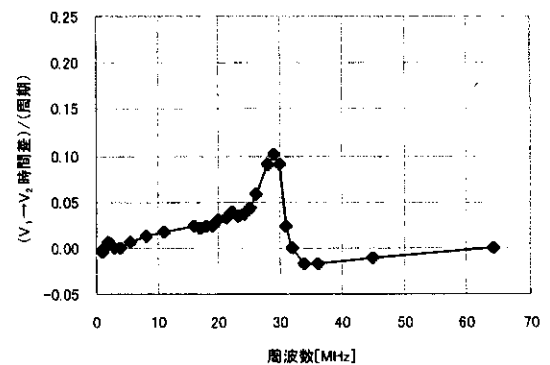


図 B-47 1.207mm 厚振動子、伝搬距離 4cm、 $V_1=0.35V_{rms}$: $(V_1 \rightarrow V_2 \text{時間差}) / (\text{周期})$ 測定結果

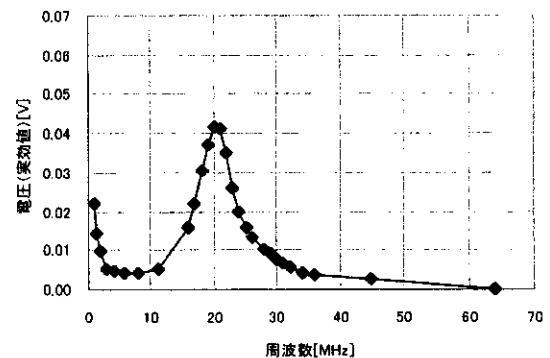


図 B-48 1.207mm 厚振動子、伝搬距離 4cm、 $V_1=0.35V_{rms}$: V_3 測定結果

(2) 実験条件が、

- 送信側振動子と受信側振動子の間隔 4cm
- $V_1=0.35V_{rms}$ 一定
- 送信側と受信側の振動子を切り替え

の場合の測定結果を図 B-49～図 B-51 に示す。

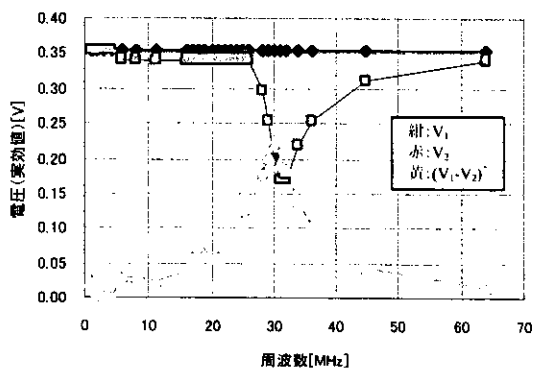


図 B-49 1.207mm 厚振動子、伝搬距離 4cm、 $V_1=0.35V_{rms}$ 、送受切り替え： V_1 、 V_2 、 (V_1-V_2) 測定結果

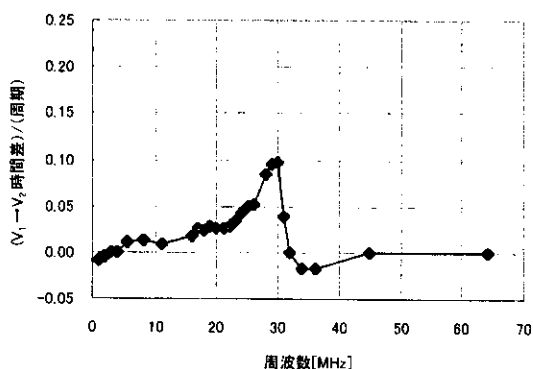


図 B-50 1.207mm 厚振動子、伝搬距離 4cm、 $V_1=0.35V_{rms}$ 、送受切り替え： $(V_1 \rightarrow V_2)$ 時間差 / (周期) 測定結果

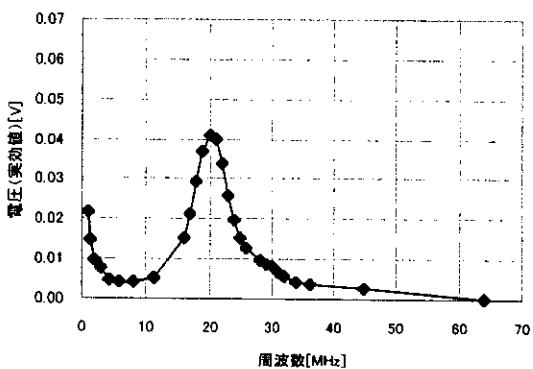


図 B-51 1.207mm 厚振動子、伝搬距離 4cm、 $V_1=0.35V_{rms}$ 、送受切り替え： V_3 測定結果

(3) 実験条件が、

- 送信側振動子と受信側振動子の間隔 10cm
- $V_1=0.35V_{rms}$ 一定

の場合の測定結果を図 B-52～図 B-54 に示す。

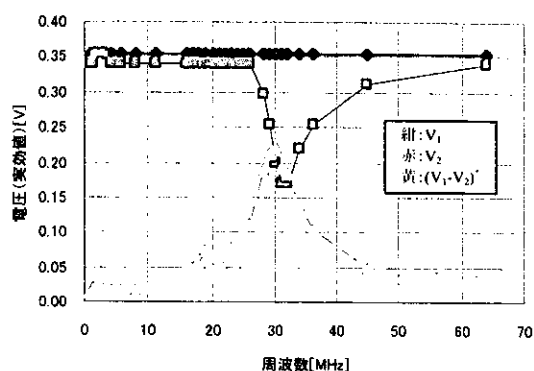


図 B-52 1.207mm 厚振動子、伝搬距離 10cm、 $V_1=0.35V_{rms}$ ： V_1 、 V_2 、 (V_1-V_2) 測定結果

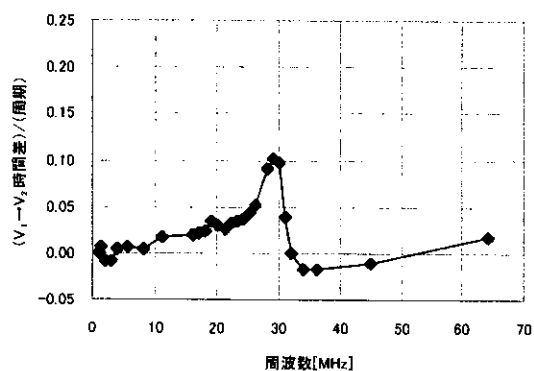


図 B-53 1.207mm 厚振動子、伝搬距離 10cm、 $V_1=0.35V_{rms}$ ： $(V_1 \rightarrow V_2)$ 時間差 / (周期) 測定結果

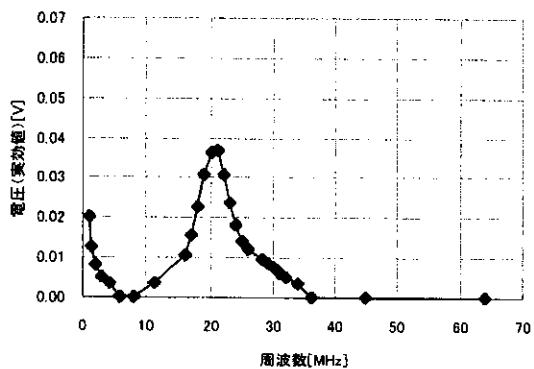


図 B-54 1.207mm 厚振動子、伝搬距離 10cm、 $V_1=0.35V_{rms}$ ： V_3 測定結果

最後に、各実験条件での伝送係数(受信側検出電圧 V_3 /送信側印加電圧 V_2)を計算して纏めた結果を図 B-55 に示す。

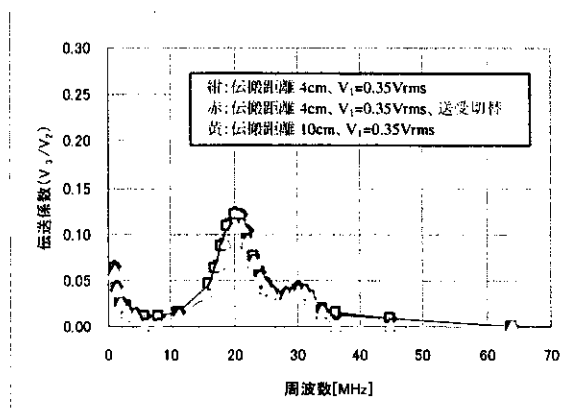


図 B-55 1.207mm 厚振動子:伝送係数(V_3/V_2)測定結果

B-2-4-5. 実験結果のまとめ

図 B-20～図 B-55 のグラフを参照して、各振動子の水中における共振周波数と超音波の伝搬特性を読み取った結果を表 B-3 に示す。

表 B-3 各振動子の水中における共振周波数と超音波伝搬特性の測定結果

振動子の厚さ	共振周波数	伝搬特性					
		ピーク周波数(*1)	帯域幅(*2)	受信側振幅 V_3 (*3)		伝送係数	
				4cm	10cm	4cm	10cm
0.121 mm	13～14MHz	14～16MHz	5MHz	0.060 Vrms	0.047 Vrms	0.26	0.19
0.362 mm	18～19MHz	17～18MHz	5MHz	0.060 Vrms	0.052 Vrms	0.24	0.21
1.207 mm	31MHz	20～21MHz	5MHz	0.042 Vrms	0.037 Vrms	0.12	0.11

(*1)ピーク周波数:伝送係数が最大になる周波数

(*2)帯域幅:伝送係数がピークの $1/\sqrt{2}$ になる点の周波数幅

(*3)受信側振幅:入力(V_1)が 0.35Vrms のときの値

B-3.超音波通信装置の基礎検討

B-3-1.通信方式の検討

超音波通信に適応可能な変調方式の検討を行

った。本研究における変調方式選定の条件は、

- (1) 送信信号が生体内で減衰しても受信できること (受信感度が高い)
- (2) 生体内への埋め込みを想定し、小型化が可能であること
- (3) 低消費電力化が可能であること

である。これらの選定条件を基に検討した結果を表 B-4 に示す。

表 B-4 通信方式の検討結果

項目	FSK	ASK	PSK
受信感度	○	△	○
小型化	○	○	△
低消費電力	○	○	△
選定結果	○	×	×

FSK: Frequency Shift Keying

ASK: Amplitude Shift Keying

PSK: Phase Shift Keying

各方式の優劣は、基礎実験の結果から想定したものであり、今後、本通信装置を使った実験結果や、生体内通信時に想定されるノイズ源の大きさ・種類によっては、変調方式を見直すことも予想される。

今回の超音波通信装置には、FSK変調方式を用いることとした。

B-3-2. 超音波通信装置の構成

図 B-56 に超音波通信装置の構成を示す。水槽内の水を生体内と想定し、水槽内に超音波素子を入れて通信を行う。

送信は、PC(送信側)側からのデジタルデータを COMB(COMUNICATION BOARD)基板内で FSK 変調し、SSWB(Super Sonic Wave Board)基板で超音波素子を駆動する。

受信は、超音波素子からのアナログデータを SSWB 基板で検出し、COMB 基板内でデジタルデータ化して、PC(受信側)に記憶する。

PC-COMB 基板間のデジタル通信は超音波通信と同時に必要はなく、送信データをすべて COMB 基板内に準備してから、超音波通信を行う。

同様に受信した超音波通信データを COMB 基板に蓄積後、受信データを PC(受信側)に読み込む。

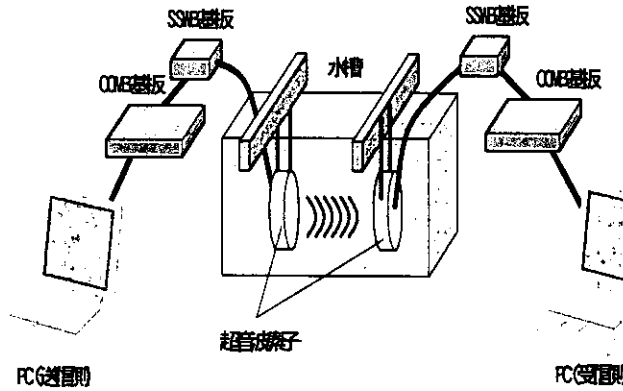


図 B-56 超音波通信装置の構成

B-3-3. 超音波通信装置のハードウェア構成

COMB 基板、SSWB基板の構成を図 B-57 に示す。

送信データのFSK変調はCOMB基板内のFPGAで行う。FPGAは、送信データ1の時はP-OSC1で設定された周波数を、送信データ0の時はP-OSC2で設定された周波数をSSWB基板に出力する。

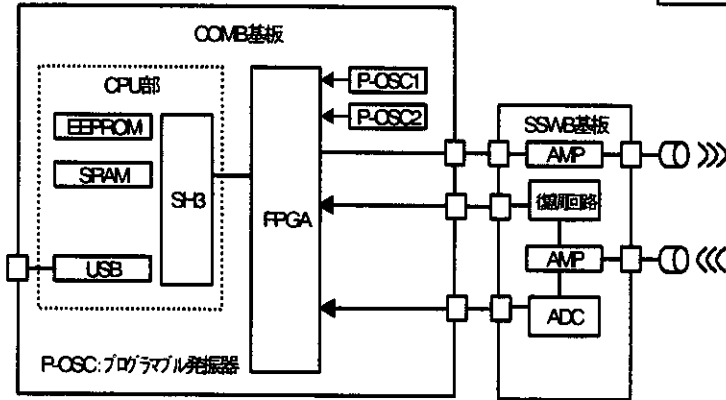


図 B-57 COMB 基板、SSWB基板の構成

受信データの復調はSSWB基板内の復調回路で行い、COMB基板に出力する。

今回のFSK復調はSSWB基板内の復調回路で行うが、今後の研究において、受信波形をデジタル処理することも考えられる。このためSSWB基板内にA/D変換器(ADC)を搭載し、COMB基板のCPUをデジタル信号処理に適したSH-3マイコンとした。

表 B-5 に COMB 基板、SSWB基板の仕様を示

す。超音波通信に使用する周波数は、共振周波数を含む10MHz~20MHzから2周波選択可能とし、ソフトウェアで選択できるようにする。

表 B-5 COMB 基板、SSWB基板の仕様

項目	仕様
COMB 基板サイズ	B5 程度 上下2枚構成
SSWB 基板サイズ	B7 程度
COMB 基板電源供給	AC アダプタ
COMB 基板動作電圧	3.3V
EEPROM	プログラムエリア
SRAM	送受信データ(最低 64KB)
USB	1.1 ターゲットモード
SH3 タイプ	SH3
SH3 動作周波数	133MHz
バスクロック	33MHz
ADC	12bit/40MHz
FPGA 動作周波数	40MHz 以上
P-OSC1/2	MAXIM 社 EconOscillators
超音波素子共振周波数	16MHz
超音波通信周波数	10MHz~20MHz から2周波 選択して使用
超音波素子駆動電圧	100mV
AMP 動作保証周波数	32MHz

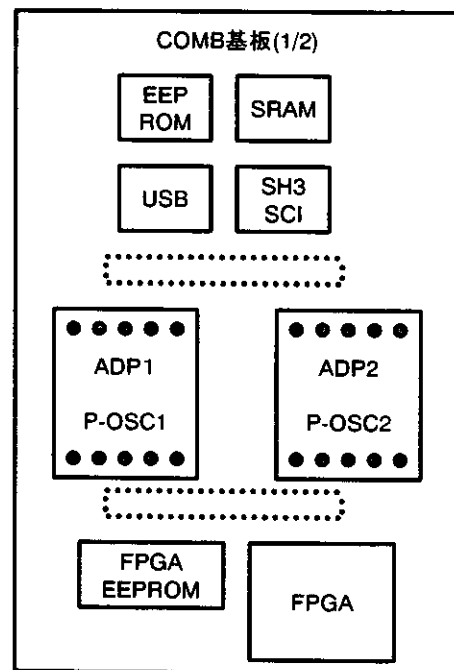


図 B-58 COMB 基板上部の構成

COMB 基板の実装は上下2枚構成とする。上部の基板に高速デジタル回路を配置し、下部の基板

に外部とのインタフェースと、アナログ電源を配置する。これによりデジタル回路で発生するノイズがSSWB基板上に伝わらないようにする。COMB基板はパターン基板4層で製作し、内層に電源ラインを配置する。図 B-58 に COMB 基板上部を示す。

図において、ADP1/2 は P-OSC1/2 を載せるアダプタ基板とし、超音波通信に使用する周波数に応じて載せ替え可能とする。図 B-59 に COMB 基板下部を示す。

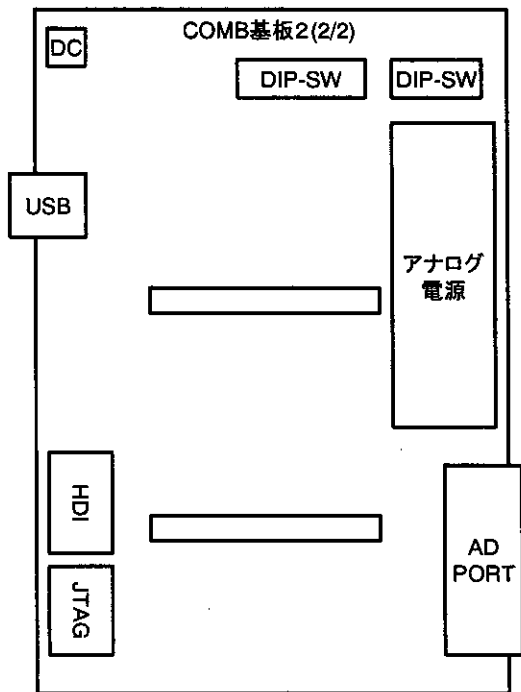


図 B-59 COMB 基板下部の構成

図においてADPORTはSSWB基板との接続コネクタ、HDIはデバッグ用のエミュレータ接続コネクタ、JTAGはFPGA書き換えコネクタである。

B-3-4. 超音波通信装置のソフトウェア構成

図 B-60 に超音波通信装置のソフトウェア構成を示す。評価ツールはVisual-Basic (VB)あるいはVisual-C (VC)にて作成し、PC上に搭載する。COMB制御プログラムはSHマイコン用C言語 (SH-C)とSHマイコン用アセンブラ (SH-ASM)にて作成し、COMB基板上に搭載する。PCとCOMB基板間にはUSBにて接続する。USBを使用するために必要なDLLやドライバも開発する。

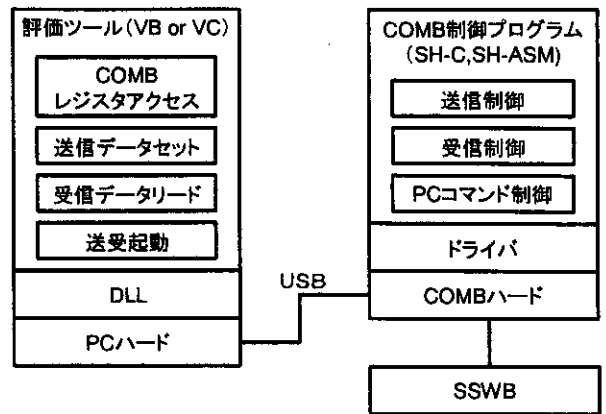


図 B-60 ソフトウェア構成

B-4. 参考文献

[B-1] 厚生労働省科学研究補助金(萌芽的先端医療技術推進研究事業)平成14年度総括・分担研究報告書「ナノテクノロジーによる機能的・構造的な生体代替デバイスの開発(H14-ナノ-002)」、pp.92-116、2003年3月

C. 研究結果

C-1. 超音波方式の基礎実験結果

C-1-1. 振動子の共振周波数の確認結果

実験で使用した振動子のインピーダンス特性を振動子単体で測定した結果、各振動子はほぼ設計した周波数で共振現象を起こしており、設計通りの周波数付近で超音波を放射/受波するものである事が確認された(図 B-6~図 B-8 参照)。

C-1-2. 実験系での振動子の共振周波数の測定結果

振動子をフリーな状態で空気中に放置して、超音波の伝搬特性を検証すると同じ実験系で、各振動子の共振周波数を測定した結果、各振動子の基本共振周波数の設計(理論)値とは大きく異なる値となった。しかも、理論的な設計値では基本共振周波数は振動子の厚さに反比例するはずであるが、実験では逆に共振周波数が振動子の厚さに比例する現象が観測された(表 B-2 参照)。

C-1-3. 超音波の水中伝搬特性の測定結果

振動子の水中における共振周波数と超音波の伝搬特性を測定した結果を以下に記述する(表 B-3 参照)。

- ① 共振周波数に関しては、振動子の厚さに比例して大きくなるという傾向は、空気中での測定結果と同じであるが、空気中での測定結果に比べて水中での測定結果は若干小さめの値が観測された。これは、空気と水の音響インピーダンスの違いが振動子の動作に影響を与えているためと予想される。
- ② 超音波伝搬特性のピーク周波数に関しては、0.121mm 厚振動子と 0.362mm 厚振動子は共振周波数と若干異なる周波数にピークが観測されたが、1.207mm 厚振動子については共振周波数から大分小さな周波数でピークが観測された。
- ③ 帯域幅は何れの厚さの振動子も 5MHz 程度の値となった。
- ④ 伝送係数に関しては、0.121mm 厚振動子と 0.362mm 厚振動子では伝搬距離 4cm で 0.25 程度、伝搬距離 10cm で 0.2 程度となったが、1.207mm 厚振動子では伝搬距離 4cm と 10cm で余り違いが無く 0.11~0.12 と小さめの値となった。

更に(図 B-20~図 B-55 参照)、

- ⑤ 伝搬距離が 4cm の条件で送信側と受信側の振動子を切り替えて同一の測定を行い、双方の測定結果が同等であり、個々の振動子の等価性を確認した。
- ⑥ 伝搬距離を 4cm から 10cm に変えて同一の測定を行い、超音波減衰の距離依存性を確認した。
- ⑦ 伝搬距離が 10cm の条件で、入力電圧 V_1 を 0.35Vrms 一定から 0.11Vrms 一定に変えて同一の測定を行い、振動子動作及び超音波伝搬の線形性を確認した。

C-1. 超音波通信装置の開発

超音波通信装置を開発した。図 C-1 に実験時の構成を示す。SSWB基板はブレッド基板で製作し、送受信兼用基板である。COMB基板はパターン基板で2式製作し、1つを送信用基板、もう一方を受信用基板として使用する。

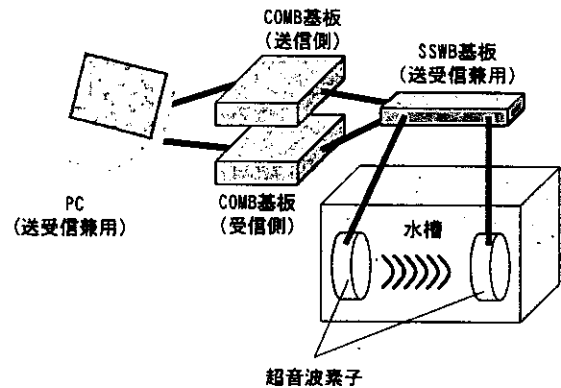


図 C-1 実験時の構成

来年度は本装置を用いて超音波通信の実験を行う予定である。

C-1-1. COMB 基板の概要

図 C-2 に開発したCOMB基板の写真を示す。

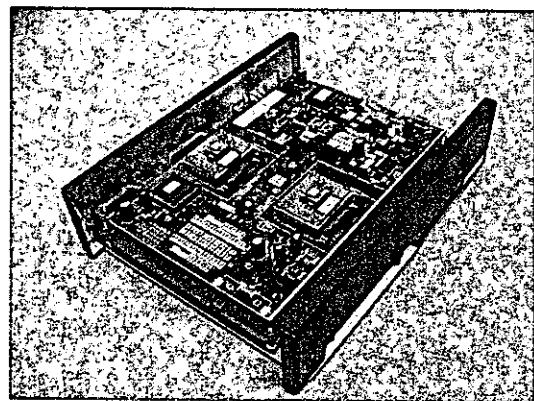


図 C-2 COMB 基板写真

C-1-2. 評価アプリケーションの概要

データ通信の確認を行うため、評価アプリケーションを開発した。表 C-1 にコマンド表を示す。

コマンドには実行手順が存在する。以下に手順を示す。

- (1) 送信手順: データ送信 → 送信開始 → 送信停止

表 C-1 コマンド表

コマンド	パラメータ	内容
データ送信	ファイル名	ファイルのデータを COMB 基板の SRAM にセット
データ受信	ファイル名	COMB 基板の SRAM からデータを リードし、ファイルに保存
受信開始	-	超音波受信開始
受信停止	-	超音波受信停止
送信開始	-	超音波送信開始
送信停止	-	超音波送信停止
調整リード	アドレス、データ数	COMB 基板内のメモリ空間リード
調整ライト	アドレス、データ数	COMB 基板内のメモリ空間ライト

- (2) 受信手順: 受信開始 → 受信停止 → データ受信
- (3) COMB 基板モード=受信の場合、送信開始・送信停止・データ送信コマンドは使用できない。
- (4) COMB 基板モード=送信の場合、受信開始・受信停止・データ受信コマンドは使用できない。

評価アプリケーションには通信周波数や通信ビットレートを変更できる機能を搭載済みである。今後は表 C-2 のパラメータを可変してSSWB基板やCOMB基板の消費電力等を測定し、超音波を用いた生体内通信に最適な回路定数や回路構成を検討していく。

表 C-2 可変項目

項目	可変範囲
送信周波数1 データ=0の時	10[MHz]~20[MHz]
送信周波数2 データ=1の時	10[MHz]~20[MHz]
データ転送レート	10[kbps]~20[kbps]

D. 考察

D-1. 同軸ケーブルによる共振周波数の変動に関する考察

超音波の伝搬特性を検証するための実験系では、各振動子の共振周波数は設計(理論)値と大き

く異なる値が観測され、測定結果に疑念が感じられる。この原因として、実験系の同軸ケーブルと配線基板が持つインピーダンスが共振周波数を判定するために測定した V_2 の値に影響を与えていることが予想される。これを検証するために同軸ケーブルの長さ(インピーダンス)を変えて再度、B-2-3 章で行った空気中での各振動子の共振周波数を測定した。測定方法は図 B-9と同様である。B-2-3 章の測定と本測定において使用した同軸ケーブルの差異を表 D-1 に示す。尚、本測定においても振動子を取り付ける配線基板はB-2-3章の測定時と同じ物を使用した。

0.121mm 厚振動子の測定結果を図 D-1 に、0.362mm 厚振動子の測定結果を図 D-2 に、1.207mm 厚振動子の測定結果を図 D-3 にそれぞれ示す。また、図 D-1~図 D-3 を参照して各振動子の共振周波数を読み取った結果と B-2-3 章での測定結果を対比して表 D-2 に示す。

表 D-2 から、同軸ケーブルの長さを短くすることによって、全ての振動子の共振周波数が高域側へ移動することが確認される。従って、共振周波数を測定するにあたって、同軸ケーブルや配線基板のインピーダンスが測定結果に影響を及ぼしており、振動子の真の共振周波数が観測されていなかったと推察される。尚、B-2-3 章の実験及び本実験は、 5.1Ω 抵抗前の V_1 の値を一定として測定を行っているため、 5.1Ω 抵抗前の同軸ケーブルのインピーダンスは問題ではなく、 5.1Ω 抵抗後の同軸ケーブルと配線基板のインピーダンスが問題であり、これらをキャンセルする必要があると考察される。

表 D-1 実験系における同軸ケーブルの差異

	5.1 Ω 抵抗前の同軸ケーブル	5.1 Ω 抵抗後の同軸ケーブル
B-2-3 章の測定	(ϕ 6.0mm、長さ 1.3m)	(ϕ 6.0mm、長さ 0.3m) + (ϕ 0.81mm、長さ 0.8m)
本測定	(ϕ 6.0mm、長さ 0.3m)	(ϕ 0.81mm、長さ 0.8m)

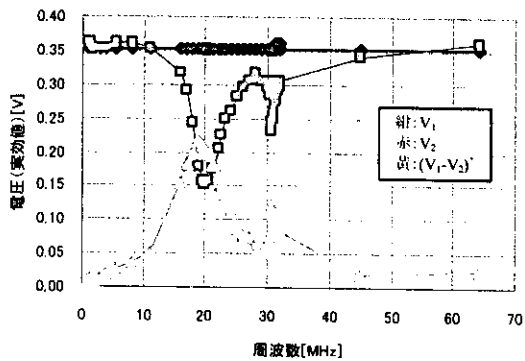


図 D-1 0.121mm 厚振動子:
 V_1 、 V_2 、 $(V_1-V_2)'$ 測定結果

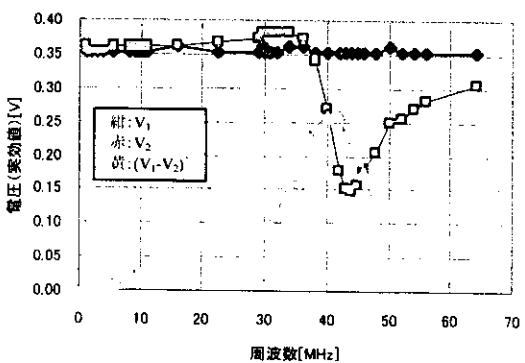


図 D-2 0.362mm 厚振動子:
 V_1 、 V_2 、 $(V_1-V_2)'$ 測定結果

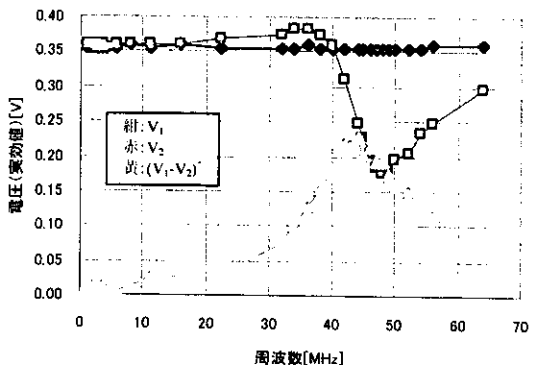


図 D-3 1.207mm 厚振動子:
 V_1 、 V_2 、 $(V_1-V_2)'$ 測定結果

表 D-2 本測定での共振周波数の測定結果と
B-2-3 章での測定結果との対比

振動子種別	共振周波数	
	B-2-3 章	本測定
0.121mm 厚	17MHz	20 MHz
0.362mm 厚	24MHz	44 MHz
1.207mm 厚	36MHz	48 MHz

D-2. 超音波水中伝搬の測定値の補正

水中における超音波の伝搬特性の測定方法を再び図 D-4 に示す。

B-2-4 章では V_2 を以って振動子に印加されている電圧と解釈していたが、実際にはこれは真に振動子に印加されている電圧 V_2' に同軸ケーブルでの電圧降下が重畳されたものであると考えられる。そこで同軸ケーブルのインピーダンスを実測し、この値を用いて V_2 から同軸ケーブルでの電圧降下分を差し引き、真に振動子に印加されている電圧 V_2' を計算で求めた。0.121mm 厚振動子の計算結果を図 D-5 に、0.362mm 厚振動子の計算結果を図 D-6 に、1.207mm 厚振動子の計算結果を図 D-7 にそれぞれ示す。尚、各図には比較のため元々の V_2 の値も合わせて示した。

尚、以下の測定データの補正は、実験条件が $V_1=0.35V_{rms}$ 一定、伝搬距離 4cm のものを対象とした。

図 D-5～図 D-7 を参照して、3 種類の振動子全てで、 V_2' は V_2 と比べて異なる値となった。また、0.121mm 厚振動子では、基本共振周波数の設計(理論)値付近で V_2' の低下が認められるが、0.362mm 厚振動子と 1.207mm 厚振動子では認められない。これは基本共振周波数の値が小さくなるほど帯域幅が狭くなるため、実験における測定ポイントが共振周波数帯域から外れているためと推察される。

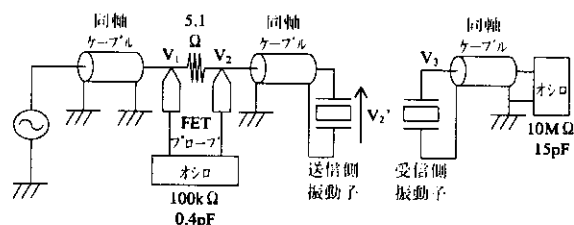


図 D-4 水中における超音波の伝搬特性の測定方法

次に V_2' の値を使って、伝送係数を V_3/V_2 から V_3/V_2' に補正した。尚、 V_3 に関しては観測しているオシロスコープの入力インピーダンスが十分に大きいいため、同軸ケーブルに流れる電流は十分小さ

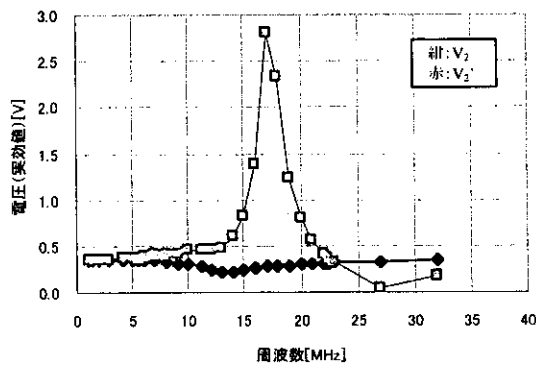


図 D-5 0.121mm 厚振動子の V_2' 計算結果

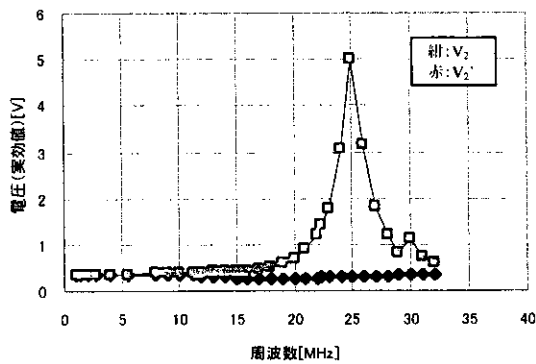


図 D-6 0.362mm 厚振動子の V_2' 計算結果

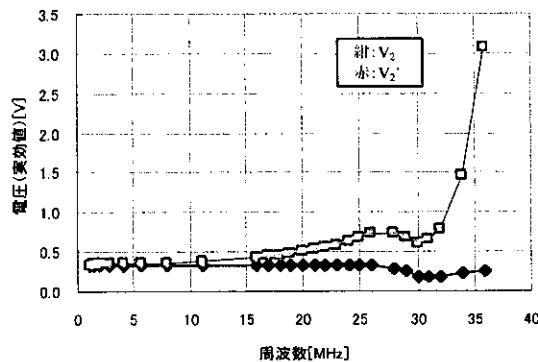


図 D-7 1.207mm 厚振動子の V_2' 計算結果

いと判断できるので、同軸ケーブルでの電圧降下は無視できると判断した。

0.121mm 厚振動子の伝送係数の補正結果を図 D-8 に、0.362mm 厚振動子の伝送係数の補正結果を図 D-9 に、1.207mm 厚振動子の伝送係数の補正結果を図 D-10 にそれぞれ示す。尚、各図には比較のため元々の伝送係数 V_3/V_2 の値も合わせて示した。

図 D-8～図 D-10 を参照して、3 種類の振動子

全てで、 V_3/V_2' では元々の伝送係数 V_3/V_2 が示していたピークの高さが小さくなっていることが認められる。また、0.121mm 厚振動子では、基本共振周波数の設計(理論)値付近で伝送係数のピークの兆しが認められるが、0.362mm 厚振動子と 1.207mm 厚振動子では認められない。これは V_2' のときと同様に基本共振周波数の値が小さくなるほど帯域幅が狭くなるため、実験における測定ポイントが共振周波数帯域から外れているためと、観測されている V_3 の値が小さいため測定誤差の影響があるためと推察される。

以上の結果から、測定ポイントの的確さの問題や V_3 の誤差の影響はあるものの、設計(理論)値の基本共振周波数での超音波伝搬の可能性が示唆される。

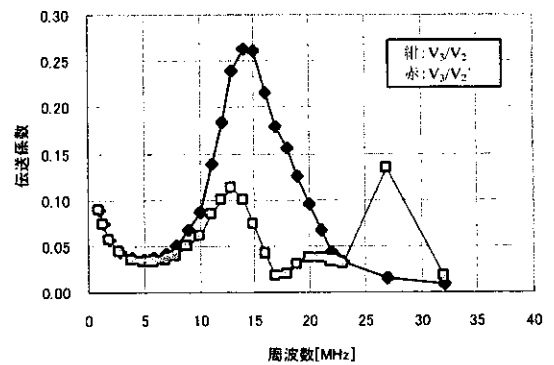


図 D-8 0.121mm 厚振動子の伝送係数の補正結果

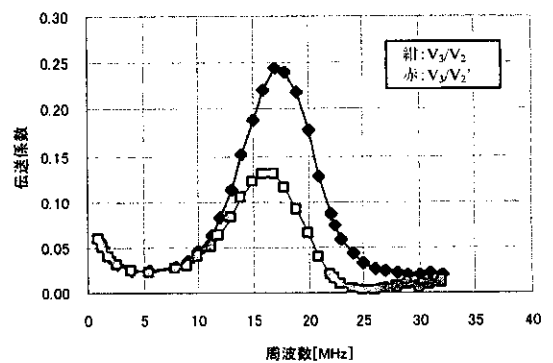


図 D-9 0.362mm 厚振動子の伝送係数の補正結果

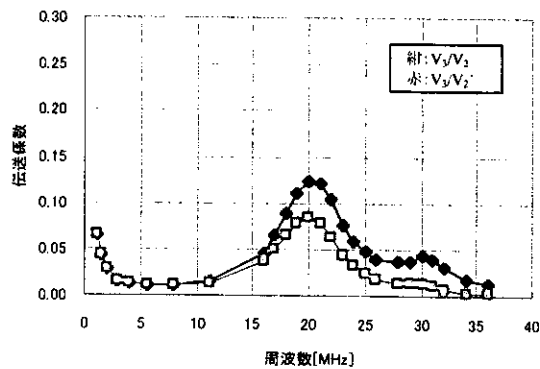


図 D-10 1.207mm 厚振動子の伝送係数の補正結果

E. 結論

血液で満たされた環境での無線通信手段として、電波を用いる方法と超音波を用いる方法が考えられるため、H14 年度の本補助金を活用してそれぞれの基礎データを取得するための実験装置を作成し、H15 年度にはこの装置を用いた実験を行なった。電波については、技術的に使いやすい周波数帯では高出力の違法無線局等が存在する。本目的では一時的にでも混信が起きると人命にかかわる可能性が高く、これを避けるため2GHz 以上の周波数帯の使用を検討した。しかしながら、水中に電波を伝播させると 2.45GHz, 5.20GHz, 7.35GHz のいずれの周波数でも減衰が大きく、血液中の無線通信には使いにくいことが判明した。一方、超音波については、20MHz 付近での水中伝播特性が良好であることが判明した。そこで、超音波を用いた無線通信装置の開発を優先し、FSK 方式で変調する通信実験装置を試作した。

F. 健康危険情報

なし

G. 研究発表

G-1.論文

1. Kokubo M, Shibahara Y, Aoki H, Hwang C. Low supply voltage and low-power 1-GHz PLL

frequency synthesizer for mobile terminals.
IEICE Trans Electron. 2003; E86-C: 71-78

G-2.学会発表

1. Kokubo M, Tanaka S. Latest topics of radio frequency transceiver circuits. The 17th Workshop on Circuit and System. 2003; SBa 1-4

H. 知的所有権の取得状況

なし