

マイクロ波の性質の研究

3年A組 寺川 峻平

指導教諭 米田 隆恒

1. 要約

私は電磁波の性質に興味を持ち、それらを実験によって確かめる研究を行っている。学校には電磁波の実験装置がなかったため、電磁波の一種であるマイクロ波を調べる装置を自作し研究した。今回は研究中のマイクロ波の波長測定について報告する。

キーワード マイクロ波、波長、誘電率、ドップラーセンサー

2. 研究の背景と目的

現代社会において、電磁波は非常に大きな役割を果たしている。携帯電話や衛星通信など、どれも生活に欠かせないものばかりである。

しかし、私はそれらの電磁波が非常に興味深い性質を持っていることを知らなかった。そこで電磁波の一種であるマイクロ波の性質を実験によって確かめることを目的として研究を行った。

実験にはマイクロ波を使用したが、これは実験装置を製作する際に用いたセンサーがマイクロ波を使用していたためである。

を行う。レール上には1.0 mm 間隔の目盛りを貼ってあるので距離の測定が容易に行える。また、マイクロ波の反射を防ぐために、装置の部品にはできるだけ木材を使用し、受信機から信号を取り出すケーブルにはシールド線を使用した。

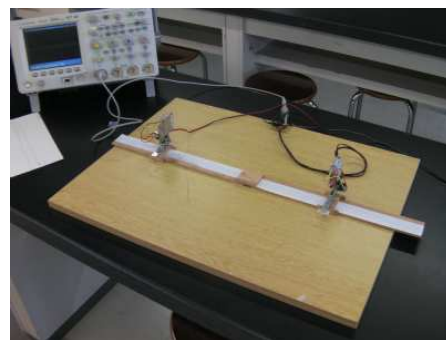


図1 実験装置

3. 研究内容

(1) 実験装置の開発

本校には電磁波実験装置がなかったので市販のセンサーを応用してマイクロ波の実験装置を自作した。

装置は大きく分けて土台、送信機、受信機、レールから構成されている。

600mm × 450mm の木製の土台の中心に2本のレールの回転軸があり、それぞれのレール上に送信機と受信機を置いて実験

送信機 A と受信機 B には市販のドップラーセンサーを使用した。このセンサーは送信波と受信波(反射波)を混合し、それを出力するというもので、ドップラー効果によって受信波の波長が変化すると、送信波との周波数の差が出力される仕組みである。

今回は2つのセンサーを1つは送信機 A、もう1つは受信機 B として使用することに

した。2つのセンサーでは微妙に発振周波数が異なるため、互いのセンサーを向かい合わせにすると常に合成波が出力される(参考文献[1]参照)。これは、送信機 A から受け取った波(以下、「受信波」という)と、受信機 B の内部でつくった波(以下、「内部波」という)が合成され、そのうなり成分を観測しているのである。以上から、送信機 A・受信機 B およびその間の空間の性質を合成波から知ることが可能となる。その際、ドップラー効果による出力信号への影響を少なくするため、送信側 A は IF 端子側のアンテナを、受信側 B は GND 端子側のアンテナをアルミホイルでシールドする。アルミホイルには絶縁のために紙を貼り付け、紙の面を両面テープでアンテナに固定するという方法をとった。

(2) 空気中のマイクロ波の波長測定

マイクロ波の波長は、
(波長)

$$= (\text{マイクロ波の速さ}) \div (\text{周波数})$$

から求められる。ドップラーセンサーのカタログから (周波数) = 10.5GHz, (マイクロ波の空気中の速さ) = $3.00 \times 10^8 \text{m/s}$ を代入すると (波長) = 0.0285m となる。よって、空気中の波長を約3cm であると仮定し、まずはこれを実際に測定することにした(図2)。

波長を測定する際には、装置の受信機 B のアルミホイルを取り除き、本来の用途である送受信機として使用する。

受信機 B から発信されたマイクロ波は、反射板で反射され、受信機 B で受信される。この受信波は、往復する間に位相が変化し、内部波と重ねあわされる。往復の距離がマ

イクロ波の波長の整数倍ならば受信波と内部波の位相差は 2π の整数倍だから強めあう。往復の距離がさらに半波長分ずれると弱めあう。よって、図3の強度分布が得られる。この電圧の変動と反射板までの距離からマイクロ波の波長が求められる。

空気中の場合、15mm ごとに強度変化をくりかえす。反射を利用しているので、これを2倍して30mm が空気中のマイクロ波の波長となる。

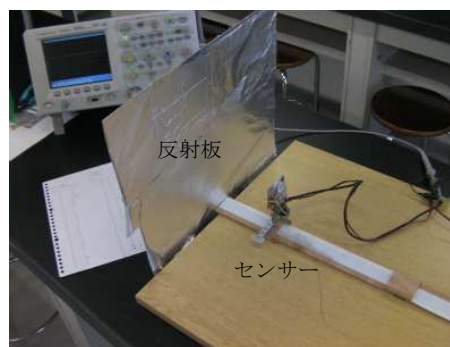


図2 空気中の波長測定

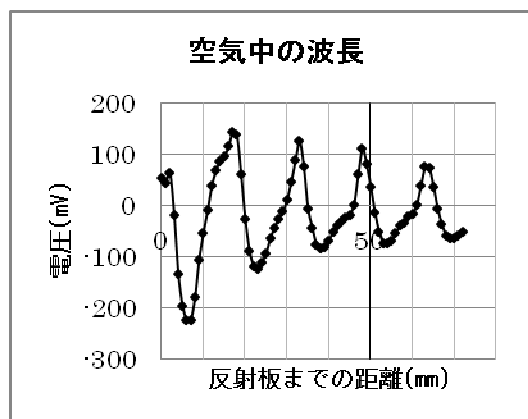


図3 空気中の波長測定結果

(3) 物質中のマイクロ波の波長測定

次に、①～⑤の波長測定を行った。

- ①紙の中での波長
- ②油の中での波長
- ③水道水の中での波長

④食塩水の中での波長

⑤砂糖水の中での波長

[実験1] 紙の中での波長

最初は紙の下に反射板を敷いて、センサーで紙を上から押さえていた(図4)が、押さえ方によって紙の厚さが変わってしまい、結果が不正確になる恐れがあった。

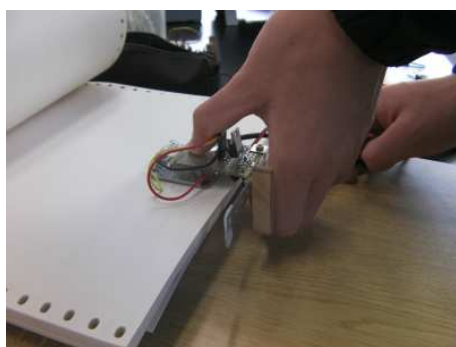


図4 紙中の波長測定

そこで、プラスチック製の下敷きにセンサーを固定し、その上に紙を重ねて一番上に反射板を置き、おもりで押さえるという方法に変更した(図5)。

その結果、図6より波長は、

$$11 \times 2 = 22 \text{mm}$$

であることがわかった。これは空気中の波長よりも短い。



図5 紙中の波長測定(改良型)

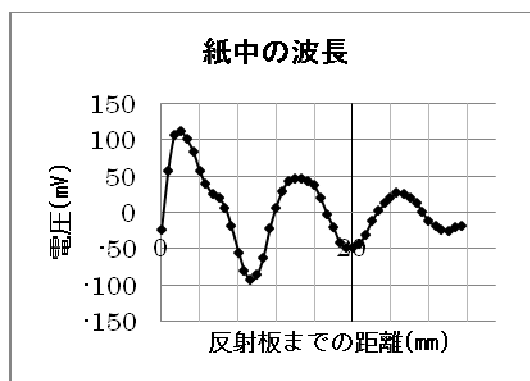


図6 紙中の波長測定結果

[実験2] 油の中での波長

食用油の中にセンサーと反射板を入れ、波長の測定を行った(図7)。しかし目盛りを正確に読み取ることは困難であり、防水加工も難しい。そこで油を入れた容器の外側にセンサーを貼り付けるという方法(図8)に改良した。

測定を行ったところ、空気中にくらべ波長が短くなった(20mm弱)ことは確認できたが、反射板が固定できなかつたため正確な測定ができなかつた。



図7 油中の波長測定

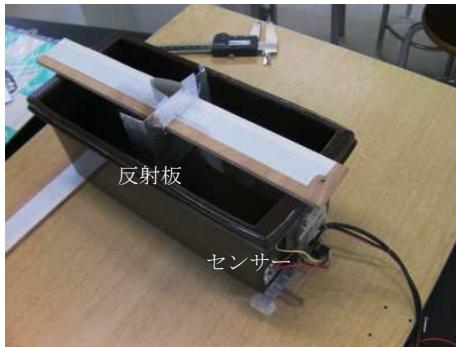


図8 油中の波長測定(改良型)

そこで図9のような装置を製作した。反射板を動かす方向を鉛直方向にし、反射板を完全に固定できるようにした。

装置を大幅に変更したため、装置のテストのためにビーカーに何も入れずに空気中の波長を測定してみた。すると図10のような波形が見られた。明らかに容器のなかった図3の波長とは異なっている。これはマイクロ波がビーカーの内側に反射し、干渉があったため現れたのではないかと考えられた。そこでビーカーのみを取り除いてからもう一度同じ操作を行うと、図3と同様な波形がみられたため、ビーカーが測定に悪影響を及ぼすことがわかった。

図9の装置を使って油を入れた測定はまだ行っていない。



図9 空気中の波長測定(改良型)

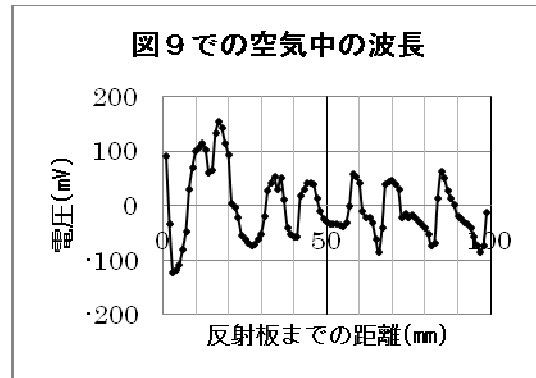


図10 図9での空気中の波長測定結果

次に図11のような装置を製作した。反射の影響が少なくなるように横長のプラスチック容器を使用し、反射板は長ねじに固定し、ナットを締めることによって移動する仕組みにした。これによって反射板の移動、固定が正確に行えるようになった。

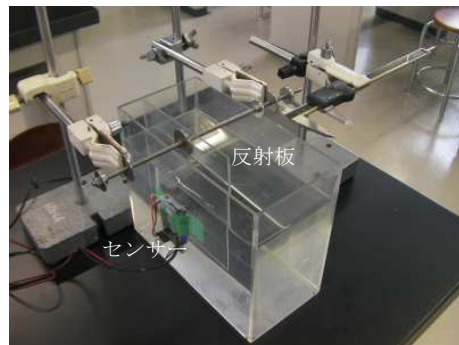


図11 液体中の波長測定装置

[実験3] 水道水の中での波長

図11の装置を用いて水中のマイクロ波の波長を調べた。その結果が図12である。距離の増加による電圧の減衰が著しく、センサーと反射板を3mm以上遠ざけると電圧の変化が非常に小さくなってしまった。これは水によってマイクロ波が吸収されたためだと考えられる。図12より、水中の波長は、 $1.6 \times 2 = 3.2\text{mm}$ だとわかった。

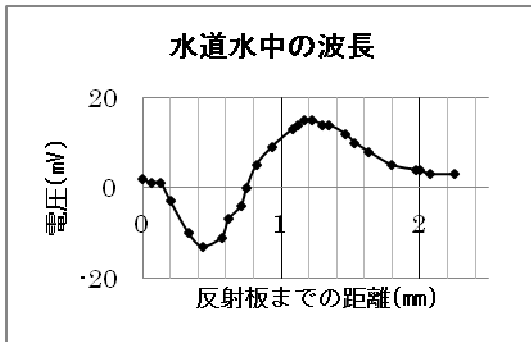


図12 水道水中の波長測定結果

[実験4] 食塩水の中での波長

水道水3.0Lに食塩を15gと30gを溶かして0.50%の食塩水と1.0%の食塩水を作り、図11の装置で波長を測定した。

その結果が図13(0.50%)と図14(1.0%)である。水道水中のグラフ(図12)と比べると振幅の減少のし方が早いことがわかる。0.50%と1.0%とでは大きな違いは見られず、また、波長の違いも見られなかった。

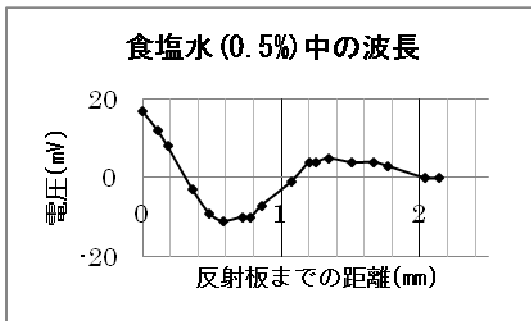


図13 0.50%の食塩水中の波長測定結果

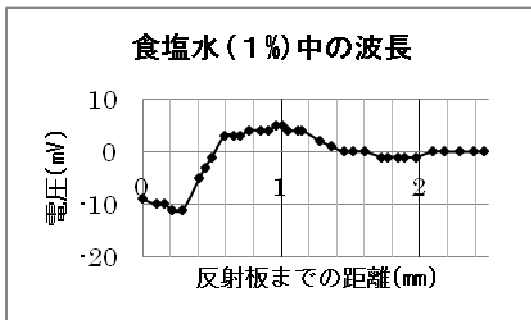


図14 1.0%の食塩水中の波長測定結果

[実験5] 砂糖水の中での波長

食塩水と同じように、水3.0Lに上白糖15gと30gを溶かして0.50%と1.0%の砂糖水を作り、波長を測定した。

その結果が図15(0.50%)と図16(1.0%)である。これを見ると、センサーと反射板の距離が近い場合、食塩水よりも砂糖水の方が減衰が小さいことがわかる。また、砂糖水の濃度の違いによる波長の違いは見られなかった。

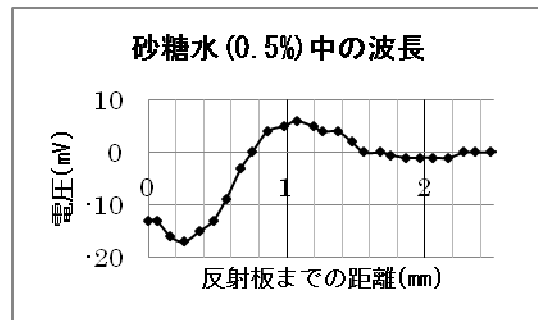


図15 0.50%の砂糖水中の波長測定結果

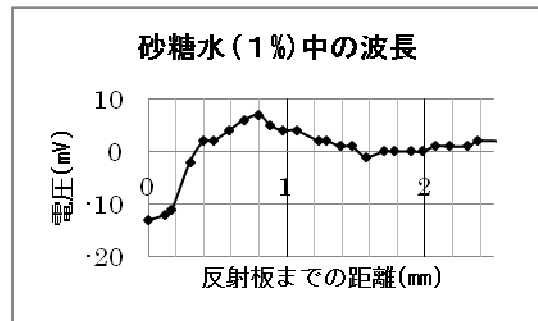


図16 1.0%の砂糖水中の波長測定結果

4. 考察

(1) 物質の誘電率と波長の関係

物質の種類によってマイクロ波の波長が異なることがわかった。

マイクロ波の振動数を f 、真空中のマイクロ波の速さ、波長、誘電率、透磁率をそれぞれ v_0 、 λ_0 、 ϵ_0 、 μ_0 とする。これらは

空気中における値と等しいとする。また、物質中のそれぞれの値を v 、 λ 、 ϵ 、 μ とすると、

$$v_0 = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = f \lambda_0$$

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon \mu}} = f \lambda$$

と表される。

これらの式から、真空中（空気中の値を用いる）と物質中の波長および誘電率の関係は、振動数、透磁率が等しいと考えたとき、

$$\lambda = \sqrt{\frac{\epsilon_0 \mu_0}{\epsilon \mu}} \lambda_0 = \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\epsilon}} \lambda_0 = \sqrt{\frac{1}{\epsilon_r}} \lambda_0 = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r}} \lambda_0$$

となる。ただし、 ϵ_r は物質の比誘電率で

あり、比誘電率 $\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0}$ である。

この式から得られる理論値と実験値を比較すると図17のようになった。ただし、比誘電率については、参考文献[2]の値を用いた。

物質	比誘電率 ϵ_r	理論値 [mm] $\lambda = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r}} \lambda_0$	実測値 λ [mm]
空気	1.00	30.00	30
紙	2.00	21.28	22
食用油	2.90	17.65	約 20
水	80.00	3.19	3.2

図17 理論値と測定値の比較

図17より、理論値と測定値は、ほぼ一致している。このことから、物質中のマイクロ波の波長は、物質の誘電率によって変化することがわかった。

(2) 物質とマイクロ波の減衰の関係

実験4と実験5から、砂糖水よりも食塩

水の方が減衰が大きいことがわかる。これは食塩水が電解質溶液であり、イオンが振動することにより、マイクロ波が進むにつれて多くのエネルギーを消費するからではないかと考えられる。

5. 今後の課題

実験装置の改良を重ねてはいるが、センサーと反射板との距離が 0mm のときの電圧(グラフの始点の電圧)にばらつきがあることなど、少し不明な点が残る。また、水中のように波長が極端に短くなる場合ではデータの比較が難しいので、装置を改良し精度を向上させることが必要である。

6. 参考文献

[1] センサーの応用

<http://www.rfworld.jp/bn/RFW08/samples/p062-063.pdf>

[2] 誘電率一覧

<http://www.pureasuka.co.jp/Blog/material%20dielectric%20constant.pdf>

7. 謝辞

今回の研究では、物理班顧問の米田先生をはじめ、各種研究発表会などで多くの方々からアドバイスをいただきました。この場を借りてお礼申し上げます。