

デジタルオシロスコープを活用した物理実験

東京学芸大学附属高等学校 川 角 博

目 次

1. はじめに	96
2. デジタルオシロスコープの特徴	96
3. 開発実験例	97
3. 1. コンデンサの充放電実験の概要	97
3. 2. 電流を積分して電気量を求める	98
3. 3. 実験振動電流の概要	99
3. 4. 音速の測定実験の概要	99
3. 5. 空間的なイメージを広げるために	100
3. 6. ドップラー効果を利用した運動体の速度測定	101
3. 7. 誘電体中の電磁波	102
3. 7. 1. 進行波による測定	103
3. 7. 2. 定常波の波長測定	103
3. 8. 気柱管口での反射	104
3. 9. 衝突時間の測定	105
4. おわりに	105

デジタルオシロスコープを活用した物理実験

東京学芸大学附属高等学校 川 角 博

1. はじめに

近年、オシロスコープのデジタル化は著しく、アナログオシロスコープは消えつつある。遠からず高等学校でも高機能・低価格のデジタルオシロスコープに置き換えられていくに違いない。そこで、今後の生徒実験のデジタル化に備え、デジタルオシロスコープによる実験を開発しておく必要がある。さらに、デジタルオシロスコープ特有の機能により、生徒実験に大きな広がりを持たせられる。また、デジタルオシロスコープは、コンピュータとの連携が図りやすく、実験データの分析も容易となる。これにより、生徒実験の時間を測定的时间ではなく、データに基づき分析し、考える時間とすることができる。この時間の確保なくして探究活動の実現は困難である。デジタルオシロスコープという汎用測定機器を多くの生徒実験に活用し、コンピュータ等のデジタル機器との連携をはかることでICTの活用も必然的に実践される。この実験開発に当たって、以下に具体的研究内容を示す。

- ① デジタルオシロスコープを利用した生徒実験を開発・実践する。
- ② どの学校でも活用可能な実験器具、方法、プリントを開発・改善する。
- ③ コンピュータ、デジタルマルチメータ、ファンクションジェネレータとの連携の具体化を進める。
- ④ 将来のマルチチャンネル化に備え、4チャンネル以上のデジタルオシロスコープ活用の可能性も探る。

2. デジタルオシロスコープの特徴

デジタルオシロスコープの特徴的な機能を以下にあげる。

- (1) 短時間の現象を静止した波形として表示できる。
- (2) 高入力電圧計として利用できる。
- (3) カーソルリードアウト機能により、電流計、周波数カウンターなどとして使える。
- (4) コンピュータとの連携が取りやすい。
- (5) 数値データのファイル化が容易である。
- (6) 画面を画像として記録できる。
- (7) Auto Set Up 機能により、自動的に適切な測定状態に設定できる。
- (8) トリガ前後のデータを容易に呼び出せる。
- (9) ゆっくり変化するデータも、アナログオシロスコープのようにチラチラせず、違和感なく表示できる。
- (10) 様々な掃引モードを持ち、実験に応じた表示が可能である（例：コンデンサの実験におけるRollモード）。
- (11) 多チャンネルでも、色の違いでグラフが表現され、分かり易い。

以上の特徴を活用すると、従来の実験をわかりやすく簡単に、しかもビジュアルにできる。このため実験時間を短縮でき、考える時間を増やせる。コンピュータなどとの連携のしやすさにより、考察の幅も広がる。また、実験器具はできるだけ同じものを汎用的に利用させた方が、生徒にとっての負担も少ない。新たな機器の理解に時間を費やさなくて済むからである。その点、デジタルオシロスコープは、センサー次第で様々な測定器ともなりうるので、便利である。デジタルオシロスコープは多機能であるがために、生徒にとって使いにくいのではないかと思える。しかし実際に授業で使わせてみると、生徒はマニュアルなど見ないでいつの間にか使いこなして

いた。いわゆるデジタル世代の特徴なのかもしれない。

3. 開発実験例

デジタルオシロスコープを活用した実験の概要とその実験結果、分析例などを以下に示す。

3. 1. コンデンサの充放電実験の概要

図1にコンデンサの充電回路を示す。実験回路は、本校の電流回路実験に汎用的に使っている端子台を利用して組んでいる。図2は、この実験結果例である。充電電圧と充電電流が示されている。ただし、オシロスコープは電圧測定であるから、電流値は、CH2の値を抵抗Rで割ったものとなる。

この表示結果は、デジタルオシロスコープのROLLモードにより表示している。このモードは、ちょうどペンレコーダーで移動する記録紙上に波形が記録されていくように、画面右から左に向かって記録波形が流れていく。適当な時間でSTOPボタンを押せば、図2のような波形が得られる。

放電は、図1の回路でウ-エの接続を、ウ-アにすればよい。このとき、切り替える前にオシロスコープのROLLモードをスタートさせておき、放電を開始させる。必要なところでSTOPボタンを押せば、図3のような放電曲線が得られる。充放電ともに10s程度の測定時間となるように抵抗Rを設定しているので（この値も、最終的には生徒に決めさせる）、実験はきわめてスピーディーに行える。

図2、図3のような画面上のグラフデータは、カーソルにより直接数値を読むことができる。USBメモリーをオシロスコープに差し込めば、図2、3のような表示画面を図として保存したり、表計算形式（csv）で数値を記録したりできる。

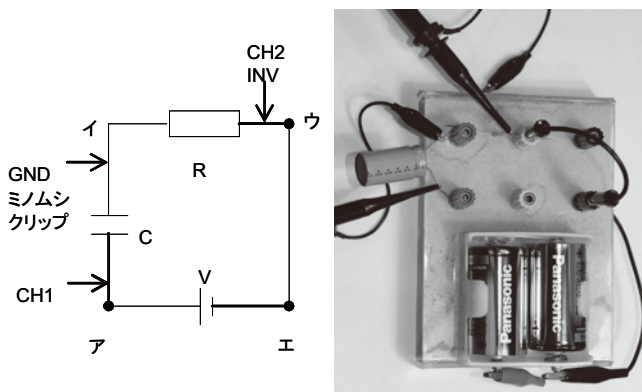
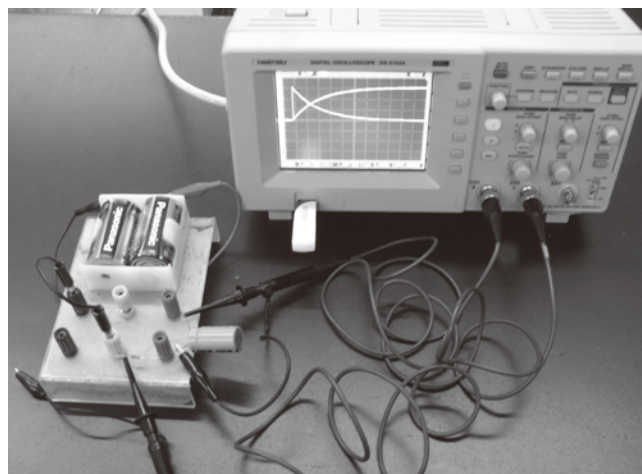


図1

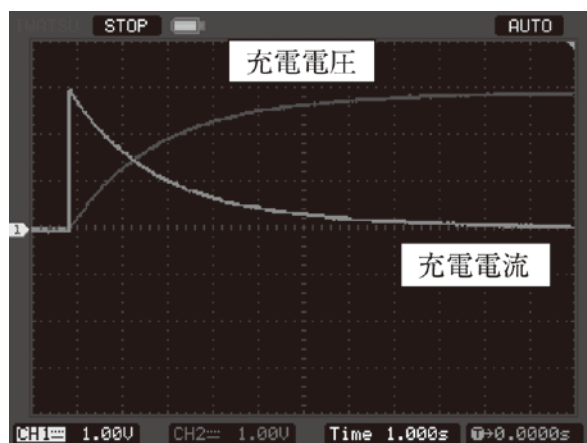


図2

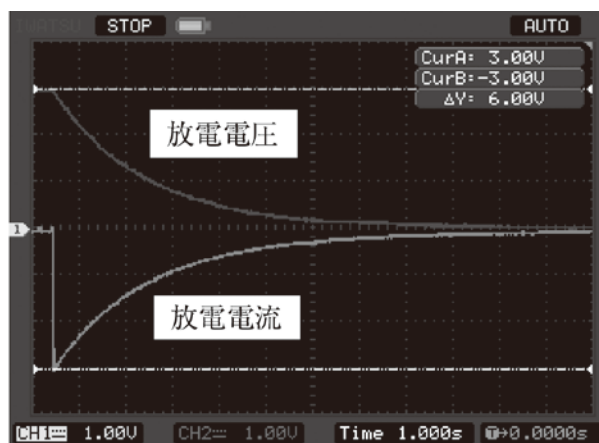


図3

以上の実験で、コンデンサの両端の電圧をオシロスコープで測るとオシロスコープを通して若干の放電が気になるところである。しかし、オシロスコープの入力抵抗はきわめて大きく、 $100\mu\text{F}$ 以上のコンデンサでは、リーク電流はほとんど気にならない。

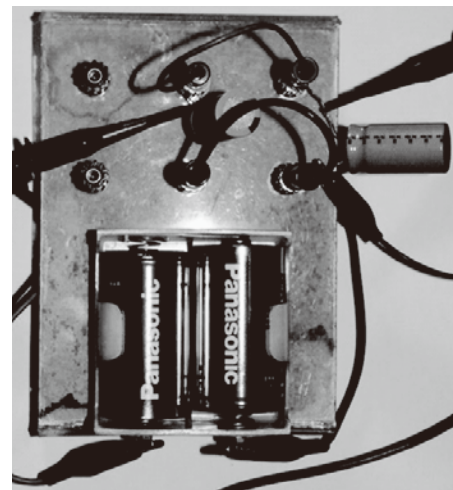
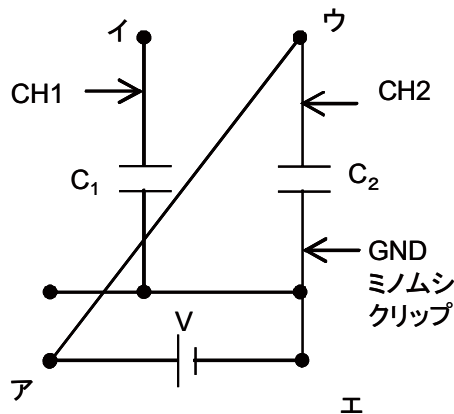


図4

このため、充電されたコンデンサと放電済みのコンデンサを並列に接続するなどの、つなぎ換えによる端子電圧の変化も、オシロスコープで直接測定できる。図4の回路で、 C_2 を充電し、アをイにつなぎかえる（写真はつなぎかえ後）。この結果は、図5のように直感的に分かりやすいグラフとして表示できる。はじめ C_2 が3.16V、 C_1 が0Vで、つなぎ換え後、両方が2.2Vになっていることが読める。

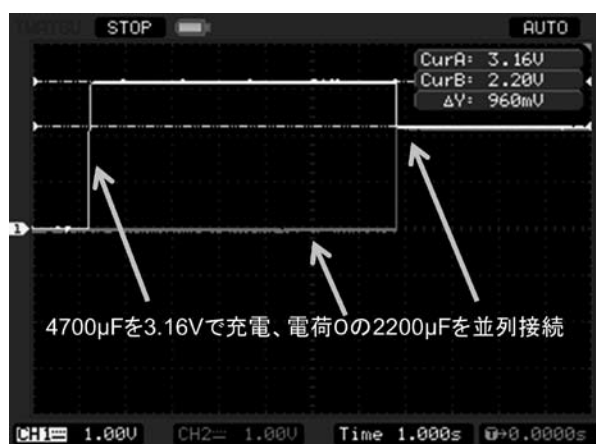


図5

3. 2. 電流を積分して電気量を求める

実験データをコンピュータの表計算に入れば、区分求積法により容易に充電電気量の時間経過を求めることができる。このためには、USBメモリをデジタルオシロのUSB端子に接続し、測定データをcsvファイルとして保存すればよい。保存できるのは、画面表示されているデータまたは、表示分を含む全データ（デジタルオシロスコープのPOSITIONで表示を変更できる）である。図6は、CH2の電圧と抵抗値から電流を求め、これに時間間隔 Δt （吐き出されるオシロスコープデータに、時間も刻まれている）を乗じたものを累積して描いている。電源3.01V、抵抗 985Ω 、コンデンサ $2200\mu\text{F}$ デジタルオシロスコープのcsvファイルから積分したものである。区分求積法そのもので、表計算を使えば、生徒にも容易に分析に使える。

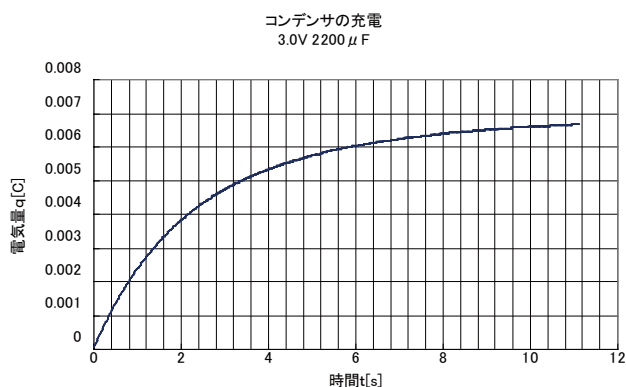


図6

D3 = C3/985*0.02+D2				
	A	B	C	D
1	時間t[s]	CH1 電圧V _L [V]	CH2 電圧V _R [V]	電気量q[C]
2	-5.14E+00	7.99E-02	3.00E+00	6.09E-05
3	-5.12E+00	7.99E-02	2.96E+00	1.21E-04
4	-5.10E+00	1.60E-01	2.88E+00	1.79E-04
5	-5.08E+00	1.60E-01	2.88E+00	2.38E-04
6	-5.06E+00	2.00E-01	2.80E+00	2.95E-04
7	-5.04E+00	2.00E-01	2.84E+00	3.52E-04
8	-5.02E+00	2.40E-01	2.76E+00	4.09E-04
9	-5.00E+00	2.40E-01	2.76E+00	4.65E-04
10	-4.98E+00	3.20E-01	2.68E+00	5.19E-04
11	-4.96E+00	3.20E-01	2.72E+00	5.74E-04
12	-4.94E+00	3.60E-01	2.64E+00	6.28E-04
13	-4.92E+00	3.20E-01	2.64E+00	6.81E-04

図7

時間刻みが十分に小さく、その間での電流変化が十分に小さければ、その微小時間 Δt に流れ込んだ電気量 Δq は、 $\Delta q = \frac{V_R}{R} \Delta t$ これを充電完了まで、全て足し合わせれば、充電電気量 Q になる。このとき、 $Q = CV$ である。図7では、 $\Delta t = 0.02\text{s}$ 、 $R = 985\Omega$ であった。このようにして、表計算にデジタルオシロスコープのデータを取り込んで、区分求積法による数値積分が容易にできる。また、 $q = CV \left(1 - \text{EXP} \left(-\frac{t}{CR} \right) \right)$ と得られたグラフから、時定数について検討することもできる。

3. 3. 実験振動電流の概要

図8のような回路で、スイッチを急に切ると、コンデンサとコイルとの間でエネルギーのやり取りが行われ、振動電流が流れる。この振動数、コイルのインダクタンス、振動電圧の最大値、エネルギー等について調べる。実際の実験装置の様子を図9に示す。

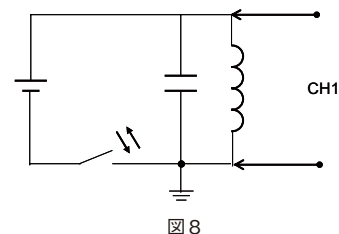


図8

コンデンサの極板間、コイル内部がともに真空であれば、コンデンサ極板間の真空の空間（電場）に蓄えられたエネルギーとコイル内の真空の空間（磁場）に蓄えられたエネルギーとのやり取りである。実際には、誘電体や磁性体の歪として蓄えられたエネルギーのやり取りとなっている。コイルのインダクタンスは不明なのだが、 $f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ より、実験結果から振動数 f を求めれば、コンデンサの既知の電気容量とから求められる。



図9

振動電流は、図3のように観測されるが、コイルなどの抵抗によりエネルギーが失われるため、減衰振動が観測される。ところで、電池の電圧は3Vであったが、図10の最大値は43.2Vを示している。これは、はじめコンデンサとコイルの両方にエネルギーが蓄えられており、コイルが蓄えていたエネルギーがまずコンデンサを充電したためである。このとき、エネルギー保存により、 $\frac{1}{2}CV_0^2 + \frac{1}{2}LI^2 = \frac{1}{2}CV'^2 + Q$ (Q を抵抗によるジュール熱として) もとめられる。抵抗 R はコイルの抵抗として測定しておけば、 Q がいくら位なのか、逆に V' がこれで妥当であるのかは、概算はできる。

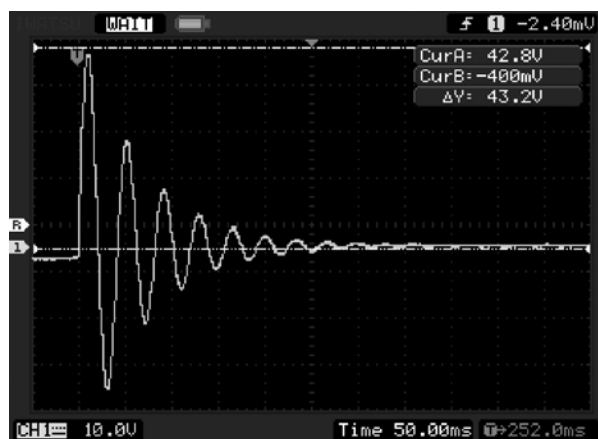


図10

これらの測定結果は、デジタルオシロスコープのデータをコンピュータに入れ、表計算で数値積分することで、更なる分析も可能である。

3. 4. 音速の測定実験の概要

この実験は、音速を正確に測定することがねらいではない。音速測定を通して、波動が時間軸と位置座標と同時に振動している様子を捉えさせることを目指している。振動が時間とともに空間を伝播していく現象として波

動を理解させたいのだが、 $y-t$ グラフ、 $y-x$ グラフを同時にイメージとして理解することは、困難である。模型を作って、遊びながら理解させる方法もあるが、それは実は波動についての理解に基づいているシミュレーションで、学習の順番としては違和感がある。

現象から波動の動的なイメージを理解するには、 $y-t$ グラフ、 $y-x$ グラフを同時に扱うことが大切である。さらに理解を深めるには、振動や媒質などに変化を与えたときに、 $y-t$ グラフ、 $y-x$ グラフにどのような影響が現れるべきかを予測しながら確かめさせたい。

図11に装置を示す。低周波発振器（ファンクションジェネレータ）から約4万Hzの振動を超音波トランスミッターに送り、これを超音波レシーバで受ける。送受信部はノギスに取り付けてあり、受信部が可動である。送受信機に現れた電圧は、デジタルオシロスコープのCH1、CH2にそれぞれ入れる。オシロスコープの調整は要らない。AutoSetupボタンを押せば、手ごろな設定をしてくれる。

レシーバを移動させて、二つのチャンネルが同位相から次に同位相になるとき（図12参照）、レシーバの移動距離が1波長である。これを繰り返して10波長の距離から波長を求め、これに振動数を掛ければ音速となる。上の表に、著者による実験結果を示す（生徒実験では、ここまで細かく扱わない）。計算値というのは、音速と気温の関係式 $v = 331.5 + 0.6t$ による値である。この実験原理を十分に考えさせれば、空間に伝わる波動のイメージが捉えられるであろう。

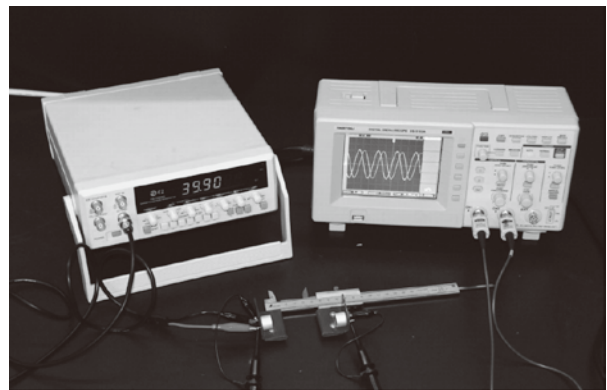


図11

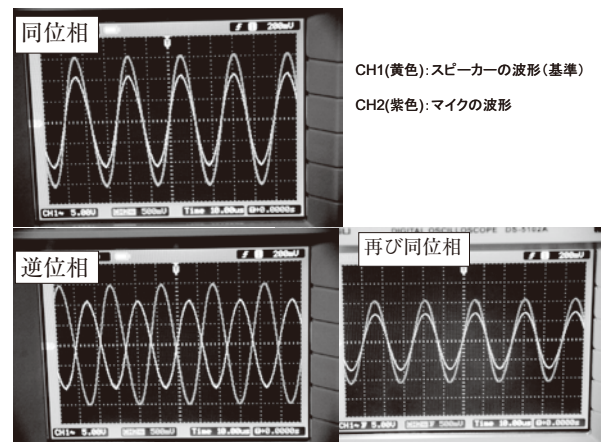


図12

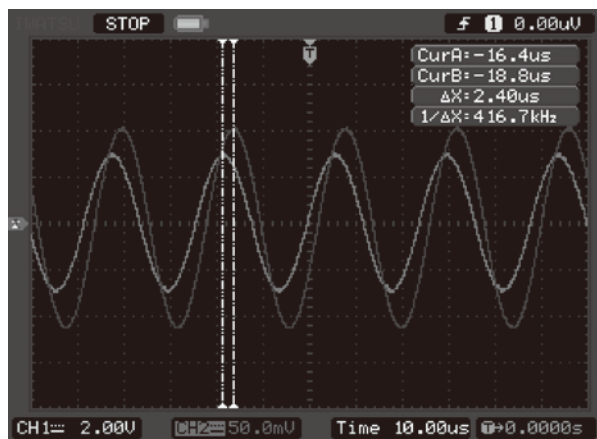


図13

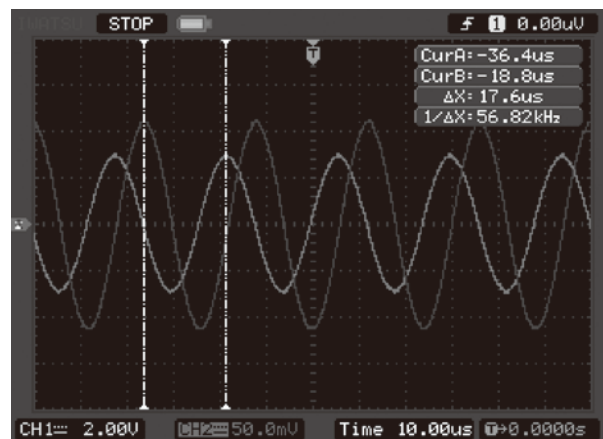


図14

3. 5. 空間的なイメージを広げるために

音速を測るだけなら、上記の実験は20～30分もかからないで終わってしまう。そこで、音速測定ができた班には、ヘアードライヤーを使って次のような【発展課題】を与える。この場合、論理的な予測を示した班にだけヘアードライヤーを貸し出すことにした。

- ①冷風をスピーカーからマイク側に向けて吹く。

- ②冷風をマイクからスピーカー側に向けて吹く。
- ③冷風をマイクとスピーカーの間に垂直に吹く。
- ④上の状態で温風にする。
- ⑤冷風の風速を計算してみよう。
- ⑥温風の温度を計算してみよう。

例えば、②の場合は音速がマイクに対して遅くなり、到着に時間がかかる。したがってオシロスコープ画面では t 軸上を右にずれることになる（図13では、右に $2.4\mu\text{s}$ 遅れている）。同様に④では音速が速くなり、マイクへの到着時間が早まり、 t 軸上では左にずれる（図14では、右に $17.6\mu\text{s}$ 早まっている）。

ヘッドライヤーの当て方などによって、風速や温度はそれほど正確には測れないだろうが、生の実験データからは、風速 $3\sim 5\text{m/s}$ 、温度 60°C 程度と求まった。この値の精度はどうでもよい。これを求める計算過程を自ら見つけ理解することが大切である。

振動数 f [kHz]	気温 t [$^\circ\text{C}$]	初端位置 x_0 [mm]	終端位置 x_{10} [mm]	$\Delta x = x_{10} - x_0$ [mm]	波長 λ $\times 10^{-3}$ [m]	音速 v [m/s]	計算値 [m/s]
41.67	22.7	9.30	91.80	82.50	8.250	343.8	345.1
41.32	22.7	9.50	92.20	82.70	8.270	341.7	345.1
41.32	23.5	9.00	92.15	83.15	8.315	343.6	345.6
41.55	23.4	8.95	92.85	83.90	8.390	348.6	345.5
41.53	23.2	9.10	92.55	83.45	8.345	346.6	345.4
平均音速						344.8	345.4

3. 6. ドップラー効果を利用した運動体の速度測定

運動する物体に超音波を当て、反射波の振動数がドップラー効果によっていくら変化しているかを測定することで、その速さを求める。このために、入射波と反射波により生じるうなりの振動数を、デジタルオシロスコープで測定する。

【測定準備】

(1) 器具を準備する。

オシロスコープ、プローブ1本、ファンクションジェネレーター（発信器）、ミノムシクリップ付ケーブル、超音波センサー（スピーカー SP & マイク MIC）、力学台車

(2) セッティングする（図15、16）。

MIC & SPセットの台を発信器の脚を乗せて押さえる。発振器の出力をスピーカー SPに入れる。力学台車で



図15

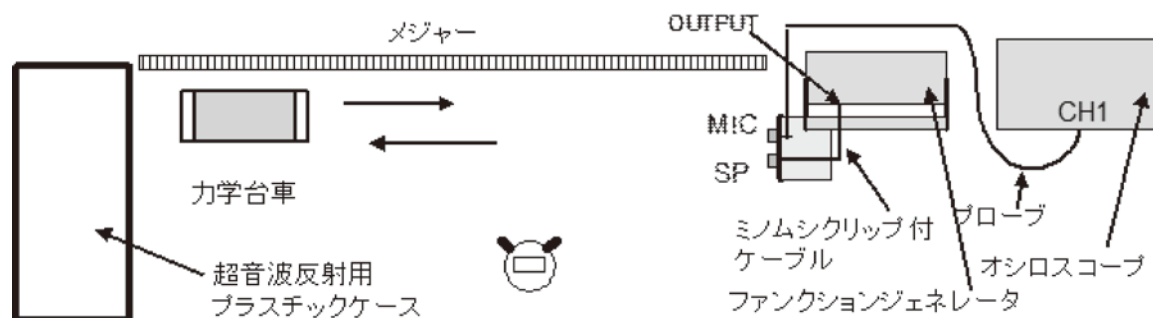


図16

反射してきた音をマイクMICで聞き、オシロスコープのCH1に付ける。MIC前方に力学台車、SP前方にプラスチックケースがくるように位置決めする（MICに力学台車とプラスチックケースからの反射音が同時に来るようにする）。

(3) 調整する。オシロスコープ、発振器の電源を入れる。

- ・発振器の出力を正弦波、約40kHz、AMPは半分くらい回した位置（反射波形の見え方次第で調整）
- ・力学台車を、超音波センサーから10cmくらいの位置に置き、オシロスコープのAUTO SETUPスイッチを押す。
- ・発振器のfrequencyダイヤルでオシロスコープの振幅がおおよそ最大になる値にする（超音波センサーの固有振動数に合わせる）。この値が f_0 である。実験中に若干変動するので、測定時に振動数を確認しておく。
- ・オシロスコープのタイムダイヤルを回して、TIMEを1ms～2msにする（力学台車の速さによる）。
- ・力学台車を動かしてみると、図17、18のような波形が現れる。

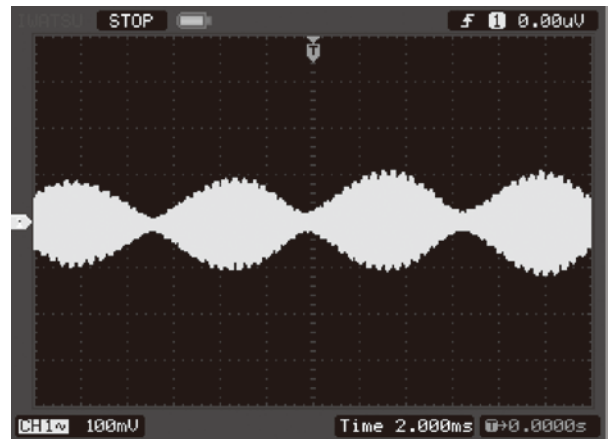


図17

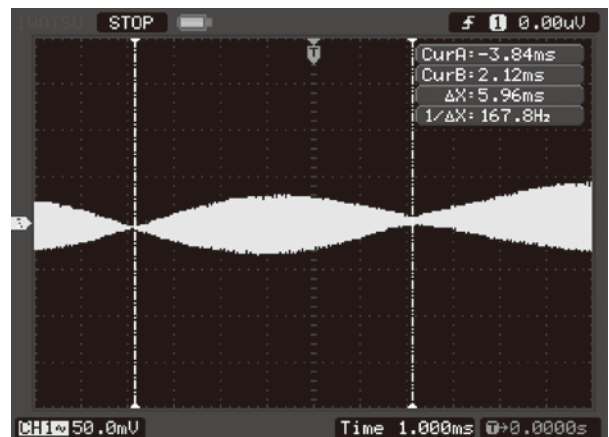


図18

【測定】（力学台車をセンサーに当てない！）

- (1) TRIGGERはAUTOにして、力学台車を運動させる。適当なタイミングでTRIGGERのSTOPを押して、波形を止める。
- (2) このとき同時に移動距離と時間（ストップウォッチで）を測り、速さを計算する。
- (3) CURSORSスイッチを押して、CURSOR AとBを動かして（FUNCTIONダイヤルで動く）、うなりの振動数を測る（右図参照）。
- (4) 音速を気温から求め、計算により力学台車の速さを求め、比較する。

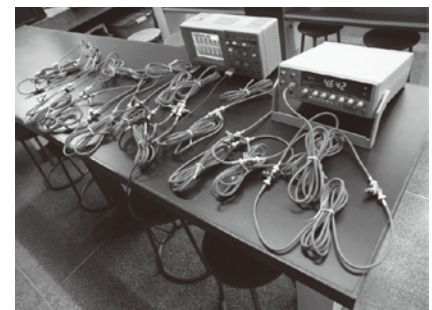


図19

3. 7. 誘電体中の電磁波

1 本約2m（実測2.1m）の同軸ケーブルを20本直列に接続し、一方の端を発振器へ、他方の端は開放、ショート、無反射のいずれかにする。発振器により2MHz～5MHzの正弦波を出す。測定点であるT型の端子をオシロスコープ（高周波高入力電圧計として使用）とプローブでつなぎ、各測定点の、電圧

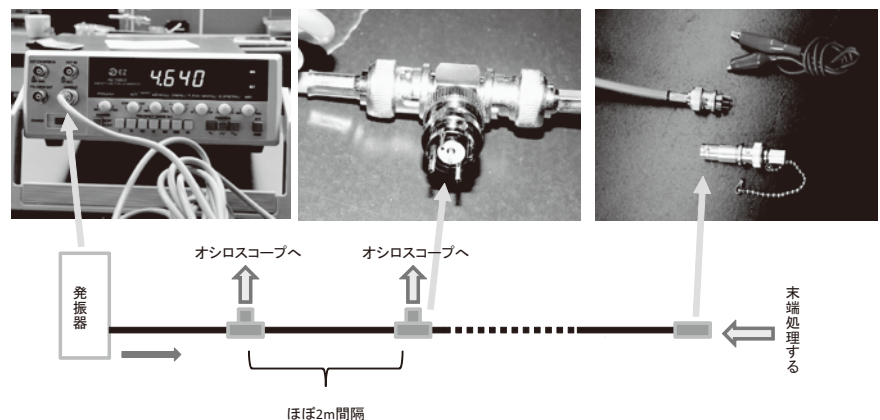


図20

振幅を測る。図19は、実験装置の全体像である。図20に回路と部品の接続関係を示す。発振器から送り出された電場振動は、同軸ケーブルの導線軸とシールド網間にある誘電体（ポリエチレンなど）の間を伝わっていく。

3. 7. 1. 進行波による測定

末端にターミネーター（図21）をつければ、進行波ができる（発振器出力端子は、ほとんど完全な無反射端となっている）。図22に4.2m（同軸ケーブル1本2.1m）間隔で、4つのチャンネルのプロブを接続した場合の波形を示す。これから、以下のように誘電体中の電場の伝播速度と比誘電率が求められる。同軸ケーブルの誘電体はポリエチレンであり、物理データ事典（朝倉書店）の値 $\epsilon_r = 2.2 \sim 2.4$ とよく合っている。

$$c' = \frac{12.6\text{m}}{66.0\text{ns}} \cong 1.91 \times 10^8 \text{m/s} \quad \epsilon_r = \left(\frac{c}{c'}\right)^2 = \left(\frac{3.00 \times 10^8}{1.91 \times 10^8}\right)^2 \cong 2.47$$

なお、発振器からターミネーターに向かって、わずかに減衰していることも測定から分かる。

3. 7. 2. 定常波の波長測定

固定端の場合、測定回路は図20の末端をショートすればよい。T型端子の振幅電圧を順に測定し、節から節までの距離を測る。このとき、ちょうど端子点に節が来るように振動数を調整するとよい（もちろんずれていても、グラフから推定できる）。図22は、腹の位置での電圧測定例である。図23に測定結果をグラフで示す（振幅は絶対値であるので、節の前後で電圧の正負を入れ替えて、定常波らしく示した）。図25は自由端での定常波である。いずれも発振器側が0個目である。図24の場合の波長は、 $\lambda = 2.1 \times 9 \times 2 \times 37.8\text{m}$ これから伝播速度は、 $c' = 37.8\text{m} \times 5.02 \times 10^6 \text{Hz} \cong 1.9 \times 10^8 \text{m/s}$ となり、進行波の場合と一致する。2MHzの場合で、No.10に節があり、その前後のNo.6、8、12、14を測定を4CHで同時測定すると、図26のようになる。図27は、測定点の位置関係のイメージ図である。また、図22、23を比べると、定常波の腹の振幅が、進行波の振幅の2倍になっていることがわかる。このことから、発振器側では反射が起こらず、定常波は入射波と反射波が1つずつ重なったものであることがわかる。この結

果、この定常波は、教科書的な逆進する2つの波による定常波の作図と同じになっている。弦や気柱の定常波では、両端で反射が繰り返されてできるため、定常波の腹の振幅が外部から与えた振幅の何倍



図21

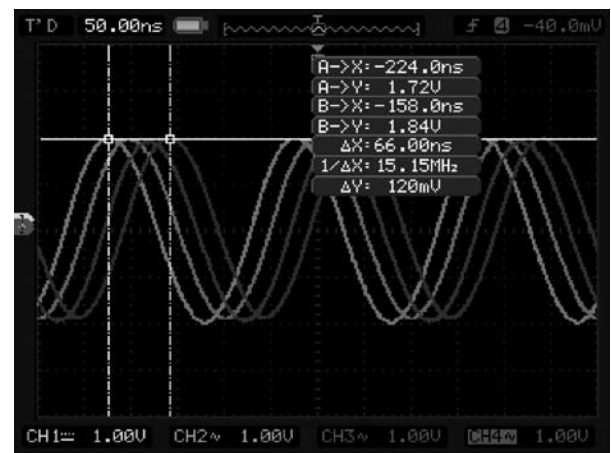


図22

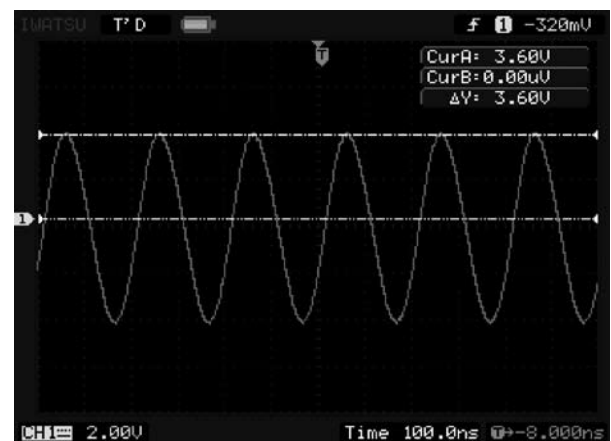
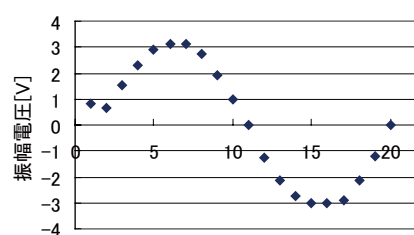


図23

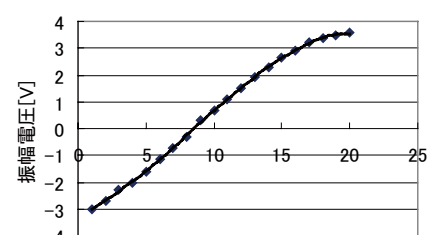
位置と振幅: 短絡端(5.019MHz)



短絡端からの測定点

図24

位置と振幅: 開放端(2.007MHz)



開放端からの測定点

図25

にもなることが多い。また、2回以上の反射で定常波ができる条件は、その固有振動数に一致する場合に限られ、この実験のように任意の波長の定常波はできない。

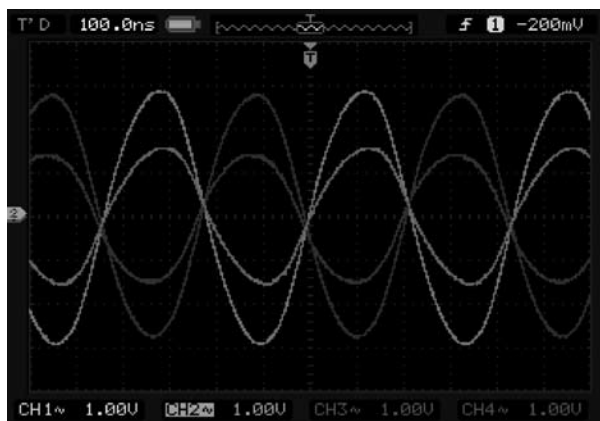


図26

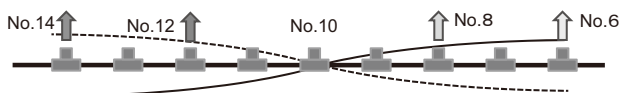


図27

3. 8. 気柱管口での反射

気柱の共鳴では、一方から音を入れて定常波ができていることから、管口で反射していることは容易に理解できる。この反射の仕方は、次のように高校教科書に記されている。開口端は自由に空気が動けるので自由端反射をし、腹となる。閉口端は空気が動けないので固定端反射をし、節となる。これは自明なのだろうか。これについては、その科学的根拠が特に示されることはなく、単なる素朴な直感に基づく仮説に過ぎないのではないかな。

これを解決するには、気柱内にパルス音を送り、この反射の様子を小さなコンデンサマイクでとらえ、分析すればよい。コンデンサマイクは、圧力変化をとらえる。パルス音は、梱包材のエアーキャップをつぶす際のプチッ音を使う。

両開き管の一方からパルス音を送り、他方の管口に置いたマイクで、パルスを拾う。すると、徐々に減衰するが、何度も一定時間間隔で繰り返される同位相のパルスが観測される (図28)。

使用したアクリル管は、内径28mm、長さ1.02mである。往復時間から音速を求めると、

$$V = \frac{1.02\text{m} \times 2}{6.08 \times 10^{-3}\text{s}} = 336\text{m/s} \text{ となる。開口端補正が}$$

1 cmずつあるとすると、 $V = 339\text{m/s}$ となり、開いた管口で反射を繰り返していると言えるのである。

片開管でも同様な実験をすると、交互に位相が反転する反射波が観測される (図29)。

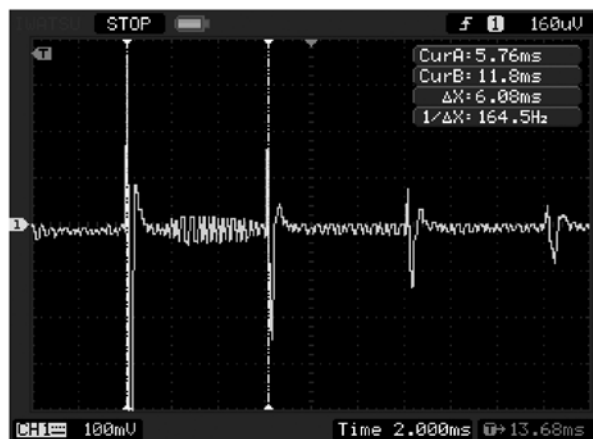
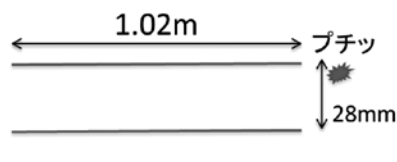


図28

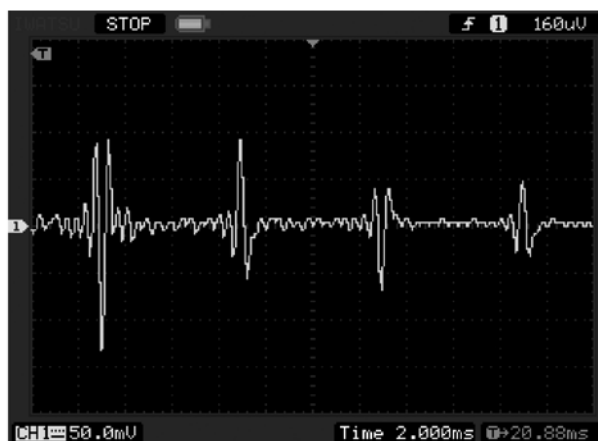


図29

これだけでは、閉口端が固定端反射であるのかわからない。

そこで、管内中央付近にマイクを置いてみた。図30が両開管、図31が片開管の場合である。このことから、閉口端が自由端反射、開口端が固定端反射をしていることがわかる。

このように、瞬間的な現象も、その場ですぐに可視化でき、実験しながら議論を進めることができる。



図30



図31

3. 9. 衝突時間の測定

衝突現象では、衝突時間が極めて短時間で完了するために、衝突により作用しあう力積に比べて、重力などの外力による力積はほとんど無視できる。このため、空中衝突などにおいても、運動量が保存されているとして扱うことができる。ところで、極めて短時間とは言いが、どれくらいなのだろう。本当に外力による力積を無視できるのだろうか。スーパーボールが花崗岩の上で跳ね上がる際に働く撃力を、デジタルオシロスコープで測定したものが、図32である。衝突時間は約2msである。初めの高さと終わりの高さ、それにボールの質量から撃力が求まる。これと衝突中の重力による力積を比べると、およそ1000分の1程度である。2ケタ程度の実験精度なら無視できることが分かる。

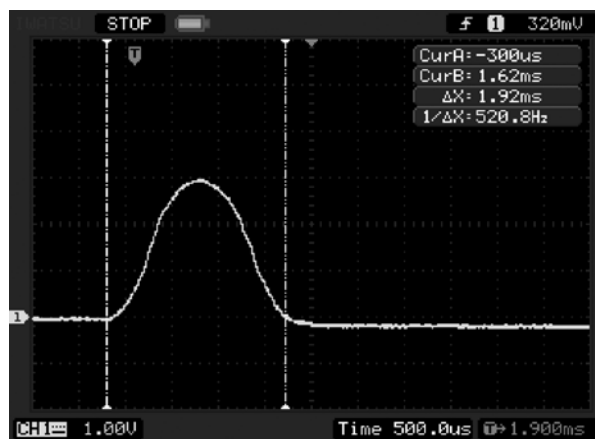


図32

4. おわりに

デジタルオシロスコープの代わりに、ノートパソコン上のパソコンオシロを使うと、さらに容易にさまざまな現象をグラフ化できるかもしれない。しかし、測定器としての信頼性や扱いやすさは、デジタルオシロスコープが優れている。また、あまりに便利にパソコン上で加工された「測定結果」は、かえって理解を妨げるだろう。

これまで、物理実験室に1台程度のオシロスコープであったと思われるが、汎用測定器として利用することになれば、生徒実験班に1台のデジタルオシロスコープの設置が望ましい。これと、ファンクションジェネレータ、ノートパソコンがセットであると、多様な生徒実験が可能となる。

参考文献

「外力の働く衝突現象」(川角 博 2009.8 全国理科教育研究大会研究集録)

「デジタルオシロスコープを利用した物理実験」(川角 博 2010.8 全国理科教育研究大会研究集録)

「誘電体中を電場が伝わる速さ」(川角 博 2011.12 研究発表集録 東京都理科教育研究会 理化部会)

「気柱の開口端は固定端？」(川角 博 2011.12 研究発表集録 東京都理科教育研究会 理化部会)