

気柱の共鳴遠隔実験装置の開発

藤井弘也*・芝原雅彦*・軸丸勇士*・山下茂*・安藤亜希子**

【要 旨】 気柱の共鳴を利用した音の性質を見る実験装置をインターネット経由で制御するシステムを開発し、その実用性を調べた。その結果、音の大小の判定や観測に必要な解像度など、従来の装置と比較して十分であることがわかった。ここではこの装置を使つてのシステムの構成と特徴について詳説する。

【キーワード】 遠隔実験 気柱の共鳴 音の波

I. はじめに

筆者らはこれまでに ICT (Information and Communication Technology) 教育活用の一環としてコンピュータによる実験装置の制御方法とそれを活用した自動測定 (気柱の共鳴実験装置¹⁾, 光の回折実験装置²⁾ および陰極線実験装置³⁾) について報告をした。今回はさらにこの制御方法とインターネットの特徴を生かして、実験機器や試料が身近になくとも遠隔操作により装置をカメラを通して目視しながら実験が可能な手法の開発を行なった。

一般に高等学校の教科書において、気柱の共鳴実験やクインケの干渉管の実験、弦の振動などは音が波であることを知る教材として古くから用いられてきた。その中でも気柱の共鳴実験は波動分野「音と音波」で、固有振動と共鳴の例として全ての教科書に扱われている。しかし、大分県下の高等学校では授業の中で実験を行っている学校は少ないのが実状である⁴⁾。これは比較的装置が大きく水が必要であり準備に時間がかかる上、実験や片づけに時間をとられたくないなどの理由のためである。

ICT 活用のうち、今回はネットワーク (インターネット) の利用に着目した。インターネットの利便性は「どこでも、誰でも利用できる」、「距離と時間を短縮できる」点にある。そこで、学校間の距離を短縮して対面でリアルタイム、双方向にコミュニケーションをとる利便性を活かす方法を考えた。実験機器のコンピュータ制御については従来から取り組んでいたので、これをインターネットと組み合わせることで実験装置を制御し、その結果を遠隔地から直接観測し、実験を行う方法に関する研究に取り組むことにした。すでに筆者らは参考文献³⁾ で開発実証結果を得ていたこともあり、比較的簡単に遠隔制御と映像、音声による観測を同じプログラム上で行うことができた。ここでは遠隔制御による気柱の共鳴実験装置について報告する。

平成 20 年 5 月 29 日受理

*ふじい・ひろなり, しばはら・まさひこ, じくまる・ゆうし, やました・しげる 大分大学教育福祉科学部

**あんどう・あきこ 大分市立王子中学校

II. 原理と理論

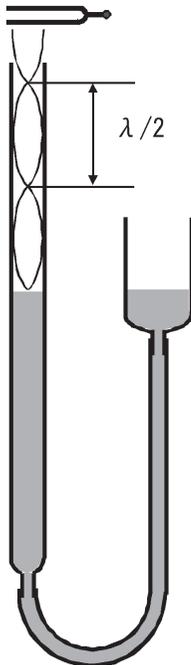


図1 気柱の共鳴実験

水を入れたコップの縁に強く息を吹きかけると、水の量によって高さの違う音が鳴る。リコーダも指で穴を押さえることで音階を作る。これらは、筒状のものによって作られる空気の柱で音が共鳴を起こすことによって生じる。図1は高校で実際に用いられている気柱の共鳴実験装置の概念図である。パイプでつながったタンクと筒に水を入れ、タンクを上下させると、それに伴い水位が等しくなるように筒の水位も上下する。音を筒の口の部分に置き、たたいて音を鳴らす。筒の中を進む波は水面で反射し干渉する。音は常に一定の高さ（振動数）の音を出すので、音の波長の条件に合った水面の高さになった時に定常波ができる。図からも隣あった節間の距離は波長を λ [m] とすると、 $\lambda/2$ [m] に等しいことがわかる。音の振動数を ν [Hz] とすれば、音速 V [m/s] は、

$$V = \lambda \nu$$

で求めることができる。音速は温度によって変化する。 0°C 、1気圧における音速 V_0 [m/s] は、

$$V_0 = 331.5 \text{ [m/s]}$$

である。ここに温度補正を加えると、 t [$^{\circ}\text{C}$] のときの音速は、

$$\begin{aligned} V &= V_0 (1 + 0.00183t) \\ &\doteq V_0 + 0.6t \text{ [m/s]} \end{aligned}$$

であるので、計算で求めた値と実測値を比較し、実験結果を検証することができる。

III. 気柱の共鳴遠隔実験装置

図2に今回製作した遠隔実験装置の概念図を示す。ガラス管の気柱部分の長さを変化させるのに、従来の実験装置では水を用いていたが、実験装置を必要な時にすぐに利用できるようなするには常備しておく必要があるため、水では蒸発してしまったり、取り扱いが難しかったりという問題があるため、アルミの円柱を可動子としてチェーンで引っ張り、代わりにすることにした。チェーンをループにしてモーターを使って移動させる。音源は音の代わりに発信器からの信号でスピーカーを鳴らしている。発信器は当初プログラマブル発信素子 (SPG8650A) を使ってアンプで増幅して用いた。しかし、共鳴点が耳で聞き取った場合はっきりしなかった。これは、波形が矩形波であるためと考えられたため、ファンクションジェネレータ（デジタル低周波発信器）を用いた。正弦波を信号とすることにより共鳴点で音が大きくなるのがはっきり観測できた。

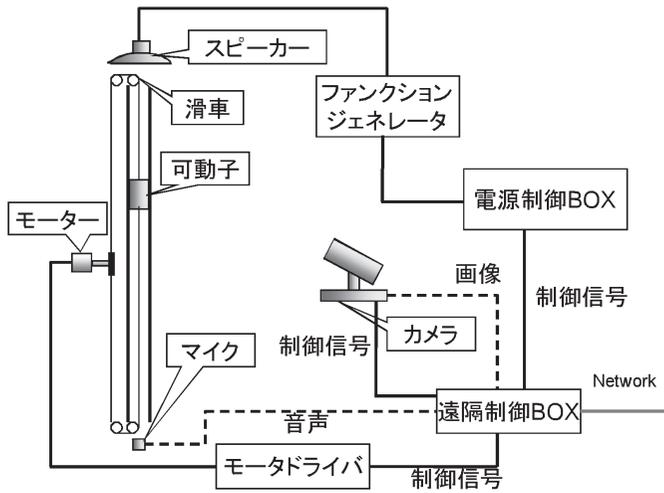


図2 遠隔装置概念図

ネットワークを通して、遠隔制御 Box に制御信号が送られると、遠隔制御 Box に装備されている汎用パラレル IO からパルス信号をパルスモータドライバユニットに送る。モータドライバは送られてきた信号に従いパルスモータを時計回りまたは反時計回りさせる。気柱に送られた音をマイクで受けカメラ映像と共に遠隔制御 Box を通してネットワーク上に送信する。カメラは遠隔制御 Box から COM ポートを通してズーム、パン、チルトの動きを

制御する。ガラス管にはメジャーが貼り付けてあり、共鳴点の可動子の位置をカメラ越しに読み取ることができるようにしてある。

ファンクションジェネレータやモーター駆動に必要な電源は必要な時にスイッチを入れる必要がある。ファンクションジェネレータの電源が入っていると常時音が鳴り続けてしまうし、モーター駆動用の電源は消費電力が大きく、電流を流しているとモーターが回転していなくても保持電流が流れて発熱し、かなり温度が高くなってしまう。そこで、遠隔制御 Box からの制御信号で動作する電源制御 BOX を自作し、ネットワークを通して電源の ON・OFF ができるようにした。

IV. 遠隔制御

遠隔制御 Box は九州エレクトロニクスシステム社製の LiveServer LsBox・S を使用した。この機器の利点は小型の 1 Box でビデオサーバ機能を持つ点と汎用パラレルインターフェースを持ちパラレルインターフェースの入出力を持つ点である。ビデオサーバとしては NTSC 信号の入出力、モノラル音声入出力、ビデオカメラ制御用 COM ポートおよびビデオカメラ電源用ポートを実装している。また、動画像の転送フォーマットとして KAM Codec (圧縮方式) を使用している。この圧縮方式の特徴は高い圧縮率と画像中の動きのある部分のみ解像度を上げて表示するという点であり、0.6~3Mbps と比較的帯域であるため、大分県の教育用ネットワークへの負荷をおさえることができる。

制御プログラムは図 3 に示すように Microsoft Visual Basic.NET など Microsoft 系の開発言語を使用してユーザーが開発することができる。そのために必要なライブラリ集 SDK が用意されている。コンパイラによって作成した実行ファイルはアプリケーションとしてクライアント側で実行する。アプリケーションはネットワークを通じて LiveServer と動画像と音声の受

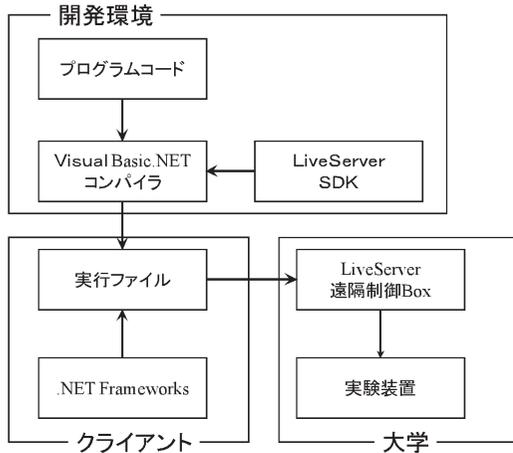


図3 開発環境と実行環境

信, カメラへの制御信号の送信と平行インターフェースへの信号の送受信を行う。

このシステムの特徴としては Web アプリケーションのようにサーバーサイドプログラムではなく, Windows アプリケーションをクライアント側で動作させる点である。クライアント側にアプリケーションを配布する必要があることから, どこでもだれでもネットワーク環境があれば使用できるという利便性はないが, 逆にアプリケーションを持っているものだけが使用可能という利用者制限が可能となる。今回の遠隔実験装置への利用では, 不特定のユーザーを対象としておらず, 目的に合致しているといえる。

V. 制御プログラム

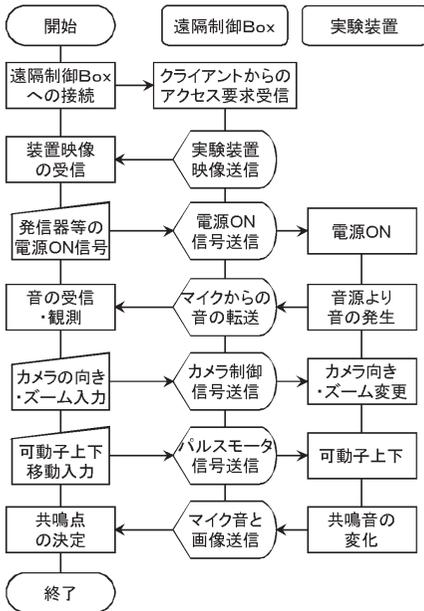


図4 処理のための流れ図

プログラムのフローチャートを図4に示す。

左のフローがユーザー側のプログラム処理の流れで, 中央のフローが遠隔制御 Box の処理の流れ, 右が実験装置の処理の流れである。ユーザー側からのアクセス要求を受けて遠隔制御 Box はビデオカメラの映像を送信する。ユーザーは発信器およびモーター用電源を入れる命令を送るボタンを実行画面上でクリックする。遠隔制御 Box は平行インターフェースから電源制御 Box に電源スイッチを入れる信号を送信し, 電源が入る。同時に音源より音が発生するので, その音をマイクで拾って遠隔制御 Box 経由でユーザーへ送信する。表示されている画面を見ながら, カメラのパン, チルトおよびズームを変化させるボタンを画面上でクリックする。遠隔制御 Box は, 制御信号を COM ポートから送信し, 指令通りにカメラを駆動する。送られてきた画像を見ながら, 観測しやすい位置, 大きさの画像に調整する。送信されてくる音を聞きながら,

可動子の上下を制御するボタンを画面上でクリックすると, 遠隔制御 Box は平行インターフェースからモーターを回転させるパルスを送信し, 可動子に

つながったチェーンを送って上下させる。音の大きさが変化し、条件にあった位置で共鳴を起こす。このときの位置をカメラで読み取り記録する。共鳴点は複数個あるので、位置を移動させながらいくつかのデータをとり、与えられた数値から発信器の周波数を計算で求める。

VI. 実行画面と装置写真

図5に実行画面を示す。左側にビデオ画像が表示され、右上に接続・切断ボタンが配置して

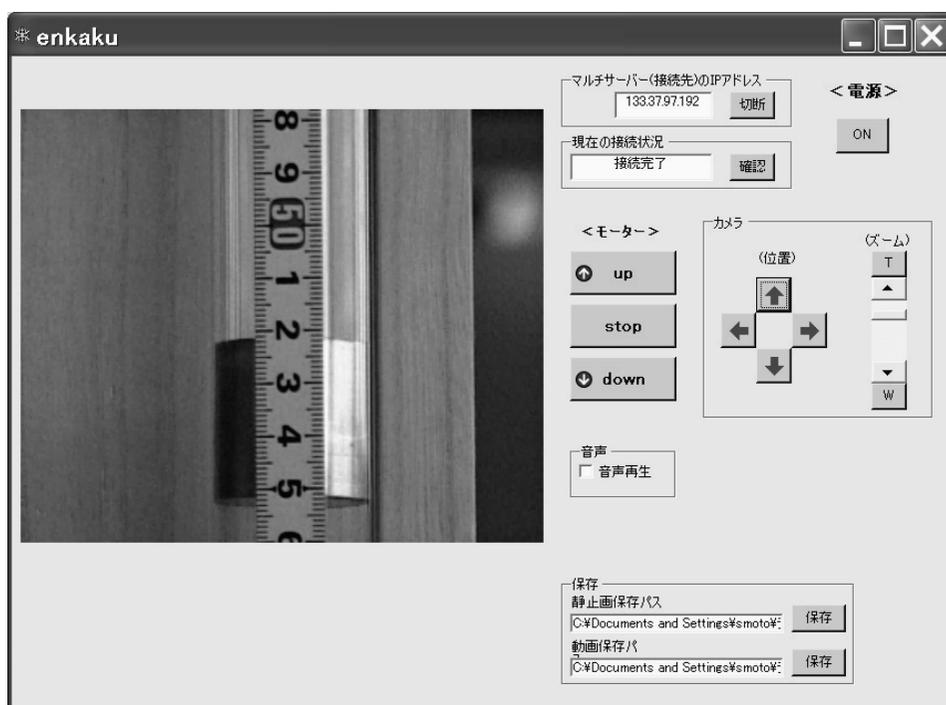


図5 実行画面

ある。その右側には発信器等の電源を入れる命令を送るボタンがあり、右中段に可動子の上下およびカメラのパン、チルト、ズームを変更するボタンが配置してある。ズームボタンには、ズーム可能範囲のうち、どの程度拡大しているかがわかるように、スライドバーを一緒に配置してある。このスライドバーをマウスで直接動かすことによってもズームを操作することができるようにしている。動画や静止画を必要に応じて保存できるように、画面右下段に保存ファイルパスおよびファイル名を入力するテキストボックスと保存ボタンを配置している。図の画面上のビデオ画像は実際に観測した時の画像であり、アルミでできた可動子の上面の位置が共鳴している気柱の長さとなるので、この位置をメジャーのメモリで読み取り、記録する。モーター駆動を制御する部分には停止ボタンを配置しており、大まかに位置を決めた後、狭い範囲で上下させ位置を確定する。これは、見ている画像音声がコンピュータまで届くまでにある一定の時間がかかるため、操作と送りとの間にタイムラグが発生してしまうので、細かく送らな

いと共鳴点がずれるからである。

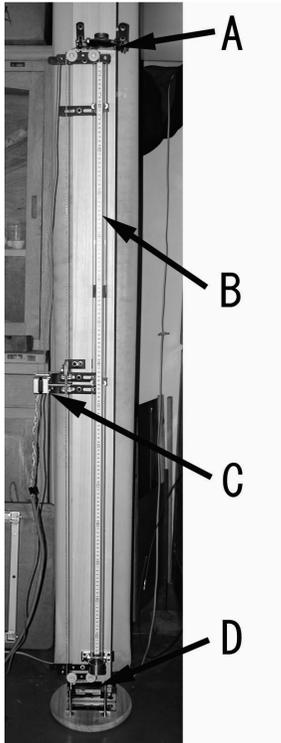


図6 装置外観写真

A : スピーカー B : ガラス管
C : モーター部 D : マイク部

実際の実験装置の写真を図6に示す。(B)が本体のガラス管部分で、(A)が音源のスピーカー、(C)がモーター部、(D)がマイク部である。全体を長い板(180cm)に固定してある。実際の実験装置が水を使用する関係で縦型になっていることや観測用のカメラの配置の関係から立てて使うようにした。

各部の拡大図を図7に示す。モーター部分にはチェーンを引っ張るためのプーリーが取り付けられている。チェーンの絡まりや滑りを防ぐために、滑車を使って引張を持たせてある。ほとんどの部品はDIYショップで用意できるものである。モーターを固定している金具部分にはゴムが緩衝材として取り付けられており、モーターの振動の影響を少なくするように工夫した。固定電圧電源が2台配置(A)してあるが、これは汎用パラレルインターフェース信号をパルスの形にするためと、モーター駆動のための電源である。マイクにはコンデンサマイクにマイクアンプが組み込まれたキットを用いた。水と音を使った装置では音源近くのガラス管口に耳を近づけて観測するが、今回スピーカーを用いた実験では、マイクを音源側の位置に設置すると音源の音に埋もれて共鳴音の大小が判別しにくくなることがわかった。そこで逆側に設置したところ共鳴点が明確に判別できた。

モーターを動かして可動子を上下させると、モーターのステップ音と可動子がガラス管に当たる音が大きく響き、音源の音が聞き取りにくくなった。そこで、アルミの円柱をガラス管内径より少し小さめにして、プラスチックの薄いシートを表面に貼り付ける

ことで音を押し返すことができた。可動子の位置をステップモーターのステップ数を数えて決めることも可能であるが、今回の装置ではチェーンとプーリーの間での微少の滑りによるずれによる影響を排除することと、より実験室での実験に条件を近づけるために、メジャーをガラス管に貼り付け、目で読むよ

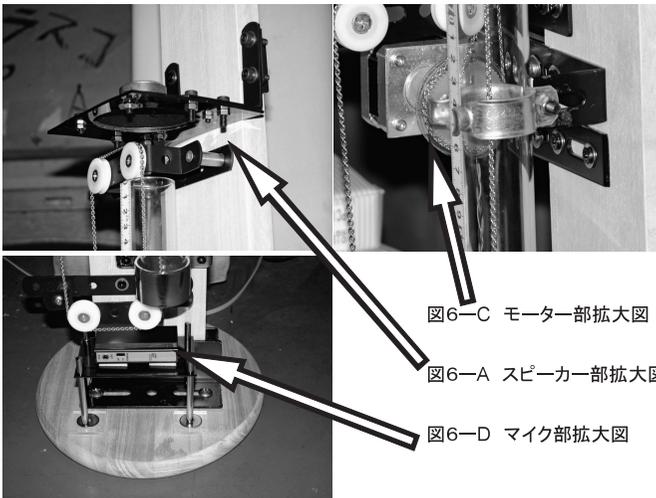


図6-C モーター部拡大図

図6-A スピーカー部拡大図

図6-D マイク部拡大図

図7 装置部分拡大図

うにした。

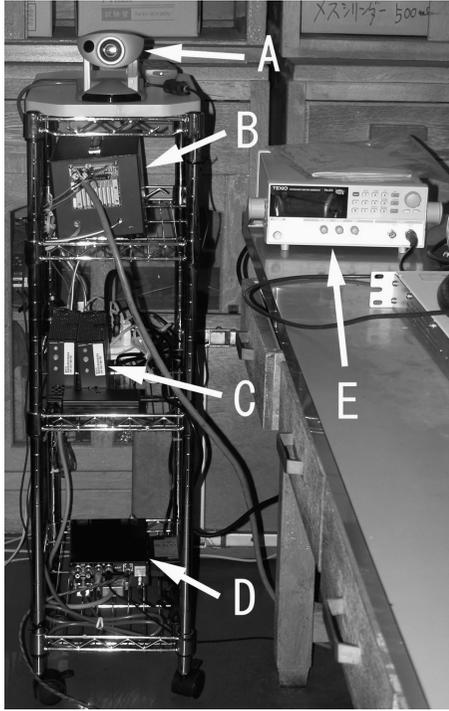


図8 遠隔制御装置

- A : カメラ B : 電源制御 Box
 C : モーター駆動用電源 D : 遠隔制御 Box
 E : ファンクションジェネレータ

図8に遠隔制御装置の写真を示す。市販のメタルラックに収めて、装置全体を移動できるように工夫した。(A)がカメラで、高さがガラス管の中央ぐらいになるように設置してある。(B)がサイリスタを組み込んだ電源制御Boxで、背面にモータードライバを取り付けてある。これは電流が流れると温度が上がるため、放熱のために外付けにした。(C)はモーター駆動用の電源と、制御信号を作るための電源である。(D)が遠隔制御Boxである。(E)がファンクションジェネレータで、写真で見やすいようにラックから取り出してある。ラックの大きさは幅25cm、奥行き45cm、高さ90cmで、実験室の端に設置してもあまり大きなスペースを必要としない。ケーブルはモータードライバからモーター、ネットワークケーブル、電源ケーブル、マイクから遠隔制御Boxおよびファンクションジェネレータからスピーカーまでの5本であり、装置本体との間のもを除くと2本なので、設置上も容易なものとなっている。遠隔制御Boxに装備されているパラレルインターフェースは標準では4ポート出力、4ポート入力であり、出力端子は、フォトカプラによって内部回路と外部端子とが回路的に独立させてあるタイプが使用されているので、構造的には壊れにくい代わりに5Vの信号を作るためには別に外部電源が必要となる。

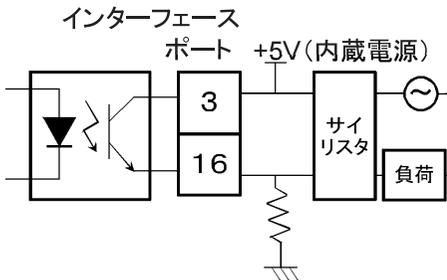


図9 電源制御回路

電源制御回路を図9に示す。インターフェースの3番と16番ポートを使い、3番ポートを5V電源の+側に接続し、16番ポートをプルダウン抵抗経由で一側に接続する。ポートに対してなにも信号が来ていない時はダイオードに電流が流れていないので、3番ポートと16番ポートが電気的に切断されている状態になっている。信号が届いてダイオードに電流が流れると、発光ダイオードが発光し、フォトダイオードがこの光を受光してポート間を短絡する。つまり、スイッチのON, OFFに相当する動作を行うことになる。

VII. 遠隔実験による測定結果

実際にこの実験装置を使用して遠隔で画像を見ながら測定した実験結果を表1に示す。

ここでガラス管の口端上部から、第1～第5共鳴点までの距離を上から順に l_1, l_2, l_3, l_4, l_5 とするとし、それぞれの位置の間の距離を $\Delta l_1, \Delta l_2, \Delta l_3, \Delta l_4$ とおく。この4つの値の平均値を $\lambda/2$ としている。開口端補正を Δl とすると、

$$\Delta l = (\lambda/2 \div 2) - l_1$$

で求めることができる。

今回、実験によって求めた波長 λ [m] と、温度から計算した音速 V [m/s] を用いて、振動数 ν [Hz] を求めてみると、

- ・気柱内の音波の平均波長

$$\lambda = \frac{\lambda}{2} \times 2 = 0.2146 \times 2 = 0.4292 \text{ [m]}$$

- ・気温 $t = 18.6^\circ\text{C}$

- ・振動数

$$\nu = \frac{V}{\lambda} = \frac{331.5 + 0.6t}{\lambda} = \frac{331.5 + 0.6 \times 18.6}{0.4292} = 798.4 \text{ [Hz]}$$

表1 実測値 (単位は cm)

	l_1	Δl_1	l_2	Δl_2	l_3	Δl_3	l_4	Δl_4	l_5	$\lambda/2$	Δl
1	9.9	21.5	31.4	21.5	52.9	21.3	74.2	21.4	95.6	21.43	0.815
2	9.9	21.3	31.2	21.5	52.7	21.6	74.3	21.4	95.7	21.45	0.825
3	9.8	21.5	31.3	21.5	52.8	21.3	74.1	21.7	95.8	21.50	0.950
4	9.8	21.5	31.3	21.5	52.8	21.5	74.3	21.3	95.6	21.45	0.925
5	9.9	21.4	31.3	21.6	52.9	21.4	74.3	21.4	95.7	21.45	0.825
6	9.8	21.5	31.3	21.5	52.8	21.6	74.4	21.4	95.8	21.50	0.950
7	9.9	21.5	31.4	21.5	52.9	21.4	74.3	21.3	95.6	21.43	0.815
8	9.8	21.5	31.3	21.5	52.8	21.5	74.3	21.4	95.7	21.47	0.935
9	9.9	21.5	31.4	21.4	52.8	21.5	74.3	21.5	95.8	21.47	0.835
10	9.9	21.4	31.3	21.6	52.9	21.5	74.4	21.3	95.7	21.45	0.825
Ave	9.86	21.46	31.32	21.51	52.83	21.46	74.29	21.41	95.70	21.46	0.870

となる。今回の実験ではファンクションジェネレータの発信周波数を800Hzに設定したので、0.2%の誤差の範囲で測定結果が得られている。

ガラス管の半径を r [cm] とすると、開口端補正は、一般的に

$$\Delta l = (0.55 \sim 0.85) \times r \text{ [cm]}$$

となることが知られている。今回実験に用いたガラス管の半径を当てはめて計算すると、0.88～1.36 [cm] となり、今回の実験結果の 0.870 [cm] とほぼ一致する。

VIII. 考察

今回の実験装置では陰極線の遠隔実験装置と同様に、一つの実行画面に制御パネル部と映像部が配置できているため操作性がよい。また、実際にインターネット経由で操作、観測を行ったが、帯域の不足によるコマ落ちや遅延もなく、実験装置の制御も全く問題なかった。今回使用したカメラおよび LiveServer の KAM Codec による動画像の解像度は今回の観測を行うには十分であり、必要な測定精度を得ることができた。現在は学内でのテスト実験のみであるが、本学には県内の学校と直接つながるインターネット回線が配線されており、県内の高等学校の授業での実践研究を行うことを計画している。

今後はプログラム使用方法のマニュアルを作成すること、原理等教材をホームページに載せ、公開し併用できるようにする作業を進める。また、シミュレーションによる教材を使用して授業を行った場合と、この遠隔実験装置を使用して授業を行った場合とを比較して教育効果、理解度の差を検証する調査を行い、改良を加えると共にどのような教材にこのシステムが効果的かなどの研究を行う予定である。

参考文献

- 1) 藤井弘也他：大分大学教育学部教育研究紀要 13 359 (1991)
- 2) 藤井弘也他：大分大学教育学部教育研究紀要 16(2) 423-428 (1994)
- 3) 藤井弘也他：大分大学教育福祉科学部研究紀要 13(1) 15-20 (2008)
- 4) 軸丸勇士他：大分大学教育福祉科学部研究紀要 27(2) 243-256 (2005)

Development of the Experimental Equipment for Columnar Resonance by Remote Control

FUJII, H., SHIBAHARA, M., ZIKUMARU, Y., YAMASHITA, S and ANDO, A.

Abstract

We developed the system for controlling and/or observing the experimental equipment for columnar resonance by means of the Internet. And then we looked into its effectiveness and thereby verified the usefulness and practicality of the system. We got good results such as the clear decision of resonant points and the resolution good enough to observe it. Here we made a detailed explanation of the construction and characteristics of the system.

【Key words】 Experiment by remote control, Columnar resonance, Sound wave