

水の楽器における共鳴管の側壁孔が放射音に及ぼす影響

李偉* 大内可人** 中園与一***

Effect of Some Side Holes of a Resonance Tube in the Water Music Instrument on the Radiated Sound

by

I Ri, Yoshito OHUCHI and Yoichi NAKAZONO

(Received: September 30, 2015, Accepted: February 24, 2016)

Abstract

Tubes of many different lengths are needed to emit a musical scale from the resonance tube of the water music instrument. In order to downsize the instrument, we can perforate the resonance tube and reduce its number or adjust its length. With the conventional study, the acoustical properties were measured with water continuously running through the plugged tube. However, when you play the water music instrument, its hole cannot be kept closed. We need a mechanism for matching the time of water droplets reaching water surface with that of closing the hole for a short time. Various kind of sounds are generated depending on the number of holes and its location on the resonance tube and its thickness. In this study the mechanism of water music instrument as mentioned above has been made clear and its musical performance has been demonstrated.

Key Words : water music instrument, downsizing, side holes, resonance tube

1. はじめに

楽器は空気振動を利用するものが一般的であるが、水の音を利用して音楽を演奏する楽器はまだ見られない。雨音や水琴窟の音のように、人が水の音を聞いたときに癒しの気持ちを感じることができるものもある。本研究では、水滴が水面に落下したときに発する音を利用した水の楽器を開発した^{1)~3)}。初期に開発したものは高さが2mで1m四方の大きさであった。その後、よりコンパクトな大きさで31本の共鳴管を有する水の楽器を製作⁴⁾したが、それでも500×400×700mmの大きさであった。これを更に小型化するには、共鳴管の数を少なくする方法が考えられ、その一案として共鳴管の側壁に孔を開けた笛吹きタイプがある。

本研究は笛のような側壁孔付き共鳴管を用い、その孔をソレノイドで開閉させ、音楽を演奏することが目的である。これまで、共鳴管側壁の孔数、孔位置、肉厚が音響特性に及ぼす影響の基礎研究を行ったが⁵⁾、このような研究は他にはまだ見られない。今回は1本の共鳴管で音階を作る方法として、図1の共鳴管設計のフローチャートに示すように、リコーダーと同じく、共鳴管に7つ

の孔を開けて、水滴が水面に衝突するタイミングと孔を開くタイミングを合わせた実験を行った。また音階の基音と共鳴管の理論によって、共鳴管の孔位置と孔径を決定した。

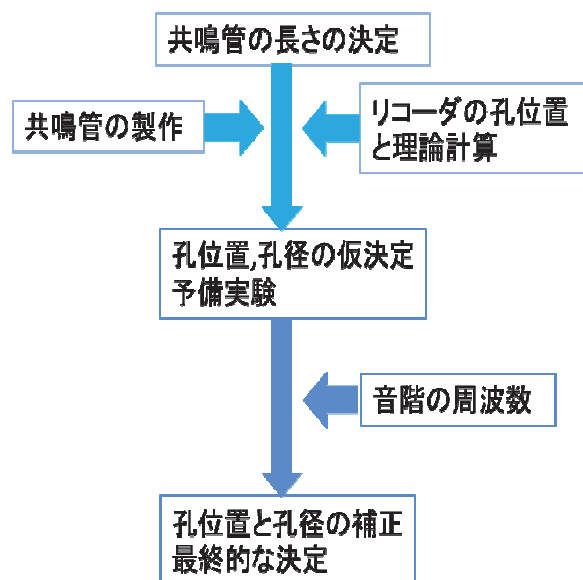


図1 共鳴管設計のフローチャート

2. 実験装置及び方法

実験装置の概略図を図2に示す。上部の水タンクから

* 大学院産業工学研究科情報工学専攻2年

** 基盤工学部医療福祉工学科教授

*** 元産業工学部機械システム工学科教授

電磁弁までの間隔は 750mm である。電磁弁の出口側にノズル（出口直径 3mm）を取り付け、このノズルから水が噴出されることによって、水滴は共鳴管の水面に衝突し、気泡振動による音が発生する。下部の水を受ける容器は 360mm×360mm×360mm のアクリル製である。また、下部容器からのオーバーフローにより、容器に落下した余分の水は排出されるので、水位は一定に保たれる仕組みになっている。

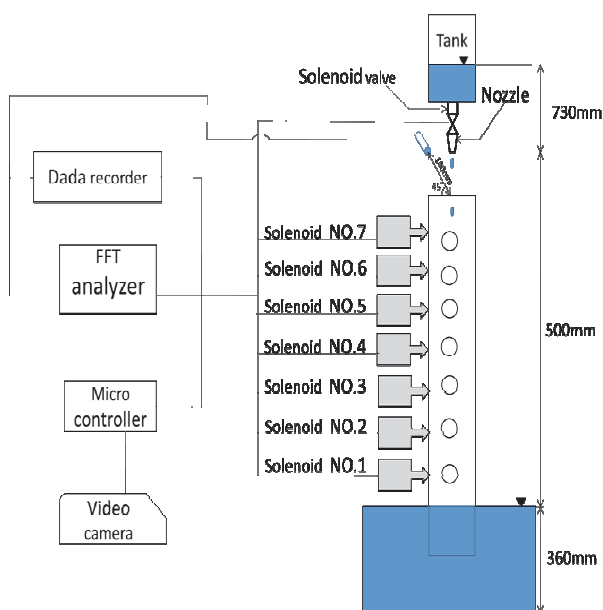


図2 実験装置の概略図

図3に、共鳴管とソレノイドを取り付けたときの写真を示す。

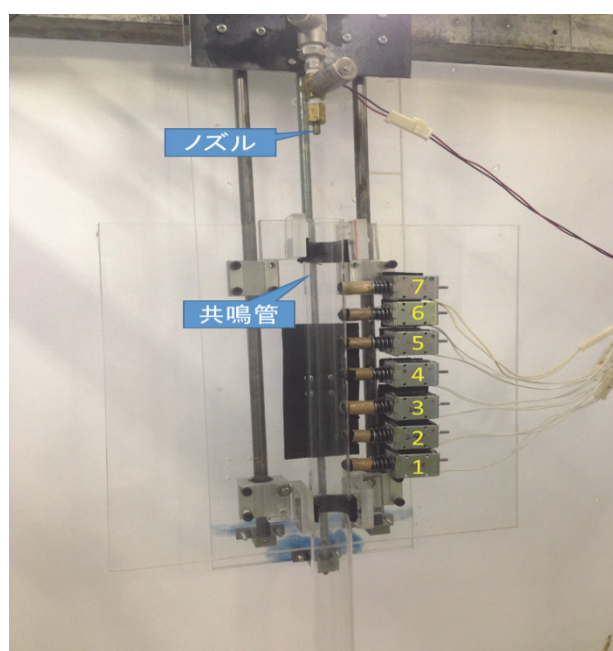


図3 実験装置の写真

図1の共鳴管設計のフローチャートに基づき製作した共鳴管の形状を図4に示す。共鳴管の長さ425mm（基音はソ音に相当）、内径 30mm、肉厚 2mm で、側壁孔の孔径はリコーダーを参考にして 8mm~12mm とした。リコーダーを参考にして側壁の孔数は 7 個とし、それぞれの孔番号を水面から順に 1~7 番とする。これらの位置にプッシュ式ソレノイド（タカハ機工 CBS1240 型 24V）を設置し、ソレノイドの先端部に孔を閉じるための半丸形状をしたスポンジを取り付けた。マイコンからの信号がない（OFF）場合、孔を閉じ、信号が入力（ON）したときに孔を開くようになっている。

音響測定はマイクロホン共鳴管の開口端から 100mm、角度 45°の位置に置き、共鳴によって発生した音を騒音計（C 特性）（小野測器社製 LA-4350）で収集し、FFT アナライザー（高速フーリエ分析器、小野測器社製 FC-350/360 型）に接続して周波数分析した。同時にデータレコーダ（OMRON 社製 ZR-MDR10 型）に時系列音信号を記録した。さらに水面への水滴の落下と気泡の形成・崩壊過程を高速ビデオカメラ（1000 fps）で記録した。水滴が水面へ衝突する時刻や気泡振動音が発生する時刻はデータレコーダに記録した時系列音とビデオカメラの映像を利用して求めた。

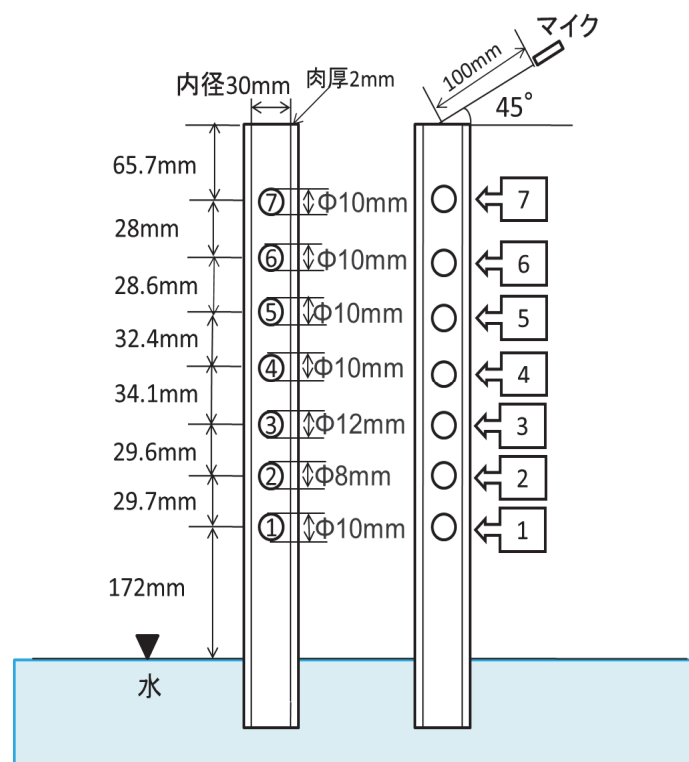


図4 共鳴管の形状

3. 孔を有する共鳴管の共鳴音の計算

図5に共鳴音計算のための共鳴管概略図を示す。音源から開口端までの距離を l_t 、音源から最初の孔の中心までの距離を l_1 、この孔の中心から次の孔の中心までの距離を l_2 としていき、最後の孔の中心までの距離を l_n 、最後の孔の中心から開口端までの距離を l_{n+1} とする。

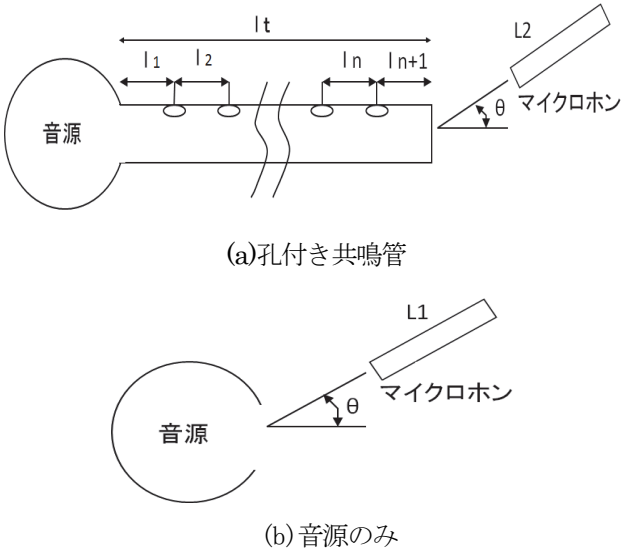


図5 共鳴管概略図

音響四端子の理論により、音響回路と4個の端子をもった電気回路は等価であり、音響四端子回路において、入り口の音圧と体積速度を p_1, U_1 、出口の音圧と体積速度を p_2, U_2 とすると式(1)のように表される。

$$\begin{bmatrix} p_1 \\ U_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_2 \\ U_2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

ここで A, B, C, D を四端子定数とよび、それぞれ開放伝達係数、短絡伝達インピーダンス、開放電圧アドミタンス、短絡伝達係数である。また、側壁孔付きの共鳴管の四端子定数は l_1 区間の四端子定数 (a_1, b_1, c_1, d_1) と孔部分の四端子定数 ($1, 0, 1/z_1, 1$) の行列の積として計算され、共鳴管全体の四端子定数は次式のように表される。

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} a_1 & b_1 \\ c_1 & d_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 1/z_1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_2 & b_2 \\ c_2 & d_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 1/z_2 & 1 \end{pmatrix} \dots \\ &\dots \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 1/z_n & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_{n+1} & b_{n+1} \\ c_{n+1} & d_{n+1} \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、 a_n, b_n, c_n, d_n は次式で表される⁶⁾。

$$\begin{pmatrix} a_n & b_n \\ c_n & d_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos kl_n & iz_o \sin kl_n \\ i \frac{1}{z_o} \sin kl_n & \cos kl_n \end{pmatrix} \quad (3)$$

ただし

$$z_o = \frac{\rho_0 C_0}{S}$$

また、

$$z_n = R_n + iS_n$$

$$R_n = \frac{16}{dh_n^3} \sqrt{\frac{\mu \rho_0 f}{\pi}}$$

$$S_n = R_n + \frac{8f\rho_o \left(t + 2\beta \frac{dh_n}{2} \right)}{dh_n^2}$$

である。上記の表示記号は、 C_0 : 大気音速、 ρ_0 : 大気密度、 t : 肉厚、 dh : 孔径、 f : 周波数、 β : 開口端補正值、 S : 管の断面積、 κ : 波長定数、 i : 虚数単位、 μ : 粘性係数である。孔を有する共鳴管の共鳴音レベル (RL) は次式で表される。

$$RL = L_2 - L_1 = SPL_2 - SPL_1 = -10 \log |D|^2 \quad (4)$$

但し、 $L_1 (SPL_1)$ は音源からの音の音圧レベル (dB)、 $L_2 (SPL_2)$ は共鳴管から放射された音の音圧レベル (dB) である。 D は式(2)の左辺行列における2行2列目の要素である。

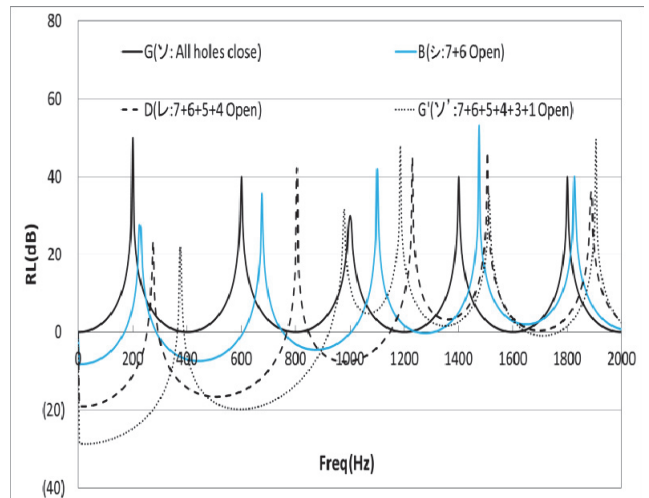


図6 計算結果

図6は共鳴音レベル RL の理論計算値を示す。孔位置と孔数による共鳴音の規則的な変化が見られる。孔全閉じの G (ソ音 200Hz) より孔 7,6 番開きの B (シ音 230Hz) は音圧のピークが高周波数側に移動する。また孔 7,6,5,4 番開きの D (レ音 325Hz)、及び孔 7,6,5,4,3,1 番開きの G' (高いソ音 393Hz) は音圧のピークが更に高周波数側に移動する。以後共鳴周波数の高いソ音は低いソ音と区別するためソ' と明記する。開いた孔数が多くなると、音圧の第 1 のピークが高周波数側に移動することがわかる。

4. 実験結果

図7に電磁弁の開閉、ソレノイド作動と共鳴音の関係を示す。



A(311ms) B(366ms) C(500ms)

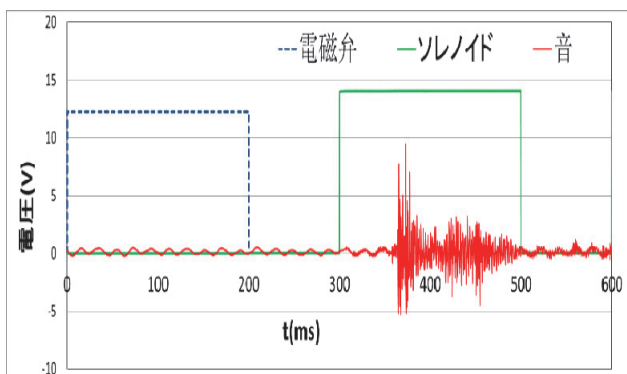


図7 電磁弁が作動後の気泡の可視化と電磁弁の開閉、ソレノイドの開閉、及び共鳴音の時間変化の関係

図7より電磁弁を ON にして水滴を落下させると、約 300ms 後に水滴は水面に衝突する (図7写真 A)。同時にソレノイドを ON にして作動させる。図7写真 B のように 366ms 付近で気泡振動が生じ、そのときソレノイドが完全に開く。約 500ms の時刻で気泡振動が終了し (図7写真 C)、ソレノイドの作動は終了して孔を閉じる。気泡振動の発生音と孔の開くタイミングを合わせる場合は、

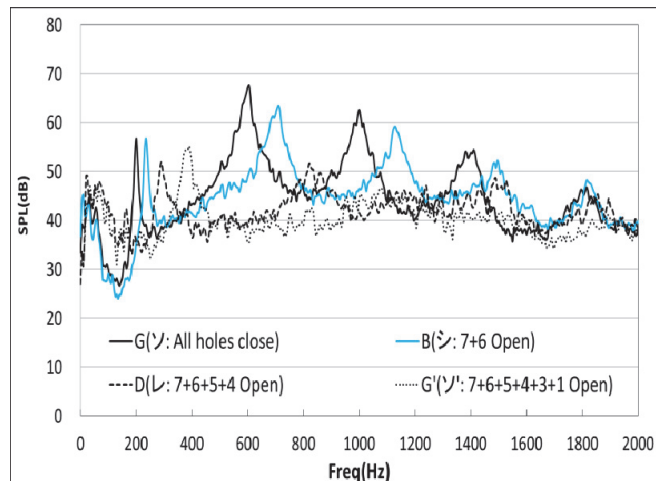


図8 音圧スペクトル(平均値)

ソレノイドの作動時刻は電磁弁の作動時刻より 300ms 遅らせたときとタイミングがよく合う。またソレノイドと電磁弁の作動時間を同じにした方が良い。図8は共鳴管から放射された音の音圧スペクトルを示す。図は電磁弁の作動時間を 200ms 一定にして 20 回落下したときの加算平均音圧スペクトルである。

図中の基音は G (ソ 200Hz)、B (シ 235Hz)、D (レ 320Hz) 及び 1 オクターブ高い G (ソ' 390Hz) で、図6の共鳴周波数の計算値とほぼ一致しているが、開いた孔数が 4 個以上になると音圧レベルの第 2 次共鳴音のピークが徐々に不明瞭となる。原因としてソレノイドの開閉振動が共鳴管に影響したためと思われる。それらの開閉振動を減らすのは今後の課題である。

実際の音楽演奏では、常に音階が変化し、また一つの音階の時間も 80ms 程度から 600ms の範囲でばらつく。音楽にもよるが、より利用頻度の多い時間は 250ms 程度である⁶⁾。音階と音階の間の休止の時間も短い。また水の楽器の場合、ソレノイドが ON/OFF する時間と孔開閉のタイミングが設計した時間に合うかどうかも重要である。そこで、ここでは孔の開閉が、音楽演奏での音階の変化に対応できるかどうか、また発生音が求める音階の音を発生しているかどうかの基礎実験を行った。

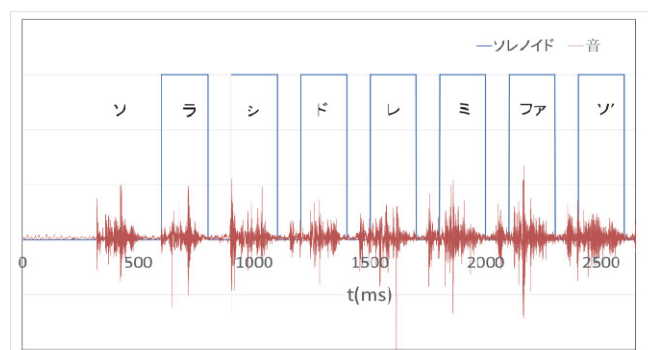
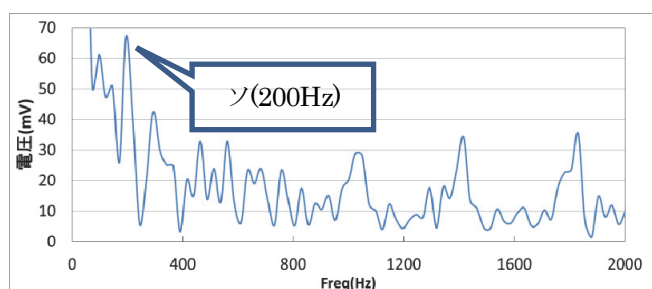


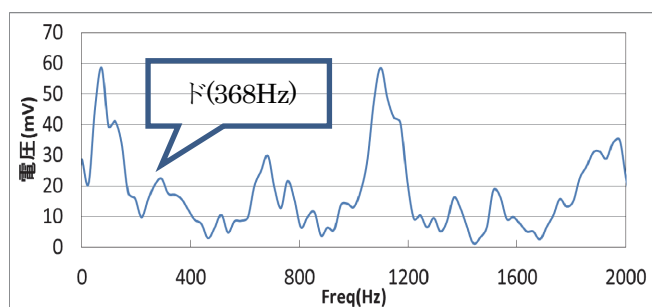
図9 1 オクターブの時系列音

図9は孔数を変化させたときの時系列音を示す。基音がソ音から(孔全閉じ)、高いソ'音(7,6,5,4,3,1番孔開き)まで、1オクターブ音域の演奏にうまく対応するかどうか確認した。電磁弁を200msONと100msOFFを繰り返し、それぞれの水滴が水面に衝突するタイミングに合わせてソレノイドを作動させて各音階に対応する孔を塞いだ。そのときの共鳴音を録音した。図9から、共鳴音とソレノイドの作動はタイミングがよく合うことがわかる。しかし、シ音(7,6,5番孔開き)から高いソ'音まで、ソレノイドがOFF状態のときにも音が発生していることが分る。それらの音はソレノイドが孔をふさぐときの振動音だと思われる。振動の影響については後述する。

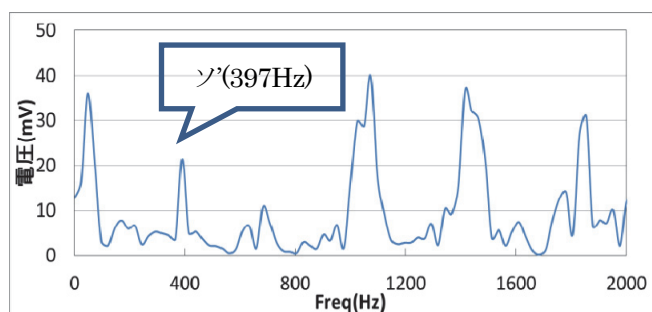
図10は図9の代表的な音階の時系列音をフーリエ解析した音圧スペクトルを示す。60Hzに鋭い音圧のピークがみられるが、これは電氣的なノイズで本論では対象外である。この音圧スペクトルは多くのデータの平均値ではないので、分析した音圧スペクトルの形はきれいではない。



(a) 孔全閉じ



(b) 7,6,5 番孔開き



(c) 7,6,5,4,3,1 番孔開き

図10 音階の音圧スペクトル

ない。しかし孔数の変化により音圧の第1次共鳴音のピークの規則的な変化は見られる。孔全閉じの低いソ音(200Hz)から、7,6,5,4,3,1番孔開きの高いソ'音(400Hz)まで、開いた孔数が増えると、音圧レベルのピークが高周波数側に移動する。なお、1オクターブの音域をもつ演奏が可能となった。

ソレノイドの開閉振動による音が気柱共鳴音に影響した。そこでこれらの分離を試みた。共鳴管の側壁に孔を有する水の楽器からの放射音の音圧 $P_{音+振動}$ は、音源からの音を含んだ共鳴管の気柱共鳴の音圧 $P_{音}$ とソレノイドの開閉振動による発生音の音圧 $P_{振動}$ の和で表わされるので、気柱共鳴音の音圧レベル $SPL(dB)$ は

$$SPL = 20 \log \frac{P_{音}}{P_0} \quad (5)$$

$$P_{音} = P_{音+振動} - P_{振動}$$

となる。図11は7番目の孔を開け(ラ音)、他の孔は閉じたときの音圧スペクトルである。図中の“音+振動”とは水滴を落下させ、またソレノイドを作動したときの結果で、“振動”とは水滴を落下させないでソレノイドのみを作動させたときの結果である。

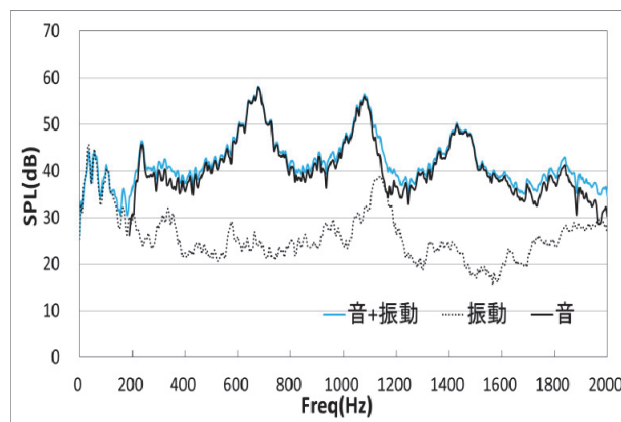


図11 7番開きの場合の音と振動の分離

“音”は式(5)より求めた音圧レベルである。ソレノイドによる孔閉じが少ない場合、即ち7番孔を開けた場合、気柱共鳴音の音圧スペクトル(図11:音+振動)と計算により振動分離した音圧スペクトルはほぼ一致しているから孔閉じが少ない場合はソレノイドによる振動の影響はない。

図12は7,6,5,4,3,1番孔を同時に開けたときの振動音と振動分離した音の音圧スペクトルを示す。この場合基音はソ'音である。図から計算により振動分離したことによって、“音”の音圧スペクトルの周波数ピークがはっきりと見える。

及ぼす影響と低周波数音の改善), 2011 年度東海大学
大学院産業工学研究科修士論文.

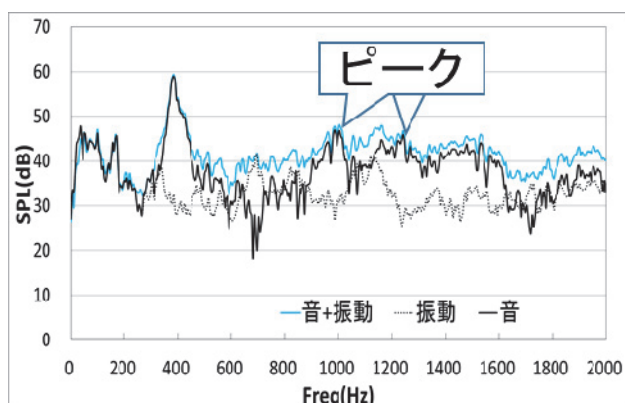


図 12 7,6,5,4,3,1 番開きの場合の音と振動の分離

5. 結論

水の楽器における共鳴管の側壁孔の影響について実験した結果、以下の結果が得られた。

- (1) 開閉させる孔数を7個まで増やしたときの共鳴管の共鳴周波数は孔数、孔位置、孔径が変化しても理論によって予測できる。
- (2) 実験により笛吹きタイプによる水の楽器の小型化は可能であり、また音楽の演奏ができることを確認できた。

今後の課題として以下のような項目がある。

- (1) 孔開閉時の振動を減らす。
- (2) 指を模したロボットを開発し、水の楽器による演奏を行う。
- (3) 水の楽器からの共鳴音を信号処理して、クリアな音が聴こえるようにする。

参考文献

- 1) 中園与一:楽器,特許第 3460670,(2003).
- 2) 中園与一・高山明久: 雨垂れを利用した楽器の開発, 日本産業技術教育学会誌, 45 巻 4 号 (2003) pp183-189.
- 3) 中重友和・大竹慶一・中園与一:可動式水の楽器の試作, 日本産業技術教育学会第 20 回九州支部大会要旨集 (2007) pp33-34.
- 4) 戸高敬史・長瀬輝彰・中園与一・大内可人: 水の楽器の小型化, 日本産業技術教育学会九州支部論文集, 17 巻 (2009) pp39-44.
- 5) 李偉・中園与一・大内可人: 水の楽器における側壁孔付き共鳴管からの放射音の音響特性, 日本産業技術教育学会第 26 回九州支部大会要旨集(2013) pp53-54.
- 6) 長瀬輝彰: 水の楽器の基礎研究 (各因子が気泡振動へ