

# 水琴窟より発生する音の解明について

横 井 雅 之<sup>†</sup>

## A Study on Sound Generated from Suikinkutu

YOKOI Masayuki<sup>†</sup>

### 要 旨

日本庭園によく設置されている水琴窟は大きな甕の底に穴をあけて、ひっくり返して土の中に埋めて、その中に水を張って、上の穴から柄杓にくんだ水をたらすと、水滴が甕の中に溜まっていた水と反射して、涼やかな音発生をする。この音は癒しの効果があるとされている。本報告では、実際に存在する水琴窟の音響データを分析するとともに、ガラス瓶で製作したモデルについて、実験的・理論的に検討した。

キーワード：水琴窟，ヘルムホルツ共鳴，日本庭園

### 1. はじめに

「水琴窟」は手水鉢の近くに設けられた地中に比較的大きな甕をひっくり返して埋め、甕の底に当たる箇所に小さな穴をあけ、上から水をたらす（落水と称する）と、落水と底にたまった水（溜水と称する）が甕の中で反響して穴から聞こえるというものである。寺院や日本庭園によく設置されている。図1に構造図と全体図の一例を示す。<sup>(1)</sup>

これは平山によると、「わが国では古来梵鐘の音を享樂したり、松風の音に喜悅を感じたり、風鈴の音を興愛したりする風習が多分にあり、人々は音響に対する頗るデリケートな感覚を豊富にもっており、その態度は音そのものが本来所有しているところの反響や余韻などを純粹に鑑賞しようとするものである。水琴窟の場合も全くその態度の現われの一つに他ならない。」と述べている。<sup>(2)</sup>

水琴窟の起源は江戸時代とも言われているが、定かでない。明治時代にブームになったが、その後廃れてしまった。しかし1980年代にマスコミなどに取り上げられ、再びブーム

---

<sup>†</sup> (元) 大阪産業大学短期大学部 自動車工学科教授

草 稿 提 出 日 10月9日

最終原稿提出日 10月22日

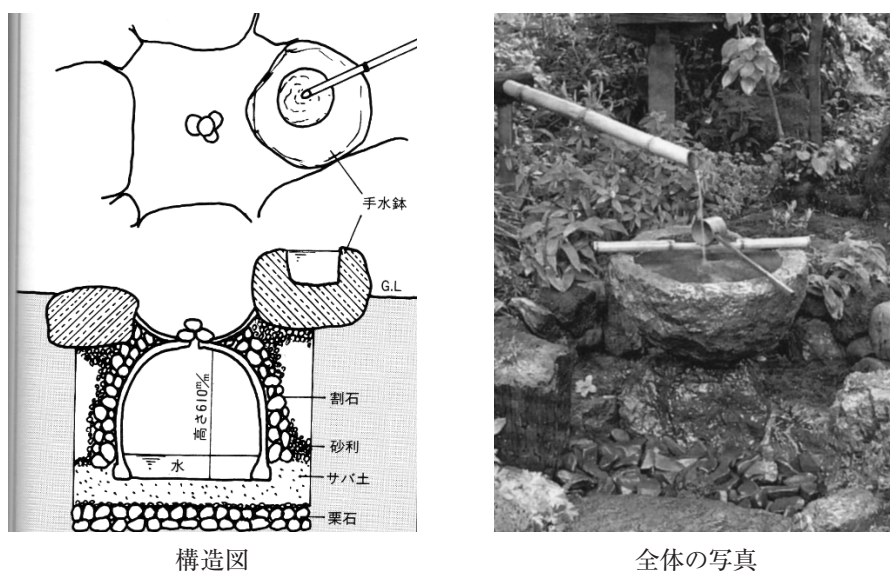


図1 典型的な水琴窟の一例

になった。水滴が甕の内壁に反射し、だんだん広がっていく音は聴く人々に安らぎや癒しを与えるといわれている。さらに後述するように、近年は水琴窟の音を手軽に家で楽しむように、小型・卓上用の水琴窟が販売されている。これは、ポンプを内蔵して水を循環させて、音を発生させるものである。

ここでは、著者の近所の水琴窟の音を収録・分析した。しかし水琴窟は甕の大きさなどにより発生する音の大きさや周波数なども変化するもので、一概に比較することは難しい。

また、水琴窟の音の発生についての詳細を求めるために、小型のガラス製のビンを使用した簡易型の水琴窟を製作し、発生条件を求め、簡単な理論解析も併せて行った。

## 2. 実在の水琴窟の音

図2、図3は京都府長岡京市の西山に位置する柳谷観音（楊谷寺）にある水琴窟の説明板と水琴窟である。なお、ここでは、水琴窟を心琴窟と呼んでいる。これは柳谷観音が目の治療で名高いために、目で見るとは、心で聴くためと称している。図2には、柄杓で水をすくって、水琴窟の上をかけ、さらに脇に置いてある竹筒で聴くと良く聞こえることが示されている。図3は水琴窟の全体図で、手水鉢、柄杓、心琴窟、さらに左側には竹筒が立てかけてある。水琴窟から発生する音は非常に小さいので、竹筒は水琴窟の上においてある石に先を当ててもう一方を耳にあてて音を聴くためにある。



図2 水琴窟の説明板



図3 水琴窟の全体図

一般に、水琴窟の音の周波数は一定でなく、数種類発生する。これは、水滴の大きさなどの違いによるものと考えられる。この水琴窟でも一番多く発生する周波数は約950Hzで、約50%の確率である。残りは675Hz、3520Hzが発生する。675Hzおよび950Hzの音は他の周波数成分がほとんどなく、音が比較的澄んでいて、余韻が長いのが特徴である。図4は周波数分析結果を示す。ピーク周波数は950Hzである。

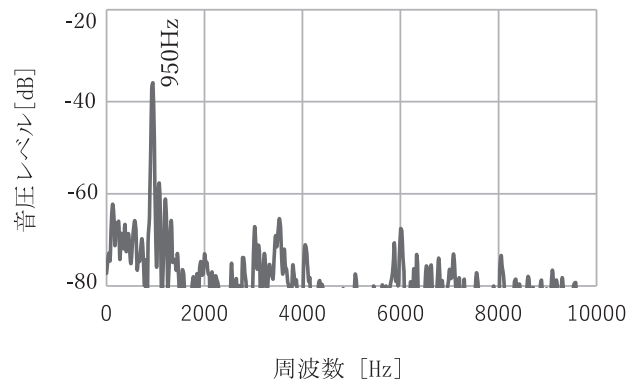


図4 柳谷観音（楊谷寺）にある水琴窟の周波数分析結果

### 3. 水琴窟のモデル化

#### 3.1 実験モデル

実際の水琴窟は主に陶器製で全体が地中に埋められているが、近年は水琴窟の音を手軽に家で楽しめるように、小型・卓上用の水琴窟が販売されている<sup>(3)</sup>。図5に外観図を示す。



図5 卓上型水琴窟<sup>(3)</sup>

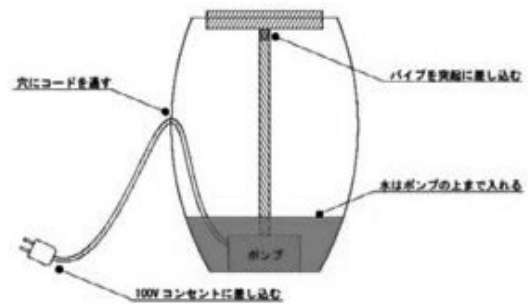


図6 水琴窟の内部構造<sup>(3)</sup>

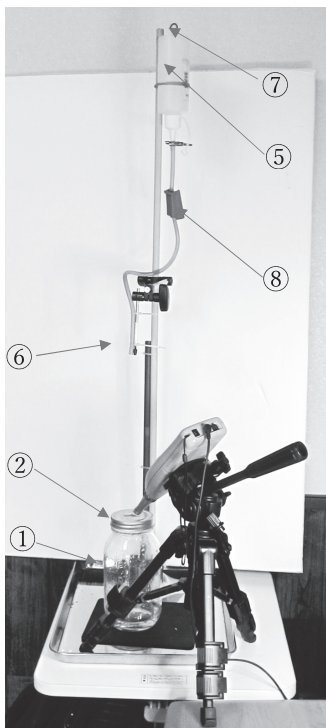


図7 装置全体図



図8 瓶の中央に開けた穴と騒音計

また図6に内部詳細を示すが、ポンプを内蔵して水を循環させて、上から水滴を落とし、音を発生させるものである。

本実験では、陶器の代わりにガラス瓶を使用した。図7の装置全体図を示す。図8は瓶の中央部の拡大図であり、開けた穴と騒音計を示す。瓶①は直径90mm、高さ150mmであり、容積は880cm<sup>3</sup>である。蓋②はアルミニウム製であり、中央に直径10mmの穴があけてある。音は蓋の穴から15mmの位置に騒音計（NL-31、リオン製）のマイク③および騒音計④が設置されている。水滴は高さ850mmに設置された容積200cm<sup>3</sup>のポリタンク⑤からパイプを通り、高さ400mmに置かれた⑥パイプ先端から滴下する。水滴は1回に約0.09gである。水滴の流量はポリタンクの底に付けた調整ねじ⑦およびパイプの途中の流量調節ピンチ⑧により調整する。実際の水琴窟では、甕に水があふれないように、ある程度留水がたまると外へ排水するようになっているが、本実験の装置では省略した。これは卓上型なので、ある程度水が溜まると、こぼしてほぼ一定になるようにした。

### 3.2 実験モデル（土中モデル）



図9 ポリバケツに埋め込んだガラス瓶の水琴窟

ここでは、3.1で使用したガラス瓶と同じ物を使用し、図9のように容量10リットルのポリプロピレンバケツの中央にビンをうめて、周囲を土で覆った。これは、実際の水琴窟が地中に埋められているので、外に出したままの場合と比較した。その他の実験条件は同じにして、水琴窟の音を計測した。



## 4. 実験結果

一般に甕の高さに比較して留水の高さは1/10程度になっているものが多いとされている。<sup>(1)</sup> また、実物は土中に埋められているので正確な値は不明なことが多いが、本実験では落水の高さを30mm容量100cm<sup>3</sup>とした。(ビンの高さの約1/5, 容量では1/9に相当)

発生した音圧波形は典型的な衝撃音であり、水滴が水面に跳ね返る状態によって周波数に変化すると思われる。主に175Hz, 2250Hz, 3250Hzおよび4450Hzの音が発生した。発生確率は3250Hzが一番多かった。

また、175Hzの音は「ポン」という他の音に比較してややレベルが低い音であり、周波数分析結果よりあまり高周波成分は含まれなかった。図10の音圧波形と周波数分析結果を示す。また、水滴が水面に跳ね返って「ポチャン」という音を立てる時は主に2250Hz, 3250Hzおよび4450Hzの音が発生した。

水滴の質量が0.05gの時は、発生する音は175Hzでレベルも低かったが、水滴の質量を0.09gと2倍近く増やすと、175Hzの発生割合が小さくなり、2250Hz, 3250Hzおよび4450Hzの音の発生割合が増加した。水滴の質量をさらに増加して0.12gまで増加させたが、発生する周波数割合はあまり変化しなかった。これは、一つには水滴が小さいと瓶を加振するだけの力を発生させることができないのではないか。そのためにヘルムホルツ共鳴の発生割合が大きくなったと考えられる。

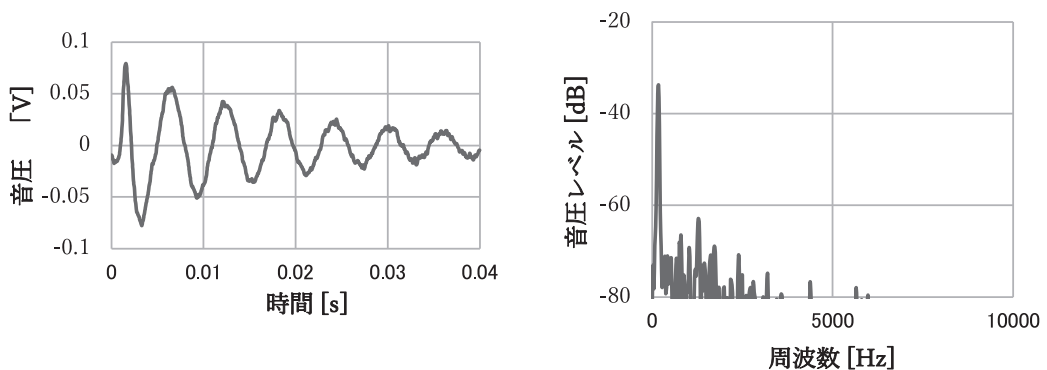


図10 175Hzの水琴窟の音圧波形と周波数分析結果

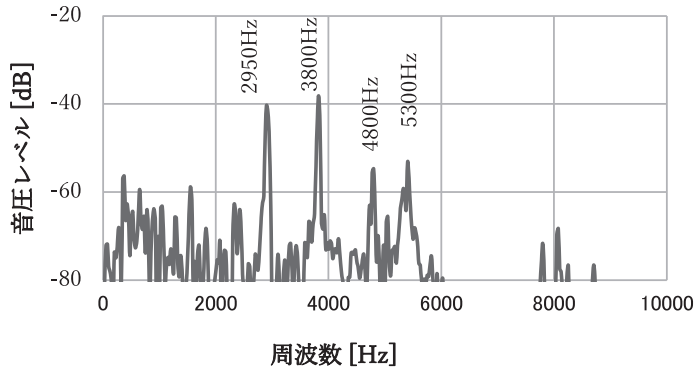


図11 瓶を打撃した時の固有振動数

図11は瓶の側面を半径方向に打撃した時の発生した音の周波数分析結果である。固有振動数は2950, 3800, 4800および5300Hzであった。これらの振動モードを調べるとそれぞれ(2-0), (3-0)および(4-0)モードであった。ここに(m, n)は節直径m本, 節円n本のモードを表す。また, 4800Hzは後述の理論計算より(0-1)モードと思われる。175Hzについては, ヘルムホルツの共鳴によるものと思われる。

図12は発生した音のうち3250Hzの音圧波形と周波数分析結果を示す。

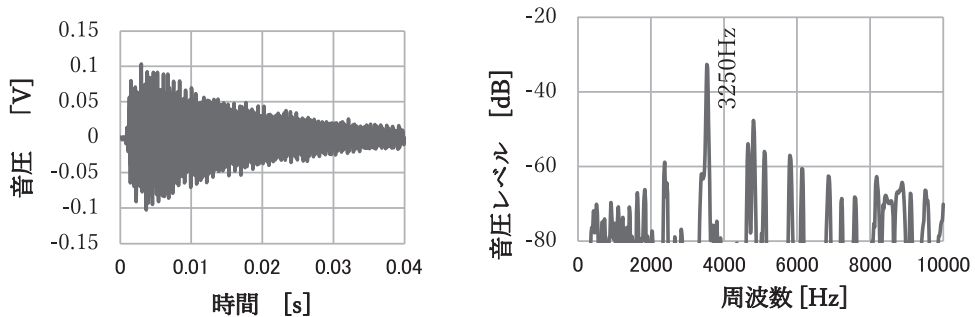


図12 ガラス瓶による水琴窟から発生する音圧波形と周波数分析結果

図13に土中に埋めた場合の水琴窟の音圧波形と周波数分析結果を示す。卓上に置いた場合とほぼ同じ音が発生した。発生した音圧波形は典型的な衝撃音であり, 周波数は多様であったが, 主に175Hz, 2250Hz, 3250Hzおよび4450Hzの音が発生した。発生する確率は3250Hzが一番多かった。

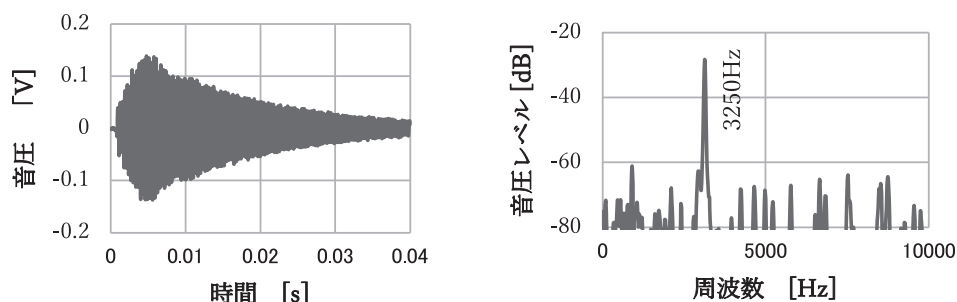


図13 土中に埋めたガラス瓶より発生した音圧波形と周波数分析結果

#### 4.1 理論解析

ふたをした瓶を両端が閉じた円筒空間として考え、この空間での共鳴を考える。

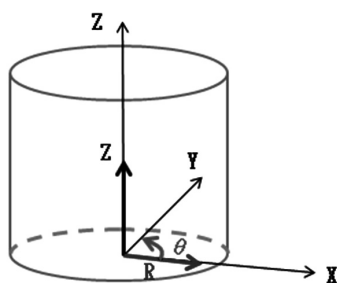


図14 円筒座標系

図14には、円筒座標系を示す。平尾による理論解析<sup>(4)</sup>を参考にする、軸対称と仮定し、速度ポテンシャルを変数分離して、

$$\phi = R(r) \cos k_z z e^{i\omega t}$$

$\cos k_z z$ は底 $z=0$ で速度が零という境界条件を満足する。

以下の3つの場合について固有振動数を求める。

まず、瓶や穴の寸法を定義しておく。 $c$ : 音速 [m/s] ここでは344 [m/s] とする。

$S$ : 穴の断面積 [ $\text{m}^2$ ],  $d$ : 穴の直径 [m]  $S = \frac{\pi d^2}{4}$ ,  $V$ : 瓶の容積 [ $\text{m}^3$ ]

$V = AH$ ,  $A$ : 瓶の断面積 [ $\text{m}^2$ ]  $A = \frac{\pi D^2}{4}$ ,  $D$ : 瓶の内径 [m],  $H$ : 瓶の高さ [m],



$L'$ ：開口部の有効長さ [m],  $L' = L + 0.75d$   $L$ ：ヘルムホルツ共鳴と考えた場合の首部分の長さ [m]

数値計算において,  $c=344$  [m/s],  $d=0.01$  [m],  $D=0.09$  [m],  $H=0.15$  [m],  $L=0$  [m] を用いる。

なお,  $m$ は節直径,  $n$ は節円の数を表す。

$$\frac{w_{m,n}^2}{c^2} = \frac{m^2}{H^2} \pi^2 + \frac{(j_{m,n})^2}{\left(\frac{d}{2}\right)^2}$$

ここに,  $j_{m,n}$ はベッセル関数

(1) 円筒波共鳴と仮定した場合

$$m=0 \text{ とおいて, } f_{0,n} = c \frac{\pi (j_{1,n})}{d}$$

$j_{1,n}$ はベッセル関数 $j_1$ の零点 (0, 3.832, 7.01...) である。

よって,  $f_{0,1}=4665\text{Hz}$ ,  $f_{0,2}=8841\text{Hz}$

(2) 平面波共鳴と仮定した場合

$$n=0 \text{ とおいて, } f_{m,0} = \frac{c}{2mH}$$

$f_{1,0}=1147\text{Hz}$ ,  $f_{2,0}=2294\text{Hz}$ ,  $f_{3,0}=3441\text{Hz}$

(3) ヘルムホルツ共鳴と仮定した場合

固有振動数 $f_0$ は次式で表される。

$$f_0 = c \sqrt{\frac{S}{VL}}$$

前述の数値を代入すると, 固有振動数 $f_0$ は約181Hzとなる。

これらの計算結果から, 175Hzの音はヘルムホルツ共鳴によると思われる。一方, 2250Hz, 3250Hzおよび4450Hzの音はガラス瓶の (2-0), (3-0) および (0-1) モードによるものと思われる。

## 5. まとめ

日本庭園によく付随している「水琴窟」について、実在の水琴窟の音を調べ、さらに小型の卓上式モデルを製作し、実験を行った。また、数値モデルによる解析も併せておこなった。

以下の結論がえられた。

- (1) 水琴窟から発生する音の周波数は一定でなく、水滴の大きさや落下状態に影響される。
- (2) 水滴が小さいときはヘルムホルツ共鳴による音が発生しやすい。
- (3) 水琴窟で発生する音は甕の固有振動数である。実際の水琴窟ではヘルムホルツ共鳴は見当たらなかった。多く発生するのは甕の円筒波共鳴および平面波共鳴による振動であると推測される。

## 参考文献

- (1) 龍居庭園研究所編、『水琴窟の話』，建築資料研究社，1995.
- (2) 平山勝蔵，庭園の水琴窟について，造園雑誌，22巻3号，1959，p.14-17.
- (3) 例えば，<http://www.daikinoutsuwa.com/blog1/2015/04/po000199.html>  
(参照日：2020年9月30日).
- (4) 平尾雅彦，音と波の力学，岩波書店，2013，p.93.