

注水したガラス瓶の振動解析

関西大学 環境都市工学部 建築学科
建築環境工学第 I 研究室
建 16-86 広瀬 智花
指導教官 豊田 政弘 准教授

目次

| | | |
|-----|--------------|----|
| 第1章 | はじめに | 1 |
| 1.1 | 研究背景 | 1 |
| 1.2 | 既往研究 | 2 |
| 1.3 | 研究目的 | 4 |
| 1.4 | 本論文の構成 | 5 |
| 第2章 | 数値解析の妥当性 | 6 |
| 2.1 | 計算条件 | 6 |
| 2.2 | 実験条件 | 9 |
| 2.3 | 比較 | 10 |
| 第3章 | 原因の検討 | 12 |
| 3.1 | 表面積の変化 | 12 |
| 3.2 | 容器内表面に水を沿わせる | 13 |
| 3.3 | 容器内表面から水を離す | 15 |
| 3.4 | 板に水を沿わせる | 17 |
| 3.5 | 板の密度を変化させる | 19 |
| 3.6 | 考察 | 21 |
| 第4章 | おわりに | 22 |
| | 参考文献 | 23 |

第1章 はじめに

1.1 研究背景

マンションやアパートなどの集合住宅で、貯水タンクの騒音問題がある。主に受水槽から圧送ポンプで水を送る際に発生する音が原因であり、住民に不快感を与えるため、トラブルのもとになりかねない問題である。この問題は解決に至っておらず、有効な解消方法を探す必要がある。

1.2 既往研究

既往研究として、富山県立大学の平原教授らによる「注水したガラスビン打音のピッチ」[1]、「注水したガラスビンの振動姿態の3Dレーザースキャニング振動計による測定」[2]に着目する。

「注水したガラスビン打音のピッチ」では、注水したガラスビンを傾けると、打音のピッチが傾斜角度と水量によって高くなる場合と低くなる場合があるという事実を紹介している。これを踏まえ、注水したガラスビンの打音を音響解析し、ガラスビンの傾斜角度と注水量による打音のピッチの関係を調べている。注水したガラスビンを様々な角度で同じ条件の下に叩くことができるガラスビン打音装置という機械を用い、0 ml～700 ml（100 ml 毎）を注水した8種類のガラスビンをそれぞれ0°～90°（15° 毎）の13通りで叩いて測定を行った。その結果は図1の通りである。

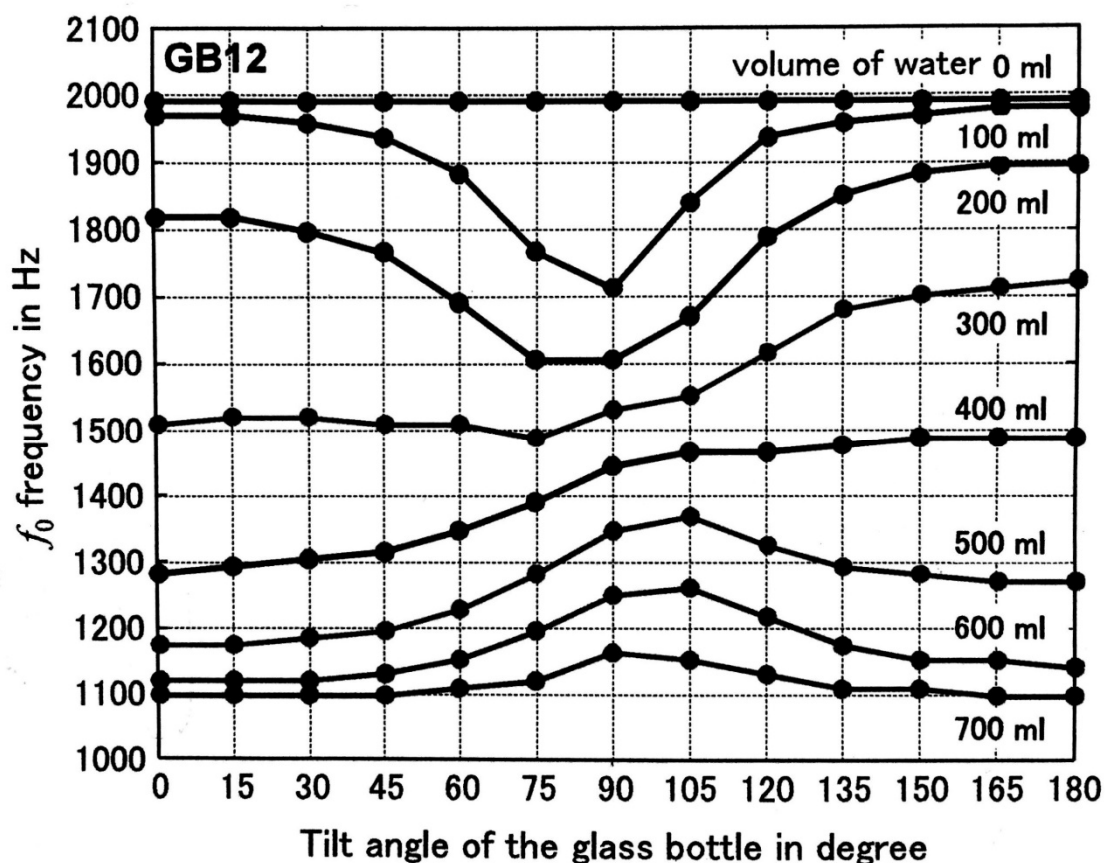


図1 注水したガラスビン打音のピッチ

このグラフに示されるように、傾斜角度が同じであれば、注水量が多いほど打音のピッチは低くなる。一方、注水量が 200 ml 以下であれば傾斜角度が 90° に近いほど打音のピッチは低くなり、注水量が 500 ml 以上であれば傾斜角度が 90° に近いほど打音のピッチは高くなることからわかる。

次に、「注水したガラスビンの振動姿態の 3D レーザースキャニング振動計による測定」では、上述の研究で示された不規則な周波数の変化が起きる現象への理解を深めるため、ガラスビンの振動姿態を測定している。

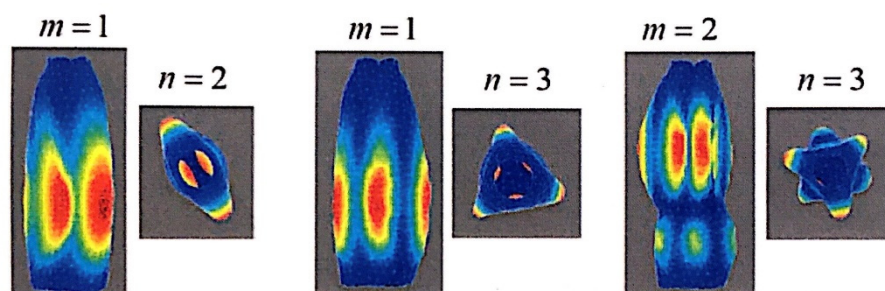


図 2 ガラスビンの振動姿態

図 2 は空のガラスビンの振動姿態である。(m:振動モードの長軸方向、n:周方向) 注水したガラスビンの振動姿態を観測した結果、打音のピッチを決める周波数は注水量とビンの傾斜角で異なったが、その振動モードと振動姿態は注水量とビンの傾斜角によらず全く同じであることがわかった。

1.3 研究目的

本研究は、既往研究で示されたガラスビンに起こる現象の原因を解明することで1.1節で述べた騒音問題の解消を目的とする。

ガラスビンを叩くとガラスビンが振動して打音が鳴る。また、ガラスビンに水を注ぐと、注水量が多いほど打音のピッチは低くなる。しかし、注水したガラス瓶を傾けると、打音のピッチは傾斜角度と水量によって高くなる場合と低くなる場合がある。本論文では、注水したアクリル容器の打音を解析し、容器の傾斜角度、および、注水量と打音ピッチとの関係を調べ、また、この現象への理解を深めるために、数値解析を用いたいくつかの非現実的な計算結果から考察を述べる。それに基づき、貯水タンクにおける騒音問題の解決策を提案する。

1.4 本論文の構成

本論文では、第2章で実測値との比較から数値解析の妥当性を検証する。第3章では非現実的な状況を模擬した計算を行い、原因の検討を行う。4章には本研究のまとめを述べる。

第2章 数値解析の妥当性

2.1 計算条件

ガラスビンの不規則な形をモデル化して解析を行うことが困難だと判断し、ガラスビンのかわりに直方体のアクリル容器（内寸 50 mm×50 mm×200 mm、壁厚 5 mm）を想定した。あらかじめアクリル容器でも同様の現象が起こり、またガラス瓶よりも音の高さの変動は少し小さくなることを確認した。解析には FDTD 法を用いることとし、容器内の水量を 0, 100, 200, 300, 400, 500 ml とした 6 種類のモデルを作成し、図 3, 4 のようにアクリル容器周辺の空気の解析領域を 300 mm×100 mm×250 mm とした。また、解析領域は完全吸収層（Perfectly Matched Layer: PML）で囲んだ。容器から 200 mm の位置にマイクロフォンを設置し、マイクロフォンを設置した側とは反対の面を一定の強さで叩くものとする。モデルを傾ける角度は既往研究に則り 0° ~180°（15° 毎）の 13 通りとするが、今回使用する容器は直方体であるため、対称性から 0° ~90°（15° 毎）の 7 通りの計算で十分である。従って、今回は、0, 100, 200, 300, 400, 500 ml の 6 種類の条件を 0° ~90° の 7 通りの角度、計 42 通りの計算を行う。図 5 に水量が 200 ml の場合の計算モデル例を示す。

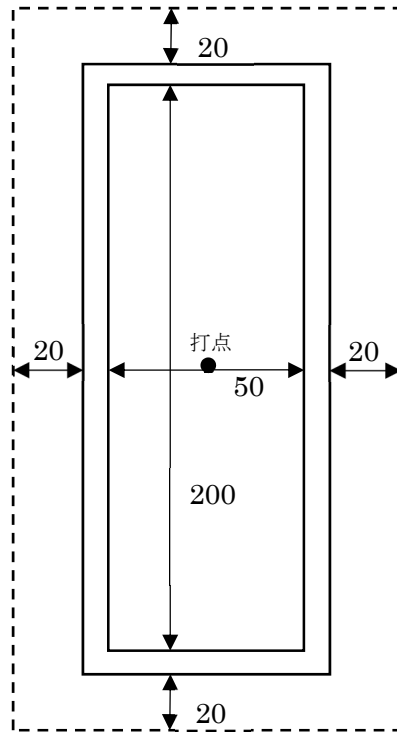


図3 計算用モデルと周辺領域 横面

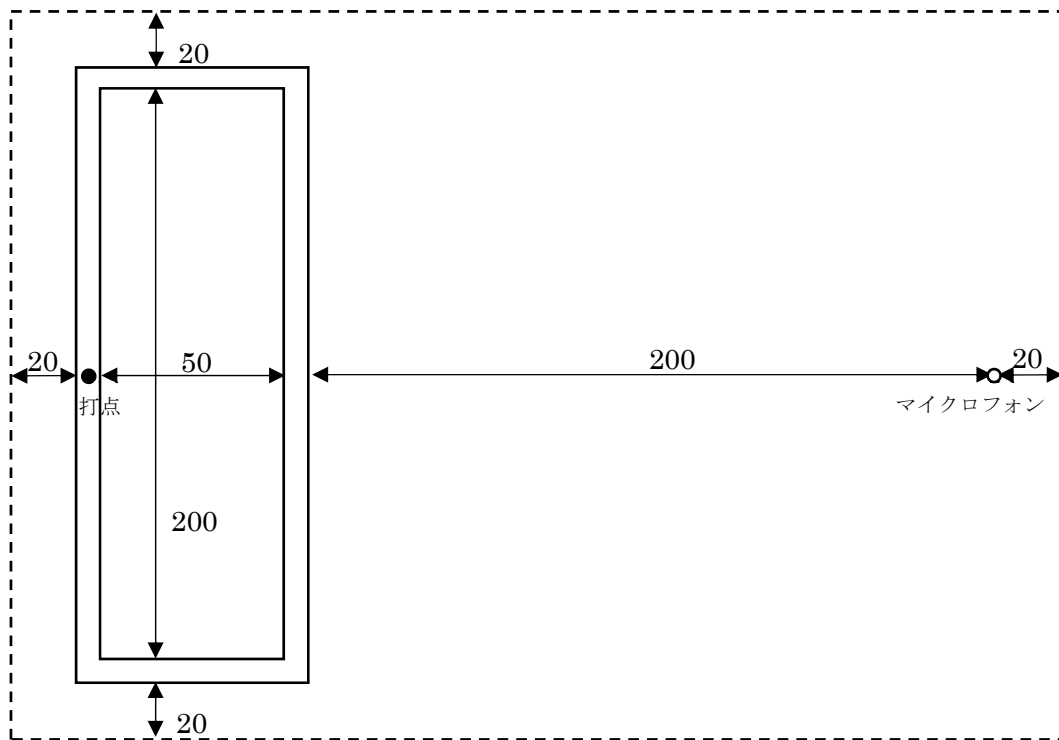
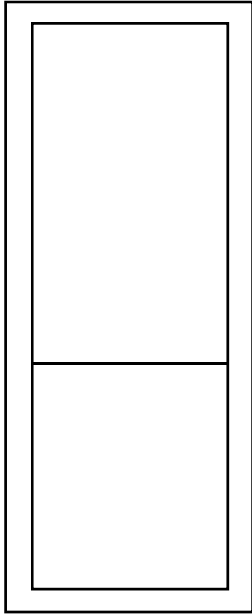
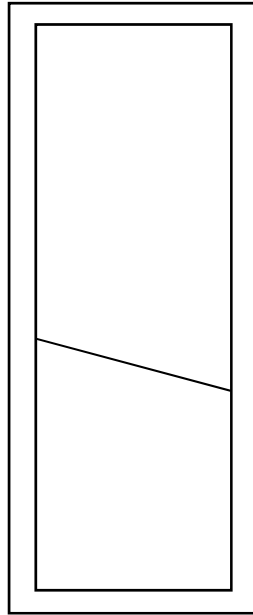


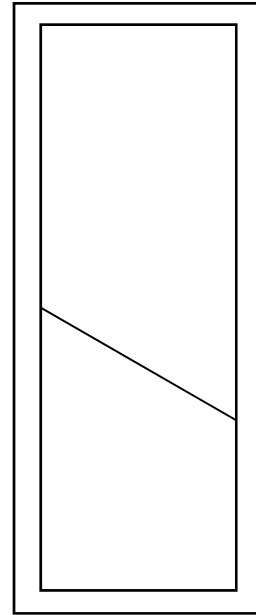
図4 計算用モデルと周辺領域 前面



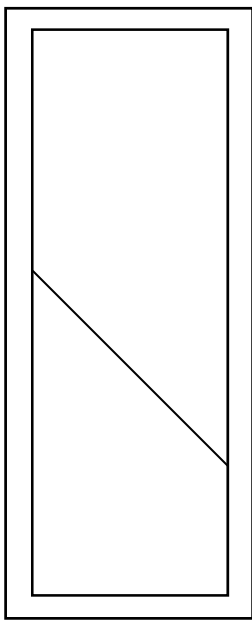
0°



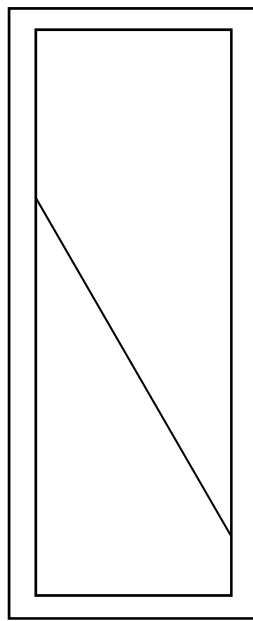
15°



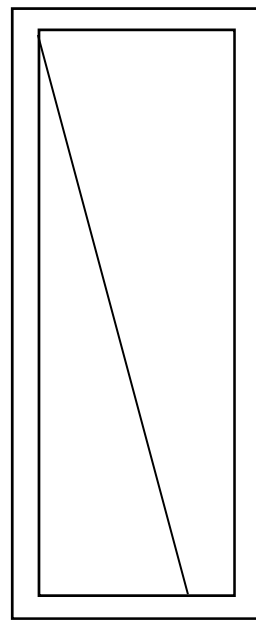
30°



45°



60°



75°

図5 200mlでの角度変化

2.2 実験条件

上記の数値解析が妥当なものであることを検証するために実験を行った。

まず、計算と同様に直方体のアクリル容器（50 mm×50 mm×200 mm、壁厚 5 mm）を作製し、容器内の水量を 0, 100, 200, 300, 400, 500 ml とした 6 種類の模型を用意した。それぞれの模型を無響室内で設置し、その模型の面の中心点から 200 mm の距離にマイクロフォンを固定する。その点の水平延長線と模型の反対側の面が交わる位置をハンマーで叩く。また、模型を設置する角度も計算と同様に $0^\circ \sim 180^\circ$ （ 15° 毎）の 13 通りの結果を得るために $0^\circ \sim 90^\circ$ （ 15° 毎）の 7 通り行う。従って、0, 100, 200, 300, 400, 500 ml の 6 種類の模型を用い $0^\circ \sim 90^\circ$ の 7 通りの角度で、計 42 通りの実験を行う。

今回の実験には既往研究で使用しているような特別な機械は使用できないため、図 6 のように無響室内に掛けてある鎖に模型をビニール紐で吊るし、人力でハンマーを可能な限り均等な力で叩くこととした。角度を変える際は吊るす紐の長さを変えることで調節した。マイクロフォンの音圧信号を解析し、それぞれの水量・角度での基音周波数を求めた。

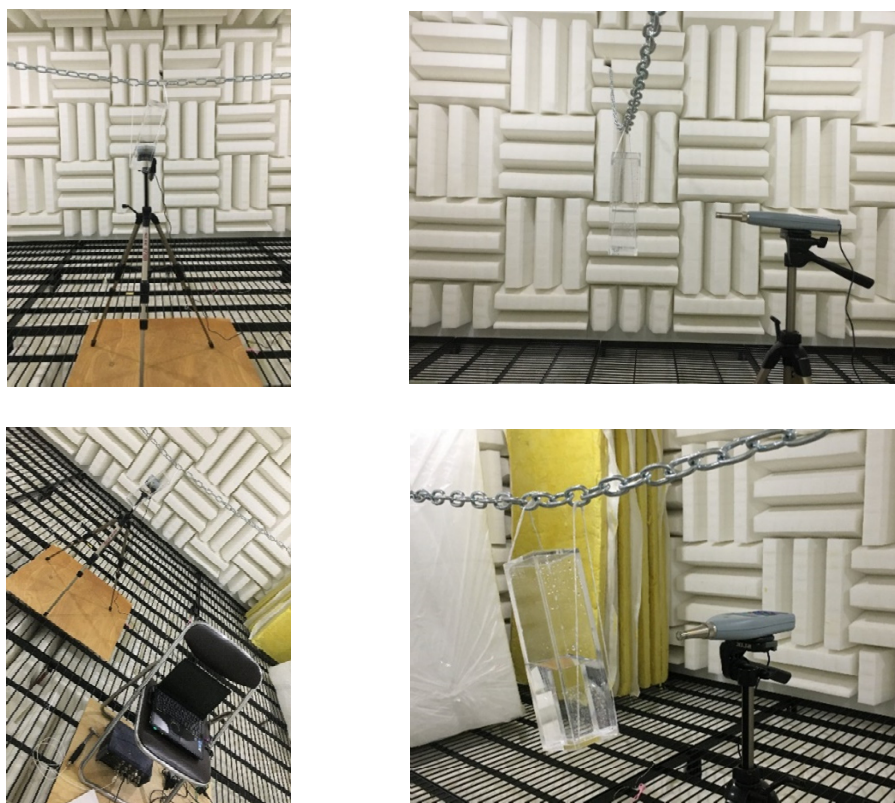


図 6 実験の様子

2.3 比較

計算と実験の結果をそれぞれ図7, 8に示す。

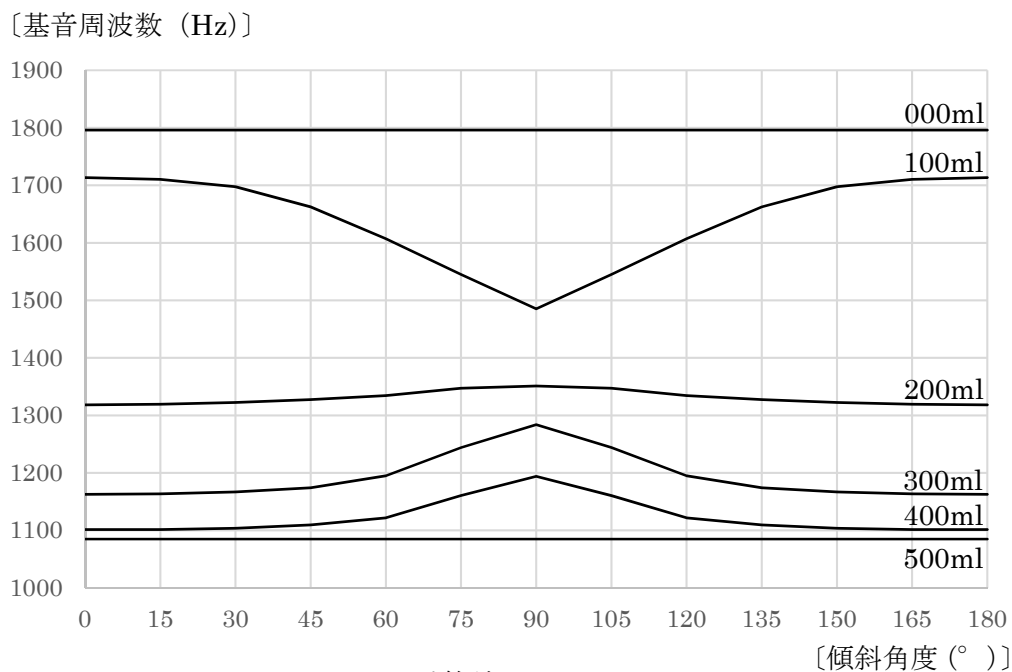


図7 計算結果

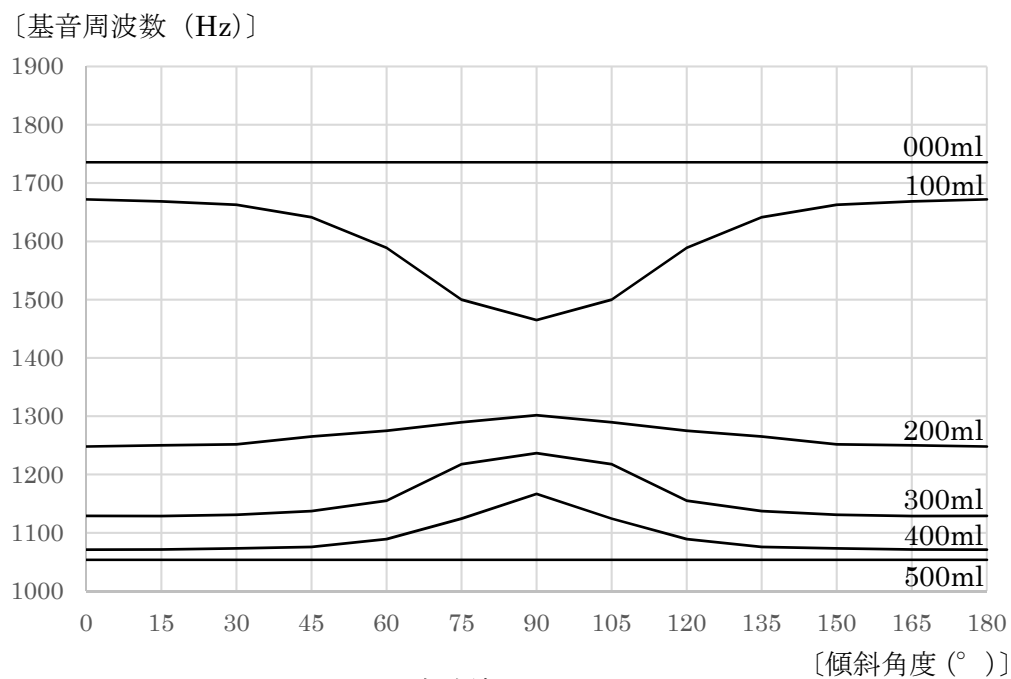


図8 実験結果

図7, 8より、計算結果は実験結果とよく一致していると言える。また、一部違いが見られるものの、既往研究のグラフとも似た結果を示している。計算結果の周波数が実験結果のものよりも少し高くなっているのは、アクリルの物性値（弾性率や密度）に実測した値ではなく文献に載っている値を使用したためだと考えられる。この結果から数値解析の妥当性が示されたと考えられ、次章ではこの数値解析手法を用いた検討を行う。

第3章 原因の検討

3.1 表面積の変化

アクリル容器内の水とアクリル容器とが接している表面積の大小が基音周波数に与える影響を検討する。

図3, 4, 5のモデルの各水量・角度での水が接する表面積を図9に示す。

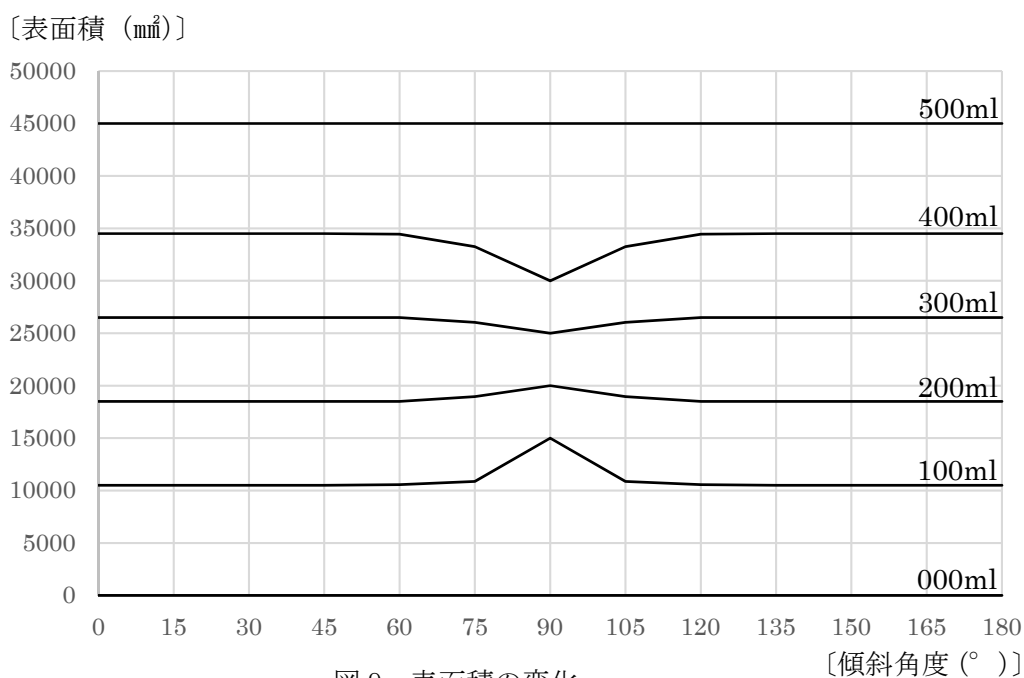


図9 表面積の変化

図9が示すように、注水量が100 ml, 200 mlであれば傾斜角度が大きくなるにつれて水が接する表面積は増加し、300 ml, 400 mlであれば傾斜角度が大きくなるにつれて水が接する表面積は減少する。また、100 ml, 200 mlの場合、0° ~45°, 135° ~180°での傾斜角度の変化では水が接する表面積は変化せず、300 ml, 400 mlの場合、0° ~60°, 120° ~180°での傾斜角度の変化では水が接する表面積は変化しないことがわかった。

3.2 容器内表面に水を沿わせる

水が接する表面積が同じ場合に、アクリル容器内の水量が周波数の変動に与える影響を検討する。

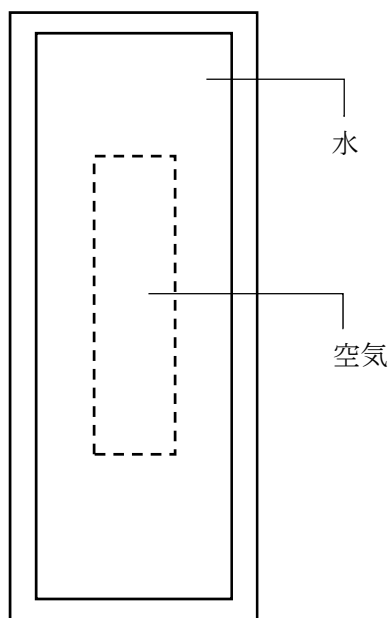


図 10 容器内表面に水を沿わせたモデル

図 10 のようにアクリル容器内表面全体に水を沿わせ、その水量をそれぞれ 100, 200, 300, 400, 500 ml としたモデルを作成し、計算した。結果は図 11 に示す。

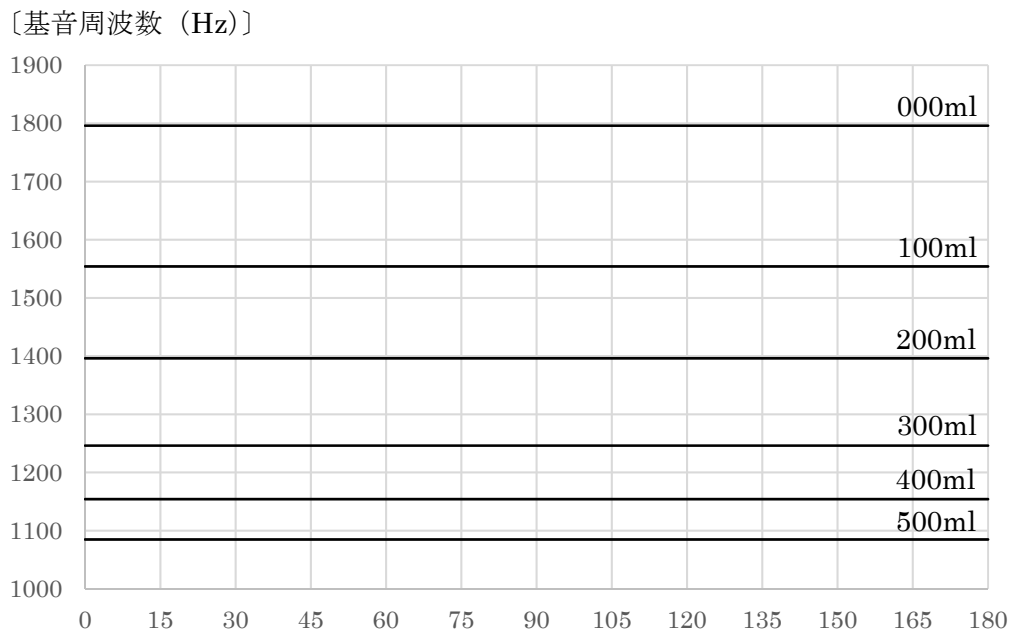


図 11 容器内表面に水を沿わせる [傾斜角度 (°)]

図 11 が示すように、アクリル容器内に沿わせる水量が増加するほど周波数は低くなることがわかった。

3.3 容器内表面から水を離す

水がアクリル容器内表面と接していない場合に、水量が周波数の変動に与える影響を検討する。

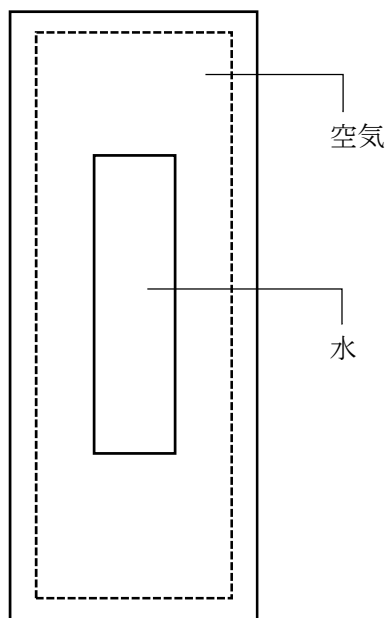


図 12 容器内表面から水を離したモデル

図 12 のようにアクリル容器内表面から水を離し、その水量をそれぞれ 100, 200, 300, 400 ml としたモデルを作成・計算した結果を図 13 に示す。500 ml の場合は水が容器内表面と必然的に接してしまうため除外した。

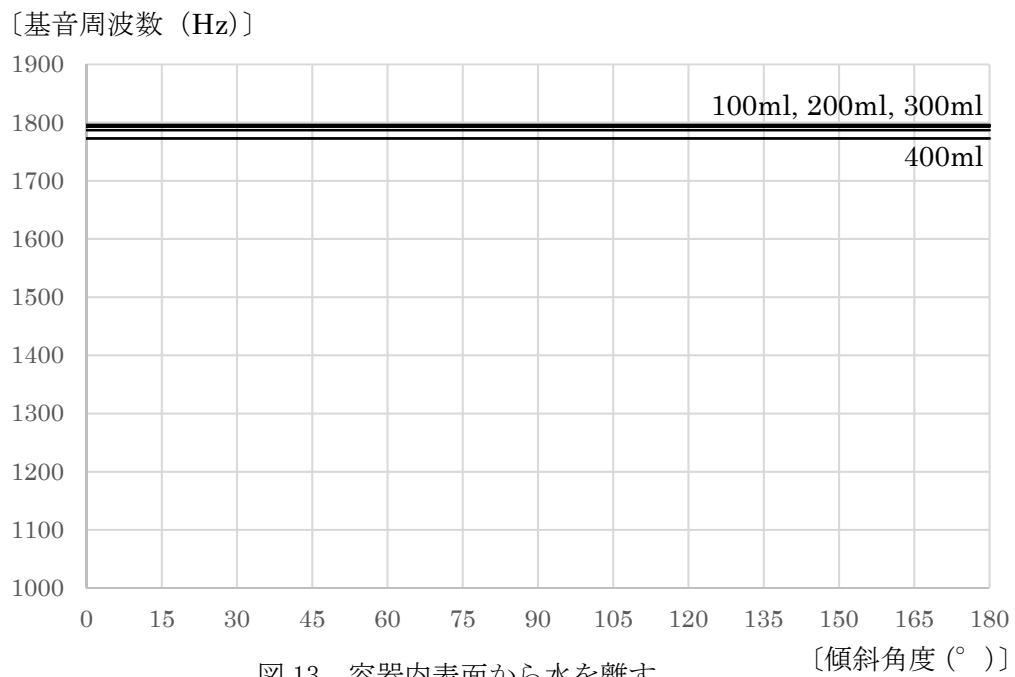


図 13 容器内表面から水を離す

図 13 が示すように、アクリル容器内の水量に関わらず、周波数はほとんど変化しないことがわかった。

3.4 板に水を沿わせる

3.2の結果を基に、アクリル容器ではなくアクリル板の片面に水を沿わせたものを叩くと3.2と同じ結果が得られるのかを検討する。

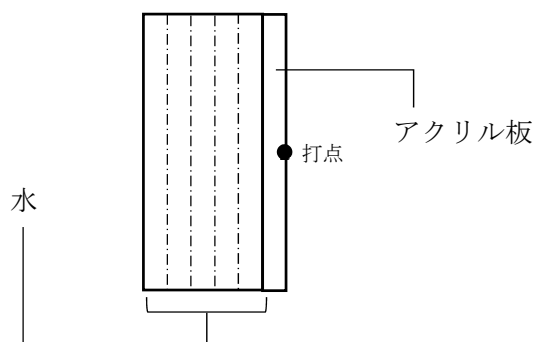


図 14 板に水を沿わせたモデル

図 14 のように、アクリル容器と同じ厚さ (5 mm) で底面と同じ大きさ (50 mm×50 mm) のアクリル板のモデルを想定する。その片面に 100, 200, 300, 400, 500 ml の水を沿わせ、反対の面の中心を叩いた条件を計算した結果を図 15 に示す。

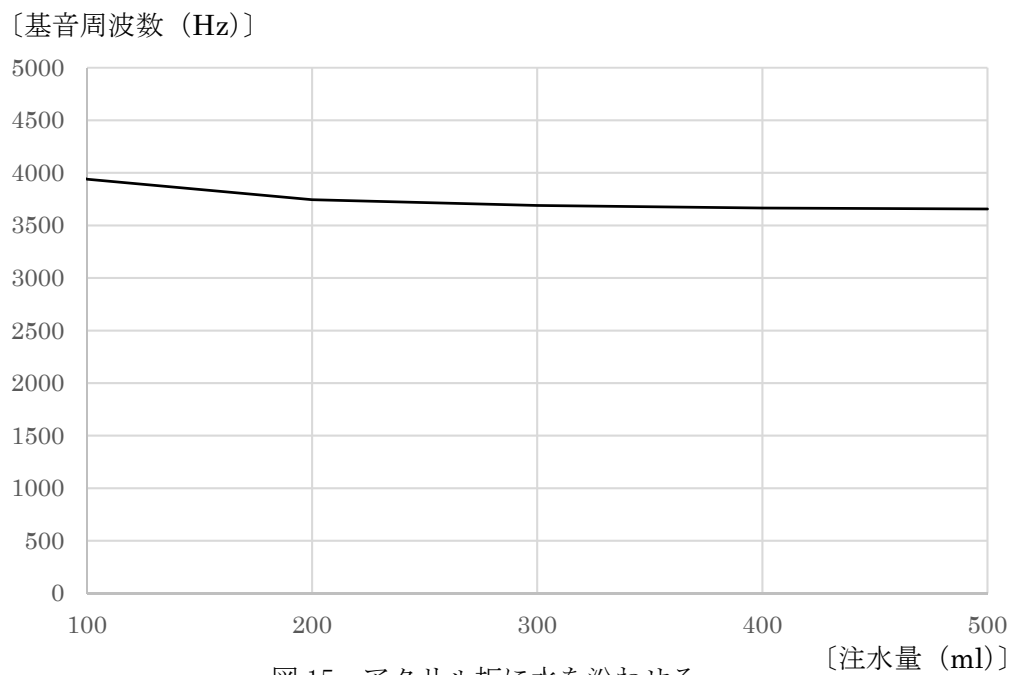


図 15 アクリル板に水を沿わせる

図 15 が示すように、変化は緩やかであるが、板に沿わせる水量が増加するほど周波数は低くなることがわかった。

3.5 板の密度を変化させる

3.4 のアクリル板 (500 mm×500 mm×5 mm) の密度をそれぞれ 100, 200, 300, 400, 500 ml の水の密度分増加させ、その影響を検討する。

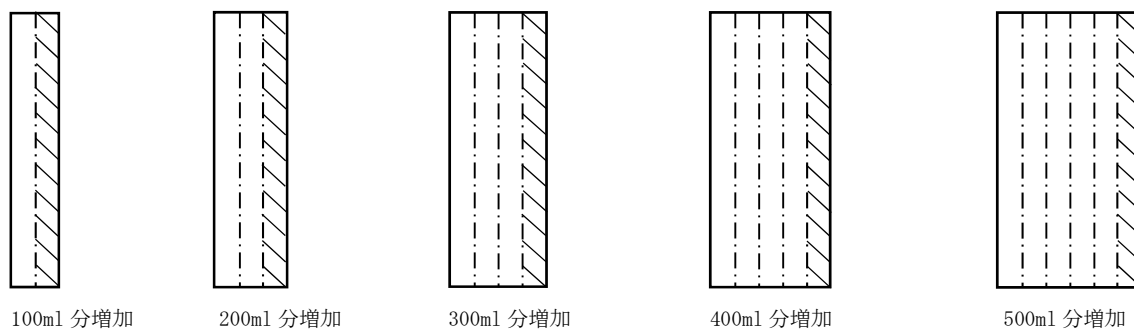


図 16 板の密度を変化させたモデル

図 16 のように斜線部のもとのアクリル板に、白地の水の分の密度を増加させたモデルをそれぞれ作成した。増加する水の層の厚さはそれぞれ 5, 10, 15, 20, 25 mm である。アクリル板の密度を 1150 kg/m^3 、水の密度を 1000 kg/m^3 として計算しており、100 ml 増加するごとに密度は 1000 kg/m^3 増加する。計算結果を図 17 に示す。

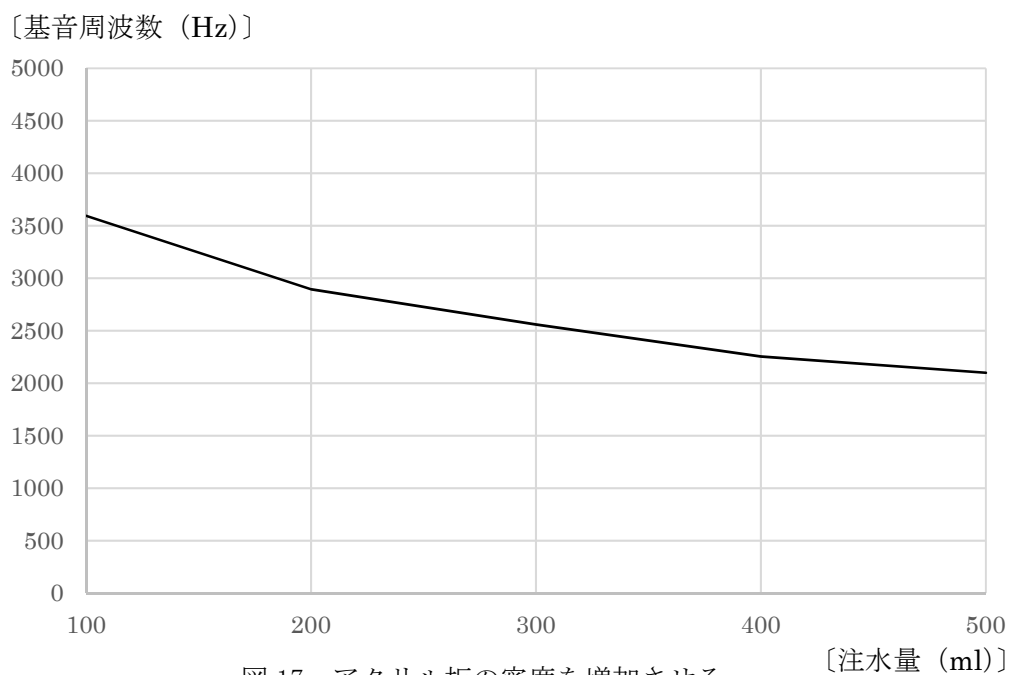


図 17 アクリル板の密度を増加させる

図 17 が示すように、変化は緩やかであるが、板に沿わせる水量が増加するほど周波数は低くなることがわかった。図 15 よりも変化が大きく、全体的に低くなっているのは密度の増加幅が大きすぎたからだと考えられる。

3.6 考察

図 7, 8, 9 より、各水量での角度による変動などから水が接する表面積と周波数の変動には大きな相関があり、水が接する表面積が大きいほど周波数は低くなることがわかる。これは水とアクリル容器が接することで、水がアクリル容器の振動を妨げているからであると考えられる。

図 11 より、水が接する表面積が同じ場合でもアクリル容器内の水量と周波数の変動には相関があり、アクリル容器内の水量が増加するほど周波数は低くなることがわかる。これは水量が増加するほど、アクリル容器の振動を妨げる力が増大するからであると考えられる。

図 13 より、周波数は水量に関わらずほとんど変化していないことから、水がアクリル容器内表面と接していない場合には水量は周波数の変動にほとんど影響しないと言える。このことから、容器内の空気の振動は大きく影響しておらず、容器本体の振動が支配的に周波数に影響を及ぼすと考えられる。

これらの結果から、周波数の変動にはアクリル容器内表面に水が接する表面積と水量が関係しており、アクリル容器内の空気の振動よりもアクリル容器本体の振動が支配的であると考えられる。

また、図 15, 17 より、3.2 の結果であるアクリル容器に接する水量の大小による周波数の変化は、アクリル容器自体の密度を増減させることで同様の変化が得られることがわかる。したがって、水はアクリルに対する付加質量の効果を持っていると考えることができる。

以上の結果から、アクリル容器と水が接する表面積の大小が最も周波数に影響を及ぼしており、その水量も周波数に影響を及ぼすことがわかった。また、水量に関しては、アクリル容器自体の密度を変化させることで同様の結果が得られることが示唆された。

第4章 おわりに

本研究により、注水したガラス瓶を傾けた際に起こる現象の要因を、いくつかの観点から検証することができた。これにより、貯水タンクの材質を密度の高いものに変えることや、タンクを二重構造にして間にも水を貯めて満たすことで騒音の周波数を制御できる可能性があると考えられる。

参考文献

- [1] 平原達也、村田剛史、岡沢浩樹、「注水したガラスビン打音のピッチ」、日本音響学会秋季研究発表会講演論文集、1115-1116、2016.9
- [2] 平原達也、石山亮、フランソワ・ブテイ、財満啓彰、「注水したガラスビンの振動姿態の3Dレーザースキャニング振動計による測定」、日本音響学会春季研究発表会講演論文集、1367-1368、2019.3