

音板放射音に与える共鳴パイプの効果

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
音環境ゼミ
建 11-0019 大倉 成貴
指導教官 豊田 政弘 准教授

目次

第1章 はじめに.....	3
1.1 背景.....	3
1.2 既往研究.....	4
1.3 目的.....	5
1.4 計算方法.....	6
1.5 材料設定.....	7
第2章 実験値と計算値の比較.....	8
2.1 結果.....	9
2.2 考察.....	13
第3章 パイプの有無で音場の変化の可視化.....	14
3.1 結果.....	14
3.2 考察.....	16
第4章 音板上下部での音波の位相の確認.....	17
4.1 結果.....	18
4.2 考察.....	19
第5章 バッフル挿入による検討.....	20
5.1 結果.....	21
5.2 考察.....	22
第6章 パイプの長さを変えての検討.....	23
6.1 結果.....	24
6.2 考察.....	25
第7章 結論.....	26
参考文献.....	27
謝辞.....	28

第1章 はじめに

1.1 背景

音は空気を振動させることによって生み出される。そして、世の中には音を発生させる様々な装置が存在する。その内の一つが一般的に知られる楽器である。なじみのある楽器の例としては弦の振動を利用するバイオリンやピアノ、角棒や丸棒を利用するシロホンやグロックンシュピール、膜の振動を利用するドラムやバンジョウ、板やシェルの振動を利用したシンバルやコング、管内の空気の振動を利用したパイプオルガンや金管・木管楽器などが考えられる。これらの楽器は音を生じさせる装置と音を増幅させる装置によって構成されており、個々の要素が比較的簡単であっても全体としての楽器は一つの複雑な仕組みとなっている。

楽器の中でも木琴は音板が音を生じさせる役割を持っており、その音板の下部に設置されるパイプが音を増幅させる役割を持っている。

しかし現在、この木琴で使われているパイプが音を増幅させる仕組みについては、まだ十分に解明されているとは言えない。もし、この仕組みがわかれば、楽器以外にも様々な用途で応用ができると考えられる。

1.2 既往研究

関西大学システム理工学部の細川により、木琴を鳴らした時の音板周辺の音圧分布について検討がなされている [1]。

この既往研究では、木琴での音板周辺の音圧分布は、パイプを設置していない場合には双極子となりパイプを設置している場合には単極子となるという推察がされている。

図 1.2(A)にパイプを設置していない場合の音板を横から見た図を示す。まず、音板を叩くと音板下部の空気は圧縮され、音板上部の空気は膨張する。その結果、音板下部にはプラスの音圧が生じ、音板上部にはマイナスの音圧が発生する。その後、時間がたつにつれプラスの音圧、マイナスの音圧が交互に発生し続け、音板上下部に逆位相の音波ができ、それらは音板の延長線上でぶつかり打ち消し合う。そして八の字状に音が広がっていき、双極子の形となる。

図 1.2(B)にパイプを設置している場合の音板を横から見た図を示す。こちらも同様に音板を叩くとプラスとマイナスの音圧が発生する。そして、パイプの共鳴により、音板下部の波が打ち消し合い、音圧が 0 となる。その結果、音板上部の波だけが広がり、円状に広がっていき、単極子の形となる。

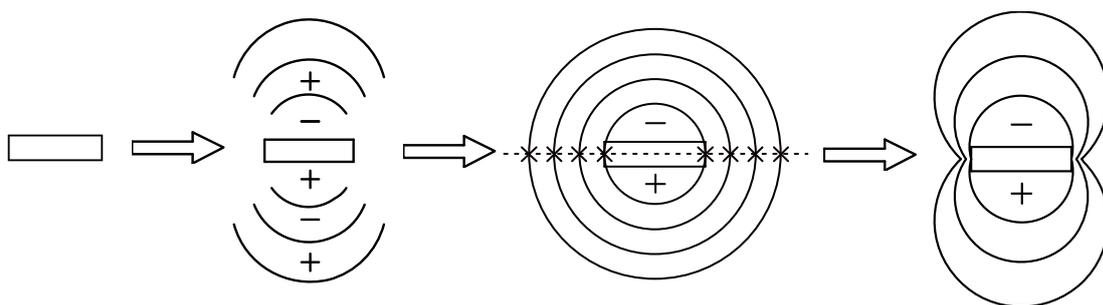


図 1.2(A) : 音板を横から見た図(パイプ無し)

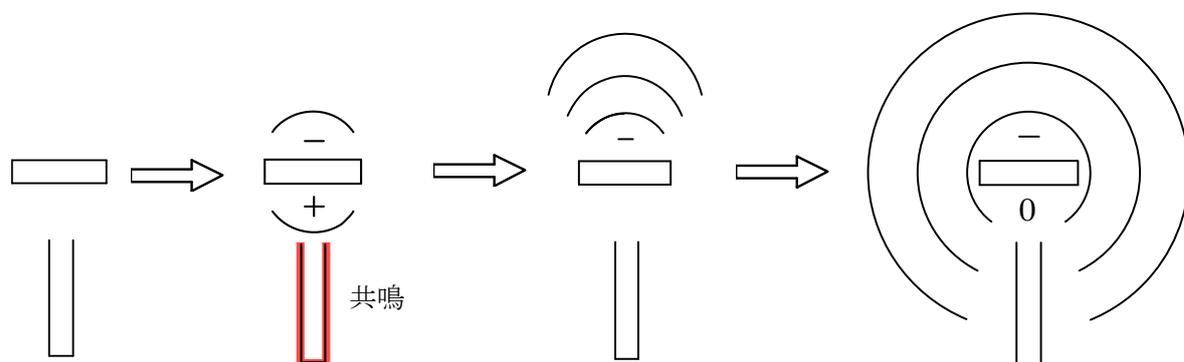


図 1.2(B) : 音板を横から見た図(パイプ有り)

1.3 目的

既往研究〔1〕では、木琴は音板を叩くことによって発生した音波がパイプで共鳴し、音板下部の音波を打ち消すことにより、単極子となることで、より音が広がるという推察がなされた。

本研究では、既往研究の推察が正しく、本当にパイプの共鳴により音板下部の音圧が 0 となるのか、更に、共鳴するとすれば、その時の音板周辺での音場はどうなっているのか、数値解析を用いて可視化し、音板放射音に与える共鳴パイプの効果の仕組みを解明することを目的とする。

1.4 計算方法

数値解析では FDTD 法(Finite Difference Time Domain Method)を用い、計算を行う。FDTD 法とは偏微分方程式の微分項を差分に置き換え、逐次時間積分を行うことで、対象となる方程式の時間発展を計算していく手法である。物理の分野などでは古くから用いられていた手法であり、コンピュータの発展とともに工学的に広く使われている [2]。

本研究では、一辺 40cm の正方形の完全吸音面で囲まれた空間内に音板とパイプを設置し、音板上部表面の中心に鉛直下向きに加振を与えた時の音場の変化を求める。図 1.4 に解析条件を示す。

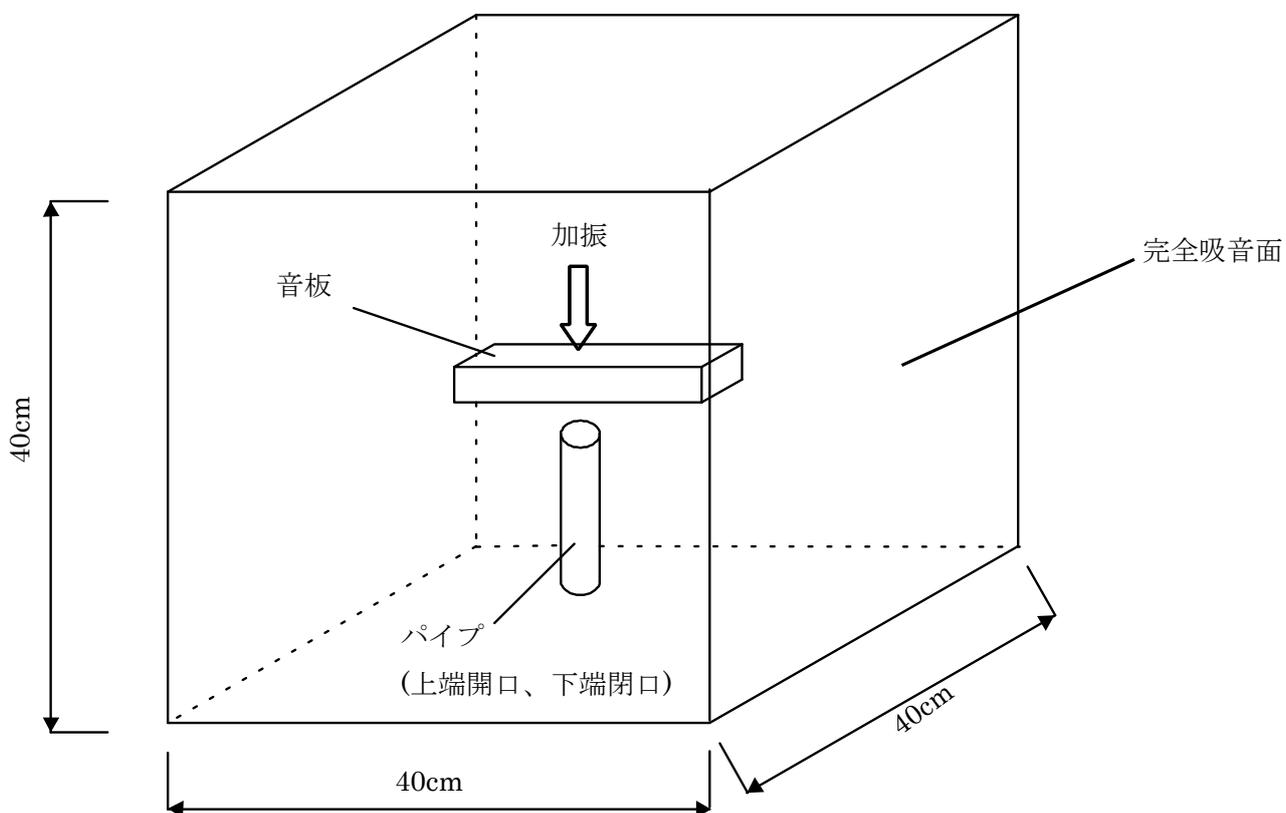


図 1.4 : 解析条件

1.5 材料設定

本研究では基本の音となるラを対象とする。ラはおよそ 440Hz で振動し、この周波数をもとに音板とパイプの寸法の設定を行う。音板の材質はアルミニウムとし、パイプの材質は塩化ビニルとする。ただし、パイプは計算上では剛として取り扱う。

図 1.5(A)と図 1.5(B)に音板とパイプの寸法図を示す。

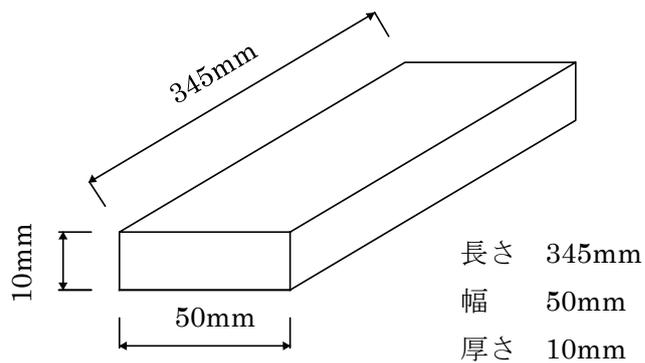


図 1.5(A) : 音板の寸法図

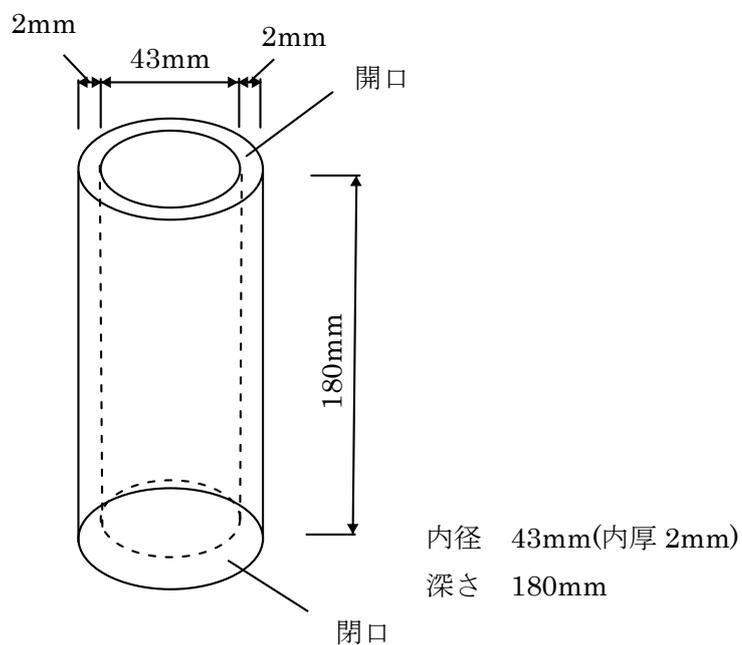


図 1.5(B) : パイプの寸法図

第2章 実験値と計算値の比較

まず、数値解析の妥当性を確認するため実験を行い、音圧の時間波形、周波数特性について計算値と実験値で比較を行う。実験方法を下記に示す。

- ・測定場所 関西大学 建築環境工学第一研究室 無響室
- ・測定箇所 音板の真横方向と真上方向に 15cm 離れた位置
- ・測定時間 叩いた瞬間から 4 秒間計測

音板とパイプの開口との距離は 1cm とし、音板をインパルスハンマーで叩くときに、音板の揺れをなるべく少なくするために釣り糸 2 本で支え、測定箇所にはマイクを設置する。この方法により、パイプを設置している場合と設置していない場合で分けて計測をする。図 2(A)に実験装置を、図 2(B)に測定箇所を、図 2(C)に実験写真を示す。

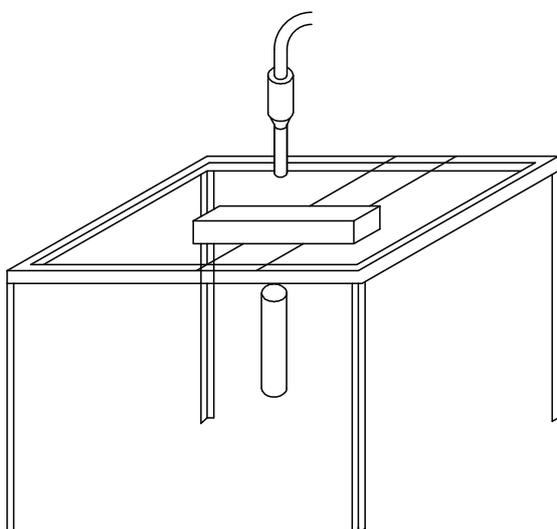


図 2(A) : 実験装置

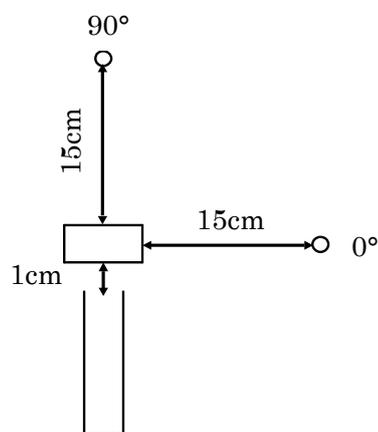


図 2(B) : 実験の測定箇所



図 2(C): 実験写真

2.1 結果

図 2.1(A)に、音圧真上方向の受音点におけるパイプ有りの場合の音圧の時間波形を、図 2.1(B)に、音圧真上方向の受音点におけるパイプ有りの場合の音圧の周波数特性を示す。

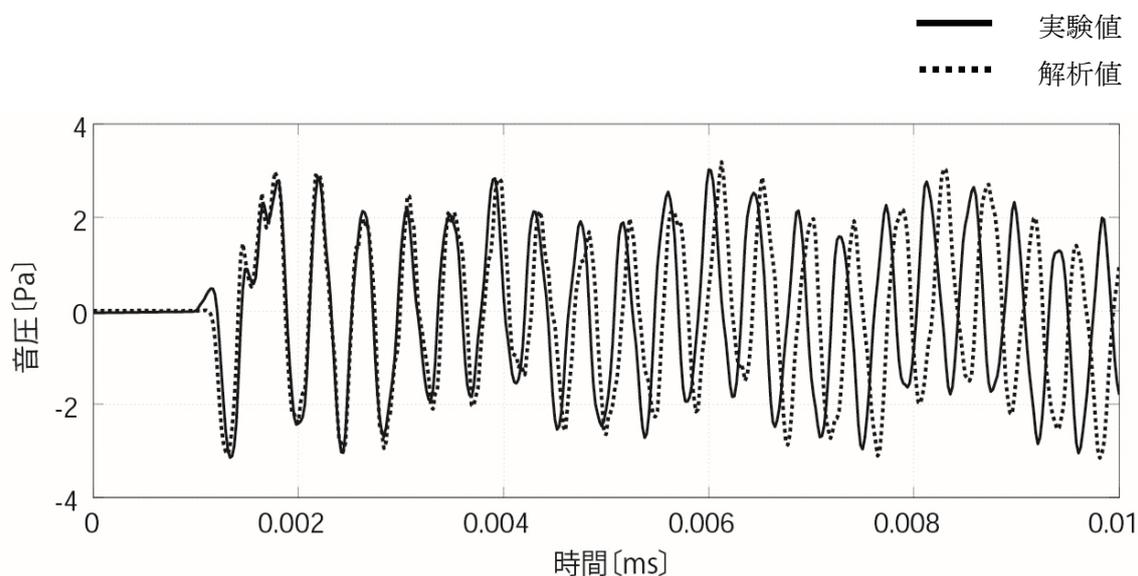


図 2.1(A) : 音圧真上方向の受音点における音圧の時間波形(パイプ有り)

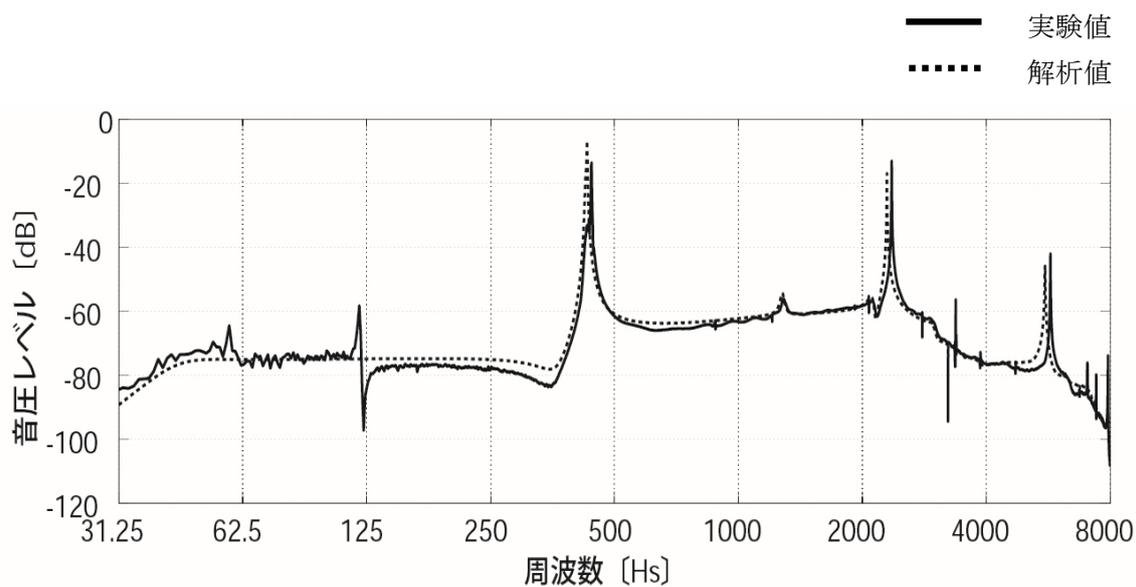


図 2.1(B) : 音圧真上方向の受音点における音圧の周波数特性(パイプ有り)

図 2.1(C)に、音圧真横方向の受音点におけるパイプ有りの場合の音圧の時間波形を、図 2.1(D)に、音圧真横方向の受音点におけるパイプ有りの場合の音圧の周波数特性を示す。

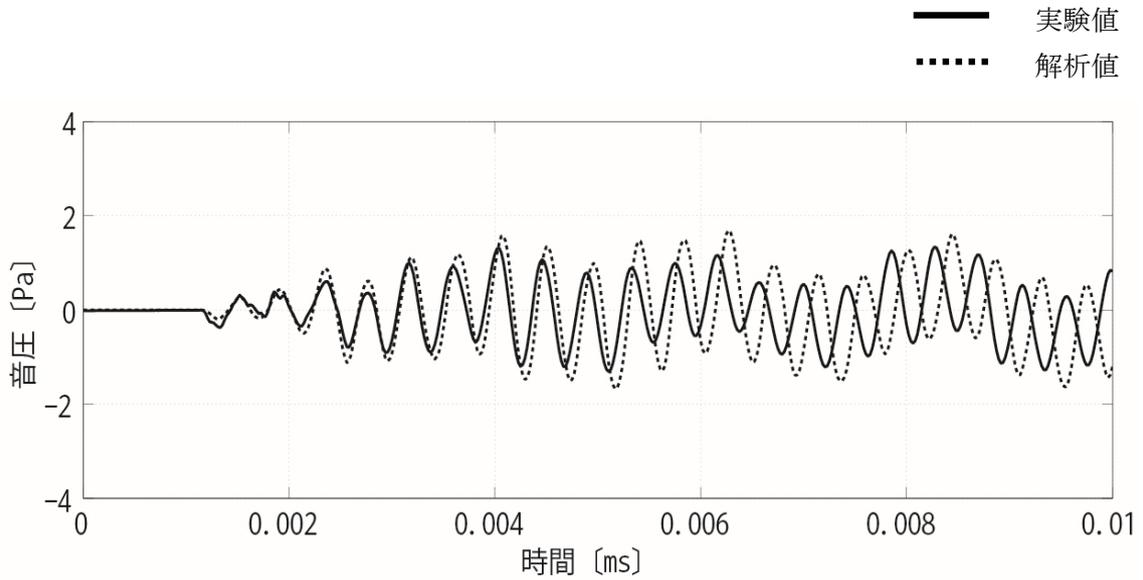


図 2.1(C) : 音圧真横方向の受音点における音圧の時間波形(パイプ有り)

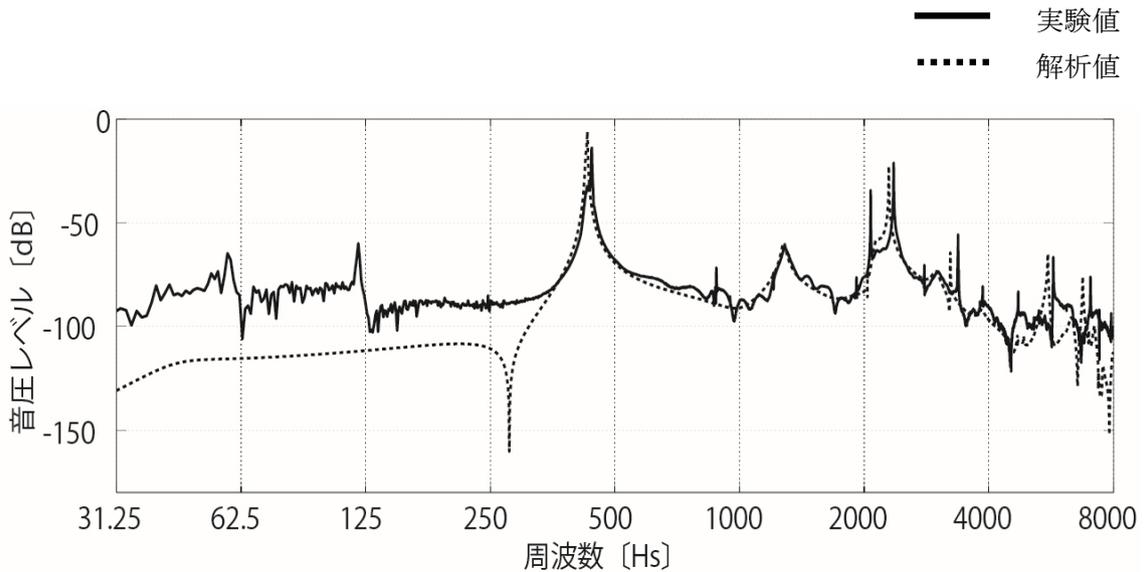


図 2.1(D) : 音圧真横方向の受音点における音圧の周波数特性(パイプ有り)

図 2.1(E)に、音圧真上方向の受音点におけるパイプ無しの場合の音圧の時間波形を、図 2.1(F)に、音圧真上方向の受音点におけるパイプ無しの場合の音圧の周波数特性を示す。

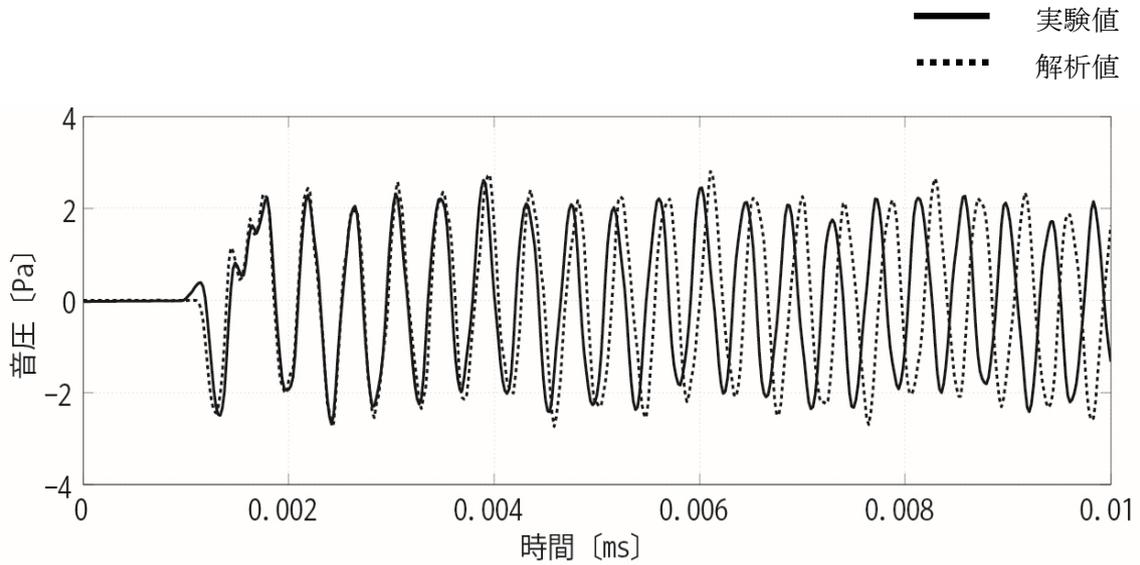


図 2.1(E) : 音圧真上方向の受音点における音圧の時間波形(パイプ無し)

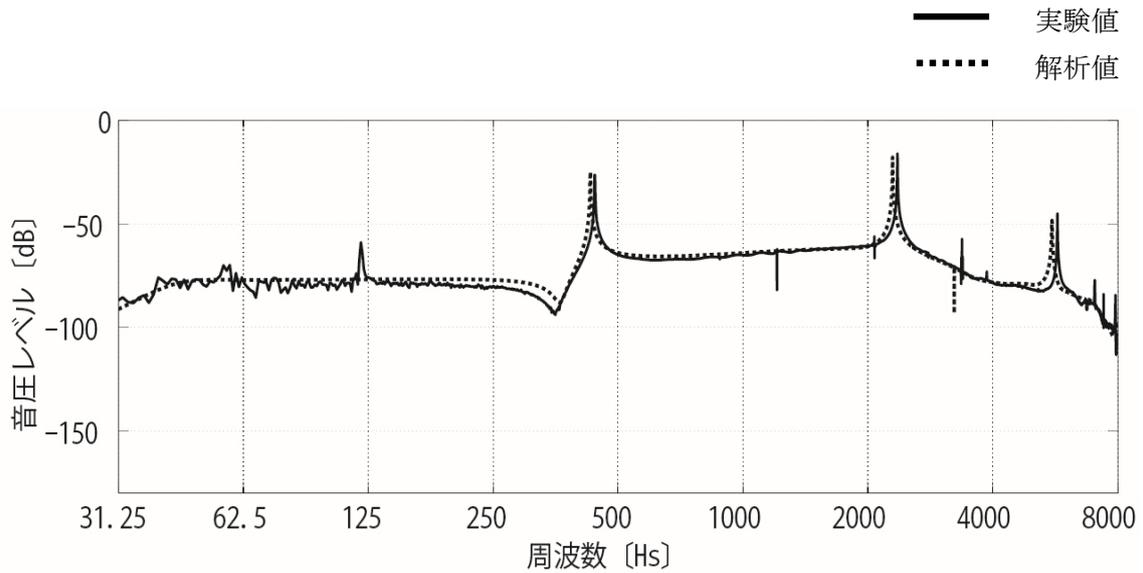


図 2.1(F) : 音圧真上方向の受音点における音圧の周波数特性 (パイプ無し)

図 2.1(G)に、音圧真横方向の受音点におけるパイプ無しの場合の音圧の時間波形を、図 2.1(H)に、音圧真横方向の受音点におけるパイプ無しの場合の音圧の周波数特性を示す。

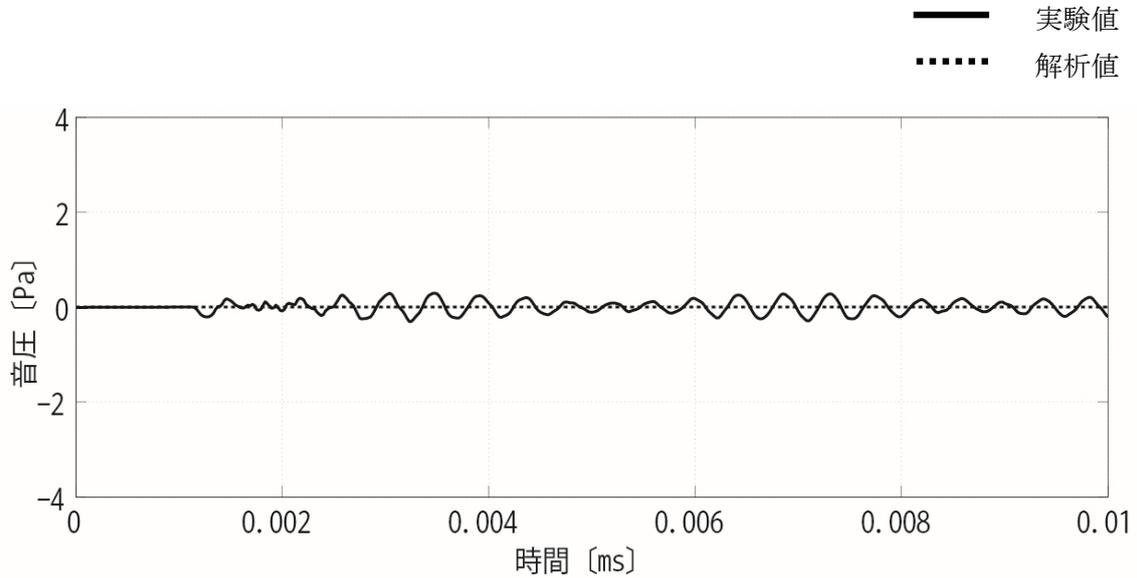


図 2.1(G) : 音圧真横方向の受音点における音圧の時間波形(パイプ無し)

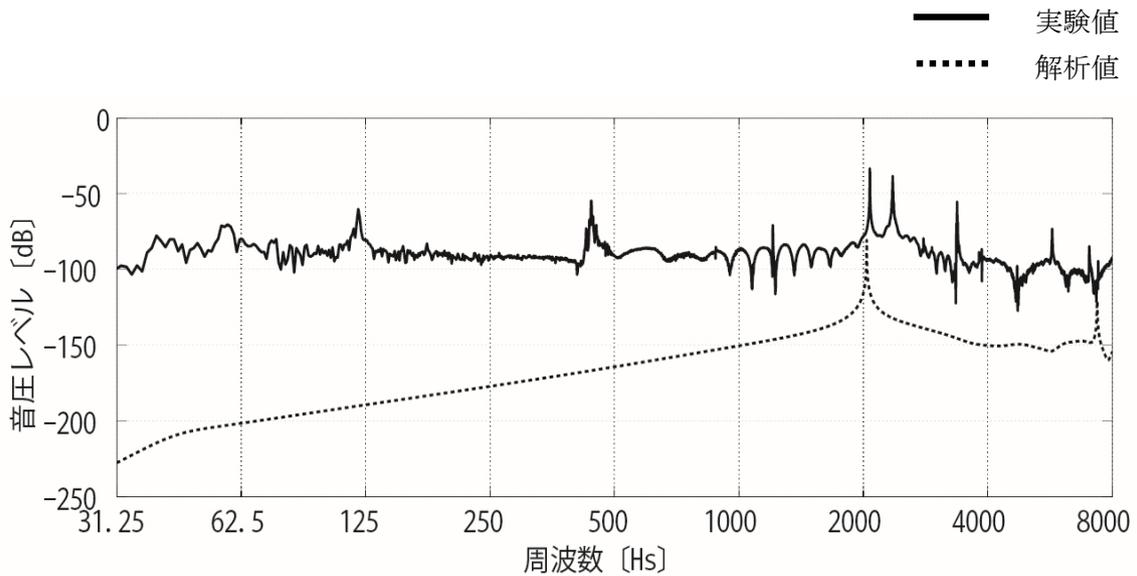


図 2.1(H) : 音圧真横方向の受音点における音圧の周波数特性 (パイプ無し)

2.2 考察

図 2.1(A)～図 2.1(H)の結果より、パイプを設置した場合は、真上方向からの計測、真横方向からの計測、共に、音圧の時間波形グラフと周波数特性グラフの実験値と解析値はほぼ一致した。また、パイプを設置していない場合は、真上方向からの計測ではどちらのグラフも実験値と解析値が一致したが、真横方向からの計測ではどちらのグラフも十分には一致しなかった。

これは、実験で音板を叩いた時に音板が上下に微小な振動をすることにより、音板の位置が、真横方向に設置しているマイクに対して振動に合わせて上下にずれてしまうことが原因だと考えられる。

以上より、不一致の原因も明らかであり、本研究で使用する数値解析法による計算結果は妥当であると考えて差し支えないものと思われる。

第3章 パイプの有無で音場の変化の可視化

次に、パイプを設置している場合としていない場合で、音板を叩いた時の音板周辺での音場の変化を可視化し、既往研究の推察が正しいのかを検証する。

まずは、音板を叩いた時の音圧分布がパイプを設置していない場合は双極子、パイプを設置している場合は単極子となることを検証するため、指向性を求める。

また、パイプを設置していない場合に音板を叩くと、音板上下部に逆位相の音波が発生すること、および、パイプを設置している場合に音板を叩くと音板下部に発生した音波がパイプでの共鳴により、0となることを検証するため、音圧分布解析結果を可視化する。

3.1 結果

図 3.1(A)に指向性グラフを示す。

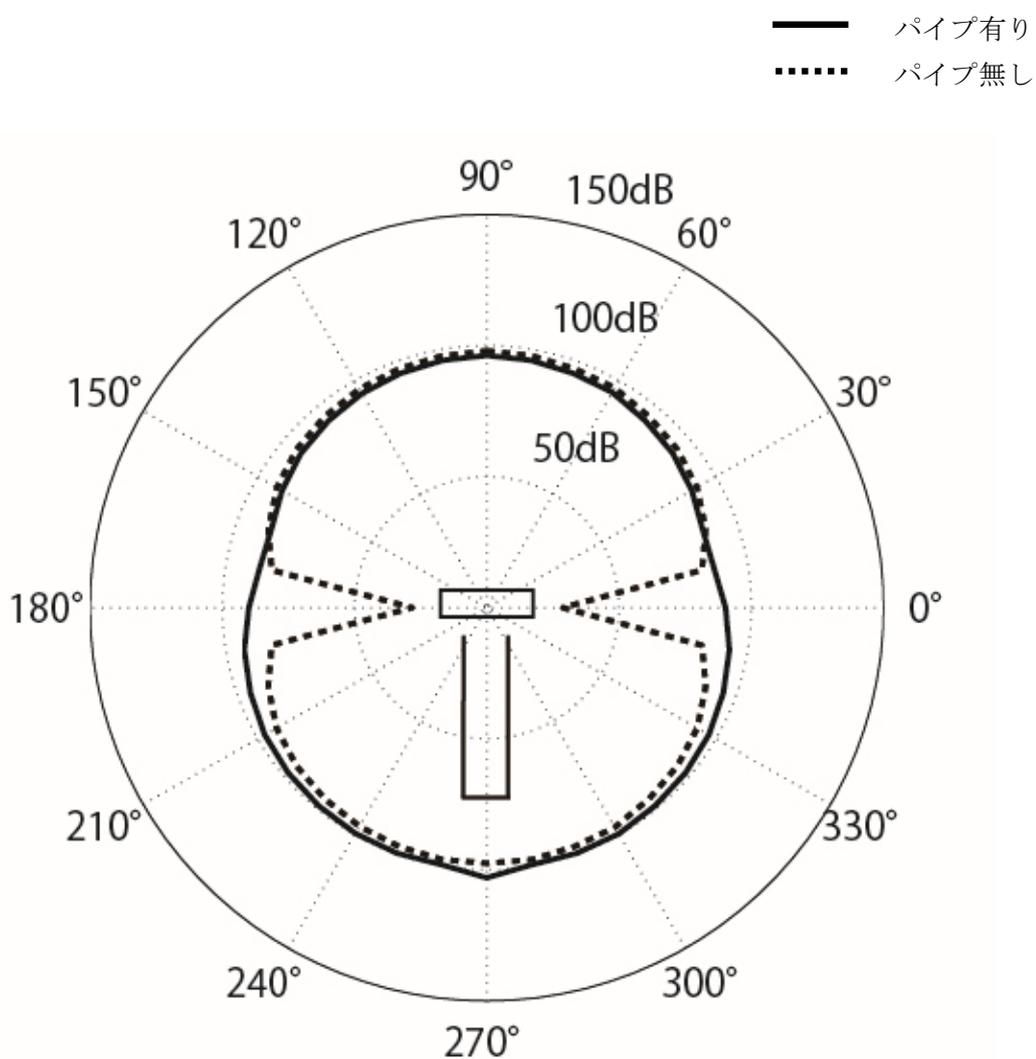


図 3.1(A) : 指向性グラフ

図 3.1(B)にパイプ無しでの音圧分布を、図 3.1(C)にパイプ有りでの音圧分布を示す。

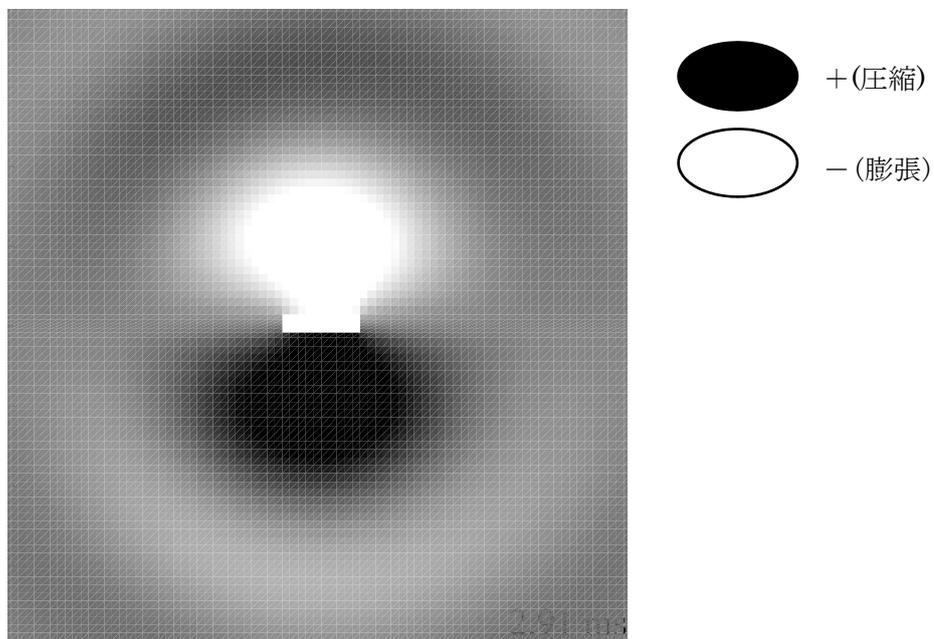


図 3.1(B) : 音圧分布(パイプ無し)ー加振後 29.1ms

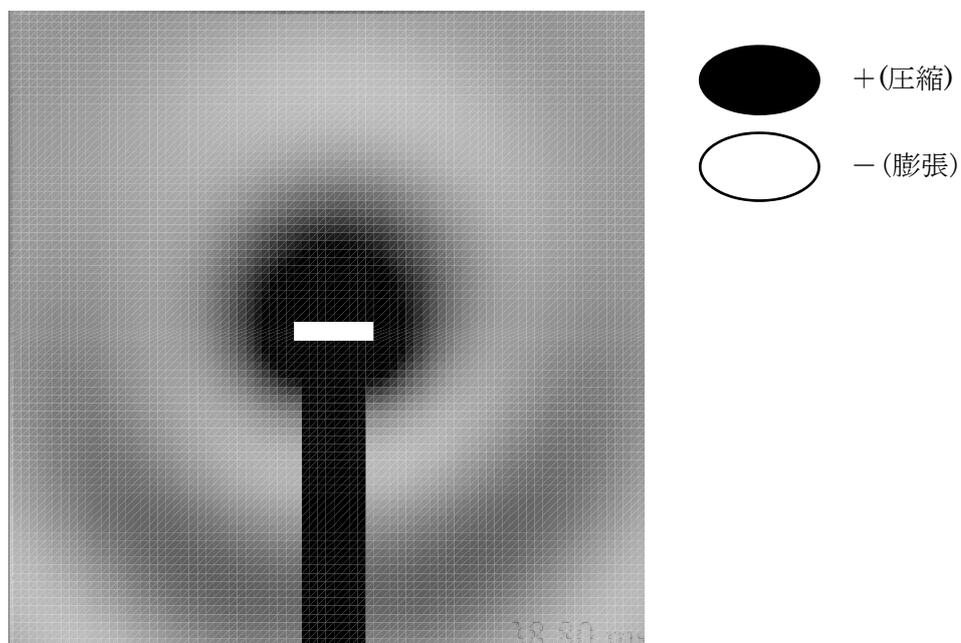


図 3.1(C) : 音圧分布(パイプ有り)ー加振後 38.8ms

3.2 考察

図 3.1(A)の結果より、音板を叩いた時の音板周辺での音圧分布はパイプを設置していない場合は双極子、パイプを設置している場合は単極子となることがわかる。

また、図 3.1(B)と図 3.1(C)の結果より、パイプを設置していない場合は音板上下部の音波が逆位相となるが、パイプを設置している場合は音板下部の音圧は常に 0 というわけではなく、既往研究の推察とは違う結果となることがわかる。

この結果から、パイプを設置して音板を叩いた時に音板周辺での音圧分布が単極子になるのは、音板下部に発生した音波がパイプでの共鳴によって 0 となることが原因ではなく、別の原因があると考えられることができる。

第 4 章 音板上下部での音波の位相の確認

前述した別の原因を検討するため、パイプを設置している場合で音板の上部と下部の表面から 5mm 離れた位置に受音点を設置し、音圧の時間波形を数値解析によって求め、音板上下部の音波の位相の確認を行う。解析条件を図 4 に示す。

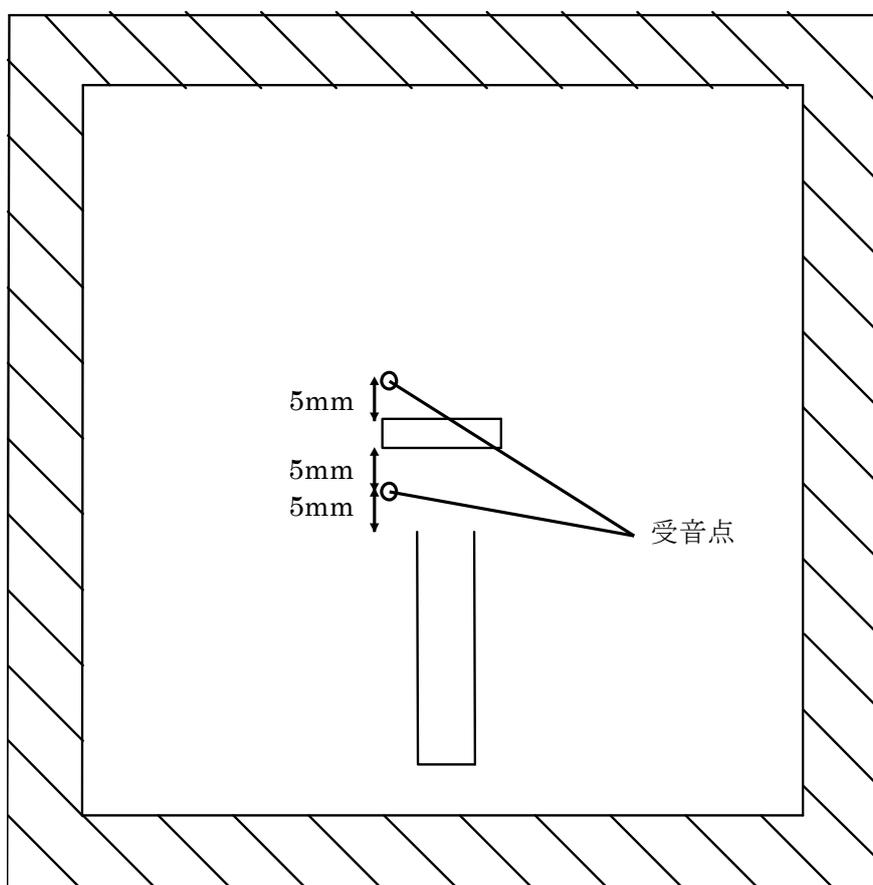


図 4 : 解析条件

4.1 結果

図 4.1 に音板上下部での受音点での音圧の時間波形を示す。

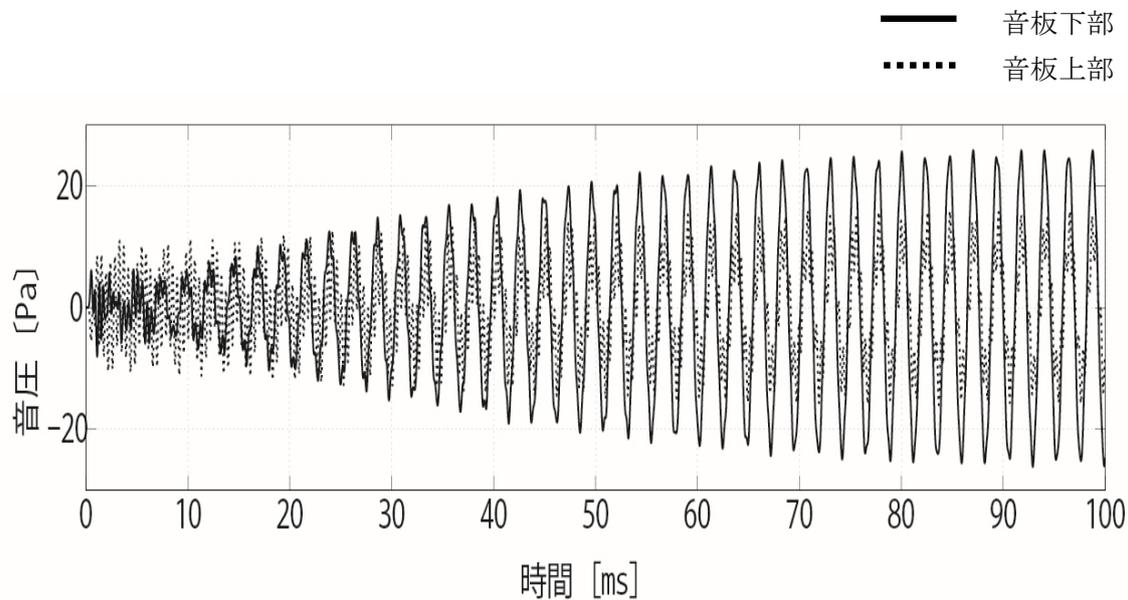


図 4.1 : 音板上下部の受音点での音圧の時間波形

4.2 考察

図 4.1 の結果より、パイプを設置している場合に音板を叩くと、叩いた直後は音板上下部から逆位相で同振幅の音波が発生するが、時間がたつにつれ、音板上下部の 440Hz の音波はほぼ同位相で同振幅となる。この結果から、2つの仮説が考えられる。

1つ目は音板下部の音波はパイプでの共鳴によって弱め合い、0 となるが、音板上部で発生している音波が音板下部まで回りこみ、音板上下部がほぼ同位相で同振幅の音波となるという説である。これをパターン 1 とする。

2つ目は音板下部の音波はパイプでの共鳴によって強め合い、増幅し、音板下部で発生している音波が音板上部まで回りこみ、音板上下部がほぼ同位相で同振幅の音波となる説である。これをパターン 2 とする。

図 4.2(A) にパターン 1 を、図 4.2(B) にパターン 2 を示す。

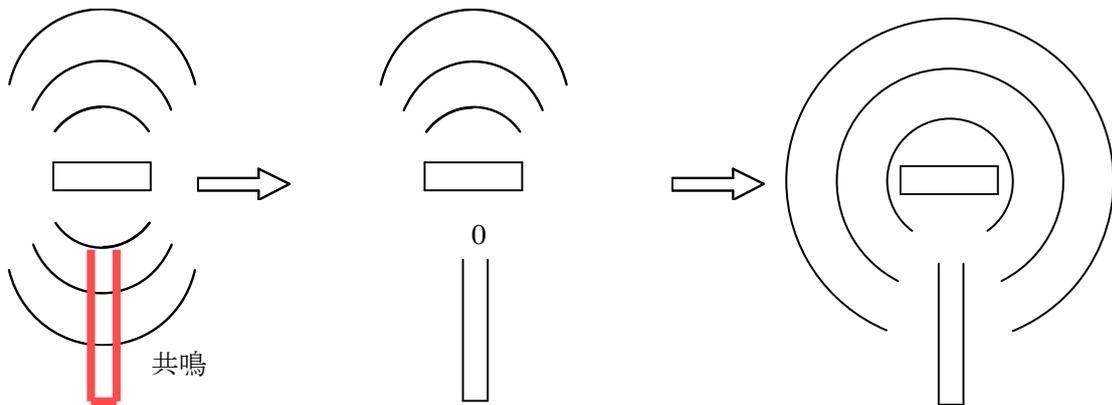


図 4.2(A) : パターン 1

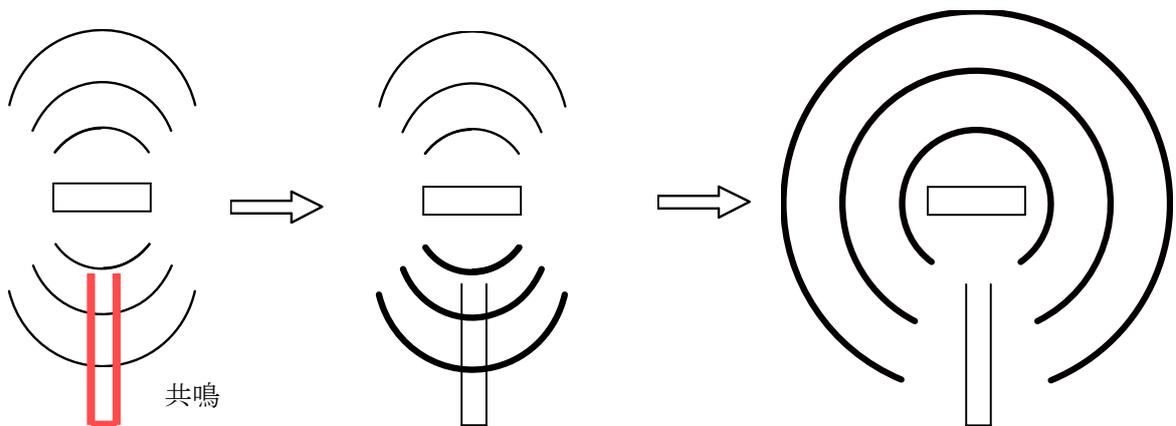


図 4.2(B) : パターン 2

第5章 バッフル挿入による検討

次に、前章で述べた二つの仮説のどちらが正しいのかを検証する。

音板上下部で発生した音波がそれぞれ回り込まないようにバッフルプレートを挿入し、音板上部と下部に受音点をおき、数値解析によってそれぞれの受音点での音圧の時間波形と周波数特性を求める。解析条件を図5に示す。

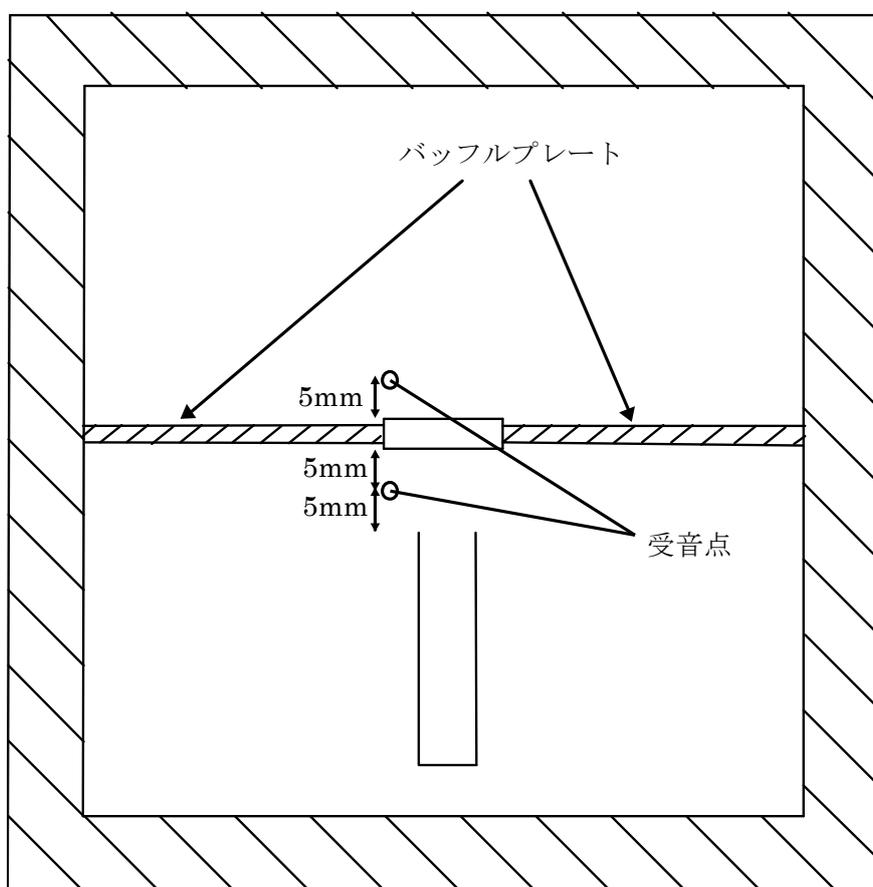


図5：解析条件

5.1 結果

図 5.1(A)にバッフル挿入時の音圧の時間波形を、図 5.1(B)にバッフル挿入時の音圧の周波数特性を示す。

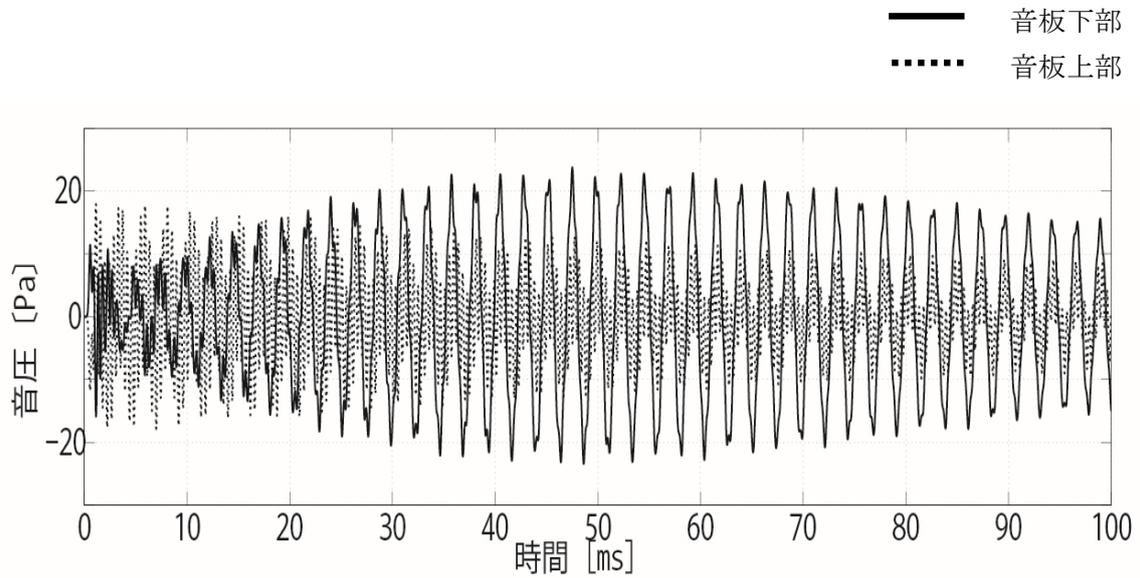


図 5.1(A) : バッフル挿入時の音圧の時間波形

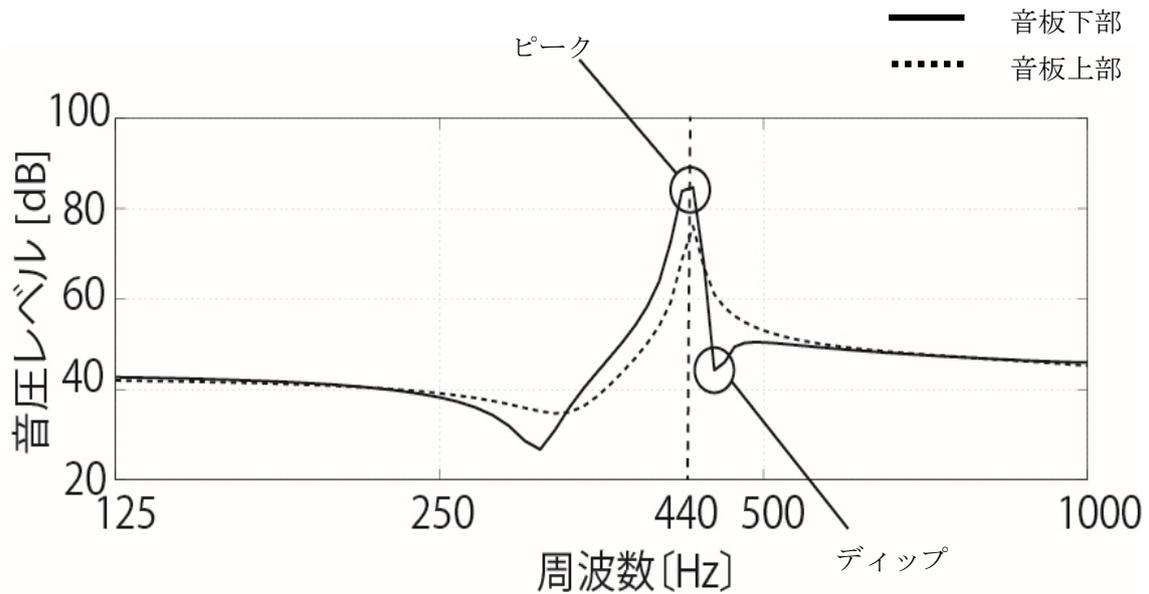


図 5.1(B) : バッフル挿入時の音圧の周波数特性

5.2 考察

図 5.1(A)の結果より、音板を叩いた直後は音板下部で発生した音波は音板上下部から逆位相で同振幅の音波が発生するが、時間がたつにつれ、音板上下部の 440Hz の音波はほぼ同位相で同振幅となり、時間が 20ms を超えたあたりから音板上部の音波より音板下部の音波の振幅の方が大きくなっていっている事がわかる。この結果から、音板下部で発生した音波はパイプでの共鳴によって 0 となるのではなく、増幅しているので、前章で述べたパターン 2 が正しいと考えられる。

また、図 5.1(B)の結果より、丸で囲んでいる部分に着目すると、周波数によって、音板下部の音波の音圧の大きさが変化することがわかる。

つまり、音板下部で発生する音波は、パイプでの共鳴によって強めあう周波数(ピーク)と弱めあう周波数(ディップ)が存在し、共鳴周波数を変えることでパイプの役割を変化させることが可能だと考えられる。

第6章 パイプの長さを変えての検討

前章より、音板下部で発生する音波は、パイプでの共鳴によって、強めあう周波数(ピーク)と弱めあう周波数(ディップ)が存在し、周波数を変えることでパイプの役割を変化させることが可能だと考えられる。

次に、パイプの長さを変えることにより、共鳴する周波数を変え、強めあう効果(ピーク)と弱めあう効果(ディップ)を変えることができるのか検討する。

パイプの開口部が鉛直下向きになるように設置し、パイプの開口部から 5mm 離れた位置にパルス性の音源と受音点を設置する。壁は下面だけ剛境界とし、それ以外は完全吸音面とする。以上の条件でパイプの長さを 16cm~20cm の 1cm 刻みの 5 パターンで音圧の周波数特性を求め、パイプがどの長さの時に 440Hz の周波数が共鳴によって、強め合うのか、弱め合うのかを求める。解析条件を図 6 に示す。

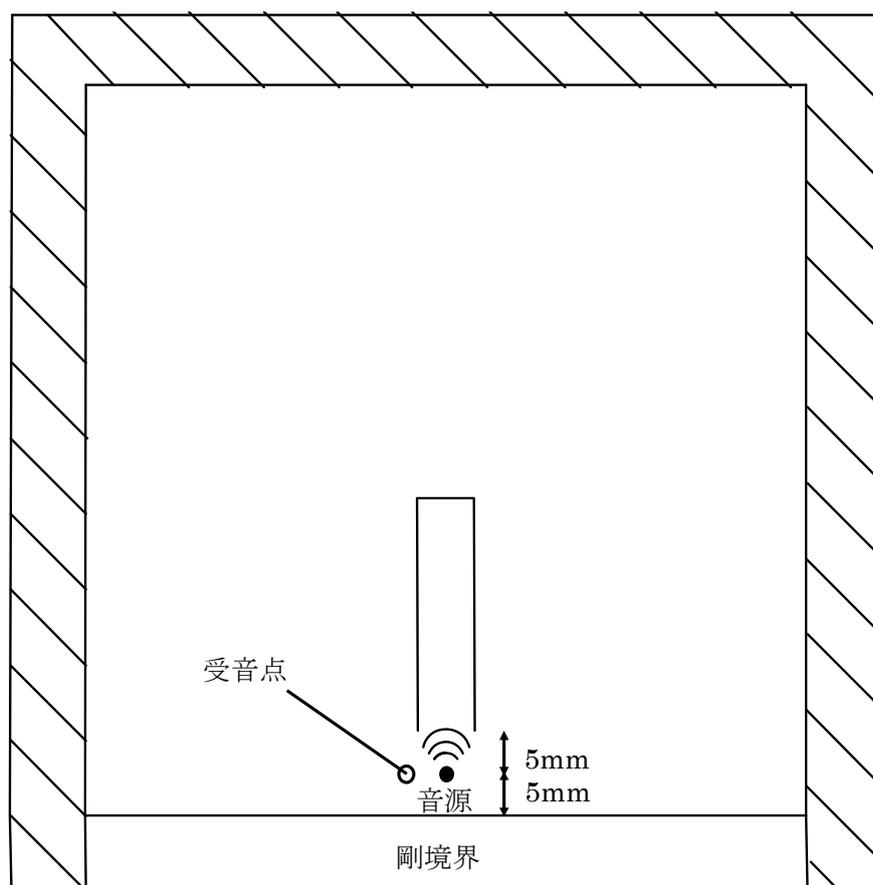


図 6 : 解析条件

6.1 結果

図 6.1 にパイプの長さ別の音圧の周波数特性を示す。

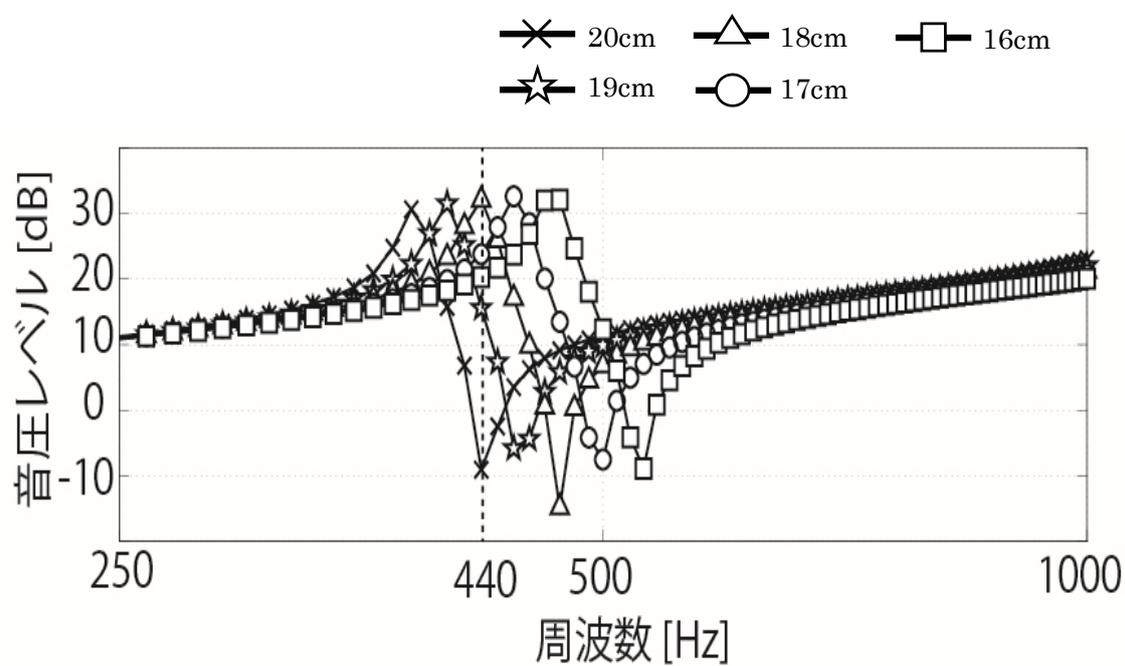


図 6.1 : 音圧の周波数特性(パイプの長さ別)

6.2 考察

図 6.1 の結果から、440Hz の音波はパイプの長さが 16cm～18cm と長くなるにつれて音圧レベルが大きくなり、18cm 場合に音圧レベルが最大値(ピーク)となり、19cm と 20cm で急激に音圧レベルが下がっていき、20cm の場合に音圧レベルが最小値(ディップ)となることがわかる。

つまりパイプの長さが 18cm の場合はパターン 1 の共鳴がおき、20cm の時はパターン 2 の共鳴が起きるということがこの結果から推察される。

第7章 結論

本研究では音板放射音に与える共鳴パイプの効果の仕組みを解明することを目的とし、パイプの有無で音場の変化の可視化や様々な条件での数値解析を行った。また、数値解析の妥当性を確認するため原寸大の音板により実験を行い、実験値と解析値の比較を行った。

その結果から以下のことがわかった。

- ・ 木琴の音板周辺の音圧分布はパイプを設置していない場合は双極子となり、パイプを設置している場合は単極子となる。
- ・ パイプは、音板下部への放射音を共鳴によって打ち消す役割と増幅させる役割の両方を担う可能性がある。
- ・ どちらの役割をパイプに持たせるかは、パイプの長さを調整することにより、変えることができる。

今回、音板放射音に与える共鳴パイプの効果の仕組みを解明することが目的だったため音板とパイプの材質を変えずに研究を進めた。今後の課題として、音板とパイプの材質や寸法を変えた場合の解析等を行い、本研究の考察の裏付けを行うことが挙げられる。

参考文献

- [1] 細川元気, 楽器の振動音響特性の可視化研究, 関西大学卒業論文, 2014
- [2] 日本建築学会編, はじめての音響数値シュミレーションプログラミングガイド, コロナ社(東京), 2012

謝辞

本研究を進めるにあたり、お忙しい中ご指導・ご鞭撻して頂きました豊田政弘先生にこの場をお借りして心より深くお礼申し上げます。

また、建築環境工学第 1 研究室の皆様からは、研究面で有益な議論や助言を頂き、心より深く御礼申し上げます。