三味線の振動と音響

國吉, 大吾 / KUNIYOSHI, Daigo

(発行年 / Year)
2012-03-24

(学位授与年月日 / Date of Granted)
2012-03-24

(学位名 / Degree Name)
修士(工学)

(学位授与機関 / Degree Grantor)
法政大学 (Hosei University)

2011 年度　修士論文

三味線の振動と音響

Vibration and Sound of SHAMISEN

指導教員　御法川学

岩原光男

法政大学大学院

工学研究科機械工学専攻

10R1119　國分　圭介

Keisuke KOKUBUN

目次

1.　緒論

1.1　　はじめに

近年、様々な工業製品において低騒音化、低振動化は重要な項目とされているそのため、製品の設計段階からＣＡＤデータなどを用いて振動特性や音響特性を解析することにより、振動や騒音をあらかじめ予測し、それらを低減する事がスタンダードとなっている。

それに対して楽器は、有限要素法による振動解析などの研究は以前から行われてきたが、一般的な工業製品に比べて量産化および自動化が困難な事もあり、それらを楽器作りに用いるようになったのはごく最近の事である。しかもこれらの技術が用いられているのはピアノなどの西洋楽器を製造する大手楽器メーカーに限られている。

これまでに当研究室でも、シンバルやギターといった西洋楽器に関して、音質評価のための周波数解析や実験モード解析を行い、これら楽器に独自の加工を行うなどして音質の向上を試みてきた。これらの楽器に対し、本研究の対象である三味線は日本の伝統的な楽器である。この伝統的な楽器には「さわり」と呼ばれる特徴的な機構が存在する。

この「さわり」機構は西洋音楽の観点からすると一種のノイズを作り出す。このノイズを含んだ音色は、同じ撥弦楽器であるギターの音色とは大きく異なったものであり、三味線特有の音色である。この「さわり」機構は三味線の元になる楽器が日本に伝来した後、日本で独自に付加されたものであるが、同様の効果を狙った機構はタンブーラやシタール、琵琶などの楽器にも存在している。

このように、「さわり」機構は三味線の重要な機構である。しかし、この機構には未だに不明な点が多く、その調整には経験と勘が求められている。そこで本研究では、「さわり」機構の特徴を明らかにし、理想とする三味線の音を誰でも簡単に出すことができるよう支援することを目的とする。

本論文では、まず三味線音のディジタルサンプリングと周波数解析を行い、その結果について考察する。

本論文では、 本学卒業生である大江耕司氏の論文に続き、まず三味線音のディジタルサンプリングと周波数解析を行い、その結果について考察する。そして、音の加工、三味線本体の実験モード解析、弦振動シミュレーションの各実験結果について考察した。

その上で、胴体に着目し胴体本体の加振試験および空洞共鳴の実験を行った。さらに胴体内部について FEM 解析を行い空洞の周波数解析を行い実験結果と比較した。

また、皮に着目して皮の加振試験およびアルミ製三味線モデルを製作し皮による音色の比較試験を行った。

1.2 三味線の構造及び各部名称

三味線は弦を弾くことで音を鳴らす撥弦楽器の一つである。まず、三味線の構造は大きく分けて棹と胴で成り立っている。棹には硬い木材（紅木や花梨など）が使用され､胴には主に花梨が用いられる｡胴は4枚の胴木を枠状に張り合わせ、開口部の両面に皮（猫もしくは犬）を張り付ける。三味線に張られた三本の弦は低い音程のものから順に一の糸、二の糸、三の糸と呼ばれる。素材は絹が使われているが､三の糸は細く切れやすいためナイロンなどの合成糸が使われることもある。下端を根緒（音緒）に結び上端を糸巻に巻いて調弦する、駒は糸の振動を皮に伝えるためのもので、象牙や水牛の角などにより作られる。以下に三味線各部の写真、および弦に関するデータを示す。

Figure 1-1 Shamisen [topview]

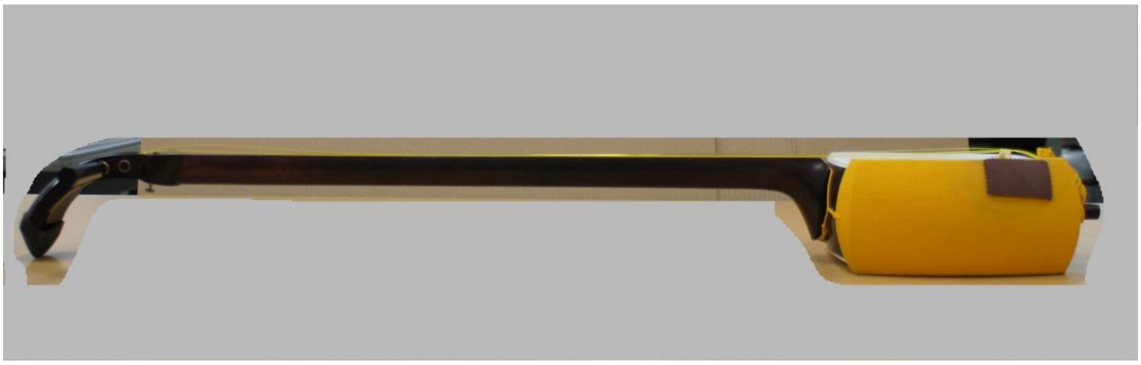

Figure 1-2 Shamisen [side view]

Figure 1-3 Tenjin　[Pegbox]

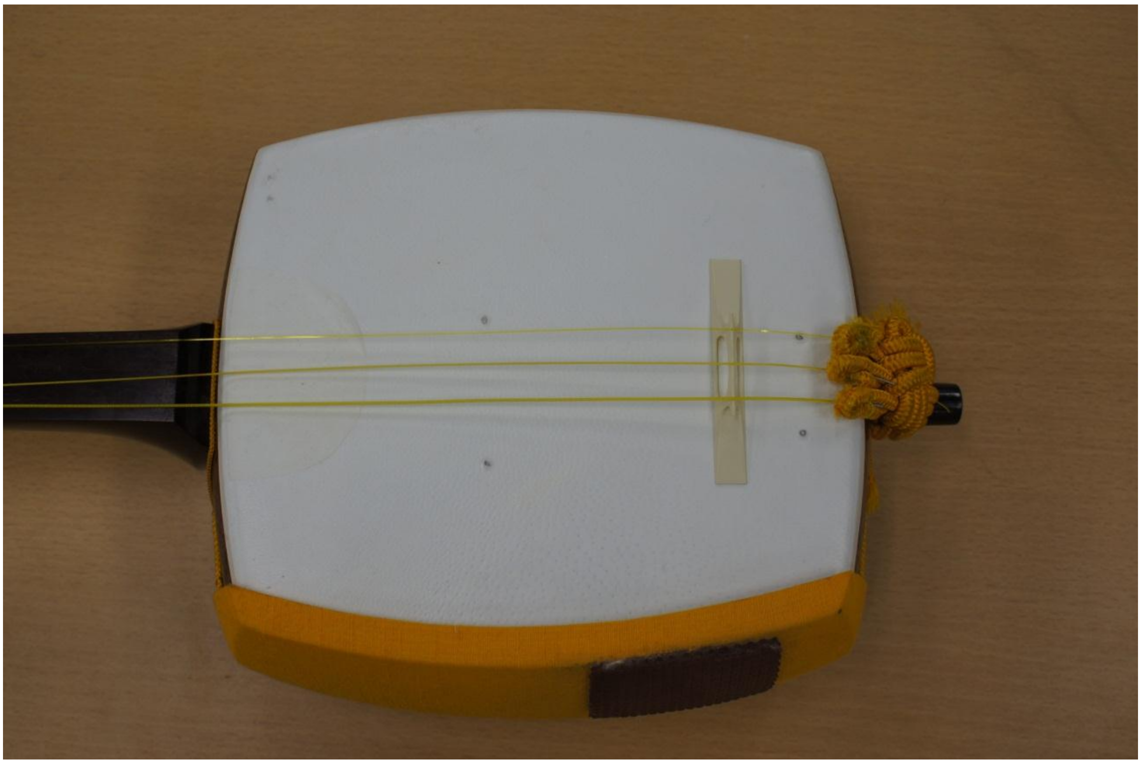

Figure 1-4 Dou [Body]

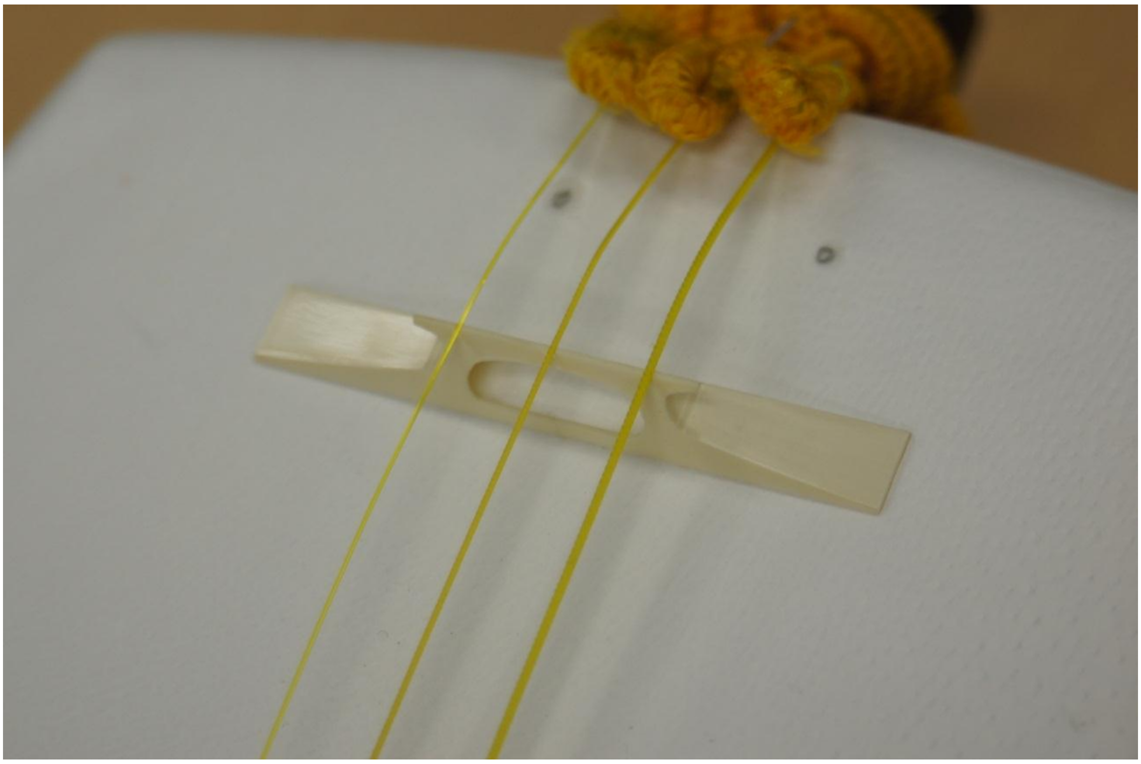

Figure 1-5 Kamigoma [saddle]

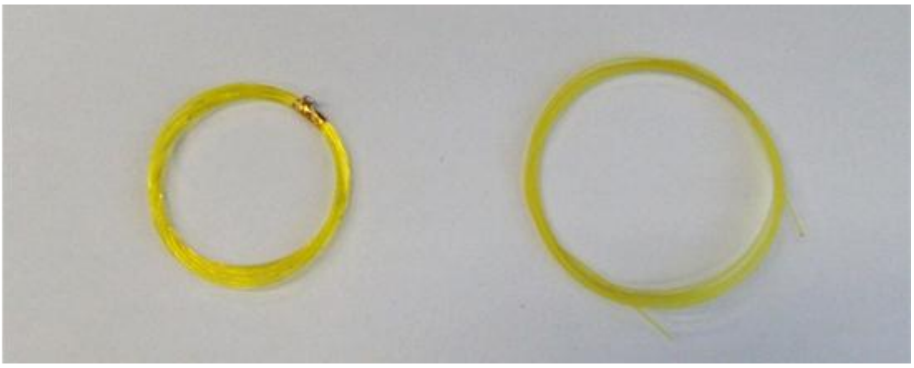

Figure 1-6 13-3(Nylon),13-3(Silk)

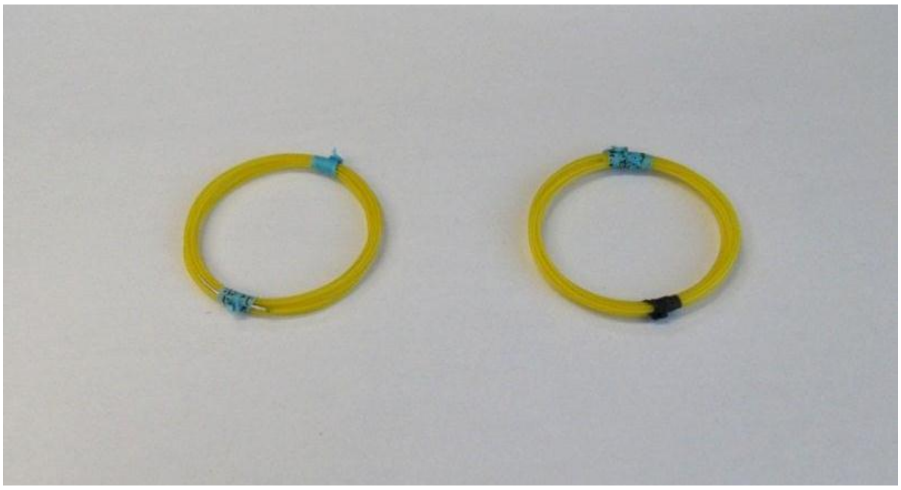

Figure 1-7 14-2(Silk),15-2(Silk)

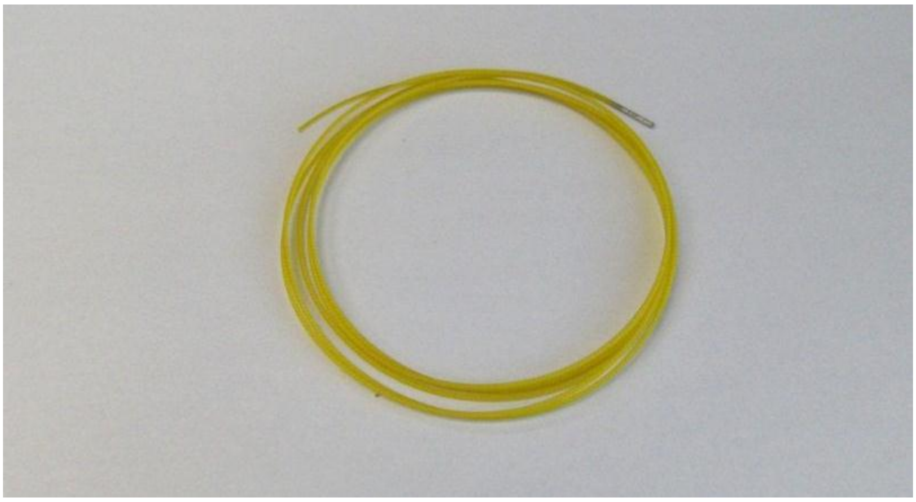

Figure 1-8 17-1(Silk)

Table 1-1 Strings

Product name	Model (Material)	Mass (g)	Diameter (mm)	Length (mm)
富士糸	17-1（Silk）	1.0	0.90	1128
富士糸	15-2（Silk）	0.5	0.65	1132
富士糸	14-2（Silk）	0.4	0.60	1121
富士糸	13-3（Silk）	0.2	0.40	1186
富士糸	13-3（Nylon）	0.3	0.50	1145

Table 1-2 Useage of strings

Usage	Kind of strings		
	First string(一の糸)	Second string(二の糸)	Third string(三の糸)
民謡	17-1	15-2	13-3
長唄	15-1	14-2	13-3

1.3　　三味線の調律

三味線の調律は、「調子」および「本数」という 2 つの要素で行われる。これは西洋楽器のように決まった音程の調弦方法があるものとは大きく異なっている。また、演奏する楽器によっては局注でも調律を変化させる場合がある。なお、調律の詳細については付録の調弦表にて記述する。

1.3.1　調子

調子は、弦それぞれの音程の関係を示しており、本調子、二上がり、三上がりの三種類がある。

本調子は、一の糸を基準にしたとき、二の糸を完全 4 度、三の糸を一オクターブ上に調律する調子である。

二上がりは、一の糸を基準にしたとき、二の糸を完全 4 度、三の糸をオクターブ上に調律する調子である。

三下がりは、一の糸を基準とした時、二の糸を完全 4 度、三の糸を短 7 度(オクターブより一度低い)に調律する調子である。

1.3.2　本数

本数は、音域の基準を示しており、歌い手の声域などによって異なった調律を行う。1 本かた 12 本まであり、西洋音階でいう半音を単位としている。

1.4　さわりについて

1.1 項でも述べたとおり、「さわり」は三味線の重要な機構である。ここではその「さわり」とよばれる機構について説明する。

まず、この機構の目的から述べる。この機構はただ単に一の糸をひいたときに雑音をのせるためのものではない。さわりの目的には音色の付加以外に2通りの目的が存在する。それは三味線の調律が正しいかを判断すること、および勘所（左手で弦を抑える位置）が正しいかを判断することである。

前者は、二の糸、三の糸が正しく倍音に調律されていた場合それらの弦を引いた際に一の糸が共振し、さわりが発生することで判断できる。同様に後者も正しい倍音の位置を左手で抑えることができていれば一の糸が共振し、さわりが発生することで判断できる。

次に、さわりの機構について述べる。三味線にある三本の弦のうち二の糸、三の糸は「上駒」に乗せられている。上駒とはギターなの他の弦楽器に使われているナットというパーツと同様、糸を持ち上げて面（つら）と擦れないようにするものである。これに対して、一の糸はこの上駒を使わず、棹に直接乗せる構造になっている。そのため、弦の高さが他の2本に比べて低くなり、上駒のきわめて近い位置にある「さわり山」と呼ばれる突起をかすめるようになっている。このため弦を引いた際にさわり山と位置の糸が擦れ、三味線独特のさわり音が発生する。このさわり音が出ることをさわりがつくと表現し、この音や構造を総称して「さわり」という。

このようにさわり山があるだけの構造のものを「一文字ざわり（別名押しざわり）」という。それに対し、さわり山の高さを調整できるように改良されたものに「東ざわり」というものがある。これは螺子（ねじ）によりさわり山の高さを調整するものであり一文字ざわりよりも容易にさわりを付けることができる。

Figure 1-9　Ichimonji-sawari(一文字さわり) [top view]

Figure 1-10　Ichimonji-sawari(一文字さわり) [side view]

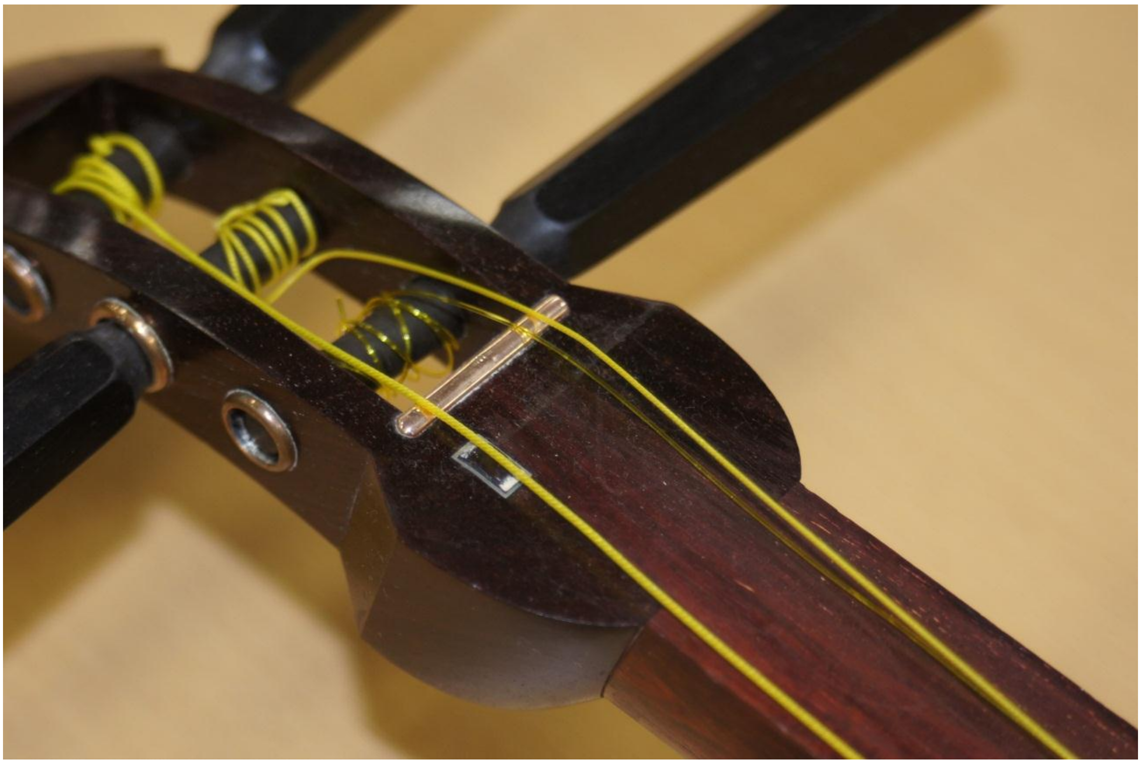

Figure 1-11　Azuma-sawari(東さわり) [top view]

Figure 1-12 Azuma-sawari(東さわり) [side view]

2.　音の録音と解析

2.1　　目的

さわり音の特徴を調べるために三味線音の録音と解析を行う．音の比較方法として時間軸および周波数軸での解析結果の比較、およびスペクトログラムでの比較を行う。

2.2　　時間・周波数解析

2.2.1　目的

三味線およびさわりの特徴を抽出するために三味線音の録音と解析を行う。

2.2.2　実験方法

これらの実験において、録音は精密騒音計(リオン社製 NL-32)を用いて行い、各楽器ともに胴体表側から約 15ｃｍ程度の所に楽器に対して垂直に設置した。

騒音計から出力された信号は、FFT アナライザ(リオン社製 SA-01)にて処理され、データをパソコンに取り込んだあと MATLAB を使って解析を行った。実験器具を以下に示す。

Figure 2-1 FFT analyzer

Figure 2-2 Sound level meter (リオン社製 NL-32)

Figure 2-3 Laptop computer (lenovo 社製)

2.3　　実験結果

2.3.1　一の糸

一の糸の録音は美邦堂三味線店にて行った。そして指で弦をつまみ上げ、離した際に発生する音を収録した。弦は同店、喜多川派家元の喜多川保延氏が弾いた。チューニングに関しては喜多川氏が行った。

なお、この実験ではさわりの効き具合による違いについても調べる。目安は喜多川氏の感覚によるものであり、表 2-1 に示す。

Table 2-1 Sawari level

Title	Sawari level /pitch	Remarks
Without sawari	zero	No.001～003 (only 003 with plectrum)
Sawari low	low	No.001,002
Sawari low (80)	low（80%）	No.001~003
Sawari middle	Middle（100%）	No.001~003
Sawari high(120)	high（120%）	No.001,002
Sawari high (150)	high（150%）	No.001

2.3.1.1 時間軸波形

次に、各音の時間軸波形を示す。解析周波数は 10000Hz、サンプリング点数は 32768 点である。なお、縦軸は騒音計から出力された電圧[V]、横軸は時間[s]である。

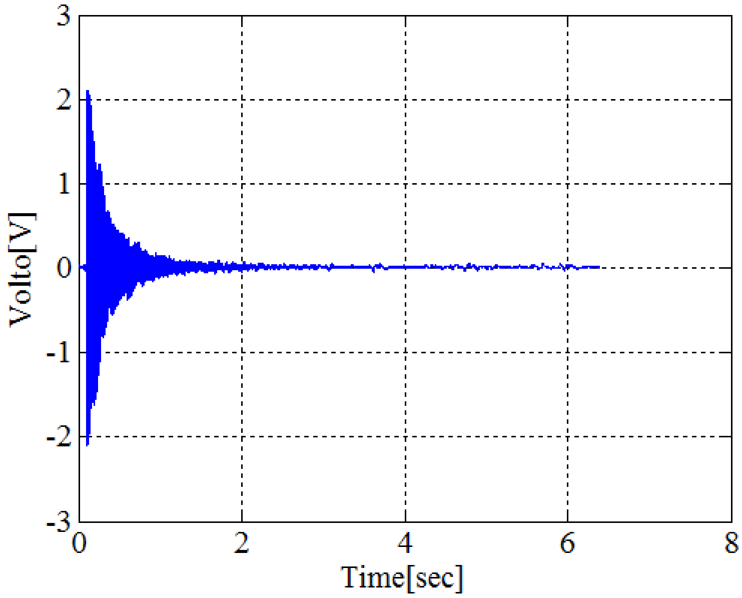

Figure 2-4 Without SAWARI [001]

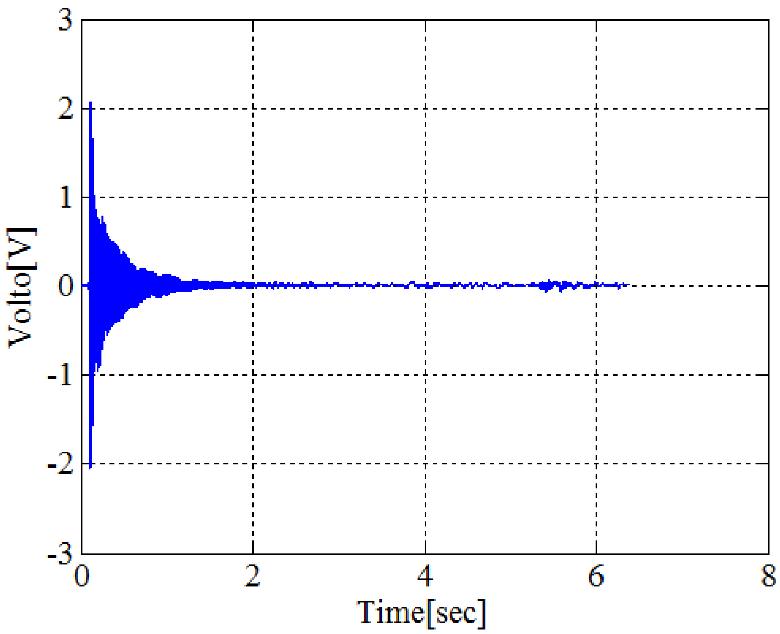

Figure 2-5 Without SAWARI [002]

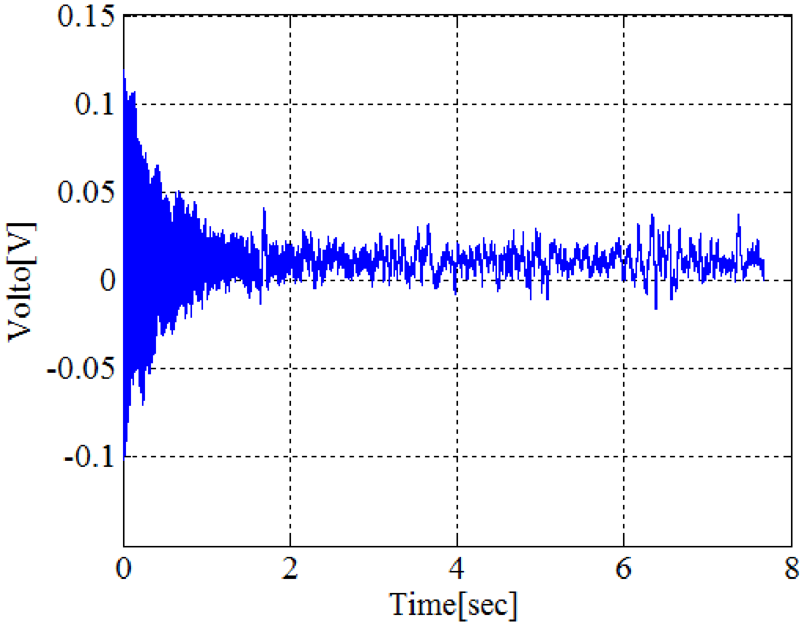

Figure 2-6 Without SAWARI (with plectrum) [003]

図 2-3 から図 2-6 までがさわりなしの結果である。図 2-3 はさわりなしの結果である。図 2-4、図 2-5 は綺麗な減衰となっており、音もバイオリンなどに近い音となった。

さわりなしの中で唯一、撥を用いたものが図 2-6 である。機材の不調により弾き始めが録音できていないが、後半の余韻に大きな差が出ていることがわかる。

次に、さわり不足の状態の結果を 3 つ示す。

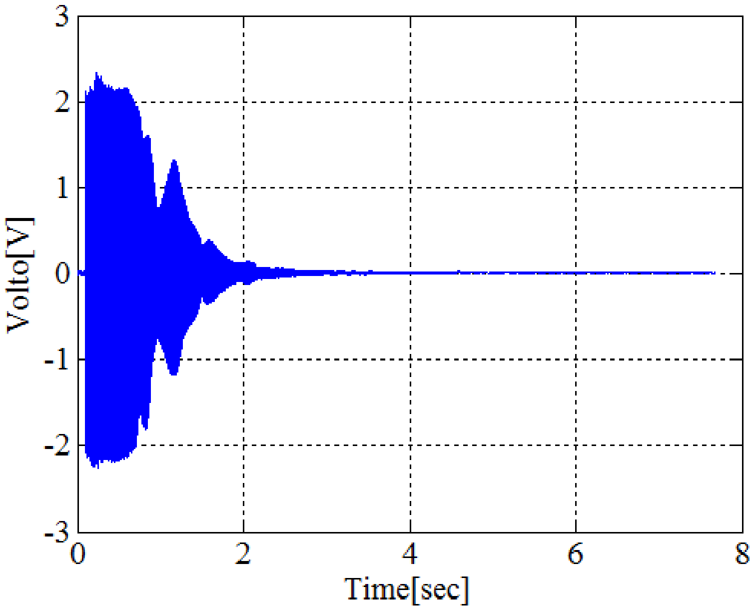

Figure 2-7 SAWARI low [001]

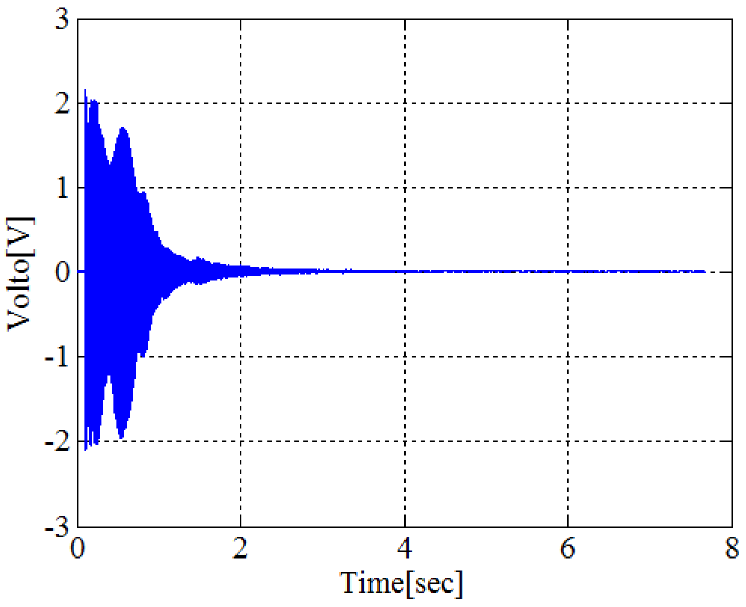

Figure 2-8 SAWARI low [002]

さわり不足の状態の結果より、さわりが不足すると音のふくらみが一度ではなく、複数回にわたって発生することがわかる。特に図 2-7 は音の立ち上がりから減衰、その後の膨らみまで波形が著しく似ている。

次に、さわり不足(80%程度)の状態の結果を 3 つ示す。なお、3 つめのデータのみ撥を用いた発音している。

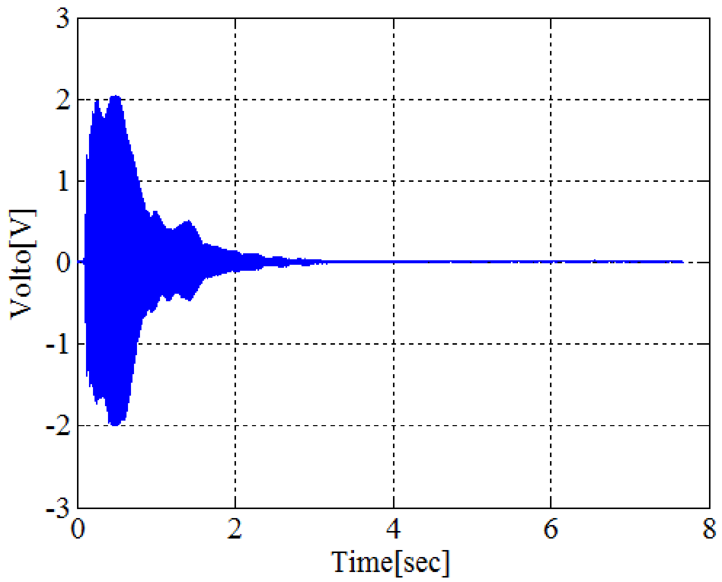

Figure 2-9 SAWARI low (80%) [001]

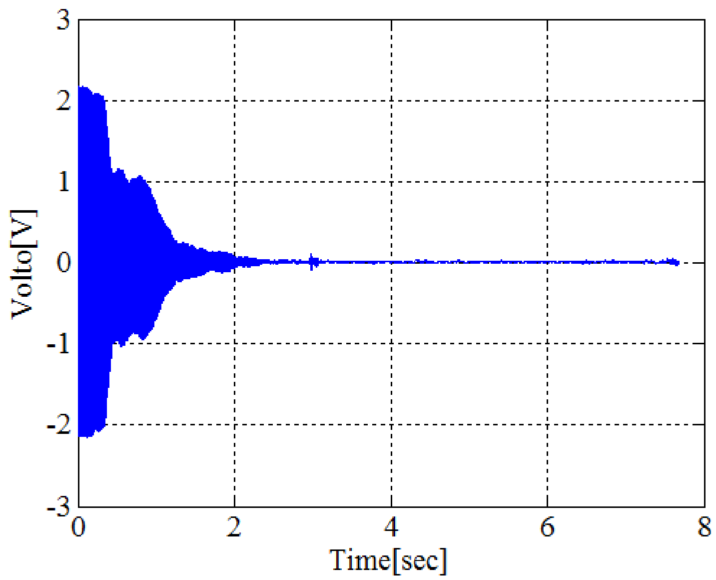

Figure 2-10 SAWARI low(80%) [002]

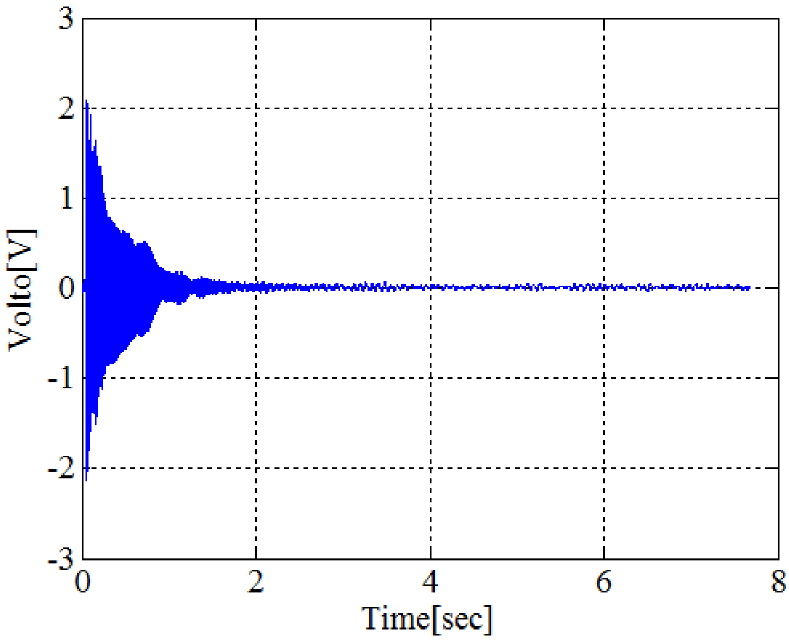

Figure 2-11 SAWARI low(80%) [003]

さわり不足（80%程度）の結果も、さわり不足と同様の傾向があるが、その結果に比べて後半のふくらみが大きくない。また、撥を用いたほうが大きなふくらみがなく、減衰がきれいな形になっている。次に、さわりアリの状態の結果を示す。

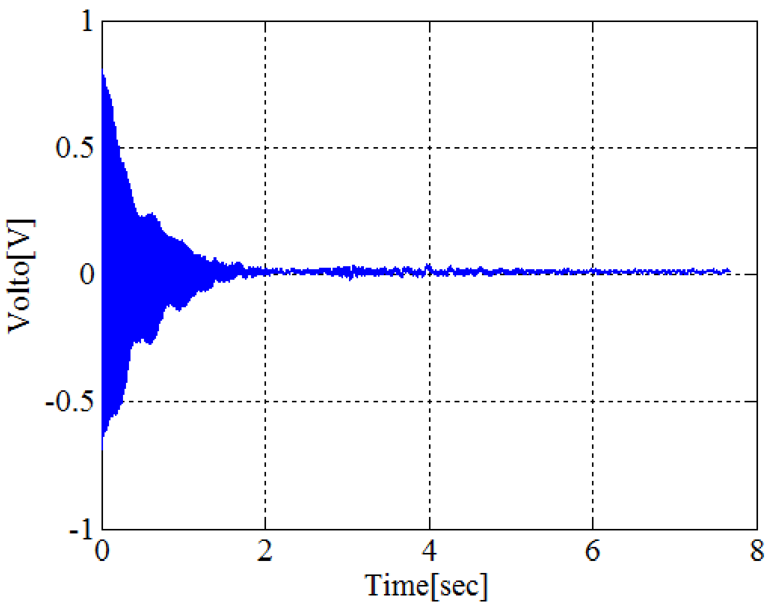

Figure 2-12 SAWARI middle [001]

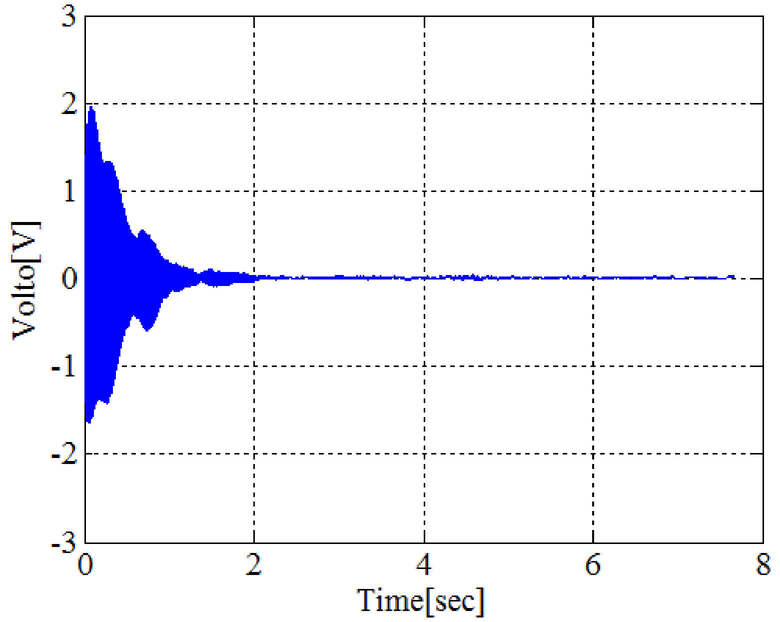

Figure 2-13 SAWARI middle [002]

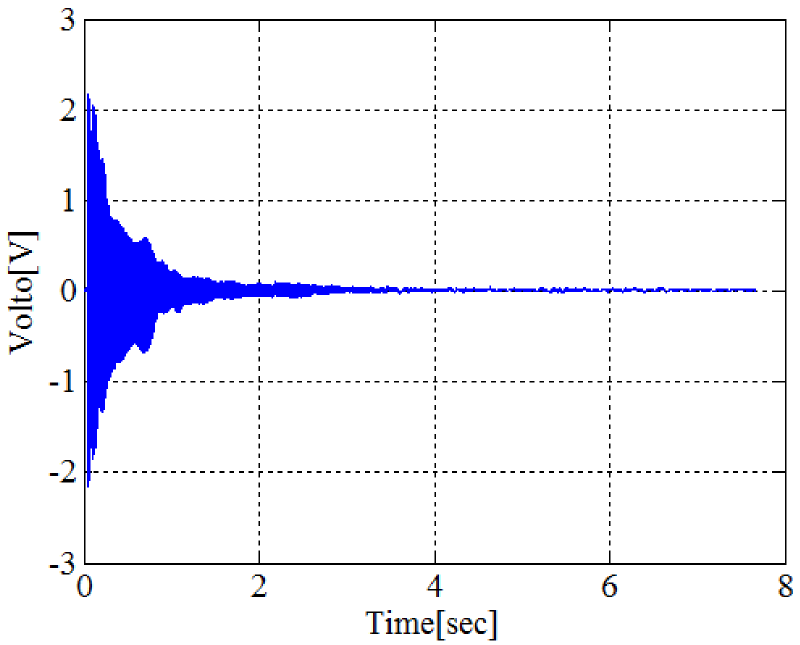

Figure 2-14 SAWARI middle [003]

さわり有りの状態の結果より、大きなふくらみがないものが正しく調整されたさわりで有ることがわかる。この実験からさわりは減衰過程において少し音を維持、もしくは大きくする働きをしていることがわかる。そしてそのぶんだけ余韻が長くなっている。なお図 2-12 と図 2-13 は弾き始めが録音できていない。

次に、さわり超過（120%）の状態の結果を 2 つ示す。

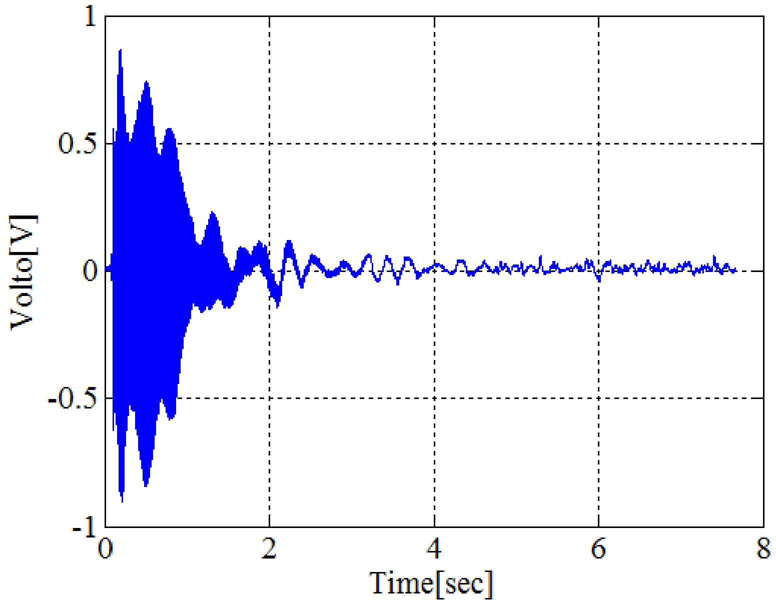

Figure 2-15 SAWARI high(120%) [001]

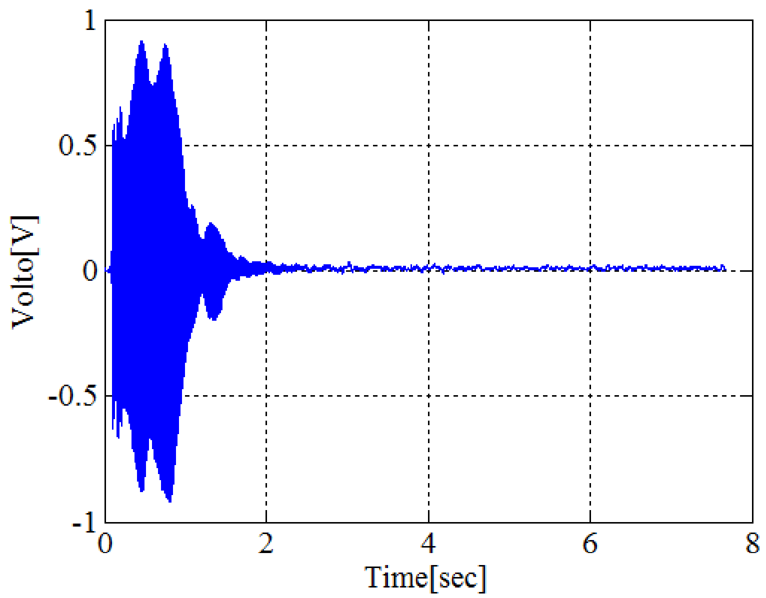

Figure 2-16 SAWARI high(120%) [002]

さわり超過(120%)の結果から、さわりの付き過ぎは大きなうなりを発生し、余韻にもうなりが出ていることがわかる。また、音が早めに減衰してしまうことがわかる。

次にさわり超過(150%)の状態の結果を示す。

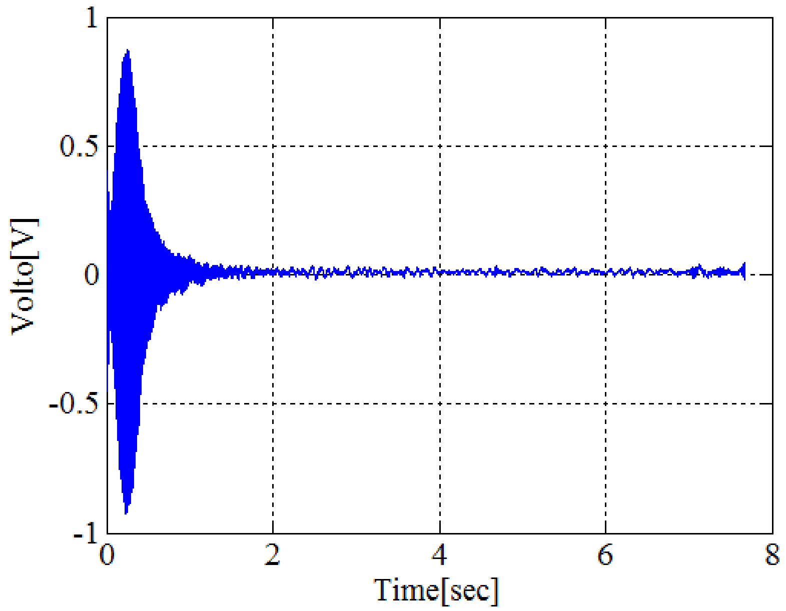

Figure 2-17 SAWARI high(150%) [001]

さわり超過(150%)の結果から、さわりがつきすぎるとうなりすら発生しなくなることがわかる。これはさわり山が高すぎるため、さわり山が上駒の代わりとして働いてしまうためと考えられる。

最後に調子笛の波形を示す。調子笛とは三味線の調律の際に使用する増えである。ここでは C-#の音を録音した。なお、この音は本調子の 5 本、一の糸の調律に用いる。

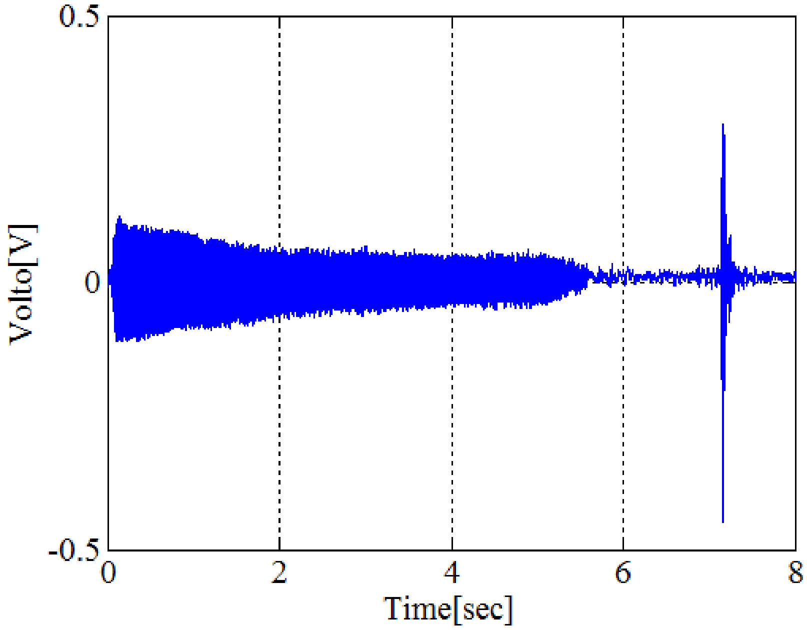

Figure 2-18　Choushi-bue (Pitch pipe) [001]

調子笛はその名の通り笛であり、吹く息の圧力により音量がかわる。グラフ後半の立ち上がった部分はノイズであり、調子笛とは関係がない音である。

2.3.1.2 周波数波形

次に周波数波形を示す。なお、横軸が周波数[Hz]、縦軸が音圧[Pa]である。

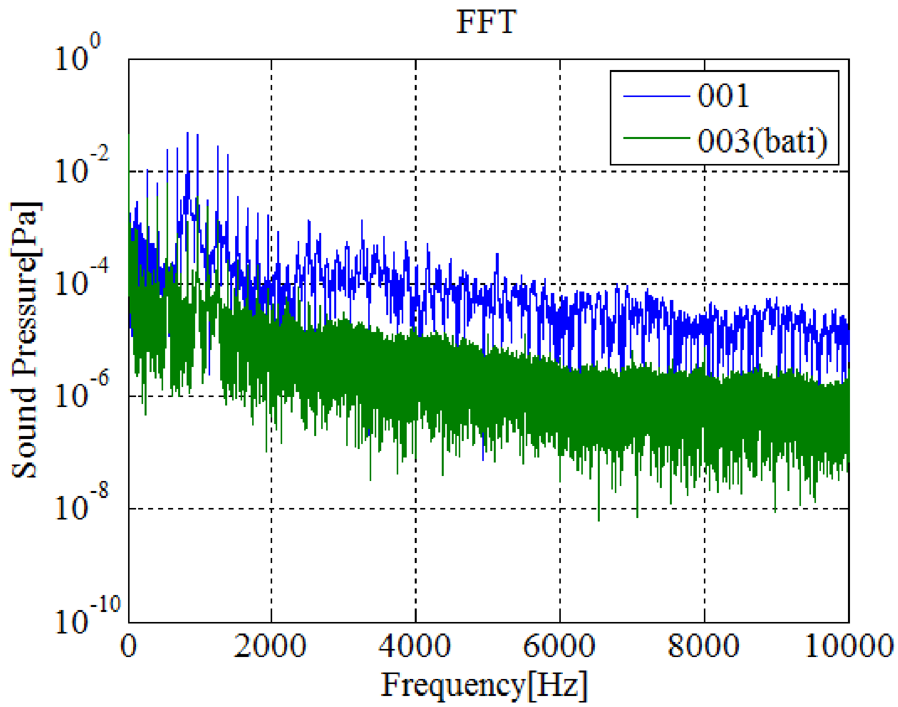

Figure 2-19 Without SAWARI [001 003 (with plectrum)]

図 2-19 はさわり無しのデータ 001 番および 003 番の結果である。001 番と 003 番にはノイズが入っていたため除いた。001 番と 003 番の比較から、撥を用いた場合、高周波成分の割合が下がるという傾向があることがわかる。しかし、これは録音の際、弾き始めがうまく録音できておらず、減衰が早い高周波成分は弾き始めのみに存在するため、このような結果になったと考えられる。

次にさわり不足（001 番、002 番）の周波数解析結果を示す。

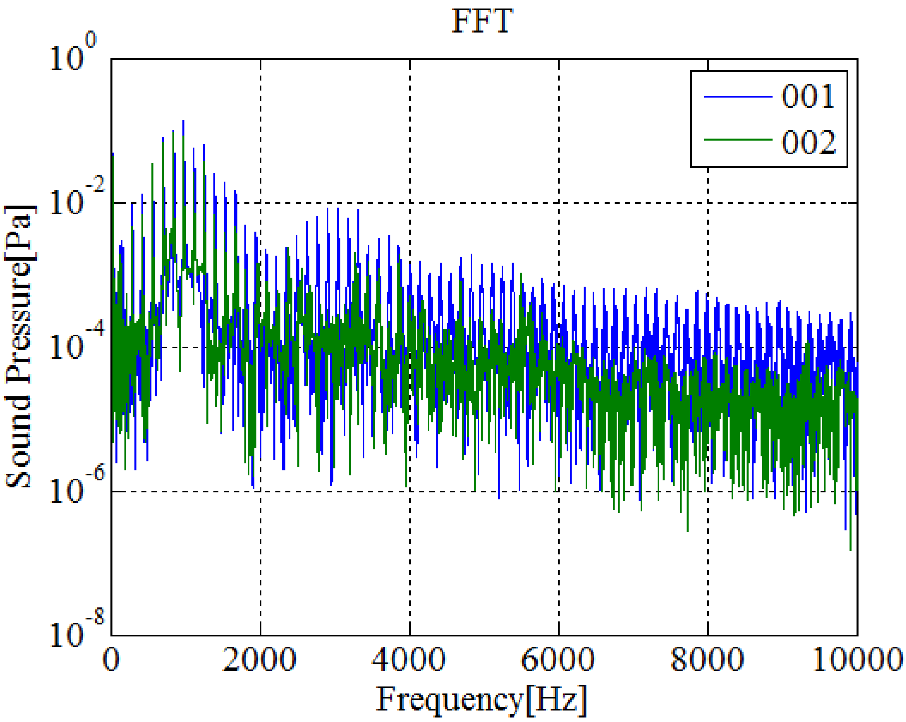

Figure 2-20 SAWARI low [001,002]

002 番に関しては 1000Hz 前後のピークが相対的に高く，高周波帯域で低くなっている事が確認できる．

次にさわり不足（80%）の周波数解析結果を示す。なお、002 番のデータに関しては弾き始めの録音ができていないため除いた。

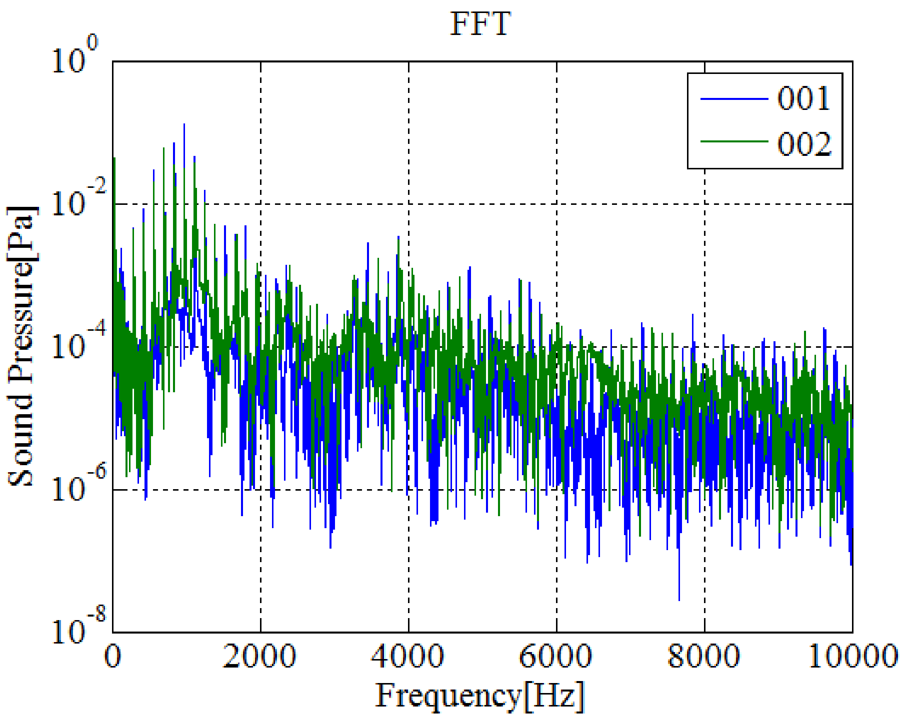

Figure 2-21 SAWARI low (80%) [001, 003 (with plectrum)]

001 番と 003 番の比較から、さわりが不足した状態では 1000Hz 前後のピークが最も高く、2500 から 3000Hz で音圧が一度低くなる傾向があり、その後 3000 から 5000Hz では逆に高くなる傾向があることがわかる。

次にさわり有り 003 番の結果を示す。なお、001 番および 002 番は弾き始めが録音できていなかったので除いた。

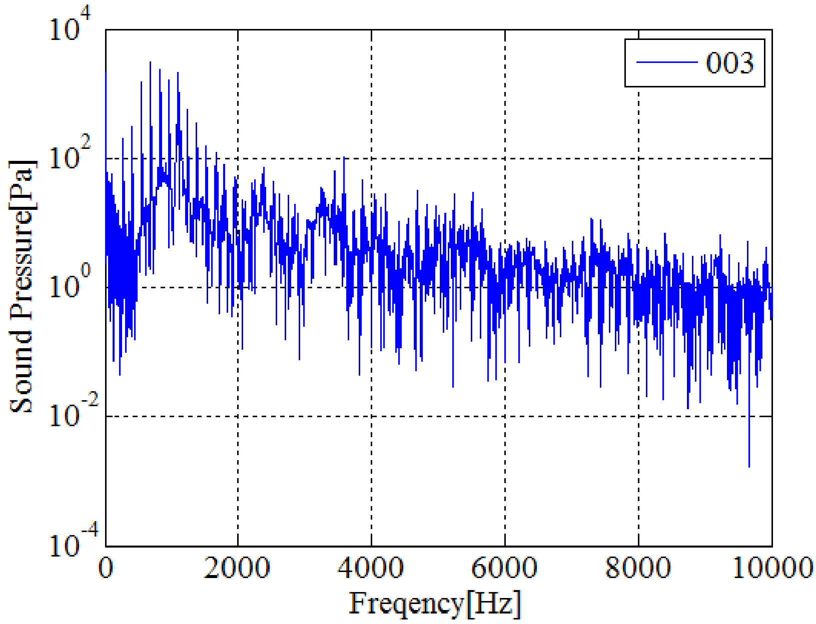

Figure 2-22 SAWARI middle [003]

図 2-42 と比べ, 最も高いピークが低周波よりになっていることがわかる. また, 2000Hz 以降に関しては図 2-42 と同様, 2500 から 3000Hz にかけて一度音圧が低くなっていることがわかる. 3000Hz 以降では, 一度音圧が高くなり 4500 付近で再び音圧が低くなっている.

次にさわり超過（120%）のデータ 001 番および 002 番の結果を示す.

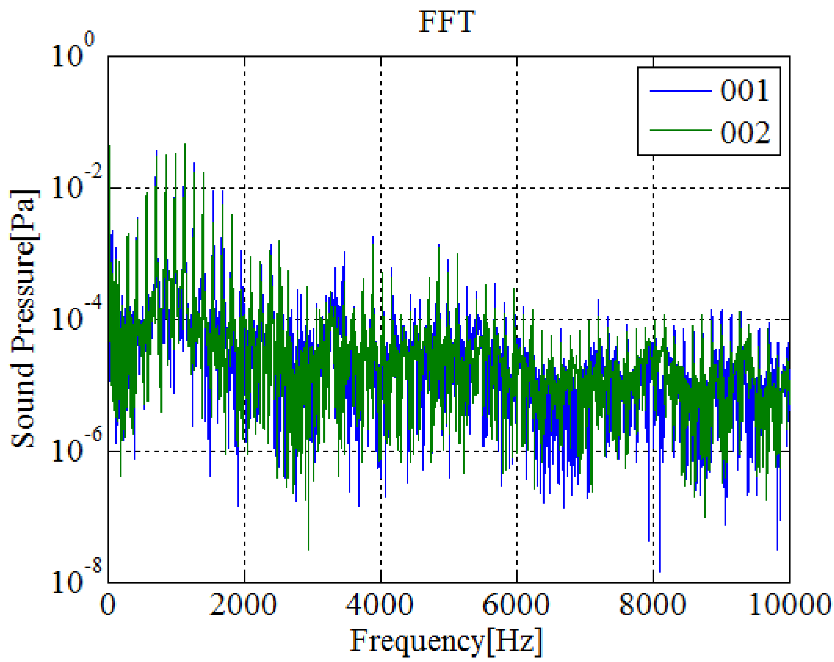

Figure 2-23 SAWARI high (120%) [001,002]

図 2-22 と比べ、8000Hz 以降の帯域の音圧が全体的に高めに出ていることがわかる。それに対し、低周波帯域の傾向は大きく変わらない。

次にさわり超過（150%）のデータ 001 番の結果を示す.

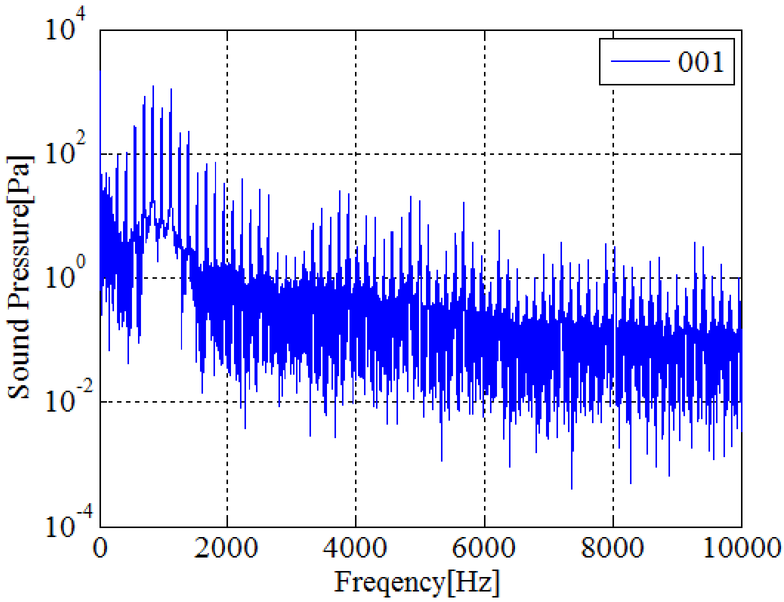

Figure 2-24 SAWARI high (150%) [001]

先ほどの 120%の結果と比べ、4000Hz 以降の音圧が低くなっていることがわかる。それ以下の帯域では特に大きな差は見られない。

次に調子笛の結果を示す。

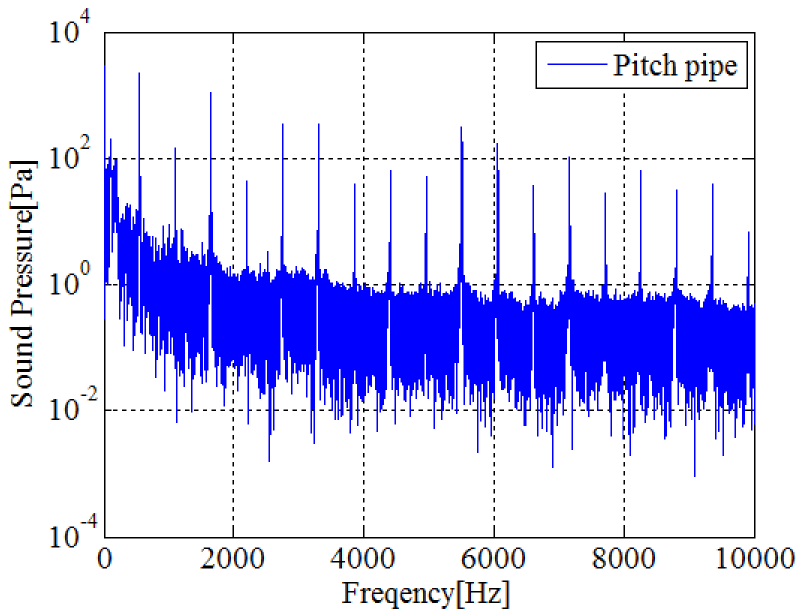

Figure 2-25 Chousi-bue [Pitch pipe]

調律用の笛であるので倍音成分がきれいに出ていることがわかる。三味線の波形とは周波数が多少異なるが、2000Hz や、4000Hz 付近のピークが一度低くなりその後のピークが再び高くなるなど、三味線と類似した傾向があることがわかる。

2.3.1.3 スペクトログラム解析

次にスペクトログラムを作成し、三味線自体の特徴を得るために、時間に依存した周波数解析を行った。2.3.1.1 項で用いた時間領域のデータを MATLAB の Spectrogram を用いてスペクトログラム表示し、比較する。窓関数にはカイザーを用いた。スペクトログラムにより得られた各楽器の時間依存周波数領域データを以下に記載する。なおグラフの縦軸が周波数、横軸が時間を示し、解析周波数は 10000Hz、サンプリング点数は 32768 点である。 グラフの赤い部分がピークの高い領域、青い部分がピークの低い領域である。

まず、さわりなしの結果を示す。

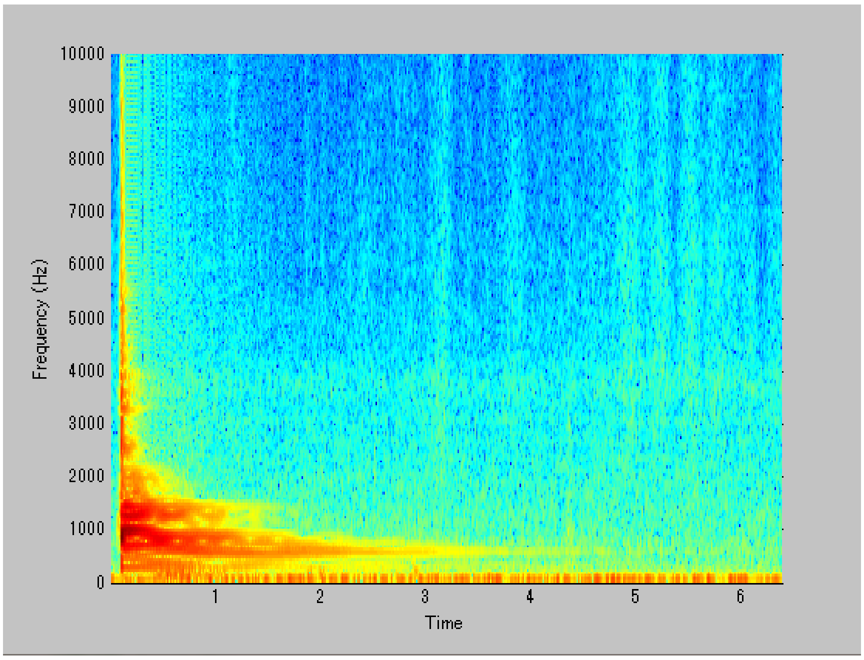

Figure 2-26 Without SAWARI [001]

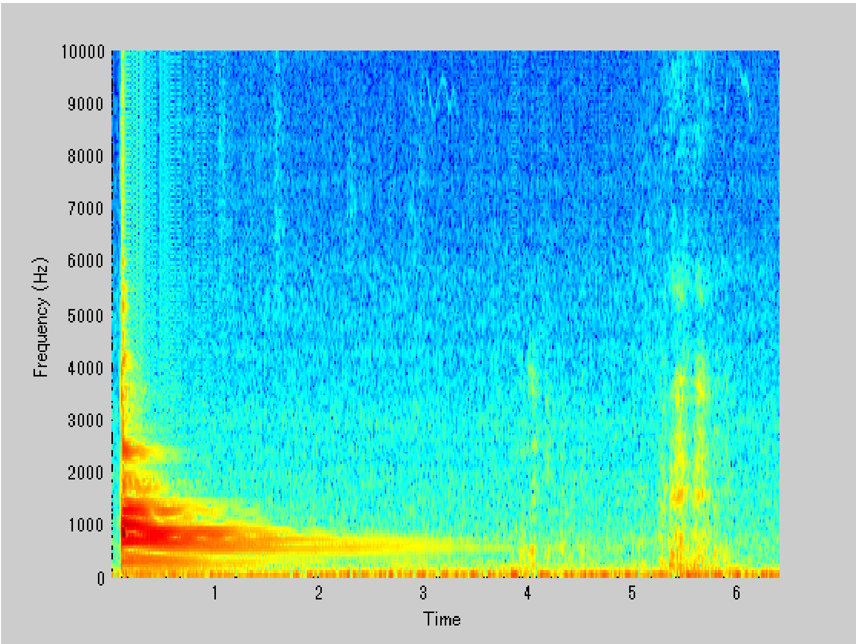

Figure 2-27 Without SAWARI [002]

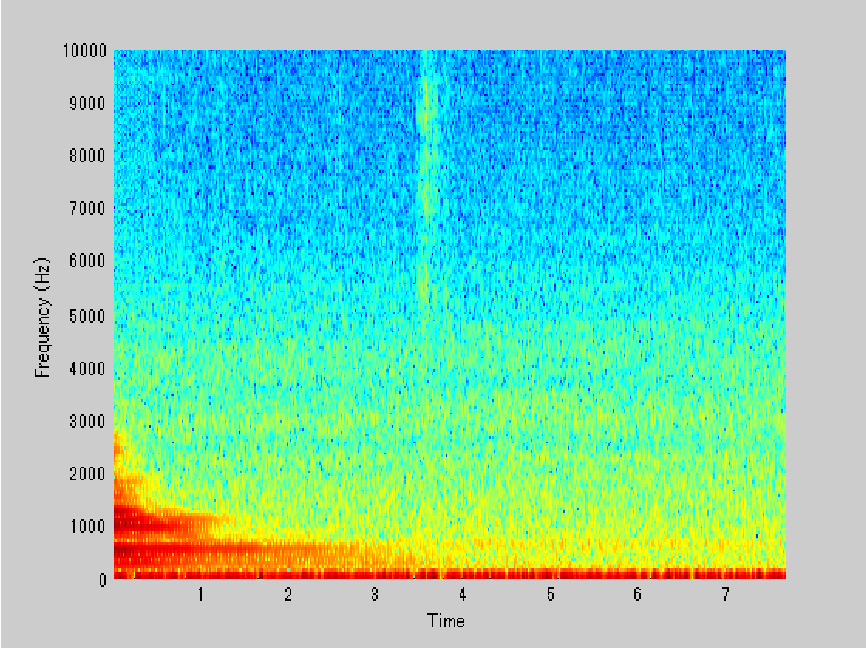

Figure 2-28 Without SAWARI (with plectrum) [003]

さわり無しの結果は他の実験と同様に、基音の残響が少し短いこと、および1000Hz 前後の音が最も強く高周波にすすむにつれ残響が短くなるという結果がえられた。

次にさわり不足の結果（001 から 003）の結果を示す。

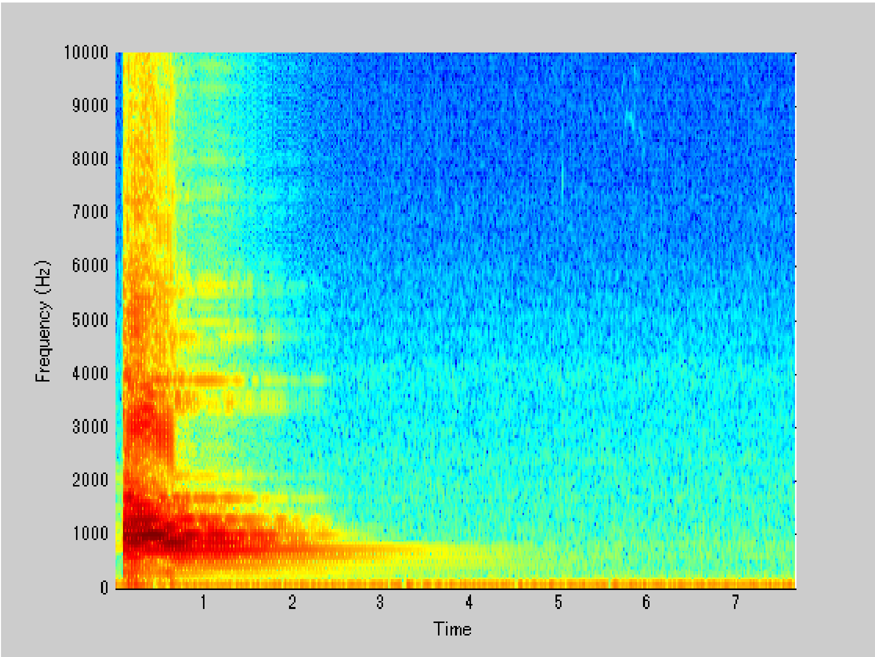

Figure 2-29 SAWARI low [001]

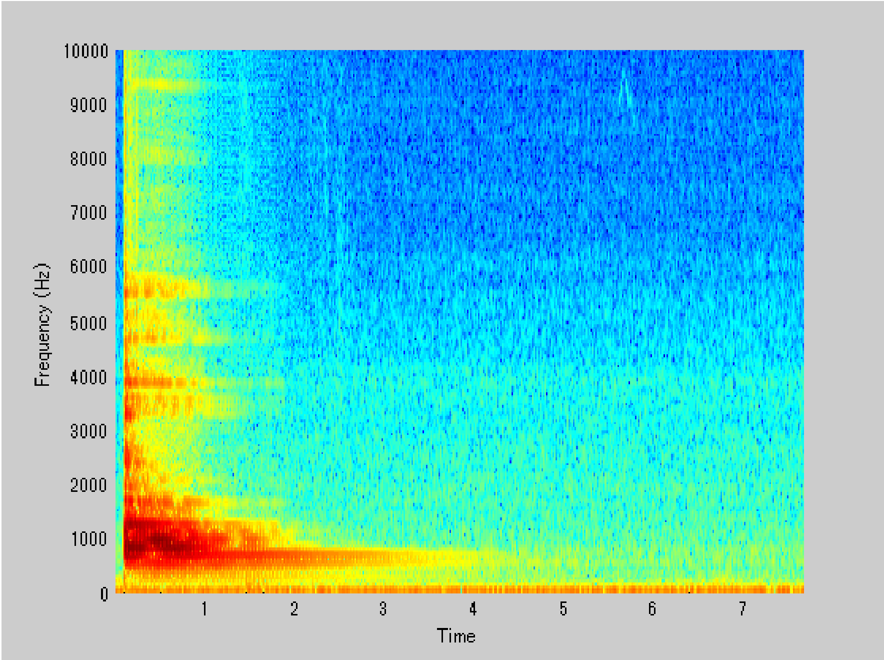

Figure 2-30 SAWARI low [002]

さわり不足の状態の結果から、さわりが多少ついた状態では 4000Hz 付近と 6000Hz 付近の音が強く出る傾向があることがわかる。また、9500Hz 付近に 1 つピークが出ていることがわかる。

次にさわり不足（80%）の結果を示す。

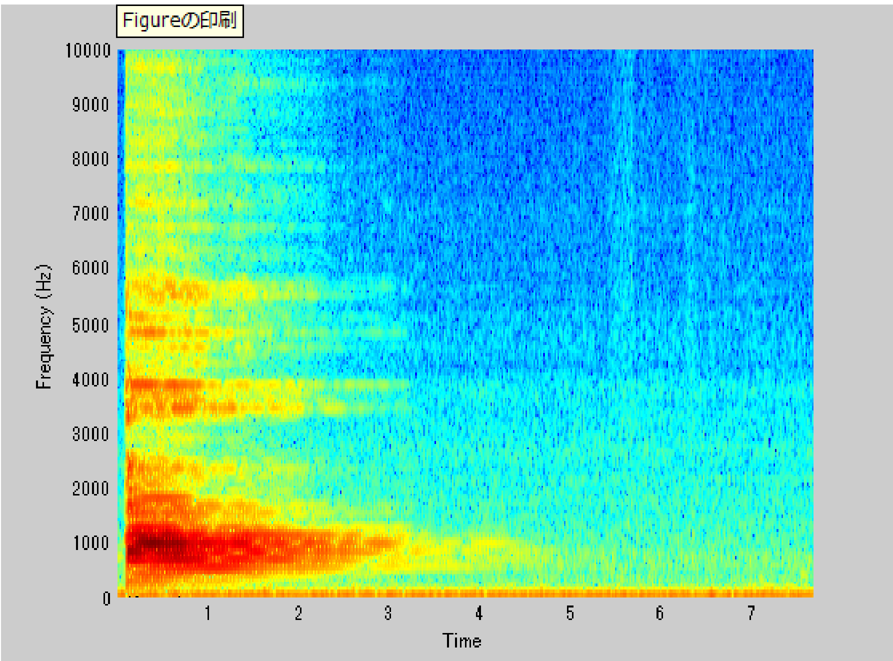

Figure 2-31 SAWARI low (80%) [001]

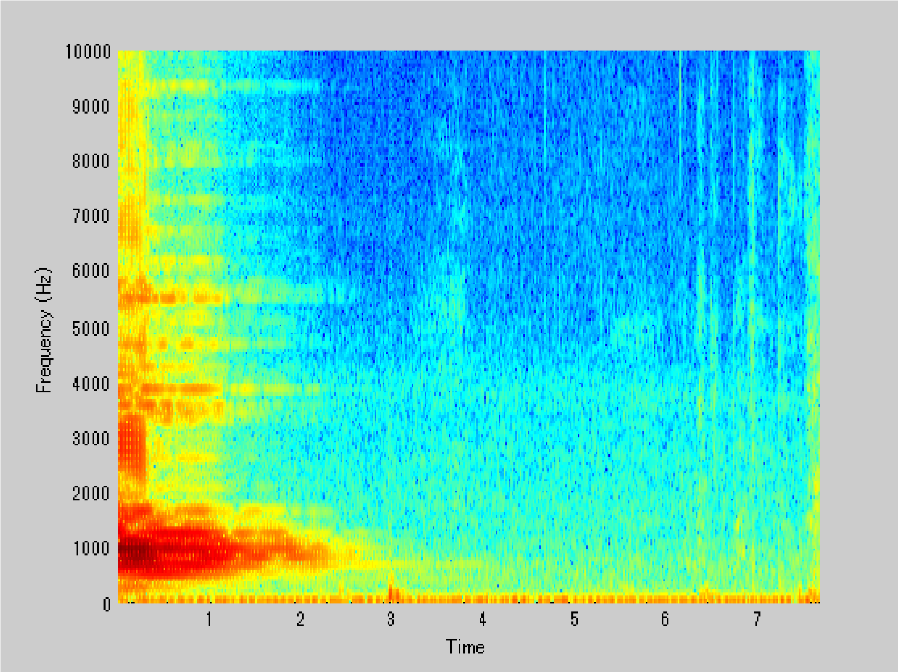

Figure 2-32 SAWARI low (80%) [002]

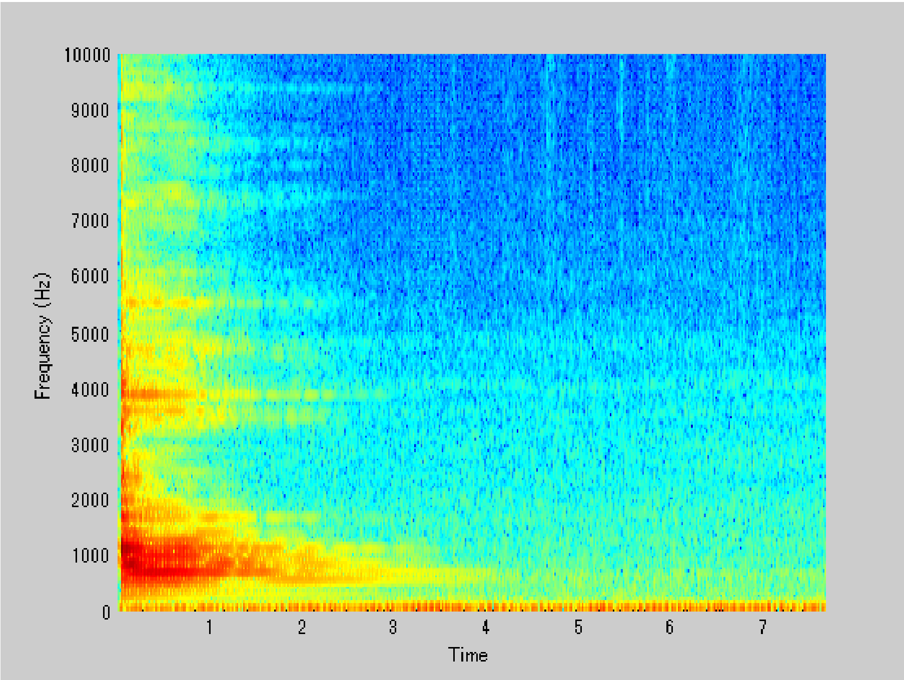

Figure 2-33 SAWARI low (80%) [003 (bati)]

さわり不足(80%)の状態の結果から、さわり不足の時よりも残響が長くなっていることがわかる。 ただし、さわり不足と同様に 4000Hz 付近と 6000Hz 付近の音が強く出る傾向があることもわかる。

次にさわり有り（001 から 003）の結果を以下に示す。

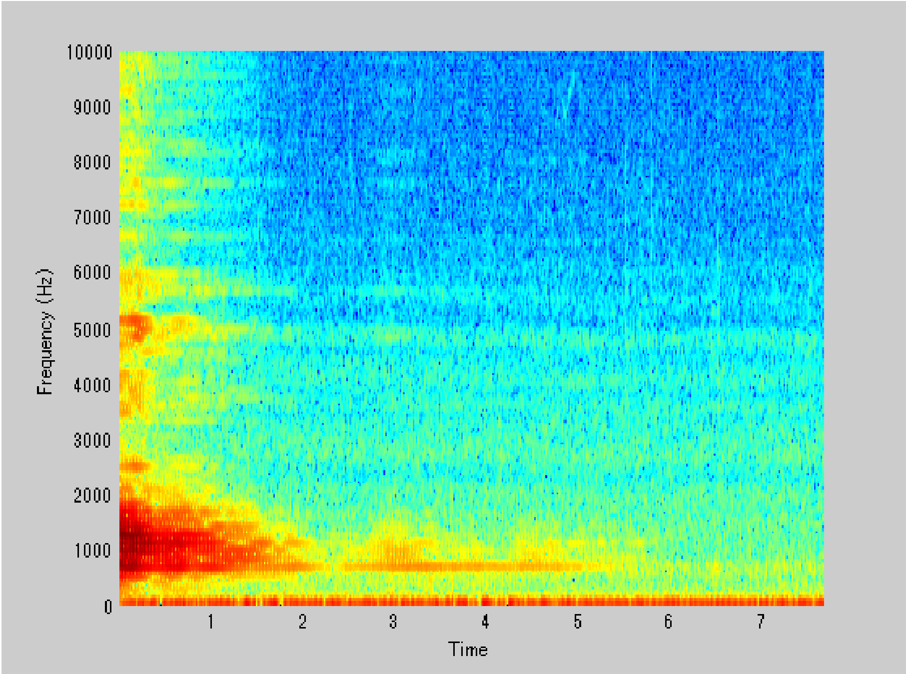

Figure 2-34 SAWARI middle [001]

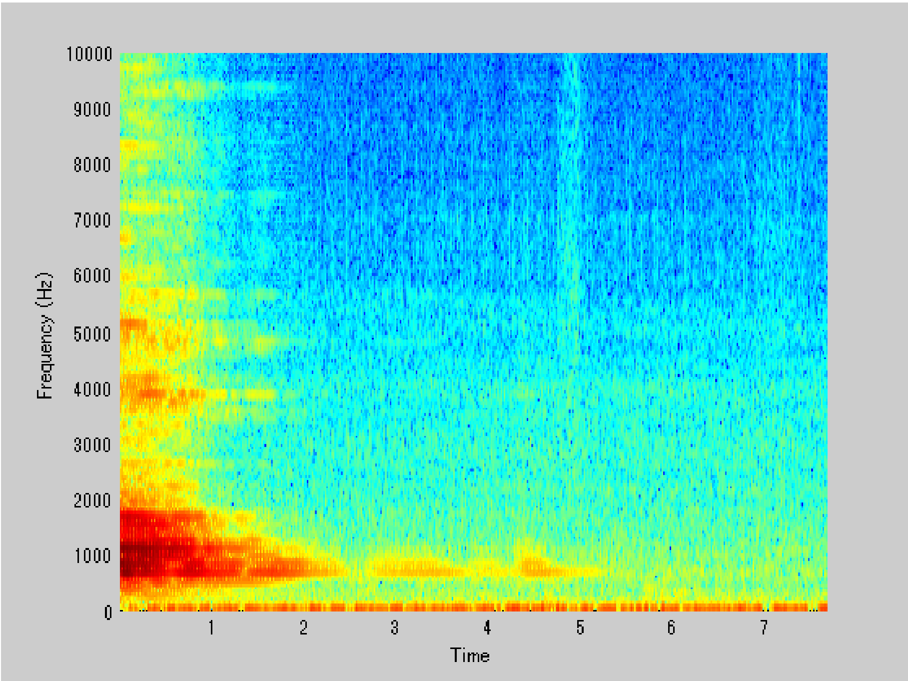

Figure 2-35 SAWARI middle [002]

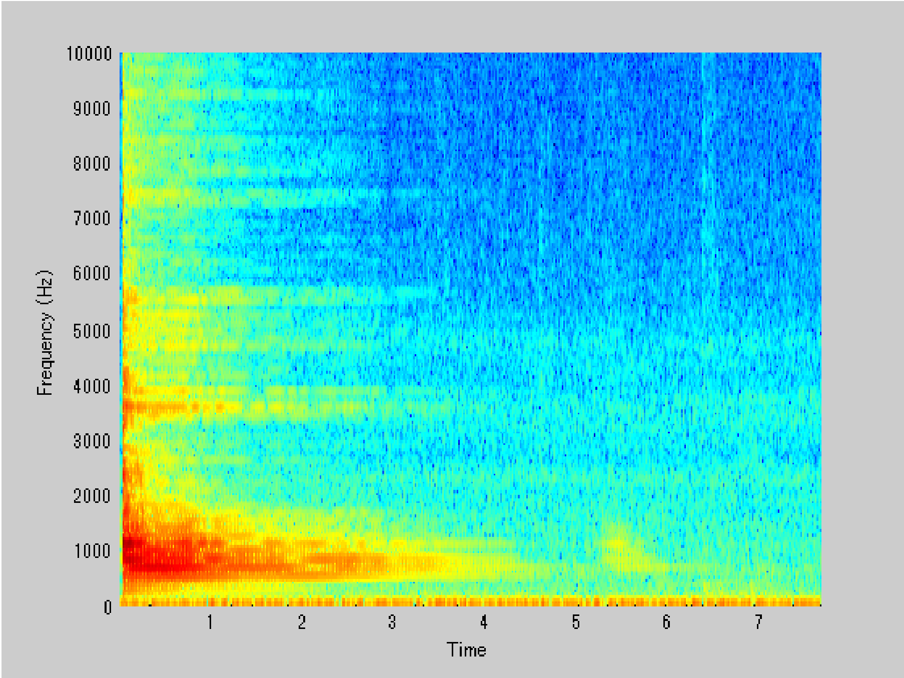

Figure 2-36 SAWARI middle [003]

さわり有りの結果から、高周波帯域での残響はもちろんのこと、1000Hz 前後の帯域の残響も長くなっていることがわかる。

次にさわり超過（120%）の結果を示す。

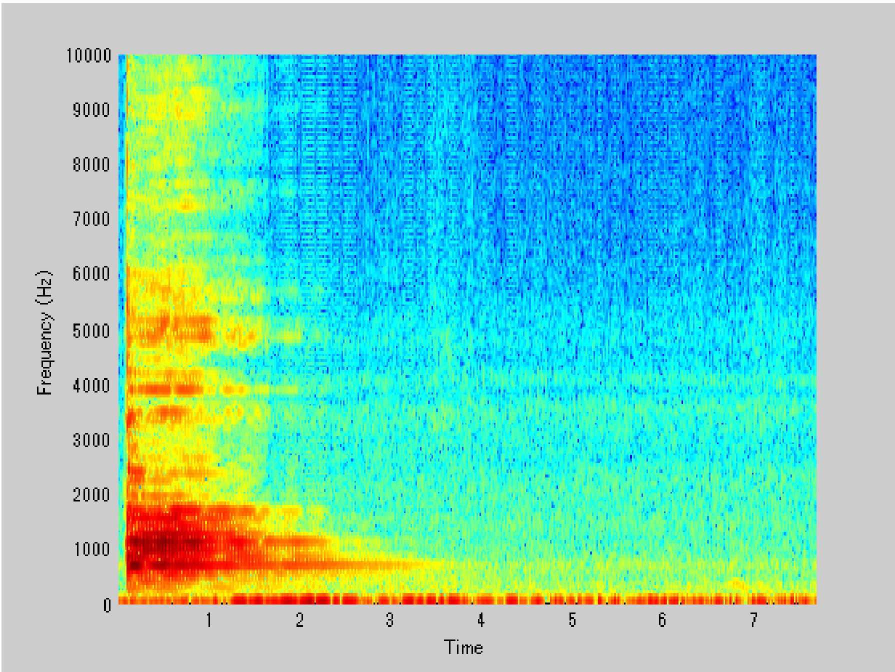

Figure 2-37 SAWARI high (120%) [001]

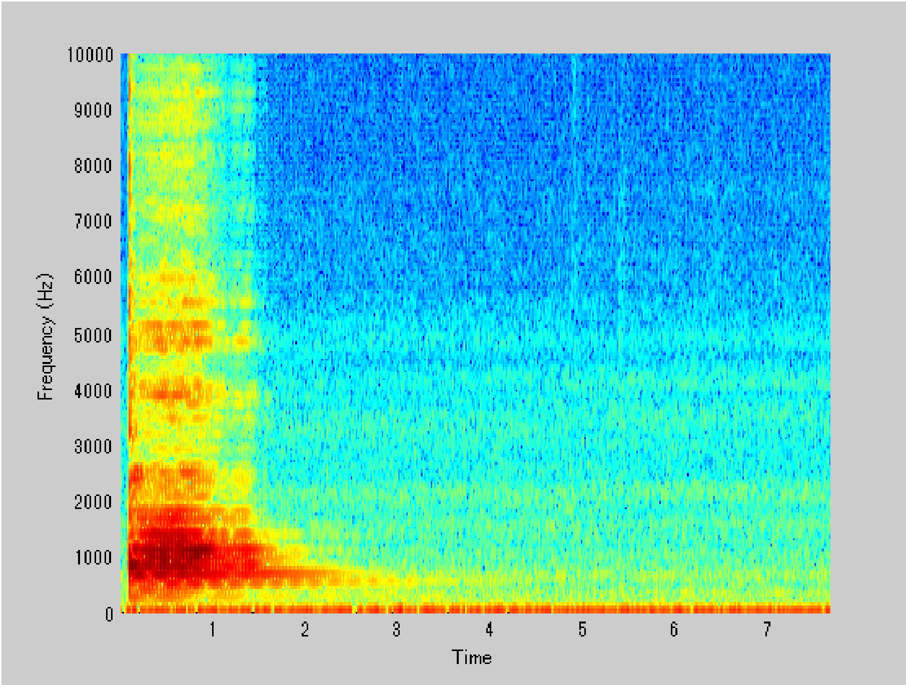

Figure 2-38 SAWARI high (120%) [002]

さわり超過（120%）の結果より、さわりが強くついた場合、1000Hz 付近の残響が短くなることがわかる。高周波帯域はさわり不足と同程度の残響であることがわかった。

次に、さわり超過(150%)の結果を以下に示す。

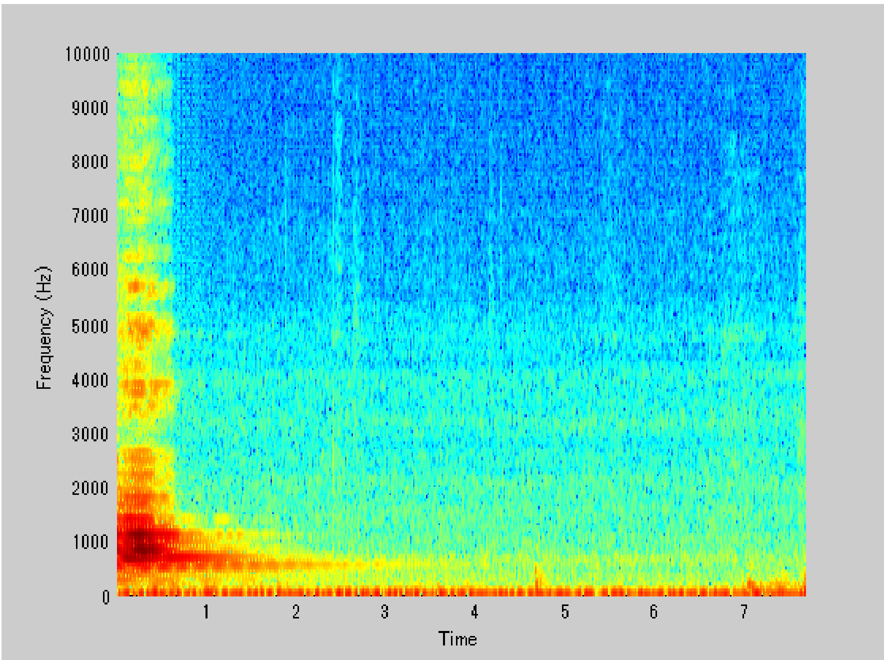

Figure 2-39 SAWARI high (150%) [001]

さわり超過(150%)の結果より、さわりが極端についた場合、他のさわりがついた状態に比べて高周波帯域の残響が著しく短くなることがわかった。また、1000Hz 前後の音に関しては多少残響が短くなったが、高周波帯域に比べるとわずかな差であった。

次に調子笛の結果を以下に示す.

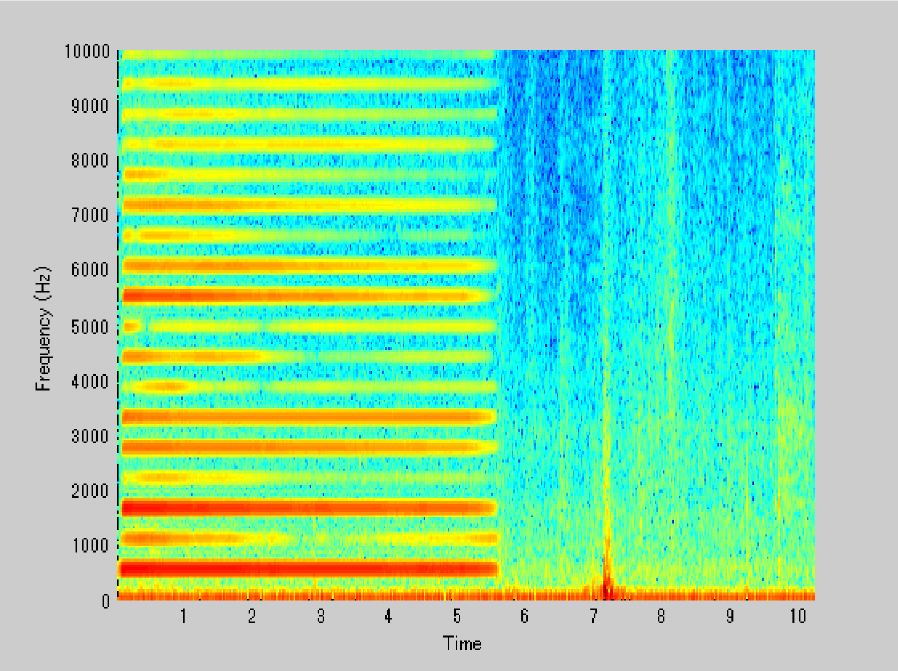

Figure 2-40 Choushi-bue [pitch pipe]

調子笛は先の考察でも述べたように調律用の笛であるので倍音成分がきれいに出ている。そして 2000Hz や、4000Hz 付近のピークが低く、その他のピークが高いなど、三味線と類似した傾向があることがわかる。

2.3.2　二の糸、三の糸

二の糸、三の糸の録音は本学内研究棟ゼミ室 A で行った。卓上に緩衝用のスポンジを置き、その上に三味線を設置して実験を行った。弦は本学卒業生の大江耕司氏が弾いた。チューニングに関しては一の糸と同様に喜多川氏が行った。

2.3.2.1 時間軸波形

次に、各音の時間軸波形を示す。解析周波数は 5000Hz、サンプリング点数は 32768 点である。なお、縦軸は騒音計から出力された電圧[V]、横軸は時間[s]である。

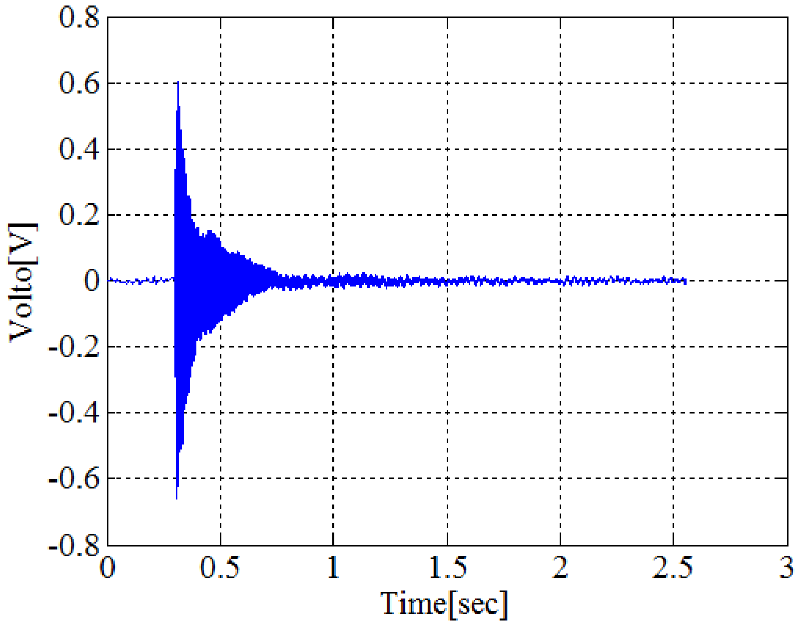

Figure 2-41 Ni-no-ito [2nd string] (without SAWARI)

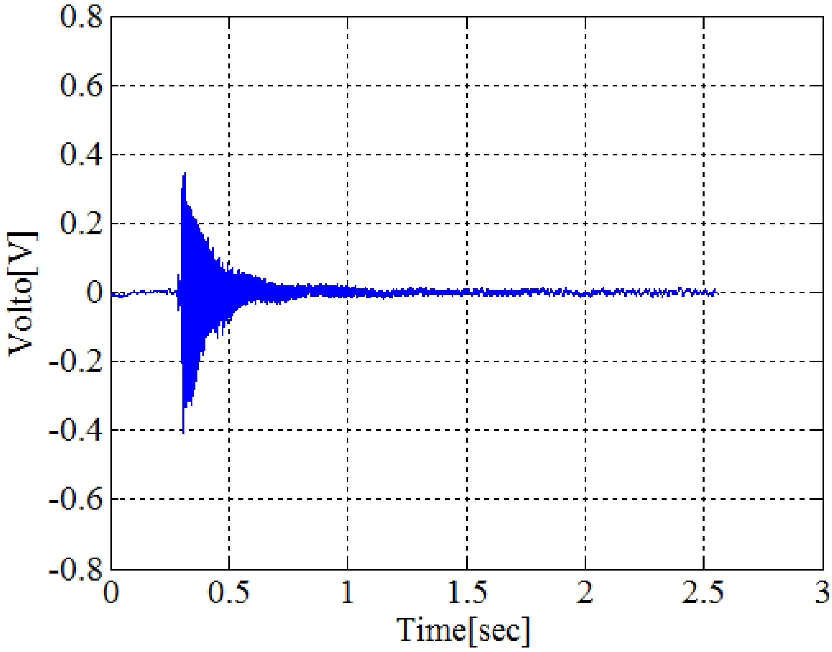

Figure 2-42 Ni-no-ito [2nd string] (with SAWARI)

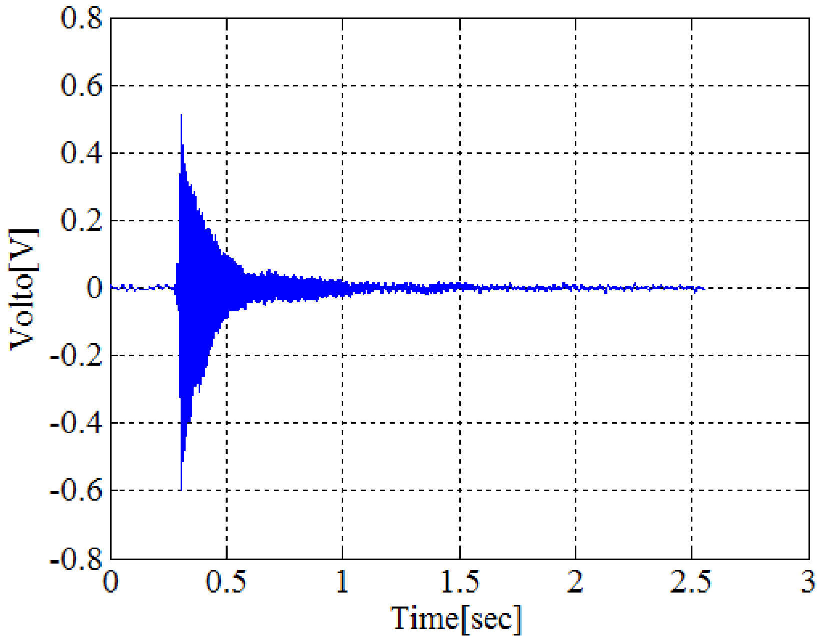

Figure 2-43 San-no-ito [3rd string] (without SAWARI)

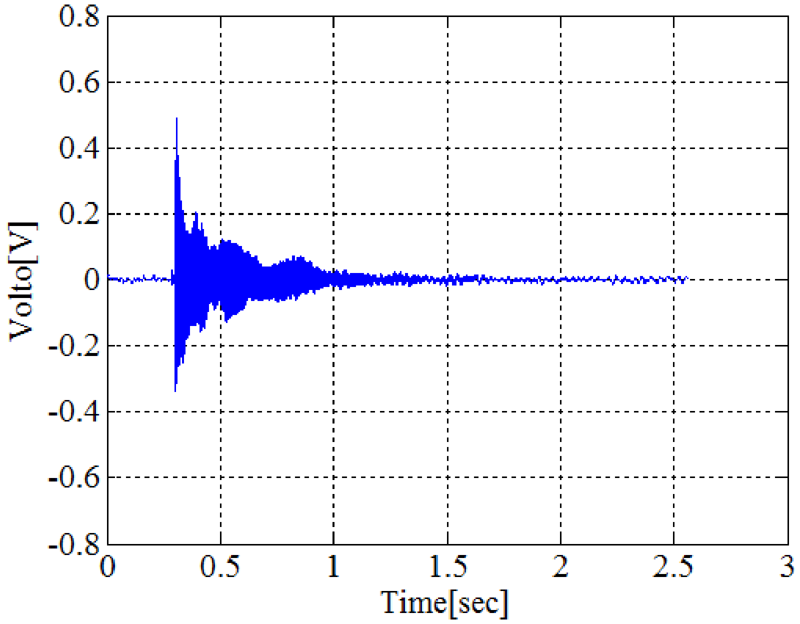

Figure 2-44 San-no-ito [3rd string] (with SAWARI)

さわり有りの二の糸，三の糸にうなりが発生していることがわかる。しかしながら、さわりの無いはずの二の糸、三の糸のどちらも多少うなりが発生していることがわかる。

2.3.2.2 周波数波形

次に周波数波形を示す。なお、横軸が周波数[Hz]、縦軸が音圧[Pa]である。

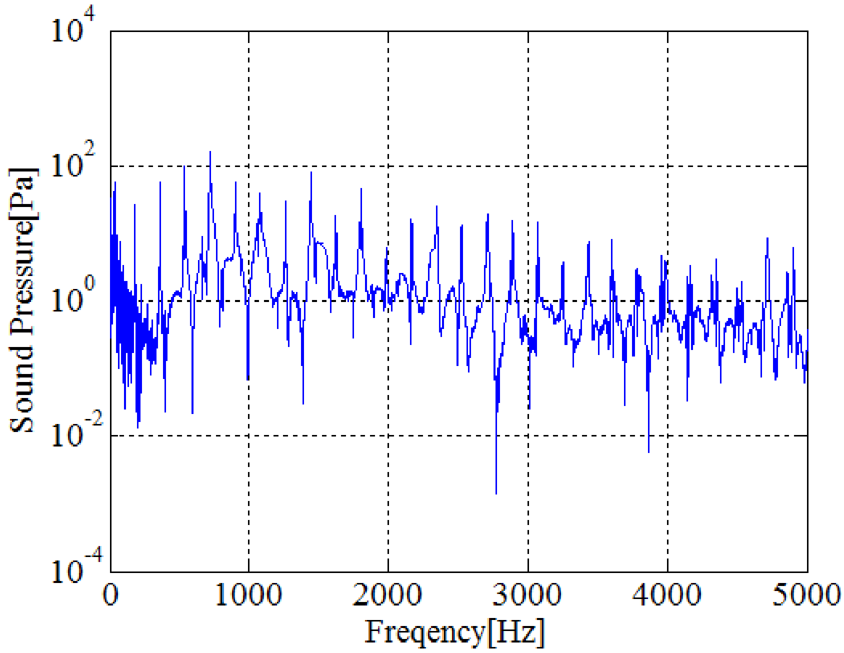

Figure 2-45 Ni-no-ito [2nd string] (without SAWARI)

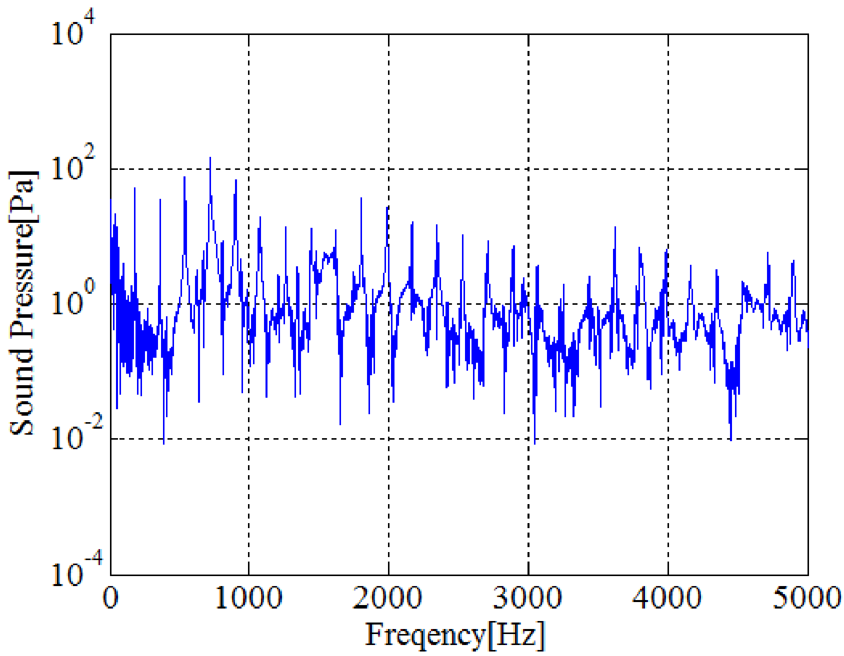

Figure 2-46 Ni-no-ito [2nd string] (with SAWARI)

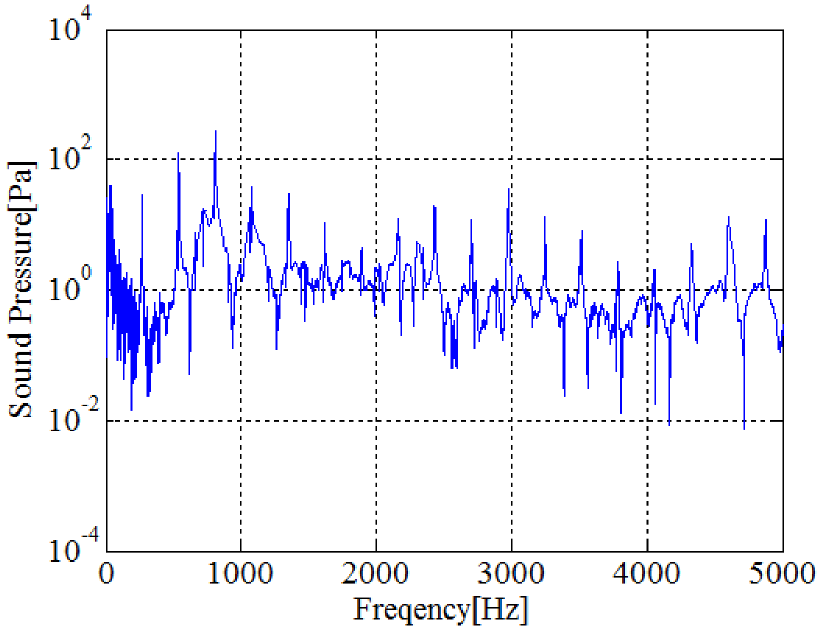

Figure 2-47 San-no-ito [3rd string] (without SAWARI)

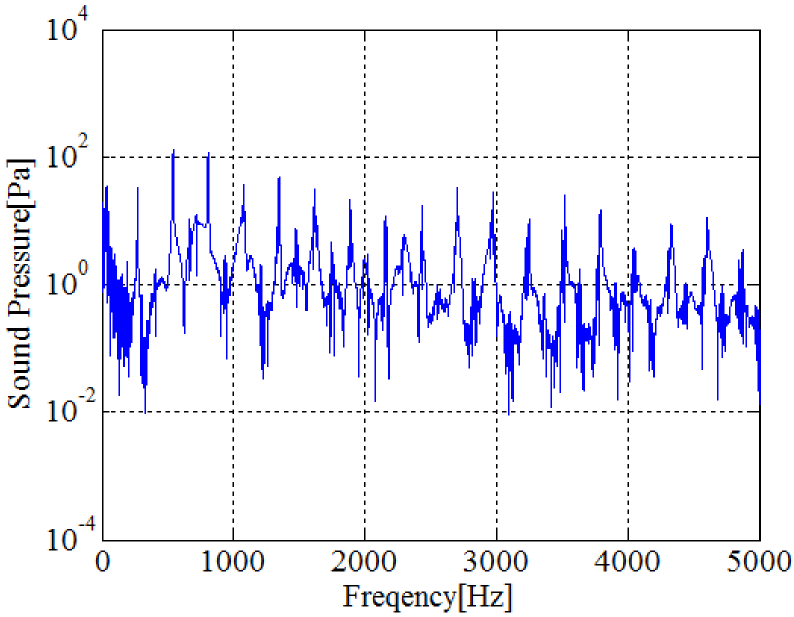

Figure 2-48 San-no-ito [3rd string] (with SAWARI)

二の糸、三の糸も一の糸と同様、基音の音圧より 1000Hz 前後の音圧のほうが高くなっている。

2.3.2.3 スペクトログラム解析

一の糸と同様にスペクトログラム解析を行った。なお、解析周波数は 5000Hz、サンプリング点数は 32768 点である。 グラフの赤い部分がピークの高い領域、青い部分がピークの低い領域である。

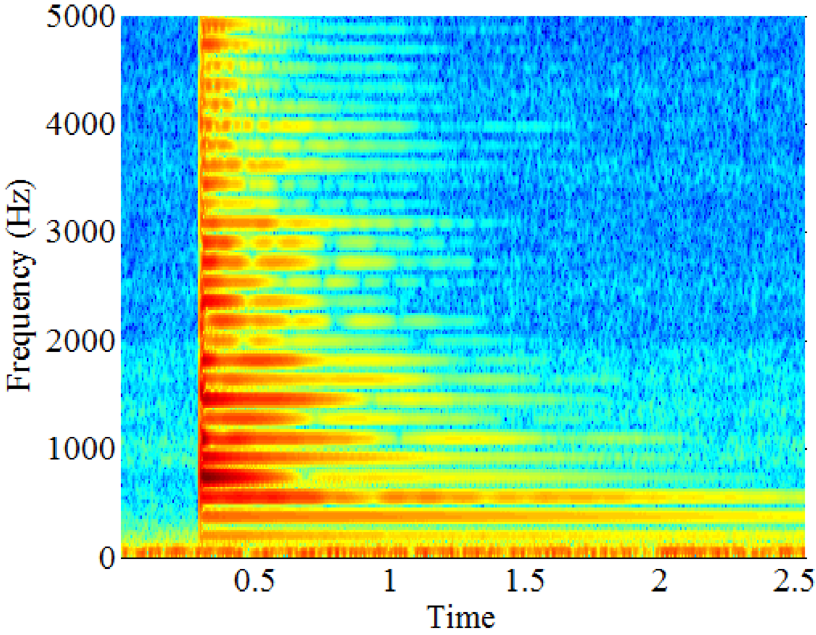

Figure 2-49 Ni-no-ito [2nd string] (without SAWARI)

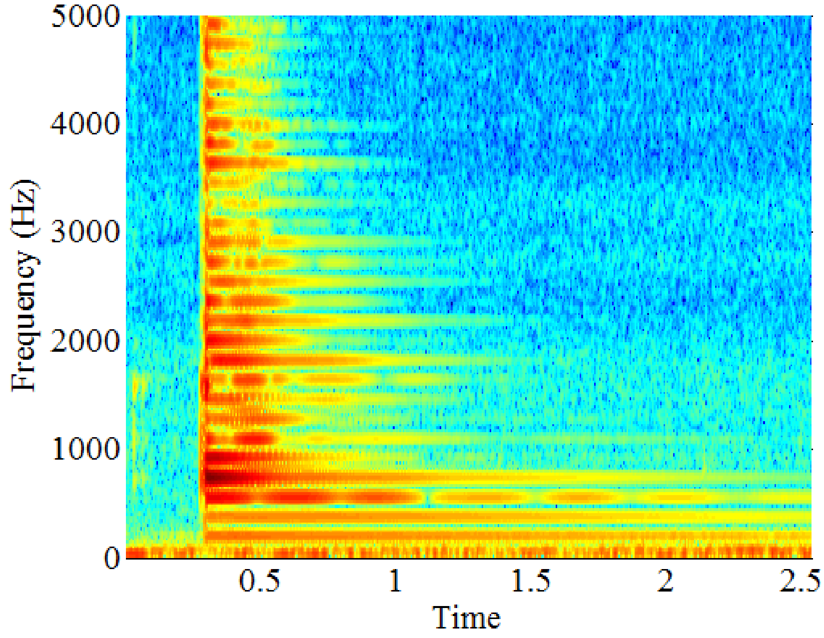

Figure 2-50 Ni-no-ito [2nd string] (with SAWARI)

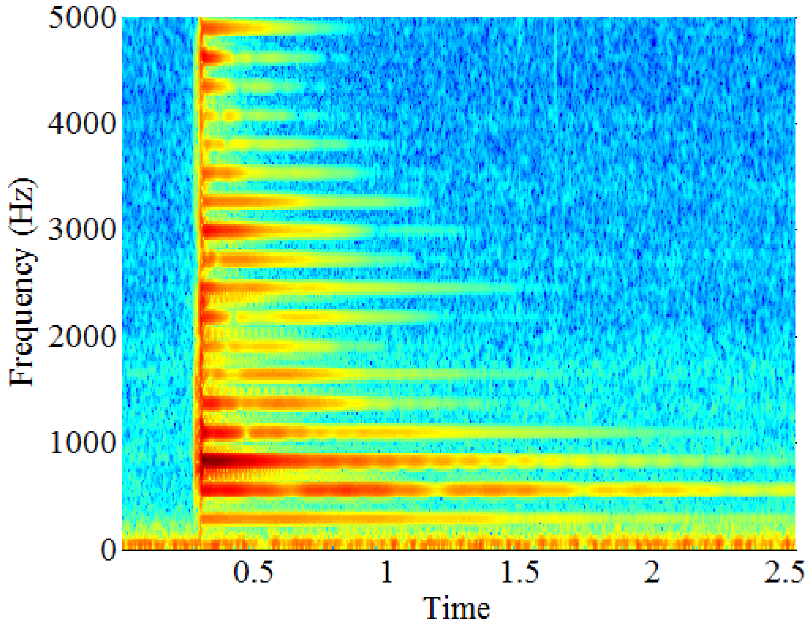

Figure 2-51 San-no-ito [3rd string] (without SAWARI)

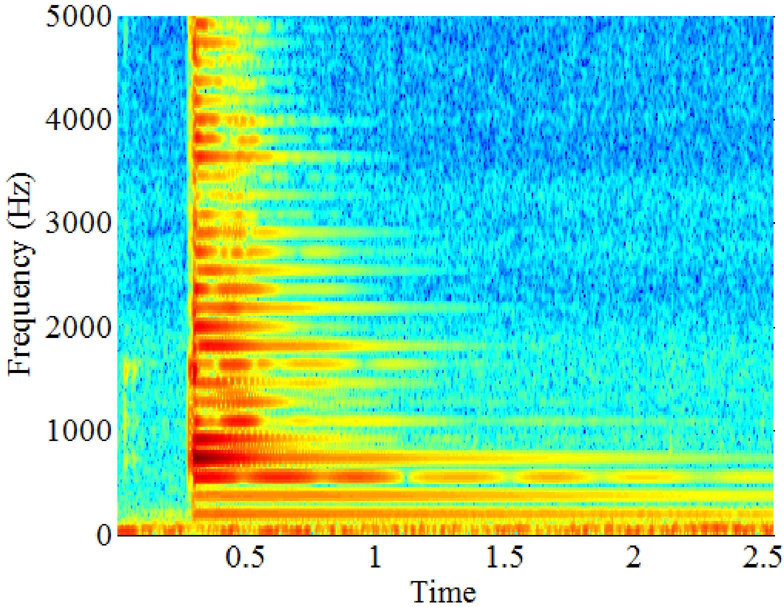

Figure 2-52 San-no-ito [3rd string] (with SAWARI)

まず、図 2-49 と図 2-50 の比較を行う。これらは二の糸のさわり有りと無しの結果である。これらを比較するとさわりが無いほうが高周波帯域での残響が長いという結果になっている。これは今までの結果とは逆である。この原因は基本周波数付近のピークのうなりから判断するに、さわりが付きすぎているためと考えられる。その結果として残響が短くなっている。

次に図 2-51 と図 2-52 の比較を行う。これらは三の糸のさわり有りと無しの結果である。さわり有りの結果には広い帯域で細かなうなりが確認でき、高周波帯域の音圧も高いことがわかる。それに対してさわり無しはうなりがすくなく、高周波帯域の音圧が低いことがわかる。しかし、さわり有りの高周波帯域の残響にかんしてはそれほど伸びていない。これはさわりの付きすぎが原因と考えられる。

2.4　　考察

2.4.1.　時間軸領域

実験結果から一の糸のさわりなしの場合の時間の経過とともになだらかに減衰することがわかった。それに対して、さわり有りの結果では一度音が大きくなってから減衰することがわかった。このように波形が膨らむ原因はさわりによって弦長がわずかに変化することで生じるうなりと胴体もしくは胴体内部の空気が共鳴して発生しているのではないかと考えられる。

また、さわりの効き具合によって違いがでることもわかった。さわりが不十分な場合、音のふくらみが一度ではなく、複数回にわたって発生し、さわりの効き具合が徐々に強くなるにつれ、後半の音のふくらみが小さくなっていく傾向があることがわかった。

さらにさわりを付加し十分に効いた状態にすると、不十分な状態のときには大きなふくらみを発生していたものが、段階的に音が減衰していく形となった。この結果からさわりの効果は減衰過程において少し音を維持、もしくは大きくする働きをするものではないかと考えられる。

また、さわりの効きすぎた状態では大きなうなりを発生し，音が早めに減衰してしまうことがわかった。その状態からさらにさわりをつけた場合、うなりは発生しなくなる。これはさわり山が高すぎるため、さわり山が上駒の働きをしてしまうためと考えられる。

二の糸、三の糸については基本的には時間の経過と共になだらかに減衰することがわかった。しかし、さわりが無いはずなのに多少うなりが発生することがわかった。これは一の糸の共振が影響しているのではないかと考えられる。

2.4.2.　周波数領域

三味線の周波数領域波形に共通して基本周波数（基音）のピークが低いことがわかる。この傾向はさわりの有無に関係なく３本の糸すべてに見られることから、三味線の基本的な特性と考えられる。また，一の糸に関しては，3000～5000Ｈｚ付近で，さわり有りのピークがさわり無しのピークよりも高くなっていることがわかった。

2.4.3. スペクトログラム領域

各弦の結果から 500〜1500Hz のピークの残響がながかった。これはさわりの有無に関わらず同様であり、時間軸解析、周波数解析と同様に三味線の基本的な特性であると考えられる。

次に一の糸におけるさわりの有無について考察を行う。さわりの有無による大きな違いとして、残響時間に大きな差が出ていることが確認できた。特に 3000Hz 以降の帯域では、さわりの有無による差が顕著であることがわかった。さわりがある場合はこれらの帯域の残響音はすぐに減衰せず、ある程度持続するが、ない場合では音がすぐに減衰している。

続いて、さわりの付き具合についての考察を行う。まずさわりをつけた状態では 4000Hz、6000Hz 付近の帯域を中心に残響が長くなった。また、1000Hz 前後の帯域の残響も長くなることがわかった。

次にさわり不足の状態の結果からも 4000、6000Hz 付近の帯域の残響は同様に長くなったが、不足していない状態に比べてその他の帯域において、残響は長くならなかった。さわり不足の状態の結果とさわり(80%)の結果では残響の長さに違いはあったものの強い周波数成分が観測されるのはほぼ同じ所であった。

一方、さわりを超過させた結果(120%)から、さわりが強くついた場合、1000Hz 付近の残響が短くなることがわかった。また、高周波帯域においてはさわり附則と同程度の残響であることがわかった。さわりを超過させた結果(150%)では、高周波帯域の残響が他の状態と比べて著しく短くなった。また、1000Hz 前後の音に関しては多少残響が短くなったが、高周波帯域に比べるとわずかな差であった。

以上の結果からさわりが付きすぎた状態ではうなりが発生するものの、減衰が早く起きる傾向があることがわかった。同様にさわりが少ない状態でもうなりが発生するが、高周波帯域が早く減衰してしまうことがわかった。

最後に調子笛に関する考察を行う。調子笛は先の考察でも述べたように調律用の笛であるので倍音成分がきれいに出ている。そして 2000Hz や、4000Hz 付近のピークが一度低くなりその後のピークが再び高くなるなど、三味線と類似した傾向があることがわかる。

3. 音の加工[1]

3.1　目的

収録した音の特定の帯域に重みをかけることでその帯域の特性を抽出する。

3.2　加工結果

本論文では結果のみを示す。

3.3.1　加工音１

原音（一の糸、さわり有り）を表 3-1 に示す帯域で抽出するように加工した。

Table 3-1 Processing conditions [001]

No.	Processing conditions [Extraction band]
1-1	Original sound
1-2	0 ~ 500Hz
1-3	500 ~ 1500Hz
1-4	1500 ~ 3000Hz
1-5	3000Hz ~

なお、抽出する帯域はスペクトログラム解析での残響の長さを考慮し、残響が長い帯域の２つ（500～1500Hz と 3000Hz 以降）、およびそのほかの帯域とした。

次にそれらの結果を時間波形のグラフとして示す。なお、音の時間波形は前述のため割愛した。

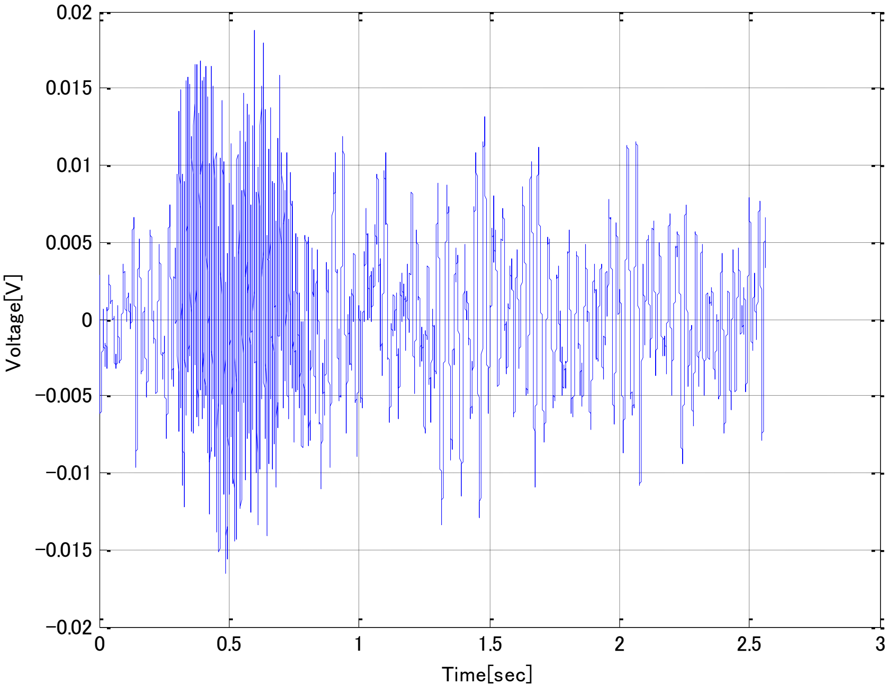

Figure 3-1 No.1-2 [0~500Hz]

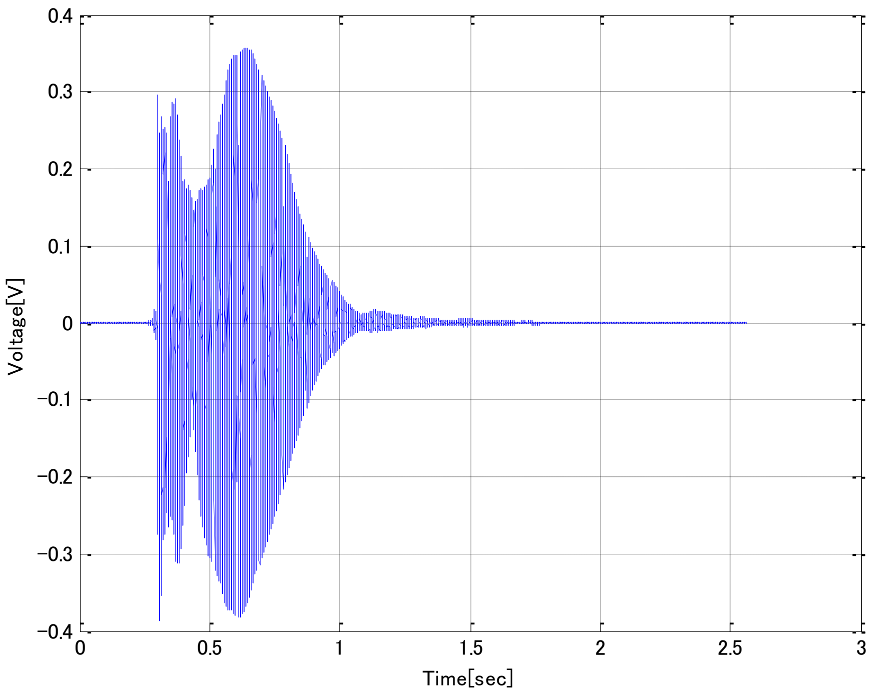

Figure 3-2 No.1-3 [500~1500Hz]

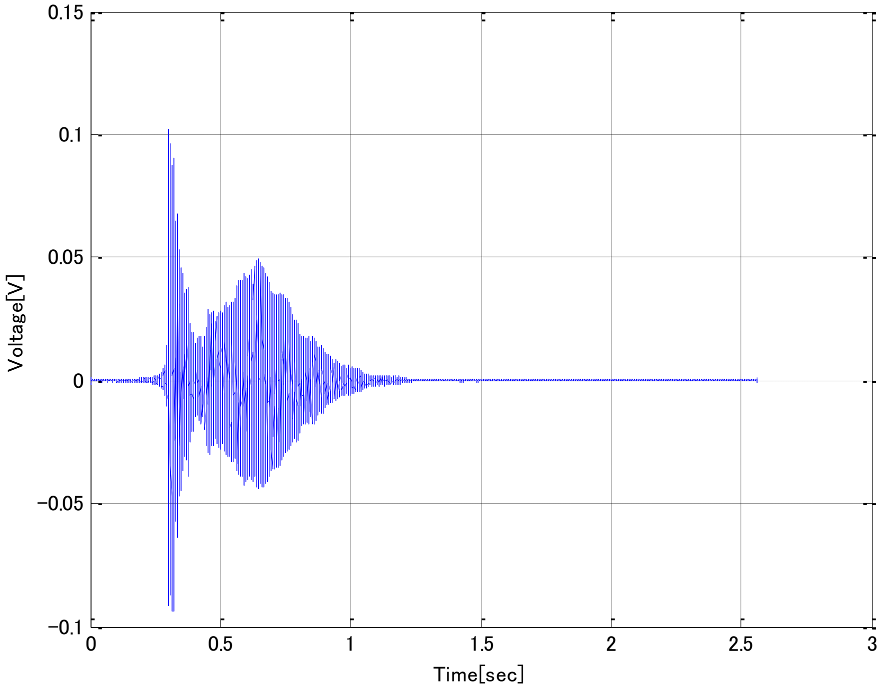

Figure 3-3 No.1-4 [1500~3000Hz]

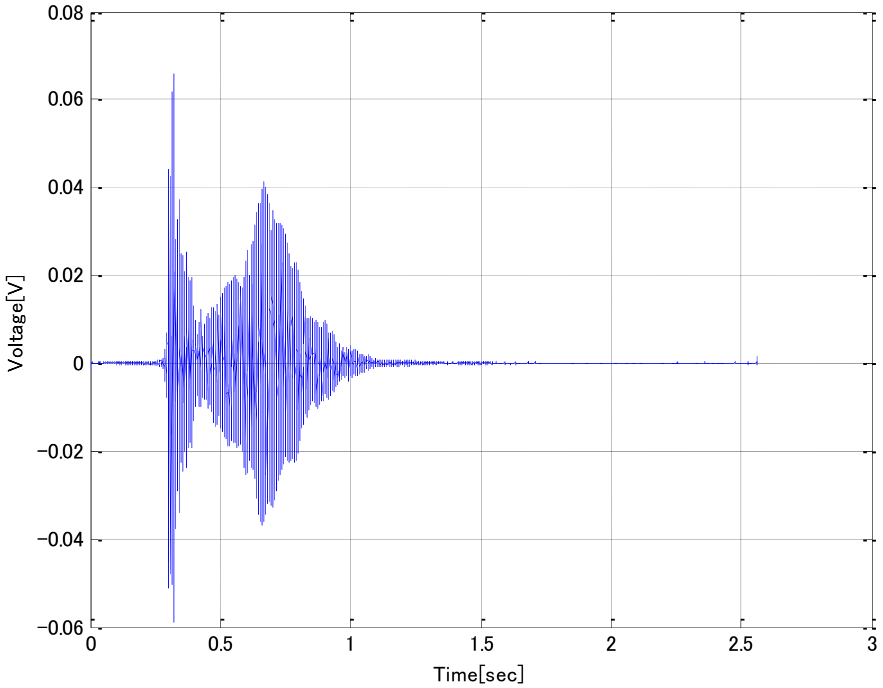

Figure 3-4 [3000Hz~]

3.3.2　加工音Ⅱ

加工音Ⅱ を作成するにあたり，さわり有り，無し，それぞれについて基本周波数の音圧を基準として各ピークの音圧比を求めた．こうして求めた比を用いて次のような加工を行った．

まずさわり有りの原音のピーク音圧に重みをかけることで，音圧比をさわり無しの音圧比と一致させた．同様にさわり無しの原音に関してもピーク音圧を加工し，音圧比がさわり有りの音圧比と同様になるように加工した．

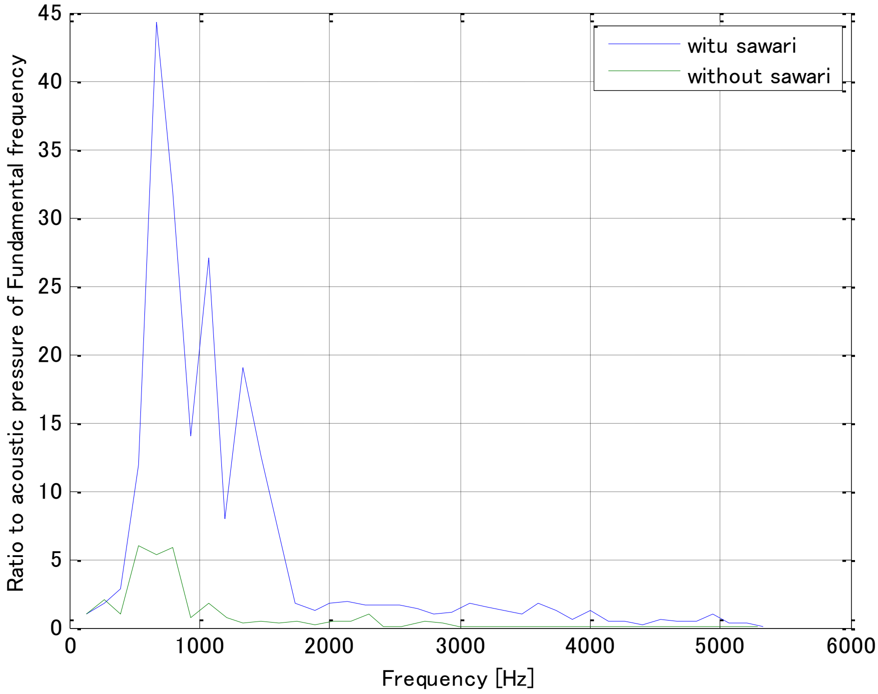

Figure 3-5 Frequency-Ratio [Ichi-no-ito]

Table 3-2 Processing conditions [002]

No.	Original data	Processing conditions
2-1	With sawari	The ratio is processed to Without Sawari.
2-2	Without sawari	The ratio is processed to With Sawari

3.4　考察

3.4.1.　加工音Ⅰ

No.1-2

時間波形、音質ともにさわりの特徴は出ていないと考えられる。周波数、音圧が低いため、音量が低い。

No.1-3

時間波形、および音質ともにさわり音の特徴が出ている。加工音1の中で最も原音に近い音色となった。また、ほかの加工条件より音圧が極端に高いため、音が大きく聞こえる.

No.1-4

No.1-3 と同じく、さわり音の特徴が出ている。しかし原音に比べて軽い音である。

No.1-5

No.1-4 の音と同様、さわり音の特徴は出ているが原音に比べて軽い音である。

3.4.2.　加工音Ⅱ

No.2-1

さわりの特徴は消えなかった。ほとんどのピークの音圧を下げたので音量は小さくなった。

No.2-2

音に少しうなりが感じられる。No.2-1 とは逆に音圧をあげたので音は大きくなった。

音圧比をさわり有りからさわり無しに、およびその逆の加工を行ってもさわりの有無に大きな変化が無かったことから、さわり音の構成要素として音圧の果たす割合は低いと考えられる。

4. 実験モード解析

4.1　三味線本体 [1]

4.1.1　目的

三味線本体の振動特性を加振実験から得ることで、さわり音へ及ぼす影響についての検討を行う。

4.1.2　実験方法

インパルスハンマを用いた打撃加振で加速度ピックアップ固定の加振点移動でZ方向に計12点を垂直に加振した。使用した道具を以下に示す。

Figure 4-1 FFT anylyzer (リオン社製)

Figure 4-2　Acceleration-pick-up(PCB 社製)

Figure 4-3 Impulse-hummer(小野測器社製)

Figure 4-4 Laptop computer(lenovo 社製)

Figure 4-5 Position of Acceleration pickup

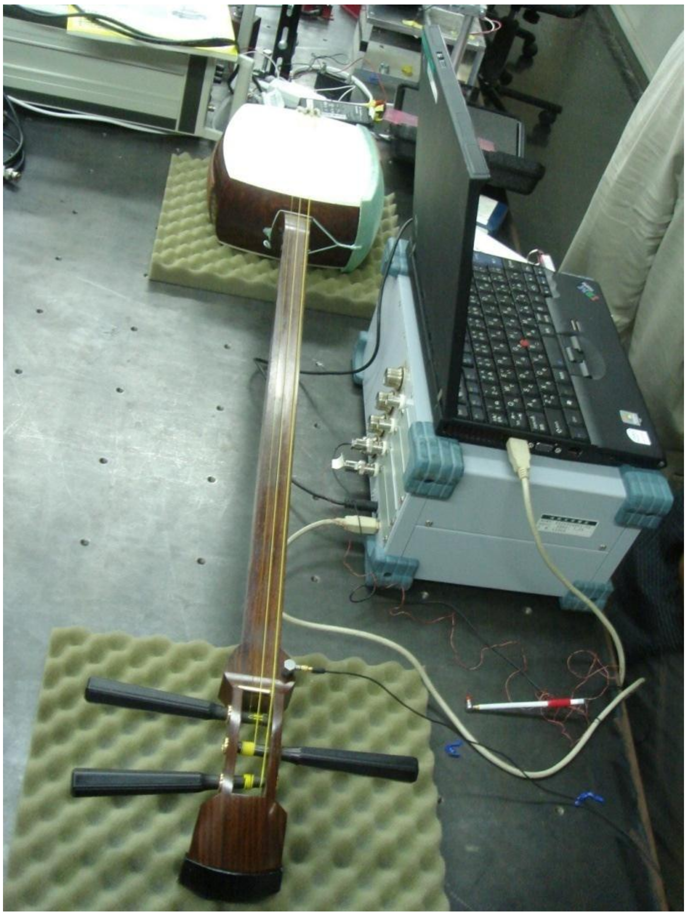

Figure 4-6 Experiment scenery

図 4-5 は加速度ピックアップの取り付け位置、図 4-6 は実験モード解析の様子である。天神付近に加速度ピックアップを取り付け、インパルスハンマで加振点を加振し、FFT アナライザでデータの収録を行う。ここで、三味線の質量に対し加速度ピックアップの質量は微小なため、加速度ピックアップを取り付けたことによる質量の変化が実験に影響を与えることはないものとした。なお、図 4-7 に三味線本体の加振点をしめす。

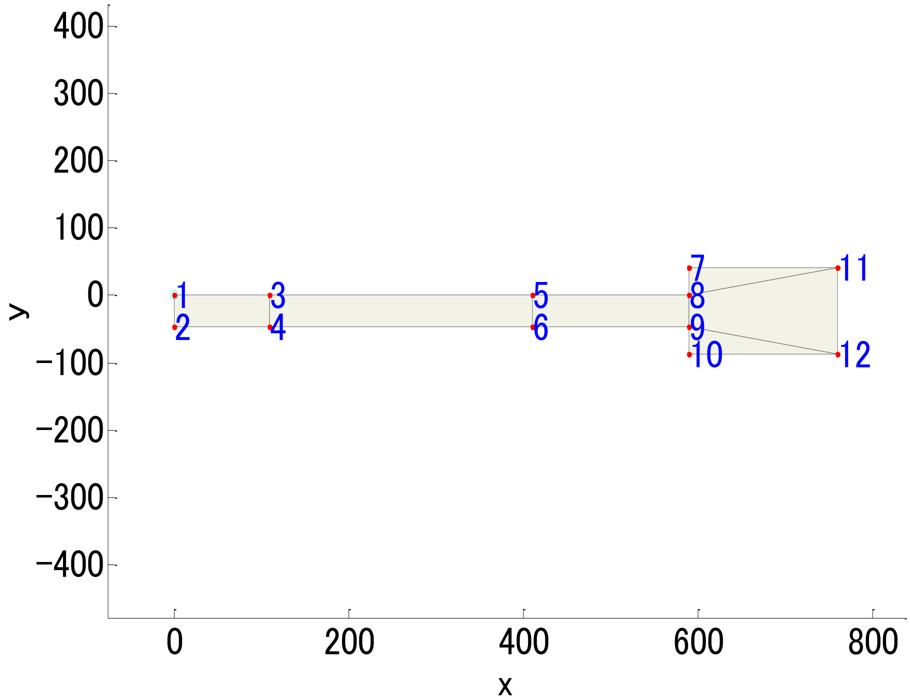

Figure 4-7 Excitation points and measurement point

4.1.3　実験結果

得られたモードを以下に示す。

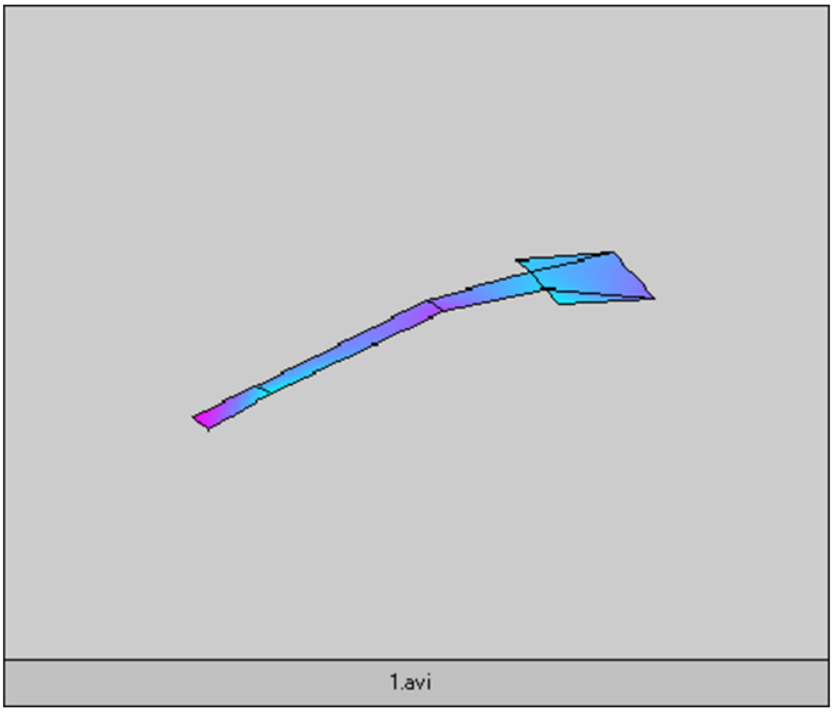

Figure 4-8 Fundamental mode shape

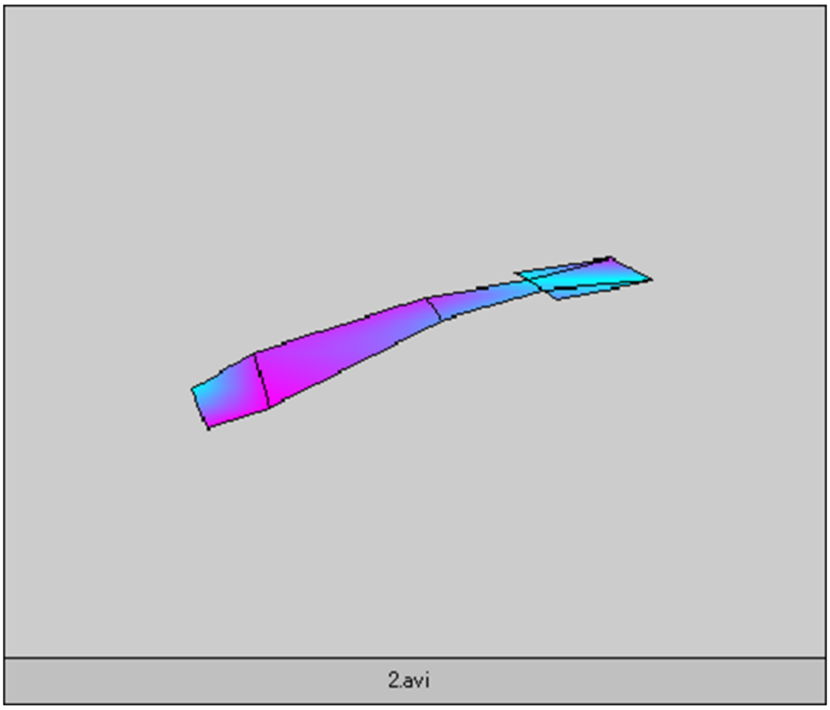

Figure 4-9 Second mode shape

Table 4-1 Experiment modal analysis [shamisen]

Mode number	Natural frequency f[Hz]	Modal damping ratio ζ[%]	Mode shape
Fundamental	67.55	0.923	bend
Second	85.38	2.35	twisted

4.2 三味線の胴体

4.2.1 目的

三味線の胴体が三味線音やさわり音にどのような影響を及ぼすか調べるために胴体の加振試験を実施した。

4.2.2 実験方法

4.1.2と同様にインパルスハンマを用い、Z方向に計9点を垂直に打撃加振した。以下に実験に使用した胴体に示す。

Figure 4-10　Shamisen dotai

4.2.3　実験結果

まず図 4-11 と図 4-12 では加振方向と加振点について示した。

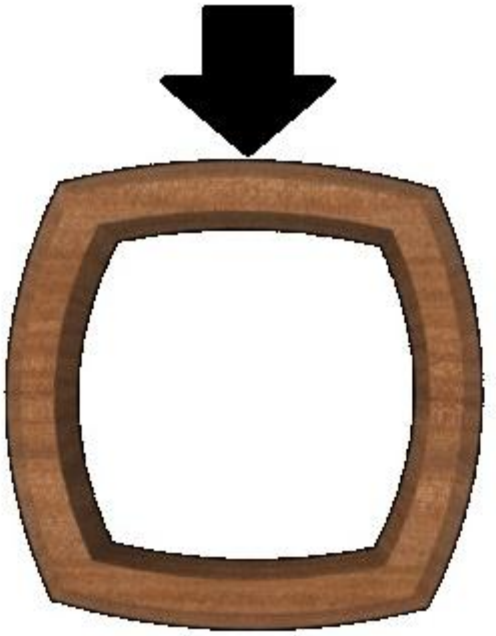

Figure 4-11 Body vibration [side view]

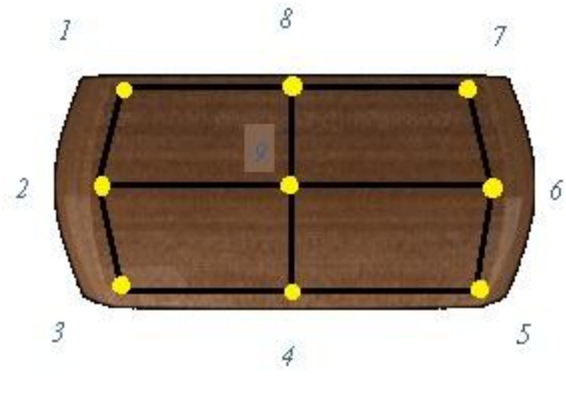

Figure 4-12 Excitation of vibration

続いて実験結果を示す。

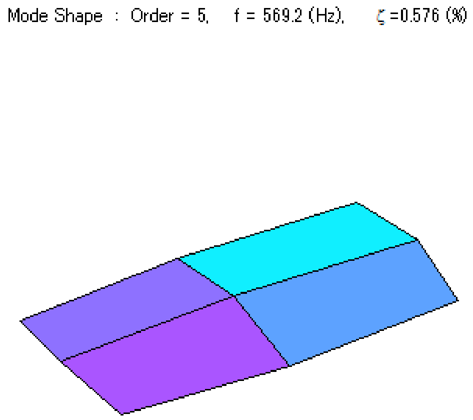

Figure 4-13　Fundamental mode shape 「569.2Hz」

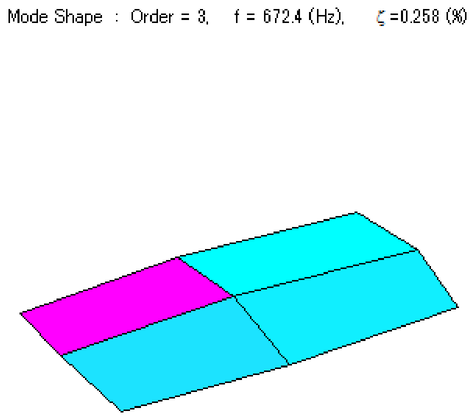

Figure 4-14　Second mode shape [672.4Hz]

Table 4-2 Experiment Model Analysis [Body]

Mode number	Natural frequency f [Hz]	Modal damping ratio ζ[%]	Mode shape
Fundamental	569.2	0.576	bend
Second	672.4	0.258	twisted

実験から胴体の固有振動数は一次モードが 569.2Hz、二次モードは 672.4Hz となった。

4.2.4　再実験

より精度の高い結果を得るために再実験を実施した。1 回目の実験では Z 方向のみ加振を行ったが、この実験では XYZ 方向に 49 点加振試験を行った。

4.2.5　実験結果

モード解析は図 4-15 に示すような線で胴体を表した。

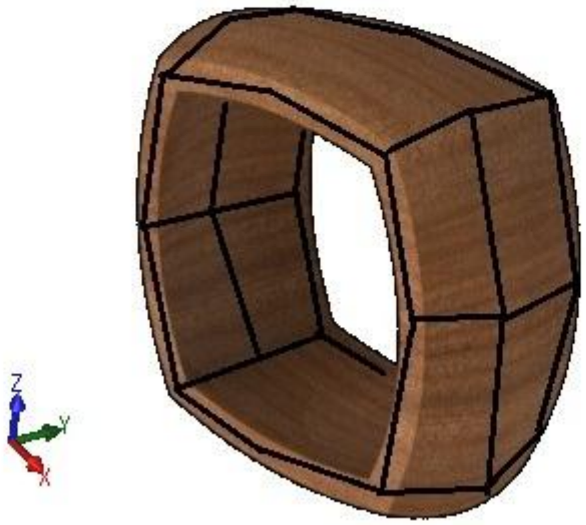

Figure 4-15 Body vibration [sidelong glance view]

以下に実験結果を示す。

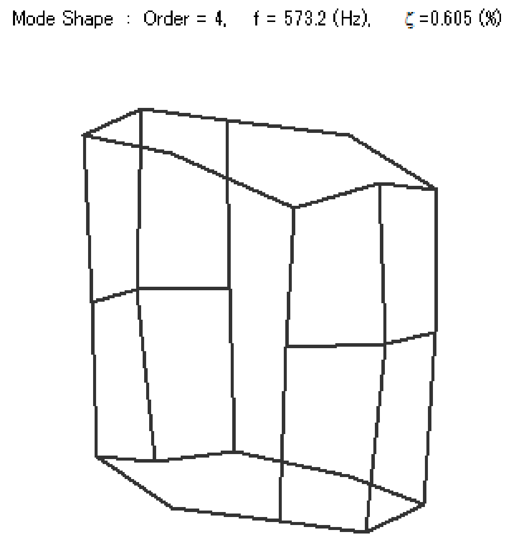

Figure 4-16 Fundamental vibration [573.2Hz]

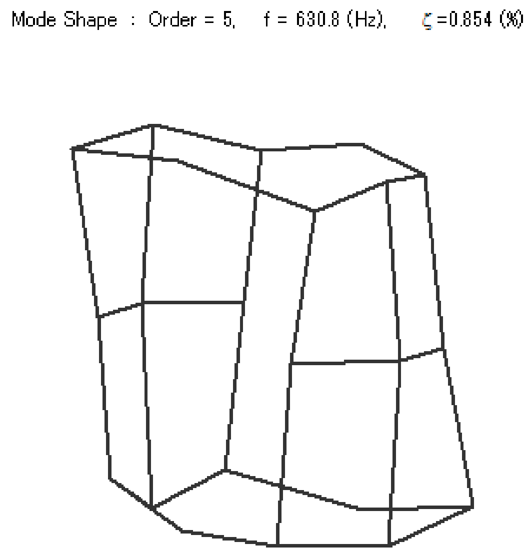

Figure 4-17 Second vibration [630.8Hz]

Table 4-3 Experiment Model Analysis [Body]

Mode number	Natural frequency f [Hz]	Modal damping ratio ζ [%]	Mode shape
Fundamental	573.2	0.605	bend
Second	630.8	0.854	twisted

再実験の結果 1 次モードが 573.2Hz、2 次モードが 630.8Hz となった。Z 方向のみで行った実験と比べ 1 次モードは 4Hz 低くかったもののほぼ同じ値となった。一方 2 次モードは再実験の値が 40Hz ほど低かった。これはねじりモード形状がねじりモードであり、XYZ 方向から加振した結果より精度の高い結果が得られたのではないかと考えられる。

4.3 皮

4.3.1 目的

皮単体がさわり音にどの程度影響を及ぼしているか調べるために皮の加振試験を実施した。

4.3.2 実験方法

インパルスハンマを用いた打撃加振でレーザードップラー振動計を固定した。加振点移動で Z 方向に計 124 点を垂直に加振した。使用した道具は 4.1.2 とほぼ同様であるが加速度ピックアップの代わりにレーザードップラー振動計を使用したので以下に示す。

Figure 4-18 Layser-Doppler-vibrater

Figure 4-19 Position of Layser-Doppler-vibrater

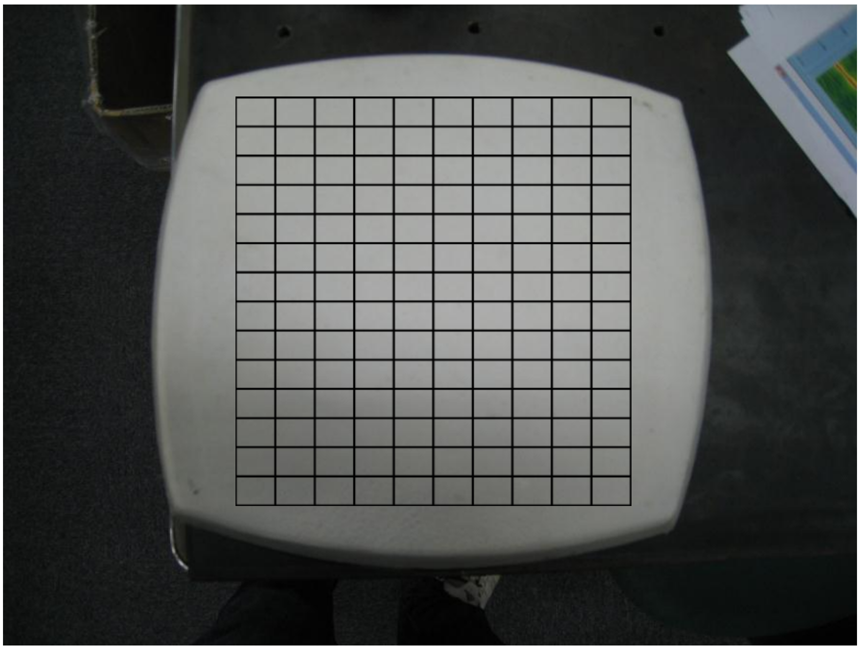

Figure 4-20 Point of vibration on skin

4.3.3　実験結果

以下に実験結果を示す。

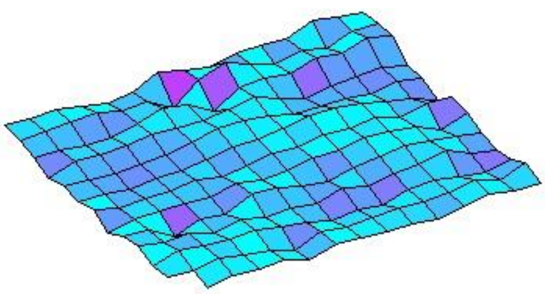

Figure 4-21 Fundamental vibration [151.7Hz]

Table 4-4 Experiment Model Analysis [Kawa]

Mode number	Natural frequency f [Hz]	Modal damping ratio ζ[%]	Mode shape
Fundamental	151.7	1.02	bend

皮の固有振動数はハンマリングによる加振試験で減衰比の小さな値は 151.7Hz に 1 次モードが見られた。

4.4　考察

4.4.1　三味線本体

三味線本体の実験結果から1次のモード形状がはりの一次曲げ、2次がねじれ形状に類似することがわかった。今回の実験で得た2次モードまでの場合、固有振動数は 67.55Hz および 85.38Hz であった。これは三味線の最も低い音（一の糸開放）よりも著しく低かった。このことから三味線本体はあまり音には影響していないものと考えられる。

4.4.2　胴体

胴体の実験結果からも1次のモード形状がはりの一次曲げ、2次のモード形状がねじれ形状に類似することがわかった。固有振動数は Z 方向のみ加振の場合が 569.2Hz、672.4Hz となった。また XYZ 方向から加振して行った再実験では 573.2Hz、630.8Hz となった。1次の固有振動数はほぼ同じ値となったが2次の固有振動数はやや再実験のほうが低い周波数がでた。再実験では XYZ 軸方向に 49 点加振を行ったので再実験のデータの方が実際の固有振動数であると考えられる。2つの実験結果から1次モードは 570Hz 付近となった。以下にさわり有り無しのデータと胴体の1次の固有振動数を比較した図を示す。

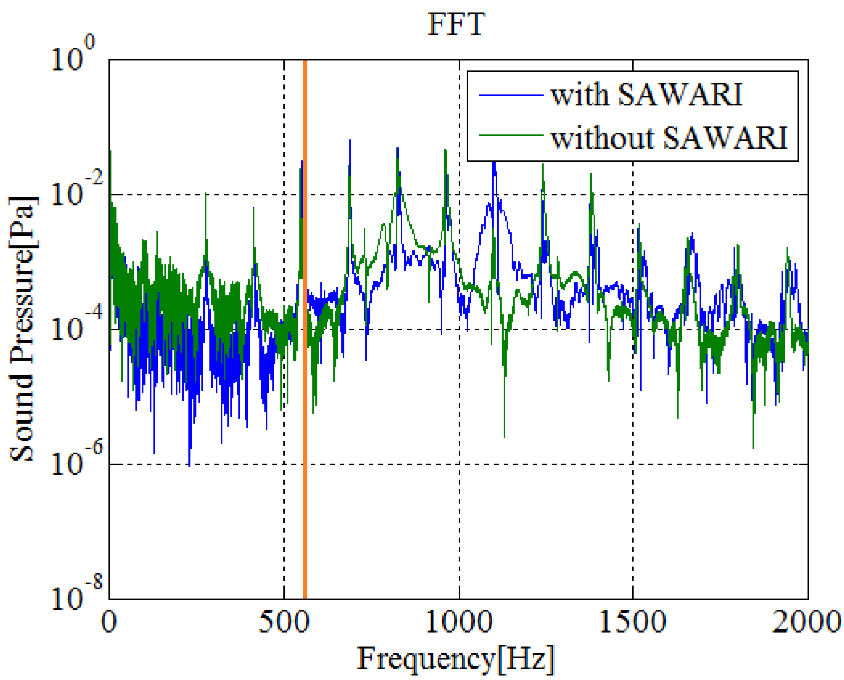

Figure 4-22 Shamisen sound (1st string) and Natural frequency

図 4-22 よりさわりの有無を問わずピークが高くなっているあたりと胴体の固有振動数は近くに位置していることがわかる。また、2 章「音の録音と解析」においてこの付近の周波数はさわりの有無に関わらず残響が比較的短かった。さらに 3 章「音の加工」の加工音Ⅱにおいて基本周波数の音圧がもっとも高くなっているのも 570Hz 付近であった。このことから胴体はさわりの有無に関わらず三味線音に影響を及ぼしているのではないかと考えられる。

4.4.3　皮

皮の実験結果から 1 次のモード形状がはりの一次曲げ形状に類似することがわかった。固有振動数は 151.3Hz であった。これは三味線本体と同様に三味線の最も低い音よりも低かった。このことから皮単体では三味線の音にはあまり影響を及ぼさないものと考えられる。

5. 弦振動シミュレーション [1]

5.1　目的

さわりが付いた状態での弦振動の特徴を調べるため、一の糸の弦振動シミュレーションを行う。シミュレーションは波動方程式を差分法で近似し、MATLABを用いて行った。シミュレーション条件としてはさわりの有無や位置、減衰の有無を比較した。

5.2　計算理論

5.2.1　波動方程式

線密度ρ、張力Tで引っ張られている一様な弦を考える．線分dsを平衡位置に戻そうとする力$\mathrm{d}F_{\mathrm{y}}$は線分の両端における張力Tのy方向の差である．

$$\mathrm{d}F_{\mathrm{y}} = (Tsin\theta)_{x+dx} - (Tsin\theta)_x \tag{5.1.}$$

$Tsin\theta$にテイラー展開を適用し、第１次の項だけを残すと次式得られる。

$$\begin{aligned} F_y &= \left[(Tsin\theta)_x + \frac{\partial(Tsin\theta)}{\partial x}dx\right] - (Tsin\theta)_x \\ &= \frac{\partial(Tsin\theta)}{\partial x}dx \end{aligned} \tag{5.2.}$$

変位yが小さなとき、$sin\theta$は$\tan\theta = \frac{\partial \mathrm{y}}{\partial \mathrm{x}}$ に置き換えることができる。よって

$$dF_y = \frac{\partial\left(T\frac{\partial y}{\partial x}\right)}{\partial x}dx = T\frac{\partial^2 y}{\partial x^2}dx \tag{5.3.}$$

となる。線分の質量はρdsなのでニュートンの第２運動法則は次のようになる。

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2}dx = (\rho ds)\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \tag{5.4.}$$

ここで変位yは小さいので$ds \cong dx$となる。さらに$\frac{T}{\rho} = \mathrm{c}^2$と置くと次式のようになる。

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = \frac{T}{\rho}\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = \mathrm{c}^2\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \tag{5.5.}$$

5.2.2　差分法（中央差分）

関数$f(x)$はなめらかで、$h > 0$としてテイラー展開する。

$$f(x+h) = f(x) + hf'(x) + \frac{h^2}{2!}f''(x) + \frac{h^3}{3!}f'''(x) + \cdots \tag{5.6.}$$

$$f(x-h) = f(x) - hf'(x) + \frac{h^2}{2!}f''(x) - \frac{h^3}{3!}f'''(x) + \cdots \tag{5.7.}$$

ここで(5.6)、(5.7)式を$f'(x)$について整理する。

$$f'(x) = \frac{f(x+h) - f(x) - \frac{h^2}{2!}f''(x) - \frac{h^3}{3!}f'''(x) + \cdots}{h} \tag{5.8.}$$

$$f'(x) = \frac{f(x) - f(x-h) + \frac{h^2}{2!}f''(x) - \frac{h^3}{3!}f'''(x) + \cdots}{h}、 \tag{5.9.}$$

(5.8)式で$x = x_n$と置けば

$$f'(x_n) = \frac{f(x_{n+1}) - f(x_n) - \frac{h^2}{2!}f''(x_n) - \frac{h^3}{3!}f'''(x_n) + \cdots}{h} \tag{5.10.}$$

となる。(5.10)はさらに

$$f'(x_n) = \frac{f(x_{n+1}) - f(x_n)}{h} + O(h) \tag{5.11.}$$

とも書ける。（１階の前進差分）

同様に(59)式で$x = x_n$と置けば

$$f'(x_n) = \frac{f(x_n) - f(x_{n-1})}{h} + O(h) \tag{5.12.}$$

と書ける。（１階の後退差分）

次に(5.8)式と(5.9)式を加え合わせて２で割ると

$$f'(x) = \frac{f(x+h) - f(x-h)}{2h} + O(h^2) \tag{5.13.}$$

と書ける。（１階の中心差分）

同様に(5.6)、(5.7)式を$f''(x)$について整理し、２階の中心差分を求める。

$$f''(x_n) = \frac{2\{f(x_{n+1}) - f(x_n) - hf'(x) - \frac{h^3}{3!}f'''(x_n) + \cdots\}}{h^2} \tag{5.14.}$$

$$f''(x_n) = \frac{2\{f(x_{n-1}) - f(x_n) + hf'(x) + \frac{h^3}{3!}f'''(x_n) + \cdots\}}{h^2} \tag{5.15.}$$

得られた２つの式を加えると

$$f''(x) = \frac{f(x+h) - 2f(x) + f(x-h)}{h^2} + O(h^2) \tag{5.16.}$$

となる。

5.3　計算方法

5.3.1　計算式導出

波動方程式に差分法を適用し MATLAB で用いる計算式を導出する。

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = \frac{T}{\rho}\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = \mathrm{c}^2\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \tag{5.17.}$$

$$f''(x) = \frac{f(x+h) - 2f(x) + f(x-h)}{h^2} + O(h^2) \tag{5.18.}$$

左辺に差分法を適用する．

$$\frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial t^2} = \frac{y(x, t+\Delta t) - 2y(x,t) + y(x, t-\Delta t)}{\Delta t^2} \tag{5.19.}$$

つぎに右辺に適用する．

$$\mathrm{c}^2\frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial x^2} = \mathrm{c}^2\frac{y(x+\Delta x, t) - 2y(x.t) + y(x-\Delta x, t)}{\Delta x^2} \tag{5.20.}$$

これらをまとめると

$$y(x,t+\Delta t) = c^2\frac{\Delta t^2}{\Delta x^2}\{y(x+\Delta x,t) - 2y(x.t) + y(x-\Delta x,t)\} - y(x,t-\Delta t) + 2y(x,t) \quad (5.21.)$$

となる。

5.3.2 初期値設定

今回行ったすべてのシミュレーションにおいて、一の糸の長さを 800mm の両端固定とし、距離刻みは 2mm、時間刻みは 0.01ms とした。波の伝搬速度は 100m/s とした。また、中心点の初期変位は 8mm とした。なお、条件ごとに異なる設定を行った点（シミュレーション時間など）は次項に記載する。

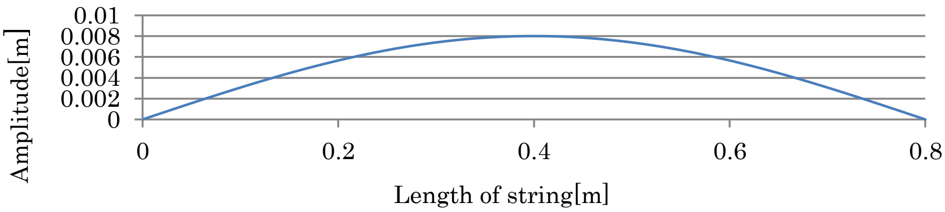

Figure 5-1 Initial shape

5.3.3 条件設定

今回のシミュレーションでは、複数の比較条件を設定した。比較条件ごとにシミュレーションの詳細条件を示す。

5.3.3.1 条件 1　さわりの有無

さわりの有る状態とない状態の比較を行った。さわり有りの場合のさわり位置は以下の通りである。なお、さわりの水平および垂直位置は上駒からの距離を示す。

Table 5-1 Simulation condition [001]

Simulation time	0.8 (s)
Sawari position(vertical)	-0.21 (mm)
Sawari position(horizontal)	10 (mm)

5.3.3.2 条件２　さわりの位置

さわり位置によるさわり効果の比較では、上駒からの水平方向の距離による比較、および垂直方向の距離による比較をそれぞれ行った。

水平方向の距離による比較では上駒からの距離を 2mm ごとに変化させ、2～20mm の範囲でシミュレーションを行った。なお、上駒からの垂直方向の距離は 0mm で固定した。(図 5-2　①方向を変化)

垂直方向の距離による比較では上駒からの距離を 0.01mm ごとに変化させ、-0.05～0.05mm までシミュレーションを行った。 なお、上駒からの水平方向の距離は 10mm に固定した。(図 5-2　②方向を変化)

Table 5-2 Simulation condition [002]

Simulation time	0.8 (s)
Sawari position(vertical)	-0.05～0.05 (mm)
Sawari position(horizontal)	2～20 (mm)

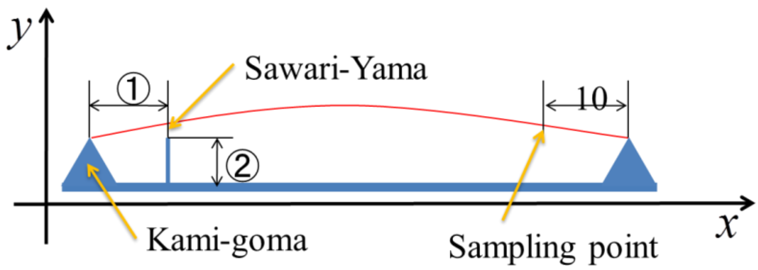

Figure 5-2 Simulation condition [002]

5.3.3.3 条件 3　減衰項の付加

5.2.1.項で述べた波動方程式に減衰項を付加する。ただし、d は減衰係数[1/s]である．

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + d\frac{\partial y}{\partial t} = c^2\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \qquad (5.22.)$$

さらに上式に差分法を適用し近似する。

$$
\begin{aligned}
y(x,t+\Delta t) = c^2\frac{\Delta t^2}{\Delta x^2}\{y(x+\Delta x,t) - 2y(x.t) + y(x-\Delta x,t)\} \\
- y(x,t-\Delta t) + 2y(x,t) - d\Delta t\{y(x,t) \\
- y(x,t-\Delta t)\}
\end{aligned}
\tag{5.23.}
$$

5.23 式を用いてシミュレーションを行った。なお、減衰係数は 0.5 とした。なお、さわりの水平、垂直位置は条件 1 と同一とした。以下にシミュレーション条件を示す。

Table 5-3 Simulation condition [003]

Simulation time	5 (s)
Damping coefficient	0.5 (1/s)

5.4　　計算結果

5.4.1　　条件１　さわりの有無

さわりの有無による比較結果を以下に示す。(左：さわり無し，右：さわり有り)

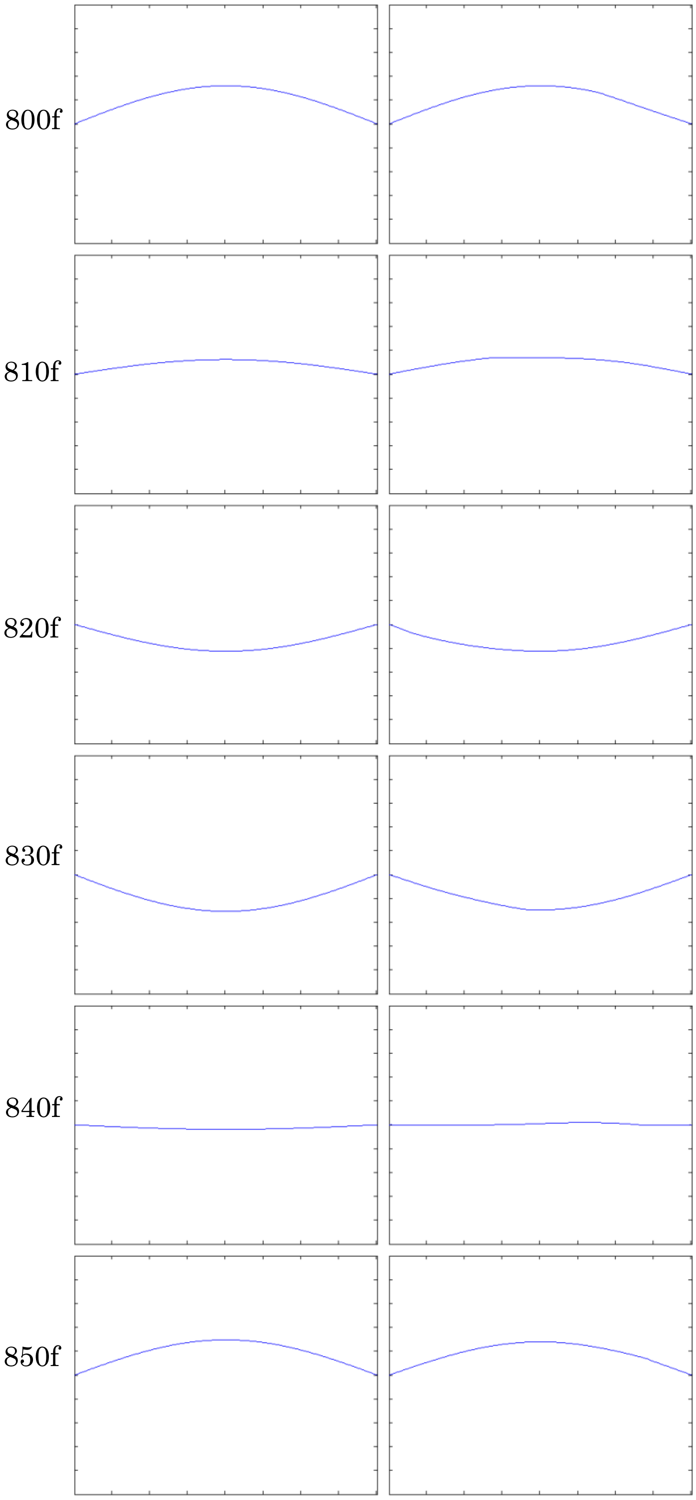

Figure 5-3 Simulation condition [001]

図 5-3 は 800 フレームから 850 フレーム（0.240s から 0.255s）までを 10 フレームずつ表示している。シミュレーションの初期段階ではさわりの有無による差は見られないが時間経過とともに大きな差がみられる。さわり無しの条件では一定の振動を繰り返すだけだが、さわり有りの条件では徐々に振動の形状が変わっていき、頂点が回転するような現象がおきていることがわかる。

さわりの有無による比較の時間軸波形を以下に示す。

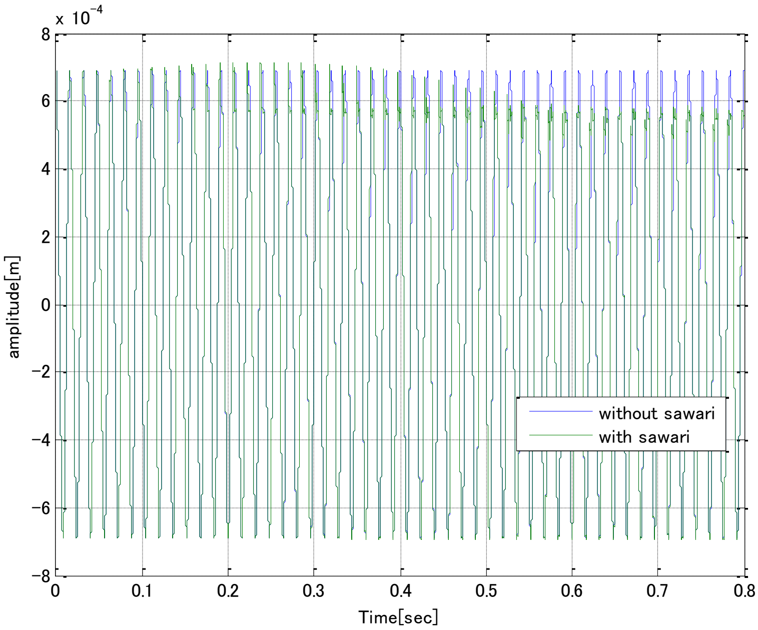

Figure 5-4 Simulation condition 001 [time]

図 5-4 は弦右端から 10mm の点の振幅の時間軸波形である、横軸が時間[s]、縦軸が振幅[m]を示す。なお、図中に示す通り、青がさわり無し、緑がさわり有りである。

さわりが無いほうは一様に振動していることがわかるが、さわりが有るほうは一度膨らんだのちに振幅が小さくなっていることがわかる。

次にさわりの有無による比較の周波数波形の結果を示す。

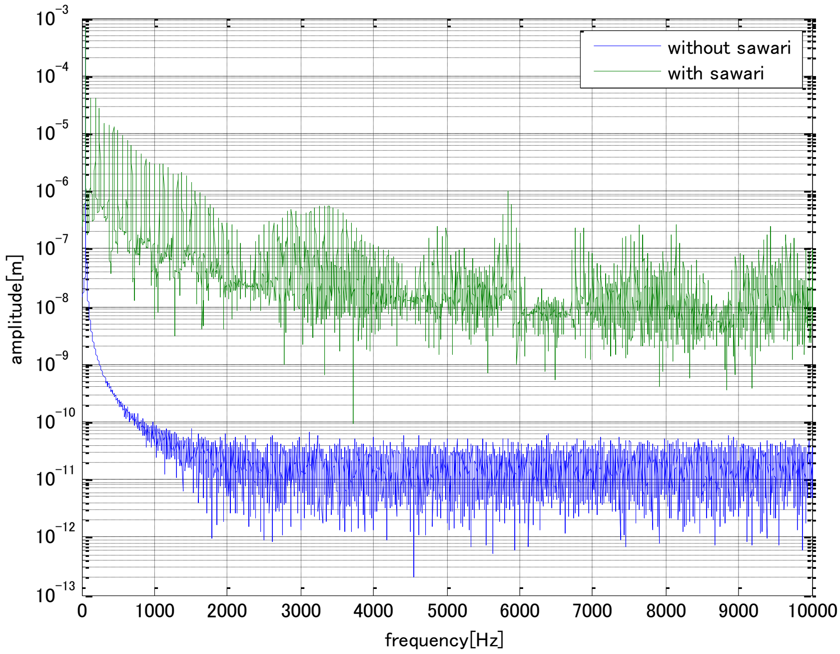

Figure 5-5 Simulation condition 001 [Frequency]

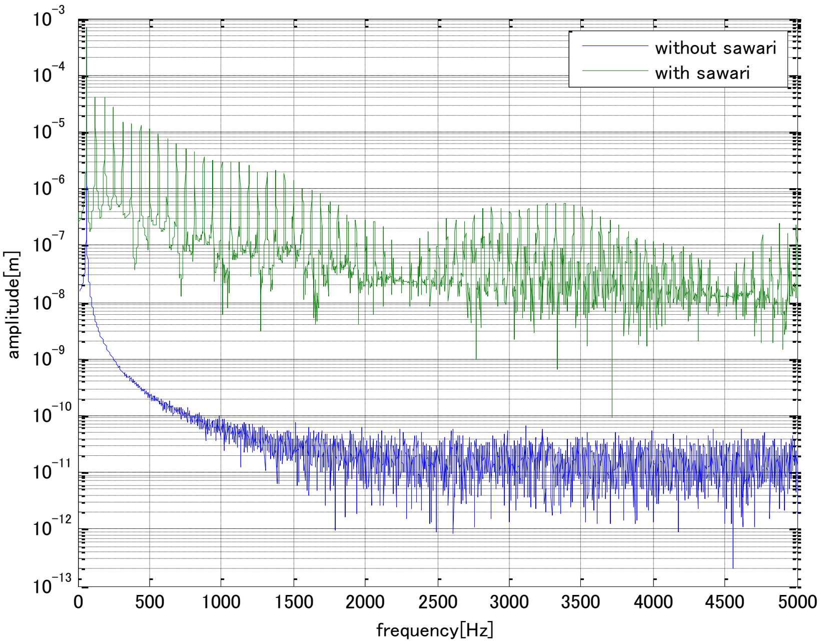

Figure 5-6 Simulation condition 001 [Frequency (0-5000Hz)]

図 5-5 と図 5-6 は弦右端から 10mm の点の振幅の周波数波形である。横軸が周波数[Hz]、縦軸が振幅[m]を示す。なお、図中に示す通り、青がさわり無し、緑がさわり有りである。図 5-6 は 5000Hz までを拡大した図である。

図 5-5 より、さわりが有る状態では 2500Hz、4500Hz、6500Hz 付近でピークが低くなっている。これは三味線の録音実験の結果（図 2-42 など）と同様の傾向であることがわかる。なお、さわりの有無に関係なく基本周波数は 63Hz 程度である。

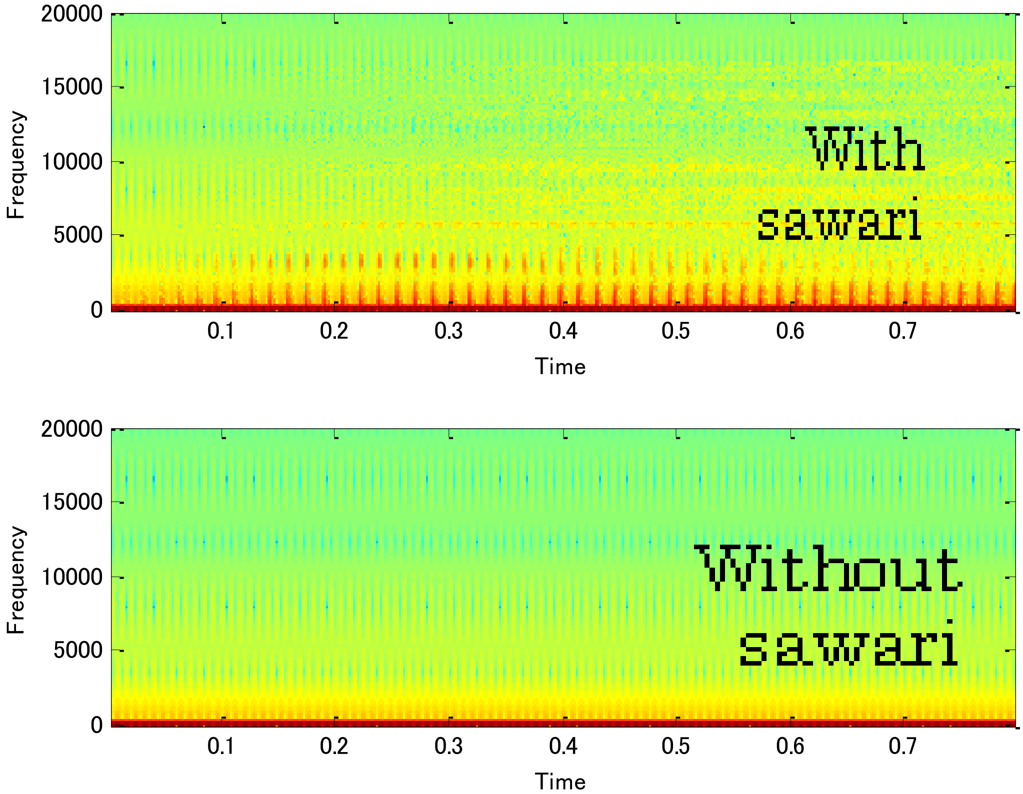

Figure 5-7 Simulation condition 001 [spectrogram]

上図はスペクトログラムによる比較結果である。さわり有りの結果（上段）からさわりによる高周波振動が発生していることがわかる。それに対し、さわり無し（下段）ではそれらがみられない。

5.4.2　条件２　さわりの位置

さわりの垂直方向の位置比較の結果を以下に示す。横軸が周波数[Hz]、縦軸は振幅[m]である。凡例は上駒からの垂直方向の距離[mm]を示している。

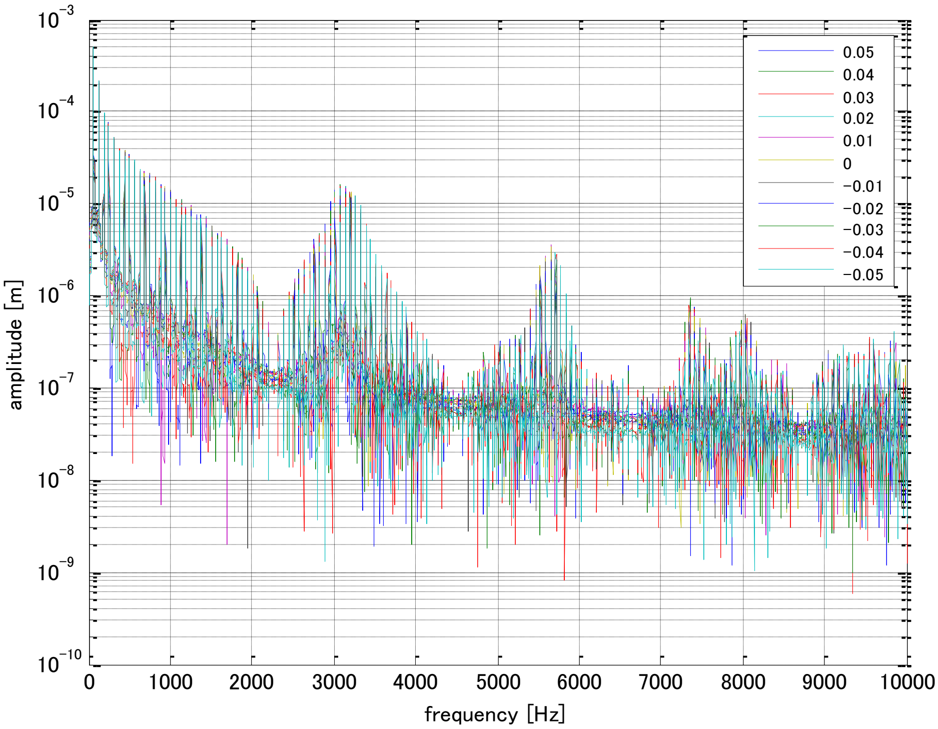

Figure 5-8 Simulation condition 002 (vertical)

図 5-8 から、上駒からの垂直方向の距離が-0.05mm から 0.05mm の間では、さわりの位置が低いほどさわりにより発生する弦振動の周波数がわずかながら高くなる傾向があることがわかった。

次に、さわりの水平方向の位置比較を行う。下図の横軸は周波数[Hz]、縦軸は振幅[m]である。なお、図中にある凡例の数字は上駒からの水平方向の距離[mm]を示す。条件の項でも述べた通り、さわりの垂直方向の位置は上駒から 0mm の位置で固定している。

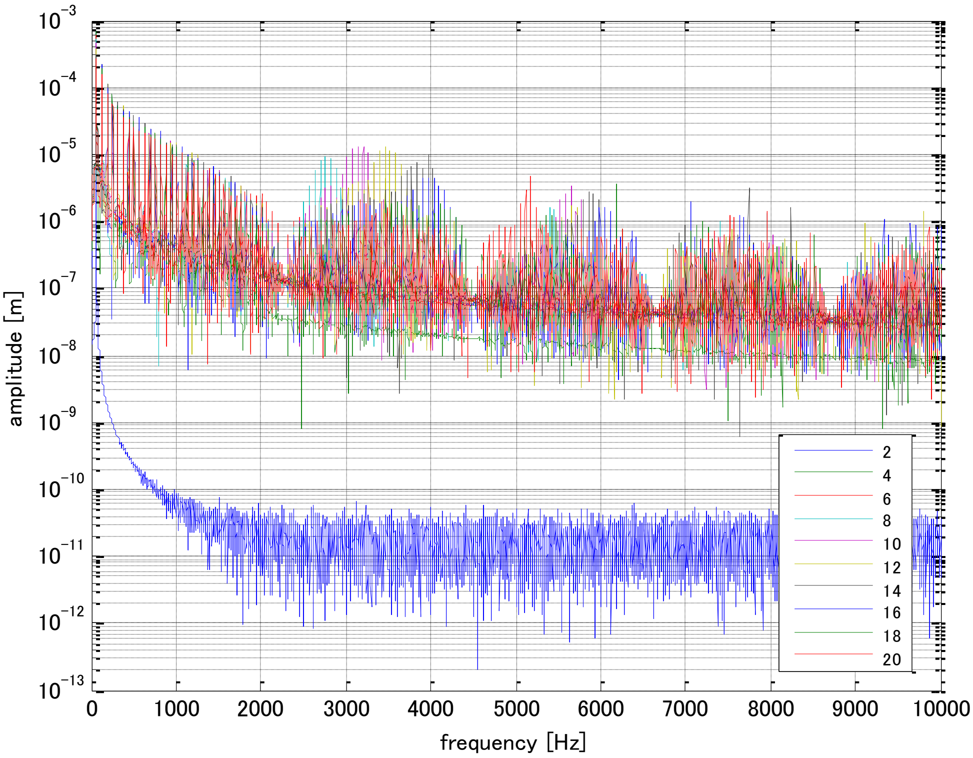

Figure 5-9 Simulation condition 002 (horizontal)

図 5-9 から、さわりと上駒の水平方向の距離を大きくするほど、さわりにより発生する弦振動の周波数が高くなる傾向がある。

次にスペクトログラム解析結果を示す。横軸がそれぞれ時間[s]、縦軸が周波数[Hz]である。グラフの赤い部分がピークの高い領域、青い部分がピークの低い領域を示す。なお、周波数軸の単位は 10000Hz である。図中にある距離は上駒とさわりの水平方向の距離を示す。

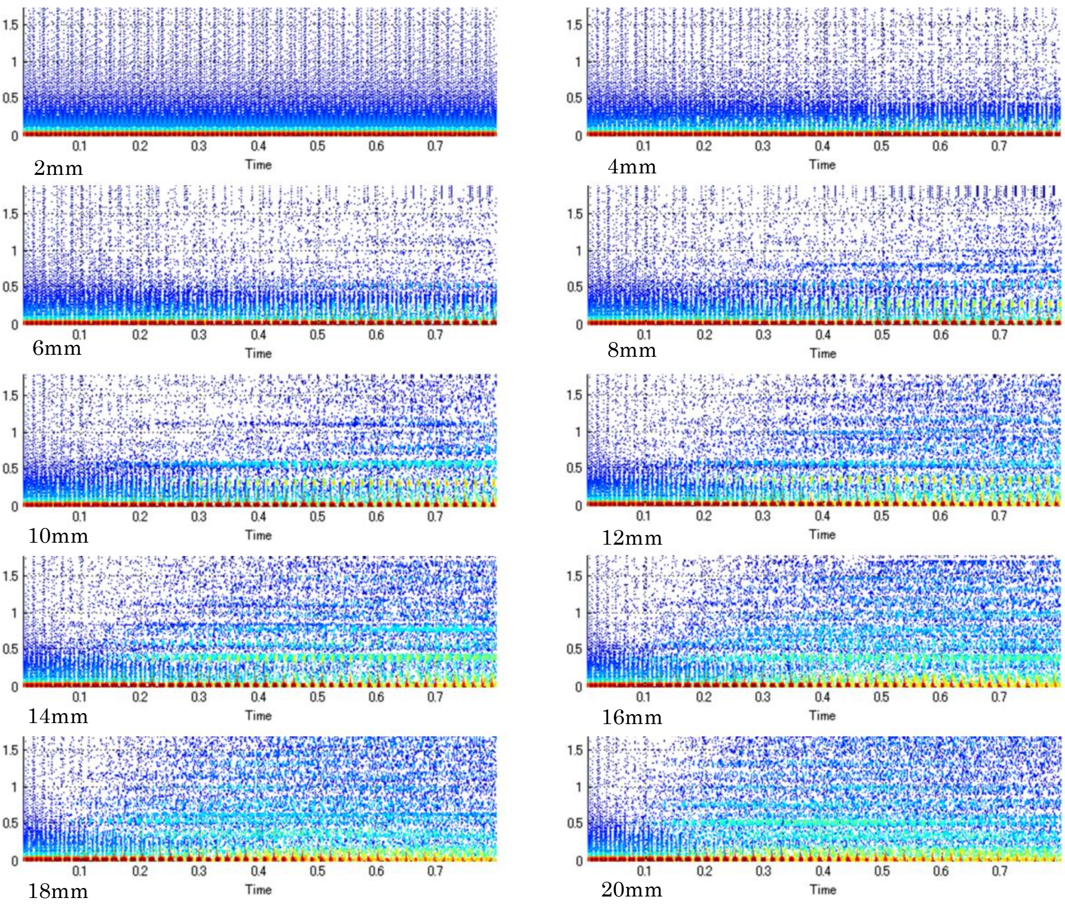

Figure 5-10 Simulation condition 002 (horizontal)

図 5-10 より、上駒とさわりとの距離が 10mm 付近(8,10,12)でサワリ効果が顕著に発生していることがわかる。また、距離が遠くなるにつれてさわりの影響による弦振動の発生時間が早くなっていることがわかる。

5.4.3　条件３　減衰項の付加

5.3.3.3 項のとおり、波動方程式に減衰項を付加した結果を以下に示す。横軸が時間[s]、縦軸は振幅[m]である。なお、図中のある凡例のとおり、青が減衰なし、緑が減衰ありである。

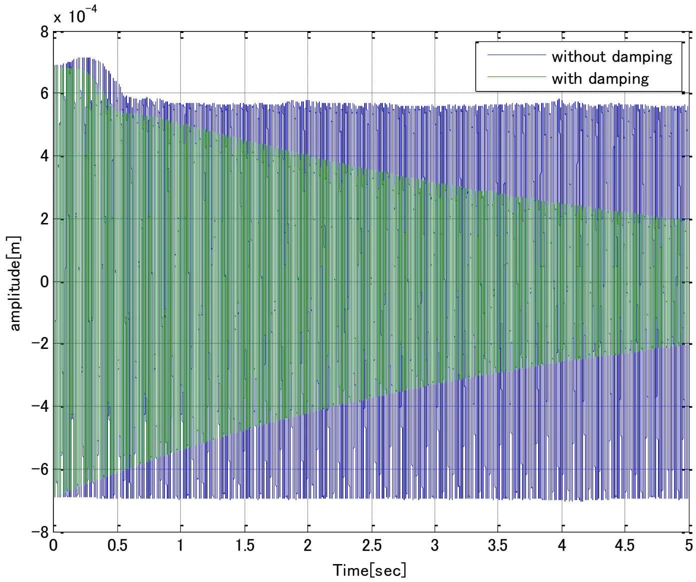

Figure 5-11 Simulation condition 003 [time]

次に周波数波形を示す。横軸が周波数[Hz]、縦軸が振幅[m]である。

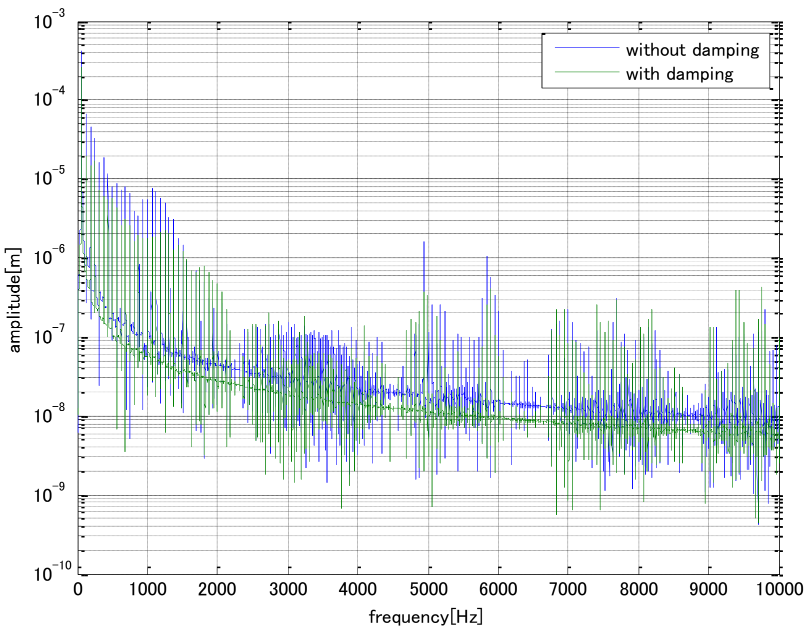

Figure 5-12 Simulation condition 003 [Frequency]

次にスペクトログラムの結果を示す。なおグラフの縦軸が周波数[Hz]、横軸が時間[s]を示す。グラフの赤い部分がピークの高い領域、青い部分がピークの低い領域である。

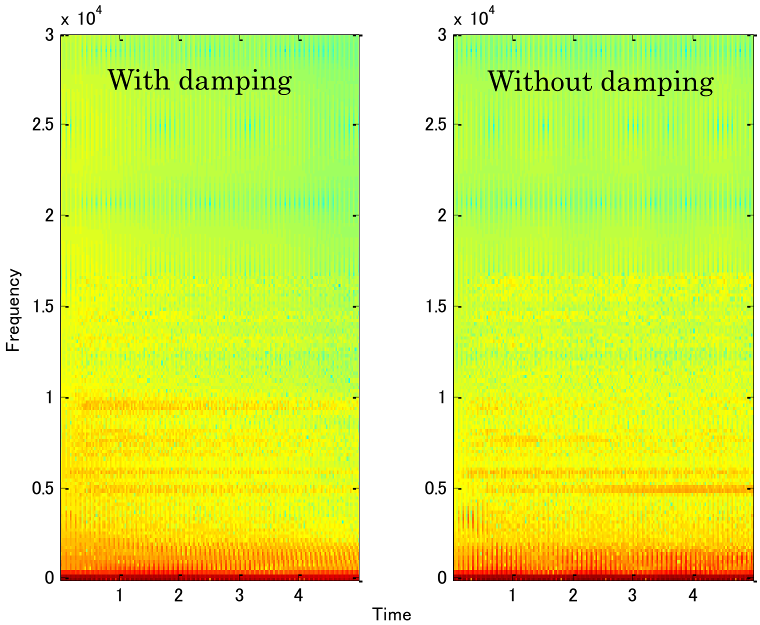

Figure 5-13 Simulation condition 003 [spectrogram]

図 5-11 および図 5-13 から時間とともに振幅が小さくなり､減衰していることがわかる。ただし､10000Hz 付近のピークは減衰があるときの方が大きく出ている。また、図 5-12 より減衰の有無により振幅だけでなく周波数にも差が発生していることがわかった。とくに 2500Hz～4000Hz で顕著に発生している。

5.5 考察

条件１より、さわりを付加すると弦振動の振幅が一度膨らんだのちに振幅が小さくなる事がわかった。また、さわりが付加された状態では 2500Hz、4500Hz、6500Hz 付近でピークが低くなる現象が発生した。これは三味線の録音実験の結果（図 2-20 など）と同様の傾向となった。条件２より、さわりの垂直方向の距離が低いほど、さわりにより発生する弦振動の周波数がごく僅かながら高くなる傾向があることがわかった。また、さわりと上駒の水平方向の距離を大きくするほど、さわりにより発生する弦振動の周波数が高くなる傾向があることがわかった。同時に距離が遠くなるにつれてさわりの影響による弦振動の発生時間が早くなる傾向があること、およびさわり効果が最もよく出る距離は 10mm 付近(8、10、12)であることもわかった。これらのことから、さわりの影響による弦振動の周波数を変化させたい場合にはさわり山の水平方向の位置を変化させる事が効果的であるといえる。条件３より、波動方程式への減衰項付加により減衰を再現する事ができた。この減衰項の付加により振幅だけでなく周波数にも差が発生していることがわかった。これは特に 2500Hz～4000Hz で顕著に発生することがわかった。

6. 胴体の空洞共鳴シミュレーション

6.1　目的

胴体内部の空洞共鳴がさわり音に及ぼす影響を調べるために胴体内部の空気の周波数解析行った。

6.2　計算理論

6.2.1　ヘルムホルツ方程式

$$\cos(\omega t+\delta) \tag{6.1}$$

$$\mathrm{e}^{\mathrm{i\omega t}}(i=\sqrt{-1}) \tag{6.2}$$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2}=\frac{T}{\rho}\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}\equiv c^2\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \tag{6.3}$$

波動方程式の解が時間変数について、(6.1)もしくは(6.2)のような一定の振動数$\omega/2\pi$で振動する場合、一次元波動方程式(6.3)は

$$\frac{d^2 u}{dx^2}+k^2 u=0 \tag{6.4}$$

となる。ここに$k=\omega/c$は波数(長さ2πに含まれる波の個数)を表す。2 次元、3 次元波動の場合には、各次元に対応するラプラシアン∇^2を用いることによって、

$$\nabla^2 u+k^2 u=0 \tag{6.5}$$

と書かれる。このような方程式をヘルムホルツ方程式と呼ぶ。また上記のヘルムホルツ方程式において、係数が負になった方程式、

1 次元　$$\frac{d^2 u}{dx^2}-k^2 u=0 \tag{6.6}$$

2、3 次元　$$\nabla^2 u-k^2 u=0 \tag{6.7}$$

は変形ヘルムホルツ方程式と呼ばれている。

6.2.2 有限要素解析

単一閉曲線Γで囲まれた、直交xy座標平面内の短刑領域$\Omega = (a,b) \times (c,d)$において、関数$u = (x,y,t)$を未知とする次の双曲線方程式を考える。

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c^2 \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}\right) \tag{6.8}$$

ここに、cは正の定数であり、波uの伝播する速度を表す。時刻$t = 0$における初期条件として、Ωにおいて、

$$\mathrm{u(x,y,0)} = u^0(x,y), \quad \frac{\partial u}{\partial t}(x,y,0) = v^0(x,y) \tag{6.9}$$

を与える。u^0は初期波形、v^0は初期速度を表す。

境界条件として、Γの一部Γ_uにおいて$u = \bar{u}$、残りの境界Γ_qにおいて法線方向の微係数$\partial u / \partial n = \bar{q}$が課せられるものとする。

まず初めに、非定常波動問題の有限要素解析について触れ、次に定常波動問題。すなわちヘルムホルツ方程式の有限要素解析について述べる。

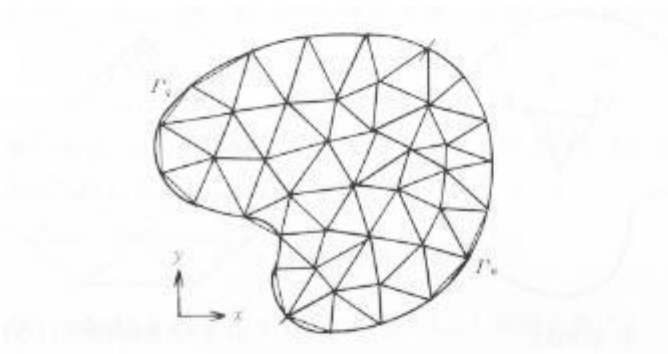

Figure 6-1 Split of triangle with territory [2]

図 6−1 のように三角形分割を行って近似空間$S_N = \langle \varphi_1, \varphi_2, \cdots, \varphi_N \rangle$を用意し、

$u^h \in S_N$を

$$u^h(\mathrm{x,y,t}) = \sum_{j=1}^{N} u_j(t)\varphi_j(x,y) \tag{6.10}$$

とおく。ここで、1 次結合の係数 u_j は時間 t の関数であり、節点 $P_j(x_j, y_j)$ における真の $u(P_j, t)$ の近似を表す。u^h は空間変数についてのみ離散化されているので半離散解と呼ばれる。

(6.10)式についてガラーキン法を用いて空間変数について離散化すると、N 個の未知関数 $u_j(t)$ に関する次の半離散化方程式が得られる。

$$\sum_{j=1}^{N}(m_{ij}\frac{d^2u_j}{dt^2}+k_{ij}u_j)=d_i(t),\quad i=1,2,\cdots,N \tag{6.11}$$

ここに、係数 m_{ij} 、k_{ij} と右辺 $d_i(t)$ は各要素の積分の和として計算される。2 階連立常微分方程式(6. 11)の初期条件は、節点 P_j において、

$$u_j(0)=u^0(P_j),\ \frac{du_j}{dt}(0)=v^0(P_j) \tag{6.12}$$

で与えられる。次に未知関数を $w(x, y, t)$ であらわした波動方程式

$$\frac{\partial^2 w}{\partial t^2}=c^2(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}) \tag{6.13}$$

の解が周波数 ω の定常振動するものと仮定する。すなわち、

$$\mathrm{w(x,y,t)}=\mathrm{e}^{-\mathrm{i}\omega\mathrm{t}}u(x,y) \tag{6.14}$$

ここに $u(x, y)$ は空間波形を表す。これを上記の波動方程式に代入して、ヘルムホルツ方程式

$$(\nabla^2+k^2)u(x,y)=0 \tag{6.15}$$

を得る。ただし、波数 $k=\omega/c(>0)$ と置いた。境界条件は簡単のため $\Gamma=\partial\Omega$ 上で $u=0$ とする。以下では(6.15)を Ω で満たす恒常的には 0 でない解 u と定数 k を求める問題を考える。ここで $\lambda=k^2$ を固有値、u を固有値 λ に対応する固有関数と呼ぶ。

固有値問題を近似的に解くために、領域 Ω を三角形要素に分割し、この分割に対応する 1 次有限要素基底を $\{\varphi_j(P)\}_{j=1}^{N}$ とする。固有関数 u(P)の近似関数として、

$$u^h(\mathrm{P}) = \sum_{j=1}^{N} u_j \varphi_j(P) \tag{6.16}$$

を考える。ここに係数u_jは真値$u(P_j)$の近似値であり、次の関係によって定められる。

$$\int_\Omega (\nabla^2 + k^2) u^h \varphi_i d\Omega = 0, \quad i = 1,2,\cdots,N \tag{6.17}$$

上式は発散定理によって次のようになる。

$$\int_\Omega \left(\frac{\partial u^h}{\partial x}\frac{\partial \varphi_i}{\partial x} + \frac{\partial u^h}{\partial y}\frac{\partial \varphi_i}{\partial y}\right) d\Omega = k^2 \int_\Omega \varphi_i u^h d\Omega \tag{6.18}$$

さらに(6.16)に代入して

$$\sum_{j=1}^{N} k_{ij} u_j = \lambda \sum_{j=1}^{N} m_{ij} u_j, \ \ i = 1,2,\cdots,N \tag{6.19}$$

を得る。ここに、

$$k_{ij} = \int_\Omega \left(\frac{\partial \varphi_i}{\partial x}\frac{\partial \varphi_i}{\partial x} + \frac{\partial \varphi_i}{\partial y}\frac{\partial \varphi_i}{\partial y}\right) d\Omega,\ m_{ij} = \int_\Omega \varphi_i \varphi_i d\Omega \tag{6.20}$$

とおく。これらの係数k_{ij}, m_{ij}は各要素ごとの積分の和で与えられる。

要素 e 上では、

$$\begin{gathered} k_{ij}^e = \int_e \left(\frac{\partial \varphi_i}{\partial x}\frac{\partial \varphi_i}{\partial x} + \frac{\partial \varphi_i}{\partial y}\frac{\partial \varphi_i}{\partial y}\right) d\Omega = \frac{1}{4\Delta^e}\left(b_i b_j + c_i c_j\right), \\ m_{ij}^e = \int_e \varphi_i \varphi_i d\Omega = \frac{\Delta^e}{12}(1 + \delta_{ij}) \end{gathered} \tag{6.21}$$

となる。ここで

$$\varphi_i(x,y) = \begin{cases} 1, (x,y) = \textit{第一接点座標}\left(x_i, x_j\right) \\ 0, (x,y) = \left(x_j\ , y_j\right)(i \neq j) \end{cases} \tag{6.22}$$

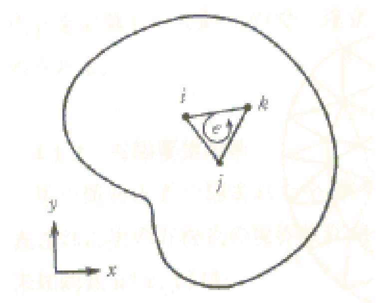

Figure 6-2 Triangle element (Element nodes) [2]

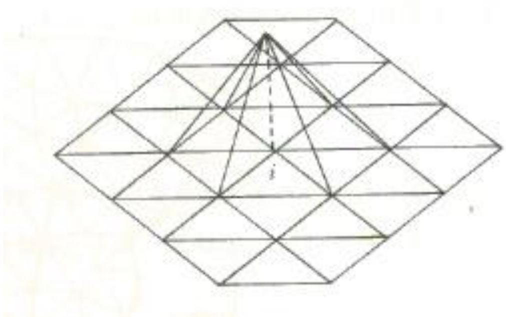

Figure 6-3 Triangle element (Fundamental function of normal $\boldsymbol{\varphi}_{\mathbf{i}}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{y})$) [2]

このようなφ_iを有限要素法では形状関数という。第 i 節点に隣接する三角形要素 e の節点を図 6-2 のように反時計回りにi, j, kとする。$\varphi_i(x,y)$は要素 e 内で

$$\varphi_i(x,y) = \frac{1}{2\Delta^e}(a_i + b_i x + c_i y) \tag{6.23}$$

Δ^e ：三角形の面積

と表される。

$$\Delta^e = \begin{vmatrix} 1 & x_i & y_i \\ 1 & x_j & y_j \\ 1 & x_k & y_k \end{vmatrix} = \frac{1}{2}\left(c_j b_i - c_i b_j\right)$$

$$\begin{aligned} \mathrm{a}_i &= x_j y_k - x_k y_j\,, \mathrm{b}_i = y_j - y_k\,, \mathrm{c}_i = x_k - x_{j,} \\ \mathrm{a}_j &= x_k y_i - x_i y_k\,, \mathrm{b}_j = y_k - y_i\,, \mathrm{c}_j = x_i - x_{k,} \\ \mathrm{a}_k &= x_i y_j - x_j y_i\,, \mathrm{b}_k = y_i - y_j\,, \mathrm{c}_k = x_j - x_{i,} \end{aligned} \tag{6.24}$$

で与えられる。

このようなφ_iは節点も数 N だけあり、お互いに 1 次独立、しかも$\{\varphi_j(P)\}_{j=1}^{N}$の 1 次結合全体の集合$S_N = \langle\varphi_1, \varphi_2, \cdots, \varphi_N\rangle$はソボレフ空間と呼ばれる関数空間$H^1(\Omega)$の部分空間となっている。

(6.21)式における($b_i, b_j, c_i, c_j, \Delta^e$)は(6.24)にて得られる。 k_{ij}, m_{ij} を第(i,j)要素と

する正方行列を $\boldsymbol{K}$,$\boldsymbol{M}$ で表し、 u_j を第 j 成分とする列ベクトルを $\boldsymbol{u}$ で表すと(6.19)

は次のようにまとめて書くことができる

$$\boldsymbol{Ku} = \lambda\,\boldsymbol{Mu} \tag{6.25}$$

これは、λを固有値、 $u(\neq 0)$ をλに対応する固有ベクトルとする一般固有値問題であり、境界条件を考慮することによって $\boldsymbol{K}$ と $\boldsymbol{M}$ は正値対象行列となる。すなわち、今節点 $P_i \in \Gamma$ とする。境界値 $u_i = 0$ を考慮に入れるためには、十分小さな正数 ε を用いて、(6.25)を

$$\begin{bmatrix} k_{11} & \cdots & k_{1i-1} & 0 & k_{1i+1} & \cdots & k_{1N} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ & \cdots & k_{i-1i-1} & 0 & k_{i-1i+1} & \cdots & k_{i-1N} \\ & & & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ & \cdots & & & k_{i+1i+1} & \cdots & k_{i+1N} \\ \vdots & \ddots & \vdots & & \vdots & \ddots & \vdots \\ & \cdots & & & & \cdots & k_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ \vdots \\ u_{i-1} \\ u_i \\ u_{i+1} \\ \vdots \\ u_N \end{bmatrix}$$

$$= \lambda \begin{bmatrix} m_{11} & \cdots & m_{1i-1} & 0 & m_{1i+1} & \cdots & m_{1N} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ & \cdots & m_{i-1i-1} & 0 & m_{i-1i+1} & \cdots & m_{i-1N} \\ & & & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ & \cdots & & & m_{i+1i+1} & \cdots & m_{i+1N} \\ \vdots & \ddots & \vdots & & \vdots & \ddots & \vdots \\ & \cdots & & & & \cdots & m_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ \vdots \\ u_{i-1} \\ u_i \\ u_{i+1} \\ \vdots \\ u_N \end{bmatrix} \tag{6.26}$$

と書き直すことができる。

次数 N が小さいならば、ヤコビ法よってすべての固有値と固有ベクトルを計算すること容易であるが、通常 N(>1000)は大きいので、すべての固有値、固有ベクトルを求めることはあきらめて、固有値 λ(>0)の小さい方から n(=20)個程度求めることが多い。 n 次の正方行列 $\boldsymbol{K}$, $\boldsymbol{M}$ は正値対象とする。一般化固有問題

$\boldsymbol{Kx} = \lambda \boldsymbol{Mx}$ の小さい方からm個(m ≤ n)の固有値 $0 < \lambda_1 \leq \lambda_2 \leq \cdots \leq \lambda_m$ と対応するmこの固有ベクトル $x_1, x_2, \cdots, x_m$ を求めるには次のようにする。

1 次独立な出発ベクトル $x_1^0, x_2^0, \cdots, x_m^0$ をとり、n × m行列

$$\mathbf{X}^{(\mathbf{0})} = \left[x_1^{(0)} \;\vdots\; x_2^{(0)} \;\vdots\; \cdots \;\vdots\; x_m^{(0)}\right] \tag{6.27}$$

を作る。 $k = 0,1,2,\cdots$ に対して収束するまで以下の手順を繰り返す。

積 $\boldsymbol{Z} = \boldsymbol{MX}^{(\boldsymbol{k})}$ をつくり m 組の連立 1 次方程式 $\boldsymbol{KY} = \boldsymbol{Z}$ を解いて $\boldsymbol{Y}$ を求める。ついで m 次の正方行列 $\widetilde{\boldsymbol{K}} = \boldsymbol{Y}^{\boldsymbol{T}}\boldsymbol{KY}, \overline{\boldsymbol{M}} = \boldsymbol{Y}^{\boldsymbol{T}}\boldsymbol{MY}$ を作る。m 次の固有値問題 $\widetilde{\mathbf{K}}\boldsymbol{p} = \lambda\overline{\boldsymbol{M}}$ を一般化ヤコビ法を用いて解き、得られた m 個の固有ベクトルを

$$\mathbf{P} = [p_1 \ \vdots \ p_2 \ \vdots \ \cdots \ \vdots \ p_m] \tag{6.28}$$

とおく。最後に$\boldsymbol{X}^{(\boldsymbol{k}+\boldsymbol{1})} = \boldsymbol{YP}$を求める。$\mathrm{k} \to \infty$のとき$x_j^{(k)} = x_j (j = 1,2,\cdots,m)$が得られる。収束の判定は$\widetilde{\boldsymbol{K}}$と$\widetilde{\boldsymbol{M}}$が同時に対角行列に十分近くなったかどうかで判断する。

6.3 計算方法

計算ソフトとしては Altair 社の Hypermesh を使用し、計算ソルバーには同社の Radioss を使用した。

6.3.1 計算対象

4.2 の胴体の実験モード解析で使用した胴体を 3DCAD にてモデリングを行い、図 6-4 のように空間内にヘキサ要素を作成し、これを有限要素解析することで空間の固有振動数を求めた。なお、節点は 1573 点、3D 要素数は 1320 個で計算を行った。境界条件は外部との共振がない完全な空洞共鳴とし剛体として扱った。

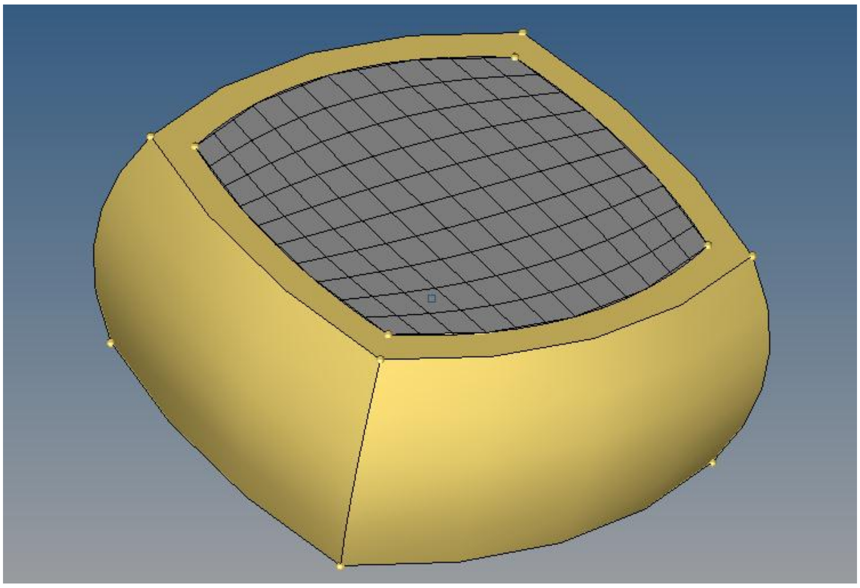

Figure 6-4 3D shamisen model

6.3.2 計算式

音場解析は次のような線形圧力-密度関係の非粘性流れに基づいている。

$$\frac{1}{\rho}\nabla P + \ddot{u} = 0 \tag{6.29}$$

そして連続方程式は、

$$P + \beta \nabla u = 0 \tag{6.30}$$

ここで、

P: *流体領域の圧力*

u: *構造領域の変位*

β: *流体領域の圧縮性*

ρ: *構造領域の密度*

(6.29)と(6.30)が組み合わされると、流体領域の支配方程式は次のようになる

$$\frac{\ddot{\mathrm{P}}}{\beta} - \frac{1}{\rho}\nabla^2 P = 0 \tag{6.31}$$

有限要素への離散化の後、流体領域の方程式の重ね合わせは

$$M_p\ddot{P} + B_p\dot{P} + K_p P - A\ddot{u} = S_p \tag{6.32}$$

ここで、

M_p: *流体領域の質量マトリックス*

B_p: *減衰マトリックス*

K_p: *剛性マトリックス*

S_p: *ソースベクトル*

A: *インターフェイスマトリックス*

$\ddot{u}_\iota$: *流体と構造間のインターフェイス上の構造節点の加速度*

同様に構造の方程式も以下のように表すことができる

$$M_s\ddot{u} + B_s\dot{u} + K_s\dot{u} + A^T P = S_s \tag{6.33}$$

M_s: *構造領域の質量マトリックス*

B_s: *構造領域の減衰マトリックス*

K_s: *構造領域の剛性マトリックス*

S_s: *構造領域のソースベクトル*

P: インターフェイス上の流体構造の圧力

(6.32)と(6.33)を組み合わせた流体構造インターフェイスの方程式は

$$\begin{bmatrix} M_s & 0 \\ -A & M_p \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \ddot{u} \\ \ddot{P} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_s & 0 \\ 0 & B_p \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{P} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_s & A^T \\ 0 & K_p \end{bmatrix}\begin{bmatrix} u \\ p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_S \\ S_P \end{bmatrix} \tag{6.34}$$

となる。(6.34)は、直接周波数応答またはモーダル周波数応答のどちらかで、構造の流体領域の未知量に関して同時に解かれる。

6.4　計算結果

以下に計算結果を示す。

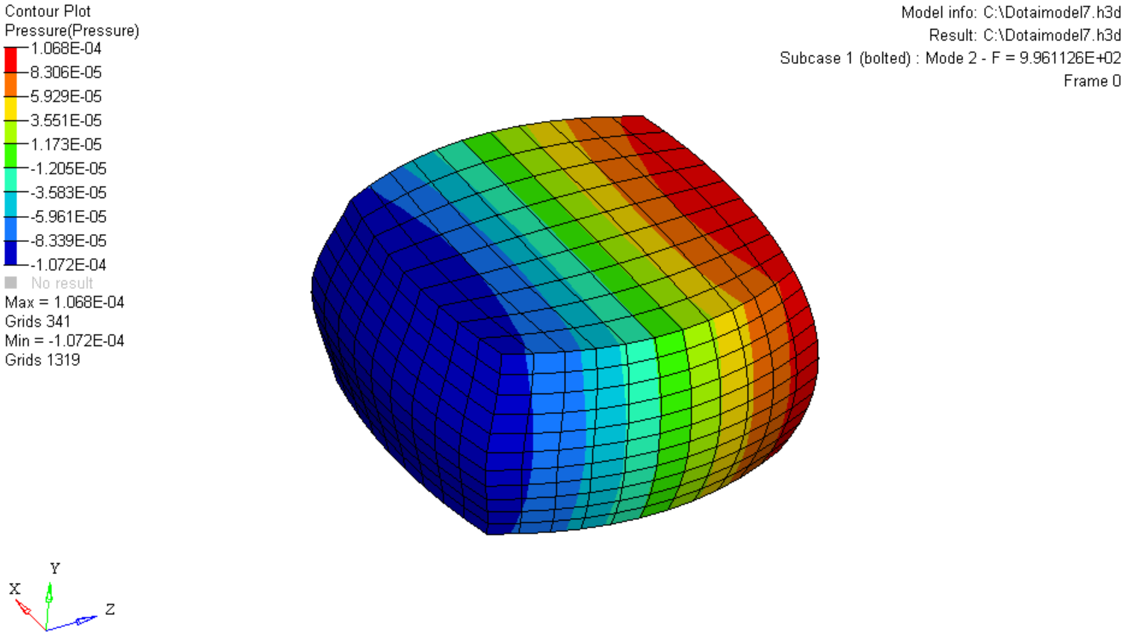

Figure 6-5 Fundamental mode shape

図 6-5 は FEM モデルの解析結果を示している。なお、赤い部分が音圧の高い部分を示し、青い部分は低い部分を示す。

FEM 解析で 1 次モードは 996Hz を示した。

Table 6-1 Natural frequency of dotai's cave

Mode number	Natural frequency f[Hz]
1	996Hz
2	999Hz
3	1517Hz
4	1787Hz
5	1834Hz
6	2078Hz

表 6-1 は FEM 解析を行った結果得られた固有振動数である。1000Hz 付近、および 1500Hz 付近、1800Hz 付近、2000Hz 付近に固有振動数が見られた。

6.5 考察

1 次モードの結果は 996Hz となった。これはさわり音の特徴である、1000Hz 付近の残響が長くなる現象となんらかの関連があるのではないかと考えられる。
以下に胴体の空洞の固有振動数とさわり有りの場合の周波数波形を比較した。

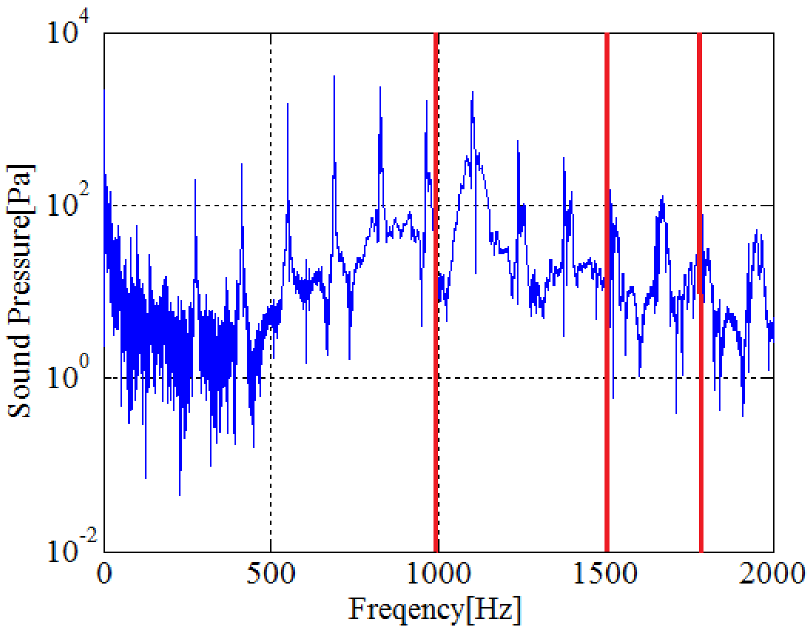

Figure 6-6 SAWARI middle (1st string) and Natural frequency of Air

図 6-6 よりさわり有りのピークと胴体内部の空気の固有振動数の値は比較的近い位置にあることがわかった。以下にさわり有り、無しと今回出た固有値の比較を示す。

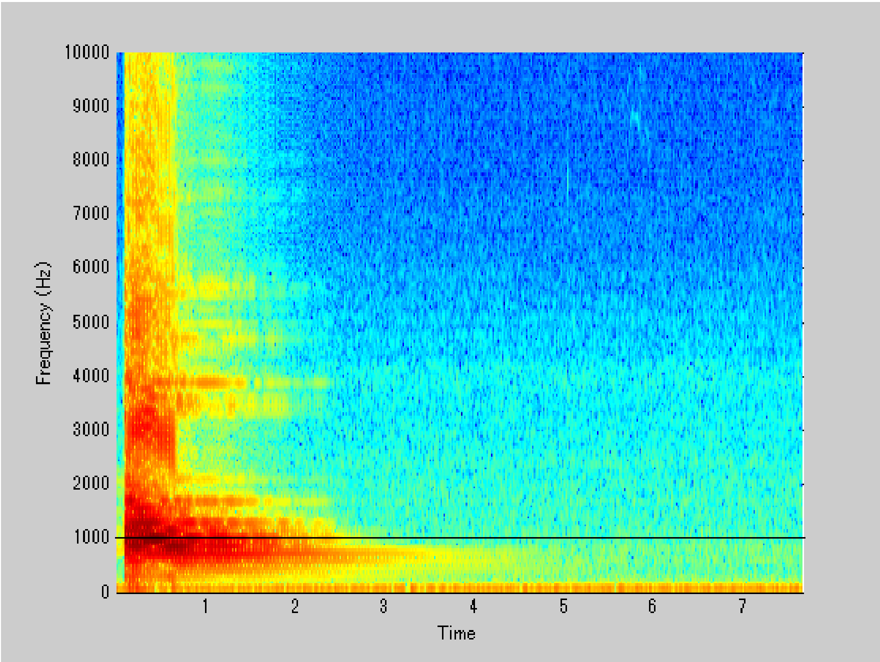

Figure 6-7 Without SAWARI and Natural frequency of Air

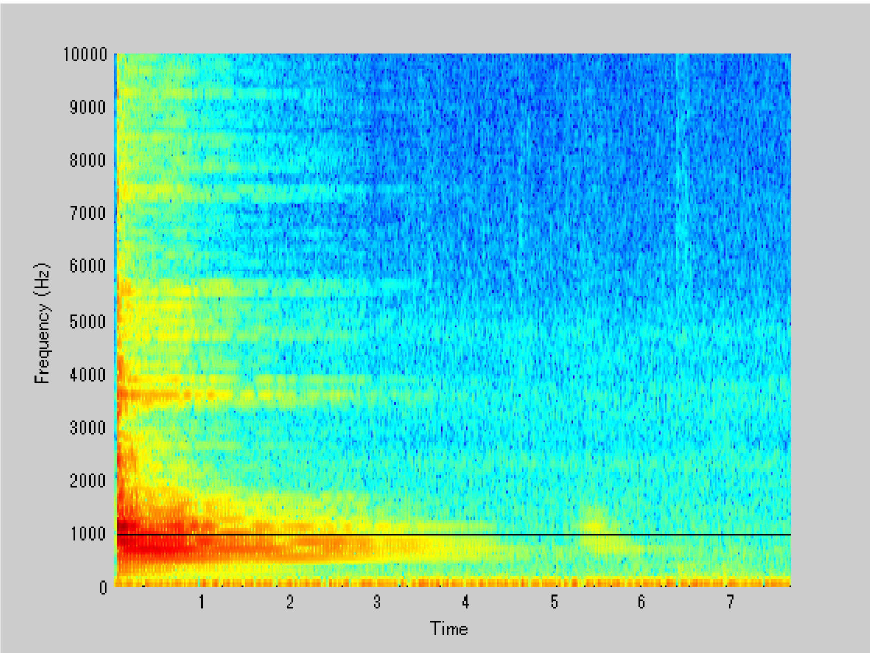

Figure 6-8 With SAWARI and Natural frequency of Air

図 6-7、図 6-8 を比較するとさわりがある場合のほうが、ない場合に比べて 1000Hz 付近の残響が長くなった。5 章「弦振動シミュレーション」における結果、図 5-7 よりさわりの有りの弦振動においてさわり有りの場合は 1000Hz 付近の残響が長くなっていた。さわりの唸り音はこの弦振動と胴体の空洞共鳴が共振現象をおこしているのではないかと考えられる。

弦振動と空洞共鳴の共振現象について以下に述べる。

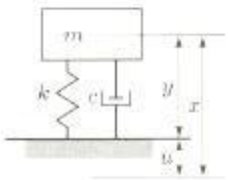

Figure 6-9 one flexibility system with foundation excitation [2]

図 6-6 のような 1 自由度系の土台が、第一波が 700Hz の正弦波の半波で土台加振されたのちにさらに第二波として 1000Hz の 10 波加振を行った場合の応答を求める。なお第一波と第二波では 0.02 秒の差をつけ、大きさも第二波は 1 とした時第一波を 5 とする。

計算方法としては時系列解析を行う。時系列解析とは振動方程式を直接、時間軸上で解いていくものである。

以下に振動方程式を示す。

$$ku + c\dot{u} + m\ddot{u} = f(t) \tag{6.35}$$

今回は線形化速度法を用いて計算を行った。

まず、変位を *u(t)*として微小時間増分を$\Delta t = T$とすると、*u(t+T)*はテイラー展開により

$$u(t+T) = u(t) + T\dot{u}(t) + \frac{T^2}{2}\ddot{u}(t) + \frac{T^3}{6}\dddot{u}(t) + \cdots \tag{6.36}$$

と無限級数になる。これを有限項で打ち切ってT^3項を

$$\dddot{u}(t) = \frac{\ddot{u}(t+T) - \ddot{u}(t)}{T} \tag{6.37}$$

と近似すると

$$u(t+T) = u(t) + T\dot{u}(t) + \frac{T^2}{3}\ddot{u}(t) + \frac{T^3}{6}\ddot{u}(t+T) \tag{6.38}$$

とできる。速度については

$$\dot{u}(t+T) = \dot{u}(t) + T\frac{\ddot{u}(t)+\ddot{u}(t+T)}{2} \tag{6.39}$$

とする。加速度は振動方程式(8.6)に、ここで導いた速度と変位を代入して、

$$\begin{aligned}\ddot{u}(t+T) = (\mathrm{m} + \frac{T}{2}c + \frac{T^2}{6}k)^{-1}\Big[f(t+T) \\ - c\left\{\dot{u}(t) + \frac{T}{2}\ddot{u}(t)\right\} \\ - k\left\{u(t) + T\dot{u}(t) + \frac{T^2}{3}\ddot{u}(t)\right\}\Big]\end{aligned} \tag{6.40}$$

となる。これを線形化速度法という。

線形化速度法を一般化すると

$$u(t+T) = u(t) + T\dot{u}(t) + \frac{T^2}{2}\ddot{u}(t) + \beta T^2\{\ddot{u}(t+T) - \ddot{u}(t)\} \tag{6.41}$$

となる。*β=1/6* とすれば線形化速度法である。数値的収束性がよいのは *β=1/4* のときであり、*1/4* と *1/6* がよく用いられている。まとまめると

$$\begin{aligned}\ddot{u}(t+T) = (\mathrm{m} + \frac{T}{2}c + \beta T^2 k)^{-1}\Big[f(t+T) \\ - c\left\{\dot{u}(t) + \frac{T}{2}\ddot{u}(t)\right\} \\ - k\left\{u(t) + T\dot{u}(t) + (\frac{1}{2} - \beta)T^2\ddot{u}(t)\right\}\Big]\end{aligned} \tag{6.42}$$

$$\dot{u}(t+T) = \dot{u}(t) + T\frac{\ddot{u}(t)+\ddot{u}(t+T)}{2} \tag{6.43}$$

である。

これを MATLAB を用いて計算を行った。結果を以下に示す。

まず第一波、第二波の力と 1000Hz の応答を示す。

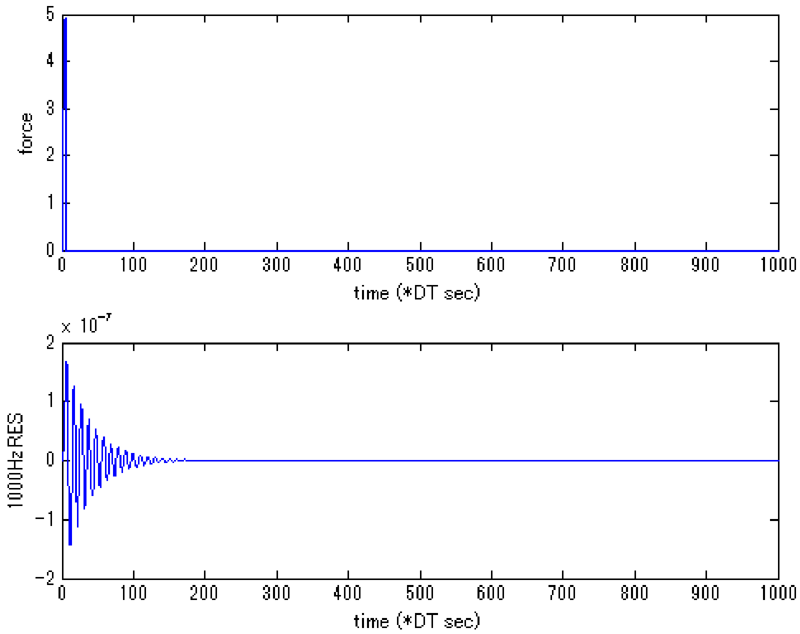

Figure 6-10 Wave and frequency response [001]

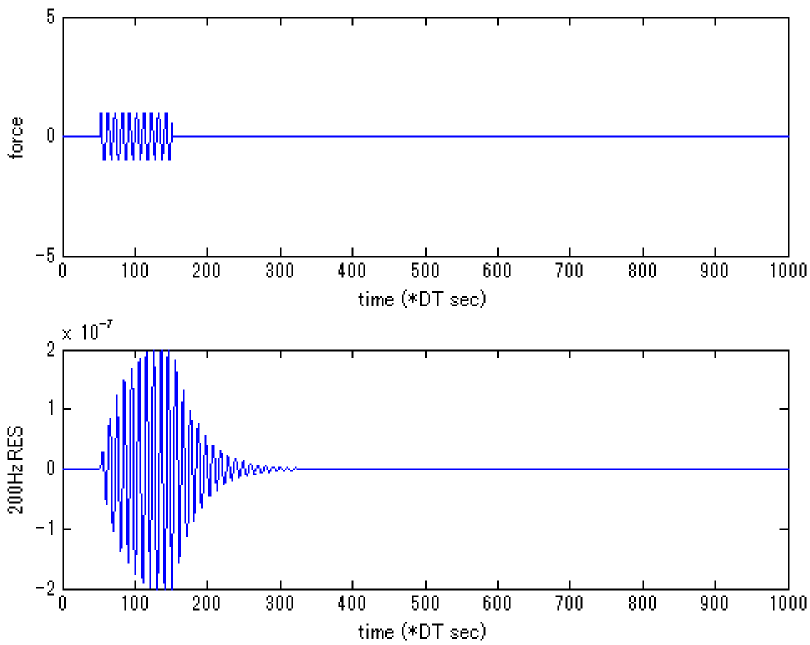

Figure 6-11 Wave and frequency response [002]

図 6-7 は第一波の波形である。1000Hz の応答は綺麗な減衰波形となりさわり無しの場合の波形に類似している。

図 6-8 は第二波の波形である。1000Hz の応答は徐々に応答が大きくなったあとに徐々に減衰していくことがわかった。

次に図 6-7 と図 6-8 を足した図形を示す。

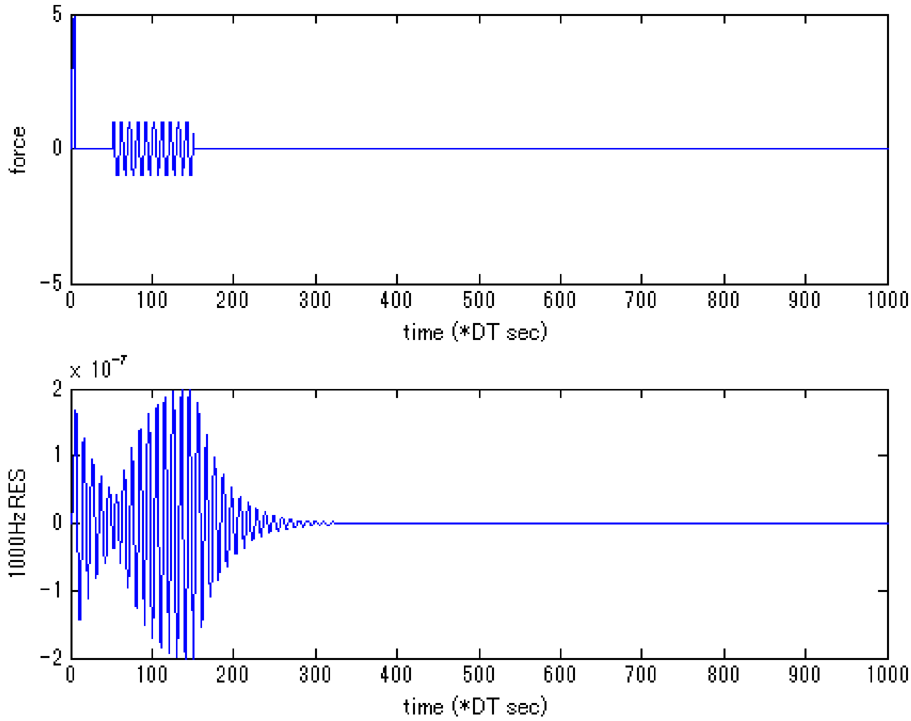

Figure 6-12 Wave and frequency response [001+002]

図 6-9 は第一波と第二波を足したものである。1000Hz の応答は一度減衰しかけたのち再び応答が大きくなってから減衰する波形となった。これは 3 章「音の加工」の結果の図 3-2 の 500-1500Hz の波形とよく似た形となった。このことから三味線のさわり音は弦振動と空洞共鳴の共振現象ではないかと考えられる。

7.　胴体の空洞共鳴実験

7.1　　目的

胴体を使用して、空洞共鳴の音を録音・解析しシミュレーションの結果と比較してシミュレーションの妥当性を調べた。

7.2　　実験方法

胴体の空洞共鳴音を録音するためにまず胴体の開口部に板を張り、さらに紐できつく縛ることで空洞部分をほぼ密閉状態とした。片側の板には穴を 2 つ開け、下の穴に騒音計の先端を挿入した。そして、上の穴で梱包材に使用されている“プチプチ”を潰した際にでる音を録音した。騒音計から出力された信号は **FFT** アナライザ(リオン社製 SA-01)によって処理され、データをパソコンに取り込んだあと MATLAB を使って解析を行った。実験風景、実験器具を以下に示す。

Figure 7-1 FFT analyzer(リオン社製)

Figure 7-2 Sound level pressure(リオン社製)

Figure 7-3 Laptop computer

Figure 7-4 Body and board

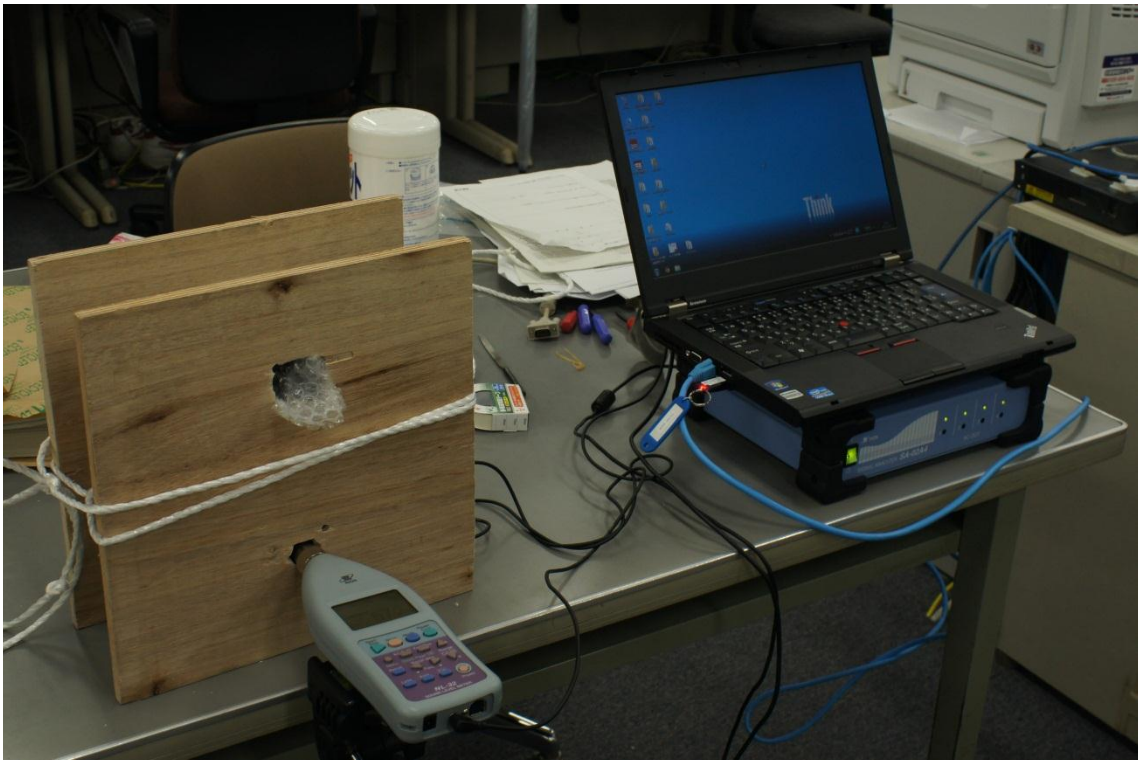

Figure 7-5 Experiment scenery 1

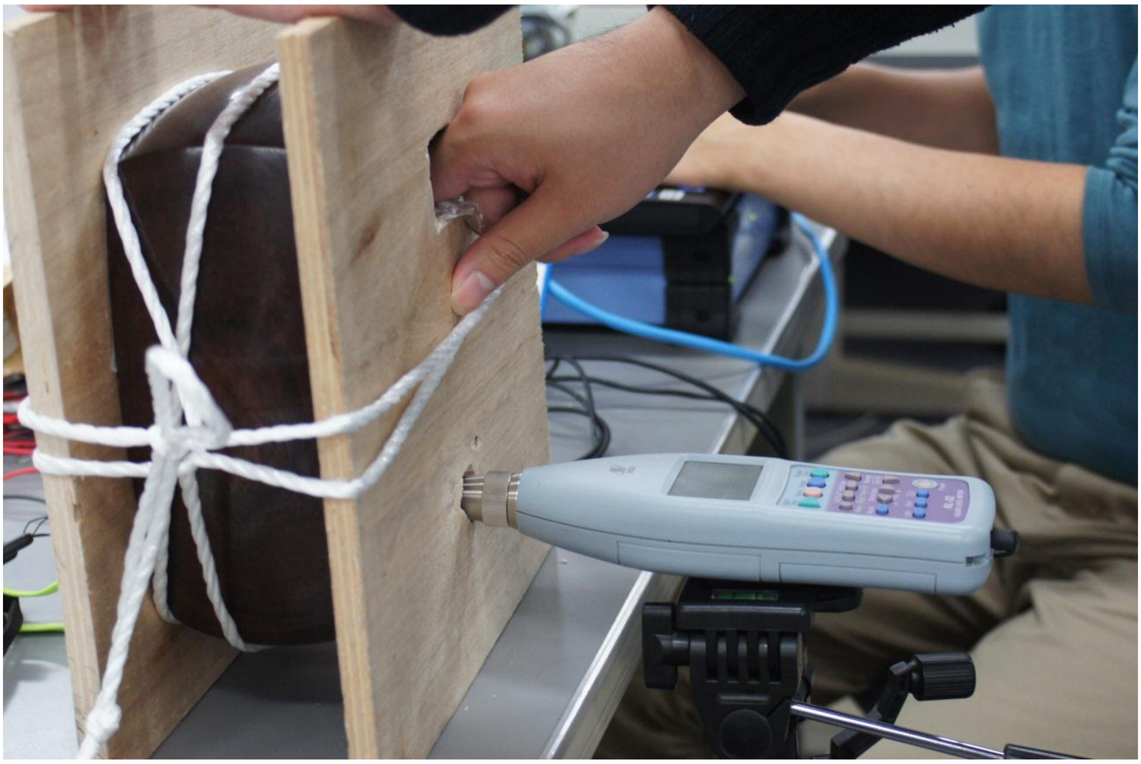

Figure 7-6 Experiment scenery 2

7.3　　実験結果

実験は 6 回行い、実験結果を比較した。以下に実験結果を示す。なお、分析周波数は 5000Hz、分析点数 4096 点とした。

7.3.1.　時間軸波形

図 7-7 から図 7-12 の横軸が時間[s]、縦軸が FFT アナライザより収録したデータの電圧である。図は “プチプチ “を潰してから減衰するまでの波形を示す。

すべてのデータにはおいて 0.05 秒ほどの時間で減衰した。図 7-7 においては 0.2 秒付近においては雑音が入ってしまった。

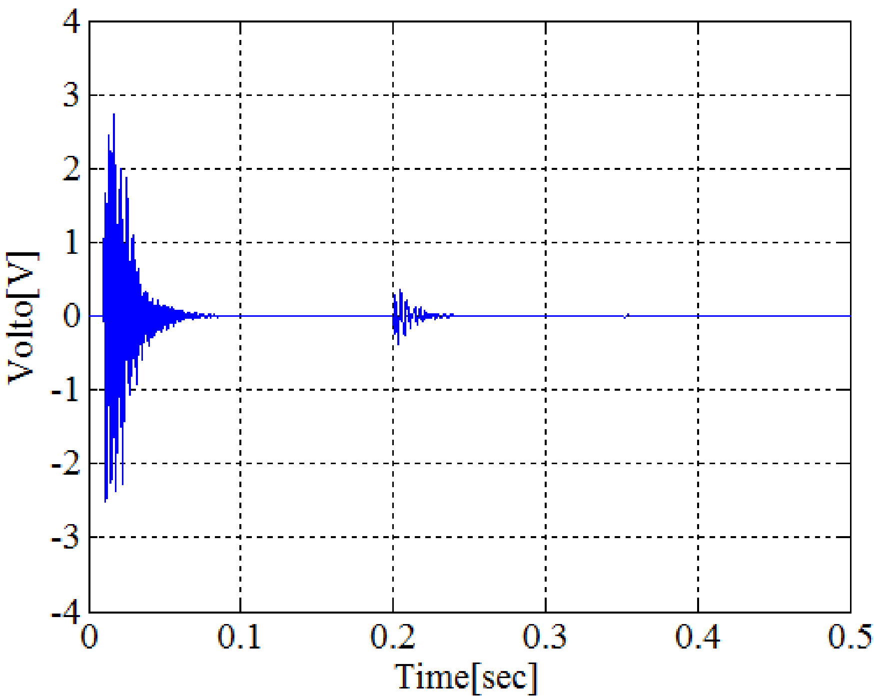

Figure 7-7 Kyomei [1]

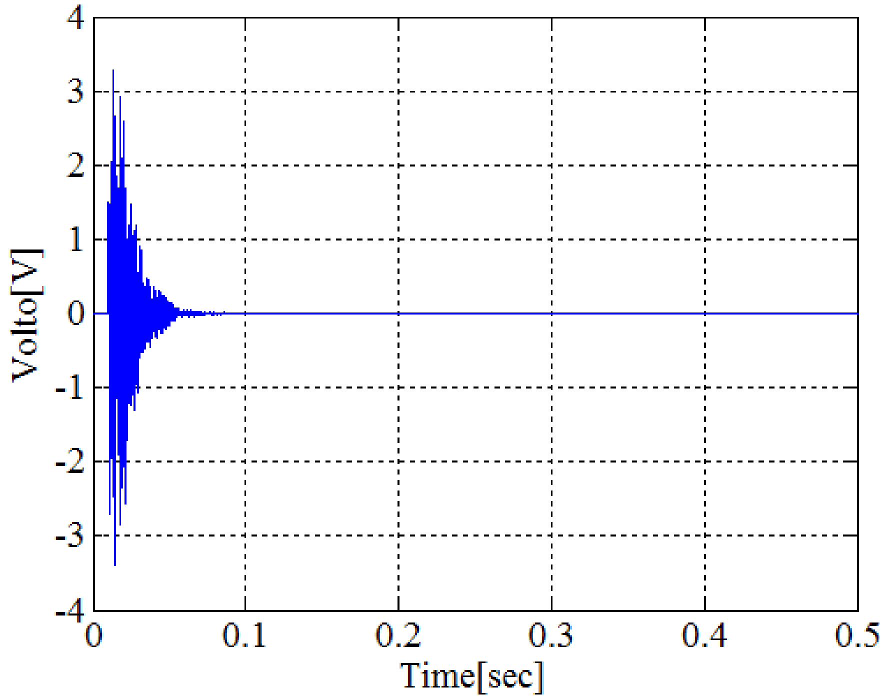

Figure 7-8 Kyomei [2]

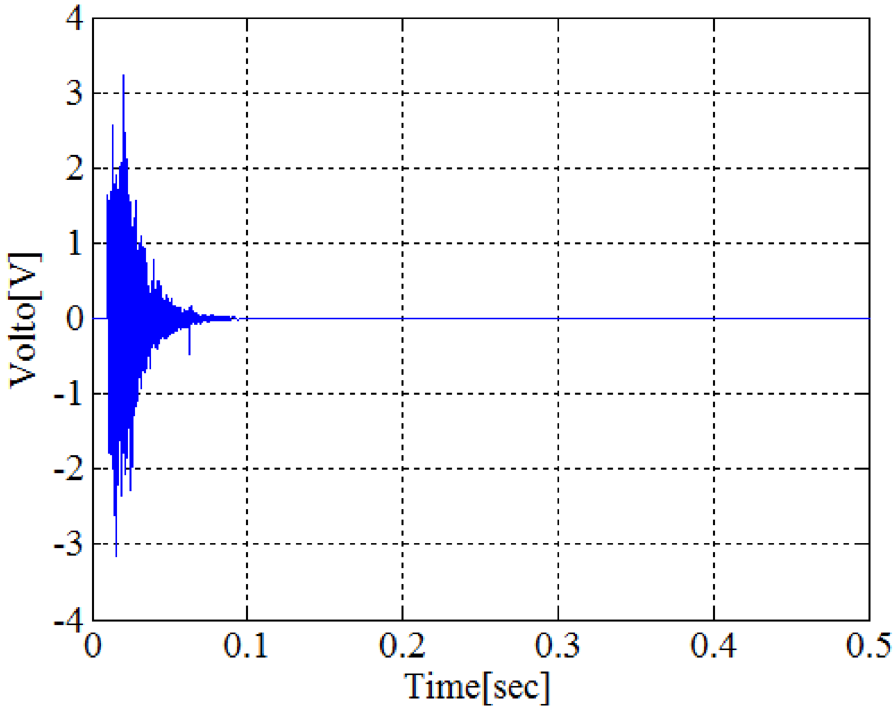

Figure 7-9 Kyomei [3]

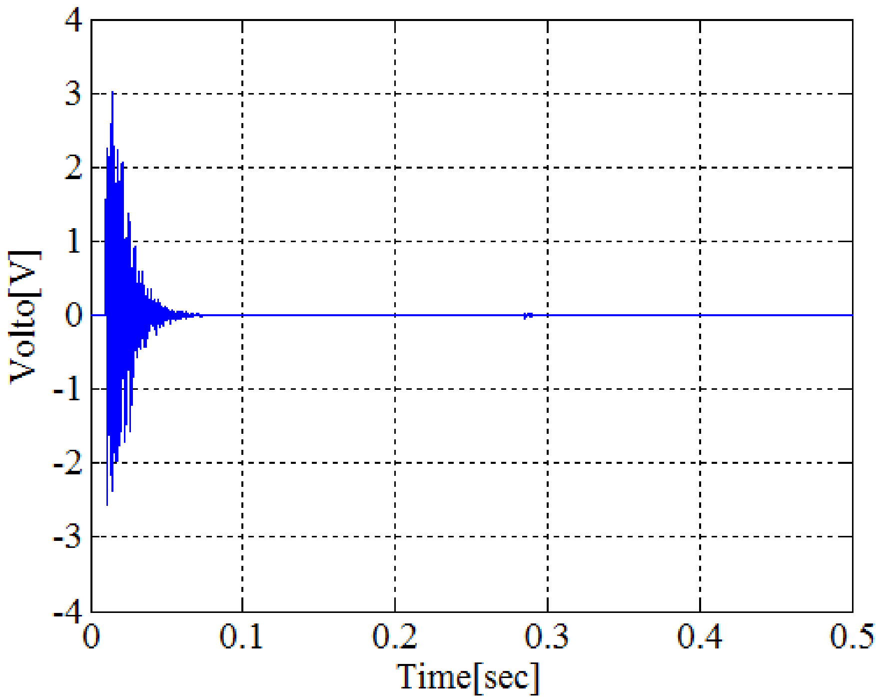

Figure 7-10 Kyomei [4]

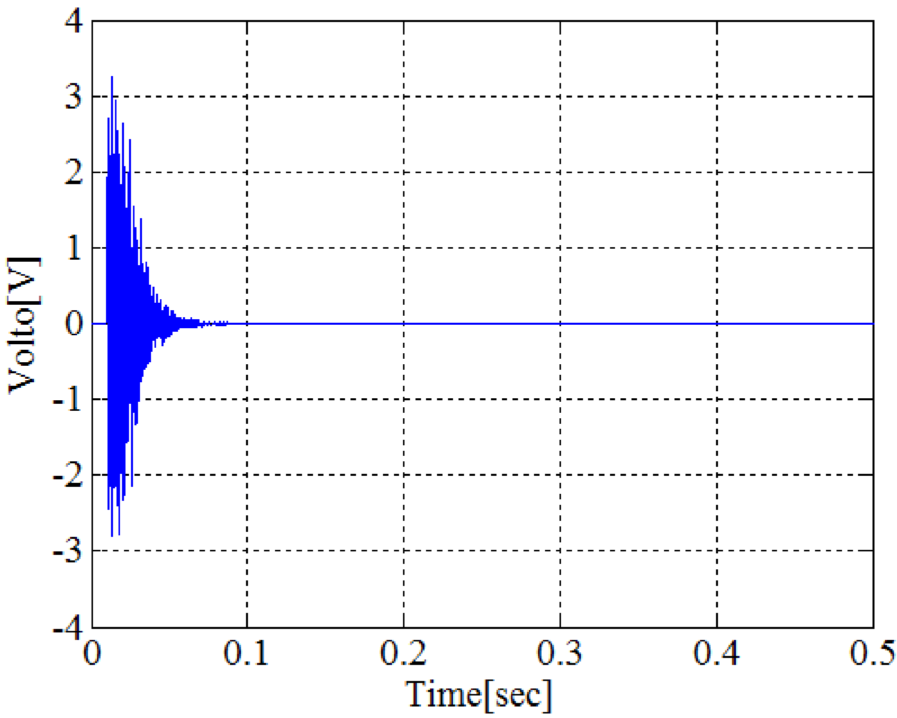

Figure 7-11 Kyomei [5]

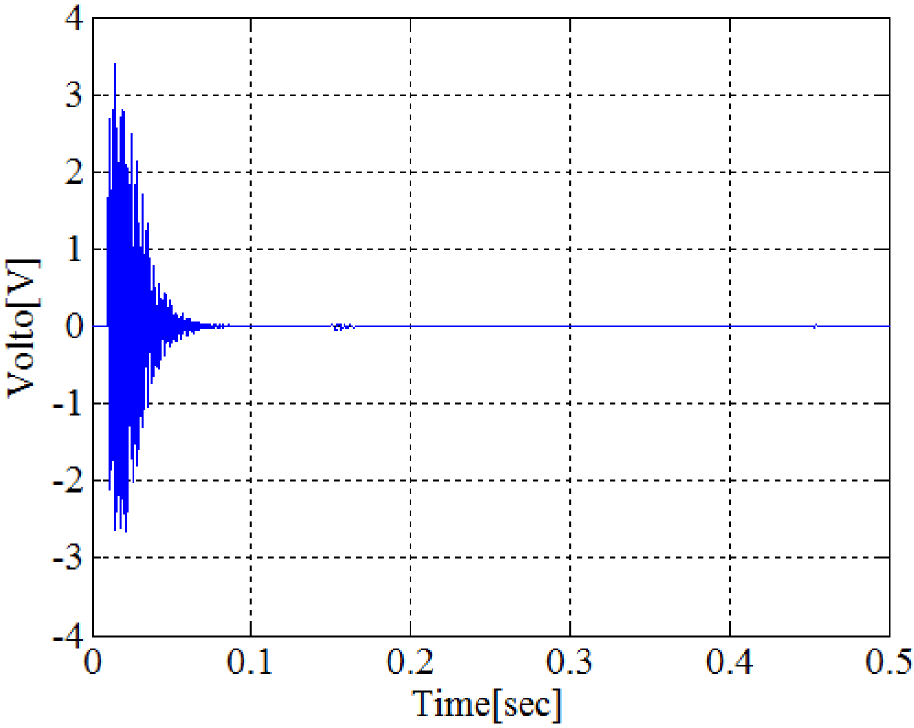

Figure 7-12 Kyomei [6]

7.3.2. 周波数波形

次に時間軸波形をフーリエ変換し、周波数波形を示す。

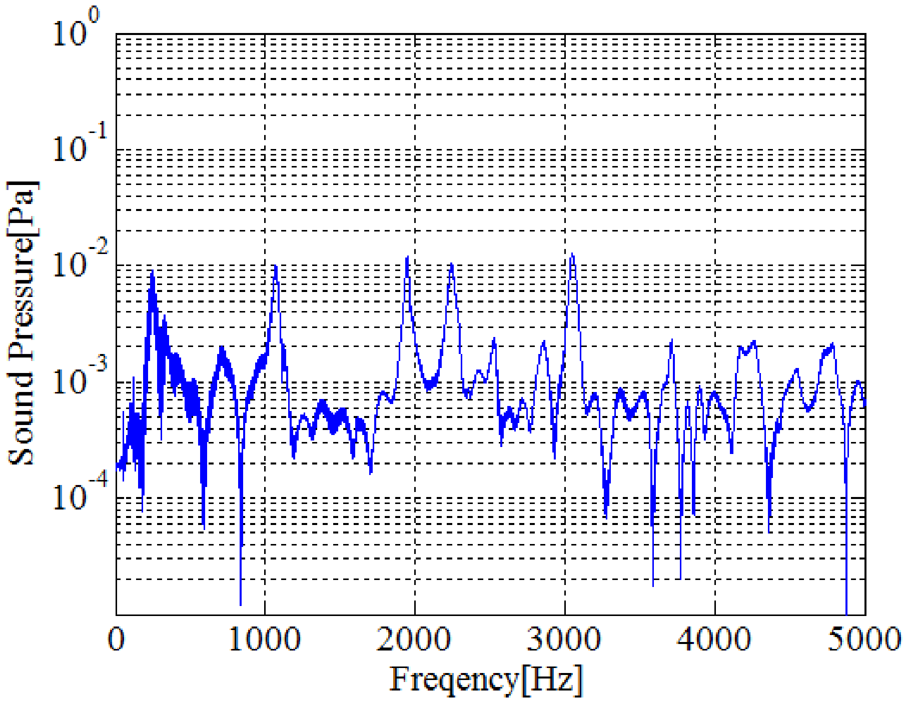

Figure 7-13 Kyomei [1]

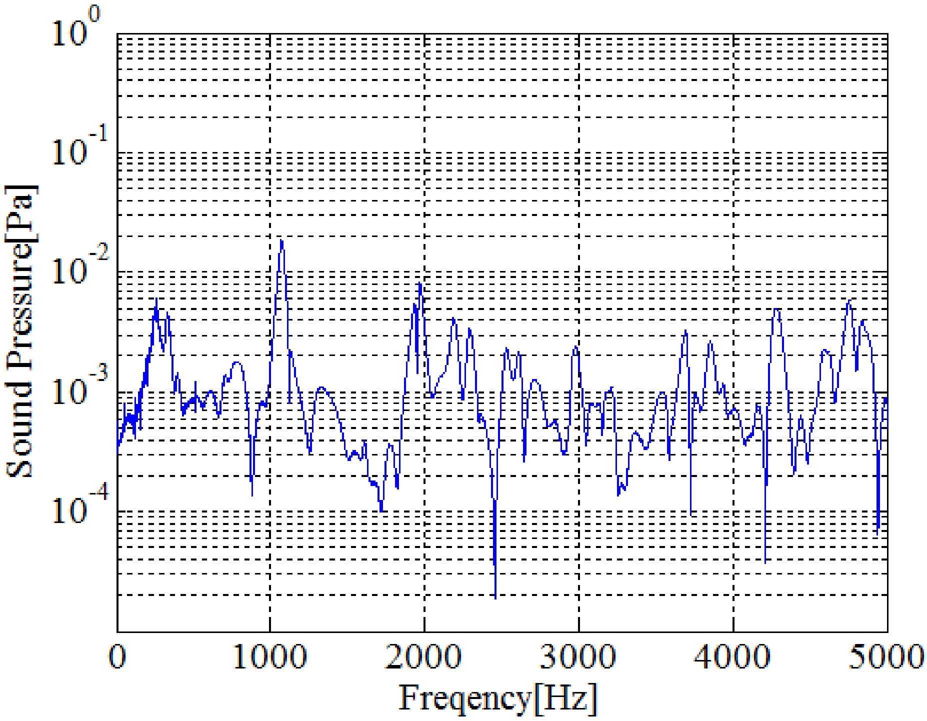

Figure 7-14 Kyomei [2]

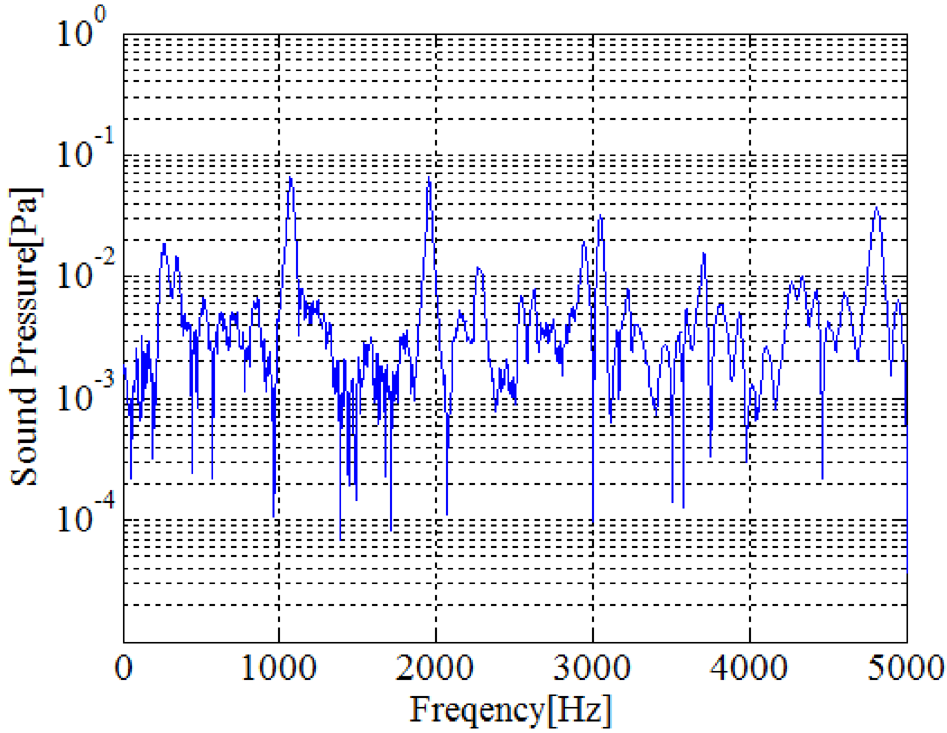

Figure 7-15 Kyomei [3]

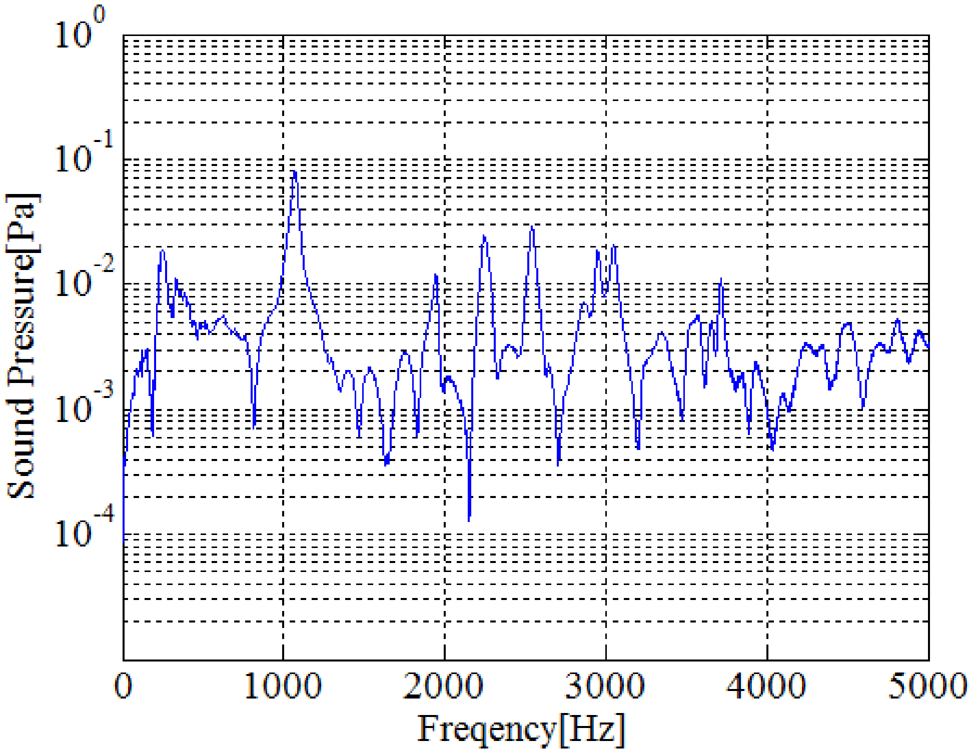

Figure 7-16 Kyomei [4]

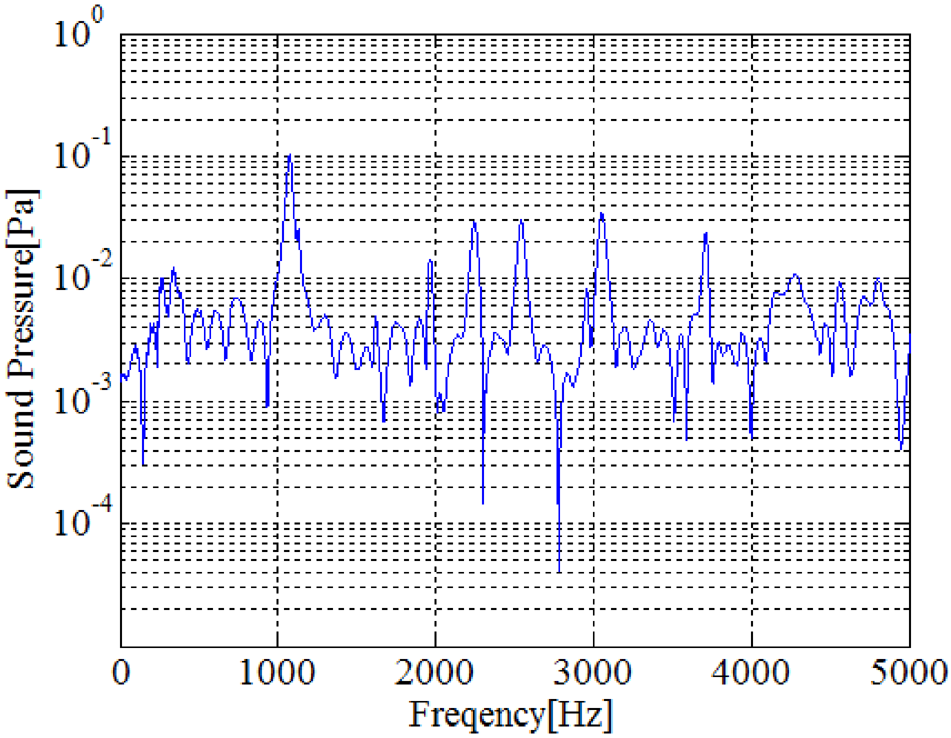

Figure 7-17 Kyomri [5]

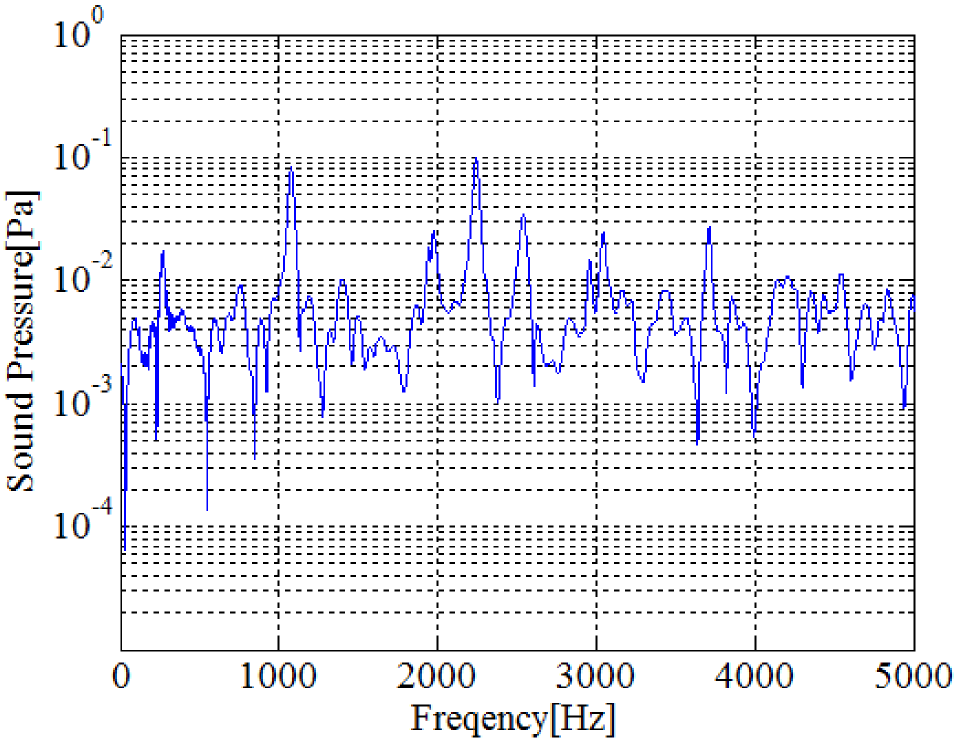

Figure 7-18 Kyomei [6]

すべての結果で 1000Hz、2200Hz、3700Hz 付近にピークが見られた。図 7-13 においては 300Hz 付近のピークが他のデータより際立っていた。これは 0.2 秒付近に雑音がはいったためそれが影響してしまっているのではないかと考えられる。また図 7-13、7-14、7-15 では 2000Hz、3000Hz 付近にもピークが見られた。

7.3.3. スペクトログラム解析

さらにスペクトログラムを用いて、時間に依存した周波数解析を行った。2 章と同様にデータは MATLAB の spectrogram を用いてスペクトログラム表示され、窓関数にカイザーを利用した。グラフの縦軸が周波数、横軸が時間を示され、赤い部分がピークの高い周波数、青い部分がピークの低い周波数である。

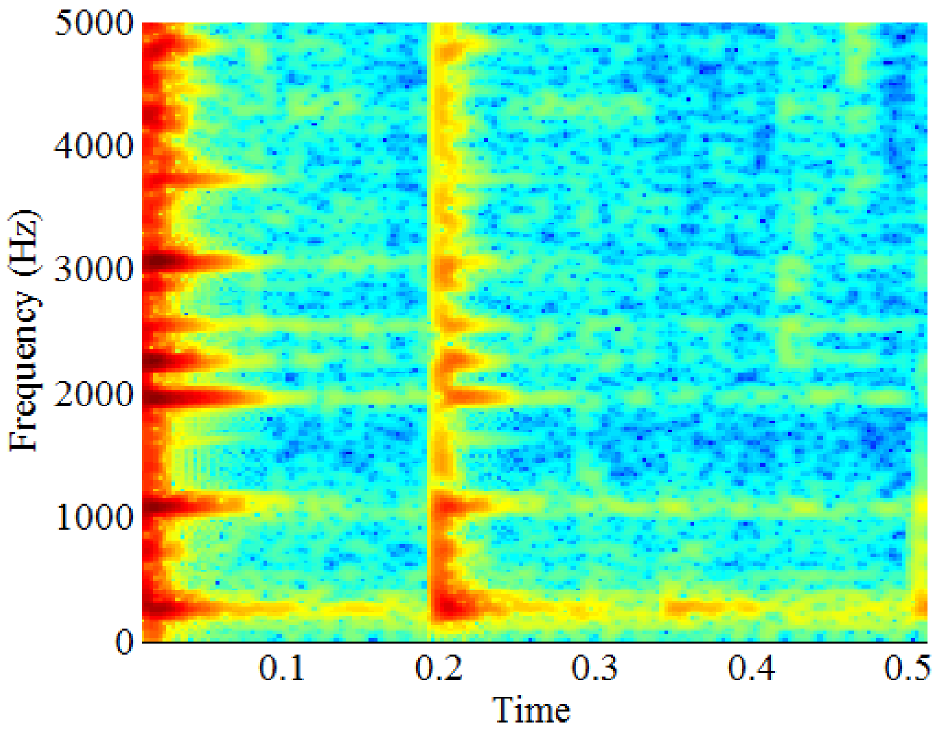

Figure 7-19 Kyomei [1]

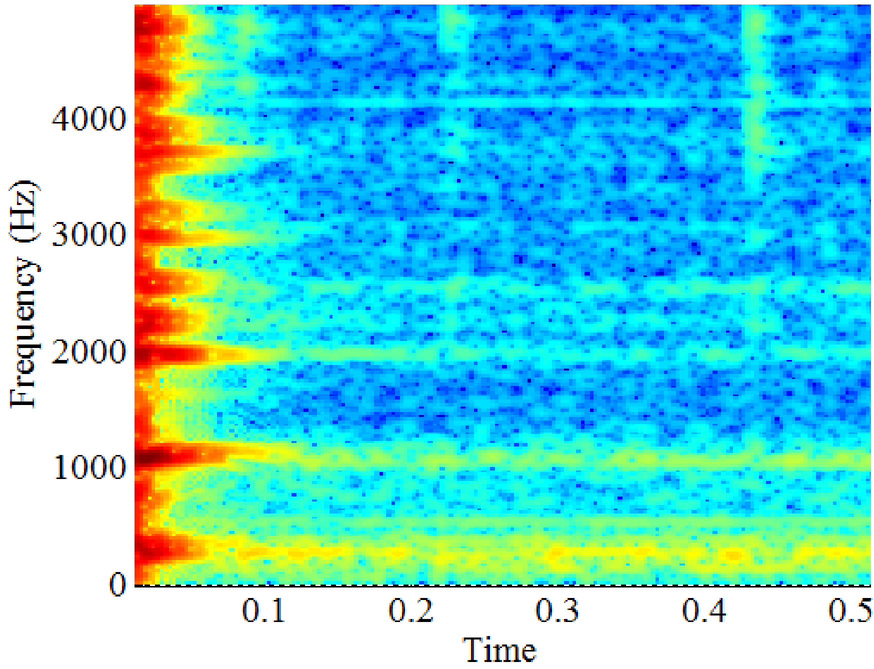

Figure 7-20 Kyomei [2]

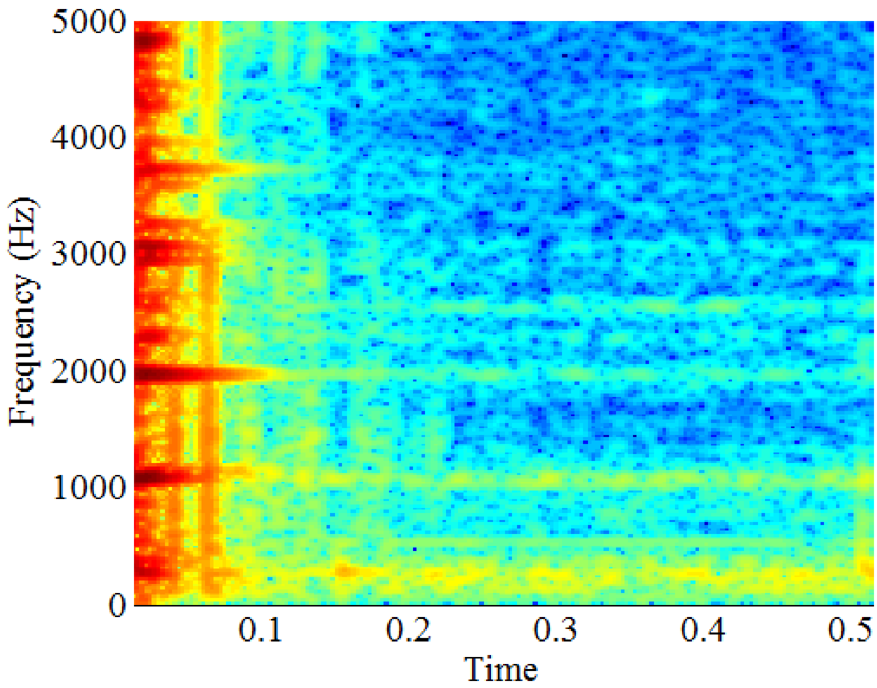

Figure 7-21 Kyomei [3]

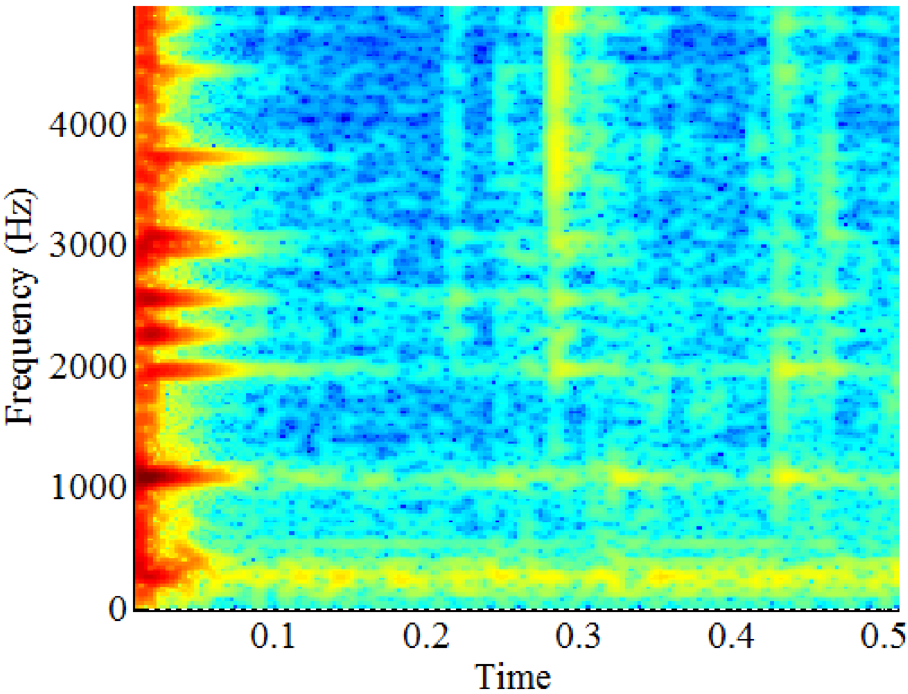

Figure 7-22 Kyomei [4]

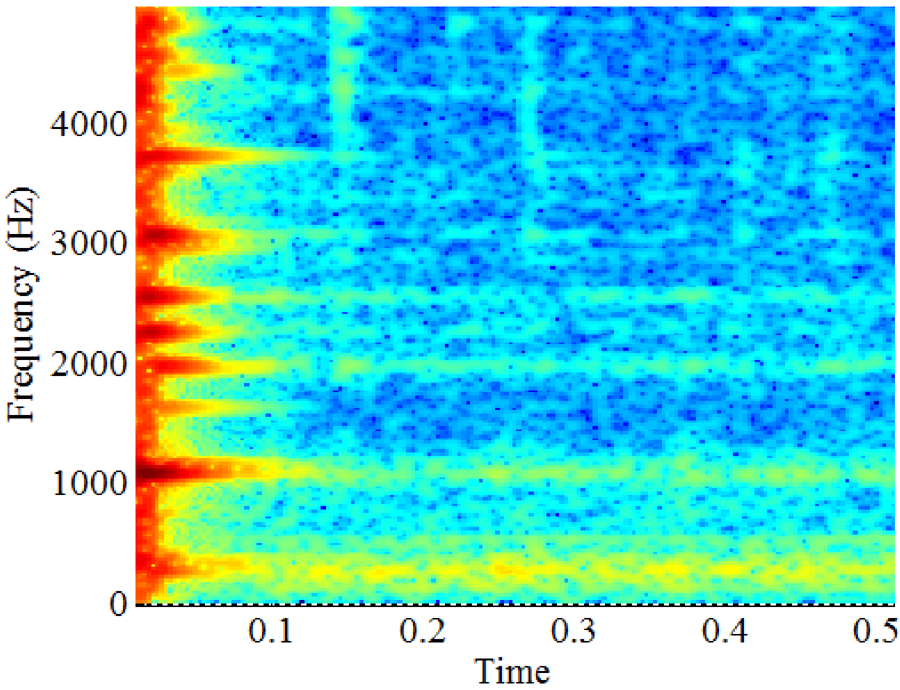

Figure 7-23 Kyomei [5]

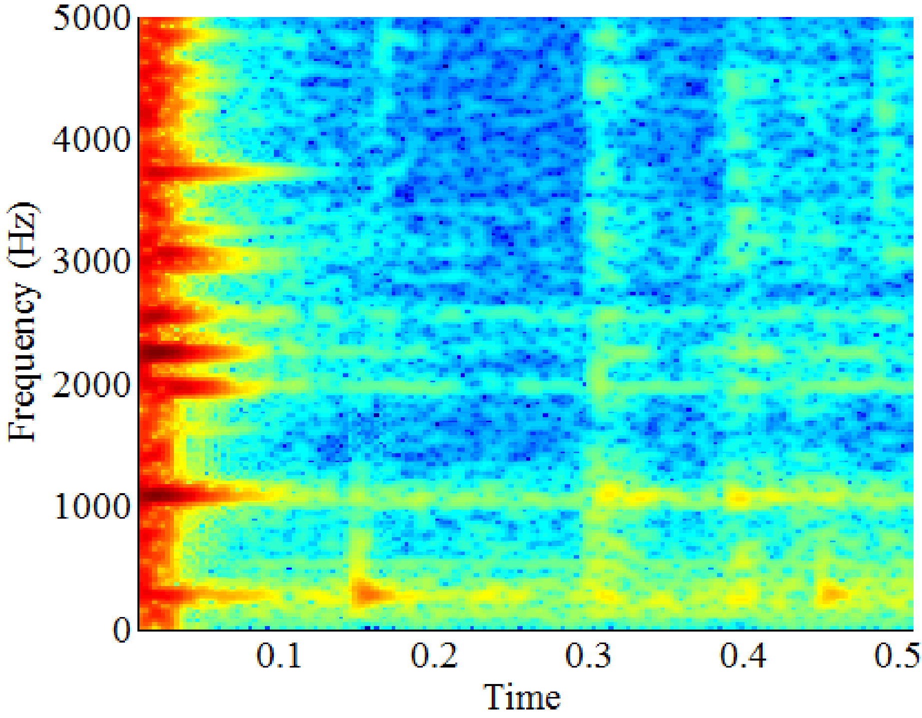

Figure 7-24 Kyomei [6]

7.4 考察

周波数波形より、1000Hz、2200Hz、2600Hz、3700Hz 付近において音圧が最も高くなった。またスペクトログラムより 1000Hz 付近の残響音が他のピークに比べても長かった。6 章のシ胴体の空洞共鳴ミュレーションにおいても 1 次モードは 996Hz であったのでシミュレーションの解析を概ね正確であったと考えられる。

8. アルミ製モデルの制作

8.1　目的

アルミ製の三味線モデルを作成し皮を張り替えた時音にどのような違いが出るか比較し調べた。

8.2　実験方法

これらの実験において、2 章「音の録音と解析」と同様の方法で行う。なお今回使用した皮を以下の表に示す。

Table 8-1 Skin on Board

	厚さ
ベニア板	3mm
アルミ板	0.5mm
牛革	3mm

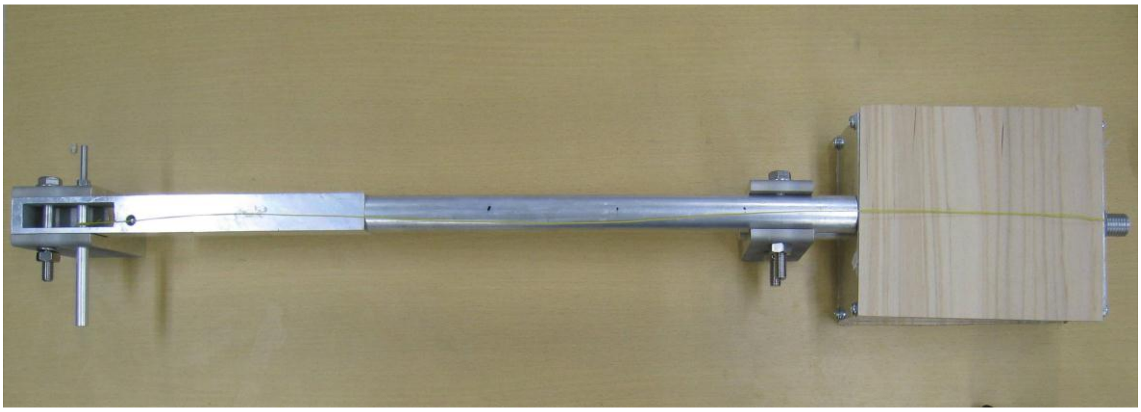

Figure 8-1 Alminium model [top view]

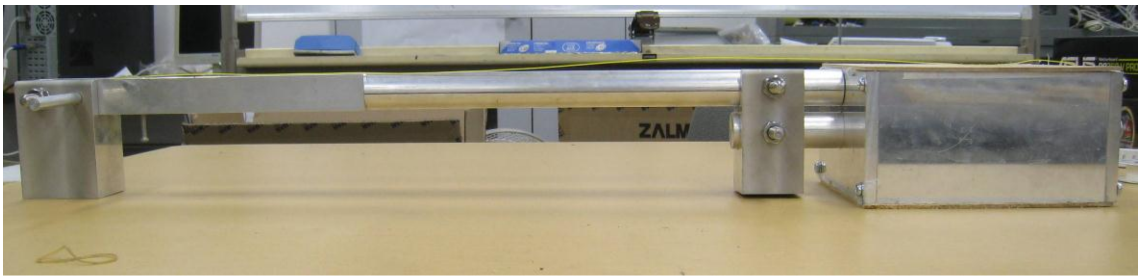

Figure 8-2 Alminium model [side view]

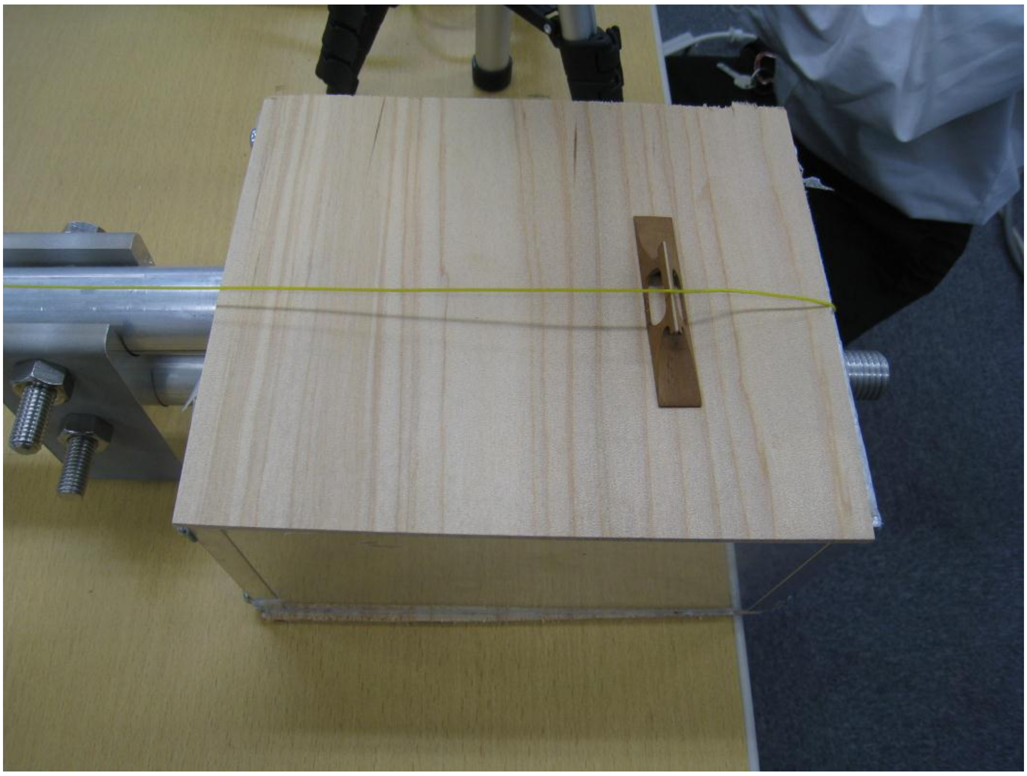

Figure 8-3 Plywood board skin

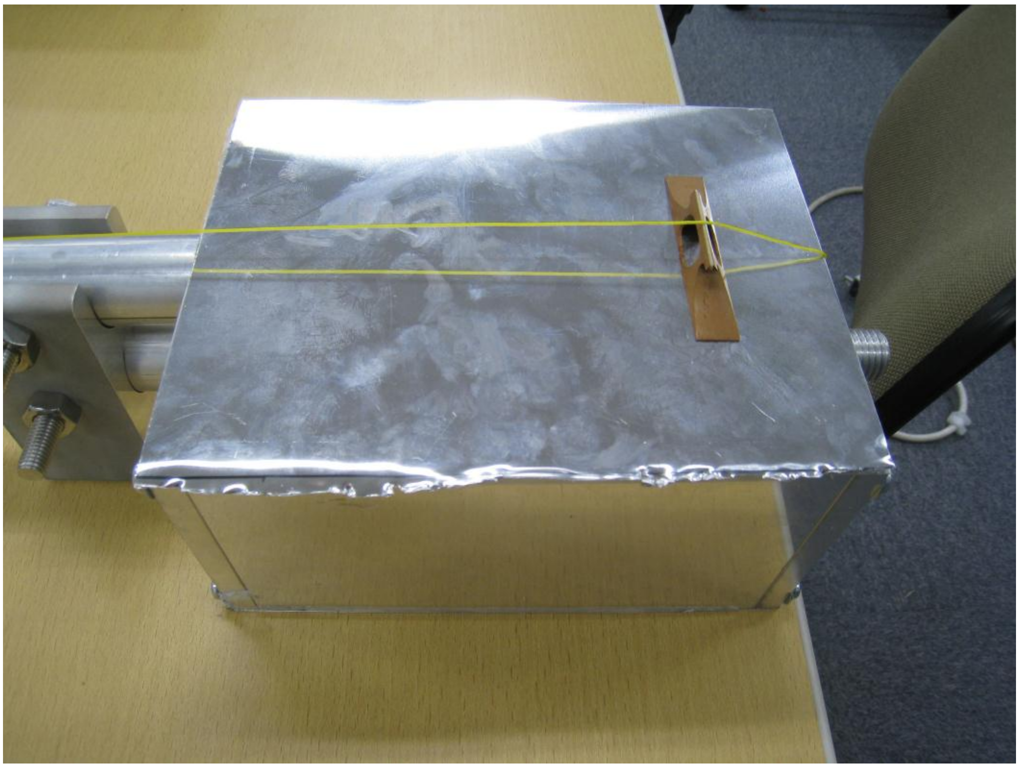

Figure 8-4 Alminuim skin

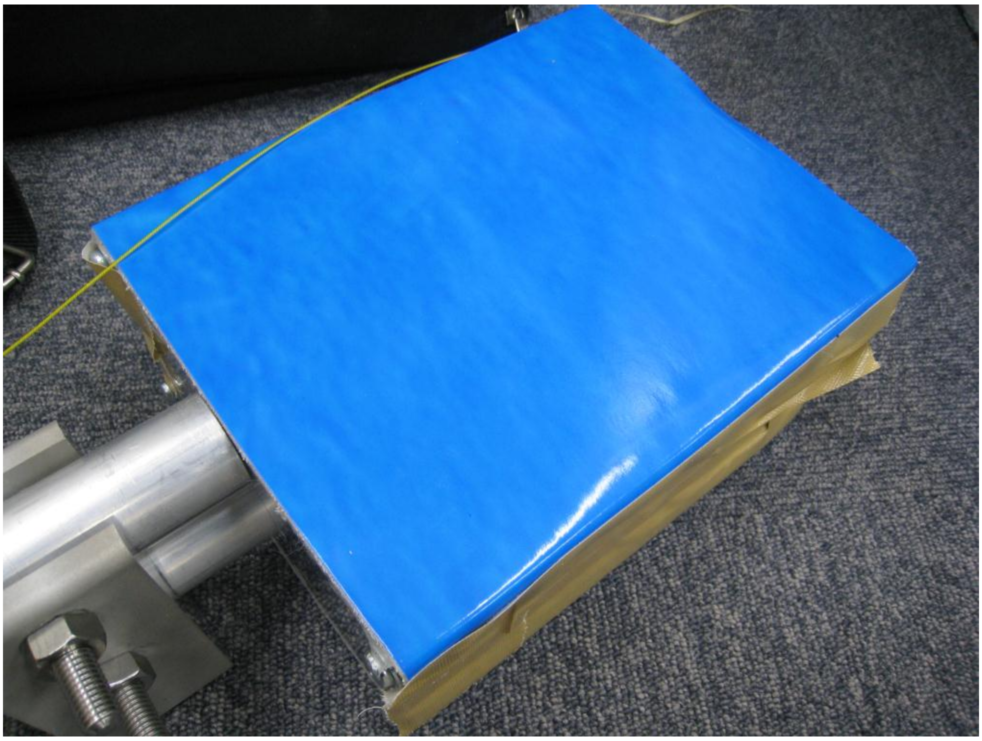

Figure 8-5 Cowhide skin

8.3　　実験結果

8.3.1　　時間軸波形

以下にベニア板を貼ったときの時間軸波形を示す。

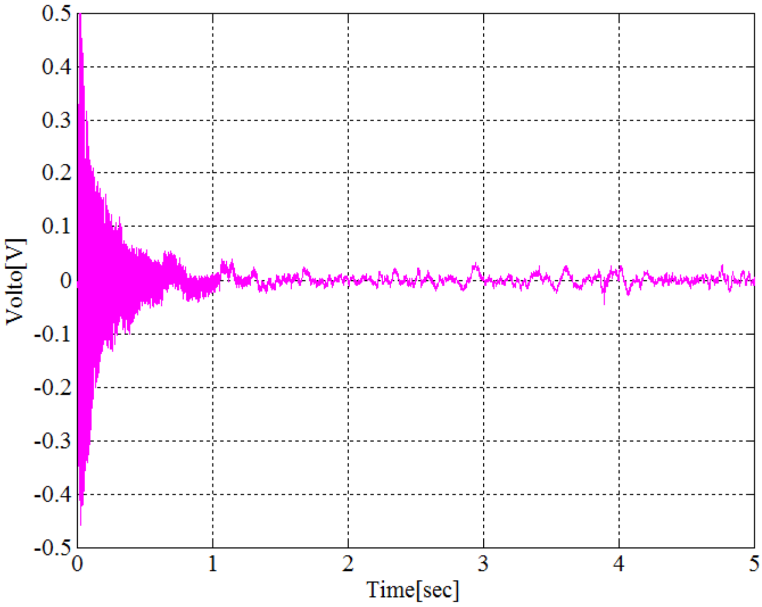

Figure 8-6 Plywood board skin (without SAWARI)

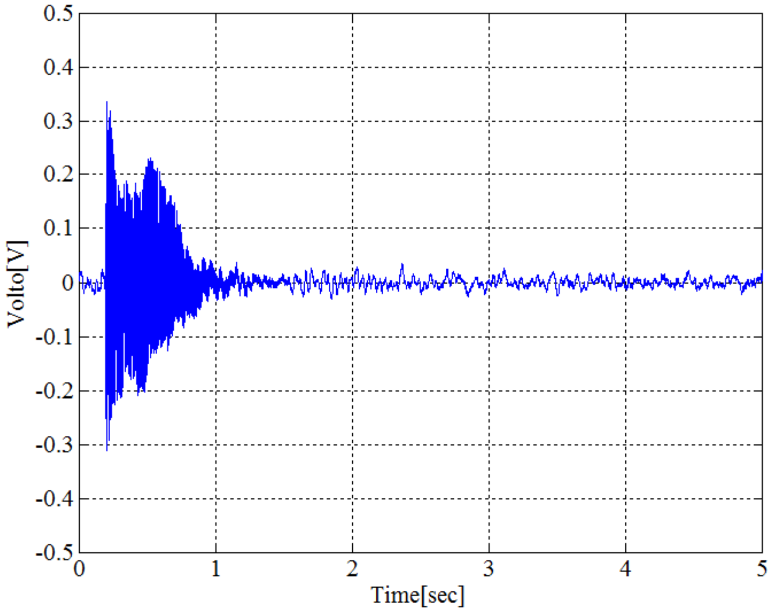

Figure 8-7 Plywood board skin (with SAWARI)

ベニア板をアルミモデルの皮として用いた場合もさわりなしの場合は他の弦楽器と同様きれいに減衰した。一方さわりを付与した場合の途中でもう一度音が膨らむような現象も再現することができた。

次にアルミ板を貼った場合を示す。

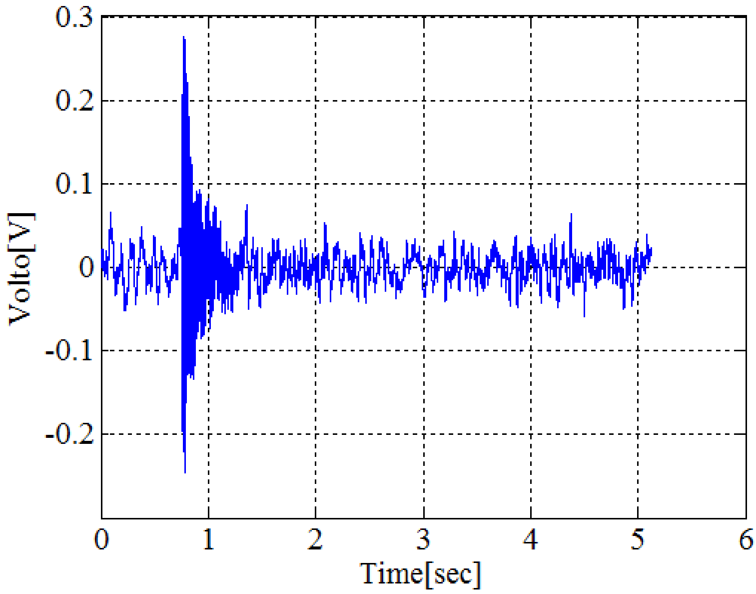

Figure 8-8 Alminuim skin (Without SAWARI)

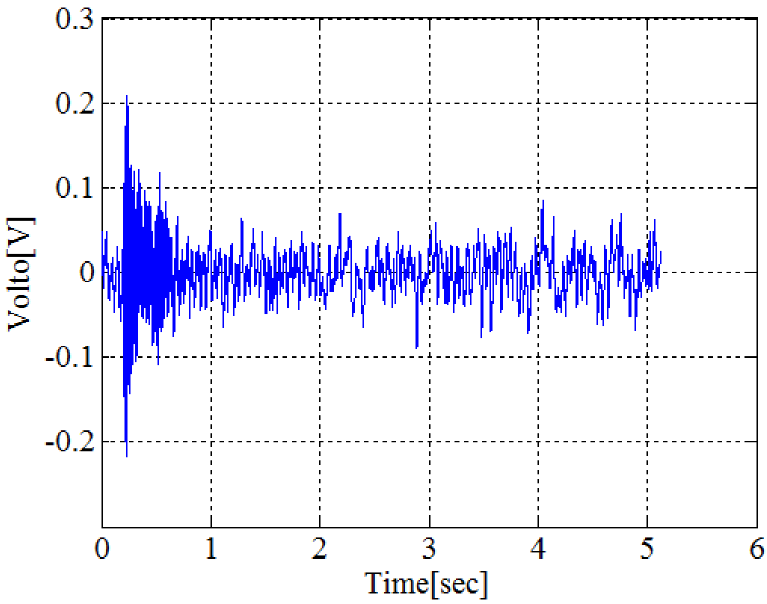

Figure 8-9 Alminium skin (With SAWARI)

最後に牛皮を貼った場合を示す。

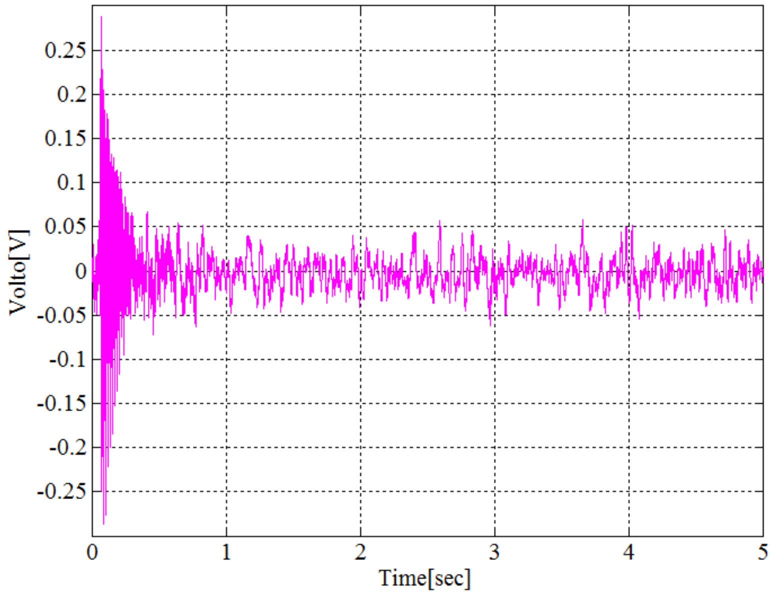

Figure 8-10 Cowhide skin (without SAWARI)

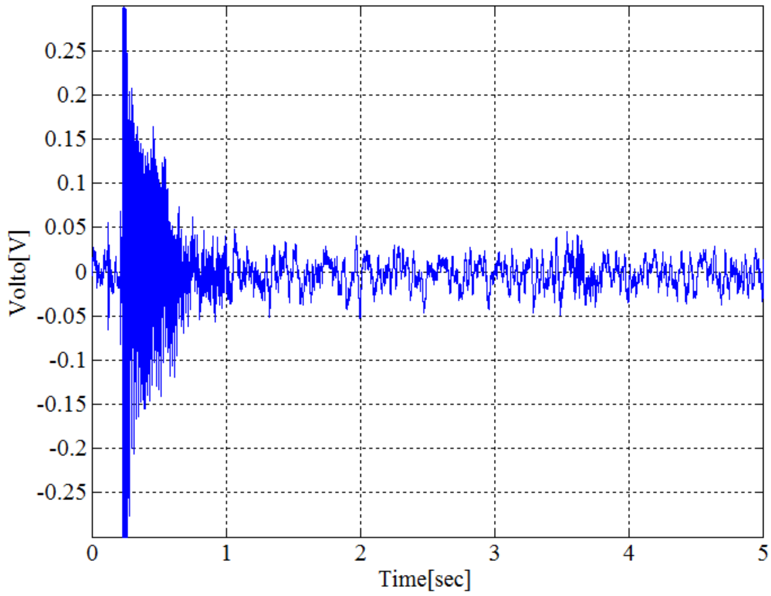

Figure 8-11 Cowhide skin (with SAWARI)

牛皮を使用した結果より、ベニア板やアルミ板を使用した場合と比べて減衰が短かった。また、さわり現象もこれらに比べるとわずかしか付かなかった。これは剛性の不足により、上駒まで上下動してしまったためではないかと考えられる。

8.3.2　周波数波形

以下にベニア板の場合の周波数波形を示す。

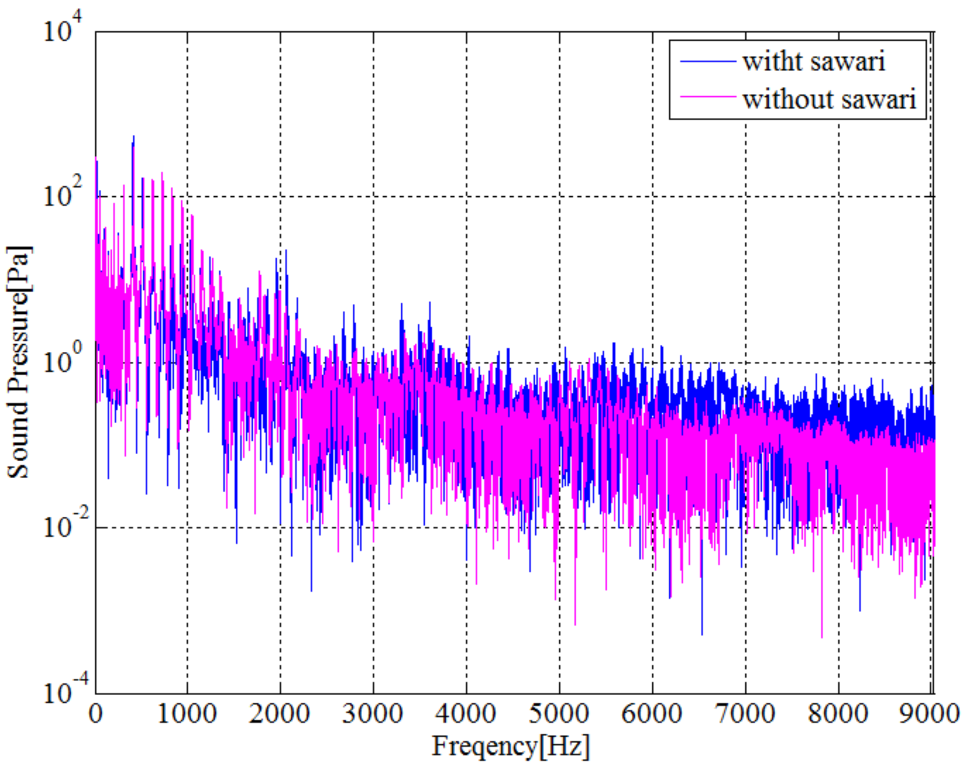

Figure 8-12 Plywood board skin

実験結果より 2000Hz、2600～2700Hz と 3000Hz 以降においてさわりを付加した状態のほうが付加していない状態よりも音圧が高くなった。一方三味線音において残響の長くなった 1000Hz 付近にはあまり変化は見られなかった。

次にアルミ板の場合を示す。

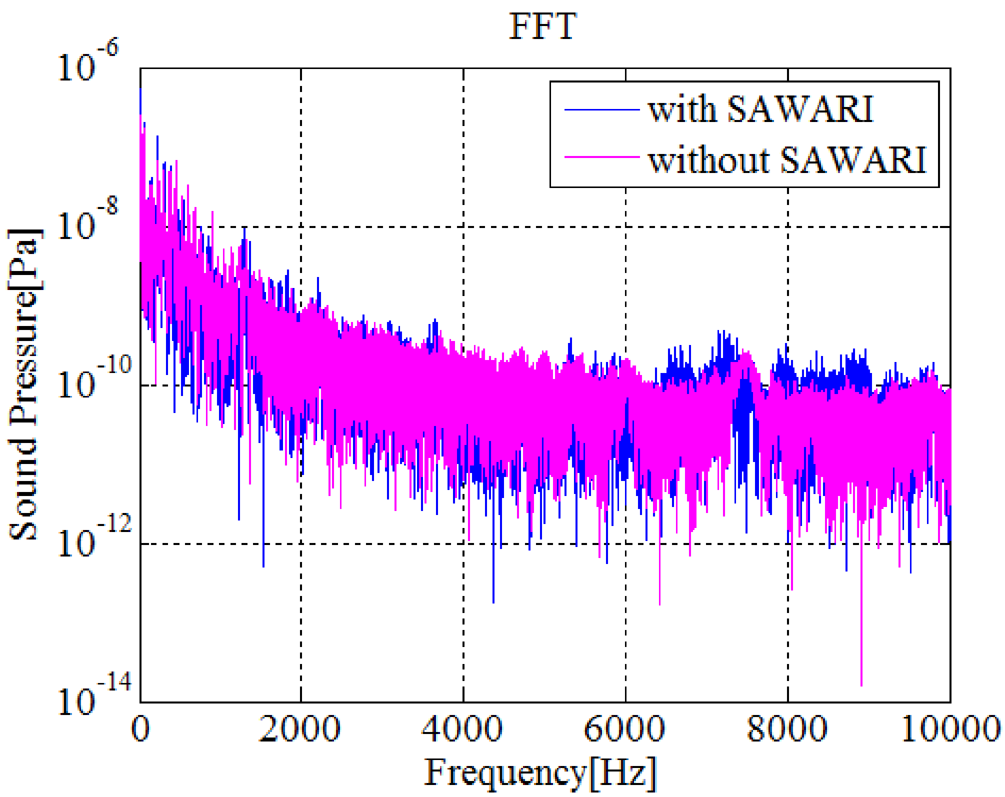

Figure 8-13 Alminium skin

実験結果からさわりを付加した状態では 1200Hz、2100Hz7 付近と 7000～9000Hz の音圧が高くなることがわかった。その他の帯域ではあまり変化はみられなかった。

最後に牛皮の場合を示す。

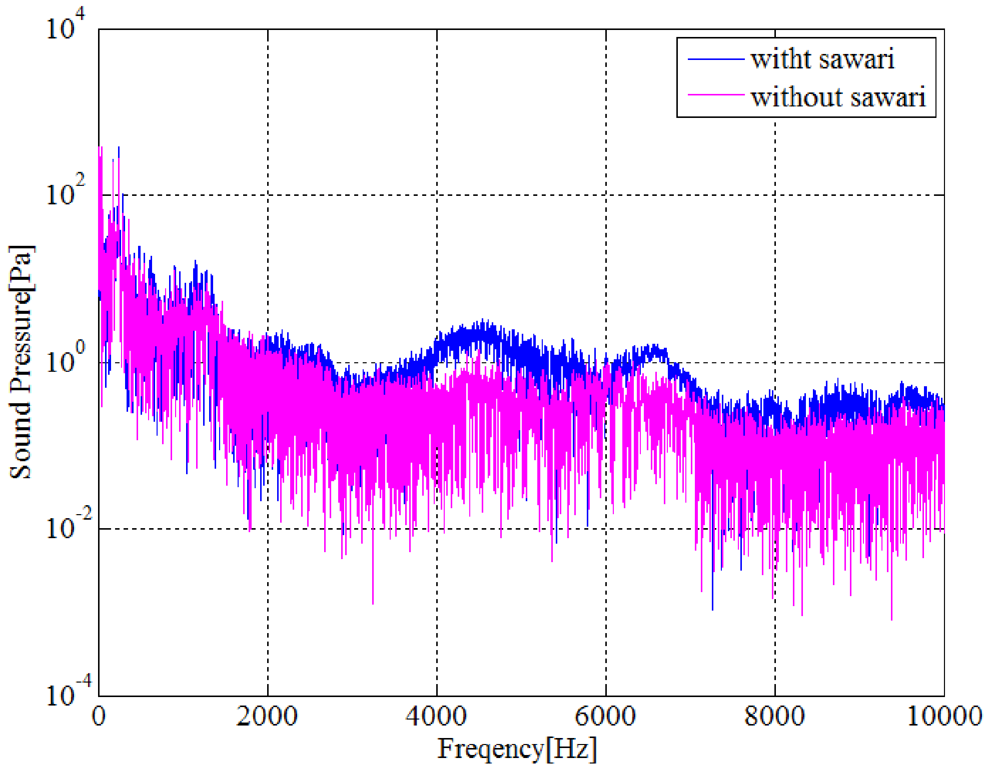

Figure 8-14 Cowhide skin

実験結果から牛皮の場合 630Hz、1100Hz 付近と 2000Hz 以降の帯域においては全体的にさわりなしの場合と比べて音圧が高かった。特に 4000～6000Hz 付近では明らかに音圧が高かった。

8.3.3　スペクトログラム波形

次にスペクトログラムを作成し、三味線自体の特徴を得るために、時間に依存した周波数解析を行った。8.3.2 項で用いた時間領域のデータを MATLAB の Spectrogram を用いてスペクトログラム表示し、比較する。窓関数にはカイザーを用いた。スペクトログラムにより得られた各楽器の時間依存周波数領域データを以下に記載する。なおグラフの縦軸が周波数、横軸が時間を示し、解析周波数は 10000Hz、サンプリング点数は 8192 点である。 グラフの赤い部分がピークの高い領域、青い部分がピークの低い領域である。

最初にベニアを貼った場合のスペクトログラムを示す。

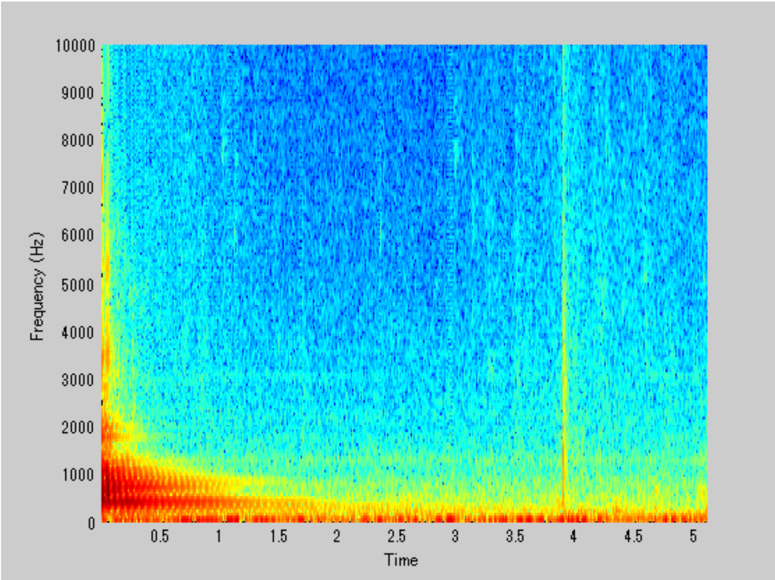

Figure 8-15 Plywood board skin (Without SAWARI)

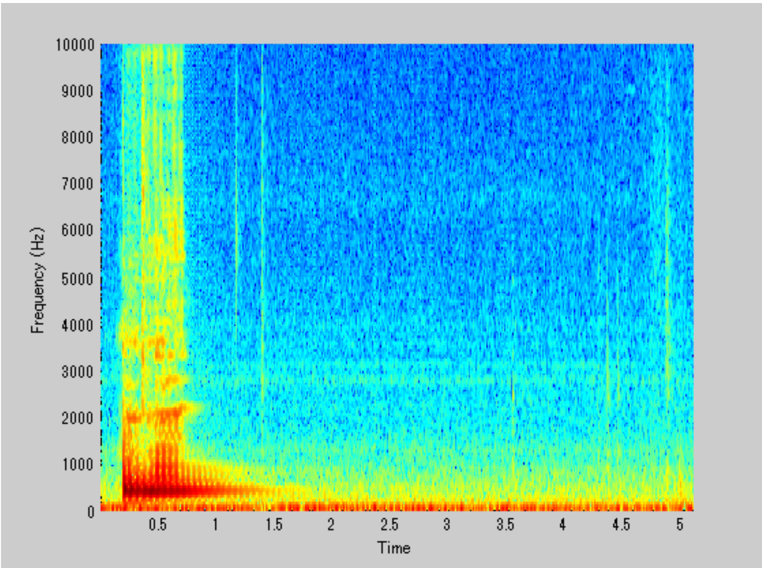

Figure 8-16 Plywood board skin (With SAWARI)

実験結果からベニア板を貼った場合の残響は張らなかった場合に比べ高周波の残響が全体的に長かった。特に 500～1500Hz、2000Hz 付近の音圧が強かった。

次にアルミ板を貼った場合を示す。

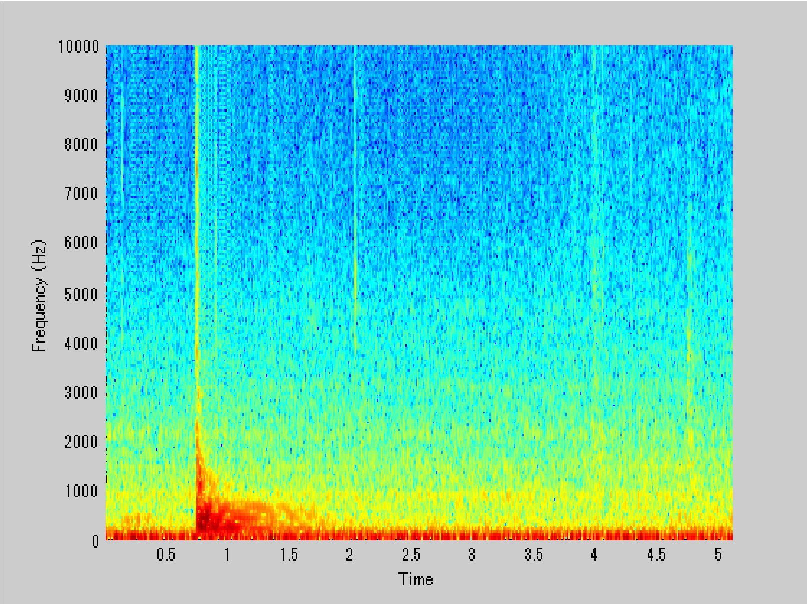

Figure 8-17 Alminium skin (Without SAWARI)

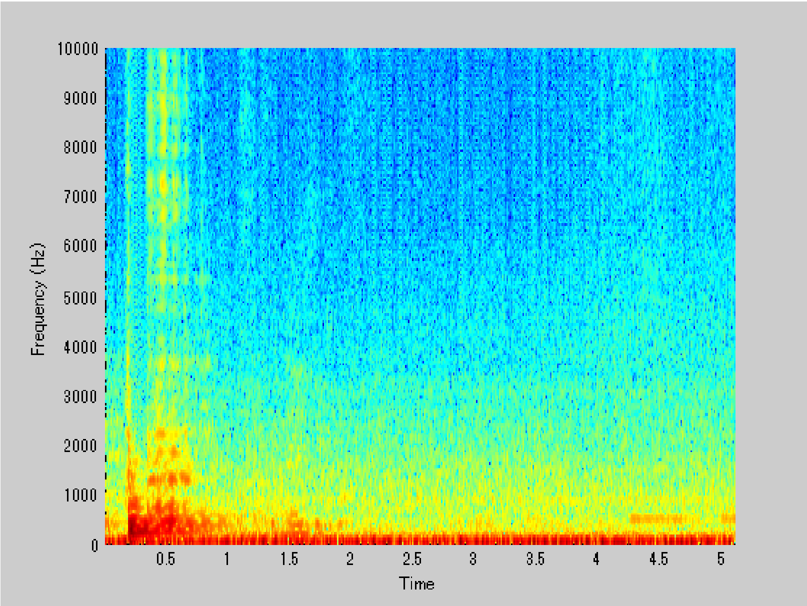

Figure 8-18 Alminium skin (With SAWARI)

実験結果からさわり有りの場合は 1200Hz 付近が特に残響が長くなることがわかった。また全体的に高周波の残響が長くなった。

最後に牛皮の結果を示す。

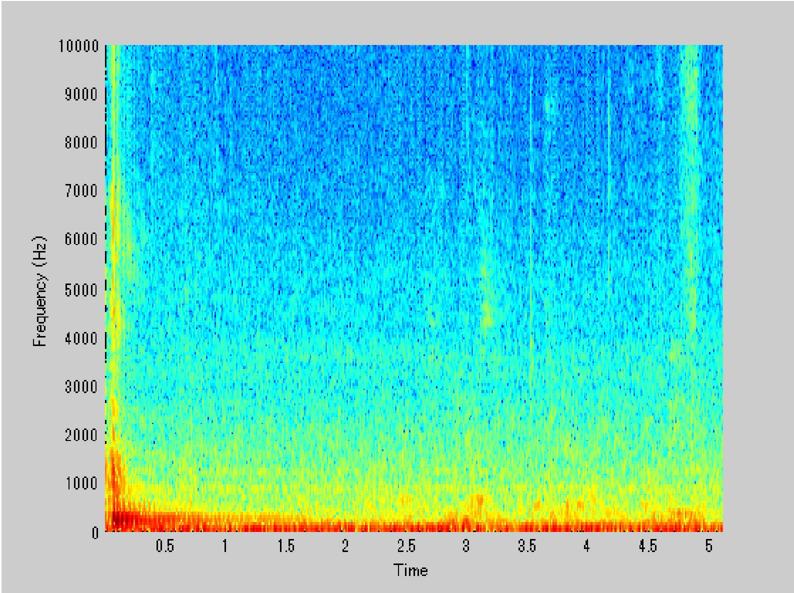

Figure 8-19 Cowhide skin (Without SAWARI)

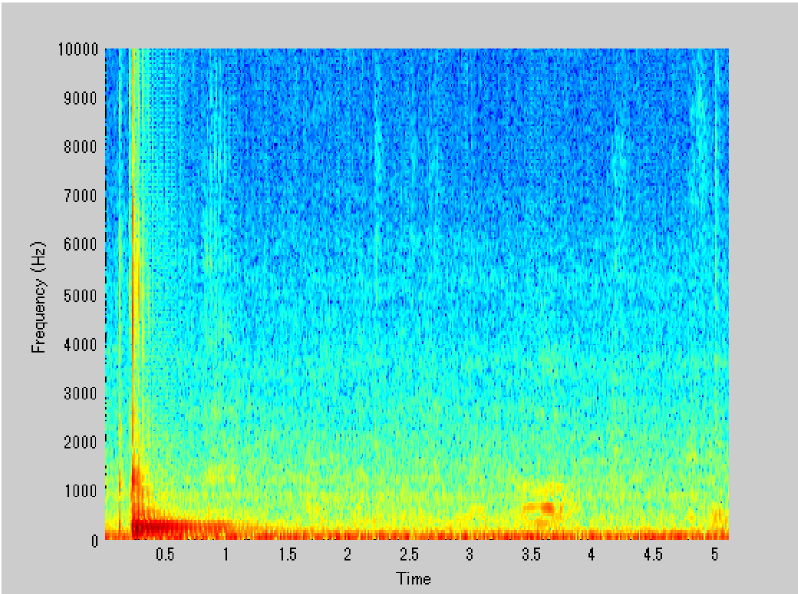

Figure 8-20 Cowhide skin (With SAWARI)

スペクトラムの比較より残響時間はさわりの有無にかかわらずあまり変化は見られなかった。

8.4　考察

ベニア板を使用した実験の結果、2000Hz 付近が特に音圧が強いことがわかった。さらに三味線音の特徴ある 1000Hz 付近の残響も長いことがわかった。またアルミ板を使用した実験の結果、1200Hz 付近の残響が特に長くなった。このことからベニア板やアルミ板を使用した際は弦振動と空洞共鳴の共振現象が発生しているのではないかと考えられる。

一方牛皮を使用した実験の結果、さわりの有無にかかわらずあまり差のない結果となった。これは剛性が不足しており、上駒が上下動してしまったため、さわりが十分に付加できなかったためと考えられる。

9.　結論

本研究では音の録音と解析、胴体、皮の加振実験、胴体の空洞共鳴のシミュレーションおよび実験、アルミ三味線の制作を行った。さらに昨年度までの大江耕司氏の行った音の加工、三味線本体の加振実験、弦振動シミュレーションも含め、これらの結果から三味線およびさわりの特徴を抽出することができた。以下に得られた結論を示す。

9.1　　音の録音と解析

三味線音の基本的な特性がわかった。具体的には基本周波数の音圧が低く、1000Hz 付近の音圧が最も高かった。そして、この帯域の残響が長いこともわかった。これに対して付録に示すギターの場合は基本周波数が最も高く、周波数の上昇につれて音圧が下がる傾向があり、基音の残響も長かった。

次に、さわりの有無の比較によりさわりの特性がわかった。さわりがない場合、音はなだらかに減衰した。これに対して、さわりがある場合は一度音が膨らんだり、段階的に減衰していく現象があることがわかった。これらの違いはさわりの効き具合の差により発生し、さわりが不十分な場合には音のふくらみが複数回発生し、徐々にさわりの効き具合を強くすると後半部分の音のふくらみが小さくなっていく。そして程よい効き具合では音のふくらみが発生すると言うよりは段階的に減衰する波形となる。この状態以上にさわりをつけると大きなうなりを発生し、減衰も早くなる。そして最終的にはうなりが発生しなくなる。これはさわり山が上駒の代わりをするためと考えられる。

また、さわりが付加されることにより 3000～5000Ｈｚ付近の帯域の音圧が高くなることがわかった。そしてこれらの帯域の残響がさわりの付加により大きく伸びることもわかった。

9.2　　音の加工

加工音Ⅰの結果から 500～1500Hz の帯域がさわり音において主要な成分であることがわかった。また、加工音Ⅱの結果からさわり音を構成する要素として音圧の果たす役割は低いことがわかった。

9.3　　実験モード解析

三味線本体の実験結果から１次のモード形状がはりの一次曲げ、２次がねじれ形状に類似することがわかった。今回の実験で得た２次モードまでの場合、固有振動数は 67.55Hz および 85.38Hz であった。この結果から三味線の最も低い音おりも著しく低く、あまり音に影響していないと考えられる。

次に胴体の実験結果から１次のモード形状がはりの一次曲げ、２次がねじれ形状に類似することがわかった。今回の実験で得た２次モードまでの場合、固有振動数は１次モードが 573.2Hz、2 次モードが 630.8Hz となった。3 章「音の加工」加工音Ⅱで音圧の高かった付近とⅠ次モードが一致したことから三味線の胴体は三味線の音に影響を及ぼしているももと考えられる。しかしながら、さわりの有無により残響にあまり差のない帯域であったため、胴体本体はさわり音にはあまり影響は与えていないものと考えられる。

最後に皮の実験結果は１次のモード形状が一次曲げとなり固有振動数は 151.3Hz となった。このことから皮単体ではあまり音に影響していないものと考えられる。

9.4　　弦振動シミュレーション

条件１より、さわりを付加すると弦振動の振幅が一度膨らんだのちに小さくなる事がわかった。また、さわりが付加された状態では 2500Hz、4500Hz、6500Hz 付近でピークが低くなる現象が発生した。これは三味線の録音実験の結果と同様の傾向である。

条件２より、さわりの位置による弦振動の特徴を抽出することができた。

さわりの垂直方向の位置が低いほど、さわりにより発生する弦振動の周波数がごく僅かながら高くなる傾向があることがわかった。また、さわりと上駒の水平方向の距離を大きくするほど、さわりにより発生する弦振動の周波数が高くなる傾向があることがわかった。また、距離が遠くなるにつれてさわりの影響による弦振動の発生時間が早くなる傾向があること、およびさわり効果が最もよく出る距離は 10mm 付近(8、10、12)であることもわかった。

これらのことから、さわりの影響による弦振動の周波数を変化させたい場合にはさわり山の水平方向の位置を変化させる事が効果的であるといえる。

条件３より、波動方程式への減衰項付加により減衰を再現する事ができた。この減衰項の付加により振幅だけでなく周波数にも差が発生していることがわかった。これは特に 2500Hz～4000Hz で顕著に発生することがわかった。

9.5　胴体の空洞共鳴解析

空洞内部の FEM 解析を行った結果１次の固有振動数が 996Hz となることがわかった。弦振動のシミュレーションでもさわりを付加した状態では高周波振動が発生していたことから、さわり音は弦振動と胴体内部の空気共鳴の共振現象であると考えられる。今後は弦、皮を含めた解析を行なっていく必要がある。

9.6　胴体の空洞共鳴実験

実験の結果、1000Hz、2200Hz、2600Hz、3700Hz 付近の音圧が高いことがわかった。また、スペクトログラム解析の結果最も残響が長かったのが 1000Hz 前後となった。このことから FEM 解析シミュレーションの結果は妥当であったと考えることができる。

9.7　アルミ製モデルの制作

実験の結果、ベニア板、アルミ板を貼った場合にさわりを付加した時、三味線音と同様に 1000Hz 付近の残響が長くなった。一方牛皮についてあまり差はでなかった。これは牛皮の張りが甘く上駒の上下動が発生したからではないかと考えられる。このことから弦振動と空洞共鳴の共振現象は剛性が高い場合は発生するのではないかと考えられる。今後は皮については三味線に使われているものと同様もしくは近い素材で実験する必要がある。また調弦についても専門家に依頼してさらに実験していく必要がある。

10. 付録

10.1. 皮の特性

以下の表 10-1 および 10-2 は皮に使われている犬皮、猫皮の特性を示す。

Table 10-1 Characteristic of skin [dog]

		Ave.	Max	Min
Thickness	mm	0.34	0.45	0.23
Shearing strength	N	10.78	156.8	8.82
Tensile strength	N	209.72	307.72	127.4
Depth fracture point	%	15	17	14

Table 10-2 Characteristic of skin [cat]

		Ave.	Max	Min
Thickness	mm	0.37	0.46	0.3
Shearing strength	N	7.84	10.78	4.9
Tensile strength	N	157.78	189.14	119.56
Depth fracture point	%	15	16	13

10.2. 調弦表

三味線の調弦表を以下に示す。

Table 10-3 Shamisen Tuning

一の糸の高さ	本調子						二上がり		三下がり	
三弦名(十二律)	一の糸		二の糸		三の糸		二の糸		三の糸	
一本（黄鐘（おうしき））	A	218.5	D	292.7	A	437	E	326.2	G	391.5
二本（鸞鏡（らんけい））	A#	230	D#	305.6	A#	460	F	343.1	G#	401.1
三本（盤渉（ばんしき））	B	245.8	E	326.2	B	491.5	F#	365.7	A	437
四本（神仙（しんせん））	C	258.7	F	343.1	C	517.3	G	391.5	A#	460
五本（上無（かみむ））	C#	274.8	F#	365.7	C#	549.5	G#	410.1	B	491.5
六本（壱越（いちこつ））	D	292.7	G	391.5	D	585.4	A	437	C	517.3
七本（断金（たんぎん））	D#	305.6	G#	410.1	D#	611.2	A#	460	C#	549.5
八本（平調（ひょうじょう））	E	326.2	A	437	E	652.4	B	491.5	D	585.4
九本（勝絶（しょうせつ））	F	343.1	A#	460	F	686.2	C	517.3	D#	611.2
十本（下無（しもむ））	F#	365.7	B	491.5	F#	731.4	C#	549.5	E	652.4
十一本（双調（そうじょう））	G	391.5	C	517.3	G	783	D	585.4	F	686.2
十二本（鳧鐘（ふしょう））	G#	410.1	C#	549.5	G#	820.2	D#	611.2	F#	731.4

10.3.　MATLAB プログラム

ニューマークの β 法解析プログラム

```
clear
close all

%外力の作成
%STEP FUNCTION
FORCE1=zeros(1,1100); %1100*DT秒まで計算
DT1=0.0001;           %時間刻(秒)
OMESYS1=2*3.1415926*700.0; %700Hzを各振動数に
TT1=sin(OMESYS1*DT1*(1:4));%100/times 0.0001=0.01秒
FORCE1(2:5)=TT1*5; %0.02秒の時間で外力を作った
%
%50Hz系の応答
M1=1;K1=(2*pi*50)^2;C1=2*0.05*(2*pi*50)*M1;
[ACCA50,VA50,DISA50]=NEWMARK(FORCE1,M1,K1,C1,DT1);
%1000Hz系の応答
M1=1;K1=(2*pi*1000)^2;C1=2*0.05*(2*pi*1000)*M1;
[ACCA1000,VA1000,DISA1000]=NEWMARK(FORCE1,M1,K1,C1,DT1);

figure(1)
subplot(2,1,1);plot(FORCE1);
xlabel('time (*DT sec)');ylabel('force');
axis([0 1000 0 5]);
subplot(2,1,2);plot(DISA1000);
xlabel('time (*DT sec)');ylabel('1000HzRES');
axis([0 1000 -2E-7 2E-7]);

%外力の作成
%STEP FUNCTION
FORCE2=zeros(1,1100); %1100*DT秒まで計算
DT2=0.0001;           %時間刻(秒)
OMESYS2=2*3.1415926*1000.0; %1000Hzを各振動数に

TT2=sin(OMESYS2*DT1*(52:151));%100/times 0.0001=0.01秒
FORCE2(52:151)=TT2;
```

```
%50Hz系の応答
M2=1;K2=(2*pi*500)^2;C2=2*0.05*(2*pi*500)*M2;
[ACCB50,VB50,DISB50]=NEWMARK(FORCE2,M2,K2,C2,DT2);
%1000Hz系の応答
M2=1;K2=(2*pi*1000)^2;C2=2*0.05*(2*pi*1000)*M2;
[ACCB1000,VB1000,DISB1000]=NEWMARK(FORCE2,M2,K2,C2,DT2);

figure(2)
subplot(2,1,1);plot(FORCE2);
xlabel('time (*DT sec)');ylabel('force');
axis([0 1000 -5 5]);
subplot(2,1,2);plot(DISB1000);
xlabel('time (*DT sec)');ylabel('1000HzRES');
axis([0 1000 -2E-7 2E-7]);

FORCE3=FORCE1+FORCE2;
DISC50=DISA50+DISB50;
DISC1000=DISA1000+DISB1000;

figure(3)
subplot(2,1,1);plot(FORCE3);
xlabel('time (*DT sec)');ylabel('force');
axis([0 1000 -5 5]);
subplot(2,1,2);plot(DISC1000);
xlabel('time (*DT sec)');ylabel('1000HzRES');
axis([0 1000 -2E-7 2E-7]);

figure(4)
plot(DISB1000);

figure(5)
plot(DISC1000);
xlim([0 1000]);
ylim([-2E-7 2E-7]);
```

```
%Newmarkのβ法のサブルーチン
function[A,V,D]=NEWMARK(FORCE,FM,FK,FC,DT)
BETA=1/4;
[N1,N2]=size(FORCE);NT=[N1,N2];
A=zeros(NT);V=A;D=A;
AB=0.0;VB=0.0;DB=0.0;FN=FORCE(1);
%
CONST=1/(FM+0.5*DT*FC+BETA*DT*DT*FK);
for I=1:(N2-1)
    AN=(FN-FC*(VB+0.5*DT*AB)-FK*(DB+DT*VB+(0.5-BETA)*DT*DT*AB))*CONST;
    VN=VB+DT*0.5*(AN+AB);
    DN=DB+DT*VB+DT*DT*0.5*AB+BETA*DT*DT*(AN-AB);
    A(I)=AN;V(I)=VN;D(I)=DN;
    AB=AN; VB=VN; DB=DN;
    FN=FORCE(I+1);
end
```

10.4. ギターの録音と解析

参考として昨年度実施したギターの試験結果を大江氏の論文[2]より転載し、ギターの録音および解析結果を以下に示す。なお, この実験は本学内半無響室で行い、調律は著者が行った。実験の解析周波数は5000Hz、サンプリング点数は196608点である。

（ア）時間軸波形

1弦から順に6弦までの時間軸波形を以下に示す。なお、縦軸は騒音計から出力された電圧[V]、横軸は時間[s]である。

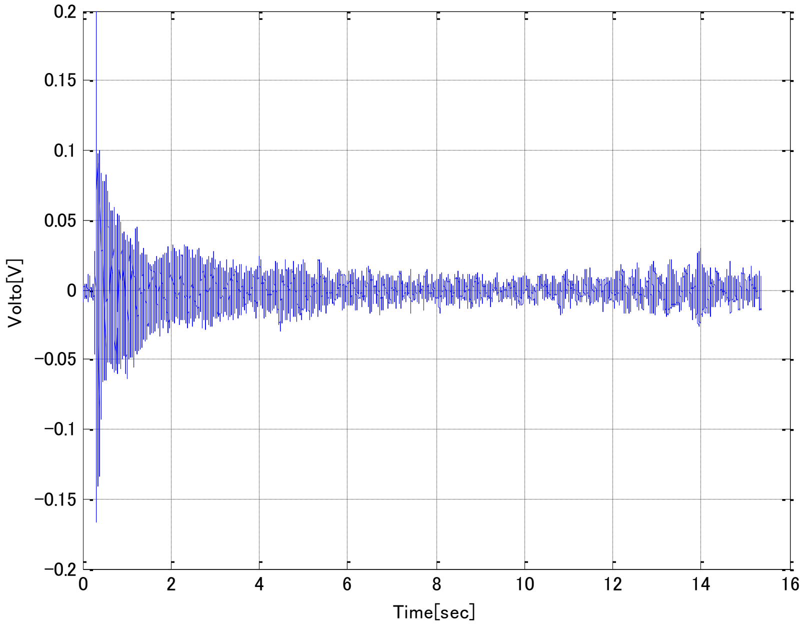

Figure 10-1 First string

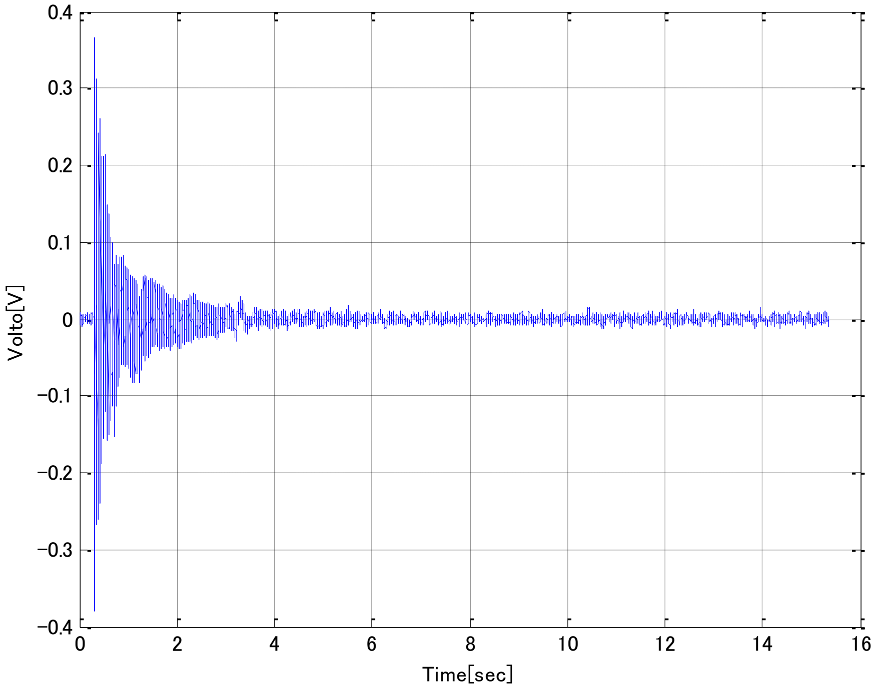

Figure 10-2 Second string

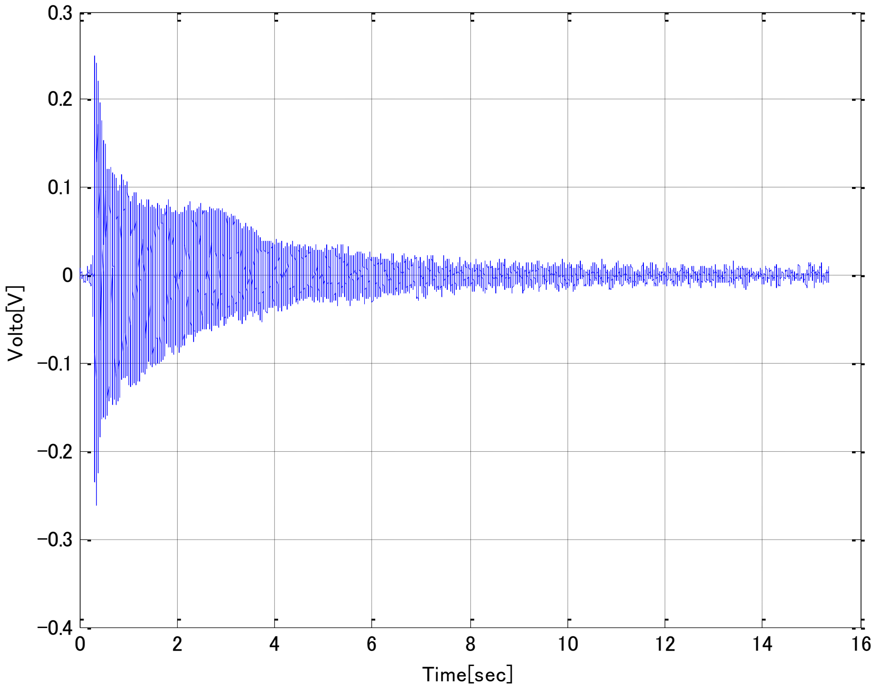

Figure 10-3 Third string

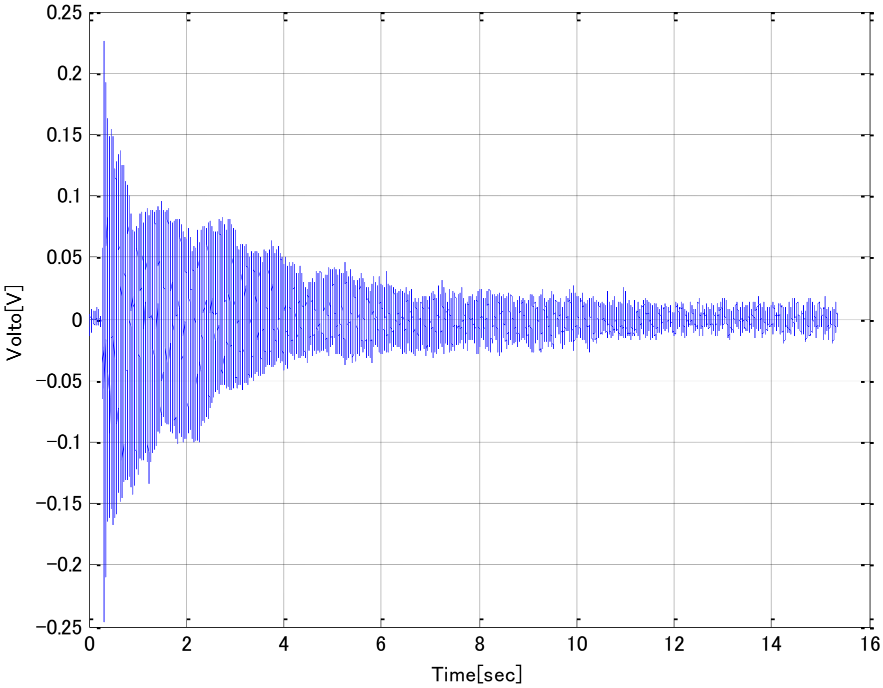

Figure 10-4 Fourth string

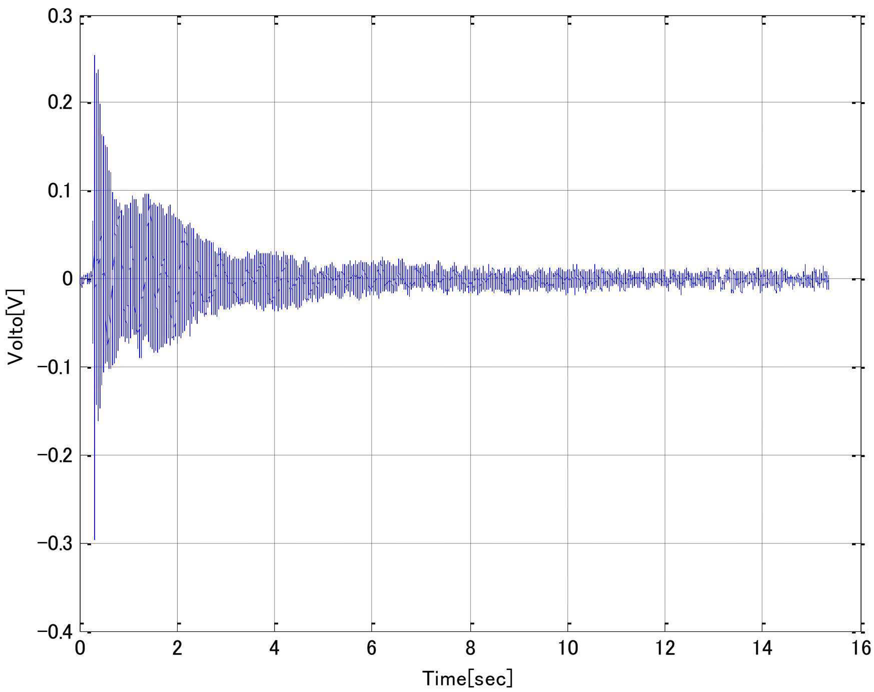

Figure 10-5 Fifth string

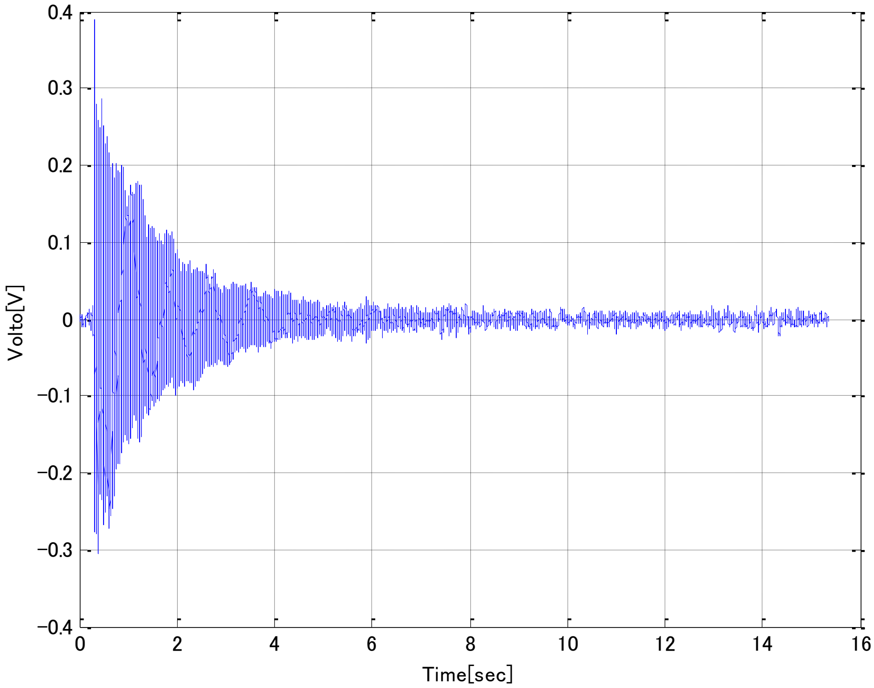

Figure 10-6 Sixth string

ギターは三味線の結果とは異なり、大きなうなりを発生せずに減衰をしていることがわかる。ただし多少のうなりが発生している弦も確認できた。この原因としてはチューニングが不十分であることが考えられる。

（イ） 周波数波形

1 弦から順に 6 弦まで周波数波形を示す。横軸が周波数[Hz]、縦軸が音圧[Pa]である。

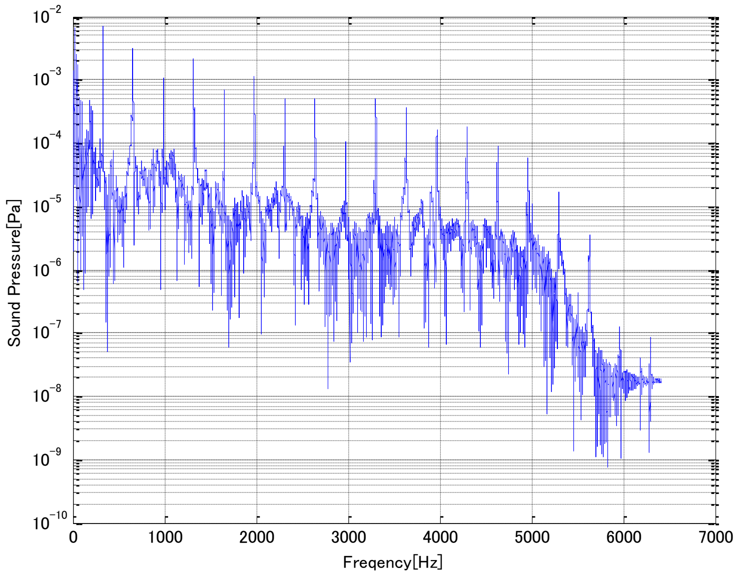

Figure 10-7 First string

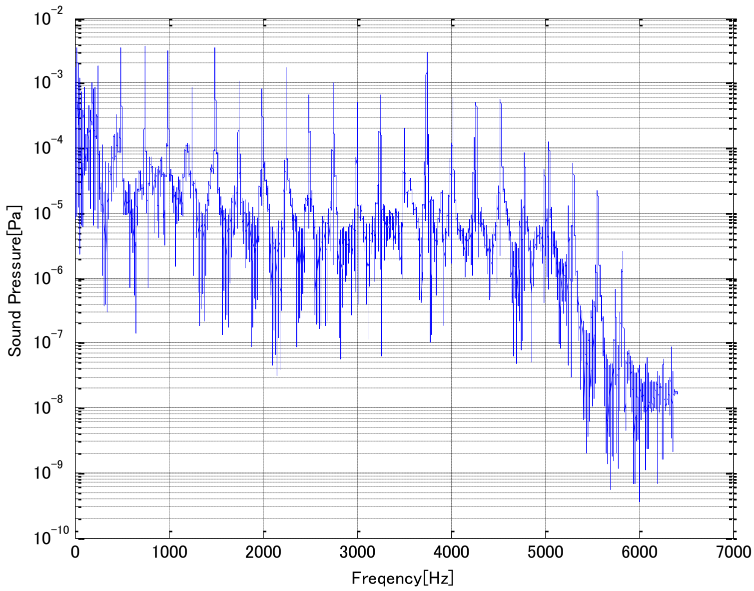

Figure 10-8 Second string

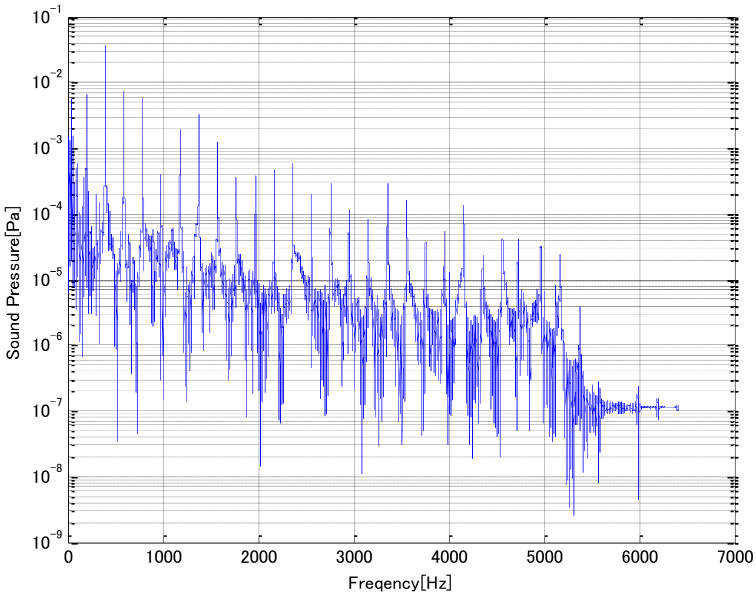

Figure 10-9 Third string

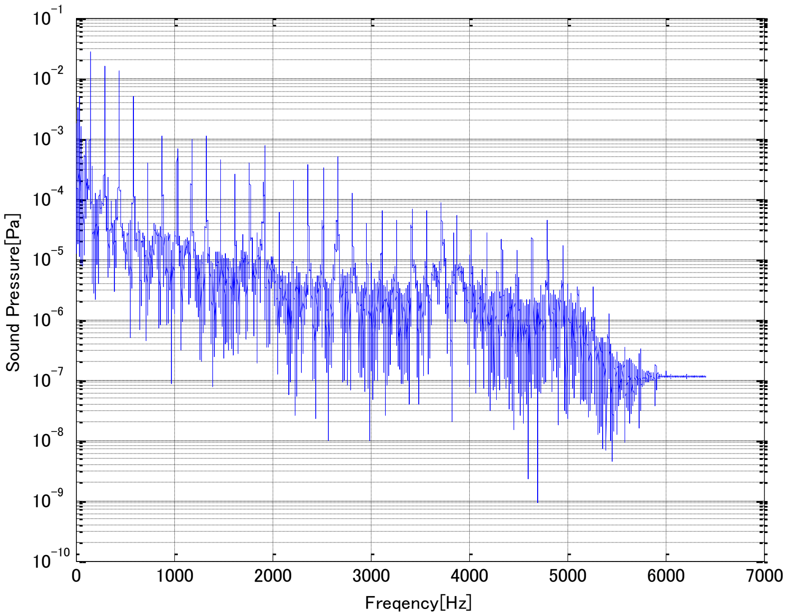

Figure 10-10 Fourth string

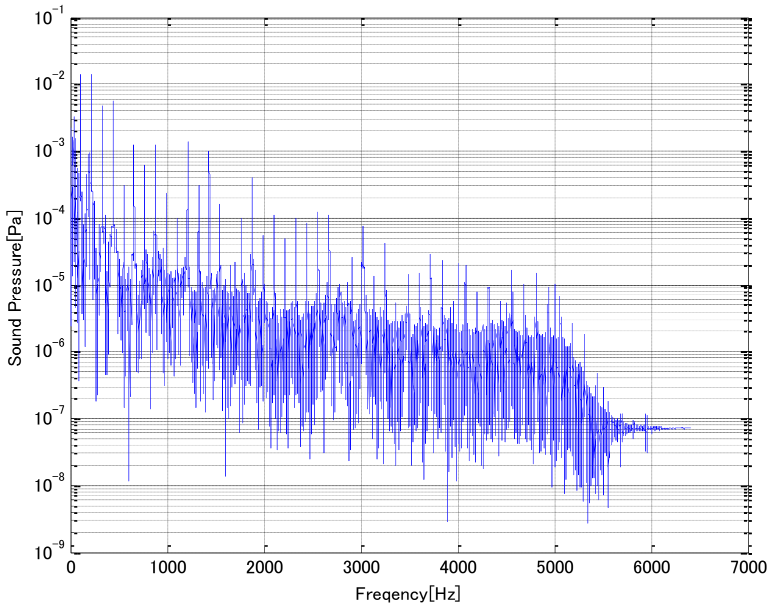

Figure 10-11 Fifth string

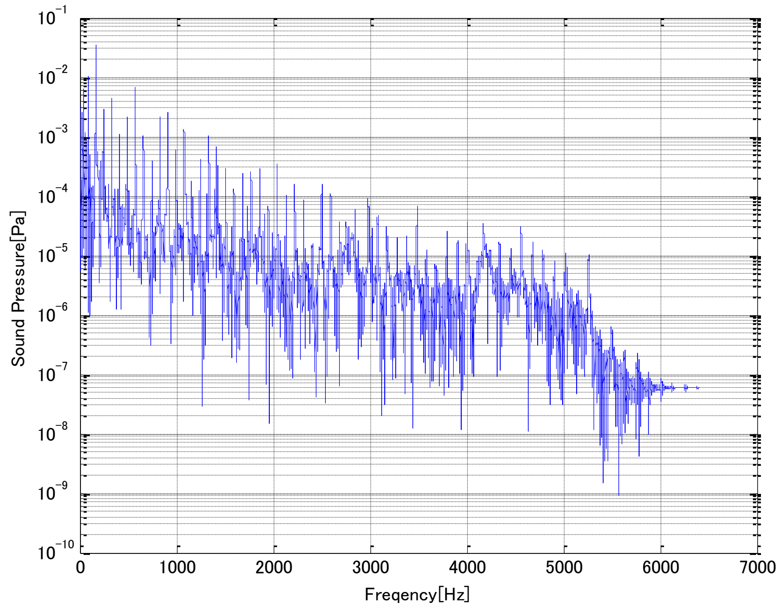

Figure 10-12 Sixth string

図 10-7 から図 10-12 の結果から、多少の上下はあるものの、ギターは基音の音圧が最も高く、周波数の増加に伴って音圧が低下していく傾向があることがわかる。これは三味線の結果とは大きく異なった結果であり、バイオリンのものと同様の傾向であることがわかる。

引用文献

1. **大江耕司.** 三味線のさわり機構による音響・振動特性. 東京都 : 法政大学, 2010.

2. **小松敬治.** 機械構造振動学. 東京都千代田区 : 森北出版株式会社, 2009.

3. **登坂宣好、大西和榮.** 偏微分方程式の数値シミュレーション. 東京都文京区 : 東京大学出版会, 1991.

4. **田辺行人、中村宏樹.** 偏微分方程式と境界値問題. 東京都文京区：財団法人　東京大学出版会, 1981.

5. **横川市次、今井哲夫.** 三味線用猫・犬皮の機械的性質. 東京都墨田区 : 皮革科学 Vol.46, 2000.

6. **長松昭男.** モード解析入門. 鎌倉市 : コロナ社, 1993.

7. **鈴木昭次.** 機械音響工学. 東京都 : コロナ社, 2004.

8. **ThomasNeville H. (Neville Horner)、RossingFletcher.** 楽器の物理学. 東京都 : シュプリンガー・フェアラーク東京, 2002.

謝辞

本論文は筆者が法政大学大学院工学研究科機械工学専攻修士課程に在籍中の研究成果をまとめたものである。同専攻教授であった御法川学先生、同専攻専任講師の岩原光男先生には指導教授として本研究の実施の機会を与えていただき、終始懇切丁寧にご指導いただいた。ここに深謝の意を表する。同専攻卒業生の大江耕司氏には修士 1 年次にご指導いただいた。ここに深謝の意を表する。

また，共同研究者として多くのご助言いただいたシステムデザイン専攻教授田中豊先生に感謝の意を表する。本研究を行うにあたり、三味線および関係資料の貸与，録音実験の協力下さった美邦堂三味線店の喜多川保延氏、外川氏に厚く御礼申し上げる。FEM 解析においてはアルテアエンジニアリング株式会社の依知川氏、矢野氏より解析方法の助言を戴いた。ここに感謝の意を表する。

最後に、本専攻振動音響研究室の各位には研究遂行に当たり日頃より有益なご助言をいただいた。ここに感謝の意を表する。