

三味線のさわり機構による音響・振動特性

大江, 耕司 / OE, Koji

(発行年 / Year)

2011-03-24

(学位授与年月日 / Date of Granted)

2011-03-24

(学位名 / Degree Name)

修士(工学)

(学位授与機関 / Degree Grantor)

法政大学 (Hosei University)

2010 年度 修士論文

三味線のさわり機構による音響・振動特性

Sound and vibrational property with SAWARI mechanism of SHAMISEN

指導教員 長松 昭男
岩原 光男
御法川 学

法政大学大学院
工学研究科機械工学専攻修士課程

09R1103 大江 耕司
Koji OE

目次

1. 緒論.....	- 1 -
1.1. はじめに.....	- 2 -
1.2. 三味線の構造および各部名称.....	- 3 -
1.3. 三味線の調律.....	- 6 -
1.3.1. 調子.....	- 6 -
1.3.2. 本数.....	- 6 -
1.4. さわりについて.....	- 7 -
2. 音の録音と解析.....	- 10 -
2.1. 目的.....	- 11 -
2.2. 時間・周波数解析.....	- 11 -
2.2.1. 目的.....	- 11 -
2.2.2. 実験方法.....	- 11 -
2.2.3. 実験結果.....	- 13 -
2.2.4. 考察.....	- 48 -
2.3. スペクトログラム解析.....	- 50 -
2.3.1. 目的.....	- 50 -
2.3.2. 実験方法.....	- 50 -
2.3.3. 解析結果.....	- 50 -
2.3.4. 考察.....	- 71 -
3. 音の加工.....	- 73 -
3.1. 目的.....	- 74 -
3.2. 加工方法.....	- 74 -
3.3. 加工結果.....	- 74 -
3.3.1. 加工音Ⅰ.....	- 74 -
3.3.2. 加工音Ⅱ.....	- 77 -
3.4. 考察.....	- 78 -
3.4.1. 加工音Ⅰ.....	- 78 -
3.4.2. 加工音Ⅱ.....	- 78 -
4. 実験モード解析.....	- 79 -
4.1. 目的.....	- 80 -
4.2. 実験方法.....	- 80 -
4.3. 実験結果.....	- 84 -
4.4. 考察.....	- 85 -

5.	弦振動シミュレーション.....	- 86 -
5.1.	目的.....	- 87 -
5.2.	計算理論.....	- 87 -
5.2.1.	波動方程式.....	- 87 -
5.2.2.	差分法（中央差分）.....	- 88 -
5.3.	計算方法.....	- 89 -
5.3.1.	計算式導出.....	- 89 -
5.3.2.	初期値設定.....	- 90 -
5.3.3.	条件設定.....	- 90 -
5.4.	計算結果.....	- 92 -
5.5.	考察.....	- 99 -
6.	モデル作成.....	- 100 -
6.1.	目的.....	- 101 -
6.2.	方法.....	- 101 -
6.3.	結果.....	- 102 -
6.4.	考察.....	- 104 -
7.	結論.....	- 105 -
7.1.	音の録音と解析.....	- 106 -
7.2.	音の加工.....	- 106 -
7.3.	実験モード解析.....	- 106 -
7.4.	弦振動シミュレーション.....	- 107 -
7.5.	簡易モデルによる高速度撮影.....	- 107 -
8.	付録.....	- 108 -
8.1.	調弦表.....	- 109 -
8.2.	Matlab プログラム.....	- 110 -
8.2.1.	音解析用プログラム.....	- 110 -
8.2.2.	弦振動シミュレーションプログラム.....	- 111 -
8.2.3.	弦振動シミュレーション周波数解析プログラム.....	- 112 -
8.3.	さわり調整について.....	- 114 -
	参考文献.....	- 116 -
	謝辞.....	- 117 -

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。次に、それらの音を加工し、比較することで三味線音の特徴を抽出する。さらに、三味線本体の加振実験を行い、解析結果を三味線音のそれと比較した。また、弦振動そのものにも着目し、「さわり」による弦の動きを調査するため弦のシミュレーションおよび弦振動の高速度撮影を行った。

1.2. 三味線の構造および各部名称

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（こうき 紅木やかりん 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（ねお 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。

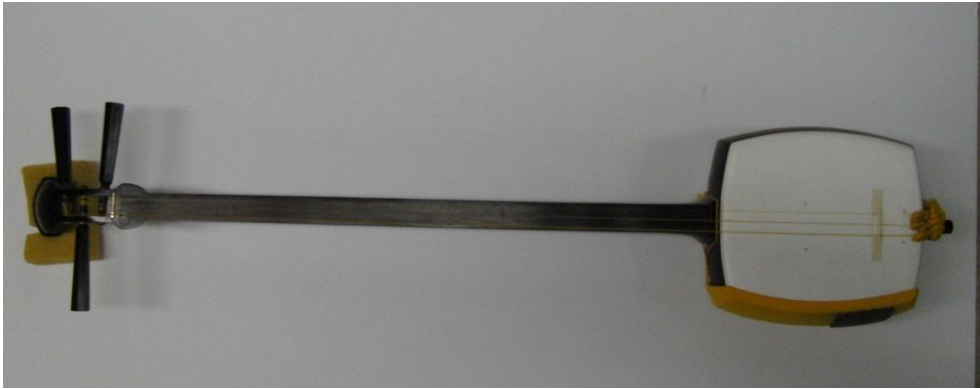


Figure 1-1 Shamisen [top view]



Figure 1-2 Shamisen [side view]



Figure 1-3 Tenjin [Pegbox]

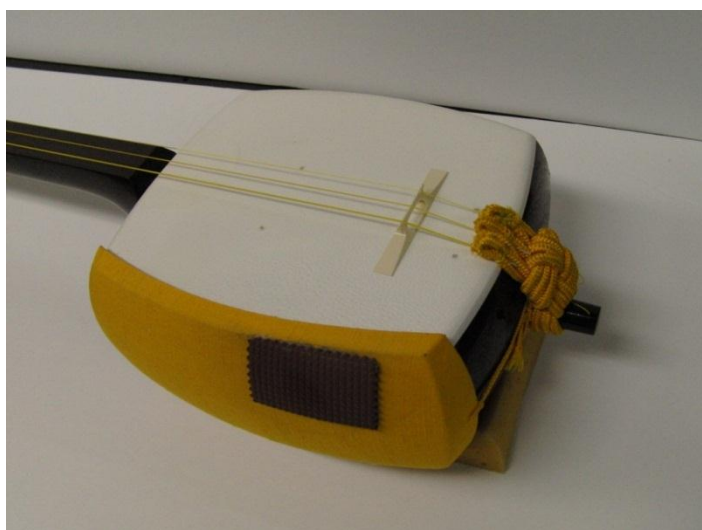


Figure 1-4 Dou [Body]



Figure 1-5 13-3 (Nylon), 13-3 (Silk)



Figure 1-6 14-2 (Silk), 15-2 (Silk)



Figure 1-7 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 Usage 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、演奏する楽曲によっては曲中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、三下がりの三種類がある。

本調子は、一の糸を基準にした時、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、一の糸を基準とした時、二の糸を完全5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本から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」といわ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乗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。

つぎに、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^{かみごま}」に乗せられている。上駒とはギターなど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^{つら}面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、上駒の極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。このため弦を弾いた際にさわり山と一の糸が擦れ、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付くと表現し、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 1-8 Azuma-sawari (東さわり) [top view]



Figure 1-9 Azuma-sawari (東ざわり) [bottom view]



Figure 1-10 Ichimonji-sawari (一文字ざわり) [top view]



Figure 1-11 Ichimonji-sawari (一文字ざわり) [bottom 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と比較対象である楽器（ギター，バイオリン）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．比較対象としてギター，バイオリンについても同様に録音と解析を行う．

2.2.2. 実験方法

三味線，バイオリン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，その上に対象楽器を設置した．そして指によって弦をつまみ上げ，離した際に発生する音を収録した．チューニングに関してはそれぞれ，三味線は喜多川派家元である喜多川保延氏，バイオリンは田中研究室の芹澤氏が行った．

また，三味線に関しては必要なデータ収集のため適宜，追加実験を行った．その際にギターの録音も行った．追加実験の詳細については別途記述する．

これらすべての実験において，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 30 c m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 を用いて解析を行った．実験器具を以下に示す．



Figure 2-1 FFT analyzer（リオン社製 SA-01）



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



Figure 2-3 Laptop computer (IBM 社製)

2.2.3. 実験結果

実験結果を楽器毎に示す．なお，三味線の追加実験の結果については下記の三味線とは別に項目を設けて示すこととする．

2.2.3.1. 三味線

三味線の録音および解析結果を以下に示す．内容は一の糸のさわり有無の比較，二の糸および三の糸の比較である．

2.2.3.1.1. 時間軸波形

まず，さわりの有り無しで録音を行った本調子一の糸について示す．解析周波数は 1000Hz，サンプリング点数は 8192 点である．

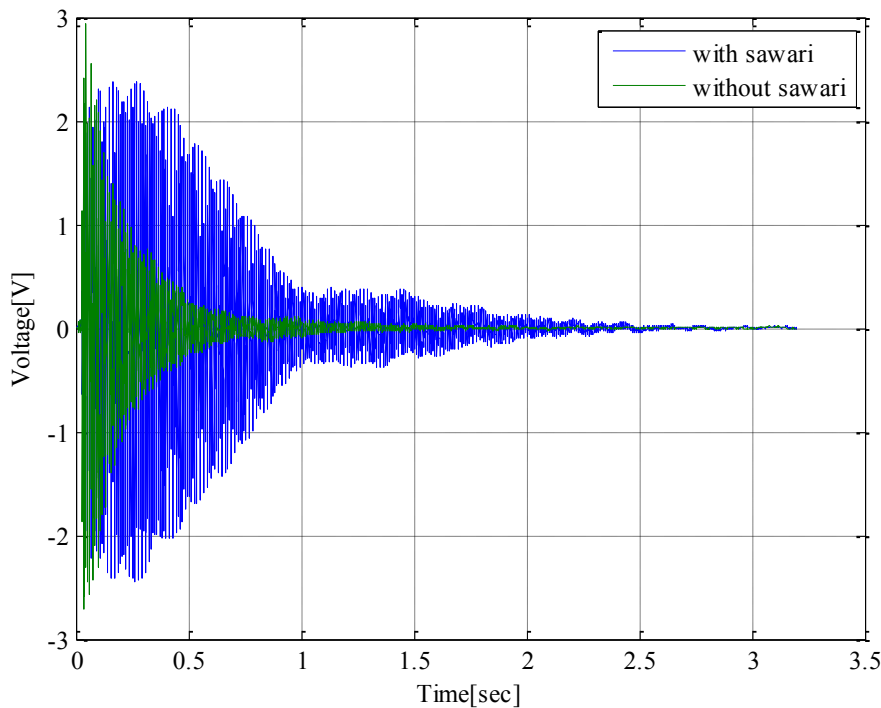


Figure 2-4 Ichi-no-ito [first string]

図 2-4 は横軸が時間[s]，縦軸が FFT アナライザより収録したデータの電圧[V]である．図中にあるように青色がさわりの付いたもの，緑色がさわりの無いものを示す．さわりの無いものは時間経過とともになだらかに減衰しているが，さわりが付いた音は 0.3 sec 付近で一度大きくなり，その後減衰していく形をしている．

次に本調子の二の糸，三の糸の時間軸波形を示す．それぞれ解析周波数は 5000Hz，サンプリング点数は 32768 点である．

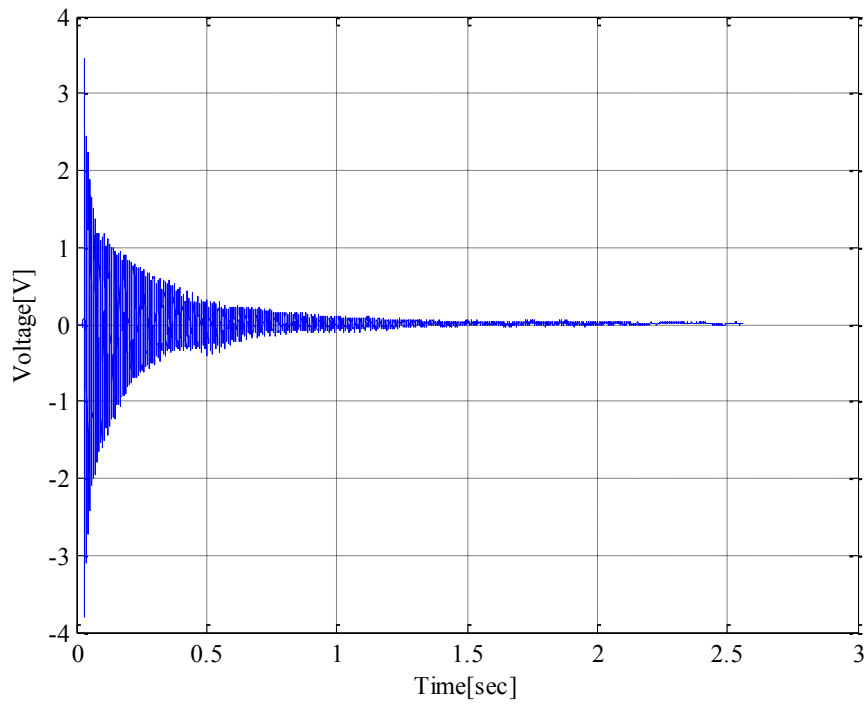


Figure 2-5 Ni-no-ito [second string]

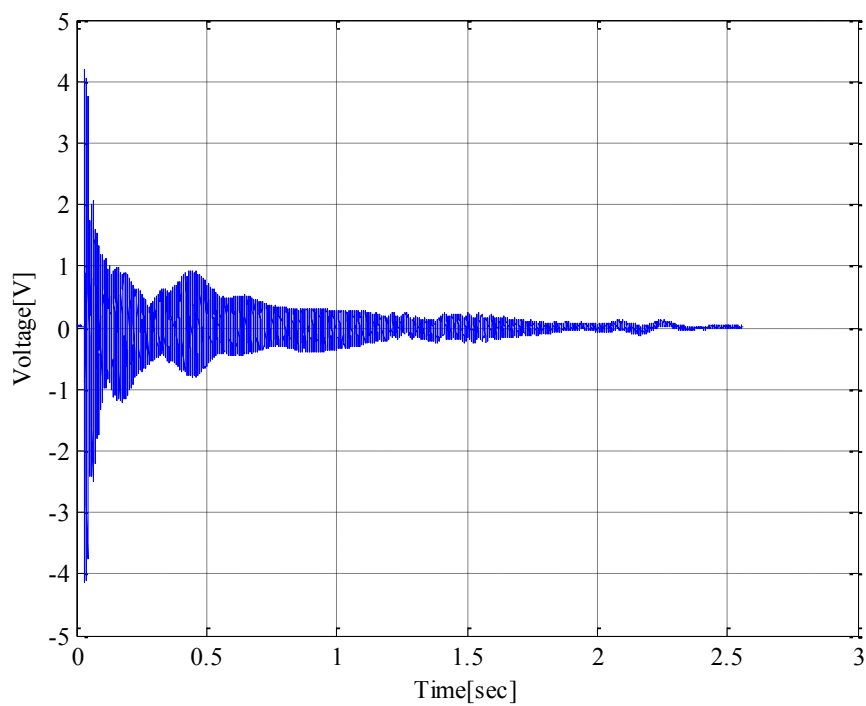


Figure 2-6 San-no-ito [third string]

図 2-5 および図 2-6 を見るとさわり構造がないはずの二の糸と三の糸に、うなるような現象が発生していることがわかる。この現象は「1.4 さわりについて」で述べたとおり、一の糸の共振が影響していると考えられる。

2.2.3.1.2. 周波数波形

まず、さわりの有り無しで録音を行った本調子一の糸について示す。解析周波数は 1000Hz、サンプリング点数は 8192 点である。

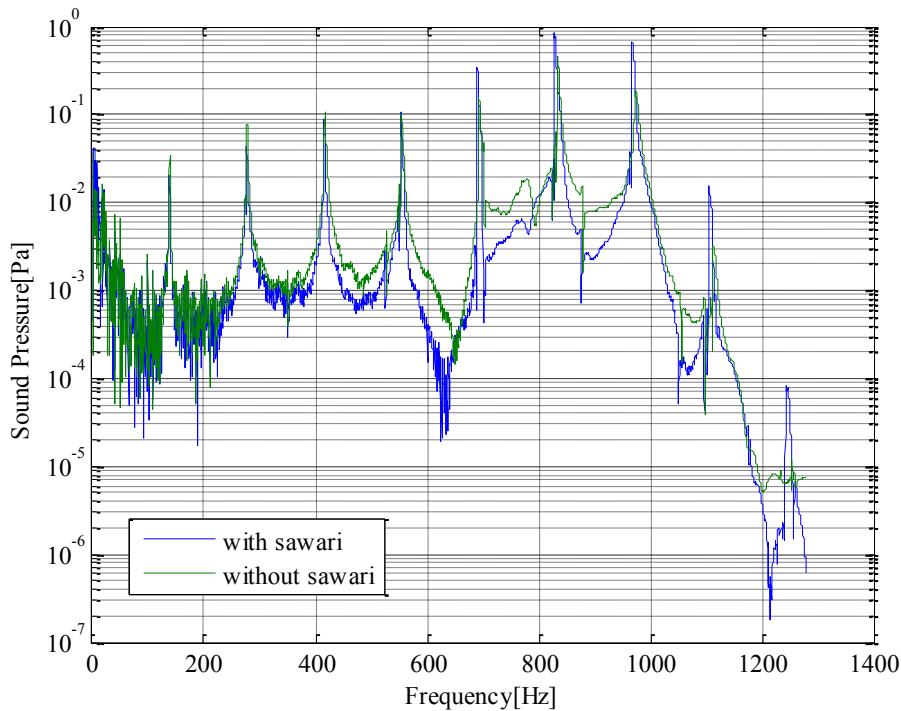


Figure 2-7 Iti-no-ito [first string]

図 2-7 は横軸が周波数[Hz]、縦軸が音圧[Pa]である。図中にあるように青色がさわりの付いたもの、緑色がさわりの無いものを示す。

上図から、三味線音は基音と倍音成分からなっていることが確認できる。また、さわりの有無に関係なく基音（150Hz 付近のピーク）の音圧よりも 1000Hz 前後のピークの音圧のほうが高くなっていることから、三味線の基本的な特性と考えられる。

さわりの有無による違いという点では、700～1000Hz の範囲において、さわりが付いた音の音圧がさわりの無い音に比べ高くなっていることから、これがさわ리音の特徴の一つであると考えられる。

次に本調子の一の糸, 二の糸, 三の糸の比較結果を示す. 解析周波数は 5000Hz, サンプルング点数は 32768 点である. ここでは 1500Hz までを拡大して表示する.

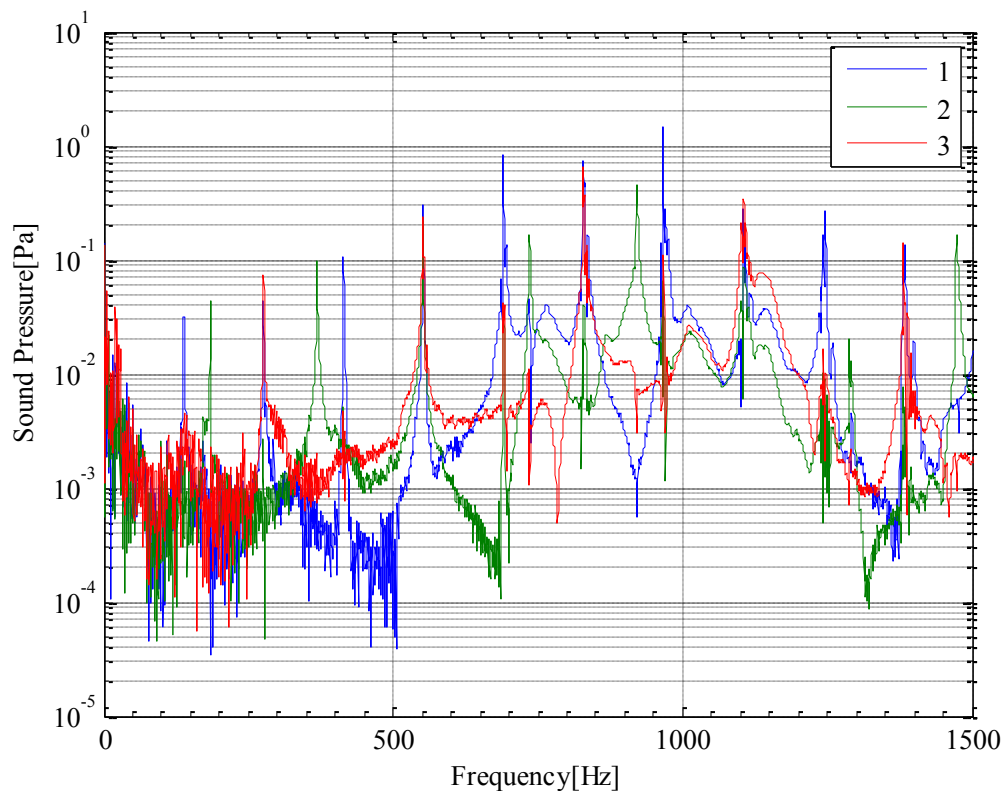


Figure 2-8 Comparison of strings

青が一の糸, 緑が二の糸, 赤が三の糸の結果である. 図 2-7 の結果と同様, 基音の音圧より 1000Hz 前後の音圧のほうが高くなっている. また, 二の糸は 3 倍音と 6 倍音が一の糸の 4 倍音と 8 倍音に, 三の糸は基音, 2, 3, 4 倍音が一の糸の 2, 4, 6, 8 倍音とほぼ一致している. このことから図 2-5 と 2-6 で考察した現象(一の糸の共振)が発生しているといえる. また, 三の糸は一の糸の 1 オクターブ高い音であるため倍音の位置の一致が多く, 一の糸と共振し易い. これが二の糸よりも三の糸のグラフの方がうなりの度合いが大きいことの原因であると考えられる.

2.2.3.2. バイオリン

バイオリンの録音および解析結果を以下に示す。なお、調律は田中研究室の芹澤氏が行った。解析周波数は 5000Hz, サンプルング点数は 32768 点である。

2.2.3.2.1. 時間軸波形

バイオリンの A 線の時間軸波形を以下に示す。

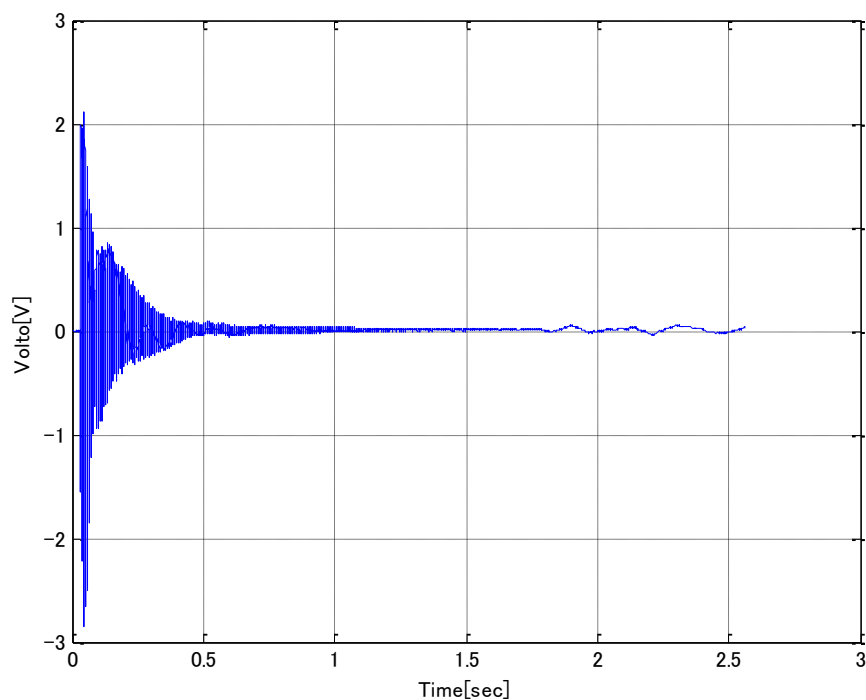


Figure 2-9 String in A

図 2-9 は横軸が時間[s], 縦軸が FFT アナライザより収録したデータの電圧[V]である。この結果と三味線の結果 (図 2-4) と比較するとさわり無しのもので類似していることがわかる。

次に, D, E, G 線に関する結果を示す。図 2-9 と同様, 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[V]である。

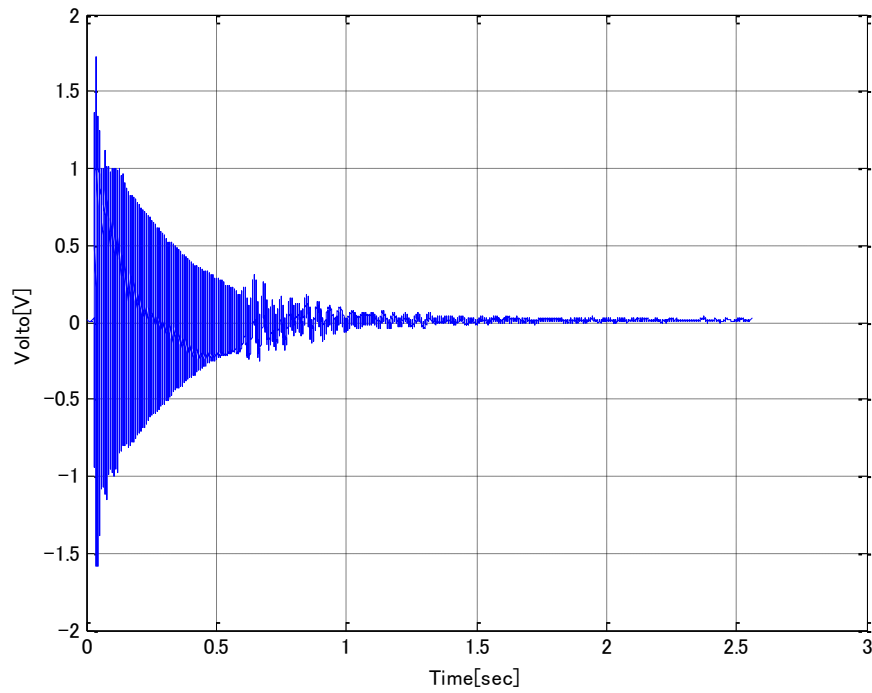


Figure 2-10 String in D

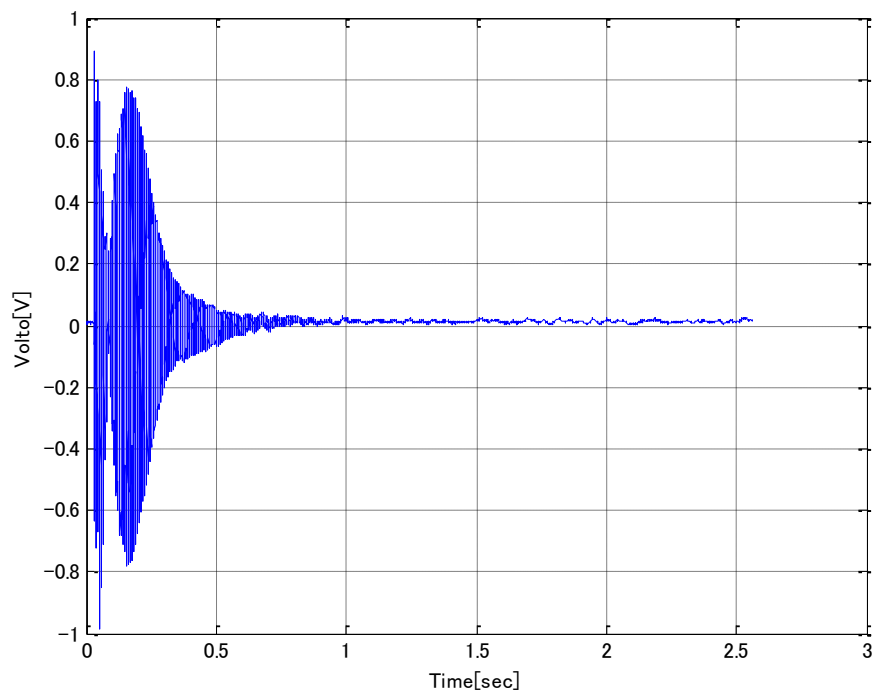


Figure 2-11 String in E

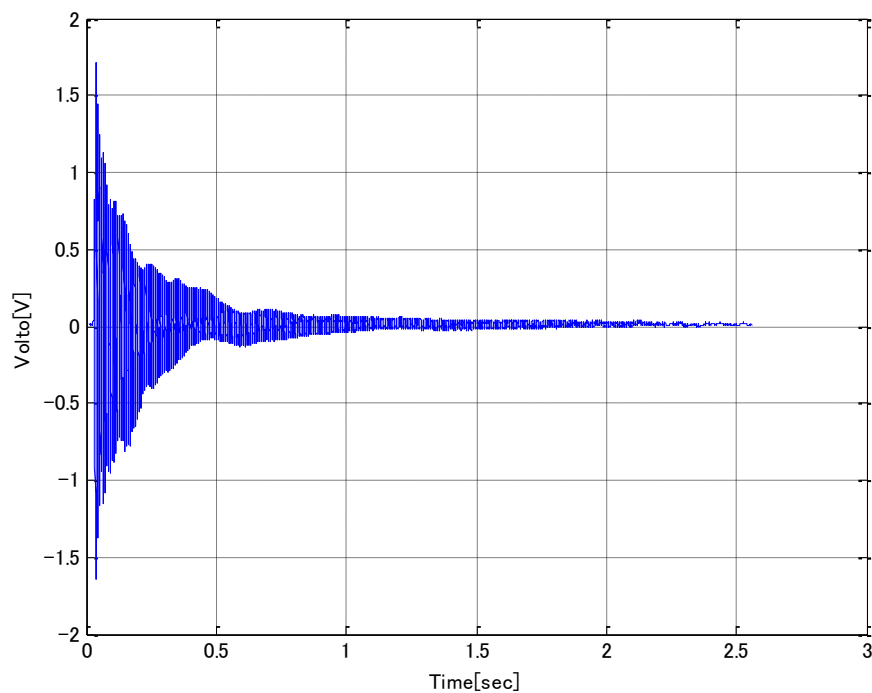


Figure 2-12 String in G

D, G 線に関しては三味線の結果 (図 2-4) と比較するとさわり無しのものと同様していることがわかる。

それに対し E 線は一度ふくらみが発生しており、さわり有りのものと類似していることがわかる。E 線は 4 線の中で最も高い周波数の弦であり、最も音がずれやすいため、うなりが発生したと考えられる。

2.2.3.2.2. 周波数波形

バイオリンの各弦（A, D, E, G）の周波数波形を以下に示す．横軸が周波数[Hz]，縦軸が音圧[Pa]である．

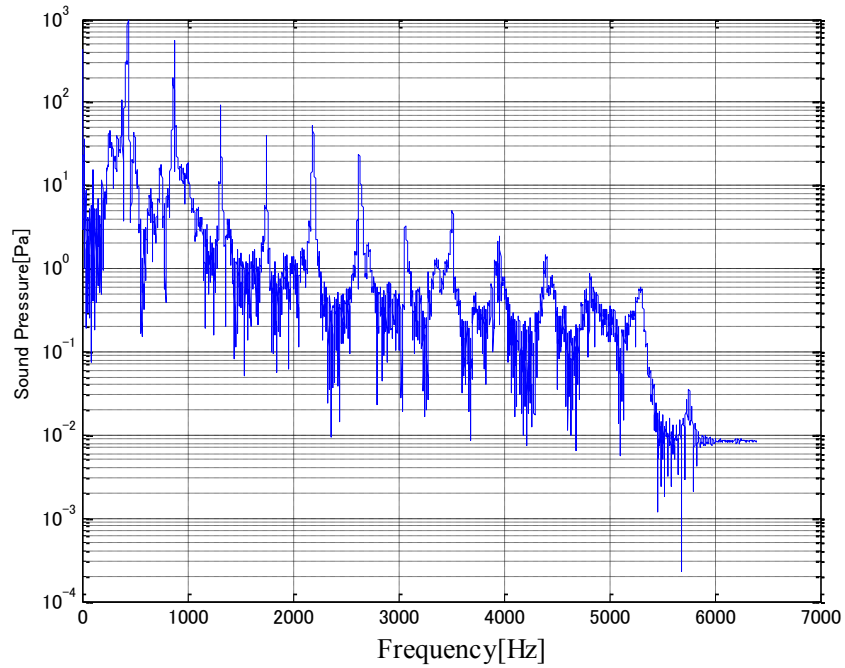


Figure 2-13 String in A

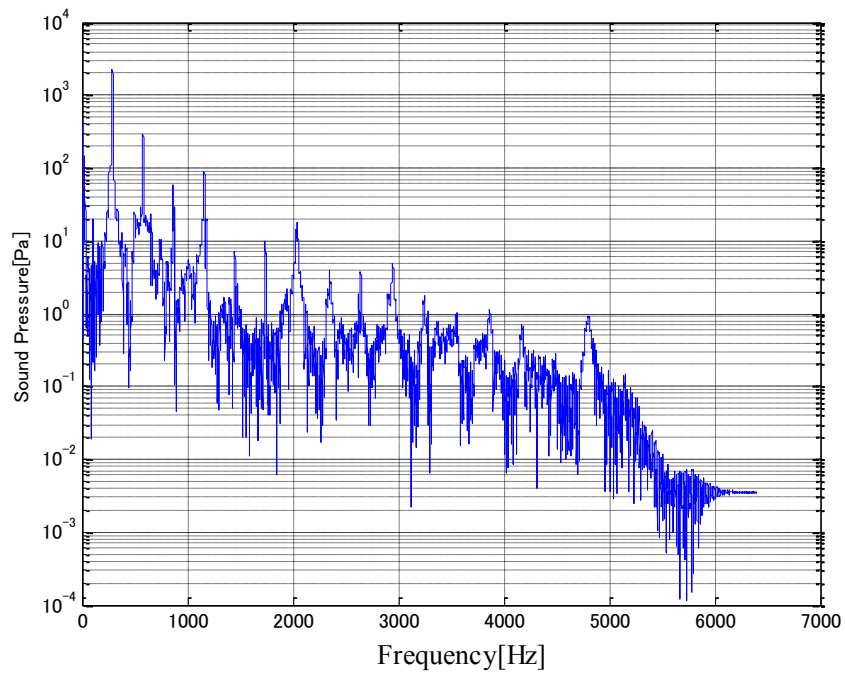


Figure 2-14 String in D

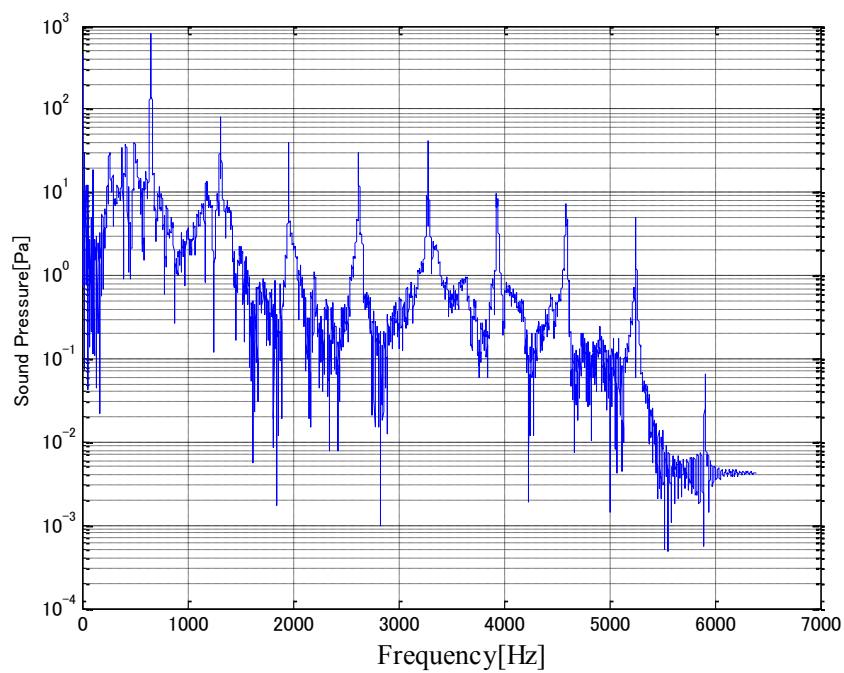


Figure 2-15 String in E

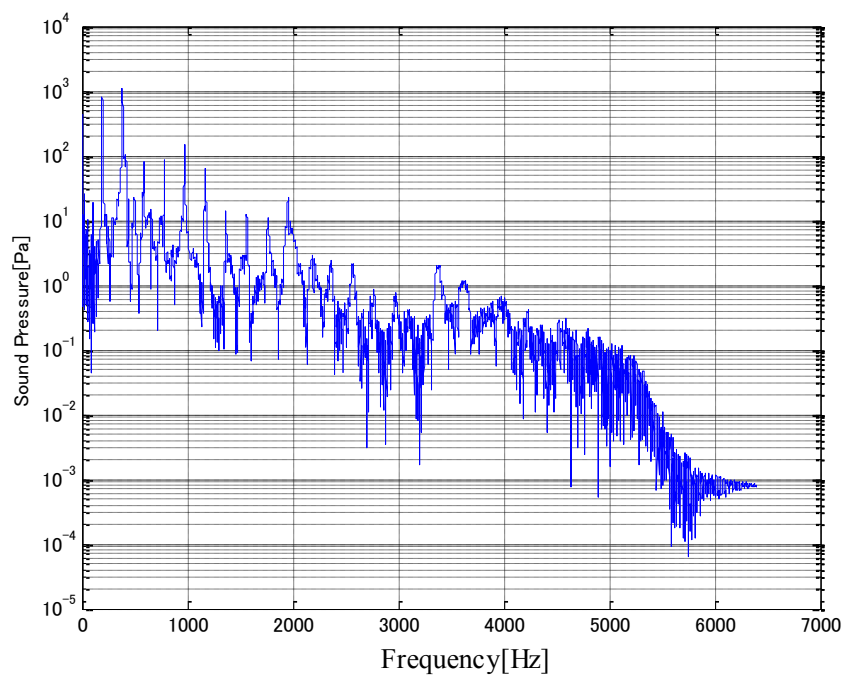


Figure 2-16 String in G

図 2-13 から図 2-16 の結果より、多少の上下は存在するものの、バイオリン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る。

2.2.3.3. 三味線（追加実験）

追加実験の録音および解析結果を以下に示す．追加実験は二回行った．一回目の目的はより高い周波数領域での解析を行うこと，二回目の目的はさわりの利き具合による音の変化を解析することである．

2.2.3.2.1. 追加実験 一回目結果

この実験は本学内半無響室で行い，調律は筆者が行った．解析周波数は 5000Hz，サンプリング点数は 32768 点である．

まず，さわりの有り無しで録音を行った本調子一の糸について示す．

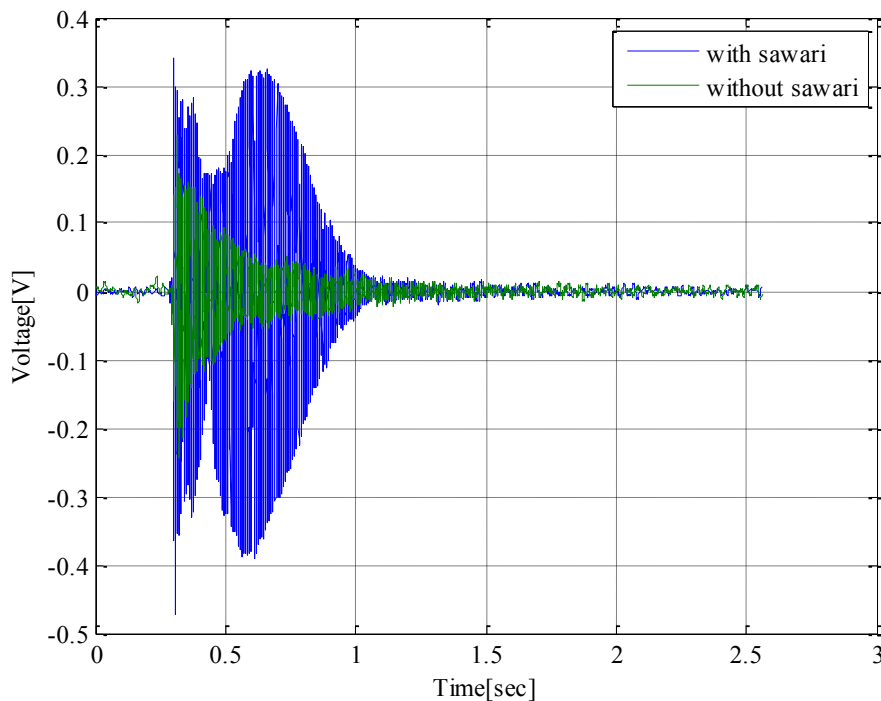


Figure 2-17 Iti-no-ito [first string]

図 2-17 は横軸が時間[s]，縦軸が FFT アナライザより収録したデータの電圧[V]である．図中にあるように青色がさわり有り，緑色がさわりの無いものを示す．

前回の実験同様，さわりの無いものは時間経過とともになだらかに減衰しているが，さわりが付いた音は一度大きくなり，その後減衰していく形をしている．

次に本調子の二の糸，三の糸の時間軸波形を示す．

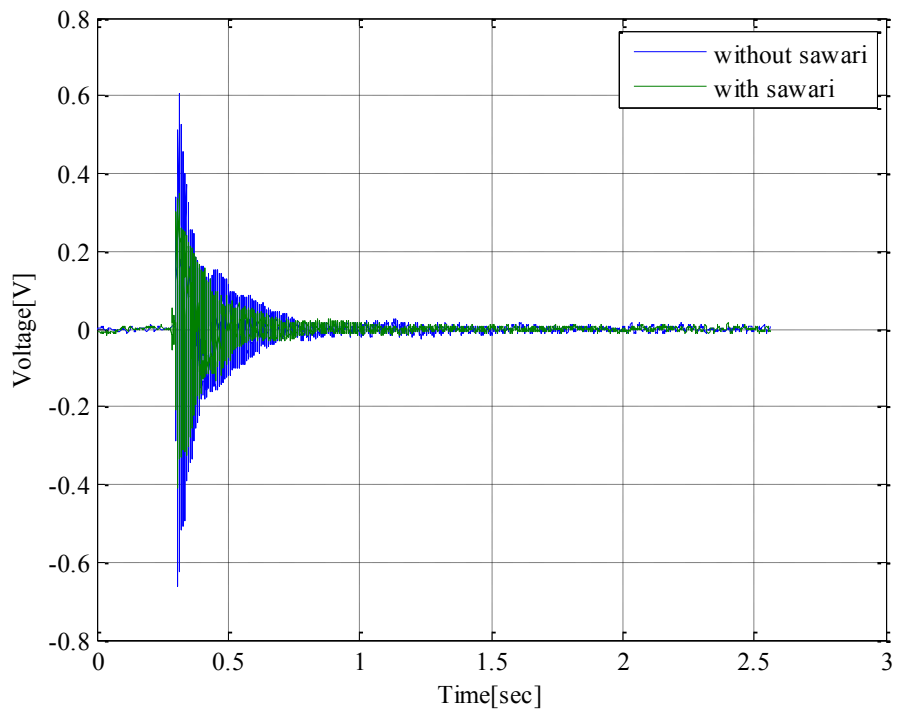


Figure 2-18 Ni-no-ito [second string]

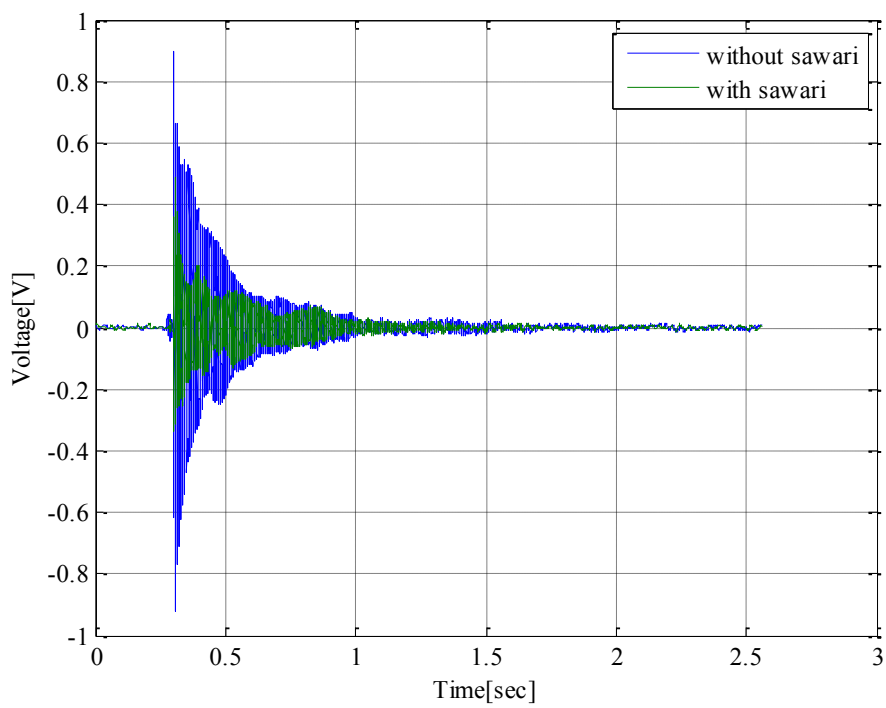


Figure 2-19 San-no-ito [third string]

図 2-18 および図 2-19 を見ると、前回の実験同様、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。なお、さわりなしの状態でも多少のうなりがみられることの原因としては、調律が不十分であることが考えられる。

次に、周波数波形による比較を行う。まず初めに一の糸の結果を示す。なお、横軸が周波数[Hz]、縦軸が音圧[Pa]である。

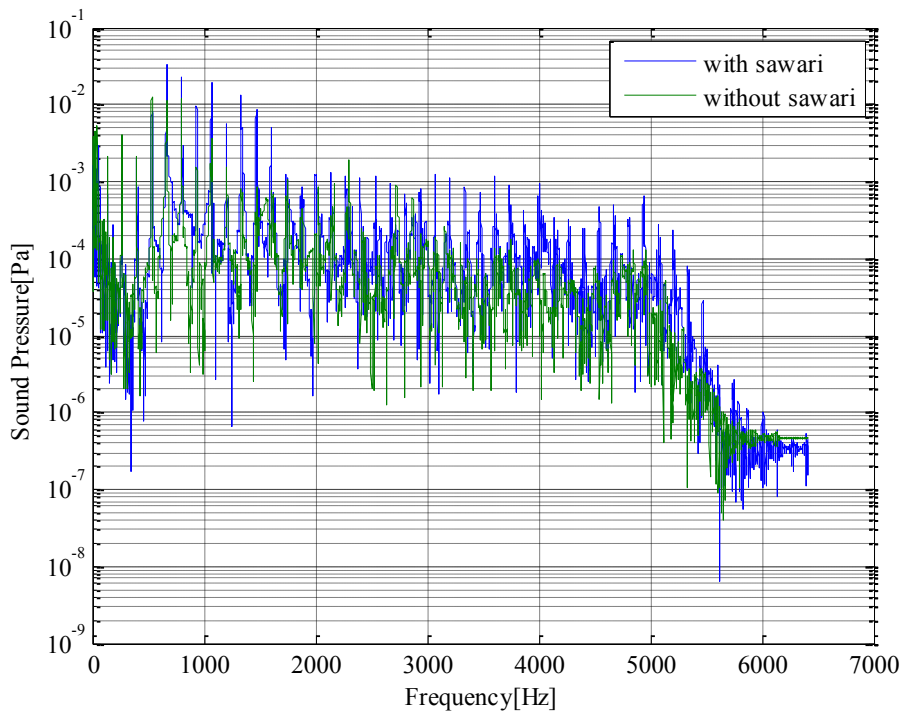


Figure 2-20 Iti-no-ito [first string]

図 2-20 を見ると、前回の実験と同様にさわりの有無に関係なく 1000Hz 前後の音圧が高いことがわかる。そして前回測定できなかった 1000Hz 以降に大きな特徴があることがわかる。特に 3000Hz 以降ではさわりが有る状態ではそれぞれのピークが高くなっていることがわかる。

次に二の糸、三の糸の周波数解析結果をそれぞれ示す。なお、これらの図も横軸が周波数[Hz]、縦軸が音圧[Pa]である。

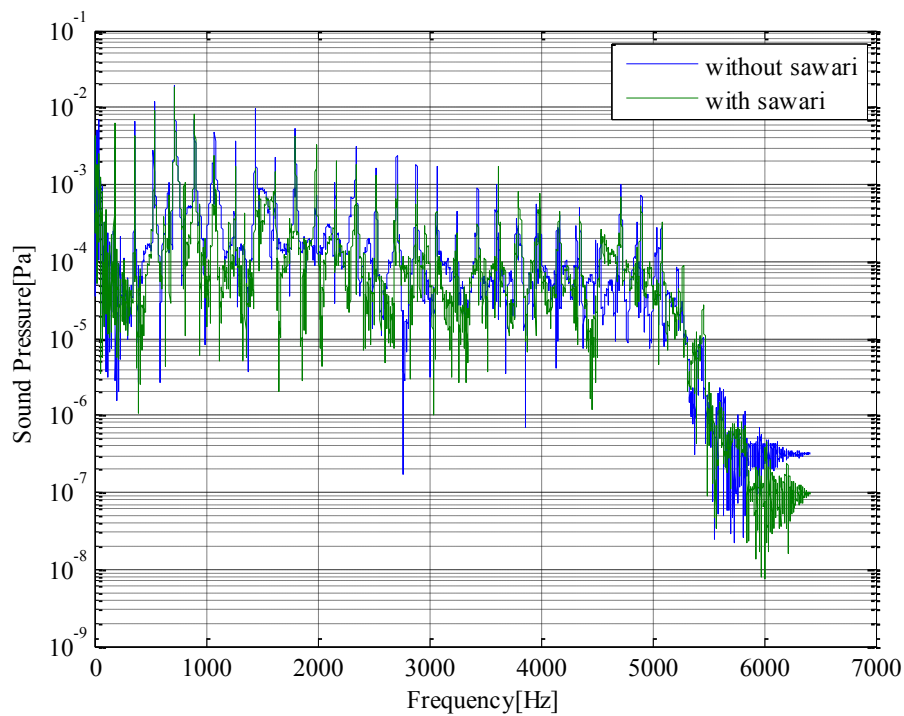


Figure 2-21 Ni-no-ito [second string]

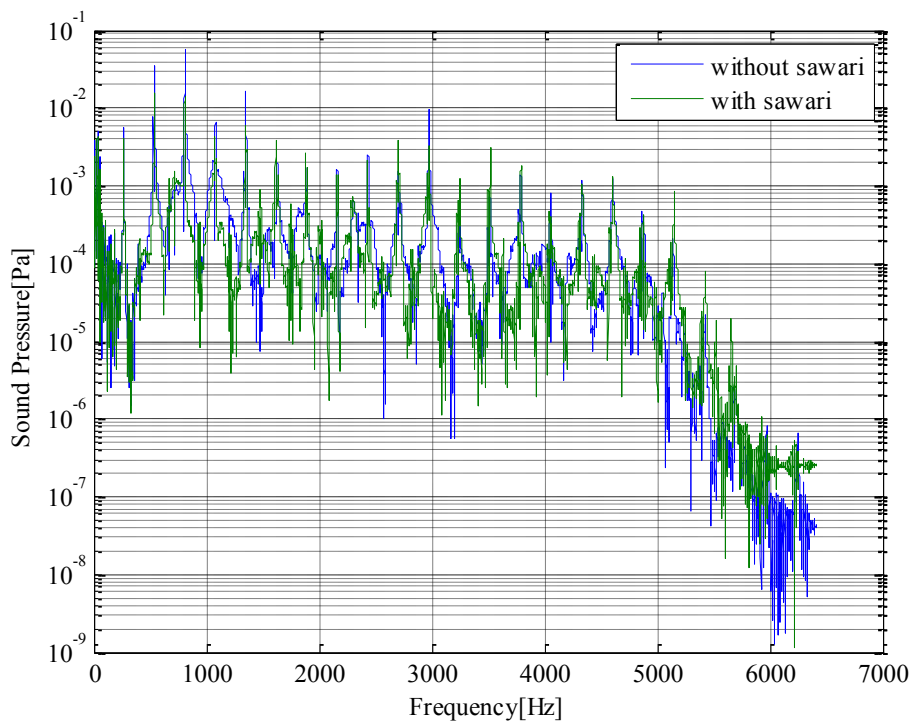


Figure 2-22 San-no-ito [third string]

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。一の糸の結果で見られたようなさわりの有無による 3000Hz 以降の差はそれほど見られなかった。

2.2.3.2.2. 追加実験 二回目結果

この実験は美邦堂三味線店にて行い、調律は喜多川派家元である喜多川保延氏が行った。先に述べた通り、この実験ではさわりの効き具合による音の変化を比較するために行い、録音は調子笛を除き、本調子一の糸である。以下の表にさわりの効き具合の目安と調子笛の音程等を示す。なお、この目安は喜多川保延氏の感覚によるものである。

Table 2-1 Sawari level

Title	Sawari level /pitch	Remarks
Without sawari	zero	No.001~004 (only 004 with plectrum)
Sawari low	low	No.001~003
Sawari low (80)	low (80%)	No.001~003 (only 003 with plectrum)
Sawari middle	Middle (100%)	No.001~003
Sawari high(120)	high (120%)	No.001,002
Sawari high (150)	high (150%)	No.001
Chousi-bue	C-#	Pitch pipe

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。

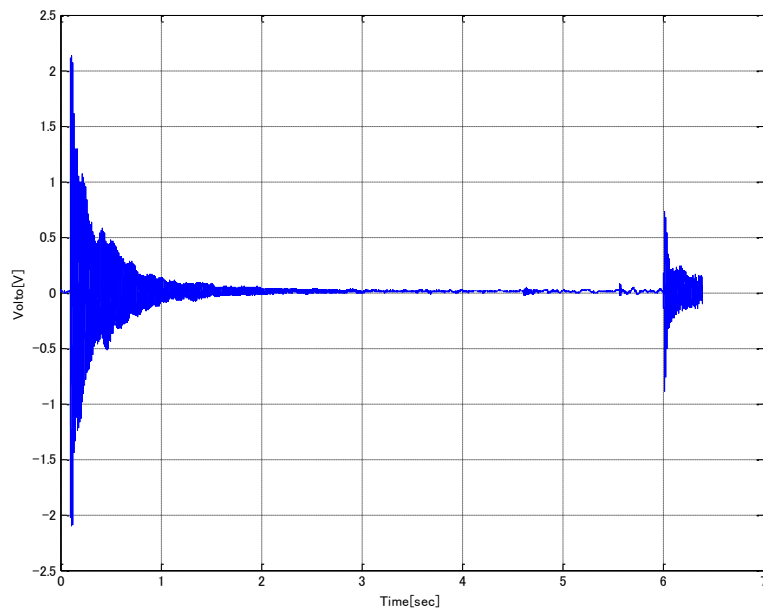


Figure 2-23 Without sawari [001]

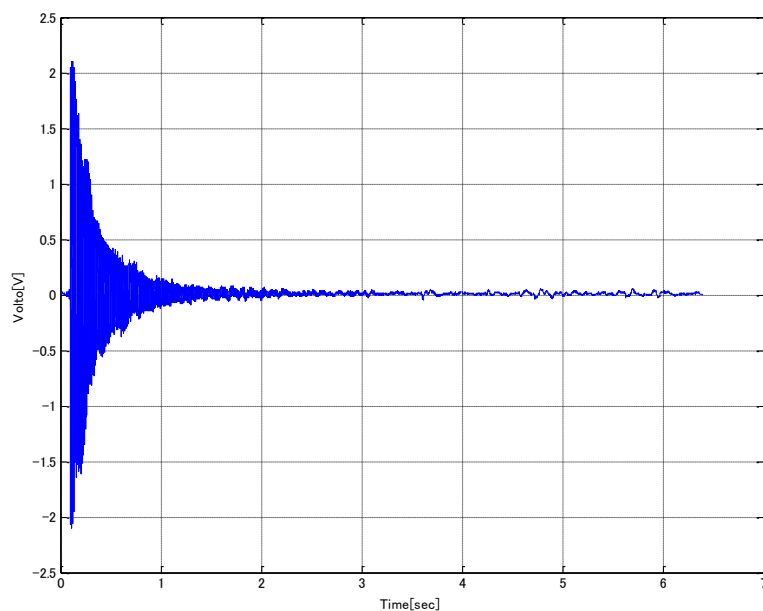


Figure 2-24 Without sawari [002]

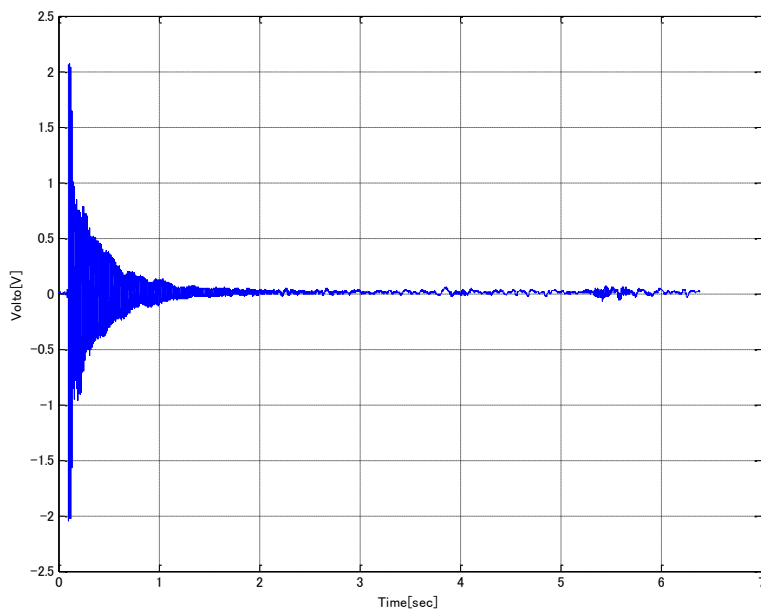


Figure 2-25 Without sawari [003]

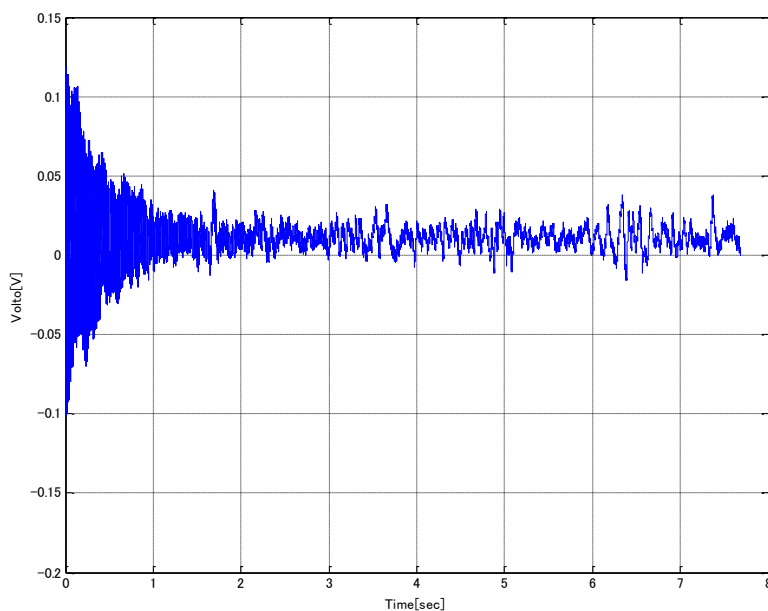


Figure 2-26 Without sawari [004 with plectrum]

図 2-23 から図 2-26 まではさわり無しの結果である。図 2-23 はさわり無し一回目の結果である。この収録では若干のノイズが入っている。また、6 秒付近に音が入ってしまったが、音の減衰傾向は以前の実験と変わらない。これは図 2-25 も同様である。図 2-24 はきれいな減衰となっている。音もバイオリン等に近い音である。

さわり無しの中で唯一、撥を用いたものが図 2-26 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、これまでの結果に比べ、後半の余韻に大きな差ができていくことがわかる。

次に、さわり不足の状態の結果を 3 つ示す。

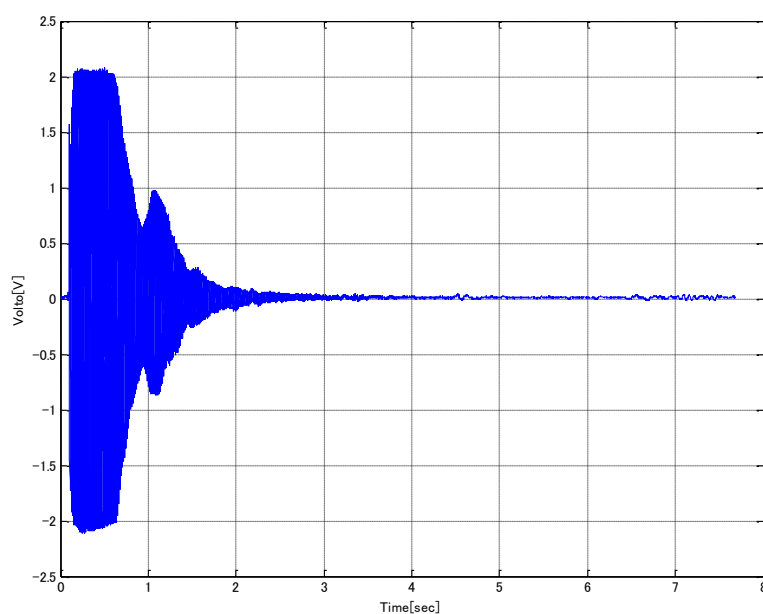


Figure 2-27 Sawari low [001]

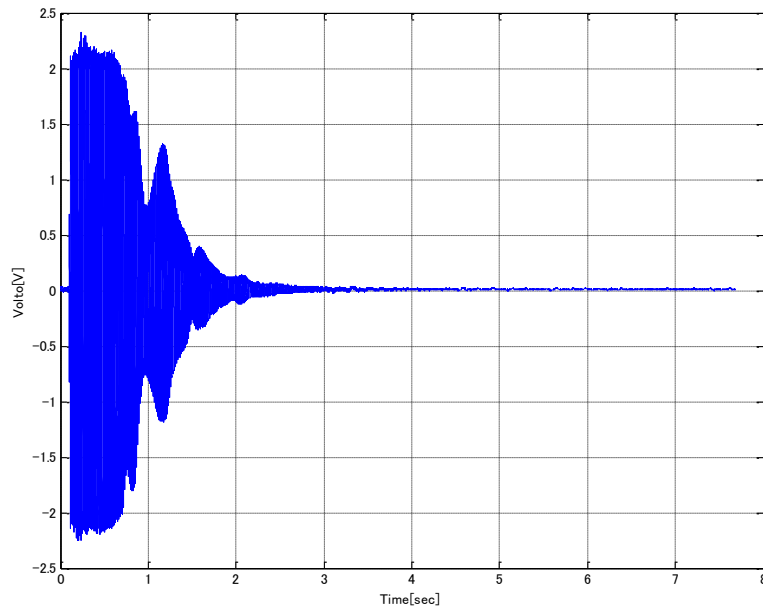


Figure 2-28 Sawari low [002]

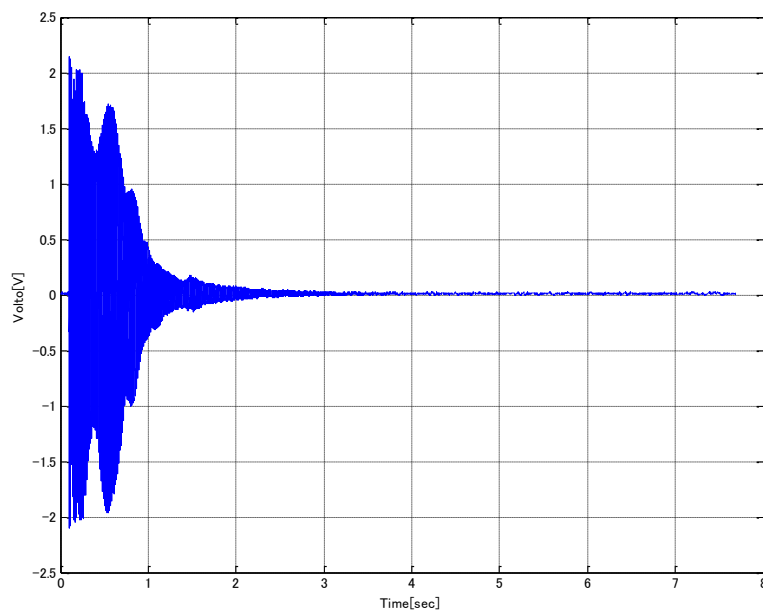


Figure 2-29 Sawari low [003]

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 2-27 と図 2-28 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つ目のデータのみ撥を用いて発音している。

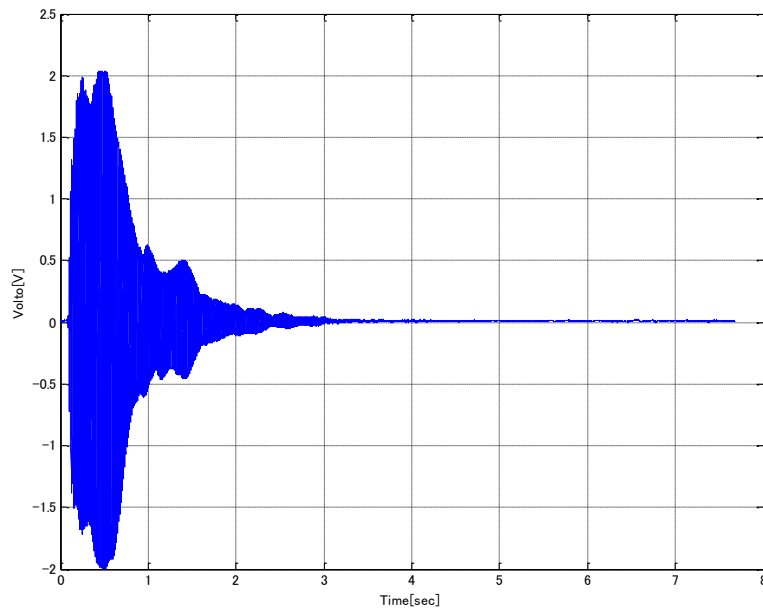


Figure 2-30 Sawari low (80%) [001]

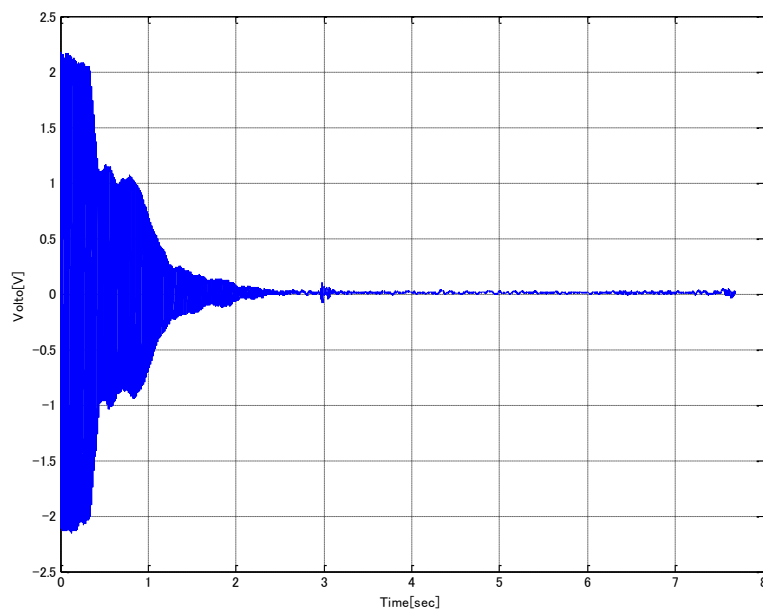


Figure 2-31 Sawari low(80%) [002]

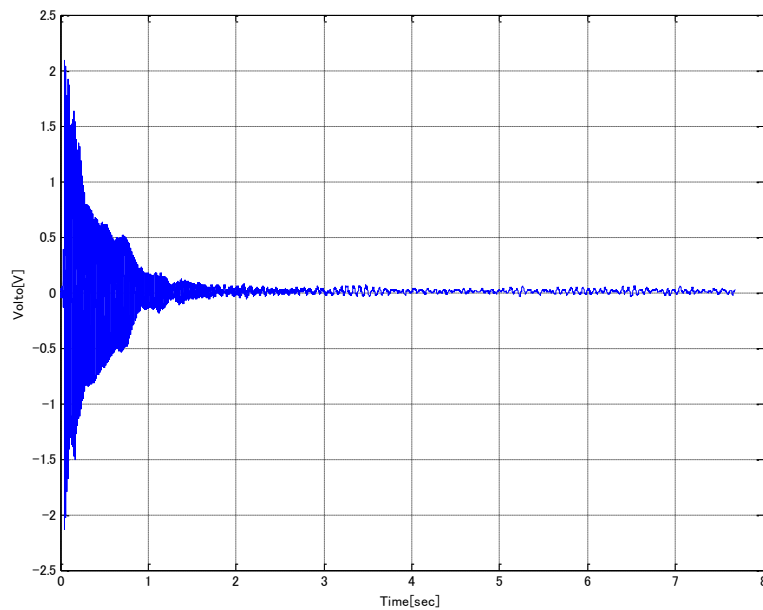


Figure 2-32 Sawari low(80%) [003 with plectrum]

さわりの不足（80%程度）の結果も、さわりの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、さわりの有りの状態の結果を3つ示す。

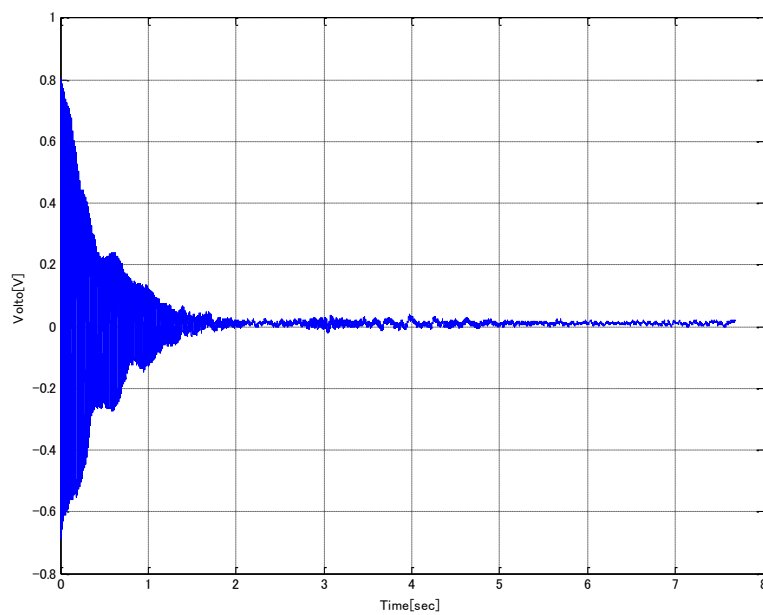


Figure 2-33 Sawari middle [001]

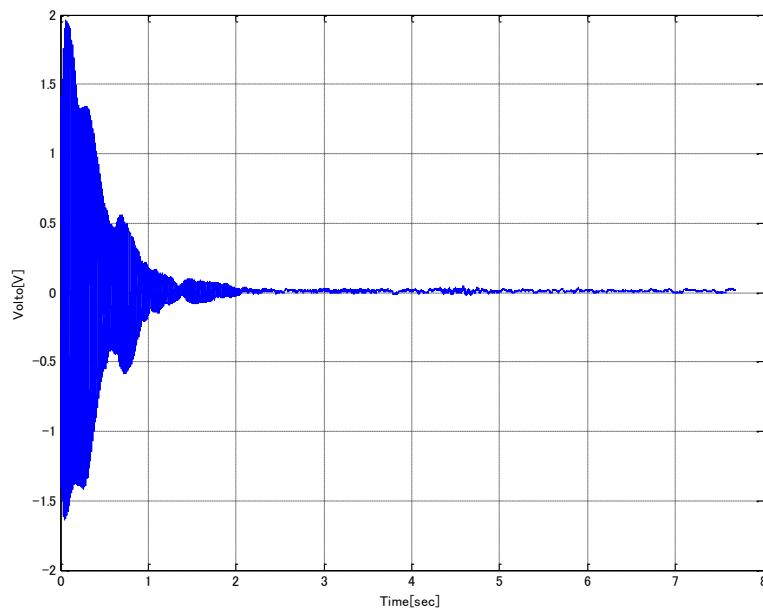


Figure 2-34 Sawari middle [002]

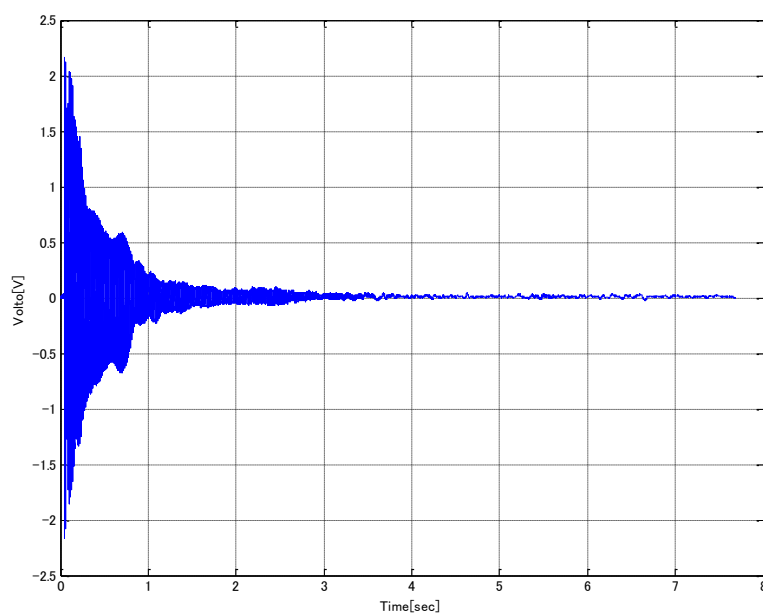


Figure 2-35 Sawari middle [003]

さわ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の事である事がわかる。これまでの録音結果では「さわりの状態=大きなふくらみを出す」という事であったが、この実験ではそういった事はなく、どちらかという減衰過程に

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。そしてその分だけ余韻が長くなっている。なお、図 2-33 と 2-34 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。

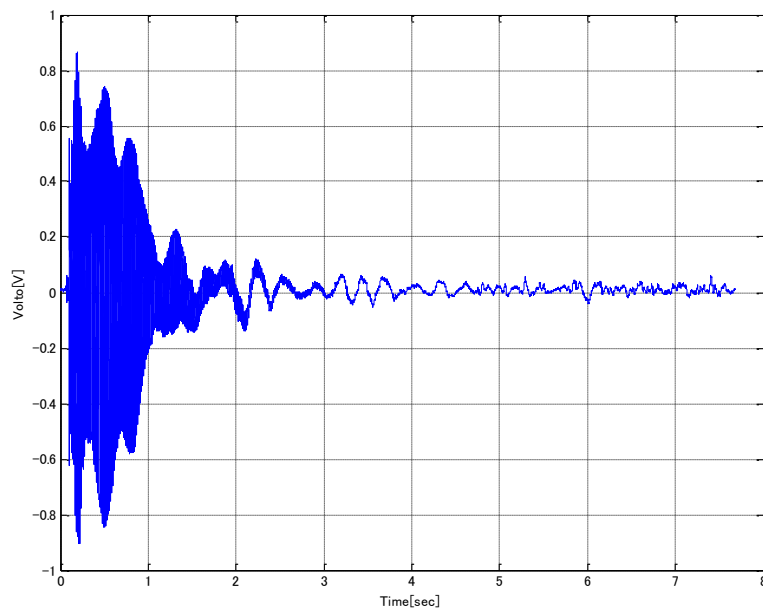


Figure 2-36 Sawari high(120%) [001]

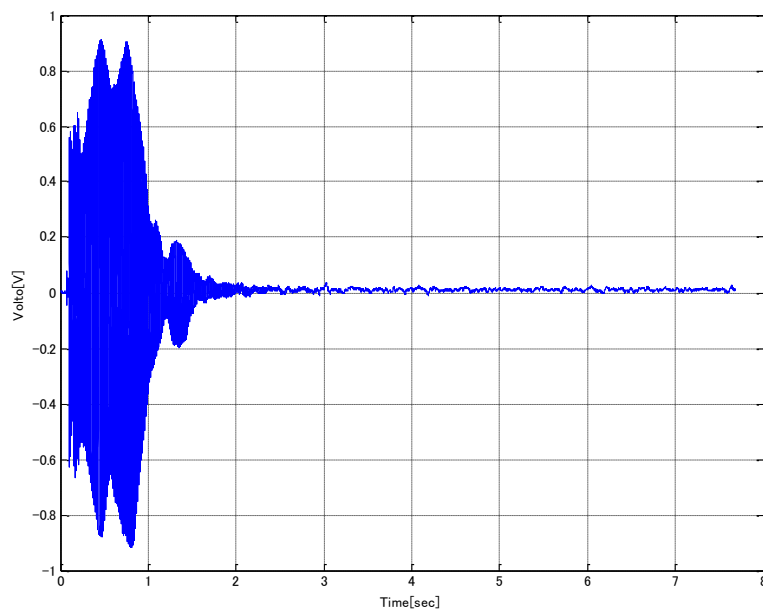


Figure 2-37 Sawari high (120%) [002]

さわり超過(120%)の結果から、さわりの付きす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。

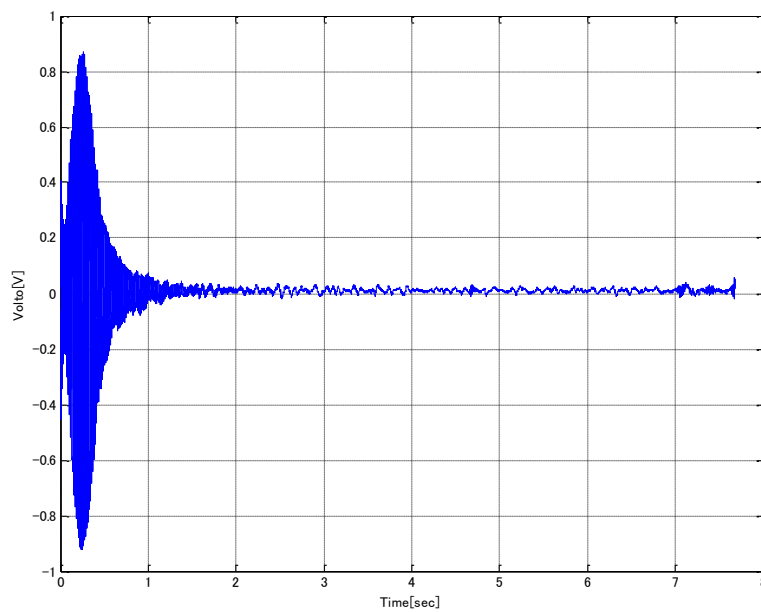


Figure 2-38 Sawari high(150%) [001]

さわり超過(150%)の結果から、さわりが付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笛である。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。

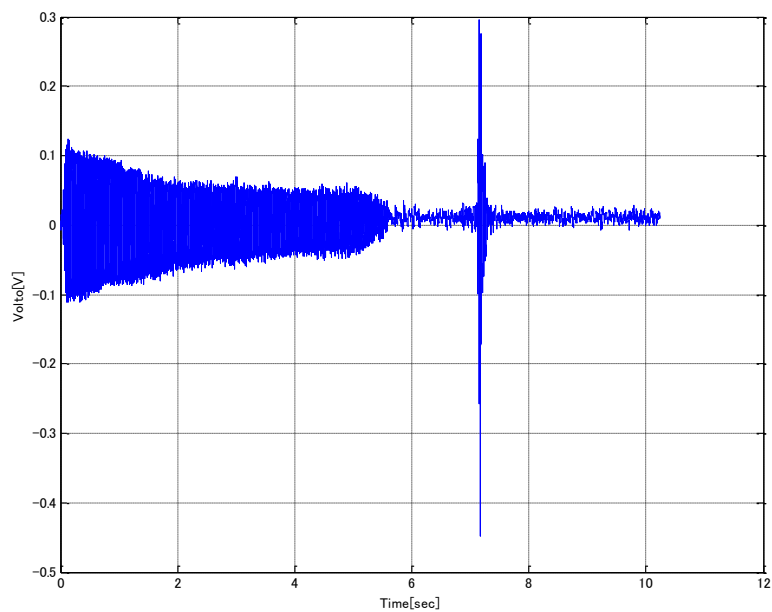


Figure 2-39 Choushi-bue [pitch pipe]

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変わる。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。

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。

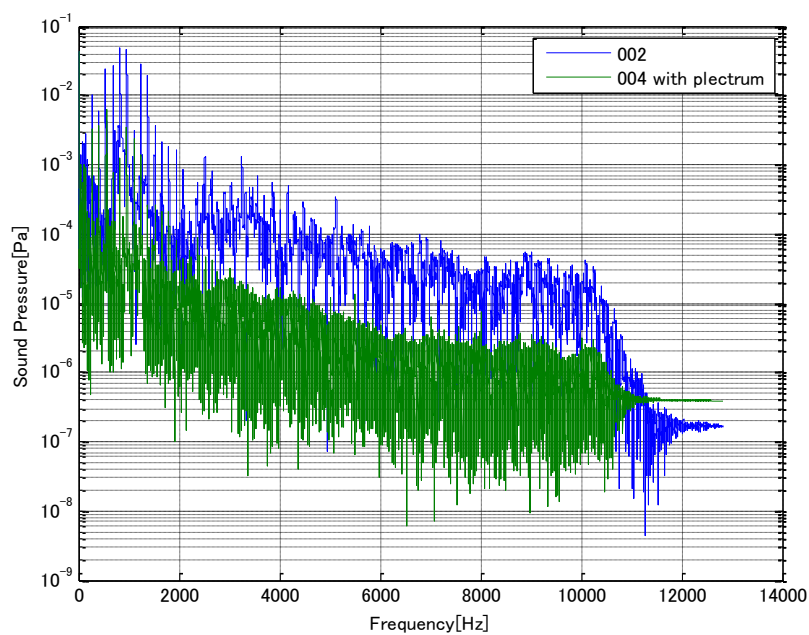


Figure 2-40 Without sawari [002,004 with plectrum]

図 2-40 はさわり無しのデータ 002 番および 004 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。002 番と 004 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 番から 003 番）の周波数解析結果を示す。

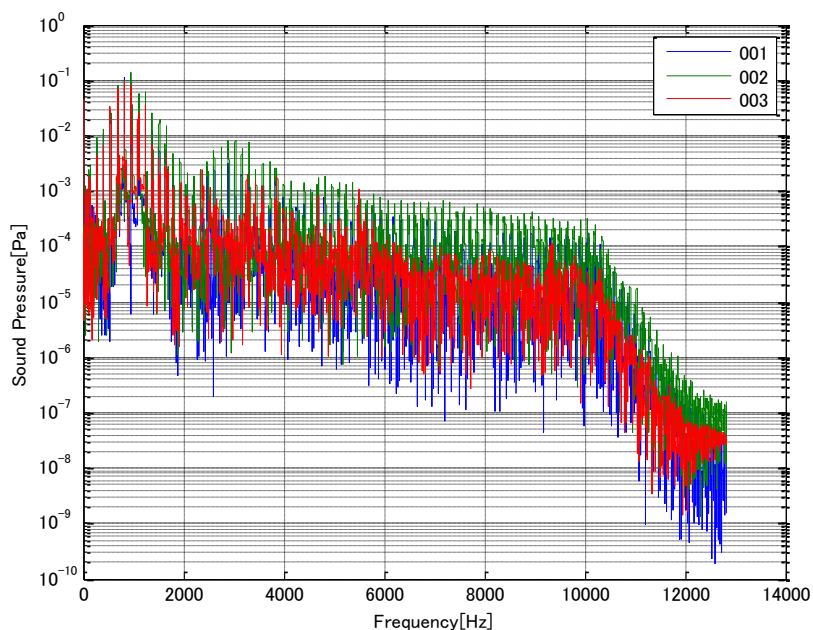


Figure 2-41 Sawari low [001~003]

時間軸波形の比較と同様、001 番と 002 番には特に大きな差は見られない。003 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るため除いた。

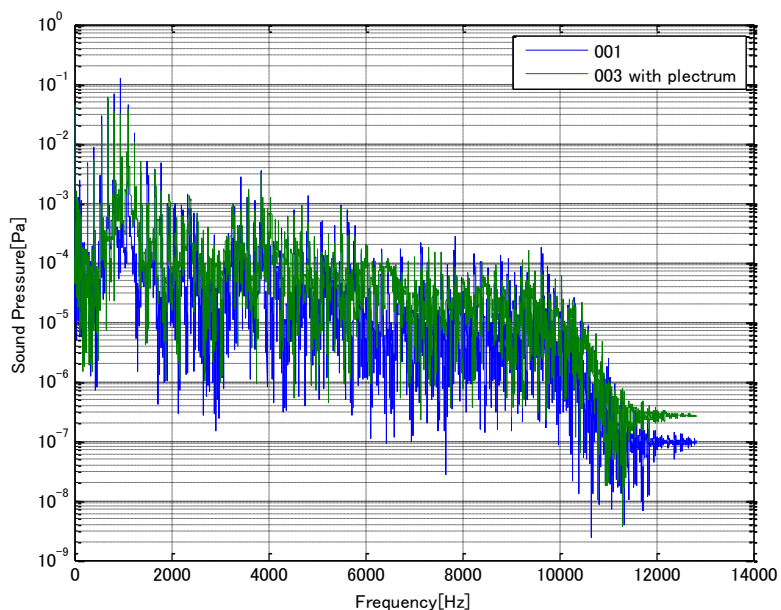


Figure 2-42 Sawari low(80) [001,003 with plectrum]

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。

次にさわりの有る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を除いた。

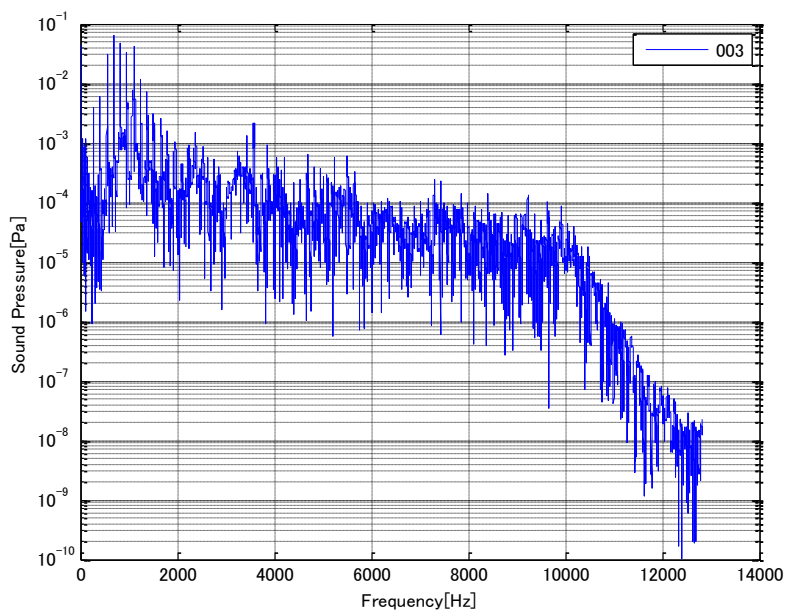


Figure 2-43 Sawari middle [003]

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。

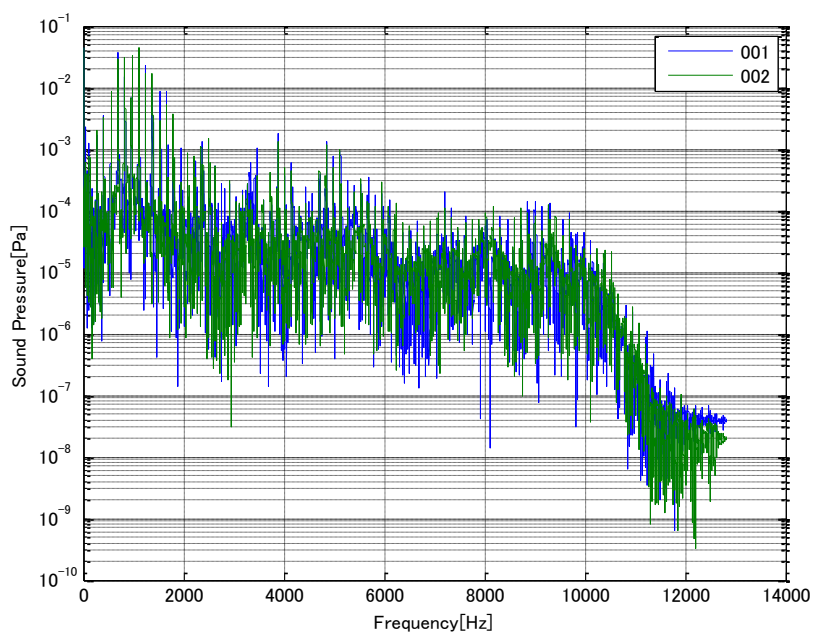


Figure 2-44 Sawari high(120) [001,002]

図 2-43 と比べ、8000Hz 以降の帯域の音圧が全体的に高めにれ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。

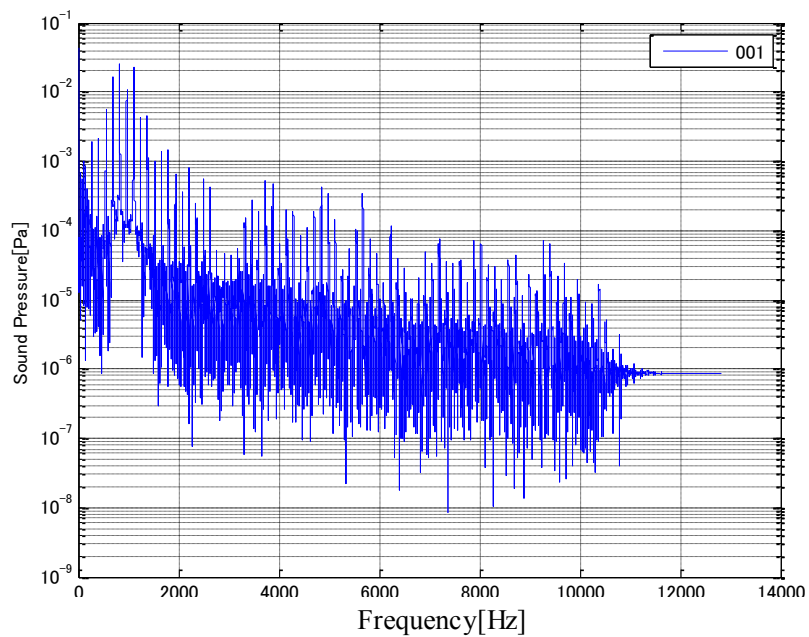


Figure 2-45 Sawari high(150) [001]

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。

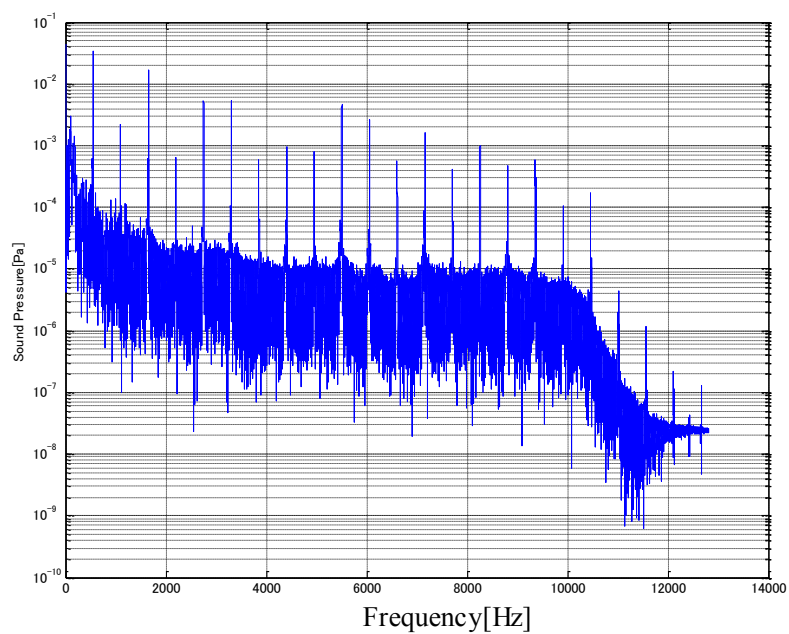


Figure 2-46 Choushi-bue [pitch pipe]

調律用の笛であるので倍音成分がきれいで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。

2.2.3.4. ギター

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。

2.2.3.4.1. 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。

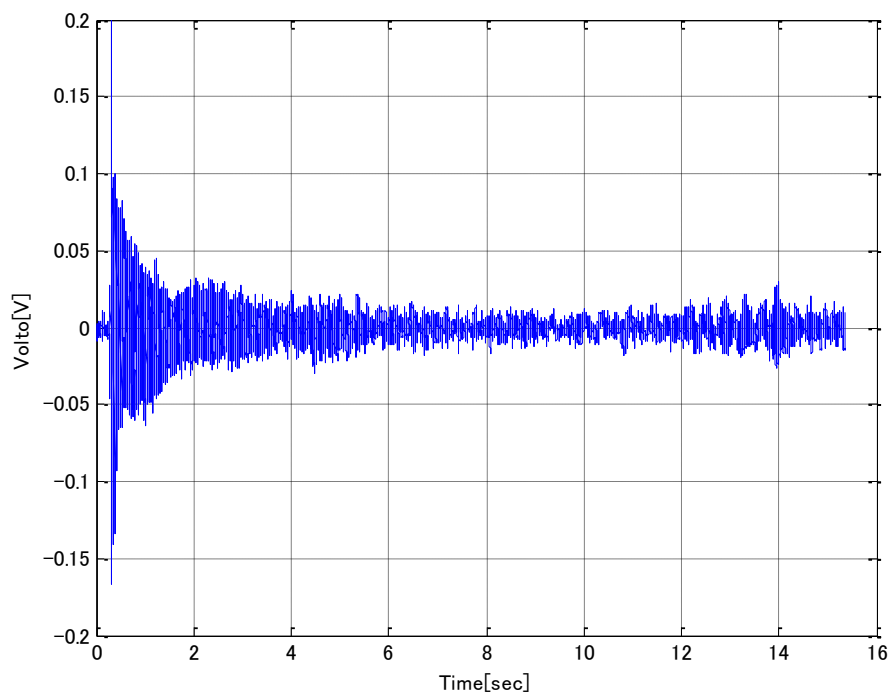


Figure 2-47 First string

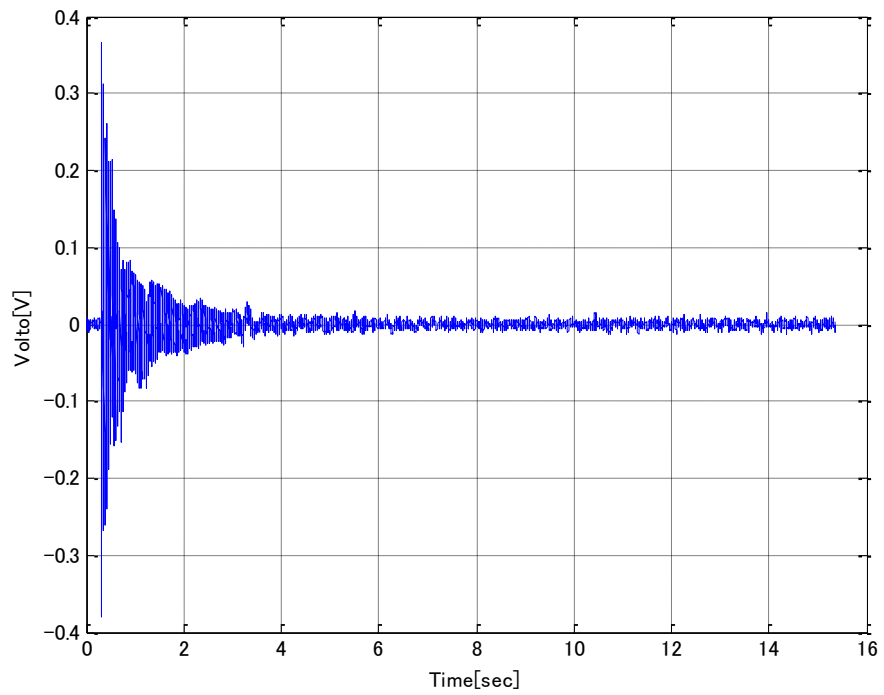


Figure 2-48 Second string

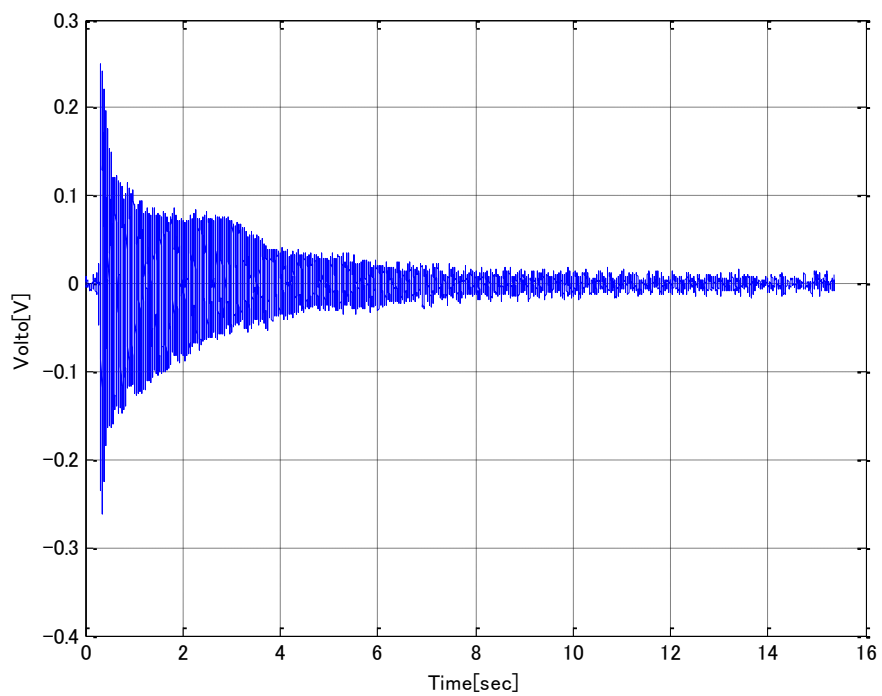


Figure 2-49 Third string

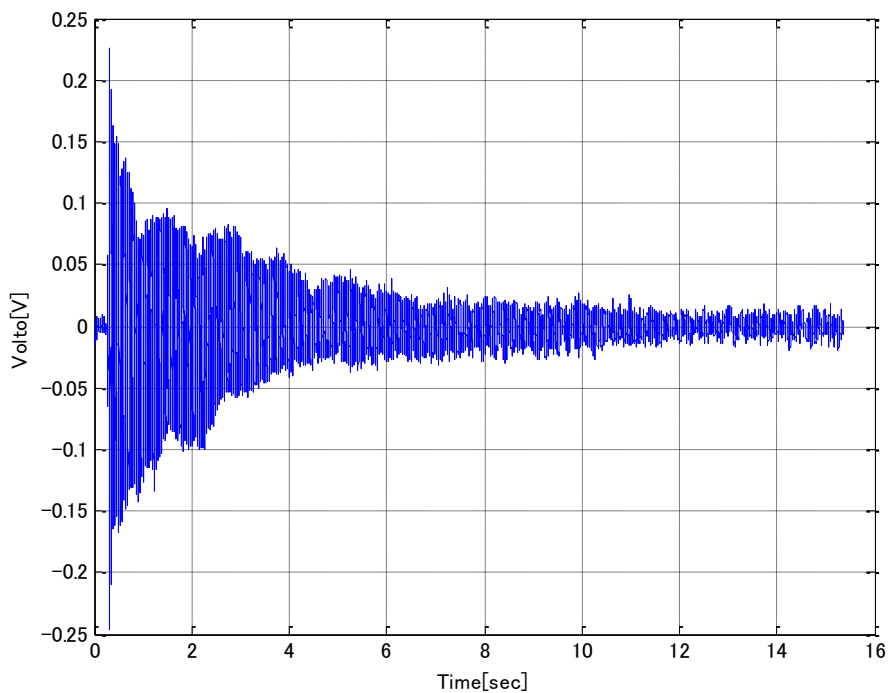


Figure 2-50 Fourth string

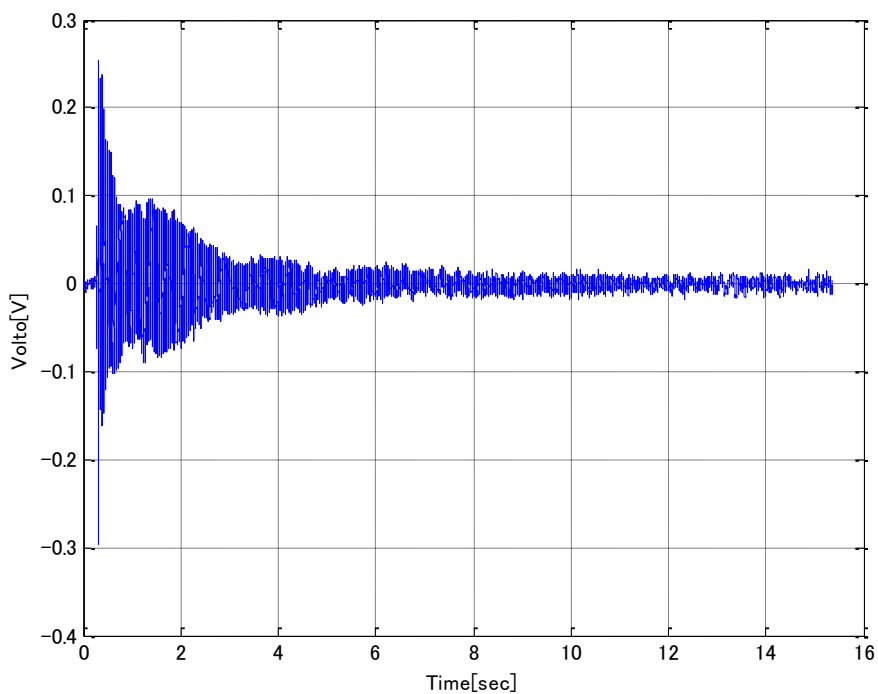


Figure 2-51 Fifth string

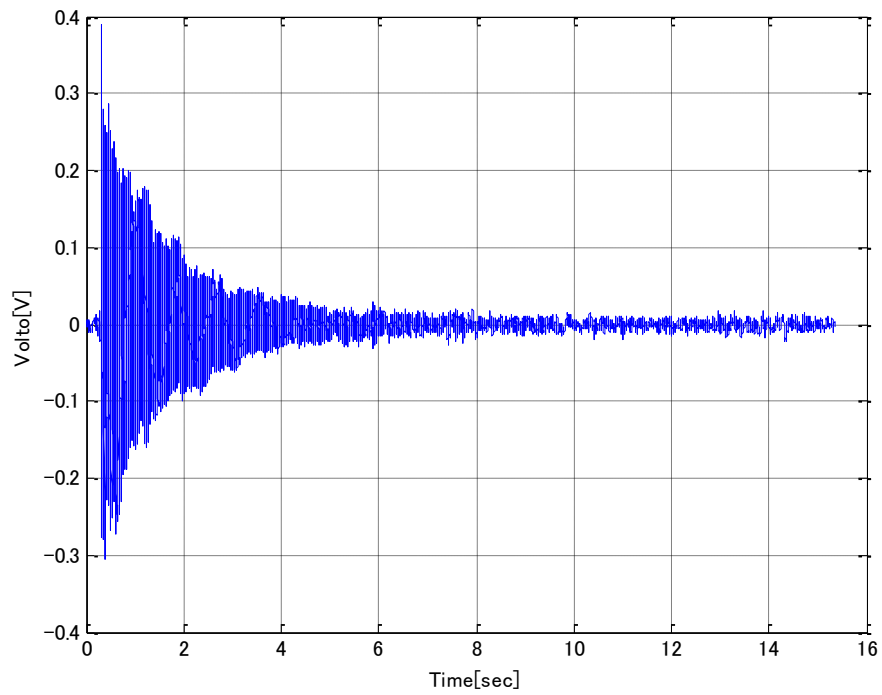


Figure 2-52 Sixth string

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。

2.2.3.4.2. 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.

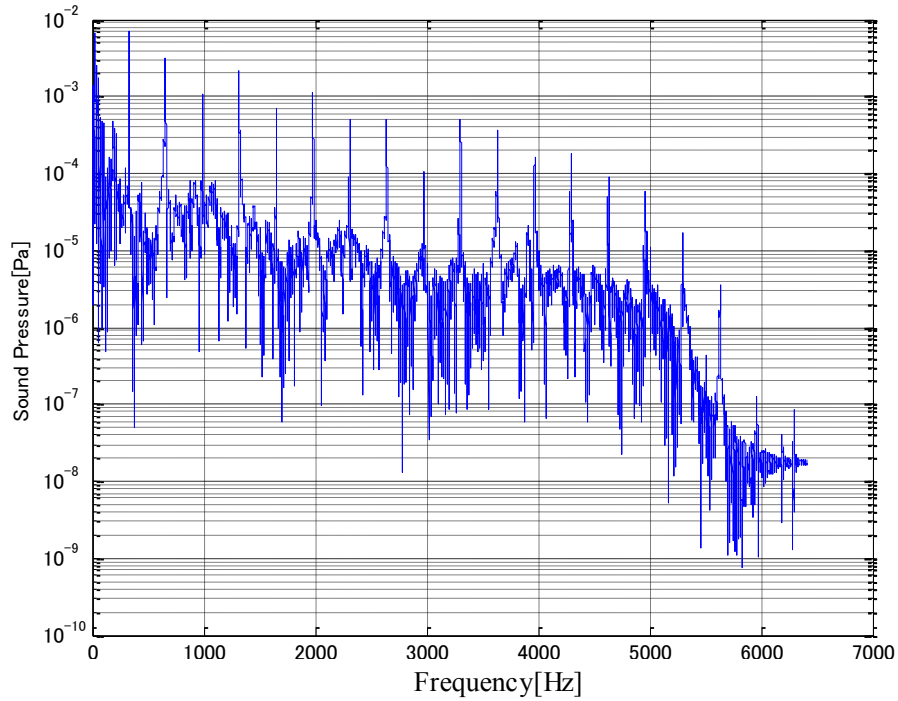


Figure 2-53 First string

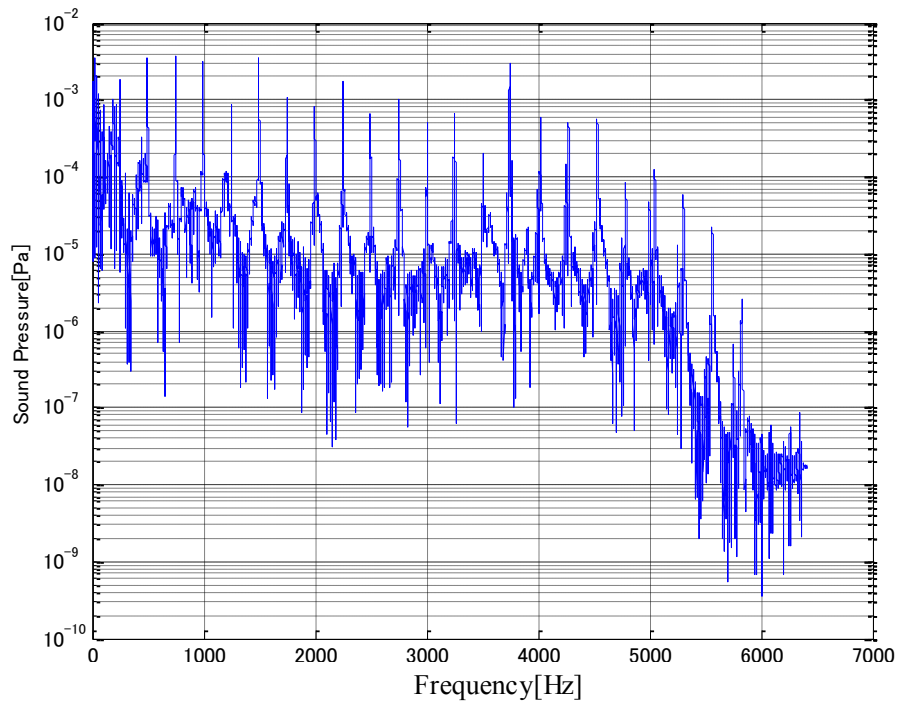


Figure 2-54 Second string

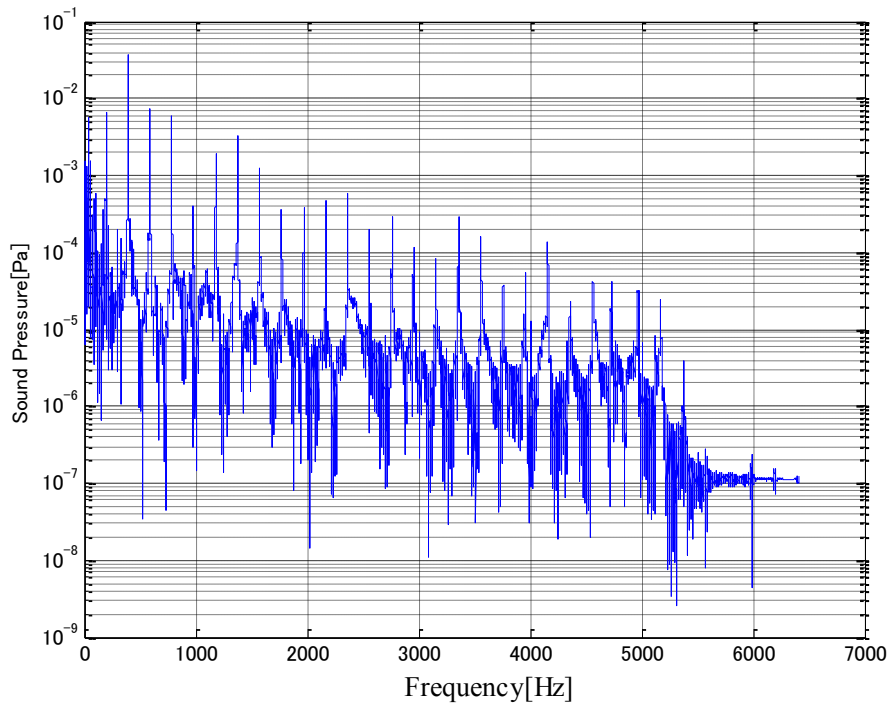


Figure 2-55 Third string

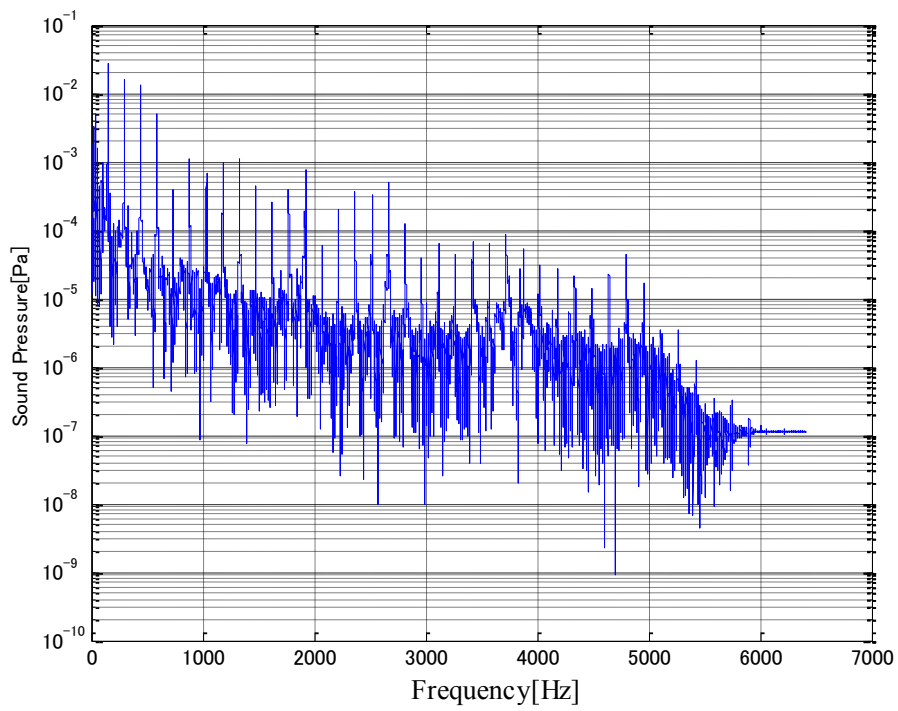


Figure 2-56 Fourth string

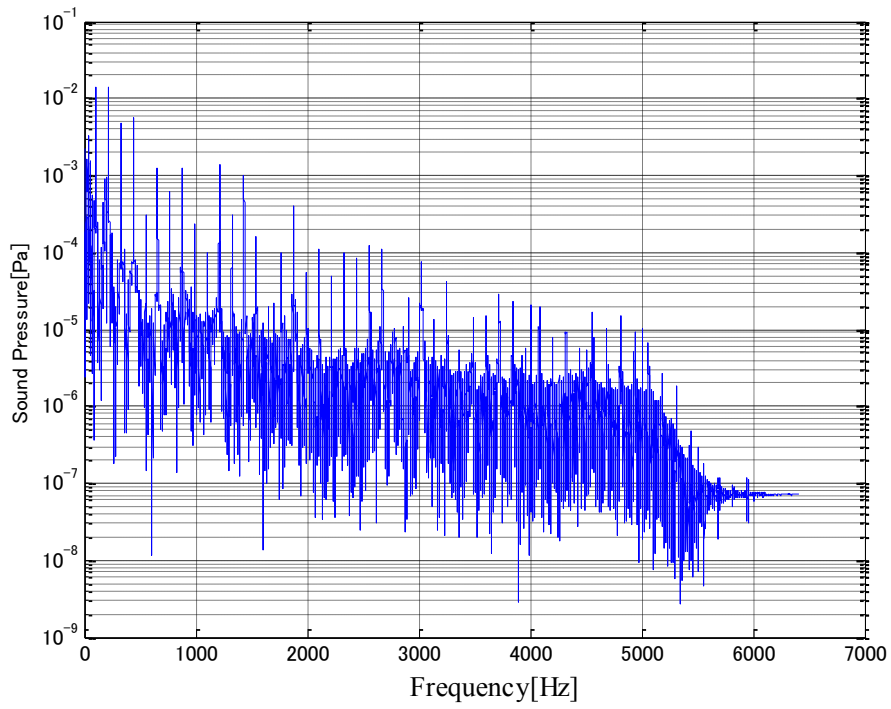


Figure 2-57 Fifth string

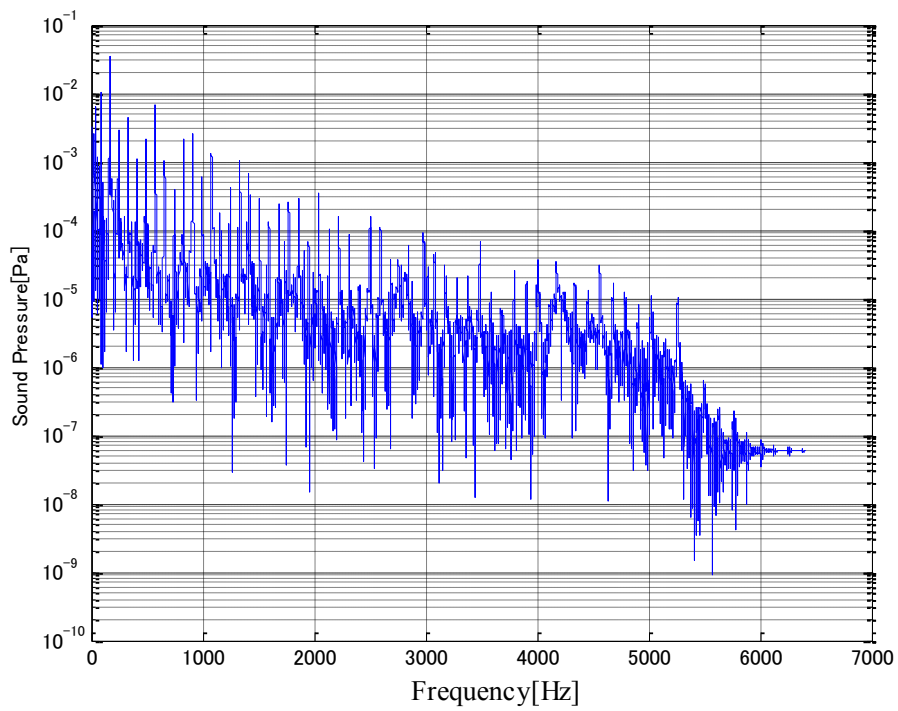


Figure 2-58 Sixth string

図 2-53 から図 2-58 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。

2.2.4. 考察

以下に楽器毎の考察をまとめる。

2.2.4.1. 三味線

時間領域

初回の実験および追加実験 1 回目の結果から、さわりの無い状態の一の糸は時間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が有る状態の一の糸は途中で音が一度大きくなり、その後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ために発生するうなりの一種と考えられる。また、二の糸と三の糸にはさわり構造はないが、うなるような現象が発生していることもわかった。この現象は「1.4 さわりについて」で述べたとおり、一の糸の共振が影響していると考えられる。

次に、追加実験 2 回目の結果からさわりの効き具合による違いも明らかになった。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することがわかった。そして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、大きなふくらみを発生するというよりも段階的に音が減衰していく形であることが新たにわかった。これは先の実験とは異なった結果である。これまでは「さわり=大きなふくらみを出す」と考えていたが、この実験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あると考えられる。

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。

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る。

2.2.4.2. バイオリン

時間領域

波形はA線, D線, G線の3本は「さわり」のようなふくらみが発生せず, 減衰していきただけである. しかしE線の結果にのみさわりのようなふくらみが発生した.

これはE線が4線の中で最も高い周波数の弦であり, 最も音がずれやすいため, うなりが発生したと考えられる.

周波数領域

波形は基本周波数のピークが高く, 周波数が高くなるにつれてピークも低くなる傾向があることがわかった.

2.2.4.3. ギター

時間領域

波形は1弦から6弦の6本すべてにおいて「さわり」のようなふくらみが発生せず, 減衰していきただけであることがわかった.

周波数領域

波形はバイオリンと同様に, 1弦から6弦の6本すべてにおいて, 基本周波数のピークが高く, 周波数が高くなるにつれてピークも低くなる傾向があることがわかった.

2.3. スペクトログラム解析

2.3.1. 目的

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い、各楽器の残響の長さなどの特徴を調べ、三味線自体の特徴やさわりの有無による特徴を得る。

2.3.2. 実験方法

2.2 項で収録した各楽器の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。なお窓関数にカイザーを利用した。

2.3.3. 解析結果

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。

2.3.3.1. 三味線

本調子一の糸の結果を以下に示す。なお、解析周波数 1000Hz、サンプリング点数 8192 点である。

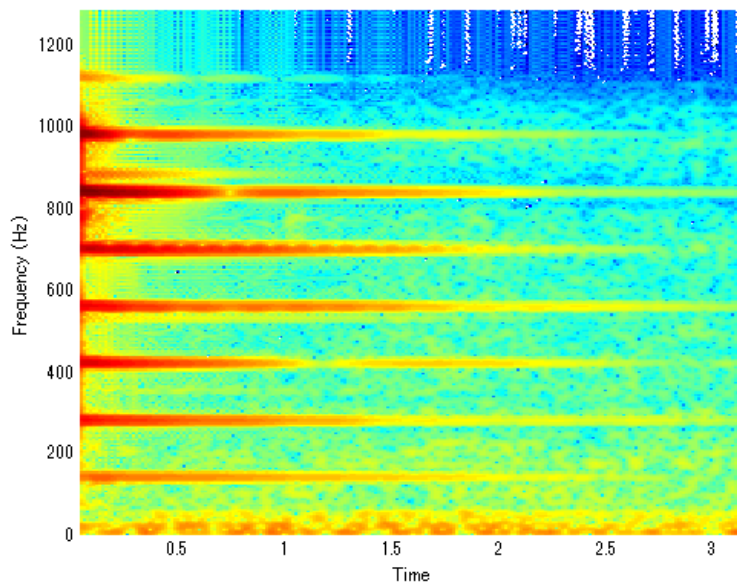


Figure 2-59 Ichi-no-ito (first string) [without sawari]

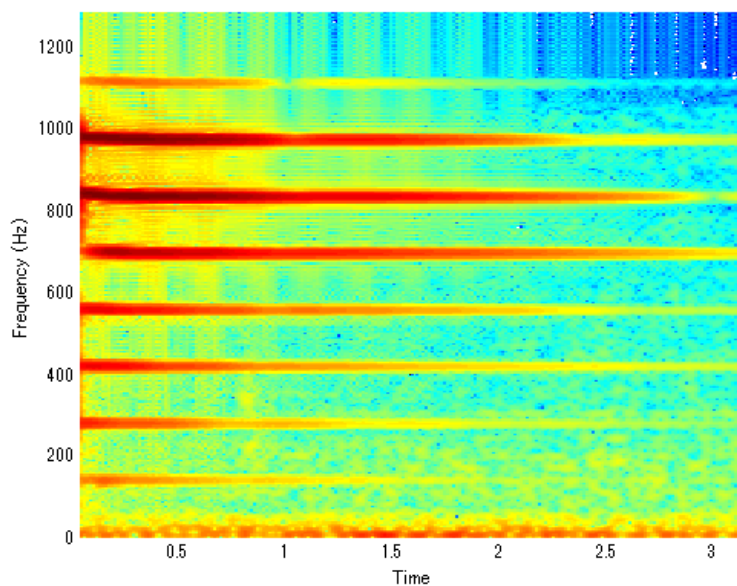


Figure 2-60 Ichi-no-ito (first string) [with sawari]

一の糸の結果の比較より、基音の残響はさわりが無いほうが長いことがわかる。それに対し 1000Hz 前後の音域ではさわりが有るほうが長くなっていることがわかる。

次に一の糸にさわりが有る状態の二の糸、三の糸の結果を示す。なお、解析周波数は 5000Hz、サンプリング点数は 32768 点である。

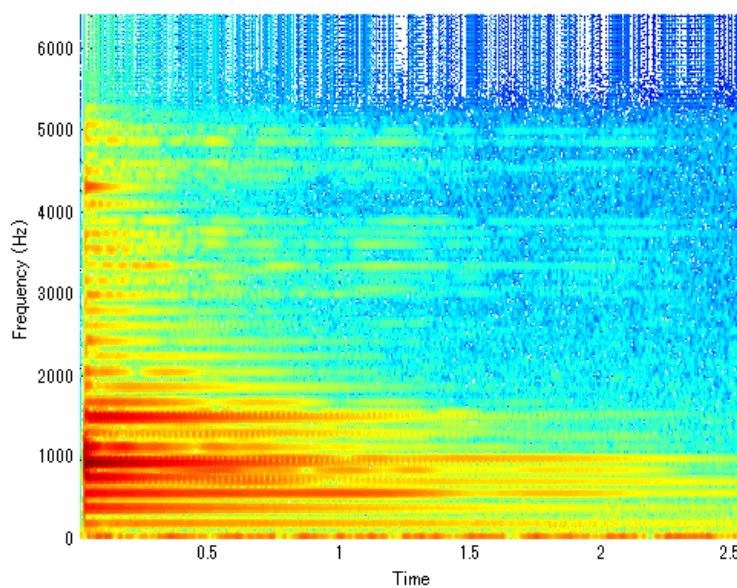


Figure 2-61 Ni-no-ito (second string) [with sawari]

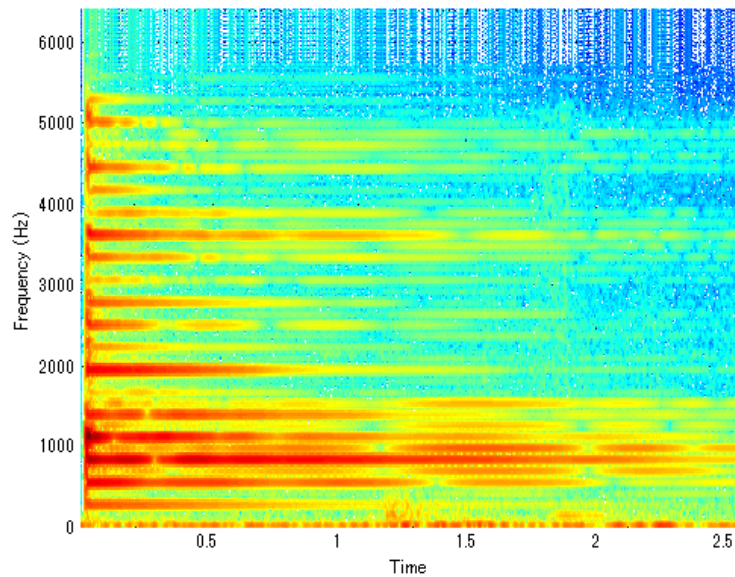


Figure 2-62 San-no-ito (third string) [with sawari]

図 2-61 と図 2-62 から一の糸にさわりが付いた状態の二の糸、三の糸の特徴がわかる。まず、どちらの結果にも言えることが基音の音圧が低く、減衰が早いことである。また、複数のピークで時間経過とともに単に赤から青へ色が変わっていくのではなく、その減衰の過程で何度か赤に戻っていることがわかる。そのほかにも 3000Hz 以降の残響が長いこともわかる。ただし、現時点ではさわりの無い状態のデータがないので、これがさわりによる影響とは断定できない。

2.3.3.2. バイオリン

次にバイオリンの解析結果を以下に示す。なお、解析周波数は 5000Hz、サンプリング点数は 32768 点である。

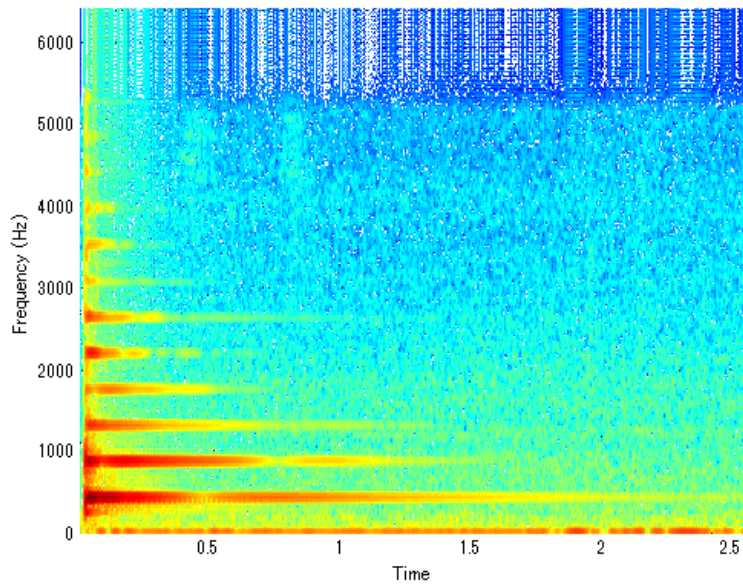


Figure 2-63 String in A

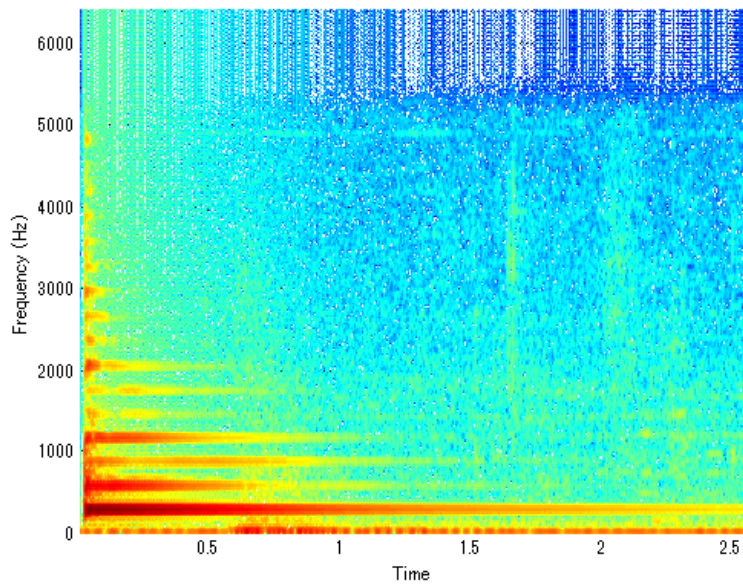


Figure 2-64 String in D

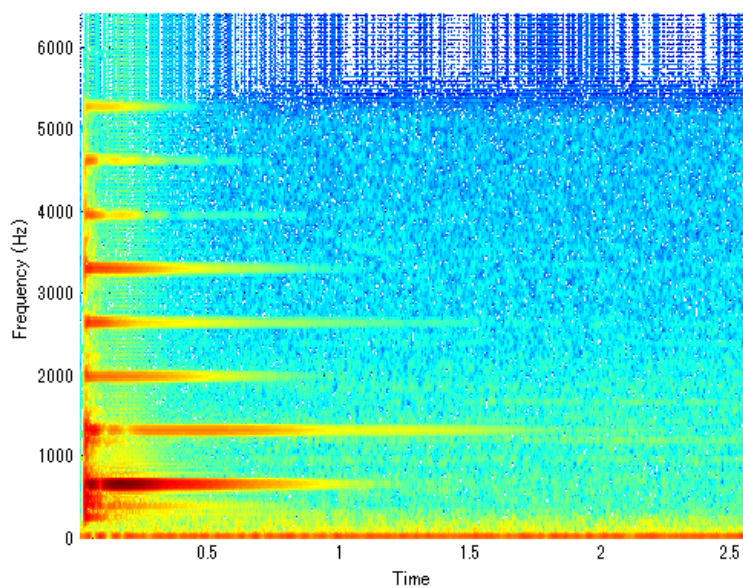


Figure 2-65 String in E

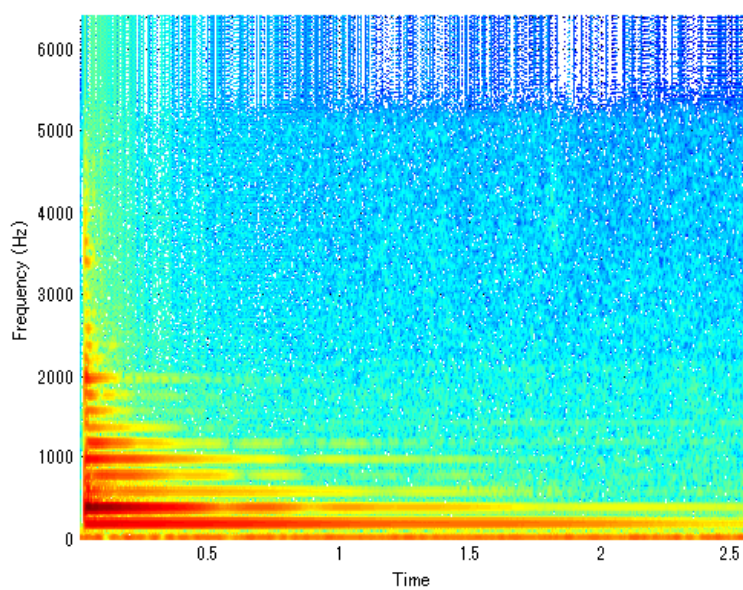


Figure 2-66 String in G

図 2-63 から図 2-66 の結果より、バイオリンではE線を除く3本の弦において基本周波数（基音）のピークの残響が長く、周波数の上昇につれて残響が短くなる傾向がある事がわかる。

2.3.3.3. 三味線（追加実験）

追加実験のスペクトログラム解析の結果を以下に示す。

2.3.3.3.1. 追加実験一回目

三味線の追加実験一回目の結果を以下に示す。なお、解析周波数は5000Hz、サンプリング点数は32768点である。

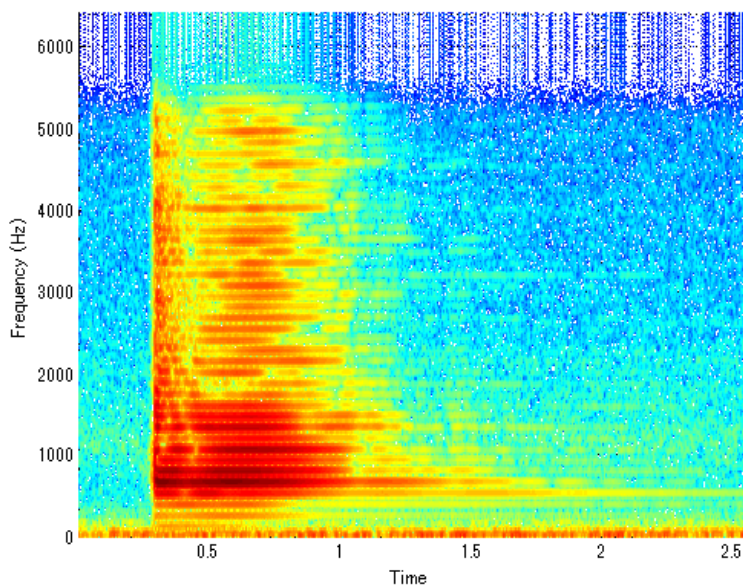


Figure 2-67 Iti-no-ito (first string) [with sawari]

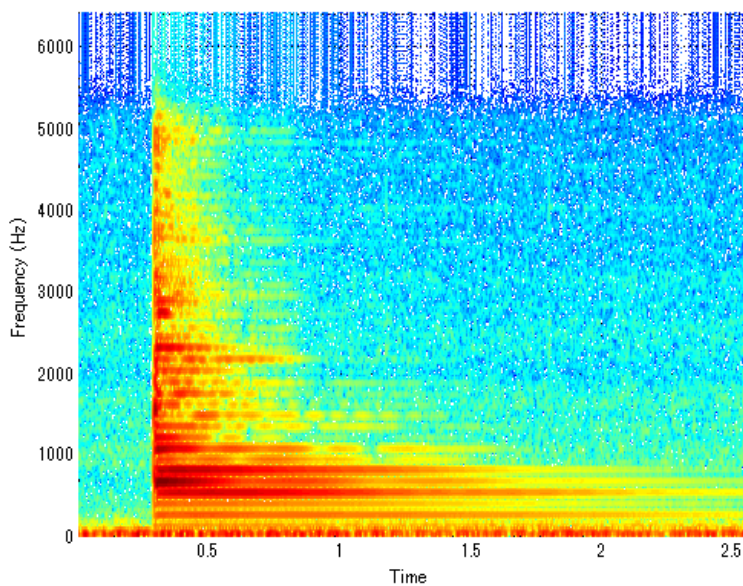


Figure 2-68 Iti-no-ito (first string) [without sawari]

図 2-67 および図 2-68 は一の糸さわり有り，無しの結果である．これらの図から初めの実験のデータでは確認できなかった 1000Hz 以降の特性も確認することができる．

特に 3000Hz 以降の帯域で，さわりの有無による差が顕著である．さわりが有る場合，これらの帯域の残響音はすぐに減衰せず，ある程度持続していることがわかった．それに対し，さわりがない場合では，音がすぐに減衰していることがわかる．

次に本調子の二の糸，三の糸の解析結果を示す．

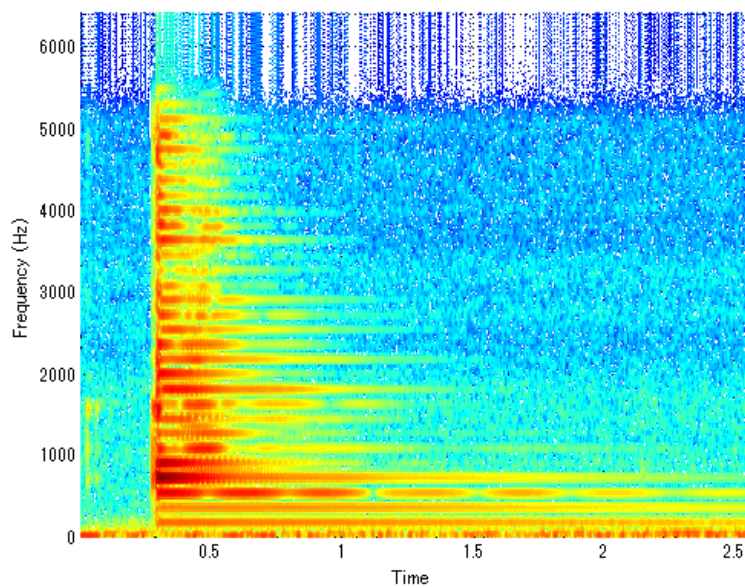


Figure 2-69 Ni-no-ito (second string) [with sawari]

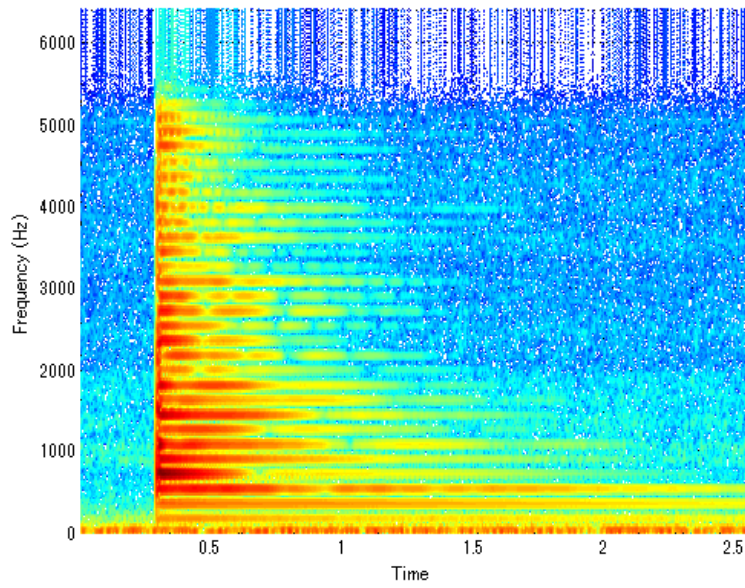


Figure 2-70 Ni-no-ito (second string) [without sawari]

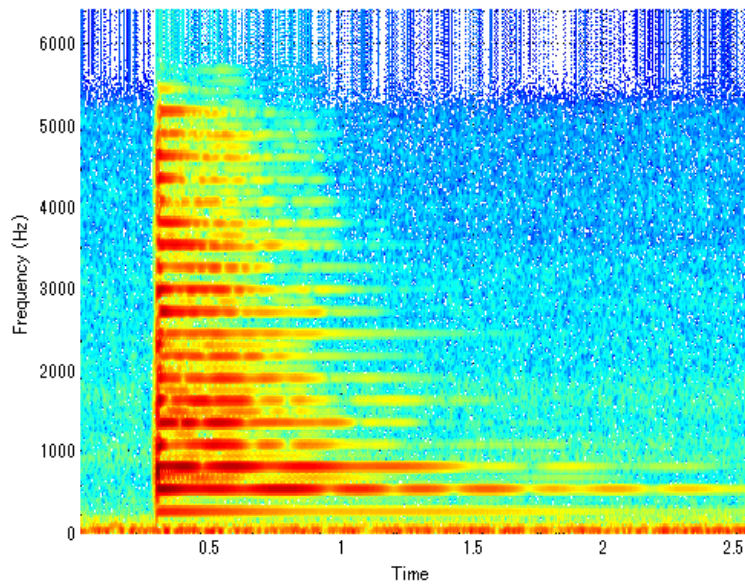


Figure 2-71 San-no-it (third string) [with sawari]

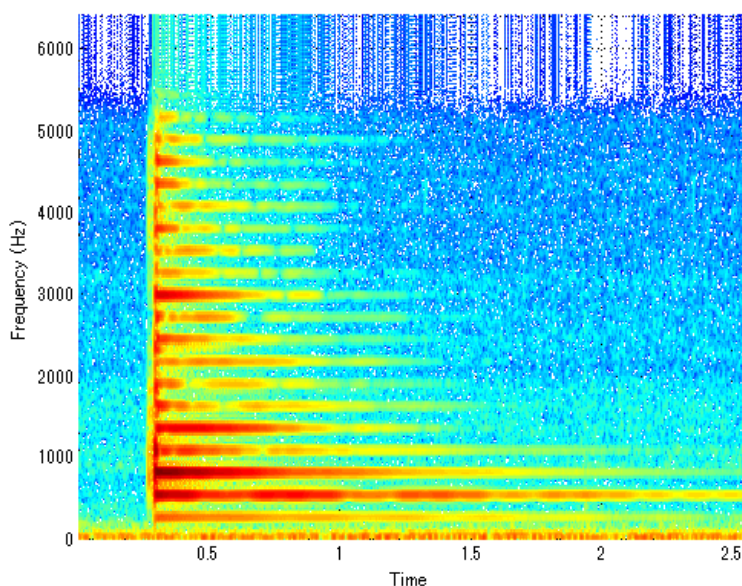


Figure 2-72 San-no-it (third string) [without sawari]

まず、図 2-69 と図 2-70 の比較を行う。これらは二の糸のさわり有り無しの結果である。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ちから判断するに、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 2-71 と図 2-72 の比較を行う。これらは三の糸のさわり有り無しの結果である。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。

2.3.3.3.2. 追加実験二回目

美邦堂三味線店にて行った追加実験二回目の結果を以下に示す。本実験の調律は喜多川派家元である喜多川保延氏が行った。録音は調子笛を除き、本調子一の糸である。なお、解析周波数は 10000Hz, サンプルング点数は 32768 点である。

まず、さわり無しの結果 (001~004) を示す。

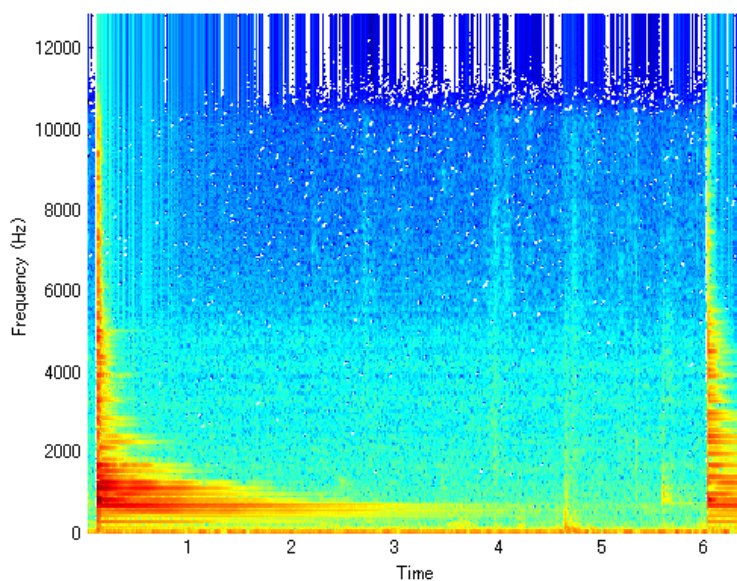


Figure 2-73 Without sawari [001]

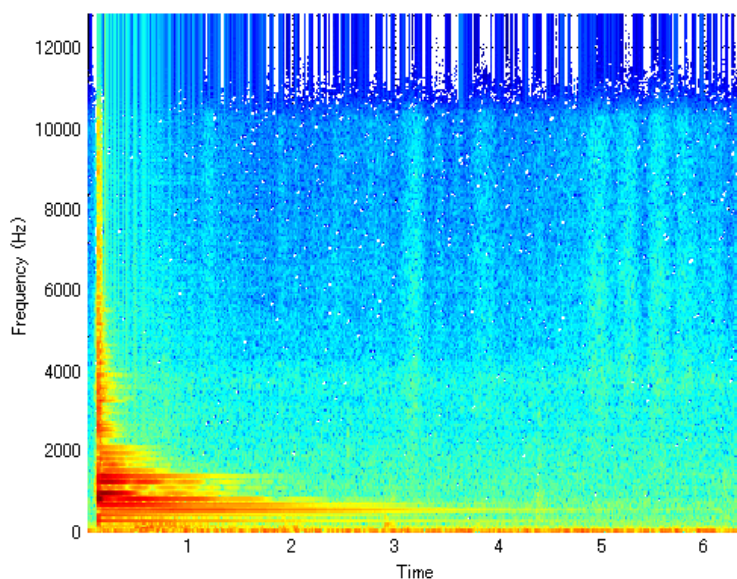


Figure 2-74 Without sawari [002]

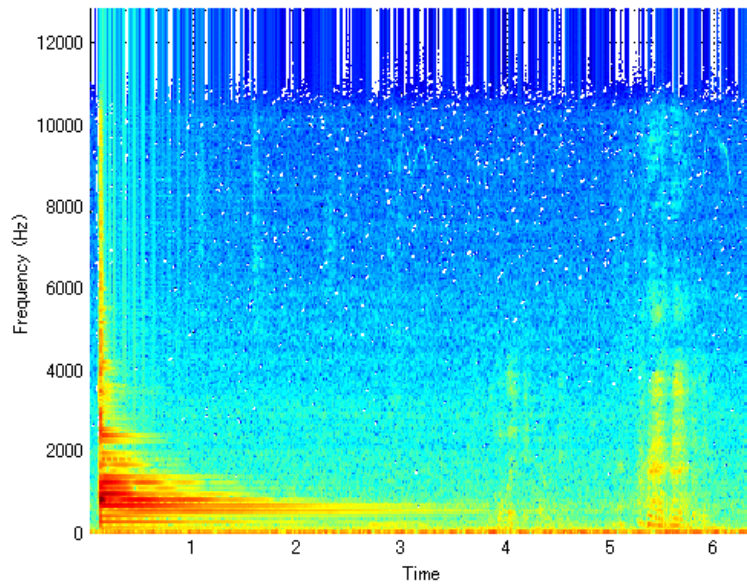


Figure 2-75 Without sawari [003]

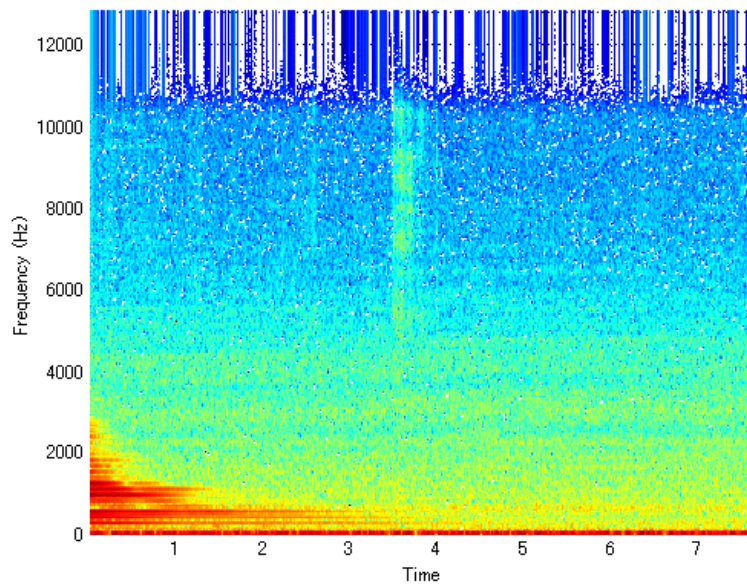


Figure 2-76 Without sawari [004 with plectrum]

さわり無しの結果(001 から 004)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.

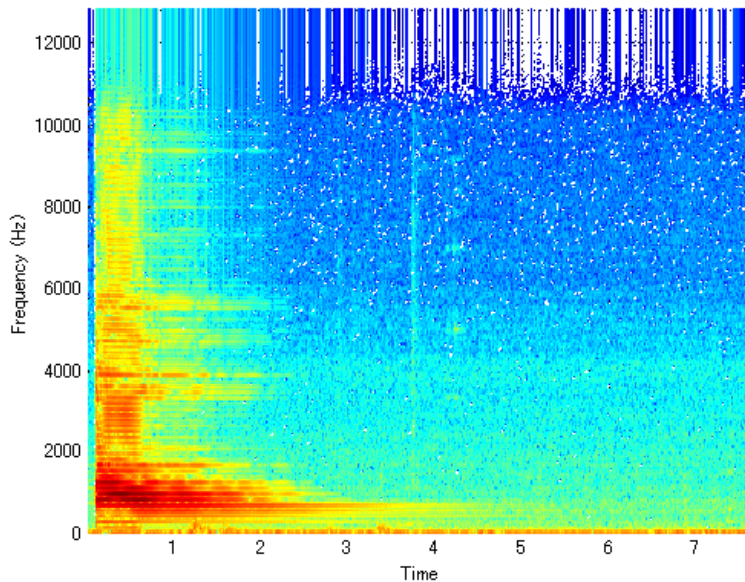


Figure 2-77 Sawari low [001]

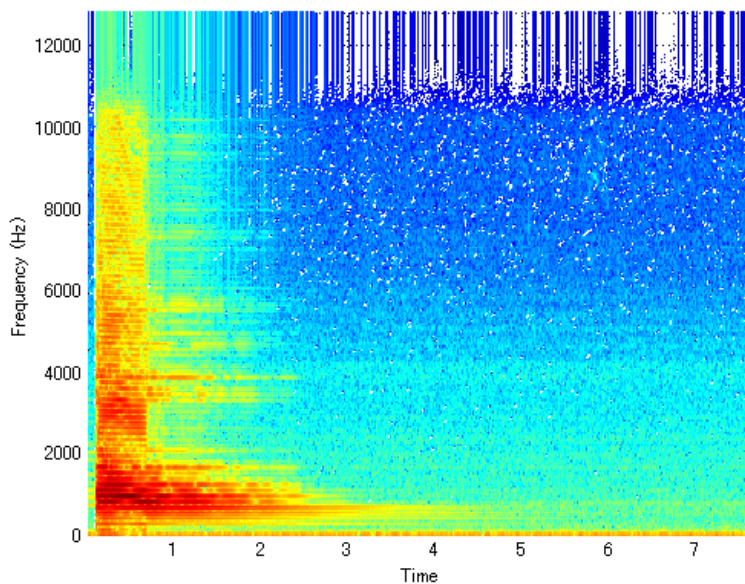


Figure 2-78 Sawari low [002]

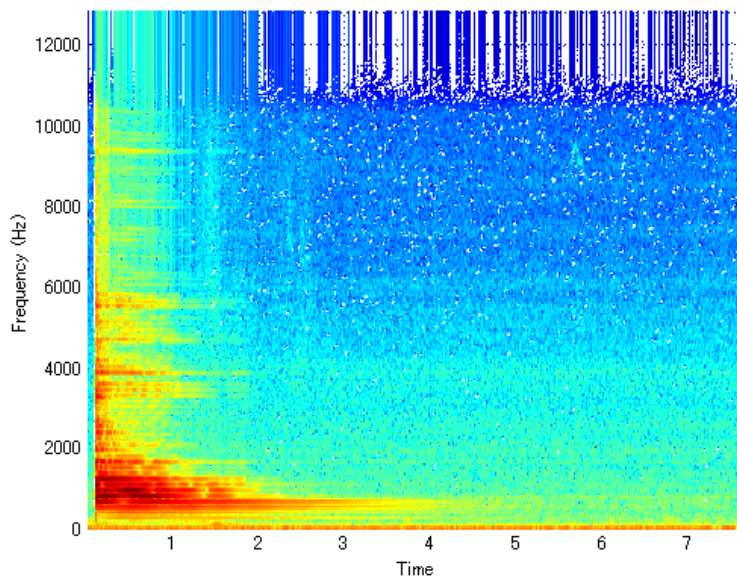


Figure 2-79 Sawari low [003]

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。

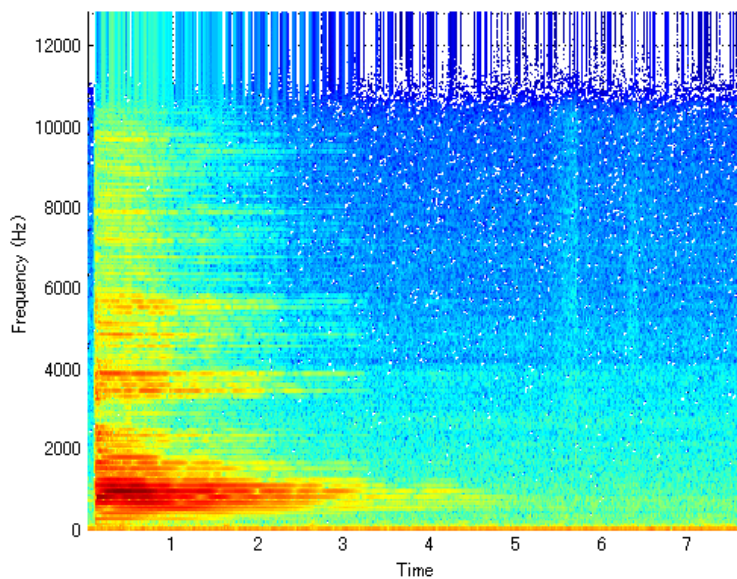


Figure 2-80 Sawari low (80%) [001]

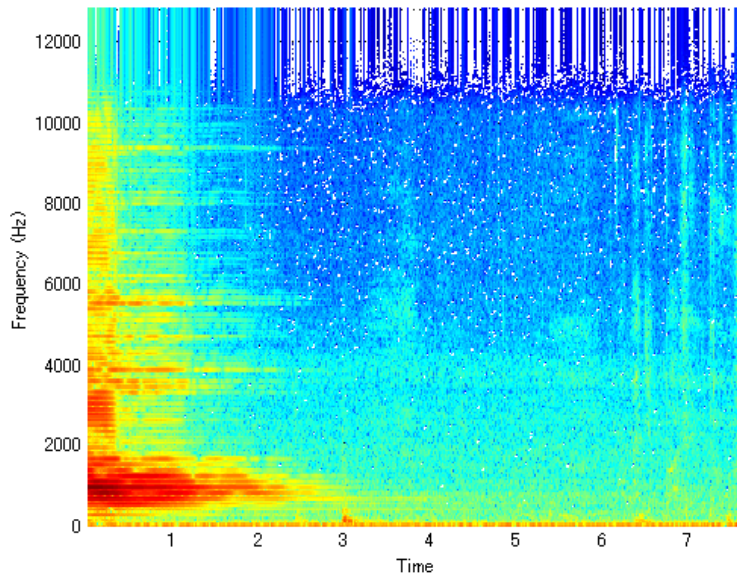


Figure 2-81 Sawari low (80%) [002]

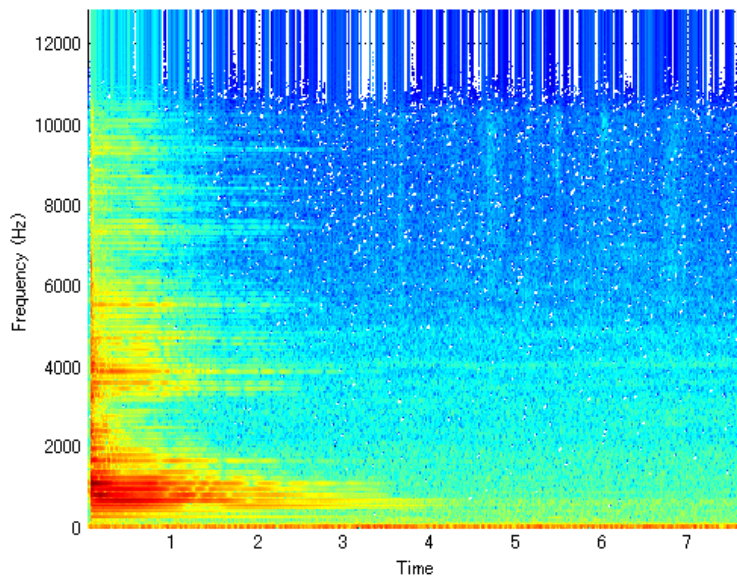


Figure 2-82 Sawari low (80%) [003 with plectrum]

さわりの不足(80%)の状態の結果から、さわりの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、さわりの不足と同様に 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.

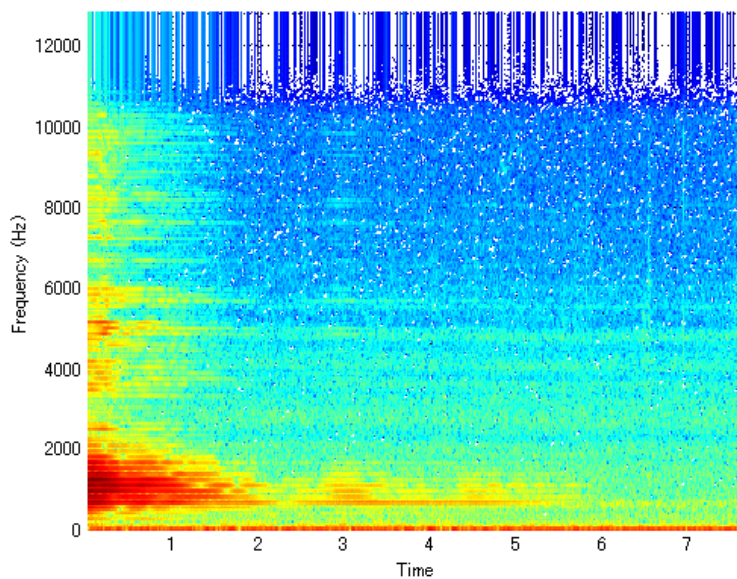


Figure 2-83 Sawari middle [001]

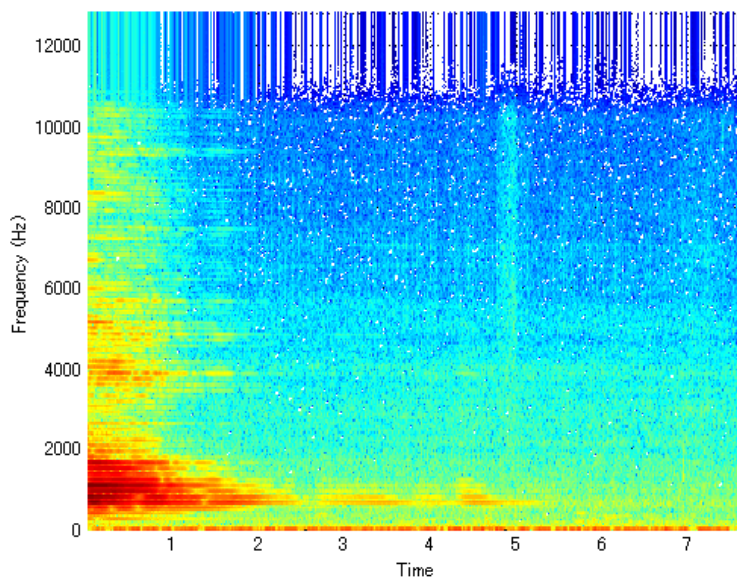


Figure 2-84 Sawari middle [002]

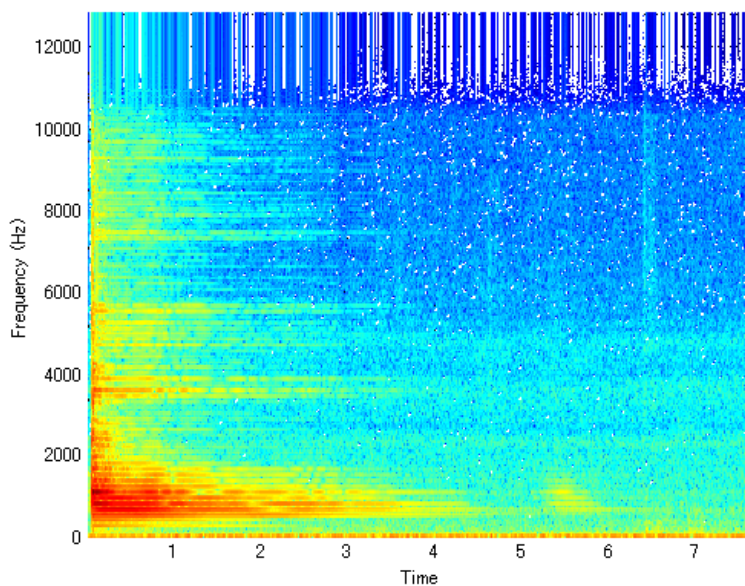


Figure 2-85 Sawari middle [003]

さわりの結果から、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。

つぎにさわりの超過（120%）の結果を示す。

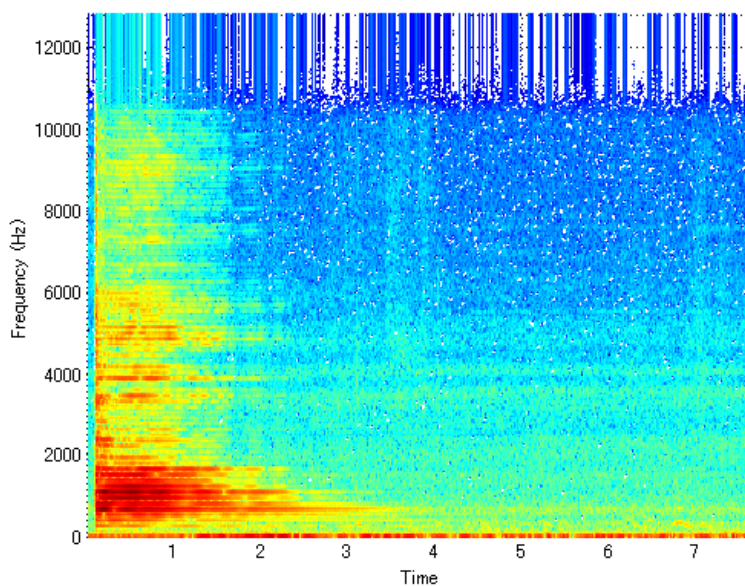


Figure 2-86 Sawari high (120%) [001]

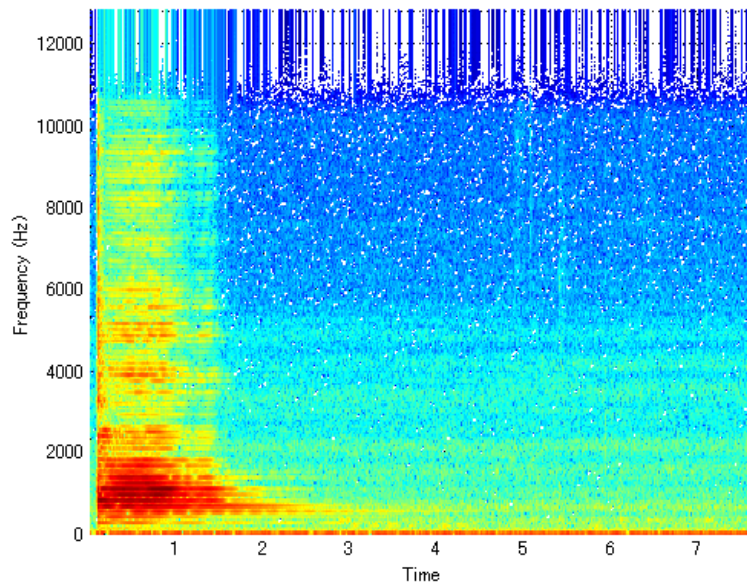


Figure 2-87 Sawari high (120%) [002]

さわり超過（120%）の結果より，さわりが強かついた場合，1000Hz 付近の残響が短くなることわかる．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．

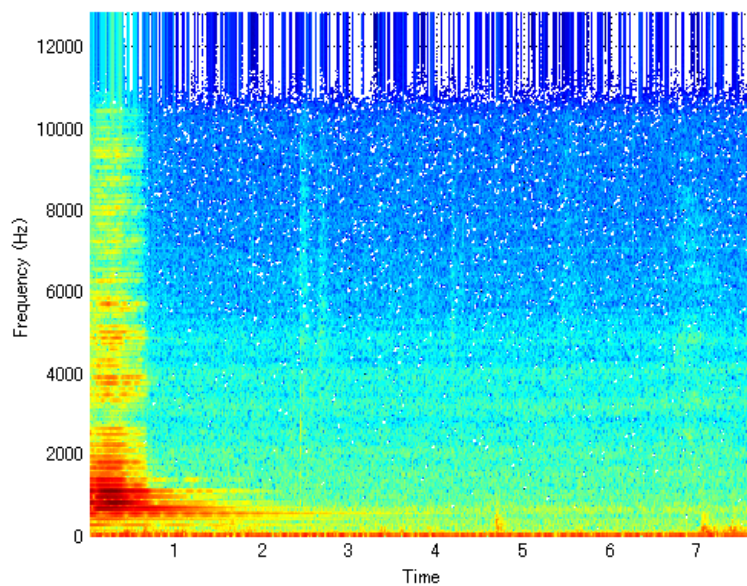


Figure 2-88 Sawari high (150%) [001]

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。

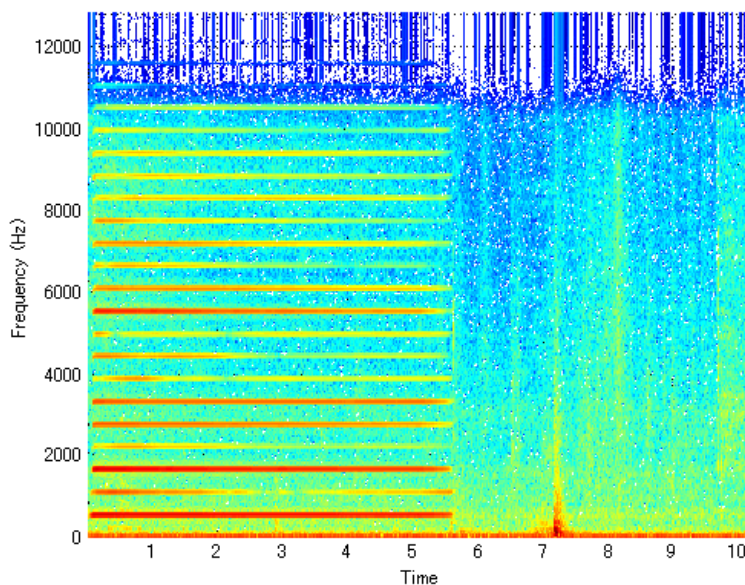


Figure 2-89 Choushi-bue [pitch pipe]

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。

2.3.3.4. ギター

ギターの解析結果を図 2-90 から図 2-95 に示す. 解析周波数は 5000Hz, サンプルング点数は 196608 点である.

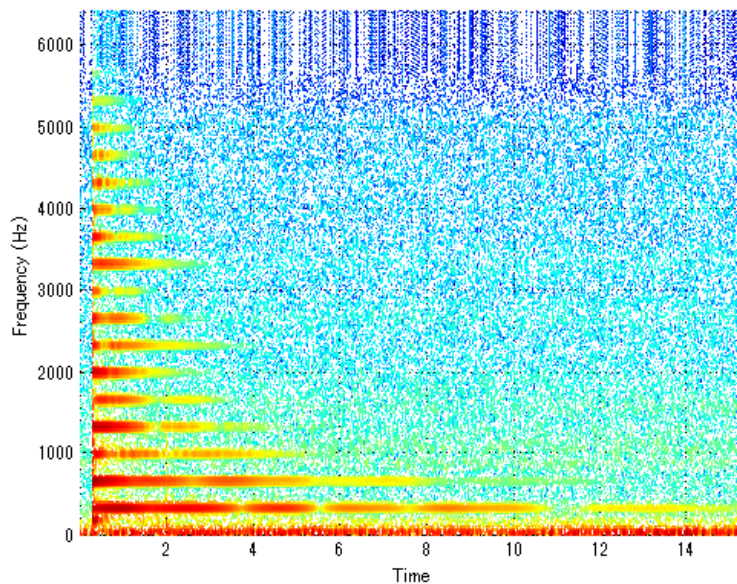


Figure 2-90 First string

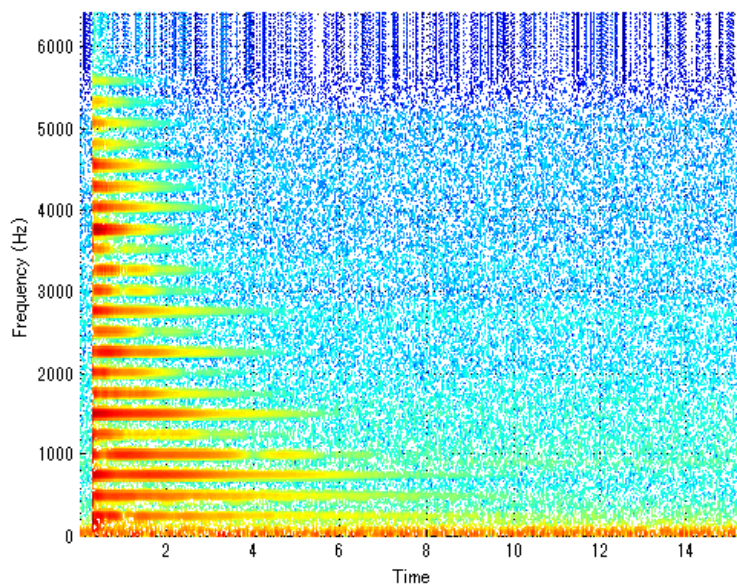


Figure 2-91 Second string

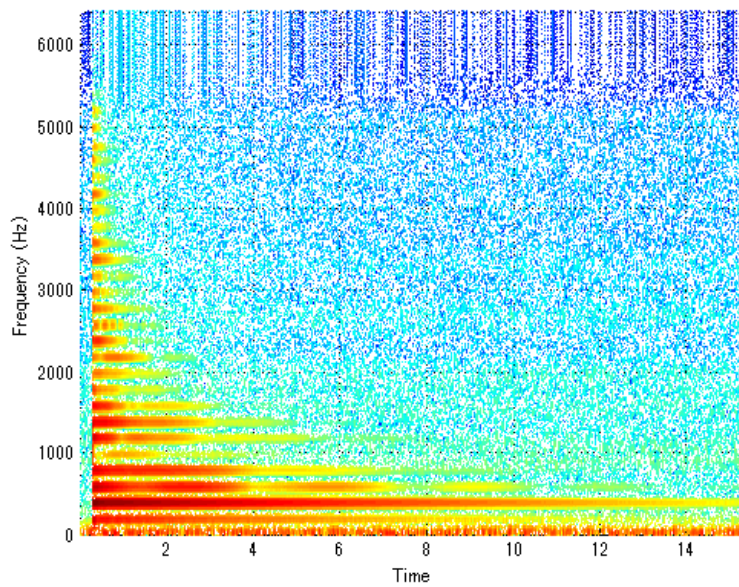


Figure 2-92 Third string

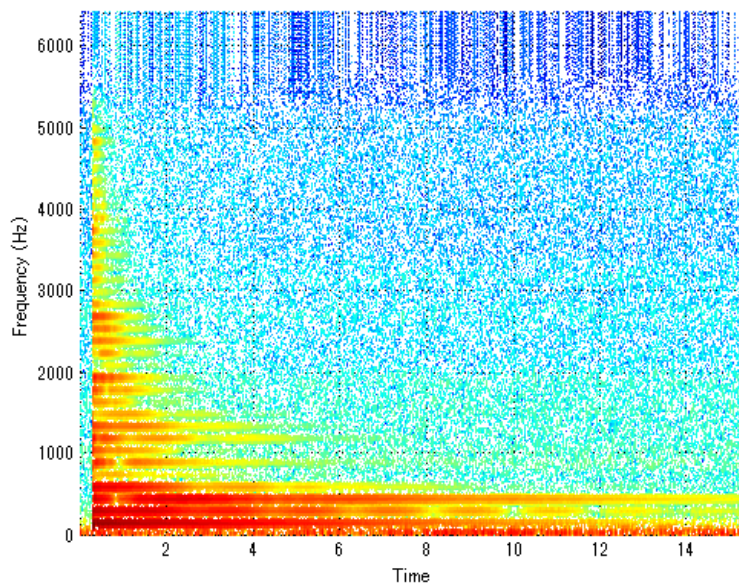


Figure 2-93 Fourth string

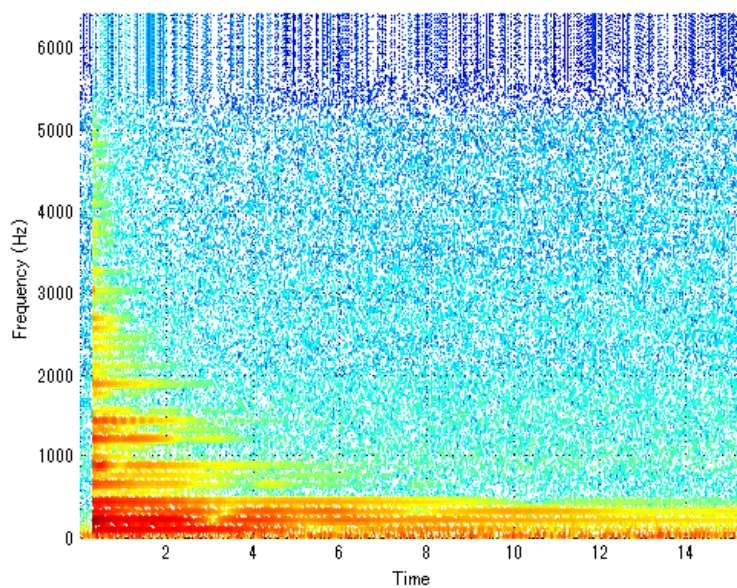


Figure 2-94 Fifth string

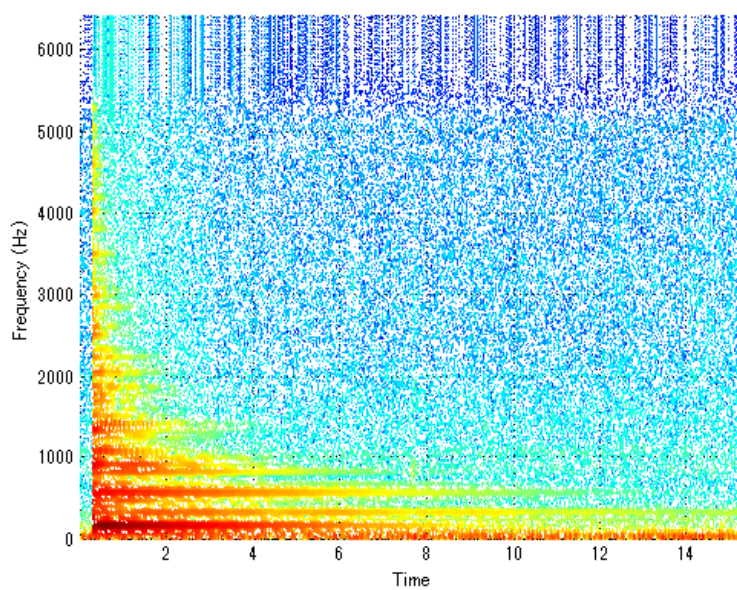


Figure 2-95 Sixth string

図 2-90 から図 2-95 までの結果より、ギターもバイオリンと同様に基本周波数およびその付近のピークの残響が著しく長く、周波数の上昇につれて残響が短くなる傾向がある事がわかった。

2.3.4. 考察

三味線

各弦の結果から 500～1500Hz のピークの残響が長いことがわかった。これはさわりの有無にかかわらず発生しており、時間・周波数解析結果と同様、三味線の基本的な特性であると考えられる。

次にさわりの有無による比較の考察を一の糸から行う。一の糸ではさわりの有無による違いとして、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、さわりの有無による差が顕著であることが追加実験によってわかった。さわりが有る場合、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。それに対し、さわりがない場合では音がすぐに減衰している。

次に二の糸についての考察を行う。二の糸では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が得られた。これは今までの結果とは逆である。この原因はさわり有りの基本周波数付近のピークにうなりが強く出ていることから、さわりが付きすぎているためと考えられる。また、残響が短くなっている事からもそう考えられる。この理由に関してはさわりの効き具合による比較の項で述べる。

最後に三の糸についての考察を行う。三の糸では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った。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、二の糸同様、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。

続いて、さわりの効き具合による比較の考察を行う。なお、さわり無しの結果は他の実験と同様であったので割愛する。

まず、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 付近の音のみが強く出る傾向があることがわかった。

それに比べ、さわり不足(80%)の状態では残響が長くなることがわかった。ただし、さわり不足の状態と同様に 4000Hz 付近と 6000Hz 付近のみが強く出る傾向があった。

さらにさわりをつけた「さわり有り」の状態では、先ほどまでの結果に比べ、4000、6000Hz 以外の帯域の残響も長くなっていた。そして 1000Hz 前後の帯域の残響も長くなっていることがわかった。

そしてさわり超過 (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った。また、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。

さらにさわりをつけたさわり超過(150%)の状態では、他の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。

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。

バイオリン

E線を除く3本の弦は基本周波数(基音)のピークの残響が長く、周波数の上昇につれて残響が短くなる傾向がある事がわかった。

ギター

ギターもバイオリンと同様に、基本周波数(基音)のピークの残響が長く、周波数の上昇につれて残響が短くなる傾向がある事がわかった。

3. 音の加工

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. 加工方法

2.2 項で録音した音（ここでは三味線，一の糸のさわり有り無し）をフーリエ変換によって周波数領域のデータにし，そのデータに周波数重み関数をかけ加工する。

加工された周波数領域のデータを逆フーリエ変換して時間領域のデータにし，加工音 1，加工音 2 を得た。なお，加工音 1，2 の加工条件はそれぞれの加工結果の項で示す。

3.3. 加工結果

3.3.1. 加工音 I

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，原音の時間波形は前述のため割愛した。

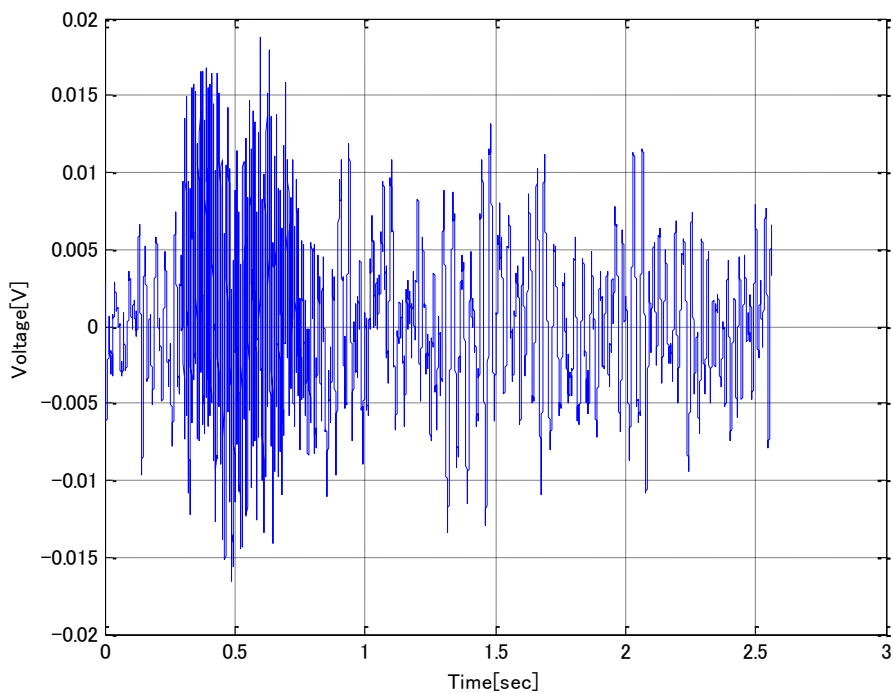


Figure 3-1 No.1-2 [0 ~ 500Hz]

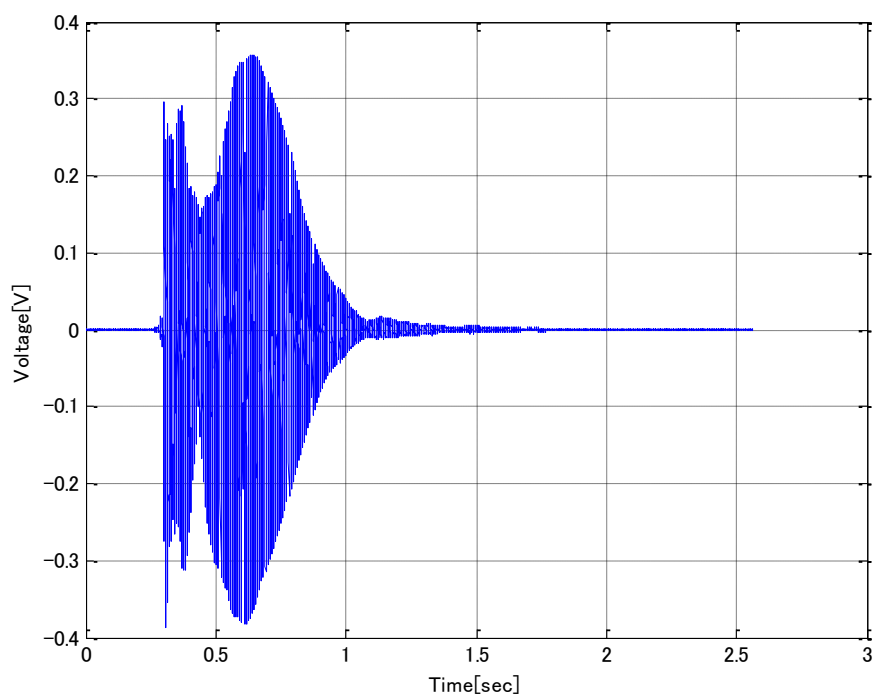


Figure 3-2 No.1-3 [500 ~ 1500Hz]

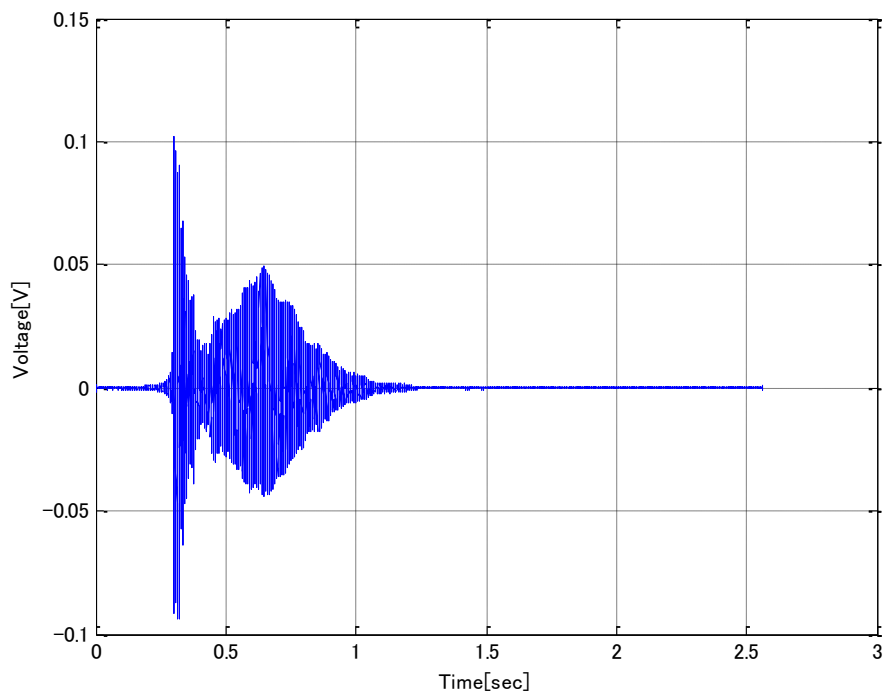


Figure 3-3 No.1-4 [1500 ~ 3000Hz]

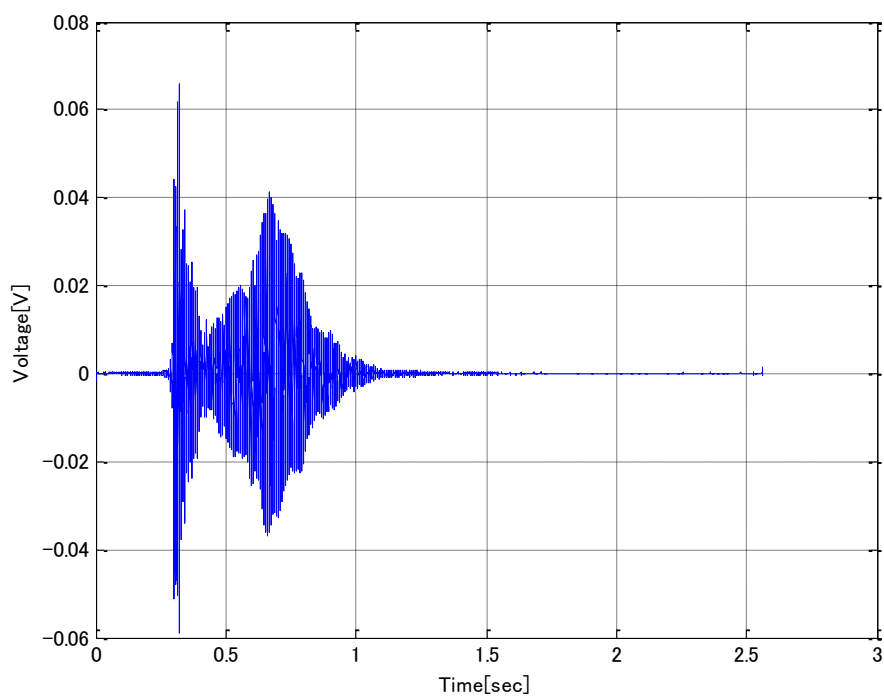


Figure 3-4 No.1-5 [3000 Hz ~]

3.3.2. 加工音Ⅱ

加工音 2 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つい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．

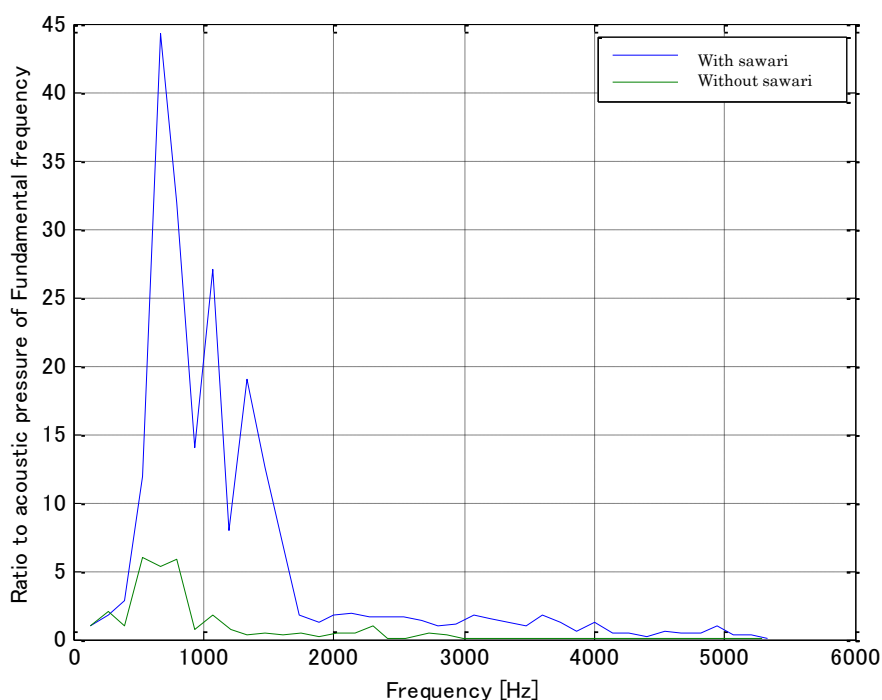


Figure 3-5 Frequency-Ratio [Ichi-no-ito]

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

以下に各音の特徴をまとめた。なお、原音 (No.1-1) については割愛した。

Table 3-3 Processing sounds [001]

No.	Feature
1-2	時間波形, および音質ともにさわりの特徴が出ていないといえる。周波数, 音圧が低いため, 音量が低い。
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である。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。
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。
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。

上記のような結果から, No.1-3 (500-1500Hz) の帯域がさわり音の主要な成分であるといえる。

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。

音圧比をさわりの有りからさわりの無しに, 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. 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。

4.2. 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 analyzer (リオン社製 SA-01)



Figure 4-2 Laptop computer (IBM 社製)



Figure 4-3 Impulse hammer (小野測器社製)



Figure 4-4 Acceleration pickup (PCB Piezotronics 社製)



Figure 4-5 Position of Acceleration pickup

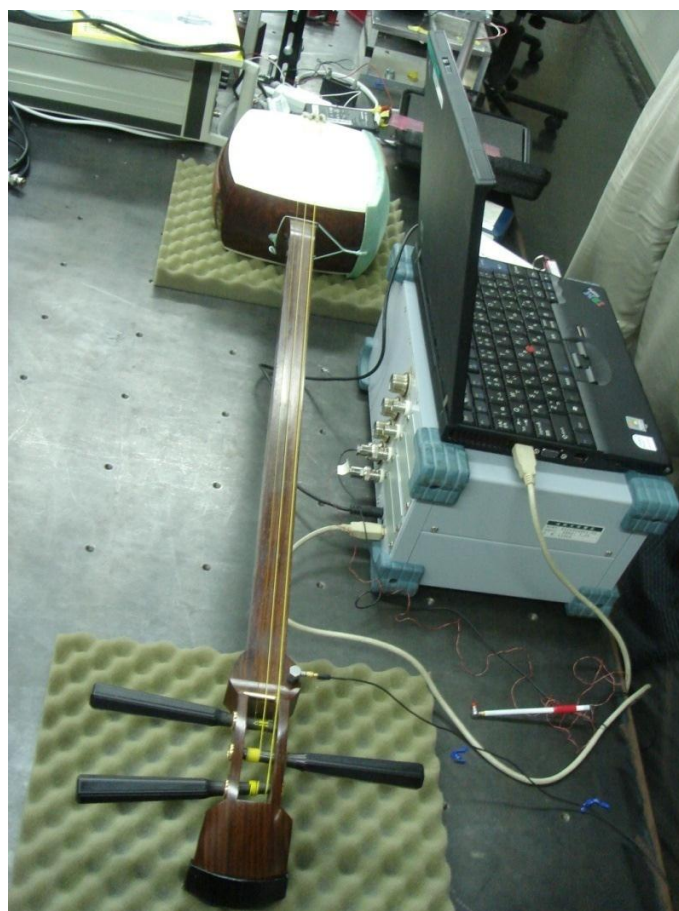


Figure 4-6 Experiment scenery

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.

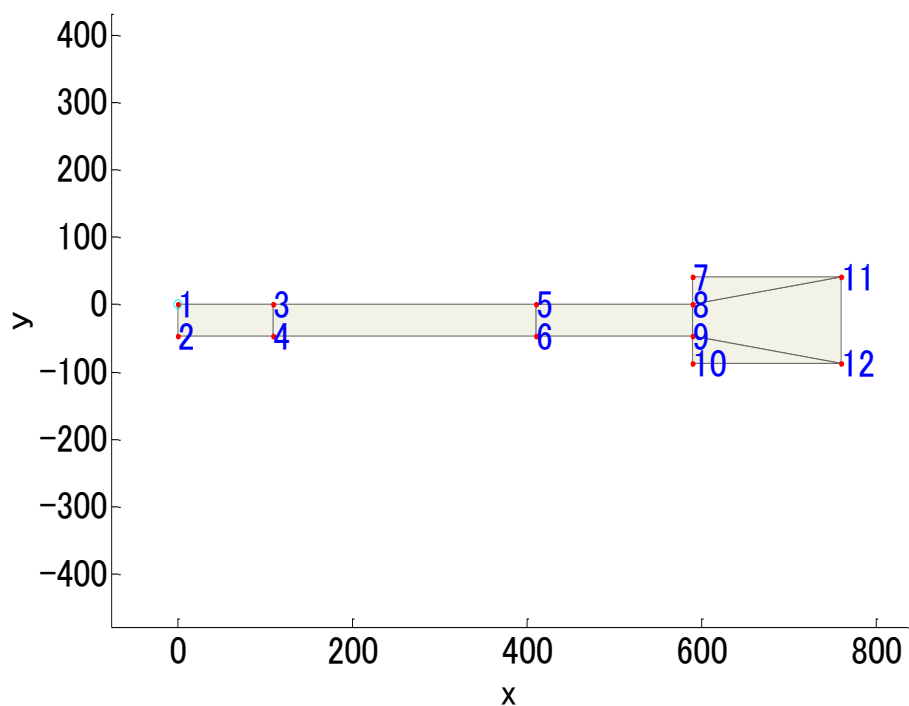


Figure 4-7 Excitation points and measurement point

4.3. 実験結果

得られたモードを以下に示す.

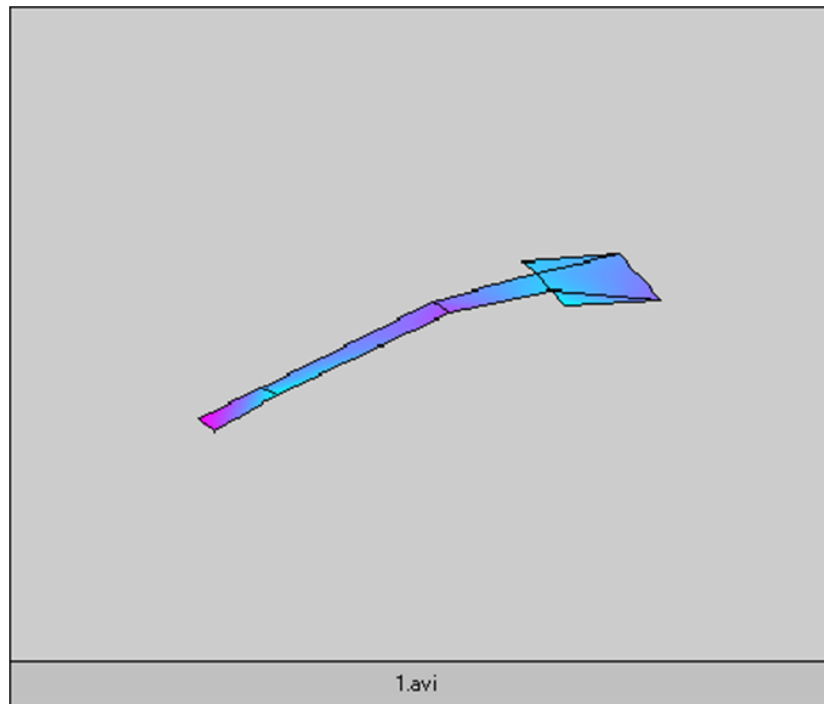


Figure 4-8 Fundamental mode shape

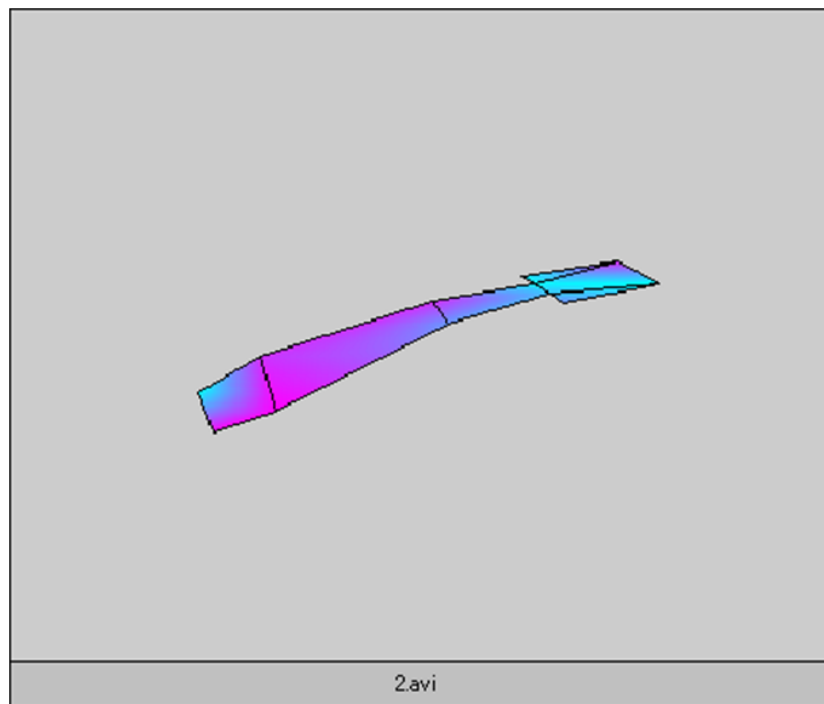


Figure 4-9 Second mode shape

Table 4-1 Experimental 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

4.4. 考察

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）よりも著しく低い。

また，ギターに比べて胴が小さい三味線の場合，全体の固有振動でなく，胴内部や，皮の固有振動のほう音が影響しているとも考えられる。

5. 弦振動シミュレーション

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 dF_y は線分の両端における張力 T の y 方向の差である。

$$dF_y = (T \sin \theta)_{x+dx} - (T \sin \theta)_x \quad (5.1.)$$

$T \sin \theta$ 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。

$$F_y = \left[(T \sin \theta)_x + \frac{\partial (T \sin \theta)}{\partial x} dx \right] - (T \sin \theta)_x = \frac{\partial (T \sin \theta)}{\partial x} dx \quad (5.2.)$$

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

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

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。

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

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

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = \frac{T}{\rho} \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = c^2 \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \quad (5.5.)$$

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.

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

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

ここで(5.6), (5.7)式を $f'(x)$ について整理する.

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

$$f'(x) = \frac{f(x) - f(x-h) + \frac{h^2}{2!}f''(x) - \frac{h^3}{3!}f'''(x) + \dots}{h}, \quad (5.9.)$$

(5.8)式で $x = x_n$ と置けば

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

となる. (5.10)はさらに

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

とも書ける. (1階の前進差分)

同様に(5.9)式で $x = x_n$ と置けば

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

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

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

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.

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

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

得られた2つの式を加えると

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

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.

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = \frac{T}{\rho} \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = c^2 \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \quad (5.17.)$$

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

左辺に差分法を適用する.

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

つぎに右辺に適用する.

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

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。

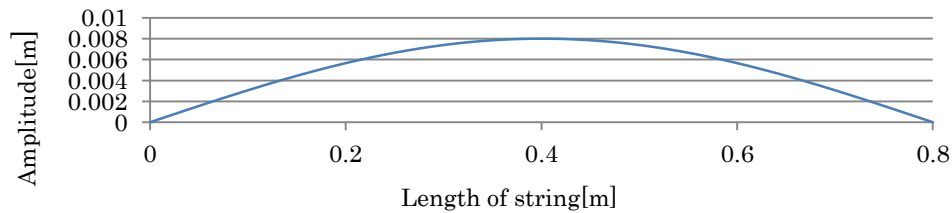


Figure 5-1 Initial shape

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。さわりの有る場合のさわりの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

さわりの位置によるさわりの効果の比較では、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)

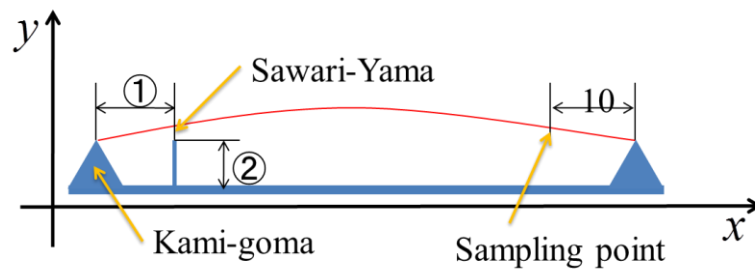


Figure 5-2 Simulation condition [002]

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.

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

さらに上式に差分法を適用し近似する.

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

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)

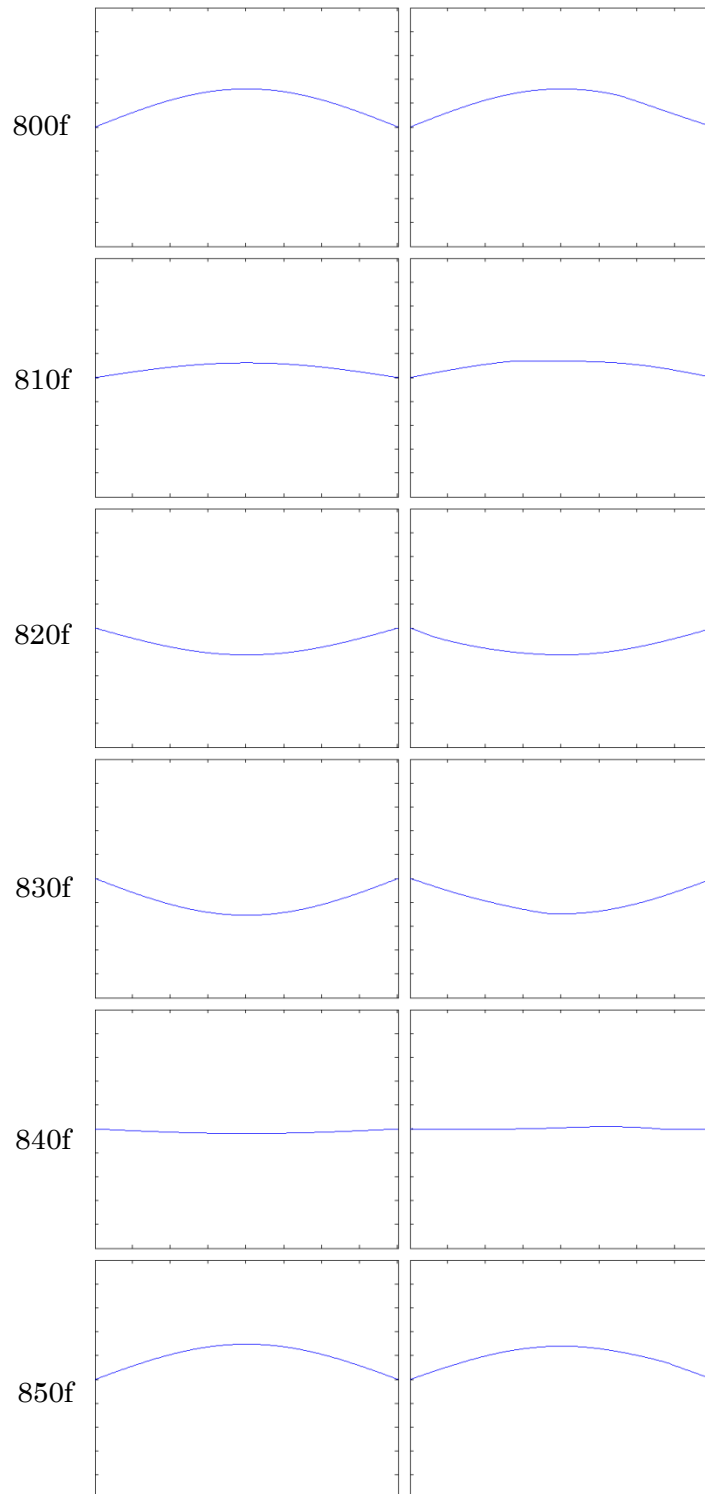


Figure 5-3 Simulation condition 001

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。

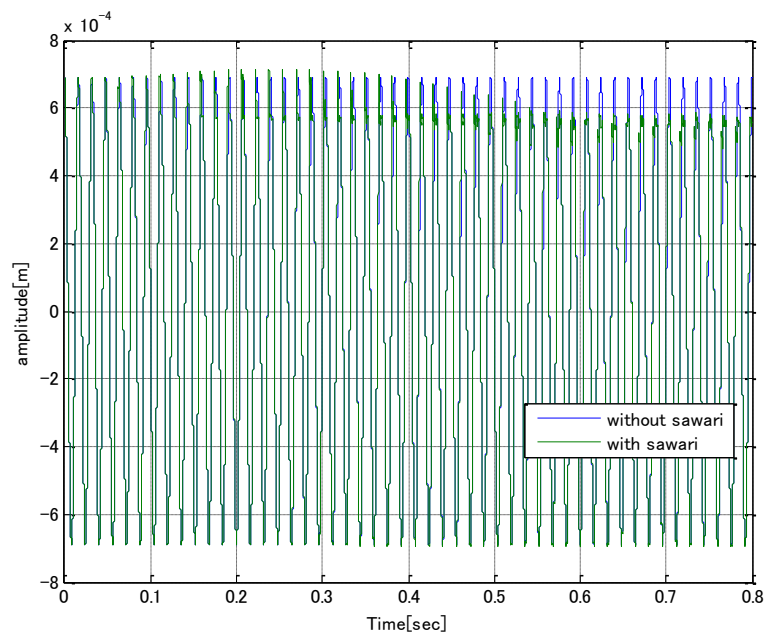


Figure 5-4 Simulation condition 001 [Time]

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。

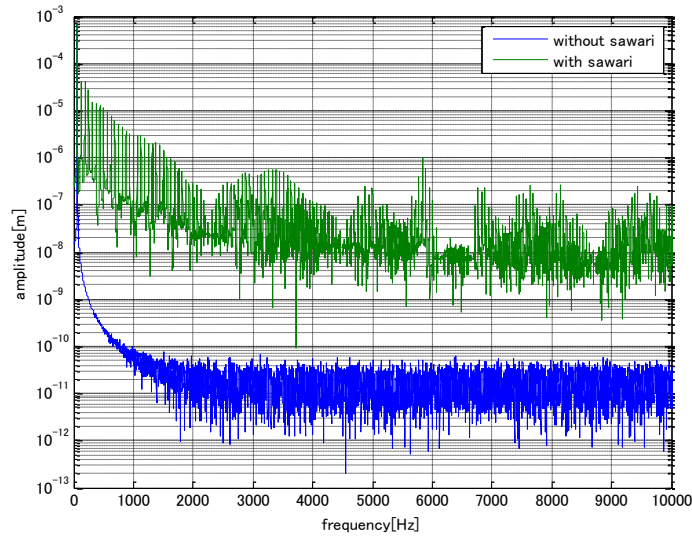


Figure 5-5 Simulation condition 001 [Frequency]

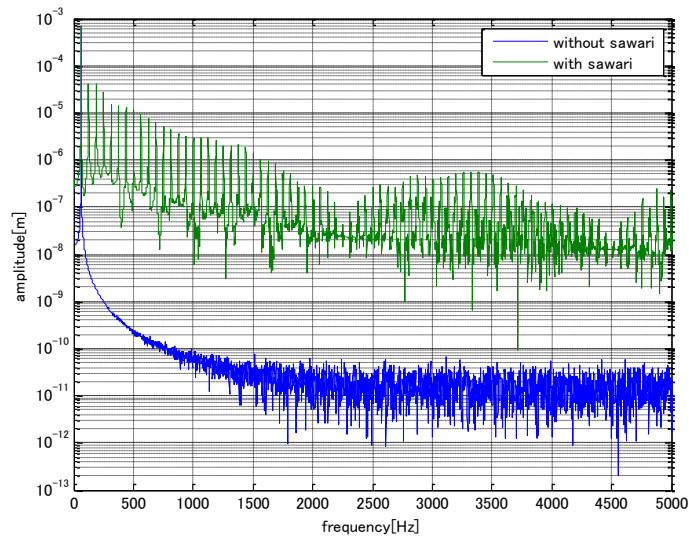


Figure 5-6 Simulation condition 001 [Frequency(0-5000Hz)]

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。

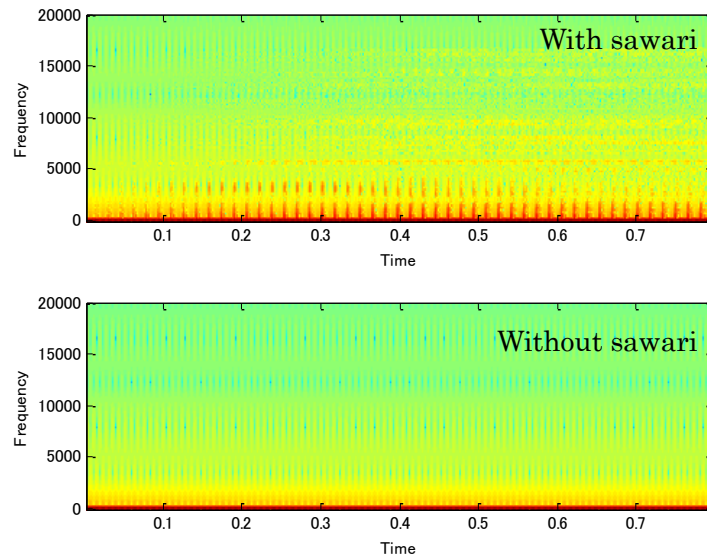


Figure 5-7 Simulation condition 001 [spectrogram]

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。

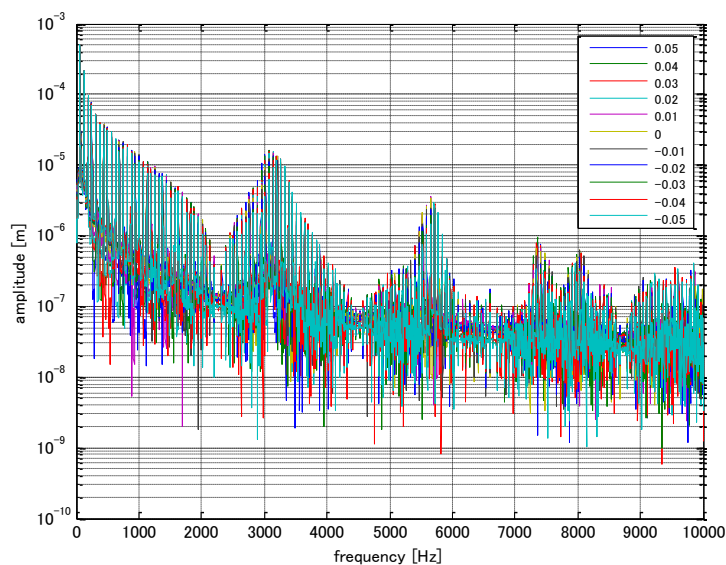


Figure 5-8 Simulation condition 002 (vertical)

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増え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。

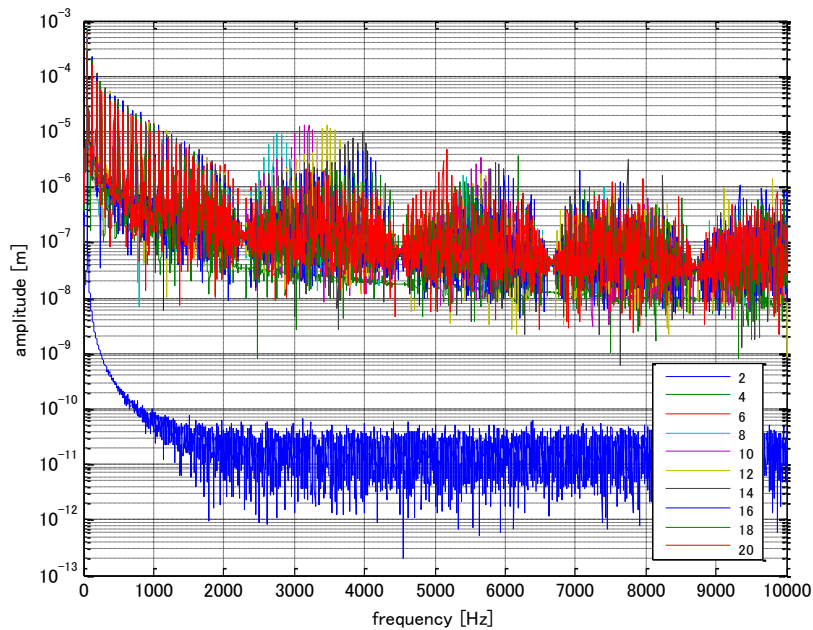


Figure 5-9 Simulation condition 002 (horizontal)

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．

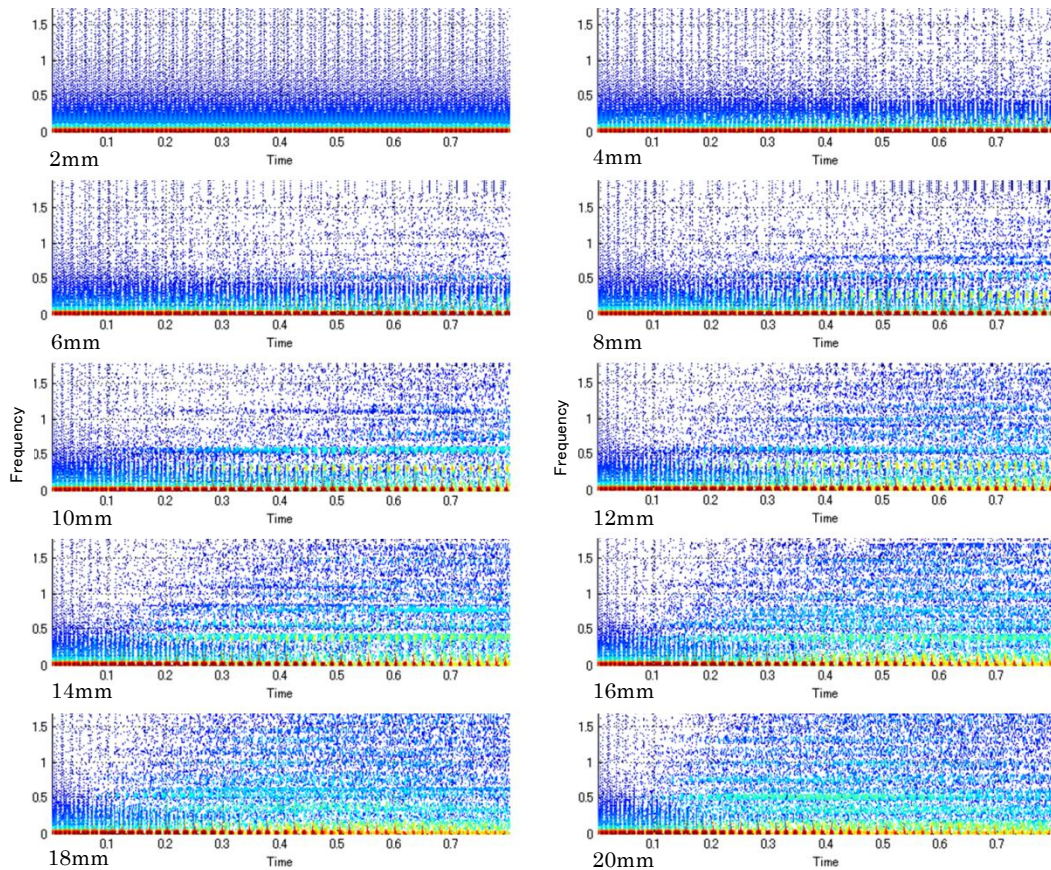


Figure 5-10 Simulation condition 002 (horizontal)

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．

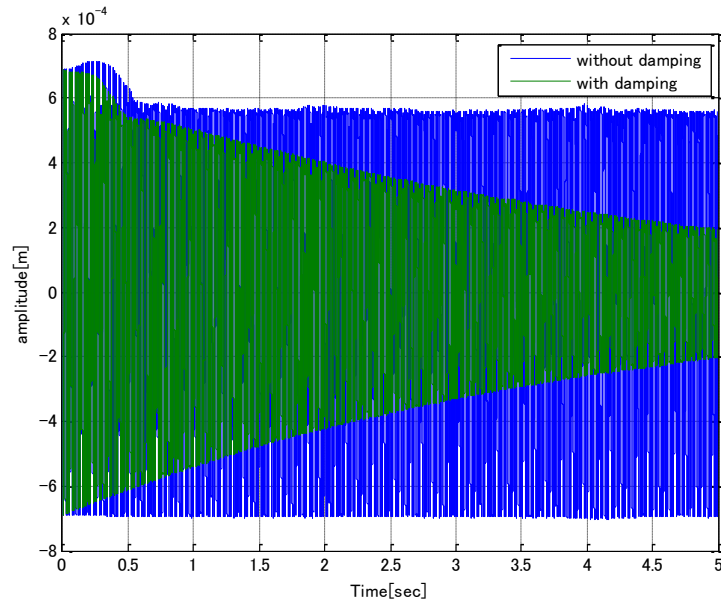


Figure 5-11 Simulation condition 003 [Time]

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．

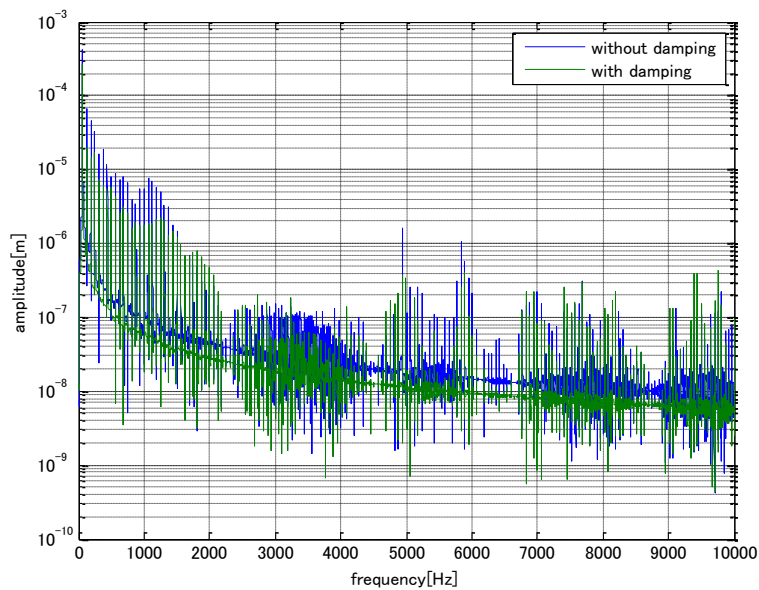


Figure 5-12 Simulation condition 003 [Frequency]

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低い領域，青い部分がピークの高い領域である。

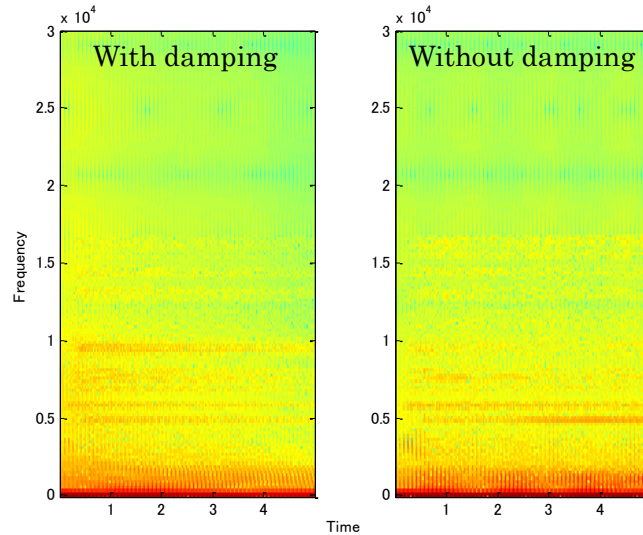


Figure 5-13 Simulation condition 003 [spectrogram]

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 2-42 など）と同様の傾向である。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. モデル作成

6.1. 目的

弦振動の簡易モデルを作製し，振動の様子を高速度撮影する．その結果とシミュレーション結果とを比較することでシミュレーションの妥当性を評価する．

6.2. 方法

弦振動の観察を行う簡易モデルを作製し，モデルに張られた弦の振動を高速度撮影したものとシミュレーション結果との比較を行う．

以下に簡易模型の写真を示す．図 6-1 はモデルの全体図，図 6-2 はさわり部の拡大図である．図の通り，さわり部にはマイクロメータを採用し，細かな高さ調整ができるようになっている．また，マイクロメータの固定台自体も水平方向に調整できるようになっている．なお，弦の張力は先のシミュレーションの波動速度を 100m/s としたので弦の線密度との関係から 11.36N とした．

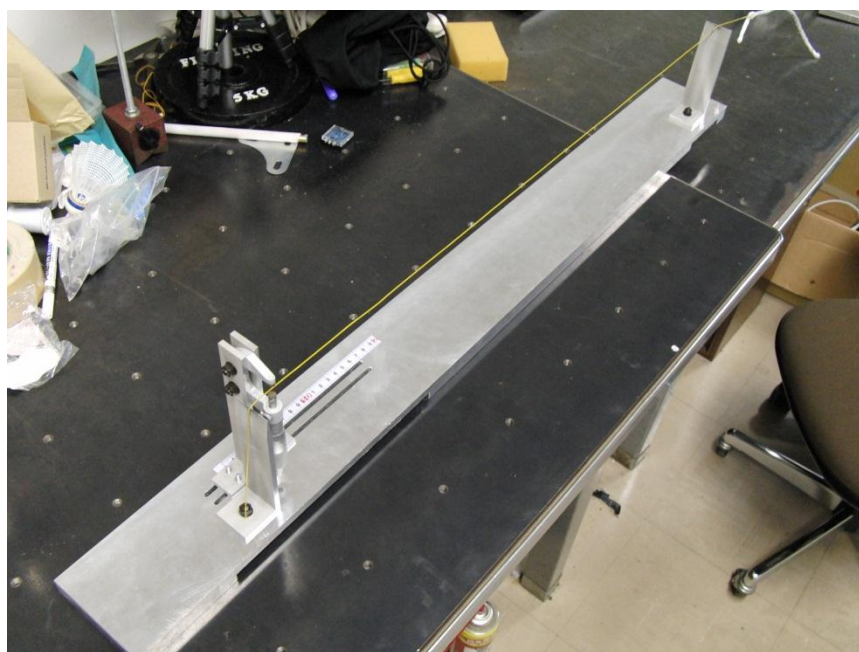


Figure 6-1 Simplified Model [Overall view]

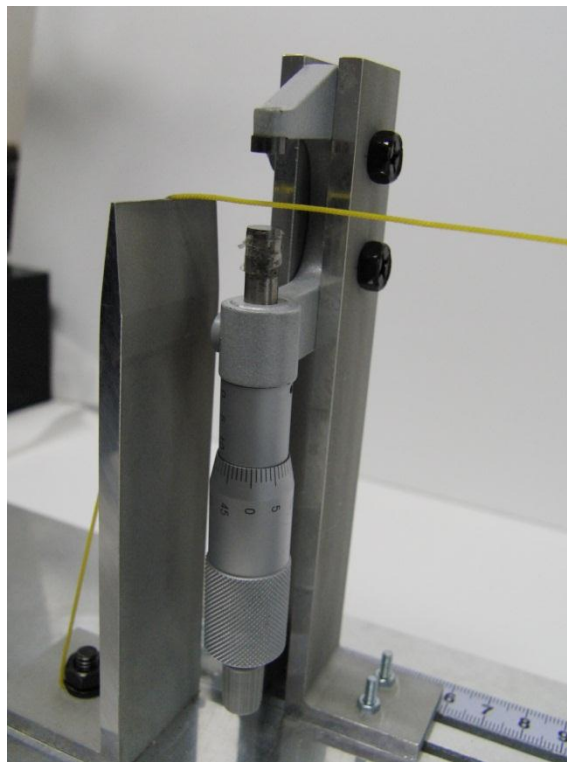


Figure 6-2 Simplified Model [Enlarged view]

6.3. 結果

高速度撮影の結果を以下に示す。本実験の撮影はカシオ計算機社製 EX-F1 にて行った。なお、fps 等のデータに関してはそれぞれ記載することとする。



Figure 6-3 EX-F1 (カシオ計算機社製)

初めにさわり有り無しと比較を行う。下図左側はさわり無し、右図はさわり有りである。撮影は 600fps で行い、3 フレームずつ表示している。

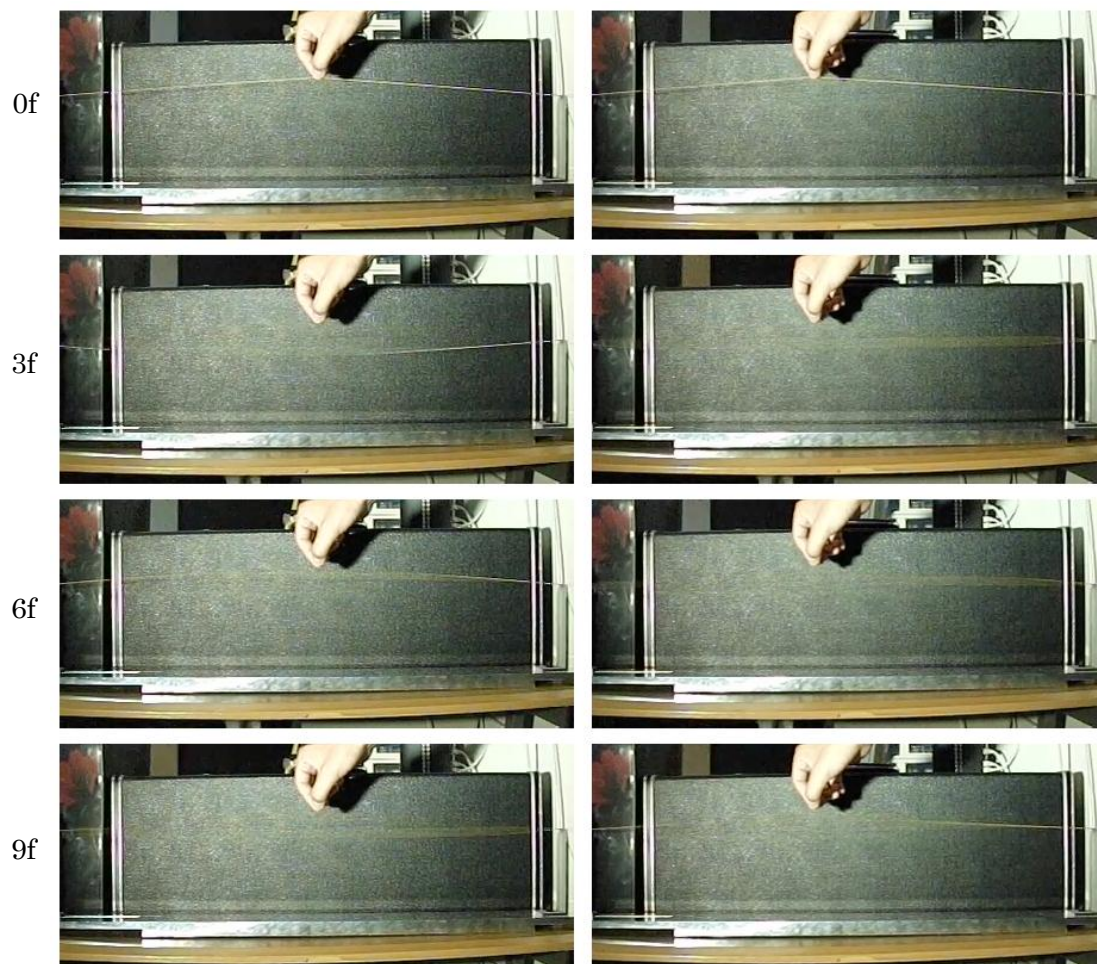


Figure 6-4 600fps

上図より、弦振動の周期が 9 フレーム程度であることがわかる。撮影が 600fps であるので弦振動が 66Hz 前後であることがわかる。これはシミュレーションで得られた基本周波数と近いことがわかる。また、撮影された動画から判断するにさわり有りの方は振動の頂点が回転しているように見え、これもシミュレーションと類似した結果であるといえる。

次に 1200fps で撮影した結果を 3 フレームずつ表示している。なお、こちらも左図がさわり無し、右図がさわり有りである。

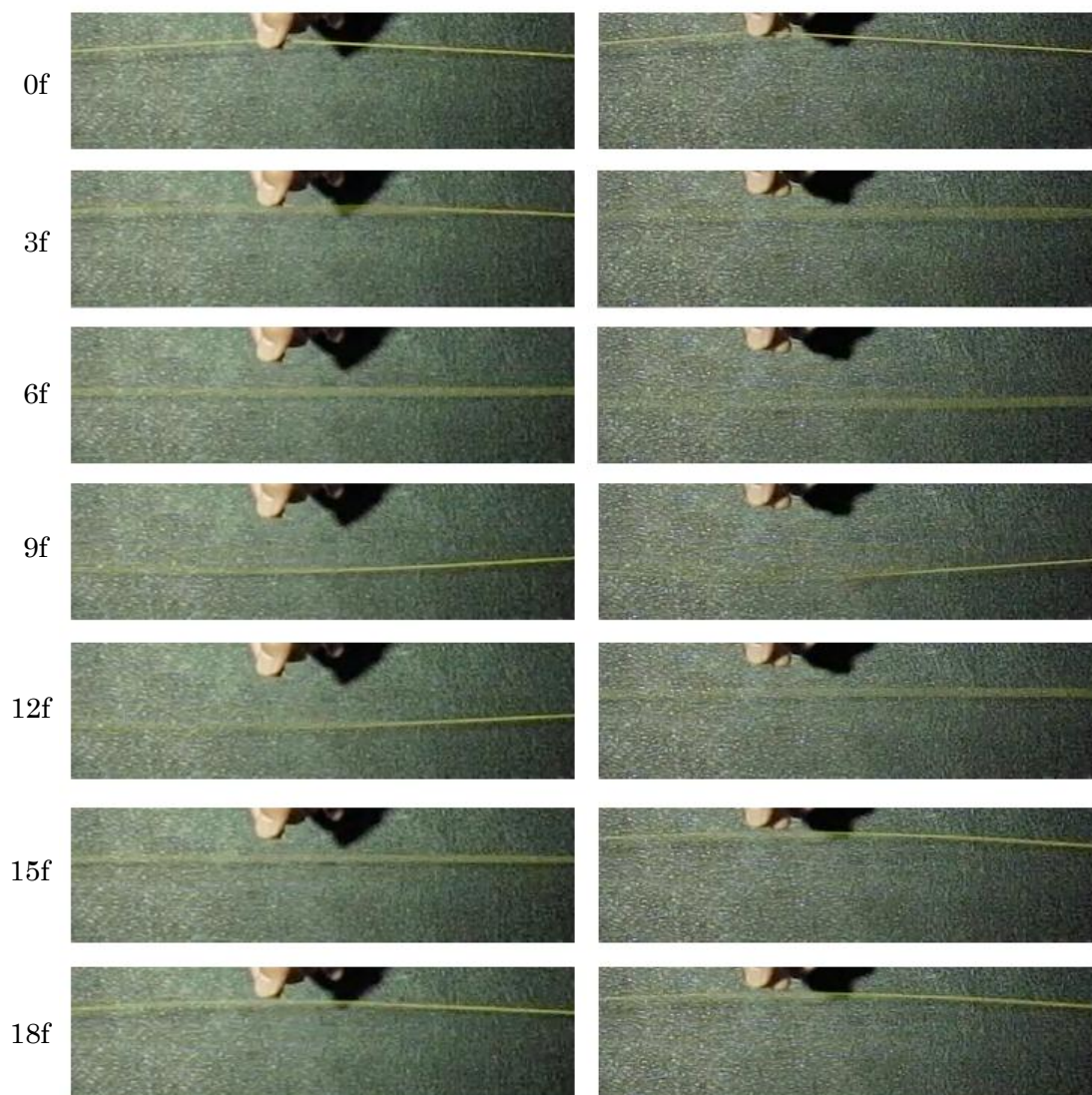


Figure 6-5 1200fps

先の図と同様に弦振動の周期が 18 フレーム程度であることがわかる。撮影が 1200fps であるので弦振動が 66Hz 前後であることがわかる。これはシミュレーションで得られた基本周波数と近いことがわかる。また、少しではあるが振動の頂点が回転しているように見え、これも先の結果と同様にシミュレーションと類似した結果であるといえる。

6.4. 考察

高速度撮影により弦振動が 66Hz 前後であること、および弦の振動形状がわかった。この結果より、シミュレーションは弦振動を再現できていると考えることができる。

7. 結論

本研究では音の録音と解析，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および簡易モデルによる高速度撮影を行った．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．

7.1. 音の録音と解析

三味線と他の楽器（バイオリン，ギター）との比較により，三味線の特性がわかった．三味線の基本的な特性として基本周波数の音圧が低く，1000Hz 前後の音圧が最も高い．そしてこの帯域の残響が基音の残響よりも長いことがわかった．これに対して他の楽器で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，基音の残響が最も長いことがわかった．

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．さわりの無い場合，音は時間経過ともになだらかに減衰する．これに対し，さわりが有る場合で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．これはさわりの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．

7.2. 音の加工

加工音 1 の結果から 500～1500Hz の帯域が三味線のみならず，さわりの音においても主要な成分であることがわかった．次に加工音 2 の結果からさわりの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．今後は位相等，他の要素の影響について考察する必要がある．

7.3. 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．これは三味線の最も低い音よりも著しく低い．このことから，ギターに比べて胴が小さい三味線の場合，全体の固有振動でなく，胴内部や，皮の固有振動のほうが音に影響していると考えられるので，今後はそういった部分の振動解析を行う必要がある．

7.4. 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の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の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。

上記のシミュレーションは波動方程式の近似により行ったが、今後は胴などの要素と弦を一体とした有限要素解析等を行っていく必要がある。

7.5. 簡易モデルによる高速度撮影

高速度撮影により弦振動が 66Hz 前後であること、および弦の振動形状がわかった。この実験結果より、シミュレーションは弦振動を再現できていると考えることができる。今後は三味線のモデルを作成し、三味線本体との比較を行っていく必要がある。

8. 付録

8.1. 調弦表

三味線の調弦表を以下に示す.

Table 8-1 Shamisen Tuning

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

8.2. Matlab プログラム

8.2.1. 音解析用プログラム

```

clear all %ワークスペースからすべての変数を消去。
close all %開いているすべてのfigureウィンドウを閉じる。

% データ読み込み
[load_file, load_path] = uigetfile('*.csv', 'csvファイルを入力'); %ファイルを開く標準的
なダイアログボックス。
fname1=strcat(load_path, load_file); %文字列の結合。(パスとファイル名を結合)
points1=csvread(fname1, 6, 1, [6, 1, 6, 1]); %全時間データ数を読み込み
EU1=csvread(fname1, 16, 1, [16, 1, 16, 1]); %電圧から音圧に変換する
M1=csvread(fname1, 20, 0, [20, 0, 20+points1, 1]); %MATLABに行列Mを作成。
FS1=1/M1(2, 1); %サンプリング周波数を計算。
fname11=strrep(fname1, 'csv', 'wav'); %CSVをWAVに書き換える。
wavwrite(M1(:, 2), FS1, 32, fname11); %WAVファイルの書き出し
F1=fft(M1(:, 2)); %2列目をFFT変換。
FAMP1=abs(F1); %Fを絶対値に変換。
Hz1=[0:FS1/points1:FS1/points1*(points1-1)]; %FFTのX軸用数値。
Hz11=[0:FS1/points1:FS1/points1*(points1-1)/2]; % 軸調整
FAMP11=FAMP1([1:points1/2], 1); % 軸調整

FAMP111=FAMP11/(points1/2); %FFTの縦軸を調整 MATLABでフーリエ変換したY軸を [サンプリ
ング点数/2]でデータを割る
FAMP1111=FAMP111*EU1; %電圧から音圧に変換する

figure(1) %図 1 (時間軸波形)を描く。
plot(M1(:, 1), M1(:, 2)); %グラフの作成。Mの一行目をX、二列目をY
xlabel('Time[sec]');
ylabel('Volto[V]'); %グラフのY軸名
grid on

figure(2) %図 2 (FFT)を描く。
semi logy(Hz11, FAMP1111); %方対数グラフ
xlabel('Frequency[Hz]'); ylabel('Sound Pressure[Pa]');
grid on

```

8.2.2. 弦振動シミュレーションプログラム

```

clear all
close all

%弦条件設定
nx=0.800;           %弦の長さ (m)
nt=0.8;            %シミュレーション時間 (s)
c=100;            %波の速さ (m/s)
dx=2e-3;          %距離刻み (m)
dt=1e-5;          %時間刻み (s)
A=(c*dt/dx)^2;    %差分計算の時に用いる係数
u=zeros(nx/dx+1, nt/dt+1); %位相u(x, t)の作成
d=0;              %減衰係数 0~1

%初期形状 (sin波)
x=2:nx/dx;
u(x, 1)=0.01*nx*sin(pi*0.002*(x-1)/nx);
u(:, 2)=u(:, 1); %初期条件から静かに離す

%FTD計算
for t=2:nt/dt;
    u(2:nx/dx, t+1)=A*(u(1:nx/dx-1, t)-2*u(2:nx/dx, t)+u(3:nx/dx+1, t))-u(2:nx/dx, t-1)
    +2*u(2:nx/dx, t)-d*dt*(u(2:nx/dx, t)-u(2:nx/dx, t-1));
    %サワリ条件の付加
    x=5;
    u(x, t+1)=(u(x, t+1)<=-2.10*10^-4).*(u(x, t+1)*0-2.10*10^-4)+(u(x, t+1)>-2.10*10^-4).*u(x, t+1);
end

%解析用サンプリング点の指定
UU=u(390, :);
%振幅を出力
csvwrite('amup.csv', UU);

```

```

%ムービーの作成および表示
u=u(:, 1:30:nt/dt+1);           %コマ数を変更する
h = plot(u(:, 1));              % 初期状態のグラフの作成
axis([1 nx/dx+1 -0.025 0.025]); %表示範囲の設定
for t = 1:(nt/dt)/30+1;
    set(h, 'ydata', u(:, t));    % Y 軸方向のデータを変更
    drawnow                      % 強制描画
    M(t) = getframe;
end
%ムービーの保存
[save_file, save_path] = uiputfile({'*.avi', 'AVIファイル (*.avi)'}, '*.aviファイルに名前を付けて保存');
if save_file
    save_file=strcat(save_path, save_file);
    cd(save_path)
    movie2avi(M, save_file, 'quality', 100)
else
end
end

```

8.2.3. 弦振動シミュレーション周波数解析プログラム

```

clear all
close all
[load_file, load_path] = uigetfile('*.csv', 'csvファイルを入力');
fname=strcat(load_path, load_file);
Mamup=csvread(fname);
dt=1e-5; %時間刻み(s)
FS=1/dt;%サンプリング周波数を求める
F=fft(Mamup);%FFT変換。
FAMP=abs(F);
Hz=[0:FS/80000:FS];
T=[0:dt:dt*80000];
points=80000; ;%サンプリング点数
FAMP11=FAMP/(points/2);

```

figure(1) %スペクトログラムの表示

```
spectrogram(Mamup, kaiser(256, 5), 220, 512, FS, 'yaxis'); % 'yaxis' で周波数をy軸に、時間をx軸に表示
```

```
% kaiser(N, beta) : betaをパラメータするkaiser窓を長さNの列ベクトルとして出力する
```

```
% NOVERLAP: データの各セグメントがオーバーラップするサンプル数
```

```
% NFFT: FFT長で、256とデータの各セグメントの長さより大きく、最も近い2のべき乗のいずれかの大きい値
```

figure(2) %時間軸グラフの表示

```
plot(T, Mamup,); %グラフの作成。Mの一行目をX、二列目をY
```

```
xlabel('Time[sec]'); %グラフの軸名
```

```
ylabel('amplitude[m]'); %グラフの軸名
```

```
legend('without sawari', 'with sawari');
```

```
grid on
```

figure(3) %周波数軸グラフの表示

```
semilogy(Hz, FAMP11); %方対数グラフ
```

```
xlabel('frequency[Hz]'); %グラフの軸名
```

```
ylabel('amplitude[m]'); %グラフの軸名
```

```
legend('without sawari', 'with sawari');
```

```
grid on
```

8.3. さわり調整について

喜多川派家元、喜多川保延氏から頂いた資料を参考に、さわり調整の一つとして時間を計りながら調整する方法について紹介する。なお、以下の調整法は東さわりのものである。

サワリは日本人の噪音（そうおん）愛好性の一つとして、撥音とともに重要視される。一の糸を上駒から外し、意図的に一種の雑音を加えることでサビのある音色を出す。さらに、一の糸に効果的なサワリをつけることにより、他の糸（二、三の糸）にも特有の音色を発生する。この音を愛好するというのは三味線音楽の大きな特色である。このように重要な構造であるにも関わらずサワリのよしあしは感覚的に判断され調整されてきた。しかし、本当に良いサワリ位置というものは一点しか存在せず、わずかでも糸と山の隙間が広くても狭くてもサワリ音は短くなってしまう。

この隙間の見分け方としては、指で一の糸を軽くひいて音を出し、その音の切れ具合を聞く方法がある。以下に3通りの切れ具合を示す。

1. サワリ音が全くなく、通常の弦の音しかしない

これは弦がサワリ山に全く触れていない場合と、弦が山にくっついてしまっている場合のどちらかである。どちらの状況かは弦と山の間に紙を通すことで判断することができる。つまり、隙間が広すぎるのであれば紙は楽に通り抜け、逆にくっついていれば山を越えることはできない。

2. さわり音はするが、音が消える寸前に音が膨らんだりポツッと途切れてしまう。

これは弦とさわり山の隙間が狭い場合に発生する。

3. さわり音が発生し弱まりながら消えていくが、時間が4秒未満で消えてしまう。

これは弦とさわり山の隙間が広すぎる場合に発生する。

1の場合、隙間が広すぎるのであれば一の糸を軽く指で弾き、さわり調節ねじを右にゆっくりまわす。するとサワリの加わった音に変化する点があるので、そこでいったん回転を止める。

一方、隙間がなかった場合はねじを左にゆっくりまわす。するとさわりの加わった音に変化する点があるので、そこでいったん回転をやめる。

この調整により1～3の場合それぞれでサワリ音が少しでも出る状態になったと思われる。

ここからいよいよ調整に入っていく。これ以降の調整ではさわり螺子をくるくるとまわしてはならない。

左手の親指以外のすべての指を軽く握る。そして人差し指の爪から数えて第一関節と第二関節の中間の側面に親指を軽く乗せる。そして、この指の位置でサワリねじを挟む。そして指ではなく手首全体をまわしながらゆっくりとねじをまわし調整していく。手首を少しだけ左に回す。するとそれだけでさわり音は消えていると思われる。

その位置で一の糸を指で軽くひく。そして手首を少しずつ右に回す。先ほど左に回す前の位置に戻る前にさわりが鳴り始める。サワリがちょっとでも鳴ったら今右に回した半分だけ左に手首を回す。そしてもう一度右に手首をまわしてサワリが鳴ったら、また左に半分だけ戻す。これを4、5回繰り返すとかなり長いさわり音が得られる。

一の糸を軽く弾いてさわりが4秒以上なっていれば十分な状態であるといえる。しかし音の切れ具合を今一度確かめなければならない。音が消える前に「ぼっ」と切れたり、あるいは音が膨らんで消えたりするときはさわり山と糸の隙間が狭いことが考えられる。また、さわりの長さが4秒に満たない場合はさわり山と一の糸の隙間がまだ広すぎるとが考えられるので、再調整が必要である。

長いサワリが得られた場合、すぐに二の糸と三の糸の調整に取り掛かる。それぞれがしっかり調弦されていれば必ず一の糸が共振し、サワリが発生する。ただし、合わせた調子が三下がりの場合、三の糸の開放音ではサワリは発生しない。

これでサワリと各弦の調整は終了する。しかしい、サワリと調子は合わせた瞬間から狂い始めるということを忘れてはならない。

参考文献

- 1)長松 昭男:モード解析入門, 長松昭男; コロナ社 (発売), 鎌倉; 東京, 1993.
- 2)Fletcher Neville H. (Neville Horner), Rossing Thomas D., 1929-, 岸 憲史, 他:楽器の物理学, シュプリンガー・フェアラーク東京, 東京, 2002.
- 3)Taguti T :Dynamics of simple string subject to unilateral constraint : A model analysis of sawari mechanism. Acoustical science and technology, 29(3) : 203-214, 2008.
- 4)Taguti T :Acoustical analysis on the sawari tone of Chikuzen biwa. Acoustical science and technology, 22(3) : 199-207, 2001.
- 5)中能島 欣 :三味線の運指法とサワリ現象について. 東京芸術大学音楽学部年誌, 1(0) : 1-A39, 1974.
- 6)吉川 茂, 鈴木 英男(電気通信工学), 大串 健吾, 他:音楽と楽器の音響測定, コロナ社, 東京, 2007.
- 7)大宮 真弓:非線形波動の古典解析, 森北出版, 東京, 2008.
- 8)鈴木 昭次:機械音響工学, コロナ社, 東京, 2004.

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長松昭男先生には学部，修士1年まで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。同専攻専任講師岩原光男先生，並びに同専攻教授御法川学先生には引き続きご助言を戴くとともに本論文の細部にわたりご指導を戴いた。ここに深謝の意を表す。

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，並びに田中研究室の芹澤氏に感謝の意を表す。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，さらには皮張りの見学までさせて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。高速度撮影では機械工学専攻教授新井和吉先生に機材を提供していただくとともに有益なご助言を戴いた。ここに感謝の意を表す。

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。