

共鳴部駆動による箏のエレキ化

○高橋直也† 橋本周司†
†早稲田大学大学院理工学研究科

近年、箏とエレキベースやドラムなどの大音量楽器とのセッションが増えている。弱音量楽器の PA の際
に起こるハウリング、外部音侵入、音質劣化の問題を同時に解決する手法として、共鳴部駆動による箏の
エレキ化を提案する。箏に内蔵したスピーカを用いて共鳴部を駆動させることを実現した。作成したエレキ
箏は 10dB 程度の音量増幅を実現し、外部音侵入を SN 比にして 12dB 改善し、音質劣化の問題につい
ても改善した。

Electric KOTO with vibrating body

ONAOYA TAKAHASHI† SHUJI HASHIMOTO†
†School of Science and Engineering Waseda University

In these years, KOTO which is Japanese instrument and high-volume instrument such as electric
bass and drums are often played together. In that case, the volume of KOTO sound must be increased
to a satisfactory level for balancing. However there are some problems in amplifying the volume of
KOTO sound such as acoustic feedback to cause howling, commingling of other back ground sounds,
and degradation of sound quality. In this paper, we propose an electric KOTO with real body. The
electric KOTO has a built-in speaker which makes the body resonance. We achieved 10dB
amplification of sound pressure level without the problems of acoustic feedback, commingling of other
sounds, and degradation of sound quality.

1. はじめに

近年、邦楽の海外進出やセッションの多様により、箏においてもドラム、エレキベース、ピアノやシンセサイザーなどの大音量楽器とセッションすることが増えている。その際、箏の音量はこれらの楽器と比べ弱いので、箏の音量を増幅し、バランスをとる必要がある。多くのライブでは大音量楽器とセッションする時のマイキング位置は、箏の音量が最も大きいサウンドホールの真下に置かれることが多い。しかしながら、箏はサイズが大きく、弦や共鳴部全体で響く楽器であるため、本来前方で聴く箏の音色とは異なってくる。またこのようなマイキング位置でも、エレキベースやバスドラムなどの大音量楽器の音がマイククロフオンに侵入してしまう。そのため箏の音量を上げようとしても一緒にこれらの音が上がってしまい、結果として箏の音が聴こえにくかったり、バランスを取れなかったりする。また、ハウリングが起こってしまい十分な音量を出せないことも少なくない。

圧電素子を使ったピエゾピックアップを用いて外部音侵入やハウリングの問題を防ぐ手法があるが、これは圧電素子が接している面の振動を拾っていることや、その周波数特性から音色が変わってしまい、「乾いた」あるいは「キンキンした」といった印象の音になる。

このように弱音量楽器である箏は音質劣化、外部音侵入、ハウリングの問題から十分な音量増幅と音色保持を両立することが難しい。

ここではこれらを同時に解決する手法として、箏の共鳴部を駆動することにより音を発生させ、音量増幅を図る手法を提案する。

2. 箏の構造

図 2.1 に箏の構造と糸の名称を示す [1]。全長は約 180cm、幅は 25cm、厚さは中央部でおよそ 7.5cm、両端で 4.5cm 前後である。箏の胴材は桐であり、糸はテトロン製のものが多い。甲板の表側曲率は演奏技法から決まっている。下から見た図の両端近くにある丸口はサウンドホール（共鳴孔）である。甲板の裏側には左端（口前）からおよそ 35cm の間隔で約 3cm 角の 4 本の梁（胴梁）が設けられている。この甲板はバイオリンで言うところの表面版と側板が一体で作られたもので図 2.1 の断面図のように、一枚の桐材から削り出される。表板に相当する部分、竜甲の板厚は中央付近で約 3.7 cm、長さ方向の両端で 3.0cm と他の弦楽器と比べて著しく厚い。この断面図で注目される点は、両肩に溝掘って板厚を薄くしている点で、この部分は 2.0cm ほどである。さらに裏板の部分は甲板に比べて薄く、1.1cm 程であることも大きな特徴である。このため

周波数の高域ではしばしば甲板より裏板のほうで放射エネルギーが大きい [2].

箏の弦は 13 本で、各弦に一つの音が割り当てられる。各弦の音の高さは琴柱の位置を調整することにより決める。琴柱は高さが 5~6cm ほどの弦を支えるもので、バイオリンでいうと駒、ギターでいうとフレットのような役割を併せもつが、移動可能であることが大きな特徴である。竜角から琴柱までの距離を変えて、弦の弾く部分の長さ調整することで音程を変える。箏の演奏には象牙でできた爪を親指、人差指、中指につけて演奏する。

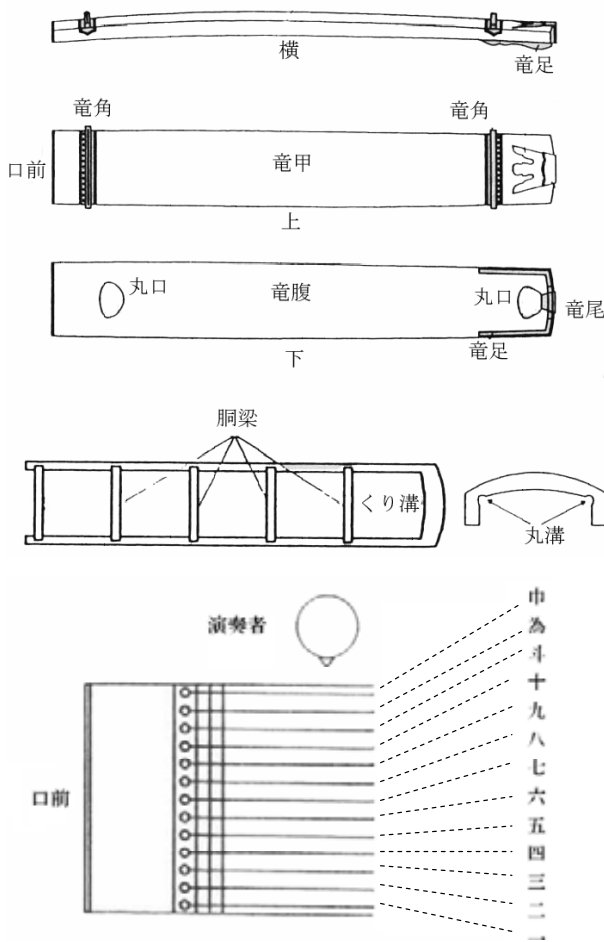


図 2.1 箏の構造と弦の名称

3. 提案手法

箏の発音システムをモデル化し、モデルを用いて既存手法の問題点を考察した後に提案手法について述べる。

3.1. 箏の発音システムのモデル化

図 3.1 に箏の発音をモデル化した概念図を示す。奏者が弦を弾くと弦がオシレータとなり、琴柱、駒を伝わって共鳴部(胴)を振動させる。共鳴部がフィルタとなり音色が生成され聴衆へ届く。また共鳴部の振動が再び琴柱、駒を伝わって弦に戻るフィードバック経路も存在する。フィルタから聴衆に伸びる出力の

矢印が音響である。フィルタは楽器としての大きさを持ち、場所により振動が異なっている。つまり聴く位置によって音色が変わり、フィルタは連続的多出力であると考えられる。これが生楽器らしさを感じさせる原因のひとつとなっていると考えられる。

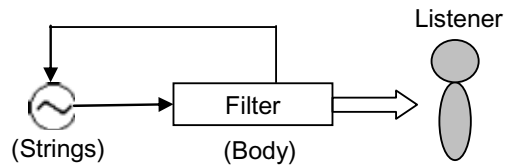


図 3.1 箏の概念図

3.2. 既存手法の問題点

マイクを用いて音量増幅する手法の概念図を図 3.2 に示す。ハウリングは増幅されて出た音が再びマイクに入ることにより起こり、外部音進入は増幅経路に他の楽器の音が混入することである。またマイキング位置によって音色が変わり、箏のゲインを上げるためにサウンドホール下にマイクを置くことが多く、普段聴衆が聞いている(音色が最もよい)前方位置を選べない。

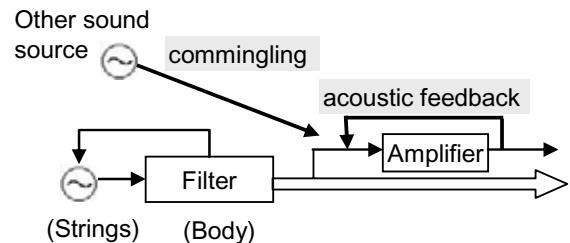


図 3.2 マイクによる手法の問題点

3.3. 提案手法

図 3.3 に提案手法の概念図を示す。弦の振動を増幅して共鳴部に伝えることにより音量増幅を図る。システムの構成は、図 3.4 のように弦の振動を拾うピックアップ、共鳴部を駆動させるバイブレータを箏に追加した形となっている。音を生成するフィルタに共鳴部そのものを用いているため、音質を変化させることなく音量増幅ができると考えられる。また空気振動を利用しないピックアップを用いることで外部音侵入を低減できると考えられる。

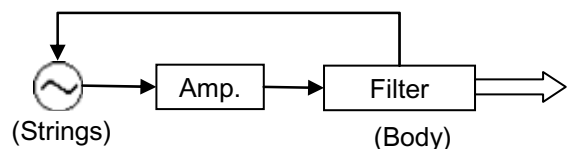


図 3.3 提案手法の構成図

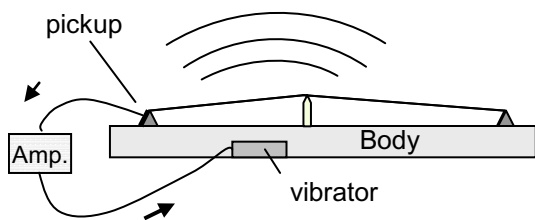


図 3.4 提案手法の構成図

4. エレキ箏の作製

提案手法の実現方法として、図 4.1 に示すようなエレキ箏を作成した。ピックアップには弦や共鳴部に極端な加工をする必要がない piezoピックアップを用い、バイブレータとしては音響信号を、ゆがみを最小限に抑えて物理的振動に変換できるスピーカを用いた。ピックアップは駒の下に 3 箇所取り付け(図 4.2)、後に述べるハウリングの問題を防ぐ為に図 4.3 のようにゴムを背面に取り付けた。3 つのピックアップからの信号をミキサでバランスを取って 1 つにまとめ、イコライザを通してアンプに入力、スピーカから再生する。イコライザは piezo の周波数特性補正、及びハウリング抑制用である。スピーカは取り付け位置による音色の違いがあまりなかったので共鳴部中央に取り付けた。

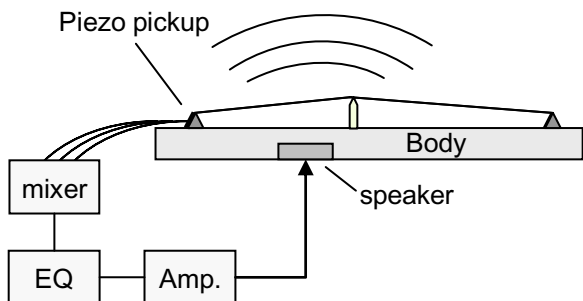


図 4.1 作成したエレキ箏の構成

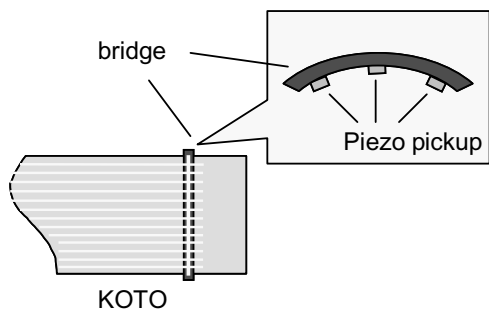


図 4.2 ピックアップの取り付け位置

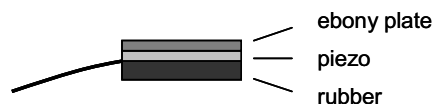


図 4.3 ピエゾピックアップの構成

5. 評価実験

作成したエレキ箏に対し外部音侵入の改善、音量増加、音色保持の目標がどれだけ達成されているかを調べる為に以下の実験を行った。

5.1. 音量

音量がどれだけ増幅されているかを調べるため音圧レベルの比較を行った。一般的な曲を演奏し、箏の前方 1.5 m で騒音計 (A 特性) を用いて音圧レベルの変動幅を測定した。表 4.1 に結果を示す。比較のためにドラムの基本ビート演奏時の音圧レベル変動幅を示す。エレキ箏は約 10dB 音圧レベルが増加しており、ドラムには及ばないが聴覚上セッションに十分な音量が得られていた。

表 5.1 音圧レベルの比較

楽器	音圧レベル [dB]
箏	65~80
エレキ箏	75~90
ドラム	80~110

5.2. 外部音侵入

piezoピックアップを用いることによる外部音侵入の改善の程度を調べるため S/N 比を求めた。箏後方 2m に、外部音としてスピーカからドラム、エレキギター、ベース音の入った箏合奏用の楽曲 (箏パートは抜いてある) を再生し、マイクロフォン、及び piezoピックアップに録音したときの波形の振幅 A_{Nm} , A_{Np} と、箏を演奏したときのそれらの振幅 A_{Sm} , A_{Sp} から S/N 比を次式で求める。

$$SN_m = 20 \log \frac{A_{Sm}}{A_{Nm}} \quad (1)$$

$$SN_p = 20 \log \frac{A_{Sp}}{A_{Np}} \quad (2)$$

SN_m と SN_p はそれぞれマイクロフォンと piezo の S/N 比である。但し、外部音の振幅は A_{Nm} , A_{Np} はほぼ一定であるエンベロープの値とし、箏の波形の振幅 A_{Sm} , A_{Sp} は各弦 (13 弦) を標準的な強さで演奏し、各振幅最大値の平均の半分と定めた。結果を表 5.2 に示す。このように大幅な改善が見られ piezoピックアップを用いることで外部音侵入の問題が 12dB 程改善されることが分かる。

表 5.2 SN比の比較

SN _m	3.9
SN _p	16.5

5.3. 音色

楽器の音色と物理的なパラメータとの関係は興味深いものであり、周波数スペクトルが大きく関わっていることが分かっているものの、人間の感じる細かい音色の差と物理パラメータとの関係は良く分かっていない。そもそも音色とは「基音の振動数が同じ音の中で聴覚に差を起こさせる特性」などとあいまいに定義される。また音色の良し悪しは最終的に人により判断されるものであり絶対的な評価尺度はない。しかしここではまず音色保持を目的とし、音の良し悪しは考えず、音色に深くかかわっているとされるスペクトル、及びソナグラムの比較を行うことで生の筍の音色と比較する。つまりスペクトルやソナグラムの構造が音圧レベルの全周波数に対する平行移動を除いて完全に生の筍のものとも一致すれば、音色を変化させずに音量を増幅できたことと仮定することとなる。スペクトル、ソナグラムの比較は筍、ピエゾ、及び提案手法のエレキ筍で行う。筍、エレキ筍の音は筍前方 30cm のマイキング位置で録音し、ピエゾは共鳴部裏面に貼り付けたピエゾからの信号を用いた。またエレキ筍は、筍のフィルタの役割を明確にするため、図 4.1 のイコライザは省いた。

5.3.1. スペクトル

図 5.1 に九弦(A音 442Hz)を弾いたときの筍、ピエゾ、及びエレキ筍のスペクトルを示す。FFT は波形の最大値から 1 秒間について表 5.2 に示す条件で行った。波形は基音が一致するように正規化してある。基音に対しての倍音の含み方で、音色を評価する。つまり倍音の含まれる割合が筍に近ければ、音色も近いと考える。図 5.1 よりピエゾは筍と比べ 2000Hz 以下ではほぼ倍音構造は一致しているが、それ以上の周波数域で 20dB ほど強くなっていることが分かる。これは「キンキンした」あるいは「乾いた」という印象の音になる原因になっていると考えられる。一方、エレキ筍は 800Hz~1600Hz の帯域で 10dB ほど強くなっているが、その他の帯域ではおおむね似ていると言える。

表 5.2 FFT の条件(スペクトル)

サイズ	65,536
オーバーラップ	75%
窓	ブラックマン

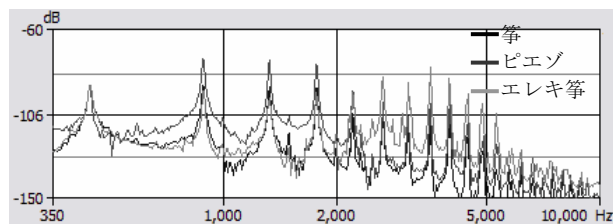


図 5.1 スペクトルの比較

5.3.2. ソナグラム

図 5.2, 図 5.3, 図 5.4 に第九弦(A音 442Hz)を弾いたときの筍、エレキ筍、及びピエゾのソナグラムを示す。FFT は波形の始まりから 1 秒間について、表 5.3 に示す条件で行った。図から分かるようにピエゾでは 2000Hz~5000Hz 付近の周波数が強く、倍音の余韻の強さ、長さが大きく異なっていることが分かる。一方、エレキ筍は、倍音の減衰の様子が筍に良く似ていることが分かる。

表 5.3 FFT の条件(ソナグラム)

サイズ	4,096
オーバーラップ	75%
窓	ブラックマン

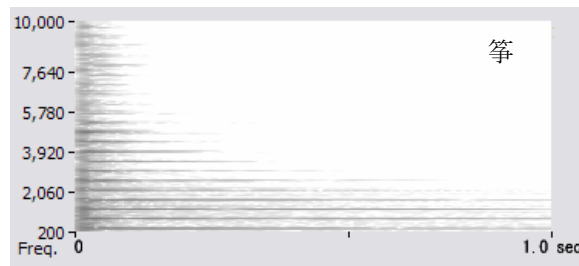


図 5.2 筍のソナグラム

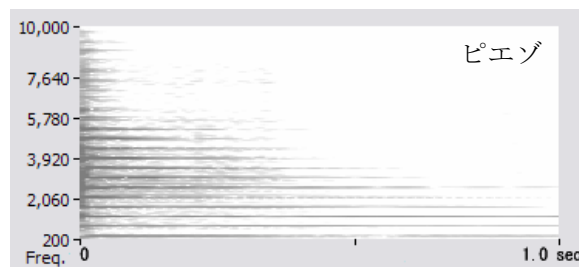


図 5.3 ピエゾのソナグラム

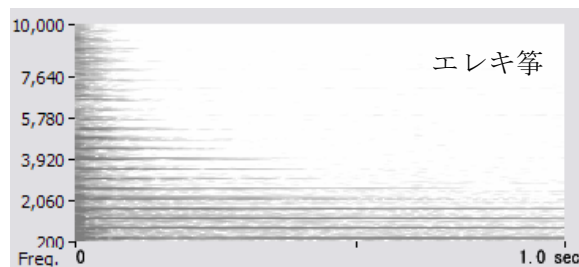


図 5.4 エレキ筍のソナグラム

6. 考察

システム内でのハウリング防止のために用いたゴムによる効果の検証，箏の共鳴部がどのようなフィルタになっているかの検証，ピックアップと弦の距離とゲインの関係，及び聴覚的印象について考察する。

6.1. ゴムによるハウリング防止

本システムの音量増幅の限界はハウリングの発生しない限界レベルで決まる。ハウリングはスピーカによって振動させられた共鳴部の振動が再びピエゾピックアップに帰還することで起こる。そこでピエゾピックアップ背面にゴムを取り付け上部の弦から伝わる振動には感度がよく，下部の共鳴部からの振動には感度を下げる工夫を施した。上部，下部からの感度比を図 6.1 に示す。感度比Rはスピーカをピエゾの上部，下部にそれぞれ接触させ，音を再生したときにピエゾから得られる振幅 A_{under} , A_{over} より次式で求めた。

$$R = 20 \log_{10} \frac{A_{\text{over}}}{A_{\text{under}}}$$

感度比が低いほど減衰が大きいことを示す。図から分かるようにほとんどの帯域で減衰できており，平均で 6dB ほど減衰できている。また 800Hz で比が最も高く，ここではほとんど減衰できていない。これは本システムで最もハウリングが起こりやすかった周波数と一致する。また 600Hz 以下，2300Hz 以上でよく減衰できている。

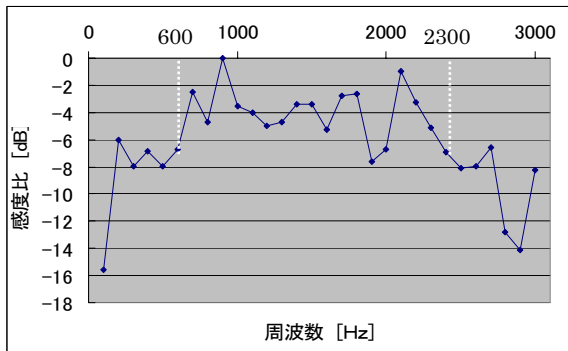


図 6.1 感度比の周波数特性

6.2. 周波数特性

本システムでは箏の共鳴部をフィルタとしている。共鳴部がどのようなフィルタになっているかを調べるため周波数特性を測定した。測定は共鳴部に設置されたスピーカから振幅一定の sin 波を本システムで用いているアンプを通して再生し，箏前方 30cm で音圧レベルを測定した (A 特性)。測定した結果を図 6.2 に示す。図から分かるように 800Hz 付近にピークを持っている。これは本システムで

最もハウリングが起こりやすい周波数と一致している。また 100~200Hz 付近の低周波では非常に小さい。この付近の周波数は実際に最も低い音の弦で使用される周波数域である。また全体的に細かい変動を示しており，10Hz の違いで 10dB 異なる帯域もあった。これよりフィルタとしてのエレキ箏の共鳴部は非常に複雑な特性のイコライザ機能を含んでいることが分かる。

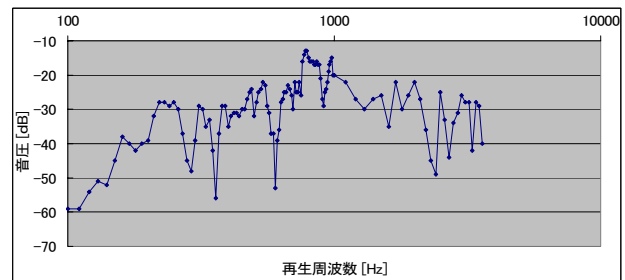


図 6.2 共鳴部の周波数特性

6.3. 弦とゲインの関係

今回はピックアップを駒下の前方 (三弦下部)，中央 (八弦下部)，手前 (斗弦下部) の三箇所設置したが，ピックアップのすぐ上の弦のゲインが強くなり，ピックアップ間の弦のゲインが弱いという現象が起きた。そこでピックアップからの距離とゲインの関係を測定した。表 6.1 に中央のピックアップを基準に弦間とゲインのレベル差の関係を示す。測定はアンプなどを通るフィードバック経路は切った状態で，中央のピエゾピックアップから得られる信号を測定した。弦間 1 とは手前に 1 弦となりの弦，-2 とは奥に 2 弦となりの弦を示す。表から分かるように 1 つ隣の弦でも 5dB のレベル差があり，最大で 21dB の差がある。これよりピックアップは約 2 弦間隔 (ピックアップおよそ 6~7 つ) で設置する必要があることが分かる。

表 6.1 弦間とゲイン差の関係

弦間 [本]	ゲイン差 [dB]
-4	-21
-3	-12
-2	-14
-1	-8
0	0
1	-5
2	-18
3	-6
4	-8

6.4. 聴覚的印象

今回はピックアップにピエゾを用いたが、ピエゾからの信号を直接再生した音は、「キンキンした」あるいは「乾いた」という印象の音になってしまう。しかし提案手法の共鳴部駆動によるエレキ化によって、ピエゾからの信号を用いても、これらの印象は大幅に改善された。提案したエレキ箏では共鳴部が生箏の箏の音を作り出すフィルタとして機能している。また特に、従来のエレキ箏では爪が弦に当たるときにする爪音が強調されてしまい、耳障りに聞こえていたが、これはほとんど気にならなくなった。

また特筆すべきは、マイクやピックアップによる方法のときのように、スピーカから再生されている音と比べ、自然な印象を受けることである。スピーカから再生するボリュームを上げると、直接音よりもスピーカからの音が強くなり、明らかにスピーカからなっている音という印象を受けてしまうが、提案手法はそのような印象がなく、箏からの音が大きくなったという自然な印象を受けた。これは100人～1000人程度の収容人数を持つライブハウス、コンサートホールで音量増幅をしたいときに、非常に効果的であると考えられる。

6.5. 今後の展望

作製したエレキ箏は通常ピエゾピックアップ型に比べて聴覚的に音色が大きく改善されており、外部音侵入、PAによるハウリングの心配なく、音量増幅ができるシステムとして有効であることが分かった。またミキサ、アンプ間にエフェクタを挿入することで新たな音色を発生する楽器としても使用が可能である。

今回作製したエレキ箏は弦のゲインのばらつきが問題であったが今後はピックアップ数を増やし対応していくことを考えている。また、システム内のハウリングは800Hz～2kHzで起こりやすかったが、これはピエゾの共振周波数や共鳴部の周波数特性、ゴムの防振周波数特性に依存すると考えられる。ハウリングを抑制しさらに音量増幅を図るにはフィードバックをさらに制御することが必要である。今後はゴムなどによるネガティブフィードバックのほかに、アクティブフィードバックについても検討していく。

今回作製したエレキ箏のシステムは既存のミキサ、イコライザ、アンプ等の機材を使用した大規模なものであり、演奏者一人が持ち歩くことは難しい。本システムを実用的なものにするためにも今後はシステムの小型化も検討していく予定である。

7. まとめ

共鳴部駆動による箏のエレキ化を提案し、製作した。製作したエレキ箏は、約10dBの音圧レベル増加を実現し、外部音に対するSN比は12dB増加、またスペクトル、ソナグラムから音色が生箏の箏に近づいていること、聴覚的印象が自然であることを確認した。今後はピックアップ数を増やし、弦に対するゲインのフラット化、システムの小型化、ハウリング防止の強化、音色の向上を行っていく予定である。

8. 謝辞

本研究を進めるにあたりお世話になった、尺八演奏家中村明一氏、はなの楽器、R&Bell社の飯田氏に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- [1] 安藤由典「新版 楽器の音響学」pp.204214, 音楽之友社, 4276123119
- [2] 石井淳, 安藤由典「音響インテンシティ法による箏の放射特性の測定」日本音響学会音楽音響研究委員会資料, MA8628('87)
- [3] 安藤由典「箏(琴)の材質, 構想, 音響的性質, 及び楽器としての品質の相互関係に関連する研究」昭和59年度科学研究費補助金研究成果報告書, 課題研究番号57462001
- [4] 小坂直敏「楽曲製作のための音色理論の構築にむけて」情報処理学会研究報告, MUS-54, pp.17-22 (2004)
- [5] 安藤由典「ソナグラフによる楽器音の周波数分析」, 音楽学, 9, 3349 ('63)
- [6] 水野秀和, 井出口健, 畑地洋彦「アコースティックギターを用いた音楽の体感聴取方法の検討」電子情報通信学会, Vol. J87-A No.11 pp.1460-1465
- [7] 小坂直敏「楽曲政策のための音色理論の構築にむけて」情報処理学会研究報告, vol.2004MUS-54
- [8] 高橋直也, 橋本周司「共鳴部駆動を用いた箏のエレキ化」情報処理学会第68回全国大会公演論文集2 pp.165-166