

博士請求論文（令和 3年度）

新規な電子楽器の演奏性と演奏正確性及び上達過程の分析

指導教授	主査	西村明	教授
	副査	布広永示	教授
	副査	松下孝太郎	教授
	副査(外部)	三浦雅展	准教授

(国立音楽大学 音楽学部)

総合情報学専攻 システム・サイエンス情報系列

学籍番号 H19001
氏名 小出英範

内容

第1章	序論	1
1.1	楽器	1
1.2	従来楽器	1
1.3	従来楽器の問題点	1
1.4	電子楽器	2
1.5	新規な電子楽器	3
1.6	本論文の目的とその構成	3
第2章	従来の新規な電子楽器	5
2.1	企業が提案、販売している新規な電子楽器	5
2.2	新規な電子楽器を対象とした従来研究とその問題点	5
2.2.1	センサによる新しい演奏インターフェースの電子楽器	6
2.2.2	スイッチ操作により演奏する電子楽器	6
2.2.3	演奏内容が制限される電子楽器	6
2.2.4	既存の道具を改造した電子楽器	7
2.2.5	従来楽器に付加価値を追加した電子楽器	7
2.2.6	音楽演奏以外にも利用される電子楽器	8
2.2.7	従来研究の問題点のまとめ	8
2.3	本論文での実験の方針	9
2.4	まとめ	9
第3章	楽器演奏の意識調査	11
3.1	はじめに	11
3.2	楽器演奏に関する意識調査の従来研究	11
3.3	演奏練習支援に関する従来研究	11
3.3.1	間違いの提示やアドバイスをフィードバックする支援システム	11
3.3.2	フィードフォワードな支援システム	12
3.3.3	支援システムの有効性を評価した従来研究	12
3.3.4	演奏練習支援に関連する意識調査	13
3.4	意識調査	14
3.5	意識調査の対象	14
3.6	質問項目	15
3.6.1	2019年度	15
3.6.2	2020年度	17
3.7	電子楽器及び支援システムのニーズ	21
3.7.1	電子楽器のニーズ	21

3.7.2	支援システムのニーズ.....	22
3.7.3	電子楽器と支援システムの併用.....	24
3.8	楽器演奏の意識に関する回答結果.....	24
3.8.1	楽器の演奏経験と今後の演奏について.....	25
3.8.2	楽器演奏における難点.....	26
3.8.3	楽器演奏の楽しさ.....	28
3.8.4	難しいと感じる楽器の操作内容.....	29
3.9	考察.....	31
3.9.1	楽器演奏の意識に影響する要因.....	31
3.9.2	支援システムのニーズと有用性.....	32
3.9.3	今後の調査について.....	33
3.10	まとめ.....	33
第4章	新規な電子楽器の演奏正確性の分析と演奏性の主観的評価項目.....	34
4.1	はじめに.....	34
4.2	第1実験：市販及び従来研究での新規な電子楽器の演奏評価実験.....	35
4.2.1	演奏した新規な電子楽器.....	35
4.2.2	市販及び従来研究での新規な電子楽器のレイテンシー測定.....	36
4.2.3	被験者.....	39
4.2.4	演奏内容.....	39
4.2.5	演奏性の主観的評価.....	40
4.2.6	課題曲演奏と自由演奏の主観的評価結果の差異.....	40
4.3	第2実験：著者が製作した新規な電子楽器の演奏評価実験.....	41
4.3.1	演奏した新規な電子楽器.....	41
4.3.2	レイテンシー測定.....	44
4.3.3	被験者.....	46
4.3.4	演奏内容.....	46
4.4	演奏正確性の評価結果.....	47
4.4.1	IOIの導出方法.....	47
4.4.2	発音正解率.....	47
4.4.3	IOIの誤差の絶対値.....	50
4.4.4	余分な発音数.....	51
4.4.5	発音の不足数.....	52
4.4.6	音高の間違いの数.....	53
4.5	主観的評価の結果.....	54
4.5.1	因子分析.....	54
4.5.2	因子得点の分散分析.....	56

4.6	考察	58
4.6.1	演奏しやすい演奏インターフェースの特徴	58
4.6.2	演奏性の主観的評価の項目	59
4.6.3	正確な演奏ができなかった原因	60
4.7	まとめ	61
第5章	新規な電子楽器の製作	62
5.1	タブレット	62
5.2	joystick	63
5.3	鍵盤楽器	64
5.4	グローブの使用について	65
5.5	レイテンシー測定	65
5.6	まとめ	66
第6章	新規な電子楽器と従来楽器を対象にした演奏練習実験	67
6.1	被験者	67
6.1.1	楽器演奏経験がない被験者	67
6.1.2	鍵盤楽器の演奏経験がある被験者	67
6.2	演奏内容	67
6.2.1	3週間練習する課題曲	67
6.2.2	初日と最終日のみ演奏する課題曲	69
6.3	演奏練習実験の内容	70
6.3.1	楽器演奏未経験の被験者の実験内容	70
6.3.2	鍵盤楽器演奏経験がある被験者の実験内容	72
6.4	演奏音分析	72
6.5	演奏音の分析結果	72
6.5.1	課題曲による演奏精度の違い	73
6.5.2	演奏練習に伴う演奏精度の変化	73
6.5.3	共通の被験者による3種類の実験対象楽器の比較	79
6.5.4	練習初日と最終日に初めて演奏する曲	82
6.6	演奏性の主観的評価の因子分析	84
6.6.1	演奏性の主観的評価結果の傾向	84
6.6.2	4.5.1項で得られた3つの因子に対する確証的因子分析	85
6.6.3	3週間の主観的演奏性の変化	87
6.6.4	因子得点による本章の実験対象楽器の演奏性の比較	89
6.6.5	第4章の実験対象楽器を加えた場合の探索的因子分析	91
6.6.6	因子得点による9種類の実験対象楽器の演奏性の比較	93
6.7	考察	94

6.7.1	楽曲による演奏精度の違い	94
6.7.2	タブレットの演奏インターフェースの改善	95
6.7.3	joystick の演奏インターフェースの問題点	95
6.7.4	演奏インターフェースの特徴と演奏性評価の因子	95
6.7.5	演奏性に対する演奏インターフェースの特長の影響	96
6.7.6	上達過程	96
6.8	まとめ	97
第7章	総括	98
謝辞	102
参考文献	103
本論文に関する発表文献リスト	107

第1章 序論

1.1 楽器

一般的に楽器とは「音を出すための道具」、「音楽を演奏するための道具」を示し、音楽において広く用いられている。楽器は形状や発音原理などによっていくつかに分類できるが、本研究では従来楽器と新規な電子楽器の2種類に大分して説明する。

1.2 従来楽器

まず、楽器は発音源によって以下のように分類できる [1]。

- A) 気鳴楽器 (笛やラッパ) : 空気の流れを利用して発音する。気流によって音を出したり、リードや唇を振動させて発音源としたりするものがある。
- B) 弦鳴楽器 (ギターやバイオリン) : 弦の振動を発音源とする。
- C) 膜鳴楽器 (ティンパニや鼓) : 膜など平面的なものを振動させて発音源とする。
- D) 体鳴楽器 (シンバルやカスタネット) : 木片や金属あるいは石のような固体を叩いて発音源とする。
- E) 電鳴楽器 (ヴィブラフォンやエレキギター) : 電気によって作られた振動を発音源とする。

本論文では以上のうち、発音源に電氣的な発振を用いない A) から D) を「アコースティック楽器」と定義する。アコースティック楽器はオーケストラやバンド、劇伴など多くの場で演奏されている。プロの演奏以外でも学校教育や部活動などアマチュアの演奏の機会も多く、ヤマハ株式会社や株式会社河合楽器製作所など多くの企業が販売を行っている。また、アコースティック楽器とそれを模擬した電子楽器を本論文ではまとめて「従来楽器」と定義する。なお、電子楽器とは電子回路で音を生成して、センサでその音の発音と消音、あるいはおよび音色を制御する楽器である。アコースティック楽器を模擬した演奏インターフェースを有する電子楽器も、ヤマハ株式会社の電子オルガン [2] やローランド株式会社の電子ドラム [3] のように販売されて、演奏されているものがある。

1.3 従来楽器の問題点

従来楽器の問題点として、演奏が難しいものがあり、上達に多くの練習を必要とする点がある。なお、ここでの練習とは楽譜の読み方などの知識を学ぶことではなく、音の生成や音高操作に必要な演奏技術を習得することを指す。例えばピアノの演奏では適切な時刻に適切な音名の鍵を打鍵することが求められる。打楽器など音高を操作しない楽器でも適切な時刻に発音をすることが求められる。その他にもトランペットやクラリネットは息の吹き込みと指の動作といった複数の動作を同時に行う必要がある。そのような従来楽器は演奏動作が複雑になり、演奏が難しくなる場合がある。また、日常生活では従来楽器の演奏動作

と同じ、及び類似した身体動作を行うことがあまりないため、慣れない演奏動作が難しくなることも考えられる。例えば、ピアノでの鍵盤の押下はコンピュータでのキーボード操作に似ているが、決められた演奏テンポやタイミングに合わせた動作を要求されるか否か、という点が異なる。トランペットやクラリネットについては、日常生活では息の吹き込みを行うことそのものがあまりない。その結果、楽器演奏の習得や上達には多くの練習が必要になり、楽器演奏を始めることに難しさを感じる人間もいる [4]。アコースティック楽器を模擬した電子楽器も同様の問題点を持つ。従来研究 [5] [6]では従来楽器の演奏の上達を促す方法を練習や指導の側面から論じている。鍵盤楽器を対象に演奏分析を行った従来研究 [5]では継続的な演奏訓練が初学者の手指動作機能を高めていることを論じた。演奏における体の使い方を論じた文献 [6]では、同じことを何度も繰り返して訓練することが重要であるとして、演奏者に演奏のイメージを持ってもらうことが上達につながると考察した。

演奏の難しさ以外の問題点としては、手入れやメンテナンスの手間の多さがある。例えばトランペットやサクソフォンなど息の吹き込みを要する楽器は、演奏中に楽器内部に水分が溜まる。水分が溜ると音色に影響するため、その都度水分を抜いたり拭き取ったりする必要がある。ティンパニなどの膜鳴楽器は膜の張りの強さの調整や張り替えが必要になる。

その他に従来楽器の難点として、楽器本体の扱いの難しさがある。これは演奏の難しさではなく、運搬や演奏準備の際の扱いの難しさを指す。楽器は非常にデリケートであり、他のものと衝突して形状が変化すると、音色が変化する可能性がある。例として、トランペットやサクソフォン、ベルなどがある。また、サクソフォンやオーボエなどの演奏に必要なリードは、その湿らせ具合によって楽器の音色が変わる。また、リードは消耗品であり、非常に脆いため慎重に扱う必要がある。

人間が使う道具は使いにくかったり欠点があったりする場合は改良を施すことができる。しかし、アコースティック楽器は発音原理によって形状や構造に制約があるため改良が難しく、演奏インターフェースの自由度が低い。そのため、改良を施すことで先に挙げた問題点を克服することが難しい。本論文ではそれら問題点の中でも、演奏の難しさ及び上達に多くの練習を必要とする点を克服することを目指す。

なお、楽器演奏の難しさには「初心者が楽器の音をコントロールできて、ある程度上達する」段階と、「楽器演奏の熟達者が更に芸術的な演奏表現を目指す」段階がある。本論文では前者を対象として、初めて演奏する楽器を用いて単純な旋律を演奏できるようになることを目指した実験を行う。

1.4 電子楽器

本論文では従来楽器の演奏の難しさや多くの練習を必要とする点を克服する新たな手段として、新しい演奏インターフェースによって簡単に演奏できる電子楽器を利用することを提案する。本節ではまず電子楽器について説明する。電子回路で音を生成して、その音をセンサやコントローラで制御する楽器である。電子楽器は1900年初頭に真空管が誕生して

間もなく誕生したとされている [7]。従来楽器とは異なる演奏インターフェースのものとしてはテルミンが古くから存在する。テルミンは 1920 年に発表された電子楽器であり、2 本のアンテナが木製のボックスから突き出た形状をしている。テルミン本体には触らずに空間中で手をアンテナに近づけたりすることで、周波数可変オシレーターの周波数を変化させて音高と音量を調節する。初期のものとは形状が異なるが、テルミンは現在でも販売され演奏されている。テルミンと同程度の長い歴史をもつ電子楽器としてオンド・マルトノがある。1928 年に発表され、リボンコントローラによって演奏する電子楽器である。指にはめた金属製のリングでリボンをスライドさせて、オシレーターの周波数を変化させる。後に鍵盤の演奏インターフェースも搭載されて、現在でもオーケストラなどで演奏されている。

1.5 新規な電子楽器

電子楽器は 1.4 節で説明したように電子回路で音を生成して、その音をセンサやコントローラで制御する。そのため、演奏インターフェースの形状や大きさには発音原理による制約がないため、従来楽器よりも演奏インターフェースの自由度が高く、改良を施すことが可能である。近年は高性能なマイコンや様々なセンサが開発されたことで、従来楽器とは異なる多様でユニークな電子楽器 [8] が誕生している。

新しい演奏インターフェースの電子楽器は主に 2 種類に大分できる。1 つ目は新しい演奏インターフェースによって、より芸術的な演奏を目指したものである。例えば CD-Synth [9] は CD のような回転機構を演奏に取り入れることで、より芸術的な演奏を目指している。

2 つ目は新しい演奏インターフェースによって、より容易に演奏できることを目指したものである。例えば Furimpro [10] は球型のデバイスを手で持って任意の高さで振るという、日常で使う動作を用いることで直観的な演奏を目指した電子楽器である。電子楽器は演奏インターフェースの自由度の高さ故に議論が生じることもあり [8]、例えば、「誰でも簡単に演奏できる電子楽器では、誰が使っても同じような演奏になる」という意見もある。一方で、「誰でも簡単に演奏できる電子楽器は音楽演奏をはじめるきっかけとして有用である」という意見もある。そこで、本論文では従来楽器の演奏の難しさや多くの練習を必要とする点を克服する新たな手段として、後者の「従来楽器とは異なる新しい演奏インターフェースによって誰でも容易に演奏できることを目指した電子楽器」に着目して、これを「新規な電子楽器」と定義して研究を進める。簡単な演奏を目指した他の新規な電子楽器の従来研究と、それらの問題点については第 2 章で説明する。なお、演奏内容が限られる電子楽器や電子オルゴールのように、演奏者が自分で音高を操作できない電子楽器は対象外とする。

1.6 本論文の目的とその構成

本論文は従来楽器の演奏の難しさやしきいの高さを克服する新たな手段として、誰でも容易に演奏できる新規な電子楽器を実現することを目指す。第 1 章では楽器の説明と従来楽器の問題点を示す。その上で、従来楽器の問題点を克服することが期待できる新たな手段

として、新規な電子楽器を説明する。

第 2 章では市販されている新規な電子楽器と、新規な電子楽器を対象とした従来研究を紹介する。従来研究での問題点を論じて、本論文での研究と実験の方針を述べる。

第 3 章では本論文が目指す新規な電子楽器とは別に、演奏を容易にすることが期待できる手段として演奏練習支援システムの従来研究を紹介する。また、楽器演奏や演奏練習支援に関連する意識調査を実施した従来研究を紹介する。その上で、新規な電子楽器や演奏練習支援システムの必要性の調査が十分に行われていないことを述べる。本論文が目指す新規な電子楽器が必要とされるのかを明らかにするため、大学生を対象に楽器演奏や新規な電子楽器、演奏練習支援についての意識調査を実施する。その結果から、新規な電子楽器の必要性を論じる。

第 4 章では著者が修士課程にて実施した新規な電子楽器の演奏評価実験の紹介と再分析を行う。市販品及び従来研究で製作された新規な電子楽器を対象にした第 1 実験と、第 1 実験の結果を参考に設計した新規な電子楽器を対象にした第 2 実験について、その実験内容や対象とした電子楽器の概要、分析方法を紹介する。更に、新たな分析として、両実験で対象にした新規な電子楽器に対して新たな特徴量を追加した演奏正確性の分析と、全ての被験者を対象とした演奏性の主観的評価結果の因子分析を行う。それらの結果から、客観的演奏正確性と主観的演奏性に優れる演奏インターフェースの特長を考察する。更に、演奏性の主観的評価に適した評価項目について論じる。

第 5 章では演奏練習実験の対象とする新規な電子楽器を製作する。第 4 章での考察を参考に演奏しやすいことを目指した新規な電子楽器を設計、製作する。また、ここで製作した新規な電子楽器の比較対象とするための鍵盤楽器も説明する。

第 6 章では第 5 章で製作した新規な電子楽器と鍵盤楽器を対象に、3 週間の演奏練習実験を実施する。演奏内容や実験内容の説明をして、各電子楽器の客観的演奏正確性の比較や、演奏練習に伴う演奏の上達具合、上達に要する時間について論じる。更に、第 4 章の演奏評価実験で対象とした新規な電子楽器とも比較することで、第 5 章で製作した新規な電子楽器がより演奏しやすいものとなっているか評価する。

第 7 章では結論として本論文をまとめると共に、今後の新規な電子楽器開発の展望や、その評価における課題について述べる。

第2章 従来の新規な電子楽器

2.1 企業が提案、販売している新規な電子楽器

近年でも企業によって電子楽器が提案、販売されており、電子ピアノや電子ドラムだけではなく新規な電子楽器も販売されている。楽器や音楽製品を扱っている企業では株式会社コルグのカオシレーター [11]やヤマハ株式会社の TENORI-ON [12]がある。カオシレーターはタッチパネルに指1本で触ることで発音する。音色やスケール、主音、全音階か半音階かを設定した上で演奏する。本体のパネル幅で操作できるオクターブの幅は1オクターブから9オクターブまで設定できる。例えば、上下の触る位置で音の強さを操作して、左右の触る位置で2オクターブの音高を操作することなどができる。TENORI-ONはLEDによって発光するスイッチが16×16の碁盤の目のように配置されており、自由にメロディ演奏ができるSoloモードを実装している。このSoloモードではスイッチの押下によって対応された音名の音を繰り返し発音する。繰り返す回数はスイッチの上下の位置で決まる。音名は左右のスイッチの位置で決まり、全音階で左が低い音、右が高い音となる。音の強さやオクターブなどは設定用のスイッチによってあらかじめ設定して演奏する。

楽器以外の製品を主に扱っている企業が提案、販売している電子楽器として、株式会社明和電機のおタマトーン [13]がある。おタマトーンはおタマジャクシと八分音符を組み合わせたような外観をしている。リボンコントローラに触ることで発音して、触る位置によって演奏音の基本周波数が連続的に変化する。約2オクターブの範囲で音高を操作できて、更に音高をHigh、Middle、Lowの3つの音の高さに設定して演奏する。この3つの音の高さの設定では発音できる音域は重複していないため、全体として6オクターブの音高操作が可能である。音の強さはつまみによって設定する。スピーカ周辺のカバーを潰すように押さえると、音の大きさを変化させてヴィブラートを表現することができる。このおタマトーンはサイズや音高の区切りなどによっていくつか種類があり、鍵盤のように音高を区切ってラの音から1オクターブ上のミの音（全体として白鍵12個）を半音階で演奏できるおタマトーンでじたる [14]も開発されている。有限会社トゥロッシュが販売しているケロミン・アマガエル [15]はカエルのパペット人形を電子楽器にしたものである。パペット人形を演奏者の手にはめて、カエルの口を開くように手指を動かすと発音する。口を開けた大きさによって半音階で音高を操作して、1オクターブから5オクターブの範囲で設定して演奏できる。音の強さやスケールはあらかじめスイッチで設定して演奏する。

2.2 新規な電子楽器を対象とした従来研究とその問題点

大学や企業の研究室で製作されている新規な電子楽器もあるが、それら従来研究には製作物の評価において問題点がある。

2.2.1 センサによる新しい演奏インターフェースの電子楽器

センサを活用して新規な電子楽器を製作した研究例として、日常で使う動作を演奏に組み込んだ Furimpro [10]がある。これは距離センサと加速度センサを内蔵した球型のデバイスを手で持って演奏する。地面からの高さを測定して、加速度センサによって振る動作を検知する。任意の高さで振ることでその高さに対応した音高の音を発音する。しかし、演奏正確性の定量的評価は行われておらず、演奏者の内観報告による評価のみが行われている。そのため、これを使って正確な演奏ができるかは明らかになっていない。

電子楽器こすりん [16]は細い金属棒に銅線を巻いてプラスチックの筒で覆い、その外部を磁石で上下に擦って電磁誘導を起こして発音する。更に、スピーカからの音をビニールチューブに通して奏者の口の中に伝導させて、口の形によって音色を操作する。このこすりんを使用することに対する主観的評価が行われ、バンド演奏にこすりんを組み込みたいなどの肯定的な内観報告が得られた。しかし、演奏正確性の評価は行われておらず、また音階の操作が難しそうと感じる内観報告があった。

2.2.2 スイッチ操作により演奏する電子楽器

新しく製作、あるいは改造したスイッチを利用することによって、発音操作や音高操作を行う演奏インターフェースを提案することも行われた。鍵盤に代わる音高操作インターフェースを提案した従来研究 [17]では、4つのスイッチによって演奏する電子楽器を提案している。演奏する際は1つ、あるいは複数のスイッチを同時に押下して、その組み合わせに対応した音名の音を発音する。これにより、鍵盤楽器よりも押す対象を少なくした上で1オクターブの演奏を可能にしている。試作した電子楽器を第三者に演奏してもらった結果、楽譜に集中して演奏できたという感想が得られている。しかし、指定した楽譜に対してどの程度正確に演奏できたかなど、演奏正確性の評価は行われていない。

発音操作と音高操作とでそれぞれ新しい演奏インターフェースを提案している従来研究 [18]では、発音操作の演奏インターフェースとしてポテンショメータを利用した円弧状に移動するつまみ状のスイッチを提案している。スイッチを弾くことによって、その力加減によって音の強さを操作することができる。音高操作では、押下によって発音するスイッチを複数個配置して、それらを押下すると対応した音名の音が発音される。それらスイッチは物理的な高さを任意に変更できて、発音される音名とスイッチの対応を視覚や触覚で認識できる。例えば、主音のスイッチの高さを高くすることが挙げられている。しかし、それらの演奏インターフェースでは演奏正確性や操作性の評価は行われていない。

2.2.3 演奏内容が制限される電子楽器

演奏内容が制限される点は本論文が目指す電子楽器とは異なるが、従来楽器とは異なる演奏インターフェースの電子楽器として紹介する。タッチパネルに表示された楽譜上の音

符に触ることで発音する電子楽器「Cymis」では演奏内容が楽譜の内容に限られるが、重度障害者でも演奏できて楽しめる [19]など、福祉関連の利用が検討されている。Cymis の評価では演奏音の分析による演奏正確性の定量的評価が行われたが、その内容は演奏音の音名や発音時刻の正誤の判定、タッチパネルに触った位置の正誤の判定が主であり、誤差の程度やその原因の調査は十分でなかった [20]。また、評価対象は Cymis のみであり、他の電子楽器や改良した Cymis との比較も行われなかった。

2.2.4 既存の道具を改造した電子楽器

既存のヒューマンインターフェースや日常で使う道具を改造して新規な電子楽器を製作した従来研究として、ゲームインターフェースを電子楽器にした従来研究 [21]がある。ゲームのコントローラとして市販されているゲーミングキーボードと、シューティングゲームに用いるバトルスティック（スティック本体を手で握って卓上でスライドさせて位置を変えて、指でボタンを押下するタイプ）によって演奏する電子楽器が提案されている。ゲーミングキーボードではキーに音名を対応させて、その他にオクターブ操作用のキーを割り当てることで、キーの押下で演奏する。バトルスティックではその前後の位置によって1オクターブの音高の操作を行い、ボタンの押下によって発音を行う。着想の良さや提案楽器の位置づけ、操作性の評価が行われているが、それらの定量的評価や演奏正確性の評価は行われていない。

洗濯ばさみを電子楽器にすることを提案した従来研究 [22]では、色覚センサを備えた洗濯ばさみを演奏インターフェースとした。演奏可能な音域は明示されていないが、音色や音高を色によって区別した紙を円状に配置、あるいは各色の紙を分けて吊るした状態で配置されている。それを洗濯ばさみで挟む、あるいは触れることによって発音して、色による感覚的な音色の選択ができることを目指している。演奏実験による評価は行われておらず、演奏インターフェースの改良や、挟んだものと生成される音色を近づける工夫が必要であることが論じられている。

2.2.5 従来楽器に付加価値を追加した電子楽器

従来楽器の演奏インターフェースを改造して、元々の従来楽器における問題点の克服を目指した従来研究を紹介する。演奏の難しさやしきいの高さを克服することを目指す本論文とは目的が異なるが、新しい演奏インターフェースの電子楽器として紹介する。モバイルクラヴィア II [23]は2オクターブ分の小型鍵盤において、本来黒鍵がない位置に黒鍵を追加した鍵盤楽器である。通常小型鍵盤は運搬が容易であるが、その小型さ故に音域が狭く、キートランスポーズ機能などによって広い音域の演奏を実現している。しかし、打鍵した鍵と出力音に違和感がある、各鍵の出力音を視覚的に認識できない、などの問題点もある。この問題点に対して、モバイルクラヴィア II は黒鍵を追加することで度数単位でのキートランスポーズ機能を実装している。更に、音が割り当てられていない黒鍵は NULL 鍵と

して、音が割り当てられた鍵盤とは異なる色で発光させる。これにより通常の小型鍵盤の運搬の容易さを維持しつつ、問題点の克服を目指している。モバイルクラヴィアⅡは有効性の評価実験が行われており、指定の課題曲を十分に演奏できる音大生とプロピアニストを被験者とした。15分の演奏で引き間違えなく演奏できる被験者やベロシティのばらつきを小さく演奏できる被験者が確認された。

著者も過去に新規な電子楽器として電子ハンドベル [24]を製作している。これは加速度センサによって振る動作を検知して、ハンドベルと同様に振ることで発音する。通常、ハンドベルは1つのベルで1つの音名のみを発音するが、電子ハンドベルは持ち手に音名操作のスイッチを取り付けて、2オクターブの半音階の発音を可能にしている。それにより少人数での演奏や導入コストの低下を目指している。この電子ハンドベルの詳細は4.2.1項にて説明する。電子ハンドベルの評価では被験者の演奏体験とその内観報告のみを行っており、音名操作が難しいなど、演奏しにくいと評価されている。

2.2.6 音楽演奏以外にも利用される電子楽器

本論文は音楽演奏を目的として研究、実験を進めるが、新規な電子楽器を他分野に活用する従来研究についても紹介する。Freqtric Drums [25]は複数人で楽器本体の電極を手で持って、その状態で互いの体に触ったりハイタッチしたりする。その際の通電量を測定して発音する。音高操作の方法は明示されていないが、キラキラ星やカエルの歌、カノンなどの演奏ができることが確認されている [26]。これを演奏することで子供の1人遊びの防止に繋がるなど、教育や福祉現場での利用が考えられている [26]。

左右の靴型の演奏インターフェースに4つずつ、合計8個のスイッチが設置されているオトクツ [27]という電子楽器はスイッチを踏むことで発音して、左右の足で踏むスイッチの組み合わせによって音高を操作する。このオトクツは介護予防やリハビリに利用することをコンセプトとしている。普段行わない運動ができることや、手術後に足の感覚を取り戻すなどの成果が期待されている。使用者からの内観報告より、演奏が楽しい、また演奏したいという意見が得られている。ユニバーサルデザインもコンセプトとなっており、誰でも簡単に演奏できることを目指した点は本論文が目指す新規な電子楽器と同じである。しかし、本項で紹介した音楽演奏以外の分野での活用を目指した電子楽器の従来研究においても演奏正確性の分析は行われておらず、演奏のしやすさは評価されていない。これらの従来研究は音楽演奏や演奏技術の習得を目的としているわけではないためである。

2.2.7 従来研究の問題点のまとめ

従来研究では新規な電子楽器を用いた演奏について、どの程度楽器演奏を制御できて正確な演奏ができるか評価することは行われてこなかった。また、複数の新規な電子楽器を比較することや従来楽器との比較も行われていない。そのため、どのような特徴を持つ演奏インターフェースが演奏しやすいか明らかになっていない。製作した電子楽器を実際に演奏

してみると演奏が難しいと評価され、正確に演奏できなかった従来研究もあった [16] [24]。更に、電子楽器の演奏の正確さや演奏性を評価する際に、どのような評価手法や評価項目が適切であるかも明らかになっていない。

2.3 本論文での実験の方針

新規な電子楽器の従来研究の問題点を受けて、楽器演奏に対するしきいの高さを克服できるような、演奏しやすい新規な電子楽器の実現を目指す。それを達成するために、本論文では新規な電子楽器の演奏評価実験を経て、演奏しやすい演奏インターフェースの特徴と、その演奏性の評価項目について論じることとした。

演奏しやすい演奏インターフェースの特長の検討においては、客観的演奏正確性（以下、演奏正確性）に優れる演奏インターフェースの特徴から論じる。ここでの演奏正確性とは演奏音から分析した演奏の正確さや間違いの少なさを指す。例えば、楽譜通りのタイミングで発音できているか、発音の過不足がないか、音列が正しいか、などがある。本論文では新規な電子楽器の演奏評価実験で記録した演奏音を分析して演奏正確性を定量的に評価する。複数の新規な電子楽器に対して演奏評価実験を実施して、演奏正確性と演奏インターフェースの特徴を比較することで、演奏しやすい演奏インターフェースに共通する特徴を得る。なお、本論文では以下の観点から演奏しやすい演奏インターフェースを検討する。

- 初めて演奏する段階でも従来楽器と同程度の間違いの少なさで演奏ができるか。（第4章と第6章にて論じる）
- 短い練習期間で従来楽器と同程度の間違いの少なさで演奏ができるか。（第6章にて論じる）

新規な電子楽器の演奏性の評価項目の検討について、まず演奏性とは新規な電子楽器を演奏した演奏者が感じる主観的な演奏のしやすさを指す。例えば、発音を操作しやすいか、音高を操作しやすいか、上達を感じるか、などの評価がある。新規な電子楽器の演奏評価実験において、被験者に演奏性を複数の評価項目で評価してもらい、その結果に対して因子分析を行う。多くの評価項目をより少ない因子にグルーピングすることで、評価項目を減らして演奏性を評価する際の被験者の負担を軽減しつつ、演奏性を適切に評価できる評価項目を検討する。

以上のように、本論文では新規な電子楽器の「演奏音から分析した客観的演奏正確性」と「主観的演奏性」という2つの異なる観点に注目して実験を行う。

2.4 まとめ

本論文では「従来楽器とは異なる新しい演奏インターフェースによって誰でも容易に演奏できることを目指した電子楽器」を新規な電子楽器と定義している。市販されている新規な電子楽器について、楽器メーカーやそれ以外の企業が提案、販売しているものを紹介し

た。販売されていないが、研究活動で製作された新規な電子楽器も紹介した。従来研究での新規な電子楽器はそれぞれ特徴が異なり、多様なセンサの利用やスイッチの改造などによって、全く新しい演奏インターフェースが製作されている。既存の道具を改造した新規な電子楽器も製作されており、日常で使われている道具や従来楽器を改造したものがある。新規な電子楽器の用途や目的は楽器演奏のみではなく、福祉やリハビリテーションでの利用を目的としたものも製作されている。従来研究の問題点として、製作した新規な電子楽器の演奏正確性や演奏性の評価が不十分であることを示した。それにより、演奏しやすい演奏インターフェースの特徴が明らかになっておらず、更に演奏性の適切な評価項目も検討されていないことも示した。本論文が目指す新規な電子楽器を実現するには、製作した新規な電子楽器の演奏正確性と演奏性を評価することが必要不可欠である。本章で挙げられた従来研究の問題点より、本論文で行う研究と実験の方針を決定した。

第3章 楽器演奏の意識調査

3.1 はじめに

第2章では新規な電子楽器を対象にした従来研究とその問題点を挙げた。その問題点を受けて本論文では新規な電子楽器の製作と演奏評価実験を行うわけであるが、ここでもう一つ問題点がある。従来楽器以外の楽器に対する意識、つまり新規な電子楽器を演奏したいと思うか否か、興味の有無などはこれまで調査されておらず不明であった。そのため、本論文が目指す「容易に演奏できる新規な電子楽器」が実現したとしても、演奏者はそれを必要としない可能性もある。そこで、本論文が目指す新規な電子楽器が必要とされるか意識調査を行った。

3.2 楽器演奏に関する意識調査の従来研究

まず、音楽や楽器演奏に対する意識を調査した従来研究を紹介する。過去には人が楽器演奏に対してどのような意識を持っているかの調査が行われた。幼稚園児や小学生約2200人を対象にした調査では回答者の約9割が楽器演奏を好きな音楽活動として挙げた [28]。現代の若者316人を対象にした調査では、年齢層によって差はあるが男性では約4割、女性では6~8割の回答者が演奏してみたい楽器があると回答した [29]。なお、同調査においてどのような楽器を演奏したいか集計した結果、上位にはギターやドラム、バイオリン、フルートなど、バンドやクラシックで演奏されるアコースティック楽器が挙げられ、約半数を占めていた。保育者をめざす学生が通う専門学校の1年生を対象としたピアノ演奏の意識調査では、個別のレッスンや個人に合ったレッスンを充実させることが、ピアノを弾くことが楽しくなることにつながり、満足感を得ることがわかった [30]。

3.3 演奏練習支援に関する従来研究

本論文では楽器演奏をより容易にする手段として新規な電子楽器に着目したが、他にも演奏の習得や上達を促すことが期待できるものとして演奏練習支援システム（以下、支援システム）というものがある。その名前の通り、演奏の上達を支援したり、指導者に代わって演奏指導をしたりする機能を有するシステムである。

3.3.1 間違いの提示やアドバイスをフィードバックする支援システム

支援システムの研究ではギターや鍵盤楽器などの従来楽器の演奏を分析して、その演奏の間違いを指摘することで演奏上達を支援することを目指している [31] [32] [33]。ギター演奏を対象にした支援システムでは弦の押さえ方をCGで説明して、更に正しい音が出ているか自動判定する支援システムが提案されている [31]。同研究ではあらかじめ用意した「正しく弾けている音」と「正しく弾けていない音」のデータベースを用いて、k最近傍法

により正しく弾けているか判定する。また、正しい音が出せていない典型的な 4 種類の原因をシステムに設定しており、演奏者に考える原因を提示する機能も実装している。提案した支援システムの評価について、正しい音が出ているかの自動判定の正解率を分析した結果、1~3 弦では 90%、4~5 弦では 85%となった。しかし、このシステムを使って練習することでより上達ができるかなど、支援システムそのものの有効性の評価は行われていない。

鍵盤楽器を対象とした従来研究について、音階演奏を対象にした支援システムの従来研究 [32]では、メトロノームに合わせて演奏すると、演奏課題に対する打鍵時刻のずれや打鍵強度、押鍵時間長のずれをリアルタイムで表示するシステムを提案している。更に、演奏後は熟達度の推定による演奏の点数やアドバイス文の表示を行う。熟達度の推定手法は文献 [34]にて解説されている。熟達度は演奏における指の折り返しと交差を元に 1 オクターブの上下演奏を 4 つの部分音列に分割して、各部分音列における代表点をスプライン補間する。これにより求めたスプライン補間曲線と打鍵時刻のずれ、打鍵強度、押鍵時間長のズレなどの演奏データとの差から 100 点満点の熟達度を推定する。

鍵盤楽器演奏におけるリズム学習に注目した従来研究 [33]では、演奏音より適切な打鍵、及び離鍵タイミングをチェックする機能を有した演奏学習支援システムを提案している。楽譜とその音符の音長情報提示機能により、楽譜上に単旋律の各音符の音長情報を横棒で表示する。はじめは音長情報が青色で表示されていて、発音中は該当する音長情報の色が曲のテンポに合わせて左から徐々に黄色に変化する。楽譜の音長を超過して発音した場合は色が赤に変わり、音長情報の横棒が超過した分だけ伸び続ける。これにより、自身の演奏を視覚的に確認できる。

3.3.2 フィードフォワードな支援システム

演奏の分析やその結果のフィードバックは行わずに、次に行うべき演奏内容の提示や演奏補助のみを行うフィードフォワードな支援システムも研究されている。鍵盤楽器の演奏練習に対して、投影機によって壁や鍵盤に情報を投影する支援システムを提案した従来研究 [35]では、楽譜の表示や次に打鍵すべき鍵盤位置を提示する機能を実装した支援システムを提案している。更に、その投影した楽譜上に任意のキューポイント（集中して練習したい箇所のマーキング）の設定機能、模範演奏再生機能など、練習を支援する機能も実装している。

3.3.3 支援システムの有効性を評価した従来研究

支援システムの提案、製作を行い、更に評価実験によりシステムの有効性、つまり支援システムを使うことでより上達することができるか分析することも行われている。本項では 3.3.1 項、3.3.2 項で紹介した従来研究の中でも、提案システムの有効性を評価した従来研究を紹介する。

3.3.1 項で紹介した鍵盤楽器の音階演奏に対する打鍵時刻のずれや打鍵強度、押鍵時間長の表示や熟達度の点数の表示、アドバイス文の表示を行う支援システムの従来研究 [32]では、提案システムの使用の有無や練習前後によって演奏の熟達度に差があるか分析して、提案システムの有効性を論じている。提案システムを使った被験者は、練習後に打鍵時刻のズレが小さくなる、100点満点で評価される熟達スコアが上昇する、打鍵強度のばらつきが小さくなるなど、提案システムの有効性が示されている。

鍵盤楽器の演奏音より適切な打鍵、及び離鍵タイミングをチェックする機能を有した支援システムを提案している従来研究 [33]では、初学者を被験者にした評価実験を行っている。なお、初学者を対象としていることから、楽曲を演奏する際は演奏テンポを 12.5BPM と遅く設定している。評価のパラメータとして打鍵ミスとリズムミスを用いており、打鍵ミスとは課題曲に対する余分な打鍵、未打鍵、楽譜と異なる鍵盤の打鍵を行ってしまうことを指す。リズムミスとは打鍵時間の ± 0.3 s(64分音符の音価に相当)以上の誤差で演奏してしまうことと、離鍵から次の音の打鍵までの時間間隔において ± 0.6 s(32分音符の音価に相当)以上の誤差で演奏してしまうことを指す。評価実験を行った結果、提案システムを使った30分の練習を経て、打鍵ミスやリズムミスが減少することが確認されている。

3.3.2 項で紹介した、鍵盤楽器演奏に対する支援システムを提案した従来研究 [35]では、その評価実験を実施しており、演奏音から打鍵ミス数を導出している。打鍵ミスとは課題曲に対する余分な打鍵、未打鍵、楽譜と異なる鍵盤の打鍵を行ってしまうことを指す。更に、その実験での被験者の練習の様子やヒアリングから、被験者によって練習方略が異なることを考察した。評価実験の結果、提案システムを使った打鍵位置の確認や模範演奏を試聴して練習するだけでなく、打鍵位置提示機能を ON/OFF することで補助機能なしでも演奏ができるか確認したり、キューポイントを用いて苦手な部分を集中的に練習したりする練習方略の被験者は、練習を経て打鍵ミス数を減少できることがわかった。

3.3.4 演奏練習支援に関連する意識調査

演奏練習支援に関連する意識調査を行った従来研究として、2006年に行われた20～60代の2000人を対象にしたアンケート調査 [36]がある。ここでは約4割の回答者が、未経験者の楽器演奏習得には演奏練習ができる環境やレッスンを受けることが重要である、と回答している。このことから、指導者に代わって演奏者にアドバイスを提示する機能を有する支援システムは、演奏指導を重要視する演奏者に対しても有用である可能性がある。

従来研究では鍵盤楽器などの従来楽器を対象とした支援システムが研究されてきたが、従来楽器だけではなく新規な電子楽器の演奏においても、早期上達や必要な練習時間の短縮が期待できる。しかし、新規な電子楽器を対象とした支援システムやその研究は例がなく、また演奏者が支援システムを使って演奏練習したいか否かは調査されていない。新規な電子楽器の支援システムが実現するならば、新規な電子楽器において「従来楽器とは異なる新しい演奏インターフェースによって誰でも容易に演奏できること」を目指す必要はなくな

る可能性がある。その逆も然りであり、本論文が目指す新規な電子楽器が実現するならば、それを対象にした支援システムは必要とされない可能性がある。そこで、新規な電子楽器とそれを対象にした支援システムのそれぞれの必要性、及びそれらの併用についての意識調査を行うこととした。

3.4 意識調査

2019 年度と 2020 年度に東京情報大学の学生に対して楽器演奏や電子楽器、電子楽器を対象とした支援システムについての意識調査 [4] [37]を実施した。なお、意識調査では電子楽器と支援システムは既存の製品や製作物に限定して調査せず、また今後製作されるものも含めて広義での電子楽器と支援システムについて調査することとした。ただし、いずれも容易に演奏できることや上達できることに重きを置いて調査した。電子楽器は「容易に演奏できるが音の表現が制限されるもの」として、アコースティック楽器を模擬しているか否かは指定しなかった。支援システムは指導者からアドバイスを受ける従来の練習手法と近い練習形態を想定するため、アドバイスや間違いの指摘を行う機能によって上達できるものとした。実際の調査では電子楽器と支援システムは上記のように定義して、それらの特徴を想起させる質問文を使用した。

3.5 意識調査の対象

東京情報大学で開講されている「社会情報学概論」と「サウンドデザイン論」の2つの講義の受講者に対して実施した。講義の冒頭に実施することで、音楽や電子楽器、支援システムなどに対する先入観や予備知識のない状態で回答した。なお、この調査において個人のプライバシーは守られることと、回答結果が成績に一切関わらないことを示した上で実施した。

社会情報学概論では 2020 年度後期と 2019 年度後期の両年度で意識調査を実施した。1 年生の必修科目であり、複数の教員が各研究内容を紹介して研究の特徴の理解を促す内容となっている。集計結果は講義の中で、新しいインターフェースの電子楽器の研究例を説明することにも用いられた。

サウンドデザイン論では 2019 年度後期の意識調査を実施した。2 年生以上の希望者が受講する。音という物理現象の知識や、社会と音との関わりについて学ぶ。集計結果は音楽療法での新しい電子楽器の活用を説明するための例としても用いられた。

学校の授業以外に楽器の演奏経験がある者を経験者と定義して、各講義での楽器演奏経験者と未経験者の人数を表 1 に示す。各講義での経験者と未経験者の比率に差があるかカイ二乗検定を行ったところ、有意な差がない($p=0.39$)ことが確認された。以後に示す集計結果では、2019 年度は両科目の集計結果を合わせたものであり、2020 年度は社会情報学概論のみの集計結果として扱う。

表 1 楽器演奏経験者と未経験者の人数。

	経験者	未経験者	合計
2020 年度			
社会情報学概論	51(27.9%)	132(72.1%)	183(100%)
2019 年度			
社会情報学概論	61(38.1%)	99(61.9%)	160(100%)
サウンドデザイン論	27(31.0%)	60(69.0%)	87(100%)
合計	139	291	430

3.6 質問項目

3.6.1 2019 年度

2019 年度の意識調査で使用した質問項目と回答方式を以下に示す。一部の質問項目は楽器演奏経験者のみが回答するものとなっている。

- A) 楽器の演奏経験（音楽の授業を除く）について：以下から択一で選択
1. 普段楽器を演奏している
 2. 楽器を演奏していないが、過去に演奏経験がある
 3. これまで楽器を演奏していないが、将来的に演奏したいと考えている
 4. これまで楽器を演奏していない、かつ今後も演奏するつもりはない
- B) 楽器演奏において、どのようなときに楽しさを感じますか？：以下から複数回答有り
回答
1. 難易度の高い楽曲の演奏ができるようになったとき
 2. 合奏をしているとき
 3. 自分が理想としている演奏ができたとき
 4. 曲の完成度や演奏の人数に関わらず、演奏をしているだけで楽しい
 5. 楽器を使って音を鳴らせるだけで楽しい
 6. 楽しさを感じることはない
 7. その他
- C) 演奏中の表現が発音操作や音高操作などに限られる（例：演奏中に音の強弱や音色を変えたり、音高をゆらしたりすることができない）が、自分が思ったメロディーを簡単に演奏できる電子楽器があれば演奏したいと思いますか？：以下から択一で選択
1. 演奏したい

2. 演奏したくない
 3. わからない
- D) 1人での楽器演奏の練習を支援するシステム（例：演奏音を分析して、間違いを指摘したりアドバイスをしたりするシステム）があれば、演奏経験がない電子楽器でも演奏してみたいと思いますか？：以下から択一で選択
1. 演奏したい
 2. 演奏したくない
 3. わからない
- E) 楽器演奏をはじめるとは難しいと思った楽器があれば、その代表的な楽器名をひとつ入力してください。なければ、「なし」と入力してください。：自由記述
（※質問 F）と合わせて、本論文では集計結果を割愛する。）
- F) 前の質問で記入した楽器について、楽器演奏をはじめるとは難しいと思った理由を選んでください。：以下から複数回答有りで回答
（※演奏をやめた要因を調査する質問 I）と概ね同様の結果と結論になったため、本論文では集計結果を割愛する。）
1. 技術的に難しい
 2. 金銭的に楽器などの準備が難しい
 3. 指導者がいない
 4. 演奏する場所や団体、機会、環境がない
 5. その他
- G) 楽器演奏経験者（音楽の授業を除く）の方へ質問します。楽器演奏を始めた理由はなんですか？：楽器演奏経験者のみが以下から複数回答有りで回答
（※演奏の楽しさを調査する質問 B）と概ね同様の結果と結論になったため、本論文では集計結果を割愛する。）
1. 特定の曲を演奏したいと思ったから
 2. 特定のアーティストと同じように演奏したいと思ったから
 3. 演奏したい、興味がある楽器があったから
 4. 知人に勧められたから
 5. 演奏している人が格好良いので、自分も格好良くなりたかったから
 6. 演奏している人がかわいいので、自分もかわいくなりたかったから
 7. その他

- H) 楽器演奏経験者（音楽の授業を除く）の方に質問します。あなたが楽器演奏をやめたり、挫折したりした楽器があれば、その代表的な楽器名をひとつ入力してください。：自由記述
- I) 前の質問で記入した楽器について、楽器演奏をやめたり、挫折したりした理由を選んでください。：前の質問 H)に回答した楽器演奏経験者のみが以下から複数回答有り
回答
1. 技術的に難しかった
 2. 金銭的に演奏を続けることが難しかった
 3. 指導者がいなかった、もしくはいなくなった
 4. 演奏する場所や団体、機会、環境がなくなった
 5. 楽器演奏に対して興味がなくなった
 6. その他
- J) 楽器演奏をやめた、挫折したことがある方、もしくは楽器演奏を始めることは難しいと思ったことがある方に質問します。その理由を克服できる電子楽器があれば、その電子楽器を演奏したいと思いますか？：経験者のみが以下から択一で選択
（電子楽器の是非を調査する質問 C)と同様の結果と結論になったため、本論文では集計結果を割愛する。）
1. 演奏したい
 2. 演奏したくない
 3. わからない

3.6.2 2020 年度

3.6.1 項で示した 2019 年度の質問項目の回答結果等を参考に、再検討した以下の質問項目を使用した。一部の質問項目は楽器演奏経験者のみ、あるいは未経験者のみが回答した。

- A) 楽器の演奏経験について質問します：経験者のみが以下から択一で選択
（※2019 年度(3.6.1 項)で使用した質問 A)を経験者と未経験者と分けるため、次の質問 B)と分けて使用）
1. 普段楽器を演奏している
 2. 今は楽器を演奏していないが、過去に演奏経験がある（音楽の授業を除く）
- B) 今後の楽器の演奏に関する希望について質問します：未経験者のみが以下から択一で選択
（※2019 年度(3.6.1 項)で使用した質問 A)を経験者と未経験者と分けるため、下線部

を変更して前の質問 A)と分けて使用)

1. 今後、演奏するつもりはない
2. 将来的に演奏したいと考えている

C) 楽器演奏において、どのようなときに楽しさを感じますか？：経験者のみが以下から複数回答有りて回答

(※2019 年度(3.6.1 項)で使用した質問 B)を経験者と未経験者と分けるため、次の質問 D)と分けて使用。芸術的な演奏が楽しさに影響するか調査するために選択肢 2 を追加。)

1. 自分が思った通りに演奏できたとき (※この選択肢は 2019 年度と同質問項目における選択肢「自分が理想としている演奏ができたとき」に相当する)
2. 個々の演奏技術としてヴィブラートやアクセントなどの芸術的表現を思った通りに演奏できたとき (※2020 年度でのみ使用)
3. 楽器を使って音を鳴らせるだけで楽しい
4. 曲の完成度や演奏の人数に関わらず、演奏をしているだけで楽しい
5. 難易度の高い楽曲の演奏ができるようになったとき
6. 合奏しているとき
7. 楽しさを感じることはない
8. その他

D) 義務教育での音楽の授業での楽器演奏において、どのようなときに楽しさを感じますか？：未経験者のみが以下から複数回答有りて回答。

(※2019 年度(3.6.1 項)で使用した質問 B)を経験者と未経験者と分けるため、下線部を変更して、前の質問 C)と分けて使用。回答結果の分析では質問 C)と同じものとして扱った。芸術的な演奏が楽しさに影響するか調査するために選択肢 2 を追加。)

1. 自分が思った通りに演奏できたとき (※この選択肢は 2019 年度と同質問項目における選択肢「自分が理想としている演奏ができたとき」に相当する)
2. 個々の演奏技術としてヴィブラートやアクセントなどの芸術的表現を思った通りに演奏できたとき (※2020 年度でのみ使用)
3. 楽器を使って音を鳴らせるだけで楽しい
4. 曲の完成度や演奏の人数に関わらず、演奏をしているだけで楽しい
5. 難易度の高い楽曲の演奏ができるようになったとき
6. 合奏しているとき
7. 楽しさを感じることはない
8. その他

- E) 現在演奏している楽器名を 1 つだけ記入してください。演奏していない場合は空白で結構です。：経験者のみが自由記述
(※2020 年度で新たに使用。現在行っている楽器演奏においてネックに感じる要因があるか確認するために追加した。質問 F)と合わせて、本論文では集計結果を割愛する。)
- F) 前の質問で記入した現在演奏している楽器について、演奏の継続を断念するほどではないが、演奏していて大変なことやネックになっていることを選んでください。：経験者のみが以下から複数回答有りて回答
(※2020 年度で新たに使用。現在行っている楽器演奏においてネックに感じる要因があるか確認するために質問 E)と合わせて追加。なお、演奏をやめた要因を調査する質問 H)と概ね同様の結果と結論になったため、本論文では集計結果を割愛する。)
1. 演奏が技術的に難しいこと
 2. 楽器演奏に対して興味がなくなること
 3. 演奏する場所や団体、機会、環境を維持することが難しいこと
 4. 指導者がいないこと
 5. 金銭的な負担があること
 6. 特にない
 7. 現在演奏している楽器はない
 8. その他
- G) 楽器演奏をやめたり、挫折したりした楽器がありますか？ある場合はその代表的な楽器名をひとつだけ記入してください。そのような楽器が無い場合は空白で結構です。：経験者のみが自由記述
- H) 先の設問で、楽器演奏をやめたり、挫折したりした楽器がある場合、その理由を選んでください。：経験者のみが複数回答有りて回答
1. 演奏が技術的に難しいこと
 2. 楽器演奏に対して興味がなくなること
 3. 演奏する場所や団体、機会、環境を維持することが難しいこと
 4. 指導者がいないこと
 5. 金銭的な負担があること
 6. 特にない (※2020 年度でのみ使用)
 7. その他
- I) 音楽の授業も含めてこれまで経験した楽器の中で、特に演奏が難しいと感じた楽器名を 1 つだけ記入してください。そのような楽器が無い場合は空白で結構です。：自由記

述

(※2020 年度で新たに使用。楽器演奏においてどのような操作が難しいと感じるか調査するために追加。)

- J) 前の質問で記入した楽器について、どの操作が難しいと感じたか選んでください。：複数回答有りで回答

(※2020 年度で新たに使用。楽器演奏においてどのような操作が難しいと感じるか調査するために質問 I)と合わせて追加。)

1. 難しく感じる楽器はない
2. 音高や音名（ドレミ）を変えること
3. 発音のタイミングを操作すること
4. 発音を維持すること
5. 音を消すタイミングを操作すること
6. 音の強弱を調整すること
7. ヴィブラート（音の高さの揺らぎ）をかけること
8. その他

- K) 楽器演奏をやめた、挫折した理由、あるいは、演奏継続を断念するほどではないが、演奏を続けるにあたって大変な理由やネックになる理由を克服できる電子楽器があれば、その電子楽器を演奏したいと思いますか？：経験者のみが以下から択一で選択

(※2019 年度での質問 J)について、演奏継続を断念するほどではないが、その要因を克服する電子楽器の是非を問うため、下線部を変更して再度使用。なお、電子楽器の是非を調査する質問 M)と概ね同様の結果と結論になったため、本論文では集計結果を割愛する。)

1. 演奏したい
2. 演奏したくない
3. わからない

- L) 音楽の授業において、演奏を続けるにあたって大変な理由やネックになる理由を克服できる電子楽器があれば、その電子楽器を演奏したいと思いますか？：未経験者のみが以下から択一で選択

(※2019 年度での質問 J)について、未経験者に対しても楽器演奏においてネックに感じる要因を克服する電子楽器の是非を問うため、下線部を変更して再度使用。なお、電子楽器の是非を調査する質問 M)と概ね同様の結果と結論になったため、本論文では集計結果を割愛する。)

1. 演奏したい

2. 演奏したくない
3. わからない

M) 演奏中の表現が発音操作や音高操作などに限られる（例：演奏中に音の強弱や音色を変えたり、音高をゆらしたりすることができない）が、自分が思ったメロディーを簡単に演奏できる電子楽器があれば演奏したいと思いますか？：以下から択一で選択

1. 演奏したい
2. 演奏したくない
3. わからない

N) 1人での楽器演奏の練習を支援するシステム（例：演奏音を分析して、間違いを指摘したりアドバイスをしたりするシステム）があれば、演奏経験がない電子楽器でも演奏してみたいと思いますか？：以下から択一で選択

1. 演奏したい
2. 演奏したくない
3. わからない

3.7 電子楽器及び支援システムのニーズ

本節では電子楽器や支援システムにニーズがあるかを分析した。しかし、そもそも演奏が簡単な電子楽器があるならば支援システムは不要と思われる、あるいは従来楽器の演奏練習支援システムが実現できれば演奏が容易な電子楽器を目指す必要がなくなる可能性もある。そこで、本章ではまず電子楽器と支援システムのそれぞれのニーズを分析し、その上でそれらの併用について分析した。

3.7.1 電子楽器のニーズ

経験者と未経験者に「演奏中の表現が発音操作や音高操作などに限られる（例：演奏中に音の強弱や音色を変えたり、音高をゆらしたりすることができない）が、自分が思ったメロディーを簡単に演奏できる電子楽器があれば演奏したいと思いますか？」の質問に回答してもらい分析した。なお、ここでの電子楽器の説明は上記の文章のみとして、具体的な演奏インターフェースや演奏音の説明、及びそれらの図示は行わなかった。その理由は、本章は既存の電子楽器や製品を特定せず、また今後製作されるものも含めてニーズを分析するためである。

各年度の集計結果を図 1 と図 2 に示す。この質問は図中の 3 つの選択肢から 1 つを選択して回答した。結果、経験者と未経験者ともに約半数の回答者が電子楽器を演奏してみたいと回答した。これより、音の表現が制限される電子楽器でも演奏したい学生が一定数いることがわかった。また、2019 年度と 2020 年度で回答の比率に差があるか調べるため、経験者

と未経験者の集計結果をあわせてカイ二乗検定を行ったところ、それらに有意差がない ($p=0.23$)ことが確認された。



図 1 「演奏中の表現が発音操作や音高操作などに限られるが、自分が思ったメロディを簡単に演奏できる電子楽器があれば演奏したいと思いますか？」の集計 (2019 年度)。

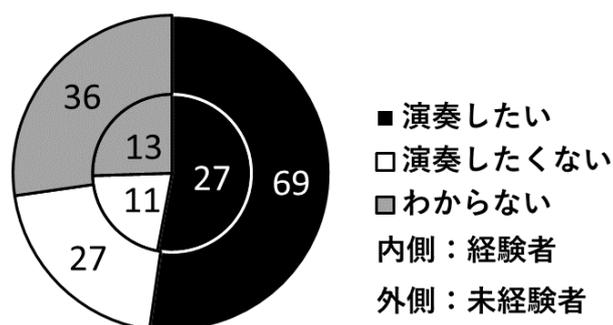


図 2 「演奏中の表現が発音操作や音高操作などに限られるが、自分が思ったメロディを簡単に演奏できる電子楽器があれば演奏したいと思いますか？」の集計 (2020 年度)。

3.7.2 支援システムのニーズ

経験者と未経験者に「1人での楽器演奏の練習を支援するシステム (例：演奏音を分析して、間違いを指摘したりアドバイスをしたりするシステム)があれば、演奏経験がない電子楽器でも演奏してみたいと思いますか？」に回答してもらい分析した。なお、支援システムには演奏を分析してその結果を練習者にフィードバックするタイプと、次に行う演奏や動作を教示するフィードフォワードな支援システムがある。本章では指導者が演奏者にアドバイスする場面と近くなるようにするため、演奏者に演奏の分析結果や演奏の良し悪しをフィードバックする支援システムを想起するような例を質問文に加えた。また、後に電子楽器との併用について分析するため、支援の対象を電子楽器とする質問文とした。なお、ここ

での支援システムの説明は上記の文章のみとして、具体的な仕様やインターフェースの説明、及び図示は行わなかった。その理由は3.7.1項の電子楽器のニーズの分析と同様に、本章は既存の支援システムや製品を特定せず、また今後製作されるものも含めてニーズを分析するためである。

各年度の集計結果を図3と図4に示す。この質問は図中の3つの選択肢から1つを選択して回答した。結果、経験者と未経験者ともに約半数の回答者が支援システムを使って電子楽器を演奏してみたいと回答した。これより、電子楽器を支援対象とした支援システムを使って演奏をしたい学生が一定数いることがわかった。また、2019年度と2020年度で回答の比率に差があるか調べるため、経験者と未経験者の集計結果をあわせてカイ二乗検定を行ったところ、有意差がない($p=0.15$)ことが確認された。

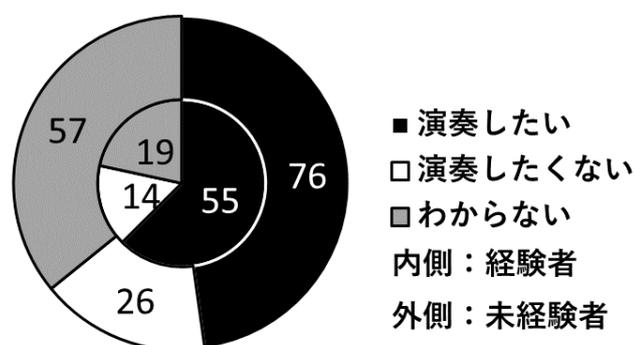


図3 「1人での楽器演奏の練習を支援するシステムがあれば、演奏経験がない電子楽器でも演奏してみたいと思いますか？」の集計 (2019年度)。

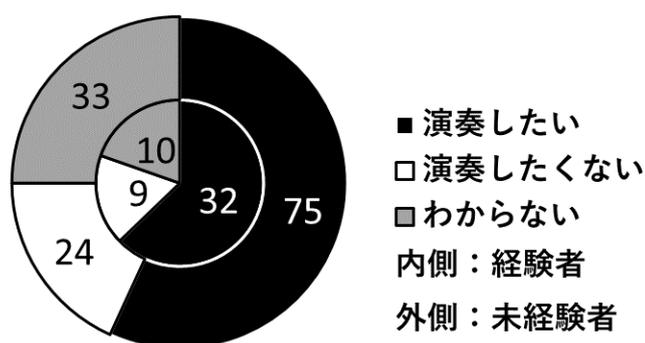


図4 「1人での楽器演奏の練習を支援するシステムがあれば、演奏経験がない電子楽器でも演奏してみたいと思いますか？」の集計 (2020年度)。

3.7.3 電子楽器と支援システムの併用

3.7.1 項（音の表現が制限される電子楽器の演奏のニーズ）と 3.7.2 項（支援システムを使った電子楽器の演奏のニーズ）の集計結果より、電子楽器と支援システムのそれぞれについてはニーズがあることが示唆された。本項ではそれらの併用について分析する。3.7.1 項と 3.7.2 項の集計結果について、2019 年度は表 2 に、2020 年度は表 3 に示すクロス集計とカイ二乗検定を行った。その結果、支援システムを使って演奏したいと回答した学生の中では、電子楽器を演奏したい回答率が有意に高かった(表 2 : $p < 0.001$ 、表 3 : $p < 0.01$)。これより、演奏練習の支援システムが実現したとしても、本論文が目指す演奏しやすい電子楽器は求められることが示唆された。

表 2 2019 年度のクロス集計結果。

		電子楽器の演奏のニーズ			合計
		演奏したい	演奏したくない	わからない	
支援システム のニーズ	演奏したい	108	8	15	131
	演奏したくない	9	25	6	40
	わからない	18	3	55	76
	合計	135	36	76	247

表 3 2020 年度のクロス集計結果。

		電子楽器の演奏のニーズ			合計
		演奏したい	演奏したくない	わからない	
支援システム のニーズ	演奏したい	79	7	21	107
	演奏したくない	2	28	3	33
	わからない	15	3	25	43
	合計	96	38	49	183

3.8 楽器演奏の意識に関する回答結果

2019 年度と 2020 年度の両方、あるいは 2020 年度のみで使用した楽器演奏の意識に対する質問項目で、新規な電子楽器あるいは支援システムのニーズに関するものとして、以下の 4 つについて回答結果を報告する。

- 「楽器の演奏経験について (2019 年度 (3.6.1 項) の質問 A)、2020 年度 (3.6.2 項) の質問 A)」及び「今後の楽器の演奏に関する希望について質問します (2020 年度 (3.6.2 項) の質問 B)」
- 前の質問で記入した楽器について、楽器演奏をやめたり、挫折したりした理由を選んで

ください。(2019年度(3.6.1項)の質問H)とI、2020年度(3.6.2項)の質問G)と質問H))

- 楽器演奏において、どのようなときに楽しさを感じますか？(2019年度(3.6.1項)の質問B)、2020年度(3.6.2項)の質問C))
- 前の質問で記入した楽器について、どの操作が難しいと感じたか選んでください。(2020年度(3.6.2項)の質問I)と質問J))

3.8.1 楽器の演奏経験と今後の演奏について

意識調査実施時までの楽器演奏経験と、今後の楽器演奏に対する希望について調査する。2019年度(3.6.1項)の質問A「楽器の演奏経験(音楽の授業を除く)について」と2020年度(3.6.2項)の質問A「楽器の演奏経験について質問します」、質問B「今後の楽器の演奏に関する希望について質問します」を集計する。なお、本項では2020年度の2つの質問はそれらを合わせた上で2019年度の質問と同一のものとして扱う。各年度の各質問での選択肢は表4において同じ行のものを同一の選択肢と扱って集計する。

表4 「楽器の演奏経験について」の選択肢の2019年度と2020年度の対応、同じ行の選択肢は同一のものとして扱う。

2019年度	2020年度	
3.6.1項の質問A)	3.6.2項の質問A)	3.6.2項の質問B)
普段楽器を演奏している	普段楽器を演奏している	-
楽器を演奏していないが、過去に演奏経験がある	今は楽器を演奏していないが、過去に演奏経験がある(音楽の授業を除く)	-
これまで楽器を演奏していないが、将来的に演奏したいと考えている	-	将来的に演奏したいと考えている
これまで楽器を演奏していない、かつ今後も演奏するつもりはない	-	今後、演奏するつもりはない

集計結果を図5に示す。図5より、まず現在も楽器を演奏している(普段楽器を演奏している)学生が全体の約10%となっている。また、これから演奏したいと考えている(これまで楽器を演奏していないが、将来的に演奏したいと考えている)学生は約30%であり、これから演奏するつもりがない(これまで楽器を演奏していない、かつ今後も演奏するつもりはない)学生が約半分であることもわかった。これらより、現在演奏している、あるいはこれから演奏を始めようとしている学生の方が比較的少ないことがわかった。本論文が目指す電

子楽器は楽器を演奏したいと思わない学生には必要とされない可能性がある。しかし、「誰でも簡単に演奏できる電子楽器は音楽演奏をはじめるきっかけとして有用である」という意見 [8] もあり、そのような電子楽器が普及すれば将来的に楽器を演奏したいと感じる学生も増える可能性もある。

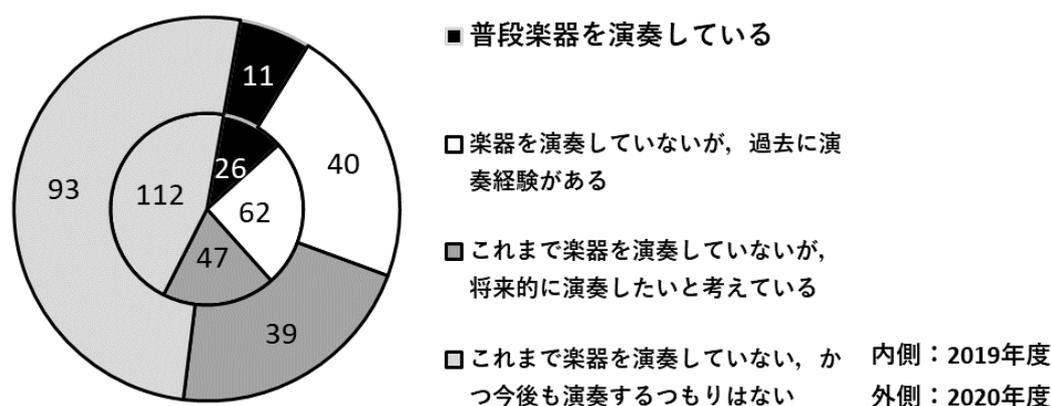


図 5 「楽器の演奏経験について」及び「今後の楽器の演奏に関する希望について質問します」の集計結果。

3.8.2 楽器演奏における難点

電子楽器に限定せずに楽器演奏における難点を分析する。この難点が電子楽器や支援システムによって克服、改善できるなら、それらにニーズがある可能性がある。3.6.1 項の質問 H) と 3.6.2 項の質問 G) の「楽器演奏経験者（音楽の授業を除く）の方に質問します。あなたが楽器演奏をやめたり、挫折したりした楽器があれば、その代表的な楽器名をひとつ入力してください。」に回答した楽器演奏経験者の 3.6.1 項の質問 I) と 3.6.2 項の質問 H) の「演奏をやめたり挫折したりした理由」の集計結果を分析した。ただし、挫折したりやめたりした楽器がないと報告した回答者や、理由を回答しなかった回答者の回答は除外して、2019 年度では 43 人、2020 年度では 19 人が回答した。集計において、この人数を 100% として回答率を導出した。

図 6 に集計結果と各選択肢での楽器の種類割合を示す。なお、2020 年度でのみ使用した選択肢「特になし」を選択した回答者はいなかったため、図 6 には記載しなかった。各選択肢の回答結果、つまり選択したか否かの結果に両年度間で差異があるかカイ二乗検定を行った結果、いずれの選択肢でも有意な差はなかった。このことから、楽器演奏においてネックを感じる要因は年度間で差がないことが確認された。楽器の種類についてはギター、鍵盤楽器、金管楽器が主に挙げられた。それら以外の楽器は個々の回答数が比較的少なかったため、その他でまとめた。

図 6 より「演奏が技術的に難しいこと」という回答が最も多く、20~30%の学生が技術的な理由でネックに感じていることが示唆された。同質問に回答した学生がやめた、挫折した楽器の割合について、両年度ともギターをやめた、挫折した学生が約 10%いることがわかった。ギターは音楽の授業で扱うため、演奏を経験した学生が他の楽器よりも多い可能性があり、やめたり挫折したりした学生も多くなったと考えられる。その他の楽器としてはバイオリンや琴、ドラムなどが挙げられた。これらは演奏方法や発音原理、音高操作の有無が異なる。このことから、どのような楽器においても技術的な理由が原因でやめたり挫折したりする可能性があることが示唆された。

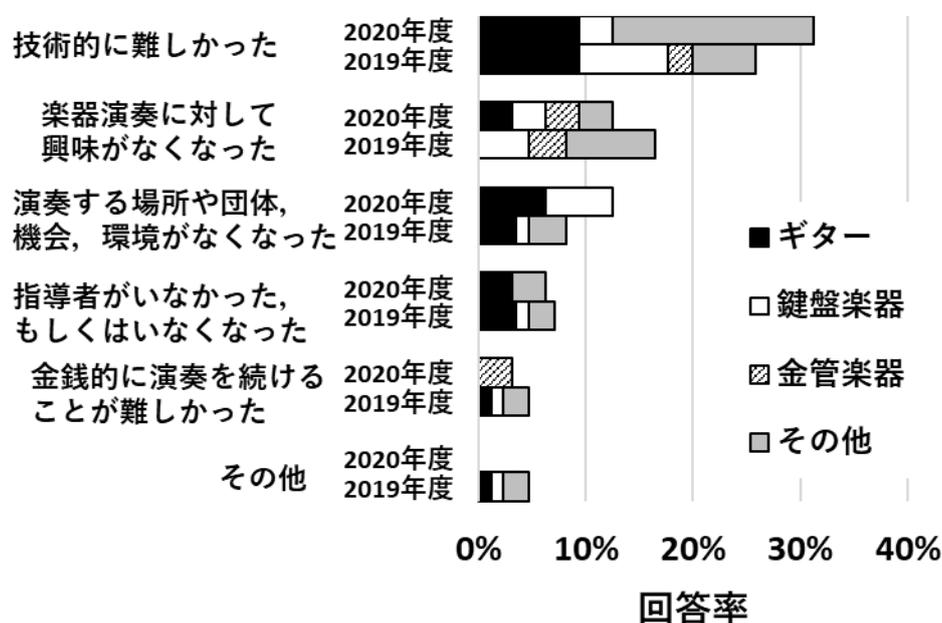


図 6 「演奏をやめたり挫折したりした理由」の集計、選択肢「特にない」は除外。

支援システムは指導者の代わりとして演奏者単独での上達を支援できることから、演奏技術の面から演奏を容易にすることが期待できる。これより、演奏技術の面で難点を感じる演奏者に対して支援システムはニーズがある可能性がある。

電子楽器は演奏インターフェースの自由度が高く、容易に演奏できるようにすることが期待できる。一方で、演奏者は複雑な音の表現や難易度の高い楽曲の演奏を目指したため、演奏において技術的な難しさを感じた可能性もある。そのような演奏者には、容易に演奏できるが演奏表現が限られる電子楽器は受け入れられない可能性もある。そこで、「演奏が技術的に難しいこと」を理由に演奏をやめた、あるいは挫折した学生のみで 3.7.1 項の「演奏中の表現が発音操作や音高操作などに限られる(例:演奏中に音の強弱や音色を変えたり、音高をゆらしたりすることができない)が、自分が思ったメロディーを簡単に演奏できる電子楽器があれば演奏したいと思いますか?」の回答結果を再度集計した。集計結果を図 7 に

示す。集計した人数が少ない（2019年度：11人、2020年度：6人）ため統計的に論じることができないが、両年度の集計結果を合わせると回答者の約半数が、容易に演奏できるが音の表現が制限される電子楽器に対して肯定的な回答をした。このことから、本論文が目指す新規な電子楽器を受け入れられる学生もいることがわかった。

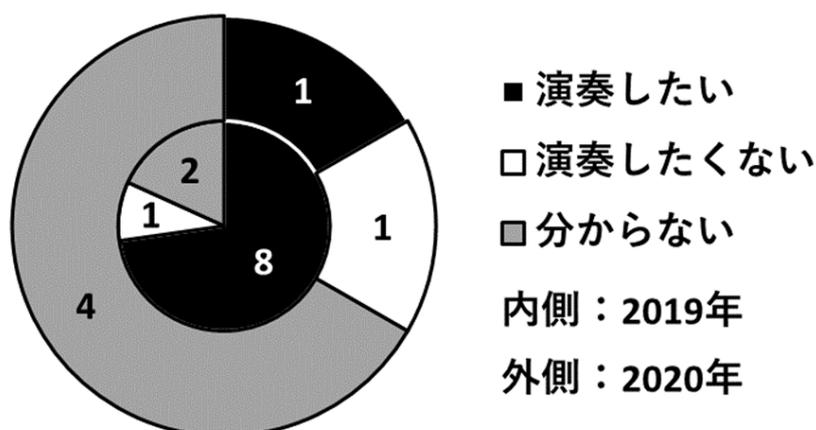


図7 「演奏が技術的に難しいこと」を理由に演奏をやめた、あるいは挫折した学生における「演奏中の表現が発音操作や音高操作などに限られるが、自分が思ったメロディーを簡単に演奏できる電子楽器があれば演奏したいと思いますか？」の集計結果。

3.8.3 楽器演奏の楽しさ

演奏経験者と未経験者に対して3.6.1項の質問B)と3.6.2項の質問C)の「楽器演奏において、どのようなときに楽しさを感じますか？」の集計結果を分析した。ただし、未回答だった回答者は除外して2019年度では247人、2020年度では184人が回答した。集計において、この人数を100%として回答率を導出した。なお、2019年度と2020年度の両方において同一の質問をしているが、以下のように一部の選択肢の文言が異なっている。これは2019年度での質問の意図が回答者により伝わりやすくなるように2020年度では文言を変えたためである。以下の項目は同一のものとして扱う。

- 2019年度：自分が理想としている演奏ができたとき
- 2020年度：自分が思った通りに演奏ができたとき

図8に集計結果を示す。各選択肢の回答結果、つまり選択したか否かの結果に両年度間で差異があるかカイ二乗検討を行った結果、「自分が思った通りに演奏ができたとき(自分が理想としている演奏ができたとき)」は2020年度では2019年度よりも有意に多く回答されていた($p < 0.01$)。この原因は選択肢の文言を変えたことが考えられる。2019年度で用いた「理想」という言葉は2020年度の「思った通り」よりもより高いレベルの演奏を想起させる可能性がある。この言葉の差によって回答の比率が変わったと考えられる。

図 8 より「自分が思った通りに演奏できたとき(自分が理想としている演奏ができたとき)」に楽しく感じる学生が 40~60%おり、更に「難易度の高い楽曲の演奏ができるようになったとき」に楽しく感じる学生が 20~30%いることが示された。これらより、自身の演奏の完成度や達成度によって楽しさを感じる学生がいることが示唆された。演奏者が求める演奏のレベルにもよるが、演奏を容易にできる電子楽器ならば演奏者が思った通りの演奏や難易度の高い楽曲の演奏をしやすくなるため、演奏をより楽しく感じる可能性がある。支援システムについても、演奏者が演奏をしやすくなるように支援することができる。これらより、演奏の楽しさの面においても、電子楽器や支援システムにニーズがある可能性がある。

また、3.8.2 項の「楽器演奏における難点」において挫折したことがある経験者は、挫折したことがない者よりも高い意識を持つため挫折を経験した可能性がある。例えば、より難易度の高い楽曲を演奏したい願望が強い演奏者は、その楽曲を自身が納得する完成度で演奏できなかったため挫折した可能性がある。一方で、そのような演奏者は難しい楽曲の演奏ができたときにより楽しさを感じることも考えられる。そこで、3.8.2 項において楽器演奏を挫折したことがある経験者のみで、再度楽しさの集計を行った。その結果、集計結果は図 8 と概ね同様の結果となった。また、各項目の回答率は年度間で有意差はなかった。このことから、3.8.2 項で挫折したことがある経験者は、楽器演奏の楽しさに関して特別高い意識を持っているわけではないことが示唆された。

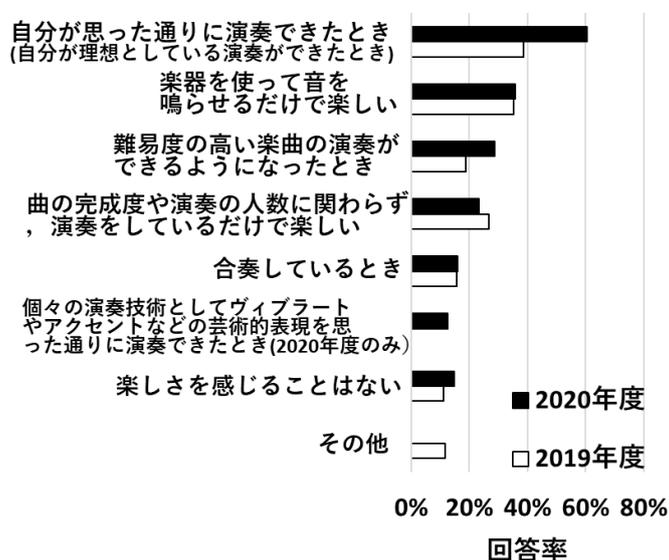


図 8 「楽器演奏において、どのようなときに楽しさを感じますか？」の集計。

3.8.4 難しいと感じる楽器の操作内容

2020 年度で「音楽の授業も含めてこれまで経験した楽器の中で、特に演奏が難しいと感じた楽器名を 1 つだけ記入してください。そのような楽器が無い場合は空白で結構です。」

で楽器名を回答した回答者のみで、「前の質問で記入した楽器について、どの操作が難しいと感じたか選んでください。」の集計結果を分析した。ただし、未回答だった回答者は除外して、経験者は27人、未経験者は78人が回答した。集計において、この人数を100%として回答率を導出した。

図9に経験者と未経験者を分けた集計結果と各選択肢での楽器の種類割合を示す。経験者未経験者共に「音高や音名（ドレミ）を変えること」が難しいと感じる学生が約40%いることが示された。「発音のタイミングを操作すること」、「発音の維持をすること」は約20%いることが示された。本研究が目指す新規な電子楽器は発音操作と音高操作の機能を有していて、演奏が容易なことを目指している。また、支援システムは鍵盤楽器やギターなどの発音タイミングのずれや音名操作の間違いを指摘する機能を有するものも研究されている。よって、発音や音名操作が難しいと感じる演奏者に対して、本論文が目指す新規な電子楽器や支援システムにニーズがある可能性がある。

「音の強弱を調整すること」については経験者で約20%、未経験者で約40%いることも示された。芸術的な演奏や複雑な表現を行う場合は音の強弱の調整機能が必要であるが、単純な旋律演奏においてはその機能がなくても演奏は可能である。また、本論文が目指す新規な電子楽器は音の強弱を変える機能は実装しない。そのため「音の強弱を調整すること」が難しく感じる学生でも単純な旋律演奏、あるいは本論文が目指す電子楽器での演奏を行う場合は、難しいと感じる操作を意識することなく演奏できることが期待できる。

選択肢「その他」の内容について、経験者ではピアノ経験者の「指がうごかなかった」、トランペット経験者の「高音域を出すこと」、ホルン経験者の「マウスピースが小さく口での表現が難しい」などがあつた。未経験者ではリコーダーでの「吹き加減を一定に保つこと」、ギターでの「基本動作がわからない」、ピアノでの「右手と左手で別の動きをすること」などがあつた。電子楽器であれば息の吹き込みやマウスピースの大きさなど、難しく感じる操作やその部位そのものをなくした演奏インターフェースを実現できるため、演奏の難しさの改善が期待できる。指の動きや左右の手の動きについては、支援システムによる演奏動作の分析やそのフィードバック機能による改善と、演奏動作の技術の向上が期待できる。

難しいと感じた楽器の種類について、ギター、鍵盤楽器、金管楽器、木管楽器、リコーダーが主に挙げられた。それら以外の楽器は個々の回答数が比較的少なかつたため、その他でまとめた。選択肢「音高や音名（ドレミ）を変えること」において、経験者ではギターが、未経験者ではリコーダーが難しいと感じる学生が比較的多いことがわかつた。他の選択肢においてもギターとリコーダーが含まれている。ギターもリコーダーも学校の音楽の授業で演奏するため、演奏を経験した学生が多いことが原因であると考えられる。他の楽器についても、経験の有無や選択肢によって集計結果は異なるが、音の強弱や発音のコントロールを難しく感じる学生がいることが示された。それらの難しいと感じた操作をしやすくした、あるいは難しい操作そのものをなくした電子楽器や、操作の上達を支援するシステムであれば、本意識調査で挙げられた楽器を演奏したことがある演奏者にも電子楽器や支援シス

テムが受け入れられると考えられる。

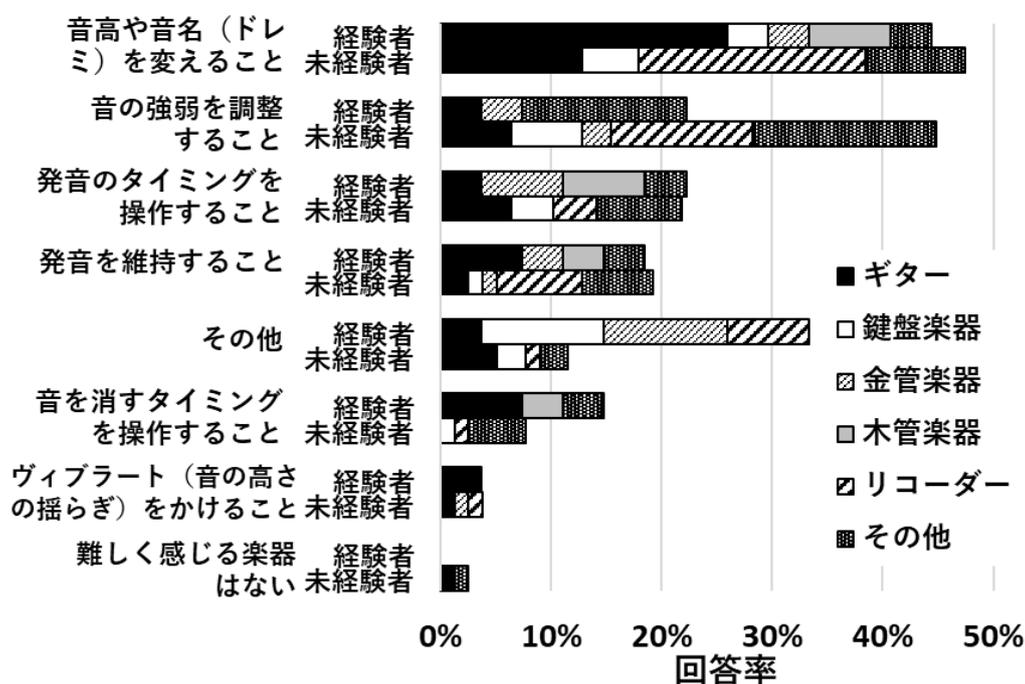


図 9 「前の質問で記入した楽器について、どの操作が難しいと感じたか選んでください。」の集計結果、2020 年度のみ集計。

3.9 考察

3.9.1 楽器演奏の意識に影響する要因

3.8.2 項における演奏の難点と 3.8.3 項における演奏の楽しさの意識調査より、これらに影響する要因は年度が違っていてもほぼ同じであることが示唆された。また、電子楽器や支援システムのニーズについての調査でも 2019 年度と 2020 年度の両年度で同様の結果が得られた。意識調査を行った 2019 年度は通常の授業形態であったが、2020 年度は新型コロナウイルスの感染対策のため、東京情報大学は全科目の講義をオンラインにて実施していた。このことから 2020 年度は、自宅での自由な時間が増えたことで趣味や娯楽に費やせる時間も増えたと考えられる。それによって、室内で行える楽器演奏に対する意識や、オンライン講義のように対面なしで上達できる支援システムに対する意識に変化があることも考えられる。しかし、楽器演奏及び支援システムに対する意識は年度の違いによって差異はなかった。

楽器演奏の意識に影響する要因として考えられるものとして、演奏形態の違いが考えられる。過去にはアマチュア・オーケストラの演奏者 32 人を対象にした調査がある [38]。1 人での練習において楽しさや喜びを感じる時、原動力になるものを自由回答する問いへの回答を分類した結果、「苦労して練習し、弾（吹）けるようになった時など音楽を自分の

ものにしたようで嬉しい」という旨の回答をした演奏者が 53.1%であった。一方で、全体合奏の練習において楽しさや喜びを感じることを自由回答する問いへの回答を分類した結果、「合奏の音に包まれた中にわが身を置き、その一員として演奏しながら楽しんでいる」という旨の回答をした演奏者が 56.6%であった。これらのように、1人での練習と合奏では楽しさや喜びを感じる要因は異なる。本章の調査では演奏形態や演奏人数を指定しておらず、また支援システムのニーズを調査した質問では、1人での演奏を想起させる質問文であった。今後、楽器演奏に対する意識調査や、電子楽器や支援システムのニーズの調査を実施する場合、想定する演奏形態や演奏人数などの条件を変えると、条件間で異なる結果が得られると考えられる。

また、演奏動作と音のイメージとの乖離が演奏の楽しさに影響する可能性もある。3.8.3項では「自分が思った通りに演奏できたとき」に演奏が楽しく感じる結果が得られたが、「思った通りの演奏」とは様々な側面がある。本論文では「思った通りの演奏内容」という観点で論じたが、例えば演奏動作から想起される演奏音のイメージがある。叩く動作では音の急激な立ち上がりや急峻な減衰をイメージする可能性がある。スイッチを押下する動作ではブザー音のような、機械を想起させる音色をイメージする可能性がある。電子楽器は音色を自由に変えることができ、かつ演奏インターフェースの自由度も高いため、従来楽器や日常生活ではなかった演奏動作と音の組み合わせが可能となる。しかし、これらのイメージが一致しない電子楽器では、「演奏動作から想起した（思った通りの）音で演奏できない」と感じて、演奏の楽しさに影響することも考えられる。

3.9.2 支援システムのニーズと有用性

支援システムのニーズを示す本章の結果は、今後の演奏練習の形態、練習のやり方についての示唆を与えた。支援システムを利用する場合は指導者から対面で指導を受ける必要がなく、更に自身の好きな時刻に単独での練習が可能、という利点がある。楽器演奏練習において同様の利点をもつものにはネットワークを利用した遠隔指導や動画教材の利用などがある。

これらの有用性は以前から論じられている一方で問題点もある。2006年に行われた調査[36]では20代～60代の約7割の人が「自分には合わない」、「音楽とネットがいまいち結びつかない」という理由でネットワークやテレビ電話を利用した音楽レッスンに抵抗があると回答している。しかし、本章より2019年度と2020年度においては支援システムに対して肯定的な学生が一定数おり、ネットワークなどを利用した音楽レッスンに代わる練習手段として役立つ可能性がある。また、2006年と比べると、2019年度と2020年度は演奏練習に対する意識が変化していることも考えられる。

また、ピアノ弾き歌い練習にICT（情報通信技術）を利用することを検討した従来研究[39]では、動画教材のみで指導するのではなく、要所で対面での指導がある方がより効果的であると論じている。支援システムには動画を提示する機能を実装することが可能であり、

更に指導者の代わりに演奏についての教示を練習者に与えることも可能である。このように、支援システムは遠隔指導や動画教材の問題点の改善に有用であり、今後の新しい演奏練習の方法として期待できると考えられる。

3.9.3 今後の調査について

電子楽器や支援システムのニーズの調査では具体的なインターフェースや仕様を示さずに調査を行った。しかし、新しい電子楽器や支援システムを既に製作している研究もある。そういった研究では、練習の前後や支援システムの使用の有無によって客観的に上達具合を比較することは行われているが、ニーズの調査は行われていなかった。今後支援システムの開発や評価をする研究では、支援システムを企画する段階、あるいは仕様を検討する段階で本章のようにニーズの調査を行うべきである。その上で、提案した支援システムを製作して実機での練習を行い、有効性の評価と同時に使用感や操作性を主観的に評価して、製作物の改良などを行うべきである。

3.10 まとめ

楽器演奏に対する意識や電子楽器、及び支援システムのニーズについて意識調査を実施した。その結果、2019年度と2020年度で概ね同様の結果が得られた。本意識調査の中では、経験者では演奏をやめた、挫折した理由は技術的な難しさが最も多く、また経験者未経験者問わず自分が思った通りに演奏できたときに楽しく感じる学生が多かった。これらの要因は電子楽器や支援システムによって改善、向上を目指すことが可能である。音の表現が制限されるが演奏が容易な電子楽器と支援システムの併用に肯定的な学生がいることもわかった。これらより、電子楽器の練習を支援するシステムが実現したとしても、本論文が目指す新規な電子楽器にはニーズがあることが示唆された。

第4章 新規な電子楽器の演奏正確性の分析と演奏性の主観的評価項目

4.1 はじめに

第 3 章では大学生を対象に楽器演奏や演奏が容易な電子楽器、演奏練習支援の意識調査を実施した。その結果、本論文が目指す新規な電子楽器にニーズがあることが示された。本章では著者が修士課程において、新規な電子楽器を対象とした演奏練習実験を実施して、正確な演奏ができる新規な電子楽器の演奏インターフェースの特徴とその演奏性評価項目を論じた実験 [40] [41] [42]を紹介する。また、演奏正確性の分析では本論文で新たに取り入れた特徴量の分析結果も報告する。更に、全ての被験者を対象にした演奏性の主観的評価結果の因子分析についても報告する。

第 2 章で論じた以下の問題点を解決する、あるいは解決するための知見を得ることを目的として、新規な電子楽器の演奏評価実験を実施した。

- 演奏しやすい演奏インターフェースの特徴が不明
複数の新規な電子楽器の演奏音を分析して演奏正確性を評価、比較する。その結果から演奏しやすい演奏インターフェースの特長を考察する。
- 演奏性を適切に評価する項目が不明
演奏性を評価する複数の評価項目を使って主観的評価を行い、その結果を因子分析する。それにより評価項目をグルーピングして、評価項目を減らすことで演奏性を評価する際の被験者の負担を軽減しつつ、演奏性を評価できる評価項目を得る。更に、その結果を用いて演奏性に優れる新規な電子楽器の特長を考察する。

本章では 2 つの実験を紹介する。第 1 実験として、企業で開発され市販されている新規な電子楽器と、従来研究で開発された新規な電子楽器から合計 3 種類の新規な電子楽器を選定して演奏評価実験を行った。この実験の結果を元に演奏しやすい演奏インターフェースの特徴と演奏性の評価項目を考察した。第 2 実験では第 1 実験で得られた知見を元に新規の電子楽器を 3 種類製作して再度演奏評価実験を行うことで、第 1 実験で得られた知見が妥当であるか検証した。なお、本論文では第 1 実験と第 2 実験の個々の分析結果は割愛する。修士研究での両実験にて演奏した 6 種類の新規な電子楽器を合わせた結果は 4.4.4 項から 4.4.6 項にて紹介する。新たな特徴量を用いた演奏音の分析、比較の結果は 4.4.2 項と 4.4.3 項に示す。修士研究では第 1 実験での実験対象楽器と第 2 実験での実験対象楽器の全てを演奏した 4 人の被験者のみを対象として、演奏性の主観的評価結果を因子分析した。本論文では第 1 実験か第 2 実験のどちら片方の実験対象楽器のみを演奏した被験者も対象にして因子分析を行った。その結果については 4.5 節にて述べる。

4.2 第1実験：市販及び従来研究での新規な電子楽器の演奏評価実験

市販されている新規な電子楽器や従来研究で製作された新規な電子楽器を3種類選定して演奏評価実験を実施した。選出の条件として以下の規定を設けた。

- 従来楽器とは異なる演奏インターフェースを有する
- 発音や音高を操作することで旋律演奏ができる
- 比較的安価で購入可能な価格（約10,000円以下）もしくは安価にレンタル可能である

4.2.1 演奏した新規な電子楽器

本実験で使用した新規な電子楽器の一部は固定ドのハ長調全音階での演奏を想定して製作された。被験者に操作方法を説明する際は半音単位で音名を操作できる新規な電子楽器であっても、ハ長調全音階での演奏を想定して説明した。

図10は著者が製作した電子ハンドベル [24]である。加速度センサで振る動作を検知することで、従来のハンドベルと同様に振る動作によって音を発音できる。持ち手部分には音高操作用の押しボタンがあり、図10(b)に示すように全音階用が6個、図10(c)に示すように半音階用が1個（人差し指で触れているボタン）、オクターブ用が1個（中指で触れているボタン）ある。全音階用ボタンはレミファソラシの6つの音名に対応しており、押下している音名の音が生成される。全音階用ボタンを押下していないときはドの音を生成する。半音階用のボタンを全音階用ボタンと同時に押下すると半音上の音が生成される。オクターブ用のボタンを同時に押下すると1オクターブ上の音が生成される。電子ハンドベル本体の全長は約250mmである。

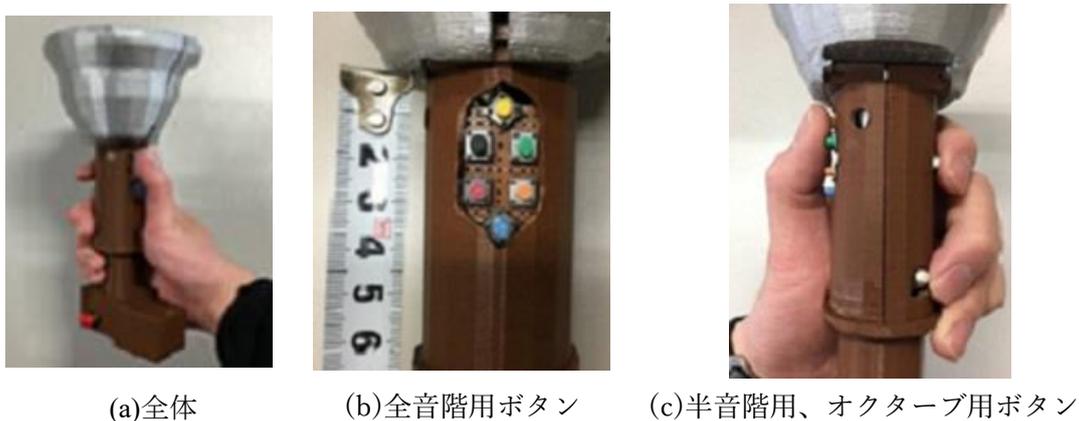


図10 電子ハンドベル。

図11は株式会社明和電機が提案して販売されているオタマトーン [13]である。オタマジャクシの形をしており、黒いリボンコントローラに触ることで発音する。本実験で使用したものは本体の大きさが約450mm、リボンコントローラの長さが約220mmである。リボンコントローラに触る位置によって音高が変化して、約2オクターブ分変化する。音域はス

ライドスイッチにて High、Middle、Low の 3 種類を設定できて、全体としては 6 オクターブ分の演奏が可能であるが、実験では Middle での 2 オクターブの音域のみで演奏した。なお、音高は音階に従わず、リボンコントローラに触る位置によって音の基本周波数が連続的に変化する。音の強さはつまみによって調整できて、スピーカ近傍のカバー（オタマジャクシの顔）を潰すように押さえると、音の大きさを変化させてヴィブラートを表現することができる。本実験では音の強さの操作は評価対象としないため、音の強さは一定として演奏した。

図 12 は株式会社コルグが販売しているカオシレーター2S [11]である。パネルに触ることで発音して、上下左右の触る位置によって音を操作できる。本体の大きさは縦 130 mm×横 80 mm、パネルの大きさは縦 40 mm×横 55 mm である。本実験では、パネルの上下の位置で音の強さを変えることができ、また既定の設定であるが、パネルの左右の位置で音名を全音階で 2 オクターブ分操作できる状態で演奏評価実験を実施した。実験では音の強さの操作は評価対象としないため、音の強さは指定せずに演奏した。



図 11 オタマトーン。



図 12 カオシレーター2s。

4.2.2 市販及び従来研究での新規な電子楽器のレイテンシー測定

電子楽器はセンサからの測定値やコントローラからの信号を受け取って、その数値や内容を元に音を生成、制御する。そのため、レイテンシー（発音操作を行ってから発音されるまでの遅延時間）が必ず存在する。レイテンシーは電子楽器の操作性に影響する可能性がある。

演奏とレイテンシーの関連を分析した従来研究として、任意のレイテンシーで演奏できるドラムパッドを 4 人の被験者が演奏した研究 [43]がある。その研究では正しいリズムパターンである教示データと、レイテンシーがある場合でのドラムパッドの演奏データとで発音タイミングのずれを分析した。その結果、レイテンシーが 50 ms 程度までであれば教

示データと同程度の正確さで演奏できて、80 ms を超過すると著しくズレが大きくなることを示した。ただし、これはあくまで教示データとの比較をした際の結果である。また、本実験の実験対象楽器はドラムパッドとは演奏インターフェースが大きく異なるため、レイテンシーが 80 ms を超過すると必ずしも演奏が困難になるとは言えない。本項では実験対象楽器の性能を確認する目的でレイテンシー測定を行った。

電子ハンドベルは振る動作で発音するため、演奏音を聴く以外には発音タイミングを認識できる身体的フィードバックが得られない。そのため、電子ハンドベルのレイテンシーを測定することには意味がない。加えて、電子ハンドベルに使用しているセンサの仕様により、発音動作が行われたタイミングを測定することが困難であることから、電子ハンドベルはレイテンシー測定を行わないこととした。

発音操作により発生する操作音と、その演奏音を左右のチャンネルに分けてオーディオインターフェース（サンプリング周波数 96 kHz）により録音した。発音操作音として、オタマトーンでは指先と爪がリボンコントローラに接触するように触れて、その際の衝突音を録音した。カオシレーター2S では指先と爪がタッチパネルに接触するようにタッチパネルに触り、その際の衝突音を録音した。

演奏音はライン出力を録音した。オタマトーンの演奏音のエンベロープは矩形であるため、演奏音が立ち上がって 1 周期の振幅の絶対値が最大になったタイミングを発音時刻とした。カオシレーター2S はあらかじめ用意された音色を選んで演奏ができ、実験では「Soft Lead」という音色を使用した。この Soft Lead のエンベロープは矩形ではなく、音の立ち上がりが緩やかになっている。そこで、カオシレーター2S についてはこの Soft Lead の振幅が一定になったタイミングを発音時刻とした場合と、参考としてエンベロープが矩形になっている音色「Square Lead」にて、演奏音が立ち上がって 1 周期の振幅の絶対値が最大になったタイミングを発音時刻とした場合についてそれぞれ測定した。

以上の手順で発音操作時刻と発音時刻を導出して、その時間差をレイテンシーとした。例としてカオシレーター2S の「Soft Lead」と「Square Lead」のそれぞれの発音操作音と演奏音の波形を図 13 と図 14 に示す。各電子楽器の 10 回測定での平均値と最大値、最小値を表 5 に示す。

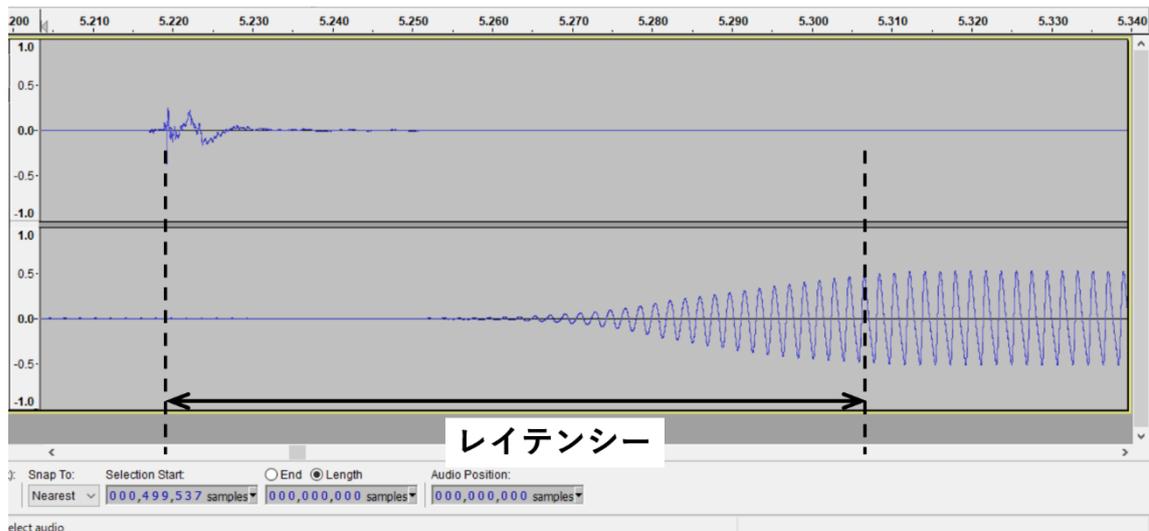


図 13 レイテンシー測定の実例、カオシレーター2S、音色「Soft Lead」、上段：発音操作音、下段：演奏音。

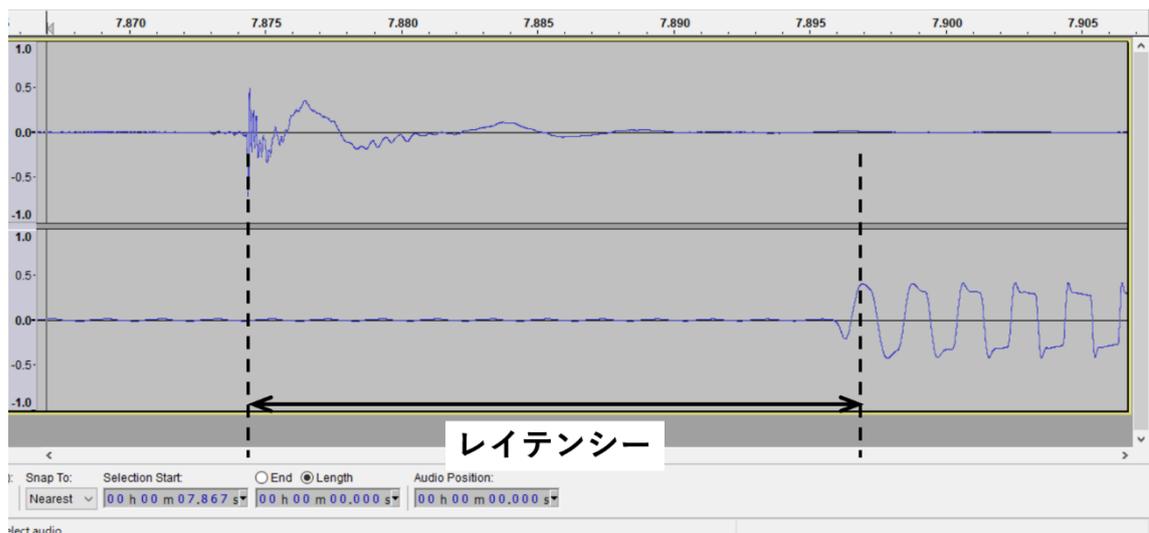


図 14 レイテンシー測定の実例、カオシレーター2S、音色「Square Lead」、上段：発音操作音、下段：演奏音。

表 5 レイテンシー測定結果。

	平均値[ms]	最大値[ms]	最小値[ms]
オタマトーン	1.62	2.54	1.01
カオシレーター2S	80.0	92.5	70.8
Soft Lead	22.3	26.7	15.9
カオシレーター2S			
Square Lead			

4.2.3 被験者

課題曲として簡単な旋律演奏（4.2.4 項を参照）を練習するため、音楽経験が全く無い被験者では演奏が困難になる可能性がある。被験者は旋律演奏ができる楽器の演奏経験者に限定して、東京情報大学の学生と木更津工業高等専門学校吹奏楽部の部員、合計 13 人に依頼した。いずれの被験者も 4.2.1 項に示した実験対象楽器の演奏経験はない。

4.2.4 演奏内容

課題曲演奏と自由演奏を行った。課題曲演奏では既存の曲を演奏すると被験者によって結果に差が出る可能性があったため、図 15 に示す新規の課題曲を演奏テンポ BPM100 で演奏した。課題曲は MIDI 音楽編集ソフト「Domino」を用いて、オルガン音とピアノロールで被験者に提示し、楽譜は提示しなかった。課題曲について、なるべく演奏しやすくなるように、著者の音楽演奏の経験から以下の条件を設けて作成した。

- 1 回の演奏時間を短くして、約 10 秒とした。
- 最も小さい音価は八分音符とした。
- 音高の幅を狭くして、発音する音名を 4 つとした。
- 本実験は旋律演奏を対象とするため、簡単な発音と全音階の操作のみで演奏可能とした。



図 15 課題曲。

4.2.1 項で示した実験対象楽器の中でカオシレーター 2S はハ長調全音階のみ演奏できるが、使用した図 15 の課題曲は冒頭ではハ長調で始まり、後半部がヘ長調とも感じられる。実験後の被験者へのヒアリングでは、移調や楽譜の書き換えに慣れている被験者 1 人は演奏に違和感を覚えたが、演奏のしやすさに影響することは報告しなかった。また、他の被験者からは調性と演奏性の関連についての内観報告はなかった。この調性の違和感については、第 6 章にて同じ図 15 の課題曲を演奏した演奏練習実験での考察で述べる。

課題曲が 1 種類しかないことを補い、更に演奏内容によって主観的評価に差異が生じるか検討するため自由演奏も行った。実験対象楽器を演奏する順番に偏りがないように、被験者ごとに異なる順番で実験対象楽器を演奏した。

各実験対象楽器での演奏実験の順序を以下に示す。

1. 固定ドかつハ長調を想定して、実験対象楽器の音名操作方法と発音操作方法を実験者が実演して説明。

2. 図 15 の課題曲をメトロノームに合わせて 10 分間練習。
3. メトロノームに合わせて図 15 の課題曲を 2 回本番演奏。
4. 5 分間演奏内容を指定しない自由演奏。

4.2.5 演奏性の主観的評価

被験者は各実験対象楽器で課題曲の本番演奏後と自由演奏後に、それぞれの演奏に対して以下の評価項目に回答した。なお、これらの質問は課題曲などの演奏内容を評価するのではなく、各実験対象楽器に対して評価を行うものとした。回答は 0~10 の 11 段階とした。この数字が大きい程ポジティブな評価となる。例えば、「演奏していてストレスや苦痛を感じなかったか?」では、10 に近いほどストレスや苦痛を感じないと評価し、0 に近いほどストレスや苦痛を感じると評価した。

1. 演奏していてストレスや苦痛を感じなかったか?
2. 音高を操作しやすかったか?
3. 発音のタイミングを操作しやすかったか?
4. 消音のタイミングを操作しやすかったか?
5. 出したい音高をすぐに発音できるか?
6. 発音や音高を操作するとき、楽器位置や持ち方は安定していたか?
7. 指定した内容の演奏をすることは容易であったか?
8. 開始直後は演奏が難しいと感じなかったか?
9. 10 分で演奏が上達したと思うか?
10. 練習すればすぐに上達できると思うか?
11. 電子楽器を演奏して楽しかったか?
12. また演奏したいと思うか?

4.2.6 課題曲演奏と自由演奏の主観的評価結果の差異

4.2.5 項の評価項目について、課題曲演奏と自由演奏とで評価結果が異なるかを一元配置の分散分析と下位検定によって調べた。その結果、課題曲演奏と自由演奏間で有意差があり ($p=0.028$)、全体としては自由演奏の方がポジティブな評価になる傾向があった。本実験ではいずれの被験者も課題曲を最初に演奏して、その次に自由演奏を行った。そのため、後に行った自由演奏の方がより実験対象楽器の演奏に慣れて、演奏性に関してポジティブな評価になったと考えられる。更に、課題曲演奏と自由演奏のそれぞれの評価結果が同じ傾向であるかを調べるため、それらの相関を被験者ごとに調べた結果、すべての被験者において有意な正の相関 (相関係数 0.456~0.806、 $p<0.05$ 、ボンフェローニの補正済み) があった。これより、課題曲演奏と自由演奏では演奏性の主観的評価の傾向があまり異なることがわかった。この結果より、4.3 節の第 2 実験では自由演奏は行わずに課題曲演奏のみを行うこととした。

4.3 第2実験：著者が製作した新規な電子楽器の演奏評価実験

4.3.1 演奏した新規な電子楽器

実験結果の詳細は割愛するが、4.2節の新規な電子楽器の演奏正確性を分析した結果より、演奏しやすい新規な電子楽器の演奏インターフェースについて以下のことが示唆された。

- 演奏インターフェースに音高操作の目盛りや印があると音高を操作しやすい。
- 発音と音高を単一かつシンプルな動作で操作できると演奏しやすい。

第2実験では以上の特徴によって演奏正確性が向上するか比較できるように意図して設計した新規な電子楽器と、音高操作の動作として既存の何らかの動作を用いる新規な電子楽器を著者が自作して、それらを評価対象とした。従来提案されていた新規な演奏インターフェースをもつ新規な電子楽器としては Furimpro [10]がある。しかし、Furimpro は本体の床からの高さを変えて音高を操作するため、音高の目安がないことと、自由空間での上下動作を必要とする道具が日常で使われることがない点を考慮して、本実験の評価対象とはしなかった。

図16は布手袋を改造した新規な電子楽器、グローブである。グローブは4.2.1項のカオシレーター2Sを意識して設計した新規な電子楽器である。参考文献[41]より、カオシレーター2Sは4.2.1項の中で最も正確な演奏ができたが、間違えた音高の音も余分に発音することが頻発した。この問題点に対して、音高の変化を視覚や触覚で認識できるようにすることで、問題点の克服を試みたのがグローブである。本体には導電糸という電気を通す糸で刺繍が施してある。左手用手袋の手の平には長さ約30mmの直線状の刺繍が16個あり、図16(b)のように刺繍が8個ずつ10mmの間隔で平行して2列に並んでいる。親指側の8個の刺繍は1オクターブ分の全音階に対応する。その刺繍の中でも手末端側に位置する刺繍は低いドの音に対応しており、手前の刺繍になると音名はレ・ミ・ファ…高いドの順で切り替わる。小指側の8個の刺繍は隣り合った全音階の半音上の音名に対応する。右手用手袋には人差し指の先端に7mm×3mmの大きさの帯状の刺繍が1個ある。右手の人差し指の先端で左手の刺繍に触ることで、触っている刺繍に対応した音名の音を発音する。原理としては、手の平の各刺繍には異なる抵抗値の固定抵抗が接続されており、刺繍が接触した際に検知される電圧の大きさによって音名を切り替える。刺繍によって音名を視覚で認識して、更に手の平の触覚で音名を認識できるようにした。また、カオシレーター2Sは2オクターブの音域で音高操作したが、グローブは手の平の大きさの演奏インターフェース上で1オクターブの音域で音高操作する点が異なる。以上のようにグローブは音高を認識できて、かつ単一の動作で発音と音高を操作できる。



(a) 全体

(b) 刺繍の配置

図 16 グローブ。

図 17 は車のハンドル（ステアリングホイール）を模擬した新規な電子楽器、ドライバーである。ハンドルは古くから使われている道具であり、ハンドルによって人間は車を容易に運転できる。ハンドルを楽器演奏に用いることで車の運転のように容易に音楽演奏ができると考え、ドライバーを提案した。ハンドルを強く握ると圧力センサが反応して発音する。ハンドルを回すことで可変抵抗の抵抗値が変わって、音名を操作する。音名は左に回すほど低くなり右に回すほど高くなる。ハンドルの直径は約 300 mm で、回転角度は左右にそれぞれ最大約 90° であり、手を離すとバネによって回転角度が 0° に戻る。音名は 1 オクターブ分操作できて、ハンドルを左に最大角度で回すと低いドの音が生成され、そこから右へ約 22.5° 回すごとにレ・ミ・ファ…高いド、という順番で音名が切り替わる。また、ハンドルを回していない状態、つまり回転角度が 0° の場合はファとソの領域の境目の角度となり、本実験ではファの音が生成される状態とした。音名の境目付近ではどの音名の音が生成されるか演奏者には判断が困難になる。対策として、ハンドルの表面に LED を設置して、音名が変わると対応した LED が 1 つのみ点灯する状態にした。これにより、演奏者は音名を視覚で認識できる。以上のようにドライバーは音高の変化を視認できるが、発音と音高はそれぞれ別の動作で操作する。

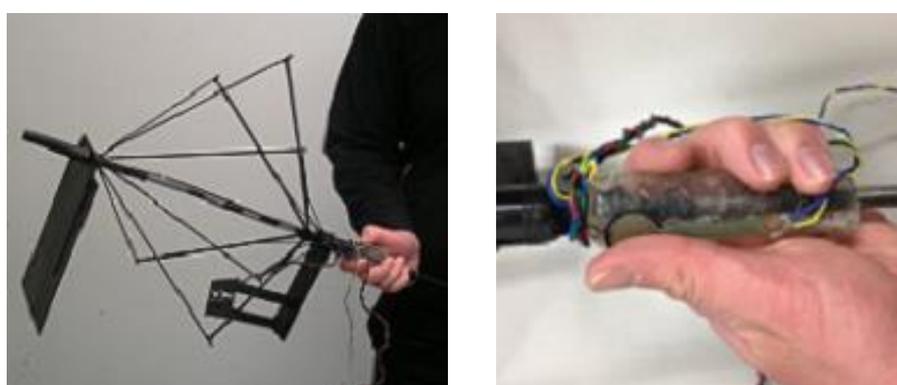


(a) 全体

(b) 圧力センサの配置

図 17 ドライバー。

図 18 はジャンプ傘を改造した新規な電子楽器、スライダーである。スライダーはトロンボーンを意識しており、持ち手のスライドで音高を操作するが、音高変化の目盛りがあることやバネにより持ち手が動くこと、息の吹き込みが不要であることがトロンボーンとは異なる。これらの差異が演奏性を向上させるか分析する目的で提案した。全長は約 850 mm で、持ち手の可動域は約 350 mm である。持ち手を強く握ると圧力センサが反応して発音する。持ち手を前後にスライドさせると超音波距離センサとコントローラ先端のプレートとの距離が変化して音名が変わる。持ち手が傘の先端にあるときは低いドの音が発音されて、その状態から持ち手を手前に約 25 mm ずつスライドするごとに音名はレ・ミ・ファ…高いドの順番で切り替わる。持ち手の軸は発音される音名と対応するように約 25 mm 間隔で黒白に色分けされており、音名の変化を視認できる。また、音名は 1 オクターブ分操作することができて、高いドの音を発音している状態で持ち手を 25 mm 以上手前にスライドした場合は、音名は変わらず高いドの音名を維持する。以上のように、スライダーはドライバーと同様に音高の変化を視認できるが、発音と音高はそれぞれ別の動作で操作する。



(a) 全体

(b) 圧力センサの配置

図 18 スライダー。

4.3.2 レイテンシー測定

グローブ、ドライバー、スライダーはいずれもマイコンモジュール「Arduino」とコンピュータをシリアル通信した上で、プログラミング環境「Pure Data」のソフトウェアと連携させており、マイコンなどを単体で動作させて音を再生、制御するよりもレイテンシーが比較的大きくなってしまいます。本項ではレイテンシーの測定方法とその結果を説明する。対象となるグローブ、ドライバー、スライダーは全て同じ環境で音を生成しているため、その環境でのレイテンシー性能を測定することとした。

図 19 に示すレイテンシー測定用の回路とプログラムを用いてレイテンシーの測定を行った。回路は主に Arduino UNO（音響研究室の備品、No.11）とオーディオインターフェース（M-Audio Fast Track Pro 4x4 Mobile USB Audio/MIDI Interface with Preamps、型番:AU02-073B0、シリアルナンバー：298Z073005A53）、測定用 PC で構成される。PC では M-AUDIO の 1ch と 2ch をサンプリングしている音声編集ソフト「Audacity」と、Arduino UNO のデジタル入力 PIN2 の入力信号を観測している Pure Data のプログラムを動作させている。Pure Data のプログラムは PIN2 のデジタル入力が HIGH になると 440Hz の正弦波、あるいはのこぎり波の音を選択して、振幅を最大として出力する。PIN2 のデジタル入力が LOW になると振幅を 0 とすることで、発音と消音を制御する。音のエンベロープは矩形であり、発音してから消音するまで振幅は一定である。図 19 の回路中のスイッチが ON になると Arduino UNO のデジタル入力 PIN2 と M-AUDIO の 1ch に直流電圧が印加される。そうすると M-AUDIO の 1ch は信号の立ち上がりを検出し、同時に PureData によって演奏音が出力される。そして、M-AUDIO の 2ch が PureData により出力された音をサンプリングする。1ch で信号が立ち上がった時刻と、2ch で演奏音が立ち上がって 1 周期の振幅の絶対値が最大になった時刻の差をレイテンシーとした。

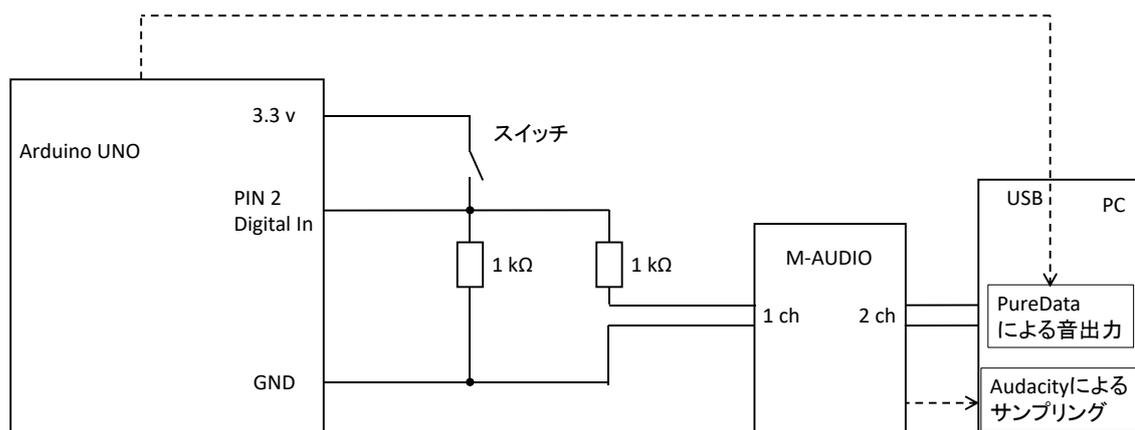


図 19 レイテンシー測定用回路。

測定結果の例を正弦波について図 20 に、のこぎり波について図 21 に示す。10 回測定での平均値と最大値、最小値を表 6 に示す。この結果より、グローブ、ドライバー、スライ

ダーでは発音操作をしてから発音するまでに 100 ms 前後の遅れが生じることになる。ただし、レイテンシーは 96ms から 125 ms の間でばらつきがある。

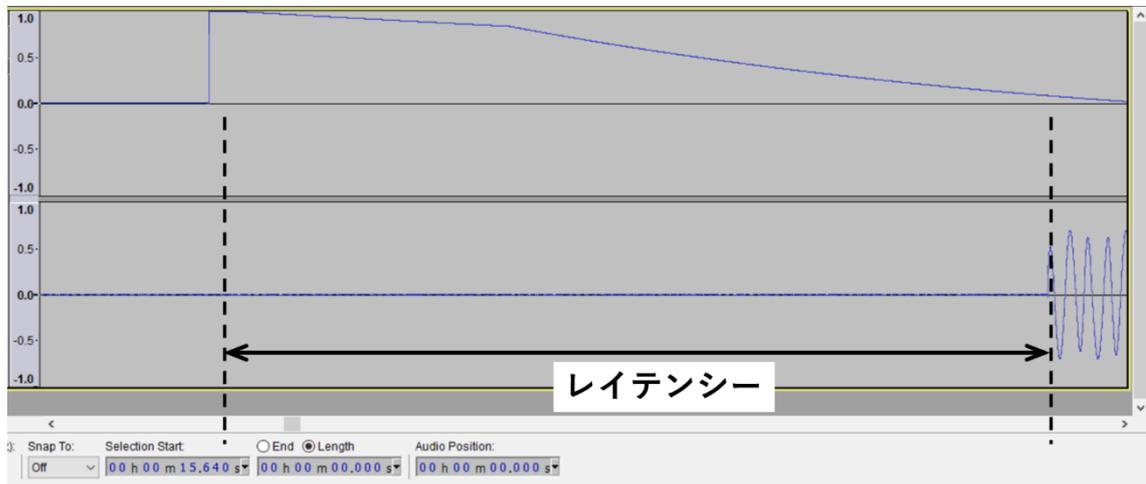


図 20 レイテンシーの測定の例、PureData、正弦波。

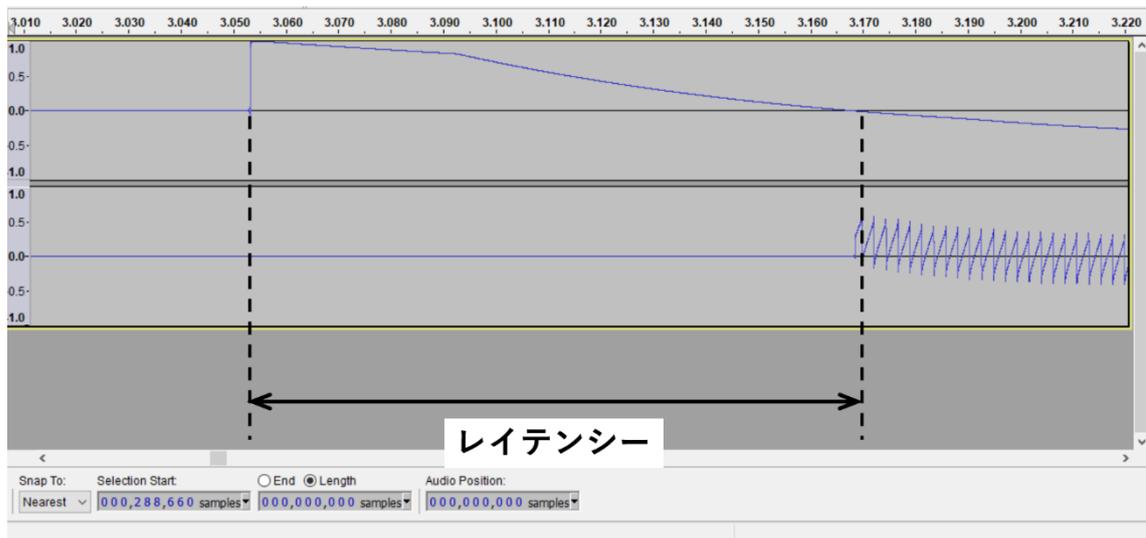


図 21 レイテンシーの測定の例、PureData、のこぎり波。

表 6 PureData のレイテンシー測定結果。

	平均値[ms]	最大値[ms]	最小値[ms]
正弦波	101	118	96
のこぎり波	113	125	103

4.3.3 被験者

4.2 節と同様に課題曲として簡単な旋律演奏を練習するため、被験者は旋律演奏ができる楽器の演奏経験者に限定して、東京情報大学の学生と木更津工業高等専門学校吹奏楽部の部員に依頼した。人数は 13 人で、4.2 節の第 1 実験と共通する被験者は 4 人である。

4.3.4 演奏内容

4.2.6 項より課題曲演奏と自由演奏では演奏性の主観的評価の傾向があまり異なることがわかったため、自由演奏は行わずに図 22 の課題曲のみを演奏した。4.2 節と同様に課題曲は MIDI 音楽編集ソフト「Domino」を用いて、オルガン音とピアノロールで被験者に提示し、楽譜は提示しなかった。既存の曲だと被験者によって結果に差が出る可能性があり、また 4.2.4 項と同じ課題曲だと 4.2 節の実験にも参加した被験者がより容易に演奏できてしまう可能性もあるため、新規の曲を著者が作成した。演奏テンポ (BPM100) と発音数 (20 回)、演奏時間の長さ (テンポ 100、4 小節)、隣接した音程の最大は完全 4 度、音価は最も小さい音で八分音符であることは、4.2.4 項の課題曲と同じである。これらの音域やリズム、演奏難易度は著者の演奏経験から決定し、さらに 4.2.4 項の課題曲と同程度の演奏難易度になるように作成した。



図 22 課題曲。

本論文では報告しないが、本実験では演奏音の音色と演奏動作の関連性を評価するため、各実験対象楽器でそれぞれ波形や減衰時間が異なる 4 種類の音色で演奏できるように実験対象楽器を設計し、各実験対象楽器の各音色で音と動作の関連性の主観的評価も行った。そのため、各実験対象楽器において以下の順番で演奏や評価を行った。なお、実験対象楽器と音色を演奏する順番に偏りがないようにするため、被験者ごとに異なる音色の順番で演奏した。

1. 固定ドかつハ長調を想定して、実験対象楽器の音名操作方法と発音操作方法を実験者が実演して説明。
2. 1つ目の音色で図 22 の課題曲を 2 分 30 秒間演奏
3. 1つ目の音色について、音と動作の関連性の主観的評価の評価項目に回答
4. 2つ目の音色で図 22 の課題曲を 2 分 30 秒間演奏
5. 2つ目の音色について、音と動作の関連性の主観的評価の評価項目に回答
6. 3つ目の音色で図 22 の課題曲を 2 分 30 秒間演奏

7. 3つ目の音色について、音と動作の関連性の主観的評価の評価項目に回答
8. 4つ目の音色で図 22 の課題曲を 2 分 30 秒間演奏
9. 4つ目の音色について、音と動作の関連性の主観的評価の評価項目に回答
10. 各音色でメトロノームに合わせて本番演奏を 2 回、合計 8 回演奏

4.4 演奏正確性の評価結果

4.2 節での 3 種類の実験対象楽器と 4.3 節での 3 種類の実験対象楽器、合計 6 種類の実験対象楽器の課題曲演奏から演奏正確性を分析した。本実験の結果を報告した参考文献 [41]では、演奏音から発音の過不足の数や音高間違いの数を分析して評価した。本論文では新たに「発音正解率」と「IOI の誤差の絶対値」を分析して評価した。これらの特徴量から、演奏しやすい演奏インターフェースの特徴について論じた。

4.4.1 IOI の導出方法

各特徴量について述べる前に、それらの導出に必要な IOI (Inter Onset Interval) と音名の導出方法を説明する。IOI は発音時間間隔を意味し、対象の演奏音が発音された時刻から、その次の演奏音が発音される時刻までの時間間隔を指す。発音時刻は、演奏音が立ち上がった 1 周期の振幅の絶対値が最大になったタイミングとした。

IOI は発音時刻のみを基準としているため、対象の演奏音の持続時間や、次の音が発音されるまでの間の消音時間は考慮しなかった。また、発音を維持したまま他の音名に切り替わった際は、その新しい音名に切り替わった時刻を、その新しい音名の音の発音時刻とした。音名は対象の音の波長から周波数を導出して判別した。

4.4.2 発音正解率

発音正解率の導出手順を以下に示す。

1. 4.4.1 項で示した方法で導出された IOI と音名を用いて、楽譜を元にした正しい音と演奏音との DP (Dynamic Programming) マッチングを行った。DP マッチングは動的解析法を利用した、長さが異なるパターン間のマッチング法である [44] [45]。本実験では演奏が途中で止まってしまう、演奏後半の発音時刻が大きすぎる演奏もあった。そのため、IOI がずれていても音名が正しければマッチングされるように、DP マッチングにて累積させるペナルティを調整した。数値としては、IOI の誤差が 1 小節以上になった場合に、音名を間違えた場合と同等のペナルティ付加になるように調整した。
2. マッチング結果を元に以下の特徴量を導出した。
 - 余分な発音数：DP マッチングで楽譜の音と対応されなかった演奏音の数。
 - 発音の不足数：DP マッチングで演奏の音と対応されなかった楽譜の音の数。
 - 音高の間違い数：IOI がほぼ一致しているため DP マッチングで対応された演奏音と楽譜の音のペアの中で、音名が一致しなかった数。

3. DP マッチングで楽譜の音と対応された演奏音のみを用いて再度 IOI を計算した。ただし、余分な発音である音と発音が不足した音は IOI の計算には用いず、またその次の音が発音されなかった(発音の不足があった)音は適切に IOI を計算できないため、その音の IOI は欠損値とした。なお、音高が間違っている音はそのまま IOI の計算に用いた。
4. 本実験の演奏では発音が遅れたり演奏が途中で止まったりして IOI が大きくなることがあった。また、発音時刻が早まって IOI が小さくなる演奏もあった。発音正解率の導出において、IOI の伸び、あるいは縮みが課題曲の最小の音価である半拍 (0.3 s) 以上の音を間違った IOI の音と定義して、演奏ごとにその音の数を割り出した。
5. 式(1)より発音正解率を計算した。この発音正解率は最大値が 1 となり、発音の過不足や音名の間違い、間違った IOI の音が増えると数値が小さくなる。数値が 1 に近いほど演奏の間違いが少なく、楽譜通りに演奏できていると評価される。発音正解率の値に下限はなく、例えば余分な発音が多くなれば負の数値になる場合もある。なお、音高を間違えて、かつ IOI の伸び、あるいは縮みが半拍 (0.3 s) 以上だった場合、式(1)中では「音高間違えの数」としてのみ扱う。

$$\text{発音正解率} = \frac{\text{Total} - \text{Ex_sound} - \text{In_sound} - \text{Pi_mistake} - \text{Te_IOI}}{\text{Total}} \quad (1)$$

Total : 楽譜上の発音の総数 (Total number of notes)

Ex_sound : 余分な発音数 (Extra sound productions)

In_sound : 発音不足数 (Insufficient sound productions)

Pi_mistake : 音高間違えの数 (Pitch mistakes)

Te_IOI : IOI の誤差の絶対値が半拍以上の演奏音の数 (Temporal errors of inter-onset interval)

演奏の分析、評価を行った従来研究 [46] [47]では、発音正解率は余分な発音数、発音の不足数、音高の間違いの数をを用いて導出していた。「IOI の誤差の絶対値が半拍以上の演奏音の数」は本論文で新たに追加した特徴量である。第 6 章で示す演奏練習実験では、IOI が大きくずれる被験者がいた。また、余分な発音数、発音の不足数、音高の間違いの数のみでは、音列の正しさしか評価することができない。演奏は正しいタイミングでの音の操作が必要であり、楽譜通りに演奏できているか否か評価するという観点から、発音タイミングや IOI の正しさを評価する特徴量を追加した。

なお、手順 4 にて間違った IOI の音の基準を半拍 (0.3 s) の誤差とした理由について、IOI の誤差の大きさの分布がある。第 6 章にて新規な電子楽器を 3 週間毎日演奏練習した実験において、上達した 3 週目の演奏での IOI の誤差のヒストグラムを図 23 に示す。0 s 付近のピークから 0.3 s 付近にかけて度数は減少しており、それ以後はある程度一定になっ

ている。これより、IOI の間違いを判定する基準として半拍 (0.3 s) を設定して、その範囲に含まれない IOI の間違いを発音正解率に組み込んで評価することとした。なお、1.2 s 付近のビンは、1.2 s 以上の IOI の誤差の度数を全て累計したものであり、-0.6 s 付近のビンは-0.6 s 以下の IOI の誤差の度数を全て累計したものである。

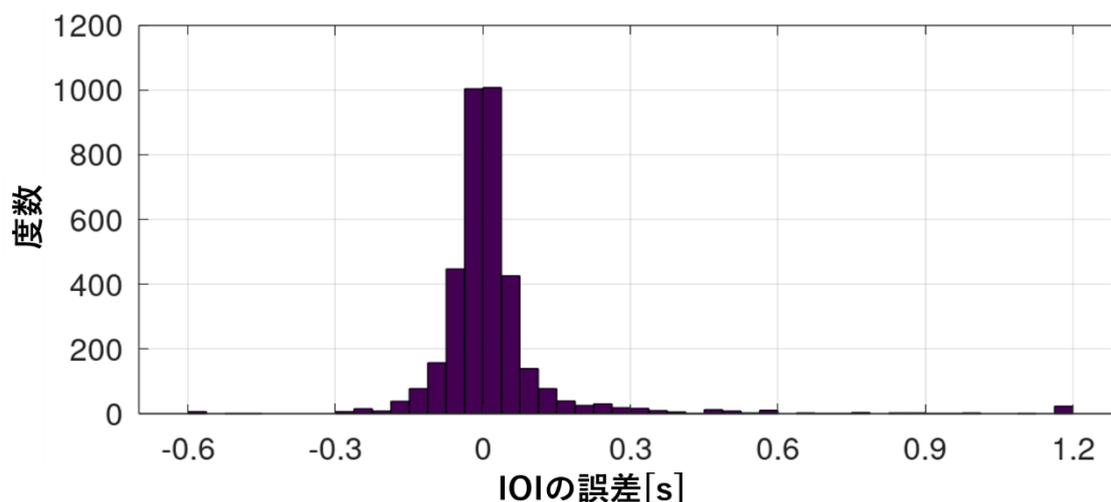


図 23 第 6 章での演奏練習実験の 3 週目における IOI の誤差のヒストグラム。

6 種類の実験対象楽器ごとに被験者全員分の発音正解率の平均を取った結果を図 24 に示す。また、6 種類の実験対象楽器の間で発音正解率に有意差があるかをマン・ホイットニーの U 検定 (ボンフェローニの補正済み) で比較した。検定の結果、グローブは他の 5 種類よりも発音正解率が有意に高く、間違いを少なく演奏できることがわかった。

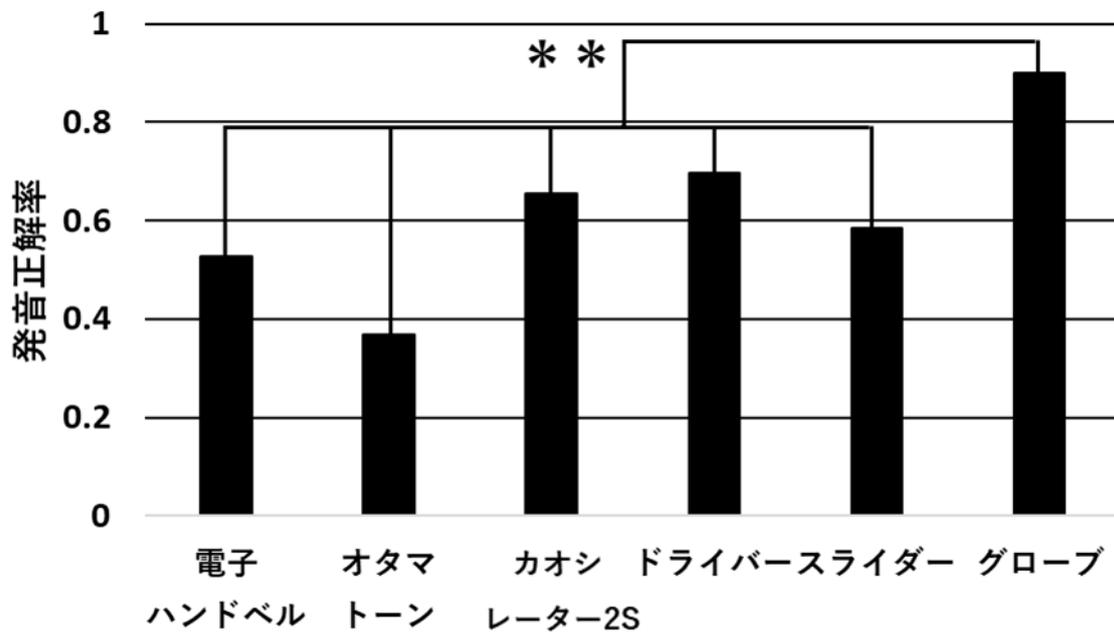


図 24 発音正解率の平均値 (** : 危険率 1% で有意差あり)。

4.4.3 IOI の誤差の絶対値

4.4.2 項での楽譜を元にした正しい音と演奏音との DP マッチング後に、マッチングされた演奏音で一音ごとに楽譜の IOI との差を求めて、その絶対値の平均を演奏ごとに求めた。なお、発音正解率を導出する(1)式における間違っ IOI の音を除外するため、半拍 (0.3 s) 以上の IOI の誤差の絶対値は平均の計算から除外した。つまり、半拍以内の IOI の間違いは本項の IOI の誤差の絶対値で評価して、半拍より大きい IOI の間違いは 4.4.2 項の発音正解率で評価することとなる。また、マッチングされた演奏音の中で最後に発音された音も IOI を計算できないため、平均の計算から除外した。IOI の誤差の絶対値が小さいほど IOI の伸び、縮みを小さく演奏できていると評価できる。

6 種類の実験対象楽器ごとに被験者全員分の IOI の誤差の絶対値の平均を取った結果を図 25 に示す。また、6 種類の実験対象楽器の間で IOI の誤差の絶対値に有意差があるかを、被験者を繰り返し要因、実験対象楽器の種類を要因にした 1 元配置の分散分析で比較した。分散分析表を表 7 に示す。電子ハンドベルは他の 5 種類よりも IOI の誤差の絶対値が有意に大きく、IOI を正確に演奏できないことがわかった。

表 7 分散分析表 (IOI の誤差の絶対値、実験対象楽器)。

ソース	平方和	自由度	平均平方	F 値	危険率
実験対象楽器	0.260	5	0.05	5.99	0.000
修正モデル	0.260	5	0.05	5.99	0.000
全体	0.870	77	0.01		

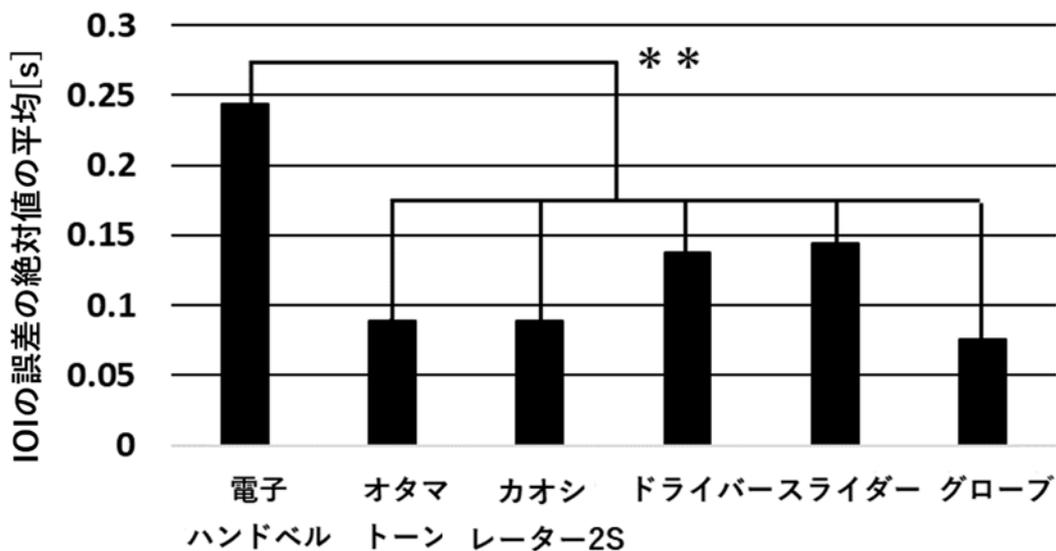


図 25 IOI の誤差の絶対値の平均値 (** : 危険率 1% で有意差あり)。

4.4.4 余分な発音数

4.4.2 項での楽譜を元にした正しい音と演奏音との DP マッチングにおいて、楽譜とマッチングされなかった演奏音の個数を余分な発音数として集計した。実験対象楽器間の余分な発音数を比較するため、実験対象楽器の種類を要因にした 1 元配置の分散分析を実施した。分散分析表を表 8 に示す。また、余分な発音数を実験対象楽器毎に比較するグラフを図 26 に示す。ドライバーとスライダーは他の実験対象楽器よりも余分な音を多く発音していた。これらは音高を変えたり音を発音したりするときに異なる音高の音を余分に発音していた。ドライバーは発音の操作を維持 (ハンドルを握り続ける) する状態で音高を変えると新しい音高の音を発音し直す。また、スライダーは発音の操作を維持 (持ち手を握り続ける) する状態で音高を変えると新しい音高の音を発音し直す。そのため、音高を変えたり発音したりするときにハンドルあるいは持ち手を握り続けて、余分な音を発音してしまったと考えられる。一方でグローブは余分な発音が少ない。グローブは触る動作のみで発音でき、かつ発音する音名を刺繍で視認できるため、異なる音高の音を余分に発音することが少

なかったと考えられる。

表 8 分散分析表（余分な発音の数、実験対象楽器）。

ソース	平方和	自由度	平均平方	F 値	危険率
実験対象楽器	3437.57	5	687.51	33.96	0.000
修正モデル	3437.57	5	687.51	33.96	0.000
全体	10724.68	365	29.38		

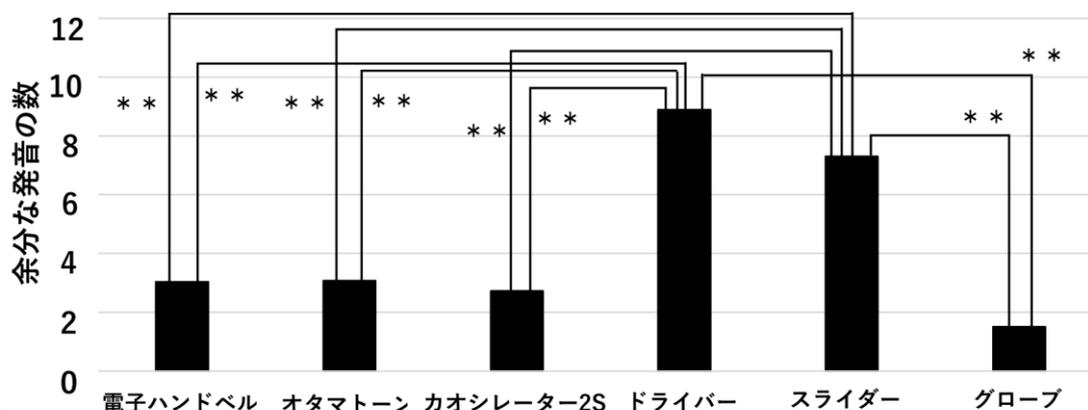


図 26 余分な発音の数 (** : 危険率 1%で有意差あり)。

4.4.5 発音の不足数

4.4.2 項での楽譜を元にした正しい音と演奏音との DP マッチングにおいて、演奏とマッチングされなかった楽譜の演奏音の個数を発音の不足数として集計した。実験対象楽器間の発音の不足数を比較するため、実験対象楽器の種類を要因にした 1 元配置の分散分析を実施した。分散分析を表 9 に示す。また、発音の不足数を実験対象楽器毎に比較するグラフを図 27 に示す。電子ハンドベルは他の実験対象楽器よりも発音の不足が多くなっていた。電子ハンドベルは発音操作を振る動作で行う。一方で他の 5 種類は発音操作を触る動作や握る動作のみで行う。振る動作は触る動作や握る動作よりも発音が難しいと考えられる。また、グローブとドライバー、スライダーの 3 種は、オタマトーンとカオシレーター2S よりも発音の不足が少なかった。

表 9 分散分析表（発音の不足数、実験対象楽器）。

ソース	平方和	自由度	平均平方	F 値	危険率
実験対象楽器	156.39	5	31.28	20.46	0.000
修正モデル	156.39	5	31.28	20.46	0.000
全体	706.62	365	1.94		

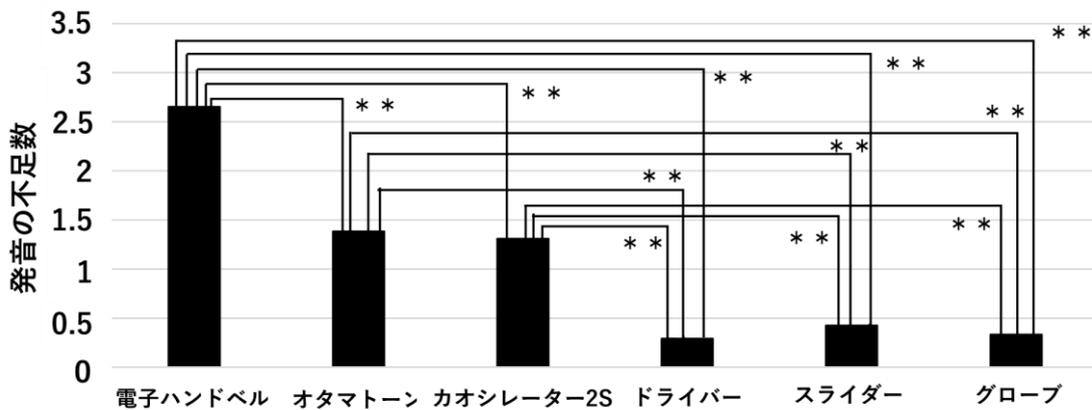


図 27 発音の不足数 (** : 危険率 1%で有意差あり)。

4.4.6 音高の間違いの数

オタマトーンでは演奏音の基本周波数が課題曲の楽譜での正しい基本周波数より 1/2 半音以上ずれると、音高を間違えたと評価した。実験対象楽器間の音高の間違いの数を比較するため、実験対象楽器の種類を要因にした 1 元配置の分散分析を実施した。分散分析表を表 10 に示す。また、音高を間違えた数を比較するグラフを図 28 に示す。オタマトーンは他の実験対象楽器よりも音高の間違いの数が有意に多かった($p < 0.01$)。なお、オタマトーンでは全体的に低い基本周波数にシフトして演奏していて、音高を間違えたと判定された被験者もいた。音高の変化が連続的で、かつ音高を視覚などで認識できないことが原因であると考えられる。

第 2 実験でのドライバー、スライダー、グローブは、第 1 実験での電子ハンドベル、オタマトーン、カオシレーターよりも音高の間違いの数が有意に少なかった($p < 0.01$)。ドライバー、スライダー、グローブは音階に従って音高を操作できて、かつ音高を視覚や触覚で認識しやすかったため、音高の間違いが少なかったと考えられる。

表 10 分散分析表（音高間違いの数、実験対象楽器）。

ソース	平方和	自由度	平均平方	F 値	危険率
実験対象楽器	2410.22	5	482.04	111.02	0.000
修正モデル	2410.22	5	482.04	111.02	0.000
全体	3973.34	365	10.89		

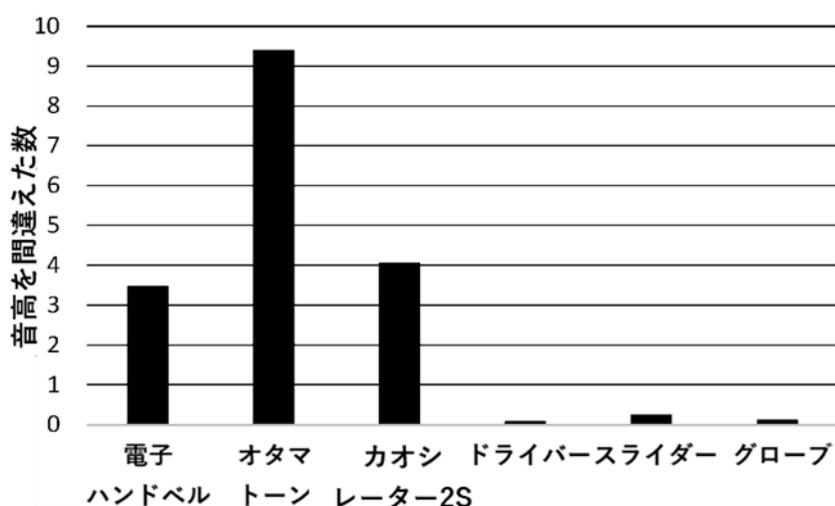


図 28 音高の間違いの数の比較。

4.5 主観的評価の結果

4.5.1 因子分析

4.2.5 項で示した演奏性の主観的評価の評価項目の回答結果を、全被験者の実験対象楽器 6 種類分全て合わせて、因子抽出手法を主因子法とした探索的因子分析を行った。なお、4.2 節の実験対象楽器では評価項目の回答結果が 2 つ（課題曲と自由演奏）あるのに対して、4.3 節の実験対象楽器では評価項目の回答結果が 1 つ（課題曲のみ）しかない。ここでは 4.2 節の各被験者の各実験対象楽器の回答結果を課題曲演奏と自由演奏で平均することで、各評価項目で 78 個（実験対象楽器 6 種類×被験者 13 人）の回答結果を用意した。探索的因子分析で Varimax 回転後に得られた因子と因子負荷量を表 11 に示す。

表 11 因子と因子負荷量。

	上達感	音高操作	発音動作
また演奏したいと思うか?	0.811	0.137	0.303
電子楽器を演奏して楽しかったか?	0.791	0.0127	0.401
練習すればすぐに上達できると思うか?	0.752	0.319	0.206
10分で演奏が上達したと思うか?	0.594	0.221	0.196
演奏していてストレスや苦痛を感じなかったか?	0.524	0.328	0.301
指定した内容の演奏をすることは容易であったか?	0.273	0.773	0.278
出したい音高をすぐに発音できるか?	0.182	0.714	0.274
開始直後は演奏が難しいと感じなかったか?	0.0262	0.652	0.148
音高を操作しやすかったか?	0.408	0.631	0.321
発音のタイミングを操作しやすかったか?	0.310	0.0975	0.820
消音のタイミングを操作しやすかったか?	0.376	0.083	0.734
発音や音高を操作するときに、楽器位置や持ち方は安定していたか?	0.283	0.285	0.487
因子寄与率[%]	46.2	11.2	5.3

第1因子には「10分で演奏が上達したと思うか?」、「練習すればすぐに上達できると思うか?」という演奏の上達についての評価項目が含まれた。よって、「上達感因子」と名付けた。この因子の因子得点が大きいと演奏の上達を感じると評価できる。この上達感因子の中では「また演奏したいと思うか?」(因子負荷量:0.811)と「電子楽器を演奏して楽しかったか?」(因子負荷量:0.791)の因子負荷量が比較的大きくなっており、演奏が楽しく感じると再度演奏したいと感じることが示唆された。

第2因子には「音高を操作しやすかったか?」、「出したい音高をすぐに発音できるか?」という音高操作についての評価項目が含まれた。よって、「音高操作因子」と名付けた。この因子の因子得点が大きいと音高を操作しやすく感じると評価できる。この音高操作因子の中では「指定した内容の演奏をすることは容易であったか?」(因子負荷量:0.773)と「出したい音高をすぐに発音できるか?」(因子負荷量:0.714)の因子負荷量が比較的大きくなっており、出したい音高をすぐに発音できる演奏インターフェースだと、演奏そのものも容易に感じることを示唆された。

第3因子には、「発音のタイミングを操作しやすかったか?」、「消音のタイミングを操作しやすかったか?」という発音についての評価項目が含まれた。よって、「発音動作因子」と名付けた。この因子の因子得点が大きいと発音の操作をしやすく感じると評価できる。この発音動作因子では「発音のタイミングを操作しやすかったか?」(因子負荷量:0.820)と「消音のタイミングを操作しやすかったか?」(因子負荷量:0.734)の因子負荷量が比較的大きくな

っており、発音を操作しやすい演奏インターフェースだと消音も操作しやすいと感じることが示唆された。

なお、上記の因子分析の適合度を調査するため確証的因子分析を行い、適合度指標を求めた。0.95 以上が望ましい CFI (comparative fit index) [48]は 0.883、1 に近いことが望ましい TLI (Tucker-Levis index) [48]は 0.848 となった。

4.5.2 因子得点の分散分析

演奏インターフェースの特徴と、因子分析より得られた各因子による演奏性の主観的評価結果との関連を考察する。4.5.1 項の因子分析で得られた各因子の因子得点について、実験対象楽器の種類を要因にした 1 元配置の分散分析を実施した。上達感因子の因子得点の分散分析表を表 12 に、音高操作因子の因子得点の分散分析表を表 13 に、発音動作因子の因子得点の分散分析表を表 14 にそれぞれ示す。

表 12 より、上達感因子では実験対象楽器の主効果が有意でなかった。これより、本実験での新規な電子楽器では演奏の上達の感じ方に差異がなかった。

表 12 因子得点の分散分析表 (上達感)。

要因	平方和	自由度	平均平方	F 値	危険率
実験対象楽器	3.27	5	0.65	0.77	0.576
全体	64.60	77			

表 13 因子得点の分散分析表（音高操作）。

要因	平方和	自由度	平均平方	F 値	危険率
実験対象楽器	16.37	5	3.27	4.91	0.001
全体	64.35	77			

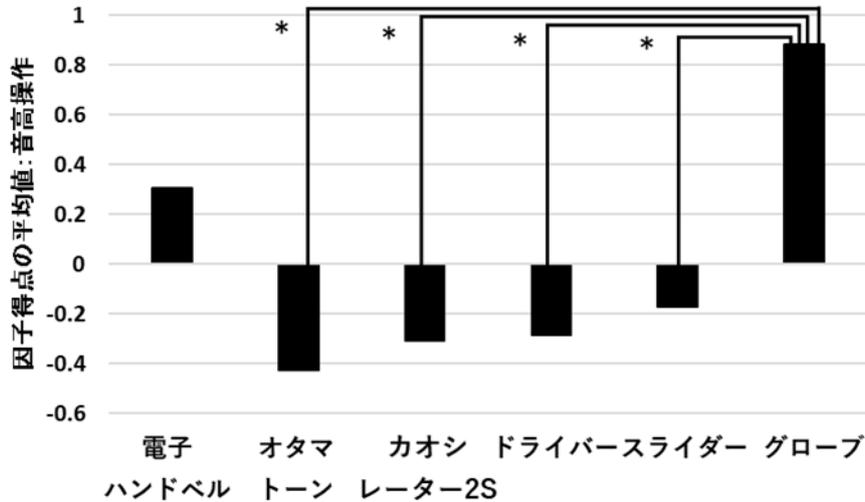


図 29 音高操作因子得点の平均値 (* : 危険率 5%で有意差あり)。

表 13 より、音高操作因子において実験対象楽器の主効果が有意であった。図 29 は各実験対象楽器の音高操作因子の因子得点の平均値を示す。因子得点の平均値が大きいほど音高操作が容易に感じると評価される。これより、グローブは電子ハンドベルを除く 4 つの実験対象楽器よりも音高操作が容易であると感じたと評価された。グローブは各音名に対応した刺繍を「触る」という単純な動作で音高を操作できる。ドライバーやスライダーは直前の音名と隣接していない音名の音を発音しようとする、より大きな動作が必要になり、音高操作が難しくなる。オタマトーンやカオシレーター2S はグローブと同様にパネルなどに触る位置で音高を操作できるが、パネルには音高や音名を識別できる目安や目盛りがない。以上より、他の音高に即座に切り替えることができ、かつ生成される音名を演奏者が視覚で認識できる演奏インターフェースでは、音高の操作をしやすく感じると考えられる。また、グローブは参考にしたカオシレーター2S よりも音高操作がしやすいと評価された。これは音名を視覚で認識できたことに加えて、手の平の触覚でも認識できたため、より音高を操作しやすく感じた可能性がある。また、操作できる音域の幅も影響していると考えられる。どちらも手の平程度の大きさの演奏インターフェースで演奏できるが、カオシレーター2S は 2 オクターブ分の音名を操作して、グローブは 1 オクターブ分の音名を操作する。そのため、グローブでは演奏インターフェース上で各音名の幅がカオシ

レーター2Sよりも広くなり、音高操作に余裕ができたと考えられる。以上のことから、視覚や触覚などにより音高の変化を認識できて、更に音高操作に余裕がある形状や大きさの演奏インターフェースでは音高操作をしやすと考えられる。

表 14 因子得点の分散分析表（発音動作）。

要因	平方和	自由度	平均平方	F 値	危険率
実験対象楽器	10.26	5	2.05	2.92	0.019
全体	60.86	77			

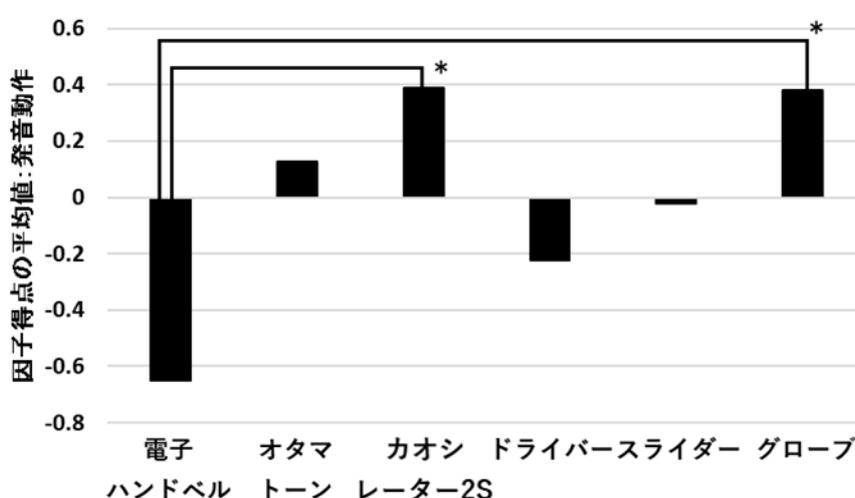


図 30 発音動作因子得点の平均値 (*: 危険率 5%で有意差あり)。

表 14 より、発音動作因子において実験対象楽器の主効果が有意であった。図 30 は各実験対象楽器の発音動作因子の因子得点の平均値を示す。因子得点の平均値が大きいほど発音操作が容易に感じると評価される。これより、電子ハンドベルはカオシレーター2S やグローブよりも発音操作が難しく感じたと評価された。電子ハンドベルは「振る動作」によって発音し、「ボタンの押下」によって音高を操作する。一方で、カオシレーター2S やグローブは「演奏インターフェースに触る」という単一の動作で発音と音高の両方を操作できる。これより、複数の動作で演奏する新規な電子楽器は単一の動作で演奏する新規な電子楽器と比べると発音操作が難しく感じると考えられる。

4.6 考察

4.6.1 演奏しやすい演奏インターフェースの特徴

まず音高操作について、4.3 節のドライバー、スライダー、グローブは音高の間違いが少ない傾向があった。また、これらは 4.2 節の電子ハンドベル、オタマトーン、カオシレーター2S よ

りも発音の不足が少ないことがわかっている。ドライバー、スライダー、グローブは音高操作がしやすくなるように、音階での音高操作や、音名を視覚などで認識できるように意図して設計している。これより、音高を音階に従って制御できて、かつ演奏インターフェース上で音高を認識できるようにすることで、音高の間違いを少なくできる可能性がある。

電子ハンドベルは他の実験対象楽器よりも IOI の誤差の絶対値が大きかった。他の実験対象楽器は「触る」や「握る」動作によって発音している一方で、電子ハンドベルのみは「振る」動作によって発音を操作していた。これより、「触る」や「握る」動作は「振る」動作よりも IOI の誤差を小さく演奏できる可能性があり、IOI の正確さは演奏動作の内容に影響されると考えられる。

ドライバーとスライダーは他の実験対象楽器よりも余分な発音数が多かった。これらは発音と音高をそれぞれ別の動作で操作しており、実験中は音高を変える際に間違った音名の音を、正しい音名の音が発音される直前に一瞬発音してしまうケースが見られた。これより、単一の動作で発音と音高を操作できると発音の間違いを少なくできる可能性がある。

グローブは上記の考察の「音高の認識」と「触る動作で演奏」、「単一の動作での発音と音高の操作」の3つの特徴を持っており、そのグローブは発音正解率が最も高かった。このことから、この3つの特長を有する演奏インターフェースは演奏しやすいことが考えられる。

4.6.2 演奏性の主観的評価の項目

本実験で使用した新規な電子楽器と評価項目では、新規な電子楽器の演奏性の主観的評価は「上達感」、「音高操作」、「発音動作」の3つの因子に集約された。これにより、同様の評価項目で新規な電子楽器の演奏性の主観的評価を行う場合は、3つの因子をそれぞれ代表する3つの評価項目を用いることで評価項目を減らして、演奏性を評価する際の被験者の負担を軽減しつつ、新規な電子楽器の演奏性を適切に評価できると考えられる。

音高操作と発音動作の2つの因子が見つかったが、これは評価した新規な電子楽器が発音と音高のみを操作するためであると考えられる。例えば電子ハンドベルは「振る動作」と「ボタンの押下」の2つの動作で演奏を行い、オタマトーンやカオシレーター2Sは「触る動作」の1つの動作のみで演奏を行う。演奏に必要な動作の数や内容は異なるが、発音と音高を操作する点は共通している。そのため、演奏性の主観的評価は発音動作と音高操作の2つの因子に集約されたと考えられる。仮に、本実験と同様の演奏評価実験をより複雑な演奏ができる新規な電子楽器で実施した場合、新たな因子が見つかる可能性がある。例えばヴィブラートを表現できる新規な電子楽器を演奏して、更にヴィブラートのしやすさを評価する項目を追加して因子分析を行えば「ヴィブラート操作」などの新しい因子も見つかると考えられる。

探索的因子分析で見つかった上達感因子より、演奏において楽しさを感じる場合に、再度演奏したいと感じることが示唆された。新規な電子楽器を再度演奏したい、あるいは継続して演奏したいと感じることは、それら新規な電子楽器の普及において重要である。しかし、

この知見が妥当だとすると、次は演奏においてどのようなときに楽しさを感じるかを明らかにする必要がある。第3章での楽器演奏に対する意識調査では、特定の演奏形態に限定せずに、演奏者が理想とする演奏（思った通りの演奏）ができると楽しさを感じる事が示唆された。今後、演奏の楽しさを感じる要因を更に調査して明らかにすることで、新規な電子楽器の普及、あるいは継続的な演奏につながると考えられる。

探索的因子分析で見つかった音高操作因子より、出したい音高をすぐ発音できるようにしたり、音高操作を容易にしたりすることが演奏そのものを容易に感じることにつながることが示唆された。これより、演奏の難易度には発音操作のしやすさよりも音高操作のしやすさの方が強く影響すると考えられる。

発音動作因子より、発音操作がしやすいと感じると消音操作もしやすいと感じることが示唆された。今回評価した新規な電子楽器は電子ハンドベルを除いて、いずれも「触る」や「握る」などの動作を維持することで発音を維持して、その動作をやめることで消音する演奏インターフェースであった。そのため、発音操作をしやすく感じると消音操作もしやすく感じたと考えられる。

因子得点の分散分析より、グローブは同じ「触る」動作によって演奏するカオシレーター2Sよりも音高操作がしやすく感じたことが評価された。これより、演奏動作が類似する新規な電子楽器において、視覚や触覚などによって音高の変化を認識できて、更に音高操作に余裕がある形状や大きさの演奏インターフェースはより音高操作をしやすく感じる事が示唆された。また、単一の動作で発音と音高の両方を操作できる演奏インターフェース（カオシレーター2Sやグローブ）は発音操作をしやすく感じる事が示唆された。これらの知見は今後の新規な電子楽器の設計、開発の指標として役立つ。また、新規な電子楽器を開発して、それらの演奏性を演奏者が主観的に評価することを必要とする研究では、開発段階である程度評価を予測しながら設計することが可能になると考えられる。

演奏評価実験の内観報告から、移調や楽譜の書き換えに詳しい被験者1人は本実験の課題曲の調に違和感を覚えていた。この違和感が演奏性の主観的評価に影響するとは報告しなかったが、今後同様の実験を行う際は、このような違和感を覚えることがないように、演奏する新規な電子楽器の調と課題曲の調を合わせる必要がある。

4.6.3 正確な演奏ができなかった原因

本章の演奏評価実験では電子ハンドベルやドライバーなど、正確な演奏ができない新規な電子楽器が見られた。原因として2つのことが考えられる。

1つ目は、実験の対象とした新規な電子楽器の演奏インターフェースが楽器演奏に不向きであった可能性である。この問題点の克服には、4.6.1項で考察したような演奏しやすい演奏インターフェースの特徴を得ることが有効であると考えられる。しかし、その考察や知見によって従来楽器と同等かそれ以上に正確な演奏ができるかは明らかになっていない。今後は正確な演奏がしやすいことを目指した新規な電子楽器を複数製作して、更にそれらと

従来楽器の演奏の評価、比較をする必要がある。これについて、複数の新規な電子楽器の製作は第5章で、それらと従来楽器との比較は第6章で報告する。

2つ目は、そもそも初めて扱う楽器を使いこなすことが難しいという可能性である。通常、楽器演奏の習得や上達にはある程度の練習が必要であり、新規な電子楽器においてもある程度の演奏練習が必要であると考えられる。新規な電子楽器の演奏練習実験については第6章で報告する。

4.7 まとめ

著者が過去に行った新規な電子楽器の演奏評価実験を紹介した。更に、新たな特徴量を用いた演奏音の分析結果と、全ての被験者を対象とした際の演奏性の主観的評価結果の因子分析について報告した。実験対象として市販の新規な電子楽器、及び先行研究で製作された新規な電子楽器を3種類使用した。更に、それら3種類の評価結果を元に著者が新たに製作した3種類の新規な電子楽器も実験対象とした。

実験対象楽器の演奏音分析結果より、音高を音階に従って操作して、かつコントローラ上で音高を認識できるグローブなどは比較的音高の間違いや発音の不足が少なかった。また、振る動作で演奏する電子ハンドベルは、触る動作などで演奏する他の実験対象楽器よりもIOIの誤差が大きかった。更に、ドライバーやスライダーなど、発音操作と音高操作を別々の動作で行う新規な電子楽器は余分な発音が多かった。これらの結果より、演奏しやすい演奏インターフェースの特徴について、「音高を音階に従って制御できて、かつコントローラ上で音高を認識できると音高操作をしやすい」、「触る、握る動作は振る動作よりもIOIの誤差を小さく演奏できる」、「単一の動作で発音と音高を操作できると発音操作をしやすい」などの考察を行った。これらの特徴を併せ持つグローブは、発音正解率が最も高かった。本実験で得られた考察を元に新規な電子楽器を設計することで、より演奏しやすい新規な電子楽器を製作できる可能性がある。

新規な電子楽器の演奏性の主観的評価結果の因子分析により、12個の評価項目を「上達感因子」、「音高操作因子」、「発音動作因子」の3つの因子に集約できた。これらの因子に集約された評価項目より、演奏で楽しさを感じる場合に再度演奏したいと感じることが示唆された。今回評価した新規な電子楽器では、出したい音高をすぐ発音できると演奏そのものが容易であると感じて、発音操作をしやすいと感じると消音操作もしやすいと感じることが示唆された。因子得点の分散分析により、他の音高への切り替えが容易で、視覚や触覚によってその音高の変化を認識できて、更に音高操作に余裕がある形状や大きさの演奏インターフェースは音高操作がしやすいことが示唆された。また、単一の動作で発音と音高の両方を操作できる演奏インターフェースは発音操作をしやすいことがわかった。本実験で得られた結果や知見は、多くの評価項目を減らして演奏性を評価する際の被験者の負担を軽減しつつ、新規な電子楽器の演奏性を適切に評価することに役立つ。

第5章 新規な電子楽器の製作

第4章では、演奏しやすい演奏インターフェースの特徴について考察した。本章ではその考察を元に演奏しやすいことを目指した新規な電子楽器を複数製作する。それらを使って、第6章では演奏の正確さや上達過程、上達に要する時間を分析する演奏評価実験を実施する。

以下が第4章での考察である。これらを参考に2種類の新規な電子楽器を製作した。

- 音高を音階に従って制御できて、かつコントローラ上で音高を認識できると音高操作をしやすい
- 単一の動作で発音と音高を操作できると発音操作をしやすい
- 触る、握る動作は振る動作よりも IOI の誤差を小さく演奏できる

5.1 タブレット

iPad Air (第1世代、9.7インチ) に Web Audio API で音の生成機能とその音を制御する機能を実装した電子楽器である。図31のようにタッチパネルに各音名に対応する色分けした四角の領域を環状に配置して、その領域に触ることで発音する。発音したら指を離すまで発音を維持する。触ったまま指をスライドして他の音名の領域を触ると、その音名の音に切り替わる。また、仮にタッチパネルに触った時点でいずれの音名の領域にも触っていなければ音は発音されない。ただし、その状態で指をスライドしていずれかの音名の領域に触れば、その音名の音を発音する。以上の機能により、この楽器は指で触る、もしくは任意で指をスライドする動作のみで演奏できる。各音名の領域を環状に配置したことによって、音階において隣接していない異なる音名にも指の短い移動距離で切り替えができる。画面上に配置された音名の中で内側の7音はC4からB4の全音階、外側の7音はC5からB5の全音階に対応する。各音名の領域の大きさや間隔は、タッチパネル上のボタンサイズや間隔の評価を行った従来研究 [49] を参考にして、更に著者が実際に演奏して調整した。

タッチパネルを楽器にすることは既に行われており、例えば鍵盤楽器や鍵盤を表示して演奏するものもある。本節のタブレットの利点としては、音名を環状に配置したことで隣接していない音名へも指の短い距離で切り替えできることや、音名によっては直線の経路で切り替えができることがある。更に、指をスライドして音名を変更できるため、指を1本のみで演奏していてもタッチパネルから離さずにスラーの演奏ができることが挙げられる。欠点としては、音名を環状に配置しているため鍵盤楽器のようにあらかじめ指を各鍵盤上に配置して、複数本の指で演奏することが困難な点がある。タブレットを対象とした第6章の演奏練習実験では、被験者は音楽の授業以外では楽器演奏経験がない初心者としており、その実験では複数本の指を同時に使って演奏することはなかったため、本論文では欠点ではないと判断した。

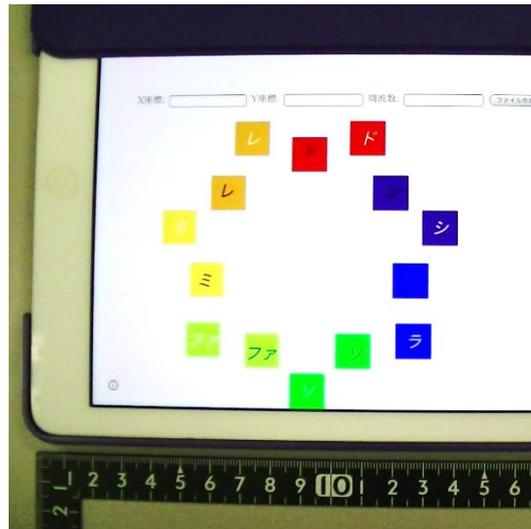


図 31 タブレット。

5.2 joystick

楽器演奏以外の分野で用いられている既存のヒューマンマシンインターフェースを用いることで、演奏しやすくすることを目指した。joystick はテレビゲームやアーケードゲームの操作に用いられており、現代でも家庭用ゲーム機である任天堂の「Nintendo Switch」 [50] のコントローラなどで用いられている。映像再生など他分野に利用する研究 [51] も行われている。音楽演奏においても、従来研究では 5 つの指の位置に配置した各 joystick を操作して音高や音の強さをコントロールする電子楽器が提案されている [52]。そこで、本実験でも音楽演奏に用いることとした。製作した電子楽器を図 32 に示す。任天堂 Wii の拡張コントローラ「ヌンチャク [53]」を改造して、joystick を親指 1 本で傾けると発音する電子楽器である。この joystick は 2 つの回転型の可変抵抗を内蔵し、左右方向と前後方向のスティックの傾けによって可変抵抗の抵抗値が変化する。可変抵抗に直列接続された固定抵抗の印可電圧を測定して 10bit 量子化を行い、分圧による印可電圧の変化によって左右方向と前後方向のスティックの傾けの大きさを導出する。左右方向と前後方向の傾けの大きさからスティックの全周の傾け方向とその大きさを導出する。スティックを傾けることができる最大の角度、つまりコントローラ本体からスティックが出ている穴の淵に衝突する位置に達する角度は 30° である。スティックの傾けの大きさにしきい値を設定しており、傾け角度の最大である 30° まで傾けると発音する。電子楽器のプログラムで傾ける方向の範囲を 45° ずつ 8 分割で再量子化して、各範囲に C4 から C5 の音名を割り当てることで 1 オクターブの全音階の音を発音できる。親指で触る部分にはオクターブ操作の圧力センサが設置されており、押下により 2N の力を検知した場合はオクターブ上の音を発音する。なお、圧力センサの端子は被験者の手に接触しないように配置した。以上のように、演奏にはスティックの傾けと圧力センサの押下の 2 種類の動作を要する。この joystick は第 4 章で得られた知見「単一の動作で発音と音高を操作できると発音操作をしやすい」、「コントローラ上で

音高を認識できると音高操作をしやすい」に反するが、指 1 本のみで操作することで演奏しやすくすることを目指して、このような演奏インターフェースとした。演奏に用いる指の本数について、複数の指で演奏するマルチタッチインターフェースを提案した従来研究 [54]では、使用者から「複数の指を使用した実際の操作は難しいと感じる」内観報告が得られている。本論文の joystick も演奏を目的とするため、複数本ではなく 1 本の指の方が演奏に適すると判断した。演奏する際は joystick からの信号をマイコンモジュール「Arduino」で読み取り、Tone 関数によって音を生成した。



図 32 joystick。

5.3 鍵盤楽器

比較用の従来楽器として鍵盤の MIDI コントローラ (AKAI MPK mini、25 鍵盤、1 オクターブの鍵盤の幅 155.2mm、ベロシティ対応) を用いて、白鍵のみを単旋律で演奏できる課題曲を演奏した。演奏する際に OS は Windows10 を用いて、VST プラグイン「Harmonaut (ver 0.9)」を VST ホスト「MiniHost (ver 1.64)」で動作させて、ASIO4ALL ドライバ(ver 2.14)経由で音を再生した。

本実験では標準鍵盤よりも小型な、所謂ミニ鍵盤というものを使用した。第 6 章で説明する演奏練習実験では被験者の自宅毎日演奏練習を行う。大きな鍵盤では運搬やセッティングにおいて被験者の負担が大きくなり、更に場所によっては演奏そのものが困難になる可能性があるためミニ鍵盤を使用した。

ピアノや鍵盤ハーモニカなどの鍵盤楽器は学校教育で演奏されているため、タブレットや joystick のように本実験で初めて演奏したことにはならない。しかし、他の従来楽器では音の発音や、そのコントロールができるようになるまでに多くの練習を要する可能性がある。音楽の授業で演奏するリコーダーでは低い音や多くの穴を押さえる必要がある音を発音できない可能性がある。ギターで発音する際は適切に弦を押さえて弾く必要がある。そのため、本実験では鍵盤の押下のみで発音できる鍵盤楽器を用いた。

5.4 グローブの使用について

第 4 章の演奏評価実験より、グローブは他の 5 種類の実験対象楽器と比べて発音正解率が高く、演奏の間違いが少ないと評価された。しかし、本章で製作した新規な電子楽器と同じ第 6 章の演奏練習実験には使用しないこととした。その理由として、演奏インターフェースの脆弱さがある。グローブは視覚と手の平の触覚によって音高操作をしやすくすることを目指し、布手袋の手の平に施した導電糸による刺繍に触ることで発音する演奏インターフェースとなっている。この導電糸は演奏者の汗や汚れ、摩耗により抵抗値が変化して、誤動作を起こしてしまうことが確認された。本章の電子楽器の仕様検討をしている段階で、演奏練習を 3 週間継続する演奏練習実験を計画していた。実験途中では演奏インターフェースの整備をすることが難しく、また実験実施前にグローブの演奏インターフェースにおける上記の問題点を改善することができない状況であったため、第 6 章の演奏練習実験では使用しないこととした。

今後の課題として、グローブと類似した操作性の電子楽器を新たに製作することが挙げられる。例えば小型のリボンコントローラを手袋の手の平に配置して、触る場所によって音名が変化する電子楽器を製作することができる。更に、音名と手の平の触る場所の対応関係を手の平に触った際の触覚で認識できるものと、触覚の遮断により認識できないものなど、仕様が異なる演奏インターフェースで演奏を比較する。それにより、グローブが間違いを少なく演奏できたことに手の平の触覚が影響しているか分析することが望まれる。

5.5 レイテンシー測定

4.2.2 項で述べたように、電子楽器はセンサやコントローラの信号を元に発音するため、発音操作をしてから演奏音が再生されるまでにレイテンシーが生じる。更に、本章で示した 3 種類の電子楽器はそれぞれ音を生成するモジュールや環境が異なる。そこで、各電子楽器のレイテンシー測定を行った。

発音操作により発生する操作音と、その演奏音を左右のチャンネルに分けてオーディオインターフェース（サンプリング周波数 96 kHz）により録音した。発音操作音として、鍵盤楽器では指先と爪が鍵盤に接触するように打鍵して、その際の衝突音を録音した。タブレットでは指先と爪がタッチパネルに接触するようにタッチパネルに触り、その際の衝突音を録音した。joystick ではスティックを傾けて、スティックがそれが出ている穴の淵に衝突した際の衝突音を録音した。このとき、録音波形の絶対値が最大になったタイミングを発音操作時刻とした。

各電子楽器の演奏音はライン出力を録音した。演奏音のエンベロープはいずれも矩形であるため、演奏音が立ち上がって 1 周期の振幅の絶対値が最大になったタイミングを発音時刻とした。

以上の手順で発音操作時刻と発音時刻を導出して、その時間差をレイテンシーとした。例

としてタブレットの演奏音と発音操作音の波形を図 33 に示す。各電子楽器の 10 回測定での平均値と最大値、最小値を表 15 に示す。

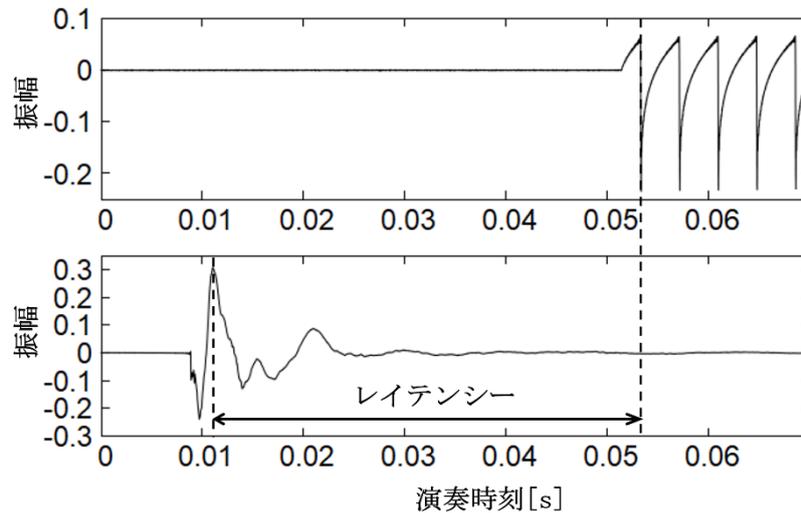


図 33 レイテンシー測定の実例、タブレット対象、上段：演奏音、下段：発音操作音。

表 15 レイテンシー測定結果、10 回測定。

	平均値[ms]	最大値[ms]	最小値[ms]
タブレット	48.1	58.4	39.2
joystick	25.5	27.3	24.8
鍵盤楽器	20.2	22.1	19.6

5.6 まとめ

第 4 章での考察を元に、演奏しやすいことを目指した新規な電子楽器であるタブレットと joystick を製作した。タブレットはタッチパネルに触ることにより発音して、触る位置によって音名を操作する。指のスライド動作でも演奏が可能である。joystick はスティックの傾けとその方向によって発音と音高の操作を行い、指 1 本で演奏ができる。圧力センサの押下により 1 オクターブ上の音名に切り替え可能である。また、比較対象としてミニ鍵盤で演奏する鍵盤楽器についても説明した。第 6 章ではこれら 3 種類の電子楽器を対象として、演奏練習を 3 週間継続して行う演奏練習実験を行う。

第6章 新規な電子楽器と従来楽器を対象にした演奏練習実験

第5章で製作したタブレット、joystick と、それらと比較するための鍵盤楽器を対象とした演奏練習実験 [55]を実施した。本章では演奏練習を3週間継続して行い、その前後の演奏精度の比較や、実験対象楽器同士の演奏精度及び上達の速さの比較を行う。本論文では発音正解率と IOI の誤差を用いて、楽譜に対して演奏の間違いが少ないことを、演奏精度が高いとして論じる。また、第4章での6種類の新規な電子楽器との比較も行う。第5章で製作した新規な電子楽器は第4章での6種類の新規な電子楽器の評価結果を元に設計、製作しているため、より高い演奏性と演奏精度が期待できる。

6.1 被験者

本実験では楽器演奏未経験者と経験者、それぞれに異なる内容の実験での被験者を依頼した。いずれの被験者にも謝礼を支払い、実験に協力してもらった。

6.1.1 楽器演奏経験がない被験者

楽器演奏初心者でも少ない間違いで演奏できるか分析するため、音楽の授業以外では楽器の演奏経験がない人間を被験者とした。東京情報大学の学生9人に依頼して、そのうち5人はタブレットと鍵盤楽器を、4人は joystick と鍵盤楽器を演奏した。なお、一部の被験者は iPad などのタブレットの使用経験があったが、スマートフォンを使用する機会の方が多く、本実験で使用したサイズのタブレットを使用する頻度は低かった。また、一部の被験者はテレビゲームやアーケードゲームのコントローラの使用経験があったが、本実験の joystick と全く同じ任天堂の「ヌンチャク [53]」を使用した経験はなかった。楽器演奏経験がない被験者は楽譜を読めない可能性があるため、実験での演奏内容はピアノロールとオルガンの音で提示した。

6.1.2 鍵盤楽器の演奏経験がある被験者

演奏経験者として6.1.1項の被験者との比較対象とするため、鍵盤楽器の演奏経験（ピアノをのべ12年経験）がある学生1人にも被験者を依頼した。ただし、この学生は鍵盤楽器のみを演奏することとした。演奏内容は楽譜とオルガンの音で提示した。

6.2 演奏内容

6.2.1 3週間練習する課題曲

従来楽器の演奏上達を支援するシステムの従来研究において、1日30分で5日間にわたり鍵盤楽器を演奏して、上達の具合を分析、比較することが行われている [35]。本実験では新規な電子楽器と鍵盤楽器の上達の速さを比較する目的で、各実験対象楽器を3週間演

奏練習してもらった。ただし、本研究で対象とした新規な電子楽器は初めて触った段階でも容易に演奏できることを目指しており、それが実現した場合は1日30分の演奏練習では上達が速くなりすぎて、練習日数に伴う上達過程を適切に観測できない可能性があった。そこで、実験で演奏する課題曲は1曲当たりの演奏練習時間を短くして、自由演奏と2種類の課題曲演奏をそれぞれ1日3分間ずつ行った。

1つ目の課題曲 A には単純な旋律で、かつ被験者が知っている可能性のある既存の曲として図 34 の「春が来た（高野辰之作詞、岡野貞一作曲）」を演奏してもらった。被験者が小学生だった当時の学習指導要領 [56]にて、この楽曲が指定されていたことから、本実験に使用することとした。2人の被験者を除いて音楽の授業でこの楽曲の聴取経験があることが確認された。なお、テンポは BPM120 程で歌われる場合もあるが、本実験の被験者は速いテンポでの演奏が困難である可能性があったため、テンポを BPM100 として演奏した。



図 34 課題曲 A。

2つ目の課題曲 B には被験者に演奏や歌唱の経験がない曲として、課題曲 A と同程度の難易度の曲を作成した。曲のテンポ、曲の長さ、発音回数、音域、最小と最大の音価、各音価の出現頻度などの条件を課題曲 A と揃えた楽曲とした。なお、2つの実験対象楽器で同じ課題曲 B を演奏すると、後から演奏した実験対象楽器ではより少ない間違いで演奏できる可能性がある。そこで、それぞれ初めて演奏する曲を演奏させるために2種類の曲を作って、1つ目の実験対象楽器では図 35 の課題曲 B を、2つ目の実験対象楽器では図 36 の課題曲 B'を演奏することとした。



図 35 課題曲 B。



図 36 課題曲 B'。

課題曲 A は和声進行として全体の 8 小節のメロディを構成する音楽的印象を与えるが、課題曲 B、B'は 4 小節目が C 音となっているため、課題曲 A に比べて不自然で、8 小節のメロディの印象を与えない可能性がある。この点については 6.7.1 項にて考察する。

6.2.2 初日と最終日のみ演奏する課題曲

各実験対象楽器の実験初日と最終日(3 週間経過時)にそれぞれ演奏内容を初めて提示して演奏する課題曲である。演奏経験がある楽曲を演奏すると、その楽曲は演奏経験によってより少ない間違いで演奏できる可能性がある。ここでは演奏インターフェースの違いを比較するため、実験で演奏する 2 種類の実験対象楽器での初日と最終日でそれぞれ初めて演奏する新規な課題曲を 4 種類作成した。1 つ目の実験対象楽器の初日は図 37 の課題曲 C、最終日は図 38 の課題曲 D、2 つ目の実験対象楽器の初日は図 39 の課題曲 C'、最終日は図 40 の課題曲 D'とした。なお、初日の演奏は第 4 章の演奏評価実験の結果と比較するため、課題曲 C (及び C') は第 4 章の演奏評価実験で演奏した 2 種類の課題曲をそのまま使用した。課題曲 D (及び D') は課題曲 C(C')と同程度の難易度になるように、曲のテンポ、曲の長さ、発音回数、最小と最大の音価、各音価の出現頻度を課題曲 C(C')と同じになるように作成して演奏した。



図 37 課題曲 C。



図 38 課題曲 D。



図 39 課題曲 C'。

各日の全ての演奏を行った後に演奏性の主観的評価を行った。評価項目は第4章での演奏評価実験で使用した評価項目(4.2.5項を参照)に以下の3項目を追加した15項目として、0～10の11段階で回答した。

- 10分間演奏して疲労を感じなかったか？
- 自分が意図しない、余分な発音はあまりなかったと思いますか？
- 自分が意図しない、発音の不足はあまりなかったと思いますか？

3週間の各日の演奏練習実験の内容、手順を以下に示す。

- 1日目

東京情報大学の研究室にて実験対象楽器の演奏方法及び実験内容を説明して、演奏実験を実施した。

1. 課題曲C(2つ目の楽器ではC')を10分間演奏練習した。なお、メトロノームの使用は任意とした。
2. メトロノームの音に合わせるように課題曲C(もしくはC')を2回演奏した。
3. 課題曲C(もしくはC')のメロディをメトロノームの音に合わせるように歌唱した。
4. 演奏した実験対象楽器の演奏性や自身の上達具合について主観評価した。

- 2日目～7日目

被験者自宅にて毎日演奏練習実験を実施した。

1. メトロノームの使用は任意として、演奏内容を指定せずに3分間演奏した。
2. メトロノームの使用は任意として、課題曲Aを3分間演奏練習した。
3. メトロノームの音に合わせるように課題曲Aを2回演奏した。
4. メトロノームの使用は任意として、課題曲B(もしくはB')を3分間演奏練習した。
5. メトロノームの音に合わせるように課題曲B(もしくはB')を2回演奏した。

課題曲Aと課題曲B(B')の演奏において、後から演奏した方が実験対象楽器に慣れて、少ない間違いで演奏できる可能性がある。そのため、上記の手順2.～3.と手順4.～5.は偏りがないように被験者ごとに順番を入れ替えて、課題曲の演奏の順番のバランスを取った。

自宅での実験は被験者の都合によっては実施できない日もあった。その場合は翌日の朝と夕方のように時間の間隔を空けて、1日で2日分の実験を実施してもらった。

- 8日目

東京情報大学の研究室にて演奏練習実験を実施した。実験内容は自宅での実験内容と同様であるが、演奏中の動作を測定するため、手にモーションキャプチャを装着した状態で演奏練習した。また、各課題曲の演奏後にはメトロノームの音に合わせるように歌唱してもらった。更に、演奏練習後は実験対象楽器の演奏性や自身の上達具合について主観評価してもらった。

- 9日目～14日目

2日目~7日目と同様の演奏練習実験を実施した。

- 15日目

8日目と同様の演奏練習実験を実施した。

- 16日目~21日目

2日目~7日目と同様の演奏練習実験を実施した。

- 22日目（最終日）

東京情報大学の研究室にて演奏練習実験を実施した。内容は8日目の実験内容における課題曲Aと課題曲B(B')の演奏、歌唱を両方行った後に以下の手順を追加した。

1. 課題曲D(2つ目の楽器ではD')を10分間演奏練習した。なお、メトロノームの使用は任意とした。
2. メトロノームの音に合わせるように課題曲D(もしくはD')を2回演奏した。
3. 課題曲D(もしくはD')のメロディをメトロノームの音に合わせるように歌唱した。

6.3.2 鍵盤楽器演奏経験がある被験者の実験内容

鍵盤楽器の経験者は鍵盤楽器の演奏が十分熟達していると仮定して、3週間の演奏練習は行わずに、鍵盤楽器のみで演奏練習実験を1回のみ行った。まずメトロノームの使用は任意として、被験者が納得するまで(30秒~2分30秒程度)課題曲を演奏練習してもらった。その際に、演奏内容の確認と試聴は自由とした。その後、メトロノームに合わせるように課題曲を2回演奏してもらった。以上の実験を6.2.1項と6.2.2項で示した7つの課題曲全てに対して行った。

6.4 演奏音分析

第4章での演奏評価実験で用いた発音正解率とIOIの誤差の絶対値を分析した。発音正解率の導出方法は4.4.2項、IOIの誤差の絶対値の導出方法は4.4.3項と同様である。分析に用いるのは、各日に各課題曲を練習した後の2回の演奏における演奏音とメトロノーム音の録音とした。

6.5 演奏音の分析結果

発音正解率とIOIの誤差の絶対値について、新規な電子楽器と鍵盤楽器との比較や演奏練習に伴う変化を分析した。ただし、演奏に慣れていても間違えてしまうことはある。各日に各課題曲を2回ずつ演奏しているが、2回のうち片方の演奏でのみ間違ってしまう、発音正解率が低くなることがあった。これは鍵盤楽器の演奏経験がある被験者でも生じた。そこで、そのような間違った演奏を除外するため、2回の演奏の中でも発音正解率が高い方の演奏の分析結果を使って論じることとした。なお、3週間の演奏練習において1週目(2日目から8日目)は余分な発音が多く、発音正解率が負の値になる演奏が多く見られた。負の値にまで低くなった発音正解率を演奏の評価に用いることには無理があり、またIOIの誤差

の絶対値の値も信頼できない。そのため、2週目（9日目から15日目）と3週目（16日目から22日目）を分析対象とした。

6.5.1 課題曲による演奏精度の違い

既存の曲である課題曲 A の聴取経験がある 7 人の被験者について、課題曲 A と課題曲 B(B')の演奏精度の比較を行った。

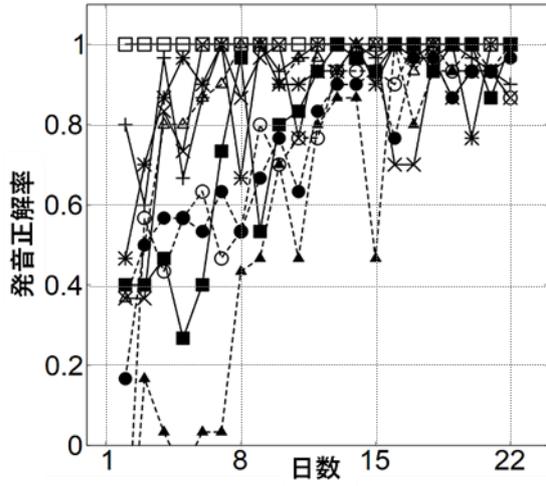
まず発音正解率について、各被験者の鍵盤楽器の演奏を 2 週目と 3 週目に分けて、各週で 7 日分の平均を取った。その上で、課題曲 A と課題曲 B(B')の発音正解率に有意差があるかを 2 週目と 3 週目のそれぞれで Wilcoxon の符号付き順位検定で比較した。その結果、いずれの週においても課題曲 A の発音正解率が有意に高かった（2 週目： $p<0.05$ 、3 週目： $p<0.05$ ）。

次に IOI の誤差の絶対値について、各被験者の鍵盤楽器の演奏を 2 週目と 3 週目に分けて、各週で 7 日分の平均を取った。その上で、課題曲 A と課題曲 B(B')の IOI の誤差の絶対値に有意差があるかを 2 週目と 3 週目のそれぞれで Wilcoxon の符号付き順位検定で比較した。その結果、いずれの週においても課題曲 A の IOI の誤差の絶対値が有意に小さかった（2 週目： $p<0.05$ 、3 週目： $p<0.05$ ）。

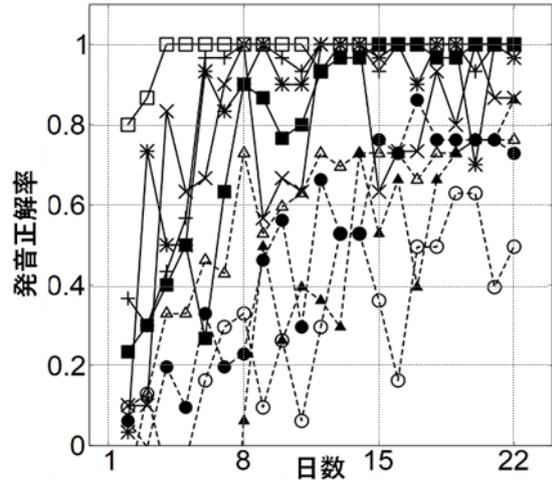
タブレットと joystick の演奏音について同様の分析を行った場合も、鍵盤楽器と同様に課題曲 A の方が課題曲 B(B')よりも高い演奏精度で演奏できた。

6.5.2 演奏練習に伴う演奏精度の変化

まず発音正解率を分析する。各実験対象楽器の発音正解率の変化を図 41 から図 43 に示す。ただし、これらの図では発音正解率がどの程度の練習時間で 1 に近づくかを確認するため、余分な発音が多く、発音正解率が負の値になっている演奏は示さないこととした。なお、鍵盤楽器の演奏経験がある被験者はいずれの課題曲においても発音正解率が 1 となった。各被験者の各実験対象楽器の課題曲 A と課題曲 B(B')の演奏において、2 週目と 3 週目のそれぞれで 7 日分の平均を取った。その上で、各実験対象楽器において発音正解率が 2 週目と 3 週目の間で有意差があるかを Wilcoxon の符号付き順位検定で比較した結果を表 16 に示す。更に、タブレットと joystick の発音正解率が鍵盤楽器と有意差があるかを 2 週目と 3 週目のそれぞれで Wilcoxon の符号付き順位検定で比較した。

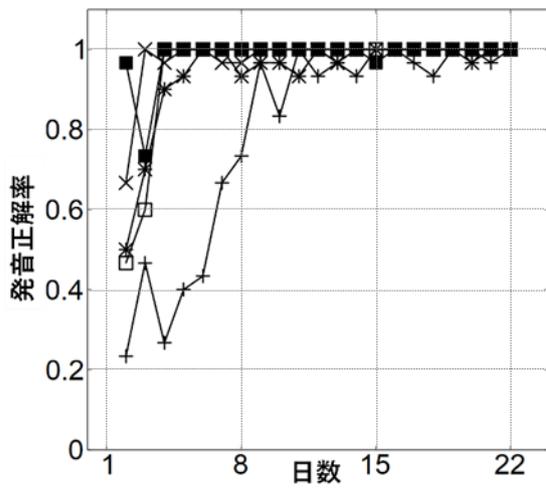


(a) 課題曲 A

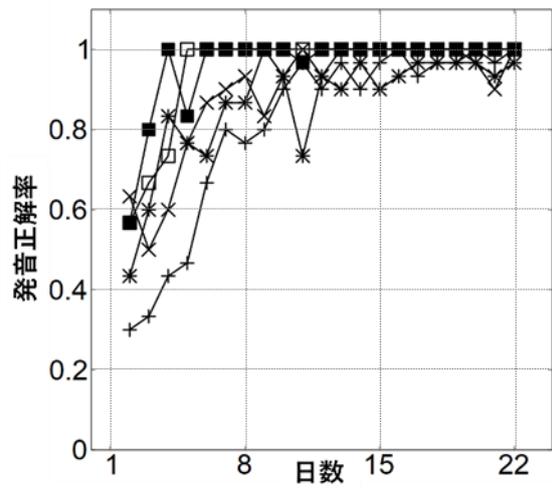


(b) 課題曲 B(B')

図 41 鍵盤楽器の発音正解率の変化、マーカは被験者を示す、実線はタブレットを演奏した被験者を示し、破線は joystick を演奏した被験者を示す。

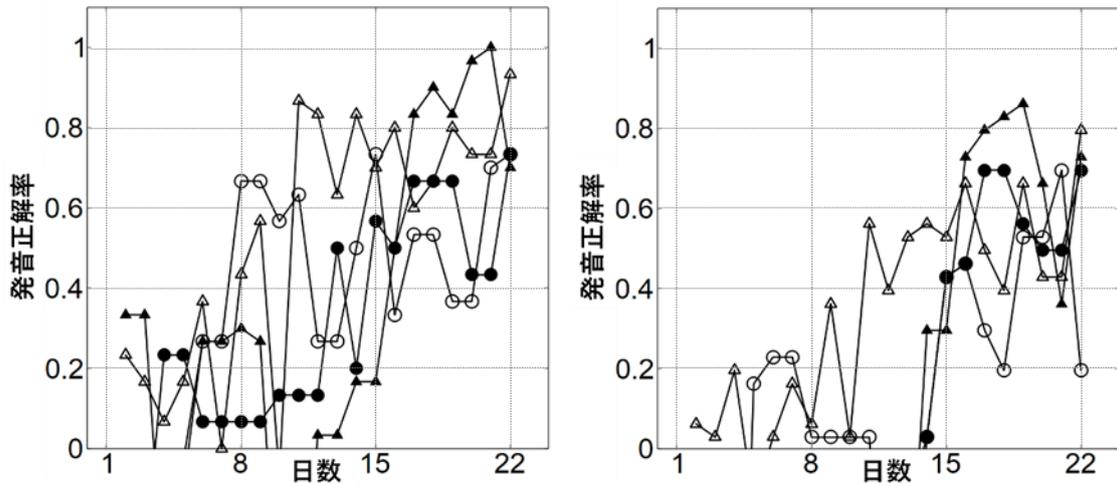


(a) 課題曲 A



(b) 課題曲 B(B')

図 42 タブレットの発音正解率の変化、マーカは被験者を示す。



(a)課題曲 A

(b)課題曲 B(B')

図 43 joystick の発音正解率の変化、マーカは被験者を示す。

表 16 2 週目と 3 週目の間の発音正解率の有意差の有無、課題曲 A と課題曲 B(B')を合わせて分析、 p は危険率。

鍵盤楽器とタブレットを演奏した被験者群		鍵盤楽器と joystick を演奏した被験者群	
鍵盤楽器	タブレット	鍵盤楽器	joystick
2 週 ≒ 3 週	2 週 ≒ 3 週	2 週 < 3 週	2 週 < 3 週
($p=0.386$)	($p=0.235$)	($p=0.0173$)	($p=0.0172$)

鍵盤楽器とタブレットを演奏した被験者群について、図 41 と図 42 より 2 週目で発音正解率が 1 に近づき、それ以後は外れ値もあるがある程度一定になっていることがわかる。また、表 16 より 2~3 週間の演奏練習期間である程度上達できることがわかった。更に、タブレットと鍵盤楽器の発音正解率は 2 週目と 3 週目のいずれにおいても有意差はなかった。以上より、タブレットは鍵盤楽器と同程度の間違いの少なさで演奏できて、同程度の速さで上達できることがわかった。

鍵盤楽器と joystick を演奏した被験者群について、joystick は図 43 と表 16 より 3 週目の時点ではまだ発音正解率は一定になっておらず、上達しきっていないことがわかった。また、2 週目と 3 週目のいずれの週においても、発音正解率は鍵盤楽器よりも有意に低かった (2 週目： $p<0.05$ 、3 週目： $p<0.05$)。以上より、joystick は上達が難しく、また鍵盤楽器よりも間違いを少なく演奏することも難しいことがわかった。

次に、IOI の誤差の絶対値を分析した。ここでは鍵盤楽器の演奏経験がある被験者の IOI の正確さとも比較する目的で、楽器演奏未経験の被験者と演奏経験がある被験者 1 人との IOI の誤差の絶対値の比較も行った。各実験対象楽器の IOI の誤差の絶対値の 3 週間の変化

を図 44 から図 46 に示す。図中の点線の横線は鍵盤楽器の経験がある被験者 1 人が各課題曲を演奏した際の IOI の誤差の絶対値を示す。なお、鍵盤楽器の経験がある被験者 1 人の IOI の誤差の絶対値は課題曲 B では 0.0430 s、課題曲 B' では 0.0463 s となった。これらの値を示す線は、課題曲 B(B')の結果を示す各図の(b)では重なって描画されてしまうため、これらの平均値である 0.0446 s を図中で示す。各被験者の各実験対象楽器の課題曲 A と課題曲 B(B')の演奏において、2 週目と 3 週目のそれぞれで 7 日分の平均を取った。その上で、各実験対象楽器において IOI の誤差の絶対値が 2 週目と 3 週目の間で有意差があるかを Wilcoxon の符号付き順位検定で比較した結果を表 17 に示す。また、タブレットと joystick の IOI の誤差の絶対値が鍵盤楽器と有意差があるかを、2 週目と 3 週目のそれぞれで Wilcoxon の符号付き順位検定で比較した。更に、各実験対象楽器において IOI の誤差の絶対値が、鍵盤楽器の演奏経験がある被験者と有意差があるかを、2 週目と 3 週目のそれぞれで平均値の差の検定で比較した結果を表 18 に示す。

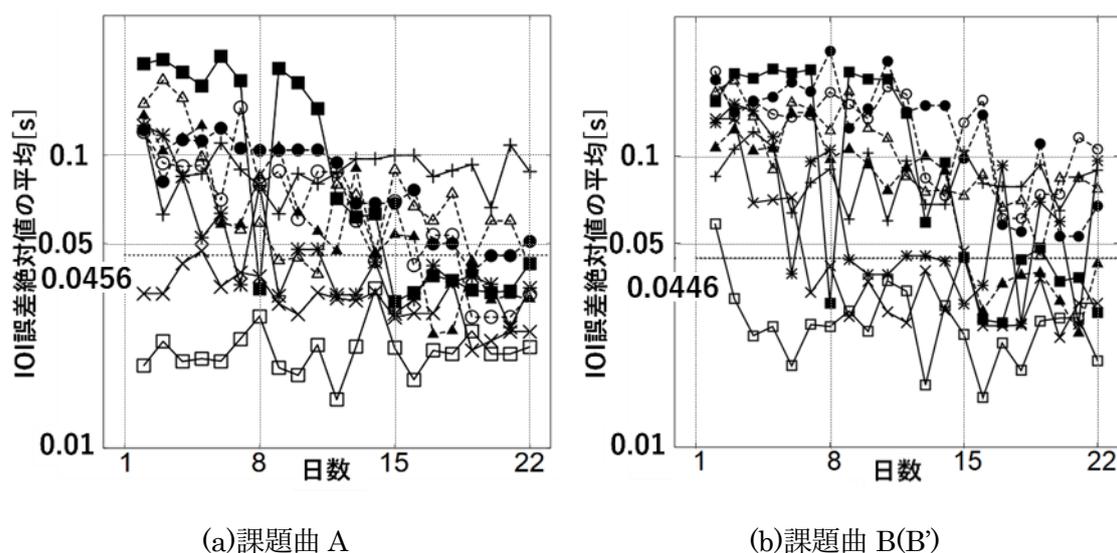
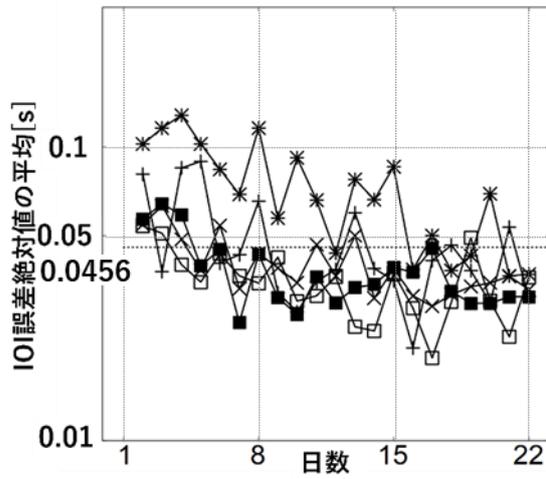
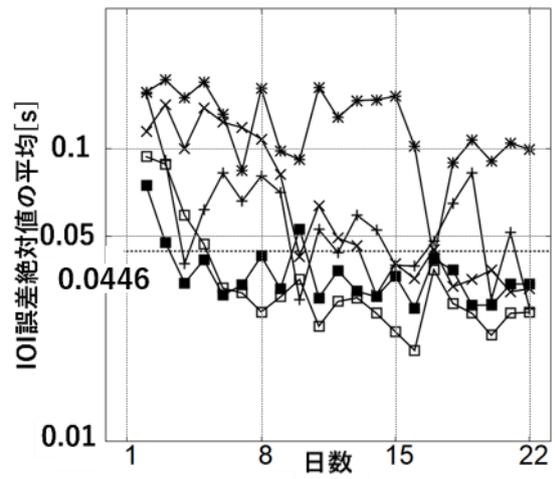


図 44 鍵盤楽器の IOI の誤差の絶対値の変化、マークは被験者を示す、実線はタブレットを演奏した被験者を示し、破線は joystick を演奏した被験者を示す、点線の横線は鍵盤楽器の経験がある被験者を示す。

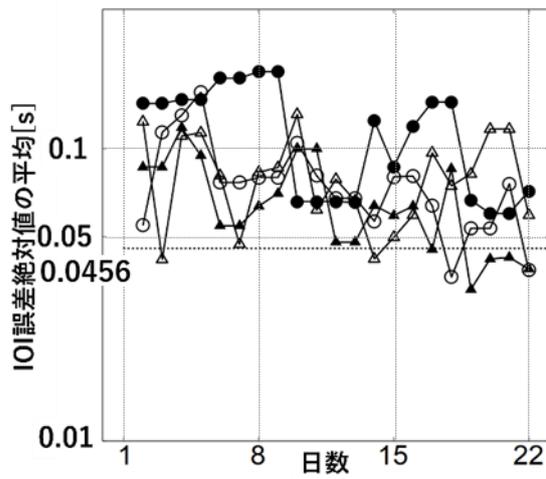


(a)課題曲 A

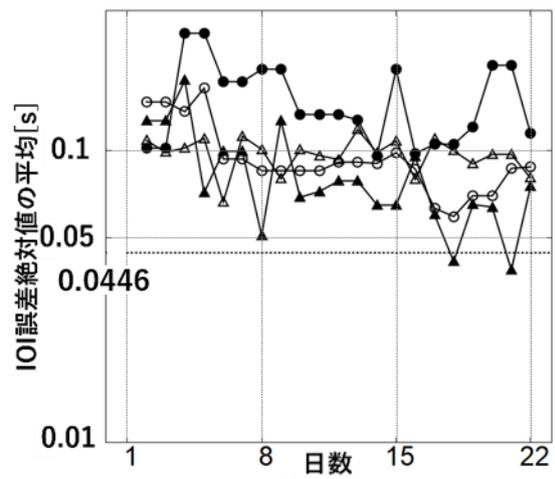


(b)課題曲 B(B')

図 45 タブレットの IOI の誤差の絶対値の変化、マーカは被験者を示す、点線の横線は鍵盤楽器の経験がある被験者を示す。



(a)課題曲 A



(b)課題曲 B(B')

図 46 joystick の IOI の誤差の絶対値の変化、マーカは被験者を示す、点線の横線は鍵盤楽器の経験がある被験者を示す。

表 17 2 週目と 3 週目の間の IOI の誤差の絶対値の有意差の有無、課題曲 A と課題曲 B(B')を合わせて分析、 p は危険率。

鍵盤楽器とタブレットを演奏した被験者群		鍵盤楽器と joystick を演奏した被験者群	
鍵盤楽器	タブレット	鍵盤楽器	joystick
2 週目 \doteq 3 週目 ($p=0.139$)	2 週目 \doteq 3 週目 ($p=0.0679$)	2 週目 $>$ 3 週目 ($p=0.0117$)	2 週目 \doteq 3 週目 ($p=0.0687$)

表 18 楽器演奏未経験者と経験者の間での IOI の誤差の絶対値の有意差の有無、課題曲 A と課題曲 B(B')を合わせて分析、 p は危険率、各条件で計 8 回分析したため危険率に 8 をかけた。

	鍵盤楽器とタブレットを演奏した被験者群		鍵盤楽器と joystick を演奏した被験者群	
	鍵盤楽器	タブレット	鍵盤楽器	joystick
2 週目	未経験 \doteq 経験 ($p=1.00$)	未経験 \doteq 経験 ($p=1.00$)	未経験 $>$ 経験 ($p=0.024$)	未経験 $>$ 経験 ($p=0.008$)
3 週目	未経験 \doteq 経験 ($p=1.00$)	未経験 \doteq 経験 ($p=1.00$)	未経験 \doteq 経験 ($p=1.00$)	未経験 $>$ 経験 ($p=0.04$)

まず鍵盤楽器について、図 44 と表 17 より、被験者群によって 2 週目と 3 週目の IOI の誤差の絶対値の有意差の有無は異なるが、演奏練習に伴い IOI の誤差の絶対値が小さくなっている。また、初日の時点から鍵盤楽器の経験がある被験者よりも数値が小さい被験者もあり、表 18 より被験者群によって 2 週目あるいは 3 週目の時点で経験者と有意差がないことが示された。以上より、鍵盤楽器は 1~2 週間の演奏練習期間で鍵盤楽器の経験がある被験者と同程度の IOI の正確さで演奏できることがわかった。

次にタブレットについて、図 45 と表 17 より 2 週目と 3 週目では IOI の誤差の絶対値は同程度であった。また、2 週目と 3 週目のいずれにおいても鍵盤楽器と有意差はなく、同程度の IOI の正確さで演奏できた。表 18 より 2 週目の時点で鍵盤楽器の経験がある被験者と同程度になっている。以上より、タブレットは 1 週間の演奏練習期間で鍵盤楽器の経験がある被験者と同程度の IOI の正確さで演奏できることがわかった。

次に joystick について、図 46 と表 17 より 2 週目から 3 週目では IOI の誤差の絶対値に有意差がなかった。また、3 週目において鍵盤楽器よりも有意に大きく ($p<0.05$)、鍵盤楽器よりも IOI を正確に演奏できなかった。表 18 より 3 週目の時点でも鍵盤楽器の経験がある被験者の方が IOI の誤差の絶対値が有意に小さい。これより、joystick は 3 週間の演奏練習期間では鍵盤楽器の経験がある被験者よりも IOI を正確に演奏することは難しいことがわかった。

6.5.3 共通の被験者による 3 種類の実験対象楽器の比較

6.5.2 項ではタブレットと joystick の両方を演奏した被験者はおらず、それらを直接比較することはできなかった。そこで、joystick と鍵盤楽器を演奏した被験者 1 人を対象に、実験後にタブレットの演奏練習実験を実施した。実験の内容は 6.3.1 項で示した 3 週間の演奏練習実験と同様である。ただし、3 週間演奏練習する課題曲 B(B')と初日に演奏する課題曲 C(C')、最終日に演奏する課題曲 D(D')について、その被験者が joystick や鍵盤楽器で演奏した課題曲と同じ課題曲を再度タブレットで演奏すると、実験での演奏経験が演奏精度に影響する可能性がある。そこで、演奏経験がない課題曲として、課題曲 B(B')と演奏難易度が同じになるように曲のテンポ、曲の長さ、発音回数、最小と最大の音価、各音価の出現頻度といった条件を揃えて作成した図 47 の課題曲 B''を 3 週間練習した。初日は課題曲 C(C')と演奏難易度が同じになるように各条件を揃えて作成した図 48 の課題曲 C''を、最終日は課題曲 D(D')と演奏難易度が同じになるように各条件を揃えて作成した図 49 の課題曲 D''を演奏することとした。いずれの課題曲も演奏テンポは BPM100 とした。



図 47 課題曲 B''。



図 48 課題曲 C''。



図 49 課題曲 D''。

まず発音正解率を分析する。各実験対象楽器の発音正解率の変化を図 50 に示す。本項においても発音正解率がどの程度の時間で 1 に近づくかを確認するため、余分な発音が多く、発音正解率が負の値になっている演奏は示さないこととした。タブレットと joystick、鍵盤楽器のそれぞれの発音正解率の間に有意差があるかを、2 週目と 3 週目のそれぞれで Wilcoxon の符号付き順位検定で比較した結果を表 19 に示す。

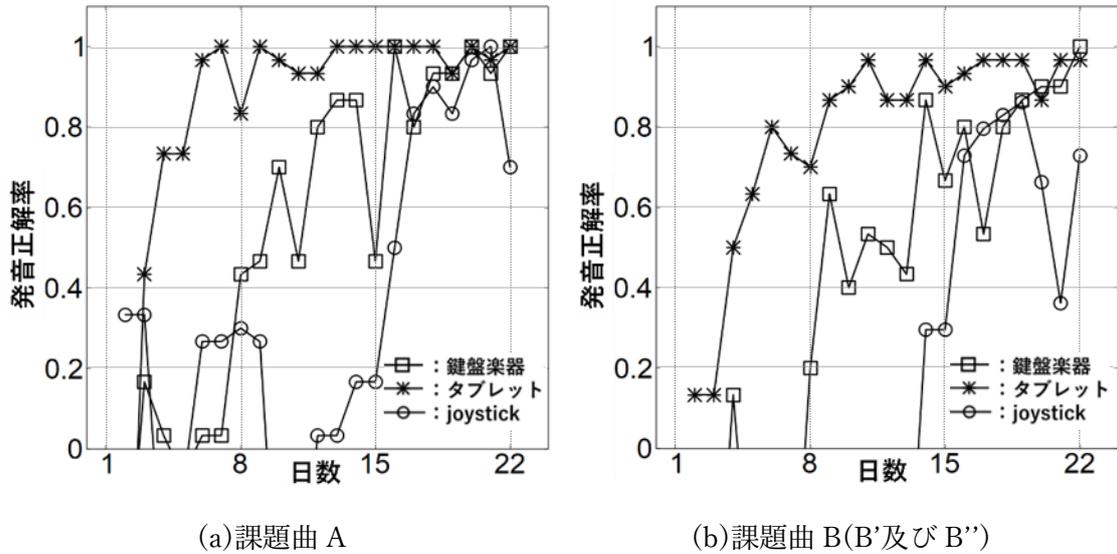


図 50 発音正解率の変化、マーカは実験対象楽器の種類を示す。

表 19 2週目と3週目における実験対象楽器間の発音正解率の有意差の有無、課題曲 A と課題曲 B(B'及びB'')を合わせて分析、 p は危険率、各条件のデータで計 2 回分析したため危険率に 2 をかけた。

	鍵盤楽器とタブレット	鍵盤楽器と joystick	タブレットと joystick
2 週目	鍵盤楽器 < タブレット ($p=0.002$)	鍵盤楽器 > joystick ($p=0.002$)	タブレット > joystick ($p=0.002$)
3 週目	鍵盤楽器 < タブレット ($p=0.0378$)	鍵盤楽器 \approx joystick ($p=0.0958$)	タブレット > joystick ($p=0.0028$)

図 50 と 表 19 より、まず 2 週目において、いずれの実験対象楽器間においても発音正解率に有意差があり、タブレットが最も発音正解率が高く、joystick が最も発音正解率が低いことがわかった。3 週目ではタブレットは joystick、鍵盤楽器よりも発音正解率が有意に高いことがわかった。

次に、IOI の誤差の絶対値を分析した。各実験対象楽器の IOI の誤差の絶対値の 3 週間の変化と、鍵盤楽器の演奏経験がある被験者 1 人の IOI の誤差の絶対値を図 51 に示す。なお、本項におけるタブレットの追加の演奏練習実験の計画及び実施は、鍵盤楽器の経験がある被験者の実験後に行った。そのため、経験者が課題曲 B'' を演奏した際のデータがない。そこで、課題曲 B での 0.0430 s と課題曲 B' での 0.0463 s の平均値である 0.0446 s を、課題曲 B'' での IOI の誤差の絶対値とすることとした。また、経験者の課題曲 B、B' 及び B'' での IOI の誤差の絶対値は、図 51 の(b)では重なって描画されてしまうため、課題曲 B と B' での平均値である 0.0446 s を図中で示すこととする。タブレットと joystick、鍵盤楽器のそれぞれの IOI の誤差の絶対値の間に有意差があるかを、2 週目と 3 週目のそれぞれで Wilcoxon

の符号付き順位検定で比較した結果を表 20 に示す。更に、各実験対象楽器において IOI の誤差の絶対値が鍵盤楽器の演奏経験がある被験者と有意差があるかを、2 週目と 3 週目のそれぞれで平均値の差の検定で比較した結果を表 21 に示す。

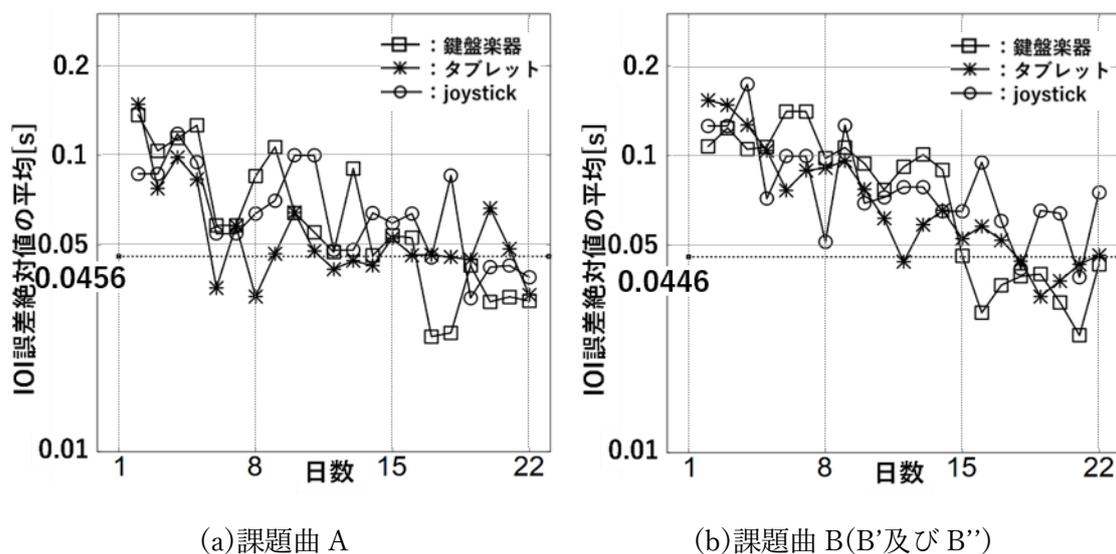


図 51 IOI の誤差の絶対値の変化、マーカは実験対象楽器の種類を示す、破線の横線は鍵盤楽器の経験がある被験者を示す。

表 20 2 週目と 3 週目における実験対象楽器間の IOI の誤差の絶対値の有意差の有無、課題曲 A と課題曲 B(B', B'')を合わせて分析、 p は危険率、各条件のデータで計 2 回分析したため危険率に 2 をかけた。

	鍵盤楽器とタブレット	鍵盤楽器と joystick	タブレットと joystick
2 週目	鍵盤楽器 > タブレット ($p=0.007$)	鍵盤楽器 \approx joystick ($p=1.00$)	タブレット < joystick ($p=0.007$)
3 週目	鍵盤楽器 < タブレット ($p=0.0264$)	鍵盤楽器 < joystick ($p=0.0046$)	タブレット \approx joystick ($p=0.219$)

表 21 楽器演奏未経験者 1 人と経験者 1 人の中での IOI の誤差の絶対値の有意差の有無、課題曲 A と課題曲 B(B'及び B'')を合わせて分析、 p は危険率、各条件で計 6 回分析したため危険率に 6 をかけた。

	鍵盤楽器	タブレット	joystick
2 週目	未経験 > 経験 ($p<0.006$)	未経験 \approx 経験 ($p=0.06$)	未経験 > 経験 ($p<0.006$)
3 週目	未経験 < 経験 ($p<0.006$)	未経験 \approx 経験 ($p=1.00$)	未経験 \approx 経験 ($p=0.84$)

2 週目ではタブレットは joystick、鍵盤楽器よりも IOI の誤差の絶対値が有意に小さかった。3 週目では鍵盤楽器はタブレット、joystick よりも IOI の誤差の絶対値が有意に小さくなった。また、タブレットと joystick の間に有意差は見られなくなった。これは各実験対象楽器の IOI の精度の向上の速さが影響していると考えられる。各実験対象楽器の演奏を課題曲 A と課題曲 B(B'及び B'')に分けて、それぞれの条件での IOI の誤差の絶対値が 2 週目と 3 週目の間で有意差があるかを Wilcoxon の符号付き順位検定で比較した。その結果、課題曲 B(B'及び B'')ではいずれの実験対象楽器でも 3 週目の方が有意に小さかった (いずれも $p<0.05$)。一方で、課題曲 A では鍵盤楽器と joystick は 3 週目の方が有意に小さかったが (いずれも $p<0.05$)、タブレットでは有意差がなかった($p=1.00$)。これより、対象となった被験者はタブレットの演奏のみが 2 週目の時点である程度上達しきっていて、2 週目と 3 週目の間で有意差がなかった可能性がある。そのため、鍵盤楽器は 3 週目の時点で 2 週目よりも上達して、他の 2 種類の実験対象楽器よりも IOI の誤差の絶対値が小さくなったと考えられる。また、joystick も 3 週目の時点で 2 週目よりも上達して、タブレットの IOI の誤差の絶対値と差がなくなったと考えられる。

鍵盤楽器経験者との比較について、2 週目ではタブレットのみが、鍵盤楽器経験者の IOI の誤差の絶対値と有意差がなかった。3 週目では鍵盤楽器のみが、鍵盤楽器経験者の IOI の誤差の絶対値よりも有意に小さく、またタブレットと joystick では有意差がなかった。これより、対象となった被験者は実験対象楽器によって上達に要した練習期間は異なるが、1~2 週間の練習期間で鍵盤楽器経験者と同程度の IOI の正確さで演奏ができるようになったことがわかった。

以上の結果より、本項で対象になった被験者に限れば、joystick よりもタブレットの方が高い演奏精度で演奏できることがわかった。

6.5.4 練習初日と最終日に初めて演奏する曲

3 週間の演奏練習の前後の演奏精度を比較するため、演奏練習初日の課題曲 C(C')と最終日の課題曲 D(D')での発音正解率と IOI の誤差の絶対値を分析した。初日は課題曲 C(C')のみを 10 分練習した後の演奏である。最終日は 3 週間の演奏練習をした上で、課題曲 D(D')を 10 分練習した後の演奏である。初日と比べて最終日での演奏精度がより高くなっていれば、3 週間の演奏練習によってその実験対象楽器の演奏そのものに慣れた可能性がある。初日と最終日で演奏精度に差がなく、かつ演奏精度が高くなっていれば、その実験対象楽器は初めて触った段階でも高い演奏精度で演奏できる可能性がある。

第 4 章の演奏評価実験で演奏した 6 種類の実験対象楽器との比較も行った。タブレットと joystick はその実験で得られた知見を参考にして設計されているため、より高い演奏精度が期待できる。

第 4 章での 6 種類の実験対象楽器の発音正解率と、本章の実験対象楽器である鍵盤楽器、

タブレット、joystick の初日及び最終日の発音正解率を図 52 に示す。なお、図中では第 4 章の実験対象楽器は名称の代わりに記号で表記した。その組み合わせを以下に示す。

電子楽器 A：電子ハンドベル

電子楽器 B：オタマトーン

電子楽器 C：カオシレーター2S

電子楽器 D：ドライバー

電子楽器 E：スライダー

電子楽器 F：グローブ

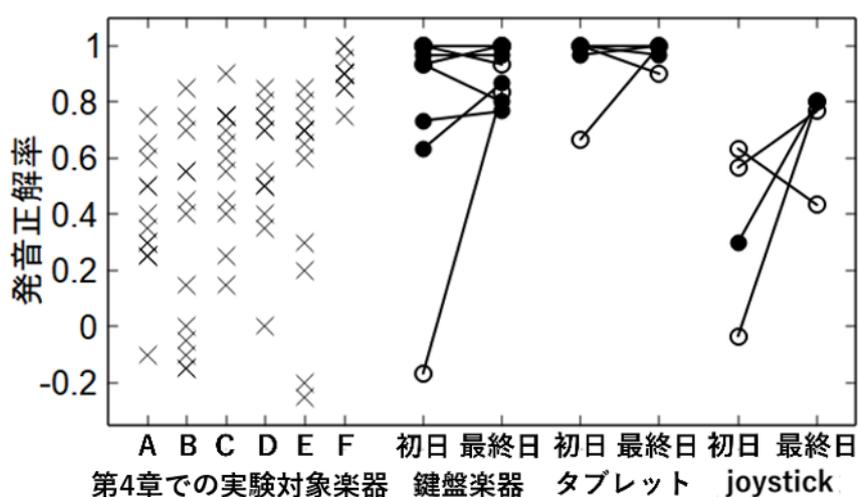


図 52 10 分間の演奏練習後の発音正解率、鍵盤楽器とタブレットと joystick において中空は先に、中実は後に演奏した実験対象楽器であることを示す。

まず 3 週間の演奏練習の前後について、鍵盤楽器とタブレットは初日と最終日のいずれにおいても発音正解率が 1 になる、あるいは 1 に近い被験者がおり、初めて触った段階でも少ない間違いで演奏できる可能性があった。joystick は初日では発音正解率が最大でも約 0.6 となっており、初めて触った段階では間違いが多かった。鍵盤楽器、タブレット、joystick のいずれにおいても、初日より最終日の発音正解率が高くなっている被験者がいた。これより、演奏練習によってその演奏に慣れて、より少ない間違いで演奏できるようになった被験者もいることがわかった。

次に第 4 章での 6 種類の実験対象楽器の発音正解率と、本章の実験対象楽器の初日の発音正解率に有意差があるかを、マン・ホイットニーの U 検定 (ボンフェローニの補正済み) で比較した。鍵盤楽器の初日の発音正解率は電子ハンドベルよりも有意に高く ($p < 0.05$)、他の 5 種類とは有意差がなかった。これより、鍵盤楽器は第 4 章の実験対象楽器と同程度かそれ以上の間違いの少なさで演奏できることがわかった。

タブレットの初日の発音正解率は電子ハンドベルとオタマトーンよりも有意に高く(い

れも $p<0.05$)、他の 4 種類とは有意差がなかった。これより、タブレットは第 4 章の実験対象楽器と同程度かそれ以上の間違いの少なさで演奏できることがわかった。

joystick の初日の発音正解率はグローブよりも有意に低く ($p<0.05$)、他の 5 種類とは有意差がなかった。これより、joystick は第 4 章の実験対象楽器よりも少ない間違いで演奏できるとは言えなかった。

次に、第 4 章での 6 種類の実験対象楽器の IOI の誤差の絶対値と、本章の実験対象楽器である鍵盤楽器、タブレット、joystick の初日と最終日の IOI の誤差の絶対値を図 53 に示す。図 52 と同様に、第 4 章での実験対象楽器は名称の代わりに記号で表記した。先に示した発音正解率の比較より、第 4 章の 6 種類の中ではグローブ以外の 5 種類はグローブよりも発音正解率が小さい傾向があり、更に joystick も第 4 章の実験対象楽器よりも演奏の間違いが少ないとは言えなかった。そのため、ここではそれらを除外してグローブと鍵盤楽器の初日と最終日、タブレットの初日と最終日の IOI の誤差の絶対値に有意差があるかを、被験者を繰り返し要因にした 1 元配置の分散分析で比較した。

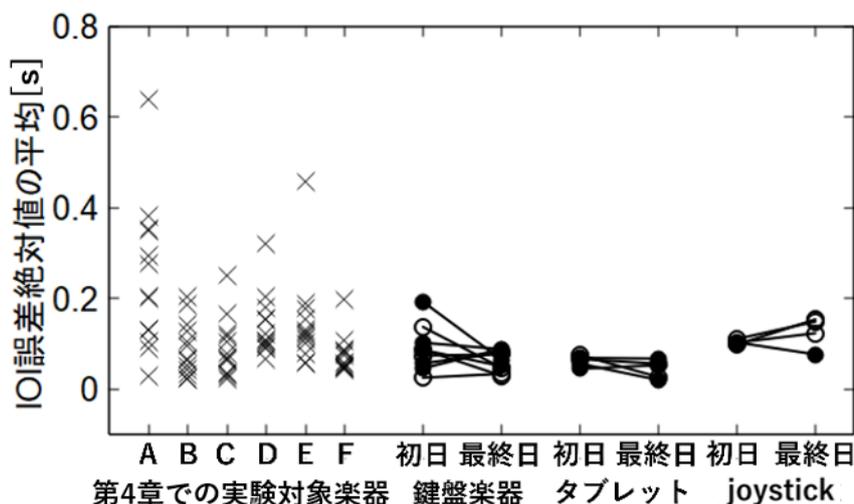


図 53 10 分の演奏練習後の IOI の誤差の絶対値、鍵盤楽器とタブレットと joystick において中空は先に、中実は後に演奏した実験対象楽器であることを示す。

検定の結果、いずれにおいても IOI の誤差の絶対値に有意差はなかった。これより、鍵盤楽器とタブレットは、グローブと同程度の IOI の正確さで演奏できることがわかった。

6.6 演奏性の主観的評価の因子分析

6.6.1 演奏性の主観的評価結果の傾向

演奏性の主観的評価結果の因子分析の実施にあたり、まず演奏練習に伴い本章の実験対象楽器の演奏性の主観的評価結果の傾向が変化するか分析した。各被験者の各実験対象楽器について、練習初日、1 週間練習後、2 週間練習後、3 週間練習後のそれぞれの主観的評

価結果に対して、スピアマンの順位相関係数を求めた。各実験対象楽器での相関係数の最大値と最小値を表 22 から表 24 に示す。相関分析の結果、各実験対象楽器において、全ての週の組み合わせにおいて相関が見られない被験者、あるいは一部の週の組み合わせでのみ相関が見られた被験者がいた。また、全ての週の組み合わせで相関が見られた被験者はいなかった。これより、各実験対象楽器の演奏性について、全ての週で同じような主観的評価をしていることはないことが示唆された。

表 22 鍵盤楽器での演奏性の主観的評価の各週の間スピアマンの順位相関係数の最大値と最小値。

	初日	1 週間練習後	2 週間練習後	3 週間練習後
初日	1			
1 週間練習後	0.867~0.0466	1		
2 週間練習後	0.897~-0.0876	0.897~0.183	1	
3 週間練習後	0.731~-0.213	0.738~-0.0129	0.774~0.262	1

表 23 タブレットでの演奏性の主観的評価の各週の間スピアマンの順位相関係数の最大値と最小値。

	初日	1 週間練習後	2 週間練習後	3 週間練習後
初日	1			
1 週間練習後	0.731~0.262	1		
2 週間練習後	0.486~0.0920	0.790~0.475	1	
3 週間練習後	0.847~0.268	0.818~0.0720	0.777~-0.226	1

表 24 joystick での演奏性の主観的評価の各週の間スピアマンの順位相関係数の最大値と最小値。

	初日	1 週間練習後	2 週間練習後	3 週間練習後
初日	1			
1 週間練習後	0.567~0.353	1		
2 週間練習後	0.455~0.418	0.790~0.578	1	
3 週間練習後	0.474~-0.342	0.811~0.185	0.805~0.306	1

6.6.2 4.5.1 項で得られた 3 つの因子に対する確証的因子分析

鍵盤楽器、タブレット、joystick の演奏性の主観的評価結果を対象にした場合も、4.5.1 項での探索的因子分析で得られた上達感因子、音高操作因子、発音動作因子に評価項目をグルーピングすることが妥当であるか分析するため、確証的因子分析を行った。6.6.1 項の相関

分析より、鍵盤楽器、タブレット、joystick の演奏性の主観的評価結果は、練習初日、1 週間練習後、2 週間練習後、3 週間練習後の全ての週において、同じような回答をしていることは見られなかった。そのため、各被験者の各実験対象楽器での全ての週の主観的評価結果をそのまま使用した。それにより、4.2.5 項で示した 12 個の評価項目に対して 72 個（タブレットの被験者 5 人×4 回、joystick の被験者 4 人×4 回、鍵盤楽器の被験者 9 人×4 回）の回答結果を用意した。その回答結果の確証的因子分析で得られた因子負荷量を表 25 に示す。この確証的因子分析の適合度指標について、CFI は 4.5.1 項では 0.883 であったが、本項での 3 種類の実験対象楽器では 0.817 になった。また、TLI は 4.5.1 項では 0.848 であったが、本項での 3 種類の実験対象楽器では 0.763 となった。これより、鍵盤楽器、タブレット、joystick の主観的評価結果を 4.5.1 項で得られた因子にグルーピングすると適合度が低下することがわかった。

本項では 4.5.1 項とは全く異なる演奏インターフェースの電子楽器を対象としており、また対象の数も 3 個のみと少なくなっている。限られた種類の演奏インターフェースを対象とすると、その特徴が因子の構造に強く影響するため、因子を構成する評価項目も変化することが考えられる。

表 25 本章の実験対象楽器のみを対象にした確証的因子分析で得られた因子負荷量、4.5.1 項で得られた 3 つの因子を想定、各因子において先頭に配置した評価項目の因子負荷量は 1 に固定。

	上達感	音高操作	発音動作
また演奏したいと思うか?	1.00	-	-
電子楽器を演奏して楽しかったか?	0.779	-	-
練習すればすぐに上達できると思うか?	0.470	-	-
10 分で演奏が上達したと思うか?	0.512	-	-
演奏していてストレスや苦痛を感じなかったか?	0.585	-	-
指定した内容の演奏をすることは容易であったか?	-	1.00	-
出したい音高をすぐに発音できるか?	-	1.055	-
開始直後は演奏が難しいと感じなかったか?	-	1.072	-
音高を操作しやすかったか?	-	1.196	-
発音のタイミングを操作しやすかったか?	-	-	1.00
消音のタイミングを操作しやすかったか?	-	-	0.730
発音や音高を操作するときに、楽器位置や持ち方は安定していたか?	-	-	0.974

6.6.3 3週間の主観的演奏性の変化

6.6.2 項より、演奏インターフェースの特徴によって、因子を構成する評価項目が変わることが示唆された。そこで、鍵盤楽器、タブレット、joystick の演奏性の主観的評価結果を用いて探索的因子分析を実施した。更に、ここで得られた因子得点より、3週間の練習期間で主観的演奏性が変化するか分析した。6.5.2 項では鍵盤楽器、タブレット、joystick の演奏精度は演奏練習に伴い向上していることがわかっている。演奏練習の継続、あるいは演奏精度が向上することに伴い、主観的演奏性も向上することが考えられる。

ここでは 6.3.1 項で示して新たに追加した 3 つの評価項目を加えた 15 項目を用いて、探索的因子分析を実施した。因子分析で Varimax 回転後に得られた因子と因子負荷量を表 26 示す。

表 26 本章の実験対象楽器を対象とした探索的因子分析で得られた因子と因子負荷量。

	愉快	容易度	演奏音操作
電子楽器を演奏して楽しかったか?	0.886	0.345	0.051
また演奏したいと思うか?	0.883	0.366	0.167
発音のタイミングを操作しやすかったか?	0.663	0.299	0.410
練習すればだれでもすぐに上達できると思うか?	0.603	0.294	0.338
演奏していてストレスや苦痛を感じなかったか?	0.380	0.749	0.029
指定した内容の演奏をすることは容易であったか?	0.327	0.712	0.311
開始直後は演奏が難しいと感じなかったか?	0.292	0.648	0.294
10 分間演奏して疲労を感じなかったか?	0.431	0.580	0.248
発音や音高を操作するときに、楽器位置や持ち方は安定していたか?	0.335	0.549	0.404
10 分で演奏が上達したと思うか?	0.472	0.473	0.311
自分が意図しない、発音の不足はあまりなかったと思いますか?	0.100	0.430	0.264
自分が意図しない、余分な発音はあまりなかったと思いますか?	0.027	0.115	0.795
出したい音高をすぐに発音できるか?	0.197	0.270	0.711
消音のタイミングを操作しやすかったか?	0.354	0.251	0.698
音高を操作しやすかったか?	0.532	0.333	0.591
因子寄与率[%]	51.9	8.6	4.6

第1因子には「電子楽器を演奏して楽しかったか?」、「また演奏したいと思うか?」という演奏の楽しさなどについての評価項目が含まれた。よって、「愉快因子」と名付けた。この因子の因子得点が大きいと演奏を楽しく感じると評価できる。この愉快因子の中では「電子楽器を演奏して楽しかったか?」(因子負荷量:0.886)と「また演奏したいと思うか?」(因子負荷量:0.883)の因子負荷量が比較的大きくなっており、演奏が楽しく感じると再度演奏したいと感じることが示唆された。また、「発音のタイミングを操作しやすかったか?」という発音操作に関する評価項目も含まれた。

第2因子には「指定した内容の演奏をすることは容易であったか?」、「開始直後は演奏が難しいと感じなかったか?」という演奏の難易度についての評価項目が含まれた。これらの評価項目の評価値が高いと演奏を難しく感じず、容易に感じると評価されることから、「容易度因子」と名付けた。この因子の因子得点が大きいと演奏が容易に感じると評価できる。この容易度因子の中では「演奏していてストレスや苦痛を感じないか?」(因子負荷量:0.749)と「指定した内容の演奏をすることは容易であったか?」(因子負荷量:0.712)の因子負荷量が比較的大きくなっており、演奏が容易に感じると、ストレスを感じないことが示唆された。また、新たに追加した評価項目である「10分間演奏して疲労を感じなかったか?」と「自分が意図しない、発音の不足はあまりなかったと思いますか?」はこの容易度因子に集約された。演奏における疲労の感じ方や発音の不足は主観的な演奏の容易さ及び難しさに影響する可能性が示唆された。

第3因子には、「出したい音高をすぐに発音できるか?」、「消音のタイミングを操作しやすかったか?」という演奏音の操作についての評価項目が含まれた。よって、「演奏音操作因子」と名付けた。この因子の因子得点が大きいと演奏音の操作をしやすく感じると評価できる。この演奏音操作因子では新たに追加した「自分が意図しない、余分な発音はあまりなかったと思いますか?」(因子負荷量:0.795)と「出したい音高をすぐに発音できるか?」(因子負荷量:0.711)の因子負荷量が比較的大きくなっており、本章の実験対象楽器では出したい音高をすぐに発音できると、余分な発音が少なく感じることが示唆された。

各実験対象楽器での因子得点について、評価した週と3種類の因子を要因、被験者を繰り返し要因にした二元配置の分散分析を実施した。各実験対象楽器での分散分析表を表27から表29に示す。いずれの実験対象楽器においても、評価した週の主効果は有意ではなかった。これより、演奏練習に伴って、あるいは演奏精度が向上することに伴って主観的演奏性が変化することは確認できなかった。また、評価を行った週と因子の種類の交互作用も有意ではなかった。これより、特定の因子の特定の週でのみ因子得点が顕著に変化する、つまり主観的評価結果が高くなる、あるいは低くなることがないことも示唆された。

タブレットとjoystickにおいて、因子の種類の主効果は有意であった。ただし、各因子では評価する内容がそれぞれ異なるため、因子の種類で評価結果を比較することには意味がない。

表 27 鍵盤楽器の演奏性の主観的評価結果における因子得点の分散分析表。

要因	平方和	自由度	平均平方	F 値	危険率
評価した週	0.97	3	0.32	0.37	0.772
因子の種類	3.34	2	1.67	1.92	0.152
交互作用	4.65	6	0.78	0.89	0.503
全体	92.25	107	0.86		

表 28 タブレットの演奏性の主観的評価結果における因子得点の分散分析表。

要因	平方和	自由度	平均平方	F 値	危険率
評価した週	0.61	3	0.2	0.31	0.818
因子の種類	4.91	2	2.46	3.74	0.031
交互作用	3.33	6	0.55	0.84	0.542
全体	40.38	59	0.68		

表 29 joystick の演奏性の主観的評価結果における因子得点の分散分析表。

要因	平方和	自由度	平均平方	F 値	危険率
評価した週	0.74	3	0.25	0.3	0.823
因子の種類	6.46	2	3.23	3.97	0.028
交互作用	5.11	6	0.85	1.05	0.412
全体	41.6	47	0.89		

6.6.4 因子得点による本章の実験対象楽器の演奏性の比較

6.6.3 項で得られた因子の因子得点を使って、実験対象楽器の演奏性を比較した。各因子の因子得点について、実験対象楽器の種類を要因、被験者を繰り返し要因にした一元配置の分散分析を実施した。愉快因子の分散分析表を表 30 に、容易度因子の分散分析表を表 31 に、演奏音操作因子の分散分析表を表 32 に示す。

表 30 より、愉快因子では実験対象楽器の主効果が有意でなかった。これより、演奏の楽しさは実験対象楽器間で差がないことがわかった。

表 30 因子得点の分散分析表 (愉快)。

要因	平方和	自由度	平均平方	F 値	危険率
実験対象楽器	0.88	2	0.44	0.47	0.624
全体	64.97	71	0.92		

表 31 因子得点の分散分析表（容易度）。

要因	平方和	自由度	平均平方	F 値	危険率
実験対象楽器	11.55	2	5.77	8.91	0.00
全体	56.29	71	0.79		

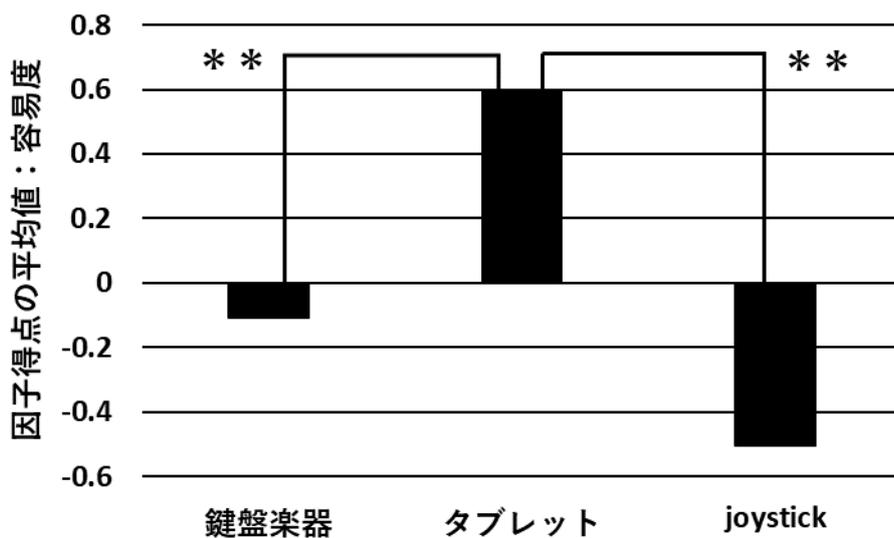


図 54 容易度因子得点の平均値 (** : 危険率 1% で有意差あり)。

表 31 より、容易度因子では実験対象楽器の主効果が有意であった。容易度因子の因子得点の平均値を図 54 に示す。この因子得点が大きいと演奏そのものが容易に感じると評価できる。タブレットは他の実験対象楽器よりも因子得点が有意に大きく、演奏を容易に感じる傾向があった。

表 32 因子得点の分散分析表（演奏音操作）。

要因	平方和	自由度	平均平方	F 値	危険率
実験対象楽器	9.22	2	4.61	6.27	0.003
全体	59.91	71	0.84		

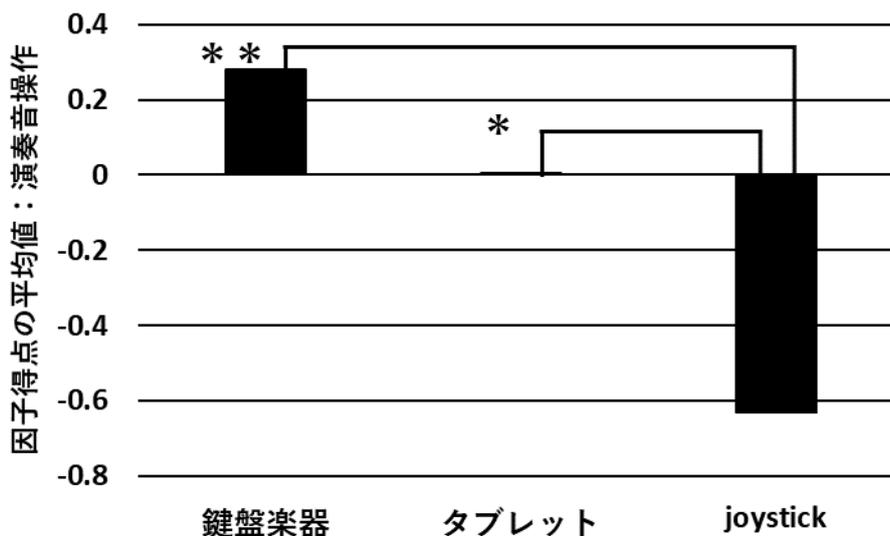


図 55 演奏音操作因子得点の平均値 (* : 危険率 5% で有意差あり、** : 危険率 1% で有意差あり)。

表 32 より、演奏音操作因子では実験対象楽器の主効果が有意であった。演奏音操作因子の因子得点の平均値を図 55 に示す。この因子得点が高いと演奏音の操作を容易に感じると評価できる。joystick は他の実験対象楽器よりも因子得点が有意に小さく、演奏音の操作を難しく感じる傾向があった。

以上より、タブレットでは演奏を容易に感じ、また joystick では演奏音の操作を難しく感じる事が示唆された。

6.6.5 第 4 章の実験対象楽器を加えた場合の探索的因子分析

6.6.2 項での確証的因子分析と 6.6.3 項での探索的因子分析より、限られた種類の演奏インターフェースを対象とすると、その特徴が因子の構造に強く影響して、因子を構成する項目が変わることが考えられた。そこで、ここでは第 4 章での 6 種類の実験対象楽器と、本章での実験対象楽器である鍵盤楽器、タブレット、joystick の演奏性の主観的評価結果を対象とした探索的因子分析を実施した。これにより、特定の電子楽器ではなく、多くの種類の新規な電子楽器の演奏性の主観的評価に適する評価項目を検討した。

12 項目の回答結果を全て合わせて、因子抽出手法を主因子法とした探索的因子分析を行

った。第4章の6種類の実験対象楽器にはそれぞれ13個（被験者13人分）の回答結果があるが、鍵盤楽器、タブレット、joystickはそれぞれ演奏した人数が異なるため、回答結果の個数も異なる。そこで、本章の実験対象楽器毎に、被験者の各週の実験で得られた主観評価ベクトルに対してクラスタ分析を実施した。距離行列を用いて平方ユークリッド距離を設定した階層クラスタ分析を実施して、類似する回答結果をまとめた13個のクラスタに分けた。その上で、同じクラスタに分けられた回答結果を評価項目ごとに平均をとった。それにより、第4章の6種類の実験対象楽器と鍵盤楽器、タブレット、joystickのそれぞれにおいて、13個の回答結果を用意した。探索的因子分析でVarimax回転後に得られた因子と因子負荷量を表33に示す。なお、この探索的因子分析は最小固有値を0.8として行った。

表 33 第4章の実験対象楽器を加えた探索的因子分析で得られた因子と因子負荷量。

	上達感	音高操作	発音動作
電子楽器を演奏して楽しかったか?	0.854	0.0935	0.336
また演奏したいと思うか?	0.839	0.222	0.319
練習すればすぐに上達できると思うか?	0.627	0.387	0.263
10分で演奏が上達したと思うか?	0.572	0.346	0.170
演奏していてストレスや苦痛を感じなかったか?	0.489	0.397	0.291
指定した内容の演奏をすることは容易であったか?	0.312	0.767	0.244
開始直後は演奏が難しいと感じなかったか?	0.133	0.659	-0.003
音高を操作しやすかったか?	0.366	0.621	0.386
出したい音高をすぐに発音できるか?	0.118	0.604	0.323
消音のタイミングを操作しやすかったか?	0.280	0.213	0.744
発音のタイミングを操作しやすかったか?	0.436	0.143	0.712
発音や音高を操作するときに、楽器位置や持ち方は安定していたか?	0.288	0.387	0.468
因子寄与率[%]	49.4	8.2	4.6

表33より、各因子にグルーピングされた評価項目の種類は4.5.1項での探索的因子分析と同様であり、演奏性の主観的評価は上達感、音高操作、発音動作の3つの因子にグルーピングできることがわかった。これより、得られた3つの因子をそれぞれ代表する評価項目を使うことで、特定の演奏インターフェースに限らず、特徴が異なる様々な種類の演奏インターフェースや、それを有する新規な電子楽器の演奏性を評価することが期待できる。この成果は、今後製作される新規な電子楽器の演奏性評価に限らず、従来研究にて既に製作されている新規な電子楽器との演奏性の比較においても有用である。

6.6.6 因子得点による 9 種類の実験対象楽器の演奏性の比較

6.6.5 項での探索的因子分析で得られた各因子の因子得点について、実験対象楽器の種類を要因にした 1 元配置の分散分析を実施した。それにより、本章での実験対象楽器が第 4 章での実験対象楽器よりも演奏性に優れているか評価する。なお、第 4 章での実験対象楽器同士の演奏性の比較は既に第 4 章で述べたため、本項では割愛する。各因子の分散分析表を表 34 から表 36 に示す。これより、音高操作因子でのみ実験対象楽器の主効果が有意であった。

各実験対象楽器の音高操作因子の因子得点の平均を図 56 に示す。この因子得点が大きいほど音高操作をしやすいと感じると評価できる。まず鍵盤楽器はオタマトーンよりも因子得点が有意に大きかった($p < 0.05$)。これより、鍵盤楽器は第 4 章の実験対象楽器と同等かそれ以上の音高操作のしやすさを感じたと評価された。

タブレットはオタマトーン、カオシレーター-2S、ドライバー、スライダー、joystick よりも因子得点が有意に大きかった(スライダー： $p < 0.05$ 、その他： $p < 0.01$)。これより、タブレットも第 4 章の実験対象楽器と同等かそれ以上の音高操作のしやすさを感じたと評価された。

joystick はタブレットとグローブよりも因子得点が有意に小さかった(いずれも $p < 0.01$)。これより、joystick は第 4 章の実験対象楽器と同等かそれ以上の音高操作のしやすさを感じたとは評価されなかった。

表 34 因子得点の分散分析表 (上達感)。

要因	平方和	自由度	平均平方	F 値	危険率
実験対象楽器	10.92	8	1.36	1.15	0.334
全体	138.73	116	1.2		

表 35 因子得点の分散分析表 (音高操作)。

要因	平方和	自由度	平均平方	F 値	危険率
実験対象楽器	42.59	8	5.32	5.57	0.00
全体	145.84	116	1.26		

表 36 因子得点の分散分析表 (発音動作)。

要因	平方和	自由度	平均平方	F 値	危険率
実験対象楽器	21.63	8	2.7	2.02	0.051
全体	166.17	116	1.43		

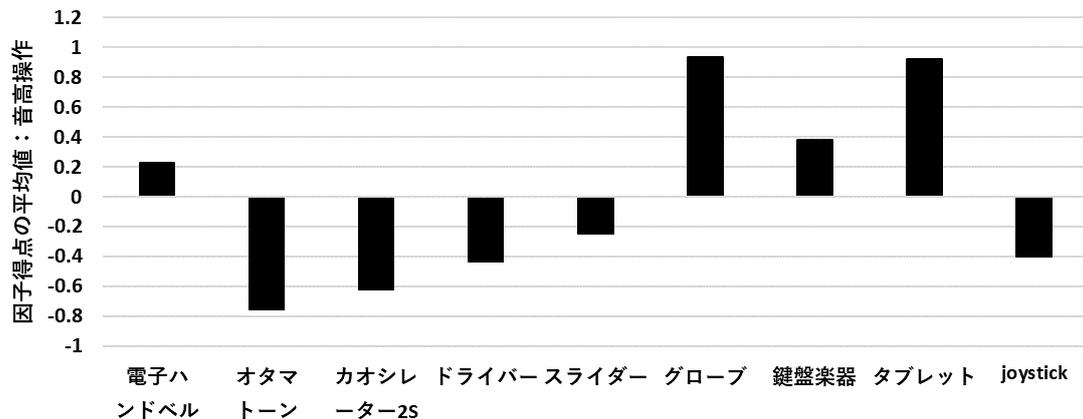


図 56 音高操作因子得点の平均値。

6.7 考察

6.7.1 楽曲による演奏精度の違い

課題曲 A と課題曲 B(B')は演奏テンポや曲の長さなどの条件を揃えているが、課題曲 Aの方が間違いを少なく演奏できた。比較に用いた被験者は課題曲 A の聴取経験があることが確認されており、聴取経験の差が演奏精度に影響した可能性がある。また、課題曲の調性の不自然さが演奏精度に影響した可能性もある。課題曲 B(B')は課題曲 A と比べると 8 小節のメロディの印象を与えない可能性がある。楽器演奏未経験者ならば不自然な調性の楽曲を聴いても違和感を覚えない可能性があり、研究室での実験後に被験者に対して行った、実験対象楽器や演奏練習実験についてのヒアリングでは、調性の違和感は報告されなかった。しかし、潜在的に違和感を覚え、演奏精度に影響した可能性はある。

ハ長調の課題曲 D(D')と比べると、課題曲 C(C')はハ長調で始まって途中からへ長調に聞こえる可能性がある。課題曲 C を用いた第 4 章での演奏評価実験後のヒアリングにおいて、移調や楽譜の書き換えに慣れている被験者 1 人のみは演奏に違和感を覚えたが、演奏のしやすさに影響することは報告されなかった [58]。第 4 章でのその他の被験者、及び本章の演奏練習実験における研究室での実験後の被験者に対するヒアリングでは、課題曲に対する違和感は報告されなかった。しかし、潜在的に違和感を覚えた可能性はある。初日の課題曲 C(C')よりも最終日の課題曲 D(D')の発音正解率が高かった被験者がいたことについて、3 週間の演奏練習によって実験対象楽器に慣れたことの他に、調性における違和感がなくなったことも影響している可能性もある。これらの課題曲の聴取経験や調性、及びそれらの演奏精度への影響については、今後の検討課題とする。

6.7.2 タブレットの演奏インターフェースの改善

タブレットの発音正解率や IOI の誤差の絶対値は第 4 章のグローブと同程度であった。鍵盤楽器と同程度の間違いの少なさで演奏できる被験者がいた。1 週間の演奏練習期間を経て、鍵盤楽器の演奏経験がある被験者と同程度の IOI の正確さで演奏できる被験者もいた。これより、タブレットを用いた演奏インターフェースによって、第 4 章での実験対象楽器、及び従来楽器と同程度の間違いの少なさで演奏が可能な新規な電子楽器が実現できた。

しかし、被験者の演奏を観察したところ、指をスライドする途中で目的とは異なる音名の領域に触れて、その音名の音を余分に発音している演奏があった。この対策として、各音名の領域間の距離をより長くすることが考えられる。ただし、距離を長くすると音名の切り替えに要する時間も多くなり、IOI の誤差が大きくなる可能性もある。今後の改良に際しては、領域の間隔が異なる複数のタブレット型楽器を比較して、適切な動作範囲を検討するべきである。

本実験では指で音名の領域に触っているか否かのみで発音を制御したが、指のスライド速度や加速度を操作に組み込むこともできる。例えば、音名の領域内で一定以下の速度、あるいは負の加速度の場合にのみ発音する設定にすれば、指が目的以外の音名の領域に触ったとしても、誤った発音を減らすことが期待できる。

6.7.3 joystick の演奏インターフェースの問題点

joystick は第 4 章での実験対象楽器と比べて、演奏の間違いを少なく演奏することができなかった。原因として、動作範囲の狭さが考えられる。joystick は親指の関節のみを使ってスティックを傾ける必要がある。このスティックは鍵盤楽器やタブレットのタッチパネル、及び第 4 章での実験対象楽器と比べると動作範囲が狭くなっている。この動作範囲の狭さが原因で、余分な発音など演奏の間違いが多くなった可能性がある。これに対する改善案として、ゲーム機のコントローラではなく、航空機や機械の操縦などで使われる大きなスティックを実装して動作範囲を広くすることで、少ない間違いで演奏できる可能性がある。

6.7.4 演奏インターフェースの特徴と演奏性評価の因子

鍵盤楽器、タブレット、joystick のみを対象にした確証的因子分析より、演奏性を第 4 章での上達感、音高操作、発音動作の 3 つの因子に同じ構造でグルーピングすると適合度が低下することが示された。また、鍵盤楽器、タブレット、joystick のみを対象にした探索的因子分析では、第 4 章とは異なる因子構造で評価項目がグルーピングされた。これより、限られた種類の演奏インターフェースを対象とすると、その特徴が因子の構造に強く影響して、因子を構成する評価項目も変わることが考えられる。

鍵盤楽器、タブレット、joystick のみでの探索的因子分析において、第 3 因子の「演奏音操作因子」では、「出したい音高をすぐに発音できるか?」という音高操作のしやすさを評価

する項目と「消音のタイミングを操作しやすかったか?」という発音操作のしやすさに関連する評価項目の両方が集約された。音高操作と発音操作をそれぞれ評価する項目が同一の因子に集約されるこの結果は、4.6.2 項での「発音と音高を操作する電子楽器では、発音動作と音高操作の因子が見つかる」という考察に反する。原因として、演奏インターフェースの特徴が考えられる。鍵盤楽器、タブレット、joystick はいずれも発音する際に必ず音高を選択する演奏インターフェースである。この点は第 4 章において、発音と音高を別々の動作で操作する電子ハンドベル、ドライバー、スライダーとは異なる。音高を選択しながら発音する演奏インターフェースでは、発音操作と音高操作をそれぞれ行っている、という意識が薄くなり、それらが同一の「演奏音操作因子」に集約された可能性がある。

6.7.5 演奏性に対する演奏インターフェースの特長の影響

鍵盤楽器とタブレットは第 4 章の実験対象楽器と同等かそれ以上の音高操作のしやすさを感じたと評価された。これらは「音高を音階に従って制御できて、かつコントローラ上で音高を認識できると音高操作をしやすい」という特徴を有していたことから、音高操作を容易に感じたと考えられる。

joystick もスティックの傾け方向で音高を認識できるが、音高操作を容易に感じるとは評価されなかった。原因として、6.7.3 項で述べた動作範囲の狭さが影響した可能性がある。動作範囲の狭さが原因で、余分な発音による演奏の間違いが多くなったことで、音高操作を難しく感じたと考えられる。余分な発音の多さは音高操作とは関連がないようにも思えるが、joystick は発音する際に必ず音高を選択する演奏インターフェースとなっている。6.7.4 項で述べたように、発音操作と音高操作をそれぞれ行っている意識が薄くなったことで、動作範囲の狭さによる余分な発音の多さが、主観的な音高操作のしやすさの評価に影響したことが考えられる。

6.7.6 上達過程

鍵盤楽器で 8 小節の単純な旋律を片手で演奏して、1 楽曲につき 1 日 3 分、3 週間演奏練習した。その結果、1~2 週間の演奏練習期間である程度上達できて、鍵盤楽器経験者と同程度の IOI の正確さで演奏できることがわかった。ただし、本実験の結果は単純な旋律を 1 日 3 分演奏練習するという限定的な条件で得られたものであり、楽曲の難易度や練習条件が異なる従来研究と直接比較することはできない。

本実験では 1 日の練習時間や総練習日数など、練習条件を変えた場合の上達過程の分析は行っていない。そのため、1 日の練習時間を多くして短い日数で練習するか、あるいは 1 日の練習時間を短くして多くの日数をかけて練習するかなど、どのような練習条件であるとのべ練習時間を短くして、効果的に上達できるかは明らかになっていない。今後の課題として、複数の練習条件で上達過程の分析、比較をすることで、より早期に上達できる練習条件を明らかにする。

また、演奏インターフェースによって得意、不得意となるメロディが異なる可能性がある。例えば、音階上で隣接していない複数の音名で演奏する場合、鍵盤楽器では手の動きが大きくなる、もしくは複数の指か手の使用を要する。一方で、タブレット、及び joystick では隣接している音名での演奏の動作の大きさと大差ない。この例だと鍵盤楽器はより多くの練習時間を要する可能性もある。今後上達の速さを分析する際は、楽曲の特徴と演奏インターフェースの特徴が上達の速さに影響することも考慮して実験を行うべきである。

本実験で得られた鍵盤楽器の上達過程のデータは新規な電子楽器の比較対象として有用である。今後、新規な電子楽器を対象に単純な旋律の演奏の正確さの分析や、短時間の演奏練習での上達過程の分析を行う場合、従来楽器と同程度の間違いの少なさで演奏できるか、あるいはより早期に上達できるか評価する際の指標として役立つ。

6.8 まとめ

楽器演奏未経験の被験者を対象に、第 5 章での 2 種類の新規な電子楽器と鍵盤楽器を 1 日約 10 分（自由演奏と 2 つの課題曲を 3 分ずつ、及び演奏録音）、3 週間演奏練習した。また、比較対象として鍵盤楽器の演奏経験がある被験者 1 人にも鍵盤楽器で同じ課題曲を演奏してもらった。それらの演奏精度を分析、比較した結果、タブレットのタッチパネルを用いた新規な電子楽器は、鍵盤楽器と同程度の間違いの少なさでの演奏と、同程度の速さでの上達できた。更に、第 4 章の実験対象楽器と同程度の間違いの少なさでの演奏ができた。タブレットでより少ない間違いで演奏をするための改善案として、タッチパネル上の各音名の領域の間隔の調整や、指の位置だけではなく速度や加速度も操作に組み込むことが考えられる。joystick を用いた新規な電子楽器は鍵盤楽器や第 4 章の実験対象楽器と比べて、少ない間違いで演奏できたとは言えなかった。改善案として、より大きなスティックを用いて動作範囲をより大きくすることが考えられる。8 小節の単純な旋律演奏において、鍵盤楽器は 1~2 週間の演奏練習期間である程度上達できることがわかった。鍵盤楽器の上達についての知見は、今後新規な電子楽器を試作する際に、従来楽器と同程度の速さで上達できるか否か評価する際の指標として有用である。

新規な電子楽器の演奏性の評価項目について、それらを集約する因子の構造は演奏インターフェースの特徴に影響され、限られた演奏インターフェースのみを対象とすると、その特徴が強く出ることが示唆された。本章の鍵盤楽器、タブレット、joystick は発音動作と同時に音高の選択も行っており、それらのしやすさを評価する項目、及び関連する項目が同一の因子に集約された。

多くの種類の新規な電子楽器の演奏性の主観的評価には、第 4 章でも見つかった上達感、音高操作、発音動作を評価する項目が適することが示唆された。この 3 つの因子をそれぞれ代表する評価項目を用いることで、新規な電子楽器の演奏性の主観的評価において、評価項目を減らして演奏性を評価する被験者の負担を軽減しつつ、適切に演奏性を評価することが期待できる。

第7章 総括

本論文は従来楽器の演奏に多くの練習を必要とすることに対して、それを克服することが期待される新規な電子楽器に着目した。新規な電子楽器を対象にした従来研究ではその演奏性や演奏正確性の評価が不十分である問題点を挙げて、新規な電子楽器の演奏練習実験とその分析結果を元に、容易に演奏できる電子楽器を実現することを目的とした。

第1章では本論文における従来楽器と新規な電子楽器の定義を明確にした。従来楽器は発音原理によって演奏インターフェースの形状やサイズに制約があり改良が難しいこと、それにより演奏に多くの練習を必要とする問題点を指摘した。その問題点を克服することが期待できる手段として新規な電子楽器に着目し、その特長と有用性を述べた。

第2章では、まず市販されている新規な電子楽器について、楽器メーカーやそれ以外の企業が提案、販売しているものを紹介した。更に、販売されていないが、研究活動で製作された新規な電子楽器も紹介した。従来研究での新規な電子楽器はそれぞれ特徴が異なり、多様なセンサの利用やスイッチの改造などによって、全く新しい演奏インターフェースが製作されている。既存の道具を改造した新規な電子楽器も製作されており、日常で使われている道具や従来楽器を改造したものがある。新規な電子楽器の用途や目的は楽器演奏のみではなく、福祉やリハビリテーションでの利用を目的としたものも製作されている。従来研究の問題点として、製作した新規な電子楽器の演奏正確性や演奏性の評価が不十分であることを示した。それにより、演奏しやすい演奏インターフェースの特徴が明らかになっておらず、更に演奏性の適切な評価項目も検討されていないことも示した。本論文が目指す新規な電子楽器を実現するには、製作した新規な電子楽器の演奏正確性と演奏性を評価することが必要不可欠である。第2章で挙げられた従来研究の問題点を受けて、楽器演奏に対するしきいの高さを克服できるような、演奏しやすい新規な電子楽器の実現を目指すこととした。それを達成するために、本論文では新規な電子楽器の演奏評価実験を経て、「演奏しやすい演奏インターフェースの特徴の検討」と「演奏性の評価項目の検討」という研究、実験の方針を決めた。

第3章では、まず本論文が目指す新規な電子楽器にニーズがあるか明らかになっていないことを示し、楽器演奏に対する意識調査を実施した従来研究を紹介した。また、新規な電子楽器とは別のアプローチで演奏を容易にすることが期待できる演奏練習支援システムの存在を指摘して、それもニーズの調査が十分でないことを示した。そこで、東京情報大学の学生を対象として、楽器演奏に対する意識や電子楽器、及び支援システムのニーズについて意識調査を実施した。その結果、2019年度と2020年度で概ね同様の結果が得られた。本意識調査の中では、経験者では演奏をやめた、挫折した理由は技術的な難しさが最も多く、また経験者未経験者問わず自分が思った通りに演奏できたときに楽しく感じる学生が多かった。これらの要因は電子楽器や支援システムによって改善、向上を目指すことが可能である。音の表現が制限されるが演奏が容易な電子楽器と、支援システムの併用に肯定的な学生が

いることもわかった。これらより、電子楽器の練習を支援するシステムが実現したとしても、本論文が目指す新規な電子楽器にはニーズがあることが示唆された。

第4章では、著者が過去に行った新規な電子楽器の演奏評価実験を紹介した。更に、新たな特徴量を用いた演奏音の分析結果と、全ての被験者を対象とした際の演奏性の主観的評価結果の因子分析について報告した。実験対象として市販の新規な電子楽器、及び先行研究で製作された新規な電子楽器を3種類使用した。更に、それら3種類の評価結果を元に著者が新たに製作した3種類の新規な電子楽器も実験対象とした。

実験対象楽器の演奏音分析結果より、音高を音階に従って操作して、かつコントローラ上で音高を認識できる演奏インターフェースは比較的音高の間違いが少なかった。また、振る動作で発音操作する演奏インターフェースでは、触る、握る動作で発音操作する演奏インターフェースよりも IOI の誤差が大きかった。更に、発音操作と音高操作を別々の動作で行う演奏インターフェースは余分な発音が多かった。これらの結果より、演奏しやすい演奏インターフェースの特徴について、「音高を音階に従って制御できて、かつコントローラ上で音高を認識できると音高操作をしやすい」、「触る、握る動作は振る動作よりも IOI の誤差を小さく演奏できる」、「単一の動作で発音と音高を操作できると発音操作をしやすい」などの考察を行った。手のひらに触ることで発音して、同時に音階に従った音高を視覚で認識しながら操作できる新規な電子楽器「グローブ」は上記の特徴を併せ持ち、発音正解率が最も高かった。本実験で得られた考察を元に新規な電子楽器を設計することで、より演奏しやすい新規な電子楽器を製作できる可能性がある。

新規な電子楽器の演奏性の主観的評価の因子分析により、12個の評価項目を「上達感因子」、「音高操作因子」、「発音動作因子」の3つの因子に集約できた。これらの因子に集約された評価項目より、演奏で楽しさを感じる場合に、再度演奏したいと感じることが示唆された。本章の実験対象楽器では、出したい音高をすぐ発音できると演奏そのものが容易であると感じて、発音操作をしやすく感じると消音操作もしやすく感じることを示唆された。因子得点の分散分析により、他の音高への切り替えが容易で、視覚や触覚によってその音高の変化を認識できて、更に音高操作に余裕がある形状や大きさの演奏インターフェースは音高操作をしやすく感じるということがわかった。また、単一の動作で発音と音高の両方を操作できる演奏インターフェースは、発音操作をしやすく感じるということがわかった。本実験で得られた結果や知見は、評価項目を減らすことで演奏性を評価する被験者の負担を軽減しつつ、新規な電子楽器の演奏性を適切に評価することに役立つ。

第5章では、第4章での考察を元に、演奏しやすいことを目指した新規な電子楽器である、タブレットとjoystickを製作した。タブレットはタッチパネルに触ることにより発音して、触る位置によって音名を操作する。指のスライド動作でも演奏が可能である。joystickはスティックの傾けとその方向によって発音と音高の操作を行い、指1本で演奏ができる。圧力センサの押下により1オクターブ上の音名に切り替え可能である。また、比較対象としてミニ鍵盤で演奏する鍵盤楽器についても説明した。第6章ではこれら3種類の電子楽

器を対象として、演奏練習を3週間継続して行う演奏練習実験を行うこととした。

第6章では、楽器演奏未経験の被験者を対象に、第5章での2種類の新規な電子楽器と鍵盤楽器を1日約10分（自由演奏と2つの課題曲を3分ずつ、及び演奏録音）、3週間演奏練習した。また、比較対象として鍵盤楽器の演奏経験がある被験者1人にも鍵盤楽器で同じ課題曲を演奏してもらった。それらの演奏精度を分析、比較した結果、タブレットのタッチパネルを用いた新規な電子楽器は鍵盤楽器と同程度の間違いの少なさでの演奏と、同程度の速さで上達できた。更に、第4章の実験対象楽器と同程度の間違いの少なさで演奏できた。タブレットでより少ない間違いで演奏をするための改善案として、タッチパネル上の各音名の領域の間隔の調整や、指の位置だけではなく速度や加速度も操作に組み込むことが考えられる。joystickを用いた電子楽器は鍵盤楽器や第4章の実験対象楽器と比べて、少ない間違いで演奏できたとは言えなかった。改善案として、より大きなスティックを用いて動作範囲をより大きくすることが考えられる。8小節の単純な旋律演奏において、鍵盤楽器は1~2週間の演奏練習期間である程度上達できることがわかった。鍵盤楽器の上達についての知見は、今後新規な電子楽器を試作する際に、従来楽器と同程度の速さで上達できるか否か評価する際の指標として有用である。

新規な電子楽器の演奏性の評価項目について、それらを集約する因子の構造は演奏インターフェースに影響され、限られた演奏インターフェースのみを対象とすると、その特徴が強く出ることが示唆された。鍵盤楽器、タブレット、joystickは発音動作と同時に音高の選択も行っており、それらのしやすさを評価する項目が同一の因子に集約された。

多くの種類の新規な電子楽器の演奏性の主観的評価には第4章でも見つかった上達感、音高操作、発音動作を評価する項目が適することが示唆された。この3つの因子を代表する評価項目を用いることで、新規な電子楽器の演奏性の主観的評価において評価項目を減らして演奏性を評価する被験者の負担を軽減しつつ、適切に演奏性を評価することが期待できる。

第7章では、本論文をまとめると共に、今後の展望と課題について論じる。

今後の展望として、本実験の成果より演奏しやすい新規な電子楽器の実現が期待できる。演奏評価実験より、演奏しやすい演奏インターフェースの特徴について考察し、実際にタブレット型電子楽器を製作した。タブレット型電子楽器においても、余分な発音をしてしまう欠点が見られたが、その改善点も提示できた。今後、タブレット型電子楽器を改善して、更に演奏練習実験を経てブラッシュアップすることで、より演奏しやすい演奏インターフェースが期待できる。更に、本論文では演奏音分析により演奏正確性を新規な電子楽器同士で比較することや、主観的演奏性を評価する因子を見つけることも行った。これらの演奏評価手法や得られた知見は、今後の新規な電子楽器の製作において、製作物を適切に評価、比較することに役立つ。

本論文は音楽演奏を習得、上達することを目的とした新規な電子楽器の演奏練習実験を行ったが、将来的には音楽演奏以外の分野に用いることを目指した新規な電子楽器の製作

にも役立つ可能性がある。新規な電子楽器は音楽演奏以外にもリハビリテーションやコミュニケーションなど、他分野に利用することも研究されている。従来研究では認知障害児を対象にした演奏インターフェース [59]や発達障害の音楽療法を目的とした電子楽器 [60]、2人で協調して演奏することを目指した電子楽器 [61]などが提案されている。そういった研究では各分野への貢献度の主観的評価やリハビリテーションの効果など、本論文では分析していない評価項目やデータの分析も必要になる。本論文の成果をそのまま活用することは難しいが、新規な電子楽器を他分野に活用するための研究の基礎的なデータとして、今後本論文の成果が役立つことが期待できる。

今後の課題として、新規な電子楽器の演奏正確性の定量的評価を行う際の注意点として、被験者の楽曲の知識の確認がある。本論文では知らない楽曲よりも知っている楽曲の方が間違いを少なく演奏できる可能性があった。また、音楽学や作曲の側面における楽曲の調性や旋律のまとまりが、演奏精度や上達の速さに影響した可能性もあった。楽曲の調性、楽曲の選定とその楽曲に対する被験者の知識の確認、及び実験条件などの実験デザインについては今後の検討課題とする。

本論文は演奏のしきいの高さの克服を目指しているが、「未経験者にも演奏してもらう」ことも目指す場合、今後は演奏のしやすさを目的とした新規な電子楽器の開発、あるいは演奏インターフェースの改良だけでは不十分である。楽器は管弦楽やバンド、学校教育など多くの場で演奏されており、種類も多い。しかし、日頃から演奏されている楽器の種類は限られており、既存、及び古くから存在する楽器が大半を占める。その状況の中で、新しい電子楽器を演奏してもらうのは困難に思える。今後、新規な電子楽器を広めるには演奏しやすさを高めつつ、その有用性と存在を周知させる必要がある。例えば、楽器演奏の未経験者に広めるには SNS による発信がある。SNS は利用者が多く、また注目を集める所謂インフルエンサーによる発信を行うことで、より効果的に広めることが期待できる。更に、初心者を対象とした本論文の目的とは異なるが、楽器演奏経験者に対しては、既存の楽器とのセッションを行うことや、著名な演奏者による演奏を行うことが有効であると考えられる。これは新規な電子楽器を広めるとともに、既存の楽器とセッションできる程の演奏が可能であることをアピールすることにもつながる。このように、今後は新規な電子楽器を製作して、更にその存在を知ってもらう機会を積極的に作ることも必要である。

謝辞

今回の研究、電子楽器の製作、演奏練習実験の計画作成にあたり、ご指導をいただいた主査の西村明教授に心より感謝致します。電子楽器の改善点やデータの分析方法、使用機材やソフトウェアの提案など様々な場面でご指導いただきました。本当にありがとうございました。副査を引き受けてくださった布広永示教授と松下孝太郎教授にも心より感謝致します。本論文が目指す新規な電子楽器の在り方や従来楽器と比較した場合の優位性について、多くのご指摘をいただきました。本当にありがとうございました。外部副査を引き受けてくださった国立音楽大学音楽学部の三浦雅展准教授にも心より感謝致します。新規な電子楽器について、技術以外の音楽的な観点から、その評価及び普及に関する多くのご指摘をいただきました。本当にありがとうございました。

新規な電子楽器の演奏評価実験に協力してくださった東京情報大学の西村ゼミの皆様と木更津工業高等専門学校吹奏楽部の皆様に心より感謝致します。楽器演奏の意識調査に回答してくださった東京情報大学の皆様に心より感謝致します。3週間の演奏練習実験の一部には、エヴィクサー株式会社の援助を受けました。ここに謝意を表します。

最後に、これまで自分の研究や学業を温かく見守り、生活や金銭面で支援してくださった両親に対して感謝の意を表して謝辞と致します。

参考文献

1. 一般社団法人日本音響学会. 音響キーワードブック. 出版地不明 : コロナ社, 2016.
2. Yamaha Music Japan Co., Ltd. and Yamaha Corporation. エレクトーン. (オンライン) (引用日 : 2021 年 11 月 17 日 .) https://jp.yamaha.com/products/musical_instruments/keyboards/electone/index.html.
3. Roland Corporation. Drums & Percussion. (オンライン) (引用日: 2021 年 11 月 17 日.) https://www.roland.com/jp/categories/drums_percussion/v-drums_acoustic_design/.
4. 大学生の楽器演奏に対する意識と演奏練習支援についての調査. 小出英範, 西村明. 1, 2021 年, 日本音響学会音楽音響研究会資料, 第 40 巻, ページ: 1-6.
5. モーションキャプチャと表面筋電図を用いたピアノ学習効果の評価. 中村あゆみ、合田竜志、古屋晋一、長田典子. 2, 2014 年, 計測自動制御学会論文集, 第 50 巻, ページ: 162-169.
6. 升田俊樹、古川康一. 音楽の練習指導とコラボレーション. 14, 2012 年, 人工知能学会第二種研究会資料, 第 2012 巻, ページ: 1-4.
7. 電子楽器の技術発展の系統化調査. 北口二郎. 2019 年, 国立科学博物館技術の系統化調査報告, 第 26 巻, ページ: 1-90.
8. 新楽器へのアプローチ. 長嶋洋一. 2015 年, 情報処理学会研究報告.音楽情報科学, 第 11 巻, ページ: 1-18.
9. CD-Synth: a Rotating, Untethered, Digital Synthesizer. ParadisoChwalek, JoePatrick. 2019 年, Proceedings of the International , UFRGS, ページ: 371-374.
10. Furimpro : 楽器演奏初学者のための即興演奏用電子楽器の開発と評価. 辻岡暁郎、柳英克. 2012 年, 情報処理学会インタラクション 2012, ページ: 463-467.
11. KORG Inc. Kaossilator2S DYNAMIC PHRASE SYNTHESIZER.X. (オンライン) (引用日: 2021 年 8 月 18 日.) <https://www.korg.com/jp/products/dj/kaossilator2s/>.
12. ヤマハ株式会社. Yamaha Design “Synapses” TENORI-ON. (オンライン) (引用日: 2021 年 10 月 17 日.) https://www.yamaha.com/ja/about/design/synapses/id_005/.
13. 株式会社明和電機. オタマトーン DX / Otamatone DX. (オンライン) (引用日: 2019 年 8 月 18 日.) <https://www.maywadenki.com/products/goods/otamatone-dx-2/>.
14. 株式会社明和電機 . オタマトーンでじたる. (オンライン) (引用日: 2021 年 12 月 3 日.) <https://otamatone.jp/lineup/otamatone-digital/>.
15. 有限会社トゥロッシュ. 口の開きで演奏するパペット楽器ケロミン. (オンライン) (引用日: 2021 年 11 月 28 日.) <http://www.keromin.com/index.html>.
16. 擦る事で音を奏でる電子楽器「こすりん」のシステム開発. 山本大寛. 2012 年, 平成 23 年度公立はこだて未来大学卒業論文.
17. 新しい演奏方法の電子楽器の研究. 中島瑞紀, 酒井聡. 2018 年, 日本デザイン学会第 65 回春季研究発表大会概要集, ページ: 356-357.

18. 誰でも簡単に演奏できる電子楽器の研究. **中島瑞紀、酒井聡**. 2017 年, 日本デザイン学会第 64 回春季研究発表大会概要集, ページ: 102-103.
19. 新しいバリアフリー電子楽器 Cymis の重度障害者施設への導入の報告. **赤澤堅造、奥野竜平、益子務、蓬萊元次**. 2009 年, バイオエンジニアリング講演会講演論文集, 第 22 巻, ページ: 300.
20. 新しいバリアフリー電子楽器 Cymis の重度障害者施設での評価. **赤澤堅造、奥野竜平**. 2010 年, 電子情報通信学会総合大会講演論文集 2010 年_基礎・境界, ページ: 272.
21. ゲームインターフェースを備えた電子楽器ソフトウェアの開発. **熊谷武洋**. 2017 年, 山口大学教育学部研究論叢 第 3 部 芸術・体育・教育・心理, 第 66 巻, ページ: 73-82.
22. 音を奏でる洗濯ばさみ - Music Clothespin -. **福田祐己、広瀬淳一、郭清蓮**. 2011 年, 画像の認識・理解シンポジウム(MIRU2011)論文集, 第 2011 巻, ページ: 948-950.
23. 追加黒鍵を持つ小型鍵盤楽器モバイルクラヴィーア II の設計と実装. **竹川佳成、寺田努、塚本昌彦、西尾章治郎**. 12, 2005 年, 情報処理学会論文誌, 第 46 巻, ページ: 3163-3174.
24. 音響特徴量抽出による電子ハンドベル. **小出英範**. 2016 年, 木更津工業高等専門学校平成 27 年度特別研究論文.
25. Freqtric Drums : 他人と触れ合う電子楽器. **馬場哲晃、牛尼剛聡、富松潔**. 3, 2007 年, 情報処理学会論文誌, 第 48 巻, ページ: 1240-1250.
26. 教育・福祉現場における電子楽器インターフェースの可能性～Freqtric Drums を事例として～. **馬場哲晃**. 1, 2011 年, 情報処理学会研究報告 エンタテインメントコンピューティング (EC) , 第 22 巻, ページ: 1-3.
27. ユニバーサルデザインを考慮した靴型楽器 (オトクツ) の開発とその介護予防への応用. **菅谷輪、的場やすし、喜納ロビン政志**. 2, 2011 年, ものづくり大学紀要, ページ: 11-14.
28. Music Activity Preferences of Elementary Students. **Bowles L. Chelcy**. 46, 1998 年, Journal of Research in Music Education, 第 207 巻, ページ: 193.
29. 「現代の若者と音楽」に関する調査. **川西孝依、奥忍**. 1, 2004 年, 岡山大学教育実践総合センター紀要, 第 4 巻, ページ: 43-53.
30. ピアノ演奏に対する苦手意識の改善を目指して. **上野史織**. 2019 年, 豊岡短期大学論集, 第 16 巻, ページ: 209-216.
31. ギター初心者のための演奏練習支援システムの提案. **宇田川真唯、植村あい子、北原鉄朗**. 1, 2018 年, 情報処理学会第 80 回全国大会講演論文集, 第 2018 巻, ページ: 125-126.
32. ピアノ音階演奏を対象とした学習支援システム. **加藤久喬、江村伯夫、三浦雅展**. 5, 2014 年, 日本音響学会誌, 第 70 巻, ページ: 273-276.
33. リズム学習を考慮したピアノ演奏学習支援システムの構築. **竹川佳成、寺田努、塚本昌彦**. 2012 年, 情報処理学会インタラクション 2012, ページ: 73-80.
34. ピアノによる 1 オクターブの上下行長音階演奏に対する熟達度の自動評価. **三浦雅展、江村伯夫、秋永晴子、柳田益造**. 5, 2010 年, 日本音響学会誌, 第 66 巻, ページ: 203-212.

35. 鍵盤上への演奏補助情報投影機能を持つピアノ学習支援システムを用いた熟達過程の評価分析. 竹川佳成, 平田圭二, 田柳恵美子, 椿本弥生. 5, 2017 年, 情報処理学会論文誌, 第 58 卷, ページ: 1093-1100.
36. ヤマハ音楽振興会. 音楽ライフスタイル Web アンケート報告書 2006. (オンライン) (引用日: 2019 年 12 月 15 日.) https://www.yamaha-mf.or.jp/onken/wp-content/themes/onken/shared/pdf/report/rpt001_lifestyle2006.pdf.
37. 大学生に対する楽器演奏及び演奏練習支援に関する意識調査. 小出英範, 西村明. 2020 年, 日本音響学会 2020 年春季研究発表会講演論文集, 2-11-12, ページ: 1209-1212.
38. 成人音楽活動に関する一考察 -アマチュア・オーケストラの活動を中心に-. 鈴木渉. 2008 年, 山形大学紀要 (教育科学), ページ: 123-140.
39. ピアノ弾き歌い学習支援における ICT 利活用の効果と課題. 長嶺章子. 2017 年, 植草学園短期大学研究紀要, 第 19 卷, ページ: 11-20.
40. 電子楽器における音楽演奏をしやすい動作とその動作に調和した音の特徴. 小出英範. 2018 年, 東京情報大学修士論文.
41. 従来の楽器とは異なる演奏動作と演奏音の評価. 小出英範, 西村明. 2017 年, 日本音響学会 2017 年春季研究発表会講演論文集, 3-4-4, ページ: 745-748.
42. 従来の楽器とは異なる電子楽器の演奏動作の評価と演奏音との関連性. 小出英範, 西村明. 2018 年, 日本音響学会 2018 年春季研究発表会講演論文集, 1-12-13, ページ: 795-798.
43. 遅延のある演奏系での遅延の認知に関する実験とその考察. 西堀佑, 多田幸生, 曾根卓朗. 2003 年, 情報処理学会研究報告.[音楽情報科学], 第 53 卷, ページ: 37-42.
44. 嵯峨山茂樹. 東京大学工学部計数工学科/物理工学科 応用音響学: 音声認識 - DP matching. (オンライン) (引用日: 2021 年 10 月 14 日.) https://ocw.u-tokyo.ac.jp/lecture_files/engin_01/5/notes/ja/E1-DPmatching.pdf.
45. マーカレス運指認識と音列照合によるピアノ演奏スキル評価システムの提案. 岡明也, 有賀治樹, 杉山健太郎, 橋本学, 長田典子. 2013 年, 情報処理学会研究報告.音楽情報科学, 第 100 卷, ページ: 1-4.
46. 確率モデルによる多声楽曲 MIDI 演奏からの楽譜推定. 武田晴登, 西本卓也, 篠田浩一, 他. 2003 年, 情報処理学会研究報告, 第 50 卷, ページ: 21-26.
47. メロディリズムのタップを併用する Voice-to-MIDI 変換手法の音高 変換精度評価. 伊藤直樹, 西本一志. 2010 年, 情報処理学会インタラクション 2010 論文集, ページ: 143-150.
48. 要弥由美, 小澤伊久美. 統計は怖くない! 図を見てわかる直感的統計分析 - 論文理解のための構造方程式モデリング (SEM) 入門 -. (オンライン) 2008 年. (引用日: 2021 年 10 月 14 日.) <http://www.nkg.or.jp/pdf/jissenhokoku/2008kaname.pdf>.
49. タッチパネルタブレット端末における人差し指の接触角度を考慮したボタンのサイズ及び間隔の評価. 西村崇宏, 土井幸輝, 藤本浩志. 3, 2015 年, 日本感性工学会論文誌, 第 14

巻, ページ: 343-350.

50. 任天堂株式会社. Nintendo Switch - 任天堂. (オンライン) (引用日: 2021 年 11 月 18 日.) <https://www.nintendo.co.jp/hardware/switch/>.
51. Ha Dou Ken Music: Different mappings to play music with joysticks. **SchiavoniLopes Rocha, João Teixeira Araújo, and Flávio LuizGabriel**. 2019 年, Proceedings of the International Conference on New Interfaces for Musical Expression, ページ: 77-78.
52. The JoyStyx: A Quartet of Embedded Acoustic Instruments. **BerdahlBlessing and EdgarMatthew**. 2017 年, Proceedings of the International Conference on New Interfaces for Musical Expression, ページ: 271-274.
53. 株式会社任天堂. Wii | コントローラ. (オンライン) (引用日: 2021 年 10 月 14 日.) <https://www.nintendo.co.jp/wii/controllers/index.html>.
54. マルチタッチインタフェースを使用したメディアパフォーマンスシステム“MoPH”. 平野砂峰旅、池淵隆、片寄晴弘. 4, 2011 年, 芸術科学会論文誌, 第 11 巻, ページ: 186-194.
55. 電子楽器の演奏の正確さと上達過程の分析-従来楽器と新規な電子楽器との比較-. 小出英範, 西村明. 2022 年, 日本音響学会誌, 採録決定.
56. 文部科学省. 平成 10 年 12 月告示 小学校学習指導要領 第 2 章 第 6 節. (オンライン) (引用日: 2021 年 10 月 14 日.) https://www.mext.go.jp/a_menu/shotou/cs/1319999.htm.
57. 日本音楽知覚認知学会. 日本音楽知覚認知学会倫理規定. (オンライン) (引用日: 2021 年 10 月 14 日.) http://jsmpc.org/wp-content/uploads/2013/12/ethics_20051015.pdf.
58. 従来楽器とは異なる電子楽器の評価手法の検討—演奏に対する主観評価因子についての分析—. 小出英範、西村明. 1, 2021 年, 日本音響学会誌, 第 77 巻, ページ: 7-15.
59. Sound Control: Supporting Custom Musical Interface Design for Children with Disabilities. **Samuel Thompson Parke-WolfeScurto, and Rebecca FiebrinkHugo**. 2019 年, Proceedings of the International Conference on New Interfaces for Musical Expression, UFRGS, ページ: 192-197.
60. 発達障害音楽療法のための Kinect を用いた電子福祉楽器演奏デバイスの構築. 衣川琢磨、奥野竜平、他. 2015 年, 電子情報通信学会総合大会講演論文集 2015 年_基礎・境界.
61. EmotionTuner : 協調して演奏できるコミュニケーション型楽器デバイスの提案. 土谷幹、河瀬裕志、柳英克. 5, 2010 年, 情報処理学会研究報告, ページ: 1-8.

本論文に関する発表文献リスト

査読付き論文

1. 小出英範, 西村明, “従来楽器とは異なる電子楽器の評価手法の検討 -演奏に対する主観評価因子についての分析-,” 日本音響学会誌. 77 巻, 1 号, 7-15 (2020).
2. 小出英範, 西村明, “楽器演奏に対する意識及び電子楽器と練習支援システムの必要性の調査,” 日本音響学会誌, 77 巻, 12 号, 766-771 (2021).
3. 小出英範, 西村明, “電子楽器の演奏の正確さと上達過程の分析-従来楽器と新規な電子楽器との比較-,” 日本音響学会誌, 採録決定 (2022).

国際会議発表

1. Hidenori Koide, Akira Nishimura, “Evaluation of suitable actions for musical performance using non-conventional musical instruments,” Proceeding of the 6th Conference of the Asia-Pacific Society for the Cognitive Sciences of Music, (2017).
2. Hidenori Koide, Akira Nishimura, “Evaluation of non-conventional electronic musical instruments and relationships between their sounds and actions,” International Symposium on Performance Science 2019 (2019).

学会および研究会発表

1. 小出英範, 西村明, “従来の楽器とは異なる演奏動作や演奏音の電子楽器の評価実験,” 日本音響学会音楽音響研究会資料, 35 巻, 4 号, 67-72 (2016).
2. 小出英範, 西村明, “従来の楽器とは異なる演奏動作と演奏音の評価,” 日本音響学会 2017 年春季研究発表会講演論文集, 3-4-4, 745-748 (2017).
3. 小出英範, 西村明, “従来型の楽器とは異なる演奏動作の電子楽器の提案 -演奏動作とそれに合う演奏音の評価-,” 若手・学生のための AES ジャパンフォーラム 2017, (2017).
4. 小出英範, 西村明, “従来の楽器とは異なる電子楽器の演奏性及び演奏動作と演奏音との関連性,” 日本音響学会音楽音響研究会資料, 36 巻, 7 号, 13-18 (2018).
5. 小出英範, 西村明, “従来の楽器とは異なる電子楽器の演奏動作の評価と演奏音との関連性,” 日本音響学会 2018 年春季研究発表会, 1-12-13, 795-798 (2018).
6. 小出英範, 西村明, “従来楽器とは異なる演奏インターフェースの電子楽器 -演奏未経験者でも直感的な演奏を可能とすることを目指す-,” 若手・学生のための AES ジャパンフォーラム 2019, (2019).
7. 小出英範, 西村明, “大学生に対する楽器演奏及び演奏練習支援に関する意識調査,” 日本音響学会 2020 年春季研究発表会, 2-11-12, 1209-1212 (2020).
8. 小出英範, 西村明, “大学生の楽器演奏に対する意識と演奏練習支援についての調査,” 日本音響学会音楽音響研究会資料, 40 巻, 1 号, 1-6 (2021).