マイコンを用いた電子楽器開発記②
～ヨーヨー型電子楽器「轟」の開発～

ものつくり大学　三井　実

1. はじめに

前稿[1]では，図1に示すような電子楽器の本質を明示し，“電子楽器とは何であろう？”という問に対しての本質的な答えは“人間の何らかの動作を電子回路により音へ変換する器具”であると述べた。つまり，センサによって何らかの人間の動作を信号に変換し，マイコンに入力，マイコンではそれを音の情報に変換して出力すれば良いわけである。

また，以下に列記する理由から，“誰でも新楽器創成時代”が到来したと述べた。

理由1：インターネットショップのおかげでマイコンや各種センサが非常に安価に，かつ，簡単に入手できるようになったこと。

理由2：マイコンやセンサの使い方を学習するとき，それについて書かれた書籍や，インターネット上の記事などに簡単に触れられること。

理由3：3Dプリンタや，NCルータ，レーザーカッターなどのいわゆるデスクトップファブリケーションが購入しやすくなったり，市民工房に設置されたりと加工環境やインフラが整いつつあること。それに伴い筐体設計や製作に関わるCAD・CAM・CAEなどの技術に関しても，情報に触れられる機会が増え，アプリケーション自体も簡単化されつつあることから，随分と一般的になってきた。

そこで本稿では前稿に引き続き，小生研究室にて開発してきた新しい電子楽器について紹介する。第2回目として，2012年に開発された，ヨーヨー型電子楽器「轟」[2][3]について述べることにする。

図1：電子楽器のシステム図

2. ヨーヨー型電子楽器開発の背景

2.1　ヨーヨーとは

ご存知の方も多いと思うが，念のためヨーヨーを辞書で引いてみると，「玩具の一種。二個の饅頭（まんじゅう）形の木片をつないだ軸にひもを巻きつけ，ひもの先端を持って吊り下げ，回転の反動により上下させて遊ぶもの。（三省堂「大辞林 第二版」より）」とある。ヨーヨーの基本的な情報は「総合ヨーヨー情報サイトGIOY」[4] が非常に詳しいウェブサイトのため，以下ヨーヨーの歴史を抜粋する。ヨーヨーの起源は紀元前1000年頃の中国や，紀元前500年頃のギリシャなどというのが主流な説のようである。また，時は流れて，1928年には現在でも続くヨーヨーメーカであるダンカン社が設立され，現在のヨーヨーのひな形が完成する。さらに1950-60年代，アメリカでダンカンヨーヨーがブームになったようである[4]。

さらに時は流れて，筆者の小学生時代（1980年代後半）には某飲料メーカのおまけとしてヨーヨーが大流行した（同年代の方々は目を細めて昔を思い出すことであろう）。赤いジャケットを着たお兄さん

が町の駄菓子屋にやってきて，ヨーヨーのパフォーマンスを行っていた。その当時，ヨーヨーを振り下ろした際に最下点で長時間空転（以下スリープという）させ，その間に“犬の散歩”，“ブランコ”，“東京タワー”などと呼ばれる“技”が繰り出されていた。

さらにさらに時は進み，1997年に，株式会社バンダイが海外メーカのヨーヨーを集めて「ハイパーヨーヨー」ブランドで大きく事業展開した。ハイパーヨーヨー第一世代と呼ばれるようで，ヨーヨーが再び大流行した。それまでの“技”は“トリック”とお洒落な名前に変わり，スリーピングトリック（投げた後ヨーヨーが空転し，その間に振り子運動を応用させる技）や，ルーピングトリック（ヨーヨーをキャッチせずに周期的な運動をさせる技）など，かつての“技”に比して別次元の技術に進化した。トリックの一例（ダブルハンドストリングトリック）を図2に示す。この進化は，ヨーヨーの扱いやすい形状・重量・バランスが研究されたり，高品質なベアリングが回転軸に配されたりと，ヨーヨー自体の性能が大幅に向上したことに起因する。それに伴い，従来の性能では出来ない動きができるようになり，ヨーヨーを扱う技術も向上した。

2.2　ヨーヨーの競技

近年のヨーヨーはハイパーヨーヨーブームが去った後もヨーヨーを続けていたプレイヤー達によって発展を続けてきた。これにはインターネットの普及が大きく関係している。全国津々浦々に点在するプレイヤーはインターネットを利用してヨーヨーの購入・共同練習・大会を行っていた。また動画投稿サイトの隆盛により，プレイヤーはインターネットを利用してヨーヨーの情報収集を行ったり，情報を発信したり行われているようである[2][3]。

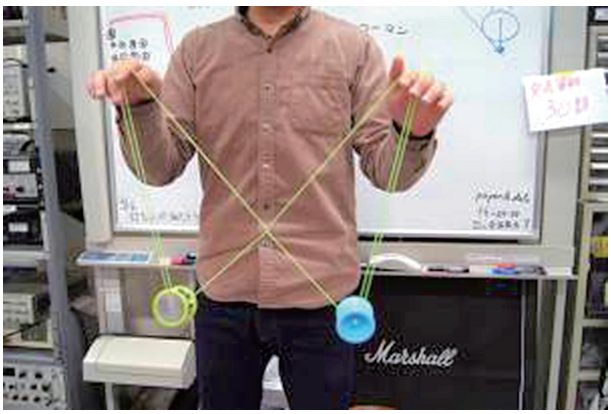


図2：トリックの一例：ダブルハンドストリングトリック

現在でも国内外でヨーヨーの技術を競い合う競技大会が開催されている。世界大会ヨーヨーの競技には6つの種目がある。1A，2A，3A，4A，5A，APと呼ばれる。表1に各種目の特徴を示す。表1から，競技では音楽を再生し，それに合わせて演技を行うのが一般的である。特に音楽とヨーヨーの技が高いレベルで調和されている演技は観客を圧巻する。競技の勝敗はジャッジの採点（技術点＋芸術点）で決まる。技術点は，加点・減点方式，芸術点は加点方式である。芸術点は以下に列記する10個の項目をそれぞれ0～3点の4段階で採点する。

・テーマ
・ルーティン（構成）
・アウトフィット（衣装）
・ボディコントロール（体の動き）
・オーディエンスインタラクション（観客とのやり取り）
・コーリアグラフィ（音楽に対する振付）
・ステージの使用と動き
・クリーンネス
・バリエーション
・リスク

テーマ，ルーティン，コーリアグラフィの要素は，BGMに用いる音楽と関連が深い。逆にその他の要素はヨーヨーをいかに操るか，どのようなパフォーマンスを行うかに重きがおかれ，ヨーヨーを上手く取り扱えることが前提の評価要素である。つまり，熟練者が高評価を狙うためには，難度の高いトリックに挑戦すること，新規性の高いトリックを成功させること，そして“音楽と調和したストーリー性の高いパフォーマンスを行うこと”の三要素を満足する必要がある。先の二要素はヨーヨーを練習すれば達成できる。当然三要素目もヨーヨーの練習という手段で達成できるが，音楽との調和に着目すれば，機械的・電気的に達成する手段があっても良いはず

である。つまり音楽とヨーヨーパフォーマンスの調和を更に高いレベルで実現するにはヨーヨー自体が発する運動（運動・振動等）エネルギーの情報を音に変換し，ヨーヨー演技と楽器演奏を同時に行うことが望ましいと考えた。

そこで本開発では，ヨーヨーにセンサを搭載し，ヨーヨーの回転や運動を，音や音楽の情報に変換するシステムを実装することになった[2][3]。

2.3　ヨーヨー型電子楽器に求められるもの

ヨーヨー本体に電子回路を搭載し，メロディーを鳴らしたり，LEDを点灯させたりする機能付きヨーヨーは既に市販されている。しかしながら，いずれもその電子回路や，回転体のチープさなどから，ヨーヨー自体の性能を大きく損ねていた。すわなち，高度な技に耐えられる性能を持つ機能付きヨーヨーは存在しなかった。さらに，機能付きヨーヨーの，電子回路によって発せられる音や光はシンプルで，高度なヨーヨーパフォーマンスで利用できそうなものも存在しなかった。

そこで本開発では，より高いレベルのヨーヨーパフォーマンスツールの開発を目的とした。ヨーヨーとして高度なトリックに耐えられる性能を維持し，動きによって音色を変化させ，音楽を奏でられるヨーヨー型電子楽器を開発する。本開発のターゲットはヨーヨーパフォーマーである。一般的に手づくりの楽器は，ユニバーサルデザインや誰でも演奏しやすいコンセプトのものが多いが，本装置を扱うためにはある程度のヨーヨースキルが必要である。さらにヨーヨープレイヤーに受け入れられるものでなければならない。そのためヨーヨープレイヤーが好むデザイン・機能を意識し，スマートでストリート色が強いものを目指した。2名の学生がそれぞれ，電子制御部の開発，回転体およびシステム筐体の開発と，テーマを分担し実装が始まった。そして我々が開発を目指すヨーヨー型電子楽器を「轟」と名付けた。回転体を“車輪”のイメージに見立てて“車”の字をもらい，さらに回転するときの音を“轟音”と比喩したネーミングだそうである（学生談）。

表1　競技種目別特徴

種目	ヨーヨー		人数	特徴
	種類	個数		
1A	スリープ	1	1	1 個のスリーピングタイプヨーヨーでストリングトリックを行う。音楽を流し，それに合わせて演技する。
2A	ループ	2	1	ルーピングタイプヨーヨーでループトリックを行う。スピード感があり，体を大きく動かす迫力のある演技が行われる。ノリのいい音楽に合わせて演技する傾向が強い。
3A	スリープ	2	1	2 個のスリーピングタイプヨーヨーでストリングトリックを行う。1A より難易度が高い。音楽に合わせて演技する。
4A	オフストリング	1以上	1	糸とヨーヨーが分離する。分離したヨーヨーを糸で操る。ヨーヨーの移動範囲が上方に無制限となるため非常に大きな動きのある演技になる。音楽に合わせて演技する。
5A	スリープ	1以上	1	糸の指側にダイスと呼ばれる部品を取り付ける。糸と指は固定されておらず，ダイスによる反力も加わりヨーヨーに独特の軌道が発生する。音楽に合わせて演技する。
AP	自由	自由	自由	芸術性を競う。ヨーヨーの技以外の面も重要になる。寸劇やダンス，なんでもありの種目。

3. ヨーヨー型電子楽器「轟」の開発

3.1　発案から試作までの裏話

そもそもこの電子楽器を発案したのは，筆者の研究室恒例の“コーヒーブレーク”のひと時であった。新しいアイディアの多くはくだらない会話をしているときに生まれ，それを実現するためのフットワークの軽さが発明を生むケースがある。開発者の一人である星野君は，高校時代よりヨーヨーパフォーマーとして競技大会に出場する腕前であった。本当は全く別の卒業研究テーマを与えていたのだが，たまたまコーヒーブレーク中にヨーヨーパフォーマンスという人並外れた特技があることを知り，そのパフォーマンスを目の当たりにして，この能力をそのままにしておくのは勿体ないと思ったことから「ヨーヨーを電子楽器にしてみないか？」と誘った。その場でディスカッションが始まり，ヨーヨーの回転や動きを検知するセンサを積むにあたり，まず問題になったのが，情報をどうやって伝送するか？ということであった。ヨーヨーは回転するので，センサの情報を音の情報に変換するためには，「ヨーヨー自体が音を発する」か，「ヨーヨー内で検知した情報を無線通信する」のどちらかの手段しかない。

もしヨーヨー自体が音を発する仕様を考えた場合，センサ，マイコン，バッテリ，アンプ回路，スピーカなどを内包するものを作ればよい。つまり内部ですべてのシステムが完結している状態である。しかしながら，回転をぶれさせずにヨーヨー内に市販パーツを複数配置するのは至難の業である。さらにヨーヨー自体が重くなり，ヨーヨーパフォーマンスにも影響が出てしまう。

そこで，ヨーヨー内に配置するのは，センサ，バッテリ，センサ情報を無線通信するユニットにとどめることにした。さらに問題点となったのが，無線通信用のICは，高い加速度を持つ回転体内で，「正確に動作するのか？」ということであった。ZigBee規格で無線通信できるXBee シリーズ2を，ボール盤の先端に偏心するように装着，最高速の3000rpmで回転させ動作を確認した。

この段階まで発案してから約2日。「あれを試してみよう，これならどうだ？」を繰り返した。程なくして，もう一人の開発者飯嶋君も興味深いテーマなので一緒にやりたいとのことで合流。そこからさらに2か月間で様々なディスカッションを行い，試作機第1号が瞬く間に完成しと，非常に楽しい時間であったのを覚えている。前稿[1]で述べた“無弦チェロ”にしてもそうであったが，趣味と実益を兼ねたテーマを与えられた学生は動きが速いのである。

3.2　制御部システムの構築

3.2.1　制御部システムの概要

図3にヨーヨー型電子楽器「轟」のシステム構成を，図4には電子楽器の全景を示す。

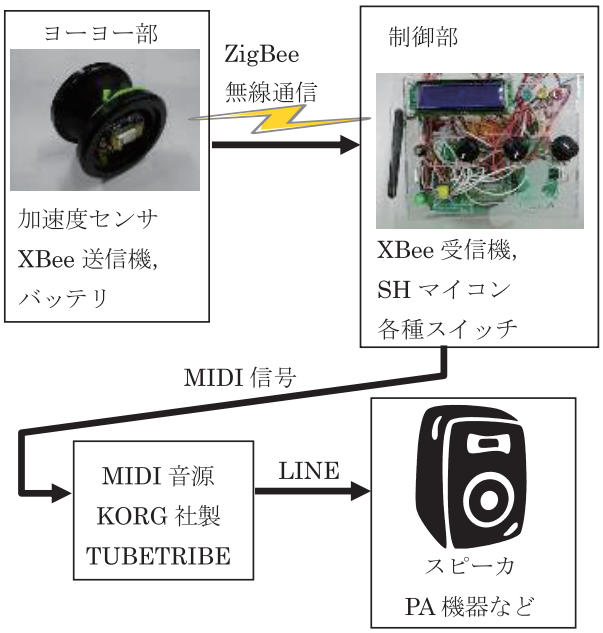


図3：ヨーヨー型電子楽器のシステム構成

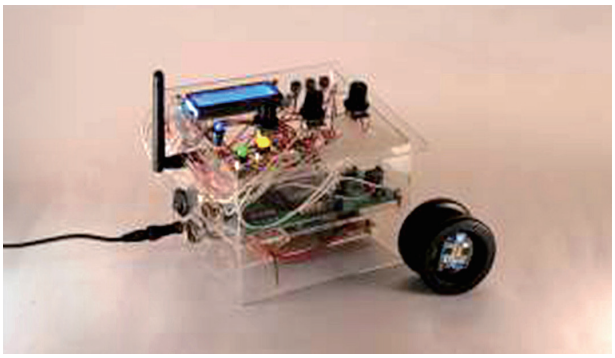


図4：ヨーヨー型電子楽器の全景

ヨーヨーには電子回路基板が搭載されている。基板にはヨーヨーの回転情報を検知するセンサ，ZigBee無線通信するためのXBeeが搭載されている。ヨーヨーから送られた情報を制御ユニットで受信し，その情報からマイコンでMIDI信号を生成する。そしてMIDI音源とアンプ・スピーカをライン接続し出音する。以降の項で詳細を説明する。

3.2.2　ヨーヨー部

ヨーヨーの回転や動きの情報を加速度センサで検知する。加速度センサの選定条件として，ヨーヨー内に実装できる大きさであること，ダイナミックレンジを適切に合わせられることが挙げられる。これらを考慮し，アナログデバイセズ社の加速度センサADXL001（250g /500g）・ADXL325・ADXL326を用いて試作を行った。ADXL001は1軸の加速度センサであり，測定範囲は±250gと±500gの2種類がある。ADXL325は3軸加速度センサであり±5gである。ADXL326は3軸加速度センサであり±16gである。いずれのセンサも5mm角とサイズも小さい。ヨーヨーに搭載した基板に実装する加速度センサの種類・位置が適切になるよう，複数の試作機を製作し改良を重ねた。図6に示した最終版電子基板は加速度センサADXL001（250g）を一つ使用したものである。この基板に実装した加速度センサはADXL001の250gタイプのもので，遠心軸方向にかかる加速度を検出している。この基板では中心から約11mmの位置に加速度センサを置いてヨーヨーを回転させたところ約200gの加速度が出ていることが確認できた。

ヨーヨーは回転体であり，ヨーヨーからの信号を有線で受け取るのは困難であるためこのシステムでは，無線通信を行うこととした。部品はXBee（シリーズ2）通信モジュールを用いる。このモジュールはZigBeeという無線規格で通信を行え，国内でも無許可で使用でき，設定等も他のモジュールと比べて比較的容易に行える点が特徴である。このモジュールはアナログ･デジタル入力共に対応しているため，開発がしやすいことから無線通信のモジュールとして選定した。

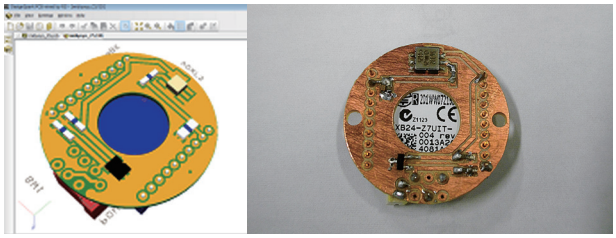


図6：ヨーヨーに搭載の電子回路基板

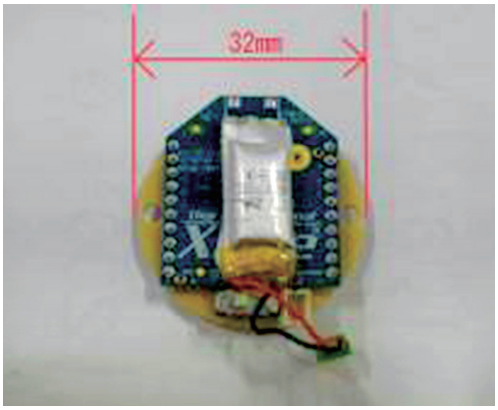


図7：無線通信ICとバッテリを搭載した基板

ヨーヨー部回路の駆動に使用したバッテリはFULLRIVER社のリチウムイオンポリマーバッテリー（二次電池）である。このバッテリは，室内用ラジコン飛行機に使用されているものであるため，軽量小型で充分な電流を流すことができる。使用したバッテリは3.7V・30mAhのものである。バッテリの選定条件として，小型・軽量であること，回路の駆動に適切な電圧であること，充分な電流を流せること，ある程度の時間（パフォーマンスの時間）は動作し続ける容量があることなどが挙げられる。XBeeが3.3V駆動であることや，本回路では約50mA必要であることを考慮した結果，このバッテリを選定した。

無線通信ICとバッテリを回路基板に搭載したイメージを図7に示す。

回路基板は切削機KitMill CIP100を使って製作を行った。KitMill CIP100はオリジナルマインド社製の基板切削用の3軸NCドリルである。回路基板専用の加工機のため，特別な設定をしなくてもプリント基板を製作することができる。また，CADソフトはDesign Spark PCBを使用した。これはRSコンポーネンツの基板用CADソフトである。フリーで

利用でき，充分な機能を備えている。

3.2.3　制御部

制御部の役割は主にXBeeからのセンサ出力の情報を受信したものを監視し，ある閾値を超えたらMIDI出力を行うこと，つまり加速度信号をMIDI信号に変換することである。この制御部にはコントローラタイプのSH-2マイコンの評価ボードであるSH7144を用いた。開発当時，SHマイコンは他のマイコンと比べ動作速度が速いのが特徴であった。本装置ではXBeeで常に無線通信を行い，そこからMIDI出力までのタイムラグをできるかぎり小さくしたいと考え，動作速度の速いSHマイコンを選定した。

制御部にはLCD・スイッチ・ボリューム，受信側のXBeeの基板・各スイッチ用の電源基板などが搭載されている。スイッチやボリュームは，この楽器のモード切替に使う。また，SHマイコンの外装として，レーザーカッターでカットしたアクリル材を組み合わせ，ケースを製作した。製作された制御部を図8に示す。

制御部を動作させるためのプログラムも製作した。当初このシステムには，ヨーヨーの回転を検知するとその速さにより音の周波数を変化させたり，制御部に配されたスイッチにより音色を変化させたりといった，楽器に近い機能を持たせていた。しかしながら，ヨーヨーを回転させパフォーマンスしながら，楽器を鳴らしているうちに，開発者である星野君は違和感を覚えたようである。本開発の目的は，ある程度ヨーヨーの経験のある競技者がさらに高い表現力を得るためのシステム構築にあったはずだったが数多の試作を経て，たくさんのヨーヨーを回転させ楽器の音を出音しても，ピンとくるものが皆無であったようだ。

そこで，楽器のコンセプトを見直した。あらかじめ，楽曲のMIDIデータをプログラム上に組み込み，ヨーヨーの回転の有無・速さを楽曲のテンポの速さに変換する。ヨーヨーの回転が速ければ楽曲も早く進み，ヨーヨーの回転が遅ければ楽曲も遅く進む。回転していなければ出音されない。これによりあらかじめ用意された楽曲が，ヨーヨーパフォーマンスのテンポに合わせて出音される。これまでのヨーヨーパフォーマンスは，BGMに合わせて演技を行っていたが，この楽器を使えばヨーヨーパフォーマンスに合わせてBGMがついてきてくれるわけである。つまり本開発は，新しいヨーヨーパフォーマンスのためのツールを創り出したことになるわけである。

3.2.4　試作機の経過

これまでに最終的に製作したヨーヨー型電子楽器について説明してきたが，完成までに複数の試作機を製作したため，ここでは試作機の経過についても説明する。それぞれの試作機は適宜改良を行ったものであるため，順を追って表2にまとめる。ヨーヨーの筐体に関して，3Dプリンタで製作したり，市販品を利用したり，様々な検討があって，最終的にはポリアセタールを切削加工する方式に至った。最終版のヨーヨー本体を図9に示す。センサについても

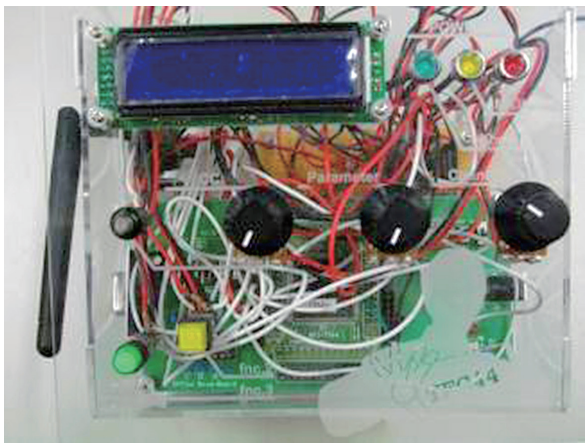


図8：制御部の全景

図9：試作最終版のヨーヨー部全景

最終版の加速度センサを採用するまで，様々なセンサを試してきた。開発の苦労がわかる表であると自負している。

4. まとめ

本開発ではより高いレベルのヨーヨーパフォーマンスツールの構築を目的とし，ヨーヨーとして高度なトリックに耐えられる性能を維持し，動きによって音楽を奏でられるヨーヨーを目指した。その結果，ヨーヨーの回転を加速度センサで検知，無線通信でその検知情報を受信機に送り，マイコンによりMIDI信号に変換して音楽を奏でられるヨーヨー型電子楽器「轟」が完成した。

開発は当初からプロダクト化を目論み進めていたため，精力的に広報活動や対外的発表を行った。展示会への出展，コンテストへの出場，大学のPR活動の一環である各種イベントでの展示など機会があれば参加した。

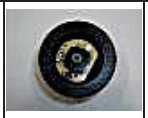
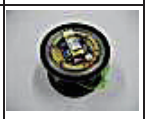
対外活動のねらいとして，ひとつは情報交換の機会をつくり，楽器やその製作活動を世間に発表し認知度を向上し情報提供や意見交換，協力者を仰ぎ研究に役立てるためである。特に楽器フェアへの出展は非常に有意義であった。工業系の展示会ではセンサやマイコン，素材の加工などに関する技術的な質問や意見が多かった。一方，楽器フェアでは演奏家や音楽愛好家など芸術活動やパフォーマ側のアドバイスや意見や，市販化に関しての問い合わせが多く，学生はもちろん，筆者にとっても刺激的なイベントであった。何かしらの“ものづくり”をテーマにした研究活動は，プロダクト化を見据えて，製品や市販品レベルのものが並ぶ展示会に出展するのが理想的であることを勉強した。

また，広報活動のため，WEBページを製作した。http://www.iot.ac.jp/manu/mitsui/tec44/

現在更新は止まっているが，WEBページでは製作の記録・動画の紹介等を行っている。またTwitterのアカウント(@TEC44_PR)も取得したため，つぶやきも表示されるようになっている。なるべく多くの人に見てもらうため，PR活動する際には，ウェブページのURL等を紹介するようにした。Twitterは一時期100以上のフォロワーが存在し，特にプロや協議会上位者のヨーヨーパフォーマーからのフォローが多いのが特筆できる点である。

さらに，演奏のイメージとして，動画サイトに投

表2：試作機開発の経過

	外観	試み	問題点	評価
1		最初に作った物ブレッドボードが乗るようになっている。３D プリンタで製作。	ブレる。 重い。 素材への不満が浮上。	最初に作った物としては良い。使用頻度も高い。
2		新たな素材としてサンモジュールで製作。	強度・精度不足	性能が低く，使い物にならない。
3		３D プリンタで製作。重量を調節した。	ブレる。 基板が固定できない。	性能が低く，使い物にならない。
4		市販品のヨーヨーファクトリー社ジェネシスに取り付けた。	ブレる。 重い。	ベースヨーヨーが良いので，それなりに使用できる。
5		ポリアセタール(白)で製作。	本体の重量配分が悪く回らない。	使用できない。
6		ポリアセタール(黒)で製作。これが最終版	形状が極点である。	回転精度が飛躍的に向上した。十分使用できる。
7		衝撃検出。中心にアナログスティックを搭載。形状の見直し。	うまく動作せず，衝撃が検出できない。	ヨーヨーとしての完成度は向上した。
8		衝撃検出。大径ベアリングの内径で基板外形を保持し，基板の回転を防ぐ。	基板も回転してしまい，衝撃の検出ができない。	新しいヨーヨーとしては面白い。

稿した動画を紹介する。動画配信サイトYoutubeにて「ヨーヨー型電子楽器」と検索か，下記のURLにアクセス。

https://www.youtube.com/watch?v=vmUrxnxbLlM&t=20s

最後に，本開発が出展・紹介されたイベントを以下に列記する。

【2012年度】

・秋葉原電子工作コンテスト（現：GUGEN）出場
　⇒審査員特別賞オリジナルマインド賞受賞
・全国手づくり楽器アイデアコンテスト2012出場，
　⇒会長賞（最優秀賞）受賞

会長賞を受賞したことにより，下記のメディアでの取材があった。

○新聞
　読売新聞（2月2日夕刊）
　埼玉新聞（2月4日）
　神奈川新聞
○テレビ
　テレビ神奈川（2月24日）
○ラジオ
　TOKYO FMクロノス（2月1日）
　かわさきエフエム（1月24日）

【2013年度】

・三井 実，松本 宏行，星野 貴也，飯嶋 瑞生，特許出願“ヨーヨー型電子楽器”，特願2013-153489
・MakerFaireTokyo2013出展，11月3-4日
・コラボさいたま2013出展，11月8-10日

【2014年度】

・ヤマハ株式会社の浜松工場にて技術交流会
・楽器フェア2014　出展，11月21-23日

5. 今後の課題

ヨーヨー型電子楽器の最終的な形態として，スマートフォンで扱えるようにするのが最適であると考える。現状では，ヨーヨーだけでなく，受信機・制御装置・MIDI音源が必要である。これら役割をスマートフォンに担わせるのである。この楽器をより手軽にするために，スマートフォンとヨーヨーのみでパフォーマンスできるようになることが望ましい。将来的にはスマートフォンの専用アプリケーションを開発し，ユーザーインターフェースの完成度を高めることにより，よりスマートで扱いやすいツールになる。

最後に，一番の問題点は，前稿の“無限チェロ”もそうであるが，“チェロが弾ける”とか，今回のように“ヨーヨーが上手い”とか，専門の技術を持った学生が卒業すると同時に開発が止まってしまうことである。しかしながら，コーヒーブレークから発したアイディアを具現化して最終的には製品が並ぶ楽器フェアにまで出展できたことは，学生にとっても筆者にとっても貴重な経験になったことを強調したい。

＜参考文献＞

[1] 三井実，“マイコンを用いた電子楽器開発記①～「無弦チェロ」の開発～”，技能と技術20171号，2017年3月
[2] 星野貴也，“ヨーヨー型電子楽器の研究開発－制御用ハードウェア・ソフトウェアの開発－”，ものつくり大学卒業論文，2013年3月
[3] 飯嶋瑞生，“ヨーヨー型電子楽器の研究・開発”，ものつくり大学卒業論文，2013年3月
[4] 総合ヨーヨー情報サイトGIOY
http://www.yo-yo.jp/

＜謝辞＞

本投稿にあたり，研究内容の公開や，写真・図等の使用を快諾してくれた小生研究室OBの星野貴也君，ものつくり大学製造学科 松本研究室OBの飯嶋瑞生君に深く感謝します。