

修士論文 2011年度(平成23年度)

コンピュータ音楽の要素を模倣する、  
物理的な演奏装置の制作

Creating Instruments Using Physical Sound  
Imitating Elements of Computer Music

慶應義塾大学大学院 政策・メディア研究科  
土居 真也

## 修士論文 2011年度(平成23年度)

### コンピュータ音楽の要素を模倣する、物理的な演奏装置の制作

#### 論文要旨

本研究は、コンピュータにより生成される電子音を用いた「コンピュータミュージック」を補完するものとして、物理的な現象を音源に用いて、「生の音」でその音響を模倣的に作り出すものである。ここで用いられる物理的な現象は録音ではなく、実空間においてコンピュータによりアクチュエータを駆動させることで、物理的な音源から音響を発生させ、その場で構築される音である。ここで構築される音は「コンピュータミュージックの音響要素」を持つものである。本研究では、コンピュータミュージックによって発展してきた領域を分析し、以下のようにその要素を定義した。

- ・定常的に生み出されるもの
- ・連続的で、さまざまな変化を伴うもの

これらの要素は、人間による演奏では困難なものであり、音楽として活用された事例はあまりなかったが、コンピュータの導入により表現として確立されたものである。物理的に音響を生み出す装置は、音響彫刻や音を出すキネティックアートなどが存在している。また昨今では、物理現象を用いてビジュアライズを行なう作品も多く作られている。これらを元に、上記のようなコンピュータミュージックの音響要素を持つ物理的な音源をコントロールし、実空間で音を奏でるサウンドアートを作成する。そして、実空間に存在しているからこそ起こりうる、電子音にはない可能性や、新しい音響パターン、人と音との関わり方を提案する。

#### キーワード：

コンピュータミュージック、サウンドアート、キネティックアート、音響彫刻、フィジカルコンピューティング

慶應義塾大学大学院 政策・メディア研究科  
土居真也

Abstract of Master's Thesis Academic Year 2011

## Creating Instruments Using Physical Sound Imitating Elements of Computer Music

### Summary

The purpose of this research is representing sound using “Real Sound” from physical phenomenon in imitation of computer music. This will complement “Computer Music” using electronic sound formed by computer. In this research, physical phenomenon is not recorded, but generated by moving actuator driven by computer in real space. This sound has “Elements of Computer Music”. Elements of computer music is defined by analysis of computer music domain. The definition is as follows.

- Generated sustainedly
- Sequential and various alternation

These elements are difficult to play for human, so used in music little. But by introducing computer, they could be expression. Devices that generate sound physically exist as sound sculpture and sounding kinetic art. Nowadays there are many works using visualization of physical phenomenon. These works as bases, in this research some sound art that sound in real space are created. Their sound is physical sound that has elements of computer music. And some elements are proposed. That is possibility of existence in real space, new musical pattern and new relation between human and sound.

### Keywords:

Computer Music, Sound Art, Kinetic Art, Sound Sculpture, Physical Computing

Graduate School of Media and Governance  
Keio University  
Masaya Doi

## 目次

---

1. はじめに	1
1.1 コンピュータミュージックの現状	2
1.1.1 西洋音楽の発展と現代音楽の誕生	2
1.1.2 現代音楽とコンピュータミュージックの関連性	4
1.1.3 コンピュータミュージックにおける音響の生成プロセス	7
1.1.4 コンピュータミュージックにおける表現のメリットとデメリット	7
1.2 問題意識	8
1.3 問題解決の手法	11

---

2. 研究の背景	13
2.1 コンピュータにより発展した音楽	14
2.1.1 クリック、グリッチ	14
2.1.2 立体音響	14
2.1.2 ノイズ・ミュージック	14
2.1.3 ドローン・ミュージック	15
2.2 音響彫刻	15
2.3 キネティックアート	17
2.4 物理現象を利用したビジュアライズ	21

---

3. 研究の概要	23
3.1 本研究の手法	24
3.2 既存の手法との比較	25
3.3 本研究特有のアプローチ	27

---

4. 制作物について	28
4.1 AsWi	29
4.1.1 AsWiの構造	29
4.1.2 AsWiの課題	29
4.2 AsMetal	31
4.2.1 AsMetalの構造	31
4.2.2 AsMetalの課題	31
4.3 MassProduction	33
4.3.1 MassProductionの構造	33
4.3.2 MassProductionの課題	33
4.4 Takuboku	35
4.4.1 Takubokuの構造	35
4.4.2 Takubokuの課題	35
4.5 Ryo-On	37
4.5.1 Ryo-Onの名称について	37
4.5.2 Ryo-Onの先行事例	37
4.5.3 Ryo-Onの基礎	37

4.5.4	ダクト状のものを動かす手段	41
4.5.5	Ryo-Onの構造	45
4.5.6	Ryo-Onに対するフィードバック	51
<hr/>		
5.	おわりに	53
5.1	研究により得られた音響	54
5.2	展示空間について	54
5.3	まとめ	55
<hr/>		
6.	謝辞	56
<hr/>		
7.	参考文献等	57
7.1	文献、論文	57
7.2	Webサイト	58
7.3	作品	58

## 図目次

---

1. ベートーヴェンの交響曲第5番第1楽章の譜例	3
2. マーラーの交響曲第5番第4楽章の譜例(厳密な指示の例)	3
3. 西洋音楽における情報空間と実空間の関連性	3
4. テルミン	5
5. オンド・マルトノ	5
6. 初期のシンセサイザ	5
7. ソフトウェアシーケンサの例 (Logic Studio)	5
8. コンピュータミュージックにおける情報空間と実空間の関連性	6
9. スナリ	10
10. エオリアンハーブ	10
11. 本研究の主眼となる音楽の構成要素の部分	12
12. Sonambient	16
13. Singing Ringing Tree	16
14. Musical Kettle	18
15. The Animatic	18
16. Particle	18
17. LEMURの作品群	19
18. 森の木琴	19
19. 音手	20
20. WAHHA GO GO	20
21. bit.fall	22
22. texmoca	22
23. Shaboned Display	22
24. 既存のコンピュータミュージックの生成過程	26
25. 本研究の音響の生成過程	26
26. 既存の作品制作と本研究のアプローチの差異	27
27. AsWi	30
28. AsWiの内部構造	30
29. AsMetal	32
30. MassProductionの初期構想	34
31. MassProduction	34
32. MassProduction	34
33. Takuboku	36
34. Takubokuの動作する様子	36
35. アナラポス	38
36. スプリングドラム	38
37. バネの振動のみを拾った場合の波形	40

38. アルミダクトを通した場合の波形	40
39. アルミダクトを利用したRyo-Onのプロトタイプ	40
40. 蛇型ロボットACM-R5	42
41. ミミズロボット	42
42. 蠕動運動ポンプ	42
43. ステッピングモータとラダーチェーンを取り付けたもの	44
44. 各モータ同士の比較	44
45. クランク機構の様子(モデル1)	46
46. Ryo-Onの初期スケッチ	47
47. Ryo-Onモデル1(ORF2011にて)	47
48. Processingの画面(モデル1)	47
49. Ryo-Onモデル2(IC2011にて)	49
50. Processingの画面(モデル2)	49
51. クランク機構の様子(モデル2)	50
52. ラダーチェーンとスプロケット機構の様子(モデル2)	50
53. IC2011でのモデル2展示の様子	52
54. 動作するRyo-On(モデル2)	52

## 1. はじめに

---

本章では、研究を始めた経緯と問題意識、及び一般的な音楽についての解説を行なう。

## 1.1 コンピュータミュージックの現状

本研究では、伝統的な西洋音楽、そしてそれに連なるコンピュータ音楽の歴史を踏まえた上で、新しい音楽の形態を標榜し、可能性を模索する。そのために、西洋音楽の持つ要素を再確認し、コンピュータミュージックが導入された経緯についてを調査し、その現状を説明する。

### 1.1.1 西洋音楽の発展と現代音楽の誕生

現代社会において、音楽と認識されているものは西洋音楽から派生したものである。西洋音楽とはすなわち、ヨーロッパの伝統文化の上に成り立つ音楽である。西洋音楽はギリシャやローマで生まれたものである。伝統的な音楽は神秘的な儀式と不可分なものであるが、ヨーロッパの音楽もそれに当てはまる。ヨーロッパでは合理性が追求され、ピタゴラス音律のような厳密な音楽規則が導入された。これは岡本暁生が西洋音楽を「楽譜として設計された音楽」と定義しているところや、リベラル・アーツにおいて、音楽が数学と同義に扱われたことから考えられる。

その規則的な音楽の構成手法は、バロック音楽や古典派の時代に頂点を迎える。すなわち厳密な規則に基づいた音楽の生成である。古典派の代表的な作曲家であるベートーヴェンの交響曲第5番の第1楽章(図1)は八分休符とその後に連続する3つの八分音符と小節線を挟んだ1つの四分音符を中心の構造とする、構築的な音楽である。この楽曲は規則から生成された音楽の表現の1つといえる。その後、音楽は「人の感情を表現する芸術」となり、構造を維持しつつも、より感覚的な音楽が表現されるようになった。これが古典派の時代である。やがてロマン派の時代になり、感情表現としての音楽が最盛期を迎えると、音楽的な構造は徐々に無視され始める。しかし、その中でも作曲者による構築感が見え隠れする。マーラーの作品群は、そのロマンチックで感情的な表現とともに、厳密な指示(図2)で知られる。感情的な土台を持ちつつも、作曲者の意図と構築性は損なわれることはなく、表現されたものは作曲者の生み出した構築美であった。

人間の感情の表現となった音楽に、そこに新たな秩序を持ちこむ流れが、20世紀前半から生まれた。シェーンベルクらによる十二音技法や、それを発展させたセリー、そしてトータルセリエリズムなどの時代に再び厳密に規定されるようになった。これが「現代音楽」と呼ばれる音楽の始まりである。

厳密な音楽の構築が進むにつれて、それとは逆に、人の解釈を取り込む音楽を作る流れも誕生した。これはケージらによって創出された偶然性の音楽である。この中には図形楽譜のような厳密な音を規定しない作曲法が挙げられる。マリー・シェーフアーの、自然の音に耳を傾けるようなサウンドスケープのようなものも生まれた。これは演奏者ではなく、聴衆に対しての譜面ということもできる。このような作品はオノ・ヨーコにも見られる。

また、今まで美術館で展示されていたものに、音響作品が取り入れられるようになった。これらはサウンドアートと呼ばれる。音楽はさまざまな要素を飲み込みながら、拡大しありとあらゆる音響を含むようになった。これは管理された厳密な音響とは相対する考え方であるが、現代音楽を規定する上で重要な要素である。これ以降、管理された音響や偶然性を用いる音響、さまざまな要素が試行され、西洋音楽は進歩していった。

ここで作曲家によって作られる譜面は、あくまでも「指示」とどまっている。どのように演奏するのかという情報が、譜面で与えられる。これは一種の情報ということができる。その情報は実空間において再現される。この情報は演奏者に渡され、演奏者の

Allegro con brio. *sf* - *tos.*

Flauti.

Oboi.

Clarinetti in B.

Fagotti.

Corni in Es.

Trombe in C.

Timpani in C.G.

Violino I.

Violino II.

Viola.

Violoncello.

Basso.

図1: ベートーヴェンの交響曲第5番第1楽章の譜例

etwas drängend. *poco* *cresc.* *ff* *fliessend.* *zurückhaltend.* *dim.*

Harfe.

Erste Viol.

Zweite Viol.

Violen.

Vielle.

Bässe.

*viel Bogen wachhalten*

*Griffbrett*

*gestillt*

*arco*

*espress.*

図2: マーラーの交響曲第5番第4楽章の譜例(厳密な指示の例)

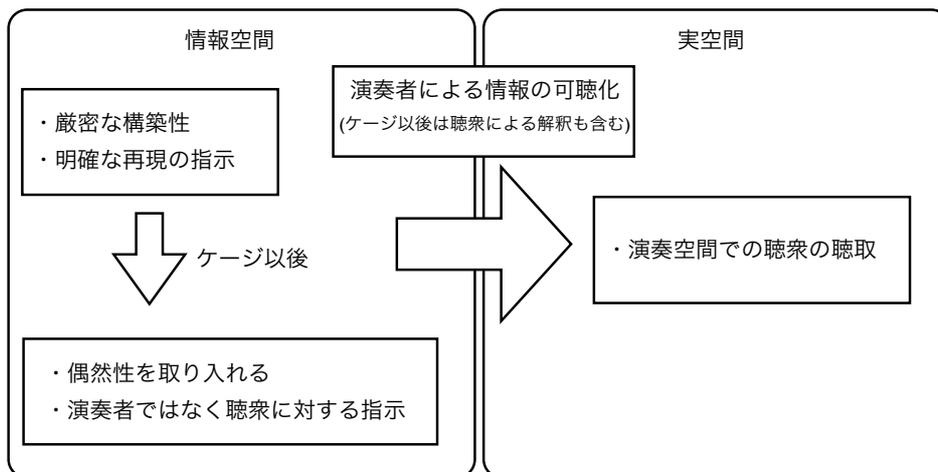


図3: 西洋音楽における情報空間と実空間の関連性

解釈を含んで演奏される。いわば情報空間のものが、実空間において演奏者の手によって可聴化されるというプロセスをとる(図3)。この情報の可聴化は、ケージ以後では偶然性を取り入れたものであったり、聴衆の解釈によるものもある。この可聴化された音響を、聴衆は作曲者の意図する音楽として受け取る。これが西洋音楽の作り出す音響である。

### 1.1.2 現代音楽とコンピュータミュージックの関連性

コンピュータミュージックは現代音楽と密接な関連性を持っている。コンピュータは人間のような間違いや解釈を持たないため、作曲者の意図を反映させやすい。コンピュータと違い演奏者は人間である以上、演奏上の間違いをおかす可能性がある。また、作曲者の意図とは違う解釈で演奏することもある。厳密な指示を行なっても、この可能性を無くすことはできない。そのため、間違いを犯さないコンピュータは作曲者の意図を反映する意味でも、またその持つ自由度の面からも歓迎され、多くの場面で使われることとなった。数値的な処理により、曲を構成できることも、コンピュータの利点である。楽譜はプログラムとなり、人間が演奏できないような複雑な要素も取り入れられた。

一方で、外界から得た情報と組み合わせることによって偶然的な音楽も作り出すことができる。これはセンサによる外部情報の取得による。これによって、人間外の要素から情報を抽出し、曲に利用することができるようになった。このようにコンピュータは西洋音楽との相性がよく、コンピュータが生まれた当初から積極的に用いられた。その利用された事例を挙げる。

コンピュータがまず用いられたのは、楽曲ではなく、西洋的な「楽器」としてである。それは最初期の電子楽器はレフ・セルゲイヴィチ・テルミンにより開発されたテルミン(図4)である。これは人の手の位置を読み取り、音程や音量をコントロールするものである。空間を操作する性質上、フィードバックを得ることが難しいものの、正弦波を生み出す楽器として発展した。また、同時期に作られたものが、モーリス・マルトノによって作られた、オンド・マルトノ(図5)である。オンド・マルトノは鍵盤を持ち、既存の楽器のメタファーを利用することでより操作しやすく、オリヴィエ・メシアンによる”トゥランガリーラ交響曲”など、現代音楽の作曲家にも大きな影響を与えた。

やがてシンセサイザ(図6)のような、音を電氣的に発生させ、加算合成や減算合成する手法が誕生した。テルミンやオンド・マルトノにおいては、音色は制御対象とは鳴らなかったが、シンセサイザは合成によって制御することができる。これによって、複雑な音色を生み出すことができるようになり、既存の楽器で表現できる音色を大きく超えたものが作られるようになった。このことにより、コンピュータがさまざまな音色を作り出す下地が生み出された。

録音技術に伴うピエール・シェフェールによるテープ音楽の導入も、音楽の歴史を大きく変えたものである。楽音だけでなく、具体音も制御の対象となり、録音を持って音楽作品といえるものを作り上げることができるようになった。テープの制御によって、楽器の演奏に長けた演奏者が表現を行なうのではなく、音楽を作り上げる作曲者が、自分の意図通りに音響を作り出す。そのため、音の細かい点までも作曲者が制御し、予め作曲者によって全てが定められた音楽が発展した。カールハインツ・シュトックハウゼンやピエール・ブーレーズによるコンピュータの積極的な利用が始まったのも、この頃からである。コンピュータが演奏者の代替となり、聴衆が耳にする音響を作り出す音楽が創始した。



図4: テルミン



図5: オンド・マルトノ



図6: 初期のシンセサイザ



図7: ソフトウェアシーケンサの例(Logic Studio)

このような作曲法は、今日ではシーケンス制御による音楽として目にする事ができる。シーケンサは音色と、その音色の動きをピアノロールのように記述することで、楽譜のように音を並べながら、楽曲を作成することができる。録音した音を利用することによって、テープ音楽で行なっていたようなこともできる。これは前項で挙げたような作曲家による楽曲の構築を、完全にできあがった状態で、意図を反映することができるツールである。シーケンサ以外に限らず、プログラムで構築した音楽はこのような要素を持つ。作曲者ができあがった音楽に至るまでコントロールできるようになった。現在はソフトウェアシーケンサ(図7)を利用することで、簡単にこのような構築的な音楽を作り上げることが可能となっている。

また、前述した通りコンピュータを利用して偶然性の音楽に対するアプローチも可能である。アルゴリズムを利用したり、センサを利用した音楽は偶然性の音楽に近いものといえる。一定のアルゴリズムを与えたり、センサを設置し、そのデータに音をマッピングすることで、作曲者が意図するよりも多くの偶然的な要素を含んだ音楽を「作曲」することができる。このような音楽は、どこに存在するのか、ということが重要になり、美術館等で展示されるサウンドアートでこの手法が多く用いられることとなった。これは音楽の時間性よりも、空間性を優先したものだといえる。これはケージ以後に生まれた概念である。現代では、さまざまな空間情報を取り込んだり、あるいは鑑賞者の振る舞いを利用することによって、コンピュータ以前にはなかった表現を実現している。これらの先行事例には、音響彫刻なども存在する。音響彫刻とサウンドアートについては、2章で詳説する。

ここで重要なのは、音響の生成手法である。既に述べた通り、得た情報を元にどうマッピングがサウンドアートでは重要な概念となる。このマッピングにおける音響の生成のプロセスは、次項で説明する。

このように、コンピュータは、偶然性の高いその場の環境を取り込んだような音楽、あるいは厳密に構築された音楽の双方に対して、大きな貢献をしてきた。そして、その生まれる音響はコンピュータの中で厳密に管理される(図8)。それは、コンピュータを用いない既存の音楽が可聴化を情報空間と実空間の間で行なっていたのとは異なるプロセスである。音響の生成までが、情報空間の中で行なわれるのである。

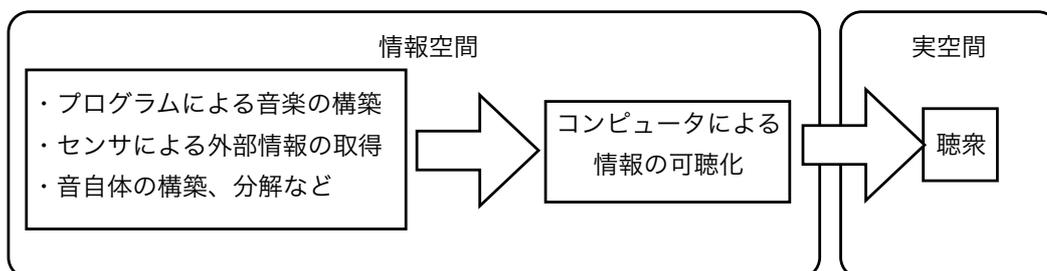


図8: コンピュータミュージックにおける情報空間と実空間の関連性

### 1.1.3 コンピュータミュージックにおける音響の生成プロセス

現代における音響の生成プロセスは、コンピュータを用いたデジタル音響合成である。これはコンピュータによる音響の生成となる。音響の生成は以下の2つに分けられる。これはコンピュータを用いた音楽の創成期に、それぞれシュトックハウゼンとシェフェールが行なった方法論である。

- ・シンセサイザを用いて生成するもの
- ・レコーディングされた素材を元に行なうもの

シンセサイザからの生成は、正弦波や矩形波、ノイズといった音響の元となる素材を足し合わせる、あるいは引くことによって作り上げていくものである。加算合成は波形の合成によって成立する。フーリエ変換を行えば、全ての音は正弦波に分割できる。逆に正弦波を組み合わせることで、さまざまな音色を作り出すことができる。また減算合成は矩形波やノコギリ波、ノイズのような複数の周波数成分を持つ音にフィルタをかけることによって、特定の周波数成分だけを取り出し、音色を作り上げるものである。

レコーディングされた素材を元に行なうものは、複雑で印象的な音響を作り上げることができるので、現代においては多くのアーティストがこの方法を用いて音響を生成する。音響素材を引き延ばしたり、縮めたりすることで音程を変化させることができる。また、エフェクトをかけることによって、全く違った印象を与えられる。エフェクトには位相をずらし空間的な効果を与える(フェイザー、フランジャー、コーラス)、残響を与える(ディレイ、リバーブ)、音を歪ませたり劣化させる(ディストーション)、波形を伸縮させることなく音程を変化させる(ピッチシフト)などが挙げられる。フィルタをかけることもよく行なわれる。特定の周波数領域を強調あるいは低減させることで音程感を変化させたり、音の印象を変化させる。近年ではグラニューラーシンセシスのように、音を細かく分割して再構成するなどの手法がとられる。シンセサイザからの生成を含め、これらを組み合わせることによって、多様な音色を生み出される。

これらは人間的の操作によってコントロールされる。前述したシーケンサで音を組み合わせることをはじめ、MaxやSuper Colliderのような音の操作に特化したソフトウェアを利用する、プログラムで音響をコントロールする、波形編集ソフトで波形を直接編集するなどである。これらの方法を用いて、説得力のある音響を作り上げるのが、作家としてのクリエイティビティとなる。

### 1.1.4 コンピュータミュージックにおける表現のメリットとデメリット

コンピュータの導入により、前項で述べたようなさまざまな音響生成が可能となった。例えばある音の残響部分だけを取り出し、そこに対して加工を行なうといった工夫は、コンピュータでしかできない。また、センサで外界の情報を取り込みつつ、それを即時的に音響に変換する行為はコンピュータの発展により進んできた。これは音響の生成プロセス上に演奏者を介さず、作曲者の意図することをそのまま音響に反映することができる。

逆にいえば、これらのメリットがそのままデメリットともなりうる。過度な音響の加工は元の音との関連性を失わせ、音響の生成過程が「ブラックボックス」となってしまう。西洋音楽は、前述した通り音の構造に重きを置き、その構造を聞き取れる鑑賞者が理想的な鑑賞者であるが、作曲者が意図することを鑑賞者が認識できなければ、その意

図は無意味なものとなってしまふ。これは十二音技法やセリエリズムが廃れていった原因の1つでもある。この作者の意図の認識のしづらさが、コンピュータミュージックの進展を妨げ、評価を難しいものとしている。

また、作曲者の意図と作品の表出の間に他のプロセスが挟まらないということは、作品が「静的」なものになってしまう。それは音響を動的に生成している場合にも同様である。これは人間が行なう音楽が演奏者を介し、演奏者の解釈によって音楽が変容してしまうことの対極の位置にある。それ自体は作曲者にとってはメリットではあるが、同じ素材を元とした、さまざまな音を聴くことができないということはデメリットでもある。またその作品の発展が、作者の手を離れて発展していく可能性を削いでしまう。

その他の問題として、デジタルによる音響合成はスピーカーを通すことでしか知覚することができない。スピーカーを複数置くことによって立体的な音響を作り出すことはできるが、その表現はスピーカーから現れたものに限られてしまう。これはビジュアルの表現が、ディスプレイに限られることと同じであり、逆に表現力を削いでしまうことになる。

## 1.2 問題意識

筆者はオーケストラにおいてトランペットを担当し、また指揮を行なうことによって音楽観を作り上げてきた。その上で現代の音楽やコンピュータミュージックを分析し、前節で説明したようなメリットとデメリットを見いだすに至った。オーケストラのような音楽は、作曲者の書いた譜面に厳密に管理されつつも、指揮者や演奏者がその中から音響を掘り下げていくことによって更なる発展が行なわれる。コンピュータミュージックにおいては、前述した通り作曲者と音響が直接結びつけられているため、音響が作曲者の手を離れる可能性が無くなり、音響の生成に関して他者の理解を促す必要や、そこから生まれる発展可能性を失っている。

コンピュータにおいては1人で複数の音源を同時に、かつ容易に扱うことができることは、シーケンサの例からも明らかである。それまでは多彩な音源を管理し、それぞれを作曲しながらバランスを整えていく作業を1で行なうことは不可能だった。複数の楽器を用いる作曲方法は、あらかじめ何らかの楽器を演奏することで下書きを作り、それを音域や音色に応じて楽器に当てはめていく作業であった。それを複数の奏者に演奏してもらい曲にする。しかし現代では、特定の楽器の音色を使いながら作曲をし、それを楽曲として完成させるプロセスを1人で完結させることができるようになった。確かにそのことにより、限られた人にしかできなかった作曲という行為が人々に身近な存在となり、多種多様な楽曲が日々誕生している。その他にも、この複数の音色の同時管理は、リアルタイムで扱うことも可能である。DJのクラブにおけるパフォーマンスでは、複数のリズムトラックを予め用意し、それをリアルタイムで入れ替えてコントロールすることで、1人で多彩な音を管理し、表現することを可能にしている。これはデジタルにより音楽が身近になった好例であり、現代的な方法論となる。

しかし、これらの行為の中で、音楽は音を発するきっかけと現れる音響が一体化したような物理的な音の「身体性」を失っている。例えば、音量を上げようとした場合、アコースティック楽器の場合には擦弦楽器や鍵盤楽器であればより強い力で発音させ、管楽器であればより大量の空気を送る。その際には、楽器の音は小音量にはない、物理的な歪みなどが加わったものとなる。ここには弦の振動や空気の振動といった音を発するきっかけがあり、それに対応した音響が表れる。これに対して、デジタル的な処理で音量を上げようとした場合は、つまみやスライダにより値を変化させるのが主な方法である。これが音を

発するきっかけとなる。この方法であれば確かに音量は上がるが、その際に生じる物理的な歪みは再現できないものである。たとえここに用いるVA音源が音量に応じて音色を変化させたとしても、音量を上げるために生じた物理的なフィードバックを得ることができない。それはデジタルを通したことによる、因果関係の変化である。これが現象の「ブラックボックス」化である。「きっかけ」と出てくる「音響」に乖離は、音楽の理解を妨げる。実世界の現象と、起こる現象に結びつきが生まれなことが、音から「身体性」を奪っている。

また、演奏者の解釈の違いも音に彩りを与える要素である。それぞれの演奏者が身体性を持ち、自律的な演奏を行い、それが協調しつつ演奏が進むことによって、躍動感が生まれる。コンピュータミュージックにおいてはこのような人が関わることによる躍動性よりも、コンピュータが刻む正確な音響の方が強調される。確かにそれは新しさでもある。榎木野衣はそのコンピュータの刻む正確性を「テクノ」の本質だと説明している。しかしそこに対して、肉体的な感触を持つ何らかの現象を組み込むことを考え、コンピュータ的でありつつも躍動感を持つ音色、というものが生まれ得ないかを考えた。

デジタルでは一見してアコースティックで表現できないような音色も存在する。普段我々が耳にすることができる楽器は、何らかの曲を演奏するために調律され、「正しい」音が出るように調整されているものであるが、民族楽器や古楽器の中には、そのような音像を持たない、ともすれば「コンピュータ的」な音を出すものが存在する。そのうちのひとつが、バリ島のスナリ(図9)と呼ばれる竹による楽器である。スナリは竹にスリットを施すことで、そのスリットが通過する風を音に変換するものである。スナリは複数の竹を利用することによって神秘的な音響を生み出すことができる。同様の楽器として、古代ギリシアのエオリアンハープ(図10)があげられる。これはギターのように共鳴する箱と弦が取り付けられた楽器であるが、人ではなく、風が弦に当たることによって音を発する。これらの音は完全にアコースティックから生み出されているが、「コンピュータ的」な音響を発するものである。これらの音は、コンピュータミュージック以前は音楽として認識されにくかった音かもしれない。しかし、コンピュータによりこのような音が許容されるようになった「耳」からは、これを音楽として認識することができる。

中村滋延は現代音楽のもたらした要素を次のようにまとめている。(出典:“音楽表現学のフィールド” 東京堂出版)

- ・拡大された音素材：無調性、不協和音、騒音、電子音、環境音
- ・知的操作の推奨：音列思考、計算機の応用、コンセプチュアル・アートの思考
- ・コンサート制度の形骸化：“現代音楽”コンサートに置ける聴衆の少なさに由来するコンサート制度への疑問

このことは、現代要素によって、我々が音楽だと認識しているものが拡大されたということを示す。既にコンピュータミュージックを経過した我々には、このような音楽も十分に音楽として認識できるものである、そこでアコースティック的な手法に回帰すれば、コンピュータミュージックの要素を踏まえつつも、リアルな感触をもった音楽を生成できるのではないかと、いう考えに至った。すなわち、アコースティックによってコンピュータの音楽要素を「模倣」し、再現することによって、コンピュータミュージックになかったリアリティのある質感を音楽に取り戻す、というのが本研究の目的となる。このリアリティのある質感こそが、音があるべくしてあるということであり、音と実世界の運動が密接に絡み合った「身体性」である。内部では西洋音楽の伝統に則った厳密なプロセ



図9: スナリ

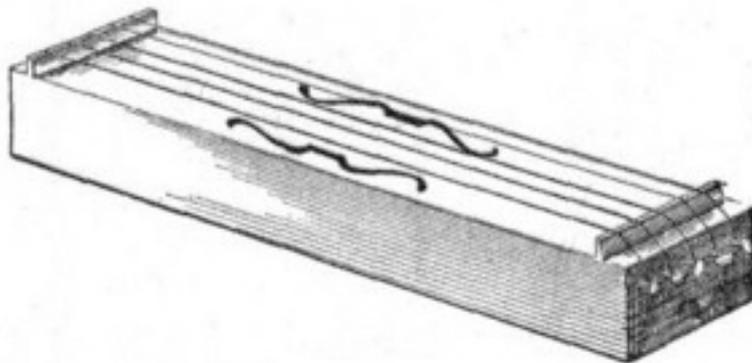


図10: エオリアンハーブ

スを持ちながらも、表面に物理現象を用いることで「揺らぎ」を作り出し、新しい要素を取り入れる。

### 1.3 問題解決の手法

前節で説明したように、アコースティックにより構築された音響を利用して、「コンピュータ的」な音を作り出し、作品を作ることが本研究の手法となる。そのためにはコンピュータミュージックで用いられる手法を分析し、それをデジタルではなくアコースティックによって表現する。これはコンピュータ音楽の生成プロセスをアコースティックに置き換えることとなる。音の生成部分がアコースティックであれば、音を生み出すのに必要な現象と、音の乖離は発生しないため、音の発生源はアコースティックを利用し、それ以外の部分でコンピュータを利用することは否定しない。つまり、音を発生させる装置をコンピュータにより制御して動作させるということである。

模倣する対象であるコンピュータ的な音響とは、次のようなものと定義する。

- ・ 定常的に生み出されるもの
- ・ 連続的で、さまざまな変化を伴うもの

これらの要素は、前節で説明したような、コンピュータの進歩により発展してきた音響である。定常的な音は、人にとっては実現困難であるが、変化がほとんど起こらない機械やコンピュータにとってはもっとも容易な表現である。これはテクノロジーに依存したコンピュータの持つ「身体性」ということができる。定常性こそがコンピュータの持つ特徴ともいえる。

また、連続的な変化も、音響を発するための楽器的特性、あるいは音楽を表現するものの楽器としての存在によって、避けられてきた要素である。伝統的な楽器には、「鳴るべき音」が存在しており、その部分において最適になるように物理的に調整されている。これは調律という行為で実現される。しかし、コンピュータの場合はこの目標とすべき音を作者の意図によって、容易にコントロールすることができる。そのため、現実的には不可能であるような連続的な変化、さまざまな変化を生み出すことができる。

このような要素がコンピュータによっていかに発展してきたかは2章で示す。そして、それがどう分類でき、どのように本研究の制作に当てはめられるかは3章で説明する。これらの要素をコンピュータを用いて起こすことで、アコースティックとデジタルの融合、そしてそれらを超えた音響の生成を目指す。

このような音響は、人や自然現象によって起こすことは難しい。しかし上述のようにコンピュータによって制御すれば、容易に起こせる現象となる。新しい音響装置を作り、それを機械で動作させるという試みは多く行なわれてきたものの、それを現代的なアプローチであるセンサ技術やフィジカルコンピューティングを用いている実現しているものは未だ少ない。コンピュータを利用して外界の情報を取り込み、それを利用し機械的な動作を起こす。そして人がそれに対してまた自由にアクションを行ない、作者が意図し得なかったほどの音を変化させる性質のものを目指す。これはデジタルに存在しなかった可能性である。

本研究で重きを置く対象は、音楽の可聴化のプロセスである。音楽を音によって生み出される芸術として捉えるのであれば、その構成要素は情報空間においてはその構成が保管された楽譜やプログラムであり、実空間においては表れる音のテクスチャ、すなわち音響である。この音響をよりよいものにするのが本研究の目的である(図11)。音響生成プロセ

スの見直しこそが本研究の主眼といえる。そして、現在多く行なわれているコンピュータミュージックの手法である、サウンドアートを補完するものとして、サウンドアートにおける可聴化を物理現象に置き換えることを行なう。

コンピュータにより失われた実世界と音の結びつきを復活させ、コンピュータにより見えなくなっていた音響の生成過程が見えるものとし、外界の状況や現象、あるいは人が加える操作が直接的に音響に影響を与えるものを作り出すことによって、既存のコンピュータミュージックになかったものを補完する。

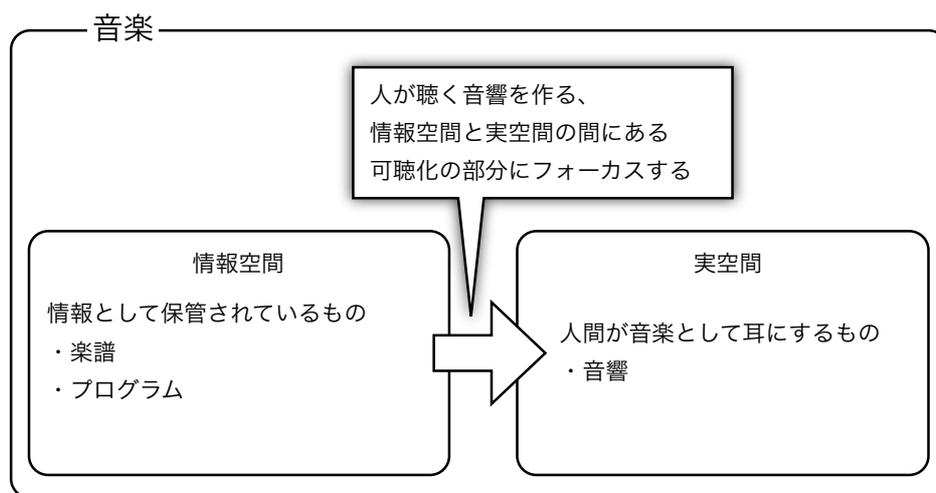


図11: 本研究の主眼となる音楽の構成要素の部分

## 2. 研究の背景

---

本章では、前章で説明した研究の経緯を踏まえた上で、関連または先行する作品や事柄について扱う。本研究の手法の前段階となる事例を紹介する。

## 2.1 コンピュータにより発展した音楽

コンピュータの技術を取り込むことによって発展した音楽ジャンルはいくつか存在する。これらの音楽ではアコースティックな処理では難しかった音響の生成が、特に強調されて行われるようになった。この技法が浸透したことにより、これらの音響も音楽として認められるようになった。本節ではそのような音楽に焦点を当て、アコースティックで再現すべき対象として挙げる。これらの音楽をベースに、その発展系としての音響を構築する。各要素は分離的に説明しているが、これらは横断的な繋がりを持つ。

### 2.1.1 クリック、グリッチ

正弦波やホワイトノイズといった音響は、リアルな空間では生まれることが難しいものである。サイン波は音波をフーリエ変換することによって得られる、音の最小単位である。全ての音は正弦波の重ね合わせとして考えられる。正弦波は音の原子ともいい換えることができる。このような音の微細な構造に着目した作品も多く生まれてきている。これはオヴァルや池田亮司やカールステン・ニコライの作品に代表されるような、単純な要素に還元した音楽が挙げられる。彼らの作品は、正弦波や矩形波、ホワイトノイズのような素材をそのまま、あるいは僅かな加工を施し、それを配置することによって生み出される。これはクリックやグリッチといわれる音となる。これらは単音で鳴り、音も単純であるために類似する音を再現することは容易である。

### 2.1.2 立体音響

立体的な音響も、コンピュータの発展により進歩した。複雑な立体音響の制御や構築はコンピュータによって作り上げる必要が不可欠であるからである。空間音響の初期の例は、エドガー・ヴァレーズの”Poème électronique”である。これは300個のスピーカーを用い、その動きをコントロールして表現したものである。このような表現は現在でも多くの作品で行なわれており、立体音響による音楽の解体や再構成は主流の表現であるといえる。その代表的な事例が、ピアノの音を解体して作り上げた渋谷慶一郎+evalaによる”for maria anechoic room version”である。

空間性を持つ音楽は、古くは古典派やロマン派の時代から客席や舞台裏にも演奏者を配置するという行為により行なわれていた。しかし自由に配置できるスピーカーと、それをコントロールするコンピュータという概念が、厳密な制作を容易にした。演奏者による立体音響は、連続的に激しく音源を動かしたり、徐々に音色を変化させることができない。アコースティックでこのような立体音響の持つ効果を再現するには、複数の音源を利用することで対処できる。アコースティックでは単一の音色が基本となるが、それを発生させる装置が複数あればよい。

### 2.1.3 ノイズ・ミュージック

ノイズ・ミュージックは、非楽音の音を用いることによって音響を構成するものである。非楽音で音楽を表現する行為が最初に行なわれたのは、ルイジ・ルッソロによる騒音発生装置による音楽である。これは”イントナルモーリ”という騒音を発する「楽器」であり、楽音的に調整された楽器ではなく、非楽音を発するものである。打楽器によるアンサンブルも、非楽音を多く含む広義のノイズ・ミュージックといえる。

ノイズ・ミュージックが更なる発展を遂げたのは、録音技術の賜物である。前章でも述べた、ピエール・シェフェールの創始したミュージック・コンクレートはノイズ・

ミュージックとの関連性を持つものでもある。これは楽音ではない具体音を予め録音によって採取し、テープ編集によって音楽的構造を作り上げたものである。このような手法は現代ではデジタル録音とそれに伴うデジタル処理に置き換えられており、コンピュータを駆使した変調を行い、更なる表現を求めている。具体音の音楽的再構成が行なわれることで、より新しく複雑な音響が行なわれている。また、電氣的な増幅によって大音量を用いることも、ノイズミュージックでは多用される表現である。メルツバウは大音量を利用したノイズ・ミュージックの最たる例であり、圧倒的な音圧を、コンピュータと電氣的な増幅により生み出す作家である。

このような非音楽的要素はコンピュータミュージックでは、特に音響の素材として利用されることが多い。その構築により独特の音楽的効果をもたらしている。それゆえに、この具体音的な要素も、直接その場で具体音を鳴らすことによって再現できる。これは増幅や変調を考えなければ、具体音を何らかの装置で起こせばよいので、もっとも再現しやすい要素である。

#### 2.1.4 ドローン・ミュージック

ドローン・ミュージックは変化の少ない、長い音で構成される音楽である。通常は人の知覚可能なテンポで音楽は演奏されるが、テンポという概念を排し、徐々に変化する音像を楽しむのがドローン・ミュージックである。起源はバグパイプなどに存在する持続する低音である。バグパイプは管楽器であるが、息をためておく袋に一度空気を入れてから、それを押し出すことで空気の流れを作るものである。そのため、息継ぎのような音の途切れを生じさせることなく演奏させることが可能である。そのため、音楽のバックグラウンドを飾り、雰囲気を作り出すものとしてこのような持続音が使用されてきた。同じようなことはインドの弦楽器のシタールにもいうことができる。

これらの音は本来の用途としてはメインの音響として聴かせるものではなかったが、その音楽要素を抽出したものがドローン・ミュージックである。人では演奏するのが難しい長い音でも、コンピュータによる演奏では持続させることは容易となる。このような音楽も、定常的に演奏させることができるコンピュータの利点を活かした音楽である。ドローン・ミュージックを実用化させた人物がラ・モンテ・ヤングであり、彼はサイン波を空間で流し続ける”Dream House”を作成した。他にも多くのドローン作品が存在するが、特に本研究と関連性があるのが、佐藤実+ASUNAの“texture in glass tubes and reeds organ”である。これはオルガンのリードの音をガラス管の中に通した音を元に作ったドローン・ミュージックである。この方法は録音という方法で行なわれたため、本研究とは違うものとなるが、機械の力を援用して持続音を作り出した例である。機械を利用すれば、持続的な音響を作り出すことは容易である。

## 2.2 音響彫刻

楽器と彫刻の中間のような存在として、音響彫刻が存在する。これはハリー・ベルトイアによって創始されたジャンルで、音を奏でることを主眼とした彫刻である。彼の著名な作品として、”Sonambient”(図12)がある。これは棒の先端に金属を固定することによって、振動によってこの金属同士がぶつかり合い、音を出す。これは彫刻として完成したものであるが、人が触れることによって金属のぶつかり合う音が生み出されるという作品である。このジャンルの代表には、他にバシェ兄弟があげられる。彼らは自作を”スクラブチャ・ソノル”と名付け、楽器と彫刻の中間のような装置を生み出してきた。音響彫刻は多



图 12: Sonambient



图 13: Singing Ringing Tree

様な素材を用い、今までの楽器になかったさまざまな音を作り出している。それには楽音というよりは、むしろノイズに近い。前述の”Sonambient”は、その音を録音したレコードが、ノイズミュージックの領域で流通している。これらは生音を利用して新しい音を生み出し続けているものといえる。

これらの作品は人の力を利用するものであるが、人の力を利用しないものとして、”Singing Ringing Tree”(図13)がある。これは複数のパイプの組み合わせて木のようにした作品であり、この中を風が通過することによって音を立てる。この作品はモニュメントとして丘の上に立てられており、不思議な音を常に奏で続けている。これは先述した竹の楽器であるスナリとの関連性が見いだせる。

音響彫刻は楽器と彫刻の中間として、厳密な音楽を奏でるだけでなく、人の操作や外から何らかの力を加えることによって音を立てるものである。本研究は、コンピュータにより制御される音響彫刻ともいえるため、音響彫刻が持つ音の構築法を参考にすることができる。

## 2.3 キネティックアート

音響彫刻の現代的な表現として、更に本研究と密接な関わりを持つものとして、キネティックアートというジャンルが挙げられる。これは物理的な現象をコンピュータで制御し、何らかの動きを見せるアートであるが、その中でも音にフォーカスした作品が存在する。代表的なものがスズキユウリによる作品群である。”Musical Kettle”(図14)は、お湯が沸いたことを知らせるためのホイッスルをリコーダー状にし、音程を制御できるようにしたもので、延長し木管楽器のような音孔を持つものである。これはソレノイドにより制御されている。また、”The Animatic”(図15)はミュージックビデオのためのインсталレーション作品であり、ボールが転がることによって様々な現象が起こる。これはボールの移動に伴った音という、シーケンシャルな動作を可能にしている。

堀尾寛太も物理現象を用いて音を作り出すアーティストである。彼の作品の1つである”スピード・スイッチング”は、缶や湯のみのような身近なものを叩いたり擦ったりことで音を出す。素朴なものの組み合わせでありながら、いろいろな音を生み出すのが彼の作品の特徴である。他にも、”Particle”(図16)という作品では、磁石によりクリップの動きをコントロールし、その音を拡大することでリズムを生み出すことも行なわれた。彼は身近な素材を用いて、変わった音響を作り出すことに成功している。

海外で行なわれている試みとして、League of Electronic Musical Urban Robots (LEMUR)がある。これは音響を生み出すロボットを作るチームであり、音響彫刻的な要素を持つロボットを生み出している。彼らは棒の先にマラカスを付けその振動を機械で起こさせたり、打楽器を機械的に制御を施してコントロールする(図17)など、上記の堀尾寛太をより楽器に近いアプローチで行なっている。

2011年のdocomoのCMで使われた、”森の木琴”(図18)も、キネティックアートの一種である。これは森の中に仕掛けられた木琴の上をボールが転がるというシンプルなものであるが、ボールは最初の角度によって、わずかに斜めに落ちていき、木琴を叩くリズムが等しくなくなる。実空間に存在するからこそ起こりうるわずかなズレを効率的に作品の中に取り込んでいる好例である。

また、高橋征資の作品は、キネティックアートに生々しい音像を組み込んだものである。”音手”(図19)は機構により駆動する拍手ロボットであり、音源に対して肉感的な触感を持った柔らかい物体を使用することで、デジタルとアコースティックの中間的な音像を生み出している。これは拍手をするだけのロボットであるが、ロボットによる音とは思え



图 14: Musical Kettle



图 15: The Animatic

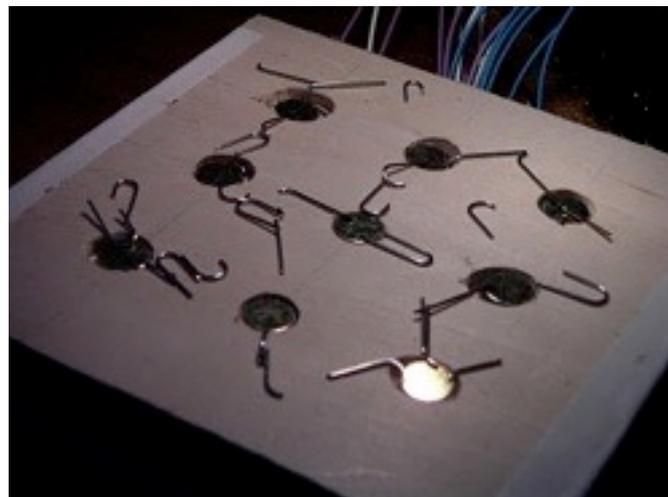


图 16: Particle

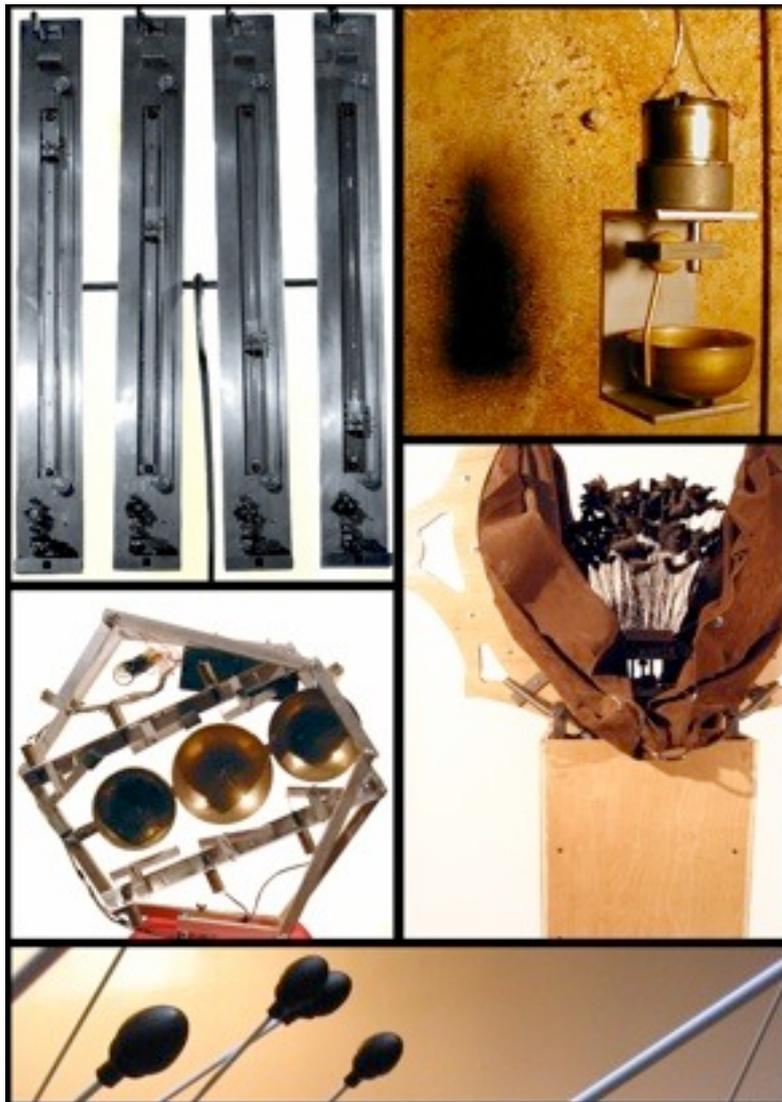


図 17: LEMURの作品群



図 18: 森の木琴



图 19: 音手

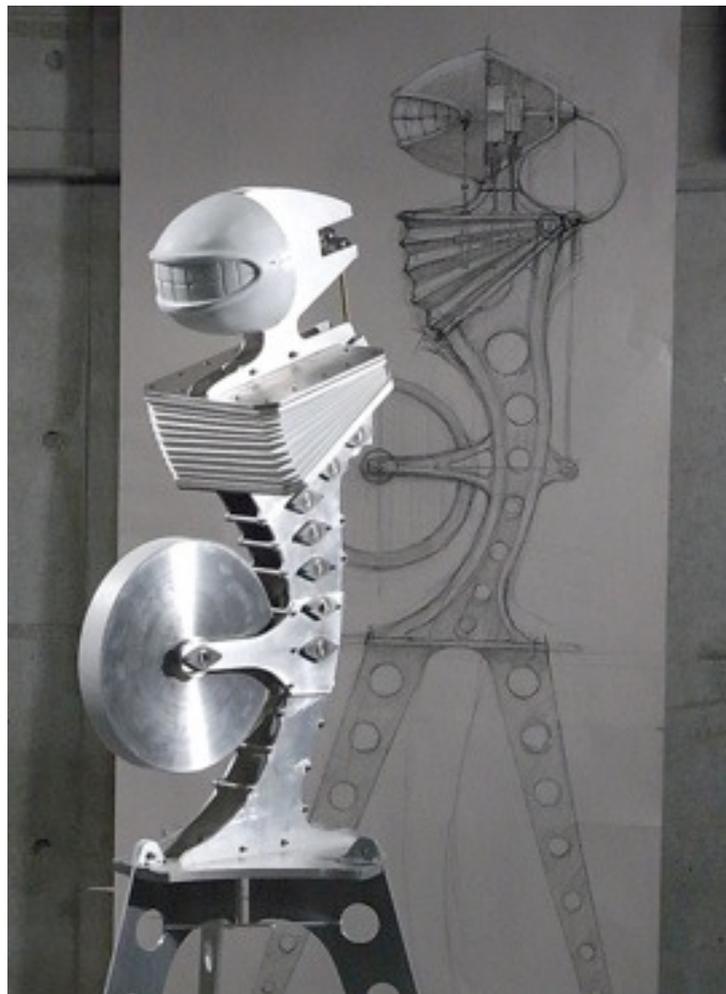


图 20: WAHHA GO GO

ないような有機的な音色が生み出される。高橋征資は肉体的な表現に重きを置いた作品制作を行っており、有機的なものとデジタル技術の合成が行なわれている。同様に生々しい表現を持ち込んだものとしては、人工声帯を利用した明和電機の”WAHHA GO GO”(図20)も挙げられる。デジタル技術により、肉感的な音響制御も多く行なわれるようになった。

彼らの多くが、コンピュータで物理的な制御を行なうことでさまざまなコントロールを行なおうとしている。それによって、人間の力では得られない音、そしてコンピュータからも得られない音の双方がないかを探している。これはコンピュータを用いた方法と、物理的に何かを起こすという方法を組み合わせたものが、デジタル表現とリアルな表現の境界に位置しているからである。これらはフィジカルコンピューティングの普及により、多く行なわれるようになった試みである。本研究も、このような試みの流れの中に位置づけられる。

## 2.4 物理現象を利用したビジュアライズ

デジタルで物理現象を制御し、それを見せることで、光をコントロールして表示をする既存のディスプレイとは異なる表現を行なおうという試みも多くなされている。これは物理現象の持つゆらぎや、その意味性、あるいは直接触ることができるといった特徴を利用するものである。これはデジタル表現だけではできないものを、リアルな素材を利用することで補完するものである。このような試みは多数行なわれているが、いくつかを抽出する。

水を滴のように流し、その動きをコントロールすることで水によるディスプレイ表現は多様な場面で使われている。一例としてbit.fall(図21)が存在する。これは水滴を制御し、文字を空間状に浮かび上がらせるものである。関根雅人の”Fluid Texture”と呼ばれる作品群は、流体を可視化することで模様を作り出すものである。煙を利用したtexmoca(図22)は、熱対流によって生まれた模様レーザー光を当てることによって模様を把握させやすくしたものである。これはシーケンスによる制御もできるが、一方で煙であることによる不安定性を含む。

これらのような作品群は、オーガニックユーザーインタフェースとも関連を持つ。すなわち、入出力の部分を実体を持つ何らかのものを利用することで、コンピュータにはない表現を狙ったものである。この中には、平山詩芳による”Shaboned Display”(図23)がある。

デジタル表現のアウトプットの最後の部分を、あえて物理現象に頼ることによって、アウトプットに更なる要素を加えることができ、鑑賞者の振る舞いや空間の持つ要素をファクターとして作品に取り入れることができる。本研究もそのような作品の一部として、物理現象によるビジュアライズを音による表現に置き換えることで成り立っている。



图 21: bit.fall

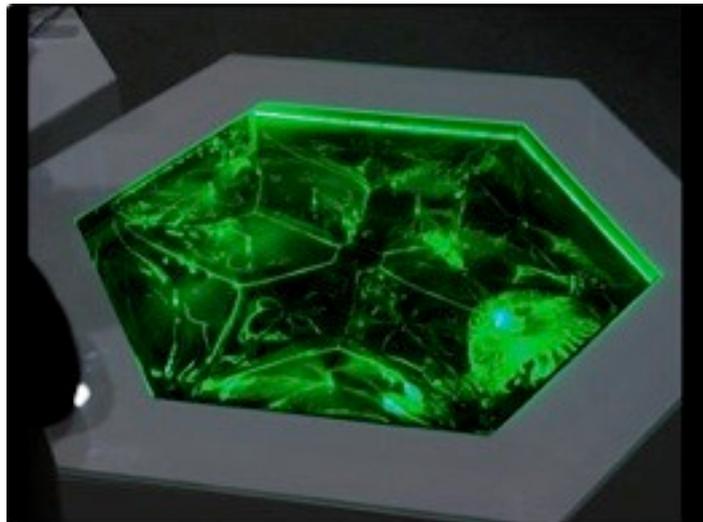


图 22: texmoca



图 23: Shaboned Display

### 3. 研究の概要

---

本章では、研究の手法と、前章で述べた既存の研究や作品との差異についての説明を行なう。

### 3.1 本研究の手法

本研究では、アコースティックによってコンピュータ的な音が再現される。この要素は、1章で定義したように以下の通りである。

- ・定常的に生み出されるもの
- ・連続的で、さまざまな変化を伴うもの

この要素は、2章の1節で挙げた参照すべきコンピュータミュージックの音響要素と比較すると以下のように分けられる。

1. 定常的に生み出されるもの
  - a. 単発的に生み出されるもの(クリック、グリッチ)
  - b. 持続的に生み出されるもの(ドローン)
2. 連続的で、さまざまな変化を生み出すもの
  - a. 微細な音の変化(ドローン、クリック、グリッチ)
  - b. 多彩な音の変化(ノイズミュージック)
  - c. 空間的な音の変化(立体音響)

これらの要素のうちの1つ、あるいは複数のものを取り出して、アコースティックで実現していく。これらの音の探索や制御には、先行事例で挙げた音響彫刻やキネティックアート、あるいは物理現象によるビジュアライズが関連していく。

1章でスナリやエオリアンハープは「コンピュータ的」な音色を持つものとした。これは、音響成分に上の分類の、

- 1-b. 持続的に生み出されるもの
- 2-a. 微細な音の変化
- 2-b. 多彩な音の変化
- 2-c. 空間的な音の変化(スナリの場合)

が含まれるためである。これは西洋音楽の中では、コンピュータ以後に確立された音像といえる。このような民族音楽や、あるいは自然音を元にしながら、上記のような音響要素を含む音を探索、あるいは構築することで、基礎となる音を作り出す。

スナリやエオリアンハープは風の力を利用したものであるが、風の力では不確定な要素が大きかった。そこに対してコンピュータによって駆動するアクチュエータによる制御を当てはめる。これにより、キネティックアートや物理現象によるビジュアライズで行なわれているような、デジタルな制御を可能とする。このデジタルな制御で、アコースティックによる音響を生成していく。

音の生成過程に関して、外界の情報を探知し、それを音声に変換するという点に関しては、既存の多くのコンピュータミュージック、あるいはサウンドインスタレーションで使われるものとの違いはないが、その先に存在し、作品のアイデンティティとなる「音」については実空間で起こる現象が、増幅や変調無しに、物理的な特性のまま表現される。この音を起こす現象については、比較的容易に「妨害」できるようにする。それによりインタラクションが発生し、鑑賞者が積極的に音の変化に関われるようにする。

### 3.2 既存の手法との比較

既存のコンピュータミュージックはコンピュータの中の情報を利用して発音するものである。その生成手法を図示(図24)する。

このプロセスにおいては、音響は完全にコンピュータの中で生成され、スピーカーを通して聞くことになる。そのため、音響はコンピュータの中でのみ生成される不可視なプロセスとなる。これにより音響の生成過程が見えにくいものになってしまう。これが音響の「ブラックボックス」となり、音のきっかけと音響を分裂というコンピュータミュージックが常にかかえる問題点になっている。また、音響に対しては制作者の恣意性が強く反映される。この恣意性とは、音のコントロールが全て制作者の意図のままに表現されるということである。制作者があえて自分のコントロールできない現象を処理の中に加えることで、音響に変化を与えることもあるが、それは制作者の音響プロセスにランダム性を加えたい意図の反映となる。

センサからの入力を利用して音響を操作する場合は、センサからの入力以外のものは受け付けず、その音色は制作者のマッピングによるものに限られる。これはあらかじめ情報が入力されており、それを元に音響が生成されている場合も同様である。音響に関しては制作者の意図が反映されるよう、入力から出力まで阻害されることなく連続する。そして、音響はコンピュータの中で完全に生成され、スピーカーもその生成された音色をそのまま再現することに重きが置かれた設計になっているため、すでに「完成された」音が再現されるのみとなる。スピーカーは入力された音を再現する装置であるが、それは音を出力する装置としての役割でしかない。

対して、本研究での方法論を図示(図25)する。音響生成はデジタル音響合成ではなく、用意された素材が鳴る音によってなされる。これによって、上記のコンピュータミュージックにおける生成過程で存在していたデメリットが解決される。まずは音響生成プロセスの可視化である。これは物理的な現象が用いられているため、音響生成自体を実空間で確認することができる。これにより、音のきっかけと音響に密接な関連性が生まれるとともに、「ブラックボックス」化を避けることができる。またコンピュータミュージックにおいては知識や解説が必要なプロセスを実際に確認できることで、理解を深めることができる。そしてアクチュエータを用いて現象を出力することで、その出力に対して「干渉」をすることができる。干渉自体はプリペアドピアノのように、楽器の発音機構自体を操作することで行なえる。それにより、制作者が全く意図していないような音響が生成される可能性が生まれる。あえて制作者がコントロールせず、さまざまな可能性に任せるのが本研究により生まれる制作物である。また、乱数などを利用していない「自然なランダム性」が音響に影響を与える。そのことにより、コンピュータミュージックでありつつもそうでないという、境界的な可能性にアプローチできる。

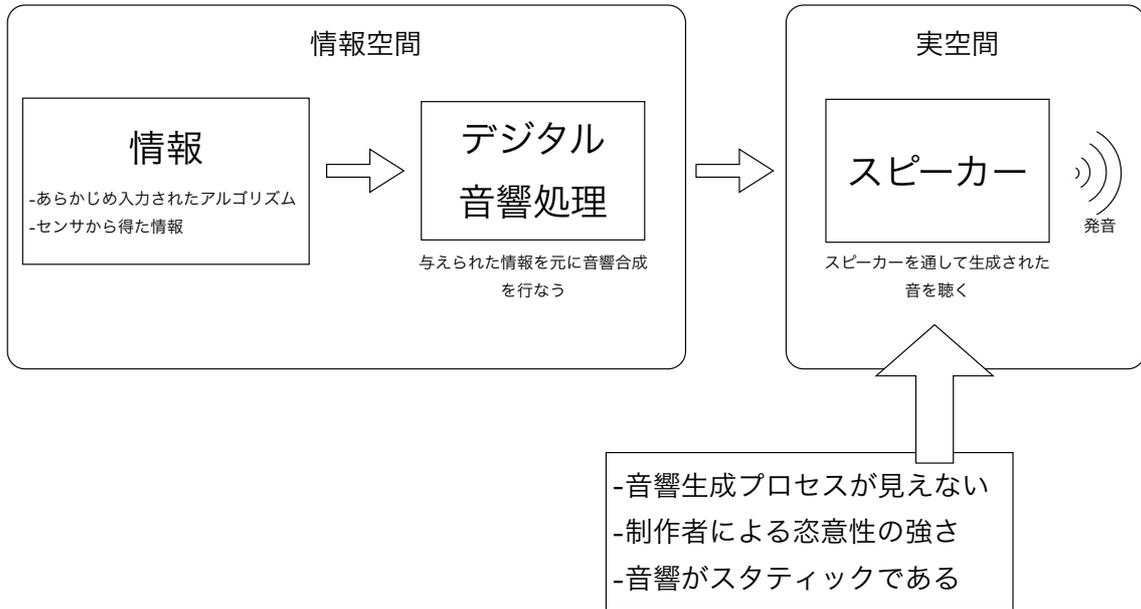


図24: 既存のコンピュータミュージックの生成過程

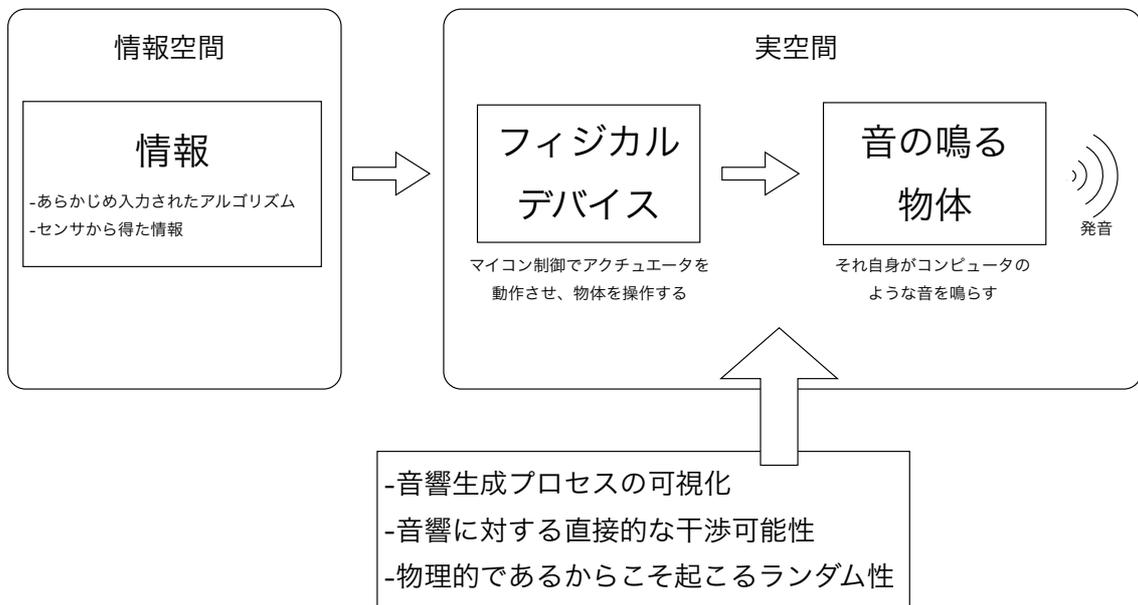


図25: 本研究の音響の生成過程

### 3.3 本研究特有のアプローチ

物理的な音響制御という点では、先行事例のような作品が存在しているが、コンピュータミュージックを模倣し、実空間において再現した結果がコンピュータミュージック的であるという部分が、本研究によって生み出されるものの特徴である。すなわち、デジタルを用いた作品の多くがリアルかつアコースティック的な音響へのアプローチを行なうのに対し、本研究ではアコースティックによって積極的にデジタルの音に近づける(図26)。それはコンピュータミュージックにより拡張された人々の耳に、新たなる刺激を与えるものとなる。普段録音音楽を含むデジタル音響に触れている我々にとって、完全にアコースティックな音を耳にすることは少ない。そして、デジタルでは当たり前存在している「不思議な音」をアコースティックが奏でることに対する意外性を生み出すことができる。

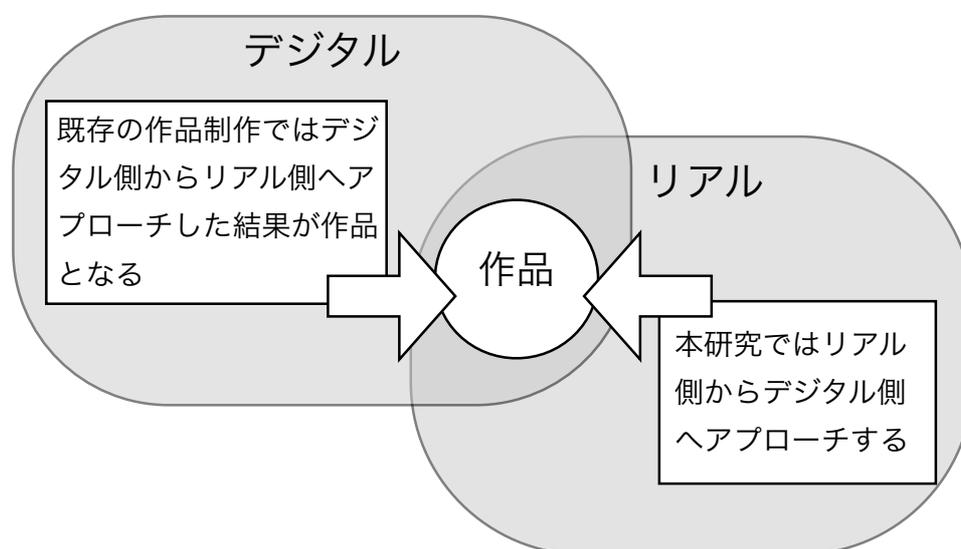


図26: 既存の作品制作と本研究のアプローチの差異

## 4. 制作物について

---

本章では、前章までに説明したアプローチにより制作されたものを紹介し解説する。これらはさまざまな形態での制作となっているが、特に最後に作成したRyo-Onは本研究の集大成であり、さまざまな要素を含むものである。

各作品の紹介の後に、3章で挙げた音響要素のうちの何を利用したかを記述する。

## 4.1 AsWi

"As"とは"Acoustic Synthesis"の略であり、本研究の初期の名称である。"Wi"はWindの略であり、本研究の手法と技術を用いたWind Instrument、つまり管楽器のような構造を持つものである(図27)。単純に息を入れつつも、コンピュータによって音に変化させるものである。人が同じ行為を継続して行なっているにもかかわらず、コンピュータ制御により音が変わる。それに対して人がまた微妙にリアクションを変化させる、というインタラクションを取り入れたものである。

この作品では、以下の要素を用いる。

### 2-a. 微細な音の変化

#### 4.1.1 AsWiの構造

AsWiはリコーダーのような構造を持つ。リコーダーの構造は、空気の流れであるジェットが、「エッジ」と呼ばれる鋭角の物体に当たることによって、音響が発生するものである。このような発音機構を持つ楽器の例として、リコーダー以外には、フルート属やパイプオルガンなどがあげられる。リコーダー属やフルート属は、人の息によって、パイプオルガンは人工的に空気を送ることによって空気の流れを作りだし、それをエッジに当てる。エッジに当たった空気は、カルマン渦という渦を発生させる。これは周期的なものであり、この周期的な渦が、管の共鳴する周波数と一致したときに管が共鳴し人間の耳に知覚可能な音程が鳴る。

管の共鳴周波数は、管長と一致する。そのため一般的な木管楽器では、複数の孔を用意し、その孔を塞いだり開いたりすることで管の長さを変え、音程を変化させる。これに対して、AsWiではエッジの部分を動かすことによって音を変えることを行なった。そのため、ただ単に息を入れているだけで共鳴する箇所と、共鳴しない箇所が発生し、音程ではなく、音の明瞭さが変化する。構造としてはリコーダーのエッジの部分が前後に動くものである。この動きにはソレノイドを利用する(図28)。

#### 4.1.2 AsWiの課題

構造として、AsWiは管体の内部にエッジをおいた。そのため、管による共鳴を活かしきることができず、音量が大きさに比例して小さくなってしまいう欠点があった。また、空気を送りこまなければならないという性質上、人が息を入れなければ音が発生しないという欠点があった。これは空気を自動的に送ることで代替できるものの、音質を一定にしてしまい、偶発的な要素が生まれにくくなってしまふ。

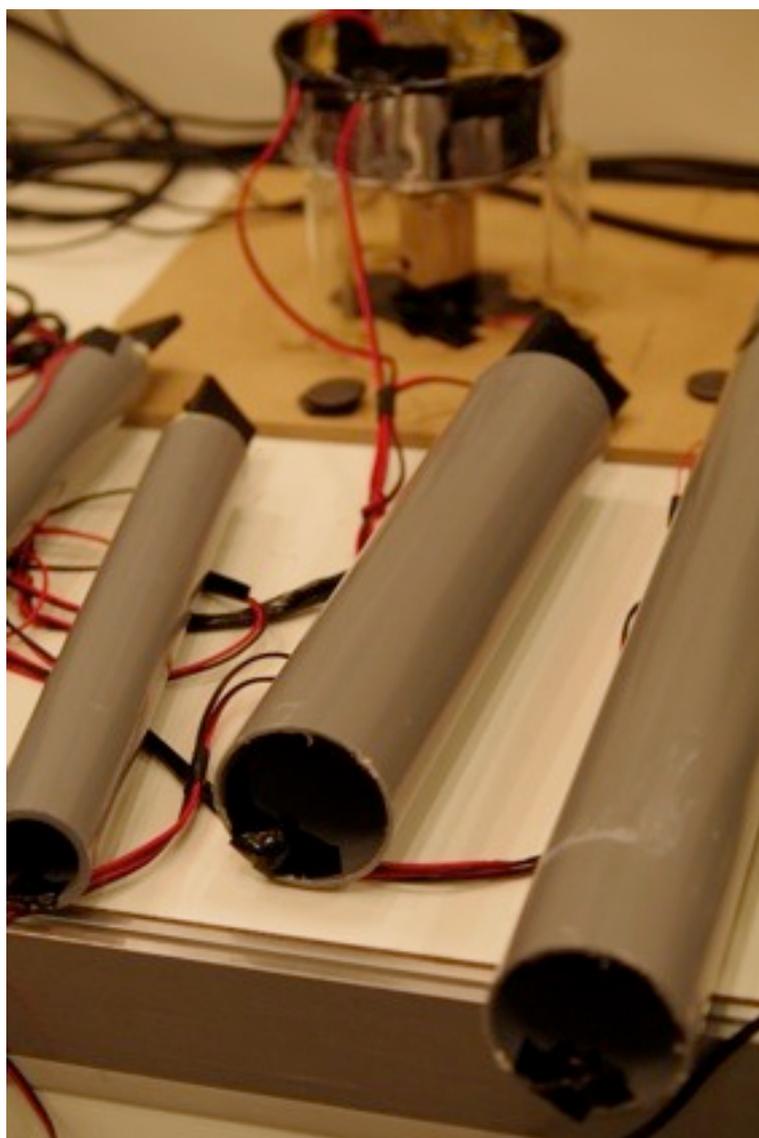


図27: AsWi

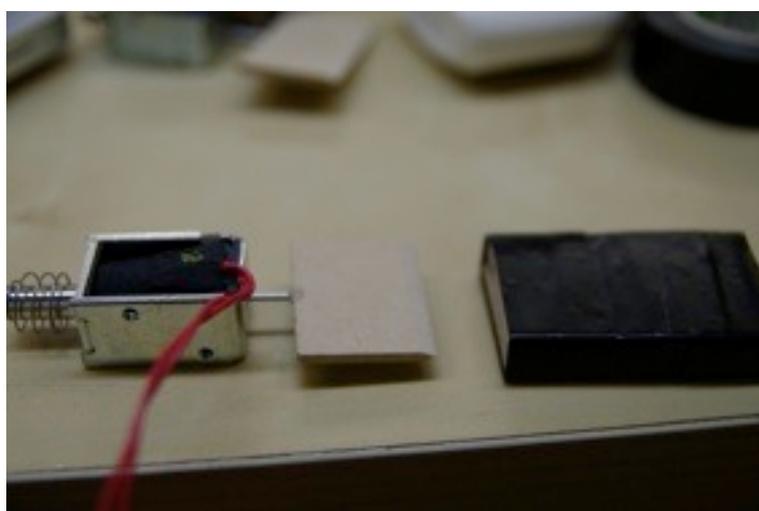


図28: AsWiの内部構造

## 4.2 AsMetal

モーターとたくさんの金属片を用いて、ノイズを発生させる装置である(図29)。これもモーターや金属片の位置によって、出る音色が微細な変化をするものである。この名称は、AsWiと同様に”Acoustic Synthesis Metal”の略称である。

この作品では、以下の要素を用いる。

- 1-b. 持続的に生み出されるもの
- 2-a. 微細な音の変化
- 2-b. 多彩な音の変化

### 4.2.1 AsMetalの構造

AsMetalは大量の金属片を篩の中に入れて、それを磁石によって動かすことによって音響を生み出すものである。篩の下部にはモーターを設置し、モーターには磁石が接続されている。モーターの回転によりこの磁石が動き、それに応じて金属片が引きつけられ、偶発的なノイズを出すことを試みたものである。動きによって、金属片の位置にムラが生じ、その位置がさらに偶発的に動くことによって予測不可能な音を出す。

### 4.2.2 AsMetalの課題

AsMetalの欠点としては、配置がいかなるものであろうと発生音が完全にノイズであるため、音に大きな変化が生まれ得ないことである。それはムラによる若干のリズムの違いには繋がるが、明確な音の変化を生み出すことが難しかった。また、構造上大きな音を出すことができず、表現力に欠けてしまう。そのため、他の手段で音を生み出すことを検討した。

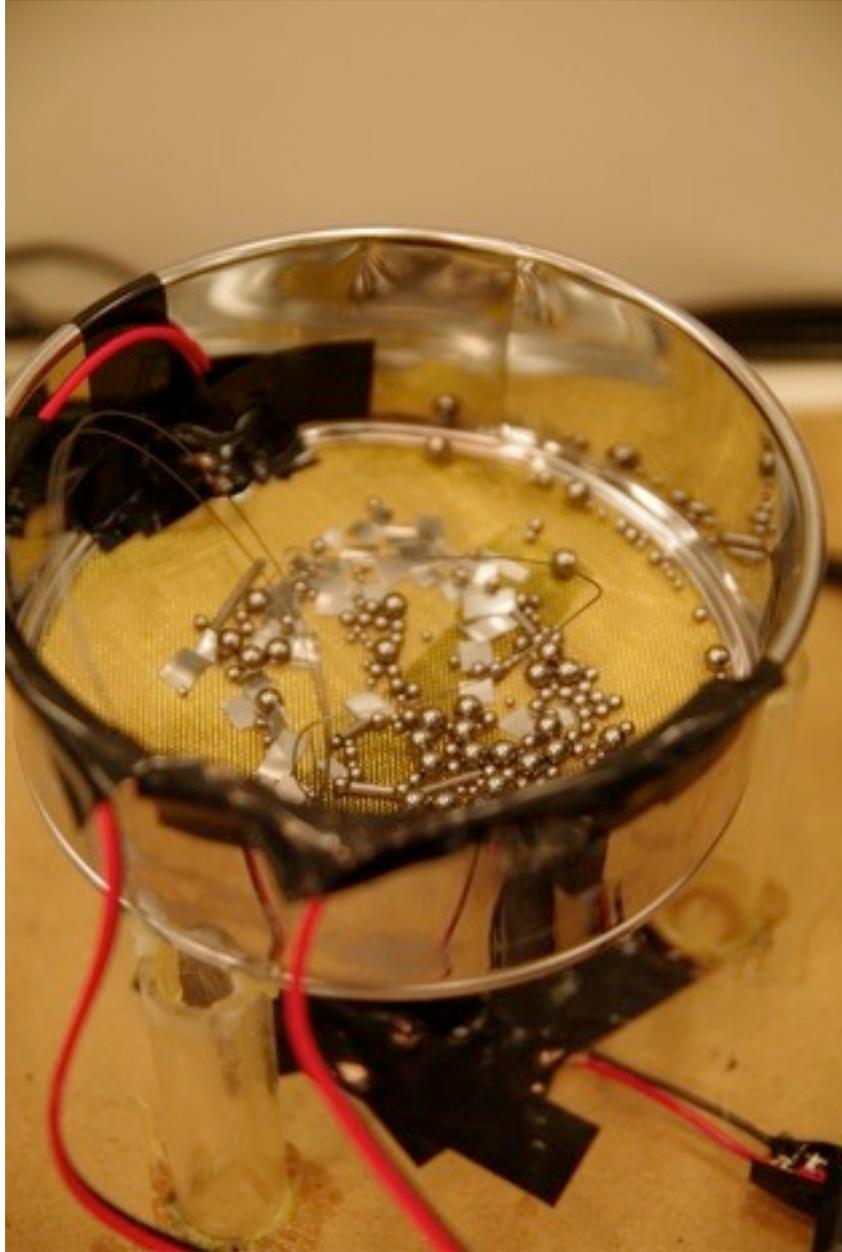


图29: AsMetal

## 4.3 MassProduction

これは複数の枡をモーターを用いて自在に動かせるようにし、その枡の中身によってさまざまな音色を出す試みである。ユーザーは自由に枡を配置することができ、その位置がモーターによって変化することで、置いた人が予知できないようなリズムや音を生み出すことを想定したものである。

この作品では、以下の要素を用いる。

- 1-a. 単発的に生み出されるもの
- 2-a. 微細な音の変化
- 2-b. 多彩な音の変化

### 4.3.1 MassProductionの構造

MassProductionは音を生み出す物体となる枡の部分と、枡を動かすアクチュエータが含まれる部分からなる。本作品の制作時には、枡の部分は「客体モジュール」、アクチュエータの部分は「主体モジュール」と呼んだ。初期構想ではこの客体モジュールと主体モジュールを組み合わせたものを複数個用意することによって様々な音を出そうとしている(図30)。

この作品では、「身近なもの」のもつ音に主眼を当てている。枡自体は非常にありふれた、計量器、食器としての役割を持ったものであり、通常は楽器として意識されることはない。しかし、当然叩くことによって何らかの音を発する。こうした自然的な音を組み合わせることでリズムや音色を作り出し、新しい音響を生成することができないかということを考えた。過去に具体音を取り入れたミュージック・コンクレートのような例があるが、それを実際の環境で、人とのインタラクションを繰り返しながら作り出すものがこのMassProductionである。

MassProductionにおいては、コンピュータはアクチュエータである「主体モジュール」を動作させ、その上に「客体モジュール」である枡を人が置いていくことでサウンドを作り出していく。主体モジュールはMax/MSPから操作をコントロールすることができるが、モジュール自体はマッサージチェアのように内部の玉をモータで回転させるものである(図31、32)。この運動により、上に置いた客体モジュールが、徐々に位置をかえていき次第にそれぞれがぶつかり合い音を出す。それは一定の周期を生み出すものであり、そこからリズムが生まれる。また枡の中にもものを入れれば、枡の中のもの自体が場所をかえて動き、さらに別の音を出す。枡の素材を木だけではなく他のものに変えることで、音のバリエーションも増やすことができる。

### 4.3.2 MassProductionの課題

この機構の欠点として、打撃音が中心になる性質上、音色のバリエーションがあまり増えないというものである。もちろん枡の素材や枡の中に入れるものを検討することによって、さまざまな音を作り出すことができるが、その動きの中心が枡自体の小さな動きの連続となるため、効果的な音響を得られなかった。また音色の意外性が低く、コンピュータや既存の楽器と結びつけた際に、「表現」といえるほどの質を持った音色を提供できなかった。また、思ったほどの音量を出すことができなかったのも欠点となる。これは枡自体がそれなりに響きを生み出す構造をしてはいるものの、モータの音量を上回るほどの響きを作り出すことができなかったことである。

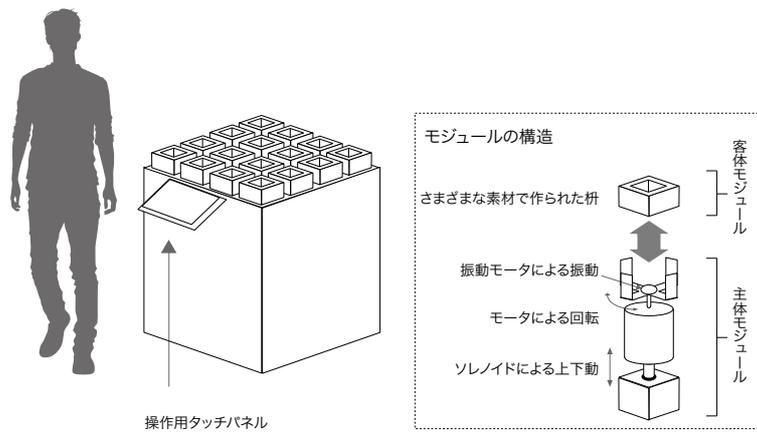


図30: MassProductionの初期構想



図31: MassProduction

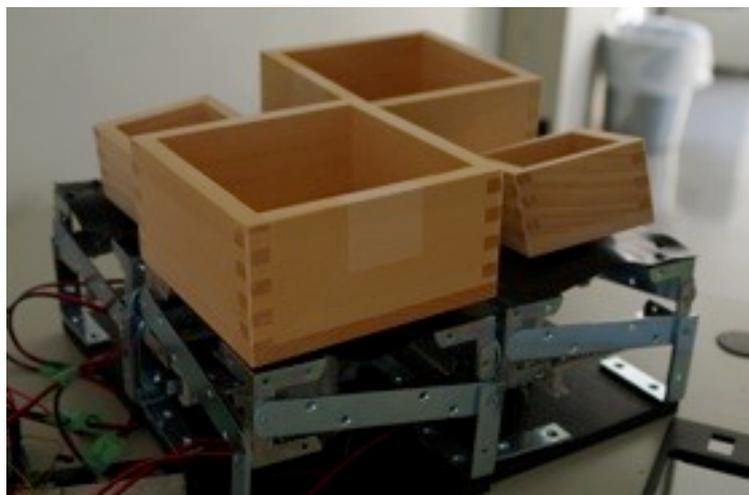


図32: MassProduction

## 4.4 Takuboku

Takubokuは音源を装置自体ではなく、空間に依存する作品である。これ自体は壁等に  
取り付け可能なマレットであり、人の動きに合わせて対象物を叩き、「新たな音」に気づ  
かせる装置である。

この作品では、以下の要素を用いる。

- 1-a. 単発的に生み出されるもの
- 2-c. 空間的な音の変化

### 4.4.1 Takubokuの構造

Takubokuはマレットとなる本体と、人の動きを感知する赤外線センサからなる(図  
33)。これは前節で説明したMassProductionと同様に、「身近なもの」の持つ音に主眼  
を当てたものである。すなわちこの作品は、普段は楽器とは見なされないものを楽器と  
して扱うことを目的としている。空間に存在する柱や壁、机、椅子などは、楽器として  
見なされることは無いが、力を加えればどれも音を発する。これらを「客体モジュ  
ール」として捉え、それを人の動きに合わせて「主体モジュール」であるマレットを動作  
させ、無意識のうちに取り出すことで、その空間が持ちうる音に新たな気づきを与え  
るのが作品の目的である。ここでは壁を叩いている(図34)が、実際には何を叩いても構  
わない。赤外線センサにより人の接近を感知し、動作する。

### 4.4.2 Takubokuの課題

ものを叩くという動作を中心としているため、MassProductionの時と同様、音色が  
打撃音に限られてしまう。他にも擦ったり引っ掻いたりという動作を考えたが、これら  
が構造体に与える影響があまりにも大きいため、実現は難しかった。またただ叩くとい  
う動作だけでも、あまりにも回数が多ければ不可逆的なダメージを与えてしまうこと  
も考えられたため、制作を断念した。また、何らかのセンサの入力に対してものを叩く  
という動作はありふれており、差別化を図ることが難しかった。特に明和電機の”ノッ  
カー”との類似度が高かった。



図33: Takuboku



図34: Takubokuの動作する様子

## 4.5 Ryo-on

Ryo-Onはこの研究の最終成果物であり、過去作ったものを得た知識や、新たな調査を含めて作成したものである。これはアルミダクトとバネからなり、バネを振動させることによって音を奏でるものである。この節では、他の作品と比較して多くRyo-Onの説明を行なう。

この作品では、以下の要素を用いる。

- 1-b. 持続的に生み出されるもの
- 2-a. 微細な音の変化
- 2-c. 空間的な音の変化

### 4.5.1 Ryo-Onの名称について

Ryo-Onは、音と龍を組み合わせて作った造字である「龍」に由来する。これは外観が龍に似ていることから名付けられた。本作品の正式な名称は、「龍(Ryo-On)」であるが、読みやすさなども含め、便宜上ここではRyo-Onとして紹介する。

### 4.5.2 Ryo-Onの先行事例

バネを利用して不思議な音を出すことは多くの事例がある。糸電話の派生したものであるバネ電話は、糸電話の音の伝達装置である糸をバネに替えたものである。糸電話は物理的な振動を糸で伝えるものであるが、バネを利用することで振動時間を延長させ、リバーブのような効果を得ることができる。それぞれのバネは固有の共鳴を持っており、共鳴によって伝わった音が持続する。それがリバーブを生む。また、鈴木昭男のアナラポス(図35)は、バネ電話を改良し、さまざまな用途で利用できる楽器としたものである。これはバネと金属製の筒からなっている。この筒を叩いたり、バネを擦ったりすることで、複雑な音を奏でるものである。これはバネの振動の特性を利用して複雑な音を生み出す好例といえる。より一般に普及したもので、バネの響きを十分に利用したものが、スプリングリバーブである。スプリングリバーブは音源をバネに流し、そのバネの振動を増幅させることで、擬似的なりバーブを得ることである。これはデジタル処理によるリバーブエフェクターが誕生する前は、一般的なりバーブの付加方法であった。

Ryo-Onの直接のアイデアのきっかけとなったものは、スプリングドラムという楽器(図36)である。これはインドの打楽器奏者である、トリロク・グルトウが開発したものである。筒状のドラムに長いバネが装着されている。これを振動させることによって、バネの振動がドラムの膜の振動及び筒によって増幅され、バネの音とは違った響きを生み出すものである。これはそのほかの例と違い、バネが両端ではなく片方の端にしか固定されていない。そのためバネが自由に振動し、音がかなり長く持続する。また周囲の物体に触れることで、その接触音が生じ、これもバリエーションを生み出すものとなる。

### 4.5.3 Ryo-Onの基礎

スプリングドラムを元に、新しい音色を持ったものを3章で用いた手法で探索した。まず調べたのは、どのようなバネが最も響くかである。複数のバネを用意し、その中でどのバネが最も豊かな音がするかを調査した。線径0.4mm、総巻数300のもの、線径0.5mm、総巻数132のもの、線径0.6mm、総巻数182のものを入手し、それぞれで検討



図35: アナラボス



図36: スプリングドラム

を行った。全て長さは300mmである。この3者を比較したところ、もっとも音に影響を与えるのは長さ辺りの巻数であることがわかった。巻数が多いほど音が連続的に発生し、単発的な音から連続的な音に聴こえるようになった。巻数によってバネ同士の音の反射が増えるからである。そのため、長さを持ちつつも巻数の多いバネを使用した。入手度合いも含めて検討したところ、全長1000mm、線径0.5mm、総巻数700のバネを利用することにした。

次に、筒をどのように変化させるかを考えた。筒自体をそのまま他の物体に置き換えることも可能であるが、ここは管に置き換えることで、打楽器の一種であるスプリングドラムに管楽器的な要素を加えられないか考えた。管楽器的な要素とは、すなわち管の共振により生まれる明確な音程感である。バネの振動だけでは非高次倍音を多く含むノイズで可聴な非楽音となるが、ここに管の共振によるフィルタリングを加えることで、高次倍音を多く含む、楽音的な音色を生み出すことを考えた。

その際に利用した素材は筒状のものである。柔軟性を持つ紙筒、木筒、金属の筒などを試した。それぞれは素材に応じた音色を発するものの、面白みに欠ける部分があった。そのため、筒を柔軟性を持つものに変えることを考えた。試したものとしてはゴム製ホース、紙筒にゴムのジョイントをつけたものがある。これらはただの筒よりも柔軟な動きを行なえるようになったものの、ゴムの部分が音を吸収してしまい、「よい音」からは離れたものとなってしまった。そこで、高い音の反射率を持ちつつも、より柔軟性を持つアルミダクトを素材として用いることを考えた。これにより、柔軟性と音の良さという2つの要素を兼ね備えたものを作ることができた。

バネ自体の音は音程感をあまり持たない音である。しかし、ダクトを通すことでより音程感の強い音に変化する。これは管自体の共振により、音が一定の周波数を通すバンドパスフィルタの役割を果たすからである。実験に使用した太さ0.4mm、長さ30cmのバネを、その振動だけをコンタクトマイクで拾った場合(図37)と、長さ50cmのアルミダクトを通して拾った場合(図38)の比較を図示する。周波数領域が明確になり、音程感が生まれ楽音的要素が高まったのがわかる。

また、振動膜はアルミ板を用いた。ドラムでは主にアクリル板が用いられるが、金属的な音と、トータルの見た目の統一感を出すために、アルミ板を振動させることとなった。このアルミ板は振動しやすく、尚かつ剛性を持つ範囲で、0.3mm厚のものを使用した。こうして作られたものがアルミダクトとアルミ板、そしてバネを使ったプロトタイプ(図39)である。

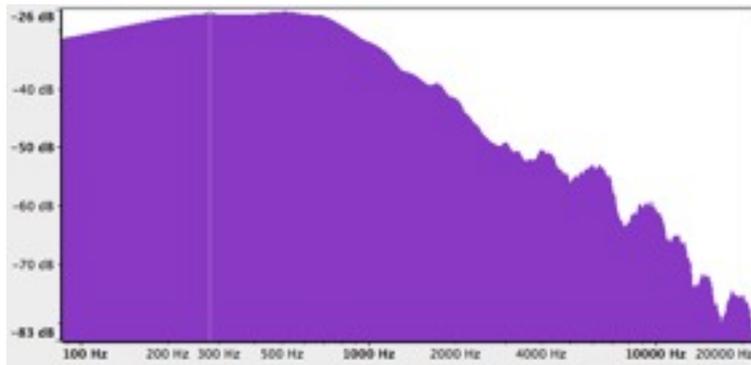


図37: バネの振動のみを拾った場合の波形

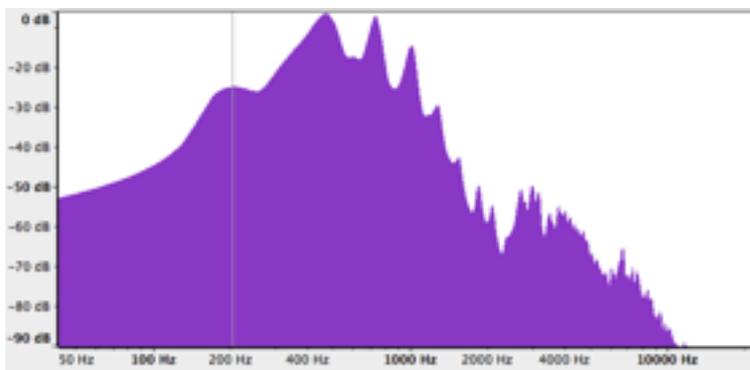


図38: アルミダクトを通した場合の波形



図39: アルミダクトを利用したRyo-Onのプロトタイプ

#### 4.5.4 ダクト状のものを動かす手段

自在に曲げることのできる柔軟性と、音響的特性の良さからアルミダクトを選択し、ここから音響を生み出すための方法について模索した。

音響的な特性を損なわないために、ダクトの内部になんらかの機構を用いることは極力避け、外部の力のみによって動かすことを検討した。その際に、既存の研究を参照し、どのような技術を用いて長く柔軟性を持ったものを動かしているかを調べた。さらに、楽器という性質上、駆動系にも静粛性を求めた。駆動系があまりにも大きい騒音を発した場合、本来の目的である音を発する機構がマスキングされ、音色に大きな影響を与える可能性がある。完全なる静粛性は求めにくいものの、できるだけ静かな音で駆動するものを調査した。

参照したのはロボット工学の分野である。ロボット工学においては、関節を持つようなものを動かす手段についての研究が多くなされている。ロボットは一般的には限られた関節を持つものが多いが、東京工業大学の広瀬・福島研究室では、多数の自由に回転する関節を持つ蛇型ロボットの開発が行なわれている(図40)。この蛇型ロボットを参考に、アルミダクトを自由自在に動かすことを考えた。これはモジュールを組み合わせることによって、ひとつの長い物体にしたものである。中には多数のアクチュエータと制御系が含まれている。内部には左右に屈曲するサーボモータと、回転する駆動系を含む。これらがコントロールされることによって、くねりや鎌首をもたげるなどの自在な動きを可能にしている。ただし機構的に複雑なため、騒音を発生する。また内部は管状になっておらず、機構によって埋め尽くされており、ダクトを動かすにはあまり適していない機構であった。

次に調査したのは、ミミズのように動くロボットである。ミミズの動きは蠕動運動といい、消化管と同じ動きを行なうものである。これは細かく分節化された複数の環状の節が伸縮することによって起こる動きで、この伸縮運動によってミミズは移動する。この動きが蛇をモデルにした動きとは違う点は、中を空洞にできる点である。消化管と同じ動きであるので、例えばポンプのような中に何かを通すことを前提としたものにも利用できる。この研究を行なっているのが、中央大学の中村研究室である。この研究を調査し、応用できるかどうかを調べた。通常ミミズ型ロボット(図41)は、蛇型ロボットと同じく、中に駆動系を備えている。またバイオメタルを利用した研究も存在するが、静かではあるがトルクが低く、アルミダクトを駆動させるものとしては不十分である。

この蠕動運動をモデルにしたもので、ポンプが作られている(図42)。蠕動運動はそれぞれの節の収縮による運動であるため、移動のためのエネルギーが管の外側と内側の両方に伝わる。そのため、ポンプとしての応用が行なわれている。このポンプの原理を使って、自在にアルミダクトを操作できないか検討した。このポンプは複数のゴムの節からなっている。この節は、空気圧のアクチュエータによって収縮をし、管の外部と内部それぞれに動力を発生させる。アクチュエータの部分はゴムでできているが、中の素材はゴムでなくても駆動させることが可能である。

しかし、この機構の欠点として、空気圧のアクチュエータを稼働させるためのエアークOMPRESSAが必要となることがあげられる。エアークOMPRESSAはそれ自体がかなりの騒音を発するものであり、静音エアークOMPRESSAと呼ばれるものでも60dBほどの騒音を発する。そのため、エアークOMPRESSAの音を消音する必要性ができてしまう。また、巨大なものになればなるほど、その動きは緩慢となってしまう、バネを振動させるのに十分な動きの速さを出すことができない。

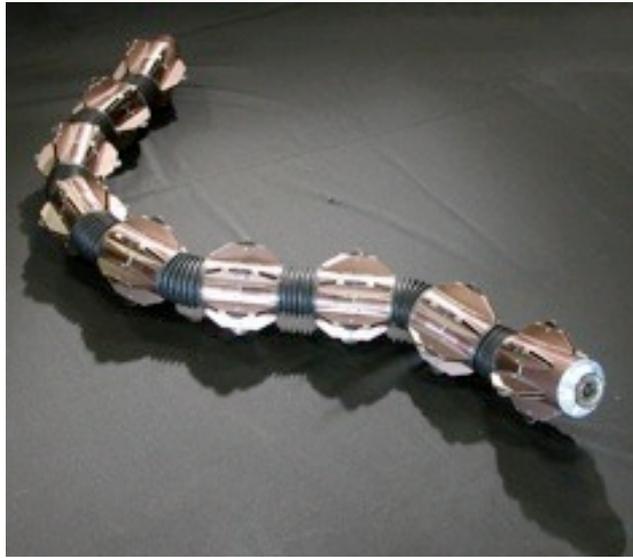


図40: 蛇型ロボットACM-R5

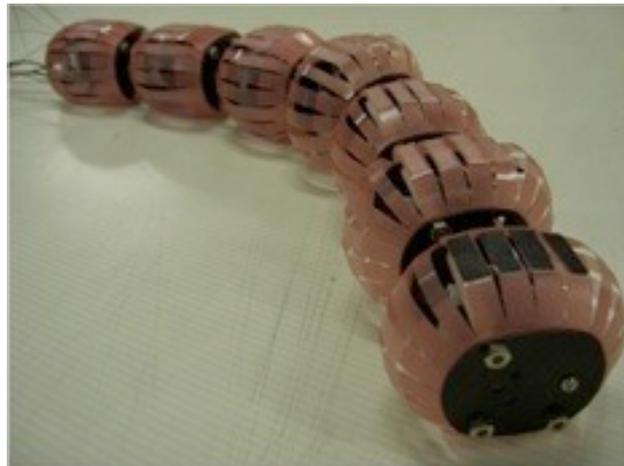


図41: ミミズロボット



図42: 蠕動運動ポンプ

長い管状のものを動かす手段として研究されているロボットは以上であるが、どちらもアルミダクトを動かし、バネを振動させるのには適したものではなかった。また、それぞれの構造物の制作及び入手も困難であった。そのため、通常のロボット制作で使われるようなアクチュエータを用いて、より簡便な方法で、外側からアルミダクトを操作することを試みた。その際、いくつかのアクチュエータを入手し、実験を試みた。

まず試したのはサーボモータである。サーボモータはロボット用に用いられるモータで、内部にフィードバックのための位置検出器と、減速機を持ったものである。この機構により回転の角度を自在にコントロールする。減速比は高く設定されており、大きさに比べて高いトルクを持つ。そのため、小型かつ高出力であり、視覚的にあまり影響を与えることなく搭載することが可能となる。

サーボは通常ロボットの関節として用いられるため、アルミダクトの1つ1つの節としてサーボモータを装着する実験をした。サーボ自体は1つの回転軸にしかならないが、複数個あわせることで蛇のような柔軟な動作ができないかを考えた。サーボを軸としてダクトを動かすために、簡易的にサーボを押さえつける機構を作成し、それを関節として利用することにした。

この機構においては、サーボにより駆動する「外骨格」の部分をArduinoを用いてPWM制御した。サーボのトルクを伝えることと、ダクト自体の柔軟性を両立するため、横方向には動かないが、縦方向には自在に動くローラーチェーンをサーボのホーンに延長させるように取り付けた。これにより、ある程度の動きを作ることができたが、サーボ自体が多くのギアを内部に備えたものであり、駆動時の騒音が大きいというデメリットがあることが分かった。また、サーボは非常に大きなトルクを発生させることができるが、逆にスピードは遅くなる。小型サーボに利用されるモータは小型のものであり、ある程度のスピードとトルクを両立させたものが存在しなかったため、サーボを利用することはやめ、他の手段によりダクトを駆動させることにした。

サーボの難点であった騒音があまり発生しないモータとして、ステッピングモータが挙げられる。ステッピングモータは通常使われるモータと違い、電流を交互に流すことにより、運動量を少しずつ制御することができるモータである。1つ1つの運動をステップといい、このステップを連続させることで回転することができる。通常のもとの相違点として、回転角度を厳密に制御することができることや、ゆっくりとしたスピードを出すために減速ギアを必要としない点である。ギアを持たない構造のため、ステッピングモータを利用してダクトを動作させることを検討した。

ステッピングモータでは大きな動作をさせることができないため、ダクト全体の駆動にsprocketとラダーチェーンを用いた(図43)。ステッピングモータでラダーチェーンを巻き取ることによって、回転だけでは行なえない大きな動きを直線運動に変えることができる。また、回転運動だけでは実現不可能な大きな動きを行なわせることが可能である。この機構を用いて、ダクトを動かす実験を行なった。結果として、音を出すのに十分なスピードとトルクを発生させることができなかった。ステッピングモータはあまり高いトルクを持っていない。さらに、スピードを上げすぎると脱調という現象が起こり、うまく回転しない。脱調を起こすスピードはかかっている負荷により変化するため、柔軟性を持ち、その都度負荷が変化するような装置には不向きであった。

以上のことから、サーボモータやステッピングモータのようなモータを利用せず、一般的に用いられるモータの中から、ダクトを動かすのに適したものを選択した。サーボやステッピングモータは回転角度を厳密に制御できるものであったが、そこまでの厳密な制御を要しないことと、入手性の高さから一般的なモータを使用した。サーボの実験

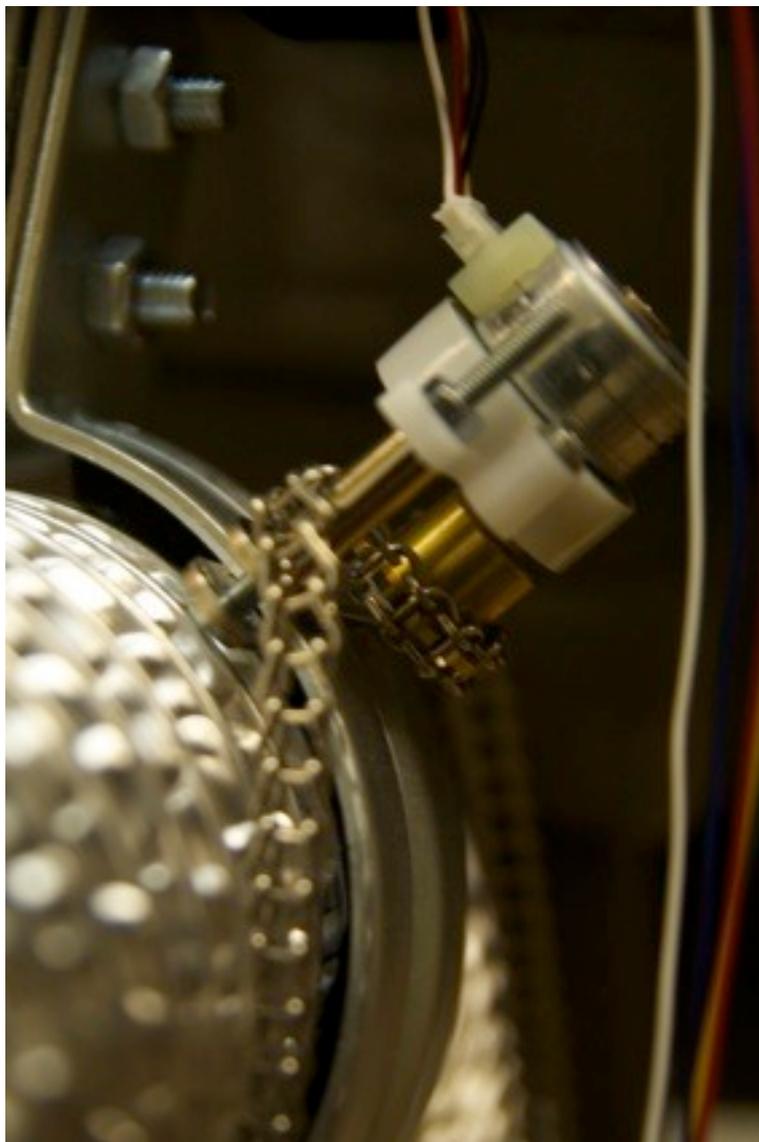


図43: ステッピングモータとラダーチェーンを取り付けたもの

	サーボモータ	ステッピングモータ	ギアードモータ
トルク	0.9~5.4kg*m	~1.9kg*m(脱調しない範囲)	2.7~10kg*m
スピード	59~83rpm	~33rpm (脱調しない範囲)	117~466rpm
静音性	小	大	中

図44: 各モータ同士の比較

の際に問題となった騒音であるが、ギアボックスが密閉されたギアドモータを利用することで、ある程度は低減可能となった。今回使用したものは、ギア比が1:15~1:60の範囲のものを選択した。そのため、トルクをかなり増大させることができた。

今回入手可能であった各駆動装置における特徴を表にまとめた(図44)。結果として、採用したギアドモータは静音性としてはステッピングモータに譲るものの、バランスのとれたものとなっている。

伸縮に関しては、ステッピングモータの際に利用したラダーチェーンを用いた。伸縮に関してはもっとも効率よく制御することが可能となった。また、バネの振動を生み出す、ダクトの動作に関してはクランク機構を用いてダクト全体を動かした(図45)。ダクトの柔軟性により、僅かな反復運動が大きな振幅となってバネに伝わり、十分な音量を出すことが可能となった。

#### 4.5.5 RyoOnの構造

Ryo-Onはアルミダクトとバネからなる本体と、それを支える構造体からなっている。構造体は作り替える毎にバージョンアップを行なっている。

本体はそれぞれ直径が50mm、75mm、100mmの3本のアルミダクトからなっている。これは直径により振動する膜の範囲が変化し、音程が変化するからである。直径が小さいほど音程が高くなり、逆に大きいほど低くなる。使用するバネは全て100mm長の同じものを用いているため、アルミダクトの太さによる音程の違いにフォーカスすることができた。

構造体には本体を駆動させるためのアクチュエータと、本体を固定するための金具が取り付けられている。また、外界の情報を察知するセンサも構造体につけられる。金具によって本体を構造体に固定し、アクチュエータが駆動することによってバネの振動、及びアルミダクトの伸縮が生み出される。バネの振動を生み出すアクチュエータは1つのモータとクランク機構からなる。最初はラダーチェーンとモータにより全てを制御することを考えていたが、長さの面から2つの駆動部分を採用することにした。モータが回転し、クランクが動くことによって横の往復運動がダクトに伝わる。ダクト自体は柔軟性を持つため、その運動は慣性に従ってより大きいものとなる。大きな振幅と素早い動きがバネに振動を与える。この振動により、基本となるバネの振動音が発生する。

初期の段階では、Ryo-Onは立体音響のように人に取囲むように配置し、その中に入った人を感知し、音を立てることを構想していた(図46)。最初は赤外線センサを用いて人の感知をしていたが、赤外線センサは特性上直線上にしか情報をとることができず、例えば人がセンサに向かって手をかざすだけで反応が起こってしまう。もう少し広く、空間の全体の情報をとるために、センサにはKinectを用いた。Kinectでは深度情報と画像解析による人の検出が行なわれ、ライブラリを利用することによって人の重心位置、すなわち腰の辺りの3次元座標を取得することができる。人がRyo-Onで囲まれた空間に入ると、それぞれが反応し、人の動きに合わせて音が変わっていくというインタラクションを構想し、制作に入った。

この人を取り囲むというモデルで制作したのが、Open Research Forum2011(以下、ORF2011)で展示したものである(図47)。本体を複数の構造体に取り付け、構造体で正三角形を作る。その内部の情報を外に置いたKinectで取得する。この空間内に人が入ることによって、ダクトが振動し音を奏でる。また、それぞれのダクトはランダムで伸縮を行ない、音程に常に変化を与えるように設定を行なった。これは立体音響的な意図を考慮したものである。これを「モデル1」と呼称する。このとき、人の位置を

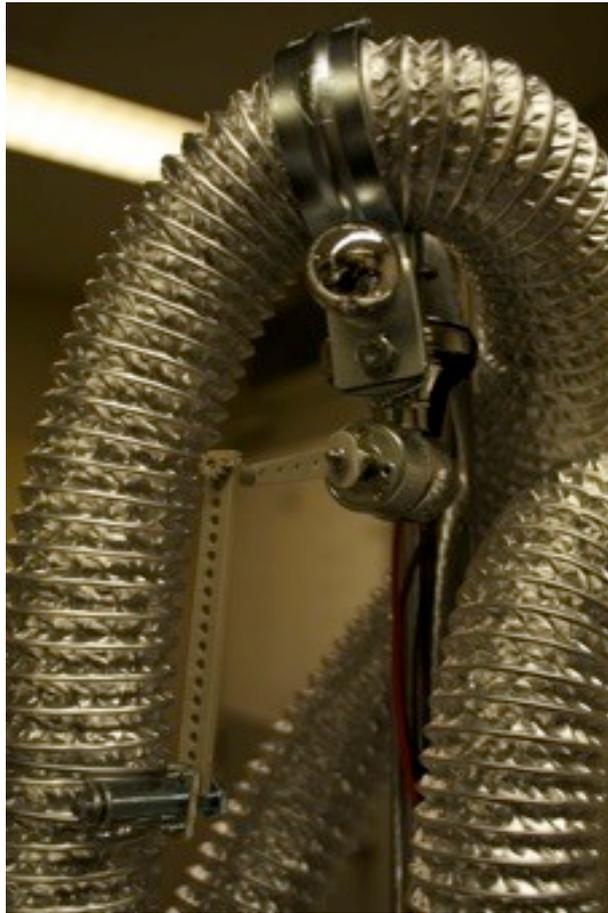


図45: クランク機構の様子(モデル1)



図46: Ryo-Onの初期スケッチ



図47: Ryo-Onモデル1(ORF2011にて)

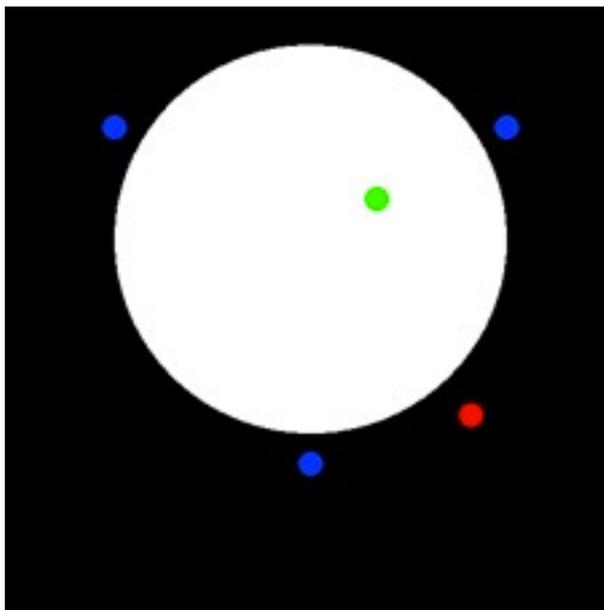


図48: Processingの画面(モデル1)

Kinectにより深度をとりながら、空間におけるx軸、すなわちKinectから見たx軸の位置座標と、z軸、すなわちKinectからの深度座標を取り、それを上から見たようにProcessingを用いてマッピングした(図48)。白い円がRyo-Onの反応する空間を表しており、Ryo-Onの座標が青、その外にいる人の座標は赤、中にいる人の座標は緑で示されている。人を示す点が緑のとき、すなわち人が反応する空間内にいるとき、Ryo-Onは反応する。また、それぞれの筐体との距離が近づけば近づくほど、より大きく反応するようにした。この処理はProcessingでSimpleOpenNIライブラリを用いて行い、StandardFirmataライブラリを利用したArduinoとシリアル通信を行なうことで、筐体を動作させている。

しかし、人を取り囲むことによる空間的制限と、Kinectの精度などを考えた結果、人を取り囲み、中心で音を聴いてもらうというインタラクションではなく、人が接近したり、通り過ぎたときに音を発生させるような構造へと変化させた。これが第2のモデルである。構造体を1つの箱状のものとし、そこにダクトをからませるような表現を行なった。動作のきっかけは前のモデルでは人が入ることによって行なわれたが、今回の場合はRyo-Onの前に広い空間が広がるため、人の位置を取得し、Ryo-Onとの距離に応じて動きの強度を上げるように試みた。またKinectによって取得した深度を、ある空間ごとに平均化し、その値に応じて伸縮のペースに影響を与えた。例えばRyo-Onの近くに物体があり、深度の平均が浅くなっている状態では、伸縮のペースは上がる。多くの人がRyo-Onの前にいる際は伸縮のペースが上がり、これによって空間に依存する表現の変化を作り出す。これを「モデル2」と呼称する。これによってそれぞれの機構がうまく隠蔽されると共に、人とのインタラクションも創発させやすくなった。そのため、このモデルは、インターカレッジコンピュータ音楽コンサート2011(以下、IC2011)でインスタレーション作品として展示を行なった(図49)。

モデル2は動作の確認用に、ProcessingでKinectの画面をそのまま表示し、オーバーレイする形で表現している(図50)。上部に赤い四角、下部に緑の四角が表示されるが、それぞれが対応する筐体のクランクの動作と、伸縮の動作を示している。動作はモデル1と同じく、Kinectの情報をProcessingにSimpleOpenNIライブラリをインポートしたもので処理し、ArduinoとStandardFirmataライブラリを用いてシリアル通信をし、筐体を動作させている。

またアルゴリズムの改善のみならず、機構自体の信頼性も向上させた。そのため、クランク機構(図51)と、ラダーチェーンによる伸縮機構はフレームに取り付けられ(図52)、より強固なものとなっている。



図49: Ryo-Onモデル2(IC2011にて)



図50: Processngの画面(モデル2)



図51: クランク機構の様子(モデル2)



図52: ラダーチェーンとスプロケット機構の様子(モデル2)

#### 4.5.6 Ryo-Onに対するフィードバック

前述の通り、Ryo-Onは制作の過程で表現方法を変えて展示を行なった。ORF2011の際、すなわちモデル1の展示(図47)と、インターカレッジコンピュータ音楽コンサートにおけるモデル2の展示(図49、53)である。モデル1の時には、多くの鑑賞者からのフィードバックを受けることができた。特に音を聴いてもらった人の中で多かった意見が、「地下鉄の音」「電車の音」である。これは「管の中を振動が伝わる」という点で、Ryo-Onが奏でる音と更にマクロな現象との共通点が見られた。他にも、シューゲイザーのようなエフェクトを駆使したギターの音や、特定のアーティストを指してコンピュータ音楽のような音だという意見をもらうことができた。これは本研究の狙った音を生み出していることとなる。総じて実空間に存在するバネの音だと認識できた人は少なかった。また、バネを擦ったり、アルミによる膜の部分を叩いたりといった、新たな音響生成を試している人もいた。

そのほかの得られた感想として、シンセサイザーのような音がする、というものがあつた。これは再現性がなかったため、どのような生成プロセスで音響が生まれたのかはわからなかったが、制作者の意図を超えた可能性を作品が持っているということを証明した。

また、バネを引っ張って離すことによって膜を強打し、爆発的な音響を生み出すという表現方法も可能である。このように、動作するものに対して直接動きを加えることで、コンピュータと人間のコラボレーションも可能となる。

またORF2011ではメディアの取材を受け、ITmediaのねとらぼにRyo-Onが掲載された(<http://nlab.itmedia.co.jp/nl/articles/1111/24/news036.html>)。高い注目度があり、多くの人の興味をひいた1つの例といえる。

モデル2の展示では、1つのインスタレーションとして展示したため、フィードバックを得る機会は少なかったが、多くの人がRyo-Onの前で動き、インタラクションを楽しんでいた。それぞれの音に注目したり、積極的に触れることで更なる音を生み出そうと考えている人も見受けられた。また、ふるまいを観察すると遠くから徐々に接近し、近くでじっくりと生み出す音を聴こうとする人が多かった。

また、生物的な感想を持った人も多かった。その動きを純粋に楽しむために、あえてセンサの前で動き動作をコントロールする人がいた。動き自体はクランク機構による単純なものであるが、柔らかいものを動かしているために複雑なものに見える(図54)。クランク機構による動作だと気づかない人も多くいた。また、動きや見た目に対してエロティックであったりグロテスクな解釈を行なう人もいた。楽器には見た目にエロティックであったり、グロテスクであったりといった生物的要素を含むものも多い。そういった動きに対する愛着を持たれることもあり、音だけでなく見た目の面からもアプローチすることができたといえる。



図53: IC2011でのモデル2展示の様子



図54: 動作するRyo-On(モデル2)

## 5. おわりに

---

本章では、前章の制作物を踏まえて、本研究が今後どういう形に発展するかを説明し、本研究の成果について改めてまとめる。

## 5.1 研究により得られた音響

本研究で起こる音響の現象は、全て実空間で起こるものである。そのため、コンピュータ上で行なわれるシミュレーションよりもさらに複雑な要素を持つ。例えばRyo-Onの例では、バネの挙動は初期状態によって変化するカオス的な振る舞いを示す。これにより、全てをコンピュータで行なうよりも豊かな音響を生み出すことができた。また、直接作品自体に手を加えることによって、誰でも音色に変化をつけることができる。デジタルによって生み出された音響は、気軽に誰かが変化させることはできない。変化はあくまでも制作者の意図の上で行なわれる。それに対して、本作品の方法論では制作者が意図していなかった行為も音響として付加できる。実際にRyo-Onの展示においては、バネを擦ったりすることで意図していなかった音響を生み出そうとする人がいた。また、バネを引っ張って離すことで、爆発的な音響を生み出すことができるという「発見」もあった。他にもセンサーのような音響が得られたり、意図せざる音響を作品自体、あるいは関わっている人が作り出すことができることを感じた。

これらのように、人が関わっていたり、一度起こった現象を利用して、更なる表現に繋がっていく可能性も考えられる。例えば再現性がなかった特異な現象がどのような状況で起こったかをセンシングし、それを再び生み出せるような環境を作ったり、人が作品に加えて与えた何らかのアクションをそのままデジタルに取り込んで、音響生成プロセスに加えるなどである。このようなフィードバックを加えることによって、実空間とデジタルでの反復処理が行なわれ、更なる表現に繋がる可能性もある。また、その場で生成されている音を録音し、それに更なるデジタル加工を加えることによって、コンピュータを含んだライブエレクトロニクスという表現も可能である。ライブエレクトロニクスはマイクというセンサを用いたコンピュータミュージックとすることができるので、一度実空間で表現することによって、実空間が持つ可能性を取り込みつつデジタルに落としこんでいく、という表現も、更に一步進んだ形態として考えることができるだろう。

リアルとデジタルの両者の境界を行き来するような作品は、2章で挙げたキネティックアートや物理現象を用いたビジュアライズ等でも多く制作されている。デジタルの表現だけでなく、リアルな現象を取り込み、その持つ個性を活用した作品はこれからも作られていくだろう。本研究はそのようなアプローチの中でも、音響に重点を置いたものとして評価することができる。今後の方向性として、そこにフィードバックを加えることによって、さらに両者の関係性を曖昧にし、揺らがせるようなものが生まれることも考えられる。音響分野においては、既にライブエレクトロニクスといった表現形態が確立されているため、本研究のような作品を通し、さらに新しいものが生まれやすい土壌が整っているだろう。

## 5.2 展示空間について

本研究の制作物は、インスタレーションとして展示された。しかしそれはあくまでもこのような表現の展示の一形態である。この研究の主眼はコンピュータのような音を物理現象で再現する、というものである。例えば過去においては、鳴子が人感センサの役割を果たしていた。何か接触したときに音を立てるといった楽器が、そのまま信号となっている。現代においてはそれはデジタル技術に置き換えられる。そしてそれに応じた信号音が鳴る。その信号音を本研究で意図していた物理現象による音響に切り替えることで、動きと音という要素を組み合わせた信号装置を生み出すことができる。そのために音響は信号

のような警戒的な音色にチューニングされる。これらは全て実空間にあるからこそ、容易に付加できるものである。

この研究により生み出されるものは、展示に関わらず、生活により密着した形態でも表現が可能である。例えばMass ProductionやTakubokuはそこにアプローチした作品であった。それは生活と音をより身近にし、空間そのものが楽器になる感覚である。あるいはRyo-Onのような物体自体が不思議な音を奏でるものを、既に存在しているものの代替として空間状に置くことも考えられる。このような研究を通して、実空間で表現される特殊な音響によって、更なる表現を生み出し、音にあふれた社会を生み出す可能性にアプローチできた。

### 5.3 まとめ

西洋音楽では、伝統的に構築を重んじ、その上に構築性を生み出すのに最適であるコンピュータを適応させて音楽を発展させてきた。本研究では、その歴史を踏まえた上でコンピュータミュージックの発展した形態を模索し、コンピュータミュージックの持つ要素を分析し、それを模倣するような現象を実空間で起こすことにより、コンピュータミュージックの持つ、

- ・定常的に生み出されるもの
- ・連続的で、さまざまな変化を伴うもの

という要素を持ちつつも、人が自由に接することができ、現象が実空間で起こり、音の生成過程を確認することができるアコースティックな演奏装置を制作した。これらの要素は最終成果物であるRyo-Onにおいては、このような要素を持ちつつ、鑑賞者が自由に手を加えられるような音響作品として結実した。また、今後の可能性として、フィードバックを利用してさらに境界的な音を生み出したり、音にフォーカスしたより豊かな社会を作り出すような発展可能性を見いだすことができた。

## 6.謝辞

---

主査をひきうけてくださった慶應義塾大学環境情報学部岩竹徹教授には大変お世話になりました。2年間という短い間でしたが、修士論文の執筆を含め、篤いご指導をいただくことができましたことに深い感謝をしております。また副査をひきうけてくださった慶應義塾大学環境情報学部田中浩也准教授、慶應義塾大学環境情報学部中西泰人准教授、ならびにエクス・デザインプログラムの先生方には、研究に関して多くの的確なアドバイスを受けることができました。感謝いたします。

岩竹徹研究室のサイバーサウンド・プロジェクトのメンバーの皆様にも感謝いたします。互いに切磋琢磨し、苦楽を共にしたことは研究活動において大変有益なものとなりました。時には研究活動をお手伝いくださり、感謝しております。特に、先輩という立場で日々アドバイスをくださった魚住勇太氏、小林良穂氏は重ねて感謝の気持ちを申し上げます。

慶應義塾アインクラインネスオーケストラの皆様、諸先輩方、ご指導いただいた先生方にも感謝いたします。研究を行なう上で必要な音楽の本質を、このオーケストラの活動を通じて理解することができました。

最後に、心身共に支えてくださった家族・友人には感謝を申し上げます。研究活動及び修士論文の執筆は、皆様方の助けがなくては決してできないものでした。以上を持ちまして謝辞とさせていただきます。

## 7.参考文献等

---

### 7.1 文献、論文

- [1] アラン・リクト 著／荻開 津広、西原 尚 訳／木幡 和枝 監訳(2010) “サウンドアート - 音楽の向こう側、耳と目の間”フィルムアート社 352pp.
- [2] 日本音楽表現学会 編(2010) “音楽表現学のフィールド” 東京堂出版 p.229
- [3] フィリップ・ロベール 著／屋間 賢、松井 宏 訳(2009) “エクスペリメンタル・ミュージック-実験音楽ディスクガイド” NTT出版 344pp.
- [4] オライリー・ジャパン 編(2009) “Make: Technology on Your Time Volume 06” オライリー・ジャパン 192pp.
- [5] 川崎 弘二 著(2009) “日本の電子音楽 増補改訂版” 愛育社 1115pp.
- [6] 山田陽一 著(2008) “音楽する身体—“わたし”へと広がる響き” 昭和堂 p.113-136
- [7] 中村 滋延(2008) “現代音楽×メディアアート—音響と映像のシンセシス” 九州大学出版会 207pp.
- [8] 吉川 茂、藤田 肇 著(2002) “基礎 音響学—振動・波動・音波” 講談社 269pp.
- [9] 楽器の物理学 N.H.フレッチャー、T.D.ロッシング 著／岸 憲史、久保田 秀美、吉川 茂 訳(2002) “楽器の物理学” シュプリンガー・フェアラーク東京 760pp.
- [10] カーティス・ローズ 著／青柳龍也、小坂直敏、平田圭二、堀内靖雄 訳(2000) “コンピュータ音楽—歴史・テクノロジー・アート” 東京電機大学出版局 1054pp.
- [11] 九州芸術工科大学音響設計学科 編 (2001) “音響設計学入門” 九州大学出版会 240pp.
- [12] D.J.グラウト、C.V.パリスカ 著／戸口 幸策、寺西 基之、津上 英輔 訳(2001) “グラウト/パリスカ 新 西洋音楽<下>” 音楽之友社 448pp.
- [13] 藤枝 守 著(2000) “響きの生態系 -ディープ・リスニングのために”フィルムアート社 255pp.
- [14] D.J.グラウト、C.V.パリスカ 著／戸口 幸策、寺西 基之、津上 英輔 訳(1998) “グラウト/パリスカ 新 西洋音楽<上>” 音楽之友社 369pp.
- [15] D.J.グラウト、C.V.パリスカ 著／戸口 幸策、寺西 基之、津上 英輔 訳(1998) “グラウト/パリスカ 新 西洋音楽<中>” 音楽之友社 404pp.
- [16] 安藤 由典 著(1996) “新版 楽器の音響学” 音楽之友社 306pp.
- [17] 早坂 寿雄 著／電子情報通信学会 編(1992) “楽器の科学” 電子情報通信学会 272pp.
- [18] マイケル・ナイマン 著／椎名 亮輔 訳(1992) “実験音楽—ケージとその後” 水声社 326pp.
- [19] 難波 精一郎 著(1989) “音の科学” 198pp.
- [20] 小川 博司、田中 直子、庄野 泰子、鳥越 けい子 著(1986) “波の記譜法—環境音楽とはなにか” 時事通信社 377pp.
- [21] 牧田 康雄(1986) “現代音響学(改訂2版)” オーム社 297pp.
- [22] Taro Nakamura, Kazuyuki Suzuki(2011) “Development of a Peristaltic Pump Based on Bowel Peristalsis using Artificial Rubber Muscle” Advanced Robotics, Vol. 25, No.3 pp. 371-385
- [23] 平山詩芳(2010) “Shaboned Display: 膜状素材の変形を利用したインタラクティブディスプレイ”

- [24] 関根雅人(2009) “Fluid Texture: New Cvisual Media and Pattern Development Using Physical Computing System and Fluid Material”
- [25] 高橋征資(2008) “人工筋肉・人工皮膚／人工音声を組み合わせた動的・触覚的インタフェースに関する研究”
- [26] 高山俊男、広瀬茂男(2005) “螺旋回転推進を行う三次元索状能動体の研究” 日本ロボット学会誌 Vol.22 No.5 pp.635-6
- [27] 嵯峨宣彦、植田晋也、中村太郎 “人工筋アクチュエータを用いた蠕動運動型ロボットの開発” 計測自動制御学会論文集, Vol.41 No.12 pp. 1013-1018
- [28] Rob Bandt(2003) “Taming the wind: Aeolian soundpractices in Australasia”

## 7.2 Webサイト

- [29] Edward Gno: IMSLP<<http://imslp.org>> 2012/01/05
- [30] てみる屋: 音があれば天国<<http://oto.temiruya.com/>> 2010/06/23
- [31] スズキユウリ: Yuri Suzuki<<http://www.yurisuzuki.com/>> 2012/01/05
- [32] Artnet Worldwide Corporation: artnet.com<<http://www.artnet.com/>> 2012/01/05
- [33] TOUCH WOOD 森の木琴プロジェクトサイト<<http://www.invisi.jp/works/xylophone/index.php>> 2012/01/05
- [34] 高橋 征資: バイバイワールド<<http://www.byebye-world.com/>> 2012/01/05
- [35] 土佐 信道: 明和電機社長ブログ<<http://maywa.laff.jp>> 2012/01/07
- [36] 関根 雅人: masato sekine web<<http://sekines.net>> 2012/01/05
- [37] 筧 康明: 慶應義塾大学SFC 環境情報学部 筧康明研究室ウェブサイト<<http://www.xlab.sfc.keio.ac.jp/>> 2012/01/05
- [38] 金田家親族: 金田真一オンライン記念館<[http://www.geocities.jp/city\\_memo/kaneda/index.htm](http://www.geocities.jp/city_memo/kaneda/index.htm)> 2011/11/22
- [39] 広瀬 茂男、福島 E. 文彦: Hirose Fukusima Lab<<http://www-robot.mes.titech.ac.jp/home.html>> 2011/09/06
- [40] 中村 太郎: 中央大学バイオメカトロニクス研究室<<http://www.mech.chuo-u.ac.jp/~nakalab/>> 2011/09/27
- [41] ITmedia、山本恵太: SFC ORF 2011 Report : アルミダクトがぶるんぶるん 新感覚の楽器「Ryo-On」 - ねとらぼ<<http://nlab.itmedia.co.jp/nl/articles/1111/24/news036.html>>

## 7.3 作品

- [42] 菱川 勢一 他 (2011) “森の木琴”
- [43] 渋谷 慶一郎+evala(2011) ”for maria anechoic room version”
- [44] 中村研究室(2011) “蠕動運動ポンプ”
- [45] 堀尾 寛太(2010) “スピード・スイッチング”
- [46] スズキ ユウリ(2009) “The Animatic”
- [47] 関根 雅人(2009) “Texmoca”
- [48] 高橋 征資(2009) “音手”
- [49] 平山詩芳+筧康明(2009) “Shaboned Display”
- [50] スズキ ユウリ(2008) “Musical Kettle”
- [51] 佐藤 実+ASUNA(2007) “texture in glass tubes and reeds organ”

- [52] トンキン・リュウ(2006) “Singing Ringing Tree”
- [53] 広瀬・福島研究室(2005) “水陸両用蛇型ロボット ACM-R5”
- [54] 中村研究室(2005) “ミミズロボット”
- [55] 堀尾 寛太(2003) “Particle”
- [56] 鈴木昭男(1990) “アナラポス”
- [57] 明和電機(1988) “ノッカー”
- [58] ラ・モンテ・ヤング(1962) “Dream House”
- [59] フランソワ・バシエ／ベルナール・バシエ(1960～) ”スクラブチャ・ソノル”
- [60] ハリー・ベルトイア(1960) “Sonambient”
- [61] エドガー・ヴァレーズ(1958) ”Poème électronique”
- [62] モーリス・マルトノ(1928) “オンド・マルトノ”
- [63] レフ・セルゲイヴィチ・テルミン(1919) “テルミン”
- [64] ルイジ・ルッソロ(1917) “イントナルモーリ”
- [65] グスタフ・マーラー(1902) “交響曲第5番”
- [66] ルートヴィヒ・ヴァン・ベートーヴェン(1808) “交響曲第5番”