

平成 16 年度 修士研究論文

共振現象を取り込んだ楽器デザイン

A study on musical instrument design by using sympathetic vibration

指導教官 藤枝 守 教授

九州芸術工科大学大学院芸術工学研究科

博士前期課程芸術工学専攻

学籍番号 03A25

杉山 紘一郎

SUGIYAMA Kouichirou

要約

共振という振動現象がある。外から周期的な力が加わる時、この力の振動数と同じ固有振動数をもつ物体が大きく振動を始めるという現象である。共振現象は、ラジオなど日常的な中でさまざまに利用されている。また、弦や膜などの発音体の音を大きくするために、ほとんどのアコースティックな楽器に取り込まれている。近代西洋の楽器においては、共鳴体を緻密に設計することで共振現象をコントロールし、響かせる過程に秩序を与えることで音高を明瞭にしている。また一方で、シタールやハーディガーディのように共振弦を取り込んだ楽器や、身体を共鳴体とする口琴や倍音唱法では、音を自由に響かせるために共振現象を取り込んでいる。音が自由に響きあうことで音に複雑なゆらぎがあらわれ、コントロールを超えるような自律的な音響が生み出されてくる。

また、共振現象に着目し、共振現象の可能性を実験的に模索する現代の作曲家がいる。グレン・ブランカとアルヴィン・ルシエである。彼らは、作品の中に共振現象を積極的に取り込んでいくことで、音が自由に響く状態を作り出し、単純な楽器やシステムを超えた複雑な音響を生み出している。

共振現象を取り込んでいる楽器や実験的な表現をモデルにして、共振現象に基づく新たな楽器デザインの考案と、それを用いたインスタレーション作品を制作した。これらの作品は、セッティングの微妙なズレや設置場所などさまざまな要因によって毎回異なる表情を見せた。これらの作品制作を通じて、共振という現象がいかに関性的で、多様な性質をもつものであるか体験的に学ぶことができた。

共振現象を取り込むことで、響きは複雑化してカオス的な様相を呈していく。カオスとは、ある確定的な規則に従って、初期条件に敏感に反応しながら予測できない振る舞いをする現象である。共振によって振動の振幅が大きくなることで、振動に非線形性があらわれ、音の響きにカオスが生じていくのではないだろうか。今後は、共振現象とカオスの関係性を探りながら新たな楽器デザインを模索していく。

もくじ

1. はじめに	4
2. 共振現象とは	5
2.1 共振のメカニズム	5
2.1.1 共振現象の例1：共振振り子	5
2.1.2 共振現象の例2：ブランコ	6
2.1.3 共振現象におけるエネルギーの出入り	6
2.2 日常に見られる共振現象	9
2.2.1 共振回路 — ラジオ	9
2.2.2 再生形振動 — 工作機械や路面	9
3. 共振現象を取り込んだ楽器デザイン	10
3.1 共振と共鳴の違い	10
3.2 楽器における共鳴体	10
3.2.1 木琴の共鳴管	10
3.2.2 弦楽器の共鳴体 — ギターを中心に	11
3.2.3 楽器における共鳴体の役割	12
3.3 共振弦をもつ特殊な楽器	12
3.3.1 シタール	13
3.3.1.1 シタールの楽器デザイン	14
3.3.1.2 シタールの共振弦の役割	14
3.3.2 ハーディガーディとニッケルハルパ	14
3.3.2.1 ハーディガーディの楽器デザイン	14
3.3.2.2 ニッケルハルパの楽器デザイン	15
3.3.2.3 ハーディガーディとニッケルハルパの共振弦	15
3.4 身体を共鳴体とする楽器・唱法	16
3.4.1 口琴と倍音唱法	16
3.4.2 身体での共鳴 — 口琴の演奏テクニックからみる	17
3.4.2.1 口腔と咽頭の共鳴	17
3.4.2.2 鼻腔や喉頭などの共鳴	18
3.4.3 共鳴体としての身体	18
3.5 共振が生み出す多様な響き	19
4. 共振現象に基づく実験的な表現	20
4.1 グレン・ブランカ	20
4.1.1 グレン・ブランカの紹介	20
4.1.2 ハーモニック・ギター	20
4.1.3 グレン・ブランカの音楽にみられる共振	21
4.1.3.1 共振現象が生み出す多様な結合音	21
4.1.3.2 共振による響きの延長	22
4.1.3.3 大音響による共振の効果	22
4.2 アルヴィン・ルシエ	23
4.2.1 アルヴィン・ルシエの紹介	23
4.2.2 共振現象の音楽化	23
4.2.3 具象化された共振	24
4.3 共振現象を取り込む実験的なアプローチ	25

5. 共振現象を取り込んだ楽器デザインの開発	26
5.1 ハーモニック・ギターの拡張	26
5.1.1 “Sympathetic Vibration”	27
5.1.2 “Dance on the Sympathetic Strings”	27
5.1.3 拡張したハーモニック・ギターの実験	28
5.1.3.1 実験目的	29
5.1.3.2 手順	29
5.1.3.3 実験機材	29
5.1.3.4 実験結果	30
5.1.3.5 実験の考察	30
5.1.4 拡張したハーモニック・ギターのふるまい	31
5.2 コルゲイティッド・ホース	32
5.2.1 発音メカニズム	32
5.2.2 楽器デザイン	33
5.2.3 “Wind Hose”	33
6. まとめ	36
7. 今後の展開	38

1. はじめに

振動現象のなかに、共振現象というものがある。物体には振動しやすい固有の周期があり、外部からその振動周期と同じ振動が加わると、物体が振動し始めていくという現象である。共振現象はお互いに振動振幅が大きくなるため、非常に多くの場面で利用されている。音楽の分野においては、主に音を大きくするという理由で共振現象が取り込まれている。なかでも、ピアノやヴァイオリンのような近代西洋の楽器では、共振現象によって音高を明確にし、合奏時に他の楽器の響きを妨げないようにしている。共振のさせ方を巧妙に計画することで、余分な音の成分は強調しないようにしているのである。

しかし、共振のさせ方をコントロールすることは、自由に振動のエネルギーを取り込むという共振現象の特性を抑制していることになる。共振をコントロールするのではなく、むしろ自由に共振し合う状況を作ることによって、さらに大きなエネルギーをもつ音響を生み出すことはできないだろうか。例えば、インドのシタールのように音の共振によって自由に響かせる共振弦をもつ楽器がある。シタールの演奏に従って共振弦が振動し、音にゆらぎが発生して非常に複雑な響きを形成する。ひとつの楽器が、まるでいくつもの楽器を同時に演奏しているかのような響きを生み出しているのである。シタールのように共振現象を積極的に取り込むということは、楽器そのものの音響的な充実度をさらに高めていると言える。

そこで本論文では、共振現象に着目して楽器デザインや音楽表現を探り、共振現象がいかに重要な存在であり、多様性をうみだす現象であるか考えることを目的としている。より積極的に楽器デザインや音楽表現の中に共振現象を取り込んでいくことで、それらから生み出されてくる音響はどのように充実度を高めていくのか。日常的な現象としての共振現象が発生するメカニズムを探りながら、共振現象をより積極的に取り込んでいる楽器デザインを調べていく。

具体的には、シタールやハーディガーディのような共振弦をもつ楽器、口琴や倍音唱法のように身体を共鳴体とする楽器や唱法を取り上げていく。また、共振現象の可能性を実験的に模索している二人の現代の作曲家グレン・ブランカとアルヴィン・ルシエの活動についても調べていく。二人の作曲家が共振現象をどのように取り込んでいるのか学んだ上で、自身でも共振現象に基づく楽器デザインや表現のモデルを提案する。こうしたプロセスを経て、共振という現象を体験的に学びながら、共振現象の可能性を考察していく。

2. 共振現象とは

共振という現象は、どのようなメカニズムで発生するのだろうか。本章では、振り子やブランコの例を挙げながら、共振現象が起こるメカニズムやエネルギーの伝播を考えていく。そして、日常的な場面ではどのような共振現象が見られるのか調べ、共振現象が発生する状況を考えていく。

2.1 共振のメカニズム

機械や構造物に外力が作用しているとき、その外力の振動数が、機械や構造物などの振動系の固有振動数に一致すると、非常に大きな振動が発生する。これは共振や共鳴と呼ばれる現象で、外部からの振動エネルギーが次々と系に入り込み、振動の変位、速度、圧力などの量が極大値をとる現象である。つまり、物体の固有振動数と同じ振動数を物体に与えると、振動が増幅されて強い振動が起こるのである。固有振動数とは、物体やシステム特有の最も振動しやすい振動数のことで、共振周波数とも呼ばれる。固有振動数は、物体の運動状態に関係なく物体の質量や物体の剛性などによって決まり、物体やシステムの構成によって異なる。

共振現象が起こるとき、元の振動エネルギーの振動数と被振動体の固有振動数が近いほどより大きな共振を得ることができる。共振と共鳴は基本的に同じ意味のものであるが、共鳴という用語は主として可聴周波数の音に対して用いられる。本論文では、可聴周波数の音に対する場合は共鳴という語を用いることがあるが、振動現象ということ意識するために共振という語を主に用いている。このことに関しては、3.1 節で詳しく説明する。

2.1.1 共振現象の例 1：共振振り子

共振のモデルを考える上で最もわかりやすいものが共振振り子の実験であろう。長さの違ういくつかの振り子と、その中のひとつ（この振り子を A とする。）と長さが等しい振り子を水平に張ったひもに吊るす（図 1）。それぞれの振り子の重さは自由。

A の振り子に揺れを起こすと、振り子全てがわずかに揺れ始めるが、しだいに振り子 A と長さが同じ振り子だけが勢いよく振動する。これは、はじめに揺れている振り子 A が起こす振動によって、同じ固有振動数を持つ同じ長さの振り子だけが共振を起こすためである。つまり、振り子 A と同じ固有振動数もしくは固有周期をもつ振り子が共振して振動が大きくなるのである（図 2）。



図 1：共振振り子（両端が同じ長さ）



図 2：同じ長さの振り子が共振している様子（横から見た図）

2.1.2 共振現象の例 2：ブランコ

次に、振動している系にエネルギーが入り共振を起こすメカニズムを考えてみる。例えば、ブランコでは体の重心を動かすことでブランコを共振させ、揺れを大きくしている。重心を動かしてブランコをこぐ方法は次の 3 通りのこぎ方が考えられる。

1. 揺れている方向に体の重心を動かす方法
2. 重心を上下に動かす方法
3. 上記 1、2 を組み合わせた方法

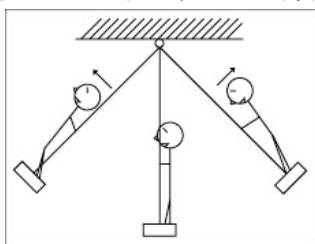


図 3：1 の方法でのこぎ方

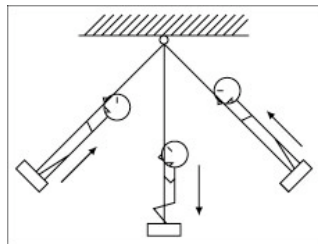


図 4：2 の方法でのこぎ方

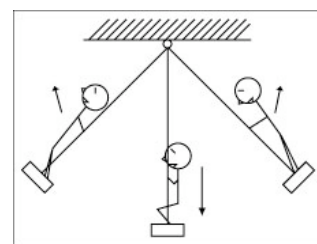


図 5：3 の方法でのこぎ方

図 3～5 は立ちこぎの場合における上記 1～3 の方法を図で表したものである。1 の方法は、体の重心の移動をブランコの動きに合わせてすることでブランコの揺れを大きくする。立ちこぎの場合、ブランコの移動する方向に合わせて体を前後に移動させる。座りこぎの場合、ブランコの移動に合わせて足を前後させることで体の重心を移動させる。立ちこぎ、座りこぎどちらの場合もブランコの速度が最も大きいとき、つまりブランコが真下のときに体の重心を加速して動かすことで効率よくブランコの揺れを大きくする。

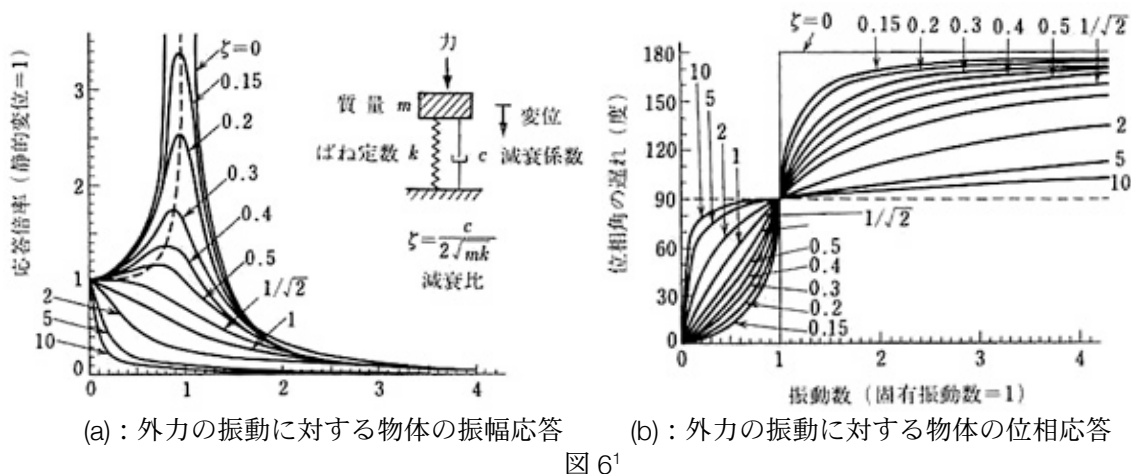
2 の方法は、ブランコが真下に来たときにしゃがんで体の重心を下げ、最も高くブランコが振れたときに立ち上がり体の重心を上げるというものである。ブランコが高い位置に来たときに立ち上がり、体の重心を高くすることでブランコの系に位置エネルギーを与える。そしてブランコが低くなったときにしゃがむことで体の重心を下げ、位置エネルギーを運動エネルギーに変えることでブランコは加速されるのである。

3 は 1 と 2 を組み合わせた方法で、実際にブランコを立てこぐ場合にはこの方法で揺れを大きくしている。また、実際には 3 の方法に加えてブランコのくさりを利用することで体をより変形させて重心の移動を行い、効率よくブランコの揺れを大きくしている。

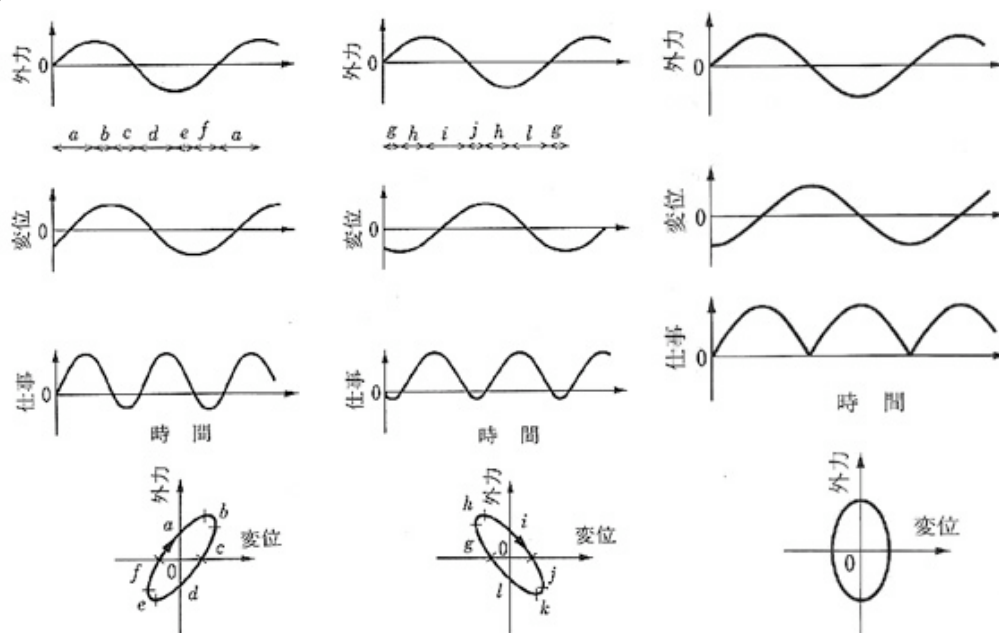
2.1.3 共振現象におけるエネルギーの出入り

物体に一定の安定した外力が働いているとき、物体には外力の振動数に応じた振動が生じている。外力が作用した直後は、過渡応答やトランジェントと呼ばれる自由振動に近い振動をするが、しばらくすると外力と同じ周波数で調和的に振動する定常状態となる。先述の共振振り子の例では、はじめに全ての振り子がわずかに揺れる状態が過渡応答であり、しばらくして同じ周期の振り子だけが共振して振動している状態が定常状態といえる。この定常状態における共振現象のエネルギーの出入りを考え、共振現象のメカニズムをとらえていく。

外力の振動に対する物体の応答は、振動数を横軸にとると図 6a のようになる。これは共振曲線と呼ばれるもので、外力の振動数が物体の固有振動数に近づくにつれて物体の振幅は大きくなり、両者が一致したときに振幅は最大の値をとる。この振幅が最大の値となる状態が共振である。また、外力の振動数が共振周波数よりも大きくなると、物体は外力に応答しなくなり振幅は小さくなっていく。また、外力の作用のタイミングと物体の応答のタイミングの関係、つまり位相関係は、図 6b のような周波数に依存した特徴がある。



共振点より小さい振動数では、物体は外力に対して 90 度より小さい位相遅れで振動する。これは外力が作用する方向と物体が振動する方向が同じであるから同相と呼ばれる。また、共振点より大きい振動数では、物体は外力に対して 90 度より大きい位相遅れ、つまり逆相で振動する。この関係を外力の加振源からの物体へのエネルギーの出入りを考えると図 7 のようになる。



外力と物体の応答の変位速度の積が外力源から物体に入るエネルギーを表しているから、外力と物体の応答の変位速度の積が正のときは外力源から物体にエネルギーが入り、負の場合物体から外力源にエネルギーが戻ることになる。

まず、外力の振動数が共振点より小さい場合 (図 7A) を考える。a 部分では、外力は正、物体の応答の変位速度も正となっており、積は正となるから外力源からエネルギーが入る。b 部分でも同様に積は正になることが分かる。c 部分では、外力は正であるが物体の応答の変位速

¹ 3) 田中基八郎、大久保信行「振動をみる」(オーム社), p.69

² 3) 同上, p.70

度は負になっており、積は負となるので外力源に物体からエネルギーが戻る。さらに、d 部分では外力は負、応答の変位速度も負になっており積は正となるから外力源から物体にエネルギーが入る。また、e 部分でも同様に積は正になり、f の部分では積が負となり外力源に物体からエネルギーが戻る。

このように、外力源と物体との間に一定のエネルギーのやりとりがあり、図 8 のように特定の量のエネルギーが物体に入り、減衰要素によって消費される。そして、物体には外力と同じ振動数で外力と位相のずれをもつ一定振幅の振動が安定して継続する。

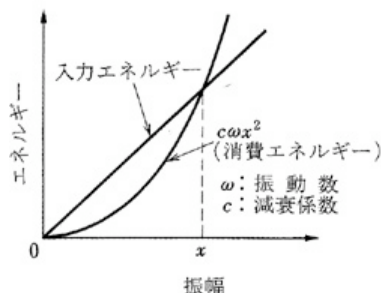


図 8：振動振幅とエネルギーの出入り³⁾

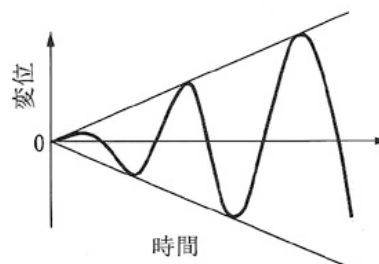


図 9：共振における振幅の成長⁴⁾

次に、外力の振動数が共振点より大きい場合（図 7B）を考える。この場合、共振のときよりも振動数が大きいため運動による慣性は、バネの復元力より大きくなる。そのため、外力に対する物体の振動応答は 90 度以上の位相の遅れを伴う。そのため外力に対して逆相の振動応答が釣り合って安定した振動が続く、図 7B の下から二番目のグラフのようになる。振動応答が逆相であることを除けば、外力の振動数が共振点より小さい場合（図 7A）と同じように外力源から物体にエネルギーが出入りすることがわかる。

共振の場合は、バネの復元力と慣性力が釣り合って動的な復元力がなくなり、減衰要素による抵抗力のみになる。このとき、図 7C のように外力と応答の位相がちょうど 90 度ずれて完全な同相となり、物体に一番多くエネルギーが入る状況ができる。減衰が少ない特別な場合においては、減衰要素で消費されるエネルギーは少ないため物体に外力源から入るエネルギーがどんどん蓄積され、図 9 のように振動振幅が成長していく。

このように、共振のときには外力の作用とその周期をうまく合わせることで、振動が成長していく様子がエネルギー的に理解できる。図 10 は、共振時における波数に対する振幅の成長を表した図である。減衰が大きい場合は数波で定常状態になるが、減衰が小さい場合はどんどん振幅が成長してから定常状態になることがわかる。

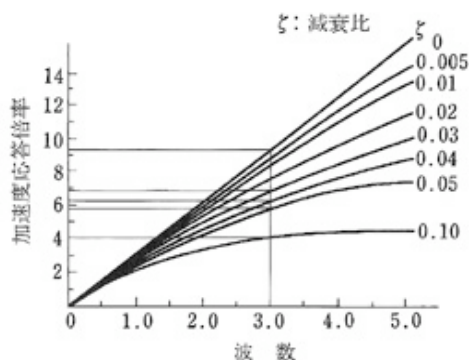


図 10：共振時の入力波数に対する振動の成長⁵⁾

³⁾ 田中基八郎、大久保信行「振動をみる」(オーム社), p.72

⁴⁾ 同上, p.73

⁵⁾ 同上, p.77

2.2 日常に見られる共振現象

2.2.1 共振回路 — ラジオ

共振現象が見られる身近な例として、まずラジオの放送局の選局があげられる。ラジオをチューニングして放送局を選ぶとき、つまみを調節する。このつまみによってラジオの中にある共振回路（同調回路）の共振周波数を変え、放送局から送られてきている多くの電波信号の振動数のいずれかに合うように調整しているのである。調整ができると、ラジオはすべての放送局の中からひとつの放送局の電波だけを音に変換し、聞くことができるのである。

2.2.2 再生形振動 — 工作機械や路面

外力の振動数が物体の固有振動数に一致すると発生する共振現象は、物体自身の以前の振動を外力の振動としても発生する。物体自身の振動が作り出した外力であるため、振動数は物体の固有振動数と一致するのである。こうして発生した共振現象は再生形振動と呼ばれる。

再生形振動は、工作機械で再生形びびり振動という現象としてよく発生する。例えば、工作機械で丸棒を切削する場合、削るときに工作機械が発するわずかな振動が、削られる丸棒の表面にびびりマークと呼ばれる波模様の痕跡を残す。表面に波模様が残った状態で、機械のスピードを同じにしてさらに削ると、工作機械が丸棒の表面のびびりマークによって振動させられる。このとき、工作機械に作用する振動数は最初に工作機械が削るときに生じた振動数と一致するため、共振が発生するのである。

この状態を続けていくと、共振によって生じた振動はますます大きくなり、騒音や異常な振動音が発生して工作機械の一部を破損させることもあるという。そこで、工作機械では切削スピードの変化や機械自体の振動を減衰するなどして再生形びびり振動が起きないように工夫している。

また、再生形振動の例は他にも多く見られる。車が柔らかい道を通ったときにできるでこぼこの路面もそのひとつである。車ではタイヤやサスペンションのバネなどから車輪の振動が発生する。ふつうの乗用車の場合、この車輪の振動の固有振動数はだいたい同じくらいになるといわれている。車輪を構成する部品や素材がほとんど同じためである。そのため、このような固有振動数をもつ乗用車が土のように柔らかい路面を通ると、車輪の振動によるわずかなでこぼこ跡が路面に残る。このわずかなでこぼこ跡のある道に同じようなスピードで乗用車が通ると、同じような固有振動数を持っているために、車輪が路面のでこぼこ跡と共振をする。その結果、路面にはまた強くでこぼこ跡が残る。そして、乗っている人にも振動を強く感じさせるような大きなでこぼこ跡のついた道が出来上がるのである。このように、物体自身の振動がフィードバックされて大きな共振が発生するという再生形振動は、身近に多く存在していることがわかる。

3. 共振現象を取り込んだ楽器デザイン

次に、楽器における共振を考えていく。楽器は、音を大きくする、音色を良くするなどさまざまな理由で共振現象を楽器デザインのなかに取り込んでいる。この章では、楽器において、共振現象がどのような効果を生み出しているのか調べていく。また、共振弦という共振専用の弦をもつシタールのように、共振現象を積極的に取り込んだ楽器デザインも調べ、楽器において共振現象がどのような重要性を持っているのか考察していく。

3.1 共振と共鳴の違い

まず、共振と共鳴という言葉の違いを明らかにする。共振と共鳴について、2.1節の中で「共振と共鳴は基本的に同じ意味のものであるが、共鳴という用語は主として可聴周波数の音に対して用いられる。」と述べた。共振は、物体や空気などの振動系が、外部エネルギーによって固有振動を始める振動現象である。この共振という振動現象の中で、特に音という振動によって固有振動を始める、あるいは外部エネルギーによって音という振動が生じる場合のことを共鳴と呼ばれている。

楽器を考えると、共振・共鳴どちらも関わっていることが多い。そのため、楽器を語る上で共振と共鳴を厳密に分けることなく、共振・共鳴現象と一緒にして呼ばれることも多い。そこで本論文では、明らかに音によって音があらわれてくる場合は共鳴という語を用い、総合的に共振現象について述べる場合や、音の振動という面を強調したい場合は、共振という語を用いることにする。例えば、木琴の共鳴管は、音によって管を響かせて音を生じるために、共鳴という語を用いる。同様に、弦楽器の胴も音によって箱を振動させて音を生じるために、共鳴という語を用いる。また、弦の振動によって他の弦が振動し始めるといった場合では、弦振動が生じる音よりも、振動としての側面の方が強いと言える。そのため、共振という語を用いる。

3.2 楽器における共鳴体

本論文でキーワードとなる楽器デザインにおける共振を考えるために、まず、ほとんどの楽器に見ることができる共鳴体について調べていく。なかでも、巧みに共振現象を楽器デザインのなかに取り込んでいったと言える木琴やギターを例にあげ、共振現象を構造のなかに組み込むことで、どのような効果を生み出しているのか調べる。

3.2.1 木琴の共鳴管

ここから、実際の楽器の中で、共振現象がどのように関わっているのか考えていく。共振現象を楽器デザインの中に取り込んでいるものとして、シロフォン（図 11）のような木琴が挙げられる。シロフォンは音板を叩いて音を出す、バチの衝撃だけではコンサートのような場で演奏するに十分な音量がえられない。また、バチの衝撃によって大量のノイズが生じ、音板の音色は澄んだ音ではなくなる。

これらの問題を解決し、オーケストラなどでも使用できる楽器にするため、木琴は管の共鳴を利用している。音板の下に音板の固有振動数で共鳴する管を置くのである。これによって音板の音は管で共鳴して音が大きくなる。バチの衝撃によるノイズは共振せず、管の固有振動数に一致する音だけが大きくなる。結果として、木琴から奏でられる音はノイズの割合が少ない澄んだ音となる。また、共鳴管は音板の楽音を強めるだけでなく、管が共鳴することで音の余韻を長くしている。



図 11：シロフォン(YAMAHA YX-350A)



図 12：ヴィブラフォン(YAMAHA YV-3000AJ)

この共鳴管の効果をさらに活用した楽器がある。ヴィブラフォンである（図 12）。アルミニウム合金製の鉄琴に、木琴のものと似た共鳴管が取り付けられている。その共鳴管の上端近くを長い軸が貫いており、それぞれの管の内側に、軸に取り付けられた円盤がついている。この軸をモーターで回転することで円盤も回転し、共鳴管の蓋を開閉する。円盤が回転して蓋が開閉することで管の共鳴の状態は変化し、響いたり響かなかったりすることで音にヴィブラートをつけることの出来るのである。モーターは止めることも出来るが、その場合は鉄琴と同じ状態になる。

このように、木琴は対応する音板に合わせてあらかじめ調律された共鳴器を取りつけることで、音を大きくしている。また、音板を叩くときに生じるノイズを共鳴させないことで音板の音色をはっきりさせている。それと同時に、管という共鳴体の振動によって、木琴の音は非常に長い余韻をもつようになっている。また、ヴィブラフォンのように、共鳴管に回転する蓋を取り付ける事で、響く状態と響かない状態を作り出し、ヴィブラート効果を得ている。

3.2.2 弦楽器の共鳴体 — ギターを中心に

今度は、一般的な弦楽器を考えてみる。弦を弾いてみると音が聞こえるが、その音は非常に小さい。この理由は弦が非常に細いので、振動するときに空気が弦のまわりを自由に動くことができ、大きな圧力差を作り出すことができないからである。そこで、弦の振動振幅を増幅して楽器として演奏できるようにするために、共鳴体が必要となってくる。共鳴体によって音の放射効率を上げ、音量を大きくするのである。

ここで、弦楽器の代表的な例としてギターを考えてみる。ギターの共鳴体は、さまざまな種類の木材でできた薄くて大きな8の字型の箱で、表板と裏板、側板からできている（図13左）。また、表板にはサウンド・ホールと呼ばれる穴が開いており、図13右の写真のように表板の裏側には細い木が複雑にはりつけてある。共鳴体の中は空洞である。

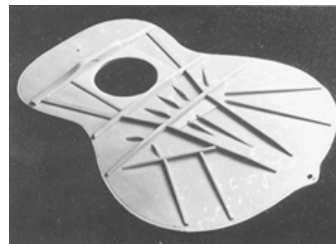


図13：ギターの共鳴体制作キット（左）と、Gibsonのギターの表板（右）

ギターの弦を弾いて振動させると、弦の振動はブリッジを経て共鳴体の表板に伝わる。このとき、薄い表板は振動しはじめ、大きな表板から音が放射される。表板の振動は側板や裏板にも伝わり、共鳴体全体が振動して音が効率よく放射される。また、弦の振動によって空洞がヘルムホルツ共鳴器として働き、サウンド・ホールからポンプのように空気が出たり入ったりする。ヘルムホルツ共鳴器とは、開口部をもち内部に空気などの気体を蓄えた容器のことで、それぞれの寸法で決まる共振周波数を持っている。ギター弦の振動によってそれと等しい周波数

をもつ音波が入ってくると、内部の空気のバネのような性質によって開口部やその近くの空気が激しく振動して音が大きくなる。

こうした表板や裏板といった響板の振動やヘルムホルツ共鳴などが複雑に絡み合い、それぞれに共振することで音を効率よく放射し、音量を大きくしている。また、図13右の写真に見られるような複雑な細い木を取り付けることで表板の振動を制御し、効率よくギター弦の音と共振するように工夫されている。弦という細い振動体の音を大きくするために、ギターのような弦楽器はさまざまな形や構造の共鳴体を取り込み、音を大きくしているのである。

3.2.3 楽器における共鳴体の役割

外力の振動数が物体の固有振動数に一致したとき、物体は外部からのエネルギーを次々と取り込み、非常に大きな振動を発生する。この共振現象は非常に身近な現象であり、さまざまな場面でみつけることができることがわかる。ところが、工作機械や地震などでは共振現象が騒音や構造物の破損などの原因となり、生活や作業の妨げとなることも多い。振動が別の物体の振動を呼び起こし、結果的に非常に大きな振動となるために、これを制御する必要がでてくるのである。

しかし、この振動が大きくなるということを、逆に利用するものも少なくない。楽器においては、むしろ共振現象は非常に重要である。楽器は、共鳴体を構造の中に取り込むことで共振現象を利用している。共鳴体の役割は、以下のものが挙げられる。

- ・ 音板や弦などの発音体の音を大きくする
- ・ 音の余韻を長くする
- ・ 発音源の音色に影響を与える
- ・ 音の立ち上がりに影響を与える

まず、楽器の中に共振現象を取り込む最大の理由は音を大きくする効果である。共振によって発音体の振動振幅を増大して、演奏に十分な大きさの音量を得るのである。また、共鳴体が振動することで、音の響きが引き延ばされて音の余韻が長くなるとともに、音色に変化が与えられる。共鳴体は形や大きさ、材質などによって異なった固有振動数を持ち、周波数によって音量の増加の割合が異なる。その結果、共鳴体を通して生じる音の倍音成分には、もとの発音源の倍音成分だけではなく共鳴体が及ぼす影響も加わるのである。つまり、楽器の音は、共鳴体の音響特性の影響を受けた音色となるのである。

また、共鳴体はそれぞれの楽器に特徴的な音の立ち上がりにも影響を与える。音の立ち上がりとは、定常的な振動になる直前の1秒の何分の1と非常に短い時間だが、脳で楽器を知覚する際の重要な手がかりとなっているものである。発音体の振動が共鳴体に伝わる時、共鳴体は慣性などによって一瞬では全体が振動することができない。そのため、非常に短い時間びびり振動のような現象がおこる。これが、音の立ち上がりに強く影響するのである。発音体の音は、共鳴体をもつことでそれぞれの楽器特有の特徴を生み出している。

3.3 共振弦をもつ特殊な楽器

一般的な楽器において、共振現象は、音を増幅して豊かな音色へと変えるという役割を担っていた。しかし、より積極的に楽器デザインのなかに共振現象を組み込むことで、音のなかにさらに大きなエネルギーを取り込んでいくことができるのではないだろうか。そこで、共振現象をより積極的な形で取り込んでいるシタールやハーディガーディ、口琴などの楽器を調べ、共振現象を積極的に取り込んでいくことの重要性を考えていく。

3.3.1 シタール

3.3.1.1 シタールの楽器デザイン

共振現象を積極的に取り込んでいる楽器デザインとして、シタールが挙げられる。シタールは北インドにおいて最も代表的な弦楽器で、大きなひょうたんをくりぬいて芸術的な装飾を施した共鳴胴をもつ。13 世紀にインドの古典ペルシア詩人であり音楽家であったアミール・ホスローが、当時ペルシアから伝来したセタール⁶という楽器をもとにインド古典楽器のヴィーナ⁷を改良して制作されたと伝えられている。それから今日に至るまでにさまざまな人々のアイデアが加わり、現在のような非常に完成度の高い楽器となった。



図 14：シタール⁸



図 15：セタール⁹

シタールの共鳴体であるひょうたんをくりぬいた共鳴胴は非常に軽く、硬い。そのため、ヴィーナに比べて持ち運びがしやすく音も大きい。また、ネック部分には取り外しが可能なカボチャをくりぬいた小さな共鳴体をつけることができる。この小さな共鳴体は、高度な演奏による楽器の揺れを防ぐとともに、演奏者のためのモニターの役割を担う。弦はフレットを境として上下二段になっており、上段に 7 本、下段に 11 から 13 本の弦が張ってある。上段の弦は、主旋律弦、ドローン¹⁰を奏する弦、リズムを刻む弦から成る。下段に張られた 13 本の弦はすべて共振弦である。22 個あるフレットは動かすことができ、インド音楽において重要なさまざまな微分音程を表現することができる。

また、弦を支える駒には鹿の骨や象牙を加工したジャワリと呼ばれる微妙な曲線をもつ板がつけてある。ジャワリは、琵琶や三味線のさわりと同じように弦の振動を板に触れさせて雑音を出す。それによって弦の振動に多くの倍音成分を含ませ、複雑で独特な音色を出す。また、ジャワリに弦が触れることで音量が大きくなる。そのため、弦の振動が減衰して聴こえなくなるとなかなかな音になっても、ジャワリに触れることで音が聴こえるようになる。つまり、音の余韻を長くしているのである。

⁶ セタール(setar)：ペルシア語で 3 弦を意味する言葉。セタールという楽器は 3 本弦の非常に素朴な楽器。共振弦はもっていない。

⁷ ヴィーナ：インドの代表的な大型の弦楽器でインドに起源をもつ。時代や地域でさまざまな形があるが、木をくりぬいた本体にカボチャの共鳴体を 2 つつけたタイプが有名。

⁸ 11) 若林忠宏『民族楽器大博物館』(京都書院, p.40)

⁹ 11) 同上, p.80

¹⁰ ドローン：蜂の羽音に由来する語で、旋律に対して一定の音高で鳴らし続けられる持続音のこと。

3.3.1.2 シタールの共振弦の役割

シタールは、ジャワリや共振弦を持たせるなどの改良を随所に行うことで、旋律にさまざまな装飾音を加えてシタール独特の音色を生み出している。このシタールの複雑な音色は、主にジャワリによって音の倍音成分を豊富に含ませているために生じている。しかし、シタールの音色をさらに深く複雑な音色へと導いているものは、非常に多くの共振弦によるものであろう。

共振弦は、主旋律弦の音に共振してラーガに基づいて決定された旋律の中で重要な音をより強める。共振弦によって重要な音が補強されることで、ラーガに基づいて即興的に演奏される旋律が散漫になるのを防ぎ、一定の特徴ある雰囲気を持続する。また、旋律の音は、微分音程の連続的な変化によって曲線的な音のゆらぎをもち、モノフォニーである旋律を多層的なものへと装飾する。それと同時に、主旋律弦の音はジャワリによって、より多くの倍音成分が含まれており、さまざまな共振弦が共振する。それによって、音のゆらぎはよりいっそうの深みをもった複雑なものとなる。

また、ジャワリによって長くなった音の余韻は、さまざまに共振する共振弦によってさらに引き延ばされてドローンを生み出していく。ドローンは聴取者に旋律と基準音との響きや音程などの関係性を意識させ、集中して聴くことを促す。積極的に聴くことで、旋律はさまざまな音のゆらぎを取り込み、響きと一体となりながらも、非常に際立ったものとして聴こえてくる。

このように、シタールは共鳴弦を多数もつことで旋律の中で重要な音をより響かせ、さらに個々の音に深みをもたせて旋律を一層強固なものとしている。また、共振弦が生み出すドローンによって集中して聴くことが促され、響きと一体となった旋律や音のゆらぎがはっきりと聴こえてくる。旋律が響きと一体となり、ドローンとの関係性に基づいて多様な音のゆらぎが浮かび上がってくるのである。シタールは、響きの多様性を生み出す基盤として、楽器デザインの中に共振弦を取り込んでいる。

3.3.2 ハーディガーディとニッケルハルパ

3.3.2.1 ハーディガーディの楽器デザイン

ハーディガーディは、鍵盤の原理を適用した最初の弦楽器で、10 世紀ごろのヨーロッパが起源であると考えられている。ハーディガーディは英語での呼び名で、ギイギイ持続する音という意味である。フランス語では、organistrum（オルガニストルム）や vielle à roué（ヴィエル・ア・ルウ）とも呼ばれる。図 16、17 のようにヴァイオリンのような形をしているが、弓で弦をこする代わりにハンドルで円板を回転させて旋律弦とドローン弦をこすることで持続的に音を出す。そのため、バグパイプに似た音が鳴る。

演奏は鍵盤を押して、ブリッジを弦にあてることで行う。これは音程を計測して音律を実験したモノコードという楽器で、駒を弦にあてて音高を変える方法と同じである。ハーディガーディには旋律弦が 2 本、ドローン弦が 4 本、共振弦が 4 本程度の弦が張ってある。ドローン弦は回転円板と触れないようにもでき、ドローンの音量や音程を調節できる。また、ドローン弦の 1 本には特殊な駒がつけてあり、ドローン弦の振動に合わせて駒が胴体と触れ、リズムを刻むことができる。



図 16：ハーディガーディ¹¹

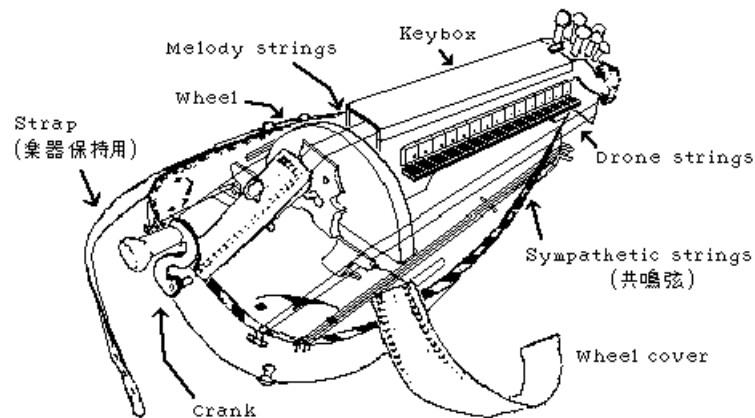


図 17：ハーディガーディの構造

はじめは巨大で、二人で演奏する楽器であったハーディガーディはしだいに小型化され、固定的なドローン音とともに旋律を奏する舞曲用の楽器として定着していった。しかし、西洋音楽の和声を重視する文脈の中では、ハーディガーディのようにドローンや共振弦をもつ楽器は衰退の道を辿り、その後に登場したより技巧的な演奏ができるヴァイオリンにその地位を奪われていく。民族楽器としては伝承されていくが、西洋音楽の考え方に影響を受けていくことでハーディガーディの共振弦の数は大幅に減っており、現存するハーディガーディには共振弦を持たないものも多くみられる。

3.3.2.2 ニッケルハルパの楽器デザイン

ハーディガーディは後に東方の影響を受けながら発展し、14 世紀ごろにスウェーデンでニッケルハルパ（図 18 左）という新たな楽器を誕生させた。ニッケルハルパは、ハーディガーディのように円板を回転させるのではなく弓で奏するため、よりヴァイオリンに近い楽器である。

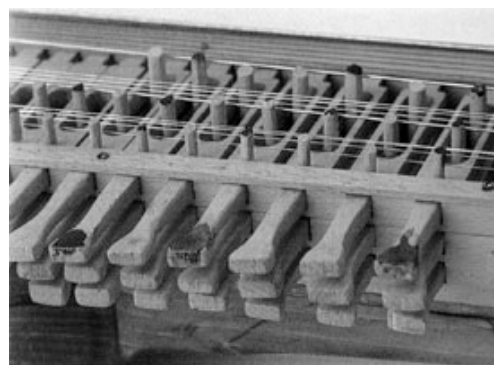


図 18：ニッケルハルパ（左図）と鍵盤部のアップ（右図¹²）

構造は回転円板をもたない以外はほとんどハーディガーディと同じであるが、アジアの影響を受けたニッケルハルパは 13 本ほどの共振弦をもつ（図 18 右）。弓で演奏するため、ハーディガーディよりも微妙なニュアンスを演奏することができ、また多くの共振弦が生み出す繊細

¹¹ 11) 若林忠宏『民族楽器大博物館』（京都書院, p.122）

¹² 11) 同上, p.115

でひそやかな音の響きが特徴的である。弓でひくことで生じるドローン音は、シタールと同じように共振弦を伴うことでより豊かな響きを得る。ハンドルをまわすことで機能的にドローンを出して演奏するハーディガーディに対し、ニッケルハルパは弓で演奏することでドローン音と共振弦の響かせ方を自由に変えることができる。

3.3.2.3 ハーディガーディとニッケルハルパの共振弦

ハーディガーディとニッケルハルパは、回転円盤を用いるか弓で奏するかの違いはあるが、どちらも連続的な旋律とドローン音を生み出すことが目的となっている。両者の楽器の中での共振弦の役割は、常に持続するドローン音と旋律の音が一体となっていく中で、旋律の音を補強し、浮かび上がらせることである。共振弦の音が加わることで、シタールと同じようにひとつひとつの音は深みを持ち、連続的な旋律は非常に強固な響きとなる。

それと同時に、一定の音高で持続されるドローン音を装飾し、音にわずかなゆらぎを与えている。また、共鳴弦を多くもつニッケルハルパは、共振弦によって音の余韻を長くすることで弓による音のわずかな途切れを補っている。ハーディガーディ、ニッケルハルパどちらも、共振弦をもつことによって音に繊細さを与え、豊かな音の響きを獲得している。

3.4 身体を共鳴体とする楽器・唱法

3.4.1 口琴と倍音唱法

弦楽器などのように決まった大きさや形の共鳴体をもつのではなく、複雑な人体そのものを共鳴体とするものがある。声である。声は、喉の奥にある声帯の振動が声道で共鳴することで音として発音される。通常の発声でも身体を共鳴させているが、身体内の鼻腔や胸腔などさまざまな腔を最大限に共鳴させる唱法がある。この唱法は、身体にある腔を意識的に響かせることで2つ以上の音高を同時に出すことができ、倍音唱法と呼ばれている。倍音唱法は、モンゴルのホーミーやトゥバのホーメイなど、地域によってさまざまな呼び名や方法がある。

また、倍音唱法と同じように身体を意識的に共鳴させる口琴という楽器がある。口琴は、声帯を取り出して口に持ってきたような楽器で、口に振動する弁をつけることで人の口をヘルムホルツ共鳴器のように使用する楽器である。口琴は、主に弁と枠で構成された楽器で、ジューズ・ハーブ（Jew's Harps、英語では Jaw's Harps）とも呼ばれる。日本では、ムックリと呼ばれるアイヌの口琴以外はあまり知られていないが、ヨーロッパやアジアなどさまざまな土地で古くから存在している楽器である。弾力のある薄い板でできた弁の一端が枠に固定され、弁のもう一端は自由に振動できるようになっている。

この口琴を口にくわえるもしくは口に当てて構え、弁を指ではじくか弁に取り付けられた紐をひくことで弁を振動させることで音を出す。弁の振動によって生じる音は、さまざまなモードを含んでおり、口腔や鼻腔などの形を調節することで、倍音唱法と同じようにさまざまなモードの中から特定の倍音を強調して演奏することができる。図 19、20 として口琴の一例を紹介する。



図 19：金属口琴



図 20：アイヌの口琴「ムックリ」（上）と
ベトナム・モン族の口琴（下）

口琴の素材には竹や金属が用いられる。最初は杵と同じ竹を切り込んで弁を作ったもので、弁の根元は杵とつながったものであった。しだいに弁と杵は別に作られ、その一端が杵に取り付けられるようになっていった。また、素材も竹だけではなく、さまざまな金属が幅広く用いられるようになった。弁の振動のさせ方も2種類あり、アイヌのムックリのように古いタイプの口琴では、弁の反対側の端に紐をつけ、この紐を引っ張ることで弁を振動させる。もう1種類は弁の先にでっぱりがついており、でっぱりを直接弾くことで弁を振動させる。一般に、硬い弁であるほど大きな音が鳴るが、音色は弁と杵の隙間によって非常に左右され、口琴の制作には精巧な技術を要する。

3.4.2 身体での共鳴 – 口琴の演奏テクニックからみる

口琴は、口腔や鼻腔など身体を共鳴体とする体鳴楽器である。振動体を外に取り出したという点を考えれば、倍音唱法も同様に体鳴楽器といえるだろう。また、身体を純粋な共鳴管として考えれば、口琴も倍音唱法も管楽器ととらえることもできる。この非常にユニークな口琴や唱法がいかに身体で共鳴しているのか。ここで、阿部和厚とハレ・ダイスケによる『口琴による発音、音色の変化についての解剖学的考察』¹³や長根あきの『ムックリの音、私の音』を参考にして、口琴における実際の演奏テクニックを考える。そして、口琴や倍音唱法が人体をどのように共鳴させているのか考察する。

口琴を口に当てて演奏した場合、口琴の振動は骨と空気に伝わる。これら両者の関係によって、弁の振動の中に含まれるある倍音が強調されてくる。しかし、口に振動体である口琴を当てるため、声を出す場合に比べて、口の大きさはそれほど変えることができない。そこで、口琴を演奏するときには共鳴させる位置を変える、もしくは複数の部位を共鳴させることでさまざまな音を出している。口琴の弁の振動は、人体頭部において次の3種の共鳴腔で共鳴すると考えられている（図21参照）。

1. 口腔、咽頭
2. 鼻腔、副鼻腔
3. 喉頭、気管および胸腔

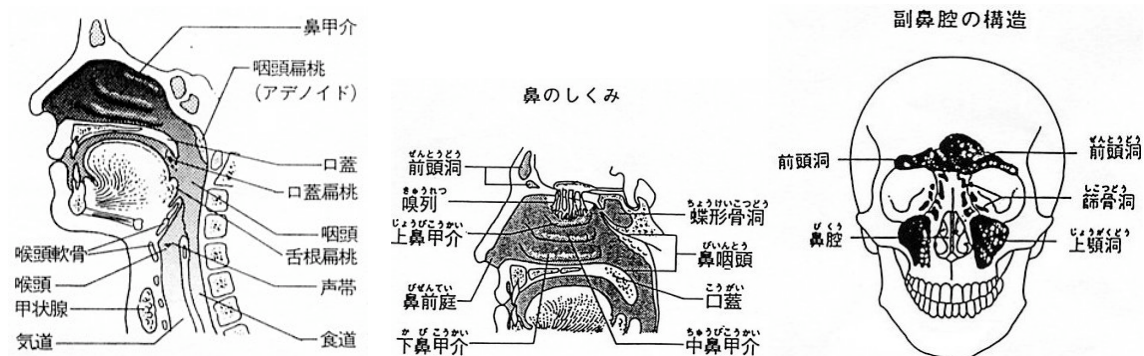


図 21：喉、鼻、副鼻腔の構造

3.4.2.1 口腔と咽頭の共鳴

口琴の演奏において最も重要なものが口腔、咽頭である。口腔と咽頭は一つの腔を作っており、舌の動きや頬の動き等によって大きさや形をさまざまに変えることができる。口腔とは、上下の唇から軟口蓋までの空間のことで、さらにその奥は咽頭に続いている。

¹³ 23) 阿部和厚、ハレ・ダイスケ『口琴による発音、音色の変化についての解剖学的考察』,
<http://jewsharp.hp.infoseek.co.jp/kaiboukoukin.html>

口蓋のうち歯の後から奥までの大部分は骨でできた硬口蓋で、動かすことはできない。一番奥の軟口蓋は、筋肉の動きによって動かすことができる。口琴の演奏において、口腔の大きさや形状を変えてさまざまな音程を出すために、最も重要な役割を担うのが舌の動きである。舌の動きによる主な演奏テクニックを以下に挙げる。

1. 口腔と咽頭を遮断する

舌を口蓋全体に押し付けて前後に動かす演奏法。舌は咽頭へと続く部分を遮り、舌の動きによって共鳴腔の大きさを変える。舌を前後させることで、微細に腔の大きさを変化させることができるため、メロディーを演奏することができる。

2. 口腔と咽頭を開く

口を自然な形にし、母音を発音するように口腔の形を変化させる。舌は口腔から咽頭へと続く部分を妨げず、口琴の弁の振動は口腔と咽頭というひと続きの腔で共鳴する。舌と口の動きによって声のような音色を出すことができる。

3. 口蓋に舌先をあてる

歯のすぐ後ろの硬口蓋から軟口蓋までの間で口蓋に舌先をあてる演奏法。

以上のように舌の動きや口腔の状態を変えることで様々な音程を出すことができる。これに鼻腔、副鼻腔での共鳴や喉頭、気管および胸腔での共鳴など人体の多くの部位を共鳴させるテクニックを加えることで、口琴の弁の振動から倍音唱法のように多重の音程をもつ音を出すことができる。

3.4.2.2 鼻腔や喉頭などの共鳴

鼻は、主に呼吸とにおいを感じる働きがあるが、声を響かせる働きもある。顔の外に見えている外鼻、鼻の中の空洞である鼻腔、鼻腔周囲の骨の中の空洞である副鼻腔の3つからできている。鼻腔と副鼻腔は骨に囲まれた腔で、口琴や声によって共鳴させることができる。

鼻腔は、鼻中隔という板によって左右に分けられており、鼻腔の周りは副鼻腔によってかこまれている。副鼻腔は内側が粘膜でおおわれた大小さまざまな複数の空洞で、鼻腔と細い通路でつながっている。鼻腔の周りには筋肉がなくこれらの通路を開閉することはできないが、軟口蓋を持ち上げて口腔と鼻腔をつなげることで積極的に鼻腔へ響かせることができる。また、副鼻腔は大きさを調節することができないため、口琴や声の音程に応じてさまざまな腔が自律的に共鳴する。

また、口琴を演奏すると、声を出しているときと同じようにのどでも共鳴が起きている。のどは咽頭と喉頭からなり、鼻の奥から声帯のすぐ下までを指す。喉頭は吸い込んだ空気と吐く息の通路で、軟骨に囲まれた短い管である。軟骨で囲まれた喉頭腔には声帯があり、肺からあがってくる空気によって声帯が振動することで声を出す。喉頭には食べ物が気管に入るのを防ぐ喉頭蓋と呼ばれる蓋があり、飲み込む動作をすると同時に声帯に蓋をする。

口琴の演奏を行いながら飲み込む動作はできないため、声帯に蓋をすることはできない。しかし、喉仏を上下させることで喉頭蓋を上下させることができ、喉頭の腔の形を変えることができる。また、声帯を意識的に開けると、声帯の下にある気管や胸腔全体も共鳴させることができる。逆に、高い声を出すようにして声帯をほとんど閉じた状態にし、気管や胸腔を響かせないこともできる。これによって、ヴィブラフォンと同じような効果を得ることができる。

また、食道も口腔とつながった腔と考えることができる。このように考えていくと、意識的に共鳴させることが困難な部位もあるが、身体の中にある腔全てを共鳴体として響かせることが可能である。

3.4.3 共鳴体としての身体

今まで見てきたように、口琴や倍音唱法は、口の周りにある数多くの腔（鼻腔や副鼻腔、口腔、咽頭、喉頭、気管、肺、食道など）の間を開閉して、身体をさまざまに共鳴させていく。

また、多くの腔を複合的に響かせ、共鳴する状態を変化させることで多様な音を演奏することができる。身体の共鳴腔の共鳴のさせ方によって、口琴の弁や声帯の振動に含まれる倍音成分を複数強調することができ、同時に 2 つ以上の音程を出す事が可能となるのである。このように身体を共鳴させることで、どのような意味をもたらすのだろうか。

口琴は、古くからさまざまな土地で演奏されている楽器である。同様に、声帯の振動に含まれる倍音を複数強調する倍音唱法もさまざまな地域で見いだすことができる。しかし、口琴も倍音唱法も単に音楽を奏でる楽器として用いられるだけでなかったようである。台湾のタイヤル族では、若い男女が口では言うことのできない求愛問答を口琴に託していたようである。振動体の位置を外に持つことで、声とは似て非なる口琴の音で会話を行っていたようだ。

また、さまざまな土地においてシャーマンが口琴や倍音唱法を用いていたと言われている。そのため、口琴も倍音唱法も鳥や獣などの動物の鳴き声、川や山、風などの自然の音を模倣する演奏テクニックが多い。例えば、サハの口琴であるホムスは、カッコウの鳴き声を真似た音を出すことで春の訪れを表す。この模倣する演奏方法は、日常的な言葉とは異なる言葉と解釈することができる。シャーマンは、口琴や倍音唱法の音によって動物や自然の音を模倣することで非日常的な言葉を発し、その振動を身体の中に響かせることで、精霊や神とコミュニケーションを行ったのである。サハの口琴ホムスの例では、カッコウの鳴き声を真似た音を出すことで自分の援助者である霊を呼び集めるのだという。

身体を共鳴させることによって、自然など外部から多くのエネルギーを取り込む。そして、身体のすみずみまでエネルギーを浸透させることで、日常的な響きを超えた響きを生み出している。

3.5 共振が生み出す多様な響き

シタールやハーディガーディ、口琴、倍音唱法といった楽器や唱法では、共振現象によって音を大きくするだけではなく、音にうねりを付加して旋律を装飾する。共振現象を積極的に取り込むことで、ひとつの楽器から多くの響きを出しているのである。

しかし、こうした楽器は西洋音楽ではむしろ衰退の道を辿っており、特にオーケストラのような演奏では使用されることは極めて少ない。西洋音楽は、和声進行や多声を重用視するために、確定的で他の楽器と組み合わせても他の響きを妨げないような音が求められていった。そのため、近代西洋の楽器デザインでは、共鳴体の形を厳密に調整して発音体の倍音成分の強調のさせ方をコントロールし、できるかぎり余分な倍音成分を含ませずに音を大きくするように工夫している。そのため、たとえ西洋で誕生した楽器であっても、ハーディガーディやニッケルハルパのように非常に個性的で豊富な倍音成分と音のゆらぎをもつ楽器は衰退し、わずかに民族のなかで演奏されるだけである。

その一方で、非西洋音楽では和声進行ではなく旋律を重用視しており、多くの場合が単声である。また、西洋音楽のように頻繁に転調をすることもなく、終始一定のムードの中で旋律が形成され、装飾音を多く用いることで音楽のバランスがとられる。旋律の流れを重要とするために、西洋音楽でよく見られるような異なった音の高さで模倣することはほとんどない。曲線的で連続的な流れの音を求めていく中で、楽器デザインや唱法に積極的に共振現象を取り込んだのである。共鳴体の形を工夫して響かせ方をコントロールするのではなく、むしろ自由に響かせることによって、音響としてのエネルギーを次々と取り込んでいく。そして、複雑で多様な音のゆらぎをもつ独特の音色が生み出されている。

また、共振することで音の響きを引き延ばす共振弦や共鳴体は、ドローンを生じていく。ミニマル・ミュージックやアンビエント・ミュージックのように、ドローンのような一定の持続音は次第に変化する音の響きへ意識を向けさせ、注意深く聴くことを促す。深く聴き入ることで、これらの楽器から生じる音響の中に、無限の変化を見いだすことができる。このように、共振現象は響きの中に多様性を生み出す原動力となっている。

4. 共振現象に基づく実験的な表現

振動によって他の物体の振動を呼び起こし、音の響きを変える共振現象。共振現象は楽器において重要なものであるが、さらに積極的に取り込むことで多様な響きを得ている楽器デザインや唱法を見てきた。今度は、共振現象を取り込むことで、実験的に共振現象の可能性を模索する二人の現代作曲家についてみる。アメリカの実験作曲家グレン・ブランカとアルヴィン・ルシエである。彼らは、どのように共振現象を作品の中に取り込んでいるのだろうか。

4.1 グレン・ブランカ

4.1.1 グレン・ブランカの紹介

グレン・ブランカは、アメリカの実験作曲家で、1949年にペンシルベニアのハリスバーグで生まれる。幼少のころからブロードウェイ・ミュージカルに興味をもち、ボストンのエマーソン・カレッジで演劇を学ぶ。そのときにブランカはバスタード・シアターという名の実験劇団を設立し、パフォーミング、演出、音楽と精力的に活動する。彼の演劇は筋書きがなく抽象的なもので、音楽は彼自身がポットやフライパン、壊れた楽器を用いて作った。こうした自身の劇作品への作曲を通してブランカは音楽への興味を膨らませていく。

1976年にニューヨークに移り、アートロック・バンド「セオレティカル・ガールズ」を結成して1977年から1979年まで活動した。また1978年に「ザ・スタティクス」というグループを結成し「情動の構造」という手法にとりくむ。「情動の構造」という手法は、典型的な感情をむき出しにして表現を行うというものである。1979年には、弦が次々と巨大なクラスター音を確立するというクシシュトフ・ペンデレッキが用いたような独特な手法を用いて、6本のギターのための曲を作曲した。

その後は、クラスター音の多様さとクラスターの動きによる作曲法を発展させ、80年代からエレキ・ギター群やドラムスを中心としたアンサンブルによる「シンフォニー」のシリーズを始める。ブランカは「シンフォニー」のシリーズを作曲する中で、ラ・モンテ・ヤングやハリー・パーチの音楽を通して倍音列に興味を持ち、音楽の構造に倍音列を取り込んでいく。この「シンフォニー」は現在のところ第十番(1994)までが完成されている。

4.1.2 ハーモニック・ギター

ブランカは、倍音列から導き出された純正調という調律法を、音楽の構造や演奏する楽器に取り込むことで「シンフォニー」のシリーズの作曲を行っている。ここで、簡単に倍音列について説明しておく。弦を弾いたとき、通常ひとつの音の高さをもつ音を知覚する。しかし、実際には基本音と呼ばれる基本となる音の高さを決める一番大きな音と、基本音の整数倍の倍音が同時に鳴り響いている。この基本音の整数倍で表せる倍音の列を倍音列といい、倍音列上の音程に基づいた調律を純正調と呼ぶ。純正調には、十二平均律にはない微分的な音程を含んでおり、ピアノのように十二平均律であらかじめ調律された楽器は、対応することができない。そのため、純正調で演奏するためにはオリジナルな楽器を作るなどして自由に調律が可能な楽器を用いる必要がある。

そこで、ブランカは純正調を演奏するためにいくつかオリジナルな楽器を制作している。例えば《シンフォニー第三番〜グロリア》(1983)では、ブランカはハーモニック・ギターという共振現象を積極的に取り込んだ楽器を考案している。ハーモニック・ギターは、複数の同じ弦が張られたモノコードのような楽器で、水平に置いたエレキ・ギターのネック部分を延長したような構造をしている。それに加えて弦を2分する位置に第3のブリッジが置かれている。中央のブリッジを置くことで、演奏時の弦を弾く音をキャンセルし、弦振動に含まれる倍音成分の中から、ある倍音を強調して純粋な形で取り出すことができる。詳しいハーモニック・ギターの構造図を次に掲載する(図22)。

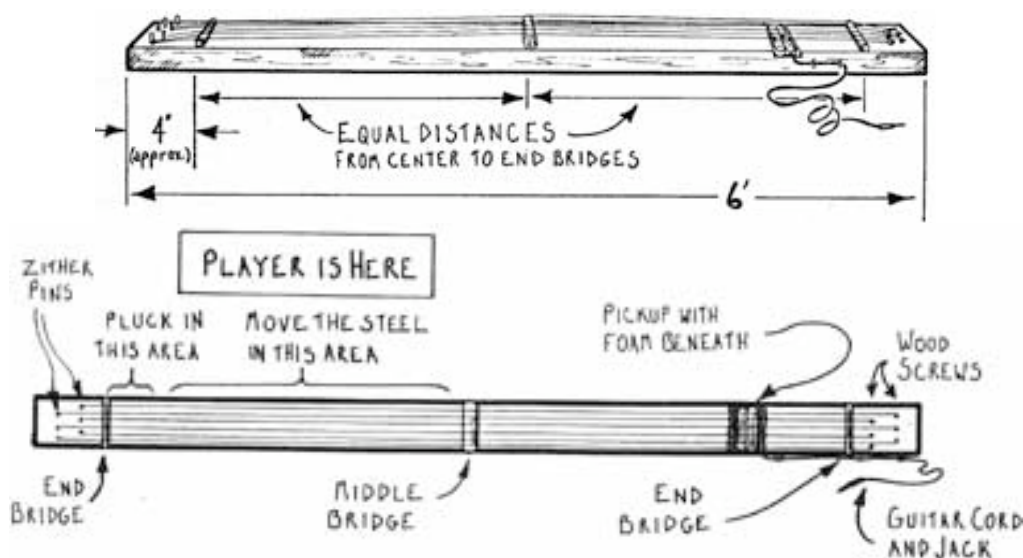


図 22：ハーモニック・ギターの構造¹⁴

また、この図をもとに再現したハーモニック・ギターが次の写真である（図 23）。



図 23：図 22 をもとに制作したハーモニック・ギター

ハーモニック・ギターについてももう少し細かく説明する。弦を 2 分する位置にある中央のブリッジを境として、左側が演奏部、右側がピックアップ部である。弦は同じ太さのものを 6 本張り、それぞれ同じ高さに調律する。演奏部の一番手前の弦の節となる点に金属の棒を当て、弦を前後にかき鳴らすことで演奏する。金属の棒を当てることで、ハーモニクス奏法やフラジオレットのように倍音（ハーモニクス音）を取り出すのである。

かき鳴らした弦の振動は他の弦にも共振し、さらに中央のブリッジを挟んで反対側のピックアップ部にも共振していく。そのとき、中央のブリッジでは、弦を弾いた擦弦音はピックアップ側の弦には共振しないため、キャンセルされた形となる。共振現象を利用することで、演奏によって取り出された倍音だけが、ピックアップ側の弦に伝わるのである。こうして、より純粋な倍音だけが、ピックアップに伝えられる。このように、弦の共振性を利用することで、ハーモニック・ギターは弦の振動に含まれる倍音をより純粋な形で取り出している。

また、ピックアップ側の弦の振動は、演奏者によって妨げられることなく自然と弦振動が減衰するまで続き、次の共振へと次第に移行していく。つまり、共振を利用することで連続的なめらかに音が変化していく旋律を生み出している。ブランカは、連続的に倍音同士が結合されていくハーモニック・ギターによって、複雑な音響のうねりをもつ「シンフォニー」を作曲している。

4.1.3 グレン・ブランカの音楽にみられる共振

4.1.3.1 共振現象が生み出す多様な結合音

ブランカはハーモニック・ギターを用いて、音を形成する要素である倍音を分離して取り出し、それらを再び結合していくことで音楽を作る。一見、要素である倍音を分離して取り出すために、結果としての音響は非常に貧弱なものになるように思える。しかし、ブランカの音楽

¹⁴ 18) Bart Hoplin 『Musical Instrument Design』（See Sharp Press）, p.13

は、無数の音が多層的に重なり合う巨大なうねりをもち、音響的に非常に充実している。この理由は、ブランカの音楽には結合音が非常に多く生み出されているからだと考えられる。

ここで、結合音について簡単に説明する。例えば、周波数が 440Hz の純音と 445Hz の純音を 2 つ同時に聴くと、5Hz のうなりが聴こえてくる。次に、445Hz の音の周波数を次第に上げていくと、うなりの回数は増えていく。しかし、最終的にはうなりがあまりにも速いために、うなりとして知覚することはできなくなる。400Hz と 600Hz の純音を聴くと、うなりは 200Hz と非常に速いためにうなりとしては聴くことはできない。しかし、実際には 200Hz の音を知覚するのである。この音が、差音である。また、同時に 400Hz と 600Hz の音を加えた加音も知覚される。これらが結合音である。また、差音と加音は、さらに結合して差音と加音を生み出す。2 つの音を同時に鳴らすだけで、非常に多くの結合音が生じてくるのである。

この結合音は、音同士が最も響き合う純正な音程であるほど、結合音が多く生み出される。ブランカの音楽は、倍音列に基づく純正調によって、多くの結合音が生じている。しかしそれだけではなく、ハーモニック・ギターという共振現象を取り込んだ楽器によって、はっきりと純正な音高を保持する純粋な倍音を取り出ししている。それらの純粋な倍音同士は、純正な音程をもつ加音や差音を生み出し、さらにそれらの結合音は結合し合う。結果として、極めて多くの結合音が生み出される。純正な音程関係をもつ倍音を純粋な形で取り出すことで、倍音同士の結合性が非常に高められているのである。ブランカは、共振現象を伴うことで純正な音程関係にある結合音を豊富に導き出し、非常に充実した音響を生み出しているのである。

4.1.3.2 共振による響きの延長

ブランカの音楽は、どの作品においても複数の楽器を用いて多層的に音が重ねられている。それはまるで教会で響いた音楽のように非常に深い共鳴を伴った音楽のようである。また、響きはどこまでも続くように長い余韻に包まれている。ブランカは、合唱団とオーケストラのための《The Tower Opera》(1992)という合唱団のオペラを作曲したことに関して次のように述べている。「私は伝統的なオペラの声や非常に明確に歌われたソロの声は好きではない。合唱などのような音の方が非常に好きで、教会のように共鳴した音質がいい。」¹⁵このことから、ブランカはものを反響させることや響きを延長することで音を幾重にも重ねることに興味を持っていることがわかる。

音を重ね、響きを長くすることによってクラスター音を作り出すブランカの音楽は、ペンデレッキからの影響が大きいと考えられる。しかし、ペンデレッキのように音を組織化することでクラスター音を作り出すのではない。共振現象によって弦を自由に振動させ、音をより響かせる状態を作っている。自由に音が響くことによって、多様な音のうねりをもつ音響がうみだされている。

4.1.3.3 大音響による共振の効果

グレン・ブランカは、ハーモニック・ギターによって弦の中から取り出した純粋な倍音を最大限まで増幅して、コンサート・ホールに放出する。ブランカは、「音が大きければ大きいほど音は長く保持されてばらばらの音でなくなり、組合わさった音としてその音の真の性格があらわになる」¹⁶と述べている。音の真の性格とはどういうことだろうか。

ハーモニック・ギターは、振動する弦から生み出されるかすかな音響が、共振によって純粋な倍音列上の音を取り出して、加音や差音といったさまざまな結合音が生み出されてくる。しかし、弦の振動のような小さな音ではそうした結合音をあまり知覚することができない。そこで、純粋な倍音を最大限まで増幅することで、コンサート・ホールはひとつの共鳴体となり、より多くの結合音を知覚できるようになる。ブランカは、音を過剰なまでに大きくすることに

¹⁵ 24) EST Magazine Issue Five (Summer 1994), Interviews with Glenn Branca, <http://media.hyperreal.org/zines/est/intervs/branca.html>

¹⁶ 16) ビリー・バークマン、リチャード・ホーン（若尾裕訳）『実験的ポップ・ミュージックの軌跡』（勁草書房），p.103

よって、純正調に基づく倍音同士の結合性を最大限まで高くすることで音の強靱なエネルギーを開放し、身体を震わせる振動としての性格を露呈するのである。

4.2 アルヴィン・ルシエ

4.2.1 アルヴィン・ルシエの紹介

アメリカの実験作曲家アルヴィン・ルシエは、1931年にニューハンプシャー州ナシュアに生まれる。イエール大学とブランダイス大学で学び、1962年から1970年まではブランダイス大学で、1970年以降はウェズリアン大学で教鞭をとる。1966年にはロバート・アシュリー、デヴィッド・バーマン、ゴードン・ムンマとともにソニック・アーツ・ユニオンを結成。科学的、音響的な実験や現象などを転用して構造的に取り入れた非常にユニークな作曲を行う。音楽的な方法で部屋の音響特性を具現化する、脳波をライブ・パフォーマンスで用いる、音の振動によって視覚的なイメージを生成するなど、ルシエの作品は多岐にわたり、音楽の作曲とパフォーマンスにおけるさまざまな領域を開拓した。

最近では、近い周波数に調律した楽器やサイン波を用いてうなりを生じさせ、空間で音波が回転を始めるような作品を制作している。ルシエは、単純で身近なものから意外で複雑な結果を生み出す自身の音楽に関して、「基本的な金属を変化させて純金を生み出すという錬金術の精神に非常に近いものだと思う。」¹⁷と述べている。ルシエは、音の振動としての特性に着目し、作品の中で音によって音自身の正体を詩的に明らかにしていく。

4.2.2 共振現象の音楽化

アルヴィン・ルシエは、さまざまな実験や現象を音楽的な構造へと転用していく中で、共振現象を取り込んだ作品をいくつか制作している。その中のひとつに、バスドラムの皮を共振させる《Music for Pure Waves, Bass Drums and Acoustic Pendulums》(1980)という作品がある。



図 24 : 《Music for Pure Waves, Bass Drums and Acoustic Pendulums》¹⁸

図 24 はその展示模様である。4つのバスドラムが並べられ、ドラムの皮に触れるようにピンポン球が吊るされている。バスドラムの後ろにはスピーカが置かれており、スピーカからは上昇していくサイン波が出力されている。サイン波の周波数が上昇していくと、少しの範囲だけドラムが共振し、次第に振動がおさまっていく。バスドラムの共振周波数にサイン波の周波数が合ってくるにつれてドラムは共振し始めるのである。バスドラムの皮の振動は、ピンポン球に触れることでピンポン球を動かしていく。

¹⁷ 20) Alvin Lucier “Origins of a Form: Acoustical Exploration, Science and Incessancy”, LEONARDO MUSIC JOURNAL, Vol8, p.11

¹⁸ 20) 同上 p.9

この作品は、システムのにも非常に単純に見える。しかし、実際はすべての波に対して 1 つか 2 つのドラムがまったく反応せずに静止していることもあり、まったく単純ではない結果をもたらした。外見上は何の変化もないのに、突然静止したドラムが動き出すこともあったようである。サイン波はすべて同じ条件で出されており、ドラムは全て同じ大きさのものを使っている。それにもかかわらず、共振する範囲はドラムごとに異なっているのである。また、バスドラムの皮とピンポン球の位置関係の微妙な違いによって、ピンポン球が非常に大きく動くこともあれば、逆に止まってしまうこともある。このように、非常にシンプルなシステムだが、複雑で多様なピンポン球の動きと音響が生み出されてくる。

この作品では、バスドラムの固有周波数に焦点が当てられている。しかし、同じシステムのものが 4 つ並べられるだけで、さまざまな結果が生じている。これは、バスドラムそれぞれの皮の振動などが微妙に異なっていることから生じているのだと考えられる。また、スピーカの個体差やバスドラムとの距離などの微妙な差の影響もあると考えられる。このようにほとんど同じに見えるバスドラムそれぞれの特性と周囲の環境との関係性が、ルシエの共振現象をもちこんだ作品を通してあらわになっている。

また、この作品では、ただバスドラムをサイン波によって共振させるだけではなく、ピンポン球をそこに取り付けている。このピンポン球があることで、ドラムの皮の振動はピンポン球に伝わって増幅され、その動きと音によって共振周波数の存在はより明確に知覚することができる。しかしそれだけではなく、バスドラムの皮とピンポン球の位置関係によって全く予測不能なふるまいをするピンポン球は、振動が伝わるといことが、いかに複雑で多様なことであるかを教えてくれる。

4.2.3 具象化された共振

作品の中で音をさまざまな方法で変換し、普段は意識されないような音の魅力的な一面を気づかせてくれるアルヴィン・ルシエ。音の振動としての性質に着目するルシエは、振動としての性格が顕著に表れた音の共鳴現象に魅せられて作品に取り込んだ。振動によって物体同士が相乗的に振動する共振現象は、物体があたかも自然と振動をし始めるかのようであり、非常に不思議な印象と何か大きな力の存在を感じさせる。

上に紹介した作品ではこの不思議な現象としての共振現象を、最も素直な形で取り込んでいく。音によって物体が共鳴して振動を始めるということをシンプル行うことで、むしろ共振現象そのものの繊細さや微妙さを表出させているのである。また、場所や時間、空間などのさまざまな条件が取り込まれ、作品は毎回違った表情をみせる。

ルシエの作品の中で共振現象の最も大きな役割は、響かせることで視覚ではとらえられないインヴィジブルな物体の特性を音に変換し、知覚することを可能としていることである。ルシエの作品の中で、共振現象はシンプルなシステムの中にある物体の特性だけではなく、空間や場所といった作品の周りに存在するさまざまな事象の関係を音に変換していく。そして、その音を聴くことで、それらの特性や関係性の一端が知覚できる。また、その音からさまざまな事象の関係を自由に想像することもできる。しかし、ルシエは、共振現象をシンプルな形で取り込んだ上に、何か加えることで巧妙に作品を多様化させる。《Music for Pure Waves, Bass Drums and Acoustic Pendulums》では、バスドラムにピンポン球をつけることで、共振するドラムの皮の振動をより複雑なものへと増幅している。

口にアタッチメントをつけることで身体の共鳴を音として浮かび上がらせる口琴のように、共振現象に何らかの装置を取り付けることでインヴィジブルな特性を音響として浮かび上がらせている。ルシエは、目に見えない物体や空間などの特性を耳で知覚できるように変換するための鍵として、共振現象を作品の中に取り込んでいく。

4.3 共振現象を取り込む実験的なアプローチ

物体の振動が別の物体の共振周波数に一致することで、自然と喚起されてくる共振現象。3章で見てきたように、近代西洋の楽器では、共鳴体を緻密に設計することで共振現象をコントロールし、増幅する倍音成分を限定することで、正確な音の高さの音を演奏できるようにしている。一方で、シタールやハーディガーディなど共振現象を積極的に取り込んだ楽器は、むしろ自由に響かせることで音響的なエネルギーを取り込み、多様な音のゆらぎをもつ独特な音を生み出していた。

こうした背景の中、グレン・ブランカやアルヴィン・ルシエは、多様性を生み出す原動力としての共振現象に着目し、共振現象の可能性を実験的に模索している。ブランカは、共振現象を取り込んだ楽器を製作することで弦の振動に含まれる倍音成分を分離し、「無数の倍音が暴れまわる壮大な音響の響宴」¹⁹を生み出す。ルシエは、共振現象そのものを実験的に見せていくことで物体や空間がもつ目に見えない特性を音に変換していく。彼らの作品では、どちらも共振現象を作品や楽器の中に取り込むことで、音をできる限り自由に響かせている。より一層響かせる状態を作ること、音を響かせるという共振現象の性質を最大限まで引き出しているといえる。

また、どちらの場合も非常にシンプルなシステムの中に、共振現象をひとつの鍵として取り込むことで複雑で多様な音響を生み出している。ピアノのように複雑なシステムを作り、そこから豊かな音響を生み出すのではなく、モノコードのように非常にシンプルなシステムから複雑で豊かな音響を引き出している。シンプルな楽器やシステムの中に共振現象を取り込み、響きや振動をコントロールすることなく、より自由度の高い状態を作り出すことによって、単純な楽器やシステムを超えた音響を生み出しているのである。

¹⁹ 6) 藤枝守「響きの考古学」(音楽之友社) p.170

5. 共振現象を取り込んだ楽器デザインの開発

これまで、共振という現象のメカニズムや、共振現象を積極的に取り込んだ楽器デザインや唱法を見てきた。また、共振現象と関わる二人の現代作曲家の作品を通して、彼らがどのように共振現象の可能性を引き出しているか考えてきた。ここでは、4.3 節で述べた現代の作曲家による共振現象を取り込んだ実験的なアプローチを拡大して、新たな楽器デザインの考案とインスタレーション作品の制作を行った。こうした実践的な活動を経て、共振現象を積極的に取り込んでいくことの可能性を体験的に学んでいく。

5.1 ハーモニック・ギターの拡張

グレン・ブランカが考案したハーモニック・ギターは、弦の共振を利用することで、弦振動に含まれるさまざまな倍音成分を取り出すことができる。このハーモニック・ギターの再現を試みる中で、さらに弦の共振を利用して、楽器を拡張することを考えた。そこで、ハーモニック・ギターを拡張し、弦の音をリアルタイムに弦に当てることで、2.2 節でみた再生形振動のように弦を共振させ続ける「シンパシティック・ストリングス」という新たな楽器デザインを考案した。



図 25 : 「シンパシティック・ストリングス」
(《Sympathetic Vibration #2》)

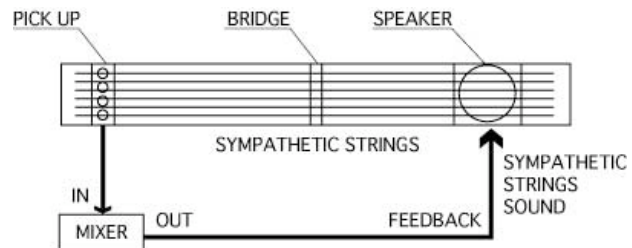


図 26 : 「シンパシティック・ストリングス」
のシステム図

図 25 は「シンパシティック・ストリングス」の写真で、図 26 は「シンパシティック・ストリングス」のシステム図である。ハーモニック・ギターの演奏部にスピーカを内蔵して、ピックアップで拾った弦の音を本体に埋め込んだスピーカから出力することで弦を共振させる。スピーカから流す音量、つまりフィードバック量を調節することで、次の3つの状態になる。

- ・フィードバック量が少ないとき：弦振動の余韻を長くする。
- ・フィードバック量が多い場合：ハウリング状態となる。
- ・上の2つの状態の境のとき：音の大きさを一定に保ちながら弦が持続的に振動し続ける。

「シンパシティック・ストリングス」の弦には、6本の弦のうちの3本に取りはずし可能な金属の輪を取り付けている。金属の輪は、弦の振動によってさまざまに位置を変えながら、ハーモニクス奏法のように軽く弦に触れることで弦の振動から自動的にハーモニクス音を取り出していく。また、フィードバックによって生じるシステムの発振を防ぐ役割もある。

「シンパシティック・ストリングス」を駆動すると、金属の輪は振動しない安定な点である節を求めてさまよい、さまざまに位置を移動していく。そして、ハーモニック・ギターと同じように純粋な倍音を取り出し、その倍音が内蔵されたスピーカから出力されて弦自身を共振させる。取り出された倍音によって弦が共振することで、弦は微妙に振動状態を変え、金属の輪の移動に影響を与える。弦の音で弦を共振させることで、音が次なる音を導いていく関係が作り出された。

また、金属の輪を取り付けていない開放弦も持続的に振動し続けている。そのため、開放弦の音がドローンとして鳴り続けている。そして、ドローンの中から、ある倍音成分が金属の輪によって強調されて取り出されていく。つまり、ハーモニック・ギターと同じように倍音列に基づく音を取り出され、多くの結合音が発生してくる。また、シタールのように基本となる音のドローンは、取り出されていく倍音との関係を浮かび上がらせ、聴くことを促す。そして、ドローンという響きの中から倍音や結合音が生み出されていくプロセスに多様な旋律を聴くことができる。

5.1.1 “Sympathetic Vibration”

「シンパシティック・ストリングス」を用いて、《Sympathetic Vibration #1》と《Sympathetic Vibration #2》という 2 つのインスタレーション作品を制作した。

《Sympathetic Vibration #1》では、「シンパシティック・ストリングス」そのものを展示し、楽器のふるまいを見ながら、取り出されてくる倍音や結合音による音のゆらぎを体験するインスタレーション作品である。この作品は、2003 年 11 月に九州大学大橋キャンパスにて行われた FREQ03 のインスタレーション部門において、《Sympathetic Vibration #1》という名前で展示、公開した（図 27）。マイク・スタンドを利用して「シンパシティック・ストリングス」を胸の高さほどに横に寝かせた状態で展示している。

《Sympathetic Vibration #2》では、「シンパシティック・ストリングス」を 2 台並べ、一方の中央のブリッジを動かして開放弦の音が 5 度の関係となるようにセッティングしている。5 度の関係となることで、それぞれの「シンパシティック・ストリングス」から生じる倍音や結合音はより複雑なものとなり、さまざまなハーモニーを形成していく。この作品は、2003 年 12 月に静岡で行われたインターカレッジコンピュータ音楽コンサートにて展示、公開した（図 28）。



図 27 : 《Sympathetic Vibration #1》

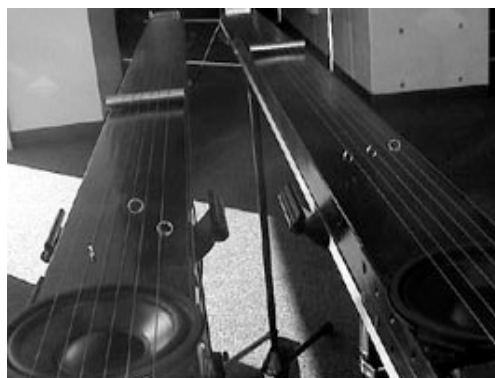


図 28 : 《Sympathetic Vibration #2》

5.1.2 “Dance on the Sympathetic Strings”

次に、国内レーベル「Crescent」のコンピレーション CD に収録するための作品として藤枝守と共同で、「シンパシティック・ストリングス」を用いた作品を制作した。この作品では「シンパシティック・ストリングス」をグランド・ピアノの上に置き、ピアノという楽器を共鳴体としてシステムの一部として取り込んでいる。また、ピックアップで拾った音をピアノの弦の上に置いたスピーカから出力することで、ピアノ弦を共振させている。下に、システム図（図 29）と制作時の写真（図 30）を掲載する。

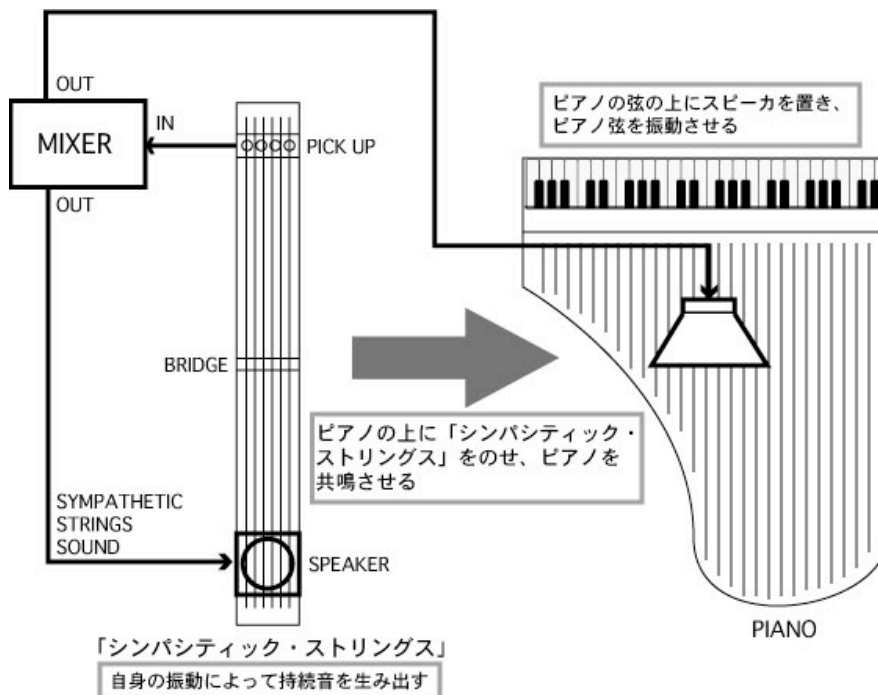


図 29：《Dance on the Sympathetic Strings》システム図



図 30：《Dance on the Sympathetic Strings》のピアノ内部（左）と全体（右）

この作品では、ピアノを取り込む事で「シンパシティック・ストリングス」の共振性をさらに拡張している。グランド・ピアノの上に置くことで、「シンパシティック・ストリングス」自体の振動は直接ピアノに伝わる。また、ピアノの弦の上に置いたスピーカによって「シンパシティック・ストリングス」の生み出す音響は、ピアノ弦の共振を発生させている。そして、ピアノの音や振動は、「シンパシティック・ストリングス」にも影響を与える。つまり、ピアノと「シンパシティック・ストリングス」とが相互的に作用し合い、それらの複雑な関係性が、音としてあらわれてくる。その結果、ブランカが「シンフォニー」のシリーズで空間を共鳴させた状態と同じように、このシステムから発せられる倍音は、より多くの結合音を耳に聴こえるものとし、音響としての充実さを一層獲得している。

5.1.3 拡張したハーモニック・ギターの実験

これまで、作品を制作していく中で「シンパシティック・ストリングス」の振る舞いを見てきた。ここでは、新たな楽器デザインとしての「シンパシティック・ストリングス」の振る舞いをさらに考察するために、ランダムに見える金属の輪の動きを観察し、時間とともにどう変化していくのか、実験を行うことで詳しく調べていく。

5.1.3.1 実験目的

「シンパシティック・ストリングス」を長時間駆動させると、時間の経過とともに徐々に演奏部の中央（演奏部の長さを 1 とした場合、1/2 となる位置）に金属の輪が集まってくる。また、集まってくるまでの間は、節と思われる位置周辺で金属の輪がさまようように動いているようである。

そこで、金属の輪の動きを撮影し、位置を計測することで、最終的に金属の輪がどこに集まってくるのか確認する。また、節の位置を探すように、節周辺でさまよっているかどうかについても確認する。

5.1.3.2 手順

実験は以下の手順で行った。

- ・《Sympathetic Vibration #1》のように、「シンパシティック・ストリングス」をマイク・スタンドにのせて設置する。中央のブリッジはちょうど弦の長さを 2 分する位置に置く。
- ・ブリッジを始点（0cm）とし、スピーカがある側を終点として定規を「シンパシティック・ストリングス」の本体に固定する。
- ・金属の輪を始点から 5cm のところに置き、弦を一度かき鳴らすことで実験を開始する。
- ・「シンパシティック・ストリングス」を DV カメラ、高速度カメラで撮影し、金属の輪の位置を 2 秒ごとに読み取りグラフ化する。計測時間が短いものは 1 秒ごとに読み取る。

高速度カメラを使用する理由は、非常に細かな金属の輪の移動を撮影することができるからである。3 つの金属の輪が重なって、位置を読み取りにくい撮影開始時を高速度カメラで撮影することで、3 つの金属の輪の位置を正確に読み取る。

セッティングの図及び実験時の写真を以下に掲載する（図 31）。

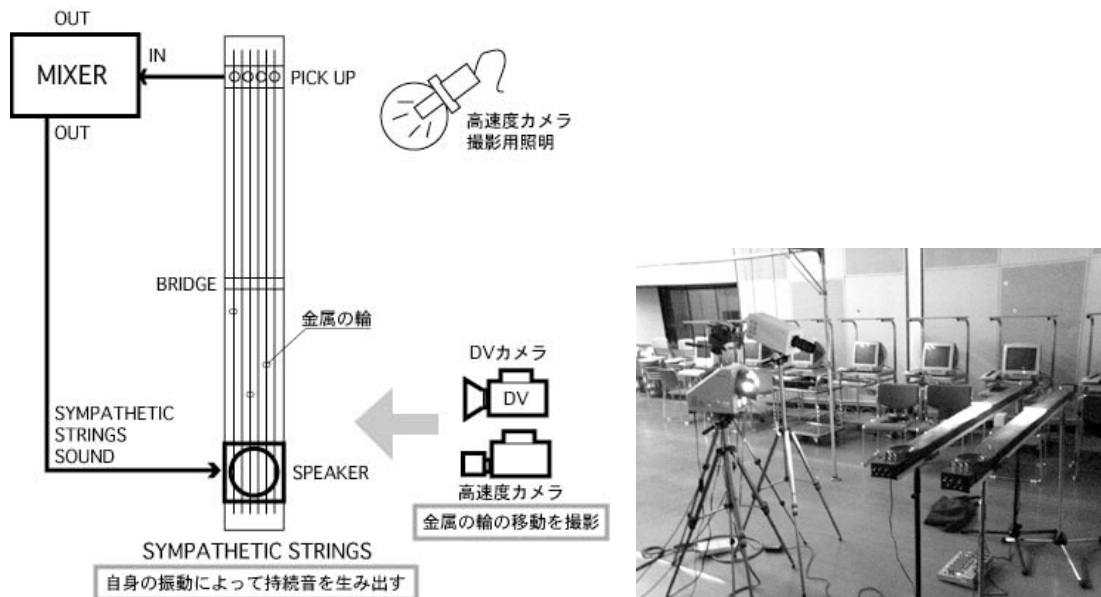


図 31：実験のセッティング図および実験風景

5.1.3.3 実験機材

実験に使用した機材は以下のものである。

- ・騒音計「ONSOKU SOUND METER SM-770」× 1
- ・照明「PHOTRON HVC-SL」× 1

- ・ 高速度カメラ「PHOTRON HVC-11B」× 1
- ・ 高速度カメラ用レンズ「CANON TV ZOOM LENS J6X11-1.4-II T06-J868-000」× 1
- ・ 高速度カメラ、照明用三脚「Velbon VGB-36」× 2
- ・ DV カメラ「DCR-TRV22」× 1
- ・ DV カメラ用三脚「kenko PHOENIX-LIBERO」× 1
- ・ モニタ「SONY TRINITRON COLOR TV KV-9AD2」× 1
- ・ ミキサー「BEHRINGER EURORACK MXB1002」× 1
- ・ アンプ（自作）× 1
- ・ 「シンパシティック・ストリングス」（自作）× 1
- ・ 50cm 定規× 1
- ・ マイク・スタンド× 2

5.1.3.4 実験結果

実験日は 2004 年 8 月及び 9 月、実験場所は九州大学大橋キャンパス音響特殊棟スタジオである。実験から得られたグラフは巻末資料に添付している。今回使用した DV カメラでは、解像度の問題等で全体を詳細に撮影することができないため、中央のブリッジから 50cm の範囲で撮影を行った。そこで、ブリッジの位置から 50cm の範囲を超えた場合、金属の輪はスピーカの影響で位置が収束しないと仮定している。また、巻末に添付されているグラフ中に示されている節の位置は、計算で求めた節の位置であり、中央のブリッジを 0、スピーカ側のブリッジを 1 とした場合の弦の分割率を表している。

グラフを見てみると、金属の輪は主に基本振動の数倍の振動にあるような安定した節の間をさまようように移動している。そして、最終的には $1/2$ 付近や $1/3$ 付近、 $2/5$ 付近、0 付近などかなり安定した節の位置に収束するか、 $1/2$ を超えてスピーカ部へと移動をしていくことがわかる。しかし、収束する位置は、計算で求めた節の位置とは数 cm のズレが生じている。 $1/2$ 付近に収束する場合は、 $1/2$ となる位置より 2cm ほど中央のブリッジ寄りに収束している。また、 $1/3$ 付近に収束する場合は、 $1/3$ となる位置よりも 2~3cm のズレが生じていることがわかる。

実験 6,7,10 のように 3 つの金属の輪のうち 1 つが、中央のブリッジ付近に収束していった場合、他の 2 つは $1/2$ の位置をこえていくことなく収束している。その時、1 つは $1/2$ 付近に、もうひとつは、 $2/5$ か $1/3$ 付近に収束をしていることがわかる。そして、金属の輪の移動は、8 倍振動や 6 倍振動のように、数の少ない倍数の振動の節周辺でさまようように位置を変えながら、結果的に線形的に始点から離れていくことが読み取れる。

5.1.3.5 実験の考察

金属の輪の収束する位置ズレは、弦自身の音だけではなく、「シンパシティック・ストリングス」自体の振動が、弦に影響を及ぼしているからだと考えられる。スピーカという駆動力が本体内に内蔵されているために、本体も強く振動している。その振動がブリッジを伝わり、弦の振動状態に影響を与えていると考えられる。また、スピーカの周辺では振動が常に強く出ており、演奏部側の弦には強い影響が出ていると思われる。その結果、演奏部側での弦の振動の形には大きな変化が生じ、節の位置が変わったのではないかと考えられる。

また、実験 6,7,10 のように 3 つの金属の輪のうち 1 つが中央のブリッジ付近に収束していく場合に関しては、ひとつが中央のブリッジ近くにあることで、スピーカからは開放弦の振動がより強く発せられているためだと考えられる。開放弦の音が強くなることで、他の 2 つの金属の輪は 2 倍振動や 3 倍振動のような強い節に引き込まれているのだと推測できる。

今回の実験の結果から、金属の輪は、実際に節の位置の周辺でさまよいながらハーモニクス音を出し、 $1/2$ や $1/3$ といった強い節の位置に集まってくることがわかる。しかし、実験を行うごとに毎回違った結果があらわれており、一見単純に見えるシステムだが、非常に多くの異なる結果があらわれている。これは、フィードバックと共振という 2 つの不安定な要素が絡

み合っているからだと考えられる。そのため、実験する場所や空間などの実験条件を変えることで、また多様な結果があらわれてくると推測される。「シンパシティック・ストリングス」の振る舞いをさらに詳しく調べるために、今後はフィードバックと共振の関係性を明らかにするような実験を行うことが必要だと考えられる。

5.1.4 拡張したハーモニック・ギターのふるまい

グレン・ブランカが考案したハーモニック・ギターにスピーカを内蔵することで、弦の共振性をより強調した「シンパシティック・ストリングス」。再生形振動のように、自身の音のフィードバックによって共振を起こし、弦に取り付けた金属の輪が連続的かつ自律的に弦の倍音成分を強調して取り出す。ブランカのハーモニック・ギターを拡張することで、以下の効果が得られた。

- ・ 人の行為が全く介入しないことで、弦や音同士がさらに自由に振動する
- ・ シタールのようにドローンを常に生み出す
- ・ 金属の輪が弦に触れることで、リズムを生み出す
- ・ 金属の輪によって、弦振動の節と腹の位置を増幅して可視化する

「シンパシティック・ストリングス」は、本体内にスピーカを取り込むことで、弦が弦の音によって自由に響き合う関係を作り出している。さらに、こちらが演奏者として介在するのではなく、弦の振動によって動く金属の輪によって自動的にハーモニクス音を取り出していく。共振現象を取り込むことによって、音同士が極めて自由に振動し合う状況を作り出しているのである。こうした自由に振動し合う状況にあることで、金属の輪が取り出したハーモニクス音は、フィードバックされて弦の振動状態に影響を与え、次の音を導いていく。つまり、音が連鎖反応的にあらわれてくるようになる。

また、フィードバックによって定常的な振動状態を生み出すために、金属の輪をつけていない弦があり、その開放弦の音はドローンとして常に鳴り響く。シタールのように常に基本となる音があり、その中から高次のハーモニクス音がさまざまに取り出され、結合していくことで複雑な旋律が浮かび上がってくる。そして、シタールのようにドローンが存在によって聴くことが促され、倍音や結合音の変化へ意識が向き、複雑な音の変化を知覚することができる。

「シンパシティック・ストリングス」において、金属の輪というアタッチメントの存在は非常に重要である。この金属の輪があることで、自動的にラジオのチューニングを合わせるように倍音を取り出しているのである。また、弦に触れるときに生じるチリチリとした金属音は、リズムとして感じるができる。この音によって、絶えず流れていくドローンと旋律に刻みを与え、荒削りな繊細さが響きのなかに生まれてくる。

また、弦の振動に影響されて動く金属の輪は、その動きを見ていることで弦振動における節と腹の位置がおぼろげながら浮かび上がってくる。アルヴィン・ルシエのように、金属の輪を付け加えることで、弦の振動に内在する目では知覚できないような振動状態が明らかになっている。

そして、実験した結果からもわかるように、金属の輪は最終的に弦振動のなかで安定な点である節の位置へと向かっていくが、金属の輪の動きや収束していく位置は毎回異なる。フィードバックと共振現象の組み合わせが、金属の輪同士の位置関係や響き、場所や空間などさまざまな事象と関わり、システムの中に取り込んでいるからだと考えられる。このように、共振現象とフィードバックという手法に基づくことで、「シンパシティック・ストリングス」は毎回異なる状態を作り出し、共振現象がいかに一回性的な現象であるか教えてくれる。

5.2 コルゲイティッド・ホース

空気が流入することで自律的に共振し、音を生じるホースがある。コルゲイティッド・ホースと呼ばれる特徴的な波状のひだをもつジャバラ型のホースである。空気を入れるだけでさまざまな倍音を生じるこのコルゲイティッド・ホースは、非常に強い共振性を内在しており、ホースの共振性を引き出すような作品制作を行っている。

5.2.1 発音メカニズム

コルゲイティッド・ホースは、側面から見ると波状の形をした規則的なひだをもつホースである。頭上で振り回すことで音を生じるこのホースは、うなり棒やサウンド・ホースなどと呼ばれ、玩具として親しまれている。



図 32：コルゲイティッド・ホース

コルゲイティッド・ホースは、振り回すか吹くことによってホースの中に空気を流入させることで音が鳴る。しかし、ジャバラ構造をもたない一般的なホースを振り回しても、音は鳴らない。ここで、コルゲイティッド・ホースの発音メカニズムを考えてみる。

コルゲイティッド・ホースは、ジャバラのような構造をしているため、ホースの内部に規則的に並んだ多くの凹凸がある。空気がホース内部を通過するとき、この凹凸に衝突して流れの不連続面が作り出され、渦が発生する。空気の流入速度を上げると、次々とホース内部の凹凸に衝突して、渦の発生頻度（周波数）が大きくなる。そして渦の周波数がホースの共振周波数と一致したときに、ホースは共振して音が生じるのである。コルゲイティッド・ホースは、内部に非常に多くの音源をもつ特殊なホースだといえよう。

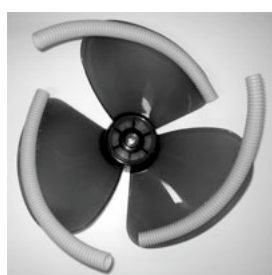
ホース内部の凹凸の間隔が大きければ発生する渦は少なく、逆に凹凸の間隔が狭ければ発生する渦は多くなる。そのため、コルゲイティッド・ホースの音の周波数は、流入する空気の速度とホース内部の凹凸の間隔によって決まってくる。つまり、同じホースを使った場合、空気の流入速度を大きくすると渦の発生頻度は大きくなり、より高い周波数で共鳴する。しかし、渦によるホースの共振は、ホースの共振周波数で発生するため、ホースは連続的に上昇していく音を出すことはできず、ある共振周波数から次の共振周波数へとジャンプするように音を出す。つまり、ホースの倍音列に基づく音が生み出されてくるのである。また、その音色はほとんど純音に近い。

コルゲイティッド・ホースに空気を流入させて生み出すことのできる最も低い音は、ホースの第2倍音にあたる。第1倍音は、通常手に入る写真のようなコルゲイティッド・ホースでは出す事ができない。これは、ホースの長さ、口径の大きさ、ホース内部の凹凸の関係から発生する渦の頻度が最低でもホースの基本周波数よりも大きいためだと考えられる。ホースの共振周波数は、基本的にジャバラ構造ではない管と同じように管の径と長さによって変わる。音の大きさは、コルゲイティッド・ホースの長さが長くなるほど大きくなるようである。同様に、口径が大きくなるほど音の大きさは大きくなる。

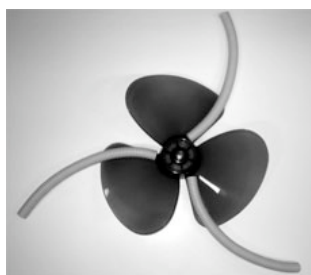
5.2.2 楽器デザイン

コルゲイティッド・ホースは、空気を流入することで自律的に共振を始める。そこで、ホースを扇風機の羽根に取り付け、モーターの回転によって持続的にホースの倍音を取り出す楽器デザインを考案した。扇風機のモーターの回転速度を調光器（市販のキットを使用して自作）で変えることで、さまざまな倍音を出すことができる。この楽器デザインを制作する中で、どのようにホースの中へ空気を取り込むかということを重点的に考えた。ホースの取り付け方は大きく分けて以下の3通りがある（図33）。

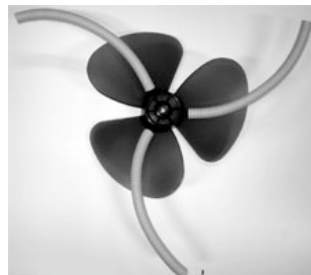
1. 扇風機の羽根の外円に沿って取り付ける
2. 1の方法とは直角に、扇風機の中央から外側へ向けて、羽根と直角に取り付ける
3. 1と2の間になるように、羽根の対角線上に取り付ける



1:羽根の外円に沿わせる



2:羽根と直角に取り付ける



3:羽根の対角線上につける

図33：ホースの取り付け方

扇風機の羽根に取り付ける場合、回転するときにバランスが崩れないようにしなくてはならない。そこで、何本のホースを取り付けるかということも問題になってくる。いろいろと試した結果、それぞれの羽根に少なくとも1本ずつ取り付けなければならないことがわかった。しかし、取り付けるホースの数を増やすほど空気抵抗が大きくなり、扇風機の回転が非常に遅くなる。多くのホースを共振させることができ同時発音数は増加するが、扇風機の回転速度があまり増加しないためにそれぞれのホースから出す音高は少なくなる。試行錯誤の上、図34の写真のようにホースを取り付けた。



図34：扇風機にホースを取り付けた楽器デザイン

5.2.3 “Wind Hose”

扇風機にホースを取り付けた楽器デザインを用いて、《Wind Hose #1》と《Wind Hose #2》という2つのインスタレーション作品を制作している。

《Wind Hose #1》では、集会用テントの骨組み上部から扇風機を吊るし、観賞者はテントの骨組みの擬似的な部屋の中に入り、ホースが生み出すさまざまな音のうなりを聴く。この作品

は福岡市美術館にて 2004 年 8 月に展示を行った。扇風機の数 は 4 つで、そのうち 3 つの扇風機には同じ長さのホース、残り 1 つの扇風機にはその長さの 2 倍の長さ、つまり 1 オクターブ低い音を出すホースを取り付けた。

テントの骨組みに固定した部分から扇風機のモーターまでの距離を調整し、共振振り子のように扇風機同士が共振し合うように設置している。また、個々の扇風機同士は、同じ周波数をもつように、調光器によって同じ回転速度になるようにしている。扇風機が回転し、微妙な回転バランスのずれから扇風機自体が振り子のようにわずかに振動する。その振動がテントの骨組みを伝わって他の扇風機と共振し、扇風機自体が揺れることでホース内に流入する空気の量や速度に変化を与える。図 35 は展示している時の様子である。



図 35：《Wind Hose #1》展示風景（左）とテント骨組み上部に固定した扇風機（右）

《Wind Hose #2》は、部屋の外に取り付けられた装置がリアルタイムに風力を感知し、扇風機の回転速度を制御するインスタレーション作品である。外の風の微妙な変化がリアルタイムに扇風機の回転速度を変化し、コルゲイティッド・ホースの音として変換される。2004 年 12 月に九州大学大橋キャンパスで行われた FREQ04 インターカレッジコンピュータ音楽コンサートのインスタレーション会場にて展示した。図 36 は、《Wind Hose #2》のシステム図と FREQ04 での展示模様である。

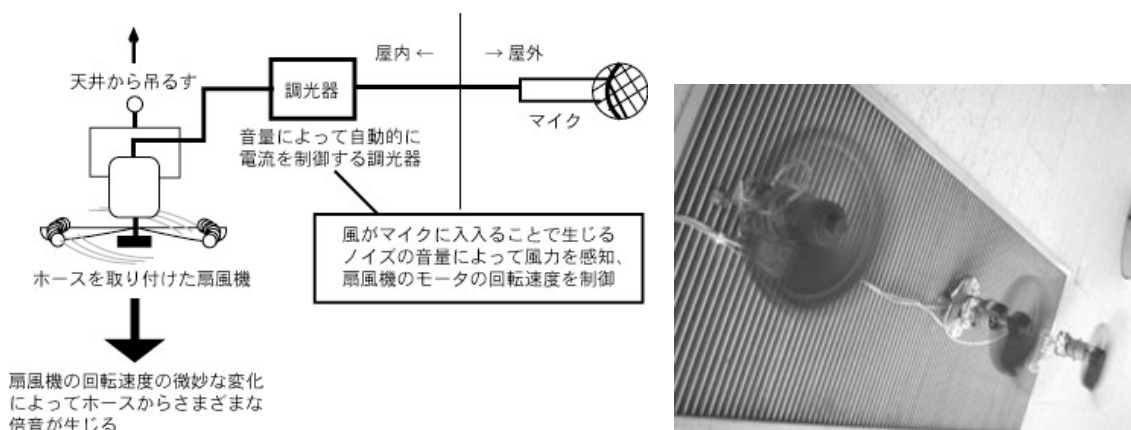


図 36：《Wind Hose #2》システム図（左）と FREQ04 での展示風景（右）

この作品は、インスタレーション会場の天井にあった空調用の網枠を利用して、3 個の扇風機を設置した。3 つの扇風機のうち 2 つは外の風力に応じて回転速度が変わるように装置を通し、残り 1 つは、ホースが出すことのできる最低音である第 2 倍音を基準音として鳴らし続ける。外の風力が強くなるにしたがって 2 つの扇風機の回転速度が増大し、ホースの音は第 2 倍音からより高次の倍音へと移行していく。これら 3 つの扇風機によって、基準となる音のドローンと、基準となるドローン音から離れていく音の推移が、風の音としてあらわれてくる。ま

た、純音に近いホースの音色によって音の変化は多くの結合音が生じ、外の風という変動的な自然現象を取り込んだ音のうねりを生み出す。

これらの作品では、ホースの長さを同じまたはその倍に限定している。ひとつのホースに統一することで、ホースから生じる音は同じ倍音列に従う。そのため、回転によるホースの響き方のずれ、つまり共振周波数のずれが、微分音的な結合音や音のうなりとなってあらわれている。しかし、現時点ではまだホースの共振性を引き出しきれていない部分も多く、作品はシステムの面で見ても完成までは達していない。この特徴的なホースを長くするなどさまざまな工夫でよりいっそうの共振性が引き出すことができると考えられる。コルゲイティッド・ホースは、非常に大きな共振性を秘めており、まだ多くの可能性を引き出すことができるであろう。

6. まとめ

共振現象は、振動によって他の物体の振動を呼び起こし、互いに増幅していく振動現象である。2 章で見たように共振現象はラジオのように日常的な中にも多く利用されている。また 3 章でみたように、共振現象は楽器において欠かせないものとなっている。アコースティックな楽器では、音板や弦、膜などの発音体の音が小さいため、コンサートなどの演奏で使用することは難しい。そこで、楽器デザインに共鳴体を組み込み、共振現象を利用することで発音体の音を大きくしている。また、共鳴体は音を大きくする以外にも、以下の効果がある。

- ・ 音の余韻を長くする
- ・ 発音体の音色に共鳴体の音響特性の影響を与える
- ・ 脳で楽器を知覚する際に重要な音の立ち上がりに影響を与える

共鳴体を取り込むことで、共鳴体の共振周波数にしたがって発音体の特定の倍音成分が強調され、楽器特有の音色が生み出される。近代西洋の楽器では、共鳴体を緻密に設計することでこうした共振現象の特性をコントロールし、和声に基づく音楽に合うような楽器デザインがなされた。響きをコントロールすることで楽器の音を秩序立て、発音体の音響的な特性が方向付けられている。

近代西洋のように響きをコントロールしていく楽器デザインとは異なる方向で、むしろ多くの響きを得るために共振現象を積極的に取り込んでいる楽器デザインがある。シタールやハーディガーディのように共振弦をもつ楽器や、口琴のように身体を共鳴体とする楽器である。これらの楽器デザインは、共振現象を取り込むことで音を自由に響かせ、多くの響きを生み出している。また、以下のような効果もあらわれてくる。

- ・ 旋律の中で重要な音を強める
- ・ 音の余韻はさらに長くなり、ドローンを生み出す
- ・ 旋律が微分音的な音のゆらぎをもち、複雑で多様なものとなる

共振現象によって響きが多様化し、旋律は響きと一体化して大きなひとつの流れとなる。また、ドローンという持続音の存在によって、響きの流れである旋律と基準音であるドローンとの関係性が浮かび上がり、微細な変化をしていく旋律へ意識が向いていく。こうして、大きな響きの流れの中から多様な旋律が知覚されていく。このような音楽は、ミニマル・ミュージックやアンビエント・ミュージックのような実験的な音楽を生み出す基盤となっている。共振現象によって音が自由に響き合うことで、音は複雑なゆらぎを発生し、音の多様性を生み出す原動力となっている。

4 章では、このような効果をもたらす共振現象に着目し、作品の中に取り込んでいる現代の作曲家をみてきた。グレン・ブランカとアルヴィン・ルシエである。彼らは、作品の中で共振現象のもつ可能性を実験的に模索している。ブランカは、エレキ・ギターの中央に第 3 のブリッジをつけ、弦を共振させることで純粋な倍音を取り出す。純粋な倍音は、ブランカによって最大限まで増幅されることで、非常に多くの結合音をはっきりと浮かび上がらせ、壮大な音響を生み出す。ルシエは、振動によって他者の振動を励起するという共振現象の振動としての性質に着目し、物体を共振させることで物体の特性を音に変換して浮かび上がらせる。彼らは、作品の中に共振現象を取り込み、音が自由に響き合う状況を作り出すことで、単純な楽器やシステムを超えるような自律的な音響を生み出している。

5 章では、共振現象を取り込んでいる楽器や二人の現代作曲家の作品をモデルにしながら、共振現象に基づく新たな楽器デザインの考案とそれを用いた作品の制作を行った。ブランカが考案したハーモニック・ギターの共振性を拡張して制作した「シンパシティック・ストリングス」は、フィードバックによって自律的に弦が振動し続け、弦に取り付けられた金属の輪が連続的に倍音を取り出していく。また、空気が入ることで自律的に共振を発生し、音が鳴るホー

スを扇風機に取り付けた楽器デザインは、回転速度に応じてホースの倍音成分が強調されて響く。これらを用いたインスタレーション作品では、人為的な操作を行わず、弦や金属の輪、ホースが自律的に響く状況を作った。これらの作品では、設置状況などによって共振の状態が毎回異なり、さまざまな表情があらわれた。ルシエの作品で見たように、いかに共振現象が繊細で複雑な性質をもつ現象であり、一回性的で体験的な現象であるかがわかる。

楽器や表現の中に共振現象が積極的に介在していくことで、音は自由に振動をして次々とエネルギーを取り込んでいく。そして、他の物体から多くの響きを引き出していく。また、響きを多様化させるだけでなく、音は空間や身体などとも自由に共振を始めていく。自由に響き合うことで、音は楽器やシステムといった枠組みを超え、人の意識よりも遥かに高いレベルで自然の秩序に基づきながらさらに共振性を強めていく。そして、音が本来もっていたとされる魔術的な力を帯びて、身体を震わせる響きとなる。

7. 今後の展開

本論文で調べた楽器の他にも、さまざまな形で共振現象を取り込んだ楽器デザインや唱法、表現がある。そうした楽器デザインや作品のなかでは、共振現象はまた別の効果を浮かび上がらせていると思われる。そこで今後は、共振現象を取り込んだより多くの楽器や作品を調べ、共振現象のもつ可能性をさらに追求することが必要である。また、ブランカやルシエのように共振現象の可能性を模索する作品を自身でも制作をする。そして、楽器や表現の中にどのように積極的に共振現象を取り込む事ができるのか、引き続き実践的に模索していきたいと考えている。

同様に、今回制作した「シンパシティック・ストリングス」やコルゲイティッド・ホースを用いた楽器デザインや表現をさらに追求していくことが重要である。どちらの作品においても、空間や場所などに対する意識が低いと思われる。共振現象をひとつの鍵としながら、空間などとの共振を生み出すような新たな展示方法や公開方法を探ることが今後の大きな課題である。

また、本論文中で制作した楽器デザインや作品は、共振現象を取り込むことで、複雑でカオス的な響きが生み出されていた。カオスとは、ある確定的な規則に従って、初期条件に敏感に反応しながら予測できない振る舞いをする現象である。弦や空気は、振動の振幅が大きくなることで非線形性があらわれてくるという。共振現象によって振動の振幅が大きくなることで振動に非線形性があらわれ、そこからカオスが生じているのではないだろうか。今後は、共振現象とカオスの関係性を探りながら、新たな楽器デザインを模索していきたい。

謝辞

本論文の作成にあたり、丁寧に御指導くださった藤枝守教授、ならびに、御助言くださった諸先生方に感謝致します。

参考文献

- 1) 吉川茂、藤田肇『基礎音響学—振動・波動・音波』(講談社, 2002 年)
- 2) 日本音響学会編『音響用語辞典』(コロナ社, 1988 年)
- 3) 田中基八郎、大久保信行『振動をみる』(オーム社, 1994 年)
- 4) チャールズ・テイラー (佐竹淳、林大 訳)『音の不思議をさぐる』(大月書店, 1998 年)
- 5) 郡司すみ『世界楽器入門—好きな音 嫌いな音』(朝日新聞社, 1989 年)
- 6) 藤枝守『響きの考古学—音律の世界史』(音楽之友社, 1998 年)
- 7) 若林忠宏『世界の民族音楽』(東京堂出版, 2003 年)
- 8) 中村仁『ナーダの贈り物』(音楽之友社, 1989 年)
- 9) ロベルト・ラッハマン (岸辺成雄 訳)『東洋の音楽』(音楽之友社, 1970 年)
- 10) H.A.ポプレイ (関鼎 訳)『インドの音楽』(音楽之友社, 1966 年)
- 11) 若林忠宏『民族楽器大博物館』(京都書院, 1999 年)
- 12) 柿木吾郎『中世・ルネサンスの楽器』(音楽之友社, 1979 年)
- 13) C.ザックス (柿木吾郎 訳)『楽器の歴史 (上)』(全音楽譜出版社, 1966 年)
- 14) 長根あき『ムックリの音・私の音』(三文双書, 2000 年)
- 15) 高澤嘉光『口琴の発音機構とその音色知覚について—ホーミー(喉歌)の発声機構への類推』
(日本音響学会聴覚研究会資料 H-97-28, 1997 年)
- 16) ビリー・バーグマン、リチャード・ホーン (若尾裕 訳)『実験的ポップ・ミュージックの軌跡—その起源から 80 年代の最前線まで』(勁草書房, 1997 年)
- 17) 藤枝守『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, 2000 年)
- 18) Hopkin, Bart “Musical Instrument Design”, See Sharp Press, 1996
- 19) Hopkin, Bart “Getting a Bigger Sound: pickups and microphones for your musical instrument”,
See Sharp Press, 2003
- 20) Lucier, Alvin “Origins of a Form: Acoustical Exploration, Science and Incessancy”
LEONARD MUSIC JOURNAL, Vol.8, pp.5-11, 1998
- 21) Gann, Kyle “American music in the twentieth century”, Schirmer Books, 1997
- 22) Stefania Serafin and Juraj Kojcs, “THE VOICE OF THE DRAGON: A Physical Model of a Rotating
Corrugated Tube”, Proc. of the 6th Int. Conference on Digital Audio Effects (DAFx-03),
September 8-11, 2003

- 23) 阿部和厚、ハレ・ダイスケ『口琴による発音、音色の変化についての解剖学的考察』,
<http://jewsharp.hp.infoseek.co.jp/kaiboukoukin.html>
- 24) Interview with Glenn Branca,
<http://media.hyperreal.org/zines/est/intervs/branca.html>

注：ホームページには URL およびアクセスした年月を示した。

巻末資料

5.1.3 節で行った実験から得られたグラフを、巻末資料として次ページ以降に添付する。

実験データは、実験 1～11 までである。