

# 音が造る形

～音響対称性の概念の導入～

小野田智之

## 概要

ストラディヴァリに代表されるヴァイオリンの名器。その製作法は未だ謎に包まれたままである。ほとんどの製作者の取る手法は、名器とされる型の寸法を正確に模倣するというものである。こうした発想は、何ら共鳴原理とは関係がない。我々は形から音を決定するのではなく、音（タッピングトーン）から形を決定する方法で研究を進めてきた。これこそ共鳴の原理に立脚した方法であり、等音面（音響的な対称性）なる概念に導かれる。今回、圧電スピーカーを利用する測定方法により、タッピングトーンに基づく制作法が科学的に正当化された。測定により明らかにされたのは、等音面が、見事に共鳴板の各点において同一の振動数分布を示したという事実である。この結果を踏まえて、等音面の実現が、ヴァイオリン制作上の根本原理になりうることを紹介する。

## 1 序論

「音楽の世界で、未だに大きな謎になっているのは、過去何世紀かの名高いヴァイオリン作りたちが、制作上の知識としての物理学、音響学より以上のモノはもちあわせていないにもかかわらず、どうして今でもその美しい音色のために、宝物のように扱われる楽器を生み出したのかということである。」ヴァイオリンの音響学 C.M. ハッチンス ([1])

ストラディヴァリに代表されるヴァイオリンの名器、その製作法は未だ謎に包まれたままである。現代のほとんどの製作者の取る手法は、例えばストラディバリやガルネリ・デル・ジェスといった良いとされるモデルの型の寸法を正確に模倣するというものである。こうした発想は、何ら音の共鳴原理とは関係がないように思える。伝統技術の保存という意味においてはこれで良いのかもしれないが、根本的な原理的説明が未だなされておらず、実は詳しいことは何一つ解明されていない。私は長年、楽器製作をしてきた経験からあることに気がついた。それは板の各点におけるタッピングトーンを合わせるように削っていけば、ヴァイオリンのフォルムが自然と一意的に決まってしまうという事実である。

従来の制作法とは、いわば幾何学的対称性（視覚的対称性）をどこまでも追求し、それが音にも良いであろうという方向で確立されており、左右対称で標準寸法でないものは意味がないと思う製作者がほとんどである。この方法は、ヴァイオリンを作る材料が木材という自然物である限り、等質な材料が一つとしてないという理由から、なんら共鳴の原理とは関係がないように思える。同じ形を完全に実現したとしても、同じ共鳴体を実現でき

ないという意味である。私が取する方法はそうではなく、タッピングトーンを全て揃える、すなわち音の対称性を高くすることによって形を決めていくという真逆のやり方であり、「形」が「音」を決定するのではなく、「音」に「形」を決定させるというやり方である。これこそ、共鳴の原理という自然の法則に叶った方法であるように思える。

ヴァイオリンというのは、美しい弁当箱ではなく、あくまで美しい音色を出すための共鳴器なのだということを忘れてはならない。そして、「視覚的な幾何学的対称性」とこの「音の対称性（音響対称性）」は必ずしも一致しないのである。タッピングトーンとは板を鈍器で叩いた時に聞こえる音である。その時間聞こえるタッピングトーンというのは、単音ではなく、複数の音が混ざって聞こえるノイズである。そのノイズの中から、最もよく聞き取ることができる代表音を選び、同じ音のする場所をプロットしていく（出来れば聞き取れる音全てに施す）。板全体にわたってこの操作を施していくと、板の各点に対応した音の分布図のようなものが出来上がる。こうして出来上がった図形を音の図形という意味でフォノグラムと呼ぶことにする。音楽においては、協和関係にある音の組み合わせのニュアンスの違いを、コードによってラベリングしている。音楽的経験を積みさえすれば、ニュアンスの違いは瞬時に違和感として身体に伝わってくる。フォノグラムは、いわば、共鳴板の各点におけるタッピングトーンをコードに見立て、それらをすべて協和関係で結んでいくという技術なのである。和声理論に厳密に従うという意味において、フォノグラムは音楽的技術である。

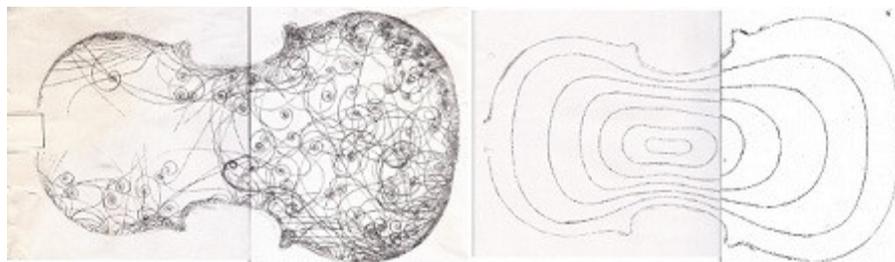


図 1 左は等音面ではない。図の渦巻きは、部分等音面どうしの境目にできる。これは、C のコードと C $\sharp$  のコードはそれぞれ別々の時には協和関係にあるが、同時に響かせると不協和音になってしまうことと事情は同じである。右は等音面である。この時、いわゆるヴァイオリン製作における標準寸法に収束していく。

このフォノグラムを元に、板の各点が同じタッピングトーンになるように成形していけば、そうして出来上がったものは等音面とでもいべきものであり、その時ヴァイオリンのフォルムが自然に一意的に浮かび上がる。従来の製作法がどのようなものであれ、音の対称性に基づいて形を作るという方法は、私の知る限り存在していない。紙面の都合

上、伝統技術の先行研究や、データなどについては、参考文献という形で代表的なものを挙げておいた ([2],[3],[4])。一応科学的な測定などの結果が記載されているが、結論としては何一つわかっていないということである。このフォノグラフィックな製法は、熟練した耳と正確に削る木工技術があって初めて可能になるものであり、このままでは科学の体をなさない。そこで私は、タッピングトーンを耳で聞くのと同様な客観的測定法を編み出した。それは、圧電スピーカーを聴診器代わりに使い、タッピングトーンで聞き取っていた響きの違いを再現性のある客観的な方法で測定するという方法である。圧電スピーカーとは、それ自体では共鳴せず、周囲の共鳴体に接触することにより共鳴するという性質のスピーカーである。異なる共鳴体に接すれば、異なる音響を示す。同一音源のCDを流せば、耳でもはっきりと違いが判る。この共鳴の違いを、マイクで集音し、それをスペクトルアナライザーでデータ化し、共鳴状態の違いを比較する。共鳴状態の違いは、振動数分布状態の違いとして視覚的に比較することができる。今回この方法で調べたことは、フォノグラムの方法で実現した等音面は、共鳴板の各点における振動数分布が、見事に同一の分布状態を示し、そうでない共鳴板の各点における振動数分布は全く異なる分布状態を示したという結果である。異なる振動数分布を示すということは、異なる響き方をするものが一つの共鳴板内に同居していることと同じである。これは、お互いが協和関係になれば、必ず不協和音やひずみ、うなりを引き起こす。これが俗にいう音色が濁っているということである。これを同一共鳴体において、すべての点で同じ響き方をすることは濁りのないよい音色の楽器を作るための必要条件であることがわかる。つまり、等音面の実現が、長い間謎とされてきた楽器制作上の一つの答えを与えるのである。

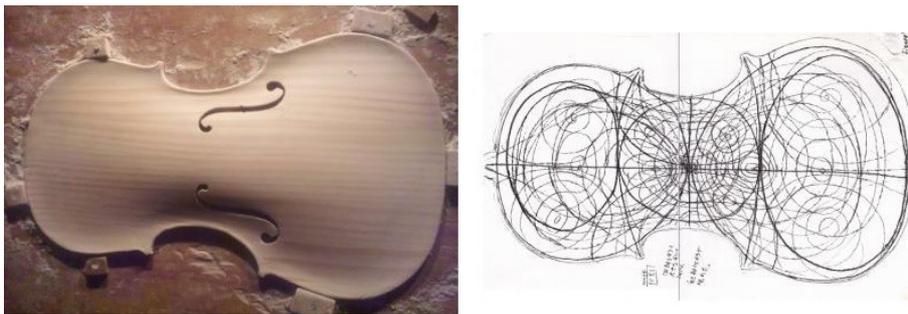


図2 共鳴板が等音面に近づくと、フォノグラム図形の渦巻きがなくなり、対称な図形になっていく。この方法で作られた等音面が文字どおり、共鳴板の各点において同一の振動数分布になることを科学的測定によって実証する。

## 2 実験方法とその概要

共鳴状態を調べる方法は、有名なものでクラドニ法というものがある。これは各固有振動モードに対応して、振動の節に砂が集まることによって、図形が浮かび上がるというものである。また、スペクトルアナライザーなどの振動数分析のような方法もある。しかし、それらの分析法が、良い共鳴板を作るのに役に立つということはなく、それによって何か新しいことが解明されるというわけでもない。この実験では、新しい響きの量というものを定義し、客観的に響きの違いを測定する方法を提案するものである。各点における異なる共鳴状態、言い換えれば異なる振動数分布が同一共鳴板内で同居している状態では、音楽的な和声理論に従えば、不協和関係の濁った音色やひずみになる。等音面が、楽器製作のみならず、音響機器一般の制作技術において必要条件足りうるのはこういった理由からである。ここは重要なポイントなので再度強調しておく、等音面以外は、和声理論と共鳴の原理に従えば、不協和成分やうなりが必ず生まれてしまう。これは論理的必然である。以下、実験方法を具体的に示していく。

### 2.1 実験の目的

一つの共鳴体の中で、共鳴板上の各点において、一般的には共鳴状態、すなわち振動数分布が異なることを示す。また、フォノグラムの方法で成形された等音面が、共鳴板全域にわたって、ひとつの共鳴状態（振動数分布）になっていることを示す。また、実験の本質を浮かび上がらせるために、最も単純な円板を採用した。

### 2.2 実験方法

A. 圧電スピーカーを聴診器がわりに用いる 実験は、圧電スピーカーを用いて行う。圧電スピーカーとは、それ自体では音が出ず、周囲にある共鳴体に振動を伝えることで初めて共鳴し、音を出すことのできるスピーカーである。当然、共鳴状態が異なるものに対して、圧電スピーカーを接触させれば、異なる音色を出す。この性質を利用して、固定端の定まった同一共鳴板上の各点に対して、圧電スピーカーを聴診器がわりに使い、振動数の分布状態、すなわち「響き」の違いを検出する。

B. CD 音源を試薬のようにして響きの違いを検出する この時、スピーカーから流れる曲を聞けば、場所によって音色が全然違うことが耳で聴けばすぐにわかるが、スペクトルアナライザーを用いてデジタルデータにすることによって、視覚的に比較することにより、

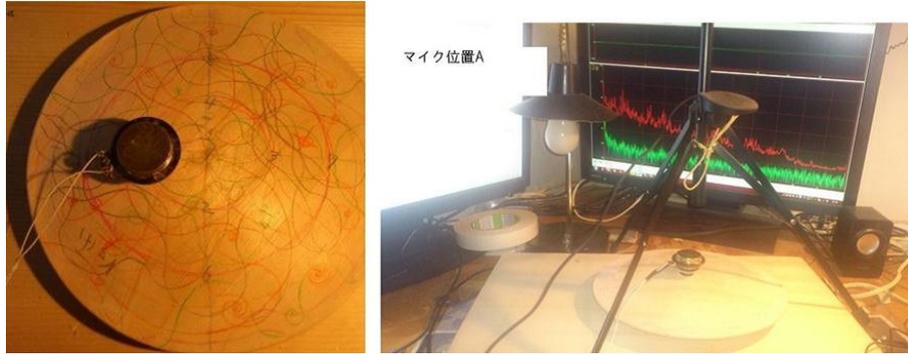


図3 圧電スピーカーは共鳴状態の違いを曲の音色の違いとして出力してくれる．実験では最も単純な円形で行う．

客観性を持たせることが可能になった．使用する曲は，CD音源を使い，計測時間，音量など，測定条件，測定環境を全て同一にすることにより，実験の再現性を保証した．CD音源はどんな曲を利用しても良いのだが，響きの違いがはっきりとわかるような曲を選んだほうが良い．基本的にはこの実験が曲目に依存することはないが，化学実験における一種の試薬のように，よく反応を示す曲とそうでないものがある．共鳴版の各点において，響きの違い，音色の違いを検出したいわけであるから，いろいろな曲で同一の測定をすればよい．我々の目的は，等音面においては響き，すなわち振動数分布の違いが，共鳴版全面にわたって見られないということを示すものであり，等音面でないものは，全くバラバラな振動数分布になっていることを示すことにある．この時，iTunesを利用した．また，曲目についてはJ.S.BachのSonata for Flute and Harpsicord In A 1(BWV 1032) Vivace Aure Nicoletを採用した．特にこの曲を選ばなければいけない理由はない．図のように共鳴版の各点に圧電スピーカーを設置し，音源をある一定時間流し，それをマイクで収録する．収録した音をスペクトルアナライザーにかけてデジタルデータにし，視覚化する．

C. スペクトルアナライザーのPEAK表示機能を利用して比較する スペクトルアナライザーはフリーウェアのweb spectraを使用した．設定値は以下の通りである．

縦軸 DBモード レンジ 120 DB  
 横軸 リニア 範囲 0～20000HZ

計測時間は30秒にした．縦軸が振幅で，横軸が振動数分布であるわけだが，時間とともに変化し続けているのでそのままでは変化をおうことができず，比較することができない．そこで，縦軸の振幅のピーク値だけを残す表示法を利用する．そうすれば，ピークの

積算値を視覚的に静止画として比較できる。これは、各点における共鳴状態の違いを客観的に表すものである。このグラフを元にすれば、各点の響き方の違い共鳴状態の違いが検出できるというわけである。

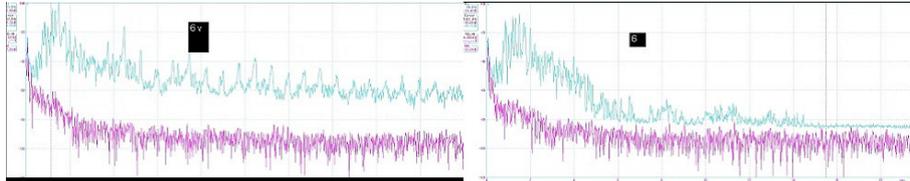


図4 響きの異なる2点の比較，明らかに振動数分布が異なる．音が合うように削るとは，このグラフがぴったり合うように削るという意味である．

D. 測定における注意事項 集音マイクの位置やマイクの角度によって、測定に若干の誤差があった。マイクの位置は、正確に圧電スピーカーの真上に垂直に設置しておく。測定誤差について、同じ測定を二回続けて行い、測定誤差がどの程度あるのかということ調べておいた。この程度の誤差は誤差として扱えるし、実験は十分に再現性のあるものであるという結果でもある。圧電スピーカーの接触面は、両面テープで貼り付くようにしてある。不必要に圧電スピーカーを抑えたりすると、響きの状態が変わってしまう。両面テープで自然に張り付いている状態で図るように注意する。テープの粘着力が変わったらすぐに、テープを張り替える。

### 3 結論及び考察

実験結果より導かれる結論として、まず挙げられるのが、同一共鳴板上において、異なる共鳴状態が複数存在するという事実である。クラド二法などの固有振動モードを計測したり、固定端が決まっていれば、共鳴板内の振動の様子がすべて分かるという従来知られている方法ではこの事実はわからない。また、タッピングトーンを板全体にわたって揃えていくというフォノグラムを利用した方法により、等音面を実現した。フォノグラムの図形変化に着目した制作法は、いわば音楽的な和声理論と、それに伴う身体の生理反応を利用して書き取ったものである。私がタッピングトーンを聴いて、それを各点同じにするように形を削っていくという説明を試みると、必ずと言っていいほど「厳密さに欠ける」という印象を相手に与えざるをえない。タッピングトーンは、なにか、鈍器で共鳴版を叩いた時に出る音であるが、これを再現性のある計測で置き換えたものが圧電スピーカーを聴診器替わりにした測定法なのである。スピーカーから出ている音を振動数分析し、デジ

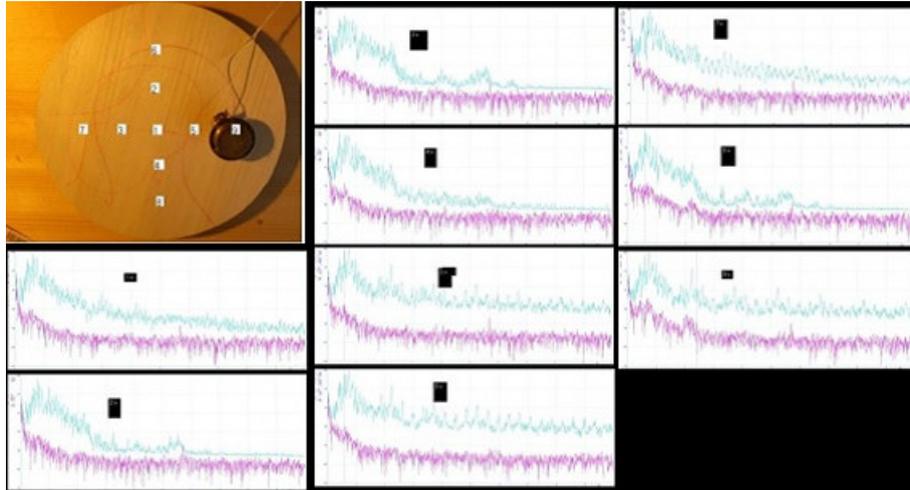


図5 等音面でない板は，固定端（外枠が同じでも）各点の振動数分布は全く異なっていることがわかる．

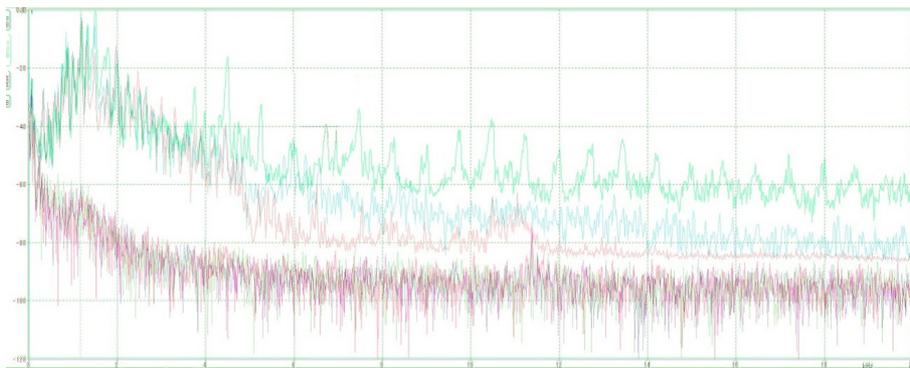


図6 図5のグラフの最も異なっている3枚を重ねたものである．いかに振動数分布がお互いに異なっているか確かめることができる．

タルデータとして視覚的に比較できる．ある一定時間の周波数の振幅の積算は明らかに客観的な響きの違いを反映した量として利用することができる．等音面というものが文字どおり，共鳴版の各点において同じ振動数分布を示すことが実証された．

圧電スピーカーによる振動数分布の測定により，等音面というものの存在が実証された．これはフォノグラムの実在性を保証するものであり，またそうした人間の感覚を使った方法が，驚くほどに正確な等音面を実現するということの証明でもある．これは音の対称性であり，音響対称性と呼ぶことにする．しかし実験結果が綺麗に出たのは，そのように私が作ることができるからであって，フォノグラムを使いこなせなければ，依然として

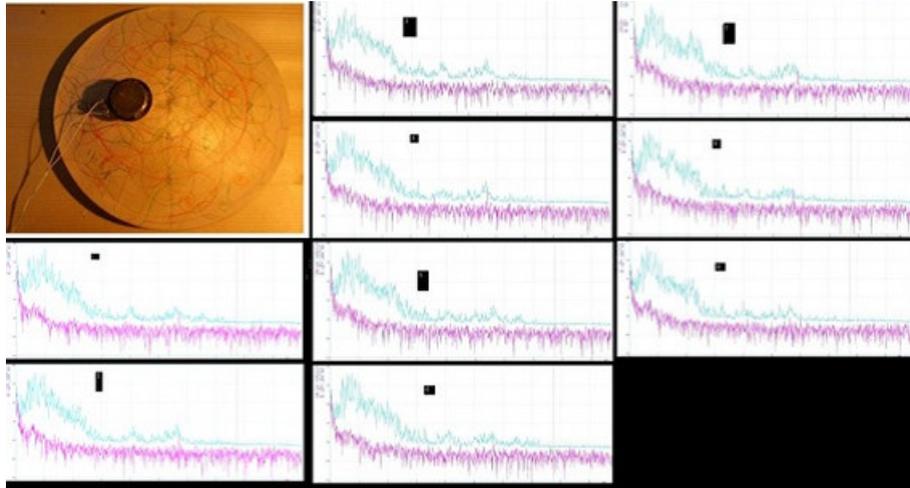


図7 等音面において，共鳴板の各点における振動数分布が同一のグラフに近づいていくことが確かめられる．



図8 図7の任意の3枚をかさねたものである．

等音面を作ることはできないのである．等音面においては，共鳴板の各点における振動数分布のグラフは全く同じ分布状態になる．この共鳴板の各点に付随する複雑なグラフをどうすれば一致させることができるのだろうか？仮に削る音やタッピングトーンをマイクで集音し，その音を解析し，そしてマシンに削らせるというCADがかりにあったとしても，フィードバックループにより，すぐにカオスの問題が発生してしまうことが予想される．これは工夫でどうにかなるような問題ではなく，原理的な限界であることは周知の事実である．実は，これを可能にすることができるのは精密な機械ではなく，音楽を理解することのできる生身の人間なのである．人間という「音楽というものを理解できる生命体」が，この複雑な操作をいとも簡単にやってのけるのである．協和・不協和という感覚は物

理学によっては説明することができない。これらは、人間の生理的反応に基づいて説明されるべきものである。これがフォノグラムを書くことを可能にしている。この、協和・不協和の快・不快という生理学的事実の普遍性を認め、厳密に理論化していったのが和声理論である。この事実の普遍性を認めなければ、そもそも音楽という芸術が成り立たない。この和声理論を証明なしの公理として認めることは、客観性を第一にする科学の立場からは批判を浴びるかもしれない。今までは、そう言いながら遠慮をしてきたが、今回の実験はそれを公理として認めて良いという科学的根拠になり得る。この協和・不協和の快・不快という生理学的反応による識別が、上の二つのグラフの複雑な振動数分布の違いを、二値化して、単純な情報に変換することを可能にしているのである。フォノグラムは、人間の身体的な生理反応を利用し、高性能な分析器として働かすことによって書きとっている図形なのである。今回の圧電スピーカーによる実証実験により、こうした人間の感覚を利用した方法が曖昧でないばかりでなく、使い方によっては機械以上に精密な結果を出すということの証明なのである。序論において、名高いヴァイオリン作りたちが、製作上の知識としての物理学、音響学より以上のモノはもちあわせていないにもかかわらず、どうして今でもその美しい音色のために、宝物のように扱われる楽器を生み出したのかということ問題の出発点とした。今回の実験事実が示すことは、従来の音響学が見落としていた点を明らかにし、全く新しい音と形の関係性、すなわち音響対称性を示したことにある。またそうして出来上がった等音面は、音楽というものが理解できる生身の人間だからこそできる技術であることも重要な事実である。そしてそれは、科学的な計測結果とも一致した。こうした事実は、従来の要素還元主義的な科学的発想の中にはないものである。今回の実験事実が従来科学の適応限界を押し広め、今まで手が出せなかった領域の解明に向かうための確かな足場になり得ることを期待するものである。音響対称性による等音面の実現は、良いヴァイオリンを作るための少なくとも必要条件であるということが結論された。

## 4 今後の研究、技術的応用など

技術的応用 良い音を作るためには、等音面の実現が必要条件であることを見てきた。この方法はヴァイオリン等の弦楽器はもちろんのこと、全ての楽器製作に応用でき、スピーカーボックス、アンプ等のオーディオ機器等の製造にも応用できる。また音響対称性によって実現された等音構造は、一点にかかったストレスを全体で受け止めるしなやかで強い構造体でもあり、音と形の新たな関係性を見出したことから、建築等の設計原理や家具などのインテリアなど、形に関するすべてに応用することが期待できる。音響対称性による等音構造というものは、こうした音と形に関するイノベーションになり得る。

今後の研究 今回の実証実験を踏まえて、フォノグラムとの図形変化との対応関係を明らかにすることができる。また音響対称性という概念をより厳密化するために、フォノグラムの数的研究に着手する。理想等音面、音響対称性が最も高い状態の振動数分布は一体どのような分布に収束していくだろうか？少し考えればそれはホワイトノイズ型になるだろうと予想される。こういったことを命題とし、実験事実と論証によって、厳密な演繹体系を構築していくのが今後の研究課題である。また、本論文の当然の帰結として、なぜ



図9 等音面によって作られたスピーカーボックス。形のバリエーションは無限に存在すると思われる。

オールドヴァイオリンの名器に非対称な楽器が散見されるのかの合理的説明が可能になる。対称に作れないのは制作技術がなかったのではなく、そうすることで音響対称性を実現し、等音場を構成した結果、視覚的な左右対称性が失われたのである。ヴァイオリンの4本の弦は全てテンションが違う。この弦張力が楽器全体に応力を発生させる。これに対するカウンターバランスを作らなければ等音場は構成できない。この事実は、いにしへのヴァイオリン製作者が音から形を決めていたと思われる間接的な証拠であることが推察される。

## 参考文献

- [1] C.M. ハッチンス 楽器の科学 バイオリンの音響学 日経サイエンス社
- [2] ヘロン アレン バイオリン製作 今と昔 1, 2
- [3] Heron Allen Violin Making as it was, and is 1,2 アート光村
- [4] 安藤由典 楽器の音響学 音楽之友社