

「ストリングラフィ」の音響解析

山口 直彦[†], 水嶋 一江^{††}, 八重樫 みどり^{††}, 管村 昇[†]

[†]工学院大学 ^{††}スタジオ・イヴ

「ストリングラフィ」は絹糸と紙コップを用いて作られ、糸電話に類似した構造を持つ楽器である。ストリングラフィの構造は既存の楽器とはかなり異なる特徴を有しており、楽器研究に有益な知見を得られることが期待される。本研究ではストリングラフィの楽音をスペクトル分析し、全ての音について基音よりも1000[Hz]付近の倍音の方がパワーが強いという結果を得た。ユニゾンの音を複数パート演奏する際に「演奏していない音」が聞こえるという現象を確認し、この現象は倍音成分が重なることによって倍音成分のピーク位置に音があるように知覚されているため、との結論を得た。

Sound analysis of a musical instrument, “Stringraphy”

Naohiko YAMAGUCHI[†] Kazue MIZUSHIMA^{††} Midori YAEGASHI^{††} Noboru SUGAMURA[†]

[†] Kogakuin University

^{††} Studio Eve

“Stringraphy” is a musical instrument that made from silk string and paper cup, and its constitution is similar to string telephone. We have analyzed frequency characteristic of it. When rearranging the experimental results, the intensity of the highest overtone of “Stringraphy” exists in the vicinity of 1000[Hz]. When several performers play sound on “Stringraphy” in unison, we can hear tone which is not actually played. The following became clear after the investigation on that, causality of the phenomenon is intensification of overtone.

1 はじめに

音楽音響学の中でも、楽器音響の研究は特に歴史が長い。しかし、現在行われている楽器音響研究の多くは伝統ある西洋楽器や和楽器を対象としたものである。電子楽器、コンピュータ音楽に関する研究は現在でも盛んに行われているが、現代において創作されたアコースティック楽器を対象とした研究は少ない。様々な演奏者が創意工夫をこらして制作した楽器を調査することで、楽器製作や改良に有用な知見を見出し、楽器の発展に寄与できることが期待できる。

本研究は、「ストリングラフィ」¹⁾と呼ばれる絹糸と紙コップで出来た創作楽器を取り上げる。この楽器は単純な構造でありながら、力強く個性的な音を奏でることができる。本稿ではストリングラフィの楽器構造上の特徴を述べると共に、演奏活動の中で発見されたストリングラフィ独特の現象について分析した結果を報告する。

2 ストリングラフィの構造とその特徴

ストリングラフィは糸電話と同様の構造となっている。図1に示すように紙コップの底面中央に小さな穴を開け、そこに弦となる絹糸を通して手芸用ボタンを結んで留める。紙コップの開口部に細い棒(バー)を通し、そのバーをワイヤーで引っ張って張力を与える。これを1本のストリングラ

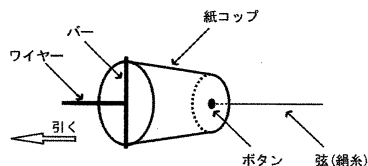


図1 ストリングラフィの構造

フィとし、演奏時は弦の長さを変えて音階を作ったものを上下に多数設置する(図2参照)。調律の微調整は張力を変化させることによって行う。

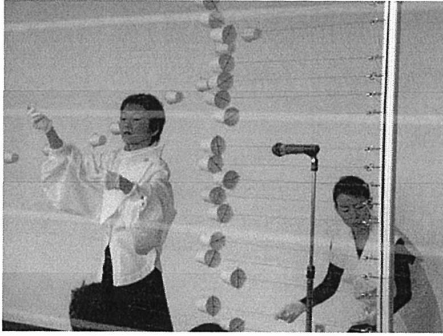


図 2 スtringグラフィを演奏する様子

Stringグラフィは擦弦楽器、あるいは撥弦楽器として演奏される。擦弦楽器として演奏する場合は弦に松脂を塗布し、綿手袋を装着した手で、弦を糸と平行な方向へ擦ることにより音を出す。撥弦楽器として演奏する場合は指もしくはピックを利用して弦をはじくことで演奏する。

Stringグラフィの楽器構造上の大きな特徴は下記の3点である。

2.1 材質

Stringグラフィの弦は絹糸が用いられ、共鳴器は紙コップが用いられている。

楽器の弦に絹を用いる例は、箏や三味線といった例があるが、共鳴器に紙を用いた既存の楽器は存在しない。

2.2 弦と共鳴器の位置関係

一般にバイオリン属、リュート属などの弦楽器は弦と共鳴器は平行な位置関係にあり、弦の振動は駒（ブリッジ）等を通じて共鳴器に伝えられて発音する。

Stringグラフィの場合、弦が共鳴器を貫通するように接続され、弦が直接共鳴器を振動させている。このような構造を持つ楽器は、既存の弦楽器においては、ハープ属しか存在しない²⁾。

2.3 弦の振動

バイオリン属等に代表される擦弦楽器は、通常弦に対して直角の方向に弓を動かしてボーイングを行う。その結果、弦は弓に塗布された松脂のスティックスリップ効果によってヘルムホルツ波と呼ばれる横振動が発生する³⁾。

Stringグラフィも弦と手袋の間に摩擦を発生させているのはバイオリンと同じく松脂であるため、ここでもスティックスリップ効果が生じているということが推測される。ただしStringグラフィの場合はバイオリンと異なり、弦と平行な方向へ擦弦を行うため、振動も弦と平行な方向、すなわち弦の縦振動として発生していると推測される。このように、弦の縦振動を利用して発音する弦楽器は、既存の弦楽器には存在しない。構造上近いのはクイーカやライオンズブローアであるが、両者は一般に打楽器、あるいは民族楽器として分類される。

3 研究テーマ

本研究では以下に示す3つのテーマを扱う。

1. 演奏中、ユニゾンの音を演奏すると「演奏していない音」が聞こえる現象の解明
2. 隣接する2本の弦を束ねて弾くと、2つの弦の中間にあたる高さの音が聞こえる現象の解明
3. Stringグラフィの発音が弦の縦振動によって起こっているという仮説の検証

研究テーマ1は、Stringグラフィのために作曲された「トカトカ テーマ」という曲を演奏する際に発生する現象である。同曲は全てが変イ音及びそのユニゾンで構成されており、最も多いところでオクターブ違いの4音（変イ、変イ、一点変イ、二点変イ）を6パートで演奏する。（図3参照）その際、各パートの音が重なっていくにつれ、「演奏していない音」が聴取される現象が演奏者の経験上知られている。

研究テーマ2は、図4のように隣接する2本の弦を束ねてつまみ、擦弦することで、2つの弦の中間にあたる高さの音が聞こえる現象である。

先に述べたとおり、Stringグラフィの発音は弦の縦振動によって行われていると考えられる。研究テーマ3はこの仮説を検証することを目的としている。

4 楽器音データの収集と解析

基本の資料となる楽器音データの収録を行った。収録機材はPCMレコーダ（SONY PCM-D1）とマイク（SONY ECM-999）を利用し、収録ビット数を

図3 「トカトカ テーマ」のスコア（一部）

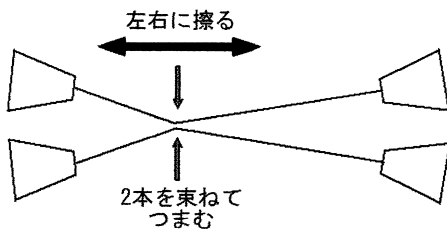


図4 隣接する弦を束ねて擦弦する

ステレオ 16[bit]、サンプリング周波数を 48[KHz] として無圧縮 PCM 録音を行った。

収録はストリンググラフィが常設されている StudioEve スタジオ、及び工学院大学八王子キャンパスの無響室で行った。

その後、収録したサンプルのスペクトル測定を行った。分析には「Wave Spectra V1.40」を利用

し、サンプルデータ数 4096、ハニング窓で FFT 処理を行っている。

図 5 のスペクトルは擦弦奏法によって 1 点変いの音を演奏したものである。計測した結果、基音の周波数は 419.9[Hz] であった。

図 5 に示したスペクトルを眺めると、はっきりと倍音成分が見え、計測すると第 1 倍音から順に

839.8, 1270.5, 1690.4, 2110.3... [Hz]

と続いている。

また各倍音のパワーを比べると、基音のスペクトルよりも第 1～第 3 倍音の方が強い。

他の測定データと比較すると、ストリンググラフィのスペクトルは 800～1000[Hz] 付近が選択的に強くなっていることが確認された。この特徴は個体、奏法、演奏会場に関わらず全ての測定データについて確認された。

図 6 は図 5 と同じ個体を、ピッツィカート奏法で演奏した時のスペクトルである。これをインパルス応答の近似とみなせば、このスペクトルはストリンググラフィの周波数応答特性に相当し、やはり 1000[Hz] 付近のパワーが強いことが確認できる。

以下、この現象をここでは「選択増幅効果」と表記する。

5 選択増幅効果の検証

5.1 選択増幅効果の原因

5.1.1 紙コップの共振特性と選択増幅効果

測定結果を元に選択増幅効果の原因について検討を行った結果、1000[Hz] 付近が増幅されるのは、紙コップの共振特性によるものであるという仮説を立てた。紙コップが 1000[Hz] 付近に共振しているとすれば、共振周波数は共振器の容積に逆比例して高くなる。従って紙コップの容積を変化させれば、容積の変化に応じて倍音ピークの位置が変化すると予想される。

この仮説を検証するため、紙コップの大きさを変化させることでスペクトルにどのような変化が生じるのかを実験した。今回は、無響室で収録したサンプル、Studio EVE スタジオで収録したサンプルのいずれにおいても選択増幅効果を確認することができたことを踏まえ、Studio Eve スタジオにおいて実験データの収録を行った。

紙コップの大きさを変化させる方法については、出来るだけ容積以外のパラメータを変化させないようにするため、通常用いている紙コップの飲み口を切断して容積を変化させる方法を検討したが、弦を張る際に紙コップの強度が問題となった。実験では紙コップに関する容積以外のパラメータ（紙厚や錐体の広がりなど）が多少変化しても実験に問題はないと仮定して、試飲用として市販されている小さい紙コップ（以下、小紙コップ）を用いて比較用のストリングラフィを作り、測定を行った。紙コップ以外の材料（弦や設置のためのワイヤー等）は全て通常と同じものを利用している。

紙コップに水を満たし、その重量を容積として計測した結果、小紙コップの容積は約96.2[cm³]であった。ストリングラフィに通常用いられている紙コップの容積も同様に測定したところ、約210.5[cm³]であったため、容積比は約 $\frac{1}{2}$ 倍である。共振周波数は容積に逆比例するため、スペクトルのピークは約2倍となって2000[Hz]付近になると予想した。

5.1.2 小紙コップを用いたストリングラフィのスペクトル

実験を行って小紙コップを用いたストリングラフィの演奏を聞いたところ、主観では通常のストリングラフィに比べて音が硬く、倍音を多く含む金属質な音に感じられた。

図7及び図8は小紙コップを用いたストリングラフィの音を図5及び図6と同一の条件でスペクトル分析したものである。通常のストリングラフィに比べ、スペクトルのピークは高音側へシフトしており、この点は主観評価と一致する。しかしピークの位置は予想されていた2000[Hz]ではなく、約1300~1500[Hz]付近となった。倍音の勢力比はやや不安定で、ピーク周波数が1500[Hz]付近で変動する例が多く見られた。

5.2 選択増幅効果と「演奏していない音」の関連性

5.2.1 選択増幅効果によるスペクトルピーク

ユニゾンの音を演奏すると「演奏していない音」が聞こえるという現象は選択増幅効果によって説明できると考えられる。

通常サイズの紙コップを用いた場合、ストリングラフィはいずれの弦も選択増幅効果によって1000[Hz]付近の倍音が強い。そのため、複数の弦を

同時に演奏した場合、各弦が1000[Hz]付近の倍音を強めあうことが予想される。複数の弦がユニゾンで演奏される際に各弦が発する倍音列は理論上全て一致するはずであり、1000[Hz]付近の倍音は特に強められる。そのためスペクトル上には1000[Hz]付近の倍音突出し、合わせてそれに続く倍音列が存在することになるため、人間がこの音を聴く際に、1000[Hz]付近を基音とする音が「演奏していない音」として知覚されているのではないかと、この仮説を立てた。

以上の仮説を確認するための実験として、小紙コップを用いたストリングラフィで「トカトカ テーマ」の演奏を行い、「演奏していない音」がどう聞こえるかを実験した。ストリングラフィに用いた紙コップは先の実験と同様であり、測定はStudio EVE スタジオで行った。

5.2.2 小紙コップを用いたストリングラフィと「演奏していない音」の関係

小紙コップを用いたストリングラフィで「トカトカ テーマ」の演奏を行ったところ、通常のストリングラフィで同曲を演奏した場合に比べ、知覚される「演奏していない音」の音高は高く感じられた。しかしその大きさは通常のストリングラフィを用いて演奏した時に比べると弱く、聞こえたり聞こえなかったりと不安定であった。

6 考察

本研究ではストリングラフィのスペクトルを分析し、1000[Hz]付近が倍音成分のピークとなる選択増幅効果の存在を確認した。また、紙コップの大きさを変化させることで、倍音成分のピークが変化することが確認された。小紙コップを用いた場合、通常のストリングラフィに比べ倍音の勢力比はやや不安定であったが、これは紙コップが新しいために、形状などが安定していないことが原因ではないかと推測される。

小紙コップを用いたストリングラフィで「トカトカ テーマ」を演奏すると、知覚される「演奏していない音」も高くなったことから、選択増幅効果が「演奏していない音」に影響を与えていることが確認された。この点に関しては現状では主観による確認しかできておらず定量的な調査が必要と思われるが、「演奏していない音」だけを抽出し、比較することは困難であると考えられる。

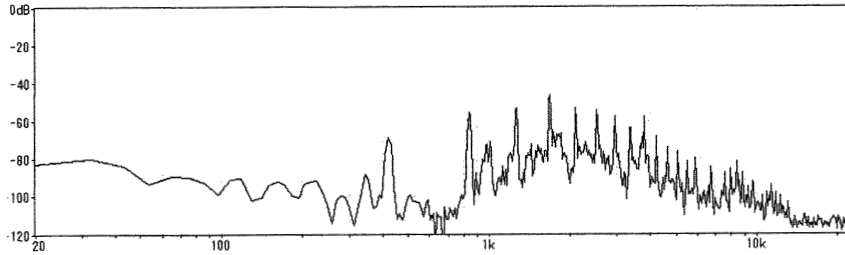


図 5 スtringグラフィの周波数スペクトル (擦弦奏法、音高 Ab、無響室にて収録)

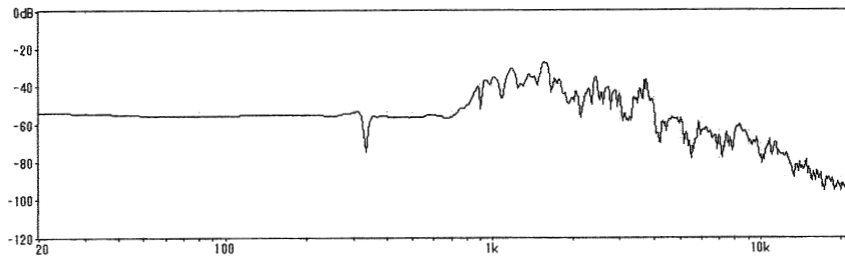


図 6 スtringグラフィの周波数スペクトル (ピッツィカート奏法、無響室にて収録)

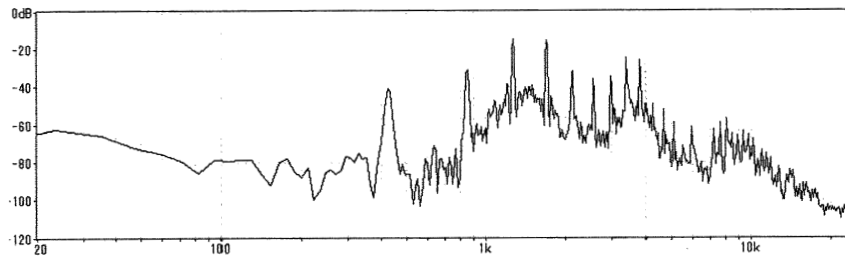


図 7 小紙コップを用いたStringグラフィの周波数スペクトル (擦弦奏法、音高 Ab、Studio EVEにて収録)

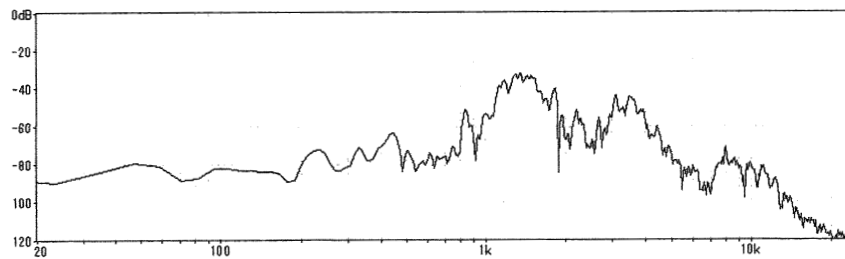


図 8 小紙コップを用いたStringグラフィの周波数スペクトル (ピッツィカート奏法、Studio EVEにて収録)

小紙コップを用いたストリングラフィは仮想音が弱く、不安定であったが、これは各パートの倍音勢力比が不安定であったため、ピーク周波数が変動することで各パートの倍音成分が十分に重ならず、パワーが得られなかったためと考えられる。

小紙コップを用いたストリングラフィのピーク周波数は紙コップ容積から予想した 1000[Hz] よりも低く、約 1300~1500[Hz] 付近となった。今回の実験では考慮しなかった容積以外の紙コップに関わるパラメータ（紙厚など）がピーク周波数に影響を与えている可能性がある。

紙コップが音響管、ホーンとしての特性を備えている可能性も考えられる。単純に考えれば、紙コップの形状はいわゆるコンカルホーンとなり、理論上の特性を求めることは可能である。しかし実際には張力による紙コップの変形や、素材自体の弱さ⁴故に、理論値との大きな誤差を生じる可能性がある。これらの点に関しても今後検討を重ねる必要がある。

7 今後の課題

今回の実験では選択増幅効果のピーク周波数が予測から外れ、紙コップ容積以外の要素がピーク周波数に影響している可能性が示唆された。今後さらなる検討と実験が必要である。

また、現在未着手である「隣接する 2 本の弦を束ねて弾くと、2 つの弦の中間にあたる高さの音が聞こえる現象」及び「ストリングラフィの発音が弦の縦振動によって起こっているという仮説の検証」に関しては、今後の課題としてさらに研究を重ねたい。

8 謝辞

本研究は、工学院大学と Studio EVE の共同研究として行われた。

本研究を行うにあたり、お忙しい中実験に協力して下さった篠原元子氏、KIKU 氏、鈴木モモ氏、向山峰子氏に深く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) <http://www.stringraphy.com/>
- 2) 角倉一郎, 『図解音楽事典』, 白水社, 1989.

- 3) 吉川茂, 「ヴァイオリンの演奏と松脂がもたらす摩擦・潤滑作用」, 日本機械学会誌 Vol.108, 2005.
- 4) 吉川茂・鈴木英夫, 『音楽と楽器の音響測定』, コロナ社, 2007.

⁴ 一般にホーンの材質は壁面自身が振動しないよう、金属などの十分な強度をもったものが想定されているが、ストリングラフィの場合は紙であるため強度が弱い。