

弦楽器の運弓動作の省エネ奏法について

On bowing skills in playing string instruments with less energy consumption

古川 康一^{*1} 升田 俊樹^{*2} 西山 武繁^{*3}
Koichi Furukawa Toshiki Masuda Takeshige Nishiyama

^{*1} 嘉悦大学大学院ビジネス創造研究科 ^{*2} チェリスト
Graduate School of Business Innovation, Kaetsu University Cellist

^{*3} 慶應義塾大学大学院政策・メディア研究科
Graduate School of Media and Governance, Keio University

Bowing is one of the most fundamental and difficult tasks in playing string instruments. In this paper, we focus bowing techniques with little energy consumption. We utilize the force generated at hip and back muscles to move the bow by delivering it to the upper limb through the back and the shoulder. We propose a new skill of keeping the head still while moving the neck forward in achieving such difficult tasks as changing the bowing direction at the tip of the bow with strong accent. We try to explain the new technique in terms of dynamics such as whip motion, action-reaction law and a stationary wave mode of the vibration system with fixed-free ends. At the same time, we select suitable terminologies to explain the skills issued by a professional player and compare them with skills induced by dynamics.

1. はじめに

チェロの運弓動作は、最も基本的な動作であるが、同時にとても困難な動作でもある。その困難さの原因は色々考えられるが、第1に弓を弦に対してほぼ直角に動かし、滑らかに方向転換すること自体が難しい。第2に、多くの場面に応じて、それぞれ最適な弓の使い方が異なり、その多様性は膨大である。弓の使い方を決定する要因を挙げてみると、曲の速さ、強さ、音の変化のさせ方、音質、弦に当てる弓の場所、弦の場所などが考えられる。これらの組み合わせは膨大である。

本論文では、とくに、余分なエネルギーを使わない、体に無理のない運弓法についての考察を行う。どのような奏法が体に無理がなく、余分なエネルギーを使わずに済むか自身、困難な問題であるが、ここでは、できるだけ腕、あるいは手先の力を使わずに、体幹の力をうまく上肢に伝達することによって弓を操作する方法を考える。一方、課題が簡単であれば、どのような運弓法を採用しても、結果に大きな差は出ない。そのため、省エネ奏法を実感するためには、困難な課題を取り出す必要がある。ここでは、第1著者の経験から、4つの課題を取り上げた。第1は、弓の中央より上半分を使ったダウンボーイングでのアクセント課題である。弓の中央から先は力が入りにくいので、この課題は困難である。第2は、アップボーイングでのアクセント課題である。とくに、ダウンからアップに切り替わるときに弓の先でアクセントをつけるのは、大変困難である。第3は、弓の中央でのアップでのアクセント課題である。第4は、アップでの低弦から高弦への移弦課題である。この課題は急激な回転運動を伴う。本論文では、これらの課題をこなすための省エネ奏法について考察する。

ここで考察するエネルギーの伝達方法は、運弓動作だけに止まらず、野球のバッティング、投球、テニスのストロークなども同様である。これらの動作の共通点は、第1に体幹の力の上肢への鞭のような伝達方式であり、第2に習熟の困難性である。本論文ではそれらの動作の生体力学的な考察を行うとともに、スキルの習熟支援のために使われるプロ奏者の言葉を収集し、それらの言葉と力学的な考察の違いについて、考察する。

連絡先: 古川康一, 嘉悦大学大学院ビジネス創造研究科, 小平市花小金井南町 2-8-4, kfurukawa@kaetsu.ac.jp

2. 運弓動作の生体力学モデル

本章では、運弓動作に関連する3つの力学モデルを取り上げて考察する。それらは、鞭運動、作用反作用の法則、および共振現象である。

2.1 鞭運動

鞭運動は、その起動、および、波動の伝播によって定義される[McMillen 03]。起動は、鞭の元で鞭を強く振ることによってなされる。そのようにして起動された鞭運動の主運動は、鞭を伝わる波動である。波動の伝播は、鞭を輪切りにした各部分の併進運動と回転運動の組み合わせよりなる運動方程式によって与えられる。その結果、鞭の波動は材質中の音速で伝わる事が知られている。そして、その音速自身は鞭の材質のヤング率の平方根に比例する。すなわち、ヤング率が4倍大きくなると、その波動の伝達速度は2倍になる。

運弓動作において、鞭は腰が鞭の元に相当し、脊椎、鎖骨あるいは肩甲骨、肩、肘、手首、指の諸関節を経由して、指先が鞭の先になる[Furukawa 05][古川 06]。体の場合、ばねの強さを表すヤング率は、動きに対する抵抗であるインピーダンスと考えてよい。鞭の起動は、腰筋を緊張させて、体を主に左右に揺り動かすことによってなされる。重心を根元として、その先を振る感じである。鞭の波動が体を伝わるためには、各関節において、ある程度のインピーダンスを必要とする。そのため、各関節で完全に脱力してしまうと、鞭の波動は伝わらない。また、鞭は先に行くにしたがって先細りしているが、そのような質量分布も鞭の伝播速度を決めるパラメータとなっている。実際、鞭モデルは、弓の返しのように説明を与える。弓の返しは、手先の加速度的なスピードによってなされるが、そのようなスピードを得るための動作として、鞭運動を考えればよい。

2.2 作用反作用の法則

運弓動作を記述する第2の力学モデルは、作用反作用の法則である。とくに、アクセントを伴う運弓動作において、作用反作用の法則は重要な役割を果たす。たとえば、アクセントを伴う、ダウンからアップの弓の返しでは、急激なアップボーが必要に

なるので、その動きに対する強い反作用が生じる。その反作用を強く跳ね返さず力に吸収してしまうと、急激なアップボウは生じなくなってしまう。壁に背中を押し付けて足で重たい箱を動かそうとするとき、壁が固定されていれば箱は簡単に押せるが、壁ではなく衝立だとすると、その反力が生まれないので、重たい箱を動かすことはできない。同じように、アップの素早い返しをする場合、左肩を動かさないように壁で支えるなどをすると、その動きは可能になる。実際には、左に壁を置くことはできないので、体幹の筋力により、壁を作るのである。これは、ゴルフでのスイングでよく言われることである。作用反作用の法則と等価な法則は運動量保存則である。さらに、回転運動に対しては、角運動量保存則がその役割を果たす。次章で述べる課題(4)のような移弦を伴う運動では、とくに角運動量保存則は重要になる。それは、体の一部を回転させるとき、外力がない場合には必ず体のほかの部分の逆回転させる必要があることを主張している。

2.3 固定端-自由端での共振

体を使った運弓法の理解を深めるために、第1著者はボディープレードと呼ばれている運動器具を購入し、その動きを体感した。実際、その器具の中心を握って上下を揺らした場合と、下端を保持して揺らした場合の周期の違いを調べて見た。その結果、前者の方が振動数が格段に多いことを確認した。そのような振動現象を説明するモデルとして、共振現象が知られているが、定常波の振動現象には、両端の固定状態により、いくつかの振動系が存在する。ここでは、固定端-自由端での共振を考える。固定端は腰に相当し、自由端は頭の天辺に相当する。ここで問題になるのは、振動モードである。振動は、固定端は振動の節になり、自由端は腹になる。図1に示すように、1次モードでは、両端の間に節が存在しないが、2次モードでは、振動系の上から 2/3 のところに節ができる。このときの振動周波数を比較すると、後者の方が前者に比べて3倍高いことが分かる。運弓動作で言えば、首を節にした振動形を採用すると、そこに節がない場合に比べて、3倍速い振動が得られる。このことは、その振動モードを作ることによって、速い弓の返し、あるいはアクセントなどの困難な課題に対処できることを示唆している。

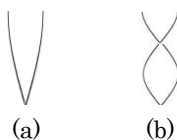


図1. 固定端-自由端振動系での定常波。
(a)は1次モード、(b)は2次モード。

3. 困難な課題

本論文で対象にしている課題は、弓の操作が大変困難な課題である。ありきたりの課題なら、ここで論じるような技巧を要しない。そのような困難な課題には、いくつかの特徴がある。その1つは、弓が弦に接触して実際に音を生成する位置が、弓の中ほど、あるいは弓先の場合である。弓元の操作は比較的楽なので、ここでの考察の対象に含める必要はない。第2に、弓の速度、あるいは加速度がある程度以上大きい課題である。それは、アクセント課題の特徴でもある。アクセントのある音を出すためには、弓を急に高速に動かさなければならないからである。我々が選んだ課題は、以下の4つである。

(1) 弓の中ほどのダウン動作でのアクセント

図2の楽譜での枠で囲んだ2つの音がその例である。これらの音は、ダウンで演奏されるが、そのときに、3つ前の音を伸ばす関係で、弓の位置が中央付近になってしまい、そこでは弓の棹の部分の振幅が最大になるので、弓がはねやすく、その制御が利きにくくなる。



図2. ダウン時の弓の中央でのアクセントの例

(2) 弓先でのダウンからアップへの弓の返しでのアクセント

図3の楽譜での枠で囲んだ音がその例である。直前の2分音符+8分音符の長いDの音を弾くために、弓が先端に行ってしまう。弦との接点が弓の先に行くにしたがって、同じ力で弦を抑えるのに必要とされる力のモーメントがアームの長さ按比例して大きくなるので、音が出しづらい。さらに、弓の急加速も難しく、そのため弓先でのアクセントは大変困難である。



図3. ダウンからアップへの弓の返しでのアクセント

(3) 弓の中央でのアップでのアクセント

アップ弓の途中で弓元まで弾ききるときにアクセントがある場合、弓の勢いを付けなければならない。そのような弓の動きを腕だけで行くと、雑音が出てしまいがちになる。それを防ぐのがここでの問題である。例として、図4の枠線の音を挙げておく。



図4. アップの途中でのアクセント

(4) アップでの低弦から高弦への移弦

本課題は、移弦による回転運動に対する補正を必要とする。とくに、低弦から高弦への移弦は重力に逆った動きなので、アップボウで行う場合、弓を持ち上げる動きと左に巻き込む運動の両者を同時に行う必要がある。そのため、脊椎を軸とする回転運動が発生し、その補正のために、首などでの逆回転を必要とする。楽譜例は、図5の枠で示した音列である。



図5. アップでの低弦から高弦への移弦の例

4. 生体力学からの奏法の提案

4.1 鞭運動からのヒント

2章で与えた生体力学モデルは、このような困難な課題を達成するためのヒントを与える。鞭モデルは、弓のしなやかな動きを実現するための基本的な制約条件を与える。それは、鞭の経路に沿ったインピーダンスの確保である。これを言い換えると、筋肉の不必要な緩みを作らない、ということである。鞭の経路上の筋肉の緩みはインピーダンスを失わせ、その箇所では鞭の波動が途切れてしまう。すなわち、腰筋で作られた筋力を手先にまで伝えることができなくなる。それは、操り人形の糸が途中でたるむと、手足が動かなくなるのに似ている。

鞭運動からの第2のヒントは、インピーダンスの強化による波動伝播速度の向上である。鞭運動の方程式によれば、2倍速い動きを得るためには、体のインピーダンスは4倍にしなければならない。たとえば、背筋のインピーダンスの強化のためには、背筋を伸ばす方向に力を入れればよい。また、脊柱を左に倒す筋肉と右に倒す筋肉の両方(拮抗筋)を同時に活性化させることによって、インピーダンスが上がる。腕の場合も同様に、伸ばす方向に力を入れる分には、弓の制御を妨害する余分な力にはならず、インピーダンスの増強に役立つ。

4.2 作用反作用の法則からのヒント

作用反作用の法則から得られるヒントは、3章で与えたすべての課題に適用できるが、主効果の動きを打ち消すような逆向きの運動を行う、というものである。それらの運動自身は、課題ごとに若干異なる。3章の(1)の課題では、ダウンのアクセントを必要とするが、その主効果に対する逆向きの運動は、首を左に残す運動になる。同時に、背筋のインピーダンスを瞬間的に強化することも必要になると思われる。

一方、課題(2)は同一の弦でのダウンからアップへの弓の返しであるが、その場合は、逆に首を右に振る運動になる。同時に体幹の上半分を右に倒すのも効果がある。課題(3)もほぼ同様であるが、体を傾ける(引っ張る)方向がやや違っており、右斜め後ろとなる。それは、弓の方向が左斜め前だからである。こうすると、前節で述べた、筋肉の緩みの発生を防ぐ効果もある。

課題(4)は、回転運動の課題であるが、その主効果に対する逆向きの運動は、逆回転である。これは、角運動量保存則に相当する。主効果の回転運動を生成するためには、肘を上げて左に回す必要があるが、逆回転のために肩を残し、首から上を逆に回転する。

4.3 固定端－自由端での共振モデルからのヒント

共振モデルでのモードの選択は、鞭モデルにおいてインピーダンスを上げることによって波動の伝播速度を加速すると同様の効果をもたらす。すなわち、1次のモードから2次のモードに変化させることによって、その振動数は3倍になり、結果として振動の速さが3倍になる。これを運弓動作に当てはめると、2次のモードでは首を節にした振動モードを採用することに相当するが、このような振動を生成するためには、上の節となる首を固定させて頭を振る運動が効果的であると考えられる。このモードは、とくに高速での弓の操作、アクセントの実現に効果が期待できる。

5. プロ奏者との議論による気付き

4章では、生体力学が与えるヒントと、それによる必要な体の動きを求めたが、第2著者であるプロのチェロ奏者は、その結果

の妥当性をより吟味する必要性を指摘した。とくに、4.2節、4.3節で述べた、首なしの頭を振る運動であるが、その妥当性に疑問を呈した。第1著者は、生体力学からの帰結をより尊重する立場を取っているが、一方、第2著者は、経験主義の立場からの疑問を呈している。実際、第1著者も、首を振ることに欠陥があることを認識している。それは、視点が定まらず、楽譜の読みに問題を生じるからである。楽器が揺れてしまうことも問題である。また、解剖学的にも、首をやたらに振ることが体のほかの部分の制御に少なからず影響を与えてしまうと思われる。首を振りすぎるのは、見た目にも格好が悪い、という欠点もある。また、その動きが直感に合わないというも、見過ごせない意見かもしれない。首を振ること自身、解の1つであり、真の目的は、作用反作用の法則を満たすように、主運動に対して逆方向の運動を生成すればよい。首を振るのは、その目的に対するひとつの解に過ぎない。よりよい解があり、しかも、副作用がより少ない場合、そのような解の方がよりすぐれていると考えられる。

このような着眼点は、プロ奏者の経験から得られたものと考えられるが、次章では、このような着眼点を含む、プロ奏者による教示での表現の問題を考えよう。

6. プロ奏者の助言と生体力学からの提案の違い

プロの奏者からボーイングに関連する教示上の言葉、表現を抽出することを目的として、2回のインタラクティブ・インタビュー実験を行った。参加者は、2回とも、二人の被験者、すなわち、第1著者と第2著者、インタビュアー(第3著者)、および書記の4名である。1回目の実験では、第1著者が中心となってインタビューを受け、運弓課題での諸問題に対する自由討論を行った。そこで採られた手法は、忽滑谷[忽滑谷 11]に基づく、hex[西山 11]を利用したインタビュー実験である。ここで、hex は一辺45mmの六角形のメモ帳であり、書いたメモを並べることで使用者のメタ認知的な思考を促すことを意図して開発されている。1回目のインタビュー実験では、約50枚のhexメモが作られ、その内の30枚が運弓動作に関連付けられた。そのメモ群をグループ化して、相互の関係を明らかにした。そのときに得られたグループは、(1)身体の構造と機能に関する部分(ハードウェア)、(2)動きを振動系として捉え、多様な振る舞いを記述したグループ、(3)ターゲットとなる運弓動作を実現するための首や頭などの体の各部分の瞬間的な動きに関する記述、(4)その動きを「首を残す」という表現に変えることに関する主張、の4つである。とくに、第4のグループは、第2著者のプロ奏者による意見が反映されたグループであり、(3)の主張と対立している。

2回目の実験では、第2著者(プロ奏者)が中心となってインタビューを受け、同様のメタ認知実験を行った。そこでは、46枚のhexメモが作成され、それらは(1)第1著者が関与する生体力学的側面、(2)課題をこなすための体の動かし方、弓の操作、(3)課題の困難性についての記述、(4)第2著者の発言の主要部分である、奏法のヒントを与える比喩的表現、の4グループに整理された。

ここでは、これらの実験の中で論じられた3つの点についての考察を行いたい。それらは、(1)課題達成のために首を振ることの是非、(2)第2著者による準備動作としての、「弾みをつける」動きに関する示唆、(3)第2著者による奏法のヒントとなる比喩的表現についてである。

6.1 課題達成のために首を振ることの是非

生体力学からの考察によれば、作用反作用の法則から見ても、腕の急激な運動に対して、その運動を補償するような逆向きの運動は、なくてはならない。その点から、第1著者は、とくに 3

章で述べた課題 1 のような、ダウンからアップへの腕の運動方向の急激な変化に対応して、首を逆方向に振る補償運動を提案した。一方、第2著者は、経験的に、そのような動作の不適切性を感じ取った。メタ認知実験を通して明らかになった理由としては、首の動きにより視線が定まらなくなる点、および、首を振ることにより楽器が揺れてしまう点の2点が上げられた。もう一点挙げるとすると、首を極端に振ると、脊柱から頭の天辺までの体の軸が折れ曲がってしまうのも、問題であろうと考えられる。

一方、この問題の解決策として考えられたのは、「首を振る」のではなく、「首(頭)を残す」と言う表現である。第2著者は、この表現に大いに納得した。実際、ゴルフなどでも、スイング時に頭を残すことの重要性が指摘されている。首あるいは頭を残す動作は、2.2 節で述べた「壁を作る」ことに寄与すると考えられる。

6.2 「弾みをつける」動き

ボーイングにおけるアクセント課題を考えるとき、生体力学的考察では当然ターゲットとなるアクセントのついた音の処理を考察の対象としたが、第2著者の助言は、「その前で弾みをつける」と言うものであった。この方法は、第3章で与えた課題 1 および課題 4 の実現にとって、大変有効であることが確認された。直前での弾み動作は、アクセント動作の起動の問題と密接に関連している。実際、2.1 節の鞭運動の項で述べたように、鞭で重要になるのは、鞭動作の起動と鞭波動の伝播の 2 つである。その起動をどのように行うのかについての考察は欠落していたが、直前での弾み動作は、鞭の起動のきっかけを与えるものと考えられる。このような、一見思いつかないところに重要なヒントが隠されていることはよくあるが、これもその例のひとつである。実際、この方法で起動すると、作用反作用の法則での壁を作ること自身、自然に行うことができ、意識して首を振る動作を行わなくてよくなる。このことは、第2著者が首を振る動作に異を唱えた理由のひとつかもしれない。

6.3 奏法のヒントとなる比喩的表現

ここでの課題に関連した第2著者による表現は、大変興味深い。それらを列挙しよう。前節で述べた、弾みの例では、「弾みがほしい」と言う表現が見られた。一方、ターゲットとなるアクセントを伴う音に関しては、「弓と弦の出会いがしら」、「出会いがしらの力をうまく使う」などの表現が見られた。この表現は、2.2 節で述べた作用反作用の法則をうまく言い当てている。「作用反作用の法則を満たすように」と言うより、「出会いがしら」の方が腑に落ちる表現と言えるであろう。そのほか、「音の長さが変わったときには、新しいエネルギーが要る」といったより一般的な経験則も見られた。そのほか、「豹の動き」、「スネークテクニク」などの、体全般の動きを形容する言葉も紹介された。また、本課題に関係なく、より一般的に、「音楽に血を流したり、体温を持たせる」などの表現も使うことが示された。また、プロ奏者は、「揺らして大きな楽器にする」、「音楽だけでなく、体の動きに関するイメージを持つ」、「芯をつかまえるイメージを持つ」、「肘より先を木の枝とイメージする」など、豊富なイメージを持ち合わせていることを確認した。

7. おわりに

アクセントを伴う困難な運弓課題に対して、生体力学からのアプローチでは、鞭モデルによる全体の動きの説明、作用反作用の法則によるカウンターバランスの重要性、固定端-自由端を持つ振動系の共振でのモードの選択による高速な体の動きの説明などを行うことができるが、それらの説明を直ちに理解することは容易ではない。

一方、プロ奏者による豊富なイメージと場面に応じたイメージの当てはめは、学習者にとって、直感的に理解できるという点で、大変優れている。そこでの理解は理屈抜きであるが、場面への当てはめが妥当であれば、与えられたイメージは課題をこなすための奏法に直結する。

生体力学的アプローチがこの場面で貢献するとすれば、新しい奏法の提案であろう。ここで取り上げたアクセント課題でも、常識的には、「先ず上体、あるいは肩の動きを腕の動きに先行させて、たとえばダウンからアップの時には先ず上体と肩を左方向に返して、その後で腕および手首を左に返す」と言う奏法が思いつくが、生体力学からは、逆に最後まで頭を残して、あるいは、弓は左方向に返すが頭は右方向に振る、といった全く逆の動作を示唆される。そのため、直感に反する動きが要求され、学習者にとっては、理解に苦しむことになるわけである。

ここでの議論を通して得られた最終的な結論は、「首を振る」ことの妥当性はさておき、「首(頭)を残す」奏法の提案である。本提案は、アクセント課題での新たな奏法と考えてよいであろう。これまでに知られていたさまざまな工夫は、従来解と考えられる。従来解には、脇を閉めることによって弓を急加速すると同時に、「左手指で指板を強打する」奏法が教示されている。演奏者にとって、多くの解を持っていることは、状況に合せたり、自分のやりやすい方法を選べると言う意味で、有利と考えられる。

残された問題は、鞭運動を起動する動作についてである。実際、この問題はチェロの場合、大変厄介である。チェロ奏者は座って演奏するので、腰周りの動きが制約される。第1著者は、ある公開セミナーで、立ち上がらんばかりの姿勢で演奏している音楽大学の学生を見たことを覚えているが、その姿勢は鞭運動の起動に適していると思われる。第2著者は、この問題に対して、丹田の重要性を指摘している。そこでは「丹田を落とす」と言う表現を使っているが、この問題に関する科学的な分析は今後の課題である。

謝辞

本研究でのインタビュー実験で慶応大学環境情報学部の忽滑谷春佳さんに記録のお手伝いを頂いた。深謝する。

参考文献

- [McMillen 03] McMillen, T. and Goriely, A.: Whip Wave, *Physica D Nonlinear Phenomena*, Vol.184, Issues 1-4, pp.192-225, 2003.
- [Furukawa 05] Furukawa, K., Kinjo, K., Shimizu, S., Sawai, K. and Yoshinaga, S.: On Modeling Bow Arm Movement in Cello Playing by Whip Motion, *Proc. of the 3rd European Medical and Biological Engineering Conference*, Prague, 2005.
- [古川 06] 古川康一, 清水聡史, 金城敬太, 澤井啓吾: 鞭力学による協調動作のモデル化, 第27回バイオメカニズム学術講演会, 神戸学院大学, 2006.
- [忽滑谷 11] 忽滑谷 春佳, 諏訪 正樹: ナラティブ生成を目的としたインタラクティブなインタビュー手法の提案 - 建築学科の設計課題を例にして, 人工知能学会身体知研究会, SKL-11-01, 2011.
- [西山 11] 西山武繁, 諏訪正樹, 佐山由佳, 浦上咲恵, 泉二肇: 身体と意識の開拓を促す文房具のデザイン: 2つのメモツールに関する考察, 人工知能学会身体知研究会, SIG-SKL-09-04, pp.27-35, 2011.