

サワリ機構をもつ弦楽器モデルにおける撥弦振動に関する実験的考察 - 初期条件の影響について -

千田 崇文^{†1} 吉川 茂^{†2}

本研究では2つの異なる初期条件: “up-plucking” と “down-plucking” が与えられた際のサワリ機構との接触を伴う撥弦振動を高速度ビデオカメラを用いて可視化した。その結果、振動周期や高周波の形成過程に関して初期条件が弦振動に与える影響が確認された。

Experimental consideration on the plucked string vibration in a string instrument model with a sawari mechanism: On the effects of initial conditions

TAKAFUMI SENDA ^{†1} and SHIGERU YOSHIKAWA ^{†2}

In this study, we visualized string vibration accompanied by contact with a sawari mechanism by means of high-speed video camera when two different initial conditions: “up-plucking” and “down-plucking” are given. In consequence, we confirmed effects of initial conditions on string vibration with respect to period of vibration and formation process of high-frequency waves.

1. はじめに

日本の伝統的な撥弦楽器である琵琶や三味線には「サワリ」と呼ばれる特殊な機構が存在する。これらの楽器では図1に示すように、弦端を支持するナット(及びフレット)の幅を

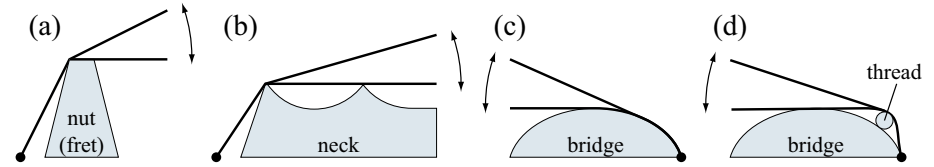


図1 弦がサワリ機構と接触する様子を表した模式図¹⁾⁻³⁾。(a) 琵琶:ナット(フレット)上部の平面部分と接触;(b) 三味線(一の糸のみ):ネック上の突起した点に接触;(c) シタール、ヴィーナ:ブリッジ表面が曲面状で、弦が巻きつくように接触;(d) タンブーラ:弦と曲面状ブリッジの間に糸が挟まれ、曲面の頂点と接触。

広くして弦を面で支える、或いはネックの一部に突起した点を作るなどして、弦が振動した際に接触・衝突が起きるように設計されている¹⁾。弦が「接触する」という意味から、これらの面や点のことを「サワリ」と呼ぶ。同様の機構はインドのシタールやタンブーラなどでも見られ、アジアの撥弦楽器独特のものである^{2),3)}。弦の接し方によって、サワリ機構は「平面サワリ」[図1(a)]、「曲面サワリ」[図1(c)]、「点サワリ」[図1(b),(d)]の3種類に分類することができる。

サワリを持つ楽器の音は高周波の余韻が長く持続するということが知られている^{1),4),5)}。これは、サワリとの接触によって弦振動が特殊なものになることに起因すると考えられる。この特殊な弦振動に着目した研究は、主に弦とサワリとの接触をモデル化し、弦振動を図式的或いは数値的に求めるという手法によって行われ、サワリとの接触によって弦振動の境界条件が時間変化し、非線形振動となることが示されてきた⁶⁾⁻⁸⁾。一方、Valetteら⁹⁾はタンブーラについて、弦とナットの間にひずみゲージをはさんでナットに加わる張力の垂直成分の時間変化を測定することで、弦振動の実験的解析を行った。

筆者はこれまでに、弦とサワリとの間の反発係数という概念を導入して新たな接触モデルを構築し、弦振動の数値シミュレーションを行ってきた。その結果、初期条件が“up-plucking”[図3(a)]の場合と“down-plucking”[図3(b)]の場合で、振動の周期や高周波成分の生成過程といった点において振動形態が異なることが示唆された¹⁰⁾。また、実際の楽器を模擬したモノコード模型上の弦振動を高速度ビデオを用いて可視化する実験も行い、up-pluckingの場合について、数値シミュレーション結果と実験結果がよく一致していることを確認した^{11),12)}。

本研究は down-plucking の場合についても高速度ビデオを用いた可視化実験を行い、数値シミュレーションで示唆されている up-plucking の場合の振動との相違を検証することを目的とする。

^{†1} 九州大学大学院芸術工学府芸術工学専攻
Graduate School of Design, Kyushu University

^{†2} 九州大学大学院芸術工学研究院
Faculty of Design, Graduate School of Design, Kyushu University

2. 実験方法

基本的には千田 & 吉川¹¹⁾ と同じであるが、モノコード模型の土台等、若干の変更点がある。以下に実験に使用した機材と設定を簡単にまとめる。

2.1 モノコード模型 (弦楽器モデル)

モノコード模型とは、図 2 に示すような実際の楽器をモデル化したものである。

- 土台：アルミニウム製定盤 (昭和サイエンス、900×600×60 mm)
土台の振動が弦振動に与える影響を抑えるために、千田&吉川¹¹⁾ で用いた合成木材製のものよりも重く大きなものを用いた。
- ナット、ブリッジ、点サワリ：クローム製 L 字金具 (厚さ 3 mm)
- 弦：テトロン製三味線弦 (丸三八シモト、線密度 0.36 g/m、太さ 0.55 mm ϕ)
- 弦長： $L = 647$ mm
- サワリ位置： $l = 157$ mm ($\approx L/4$)
可視化の際に高周波成分の生成過程を理解しやすいように実際の楽器より広くしている。
- 弦振動の基本周波数 (サワリがない場合)： $f_0 = 100$ Hz
(周期 10 ms、弦を伝搬する横波の位相速度 $c = 2Lf_0 = 129.4$ m/s)

2.2 撥弦方法 (初期条件)

弦に綿糸を引っ掛けて初期変位を与えておき、はさみで綿糸を切ることで弦振動を開始させる¹³⁾。

- 振幅： $A = 15$ mm ($A \ll L$)
- 撥弦位置： $\beta = 4/5$ (ナットから $\beta L = 518$ mm、ブリッジから $(1 - \beta)L = 129$ mm)
- 撥弦方向：up-plucking、down-plucking の 2 通り (図 3 参照)

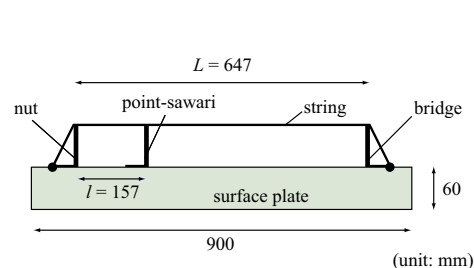


図 2 モノコード模型の概略図。

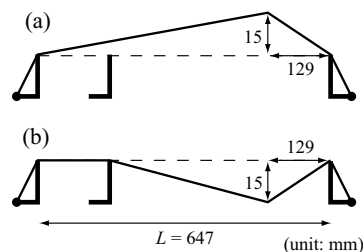


図 3 撥弦方法の概略図。(a) up-plucking: 弦を上へ振り上げて放す; (b) down-plucking: 弦を下へ押し込んで放す。

2.3 高速度ビデオ

- カメラ：Phantom v5.0 (Vision Reserach)
- 画素数：横 1024 pixel × 縦 128 pixel
- 解像度：0.65 mm/pixel
- フレームレート：5000 frame/s (時間分解能 200 μ s、露出時間 180 μ s)
- レンズ：AF Zoom-Nikkor 24-85mm f/2.8-4D IF (Nikon)
- 照明：HVC-SL (PHOTRON、150 W)、LS-M250 (SUMITA、250 W)
- 背景：暗幕を巻いた箱
弦の後方に照明の光が回り込むと弦の位置特定が困難になるため、背景を暗く保つ。
- 撮影ソフト：Phantom Camera Control Ver. 7.0 (コントラスト調整も行う)

3. 実験結果

初期条件を up-plucking で与えた場合の撥弦後 2 周期までの振動の様子を図 4 に、down-plucking の場合を図 5 に示す。画像は縦方向を 4 倍拡大して横 1024 pixel × 縦 512 pixel で表示している。今回実験で使用した高速度ビデオカメラが不調で、弦が振動すると残像がはつきりと映ってしまっている。そのため、動画を見れば弦の位置を認識することは可能であるものの、動画の各コマを取り出して静止画として見た場合、弦の位置を正確に認識することは困難である。そこで、以下ではビデオで撮影した画像と共に、弦の位置及び弦上を伝搬する「角」の軌跡を示した補助図も併記する。

3.1 up-plucking の場合

up-plucking の場合に関しては、千田 & 吉川¹¹⁾ の時と同様の結果が得られている。撥弦直後は弦とサワリとの接触がないため、通常の撥弦振動と同様、弦上を 2 つの角が伝搬していくが、 $t = 3.0$ ms で 2 つの角を結ぶ線分が図中右側から左方向に進みながらサワリと接触する [図 4(b)]。この際、点サワリの頂点が新たな固定端となり、弦振動はサワリの左右 2 つに分割され、新たに 2 つの角が発生する [図 4(c)]。その後、 $t = 4.8$ ms で弦がサワリから離れ、左右に分割されていた弦振動が統合され、計 4 つの角が弦上を伝搬していく [図 4(d)]。この角の数の増加は短波長 (高周波) の波が生成されたことを表している。

$t = 7.6$ ms で 2 つの角が重なり、ここまでが振動の第 1 周期と考えることができる [図 4(e)]。振動周期に関しては、サワリがない場合の周期 10 ms よりも短くなっている。これは、サワリとの接触によって振動が分割されて実効的な弦長が短くなっている時間がある [図 4(b)-(d)]、すなわち境界条件が時間変化しているためであると言える。さらに詳しく言

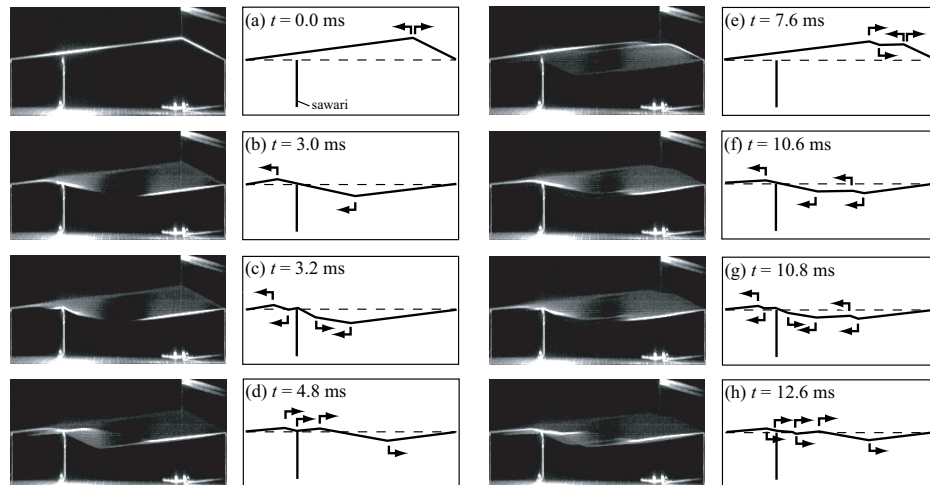


図4 up-plucking の場合の弦振動の様子。左半分列 [(a)-(d)] は1周期目、右半分列 [(e)-(h)] は2周期目の振動を示す。各コマの左側は高速度ビデオで撮影した画像、右側は弦の形状と角が伝搬している方向を示した補助図である。 t は撥弦からの時間を表す。

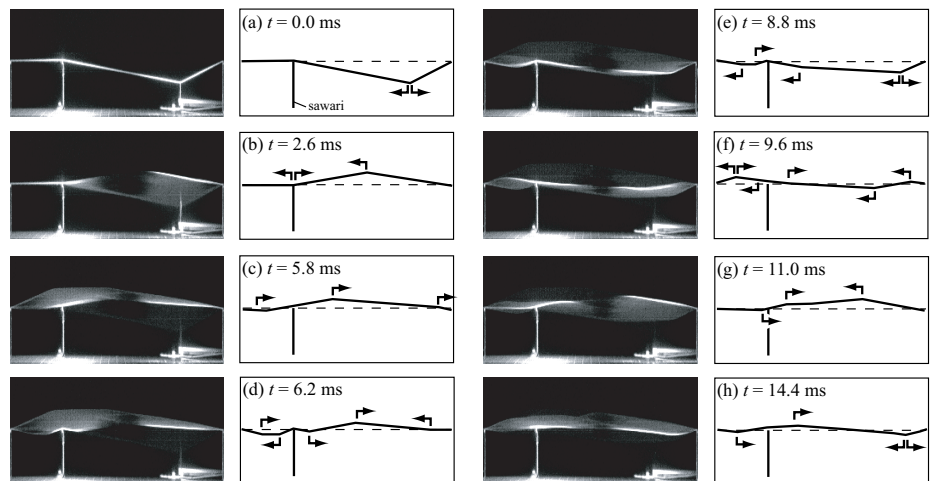


図5 down-plucking の場合の弦振動の様子。図の配置は図4と同様であるが、(g),(h)に関しては振動が複雑化しているため、一部の主要な角のみを記載している。

えば、撥弦時 [図4(a)] に右に進む角がサワリに到達した際に反射し、再び撥弦位置まで戻る時間が周期になっている。弦長 L 、ナットとサワリの間隔 l 、位相速度 c を用いると、周期は $2(L-l)/c$ で表される。今 $l \approx L/4$ なので、周期は $3/4 \times 2L/c$ となり、サワリがない場合の周期 $2L/c = 10 \text{ ms}$ の $3/4$ になっている。

第2周期に関しても、同様に点サワリへの接触、離反によって角2つが増加する [図4(f)-(h)]。この過程を繰り返すことで弦全体が高周波成分で満たされていき、これが楽器音の高周波余韻強調の源になっていると推測される。

3.2 down-plucking の場合

down-plucking の場合、撥弦時に既に弦とサワリが接触しており [図5(a)]、 $t = 2.6 \text{ ms}$ でサワリから離れる際に新たな角が1つ発生し、計3つの角が弦上に現れる [図5(b)]。そして、 $t = 5.8 \text{ ms}$ で up-plucking の時とは逆に図中左側から右方向に弦が進みサワリと接触し [図5(c)]、さらに2つの角が発生する [図5(d)]。

$t = 8.8 \text{ ms}$ までが第1周期と考えられ [図5(e)]、up-plucking の場合と同様、境界条件の時間変化に伴って振動周期はサワリがない場合の 10 ms と比べて短くなっている。しかし、up-plucking の時と比較すると 1.2 ms 長くなっている。

また、第2周期については、サワリとの離反、接触が2回起き [図5(f)で離反、(g)で接触、(h)までの間に再び離反し(h)で再接触]、up-plucking の時よりも多数の角が発生し、弦の形状は細かく複雑なものとなる。

このように、down-plucking の場合の振動は非常に複雑で、今回の不鮮明な画像を用いて振幅の小さな高周波成分についてより詳細な分析を行うことは容易ではない。しかし、up-plucking の場合と比較して周期が長くなること、より多数の角が発生して高周波で満たされていく様子は、千田ら¹⁰⁾の数值シミュレーション結果とよく一致する結果であり、初期条件によって振動の形態が異なることが実験的に確認できたと言える。

4. ま と め

本研究では、点サワリとの接触を伴う撥弦振動に関して、up-plucking と down-plucking の2つの初期条件を与えた際の振動形態の相違について実験的考察を行った。高速度ビデオカメラを用いて弦振動を可視化した結果、振動周期や高周波の形成過程といった点において初期条件の与え方による影響が確認された。

今後の課題としては、まず第一に残像が大きく残っている高速度ビデオカメラの修理が挙げられる。また、照明を増やすことによって弦全体をより明るく一様に照らすこと

ができれば、残像を抑えることにもつながると考えられる。さらに、Valetteら⁹⁾と同様の方法で、ひずみゲージを用いてナットにかかる張力の垂直成分の時間変化を測定する実験を導入し、より高いサンプリング周波数で収録した振動波形を用いて定量的な議論を行う予定である。

以上の課題を踏まえて実験環境を整えた上で、より多くの撥弦位置やサワリ位置、特に可視化実験だけでは高周波形成過程が理解しにくいと思われる、実際の楽器のようにナット・サワリ間の間隔が短い場合で実験を行おうと考えている。また、今回は第2周期までという撥弦直後の過渡状態のみで分析を行ったが、これに関してもより長い時間での分析が必要である。さらに、点サワリ以外の形状のものについても調べ、サワリの形状による振動形態の違いを明らかにしたい。

謝 辞

モノコード模型の土台部分に用いた定盤は長崎総合科学大学工学部の中村光彦先生および清山浩司先生から拝借した。ここに謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 安藤由典: 新版 楽器の音響学, 音楽之友社, pp.193-216 (1996).
- 2) Raman, C. V.: On some Indian stringed instruments, *Proc. Indian Assoc. Adv. Sci.*, Vol.7, pp.29-33 (1921).
- 3) Fletcher, N. H. and Rossing, T. D.: *The Physics of Musical Instruments*, Springer-Verlag, New York, 2nd ed., pp.268, 269 (1998).
- 4) Taguti, T. and Tohnai, Y.: Acoustical analysis on the sawari tone of Chikuzen biwa, *Acoust. Sci. & Tech.*, Vol.22, No.3, pp.199-207 (2001).
- 5) Yoshikawa, S., Shinoduka, M. and Senda, T.: A comparison of string instruments based on wood properties: Biwa vs. cello, *Acoust. Sci. & Tech.*, Vol.29, No.1, pp.41-50 (2008).
- 6) Burrige, R., Kappraff, J. and Morshedi, C.: The sitar string, a vibrating string with a one-sided inelastic constraint, *SIAM J. Appl. Math.*, Vol.42, No.6, pp.1231-1251 (1982).
- 7) Taguti, T.: Unilateral constraint to the string - A model analysis on the sawari effect of biwa, 音楽音響研究会資料, Vol.20, No.2, MA2001-6 (2001).
- 8) Vyasarayani, C. P., Birkett, S. and McPhee, J.: Modeling the dynamics of a vibrating string with a finite distributed unilateral constraint: Application to the sitar, *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol.125, No.6, pp.3673-3682 (2009).

- 9) Valette, C., Cuesta, C., Castellengo, M. and Besnainou, C.: The tapura bridge as a precursive wave generator, *Acustica*, Vol.74, No.3, pp.201-208 (1991).
- 10) 千田崇文, 吉川茂, 白石君男: 平面状サワリ機構をもつ撥弦振動の数値シミュレーション, 日本音響学会 2008 年 秋季研究発表会 講演論文集, pp.861-864 (2008).
- 11) 千田崇文, 吉川茂: サワリ機構をもつ弦楽器モデルにおける撥弦振動の可視化実験, 音楽音響研究会資料, Vol.27, No.8, MA2008-84 (2009).
- 12) 千田崇文, 吉川茂: サワリ機構との接触を伴う撥弦振動に関する研究, 第 12 回日本音響学会関西支部若手研究者交流研究発表会 (2009).
- 13) Woodhouse, J.: Plucked guitar transients: Comparison of measurements and synthesis, *Acustica/Acta Acustica*, Vol.90, No.5, pp.945-965 (2004).