

筑前琵琶のさわり音の音響解析

Acoustical analysis on the sawari tone of Chikuzen biwa

田口友康¹⁾ Tomoyasu Taguti, 藤内祥正(鶴了)²⁾ Yoshimasa(Kakuryo) Tohnai

1) 甲南大学理学部 Faculty of Science, Konan University

2) 日本大学豊山高等学校 Buzan Senior High School, Nihon University

内容梗概：筑前琵琶におけるさわりの物理的な形状を変えたときに生じるさわり音の音響特性の違いを実験的に検討した。上質の筑前琵琶 1 面を用意し、さわりの効果が皆無の状態から極めて強い状態までが実現されるように調口の形状を 4 段階に調整して、無響室においてそれぞれの場合のさわり音を通常の演奏法によって撥弦された単音として録音した。これらの音資料を短時間フーリエ分析にかけることによってさわり音の動的な部分音組成を同定して、さわり構造が高次部分音の増強と持続時間の伸長という音響特性をもたらすことを示した。

1. はじめに

邦楽器の琵琶、三味線はいずれも撥によって弦を振動させる撥弦楽器の一種であるが、撥弦によって自由振動する弦が弦自身の振動によって接触、離反を繰り返すようなある種の音響装置を有するという特徴をもつ楽器である。この音響装置は弦の振動端のごく近くに設えられている。ふつうこの装置自身を弦楽器の要素としての「さわり」と呼んでいるが、ここでは紛れを防ぐためにその物理的構造を「さわり構造」とよび、このさわり構造が弦振動にあたえる物理的作用を「さわり効果」、さわり効果によって生じる特有な振動成分が付与された撥弦音を「さわり音」とよぶことにする。

一般には三味線のさわりがよく知られている [1]。三味線のさわり構造は一の糸についてのみ設えられている。その構造の要めは、棹上部の振動端において、二の糸と三の糸が乗る上駒(かみこま)の直下に糸方向に対して直角につけられた幅数 mm の溝(さわりの谷)を隔てて立ち上がる溝縁(さわりの山)である。構造的に上駒から外されている一の糸がこの縁に動的に接触と離反を繰り返すことにより、それが無ければ調和的な定常振動になるはずの一の糸の開放弦の運動に対して、波長の短い非定常的な振動が付加される。一方、本論文が取り扱う筑前琵琶の場合、さわり構造はすべての弦に対して設えられている。その構造の要は、棹上部の振動端となる調口(しらべぐち：ギター、バイオリンなどのナットに相当する部分)が有する幅数 mm の平面状の上面である。開放弦の振動時に弦はこの上面の糸巻き側の縁を真の固定端としてこの上面に動的に接触と離反を繰り返すことにより、三味線のさわりと同様な短波

長の非定常的な振動が発生する。また、琵琶は幅の広い柱(フレット)を有している。このため弦を柱間で指の押えによって調音する開放弦以外のどの撥弦音もさわり音となることと、弦の押え(締め)の程度によりピッチ変化と同時にさわり効果も変わるという特性があり、この点も三味線と異なるところである。

安藤 [2][3][4] は早くから筑前琵琶の音響学的研究を行ってきた。藤内・岸 [6] および Kishi-Tohnai-Yamada [7] は薩摩琵琶の音響分析を行った。また藤内は現存する数多くの琵琶を実地に検分してわが国の近代琵琶を歴史的および構造的視点から考証し [8]、さわり構造に関する考察を加えた [9]。

本論文では筑前琵琶の調口におけるさわり構造とさわり音の関係を実験的に調べる。調口が弦と接する部分は煤竹で形成される。さわり構造はその煤竹の上曲面部分を微妙に削り落とし、ほぼ平面的に弦と接触させる細工によって実現する。実験では、精選した筑前琵琶 1 面を用意して、予め自然状態の煤竹をこの楽器に取り付けておいた。そして録音当日、この煤竹にさわり効果を生じさせる接触面の加工を施して、無響室においてその状態の楽器の撥弦音を録音する、という手順によった。ここで、楽器の準備およびさわり面の調整の一切を第 2 著者が、また音資料の採取と音響解析を第 1 著者が担当した。演奏は筑前琵琶の演奏家に依頼した。

2. 音資料

楽器とさわりの加工：楽器本体には、明治から大正の期間に活躍した琵琶製作者 津留崎鎮助による桑胸の筑前五弦琵琶を用いた(図 1)。表 1 に示す仕様

の糸をこの楽器に張り、七本 (G#) に調弦した。

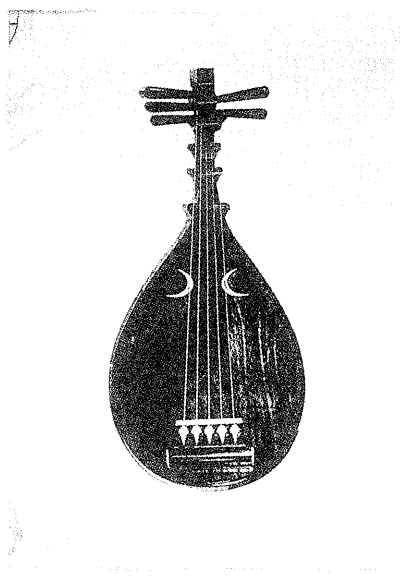


図 1. 筑前五弦琵琶 (津留崎鎮助 作)
桑胴, 長 88.0cm 幅 32.5cm

表 1. 五弦の糸仕様と調弦

一の糸	25 番	(二の糸の完全 4 度上)
二の糸	30 番	G# (基音は G2#になる)
三の糸	15 番	(一の糸と同度)
四の糸	10 番	(二の糸の完全 5 度上)
五の糸	20 号	(二の糸の完全 8 度上)

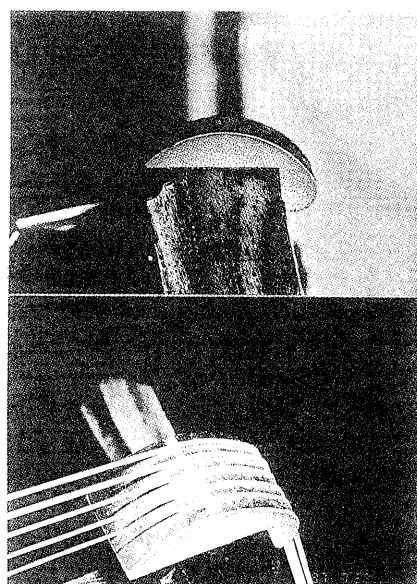
調口に約 100 年前の煤竹を取りつけ、静止状態の弦が第 1 柱 (「木」, 高さ 2.6cm) との間に 0.2 ~ 0.25cm の空隙を確保するように調口の高さを調整した。その後、弦に接する煤竹の上曲面を削りの無い状態から順次少しづつ削り込んで、表 2 の通り S0 ~ S3 の合計 4 段階のさわり構造を実現した。ここで S0 はさわりが皆無の状態、S3 が最もさわり効果の強い状態で、S3 は琵琶音としての限界と考えられるものである。図 2 に調口の煤竹の様子を示す。

一般的傾向として、さわり効果は煤竹上面につける帯状の平面領域の幅に比例して強くなるものであるが、実際にはミリメートル単位以下の精度で細工する際の微妙な凹凸や糸との接触角度によって状況は変化し、さわり面の形状とさわり効果との関係には計量困難な要因が存在することに注意する必要がある。表 2 に掲げた 4 段階のさわりは薩摩琵琶の演

奏者であって琵琶楽器の修復、調整に長年の経験と技術を有する第 2 著者が音楽的な判断に基づいてつけたものである。このうち特に S3 は最上級の音質と感じられるように仕上げられたさわりである。

表 2. 4 段階のさわり S0 ~ S3

	加工面の幅	さわり音の状態
S0	0 mm	全くつかない
S1	約 0.7 mm	わずかについた
S2	約 1.5 mm	適度についた
S3	約 3.0 mm	強くついた



(上) さわり加工前, (下) さわり S2 の状態。

図 2. 調口の煤竹

録音条件: 撥弦音は無響室の中で椅子に腰掛けた奏者に対し奏者の前方 1m のやや右上方から楽器面に正対させたマイクロフォンにより DAT に録音した。使用した録音機材は Brüel & Kjær 社製 4190 型マイクロフォン (2669L 型プリアンプと 5935L 型マイクロフォン電源を併用) とソニー社製 DTC 2000ES 型 DAT (標本周波数 48 kHz) である。また受音点における絶対音圧測定のために Brüel & Kjær 社製 4231 型音圧レベル校正器を用いた。4 段階のさわりについて、一の糸から五の糸までの開放弦の撥弦音をそれぞれ 3 回録音しておき、その中から最良と考える撥弦音を音資料として確定した。これらの撥弦音は

自然な琵琶音としての開放弦音，すなわち5弦とも開放弦に置かれた状態での各1弦の開放弦音である。

音響分析：低周波域の雑音成分を除去するための前処理として，録音された原デジタル信号に遮断周波数 80Hz のバターワース4次低域遮断フィルタをかけた．このフィルタによる影響は音資料中で最も低い部分音，すなわち二の糸の開放弦の撥弦音に含まれる基音成分（約 103 Hz）に対して 0.5 dB 低下させる程度である．

このフィルタ処理後の音響信号の S/N 比は立上がり直後の最大振幅時で約 60dB であった．この音響信号に対して高速フーリエ変換 FFT を施してパワースペクトルを求め，またその結果に高澤の公式 [10] を適用して部分音の周波数と振幅の時間発展を得た．高澤の公式は，FFT をフーリエ変換の台形則による近似数値積分と見なしたときに線スペクトル成分に対する離散近似誤差を補償する理論式であって，比較的狭い時間窓（比較的少ない計算点数）で精度の高い結果を得ることができるため，部分音の動的挙動を同定するのに適している．具体的な窓関数と窓の大きさ（計算点数）は次節に記す．

3. 時間・周波数領域分析

一の糸開放弦の時間波形を図3に示す．上段はさわり S0（さわり無し）の場合で，左右2つのグラフは立上がり初期の 20ms 間の波形（左）と 200ms 経過後の 20ms 間の波形（右）である．下段はさわり S3（強いさわり）の場合で，上段に対応する2時点での波形を示す．

立上がり直後から小刻みで速い振動成分が S3 の方に幾分優勢に見られる．しかし大きな違いは 200ms 経過後であって，S0 が滑らかな波形に移行しているのに対して，S3 の波形は棘波状を呈している．このことは S0 に比べて S3 の方が高周波成分をより豊富に含むことを表している．また，200 ms 経過時点で S3 の振幅が S0 よりも大きいことも読み取れる．

上に観察された時間波形の性質を周波数領域で分析するために，立上がり直後の振幅が最大に達した時点から 341.3ms 間（標本周波数 48 kHz の音資料の 16384 標本点）の時間窓で FFT 分析（Blackman 窓関数を使用）を行った．一の糸に対するさわり S0 ～ S3 について，パワースペクトルを図4に示す．S0 から S3 へ進むにつれて，7 次以上の高次部分音が強く現れてくる様子が明瞭に見られる．

それでは，持続時間の状況はどうであろうか．これを部分音ごとに抽出してみよう．個々の部分音の時間発展を精度高く求めるためには出来るかぎり狭い時間窓の中で精度の高い部分音振幅の推定を行う必要がある．このために2節に述べた理由により高沢の公式 [10] を用いた．この公式を適用するための FFT 分析には Hanning 窓関数を用いる必要がある．我々が対象とする琵琶音では，基音の周波数は低く，かつその振幅は相対的にきわめて小さい．求めたパワースペクトルから，分析の対象とする音資料の基音までをこの公式によって安定に抽出できるための最小 FFT 標本点数を実験的に検討したところ，一の糸（C3#，基音周波数 138.6 Hz）に対して 1024 標本点（時間窓 21.3 ms）が適当と判断された．一の糸の S0 と S3 について，この計算条件の下で得た 24 次までの部分音の時間発展図を図5に示す．S0 に比べて S3 で概ね6次以上の部分音において，時間的に単調減少するのではなく一旦成長してから起伏を伴いつつ減衰するという挙動を示している．そして S3 の方が全体として継続時間が長い．

二の糸開放弦について，一の糸と同様 S0 と S3 の場合の時間波形を図6に示す．S0 の立上がり初期に見られる小刻みで速い振動成分は 200ms 後には消滅し，全体として滑らかで振幅も小さい波形に変わっている．一方 S3 では立上がり初期に比べて 200ms 後の方で振幅が大きく，基本モードと思われる振動成分とともに相当に高い次数の振動が含まれている様子である．S0 と S3 の立上がり初期波形を比較すると S0 の方が S3 より強く撥弦されたことがわかるが，200ms 後には S0 と S3 の振幅の大きさが逆転している．S0 ～ S3 について，それぞれ最強勢時の 341.3ms 間のパワースペクトルを図7に示す．S0 から S3 に進むにつれて8次以上の高次部分音が強く現れてくる様子が見られる．二の糸の S0 と S3 について 24 次までの部分音の時間発展を時間発展図8に示す．（二の糸に対しては 2048 標本点を採用した．）S0 ではどの部分音も鋭い立上りのあと単調に減少するのに対して，S3 では概ね6次以上の部分音においていずれも緩やかに立上がり一旦成長してから起伏を伴いつつ減衰するという挙動を示している．そして S3 の方が全体として継続時間が長い．S0，S3 のどちらについても部分音の中で最大振幅を示すのは第8部分音である．（その最大値はほぼ等しいが，これは録音された音資料自体のものである．）

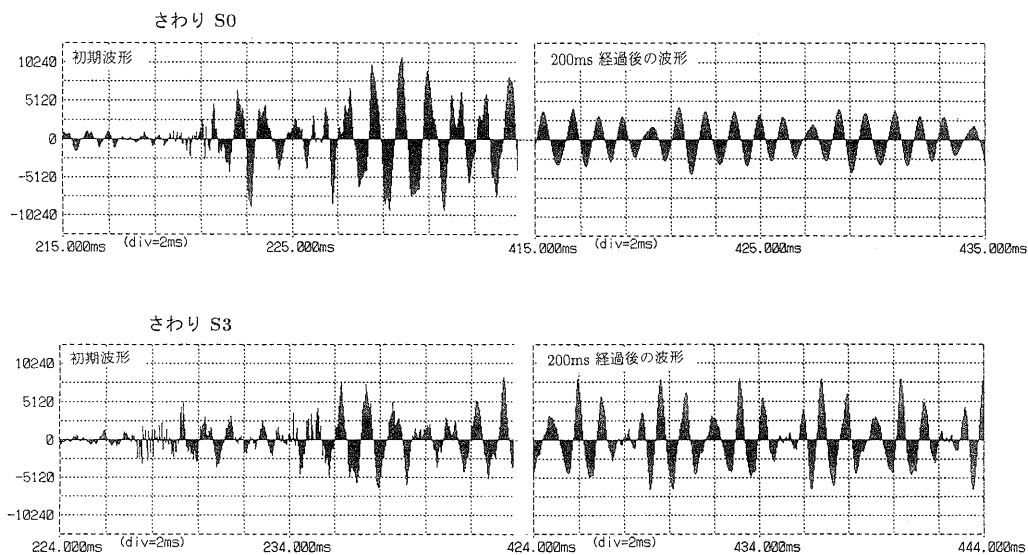


図 3. 一の糸開放弦の時間波形 (さわり S0 と S3 の比較)
上段 さわり S0; 下段 さわり S3.

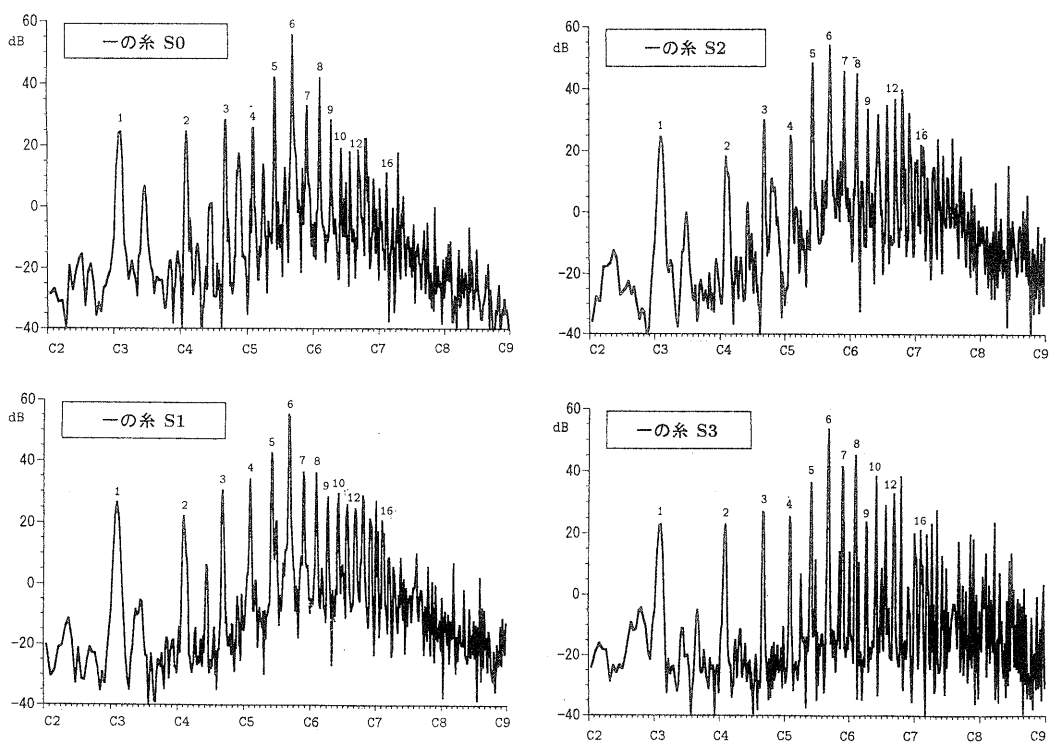
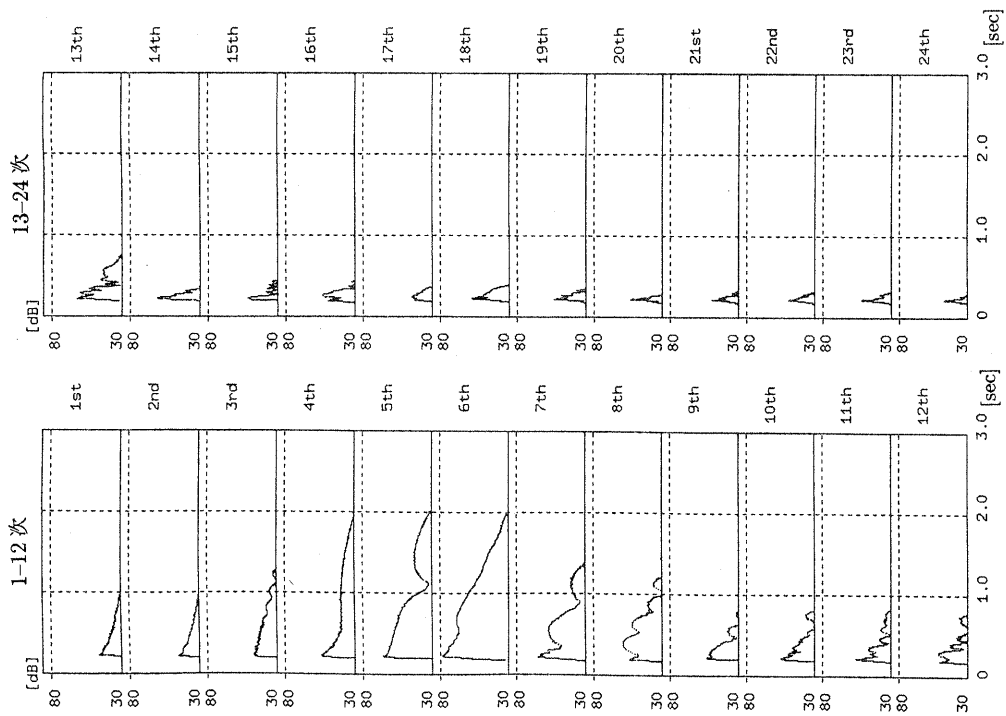


図 4. 一の糸開放弦, 最強勢時のパワースペクトル (さわり S0 ~ S3 の比較)

最大振幅到達時点から 341.3 ms 間の FFT 計算 (16384 標本点, Blackman-Harris 窓使用)
縦軸は dB; 横軸は対数周波数で, 目盛は音高名で表されている (中央ハ音 C4 = 261.6 Hz).

一の糸 S0



一の糸 S3

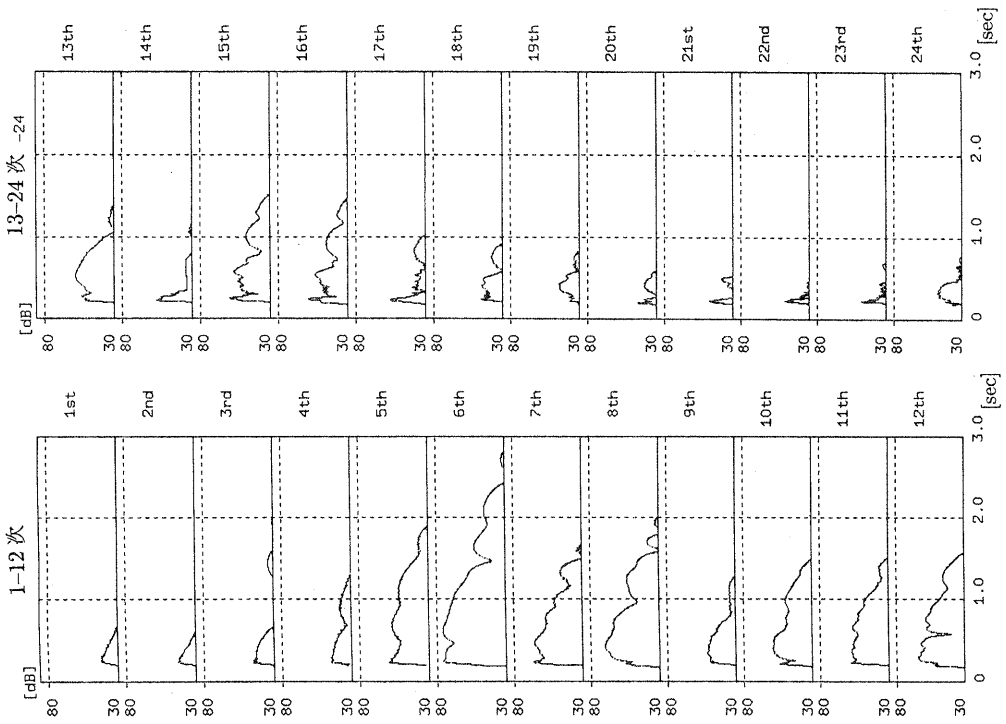


図 5. 一の糸開放弦部分音の時間発展 (さわり S0 と S3 の比較)

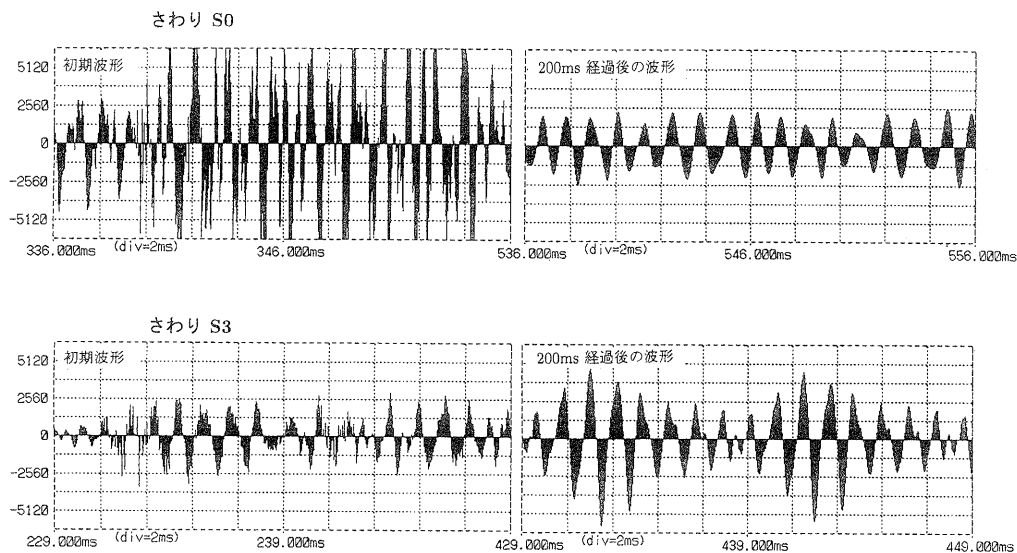


図 6. 二の糸開放弦の時間波形 (さわり S0 と S3 の比較)
上段 さわり S0; 下段 さわり S3.

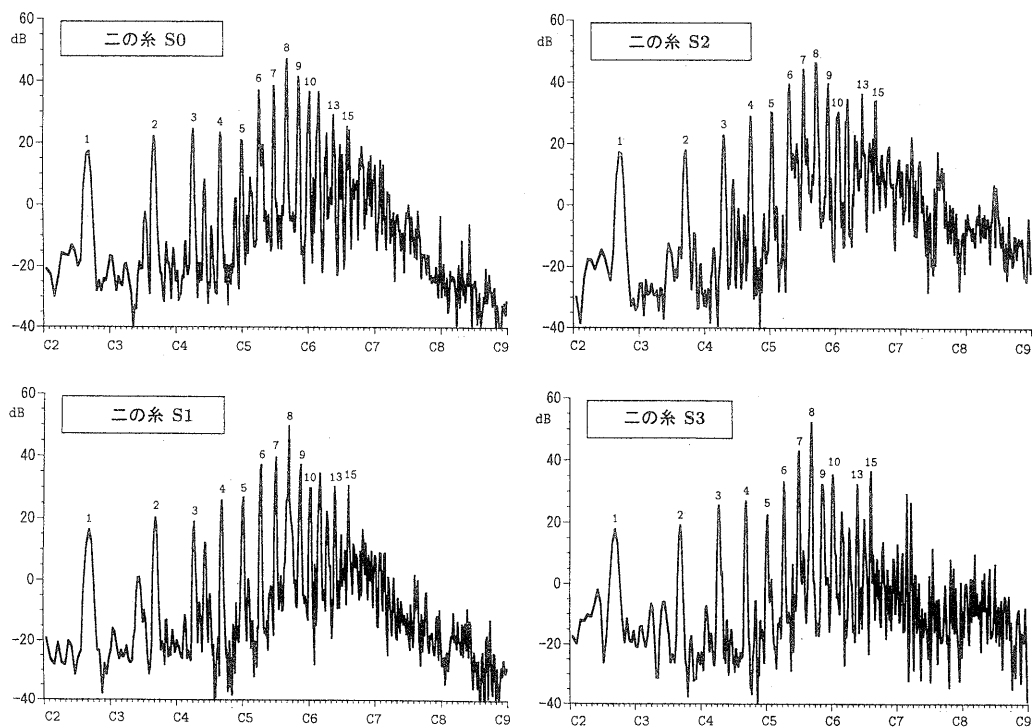
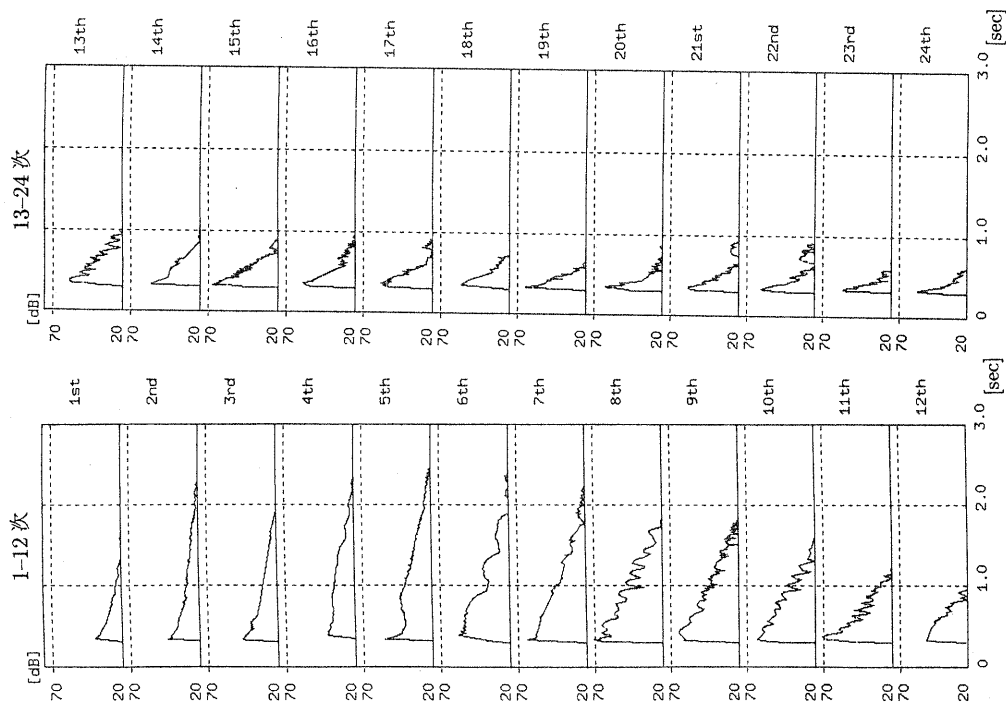


図 7. 二の糸開放弦, 最強勢時のパワースペクトル (さわり S0 ~ S3 の比較)

最大振幅到達時点から 341.3 ms 間の FFT 計算 (16384 標本点, Blackman-Harris 窓使用)

縦軸は dB; 横軸は対数周波数で, 目盛は音高名で表されている (中央ハ音 C4 = 261.6 Hz).

二の糸 S0



二の糸 S3

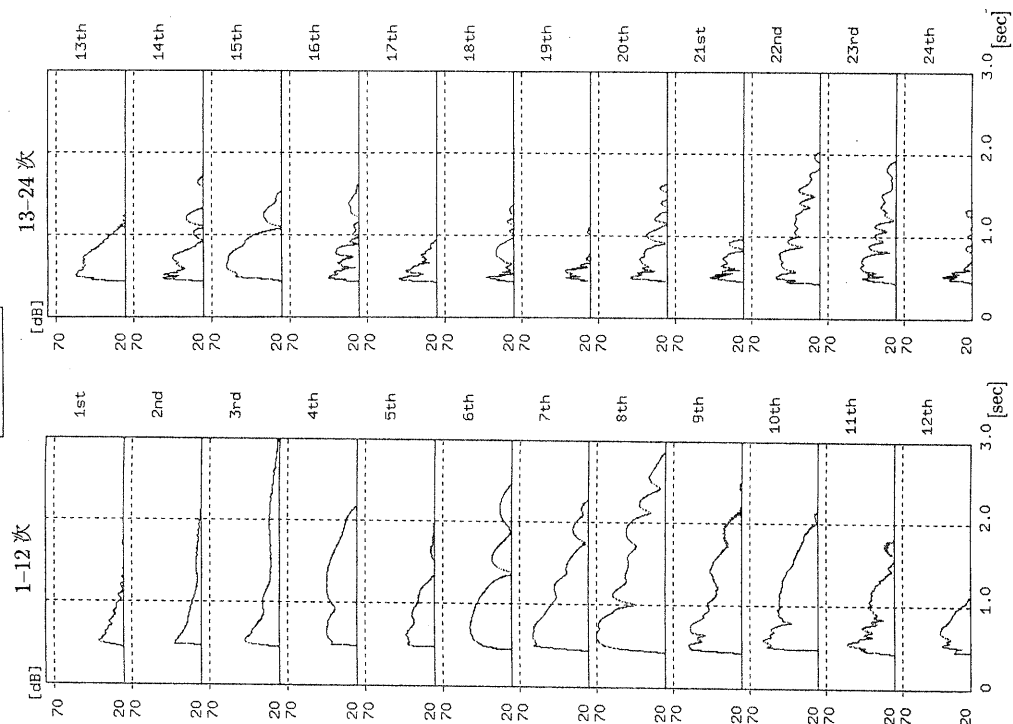


図 8. 二の糸開放弦部分音の時間発展 (さわり S0 と S3 の比較)

4. まとめと検討

用意した一面の筑前五弦琵琶の調口に4段階のさわり加工を施した場合のさわり効果の違いを実験的に検討した。ここにいうさわりの段階とは音楽的に判断したさわり効果の強度の段階を指すのであるが、構造的にはそれは煤竹上面を削ってつける帯状の「さわり面」の幅の広さと第一義的に関係づけられる。

時間・周波数領域分析の結果、さわり効果が高次部分音の強調と持続時間の伸長として現れることが示された。なお本論文では一の糸と二の糸の結果のみ記載したが、他の3弦についても同様な結果が得られている。ただしさわり効果は低音弦に強く現れる。ちなみに、安藤は三味線音の詳細な分析([5], pp 194-203)のなかで、「さわりつき」と「さわりなし」の場合の部分音ごとの平均減衰率に関して、「さわりつき」の場合に13次部分音を除くすべての平均減衰率が小さくなる(減衰が遅くなる)という結果を報告している。

本報告の結果は、用いた音資料が当該開放弦以外の弦振動によって生じる音、すなわち撥弦時の衝撃あるいは撥弦後の共鳴現象によって当該弦以外の弦が振動することによって生じる音、をも含んでいることを前提として、当該弦の基音周波数に関してその整数次部分音(調和成分)の組成を抽出したものである。この音資料の性質上、単弦の撥弦音に非整数次部分音(非調和成分)が含まれるか否かという問題は取り上げていない。

さわりは本質的に非線形の力学現象であり、しかもその発現体であるさわり構造がきわめて小さいという点に特徴がある。実際その寸法は、ここに報告した筑前五弦琵琶の場合、開放弦全長約80cmに対して4mm程度以下である。したがってさわり構造によつて励起される振動は、もしその寸法程度の単弦振動を考えるとすれば、両端固定を想定した場合に基音の200倍以上、すなわち一の糸の場合では28kHz程度以上に相当する高周波振動と計算される。このような高周波振動が如何にして高々基音の20倍程度までの部分音を増強する作用を持つのかという点は大変に興味ある問題である。ただし、200倍音以上という評価は過大すぎるかも知れない。接触時における実効接触線長の増加と弦の太さ方向の弾性変形を加味した接触非線形振動の力学モデルを考えなければならず、それによって生じる高周波振動の周波数領域は200倍音という数値から相当に低下するかも知

れない。

この問題を解明する最初の糸口は、弦の一端にさわり構造という「接触非線形ユニット」を置き他端を固定端としたときの弦単独の振動を調べることである。これは弦の変位を表す変数に対して微小区間において単方向性の(unilateral)弾性的な拘束条件がついた波動方程式という形に定式化できる。その次の段階として、楽器の胴との連成の検討を進めるのが適当である。その際、さしあたりはその接触非線形ユニットだけが非線形であるような力学モデルで検討するのがよい。これによって、今回報告した整数次部分音組成が理論的にどのようなスペクトル構造の近似なのか、また非整数次部分音が存在するののかという問題に対する解答の方向が見えてくると考えられる。

謝辞 筑前五弦琵琶演奏家の藤内旭須美氏には筑前五弦琵琶の演奏に協力していただいた。また、神戸大学教授 森本政之氏と東京大学教授 橘 秀樹氏にはそれぞれの無響室施設を使用させていただいた。上記の方々に感謝します。

参考文献

- [1] 吉川英史, “三味線のサワリについて,” 三味線の美学と芸大邦楽科誕生秘話 (出版芸術社, 東京, 1997), 113-136.
- [2] 安藤由典, “筑前五弦琵琶の工法に関連する楽器構造調査,” 筑前五弦琵琶 (筑前五弦琵琶製作技術委員会, 福岡, 1977), 17-22.
- [3] 安藤由典, “筑前五弦琵琶の構造について,” 音楽学 25(3), 137-152 (1979).
- [4] 安藤由典, “筑前五弦琵琶における構造, 胴の音響的性質および音色印象の各個性の間にある相互関係について,” 音楽学 27(2), 81-97(1981).
- [5] 安藤由典, 新版・楽器の音響学 (音楽之友社, 東京, 1996).
- [6] 藤内祥正, 岸 憲史, “薩摩琵琶の構造と演奏波形の分析例,” 音楽音響研究会資料 MA93-19 (1993).
- [7] Kishi, K., Tohnai, Y., and Yamada, M., “The ‘Satsuma’ biwa,” *Proc. of the 3rd. Joint Meeting of ASA and ASJ* (Honolulu, December 1996), 325-330.
- [8] 藤内鶴了, 日本近代琵琶の研究 (笠間書院, 東京, 1994).
- [9] 藤内鶴了, 続・日本近代琵琶の研究 (笠間書院, 東京, 1998).
- [10] 高澤嘉光, “離散フーリエ変換における補間公式,” 音楽音響研究会資料 MA89-26 (1989).