

大型擦弦楽器の等価モデル表現と  
ウルフトーン抑圧のための擦弦条件に関する研究

2022年 3月

小倉 溪

大型擦弦楽器の等価モデル表現と  
ウルフトーン抑圧のための擦弦条件に関する研究

小倉 溪

システム情報工学研究科

筑波大学

2022年 3月



主な変数対応表

変数名	記号	単位
弦長	$L$	mm
弦の張力	$T$	N
弦の線密度	$\rho$	kg/m
弦を伝わる波の速度	$c$	m/s
楽器胴体の等価質量	$m_1$	kg
楽器胴体の等価バネ定数	$k_1$	N/m
楽器胴体の等価抵抗	$r_1$	N/(m/s)
ウルフキラー部の等価質量	$m_2$	kg
ウルフキラー部の等価バネ定数	$k_2$	N/m
ウルフキラー部の等価抵抗	$r_2$	N/(m/s)
質点 $m_1$ の変位	$x_1$	mm
質点 $m_2$ の変位	$x_2$	mm
楽器胴体の共振周波数	$f_0$	Hz
楽器胴体の角共振周波数	$\omega_0$	rad/s
インパルスハンマがコマに与える力積	$P_0$	kg·m/s
弦の基本振動数	$f_s$	Hz
動摩擦係数	$\mu_d$	-
静止摩擦係数	$\mu_s$	-
弦と弓の間の摩擦力	$F_{Sx}$	N
弓が弦に及ぼす圧力 (弓の圧力)	$F_{Sy}$	N
弓の速度	$v_{Bx}$	mm/s
弦と弓の間の内部摩擦減衰比	$\tau$	-
弦と弓の間の相対速度	$V_r$	mm/s
静止摩擦と動摩擦が切り替わる速度 (臨界速度)	$V_c$	mm/s

# 目 次

第1章 序 論.....	1
1-1 研究の背景.....	1
1-2 研究の目的.....	3
1-3 本論文の構成.....	3
第2章 大型擦弦楽器におけるウルフトーンが演奏に及ぼす影響.....	5
2-1 はじめに.....	5
2-2 ウルフトーンが演奏に及ぼす影響.....	5
2-3 ウルフトーンの発生メカニズム.....	6
2-4 ウルフキラーを用いたウルフトーンの抑圧.....	8
2-5 まとめ.....	8
第3章 大型擦弦楽器の等価モデル表現.....	11
3-1 はじめに.....	11
3-2 ウルフキラー未装着時の弦-胴連成振動モデル.....	11
3-3 パラメータの推定実験.....	14
3-4 ウルフキラー装着時の弦-胴連成振動モデル.....	18
3-5 まとめ.....	20
第4章 計算に基づくウルフトーンの発生.....	21
4-1 はじめに.....	21
4-2 撥弦時のウルフトーンの発生.....	21
4-2-1 撥弦シミュレーション概要.....	21
4-2-2 撥弦シミュレーション条件.....	21
4-2-3 撥弦シミュレーション結果・考察.....	23
4-3 擦弦時のウルフトーンの発生.....	27
4-3-1 擦弦シミュレーション概要.....	27
4-3-2 擦弦の関数表現とシミュレーション条件.....	27
4-3-3 ウルフキラー未装着モデルにおけるシミュレーション結果・考察.....	33
4-3-4 ウルフキラー装着モデルにおけるシミュレーション結果・考察.....	36
4-4 まとめ.....	39
第5章 実験に基づくウルフトーンの発生.....	41
5-1 はじめに.....	41
5-2 撥弦実験に基づくウルフトーンの発生.....	41
5-2-1 実験概要.....	41
5-2-2 実験条件.....	41
5-2-3 実験結果・考察.....	42
5-3 擦弦実験に基づくウルフトーンの発生.....	47
5-3-1 実験概要.....	47
5-3-2 実験条件.....	47
5-3-3 実験結果・考察.....	50
5-4 まとめ.....	52
第6章 ウルフトーン抑圧のための擦弦条件.....	53
6-1 はじめに.....	53

6-2	ウルフキラー未装着時の擦弦条件 .....	53
6-3	ウルフキラー装着時の擦弦条件 .....	57
6-4	演奏家からみたウルフトーン発生状態マップの評価と妥当性 .....	61
6-5	まとめ .....	62
第7章	結論 .....	63
7-1	研究成果の概要 .....	63
7-2	残された課題 .....	64
7-3	今後の研究 .....	64
謝辞	.....	65
参考文献	.....	66
著者文献	.....	68

# 図表目次

図 1 様々な種類のウルフキラー .....	2
図 2 ウルフキラー装着時の様子 .....	2
図 3 本論文の構成 .....	4
図 4 チェロの概観 .....	7
図 5 ウルフトーン発生時の擦弦点における $x$ 軸方向の弦の変位の実験結果 .....	7
図 6 ウルフキラー未装着時・装着時における音圧波形の実験結果 .....	9
図 7 弦楽器の構造 .....	12
図 8 擦弦中の駒部の $x$ 軸方向の変位の実験結果 .....	12
図 9 ウルフキラー未装着時の弦-胴連成振動モデル .....	13
図 10 パラメータ推定実験 .....	16
図 11 入力した力と駒部の応答速度の実験結果 .....	16
図 12 モビリティの周波数特性 .....	17
図 13 モビリティの周波数特性 (190Hz 付近拡大) .....	17
図 14 質点-バネ-ダンパ系 .....	18
図 15 ウルフキラー装着時の弦-胴連成振動モデル .....	19
図 16 撥弦シミュレーションにおける初期条件 .....	22
図 17 撥弦後の駒部の変位の計算結果 .....	24
図 18 撥弦後に弦が駒に及ぼす駆動力の計算結果 .....	25
図 19 第 4 弦 (C 線) 撥弦後の振動姿態の計算結果 .....	26
図 20 弓と弦の間の摩擦特性 .....	28
図 21 摩擦係数推定のための擦弦モデル .....	30
図 22 弓の速度の時間変化 .....	31
図 23 第 4 弦 (C 線) 擦弦中の弦の振動姿態の計算結果 (両端固定時) .....	32
図 24 擦弦中の擦弦点における弦の変位の計算結果 (両端固定時) .....	32
図 25 擦弦点における弦の変位および速度の計算結果 (ウルフキラー未装着時) .....	34
図 26 駒にかかる駆動力の計算結果 (ウルフキラー未装着時) .....	35
図 27 ウルフトーン発生時の擦弦点における弦の変位の計算結果 .....	36
図 28 擦弦点における弦の変位および速度の計算結果 (ウルフキラー装着モデル) .....	37
図 29 駒にかかる駆動力の計算結果 (ウルフキラー装着モデル) .....	38
図 30 ウルフキラー未装着時・装着時の駒にかかる駆動力の計算結果 .....	39
図 31 撥弦実験構成図 .....	42
図 32 撥弦後の音圧波形 .....	44
図 33 ウルフトーン発生周波数 (185Hz 成分) の抽出結果 .....	45
図 34 実験によるウルフトーン発生時のスペクトログラム .....	46

図 35 自動擦弦装置を用いた実験構成.....	48
図 36 擦弦時音圧波形の実験結果（ウルフキラール未装着時） .....	51
図 37 実験によるウルフトーン未装着/装着時の音圧波形比較 1 .....	51
図 38 実験によるウルフキラール未装着/装着時の音圧波形比較 2 .....	52
図 39 計算により得られた擦弦状態マップ(ウルフキラール未装着時) .....	55
図 40 計算により得られたウルフトーン発生状態マップ（ウルフキラール未装着時） .....	55
図 41 実験により得られたウルフトーン発生状態マップ（ウルフキラール未装着時） .....	56
図 42 計算により得られた擦弦状態マップ(ウルフキラール装着時) .....	59
図 43 計算により得られたウルフトーン発生状態マップ（ウルフキラール装着時） .....	59
図 44 実験により得られたウルフトーン発生状態マップ（ウルフキラール装着時） .....	60
表 1 ウルフキラール部のパラメータ .....	19
表 2 シミュレーションにおける各弦のパラメータ .....	22
表 3 擦弦シミュレーション条件 .....	28
表 4 摩擦係数の推定に用いたパラメータ .....	30
表 5 弓の圧力の測定結果 .....	49

# 第1章 序 論

## 1-1 研究の背景

バイオリン、チェロ、ビオラ、コントラバスなどの弦楽器はオーケストラや室内楽などにおいて中心的存在であり、それらの果たす役割は大きい。中でもバイオリンやビオラは曲の旋律を奏で、チェロやコントラバスは曲の土台を築くことが多いが、これらの弦楽器では特定の音高を演奏した際に演奏の質を悪化させてしまうウルフトーンと呼ばれる現象が発生し、問題となっている。

ウルフトーンが発生した際、演奏音には狼のうなり声に例えられるうなりに似た音量の周期的増減が生じる。この時聴衆は繊細な旋律の中で突然激しいウルフトーンを聴くことになるため、演奏の質の低下につながってしまう。また、ウルフトーンは撥弦（弦をはじく奏法）・擦弦（弦を弓で擦る奏法）のいずれにおいても発生し、特に低い周波数帯であるチェロやコントラバスといった大型の擦弦楽器で顕著に発生する。そのため、本研究においては大型擦弦楽器の代表としてチェロを対象とする。

このようなウルフトーンは演奏を行う上では適切に抑圧することが望ましく、いくつかの方法が挙げられる。またウルフトーンの発生周波数は、楽器の共振周波数付近であることが知られており、楽器を調整することにより若干共振周波数をずらすことが可能である。しかし、例えば共振周波数を楽器の最低音より低い周波数に調整するなど、演奏で使用する周波数領域から完全に外すことは難しく、別の方法を検討する必要がある。

ウルフトーンに関する研究はこれまで国内外で行われており、関連する大型擦弦楽器のモデル化[1,2]や擦弦機構のモデル化[3]なども行われてきた。A.Zhang, J.Woodhouse らは擦弦時にウルフトーンが発生しうる弓の圧力と楽器の振動状態について被験者実験を行い、ウルフトーンの発生状態と弓の圧力の関係およびそれらが演奏に与える影響を考察した[4]。現在ウルフトーンを抑圧するための手法としては2通り考えられ、1つは演奏技術による抑圧である。これはウルフトーン発生時に適切な条件で擦弦を行うことで抑圧する方法であり、ウルフトーンが発生する演奏音以外への影響が無いというメリットがある。一方で、そのような擦弦を行うためには高い演奏技術が要求される。もう一つの方法は楽器に直接ウルフトーン抑圧器具を装着する手法である。P.Neubauer らはウルフトーン抑圧器具の研究を行いその効果を実証したが[5]、楽器に大型の器具を取り付けた状態で演奏することは演奏者の視点からは困難である。一方で実際の演奏に耐えうる実用的な器具としては「ウルフキラー」と呼ばれる製品が市販されており演奏者の間で広く普及している。ウルフキラーには様々な種類があり、その一

例を図 1(a)~(c)に示す。図 1(a)は最も普及しているタイプのウルフキラーであり、ゴム製の中心部分を金属で覆った構造で弦に装着してネジで締め付けて固定する。図 1(b)は上下の磁石が分離する構造であり、弦を挟み固定して使用する。図 1(c)は曲線状の切り込みが入った構造のウルフキラーであり、弦を切り込み部分にはめて固定する。他にも多くの種類のウルフキラーが存在するが、ウルフトーンの発生度合いや楽器や楽曲との相性などにより演奏家の判断で付け替えられることもある。また、いずれのウルフキラーも図 2 に示すように駒とアジャスタの間にある弦に取り付けて使用するが、その取り付け位置によっても抑圧効果に影響があることがわかっている[6, 7]。ウルフキラーについて G.Gidion は、形状の異なる複数のウルフキラーを用いた際の演奏音を解析することでそれぞれが演奏音に及ぼす傾向を明らかにしている[8]。以上のようなウルフキラーによる抑圧は、比較的容易にウルフトーンを抑圧できるというメリットがある一方、装着により楽器全体の音量が抑圧されてしまう、音色が変化してしまうなど別の問題も発生する。さらに、ウルフキラーを装着すれば必ずウルフトーンが抑圧できるわけではなく、擦弦条件によってはやはりウルフトーンが発生してしまうため装着時においても適切な擦弦を行う演奏技術が求められる。

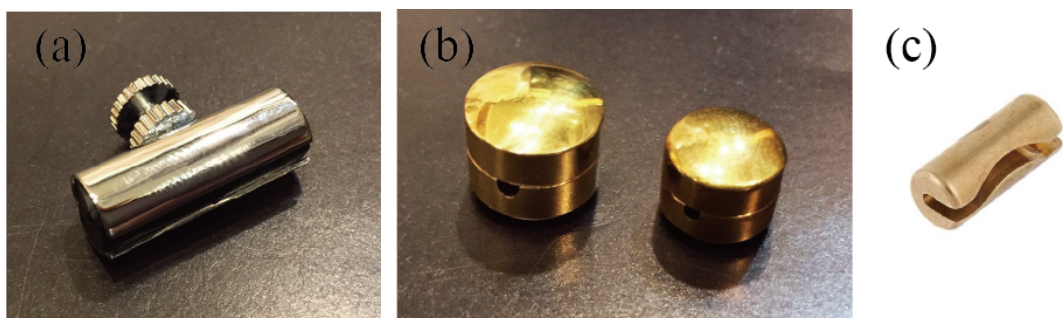


図 1 様々な種類のウルフキラー

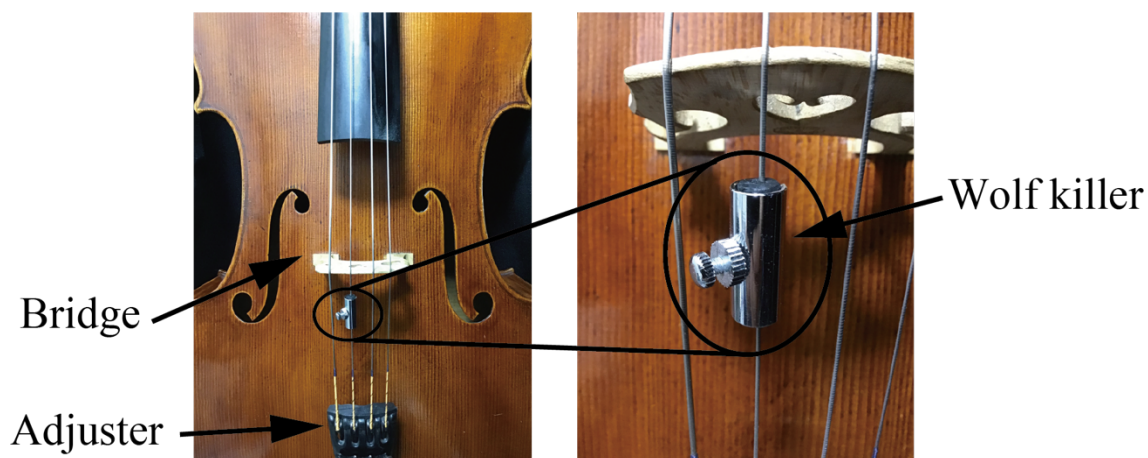


図 2 ウルフキラー装着時の様子

以上の様に、ウルフキラーを装着するか否かは演奏する楽曲への影響度に応じて演奏者の判断に委ねられるが、ウルフトーンを抑圧するためには未装着・装着いずれの場合においても高い擦弦技術が求められる。しかし、ウルフトーンを抑圧する上でどのような擦弦条件（弓の圧力と速度）で擦弦を行うべきかについては、これまで明確な条件は示されておらず、演奏者は長い年月をかけて経験的にその技術を習得する必要があった。そこで演奏者がウルフトーンを抑圧するための擦弦技術をより短期間で習得するために、ウルフトーンの発生状態と擦弦条件の関係性を明らかにし、ウルフトーン抑圧のための擦弦条件を示すことが求められている。

## 1-2 研究の目的

ウルフキラー未装着時・装着時いずれにおいても、ウルフトーンを抑圧するには適切な擦弦条件で擦弦を行うことが求められているが、その具体的な条件はこれまで示されていない。そこで本研究は、ウルフキラーの未装着時および装着時において、演奏者が技術的にウルフトーンを抑圧するための擦弦条件を工学的に示すことを目的とする。一般的なウルフトーンを抑圧方法として「演奏技術により抑圧する」、又は「ウルフキラーを取り付けて抑圧する」の2通りが考えられる。それぞれの場合についてウルフトーンを抑圧に向けた適切な擦弦条件（弓の圧力と速度）を工学的に求め2次元マップ上に示すことで、演奏者は擦弦条件とウルフトーンの発生状態の関係を把握することが可能となり、擦弦技術の早期習得の一助となる。

## 1-3 本論文の構成

本論文の構成を図3に示す。本章では研究の背景および研究目的について述べた。2章ではウルフトーンが演奏中に発生した際の演奏に対する影響について述べる。3章ではウルフトーンをシミュレーションで再現するために、大型擦弦楽器の等価モデルとして考案した弦-胴連成振動モデルについて述べる。さらに、弦-胴連成振動モデルにウルフキラーを装着したモデルについても述べる。4章では3章で示したモデルをもとに撥弦時および擦弦時におけるウルフトーンをシミュレーションにより再現する。5章では、4章で得られたシミュレーション結果の妥当性を検証するために実施した撥弦実験および擦弦実験について述べる。6章では4章および5章で得られた結果をもとに、擦弦条件とウルフトーンの発生状態の関係を2次元平面上に示したウルフトーン発生状態マップを作成し、ウルフキラー未装着・装着時それぞれの場合についてウルフトーンを抑圧するための擦弦条件を明らかにする。そして7章で本研究の結論を述べる。



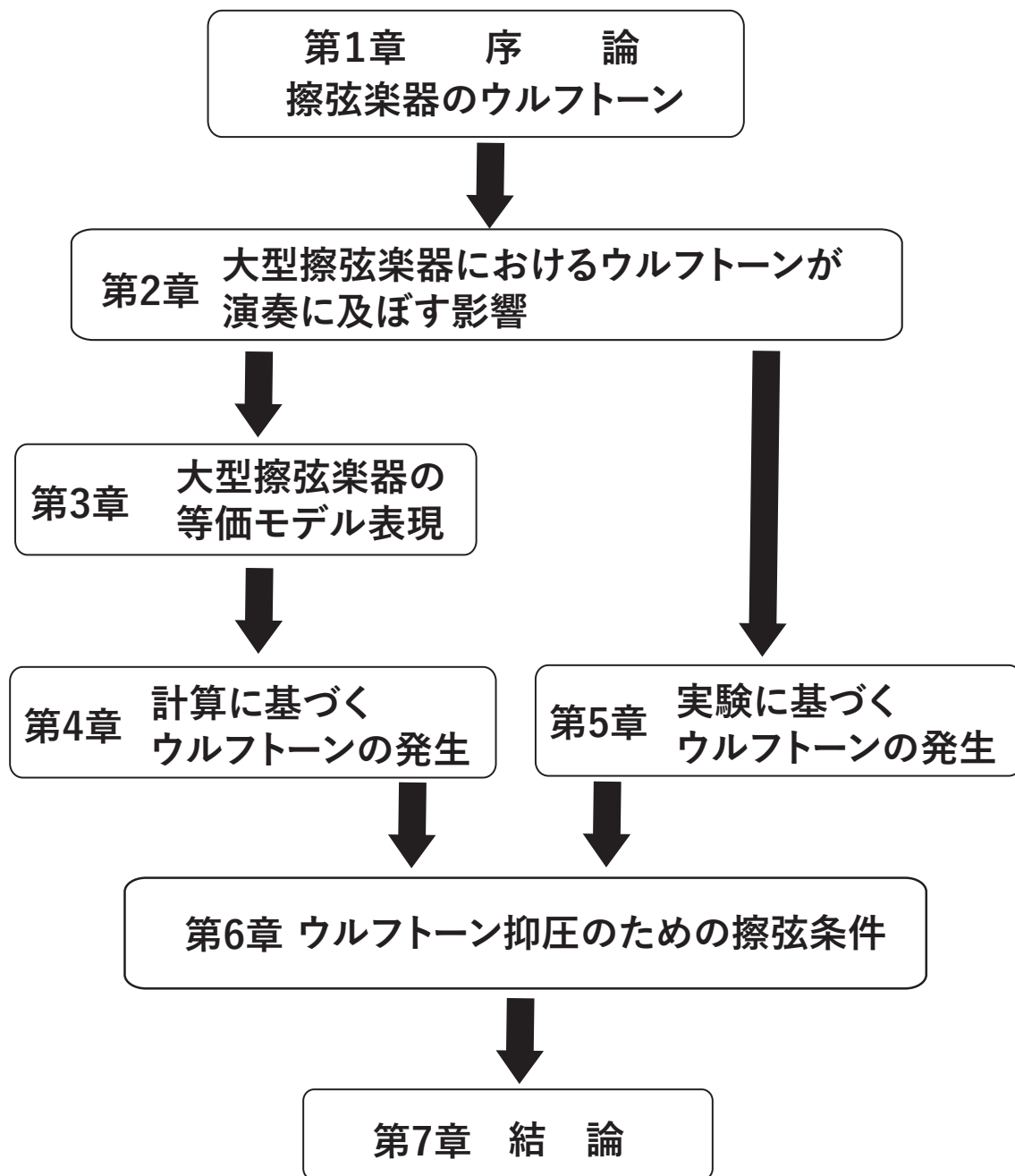


図 3 本論文の構成

## 第2章 大型擦弦楽器におけるウルフトーンが演奏に及ぼす影響

### 2-1 はじめに

本章ではまず、演奏中にウルフトーンが発生した際の演奏への影響について、楽曲編成などの視点から述べる。次に大型擦弦楽器の代表としてチェロの基本的な構造を示し、擦弦時のウルフトーンの定性的な発生メカニズムについて述べる。最後に、ウルフトーンを抑圧するためにウルフキラーを装着した際の演奏への影響について述べる。

### 2-2 ウルフトーンが演奏に及ぼす影響

ウルフトーンが演奏に与える影響の大きさは楽曲の編成によって大きく変わり、同様にウルフトーンが発生した状態であったとしても、聴衆が不快と覚えることもあれば、ウルフトーンが発生していること自体に気づかない場合もある。例えば、ウルフトーンの影響が比較的小さい例としては、オーケストラなどの大編成が挙げられる。オーケストラのように様々な楽器が一斉に演奏されている状態において、一部の楽器で発生しているウルフトーンを認識し、これを不快と覚えることは稀であると考えられる。ただし、オーケストラなどの大編成であったとしても、チェロとコントラバスなど複数の楽器で同時にウルフトーンが発生した場合などはその影響は通常よりも大きいと考えられる。また奏法によってもその影響度が異なる。例えばスタッカートなどの奏法や、非常に短い音符を演奏する際には短時間の擦弦となるため、ウルフトーンが発生するかしないかの短いタイミングで次の音に移行することになり、ウルフトーンが発生した場合であっても聴衆が認識しにくいと言える。

一方で、常にウルフトーンが発生が問題となるのは、弦楽カルテットなどの室内楽の楽曲を演奏する際である。室内楽の場合、聴衆は各楽器の音色をより認識しやすいため、各楽器の音も特に際立ちウルフトーン発生時の演奏への影響はより大きくなる。具体的な楽曲としては、例えばベートーヴェンチェロソナタ第3番1楽章が挙げられる。この曲では冒頭2小節目に、ウルフトーンが発生する音高(F#)を付点2分音符の長さでチェロがソロで演奏するが、この静寂な雰囲気の中でのウルフトーンの発生は聴衆に不安な印象を与えてしまう。また演奏者も、ウルフトーンが発生する音高に近づくとつれ、ウルフトーンが発生するかもしれないという不安や、抑圧しなければならないという緊張感から、本来は演奏に対して向けるべき集中力を失い演奏全体に悪影響を及ぼす可能

性がある。これに対し、一部の作曲家はウルフトーンをあえて奏法の一つとして取り入れている例もあるが、これは極めて稀な例である。

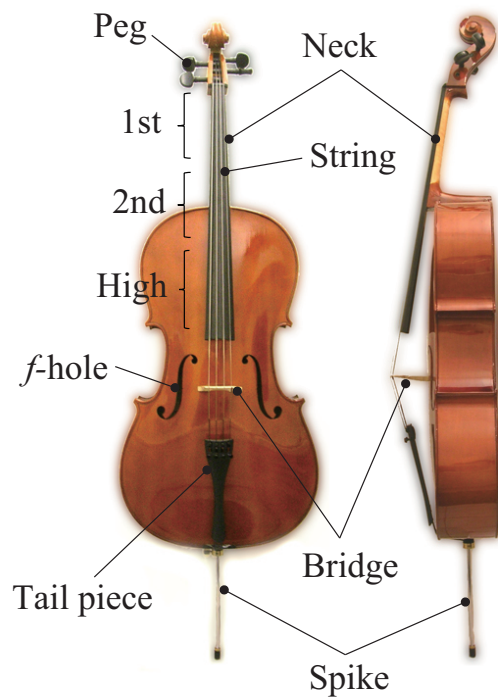
演奏者は、ウルフトーンが顕著に発生する箇所を含む楽曲を練習する際に、ウルフトーンが発生する演奏音に対し弓の圧力や弓の速度などの擦弦条件を適切にコントロールすることで抑圧する技術を習得する必要があるが、現状は長い期間を費やして試行錯誤し、徐々にその傾向を掴みながら習得していくのが一般的である。

### 2-3 ウルフトーンの発生メカニズム

チェロの概観を図 4 に示す。チェロは瓢箪形の本体に適切な張力で 4 本の弦を張った構造であり、弦は向かって右側から第 1 弦 (A 線)、第 2 弦 (D 線)、第 3 弦 (G 線)、第 4 弦 (C 線) と弦が太くなり、低音になっていく。演奏を行う際には左手の指で弦を押さえながら右手で弓を持ち擦弦する。左手について、使用する領域を図 4 中に示した第 1 ポジション、第 2 ポジション、ハイポジションの 3 領域に分けると、第 1 ポジションと第 2 ポジションは第 1 弦 (A 線) ～第 4 弦 (C 線) で頻繁に使用され、ハイポジションはその多くが第 1 弦 (A 線) および第 2 弦 (D 線) を演奏する際に使用される。擦弦による弦の振動は駒を介して本体の表板及び裏板に伝達され、楽器表面から拡大された放射音として発せられる。また楽器には本体の形状や表板及び裏板の剛性等に依存した固有周波数があり、楽器全体として起こる振動は弦と胴の連成振動である。

チェロにおいてウルフトーンが発生する 180Hz 付近の音高が出せる弦は、第 2 弦 (D 線)、第 3 弦 (G 線)、第 4 弦 (C 線) であり、それぞれの押弦位置は第 2 弦 (D 線) では第 1 ポジション、第 3 弦 (G 線) では第 2 ポジション、第 4 弦 (C 線) ではハイポジションとなる。第 2 弦 (D 線) 及び第 3 弦 (G 線) を演奏時に発生するウルフトーンはその使用頻度の高さから特に問題となる。

続いてウルフトーンの定性的なメカニズムを示すため、過去に当研究室において実測された、チェロのウルフトーン発生時における擦弦点付近の弦の変位波形を図 5 に示す。擦弦している弦は第 3 弦 (G 線) であり、横軸は時間、縦軸は x 方向の変位を表している。この時波形は、弦が弓に引っかかる「スティック状態」と弓が弦から外れて弦の上を滑る「スリップ状態」を繰り返すノコギリ波となることがわかる。そして時間が経過と共にウルフトーンが発生し始める。その際スティックの最中にスリップが一瞬発生し、その変位量が時間の経過と共に増大していき最終的に主たるスリップとなっている。一方、主たるスリップはその変位量が次第に減少していくことがわかる。このようにスティック中に発生するスリップの変位量の増減が周期的に繰り返されることで、放射音の音圧の振幅に変動が生じるものと考えられる。



出典 : <https://ja.wikipedia.org/wiki/チェロ>

図 4 チェロの概観

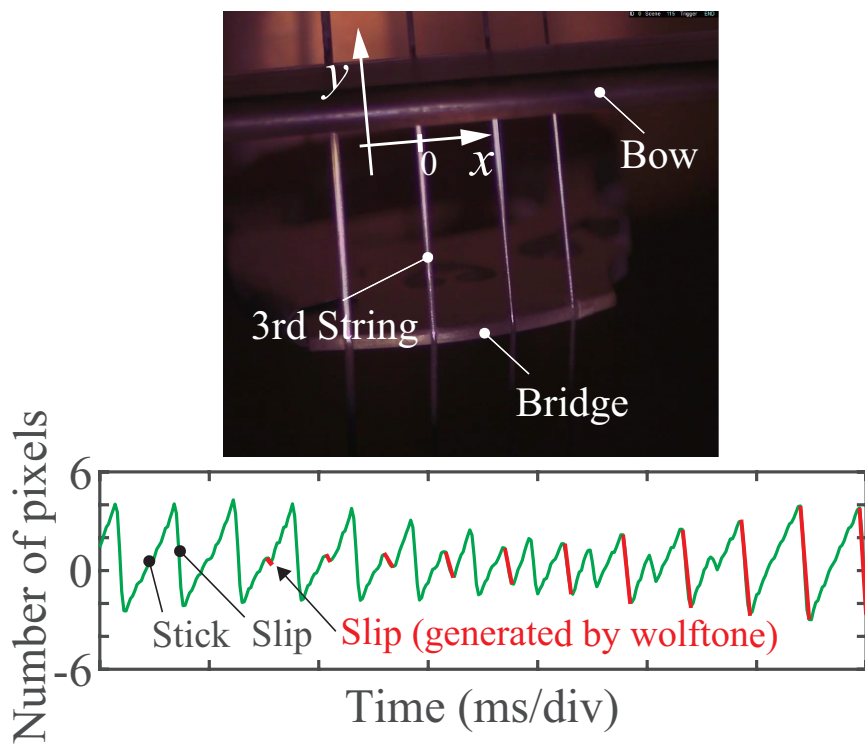


図 5 ウルフトーン発生時の擦弦点における  $x$  軸方向の弦の変位の実験結果

## 2-4 ウルフキラーを用いたウルフトーンを抑圧

ウルフキラーはその構造や演奏中の集中力維持の観点から、演奏中の着脱は通常行わない。そこで演奏者は、演奏する楽曲中にどの程度ウルフトーンが発生する音が存在するかを予め把握し、必要と判断すれば楽曲冒頭からウルフキラーを装着することが一般的である。ウルフキラーを装着するとウルフトーンは比較的容易に抑圧することができるが、擦弦条件によってはやはりウルフトーンが発生してしまうためウルフキラーによる完全な抑圧は困難であり、ウルフキラー装着時にも適切な擦弦条件で擦弦を行う必要がある。また演奏音の音量が下がり、こもった音色になるなど演奏全体に影響してしまうため、ウルフキラーの積極的な使用は望まれておらず最終手段として使用されている。先に挙げたベートーヴェンチェロソナタ第3番1楽章においても、ウルフキラーを使用した場合、静寂な中チェロのソロパートから始まる冒頭において、本来表現されるべきチェロ特有の重低音の広がりや表現されにくくなり、楽曲全体を通じて軽い印象を与えてしまう。

ウルフキラー未装着時と装着時の放射音の変化を比較するため、それぞれにおける放射音の音圧波形を図6に示す。図6(a)はウルフキラー未装着時(ウルフトーンが発生)の音圧波形であり、その振幅には周期的な変動が見られている。図6(b)は図6(a)に対してウルフキラーを装着しウルフトーンが抑圧された状態の音圧波形であり、図6(a)に生じていた振幅の変動が解消されウルフキラー装着の効果が見られている。しかし楽器の全体的な音圧も抑圧されてしまっていることがわかり、この状態で演奏すると全体を通して曲の印象が痩せて薄いものになってしまう。

## 2-5 まとめ

本章ではウルフトーンが演奏に及ぼす影響の度合いは楽曲や編成によって異なり、室内楽などの小編成において特に問題となることを述べた。またウルフトーンの定性的な発生メカニズムについて、擦弦によるウルフトーン発生時の弦の変位波形に注目して考察し、スティックの際に起こるスリップの変位量の増減が音圧の振幅変動を引き起こすことを述べた。さらに、ウルフキラーを装着した際の演奏への影響についても述べ、装着前後の放射音の音圧波形を比較することでウルフキラー装着によるウルフトーンを抑圧効果および演奏音への影響について示した。

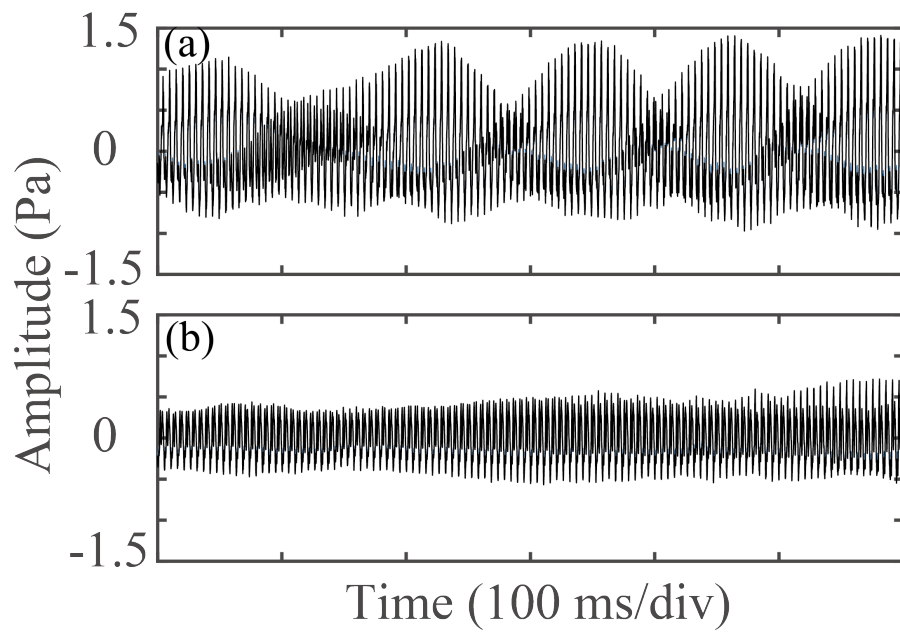


図 6 ウルフキラー未装着時・装着時における音圧波形の実験結果



## 第3章 大型擦弦楽器の等価モデル表現

### 3-1 はじめに

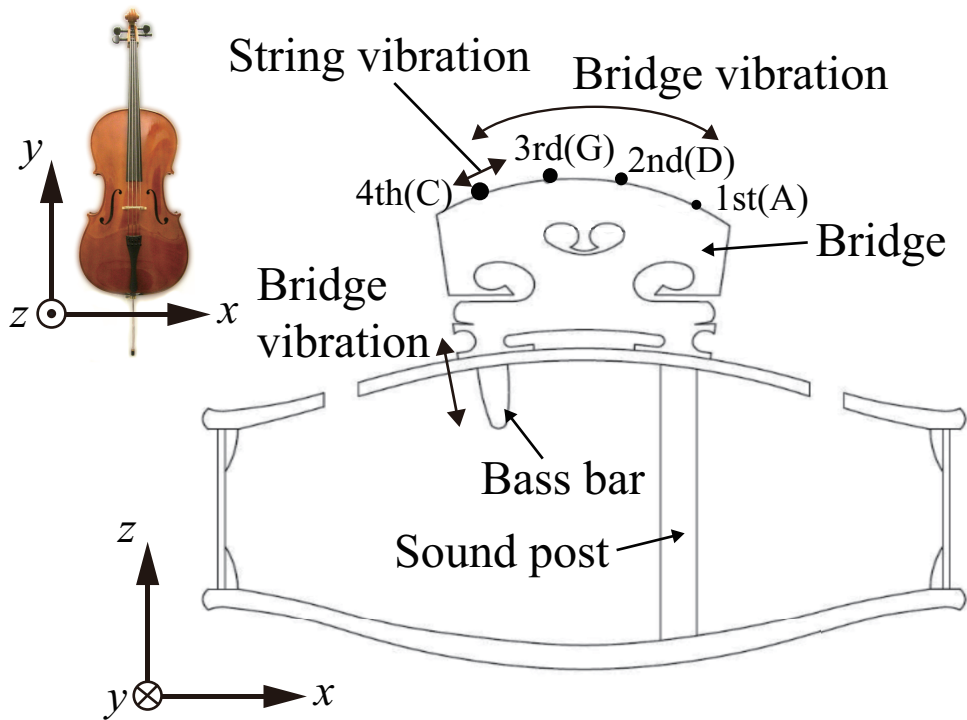
本章では、数値シミュレーションによるウルフトーンの再現に向けた弦楽器のモデル化について述べる。これまで先行研究により様々な弦楽器のモデルが考案されているが [9]、ここではまず 3-2 で弦楽器の発音機構を示し、これをもとに考案した弦-胴連成振動モデルについて述べる。3-3 では弦-胴連成振動モデルの右端境界部における等価質量、等価バネ定数、等価抵抗の値を実際の楽器（チェロ）を用いた実験により推定する。さらに 3-4 では、弦-胴連成振動モデルの右端境界部にウルフキラーとみなした新たな単振動系を付加した、ウルフキラー装着時の弦-胴連成振動モデルについて述べる。

### 3-2 ウルフキラー未装着時の弦-胴連成振動モデル

弦楽器の構造（断面図）を **図 7** に示す。楽器胴体の上には駒が乗っており、4本の弦と表板によって挟まれ弦の張力により支えられている。4本の弦のうち向かって左が低音弦、右が高音弦となる。駒の右脚（高音弦側）の脚元直下には表板と裏板を繋ぐ魂柱とよばれる支柱があり、左脚（低音弦側）の脚元直下にはバスバーと呼ばれる突起部がある。弓で弦を擦弦すると、弦は弓の駆動方向と水平な方向に振動する。弦の振動が駒に伝わることで駒は右脚を軸とした回転往復運動を行い、左脚は表板に対して垂直方向に振動する。これは擦弦中の弦の振動が駒を介して垂直方向の振動に変換されることを意味しており、この振動が表板全体に伝達され、魂柱や楽器側面から裏板に伝達されることで拡大された演奏音として放射される。**図 5** の測定結果において、駒の  $x$  軸方向の変位波形を **図 8** に示す。図中には擦弦点付近の弦の変位を併せて実線で示している。この結果より、駒部は  $x$  方向に近似的に単振動をしているとみなせる。

以上の発音機構を踏まえ、**図 9** に示す弦-胴連成振動モデルを考案した [10, 11]。モデルの左側の境界は、楽器の糸巻き部に弦が巻かれているとした固定端、右側の境界は駒までを含む胴体の主たる固有モードを有する単振動系（質点-バネ-ダンパ系）としている。このモデルは擦弦時の駒部における振動に着目しており、**図 8** の結果より駒部は楽器に水平な方向に単振動を行うものとし、楽器胴体は表板や裏板の剛性等に依存する固有周波数を有するため、単振動系はその主たる固有モードを有するものとしている。





出典 : <https://rearpond.mystrikingly.com/blog/cfc5dcfd239>

図 7 弦楽器の構造

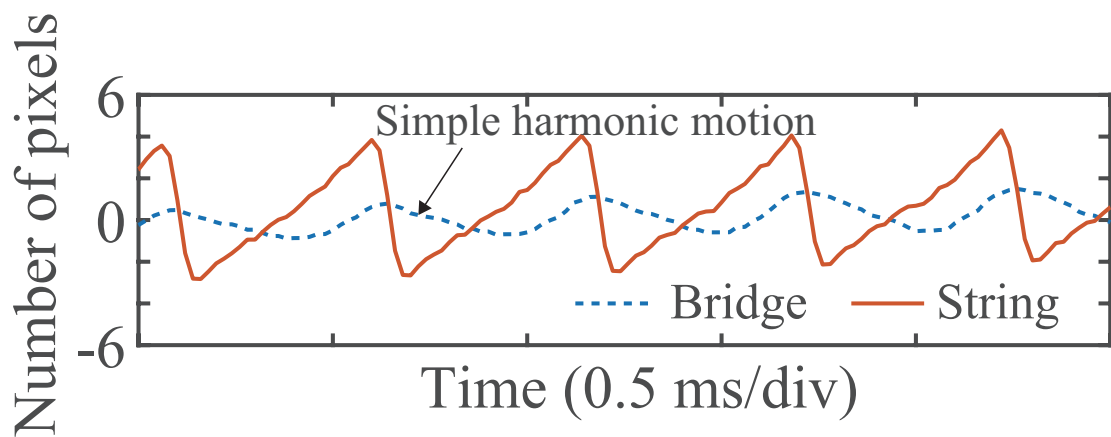


図 8 擦弦中の駒部の  $x$  軸方向の変位の実験結果

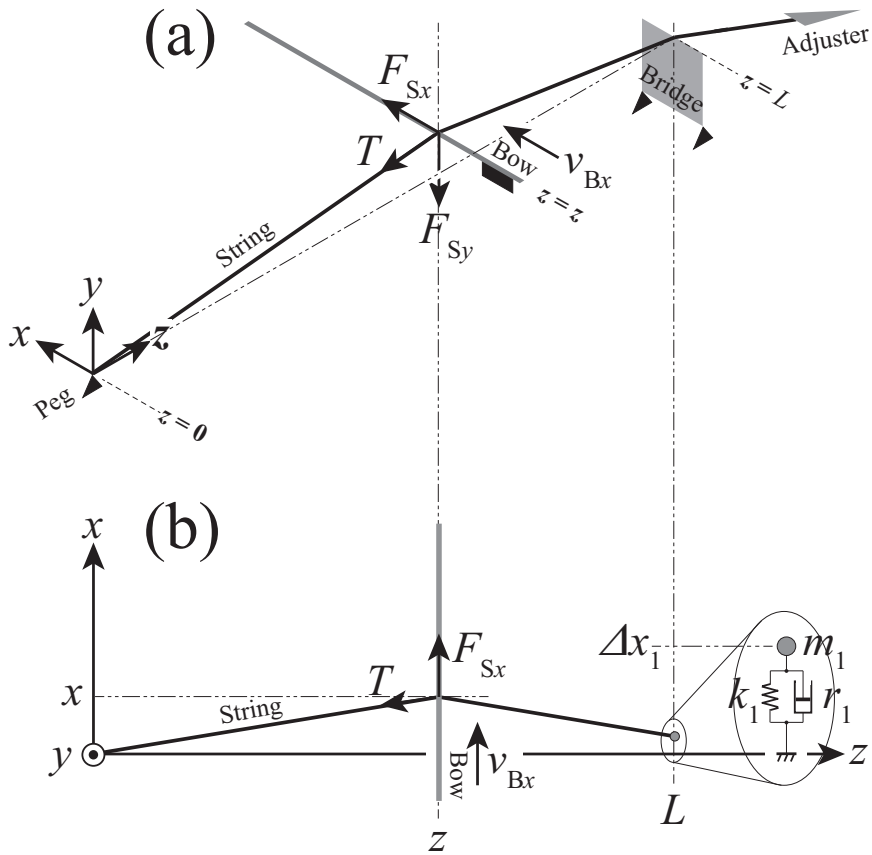


図 9 ウルフキラー未装着時の弦-胴連成振動モデル

図 9(a)において、擦弦中に発生する力  $F_{Sx}$  は擦弦点における弦と弓の間の摩擦力、 $F_{Sy}$  は弓が弦に及ぼす  $y$  軸に並行な向きの圧力、 $T$  は弦の張力、 $v_{Bx}$  は弓の速度の  $x$  成分であり、固定端を原点としたときの駒の座標を  $z=L$  とする。また図 9(b)において右端境界部における  $m_1$ 、 $k_1$ 、 $r_1$  はそれぞれ、駒までを含む胴体部が有する主たる固有モードの駒の位置における等価質量、等価バネ定数、等価抵抗であり、その際の質点  $m_1$  の微小変位を  $x_1$ 、弦の変位を  $x$  とする。このとき、境界条件は質点  $m_1$  の運動方程式から

$$m_1 \frac{\partial^2 x_1}{\partial t^2} = -k_1 x_1 - r_1 \frac{\partial x_1}{\partial t} - T \frac{\partial x}{\partial z} \quad (1)$$

と表され、弦の線密度を  $\rho$ 、弦を伝わる波の速度を  $c$  とすると、弦の波動方程式は以下の式で表される。

$$\frac{\partial^2 x}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 x}{\partial z^2} + \frac{F_{Sx}}{\rho} \quad (2)$$

### 3-3 パラメータの推定実験

図 9(b)に示した弦-胴連成振動モデルの右端境界部における等価質量  $m_1$ 、等価バネ定数  $k_1$ 、等価抵抗  $r_1$  の値は楽器固有の値であるため、実際の楽器を用いてこれらの値を推定した[12]. 実験方法は図 10 に示す様に、駒の上端側面をインパルスハンマで叩き、上端の反対側の側面における駒の応答速度をレーザードップラー振動計 (LDV) で計測するというものである. これは図 9(b)のモデル右端境界部の質点-バネ-ダンパ系に対し  $x$  軸に並行な方向にインパルスを与えることに相当する.

4 弦全てが適切な張力で張られた状態のチェロにおいて、インパルスハンマで入力した力と LDV により得られた駒部の応答速度の結果を図 11 に示す. 測定結果より、インパルスを入力した直後から駒部は振動しながら減衰していく様子が示されている. また、入力した力と応答速度から機械的な動かし易さを表すモビリティを求め、その周波数特性を図 12 に示した. さらに、チェロにおけるウルフトーン発生周波数である 180~190 Hz 付近を拡大したものを図 13 に示す. ここで縦軸は  $1 \text{ (m/Ns)}^2$  を 0 dB と定義している. 結果より胴の共振周波数は  $f_0 = 190 \text{ Hz}$ , 半値幅と共振周波数より  $Q$  値は 20 と求まった. 以上の結果を用いてモデル中の等価質量  $m_1$ 、等価バネ定数  $k_1$ 、等価抵抗  $r_1$  を推定した.

まず図 14 に示す質点-バネ-ダンパ系にインパルスを与えたとき、時間  $\Delta t$  経過した後は外力が 0 の自由振動になり、質点  $m_1$  の運動方程式は次式で与えられる.

$$m_1 \frac{d^2 x_1}{dt^2} + r_1 \frac{dx_1}{dt} + k_1 x_1 = 0 \quad (3)$$

式(3)の一般解は、角共振周波数  $\omega_0$ 、減衰比  $\xi = r_1/2\sqrt{k_1 m_1}$ 、任意定数  $A$ 、 $\phi$  を用いて

$$x_1 = A \exp(-\xi \omega_0 t) \sin(\sqrt{1 - \xi^2} \omega_0 t - \phi) \quad (4)$$

で与えられ、さらにその速度解は、

$$\begin{aligned} \frac{dx_1}{dt} = & A(-\xi \omega_0) \exp(-\xi \omega_0 t) \sin(\sqrt{1 - \xi^2} \omega_0 t - \phi) \\ & + A \omega_0 \sqrt{1 - \xi^2} \exp(-\xi \omega_0 t) \cos(\sqrt{1 - \xi^2} \omega_0 t - \phi) \end{aligned} \quad (5)$$

と求まる．ここで初期条件を，

$$x_1(0) = 0 \quad (6)$$

$$\dot{x}_1(0) = \frac{P_0}{m_1} \quad (7)$$

とすると $\phi$ と $A$ はそれぞれ

$$\phi = 0 \quad (8)$$

$$A = \frac{P_0}{\sqrt{1 - \xi^2} \omega_0 m_1} \quad (9)$$

と求まる．さらに，減衰比  $\xi \ll 1$  の近似のもとで式 (5) は

$$\frac{dx_1}{dt} = \frac{P_0}{m_1} \exp\left(-\frac{r_1}{2m_1} t\right) \cos(\omega_0 t) \quad (10)$$

と表すことができる．式中の  $P_0$  は図 11 のインパルスハンマの力積から， $P_0 = 7.2 \times 10^{-5}$  kg·m/s と求まる．また，等価質量  $m_1$  と等価バネ定数  $k_1$  は，図 13 の結果から得られた  $Q$  値や共振角周波数  $\omega_0 = 2\pi f_0$  などを用いてそれぞれ，

$$m_1 = \frac{Q r_1}{\omega_0} \quad (11)$$

$$k_1 = m_1 \omega_0^2 \quad (12)$$

と求める事ができる．

図 13 に示したモビリティのピーク値と，式(10)とインパルスハンマによる計測結果から計算されるモビリティのピーク値が合うようにフィッティングを行なった結果，等価抵抗は  $r_1 = 1.2$  N/(m/s) と推定された．この結果を用いて，等価質量  $m_1$  と等価バネ定数  $k_1$  は式(11)と式(12)からそれぞれ  $m_1 = 20.1 \times 10^{-3}$  kg， $k_1 = 28.7 \times 10^3$  N/m と求まった．以降シミュレーションにはこれらの値を用いた．

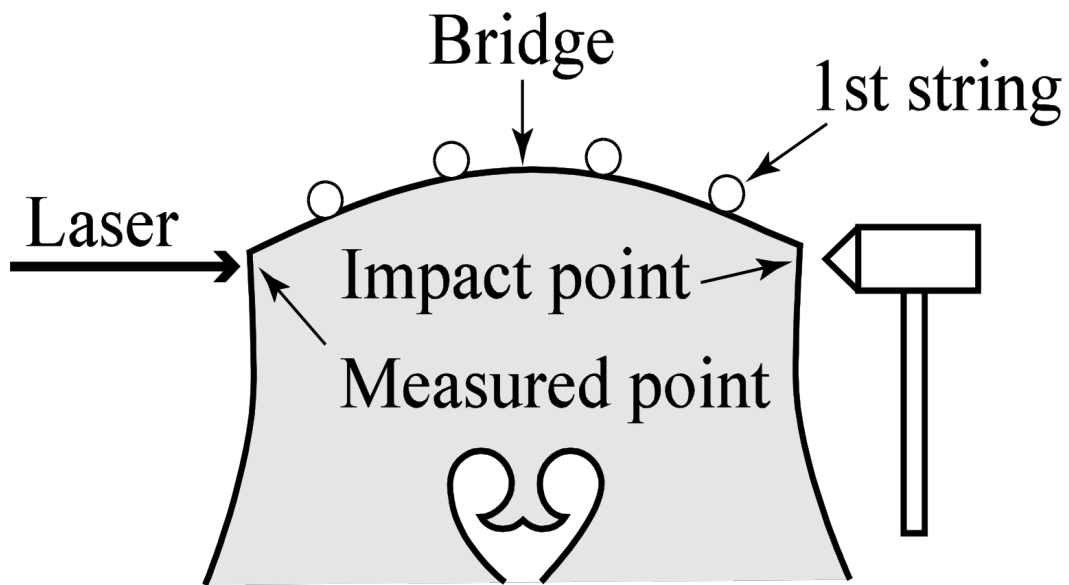


図 10 パラメータ推定実験

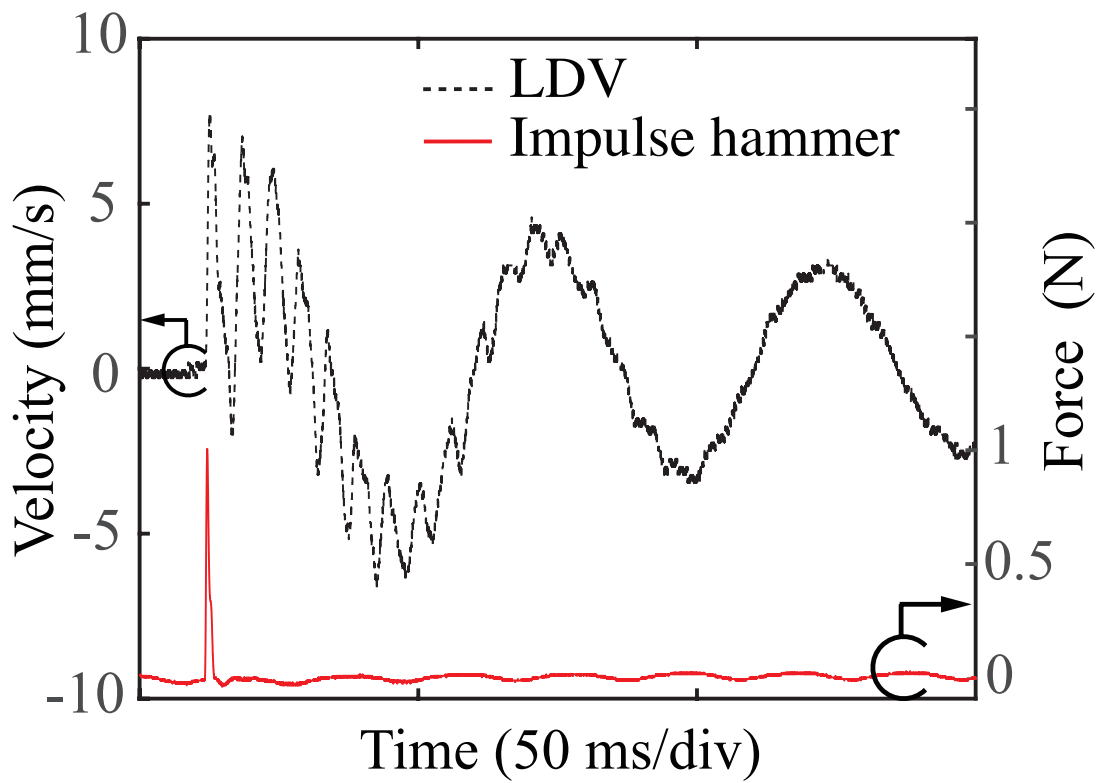


図 11 入力した力と駒部の応答速度の実験結果

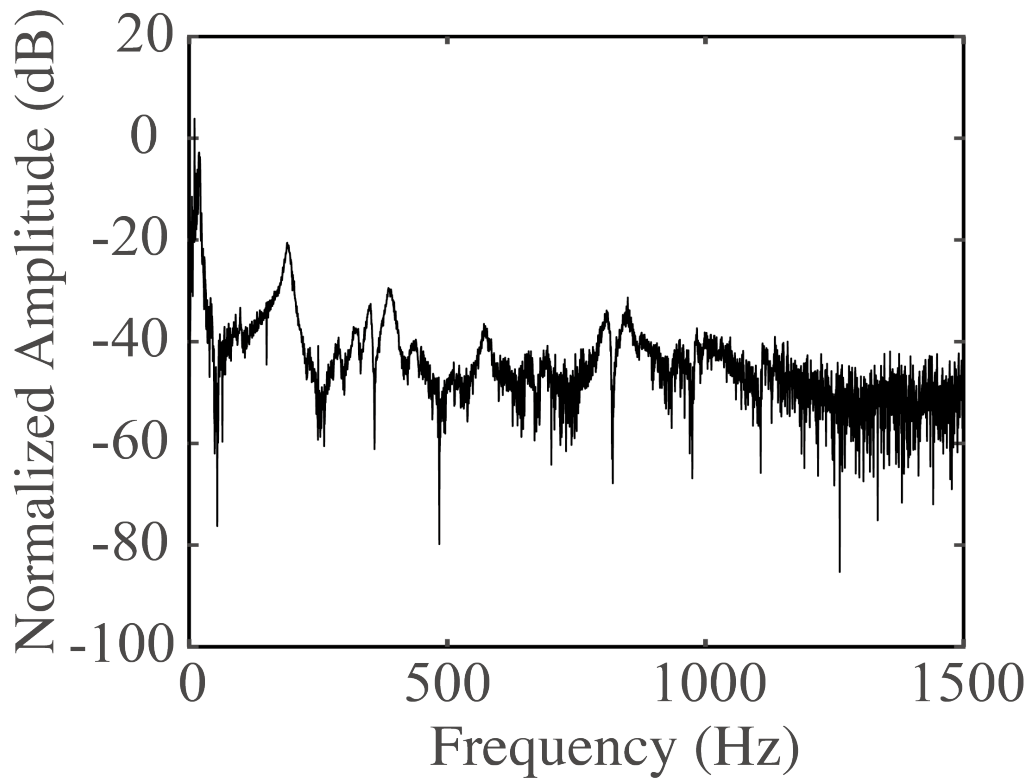


図 12 モビリティの周波数特性

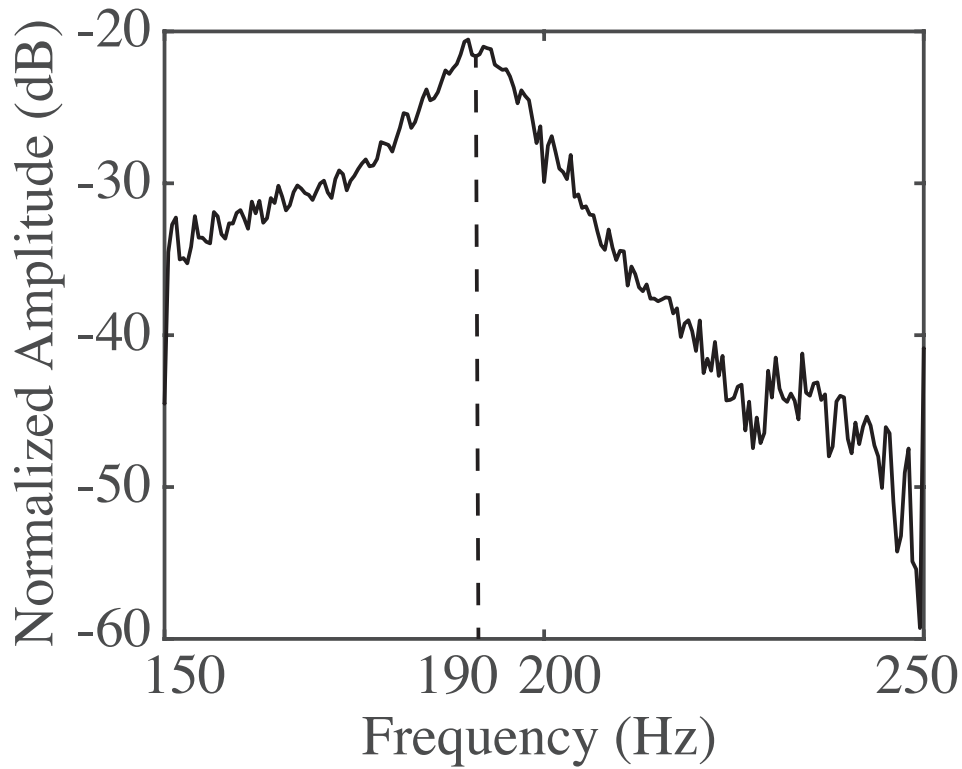


図 13 モビリティの周波数特性 (190Hz 付近拡大)

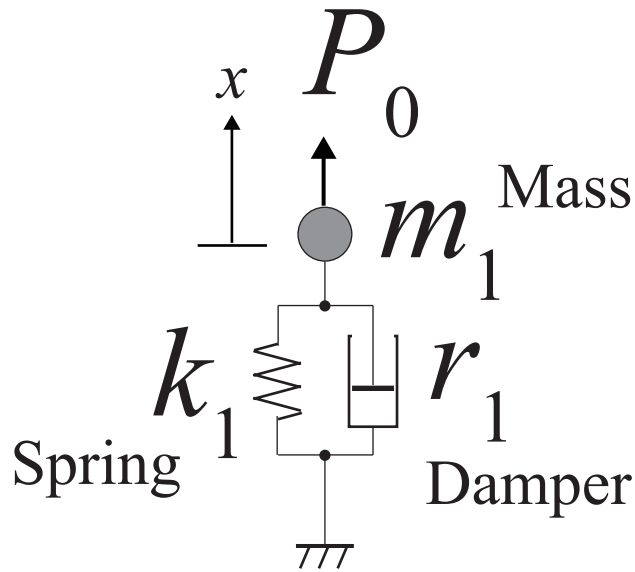


図 14 質点-バネ-ダンパ系

### 3-4 ウルフキラー装着時の弦-胴連成振動モデル

次に、ウルフキラー装着時におけるウルフトーンをシミュレーションにより再現するため、図 9 の弦-胴連成振動モデルに対してウルフキラーを装着したモデルを考案した。ウルフキラー装着時の弦-胴連成振動モデルを図 15 に示す。本モデルは図 9 のモデルの右端境界部にウルフキラーとみなした新たな質点-バネ-ダンパ系を取り付けたモデルである[13, 14]。ここで図 15(b)のモデルにおける  $m_2$ ,  $k_2$ ,  $r_2$  は、駒からアジャスタまでの間に張られた弦とそこに取り付けられたウルフキラーからなる単振動系における主たる固有モードの、駒の位置における等価質量、等価バネ定数、等価抵抗を表している。この時ウルフキラー装着時の弦-胴連成振動モデルにおける右端の境界条件は、質点  $m_1$  と質点  $m_2$  の運動方程式から

$$m_1 \frac{\partial^2 x_1}{\partial t^2} = -(k_1 + k_2)x_1 + k_2 x_2 - (r_1 + r_2) \frac{\partial x_1}{\partial t} + r_2 \frac{\partial x_2}{\partial t} - T \frac{\partial x}{\partial z} \quad (13)$$

$$m_2 \frac{\partial^2 x_2}{\partial t^2} = -k_2 x_2 + k_2 x_1 - r_2 \frac{\partial x_2}{\partial t} + r_2 \frac{\partial x_1}{\partial t} \quad (14)$$

と表される。

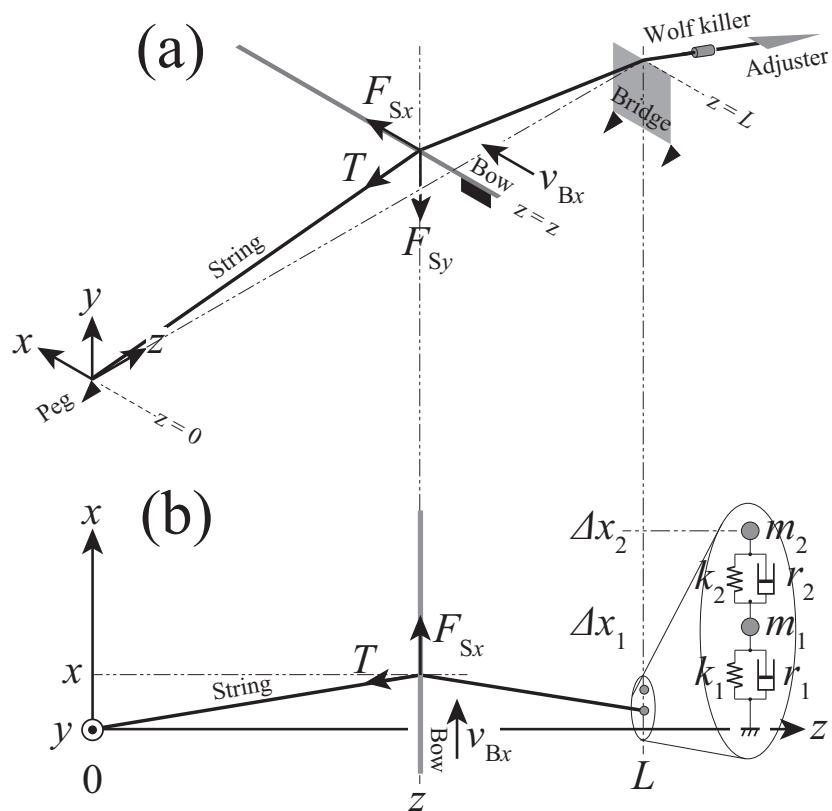


図 15 ウルフキラー装着時の弦-胴連成振動モデル

ウルフキラーの固有周波数と胴体の固有周波数は一致させており、この時  $m_2$  と  $k_2$  の比によってウルフキラーと胴の結合度が変化する。ここではウルフキラーは駒とテールピースの間に張られている弦の最も駒側に設置しているものとした。そのため駒の位置におけるウルフキラーの等価質量  $m_2$  は実際のウルフキラーの質量 (10 g) とみなすことができる。ただし、駒とテールピースの間の弦の質量は無視している。 $k_2$  の値は  $m_2$  と胴体の共振周波数から求まり、 $r_2$  は胴の等価抵抗と等しい値を用いた。それぞれのパラメータの値を表 1 に示す。

表 1 ウルフキラー部のパラメータ

記号	定数名	数値	単位
$m_2$	ウルフキラーの等価質量	$1.0 \times 10^{-2}$	kg
$k_2$	ウルフキラーの等価バネ定数	$1.2 \times 10^4$	N/m
$r_2$	ウルフキラーの等価抵抗	1.2	N/(m/s)



### 3-5 まとめ

本章ではまず、シミュレーションによりウルフトーンを再現するための弦楽器の等価モデルとして、ウルフキラー未装着時の弦-胴連成振動モデルについて述べた。さらにモデルの境界条件に含まれる等価質量  $m_1$ 、等価バネ定数  $k_1$ 、等価抵抗  $r_1$  などのパラメータについて実験的に推定を行った。また、駒からアジャスタまでの間に張られた弦とその上に取り付けたウルフキラーが駒と共に単振動を行うとみなした、ウルフキラー装着時の弦-胴連成振動モデルを示し、モデル中のウルフキラーの駒の位置における等価質量  $m_2$ 、等価バネ定数  $k_2$ 、等価抵抗  $r_2$  の値をそれぞれ推定した。本章で考案したモデルを用い、次章においてシミュレーションによりウルフトーンの再現を行う。

## 第4章 計算に基づくウルフトーンの発生

### 4-1 はじめに

本章では3章で述べたウルフキラー未装着時の弦-胴連成振動モデルおよびウルフキラー装着時の弦-胴連成振動モデルを用い、シミュレーションによりウルフトーンを再現することを目的としている。まず4-2では、撥弦の際に発生するウルフトーンをシミュレーションにより再現し、弦の線密度とウルフトーンの周期の関係を明らかにする。次に4-3で擦弦の際に発生するウルフトーンをシミュレーションにより再現する。擦弦の際は擦弦点に弦と弓の間の摩擦特性を与え、弓の圧力と弓の速度の組み合わせに対するウルフトーンの発生状態を明らかにする。これをもとにウルフキラー装着前後における擦弦状態の変化や、ウルフトーンの発生状態の変化についても考察を行う。

### 4-2 撥弦時のウルフトーンの発生

#### 4-2-1 撥弦シミュレーション概要

ウルフキラー未装着時の弦-胴連成振動モデルにおいて、撥弦の際に発生するウルフトーンをシミュレーションにより再現する。特に、第2弦(D線)、第3弦(G線)、第4弦(C線)それぞれ線密度の異なる弦を用いてシミュレーションを行い、弦の線密度とウルフトーンの周期変化の関係を明らかにする。

#### 4-2-2 撥弦シミュレーション条件

本研究におけるシミュレーションは、弦の波動方程式を差分法により解くことで行っている。計算の際は、空間と時間の離散化による数値分散を防ぎつつ計算精度を保つため、時間ステップ  $\Delta t$  と弦の刻み幅  $\Delta z$  をそれぞれ  $\Delta t = 10.9 \mu\text{s}$ ,  $\Delta z = 4.9 \text{ mm}$  とした。初期条件は図 16 に示す様に弦長  $L$  に対し  $3L/4$  の箇所を 5 mm 上方につまみ、初速 0 m/s で静かに離すものとする。また、対象とする弦はウルフトーンが発生する周波数の音高を出すことが可能である第2弦(D線)、第3弦(G線)、第4弦(C線)とし、いずれもウルフトーンの発生周波数となる様に弦長、線密度、張力の値を決めている。本シミュレーションで用いた各弦のパラメータの値を表 2 に示す。まず、弦長  $L$  は楽器に弦を張った状態でウルフトーンが発生する周波数となる際の、コマの位置から押弦位置ま

での距離とした。線密度  $\rho$  は市販のチェロ用弦（スピロコア）の質量および弦の長さから求めた。また張力  $T$  は、弦長  $L$  と線密度  $\rho$  およびウルフトーンの発生周波数より求めた値を用いている。

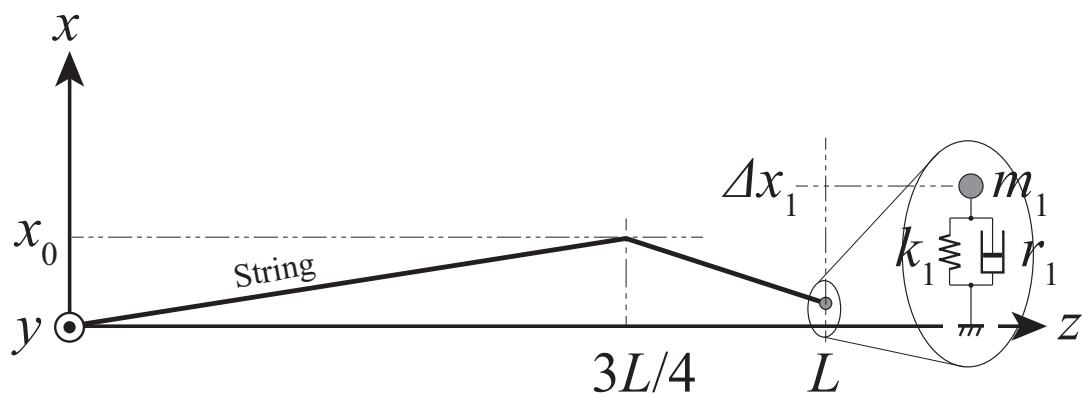


図 16 撥弦シミュレーションにおける初期条件

表 2 シミュレーションにおける各弦のパラメータ

記号	変数名	弦の種類	数値	単位
$L$	弦長	第 2 弦 (D 線)	550	mm
		第 3 弦 (G 線)	367	
		第 4 弦 (C 線)	250	
$\rho$	線密度	第 2 弦 (D 線)	$3.26 \times 10^{-3}$	kg/m
		第 3 弦 (G 線)	$7.58 \times 10^{-3}$	
		第 4 弦 (C 線)	$1.64 \times 10^{-2}$	
$T$	弦の張力	第 2 弦 (D 線)	127.8	N
		第 3 弦 (G 線)	132.3	
		第 4 弦 (C 線)	132.8	

#### 4-2-3 撥弦シミュレーション結果・考察

撥弦時の第2弦(D線), 第3弦(G線), 第4弦(C線)における駒の変位波形を図17(a)~(c)に示す. 結果より, 弦を撥弦した直後からそれぞれの弦で駒の変位波形に周期的な振幅変動が生じていることがわかる. これは, 本モデルが弦と胴の連成系であり弦の固有周波数と胴の固有周波数が近接しているため, 連成系は2つの異なる固有モードを有しその周波数差によりうなりを生じているものと考えられる. また, 撥弦後は胴のダンパーの効果によって, 時間の経過とともに次第に減衰していく様子が示されている.

また, 弦の線密度によってうなりの周期が変化していることがわかり, 第2弦(D線), 第3弦(G線), 第4弦(C線)と弦の線密度が上がるにつれて, うなりの周期もそれぞれ  $T_s = 110 \text{ ms}, 70 \text{ ms}, 50 \text{ ms}$  と短くなっていく事がわかる. これは弦の線密度が上がることで弦の固有インピーダンスが変化し, その結果弦と胴の結合度が上がるためであると考えられる.

次に, 駒の位置における「弦の張力と弦振動による勾配」によって生ずる「弦振動が駒に及ぼす駆動力」を放射音とみなし計算した際の波形を図18に示す. 結果から, 駒の駆動力波形にも, 駒の変位波形と同様にうなりが生じている事がわかり, 線密度が上がると周期が短くなるという関係が示されている. また図17と図18を比較すると, 駒部の変位波形の方が駒の駆動力波形よりもより明瞭にうなりが生じている事がわかる. これはモデルの右端の境界(駒部)が質点-バネ-ダンパ系の単一周波数であるのに対し弦振動は高周波成分まで含むため, 駒部では弦振動よりも基本周波数成分が強調されるためであると考えられる.

続いて, 撥弦後の自由振動による弦の振動姿態を計算した. その一例として第4弦(C線)を撥弦してから  $t = 1.5 \text{ ms}, 2.7 \text{ ms}, 5.5 \text{ ms}, 14 \text{ ms}$  経過時の振動姿態を図19に示す. 弦は撥弦された直後から三角形の波が上下に往復する振動となり, 仮に減衰のない両端固定弦であればその振動を持続する事になる. しかし本モデルにおいては, 時間の経過と共に(例えば  $t = 14 \text{ ms}$  まで時間が経過した際)弦の一部に丸みが生じている. これは本モデルにおける右端の境界が単振動系であるため, 振動の過程で弦と胴の間でエネルギー交換が行われ, それに伴い胴の固有周波数に一致する弦の周波数成分が胴体に吸収されるためであると考えられる.

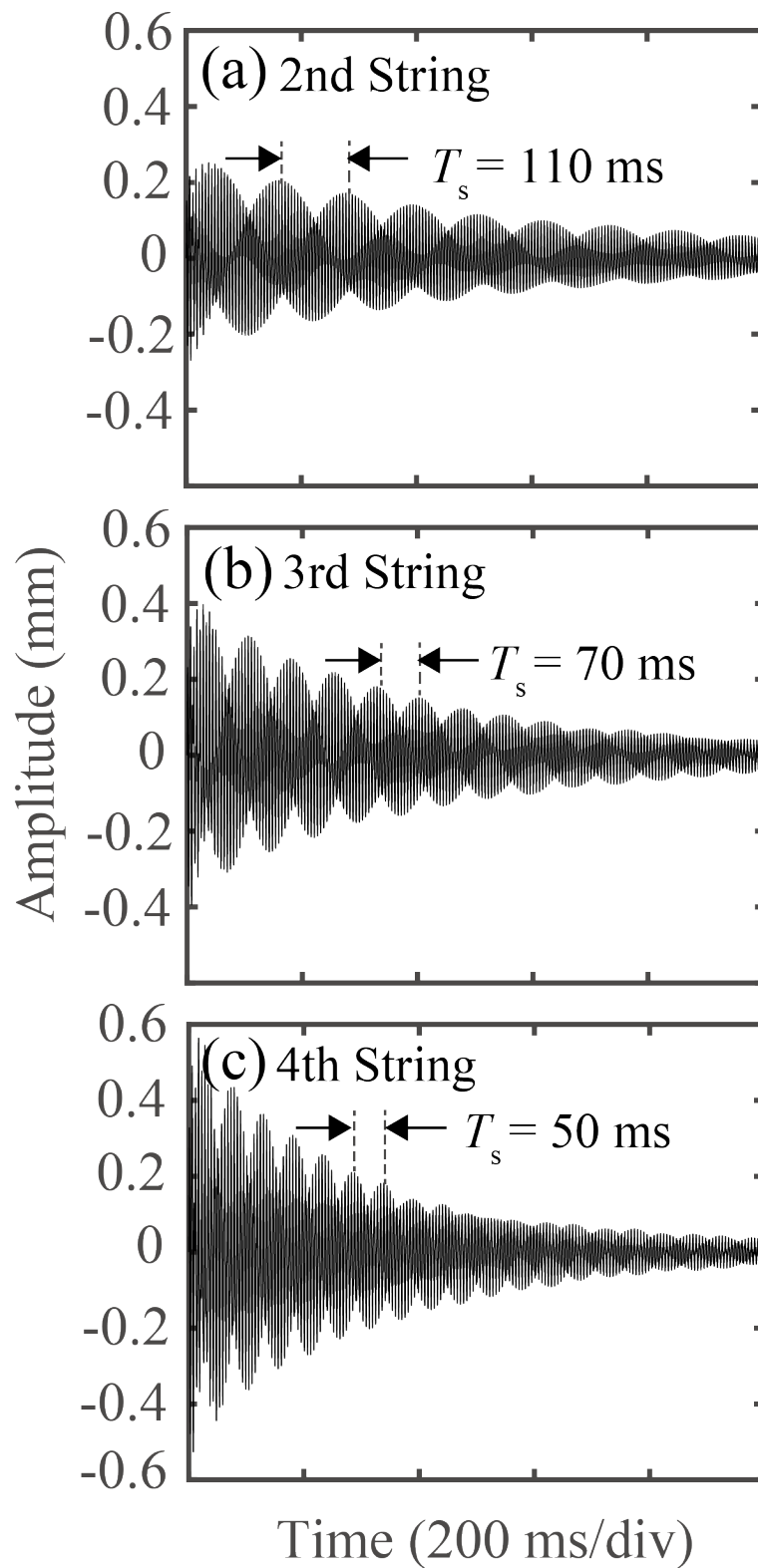


図 17 撥弦後の駒部の変位の計算結果

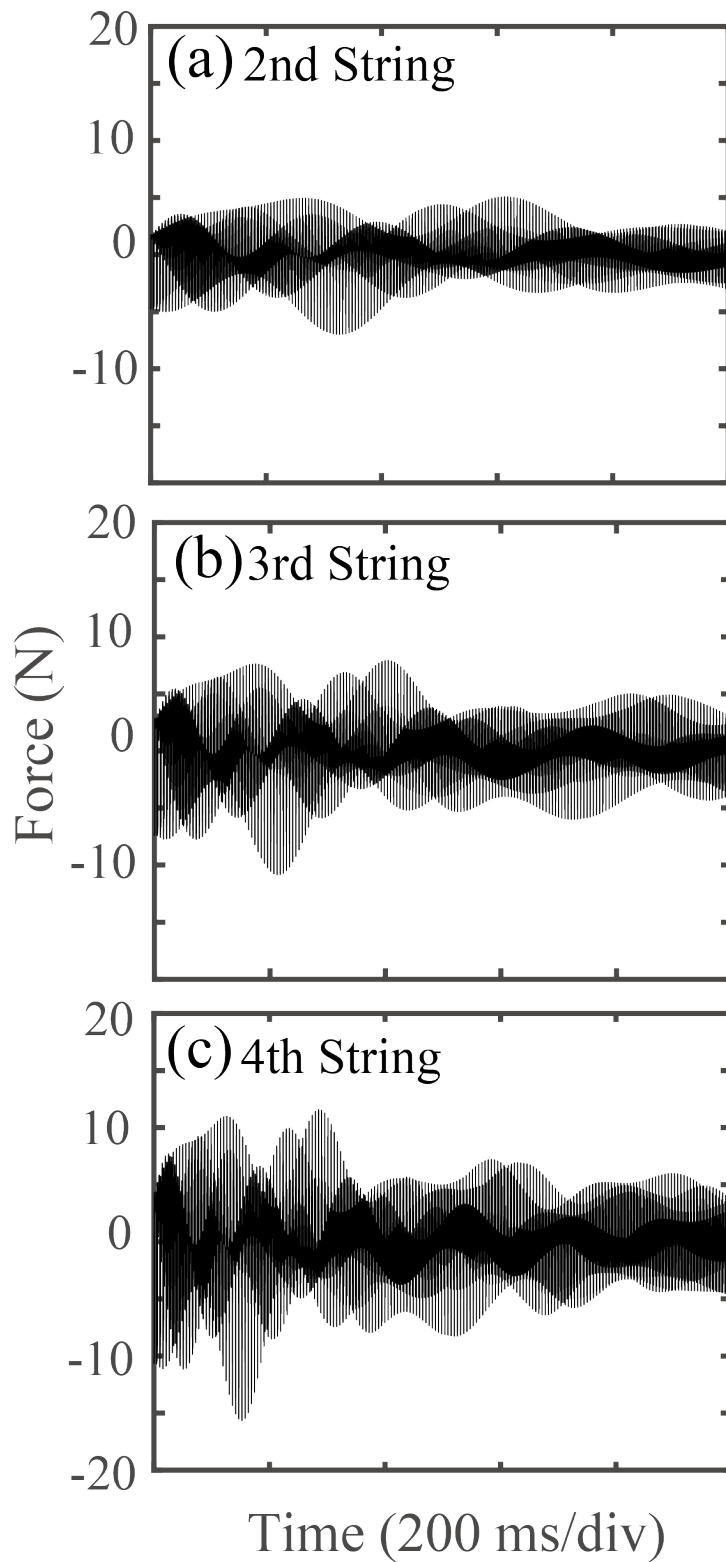


図 18 撥弦後に弦が駒に及ぼす駆動力の計算結果

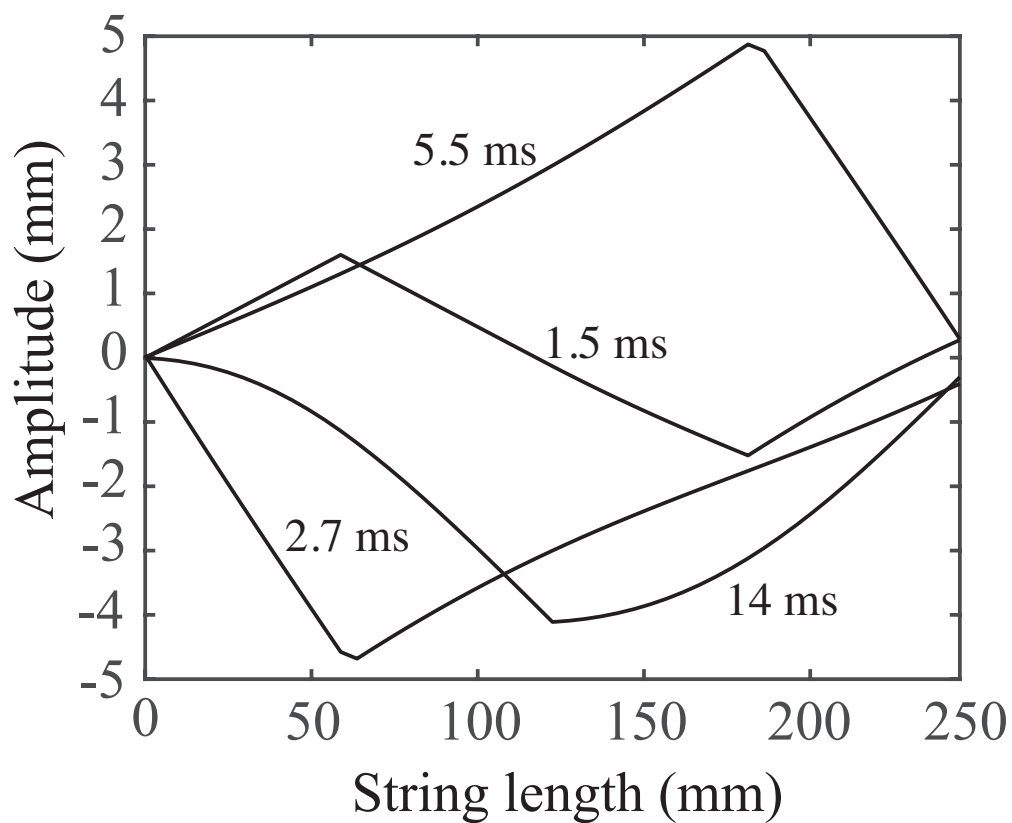


図 19 第 4 弦 (C 線) 撥弦後の振動姿態の計算結果

## 4-3 擦弦時のウルフトーンの発生

### 4-3-1 擦弦シミュレーション概要

擦弦の際に発生するウルフトーンをシミュレーションにより再現することを目的とする。まずシミュレーションにおいて弓による擦弦を表現するために、弓と弦の間の摩擦特性を擦弦点に与えることで両端固定弦において正常な擦弦の維持が可能であることを確認する。続いてウルフキラー未装着時・装着時の弦-胴連成振動モデルにおいて弓の圧力と弓の速度の組み合わせを変化させ、擦弦状態やウルフトーンの発生状態をシミュレーションすることで擦弦条件とウルフトーン発生状態の関係を明らかにする。

### 4-3-2 擦弦の関数表現とシミュレーション条件

まず、本章で示す擦弦モデルを用いて正常な擦弦を維持することが可能であることを示すため、**図 9** のモデルにおいて右端の境界も固定端とした両端固定モデルにおいて、擦弦時の弦の振動姿態を計算した。この時、擦弦点に弓と弦の間の摩擦特性を与えるために、弓と弦の間で起こるスティック&スリップ運動[15]の物理モデルが必要となる。そこで本研究においては先行研究により提案されている摩擦特性[16, 17]を採用した。摩擦特性を図示したものを**図 20**に示す。ここで横軸は弓と弦の間の相対速度、縦軸は摩擦係数である。この摩擦特性は、弦と弓の間の相対速度の値により静止摩擦と動摩擦を場合わけしており、図中の①~③それぞれの領域における摩擦係数  $\mu$  の値は式(15)~(17)で与えられる[18]。式中の  $v_{Bx}$ ,  $\mu_d$ ,  $\mu_s$ ,  $\tau$ ,  $V_r$  はそれぞれ、弓の速度の  $x$  成分、動摩擦係数、静止摩擦係数、弦と弓の間の内部摩擦減衰比、弦からみた弓の相対速度を表す。また、②の領域において、差分法では  $V_r=0$  を完全に満たすことができないため、静止摩擦と動摩擦が切り替わる  $V_r$  の値として、弓の速度  $v_{Bx}$  の 1% に相当する臨界速度  $V_c$  を定めることで直線に傾きを与えている。各式中のパラメータの値を**表 3**に示す。

$$\left\{ \begin{array}{l} \textcircled{1} \quad \mu = - \left[ \mu_d + (\mu_s - \mu_d) \exp \left\{ \frac{(V_r + V_c)}{\tau v_{Bx}} \right\} \right] \quad (V_r \leq V_c) \quad (15) \\ \textcircled{2} \quad \mu = \mu_s \left( \frac{V_r}{V_c} \right) \quad (-V_c < V_r < V_c) \quad (16) \\ \textcircled{3} \quad \mu = \left[ \mu_d + (\mu_s - \mu_d) \exp \left\{ - \frac{(V_r - V_c)}{\tau v_{Bx}} \right\} \right] \quad (V_c \leq V_r) \quad (17) \end{array} \right.$$



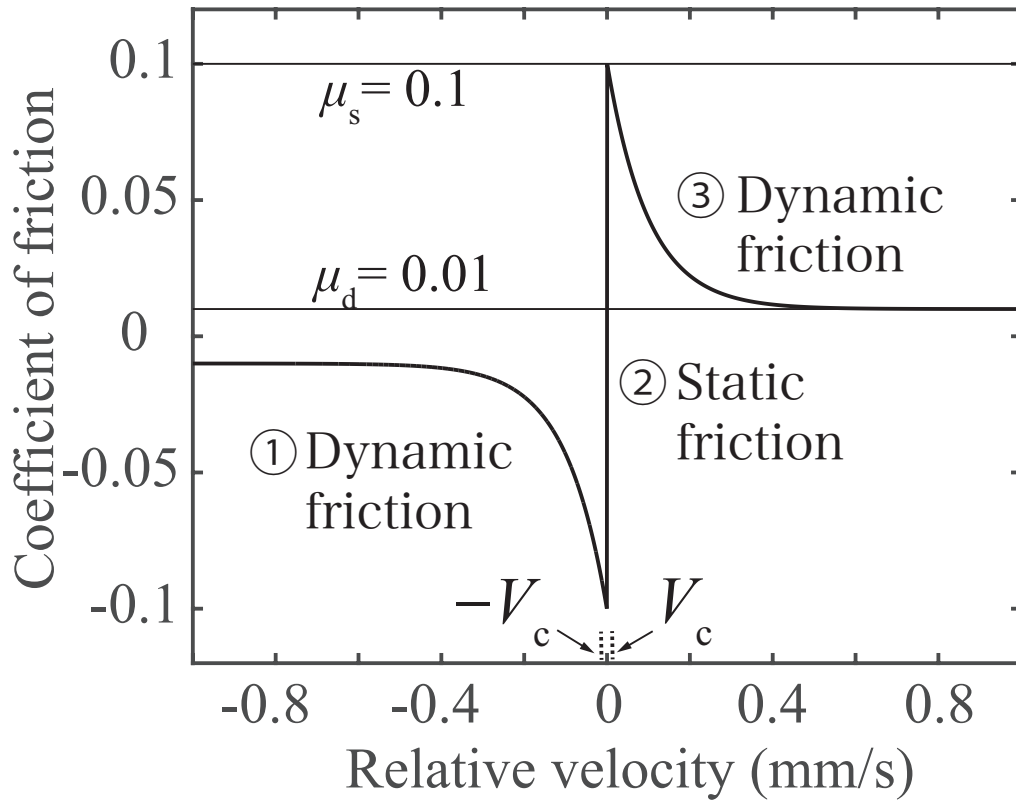


図 20 弓と弦の間の摩擦特性

表 3 擦弦シミュレーション条件

記号	変数名	数値	単位
$v_{Bx}$	弓の速度	40	mm/s
$\mu_d$	動摩擦係数	0.01	-
$\mu_s$	静止摩擦係数	0.1	-
$\tau$	内部損失係数	2.5	-
$V_c$	臨界速度	$0.01v_{Bx}$	mm/s
$\rho$	弦の線密度	$1.64 \times 10^{-2}$	kg/m
$L$	弦長	250	mm
$T$	弦の張力	132.8	N

図 20 より，弦と弓の間の相対速度が臨界速度  $V_c$  以下のとき (②の領域)，両者には静止摩擦力が働くため弦は弓にくっつくスティック状態となる．続いて相対速度が増加して臨界速度  $V_c$  を超えると静止摩擦は動摩擦に切り替わり，弦は弓からはずれ弓が弦の上を滑るスリップ状態となる (③の領域)．続いて相対速度が減少し，再び臨界速度  $V_c$  以下となると静止摩擦に切り替わりスティック状態となる．本モデルはこのようなスティックとスリップを繰り返すことにより擦弦状態を表現している．また表 3 に示した動摩擦係数  $\mu_d$ ，および静止摩擦係数  $\mu_s$  の値は実際の楽器を擦弦した際の弦の変位量  $x_0$  などから見積もった値を用いており，以下のモデルにより推定した．

擦弦中の弦の状態を示したモデルを図 21 に示す． $m_s$  は擦弦点における弦の質量であり，弦が弓から離れる (スリップする) 瞬間は  $x_0 = x_s$  で釣り合いとみなすと，質点  $m_s$  の運動方程式より，静止摩擦係数  $\mu_s$  は

$$\mu_s F_{Sy} = \frac{4T}{L} x_0 \quad (19)$$

$$\mu_s = \frac{4T}{L F_{Sy}} x_0 \quad (20)$$

$$= \frac{4T}{L F_{Sy}} x_s \quad (21)$$

と求まる．式 (21) 右辺における弦長  $L$ ，弓の圧力  $F_{Sy}$ ，弦の微小変位の値  $x_s$  は，実際の楽器を用いて測定した表 4 に示す値を用い，張力については第 4 弦 (C 線) を通常の音高である C(66 Hz) から G(49 Hz) になるように弦を緩め，その際の弦長  $L$ ，線密度  $\rho$  より算出した．なお，擦弦位置は弦の中央としている．これらの値より，静止摩擦係数は  $\mu_s = 0.1$  と求まり，動摩擦係数は式 (20) においてスリップ中の弦の変位量を  $x_0 = x_d$  として表 4 に示す値を用い， $\mu_d = 0.01$  と求まった．

シミュレーションにおける初期条件は弦がたるみなく張られた状態とし，図 22 で表される弓の速度

$$v_{Bx} = \begin{cases} 0 \text{ mm/s} & (t \leq 0) \\ 40 \text{ mm/s} & (t > 0) \end{cases} \quad (22)$$

を，擦弦点  $z = 215 \text{ mm}$  に与えた．

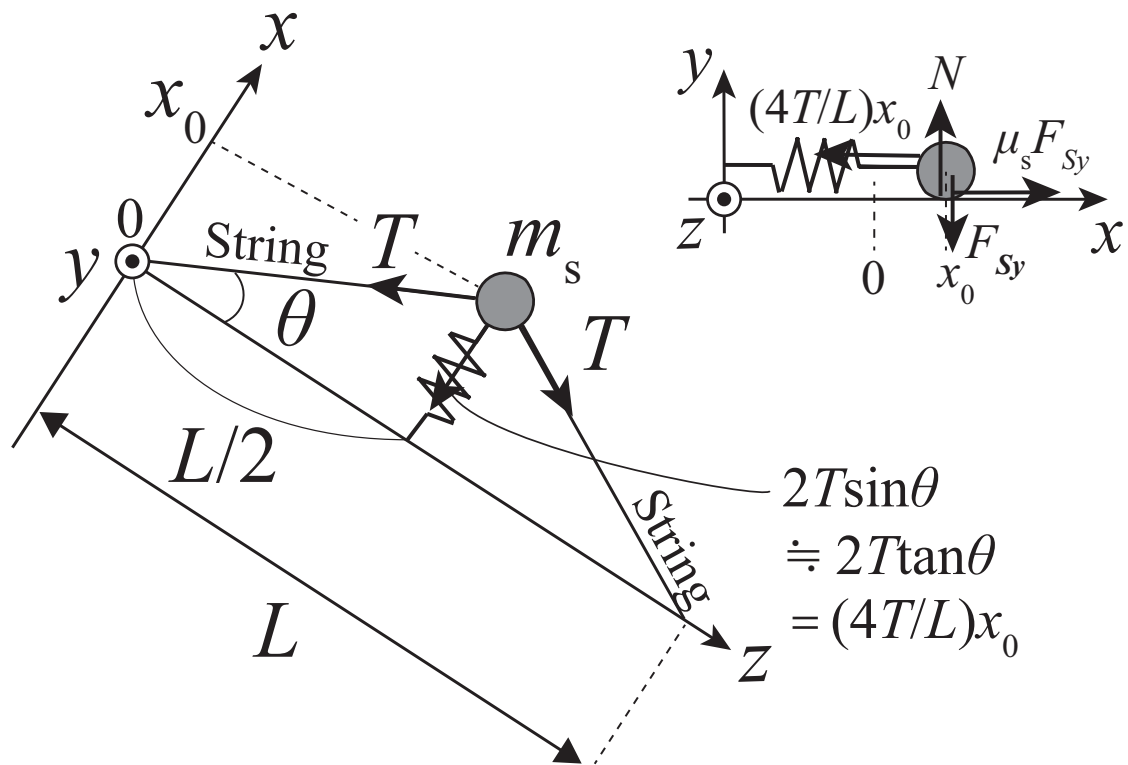


図 21 摩擦係数推定のための擦弦モデル

表 4 摩擦係数の推定に用いたパラメータ

記号	変数名	数値	単位
$F_{Sy}$	弓の圧力	2.0	N
$L$	弦長	0.7	m
$T$	弦の張力	35.6	N
$x_s$	弦が弓から外れる瞬間の 弦の微小変位	1.0	mm
$x_d$	擦弦中における弦の微小 変位	0.1	mm

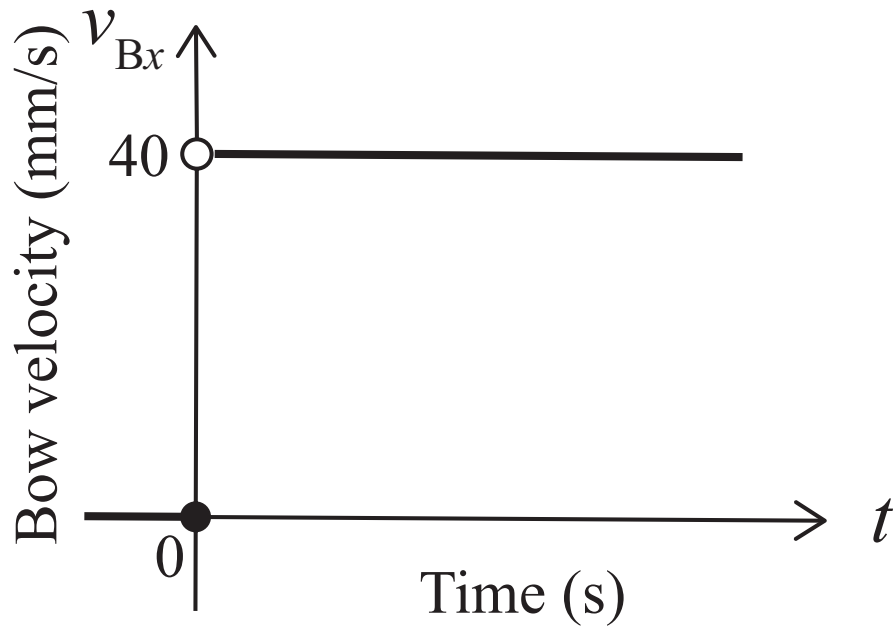


図 22 弓の速度の時間変化

以上の条件のもとでシミュレーションにより得られた擦弦時の弦の振動姿態を図 23 に示す。擦弦時の弓の圧力と弓の速度の組み合わせによって振動姿態は様々変化するが、表 3 に示した擦弦条件において、擦弦中は時間の経過と共に三角形の波（ヘルムホルツ波）が円周軌道上を周回するいわゆるヘルムホルツ運動が再現されていることがわかる[19]。また擦弦中の擦弦点における弦の変位波形を図 24 に示す。図中には擦弦点における弦の速度を併せて示している。結果より、弦の変位波形は基本モードの周期 ( $T_s \approx 5.4 \text{ ms}$ ) を有するノコギリ波がとなることが示されており、これは音が裏返らずに正常な擦弦が行えている状態であるといえる。

以上より、弦-胴連成振動モデルにおいて両端を固定した際のシミュレーションによって、擦弦条件を適切に選ぶことにより正常な擦弦状態を維持することが可能であることが示された。

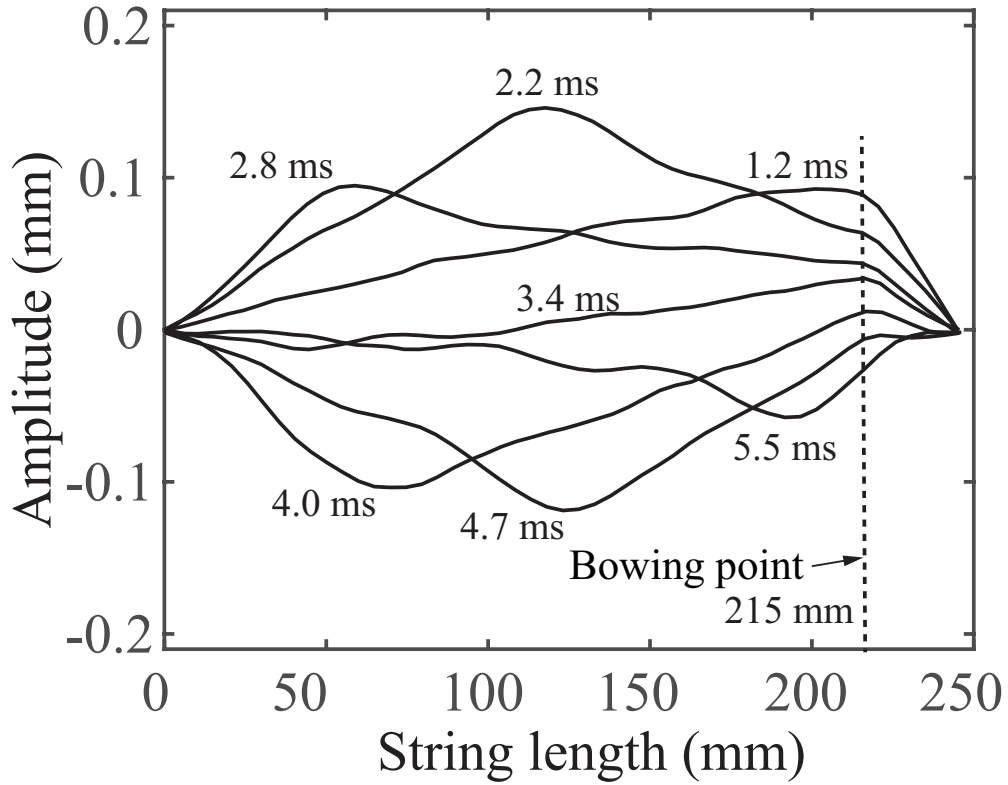


図 23 第 4 弦 (C 線) 擦弦中の弦の振動姿態の計算結果 (両端固定時)

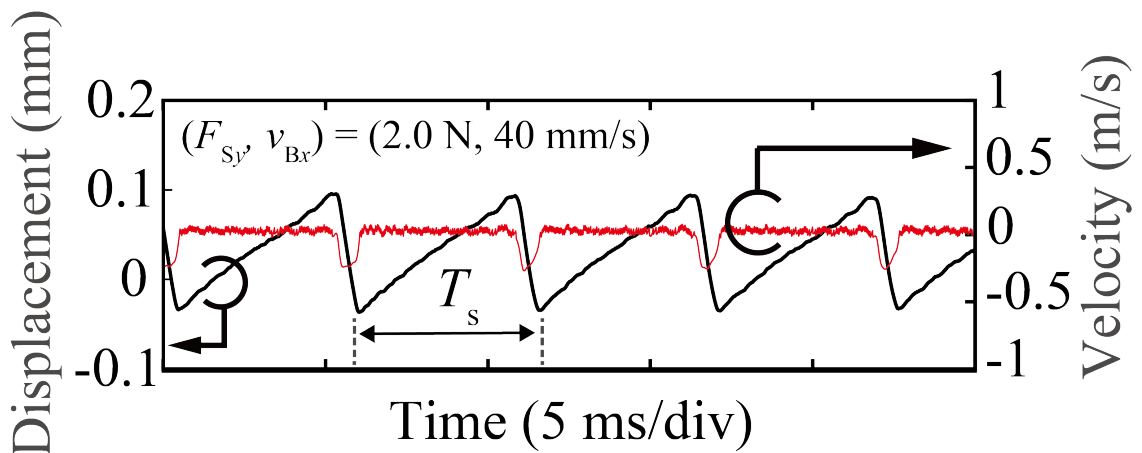


図 24 擦弦中の擦弦点における弦の変位の計算結果 (両端固定時)

#### 4-3-3 ウルフキラー未装着モデルにおけるシミュレーション結果・考察

図 9 のモデルにおいて弓の圧力と弓の速度の組み合わせを変化させ、その際の擦弦点における弦の変位と弦が駒に及ぼす駆動力を計算した。まず、弦の変位波形の例として、弓の圧力と速度の組み合わせが  $(F_{Sy}, v_{Bx}) = (3.0 \text{ N}, 50 \text{ mm/s})$ ,  $(F_{Sy}, v_{Bx}) = (1.0 \text{ N}, 30 \text{ mm/s})$ ,  $(F_{Sy}, v_{Bx}) = (1.5 \text{ N}, 80 \text{ mm/s})$  の際の計算結果を図 25 に示す。図中には擦弦点における  $x$  方向の弦の速度も併せて示している。

結果より図 25(a)は基本モードの周期 ( $T_s \approx 5.4 \text{ ms}$ ) を有するノコギリ波であり、1 度目のスティックから 2 度目のスティックの間に 1 回のみスリップしているため、演奏音は裏返らずに正常に擦弦が維持されている状態である [20]。また図 25(b)は、基本周期  $T_s$  の間に 2 回スティック及びスリップしているため  $1/2$  波長となる状態であり、基音よりも 1 オクターブ高いいわゆる「裏返った」演奏音が発生する。さらに図 25(c)の擦弦条件では、基本周期  $T_s$  の間に 3 回以上スティックとスリップが発生しており、弓が弦の上を頻繁にスリップしてしまう状態と考えられる。この時演奏音はいわゆる「かすれた」演奏音となる。

続いて弓の圧力と弓の速度の組み合わせが  $(F_{Sy}, v_{Bx}) = (2.0 \text{ N}, 30 \text{ mm/s})$ ,  $(F_{Sy}, v_{Bx}) = (2.0 \text{ N}, 40 \text{ mm/s})$ ,  $(F_{Sy}, v_{Bx}) = (2.0 \text{ N}, 60 \text{ mm/s})$ ,  $(F_{Sy}, v_{Bx}) = (2.0 \text{ N}, 80 \text{ mm/s})$  の際の弦が駒に及ぼす駆動力の波形を図 26 に示す。結果より、図 26(a)は振幅に周期的な変動が発生しない擦弦条件である一方で、弓の圧力と弓の速度の組み合わせによっては図 26(b)~(d)に示す様に周期的な振幅変動が発生することが示されている。この様な振幅変動が生じる過程を詳細に調べるために、図 26(b)の擦弦条件で擦弦を行った際の擦弦点における弦の変位波形を図 27 に示す。最初は一定のスティックとスリップが繰り返されるノコギリ波であり正常な擦弦が維持されている状態であるが、時間の経過とともにスティックの最中にスリップが一瞬発生し始めることがわかる。さらにその変位量が時間の経過と共に増加していき最終的には主たるスリップとなり、元々の主たるスリップの変位量は減少していく様子が示されている。この様な増加と減少を繰り返すことにより、振幅に周期的な変動が生じていると考えられる。これは図 5 で示したウルフトーン発生時における弦の変位と同じ挙動を示しており、この結果から図 26(b)~(d)に現れている振幅変動はウルフトーンであると考えられる。また、図 26(b)~(d)の各波形を比較することにより、ウルフトーン発生時において圧力一定のもとで弓の速度を増加させた際に、ウルフトーンの周期が短くなることが示されている。これは演奏経験上知られているウルフトーンの特徴の 1 つであり、5 章において実験的に検証を行った。

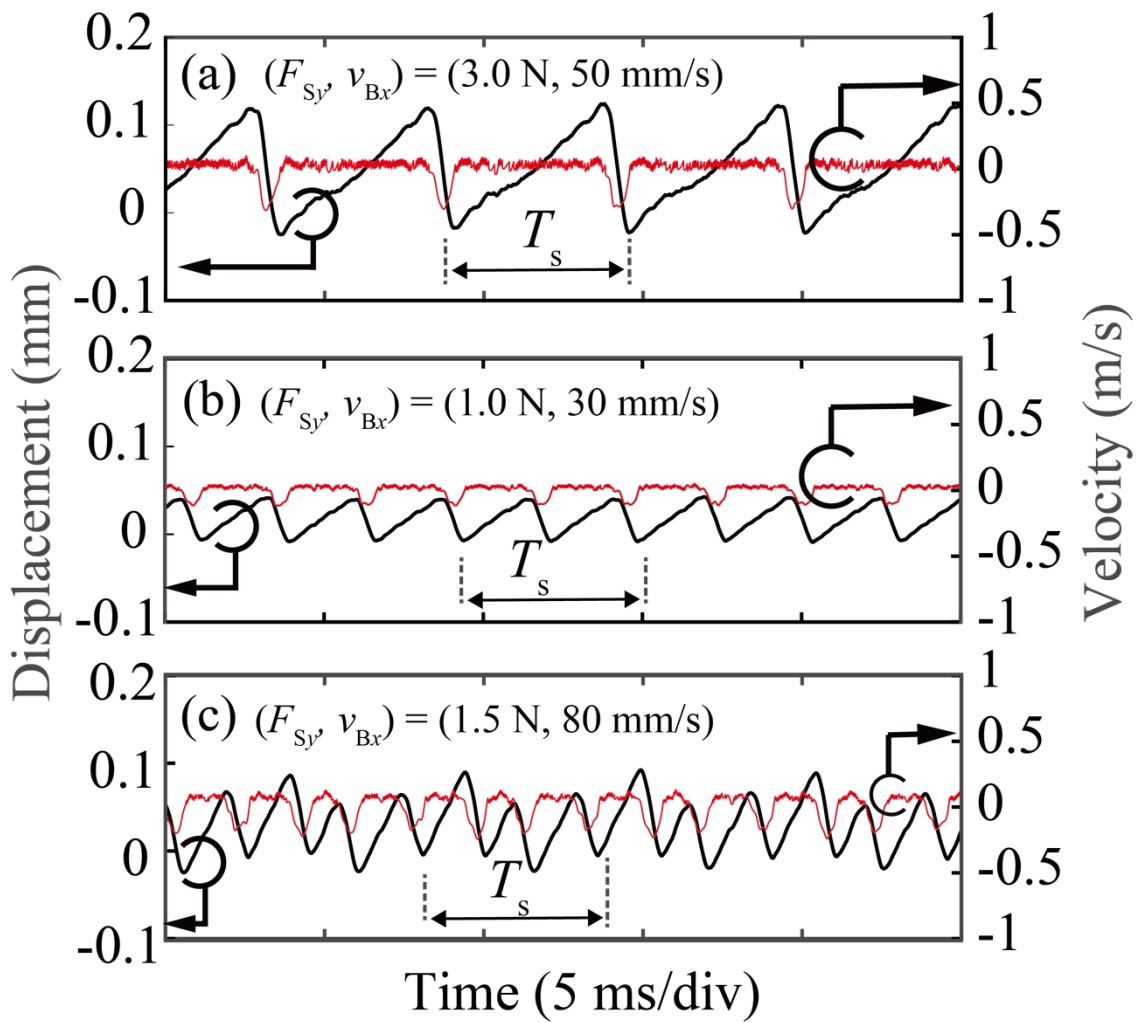


図 25 擦弦点における弦の変位および速度の計算結果 (ウルフキラー未装着時)

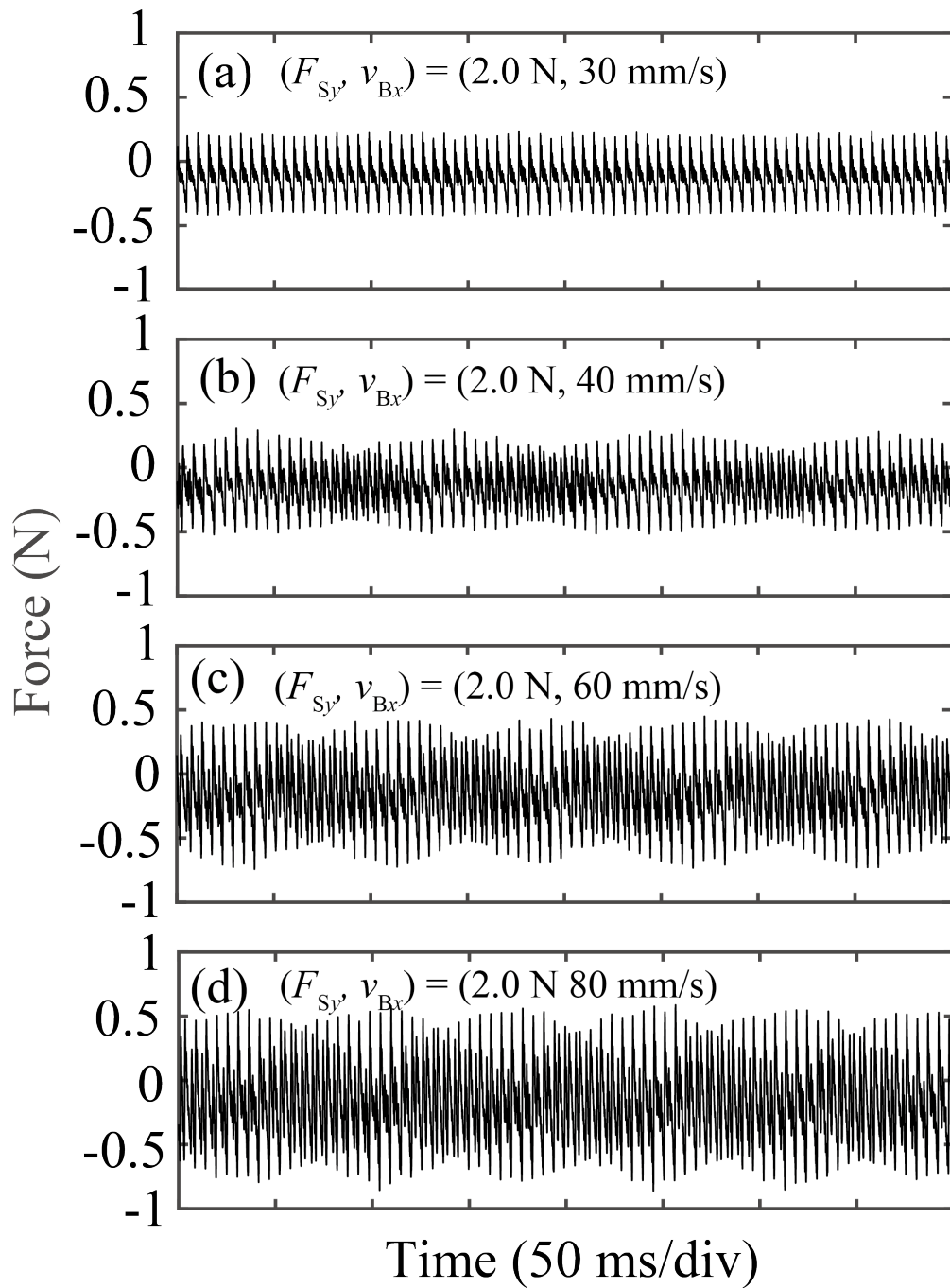


図 26 駒にかかる駆動力の計算結果 (ウルフキラー未装着時)



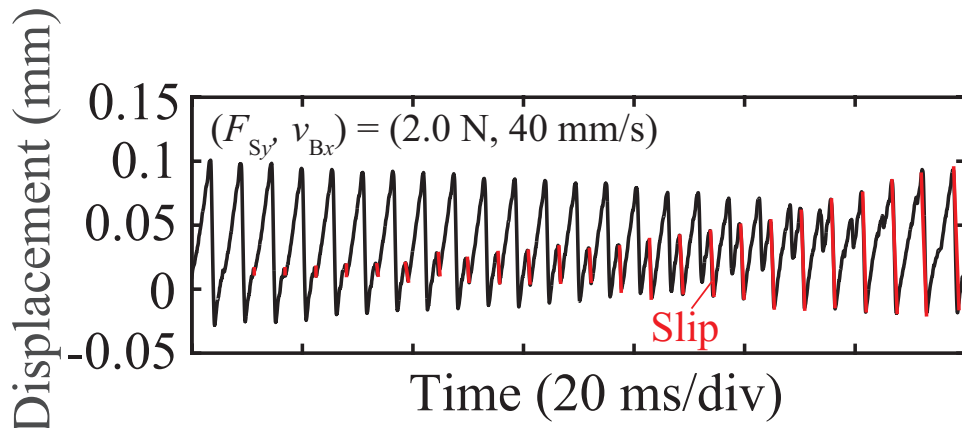


図 27 ウルフトーン発生時の擦弦点における弦の変位の計算結果

#### 4-3-4 ウルフキラー装着モデルにおけるシミュレーション結果・考察

ウルフキラー未装着時のモデルと同様に擦弦点における弦の変位や弦が駒に及ぼす駆動力を計算することで、ウルフキラー装着時のモデルにおけるウルフトーン発生状態を計算した。

まず図 25(a)~(c)と同様に  $(F_{Sy}, v_{Bx}) = (3.0 \text{ N}, 50 \text{ mm/s})$ ,  $(F_{Sy}, v_{Bx}) = (1.0 \text{ N}, 30 \text{ mm/s})$ ,  $(F_{Sy}, v_{Bx}) = (1.5 \text{ N}, 80 \text{ mm/s})$  の組み合わせにおいて、ウルフキラー装着時のモデルにおける擦弦点の弦の変位波形を図 28 に示す。図 28(a)についてウルフキラー装着前には図 25(a)に示す様に基本モード  $T_s$  の周期を有するノコギリ波であったが装着後には波形のスリップ部が乱れ、基本周期  $T_s$  の間に 2 回スティックとスリップを行う擦弦状態に変化してしまっていることがわかる。また、図 25(b)ではウルフキラー装着前には基本周期  $T_s$  の間に 2 回スティックとスリップを行っていたが、図 28(b)より装着によって基本モードの周期  $T_s$  を有するノコギリ波となる擦弦状態に変化していることがわかる。さらに図 28(c)においては図 25(c)の波形から大きな変化は見られていない。この様に、ウルフキラーは擦弦条件によって擦弦状態が悪化する場合、改善する場合、変化しない場合と様々な状態を取りうることを示されている。

次に、図 26(a)~(d)の擦弦条件と同様にウルフキラー装着時のモデルにおける  $(F_{Sy}, v_{Bx}) = (2.0 \text{ N}, 30 \text{ mm/s})$ ,  $(F_{Sy}, v_{Bx}) = (2.0 \text{ N}, 40 \text{ mm/s})$ ,  $(F_{Sy}, v_{Bx}) = (2.0 \text{ N}, 60 \text{ mm/s})$ ,  $(F_{Sy}, v_{Bx}) = (2.0 \text{ N}, 80 \text{ mm/s})$  の組み合わせの際の、弦が駒に及ぼす駆動力の波形を図 29 に示す。図 26(b)と図 29(a)を比較すると、ウルフキラー未装着モデルではウルフトーンが発生している状態であるがウルフキラー装着モデルには抑圧されることが示されており、図 29(b), (c)についても同様にその抑圧効果が得られている。さらに、

$(F_{Sy}, v_{Bx}) = (0.5 \text{ N}, 60 \text{ mm/s})$  の擦弦条件において、ウルフキラー装着前後における弦が駒に及ぼす駆動力の波形を図 30 に示す。図 30(a)はウルフキラー装着前、図 30(b)はウルフキラー装着後の波形である。この結果はウルフキラーを取り付けることにより、新たにウルフトーンが発生してしまう擦弦条件が存在することを示している。

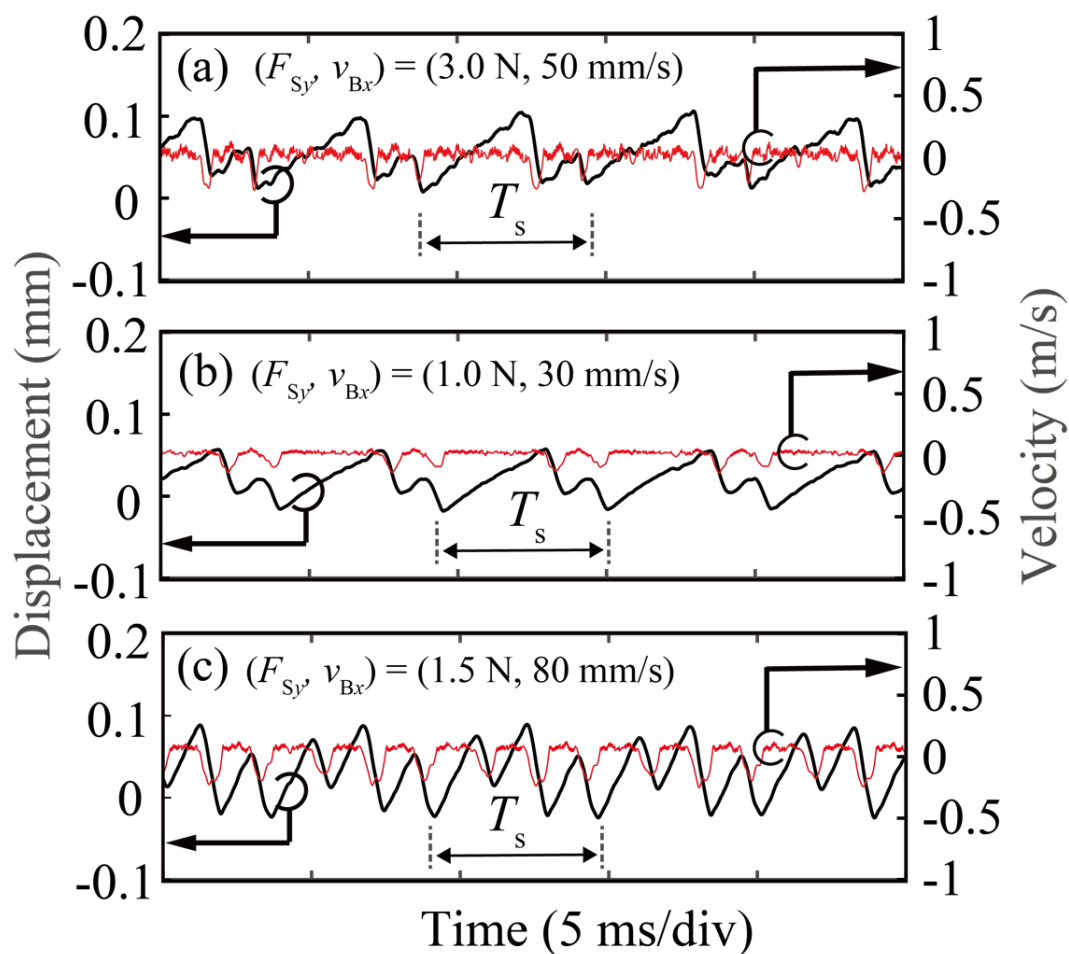


図 28 擦弦点における弦の変位および速度の計算結果 (ウルフキラー装着モデル)

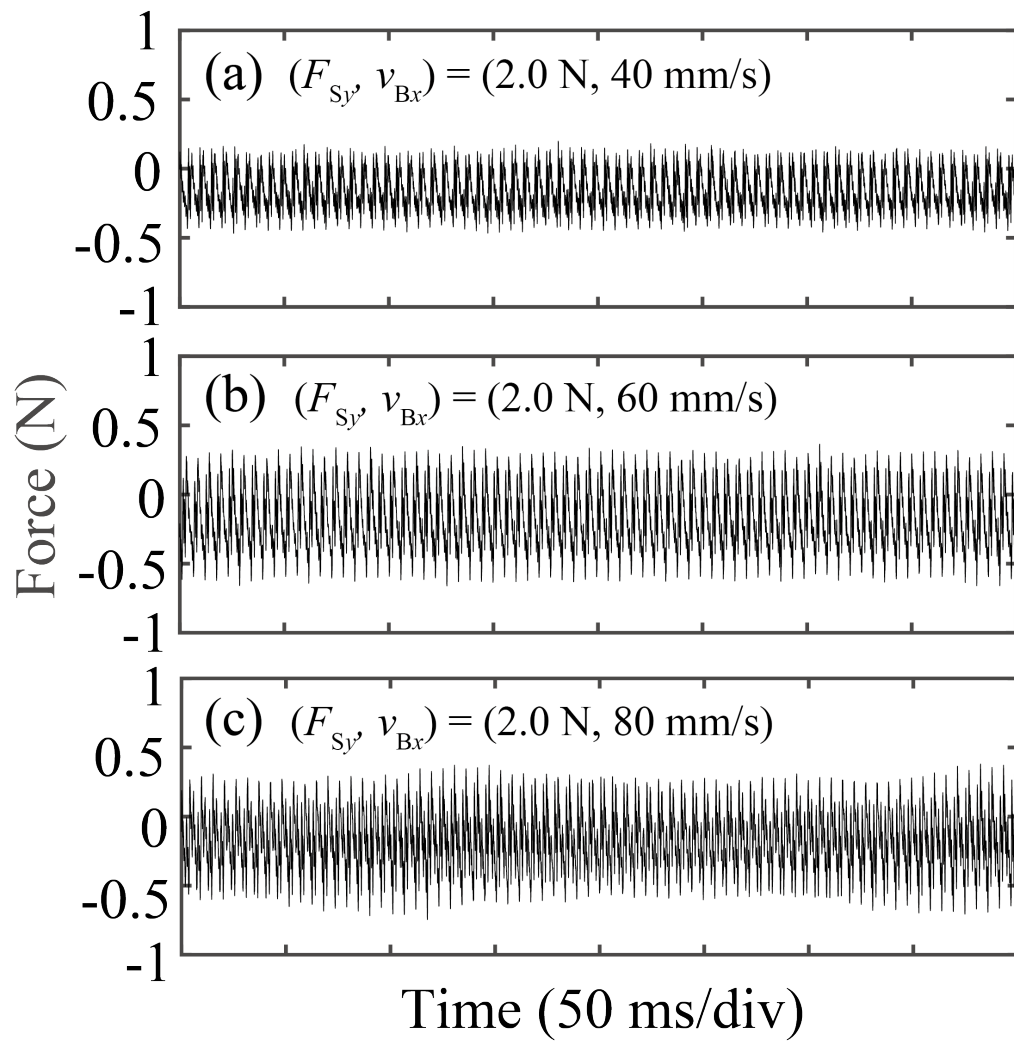


図 29 駒にかかる駆動力の計算結果 (ウルフキラー装着モデル)

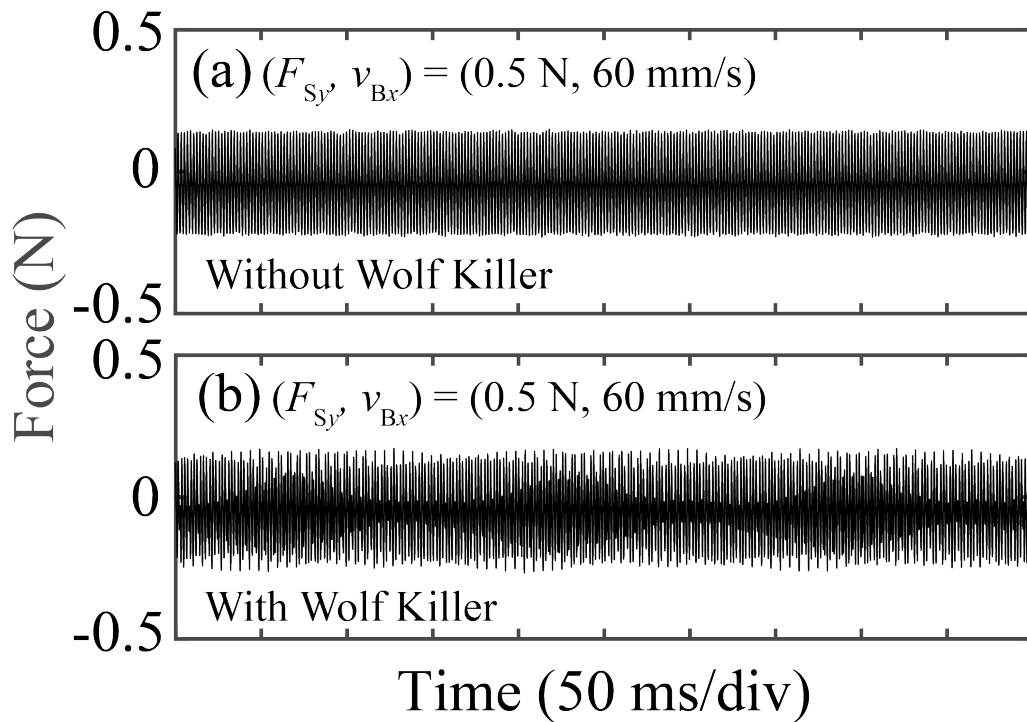


図 30 ウルフキラー未装着時・装着時の駒にかかる駆動力の計算結果

#### 4-4 まとめ

本章では撥弦及び擦弦の際に発生するウルフトーンをシミュレーションにより再現した。撥弦時のシミュレーションでは、撥弦の際に弦が駒に及ぼす駆動力の波形の振幅に変動が発生し、これは弦と胴が連成しているにより発生するうなりであることを示し、弦の線密度が大きくなるとうなりの周期も短くなるという関係を示した。

擦弦時のシミュレーションでは、擦弦点に弦と弓の間の摩擦特性を与えることで擦弦を表現し、その際の摩擦係数を擦弦時のモデルより求めた。その上で、弓の圧力と速度の組み合わせを変化させウルフトーン発生状態のシミュレーションを行った。その結果、擦弦時における弦振動（ヘルムホルツ運動）を再現するとともに、駒にかかる駆動力波形に生じる振幅変動がウルフトーンであることを明らかにした。さらに、擦弦条件によってウルフトーンの発生有無が決まることを示し、同一圧力のもとで弓の速度が速くなるとウルフトーンの周期が短くなることを示した。

また、ウルフキラーを装着することによりウルフトーンの発生を抑圧できる一方、擦弦条件によっては擦弦状態の悪化や新たにウルフトーンの発生を引き起こすことがあることを示した。



## 第5章 実験に基づくウルフトーンの発生

### 5-1 はじめに

本章ではチェロを用いた実験によりウルフトーンを発生させその放射音を解析することで、4章で得られたシミュレーション結果の妥当性を検証することを目的としている。5-2では撥弦実験によりウルフトーンを発生させ、シミュレーションにより得られた弦の線密度とウルフトーンの周期の関係の妥当性を検証する。5-3では自動擦弦装置を用いた擦弦実験[21]により、各擦弦条件におけるウルフトーン発生状態や弓の速度変化とウルフトーンの周期の関係などを明らかにし、本研究におけるモデルの妥当性を示す。

### 5-2 撥弦実験に基づくウルフトーンの発生

#### 5-2-1 実験概要

第2弦(D線)、第3弦(G線)、第4弦(C線)各弦でウルフトーンが発生する周波数となる様に押弦し、それぞれの弦を撥弦した際の放射音をリニアPCMレコーダーを用いて録音・解析した。ウルフトーン発生時は弦の線密度により周期が異なることがシミュレーション結果より得られているため、放射音の音圧波形を取得しウルフトーン発生周波数(185 Hz (F#))の成分を抽出することで線密度と周期との関係を明らかにした。

#### 5-2-2 実験条件

撥弦実験の構成図を図31に示す。リニアPCMレコーダーのマイクは駒から300mm上方に設置し、録音の際はサンプリング周波数96kHz、量子化ビット数24bitに設定した。初期条件は押弦位置を原点として駒までの距離を $L$ とした時に、 $z=3L/4$ の箇所を響板に水平な方向に5mmつまみ、初速を与えないよう静かに離した。また、弦同士の連成による影響を防ぐため、通常張られている弦のうち測定を行う弦1本のみを本体に張っている。弦を張る箇所は第3弦(G線)の位置としており、これは弦1本のみを張った際にも安定し、かつ広い範囲の弦の張力に耐えられると判断したためである。以上の条件で各弦を本来の音高に合うように張力を調整して張り、ウルフトーンの発生周波

数である 185 Hz (F#) となるように押弦箇所を固定した。また、押弦位置から糸巻き部までの弦については、振動することを防ぐため布を巻いてダンピングしている。

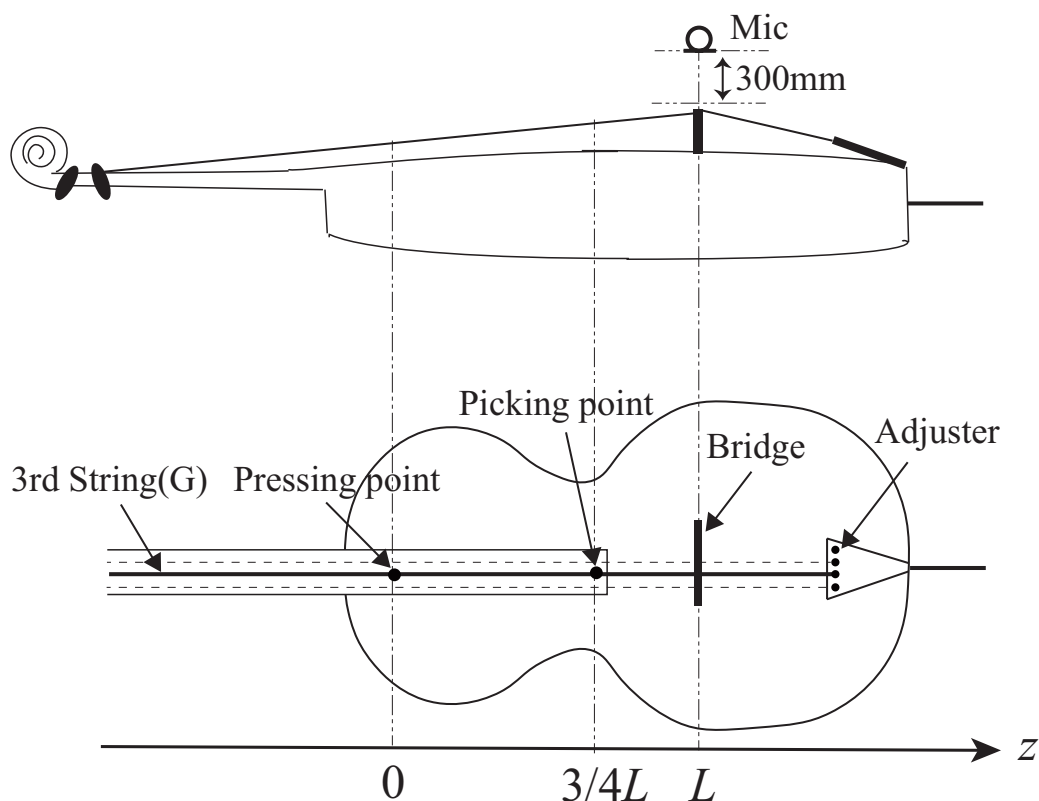


図 31 撥弦実験構成図

¥

### 5-2-3 実験結果・考察

第2弦 (D線), 第3弦 (G線), 第4弦 (C線) を撥弦した際に得られた音圧波形を 図 32(a)~(c) にそれぞれ示す。縦軸は各波形の最大振幅で規格化している。さらに 図 32(a)~(c) の各波形から同期検波法により 185 Hz の成分を抽出した結果を 図 33(a)~(c) に示す。縦軸は最大振幅値を 0 dB としている。図 33(a)~(c) それぞれの波形よりその振幅は撥弦した直後から急激に減衰し、その後緩やかな減衰に転ずる二段減衰がみられるが、これは撥弦後の弦の回転運動が寄与しているものと考えられる[22]。弦ははじかれたあと、端点であるコマの振動などの影響により時間とともに はじかれた方向とは異なる方向の振動が発生し、結果として弦は回転運動を起こす。このとき、振動方向によるモビリティの違いから、弦振動から放射音への変換効率の高い振動方向の減衰が初期の速い減衰を起こし、他方の変換効率の低い振動が後半の緩やかな減衰を起こしている

と推測される。また、ウルフトーンの周期は弦の線密度により異なり第2弦（D線）、第3弦（G線）、第4弦（C線）と弦の線密度が上がるにつれてその周期は短くなる事がわかる。

撥弦により弦が振動を開始してからのそれぞれのスペクトログラムを図 34 に示す。図 34 より、ウルフトーン発生時には各周波数成分にもうなりが生じている事がわかり、そのタイミングや周期も弦の線密度により異なる事が示されている。



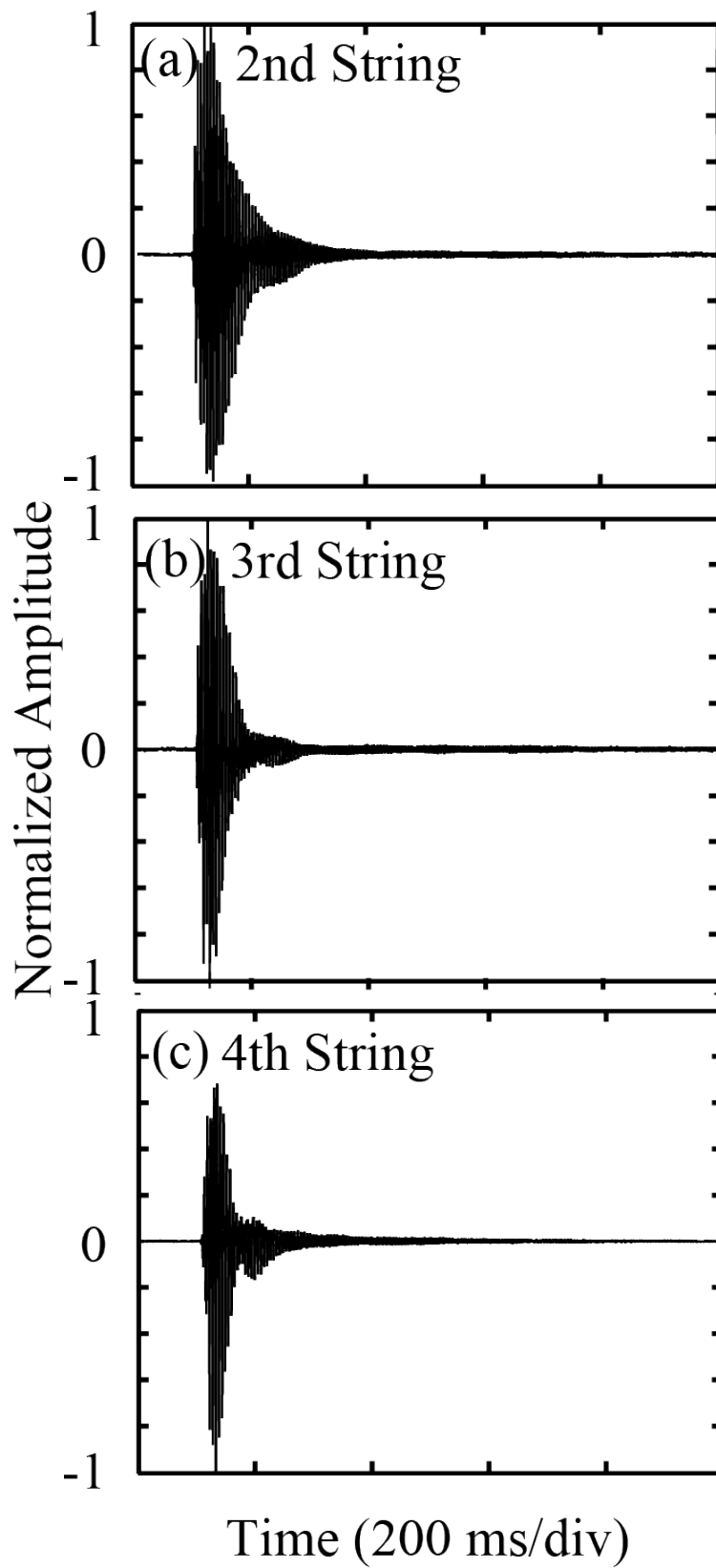


図 32 撥弦後の音圧波形

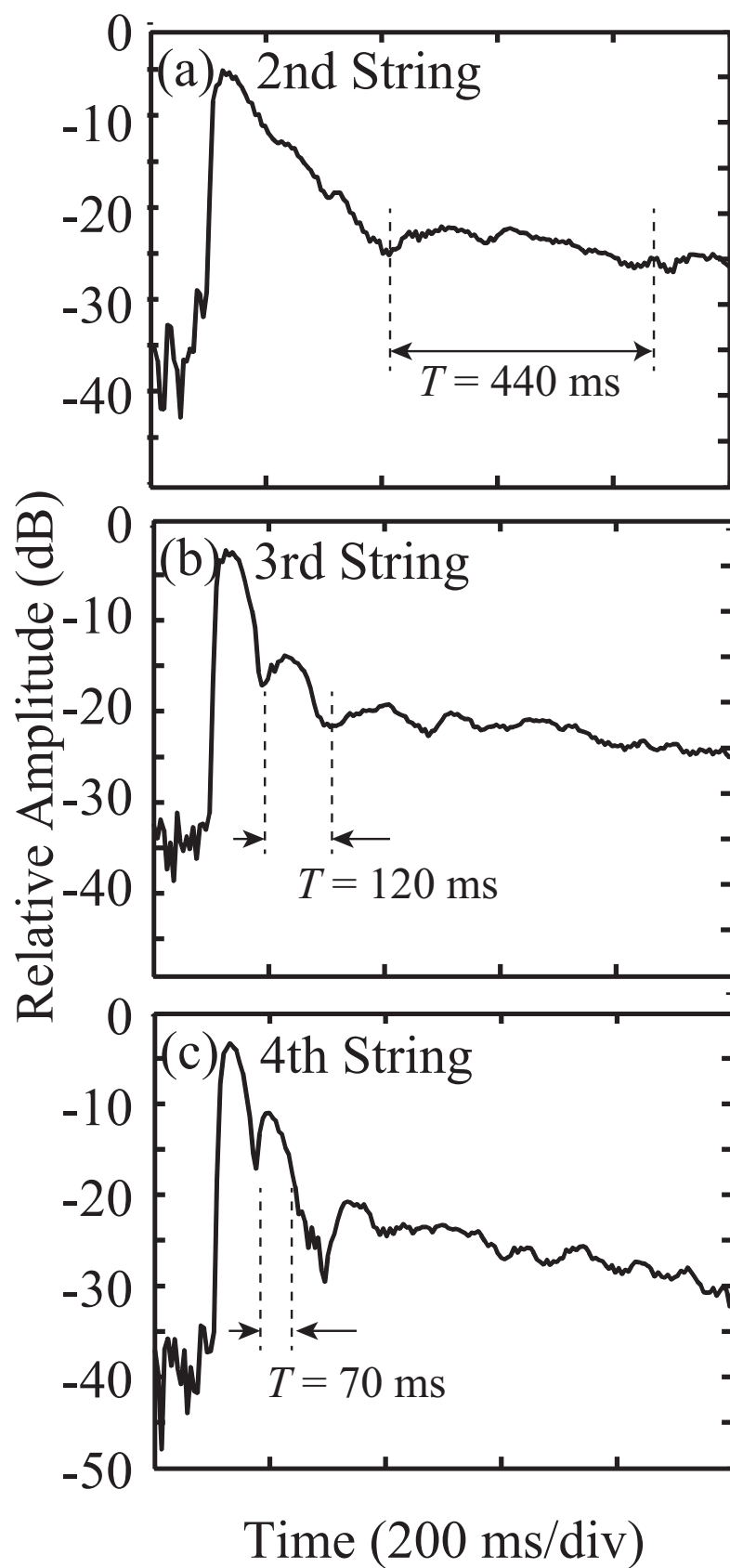


図 33 ウルフトーン発生周波数 (185Hz 成分) の抽出結果

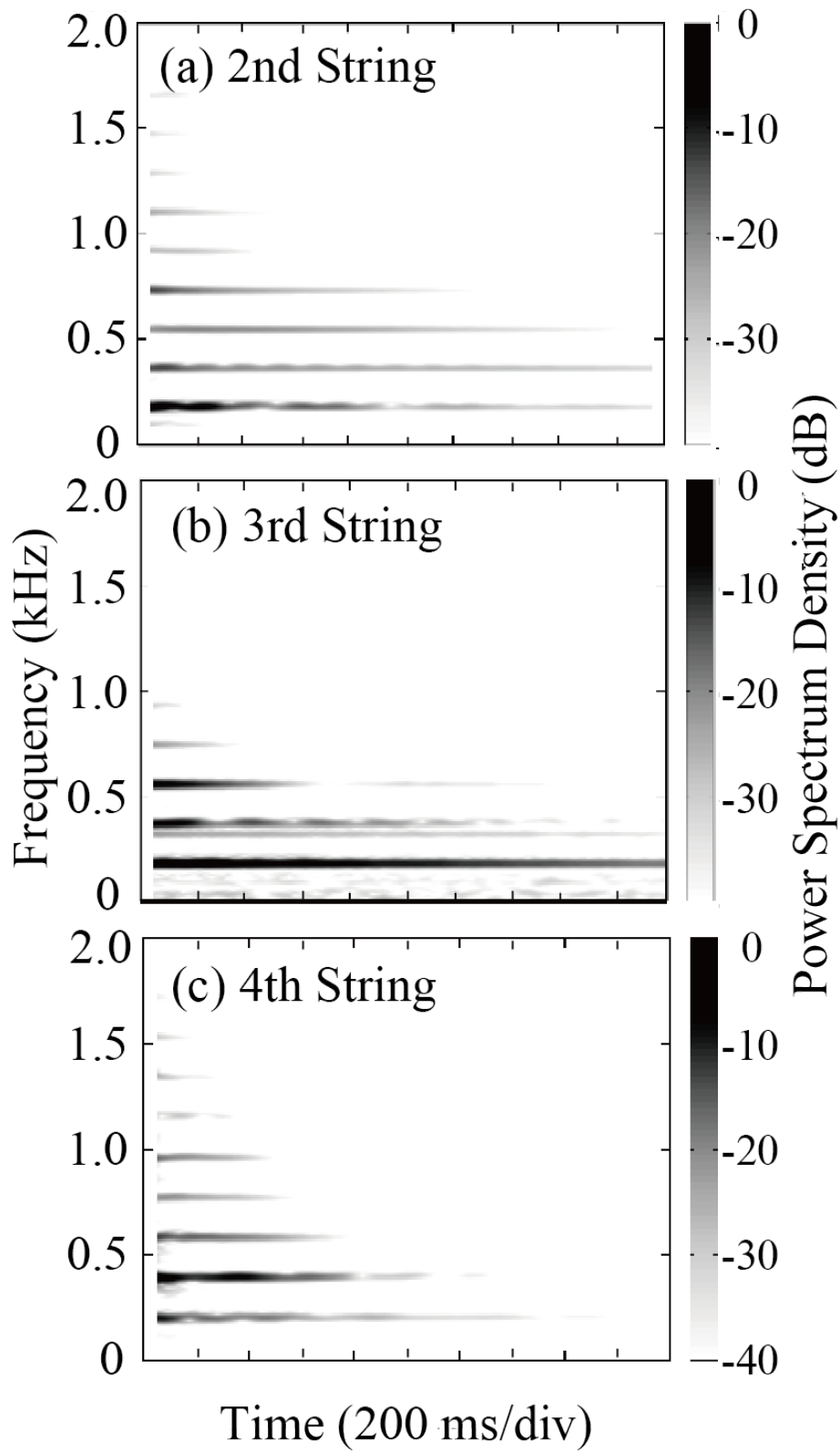


図 34 実験によるウルフトーン発生時のスペクトログラム

## 5-3 擦弦実験に基づくウルフトーンの発生

### 5-3-1 実験概要

本実験は4章で得られた擦弦シミュレーションの結果の妥当性を検証することを目的としている。実験には撥弦実験で使用したものと同一のチェロを用い、人の手による無意識的なウルフトーンの回避や一定の弓の圧力と速度を維持するため、自動擦弦装置を用いて擦弦実験を行った。その上で弓の圧力と速度の組み合わせを変えた際のウルフトーンの発生有無を検証した。

### 5-3-2 実験条件

本実験で用いた自動擦弦装置と実験構成を図 35 に示す。本装置は図中の  $x$  軸方向に駆動するリニアアクチュエーターに、金属製の L 字型のガイドを介して弓を取り付けた構造である。擦弦する弦は第4弦（C線）とし、第4弦（C線）のみを擦弦できる様に、弓の毛の表面に対する楽器の角度を調整した上で本体を固定し、ウルフトーン発生周波数の音高が発生する弦長になる様に押弦した。

弓の速度はステージの最大速度（1.2 m/s）に対して1～9%の範囲で変化させることが可能である。弓の圧力は弓が取り付けられた金属製の L 字型ガイド上の弓の持ち手部分に重りを乗せることで、0.5～3.0 N の範囲で変化させた。重りを変化させる際には、擦弦範囲の始点（A）と終点（C）およびそれら2点の中間点（B）にかかる圧力を擦弦前にバネばかりで計測し、それぞれ同一の値（誤差±3 g 以内）となる様に調整しこれを弓の圧力の値とした。このとき、L字型ガイドの腕の長さを適切に伸ばすことにより適度なたわみを与え、弓の元と先の圧力の値が近くなる様に工夫している。測定した弓の圧力を表 5 に示す。

上記の条件のもとで弓の圧力および弓の速度を変化させながら、擦弦範囲 A-B 間（46 cm）を擦弦し、楽器からの放射音をリニア PCM レコーダ（サンプリング周波数 48 kHz、量子化ビット数 24 bit）で取得した。また本実験はウルフキラー未装着時、装着時それぞれについて実施し、ウルフキラーの装着位置はウルフトーン装着時のモデルの境界条件と同様に、駒とテールピースの間に張られた弦の最も駒側に位置するように設置した。

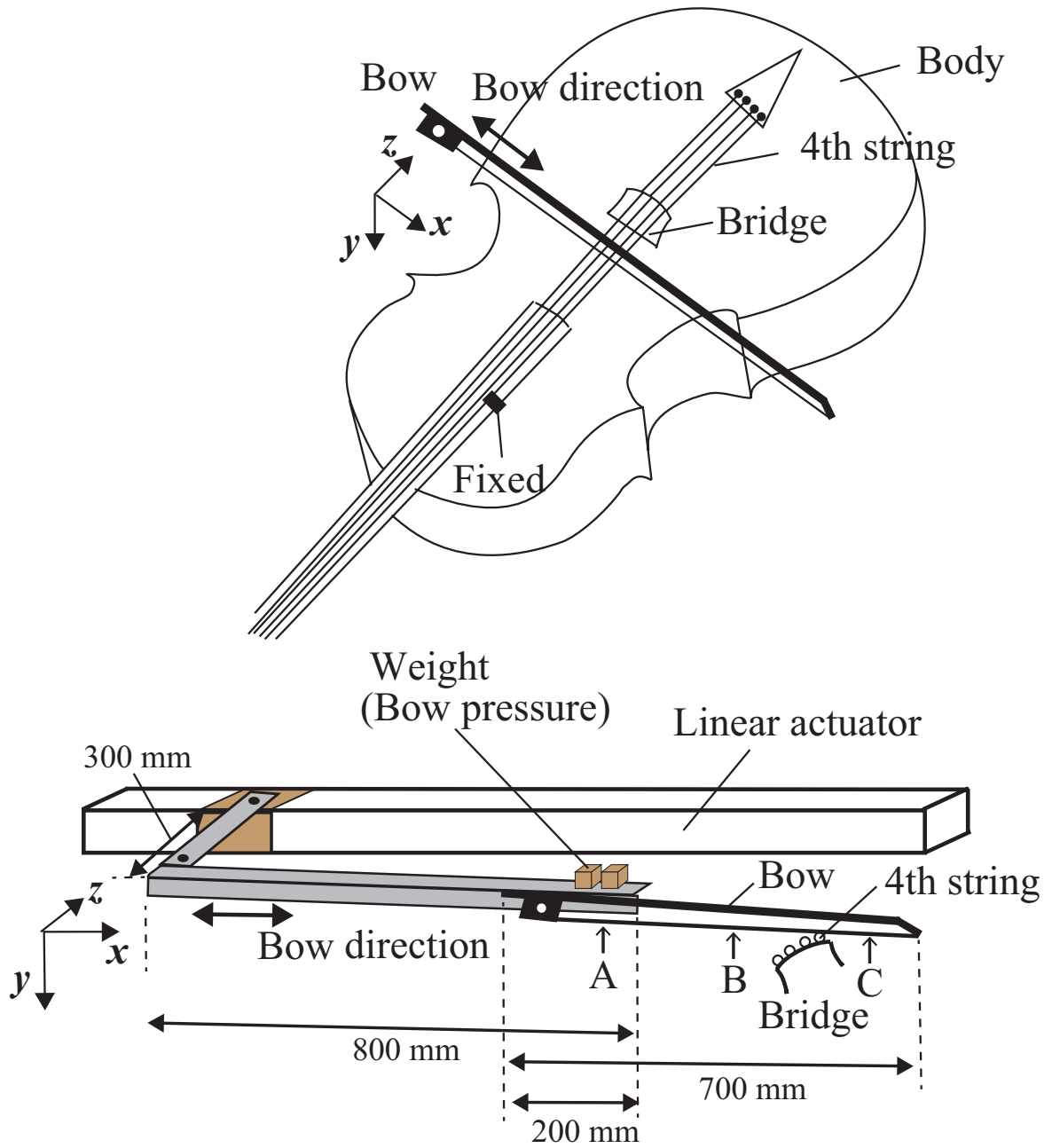


図 35 自動擦弦装置を用いた実験構成

表 5 弓の圧力の測定結果

重量(g)	測定箇所	測定値(g)	誤差(g)
50	A	52.3	+2.3
	B	49.6	-0.4
	C	48.8	-1.2
100	A	103.0	+3.0
	B	98.5	-1.5
	C	98.4	-1.6
150	A	152.4	+2.4
	B	151.7	+1.7
	C	150.1	+0.1
200	A	201.5	+1.5
	B	197.3	-2.7
	C	197.7	-2.3
250	A	251.4	+1.4
	B	249.5	-0.5
	C	249.1	-0.9
300	A	303.0	+3.0
	B	301.6	+1.6
	C	297.5	-2.5

### 5-3-3 実験結果・考察

ウルフキラー未装着時における擦弦実験によりに得られた音圧波形のうち、特徴的な例を図 36(a)~(c)に示す。図 36 のそれぞれの波形は弓の圧力  $F_{Sy}=1.5\text{ N}$  のもとで、弓の速度を  $v_{Bx}=24\text{ mm/s}$  (2%),  $72\text{ mm/s}$  (6%),  $108\text{ mm/s}$  (9%) と増加させた際の放射音の音圧波形である。ここで縦軸は最大振幅で規格化している。図 36(a)の擦弦条件では、波形の振幅は一定であり変動は生じておらずウルフトーンは発生していない状態である。図 36(b)および図 36(c)ではそれぞれの波形の振幅に周期的な振幅変動が生じておりウルフトーンが発生している状態である。この結果より弓の圧力と弓の速度の組み合わせによってウルフトーンが発生有無が決まることがわかる。さらにこれらの結果から、同一圧力のものでも弓の速度が増加するとウルフトーンの周期が短くなることが示されており、この傾向は図 26(b)~(d)に示したシミュレーション結果と一致している。

一方でウルフキラー装着時には、装着することによりウルフトーンが抑圧される擦弦条件と、装着前にはウルフトーンが発生していなかったが装着することで新たに発生してしまう擦弦条件が存在し、それぞれの例を図 37 および図 38 に示す。図 37(a), (b) はそれぞれ  $(F_{Sy}, v_{Bx}) = (1.5\text{ N}, 60\text{ mm/s})$  の擦弦条件におけるウルフキラー未装着時と装着時の放射音の音圧波形である。結果より、この擦弦条件においてはウルフキラーを装着することによりウルフトーンが解消され、ウルフキラー装着による効果が得られていることがわかる。一方、図 38(a), (b) はそれぞれ  $(F_{Sy}, v_{Bx}) = (0.5\text{ N}, 60\text{ mm/s})$  におけるウルフキラー未装着時と装着時の放射音の音圧波形である。結果よりウルフキラーを装着した際の音圧波形の振幅には周期的な変動が現れており、新たにウルフトーンが発生してしまうことがわかる。

以上より、ウルフキラーを装着することでウルフトーンが発生の抑圧が可能であるが、擦弦条件によっては新たにウルフトーンが発生してしまう事が示された。このことから、ウルフキラーはウルフトーンが発生する擦弦条件の範囲を狭める効果があると考えられる。

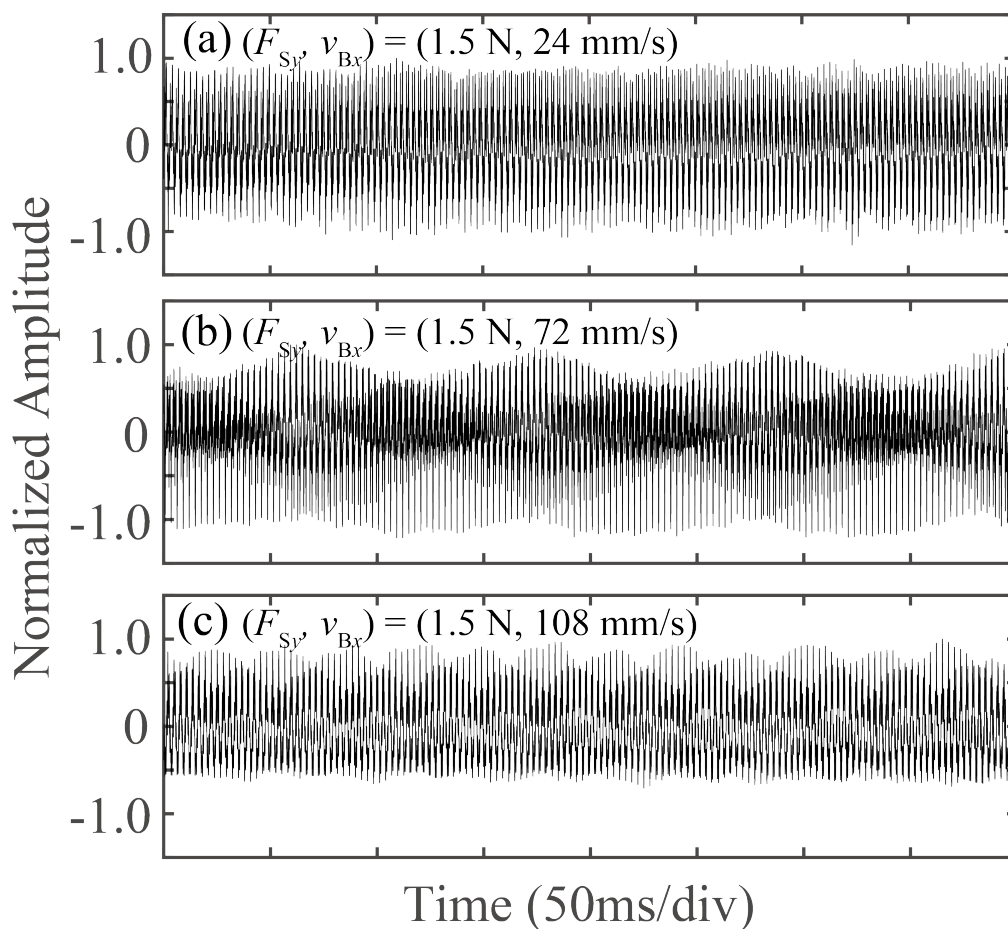


図 36 擦弦時音圧波形の実験結果 (ウルフキラー未装着時)

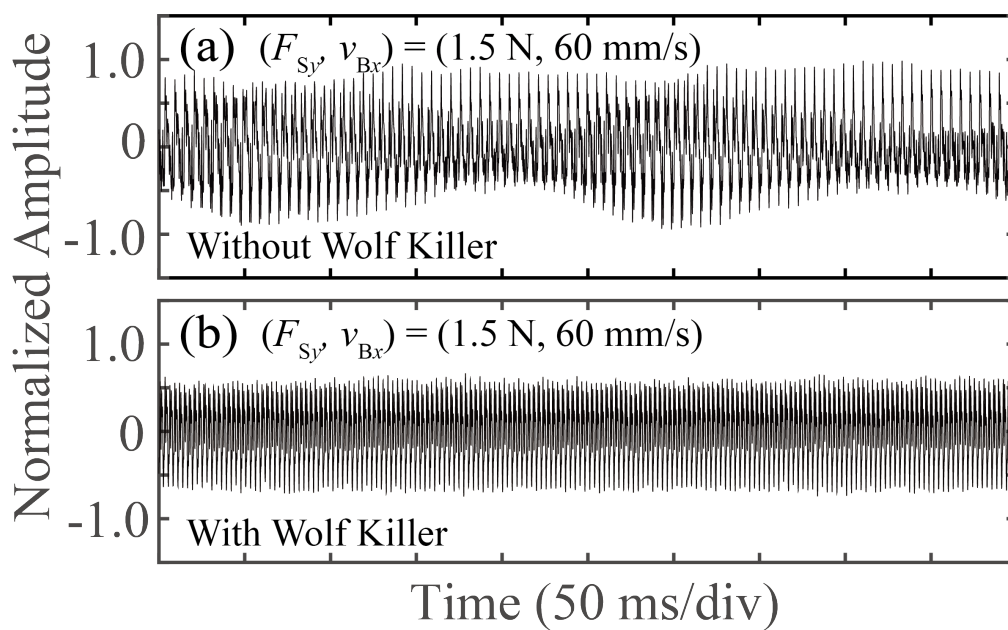


図 37 実験によるウルフトーン未装着/装着時の音圧波形比較 1



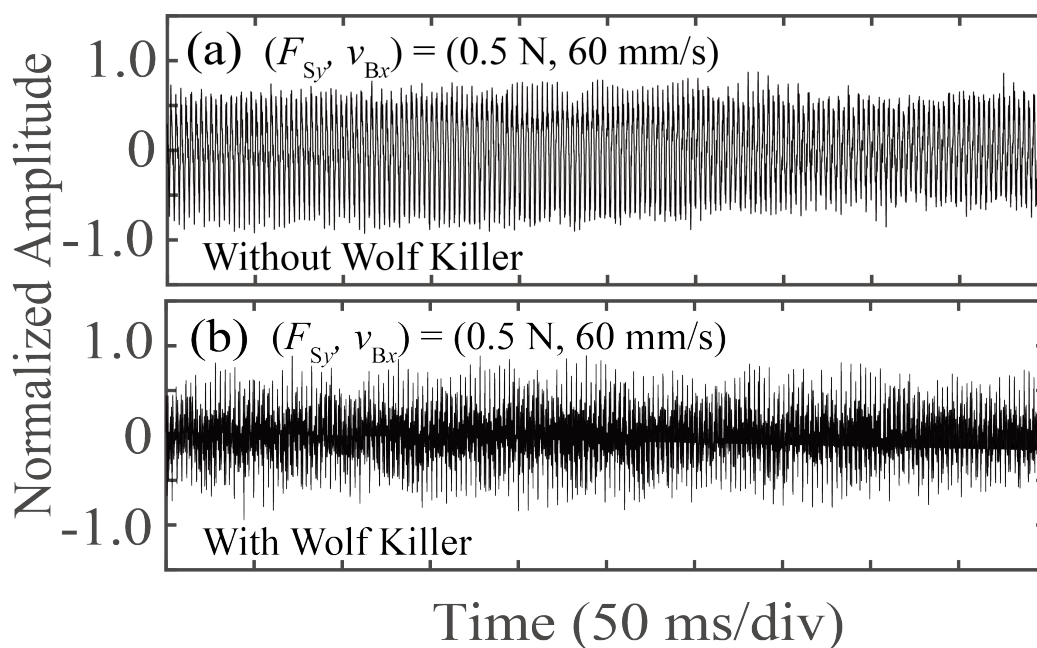


図 38 実験によるウルフキラー未装着/装着時の音圧波形比較 2

#### 5-4 まとめ

本章では撥弦及び擦弦時に発生するウルフトーンを実際の楽器を用いた実験により検証した。撥弦実験では各弦においてウルフトーンを発生させることで弦の線密度とウルフトーンの周期の関係を明らかにし、シミュレーション結果の妥当性を示した。

擦弦実験では自動擦弦装置を用いて弓の圧力と弓の速度の組み合わせを網羅的に変化させ、各擦弦条件におけるウルフトーンの発生状態を求めた。その結果実際の楽器においても擦弦条件によってウルフトーンの発生有無が決まることを示し、特に同一圧力のもとで弓の速度を増加させた際のウルフトーンの周期変化の傾向がシミュレーションと一致することを明らかにし、モデルの妥当性を示した。

さらに、ウルフキラーを装着することでウルフトーンを抑圧する効果が得られる一方、擦弦条件によっては新たにウルフトーンが発生してしまう可能性があることを示した。

## 第6章 ウルフトーン抑圧のための擦弦条件

### 6-1 はじめに

本章では4章で得られたシミュレーション結果及び5章で得られた実験結果をもとに、ウルフトーンを抑圧するための擦弦条件を示すことを目的としている。6-2では、ウルフキラー未装着時のモデルにおいて弓の圧力と弓の速度を網羅的に変化させ、その際の擦弦状態やウルフトーン発生状態を分類して2次元マップ上に示す。さらに、擦弦実験により得られた結果より作成した同様のマップと比較しその妥当性を検証する。6-3ではウルフキラー装着モデルについても同様にマップを作成し、ウルフキラーを装着する事による擦弦状態の変化やウルフトーン発生状態の変化を考察する。6-4では6-2及び6-3で得られたマップについて、プロのチェリストより受けた評価結果を示す。

### 6-2 ウルフキラー未装着時の擦弦条件

ウルフキラー未装着時のモデルを用いたシミュレーションにおいて、弓の圧力と弓の速度を変化させた際のウルフトーン発生状態を分類し、2次元平面上へマッピングを行った。まず、弓の圧力として0.5~3.0Nの範囲を0.5N間隔で、弓の速度として12~108mm/sの範囲を12mm/s間隔でこれらの組み合わせを網羅的に変化させ、擦弦点における弦の変位及び弦が駒に及ぼす駆動力を計算した。弦の変位波形を分類した擦弦状態マップを図39に示す。本マップでは擦弦点における弦の変位波形が図25(a)に示す様な基本モードの周期を有するノコギリ波形となる場合を●で示し、この状態を「正常な擦弦状態」と呼ぶことにする。一方で、図25(c)の様に1周期の間に3回以上スティックとスリップを行う際のノコギリ波形又はノコギリ波とみなす事ができない周期振動となる場合は擦弦中に頻繁にスリップしてしまう状態であり、その時の演奏音はいわゆる「かすれた状態」となり✖で示している。さらに弦が弓にスティックされず常にスリップ状態となり、自励振動が起こらない擦弦条件を/で示している。本マップから擦弦時の弓の圧力が低くかつ弓の速度が速い領域、また弓の圧力が高くかつ弓の速度が遅い領域においては正常な擦弦状態を維持出来なくなることが示されている。適切に擦弦を維持するためには、弓の圧力と弓の速度を共に増加させるか、又は弓の圧力と弓の速度を共に減少させる必要があり、そのような正常な擦弦が維持される範囲をマップ中に実線で示した。

次に、本マップの範囲の擦弦条件において擦弦を行った際にウルフトーンが発生する

領域を求めるため、各擦弦条件によるウルフトーンの発生有無を分類したウルフトーン発生状態マップを作成した。作成したマップを図 40 に示す。ここでは擦弦中に弦が駒に及ぼす駆動力を放射音とみなし、その波形においてウルフトーンが発生するか否かで分類を行っており、ウルフトーン未発生状態を●、ウルフトーン発生状態を✕、自励振動が起こらない擦弦条件を/で示している。さらに、マップ中には図 39 における正常に擦弦できる領域を実線で示している。本研究における抑圧対象は、「正常な擦弦状態において発生しているウルフトーン」であり、図 40 の実線領域内にあり、かつ✕で示された領域が該当する。この時擦弦条件を変えることでウルフトーンを抑圧するためには、実線領域内において●で示される擦弦条件で擦弦することが必要であることを意味している。そしてそのためには、「弓の圧力を増加させつつ速度を減速させる」ことが必要であることが本マップより示されている。

続いて本マップの妥当性を検証するため、5章の擦弦実験より得られた放射音の音圧波形よりウルフトーンの発生状態を同様に調べ、実際の楽器におけるウルフトーン発生状態マップを作成した。この時弓の圧力は0.5~3.0Nの範囲とし、弓の速度は自動擦弦装置のステージの最大速度(1.2 m/s)に対して1~9%(12~108 mm/s)の範囲で変化させた。実験により得られたウルフトーン発生状態マップを図 41 に示す。マップ中の実線は、聴感上明らかに音が裏返らずに正常な擦弦が行われていると判断される擦弦状態の範囲を示している。本マップより、ウルフトーンを抑圧するためにはマップ中の実線領域内において✕で示されるウルフトーン発生状態から、実線領域内において●で示される擦弦条件に変えることが必要となるが、そのためには「弓の圧力を増加させつつ弓の速度を減速させる」ことが必要であることが示されている。これはシミュレーションにより得られた傾向と一致する結果であり、シミュレーション結果の妥当性を示すものである。

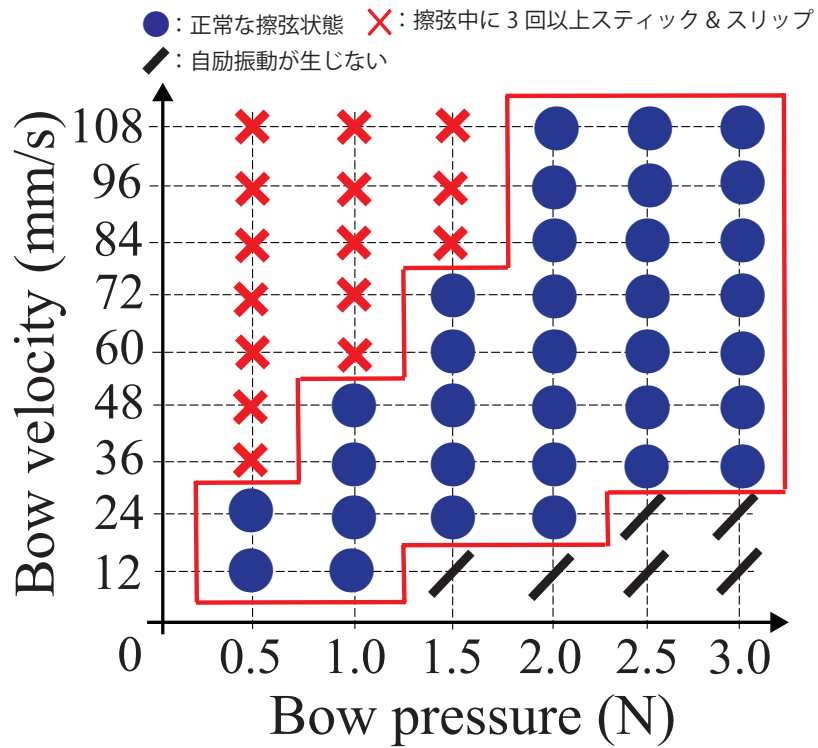


図 39 計算により得られた擦弦状態マップ(ウルフキラー未装着時)

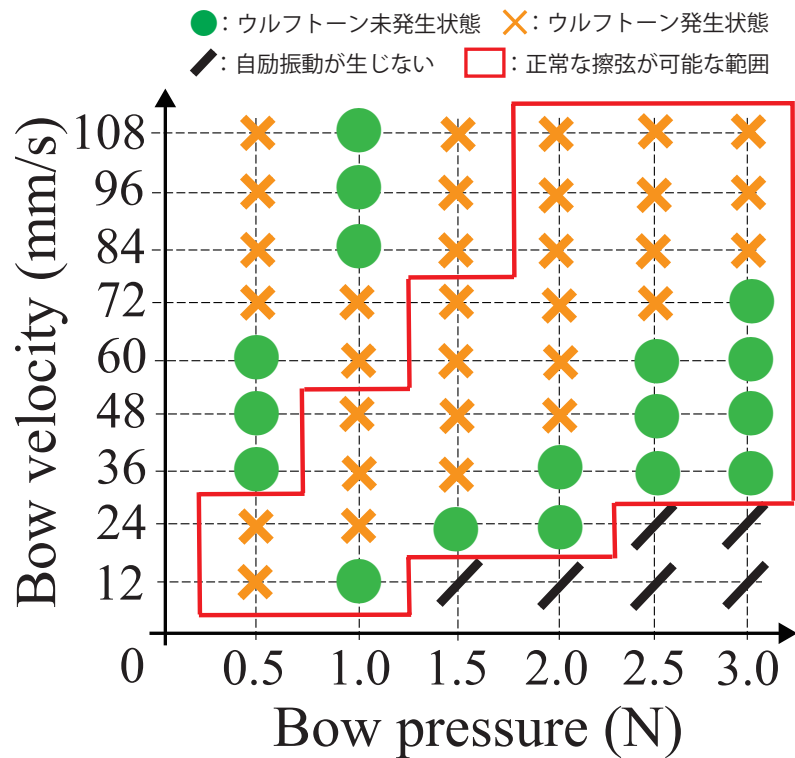


図 40 計算により得られたウルフトーン発生状態マップ (ウルフキラー未装着時)

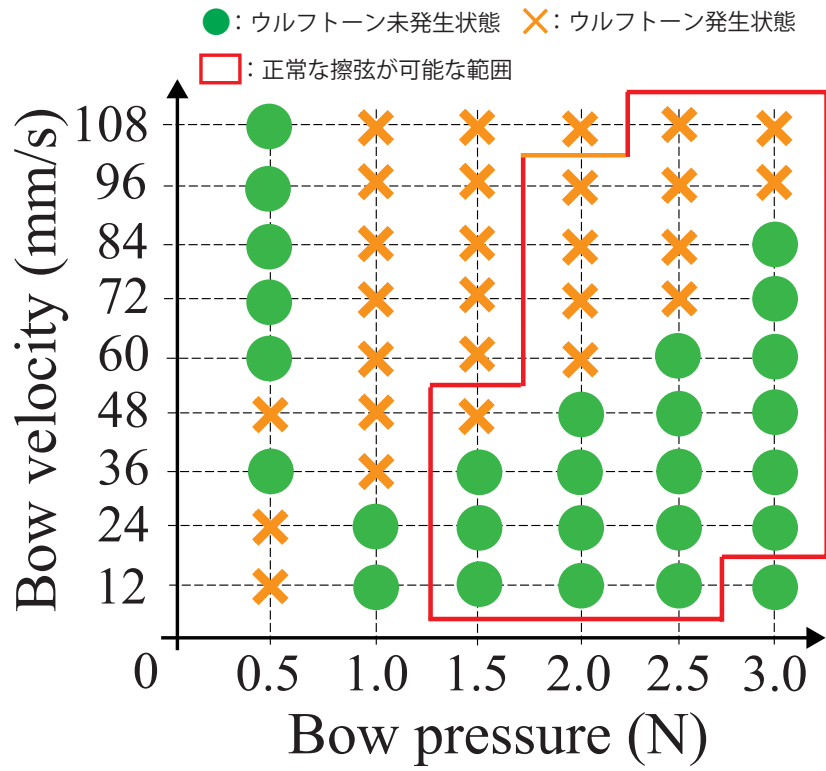


図 41 実験により得られたウルフトーン発生状態マップ (ウルフキラー未装着時)

### 6-3 ウルフキラー装着時の擦弦条件

ウルフキラー装着時のモデルにおけるシミュレーションにおいて、弓の圧力と弓の速度を変化させた際の擦弦状態とウルフトーンが発生状態を分類し、2次元平面上にマッピングを行った。ウルフキラー未装着時と同様に弓の圧力 0.5~3.0 N の範囲を 0.5 N 間隔で、弓の速度 12~108 mm/s の範囲を 12 mm/s 間隔でこれらの組み合わせを網羅的に変化させ、擦弦点における弦の変位及び弦が駒に及ぼす駆動力を計算した。得られた擦弦状態マップを図 42 に示す。ここで正常な擦弦状態を●、1周期の間に2回スティックとスリップを行う際のノコギリ波形を▲、1周期の間に3回以上スティックとスリップを行う際のノコギリ波形又はノコギリ波とみなす事ができない周期振動となる波形を✖で示し、/は自励振動が起こらない擦弦条件であることを示している。図 39 と図 42 の比較から、ウルフキラーを装着することにより、正常に擦弦可能な範囲は弓の圧力が低く弓の速度が速い領域側にシフトしていることがわかる。その結果、「ウルフキラー未装着時には正常な擦弦を維持できないが、装着することにより維持できるようになる組み合わせ」、及び「未装着時には正常に擦弦が維持できていたが、装着により維持できなくなる組み合わせ」がそれぞれ存在することがわかる。

次に、ウルフキラー装着時におけるウルフトーン発生領域を求めるため、図 40 と同様にウルフトーン発生状態マップを作成した。作成したマップを図 43 に示す。ウルフトーン未発生状態を●、ウルフトーン発生状態を✖、自励振動が起こらない擦弦条件を/で示している。ここでマップ中の実線は図 42 より得られた正常な擦弦を維持できる擦弦条件の範囲である。

図 40 と図 43 の比較より、ウルフキラーを装着した場合「正常な擦弦状態かつウルフトーンが発生しない領域」が広がり、ウルフキラーによる抑圧効果が見られることがわかる（破線領域）。また、本マップよりマップ中の実線領域内において✖で示されたウルフトーン発生状態から●で示された擦弦条件に変えることでウルフトーンの抑圧が可能であり、そのためにはウルフキラー未装着時と同様に「弓の圧力を増加させつつ弓の速度を減速させる」ことが必要であることが示されている。

続いて、本マップの妥当性を検証するため、ウルフキラーを装着した状態で行った擦弦実験により得られた放射音の音圧波形を図 41 と同様に分類し、ウルフキラー装着時のウルフトーン発生状態マップを作成した。作成したマップを図 44 に示す。マップ中には聴感上音が裏返らずに正常な擦弦が行えていると判断される範囲を実線で示している。本マップより、正常な擦弦が可能となる領域は、シミュレーションと同様に、弓の圧力が低く弓の速度が速い領域側にシフトしていることがわかる。また、実線内の領域において、同一圧力のもとで弓の速度を増加させることで抑圧効果が見られている。

さらに、ウルフキラーを装着した場合においても、実線領域内において✕で示したウルフトーン発生状態から実線領域内の●で示した擦弦条件に変えることでウルフトーンが抑圧されるが、そのためには「弓の圧力を増加させつつ弓の速度を減速させる」ことが必要であることが示されている。この傾向はシミュレーションで得られた結果と一致しており、ウルフキラー装着時のウルフトーン発生状態マップについてもその妥当性が示された。

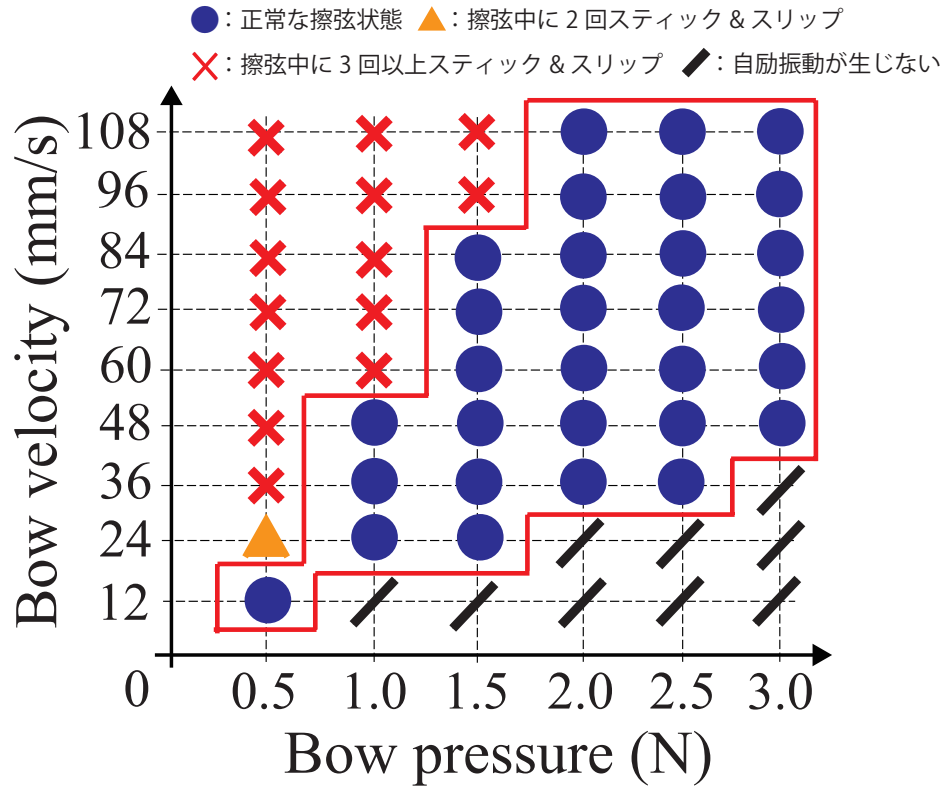


図 42 計算により得られた擦弦状態マップ(ウルフキラー装着時)

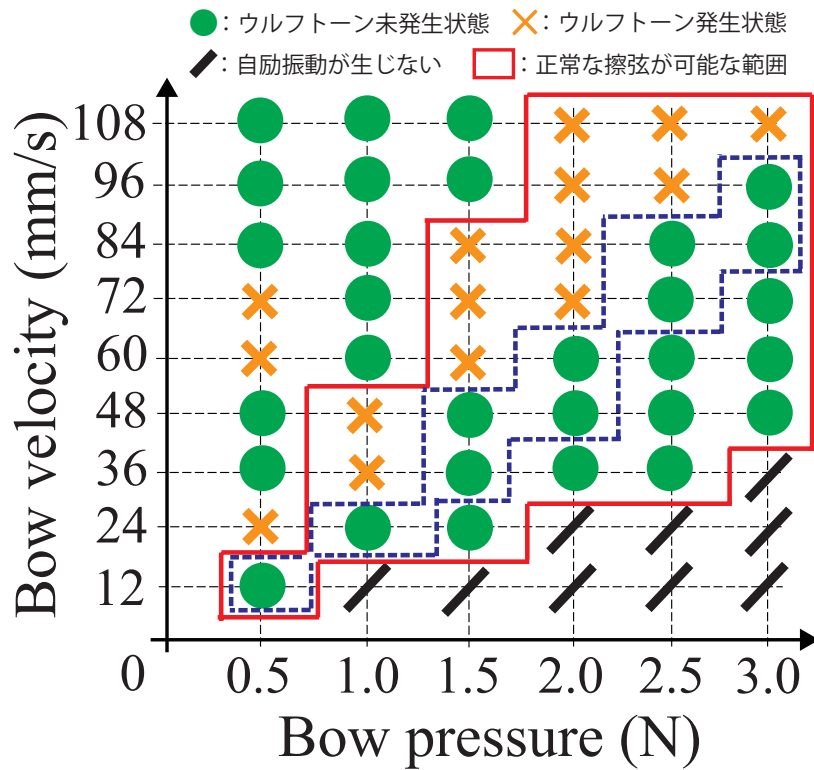


図 43 計算により得られたウルフトーン発生状態マップ (ウルフキラー装着時)



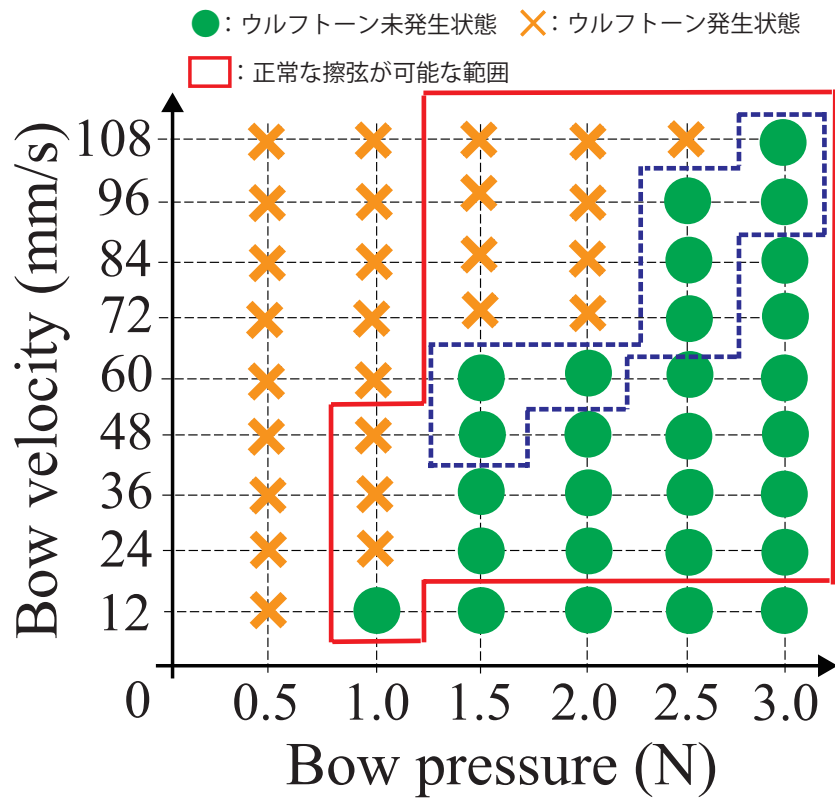


図 44 実験により得られたウルフトーン発生状態マップ (ウルフキラー装着時)

## 6-4 演奏家からみたウルフトーン発生状態マップの評価と妥当性

ウルフトーン発生状態マップより示されたウルフトーンの抑圧が可能な擦弦条件を実際の演奏や練習方法にフィードバックするため、長年演奏家として活躍されているチェリストである前田善彦氏(武蔵野音楽大学卒業、チェロを清水勝雄氏、室内楽をL.グレーラー、U.コッホの両氏に師事、アメリカのポートランド弦楽四重奏団と共演するなど、室内楽の分野で積極的に活動を行う。古典音楽協会所属、武蔵野音楽学園講師。)と意見交換を実施した。その際以下に示す評価や意見を受け、今後の研究の方向性なども確認した。

### ウルフトーン発生状態マップについて

- 本マップで示されている擦弦条件とウルフトーンの発生状態の関係は、これまでの演奏経験と直感的に一致するものであり、得られたシミュレーション結果は演奏者の視点からも妥当であると考えられる。
- 特に「弓の圧力を増加させつつ、弓の速度を減速させる」ことは、いわゆる「弦に十分な圧力をかけて丁寧に弾く」ことを示していると考えられ、ウルフトーン抑圧の方向性として妥当な結果であると考えられる。
- ただし、演奏中における弓の速度や圧力は音楽上の流れから決まることも多く、ウルフトーンが発生した場合に常に弓の速度や圧力を任意にコントロールする事が困難なこともある。よって全ての発生箇所について本手法を適用できるか否かは、また別の問題となる。
- 通常は経験的に習得する演奏技術に関するこのような詳細なデータは、練習法の考案や楽器の特性の理解などにも大変有益であるため、ウルフトーンを理解だけでなく演奏や指導につなげる上で貴重である。

### その他の意見

- ウルフトーンが発生した際には接触させる弓の角度や弓の毛の量を変えることで発生状態をコントロールすることもある。
- 弓が持つ様々な特性がウルフトーンに及ぼす影響についても研究を進めて欲しい。

## 6-5 まとめ

本章では4章のシミュレーション結果及び5章の擦弦実験結果をもとに、弓の圧力と速度の組み合わせにおけるウルフトーン発生状態を示すマップを作成し、ウルフトーン抑圧のための擦弦条件やウルフキラー装着時のウルフトーン発生領域の変化などについて考察した。その結果、ウルフキラーを装着することで正常な擦弦が可能となる領域に変化が見られた。そのような領域内においてウルフキラーの装着による抑圧効果も見られ、その傾向は実験結果より得られたマップと一致した。また、本研究における主たる目的であるウルフトーン抑圧のための擦弦条件については、ウルフキラーの未装着時・装着時いずれにおいても、ウルフトーンが発生している状態から「弓の圧力を増加させつつ弓の速度を減速させる」ことで抑圧可能であるという結論を得た。最後に本研究結果についてプロのチェリストと議論を行い、ウルフトーン発生状態マップが示すウルフトーン抑圧のための擦弦条件は、演奏家としての経験とも一致する結果であるという結論を得た。

## 第7章 結論

### 7-1 研究成果の概要

本研究は大型の弦楽器で発生するウルフトーンについて、演奏者が技術的に抑圧するための擦弦条件を工学的に示すため、ウルフトーンをシミュレーションで再現し、擦弦条件とウルフトーン発生状態の関係を明らかにすることを目的とする。そのためにまず、弦楽器を単純なモデルでモデル化した弦-胴連成振動モデルを考案し、シミュレーションにより撥弦及び擦弦の際に発生するウルフトーンの再現を行った。その結果、撥弦・擦弦いずれの場合においてもウルフトーン発生時を含む弦振動を再現することができた。続いて、得られたシミュレーション結果の妥当性を検証するため、実際のチェロを用いた撥弦・擦弦実験を実施した。その結果、撥弦時においてウルフトーンの周期と弦の線密度の関係が定性的に一致し、擦弦時においてウルフトーン発生時のスリップの変位の成長・減衰過程がシミュレーション結果と一致した。これらの結果から弦-胴連成振動モデルの妥当性が示され、本モデルを用いたシミュレーションにより撥弦・擦弦の双方においてウルフトーンが再現された。また、ウルフキラー装着時の弦-胴連成振動モデルにおいてウルフキラー装着による擦弦状態の変化を示し、装着により正常な擦弦を維持できなくなる擦弦条件が存在することを示した。

最後に、ウルフトーンを技術的に抑圧するための擦弦条件として弓の圧力と弓の速度に注目し、これらの組み合わせを網羅的に変化させてウルフトーンの発生状態をシミュレーションし2次元マップを作成した。マップからウルフキラーの未装着時・装着時いずれにおいても弓の圧力が低く、弓の速度が速い領域においてウルフトーンが顕著に発生することがわかり、弓の圧力が高く、弓の速度が速い領域では発生が抑えられることが明らかになった。この傾向は実験により同様に得られたマップと一致しており、作成したマップの妥当性が示された。

一連の結果より、ウルフトーンが発生した際には「弓の圧力を増加させつつ、弓の速度を減速させることで技術的に抑圧が可能である」ことが示された。また本研究により得られた成果について、実際の演奏にフィードバックするためにプロのチェリストと意見交換を実施した。その結果、本研究結果は演奏家が演奏技術を向上する上で重要な指針となり、また後進の育成においても有益であるとの評価を受けた。この様なウルフトーン発生状態マップの特徴は楽器ごとに異なると考えられ、これを個別の楽器について示すことで、演奏者が楽器を選択する際の一つの参考情報として利用することも可能である。

本研究は弦楽器で発生するウルフトーンを工学的に解析したものであるが、研究成果として得られた様々な知見の応用先は楽器のみに限定されるものではなく、例えば構造物や車両などの振動現象を理解する際など、音楽音響以外の分野にも応用が期待される。

### 7-2 残された課題

本研究で用いた弦-胴連成振動モデルにおいて、擦弦点に与えているのは弦と弓の間の摩擦特性のみである。しかしプロの演奏家からの評価にもあるように、実際のウルフトーン抑圧の際には極めて繊細に弓をコントロールすることから、弓のたわみの効果や質量分布、弦との接触角度などをモデルに取り入れることが必要であると考えられる。

### 7-3 今後の研究

本研究で得られた結果を土台に、押弦を指で行うことによるウルフトーンへの影響や、弓の特性によるウルフトーン発生状態の変化、巻弦の剛性の効果[23, 24]などを含め更に効果的な抑圧手法の提案に向け研究を進めていきたい。特に弓の特性については今後モデルに含める必要があると考えており、さらに精度の高いシミュレーションを行うことでより詳細なウルフトーン発生状態マップを作成していきたい。

## 謝辞

本研究を進める上で、筑波大学大学院システム情報工学研究科知能機能システム専攻 水谷孝一名誉教授には筑波大学大学院博士前期課程に引き続き、2020年度まで専攻担当教員の教授として多くのご指導を頂きました。また、社会人博士として再び音楽音響の分野の研究を継続することを快く受け入れて頂き、博士前期課程での研究テーマを継続する事が出来ました。そして業務多忙な時期における研究の進め方などについてもご助言・ご支援を頂き、研究を継続する事が出来ました。

筑波大学大学院システム情報工学研究科知能機能システム専攻 若槻尚斗准教授には2021年度指導教員として、時には深夜まで実験や論文等のご指導を頂き大変お世話になりました。日々研究に関して多くの議論をさせて頂き、新しい発見や理解につながりました。

筑波大学大学院システム情報工学研究科知能機能システム専攻 藪野浩司教授には筑波大学大学院博士前期課程に引き続き、副指導教員として多くのご指導を頂きました。

筑波大学大学院システム情報工学研究科知能機能システム専攻 海老原格准教授には2021年度副指導教員として様々なご助言を頂きました。

前田祐佳助教、善甫啓一助教、筑波大学大学院数理物質科学研究科 伊藤雅英教授には審査員として、本研究に関して多くの貴重なご指摘、ご指導を頂きました。

筑波大学大学院システム情報工学研究科博士後期課程2年 猪崎遼大氏には実験装置の作製や準備および測定の際に多くのお時間を割いて頂き、大変お世話になりました。

チェリストの前田善彦氏には、ご多忙な中、本論文の結論について演奏家の立場から貴重なご意見を多く頂きました。議論を通じ、実際の演奏へのフィードバックという研究の最も重要な部分について、様々な角度から考察を行うことが出来ました。

また、筑波大学大学院システム情報工学研究科知能機能システム専攻 音響システム研究室の皆様には研究を行う上で多くのご支援を頂きました。

最後に、社会人博士課程で研究を続けることを理解し、生活面や精神面で支え続けてくれた妻と娘に心から感謝しています。

## 参考文献

- [1] J. Woodhouse., “On the playability of violins, Part I: Reflection functions,” *Acustica*, 78, pp.125-136, 1993.
- [2] J. Woodhouse., “On the playability of violins, Part II: Minimum bow force and transients,” *Acustica*, 78, pp.137-153, 1993.
- [3] M. B. McIntyre, R. T. Schumacher., and J. Woodhouse., “On the oscillations of musical instruments,” *J. Acoust. Soc. Am.*, 74(5), pp.1325-1345, 1983.
- [4] A.Zhang and J.Woodhouse, " Playability of the wolf note of bowed string instruments," *J. Acoust. Soc. Am.* 144(5), pp.2852–2858, 2018.
- [5] P.Neubauer, J.Tscheche, J.Bos , T.Melz and H.Hanselka, “An active -system approach for eliminating the wolf note on a cello,” *J. Acoust. Soc. Am.* 143(5), pp.2965–2974, 2018.
- [6] 小倉溪, 西宮康治朗, 水谷孝一, 若槻尚斗, “チェロにおけるウルフキラー位置と抑圧効果,” *日本音響学会音楽音響研究会資料*, vol.19, No.4, MA2008-24, pp. 55-64, 2008.
- [7] V. Debut, O. Inacio, T. Dumas and J.Antunes: “Modelling and experiments on string/body coupling and effectiveness of a cello wolf-killing device,” *Proceedings of the International Symposium on Music Acoustics (ISMA2010)*, pp.25-31 August, 2010.
- [8] G.Gidion, "Evasive manoeuvres of bowed-string instruments: The effect of wolf suppressors on wolf tones," *Proceedings of the International Symposium on Music Acoustics, Le Mans, France, July. 2014.*
- [9] V.Debut and J.Antunes, "A linearized model approach for predicting wolftones," *International Congress on Sound & Vibration(ICSV18)*, Rio de Janeiro, Brazil, Jul. 2011.
- [10] 小倉溪, 水谷孝一, 若槻尚斗, “擦弦楽器におけるウルフトーンの弦胴連成振動モデルによる考察,” *日本音響学会音楽音響研究会 資料*, MA2009-62, pp. 91-96, 2009.
- [11] Kei Ogura, Naoto Wakatsuki and Koichi Mizutani: "Numerical simulation of wolf-note in string instruments using string-body coupled model," *Proceedings of the International Symposium on Music Acoustics (ISMA 2010)*, 26-31August, 2010.
- [12] 小倉溪, 水谷孝一, 若槻尚斗, “弦-胴連成振動モデルを用いるウルフトーンのモデル化,” *日本音響学会音楽音響研究会資料*, MA2010-59, 2010.
- [13] Kei Ogura, Koichi Mizutani, and Naoto Wakatsuki, "Suppression of wolf-tone based on equivalent circuit model," *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 140, No. 4, pp.3379, 5aMU, Dec. 2016.
- [14] 小倉溪, 水谷孝一, 若槻尚斗, “擦弦楽器の弦-胴連成振動モデルにおける擦弦条件

- と振動状態の関係,” 日本音響学会春季研究発表会講演論文集, pp.883-886, 2016.
- [15] 中井幹雄, 村上将雄, "擦弦における 1stick-1slip 振動から 2stick-2slip 振動への過渡振動について," 日本機械学会論文集 (C 編) ,67 巻 662 号, pp.3116-3123, 2001.
- [16] 前澤成一郎, 天摩勝洋, "擦弦の振動 (第 1 報, 空気抵抗だけを受けるモノコード-その 1) ," 日本機械学会論文集 (C 編) ,50 巻 455 号, pp.1183-1190, 昭 59-7
- [17] 前澤成一郎, 天摩勝洋, "擦弦の振動 (第 1 報, 空気抵抗だけを受けるモノコード-その 2) ," 日本機械学会論文集 (C 編) ,51 巻 470 号, pp.2454-2462, 昭 60-10
- [18] 川跡 洋子, 岸 憲史, 中村 勲, “擦弦楽器のシミュレーション-摩擦特性と過渡応答について-,” 日本音響学会音楽音響研究会資料, MA2003-38, 2003.
- [19] 小倉溪, 水谷孝一, 若槻尚斗, “大型擦弦 楽器における安定な振動維持のための擦弦条件,” 日本音響学会音楽音響研究会資料, MA2015-27, 2015.
- [20] 村上智之, 永井功, 中井幹雄 “擦弦振動の平均法による解析,” 日本機械学会論文集 (C 編) ,62 巻 598 号, pp.2102-2109, 1996-6.
- [21] 小倉溪, 水谷孝一, 若槻尚斗, “擦弦楽器の等価モデル表現とウルフトーン発生条件” 日本音響学会誌, Vol.77, No.11, pp.686-693, 2021.
- [22] 田中 秀幸, 永井 啓之亮, 水谷 孝一, “ピアノ弦の 2 次元振動測定” 日本音響学会誌, Vol. 56, No. 3, pp. 148-155, 2000.
- [23] 高澤嘉光, 徳弘一路, “弦振動におけるインハーモニシティについて-第二報,” 日本音響学会音楽音響研究会資料, MA00-24, 2000.
- [24] H.Helmholzs, “On the Sensations of Tone,”, Dover Pub. Inc., New York, p.576, 1954.



## 著者文献

### 査読付雑誌論文

(J-1) 小倉溪, 水谷孝一, 若槻尚斗, “擦弦楽器の等価モデル表現とウルフトーン発生条件” 日本音響学会誌, Vol.77, No.11, pp.686-693, 2021.

### 査読付国際会議論文

(P-1) Kei Ogura, Naoto Wakatsuki and Koichi Mizutani: "Numerical simulation of wolf-note in string instruments using string-body coupled model," Proceedings of the International Symposium on Music Acoustics (ISMA 2010), 26-31 August, 2010, Sydney Convention Centre, New South Wales, Australia, 30-31 August 2010, Carrington Hotel, Katoomba, New South Wales, Australia, CD-ROM, 40, (5 pages).

### 報告

(1) 小倉溪, 西宮康治朗, 若槻尚斗, 水谷孝一: “チェロにおけるウルフキラー位置と抑圧効果”, 日本音響学会音楽音響研究会資料, vo.27, No.3, MA2008-24, pp. 21-24, 2008.

(2) 小倉溪, 水谷孝一, 若槻尚斗: “擦弦楽器におけるウルフトーンの弦胴連成振動モデルによる考察”, 日本音響学会音楽音響研究会資料, vol.28, No.5, MA2009-62, pp. 91-96, 2009.

(3) 小倉溪, 水谷孝一, 若槻尚斗: “弦-胴連成振動モデルを用いるウルフトーンのモデル化”, 日本音響学会音楽音響研究会資料, vol.29, No.6, MA2010-59, pp. 1-6, 2010.

(4) 小倉溪, 水谷孝一, 若槻尚斗: “大型擦弦 楽器における安定な振動維持のための擦弦条件”, 日本音響学会音楽音響研究会資料, MA2015-27, pp. 59-62, 2015.

(5) 小倉溪, 水谷孝一, 若槻尚斗: “擦弦楽器の弦-胴連成振動モデルにおける擦弦条件と振動状態の関係”, 日本音響学会, 2016 年春季研究発表会講演論文集, pp. 883-886, 2016.

(6) Kei Ogura, Koichi Mizutani, and Naoto Wakatsuki: “Suppression of wolf-tone based on equivalent circuit model”, The Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 140, No. 4 (Program book the 5th Joint Meeting of the Acoustical Society of America and Acoustical Society of Japan), pp.3379, 5aMU, 2016.

## 受賞

- (1) 小倉溪 日本音響学会音楽音響研究会奨励賞, 10月 2009.
- (2) 小倉溪 筑波大学 知能機能システム専攻長表彰, 3月 2011.
- (3) 小倉溪 筑波大学 知能機能システム専攻優秀修士論文賞, 3月 2011.