

トランペット演奏における  
呼吸制御に関わる筋活動と音響的特徴との関係

筑波大学  
図書館情報メディア研究科  
2018年 3月  
佐藤 愛

# 目次

<b>第1章</b>	<b>はじめに</b>	<b>1</b>
1.1	トランペット演奏の現場	1
1.2	トランペットの演奏法	1
1.3	身体の使い方のバランス	2
1.4	演奏時の生体情報と関連研究	3
1.5	口腔内圧力とマウスピース	3
1.6	演奏条件と生体情報	3
1.7	本研究の目的と位置付け	4
1.8	論文の構成	5
<b>第2章</b>	<b>関連研究</b>	<b>6</b>
2.1	楽器演奏時の筋活動に関する研究	6
2.2	呼吸に関連する要素の研究	7
<b>第3章</b>	<b>実験</b>	<b>9</b>
3.1	概要	9
3.2	実験条件	9
3.2.1	実験参加者	9
3.2.2	実験環境	10
3.2.3	電極の貼り付け位置	10
3.2.4	演奏課題	11
3.3	実験手続き	12
3.4	データ前処理方法	13
3.5	分析手法	14
<b>第4章</b>	<b>実験結果</b>	<b>16</b>
4.1	全実験参加者	16
4.1.1	6音の%MVC 平均値	16
4.1.2	3要因分散分析（要因：音高・音強・マウスピース）	18
4.1.3	3要因分散分析（要因：音高・音強・区間）	20
4.2	各実験参加者	20
4.2.1	6音の%MVC 平均値	20

4.2.2	3 要因分散分析（要因：音高・音強・マウスピース）	23
4.2.3	3 要因分散分析（要因：音高・音強・区間）	27
4.3	筋肉の使用バランス	29
4.3.1	個人の傾向とグルーピング	30
4.3.2	グループ別分散分析の結果	36
4.4	多重比較の結果	38
4.4.1	音高の影響	38
4.4.2	音強の影響	39
4.4.3	マウスピースの影響	39
4.4.4	発音前後の変化	39
<b>第 5 章</b>	<b>考察</b>	<b>42</b>
5.1	音高の変化	42
5.2	音強の変化	43
5.3	筋肉のバランスと使い方	43
5.4	マウスピースの影響	44
5.5	発音前後の変化	45
<b>第 6 章</b>	<b>総合考察</b>	<b>46</b>
6.1	まとめ	46
6.2	今後の課題と展望	47
	<b>謝辞</b>	<b>49</b>
	<b>参考文献</b>	<b>50</b>
付 録 A	予備実験 1	53
付 録 B	予備実験 2	55
付 録 C	予備実験 3	57
付 録 D	予備実験 4	59
付 録 E	予備アンケート 1	61
付 録 F	予備アンケート 2	64
付 録 G	発表学会一覧	67
付 録 H	音楽音響研究会 2016 年 10 月研究会 発表論文	68

付 録 I	5th Joint Meeting of the Acoustical Society of America and Acoustical Society of Japan abstract	75
付 録 J	2017 International Symposium on Musical Acoustics 発表論文	76
付 録 K	全実験参加者の 3 要因分散分析の結果 (要因: 音高・音強・マウスピース)	81
付 録 L	全実験参加者の 3 要因分散分析の結果 (要因: 音高・音強・区間)	84
付 録 M	各実験参加者の 6 音の %MVC 平均値	86
M.1	参加者番号 00 . . . . .	86
M.2	参加者番号 02 . . . . .	88
M.3	参加者番号 03 . . . . .	90
M.4	参加者番号 04 . . . . .	92
M.5	参加者番号 05 . . . . .	94
M.6	参加者番号 07 . . . . .	96
M.7	参加者番号 11 . . . . .	98
M.8	参加者番号 14 . . . . .	100
付 録 N	実験参加者別の 3 要因分散分析の結果 (要因: 音高・音強・マウスピース)	102
N.1	準備時 . . . . .	102
N.1.1	参加者番号 00 . . . . .	102
N.1.2	参加者番号 02 . . . . .	103
N.1.3	参加者番号 03 . . . . .	105
N.1.4	参加者番号 04 . . . . .	106
N.1.5	参加者番号 05 . . . . .	107
N.1.6	参加者番号 07 . . . . .	109
N.1.7	参加者番号 11 . . . . .	110
N.1.8	参加者番号 14 . . . . .	111
N.2	サステイン時 . . . . .	113
N.2.1	参加者番号 00 . . . . .	113
N.2.2	参加者番号 02 . . . . .	114
N.2.3	参加者番号 03 . . . . .	115
N.2.4	参加者番号 04 . . . . .	117
N.2.5	参加者番号 05 . . . . .	118
N.2.6	参加者番号 07 . . . . .	119
N.2.7	参加者番号 11 . . . . .	121
N.2.8	参加者番号 14 . . . . .	122
付 録 O	実験参加者別の 3 要因分散分析の結果 (要因: 音高・音強・区間)	124



O.1	参加者番号 00 . . . . .	124
O.2	参加者番号 02 . . . . .	125
O.3	参加者番号 03 . . . . .	127
O.4	参加者番号 04 . . . . .	128
O.5	参加者番号 05 . . . . .	129
O.6	参加者番号 07 . . . . .	131
O.7	参加者番号 11 . . . . .	132
O.8	参加者番号 14 . . . . .	133
<b>付 録 P グループ別の 3 要因分散分析の結果（要因：音高・音強・マウスピース）</b>		<b>135</b>
P.1	準備時 . . . . .	135
P.1.1	腹グループ . . . . .	135
P.1.2	口グループ . . . . .	136
P.1.3	腹＋口グループ . . . . .	138
P.1.4	首＋口グループ . . . . .	139
P.2	サステイン時 . . . . .	140
P.2.1	腹グループ . . . . .	140
P.2.2	口グループ . . . . .	142
P.2.3	腹＋口グループ . . . . .	143
P.2.4	首＋口グループ . . . . .	144

# 目 次

1.1	演奏条件と筋活動との関連 . . . . .	4
3.1	マイクロフォンの設置位置 . . . . .	10
3.2	電極の貼り付け位置 . . . . .	11
3.3	演奏課題例 (1 シーケンス) . . . . .	12
3.4	実験全体の流れ . . . . .	13
3.5	準備時およびサステイン時の設定区間 . . . . .	14
4.1	全参加者の全演奏の準備時における腹斜筋の%MVC の平均値 . . . . .	17
4.2	全参加者の全演奏の準備時における広背筋の%MVC の平均値 . . . . .	17
4.3	全参加者の全演奏の準備時における胸鎖乳突筋の%MVC の平均値 . . . . .	17
4.4	全参加者の全演奏の準備時における口角下制筋の%MVC の平均値 . . . . .	17
4.5	全参加者の全演奏のサステイン時における腹斜筋の%MVC の平均値 . . . . .	18
4.6	全参加者の全演奏のサステイン時における広背筋の%MVC の平均値 . . . . .	18
4.7	全参加者の全演奏のサステイン時における胸鎖乳突筋の%MVC の平均値 . . . . .	18
4.8	全参加者の全演奏のサステイン時における口角下制筋の%MVC の平均値 . . . . .	18
4.9	参加者番号 05 の全演奏の準備時における腹斜筋の%MVC の平均値 . . . . .	21
4.10	参加者番号 05 の全演奏の準備時における広背筋の%MVC の平均値 . . . . .	21
4.11	参加者番号 05 の全演奏の準備時における胸鎖乳突筋の%MVC の平均値 . . . . .	22
4.12	参加者番号 05 の全演奏の準備時における口角下制筋の%MVC の平均値 . . . . .	22
4.13	参加者番号 05 の全演奏のサステイン時における腹斜筋の%MVC の平均値 . . . . .	22
4.14	参加者番号 05 の全演奏のサステイン時における広背筋の%MVC の平均値 . . . . .	22
4.15	参加者番号 05 の全演奏のサステイン時における胸鎖乳突筋の%MVC の平均値 . . . . .	23
4.16	参加者番号 05 の全演奏のサステイン時における口角下制筋の%MVC の平均値 . . . . .	23
4.17	参加者番号 00 の準備時の%MVC の平均値 . . . . .	31
4.18	参加者番号 14 の準備時の%MVC の平均値 . . . . .	31
4.19	参加者番号 02 の準備時の%MVC の平均値 . . . . .	31
4.20	参加者番号 03 の準備時の%MVC の平均値 . . . . .	31
4.21	参加者番号 05 の準備時の%MVC の平均値 . . . . .	32
4.22	参加者番号 07 の準備時の%MVC の平均値 . . . . .	32
4.23	参加者番号 04 の準備時の%MVC の平均値 . . . . .	33
4.24	参加者番号 11 の準備時の%MVC の平均値 . . . . .	33

4.25 参加者番号 00 のサステイン時の%MVC の平均値 . . . . .	33
4.26 参加者番号 14 のサステイン時の%MVC の平均値 . . . . .	33
4.27 参加者番号 02 のサステイン時の%MVC の平均値 . . . . .	34
4.28 参加者番号 03 のサステイン時の%MVC の平均値 . . . . .	34
4.29 参加者番号 05 のサステイン時の%MVC の平均値 . . . . .	34
4.30 参加者番号 07 のサステイン時の%MVC の平均値 . . . . .	35
4.31 参加者番号 04 のサステイン時の%MVC の平均値 . . . . .	35
4.32 参加者番号 11 のサステイン時の%MVC の平均値 . . . . .	35
4.33 腹斜筋における発音前後の%MVC の変化 . . . . .	40
4.34 胸鎖乳突筋における発音前後の%MVC の変化 . . . . .	40
M.1 参加者番号 00 の全演奏の準備時における腹斜筋の%MVC の平均値 . . . . .	86
M.2 参加者番号 00 の全演奏の準備時における広背筋の%MVC の平均値 . . . . .	86
M.3 参加者番号 00 の全演奏の準備時における胸鎖乳突筋の%MVC の平均値 . . . . .	86
M.4 参加者番号 00 の全演奏の準備時における口角下制筋の%MVC の平均値 . . . . .	86
M.5 参加者番号 00 の全演奏のサステイン時における腹斜筋の%MVC の平均値 . . . . .	87
M.6 参加者番号 00 の全演奏のサステイン時における広背筋の%MVC の平均値 . . . . .	87
M.7 参加者番号 00 の全演奏のサステイン時における胸鎖乳突筋の%MVC の平均値 . . . . .	87
M.8 参加者番号 00 の全演奏のサステイン時における口角下制筋の%MVC の平均値 . . . . .	87
M.9 参加者番号 02 の全演奏の準備時における腹斜筋の%MVC の平均値 . . . . .	88
M.10 参加者番号 02 の全演奏の準備時における広背筋の%MVC の平均値 . . . . .	88
M.11 参加者番号 02 の全演奏の準備時における胸鎖乳突筋の%MVC の平均値 . . . . .	88
M.12 参加者番号 02 の全演奏の準備時における口角下制筋の%MVC の平均値 . . . . .	88
M.13 参加者番号 02 の全演奏のサステイン時における腹斜筋の%MVC の平均値 . . . . .	89
M.14 参加者番号 02 の全演奏のサステイン時における広背筋の%MVC の平均値 . . . . .	89
M.15 参加者番号 02 の全演奏のサステイン時における胸鎖乳突筋の%MVC の平均値 . . . . .	89
M.16 参加者番号 02 の全演奏のサステイン時における口角下制筋の%MVC の平均値 . . . . .	89
M.17 参加者番号 03 の全演奏の準備時における腹斜筋の%MVC の平均値 . . . . .	90
M.18 参加者番号 03 の全演奏の準備時における広背筋の%MVC の平均値 . . . . .	90
M.19 参加者番号 03 の全演奏の準備時における胸鎖乳突筋の%MVC の平均値 . . . . .	90
M.20 参加者番号 03 の全演奏の準備時における口角下制筋の%MVC の平均値 . . . . .	90
M.21 参加者番号 03 の全演奏のサステイン時における腹斜筋の%MVC の平均値 . . . . .	91
M.22 参加者番号 03 の全演奏のサステイン時における広背筋の%MVC の平均値 . . . . .	91
M.23 参加者番号 03 の全演奏のサステイン時における胸鎖乳突筋の%MVC の平均値 . . . . .	91
M.24 参加者番号 03 の全演奏のサステイン時における口角下制筋の%MVC の平均値 . . . . .	91
M.25 参加者番号 04 の全演奏の準備時における腹斜筋の%MVC の平均値 . . . . .	92
M.26 参加者番号 04 の全演奏の準備時における広背筋の%MVC の平均値 . . . . .	92
M.27 参加者番号 04 の全演奏の準備時における胸鎖乳突筋の%MVC の平均値 . . . . .	92
M.28 参加者番号 04 の全演奏の準備時における口角下制筋の%MVC の平均値 . . . . .	92

M.29参加者番号 04 の全演奏のサステイン時における腹斜筋の%MVC の平均値 . . .	93
M.30参加者番号 04 の全演奏のサステイン時における広背筋の%MVC の平均値 . . .	93
M.31参加者番号 04 の全演奏のサステイン時における胸鎖乳突筋の%MVC の平均値	93
M.32参加者番号 04 の全演奏のサステイン時における口角下制筋の%MVC の平均値	93
M.33参加者番号 05 の全演奏の準備時における腹斜筋の%MVC の平均値 . . . . .	94
M.34参加者番号 05 の全演奏の準備時における広背筋の%MVC の平均値 . . . . .	94
M.35参加者番号 05 の全演奏の準備時における胸鎖乳突筋の%MVC の平均値 . . .	94
M.36参加者番号 05 の全演奏の準備時における口角下制筋の%MVC の平均値 . . .	94
M.37参加者番号 05 の全演奏のサステイン時における腹斜筋の%MVC の平均値 . .	95
M.38参加者番号 05 の全演奏のサステイン時における広背筋の%MVC の平均値 . .	95
M.39参加者番号 05 の全演奏のサステイン時における胸鎖乳突筋の%MVC の平均値	95
M.40参加者番号 05 の全演奏のサステイン時における口角下制筋の%MVC の平均値	95
M.41参加者番号 07 の全演奏の準備時における腹斜筋の%MVC の平均値 . . . . .	96
M.42参加者番号 07 の全演奏の準備時における広背筋の%MVC の平均値 . . . . .	96
M.43参加者番号 07 の全演奏の準備時における胸鎖乳突筋の%MVC の平均値 . . .	96
M.44参加者番号 07 の全演奏の準備時における口角下制筋の%MVC の平均値 . . .	96
M.45参加者番号 07 の全演奏のサステイン時における腹斜筋の%MVC の平均値 . .	97
M.46参加者番号 07 の全演奏のサステイン時における広背筋の%MVC の平均値 . .	97
M.47参加者番号 07 の全演奏のサステイン時における胸鎖乳突筋の%MVC の平均値	97
M.48参加者番号 07 の全演奏のサステイン時における口角下制筋の%MVC の平均値	97
M.49参加者番号 11 の全演奏の準備時における腹斜筋の%MVC の平均値 . . . . .	98
M.50参加者番号 11 の全演奏の準備時における広背筋の%MVC の平均値 . . . . .	98
M.51参加者番号 11 の全演奏の準備時における胸鎖乳突筋の%MVC の平均値 . . .	98
M.52参加者番号 11 の全演奏の準備時における口角下制筋の%MVC の平均値 . . .	98
M.53参加者番号 11 の全演奏のサステイン時における腹斜筋の%MVC の平均値 . .	99
M.54参加者番号 11 の全演奏のサステイン時における広背筋の%MVC の平均値 . .	99
M.55参加者番号 11 の全演奏のサステイン時における胸鎖乳突筋の%MVC の平均値	99
M.56参加者番号 11 の全演奏のサステイン時における口角下制筋の%MVC の平均値	99
M.57参加者番号 14 の全演奏の準備時における腹斜筋の%MVC の平均値 . . . . .	100
M.58参加者番号 14 の全演奏の準備時における広背筋の%MVC の平均値 . . . . .	100
M.59参加者番号 14 の全演奏の準備時における胸鎖乳突筋の%MVC の平均値 . . .	100
M.60参加者番号 14 の全演奏の準備時における口角下制筋の%MVC の平均値 . . .	100
M.61参加者番号 14 の全演奏のサステイン時における腹斜筋の%MVC の平均値 . .	101
M.62参加者番号 14 の全演奏のサステイン時における広背筋の%MVC の平均値 . .	101
M.63参加者番号 14 の全演奏のサステイン時における胸鎖乳突筋の%MVC の平均値	101
M.64参加者番号 14 の全演奏のサステイン時における口角下制筋の%MVC の平均値	101

# 第1章 はじめに

## 1.1 トランペット演奏の現場

楽器の演奏は呼吸法、アンブシュア、姿勢、運指等が統合的に機能することで実現する [1]. 中でも特に、呼吸法とアンブシュアが重要だと言われ、両者は相互に関連し合っている [2]. アンブシュア (embouchure) とは、演奏のための機能を働かせる際の口唇、舌、歯、顎、表情筋の状態を示す.

呼吸法に関して、多くの指導者は“息の支え”を作って演奏するように指導する [3, 4]. これは“腹の支え”や“横隔膜の支え”と呼ばれることもあり、腹部で呼気を支えることを意味して使われる. しかし腹部、腹筋といっても漠然としていて、初心者にはどう身体を使ったら良いか理解しにくい. また腹部といっても、みぞおちを意識するように指導する人もいれば [5], 丹田、つまり臍の下と指導する人もおり様々である [3].

アンブシュアについても、多くの教則本で異なる表現がされていたり、時には反対のことが書かれていたりする. また音高や音量が変化してもアンブシュアは変えないように書かれていることもあるが、この指導に対する科学的根拠は示されていない [6].

このように、指導の現場では指導者の経験に基づいた主観的な指導が多くなされており、さらにそれは指導者によって異なっている. また演奏者も自身の感覚を頼りに演奏しており、特に初心者は演奏ごとに音が変化してしまったり失敗してしまったりすることが多く、安定して演奏するのは難しい. にもかかわらず身体の使い方に関する定量的な研究はまだ少なく、演奏者がどういう身体の使い方をしているのかは未解明な部分が多いのが現状である.

## 1.2 トランペットの演奏法

ここでトランペットの基本的な演奏法について述べる. 金管楽器の発音において、振動源は演奏者の口唇である. その振動は演奏者が口唇自体に力を入れて動かすのではなく、息の気流によって発生する. 楽器の細い管の中に息を入れる時には、吐き出した息の一部が反射して抵抗感を感じ、この抵抗感により口唇は閉じようとするが、流れ出る息が口唇を開けようとする. この連続により唇が振動し発音される [5, 7]. またこの際口腔内に息によって圧力がかかるが、これを口腔内圧力と呼ぶ.

またアンブシュアは音色の決定に影響する [5]. 口唇を振動させるには、口唇周囲の筋肉を使用して振動しやすいような閉じ方を作ることが大切となる [7]. アンブシュアを形成するためには、表情筋や咀嚼筋等が使用される.

演奏においても一つ大事だと言われるのが呼吸である。呼吸は横隔膜を上下させることによって行われる [5]。そして演奏時の呼吸法は、安静時の呼吸法とは異なる。安静時は浅い空気の出し入れを繰り返している。また吸息が終わったところから更に息を吸うことができ、呼息からも更に吐くことができる。前者の空気量を予備吸気量、後者を予備呼気量という。そしてこの呼吸では、吸気時に呼吸筋（吸気筋）に力を入れて呼気時に脱力する。それに対して演奏時は、呼気時に呼吸筋（呼気筋）に力を入れる必要がある [8]。また予備吸気量および呼気量まで使用して深く呼吸する。

ここで、胸式呼吸と腹式呼吸という2種類の呼吸法について説明する。これらは先述した安静時と演奏時の呼吸法とは異なる分類方法である。胸式呼吸とは、肋骨を上下させて胸腔を拡大・縮小させる呼吸様式である。そして腹式呼吸とは、横隔膜の上下運動と、それに伴う腹圧の変化による呼吸様式である。これは呼気時に腹筋が働き、腹圧が高められることによって横隔膜が押し上げられ肺から空気が出る。

また、安静時の呼気時に筋肉はほとんど働いておらず、吸気時に収縮した筋肉が弛緩することによって、自然に息が吐き出される。しかし演奏時の呼気時には、腹式呼吸における腹筋の力が利用される。また吸気時には、演奏者によって異なり、腹式呼吸と胸式呼吸の両方を取り入れる場合がある [9]。

### 1.3 身体の使用方のバランス

アンブシュア形成と呼吸法についてそれぞれ仕組みや重要性を述べたが、両者のバランスも肝心である [7]。発音するためには口唇の振動が不可欠で、それには第1.2節で述べた口腔内圧力と呼ばれるエネルギーが重要となる。この呼気を生成するには呼気筋が働く。しかし呼気筋で呼気の流れをコントロールするだけでは口腔内の圧力は高められない。肺から口腔内に流れ出た空気を、表情筋によって制御する必要がある。つまり適切な呼吸がなされていたとしても、アンブシュアが崩れていては適切な口唇の振動を生成することはできない。また同様にアンブシュアが整っていても、楽器に息を流し入れなければ発音されない。

萩原は、「トランペットらしい音、よく響く音を出すために必要なものは過剰な力ではなく、生き生きと振動する唇の状態をキープするための安定した息の流れと圧力のバランスなのだ」と述べている [5]。また Gerhard は「お腹を出しながらつくる息の支えがないと、重みのある、はっきりとしたウィーンのタンギングはできません。」と述べている [10]。演奏経験の浅い奏者の呼吸において、呼吸自体が浅い場合や、呼気時の腹筋の力が不足している場合が見られ、その結果唇に負担のかかった演奏となることがある [3]。演奏の際には、安定した息の支えを作り、その支えをもとにアンブシュアを作ることが重要である。

また当然のことながら、息を吸う動作は発音より前に開始する。そしてアンブシュアの形成も発音より前に行われる [6]。発音時や持続時の身体の使用方も重要だが、同様に発音前においても重要だと考えられる。

## 1.4 演奏時の生体情報と関連研究

前節で述べた身体の使い方は、演奏する音によって変化する。これまでに金管楽器演奏時の筋活動や顎機能、口腔内圧力等についての研究が多数報告されている [6, 11, 12, 13, 14, 15]. このような研究や演奏法に関する文献では、音高や音強といった演奏条件が変化した際に、これらの生体情報がどのように変化するかを述べている。筋活動に関する研究は、アンブシュアに関係する口唇周囲の表情筋や咀嚼筋を対象としたものが数多く存在する。呼吸法も重要だと言われているが、呼吸筋を計測したものは未だ少ない。加えてこれらの研究は、演奏法において重要だとされる要因の一部に焦点を当てており、複数の要因を組み合わせた考察は不足している。

また既存研究の考察において、生体情報の変化は腹腔内や口腔内の圧力、呼気のコントロールのためであると述べられている。口腔内圧力は演奏時の生体情報に関する重要な要因だと考えられるが、演奏中に口腔内圧力を計測するには、演奏者に通常の演奏時とは異なる身体状態を強いてしまうため、正確な値を計測するのは難しい。

## 1.5 口腔内圧力とマウスピース

金管楽器は、演奏者の口唇が振動源、楽器が共鳴体であり、演奏者の身体と楽器が一体となって演奏が成り立つ。Freour は、トランペットの発音は、演奏者の直接的な制御下での生理的パラメータと物理的パラメータとの間の調整を必要とし、演奏者と楽器間の相互作用を必ず伴うと述べている [15]. 演奏者の生体情報について、口腔内圧力は重要だが計測は困難だと第 1.4 節にて述べたが、楽器の物理特性を計測するのは困難ではない。金管楽器においてはマウスピースが楽器における重要な構成要素だと言われている [16]. このマウスピースの内部の形状から、演奏者の唇にかかる入力インピーダンスが算出でき、これは吹奏抵抗感、音の鳴らしやすさに繋がる [17]. したがって異なるマウスピースを使用した場合、音の鳴らしやすさも異なる。またこの鳴らしやすさとは抵抗の大きさによるものであるため、口腔内圧力と関連していると推測される。

加えて、鳴らしやすさが異なる場合、演奏者の身体の使い方も変化する可能性がある。マウスピースは吹奏感に影響を与えており [17], 吹奏感が異なる場合でも発音するためには、呼吸やアンブシュアを調整していると考えられる。つまりこの調整のために、身体の使い方が変化するということである。

## 1.6 演奏条件と生体情報

第 1.4 節および第 1.5 節において、演奏時の生体情報の変化について述べてきた。生体情報の計測手法としては、筋活動をはじめ、脳波や心拍、重心動揺、モーションキャプチャ、胴の周囲長などが挙げられる。このうち呼吸やアンブシュアの調整に直接的に関わっていると考えられるのは筋活動である。脳波や心拍は演奏者自身でコントロールすることが不可能であ

り、演奏する状況によっても変化してしまう。金管楽器演奏は見た目の動作が小さく、同じ姿勢で異なる音を演奏できてしまうため、重心動揺やモーションキャプチャは不向きである。また胸の周囲長から呼吸量の推定が可能だが [18]、腹腔内や口腔内の空気は圧力がかけられており、正確な測定はできない。したがって、呼吸やアンブシュアに関わる生体情報の計測としては筋活動が適切だと考える。

これらをまとめると図 1.1 のようになる。口腔内圧力の変化に関係する演奏条件として、音高、音強、マウスピースが挙げられる。また音高と音強は楽譜的要素、マウスピースは楽器的要素と区別できる。実際の演奏では楽器的要素はほとんどの場合固定されているが、楽譜的要素は大きく変動する。そしてこれらの演奏条件が変化すると口腔内圧力も変化し、さらに口腔内圧力が変化すると演奏者の筋活動も変化すると推測される。ちなみに呼吸時に使用される筋肉としては、吸気時は外肋間筋、斜角筋、胸鎖乳突筋、呼気時は内肋間筋、腹直筋、内腹斜筋、外腹斜筋、腹横筋、広背筋等が挙げられる。

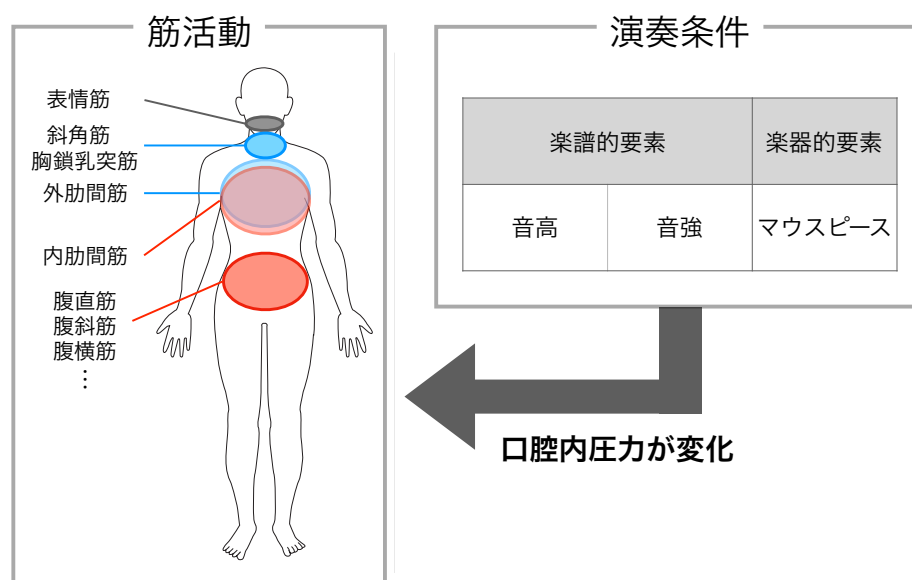


図 1.1: 演奏条件と筋活動との関連

## 1.7 本研究の目的と位置付け

これまでトランペット演奏の現場の問題点や、金管楽器の発音原理と身体の使い方について述べてきた。演奏には呼吸法とアンブシュア形成の両者が重要であり、両者は相互に関連しあっている。またそれらの制御には呼吸筋、表情筋が重要な役割を担っており、それぞれに関わる筋活動については研究されているが、両者のバランスには言及されていない。この



ため、演奏者の身体全体の使い方を定量的に計測することで、練習や指導がより効率的になるのではないかと考える。

以上を踏まえ、本研究では呼吸とアンブシュアの両方に着目し、呼吸筋および表情筋について、音高、音強、マウスピースといった演奏条件の変化に伴う筋活動の変化の特徴と、各筋肉の活動量のバランスを明らかにすることを目的とする。演奏時の筋活動を測定し、これまで演奏者の感覚を頼りに行われていた演奏を定量的に解析することによって、演奏技術の向上支援となることを期待する。

## 1.8 論文の構成

本論文は6章で構成される。第1章ではトランペットの演奏法に関する前提知識と本研究の目的を述べ、第2章では関連研究を挙げる。第3章では8名を対象とした実験について説明し、第4章にて実験結果を示す。第5章では実験結果を受けた考察を述べ、第6章にて本研究のまとめと今後の展望を述べる。

## 第2章 関連研究

### 2.1 楽器演奏時の筋活動に関する研究

White らは、トランペット奏者 18 名に対し、演奏時の上下口輪筋、口角下制筋、口角挙筋について、熟達度と筋活動の関係を研究した [11]。この研究によると、熟達度に関係なく、音高と音強の変化に伴い筋活動も変化した。また初心者は下口輪筋より上口輪筋のほうが筋活動が活発であり、概して筋活動のばらつきが大きいこともわかった。

平野らは、ホルンの熟達奏者 10 名を対象に、音高や音強を変化させた様々な音を演奏させ、発音前と音持続時の口唇周囲の筋活動と皮膚表面の動作を解析した [6]。その結果、筋活動量および皮膚表面の動きの双方について、発音前後の活動強度の間に差は見られなかったことから、発音前に適切なアンブシュアを形成することの重要性が示唆された。また演奏音の音高が高いほど、また音強が大きいほど、全ての筋で発音後の筋活動量が増加した。皮膚表面については、高音域の発音時にのみ唇を横に引く動きが見られ、その他は音高や音強によって変化しなかった。

後藤田らは、金管楽器（トランペット、ホルン、トロンボーン、チューバ）演奏時の咬筋および側頭筋の筋活動を、音高や音強との関係を中心に検討した [13]。両筋肉とも音高を変化させた条件において有意差が認められ、音強を変化させた条件では有意な差はなかった。よって音強よりも音高の方が筋活動への影響が大きいとした。

松方らは、トランペット演奏時の口唇周囲の筋活動を解析した [12]。この研究では、演奏者の演奏可能な音域や、他楽器の演奏経験を考慮した分析を行っている。結果として、低音域より高音域を演奏しているときの筋活動の方が活発だが、その度合いは演奏者の演奏可能な音域に依存することがわかった。

以上の研究から、演奏音の音高が高くなった場合、また音強が強くなった場合は、口唇周囲の筋活動が活発になることがわかった。またこれは熟達度によらず現れる特徴だった。後藤田らは音強が変化しても筋活動に変化はなかったとしているが、これは顎機能、つまり噛み締める際に使用される筋肉について解析している。これらはアンブシュアの形成に寄与している表情筋および咀嚼筋に焦点を当てた研究であり、考察で口腔内圧力に触れているものもあるが、呼吸筋や息の流量のような呼吸に関連するパラメータの計測は行なっていない。本研究では、表情筋に加え呼吸筋も同時に計測することで、演奏における統合的な身体の制御様式を解明する。

呼吸筋に関しては、Cossette らがフルート演奏時の“息の支え”の形成に関連する生理的過程について研究した [19]。呼吸に関するパラメータとして、胸郭の体積、斜角筋、側腹部、腹直筋、胸骨傍、胸鎖乳突筋の表面筋電図、口腔内圧力を計測した。また息の流量を胸郭体積

を微分することで推定した。結果として、フルート演奏においては吸気筋が息の支えに必要とされ、吸気筋は肺の容量を高い状態で保持するために働いていると推測した。吸気筋の息の支えにより、口腔内圧力の変化のより細かい制御に貢献できると述べている。

また本研究に取り組む前に、筆者は演奏音の音高や音強、音長といった音響的特徴を段階的に変化させた場合における、口唇周囲の筋活動と呼吸に関連する腹部の筋活動の変化を解析した [20]。実験の対象者は、アマチュアトランペット奏者 12 名であり、口角下制筋および腹斜筋の筋活動を表面筋電位を用いて計測し、発音直前の 375 ms 間と発音から 1 s 後からの持続 3 s 間の 2 区間を解析対象とした。実験結果の分散分析により、音高が高くなるにつれ 2 区間の両方の筋活動量が有意に増加した（口角下制筋： $p<0.001$ ，腹斜筋： $p<0.001$ ）。音強が強くなったときには口角下制筋の筋活動量に有意差は認められず、持続時は両方の筋活動量が有意に増加した（発音直前： $p<0.01$ ，持続時： $p<0.001$ ）。また音長が長くなった場合、発音直前の腹斜筋の筋活動量に有意差が認められた（ $p<0.05$ ）。発音直前と音の持続時の筋活動量は、口角下制筋は発音直前のほうが有意に大きく、腹斜筋は持続時のほうが有意に大きかった。以上の結果より、トランペット演奏時の口角下制筋および腹斜筋について、演奏音の音高が高くなると発音直前および持続時の筋活動量が増加すること、音強が強くなると持続時の筋活動量が増加すること、そして口角下制筋の筋活動量は発音後に減少し、腹斜筋は増加するということが示唆された。

この研究では腹部と口唇周囲の 2 箇所の筋活動しか計測しておらず、演奏時の呼吸制御にはより多くの部位が関わっている。本研究では腹部と口唇周囲に加え、背部と頸部の筋活動も計測した。

## 2.2 呼吸に関連する要素の研究

Stubbins はトランペットで様々な音高を演奏する際の息を吹き込む圧力とアンブシュア形成に関わる筋活動について研究した [21]。吹き込む圧力は圧力計を接続したチューブを演奏者の口角に挿入し、口唇周囲の筋活動は脳波を用いて計測した。計測時の演奏には、演奏者が普段使用している楽器およびマウスピースに加えて、全実験参加者に対して同じ楽器およびマウスピースを使用した。実験の結果、演奏者の熟達度に関わらず、吹き込む圧力と唇の張力は音高の上昇と共に増加した。

Cugell は、4 名の熟達した金管楽器奏者および 1 名の初心者のティンホイッスル奏者を対象に、呼気に対する胸郭と腹部の相対的な寄与について研究した [22]。金管楽器はトランペット、ホルン、トロンボーン、チューバの 4 種類であった。呼吸インダクタンスプレチスモグラフィ（RIP）を用いて胸郭および腹部の体積の変化を記録し、吸気時の肺容積と、呼気に対する胸郭と腹部の寄与の大きさを測定した。結果は演奏者間で大きく差があり、これは楽器それぞれの身体的要件の差によるものと述べている。また肺容積は初心者より熟達した奏者の方がより安定していた。

Freour らは、トランペット演奏時の呼吸量について、光電子プレチスモグラフとタコメーターを同時に使用し、両者の間の流量測定の一貫性を比較した [15]。光電子プレチスモグラ

フでは実験参加者の胸部に貼り付けたマーカーをモーションキャプチャによって追跡して胸郭体積を推定し、タコメーターは楽器のチューニングスライドに埋め込んで管内の流量を計測した。また実験参加者の口角より細い管を挿入し、口腔内圧力も同時に記録した。結果として、口腔内圧力が高く空気流量が低いタスク、つまり高音域の小さい音量の音を演奏する際に著しい不一致を示した。この要因として、空気の圧縮性やブラッドシフトといった物理的および生理学的現象が考えられると述べている。

また Bianco らは、3名の熟達したトランペット奏者の口腔内圧力、マウスピースを唇に押し当てる力、口角下制筋と大頬骨筋の筋活動を計測した [23]。演奏条件として3段階の音強を設定し、また短音1つだけの独立した演奏と、短音の連続した演奏を行わせた。実験の結果、音強や音の数といった演奏条件は、各計測値の変動量や発音時の口腔内圧力に影響を与えた。そして音の開始時と終了時でもそれぞれの値は変動した。したがって異なる音強とシーケンシングが、発音時の身体状態のメカニズムを再編成させる可能性があると推察した。

以上の研究では、筋活動以外の呼吸に関連するパラメータを計測しており、これらも演奏に関わる重要な要因である。しかしこのパラメータを操作しているのは演奏者本人であり、パラメータだけでなく身体の制御にも注目すべきだと考える。よって本研究では第 2.1 節で述べたように演奏者の筋活動に焦点を当てる。本研究では呼吸に関連するパラメータを物理的に制御する演奏条件となる音高、音強、マウスピースを変更することで、演奏者にパラメータを意識させることなく変更させる。そしてその結果について、本章に挙げた関連研究等によって得られた知見を元に考察する。

## 第3章 実験

### 3.1 概要

本実験は、音高、音強といった音響的特徴を段階的に変化させた条件下で、呼吸筋および表情筋の筋活動を計測し、同時に演奏音を録音する。それらのデータから、音響的特徴と筋活動との関係と、各筋肉の活動量のバランスを明らかにすることが目的である。ここで計測する筋肉は、腹斜筋、広背筋、胸鎖乳突筋および口角下制筋の4つとした。実験条件の設定のために行った予備実験およびアンケート調査の内容は付録 A～付録 F を参照されたい。

また、この実験は筑波大学図書館情報メディア系研究倫理審査委員会の承認を得ている。

### 3.2 実験条件

#### 3.2.1 実験参加者

実験参加者はセミプロおよびアマチュアトランペット奏者男女8名とした。また演奏経験年数は8～41年（平均24.6年）であった。

以下は全参加者の性別、年齢、トランペットの演奏経験年数である。

表 3.1: 実験参加者

参加者番号	性別	年齢	経験年数 (年)
00	女	20 代	11
02	男	30 代	28
03	男	20 代	16
04	女	30 代	11
05	男	20 代	8
07	男	50 代	41
11	女	20 代	13
14	男	30 代	25

### 3.2.2 実験環境

筋電の計測には、ラック筐体（日本ナショナルインスツルメンツ, cDAQ-9174）、計測デバイス（日本ナショナルインスツルメンツ, NI-9234 および NI-9219）、接続用基板（追坂電子機器, IDCS01）、リファレンス電極バンド（追坂電子機器, IDREF01）、ディスポ電極（日本光電, F-150S）を使用した。電極の固定やコードの揺れによるノイズ低減のために、サージカルテープ（3M, 1527SP-0）を使用した。また顔の面積を考慮し、口角下制筋の計測に使用した電極は大きさを加工して調整した。演奏音の録音にはマイクロフォン（PCB, 378B02）を使用し、楽器のベルから 1 m の位置にマイクロフォンを設置した。実験参加者とマイクロフォンの配置を図 3.1 に示す。サンプリング周波数は筋電位信号、演奏音ともに 51200 Hz に設定した。また楽器本体は実験参加者全員が同一のもの（ヤマハ, YTR-9335NYS）を使用し、マウスピースは実験参加者の所有しているものではない、吹奏感の異なるもの 9 本を用いた。

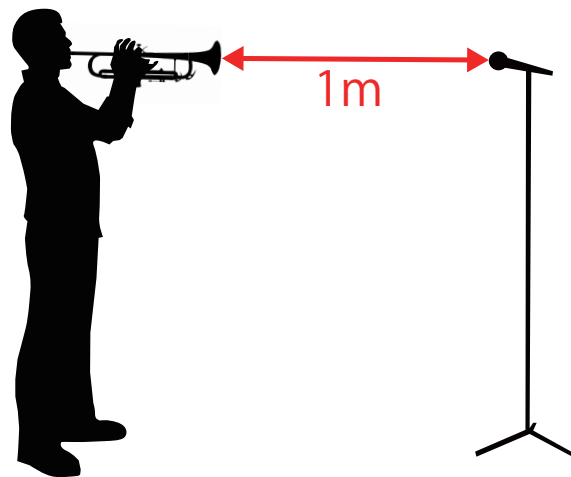


図 3.1: マイクロフォンの設置位置

### 3.2.3 電極の貼り付け位置

腹斜筋の筋電計測には、外腹斜筋と内腹斜筋の重層部位である、臍と前腋窩線の交点に電極を貼付けた [24]。広背筋は、肩甲骨下角の三横指下方の、脊柱と体幹外側縁の中央の筋腹に貼付けた [25]。胸鎖乳突筋は、乳様突起（筋停止部）から鎖骨（筋起始部）に向かって三横指下がった部分に貼付けた [26]。口角下制筋の計測には、口角の斜め下方から顎にかけての部分に電極を貼付けた [6]。また計測機器の配置の都合により、全ての筋活動計測には左半身を使用した。それぞれの電極の貼り付け位置を図 3.2 に示す。

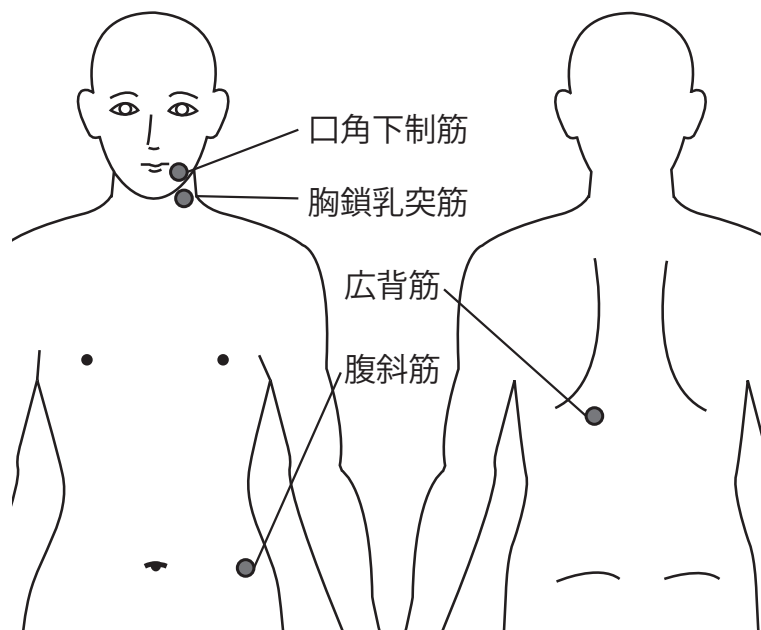


図 3.2: 電極の貼り付け位置

### 3.2.4 演奏課題

実験参加者の演奏する課題として、音高 3 種類、音強 2 種類を組み合わせた 6 音を設定した。音高、音強の段階の設定は以下のようになっている。

- 音高：Bb3 (233.08 Hz) , Bb4 (466.16 Hz) , Bb5 (932.33 Hz)
- 音強：pp, ff

6 音の全音符を順番に偏りがないようランダムに配置し、先頭に音高 Bb4、音強 mf の 1 音を追加したシーケンスを 27 個作成した。1 つのシーケンスの例を図 3.3 に示す。実験参加者ごとに演奏するシーケンスの順番はランダムイズした。演奏時のテンポは BPM=60 とし、音高は可能な限り正確な周波数に合わせるよう指示した。実験参加者のテンポの統制および演奏音の周波数のモニタリングのためにチューナー（ヤマハ、TDM-75）を使用した。

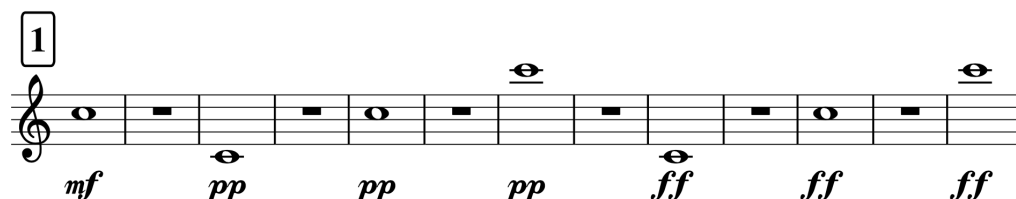


図 3.3: 演奏課題例 (1 シーケンス)

### 3.3 実験手続き

本実験は、以下の手順で実施した。

1. 電極の貼り付け
2. 電極と筋電センサーの接続
3. マイクロフォンの位置の調整
4. 筋電センサーおよびマイクロフォンの動作テスト，実験参加者音出し
5. 安静時および筋肉の最大随意収縮時の筋活動量の計測
6. チューニング
7. 課題の演奏，筋電の計測および録音
8. 筋電センサーおよび電極の取り外し

まず、接触抵抗を下げるために第 3.2.3 節で解説した電極貼り付け位置周辺をアルコールティッシュおよび皮膚前処理材（日本光電，YZ-0019）を使用して処理し、皮膚表面の汚れや皮脂を落として電極を貼り付けた。

次に実験中の立ち位置を確定して電極に筋電センサーを接続し、図 3.1 のようにマイクロフォンをベルから 1 m の地点に設置した。そして器具の準備が整ったところで、実験参加者にウォーミングアップをさせ、同時に筋電センサーおよびマイクロフォンの動作テストを行った。

その後実験参加者に立位のまま 10 秒程度安静にしてもらい、安静立位における筋活動量を計測した。続いて医学博士の指示のもと、筋肉の最大随意収縮時の筋活動量を計測し、楽器のチューニングを行った。

そして実験参加者に演奏課題を演奏してもらい、筋電および演奏音を記録した。9 シーケンスを 1 セットとして 3 セット演奏してもらい、各セット終了時に 10 分程度の休憩を取った、演奏再開時はその都度チューニングを行なった。また課題演奏時は 1 シーケンスごとに異なるマウスピースを使用し、使用する順番は 1 セット内でランダム化した。

全課題を演奏し終わったら、筋電センサーおよび電極を取り外し、実験を終了した。実験の流れを図 3.4 に示す。



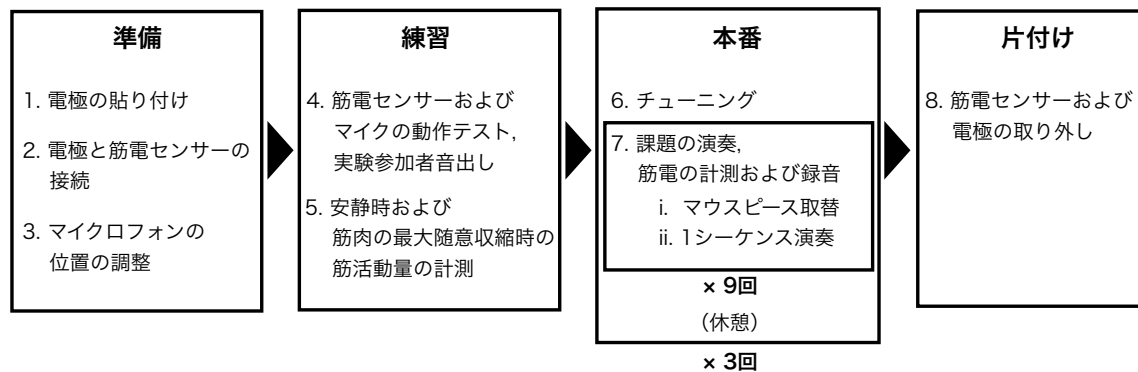


図 3.4: 実験全体の流れ

### 3.4 データ前処理方法

解析するデータは、第 3.2.2 項に記述した器具を使用して記録した腹斜筋、広背筋、胸鎖乳突筋、口角下制筋の表面筋電位および演奏音を使用した。また発音時刻の検出およびデータ解析区間の設定については、平野らの手法 [6] を参考にした。

演奏音は、まず窓幅を 50 ms に設定し RMS を計算した後、0~1 s 区間の RMS の平均値に標準偏差の 2 倍を足したものを閾値とし、サンプル点が閾値を連続して 12800 回 (250 ms) を超えたとき、超え始めた時刻を発音時刻とした。

筋電信号は、30-400 Hz の 3 次のバターワースフィルタをかけ、窓幅 300 ms の RMS を計算した。次に電源ノイズを除去するため、安静立位における筋活動量の計測データから 5 s 間の平均をとり、全体から引いた。データ解析区間は、発音時刻の 500 ms 前の区間および発音 1.5 s 後から 1 s の区間とし、演奏音から計算した発音時刻を使用してそれぞれの平均筋活動量を計算した。今後、解析区間のうち前者を準備時、後者をサステイン時と呼ぶ。それぞれの区間を演奏音の RMS のプロット上に示したものが図 3.5 である。また実験参加者間の筋活動量について比較するため、最大随意収縮時の平均筋活動量を 100% とし、平均筋活動量を正規化した。正規化した平均筋活動量を %MVC と表記する。

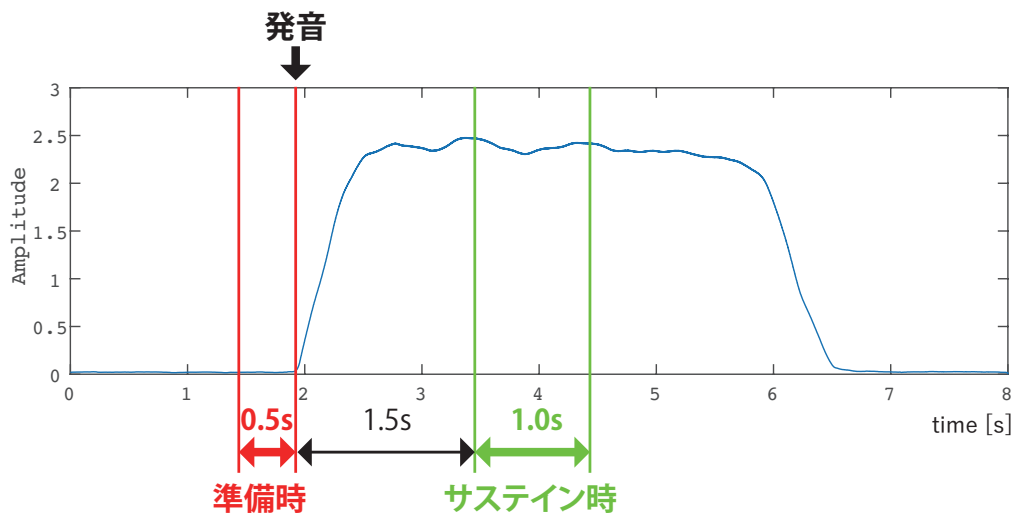


図 3.5: 準備時およびサステイン時の設定区間

### 3.5 分析手法

まず音高・音強の変化に伴う%MVC の変化の傾向を見るため、全実験参加者のデータを対象とし、準備時とサステイン時および4つの筋肉それぞれについて6音ごとの%MVC の平均値を算出した。

また演奏データは1人の実験参加者につき同じ条件（音高・音強・マウスピース）での演奏が3試行含まれている。統計分析には、準備時とサステイン時ごとに、4つの筋肉それぞれについて繰り返しのある対応ありの以下の分散分析を用いた。

- 3 要因分散分析

要因：音高、音強、マウスピース（9 本）

準備時とサステイン時との間での筋活動量の変化については、4つの筋肉ごとに以下の繰り返しのある分散分析を用いた。

- 3 要因分散分析

要因：音高、音強、区間（準備時、サステイン時）

上記3つの分散分析を全体のみではなく実験参加者ごとにも行った。

さらに、4つの筋肉の活動量のバランスについて分析するため、各実験参加者について、27シーケンス全ての演奏（1シーケンス6音×27シーケンス、全162音）の%MVC の平均値を4つの筋肉それぞれについて算出した。続いて4つの筋肉の平均値の平均値を算出し、この値を各筋肉の平均値が超えた場合、その筋肉をその実験参加者が演奏時に主に使用してい

る筋肉とした。そして主に使用している筋肉の組み合わせによってグルーピングし、グループごとに以下の分散分析を行なった。

- 3 要因 ANOVA

要因：音高、音強、マウスピース

以上の分散分析において主効果の認められた要因についてホルム法を用いて多重比較を行い、各要因の群間の比較を行った。

付録 E に示したアンケート調査において、演奏者が自身の演奏技術において課題だと感じていることとして“音色”が上位に入った。しかし音色はパラメトリックな扱いは難しく、また条件の統一のために実験参加者に対して指示することが困難なため、本実験では分析の対象にはしない。

## 第4章 実験結果

本章では、第3.5節に挙げた分析の結果を述べる。

初めに全体の結果を記載し、次に実験参加者ごとの結果およびグループごとの結果を記載する。そして最後に多重比較の結果を述べる。

### 4.1 全実験参加者

#### 4.1.1 6音の%MVC 平均値

実験参加者全員について、4つの筋肉それぞれ6音ごとの%MVCの平均値を算出した結果を表4.1～表4.8に示す。

音高・音強の変化に伴う%MVCは、サステイン時における胸鎖乳突筋の音強を除き（図4.7）、音高の上昇および音強の増加に伴い%MVCも増加する傾向が見られた。腹斜筋、口角下制筋の結果は先行研究と同様となり、準備時とサステイン時ともに、音高の上昇および音強の増加に伴い%MVCも増加した。特に、音高については最も高い音高で大きく増加し、音強の変化に伴う%MVCの変化量は、準備時においてはわずかであった。広背筋は、音高が上昇するにつれて%MVCも上昇する傾向が見られた。またppよりff演奏時の方が%MVCの値はわずかに高く、サステイン時の最も高い音高では比較的大きな差が見られた。胸鎖乳突筋も同じく、音高が上昇するにつれて%MVCも上昇する傾向が見られた。音強については最も低い音高の場合を除き、ppよりffの方が%MVCの値は高かった。

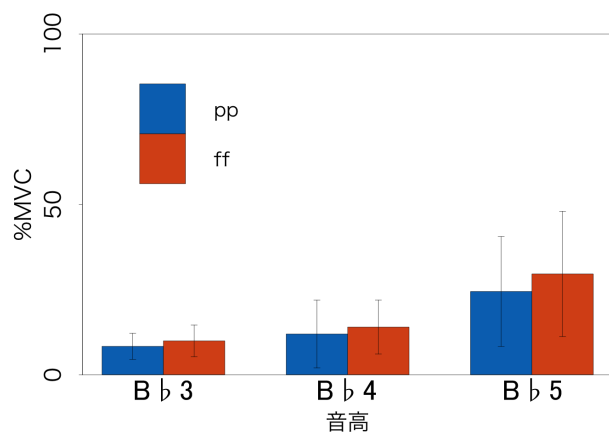


図 4.1: 全参加者の全演奏の準備時における腹斜筋の%MVC の平均値

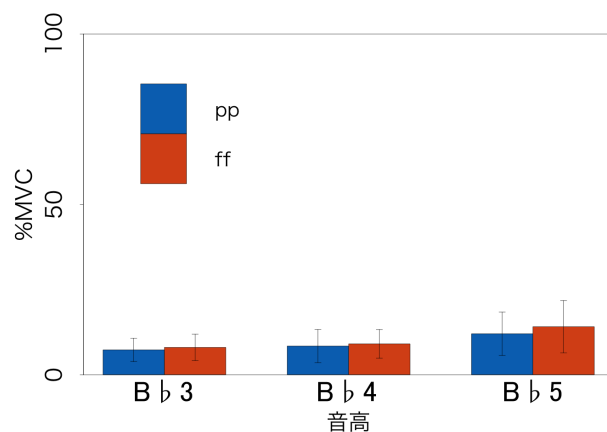


図 4.2: 全参加者の全演奏の準備時における広背筋の%MVC の平均値

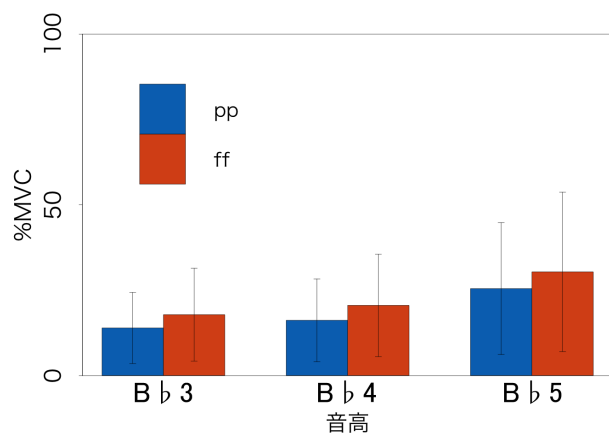


図 4.3: 全参加者の全演奏の準備時における胸鎖乳突筋の%MVC の平均値

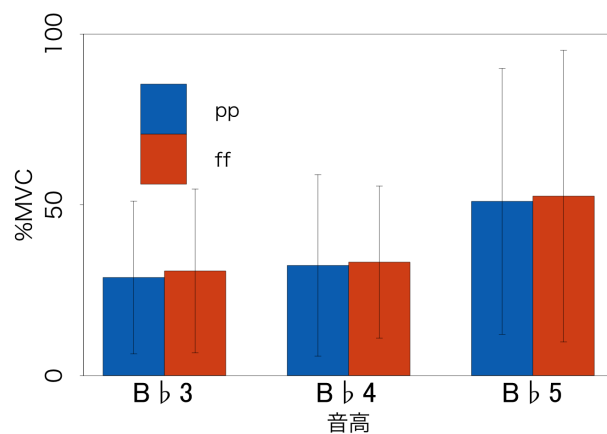


図 4.4: 全参加者の全演奏の準備時における口角下制筋の%MVC の平均値

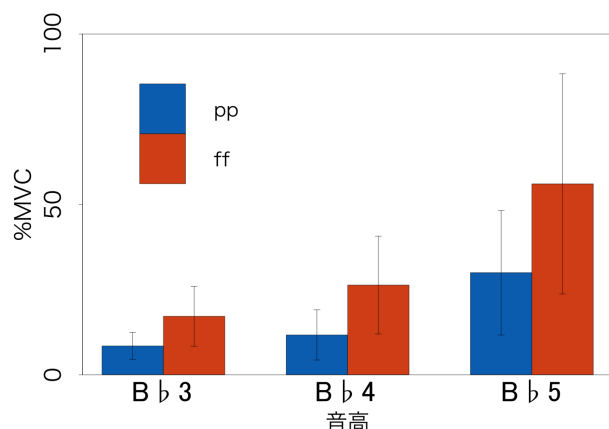


図 4.5: 全参加者の全演奏のサステイン時における腹斜筋の%MVC の平均値

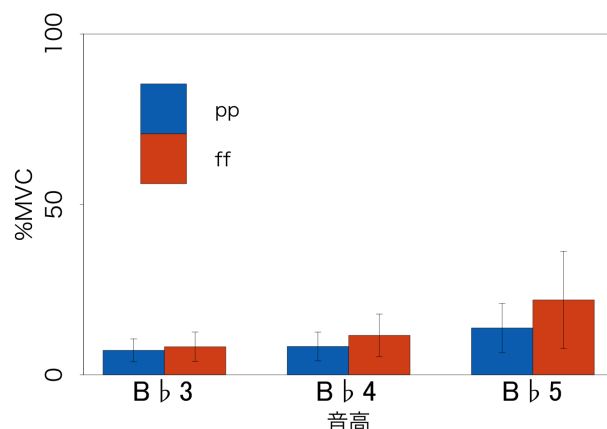


図 4.6: 全参加者の全演奏のサステイン時における広背筋の%MVC の平均値

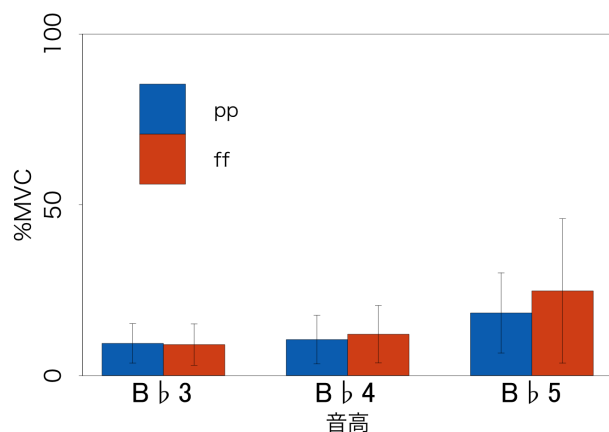


図 4.7: 全参加者の全演奏のサステイン時における胸鎖乳突筋の%MVC の平均値

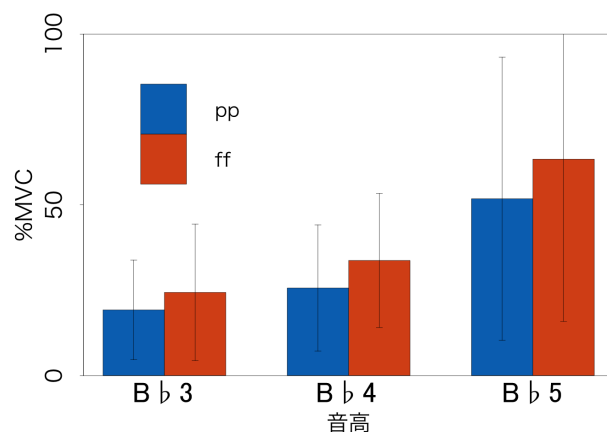


図 4.8: 全参加者の全演奏のサステイン時における口角下制筋の%MVC の平均値

#### 4.1.2 3 要因分散分析 (要因：音高・音強・マウスピース)

次に、音高、音強、マウスピースを要因とする繰り返しのある 3 要因分散分析の結果を示す。詳細な数値は付録 K に掲載する。まず準備時の結果を表 4.1 に示す。準備時の%MVC には、音高の主効果は腹斜筋 ( $p<0.001$ )、広背筋 ( $p<0.01$ )、胸鎖乳突筋 ( $p<0.01$ )、口角下制筋 ( $p<0.05$ ) の全てに認められ、音強の主効果は腹斜筋 ( $p<0.05$ )、広背筋 ( $p<0.01$ )、胸鎖乳突筋 ( $p<0.05$ ) に認められた。つまり音高や音強が変化した場合、これらの筋肉の筋活

動量は変化するということである。要因マウスピースについては全ての筋肉において主効果が認められず、異なるマウスピースを使用しても筋活動は変化しないという結果を得た。交互作用は口角下制筋における要因音高と音強とマウスピース間 ( $p<0.1$ )、胸鎖乳突筋における要因音強と音高とマウスピース間 ( $p<0.1$ ) に有意傾向が認められた。

表 4.1: 準備時における%MVC の 3 要因分散分析 (要因：音高・音強・マウスピース)

(\*\*\*:  $p<0.001$ , \*\*:  $p<0.01$ , \*:  $p<0.05$ , .:  $p<0.1$ )

	腹斜筋	広背筋	胸鎖乳突筋	口角下制筋
音高	***	**	**	*
音強	*	**	*	
マウスピース				
音高：音強				
音高：マウスピース				.
音強：マウスピース				
音高：音強：マウスピース			.	

続いてサステイン時の結果を表 4.2 に示す。サステイン時の%MVC には、音高の主効果は腹斜筋 ( $p<0.001$ )、広背筋 ( $p<0.001$ )、胸鎖乳突筋 ( $p<0.01$ )、口角下制筋 ( $p<0.01$ ) の全てに認められ、音強の主効果は腹斜筋 ( $p<0.01$ )、広背筋 ( $p<0.05$ )、口角下制筋 ( $p<0.01$ ) となった。また胸鎖乳突筋における要因マウスピースに有意傾向が認められた。要因マウスピースについては全ての筋肉において主効果が認められなかった。交互作用は腹斜筋における要因音高と音強間 ( $p<0.01$ ) と広背筋における要因音高と音強間 ( $p<0.01$ )、口角下制筋における要因音高と音強間 ( $p<0.05$ ) に主効果、胸鎖乳突筋における要因音強とマウスピース間 ( $p<0.1$ ) に有意傾向が認められた。

表 4.2: サステイン時における%MVC の 3 要因分散分析 (要因：音高・音強・マウスピース)

(\*\*\*:  $p<0.001$ , \*\*:  $p<0.01$ , \*:  $p<0.05$ , .:  $p<0.1$ )

	腹斜筋	広背筋	胸鎖乳突筋	口角下制筋
音高	***	***	**	**
音強	**	*		**
マウスピース			.	
音高：音強	**	**		*
音高：マウスピース				
音強：マウスピース			.	
音高：音強：マウスピース				

### 4.1.3 3 要因分散分析（要因：音高・音強・区間）

音高、音強、区間（準備時、サステイン時）を要因とする繰り返しのある 3 要因分散分析の結果を表 4.3 に示す。詳細な数値は付録 L に掲載する。区間の主効果は腹斜筋 ( $p<0.01$ )、胸鎖乳突筋 ( $p<0.05$ ) にのみ認められた。つまり準備時とサステイン時との間で、腹斜筋と胸鎖乳突筋は筋活動量が変化することが示唆された。音高の主効果は腹斜筋 ( $p<0.001$ )、広背筋 ( $p<0.001$ )、胸鎖乳突筋 ( $p<0.01$ )、口角下制筋 ( $p<0.01$ ) の全てに認められ、音強の主効果も腹斜筋 ( $p<0.01$ )、広背筋 ( $p<0.05$ )、胸鎖乳突筋 ( $p<0.05$ )、口角下制筋 ( $p<0.01$ ) の全てに認められた。交互作用は、腹斜筋における要因音高と音強間 ( $p<0.01$ )、音高と区間間 ( $p<0.001$ )、音強と区間間 ( $p<0.01$ )、音高と音強と区間間 ( $p<0.001$ )、広背筋における要因音高と音強間 ( $p<0.05$ )、音高と区間間 ( $p<0.01$ )、音高と音強と区間間 ( $p<0.01$ )、口角下制筋における要因音高と区間間 ( $p<0.01$ )、音強と区間間 ( $p<0.01$ )、音高と音強と区間間 ( $p<0.05$ ) に主効果が認められた。また広背筋における音強と区間間に有意傾向 ( $p<0.1$ ) があつた。

表 4.3: 3 要因分散分析（要因：音高・音強・区間）

(\*\*\*:  $p<0.001$ , \*\*:  $p<0.01$ , \*:  $p<0.05$ , ∴:  $p<0.1$ )

	腹斜筋	広背筋	胸鎖乳突筋	口角下制筋
音高	***	***	**	**
音強	**	*	*	**
区間	**		*	
音高：音強	**	*		
音高：区間	***	**		**
音強：区間	**	.		**
音高：音強：区間	***	**		*

## 4.2 各実験参加者

### 4.2.1 6 音の%MVC 平均値

実験参加者ごとの、4 つの筋肉それぞれについて 6 音ごとの%MVC の平均値を算出した結果を示す。ここでは一例として参加者番号 05 の結果を図 M.40～図 4.16 に掲載し、他の実験参加者の結果については付録 M に収録する。個人ごとに見てみると、全実験参加者を総合した結果とは異なる場合がいくつか見られた。

音高・音強の変化に伴う%MVC の変化の傾向は、腹斜筋、口角下制筋については先行研究とほぼ同様となった。サステイン時において、音高の上昇および音強の増加に伴い%MVC も増加した。準備時にも腹斜筋、口角下制筋に同様の傾向が見られたが、特に口角下制筋の%MVC の変化の傾向は全体の結果と異なる場合もあった。広背筋は、準備時では音強につい



てほとんどの場合 pp より ff 演奏時の方がわずかに%MVC の値が高かった。そして音高が上昇するにつれて%MVC も上昇する傾向が見られた。サステイン時は音高と音強ともに準備時と同様の傾向が見られ、準備時と比べて pp と ff の差が大きい参加者もいた。胸鎖乳突筋は、音強については pp より ff の方が%MVC の値が高い場合が多く、サステイン時の B $\flat$ 3、つまり最も低い音高の演奏時は半数ほどが逆転した。音高については準備時は 1 名を除き上昇に伴って%MVC も増加し、サステイン時も同様の傾向が多く見られた。

全体としては、4 つの筋肉全てにおいて音高の上昇および音強の増加に伴い%MVC も増加する傾向が見られた。しかしこの傾向は全ての実験参加者に見られた訳ではなく、%MVC が変化しない場合がある等個人差があった。

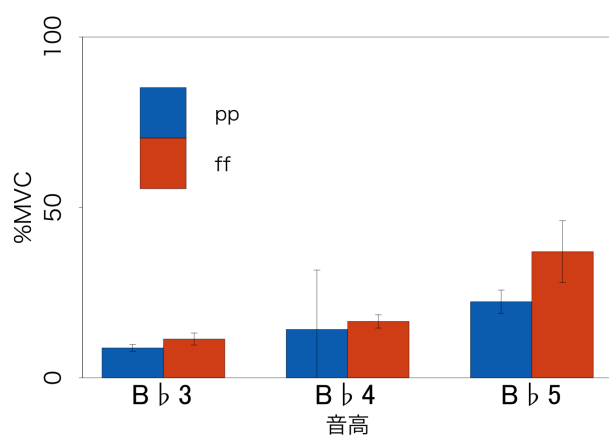


図 4.9: 参加者番号 05 の全演奏の準備時における腹斜筋の%MVC の平均値

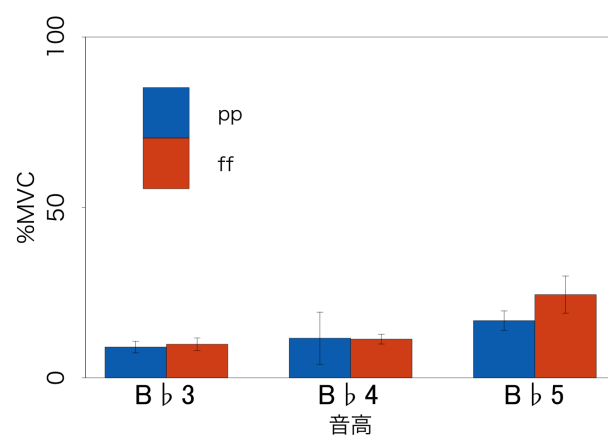


図 4.10: 参加者番号 05 の全演奏の準備時における広背筋の%MVC の平均値

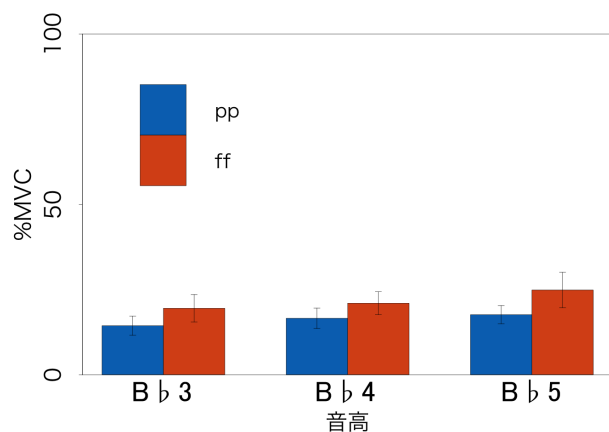


図 4.11: 参加者番号 05 の全演奏の準備時における胸鎖乳突筋の%MVC の平均値

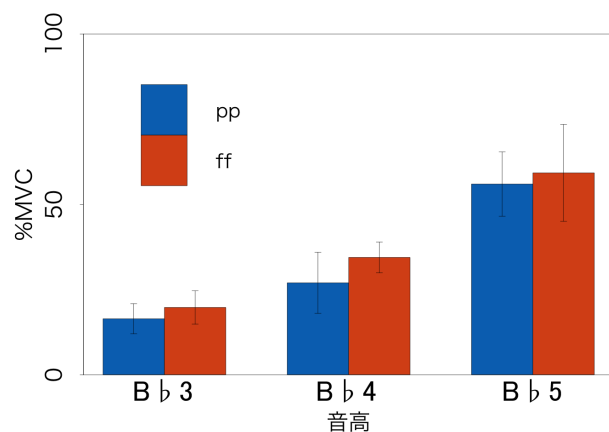


図 4.12: 参加者番号 05 の全演奏の準備時における口角下制筋の%MVC の平均値

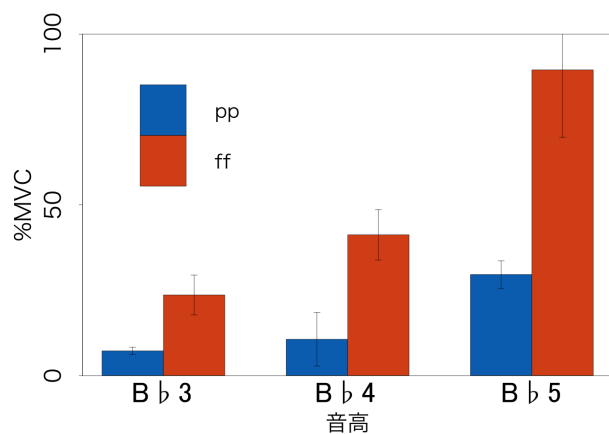


図 4.13: 参加者番号 05 の全演奏のサステイン時における腹斜筋の%MVC の平均値

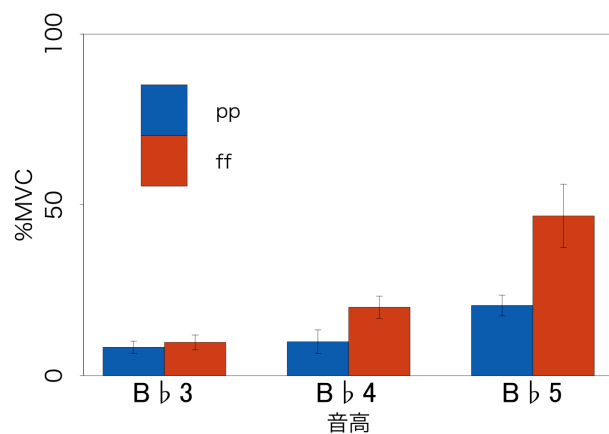


図 4.14: 参加者番号 05 の全演奏のサステイン時における広背筋の%MVC の平均値

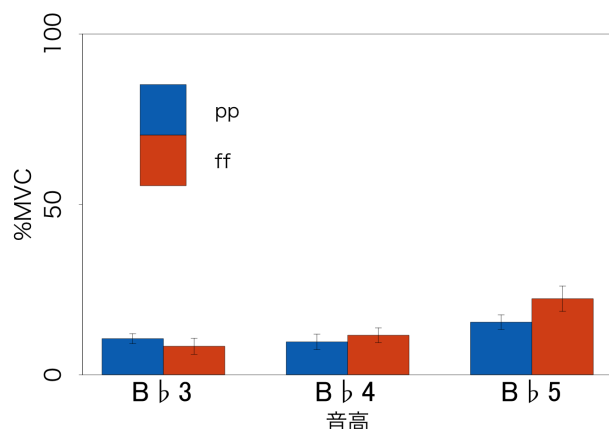


図 4.15: 参加者番号 05 の全演奏のサステイン時における胸鎖乳突筋の%MVC の平均値

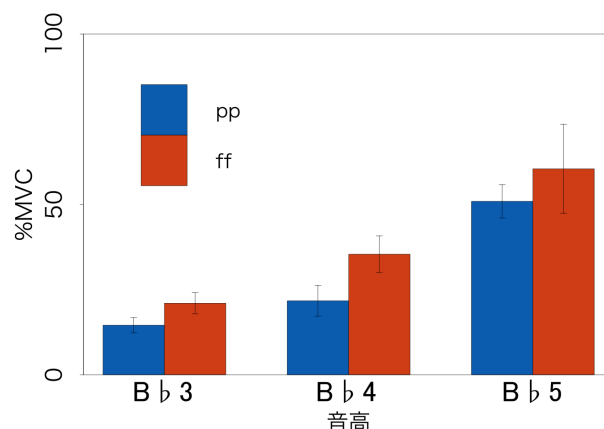


図 4.16: 参加者番号 05 の全演奏のサステイン時における口角下制筋の%MVC の平均値

#### 4.2.2 3 要因分散分析 (要因：音高・音強・マウスピース)

次に、実験参加者ごとに音高、音強、マウスピースを要因とする繰り返しのある 3 要因分散分析の結果について、準備時の結果を表 4.4、サステイン時の結果を表 4.5 に示す。

主効果の認められた要因は、個人によって大きく異なるという結果を得た。

詳細に見ていくと、まず準備時について、音高の主効果は全実験参加者の結果（表 4.1）では全ての筋肉に認められていたが、参加者番号 00 の口角下制筋、03 の広背筋と胸鎖乳突筋には認められなかった。音強の主効果は音高よりばらつきが大きかった。全体の結果と異なり主効果が認められなかったのは、参加者番号 00 の腹斜筋と胸鎖乳突筋、03 の広背筋と胸鎖乳突筋、04 の広背筋、11 の腹斜筋と広背筋、14 の胸鎖乳突筋となった。反対に全体と異なり主効果があったのは 05 の口角下制筋であった。マウスピースの主効果は、全実験参加者の結果では全ての筋肉で認められなかったが、参加者番号 00 の腹斜筋と口角下制筋、02 の腹斜筋、14 の腹斜筋に認められた。

サステイン時は、音高の主効果は参加者番号 00 の口角下制筋のみ認められなかった。音強については、全実験参加者の結果では胸鎖乳突筋のみ認められなかったが、個人では参加者番号 02, 03, 04, 05, 07, 14 に認められた。その他全体と異なり主効果が見られなかったのは、00 の口角下制筋、04 の広背筋であった。

表 4.4: 実験参加者別の%MVC の 3 要因分散分析 (要因：音高・音強・マウスピース，準備時)

(\*\*\*:  $p < 0.001$ , \*\*:  $p < 0.01$ , \*:  $p < 0.05$ , .:  $p < 0.1$ )

参加者番号		腹斜筋	広背筋	胸鎖乳突筋	口角下制筋
00	音高	***	***	***	
	音強		*		
	マウスピース	**	.		***
	音高：音強	***		**	
	音高：マウスピース	*			
	音強：マウスピース				
02	音高：音強：マウスピース				
	音高	***	***	***	***
	音強	***	***	***	
	マウスピース	*			
	音高：音強				
	音高：マウスピース				
03	音強：マウスピース				
	音高：音強：マウスピース				
	音高	***	.		***
	音強	*	***	***	
	マウスピース				.
	音高：音強				.
04	音高：マウスピース				
	音強：マウスピース				
	音高：音強：マウスピース				
	音高	***	*	***	***
	音強	***		***	
	マウスピース				
05	音高：音強	*			
	音高：マウスピース				
	音強：マウスピース				
	音高：音強：マウスピース				
	音高	***	***	***	***
	音強	***	***	***	***
05	マウスピース				
	音高：音強	***	***		
	音高：マウスピース				
	音強：マウスピース				
	音高：音強：マウスピース				

表 4.4: 実験参加者別の%MVC の 3 要因分散分析 (要因：音高・音強・マウスピース, 準備時)

(\*\*\*:  $p < 0.001$ , \*\*:  $p < 0.01$ , \*:  $p < 0.05$ , .:  $p < 0.1$ )

参加者番号		腹斜筋	広背筋	胸鎖乳突筋	口角下制筋
	音強：マウスピース 音高：音強：マウスピース				
07	音高	***	***	***	***
	音強	***	***	***	
	マウスピース	.	.		
	音高：音強	***	**	**	
	音高：マウスピース				
	音強：マウスピース	*			
11	音高	***	***	***	***
	音強	.		***	
	マウスピース				
	音高：音強				.
	音高：マウスピース			*	
	音強：マウスピース				
14	音高	***	***	***	***
	音強	***	**		
	マウスピース	*			
	音高：音強	***		*	
	音高：マウスピース				
	音強：マウスピース				

表 4.5: 実験参加者別の%MVC の 3 要因分散分析 (要因：音高・音強・マウスピース, サステイン時)

(\*\*\*:  $p < 0.001$ , \*\*:  $p < 0.01$ , \*:  $p < 0.05$ , .:  $p < 0.1$ )

参加者番号		腹斜筋	広背筋	胸鎖乳突筋	口角下制筋
00	音高	***	***	***	
	音強	**	***		
	マウスピース		.	**	***

表 4.5: 実験参加者別の%MVC の 3 要因分散分析 (要因：音高・音強・マウスピース，サステイン時)

(\*\*\*:  $p < 0.001$ , \*\*:  $p < 0.01$ , \*:  $p < 0.05$ , .:  $p < 0.1$ )

参加者番号		腹斜筋	広背筋	胸鎖乳突筋	口角下制筋
	音高：音強 音高：マウスピース 音強：マウスピース 音高：音強：マウスピース	*** .  .	***   .	. .  	
02	音高 音強 マウスピース 音高：音強 音高：マウスピース 音強：マウスピース 音高：音強：マウスピース	*** ***  ***	*** ***  ***	*** ***  *** .	*** **
03	音高 音強 マウスピース 音高：音強 音高：マウスピース 音強：マウスピース 音高：音強：マウスピース	*** ***  ***	*** *** * ***	*** ***  ***	*** ***  ***
04	音高 音強 マウスピース 音高：音強 音高：マウスピース 音強：マウスピース 音高：音強：マウスピース	*** ***  ***	** .  	*** ***  ***	*** ***  **
05	音高 音強 マウスピース 音高：音強 音高：マウスピース 音強：マウスピース 音高：音強：マウスピース	*** ***  *** . **	*** *** * *** ** *	*** *** . ***	*** ***  *
	音高	***	***	***	***

表 4.5: 実験参加者別の%MVC の 3 要因分散分析 (要因：音高・音強・マウスピース，サステイン時)

(\*\*\*:  $p<0.001$ , \*\*:  $p<0.01$ , \*:  $p<0.05$ , .:  $p<0.1$ )

参加者番号		腹斜筋	広背筋	胸鎖乳突筋	口角下制筋
	音強	***	***	***	***
	マウスピース	**	*		
	音高：音強	***	***	***	***
	音高：マウスピース	**			
	音強：マウスピース	***			
	音高：音強：マウスピース	***			
11	音高	***	***	***	***
	音強	***	***		***
	マウスピース				
	音高：音強	***	***	*	
	音高：マウスピース		**	*	
	音強：マウスピース				
14	音高	***	***	***	***
	音強	***	***	**	*
	マウスピース				
	音高：音強	***	***		
	音高：マウスピース				
	音強：マウスピース				
	音高：音強：マウスピース				

#### 4.2.3 3 要因分散分析 (要因：音高・音強・区間)

また実験参加者ごとに音高，音強，区間を要因とする繰り返しのある 3 要因分散分析の結果を表 4.6 に示す。

区間の主効果も個人によって異なる結果となった。全実験参加者の結果では腹斜筋における要因区間の主効果が認められたが，個人では参加者番号 11 のみ認められなかった。また広背筋における区間の主効果は全体で認められなかったが，03，05，07，11，14 に認められた。胸鎖乳突筋における区間の主効果は全体で認められたが，14 のみ認められなかった。口角下制筋における区間の主効果は全体で認められなかったが，03，04，07，11 に認められた。また音高と音強の主効果は，全実験参加者の結果では全ての筋肉において認められたが，参加者番号 00 の口角下制筋における音高と音強，胸鎖乳突筋における音強には認められなかった。

表 4.6: 実験参加者別の%MVC の 3 要因分散分析 (要因: 音高・音強・区間)

(\*\*\*:  $p < 0.001$ , \*\*:  $p < 0.01$ , \*:  $p < 0.05$ , .:  $p < 0.1$ )

参加者番号		腹斜筋	広背筋	胸鎖乳突筋	口角下制筋
00	音高	***	***	***	
	音強	***	***		
	区間	***	.	***	
	音高: 音強	***	***		
	音高: 区間	**	.	*	
	音強: 区間	***	***		
	音高: 音強: 区間	***	***	**	
02	音高	***	***	***	***
	音強	***	***	***	**
	区間	***		***	
	音高: 音強	***	***	**	
	音高: 区間	***	***		***
	音強: 区間	***	*		.
	音高: 音強: 区間	***	***	*	
03	音高	***	***	***	***
	音強	***	***	***	***
	区間	***	***	***	***
	音高: 音強	***	***	*	***
	音高: 区間	***	***	***	***
	音強: 区間	***	***	***	***
	音高: 音強: 区間	***	***	***	***
04	音高	***	***	***	***
	音強	***	*	***	***
	区間	***		***	***
	音高: 音強	***		***	
	音高: 区間	***		***	***
	音強: 区間	***		***	***
	音高: 音強: 区間	***		***	**
05	音高	***	***	***	***
	音強	***	***	***	***
	区間	***	***	***	.
	音高: 音強	***	***	***	*
	音高: 区間	***	***	***	



表 4.6: 実験参加者別の%MVC の 3 要因分散分析 (要因: 音高・音強・区間)

(\*\*\*:  $p < 0.001$ , \*\*:  $p < 0.01$ , \*:  $p < 0.05$ , .:  $p < 0.1$ )

参加者番号		腹斜筋	広背筋	胸鎖乳突筋	口角下制筋
	音強: 区間	***	***	***	**
	音高: 音強: 区間	***	***	***	
07	音高	***	***	***	***
	音強	***	***	***	***
	区間	***	***	***	***
	音高: 音強	***	***	***	**
	音高: 区間	***	***	***	***
	音強: 区間	***	***	***	***
	音高: 音強: 区間	***		***	***
11	音高	***	***	***	***
	音強	***	***	***	***
	区間		***	***	***
	音高: 音強	***	***	.	
	音高: 区間	***	***	***	***
	音強: 区間	**	***	***	***
	音高: 音強: 区間	**	***		
14	音高	***	***	***	***
	音強	***	***	**	*
	区間	***	***		*
	音高: 音強	***	***	*	
	音高: 区間	***	***	*	
	音強: 区間	***	*		
	音高: 音強: 区間		**		

### 4.3 筋肉の使用バランス

4つの筋肉の活動量のバランスについて分析するため、各実験参加者について、全ての演奏の%MVCの平均値を筋肉それぞれについて算出した。全ての演奏は、6音が含まれるシーケンスが計27個あるため、計162個の音の演奏となっている。

続いて実験参加者ごとの主に使用している筋肉を判定した。準備時およびサステイン時それぞれで4つの筋肉の平均値の平均値を算出し、各筋肉の平均値がその値を超えたものを、そ

の実験参加者が演奏中に主に使用している筋肉とした。広背筋を主として使用している実験参加者はいなかった。主に使用している筋肉の組み合わせによってグルーピングしたところ、4つのグループに分けることができた。その結果を表 4.7 に示す。ここで腹斜筋を「腹」、胸鎖乳突筋を「首」、口角下制筋を「口」として表記する。準備時とサステイン時で筋肉が異なる実験参加者が2名見られたが、いずれも準備時は口のみ、サステイン時は口に加えて腹も使用するタイプであった。

表 4.7: 主に使用している筋肉でのグルーピング

筋肉	準備時	サステイン時
腹	00, 14	00, 14
口	02, 03, 05	02
腹+口	07	03, 05, 07
首+口	04, 11	04, 11

#### 4.3.1 個人の傾向とグルーピング

各実験参加者について、筋肉ごとの%MVCの平均値をプロットしたグラフを、グループごとにまとめて図 4.17～4.32 に示す。筋肉を使うバランスは、個人によって大きく異なることがわかった。多くの実験参加者は口角下制筋の値が高く、そうでない場合は腹斜筋の値が高かった。胸鎖乳突筋の値が高い実験参加者もあり、その場合口角下制筋の値も高かった。

● 準備時：腹グループ

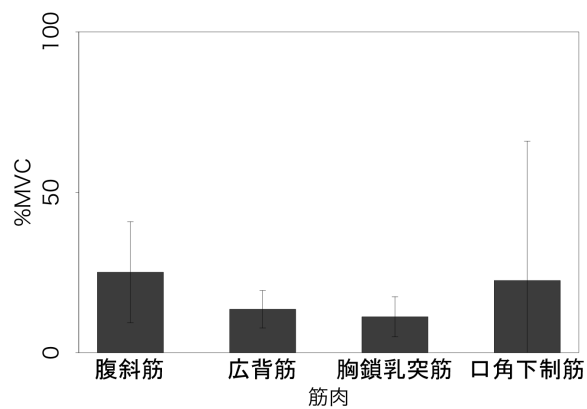


図 4.17: 参加者番号 00 の準備時の%MVC の平均値

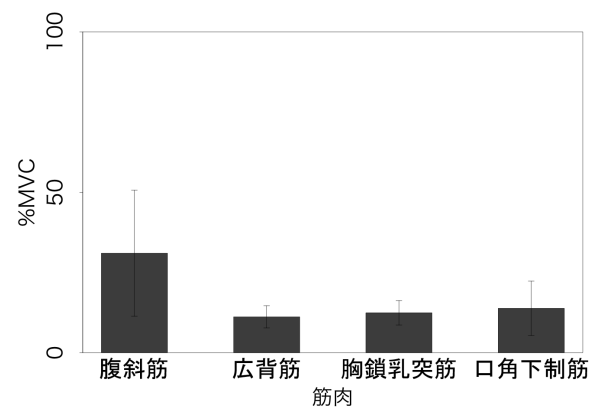


図 4.18: 参加者番号 14 の準備時の%MVC の平均値

● 準備時：口グループ

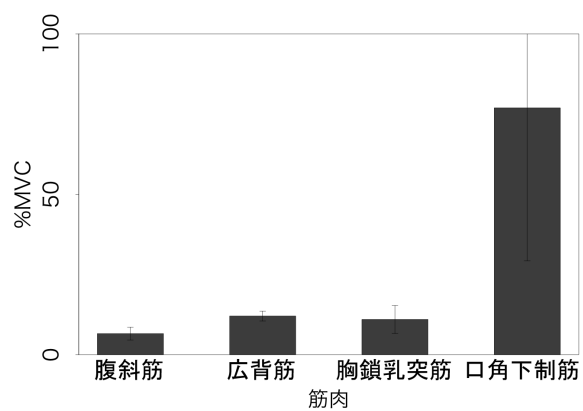


図 4.19: 参加者番号 02 の準備時の%MVC の平均値

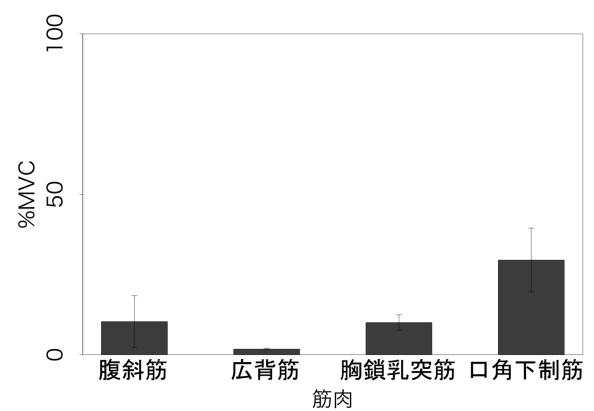


図 4.20: 参加者番号 03 の準備時の%MVC の平均値

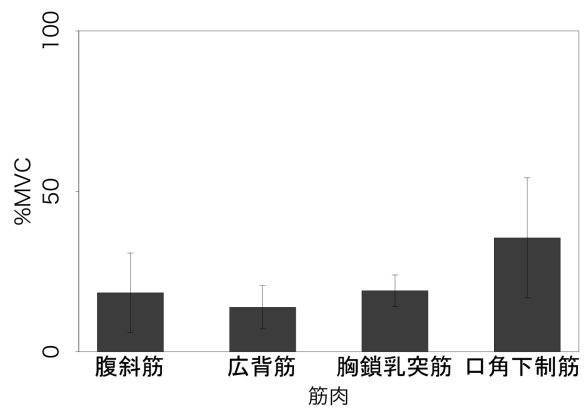


図 4.21: 参加者番号 05 の準備時の%MVC の平均値

- 準備時：腹+口グループ

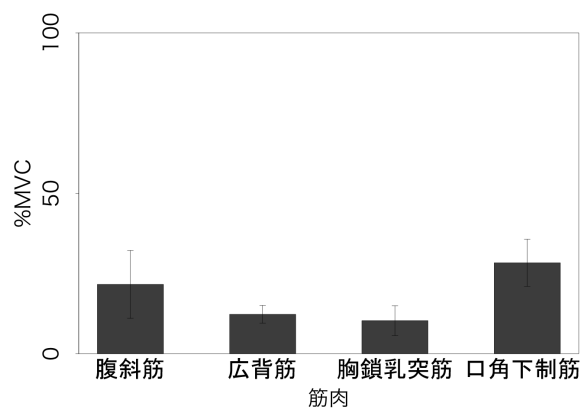


図 4.22: 参加者番号 07 の準備時の%MVC の平均値

- 準備時：首+口グループ

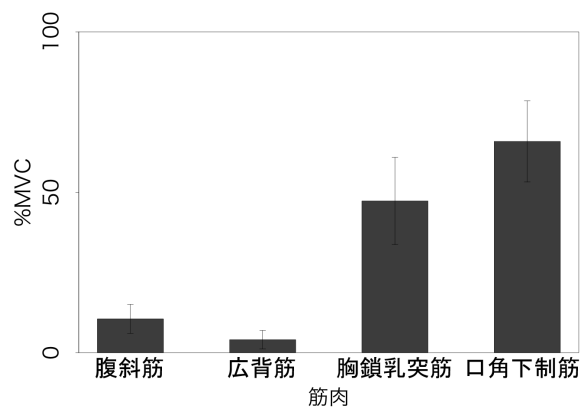


図 4.23: 参加者番号 04 の準備時の%MVC の平均値

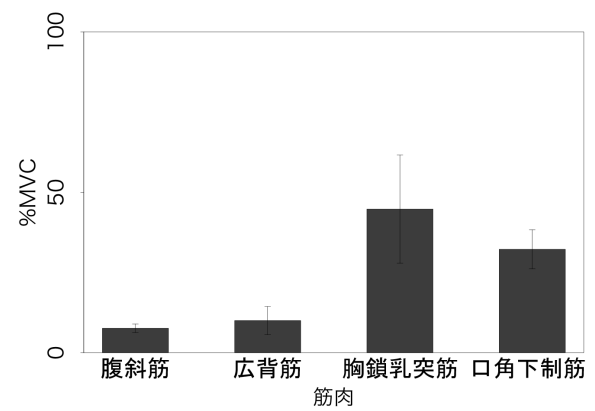


図 4.24: 参加者番号 11 の準備時の%MVC の平均値

- サステイン時：腹グループ

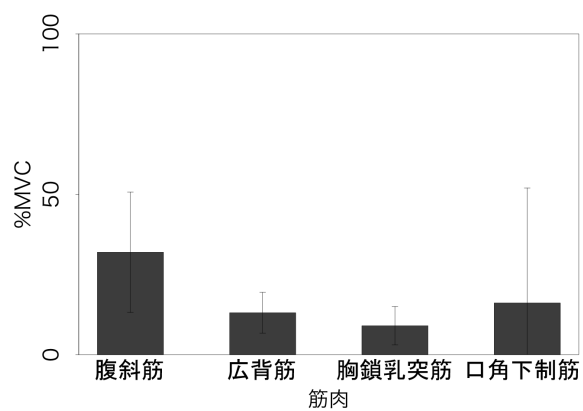


図 4.25: 参加者番号 00 のサステイン時の%MVC の平均値

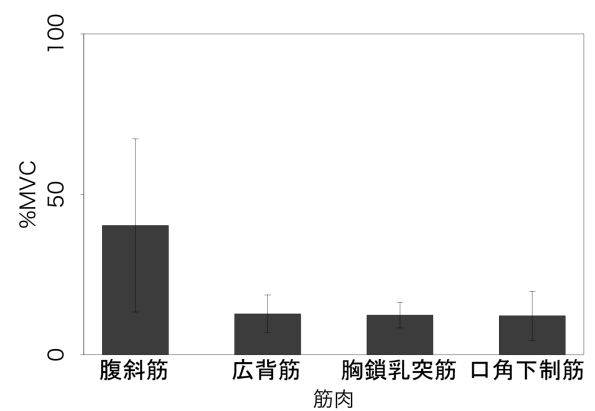


図 4.26: 参加者番号 14 のサステイン時の%MVC の平均値

- サステイン時：口グループ

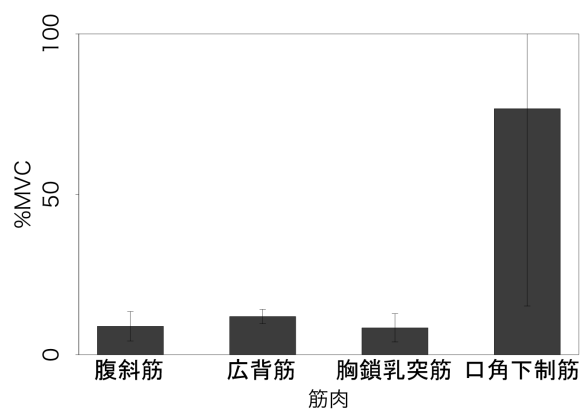


図 4.27: 参加者番号 02 のサステイン時の %MVC の平均値

- サステイン時：腹+口グループ

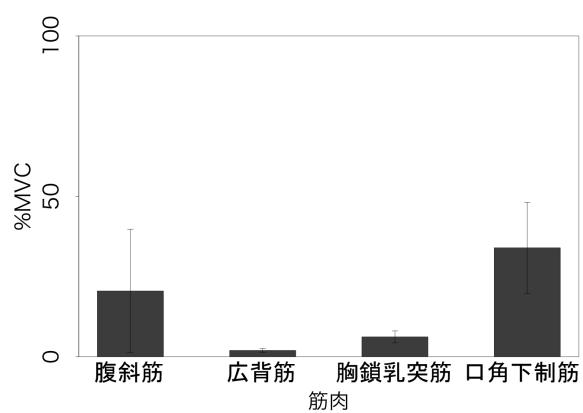


図 4.28: 参加者番号 03 のサステイン時の %MVC の平均値

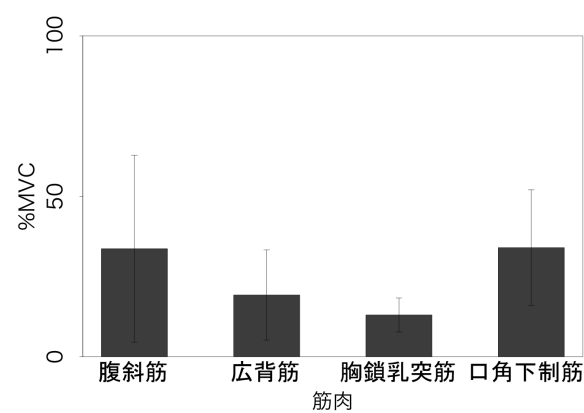


図 4.29: 参加者番号 05 のサステイン時の %MVC の平均値

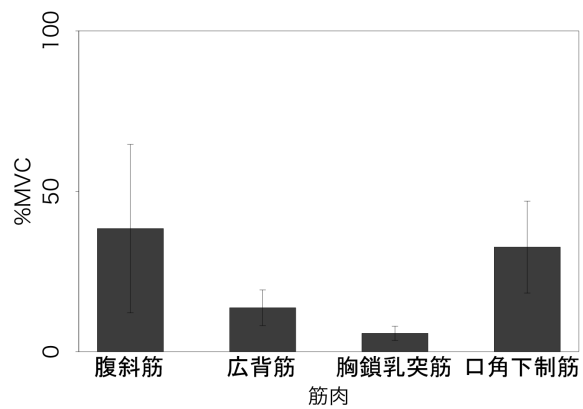


図 4.30: 参加者番号 07 のサステイン時の %MVC の平均値

● サステイン時：首+口グループ

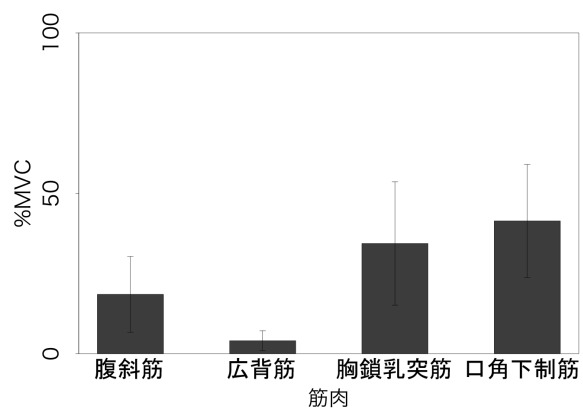


図 4.31: 参加者番号 04 のサステイン時の %MVC の平均値

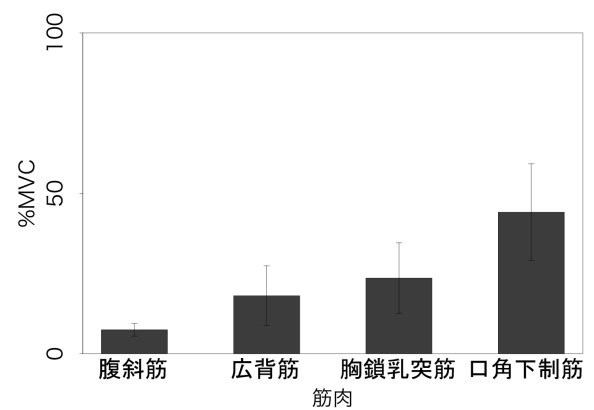


図 4.32: 参加者番号 11 のサステイン時の %MVC の平均値

#### 4.3.2 グループ別分散分析の結果

次に、グループごとに音高、音強、マウスピースを要因とする繰り返しのある 3 要因分散分析の結果について、準備時の結果を表 4.8、サステイン時の結果を表 4.9 に示す。詳細な数値は付録 P に掲載する。

全実験参加者の結果と各グループの結果を比較すると、準備時については、腹グループと口グループが全体の結果と異なった。腹グループは、腹斜筋と胸鎖乳突筋における音強、口角下制筋における音高に主効果が認められず、口グループは腹斜筋における音高と胸鎖乳突筋における音強に認められなかった。サステイン時は全てのグループが全体の結果と異なった、腹グループは口角下制筋における音高と音強、腹+口グループは広背筋における音高と音強に主効果が認められなかった。反対に全体に主効果が認められたがグループごとでは認められなかった要因は、口グループ、腹+口グループ、首+口グループの胸鎖乳突筋における音強となった。

また各グループの主に使っている筋肉について、サステイン時は全てのグループで音高と音強ともに主効果が認められ、準備時は全てのグループで音高には主効果が認められたが、音強には認められない場合も見られた。

表 4.8: 実験参加者別の%MVC の 3 要因分散分析  
(要因：音高・音強・マウスピース，準備時)

(\*\*\*:  $p < 0.001$ , \*\*:  $p < 0.01$ , \*:  $p < 0.05$ , .:  $p < 0.1$ )

グループ		腹斜筋	広背筋	胸鎖乳突筋	口角下制筋
腹	音高	***	***	***	
	音強		*		
	マウスピース	.	.		
	音高：音強	***		**	
	音高：マウスピース	**		.	
	音強：マウスピース				
	音高：音強：マウスピース				
口	音高	.	***	***	***
	音強	**	**		
	マウスピース				
	音高：音強	*			
	音高：マウスピース				
	音強：マウスピース				
	音高：音強：マウスピース				
腹+口	音高	***	***	***	***
	音強	***	***	***	
	マウスピース	.	.		
	音高：音強	***	**	**	



表 4.8: 実験参加者別の%MVC の3 要因分散分析  
(要因：音高・音強・マウスピース，準備時)

(\*\*\*:  $p < 0.001$ , \*\*:  $p < 0.01$ , \*:  $p < 0.05$ , .:  $p < 0.1$ )

グループ		腹斜筋	広背筋	胸鎖乳突筋	口角下制筋
	音高：マウスピース 音強：マウスピース 音高：音強：マウスピース	*		.	
首+口	音高	***	**	***	***
	音強	***	**	**	
	マウスピース				
	音高：音強	**			.
	音高：マウスピース				
	音強：マウスピース 音高：音強：マウスピース	*			

表 4.9: 実験参加者別の%MVC の3 要因分散分析  
(要因：音高・音強・マウスピース，サステイン時)

(\*\*\*:  $p < 0.001$ , \*\*:  $p < 0.01$ , \*:  $p < 0.05$ , .:  $p < 0.1$ )

グループ		腹斜筋	広背筋	胸鎖乳突筋	口角下制筋
腹	音高	***	***	***	
	音強	***	***		
	マウスピース				
	音高：音強	*	**		
	音高：マウスピース				
	音強：マウスピース 音高：音強：マウスピース				
口	音高	***	***	***	***
	音強	***	***	***	**
	マウスピース				
	音高：音強	***	***	***	
	音高：マウスピース			.	
	音強：マウスピース 音高：音強：マウスピース				
腹+口	音高	***		*	***
	音強	***		*	***

表 4.9: 実験参加者別の%MVC の3 要因分散分析  
(要因：音高・音強・マウスピース，サステイン時)

(\*\*\*:  $p<0.001$ , \*\*:  $p<0.01$ , \*:  $p<0.05$ , .:  $p<0.1$ )

グループ		腹斜筋	広背筋	胸鎖乳突筋	口角下制筋
	マウスピース 音高：音強 音高：マウスピース 音強：マウスピース 音高：音強：マウスピース	***	**	***	
首+口	音高	***	***	***	***
	音強	***	***	***	***
	マウスピース	**			
	音高：音強	*		***	*
	音高：マウスピース				
	音強：マウスピース				
	音高：音強：マウスピース				

## 4.4 多重比較の結果

本節では，前節で述べた全体の分散分析において主効果の認められた要因について，ホルム法を用いて多重比較を行った結果を示す．

### 4.4.1 音高の影響

準備時の結果を表 4.10，サステイン時の結果を表 4.11 に示す．音高について，準備時とサステイン時の両方で，主効果が認められた全ての筋肉において全ての群間に有意な差が認められた ( $p<0.001$ ) ．

表 4.10: 準備時における音高の多重比較

筋肉	有意差あり	有意差なし
腹斜筋	Bb3-Bb4, Bb4-Bb5, Bb3-Bb5 ( $p<0.001$ )	-
広背筋	Bb3-Bb4, Bb4-Bb5, Bb3-Bb5 ( $p<0.001$ )	-
胸鎖乳突筋	Bb3-Bb4, Bb4-Bb5, Bb3-Bb5 ( $p<0.001$ )	-
口角下制筋	Bb3-Bb4, Bb4-Bb5, Bb3-Bb5 ( $p<0.001$ )	-

表 4.11: サステイン時における音高の多重比較

筋肉	有意差あり	有意差なし
腹斜筋	Bb3-Bb4, Bb4-Bb5, Bb3-Bb5 ( $p<0.001$ )	-
広背筋	Bb3-Bb4, Bb4-Bb5, Bb3-Bb5 ( $p<0.001$ )	-
胸鎖乳突筋	Bb3-Bb4, Bb4-Bb5, Bb3-Bb5 ( $p<0.001$ )	-
口角下制筋	Bb3-Bb4, Bb4-Bb5, Bb3-Bb5 ( $p<0.001$ )	-

#### 4.4.2 音強の影響

準備時の結果を表 4.12, サステイン時の結果を表 4.13 に示す. 音強について, 準備時とサステイン時の両方で, 主効果が認められた全ての筋肉において全ての群間に有意な差が認められた ( $p<0.001$ ).

表 4.12: 準備時における音強の多重比較

筋肉	有意差あり	有意差なし
腹斜筋	pp-ff ( $p<0.001$ )	-
広背筋	pp-ff ( $p<0.001$ )	-
胸鎖乳突筋	pp-ff ( $p<0.001$ )	-

表 4.13: サステイン時における音強の多重比較

筋肉	有意差あり	有意差なし
腹斜筋	pp-ff ( $p<0.001$ )	-
広背筋	pp-ff ( $p<0.001$ )	-
口角下制筋	pp-ff ( $p<0.001$ )	-

#### 4.4.3 マウスピースの影響

マウスピースの影響については, 全体では主効果が認められなかった. しかし実験参加者ごとの分散分析の結果を見ると, 主効果が認められている場合もあり, 個人によってはマウスピースの吹奏感が筋活動に影響を与える場合もある.

#### 4.4.4 発音前後の変化

腹斜筋の%MVC をプロットしたグラフを図 4.33, 胸鎖乳突筋を図 4.34 に示す. また多重比較の結果を表 4.14 に示す. 発音前後の変化について, 主効果が認められた腹斜筋および胸

鎖乳突筋の両方の群間に有意な差が認められた ( $p<0.001$ )。腹斜筋については，%MVC は発音前より発音後の方が大きく，一方胸鎖乳突筋は発音後より発音前の方が大きかった。

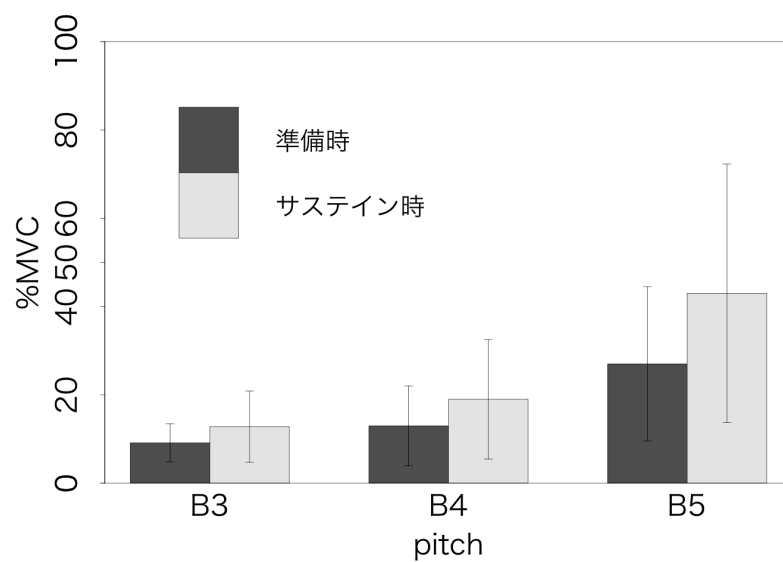


図 4.33: 腹斜筋における発音前後の%MVC の変化

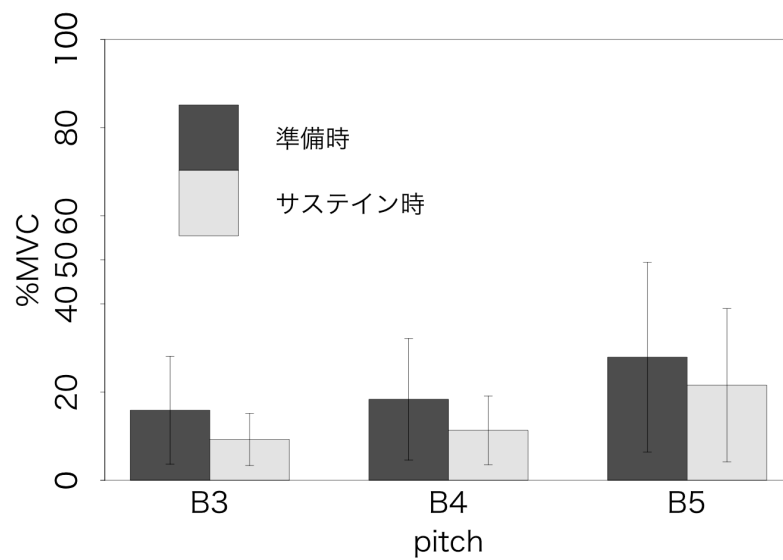


図 4.34: 胸鎖乳突筋における発音前後の%MVC の変化

表 4.14: 区間の多重比較

筋肉	有意差あり	有意差なし
腹斜筋	準備時-サステイン時 ( $p<0.001$ )	-
胸鎖乳突筋	準備時-サステイン時 ( $p<0.001$ )	-

## 第5章 考察

### 5.1 音高の変化

音高が上昇するにつれて、4つの筋肉全ての%MVCは有意に増加するという結果を得た。これは先行研究でも述べられているように、口腔内圧力が関連していると考えられている。第1章で述べたように、口唇の振動を生み出すためには、息の流れによって口腔内にかかる口腔内圧力が重要となる。先行研究によると、音高の上昇に伴い、吹奏に必要な口腔内圧力は増加する [9] [27]。この圧力の増加を実現させるために筋活動が活発になったと推測される。

トランペット吹奏の呼気時において、呼気筋である腹筋群は横隔膜を押し上げ、腹圧を高める働きをする。加えて強い運動強度において呼気に活動する広背筋も同じく、腹圧を高めたり、横隔膜の挙上を補助したりする [28]。この2つの呼気筋の活性化によって腹圧が高められ、高音域の演奏が実現したと考えられる。

口角下制筋の結果は、多数の先行研究と同様となり、これにも口腔内圧力が関連していると思われる。口腔内圧力の増加は、腹圧を上げることだけではなく、口腔内の容積を狭めることによって実現される。そして高い圧力を必要とする高音域においては、容積が狭まり呼気の手が速くなるため、ベルヌーイ効果により上唇と下唇が強く引き寄せられる。ベルヌーイ効果とは、流速が速くなると流れの向きと直角方向の圧力が下がるというものである [7]。これにより唇を閉じるエネルギーが必要となり、口唇周囲の筋肉が収縮していると考えられる。

そして胸鎖乳突筋についてだが、この筋肉は吸気筋である。フルート吹奏時の呼吸筋についての研究では、吸気筋が息の支えに寄与していると述べられていえる [19]。これはフルート吹奏時に必要な呼気の圧力が安静呼吸時より小さいため、呼気を抑えるために吸気筋が用いられていると考察されていた。しかしトランペットの吹奏において呼気圧は安静呼吸時より大きく、フルート吹奏の例は適応しない。また後述するが、胸鎖乳突筋は音強の変化において主効果が認められなかった。金管楽器演奏時は音強によって口腔内圧が変化するとされている [27]。よって口腔内圧力を増加させるために働いているものではない可能性がある。

ホルン演奏時の口唇周囲の皮膚表面の動きについて、平野らの実験では音高が高くなると笑筋によって口角が左右に引っ張られ変動するが、音強が変化しても口唇周囲の形状は変動しないという結果を得ている [6]。これは本実験における胸鎖乳突筋の結果と共通している。さらに胸鎖乳突筋は咬合機能時に活動するという点がある [29]。これに関連して、管楽器吹奏時の顎機能や咀嚼筋活動についての研究では、咬筋や側頭筋、顎二腹筋といった咬合機能を制御する筋肉は楽器吹奏時に活発になるとしている [13, 14]。特に咬筋の活動は、音強の影響は受けず音高が高くなると活発になると述べており、これは音の高低による口唇の緊張度合いと連動したものと推測している。これらの点より、本研究において音高の主効果が認め

られた胸鎖乳突筋は、笑筋やこれを含む口唇周囲の筋活動に連動した咬筋の影響を受けて活発になったのではないかと考えられ、アンブシュアの形成に関わっていることが示唆された。

ここで、多くの演奏者が課題だと感じている高音域の演奏に言及する。高音域の演奏は一般的に難しいと言われており、実験参加者に行ったインタビュー調査でも課題に感じる音域だという回答を多く得た。具体的には、口の周りが疲れてしまう、首や肩が力んでいるという状態になり、結果として息の流れが止まり、苦しそうな演奏になるといったものであった。口腔内圧力を高めるために口唇周囲の筋肉をより活性化する必要はあるが、それに連動して胸鎖乳突筋も活発になると、良い演奏法とは言えなくなってしまう。しかし、音高の変化に関して胸鎖乳突筋に主効果が見られなかった実験参加者が1名おり、アンケートではこの1名のみ苦手な音域を中音域と回答している。特にこのような演奏者の場合、胸鎖乳突筋以外の筋肉をどのように使っているのか、身体全体のバランスや筋肉量について個人にフォーカスして分析する必要があると考えられる。

## 5.2 音強の変化

音強の変化に伴う筋活動の変化は、準備時では腹斜筋、広背筋、胸鎖乳突筋に、サステイン時では腹斜筋、広背筋、口角下制筋に主効果が認められ、これらの筋肉は音強が強くなると筋活動は有意に活発になった。

金管楽器の音強の調節は、呼気量の加減による要因が大きいとされている [13]。準備時の筋活動は吸息が関連していると考えられ、演奏する音の音強によって吸気量が変動し、その影響により筋活動にも差が現れたと推測する。また口角下制筋の有意差は認められなかったことから、アンブシュアの形成に必要な筋活動量は音強の変化に関わらず一定であるということが示唆された。

さらに金管楽器演奏では、音強が強くなると口腔内圧力も増加するとされている [27]。サステイン時において、この口腔内圧力を実現するにはより強い腹圧が必要となり、そのために腹斜筋および広背筋の筋活動が活発になったと推測する。また胸鎖乳突筋には主効果が認められなかったが、この筋肉は吸気筋であるため、呼気に対する影響は小さいと考えられる。そして口角下制筋は、先行研究でも多数述べられているが、アンブシュアの維持に寄与している。口腔内圧力を高めるためには、呼気の圧力に対抗して口唇周囲の形状を維持する必要がある。これによって口角下制筋の活動が活発になったと推察される。

## 5.3 筋肉のバランスと使い方

筋肉を使用するバランスは、個人によって大きく異なった。この理由としては体格やこれまで受けた指導が影響しているのではないかと考えられる。特に指導に関しては、個々の指導者の主観からなされるものが多く [3]、人によって様々である。実験参加者に対して演奏時の身体の使い方意識していることに関してインタビューを行ったところ、腹部のみに力を入れるようにしている人もいれば、吸気時に肩が上がっても良いという人もいた。また腹部

を前に出して吹くように指導された人や、反対に内側に持ち上げるように指導されたという人もいる。本研究ではこれまで指導された内容までは踏み込んでいないが、指導されてきた内容と主に使う筋肉について分析すると、関係性が発見される可能性はある。インタビュー全体を見ると、トランペット吹奏時の身体の使い方として意識している部位は、お腹周りと回答する人が多く、次いで口周りという人が多かった。

さらに主に使っている筋肉の組み合わせについて、実験参加者8名を4つのグループに分けることができた(表4.7)。各グループのサステイン時の筋活動について、全体の分散分析の結果と比較して考察する。

まず腹グループは、口角下制筋に音高・音強ともに主効果が認められなかった。他の3グループは口角下制筋の活動が活発であることを考えると、このグループに属する演奏者は口唇周囲は脱力しており、ほぼ腹部のみを意識して演奏していると見られる。次に口グループは、胸鎖乳突筋の音強に主効果が認められた。この理由として、第5.1節にて述べたように、口唇周囲の筋活動の活性と連動したことが考えられる。またこの結果は他の腹+口グループ、首+口グループの、口角下制筋が活発だったグループにも同様に見られた。加えて腹+口グループは、広背筋に音高・音強ともに主効果が認められなかった。このグループに属する参加者番号07の方は、インタビューで首や背中を意識して使えないと回答しており、本人も腹と口を主に意識して使っているようで、筋活動も回答通りの結果となった。

またグルーピングに実験参加者の演奏経験年数および年齢は影響がなかった。しかし首+口グループは2名とも女性であったため、演奏者の体格や筋肉量等の身体的要因が影響する可能性がある。

今回の実験では8名のデータを使用した。より多くの演奏者について分析すると、多数の演奏者が属するグループや、この4グループとは異なる筋活動のバランスの演奏者が発見される可能性がある。また本研究では個人の体格との関係には踏み込んでいないが、筋活動のバランスと関連が見つかるかもしれない。加えて筋活動のみではなく、それ以外の生体情報、例えば重心動揺、肺活量、姿勢、体型と言った要素と組み合わせて比較検討することが望まれる。

## 5.4 マウスピースの影響

音高・音強・マウスピースを要因とする3要因分散分析の結果、実験参加者全体では主効果が認められなかった。しかし、実験参加者は全員マウスピース9本の吹奏感の差を感じることができていた。マウスピースによる吹奏感の差が筋活動に与える影響は小さく、身体の使い方の変化は微量であると考えられる。

また実験参加者ごとに3要因分散分析を行なった結果、個人ではマウスピースの主効果が認められる場合があり、その筋肉もそれぞれで異なっていた。よって吹奏感の違いによる身体の使い方の変化には個人差があると言える。

加えて第5.3節にて述べた各実験参加者が主に使用している筋肉と、マウスピースの主効果が認められた筋肉が一致していない場合があった。つまり、演奏において定常的に最も活



動量の大きい筋肉と、マウスピースが変わったときに活動量が変化する筋肉は異なる可能性がある。音を出すための筋肉と、コントロールするための筋肉という異なる役割があるという可能性がある。

また本研究では呼吸筋である腹斜筋と広背筋、吸気筋の胸鎖乳突筋、表情筋の口角下制筋の4つの筋肉を計測した。予備実験にて他にも多数の筋肉の計測を検討していたが、実験環境により4箇所には絞らざるを得なくなった。今回の4つの筋肉では主効果が認められなかったが、本研究にて計測していない筋肉に影響がある可能性もある。したがって今後計測箇所を増やした実験を行うことで、影響を受ける筋肉が発見されることを期待する。

## 5.5 発音前後の変化

発音前と発音後、つまり準備時とサステイン時の筋活動を比較すると、腹斜筋と胸鎖乳突筋において有意な差があった。

腹斜筋の結果は先行研究と同様となり、準備時よりもサステイン時の方が筋活動は活発であった。この結果には肺の中の空気の量、つまり肺気量が関係していると思われる。発音後の音持続時は肺気量が少なく、これを使用するためには横隔膜を押し上げる必要がある。このために腹斜筋の活動が活発になったと推測する。

胸鎖乳突筋については、腹斜筋とは反対にサステイン時よりも準備時の方が筋活動は活発であった。これは胸鎖乳突筋が吸気筋であるからだと考えられる。演奏時の吸気は安静時の呼吸とは異なり、意識的に行われる努力呼吸であるため胸鎖乳突筋が用いられて活発になり、音持続時は呼気動作となるため活動量は小さくなった。ただし全く使われないというわけではなく、第5.1節で述べたように高音域の演奏においては使用される場合がある。

広背筋は主効果が認められなかったが、%MVCの値がそもそも小さく、他の筋肉と比較すると演奏中あまり使われていない筋肉である可能性がある。

また口角下制筋も主効果は認められなかったが、これも先行研究と同様の結果を示した。つまりアンブシュアは発音前に形成され、その後も維持されていることが示唆された。

## 第6章 総合考察

### 6.1 まとめ

トランペットの演奏は呼吸法、アンブシュア、姿勢、運指等が統合的に機能することで実現し、特に呼吸法とアンブシュアが重要であり、両者は相互に関連している。このような奏法に関する指導は、指導者の経験に基づいた主観的なものが多いのが現状である。にもかかわらず身体の使い方に関する定量的な研究はまだ少なく、演奏者がどのような身体の使い方をしているのかは未解明な部分が多い。研究については呼吸やアンブシュアそれぞれに関するものは存在しているが、身体全体のバランスには言及していない。またそれぞれの考察において、身体の使い方の変化は口腔内圧力の調整のためであると述べたものが数多く存在する。演奏中の口腔内圧力を正確に計測するのは難しいが、金管楽器のマウスピースは、内部の形状が音の鳴らしやすさに関連しており、口腔内圧力に関連していると推測される。そして鳴らしやすさが異なる場合、演奏者も呼吸やアンブシュアを調整している可能性があり、この調整に直接関わっていると考えられるのは筋活動である。したがって演奏者の筋活動を定量的に計測することで、練習や指導がより効率的になるのではないかと考える。

したがって本研究では、呼吸とアンブシュアの両方に着目し、呼吸筋および表情筋の筋活動を表面筋電位を用いて計測し、音高、音強、マウスピースといった演奏条件の変化に伴う筋活動の変化の特徴と、各筋肉の活動量のバランスについて解析した。実験参加者はアマチュアトランペット奏者8名であった。実験参加者の演奏する課題は、音高3段階、音強2段階を組み合わせた6音を順番に偏りが無いようランダムに配置し、先頭に音高B $\flat$ 4(466.16 Hz)、音強mfの1音を追加したシーケンスを27個作成した。また1シーケンスごとに異なるマウスピースを使用し、9シーケンスを1セットとして3セット演奏させた。データ解析区間は、発音時刻の500 ms前の区間（準備時）および発音1.5 s後から1 sの区間（サステイン時）とした。

その結果、以下の項目が明らかになった。

1. 演奏音の音高が高くなった場合、発音直前および音の持続時における腹斜筋、広背筋、胸鎖乳突筋、口角下制筋の筋活動量は増加する。
2. 演奏音の音強が強くなった場合、発音直前においては腹斜筋、広背筋、胸鎖乳突筋、音の持続時には腹斜筋、広背筋、口角下制筋の筋活動量は増加する。
3. 吹奏感の異なるマウスピースを使用した場合、腹斜筋、広背筋、胸鎖乳突筋、口角下制筋の筋活動量の変化量は小さい。

4. 4つの筋肉を使用するバランスは演奏者によって異なり、また演奏中最も活発に使用する筋肉と、微量な調整を行う筋肉は異なる場合がある。
5. 発音直前と音の持続時の筋活動量は、腹斜筋は持続時のほうが大きく、胸鎖乳突筋は発音直前のほうが大きい。

まず1つ目には、主に口腔内圧力が関係している。音高の上昇に伴い吹奏に必要な口腔内圧力は増加する。この圧力を増加させるために筋活動が活発になったと推測される。胸鎖乳突筋については、音高の上昇による笑筋の収縮やこれを含む口唇周囲の筋活動に連動した咬筋の影響を受けて活発になったのではないかと考えられる。

2つ目は、準備時は音強による吸気量の変動により筋活動にも差が現れたと推測する。またアンブシュアの形成に必要な筋活動量は、音強の変化に関わらず一定であるということが示唆された。サステイン時については、音強が強くなると口腔内圧力も増加するとされているため、この口腔内圧力を実現するために腹斜筋および広背筋の筋活動が活発になったと考えられる。そして口角下制筋は、呼気の圧力に対抗して口唇周囲の形状を維持するために活発になったと推察される。

3つ目については、演奏者はマウスピースの吹奏感の差を感じることができ、その差が筋活動に与える影響は小さく、身体の使い方の変化も小さかった。しかし個人ではマウスピースの主効果が認められる場合があり、吹奏感の違いによる身体の使い方の変化には個人差があると言える。

そして4つ目は、体格やこれまで受けた指導が影響していると考えられる。指導は個々の指導者の主観によるものが多く、表現の仕方は人によって様々である。さらに主に使っている筋肉の組み合わせによってグルーピングができた。

最後に5つ目について、まず腹斜筋の結果は、発音後の減少している肺気量を使用するためには横隔膜の押し上げが必要であり、そのために腹斜筋の活動が活発になったと推測する。胸鎖乳突筋については、この筋肉が吸気筋であるため吸気時により活発になったと考えられる。また口角下制筋は主効果が認められず、アンブシュアは発音前に形成され、その後も維持されていることが示唆された。

楽器演奏時の筋活動を計測した既存研究は、全身のバランスについては言及していない。本研究は複数箇所の筋活動を同時に計測したことで、演奏時の複雑な身体制御様式の解明に貢献した。

## 6.2 今後の課題と展望

本研究における課題として、まず発音された音の分析が挙げられる。今回の分析では、音高と音強ともにカテゴリーカルな分析を行った。しかし実際の演奏は音高も音強も全て等しいわけではない。よって今後それぞれについて量的な分析が必要だと考える。またトランペット奏者を対象としたアンケートにおいて、改善したい技術的課題として音色が上位に入っていた。そのため音色に関する音響分析と筋活動との関係についての分析も必要である。

筋活動の分析に使用した区間については、1音あたり約4秒間の演奏のうち中間部分のデータしか使用していない。より発音に近い部分や音の終わりの部分、4秒間の変動等も検討すべきだろう。

加えて今回の実験の参加者は8名であった。より多くの演奏者を分析することで、今回ルーピングされたタイプとは異なる演奏者が現れる可能性がある。またこれまで指導されてきた内容は個人によって異なると述べたが、指導内容と筋活動のバランスとの関連も検討の余地がある。

そして本研究では、腹斜筋、広背筋、胸鎖乳突筋、口角下制筋の4つの筋肉を対象とした。しかし予備実験にて検討したように、演奏に影響を与えていると推測される筋肉はこの他にも多数存在する。今後は他の筋肉にも焦点を当てることで、演奏条件と身体の使い方との間に新たな関連が発見されるであろう。また演奏は様々な身体要素が関わっているため、筋活動だけではなく、骨格、筋肉量、肺活量、姿勢などといった情報の組み合わせも検討する必要がある。例えばアンブシュアは音色の決定に影響を与えていると言われており、歯並びや顎関節の形状を絡めて計測すると、それぞれの要素の関係性が示唆される可能性がある。骨格や筋肉量のような個人の身体情報と、筋活動のバランスとの間に関係性を発見することで、身体情報から個人に適した身体の使い方の提案が可能になることを期待する。

最後に、演奏者が本研究で得られた知見を実際の演奏に活かすには、自身の筋活動を正しく認識する必要がある。それによって、理想の音を出すための最適な身体の使い方は、今の状態からどう身体をコントロールすれば良いのか判断しやすくなる。人間の学習には、客観的、定量的指標が重要だとされており、“メタ認知”という考え方が注目されている [30]。古川らは、「一般理論をそのまま達成目的に据えても身体スキルの獲得はうまくいかない。それは身体の特徴が学習者個人個人によって異なるからである。つまり、学習者本人が自分の身体の特徴を模索しつつ、環境と身体によりよい関係をさらに模索することが身体スキル獲得プロセスの本質である。」と述べている [31]。今後、演奏中に筋活動量のフィードバックを繰り返し、演奏者自身に筋活動の特徴を認識させることで、筋活動の調整が容易になることを期待している。

## 謝辞

本研究を進めるにあたり、本学図書館情報メディア系の松原正樹先生には手厚くご指導いただきました。心より深く感謝致します。また研究について熱心ご指導くださった指導教員の寺澤洋子先生、平賀譲先生に感謝申し上げます。加えて、共同研究者であるヤマハ株式会社の福田梨沙様、棚瀬廉人様、小幡哲史様、実験の補助や研究についての議論をしてくださった増田英之様、Vincent Freour 様、荒井美希様、関根鈴花様、沼野俊亮様に厚く御礼を申し上げます。日本大学文理学部の北原鉄朗先生、桜美林大学芸術文化学群の平野剛先生、McGill 大学の Isabelle Cossette 先生には、研究に関して貴重なご意見を賜りました。深く感謝致します。山田靖子さん、横井大輔さんには物品購入や事務書類等の様々な場面でサポートしていただきました。同研究室の先輩である金澤徹さん、狩野直哉さん、崎野峻光さん、中山雄貴さん、CAO CHONG さんには、研究について優しく助言いただきました。同期の伊藤隆浩さん、黒崎友さん、小串尚也さん、中川稜介さん、藤森晶子さん、湯野悠希さんは、研究や私生活等様々な話を聞いてくださり、元気付けてくれました。また後輩の大木本美結さん、小林諒也さん、社本和磨さん、中山未緒さん、若狭健太さん、池田周平さん、河合優理子さん、沼田拓也さん、宮澤響さんにも大変お世話になりました。本学融合知能デザイン研究室の皆様には、何度も研究室に迎え入れていただきました。ありがとうございました。そして実験に快く参加していただいたトランペット奏者の方々に重ねて御礼申し上げます。最後に、学生生活をいつも支えてくれた両親に心より感謝致します。

## 参考文献

- [1] 伊藤京子, 平野剛, 野任一文, 西田正吾, 大築立志. 金管楽器演奏動作の上達に向けた練習指標の提案-アンブシュアの形状を一定の状態に保つということ-. 電気学会論文誌 C (電子・情報・システム部門誌) , Vol. 131, No. 10, pp. 1775–1785, 2011.
- [2] P. Farkas. *The art of brass playing : a treatise on the formation and use of the brass player's embouchure*. Bloomington, Ind. : Brass Publications, 1962.
- [3] 安田健太. 金管楽器演奏時の呼吸法の指導に関する事例研究-初心者対象の新たなアプローチ-. 日本体育大学紀要, Vol. 42, No. 2, pp. 181–187, 2013.
- [4] 小坂達也. 金管楽器の基礎練習に関する考察. 島根大学教育学部紀要. 教育科学・人文・社会科学・自然科学, Vol. 46, pp. 119–126, 12 2012.
- [5] 荻原明. まるごとトランペットの本. 青弓社, 東京, 2014.
- [6] 平野剛, 那須大毅, 小幡哲史, 木下博. ホルン熟達奏者の筋活動および皮膚表面の動き. バイオメカニズム, Vol. 22, pp. 27–36, 2014.
- [7] 村松匡. 金管楽器奏法革命：出せなかった音が出る. ヤマハミュージックメディア, 東京, 2010.
- [8] 黒坂洋介. 呼吸を変えれば音楽は変わる！重力と筋骨の関係を改善し合奏に生かすブレスエクササイズ. きゃたりうむ出版, 東京, 2011.
- [9] エリック宮城. エリック宮城の BRASS テクニック・ガイド. 杉原書店, 2003.
- [10] Z. Gerhard. もっとブレス！はじめてのウイーン金管奏法. メアジック, 2010.
- [11] E. R. White and J. V. Basmajian. Electromyography of lip muscles and their role in trumpet playing. *Journal of Applied Physiology*, Vol. 35, No. 6, pp. 892–897, dec 1973.
- [12] 松方翔吾, 寺澤洋子, 松原正樹, 北原鉄朗. トランペット演奏時の音高や強度の変化が口唇周囲の筋肉に及ぼす影響. 情報処理学会研究報告, Vol. 99, No. 39, 2013.
- [13] 後藤田章人, 山口泰彦, 岡田和樹, 松樹隆光, 三上紗季. 金管楽器演奏が咀嚼筋活動に及ぼす影響. 日本顎口腔機能学会雑誌, Vol. 13, No. 1, pp. 56–57, 2006.

- [14] 後藤田章人, 山口泰彦, 岡田和樹, 松樹隆光. 管楽器演奏時の顎機能解析. 日本顎口腔機能学会雑誌, Vol. 13, No. 2, pp. 93–102, 2007.
- [15] V. Fréour, R. Caussé, and I. Cossette. Simultaneous Measurements of Pressure, Flow and Sound During Trumpet Playing. In Société Française d’Acoustique SFA, editor, *10ème Congrès Français d’Acoustique*, Lyon, France, April 2010.
- [16] N.H. Fletcher and T. Rossing. *The Physics of Musical Instruments*. Springer-Verlag, 1991.
- [17] 村上和男. 金管楽器吹奏系の音響特性設計に関する研究. PhD thesis, 静岡大学, March 2008.
- [18] 榎堀優, 伊藤陽脩, 平山高嗣, 間瀬健二. 上体周囲長計測による肺気量推定の姿勢変動補正. バイオメカニズム, Vol. 22, pp. 203–211, 2014.
- [19] I. Cossette, P. Monaco, A. Aliverti, and P. T. Macklem. Chest wall dynamics and muscle recruitment during professional flute playing. *Respiratory Physiology & Neurobiology*, Vol. 160, No. 2, pp. 187–195, 2008.
- [20] M. Satou, T. Kitahara, H. Terasawa, and M. Matsubara. Relationships between abdominal and around-lip muscle activities and acoustic features when playing the trumpet. In *Proceedings of the 2017 International Symposium on Musical Acoustics*, 2017.
- [21] W. H. Stubbins, C. P. Lillya, and J. R. Frederick. Effects of Blowing Pressure and Embouchure Factors on Trumpet Tone Production. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 28, No. 4, pp. 769–770, 1956.
- [22] D. W. Cugell. Interaction of chest wall and abdominal muscles in wind instrument players. a preliminary report. *Cleveland Clinic Journal of Medicine*, Vol. 53, No. 1, pp. 15–20, 1986.
- [23] T. Bianco, V. Fréour, I. Cossette, F. Bevilacqua, and R. Caussé. Measures of facial muscle activation, intra-oral pressure and mouthpiece force in trumpet playing. *Journal of New Music Research*, Vol. 41, No. 1, pp. 49–65, 2012.
- [24] 三浦雄一郎. 体幹筋機能の研究と慢性腰痛症の運動療法. 関西理学療法, Vol. 1, pp. 7–13, 2001.
- [25] 平野正広, 加藤宗規, 宮島恵樹, 荒巻英文, 勝木員子, 五味雅大, 遠藤元宏, 兎澤良輔. 広背筋に着目したブリッジ動作の筋電図学的検討. 了徳寺大学研究紀要, No. 9, pp. 177–181, 2015.

- [26] 吉田恵一. 咬合機能時における胸鎖乳突筋の機能に関する筋電図学的解析. 口腔病学会雑誌, Vol. 55, No. 1, pp. 53–70, 1988.
- [27] N. H. Fletcher and A.Z. Tarnopolsky. Blowing pressure, power, and spectrum in trumpet playing. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 105, No. 2, pp. 874–881, 1999.
- [28] 田辺康二, 洲崎俊男. 広背筋のトレーニング効果が呼吸機能に与える影響について. 理学療法学 Supplement, Vol. 2002, pp. 398–398, 2003.
- [29] 河野正司, 吉田恵一, 小林博, 三浦宏之. 咬合機能時にみられる胸鎖乳突筋の活動様相. 日本補綴歯科学会雑誌, Vol. 31, No. 3, pp. 764–769, 1987.
- [30] J. H. Flavell. Metacognitive aspects of problem solving. *The Nature of Intelligence*, pp. 231–235, 1976.
- [31] 古川康一, 諏訪正樹, 加藤貴昭. 身体スキルの創造支援について. 人工知能学会論文誌, Vol. 22, No. 5, pp. 563–573, 2007.



# 付 録 A 予備実験 1

## 付録 予備実験 1

### 1. 目的

息の支えがある演奏とない演奏それぞれにおける筋活動を計測して比較し、息の支えと呼吸筋に関係があるか調査することを目的とする。

### 2. 実験条件

#### i. 実験参加者

トランペット奏者 1 名

#### ii. 筋電計測用機器

- 筋電センサ（追坂電子機器）
- リファレンス電極バンド（追坂電子機器）
- ディスポ電極ビトロード F（日本光電）
- トランスポアサージカルテープ（3M）

#### iii. 表面筋電位計測部位

- 腹斜筋
  - 関連研究で計測しており、主に呼気時に使用される。
- 胸鎖乳突筋
  - 吸気筋なので主に吸気時に使用されるが、関連研究ではフルート演奏時の息の支えに寄与しているとされており、演奏においては呼気時にも使用されている可能性がある。

#### iv. 演奏課題

以下の音高 4 段階、音強 3 段階を組み合わせた計 12 音のロングトーン

- 音高：B $\flat$ 3, B $\flat$ 4, F5, B $\flat$ 5
- 音強：pp, mf, ff

### 3. 結果

- 息の支えのない状態で演奏するのは困難であり、計測できなかった。

### 4. 考察

- 関連研究では、フルートの吹奏に適する呼気量の調整には、安静時の呼吸量を吸気筋によってある程度抑制することが必要だと述べられていた。しかしトランペットにおいては安静時の呼吸では発音できず、呼気を抑制するよりもむしろ押し

出すことが必要だと考えられる。

- 演奏時の体の使い方は長年の経験で身に染みついているため、息の支えは意識しなくても作ることができるようになっている。そのため支えのない状態を作り出して演奏するということがそもそも困難であったと考えられる。

## 付 録 B 予備実験 2

### 付録 予備実験 2

#### 1. 目的

本実験で計測する筋肉の部位や、演奏する課題の検討を目的とする。

部位については、本実験での計測部位を 8 箇所と仮定し、後述する 9 箇所の筋肉から選択する。

#### 2. 実験条件

##### i. 実験参加者

アマチュアトランペット奏者 1 名

##### ii. 筋電計測用機器

- Cyton Biosensing Board, 8-channels (OpenBCI)
- EMG/ECG Snap Electrode Cables (OpenBCI)
- ディスポ電極ビトロード F (日本光電)
- トランスポアサージカルテープ (3M)

##### iii. 表面筋電位計測部位

- 腹斜筋
- 腹直筋上部
- 腹直筋下部
- 広背筋
- 脊柱起立筋
- 胸鎖乳突筋
- 斜角筋
- 口角下制筋
- 上口輪筋

##### iv. 演奏課題

以下の音高 3 段階、音強 2 段階を組み合わせた計 6 音のロングトーン

- 音高：B ♭ 4, F5, B ♭ 5
- 音強：pp, ff
  - 6 音を順番に偏りがないようランダムに配置したシーケンスを 18 個作成

#### 3. 結果

##### i. 筋肉部位

- 音高を正確に演奏しようと意識した場合としていない場合の筋活動に差が見られた。
- 音高を正確に演奏しようと意識した場合は、特に広背筋が活発になった。
- 腹直筋は上部と下部で筋活動量が異なる場合が見られた。
- 脊柱起立筋の筋活動量はごく小さかった。
- 吸気筋である胸鎖乳突筋と斜角筋は、胸鎖乳突筋の方が活発だった。
- 表情筋 2 箇所（口角下制筋、上口輪筋）はほぼ同様の動きを示した。

#### ii. 演奏課題

- 音高による筋活動量の差はあまり大きくなかった。
- 音強によって筋活動量に差が見られた。

### 4. 考察

#### i. 筋肉部位

実験結果より、以下の 8 箇所を選択した。

- 腹斜筋
- 腹直筋上部
- 腹直筋下部
- 広背筋
- 胸鎖乳突筋
- 斜角筋
- 口角下制筋
- 上口輪筋
  - 腹直筋上部・下部について、演奏者によってどちらをより意識して演奏するかが異なるという意見が存在し、またそれぞれで役割が異なるため、上下両方を採用した。
  - 脊柱起立筋は活動量が小さく、また姿勢制御に寄与するため除外した。

#### ii. 演奏課題

実験結果より、今後の演奏課題を以下のように決定した。

- 音高：B♭3, B♭4, B♭5
- 音強：pp, ff
  - 今回の実験で演奏した課題は音域が比較的狭く、筋活動量に大きな差がなかったため、音域を再検討した。
  - 実際の演奏において、今回の実験で演奏した音域より低い音を演奏する機会

は多く、また高い音は難易度の高い課題となってしまうため、低い音域を追加した。

- 音強は今回の 2 段階で特に問題はないと思われたため、変更せず採用する。
- 個人や楽器によって音高に差が生じてしまうため、チューナーを使用して正確な音高で演奏するよう指示することにした。

# 付 録 C 予備実験 3

## 付録 予備実験 3

### 1. 目的

本実験で演奏する課題の最終決定，実験手続きの検討を目的とする．

### 2. 実験条件

#### i. 実験参加者

トランペット奏者 1 名

#### ii. 筋電計測用機器

- Cyton Biosensing Board, 8-channels (OpenBCI)
- EMG/ECG Snap Electrode Cables (OpenBCI)
- ディスポ電極ビトロード F (日本光電)
- トランスポアサージカルテープ (3M)

#### iii. 表面筋電位計測部位

- 腹斜筋
- 腹直筋上部
- 腹直筋下部
- 広背筋
- 胸鎖乳突筋
- 斜角筋
- 口角下制筋
- 上口輪筋

#### iv. 演奏課題

以下の音高 3 段階，音強 2 段階を組み合わせた計 6 音のロングトーン

- 音高：B ♭ 3, B ♭ 4, B ♭ 5
  - 音強：pp, ff
- 6 音を順番に偏りがないようランダムに配置したシーケンスを 18 個作成

#### v. 実験手続き

- 電極の貼り付けおよび筋電センサーの接続
- 筋電計の動作テストおよび実験参加者音出し
- 各筋肉の最大随意収縮時の筋活動量の計測
- チューニング
- 課題の演奏，筋電の計測

- 1本のマウスピースで9シーケンスを演奏
  - 休憩後、吹奏感の異なる9本のマウスピースで9シーケンスを演奏
  - 各シーケンス間に1分未満の休憩を取る
- 電極および筋電センサーの取り外し

### 3. 結果

#### i. 演奏課題

- 音域は問題なく演奏が可能であり、筋活動量に差が見られた。
- 音強によって筋活動量に差が見られた。

#### ii. 実験手続き

- 電極と筋電センサーを接続するケーブルの長さが足りず、接続に手間取った。
- 口唇周囲の電極を固定していたサージカルテープが剥がれやすかった。
- 楽譜、テンポ制御用メトロノーム、音高モニタリング用チューナーを全て譜面台に乗せていたが、演奏中視線が行ったり来たりしてしまった。
- 実験を実施した部屋は残響・広さともに問題はなかった。

### 4. 考察

#### i. 演奏課題

特に問題はないと思われたため、今回の課題を本実験で採用する。

#### ii. 実験手続き

- ケーブルの長さを確保するために、機器の配置を改善する必要があった。  
筋電センサーを高さのある台の上に置き、センサーの安定性を保つよう固定して電極と接続することを検討した。
- 口唇周囲に貼り付けるサージカルテープは、皮膚表面の動きを考慮して貼り付けるよう工夫する必要があった。
- 実験参加者の視線が安定しない問題について、今回の実験で使用した楽譜は全シーケンスを乗せたものだったため、メトロノームやチューナーを見た後に演奏中の楽譜を探す手間がかかってしまった。今後は楽譜をシーケンスごとに異なるページに配置して楽譜を探す必要がないようにし、メトロノームとチューナーの機能を1つの端末に統合する。
- 実験実施時間が限られているため、演奏時間を確保するには準備時間をさらに短縮しなければならない。電極の貼り付けについて、貼り付ける場所の探し方を理学療法士に意見を伺ったり、教示の方法を改善したりする必要があった。

## 付 録 D 予備実験 4

### 付録 予備実験 4

#### 1. 目的

本実験での実験手続きの最終確認を目的とする。

#### 2. 実験条件

##### i. 実験参加者

トランペット奏者 1 名

##### ii. 計測用機器

前回の実験で使用した筋電計はノイズが大きかったため、異なる筋電計を使用した。

- ラック筐体（日本ナショナルインスツルメンツ）
- 計測デバイス（日本ナショナルインスツルメンツ）
- 接続用基板（追坂電子機器）、
- リファレンス電極バンド（追坂電子機器）
- ディスポ電極ビトロード F（日本光電）
- トランスポアサージカルテープ（3M）
- 皮膚前処理材（日本光電）
- マイクロフォン（PCB）

##### iii. 表面筋電位計測部位

今回の筋電計は最大で 4 チャンネルの計測が可能であるため、前回の 8 箇所からさらに以下の 4 箇所に絞り込んだ。腹部、背部、頸部、口唇周囲それぞれから 1 箇所としている。

- 腹斜筋
  - 関連研究で計測しており、その結果と比較するため。
- 広背筋
  - 背部はもともと 1 箇所のみであり、また予備実験 2 での音高モニタリング時の演奏において筋活動量に差が出たため。
- 胸鎖乳突筋
  - 予備実験において頸部 2 箇所は似た動作をしており、電極を貼り付ける位置を探し当てるのは胸鎖乳突筋の方が容易であるため。
- 口角下制筋
  - 関連研究で計測しており、その結果と比較するため。

##### iv. 演奏課題

以下の音高 3 段階, 音強 2 段階を組み合わせた計 6 音のロングトーン

- 音高: B♭3, B♭4, B♭5
- 音強: pp, ff
  - 6 音を順番に偏りがないようランダムに配置したシーケンスを 27 個作成

v. 実験手続き

- 電極の貼り付けおよび筋電センサーの接続
- 各筋肉の最大随意収縮時の筋活動量の計測
- 筋電計およびマイクロフォンの動作テスト
- 実験参加者音出し
- チューニングおよびタスクの練習
- 課題の演奏, 筋電の計測
  - 吹奏感の異なる 9 本のマウスピースで 9 シーケンスを演奏
  - 上記を 1 セットとし, 休憩を挟んで 3 セット演奏
- 電極および筋電センサーの取り外し

3. 結果

- 演奏時間は約 1 時間弱となり, 負担としては問題ないと思われた.
- 電極の貼り付けは以前よりスムーズに行うことができていた.
- これまでと異なる筋電計を使用した, 筋電位および演奏音は問題なく計測できていた.
- 実験参加者に対する教示, 最大随意収縮時の筋活動の計測方法が定まっておらず, 手間取ってしまった.
- 実験前の準備時間を少々工夫すれば, 実験所要時間は問題ないと思われた.

4. 考察

- 実験参加者に対する教示をより簡潔にできるよう準備が必要だった.
- 電極を貼り付ける際, ノイズを極力少なくするために皮膚前処理剤の使用を検討する.
- シーケンスごとにマウスピースを変更するため, 施行ごとに吹奏感に違いが出てしまう. それによるシーケンス内 1 音目への影響を軽減するために, 各シーケンスの最初に B♭4, mf の音を追加するよう検討する.



## 付 録 E 予備アンケート 1

### 付録 アンケート 1

#### 1. 目的

演奏者の基本情報（所属団体の演奏形態，よく演奏する音域等），演奏技術において課題だと感じていることを調査し，実験デザインの参考にすることを目的とする。

#### 2. 調査期間

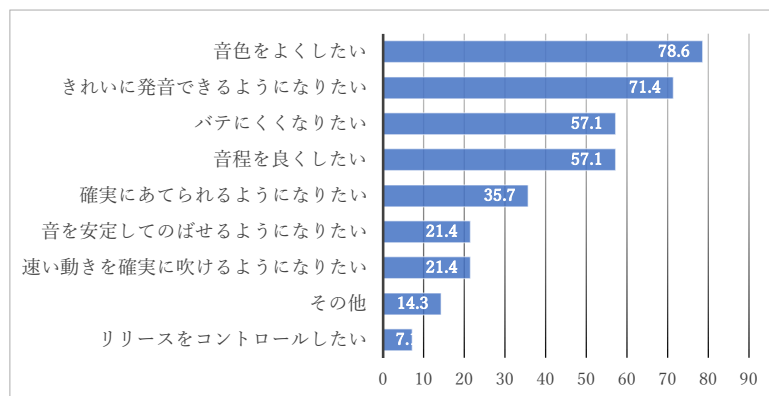
2017 年 7 月 23 日～2017 年 7 月 25 日

#### 3. 調査対象

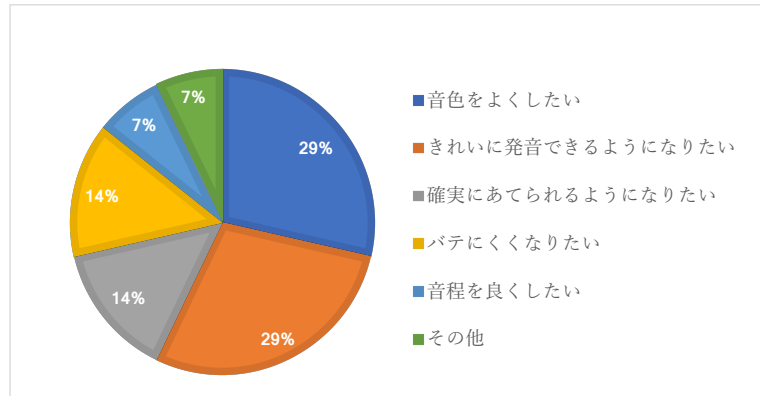
- A) 所属団体：ヤマハ株式会社社内演奏家 14 名
- B) 年齢：20 代～50 代
- C) 性別：男性 12 名，女性 2 名
- D) 平均演奏経験年数：21 年（最短 5 年，最長 41 年）

#### 4. 結果

##### i. 課題だと感じていること（複数回答可）



ii. 最も改善したい課題



iii. ii の課題を克服したい音域

B $\flat$ 3～F4	F4～B $\flat$ 4	B $\flat$ 4～F5	F5～B $\flat$ 5	B $\flat$ 5～F6
7.1%	0.0%	21.4%	50.0%	21.4%

(B $\flat$ 4= 466.164Hz とする)

iv. ii の課題を強く感じるフレーズと部分

フレーズ	スタaccart		ロングトーン		
	アタック	リリース	アタック	コア	リリース
ff	7.1%	0.0%	28.6%	21.4%	0.0%
pp	21.4%	0.0%	7.1%	0.0%	0.0%

- その他フレーズのアタック：14.3%

5. 今後の実験デザイン

i. 演奏課題

A) 音高

- 回答者の 9 割以上が B $\flat$ 4 以上の音域に課題を感じていることから、課題の音域を B $\flat$ 4 以上に設定する。
- 音高に関して、楽器本体の管による影響を除くため運指は全て開放とする。

- 上記 2 点を考慮し、演奏課題の音高は B♭4, F5, B♭5 とする。

#### B) 音長

- 課題を感じるフレーズについて ff のロングトーンという回答が 50% と最も高かった。
- スタッカートとロングトーンの 2 つで集計するとスタッカートが 28.6%, ロングトーンが 57.1% となり、ロングトーンに課題を感じている回答者が多かった。
- 上記より演奏課題の音長はロングトーンとする。また先行研究を参考に、テンポを BPM=60 に設定し 4 拍間伸ばす音を検討する。

#### ii. 分析

- iv.課題を感じるフレーズとそのうちの部分に関して、全回答をアタック、コア、リリースの 3 つの部分で合わせると、アタックが 78.6%, コアが 21.4%, リリースが 0.0% となった。そのため演奏時のリリースに関する分析は除き、アタックとリリースに着目する。
- また回答者の 71.4% が発音に課題を感じ、35.7% が確実にあてられるようになりたいと感じていることから、演奏課題のアタックに着目した分析が重要だと考えられる。
- 回答者の 78.6% が音色、57.1% が音程、課題を感じていることから、実験時に演奏音を録音して音響解析することを検討する。

## 付 録 F 予備アンケート 2

### 付録 アンケート 2

#### 1. 目的

演奏者が息の支えを作るための体の使い方や、支えが作れていない時の音への影響をどのように意識しているかを調査すること、本実験のデザインや仮説を立てるための情報の収集を目的とする。

#### 2. 調査期間

2017 年 8 月 3 日

#### 3. 調査対象

- 所属団体：ヤマハ株式会社社内演奏家 14 名
- 年齢：20 代～50 代
- 性別：男性 12 名，女性 2 名
- 平均演奏経験年数：21 年（最短 5 年，最長 41 年）

#### 4. 結果

##### i. 息の支えをイメージする時に意識する体の部分

- 頸部，肩
  - 喉に力が入る，狭くなると息の流れが止まる  
→ 小さい低い音のアタック，大きい音が出ない
  - 肩は上がっても良い（吸う時に腹式を意識しすぎないようにしている）
  - 喉が締まらないように広げると安定する，息をまとめて安定して送る
- 口腔内
  - 広い状態を保てていないと安定して息が送れない  
→ 低い，小さい音のコアが安定しない
- 臍の上
  - ここだけを意識する（ここ以外に力が入ると低い音が揺れる，高い音が出ない）
- 臍の下
  - 大きい音で圧力を高める
  - 肺を広げてキープするイメージで，お腹を凹ませるイメージではない
- 臍の下から口

- 筒を広くする
  - ii. 息の支えができていない時に変化が出る音域
    - E3～B♭3
      - 振動が大きいので、小さい力では支えられない
      - 揺れる
    - F5～F6
      - 大きい音が出なくなる
      - 音が細くなる

(B♭4= 466.164Hz とする)
  - iii. 息の支えができていない時に変化が出るフレーズ
    - pp のロングトーン
      - 安定しないので、息の量を一定にする必要がある
    - ff のロングトーン
  - iv. その他
    - 吸った勢いを殺さない
    - 大きい音はむしろ力を緩めているイメージ
5. 考察
- i. 体の部分について
    - 息の支えを作る際に意識する体の使い方に関して、力を入れるべき部位と脱力するべき部位の両方が挙げられた。よって息の支えを作るには筋肉の使い方のバランスも重要なのではないかと考えられる。またそれぞれの部位は以下のような回答を得ている。
      - 力を入れるべき部位：腹部
      - 脱力するべき部位：頸部、肩
    - その他意識するべき部位として口腔内が挙げられた。口腔内の形状を制御するための表情筋は、アンブシュアの形成だけではなく息の支えに関して重要な役割を担っている可能性がある。
  - ii. 音域について
    - 低音域 (E3～B♭3) は振動が大きいので、小さい力では支えられず揺れてしまう

という回答を得た。また喉を広げることで息を安定させるという回答もあった。よって腹部の筋活動は活発になり、頸部は脱力するのではないかと考えられる。

- 高音域 (F5～F6) では息の圧力を高めたり、肺を広げて圧力をキープしたりする必要があるという意見が挙げられた。よって特に腹部の筋活動が活発になると考えられる。また腹部以外に力が入ると高い音が出ないとも言われているため、他の部分は活発になっていないのが理想であると考えられる。ただし良くはないが力が入ってしまうという声もあるため、実験では他の部分の筋活動も活発になる可能性はある。
- 中音域 (F4～B♭4) に関しては特に指摘がなく、楽に演奏できる音域だと考えられる。

### iii. フレーズについて

- 音の大きさに関わらず、ロングトーンに関する意見が多く得られた。よって息の支えは音を伸ばしている間によく意識されていると考えられる。

## 6. 実験デザイン

- 息の支えを作る際に意識する体の部位として、腹部、頸部、肩、口腔内が挙げられた。よって実験で筋活動を計測する筋肉としてこれらの部位を検討する。
- 腹部に関しては臍の上と下で用い方について異なる意見を得た。腹部前面に位置する腹直筋は、上部と下部で筋機能が異なるため、それぞれを区別して両者を計測対象とする。
- 肩周囲の筋肉は演奏時の姿勢の制御に大きく寄与するため、息の支えを作るための独立した筋活動と言い切ることはできないため除外する。

## 付 録 G 発表学会一覧

1. 音楽音響研究会 2016 年 10 月研究会

- 開催日：2016 年 10 月 29 日, 30 日
- 開催場所：筑波大学

2. 5th Joint Meeting of the Acoustical Society of America and Acoustical Society of Japan

- 開催日：2016 年 11 月 28 日～12 月 2 日
- 開催場所：Hilton Hawaiian Village Waikiki Beach Resort (Honolulu, Hawaii, USA)

3. 2017 International Symposium on Musical Acoustics

- 開催日：2017 年 6 月 18 日～22 日
- 開催場所：McGill University (Montreal, Quebec, Canada)

## **付 録 H    音楽音響研究会 2016 年 10 月研究会 発表論文**



# 筋活動および音響的特徴の可視化による トランペット練習支援システム

## Support system for playing the trumpets using the visualization of muscle activity and acoustic features

佐藤 愛<sup>1</sup> 松原 正樹<sup>2</sup> 北原 鉄朗<sup>3</sup> 寺澤 洋子<sup>2</sup> 平賀譲<sup>2</sup>  
Megumi SATOU<sup>1</sup>, Masaki MATSUBARA<sup>2</sup>, Tetsuro KITAHARA<sup>3</sup>,  
Hiroko TERASAWA<sup>2</sup>, and Yuzuru HIRAGA<sup>2</sup>

<sup>1</sup>筑波大学 大学院図書館情報メディア研究科 〒305-8550 茨城県つくば市春日 1-2

<sup>2</sup>筑波大学 図書館情報メディア系 〒305-8550 茨城県つくば市春日 1-2

<sup>3</sup>日本大学 文理学部情報科学科 〒102-8275 東京都世田谷区桜上水 3-25-40

<sup>1</sup>Graduate School of Library, Information and Media Studies, University of Tsukuba  
1-2 Kasuga, Tsukuba, Ibaraki, 305-8550 Japan

<sup>2</sup>Faculty of Library, Information and Media Science, University of Tsukuba  
1-2 Kasuga, Tsukuba, Ibaraki, 305-8550 Japan

<sup>3</sup>Department of Information Science, Nihon University College of Humanities and Sciences  
3-25-40 Sakurajosui, Setagaya-Ku, Tokyo, 156-8550 Japan

E-mail: <sup>1</sup>megumi@slis.tsukuba.ac.jp

あらまし 我々は、トランペット演奏者に対して演奏音の音響的特徴と筋活動を可視化し、練習を支援するシステムを構築した。このシステムは音響的特徴として音強、音高、スペクトル重心を表示し、同時に特定の部位の筋活動量を表示する。また表示と同時に演奏音を再生する機能、複数の演奏を同時に表示し比較する機能も備えている。人間の学習には、客観的、定量的指標が重要だとされており、自分自身の思考や行動について認知する「メタ認知」という考え方が注目されている。このシステムによって、演奏者は自分の演奏した音と筋活動を客観的に認識することができる。演奏中の体の使い方と演奏音との関係を学習することで、演奏技術の効率的な向上を図る。

### 1. はじめに

楽器演奏技術の向上には、練習が必要である。学習には客観的、定量的指標が重要だとされ、自分自身の思考や行動について認知する「メタ認知」という考え方が注目されている[1,2]。つまり身体状態を客観的に評価すること、定量的な目標が提示されることは、知識や技能の獲得を促進させる。そこで、本研究では、演奏された音の音響的特徴と演奏時の筋活動を視覚から定量

的かつ客観的に振り返るシステムを提案する。演奏時における体の使われ方を定量的に示すために、筋電位(Electromyography, EMG)を用いて筋活動を計測する。音響的特徴と筋活動との関係を学習することで、演奏技術の効率的な向上を狙う。

金管楽器の演奏では、アンブシュア<sup>\*</sup>や呼吸法、その他姿勢や運指などが統合的に機

---

<sup>\*</sup> 演奏時の口唇、舌、歯、顎、表情筋の状態。

能している[3]. これらの中でもアンブシュアと呼吸法は重要な要素である.

金管楽器の振動源は演奏者の口唇であり, アンブシュアが音色のコントロールの要となる[4]. 口唇の振動は両唇の隙間から流れ出る息の気流によって作り出されており, 息の気流には表情筋等の口唇周囲の状態が作用する. 理想とする音色を作り出すためには, 口唇周囲の筋肉を調整し, 唇が上手に振動するようなアンブシュアを形成することが必要である.

また呼吸時の筋活動について, 安静時は筋肉がほとんど使用されていないが, 演奏時には主に腹斜筋, 腹横筋などの腹部の筋肉が使用されている. これらの筋肉は, 安定した演奏のために呼吸を支える役割を担っている. そして呼吸法に関する指導方法は個々の指導者の主観によるものが多い. またその内容は, 「腹筋に力を込めて押し上げるように支えて吐く」といったような定性的なものである.

本研究での提案システムは, 演奏された音の音強・音高・音色といった音響的特徴と, 演奏時の口唇周囲および腹部の筋活動について, 波形を表示して客観的な認識を促進させる. これによって, 演奏者に対して, 自分の演奏した音と自分の体の使い方の振り返りを, 視覚から定量的かつ客観的に行うことができるよう支援する.

## 2. 関連研究

これまでに楽器演奏の学習支援システムは多数開発されている.

熊木らはバイオリン初学者を対象としたポジショニング学習支援システムも開発している[5]. このシステムでは, 目標とする運指をディスプレイ上に表示する手法を取っており, 学習者が熟達するにつれ提示情報に曖昧さや虚偽を含めることで, 補助情報からの離脱を促進させている.

また拡張現実を用いたギターの演奏学習支援システムが元川らによって開発されている[6]. 演奏情報を楽器に投影する手法も

あり, Löchtefeld はギターの指板上に演奏情報を投影する AR アプリケーションを開発した[7]. また Raymaekers はピアノの打鍵情報を読み取り, 鍵盤上にフィードバックを投影するシステムを構築した[8].

そして演奏技術の向上には振り返り学習が重要である. 学習者が自分の演奏を振り返るために, 演奏情報をリアルタイムに可視化するシステムが開発されている.

矢島らは, ユーザーの発声技術の向上を図った「いい声マイク」を開発した[9]. このシステムでは, ユーザーの発声を独自のアルゴリズムで評価し, いい声とされる指標と比較した結果をリアルタイムに出力する. ユーザーに対して客観的評価をフィードバックすることにより, 身体状態と発声の因果関係を自発的に導き出すことを支援するシステムである.

また中野らは歌唱スキルを可視化するインタフェースを構築した[10]. これは音楽 CD のボーカルパートを参照し, 歌声の基本周波数とビブラートを可視化して比較を示すようになっている.

またメタ認知に着目した技術向上支援システムも開発されている.

ピアノ初学者に対して正確な打鍵や運指での演奏を支援するためのシステムが開発されており, 竹川らによる学習者の学習過程に焦点を当てたもの[11]や, 上田らによる学習者自身の気づきを言語化させアノテーションするシステム[12]等がある. このシステムでは, 演奏した運指等の情報を可視化して演奏者にフィードバックを与え, メタ認知の促進を狙っている.

また西山は, バッティングフォームを可視化するシステム「ColorBar」を開発した[13]. モーションキャプチャによってバッティング動作のユーザーの姿勢を計測し, その変遷を色によって可視化したものである. このシステムは目標を提示しないため, ユーザー自らが良い状態を発見していくという点で本研究と共通している.

楽器演奏時の筋活動を解析した研究もあ

る。藤沢らは、ドラムのシングルストローク演奏時におけるドラムスティックの制御動作について解析した[14]。これまではドラムスティックの動作分析によって行われていたが、この研究では奏者の生体情報を用いて解析を行った。演奏時の腕と手指の表面筋電位を計測し、動作と演奏表現の関係について調査している。これより、楽器演奏における奏者の動作解析には筋電位が使用可能だと考えられる。本研究では、トランペット奏者を対象として、演奏時の筋電位を計測する。

### 3. システム概要

システムの設計にあたり、まず演奏の出来を振り返るためには着目点の設定が必要である。これには音の基本的な要素である音強、音高、音色を採用した。そしてこれらと紐付ける筋活動について、アンブシュアと呼吸に関わる筋肉を検討した。アンブシュアに関わる筋肉は先行研究で取り上げられている口角下制筋を採用し、呼吸に関わる筋肉は表面筋電位が計測可能であり心拍等の影響の少ない腹斜筋を採用した。

そして演奏された音と筋活動との関係を学習するためには、それぞれの状態を時間で同期して見る必要がある。そのため音響的特徴3項目と筋活動2項目について、横軸を時間として縦に並べてプロットした。またこれは時間経過とともに各項目の状態を表示する機能であり、良し悪しを表示するものではない。そのため演奏音の出来について評価するため、音響的特徴3項目それぞれの安定性を点数化した。

さらに演奏技術の向上には、演奏者自身の音の聞き方を鍛えることも重要となる[15]。そのため、演奏音を再生および停止する機能を設けた。音の再生中には、再生時間と同期して各項目のプロット上に再生バーが表示され、音響的特徴の安定性の点数がレーダーチャートで表示される。停止すると、音の再生、再生バー、安定性の評価値の表示全てが停止する。

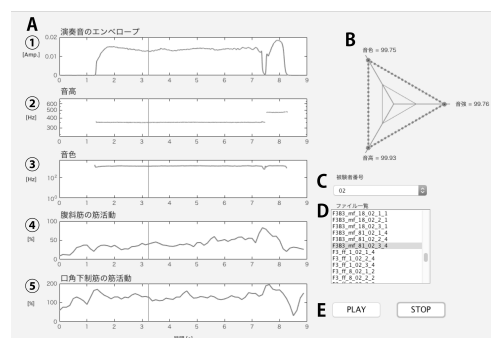


図 1 単音表示システム画面

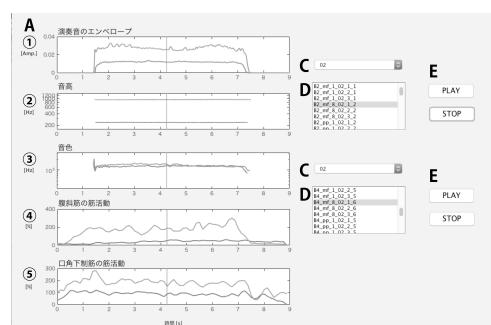


図 2 二音表示システム画面

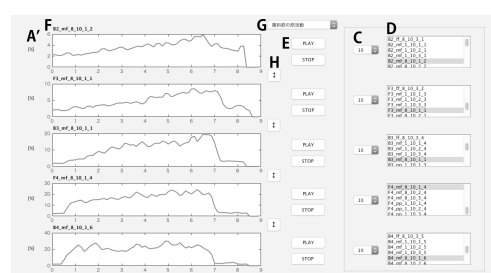


図 3 複数音並列表示システム画面

本研究で提案するシステムは3種類ある。それぞれの画面レイアウトを図1～図3に示す。以下では、3種類のシステムそれぞれの特徴について説明する。

#### i. 単音表示 (図1)

演奏した1つの音を詳細に観察するためのシステムである。演奏中に音響的特徴に変動が見られた場合、筋活動を見ることがその要因となった体の使い方の発見を支援する。

このシステムは、選択された 1 つの音について、音響的特徴 3 項目と筋活動量 2 項目を A に表示する。また音響的特徴 3 項目それぞれの安定性について点数化した値を B に表示する。

## ii. 二音表示 (図 2)

演奏した 2 つの音を比較するためのシステムである。2 つの音の音響的特徴に差がある場合、筋活動を比較してその差の要因となる体の使い方の発見を支援する。また視点を変え、筋活動を比較して差がある場合、それが演奏音に与える影響を発見するための支援となる。

このシステムは、選択された 2 つの音について、音響的特徴 3 項目と筋活動量 2 項目を、発音時刻を揃えて A に 2 つ重ねて表示する。2 つを同じプロットエリアに重ねることで、差分を把握しやすくした。また 2 つの音は色を変え、上のボックスで選択した音はオレンジと青、下のボックスで選択した音は黄色と水色を使用している。

## iii. 複数音並列表示 (図 3)

演奏した 1~5 個の音について、音響的特徴および筋活動量のうちの 1 項目について比較するためのシステムである。3 つ以上の音が選択された場合の見やすさを考慮し、ii とは異なり選択した音を縦に並べて表示する。ii より多くの音を比較することができ、選択された音について差異や共通点の発見を促す。隣り合った 2 つの音の順番を入れ替えることができ、評価の良い演奏順に並べ替えて比較すること等ができる。

### 3.1. システムの機能

また図 1~3 における A~H の各部分の機能は以下のようにになっている。

#### A: 波形表示

音響的特徴および筋活動量について、横軸を時間として波形を表示する。各項目のデータ処理方法は第 4 章にて説明する。図

2、図 3 の①~⑤の各プロットエリアには以下の項目が表示される。

- ① 演奏音のエンベロープ  
音強を表示する。
- ② 音高  
基本周波数を表示する。
- ③ 音色  
スペクトル重心を表示する。
- ④ 腹斜筋の筋活動  
腹斜筋の筋活動量を表示する。
- ⑤ 口角下制筋の筋活動  
口角下制筋の筋活動量を表示する。

#### B: 音響的特徴の安定性評価

音強、音高、音色の 3 項目について、それぞれの安定性を点数化した値を表示する。各項目名の横に点数が表示される。各項目の点数化方法は第 4 章にて説明する。

#### C: 被験者番号選択

表示するデータの演奏者を選択する。

#### D: ファイル一覧

C で選択した演奏者の演奏データが一覧表示される。表示されたデータのうち 1 音をクリックすると、A に波形が表示される。

#### E: 選択データの再生・停止

選択した演奏音の再生および停止を行う。

#### F: 演奏データ名表示

表示されている演奏音データのファイル名を表示する。

#### G: 表示項目の選択

音響的特徴 3 項目および筋活動 2 項目の 5 つの項目から、A' に表示するものを 1 つ選択する。プルダウンメニューから項目名をクリックすると、表示されているデータが全て切り替わる。

## H: 演奏データの並べ替え

ボタンの上下にある 2 つの演奏データの順番を入れ替える。

## 4. データ処理方法

ここでは、演奏音の音響信号データおよび筋電位信号データについて、それぞれの処理方法を述べる。

### 4.1. 音響信号

演奏音は、窓幅を 50 ms に設定し wav ファイルから RMS を計算した。ここで求めた RMS を①演奏音のエンベロープとして表示している。発音時刻については、0~500 ms 区間の RMS の平均値に標準偏差の 8 倍を足したものを閾値とし、連続して 4800 回 (100 ms) を超えたとき、超え始めた時刻を発音時刻とした。

②音高の表示には、基本周波数推定に DIO[16]を使用し、フレームシフト幅を 5 ms とした。計算された基本周波数について、窓幅を 10 ms として RMS を計算し、A の②に表示している。

③音色の表示には、演奏音のスペクトル重心を使用している。wav ファイルより窓幅 40 ms、フレームシフト幅 20 ms として計算した。

B の音響的特徴の安定性評価には、変動係数を使用している。窓幅を 40 ms としてそれぞれの標準偏差と平均値を求め、標準偏差を平均値で割った値を 100 から引いて求めた値を安定性の点数とした。

### 4.2. 筋電位信号

筋電信号は、電圧オフセットを除去するため 0~500 ms 区間の平均値を全体から引いた。次に 30 - 400 Hz の 5 次のバターワースフィルタをかけ、窓幅 250 ms の RMS を計算した。また被験者間の筋活動量を比較できるよう、最大随意収縮時の 1 s 間の平均筋活動量を 100%とし、RMS を正規化した。A の④および⑤では正規化された値を表示している。

## 5. システムの試用結果

本章では、構築したシステムを筆者が試用した結果を述べる。

単音表示システムは、音響的特徴と筋活動を紐付け、また時間経過とともに観察することで、発音前の筋活動の様子や、音を伸ばしている際の筋活動の特徴を発見できた。演奏音の安定性の評価は、ほとんどが 90 点以上となり差が見られないため、点数化の方法を検討する必要がある。

二音表示システムでは、音強や音高の異なる演奏の筋活動を比較すると、音響的特徴が変化した際の筋活動の変化の傾向を読み取ることができた。また異なる演奏者が同じ音を演奏した際の筋活動を比較したところ、個人の筋活動の特徴が発見された。

複数音並列表示システムは並べ替えることができるが、安定性の評価点の表示がないため、波形の変動するタイミング順に並べて表示項目を変更してみるといった使い方となった。また並べ替えた後にその結果を記録する機能の必要性を感じた。

提案システムによって、演奏された音の音響的特徴と演奏時の筋活動との間の関係が発見できた。システムを繰り返し使用し発見を重ねることで関係を学習し、演奏技術の向上に繋げられる可能性が示唆された。

## 6. まとめと今後

本研究では、トランペット演奏者を対象とした、演奏音の音響的特徴 3 項目 (音強、音高、音色) と筋活動 2 項目を表示する練習支援システムを構築した。システムは 3 種類あり、1 つの音について 5 項目表示するもの、2 つの音について 5 項目を重ねて表示するもの、1~5 個の演奏について 1 項目を同時に表示するものとなっている。

本研究は、練習におけるメタ認知の促進を促すことを目的としている。学習には自分自身の思考や行動について認知することが重要であり、演奏者が自分の演奏した音と筋活動を客観的に認識することで、演奏技術の効率的な向上が見込まれる。

現時点のシステムは、演奏し終わった 1 つの音に対する振り返り学習を想定している。波形のプロットのみでは、演奏の振り返りはできるがメタ認知の促進には至っていない。メタ認知を促すには、分節化が必要となる。分節化によって同じ節の中でコントロールできるようになり、分節する解像度を上げていくことでコントロールできるレベルを細かくすることができる。

今後は音響的特徴および筋活動を分節化しリアルタイムに表示するシステムの構築を検討している。これによって、演奏しながら自身の体の使い方を学習し修正するよう支援する。またリアルタイムに表示する際は、オブジェクトの色や形を利用して視覚に訴えるデザインとし、直感的な理解を促進させたい。構築したシステムを練習に組み込み、繰り返し使用することでメタ認知が促され、演奏者は演奏音と体の使い方との関係について学習することができると考えられる。その結果演奏技術が効率的に向上することを期待する。

## 参考文献

- [1] パーンカット他, 安達他監訳. 演奏を支える心と科学. 誠信書房, 2011.
- [2] Nielsen. Self-regulating Learning Strategies in Instrumental Music Practice. Music Education Research, 3(2), 155-167, 2001.
- [3] 伊藤他. 金管楽器演奏動作の上達に向けた練習指標の提案-アンブシュアの形状を一定の状態に保つということ-. 電気学会論文誌 C, 131(10), 1775-1785, 2011.
- [4] 荻原. まるごとトランペットの本. 青弓社, 2014.
- [5] Kumaki, et al. Proposal of a Positioning Learning Support System for Violin Beginners incorporating False and Vague Information. Proceedings of EdMedia: World Conference on Educational Media and Technology 2016, pp. 1566-1576, 2016.
- [6] Motokawa, et al. Support system for guitar playing using augmented reality display. The Journal of The Institute of Image Information and Television Engineers. The Journal of The Institute of Image Information and Television Engineers, 61(6), 789-796, 2007.
- [7] Löchtefeld, et al. guitAR: Supporting Guitar Learning Through Mobile Projection. CHI '11 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems, CHI EA '11, 1447-1452, 2011.
- [8] Raymaekers, et al. Game of Tones: Learning to Play Songs on a Piano Using Projected Instructions and Games. CHI '14 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems, CHI EA '14, 411-414, 2014.
- [9] 矢島他. 発声のメタ認知促進システム"いい声マイク"の提案, 情報処理学会インタラクティブセッション 2011, 2011.
- [10] Nakano, et al. MiruSinger: A Singing Skill Visualization Interface Using Real-Time Feedback and Music CD Recordings as Referential Data. Multimedia Workshops, 2007. ISMW'07. Ninth IEEE International Symposium on, 75-76, 2007.
- [11] Takegawa, et al. Evaluation of a Piano Learning Support System Focusing on the Learning Process. Proceedings of EdMedia: World Conference on Educational Media and Technology 2013, pp. 2306-2314, 2013.
- [12] Ueda, et al. Evaluation of a Piano Learning Support System Focusing on Visualization of Keying Information and Annotation, Proceedings of E-LEARN 2015: World Conference on E-Learning, pp. 1198-1204, 2015.
- [13] Nishiyama et al. Visualization of Posture Changes for Encouraging Metacognitive Exploration of Sports Skill, International Journal of Computer Science in Sport, 9(3), 42-52, 2010.
- [14] 藤沢他. 表面筋電位および記録映像を用いたシングルストローク演奏時におけるドラムスティック制御動作の解析. 情報処理学会研究報告. 2008(78), 161-166, 2008.
- [15] 小澤. 絶対! 伸ばせる吹奏楽指導 100 のコツ. ヤマハミュージックメディア, 東京, 2014.
- [16] 森勢. 基本波検出に基づく F0 推定法の耐雑音性向上. 研究報告音声言語情報処理 (SLP), 2016(5), 1-6, 2016.

# 付 録I    5th Joint Meeting of the Acoustical Society of America and Acoustical Society of Japan abstract

- Title: Analysis of the relationship between muscle activity and acoustic features during trumpet play and the construction of a myoelectric visual feedback system

- Abstract:

Breath control and lip vibration are crucial for a stable performance while playing the trumpet.

We analyzed the differences in abdominal and orofacial muscle activity in acoustic features such as pitch (B $\flat$ 2, F3, B $\flat$ 3, F4, B $\flat$ 4), intensity (pp, mf, ff), and duration (0.75, 6 s) during the preparation and sustain periods using surface electromyography in 11 amateur trumpeters. When the pitch was high, the activity of both muscles increased in both the preparation and sustain periods. However, when the intensity was high, the activity of both muscles increased only during the sustain period. Orofacial muscle activity was lower after tone production and abdominal muscle activity was higher after tone production than before tone production.

In addition, we developed a visual feedback system that displays the muscle activities and acoustic features related to the produced sound as biofeedback can make learning performing technique efficient (LeVine, 1984).

This system enables the player to objectively recognize the acoustic features and muscle activities related to sound. We aim to enhance performing technique by determining the relationship between the use of the body during a performance and the produced sound.

**付 録J    2017 International Symposium  
on Musical Acoustics 発表論文**



# Relationships between Abdominal and Around-Lip Muscle Activities and Acoustic Features when Playing the Trumpet

Megumi Satou,<sup>1†</sup> Tetsuro Kitahara,<sup>2</sup> Hiroko Terasawa,<sup>3</sup> Masaki Matsubara,<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Graduate School of Library, Information and Media Studies, University of Tsukuba

<sup>2</sup> Department of Information Science, Nihon University College of Humanities and Sciences

<sup>3</sup> Faculty of Library, Information and Media Science, University of Tsukuba

<sup>†</sup> megumi@slis.tsukuba.ac.jp

## ABSTRACT

When playing the trumpet, embouchure and breath control are the most important factors in achieving stable performance. To investigate these factors in greater detail, we asked 11 amateur trumpet performers to play tones of different pitches, intensities, and durations and analyzed the variations of the activities of their abdominal muscles and the muscles around their lips, which were measured via surface electromyography at the participants' abdominal oblique muscle (AOM) and depressor anguli oris muscle (DAO). The measurements were conducted during the periods of preparing and sustaining the tones. Our main experimental results are as follows. (1) As the pitch increased, the activities of both the DAO muscle and AOM increased during both the preparation and sustain periods. (2) As the intensity increased, only the activity AOM increased in both periods. (3) As the tone length increased, the AOM activity increased, while the DAO muscle was not affected. (4) The DAO muscle and AOM activities were lower and higher, respectively, during the sustain period than they were during the preparation period.

## 1. INTRODUCTION

Both embouchure and breath control are important in playing brass instruments but most of existing studies focused only on embouchure [1, 2]. Embouchure refers to the use of the facial muscles to shape the lips to the mouthpiece of a brass instrument. The sound of the instrument is driven by the vibration of the lips, which are created by the rapid flow of breath from the gap between the two lips. Embouchure plays a significant role in creating the proper lip vibrations. Therefore, many researchers have investigated the activities of the muscles around the lips when playing a brass instrument [2-9].

Breath is also an important factor and is controlled by the activity of abdominal muscles. In particular, breathing during performance differs from breathing at rest due to the fact that larger volumes of the lungs must be used while performing. Player's abdominal muscles therefore work more actively to support the breath during performance. However, brass players' abdominal muscles have been investigated in only a few studies. Cossette *et al.* reported the relationship between lung capacity and muscular activity during flute performance [10], but they did not focus on brass instruments.

Nonetheless, it is informative to investigate brass players' abdominal muscles since the abdominal muscle activity begins before the instrument starts to sound. Rather, the activity during the preparation phase is important. Generally, performers

prepare to exhale just before playing to achieve the proper tone pitches or intensities, which requires the use of the abdominal muscles. Consequently, the abdominal muscle activity during preparation is important in producing correct tones.

In this paper, we discuss the relationships between trumpet players' muscle activities and the acoustical features in the following regards: (1) how the activities of the abdominal oblique muscle (AOM) and depressor anguli oris muscle (DAO) change relative to variations in the acoustical features (e.g. pitches, intensities, and durations), (2) the differences between the activities of these muscles during the periods of preparing and performing a tone, and (3) whether these changes have different tendencies between the AOM and DAO. We aim to provide evidence regarding breath control while playing a brass instrument based on our analysis of the objectively measured muscle activities.

## 2. RELATED WORK

White and Basmajian reported on the relationship between trumpet performance proficiency and the activities of the orbicularis oris muscles in the upper and lower lips, the levator anguli oris muscle, and the DAO muscles of 18 trumpeters [4]. According to their study, muscle activity varied when the pitch or intensity changed, regardless of the player's proficiency. In addition, it was observed that the beginners had greater degrees of muscle activity in their upper lips than in the lower lips. The muscle activities of the novice players were also found to vary widely in general.

Matsukata *et al.* also analyzed the muscle activity around the lips during trumpet playing [5]. The amount of muscle activity was found to be greater when playing high pitches than when playing low pitches. In addition, the players who could perform over wider pitch ranges exhibited smaller muscle activity differences between the high and low pitch ranges.

Hirano *et al.* studied the skin surface movement and muscle activity around the lips before and after tone production in horn playing [6]. Ten proficient horn players were asked to played sounds of various pitches, intensities, and durations while wearing markers and electrodes around their lips. The authors analyzed the positions of the markers and electromyography (EMG) signals and found that the performers had great control over both their muscle activities and skin surface movements (i.e., that these activities and movements were performed with high stability), resulting in no differences between before and after tone production. These results suggest the importance of proper embouchure before tone production.

Moreover, Bianco et al. investigated the temporal evolution and interrelationships among intraoral pressure, mouthpiece force, and activity in two groups of facial muscles [7]. Three professional players were asked to perform 10 isolated C5 quarter notes and a series of 10 concatenated C5 quarter notes, using pp, mf, and ff dynamics. The results showed that the experimental conditions affected the amount and locations of the variations that occurred during performance as well as the intraoral pressure during tone production.

### 3. EXPERIMENT

#### 3.1 Participants

Eleven amateur trumpet players (seven men and four women) with more than 4 yr (mean, 8.5 yr) of training in playing brass instruments participated in this study. Informed consent was obtained from all the participants, and the experiment was approved by the institutional review board at the University of Tsukuba.

#### 3.2 EMG and sound data recording

We collected EMG signals from the DAO muscle and AOM on the right side of each player by using a wireless EMG logger (Logical Product Co.), myoelectric sensor (Oisaka Electronic Equipment Ltd.), and disposable electrode (Nihon Kohden Co.). Considering the area of each participant's face, the electrodes used to measure the participant's DAO muscle were cut to the appropriate sizes.

To perform EMG on each participant's DAO muscle, we attached electrodes obliquely from the jaw to below the corner of the mouth of the participant. To conduct EMG on the AOM in each case, electrodes were attached to each subject at the intersection between the umbilicus and the anterior axillary line, where the layer portions of the external and internal oblique muscles are located.

We also recorded the performed sounds by using a microphone with an audio interface (both by Harman International Japan Co., Ltd.). The microphone was placed 1 m from the bell of the instrument in each case. We detected the onsets of the performed sounds and used the onset data to extract the relevant EMG data periods.

#### 3.3 Tasks

The participants played in a semi-anechoic chamber using the instruments that they usually played. Our stimuli consisted of six sequences, which covered the following pitches, intensities, and durations:

- pitch: B  $\flat$  3 (233.08 Hz), F4 (349.23 Hz), B  $\flat$  4 (466.16 Hz), F5 (698.46 Hz), and B  $\flat$  5 (932.33 Hz)
- intensity: pp, mf, and ff
- duration: short note (one beat), long note (eight beats)

The sounds in each sequence were arranged randomly. Each participant played the set of six sequences three times. The order of the sequences was randomized in each set and for each participant. The tempo was set to 80 beats per minute and was shown to each participant by an illuminated electronic metronome (Yamaha). Each participant started playing when given a cue.

### 4. ANALYSIS OF EMG AND SOUND DATA

#### 4.1 EMG signals

We removed the DC offset of each EMG signal and then filtered the signal using a fifth-order Butterworth band-pass filter, which had a pass-band of 30–400 Hz. Next, we calculated the root mean square (RMS) of the signal, using a window width of 300 ms.

We computed the mean EMG data during periods of 375 ms before the onset of sound production and 750 ms starting 3 s after the onset. In the following paragraphs, the former and latter periods are referred to as the “preparation” and “sustain” periods, respectively (Fig. 1). In each one-beat case, we computed the mean EMG data only for the preparation period.

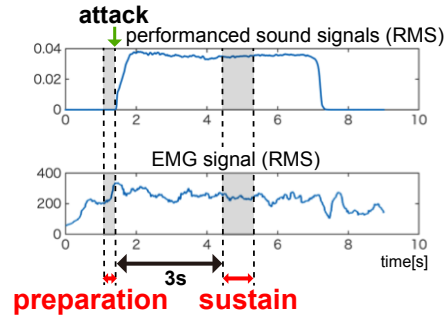


Figure 1. Preparation and sustain periods.

The EMG data were normalized to the muscle activity at the time of maximum voluntary contraction. In this report, we refer to the normalized values as %EMG values.

We calculated the average %EMG values using three trials for each participant and inspected the differences between these averages due to the variations of features such as pitch and intensity during the preparation period in the one- and eight-beat cases and during the sustain period in the eight-beat cases. In addition, to verify the variations caused by changes in duration, we compared the average %EMG values during the preparation period in the one- and eight-beat cases.

#### 4.2 ANOVA

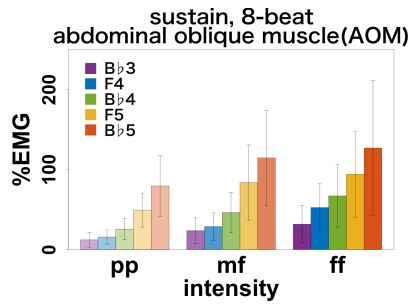
Three-factor analysis of variance (ANOVA) was used to examine the effects of pitch, intensity, and duration, and their interactions during the preparation period. Two-factor ANOVA was conducted to examine the effects of pitch and intensity during the sustain period. Furthermore, for the preparation and sustain periods in the eight-beat cases, three-factor repeated-measure ANOVAs were performed to examine the effects of pitch, intensity, and period (preparation and sustain). As mentioned in Section 3.3, the pitch and intensity categories were defined by performance instructions, rather than physical measures. Finally, post-hoc analyses with multiple comparisons, namely, t-tests with Holm's adjustments, were conducted.

## 5. RESULTS

Since the entire analysis is comprehensive and too lengthy to describe in its entirety in this paper, four key findings are described in the following sections.

### 5.1 Pitch and muscle activities

As the pitch of the performed sound became higher, the DAO muscle and AOM activities significantly increased during tone production just before and during the sustain period ( $p < 0.001$  in each case). This trend is illustrated for the AOM in Fig. 2. Thus, the higher the pitch, the more active both the muscles around the lips and the abdominal muscles are.



**Figure 2.** Mean and standard deviation (SD) %EMG values for the AOM during the sustain period in the eight-beat cases.

### 5.2 Intensity and muscle activities

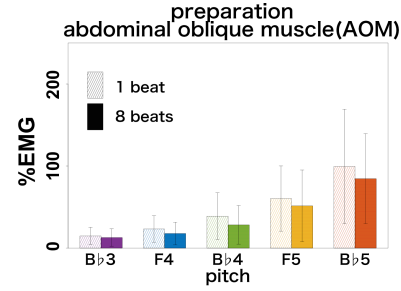
As the intensity of the performed sound increased, the AOM activities changed, although the DAO muscle didn't increase during both the preparation and sustain period. This trend is observable for the AOM in Fig. 2. The intensity only significantly affected the AOM activity during both the preparation ( $p < 0.01$ ) and sustain ( $p < 0.001$ ) periods. This result suggests that performing a tone with a greater intensity requires more abdominal muscle activity than does performing a tone with a lower intensity, although the activities of the muscles around the lips are not affected by intensity changes.

### 5.3 Duration and muscle activities

When the duration of the performed sound increased, the activity of the DAO muscle did not change during the preparation period, while that of the AOM decreased with statistical significance ( $p < 0.05$ ), as shown in Fig. 3. These findings suggest that only the abdominal muscles are activated while performing longer tones, but that the muscles around the lips are not affected by the tone duration.

### 5.4 Muscle activities during preparation and sustain periods

The DAO muscle activity was found to be greater during the preparation period than during the sustain period, while that of the AOM was greater during the sustain period than during the preparation period. In the long-tone cases, the AOM activity differed significantly between the sustain and preparation periods ( $p < 0.001$  in each case), while also being affected by the



**Figure 3.** Mean and SD %EMG values for AOM during the preparation period in the one- and eight-beat cases.

pitch and intensity. In addition, interactions were observed between pitch and intensity ( $p < 0.01$ ) and between intensity and period ( $p < 0.001$ ). The pitch, intensity, and period all significantly affected the DAO muscle activity as well (with  $p < 0.001$ ,  $p < 0.05$ , and  $p < 0.01$ , respectively).

These results suggest that when performing long tones, the abdominal muscles are relaxed during the preparation period and activated during the sustain period. On the other hand, the muscles around the lips are activated during the preparation period and relaxed during the sustain period.

## 6. DISCUSSION

### 6.1 Muscle activity variations with tone pitch

The muscle activity differences observed when the participants performed different pitches would have been caused by the corresponding intraoral pressure changes. Intraoral pressure refers to (1) the feeling of resistance caused by breath flowing out rapidly from the gap between the lips that is reflected from the mouthpiece, or (2) the pressure applied to the oral cavity in order to open the lips against the pressure from the air column inside the instrument.

When performing a high-frequency tone, the oral cavity pressure must be greater than it is when performing a low-frequency tone [9]. The increase in pressure inside mouth causes the AOM and DAO muscle to become more active. It seems that to realize a greater flow of breath, the AOM must support the diaphragm more strongly, resulting in a higher oral cavity pressure. Meanwhile, the DAO muscle becomes active to maintain stable embouchure by tightening the cheeks against the increasing oral cavity pressure.

We observed less activity in both the AOM and DAO muscle when lower pitches were played than when higher pitches were played, in order to realize the same interval differences. In other words, more muscular activity (i.e., more energy) is required in higher pitch ranges to perform the same jump between pitches than is required in lower pitch ranges (e.g., a jump from Bb 4 to Bb 5 requires more muscle activity than a jump from Bb 3 to Bb 4 does). Therefore, the muscle activity required for performance is considered to increase exponentially (yet within the realistic range) as the pitch increases.

### 6.2 Muscle activity variations with tone intensity

The muscle activity differences observed when the participants played tones of different intensities would also have been

affected by the corresponding intraoral pressure changes. When playing a tone on a brass instrument, the performer's intraoral pressure depends on the intensity with which the tone is played [6, 7]. Specifically, the intraoral pressure increases as the intensity of breathing increases. Consequently, the AOM activity must be greater to support stronger breathing.

The amount by which the sound intensity of a brass instrument changes depends on the expiratory volume. A larger difference in sound intensity requires a larger expiratory volume than a smaller difference in sound does, resulting in a more rapid decrease in lung volume. The AOM contributes to realizing this decrease in lung volume by pushing up the diaphragm.

### 6.3 Muscle activity variations with tone duration

Significant variations were not observed in either the DAO muscle or AOM activity, but the mean %EMG value for the AOM was greater in the short-tone cases than in the long-tone cases. We suspect this difference was caused by the participants' consciousness of the required tone duration. Many of the participants reported in follow-up interviews that the degree of psychological stress involved in playing the target sounds differed between the short- and long-tone cases. Higher psychological stress was involved in performing the short tones. We suspect that the AOM activity during the preparation period was higher when the psychological stress was greater.

### 6.4 Muscle activity differences between before and after production

The DAO muscle activity during the sustain period was less than it was during the preparation period. This finding contradicts that of Hirano et al., who observed no differences between the preparation and sustain periods in horn performance [6].

Unnecessary straining while sustaining a tone leads to fatigue, making it difficult to perform long tones [7]. Therefore, it is desirable to minimize the amount of muscle activity during the sustain period when performing.

Moreover, we observed that the AOM activity was greater during the sustain period than during the preparation period. This difference could have been caused by the AOM being used to push up the diaphragm to squeeze the last remaining air out from the lungs.

## 7. CONCLUSIONS

In this study, we focused on the activities of the DAO muscle in embouchure and the AOM in breathing during trumpet playing and analyzed the relationships between the levels of muscle activity and acoustic features such as the pitch, intensity, and duration of the performed sound. Based on the experimental results, the following conclusions can be drawn:

1. As the pitch of the performed sound increases, both the muscles around the lips and the abdominal muscles become more active.
2. As the intensity of the performed sound increases, the abdominal muscles become more active. However, the activity of the muscles around the lips does not change with the intensity.
3. When performing longer tones, the abdominal muscles become more active, while the muscles around the lips are not affected.
4. When performing long tones, the abdominal muscles are relaxed during the preparation period and activated during

the sustain period. On the other hand, the muscles around the lips are activated during the preparation period and relaxed during the sustain period.

We wonder if performers were aware of these complex muscle activity patterns themselves. Since performers need to conduct sequences of such coordinated movements smoothly, we anticipate that EMG measurements would be beneficial to performers, since such measurements would enable performers to recognize their own muscle activities and make connections between their physical movements and the resulting sounds. Thus, EMG feedback systems for practice sessions may be useful to performers who wish to understand their sound production processes more objectively.

## ACKNOWLEDGMENTS

This work was supported by JSPS KAKENHI Grant Numbers 16K16180 and 26240025. We would like to thank to the people who participated in the experiment.

## REFERENCES

- [1] P. Farkas, *The art of brass playing: a treatise on the formation and use of the brass player's embouchure*. Bloomington: Brass Publications, 1962.
- [2] B. C. Papsin, L. a. Maaske, and J. S. McGrail, "Orbicularis oris muscle injury in brass players," *The Laryngoscope*, vol. 106, no. 6, pp. 757–760, 1996.
- [3] P. W. Iltis and M. W. Givens, "EMG characterization of embouchure muscle activity: Reliability and application to embouchure dystonia," *Medical Problems of Performing Artists*, vol. 20, no. 1, pp. 25–35, 2005.
- [4] E. R. White and J. V. Basmajian, "Electromyography of lip muscles and their role in trumpet playing," *Journal of Applied Physiology*, vol. 35, no. 6, pp. 892–897, 1973.
- [5] S. Matsukata, H. Terasawa, M. Matsubara, and T. Kitahara, "Muscle Activity in Playing Trumpet: The Dependence on the Playable Pitch Region and the Experience of a Non-trumpet Brass Instrument Player," in *Proceedings of the Stockholm Music Acoustics Conference (SMAC)*, Stockholm, Sweden, 2013, pp. 529–534.
- [6] T. Hirano, K. Kudo, T. Ohtsuki, and H. Kinoshita, "Orofacial muscular activity and related skin movement during the preparatory and sustained phases of tone production on the French horn," *Motor Control*, vol. 17, no. 3, pp. 256–72, 2013.
- [7] T. Bianco, V. Freour, I. Cossette, and F. Bevilacqua, "Measures of facial muscle activation, intra-oral pressure and mouthpiece force in trumpet playing," *Journal of New Music Research*, vol. 41, no. 1, pp. 49–65, 2012.
- [8] N. H. Fletcher and A. Tarnopolsky, "Blowing pressure, power, and spectrum in trumpet playing," *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 105, no. 2, pp. 874–881, 1999.
- [9] I. Cossette, P. Monaco, A. Aliverti, and P.T. Macklem, "Chest wall dynamics and muscle recruitment during professional flute playing," *Respiratory Physiology & Neurobiology*, vol. 160, no. 2, pp. 187–195, 2008.

## 付 録 K 全実験参加者の 3 要因分散分析の結果 (要因：音高・音強・マウスピース)

表 K.1: 準備時における腹斜筋の%MVC の 3 要因分散分析

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
音高	2	76475	38237	14.39	0.000402	***
音強	1	2779	2779.2	6.088	0.043	*
MP	8	293.9	36.74	0.814	0.594	
音高：音強	2	807.9	404.0	1.866	0.191	
音高：MP	16	286	17.87	0.486	0.95	
音強：MP	8	311.8	38.97	0.944	0.489	
音高：音強：MP	16	349.2	21.82	0.956	0.51	

(\*\*\*:  $p < 0.001$ , \*\*:  $p < 0.01$ , \*:  $p < 0.05$ , .:  $p < 0.1$ , -: 有意差なし, 以下同様)

表 K.2: 準備時における広背筋の%MVC の 3 要因分散分析

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
音高	2	7055	3528	10.8	0.00145	**
音強	1	428.6	428.6	15.71	0.00544	**
MP	8	66.6	8.330	1.104	0.375	
音高：音強	2	138.0	68.98	2.226	0.145	
音高：MP	16	73.6	4.597	0.875	0.598	
音強：MP	8	15.9	1.985	0.348	0.943	
音高：音強：MP	16	64.4	4.023	1.069	0.393	

表 K.3: 準備時における胸鎖乳突筋の%MVC の 3 要因分散分析

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
音高	2	34877	17439	9.416	0.00256	**
音強	1	6240	6240	10.28	0.0149	*
MP	8	95.2	11.91	0.875	0.543	
音高 : 音強	2	54.6	27.30	1.152	0.344	
音高 : MP	16	380	23.75	0.815	0.667	
音強 : MP	8	113.1	14.13	1.302	0.262	
音高 : 音強 : MP	16	347.7	21.73	1.543	0.0971	.

表 K.4: 準備時における口角下制筋の%MVC の 3 要因分散分析

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
音高	2	123923	61961	5.762	0.0149	*
音強	1	702	702.0	2.902	0.132	
MP	8	6521	815.1	0.488	0.86	
音高 : 音強	2	48.5	24.27	0.137	0.873	
音高 : MP	16	4533	283.3	1.643	0.069	.
音強 : MP	8	321	40.11	0.524	0.833	
音高 : 音強 : MP	16	2201	137.6	0.982	0.481	

表 K.5: サステイン時における腹斜筋の%MVC の 3 要因分散分析

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
音高	2	219613	109806	21.3	5.66e-05	***
音強	1	87781	87781	17.56	0.00408	**
MP	8	902	112.74	1.679	0.124	
音高 : 音強	2	16816	8408	11.91	0.000953	***
音高 : MP	16	994	62.14	1.057	0.404	
音強 : MP	8	756	94.48	1.171	0.333	
音高 : 音強 : MP	16	1022	63.90	1.171	0.302	

表 K.6: サステイン時における広背筋の%MVC の 3 要因分散分析

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
音高	2	24605	12302	12.61	0.00074	***
音強	1	5657	5657	8.079	0.025	*
MP	8	145.4	18.17	1.511	0.174	
音高：音強	2	2912	1456.3	7.073	0.00753	**
音高：MP	16	182.6	11.41	0.942	0.525	
音強：MP	8	30.9	3.868	0.377	0.929	
音高：音強：MP	16	89.9	5.622	0.901	0.57	

表 K.7: サステイン時における胸鎖乳突筋の%MVC の 3 要因分散分析

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
音高	2	37576	18788	8.932	0.00316	**
音強	1	2120	2120.3	2.613	0.15	
MP	8	148.6	18.574	1.863	0.0845	.
音高：音強	2	2668	1334.0	2.55	0.114	
音高：MP	16	130.2	8.136	0.685	0.803	
音強：MP	8	82.93	10.366	2.042	0.0577	.
音高：音強：MP	16	150.5	9.408	1.168	0.305	

表 K.8: サステイン時における口角下制筋の%MVC の 3 要因分散分析

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
音高	2	305363	152681	8.218	0.00436	**
音強	1	22119	22119	18.19	0.00372	**
MP	8	4956	619.5	0.56	0.805	
音高：音強	2	2253	1126.7	3.795	0.0482	*
音高：MP	16	5654	353.4	1.297	0.211	
音強：MP	8	830	103.7	0.974	0.466	
音高：音強：MP	16	2257	141.1	1.402	0.153	

## 付 録 L 全実験参加者の 3 要因分散分析の結果 (要因：音高・音強・区間)

表 L.1: 腹斜筋の%MVC の 3 要因分散分析

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
音高	2	277633	138816	19.64	8.66e-05	***
音強	1	60900	60900	15.84	0.00533	**
区間	1	47429	47429	17.47	0.00414	**
音高：音強	2	12400	6200	8.361	0.00408	**
音高：区間	2	18455	9227	12.42	0.000791	***
音強：区間	1	29661	29661	18.42	0.0036	**
音高：音強：区間	2	5225	2612.4	14.43	0.000397	***

表 L.2: 広背筋の%MVC の 3 要因分散分析

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
音高	2	29002	14501	12.64	0.00073	***
音強	1	4600	4600	10.3	0.0149	*
区間	1	2583	2583.4	3.353	0.11	
音高：音強	2	2118	1058.8	5.977	0.0133	*
音高：区間	2	2658	1328.8	8.547	0.00375	**
音強：区間	1	1486	1485.5	5.289	0.055	.
音高：音強：区間	2	932.9	466.4	7.81	0.00527	**



表 L.3: 胸鎖乳突筋の%MVC の 3 要因分散分析

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
音高	2	72400	36200	9.882	0.00211	**
音強	1	7817	7817	7.859	0.0264	*
区間	1	28947	28947	7.291	0.0306	*
音高：音強	2	1733	866.7	2.671	0.104	
音高：区間	2	52	26.24	0.09	0.915	
音強：区間	1	542.6	542.6	1.28	0.295	
音高：音強：区間	2	989.2	494.6	2.224	0.145	

表 L.4: 口角下制筋の%MVC の 3 要因分散分析

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
音高	2	408498	204249	7.335	0.00662	**
音強	1	15351	15351	13.68	0.00767	**
区間	1	1906	1906	0.206	0.664	
音高：音強	2	1036	518.0	1.513	0.254	
音高：区間	2	20788	10394	6.99	0.00785	**
音強：区間	1	7470	7470	22.27	0.00216	**
音高：音強：区間	2	1266	633.0	4.8	0.0258	*

## 付 録 M 各実験参加者の6音の%MVC 平均値

### M.1 参加者番号 00

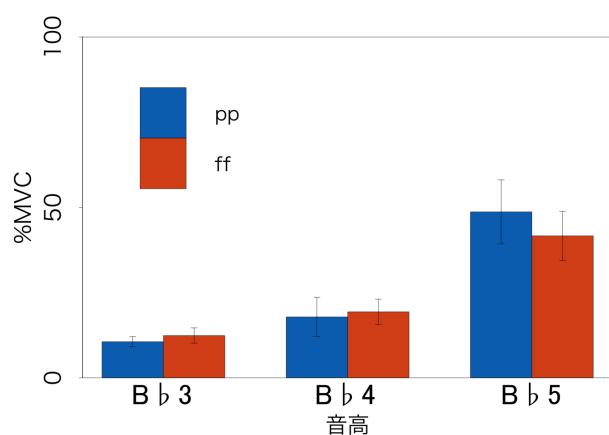


図 M.1: 参加者番号 00 の全演奏の準備時における腹斜筋の%MVC の平均値

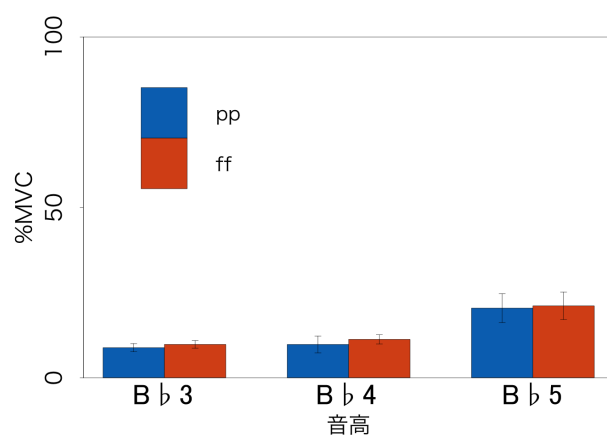


図 M.2: 参加者番号 00 の全演奏の準備時における広背筋の%MVC の平均値

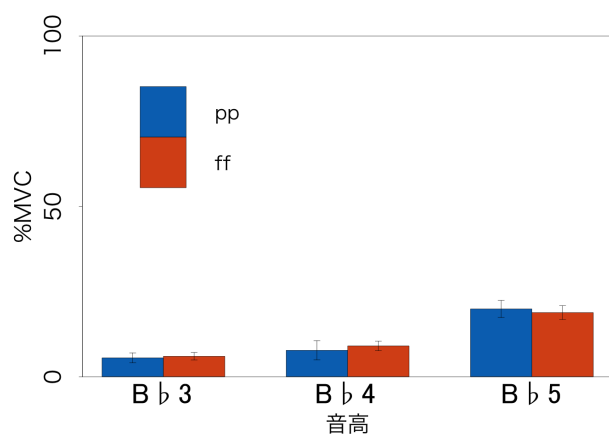


図 M.3: 参加者番号 00 の全演奏の準備時における胸鎖乳突筋の%MVC の平均値

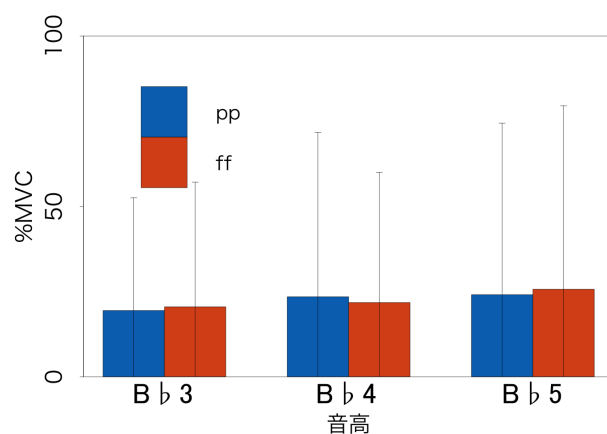


図 M.4: 参加者番号 00 の全演奏の準備時における口角下制筋の%MVC の平均値

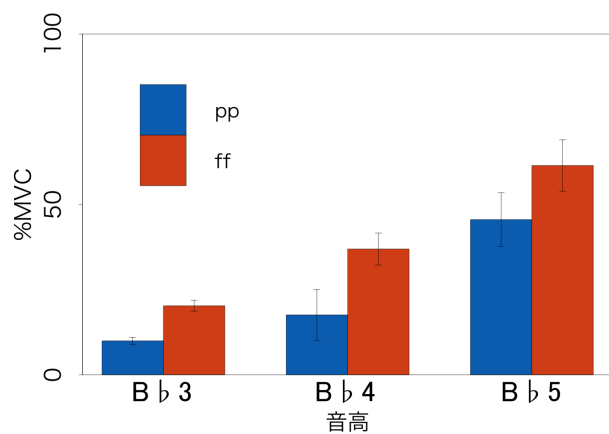


図 M.5: 参加者番号 00 の全演奏のサステイン時における腹斜筋の%MVC の平均値

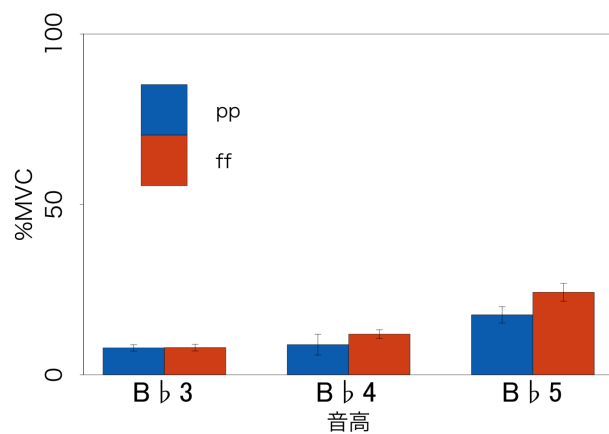


図 M.6: 参加者番号 00 の全演奏のサステイン時における広背筋の%MVC の平均値

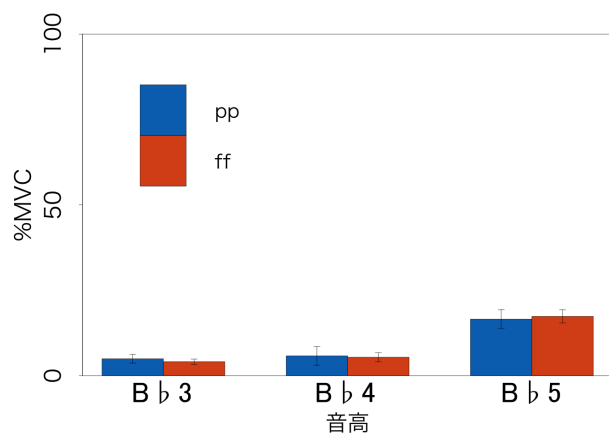


図 M.7: 参加者番号 00 の全演奏のサステイン時における胸鎖乳突筋の%MVC の平均値

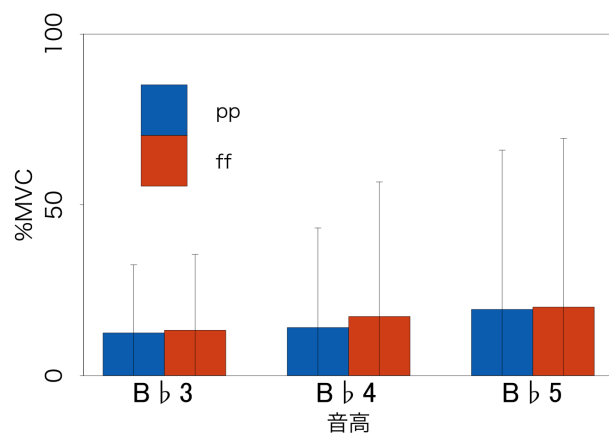


図 M.8: 参加者番号 00 の全演奏のサステイン時における口角下制筋の%MVC の平均値

## M.2 参加者番号 02

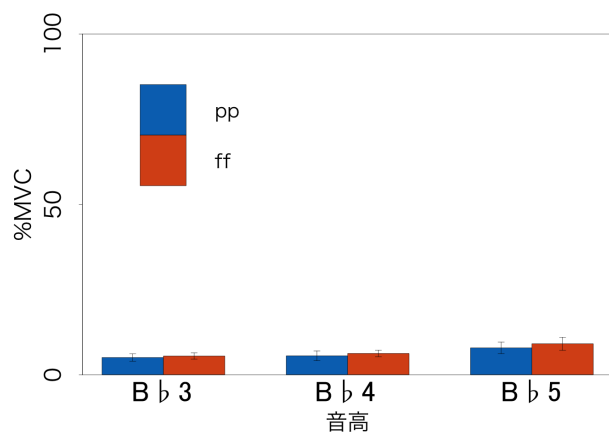


図 M.9: 参加者番号 02 の全演奏の準備時における腹斜筋の%MVC の平均値

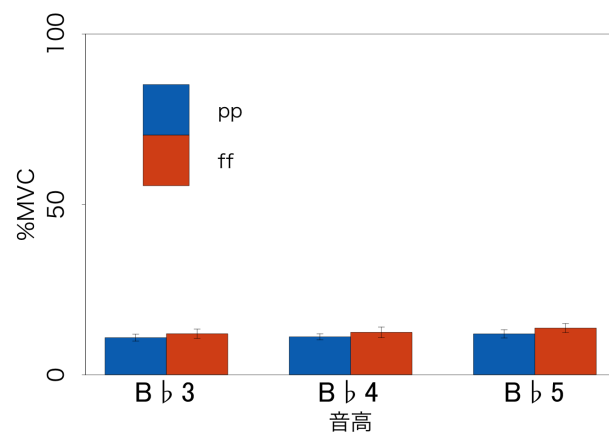


図 M.10: 参加者番号 02 の全演奏の準備時における広背筋の%MVC の平均値

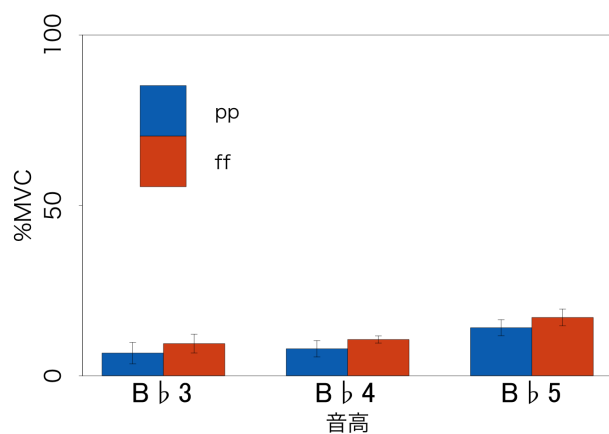


図 M.11: 参加者番号 02 の全演奏の準備時における胸鎖乳突筋の%MVC の平均値

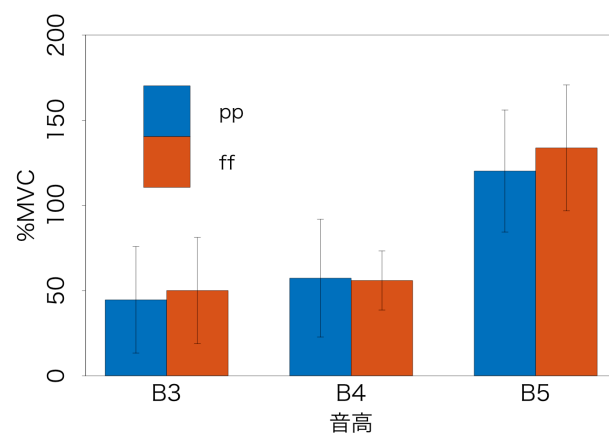


図 M.12: 参加者番号 02 の全演奏の準備時における口角下制筋の%MVC の平均値

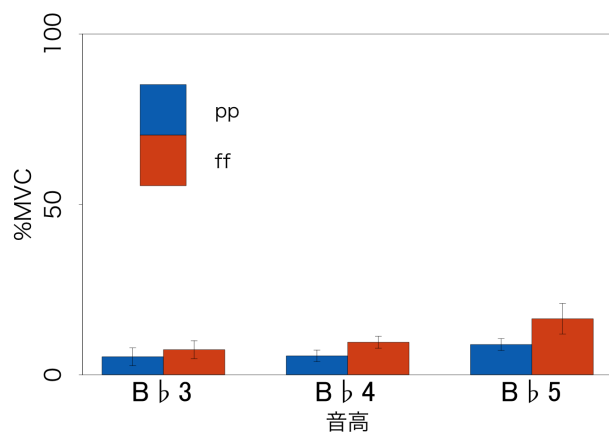


図 M.13: 参加者番号 02 の全演奏のサステイン時における腹斜筋の%MVC の平均値

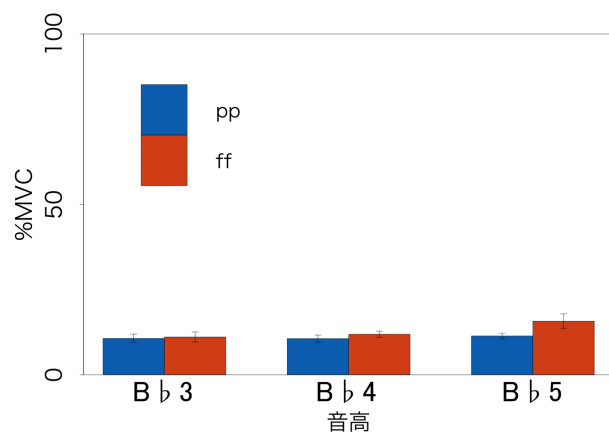


図 M.14: 参加者番号 02 の全演奏のサステイン時における広背筋の%MVC の平均値

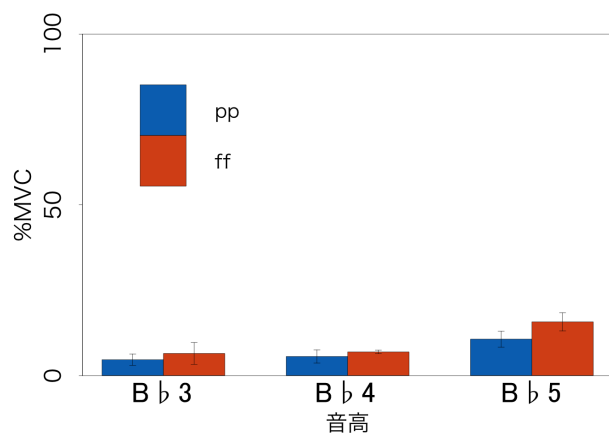


図 M.15: 参加者番号 02 の全演奏のサステイン時における胸鎖乳突筋の%MVC の平均値

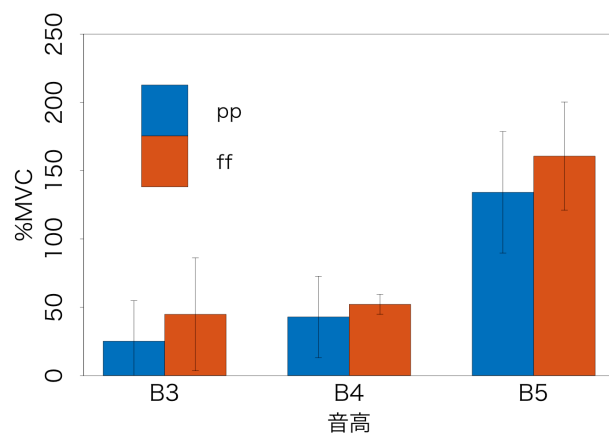


図 M.16: 参加者番号 02 の全演奏のサステイン時における口角下制筋の%MVC の平均値

### M.3 参加者番号 03

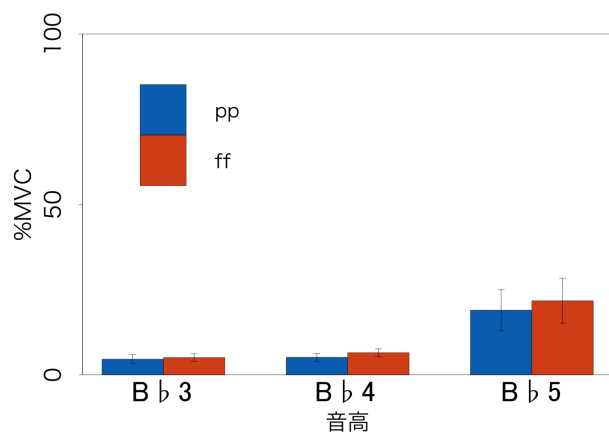


図 M.17: 参加者番号 03 の全演奏の準備時における腹斜筋の%MVC の平均値

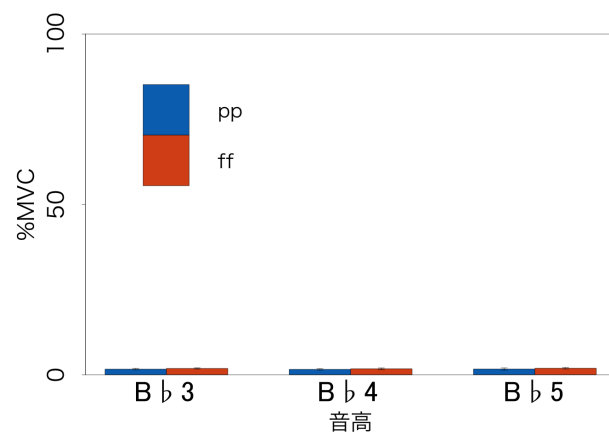


図 M.18: 参加者番号 03 の全演奏の準備時における広背筋の%MVC の平均値

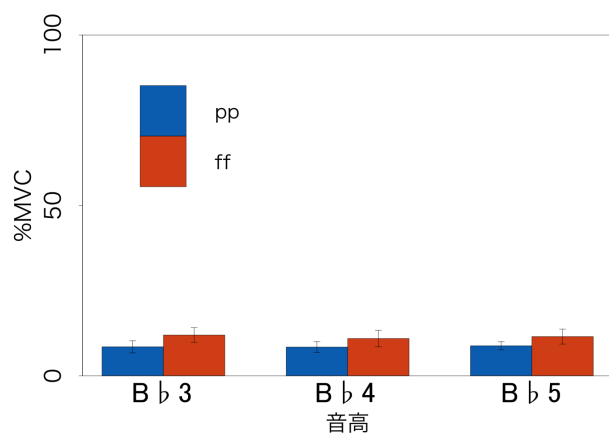


図 M.19: 参加者番号 03 の全演奏の準備時における胸鎖乳突筋の%MVC の平均値

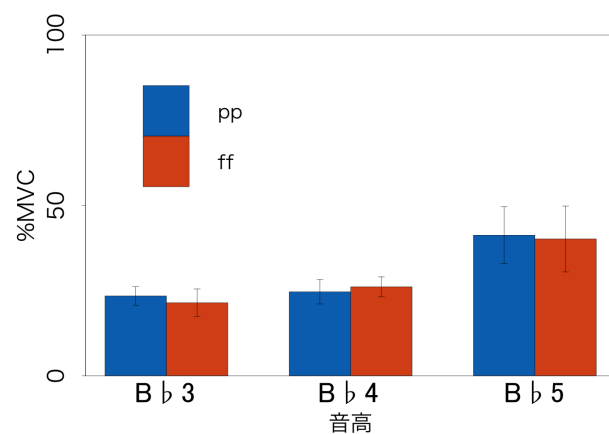


図 M.20: 参加者番号 03 の全演奏の準備時における口角下制筋の%MVC の平均値

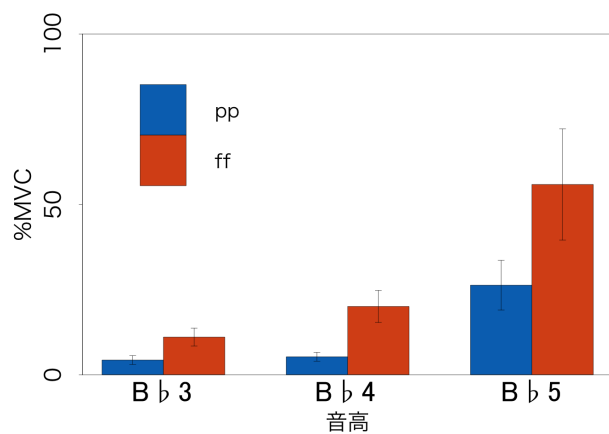


図 M.21: 参加者番号 03 の全演奏のサステイン時における腹斜筋の%MVC の平均値

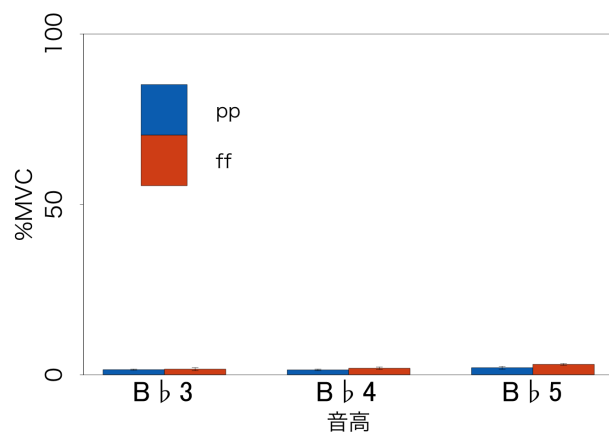


図 M.22: 参加者番号 03 の全演奏のサステイン時における広背筋の%MVC の平均値

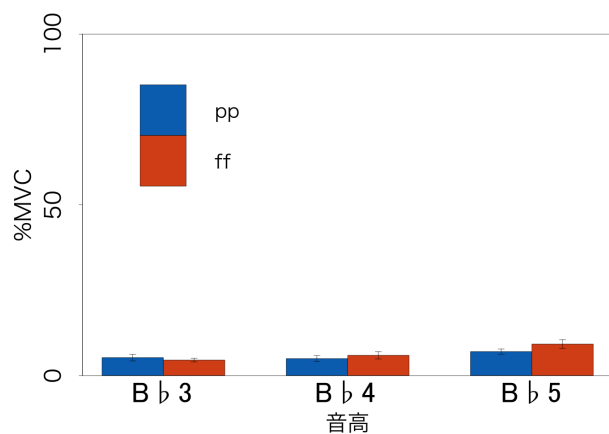


図 M.23: 参加者番号 03 の全演奏のサステイン時における胸鎖乳突筋の%MVC の平均値

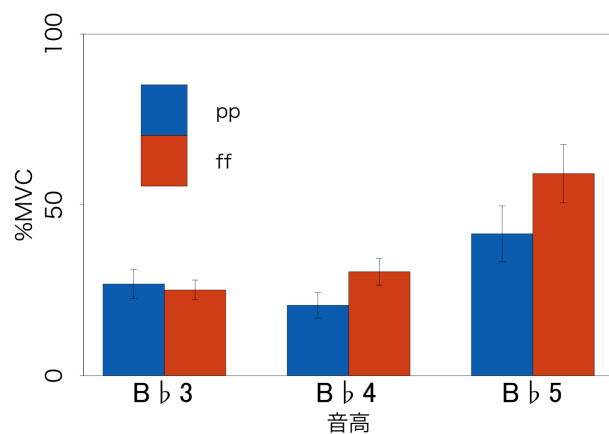


図 M.24: 参加者番号 03 の全演奏のサステイン時における口角下制筋の%MVC の平均値

## M.4 参加者番号 04

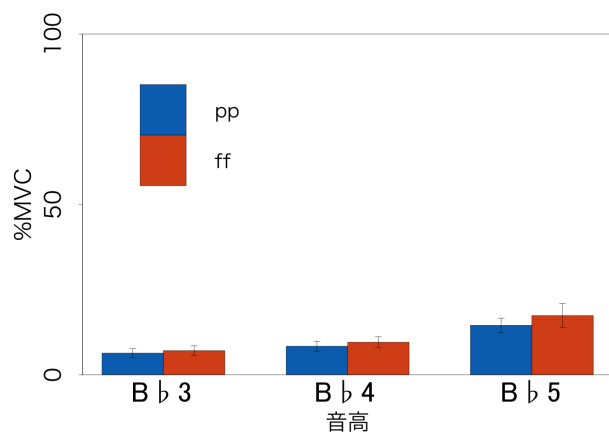


図 M.25: 参加者番号 04 の全演奏の準備時における腹斜筋の%MVC の平均値

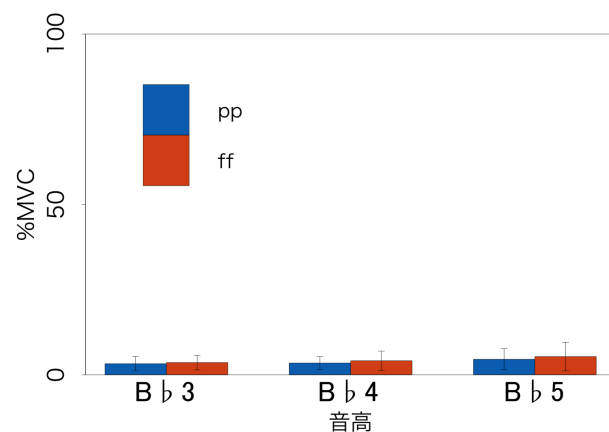


図 M.26: 参加者番号 04 の全演奏の準備時における広背筋の%MVC の平均値

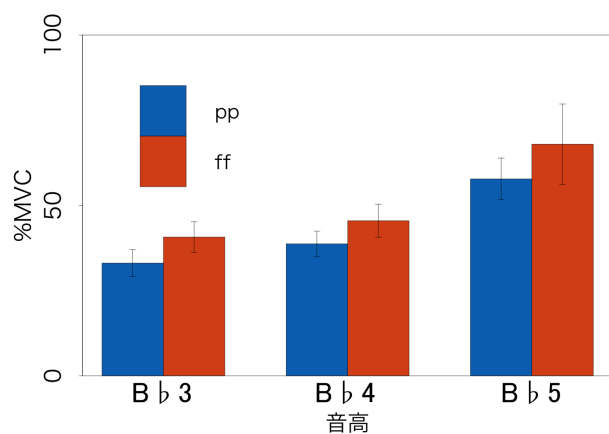


図 M.27: 参加者番号 04 の全演奏の準備時における胸鎖乳突筋の%MVC の平均値

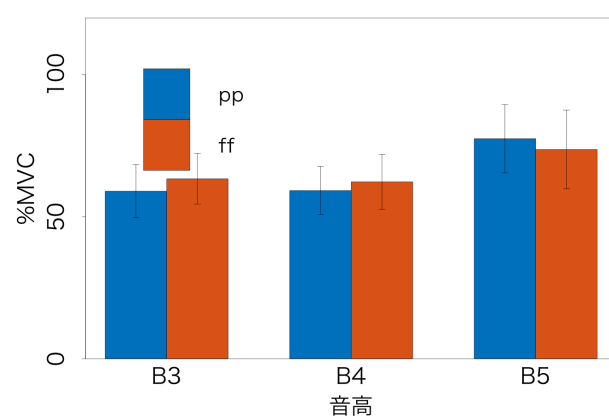


図 M.28: 参加者番号 04 の全演奏の準備時における口角下制筋の%MVC の平均値



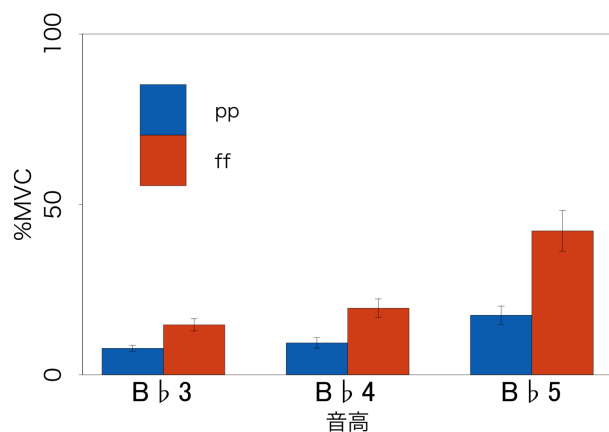


図 M.29: 参加者番号 04 の全演奏のサステイン時における腹斜筋の%MVC の平均値

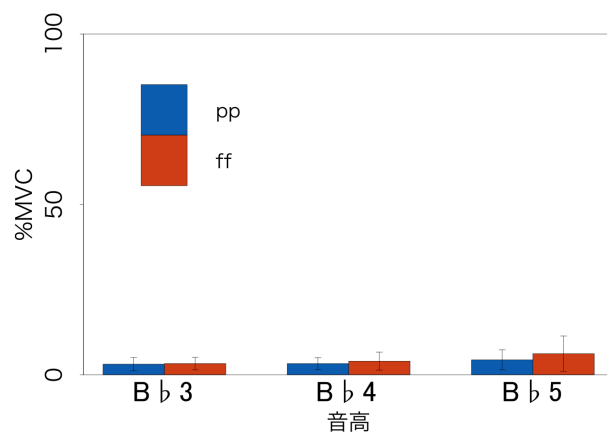


図 M.30: 参加者番号 04 の全演奏のサステイン時における広背筋の%MVC の平均値

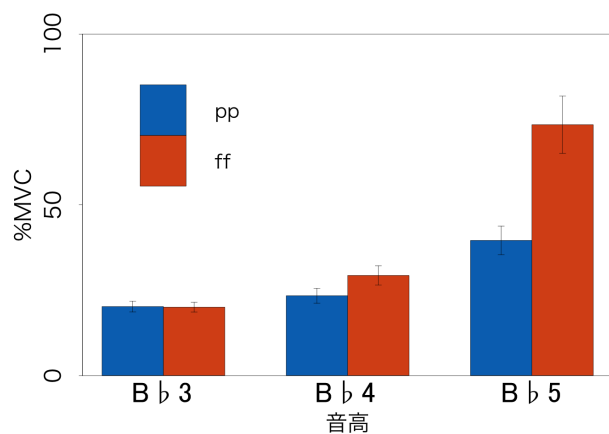


図 M.31: 参加者番号 04 の全演奏のサステイン時における胸鎖乳突筋の%MVC の平均値

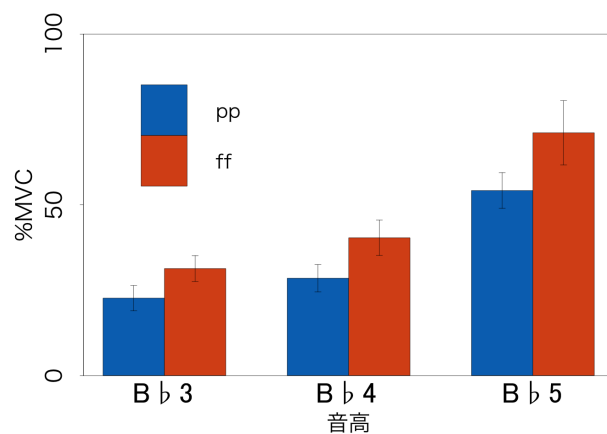


図 M.32: 参加者番号 04 の全演奏のサステイン時における口角下制筋の%MVC の平均値

## M.5 参加者番号 05

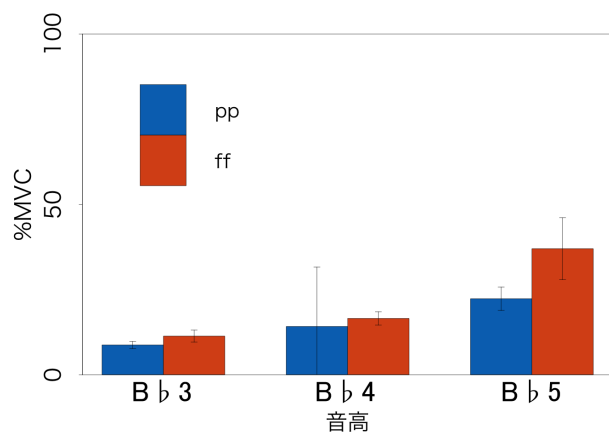


図 M.33: 参加者番号 05 の全演奏の準備時における腹斜筋の%MVC の平均値

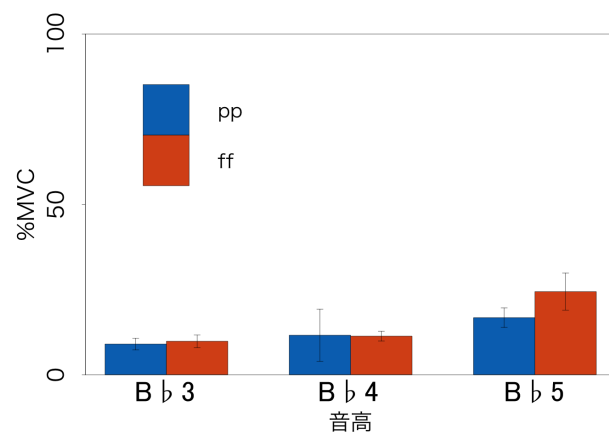


図 M.34: 参加者番号 05 の全演奏の準備時における広背筋の%MVC の平均値

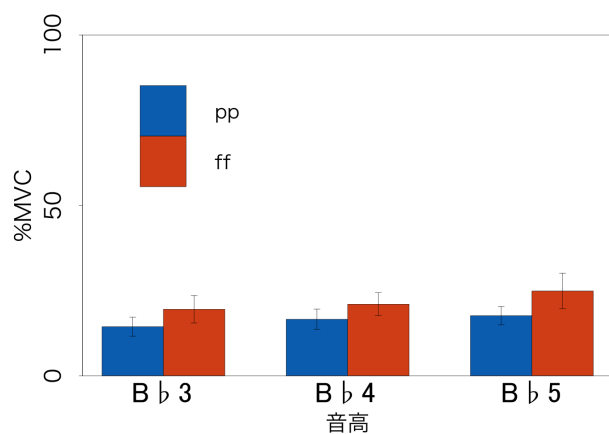


図 M.35: 参加者番号 05 の全演奏の準備時における胸鎖乳突筋の%MVC の平均値

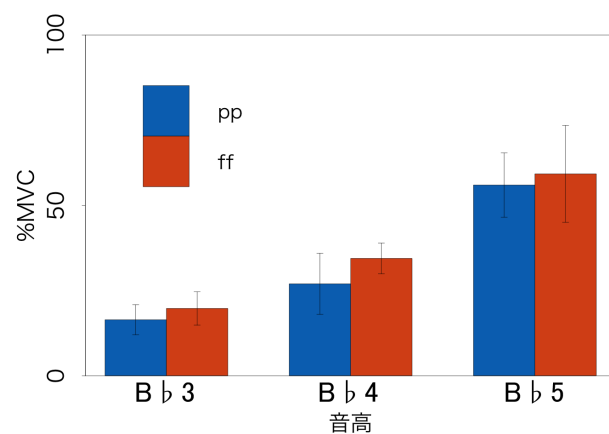


図 M.36: 参加者番号 05 の全演奏の準備時における口角下制筋の%MVC の平均値

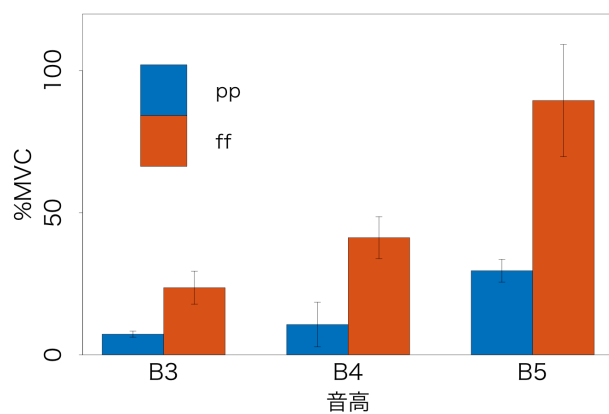


図 M.37: 参加者番号 05 の全演奏のサステイン時における腹斜筋の%MVC の平均値

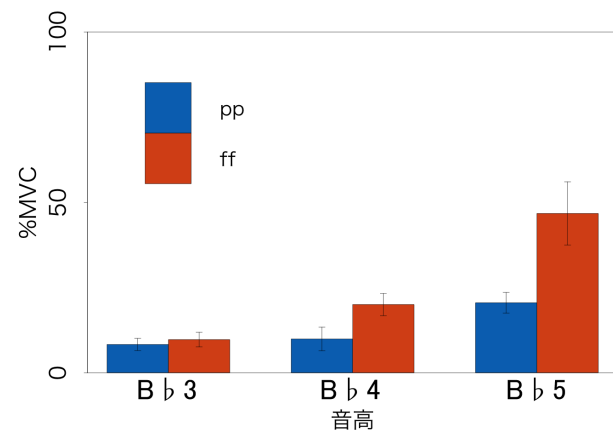


図 M.38: 参加者番号 05 の全演奏のサステイン時における広背筋の%MVC の平均値

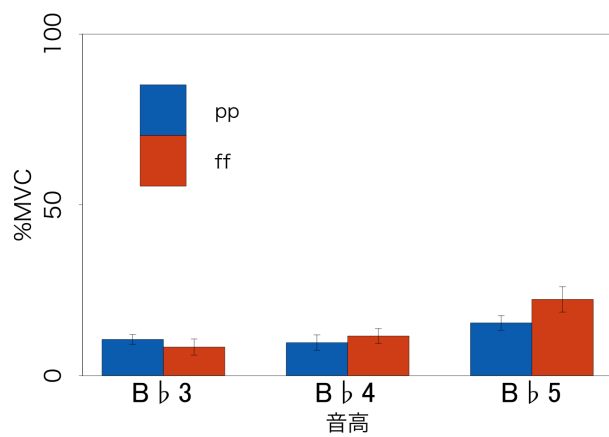


図 M.39: 参加者番号 05 の全演奏のサステイン時における胸鎖乳突筋の%MVC の平均値

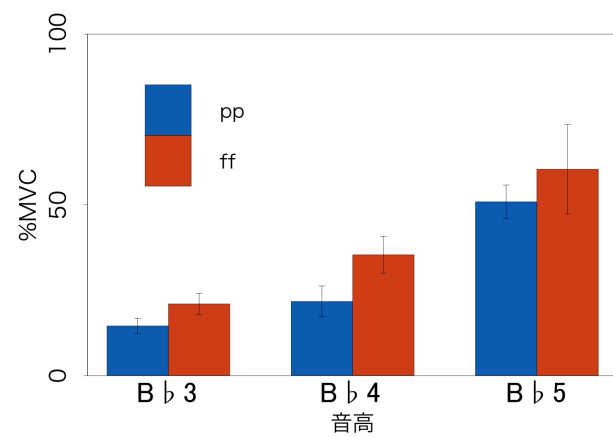


図 M.40: 参加者番号 05 の全演奏のサステイン時における口角下制筋の%MVC の平均値

## M.6 参加者番号 07

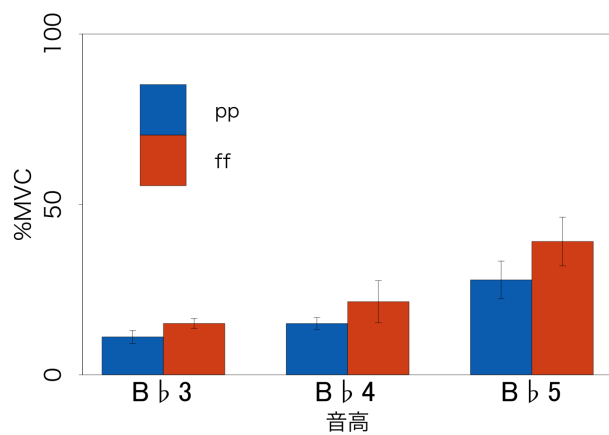


図 M.41: 参加者番号 07 の全演奏の準備時における腹斜筋の%MVC の平均値

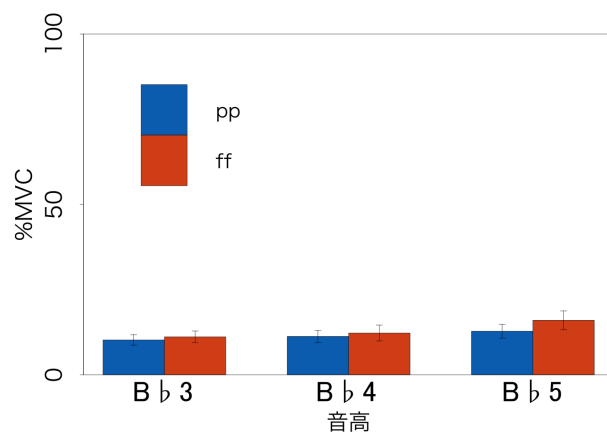


図 M.42: 参加者番号 07 の全演奏の準備時における広背筋の%MVC の平均値

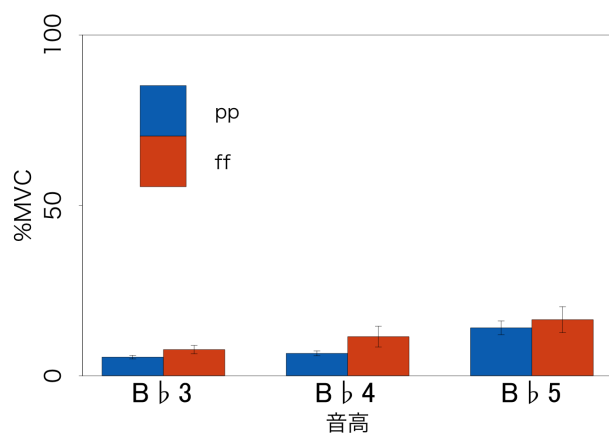


図 M.43: 参加者番号 07 の全演奏の準備時における胸鎖乳突筋の%MVC の平均値

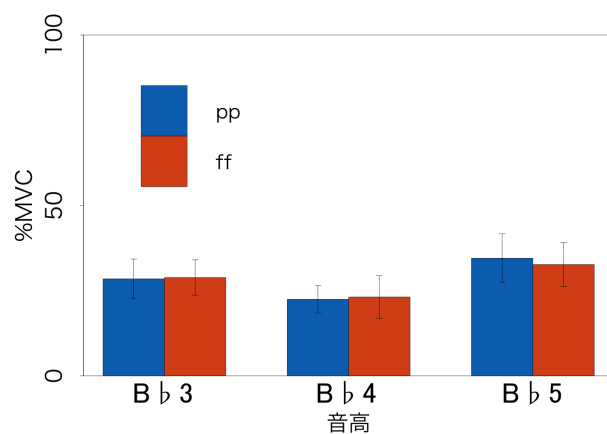


図 M.44: 参加者番号 07 の全演奏の準備時における口角下制筋の%MVC の平均値

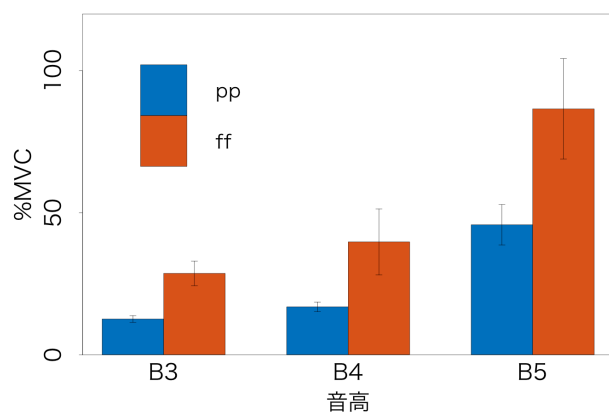


図 M.45: 参加者番号 07 の全演奏のサステイン時における腹斜筋の%MVC の平均値

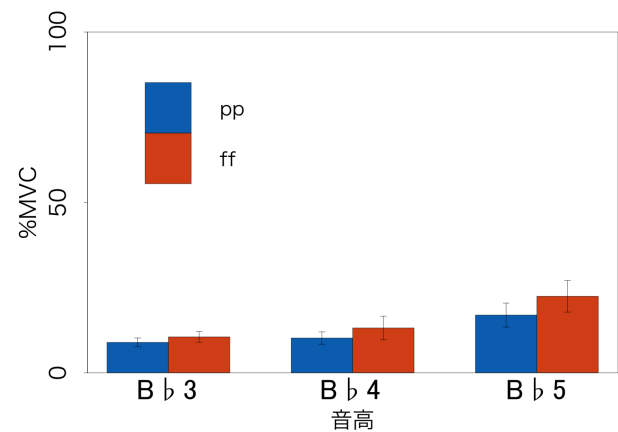


図 M.46: 参加者番号 07 の全演奏のサステイン時における広背筋の%MVC の平均値

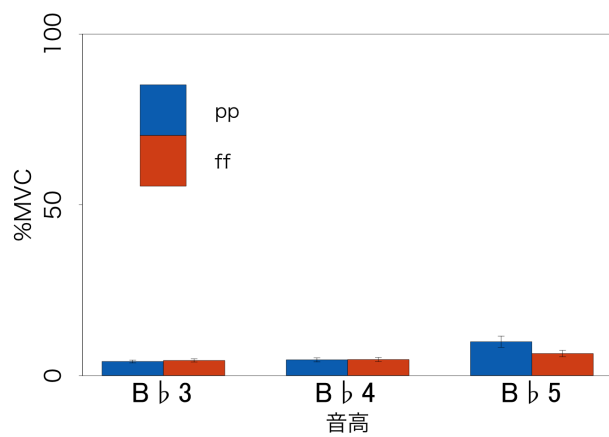


図 M.47: 参加者番号 07 の全演奏のサステイン時における胸鎖乳突筋の%MVC の平均値

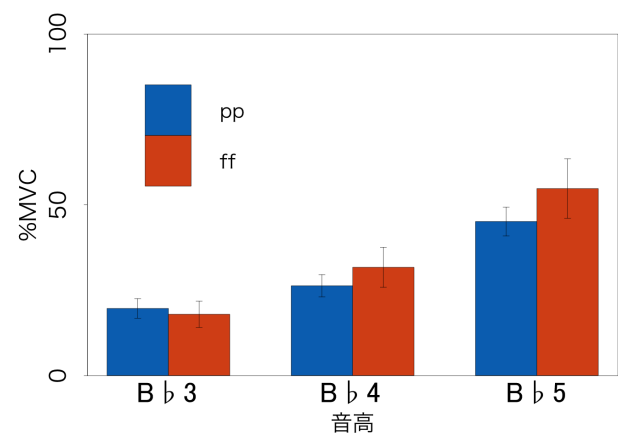


図 M.48: 参加者番号 07 の全演奏のサステイン時における口角下制筋の%MVC の平均値

## M.7 参加者番号 11

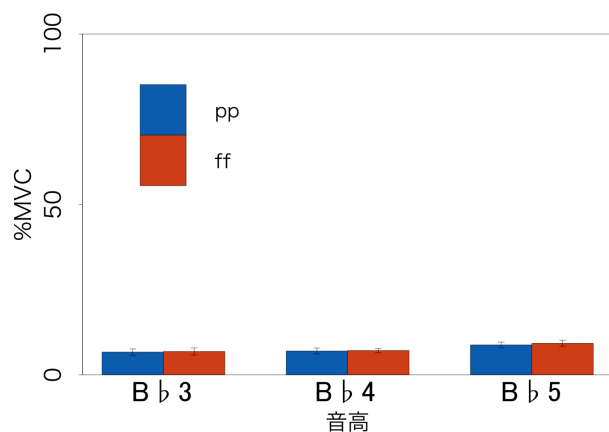


図 M.49: 参加者番号 11 の全演奏の準備時における腹斜筋の%MVC の平均値

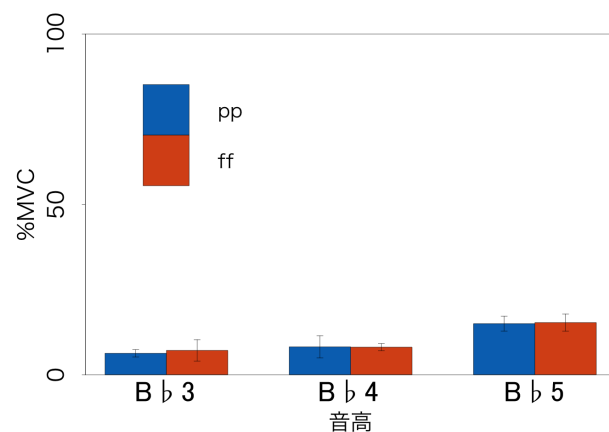


図 M.50: 参加者番号 11 の全演奏の準備時における広背筋の%MVC の平均値

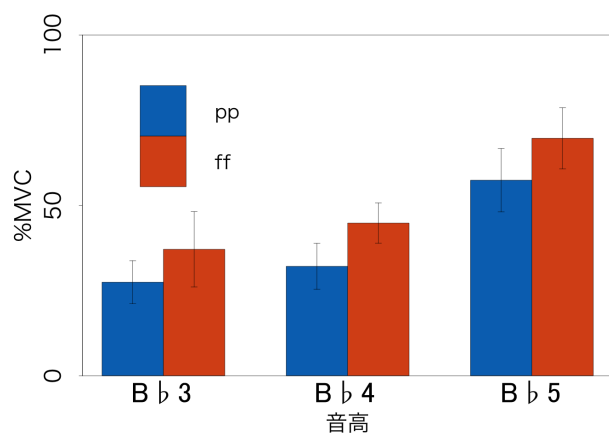


図 M.51: 参加者番号 11 の全演奏の準備時における胸鎖乳突筋の%MVC の平均値

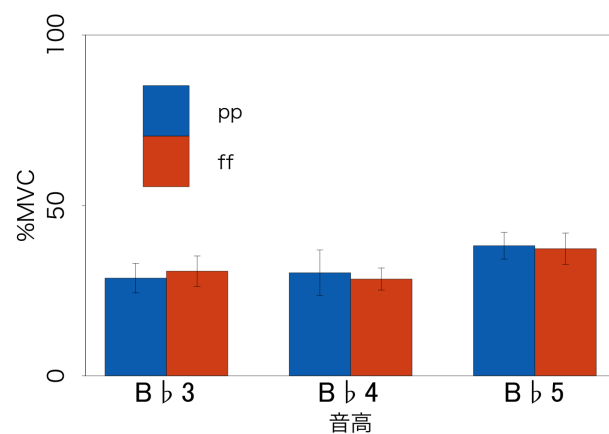


図 M.52: 参加者番号 11 の全演奏の準備時における口角下制筋の%MVC の平均値

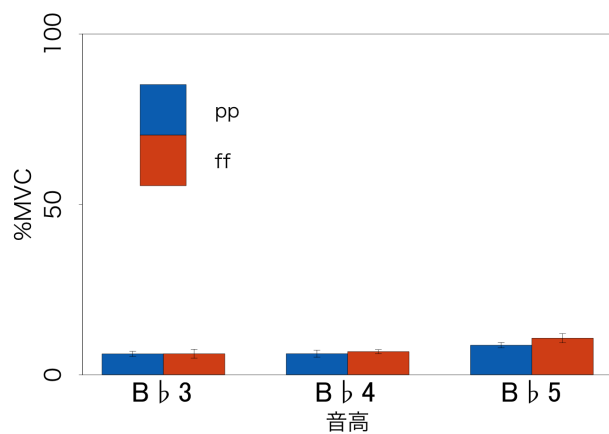


図 M.53: 参加者番号 11 の全演奏のサステイン時における腹斜筋の%MVC の平均値

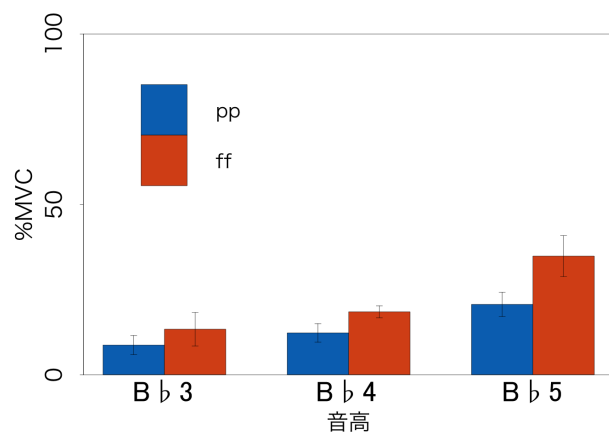


図 M.54: 参加者番号 11 の全演奏のサステイン時における広背筋の%MVC の平均値

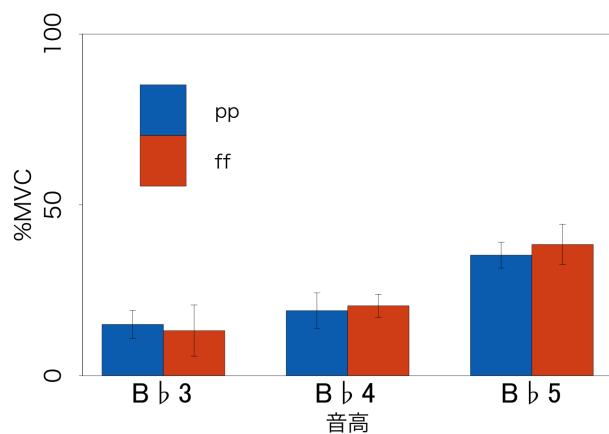


図 M.55: 参加者番号 11 の全演奏のサステイン時における胸鎖乳突筋の%MVC の平均値

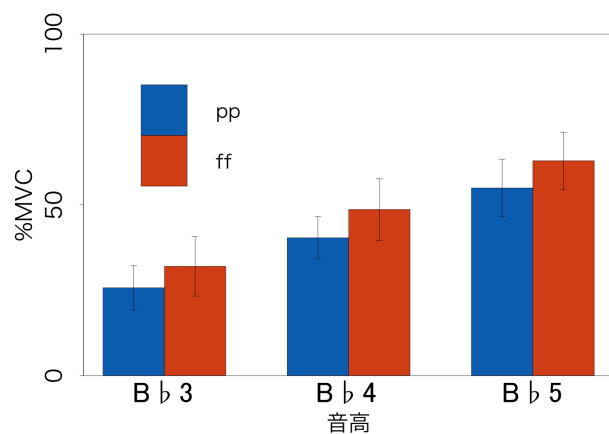


図 M.56: 参加者番号 11 の全演奏のサステイン時における口角下制筋の%MVC の平均値

## M.8 参加者番号 14

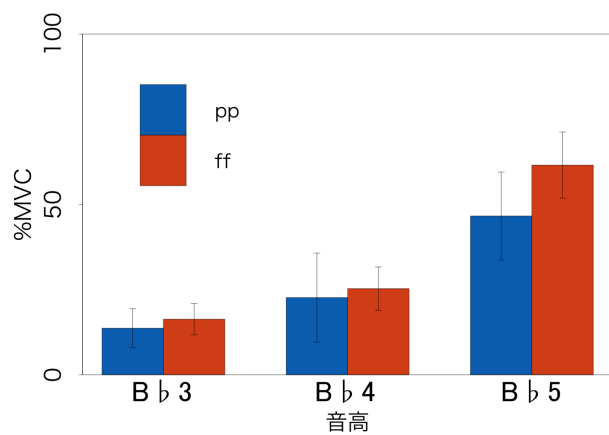


図 M.57: 参加者番号 14 の全演奏の準備時における腹斜筋の%MVC の平均値

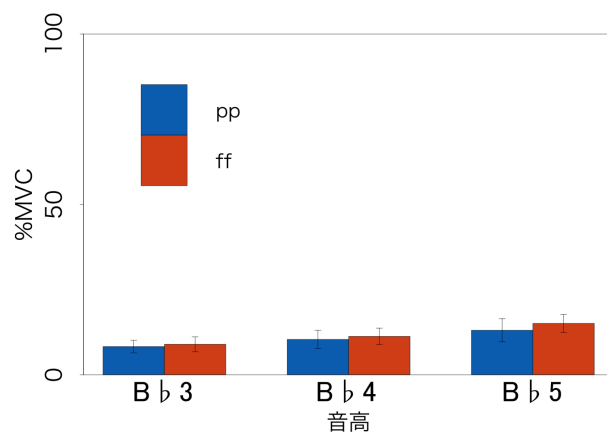


図 M.58: 参加者番号 14 の全演奏の準備時における広背筋の%MVC の平均値

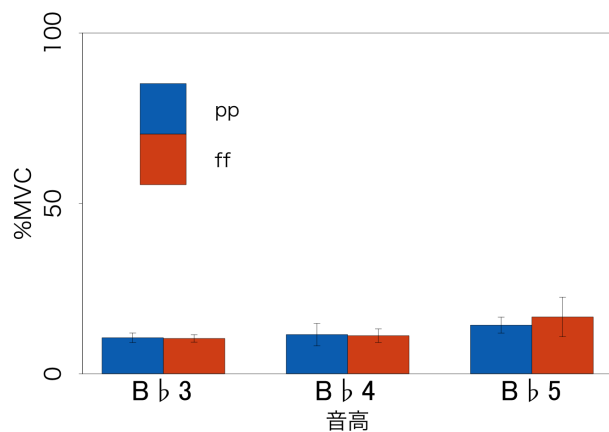


図 M.59: 参加者番号 14 の全演奏の準備時における胸鎖乳突筋の%MVC の平均値

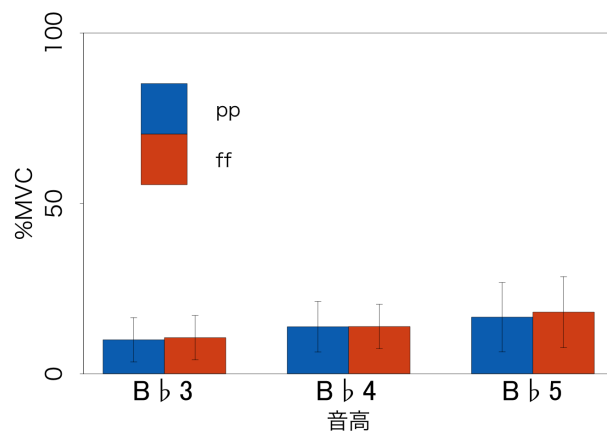


図 M.60: 参加者番号 14 の全演奏の準備時における口角下制筋の%MVC の平均値



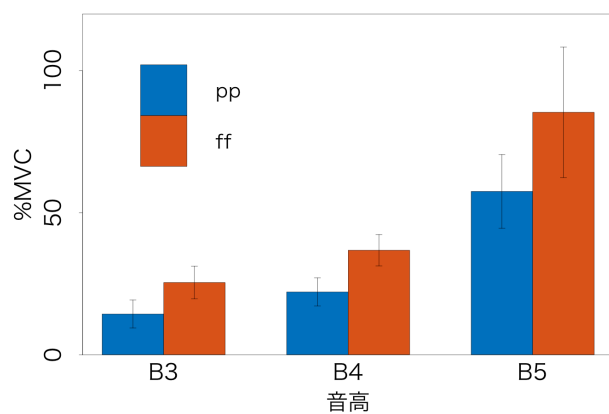


図 M.61: 参加者番号 14 の全演奏のサステイン時における腹斜筋の%MVC の平均値

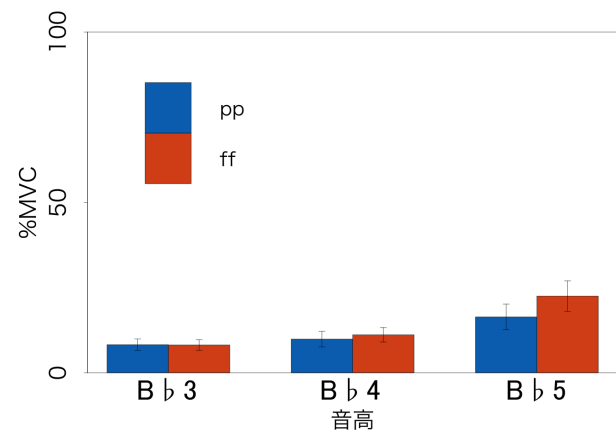


図 M.62: 参加者番号 14 の全演奏のサステイン時における広背筋の%MVC の平均値

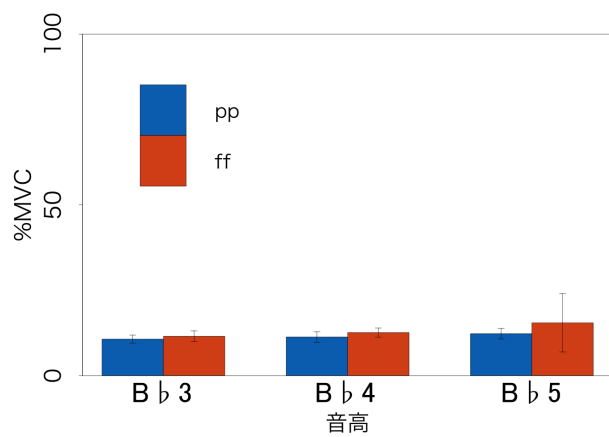


図 M.63: 参加者番号 14 の全演奏のサステイン時における胸鎖乳突筋の%MVC の平均値

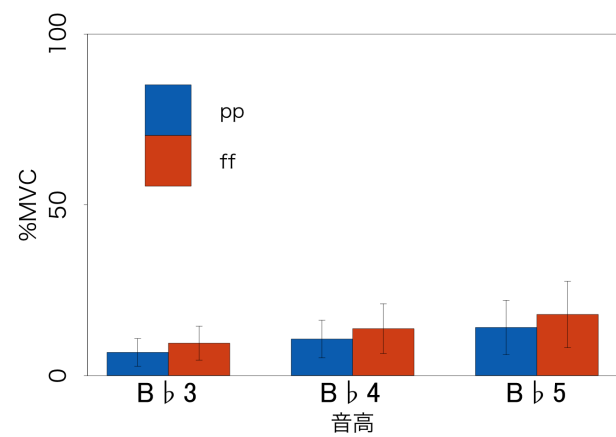


図 M.64: 参加者番号 14 の全演奏のサステイン時における口角下制筋の%MVC の平均値

## 付 録 N 実験参加者別の 3 要因分散分析の結果 (要因：音高・音強・マウスピース)

### N.1 準備時

#### N.1.1 参加者番号 00

表 N.1: 準備時における腹斜筋の%MVC の 3 要因分散分析

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
音高	2	34051	17025	622.469	< 2e-16	***
音強	1	63	63	2.296	0.13263	
MP	8	738	92	3.374	0.00172	**
音高：音強	2	682	341	12.463	1.35e-05	***
音高：MP	16	824	51	1.882	0.02972	*
音強：MP	8	217	27	0.991	0.44713	
音高：音強：MP	16	304	19	0.694	0.79443	

表 N.2: 準備時における広背筋の%MVC の 3 要因分散分析

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
音高	2	4283	2141.3	273.896	< 2e-16	***
音強	1	44	44.1	5.643	0.0193	*
MP	8	113	14.1	1.803	0.0842	.
音高：音強	2	5	2.4	0.303	0.7394	
音高：MP	16	148	9.3	1.186	0.2905	
音強：MP	8	28	3.5	0.445	0.8911	
音高：音強：MP	16	27	1.7	0.215	0.9994	

表 N.3: 準備時における胸鎖乳突筋の%MVC の 3 要因分散分析

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
音高	2	5606	2802.9	704.183	< 2e-16	***
音強	1	2	2.1	0.530	0.4680	
MP	8	45	5.6	1.411	0.2000	
音高 : 音強	2	39	19.3	4.841	0.0097	**
音高 : MP	16	68	4.2	1.067	0.3950	
音強 : MP	8	10	1.2	0.312	0.960	
音高 : 音強 : MP	16	54	3.4	0.852	0.6250	

表 N.4: 準備時における口角下制筋の%MVC の 3 要因分散分析

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
音高	2	649	324	0.168	0.846	
音強	1	4	4	0.002	0.963	
MP	8	91246	11406	5.891	3e-06	***
音高 : 音強	2	85	42	0.022	0.978	
音高 : MP	16	2075	130	0.067	1.000	
音強 : MP	8	27	3	0.002	1.000	
音高 : 音強 : MP	16	438	27	0.014	1.000	

### N.1.2 参加者番号 02

表 N.5: 準備時における腹斜筋の%MVC の 3 要因分散分析

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
音高	2	313.85	156.93	82.628	< 2e-16	***
音強	1	24.62	24.62	12.961	0.000482	***
MP	8	36.99	4.62	2.435	0.018451	*
音高 : 音強	2	4.06	2.03	1.068	0.347379	
音高 : MP	16	19.83	1.24	0.653	0.833481	
音強 : MP	8	12.50	1.56	0.823	0.584077	
音高 : 音強 : MP	16	25.31	1.58	0.833	0.646066	

表 N.6: 準備時における広背筋の%MVC の 3 要因分散分析

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
音高	2	56.85	28.42	17.674	2.29e-07	***
音強	1	77.76	77.76	48.351	2.85e-10	***
MP	8	11.99	1.50	0.932	0.493	
音高 : 音強	2	2.25	1.12	0.699	0.499	
音高 : MP	16	25.36	1.58	0.985	0.478	
音強 : MP	8	19.80	2.47	1.539	0.152	
音高 : 音強 : MP	16	10.80	0.68	0.420	0.975	

表 N.7: 準備時における胸鎖乳突筋の%MVC の 3 要因分散分析

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
音高	2	1774.7	887.4	149.163	< 2e-16	***
音強	1	326.5	326.5	54.878	3e-11	***
MP	8	13.3	1.7	0.280	0.971	
音高 : 音強	2	0.6	0.3	0.054	0.948	
音高 : MP	16	144.9	9.1	1.522	0.105	
音強 : MP	8	34.5	4.3	0.724	0.670	
音高 : 音強 : MP	16	92.9	5.8	0.976	0.488	

表 N.8: 準備時における口角下制筋の%MVC の 3 要因分散分析

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
音高	2	204799	102400	94.359	< 2e-16	***
音強	1	1405	1405	1.294	0.258	
MP	8	6180	772	0.712	0.681	
音高 : 音強	2	1510	755	0.696	0.501	
音高 : MP	16	17726	1108	1.021	0.441	
音強 : MP	8	3082	385	0.355	0.942	
音高 : 音強 : MP	16	14205	888	0.818	0.663	

### N.1.3 参加者番号 03

表 N.9: 準備時における腹斜筋の%MVC の 3 要因分散分析

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
音高	2	8159	4080	270.756	< 2e-16	***
音強	1	95	95	6.299	0.0136	*
MP	8	117	15	0.968	0.4646	
音高 : 音強	2	37	18	1.217	0.3002	
音高 : MP	16	169	11	0.702	0.7862	
音強 : MP	8	94	12	0.779	0.6220	
音高 : 音強 : MP	16	209	13	0.865	0.6100	

表 N.10: 準備時における広背筋の%MVC の 3 要因分散分析

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
音高	2	0.397	0.1984	3.044	0.0518	.
音強	1	1.663	1.6629	25.518	1.79e-06	***
MP	8	0.892	0.1115	1.712	0.1037	
音高 : 音強	2	0.024	0.0121	0.186	0.8302	
音高 : MP	16	0.460	0.0288	0.441	0.9676	
音強 : MP	8	0.272	0.0340	0.522	0.8377	
音高 : 音強 : MP	16	0.792	0.0495	0.760	0.7269	

表 N.11: 準備時における胸鎖乳突筋の%MVC の 3 要因分散分析

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
音高	2	9.6	4.8	1.093	0.339	
音強	1	337.0	337.0	76.323	3.42e-14	***
MP	8	34.9	4.4	0.989	0.449	
音高 : 音強	2	6.5	3.2	0.735	0.482	
音高 : MP	16	27.5	1.7	0.390	0.982	
音強 : MP	8	15.5	1.9	0.438	0.896	
音高 : 音強 : MP	16	29.6	1.9	0.419	0.975	

表 N.12: 準備時における口角下制筋の%MVC の 3 要因分散分析

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
音高	2	10402	5201	157.669	< 2e-16	***
音強	1	12	12	0.377	0.5407	
MP	8	473	59	1.793	0.0862	.
音高 : 音強	2	86	43	1.299	0.2771	
音高 : MP	16	855	53	1.619	0.0756	.
音強 : MP	8	222	28	0.842	0.5677	
音高 : 音強 : MP	16	297	19	0.562	0.9055	

## N.1.4 参加者番号 04

表 N.13: 準備時における腹斜筋の%MVC の 3 要因分散分析

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
音高	2	2498.0	1249.0	291.127	< 2e-16	***
音強	1	102.9	102.9	23.990	3.42e-06	***
MP	8	30.5	3.8	0.889	0.5281	
音高 : 音強	2	34.6	17.3	4.037	0.0204	*
音高 : MP	16	49.8	3.1	0.725	0.7632	
音強 : MP	8	47.1	5.9	1.373	0.2166	
音高 : 音強 : MP	16	66.5	4.2	0.968	0.4962	

表 N.14: 準備時における広背筋の%MVC の 3 要因分散分析

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
音高	2	68.6	34.31	3.635	0.0297	*
音強	1	14.2	14.17	1.501	0.2231	
MP	8	114.3	14.28	1.513	0.1609	
音高 : 音強	2	1.5	0.73	0.077	0.9259	
音高 : MP	16	42.0	2.62	0.278	0.9973	
音強 : MP	8	24.5	3.07	0.325	0.9548	
音高 : 音強 : MP	16	44.0	2.75	0.291	0.9964	

表 N.15: 準備時における胸鎖乳突筋の%MVC の 3 要因分散分析

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
音高	2	20385	10192	253.867	< 2e-16	***
音強	1	2726	2726	67.889	4.43e-13	***
MP	8	189	24	0.588	0.786	
音高 : 音強	2	85	42	1.056	0.351	
音高 : MP	16	959	60	1.492	0.116	
音強 : MP	8	188	24	0.586	0.787	
音高 : 音強 : MP	16	829	52	1.291	0.216	

表 N.16: 準備時における口角下制筋の%MVC の 3 要因分散分析

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
音高	2	7692	3846	30.018	4.3e-11	***
音強	1	60	60	0.466	0.496	
MP	8	669	84	0.653	0.732	
音高 : 音強	2	519	260	2.026	0.137	
音高 : MP	16	1262	79	0.616	0.865	
音強 : MP	8	235	29	0.229	0.985	
音高 : 音強 : MP	16	1435	90	0.700	0.788	

### N.1.5 参加者番号 05

表 N.17: 準備時における腹斜筋の%MVC の 3 要因分散分析

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
音高	2	11107	5553	80.472	< 2e-16	***
音強	1	1736	1736	25.156	2.09e-06	***
MP	8	190	24	0.344	0.946697	
音高 : 音強	2	1342	671	9.726	0.000131	***
音高 : MP	16	1221	76	1.106	0.359244	
音強 : MP	8	855	107	1.549	0.148805	
音高 : 音強 : MP	16	828	52	0.750	0.736761	

表 N.18: 準備時における広背筋の%MVC の 3 要因分散分析

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
音高	2	3809	1904.5	98.801	< 2e-16	***
音強	1	302	302.4	15.689	0.000134	***
MP	8	78	9.8	0.507	0.848469	
音高 : 音強	2	497	248.3	12.881	9.61e-06	***
音高 : MP	16	254	15.9	0.824	0.656393	
音強 : MP	8	158	19.7	1.024	0.422201	
音高 : 音強 : MP	16	152	9.5	0.493	0.945775	

表 N.19: 準備時における胸鎖乳突筋の%MVC の 3 要因分散分析

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
音高	2	501.8	250.9	18.762	1.01e-07	***
音強	1	1267.0	1267.0	94.754	< 2e-16	***
MP	8	130.3	16.3	1.218	0.295	
音高 : 音強	2	57.8	28.9	2.161	0.120	
音高 : MP	16	225.5	14.1	1.054	0.408	
音強 : MP	8	53.6	6.7	0.501	0.853	
音高 : 音強 : MP	16	182.7	11.4	0.854	0.622	

表 N.20: 準備時における口角下制筋の%MVC の 3 要因分散分析

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
音高	2	43987	21994	285.226	< 2e-16	***
音強	1	888	888	11.517	0.000965	***
MP	8	266	33	0.432	0.899549	
音高 : 音強	2	156	78	1.012	0.366985	
音高 : MP	16	1095	68	0.887	0.584909	
音強 : MP	8	3598	75	0.970	0.463757	
音高 : 音強 : MP	16	1005	63	0.815	0.666350	



### N.1.6 参加者番号 07

表 N.21: 準備時における腹斜筋の%MVC の 3 要因分散分析

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
音高	2	12144	6072	343.846	< 2e-16	***
音強	1	2112	2112	119.577	< 2e-16	***
MP	8	245	31	1.736	0.0981	.
音高 : 音強	2	376	188	10.639	6.06e-05	***
音高 : MP	16	382	24	1.354	0.1792	
音強 : MP	8	366	46	2.594	0.0124	*
音高 : 音強 : MP	16	423	26	1.498	0.1134	

表 N.22: 準備時における広背筋の%MVC の 3 要因分散分析

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
音高	2	395.4	197.69	46.591	2.58e-15	***
音強	1	116.8	116.80	27.526	7.79e-07	***
MP	8	67.4	8.42	1.985	0.05504	.
音高 : 音強	2	46.4	23.19	5.465	0.00548	**
音高 : MP	16	65.8	4.12	0.970	0.49443	
音強 : MP	8	22.7	2.84	0.669	0.71793	
音高 : 音強 : MP	16	51.8	3.24	0.763	0.72284	

表 N.23: 準備時における胸鎖乳突筋の%MVC の 3 要因分散分析

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
音高	2	2167.9	1083.9	245.433	< 2e-16	***
音強	1	408.8	408.8	92.564	3.4e-16	***
MP	8	56.9	7.1	1.609	0.1304	
音高 : 音強	2	61.0	30.5	6.909	0.0015	**
音高 : MP	16	115.4	7.2	1.633	0.0721	.
音強 : MP	8	52.7	6.6	1.493	0.1682	
音高 : 音強 : MP	16	79.5	5.0	1.125	0.3419	

表 N.24: 準備時における口角下制筋の%MVC の 3 要因分散分析

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
音高	2	3151	1575.5	39.755	1.15e-13	***
音強	1	3	2.9	0.073	0.788	
MP	8	258	32.3	0.815	0.591	
音高 : 音強	2	51	25.3	0.639	0.530	
音高 : MP	16	351	21.9	0.553	0.912	
音強 : MP	8	335	41.8	1.056	0.400	
音高 : 音強 : MP	16	204	12.7	0.321	0.994	

### N.1.7 参加者番号 11

表 N.25: 準備時における腹斜筋の%MVC の 3 要因分散分析

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
音高	2	160.74	80.37	95.011	< 2e-16	***
音強	1	2.83	2.83	3.342	0.0703	.
MP	8	11.07	1.38	1.635	0.1231	
音高 : 音強	2	0.79	0.40	0.469	0.6269	
音高 : MP	16	5.37	0.34	0.397	0.9808	
音強 : MP	8	1.40	0.17	0.206	0.9892	
音高 : 音強 : MP	16	7.14	0.45	0.528	0.9272	

表 N.26: 準備時における広背筋の%MVC の 3 要因分散分析

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
音高	2	2199.2	1099.6	195.548	< 2e-16	***
音強	1	5.1	5.1	0.906	0.343	
MP	8	33.3	4.2	0.741	0.655	
音高 : 音強	2	6.1	3.0	0.541	0.584	
音高 : MP	16	87.1	5.4	0.968	0.496	
音強 : MP	8	34.7	4.3	0.772	0.628	
音高 : 音強 : MP	16	112.4	7.0	1.249	0.244	

表 N.27: 準備時における胸鎖乳突筋の%MVC の 3 要因分散分析

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
音高	2	29592	14796	209.991	< 2e-16	***
音強	1	5406	5406	76.731	3.03e-14	***
MP	8	297	37	0.527	0.8340	
音高 : 音強	2	73	37	0.521	0.5952	
音高 : MP	16	2041	128	1.811	0.0385	*
音強 : MP	8	240	30	0.426	0.9034	
音高 : 音強 : MP	16	448	28	0.397	0.9807	

表 N.28: 準備時における口角下制筋の%MVC の 3 要因分散分析

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
音高	2	2449.4	1224.7	54.024	< 2e-16	***
音強	1	2.2	2.2	0.096	0.7569	
MP	8	300.5	37.6	1.657	0.1174	
音高 : 音強	2	110.9	55.5	2.446	0.0914	.
音高 : MP	16	295.5	18.5	0.815	0.6663	
音強 : MP	8	87.3	10.9	0.482	0.8669	
音高 : 音強 : MP	16	249.0	15.6	0.687	0.8017	

### N.1.8 参加者番号 14

表 N.29: 準備時における腹斜筋の%MVC の 3 要因分散分析

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
音高	2	45249	22625	291.009	< 2e-16	***
音強	1	1839	1839	23.657	3.94e-06	***
MP	8	1454	182	2.337	0.023477	*
音高 : 音強	2	1362	681	8.762	0.000298	***
音高 : MP	16	1735	108	1.395	0.157995	
音強 : MP	8	1031	129	1.657	0.117228	
音高 : 音強 : MP	16	1044	65	0.840	0.638610	

表 N.30: 準備時における広背筋の%MVC の 3 要因分散分析

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
音高	2	815.0	407.5	55.792	< 2e-16	***
音強	1	57.6	57.6	7.889	0.00591	**
MP	8	70.3	8.8	1.204	0.30361	
音高 : 音強	2	14.3	7.1	0.977	0.37978	
音高 : MP	16	38.6	2.4	0.330	0.99276	
音強 : MP	8	47.4	5.9	0.811	0.59457	
音高 : 音強 : MP	16	87.1	5.4	0.745	0.74190	

表 N.31: 準備時における胸鎖乳突筋の%MVC の 3 要因分散分析

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
音高	2	770.1	385.0	41.984	3.24e-14	***
音強	1	15.9	15.9	1.737	0.1903	
MP	8	91.2	11.4	1.243	0.2815	
音高 : 音強	2	63.7	31.9	3.475	0.0345	*
音高 : MP	16	63.7	4.0	0.434	0.9700	
音強 : MP	8	126.5	15.8	1.724	0.1009	
音高 : 音強 : MP	16	209.4	13.1	1.427	0.1425	

表 N.32: 準備時における口角下制筋の%MVC の 3 要因分散分析

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
音高	2	1350	674.9	7.909	0.000623	***
音強	1	21	20.9	0.245	0.621423	
MP	8	741	92.7	1.086	0.378414	
音高 : 音強	2	14	6.8	0.080	0.923448	
音高 : MP	16	184	11.5	0.135	0.999974	
音強 : MP	8	17	2.2	0.026	0.999995	
音高 : 音強 : MP	16	57	3.6	0.042	1.000000	

## N.2 サステイン時

### N.2.1 参加者番号 00

表 N.33: サステイン時における腹斜筋の%MVC の 3 要因分散分析

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
音高	2	41536	20768	671.636	< 2e-16	***
音強	1	9316	9316	301.273	< 2e-16	***
MP	8	343	43	1.388	0.209977	
音高：音強	2	565	282	9.133	0.000217	***
音高：MP	16	830	52	1.677	0.061907	.
音強：MP	8	251	31	1.015	0.428918	
音高：音強：MP	16	441	28	0.891	0.581294	

表 N.34: サステイン時における広背筋の%MVC の 3 要因分散分析

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
音高	2	5123	2561.7	706.100	< 2e-16	***
音強	1	430	430.4	118.624	< 2e-16	***
MP	8	53	6.6	1.832	0.0788	.
音高：音強	2	287	143.5	39.566	1.28e-13	***
音高：MP	16	75	4.7	1.297	0.2124	
音強：MP	8	43	5.4	1.492	0.1686	
音高：音強：MP	16	96	6.0	1.651	0.0678	.

表 N.35: サステイン時における胸鎖乳突筋の%MVC の 3 要因分散分析

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
音高	2	5137	2568.4	716.829	< 2e-16	***
音強	1	1	0.9	0.247	0.62051	
MP	8	80	10.0	2.780	0.00779	**
音高：音強	2	20	9.9	2.756	0.06801	.
音高：MP	16	95	6.0	1.662	0.06537	.
音強：MP	8	9	1.1	0.314	0.95916	
音高：音強：MP	16	20	1.2	0.343	0.99114	

表 N.36: サステイン時における口角下制筋の%MVC の 3 要因分散分析

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
音高	2	1275	638	0.484	0.617	
音強	1	100	100	0.076	0.784	
MP	8	57387	7173	5.450	8.91e-06	***
音高 : 音強	2	56	28	0.021	0.979	
音高 : MP	16	5403	338	0.257	0.998	
音強 : MP	8	306	38	0.029	1.000	
音高 : 音強 : MP	16	203	13	0.010	1.000	

## N.2.2 参加者番号 02

表 N.37: サステイン時における腹斜筋の%MVC の 3 要因分散分析

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
音高	2	1219.5	609.7	74.971	< 2e-16	***
音強	1	837.6	837.6	102.993	< 2e-16	***
MP	8	343.1	5.4	0.663	0.723	
音高 : 音強	2	209.8	104.9	12.895	9.5e-06	***
音高 : MP	16	94.6	5.9	0.727	0.761	
音強 : MP	8	19.0	2.4	0.292	0.967	
音高 : 音強 : MP	16	75.0	4.7	0.576	0.895	

表 N.38: サステイン時における広背筋の%MVC の 3 要因分散分析

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
音高	2	228.83	114.41	54.882	< 2e-16	***
音強	1	164.34	164.34	78.830	1.63e-14	***
MP	8	12.03	1.50	0.721	0.672	
音高 : 音強	2	116.83	58.42	28.020	1.58e-10	***
音高 : MP	16	14.45	0.90	0.433	0.970	
音強 : MP	8	6.71	0.84	0.402	0.917	
音高 : 音強 : MP	16	22.69	1.42	0.680	0.808	

表 N.39: サステイン時における胸鎖乳突筋の%MVC の 3 要因分散分析

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
音高	2	1926.9	963.5	200.600	< 2e-16	***
音強	1	303.5	303.5	63.183	1.96e-12	***
MP	8	31.3	3.9	0.815	0.5908	
音高 : 音強	2	111.3	55.7	11.592	2.75e-05	***
音高 : MP	16	128.4	8.0	1.671	0.0632	.
音強 : MP	8	27.7	3.5	0.721	0.6729	
音高 : 音強 : MP	16	59.6	3.7	0.775	0.7102	

表 N.40: サステイン時における口角下制筋の%MVC の 3 要因分散分析

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
音高	2	409723	204862	168.399	< 2e-16	***
音強	1	13808	13808	11.350	0.00105	**
MP	8	7517	940	0.772	0.62780	
音高 : 音強	2	2038	1019	0.838	0.43556	
音高 : MP	16	27890	1743	1.433	0.14004	
音強 : MP	8	5423	678	0.557	0.81064	
音高 : 音強 : MP	16	11484	718	0.590	0.88546	

### N.2.3 参加者番号 03

表 N.41: サステイン時における腹斜筋の%MVC の 3 要因分散分析

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
音高	2	35023	17512	261.847	< 2e-16	***
音強	1	11735	11735	175.472	< 2e-16	***
MP	8	622	78	1.164	0.328	
音高 : 音強	2	3617	1809	27.044	3.01e-10	***
音高 : MP	16	385	24	0.360	0.988	
音強 : MP	8	359	45	0.671	0.716	
音高 : 音強 : MP	16	543	34	0.507	0.939	

表 N.42: サステイン時における広背筋の%MVC の 3 要因分散分析

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
音高	2	32.15	16.075	145.312	< 2e-16	***
音強	1	11.71	11.707	105.823	< 2e-16	***
MP	8	2.08	0.260	2.349	0.0228	*
音高 : 音強	2	4.74	2.368	21.406	1.48e-08	***
音高 : MP	16	1.04	0.065	0.586	0.8883	
音強 : MP	8	0.53	0.067	0.603	0.7739	
音高 : 音強 : MP	16	1.06	0.066	0.597	0.8805	

表 N.43: サステイン時における胸鎖乳突筋の%MVC の 3 要因分散分析

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
音高	2	320.5	160.24	163.613	< 2e-16	***
音強	1	27.0	27.04	27.607	7.54e-07	***
MP	8	9.6	1.20	1.224	0.292	
音高 : 音強	2	57.9	28.93	29.537	5.86e-11	***
音高 : MP	16	8.0	0.50	0.510	0.937	
音強 : MP	8	6.0	0.74	0.760	0.638	
音高 : 音強 : MP	16	9.4	0.59	0.598	0.879	

表 N.44: サステイン時における口角下制筋の%MVC の 3 要因分散分析

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
音高	2	21813	10907	310.255	< 2e-16	***
音強	1	2967	2967	84.409	3.27e-15	***
MP	8	134	17	0.475	0.871	
音高 : 音強	2	2563	1282	36.460	7.96e-13	***
音高 : MP	16	282	18	0.501	0.942	
音強 : MP	8	165	21	0.587	0.787	
音高 : 音強 : MP	16	682	43	1.213	0.270	



## N.2.4 参加者番号 04

表 N.45: サステイン時における腹斜筋の%MVC の 3 要因分散分析

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
音高	2	10704	5352	526.477	< 2e-16	***
音強	1	7885	7885	775.681	< 2e-16	***
MP	8	128	16	1.571	0.142	
音高 : 音強	2	2439	1219	119.942	< 2e-16	***
音高 : MP	16	132	8	0.810	0.672	
音強 : MP	8	29	4	0.356	0.941	
音高 : 音強 : MP	16	79	5	0.487	0.949	

表 N.46: サステイン時における広背筋の%MVC の 3 要因分散分析

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
音高	2	130.1	65.07	6.184	0.00287	**
音強	1	33.1	33.05	3.141	0.07916	.
MP	8	124.6	15.57	1.480	0.17297	
音高 : 音強	2	18.9	9.44	0.897	0.41072	
音高 : MP	16	43.5	2.72	0.258	0.99824	
音強 : MP	8	24.4	3.05	0.290	0.96806	
音高 : 音強 : MP	16	41.2	2.58	0.245	0.99873	

表 N.47: サステイン時における胸鎖乳突筋の%MVC の 3 要因分散分析

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
音高	2	40928	20464	1128.304	< 2e-16	***
音強	1	7071	7071	389.867	< 2e-16	***
MP	8	130	16	0.898	0.521	
音高 : 音強	2	8908	4454	245.566	< 2e-16	***
音高 : MP	16	174	11	0.599	0.879	
音強 : MP	8	128	16	0.885	0.532	
音高 : 音強 : MP	16	341	21	1.176	0.299	

表 N.48: サステイン時における口角下制筋の%MVC の 3 要因分散分析

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
音高	2	38189	19095	529.000	< 2e-16	***
音強	1	6301	6301	174.550	< 2e-16	***
MP	8	337	42	1.166	0.32619	
音高：音強	2	467	233	6.469	0.00222	**
音高：MP	16	221	14	0.383	0.98398	
音強：MP	8	192	24	0.664	0.72212	
音高：音強：MP	16	208	13	0.360	0.98836	

## N.2.5 参加者番号 05

表 N.49: サステイン時における腹斜筋の%MVC の 3 要因分散分析

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
音高	2	57390	28695	366.605	< 2e-16	***
音強	1	51411	51411	656.831	< 2e-16	***
MP	8	930	116	1.485	0.17111	
音高：音強	2	13320	6660	85.088	< 2e-16	***
音高：MP	16	2077	130	1.659	0.06608	.
音強：MP	8	1825	228	2.915	0.00553	**
音高：音強：MP	16	1197	75	0.956	0.50940	

表 N.50: サステイン時における広背筋の%MVC の 3 要因分散分析

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
音高	2	17829	8914	541.140	< 2e-16	***
音強	1	6404	6404	388.731	< 2e-16	***
MP	8	308	39	2.337	0.02347	*
音高：音強	2	4269	2134	129.570	< 2e-16	***
音高：MP	16	590	37	2.237	0.00775	**
音強：MP	8	351	44	2.662	0.01046	*
音高：音強：MP	16	235	15	0.893	0.57835	

表 N.51: サステイン時における胸鎖乳突筋の%MVC の 3 要因分散分析

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
音高	2	2836.0	1418.0	227.467	< 2e-16	***
音強	1	196.3	196.3	31.496	1.56e-07	***
MP	8	87.9	11.0	1.763	0.0922	.
音高 : 音強	2	563.0	281.5	45.155	5.60e-15	***
音高 : MP	16	87.0	5.4	0.872	0.6023	
音強 : MP	8	38.3	4.8	0.769	0.6310	
音高 : 音強 : MP	16	45.0	2.8	0.451	0.9641	

表 N.52: サステイン時における口角下制筋の%MVC の 3 要因分散分析

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
音高	2	41190	20595	416.951	< 2e-16	***
音強	1	3956	3956	80.085	1.13e-14	***
MP	8	193	24	0.488	0.8624	
音高 : 音強	2	355	178	3.595	0.0308	*
音高 : MP	16	617	39	0.780	0.7043	
音強 : MP	8	308	39	0.780	0.6212	
音高 : 音強 : MP	16	292	18	0.369	0.9868	

## N.2.6 参加者番号 07

表 N.53: サステイン時における腹斜筋の%MVC の 3 要因分散分析

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
音高	2	64269	32134	587.293	< 2e-16	***
音強	1	28619	28619	523.052	< 2e-16	***
MP	8	1368	171	3.125	0.003239	**
音高 : 音強	2	4416	2208	40.356	8.16e-14	***
音高 : MP	16	1936	121	2.212	0.008550	**
音強 : MP	8	1736	217	3.966	0.000378	***
音高 : 音強 : MP	16	2591	162	2.960	0.000437	***

表 N.54: サステイン時における広背筋の%MVC の3 要因分散分析

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
音高	2	3012.5	1506.2	188.730	< 2e-16	***
音強	1	457.1	457.1	57.277	1.34e-11	***
MP	8	169.1	21.1	2.649	0.0108	*
音高：音強	2	106.1	53.0	6.646	0.0019	**
音高：MP	16	183.2	11.5	1.435	0.1392	
音強：MP	8	60.3	7.5	0.945	0.4830	
音高：音強：MP	16	111.2	6.9	0.871	0.6037	

表 N.55: サステイン時における胸鎖乳突筋の%MVC の3 要因分散分析

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
音高	2	502.3	251.13	255.614	< 2e-16	***
音強	1	42.9	42.85	43.616	1.55e-09	***
MP	8	3.3	0.42	0.424	0.905	
音高：音強	2	120.2	60.11	61.183	< 2e-16	***
音高：MP	16	6.8	0.43	0.433	0.970	
音強：MP	8	0.6	0.07	0.074	1.000	
音高：音強：MP	16	2.8	0.17	0.175	1.000	

表 N.56: サステイン時における口角下制筋の%MVC の3 要因分散分析

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
音高	2	27212	13606	491.122	< 2e-16	***
音強	1	802	802	28.947	4.36e-07	***
MP	8	371	46	1.674	0.113	
音高：音強	2	889	445	16.051	7.88e-07	***
音高：MP	16	400	25	0.902	0.569	
音強：MP	8	248	31	1.117	0.357	
音高：音強：MP	16	180	11	0.406	0.978	

## N.2.7 参加者番号 11

表 N.57: サステイン時における腹斜筋の%MVC の 3 要因分散分析

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
音高	2	415.4	207.72	201.566	< 2e-16	***
音強	1	33.2	33.20	32.216	1.17e-07	***
MP	8	7.1	0.88	0.857	0.555	
音高 : 音強	2	29.5	14.75	14.309	3.07e-06	***
音高 : MP	16	23.6	1.47	1.429	0.142	
音強 : MP	8	2.5	0.32	0.307	0.962	
音高 : 音強 : MP	16	11.4	0.71	0.691	0.797	

表 N.58: サステイン時における広背筋の%MVC の 3 要因分散分析

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
音高	2	8101	4051	279.158	< 2e-16	***
音強	1	2817	2817	194.125	< 2e-16	***
MP	8	45	6	0.391	0.92329	
音高 : 音強	2	705	353	24.296	1.94e-09	***
音高 : MP	16	556	35	2.396	0.00416	**
音強 : MP	8	50	6	0.435	0.89781	
音高 : 音強 : MP	16	163	10	0.702	0.78612	

表 N.59: サステイン時における胸鎖乳突筋の%MVC の 3 要因分散分析

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
音高	2	15156	7578	289.511	< 2e-16	***
音強	1	33	33	1.272	0.2618	
MP	8	291	36	1.388	0.2098	
音高 : 音強	2	170	85	3.243	0.0429	*
音高 : MP	16	754	47	1.801	0.0400	*
音強 : MP	8	42	5	0.201	0.9902	
音高 : 音強 : MP	16	282	18	0.673	0.8150	

表 N.60: サステイン時における口角下制筋の%MVC の 3 要因分散分析

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
音高	2	24409	12205	171.916	< 2e-16	***
音強	1	2286	2286	32.198	1.18e-07	***
MP	8	465	58	0.819	0.587	
音高 : 音強	2	31	16	0.222	0.801	
音高 : MP	16	1242	78	1.093	0.370	
音強 : MP	8	74	9	0.131	0.998	
音高 : 音強 : MP	16	380	24	0.335	0.992	

## N.2.8 参加者番号 14

表 N.61: サステイン時における腹斜筋の%MVC の 3 要因分散分析

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
音高	2	81220	40610	303.111	< 2e-16	***
音強	1	12937	12937	96.559	< 2e-16	***
MP	8	1220	153	1.138	0.343676	
音高 : 音強	2	2106	1053	7.859	0.000651	***
音高 : MP	16	2099	131	0.979	0.484649	
音強 : MP	8	1053	132	0.983	0.453669	
音高 : 音強 : MP	16	2197	137	1.025	0.437138	

表 N.62: サステイン時における広背筋の%MVC の 3 要因分散分析

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
音高	2	3811	1905.3	225.700	< 2e-16	***
音強	1	241	240.7	28.511	5.20e-07	***
MP	8	105	13.1	1.551	0.148	
音高 : 音強	2	287	143.7	17.021	3.75e-07	***
音高 : MP	16	77	4.8	0.570	0.900	
音強 : MP	8	70	8.7	1.030	0.418	
音高 : 音強 : MP	16	118	7.4	0.875	0.599	

表 N.63: サステイン時における胸鎖乳突筋の%MVC の 3 要因分散分析

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
音高	2	218.6	109.29	7.962	0.000595	***
音強	1	126.2	126.21	9.195	0.003038	**
MP	8	74.2	9.27	0.675	0.712258	
音高：音強	2	42.0	21.01	1.531	0.220983	
音高：MP	16	206.7	12.92	0.941	0.525555	
音強：MP	8	115.2	14.39	1.049	0.404604	
音高：音強：MP	16	293.9	18.37	1.338	0.187760	

表 N.64: サステイン時における口角下制筋の%MVC の 3 要因分散分析

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
音高	2	1669	834.3	13.697	4.99e-06	***
音強	1	411	411.5	6.755	0.0107	*
MP	8	452	56.5	0.927	0.4970	
音高：音強	2	9	4.5	0.073	0.9294	
音高：MP	16	111	6.9	0.114	1.0000	
音強：MP	8	79	9.9	0.163	0.9952	
音高：音強：MP	16	95	5.9	0.097	1.0000	

## 付 録 O 実験参加者別の 3 要因分散分析の結果 (要因：音高・音強・区間)

### O.1 参加者番号 00

表 O.1: 腹斜筋の%MVC の 3 要因分散分析

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
音高	2	75161	37581	1144.932	< 2e-16	***
音強	1	3924	3924	119.562	< 2e-16	***
区間	1	3807	3807	115.985	< 2e-16	***
音高：音強	2	520	260	7.924	0.00044	***
音高：区間	2	425	213	6.474	0.00176	**
音強：区間	1	5454	5454	166.166	< 2e-16	***
音高：音強：区間	2	726	363	11.064	2.28e-05	***

表 O.2: 広背筋の%MVC の 3 要因分散分析

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
音高	2	9371	4686	803.431	< 2e-16	***
音強	1	375	375	64.302	2.17e-14	***
区間	1	18	18	3.012	0.0836	.
音高：音強	2	131	66	11.272	1.88e-05	***
音高：区間	2	35	17	2.962	0.0532	.
音強：区間	1	99	99	17.052	4.67e-05	***
音高：音強：区間	2	160	80	13.746	1.90e-06	***



表 O.3: 胸鎖乳突筋の%MVC の 3 要因分散分析

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
音高	2	10707	5354	1394.890	< 2e-16	***
音強	1	0	0	0.034	0.85321	
区間	1	384	384	99.960	< 2e-16	***
音高：音強	2	7	3	0.859	0.42445	
音高：区間	2	35	17	4.550	0.01128	*
音強：区間	1	3	3	0.746	0.38843	
音高：音強：区間	2	52	26	6.733	0.00137	**

表 O.4: 口角下制筋の%MVC の 3 要因分散分析

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
音高	2	1861	931	0.571	0.565	
音強	1	72	72	0.044	0.833	
区間	1	3308	3308	2.030	0.155	
音高：音強	2	2	1	0.001	0.999	
音高：区間	2	63	31	0.019	0.981	
音強：区間	1	31	31	0.019	0.890	
音高：音強：区間	2	139	70	0.043	0.958	

## O.2 参加者番号 02

表 O.5: 腹斜筋の%MVC の 3 要因分散分析

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
音高	2	1385.3	692.7	153.284	< 2e-16	***
音強	1	574.7	574.7	127.184	< 2e-16	***
区間	1	419.7	419.7	92.871	< 2e-16	***
音高：音強	2	136.1	68.0	15.056	5.73e-07	***
音高：区間	2	148.0	74.0	16.376	1.73e-07	***
音強：区間	1	287.5	287.5	63.630	2.88e-14	***
音高：音強：区間	2	77.7	38.9	8.602	0.000231	***

表 O.6: 広背筋の%MVC の 3 要因分散分析

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
音高	2	256.3	128.15	76.499	< 2e-16	***
音強	1	234.1	234.09	139.741	< 2e-16	***
区間	1	1.8	1.76	1.049	0.306436	
音高：音強	2	75.7	37.85	22.591	6.87e-10	***
音高：区間	2	29.4	14.69	8.767	0.000198	***
音強：区間	1	8.0	8.01	4.779	0.029553	*
音高：音強：区間	2	43.4	21.69	12.950	3.95e-06	***

表 O.7: 胸鎖乳突筋の%MVC の 3 要因分散分析

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
音高	2	3695	1847.7	340.361	< 2e-16	***
音強	1	630	629.7	116.000	< 2e-16	***
区間	1	557	557.1	102.618	< 2e-16	***
音高：音強	2	64	32.2	5.931	0.00296	**
音高：区間	2	6	3.1	0.579	0.56081	
音強：区間	1	0	0.2	0.039	0.84423	
音高：音強：区間	2	48	23.8	4.384	0.01326	*

表 O.8: 口角下制筋の%MVC の 3 要因分散分析

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
音高	2	596932	298466	272.210	< 2e-16	***
音強	1	12011	12011	10.954	0.001043	**
区間	1	6	6	0.005	0.943002	
音高：音強	2	3502	1751	1.597	0.204118	
音高：区間	2	17591	8796	8.022	0.000401	***
音強：区間	1	3202	3202	2.920	0.088457	.
音高：音強：区間	2	45	23	0.021	0.979623	

### O.3 参加者番号 03

表 O.9: 腹斜筋の%MVC の 3 要因分散分析

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
音高	2	38440	19220	528.44	< 2e-16	***
音強	1	6970	6970	191.65	< 2e-16	***
区間	1	8364	8364	229.95	< 2e-16	***
音高：音強	2	2191	1095	30.12	1.10e-12	***
音高：区間	2	4743	2371	65.20	< 2e-16	***
音強：区間	1	4860	4860	133.62	< 2e-16	***
音高：音強：区間	2	1463	732	20.11	6.08e-09	***

表 O.10: 広背筋の%MVC の 3 要因分散分析

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
音高	2	18.848	9.424	112.62	< 2e-16	***
音強	1	11.097	11.097	132.62	< 2e-16	***
区間	1	3.022	3.022	36.12	5.18e-09	***
音高：音強	2	2.469	1.235	14.76	7.54e-07	***
音高：区間	2	13.699	6.849	81.86	< 2e-16	***
音強：区間	1	2.273	2.273	27.16	3.41e-07	***
音高：音強：区間	2	2.291	1.146	13.69	2.00e-06	***

表 O.11: 胸鎖乳突筋の%MVC の 3 要因分散分析

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
音高	2	177.7	88.8	38.324	1.31e-15	***
音強	1	277.5	277.5	119.720	< 2e-16	***
区間	1	1193.5	1193.5	514.911	< 2e-16	***
音高：音強	2	16.6	8.3	3.571	0.0293	*
音高：区間	2	152.5	76.2	32.890	1.09e-13	***
音強：区間	1	86.6	86.6	37.351	2.94e-09	***
音高：音強：区間	2	47.8	23.9	10.309	4.62e-05	***

表 O.12: 口角下制筋の%MVC の 3 要因分散分析

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
音高	2	30963	15481	461.40	< 2e-16	***
音強	1	1298	1298	38.68	1.60e-09	***
区間	1	1598	1598	47.62	2.89e-11	***
音高：音強	2	1492	746	22.23	9.39e-10	***
音高：区間	2	1253	626	18.67	2.19e-08	***
音強：区間	1	1682	1682	50.13	9.59e-12	***
音高：音強：区間	2	1157	579	17.24	7.90e-08	***

## O.4 参加者番号 04

表 O.13: 腹斜筋の%MVC の 3 要因分散分析

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
音高	2	11758	5879	864.12	< 2e-16	***
音強	1	4895	4895	719.49	< 2e-16	***
区間	1	5139	5139	755.31	< 2e-16	***
音高：音強	2	1527	764	112.23	< 2e-16	***
音高：区間	2	1444	722	106.12	< 2e-16	***
音強：区間	1	3093	3093	454.66	< 2e-16	***
音高：音強：区間	2	946	473	69.53	< 2e-16	***

表 O.14: 広背筋の%MVC の 3 要因分散分析

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
音高	2	193.8	96.90	11.565	1.43e-05	***
音強	1	45.3	45.25	5.401	0.0208	*
区間	1	0.0	0.01	0.001	0.9733	
音高：音強	2	14.9	7.44	0.888	0.4124	
音高：区間	2	4.9	2.47	0.295	0.7446	
音強：区間	1	2.0	1.97	0.235	0.6281	
音高：音強：区間	2	5.5	2.73	0.325	0.7225	

表 O.15: 胸鎖乳突筋の%MVC の 3 要因分散分析

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
音高	2	59527	29764	1005.72	< 2e-16	***
音強	1	9288	9288	313.86	< 2e-16	***
区間	1	13561	13561	458.22	< 2e-16	***
音高：音強	2	5291	2645	89.39	< 2e-16	***
音高：区間	2	1785	893	30.16	1.06e-12	***
音強：区間	1	508	508	17.17	4.40e-05	***
音高：音強：区間	2	3702	1851	62.54	< 2e-16	***

表 O.16: 口角下制筋の%MVC の 3 要因分散分析

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
音高	2	39655	19827	277.464	< 2e-16	***
音強	1	3794	3794	53.090	2.62e-12	***
区間	1	48544	48544	679.320	< 2e-16	***
音高：音強	2	15	8	0.108	0.8974	
音高：区間	2	6227	3114	43.571	< 2e-16	***
音強：区間	1	2566	2566	35.916	5.68e-09	***
音高：音強：区間	2	971	485	6.792	0.0013	***

## O.5 参加者番号 05

表 O.17: 腹斜筋の%MVC の 3 要因分散分析

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
音高	2	59480	29740	370.71	< 2e-16	***
音強	1	36021	36021	449.00	< 2e-16	***
区間	1	18941	18941	236.10	< 2e-16	***
音高：音強	2	11313	5657	70.51	2e-16	***
音高：区間	2	9016	4508	56.19	2e-16	***
音強：区間	1	17126	17126	213.48	< 2e-16	***
音高：音強：区間	2	3349	1675	20.87	3.1e-09	***

表 O.18: 広背筋の%MVC の3 要因分散分析

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
音高	2	19044	9522	496.20	< 2e-16	***
音強	1	4745	4745	247.24	< 2e-16	***
区間	1	2354	2354	122.68	< 2e-16	***
音高：音強	2	3675	1838	95.75	< 2e-16	***
音高：区間	2	2593	1297	67.57	< 2e-16	***
音強：区間	1	1961	1961	102.21	< 2e-16	***
音高：音強：区間	2	1090	545	28.41	4.63e-12	***

表 O.19: 胸鎖乳突筋の%MVC の3 要因分散分析

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
音高	2	2798.8	1399.4	147.124	< 2e-16	***
音強	1	1230.4	1230.4	129.360	< 2e-16	***
区間	1	2920.2	2920.2	307.014	< 2e-16	***
音高：音強	2	447.3	223.7	23.514	3.08e-10	***
音高：区間	2	538.9	269.5	28.330	4.95e-12	***
音強：区間	1	232.9	232.9	24.486	1.23e-06	***
音高：音強：区間	2	173.4	86.7	9.116	0.000142	***

表 O.20: 口角下制筋の%MVC の3 要因分散分析

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
音高	2	85123	42562	736.238	< 2e-16	***
音強	1	4296	4296	74.316	3.4e-16	***
区間	1	178	178	3.072	0.08064	.
音高：音強	2	467	234	4.043	0.01848	*
音高：区間	2	54	27	0.468	0.62690	
音強：区間	1	548	548	9.473	0.00227	**
音高：音強：区間	2	44	22	0.379	0.68517	

## O.6 参加者番号 07

表 O.21: 腹斜筋の%MVC の 3 要因分散分析

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
音高	2	66037	33018	610.83	< 2e-16	***
音強	1	23139	23139	428.07	< 2e-16	***
区間	1	22803	22803	421.85	< 2e-16	***
音高：音強	2	3681	1841	34.05	4.20e-14	***
音高：区間	2	10376	5188	95.98	< 2e-16	***
音強：区間	1	7592	7592	140.44	< 2e-16	***
音高：音強：区間	2	1111	555	10.27	4.77e-05	***

表 O.22: 広背筋の%MVC の 3 要因分散分析

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
音高	2	2789.6	1394.8	212.096	< 2e-16	***
音強	1	518.0	518.0	78.771	< 2e-16	***
区間	1	163.2	163.2	24.820	1.04e-06	***
音高：音強	2	143.0	71.5	10.870	2.73e-05	***
音高：区間	2	618.2	309.1	47.005	< 2e-16	***
音強：区間	1	55.9	55.9	8.500	0.00381	**
音高：音強：区間	2	9.5	4.7	0.722	0.48682	

表 O.23: 胸鎖乳突筋の%MVC の 3 要因分散分析

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
音高	2	2359.8	1179.9	408.546	< 2e-16	***
音強	1	93.5	93.5	32.365	2.94e-08	***
区間	1	1691.8	1691.8	585.806	< 2e-16	***
音高：音強	2	125.1	62.6	21.665	1.55e-09	***
音高：区間	2	310.3	155.2	53.729	< 2e-16	***
音強：区間	1	358.2	358.2	124.022	< 2e-16	***
音高：音強：区間	2	56.1	28.1	9.714	8.08e-05	***

表 O.24: 口角下制筋の%MVC の 3 要因分散分析

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
音高	2	20940	10470	339.645	< 2e-16	***
音強	1	354	354	11.496	0.000787	***
区間	1	1478	1478	47.935	2.52e-11	***
音高：音強	2	317	159	5.147	0.006319	**
音高：区間	2	9423	4712	152.847	< 2e-16	***
音強：区間	1	450	450	14.612	0.000159	***
音高：音強：区間	2	623	311	10.100	5.62e-05	***

## O.7 参加者番号 11

表 O.25: 腹斜筋の%MVC の 3 要因分散分析

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
音高	2	546.3	273.16	313.099	< 2e-16	***
音強	1	27.7	27.70	31.751	3.92e-08	***
区間	1	2.0	2.00	2.290	0.13119	
音高：音強	2	19.7	9.83	11.262	1.90e-05	***
音高：区間	2	29.9	14.93	17.116	8.85e-08	***
音強：区間	1	8.3	8.33	9.543	0.00219	**
音高：音強：区間	2	10.6	5.32	6.095	0.00253	**

表 O.26: 広背筋の%MVC の 3 要因分散分析

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
音高	2	9352	4676	447.93	< 2e-16	***
音強	1	1531	1531	146.63	< 2e-16	***
区間	1	5243	5243	502.20	< 2e-16	***
音高：音強	2	340	170	16.31	1.84e-07	***
音高：区間	2	948	474	45.40	< 2e-16	***
音強：区間	1	1291	1291	123.67	< 2e-16	***
音高：音強：区間	2	371	185	17.75	4.98e-08	***



表 O.27: 胸鎖乳突筋の%MVC の 3 要因分散分析

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
音高	2	43521	21761	457.773	< 2e-16	***
音強	1	3144	3144	66.144	1.00e-14	***
区間	1	36429	36429	766.345	< 2e-16	***
音高：音強	2	222	111	2.331	0.0988	.
音高：区間	2	1227	613	12.901	4.14e-06	***
音強：区間	1	2296	2296	48.290	2.15e-11	***
音高：音強：区間	2	22	11	0.227	0.7969	

表 O.28: 口角下制筋の%MVC の 3 要因分散分析

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
音高	2	19872	9936	234.680	< 2e-16	***
音強	1	1073	1073	25.352	8.09e-07	***
区間	1	11413	11413	269.575	< 2e-16	***
音高：音強	2	12	6	0.146	0.864	
音高：区間	2	6987	3493	82.508	< 2e-16	**
音強：区間	1	1215	1215	28.688	1.65e-07	***
音高：音強：区間	2	130	65	1.536	0.217	

## O.8 参加者番号 14

表 O.29: 腹斜筋の%MVC の 3 要因分散分析

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
音高	2	123794	61897	556.566	< 2e-16	***
音強	1	12266	12266	110.293	< 2e-16	***
区間	1	6961	6961	62.596	4.45e-14	***
音高：音強	2	3392	1696	15.251	4.80e-07	***
音高：区間	2	2676	1338	12.029	9.28e-06	***
音強：区間	1	2510	2510	22.571	3.09e-06	***
音高：音強：区間	2	76	38	0.343	0.71	

表 O.30: 広背筋の%MVC の 3 要因分散分析

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
音高	2	4034	2016.8	272.014	< 2e-16	***
音強	1	267	266.9	35.999	5.47e-09	***
区間	1	194	194.1	26.183	5.44e-07	***
音高：音強	2	215	107.4	14.480	9.69e-07	***
音高：区間	2	592	296.0	39.919	3.66e-16	***
音強：区間	1	31	31.4	4.234	0.04045	*
音高：音強：区間	2	87	43.5	5.862	0.00317	**

表 O.31: 胸鎖乳突筋の%MVC の 3 要因分散分析

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
音高	2	900	450.2	38.443	1.19e-15	***
音強	1	116	115.9	9.898	0.00181	**
区間	1	1	1.0	0.085	0.77039	
音高：音強	2	103	51.7	4.413	0.01288	*
音高：区間	2	88	44.2	3.770	0.02410	*
音強：区間	1	26	26.2	2.240	0.13547	
音高：音強：区間	2	2	1.2	0.103	0.90210	

表 O.32: 口角下制筋の%MVC の 3 要因分散分析

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
音高	2	3010	1504.8	26.780	1.85e-11	***
音強	1	309	309.0	5.499	0.0197	*
区間	1	231	231.3	4.117	0.0433	*
音高：音強	2	20	9.8	0.174	0.8405	
音高：区間	2	9	4.4	0.078	0.9249	
音強：区間	1	123	123.4	2.196	0.1394	
音高：音強：区間	2	3	1.5	0.027	0.9738	

## 付 録 P グループ別の 3 要因分散分析の結果 (要因：音高・音強・マウスピース)

### P.1 準備時

#### P.1.1 腹グループ

表 P.1: 準備時における腹斜筋の%MVC の 3 要因分散分析

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
音高	2	34051	17025	323.994	< 2e-16	***
音強	1	63	63	1.195	0.27553	
MP	8	738	92	1.756	0.08712	.
音高：音強	2	682	341	6.487	0.00184	**
音高：MP	16	824	51	0.980	0.48015	
音強：MP	8	217	27	0.516	0.84384	
音高：音強：MP	16	304	19	0.361	0.98927	

表 P.2: 準備時における広背筋の%MVC の 3 要因分散分析

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
音高	2	4283	2141.3	283.218	< 2e-16	***
音強	1	44	44.1	5.835	0.0165	*
MP	8	113	14.1	1.864	0.0669	.
音高：音強	2	5	2.4	0.313	0.7315	
音高：MP	16	148	9.3	1.227	0.2491	
音強：MP	8	28	3.5	0.461	0.8828	
音高：音強：MP	16	27	1.7	0.222	0.9994	

表 P.3: 準備時における胸鎖乳突筋の%MVC の 3 要因分散分析

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
音高	2	5606	2802.9	426.248	< 2e-16	***
音強	1	2	2.1	0.321	0.5716	
MP	8	45	5.6	0.854	0.5562	
音高：音強	2	39	19.3	2.930	0.0555	.
音高：MP	16	68	4.2	0.646	0.8437	
音強：MP	8	10	1.2	0.189	0.9923	
音高：音強：MP	16	54	3.4	0.516	0.9376	

表 P.4: 準備時における口角下制筋の%MVC の 3 要因分散分析

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
音高	2	68	34.12	0.629	0.534	
音強	1	11	10.58	0.195	0.659	
MP	8	636	79.52	1.465	0.171	
音高：音強	2	3	1.58	0.029	0.971	
音高：MP	16	108	6.75	0.124	1.000	
音強：MP	8	13	1.60	0.029	1.000	
音高：音強：MP	16	58	3.64	0.067	1.000	

## P.1.2 ロググループ

表 P.5: 準備時における腹斜筋の%MVC の 3 要因分散分析

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
音高	2	166	82.83	2.797	0.06225	.
音強	1	208	208.12	7.028	0.00836	**
MP	8	65	8.15	0.275	0.97382	
音高：音強	2	247	123.59	4.173	0.01612	*
音高：MP	16	379	23.69	0.800	0.68610	
音強：MP	8	207	25.84	0.872	0.53980	
音高：音強：MP	16	236	14.76	0.498	0.94778	

表 P.6: 準備時における広背筋の%MVC の 3 要因分散分析

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
音高	2	681	340.4	8.464	0.000253	***
音強	1	3	3.0	0.073	0.786516	
MP	8	31	3.8	0.096	0.999327	
音高 : 音強	2	110	55.1	1.369	0.255592	
音高 : MP	16	86	5.4	0.134	0.999982	
音強 : MP	8	77	9.6	0.239	0.983234	
音高 : 音強 : MP	16	36	2.3	0.056	1.000000	

表 P.7: 準備時における胸鎖乳突筋の%MVC の 3 要因分散分析

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
音高	2	500	250.17	19.075	1.28e-08	***
音強	1	4	3.80	0.290	0.591	
MP	8	55	6.92	0.527	0.836	
音高 : 音強	2	12	6.20	0.473	0.624	
音高 : MP	16	131	8.21	0.626	0.863	
音強 : MP	8	30	3.75	0.286	0.971	
音高 : 音強 : MP	16	76	4.74	0.361	0.990	

表 P.8: 準備時における口角下制筋の%MVC の 3 要因分散分析

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
音高	2	79869	39934	49.047	< 2e-16	***
音強	1	157	157	0.193	0.661	
MP	8	3685	461	0.566	0.806	
音高 : 音強	2	1133	567	0.696	0.499	
音高 : MP	16	9186	574	0.705	0.789	
音強 : MP	8	2373	297	0.364	0.939	
音高 : 音強 : MP	16	8974	561	0.689	0.805	

### P.1.3 腹+口グループ

表 P.9: 準備時における腹斜筋の%MVC の 3 要因分散分析

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
音高	2	12144	6072	343.846	< 2e-16	***
音強	1	2112	2112	119.577	< 2e-16	***
MP	8	245	31	1.736	0.0981	.
音高 : 音強	2	376	188	10.639	6.06e-05	***
音高 : MP	16	382	24	1.354	0.1792	
音強 : MP	8	366	46	2.594	0.0124	*
音高 : 音強 : MP	16	423	26	1.498	0.1134	

表 P.10: 準備時における広背筋の%MVC の 3 要因分散分析

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
音高	2	395.4	197.69	46.591	2.58e-15	***
音強	1	116.8	116.80	27.526	7.79e-07	***
MP	8	67.4	8.42	1.985	0.05504	.
音高 : 音強	2	46.4	23.19	5.465	0.00548	**
音高 : MP	16	65.8	4.12	0.970	0.49443	
音強 : MP	8	22.7	2.84	0.669	0.71793	
音高 : 音強 : MP	16	51.8	3.24	0.763	0.72284	

表 P.11: 準備時における胸鎖乳突筋の%MVC の 3 要因分散分析

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
音高	2	2167.9	1083.9	245.4335	< 2e-16	***
音強	1	408.8	408.8	92.564	3.4e-16	***
MP	8	56.9	7.1	1.609	0.1304	
音高 : 音強	2	61.0	30.5	6.909	0.0015	**
音高 : MP	16	115.4	7.2	1.633	0.0721	.
音強 : MP	8	52.7	6.6	1.493	0.1682	
音高 : 音強 : MP	16	79.5	5.0	1.125	0.3419	

表 P.12: 準備時における口角下制筋の%MVC の 3 要因分散分析

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
音高	2	3151	1575.5	39.755	1.15e-13	***
音強	1	3	2.9	0.073	0.788	
MP	8	258	32.3	0.815	0.591	
音高 : 音強	2	51	25.3	0.639	0.530	
音高 : MP	16	351	21.9	0.553	0.912	
音強 : MP	8	335	41.8	1.056	0.400	
音高 : 音強 : MP	16	204	12.7	0.321	0.994	

#### P.1.4 首+口グループ

表 P.13: 準備時における腹斜筋の%MVC の 3 要因分散分析

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
音高	2	1820.5	910.2	354.449	< 2e-16	***
音強	1	80.3	80.3	31.259	6.78e-08	***
MP	8	29.1	3.6	1.419	0.18987	
音高 : 音強	2	27.5	13.7	5.348	0.00541	**
音高 : MP	16	40.3	2.5	0.980	0.47921	
音強 : MP	8	43.3	5.4	2.105	0.03648	*
音高 : 音強 : MP	16	58.4	3.6	1.420	0.13385	

表 P.14: 準備時における広背筋の%MVC の 3 要因分散分析

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
音高	2	68.7	34.34	4.560	0.0115	*
音強	1	7.7	7.65	1.016	0.3146	
MP	8	106.2	13.27	1.762	0.0859	.
音高 : 音強	2	3.4	1.72	0.229	0.7955	
音高 : MP	16	66.8	4.18	0.555	0.9143	
音強 : MP	8	29.1	3.64	0.483	0.8675	
音高 : 音強 : MP	16	55.8	3.49	0.463	0.9618	

表 P.15: 準備時における胸鎖乳突筋の%MVC の 3 要因分散分析

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
音高	2	5684	2842.0	51.389	< 2e-16	***
音強	1	573	573.0	10.360	0.00149	**
MP	8	251	31.4	0.567	0.80391	
音高 : 音強	2	76	37.8	0.683	0.50630	
音高 : MP	16	1183	74.0	1.337	0.17642	
音強 : MP	8	257	32.1	0.580	0.79396	
音高 : 音強 : MP	16	657	41.1	0.743	0.74817	

表 P.16: 準備時における口角下制筋の%MVC の 3 要因分散分析

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
音高	2	4292	2146.1	28.463	1.07e-11	***
音強	1	60	60.4	0.801	0.3719	
MP	8	647	80.9	1.073	0.3832	
音高 : 音強	2	407	203.5	2.699	0.0695	.
音高 : MP	16	1153	72.1	0.956	0.5067	
音強 : MP	8	205	25.7	0.341	0.9493	
音高 : 音強 : MP	16	1270	79.4	1.052	0.4030	

## P.2 サステイン時

### P.2.1 腹グループ

表 P.17: サステイン時における腹斜筋の%MVC の 3 要因分散分析

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
音高	2	41536	20768	251.886	< 2e-16	***
音強	1	9316	9316	112.987	< 2e-16	***
MP	8	343	43	0.520	0.8405	
音高 : 音強	2	565	282	3.425	0.0343	*
音高 : MP	16	830	52	0.629	0.8585	
音強 : MP	8	251	31	0.381	0.9301	
音高 : 音強 : MP	16	441	28	0.334	0.9930	



表 P.18: サステイン時における広背筋の%MVC の 3 要因分散分析

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
音高	2	5123	2561.7	424.477	< 2e-16	***
音強	1	430	430.4	71.311	4.47e-15	***
MP	8	53	6.6	1.101	0.364	
音高 : 音強	2	287	143.5	23.786	4.61e-10	***
音高 : MP	16	75	4.7	0.780	0.708	
音強 : MP	8	43	5.4	0.897	0.520	
音高 : 音強 : MP	16	96	6.0	0.992	0.466	

表 P.19: サステイン時における胸鎖乳突筋の%MVC の 3 要因分散分析

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
音高	2	5137	2568.4	296.769	< 2e-16	***
音強	1	1	0.9	0.102	0.750	
MP	8	80	10.0	1.151	0.331	
音高 : 音強	2	20	9.9	1.141	0.321	
音高 : MP	16	95	6.0	0.688	0.805	
音強 : MP	8	9	1.1	0.130	0.998	
音高 : 音強 : MP	16	20	1.2	0.142	1.000	

表 P.20: サステイン時における口角下制筋の%MVC の 3 要因分散分析

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
音高	2	83	41.49	1.137	0.323	
音強	1	14	13.53	0.371	0.543	
MP	8	233	29.16	0.799	0.604	
音高 : 音強	2	9	4.56	0.125	0.883	
音高 : MP	16	81	5.06	0.139	1.000	
音強 : MP	8	8	0.97	0.026	1.000	
音高 : 音強 : MP	16	14	0.90	0.025	1.000	

## P.2.2 ロググループ

表 P.21: サステイン時における腹斜筋の%MVC の 3 要因分散分析

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
音高	2	1219.5	609.7	74.971	< 2e-16	***
音強	1	837.6	837.6	102.993	< 2e-16	***
MP	8	43.1	5.4	0.663	0.723	
音高 : 音強	2	209.8	104.9	12.895	9.5e-06	***
音高 : MP	16	94.6	5.9	0.727	0.761	
音強 : MP	8	19.0	2.4	0.292	0.967	
音高 : 音強 : MP	16	75.0	4.7	0.576	0.895	

表 P.22: サステイン時における広背筋の%MVC の 3 要因分散分析

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
音高	2	228.83	114.41	54.882	< 2e-16	***
音強	1	164.34	164.34	78.830	1.63e-14	***
MP	8	12.03	1.50	0.721	0.672	
音高 : 音強	2	116.83	58.42	28.020	1.58e-10	***
音高 : MP	16	14.45	0.90	0.433	0.970	
音強 : MP	8	6.71	0.84	0.402	0.917	
音高 : 音強 : MP	16	22.69	1.42	0.680	0.808	

表 P.23: サステイン時における胸鎖乳突筋の%MVC の 3 要因分散分析

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
音高	2	1926.9	963.5	200.600	< 2e-16	***
音強	1	303.5	303.5	63.183	1.96e-12	***
MP	8	31.3	3.9	0.815	0.5908	
音高 : 音強	2	111.3	55.7	11.592	2.75e-05	***
音高 : MP	16	128.4	8.0	1.671	0.0632	.
音強 : MP	8	27.7	3.5	0.721	0.6729	
音高 : 音強 : MP	16	59.6	3.7	0.775	0.7102	

表 P.24: サステイン時における口角下制筋の%MVC の 3 要因分散分析

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
音高	2	409723	204862	168.39	< 2e-16	***
音強	1	13808	13808	11.350	0.00105	**
MP	8	7517	940	0.772	0.62780	
音高：音強	2	2038	1019	0.838	0.43556	
音高：MP	16	27890	1743	1.433	0.14004	
音強：MP	8	5423	678	0.557	0.81064	
音高：音強：MP	16	11484	718	0.590	0.88546	

### P.2.3 腹+口グループ

表 P.25: サステイン時における腹斜筋の%MVC の 3 要因分散分析

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
音高	2	5956	2977.9	30.749	4.24e-13	***
音強	1	2449	2448.8	25.286	7.65e-07	***
MP	8	437	54.6	0.564	0.807230	.
音高：音強	2	1545	772.6	7.978	0.000404	***
音高：MP	16	524	32.8	0.338	0.992832	
音強：MP	8	514	64.2	0.663	0.724152	
音高：音強：MP	16	673	42.1	0.434	0.973027	

表 P.26: サステイン時における広背筋の%MVC の 3 要因分散分析

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
音高	2	3	1.63	0.020	0.980
音強	1	45	45.13	0.564	0.453
MP	8	38	4.71	0.059	1.000
音高：音強	2	72	36.01	0.450	0.638
音高：MP	16	50	3.15	0.039	1.000
音強：MP	8	38	4.69	0.059	1.000
音高：音強：MP	16	47	2.91	0.036	1.000

表 P.27: サステイン時における胸鎖乳突筋の%MVC の 3 要因分散分析

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
音高	2	189	94.70	4.642	0.01020	*
音強	1	103	103.34	5.065	0.02499	*
MP	8	15	1.81	0.089	0.99949	
音高：音強	2	245	122.47	6.003	0.00271	**
音高：MP	16	7	0.41	0.020	1.00000	
音強：MP	8	9	1.11	0.054	0.99992	
音高：音強：MP	16	8	0.49	0.024	1.00000	

表 P.28: サステイン時における口角下制筋の%MVC の 3 要因分散分析

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
音高	2	7330	3665	83.719	< 2e-16	***
音強	1	1909	1909	43.607	1.36e-10	***
MP	8	177	22	0.505	0.853	
音高：音強	2	917	459	10.475	3.73e-05	***
音高：MP	16	392	24	0.559	0.913	
音強：MP	8	120	15	0.343	0.949	
音高：音強：MP	16	437	27	0.623	0.865	

## P.2.4 首+口グループ

表 P.29: サステイン時における腹斜筋の%MVC の 3 要因分散分析

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
音高	2	8152	4076	728.083	< 2e-16	***
音強	1	6640	6640	1186.050	< 2e-16	***
MP	8	117	15	2.602	0.00979	**
音高：音強	2	1986	993	177.365	< 2e-16	***
音高：MP	16	120	7	1.335	0.17749	
音強：MP	8	25	3	0.569	0.80277	
音高：音強：MP	16	78	5	0.871	0.60302	

表 P.30: サステイン時における広背筋の%MVC の 3 要因分散分析

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
音高	2	402.4	201.22	16.076	3.1e-07	***
音強	1	162.2	162.16	12.956	0.000396	***
MP	8	95.2	11.89	0.950	0.47610	
音高 : 音強	2	26.1	13.05	1.043	0.354219	
音高 : MP	16	132.9	8.31	0.664	0.827628	
音強 : MP	8	35.2	4.40	0.351	0.944546	
音高 : 音強 : MP	16	51.8	3.24	0.259	0.998437	

表 P.31: サステイン時における胸鎖乳突筋の%MVC の 3 要因分散分析

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
音高	2	21972	10986	495.844	< 2e-16	***
音強	1	5937	5937	267.976	< 2e-16	***
MP	8	140	17	0.790	0.612	
音高 : 音強	2	7208	3604	162.653	< 2e-16	***
音高 : MP	16	184	12	0.520	0.935	
音強 : MP	8	125	16	0.706	0.686	
音高 : 音強 : MP	16	261	16	0.736	0.755	

表 P.32: サステイン時における口角下制筋の%MVC の 3 要因分散分析

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
音高	2	18145	9072	169.441	< 2e-16	***
音強	1	3394	3394	63.388	9.56e-14	***
MP	8	475	59	1.109	0.3585	
音高 : 音強	2	362	181	3.379	0.0359	*
音高 : MP	16	338	21	0.394	0.9829	
音強 : MP	8	193	24	0.450	0.8895	
音高 : 音強 : MP	16	197	12	0.230	0.9993	