

# 人間の触覚に基づく打鍵振動の生成

## Generation of Keystroke Vibration Based on Human Tactile Sensation

精密工学専攻 35号 永野 順也  
Junya Nagano

### 1. はじめに

近年発展途上国の産業が大きく成長し、安価で品質の良い製品が市場で競争力を高めている中で、先進国においてはより高付加価値な商品戦略が求められている。付加価値にはデザインや性能、他の機器との連動や操作感など様々なものがあるが、特に操作感、つまり製品の物理的ユーザインタフェースから人が感じる感覚は製品の印象に直結する重要な要素である。そこで、ユーザインタフェースに人間が心地良いと感じる挙動を付加出来れば製品の価値向上につながり、競合製品との差別化が可能となる。

人が操作感を表現するときには、例えば「はっきりした」「やわらかい」等といった「言葉」で表すことが多い。近年の研究では摩擦感や物体の質感を表す言葉と計測データとの関連性について報告されている<sup>(1)</sup>。しかし、これまでの研究は定常的な振動、反力応答が続く「撫でる」動作から得られる感覚に着目しているものが多く、打鍵動作のような非定常的な応答と感覚の関係についての報告は少ない。

そこで本研究では、打鍵動作と人が感じる感覚の関係性に着目し、感覚を表す言葉と打鍵動作時の応答データの特徴量との相関関係を明らかにする。さらに、特徴量と物理的構造の関係性を明らかにすることで、感覚を表す言葉と具体的な構造変更例を結び付け、感覚を考慮した設計の可能性を示す。

本研究では打鍵対象として、機構や発音原理の差異によって打鍵感覚が異なるピアノを選択した。また、評価試験においては被験者に十分なインフォームド・コンセントを行っている。

### 2. 実際の製品の振動応答計測

#### 2.1 アコースティックピアノの打鍵振動応答

打鍵対象のピアノは 88 鍵盤を有する一般的なアップライトピアノである。左端の鍵盤は 27.5 Hz に調弦されており、これを A0 と表記する。以降、各鍵盤は音階名(英・米式表記)とオクターブ数の組み合わせで表記する。また、実際のピアノは環境によって調弦にずれが生じたり、インハーモニシティによる倍音成分の周波数ずれが存在するため振動計測時に平均律とは若干異なるが、本論文では便宜上平均律の周波数で表記する。

Fig. 1 に打鍵時の振動応答及び圧力を計測する実験セットアップを示す。加速度の計測は小型加速度ピックアップ、圧力の計測は圧力値に応じて抵抗値が低くなるセンサーを用いる。

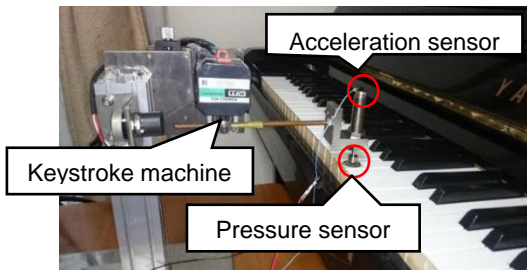


Fig.1 Experimental setup

実際には指で打鍵した際の応答データを用いるのが望ましいが、毎回同じ力、タイミングで打鍵することは困難であるため、打鍵機を用意した。Fig. 2 に指と打鍵機で打鍵した際の指先及び打鍵機先端の加速度応答と圧力を示す。打鍵機のハンマー部の質量を調整することで、指による打鍵時と同様の波形を計測できることを確認し、以後はこの打鍵機を使用する。

Fig. 2 の加速度応答に着目すると、大きく三個の区間に分けられることがわかる。これを A 区間、B 区間、C 区間と定義した。A 区間は指が鍵盤に触れてから鍵盤を底打ちするまでの区間である。B 区間は底打ち後、しばらく打鍵状態を維持している間の区間である。C 区間は離鍵動作の区間である。A1 から A6 までの鍵盤を打鍵したときの加速度応答を比較すると、A 区間はどの鍵盤も同様の振動波形を示すことが確認できた。B 区間は、アコースティックピアノの場合、打鍵した鍵盤に対応する弦をハンマーが叩き、その弦の振動が鍵盤にも伝わる。B 区間をフーリエ変換すると各鍵盤に対応する基本周波数とその倍音成分が計測された。C 区間は離鍵途中から鍵盤との接触が完全に無くなり、打鍵機自体の特性の影響が大きくなってしまったため、本研究では考慮しないこととする。また、以後は音楽の分野で基準音として用いられることが多い A4 の鍵盤に着目する。

#### 2.2 A4 の打鍵振動応答の特徴量の選定

A4 打鍵時の A 区間の拡大図を Fig. 3 に示す。加速度波形に着目すると二つの大きなピークと残留振動が存在すること

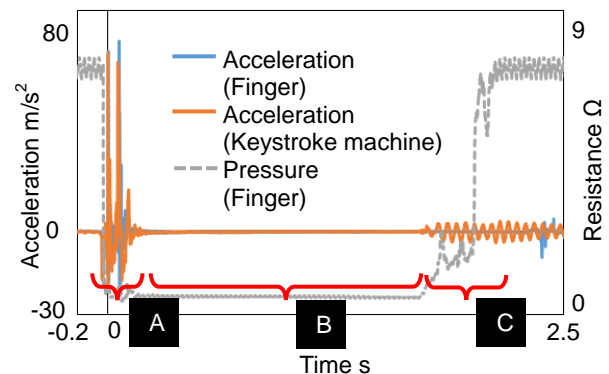


Fig.2 Measurement of keystroke vibration and pressure

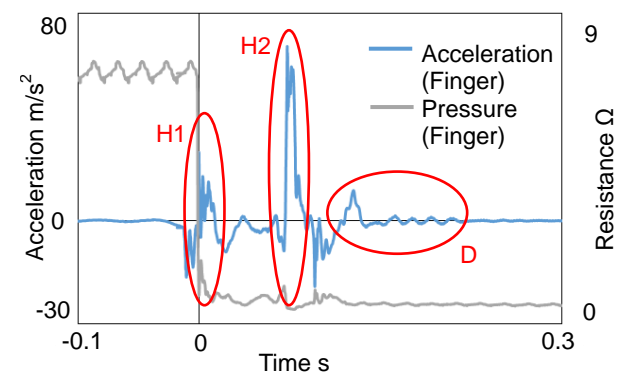


Fig.3 Enlarged view of section A

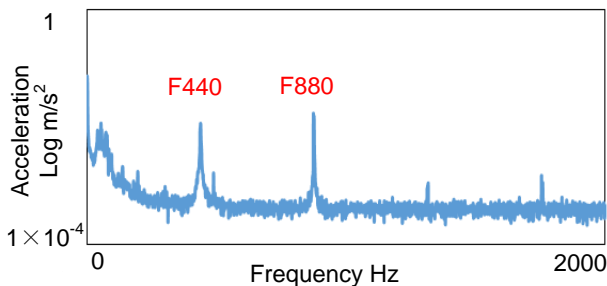


Fig.4 Frequency response at A4 key of upright piano

がわかる。最初のピークは鍵盤に接触した際の加速度、次のピークは底打ち時の加速度であり、底打ち時の衝撃が大きいためその後に残留振動が生じるものと考えられる。それぞれの加速度の最大値を順に H1, H2, D とし、A 区間の特徴量として定義する。

次に A4 打鍵時の B 区間をフーリエ変換したものを Fig. 4 に示す。A4 の基本周波数である 440 Hz とその倍音成分が存在するのがわかる。比較的大きい 440 Hz と 880 Hz のピークについて、これらの周波数軸の加速度の値をそれぞれ F440, F880 とし、B 区間の特徴量として定義する。

### 3. 特徴量と言葉の相関関係

#### 3.1 評価試験機の作成

2 章で定義した各特徴量と感覚を表す言葉がどのような関係性にあるのかを明らかにするにあたって、任意の打鍵感を提示できる評価試験機を作成した。はじめに、指先の変位に着目した評価試験機を作成した。これは任意の信号出力可能な加振機が出せる変位量を、てこの原理を用いて拡大する機構を間に挟み、ピアノの鍵盤の挙動をそのまま再現しようと試みたものである。しかし加振機の負荷が大きくなり、入力した信号と評価試験機から出力される信号の差異が大きくなってしまった。また、指を評価試験機の上に置き、評価試験機が鍵盤の変位を再現しようとしても、被験者は打鍵動作を行わないために指が評価試験機に追従せず、打鍵感が無いという意見が多かった。

そこで、Fig. 5 に示すような、加速度と圧力を同時に付加できる評価試験機を作成した。被験者は指を加振機の上に直接置き、任意の加速度を指先に与えられる。それと同時にサーボモータが同期して指を加振機側に押し付け、打鍵時の圧力も再現できる機構になっている。

ピアノ打鍵時の加速度及び圧力応答と、今回作成した評価試験機から出力される加速度及び圧力応答を Fig. 6 に示す。評価試験機には、加速度については実物のピアノの A4 打鍵時の打鍵機先端加速度を、アンプを介して大きさを調節したものを入力し、圧力については圧力が負荷されるタイミングと除荷されるタイミングが合うように、サーボの回転角度と時間をプログラムで制御している。Fig. 6 より、評価試験機は元の加速度及び圧力信号を再現できていることが確認できる。

また、評価試験機で被験者に打鍵信号を提示した際に、加速度のみを提示した場合と、加速度と圧力を同時に提示した場合でピアノの打鍵感の再現性について評価を行った。被験者は二十代男性五名で、七段階の評価をしてもらう。Fig. 7 より、圧力を負加したほうが打鍵感が明らかに向上するため、本評価試験機で今後の評価実験を行う。

#### 3.2 評価加振信号の作成

次に、評価試験機に入力する評価信号を作成する。基準となる信号は A4 打鍵時の加速度及び圧力応答である。信号の

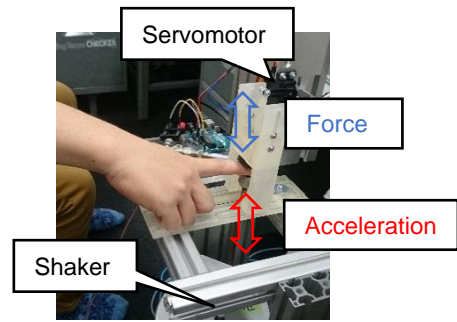


Fig.5 Evaluation testing device

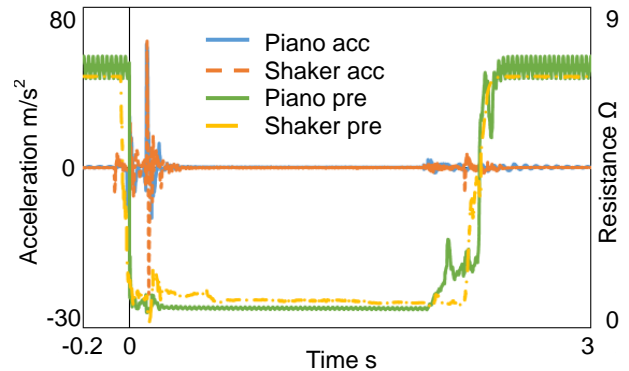


Fig.6 Comparative graph of upright piano and evaluation testing device

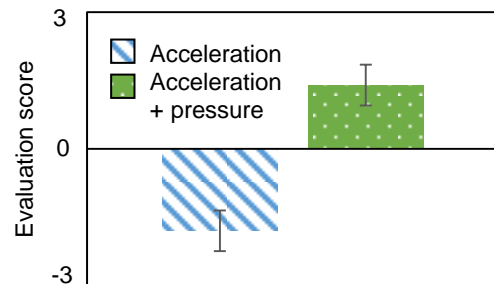


Fig.7 Score of keystroke feeling

作成手順として、A 区間の特徴量(H1, H2, D)については各部分の加速度の倍率を変更する。B 区間の特徴量(F440, F880)については、A4 打鍵時の時間軸加速度波形から B 区間のみを切り出し、フーリエ変換を行った後、各特徴量に該当する周波数の加速度成分の倍率を変更し、逆フーリエ変換をして時間軸波形に戻し、元の場所に挿入する。作成した評価信号を Table. 1 に示す。

Table.1 Evaluation signals

Signal name	Parameter	Scale factor	Signal name	Parameter	Scale factor
default			F440_05		0.5
H1_05	H1	0.5	F440_200	F440	200
H1_2		2	F440_400		400
H1_4		4	F440_800		800
H2_05		H2	0.5		F440_1200
H2_2	2		F880_05	0.5	
D_05	D	0.5	F880_200	F880	200
D_2		2	F880_400		400
D_4		4	F880_800		800
D_6		6	F880_1200		1200

### 3.3 評価実験

前述した評価試験機と評価信号を用いて評価実験を行った。被験者は二十代男性五名で、打鍵感に関係のあると思われる十一対の言葉を用いてSD法による七段階の相対評価を行った。因子分析より、高級感や歯切れの良さを表す快適因子、力強さや重さなどアコースティックピアノの特徴を表すアコースティック因子が得られた。二つの因子の累積寄与率は68.4パーセントである。これらの因子得点を示したFig. 8に着目すると、H1, H2共に大きくするほどアコースティック因子の得点が高くなる傾向が見られる。一方で快適因子に関しては、H2を大きくしたときには得点が高くなるが、H1を大きくすると快適性が悪化する傾向が見られた。これはH1が、指が鍵盤表面に衝突する時の振動波形であり、H1のみが増大するような打鍵動作と実際のピアノの打鍵動作に大きな乖離が生じるためであると考えられる。以上から、H1を増減させた応答は打鍵動作における違和感の増大につながるため、好ましくないと考えられる。また、同じA区間の特徴量であるDについては、どの言葉の対に対しても七段階評価で中央値を選択した被験者が多く、今回の言葉群に対してはDは有意な特徴量ではないと判断した。

次に、B区間の特徴量であるF440とF880を比較すると、F440については言葉群の中の「アコースティックピアノらしいー電子ピアノらしい」と非常に高い相関が見られたが、F880に関してはほとんどの被験者が、その大きさを変化させても違いを感じる事がなかった。これは、人間の触覚を司る機械受容器の感度が440Hzと880Hzで大きく異なるためであると考えられる<sup>(2)</sup>。これを踏まえ、B区間の周波数について、個人差はあるが一定以上の高周波の基音周波数、倍音周波数の振動成分については考慮する必要がないと考えられる。

最後に、各特徴量と言葉の相関をとったものの一部をTable. 2に示す。本論文で用いた言葉群と相関が高いものはH2とF440のみであった。例えばH2を大きくすると「はっきりした」、「重い」、「力強い」等の印象が向上すると推測できる。F440を大きくしたときは「鋭い」、「アコースティックピアノのような」等の印象が向上すると推測できる。

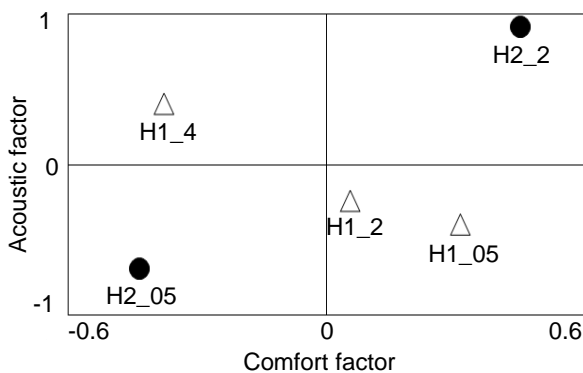


Fig.8 Factor points by SD method

Table.2 Correlation between words and parameters

Parameter	Word						Acoustic Electric
	Clear Fuzzy	Light Heavy	Dull Sharp	Rough Smooth	Weak Strong		
H1	0.16	-0.22	-0.1	-0.02	-0.17	-0.11	
H2	<b>0.73</b>	-0.79	-0.38	0.55	-0.79	0.24	
D	-0.2	0.01	0.4	-0.09	-0.03	-0.11	
F440	0.45	-0.25	-0.75	0.7	-0.29	<b>0.83</b>	
F880	-0.28	0.23	0.18	-0.33	0.26	-0.32	

### 4. ピアノモデルへの適用

前章で言葉と代表的な特徴量の相関関係が明らかになった。実際のピアノを構造変更するのは困難が伴うため、本章では簡単なピアノモデルを作成し、これを用いて特徴量と物理的構造の関係性を把握する。

#### 4.1 ピアノモデルの応答計測

Fig. 9にピアノモデルを示す。本モデルは本物のピアノに使われているハンマー機構等を再現したアクションモデルと、任意の周波数に調弦可能なピアノ線を張ったフレーム部分から成る。本研究ではA4の440Hzを基準としているため、ピアノモデルも440Hzに調弦している。本物のアコースティックピアノの振動及び圧力波形と、本モデルを打鍵機で打鍵したときの同波形を比較し、同様の時間軸波形が計測できることを確認した。また、B区間をフーリエ変換し、本物のピアノの基音とその倍音成分についても再現できていることを確認した。

#### 4.2 CASE1: はっきりした打鍵感と構造の関係性

CASE1として「はっきりした」打鍵感をもつピアノの設計を想定する。3章より、「はっきりした」印象を高めるにはA区間のH2をより大きくすれば良いことがわかっている。H2は底打ち時の加速度のピークであり、最も簡単な構造変更としては、底打ち時に鍵盤と接触するFig. 9のPoint 4の材質を変更することが考えられる。Point 4には、通常は厚さ5mm程度の円盤型のフェルト材が置かれている。このフェルト材を基準として、剛性が高い円盤型のアクリルをゴム材で挟んだ物と、円盤型のアクリルを二枚重ねた物を用意し、打鍵機で打鍵したときのH2の大きさを計測した。Fig. 10に結果を示す。これより、H2はPoint 4の剛性に依存すると考えられる。フェルト材を基準としてPoint 4を構造変更したときの、はっきり感の増減を評価した結果をFig. 11に示す。被験者は五名で七段階の相対評価である。評価結果からもPoint 4の剛性を高くする構造変更を行うことで「はっきりした」印象が高まることが示された。

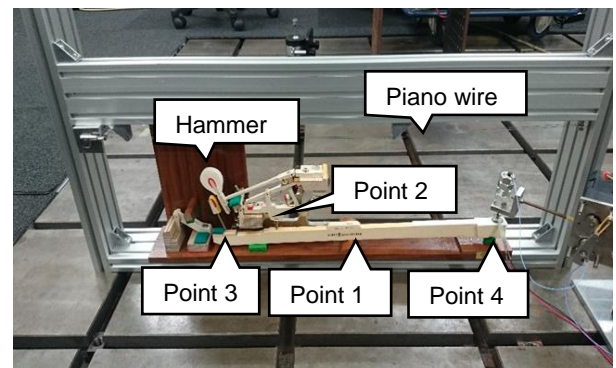


Fig.9 Piano model

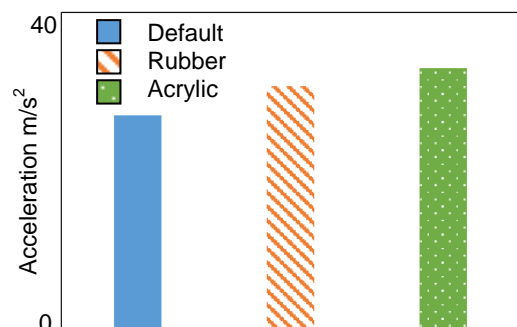


Fig.10 Maximum acceleration of H2



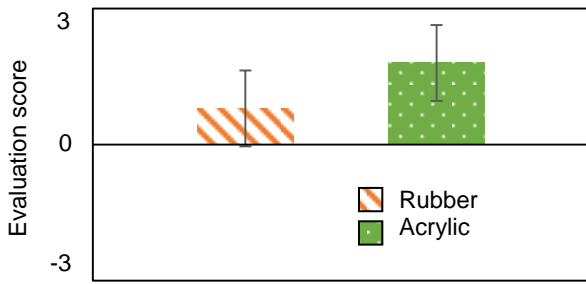


Fig.11 Evaluation result (Score of clearly)

#### 4.3 CASE2:アコースティックピアノらしさと構造の関係性

CASE2としてアコースティックピアノらしい打鍵感を高めるピアノの設計を想定する。3章より、アコースティックピアノの弾き心地には弦の振動を感じさせる F440 が関係していることが示された。そこでこの弦の振動が、打鍵位置である鍵盤の先端付近に伝達してくる間の経路に着目して、構造との関係性を検討する。Fig. 12 に示すように、鍵盤は主に Point1 から Point4 の四箇所機構部分と接している。そこで、鍵盤をパッシブ分系、Point1 から Point4 を経路、その他のアクション部分とフレーム部分をアクティブ分系として、打鍵位置(ターゲット点)に伝わる弦の振動に対する、各経路の寄与率を伝達経路解析によって求める。初めにパッシブ分系である鍵盤だけを取りはずし、各経路間の伝達関数を計測する。次に、B 区間に着目しているため鍵盤は打鍵状態とし、フレーム部分の駒の位置に接着した加振機から 440 Hz の加振信号を出力し、実稼動状態の各経路とターゲット点の加速度応答を計測する。

逆行列法を用いて各経路に加わる力を同定し、各経路とターゲット点間の伝達関数を用いて各経路の寄与率を算出する。理論式を以下に示す。

$$\{F(\omega)\} = [H]^{-1}\{a(\omega)\} \quad (1)$$

$$Y_T(\omega) = \sum Y_i(\omega) = \sum H_{Ti} F_i(\omega) \quad (2)$$

ただし、F を各経路の伝達力、H を各経路間伝達関数マトリクス、a を実稼動の加速度応答、 $Y_T$  を各経路の寄与率の合計、Y を各経路の寄与率、 $H_T$  を各経路とターゲット点間の伝達関数とする。これにより求めた各経路の寄与率を Fig. 13 に示す。これより 440 Hz においては Point1 の寄与が最も高いことがわかった。そこで Point1 の構造変更を行う。通常は薄い円盤型のフェルト材と型紙が挟まっており、これを基準に、より動剛性の低いスポンジゴムと動剛性が高い金属性のワッシャーを用意した。構造変更をした際のアコースティ

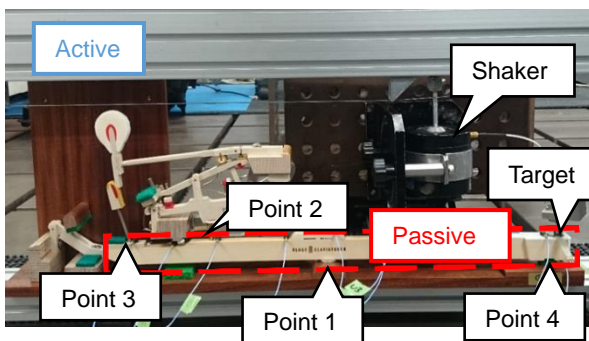


Fig.12 Experimental setup of Transfer path analysis

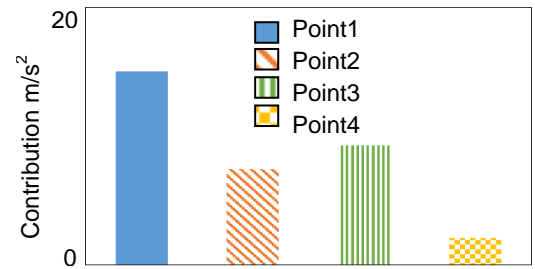


Fig.13 Contribution result (440Hz)

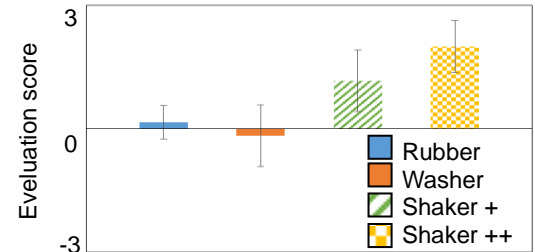


Fig.14 Evaluation result (Score of similarity of acoustic piano)

ックピアノの打鍵感の増減について 4.2 項と同様の方法で評価を行った。結果を Fig. 14 の左側二つに示す。これより、構造変更を行ってもあまり印象に差異が感じられないという結果になった。構造変更後のターゲット点の周波数軸加速度応答を比較しても、それぞれ基準に対しておよそ 1.6 倍と 0.7 倍と加速度の増減幅が小さく、差異を感じるのが困難だったためと考えられる。一方で、被験者が打鍵したときの B 区間にだけ、加振機から 440 Hz の振動が出力されるように設定し、同様に評価試験を行った結果を Fig. 14 の右側二つに示す。+の数が多いほうがより大きい加振信号を出力しており、周波数軸において Shaker+は基準の 4.4 倍、Shaker++は基準の 10.8 倍の振動成分が計測された。アコースティックピアノの打鍵感についても振動成分が大きくなると向上する傾向が見られることから、鍵盤の周波数に対応する振動を出力できるアクチュエータを設置することで、アコースティックピアノの打鍵感を高められる可能性を示した。

## 5. 研究成果

- (1) アコースティックピアノの打鍵応答を計測し、区間ごとの特徴量を定義した。
- (2) 任意の打鍵応答を再現できる評価試験機を作成し、特徴量と打鍵感を表す言葉との相関関係を明らかにした。
- (3) 構造変更が容易なピアノモデルを作成し、例として「はっきりした」という言葉と構造の関係性を明らかにし、より「はっきりした」打鍵振動を生成できる構造変更が実現できた。

### 参考文献

- (1) 昆陽雅司, 岡本正吾, “振動刺激を用いた疑似力覚の呈示”, 第 15 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, pp314-317, (2010)
- (2) A. W. Freeman and K. O. Johnson “A model accounting for effects of vibratory amplitude on responses of cutaneous mechanoreceptors in macaque monkey”, J. Physiol., 323, pp. 43-64, (1982)
- (3) 大久保信行, “伝達経路解析の基礎から応用”, エルエムエスジャパン株式会社, (2012)
- (4) N. H. Fletcher 他, “楽器の物理学”, 丸善出版, (1997)
- (5) 長松昭男, “モード解析入門”, コロナ社, (1993)