

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 1 日現在

機関番号：32611

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2012

課題番号：21520157

研究課題名（和文）現代ピアノおよび歴史的ピアノにおける操作性の定量評価と設計

研究課題名（英文）Quantitative evaluation and design of modern and historical piano action

研究代表者

森 太郎（MORI TARO）

国立音楽大学・音楽学部・准教授

研究者番号：40335782

研究成果の概要（和文）：

現代ピアノおよび歴史的ピアノのアクションの定量評価を行った。また計算機によるピアノアクションのシミュレーションを行い、実用的な設計方法を考案した。またアクションの動特性の実測値と、計算機シミュレーションの結果を比較し、両者がよく一致することを確認した。ピアノアクションの具体的な改良方法の指針を提案した。以上の結果より、演奏者が所望する任意の動特性を持ったアクションを作成することが可能になった。

研究成果の概要（英文）：

Modern and historical piano actions were investigated and quantitatively evaluated, and numerically simulated, which realized piano action design by computer. The measured dynamic characteristics of piano action were compared with calculated values. As a consequence, a improvement method of piano action was developed.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2010年度	500,000	150,000	650,000
2011年度	400,000	120,000	520,000
2012年度	500,000	150,000	650,000
総計	2,500,000	750,000	3,250,000

研究分野：芸術学・芸術史・芸術一般

科研費の分科・細目：

キーワード：ピアノ，アクション，動特性

## 1. 研究開始当初の背景

(1) ピアニストは演奏会場にあるピアノを使うことを強いられており、これまで動特性の悪いピアノアクションを調整する方法はなかった。それゆえ、ピアニストの中には自分のピアノをコンサート会場に持ち込む場合さえあり、改良が切に望まれている。ピアノアクション機構は入力インターフェイスとして最も重要な部品のひとつである。それゆえピアノの発明期以来、もっとも改良が加えられた部分であり、現在でもその設計には

様々な工夫がなされている。その背景には、演奏者にとってピアノの内部機構がブラックボックスであり、その入力インターフェイスとしてのアクションだけが唯一の音色を制御する機構であるという事実がある。それにも関わらず、ピアニストは一般に演奏会場に備え付けられているピアノを弾かねばならず、状態が悪い場合も少なくない。

(2) ピアノのアクションは、鍵、ハンマー、ウィッペン等を中心とする多くの回転部品

の組み合わせであるが、現在まで動力学特性には公的規格が存在しない。動き出す荷重は、鍵の側面に鉛（キーレド）を埋めて行われる。鍵の支点から見て片側のちょうどつりあいの取れる位置に鉛が付加される。一方、電子キーボードでは、鉛を用いず、静的規格（鍵が動き出す最小の力）を満たすためにばねを用いており、それが不自然なタッチを生み出している。

## 2. 研究の目的

(1) ピアノアクションの動的特性を明らかにし、最適なタッチの実現方法を提案するのが本研究の目的である。

(2) さらに、実物が現存せずに設計図だけ残っている歴史的な鍵盤楽器の動特性を明らかにし、歴史的アクションの性質を明らかにすることも本研究の目的である。

## 3. 研究の方法

(1) 研究開始当初に計画されていた、基本システムの構築

汎用マルチチャンネルデータステーションを新たに導入し、加速度計および非接触光センサによってアクションの動作を測定するシステムを構築した。それにより、それまで鍵速度とハンマー速度だけから推定していたアクション部品の振る舞いが直接測定できるようになった。

(2) 民生用高速度カメラによるアクション動作測定システム

(1)で構築したそれまでの加速度計および非接触光センサを用いる方法に加え、高速度ビデオカメラで捉えたアクションの動きを動画上でサンプリングし、アクションの各パーツの動きを追尾するシステムを使用してアクションを観測した。これにより、それまで4チャンネルに限られていた同時計測が、事実上無制限で可能となった。

(3) アクションの動力学モデルの計算機上での構築

アクションの動作の計算機シミュレーションを行った。本研究の動力学シミュレーションは、汎用マルチボディ・ダイナミクス・アルゴリズムを用いて行った。一般に動力学解析では、運動方程式と拘束方程式を導出し、その方程式に合わせてプログラムを作成するが、要素の数が増えるにつれて複雑化し、方程式を陽に記述することが困難になる。そのため、近年では方程式の導出そのものを自動化する手順が提案されている。本研究でもそれを採用し、拡大法を用いてシミュレーションを行った。

(4) 歴史的アクションの調査

国立音楽大学の楽器学資料館で所蔵している歴史的ピアノのアクションモデルの調査を行った。また、ドイツ博物館（ミュンヘン）、技術博物館（ベルリン、ウィーン）と、各附属図書館における文献調査を行った。それをもとに、(3)の方法で計算機によるシミュレーションを行った。

(5) 現代ピアノアクションの改良方法

アクションの部品に新たに質量を付加する方法によって、現行の静的規格と矛盾することなく回転運動を制御することを確認した。また、質量追加の効果について、実験と計算機シミュレーションによって評価、考察した。質量を付加することによってモーメントが増加するため、あわせて幾何学的改良についての考察も行った。

## 4. 研究成果

(1) アクションの動力学モデル

現代ピアノの鍵盤の幅と鍵が沈む深さはほぼ統一されている。これはアクション機構の設計時にその幾何学的形状が規格で定められているからである。一方、動力学的な明確な規格は存在せず、従って個々の楽器の差が大きい。

一連の先行研究では、それをふまえて各アクションの設計を特徴付けられるようにDijksterhuisのモデルを拡張した。

図1は、同じ入力に対する打弦直前の鍵盤の速さを表している。同一入力  $F_N$  を与えた場合、アップライトピアノとグランドピアノ、および電気ピアノの鍵盤速度  $v_k$  に相違が見られることを示している。この図からは、同じ入力に対して、鍵盤速度が楽器によって大きく異なり、グランドピアノのモーメントはアップライトピアノにくらべて大きいことが読み取れる。また、実験に用いた電気ピアノのモーメントは他に比べて小さいことがわかる。また、鍵が動き出すために必要な静的な力  $F_S$  は、規格通りいずれもほぼ  $0.5\text{ N}$  であることがわかる。

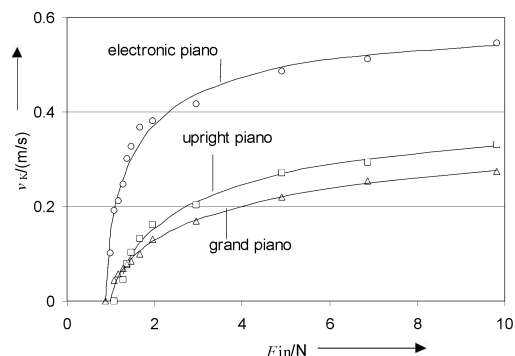


図1 打弦直前の鍵盤の速さ

一方、図 2 は同じ入力に対するアップライトピアノとグランドピアノの鍵速度とハンマー速度の関係を表している。ハンマーの最終速度は鍵盤と異なりグランドピアノのほうが大きい。結果としてグランドピアノのダイナミックレンジはアップライトピアノのそれより大きいことがわかる。これは上記の動力学モデルにおいてハンマー速度と鍵速度の比が一定ではなく、先行研究の Dijkstra のモデルは拡張されなければならないことを示している。本研究では、位置により変化するアクション全体の総モーメントを考へることにより Dijkstra のモデルを自然に拡張し、この現象を説明できた。またこれらの結果から、アップライトピアノ、グランドピアノ、電子ピアノなどのタッチの違いを定量的に明らかにすることができた。グランドピアノのアクションが主に重力のみを用いているのに対して、アップライトピアノではばねの力が多用されていることが差異の大きな原因のひとつである。

グランドピアノでは総モーメントがアップライトピアノに比べて大きいにもかかわらず、打弦直前でのハンマーの速度が大きいというのが特徴と言える。これらから、グランドピアノとアップライトピアノのアクションのタッチ（弾き心地）は主にアクションの総モーメントの違いとして特徴付けられることがわかった。さらにグランドピアノのアクションの慣性モーメントはハンマーの大きさにより低音部ほど大きく、整調作業の影響が、鍵変位-力、鍵速度-ハンマー速度に現れ、モーメントの変化によって特徴付けられるという結果を得た。このため、アップライトピアノのアクションの設計には、この二つのパラメータ（総モーメントと、ハンマーの最終速度）を制御できることが求められていると考えられる。二つのパラメータを制御することにより、工業規格に反することなく、演奏者の望むタッチ（弾き心地）を実現できる。

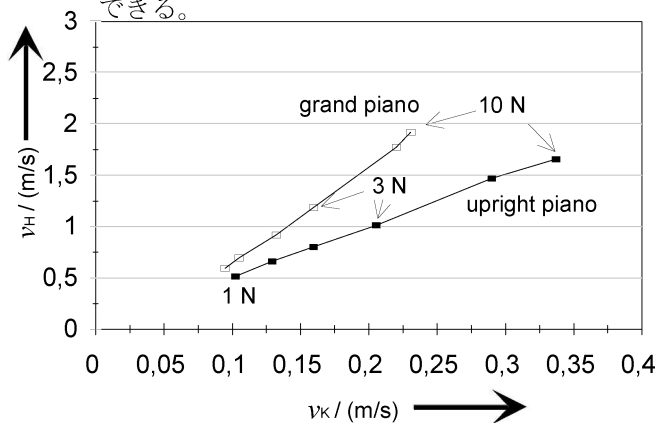


図 2 同じ入力に対するハンマーの速さの相違

## (2) 歴史的アクションの性質

(1)と同様の解析手法において歴史的ピアノアクションモデルを比較した。歴史的ピアノアクションのうち、イギリス式とよばれるシングルアクションは、その単純さから現代ピアノに比べてモーメントが著しく小さく、末期ウィーン式と呼ばれる跳ね返りアクションは逆に著しく大きいという結果が得られた。

表 1 は、各アクションのモデルにおける打鍵直前の回転モーメント  $I$  と鍵が動き出すために必要な静的な力  $F_s$  の実測結果を示している。

この結果から、歴史的アクションでは、現代楽器に比べて総じて回転モーメントが小さいことがわかる。これは歴史的鍵盤楽器のアクションが比較的シンプルな構造をしており、部品数も総じて少ないことが原因であると考えられる。ただし末期のウィーン式では、逆に現代ピアノより大きくなっている。また、クラヴィコードとイギリス式では、他のアクションに比べて一桁小さな回転モーメントを持つ。これは、クラヴィコードが極めてシンプルなアクションをもっていることと、普及型アクションが簡略化されたことが原因であると考えられる。回転する部分が少ないほど、回転モーメントの総和は小さくなると考えられるからである。また部品を省略したために  $F_s$  が小さいのも特徴といえる。

末期ウィーン式では他のアクションに比べて総回転モーメントが大きいのは、ハンマーの支点が鍵盤に取り付けられていることに起因すると考えられる。イギリス式ダブルアクションを源流とする現代ピアノではハンマーの支点が固定されているのと対照的である。このため現代ピアノと同様な入力で同じ鍵速度を得るには、鍵を長くしなければならない。ウィーン式アクションがその直接の祖先であるドイツ式アクションに比べて歴史的に巨大化し、やがては衰退した一因であると考えられる。

	$I$ [kg m <sup>2</sup> ]	$F_s$ [N]
クラヴィコード	0.0026	0.06
ハープシコード	0.014	0.37
クリストフォリ型	0.013	0.56
イギリス式	0.0026	0.25
末期ウィーン式	0.32	0.67
現代グランドピアノ	0.040	0.58
現代アップライト	0.018	0.58

表 1 各アクションの総モーメント  $I$  と、動き出す最小の力  $F_s$

### (3) 高速度カメラによる測定

一連の先行研究では、非接触センサによって鍵先端の変位を測定し、打鍵直前の傾きから速度を得た。具体的には鍵盤の動きを光学変位計によって検出し、鍵にマーキングされた基準線を非接触で測定する一方、シャンクがフォトダイオードとフォトカプラの間を通過する時間から打弦直前のハンマーの速度を測定した。またその後、加速度センサのみを用いて打鍵直前の鍵速度を得ることも試みた。

本研究ではさらにこれらに加えて、民生用高速度カメラを用いてアップライトピアノのアクションモデルを撮影し、映像処理を行って各部品の代表点の変位を測定する方法を開発した。入力には鍵の先端に錘をのせ、静かに離すことによって行った。撮影は室内照明を消して太陽光のほかハロゲンランプで光度を補い、1秒間あたり600フレームで行った。またアクションの背景部には暗色の塗装を行った。高速度カメラの映像はavi方式（1フレームあたりの画素数423×192）で録画してコンピュータにとりこみ、新たに作成したソフトウェアを用いて動体追尾を行った。動体追尾には、映像処理に特化したオープンソースのC/C++ライブラリであるOpenCVを利用した。1フレームごとにメモリに読み込み、ひとつ前のフレームからの特徴点の移動を追尾して記録した。特徴点はあらかじめ鍵、ハンマー、ウィッペンなどアクションにつけたマーキングを目視により手動で指定した。マーキングは、各部品の代表点のほか、各センターピンにもつけ、撮影期間中に不動であることを確認した。各回転部品のセンターピンを同時に測定することにより、位置のデータから、各部品の回転角度を直接計算した。

図3はハンマーの回転角度の時間履歴を計測したものである。ハンマーの先端がハンマーの回転中心に対して運動した角度を、各時刻で記録した。レットオフは整調によって行わないよう調整した。これは、これまでの研究で、レットオフ直前までのモーメントがタッチに直接影響していることが判明していたためである。また、ダンパーは用いていない。図からは、鍵の先端部に錘をのせて手を離すと、ハンマーが角速度を増しながら回転し、打弦する様子が観察できる。これにより、先行研究で用いた大掛かりな光学変位計による非接触センサを用いたシステムを用いなくても、アクション部品の回転を追尾できることが確かめられた。図3の観測結果の傾きから計算したハンマーの角速度は、弦との接触直前に最大値6.8 rad/sとなった。

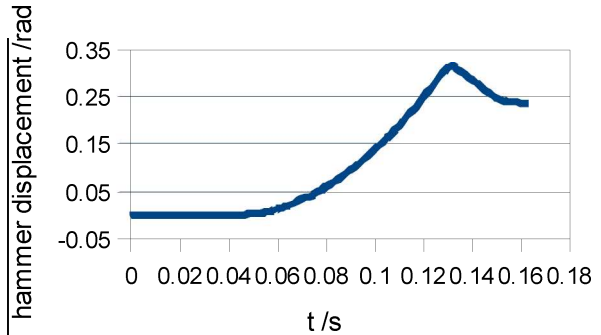


図3 ハンマーの回転角度

### (4) 各部品の回転モーメントの計測とアクションの動力学シミュレーション

ピアノアクションを設計するための動力学シミュレーションを実現し、前項の観測結果と比較した。動力学モデルには用いるピアノアクションの各部品のモーメント値が必要であるが、これは直接測定することが可能である。図4において、物体の質量、モーメントをそれぞれ  $m$ ,  $I$ , とすると、回転角が十分小さいとき

$$I\ddot{\varphi} = -mgl \sin \varphi \approx -mgl \varphi$$

が成り立つ。式中  $g$  は重力加速度を表す。ここから周期  $T$  は

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi \sqrt{\frac{I}{mgl}}$$

と表され、モーメント

$$I = T^2 mgl / 4\pi^2$$

が求められる。周期は、各部品についてセンターピンを軸に単独で回転させて、高速度カメラで撮影し、その時間履歴から求めた。

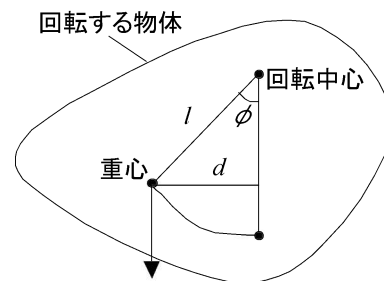


図4 モーメントの直接測定

表1にハンマー、ウィッペン、鍵のモーメントの測定値を示す。測定値からは、ハンマーやウィッペンに比べて鍵のモーメントが大きいことがわかる。これはキーレッドを用いて鍵の重さを調整していることに起因している。キーレッドとは、鍵に横から穴を開

けて、中に鉛の塊を押し込んでバランスをとり、鍵の動き出す最小の力を調整している仕組みである。

	回転モーメント $I$ $\times 10^{-4} \text{ kg m}^2$
ハンマー	1.91
ジャック	0.10
ウィッペン	0.66
鍵	17.0

表 2 各部品の慣性モーメントの実測値

本研究の動力学シミュレーションでは、汎用マルチボディ・ダイナミクス・アルゴリズムを用いて行った。処理には拘束条件式に運動方程式を加えた「拡大法」を用いた。

シミュレーションでは、鍵とハンマーおよびウィッペンは、それぞれグランドと回転関節で結ばれているものとした。またジャックはウィッペンと回転関節で結ばれているものとした。一方、鍵とウィッペンはすべり接触するものとした。これは、アップライトピアノとグランドピアノの双方のモデルで共通している。

高速度カメラによる実測値と比較するため、シミュレーションにおいても入力に錘を用いるとした。錘は鍵の先端に単純拘束されるものとした。また、実測データと直接比較するため、時刻刻みは高速度カメラのフレームレートと合わせた。モーメントは表 1 で求めた値を用い、質量は各部品を外して直接測定して求めた。各部品の静止状態での位置座標は、アクションモデルを写真撮影して直接測定した。

図 5 はハンマーの回転角度を表した図 3 に、上記の方法で計算したシミュレーション結果を重ねて示したものである。点線は図 3 のグラフを示しており、実線がシミュレーションで得られたハンマーの回転角度を表している。ハンマーが動き出す時刻にシミュレーションの開始時刻を重ね合わせている。

シミュレーションの図ではハンマーが弦に接触するまでをプロットしてある。シミュレーション結果からは、実測による結果と同様、ハンマーは時間とともに角速度を増しながら回転し、弦に衝突する様子が再現されていることがわかる。アクション系には、軸を中心として摩擦力が働いていることが予想される。たとえば、ウィッペン、ハンマーなどのピアノアクションの部品では、回転中心にセンターピンとブッシング・クロスを用いている。センターピンを中心に部品を回転させると指に抵抗を感じることから、一定の摩擦抵抗があることがわかる。実測実験におい

ては、センターピンと接触するブッシング・クロスを通常より多く削り、ほとんど指に抵抗を感じないまでに滑らかに回転するように調整したことから、シミュレーションの結果は実測値とよく一致し、ハンマーが動き始めてから弦に達する時間がほぼ一致していることがわかる。これにより、本シミュレーションによって、アクションの設計変更や質量の付加による、モーメントとハンマーの最終速度の変化を予測することが可能であることが明らかになった。

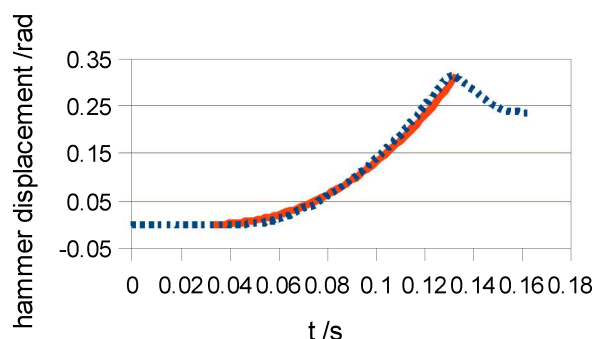


図 5 ハンマーの回転角度のシミュレーション

上記の方法で、任意のモーメントを持つピアノアクションを設計することが可能となった。これにより、設計や調整の指針が容易に得られるようになった。

本研究の応用として、既に完成されたピアノに、調律技術者が行えるアフターケアによって総慣性モーメントとハンマーの最終速度に与える影響について考察した。ピアノの鍵が動き出す最小の力は工業規格により定められているが、鍵のバランスピンから等距離の点に同じ質量のキーレッドを追加することにより、工業規格を満たしたまま鍵のモーメントを変更することが可能であることを確かめた。

#### (4) アクションの変更

(3) で述べたアフターケアによって総モーメントを変更する方法を検証するため、アップライトピアノアクションのシミュレーションにおいて、鍵のバランスピンの両側に 100 g ずつの質量を付加したところ、鍵のモーメントは約 2.1 倍になった。(1) で述べたように、グランドピアノアクションの総モーメントはアップライトピアノより大きいことがわかっているので、質量付加は有効な方法であることがわかる。

一方、質量付加により、ハンマーの最終速度は約 1 % 減少した。幾何学的形状を変更しないまま総モーメントが大きくなったので、これは当然の結果といえる。アップライトピ

ピアノのハンマーの最終速度はグランドピアノのハンマーの最終速度にくらべて逆にかつ小さいので、鍵盤に質量を付加する方法に加え、当然幾何学的な変更も必要となることがわかる。

その一例として、ダウルの変更の結果について考察した。アップライトピアノでは、ダウルを介して鍵とウィッペンは滑り接触をしている。この滑り接触は、動力学モデルでは、ダウルの曲率中心とウィッペンヒールの距離が一定である仮想リンクと等価である。仮想リンクとみなすと、バランスピン、ダウルの曲率中心、ウィッペンヒールの曲率中心、およびウィッペンセンターは、いわゆる4節回転リンク機構の節点であるとみなすことができる。図6に示すように、ダウルの接触面形状を変更することは、この仮想リンクの形状を変更することに相当する。図中、線の長さ(それぞれの曲率半径)が仮想リンクの長さに相当する。ダウルは鍵盤に単純なねじによって固定されているので簡単に交換が可能であるため、ほかに影響をあたえることなく実質的に幾何形状を変更することができる。

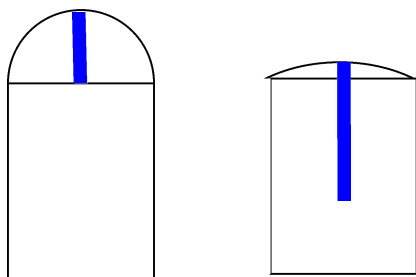


図6 ダウルの曲率と仮想リンクの長さ

シミュレーションの結果、曲率半径を元の状態から大きくしてゆくと、次第にハンマーの回転角は大きくなり、最終速度に変化が現れる。たとえばダウルの曲率半径をオリジナルの5mmから40mmに増やしたとき、シミュレーションではハンマーの最終速度は約4%大きくなることがわかった。これにより、完成した楽器でも簡単なアクション部品の交換等により、ハンマーの速度を変化させられることが確かめられた。

本研究では、当初目的としていたアクションの動特性を明らかにし、計算機シミュレーションによるアクションの設計を実現した。また同時に現代ピアノおよび歴史的ピアノのアクションの定量評価を行った。計算機によるピアノアクションのシミュレーションでは、実際のアクションにも応用できる実用的な設計方法を提示した。

アクションの動特性の実測値と、計算機シミュレーションの結果を比較し、両者がよく一致することを確認した。さらにこれらを通じて、ピアノアクションの具体的な改良方法の指針を提案した。以上の結果より、演奏者が所望する任意の動特性を持ったアクションを設計、作成し、あるいは調整することが可能になった。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計6件)

- (1) 森太郎, アップライトピアノアクションの改良のための数値シミュレーション, 国立音楽大学大学院研究年報25号, 査読有, 2013, pp.17-27

[学会発表] (計7件)

- (2) 森太郎, 西口磯春, ピアノとその音色, 日本音響学会音楽音響研究会(招待講演), 2013年5月13日, 東京情報大学
- (3) 森太郎, アップライトピアノアクションの動力学解析, 日本音響学会秋季研究発表会, 2012年9月19日, 信州大
- (4) 森太郎, 鍵盤楽器の歴史と音響, 日本音響学会秋季研究発表会(招待講演), 2011年9月20日, 島根大
- (5) 森太郎, 鍵盤楽器と音楽の相互作用, 日本音響学会秋季研究発表会(招待講演), 2011年3月9日, 早稲田大
- (6) 森太郎, 初期の有弦鍵盤楽器の発音機構, 日本音響学会音楽音響研究会, 2010年5月22日, 電気通信大学

[図書] (計2件)

- (1) 磯山雅他, 教養としてのバッハ, アルテスパブリッシング, 2012, 森太郎担当分 pp.80-91
- (2) 鈴木英男, 西口磯春, 三浦雅展, 森太郎, ピアノの音響学, 音楽之友社, 2013, 印刷中

[その他] (計7件)

- (1) 講演「森太郎のピアノ実験室3」, 日本ピアノ調律師協会主催, 2009年11月3日,
- (2) 講演「ピアノの音って何だろう」 祝ピアノ300年講演, 日本ピアノ調律師協会主催, 2009年8月29日

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

森太郎 (MORI TARO)

研究者番号: 40335782