

指揮動作の視覚情報の違いが演奏タイミングに及ぼす影響

LIU MEIXUAN[†] 阪口 豊^{††}

[†]電気通信大学 大学院情報理工学研究科

^{††}電気通信大学 大学院情報理工学研究科, 技能情報学研究ステーション

〒185-8585 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1

E-mail: [†]r2232122@gl.cc.uec.ac.jp, ^{††}yutaka.sakaguchi@uec.ac.jp

あらまし オーケストラ演奏などの合奏において、演奏者は指揮者の動きの視覚情報を頼りにして最初の音の演奏タイミングを定めるが、その際に、演奏者が指揮者のどのような動きを手がかりにしてそのタイミングを定めているのかは十分に解明されていない。本研究では、演奏動作のタイミングを定める手がかりが指揮運動のどの部分にあるかを明らかにすることを目的として、指揮棒の動きを単純化した光点アニメーションを用いた実験を行った。具体的には、光点に合わせて打楽器（ウッドブロック）を打鍵する課題を設定し、光点の動きのパラメータの違いが打鍵時刻や打鍵運動に与える影響を観察した。その結果、1) 前拍の打点の有無が打鍵時刻に大きな影響を与えること、2) 動きの大きさは打鍵時刻に影響を与えないこと、3) 振り上げ（光点の上昇）と振り下ろし（光点の下降）の時間的対称性が打鍵時刻に影響を与えることが明らかになった。

キーワード 音楽演奏, 演奏指揮, 運動タイミング, 同期性, ヒューマンコミュニケーション

Effects of Differences in Visual Information of Conducting Movements on Performance Timing

Meixuan LIU[†] Yutaka SAKAGUCHI^{††}

[†]Graduate School of Informatics and Engineering, University of Electro-Communications

^{††}Graduate School of Informatics and Engineering, University of Electro-Communications

1-5-1, Chofugaoka, Chofu, Tokyo 182-8585, Japan

E-mail: [†]r2232122@gl.cc.uec.ac.jp, ^{††}yutaka.sakaguchi@uec.ac.jp

Abstract In conducted music performances, such as orchestra performance, instrument players determine the timing of the first note of the performance rely mainly on visual information of the conductor's motion. It has not yet been fully elucidated what feature or information of the conductor's motion the performers make use of in determining the timing of their performance. Aiming to answer this question, we performed a series of psychophysical experiments using an animation of a moving dot that resembled the movement of the conductor's baton. Specifically, we prepared a task of striking a wood block with a mallet in sync with the moving dot and analyzed the effects of the movement parameters on the striking timing. We found that the strike timing was significantly affected by the existence of the previous beat in the moving dot.

Keywords Music Performance, Musical Conducting, Motion Timing, Synchrony, Human Communication

1. はじめに

オーケストラや合唱において、指揮者は身体全体の動きを通して曲のテンポや発音タイミング、音の強弱、演奏表現などを指示し、演奏者はその指示を受けて演奏する[1]。その際に、演奏者は指揮者の動きがもたらすどのような視覚情報に応じて演奏タイミングを定めているのか、また、発音に至る準備動作をどのように行っているのかはまだ十分に解明されていない。

本研究の目的は、演奏者が楽曲の最初の音を発するタイミングを定めるための視覚的手がかりを明らかに

することである。本研究では、指揮棒先端の動きを単純化した光点アニメーションを作成し、光点の動きに合わせて打楽器を打鍵する課題において、光点の動きのパラメータの違いが被験者の打鍵時刻や打鍵運動に与える影響を観察した。具体的には、演奏開始前の光点の動きの時間長、光点の動きの振幅、光点の動きの速度パターンが打鍵タイミングなどに与える影響を調査した。これらの観察に基づき、被験者にとって最も演奏しやすい条件、あるいは、異なる被験者のあいだで打鍵時刻のばらつきが小さい条件について検討する。

2. 研究背景

2.1. 指揮の役割

指揮は演奏全体を先導するもの且つ楽曲に対する各演奏者の解釈の違いを一つにまとめるものである。曲全体を通して指揮者は演奏者に指示を与えているが、演奏中はコンサートマスターやパートリーダーによる指示も参考にしている[2]。また、問題なく曲が進行している場合、指揮者は演奏者に余計な指示を出すべきではないと指摘されている[3]。このように、いったん音楽が始まれば演奏者はさまざまな手がかりに基づいて発音のタイミングを定めることができる。しかし、楽曲の冒頭ではこれらの手がかりを利用することができないため、少なくとも発音タイミングの決定において指揮者の動きの視覚的情報が果たす役割は大きい。

2.2. 指揮動作の説明

演奏指揮の教則本[4]によれば、演奏指揮の動きにおいて、拍は落下する腕を跳ね上げるタイミングを指す。このことから演奏の発音は指揮運動の最下点（以下、打点と呼ぶ）とおおむね一致していると考えられる（ただし、現実の演奏では両者は必ずしも一致していない。5章を参照）。また、指揮者は拍の位置で振り始め、すべての拍が同じ高さになるように指揮するべきであると指摘されている[1]。

2.3. 先行研究

演奏指揮に関する研究は、指揮動作もしくはそれを模倣した動作の特徴を解析するものと、指揮にあわせて演奏する動作を解析するものに分類できる。前者の例として、音楽演奏経験がある被験者に水平面内の手先の動きで拍を表現するように楕円軌道を描かせると拍付近でトルク変化が大きくなること[5]や、指揮運動での手先軌道で打点前に最大減速点があること[6]が報告されている。また、後者の例として、指揮者の腕の負の加速度が増加する区間、特に腕の位置が低い区間で演奏者の動きに同期が生じていること[7]が指摘されている。また、腕の動きの最適化規範から逸脱した運動において運動のタイミングが知覚しやすいことが報告されている[8]。

2.4. 本研究での問い(research question)

本研究で明らかにする問題は以下の三点である。

問い1：演奏開始までに提示する光点の時間長の影響（実験1）

問い2：光点の動きの振幅の影響（実験2）

問い3：光点の動きの速度パタンの影響（実験3）

3. 実験方法

3.1. 被験者

本実験には、成人15人（音楽演奏経験者12人、未経験者3人）が参加した。

3.2. 実験機器

指揮者の指揮棒の動きを単純化した光点アニメーションを、MATLAB（Version: 2022a）上で動作するPsychtoolbox（Version: 2020）を用いて作成した。高速リフレッシュレート液晶モニタ（DELL, Alienware AW2521HF, リフレッシュレート: 240 Hz, 1920 ピクセル×1080 ピクセル, サイズ 55 cm×横 31 cm）を用いて被験者に提示した。液晶モニタでの光点提示と他の計測装置との同期を取るために、画面端の明滅を検出するフォトリンジスタを導入した。実験で使用する楽器はウッドブロックであり、被験者はマレットを使ってこれを打鍵する。ウッドブロックはスタンドに固定したうえで液晶モニタから1 m離れたところに置き、被験者にはその後ろにおいた椅子に座った状態で打鍵を行ってもらった。被験者から液晶モニタまでの距離は概ね150 cmであり、画面の視野角は約20度×12度であった。ウッドブロックにはクリップ型マイクロフォン（audio-technica. AT-MA2）を取り付け、打鍵による振動を検出した。演奏時のマレット先端の動きを記録するためにモーションキャプチャ装置（Optitrack M13 カメラ7台, フレームレート 240 Hz）を用いた。実験装置全体の制御にはマイコン Arduino UNOを使用した。

3.3. 刺激

実験では、指揮者の指揮棒の動きを単純化した光点アニメーションを作成した。アニメーションのパラメータを変化させたものを被験者に提示し、被験者の打楽器を打鍵する時刻および打鍵動作に与える影響について調べた。光点の動きは、教則本に記載されている一拍子の動きをふまえて上下方向の一次元運動とした（図1）。

一試行内における刺激の提示方法は次のとおりである。初めに黒い背景のうえに白い円形（直径40ピクセル）が現れる。1秒から2秒までのランダムな時間停止したのち、決められた軌道（後述）に従って上下運動を行う。最終的に、光点は最上点に到達したタイミングで消失する。

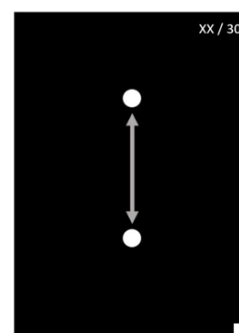


図1 実験中の画面の様子

3.4. 実験手順

被験者に文面および口頭により説明を行ったあと、マレットでウッドブロックを打鍵する練習を約5分間行ってもらい、打鍵動作に慣れてもらった。その後、光点アニメーションを用いて後述する4つの実験を実施してもらった。

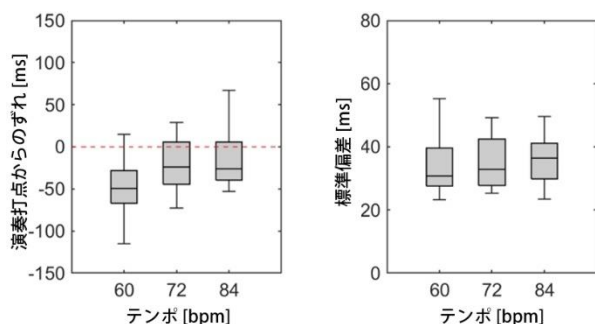


図2 対象実験における打鍵時刻の結果
演奏打点と打鍵時刻のずれ(左),
打鍵時刻のゆらぎ(右)

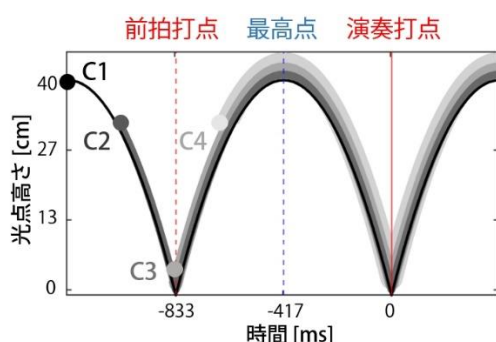


図3 実験1の光点運動軌道

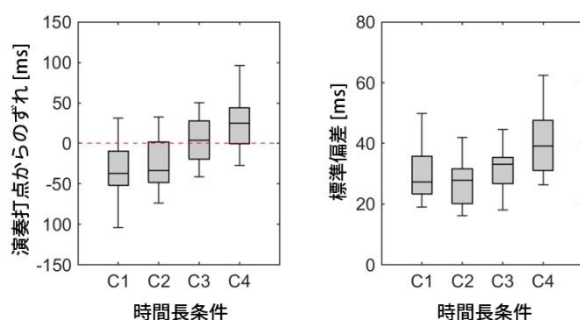


図4 実験1における打鍵時刻の結果
演奏打点と打鍵時刻のずれ(左),
打鍵時刻のゆらぎ(右)

4. 実験

4.1. 対照実験

4.1.1. 目的

曲の冒頭部の演奏タイミングを計測する実験を行う前に、対照実験として、一定のテンポで上下運動する光点の動きにあわせて連続的に打鍵する実験を行った。これにより、連続演奏時の打点時刻と打鍵時刻の関係性を明らかにするとともに、一拍目の演奏タイミングを評価する際の比較基準を得た。

4.1.2. 方法

光点の動きは、打点で弾性衝突し、それ以外の区間では下方向に一定の加速度で運動する放物運動として与えた。光点の振幅は1536ピクセル（視野角15度）とし、加速度の大きさはテンポにあわせて決定した。被験者は、この光点の動きにあわせて約1分間連続してマレットを打鍵した。このとき、打鍵タイミングを打点に一致させるようには指示せず、光点の動きに同期させて自然なタイミングで打鍵するように指示した。

テンポ条件は60, 72, 84 bpmの3条件を設定し、すべての条件を1試行ずつ行った。

4.1.3. 結果

各テンポ条件における打点時刻と打鍵時刻のずれの平均値と標準偏差を被験者ごとに求め、それを全被験者についてまとめたものを図2に示す。演奏打点からのずれの値は、正であれば、打鍵時刻が打点時刻よりも遅れていることを意味している。

図2からわかるように、すべての条件において打鍵時刻は打点時刻に対して一貫して数十ms程度先行していた。また、テンポが速くなるにつれて、先行する時間幅は減少する傾向がみられた。一方、標準偏差の大きさはそれぞれ30-40ms程度であり、その大きさについて条件間で明確な違いは見られなかった。

以上の観察内容について統計的検定を行った。打鍵時刻の分布は明らかに正規分布に従っていなかったことから、ノンパラメトリック検定であるクラスカル=ウォリス検定を使用した。その結果、打鍵時刻に対してテンポ条件の有意な効果が見られた ($\chi^2(2,42) = 7.83, p = 0.020 < 0.05$)。さらに、ボンフェローニ補正による多重比較検定を行った結果、条件60 bpm, 84 bpmのあいだに有意差が見られた ($p = 0.046 < 0.05, d = 0.96$)。

4.2. 実験1: 光点の時間長の影響

4.2.1. 実験目的

演奏指揮の教則本[3]において、「前拍の打点が演奏開始までの指揮者の動きに含まれていることが重要である」ことが指摘されている。本実験では、演奏開始

までに提示する光点の時間長の変化が被験者の打鍵時刻および打鍵運動に与える影響について調査した。

4.2.2. 実験内容

光点の動きを図3の軌道の一部を決められた4つの時間長で切り取ったものとして与えた。テンポ条件は72 bpmを設定し、すべての条件を30試行ずつ行った。

4.2.3. 実験結果

各時間長条件の打鍵時刻の結果を図4に示す、ずれの図より、光点を提示する時間長が短くなるにつれて打鍵時刻が遅くなっていった。特に、条件C1, C2では打点より約30 ms先行して打鍵していたのに対して、条件C3はほぼ打点時刻で、条件C4は打点よりも約30 ms遅れて打鍵していた。また、72 bpmでの連続打鍵時には打鍵時刻が打点時刻に約30 ms先行していた結果と本実験の結果を比較すると、条件C1, C2での時間ずれが連続打鍵時のずれ（図2）と近い値であることがわかる。以上の観察についてクラスカル=ウォリス検定を行った結果、時間長条件の有意な効果が見られた（ $\chi^2(3,56) = 21.19, p = 9.61e-05 < 0.05$ ）。ボンフェローニ補正による多重比較検定を行った結果、条件C1, C4間（ $p = 0.0018, d = 1.67$ ）と条件C2, C4間（ $p = 0.0043, d = 1.66$ ）で有意差が見られた。

さらに、対照実験で得られた72 bpmにおける連続打鍵時の演奏打点と打鍵時刻の遅れを本実験の結果と比較するためにボンフェローニ補正による多重比較検定を行った結果、条件72 bpm, C4間（ $p = 0.020, d = 1.40$ ）で有意差が見られた。

これらの結果は、前拍打点を含んでいることが一拍目から連続打鍵時の打鍵時刻の遅れに近い遅れで打鍵できることを示している。

各条件におけるマレット先端の鉛直方向の動きについて代表的な被験者2名のデータを図5に示す。この図からわかるように、条件C2からC4にかけて提示される光点運動の時間長が短くなるにつれて、振り上げ開始時刻も遅れていった。それに対して、条件C1とC2では時間長の変化が他条件と変わらないのにも関わらず、振り上げ開始時刻に大きな差が見られなかった。このことは、前拍打点を含む条件C1とC2は打鍵時刻だけでなく、打鍵の準備動作を開始する時刻も同じであることを示している。同様の傾向は大部分の被験者にも共通して見られた。

なお、被験者Aに特徴的な動きとして、条件C1とC2において前拍打点付近で一度マレットを小さく振り下げたのちマレットを振り上げていたことを指摘しておく。この前拍付近での振り下げ動作は前拍打点より早く始まり前拍打点の後で最下点を迎えているが、前拍にあわせて打鍵準備を始めていることを示唆する結果であり、興味深い。

4.3. 実験2: 光点の動きの振幅の影響

4.3.1. 目的

指揮動作の振幅は演奏音の大きさを変えるための手段であり、振幅の変化が演奏タイミングに影響を及ぼすことは望ましくない。本実験では、振幅の違いが演奏タイミングに影響を与えるかどうかを検証するために、同一のテンポで光点の振幅が変化した場合に、被験者の打鍵時刻および打鍵動作に与える影響について調査した。

4.3.2. 方法

実験では、光点運動の振幅について3つの条件（Large, Medium, Small）に設定した。それぞれの条件における光点の動きを図6に示す。それぞれ1536ピクセル（実験1で使用した光点運動の振幅と同じ）、1152ピクセル、768ピクセルの3つの条件を設定した。これに基づいて被験者の打鍵時刻およびマレット先端の動きを測定した。

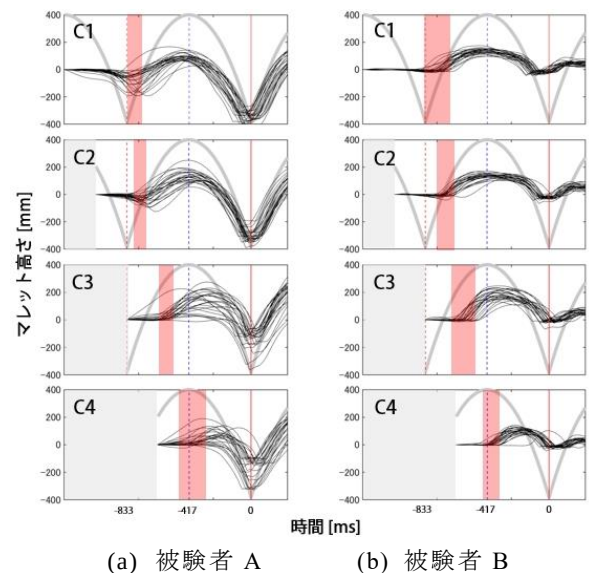


図5. マレット先端高さの時間経過
(黒：マレット先端の高さ、灰：光点の高さ、赤色帯部分：マレット振り上げ開始時刻)

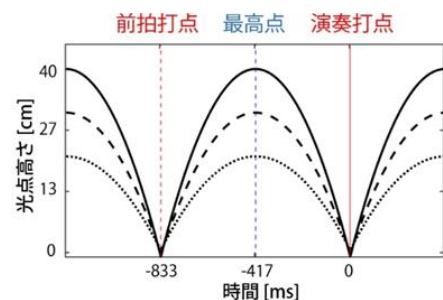


図6. 実験2の光点運動軌道

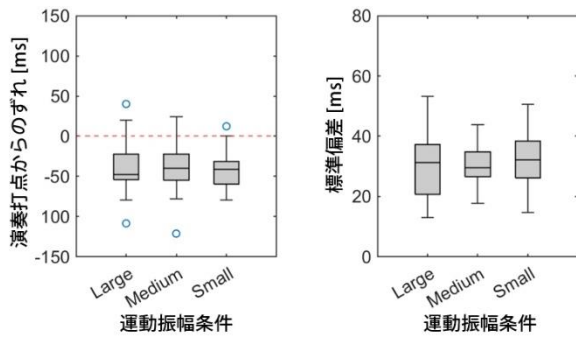


図 7. 実験 2 における打鍵時刻の結果
演奏打点と打鍵時刻のずれ(左),
打鍵時刻のゆらぎ(右)

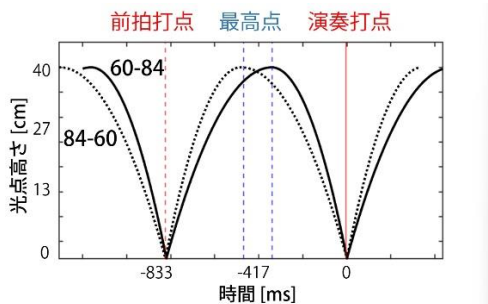


図 8. 実験 3 条件 60-84 および 60-84 の
光点運動軌道

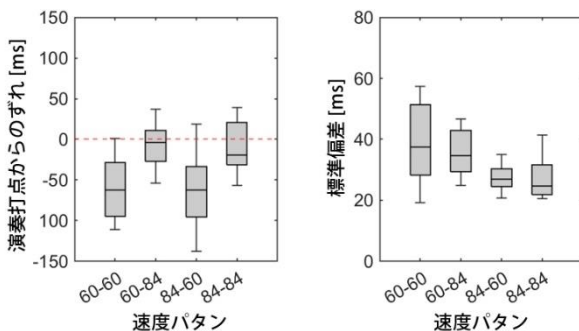


図 9. 実験 3 における打鍵時刻の結果
演奏打点と打鍵時刻のずれ(左),
打鍵時刻のゆらぎ(右)

4.3.3. 結果

被験者ごとの打鍵時刻の遅れの平均と標準偏差を全被験者についてまとめた結果を図 7 に示す。図 7 からわかるように、すべての条件において、打鍵時刻は演奏打点時刻に対して約 30 ms 先行していた。

以上の観察についてクラスカル=ウォリス検定を行った結果、打鍵時刻において 3 つの条件間に統計的な違いは見られなかった ($\chi^2(2,42) = 0.18, p = 0.91 > 0.05$)。この結果は、指揮動作の振りの大きさが変化しても演奏タイミングには影響を与えないことを示唆している。

4.4. 実験3:光点の動きの速度パタンの影響

4.4.1. 目的

指揮動作において、振り上げ動作と振り下ろし動作のあいだの時間的対称性が保たれているわけではない。例えば、指揮棒をゆっくりと振り上げて速く振り下ろす、あるいは、素早く振り上げてゆっくり振り下ろすといったことがありうる。このように、振り上げ動作と振り下ろし動作の時間対称性の違いは演奏タイミングに影響を与えるであろうか？この問いに答えるために、本実験では光点の動きを上昇運動と下降運動に分け、それぞれにかかる時間を変化させたときに被験者の打鍵時刻および打鍵動作に与える影響を調べた。

4.4.2. 方法

テンポが 60 bpm と 84 bpm であるときの光点軌道を組み合わせることによって光点の動きとして 4 つの速度パターン (条件 60-60, 60-84, 84-60, 84-84) を設けた。前半の数字は上昇時のテンポを表し、後半の数字は下降時のテンポを表している。代表として時間的対称性が保たれていない条件 60-84 および 84-60 の光点の動きを図 8 に示す。実験では、条件ごとに一つの実験ブロックを定め、30 試行を連続して行った。

4.4.3. 結果

図 9 に打鍵時刻の結果を示す。ずれに関する図からわかるように、打鍵時刻は振り下ろし運動の性質を継承する傾向がみられた。振り下ろす速度が 60 bpm の条件 (条件 60-60 と 84-60) では、打鍵時刻は光点が演奏拍打点より約 50 ms 先行していた。これは連続打鍵時 (図 2) の 60 bpm の打鍵時刻の遅れに近い時刻であった。一方、振り下ろす速度が 84 bpm の条件 (条件 60-84 と 84-84) では、打鍵時刻は演奏拍打点の時刻に近く、これは連続打鍵時 (図 2) の 84 bpm の打鍵時刻の遅れに近い時刻であった。

以上の観察についてクラスカル=ウォリス検定を使用して統計的な検定を行った。まず、打鍵時刻のずれの平均値について速度パタンの有意な効果が見られた ($\chi^2(3,56) = 16.48, p = 9.0e-4 < 0.05$)。ボンフェローニ補正による多重比較検定を行った結果、条件 60-60, 60-84 間、条件 60-60, 84-84 間、条件 60-84, 84-60 間で有意差が見られた (条件 60-60・60-84: $p = 0.0021, d = 0.31$ 。条件 60-60・84-84: $p = 0.029, d = 0.38$ 。条件 60-84・84-60: $p = 0.047, d = 0.31$)。

打鍵時刻のゆらぎに関する図からわかるように、振り上げる速度が 60 bpm である条件 (条件 60-60 と 60-84) は標準偏差の中央値が大きく分布が大きく広がっていたのに対して、振り上げる速度が 84 bpm である条件 (条件 84-60 と条件 84-84) では、標準偏差の中央値が低くそのばらつきも小さかった。この結果は、打鍵タイミングは振り上げ運動が速い方がより安定的に

なる傾向があることを示している。ただし、クラスカル=ウォリス検定を使用して統計的な検定を行ったところ、4つの条件間で有意差は見られなかった。

5. まとめと考察

本研究では、指揮動作を模した光点アニメーションを用いて、被験者に提示する光点の視覚情報の違いが発音タイミングに与える影響を調べた。

まず、対照実験において、連続打鍵時では打鍵時刻は打点時刻に先行することを示した。次に、1拍のみ演奏する条件では、演奏打点に至るまでの光点の視覚情報の長さによって打鍵時刻が変化することを示した。特に、光点の動きが前拍打点を含む条件では打鍵時刻は連続打鍵条件とほぼ同じであった一方、含まない条件では連続打鍵条件に比べて打鍵時刻が遅れることが明らかになった。この結果は、連続演奏時と同様のタイミングで演奏を行ううえで前拍打点の情報が重要な意味をもつことを意味している。

実験2では、光点の動きの大きさ（振幅）は打点時刻に影響を与えないことを示した。このことは、光点刺激の速度や加速度の絶対値は演奏タイミングに影響を与えないことを意味している。最後に、実験3では、光点運動の上昇（振り上げ）区間と下降（振り下ろし）区間の時間が異なる場合には、下降区間の特性が打鍵時刻に影響を与えることが明らかになった。

実験全体を通じて、打鍵動作自体には被験者間で個人差がみられた一方で、打鍵の準備動作を開始するタイミングは被験者間でおおむね共有されていた。この結果は、光点の動きの視覚情報に基づいて打鍵動作のタイミングを決定する仕組みが多く数の被験者に共通することを示唆している。このように異なる被験者間で共通した特性が得られたことは、多数の演奏者に同一指示を伝えるという演奏指揮が機能するうえで、光点運動からタイミング情報を抽出し運動を開始するという感覚運動系の特性が有用な土台となっていることを示している。

最後に、本実験で得られた結果は実際の演奏状況とは必ずしも同一ではないことについて述べておく。プロオーケストラの演奏では、指揮者が打点を打ってから遅れて演奏が始まる（つまり、打鍵時刻が打点時刻に遅れる）ことが多い。加えて、指揮者が演奏を導くには指揮者の振りが演奏に先行していることが重要であると述べる指揮者もいる。その一方で、上述したように、指揮法の教則本では、指揮の打点が演奏拍を定めると記載されていることが多い。また、学校行事としての合唱などのアマチュア演奏では、指揮の打点は演奏拍とほぼ同期しているようである。プロ指揮者とプロオーケストラによる演奏では、同じオーケストラであっても指揮者に応じて演奏タイミングが変わるこ

とから、リハーサル中のコミュニケーションを通じて両者のあいだに特有の演奏タイミングが形成されるものと推察される。逆にいえば、本実験で示した現象は、豊富な経験を積んだ指揮者と奏者のあいだの特別なコミュニケーションではなく、そのような経験をもたない一般の被験者において観察される現象であると考えられる。その意味で、本実験結果は人間がもつ一般的な時間コミュニケーションの特性を明らかにしたものといえるが、逆に、プロ演奏家におけるコミュニケーションではここで示したものとは異なるメカニズムが働いていると考えられる。

本実験では、3つのパラメータを操作して打鍵動作に与える影響を検討したが、操作できる光点のパラメータはほかにも多数ある。これらのパラメータを操作して打鍵動作に与える影響を体系的に調べ、知見を積み重ねることにより、演奏者が演奏タイミングを定めるメカニズム、さらには、視覚情報を介した時間情報コミュニケーションのメカニズムに迫れると考えている。最終的に、さまざまな条件における被験者の打鍵動作を系統的に模擬できる計算モデルを構築できれば、演奏指揮における時間コミュニケーションのメカニズムを理解したことになるといえるであろう。

本研究の一部は、科学研究費補助金挑戦的研究（萌芽）（22K18648）「楽曲演奏におけるリズム構造の構築とその実現」の援助により行われた。

文 献

- [1] McElheran, B. Conducting Technique for Beginners and Professionals. Oxford University, 2004.
- [2] 樋田, 山本, 齋藤, 坂本. インタビュー調査に基づくオーケストラにおける演奏音の同期方略の検討. 日本認知科学大会発表論文集(CD-ROM), No.37, pp.124-128, 2020.
- [3] 中野. 指揮者の役割-ヨーロッパ三大オーケストラ物語-. 新潮選書, 2011.
- [4] 斎藤. 指揮法教程. 音楽之友社, 1956.
- [5] 山川, 阪口. 演奏指揮における身体動作の解析: 時間情報伝達メカニズムの検討. 信学技報, NC2020-58, 2021.
- [6] 大岩, 福村, 宇野. リズムを表現するヒト腕の運動の解析. 信学技報, NC2000-119, pp.125-132, 2001.
- [7] Luck, G. & Sloboda, J. Exploring the Spatio-Temporal Properties of Simple Conducting Gestures using a Synchronization Task. Music Perception: An Interdisciplinary Journal, 25(3), 225-239, 2008.
- [8] 守田, 福村, 宇野. リズムを表現する運動の生成と知覚実験による身振りの伝達過程の検討. 信学技報, NC2004-150, 2005.