

## 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—

山川 望海<sup>†</sup> 阪口 豊<sup>‡</sup>

<sup>†</sup> 電気通信大学 情報理工学域 〒182-8585 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1

<sup>‡</sup> 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 〒182-8585 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1

E-mail: <sup>†</sup> yamakawa.nozomi@uec.ac.jp <sup>‡</sup> yutaka.sakaguchi@uec.ac.jp

**あらまし** 演奏指揮における時間情報伝達メカニズムを明らかにすることを目的として、指揮者の身体動作解析を行った。2名の指揮者が伴奏ピアニストを相手に単一音および数曲の楽曲を指揮した際の身体動作および床反力を測定し、指揮棒や身体動作の特徴点と演奏音のあいだの時間関係を解析した。解析結果に基づき、指揮棒運動の接線方向加速度の時間変化パターンが時間情報を伝達するうえで重要な特徴である可能性を指摘するとともに、奏者が指揮者の動作から演奏タイミングを読み取るメカニズムについて考察した。

**キーワード** 演奏指揮, 身体動作解析, 時間コミュニケーション, 感覚運動同期

## An analysis of conductor's body movement — Exploring communication mechanism of music conducting —

Nozomi YAMAKAWA<sup>†</sup> and Yutaka SAKAGUCHI<sup>‡</sup>

<sup>†</sup> Sch. Informatics & Engineering, Univ. Electro-Communications, 1-5-1 Chofugaoka, Chofu, Tokyo, 182-8585 Japan

<sup>‡</sup> Grad. Sch. Informatics & Engineering, Univ. Electro-Communications, 1-5-1 Chofugaoka, Chofu, Tokyo, 182-8585 Japan

E-mail: <sup>†</sup> yamakawa.nozomi@uec.ac.jp <sup>‡</sup> yutaka.sakaguchi@uec.ac.jp

**Abstract** We analyzed the body movement of music conductors, aiming to reveal the mechanism of communication of temporal information in music conducting. Two conductors performed single tones in various conditions and three music excerpts with an accompanying pianist while their body/baton movement and ground reaction force were measured. The temporal relationship between various feature points of body/baton movements and sound onset were analyzed. Based on the results, we suggested a possibility that tangential acceleration of baton movement may play an important role in telling the temporal information, and discussed the mechanism how the performers read the beat timing from the conductor's body movement.

**Keywords** Music conducting, Body motion analysis, Temporal communication, Sensorimotor synchronization

### 1. はじめに

オーケストラ等の演奏指揮において指揮者は指揮棒や身体の動作を介して奏者に情報を伝達する。指揮者の伝える情報には、多数の奏者の演奏を同期させるため時間情報と音量や音色など音楽表現（アーティキュレーション）に関する情報に分けられる。ここでは、指揮動作に含まれる身体運動を介して奏者に時間情報が伝達されるメカニズムを検討する。

演奏指揮では、指揮者の手や指揮棒の動作の最下点（打点と呼ばれる）のタイミングが奏音のタイミングは概ね一致している。ここで、視覚刺激に対するヒトの反応時間が単純反応課題において概ね150-300msであることを考えると、打点を見てから演奏動作を開始するのでは打点に合わせて音を出すことはできないから、奏者は指揮動作が打点に至る過程で打点のタイミングを予測して演奏動作を開始していると考えられる。

すなわち、奏者が指揮者の視覚情報から読み取っている拍の情報（visual beat）は、打点だけではなく指揮動作の時空間軌道によって運ばれていると考えるべきである。

本研究の目的は、指揮動作のいかなる部分・特徴量に奏者が演奏動作を始める手がかりが含まれているかを明らかにすることである。この目的を実現するため、本研究では、現実の音楽演奏になるべく近い形で、指揮者の指示に従ってピアノ奏者が演奏する場面を設定し、指揮者の身体運動を計測した。実験では、1音だけ演奏する試行（楽曲の冒頭の音を出すことに相当）と、楽曲を演奏する試行を設定した。

ヒトが感覚入力に同期して運動する際の特性については、感覚運動同期（sensorimotor synchronization）としてさまざまな研究が行われてきた[1-3]。これらの研究の多くでは、繰り返される周期的感覚入力に同期

して運動する課題を対象としている。音楽演奏においても、一定のテンポで演奏する際は周期性から次の拍の時刻を予測できるため拍のタイミングは奏者は自律的に生成できる。しかし、曲の冒頭部分やテンポが変化する部分では指揮者の指示情報が必要であり、実際、指揮者の視覚情報を与えることでテンポ変化を含む音楽系列において反応者の同期特性が向上することが報告されている[4]。

一方で、指揮動作に関する記述としては、第一に指揮法の教科書（例えば[5]）が挙げられるが、そのほとんどは言葉や static diagram による説明で、実験データに基づく説明は見られない。

演奏指揮に関する学術研究には、要素運動を取り出した基礎的研究と、実際の演奏を対象とした実践的研究がある。例えば、Luck and Slodova[6]は、モーションキャプチャ装置で計測した指揮者の示指の動きを point light 刺激として観察者に提示し、拍にあわせてキー押し課題を課す実験を行っている。詳細は割愛するが、観察者の反応タイミングの分布と有意な関係があるのは刺激の速度と加速度情報であった。また、アンサンブルを指揮する際の指揮棒の計測[7]では、奏者の演奏と最も相関が高いのは、接線方向の最大減速点、下向き鉛直速度の最大点であることが示されている。これらの結果は、指揮動作の速度変化や加速度変化が演奏タイミングの手がかりとなっていることを示唆している。

本研究では、これらの知見を土台として指揮動作の特徴を解析し、タイミング指示の手がかりとなる特徴量について検討する。具体的には、指揮棒先端の位置、速度、加速度に加え、奏者が相互に情報伝達する際に重要な頭部の動きと、ヒトがリズムをとる際に生じる全身運動（いわゆるグループ）を反映した床反力もあわせて分析した。

## 2. 実験

### 2.1. 被験者

被験者は、アマチュアオーケストラを指揮しているプロ指揮者2名（いずれも男性で主専攻は吹奏楽器演奏、指揮は副専攻）と、音楽大学の指揮科で伴奏ピアニストを務めているピアノ奏者1名（女性）である。

### 2.2. 実験装置

指揮者の身体運動を計測するため、指揮者の身体上24箇所と指揮棒の先端と根本、合計26箇所に反射マーカを貼付し、その3次元位置をモーションキャプチャ装置（Optitrack, Prime 13, 7台、サンプリング周波数120 Hz）で測定した。また、床反力計（テック技販, TF4060 2台、サンプリング周波数500 Hz）を用いて指揮者の床反力を測定した。ピアノ奏者の反応は、電子キーボード（Yamaha, P-155）の演奏音をマイク（Shure,

SM96）で収録し、デジタルレコーダ（Zoom, F-8, サンプリング周波数48 KHz）で記録した。床反力計とモーションキャプチャ装置はトリガー信号によって同期をとり、デジタルレコーダの送出するタイムコードをモーションキャプチャ装置で記録することで、音声データと身体運動計測データの同期をとった。

### 2.3. 実験手続き

実験の課題は、指揮者の指揮に従ってピアノ奏者がピアノを演奏することである。実験条件は以下の4種類である。

- (1) 種々の条件で1音のみ演奏する。
- (2) チャイコフスキー作曲バレエ音楽「くるみ割り人形」（作品71）「花のワルツ」の抜粋を演奏する。
- (3) ヨハン・シュトラウス作曲ビチカートポルカ（作品135）の抜粋を演奏する。
- (4) ベートーヴェン作曲交響曲第5番（作品6）の冒頭部分を演奏する。

条件(1)では、音量として *f*, *mf*, *p* の3段階を設定したほか、音量を *mf* としてレガート、スタカート表情をつけた条件で試行を行った。また、指揮者は奏者の演奏タイミングが自身の期待したタイミングと一致していたかどうかを回答した。条件(2)-(4)では普段通りに楽曲を演奏するように試行を行った。試行数は条件(1)では10回、他の条件では3-5回であった。本稿では条件(2)(3)の詳細に関する説明は割愛する。

## 3. 実験結果

### 3.1. 身体パーツ・指揮棒の動きの特徴

条件(1)での演奏タイミングは、少数の試行を除いて指揮者の期待どおりであった。本実験の設定では同時性判断課題のような精確な判断はできないことから、ここでは奏者が指揮者の指示通りに演奏していたことを確認することにとどめ、これ以上詳細な分析は行わない。

最初に、代表的な試行における指揮者の動作を示す。図1は、2人の指揮者について *mf* の音量での1試行の計測データを音響信号とともに示したものである。この図は、上から順に、①指揮棒先端の接線方向加速度、②速度の絶対値（速さ）、③上下方向速度、④上下方向位置、⑤頭部の上下方向位置、⑥床反力の鉛直方向成分を示している。図の縦軸はいずれも arbitrary unit で（ただし、2人の指揮者での縮尺は同一）である。この図からわかるように、振幅やパタンの細部は異なるものの、2人の指揮者のあいだで指揮棒先端の動きは概ね共通するパターンを示している。なお、指揮棒先端の最下点（打点）から音の立ち上がりまでの時間は2人の指揮者に共通して約150 msであった（統計的データについては後述する）。

まず、指揮棒先端の動きは、音を出す拍（以下「目標拍」とよぶ）で最下点（図中の矢印部分）を迎える前に二つの山を形成している。一つ目の山は、目標拍の一つ前の拍（「前拍」とよぶ）の打点を形成するための準備動作であると考えられる。この二つの山を作り出す一連の動作の中に演奏タイミングを伝える情報が含まれていると考えられる。以下、この図から読み取れる特徴について説明する。

上下方向位置を見ると、前拍から目標拍に向かう動作の振幅が最も大きい。また、指揮棒先端の速さは前拍打点後に上行する際に最大になり、（特に指揮者1では）急峻なピークを形成している。この事実は、目標拍の予告信号として働く前拍がメッセージとして重要であることを示している。このことは、指揮法の教科書に記されている diagram において、振幅最大になる箇所が1拍目に至る過程であることと符合する。

接線方向加速度には、前拍において正のピークがある一方、目標拍では明確な負のピークがある。後者（すなわち最大減速点）は先行研究において visual beat を定める特徴点と指摘されたものであり、加速度極大・極小点が果たす役割が大きいことが推察される。

また、指揮棒先端の速さは、打点に向かって下降する局面よりも打点後に上行する局面の方が大きい。つまり、指揮棒先端の上下方向の動きは対称的ではなく、前拍打点から最高点に達するまでの時間は、最高点から目標拍打点に向かう時間よりも短い。すなわち、最高点は打点間の二等分点ではない。

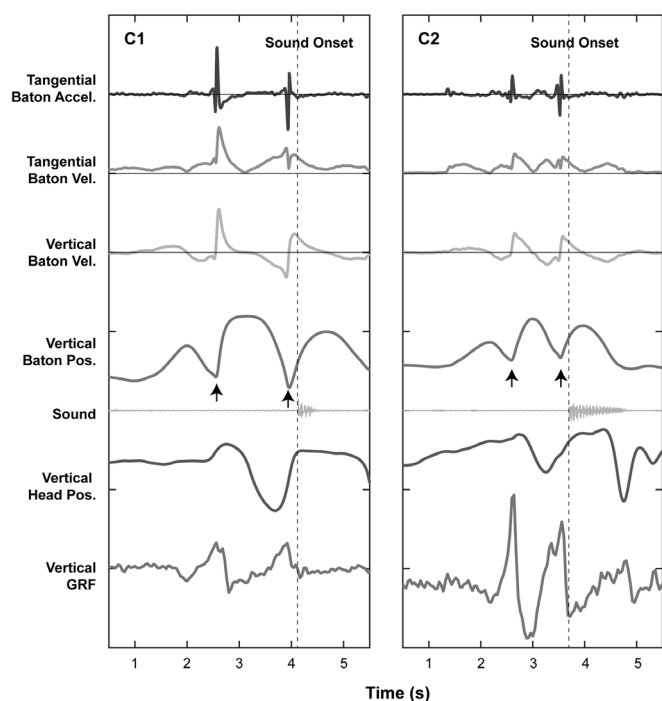


図1 2人の指揮者の動作の例

一方、頭部は指揮棒の動きに先行して下降し、打点よりも先に上昇し始める。頭部の動きの特徴は、前拍の前では下降せず、目標拍の前でのみ下降する点である。これらの事実は、頭部の動きは拍の精密なタイミングよりもむしろ「次の拍で演奏を開始せよ」といった大きな音楽的まとまりでのタイミング情報を示していると考えられる。

ここでの分析と同様に、楽曲を対象とした条件(2)、(3)においても、頭部は演奏の始まりの前に大きく下がり音が始まるより前に上昇していた。条件(2)では、テンポを減速する場面やフェルマータ後に再開する部分で頭の動きが大きかったことから、テンポ変化の局面では頭部の動きが重要である可能性が考えられる。また、条件(3)においても強音部やフェルマータ後の再開部分において頭部の大きな動きがみられた。

最後に、床反力の垂直方向成分は指揮棒の動きとほぼ同期し、その極大点は指揮棒の最下点とほぼ一致している。しかし、床反力は、打点に向かってゆっくり増加したあと、打点付近で急激に減少するという特有の鋸歯状パターンを示していることから、床反力の変化が指揮棒や腕の動きそのものを反映しているわけではないことが推測される。床反力の増加は床を蹴る力の増大もしくは重心の上昇を反映していることを考えると、床反力の振舞いはむしろ拍に向かって身体を持ち上げた（伸び上がった）のち、拍でその力が抜け落下していることを示している。頭の動きと異なり、床反力変化は目標拍、前拍に共通してみられ、その振幅は目標拍よりも前拍の方が大きいことから、床反力の振る舞いは指揮棒の動きと類似している。このことは、指揮棒に加えて指揮者の全身運動の視覚情報もまた奏者に演奏タイミングを伝える手がかりとなっていることを示唆する。また、指揮棒と同様に、床反力が目標拍よりも前拍で大きな変化をすることは、「この次の拍で音を出してほしい」というメッセージを伝えている可能性を示している。

### 3.2. 特徴点の時間関係

図2は同一条件における指揮棒先端の鉛直方向運動の相変化を示したもので、横軸は鉛直方向位置、縦軸は鉛直方向速度を表す。この図は演奏音の立ち上がり時刻を基準として、その1.5秒前から0.1秒後までの軌道を10試行分重ねて描画したものである。

この図からもいくつかの事実が読み取れる。第一に、軌道の概形は試行間で共通している一方、打点の高さは試行ごとに大きく変動していること、また、同一試行内でも目標拍と前拍の打点の高さは等しくないことである。試行ごとに打点が高さを変動していても奏者が正しく応答できたという事実は、打点の絶対的な高さは時間判断において重要ではないことを示している。

第二に、軌道が上方に大きくふくらんでおり（先に指摘したように）下降時よりも上行時の方が指揮棒の動きが速いことである。第三に、図中の矢印で示したように、目標拍の打点に向かって下降する過程で、相図上の軌道が下方に明確に向きを変える点があることである。これは指揮棒先端が下降する途中で急に加速することを意味している。この加速点は空間的には最下点から 1/4～1/3 付近にあり、時間的には打点から 150 ms 程度、演奏音から 300 ms 程度前である（図 3 の矢印③）。ヒトの視覚刺激に対する単純反応時間課題の反応時間が 150-300 ms 程度であることを考えると、この急加速点は奏者に演奏タイミングを指示する直接的な手がかりとなる可能性が考えられる。

また、図 3 をみると、目標拍と前拍に対応する減速最大点（図中矢印①と④）の中央手前に加速度が階段状に変化する瞬間がある（矢印②）があることがわかる。この加速度急変点②は、前拍の最大点減速点①と目標拍前の加速度急増点③のほぼ中央にあることから、先に述べたように、加速度急増点③が奏者に演奏タイミングを伝えるキュー信号であると仮定すると、頭頂店①と②の時間間隔を繰り返した時点でキュー信号③がくることが予想できることになる。すなわち、加速度急増点は次の拍が来るタイミングを予測する手がかりとして機能する可能性が考えられる。

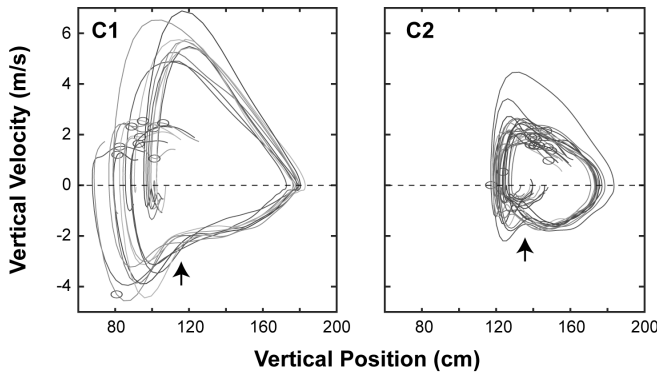


図 2 指揮棒の上下運動の相図

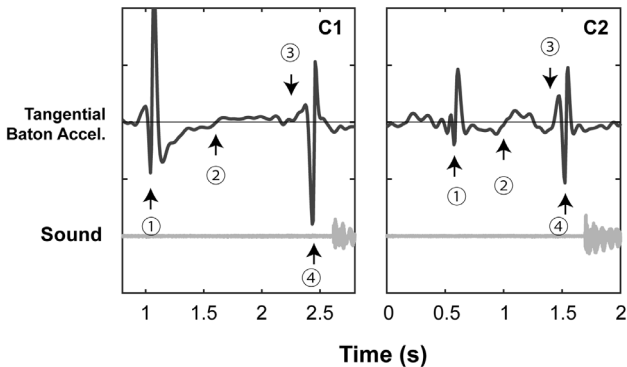


図 3 接線方向加速度の変化

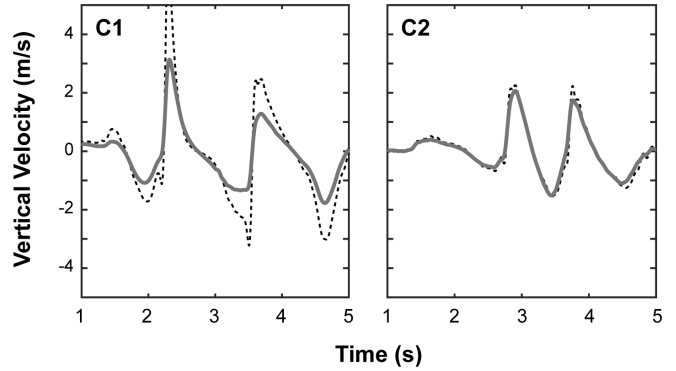


図 4 指揮棒の先端と根元の関係

### 3.3. 指揮棒先端と根元の関係

演奏指揮では、指揮者が指揮棒をもつ場合ともたない場合がある。指揮棒は指揮表現を強調して伝えるための道具であると考えられるが、ここでは、指揮棒先端と、指揮棒をもつ手元の動きを反映した指揮棒の根元の運動の関係性を分析した。

図 4 は指揮棒の先端と根元の上下方向速度の例を示したものである。図中の実線が根元、点線が先端の速度である。この図からわかるように、指揮棒先端速度は根元に比べて振幅が大きく細かな変動がみられるものの、両者の動きは時間的にはほぼ同期している（データは示さないが、接線方向速度についても同様であった）。先端速度が大きい箇所では、先端の動きが根元の動きに遅れる場合も見られたが、これは「ムチ」の効果のためと考えられる。このような細かな違いを除けば、両者の動きはほぼ同期しており、指揮棒の動きは指揮者の手の動きとほぼ同一と考えてよいことになる。

### 3.4. 音量や表現方法による違い

単一音条件(1)において音量を  $f, p$  に設定した条件では、本稿ではデータは示さないが、いずれの指揮者も基本的な速度パターンは維持しつつ、音量に応じてその速度変化の振幅を相対的に変化させていた。また、表 1 に示すように、床反力鉛直方向成分の大きさも音量を反映して変化していたことから、指揮棒の動きだけでなく、身体としての上下運動も音量に応じて変化していたといえる。

次に、スタカートおよびレガートの表情をつけて指揮をしたときの結果について説明する。図 5 は指揮者 2 の試行例である。指揮者間の違いはあるものの、両条件の大きな違いは指揮棒の速度変化にある。スタカートの条件では、指揮棒先端速度の振幅、特に打点後に指揮棒が上行するときの速度が大きい。これに加えて、目標拍後の最高点が前拍後の最高点と同程度の高さに達する点は特徴的である。このような発音後の急激な指揮棒の上昇は「跳ね上がる」表情を表しているものと考えられる。

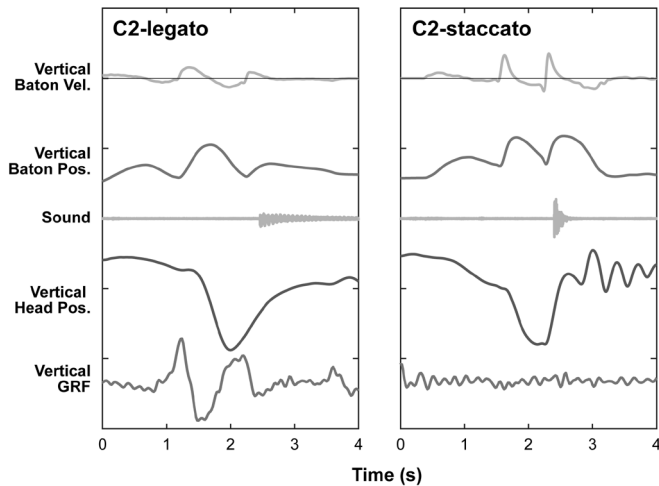


図5 スタカート，レガート指示での結果

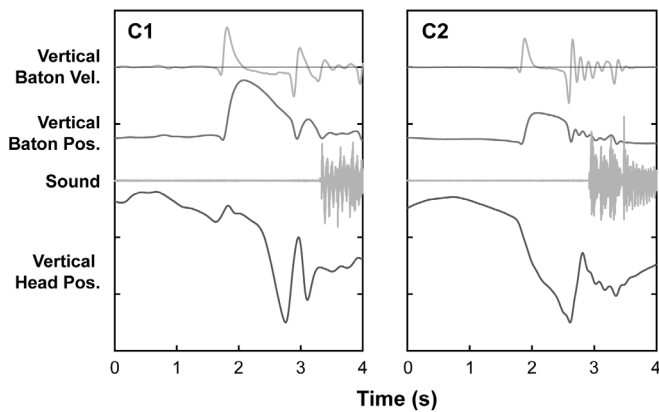


図6 Beethoven 交響曲第5番の冒頭部

表1 床反力鉛直成分の変動幅 (単位: N)

Conductor	1	2
<i>p</i>	3.6	13.9
<i>mf</i>	6.0	21.9
<i>f</i>	33.1	52.7
Beethoven	69.0	173.6

その他の点では、指揮者ごとに異なる特性も見られた。その中で興味深い点は、床反力の変動が、指揮者1ではスタカート条件の方が大きかったのに対し、指揮者2ではレガート条件の方が大きかったことである。このような違いが見られた原因は、一口にスタカート、レガートといってもそれによって表現する内容に幅があることにありと考える。あくまで推測にすぎないが、指揮者1は「強いスタカート」と「優しいレガート」を想定していたのに対し、指揮者2は「軽いスタカート」と「重いレガート」を想定してのではないだろうか。床反力の変動が指揮者の表現意図を読み取る手がかりとなることを示す結果として興味深い。

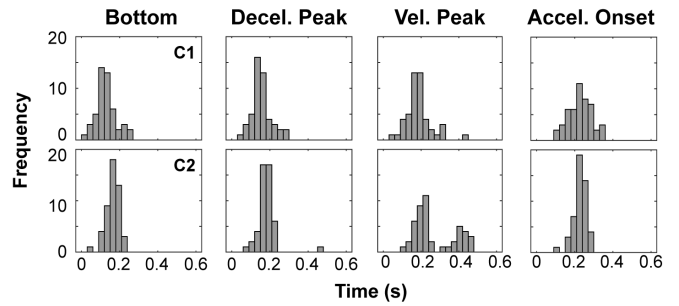


図7 拍周辺の特徴点と演奏音の時間差の分布

表2 特徴点と発音の時間差 (単位: ms)

Conductor	1	2
①最下点	130 (51)	164 (33)
②最大減速点	156 (51)	183 (55)
③最大速度点	196 (92)	277 (110)
④加速度急増点	239 (101)	227 (33)

### 3.5. ベートーヴェン交響曲第5番の場合

図6は、条件(4)における、指揮棒の動きと音の時間的關係性を表したものである。この曲は、冒頭が休符で始まり、最初の音が指揮棒の示す拍と一致しないところに特徴がある。

この図を見るとわかるように、2人の指揮者の指揮棒の動きは酷似している。この作品では静寂の中で突然大きな音で音楽が始まることから、曲が始まる前の指揮動作を小さくする必要があると考えられるが、実際、条件(1)と異なり、前拍の前に指揮棒の動きがほとんどない。しかし、前拍では小さいながらも下向きの動きがあり、その後の大きな上向き運動により、前拍のタイミングを明確に伝えていることが読み取れる。なお、この条件では床反力の変動幅は極めて大きかった。参考のため、発音から1秒前までの区間の床反力の振れ幅(最大値-最小値)の試行間平均をまとめたものが表1である。音量や表現に応じて身体の上下動が大きく変化する様子が読み取れる。

### 3.6. 種々の特徴点の時間関係

以上では、個々の試行に着目してデータを微視的に観察してきた。以下では、これまで議論してきた特徴点間の時間的關係性について統計的に検討する。

図7は、目標拍直前の種々の特徴点と音の立ち上がり時刻との時間差のヒストグラムであり、表2はその平均値と標準偏差をまとめたものである。ここに示したデータは、音量や表情付けが異なる条件のデータをすべてプールしたものである。これらの結果からわかるように、先行研究で visual beat を定めると指摘されている①指揮棒先端の最下点、②接線方向最大減速点、③下方向最大速度点の三つの特徴点と音の立ち上がり

との時間差は、平均値は異なるものの分布の広がりほぼ同じで、音量や表現条件による違いも明確ではないことから、いずれも演奏開始と結びついていると考えられる。ただし、③下方向最大速度点は、指揮者 2 の分布に二つの山があることや時間差の標準偏差も大きいことから、必ずしも演奏開始と結びついていない可能性も考えられる。

一方、先に指摘した④下方向加速度急増点は時間差の平均値はさらに大きくなるものの分布の広がり同程度である。ここにあげた特徴点の中で④は最も早く生じることから、演奏者がこの特徴点を検出できるのであれば、拍の予告信号として有用である。さらに、この特徴点は二人の指揮者のあいだで演奏開始までの時間差の違いが最も小さい（すなわち、奏者が指揮者によらずに同じように応答している）ことも興味深い点である。本実験は被験者数、データ数ともに少なく現段階ではあくまで推測にすぎないが、この結果は、奏者が演奏動作を開始する手がかりとして加速度急増点が有力な候補であることを示唆している。

さて、以上で述べた特徴点はいずれも奏者が最終的に演奏動作を開始する手がかりとなるものであるが、演奏者が演奏開始を準備するには、その最終的な手がかりがいつ来るかを予測するための手がかりも有用であり、本稿で繰り返し述べているように、それは前拍から目標拍に至る過程の軌道にあると考えられる。ここでは、その過程での特徴点として①最高点、②加速度急変点の二つを取り上げる。

図 8 は、前拍の打点からこれら二つの特徴点までの時間と、これら二つの特徴点から目標拍の打点までの時間の分布を示したものである。これらの分布を比較すると、②加速度急変点は①最高点よりも 100-200 ms 程度後ろにあるもの、いずれの特徴点についても後者は前者よりも若干長いことがわかる。表 3 は、前拍打点からこれら中間特徴点までの時間に対する、中間特徴点から目標拍打点・加速度急増点までの時間の比をまとめたものである。この表からわかるように、比は概ね 1 から 1.5 の範囲の値をとることから、演奏者が前者の時間から後者の時間を予測して演奏開始の手がかり（例えば、加速度急増点）を待ち受けることは十分に可能であると考えられる。

表 3 特徴点間隔の比

Conductor	1	2
打点⇒最高点⇒打点	1.69(0.49)	1.42(0.48)
打点⇒急変点⇒打点	1.47(0.35)	1.08(0.68)
打点⇒最高点⇒急増点	1.51(0.50)	1.26(0.42)
打点⇒急変点⇒急増点	1.28(0.39)	0.94(0.61)

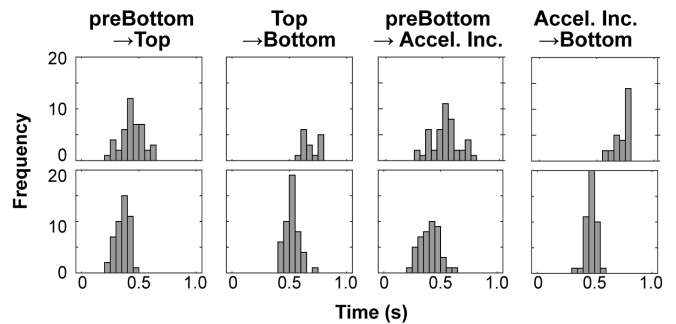


図 8 中間特徴点と打点の時間差の分布

#### 4. むすび

本研究では、演奏指揮における時間情報伝達メカニズムを明らかにすることを目的として 2 名の指揮者の指揮動作を解析した。また、その結果に基づき、奏者が指揮者の動作から演奏タイミングを読み取るメカニズムとして加速度変化の特徴点に基づく仮説を提案した。

本稿で提案した仮説は、現段階ではあくまで推測に基づくものでしかない。この仮説の妥当性を明らかにするには、条件(2)(3)も含めより広範囲の指揮動作について指揮棒の軌道を解析するとともに、これらの特徴点時刻を系統的に操作した指揮動作を生成し、その動作を見た奏者の演奏タイミングを調べることにより、分析論・構成論の双方向からさらに検討を進める必要がある。

本研究の一部は、科学研究費補助金挑戦的研究（萌芽）18K19823 の補助を受けた。

#### 文 献

[1] Repp, B. H. (2005). Sensorimotor synchronization: A review of the tapping literature. *Psychonomic Bulletin & Review*, 12(6), 969–992.

[2] Repp, B. H. & Su, Y.-H. (2013). Sensorimotor synchronization: A review of recent research (2006–2012). *Psychonomic Bulletin & Review*, 20(3), 403–452.

[3] Varlet, M., Coey, C. A., Schmidt, R., Marin, L., Bardy, B. G. & Richardson, M. J. (2014). Influence of stimulus velocity profile on rhythmic visuomotor coordination. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 40(5), 1849.

[4] Colley, I. D., Varlet, M., MacRitchie, J. & Keller, P. E. (2018). The influence of visual cues on temporal anticipation and movement synchronization with musical sequences. *Acta Psychologica*, 191, 190–200.

[5] 斎藤秀雄 (2010). 改訂版指揮法教程, 音楽之友社.

[6] Luck, G. & Sloboda, J. (2008). Exploring the Spatio-Temporal Properties of Simple Conducting Gestures using a Synchronization Task. *Music Perception*, 25(3), 225–239.

[7] Luck, G. & Toiviainen, P. (2006). Ensemble Musicians' Synchronization With Conductors' Gestures: An Automated Feature-Extraction Analysis. *Music Perception*, 24(2), 189–200.