

# ピアノ演奏MIDIデータに基づいた フレーズ・アーチングの分析

高橋 舞<sup>1,a)</sup> 小林 未知数<sup>2</sup> 大向 一輝<sup>3</sup> 中村 栄太<sup>4</sup>

**概要：**ニール・トッドが提唱した、フレーズを開始するときにはより速く・より強く、終える時にはより遅く・より弱くなる「フレーズ・アーチング」という演奏スタイルは、西洋芸術音楽研究において1945年以降増加したことが指摘されている。これまで演奏がフレーズ・アーチングを実施しているかどうかは、演奏作品の構造に則ってトリミングした部分を対象に分析されてきた。本研究では、作品をトリミングせずに、定量的に分析する手法を提案する。また10代から70代の演奏者による同じ作品の演奏データを分析することで、演奏者の年代によって演奏スタイルに違いがあるのか分析した。

## Phrase arching analysis based on MIDI data for piano performance

### 1. はじめに

心理学者のニール・トッドはピアノの演奏表現の1つとして、より速くかつ強くなるように開始し、より遅くかつ弱くなるように終息するようなフレーズ構造が一般的に存在し、拍を単位とした時間スケールにおいて、一定の加速度で速度や音量が増加・減少する傾向にあることを示した[1]。

音楽学者のニコラス・クックは、トッドが提唱したフレーズに対するこのピアノ演奏表現の一つの傾向を、「フレーズ・アーチング (phrase arching)」と名付け、演奏スタイルは歴史的に変化することを指摘した上で、フレーズ・アーチングを実施する演奏は1930年代から存在していた一方、1945年以降に増加すると述べている。クックは8小節毎のシンメトリックな構造を持つショパンのマズルカ2作品を対象に、8小節フレーズの4つ分である32小節をトリミングして分析している。具体的にはマズルカ 嬰ハ短調 Op.63-3 の4種類の録音から第1-32小節と、マズルカ イ

短調 Op.17-4 の7種類の録音から第5-36小節を2小節毎、4小節毎、8小節毎、16小節毎に区分し、音量と速度の相関を平均することで、複数の時間スケールにおいてどのようにフレーズ・アーチングが機能しているかを示した[2]。

フレーズ・アーチングという演奏スタイルが、2020年代の日本において普及しているのか分析した研究もある[3]。2023年に開催されたブルグミュラーコンクール銀座花椿地区大会において、コンクール参加者が演奏したMIDIデータから速度変化と音量変化を分析し、多くの出場者がフレーズ・アーチングを実施しており、かつ審査に合格した出場者は実施率が高いことが明らかになった。

ブルグミュラーコンクールの分析では、クックの分析と同様に、ブルグミュラーの2作品からそれぞれ4小節を抜き出して分析している。つまりフレーズ・アーチングの実施に関するこれまでの分析は、演奏ごとの個別かつ局所的な分析であり、フレーズ・アーチングを大域的に実施しているかどうかについて定量的な分析はされてこなかった。そこで本研究では、作品をトリミングせずに作品の最初から最後までを対象に分析し、フレーズ・アーチングを実施しているかどうかを定量的に分析する方法を提案する。

一方で西洋芸術音楽研究において、演奏スタイルは普遍的なものではなく、年代によって変化することが指摘されてきた[2], [4], [5], [6], [7], [8]。録音の拍間隔偏差を比較することによって、演奏スタイルの年代ごとの変化を定量的に分析した研究もある[9]。クックはフレーズ・アーチン

<sup>1</sup> 京都大学  
Kyoto University, Sakyo, Kyoto 606-8501, Japan

<sup>2</sup> 高知工科大学  
Kochi University of Technology, Kami, Kochi 782-8502, Japan

<sup>3</sup> 東京大学  
University of Tokyo, Bunkyo, Tokyo 113-8654, Japan

<sup>4</sup> 九州大学  
Kyushu University, Fukuoka, Fukuoka 819-0395, Japan

<sup>a)</sup> takahashi.mai.76e@st.kyoto-u.ac.jp

グが普遍的な演奏スタイルではなく、録音年代によって変化することを指摘しており、本研究では10代から70代の演奏者の同作品の演奏データを分析することで、演奏者の年代によって<sup>\*1</sup>演奏スタイルに違いがあるのか併せて分析する。

## 2. 分析楽曲，データの入手方法および演奏者

### 2.1 分析楽曲

本研究では、ショパンのワルツ 嬰ハ短調 Op.64-2を対象に分析する。このワルツはA-B-C-B-A-Bからなる3部形式で、冒頭にはtempo giusto（正しい速さで）との記載があり、più lento（速度を遅めて）とある中間部のCは異名同音である変ニ長調で書かれている。全体で192小節の作品で、8小節ごとのフレーズが24回あり、前半のA-B部分で8回、中間部Cで4回、後半のB-A-B部分12回からなる。

### 2.2 データの入手方法

2024年7月から2025年2月までの間にピアニスト45人に、ヤマハ銀座ビル別館のスタジオにて、YAMAHAのDisklavierが搭載されたフルコンサートグランドピアノCFXで、ショパンのワルツ 嬰ハ短調 Op.64-2を演奏してもらった。ピアニスト一人あたり1時間の時間内にショパンのワルツのほか、バッハの《平均律クラヴィーア曲集》第1巻第1番ハ長調BWV846より前奏曲の2曲を演奏してもらった<sup>\*2</sup>。演奏者は、時間内で満足がいくまで複数回演奏することが可能で、演奏者によって1度のテイクで終了した場合もあれば、10回テイクを取った演奏者もいた。楽譜のエディションは指定せず、演奏者が普段使用しているエディションを用いて演奏してもらった。

### 2.3 演奏者

研究協力者である演奏者は、18歳まで主に日本でピアノ教育を受けていることを条件に、最初は筆頭著者の知り合いを中心に募集した。さらなる条件として、30代以上では音楽大学またはそれに準じる大学にて演奏指導の教職に就き、かつ活発な演奏活動をしていること、20代以下では有名国際コンクールまたは国内コンクールにて優勝あるいは入賞し、活発な演奏活動をしていることとした。また研究協力者にも、条件に該当する知り合いを紹介してもらった。演奏者45人の年代は、10代が5人、20代が13人、30代が12人、40代が7人、50代が4人、60代が2人、70代が2人である。30代以上の演奏者は27人中26人が海外留学を経験している。

<sup>\*1</sup> クックは録音年代だけでなく、演奏者の生年によっても演奏スタイルが変化することを指摘している [2]

<sup>\*2</sup> 本研究では、バッハ作品については分析せず、ショパン作品のみ分析を実施した。

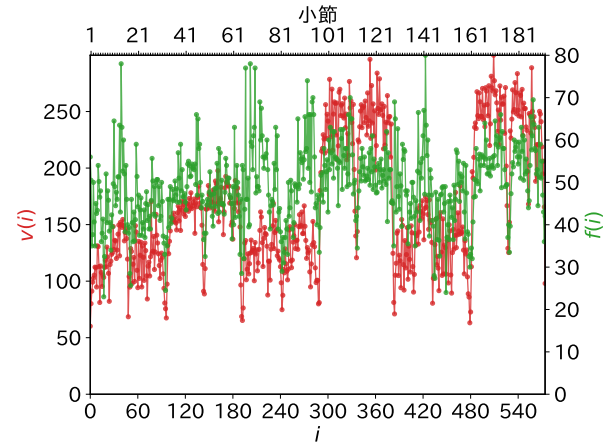


図1  $v(i)$  と  $f(i)$  の例

Fig. 1 Example of  $v(i)$  and  $f(i)$ .

## 3. 分析手法

### 3.1 局所メトロノーム速度と打鍵速度

YAMAHAのDisklavierによって得られた各演奏者ごとの演奏MIDIデータに含まれているピアノの打鍵時刻および打鍵速度から演奏速度と強弱の変化を分析するために、楽譜と演奏MIDIデータを音符単位でマッチングするためのSymbolic Music Alignment Toolを用いる [3], [10]。ただし自動分析は誤りが含まれる可能性があるため、マッチング結果はすべて人手で確認して誤りを修正した。この結果を用いて、楽譜内の各拍  $i$  に対して、対応する演奏音符の打鍵時刻を抽出し、それらの平均を拍時刻  $t(i)$  として求めた。同様に拍  $i$  に対して、対応する演奏音符の打鍵速度の平均値を打鍵速度  $f(i)$  とした。なお、本研究で対象としたショパンのワルツ 嬰ハ短調 Op.64-2は、3/4拍子で4分音符を1拍とし、最後の休符を除いて579拍から構成されている。また打鍵速度はMIDIのフォーマットに従って0から128の値で得られているため、 $f(i)$  も同様に  $0 \leq f(i) \leq 255$  を満たす。

拍  $i$  における局所メトロノーム速度  $v(i)$  は拍時刻  $t(i)$  と  $t(i+1)$  の差を用いて

$$v(i) = \frac{60}{t(i+1) - t(i)} \quad (1)$$

によって求めた。この定義より  $v(i)$  は  $t(i)$  や  $f(i)$  よりも一拍少ないデータとなる。以後、主に  $v(i)$  と  $f(i)$  を用いた分析を行うが、両者の定義域は  $v(i)$  の定義域  $0 \leq i \leq 577 \equiv N$  に揃えておく。すなわち最終拍における  $f(i)$  のデータは解析に用いない。

### 3.2 データのフィルタリング

図1にある演奏者の演奏データから得られた  $v(i)$  と  $f(i)$  を示す。なおグラフは横軸が  $i$  であるが、グラフの上部には  $i$  に対応する小節番号を記載している。この演奏者の

ケースと同様に、どの演奏者の演奏データも  $v(i)$ ,  $f(i)$  ともに変化が激しく、特に数小節をまたいだ変化の特徴を掴むのは困難である。そこで細かな変化を取り除くフィルタリングを行う。今回はシンプルなガウスたたみ込み

$$\begin{aligned}\tilde{v}(i) &= \frac{1}{Z(i)} \sum_{j=0}^N v(j) \exp\left(-\frac{(i-j)^2}{2k^2}\right) \\ \tilde{f}(i) &= \frac{1}{Z(i)} \sum_{j=0}^N f(j) \exp\left(-\frac{(i-j)^2}{2k^2}\right) \\ Z(i) &= \sum_{j=0}^N \exp\left(-\frac{(i-j)^2}{2k^2}\right)\end{aligned}\quad (2)$$

を用いる。ここで  $k$  はフィルタ長であり、これより短いスケールの変化が取り除かれる。なお4章の議論はガウスたたみ込みを用いたものであるが、他に高速フーリエ変換に基づいたローパスフィルタや、データが真値とゆらぎとの和であるとみなし、ベイズ推定に基づいてゆらぎを取り除くカルマンフィルタも行ったが、 $k \geq 6$  と、ある程度のフィルタ長があれば定量的な変化は5%未満となり、定性的な変化は見られなかった。

### 3.3 相関関数に基づくフレーズ・アーチングの分析

本研究ではフレーズ・アーチングを、「徐々に速く、徐々に強く」と「徐々に遅く、徐々に弱く」が数小節にまたがったスケールにおいて同期したようなものであると捉え、メトロノーム速度  $v(i)$  と打鍵速度  $f(i)$  との相関係数

$$R = \frac{\langle \delta v \delta f \rangle}{\sqrt{\langle \delta v^2 \rangle \langle \delta f^2 \rangle}} \quad (3)$$

$$\delta v(i) = v(i) - \langle v \rangle \quad \delta f(i) = f(i) - \langle f \rangle$$

を計算する。ここで任意の量  $A(i)$  に対する  $\langle A \rangle$  は  $A(i)$  の平均

$$\langle A \rangle \equiv \frac{1}{N+1} \sum_{i=0}^N A(i) \quad (4)$$

である。たたみ込みが適用されたメトロノーム速度  $\tilde{v}(i)$  や打鍵速度  $\tilde{f}(i)$  に対する相関係数  $\tilde{R}$  も同様に定義でき、本研究ではこれをフレーズ・アーチングの指標と定める。

相関係数は演奏全体に対して得られるものであるが、局所的な相関係数を考えることもできる。 $j$  番目の拍の前後  $l$  拍の間隔における局所平均

$$\begin{aligned}\langle A \rangle_l^j &= \frac{1}{(j+l) - (j-l) + 1} \sum_{i=j-l}^{j+l} A(i) \\ \overline{j+l} &\equiv \min(N, j+l) \quad \underline{j-l} \equiv \max(0, j-l)\end{aligned}\quad (5)$$

を考える。ここで  $\underline{j-l}$  は  $j-l$  が曲の開始拍である0を超えた場合に0に設定するというものであり、 $\overline{j+l}$  は同様に  $j+l$  が曲の終了拍である  $N$  を超えた場合に  $N$  に設定する

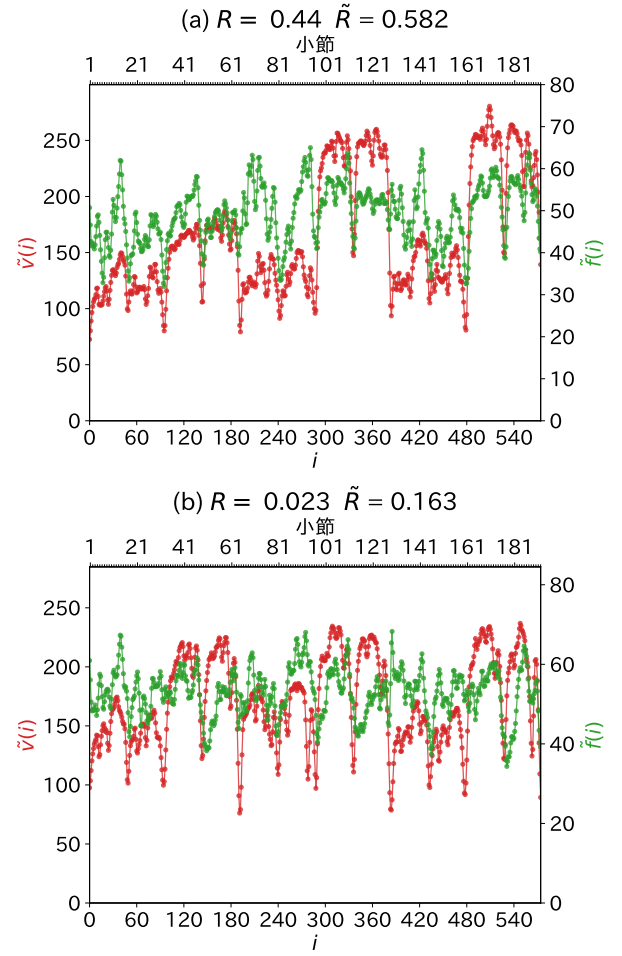


図2 ガウスたたみ込み適用後の  $\tilde{v}(i)$  と  $\tilde{f}(i)$

Fig. 2 Filtered  $\tilde{v}(i)$  and  $\tilde{f}(i)$ .

というものである。この局所平均を用いて局所相関係数

$$R_l(j) = \frac{\langle \delta v \delta f \rangle_l^j}{\sqrt{\langle \delta v^2 \rangle_l^j \langle \delta f^2 \rangle_l^j}} \quad (6)$$

を定義する。たたみ込みが適用された局所相関係数  $\tilde{R}_l(j)$  も同様に定義することができ、これを局所的なフレーズ・アーチングの指標とする。

## 4. 結果

図2(a)は図1の  $v(i)$  と  $f(i)$  にガウスたたみ込み(2)を適用した結果である。フィルタ長は他のフィルタとの差がほとんどなくなる  $k=6$ 、つまり2小節分であり、それよりも小さなスケールでの変化を取り除いたことになる。たたみ込みを適用した結果、速度変化および強弱変化が明確となり、演奏者の演奏意図が浮き彫りになったといえる。図2(a)の  $\tilde{v}(i)$  と  $\tilde{f}(i)$  に着目すると、波形の山および谷の形状およびそれらの位置はよく一致しており、演奏者が意識しているかどうかという問題はさておき、結果的にフレーズ・アーチングが実施されている演奏であるといえる。たたみ込みを適用する前と後の相関係数を比較する

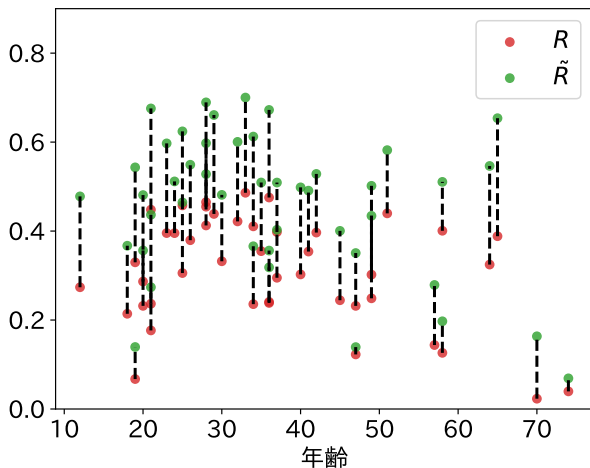


図 3  $R$  および  $\tilde{R}$  と演奏者の年齢の関係

Fig. 3 Relation between  $R$  or  $\tilde{R}$  and performer's age.

と  $R = 0.440$  および  $\tilde{R} = 0.582$  となり，細かな変化を取り除くことによって，メトロノーム速度と打鍵速度の相関が強くなったことが分かる．

図 2(a) は全ての演奏者の中でも比較的相関係数の大きなものである一方，図 2(b) はたたみ込みを適用した後も相関係数は小さい．実際  $\tilde{v}(i)$  と  $\tilde{f}(i)$  に着目すると，図 2(a) ほどの類似は見られないことが分かる．

図 3 は全ての演奏者における  $R$ ,  $\tilde{R}$  のデータである．横軸は演奏者の年齢を示し，同一の演奏者の演奏は点線で結んである． $R$  と比較すると  $\tilde{R}$  は全体的に大きくなっており，ノイズのような細かな変化を取り除くことで基本的に相関係数が大きくなることが分かる．年代ごとに着目すると，20 代後半および 30 代の演奏者はどれも  $\tilde{R}$  が大きい傾向にあり，フレーズ・アーチングをほぼ全員が実施していると思われる．40 代から 60 代は  $\tilde{R}$  の大きなものから小さなものまで幅広く存在しており，演奏者によって作品の解釈が多様で幅広いことが考えられる．同様に 10 代の演奏者も  $\tilde{R}$  の大きなものから小さなものまでであるが，10 代は一般的に指導者の影響を強く受け，また本研究における 10 代の演奏協力者は全員が 40 代以上の指導者に師事していたため，このような結果になったと考えられる．70 代の二人は相関係数が非常に小さく，フレーズ・アーチングとは異なった，速度変化と強弱変化が連動しない演奏スタイルであると考えられる．

相関関数と速度・強弱変化の関係をより詳しく見るために，局所相関関数  $\tilde{R}_l(j)$  に着目する．図 4 は図 2(a) で示された演奏者に対する  $\tilde{R}_l(j)$  の  $j$  依存性である．ここで  $l$  は 8 小節分に相当する  $l = 24$  および 16 小節分に相当する  $l = 48$  を用いている．大部分において  $R_l(j)$  は高い数値を示しているが，ところどころに  $\tilde{R}_l(j)$  の小さな領域が見られ，演奏者がどこで重点的にフレーズ・アーチングを実施しているかが分かる．また  $l = 24$  と  $l = 48$  を比べると，全

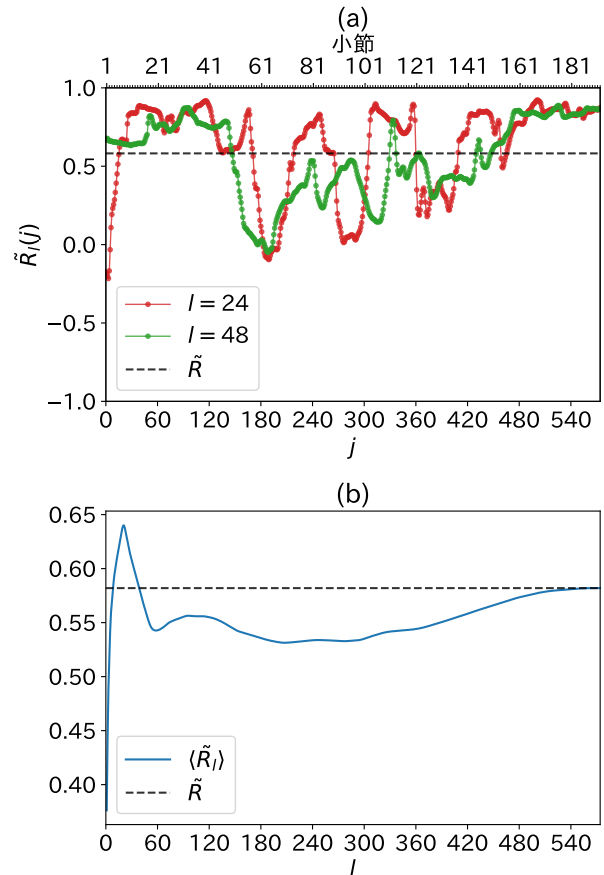


図 4 図 2(a) の演奏者に対する  $\tilde{R}_l(j)$  および  $\langle \tilde{R}_l \rangle$  の  $l$  依存性．

Fig. 4  $\tilde{R}_l(j)$  and the  $l$ -dependence of  $\tilde{R}_l$  for the player shown in Fig. 2(a)

体的に  $l = 24$  の方が高い値を示しており，8 小節単位のフレーズ・アーチングを実施していることが分かる．2.1 節で述べたように，本研究で取り上げたショパンのワルツ 嬰ハ短調 Op.64-2 は 8 小節が 1 つのフレーズの単位となっており，この結果と整合している． $R_l(j)$  の  $l$  依存性をさらに明確にするために， $l$  と  $\tilde{R}_l(j)$  の  $j$  に対する平均値  $\langle \tilde{R}_l \rangle$  との関係を示したのが図 4(b) である． $l = 24$  付近でピークを示しており，8 小節単位でのフレーズ・アーチングの兆候がより鮮明になったといえる．また， $\langle \tilde{R}_l \rangle$  は  $l = 24$  でピークを示して下がった後，再び徐々に大きくなって，図 4(a) の点線で示している  $\tilde{R}$  に近づいてゆく．これは 8 小節の局所的なフレーズ・アーチングだけではなく，作品全体を通して，速度変化と強弱変化が連動していることを示していると考えられる．

一方で図 2(b) で示された演奏者に対する  $\tilde{R}_l(j)$  の  $j$  依存性および  $\langle \tilde{R}_l \rangle$  を示しものが図 5 である． $\langle \tilde{R}_l \rangle$  が  $l = 24$  でピークとなることは図 4 と同じであるが，ピーク値は小さい．図 5(a) の詳細に着目すると，部分的に  $\tilde{R}_l(j)$  の大きなところは存在するが，逆に  $\tilde{R}_l(j)$  の極めて小さなところも存在する．特に 120 小節目から 140 小節目において速度と強弱が逆の相関を持っている．つまり  $l = 24$  で  $\langle \tilde{R}_l \rangle$  ピー



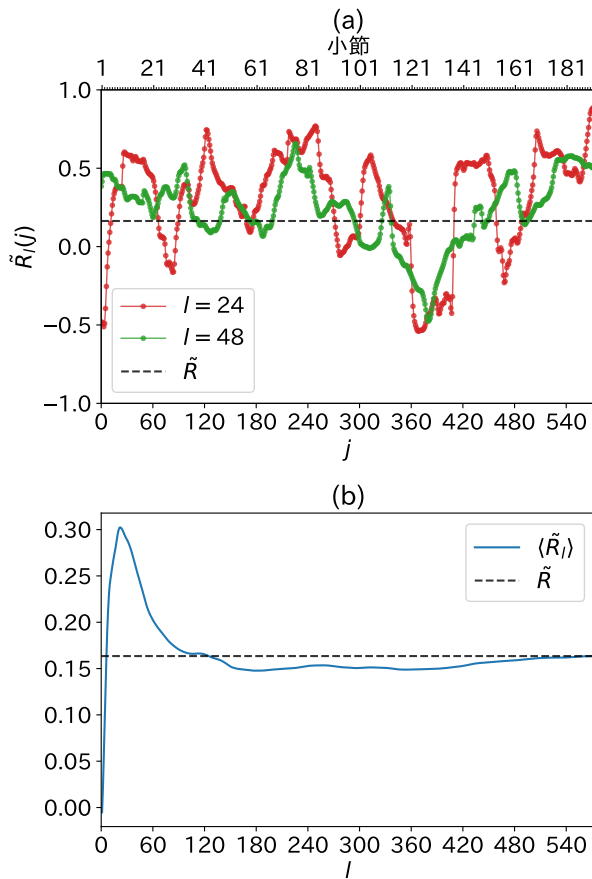


図 5 図 2(b) の演奏者に対する  $\tilde{R}_l(j)$  および  $\langle \tilde{R}_l \rangle$  の  $l$  依存性.  
Fig. 5  $\tilde{R}_l(j)$  and the  $l$ -dependence of  $\tilde{R}_l$  for the player shown in Fig. 2(b)

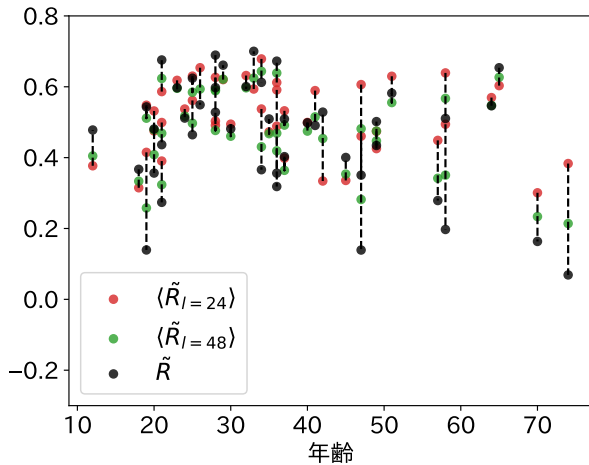


図 6  $\tilde{R}$  および  $\langle \tilde{R}_l \rangle$  と演奏者の年齢の関係  
Fig. 6 Relation between  $\tilde{R}$  or  $\langle \tilde{R}_l \rangle$  and performer's age.

クとなるのは曲の構造上のものであり、基本的に  $\tilde{R}_l(j)$  は 0 に近いが、負になっていることからこの演奏者はフレーズ・アーチングを実施していないと考えられる。また図 4(b) とは異なって、 $\langle \tilde{R}_l \rangle$  がピークとなって下がった後に再び増加傾向にないことから、作品全体を通した速度変化と強弱変化の連動もないことが分かる。

$\tilde{R}$  と  $\langle \tilde{R}_l \rangle$  との関係をもとめたものが図 6 である。 $\langle \tilde{R}_l \rangle$  については  $l = 24$  と  $l = 48$  とし、同一の演奏者の演奏は点線で結んである。 $\tilde{R}$  の小さな演奏は基本的に

$$\langle \tilde{R}_{l=24} \rangle (\text{赤}) > \langle \tilde{R}_{l=48} \rangle (\text{緑}) > \tilde{R} (\text{黒}) \quad (7)$$

となっており、その変化量は大きい。一方で  $\tilde{R}$  の大きな演奏は変化量が小さく、演奏によっては

$$\langle \tilde{R}_{l=24} \rangle (\text{赤}) < \langle \tilde{R}_{l=48} \rangle (\text{緑}) < \tilde{R} (\text{黒}) \quad (8)$$

となるものもある。変化量が小さいということは局所的から大域的にまで速度変化と強弱変化が一致していることを意味しており、局所的に実施しているフレーズ・アーチングが大域的なスケールにまで及んで実施していることを表しているといえる。

## 5. おわりに

本研究では、YAMAHA の Disklavier 用いて演奏された 45 人のショパンのワルツ 嬰ハ短調 Op.64-2 の演奏 MIDI データに対し、トッドによって提唱された、フレーズを開始するときにはより速くかつ強く、終える時にはより遅くかつ弱くなるフレーズ・アーチングの分析を行った。フレーズ・アーチングを、数小節にまたがったスケールにおいて速度と強弱変化が同期したのものであると捉え、メトロノーム速度と打鍵速度との相関係数をフレーズ・アーチングの指標として分析を行った。長いスケールにおける変化を捉えるために、メトロノーム速度と打鍵速度のデータにガウスたたみ込みを適用してデータの細かな変化を取り除き、相関係数を計算した。また、着目する拍の前後の小領域のみの局所相関を計算することによって、演奏者がどの単位、あるいはどこでフレーズ・アーチングを実施しているか、そして曲の最小フレーズ単位である 8 小節単位の局所相関から曲全体の相関係数に向かってどう変化をするのかを見ることによって、演奏者がフレーズ・アーチングを実施しているかどうかを知ることができることを示した。今回の結果を演奏者の年代ごとにまとめたところ、20 代後半および 30 代の演奏者はフレーズ・アーチングをほぼ実施しているのに対し、40 代から 60 代は実施しているケースからあまり実施していないケースまで幅広く存在しており、演奏者によって作品の解釈が多様で幅広いことが考えられる。同様に 10 代の演奏者に対してもフレーズ・アーチングの実施度合いには幅広さがあるが、10 代は一般的に指導者の影響を強く受け、また本研究における 10 代の演奏協力者は全員が 40 代以上の指導者に師事していたため、このような結果になったと考えられる。70 代の二人はフレーズ・アーチングとは異なった、速度変化と強弱変化が連動しない演奏スタイルであると考えられる。

本研究が対象としたショパンのワルツは、数多くある西洋芸術音楽におけるピアノ作品の中でも 8 小節単位のフ

レーズからなる構造が比較的分かりやすく、かつ速度変化や強弱変化に対して演奏者の自由度が高いものであったが、逆に 2.2 節で触れたバッハの《平均律クラヴィーア曲集》第 1 巻 第 1 番 ハ長調 BWV846 のように、演奏者の自由度が小さい作品に対して、この手法は全く異なる結果となる可能性がある。今回提案する相関係数を用いた分析がどの程度の汎用性を有しているのかは未知数である。西洋芸術音楽のピアノ作品において広く適用できる分析を提案することは、今後の課題である。

**謝辞** 本研究は JSPS 科研費 JP24KJ1320, JP24K15959, JP19KK0066, JP20K03765, JP24K00593, 23K24917 および JST FOREST JPMJPR226X の助成を受けて行われたものである。

## 参考文献

- [1] McAngus Todd, N. P.: The dynamics of dynamics: A model of musical expression, *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 91, No. 6, pp. 3540–3550 (online), DOI: 10.1121/1.402843 (1992).
- [2] Cook, N.: *Beyond the Score: Music as Performance*, Oxford University Press (2014).
- [3] 高橋舞, 小林未知数, 中村栄太, 大向一輝: MIDI ピアノを用いたピアノコンクールの合格者と不合格者の演奏における拍間隔変化の比較, 研究報告人文科学とコンピュータ (CH), Vol. 2024-CH-134, pp. 1–5 (2024).
- [4] Philip, R.: *Early Recordings and Musical Style: Changing Tastes in Instrumental Performance, 1900 – 1950*, Cambridge University Press (1992).
- [5] Philip, R.: *Performing Music in the Age of Recording*, Yale University Press (2004).
- [6] 渡辺裕: 西洋音楽演奏史論序説: ベートーヴェンピアノ・ソナタの演奏史研究, 春秋社 (2001).
- [7] Peres da Costa, N.: *Off the Record: Performing Practices in Romantic Piano Playing*, Oxford University Press (2012).
- [8] ブルース・ヘインズ: 古楽の終焉: HIP〈歴史的知識にもとづく演奏〉とはなにか, アルテスパブリッシング (2022).
- [9] 高橋舞: バッハ鍵盤作品における演奏の継承と変遷 — 楽譜資料および録音資料に基づく演奏研究 —, 博士学位論文, 東京大学大学院人文社会系研究科 (2023).
- [10] Kato, N., Nakamura, E., Mine, K., Doeda, O. and Yamada, M.: Computational Analysis of Audio Recordings of Piano Performance for Automatic Evaluation, *Responsive and Sustainable Educational Futures* (Viberg, O., Jivet, I., Muñoz-Merino, P., Perifanou, M. and Papathoma, T., eds.), Cham, Springer Nature Switzerland, pp. 586–592 (2023).