

# 弦楽四重奏での演奏意識の違いにおけるアンサンブル精度の解析

2021 年度 明星大学大学院  
情報学研究科情報学専攻 横山研究室  
20MJ-002 石垣 優弥

2022 年 1 月 18 日

## 概要

本研究は、弦楽四重奏での演奏意識の違いにおける各パートの音量やタイミング、ピッチ、並びに音色の解析を行った。音量に関しては、チェロの音量を意識して演奏した際に、チェロとの音量差が大きくなる傾向にあり、タイミングに関しては、ずれを意識して演奏を行うことで改善がみられた。一方で、ピッチと音色に関しては、演奏意識の違いによる影響はみられなかった。

# 目次

第 1 章	序論	1
1.1	背景	1
1.2	目的	1
1.3	先行研究	1
第 2 章	アンサンブルについて	3
2.1	アンサンブル	3
2.2	弦楽四重奏	3
第 3 章	音響特徴量	4
3.1	音響特徴量	4
3.2	音響特徴量の例	4
3.3	本研究における音響特徴量について	8
第 4 章	検証実験	9
4.1	実験 1 回目	9
4.2	実験内容	9
4.3	結果	11
4.4	発音タイミングについて	11
4.5	各フレーズの音量について	13
4.6	実験 1 回目まとめ	15
4.7	実験 2 回目	15
4.8	結果	17
4.9	発音タイミングについて	17
4.10	各フレーズの音量について	19
4.11	各フレーズのピッチについて	21
4.12	音色について	23
4.13	実験 2 回目まとめ	53
第 5 章	結論	54
5.1	結論	54
5.2	課題	54
参考文献		55

# 第 1 章

## 序論

### 1.1 背景

クラシック音楽のアンサンブル演奏において、その音の良し悪しを決める要素として、各パートの音量バランス、タイミングのずれ、ピッチ、音色、音の立ち上がり、音の終わりの形などが挙げられる。和音の根音の音量を大きくするといった音量バランスや、またカデンツのような音楽的構造は、演奏者にとってある程度共通の認識となっている。しかし、これらを実際に数値的に解析している研究は少ない。また、音色に関しては、単一の楽器を対象にし、スペクトル解析を行うなどの数値的な解析を行った研究は数多く存在するが、アンサンブルの音色に着目した研究は少ない。

### 1.2 目的

本研究ではクラシック音楽のジャンルにおける基本的な合奏形態である弦楽四重奏を対象にする。アンサンブルを構成する各楽器の音量バランスやタイミングのずれ、ピッチ、音響特徴量を用いた音色の解析を、特に何も指示を出さない状態での演奏とそれぞれの要素を意識した演奏とを比較検証を行う。そして、アンサンブルの精度の意識の違いを確認する。

### 1.3 先行研究

アンサンブルを対象にして数値的な解析を行った研究例として、宮宇地ら [1] や堀内ら [2] が挙げられる。前者は、ペア内での経験の長さが違う熟達者 1 ペアの二重奏の合奏練習を収録し、同時に眼球運動・呼吸という整理計測データと発話という言語データを獲得することで、合奏という協調活動プロセスの分析を行ったものである。後者は、人間二人の演奏を収録、分析することにより、人間がリアルタイムで協調して演奏を行う動作について考察したものであり、リハーサル前後の演奏における時間的なタイミングのずれやテンポの変化について分析を行った。本研究では四人の演奏によるタイミングのずれの変化を分析した。アンサンブルのタイミングのずれに関する研究はいくつかあり、長尾ら [3] によると、音の遅延が 20 ms 以上で 12 名の被験者のうち半数以上が遅延を認知しており、また、遅延時間の増加に伴いアンサンブル演奏のテンポが遅くなり、遅延 40 ms 以上でアンサンブル演奏の同期性が大きく損なわれることを示唆している。他では Rasch[4] によるとリコーダーや弦楽などの 3 人のプロの合奏における演奏者間の音のずれは 30 から 50 ms であり、この程度の大きさのずれでは、主観的には同時に鳴っていると述べている。また、Shaffer[5]、Keller and Appel[6]、Kawase[7] もピアノデュオにおいて 30 から 50 ms のずれ

を観察している。アンサンブルの音量バランスに関する研究としては、森松 [8] による電子楽器を含むアンサンブルの音量バランスについて分析を行ったものがある。本研究では、各パートの dB 値を計算し、分析を行う。

## 第2章

# アンサンブルについて

### 2.1 アンサンブル

アンサンブルとは、フランス語で「一緒に」、「ともに」、「つれだって」という意味があり、オペラや演劇での合唱(合奏)団数人が加わることを指していた。現在では「調和のとれた組み合わせ」の意味にも使われ、音楽では、2声部以上の合奏や重奏のことである。また、良いアンサンブルとは、お互いの演奏、および演奏認識が揃っていることであり、例えば、音量バランス、タイミングのずれなどが挙げられる。音量バランスに関しては、三和音の場合一番下の音(根音)の音量を大きく、第5音をやや強く、第3音を弱く弾くといった共通認識が演奏者間であり、良いアンサンブルであればこの条件を満たしていると考えられる。このような条件を複数満たしていくことで、あるアンサンブルは良いアンサンブルであると判断可能となる。

### 2.2 弦楽四重奏

シルヴェット・ミリヨ [9] によると、弦楽四重奏とは、二つのヴァイオリン、ヴィオラ、チェロという四つの弦楽器によるアンサンブルのことであり、弦楽四重奏曲とは、この四重奏による編成のために作曲された作品を指す。弦楽四重奏の起源としてはイタリアの作曲家アレサンドロ・スカルラッチェの書いた「2つのヴァイオリン、ヴィオレッタとチェロのためのソナタ」と言われており、その後この形式をまねた曲作りがヨーロッパ中に広がり、ハイドンによりさらに洗練されていった。ハイドンが作曲した弦楽四重奏曲の数は68曲であり、のちに続くモーツァルトは26曲、ベートーヴェンは16曲と偉大な作曲家たちの創作により弦楽四重奏はクラシック音楽の王道であると見なされるようになった。また、弦楽四重奏はオーケストラの規模を徐々に縮小していき、最後に残る形と考えられ、オーケストラのような表現力があるとされている。

## 第3章

# 音響特徴量

### 3.1 音響特徴量

本研究では、アンサンブルの音色の解析に音響特徴量を用いた。音響特徴量とは、音の物理的な特徴を数値的に表したものである。山田ら [10] によれば、近年の音楽音響分野の発展に伴い、音楽音響信号の分析や合成に関する技術が発展し、その中でコンテンツベースの分析手法が広まり、従来は人間がハンドトラベリングによって与えていたタグ情報を音響信号から人手を介することなく抽出し、分類や認識に用いるといった研究が盛んに行われるようになった。このような研究を実現したのが「音響特徴量」であるとされている。

### 3.2 音響特徴量の例

#### 3.2.1 心理音響指標

音響信号を数量として記述することは、心理音響指標として数多く研究されてきた。以下にその一部について述べる。

- ラウドネス

音響信号の心理的な大きさで、最も基礎的な指標であると考えられる。ISO 532B で標準化され、計算方法もオープンになっている。他にも多くの計算方法が提案、報告されている。

- ラフネス

心理的な音の「粗さ」を定めたものである。臨界帯域現象と関連した心理指標の一つで、計算法は既に確立している。ただし、この指標は AM 音 (振幅変調音) を用いた粗さの知覚実験に基づいているため、音楽のように周波数が大きく変動する素材に対しては新しいラフネス計算法の検討もなされている。

- 変動強度 (Fluctuation Strength)

音の変動感を表した指標。正弦波による単純なモデルの計算法が示されており、かつ時間変動を考慮した計算法もある。音楽演奏では、例えばトレモロ奏法<sup>\*1</sup>で表出される音の知覚的特徴などを捉えるのに有効であると考えられる。

---

\*1 単一の高さの音を連続して小刻みに演奏する技法、並びに複数の高さの音を交互に小刻みに演奏する技法

- 協和度

二つの異なる純音に対する協和度を求めるものであり、不協和の度合いを得ることができる。倍音を多く持つ楽器音の場合には、臨界帯域幅に入る成分全ての組み合わせについて不協和度を加算することが通例であるが、不協和度の加算性については更なる検証が必要である。しかし、ラフネスの項で述べたように、音楽に周波数変動がある場合には、音の粗さや「汚さ」に対しロバストな指標であると考えられる。

### 3.2.2 音楽情報処理における音響特徴量

次に音楽情報処理分野における音響特徴量の例を示す。

- RMS

RMS(Root Means Square) 値の算出式を式 (3.1) に示す。

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M x_i^2} \quad (3.1)$$

ここで  $M$  は分析フレームのサンプル数、 $x_i$  は第  $i$  番目のサンプル値を表している。

ラウドネスが心理的な音の大きさに対応する指標であるのに対し、RMS は物理的な強度と関連するものであるが、強度そのものではなく、dB 値との対応もよくない。

- Zerocrossings rate (ゼロクロスレート)

時間軸における一定の区間内で振幅値が 0 と交差する回数の割合であり、バイアス成分がなければ、基本周波数と一致する。また、音響信号に含まれるノイズの量を表す指標として知られている。算出式を式 (3.2) に示す。

$$ZCR = \frac{\sum_{i=t}^{t'} \theta}{t' - t} \begin{cases} 1 & (x_i x_{i-1} < 0) \\ 0 & (x_i x_{i-1} > 0) \end{cases} \quad (3.2)$$

ここで、 $x_i$  は第  $i$  番目のサンプル値、 $t$  は分析フレームの開始時刻、 $t'$  は分析フレームの終了時刻、 $\theta$  は 0 との交差の有無を表している (交差ならば 1、そうでなければ 0)。

単旋律の場合には基本周波数の推移すなわちメロディに関する情報を示すが、通常の音楽のように複数の音高の音が同時になっている場合、ゼロクロス値が何に対応しているかはよく分からない。さらにドラムの音のようなノイズ系の音が重なっている場合には事態はより複雑になり、この値が音楽的にいったい何を表すのか不明である。

- 振幅包絡

音響信号のエンベロープ成分。解析信号を用いて求める方法や、単に音響信号の 2 乗に対してローパスフィルタを用いることで得る場合もある。これから ADSR(Attack, Decay, Sustain, Release) を求めることができる。また、個々の振幅包絡をフーリエ変換することで、変動スペクトルを用いる場合もある。更に、Temporal Central という指標もある。横軸時間で縦軸パワーの図において、横軸方向のモーメント重心をとることで求める。エンベロープの時間軸上での相対的な重心が得られる。

ただし、ローパスフィルタのカットオフ周波数によって形状が変化するため、研究目的に沿った設定が必要である。また、ADSR については、楽器によっては区別が困難な場合もある (特に D と



S の区別)。

- Spectral Flux

スペクトルの変動量を表す。連続する二つの分析フレームにおいて、フレーム間のパワースペクトルにおける各周波数ビン間の差の和の絶対値で表される。算出式を式 (3.3) に示す。

$$Flu = \sum_{n=1}^N (L_h[n] - L_{h-1}[n])^2 \quad (3.3)$$

ここで  $N$  は分析フレーム内の周波数ビンの総数、 $h$  は分析フレーム ID、 $L_h[n]$  は第  $h$  フレームにおける第  $n$  周波数ビンのパワーを表している。周波数成分の変化の大雑把な量を見積もることができるため、様々な目的に用いることができる。

しかし、全ての周波数成分を同等に扱うため、聴覚にとって有効な又は有効でない成分に関する考慮 (例えば当感度曲線が示す情報の考慮) がなされていない。よって音楽の何を表すのかをはっきりと述べることは難しい。また、パワーによる正規化がなされていないため、RMS の指標との相関が高くなる傾向がある。

- Spectral Centroid (スペクトル重心)

音の明るさを表す指標である。ある単一のパワースペクトルについて、周波数のパワーにその周波数を乗算した和の総和を、周波数のパワーの総和で除算することにより求めることができる。算出式を式 (3.4) に示す。

$$Cen = \frac{\sum_{i=1}^N L_h[i] \times i}{\sum_{i=1}^N L_h[i]} \quad (3.4)$$

より明るい音になればなるほど、スペクトル重心は高い値を示す。

式 (3.4) ではスペクトルの周波数も真数であり、パワーも真数となっているが、聴覚心理学的には、横軸についてはメル周波数や対数周波数、縦軸についてはパワーでなく dB 値を使った方が聴覚末梢系の実際の仕組みとの親和性が高くなるため、そのように改変することが望ましいと考えられる。また、孤立音に対して F0 との相対的な比率を用いた方が音の明るさとの対応が良くなることが示されている。

- MFCC

Mel-Frequency Cepstral Coefficients の略。分析フレーム内における音響信号の FFT 結果をメルバンドに変換したもののケプストラム係数のことであり、メルフィルタバンクを用いて変換するため、対象とする信号を少ないバンド数で単純化できる。よってフレーム内のスペクトルの概形が得られると解釈できる。

このパラメータは音声研究由来のものであり、確かに音声の場合、声帯に由来する情報と声道に由来する情報に分離する際には有効に働くが、音楽においてこれがどのような音楽情報に対応するのかよくわからない。

- Spectral Rolloff

パワースペクトルにおいて、低周波数帯域から全体に対して閾値で与えられた割合分布のエネルギーを振幅値に対する周波数の値によって表された値のことであり、例えば 95% や 85% などが設定される。パワースペクトルの主要成分がどの周波数までに存在するのかを表すことができる。85% の場合のスペクトルロールオフ値  $Roll$  を求める算出式を (3.5) に示す。

$$\sum_{n=1}^{Roll} L_h[n] = 0.85 \times \sum_{n=1}^N L_h[n] \quad (3.5)$$

音楽全体を通しての聴感的な「明るさ」や「落ち着き感」を関係している。しかし、信号に含まれる周波数含有率が音楽の何に関係するのかは明確ではない。

- Spectral Flatness

パワースペクトルの平坦度を表す指標である。例えばホワイトノイズのような平坦な場合は1に近づく。スペクトラルフラットネスを算出するためには、ある時刻において周波数解析を行った区間のパワースペクトルを周波数軸方向に任意のサブバンド (例えば 24 バンド) に分け、各サブバンドにおけるパワーの値を合計する。また、全サブバンド数のパワーの相乗平均を相加平均で除算することで求めることができる。算出式を式 (3.6) に示す。

$$Fla = \frac{\sqrt[\lambda]{\prod_{\lambda=0}^A \rho_{\lambda}}}{\frac{1}{A} \sum_{\lambda=0}^A \rho_{\lambda}} \quad (3.6)$$

ここで  $A$  はサブバンドの数、 $\rho_{\lambda}$  は第  $\lambda$  番目のサブバンドにおけるパワーの合計値を表す。スペクトラルフラットネスは、例えば調波複合音のような線スペクトルの場合はフラットでなくなり、ホワイトノイズのようなスペクトルの場合に平坦になることから、高さをもった音らしさ (tonalness と表現される) を表すとされている。これに類似した特徴量として「Spectral Crest Factors」というものもある。

パワースペクトルの概形を描くことはできるが、サブバンドごとでまとめていることから概形にすぎない。混合音又は孤立の楽器音のような区別に利用できる可能性があるものの、音楽の何に関係する指標なのかは明確でない。

- サブバンドピーク

分析フレームのパワースペクトルについて、パワーで降べきの順で並び替えた場合に、閾値  $\alpha$  で与えられた割合のパワーの平均値を示す。算出式を式 (3.7) に示す。

$$Pe = \log \frac{1}{\alpha A} \sum_{k=1}^{\alpha A} X(k) \quad (3.7)$$

例えば  $\alpha = 0.2$  の場合、サブバンドピークは上位 20% のパワースペクトルの平均値を表す。

単に高いパワーを持つ成分の平均値を表しており、音楽的な意味はよく分からない。

- サブバンドバレー

サブバンドピークが最大のパワーからの割合であるのに対し、最小からの割合を表す。

$$Ve = \log \frac{1}{\alpha A} \sum_{k=1}^{\alpha A} X(N - k + 1) \quad (3.8)$$

例えば  $\alpha = 0.2$  の場合、サブバンドバレーは下位 20% のパワースペクトルの平均値を表す。

仮に低いパワーのバックグラウンドノイズ成分が存在する場合、音源からのノイズでないにもかかわらずサブバンドバレーの値に影響を及ぼすため、必ずしも音源の特性を表さない。

- サブバンドコントラスト

サブバンドピークの値  $Pe$  からサブバンドバレー  $Va$  の値の差で表される。算出式を式 (3.9) に示す。

$$Cont = Pe - Va \quad (3.9)$$

例えばホワイトノイズの場合、全周波数ビンに対するパワーは等しいと見なせるので、サブバンドピークとサブバンドバレーはほぼ同一の値となることから、サブバンドコントラストはほぼ 0 になる。一方、パワースペクトル内で周波数ビンによってパワーが大きく異なる場合は、このサブバンドコントラストの値は大きくなる。

サブバンドピークとサブバンドバレーの値によって決まるので、どちらかの値が正しく算出されない場合、このサブバンドコントラストも正しい値が得られない。

- Spectral Bandwidth (スペクトルバンド幅)

バンド幅とは、対象とする信号のスペクトルにおけるスペクトル重心からの距離とそのパワーを考慮した指標である。スペクトル重心付近にはほとんどパワーがなく低周波領域及び高周波領域の周波数ビンのパワーが大きい場合は、このバンド幅は広くなる。一方周波数領域の近い音源ばかりから構成される場合は、このバンド幅は狭くなる。よって心理印象としては、音楽の「迫力」に対応していると考えられる。算出式を式 (3.10) に示す。

$$Band = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N \{(L_h[n])^2 \times (v[n] - Cen_h)^2\}}{\sum_{n=1}^N (L_h[n])^2}} \quad (3.10)$$

ここで  $v[n]$  は、第  $n$  番目の周波数ビンにおける周波数値、 $Cen_h$  は第  $h$  番目のフレームにおけるスペクトル重心の値を表している。

ただし、孤立音のスペクトルの分布を知る場合には良いかもしれないが、例えば J-POP のような混合音の場合はあまり意味のある値が得られるとは考えにくい。

- Low Energy Feature

各分析フレームが持つエネルギーのうち、低周波数成分 (例えば 0~500 Hz など) の周波数成分が持つエネルギーの割合を示す。算出式を式 (3.11) に示す。

$$LEF = 10 \log \left( \frac{\sum_{n=1}^{500Hz} (L_h[n])^2}{\sum_{n=1}^N (L_h[n])^2} \right) \quad (3.11)$$

低周波数成分の割合が大きいほど、暗い印象の音楽となることから、心理的な「明るさ」の印象に関係した特徴量であると考えられる。

### 3.3 本研究における音響特徴量について

本研究では、音色の解析に音響特徴量を使用する。使用した音響特徴量は Python のライブラリである Librosa で計算可能であり、値から音の印象を付けやすいと考えられるスペクトル重心、スペクトルバンド幅、スペクトルフラットネス、スペクトルロールオフ、ゼロクロスレートを使用する。分析フレームは 2048 とした。

## 第4章

# 検証実験

### 4.1 実験1回目

### 4.2 実験内容

アンサンブルにおける和音の精度に着目し、和音のタイミング (いわゆる縦の線) と各パートの音量バランスについて考察を行った。

#### 4.2.1 録音

本学のスタジオにて、熟達者4名(1組の弦楽四重奏)による演奏の収録を行った。まず何も指示を出さずに演奏をしてもらい、次に以下の指示1、2を順に出しそれぞれについて1回ずつ録音を行った。

指示1 タイミングを意識しての演奏

指示2 チェロの音量に合わせての演奏

録音にはピンマイク型コンデンサーマイクとして COUNTRYMAN ASSOCIATES INC I2 INSTRUMENT MICROPHONE 4本及びミキサーとして TASCAM Model24を使用した。クリップタイプのコンデンサーマイクはそれぞれの駒とテールピースの間に固定した。また図4.1に実験風景をモデル化した図を示す。演奏者同士の間隔は約1mである。

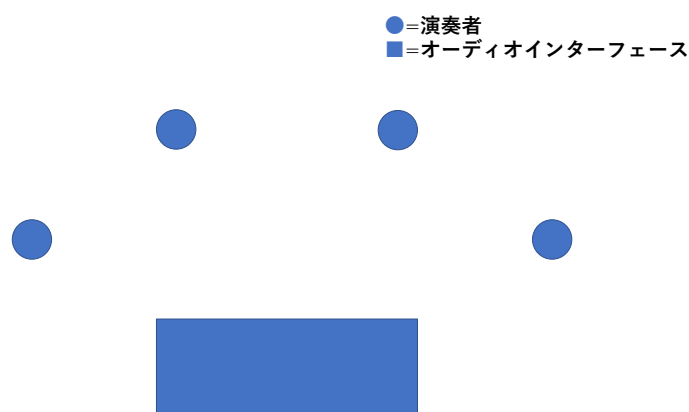


図 4.1 実験風景のモデル図

## 4.2.2 演奏楽曲

和音の解析としてハイドン弦楽四重奏曲ハ長調「皇帝」Op.76 No.3 第一楽章の冒頭部分と、同じく和音部分が多く含まれるモーツァルトセレナードト長調「アイネ・クライネ・ナハトムジーク」K.525 第一楽章冒頭部分を使用した。どちらも曲中より和音が多い区間を選んだ。

第1フレーズ 第2フレーズ 第3フレーズ

Allegro

Violino I

Violino II

Viola

Violoncello

図 4.2 ハイドン「皇帝」冒頭

第1フレーズ 第2フレーズ

Allegro

Violine I

Violine II

Viola

Violoncello und Kontrabaß

図 4.3 モーツァルト「アイネ・クライネ・ナハトムジーク」冒頭

ここで、「皇帝」に関しては、図 4.2 のように 3 つのフレーズに分割し、「アイネ・クライネ・ナハトムジーク」に関しては、図 4.3 のように 2 つのフレーズに分けた。

### 4.2.3 解析手法

各パートの音量の解析には Python のライブラリである Librosa を用いて、RMS 値式 (3.1) と dB 値式 (4.1) の計測プログラムを作成して解析を行った。RMS 値に関しては、分析フレームを 2048、ホップ幅を 512 に設定した。

$$P_{\text{ave}} = 20 \log_{10} RMS \quad (4.1)$$

タイミングの解析には Audacity を使用し、その様子を図 4.4 に示す。左側の図に表示されている波形の赤い丸の部分拡大し、音が鳴り始めている箇所の値を測定し、他の音も同様に測定を行った。

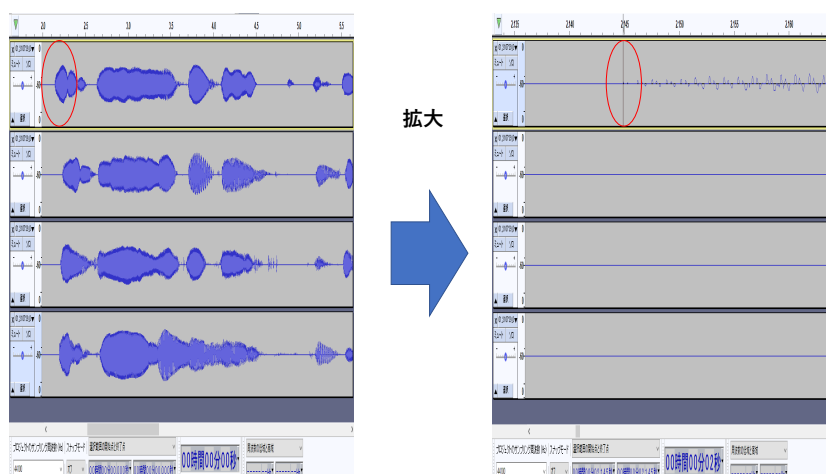


図 4.4 タイミングの解析手法

## 4.3 結果

### 4.4 発音タイミングについて

「皇帝」の各指示における 1st ヴァイオリンの発音タイミングに対する各パートのタイミングのずれについて、フレーズ毎に平均値を集計した結果を表 4.1、4.2 に示す。

表 4.1 「皇帝」の指示なしにおける各フレーズの 1st ヴァイオリンとの発音時刻のずれ (ms)

	第 1 フレーズ	第 2 フレーズ	第 3 フレーズ
2nd ヴァイオリン	18.2	28.0	26.0
ヴィオラ	17.0	29.3	20.0
チェロ	22.0	18.7	5.50

何も注意の指示を行っていない演奏 (表 4.1) とタイミングを意識して演奏を行った結果 (表 4.2) を比較すると、後者は前者よりもずれが改善されている箇所は第 2 フレーズにしかみられず、むしろタイミングのずれが大きくなった箇所が多く見受けられた。

次に「アイネ・クライネ・ナハトムジーク」の各指示における 1st ヴァイオリンの発音に対する各パートのタイミングのずれについてフレーズ毎に平均値を集計した結果を表 4.3、4.4 に示す。

表 4.2 「皇帝」の指示 1 における各フレーズの 1st ヴァイオリンとの発音時刻のずれ (ms)

	第 1 フレーズ	第 2 フレーズ	第 3 フレーズ
2nd ヴァイオリン	28.2	24.2	35.8
ヴィオラ	61.4	28.3	22.3
チェロ	24.2	17.0	30.3

表 4.3 「アイネ・クライネ・ナハトムジーク」の指示なしにおける各フレーズの 1st ヴァイオリンとの発音時刻のずれ (ms)

	第 1 フレーズ	第 2 フレーズ
2nd ヴァイオリン	28.6	22.9
ヴィオラ	32.7	26.0
チェロ	21.2	28.4

表 4.4 「アイネ・クライネ・ナハトムジーク」の指示 1 における各フレーズの 1st ヴァイオリンとの発音時刻のずれ (ms)

	第 1 フレーズ	第 2 フレーズ
2nd ヴァイオリン	25.9	22.0
ヴィオラ	17.5	27.3
チェロ	29.8	26.1

「アイネ・クライネ・ナハトムジーク」に関しては、指示なしから指示 1 にかけてタイミングのずれが改善された箇所は、パートによって異なっている。2nd ヴァイオリンの第 1、第 2 フレーズとチェロの第 2 フレーズに関しては 3 ms 以下の改善となっており、演奏者が数ミリ秒の違いを認識することは難しいためタイミングを意識して演奏を行ったことによる影響は少ないと考えられる。一方で、10 ms 以上のずれが改善された第 1 フレーズのヴィオラに関しては、指示なしの状態でも演奏を行った際にずれが 30 ms 以上あり、この場合では演奏者にずれの感覚がありタイミングを意識して演奏を行うとずれが改善されると考えられる。

以上の結果から、タイミングに関してはずれを意識して演奏を行うと、指示なしの状態でも演奏を行った際に演奏者がずれを認識している場合にはずれの改善が行われるが、そうでない場合は大きな改善は見られなかった。

## 4.5 各フレーズの音量について

図 4.5、4.6 に「皇帝」について各指示における各フレーズの音量の変化、表 4.5、4.6 にチェロの  $P_{ave}$  に対する各パートの音量差を示す。図 4.5、4.6 の縦軸は  $P_{ave}$ 、横軸はフレーズ数である。

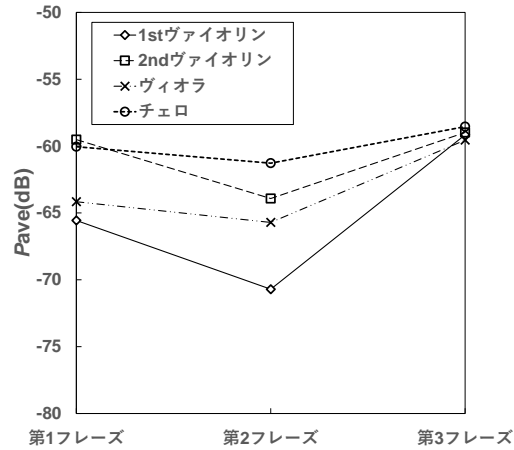


図 4.5 「皇帝」の指示なしにおける各パートの音量変化

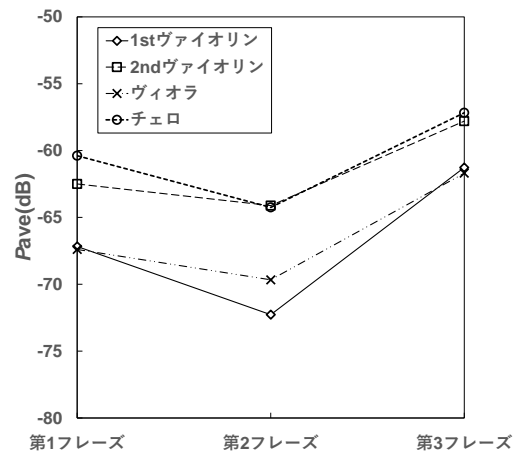


図 4.6 「皇帝」の指示 2 における各パートの音量変化

表 4.5 「皇帝」の指示なしにおける各フレーズのチェロとの音量差

	第 1 フレーズ	第 2 フレーズ	第 3 フレーズ
1st ヴァイオリン	-5.51	-9.43	-0.616
2nd ヴァイオリン	0.528	-2.65	-0.441
ヴィオラ	-4.11	-4.43	-1.01

「皇帝」のスコアには、第 1 フレーズでは  $f$ (フォルテ)、第 2 フレーズでは  $p$ (ピアノ)、第 3 フレーズではまた  $f$  記号が楽譜に記されている。図 4.5、4.6 からそれぞれの音楽記号により奏者の音量への影響があらわれている。また、全体的に 2nd ヴァイオリンとチェロの音量が大きく、1st ヴァイオリンとヴィオ



表 4.6 「皇帝」の指示 2 における各フレーズのチェロとの音量差

	第 1 フレーズ	第 2 フレーズ	第 3 フレーズ
1st ヴァイオリン	-6.78	-8.02	-4.09
2nd ヴァイオリン	-2.11	0.134	-0.628
ヴィオラ	-7.01	-5.42	-4.52

ラはそれらに対して小さくなっている。さらに指示 2 の方がチェロとそれ以外のパートの音量差が大きくなっている個所が複数見受けられた。

次に図 4.7、4.8 に「アイネ・クライネ・ナハトムジーク」について各指示における各フレーズの音量の変化、表 4.7、4.8 にチェロの  $P_{ave}$  に対する各パートの音量差を示す。図 4.7、4.8 の縦軸は  $P_{ave}$ 、横軸はフレーズ数である。

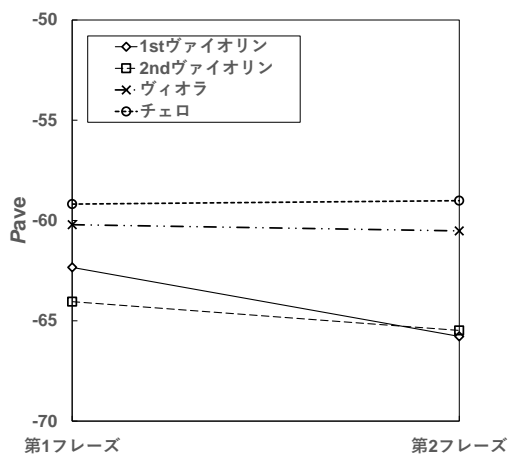


図 4.7 「アイネ・クライネ・ナハトムジーク」の指示なしにおける各パートの音量変化

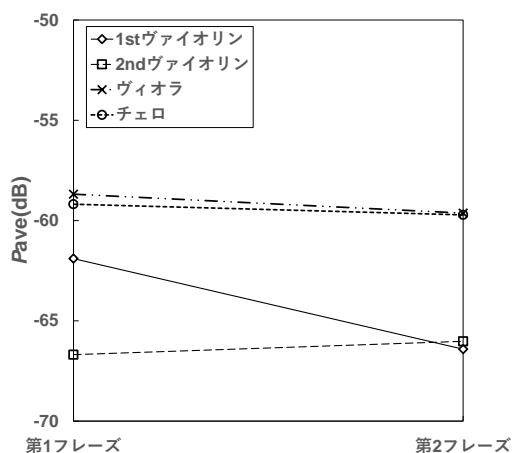


図 4.8 「アイネ・クライネ・ナハトムジーク」の指示 2 における各パートの音量変化

図 4.7、4.8 から「アイネ・クライネ・ナハトムジーク」ではヴィオラとチェロの音量が全体的に大きくなっており、1st ヴァイオリンと 2nd ヴァイオリンはそれに比べると小さくなっている。また、表 4.7、4.8 より指示なしから指示 2 にかけてヴィオラとの音量差は小さくなり、2nd ヴァイオリンでは第 1 フ

表 4.7 「アイネ・クライネ・ナハトムジーク」の指示なしにおける各フレーズのチェロとの音量差

	第 1 フレーズ	第 2 フレーズ
1st ヴァイオリン	-3.16	-6.77
2nd ヴァイオリン	-4.87	-6.47
ヴィオラ	-1.03	-1.51

表 4.8 「アイネ・クライネ・ナハトムジーク」の指示 2 における各フレーズのチェロとの音量差

	第 1 フレーズ	第 2 フレーズ
1st ヴァイオリン	-2.71	-6.70
2nd ヴァイオリン	-7.50	-6.30
ヴィオラ	0.499	0.0890

レーズでのみ音量差が大きくなっている。したがって「アイネ・クライネ・ナハトムジーク」では「皇帝」のようなチェロの音量を意識して演奏を行った際に、チェロとの音量差が広がるような演奏はあまり行われていなかった。

以上の結果から、チェロの音量を意識して演奏を行った際に、「皇帝」ではチェロの音をより響かせるためにチェロとの音量差が広がる傾向にあったが、「アイネ・クライネ・ナハトムジーク」ではその傾向はほとんどみられなかったため、同じ指示を出していても曲によって演奏認識の違いが発生すると考えられる。

## 4.6 実験 1 回目まとめ

実験 1 回目では、アンサンブル精度の解析として各パートのタイミングのずれや音量バランスに着目して解析を行った。タイミングのずれに関しては、特に何も指示を出していない状態からタイミングを意識して演奏を行った際に、指示なしの状態ですれの認識がある場合にはずれが改善されるが、ずれの認識がなかった場合はそこからタイミングを意識しても大きな改善はみられなかった。また音量バランスに関しては、指示なしからチェロの音量を意識して演奏を行った際に、チェロとの音量差を広げて演奏が行うかは曲によって異なる結果となった。

## 4.7 実験 2 回目

2 回目の実験では、和音のタイミングと各パートの音量バランスに加え、ピッチと音響特徴量を使用した音色の解析を行った。

### 4.7.1 録音

本学のスタジオにて、音大生 4 名 (1 組の弦楽四重奏) による演奏の収録を行った。収録の際に提示した指示は以下の通りである。

- 1 回目 特に何も指示を出さない状態での演奏
- 2 回目 チェロの音量を意識しての演奏
- 3 回目 チェロの音量を意識しての演奏
- 4 回目 ピッチを意識しての演奏
- 5 回目 ピッチを意識しての演奏
- 6 回目 タイミングを意識しての演奏
- 7 回目 タイミングを意識しての演奏
- 8 回目 音色を意識しての演奏
- 9 回目 音色を意識しての演奏
- 10 回目 特に何も指示を出さない状態での演奏

録音には実験 1 回目と同様にピンマイク型コンデンサーマイクとして COUNTRYMAN ASSOCIATES INC I2 INSTRUMENT MICROPHONE 4 本及びミキサーとして TASCAM Model24 を使用し、コンデンサーマイクはそれぞれの駒とテールピースの間に固定した。また図 4.9 に実験風景を示す。演奏者同士の間隔は約 1 m である。



図 4.9 実験風景

## 4.7.2 演奏楽曲

楽曲は1回目と同じハイドン弦楽四重奏曲ハ長調「皇帝」Op.76 No.3 第一楽章の冒頭部分と、モーツァルトセレナードト長調「アイネ・クライネ・ナハトムジーク」K.525 第一楽章冒頭部分を使用し、1回目の実験と同様のフレーズ分けを行った。

## 4.7.3 解析手法

解析にはデジタルオーディオエディタの Audacity と Python のライブラリである Librosa を用いて、RMS 値 (式 (3.1)) と dB 値 (式 (4.1))、並びにタイミングの計測を行った。RMS 値の分析フレームの長さを 2048、ホップ幅を 512 である。また、ピッチの計測にはスマートフォンのアプリ Sonic Tools を使用して周波数の測定を行った (図 6)。音色の解析には、3.3 節で述べた音響特徴量を使用し、1音ごとの平均値を計測した。分析フレームは 2048 である。

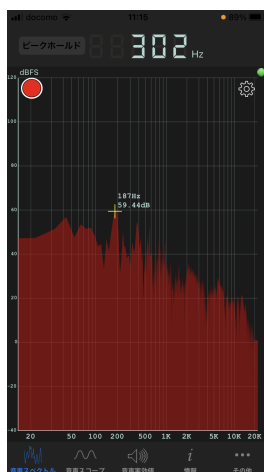


図 4.10 ピッチの解析手法

## 4.8 結果

## 4.9 発音タイミングについて

「皇帝」の各指示における 1st ヴァイオリンの発音タイミングに対する各パートのずれについてフレーズ毎に平均値を集計した結果を表 4.9、4.10 に示す。

表 4.9 「皇帝」の指示なし 1 回目における各フレーズの 1st ヴァイオリンとの発音時刻のずれ (ms)

	第 1 フレーズ	第 2 フレーズ	第 3 フレーズ
2nd ヴァイオリン	45.6	22.5	19.0
ヴィオラ	56.2	21.7	18.0
チェロ	56.4	33.8	33.5

特に何も注意の指示を出していない演奏においては、第 1 フレーズではどのパートも 40 ms 以上のずれ

表 4.10 「皇帝」のタイミングを意識した 2 回目の演奏における各フレーズの 1st ヴァイオリンとの発音時刻のずれ (ms)

	第 1 フレーズ	第 2 フレーズ	第 3 フレーズ
2nd ヴァイオリン	18.0	18.3	14.8
ヴィオラ	13.4	9.33	18.8
チェロ	19.2	28.8	15.3

があり、チェロに関しては全てのフレーズにおいてずれが 30 ms を超えている。一方、タイミングを意識した演奏に関しては指示なしでの演奏と比較した際に、ヴィオラの第 3 フレーズを除き全体的にずれが改善されている。特に第 1 フレーズに関しては各パートで 20 ms 以上の改善があり、これは演奏者にずれの認識がありタイミングを意識して演奏を行う際に特に意識された部分であると考えられる。

次に「アイネ・クライネ・ナハトムジーク」の各指示における 1st ヴァイオリンの発音タイミングに対する各パートのタイミングのずれについて、フレーズ毎に平均値を集計した結果を表 4.11、4.12 に示す。

表 4.11 「アイネ・クライネ・ナハトムジーク」の指示なし 1 回目における各フレーズの 1st ヴァイオリンとの発音時刻のずれ (ms)

	第 1 フレーズ	第 2 フレーズ
2nd ヴァイオリン	23.0	12.2
ヴィオラ	21.7	13.4
チェロ	17.8	25.8

表 4.12 「アイネ・クライネ・ナハトムジーク」のタイミングを意識した 2 回目の演奏における各フレーズの 1st ヴァイオリンとの発音時刻のずれ (ms)

	第 1 フレーズ	第 2 フレーズ
2nd ヴァイオリン	23.3	9.44
ヴィオラ	16.2	25.9
チェロ	15.7	18.6

「アイネ・クライネ・ナハトムジーク」に関しても、指示なしでの演奏からタイミングを意識した演奏にかけてタイミングのずれが改善されている個所が多く見受けられる。しかし、ヴィオラの第 2 フレーズに関しては、10 ms 以上ずれが大きくなっており、2nd ヴァイオリンの第 2 フレーズではずれが改善されているが、第 1 フレーズに関してはずれは改善されていない。よって 2nd ヴァイオリンの奏者にとって 20 ms 付近のずれはずれとして認識されていないと考えられる。

以上の結果から、40 ms 以上のずれに関しては演奏者に共通してずれの認識があり、タイミングを意識して演奏を行うことでずれは改善される。また、20 ms 付近のずれに関しては、演奏者によってずれとして認識される場合とされない場合があると考えられる。

## 4.10 各フレーズの音量について

図 4.11、4.12 に「皇帝」の各指示における各フレーズの音量の変化、また表 4.13、4.14 にチェロの  $P_{ave}$  に対する各パートの音量差を示す。図 4.11、4.12 の縦軸は  $P_{ave}$ 、横軸はフレーズ数である。

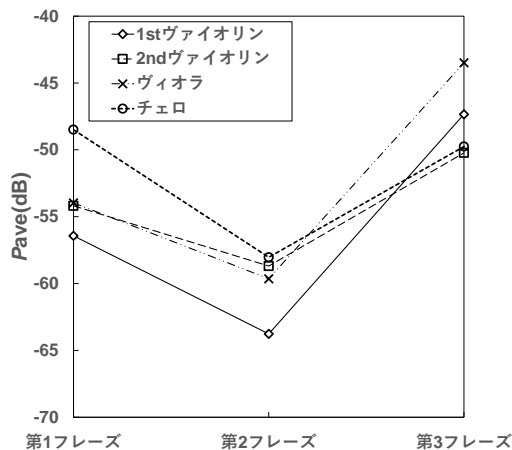


図 4.11 「皇帝」の指示なし 1 回目における各パートの音量変化

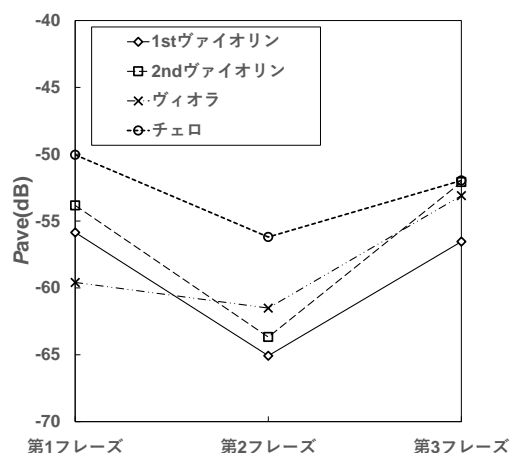


図 4.12 「皇帝」のチェロの音量を意識した演奏 2 回目における各パートの音量変化

表 4.13 「皇帝」の指示なし 1 回目における各フレーズのチェロとの音量差 (dB)

	第 1 フレーズ	第 2 フレーズ	第 3 フレーズ
1st ヴァイオリン	-7.94	-5.73	2.41
2nd ヴァイオリン	-5.70	-0.656	-0.476
ヴィオラ	-5.48	-1.61	6.26

図 4.11、4.12 から、実験 1 回目と同様に楽譜上の演奏記号による奏者の音量への影響があらわれている。また、チェロは全体的に音量が大きく、1st ヴァイオリンはそれに対して小さくなっている。次に表 4.13、4.14 から指示なしでの演奏とチェロの音量を意識した演奏を比較すると、指示なしからチェロの音量を意識した演奏にかけてチェロとの音量差が全てのパートで大きくなっているのは第 2 フレーズのみと

表 4.14 「皇帝」のチェロの音量を意識した演奏 2 回目における各フレーズのチェロとの音量差 (dB)

	第 1 フレーズ	第 2 フレーズ	第 3 フレーズ
1st ヴァイオリン	-5.80	-8.87	-4.57
2nd ヴァイオリン	-3.79	-7.48	-0.120
ヴィオラ	-9.54	-5.31	-1.13

なっており、第 1 フレーズではヴィオラ、第 3 フレーズでは 1st ヴァイオリンしかチェロとの音量差は大きくなっていなかった。これは第 1 フレーズと第 3 フレーズには  $f$  の記号があり、チェロの音量を意識して演奏した際にチェロの音をより響かせようとする認識よりも  $f$  記号の強く弾く認識の影響のほうが強かったからであると考えられる。

次に図 4.13、4.14 に「アイネ・クライネ・ナハトムジーク」について指示なしで行った演奏 1 回目とチェロの音量を意識した演奏 2 回目における各フレーズの音量の変化、また表 4.15、4.16 にチェロの  $P_{ave}$  に対する各パートの音量差を示す。図 4.13、4.14 の縦軸は  $P_{ave}$ 、横軸はフレーズ数である。

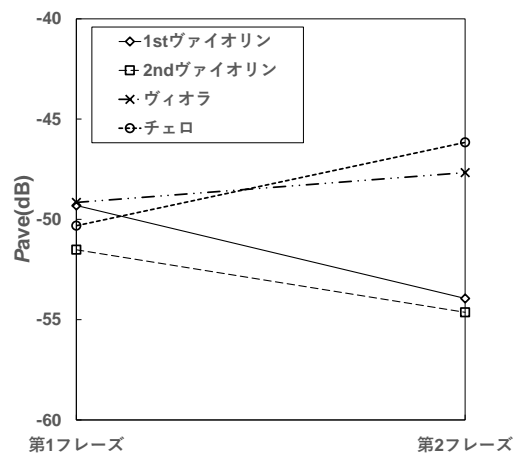


図 4.13 「アイネ・クライネ・ナハトムジーク」の指示なし 1 回目における各パートの音量変化

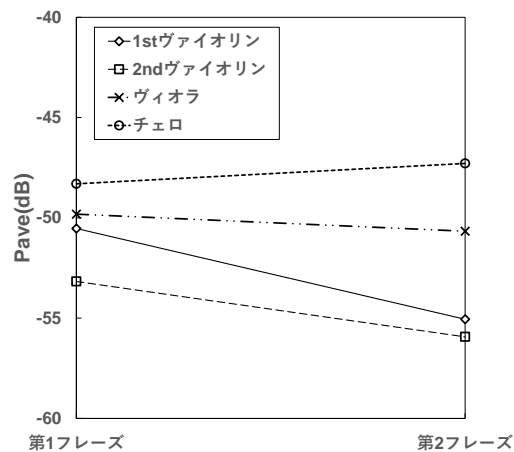


図 4.14 「アイネ・クライネ・ナハトムジーク」のチェロの音量を意識した演奏 2 回目における各パートの音量変化

表 4.15 「アイネ・クライネ・ナハトムジーク」の指示なし 1 回目における各フレーズのチェロとの音量差 (dB)

	第 1 フレーズ	第 2 フレーズ
1st ヴァイオリン	1.01	-7.78
2nd ヴァイオリン	-1.20	-8.47
ヴィオラ	1.16	-1.50

表 4.16 「アイネ・クライネ・ナハトムジーク」のチェロの音量を意識した演奏 2 回目における各フレーズのチェロとの音量差 (dB)

	第 1 フレーズ	第 2 フレーズ
1st ヴァイオリン	-2.23	-7.77
2nd ヴァイオリン	-4.87	-8.64
ヴィオラ	-1.51	-3.38

図 4.13、4.14 からチェロの音量は全体的に大きく、2nd ヴァイオリンの音量は全体的に小さくなっている。また、チェロは第 1 フレーズから第 2 フレーズにかけて音量が大きくなっているのに対し、1st ヴァイオリンと 2nd ヴァイオリンは音量が小さくなっている。次に表 4.15、4.16 から指示なしでの演奏からチェロの音量を意識した演奏にかけてチェロとの音量差が全体的に大きくなる箇所が多く見受けられた。従って「アイネ・クライネ・ナハトムジーク」に関しては、チェロとの音量差を意識して演奏を行った際にチェロとの音量差を広げることにより、チェロの音をより響かせるような心理が働いていると考えられる。

以上の結果から指示なしでの演奏からチェロの音量を意識した演奏にかけて、「皇帝」では第 2 フレーズのみチェロとの音量差が大きくなる傾向があり、「アイネ・クライネ・ナハトムジーク」においては全体的にチェロとの音量差を大きくし、チェロの音をより響かせるような演奏が行われていた。

## 4.11 各フレーズのピッチについて

表 4.17 と 4.18 に「皇帝」の第 1 フレーズにおける各指示のピッチを、表 4.19 に第 1 フレーズの平均律を示す。

表 4.17 「皇帝」の指示なし 1 回目の演奏における第 1 フレーズの各音のピッチ (Hz)

	第 1 音	第 2 音	第 3 音	第 4 音	第 5 音
1st ヴァイオリン	790	666	176	593	527
2nd ヴァイオリン	592	265	451	275	334
ヴィオラ	248	528	592	499	528
チェロ	495	266	173	196	524

実際に演奏したピッチと平均律のピッチを比較すると、差が 10 Hz 以内のものとはそうでないものに分けられる。指示なしにおいてピッチの差が 10 Hz 以内の箇所は、ピッチを意識しても差は変わらなかった。一方で、差が 10 Hz 以上ある箇所は、その音の倍音成分が強く表示されたためである。これはアプリ



表 4.18 「皇帝」のピッチを意識した演奏 2 回目における第 1 フレーズの各音のピッチ (Hz)

	第 1 音	第 2 音	第 3 音	第 4 音	第 5 音
1st ヴァイオリン	790	667	698	593	528
2nd ヴァイオリン	591	261	440	195	324
ヴィオラ	248	528	592	504	527
チェロ	258	266	173	198	260

表 4.19 「皇帝」の第 1 フレーズにおける平均律 (Hz)

	第 1 音	第 2 音	第 3 音	第 4 音	第 5 音
1st ヴァイオリン	784	659	698	587	523
2nd ヴァイオリン	587	392	440	196	349
ヴィオラ	392	523	587	494	523
チェロ	220	247	165	175	110

上に表示されるピッチが、読み取った音をフーリエ変換し、その時のピークが最も高い箇所（周波数）を表示するためである。よって実際の想定されるピッチよりも高い、あるいは低い箇所は他の倍音成分が強く表れていることになり、これは指示なしとピッチを意識した演奏両方でその傾向がみられた。

次に表 4.20 と 4.21 に「アイネ・クライネ・ナハトムジーク」の第 1 フレーズにおける各指示のピッチを、表 4.22 に第 1 フレーズの平均律を示す。

表 4.20 「アイネ・クライネ・ナハトムジーク」の指示なし 1 回目の演奏における第 1 フレーズの各音のピッチ (Hz)

	第 1 音	第 2 音	第 3 音	第 4 音	第 5 音	第 6 音	第 7 音	第 8 音	第 9 音
1st ヴァイオリン	291	592	2378	590	2380	591	2388	990	2397
2nd ヴァイオリン	292	590	784	593	2357	593	1583	1970	2397
ヴィオラ	1586	292	1582	291	1593	291	194	504	600
チェロ	198	292	202	294	200	294	194	250	293

表 4.21 「アイネ・クライネ・ナハトムジーク」のピッチを意識した演奏 2 回目における第 1 フレーズの各音のピッチ (Hz)

	第 1 音	第 2 音	第 3 音	第 4 音	第 5 音	第 6 音	第 7 音	第 8 音	第 9 音
1st ヴァイオリン	291	591	2329	601	2379	593	2376	989	2341
2nd ヴァイオリン	496	590	785	590	785	603	789	248	2345
ヴィオラ	784	292	775	293	787	293	1577	496	592
チェロ	197	292	200	292	196	294	198	200	299

表 4.22 「アイネ・クライネ・ナハトムジーク」の第1フレーズにおける平均律 (Hz)

	第1音	第2音	第3音	第4音	第5音	第6音	第7音	第8音	第9音
1st ヴァイオリン	784	587	784	587	784	587	784	988	1175
2nd ヴァイオリン	784	587	784	587	784	587	784	988	1175
ヴィオラ	392	294	392	294	392	294	392	494	587
チェロ	196	147	196	147	196	147	196	247	294

「アイネ・クライネ・ナハトムジーク」に関しても、指示なしからピッチを意識した演奏にかけて平均律との差はほとんど変わっていない。また各パートにおいて平均律よりも高い、高次の倍音成分が検出される傾向にあった。

以上の結果からピッチに関しては、指示なしとピッチを意識した演奏における平均律との差に関して、大きな変化は見受けられなかった。しかし、平均律に対し測定された周波数が大きく異なる場合があり、これは倍音成分のうちどの成分が強く出ているかによるものであり、1st ヴァイオリン、2nd ヴァイオリンでは高次の成分、チェロでは低次の成分が強く出る傾向にあった。

## 4.12 音色について

### 4.12.1 「皇帝」のスペクトル重心による分析

「皇帝」のスペクトル重心に関して、各指示、各フレーズの演奏を図 4.15 から 4.20、表 4.23 から 4.28 に示す。図の縦軸が  $Cen(Hz)$ 、横軸が第  $n$  音である。

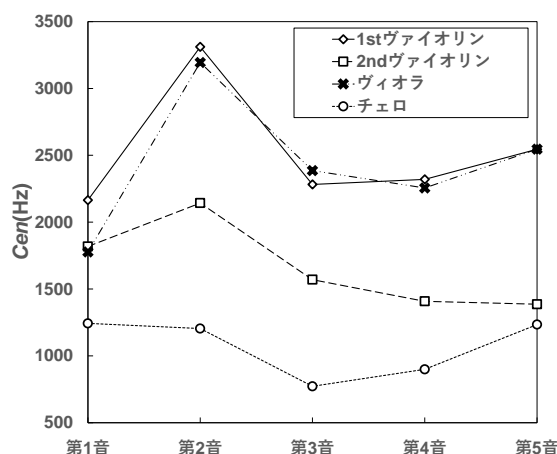


図 4.15 「皇帝」の指示なし1回目の演奏における第1フレーズ各パートのスペクトル重心の変化

図 4.15 から 4.20 において指示なしと音色を意識した演奏ともに、第1フレーズでは1st ヴァイオリンとヴィオラのスペクトル重心の値が高く、チェロの値が低い。特に2nd ヴァイオリンはヴィオラよりも高

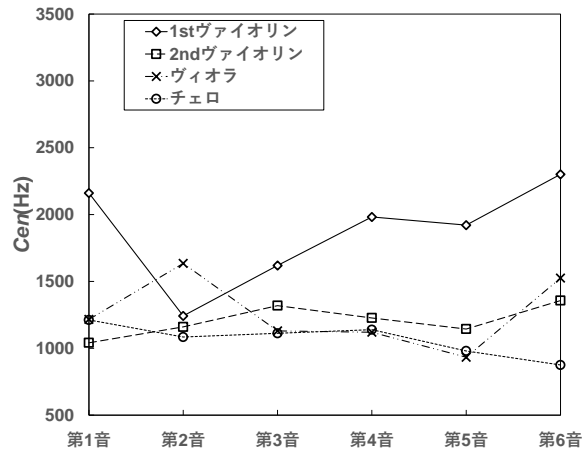


図 4.16 「皇帝」の指示なし 1 回目の演奏における第 2 フレーズ各パートのスペクトル重心の変化

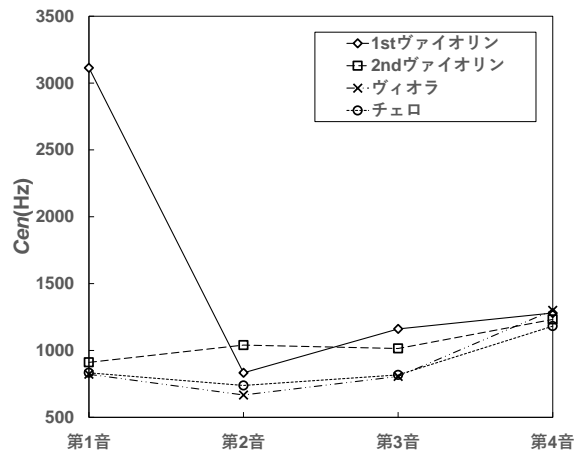


図 4.17 「皇帝」の指示なし 1 回目の演奏における第 3 フレーズ各パートのスペクトル重心の変化

表 4.23 「皇帝」の指示なし 1 回目の演奏における第 1 フレーズの各音のスペクトル重心 (Hz)

	第 1 音	第 2 音	第 3 音	第 4 音	第 5 音
1st ヴァイオリン	$2.17 \times 10^3$	$3.31 \times 10^3$	$2.28 \times 10^3$	$2.32 \times 10^3$	$2.54 \times 10^3$
2nd ヴァイオリン	$1.82 \times 10^3$	$2.14 \times 10^3$	$1.57 \times 10^3$	$1.41 \times 10^3$	$1.38 \times 10^3$
ヴィオラ	$1.78 \times 10^3$	$3.19 \times 10^3$	$2.39 \times 10^3$	$2.26 \times 10^3$	$2.55 \times 10^3$
チェロ	$1.24 \times 10^3$	$1.20 \times 10^3$	$0.772 \times 10^3$	$0.899 \times 10^3$	$1.23 \times 10^3$

表 4.24 「皇帝」の指示なし 1 回目の演奏における第 2 フレーズの各音のスペクトル重心 (Hz)

	第 1 音	第 2 音	第 3 音	第 4 音	第 5 音	第 6 音
1st ヴァイオリン	$2.16 \times 10^3$	$1.24 \times 10^3$	$1.62 \times 10^3$	$1.98 \times 10^3$	$1.92 \times 10^3$	$2.30 \times 10^3$
2nd ヴァイオリン	$1.04 \times 10^3$	$1.16 \times 10^3$	$1.32 \times 10^3$	$1.23 \times 10^3$	$1.14 \times 10^3$	$1.36 \times 10^3$
ヴィオラ	$1.22 \times 10^3$	$1.64 \times 10^3$	$1.13 \times 10^3$	$1.12 \times 10^3$	$0.933 \times 10^3$	$1.53 \times 10^3$
チェロ	$1.21 \times 10^3$	$1.08 \times 10^3$	$1.11 \times 10^3$	$1.14 \times 10^3$	$0.980 \times 10^3$	$0.875 \times 10^3$

表 4.25 「皇帝」の指示なし 1 回目の演奏における第 3 フレーズの各音のスペクトル重心 (Hz)

	第 1 音	第 2 音	第 3 音	第 4 音
1st ヴァイオリン	$3.11 \times 10^3$	$0.833 \times 10^3$	$1.16 \times 10^3$	$1.28 \times 10^3$
2nd ヴァイオリン	$0.911 \times 10^3$	$1.40 \times 10^3$	$1.02 \times 10^3$	$1.23 \times 10^3$
ヴィオラ	$0.822 \times 10^3$	$0.667 \times 10^3$	$0.806 \times 10^3$	$1.30 \times 10^3$
チェロ	$0.833 \times 10^3$	$0.738 \times 10^3$	$0.817 \times 10^3$	$1.18 \times 10^3$

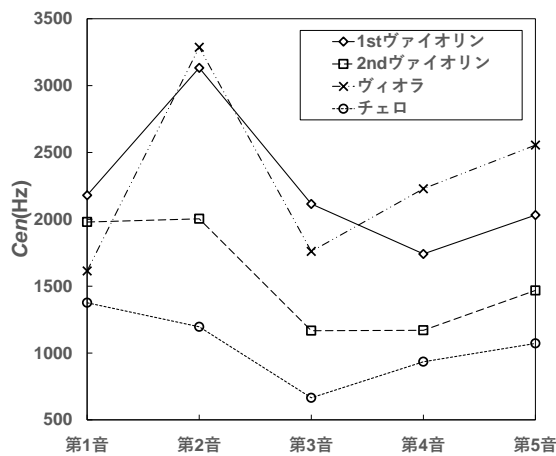


図 4.18 「皇帝」の音色を意識した演奏 2 回目における第 1 フレーズ各パートのスペクトル重心の変化

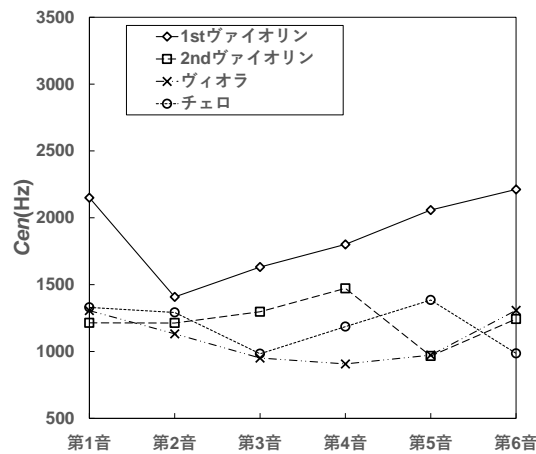


図 4.19 「皇帝」の音色を意識した演奏 2 回目における第 2 フレーズ各パートのスペクトル重心の変化

表 4.26 「皇帝」の音色を意識した演奏 2 回目における第 1 フレーズの各音のスペクトル重心 (Hz)

	第 1 音	第 2 音	第 3 音	第 4 音	第 5 音
1st ヴァイオリン	$2.18 \times 10^3$	$3.13 \times 10^3$	$2.12 \times 10^3$	$1.74 \times 10^3$	$2.03 \times 10^3$
2nd ヴァイオリン	$1.98 \times 10^3$	$2.00 \times 10^3$	$1.17 \times 10^3$	$1.17 \times 10^3$	$1.47 \times 10^3$
ヴィオラ	$1.61 \times 10^3$	$3.29 \times 10^3$	$1.76 \times 10^3$	$2.23 \times 10^3$	$2.56 \times 10^3$
チェロ	$1.38 \times 10^3$	$1.20 \times 10^3$	$0.665 \times 10^3$	$0.935 \times 10^3$	$1.07 \times 10^3$

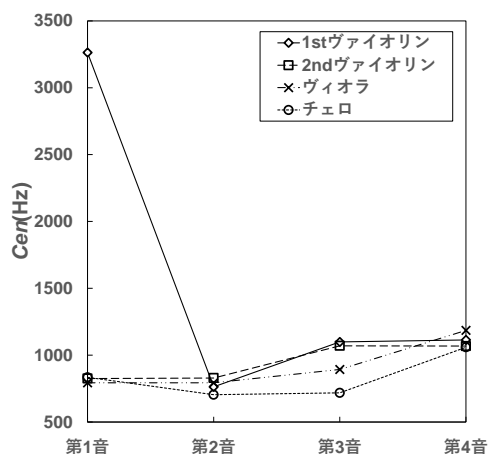


図 4.20 「皇帝」の音色を意識した演奏 2 回目における第 3 フレーズ各パートのスペクトル重心の変化

表 4.27 「皇帝」の音色を意識した演奏 2 回目における第 2 フレーズの各音のスペクトル重心 (Hz)

	第 1 音	第 2 音	第 3 音	第 4 音	第 5 音	第 6 音
1st ヴァイオリン	$2.15 \times 10^3$	$1.41 \times 10^3$	$1.63 \times 10^3$	$1.80 \times 10^3$	$2.06 \times 10^3$	$2.21 \times 10^3$
2nd ヴァイオリン	$1.21 \times 10^3$	$1.21 \times 10^3$	$1.30 \times 10^3$	$1.47 \times 10^3$	$0.966 \times 10^3$	$1.24 \times 10^3$
ヴィオラ	$1.31 \times 10^3$	$1.13 \times 10^3$	$0.951 \times 10^3$	$0.907 \times 10^3$	$0.973 \times 10^3$	$1.31 \times 10^3$
チェロ	$1.33 \times 10^3$	$1.29 \times 10^3$	$0.983 \times 10^3$	$1.19 \times 10^3$	$1.39 \times 10^3$	$0.986 \times 10^3$

表 4.28 「皇帝」の音色を意識した演奏 2 回目における第 3 フレーズの各音のスペクトル重心 (Hz)

	第 1 音	第 2 音	第 3 音	第 4 音
1st ヴァイオリン	$3.26 \times 10^3$	$0.763 \times 10^3$	$1.10 \times 10^3$	$1.11 \times 10^3$
2nd ヴァイオリン	$0.825 \times 10^3$	$0.829 \times 10^3$	$1.07 \times 10^3$	$1.70 \times 10^3$
ヴィオラ	$0.793 \times 10^3$	$0.793 \times 10^3$	$0.893 \times 10^3$	$1.19 \times 10^3$
チェロ	$0.834 \times 10^3$	$0.704 \times 10^3$	$0.718 \times 10^3$	$1.06 \times 10^3$

い音を弾いているがスペクトル重心ではヴィオラの方が高くなっており、ヴィオラの方が高次の倍音成分が強くあらわれていたと考えられる。次に、第 2 フレーズでは 1st ヴァイオリンのスペクトル重心の値が高く、他のパートは同じくらいの値に収まっており、これは第 2 フレーズにかかっている  $p$  の影響により変動が少なくなっていると考えられる。そして第 3 フレーズでは 1st ヴァイオリンの第 1 音を除き全体的に値が同程度に収まっている。また指示なしから音色を意識した演奏にかけて全体的に各パートのスペクトル重心の値の差が低くなる傾向がみられた。

#### 4.12.2 「皇帝」のバンド幅による分析

「皇帝」のバンド幅に関して、各指示、各フレーズの演奏を図 4.21 から 4.26、表 4.29 から 4.34 に示す。図の縦軸が *Band*、横軸が第  $n$  音である。

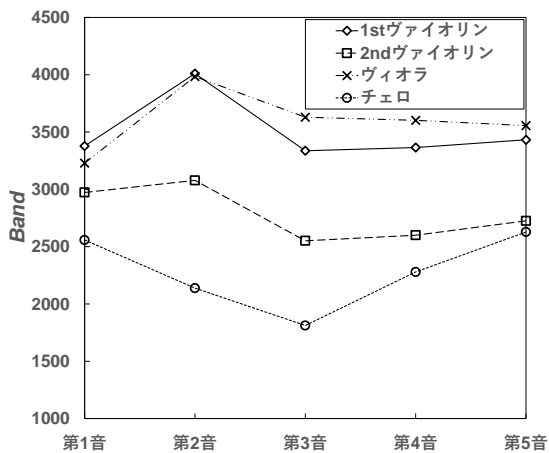


図 4.21 「皇帝」の指示なし 1 回目の演奏における第 1 フレーズ各パートのバンド幅の変化

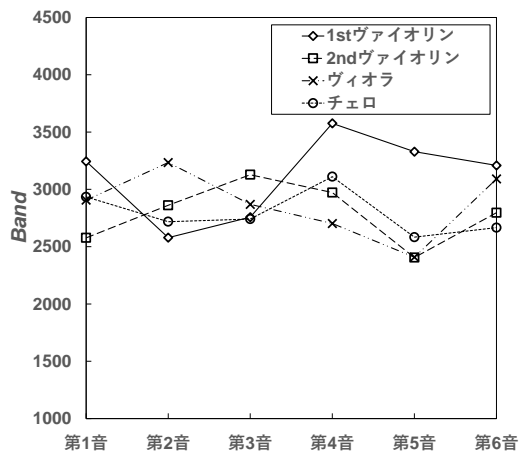


図 4.22 「皇帝」の指示なし 1 回目の演奏における第 2 フレーズ各パートのバンド幅の変化

表 4.29 「皇帝」の指示なし 1 回目の演奏における第 1 フレーズの各音のバンド幅

	第 1 音	第 2 音	第 3 音	第 4 音	第 5 音
1st ヴァイオリン	$3.38 \times 10^3$	$4.01 \times 10^3$	$3.34 \times 10^3$	$3.37 \times 10^3$	$3.43 \times 10^3$
2nd ヴァイオリン	$2.97 \times 10^3$	$3.08 \times 10^3$	$2.55 \times 10^3$	$2.60 \times 10^3$	$2.72 \times 10^3$
ヴィオラ	$3.23 \times 10^3$	$3.98 \times 10^3$	$3.63 \times 10^3$	$3.63 \times 10^3$	$3.56 \times 10^3$
チェロ	$2.56 \times 10^3$	$2.14 \times 10^3$	$1.81 \times 10^3$	$2.28 \times 10^3$	$2.63 \times 10^3$

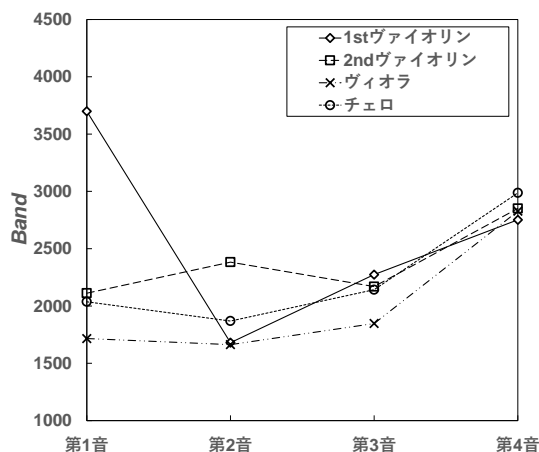


図 4.23 「皇帝」の指示なし 1 回目の演奏における第 3 フレーズ各パートのバンド幅の変化

表 4.30 「皇帝」の指示なし 1 回目の演奏における第 2 フレーズの各音のバンド幅

	第 1 音	第 2 音	第 3 音	第 4 音	第 5 音	第 6 音
1st ヴァイオリン	$3.24 \times 10^3$	$2.58 \times 10^3$	$2.76 \times 10^3$	$3.58 \times 10^3$	$3.33 \times 10^3$	$3.21 \times 10^3$
2nd ヴァイオリン	$2.58 \times 10^3$	$2.86 \times 10^3$	$3.13 \times 10^3$	$2.97 \times 10^3$	$2.41 \times 10^3$	$2.80 \times 10^3$
ヴィオラ	$2.91 \times 10^3$	$3.23 \times 10^3$	$2.87 \times 10^3$	$2.70 \times 10^3$	$2.41 \times 10^3$	$3.09 \times 10^3$
チェロ	$2.93 \times 10^3$	$2.72 \times 10^3$	$2.74 \times 10^3$	$3.11 \times 10^3$	$2.58 \times 10^3$	$2.67 \times 10^3$

表 4.31 「皇帝」の指示なし 1 回目の演奏における第 3 フレーズの各音のバンド幅

	第 1 音	第 2 音	第 3 音	第 4 音
1st ヴァイオリン	$3.70 \times 10^3$	$1.68 \times 10^3$	$2.27 \times 10^3$	$2.75 \times 10^3$
2nd ヴァイオリン	$2.11 \times 10^3$	$2.38 \times 10^3$	$2.17 \times 10^3$	$2.85 \times 10^3$
ヴィオラ	$1.72 \times 10^3$	$1.66 \times 10^3$	$1.85 \times 10^3$	$2.83 \times 10^3$
チェロ	$2.04 \times 10^3$	$1.87 \times 10^3$	$2.14 \times 10^3$	$2.99 \times 10^3$

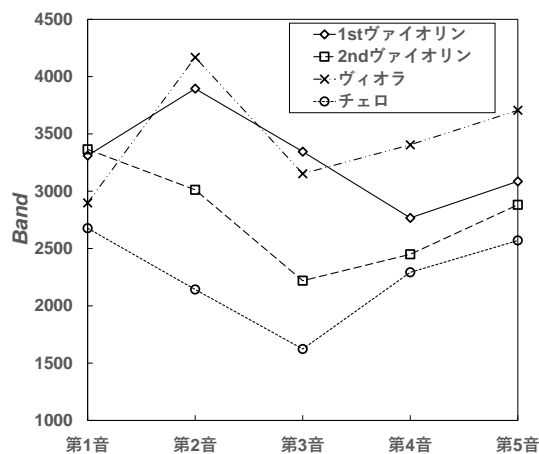


図 4.24 「皇帝」の音色を意識した演奏 2 回目における第 1 フレーズ各パートのバンド幅の変化

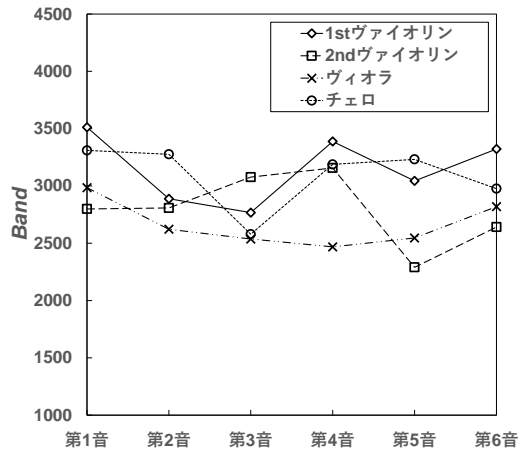


図 4.25 「皇帝」の音色を意識した演奏 2 回目における第 2 フレーズ各パートのバンド幅の変化

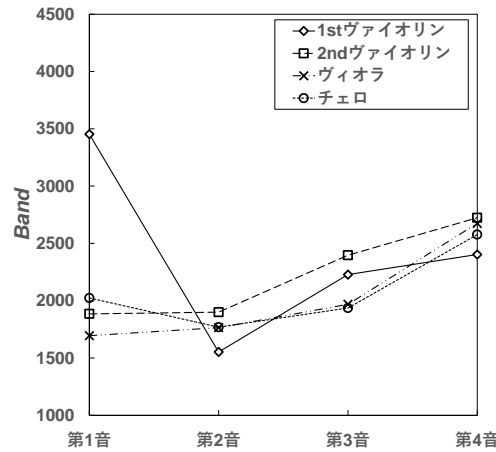


図 4.26 「皇帝」の音色を意識した演奏 2 回目における第 3 フレーズ各パートのバンド幅の変化

表 4.32 「皇帝」の音色を意識した演奏 2 回目における第 1 フレーズの各音のバンド幅

	第 1 音	第 2 音	第 3 音	第 4 音	第 5 音
1st ヴァイオリン	$3.31 \times 10^3$	$3.90 \times 10^3$	$3.35 \times 10^3$	$2.77 \times 10^3$	$3.09 \times 10^3$
2nd ヴァイオリン	$3.37 \times 10^3$	$3.01 \times 10^3$	$2.22 \times 10^3$	$2.45 \times 10^3$	$2.88 \times 10^3$
ヴィオラ	$2.90 \times 10^3$	$4.17 \times 10^3$	$3.15 \times 10^3$	$3.41 \times 10^3$	$3.71 \times 10^3$
チェロ	$2.68 \times 10^3$	$2.14 \times 10^3$	$1.62 \times 10^3$	$2.29 \times 10^3$	$2.57 \times 10^3$

表 4.33 「皇帝」の音色を意識した演奏 2 回目における第 2 フレーズの各音のバンド幅

	第 1 音	第 2 音	第 3 音	第 4 音	第 5 音	第 6 音
1st ヴァイオリン	$3.51 \times 10^3$	$2.89 \times 10^3$	$2.77 \times 10^3$	$3.39 \times 10^3$	$3.04 \times 10^3$	$3.32 \times 10^3$
2nd ヴァイオリン	$2.80 \times 10^3$	$2.81 \times 10^3$	$3.08 \times 10^3$	$3.16 \times 10^3$	$2.29 \times 10^3$	$2.64 \times 10^3$
ヴィオラ	$2.99 \times 10^3$	$2.62 \times 10^3$	$2.54 \times 10^3$	$2.47 \times 10^3$	$2.55 \times 10^3$	$2.82 \times 10^3$
チェロ	$3.31 \times 10^3$	$3.28 \times 10^3$	$2.58 \times 10^3$	$3.19 \times 10^3$	$3.23 \times 10^3$	$2.98 \times 10^3$



表 4.34 「皇帝」の音色を意識した演奏 2 回目における第 3 フレーズの各音のバンド幅

	第 1 音	第 2 音	第 3 音	第 4 音
1st ヴァイオリン	$3.45 \times 10^3$	$1.55 \times 10^3$	$2.23 \times 10^3$	$2.40 \times 10^3$
2nd ヴァイオリン	$1.89 \times 10^3$	$1.90 \times 10^3$	$2.40 \times 10^3$	$2.72 \times 10^3$
ヴィオラ	$1.70 \times 10^3$	$1.77 \times 10^3$	$1.97 \times 10^3$	$2.68 \times 10^3$
チェロ	$2.02 \times 10^3$	$1.77 \times 10^3$	$1.94 \times 10^3$	$2.58 \times 10^3$

図 4.21 から 4.26 において指示なしと音色を意識した演奏ともに、第 1 フレーズでは 1st ヴァイオリンとヴィオラのバンド幅の値が高く、チェロは低い。第 2 フレーズでは全体的に同じくらいの値に収まっており、第 3 フレーズでも 1st ヴァイオリンの第 1 音を除き同じくらいの値に収まっており、特に音色を意識した演奏では第 4 音にかけてバンド幅の値が高くなっていき、弾き終わる際に迫力が大きくなる演奏が行われている。また指示なしから音色を意識した演奏にかけて全体的な変化は見受けられなかった。

#### 4.12.3 「皇帝」のスペクトルフラットネスによる分析

「皇帝」のスペクトルフラットネスに関して、各指示、各フレーズの演奏を図 4.27 から 4.32、表 4.35 から 4.40 に示す。*Fla*、横軸が第  $n$  音である。

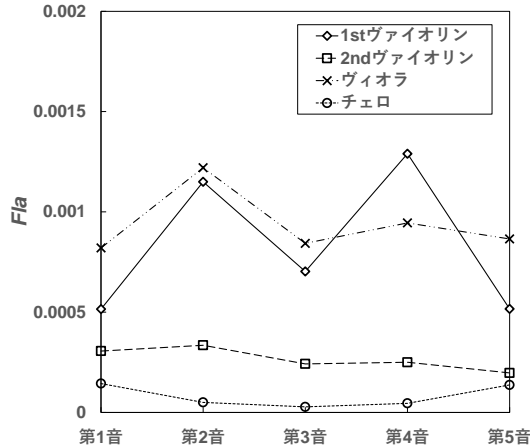


図 4.27 「皇帝」の指示なし 1 回目の演奏における第 1 フレーズ各パートのスペクトルフラットネスの変化

表 4.35 「皇帝」の指示なし 1 回目の演奏における第 1 フレーズの各音のスペクトルフラットネス

	第 1 音	第 2 音	第 3 音	第 4 音	第 5 音
1st ヴァイオリン	$5.15 \times 10^{-3}$	$11.5 \times 10^{-3}$	$7.03 \times 10^{-3}$	$1.29 \times 10^{-3}$	$5.16 \times 10^{-3}$
2nd ヴァイオリン	$3.06 \times 10^{-3}$	$3.35 \times 10^{-3}$	$2.42 \times 10^{-3}$	$2.50 \times 10^{-3}$	$1.97 \times 10^{-3}$
ヴィオラ	$8.20 \times 10^{-3}$	$1.22 \times 10^{-3}$	$8.43 \times 10^{-3}$	$9.45 \times 10^{-3}$	$8.65 \times 10^{-3}$
チェロ	$1.44 \times 10^{-3}$	$5.01 \times 10^{-3}$	$2.76 \times 10^{-3}$	$4.55 \times 10^{-3}$	$1.37 \times 10^{-3}$

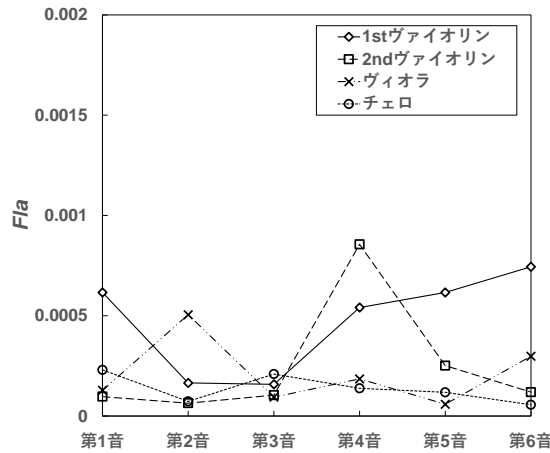


図 4.28 「皇帝」の指示なし 1 回目の演奏における第 2 フレーズ各パートのスペクトルフラットネスの変化

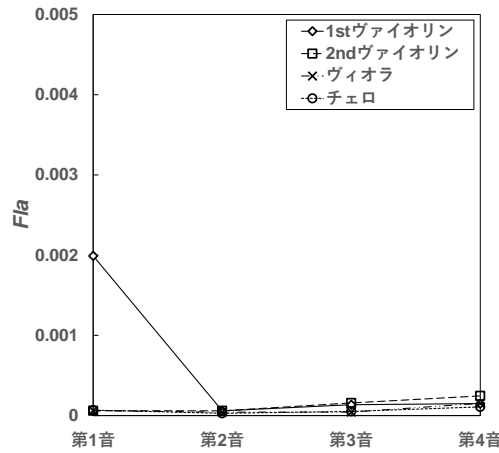


図 4.29 「皇帝」の指示なし 1 回目の演奏における第 3 フレーズ各パートのスペクトルフラットネスの変化

表 4.36 「皇帝」の指示なし 1 回目の演奏における第 2 フレーズの各音のスペクトルフラットネス

	第 1 音	第 2 音	第 3 音	第 4 音	第 5 音	第 6 音
1st ヴァイオリン	$6.16 \times 10^{-3}$	$1.65 \times 10^{-3}$	$1.58 \times 10^{-3}$	$5.41 \times 10^{-3}$	$6.16 \times 10^{-3}$	$7.44 \times 10^{-3}$
2nd ヴァイオリン	$0.965 \times 10^{-3}$	$0.639 \times 10^{-3}$	$1.04 \times 10^{-3}$	$8.56 \times 10^{-3}$	$2.51 \times 10^{-3}$	$1.19 \times 10^{-3}$
ヴィオラ	$1.28 \times 10^{-3}$	$5.05 \times 10^{-3}$	$0.940 \times 10^{-3}$	$1.85 \times 10^{-3}$	$0.586 \times 10^{-3}$	$2.98 \times 10^{-3}$
チェロ	$2.30 \times 10^{-3}$	$0.729 \times 10^{-3}$	$2.09 \times 10^{-3}$	$1.38 \times 10^{-3}$	$1.18 \times 10^{-3}$	$0.560 \times 10^{-3}$

図 4.27 から 4.32 において指示なしの第 1 フレーズでは 1st ヴァイオリンとヴィオラのスペクトルフラットネスの値が高く、チェロは低い。音色を意識した演奏では 1st ヴァイオリンとヴィオラのスペクトルフラットネスの値が高く、2nd ヴァイオリンとチェロの値が低い。また第 2 フレーズに関しては、指示なしで 2nd ヴァイオリンとヴィオラで部分的に値が高くなっている箇所があるが、音色を意識した演奏では 1st ヴァイオリン以外のパートは全体的に低い値に収まっている。第 3 フレーズでは、指示なしでに関して第 4 音にかけて値は上がっていくが、音色を意識した演奏では第 3 音の値が 1 番高い値となっているパートが存在した。次に指示なしから音色を意識した演奏にかけて第 1 フレーズでは全体的にスペクトル

表 4.37 「皇帝」の指示なし 1 回目の演奏における第 3 フレーズの各音のスペクトルフラットネス

	第 1 音	第 2 音	第 3 音	第 4 音
1st ヴァイオリン	$19.9 \times 10^{-3}$	$0.587 \times 10^{-3}$	$1.35 \times 10^{-3}$	$1.49 \times 10^{-3}$
2nd ヴァイオリン	$0.602 \times 10^{-3}$	$0.593 \times 10^{-3}$	$1.57 \times 10^{-3}$	$2.45 \times 10^{-3}$
ヴィオラ	$0.610 \times 10^{-3}$	$0.423 \times 10^{-3}$	$0.434 \times 10^{-3}$	$1.52 \times 10^{-3}$
チェロ	$0.670 \times 10^{-3}$	$0.277 \times 10^{-3}$	$0.511 \times 10^{-3}$	$1.08 \times 10^{-3}$

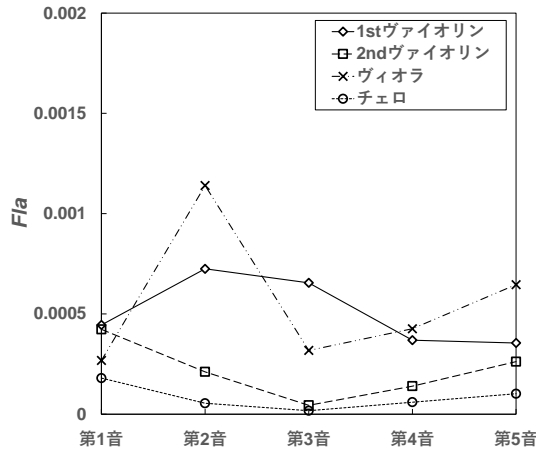


図 4.30 「皇帝」の音色を意識した演奏 2 回目における第 1 フレーズ各パートのスペクトルフラットネスの変化

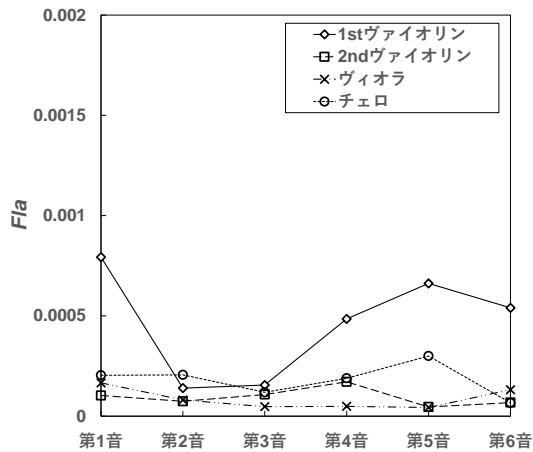


図 4.31 「皇帝」の音色を意識した演奏 2 回目における第 2 フレーズ各パートのスペクトルフラットネスの変化

表 4.38 「皇帝」の音色を意識した演奏 2 回目における第 1 フレーズの各音のスペクトルフラットネス

	第 1 音	第 2 音	第 3 音	第 4 音	第 5 音
1st ヴァイオリン	$4.45 \times 10^{-3}$	$7.25 \times 10^{-3}$	$6.55 \times 10^{-3}$	$3.69 \times 10^{-3}$	$3.55 \times 10^{-3}$
2nd ヴァイオリン	$4.23 \times 10^{-3}$	$2.11 \times 10^{-3}$	$0.444 \times 10^{-3}$	$1.40 \times 10^{-3}$	$2.62 \times 10^{-3}$
ヴィオラ	$2.68 \times 10^{-3}$	$11.4 \times 10^{-3}$	$3.18 \times 10^{-3}$	$4.26 \times 10^{-3}$	$6.46 \times 10^{-3}$
チェロ	$1.80 \times 10^{-3}$	$2.63 \times 10^{-3}$	$0.544 \times 10^{-3}$	$0.174 \times 10^{-3}$	$1.02 \times 10^{-3}$

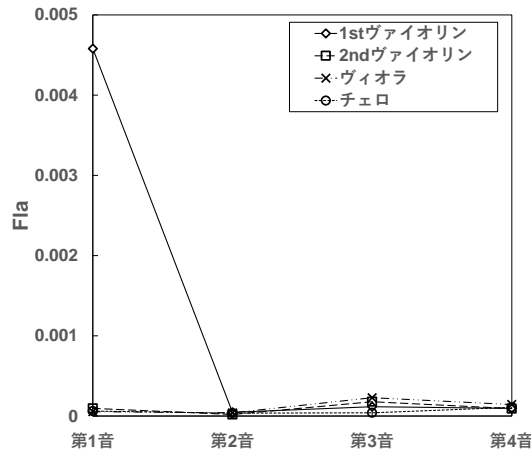


図 4.32 「皇帝」の音色を意識した演奏 2 回目における第 3 フレーズ各パートのスペクトルフラットネスの変化

表 4.39 「皇帝」の音色を意識した演奏 2 回目における第 2 フレーズの各音のスペクトルフラットネス

	第 1 音	第 2 音	第 3 音	第 4 音	第 5 音	第 6 音
1st ヴァイオリン	$0.793 \times 10^{-3}$	$1.40 \times 10^{-3}$	$1.55 \times 10^{-3}$	$4.85 \times 10^{-3}$	$6.62 \times 10^{-3}$	$5.40 \times 10^{-3}$
2nd ヴァイオリン	$1.03 \times 10^{-3}$	$0.740 \times 10^{-3}$	$1.08 \times 10^{-3}$	$1.71 \times 10^{-3}$	$0.459 \times 10^{-3}$	$0.677 \times 10^{-3}$
ヴィオラ	$1.66 \times 10^{-3}$	$0.809 \times 10^{-3}$	$0.475 \times 10^{-3}$	$0.490 \times 10^{-3}$	$0.434 \times 10^{-3}$	$1.32 \times 10^{-3}$
チェロ	$2.04 \times 10^{-3}$	$2.06 \times 10^{-3}$	$1.19 \times 10^{-3}$	$1.89 \times 10^{-3}$	$3.00 \times 10^{-3}$	$0.664 \times 10^{-3}$

表 4.40 「皇帝」の音色を意識した演奏 2 回目における第 3 フレーズの各音のスペクトルフラットネス

	第 1 音	第 2 音	第 3 音	第 4 音
1st ヴァイオリン	$45.8 \times 10^{-3}$	$0.465 \times 10^{-3}$	$1.16 \times 10^{-3}$	$0.952 \times 10^{-3}$
2nd ヴァイオリン	$0.947 \times 10^{-3}$	$0.188 \times 10^{-3}$	$1.78 \times 10^{-3}$	$0.922 \times 10^{-3}$
ヴィオラ	$0.539 \times 10^{-3}$	$0.393 \times 10^{-3}$	$2.28 \times 10^{-3}$	$1.43 \times 10^{-3}$
チェロ	$0.610 \times 10^{-3}$	$0.356 \times 10^{-3}$	$0.402 \times 10^{-3}$	$1.08 \times 10^{-3}$

フラットネスの値が高くなっている。

#### 4.12.4 「皇帝」のスペクトルロールオフによる分析

「皇帝」のスペクトルロールオフに関して、各指示、各フレーズの演奏を図 4.33 から 4.38、表 4.41 から 4.46 に示す。図の縦軸が *Roll*、横軸が第  $n$  音である。

図 4.33 から 4.38 において指示なしと音色を意識した演奏ともに、第 1 フレーズでは 1st ヴァイオリンとヴィオラのスペクトルロールオフの値が高く、チェロは低い。第 2 フレーズでは 1st ヴァイオリン以外のパートは同じくらいの値に収まっており、第 3 フレーズでも 1st ヴァイオリンの第 1 音を除き同じくらいの値に収まっている。また指示なしから音色を意識した演奏にかけて、各フレーズにおいて全体的に値が低くなっている。

表 4.41 「皇帝」の指示なし 1 回目の演奏における第 1 フレーズの各音のスペクトルロールオフ

	第 1 音	第 2 音	第 3 音	第 4 音	第 5 音
1st ヴァイオリン	$3.22 \times 10^3$	$5.83 \times 10^3$	$3.82 \times 10^3$	$4.33 \times 10^3$	$4.31 \times 10^3$
2nd ヴァイオリン	$2.71 \times 10^3$	$3.27 \times 10^3$	$2.46 \times 10^3$	$1.89 \times 10^3$	$1.80 \times 10^3$
ヴィオラ	$2.59 \times 10^3$	$5.74 \times 10^3$	$4.42 \times 10^3$	$3.83 \times 10^3$	$4.40 \times 10^3$
チェロ	$1.44 \times 10^3$	$1.83 \times 10^3$	$0.861 \times 10^3$	$1.12 \times 10^3$	$1.40 \times 10^3$

表 4.42 「皇帝」の指示なし 1 回目の演奏における第 2 フレーズの各音のスペクトルロールオフ

	第 1 音	第 2 音	第 3 音	第 4 音	第 5 音	第 6 音
1st ヴァイオリン	$3.22 \times 10^3$	$1.51 \times 10^3$	$2.27 \times 10^3$	$2.63 \times 10^3$	$2.39 \times 10^3$	$3.59 \times 10^3$
2nd ヴァイオリン	$1.03 \times 10^3$	$0.981 \times 10^3$	$1.13 \times 10^3$	$1.11 \times 10^3$	$1.74 \times 10^3$	$1.90 \times 10^3$
ヴィオラ	$1.31 \times 10^3$	$1.98 \times 10^3$	$1.06 \times 10^3$	$1.35 \times 10^3$	$0.913 \times 10^3$	$2.01 \times 10^3$
チェロ	$1.25 \times 10^3$	$0.869 \times 10^3$	$1.45 \times 10^3$	$0.909 \times 10^3$	$1.07 \times 10^3$	$0.749 \times 10^3$

表 4.43 「皇帝」の指示なし 1 回目の演奏における第 3 フレーズの各音のスペクトルロールオフ

	第 1 音	第 2 音	第 3 音	第 4 音
1st ヴァイオリン	$5.06 \times 10^3$	$1.15 \times 10^3$	$1.47 \times 10^3$	$1.67 \times 10^3$
2nd ヴァイオリン	$0.972 \times 10^3$	$1.09 \times 10^3$	$1.42 \times 10^3$	$1.28 \times 10^3$
ヴィオラ	$1.15 \times 10^3$	$0.772 \times 10^3$	$1.07 \times 10^3$	$1.60 \times 10^3$
チェロ	$1.08 \times 10^3$	$0.745 \times 10^3$	$0.967 \times 10^3$	$1.16 \times 10^3$

表 4.44 「皇帝」の音色を意識した演奏 2 回目における第 1 フレーズの各音のスペクトルロールオフ

	第 1 音	第 2 音	第 3 音	第 4 音	第 5 音
1st ヴァイオリン	$2.93 \times 10^3$	$5.25 \times 10^3$	$3.50 \times 10^3$	$2.83 \times 10^3$	$3.25 \times 10^3$
2nd ヴァイオリン	$2.77 \times 10^3$	$2.90 \times 10^3$	$1.54 \times 10^3$	$1.42 \times 10^3$	$1.92 \times 10^3$
ヴィオラ	$2.47 \times 10^3$	$5.87 \times 10^3$	$2.61 \times 10^3$	$3.56 \times 10^3$	$4.01 \times 10^3$
チェロ	$1.50 \times 10^3$	$1.74 \times 10^3$	$0.741 \times 10^3$	$1.12 \times 10^3$	$1.20 \times 10^3$

表 4.45 「皇帝」の音色を意識した演奏 2 回目における第 2 フレーズの各音のスペクトルロールオフ

	第 1 音	第 2 音	第 3 音	第 4 音	第 5 音	第 6 音
1st ヴァイオリン	$2.94 \times 10^3$	$1.71 \times 10^3$	$2.23 \times 10^3$	$2.21 \times 10^3$	$2.79 \times 10^3$	$3.23 \times 10^3$
2nd ヴァイオリン	$1.17 \times 10^3$	$1.15 \times 10^3$	$1.19 \times 10^3$	$1.49 \times 10^3$	$0.895 \times 10^3$	$1.67 \times 10^3$
ヴィオラ	$1.43 \times 10^3$	$1.46 \times 10^3$	$0.891 \times 10^3$	$0.836 \times 10^3$	$0.886 \times 10^3$	$1.79 \times 10^3$
チェロ	$1.33 \times 10^3$	$1.14 \times 10^3$	$1.10 \times 10^3$	$1.02 \times 10^3$	$1.54 \times 10^3$	$0.774 \times 10^3$

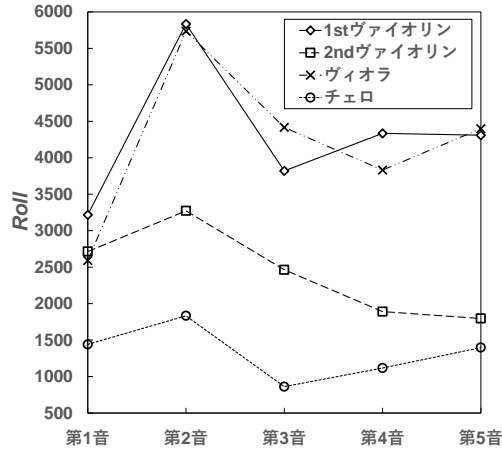


図 4.33 「皇帝」の指示なし 1 回目の演奏における第 1 フレーズ各パートのスペクトルロールオフの変化

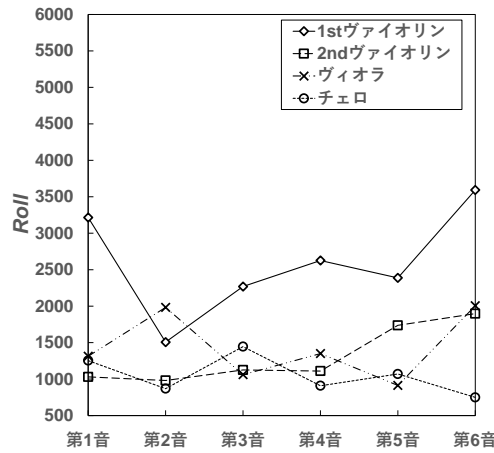


図 4.34 「皇帝」の指示なし 1 回目の演奏における第 2 フレーズ各パートのスペクトルロールオフの変化

表 4.46 「皇帝」の音色を意識した演奏 2 回目における第 3 フレーズの各音のスペクトルロールオフ

	第 1 音	第 2 音	第 3 音	第 4 音
1st ヴァイオリン	$5.39 \times 10^3$	$1.03 \times 10^3$	$1.36 \times 10^3$	$1.32 \times 10^3$
2nd ヴァイオリン	$0.965 \times 10^3$	$0.944 \times 10^3$	$1.31 \times 10^3$	$1.22 \times 10^3$
ヴィオラ	$1.14 \times 10^3$	$1.01 \times 10^3$	$1.24 \times 10^3$	$1.35 \times 10^3$
チェロ	$1.15 \times 10^3$	$0.799 \times 10^3$	$0.815 \times 10^3$	$1.06 \times 10^3$

#### 4.12.5 「皇帝」のゼロクロスレートによる分析

「皇帝」のゼロクロスレートに関して、各指示、各フレーズの演奏を図 4.39 から 4.44、表 4.47 から 4.52 に示す。図の縦軸が ZCR 横軸が第  $n$  音である。

図 4.39 から 4.44 において指示なしと音色を意識した演奏ともに、第 1 フレーズでは 1st ヴァイオリンとヴィオラのゼロクロスレートの値が高く、チェロは低い。第 2 フレーズでは 1st ヴァイオリン以外のパートは同じくらいの値に収まっており、第 3 フレーズでも 1st ヴァイオリンの第 1 音を除き同じく

表 4.47 「皇帝」の指示なし 1 回目の演奏における第 1 フレーズの各音のゼロクロスレート

	第 1 音	第 2 音	第 3 音	第 4 音	第 5 音
1st ヴァイオリン	$4.61 \times 10^{-2}$	$6.46 \times 10^{-2}$	$4.79 \times 10^{-2}$	$3.74 \times 10^{-2}$	$3.85 \times 10^{-2}$
2nd ヴァイオリン	$3.07 \times 10^{-2}$	$4.31 \times 10^{-2}$	$2.65 \times 10^{-2}$	$2.22 \times 10^{-2}$	$2.51 \times 10^{-2}$
ヴィオラ	$2.81 \times 10^{-2}$	$6.64 \times 10^{-2}$	$4.51 \times 10^{-2}$	$3.58 \times 10^{-2}$	$5.59 \times 10^{-2}$
チェロ	$2.34 \times 10^{-2}$	$2.43 \times 10^{-2}$	$1.75 \times 10^{-2}$	$1.02 \times 10^{-2}$	$2.29 \times 10^{-2}$

表 4.48 「皇帝」の指示なし 1 回目の演奏における第 2 フレーズの各音のゼロクロスレート

	第 1 音	第 2 音	第 3 音	第 4 音	第 5 音	第 6 音
1st ヴァイオリン	$4.09 \times 10^{-2}$	$2.03 \times 10^{-2}$	$2.87 \times 10^{-2}$	$3.63 \times 10^{-2}$	$4.10 \times 10^{-2}$	$5.79 \times 10^{-2}$
2nd ヴァイオリン	$1.40 \times 10^{-2}$	$1.44 \times 10^{-2}$	$1.42 \times 10^{-2}$	$1.32 \times 10^{-2}$	$1.82 \times 10^{-2}$	$2.21 \times 10^{-2}$
ヴィオラ	$1.66 \times 10^{-2}$	$2.73 \times 10^{-2}$	$1.28 \times 10^{-2}$	$1.34 \times 10^{-2}$	$1.48 \times 10^{-2}$	$1.74 \times 10^{-2}$
チェロ	$1.84 \times 10^{-2}$	$2.09 \times 10^{-2}$	$1.00 \times 10^{-2}$	$1.14 \times 10^{-2}$	$1.09 \times 10^{-2}$	$0.756 \times 10^{-2}$

表 4.49 「皇帝」の指示なし 1 回目の演奏における第 3 フレーズの各音のゼロクロスレート

	第 1 音	第 2 音	第 3 音	第 4 音
1st ヴァイオリン	$9.27 \times 10^{-2}$	$1.68 \times 10^{-2}$	$2.40 \times 10^{-2}$	$1.73 \times 10^{-2}$
2nd ヴァイオリン	$1.62 \times 10^{-2}$	$1.69 \times 10^{-2}$	$1.82 \times 10^{-2}$	$1.77 \times 10^{-2}$
ヴィオラ	$1.55 \times 10^{-2}$	$1.38 \times 10^{-2}$	$1.31 \times 10^{-2}$	$1.75 \times 10^{-2}$
チェロ	$1.07 \times 10^{-2}$	$1.67 \times 10^{-2}$	$1.16 \times 10^{-2}$	$1.32 \times 10^{-2}$

表 4.50 「皇帝」の音色を意識した演奏 2 回目における第 1 フレーズの各音のゼロクロスレート

	第 1 音	第 2 音	第 3 音	第 4 音	第 5 音
1st ヴァイオリン	$5.04 \times 10^{-2}$	$6.13 \times 10^{-2}$	$3.77 \times 10^{-2}$	$2.86 \times 10^{-2}$	$3.24 \times 10^{-2}$
2nd ヴァイオリン	$3.28 \times 10^{-2}$	$3.50 \times 10^{-2}$	$1.95 \times 10^{-2}$	$2.19 \times 10^{-2}$	$2.55 \times 10^{-2}$
ヴィオラ	$2.54 \times 10^{-2}$	$6.52 \times 10^{-2}$	$3.21 \times 10^{-2}$	$2.68 \times 10^{-2}$	$4.79 \times 10^{-2}$
チェロ	$2.47 \times 10^{-2}$	$2.50 \times 10^{-2}$	$1.46 \times 10^{-2}$	$1.29 \times 10^{-2}$	$1.76 \times 10^{-2}$

表 4.51 「皇帝」の音色を意識した演奏 2 回目における第 2 フレーズの各音のゼロクロスレート

	第 1 音	第 2 音	第 3 音	第 4 音	第 5 音	第 6 音
1st ヴァイオリン	$4.07 \times 10^{-2}$	$1.58 \times 10^{-2}$	$3.53 \times 10^{-2}$	$3.28 \times 10^{-2}$	$5.56 \times 10^{-2}$	$5.28 \times 10^{-2}$
2nd ヴァイオリン	$1.89 \times 10^{-2}$	$1.75 \times 10^{-2}$	$1.40 \times 10^{-2}$	$1.85 \times 10^{-2}$	$1.93 \times 10^{-2}$	$2.18 \times 10^{-2}$
ヴィオラ	$1.58 \times 10^{-2}$	$1.32 \times 10^{-2}$	$1.28 \times 10^{-2}$	$1.08 \times 10^{-2}$	$1.40 \times 10^{-2}$	$1.30 \times 10^{-2}$
チェロ	$0.980 \times 10^{-2}$	$1.46 \times 10^{-2}$	$0.901 \times 10^{-2}$	$1.03 \times 10^{-2}$	$1.68 \times 10^{-2}$	$0.776 \times 10^{-2}$

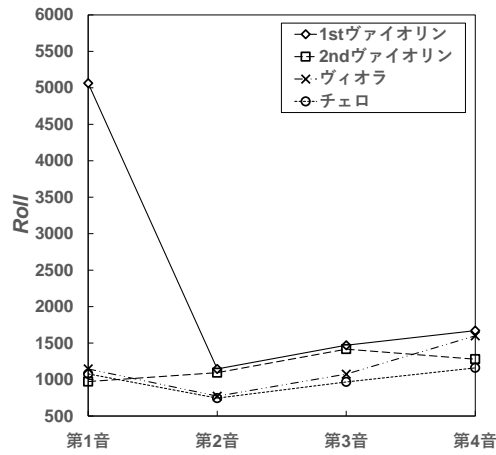


図 4.35 「皇帝」の指示なし 1 回目の演奏における第 3 フレーズ各パートのスペクトルロールオフの変化

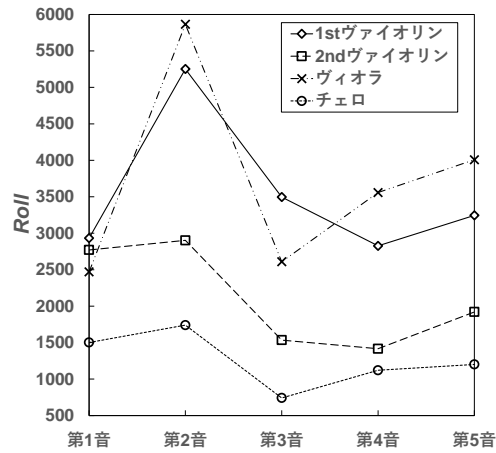


図 4.36 「皇帝」の音色を意識した演奏 2 回目における第 1 フレーズ各パートのスペクトルロールオフの変化

表 4.52 「皇帝」の音色を意識した演奏 2 回目における第 3 フレーズの各音のゼロクロスレート

	第 1 音	第 2 音	第 3 音	第 4 音
1st ヴァイオリン	$9.87 \times 10^{-2}$	$1.74 \times 10^{-2}$	$0.210 \times 10^{-2}$	$1.69 \times 10^{-2}$
2nd ヴァイオリン	$1.62 \times 10^{-2}$	$1.62 \times 10^{-2}$	$1.97 \times 10^{-2}$	$1.38 \times 10^{-2}$
ヴィオラ	$1.38 \times 10^{-2}$	$1.59 \times 10^{-2}$	$1.44 \times 10^{-2}$	$1.71 \times 10^{-2}$
チェロ	$1.01 \times 10^{-2}$	$1.81 \times 10^{-2}$	$1.09 \times 10^{-2}$	$1.77 \times 10^{-2}$

らの値に収まっている。また指示なしから音色を意識した演奏にかけて全体的な変化は見受けられなかった。



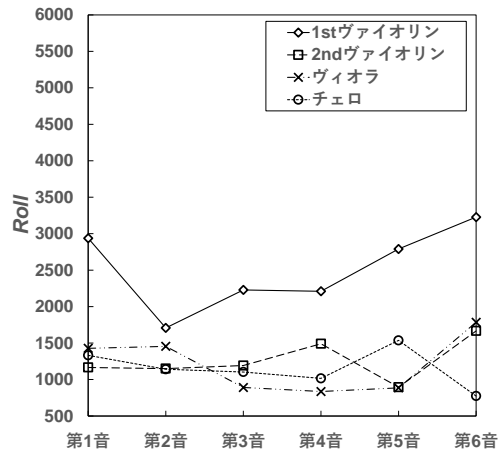


図 4.37 「皇帝」の音色を意識した演奏 2 回目における第 2 フレーズ各パートのスペクトルロールオフの変化

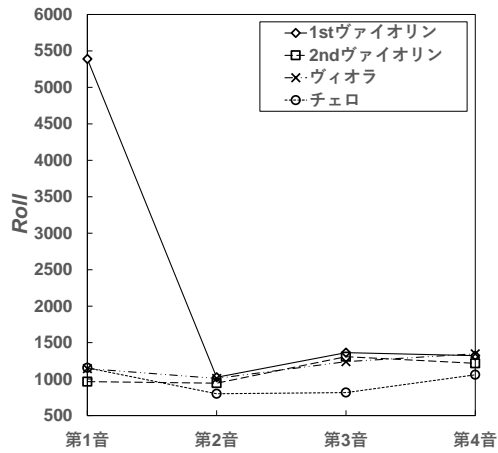


図 4.38 「皇帝」の音色を意識した演奏 2 回目における第 3 フレーズ各パートのスペクトルロールオフの変化

#### 4.12.6 「皇帝」の音色

各音響特徴量に関してそれぞれのフレーズで似たような傾向が見受けられ、第 1 フレーズでは 1st ヴァイオリンとヴィオラの値が全体的に高く、2nd ヴァイオリン、チェロの順に値が低くなっていた。また第 2 フレーズでは 1st ヴァイオリン以外のパートは同じくらいの値に収まっており、第 3 フレーズでは全体的に同じくらいの値に収まっていた。特にヴィオラに関しては、使用した音響特徴量がピッチの影響を受けやすいにもかかわらず第 1 フレーズでは高い値となっている。これはヴィオラの音に高周波の倍音成分が多く含まれているからであり、どのメーカーを使用するかで値が変わる可能性がある。

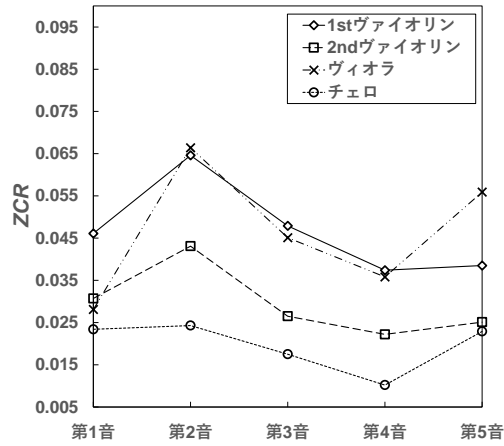


図 4.39 「皇帝」の指示なし 1 回目の演奏における第 1 フレーズ各パートのゼロクロスレートの変化

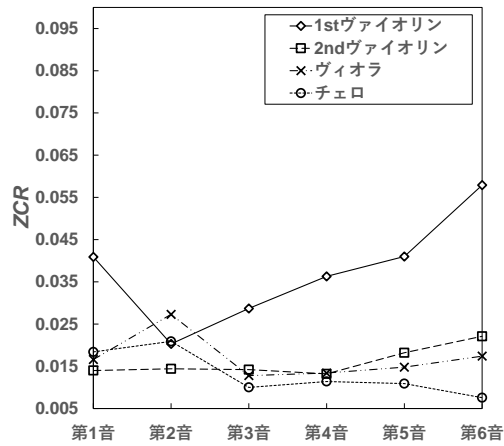


図 4.40 「皇帝」の指示なし 1 回目の演奏における第 2 フレーズ各パートのゼロクロスレートの変化

#### 4.12.7 「アイネ・クライネ・ナハトムジーク」のスペクトル重心による分析

「アイネ・クライネ・ナハトムジーク」のスペクトル重心に関して、各指示、各フレーズの演奏を図 4.45 から 4.48、表 4.53 から 4.56 に示す。図の縦軸が  $Cen(\text{Hz})$ 、横軸が第  $n$  音である。

表 4.53 「アイネ・クライネ・ナハトムジーク」の指示なし 1 回目の演奏における第 1 フレーズの各音のスペクトル重心 (Hz)

	第 1 音	第 2 音	第 3 音	第 4 音	第 5 音	第 6 音	第 7 音	第 8 音	第 9 音
1st ヴァイオリン	$1.47 \times 10^3$	$1.61 \times 10^3$	$2.69 \times 10^3$	$1.83 \times 10^3$	$2.72 \times 10^3$	$1.84 \times 10^3$	$2.65 \times 10^3$	$3.11 \times 10^3$	$3.86 \times 10^3$
2nd ヴァイオリン	$1.36 \times 10^3$	$1.87 \times 10^3$	$3.10 \times 10^3$	$2.01 \times 10^3$	$2.61 \times 10^3$	$2.01 \times 10^3$	$3.18 \times 10^3$	$4.18 \times 10^3$	$4.34 \times 10^3$
ヴィオラ	$1.74 \times 10^3$	$1.33 \times 10^3$	$1.56 \times 10^3$	$1.79 \times 10^3$	$1.73 \times 10^3$	$1.49 \times 10^3$	$1.70 \times 10^3$	$1.70 \times 10^3$	$2.19 \times 10^3$
チェロ	$1.28 \times 10^3$	$1.08 \times 10^3$	$1.12 \times 10^3$	$1.04 \times 10^3$	$0.916 \times 10^3$	$0.994 \times 10^3$	$1.09 \times 10^3$	$1.28 \times 10^3$	$1.84 \times 10^3$

図 4.45 から 4.48 において第 1 フレーズでは指示なしと音色を意識した演奏ともに、1st ヴァイオリンと 2nd ヴァイオリンのスペクトル重心の値が高く、チェロの値が低い。「アイネ・クライネ・ナハトムジーク」は第 1 音から第 2 音にかけてソとレが交互に続き、第 7 音から第 9 音にかけてソシレと上がる。図か

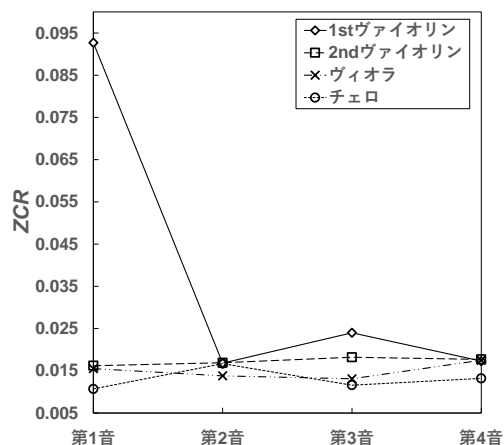


図 4.41 「皇帝」の指示なし 1 回目の演奏における第 3 フレーズ各パートのゼロクロスレートの変化

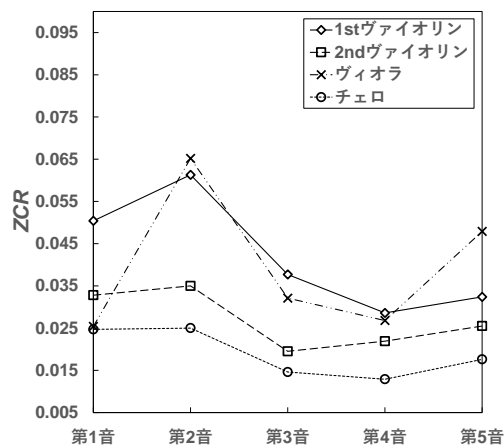


図 4.42 「皇帝」の音色を意識した演奏 2 回目における第 1 フレーズ各パートのゼロクロスレート

表 4.54 「アイネ・クライネ・ナハトムジーク」の指示なし 1 回目の演奏における第 2 フレーズの各音のスペクトル重心 (Hz)

	第 1 音	第 2 音	第 3 音	第 4 音	第 5 音	第 6 音	第 7 音	第 8 音	第 9 音
1st ヴァイオリン	$3.60 \times 10^3$	$2.44 \times 10^3$	$3.74 \times 10^3$	$2.63 \times 10^3$	$4.01 \times 10^3$	$2.64 \times 10^3$	$2.64 \times 10^3$	$2.28 \times 10^3$	$2.22 \times 10^3$
2nd ヴァイオリン	$3.04 \times 10^3$	$2.57 \times 10^3$	$3.60 \times 10^3$	$2.81 \times 10^3$	$3.13 \times 10^3$	$2.70 \times 10^3$	$2.36 \times 10^3$	$2.70 \times 10^3$	$2.25 \times 10^3$
ヴィオラ	$2.48 \times 10^3$	$2.01 \times 10^3$	$2.73 \times 10^3$	$1.98 \times 10^3$	$3.08 \times 10^3$	$1.88 \times 10^3$	$1.37 \times 10^3$	$1.67 \times 10^3$	$1.33 \times 10^3$
チェロ	$1.05 \times 10^3$	$1.50 \times 10^3$	$1.12 \times 10^3$	$1.35 \times 10^3$	$1.28 \times 10^3$	$1.42 \times 10^3$	$0.753 \times 10^3$	$1.13 \times 10^3$	$0.983 \times 10^3$

ら 1st ヴァイオリンと 2nd ヴァイオリンの第 1 音以外では交互に続いていき、最後に上がる影響が見受けられたが、ヴィオラとチェロではその傾向はみられなかった。第 2 フレーズでは第 1 音から第 6 音までドとラが交互に続き、第 7 音から第 9 音にかけて下がっていくが、指示なしではチェロ以外のパートでその影響が見受けられたが、音色を意識した演奏では交互に現れる影響が見受けられたのは 1st ヴァイオリンのみとなっている。また、指示なしから音色を意識した演奏にかけて、第 1 フレーズではヴィオラの値が高くなり、第 2 フレーズでは 2nd ヴァイオリンの値が低くなっていた。

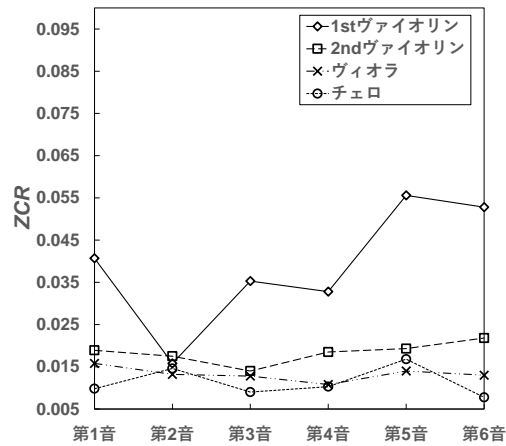


図 4.43 「皇帝」の音色を意識した演奏 2 回目における第 2 フレーズ各パートのゼロクロスレート

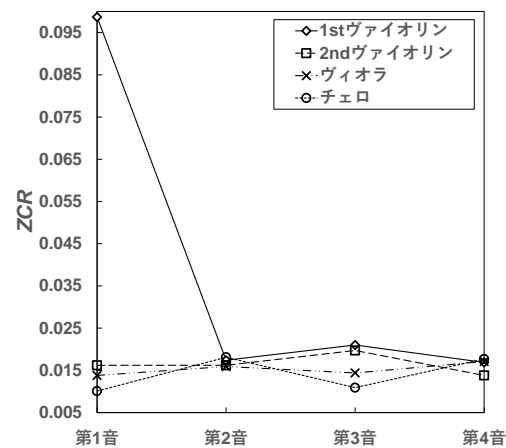


図 4.44 「皇帝」の音色を意識した演奏 2 回目における第 3 フレーズ各パートのゼロクロスレート

表 4.55 「アイネ・クライネ・ナハトムジーク」の音色を意識した演奏 2 回目における第 1 フレーズの各音のスペクトル重心 (Hz)

	第 1 音	第 2 音	第 3 音	第 4 音	第 5 音	第 6 音	第 7 音	第 8 音	第 9 音
1st ヴァイオリン	$1.57 \times 10^3$	$1.64 \times 10^3$	$2.59 \times 10^3$	$2.18 \times 10^3$	$2.98 \times 10^3$	$1.82 \times 10^3$	$2.34 \times 10^3$	$2.67 \times 10^3$	$3.75 \times 10^3$
2nd ヴァイオリン	$1.21 \times 10^3$	$1.75 \times 10^3$	$2.83 \times 10^3$	$2.34 \times 10^3$	$3.17 \times 10^3$	$1.82 \times 10^3$	$3.45 \times 10^3$	$3.99 \times 10^3$	$4.45 \times 10^3$
ヴィオラ	$1.64 \times 10^3$	$1.50 \times 10^3$	$2.12 \times 10^3$	$1.68 \times 10^3$	$1.80 \times 10^3$	$1.79 \times 10^3$	$1.75 \times 10^3$	$2.11 \times 10^3$	$2.89 \times 10^3$
チェロ	$1.05 \times 10^3$	$0.920 \times 10^3$	$1.11 \times 10^3$	$0.878 \times 10^3$	$0.862 \times 10^3$	$0.992 \times 10^3$	$1.10 \times 10^3$	$1.34 \times 10^3$	$1.42 \times 10^3$

#### 4.12.8 「アイネ・クライネ・ナハトムジーク」のバンド幅による分析

「アイネ・クライネ・ナハトムジーク」のバンド幅に関して、各指示、各フレーズの演奏を図 4.49 から 4.52、表 4.57 から 4.60 に示す。図の縦軸が *Band*、横軸が第  $n$  音である。

図 4.49 から 4.52 において第 1 フレーズでは指示なしと音色を意識した演奏ともに 1st ヴァイオリンと 2nd ヴァイオリンのバンド幅の値が高く、チェロの値が低い。第 2 フレーズではチェロのバンド幅が低く、他のパートのバンド幅は低くなっている。また、指示なしから音色を意識した演奏にかけて、第 1 フ

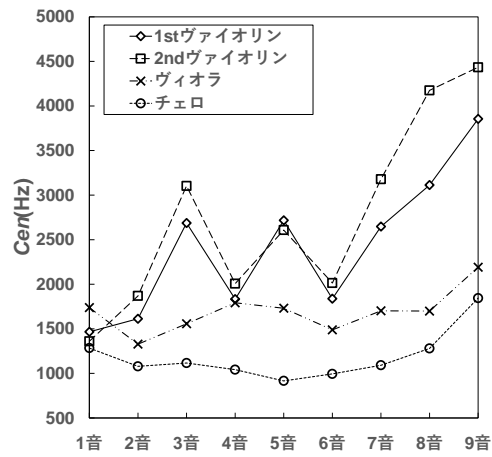


図 4.45 「アイネ・クライネ・ナハトムジーク」の指示なし 1 回目の演奏における第 1 フレーズ各パートのスペクトル重心の変化

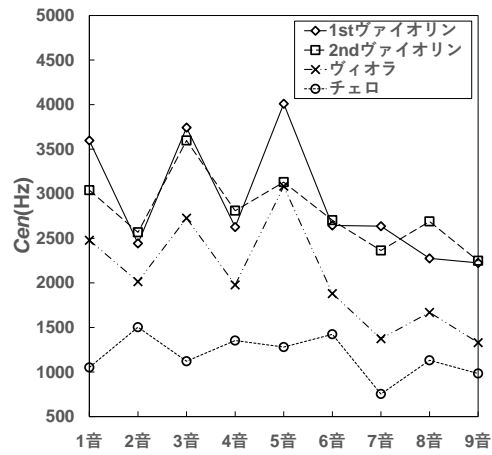


図 4.46 「アイネ・クライネ・ナハトムジーク」の指示なし 1 回目の演奏における第 2 フレーズ各パートのスペクトル重心の変化

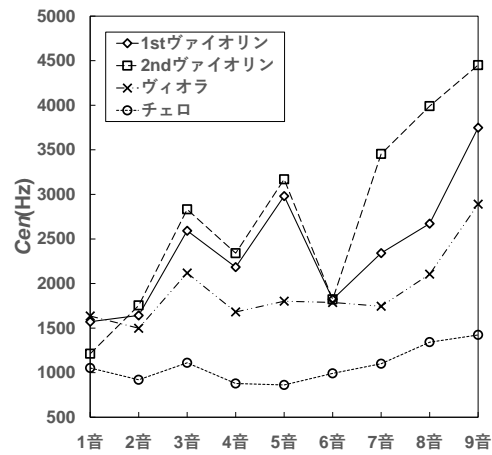


図 4.47 「アイネ・クライネ・ナハトムジーク」の音色を意識した演奏 2 回目における第 1 フレーズ各パートのスペクトル重心の変化

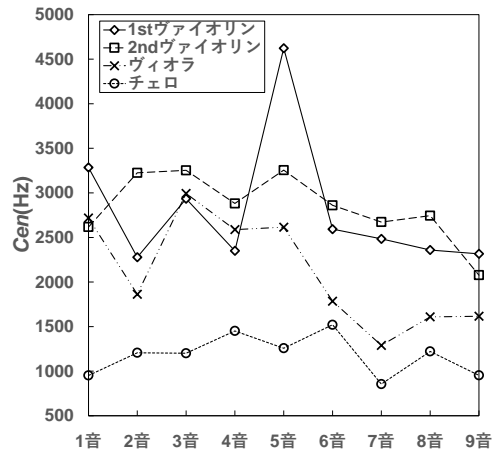


図 4.48 「アイネ・クライネ・ナハトムジーク」の音色を意識した演奏 2 回目における第 2 フレーズ各パートのスペクトル重心の変化

表 4.56 「アイネ・クライネ・ナハトムジーク」の音色を意識した演奏 2 回目における第 2 フレーズの各音のスペクトル重心 (Hz)

	第 1 音	第 2 音	第 3 音	第 4 音	第 5 音	第 6 音	第 7 音	第 8 音	第 9 音
1st ヴァイオリン	$3.29 \times 10^3$	$2.28 \times 10^3$	$2.93 \times 10^3$	$2.35 \times 10^3$	$4.62 \times 10^3$	$2.59 \times 10^3$	$2.48 \times 10^3$	$2.36 \times 10^3$	$2.32 \times 10^3$
2nd ヴァイオリン	$2.62 \times 10^3$	$3.23 \times 10^3$	$3.25 \times 10^3$	$2.88 \times 10^3$	$3.26 \times 10^3$	$2.86 \times 10^3$	$2.67 \times 10^3$	$2.74 \times 10^3$	$2.08 \times 10^3$
ヴィオラ	$2.72 \times 10^3$	$1.86 \times 10^3$	$2.99 \times 10^3$	$2.59 \times 10^3$	$2.62 \times 10^3$	$1.79 \times 10^3$	$1.29 \times 10^3$	$1.61 \times 10^3$	$1.62 \times 10^3$
チェロ	$0.952 \times 10^3$	$1.21 \times 10^3$	$1.20 \times 10^3$	$1.45 \times 10^3$	$1.26 \times 10^3$	$1.52 \times 10^3$	$0.855 \times 10^3$	$1.22 \times 10^3$	$0.953 \times 10^3$

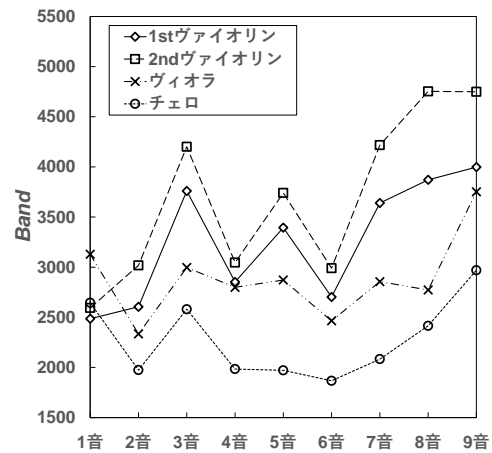


図 4.49 「アイネ・クライネ・ナハトムジーク」の指示なし 1 回目の演奏における第 1 フレーズ各パートのバンド幅の変化

表 4.57 「アイネ・クライネ・ナハトムジーク」の指示なし 1 回目の演奏における第 1 フレーズの各音のバンド幅

	第 1 音	第 2 音	第 3 音	第 4 音	第 5 音	第 6 音	第 7 音	第 8 音	第 9 音
1st ヴァイオリン	$2.49 \times 10^3$	$2.61 \times 10^3$	$3.76 \times 10^3$	$2.85 \times 10^3$	$3.39 \times 10^3$	$2.70 \times 10^3$	$3.64 \times 10^3$	$3.87 \times 10^3$	$4.00 \times 10^3$
2nd ヴァイオリン	$2.59 \times 10^3$	$3.02 \times 10^3$	$4.20 \times 10^3$	$3.05 \times 10^3$	$3.74 \times 10^3$	$2.99 \times 10^3$	$4.22 \times 10^3$	$4.75 \times 10^3$	$4.75 \times 10^3$
ヴィオラ	$3.13 \times 10^3$	$2.33 \times 10^3$	$3.00 \times 10^3$	$2.80 \times 10^3$	$2.87 \times 10^3$	$2.47 \times 10^3$	$2.86 \times 10^3$	$2.77 \times 10^3$	$3.75 \times 10^3$
チェロ	$2.65 \times 10^3$	$1.97 \times 10^3$	$2.58 \times 10^3$	$1.98 \times 10^3$	$1.97 \times 10^3$	$1.87 \times 10^3$	$2.08 \times 10^3$	$2.42 \times 10^3$	$2.07 \times 10^3$

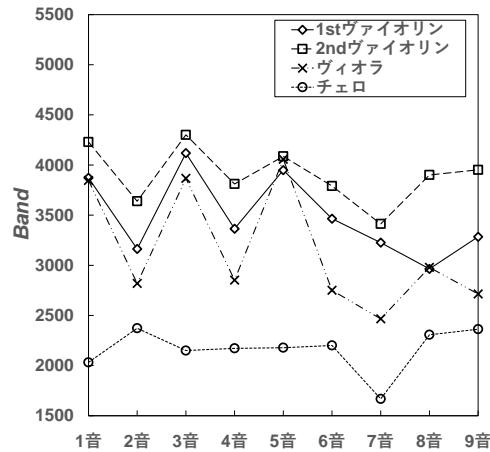


図 4.50 「アイネ・クライネ・ナハトムジーク」の指示なし 1 回目の演奏における第 2 フレーズ各パートのバンド幅の変化

表 4.58 「アイネ・クライネ・ナハトムジーク」の指示なし 1 回目の演奏における第 2 フレーズの各音のバンド幅

	第 1 音	第 2 音	第 3 音	第 4 音	第 5 音	第 6 音	第 7 音	第 8 音	第 9 音
1st ヴァイオリン	$3.87 \times 10^3$	$3.16 \times 10^3$	$4.12 \times 10^3$	$3.37 \times 10^3$	$3.95 \times 10^3$	$3.47 \times 10^3$	$3.23 \times 10^3$	$2.96 \times 10^3$	$3.28 \times 10^3$
2nd ヴァイオリン	$4.23 \times 10^3$	$3.64 \times 10^3$	$4.30 \times 10^3$	$3.81 \times 10^3$	$4.09 \times 10^3$	$3.79 \times 10^3$	$3.41 \times 10^3$	$3.90 \times 10^3$	$3.95 \times 10^3$
ヴィオラ	$3.85 \times 10^3$	$2.82 \times 10^3$	$3.87 \times 10^3$	$2.85 \times 10^3$	$4.06 \times 10^3$	$2.75 \times 10^3$	$2.47 \times 10^3$	$2.98 \times 10^3$	$2.71 \times 10^3$
チェロ	$2.03 \times 10^3$	$2.37 \times 10^3$	$2.15 \times 10^3$	$2.17 \times 10^3$	$2.18 \times 10^3$	$2.20 \times 10^3$	$1.67 \times 10^3$	$2.31 \times 10^3$	$2.36 \times 10^3$

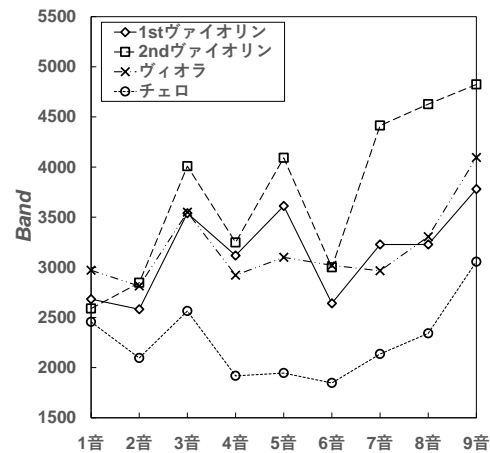


図 4.51 「アイネ・クライネ・ナハトムジーク」の音色を意識した演奏 2 回目における第 1 フレーズ各パートのバンド幅の変化

表 4.59 「アイネ・クライネ・ナハトムジーク」の音色を意識した演奏 2 回目における第 1 フレーズの各音のバンド幅

	第 1 音	第 2 音	第 3 音	第 4 音	第 5 音	第 6 音	第 7 音	第 8 音	第 9 音
1st ヴァイオリン	$2.68 \times 10^3$	$2.58 \times 10^3$	$3.54 \times 10^3$	$3.12 \times 10^3$	$3.61 \times 10^3$	$2.64 \times 10^3$	$3.23 \times 10^3$	$3.23 \times 10^3$	$3.78 \times 10^3$
2nd ヴァイオリン	$2.59 \times 10^3$	$2.85 \times 10^3$	$4.01 \times 10^3$	$3.25 \times 10^3$	$4.09 \times 10^3$	$3.00 \times 10^3$	$4.41 \times 10^3$	$4.63 \times 10^3$	$4.82 \times 10^3$
ヴィオラ	$2.97 \times 10^3$	$2.81 \times 10^3$	$3.55 \times 10^3$	$2.92 \times 10^3$	$3.10 \times 10^3$	$3.02 \times 10^3$	$2.97 \times 10^3$	$3.31 \times 10^3$	$4.10 \times 10^3$
チェロ	$2.46 \times 10^3$	$2.10 \times 10^3$	$2.56 \times 10^3$	$1.92 \times 10^3$	$1.95 \times 10^3$	$1.85 \times 10^3$	$2.14 \times 10^3$	$2.34 \times 10^3$	$3.06 \times 10^3$

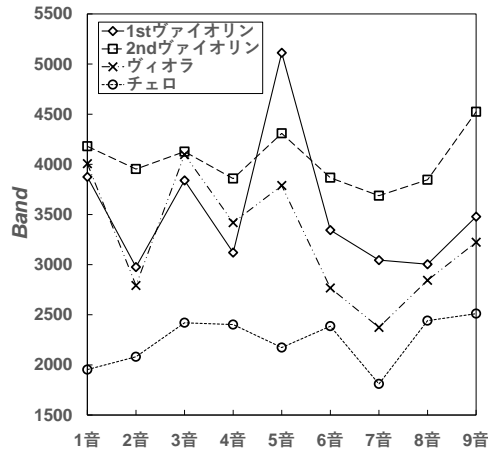


図 4.52 「アイネ・クライネ・ナハトムジーク」の音色を意識した演奏 2 回目における第 2 フレーズ各パートのバンド幅の変化

表 4.60 「アイネ・クライネ・ナハトムジーク」の音色を意識した演奏 2 回目における第 2 フレーズの各音のバンド幅

	第 1 音	第 2 音	第 3 音	第 4 音	第 5 音	第 6 音	第 7 音	第 8 音	第 9 音
1st ヴァイオリン	$3.88 \times 10^3$	$2.98 \times 10^3$	$3.84 \times 10^3$	$3.12 \times 10^3$	$5.11 \times 10^3$	$3.34 \times 10^3$	$3.05 \times 10^3$	$3.00 \times 10^3$	$3.48 \times 10^3$
2nd ヴァイオリン	$4.18 \times 10^3$	$3.95 \times 10^3$	$4.13 \times 10^3$	$3.86 \times 10^3$	$4.31 \times 10^3$	$3.87 \times 10^3$	$3.69 \times 10^3$	$3.85 \times 10^3$	$4.52 \times 10^3$
ヴィオラ	$4.01 \times 10^3$	$2.79 \times 10^3$	$4.10 \times 10^3$	$3.42 \times 10^3$	$3.79 \times 10^3$	$2.77 \times 10^3$	$2.37 \times 10^3$	$2.84 \times 10^3$	$3.22 \times 10^3$
チェロ	$1.95 \times 10^3$	$2.08 \times 10^3$	$2.42 \times 10^3$	$2.40 \times 10^3$	$2.17 \times 10^3$	$2.39 \times 10^3$	$1.81 \times 10^3$	$2.44 \times 10^3$	$2.51 \times 10^3$

レーズではヴィオラの値が高くなっている。

#### 4.12.9 「アイネ・クライネ・ナハトムジーク」のスペクトルフラットネスによる分析

「アイネ・クライネ・ナハトムジーク」のスペクトルフラットネスに関して、各指示、各フレーズの演奏を図 4.53 から 4.56、表 4.61 から 4.64 に示す。図の縦軸が  $Fla$ 、横軸が第  $n$  音である。

表 4.61 「アイネ・クライネ・ナハトムジーク」の指示なし 1 回目の演奏における第 1 フレーズの各音のスペクトルフラットネス

	第 1 音	第 2 音	第 3 音	第 4 音	第 5 音	第 6 音	第 7 音	第 8 音	第 9 音
1st ヴァイオリン	$3.06 \times 10^{-4}$	$2.33 \times 10^{-4}$	$5.93 \times 10^{-4}$	$4.17 \times 10^{-4}$	$9.28 \times 10^{-4}$	$5.39 \times 10^{-4}$	$10.6 \times 10^{-4}$	$15.0 \times 10^{-4}$	$5.39 \times 10^{-4}$
2nd ヴァイオリン	$2.20 \times 10^{-4}$	$3.42 \times 10^{-4}$	$9.70 \times 10^{-4}$	$3.43 \times 10^{-4}$	$7.41 \times 10^{-4}$	$24.5 \times 10^{-4}$	$30.2 \times 10^{-4}$	$26.2 \times 10^{-4}$	$13.8 \times 10^{-4}$
ヴィオラ	$6.24 \times 10^{-4}$	$4.89 \times 10^{-4}$	$2.70 \times 10^{-4}$	$16.1 \times 10^{-4}$	$5.98 \times 10^{-4}$	$8.70 \times 10^{-4}$	$3.98 \times 10^{-4}$	$5.27 \times 10^{-4}$	$4.75 \times 10^{-4}$
チェロ	$2.01 \times 10^{-4}$	$1.58 \times 10^{-4}$	$0.931 \times 10^{-4}$	$1.59 \times 10^{-4}$	$0.643 \times 10^{-4}$	$1.22 \times 10^{-4}$	$1.41 \times 10^{-4}$	$2.41 \times 10^{-4}$	$3.14 \times 10^{-4}$

図 4.53 から 4.56 において第 1 フレーズでは指示なしでは 2nd ヴァイオリンの第 6 音から第 8 音にかけてスペクトルフラットネスの値が高く、それ以外では各パート同じくらいの値に収まっている。音色を意識した演奏では 2nd ヴァイオリンの値が高く、他のパートは同じくらいの値に収まっている。第 2 フレーズでは指示なしと音色を意識した演奏ともに 2nd ヴァイオリンとヴィオラの値が高く、チェロの値が低い。また、指示なしから音色を意識した演奏にかけて、第 1 フレーズで 1st ヴァイオリンの値が低く、



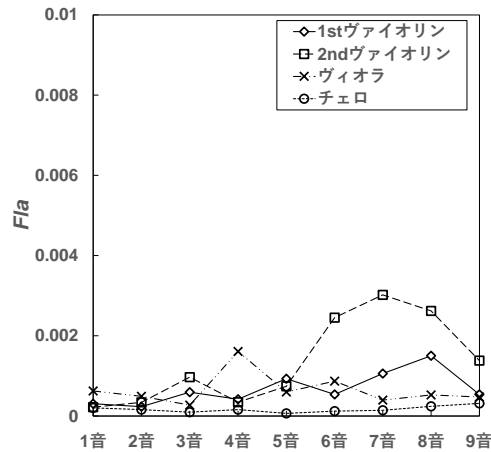


図 4.53 「アイネ・クライネ・ナハトムジーク」の指示なし 1 回目の演奏における第 1 フレーズ各パートのスペクトルフラットネスの変化

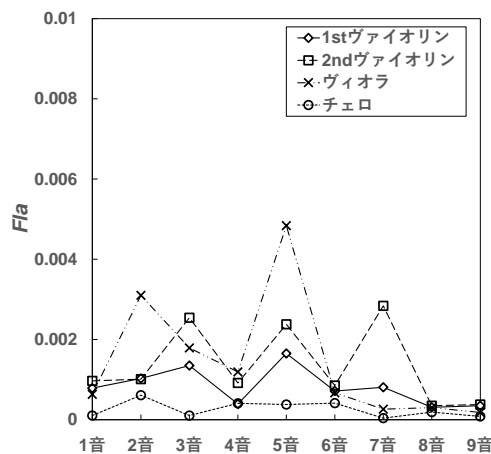


図 4.54 「アイネ・クライネ・ナハトムジーク」の指示なし 1 回目の演奏における第 2 フレーズ各パートのスペクトルフラットネスの変化

表 4.62 「アイネ・クライネ・ナハトムジーク」の指示なし 1 回目の演奏における第 2 フレーズの各音のスペクトルフラットネス

	第 1 音	第 2 音	第 3 音	第 4 音	第 5 音	第 6 音	第 7 音	第 8 音	第 9 音
1st ヴァイオリン	$7.89 \times 10^{-4}$	$10.3 \times 10^{-4}$	$13.5 \times 10^{-4}$	$3.91 \times 10^{-4}$	$16.5 \times 10^{-4}$	$7.14 \times 10^{-4}$	$8.07 \times 10^{-4}$	$3.11 \times 10^{-4}$	$3.48 \times 10^{-4}$
2nd ヴァイオリン	$9.69 \times 10^{-4}$	$10.1 \times 10^{-4}$	$25.4 \times 10^{-4}$	$9.17 \times 10^{-4}$	$23.8 \times 10^{-4}$	$8.54 \times 10^{-4}$	$28.4 \times 10^{-4}$	$3.50 \times 10^{-4}$	$3.77 \times 10^{-4}$
ヴィオラ	$6.32 \times 10^{-4}$	$31.0 \times 10^{-4}$	$1.79 \times 10^{-4}$	$11.9 \times 10^{-4}$	$48.4 \times 10^{-4}$	$6.70 \times 10^{-4}$	$2.63 \times 10^{-4}$	$3.00 \times 10^{-4}$	$1.82 \times 10^{-4}$
チェロ	$1.03 \times 10^{-4}$	$30.7 \times 10^{-4}$	$1.04 \times 10^{-4}$	$4.07 \times 10^{-4}$	$3.80 \times 10^{-4}$	$4.14 \times 10^{-4}$	$0.379 \times 10^{-4}$	$1.89 \times 10^{-4}$	$0.821 \times 10^{-4}$

表 4.63 「アイネ・クライネ・ナハトムジーク」の音色を意識した演奏 2 回目における第 1 フレーズの各音のスペクトルフラットネス

	第 1 音	第 2 音	第 3 音	第 4 音	第 5 音	第 6 音	第 7 音	第 8 音	第 9 音
1st ヴァイオリン	$3.81 \times 10^{-4}$	$1.24 \times 10^{-4}$	$3.23 \times 10^{-4}$	$4.63 \times 10^{-4}$	$3.25 \times 10^{-4}$	$2.25 \times 10^{-4}$	$3.10 \times 10^{-4}$	$6.74 \times 10^{-4}$	$4.26 \times 10^{-4}$
2nd ヴァイオリン	$1.30 \times 10^{-4}$	$4.76 \times 10^{-4}$	$15.5 \times 10^{-4}$	$23.0 \times 10^{-4}$	$22.5 \times 10^{-4}$	$4.67 \times 10^{-4}$	$31.0 \times 10^{-4}$	$27.2 \times 10^{-4}$	$17.3 \times 10^{-4}$
ヴィオラ	$2.63 \times 10^{-4}$	$4.61 \times 10^{-4}$	$6.05 \times 10^{-4}$	$10.1 \times 10^{-4}$	$3.85 \times 10^{-4}$	$10.3 \times 10^{-4}$	$6.56 \times 10^{-4}$	$11.2 \times 10^{-4}$	$14.2 \times 10^{-4}$
チェロ	$0.963 \times 10^{-4}$	$1.03 \times 10^{-4}$	$1.47 \times 10^{-4}$	$0.863 \times 10^{-4}$	$0.414 \times 10^{-4}$	$1.43 \times 10^{-4}$	$1.25 \times 10^{-4}$	$5.11 \times 10^{-4}$	$1.69 \times 10^{-4}$

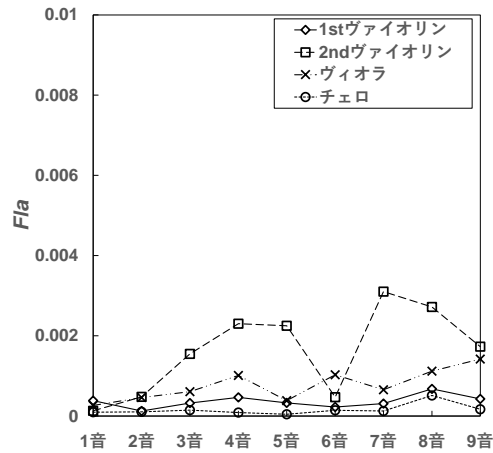


図 4.55 「アイネ・クライネ・ナハトムジーク」の音色を意識した演奏 2 回目における第 1 フレーズ各パートのスペクトルフラットネスの変化

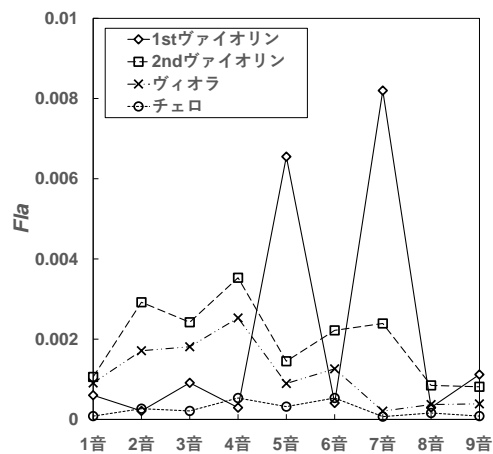


図 4.56 「アイネ・クライネ・ナハトムジーク」の音色を意識した演奏 2 回目における第 2 フレーズ各パートのスペクトルフラットネスの変化

表 4.64 「アイネ・クライネ・ナハトムジーク」の音色を意識した演奏 2 回目における第 2 フレーズの各音のスペクトルフラットネス

	第 1 音	第 2 音	第 3 音	第 4 音	第 5 音	第 6 音	第 7 音	第 8 音	第 9 音
1st ヴァイオリン	$6.04 \times 10^{-4}$	$2.13 \times 10^{-4}$	$9.10 \times 10^{-4}$	$2.94 \times 10^{-4}$	$65.5 \times 10^{-4}$	$4.10 \times 10^{-4}$	$82.0 \times 10^{-4}$	$2.99 \times 10^{-4}$	$11.2 \times 10^{-4}$
2nd ヴァイオリン	$10.6 \times 10^{-4}$	$29.2 \times 10^{-4}$	$24.2 \times 10^{-4}$	$35.3 \times 10^{-4}$	$14.5 \times 10^{-4}$	$22.2 \times 10^{-4}$	$23.9 \times 10^{-4}$	$8.48 \times 10^{-4}$	$8.14 \times 10^{-4}$
ヴィオラ	$9.07 \times 10^{-4}$	$17.1 \times 10^{-4}$	$18.1 \times 10^{-4}$	$25.3 \times 10^{-4}$	$8.96 \times 10^{-4}$	$12.6 \times 10^{-4}$	$2.05 \times 10^{-4}$	$3.71 \times 10^{-4}$	$3.87 \times 10^{-4}$
チェロ	$0.816 \times 10^{-4}$	$2.68 \times 10^{-4}$	$2.10 \times 10^{-4}$	$5.35 \times 10^{-4}$	$3.17 \times 10^{-4}$	$5.33 \times 10^{-4}$	$0.678 \times 10^{-4}$	$1.60 \times 10^{-4}$	$0.812 \times 10^{-4}$

2nd ヴァイオリンの値が高くなっている。

#### 4.12.10 「アイネ・クライネ・ナハトムジーク」のスペクトルロールオフによる分析

「アイネ・クライネ・ナハトムジーク」のスペクトルロールオフに関して、各指示、各フレーズの演奏を図 4.57 から 4.60、表 4.65 から 4.68 に示す。図の縦軸が *Roll*、横軸が第  $n$  音である。

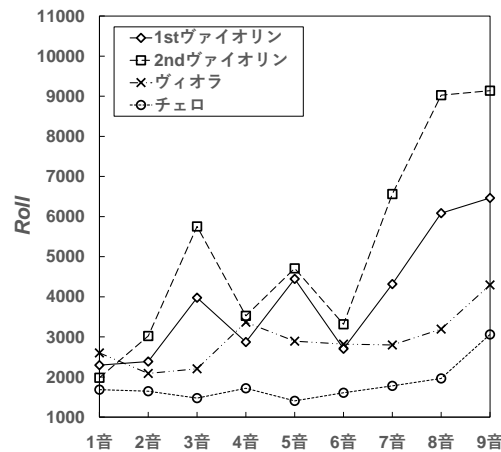


図 4.57 「アイネ・クライネ・ナハトムジーク」の指示なし 1 回目の演奏における第 1 フレーズ各パートのスペクトルロールオフの変化

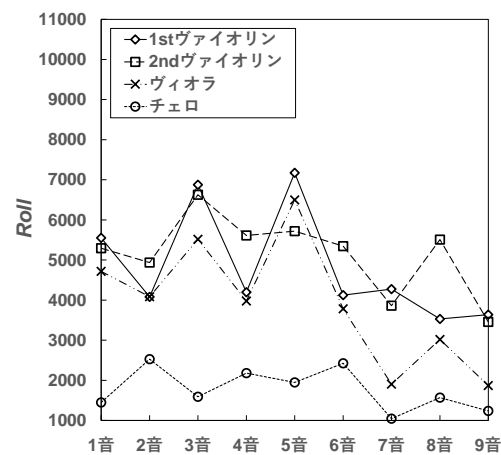


図 4.58 「アイネ・クライネ・ナハトムジーク」の指示なし 1 回目の演奏における第 2 フレーズ各パートのスペクトルロールオフの変化

表 4.65 「アイネ・クライネ・ナハトムジーク」の指示なし 1 回目の演奏における第 1 フレーズの各音のスペクトルロールオフ

	第 1 音	第 2 音	第 3 音	第 4 音	第 5 音	第 6 音	第 7 音	第 8 音	第 9 音
1st ヴァイオリン	$2.29 \times 10^3$	$2.39 \times 10^3$	$3.98 \times 10^3$	$2.87 \times 10^3$	$4.45 \times 10^3$	$2.70 \times 10^3$	$4.32 \times 10^3$	$6.09 \times 10^3$	$6.46 \times 10^3$
2nd ヴァイオリン	$1.98 \times 10^3$	$3.02 \times 10^3$	$5.75 \times 10^3$	$3.52 \times 10^3$	$4.71 \times 10^3$	$3.32 \times 10^3$	$6.56 \times 10^3$	$9.03 \times 10^3$	$9.14 \times 10^3$
ヴィオラ	$2.60 \times 10^3$	$2.09 \times 10^3$	$2.20 \times 10^3$	$3.37 \times 10^3$	$2.89 \times 10^3$	$2.82 \times 10^3$	$2.80 \times 10^3$	$3.20 \times 10^3$	$4.29 \times 10^3$
チェロ	$1.69 \times 10^3$	$1.65 \times 10^3$	$1.47 \times 10^3$	$1.72 \times 10^3$	$1.40 \times 10^3$	$1.61 \times 10^3$	$1.78 \times 10^3$	$1.96 \times 10^3$	$3.06 \times 10^3$

表 4.66 「アイネ・クライネ・ナハトムジーク」の指示なし 1 回目の演奏における第 2 フレーズの各音のスペクトルロールオフ

	第1音	第2音	第3音	第4音	第5音	第6音	第7音	第8音	第9音
1st ヴァイオリン	$5.55 \times 10^3$	$4.08 \times 10^3$	$6.87 \times 10^3$	$4.20 \times 10^3$	$7.17 \times 10^3$	$4.12 \times 10^3$	$4.28 \times 10^3$	$3.53 \times 10^3$	$3.64 \times 10^3$
2nd ヴァイオリン	$5.29 \times 10^3$	$4.93 \times 10^3$	$6.63 \times 10^3$	$5.61 \times 10^3$	$5.72 \times 10^3$	$5.35 \times 10^3$	$3.86 \times 10^3$	$5.51 \times 10^3$	$3.46 \times 10^3$
ヴィオラ	$4.72 \times 10^3$	$4.08 \times 10^3$	$5.52 \times 10^3$	$3.98 \times 10^3$	$6.50 \times 10^3$	$3.78 \times 10^3$	$1.90 \times 10^3$	$3.02 \times 10^3$	$1.87 \times 10^3$
チェロ	$1.45 \times 10^3$	$2.53 \times 10^3$	$1.59 \times 10^3$	$2.18 \times 10^3$	$1.95 \times 10^3$	$2.42 \times 10^3$	$1.04 \times 10^3$	$1.57 \times 10^3$	$1.24 \times 10^3$

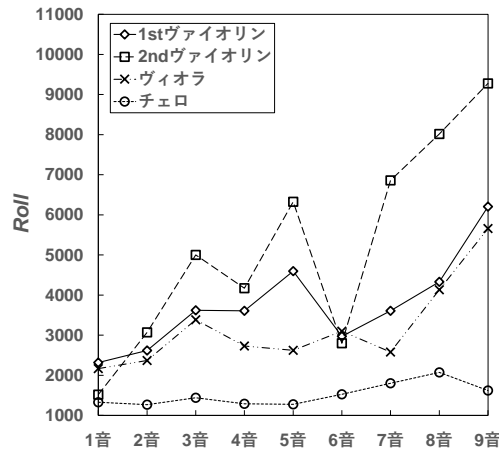


図 4.59 「アイネ・クライネ・ナハトムジーク」の音色を意識した演奏 2 回目における第 1 フレーズ各パートのスペクトルロールオフの変化

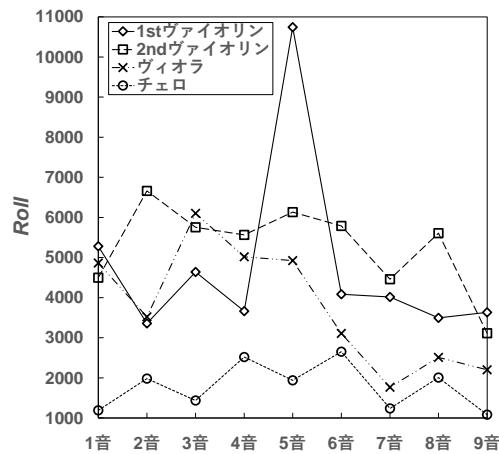


図 4.60 「アイネ・クライネ・ナハトムジーク」の音色を意識した演奏 2 回目における第 2 フレーズ各パートのスペクトルロールオフの変化

表 4.67 「アイネ・クライネ・ナハトムジーク」の音色を意識した演奏 2 回目における第 1 フレーズの各音のスペクトルロールオフ

	第1音	第2音	第3音	第4音	第5音	第6音	第7音	第8音	第9音
1st ヴァイオリン	$2.32 \times 10^3$	$2.62 \times 10^3$	$3.62 \times 10^3$	$3.61 \times 10^3$	$4.60 \times 10^3$	$2.97 \times 10^3$	$3.61 \times 10^3$	$4.33 \times 10^3$	$6.21 \times 10^3$
2nd ヴァイオリン	$1.52 \times 10^3$	$3.07 \times 10^3$	$5.00 \times 10^3$	$4.17 \times 10^3$	$6.32 \times 10^3$	$2.80 \times 10^3$	$6.86 \times 10^3$	$8.02 \times 10^3$	$9.28 \times 10^3$
ヴィオラ	$2.16 \times 10^3$	$2.37 \times 10^3$	$3.38 \times 10^3$	$2.73 \times 10^3$	$2.62 \times 10^3$	$3.10 \times 10^3$	$2.58 \times 10^3$	$4.13 \times 10^3$	$5.66 \times 10^3$
チェロ	$1.33 \times 10^3$	$1.27 \times 10^3$	$1.44 \times 10^3$	$1.29 \times 10^3$	$1.28 \times 10^3$	$1.52 \times 10^3$	$1.80 \times 10^3$	$2.07 \times 10^3$	$1.62 \times 10^3$

表 4.68 「アイネ・クライネ・ナハトムジーク」の音色を意識した演奏 2 回目における第 2 フレーズの各音のスペクトルロールオフ

	第 1 音	第 2 音	第 3 音	第 4 音	第 5 音	第 6 音	第 7 音	第 8 音	第 9 音
1st ヴァイオリン	$5.28 \times 10^3$	$3.36 \times 10^3$	$4.64 \times 10^3$	$3.66 \times 10^3$	$10.7 \times 10^3$	$4.09 \times 10^3$	$4.02 \times 10^3$	$3.49 \times 10^3$	$3.63 \times 10^3$
2nd ヴァイオリン	$4.50 \times 10^3$	$6.66 \times 10^3$	$5.75 \times 10^3$	$5.57 \times 10^3$	$6.13 \times 10^3$	$5.79 \times 10^3$	$4.46 \times 10^3$	$5.61 \times 10^3$	$3.31 \times 10^3$
ヴィオラ	$4.86 \times 10^3$	$3.52 \times 10^3$	$6.10 \times 10^3$	$5.02 \times 10^3$	$4.92 \times 10^3$	$3.12 \times 10^3$	$1.77 \times 10^3$	$2.51 \times 10^3$	$2.20 \times 10^3$
チェロ	$1.19 \times 10^3$	$1.98 \times 10^3$	$1.44 \times 10^3$	$2.52 \times 10^3$	$1.94 \times 10^3$	$2.65 \times 10^3$	$1.24 \times 10^3$	$2.01 \times 10^3$	$1.08 \times 10^3$

図 4.57 から 4.60 において指示なしと音色を意識した演奏ともに第 1、第 2 フレーズでチェロのスペクトルロールオフの値が低く、他のパートの値は高い。また、指示なしから音色を意識した演奏にかけて、第 1 フレーズではチェロの値が低く、第 2 フレーズでは 1st ヴァイオリンの値が高くなっている。

#### 4.12.11 「アイネ・クライネ・ナハトムジーク」のゼロクロスレートによる分析

次に「アイネ・クライネ・ナハトムジーク」のゼロクロスレートに関して、各指示、各フレーズの演奏を図 4.61 から 4.64、表 4.69 から 4.72 に示す。図の縦軸が ZCR、横軸が第  $n$  音である。

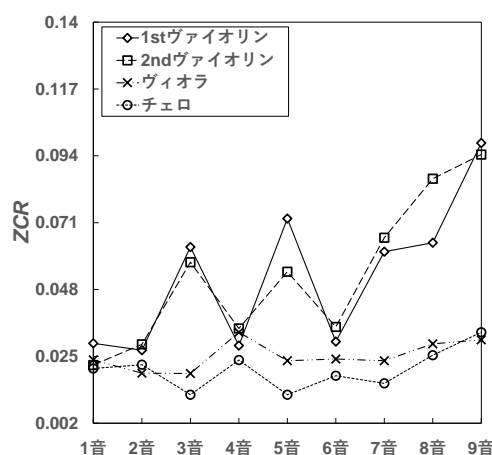


図 4.61 「アイネ・クライネ・ナハトムジーク」の指示なし 1 回目の演奏における第 1 フレーズ各パートのゼロクロスレートの変化

表 4.69 「アイネ・クライネ・ナハトムジーク」の指示なし 1 回目の演奏における第 1 フレーズの各音のゼロクロスレート

	第 1 音	第 2 音	第 3 音	第 4 音	第 5 音	第 6 音	第 7 音	第 8 音	第 9 音
1st ヴァイオリン	$2.95 \times 10^{-2}$	$2.71 \times 10^{-2}$	$6.26 \times 10^{-2}$	$2.87 \times 10^{-2}$	$7.24 \times 10^{-2}$	$3.01 \times 10^{-2}$	$6.10 \times 10^{-2}$	$6.41 \times 10^{-2}$	$9.84 \times 10^{-2}$
2nd ヴァイオリン	$2.20 \times 10^{-2}$	$2.91 \times 10^{-2}$	$5.74 \times 10^{-2}$	$3.46 \times 10^{-2}$	$5.41 \times 10^{-2}$	$3.51 \times 10^{-2}$	$6.58 \times 10^{-2}$	$8.61 \times 10^{-2}$	$9.44 \times 10^{-2}$
ヴィオラ	$2.38 \times 10^{-2}$	$1.92 \times 10^{-2}$	$1.91 \times 10^{-2}$	$3.33 \times 10^{-2}$	$2.35 \times 10^{-2}$	$2.41 \times 10^{-2}$	$2.35 \times 10^{-2}$	$2.93 \times 10^{-2}$	$3.07 \times 10^{-2}$
チェロ	$2.08 \times 10^{-2}$	$2.21 \times 10^{-2}$	$1.18 \times 10^{-2}$	$2.37 \times 10^{-2}$	$1.18 \times 10^{-2}$	$1.83 \times 10^{-2}$	$1.57 \times 10^{-2}$	$2.54 \times 10^{-2}$	$3.33 \times 10^{-2}$

図 4.61 から 4.64 において指示なしと音色を意識した演奏ともに、第 1 フレーズでは 1st ヴァイオリン、2nd ヴァイオリンのゼロクロスレートの値が高く、ヴィオラとチェロの値が低い。第 2 フレーズでは 1st

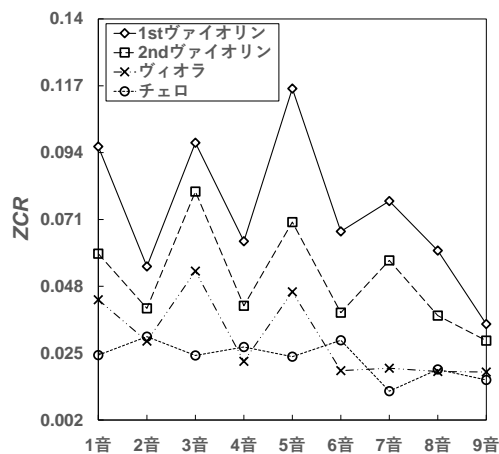


図 4.62 「アイネ・クライネ・ナハトムジーク」の指示なし 1 回目の演奏における第 2 フレーズ各パートのゼロクロスレートの変化

表 4.70 「アイネ・クライネ・ナハトムジーク」の指示なし 1 回目の演奏における第 2 フレーズの各音のゼロクロスレート

	第1音	第2音	第3音	第4音	第5音	第6音	第7音	第8音	第9音
1st ヴァイオリン	$9.61 \times 10^{-2}$	$5.48 \times 10^{-2}$	$9.74 \times 10^{-2}$	$6.35 \times 10^{-2}$	$11.6 \times 10^{-2}$	$6.69 \times 10^{-2}$	$7.73 \times 10^{-2}$	$6.03 \times 10^{-2}$	$3.50 \times 10^{-2}$
2nd ヴァイオリン	$5.92 \times 10^{-2}$	$4.04 \times 10^{-2}$	$8.06 \times 10^{-2}$	$4.13 \times 10^{-2}$	$7.01 \times 10^{-2}$	$3.89 \times 10^{-2}$	$5.69 \times 10^{-2}$	$3.79 \times 10^{-2}$	$2.93 \times 10^{-2}$
ヴィオラ	$4.34 \times 10^{-2}$	$2.91 \times 10^{-2}$	$5.32 \times 10^{-2}$	$2.22 \times 10^{-2}$	$4.61 \times 10^{-2}$	$1.90 \times 10^{-2}$	$1.98 \times 10^{-2}$	$1.87 \times 10^{-2}$	$1.85 \times 10^{-2}$
チェロ	$2.43 \times 10^{-2}$	$3.07 \times 10^{-2}$	$2.42 \times 10^{-2}$	$2.71 \times 10^{-2}$	$2.38 \times 10^{-2}$	$2.94 \times 10^{-2}$	$1.19 \times 10^{-2}$	$1.94 \times 10^{-2}$	$1.58 \times 10^{-2}$

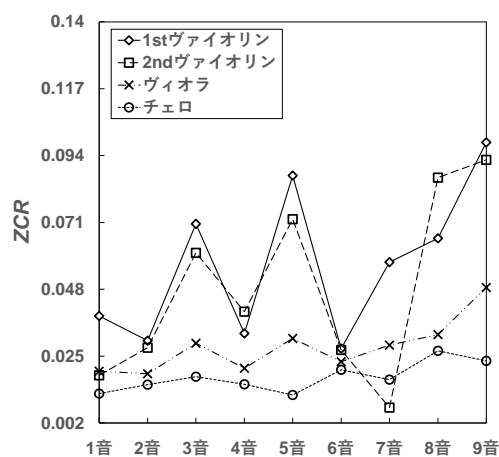


図 4.63 「アイネ・クライネ・ナハトムジーク」の音色を意識した演奏 2 回目における第 1 フレーズ各パートのゼロクロスレートの変化

表 4.71 「アイネ・クライネ・ナハトムジーク」の音色を意識した演奏 2 回目における第 1 フレーズの各音のゼロクロスレート

	第1音	第2音	第3音	第4音	第5音	第6音	第7音	第8音	第9音
1st ヴァイオリン	$3.38 \times 10^{-2}$	$3.03 \times 10^{-2}$	$7.05 \times 10^{-2}$	$3.28 \times 10^{-2}$	$8.71 \times 10^{-2}$	$2.76 \times 10^{-2}$	$5.73 \times 10^{-2}$	$6.55 \times 10^{-2}$	$9.85 \times 10^{-2}$
2nd ヴァイオリン	$1.84 \times 10^{-2}$	$2.79 \times 10^{-2}$	$6.05 \times 10^{-2}$	$4.03 \times 10^{-2}$	$7.21 \times 10^{-2}$	$2.71 \times 10^{-2}$	$0.727 \times 10^{-2}$	$8.64 \times 10^{-2}$	$9.25 \times 10^{-2}$
ヴィオラ	$1.98 \times 10^{-2}$	$1.89 \times 10^{-2}$	$2.94 \times 10^{-2}$	$2.08 \times 10^{-2}$	$3.11 \times 10^{-2}$	$2.31 \times 10^{-2}$	$2.88 \times 10^{-2}$	$3.24 \times 10^{-2}$	$4.86 \times 10^{-2}$
チェロ	$1.21 \times 10^{-2}$	$1.52 \times 10^{-2}$	$1.79 \times 10^{-2}$	$1.53 \times 10^{-2}$	$1.16 \times 10^{-2}$	$2.03 \times 10^{-2}$	$1.69 \times 10^{-2}$	$2.68 \times 10^{-2}$	$2.34 \times 10^{-2}$

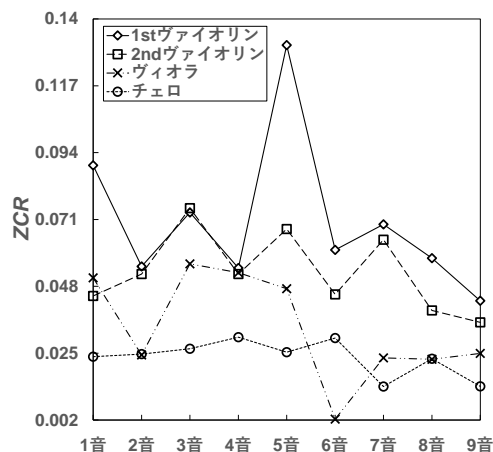


図 4.64 「アイネ・クライネ・ナハトムジーク」の音色を意識した演奏 2 回目における第 2 フレーズ各パートのゼロクロスレートの変化

表 4.72 「アイネ・クライネ・ナハトムジーク」の音色を意識した演奏 2 回目における第 2 フレーズの各音のゼロクロスレート

	第 1 音	第 2 音	第 3 音	第 4 音	第 5 音	第 6 音	第 7 音	第 8 音	第 9 音
1st ヴァイオリン	$8.96 \times 10^{-2}$	$5.48 \times 10^{-2}$	$7.34 \times 10^{-2}$	$5.43 \times 10^{-2}$	$13.1 \times 10^{-2}$	$6.05 \times 10^{-2}$	$6.93 \times 10^{-2}$	$5.77 \times 10^{-2}$	$4.30 \times 10^{-2}$
2nd ヴァイオリン	$4.47 \times 10^{-2}$	$5.22 \times 10^{-2}$	$7.49 \times 10^{-2}$	$5.22 \times 10^{-2}$	$6.77 \times 10^{-2}$	$4.52 \times 10^{-2}$	$6.40 \times 10^{-2}$	$3.97 \times 10^{-2}$	$3.56 \times 10^{-2}$
ヴィオラ	$5.09 \times 10^{-2}$	$2.44 \times 10^{-2}$	$5.57 \times 10^{-2}$	$5.27 \times 10^{-2}$	$4.72 \times 10^{-2}$	$0.228 \times 10^{-2}$	$2.34 \times 10^{-2}$	$2.29 \times 10^{-2}$	$2.49 \times 10^{-2}$
チェロ	$2.38 \times 10^{-2}$	$2.47 \times 10^{-2}$	$2.65 \times 10^{-2}$	$3.05 \times 10^{-2}$	$2.53 \times 10^{-2}$	$3.02 \times 10^{-2}$	$1.35 \times 10^{-2}$	$2.31 \times 10^{-2}$	$1.36 \times 10^{-2}$

ヴァイオリンの値が一番高く、その後は 2nd ヴァイオリン、ヴィオラ、チェロの順に低くなっており、音色を意識した演奏では 1st ヴァイオリン、2nd ヴァイオリンの値が、チェロの値は低くなっている。指示なしから音色を意識した演奏にかけて、第 1 フレーズでは 1st ヴァイオリンの値が高く、第 2 フレーズではヴィオラの値が高く、1st ヴァイオリンの値が低くなっている。

#### 4.12.12 「アイネ・クライネ・ナハトムジーク」の音色

「アイネ・クライネ・ナハトムジーク」に関しては、それぞれの音響特徴量での値がピッチに応じたものとなっている。しかし、スペクトルフラットネスに関しては、同じピッチである 1st ヴァイオリンと 2nd ヴァイオリン値が大きく異なっていた。

## 4.13 実験 2 回目まとめ

実験 2 回目では、アンサンブル精度の解析として各パートのタイミングのずれや音量バランスに加え、ピッチおよび音響特徴量を用いた音色に着目して解析を行った。タイミングのずれに関しては、タイミングを意識して演奏を行った際に、指示なしの状態では 40 ms 以上のずれがあった場合は演奏者間でずれの認識がありずれは改善されるが、指示なしの状態では 20 ms 程度の場合、演奏者間でずれの認識がないためずれは改善されなかった。音量バランスに関しては、指示なしからチェロの音量を意識して演奏を行った際に、チェロとの音量差を広げて演奏が行う傾向が見受けられた。ピッチに関しては、指示なしとピッチを意識した演奏において大きな差は見られなかったが、各パートでどの倍音成分が強く出ているかが異なる傾向にあった。音色に関しては、各音響特徴量に関して各フレーズ、各パートの影響が見受けられたが、指示なしと音色を意識した演奏との差は少なかった。



## 第5章

# 結論

### 5.1 結論

本研究ではアンサンブルの精度について、各パートの発音タイミングのずれ、音量バランス、ピッチ、音色に着目して解析を行った。各パート間の発音タイミングに関しては演奏者間でずれの認識がある場合には、タイミングを意識して演奏を行うことでずれは改善されるが、演奏者間でずれの認識がない場合には、タイミングを意識して演奏を行ってもずれは改善されない。音量バランスに関しては、音量を意識して演奏を行うとチェロとの音量差を広げ、チェロの音がより響くような演奏意識が働いていた。以上の二つは演奏者間で共通の認識であり、今回の実験により演奏者のアンサンブル精度に対する意識と修正行動が確認できた。実験2回目ではピッチと音色の解析を行い、ピッチに関しては、演奏意識による違いはあらわれなかった。また音色に関しては音響特徴量を用いた解析を行い、各音響特徴量において「皇帝」では、第1フレーズでは1st ヴァイオリンとヴィオラの値が高く、第3フレーズでは全体的に同じような値になっていたなどの各フレーズ、各パートごとの違いが表れていた。

### 5.2 課題

音量バランスとタイミングのずれに関しては演奏意識の違いによる差が見受けられたが、ピッチと音色に関しては演奏意識の違いによる差はほとんど見受けられなかった。ピッチにおいては倍音成分に着目することで演奏意識の違いがあらわれていたかどうかを確認する必要がある。音色においては音響特徴量としてスペクトル重心、バンド幅、スペクトルフラットネス、スペクトルロールオフ、ゼロクロスレートを使用したが、周波数に影響しているためか演奏意識の違いがほとんど表れていなかった。よって音色の比較をする際には他の音響特徴量を使用する必要がある。また、本研究では二組の弦楽四重奏を対象にしたが、アンサンブル演奏の音の良し悪しの一般化にはより多くの実験が望まれる。

## 参考文献

- [1] 宮宇地秀和、福田忠彦、諏訪正樹 "合奏という協調活動に関する研究-熟達者ペアの二重奏のケーススタディを例として-" (情報処理学会, pp.13-18, 2005)
- [2] 堀内晴雄、三井卓、井宮淳、市川熹 "二人の人間による演奏の収録と分析" (音楽情報科学, pp.21-26, 1996)
- [3] 長尾翼, 渡邊珠希, 池田雄介, 上野加奈子, 伊勢史郎 "音の遅延条件がアンサンブル演奏に与える影響に関する検討" (日本音響学会講演論文集, pp.998, 2012)
- [4] Rasch, R. A. " Synchronization in performed ensemble music. " (Acustica, Vol.43, pp.121-131, 1979)
- [5] Shaffer, L. H. "Timing in solo and duet piano performances. " (Quarterly Journal of Experimental Psychology, Vol.36, pp.577-595, 1984)
- [6] Keller, P. E., & Appel, M. "Individual differences, auditory imagery, and the coordination of body movements and sounds in musical ensembles." (Music Perception, Vol.28, pp.27-46, 2010)
- [7] Kawase, S. "Gazing behavior and coordination during piano duo performance." (Attention, Perception, & Psychophysics, Vol.76, pp.527-540, 2014)
- [8] 森松慶子 "アンサンブル演奏における音量バランス" (電子キーボード音楽研究, Vol.10, pp.24-31, 2015)
- [9] シルヴェット・ミリヨ "弦楽四重奏"(山本省訳, 文庫クセジュ, 2008)
- [10] 山田真司, 三浦雅展 "音楽情報処理で用いられる音響パラメータによる音楽理解の可能性" (日本音響学会誌, Vol.70, No.8, pp.440-445, 2014)