

# 合奏のテンポ制御における相互作用の分析

湯浅崇司<sup>†1</sup> 堀内靖雄<sup>†1</sup> 黒岩眞吾<sup>†1</sup>

**概要:** 二人の人間同士の合奏において、独奏者と伴奏者には固有の役割が存在し、一般に独奏者は自身の希望するテンポで演奏を行い、伴奏者は独奏者の演奏に追従する形で合奏を行っていると考えられている。しかしながら、合奏ではお互いに協調することが必要であることから、独奏者も伴奏者の演奏を無視して演奏することはできない。そのため、伴奏者の影響を受けて独奏者自身のテンポを変化させる相互作用の存在が予想されるが未だ解明されていない。そこで本研究ではお互いの演奏が聞こえる状態での合奏データと独奏者が伴奏者の演奏が聞こえない状態での合奏データを比較分析した。結果として、独奏者の相互作用の存在が明らかになったことに加え、相互作用の有無による演奏者のテンポ変化の違いが示された。

**キーワード:** 伴奏システム, テンポ制御, 相互作用

## 1. はじめに

伴奏システムとは独奏パートと伴奏パートの楽譜情報が事前に計算機に与えられている状態で、人間の独奏者の演奏に協調した伴奏を人間ではなく計算機が出力するシステムである[1,2]。これは演奏会等で独奏であるフルートやヴァイオリンの伴奏を行うピアニストの役割を計算機が担うことを想定している。伴奏システムが人間の演奏者のように合奏を行えるようにするためには人間同士の合奏における演奏者のふるまいを分析することが重要である。

人間同士の合奏において、独奏者と伴奏者の2人には固有の役割が存在している。一般的に独奏者は自身の希望するテンポで演奏を進め、伴奏者は独奏者の演奏に追従する形で合奏を行っていると考えられている。しかしながら、合奏では独奏者と伴奏者が同時に演奏を行っているため、お互いの演奏を協調させるためには、伴奏者の演奏を無視して独奏者が演奏することは難しいと考えられる。そのため、独奏者もただ一方的に演奏を行うのではなく、伴奏者のテンポに影響を受け、それに反応して自分自身の演奏テンポを変化させていることが予想される。すなわち、伴奏システムの合奏テンポ制御では、単に独奏者の演奏に追従するだけでは不十分であり、独奏者も伴奏者の演奏の影響を受けて変化していることを考慮して伴奏制御を行う必要がある。このように合奏では相手を完全に無視することができず、お互いに影響を与え合う相互作用が働いていることが予想される。

合奏における演奏者間の相互作用に関する先行研究の一つとして、相互作用モデルの研究[3,4]がある。この研究では独奏者と伴奏システムとの間に相互作用があるモデルを提案しており、独奏者と伴奏者はお互いに影響を及ぼしあっていることを前提に伴奏システムのモデル化を行っている。その他、人間らしいアンサンブルの実現のため、伴奏システムのモデル化を行っている研究[5]もある。この研究では相互作用を考慮していることに加え、評価実験として、

通常の合奏とは別に、それぞれの演奏者が相手の演奏を録音したものと個別に演奏する合奏を用いている。この合奏は録音であることから、独奏者が伴奏者の演奏に影響を受けない状態の合奏を実現しており、このような特殊な条件での合奏と通常の合奏とを比較し、アンサンブルシステムを用いた際の伴奏者のふるまいを評価している。しかしながら、この研究は伴奏者のふるまいに焦点を合わせており、相互作用のうちの伴奏者から独奏者への影響が遮断された際の独奏者のふるまいについては検討されていない。

一方、我々は人間の独奏者と伴奏者が合奏するデータ収録に加えて、相手に影響されず、あらかじめ決められたテンポで演奏を行う計算機の独奏と人間の伴奏者との合奏のデータ収録を行い、独奏者と伴奏者の演奏を予測するモデルを推定した[6]。この研究では上記2条件での合奏収録に加え、独奏者が伴奏者の演奏が聞こえない状態での合奏データも収録している。これは伴奏者から独奏者への影響を遮断した演奏（相互作用の半分が除去されている）と言えるが、先行研究[6]では分析対象としなかった。そこで本研究では、相互作用が存在する通常の合奏と、伴奏者から独奏者への影響を遮断し、相互作用のない合奏をそれぞれ分析し、人間同士の合奏のテンポ制御における相互作用の解明、そして独奏者にはどのような相互作用が生じているのかを明らかにすることを目的とする。

## 2. 分析データ

### 2.1 演奏曲目

分析には我々が先行研究[6]で収録したデータを用いる。分析対象曲はHanon 作曲「ピアノの名手になる60練習曲」第5番を修正したものである。この曲はもともとピアノ独奏曲であるが本実験では左手パートを独奏パート、右手パートを伴奏パートとした。また、独奏、伴奏ともに同じ条件となるように独奏・伴奏とも右手で演奏することとした。この曲は最後の音以外はすべて同じ音価の音から構成されているため、音楽的な要素が少なく、また、独奏と伴奏の

<sup>†1</sup> 千葉大学

演奏が記譜上はまったく同じリズムとなるため、分析が容易であるという利点がある。この曲は本来、全曲を通じて右手パートと左手パートがオクターブで並行移動するが、お互いの音を聴こえやすくするため、左手パートを3度上げ、10度の並行移動とした。収録に用いた楽譜の一部を図1に示す。



図1. 収録対象曲の1部

## 2.2 演奏者

演奏者は幼少期からピアノ演奏経験がある音楽大学ピアノ専攻卒の4名である。その内の2人を独奏者(a,b)、残りの2人を伴奏者(p,q)とした。独奏者にはできるだけ指示されたテンポを守るように、伴奏者にはできるだけ相手に合わせて演奏するようにと教示した。

## 2.3 収録環境

演奏は独奏者と伴奏者がそれぞれ別々の防音室内で行った。各演奏者は88鍵のMIDIピアノで演奏を行い、各演奏者の演奏したMIDI情報(打鍵時刻、音程、強さ、打鍵時間)を計算機で記録すると同時に、外部のMIDI音源で音を再生し、各演奏者のヘッドフォンへと伝えた。すなわち、各演奏者は自分の演奏と相手の演奏をヘッドフォンの左右の耳から聞くことができる。その際、演奏された音ごとに打鍵強度が異なると相手の音の強さによって演奏が変化してしまう可能性があるため、打鍵強度にかかわらず一定の音量でヘッドフォンに出力するように音源を設定した。

## 2.4 テンポ変化の指示

独奏者が演奏する楽曲では突然のテンポ変化が2回指定された。テンポ変化のパターンは以下の2通りで、それぞれ2回ずつ収録した。テンポの単位は[beat/minute]である。

- ・パターンⅠ 116→132→116
- ・パターンⅡ 132→116→132

テンポ変化は小節の冒頭とし、変化する小節位置はランダムに配置した。独奏者は各テンポを収録前の練習で確認した。伴奏者には曲中にテンポ変化があることは収録前に伝えたが、どの箇所でのどの程度テンポ変化するかについては伝えなかった。

## 2.5 独奏者の合奏状況

本研究では、お互いの演奏が聞こえている合奏(通常合奏)に加え、独奏者が伴奏者の演奏が聞こえない状態での合奏(以下一人演奏)も収録した。一人演奏では独奏者はあたかも自分一人で演奏している(伴奏者との相互作用がない)のに対し、伴奏者はそのことを知らずに普通に合奏を行っている(相互作用がある)とみなすことができる。

## 2.6 分析データ

本研究では、一人演奏では4回のデータ(一人の独奏者に対しパターンⅠと伴奏者2人、もう一人の独奏者に対しパターンⅡと伴奏者2人の組み合わせ)、通常合奏では2パターン×2回×4ペアの16回のデータを分析対象とする。

## 3. 分析

### 3.1 独奏者と伴奏者の演奏タイミングのずれの分析

独奏者と伴奏者の演奏タイミングのずれを以下のように定義する。

$$d_n = T_n - t_n \quad (1)$$

式(1)中の  $T_n$ ,  $t_n$  はそれぞれ独奏、伴奏の  $n$  番目の音における演奏時刻を表す。 $d_n$  が正の場合は伴奏者が独奏者よりも早く演奏したことを意味し、 $d_n$  が負の場合は伴奏者が独奏者よりも遅く演奏したことを意味する。

相互作用に関する合奏状況とずれの関係を調べるため、合奏ごとにずれの二乗平均平方根(RMS)をもとめ、合奏状況ごとの平均を表1に示す。

表1. ずれの二乗平均平方根と合奏状況

合奏の種類	ずれの二乗平均平方根 (ミリ秒)
通常合奏	14.5
一人演奏	20.2

表1より独奏者が伴奏者の演奏を聞こえない状況での合奏では通常の合奏よりずれが大きくなる事が分かる。

次にずれが生じた楽譜上の位置に関する分析を行う。分析対象の合奏データでは独奏者はあらかじめ決められた楽譜位置で演奏テンポ変化を行うが、伴奏者はどこでテンポ変化が生じるか分からないため、テンポ変化後にはずれが大きくなる事が予想される。そこで本研究ではテンポ不安定部を以下のように定義し、テンポ不安定部の発生頻度や楽譜上の位置を分析する。

- (1)  $d_n$ が±30ms以上のずれが3回以上連続した区間
- (2) 上記(1)の区間同士が2小節以内に生じている場合は一つの不安定部に統合する

ここで±30ミリ秒という閾値は、人間の聴覚における先行研究[7]において、±約30ミリ秒以内の2音の立ち上がりに対して、人間はそのずれを知覚することができないという知見に基づいて数値を決定した。上記の定義に従い、テンポ不安定部が楽曲中のどの位置で発生したのかについて分析を行う。図2に通常合奏、図3に一人演奏として、楽曲の冒頭、テンポ加速後、テンポ減速後のテンポ判定部の出現頻度を示す。各グラフの横軸は冒頭、あるいはテンポ変化後に不安定部が開始されるまでの小節数を表しており、縦軸はテンポ不安定部の出現頻度を表している。

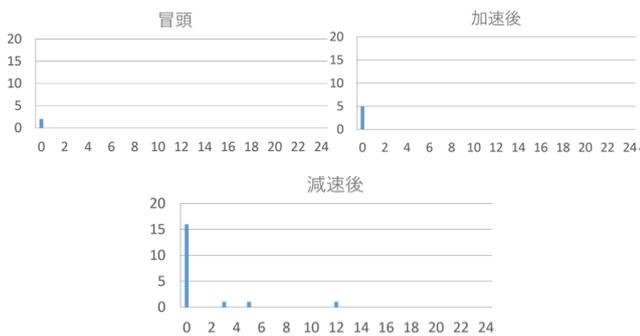


図2. 通常合奏におけるテンポ不安定部の出現頻度

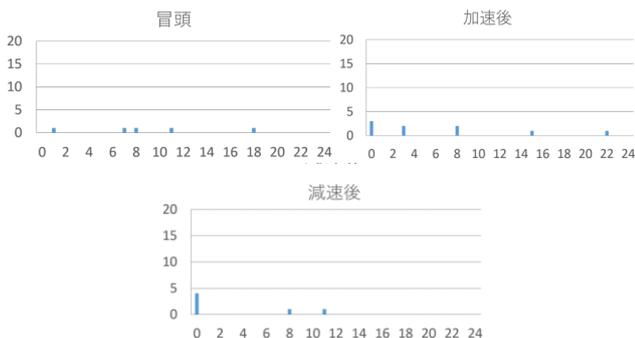


図3. 一人演奏におけるテンポ不安定部の出現頻度

まず図2から通常合奏で生じたテンポ不安定部のほとんどは冒頭またはテンポ変化後から1小節以内に生じており(23回)、テンポ変化後から離れた位置で発生した不安定部の頻度は3回のみとなっている。一方、図3から、一人演奏では冒頭またはテンポ変化直後に生じているのは7回であるのに対し、テンポ変化後から離れた位置で発生した不安定部の頻度は13回であり、非常に高いことが分かる。ここで、本研究の分析対象データでは通常合奏のデータ数が一人演奏の4倍となっていることを考慮すると、冒頭またはテンポ変化後の不安定部の出現頻度にはそれほど大きな違いはないと考えられるが、通常合奏ではほとんど見られなかった冒頭後、テンポ変化後以外の不安定部は、一人演奏では数多くみられており、この頻度の差は独奏者の相互作用の欠如に起因しているのではないかと考えられる。

冒頭直後とテンポ変化直後以外のずれと合奏状況の関係調べるため、ずれの二乗平均平方根(RMS)を表2に示す。

表2. ずれの二乗平均平方根と合奏状況  
(冒頭・テンポ変化直後以外)

合奏の種類	ずれの二乗平均平方根 (ミリ秒)
通常合奏	12.0
一人演奏	17.2

表2より、テンポが安定している状況において、独奏者が伴奏者の演奏が聞こえない状況での合奏では通常合奏よりずれが大きいことが分かる。このことも独奏者の相互

作用の欠如に起因しているのではないかと考えられる。

なお、通常合奏におけるテンポ変化後から離れた位置で発生した3事例の不安定部のうち、2事例については不安定部の継続長も短く(八分音符で3個または5個)、わずかにずれが生じたがすぐに解消した事例と考えられる。しかしながら、残る1事例については不安定部が約3小節にわたっていた。この事例について、合奏の状況を詳細に観察する。まず、図4にテンポ変化パターンIの各ペア一回目の合奏データを示す。各グラフの上段が時間長(テンポの逆数)、下段が独奏者と伴奏者の演奏タイミングのずれ $d_n$ を表している。時間長もタイミングのずれも細かい変動があるため、ここでは前後4つずつを含めた9個の値の平均値を描画している。

不安定部が長時間となった事例は図の左上の独奏者a、伴奏者pによる合奏であり、43小節目でテンポ変化が生じ、47小節目から約3小節にわたって不安定部となっている。ずれのグラフの43小節目以降の山がテンポ変化に起因するずれで、その後、47小節目以降に二つの山があり、それらが上述のテンポ不安定部を表している。

この原因を考察するため、その付近でどのような合奏の状況になっているか観察を行う。まず、ずれの変化を調べると30小節目付近から50小節目付近まで、ずれがおおむね正の値となっており、前半は20ミリ秒程度、テンポ変化後に30ミリ秒程度のずれが継続しており、この部分がテンポ不安定部となっている。ずれが正となるのは伴奏者が先行して、独奏者が後続している状況であるが、このような状態が長く続いている事例は他の合奏では見られない。この事例の場合、伴奏者が独奏者よりも常に先に音を出しているため、テンポが加速されやすい状況となっており、実際にテンポ変化直前まで非常に急激な加速が行われている(時間長のグラフの急激な下降)。これは独奏者が伴奏者の演奏を無視してテンポを維持することが難しく、伴奏者の影響により、お互いのテンポが加速してしまった事例と考えられる。テンポ変化後もその傾向は続き、わずかに加速するが、ここでは独奏者がテンポを維持しようとした結果、上述の3小節程度の不安定部が生じることとなったが、その後は独奏者の先行傾向もなくなり、安定したテンポで最後まで合奏が行われている。この例は独奏者が伴奏者の影響を強く受けた例となっており、相互作用が存在することは明らかである。なお、なぜ伴奏者が独奏者よりも先に演奏しようとしたのか、その原因は不明であるが、曲が演奏者にとって簡単すぎたため、本来は独奏者に合わせなければならない立場の伴奏者がもっと速いテンポでの演奏を期待して、演奏を先行させた可能性が考えられる。

また、このように伴奏者が先行してしまった場合、独奏者がそれを引き戻すのは難しく、音を先に出した演奏者の方が影響力が大きいという、合奏でよくみられる現象が現れている。

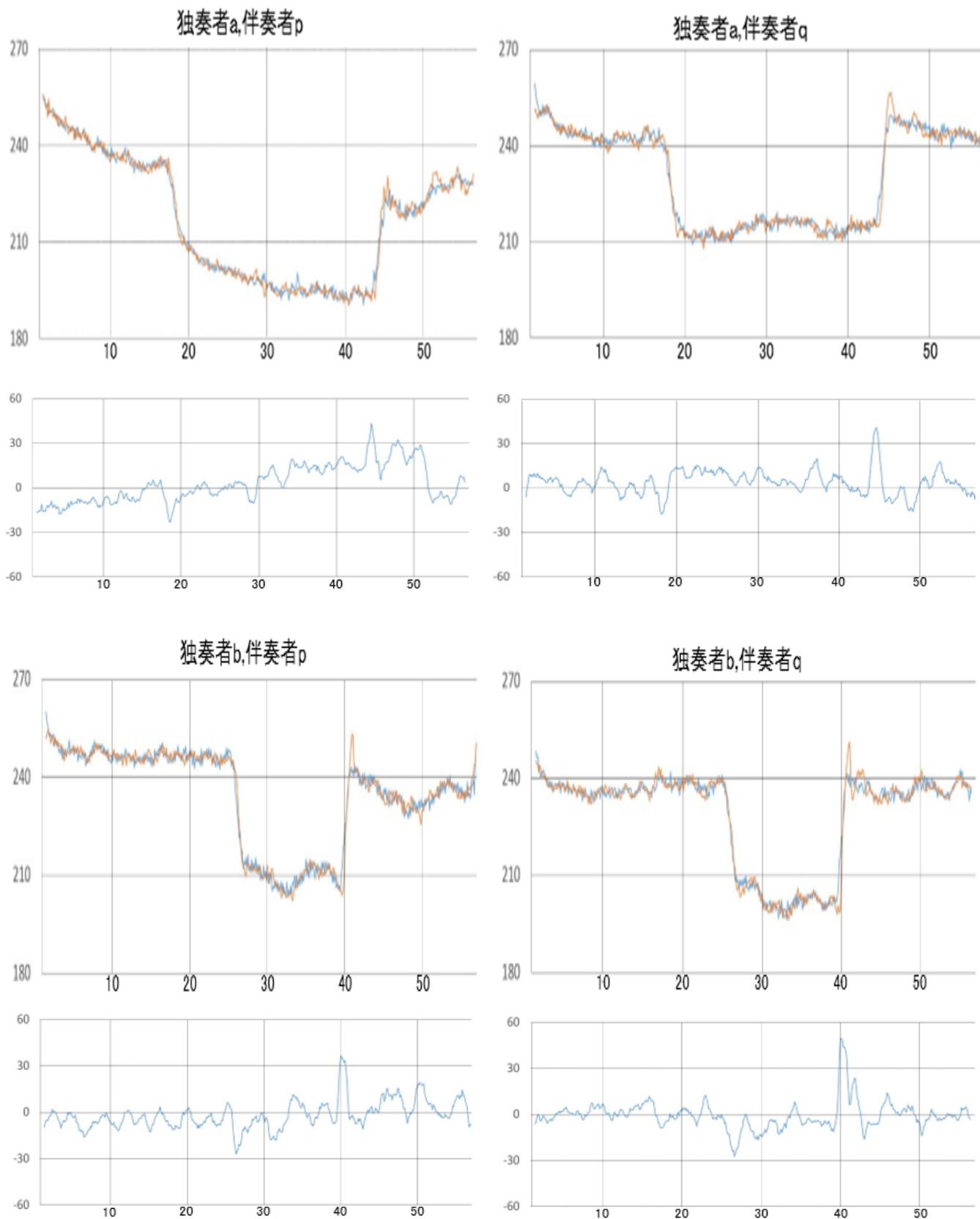


図 4. テンポ変化パターン I の各ペア一回目の合奏データ  
 上段は時間長の移動平均(青が独奏, 赤が伴奏). 下段がずれの移動平均(正が伴奏先行, 負が独奏先行).  
 各グラフの演奏者は上二つが独奏者 a, 下二つが独奏者 b, 左二つが伴奏者 p, 右二つが伴奏者 q.

一方、同じ伴奏者  $p$  が別の独奏者  $b$  と合奏したデータは図の左下になるが、こちらの合奏でもテンポ変化直後の 40 小節目付近から加速傾向がみられるが、こちらでは独奏者が 48 小節目付近で減速することにより、一時的に伴奏者のずれがわずかに正となるが、独奏者がその影響を受けずにテンポを維持（わずかに減速）することにより、テンポ変化直後のテンポまで引き戻されている。

もう一人の伴奏者  $q$  による合奏は図の右側に示されているが、とくに類似の現象は見られず、テンポ変化直後以外は大きくずれることなく、また、テンポもほぼ一定で維持されていることがわかる。

本節では、独奏者と伴奏者の演奏タイミングのずれを分析した結果、独奏者が伴奏者の音が聞こえない状況ではタイミングのずれが発生しやすくなることが分かった。これは伴奏者が独奏者と協調するように演奏制御を行ったとしても、独奏者はそのような制御ができないため、十分にずれが解消されないことが原因であると考えられる。一方、通常の場合では突然のテンポ変化などの影響を除くとずれが大きくなることはなく、ほとんどの場合は±30 ミリ秒の範囲内で合奏が進行していくことが分かった。また、今回の合奏データで伴奏者が独奏者よりも先行してテンポが速くなる事例が見られたが、この事例からも独奏者が伴奏者の影響を受けて自分の演奏を変化させているという相互作用の存在が明らかとなった。

### 3.2 時間長変化の分析

次に演奏者がどのように自身の演奏を制御しているのかを分析する。分析に当たり、まず始めに時間長変化パラメータを定義する。時間長変化とは伴奏者の演奏時間間隔 (Inter onset interval, 以下 IOI) の変化を表し、以下の式で定義する。

$$c_n = l_n - l_{n-1} \quad (2)$$

式(2)中の  $l_n$  は伴奏の  $n-1$  番目の音を演奏した時刻  $t_{n-1}$  から  $n$  番目の音を演奏した時刻  $t_n$  までの時間間隔 IOI であり、次式で定義される。

$$l_n = t_n - t_{n-1} \quad (3)$$

時間長変化  $c_n$  は、直前の時間長に対して次の時間長をどの程度変化させているかを表しており、 $c_n$  が正の場合は直前の音よりも IOI を長く演奏したことを意味し、 $c_n$  が負の場合は直前の音よりも IOI を短く演奏したことを意味する。 $l_n$  は演奏するテンポの逆数を意味していることから、 $l_n$  を用いて計算された時間長変化  $c_n$  はテンポ変化に関連するパラメータであると考えられる。

本研究では独奏者のふるまいも分析するため、独奏者の時間長変化、時間間隔 IOI を伴奏者と同様に定義する。

$$C_n = L_n - L_{n-1} \quad (4)$$

$$L_n = T_n - T_{n-1} \quad (5)$$

図 5、図 6 に通常合奏と一人演奏における直前の時間長

変化と次の時間長変化の関係を示す。横軸は直前の時間長変化  $c_{n-1}$  を表し、縦軸はその次の時間長変化  $c_n$  を表している。また、図中の  $r$  は相関係数を表す。図 5 と図 6 から、独奏者と伴奏者のどちらも強い相関を示していることが分かる。これは独奏者、伴奏者ともに、直前にわずかに加速したら次は自身のテンポをわずかに減速するという傾向を表しており、テンポを一定に保とうとする制御の表れであると解釈できる。また、独奏者の方が伴奏者よりも相関係数の値が大きいことから、独奏者の方が伴奏者よりも自身の演奏テンポを一定に保とうとする傾向が強く、伴奏者は独奏者に合わせようとテンポを調整するからではないかと考えられる。

また、独奏者の一人演奏と通常合奏を比較すると両者の間には違いがほとんど見られない。すなわち、このパラメータの傾向は合奏相手がいるかどうかとは関係なく、独奏者自身がテンポを一定に保とうとしていることを表しており、伴奏者からの影響を受けていない（相互作用が生じていない）と考えられる。

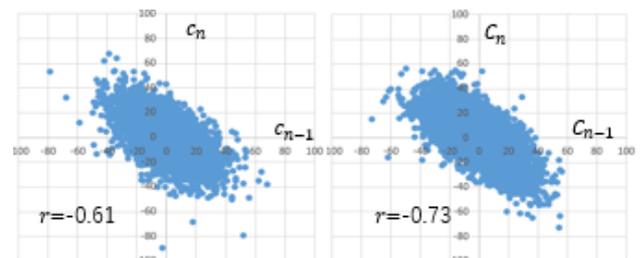


図 5. 通常合奏における直前の時間長変化と次の時間長変化の関係 (左が伴奏者, 右が独奏者)

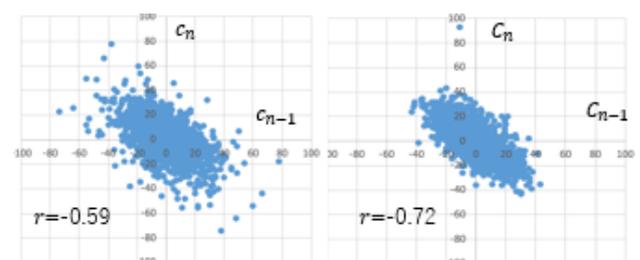


図 6. 一人演奏における直前の時間長変化と次の時間長変化の関係 (左が伴奏者, 右が独奏者)

本節では、時間長変化を分析した結果、これまで演奏制御パラメータとして予測に有効であった時間長変化[6]は合奏相手の演奏とは関係なく、各演奏者内で独立したパラメータであり、テンポを一定に維持する機能を有していると考えられるのに加え、独奏者の方がその傾向が強く、伴奏者が独奏者にテンポを合わせるという役割の違いの影響が出たのではないかと考えられる。

### 3.3 ずれと時間長変化の分析

次に直前のずれと次の時間長変化との関係を分析する。

図7, 図8に通常合奏と一人演奏における直前の演奏タイミングのずれと次の時間長変化の関係を示す。横軸は直前の演奏タイミングのずれ  $d_{n-1}$  を表し, 縦軸は独奏や伴奏の次の時間長変化 ( $c_n$  あるいは  $C_n$ ) を表し, 図中の  $r$  は相関係数を表す。伴奏と独奏で相関関係が逆になっているが, これはお互いにずれを小さくする方向に次の時間長を変更している傾向を表している。図7から通常合奏において, 独奏者は伴奏者と同様に相手とのずれを減らすように制御している傾向が見られた。

一方, 図8の一人演奏では独奏者は相手の演奏が聞こえておらず, 演奏タイミングのずれを認識できないため,  $C_n$  は  $d_{n-1}$  とは無相関となることが予想されるが, わずかながら負の相関が見られた。この原因を明らかにするため,  $d_{n-1}$  と  $C_{n-1}$  の相関を調べた所, わずかに相関がみられた。図6で示したように  $C_{n-1}$  と  $C_n$  の間には強い相関が存在することから, 結果的に図8において  $d_{n-1}$  と  $C_n$  の間にわずかな相関が表れたと解釈できる。

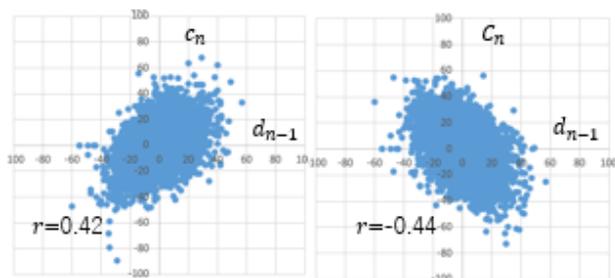


図7. 通常演奏における演奏タイミングのずれと次の時間長変化の関係 (左が伴奏者, 右が独奏者)

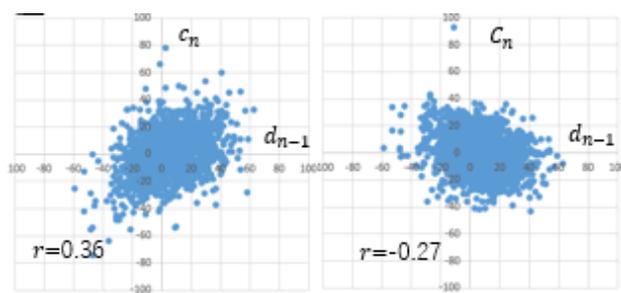


図8. 一人演奏における演奏タイミングのずれと次の時間長変化の関係 (左が伴奏者, 右が独奏者)

これらのことを考慮すると, 一人演奏での独奏者は伴奏者とのずれを認識できないため, それに反応して自身の演奏テンポを変化させることはないが, 通常合奏では独奏者は伴奏者との演奏のずれを認識し, そのずれを減らすように独奏者自身のテンポを変化させているという現象が観察された。すなわち, 独奏者は伴奏者を無視して一方的に演

奏を行っているのではなく, 伴奏者の演奏に影響を受け, それに反応して自分自身の演奏テンポを変化させているという相互作用の存在が明らかとなった。

本節では, ずれと時間長変化の関係について分析を行ったところ, 通常合奏では独奏者も伴奏者も直前のずれを減らすように次の時間長を変化させる傾向が見られ, 独奏者が伴奏者の演奏が聞こえない状況ではそのような制御が見られなかった。このことは3.1節の一人演奏でずれが生じる原因となっていると考えられる。また, これらのことや3.1節でテンポが不安定になった事例から, 独奏者が伴奏者の演奏に影響を受ける相互作用が存在し, その相互作用により協調された合奏が実現できていると考えられる。

## 4. まとめと今後の課題

本研究ではお互いに演奏が聞こえる状況での通常の合奏と独奏者が伴奏者の演奏が聞こえない状況での合奏を収録したデータを比較分析した。その結果, 演奏タイミングのずれとその後の時間長変化の相関から, 独奏者の相互作用が存在することが確認できた。また, 独奏者の相互作用の欠落により, 通常の合奏と比較して, 一人演奏では冒頭後やテンポ変化後以外でもテンポが不安定になる状況が頻繁に発生することが分かった。これらの分析結果から, 通常の合奏では, 独奏者は一方的に演奏を行うのではなく, 伴奏者のテンポに影響を受け, それに反応して自分自身の演奏テンポを変化させていることが明らかになった。

今後の課題としては独奏者の相互作用の有無と伴奏者のテンポ制御の関係について見ていきたい。演奏タイミングのずれが起きてしまったとき, 相互作用の有無によって, 独奏者の反応が変化するが, その変化がその後の伴奏者のテンポ制御にどのような影響を与えてしまうのかを分析したいと考えている。また, 今回の分析によって得られた知見をモデル化し, 伴奏システムへ実装したいと考えている。

## 参考文献

- [1] Dannenberg, R.: An On-Line Algorithm for Real-Time Accompaniment, *Proc. of ICMC*, pp. 193-198 (1984).
- [2] Vercoe, B.: The Synthetic Performer in the Context of Live Performance, *Proc. of ICMC*, pp. 199-200 (1984).
- [3] 井川孝之, 直井邦彰, 大照官, 橋本周司: 相互作用モデルによる実時間適応自動伴奏とその動作解析, 電子情報通信学会春季全国大会講演論文集 p.7.216 (1990).
- [4] 澤田秀之, 磯貝昌幸, 橋本周司, 大照完: 音楽演奏に置ける人間と機械の協調動作について, 情報処理学会全国大会論文集, pp.1.389-1.390 (1992).
- [5] 小林洋平, 三宅美博: 相互引き込みモデルを用いたアンサンブルシステムの開発, 計測自動制御学会論文集, Vol. 40 No. 9, pp. 948-957 (2004).
- [6] 堀内靖雄, 坂本圭司, 市川: 合奏時の人間の演奏制御の分析・推定, 情報処理学会論文誌 45(3), 690-697, 2004-03-15
- [7] Rasch, A.: The Perception of Simultaneous Notes such as in Polyphonic Music, *Acustica*, 40, pp.21-33(1978).