

## 協調演奏における演奏者間コミュニケーションの解析

小林 豊\* 三宅 美博\*

### Analysis of Musical Communication in Cooperated Performance

Yutaka Kobayashi\*, Yoshihiro Miyake\*

**Abstract** –In this study, we measured the temporal development of hitting time and body motion of player to investigate the mechanism of interaction of cooperated musical performance. And we analyzed their dynamics as stationary process and as non-stationary process. The results revealed that (a) Hitting lag and variation of hitting lag correlates with variation of hitting cycle. These correlations depend on note distance and become strong when note distance is 8, 16 not only the note distance is close. (b) This relationship is related to the dynamics of body motion of player. (c) We analyzed dynamic mechanism of correlation between hitting lag or variation of hitting lag and variation of hitting cycle. From these results, existence of hierarchy between short period and long period was suggested.

**Keywords:** music communication, cooperated performance, embodiment, hierarchy, co-creation

#### 1. はじめに

人の内面から考えた時間における現在というものは、一時点あるいは過去と未来の境界線などではなく、今・現在として主観的なある程度の幅を持って進んでいる<sup>[1]</sup>。このような心理的現在と呼ばれる、ある種曖昧とも取れる時間軸の上で、私たちは様々な時間を介したコミュニケーションを成し遂げている。スポーツ競技やコンサートホールでの演奏など、息をのむようなすばらしい瞬間に何度出会ったことか。このようなコミュニケーションには、決定論的な側面だけではなく創出的な側面が存在すると考えられる。正確に楽譜をなぞった機械演奏ではもたたりなく、逆にこれからどうなるかがわからない無限定状態だからである。いつも決まったことしか起こらないならば、感動にはつながらないだろう。

人間同士の音楽コミュニケーションを理解しようという研究は以前から行われている。しかし、科学的な立場からコミュニケーションを扱おうとすると、強い文脈依存性の問題や主観と客観の評価の違いなどいくつか困難が常に存在し、根本的なメカニズムの解明を難しくしている。このような問題はあつもの、状態を定常と仮定したり、再現性の低い一回性のものを周期的な問題として擬似的に扱うなどして解析が試みられている<sup>[7]</sup>。一例として、堀内ら<sup>[8]</sup>は人間と機械の演奏や人間同士の演奏を、演奏のずれからの影響を調べることにより解析を行っている。その研究では、演奏者は独奏者と伴奏者にわかれ、伴奏者の独奏者に対する線形予測モデルを立て、さらにそのモデルを重回帰分析することにより解析を進めている。小林ら<sup>[6]</sup>は、堀内らと同様な実験結果から非

線形振動子を用いたモデルを計算機に実装し、人間との相互作用型の演奏を実現するシステムを構築した。

しかし、これらの研究のほとんどが解析において系を定常として扱っている。先も述べたように創出という観点からは系が定常であるとは考えにくい。音楽コミュニケーションは何かしらの階層構造を持ち、その相互作用から非定常な系が生じると考える方が自然である。既存の研究は、この階層性に注目した解析が不十分である。また、実際に聞こえる音というものは、私たちの身体運動が生み出している<sup>[4]</sup>。音楽とは、耳に聞こえる音のみならず、身体との関わりを考えることがより本質的ではないか<sup>[5][9]</sup>。しかし、身体運動と音楽は同時に定量的に扱われていないのが現状である。そこで、コミュニケーションにおける身体運動にも同時に注目する。

本研究では解析を行う具体的な対象として、時間という観点から音楽の協調演奏に注目する。まず定常解析から、何を音楽コミュニケーションの階層性とするかを身体運動も加えて考え、さらにそれがどのような振る舞いをするのか非定常解析する。それにより、人間の音楽コミュニケーションにおける協調機構の時間的な創出過程を解析する。

#### 2. 実験手法

##### 2.1 手法概要

本研究では人間のコミュニケーションにおける協調機構を調べるため、二人の演奏者の協調演奏を解析する。時間という切り口に注目し、打鍵された時刻と身体運動を計測する。作用関係の同定を容易にするために、比較的平易な構成の曲（平均率クラヴィーア曲集第一巻第一曲プレリュード、BWV846, Bach）を課題とする。

##### 2.2 被験者

演奏者は、ピアノ教育を15年以上受けた3名の学生(右

\*: 東京工業大学大学院 総合理工学研究科

\*: Interdisciplinary Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology.

利き)である。どの奏者も、ツェルニー100番練習曲程度の演奏を楽にこなすことができる技術を持つ。また、どの奏者も課題曲をミスタッチなく一人で弾きこなすよう習熟を行った。この3名を2人1組として3組で実験を行った。

### 2.3 実験システム

計測は図1に示すシステムを用いて行った。演奏は、2台の電子ピアノ(Roland:RD-600)を用い、音はスピーカー(ONKYO:GX-R3)を通じて両者に提示する。ピアノ演奏はMIDI信号としてMIDIシーケンサ(PC)に記録する。また身体運動を計測するため、奏者の胸に加速度センサ(ANALOG DEVICE社,ADXL202E)をバンドで固定し、加速度を計測する。サンプリング周波数は100Hz、得られた加速度データは無線(横川製作所,YM-103A)で小型PC(SONY,PCG-U101)に送信される。

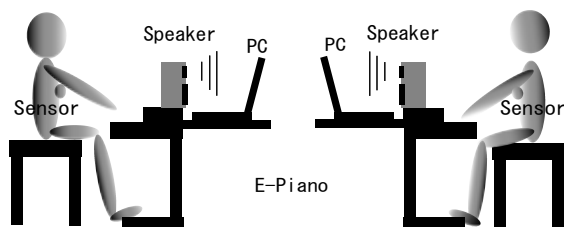


図1 実験の計測システム

Fig.1 Experimental system of a cooperative performance

### 2.4 解析指標

計測は両奏者のn番目の打鍵時刻 $t_A(n)$ ,  $t_B(n)$ を精度1msで計測する。そこから図2にしたがって、打鍵間隔 $t_A(n+d)-t_A(n)$ ,  $t_B(n+d)-t_B(n)$ より打鍵周期(Hitting cycle) $c_A(n)$ ,  $c_B(n)$ 、さらにその変化量(Hitting cycle variation) $c_{vA}(n)$ ,  $c_{vB}(n)$ を得る。また両者の打鍵時間差 $t_A(n)-t_B(n)$ から打鍵ずれ(Hitting Lag) $l_A(n)$ ,  $l_B(n)$ 、さらにその変化量(Hitting lag variation) $l_{vA}(n)$ ,  $l_{vB}(n)$ を算出し解析の指標とする。ここでdは音符の間隔であり、1であれば隣接する音符、2以上であればその分だけ音符をとばして計算する。

身体運動をとらえるために、得られた加速度を二階積分し、胸の軌跡となる位置情報 X(前後方向)Y(左右方向)を算出する。ただし通常、単純な加速度からの二階積分では誤差が蓄積してしまい妥当な結果が得られない。

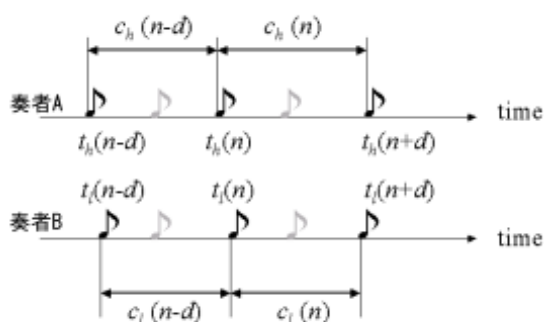


図2 測定指標

Fig.2 Definition of measurement indexes

そこで加速度、速度をともに前後1秒間の移動平均からの変位として考えることにより誤差修正を行う<sup>[12]</sup>。それにより得られる位置情報を解析の指標とする。

### 2.5 データ解析

本研究の目的である音楽コミュニケーションの階層性を考えるということから、まず統計解析により演奏全体を定常状態としてとらえる。測定した打鍵時刻、もしくは身体運動について、何が階層性を構成しているのかを考える。その結果を踏まえた上で、さらにそれがどのような振る舞いを示すか調べるために非定常解析を行う。

#### 2.5.1 打鍵時刻からの指標

演奏において、奏者自身が決定するのは打鍵周期であり、相手奏者との関係により決まるのが打鍵ずれである。自身で決める打鍵周期については打鍵周期そのものではなく、1つ前に比べてその後どのように変化させたかを見るために打鍵周期の変化量に注目する。そこで、相手との関係である打鍵ずれ、打鍵ずれの変化量から、自身で決定される打鍵周期の変化量がどのように影響を受けているか相関解析を行う。その際なるべく長い時間まで考えるために、打鍵間隔を2,3のような近傍のみではなく、16付近まで解析する。

#### 2.5.2 加速度からの指標

両奏者の身体的な関係を見るために、得られる位置情報の自己相関をそれぞれとり、パワースペクトルを算出する。また両者関係を見るため、相互相関のパワースペクトルを算出する。それらの結果を、2.5.1で述べた打鍵時刻からの指標と比較する。

## 3. 結果

### 3.1 定常解析

#### 3.1.1 打鍵時刻からの結果

典型例として図3に、dを1として横軸に打鍵ずれ $l(n)$ 、もしくは打鍵ずれの変化量 $l_v(n)$ 、縦軸に打鍵周期 $c(n)$ もしくは打鍵周期の変化量 $c_v(n)$ をプロットしたものを示す。打鍵ずれが増加すると打鍵周期が減少する傾向にあることがわかる。この傾向は、打鍵ずれの変化量と打鍵周期

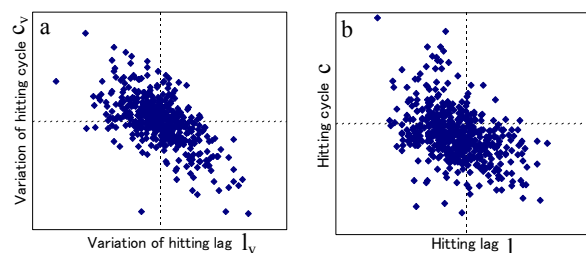


図3 a. 打鍵ずれの変化量と打鍵周期の変化量

b. 打鍵ずれと打鍵周期

Fig.3 a. Plot of hitting lag and hitting cycle

b. Plot of variation of hitting lag and cycle

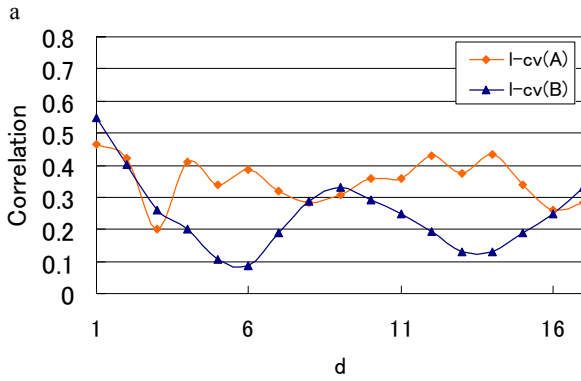


図4 各指標間の相関値

a. 打鍵ずれと打鍵周期の変化量の相関

b. 打鍵ずれの変化量と打鍵周期の変化量の相関

l:打鍵ずれ, lv:打鍵ずれの変化量, cv:打鍵周期の変化量, A,B:各奏者

l: Hitting lag, lv: Variation of hitting lag, cv: Variation of hitting cycle, A, B: Player.

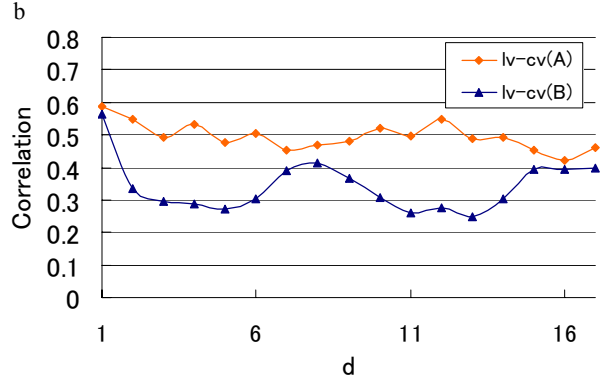


Fig.4 Correlation coefficient of each index at each d

a. Hitting lag and variation of hitting cycle

b. Variation of hitting lag and variation of hitting cycle

の変化量に関してもみられる。つまりこれらの間には負のフィードバック（つまりは負の相関）があることが予想される。

上で述べた相関の打鍵間隔  $d$  への依存性を図4に示す。図4のaが打鍵ずれ( $l$ )と打鍵周期の変化量( $c_v$ )の相関で、bが打鍵ずれの変化量( $lv$ )と打鍵周期の変化量( $c_v$ )の相関である。先に述べたとおりこれらは負の相関を示すが、見やすさのため反転させて表示している。この結果より、打鍵ずれとの相関よりも打鍵ずれの変化量との相関の方が概して相関が高い(aよりもbの方が全体的に相関値が高い)。この結果は先行研究とも合致する<sup>[6]</sup>。また奏者Bについてより顕著なのだが、打鍵間隔  $d$  に対する依存性ははっきりと見えている。またこの傾向は、(b)打鍵ずれの変化量との相関よりも(a)打鍵ずれとの相関の方によく現れている。

またその依存性に関しては、たとえば打鍵間隔  $d$  が8や16など、長時間スケールで特徴的な  $d$  があると考えられる。これは他の被験者の組でも同じ傾向を示していた。これらの結果は、演奏位置のごく近傍を解析していた先行研究では報告されていない点である。各被験者も実験後にコメントしていたのだが、少なくともこの課題曲に関してはとにかく長時間での“まとまり感”のようなものが感じられたようである。

打鍵ずれ、打鍵ずれの変化量と打鍵周期の変化量との両相関に言えるのだが、打鍵間隔が1,2程度のごく近傍では常に強い相関を示している。一方で打鍵間隔が4,8,16と広がっていくような長時間のスケールを見ると、それとは異なる振る舞いが現れている。これらの結果より短い周期スケールと長い周期スケールという、時間スケールでの階層構造が存在することが示唆される。ここでは定常状態として解析しているが、これを非定常として解析すれば階層性に関する知見がさらに得られると考えられる。

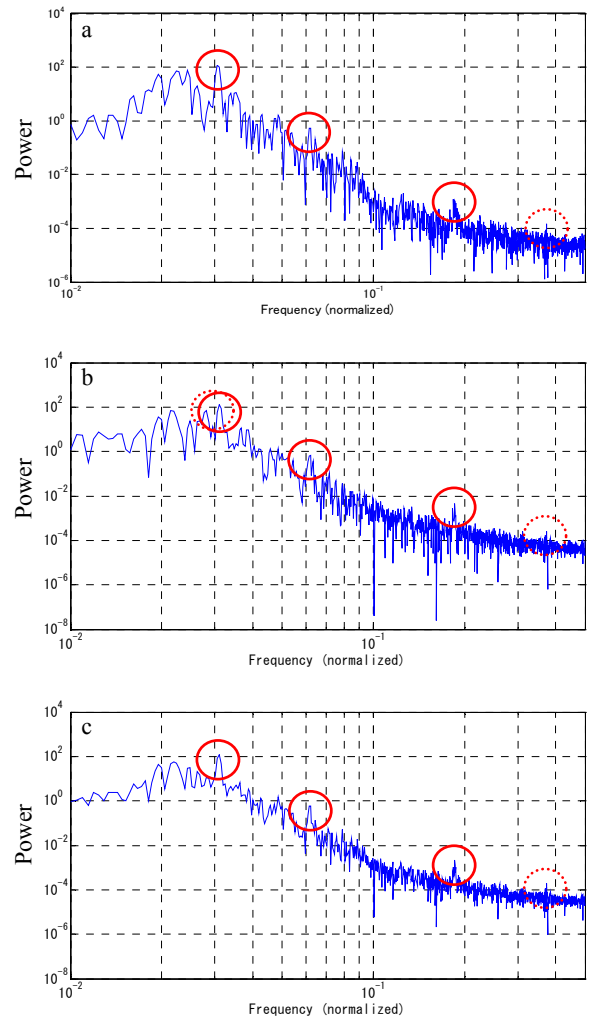


図5 身体運動のパワースペクトル

a. 奏者 A b. 奏者 B c. 両者の相互相関のスペクトル

Fig.5 Power spectrum of trajectory.

a. Player A. b. Player B.

c. Spectrum of crosscorrelation between A and B.

### 3.1.2 加速度からの結果

加速度より得られた軌跡のパワースペクトルを図5に示す。図5-a, bはそれぞれ奏者A、奏者B単独でのパワースペクトルであり、図5-cは両者の相互相関のパワースペクトルである。個別のみでなく相互相関のスペクトル解析結果まで含めて、共通にみられる顕著なパワー成分を持つ周波数に(0.018), 0.031, 0.062, 0.185, (0.352)等が挙げられる。先の結果では奏者Aにはあまり見られなかった長周期スケールでの特徴がここでは現れていて、この周波数付近で、両奏者が同調しているのが伺える。また、これは楽譜時間にして音符の約(4), 8, 16, 48, (96)個分の時間に相当する。

ここで特徴としてあげられた周波数は3.1.1項の解析結果より得られた比較的長周期でのまとまり感に概ね一致している。加えて身体運動の方がより長周期スケールの特徴的な成分を持っていることがわかる。つまり、奏者の感じているであろうまとまり感が奏者自身の身体運動と関係していることが裏付けられた。身体運動の示す長い周期性と音楽演奏の相関の間になんらかの相互関係があるのではないかと推測される。

### 3.2 非定常解析

前節の結果から、打鍵ずれ、打鍵ずれの変化量と、打鍵周期の変化量の関係に打鍵間隔  $d$  に対する依存性が示された。また身体データの側面からも比較的長いまとまり感らしきものと、その階層性が示唆された。しかし、そのいずれも系を定常と仮定した統計解析の結果である。本研究の目的を振り返っても、ここで示唆されたものがどのような振る舞いをするのかを調べるために、非定常解析に進むのが妥当だと考えられる。そこで、Short Time Fourier Transform の考え方を習って時間を適切な大きさに区切り、その時間の窓を移動させながら前章での解析をその窓内において連続的に行う。つまりは、3.1での相関解析をよりローカルな範囲で適用し、それを時間軸で移動させた結果が現れる。

#### 3.2.1 窓長の決定

連続的に時間窓を用いた解析を行うにあたり、その窓長を適切に決定することはその事象のある姿を正しく捉えるためにとっても重要である<sup>[11]</sup>。むやみに窓を大きくして解析の幅を広げても、結局は非定常としての意味が薄くなってしまう。

また一般的に、音楽には  $1/f$  ゆらぎがあることが知られている。 $1/f^\beta$  型のスペクトルを持つということは、周波数とパワーの構造が統計的な自己相似性を持つことでもある<sup>[11]</sup>。そこで、少なくとも統計的自己相似性の破綻点まではなんらかのまとまりが存在すると考え、その破綻点を見だし窓の大きさとする。そこで、 $1/f$ 性が確認されている心拍揺らぎの解析<sup>[10]</sup>で有効に用いられた例もある、Detrended Fluctuation Analysis(以下 DFA)を導入する。DFAについては付録を参照されたい。

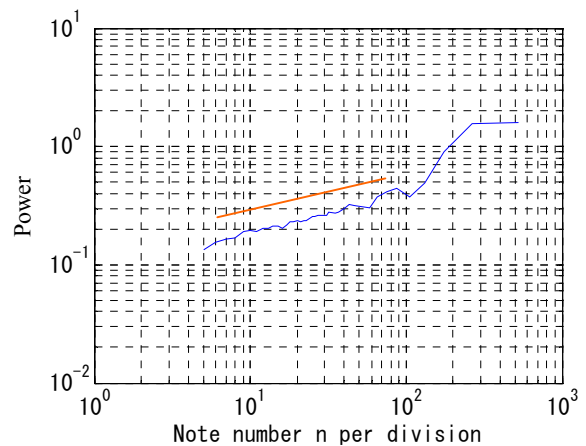


図6 DFA適用結果(打鍵ずれの変化量)

Fig6 Detrended fluctuation analysis.  
(Variation of hitting lag)

図6に打鍵ずれの変化量の適用結果を示す。最多で100分割まで等分し、ブロックあたりのデータ点数を  $n=5-500$  まで解析した。概ね  $n \leq 90$  においてプロットは直線近似可能であることがわかる。これより、打鍵ずれの変化量については約90音符長が統計的自己相似性の破綻点だとわかる。

#### 3.2.2 窓を用いた解析結果

DFAの結果をもとに時間窓長を設定し、再度3.1節と同様に、打鍵ずれ、打鍵ずれの変化量と、打鍵周期の変化量との移動窓の相関解析を行い、打鍵間隔  $d$  への依存性の経時的な振る舞いを解析した。図7に打鍵ずれと打鍵周期の変化量との解析結果を、図8に打鍵ずれの変化量と打鍵周期の変化量との解析結果を示す。その結果、定常解析では見えなかった相関の経時変化が現れた。

図7より打鍵ずれからの相関は振る舞いが打鍵間隔  $d$  に依存しているように見えるのに対し、図8より打鍵ずれの変化量からの相関は楽曲全長を通して強弱変化はするものの、打鍵間隔  $d$  にはあまり依存していないように見える。また、各打鍵間隔において特徴的に高い相関が見られるものの、それは楽曲全体に渡って生じているのではなく、場合により消えたり、もしくは現れたりしている。図8を見るとわかるように、今回示した例では楽曲中盤で相関の大小が2人の奏者の間で逆転し、互いに逆の振る舞いを示している。解析結果には様々なパターンが見られ、これらを統合的に解釈することは難しく一概には言えないが、この例に限ってはなんらかのリードフォロアの関係が現れているように思える。

打鍵間隔  $d$  による変化が考えられる打鍵ずれからの相関の特徴を捉えるために、図7、図8において打鍵間隔  $d$  方向での断面を図9、図10に示す。これより、 $d$  が小さいときには相関が比較的安定して強く出ていて、 $d$  が大きくなるにつれて相関の変動性が富むように見える。

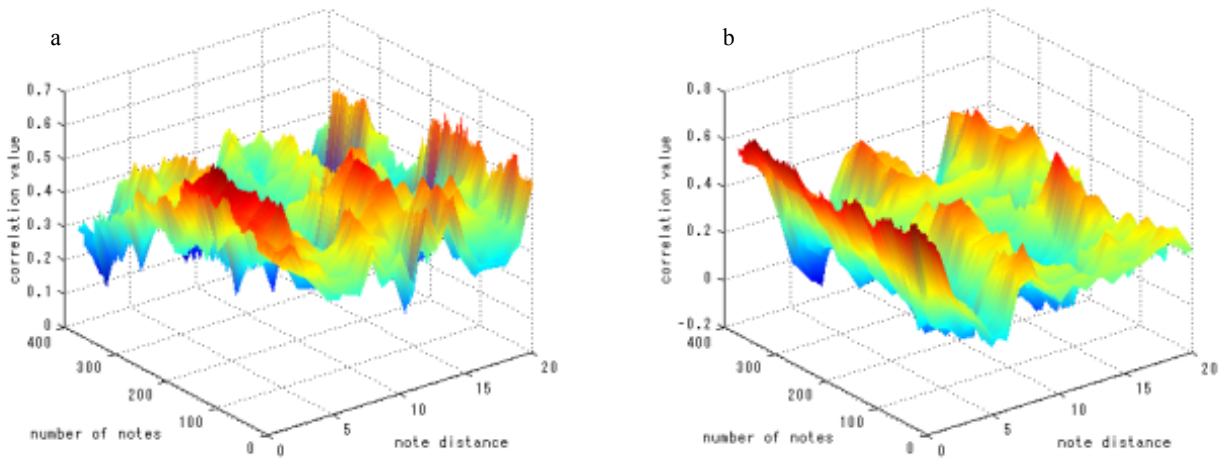


図7 打鍵ずれと打鍵周期の変化量の相関の時間発展 a: 奏者 A, b: 奏者 B

Fig.7 Temporal development of correlation of hitting lag and variation of hitting cycle a: Player A, b: Player B

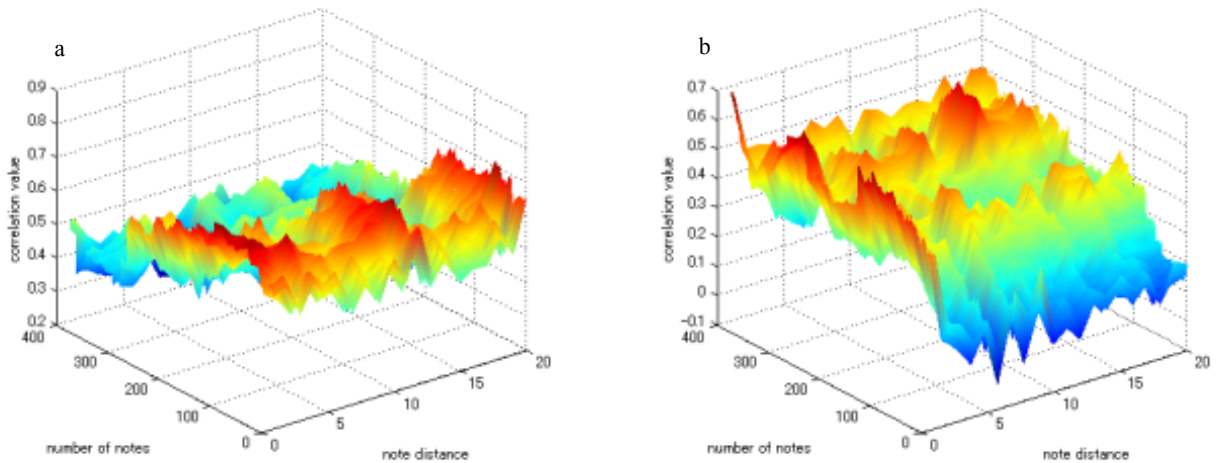


図8 打鍵ずれの変化量と打鍵周期の変化量の相関の時間発展 a: 奏者 A, b: 奏者 B

Fig.8 Temporal development of correlation of variation of hitting lag and variation of hitting cycle a: Player A, b: Player B

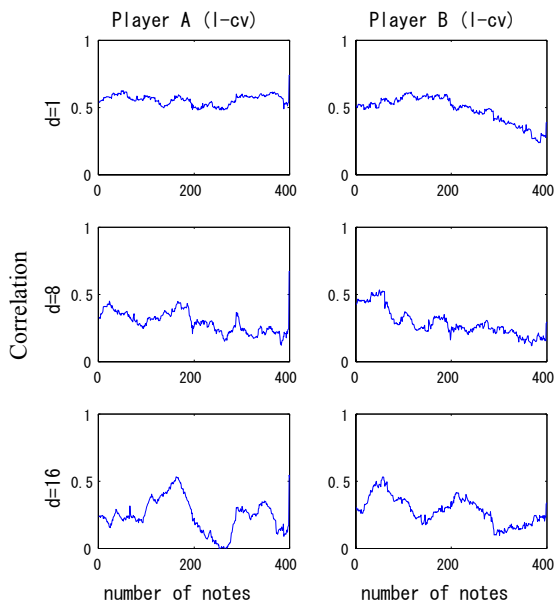


図9 打鍵ずれと打鍵周期の変化量の相関

Fig.9 Correlation of hitting lag and variation of hitting cycle

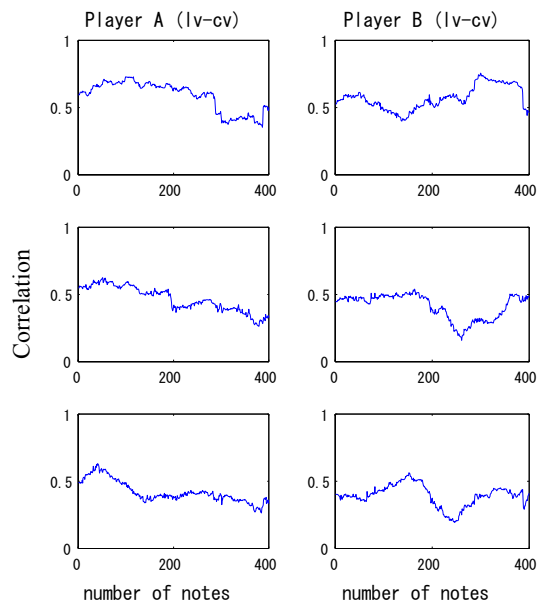


図10 打鍵ずれの変化量と打鍵周期の変化量の相関

Fig.10 Correlation variation of hitting lag and variation of hitting cycle

つまりは、ここに短周期と長周期でのダイナミクスが異なっており、相関が短周期では安定して強く、また長周期ではその変動性が現れるという時間スケールに対する階層性が反映されているものと考えられる。

#### 4. 考察

曲全体について打鍵間隔を変えて時間スケールの異なる相関を解析した。その結果、打鍵ずれと打鍵周期の変化量の相関について、打鍵間隔  $d$  に依存した長周期でのまとまり感が見えた。また、打鍵ずれの変化量と打鍵周期の変化量の相関について、打鍵間隔  $d$  に依存したまとまり感は薄くなるものの全体として強い相関を見せた。また上記の両相関ともに、短い打鍵間隔では強い相関を示している。この結果は、小林らの先行研究<sup>[6]</sup>の結果をより長時間スケールの領域に拡張したものと考えられる。さらに、時間スケールでの階層性の存在性を示唆する。

また加速度より求めた位置情報から、打鍵時刻の各指標からの長周期での相関と概ね一致する顕著なスペクトルを両者ともに検出した。このことから、実際に音となって発現する楽曲表現と、その両奏者の身体運動とはなんらかの結合系になっており、両者が相互作用していることが示唆される。協調演奏においては今まであまり触れられてこなかった奏者の身体運動に注目することが、逆に打鍵時刻から考える音楽コミュニケーションを解析する上での新たな切り口になるのではないだろうか。

本研究では解析方法を非定常解析へと進めた。打鍵ずれからの相関は打鍵間隔  $d$  とともに振る舞いに変化していた。より短い周期 ( $d$  が小さい) での相関は安定している。一方より長い周期 ( $d$  が大きい) での相関では、時間に対する変動性が現れた。また、打鍵ずれの変化量からの相関は打鍵間隔  $d$  にあまり依存しておらず、とくに短い周期( $d$  が小さい)において安定して高い相関を示していた。これらは、時間スケールでの短周期と長周期という階層性の存在を示唆するものである。今後はこの結果を踏まえ、この 2 つの階層性に注目して非定常解析を進めていきたい。

#### 5. おわりに

本研究では、2 人の人間の音楽コミュニケーション機構を調べるために、協調演奏をその具体的な題材としてその階層性に注目し、統計・時系列解析を試みた。定常の結果、短周期、長周期という時間スケールでの階層性の存在が示唆され、また打鍵時刻のデータと身体運動のデータの関係から両奏者の楽曲表現がその 2 つの側面の結合系にあることが示唆された。また、非定常解析の結果から、上記で示唆された階層構造の動的な振る舞いが抽出された。今後は得られた結果をより統合的に解釈し、

協調演奏の内部モデルの構築を目指したい。

#### 参考文献

- [1] 松田, 調枝, 甲村, 神宮, 山崎, 平(編): 心理的時間; 北大路書房, (1996).
- [2] 波田野誼余夫: 音楽と認知; 東京大学出版会, (1987).
- [3] Meyer, L.B.: Emotion and meaning in music; University of Chicago Press, (1956).
- [4] R.A.Rasch: Synchronization in performed ensemble music; ACUSTICA, 43, 121-131, (1979).
- [5] 山田陽一: 音楽と身体に関する民族美学的研究; 国立民族学博物館共同研究会, (2003).
- [6] 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; 自動計測制御学会論文誌, vol.40, No.9, (2004).
- [7] 長島洋一 他: コンピュータと音楽の世界; Bit 別冊, 共立出版, (1998).
- [8] 堀内靖雄: 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, (2004).
- [9] 山本知仁, 三宅美博: 共同演奏における演奏者間のコミュニケーション解析; 計測自動制御学会論文集, vol.40, no.5, (2004).
- [10] P. Ch. Ivanov: From 1/f noise to multifractal cascades in heart beat dynamics; Chaos, 11-3, 641/652,(2001).
- [11] 小松知章, 三宅美博: 同期タッピング課題における非同期量の時間発展; 計測自動制御学会論文集, vol.41, No.6, (2005).
- [12] 小林哲平, 三宅美博: 運動学的解析における歩行介助ロボット”Walk-Mate”の有効性評価; ヒューマンインターフェースシンポジウム, (2004).

#### 付録

Detrended Fluctuation Analysis について簡単な解説を以下に示す。

$$y(k) = \sum_{i=0}^k (x(n) - \bar{x}) \quad (1)$$

対象となる時系列データを加法過程として((1)式:平均 0 としているため  $y(k_{\max})=0$ )、それを  $n$  点ずつのデータからの等間隔の区間に分け、それぞれの区間を最小二乗法で近似する。各  $y$  につき平均値  $y_{1s}$  との残差  $\Delta y=y-y_{1s}$  を求め全  $\Delta y$  からの残差平方和からその平方根  $F(n)$  を求める。 $F(n)$ - $n$  の両対数プロットに線形の関係がある場合、 $n$  によるスケーリングが成立しており、統計的な自己相似性が示される。