

Title	ピアノ演奏における離鍵速度の重要性と特性に関する考察
Author(s)	大島, 千佳; 西本, 一志; 阿部, 明典
Citation	情報処理学会論文誌, 47(5): 1546-1557
Issue Date	2006-05-15
Type	Journal Article
Text version	publisher
URL	http://hdl.handle.net/10119/4046
Rights	<p>社団法人 情報処理学会, 大島千佳/西本一志/阿部明典, 情報処理学会論文誌, 47(5), 2006, 1546-1557. ここに掲載した著作物の利用に関する注意: 本著作物の著作権は(社)情報処理学会に帰属します。本著作物は著作権者である情報処理学会の許可のもとに掲載するものです。ご利用に当たっては「著作権法」ならびに「情報処理学会倫理綱領」に従うことをお願いいたします。 The copyright of this material is retained by the Information Processing Society of Japan (IPSJ). This material is published on this web site with the agreement of the author (s) and the IPSJ. Please be complied with Copyright Law of Japan and the Code of Ethics of the IPSJ if any users wish to reproduce, make derivative work, distribute or make available to the public any part or whole thereof. All Rights Reserved, Copyright (C) Information Processing Society of Japan.</p>
Description	

ピアノ演奏における離鍵速度の重要性と特性に関する考察

大島千佳[†] 西本一志^{††} 阿部明典[†]

以前より演奏表現に関する研究が行われ、最近ではコンピュータに自動的に人間らしい演奏をさせる研究が行われている。これらの研究では、主に各音の音量や音長をもとに演奏表現を議論してきた。しかし、音楽演奏では「音の切れ方」も表現の一要素として重要である。ピアノ演奏の場合、音の切れ方は「離鍵速度（下におりた鍵盤が元の位置に戻る速さ）」によって表現され、Musical Instrument Digital Interface (MIDI) では、“Note off velocity”として数値的に示される。したがって本論文では、音楽情報科学分野における演奏分析や演奏生成の研究に利用可能な、知識表現を求めるための基礎的な段階として、ピアノの演奏表現における離鍵速度の重要性を示した。まず、音響スペクトログラムと聴取による評価実験により、離鍵速度の変化が演奏表現に影響を与えることが分かった。次に、演奏データを分析したところ、ところどころで際立って離鍵速度が遅い箇所があり、これらの箇所は楽譜上の情報と関係していることが示唆された。さらに度数分布を求めて打鍵速度の特性と比較することで、離鍵速度に示される奏者の知識表現を求めるには、離鍵速度が際立って遅い箇所や速い箇所に注目する必要があることが示された。

Analyses on Effects and Characteristics of Key-release Velocity in a Piano Performance

CHIKA OSHIMA,[†] KAZUSHI NISHIMOTO^{††} and AKINORI ABE[†]

Many researchers have been carried out analysis of musical performance expression. Recently, there are systems that can generate musical performance automatically. Most of these researches have focused only on volume, i.e., key-touch velocity, and duration. However, acoustic attenuation is also important. The acoustic attenuation related to key-release velocity that is expressed as “Note off velocity” in Musical Instrument Digital Interface (MIDI). This paper describes importance and effects of controlling key-release velocity as the first step of an available knowledge representation for music information science. First, we demonstrate effects of key-release velocity based on sound spectrogram and results of an evaluation experiment. Next, we show that performance data include some points where very low key-release velocity is marked relating to some features of the score. Then, we compare frequency distributions of key-release velocity with that of key-touch velocity and it is shown that we should pay attention to the points where very low and very high key-release velocity are marked so that we induce a performer's characteristics of key-release velocity.

1. はじめに

ピアノの離鍵速度とは、打鍵して下におりた鍵盤が元の位置に戻る時の速さであり、鍵盤が上がると同時にダンパ（弦の響きをおさえるもの）が弦の上に落ちる。本論文では、Musical Instrument Digital Interface (MIDI) データの中で離鍵速度を表す Note off velocity（鍵盤が元の位置に戻る速さ）に焦点をあ

てて、演奏表現における離鍵速度の調整の重要性について議論する。

演奏表現に関する研究は、かなり以前から行われており、様々な知見が得られている。たとえば、Seashore¹⁰⁾ は、音の強さと時間をハンマの動きからとらえて、同一曲でもピアニストにより違う解釈で演奏を行うことを示した。Shaffer¹¹⁾ は、ピアノのアクションの動きを計測し、音の強さと長さをデジタルデータ化して記録した。Shaffer & Todd¹²⁾ は、ピアニストがテンポを部分的に変えることで音楽的な構造を表現していることを示した。Gabrielsson²⁾ は、スラーの書き方によって、演奏における音楽的な構造の示し方が変わることを示唆した。Todd¹⁹⁾ は、奏者が楽曲構造の階層性を示すために、演奏のテンポを要所

[†] 株式会社国際電気通信基礎技術研究所メディア情報科学研究所
Media Information Science Laboratories, Advanced
Telecommunications Research Institute International

^{††} 北陸先端科学技術大学院大学知識科学教育研究センター
Center for Knowledge Science, Japan Advanced Institute of Science and Technology

で遅くしていることを示した。

最近ではこれらの知見を応用して、コンピュータに自動的に人間らしい演奏をさせる研究が行われている。たとえば、楽譜に書かれた記号や標語、そして暗示されている情報を利用して、音楽が本来持つ人間に影響を与える力を演奏に備えさせることを目標に、演奏生成システムの研究が国内外で行われている⁵⁾。Widmerら²⁰⁾は、楽譜と演奏者によるテンポと音量の変化をシステムに与え、フレーズの階層ごとにテンポとダイナミクスカーブ、および残差曲線に対して二次関数をあてはめた。新しいフレーズに対してはこれらのデータベースのフレーズと比較され、近似する二次曲線を採用することにより表情づけを行う。MIS (Music Interpretation System)¹⁾も与えられた楽譜情報と演奏データに基づき、重回帰分析により演奏ルールを抽出し、新たな演奏を生成する。Kagurame¹⁵⁾は、楽譜情報と与えたい演奏表情の特徴情報を入力すると、あらかじめ用意した人間による演奏データ集から類似した曲の演奏事例を探し、その演奏表情を対象曲に反映するシステムである。MUSE (MUSIC in Structured Expression)¹⁷⁾や Yutaka⁸⁾は人間が記述したルールにより表情づけを行う。これらの演奏分析や演奏生成の研究では、MIDIデータの Note on message に含まれる velocity (打鍵速度) で示される各音の「音量☆」や Note on message に含まれる発音時刻、および Note off message に含まれる消音時刻で示される各音の「音長」を中心に演奏表現が考えられてきた。

しかし、音楽演奏では「音の切れ方」も表現の要素として重要であると指摘されている^{4),16)}。一般的にピアノの奏者や学習者が音の切れ方を、「下がった鍵盤が元の位置に戻るまでの操作 (離鍵動作)」として鍵盤の動きに注意を払っていることは少ないが、離鍵速度が音楽のフレーズを表すための大切なポイントになることも往々に指摘されている⁶⁾。電子ピアノでも、離鍵速度によって響きを10段階にまで調整できる機能が取り付けられたり⁹⁾、離鍵後に発生する音を別にサンプリングしたり²²⁾することで、音の切れ方に関する微妙なニュアンスの表現を目指している。そこで本論文では、音楽情報科学分野で演奏分析や演奏生成の研究に利用可能な知識表現を求めるための基礎的な段階として、離鍵速度 (Note off velocity) の演奏表現における重要性を示す。

2章では、ピアノの打弦機構を説明し、実験で使用するピアノでの離鍵速度の計測に関して説明する。3章

では、離鍵速度の演奏表現における重要性について、スペクトログラムと主観評価によって示す。4章では、離鍵速度と打鍵速度の特性の違いを演奏データの推移と度数分布により示す。5章では以上の分析結果から離鍵速度で注目すべき点について議論する。

2. ピアノの打弦機構について

本章では、図1をもとにピアノの打弦機構と MIDI データとの関係について示す。(a)は鍵盤を押し始めた状態を示し、(b)はハンマが弦まで3mm程度に迫った状態を示している。鍵盤を押すと支点を中心に鍵盤の奥が持ち上がり、ダンパが弦から離れ、弦が振動できる態勢に入る。ジャックが持ち上がり、ハンマは弦に向かって動き出す。鍵盤を下に向かって押し続けると、底に着く直前に「カクン」という手ごたえを感じる。このときに、ハンマは弦から3mmぐらいのところに近接しており、図中の「ジャック」の右端が「セットオフ・ボタン (ジャック・レギュレータ)」に接触して、ジャックの上部がローラから外れる (「レット・オフ」と呼ばれる) (図中の (b) 自由運動)。ジャックがローラから外れた後、ハンマは慣性運動により弦に向かって動いているが、それ以外の機構は次の打弦に向けて初期状態に戻ろうとするため、「エスケープメント機構」と呼ばれている。ハンマの初期速度は、このレット・オフまでに打鍵により与えられた速度となる。ここで重要なのは、ジャックがローラから外れた時点で、ハンマへ鍵盤の運動を伝えることができなくなる点である^{3),23)}。よって、奏者が下がったままの鍵盤上でいくら手をこね回しても何事も起こるはずがないことは明らかである⁴⁾。鍵盤を上げれば (離鍵すれば) 弦の上に並んだダンパが弦に接触し、弦の振動が止まる。

つまり、ピアニストが意図的に操作できるのは、1. 打鍵と離鍵操作のタイミングによる音の長さ、2. 打鍵速度による音の大きさ、そして3. 弦の振動を止めるダンパの速度を操作する離鍵速度である。音の長さは、リズムやアーティキュレーション☆☆を形づくる要素といえる。さらに、たとえば音の粒立ちを鮮やかにするためには、素早く離鍵する必要がある⁴⁾。MIDIでは、1. 音の長さ (Duration) は、発音時刻 (Note on message 発行時刻) と消音時刻 (Note off message 発行時刻) の差で表現される¹⁸⁾。2. 音の大きさは、ピアノの打鍵速度に相当する Note on velocity により表

☆☆ スタッカートに奏する、レガートに奏する等、1フレーズ内の旋律をより小さな単位に区切り、それにある形と意味をあたえること³⁾。

☆ 厳密には実際に聞こえる音量とはリニアではない¹⁶⁾。

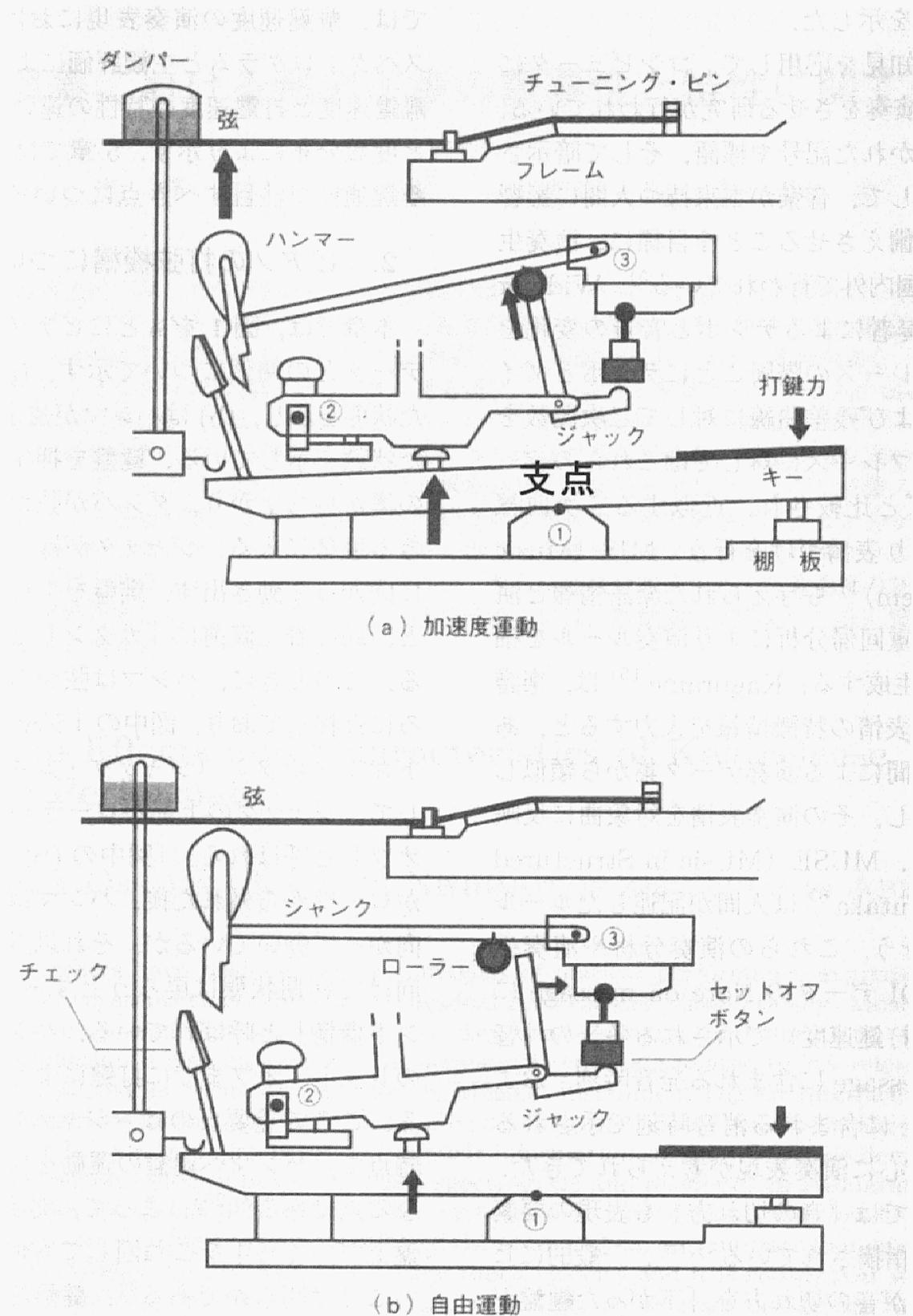


図1 ピアノの打弦機構 (文献 23) の p.19 から引用)

Fig.1 Piano action: quote from 23) p.19.

現される^{*}。Velocity には、さらに Note off velocity という、エンベロープの減衰時間を調整するのに用いられるデータがある。Note off velocity 値が小さいと徐々に音が消え、大きいと短時間で消える。ピアノにあてはめれば、離鍵速度にほぼ相当し、ダンパの下りる速度に関係する。

近年、MIDI データを出力できるアコースティック・ピアノが市場に出回っているが、すべてのピアノが離鍵速度を Note off velocity 値として出力できるわけではない。また、MIDI データをピアノに入力し、実

際にハンマを叩いて音を出力する機構を持つ楽器においても、Note off velocity については、必ずしも各値どおりではなく、全部の音について一定の値で離鍵しているピアノがほとんどである。そこで、本研究では Note off velocity 値の入出力が可能な YAMAHA SILENT ENSEMBLE プロフェッショナルモデルシリーズのグランドピアノ C5 を使用する。

このグランドピアノでは、鍵盤の下に非接触式の光によるキーセンサが4カ所あり、音を止めるタイミングや離鍵速度の MIDI データとしての出力が可能である²¹⁾。Note off velocity 値が鍵盤のどの位置で出力されるかを調べるための予備実験を行った。まず鍵を下まで下ろし、ゆっくりと元の位置へ上げていったとこ

^{*} 0 から 127 で表現されるが、0 は発音しないという意味のため、実質的には 1 が最も弱く、127 が最も強くと表現する。しかし、楽器ごとに数値とその強さの印象がまちまちである¹⁸⁾。

ろ、鍵が上から計測して 4.7 ミリ～5.5 ミリ（10 回計測）おりた個所（レットオフに相当する位置より上）で Note off message が出力された。本来、消音と離鍵速度の関係を明らかにするには、鍵盤の一番下から元の位置に戻るまでの詳細な速度や加速度も含めて明らかにする必要がある。しかし本研究の目的は、演奏表現における離鍵速度の調整の重要性を示し、演奏表現の分析や自動演奏生成システムの研究への示唆を与えることである。よって、本論文では、この YAMAHA SILENT ENSEMBLE プロフェッショナルモデルシリーズのグランドピアノに限定し分析を行う。以下、「グランドピアノ」とは、この離鍵速度を含めた MIDI データの入出力が可能なピアノを指す。また、本研究は離鍵速度に関する第 1 段階の研究であるため、ペダルによるダンパの制御に関する議論は行わない。

3. 離鍵速度の演奏表現における効果

本章では、離鍵速度が演奏表現に重要な要素であることを示す。まず、離鍵速度の差異がスペクトログラムの結果に影響を与えることを示し、次に、聴取による比較実験を行う。

3.1 スペクトログラムに見られる離鍵速度の差異

離鍵速度の違いによる周波数の様子の違いを、スペクトログラムにより示す。まず、C4, D4, E4, D4, C4 を、グランドピアノにて奏でる。出力された MIDI データ（オリジナルのデータ）のうち、離鍵速度の値のみを 127 と 25 の 2 通りに変更したデータを準備する。これらの 2 つのデータをそれぞれグランドピアノに入力し、実際にハンマで打弦させて音を出力させる。その出力した音から、それぞれサンプリング周波数 44.1 kHz、分解能 16 bit で記録した音響データを用いて、スペクトログラムを作成した。

図 2 は、その離鍵速度のみを 2 通り（127 と 25）に変更したデータのスペクトログラムの結果である。つまり、どちらの変更したデータも、離鍵速度以外のデータ（打鍵速度、発音時刻、消音時刻等）はオリジナルのデータとまったく同じである。上の段は離鍵速度を 25 に変更した E4（331.1 Hz）と D4（295.0 Hz）、下の段は離鍵速度を 127 に変更した E4 と D4 のスペクトログラムである。横軸が時間、縦軸が周波数であり、周波数の強さが時間的に変化する様子を示している。図中、Note off メッセージ発行時刻以後の周波数成分の変化を比較すると、以下の 2 点の差異が明らかである。

(1) 離鍵速度が 127 の場合、離鍵開始（Note off メッセージ発行）直後に、それまでに存在しなかつ

た周波数成分の音が出現している（離鍵速度 25 の方は離鍵開始前から出現している周波数のみ、線のようにつながっているが、離鍵速度 127 の方は、点線直後から特に周波数 2,685 Hz 以下の領域で、全体に白くなっており、Note off メッセージ発行以前には存在しなかった他の周波数が出現しているのが分かる。図 2 の四角に囲まれた (1) を比較）。これは、速い離鍵によって鍵のアクション機構が高速に元に戻る際に生じる機械ノイズではないかと思われる。

(2) 離鍵速度が 127 の場合、離鍵速度が 25 の場合と比較して離鍵の開始からいずれの帯域についてもパワーの減衰が速いが、特に約 2,000 Hz 以上の高周波成分の減衰が著しい（図 2 の四角に囲まれた (2) を比較）。

これらのノイズや周波数成分のパワーによる減衰の差は、音の消滅時間の違いとしてだけでなく、音色の差としても知覚されるはずである。一方で、離鍵速度が遅くなることで、ノイズが抑制され、「響かせる」ことに効果があると考えられる。

3.2 聴覚による離鍵速度の差異

スペクトログラムの結果を受けて、離鍵速度の差異が聴覚ではどのように違いを感じるのかを調べるために、ピアノを専攻する学生 3 名（以下、奏者 a, b, c と呼ぶ）によるショパン作曲「エチュード Op.10-3」*1～8 小節の主旋律（図 3）の演奏データ（以下、オリジナルのデータ、演奏 A, B, C と呼ぶ）を MIDI を使用して採取した。各々のデータの離鍵速度を次に示す 6 通りの方法（Lo, Hi, Av, Ex, Ct, Rn-method）で変更し、オリジナルの MIDI データと、変更した 6 種類の MIDI データをグランドピアノに入力し、被験者の目の前で、実際に打弦させて演奏を出力した。

Lo-method：離鍵速度の値をすべて 25 に統一。この場合、どの音も鍵盤がゆっくりと上がってくるデータになる。

Hi-method：離鍵速度の値をすべて 100 に統一。この場合、どの音も鍵盤が速く上がってくるデータになる。

Av-method：離鍵速度の値をすべて平均値に統一。

Ex-method：離鍵速度の値を次式により算出。

$$V_i^{(mod)} = (V_i - V_{av}) * 1.5 + V_{av} \quad (1)$$

$V_i^{(mod)}$ は i 番目の消音メッセージの算出された離鍵速度の値である。 V_i は i 番目のオリジナル

* 「別れの曲」として親しまれている曲である。

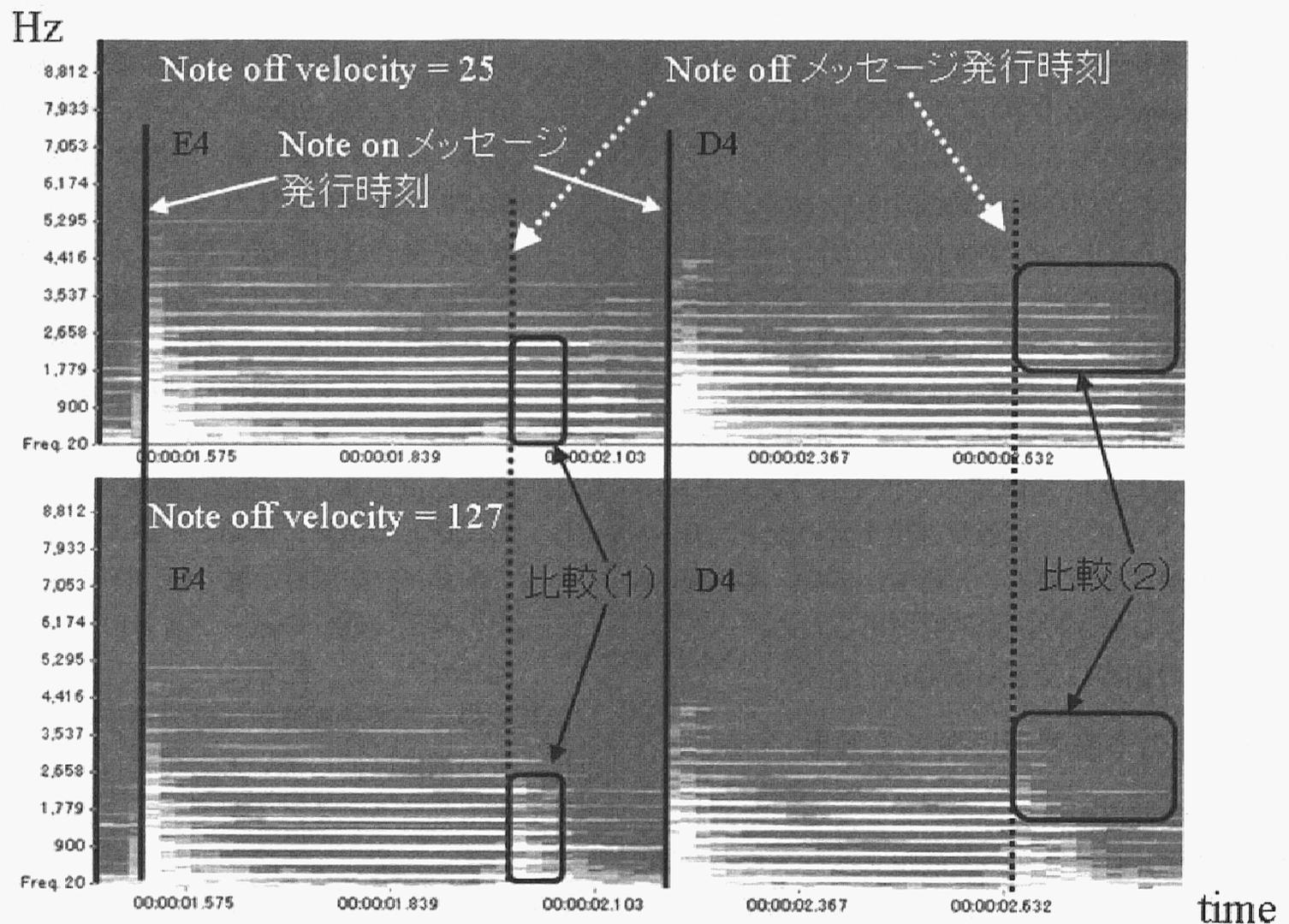


図2 離鍵速度の違いによる周波数の様子

Fig. 2 Differences of frequency in note off velocity differences.



図3 エチュード op.10-3 1~8 小節

Fig. 3 Etude op.10-3 bar 1-8.

の離鍵速度の値である。 V_{av} はすべての離鍵速度の平均値である。この変更により、平均値を中心として離鍵速度の値の分散が大きくなる。演奏における離鍵速度の効果があるならば、分散が大きくなることで離鍵速度の違いをいっそう感じる事になり、オリジナルの演奏の表現を誇張したような演奏になると思われる。倍率は2倍にすると離鍵速度の最高値である127を超えるものがあったため、1.5倍に設定した。

Ct-method : 離鍵速度の値を次式により算出。

$$V_i^{(mod)} = (V_{av} - V_i) + V_{av} \quad (2)$$

つまり、奏者が離鍵速度を遅くした箇所は速くなり、速くした箇所は遅くなる。離鍵速度の変化に

意味があるならば、離鍵速度の推移が逆転した演奏は違和感を与えると考えられる。

Rn-method : 離鍵速度の値を次式により算出。

$$V_i^{(mod)} = V_{av} + (Rnd * 25) \quad (3)$$

Rnd は -1.0 から 1.0 までの間のランダムな数である。この計算式により、ランダムな離鍵速度値が算出される。

これらの演奏データを、音楽を専攻する大学生（グループ I, II, III）に聴取評価してもらった。グループ I は奏者 a を含む 3 名、グループ II は奏者 b を含む 3 名、グループ III は奏者 c を含む 2 名で構成され、それぞれ演奏 A、演奏 B、演奏 C のオリジナルの演奏と上記に従い 6 通りに離鍵速度を変えた演奏を比較し

表 1 離鍵速度を変更させた演奏とオリジナルの演奏との違い
Table 1 Differences between note off velocity-modified performances and original performances.

変更方法	演奏	コメント
Lo	A	音がテヌートぎみになって、重い印象になった
	B	レガートがかかりすぎているような気がする
Hi	A	高い音が貧しく聞こえた
	B	音の跳躍のときに固さを感じる
	B	6 番目と 7 番目の音がレガートではなかった
Av	A	自然な感じがした (2 名が記述)
	B	ルバートの仕方が違う
	B	八分音符が速くなった
	C	違いがわからなかった (2 名が記述)
Ex	A	音全体のバランスと色が大体統一されている
	A	感情の込め方が前 (オリジナル) よりある
	B	ルバートの仕方がとても自然だと思う
	C	オリジナルよりもフレーズの上りと下りが分かった
	C	はじめの演奏 (オリジナル) よりも音がきれい
Ct	B	同じ音がつづくときにつながるかんじ
	C	曲が流れていた
	C	違いがわからなかった
Rn	A	もたついた感じ
	A	音楽性があまりないように感じる
	A	飛び抜ける音が気になる
	B	自分の予想していた音質と違うものがでてきた
	B	八分音符を全部ニュアンスを違えてある
	C	音のタッチが雑
	C	一つ一つの音を丁寧に弾こうとしているように感じた

て、違いを自由に記述してもらった。まず、オリジナルの演奏データを聴き、次に変更した演奏データのうちの 1 つを 1 回聴き、比較して評価する方法である。奏者以外の聴取被験者は、すべてピアノ専攻以外の音楽系大学生である。なお、被験者には評価の目的、および演奏データの作成方法については、いっさい知らせていない。離鍵速度に関する説明もいっさい行わなかった。

表 1 は自由記述で得られた回答を示している。回答から、*Lo-method* では、「テヌートぎみ」「レガートのかかりすぎ」等、アーティキュレーションが重くなっていることが指摘された。*Hi-method* では、「固さを感じる」という音色の変化が指摘されている。一方で前の 2 つの方法と同じく、離鍵速度値が一定であっても、平均値である *Av-method* では、「自然な感じ」という意見があったことは興味深い。また、「ルバート^{☆☆}の仕方が違う」という意見もあった。*Ex-method* では、「感情の込め方がある」「ルバートの仕方が自然」「音がきれい」等、全体の中で評価が最も良かった。*Ct-method* では、「同じ音が続くときにつながる感じ」という意見があったが、これは離鍵速度を反転させたからこその指摘である。通常、同じ高さの音を連続して打鍵するときには、幾分速く離鍵する。それにより、鍵盤も早めに元の位置に戻り、次の打鍵に備えることができる。

ところが *Ct-method* では、このような離鍵が速い箇所では、遅くなっている。それにもかかわらず、打鍵時刻には手が加わっていないため、鍵盤が上がり切らないうちに同じ鍵盤が打鍵され、「つながったように感じられた」といえる。離鍵速度がランダムな値であった *Rn-method* では、「音楽性があまりない」「自分の予想と違う」という意見があった。

以上の聴取評価により、離鍵速度の差異は、減衰時の周波数の違いとなって表れるだけでなく、人間が聴取しても音楽表情の違いとして十分に聞き分けることができることが明らかになり、離鍵速度が演奏表現のうえで、蔑ろにできない音楽要素であることが示された。

4. 演奏データにおける打鍵速度と離鍵速度の特性の違い

前章では、離鍵速度が演奏表現のうえで、蔑ろにできない音楽要素であることを示した。本章では、これまでに多くの演奏分析の研究で分析対象となってきた打鍵速度 (Note on velocity) と、離鍵速度との演奏データ上に現れる特性の違いを調べるために、離鍵速度と打鍵速度の速度の推移と度数分布の比較を行う。

4.1 打鍵速度と離鍵速度の推移の違い

図 4 は 3.2 節で使用した 3 名の演奏の打鍵速度の推移を示しており、同様に図 5 は離鍵速度の推移を示している。横軸は図 3 の音符番号に対応している。各音の推移を比較するために、それぞれの演奏の平均値を 0 とした正規化を行った。あわせて各音における標準偏差を示した。

図 4 と図 5 からは、同じ奏者の同一の演奏であっても、打鍵速度の推移と離鍵速度の推移が一見してまったく違うことが分かる。打鍵速度の推移は比較してなだらかであり、分散が小さいが、離鍵速度の推移は、ところどころで際立って低い値 (特に離鍵速度が遅い箇所) を記録し分散が大きい。2 つの速度の推移の特性を客観的に比較するために、まず打鍵速度および離鍵速度のそれぞれについて速度差 $\Delta v_i = v_i - v_{i-1}$ を求めた。ここに v_i は楽譜上の i 番目の音符の打鍵速度あるいは離鍵速度である。ついで、打鍵速度および離鍵速度のそれぞれについて Δv_i の分散を求め、両者に違いがあるかどうかを F 検定によって検定したところ、演奏 A ($F(38,38)=5.91$, $p < .01$)、演奏 B ($F(38,38)=15.54$, $p < .01$)、演奏 C ($F(38,38)=2.10$, $p < .05$) とすべてにおいて有意差が認められた。このことから打鍵速度の推移と離鍵速度の推移は同様でないことが分かる。

次に演奏 A、演奏 B、演奏 C の打鍵速度の推移の

☆ 音を保持しての意³⁾。

☆☆ 「ぬすまれた」の意であり、テンポを自由に加減して演奏することであるが、限度はある³⁾。

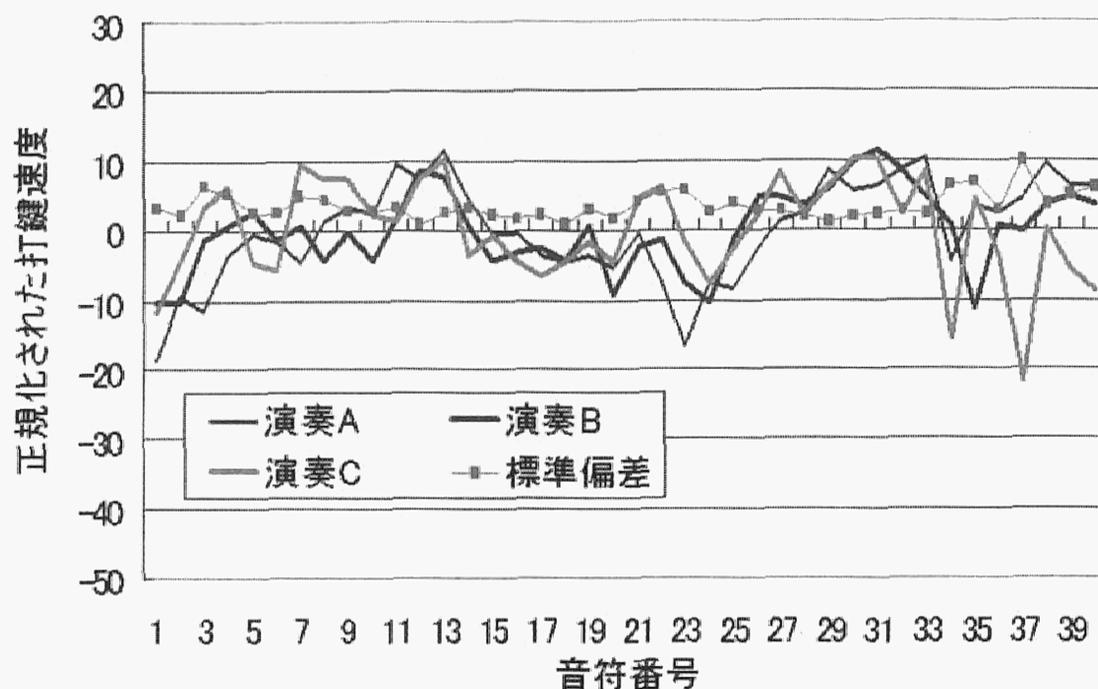


図4 3つの演奏における打鍵速度の推移

Fig. 4 Transition of note on velocity in three performances.

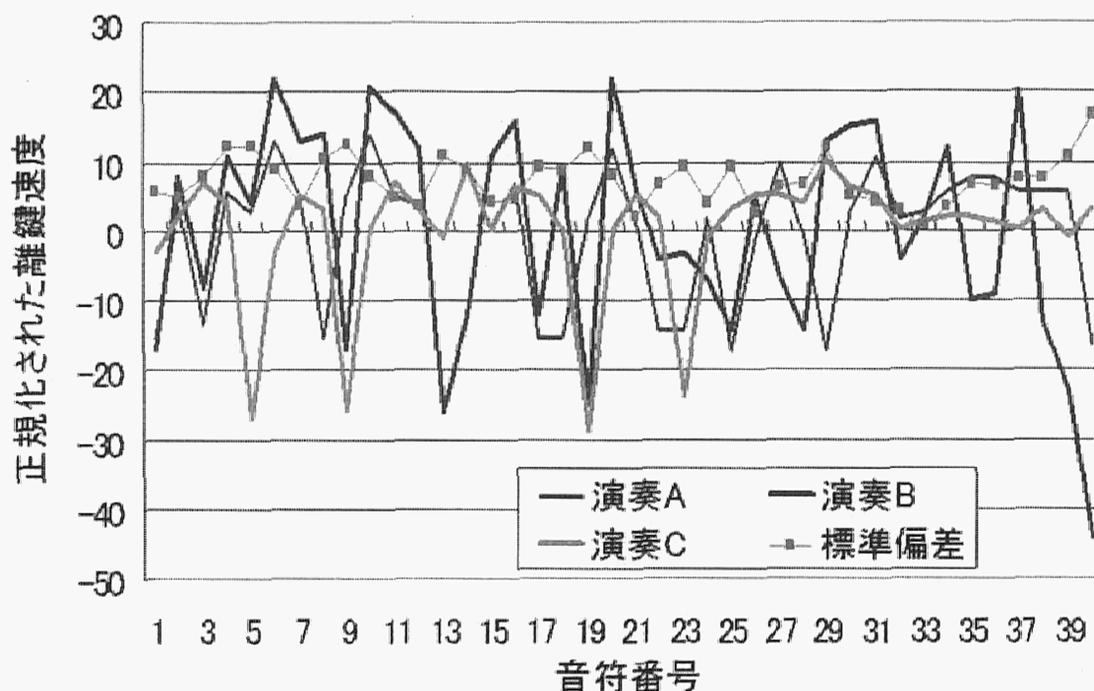


図5 3つの演奏における離鍵速度の推移

Fig. 5 Transition of note off velocity in three performances.

表2 打鍵速度の推移における相関

Table 2 Correlation of transition of note on velocity among three performances.

演奏 A と演奏 B	0.68**
演奏 B と演奏 C	0.42**
演奏 C と演奏 A	0.34*

** は 1%水準で有意. * は 5%水準で有意.

表3 離鍵速度の推移における相関

Table 3 Correlation of transition of note off velocity among three performances.

演奏 A と演奏 B	0.34*
演奏 B と演奏 C	0.24
演奏 C と演奏 A	-0.00

* は 5%水準で有意.

関係を見るために、それぞれの演奏を平均値を0として正規化したデータをもとに、各演奏間における相関係数を算出した。結果を表2に示す。表2によると、演奏Aと演奏B、および演奏Bと演奏Cの打鍵速度には比較的強い相関が見られ、演奏Aと演奏Cには弱い相関が見られる。表3は演奏A、演奏B、演奏Cの正規化した離鍵速度の推移をもとに算出した相関係数であり、演奏Aと演奏Bの離鍵速度には弱い相関

があるが、ほかの組には相関がないことが分かる。ここから、打鍵速度の推移は、いずれの奏者についてもおおむね同じ傾向が見られたが、離鍵速度の推移に関しては奏者によって違う傾向があることが分かった。

実際に、各演奏の打鍵速度の推移(図4)にどのような特徴があるかを見るために、図4を楽譜(図3)と照らし合わせて考察する。演奏AとBは音符番号の13番目付近と、31~33番目付近の2カ所の値が他

表 4 演奏データの奏者と楽曲
Table 4 Players and pieces of performance data.

奏者	所属	作曲者	曲目	記号
ア	修士 1 年	ベートーヴェン ドビュッシー	ソナタ第 8 番第 3 楽章 アルペジオのための	<i>Sonata</i> <i>Arpeggio</i>
イ	修士 1 年	ショパン	ポロネーズ第 6 番「英雄」	<i>Hero</i>
ウ	学部 4 年	ショパン	ポロネーズ第 7 番「幻想ポロネーズ」	<i>Fantasia</i>
エ	音楽教員	ショパン	ノクターン第 20 番	<i>Nocturne</i>

の音符と比較して大きくなっている。演奏 C も同じ 2 カ所では演奏中、最も大きい値になっているが、そのほかにも 4, 7, 27 番目でも大きな値を記録している。これらの箇所はすべてクレッシェンド（だんだん強く）の記号の後や、アクセント（その音を強く）の記号のついた音に相当している。

一方、離鍵速度の推移（図 5）では、ところどころで際立って低い値を記録していることが分かる。そのために、鋭い V 字のような推移になっている。際立って低い値になった演奏 A の 3, 8, 17, 23, 25, 29 番目の音符、および演奏 B の 3, 13, 17, 25 番目の音符は、音高の進行方向が変わる直前の音（その音を境に上がっていた音高列が下がる等）である。また、演奏 B の 9, 19, 36 番目の音符、および演奏 C の 5, 9, 19, 23 番目の音符は、長く伸ばす音である。演奏 B の場合は、これらの長く伸ばした音の次の音の打鍵速度が、より小さい値になっている（図 4）。これらの結果から、奏者が明示的または暗黙的な意図によって、楽譜上の情報と関係のある箇所では離鍵速度を特に遅くしている可能性が示された。

また、離鍵速度の推移（図 5）は、なだらかではなく、ところどころで際立って低い値を記録していることから、1 つの演奏での離鍵速度の度数分布は、二分していることが予測できる。

4.2 速度の度数分布

本節では、複数の奏者に曲全体を演奏してもらい、そのデータから打鍵速度と離鍵速度の度数分布を比較することで、離鍵速度の特性について考察する。

表 4 は奏者の所属と演奏曲目を示している。奏者 4 名（奏者ア～エ）全員が音楽系大学の学生や卒業生である。今回の分析では、奏者が高いモチベーションを持って練習した後の演奏をデータとして使用することが望ましかったために、各々の奏者が卒業試験やコンサート等に向けて練習した曲を用いることにした。奏者は各々の曲を 3 回連続して演奏した。

得られたすべての演奏データから各音[☆]における打鍵速度と離鍵速度の値を取り出し、度数分布を求めた。なお、グラフの形状の差を把握しやすくするために、

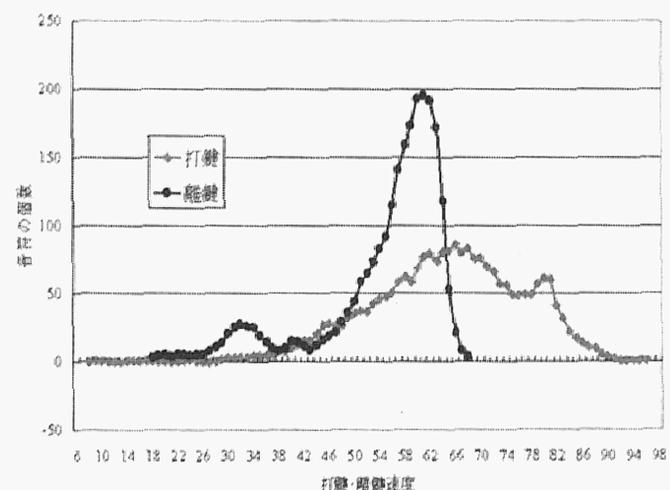


図 6 奏者アによる *Sonata* の速度の度数分布
Fig. 6 Frequency distribution of *Sonata*.

次のように 3 次の荷重移動平均によってグラフを平滑化した。

$$y(i) = \sum_{j=-m}^m w_{23(j)} x_{i+j} \quad (4)$$

$$w_{23(j)} = \frac{3}{(4m^2 - 1)(2m + 3)} \frac{3m(m + 1)}{-1 - 5j^2} \quad (5)$$

$y(i)$ は各点 i における荷重移動平均値であり、次数 m は 3 とする。 $w_{23(j)}$ （ただし、 $j = -m, \dots, -1, 0, 1, \dots, m$ ）は、2 次・3 次多項式適合に対応した各係数である。

図 6 は奏者アの *Sonata*、図 7 は同じ奏者の *Arpeggio*、図 8 は奏者イの *Hero*、図 9 は奏者ウの *Fantasia*、図 10 は奏者エの *Nocturne* のそれぞれ収録 3 回目の演奏データによる打鍵速度と離鍵速度の度数分布を示している。表 5 は、これらの演奏データの歪度と尖度によりグラフの形状を示している。

打鍵速度の分布は、歪度の結果から分かるように多少右に傾いた分布であるが、尖度の結果から分かるように扁平な分布に近い（表 5）。離鍵速度の分布は打鍵速度の分布よりも狭い範囲の値で分布し、離鍵速度 60 付近（*Sonata* と *Nocturne* は 61, *Arpeggio*, *Hero* と

[☆] メロディだけでなく、楽曲中のすべての音を対象にした。装飾音符は奏者が実際に奏でた音を他の音符と同様に扱った。

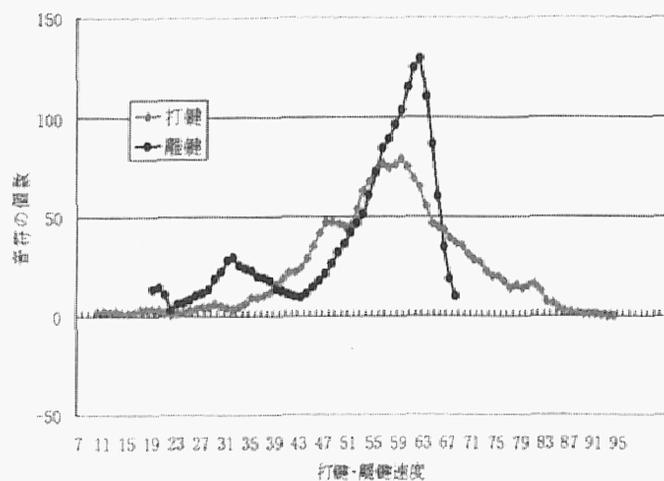


図7 奏者アによる *Arpeggio* の速度の度数分布
Fig.7 Frequency distribution of *Arpeggio*.

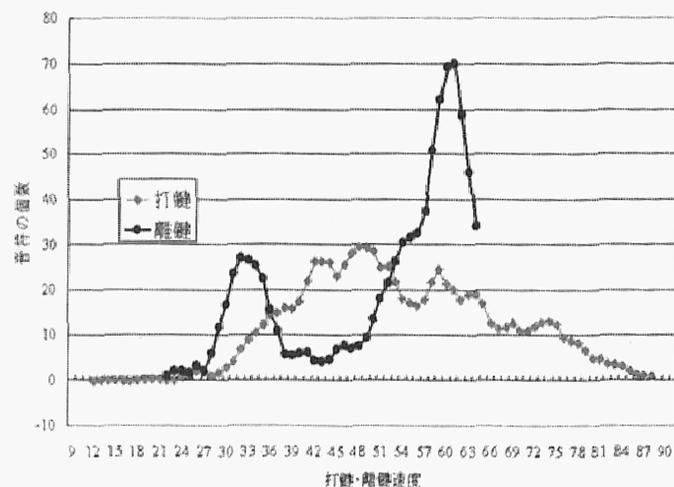


図10 奏者エによる *Nocturne* の速度の度数分布
Fig.10 Frequency distribution of *Nocturne*.

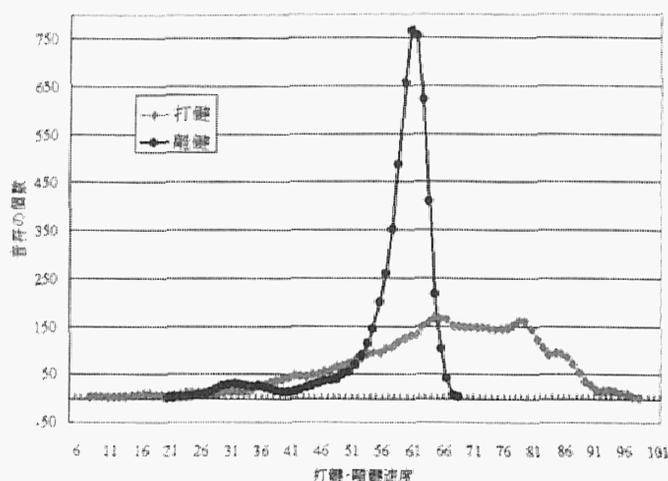


図8 奏者イによる *Hero* の速度の度数分布
Fig.8 Frequency distribution of *Hero*.

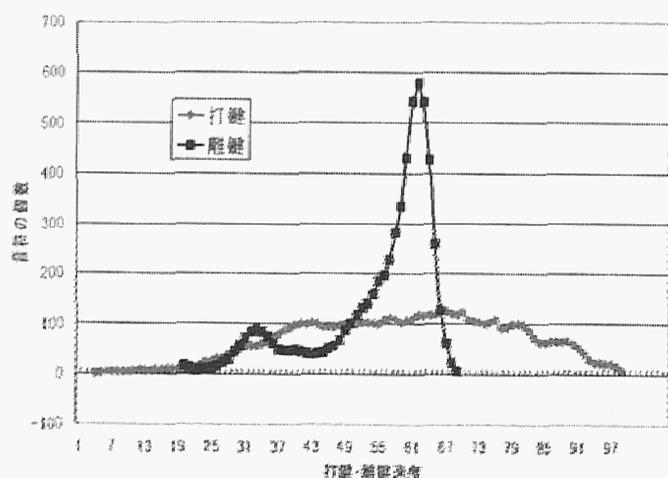


図9 奏者ウによる *Fantasia* の速度の度数分布
Fig.9 Frequency distribution of *Fantasia*.

Fantasia は62)を頂点とした先の尖った分布をしている。さらに離鍵速度30付近(*Sonata*と*Arpeggio*は32,*Hero*,*Fantasia*と*Nocturne*は33)を頂点とした山が、大きさは様々であるがどの演奏にも見られ、双峰形になっていることが分かった。*Nocturne*の演奏以外の離鍵速度の歪度はマイナス1以下の値となっており(表5)、大きく右に偏って分布していることが明らかである。*Nocturne*の演奏については、図10からも分かるように、強い双峰形の分布になっているため、偏りが打ち消された。同じように、*Arpeggio*,*Nocturne*において尖度が打鍵速度よりも離鍵速度の

表5 打鍵速度と離鍵速度の分布の歪度と尖度

Table 5 Skewness and kurtosis of transition of note on/off velocity.

奏者	曲目	打鍵速度		離鍵速度	
		歪度	尖度	歪度	尖度
ア	<i>Sonata</i>	-0.574	3.896	-1.608	4.959
	<i>Arpeggio</i>	-0.513	4.318	-1.183	3.375
イ	<i>Hero</i>	-0.805	3.721	-2.345	8.893
ウ	<i>Fantasia</i>	-0.184	2.353	-1.355	3.895
エ	<i>Nocturne</i>	0.263	2.394	-0.864	2.331

方が小さい値になった(表5)のは、分布が強い双峰形であったためである(図7, 図10)。

これらの結果から、1曲の中で、離鍵速度は30付近を記録する箇所の集合と、60付近を記録する箇所の集合に分布する傾向にあることが分かった。曲全体を通してテンポが速い部分が多く、音と音の間の跳躍も多い*Hero*(図11)は30付近を記録する箇所が少ない(図8)。一方で、全体的にテンポが遅く、メロディの1音1音が長い音符で構成された*Nocturne*(図12)は双峰形が強い(図10)。基礎的なデータ⁷⁾から離鍵速度と音長に弱い相関($R=0.54$)が見られることが分かっており⁷⁾、*Hero*と*Nocturne*のグラフの差異の理由にも、音長が多少関係していると予想できる。しかし、相関があくまでも弱いことや、4.1節の結果から、離鍵速度の値に影響を与える要因は、音長だけではないといえる。

また、*Nocturne*の、離鍵速度の最高値は64であったが、他の4曲は68から70を記録していた。前出の基礎的なデータでもわずかながら最高値は68を記録している⁷⁾ことから、70付近の値を記録した箇所

☆「ド、レ、ミ、ファ、ソ、ファ、ミ、レ」という四分音符の音列からなる、それぞれテヌート、スタッカート、スラー、テヌートスタッカート、メゾスタッカートの記号、および記号のない楽譜を作成し、5名のピアノ演奏の熟達者に楽譜を見ながら演奏してもらうことで、様々な音長のデータを取得した。



図 11 *Hero* の楽譜の抜粋
Fig.11 Score of *Hero*.



図 12 *Nocturne* の楽譜の抜粋
Fig.12 Score of *Nocturne*.

は、意図的にきわめて速く離鍵した箇所ではないかと考えられる。

5. 考 察

本論文ではまず、離鍵速度の効果を調べるために離鍵速度の違いを、スペクトログラムによる表示や聴取評価により示した。スペクトログラムの結果から、低離鍵速度の効果はノイズが制されることや、「響かせる」ことであると示唆された。聴取評価の結果からは、離鍵速度の差異が音楽的な表情の違いに表れ、聴き分けられるものであることが分かった。

次に、演奏データにおける打鍵速度と離鍵速度の特性の違いを、推移や度数分布により示した。打鍵速度の分布は、多少右に傾きつつも扁平な分布に近い(4.2節)。一方で離鍵速度の分布は打鍵速度の分布よりも狭い範囲の値で分布し、離鍵速度 60 付近を頂点とした山と離鍵速度 30 付近を頂点とした山が、大きさは様々であるがどの演奏にも見られ、双峰形になっていることが分かった(4.2節)。離鍵速度と音長には弱い相関があるという先行研究があるものの、音長だけでは要因が説明できない。

4.1 節で示した離鍵速度の推移では、際立って低い値(特に離鍵速度が遅い箇所)が、いくつかの箇所で記録されたことに注目した。打鍵速度の推移では、通常、隣り合う音符どうしの打鍵速度の差異は小さく、徐々に値が変化している箇所が多い。一方で、離鍵速度の推移においては、際立って低い値が記録された箇所の前後では、同様に値が低くなっていることがきわ

めて少ない。これらの結果から、特に 30 付近を頂点とした山の周辺の値(際立って低い値)を記録した箇所に、何らかの意味が示されていると考えられる。

Nocturne 以外の演奏で記録された 70 付近の値は、「際立って高い値」として、際立って低い値を記録した箇所とともに注目すべき箇所であろう。ただし、記録した箇所が少ないことや、60 付近の頂点の値との差異があまりないことから一概にはいえない。ピアノの演奏技法では、離鍵するとき下がった鍵盤が自然に元に戻る「反作用」を意識する必要性がいられている¹³⁾。つまり、反作用で戻ってくる鍵盤の速さに従って元の位置に戻ることもできれば、戻ろうとする鍵盤を押さえ気味にして、より遅くすることや、指の鍵盤への吸着を利用して鍵盤を引っ張り上げて、より速くすることも可能である。

「際立って低い値」や「際立って高い値」になる要因には、大きく分けて、4.1 節で論じたように奏者の意図を持って行われた表現に起因するものと、身体、特に手や指に関する制約に起因するものの 2 種類があると考えられる。奏者が意図して離鍵速度を遅く、または速くしたい箇所であっても、手の構造上や技術的能力¹⁴⁾の問題により、速度を変えることが難しいこともある。今後は、要因を明らかにすることで、演奏分析や演奏生成の研究にも有用な知見を得ることができよう。

6. おわりに

本論文で、ピアノの演奏表現における離鍵速度の調

整の重要性が示され、離鍵速度の推移は奏者間では違いがあるものの、奏者内では楽譜上の情報と関係あることが示唆された。さらに、度数分布により、離鍵速度が 30 付近の際立って遅い離鍵速度を記録した箇所と 70 付近の速い離鍵速度を記録した箇所に注目する必要があることが示された。

今後は、演奏分析や演奏生成の研究に利用可能な、離鍵速度に示される奏者の知識表現を求めるための研究を進めていく。

謝辞 収録にご協力いただいた北陸先端科学技術大学院大学の宮下芳明氏、金沢大学の皆様に心より感謝する。本研究の大島の担当分は、独立行政法人情報通信研究機構 (NICT) 「超高速ネットワーク社会に向けた新しいインタラクション・メディアの研究開発」、阿部の担当分は同「知識共有システムの研究開発」により実施したものである。西本の担当分は、科学技術研究費補助金基盤研究 (C) (2) 課題番号 16500580 の支援を受けて実施したものである。

参 考 文 献

- 1) 青野裕司, 片寄晴弘, 井口征士: 重回帰分析を用いた音楽表現法の抽出, 情報処理学会論文誌, Vol.38, No.7, pp.1473-1481 (1997).
- 2) Gabrielsson, A.: Once Again: The Theme from Mozart's Piano Sonata in A Major (K.331), *Action and Perception in Rhythm and Music*, Gabrielsson, A. (Ed.), The Royal Swedish Academy of Music No.55 (1987).
- 3) 池内友次郎ほか (編著): 新音楽辞典—楽語, 音楽之友社 (1977).
- 4) 雁部一浩: ピアノの知識と演奏—音楽的な表現のために, ムジカノーヴァ叢書 24, 音楽之友社 (1999).
- 5) 平賀瑠美ほか: Rencon.
<http://shouchan.ei.tuat.ac.jp/~rencon/index-j.html>
- 6) 伊藤庸子: タッチを意識したピアノ指導—弱音のタッチに留意して, PTNA 研究レポート, 社団法人全日本ピアノ指導者協会 (PTNA).
<http://www.piano.or.jp/seminar/thesis/itou.html>
- 7) Nishimoto, K. and Oshima, C.: Basic Analyses on Effects of Key-release Velocity in a Piano Performance, *Proc. IJCAI-03 workshop on methods for automatic music performance and their applications in a public rendering contest*, pp.76-77 (2003).
- 8) 野池賢二, 片寄晴弘, 竹内好宏: 演奏からの音楽グループ構造の抽出—K.331 を例として, 情報処理学会, 音楽情報科学研究会研究報告, MUS47-19, pp.111-114 (2002).
- 9) ローランド: 電子ピアノ HP-170.
<http://www.roland.co.jp/products/ck/HP-107.html>
- 10) Seashore, C.E.: *The psychology of music*, New York: McGraw-Hill (1938).
- 11) Shaffer, L.H.: Performance of Chopin, Bach, and Bartok: Studies in Motor Programming, *Cognitive Psychology*, Vol.13, pp.326-376 (1981).
- 12) Shaffer, L.H. and Todd, N.P.: The Interpretive Component in Musical Performance, *Action and Perception in Rhythm and Music*, Gabrielsson, A. (Ed.), The Royal Swedish Academy of Music No.55 (1987).
- 13) ソアレス: 演奏と指導のハンドブック, ヤマハミュージックメディア (1995).
- 14) 下道郁子: ピアノ奏法にみられる非熟達者と熟達者の相違—MIDI データと画像観察による比較, 財団法人ヤマハ音楽振興会 (1999).
<http://www.yamaha-mf.or.jp/>
- 15) 鈴木泰山, 徳永健伸, 田中穂積: 事例に基づく演奏表情の生成, 情報処理学会論文誌, Vol.41, No.4 (2000).
- 16) 田口友康: ピアノ演奏における運動感の表現: モーツァルトのピアノソナタ K.311 による定量的研究, 情報処理学会音楽情報科学研究会研究報告, MUS45-12, pp.67-72 (2002).
- 17) Taguti, T.: Rendering Chopin's Waltz No.6 and Mozart's Piano Sonata No.17 (1st Movement) with system MUSE; A technical note, *Proc. IJCAI-03 Rencon Workshop*, pp.82-84 (2003).
- 18) 田辺義和: Windows サウンドプログラミング, 翔泳社 (2001).
- 19) Todd, N.: A Model of Expressive Timing in Tonal Music, *Music Perception*, Vol.3, No.1, pp.33-58 (1985).
- 20) Widmer, G. and Tobudic, A.: Playing Mozart by Analogy: Learning Multi-level Timing and Dynamics Strategies, *Proc. ICAD2002 Rencon Workshop*, pp.28-35 (2002).
- 21) ヤマハ: ヤマハグランドピアノ.
<http://www.yamaha.co.jp/product/pi/prd/grp/sso/>
- 22) ヤマハ: クラビノーバ.
<http://www.yamaha.co.jp/product/epiano-keyboard/clp-280/sound-touch.html>
- 23) 吉川 茂: ピアノの音色はタッチで変わるか, 日経サイエンス社 (1997).

(平成 17 年 5 月 30 日受付)

(平成 18 年 2 月 1 日採録)

**大島 千佳 (正会員)**

1996年武蔵野音楽大学音楽学部器楽学科ピアノ専攻卒業。2001年北陸先端科学技術大学院大学知識科学研究科博士前期課程修了。2004年同大学院博士後期課程修了。優秀修了者。2004年より(株)ATRメディア情報科学研究所研究員。2005年より(株)ATR知能ロボティクス研究所研究員兼任。1991年埼玉ピアノコンクール入賞。1993年、1995年武蔵野音楽大学にて福井直秋賞。2004年インタラクシオン2004ベストインタラクティブ発表賞、ACM Multimedia 2004 Best Paper Award各受賞。博士(知識科学)。

**西本 一志 (正会員)**

1987年京都大学大学院工学研究科機械工学専攻博士前期課程修了。同年松下電器産業(株)入社。1992年(株)ATR通信システム研究所出向。1995年(株)ATR知能映像通信研究所客員研究員。1999年より北陸先端科学技術大学院大学助教授。2000~2003年科学技術振興事業団さきがけ研究21「情報と知」領域研究員兼任。2001年より(株)ATRメディア情報科学研究所非常勤客員研究員兼任。1996年度人工知能学会研究奨励賞。1997年度DiCoMoシンポジウムベストプレゼンテーション賞。1999年度情報処理学会坂井記念特別賞。1999年度人工知能学会論文賞。インタラクシオン2004ベストインタラクティブ発表賞。ACM Multimedia 2004 Best Paper Award各受賞。IEEE computer society, ACM, 人工知能学会, ヒューマンインタフェース学会各会員。博士(工学)。

**阿部 明典**

1986年東京大学工学部電子工学科卒業。1991年同大学院工学系研究科電子工学専攻博士課程修了。工学博士。同年NTT入社。NTTコミュニケーション科学基礎研究所、NTT MSC(マレーシア)等を経て、現在、(株)ATRメディア情報科学研究所勤務。Abduction等の人工知能の研究を行っており、最近では、ことば工学、Chance Discoveryにも興味を持っている。人工知能学会、電子情報通信学会、社会言語科学会各会員。