音 楽 情 報 科 学 43-5
（２００１．１２．２２）

ピアノ演奏における手首の回転運動と動作評価
―ゴニオメータによるピアノの演奏動作と演奏評価の身体知抽出 ―

米津幸絵
慶應義塾大学大学院政策・メディア研究科

概要
楽器演奏においては、身体の回転運動と音楽演奏表現の間に暗黙的な相関関係が認められる。特にピアノ演奏では、手首の回転運動と演奏の音楽心理的評価との間で科学的因果性があると考えられる。
本報告では、ピアノ演奏における手首の回転運動の角度や角速度の変化をゴニオメータを用いて客観的に測定すると同時に、認知心理実験により被験者および聴衆の主観的な演奏の評価を行った。また、それらの両者を時系列上で結びつけた。結論として、評価の高いピアノ演奏では、手首の上下運動および姿勢の重心変化が緩やかな３次元曲線を描く傾向にあることが分かった。
キーワード: ピアノ演奏、ゴニオメータ、自己評価、演奏評価、ピアノ演奏動作、手首、上下運動

Rotation Motion and Movement Evaluation of Wrist in the Piano Performance
―Mining for Body Knowledge of Piano Performance and Performance Evaluation by the Goniometer –

Yukie YONEZU
Graduate School of Media and Governance Keio University

Abstract
In the instrument performance, we recognize tacit correlation between body rotation motion and musical expressiveness. Especially in the piano performance, we consider that there exists scientific causality relation between the wrist rotation motion and musical performance evaluation. I tried to integrate cognitive psychology experiments and time sequence of the wrist angle data measured by the goniometer. As a result, I identified a tendency in the change of the center of the gravity of the wrist and the body during up-and-down wrist movement drawing a smooth 3D curve for highly evaluated performance.
Keywords: piano performance, goniometer, self evaluation, musical performance evaluation, piano performance motion, wrist, up-and-down movement

1. はじめに

音楽演奏は、自己の内面的な部分を音楽という媒体を通して表現するものである。すなわち音楽は主に感性や感受性によって構成されている。演奏者にとって感性が豊かか否かで演奏評価が決まると言っても過言ではない。音楽の持つこのような特性を科学的に解明するには、まず他覚評価手法面からのアプローチを行うことによって、客観的な分析が可能となる。古川[1997]は、チェロ演奏を、筋電図およびモーションキャプチャによる計測を行うことによって、チェロ演奏の熟練者とアマチュアの演奏動作の比較を行っている。

一方で客観的データと同時に、主観評価手法による分析も必要である。それによって、音楽の持つ感性的な部分が抽出され、より細分化された音楽演奏表現の分析が可能となる。

私は、演奏動作の客観的分析および主観的感性情報処理との融合により、よい演奏および悪い演奏の特徴を抽出し、究極的には音楽演奏上達に向けての演奏ルールの解明を行う。本研究ではその第 1 段階として、ゴニオメータによるピアノ演奏動作実験を行い、主に手首に焦点をあて手首の動きにおける特徴を明らかにした。また被験者自身による演奏自己評価を行い、演奏動作データとの相関性を考察した。加えて、

聴衆による演奏評価についても行い、演奏動作データ・被験者自己評価・聴衆による演奏評価の 3 要因による相関性についての考察も行った。最終的にはこれらの 3 要因の共通性を明らかにすることによって、演奏ルールの抽出を行うことを目的とする。

2. ピアノとゴニオメータ

2.1 ゴニオメータの長所と短所

私は他覚評価手法として、ゴニオメータによる計測を行った。ゴニオメータとは、関節角度計とも言い、関節の動きを電気信号に変えて計測[森本 1991]する生体センサのことである。ゴニオメータの長所は、関節の角度変化を測定できる点である。一方短所は、多チャンネルで測定する場合、他のチャンネルとの干渉が生じ、正確な波形を得るのが難しい点である。これを防ぐためには、ゴニオメータを取り付ける位置を細かく調整しなければならない。

2.2 ゴニオメータと身体知

本研究の目的は、まずピアノ演奏の中でも重要な役割を果たしている手首の角度変化について追究することである。そのためには、角度変位の測定が可能なゴニオメータによる計測が適切であることから、本研究では P&G 製ゴニオメータ（TSD130）を用いたピアノ演奏動作実験を実施した。

ゴニオメータには 1 軸と 2 軸のセンサがあり、大きさも大・中・小の 3 種類がある。本研究では 1 軸および 2 軸センサを用いて手首の上下運動を中心に測定を行った。

実験の準備として、まずゴニオメータのゼロ調整を行い、静止状態時においては常にゼロの値になるように調節を行った。その上で基本動作を実施し、ピアノ演奏時の状態との比較を行う際に必要な基礎データを計測した。

2.3 実験タスク

本研究では、ショパン作曲「バラード第 3 番」より第 173 小節目～第 183 小節目までのパッセージについて実験を行った。具体的には第 173 小節目～第 178 小節目までを第 1 パッセージ、第 179～第 183 小節目までを第 2 パッセージとし、それぞれ弾きやすいタスクと弾きにくいタスクで計測した。各タスクについては以下の表の通りである。

表 1：実験ﾀｽｸ　ショパン「バラード第 3 番」より

第 1 パッセージ（173 小節目～178 小節目）		第 2 パッセージ（179 小節目～183 小節目）	
ﾀｽｸ 1	自然な状態で演奏	ﾀｽｸ 6	自然な状態で演奏
ﾀｽｸ 2	手首を上下させる/ﾆｭｰﾄﾗﾙﾎﾟｼﾞｼｮﾝ	ﾀｽｸ 7	手首の回転運動/ﾆｭｰﾄﾗﾙﾎﾟｼﾞｼｮﾝ
ﾀｽｸ 3	手首を上下させる/体を右に傾ける	ﾀｽｸ 8	手首の回転運動/体を右に傾ける
ﾀｽｸ 4	手首の回転運動/ﾆｭｰﾄﾗﾙﾎﾟｼﾞｼｮﾝ	ﾀｽｸ 9	手首を上下させる/ﾆｭｰﾄﾗﾙﾎﾟｼﾞｼｮﾝ
ﾀｽｸ 5	手首の回転運動/体を左に傾ける	ﾀｽｸ 10	手首を上下させる/体を左に傾ける

測定は各ﾀｽｸともに 5 回ずつ行った。

第 1 パッセージでは、ﾀｽｸ 2･3 を弾きやすいタスク、ﾀｽｸ 4･5 を弾きにくいタスクとし、第 2 パッセージでは、ﾀｽｸ 7･8 を弾きやすいタスク、ﾀｽｸ 9･10 を弾きにくいタスクであるという仮説を立て、検証を行った。

2.4 実験方法

本研究における実験方法については以下の通りである。

I.ゴニオメータによるピアノ演奏動作実験

(a) 被験者　音楽大学在学中の学生　2 名

(b) 装置　P&G 製ゴニオメータ、MIDI、メトロノーム、ビデオ（2 台）

(c) 手続き　①被験者に事前に練習プロセス記録用紙とアンケートを渡し毎日記録してもらう

②実験当日、被験者の右手手首にゴニオメータを取り付ける

③実験当日、各ﾀｽｸ毎に被験者自身による自己演奏評価(SD 法(Semantic Differential

Method)) を記入してもらう

Ⅱ.聴取実験

(a) 被験者　都内の高校生（第 1 学年）5 名

(b) 装置　　MIDI で録音した演奏データ

(c) 手続き　演奏動作実験時に録音した MIDI データを被験者に聞かせ SD 法(Semantic Differential Method)による演奏評価を記入してもらう。

聴衆者には、演奏動作実験内容を一切提示せず、第 1 回目～第 100 回目までの演奏データの再生を行った。

3.ピアノ演奏上の手首の角度変化　－ピアノ演奏評価と手首の角度変化の相関関係－

2.1 タスクの検定および被験者内効果の検定と時系列分析

本実験では、被験者 2 名（以下、被験者 A･被験者 B）について実験を行った。解析の第 1 段階として、タスクの検定、被験者内効果の検定、および時系列分析を行った。最初に、設定タスクの分析として、カイ二乗検定でタスクの独立性の検定を行った。結果は、全タスクにおいて、独立でないとする根拠はなかった。次に演奏動作分析として、被験者内効果の検定を行った。検定は反復測定による一元配置の分散分析を用いて行い、測定回数（a,b,c,d,e）間において、指の動きに差が見られないという仮説の検定を実施した。結果は、被験者 A は全てのタスクにおいて $0.000 < \alpha = 0.05$ で仮説は棄却された。すなわち測定回数間において、指の動きに差が見られた。一方被験者 B は、まずタスク 1-5 においては $0.001 < \alpha = 0.05$ で仮説は棄却された。すなわち測定回数と共に指の動きが変化していると解釈できる。さらにタスク 6-10 においては、$0.082 > \alpha = 0.05$ となり仮説は棄却されなかった。すなわち測定回数間において差が見られなかった。換言すれば、測定回数に関係なく指の動きが安定していると解釈できる。

最後に時系列分析として波形データについての残差の自己相関の検定を行った。検定は自己相関誤差による回帰分析を行い、結果は両被験者データともに全てホワイトノイズであった。

4. ゴニオメータからの波形データと被験者自己評価との相関関係

解析の第 2 段階として、ゴニオメータからの波形データと両被験者自己評価との相関関係についての分析を行った。両被験者の演奏評価が高い状態時のピアノ演奏動作分析結果については以下の通りである。

まず第 1 パッセージにおいては、タスク 1（自然な状態）では、1 拍目で手首を高めにし、2-3 拍目で手首の上下運動を明確にし、4-6 拍目で手首を上へ明確に動かしていた。タスク 2（手首上下・ﾆｭｰﾄﾗﾙﾎﾟｼﾞｼｮﾝ）では、1 拍目～手首が高めの状態であった。続いて第 3 タスク（手首上下運動・体を右へ傾斜）においては、1 拍目で手首を下向きにし、3 拍目で手首を上向きにして 4 拍目で再び手首を下向きにしていた。タスク 4（手首回転・ﾆｭｰﾄﾗﾙﾎﾟｼﾞｼｮﾝ）では、1 拍目で手首が上向き状態であった。タスク５（手首回転運動・体を左に傾斜）は、3-4 拍目に、手首が下になるとよくない状態になっていた。一方第 2 パッセージにおいては、タスク 6（自然な状態）では、2-4 拍目で手首を上 ―下 ―上に明確に運動していた。タスク７（手首回転運動・ﾆｭｰﾄﾗﾙﾎﾟｼﾞｼｮﾝ）は、1 拍目で手首を下向きにし、2-4 拍目で手首を上 ―下 ―上 に明確に運動させていた。タスク８（手首回転運動・体を右に傾斜）は、1-2 拍目で手首を上向きにして演奏していた。タスク９（手首上下運動・ﾆｭｰﾄﾗﾙﾎﾟｼﾞｼｮﾝ）では、全体的に手首を上向きにしていた。タスク 10（手首上下運動･体を左に傾斜）は、1-3 拍目で、手首を上にし過ぎない程度に上向き状態にして動かしていた。以下に第 1 パッセージおよび第 2 パッセージの楽譜を示す。

図 1-1　第 1 パッセージ：第 173 小節目～178 小節目

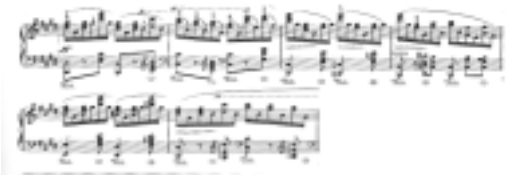
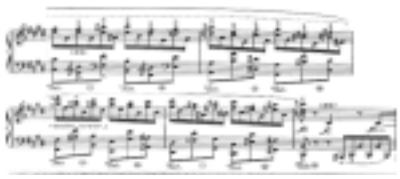


図 1-2　第 2 パッセージ：第 179 小節目～183 小節目



以上の結果から両被験者における自己演奏評価の高い状態とゴニオメータ計測による波形データとの相関関係について総合的に考察すると、まず第 1 パッセージにおいて演奏評価の高い演奏動作状態は、全体的に手首を上向き状態にして演奏を行っている。加えて第 2 パッセージにおいては、手首を意識的にはっきりと回転させた状態での演奏を行っていることが分かる。

5.各被験者と聴衆による演奏評価との比較

解析の第 3 段階として、各被験者と聴衆による演奏評価の比較を行った。検定は t 検定[竹内 97]を用いた。まず被験者 A と聴衆間について検定した。その結果、被験者 A においてはﾀｽｸ 5、ﾀｽｸ８、ﾀｽｸ 9、ﾀｽｸ 10 において有意差が認められなかった。一方、被験者 B および聴衆間においては、ﾀｽｸ 4、ﾀｽｸ 5、ﾀｽｸ 8 において有意差が認められなかった。さらにこれらの結果を総合すると、両被験者と聴衆における演奏評価について有意差が認められなかったのは、ﾀｽｸ 8（弾きやすい条件：回転運動・体を右に傾ける）およびﾀｽｸ 5（弾きにくい条件：回転運動・体を左に傾ける）の 2 つのタスクであった。以下によい演奏と悪い演奏のデータを示す。

図 2-1 よい演奏（ﾀｽｸ 8）　よい演奏時の波形(ﾀｽｸ 8)　悪い演奏（ﾀｽｸ 8）　悪い演奏の波形(ﾀｽｸ 8)

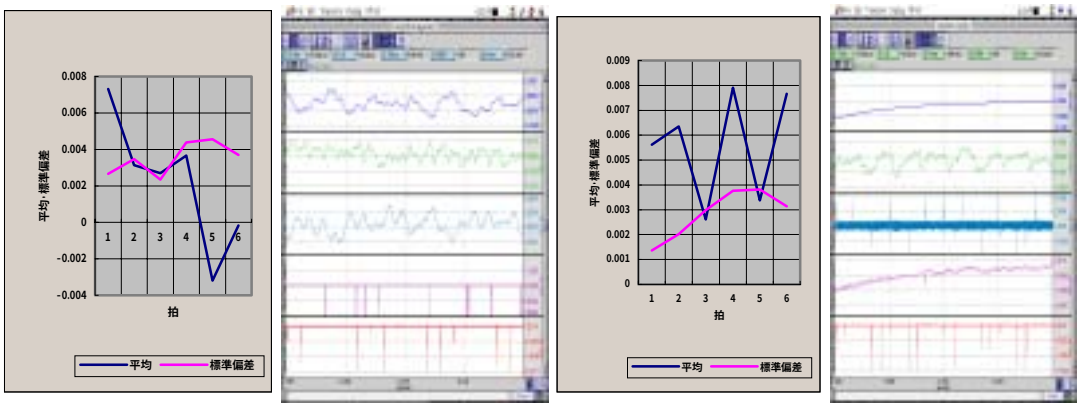
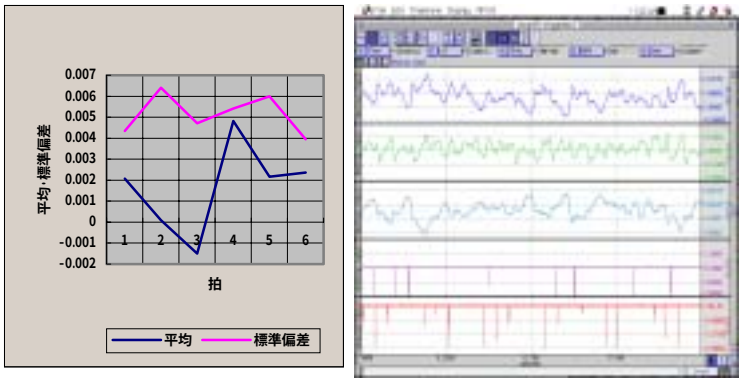


図 2-2 悪い演奏（ﾀｽｸ 5）　悪い演奏時の波形（ﾀｽｸ 5）



タスク８(よい演奏)の場合、上の図に示すグラフ上において、演奏評価が高く、かつよい一貫性を表す、滑らかな 3 次関数の軌跡を描いている。この 3 次曲線は以下の式で表すことができる。

$$f(x)= -1/6000x^3+1/500x^2-53/6000x+3/200 \quad —①$$

従ってよい演奏は、右下がりの 3 次関数の線型近似の形で表される。正の手首の回転運動の値の傾きは、一貫して同じ方向に緩やかに下がっている。以上のことから、よい演奏時では演奏者の予測的運動が上手く行われていると思われる。すなわち、手首の回転角がおよそ同じ方角を保ちながら、手首の角速度が

自然に落ちていくという回転運動が行われていると解釈できる。

実際に①式の微分を行うと、

手首の回転速度 ω=⊿ θ/⊿ｔ＝⊿電圧/⊿拍＝⊿V(volt)/⊿b(beat)

が、3 次曲線の接線の傾きを成す変化率として求められる。

$f'(x)=-1/2000x^2+1/250x-53/6000$　―②

現に②式に代入すると、f'(1)=-32/6000, f'(2)=-17/6000,f'(3)=-8/6000,f'(4)=-5/6000･･･となる。

対照的にタスク 5 においては、演奏評価が低くかつ悪い断続性を表す、波打った 4 次関数の軌跡を示している。こうした 4 次曲線は以下の式で表すことができる。

$f(x)= -11/12000x^4+61/6000x^3-451/12000x^2+4/75x-23/1000$　―③

さらに③式の微分を行うと、

手首の回転速度 ω=⊿ θ/⊿ｔ＝⊿電圧/⊿拍＝⊿V(volt)/⊿b(beat)

が、4 次曲線の接線の傾きを成す変化率として求められる。

$f'(x)=-11/3000x^3+61/2000x^2-451/6000x+4/75$　―④

これを④式に代入すると、f'(1)=1/200,f'(2)=-13/3000,f'(3)=-1/250,f'(4)=3/500,f'(5)=-11/600･･･となる。

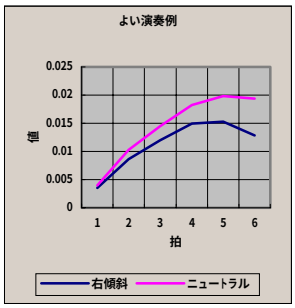
そこでタスク 5 は、U 字型の 4 次関数の線型近似の形態で表すことが出来る。すなわち、手首の回転運動の数値が正と負を行き来しながら、角速度も不規則に逆方向へと急に上がり下がりしている。このことからピアノ演奏評価の低い状態においては、演奏者の無計画に慌てた行動が生じていると考えられる。換言すれば、手首の回転角が反対方向に移ると共に、手首の角速度が不自然に変わる回転運動を発していると言える。

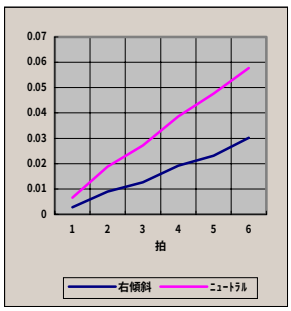
6. ゴニオメータによる生体データから抽出された各被験者の姿勢と重心

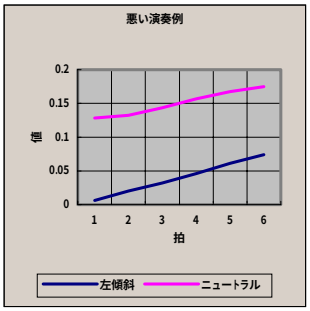
解析の第 4 段階として被験者の姿勢と重心についての分析を行った。前章で導出された結果（タスク 8・タスク 5）について積分したグラフを以下に示す。

図 3 ﾀｽｸ 8 およびﾀｽｸ 5 の積分結果

図 3-1 よい演奏（ﾀｽｸ 8）　　悪い演奏(ﾀｽｸ 8)　　図 3-2 悪い演奏（ﾀｽｸ 5）







まずタスク 8 のよい演奏の場合、右手首の回転運動が円滑に、かつ一貫性を保ちながら恒常的に行われている。逆にタスク 5 においては、上半身が左に移るために、右手首の回転運動は、反対方向に反動を受けて、断続的で不規則な変化を生じている。さらにタスク 8 の悪い演奏においてもタスク 5 と同様、ニュートラルポジション時との差が徐々に大きく開いていることが分かる。

私はさらに第 1 パッセージおよび第 2 パッセージについての考察を行った。その結果を以下の表に示す。

表 2　第 1 パッセージおよび第 2 パッセージにおける姿勢と重心

第 1 パッセージ	考察	第 2 パッセージ	考察
重心が旋律側	演奏開始時:手首下向きがよい	重心が旋律側	手首が上向き状態がよい
重心非旋律側	演奏開始時手首が下向き(不満大)	重心非旋律側	少しだけ上向きにするとよい
ﾆｭｰﾄﾗﾙﾎﾟｼﾞｼｮﾝ	演奏開始時手首は上向きがよい	ﾆｭｰﾄﾗﾙﾎﾟｼﾞｼｮﾝ	手首の上下上運動を明確にさせる

以上の考察より、第 1 パッセージにおける姿勢は、体の傾きが旋律側の場合には、演奏開始時では手首を下向きの状態にしておいてから次の音へ向かっている。その理由として、事前に手首を下向きにしておくことによって、次の音へ滑らかに演奏し、かつ綺麗な音色を出しやすくしているためと考えられる。これは菅野ら[菅野 88]による回転や手首位置移動の協調動作による滑らかな演奏実現の考察と一致している理論でもある。対して体の傾きを非旋律側に重心を置いて演奏した場合は、手首を下向きにした状態では演奏評価が低かった。一方、第 2 パッセージにおいては、体の重心を旋律側にして演奏した場合、手首を上向きにした方が演奏評価が高かった。対して体の重心を非旋律側にして演奏した場合には、手首を多少上向きにした状態の時に比較的満足度の高い演奏が行われた。すなわち、全体的に手首の状態が低めの状態においては満足度の低い結果であった。

第 1 パッセージおよび第 2 パッセージにおいて、演奏評価の高い手首の状態が反対である理由としては、本来第 1 パッセージと第 2 パッセージにおいて求められている技術が対照的であるためと考えられる。最後にﾆｭｰﾄﾗﾙﾎﾟｼﾞｼｮﾝにおける演奏の場合は、演奏開始時で手首を上向きにし、手首の上下運動を明確に行っている状態においてよい演奏結果が得られた。

7. 実験結果と練習プロセスとの相関性

以上の考察を踏まえ、解析第 5 段階として、さらに私は実験結果と各被験者の練習プロセスとの関連性についての分析を行った。

まず被験者 A は、音を外さないようゆっくりしたテンポでの練習を行っていた。ゆっくり演奏は出来ても速いテンポでの演奏まではマスター出来ていなかった。対して被験者 B は、和音の響きに注意しゆっくり練習した後、旋律を意識しながら少しずつテンポアップをしている。さらにテンポの一貫性についても注意を払っている。これらを踏まえて、さらに手首の移動を素早くする練習、右手の和音がバラバラにならないための練習を行っていた。また最終段階ではリズム練習や、左右をゆっくり練習、そして全体を通しての練習を行っていた。この練習プロセスは、R.A.Schmidt[1994]による 3 つの学習段階理論である、①言語・認知段階②運動段階③自動化段階のプロセスと一致している。さらに被験者 B は、①→②→③まで達成した後も③→②→①の順に逆プロセスを辿って練習することによって、演奏スキルを強化していると考察される。結果を総合的に考察すると、タスク 8 においては練習の初期段階では難しいタスクだが、練習を重ねるにつれてタスク 8 は大変弾きやすくなり、楽に綺麗な音が出せるようになると考えられる。

8.おわりに

本研究での実験結果より、演奏者自身の自己評価と聴衆の演奏評価が一致したタスクとして、ﾀｽｸ 8（弾きやすいﾀｽｸ）およびﾀｽｸ 5（弾きにくいﾀｽｸ）が抽出されたことを踏まえ、さらにタスクを絞り具体的な演奏上達のためのスキルの抽出を行う必要がある。加えて学習の習熟度および予測的学習のプロセスについても追究し、身体知抽出を行っていきたいと考えている。

参考文献

[1] 古川康一：身体知のディジタル化,http://www.coe.keio.ac.jp/report/html98/FURUKAWA/furuakwa.html,1-15,1998

[2] 森本正治・赤澤康史：フレキシブル関節角度計による多自由度関節角度計測手法の開発,第 12 回バイオメカニズムシンポジウム,151-152,1991

[3] 竹内良平・腰野富久ほか：変形性膝関節症と足関節症合併患者の歩行距骨下関節のゴニオメータを用いた動作分析,日本臨床バイオメカニクス学会誌 Vol.18,日本臨床バイオメカニクズ学会編,1997,63-67

[4] 菅野重樹・高柳秀彰ほか：鍵盤楽器演奏における指・腕協調運動の分析とそのロボットへの適用, バイオメカニズム 9,231-237,東京大学出版会,1988

[5] Schmidt,Richard.A.,: Motor Learning and Performance: from principles to practice, Human Kinetics,1991