自動ピアノの開発に関する研究*

(第2報, ピアノアクションの挙動の解析に基づく 同一鍵の反復打鍵の研究)

林 英治^{*1}, 山根雅巳^{*1}, 森—^{*2}

Development of Piano Player (2nd Report, Study on Repetition of Same Key Based on Analysis of Behavior of Piano-Action)

Eiji HAYASHI, Masami YAMANE and Hajime MORI

The repetition of the same key is important when playing the piano, especially since the fast repetition of the same key is difficult even for pianists. In this work, to determine the optimal input waveform for the repetition of the same key of a piano player, the authors first has studied the behavior of the piano-action before and after the string-striking of the hammer. The movement of the piano-action when the swing stroke is performed from the position that leaves the key down than its initial position has been measured, and analyzed using the dynamic model of the piano-action which the authors propose. Further, based on the results, the movements of the piano-action have been studied through experiments of repetition and fast repetition of the same key. As a result, the optimal input waveform for the repetition of the same key has been determined, and music which requires fast repetition can be played on the piano player.

Key Words: Piano-Action, Repetition of Same Key, Measurement, Analysis, Dynamic Model

1. 緒 言

優れた演奏能力を持つピアノ打鍵装置を開発した⁽¹⁾⁽²⁾. この装置は可動線輪型のアクチュエータで, 追従制御によって任意の駆動波形で鍵を駆動することができる. 前報で, 筆者らは, 制御対象である鍵からハンマヘッドまで数多くの構造部材によって組み立てられた複雑な機構を有するピアノアクションの動作解析を行うために, 単純な力学モデルを提案し, ハンマが弦を打つまでの動作解析を行うとともに, ピアノの鍵を上述べの打鍵装置で駆動したときのハンマの運動を計測した. その結果, 提案した力学モデルの有用性が実証され, 筆者らは弱音打鍵のための望ましい駆動波形を決定し, 従来の自動ピアノでは不可能であった広いダイナミックレンジの演奏を可能とした⁽³⁾.

同一音を再び鳴らす(以下, 再打鍵)とき, 時間の間隔(以下, 繰り返し周期)が短い場合には, 2つめの打鍵が安定に行われないことがある. これは最初の打弦後, 鍵から指を放してから, ピアノアクション各部が静止位置に戻るまでにかなりの時間を要すること

に起因するものである. 繰り返し周期がさらに短く, 同一鍵の繰り返し打鍵(以下, 反復打鍵)が必要な曲では, ピアノアクションの性能の限界に近い高速反復打鍵を必要とする場合^{**1}があり, それはピアニストにとっても演奏困難な技法である. このような反復打鍵を安定に行うための駆動波形の決定は, 本研究の重要な課題の1つである.

反復打鍵に関する問題を解決し, 反復打鍵の望ましい駆動波形を決定するため, 本論文では, 打弦前・後のピアノアクションの運動を調べ, 鍵を沈ませた位置を打鍵の始点, 終点として打鍵した際の鍵及びハンマの運動を計測して, その挙動を明かにした. そして, それに基づいて, 反復打鍵, 高速反復打鍵の実験を行った結果, ピアニストにとっても困難である弱い音の高速反復打鍵を可能とし, 反復打鍵のための望ましい駆動波形を決定することができた.

2. ピアノアクションの打弦前・後の挙動

図1にピアノアクションの機構を示す. ピアノアク

^{**1} ベートヴェンの曲にはあまり高速の反復打鍵は存在しないが, リストの時代以降ピアノアクションの性能は著しく改善され, 例えば, リストの"鐘", ラヴェルの"道化師の朝の歌"などの作品には約13Hzの高速反復打鍵が存在し, ピアニストには高度な技巧が要求される.

* 原稿受付 1994年9月8日.

^{*1} 正員, 早稲田大学理工学部 (〒169 東京都新宿区大久保3-4-1).

^{*2} (株)アベックス (〒102 東京都千代田区九段南2-3-14).

図1 ピアノアクション機構

ションの運動の計測は、前述した筆者らの開発した打鍵装置で打鍵した際の鍵及びハンマの変位を上方から光学センサを用いて行い、ハンマの速度は計測した変位を微分して求めた**2。

図2は、第40番鍵を打鍵（中程度の打鍵強度）し、鍵底で150ms保持した後、打鍵装置先端（以下、指）を鍵から放した場合の鍵の変位、ハンマの変位及び速度で、Aは鍵を駆動してからハンマが弦に接触するまで、Bはハンマが打弦してから、弦から離れるまで、Cはハンマが跳ね返ってバックチェックに捕らえられて停止し、指が鍵から放されるまで、Dは指が放され、ハンマが初期の静止点に安定するまでの、4つの区分に分けてその挙動を調べた。

2.1 区間A この区間はハンマが弦に達するま

**2 本報の実験に用いたピアノはヤマハ製C7グランドピアノで、鍵は白鍵先端から約90mmの位置、ハンマはハンマヘッドの付け根から約20mmのシャンクの位置の変位を計測し、それぞれレバー比を乗じ、打鍵点の鍵底までの距離、ハンマヘッドのハンマ打弦点の弦までの距離を変位に換算している。

での挙動で前報⁽³⁾に詳しく述べたが、鍵をあらかじめ沈ませた位置から打鍵を行えば、後述するごとく打弦までの時間（以下、打弦遅れ時間）を極端に短縮することができる。

2.2 区間B ハンマヘッドが弦に接触後、極くわずかに上方に変位する（以下、打弦変位）現象が認められるが、ハンマの速度が正から負へ反転するために要する時間（弦との接触時間）は、打弦速度と関係なくほぼ一定の値となり、低音部約4ms、中音部約2.4ms、高音部約1.6msであった**3。

2.3 区間C ハンマの打弦速度と跳ね返り速度の関係**4は図3に示すように、ほぼ比例関係が認められる。

打弦後、跳ね返ったハンマは、a点でハンマローラ（ハンマシャンクの回転中心近くに取り付けられた駆動の際の着力点）がレペティションレバに接触し、レペティションレバを押し下げながらハンマは下方に移動する。b点でハンマヘッドの下端がバックチェックに接触して、レペティションレバを押し下げながらハンマは下方に移動し、バックチェックとの摩擦により制動される。c点でハンマは固定され、指が鍵から放されるまでの位置（以下、停止位置）で保持される。打弦後、c点でハンマがバックチェックに固定されるまでの時間は、打弦速度に影響し、打弦速度が大きいと固定されるまでの時間は短い。

図4は、打弦速度と停止位置の関係で、打弦速度が大きく、音量が大きくなると、跳ね返り速度も大きく

3,4,5 **3の接触時間、4の跳ね返り速度、**5の静止するまでの時間は反復打鍵の挙動に大きく影響する。

図2 中程度の打鍵強度で打鍵した場合の鍵及びハンマの運動

図3 打弦速度に対する跳ね返り速度比の関係

図4 打弦速度と停止位置の関係

なり、停止位置は低くなる。低音部と中音部の鍵で、ある打弦速度以下で一定値となり、高速側と不連続となっているのは弱い音ではハンマがバックチェックに捕らえられないようにピアノアクションが整調されているためである。この状態のハンマの挙動を図5に示す。ハンマは打弦後、バックチェックに捕らえられないため、レペティションスプリングによって跳ね返され、再び弦に極めて近い位置まで上昇し、静止するまでかなりの時間を必要とする**。

2.4 区間D 指が鍵から放されると、鍵にレペティションスプリングの復元力が作用し、鍵は初期の静止点に戻り、ハンマは少し遅れて自由落下する。静止点に戻った鍵は、d点で鍵の後部がクッションクロスに衝突して跳ね返り、e点で落下してきたハンマがレペティションレバ、ウィッペン等を介して鍵を再び押し戻す。f点で再び同様な挙動を繰り返す。g点以後、ハンマはレペティションレバに当たって少々振動し、静止するまで（以下、鍵復帰時間）にかなりの時間を必要とする。図2では、150ms以上の時間がかかっており、静止以前に再び打鍵しても、希望通りの打弦速度は得られない。また、次の音を鳴らすには、さらに区間Aの時間を必要とするので、この場合、再打鍵の時間間隔は200msを越えることになる。

図6にバックチェックに固定される停止位置が、指を鍵から放した後の鍵及びハンマの運動に与える影響

図5 最弱音の鍵及びハンマの運動

図6 バックチェックに固定される停止位置が指が鍵から放された後の鍵及びハンマの運動に与える影響

を示す。停止位置が低いほど、レペティションスプリングの復元力が大きいので鍵の戻りは速く、ハンマも早い時間で静止する。最初の音が大きいほど、次の打鍵との時間間隔は短く、最初の音が小さければ、次の打鍵との時間間隔は長くなる。

2.5 結果 再打鍵、反復打鍵を行うには、区間A,C,Dの時間間隔は重要となる。区間Cでは、ハンマがバックチェックに固定される以前に鍵から指を放すと、区間Dで鍵及びハンマが極めて不安定な挙動を示し、次の打鍵に大きく影響するため、固定されるまでの時間が重要で、区間Cの最短時間間隔となる。

繰り返し周期の短い高速反復打鍵は、区間A,Dの時間間隔が大きく影響してくる。そこで、以下の第3章、第4章では、区間A,Dの打弦遅れ時間、鍵復帰時間の短縮法について述べる。

3. 打弦遅れ時間の短縮法

あらかじめ鍵を沈ませた位置を始点として打鍵することで、打弦遅れ時間を短縮することが可能である**。

図7に示すピアノアクションの力学モデルにおいて

$$D_E' = D_K' - (D_K' \cdot \cos(\omega_2 \cdot t)) \quad (2)$$

$$V_{\text{Hammer}} = \sqrt{(D_K' \cdot \omega_2 \cdot \sin(\omega_2 \cdot t))^2 - 2 \cdot g \cdot (D_H - D_E)} \quad (3)$$

初期変位をさらに大きくしていくと、 $V_{Kmin.}$ と V_{KE} が等しくなる。このときの初期変位を D_{XKI} とおき、変形の小さい場合(励振域)の固有振動数を ω_1 とすると、 D_{XKI} は次式で与えられる。

$$D_{XKI} = D_E \cdot \frac{\sqrt{2 \cdot g \cdot (D_H - D_E)}}{2} \cdot \frac{\pi}{\omega_1} \quad (4)$$

この場合の最低入力速度を $V_{min.}$ 、打鍵点での鍵の変位とハンマヘッドのレバー比を n 、質点がエスケープメント点で弦に達することのできる最低初速度 $V_{Hmin.}$ とすると、最低打鍵速度 $V_{Kmin.}$ は次式で与えられる。

$$V_{Kmin.} = V_{KE} = \frac{V_{min.}}{n} = \frac{V_{Hmin.}}{2 \cdot n} \quad (5)$$

初期変位を D_{XKI} で打鍵を行ったときの入力速度と打弦速度の関係を図10に示す。最低打鍵速度が V_{KE} と等しくなるため、質点は領域Ⅰの運動を行わず、駆動速度の大きさによって領域Ⅱ、領域Ⅲの運動により打弦を行う。

3.2 初期変位Ⅱ ($D_X : D_{XKI} \sim D_{XKII}$) 初期変位を D_{XKI} より大きくすると、領域Ⅱの運動は固有振動の半周期より早い時点で、バネの上端がエスケープメント点に達する速度からバネの下端が鍵底に達する速度までの範囲となる。最低打鍵速度は、式(6)で $D_E' = D_E - D_{XK}$ のときに、最低初速度 $V_{Hmin.}$ となる時間 t を繰り返し計算により求め、その t を式(7)に代入することにより与えられる。

$$D_E' = \frac{V_{Hmin.}}{1 - \cos(\omega_1 \cdot t)} \cdot (t - 1/\omega_1 \cdot \sin(\omega_1 \cdot t)) \quad (6)$$

$$V_{Kmin.} = \frac{V_{min.}}{n} = \frac{V_{Hmin.}}{n \cdot (1 - \cos(\omega_1 \cdot t))} \quad (7)$$

また、式(6)で求めた t が、 $D_K' = D_K - D_{XK}$ とし、式(8)の条件を満たすとき、最低打鍵速度が V_{KD} と等しくなる。

$$V_{Kmin.} = \frac{D_K'}{t \cdot n} \quad (8)$$

このときの初期変位(以下、 D_{XKII})で打鍵を行ったときの入力速度と打弦速度の関係を図11に示す。最低打鍵速度が V_{KD} と等しくなるため、質点は領域Ⅱの運動を行わず、駆動速度の大きさに問わず領域Ⅲの運動により打弦を行う。

3.3 初期変位Ⅲ ($D_X : D_{XKII} \sim D_{XKHammer}$) 初期変位を D_{XKII} より大きくすると、駆動速度の大きさに問わず、質点の運動はすべて領域Ⅲの運動に従う。

式(3)で、ある D_K' のとき V_{Hammer} の値がゼロとなる場合が、その鍵でハンマが弦に達することのできる初期変位の最大値 $D_{XKHammer}$ となり、 $D_{XKHammer}$ は式(2)の

図10 $D_{XK} = D_{XKI}$ の打鍵速度と打弦速度の関係

図11 $D_{XK} = D_{XKII}$ の打鍵速度と打弦速度の関係

D_E' から与えられる。この値より初期変位を大きくして打鍵を行っても質点は弦に達することはできない。また、この値は駆動波形に関係なく同じ値をとる。

3.4 結果 初期変位を与えると、質点の動作距離が短くなるため、式(3)で与えられる打弦速度の収束値は低くなり、音のダイナミックレンジも狭くなる。

D_{XKI} に近づくにつれ領域Ⅰが狭くなり、 D_{XKI} 以降は領域Ⅰの運動は行われなため、初期の静止位置から駆動した場合のような入力速度と打弦速度の急峻な勾配は改善され、解像度が高く、安定な弱音の再生ができる。

入力速度を切り換える方法は、入力速度 V_s と質点の打弦速度 V_{HS} の関係は次式で与えられ、

$$V_{HS} = \sqrt{4 \cdot V_s^2 - 2 \cdot g \cdot (D_H - D_E)} \quad (9)$$

上式から解るように、初期変位を大きくしても入力速度と打弦速度の関係はかわらず、図12に示すように、適用範囲が D_{XK} で決まる V_{KE} の速度以下となるだけである。この方法は定速度駆動の領域Ⅰで用いるため、質点の運動が領域Ⅰの運動に従う限界となる D_{XKI} が適用限界である。 D_{XKI} 以上では3.2, 3.3と同様となる。

図13に打弦遅れ時間とハンマ打弦速度の関係を示す。どの駆動波形においても初期変位を大きくすることによって、同じ打弦速度を得るのに打弦遅れ時間を短くすることができ、また、弱い音を短い時間で発生できる長所がある。入力速度を切り換える方法は D_{XKI} までの適用範囲であるが、初期変位を大きくし、固有振

(A) $D_{XK}=0$ の打鍵速度と打弦速度の関係 (B) $D_{XK}=2D_{XK1}-D_E (D_{XK}<D_{XK1})$ の打鍵速度と打弦速度の関係

図12 入力速度を切り換える方法

動の半周期経過以後のエスケープメント点までの等速移動区間が短くなる効果は大きい。

4. 鍵復帰時間の短縮法

ハンマは指を鍵から放してe点までは自由落下の運動を行っており、ハンマと鍵をできるだけ早く安定させるにはハンマの落下距離を短くすることが有効となる。打鍵は中程度の打鍵強度で行い、鍵底からの鍵復帰には動作制御を行わずに自然復帰とし、鍵を沈ませた位置を終点としたときの挙動を図14に示す。終点位置を沈ませる(図14中1~9)と、図14中1~4に示すように指を放してから鍵復帰時間を短くし、ハンマを早い時間で安定させることができる。終点位置をさらに沈ませ、図14中5~6を終点位置にすると、縮んだレベティションスプリングが元に戻らないままウィッペンヒールとキャプスタンスクリューが衝突し、レベティションスプリングはレベティションレバを押し上げ、ハンマが再び上方に跳ね上げられる現象が起きる。図14・1に示す終点位置よりさらに沈ませていくと、図14・2に示すようになり、最終的に図14中9のようにジャックの先端がハンマローラの下に戻れなくなり、レベティションスプリングが縮んだ状態でハンマは静止する。この位置から次の打鍵を行うことはできない。打鍵強度が大きく、ハンマの停止位置が低くなると、図14中5以降のハンマの挙動は鍵を沈ませた終点の浅

図13 打弦遅れ時間と打弦速度の関係

図14 鍵を沈ませた位置を終点としたときの鍵及びハンマの運動

い位置で起こり、鍵及びハンマの静止するまでの時間が長くなる。

鍵の動きを制御し、鍵とハンマを安定に終点位置に戻すことは可能であるが、終点位置に戻るまでかなりの時間を必要とし、鍵の戻し方によってはハンマが跳ね上げられる現象が起きる問題がある。

5. 反復打鍵

前章までの結果を基に、反復打鍵の実験を行った。実験は、鍵を沈ませたときダンパが持ち上がる手前までの位置を始点、終点とし、また、2.5節の結果よ

図15 繰り返し周期1/15secの反復打鍵の場合の鍵及びハンマの運動

り、ハンマをバックチェックに捕らえさせ、固定させることを条件として、各区間の時間間隔（区間Cの最小時間はハンマが固定されるまでの時間）の組み合わせを用いて行った。その結果、中音～高音部では繰り返し周期が1/7～1/8s(7～8Hz)程度までであれば、弱い音の反復打鍵を行うことができ、駆動速度が高い場合には、繰り返し周期の短い、高速反復打鍵を行なえた。

さらに、鍵の始点、終点の位置をダンパが持ち上げる手前までとする条件を取り除き、反復打鍵を行ったが、各区間の時間的制約があるため、駆動速度が低い、弱い音では10Hz以上の高速反復打鍵を行うことは難しいが、この方法を用いると、希望する音の安定な再生は可能となる。

6. 高速反復打鍵

ピアノアクションの限界に近い高速反復打鍵の場合、ピアニストは複数の指を使って、43214321...、あるいは、321321...の運指で、同一鍵をはじくように打ち、高速反復打鍵を行う技巧を修得している。繰り返し周期を短くすると指と鍵との衝突速度が大きくなりがちで、弱い音の反復打鍵は極めて困難である。このような高速反復打鍵では、ハンマは打弦後、バックチェックに捕らえられて停止することなく、鍵の動きとタイミング良く、ジャックがハンマローラをはじき、ハンマは打弦を行う。

できるだけ繰り返し周期を短く、そして、音の間隔、強さをそろえるには、鍵の戻り動作を素早く行わせる必要がある。鍵を押し下げ、ドロップスクリュウがレペティションレバの上面に接し、レペティションレバのそれ以上の上昇を阻止する点から鍵底までに鍵があ

るとき、レペティションスプリングは上昇を阻止する点からのジャック先端の移動分だけ縮んでおり、指を鍵から放すとその復元力が鍵に作用し、鍵はある程度の位置まで素早く戻る。

打鍵始点位置はドロップスクリュウがレペティションレバの上面に接する点に到達する手前、終点位置はハンマがバックチェックに捕らえられないよう鍵底に到達する手前とする。このとき、第一音目は繰り返し動作の始点位置から打鍵を行うと打弦速度が低くなるため、第一音目の打鍵始点位置はその位置よりも高くする必要がある。図15に第40鍵C3(MIDI:60)で繰り返し周期1/15sec(15Hz)の反復打鍵の応答を示す。10～15Hzでどの鍵も安定した反復打鍵を行え、鍵によって、あるいは、ピアノアクションの整調状態により異なるが、最高18Hzまでの反復打鍵を行うことができた。

高速反復打鍵は、打鍵の速度を変化させて、打弦速度を制御することは難しいが、エスケープメント点までの動作距離を変えることで、打弦速度を制御でき、音のダイナミックレンジが得られる。しかし、反復打鍵は繰り返し周期を短くすると、必然的にハンマ速度は大きくなり、音量も大きくなるため、弱音の反復打鍵はピアニストにとっても極めて困難な演奏技法であるが、上記の方法により15Hzで約18dBの音のダイナミックレンジを得た。

7. 結 論

(1) 打弦後のピアノアクション各部の運動の挙動を明かにし、鍵を沈ませた位置を始点、終点とする打鍵実験によって、打弦遅れ時間を短くし、鍵復帰時間を短縮でき、また、弱音の解像度が改善されることを明かにした。

(2) 上記(1)の結果を基に反復打鍵の実験を行い、再打鍵、反復打鍵の最適な駆動波形を得た。

(3) 高速反復打鍵の実験では、ピアニストでも困難である弱音の反復打鍵を可能とする高速反復打鍵の最適な駆動波形を得ることができ、15Hzで約18dBの音のダイナミックレンジを得た。

(4) 上記の結果、ピアノアクションの限界までの高速反復打鍵を必要とする曲の演奏を可能とした。

文 献

- (1) 林・山根・森、ピアノ打鍵装置の開発、精密工学会、Vol.59 No.4 (1993)、P667-672.
- (2) Hayashi E, Yamane M, Mori H, *Development of a Moving Coil Actuator for an Automatic Piano*, Int.J.JSPE, Vol.28 No.2, (1994), P164-169.
- (3) 林・山根・森、機論、第60巻11月号、(1994)、P3911-3917.