

## ピアノアクションを特徴付けるパラメータを用いた アクション改良の指針

森 太郎

### 1. はじめに

ピアノにおけるアクション機構はペダルとともにピアノの入力インターフェイスとして重要な部品である。演奏者はこれらを通じてのみ出力である音に影響を与えることが可能である。それゆえピアノの発明期以来、もっとも改良が加えられた部分であり、現在でもその設計は様々に工夫されている<sup>1</sup>。ピアノを一つのシステムとして考えるとき、演奏者は入力として鍵を押し下げ、それに対する出力として音を得て、楽器に対する評価を下す。したがって、どれだけ繊細なニュアンスが表現できるか決定づけられるアクションの特性は極めて重要であると考えられる。演奏者にとってピアノの内部機構はブラックボックスであり、そのインターフェイスとしてのアクションとペダルだけが唯一の制御機構だからである。

現代ピアノの鍵盤の幅と鍵が沈む深さはほぼ統一されている<sup>2</sup>。これはアクション機構の設計時にその幾何学的形状が規格で定められているからである。一方、動力学的な規格は存在せず、従って楽器ごとに様々なふるまいをする。

本論文はこのアクションの性質を特徴付ける本質的なパラメータに着目する。アクションの改良に関わるパラメータを用いて、実際の改良の指針を示すことを目的とする。たとえば演奏者が「キーが重い」と表現することがあるが、これは必ずしも物理的な表現ではない。本論文で提案するモデルを用いて、演奏者の表現するこれら独特の要素を定量的に表すことができると考えられる。またパラメータを工夫することにより、結果的にアクションの改良に応用できることが期待される。

演奏者が「弾き心地」と捕らえるアクションの相違を記述するには、アクションの入出力を測定し伝達関数を求めることを考えればよい。本論文では、できるだけ本質的なパラメータによって特徴付けることを考える。モデルを複雑にして微細な運動を完全に記述することも可能だが、アクションの差を本質的に明らかにするためには、モデルはできるだけ単純なほうが優れていると考えられるからである。

### 註

<sup>1</sup> たとえば文献[1]参照。18世紀初頭のピアノの発明以来、鍵盤の幅、深さ、ハンマーの打弦距離、打弦方向、中間部品の配置などが様々に工夫されてきた。

<sup>2</sup> 現代の一般的な楽器では1オクターブの幅は1652mm前後。1オクターブ中に白鍵は7つあるので、その幅は23.6mmとなる。また鍵が沈む深さは鍵の先端部で約10mmである。一方、オルガン、チェンバロなど、他の鍵盤楽器や、古いピアノでは鍵盤の幅・深さは必ずしも一定していない。

## 2. ピアノアクションの概観

図1にグランドピアノのアクション機構の動作を示す。鍵が押し下げられると、鍵にねじ込まれたパイロットがウィッペン機構を回転させ、さらにウィッペンがその上に乗ったハンマーを回転させる(A)。鍵が約半分動いたとき鍵の後端がダンパースプーンを持ち上げ、ダンパーが弦から浮く(B)。鍵が更に沈むとジャックテールがレギュレティングボタンに接触してハンマーロールから外れ、ハンマーが打弦直後に弦振動を阻害するのを防ぐ(C)。その後ハンマーは自由に回転を始め、弦を打ち、跳ね返る。ハンマーはジャック上ではなくレペティション・レバーの上に落下することになり、バックチェックに捕らえられる(D)。キーを少し持ち上げるとバックチェックはハンマーを開放し、ハンマーがジャック上に直ちに移動するので次の打鍵が可能になる。

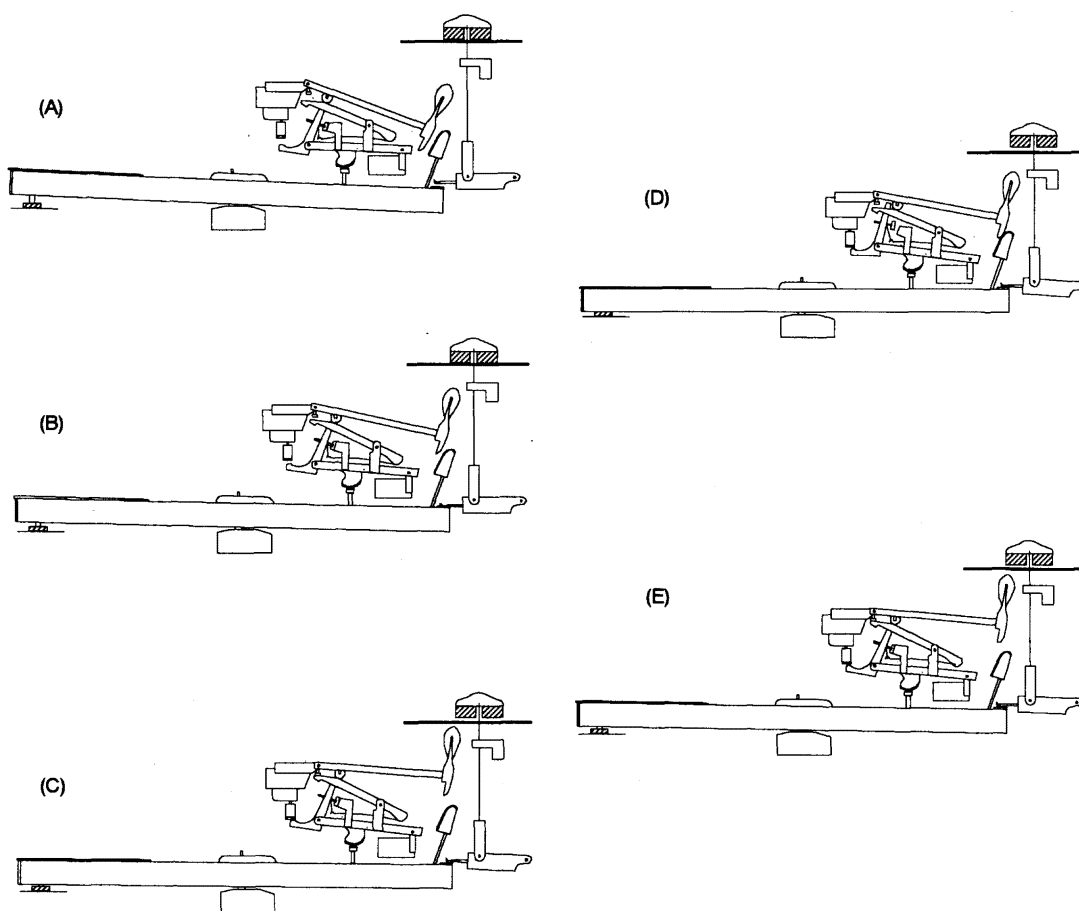


図1 グランドピアノアクション機構<sup>3</sup>

図2にアップライトピアノのアクション機構の動作を示す。グランドピアノとの一番大きな違いは、ハンマーとダンパーが垂直に弦を捕らえることである。アップライトピアノは、弦を水平から垂直に変更することで狭い面積にも置けるようにしたものである。グランドピアノではハンマーとダンパーは重力により静止位置に戻るが、アップライトピアノでは、ばね機構による動作に代替されている。(A)から(C)の動作は基本的にはグランドピアノと同じである。つまり、鍵にねじ込まれたパイロットがウィップ機構を回転させ、さらにウィップに取り付けられたジャックがその上に乗ったハンマーを回転させる(A)。鍵が約半分動いたときウィップの後端に植え付けられたダンパースプーンがダンパーを持ち上げ、ダンパーが弦から浮く(B)。鍵が更に沈むとジャックテールがレギュレーティングボタンに接触してハンマーロールから外れ、ハンマーが打弦直後に弦振動を阻害するのを防ぐ(C)。一方、アップライトピアノにはレペティション機構がないために(D)(E)にあたる動作は存在しない。<sup>4</sup>

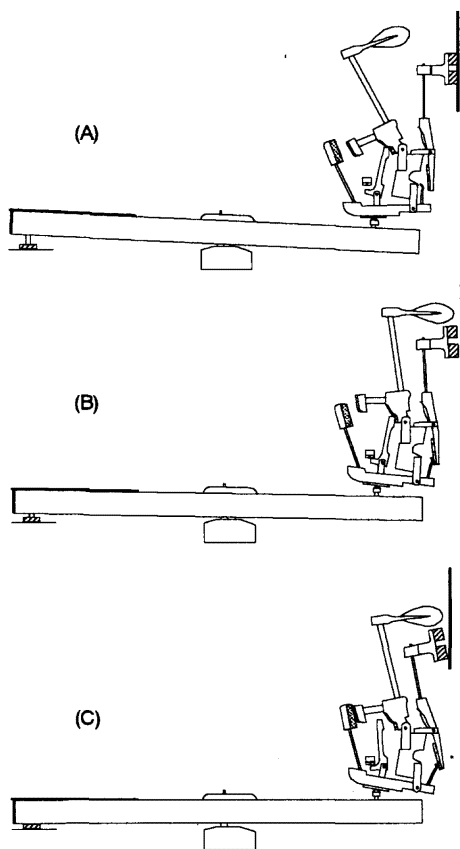


図2 アップライトピアノアクション機構

## 註

<sup>4</sup> このためアップライトピアノで遊べる速度はグランドピアノの7割ほどである。(文献[2])

### 3. ピアノアクションのモデル

アクションを特徴付けるパラメータを決めることを考える。原理的にはアクションの入出力を測定し伝達関数を求めることを考えればよい。本論文では、できるだけ本質的なパラメータによって比較をするのが目的である。モデルを複雑にして微細な運動を完全に記述することも可能だが、アクションの差を本質的に明らかにするためには、モデルはできるだけ単純なほうが優れていると考えられるからである。Dijksterhuis<sup>5</sup>は極めて単純なモデルを用いてアクションの運動のモデルを提案した。彼はハンマー等を質点とみなしてモデル化を行ない、アクションの動きに定性的な説明をあたえ、鍵盤に一定の力を加えたときのハンマーの最終速度と鍵盤の走行時間の関係を示した。ただし彼のモデルではアクションの設計の差を表すことはできない。そのほか、Askentfelt と Jansson はピアノアクションの各パーツの接触・非接触のタイミングを調べ、タッチによって鍵の変位および速度がどのように変化するかを調べている<sup>6</sup>。その結果、 $p$  と  $f$  では各パーツの接触のタイミングが異なることが示された。

ここでは、それらをふまえ各アクションの設計を特徴付けられるように Dijksterhuis のモデルの拡張を行なうものとする。従って、機種によらず有用であるモデルが必要になる。

本論文では、図 3 のような 3 つの回転要素からなる単純なモデルを考える<sup>7</sup>。

キー、ハンマー、ウィッペンの慣性モーメントをそれぞれ  $I_K, I_W, I_H$  とし、それらの角速度それぞれ  $\omega_K, \omega_W, \omega_H$  とする。回転の方向はすべて矢印の方向を正とする。ある時刻における 3 つの要素の回転エネルギーの総計  $E$  は

$$E = \frac{1}{2} I_H \omega_H^2 + \frac{1}{2} I_W \omega_W^2 + \frac{1}{2} I_K \omega_K^2 \quad (1)$$

となる。

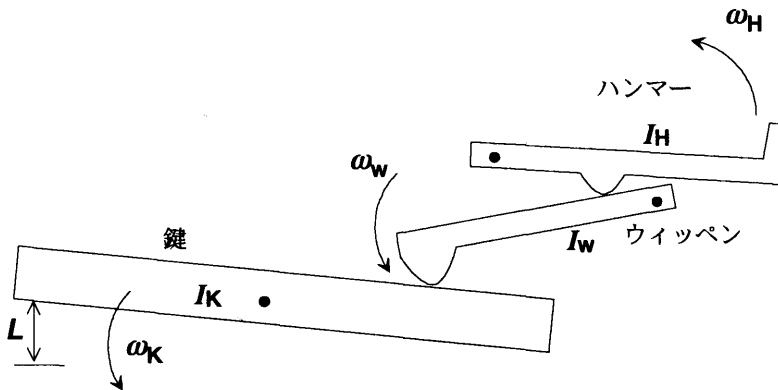


図 3 ピアノアクションのモデル

キーが動き出すために必要な静的な力  $F_s$  は、ほぼ 0.5 N である。これは 50 g のおもりをキーの先端に載せて調整される。もっとも良い弾き心地を得るために経験的に得られた値であり、アップライトピアノ、グランドピアノの双方で共通で、特別の場合でなければ変更されることは無い。指の入力  $F_{IN}$  を一定と考えると、ハンマーがジャックから外れるレットオフ直前で、次のようにエネルギー保存の等式が成り立つ。

$$\frac{1}{2}I_H\omega_H^2 + \frac{1}{2}I_W\omega_W^2 + \frac{1}{2}I_K\omega_K^2 + C = (F_{IN} - F_s)L \quad (2)$$

ここで  $C$  はばねや摩擦に起因する定数であり、 $L$  はキーの先端がレットオフまでに動く距離である。鍵の角速度に対するハンマーとウィッペン<sup>5</sup>の角速度の割合をそれぞれ

$$\alpha \equiv \omega_H / \omega_K, \quad \beta \equiv \omega_W / \omega_K \quad (3)$$

とすると<sup>6</sup>、

$$\frac{1}{2}(\alpha^2 I_H + \beta^2 I_W + I_K)\omega_K^2 + C = (F_{IN} - F_s)L \quad (4)$$

と書くことができる。

$\alpha$  と  $\beta$  は必ずしも一定である必要は無い。アクションの各パーツは単純な槌子と異なり別の回転中心を持ち互いが連結されており、 $\alpha$  と  $\beta$  はハンマーの位置に依存する。もし一定であればハンマーの打弦距離(48mm 程度)と鍵の沈み深さ(10mm 程度)は打鍵が始まってからレットオフが起きる直前まで比例関係にあるはずであるが、実際にはそうになってはならず、グランドピアノのハンマーはアップライトピアノのハンマーに比べ後半に大きく加速される<sup>7</sup>。また鍵速度が一定であるとき、グランドピアノのハンマー速度はアップライトピアノのハンマー速度に比べ約 50% 以上大きくなる。

$\alpha$  と  $\beta$  が鍵の位置に寄らず一定であり、 $C$  が恒等的にゼロである場合、式(4)は Dijksterhuis のモデルと等価であり、式(4)は Dijksterhuis のモデルの自然な拡張であるといえる。

## 註

<sup>5</sup> 文献4)参照。

<sup>6</sup> 文献5)参照。

<sup>7</sup> 文献2)に詳述。ただし、ここでは各部品の添え字は英語名<sup>8</sup>の頭文字とした。

<sup>8</sup>  $\alpha$ 、 $\beta$  は必ずしも鍵の位置に対して一定である必要はない。

<sup>9</sup> 文献2)に詳述。同じ一定入力  $F_{IN}$  を鍵に加えたときにも、グランドピアノのハンマーの最終速度はアップライトピアノの最終速度に比べて約 20% 大きくなる。

#### 4. 実験

ここでは、ピアノアクションの鍵上に錘をのせ、打弦直前のハンマー速度を測定する。ハンマー速度の測定には2組のフォトダイオードとフォトセンサーを用いた<sup>10)</sup>。実際の実験では、鍵上に乗せる錘を考慮に入れ式(4)に修正が必要である。打弦直前のエネルギー保存の式は次のようになる。

$$\frac{1}{2}I\omega_K^2 + \frac{1}{2}mv_K^2 + C = (F_{IN} - F_s)L \quad (5)$$

ここで $I$ は打弦直前でのダンパーを除くアクション全体の慣性モーメントの総計である。ここで $r_K$ をキーバランスピンと鍵の先端との距離とし、 $r_H$ をハンマーヘッドとハンマーバットセンターとの距離とすると、 $r_K\omega_K = v_K$ 、および、 $r_H\omega_H = v_H$ が成り立つので、鍵速度、ハンマー速度に関してそれぞれ

$$\frac{1}{2}\left(\frac{I}{r_K^2} + m\right)v_{TK}^2 + C = (F_{IN} - F_s)L \quad (6)$$

$$\frac{1}{2}\left(\frac{I}{r_H^2} + m\frac{r_T^2}{r_H^2}\right)\frac{1}{\alpha^2}v_H^2 + C = (F_{IN} - F_s)L \quad (7)$$

が成り立つ。ここで、 $F_{IN} = mg$  である。図4に例を示すように、このモデルはアクションの設計によらず実際の測定値と極めてよく一致する。また、アップライトピアノとグランドピアノの双方で統一的に扱うことが可能である。

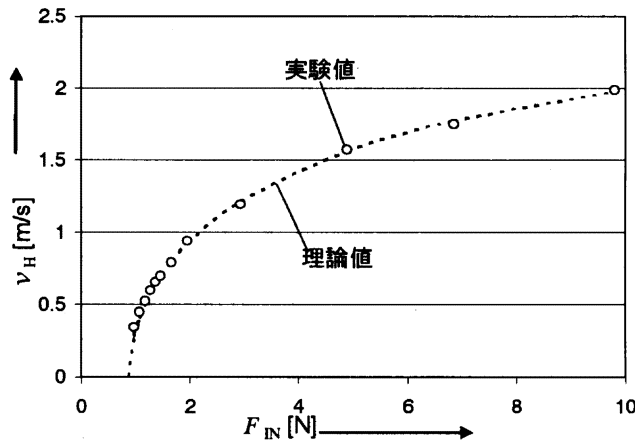


図4 鍵への入力とハンマー最終速度の関係

#### 註

<sup>10)</sup> 文献[2]で詳述。

ここでは、実際のアクションの部品を変更する際、本モデルで提案するパラメータにどのような影響が現れるかを考察する。グランドピアノはアップライトピアノに比べ、操作性が高いとされているが<sup>11)</sup>、アップライトピアノでも各部品に質量を付加するなどして慣性モーメントを調整し、ピアノアクションの性能を操作することが可能である。またグランドピアノアクションにも機種によりその操作性が異なるが、その品質評価基準として用いることも可能である。アクションの製作工程では図5に示すように鍵盤の側面に「キーレッド」と呼ばれる鉛製の質量を付加し、 $F_S$ を調整する。キーの先端に50gのおもりを載せ、ダンパーを解除した状態でアクションが動き出す位置にキーレッドの位置を調整して埋め込む。このときペダルを踏んでダンパーを矢印の方向に動かしアクションから切り離しておく必要がある。これにより、すべての現代ピアノの $F_S$ は、ほぼ0.5Nである。しかしキーレッドの付加は同時にアクション系全体の慣性モーメントを変化させる。鍵盤のバランスピンをはさんで両側にキーレッドを付加することで、 $I$ と $F_S$ の双方を矛盾無く調整することが可能であると考えられる。また、鉛を他の部品にも用いることで、アップライトピアノのアクションの動作特性をグランドピアノのそれに近づけるという発想も不可能ではない。



歴史的には重力式のアップライトピアノダンパーも存在した。図 6 は水平方向に動作する鉛を埋め込んだレバーとダンパーを連結させるオーバーダンパーと呼ばれる方式であるが<sup>43)</sup>、メカニズムが複雑であり、メンテナンスの煩雑さから現代ピアノには用いられていない。また、そのほかにもばねが多用されており、アップライトピアノでは数センチ

の影響が大きく表れていると考えられる。

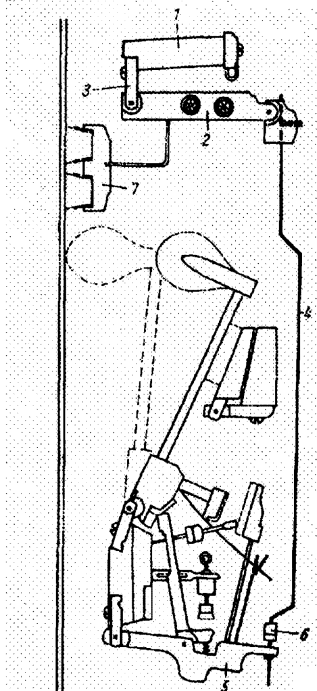


図 6 オーバーダンパー (文献[3]より)

## 注

<sup>1)</sup> 文献[3][6]など参照。グランドピアノアクションの操作部評価が高く、電子楽器にアコースティックピアノのグランドアクションをインターフェイスとして採用した機種も存在する。

<sup>2)</sup> 文献[2]に詳述

<sup>3)</sup> オーバーダンパーと呼ばれる。文献[1]を参照。

## 6. おわりに

本論文ではアクションの性質を特徴付ける本質的なパラメータに着目し、アクションの改良の指針を示した。モデルはできる限り単純であることにつとめた。得られたパラメータは実験値とよく一致するため、設計や改良の参考になることが期待できる。本稿で用いた基礎モデルを運動モデル、動力学モデルに拡張し、さらに各部品も設計、改良できるようにすることが今後の目標である。

## 参考文献

- [1] Batel, G., Schimmel, N., Vom Musikstab zum Pianoforte, Institute für Klavierkunde GmbH, Braunschweig, 1986
- [2] Mori, T., Ein Vergleich der Qualitätsbestimmenden Faktoren von Klavier und Flügel, Wissenschaftsverlag Aachen, 2000
- [3] Uchdorf, H. J., Praktisches Handbuch Klavier, Fachbuchfabrik Leipzig, 1985
- [4] Dijkstra, P. R., De piano, Nederlands Alcesteisch Genootschap, Delft 7, S.50 - 65, 1965
- [5] Askenfelt, A., Jansson, E., From touch to string vibrations: An experimental study of the initial course of the piano tone, J. Acoust. Soc. Am. 61, Suppl. 1, CC3, 1987
- [6] Jungmans, H., Der Piano- und Flügelbau, 6. Auflage, 1984, Fachbuchreihe Das Musikinstrument, Bd. 4, Verlag Erwin Bochinsky