

ピアノのタッチと音質について

Touch and Tone Quality of a Piano

鈴木 英 男

Hideo Suzuki

(株)小野測器 音響技術研究所

Acoustics Laboratory, Ono Sokki Co., Ltd.

ピアノのタッチと音質との関係について、現在までどのような議論がなされているかを簡単にレビューする。次にそれに関連すると思われる2つの研究を紹介し、最後にこの問題についてどのように取り組むべきかについて考え方を述べる。

1. はじめに

タッチと音質の関係については昔から議論が続いている^{1,2}。大ざっぱに言えば、ピアニストはタッチにより音質が変わると言い(以下YES派と呼ぶ)、一方、科学者はハンマーの打鍵時の速度さえ一定であれば、どの様に鍵盤を押そうと音質に差はないという(以下NO派と呼ぶ)。

Payzant はこの問題を、ルビンシュタインの指かそれとも彼の傘の先端がキーを押すかによって音質が変わるものか、と表現しているようである(Piano Quarterly, Fall, 1978)。Hart³らは、異なるタッチの音と人工的な打鍵装置で発生した音の波形がほとんど同じであることから、多少の心理評価も加えて、タッチは音質に影響しないと結論している。しかしながら、当時の波形記録および分析、さらに音質評価技術のレベルを考えると、そのままこの結論を鵜呑みにはできない。Alba⁴等はタッチと音質の問題に関し「議論は和解された」という副題をつけて、ピアノはパーカッシブな楽器であるが、パーカッシブなのはハンマーと弦の関係だけでなく、キーとキーベッドもそうであること、それによって音質に影響するノイズを発生することが、タッチにより音質が変わることの理由としている。確かにピアノ演奏を近くで聞いてみると、弦の振動による以外の音(ノイズ?)が聞こえることは確かである。この意味では音質はタッチにより変わると言えないこともない。ただその理由付けとして、本当のピアノ音と電子楽器のピアノ音との波形の比較から、本当のピアノの音にはノイズが含まれているとか、本当のピアノ音どうしの比較で基本

波のレベルが同じであるから両者のインテンシティが同じであるとかの理由づけが、余り科学的ではないように思える。

以上は、著者の手元にあるタッチと音質の問題を直接取り上げた論文の紹介であるが、いずれもタッチをどのように定量化するか、ならびに、音質評価をいかに科学的に行うかの点で不十分であると思う。この問題は最後に取り上げるとして、次に、タッチと音質との問題にかかわると思われる最近の2つの研究結果を紹介する。

2. ハンマーの柄の振動解析

著者は1981年から1984年までの4年間、CBSの研究所で、当時CBSの子会社の1つであったスタインウェイの依頼でピアノの研究を行った。弦の振動を高速カメラ(4000frame/s)で観測するうち、ハンマーと弦の衝突後ハンマーの柄が大きく変形することを確認した。そこで、もしかするとこれがタッチと音質の関わりを説明する1つの手がかりになるかも知れないと考え、ハンマーの柄の理論的な振動解析と若干の実験を行った^{5,6}。ここではその結果を簡単に紹介する。

2.1 柄を含めたハンマーのモデル

図1は理論解析に使用したハンマーモデルである。弦は問題を簡単化するため完全剛体としている。ハンマーヘッドは質量 M_h とスティフネス S_h とからなる。ここで、 S_h

(dyne) は $S_h = 1.8 \times 10^{10} y_h^3$ で与えられるように、変位の3乗に比例する非線形を持っている（低音部のハンマーに対応）。ここで、 y_h (mm) はハンマーの変形量である。シャンクは左側で単純支持、右端で剛結合している。シャンクは13の要素に分割され、それぞれの要素は集中質量と無質量のビームから成るものとする（シャンクの寸法は表1を参照）。シャンクの密度、ヤング率は鋼の標準的な値を用いた。

弦振動の周波数スペクトルはハンマーと弦との接触時に作用する力の鋭さに依存する。フェルトが硬いハンマーは接触時間が短くなり、結果的に周波数スペクトルの分布は広くなるので、明るい音を生み出す。また、ハンマーの速度が大きければフェルトの変形も大きくなり、スティフネスが大きいところで弦と接触するので、この場合も大きく明るい音を発生する。このように力-時間パターンは音質と直接関係するので、これが諸条件によりどのように変化するかを調べる。計算に使用するパラメタは特に断わらないかぎり表2に示す通りである。

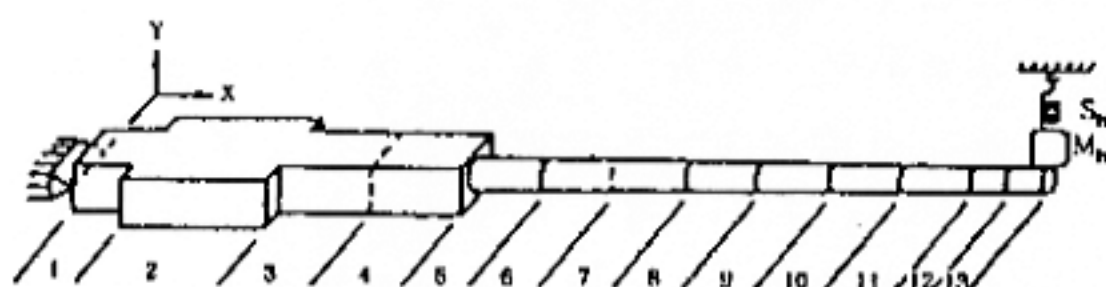


Fig.1 A hammer model.

2.2 シャンクのスティフネスの効果

上に述べた代表値を使って求めた力-時間パターンを図2 (a) に示す。力の最大値は（ハンマーの最大変形に対応する）は接触後 0.7ms で起き、力-時間パターンは対称形をしている。対称性を有している理由はハンマーのダンピングを無視していること、およびシャンクの動きが比較的小さいことによるものであろう。図3はハンマーと弦との接触時間内でのシャンクの変形をしめたものである。接触開始時は仮定により、変形はゼロである。t=0.4ms までシャンクの変形はほとんど見られない。t=1.1ms になると、シャンクは大きく変形する。これは、ハンマーヘッドが下向きに動き始めてもシャンクはそれ自身の質量による慣性のため、まだ上向きに動こうとするからである。最大変形（シャンクの両端を結ぶ直線からの最大変位量と定義する）は7番目の要素あたりで、約 0.7mm である。

シャンクのスティフネスの効果を見るため、シャンクのヤング率を 10^{11} dyn/cm² から 10^{12} dyn/cm² に増加して力-時間パターンおよびシャンクの変形量を調べた。その結果を図2 (b) および図4に示す。図2の2つの曲線の差はかなり小さい。ピークレベルと幅の双方とも硬いシャンクの方が大きくなっている。また、非常に硬いシャンクではその変形は無視できると言える。硬いシャンクでの力-

時間パターンの大きなピークと幅の広さは実効的にハンマーの質量が増えたことによるものである。高速度カメラを用いたもっと小さなハンマーヘッドの速度での観測では約 0.4mm のシャンクの最大変形が観測されており、今回の計算を裏付けている。

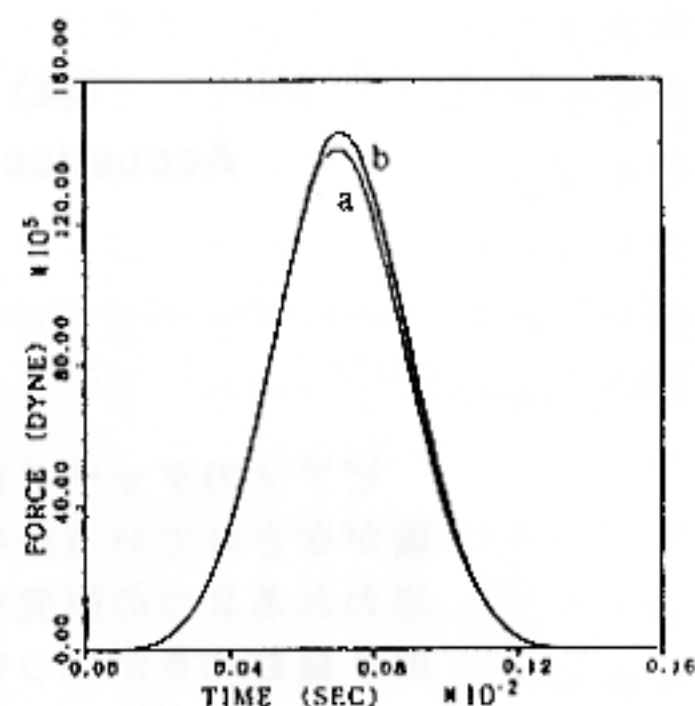


Fig.2 Force-time patterns of the system with standard parameters (a) and with $E_s = 10^{12}$ dyne/cm² (b).

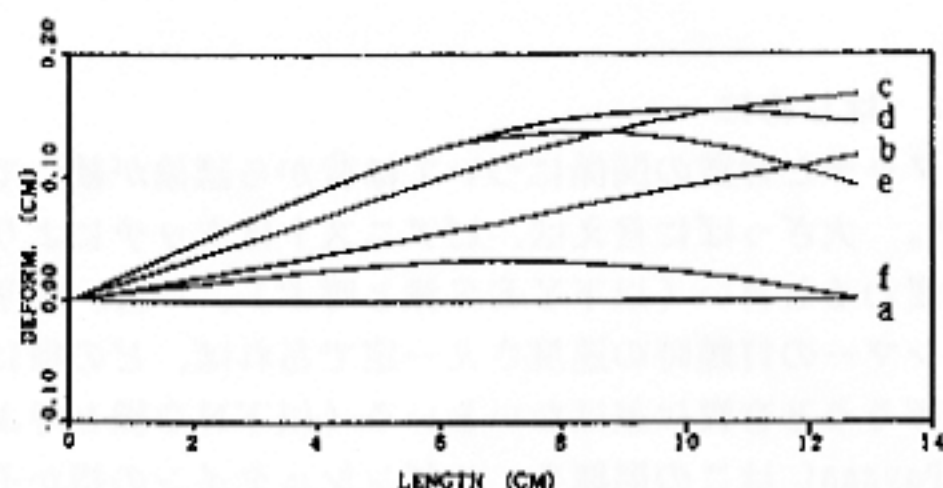


Fig.3 Shank deformations of the system with standard parameters at t=0 (a), 0.4 (b), 0.71 (c), 0.9 (d), 1.1 (e), and 1.4 (f) ms.

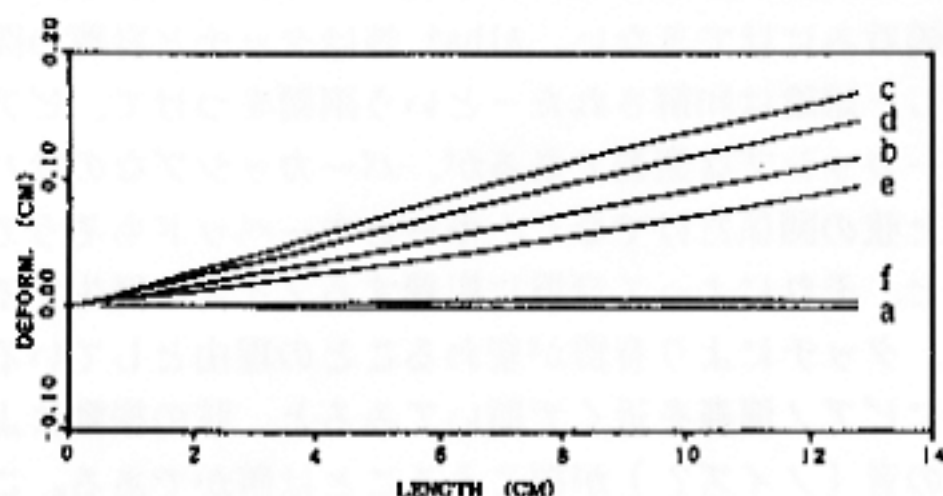


Fig.4 Shank deformations of the system with $E_s = 10^{12}$ dyne/cm² at the same times as in Fig.3.

2. 3 シャンクの初期変形の効果

ハンマーは静止状態から 3m/s のハンマーヘッドの速度まで約 20ms で加速される。この大きな加速度を考えるとハンマーが弦に衝突する前にシャンクが変形している可能性もある。衝突の開始時 ($t=0$) にシャンクがどちらにどの程度変形しているかを予測することは今回のモデルでは不可能であるが、もしハンマーが定加速度で加速されたとすると、 $t=0$ でシャンクはその中心部が正の方向に変形していると考えられる。一方、ハンマーが最初に急激に加速されその後自由になるとすると、自由振動のために衝突時には負の方向 (下に凸) に変形している可能性もある。

正と負のシャンクの初期変形を考慮したときの力-時間パターンをそれぞれ図5 (a) および (b) に示す。変形の形状は図3の曲線fを用いた。最大変形量は7番目の要素のところで 0.5mm (実際よりはずっと大きいと思われる) とした。図5はシャンクの初期変形が力-時間パターンに大きな効果を持っていることを示している。正の変形ではピークレベルは大きくパルス幅は狭い。初期変形を有するシャンクの接触時の動きは非常に複雑である (結果は省略する)。このような複雑な動きの割にはシャンクのハンマーヘッドに対する影響は小さいようである。今回扱っているハンマーは低音部のものであるが、中高音用のものであれば結果は異なっている可能性もある。

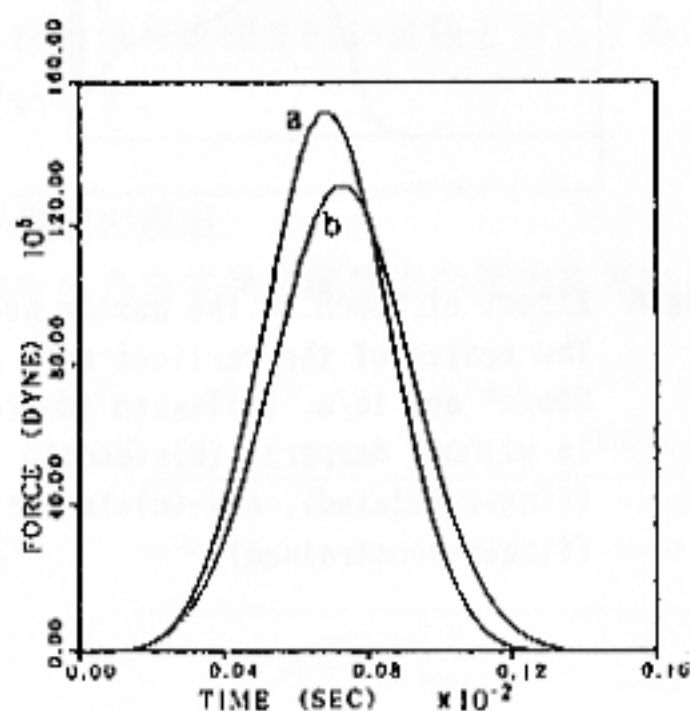


Fig.5 Force-time patterns with positive (a) and negative (b) deformations.

2. 4 ハンマーヘッドの初速度の効果

図5において2つの曲線は異なるピークレベルと幅を持っているのでそれらの比較は容易でない。比較しやすいように、シャンクの負の初期変形の場合のハンマーヘッドの初速度を $V_h=3.29\text{m/s}$ として力-時間パターンを求めた。その結果を図6に示す。図6 (a) は図5 (a) と同じである。図6 (a) と (b) はよく似ているが、シャンクが負の方向に初期変形しているときのパルス幅は多少広い。曲線 (a) と (b) に対応する加振力が弦に加わるとすれ

ば、シャンクが正に初期変形している方がパルス幅が狭いためより明るい音がするといえる。

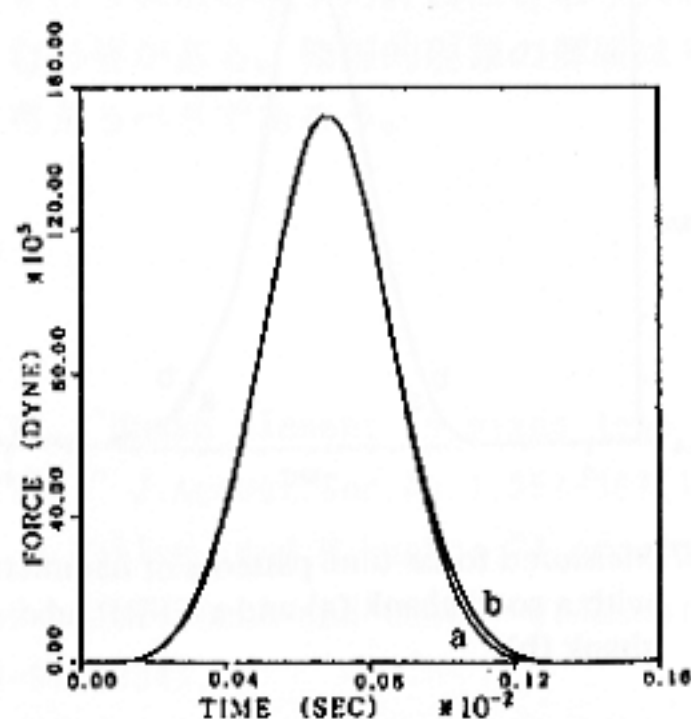


Fig.6 Force-time patterns of the positive (a) and negative deformations but with an increased hammer velocity (b).

2. 5 力-時間パターンの実験結果

低音部用のハンマーの力-時間パターンを実際のキーアクションを用いて測定した。ハンマーは弦と同程度の寸法を持つ鉄製の小片 (剛体) に衝突する。この小片はL字型のアームに力センサを介して固定されている。シャンク material としては鋼と、それとほぼ同じ外形を持つCFRP (カーボン繊維強化プラスチック) チューブを用いた。CFRPチューブのシャンクは約2倍の曲げ硬さを持っている。ハンマーヘッドの初速度は力の最大値が約 150N となるように打鍵の強さを調整した。結果を図7 (a) および (b) に示す。2種類のシャンクとも力-時間パターンは計算結果とほぼ同じ時間幅を持っており、計算結果の正しさを裏付けている。2種類のシャンクの力-時間パターンの差は僅かであるが、CFRPの方が多少幅が広い。

第2の実験では鋼のシャンクのハンマーを用いて、打鍵の仕方を変えたときに力-時間パターンが変化するかどうかを調べた。打鍵部のストロークは約 10mm である。打鍵の方法は、力の最大値をほぼ同じ ($\pm 1\%$ 以内) に保ちつつ、

- (1) ハンマーをストロークの前半だけで加速する、
- (2) ストロークの全体にわたって加速する、
- (3) ストロークの後半だけで加速する、

の3種類である。(1) は鍵の下にスペーサを置くことにより、(3) は最初に件を 5mm 程度押し下げておいて加速する方法を採った。しかしながら、この実験では図6に示すような差は見られなかった。

今回の計算および実験では低音部のハンマーについてのみ検討したが、中高音部についても検討する必要がある。さらに、実際の弦に近いモデルを用いること、ハンマーの回転モーメントも含めることなども必要であろう。

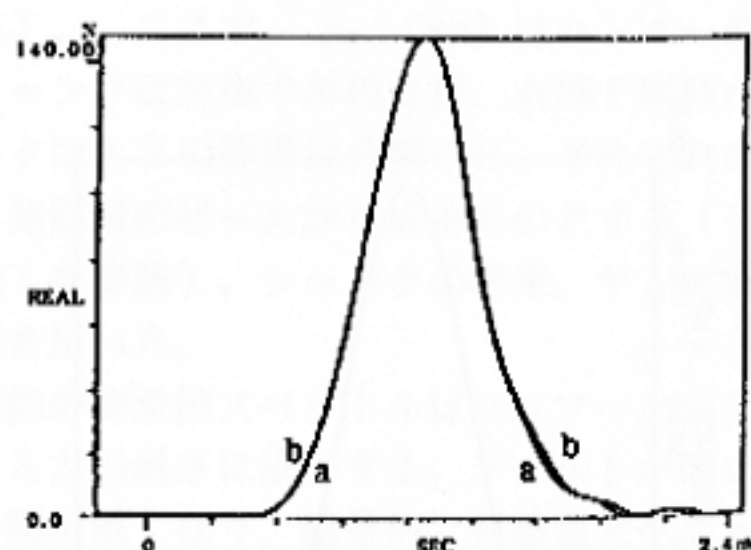


Fig.7 Measured force-time patterns of hammers with a wood shank (a) and a CFRP tube shank (b).

3. ハンマーの動きの観測

Askenfelt 等⁷ は打鍵装置の各部のタイミングを調べているうち、打弦直前の速度が一定でもハンマーの動きはタッチにより複雑に変化することを見いだした。これは、単純に1つの質量が加速されるのではなく、ハンマーの柄の部分を含めた1つの系が複雑な振動をしていることを窺わせる。図8はスタッカートとレガートにより、静止から打弦までのハンマーの速度および加速度がどのように変化するかを示したものである（打弦時の速度はほぼ同じ）。この図で示されるように、ハンマーの動きは単一共振系のそれとは大きく異なっていることが分かる。また、ハンマー系のモード解析により、ハンマーの先端（弦と接する部分）が弦に垂直に振動するモードと弦の方向に振動するモードがあることを示している。この文献でもタッチと音質に関しては、ハンマー系の振動の違いが、ピアニストとピアノとのインターフェイス（タッチが音質に影響すること）のメカニズムの候補であることを提示しているだけであると結んでいる。

4. タッチと音質の問題への取り組み方

タッチによって音質が変わるかどうかの結論を得て長い論争に終止符をうつには、YES派とNO派とが共通の土俵にのぼることがまず必要である。その上で、客観的な音質評価を行わなければならない。この点が今まで一番欠けていたように思える。音響研究者の方は音質評価を十分に行わずに、YESまたはNOの理由を見いだそうと努力してきたように思える。以下、タッチと音質の問題に取り組むべき手順を提案する。

(1) 対象音の定義

タッチと音質というとき、YES派は「同じ大きさに聞こえる単一音」で音質が異なると考えているのかどうかを明確にする。ピアノは非常に非線形性が大きく、異なる強

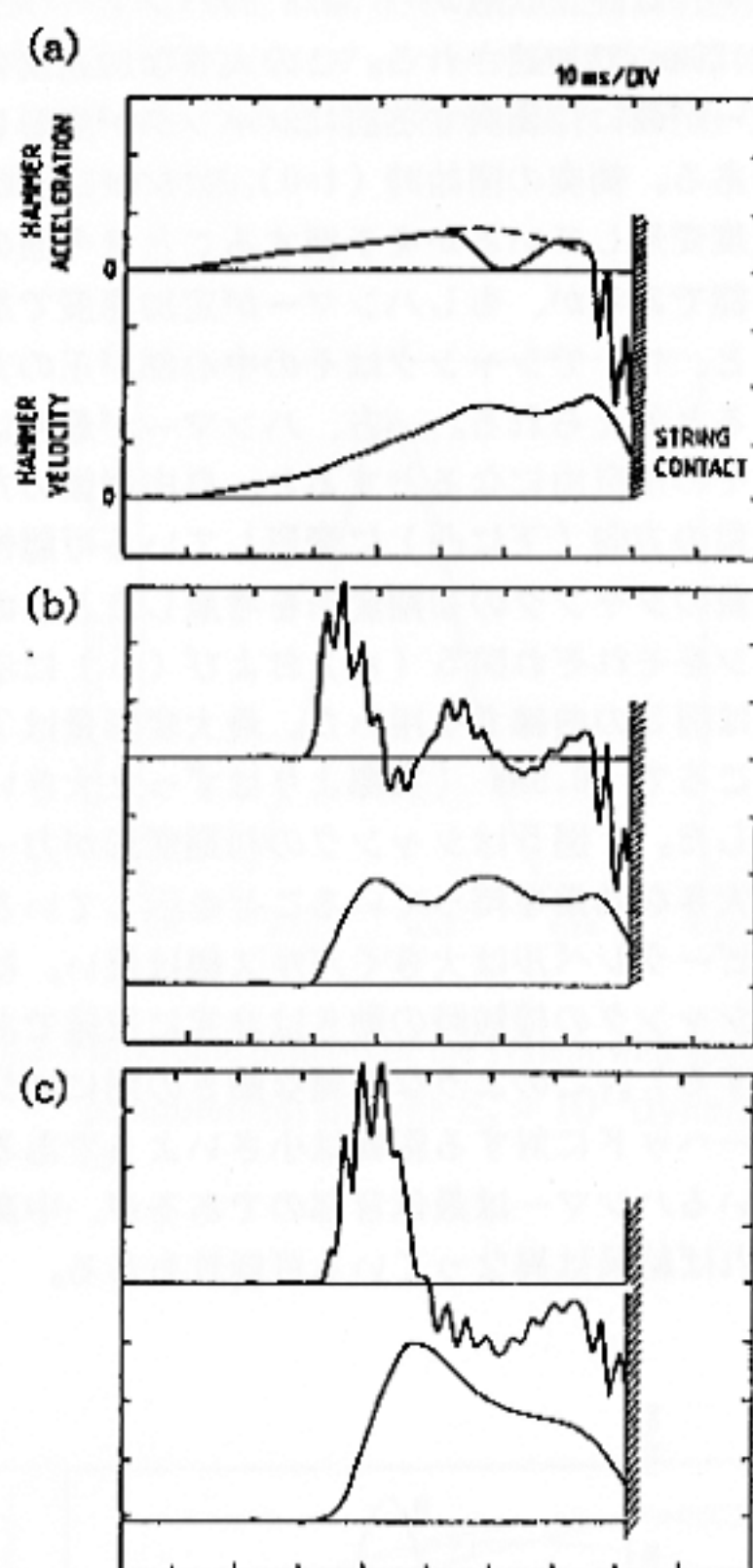


Fig.8 Effect of touch on the hammer motion. The scales of the vertical axis are 25 m/s^2 and 1 m/s . (a) legato (dotted line is without damper), (b) staccato (finger relaxed), and (c) staccato (finger constrained).

さで演奏すれば必ず音の強さのレベルとともにその周波数スペクトルのパターンが変化するので、何かを一定に保ったうえでタッチの差を評価しなければならない。上では「同じ大きさに聞こえる」という心理的な評価量を用いているが、その代わりに「同じ最大音圧を有する」という物理量が使えのかもしれない。単一音でなく、和音や単一音の連続でないとは差がないとすれば、この後のステップが非常に複雑になる。

(2) タッチの定義

タッチといってもピアニストや評論家あるいは音響研究者の間で、あるいは個人の間で異なる理解をしている可能性がある。いま問題にしているタッチとはなにかについて共通の意味付けが必要であり、できればそれぞれのタッチについて標準的な演奏方法が記述できていることが望ましい。

(3) 音質の定義

タッチと音質を問題にするときの音質とはなにかについても明確な意味付けが必要である。異なるタッチでしかも同じ大きさに演奏された単音の音の違いという観点から、それぞれのタッチの音質はどのような特徴を持つか、定義までは難しいとしても共通の認識をもつことは必要であろう。ただし、NO派にとってはこのステップは一切意味を持たない。YESの立場に立つ人達はこの作業を任せることになる。

(4) 評価用音源の作成

ピアニストが、なるべく(2)で決められた演奏法に従ってなるべく同じ大きさに関こえる単音を多数回演奏しそれを録音する。その中からさらに選別、編集して音質評価用音源を作成する。この段階では現在のハイファイ技術を最大限に活用することが重要である。

(5) 音質評価

評価用音源を用いて客観的な音質評価を行う。音質の識別能力は個人差が非常に大きいので、被験者の選定が重要である。100人に1人でも識別できる人がいるかどうかを見いだすことは重要であると思う。

(6) 信号処理

もし、タッチにより音質が変わるという結論がえられたら、ピアノ音の信号処理を行い音質と対応する信号の物理的な差を見いだす。

(7) 発音機構の解明

信号の差をもたらす発音機構上の理由を見いだす。

5. まとめ

タッチと音質に関する議論は、ヘルムホルツの時代まで遡れば1世紀以上にもなる。上にも述べたように、この問題に終止符を打つには心理学的評価法を取り入れて真っ向から取り組む必要がある。物理的現象の解明はその補助的手段として考えるべきであろう。

文献

- (1)W.B.White, "Human element in piano tone production," J.Acoust.Soc.Am.1,357-367(1930).
- (2)H.Hart, M.Fuller, and W.Lusby, "A precision study of piano touch and tone," J.Acoust.Soc.Am.6,80-94(1934).
- (3)R.Alba and A.T.Inoue, "Piano Tone Color and Touch," The Piano Quarterly,107,36-39(1979).
- (4)A.Askenfelt and E.V.Jansson, "From touch to string vibrations. I:Timing in the grand piano action," J.Acoust.Soc.Am.88,52-63(1990).
- (5)H.Suzuki, "Vibration analysis of a hammer-shank system," Interim Report of CBS Technology Center (1983).
- (6)H.Suzuki, "Vibration analysis of a hammer shank," Proceedings of International Symposium on Musical Acoustics,107-110(1992).
- (7)A.Askenfelt and E.V.Jansson, "From touch to string vibrations. II:The motion of the key and hammer," J.Acoust.Soc.Am.90,2383-2393(1991).

Table I Dimensions of the shank elements.

Element # Number 1	Width a(cm)	Height b(cm)	Radius r(cm)	Length l(cm)	Mass m(gram)	Area Moment of Inertia (cm ⁴)
						10 ⁻²
1	0.54	0.655	—	0.8	0.05	1.1
2	1.2	0.655	—	1.7	1.21	2.8
3	0.71	0.655	—	1.1	0.66	1.7
4	0.71	0.655	—	1.3	0.49	1.7
5	—	—	0.65	1.0	0.335	0.88
6	—	—	0.645	1.0	0.24	0.85
7	—	—	0.645	1.0	0.24	0.85
8	—	—	0.63	1.0	0.23	0.77
9	—	—	0.61	1.0	0.215	0.68
10	—	—	0.59	1.0	0.20	0.59
11	—	—	0.57	1.0	0.19	0.52
12	—	—	0.54	0.5	0.175	0.42
13	—	—	0.53	0.4	0.16	0.39

Table II Hammer parameters used as a standard case.

Hammer Mass	M_h	10 gram
Hammer Stiffness	S_h	$1.8 \times 10^{10} \text{ dyne/cm}$
Hammer Velocity	V_h	3 m/sec
Young's Modulus of Shank	E_s	$10^{11} \text{ dyne/cm}^2$
Density of Shank	ρ_s	0.72 gram/cm ³
Initial Shank Deformation		Zero