

ピアノの発音機構と音色*

中村 勲**

(帝京技術科学大学)

鈴木英男***

((株)小野測器音響技術研究所)

1. まえがき

ピアノの音響学的研究の発展について、筆者らは本学会誌の 1979 年 8 号と 1988 年 12 号に解説を書いた。前者¹⁾は 1920 年代から 1970 年代について、後者²⁾は主として 1980 年代について、ピアノの発音機構全般にわたっての研究の紹介が目的であった。これらは諸外国の多くの論文を参考文献に載せ、それらを調べることによって、ピアノ研究の全体像が分かるというものであり、発音機構の一部についても、参考文献のいくつかを調べることによって、その部分の研究の出発点になるように、研究の現状を紹介したものである。

さて本解説は、先のものとは違った観点で、ピアノ研究の中で幾つかの問題を取り上げ、発音のメカニズムと音色との関係を分かり易く説明することを試みたものである。最初に発音機構の概略を記し、ピアノ音の非調和性を説明する。次にタッチと音質について述べ、続いて打音と余韻及びビート音の発生メカニズムを明らかにする。後の二つの問題は最近になって種々の研究が行われているもので、筆者らの研究も含めて説明する。最後にその他の発音機構と音色の問題を取り上げる。

2. 発音機構と非調和性

演奏者がピアノの鍵盤を叩くとアクションの機構によって、ハンマが弦に衝突する。この衝突で生じた衝撃波がピアノ弦を伝搬する。低音部の 20 鍵程の弦には、ピアノ線の上に銅線を藁のように巻いた巻線弦が用いられ、最低音の 10 鍵程は 2 重の巻線弦が用いられている。またこの部分は 1 本弦であるが、高音になるに従って 1 音について 2 本組の弦、更に 3 本組の弦が用いられる。それらの弦は高張力で引っ張られている。弦長の 7 分の

1 ないし 8 分の 1 の位置にハンマが置かれていて、打弦点となっており、弦の中央に対して打弦点と反対側は駒を介して響板につながっている。響板はグランドピアノでは、外形と同じ非対象の独特の形状をしており、アップライトピアノでは矩形の相対する角の 1 組を助響板によって抑えて、非対象の形状を作っている。弦を伝搬するエネルギーの一部が、駒を介して響板に伝わり、響板を振動させて音を発生する。打弦により、弦に封じ込められたエネルギーが、響板からわずかず放たれることによって、ピアノ音が形成される。ピアノ弦は高い張力で引っ張られているが、弦自体は弾性的な性質を持っているので、弦を伝わる横波の中、高い周波数の振動は、低い周波数の振動に比べて、少し速く伝わる。従って、振動が弦を 1 往復する時間が周波数によって異なるため、ピアノの音は、基本の音の高さの完全な整数倍で構成されないで、高い部分音ほどわずかず高めになっている。この非調和性が音に暖かみを与えている。また、調律の場合、中央のド (C₄) を中心として、オクターブ異なる上下のドを合わせて行くことによって、各音程は平均率に比べて、高音部はより高く、低音部はより低くなる。これが S 字特性の調律曲線で、他のオーケストラの楽器と高音部、低音部での音の高さが異なる理由である。これらの程度は弦の性質によって決まってくる。

3. タッチと音質

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^{3),4)}。まずタッチとは何かであるが、広い意味ではピアニストの演奏方法、例えば、演奏のテンポ、和音の各成分の大きさの配分、音の引き伸ばし方など、を表す言葉として用いられる。しかしここで問題にしているタッチはもっと限定された意味で、単一音を同じラウドネス(大きさ)で発生するときの打鍵の仕方を意味するものである。タッチにより音質が変わるかどうかについて、ピアノ演奏家はタッチにより音質が変わるといふ。一方、科学者はハンマの打鍵時の速度さえ一定であれば、どのように鍵盤を押そうと音質に差はないという。Payzant

* The sound generation mechanism and timbre of the piano.

** Isao Nakamura (Teikyo University of Technology, Ichihara, 290-01)

*** Hideo Suzuki (Acoustics Laboratory, Ono Sokki Co., Ltd., Yokohama, 226)

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、本当のピアノ音同士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、あまり科学的ではないように思える。

Askenfelt らは打鍵装置の各部のタイミングを調べているうち⁸⁾、打弦直前の速度が一定でもハンマの動きはタッチにより複雑に変化することを見出した⁷⁾。これは、単純に一つの質量が加速されるのではなく、ハンマの柄の部分を含めた一つの系が複雑な振動をしていることを窺わせる。図-2 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の速度及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、ハンマ系のモード解析により、ハンマの先端 (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、ハンマ系の振動の違いが、ピアニストとピアノのインタフェース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。

筆者の一人鈴木は打弦のメカニズムを解明することを目的として、高速度映写機を用いて弦の振動を観察した。秒速 4,000 コマで撮影したところ、打弦の後でハンマは大きく首振り運動をしながら戻ってくることを確認した。この結果をもとに、ハンマの柄の部分を含めてハンマ系をモデル化し、柄の振動が弦に加わる力の時間特性にどのように影響するかを検討した^{8),9)}。図-3 は柄の部分をも 13 の要素でモデル化したハンマ系を示す。図-4 は弦を完全剛体としたときのハンマと弦とが接触している間の柄の変形の様子を示したものである。通常の柄の剛性では柄は大きく変形することが分かる。図-5 はハンマの柄が打弦時に 0.5 mm の正 (凸形) 及び負 (凹形) の初期変形を受けているとしたときの完全剛体弦に加わる力の時間特性を示したものである。ハンマの打弦時の速度が同じでも力-時間パターンは大きく異なる。問題は、タッチによって柄の初期変形にどの程度の差が発生するか、である。簡易実験によって、ハンマを加速の初期段階で大きく加速するタッチとその逆の場合とで、完全剛体に近い弦モデルに加わる力を測定したが、パターンに有意な差は見られなかった。ただ、このときの実験に用いたハンマが低音用のものであったので、中

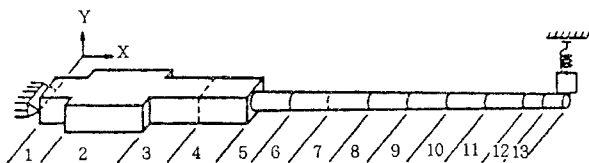


図-3 ハンマモデル

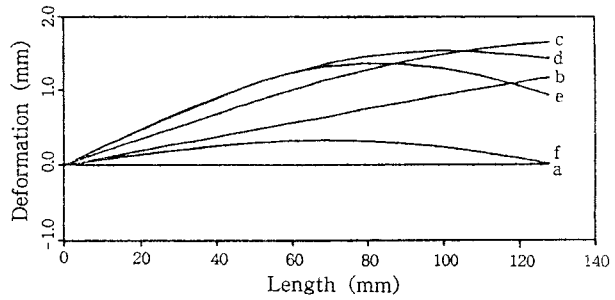


図-4 接触開始後 0(a), 0.4(b), 0.71(c), 0.9(d), 1.1(e), 及び 1.4(f) ms における柄の変形
ハンマの寸法及び材質は代表的な値、ハンマの接触時の初速度は 3 m/s.

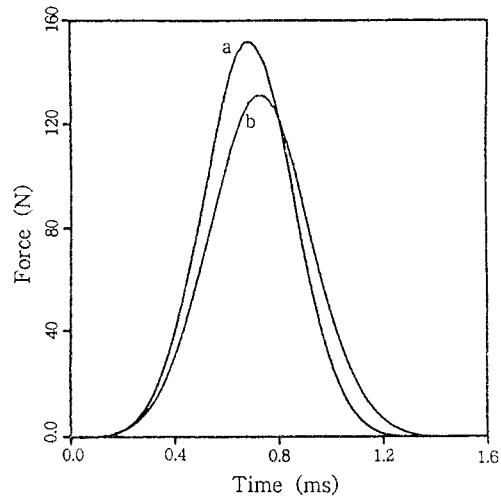


図-5 柄の初期変形 (0.5 mm) が正(a)及び負(b)のときの剛体弦に加わる力の時間依存性

高音用のものでどうなるかは分からない。この研究も、ハンマの柄の初期変形がもしかすると弦の振動に影響するかも知れない、という提案であり、途中で終わっている。モデル化の改良やもっと綿密な実験も含めてハンマ系と弦の接触のメカニズムの解明が必要である。

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。

4. ピアノ音の減衰特性

ピアノの弦は大部分が 1 音について複数で構成され、駒を介して結合されているので、弦相互間にエネルギーの交換がある。同音の複数弦が全く同一に調律されたときは、相互間のエネルギーの交換はなく、音は一様に減衰するが、わずかな調律の違いによって、初期の減衰の速い打音と、時間が経った後の減衰の緩やかな余韻が生ずる。これについては Weinreich^{11),12)}と Hundley¹³⁾らの研究がある。ここでは筆者の一人中村¹⁴⁾が行った研究を紹介する。図-6(a)は、あるアプライトピアノの中央のド (C₄) の 3 本の弦について、中央弦に対しそれぞれ

1セントずつずらした場合、駒点の速度振幅エンベロープの時間変化をコンピュータでシミュレートしたもので、(b)は音圧振幅エンベロープの時間変化の実測を示したものである。これはピアノの個性と調律の仕方によって変わってくる。調律師は3本の弦を全く同じ音の高さに合わせているつもりであるが、実際は経験によって、好ましい音を得るように3本弦がわずかに異なる調律をしている。また図-7は最低音のソ(G₁)の音圧について、コンピュータで分析した結果¹⁵⁾を示したものである。(a)は各部分音のスペクトルの時間変化、(b)は各部分音別の振幅レベルの時間変化である。2.5秒付近に現れている波形変化は録音系の雑音である。これらの複雑な変化は、調律の違いと、響板と弦の特性比によって現れる。低音部においては、響板に垂直な振動のほかにも水平な振動も起こり、それぞれの部分音について、響板を介しての弦の結合の状態の違いによって、振動が異なってくる。2本弦の垂直方向振動について言えば、響板による結合が強い場合は2段減衰、弱い場合はビートを生ずることが筆者の一人中村の研究¹⁶⁾で理論的に明らかにされている。また高い部分音ほど音の放射がよいので速く減衰することが図に見られる。これらが複雑にからみ合っ、て、ピアノの音色を決定している。

では図-7の打音—余韻あるいはビートが生ずるメカニズムを考察する。2本弦と響板の等価回路を図-8に示す。それぞれの弦は各部分音を生ずる共振系となるように展開され、両者を結合する響板の入力インピーダン

スも同様に表される。最も単純化したモデルを図-9に示す。ある部分音のモードはミチューニングに相当する分だけインダクタンスに差のある二つの共振系で表される。弦は高いQを持つので抵抗は省略する。響板はそのモードの共振周波数の近傍で決まる抵抗Rのみを用いて表す。このモデルで、コンデンサCに電荷がある場合、 i_1 , i_2 及び i_1+i_2 の過渡現象の近似解を理論的に、

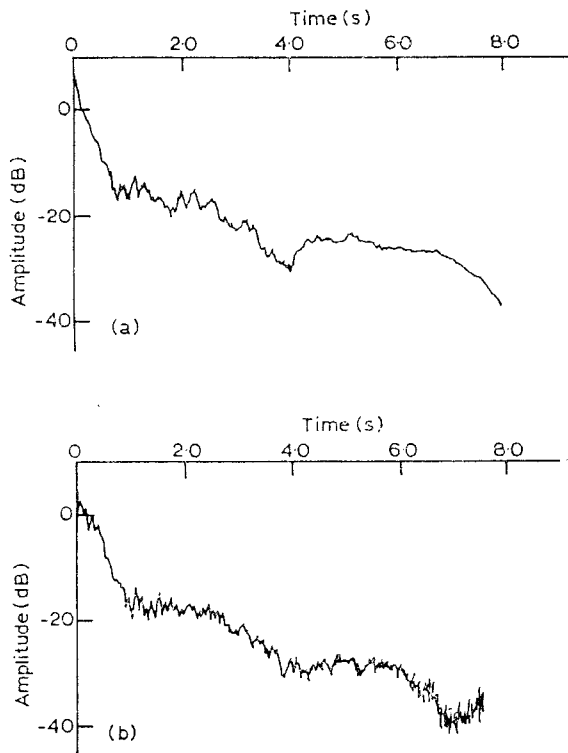
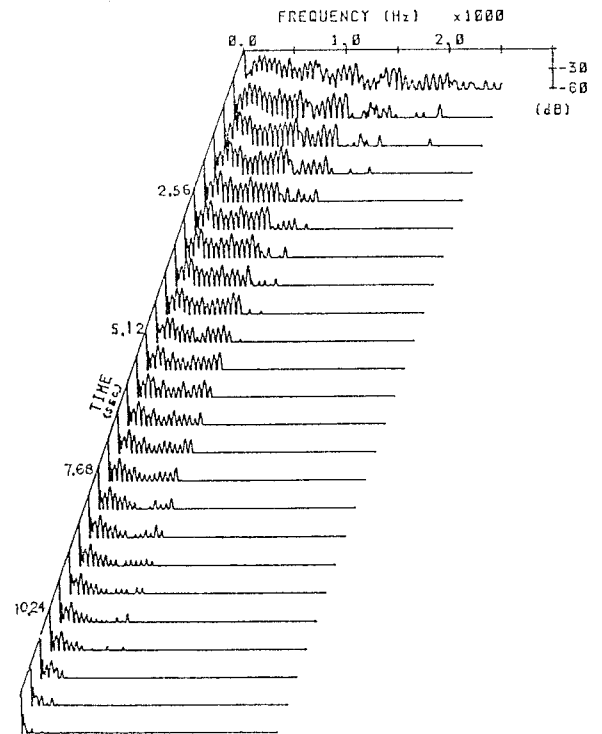


図-6 振幅エンベロープの時間特性 (C₁)
(a) 駆動点における響板の振動速度 (シミュレーション), (b) 響板より 30 cm 離れた場所の音圧 (実測)。



(a) スペクトルの時間変化

(b) 各部分音の時間変化

図-7 STFT による分析例 (G₁)

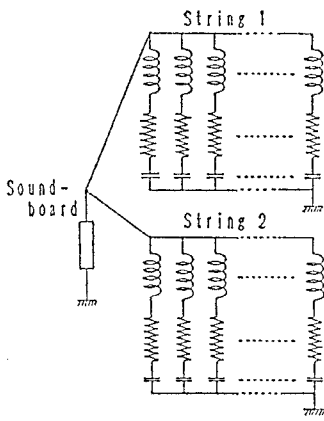


図-8 2本弦と響板の等価回路

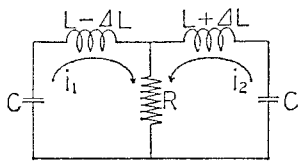


図-9 2本弦と響板の単純化した等価回路

あるいはシミュレーションによって求めることができる。シミュレーションによる結果の一例を図-10に示す。ここで $\Delta L/L$ はミスチューニングの割合、 $R/\sqrt{L/C}$ は響板と弦のインピーダンス比である。この例は両者とも極めて大きく取ってあるので、時間と振幅エンベロップのスケールは正しくないが、電流変化すなわち駆動力変化の傾向を知ることができる。2本弦で、あるモードの響板による結合の割合 $R/\sqrt{L/C}$ が小さい場合は、各共振系は独立して振動するため、響板駆動力はビートを生ずるが、結合が大きくなると打音と余韻に分かれる。すなわち同相成分は速く減衰し、逆相成分はほとんど減衰しないためである。またこれは弦のミスチューニングの割合 $\Delta L/L$ によって異なる。ミスチューニングが大きいと、分岐点はインピーダンス比の大きい方向にずれる。図の例で同じインピーダンス比 $1/200$ の場合、調律の違いによって打音—余韻を生ずる場合とビートを生ずる場合が起ることが分かる。図-7の例では、4~7部分音は打音—余韻の傾向があるが、高次部分音ではビー

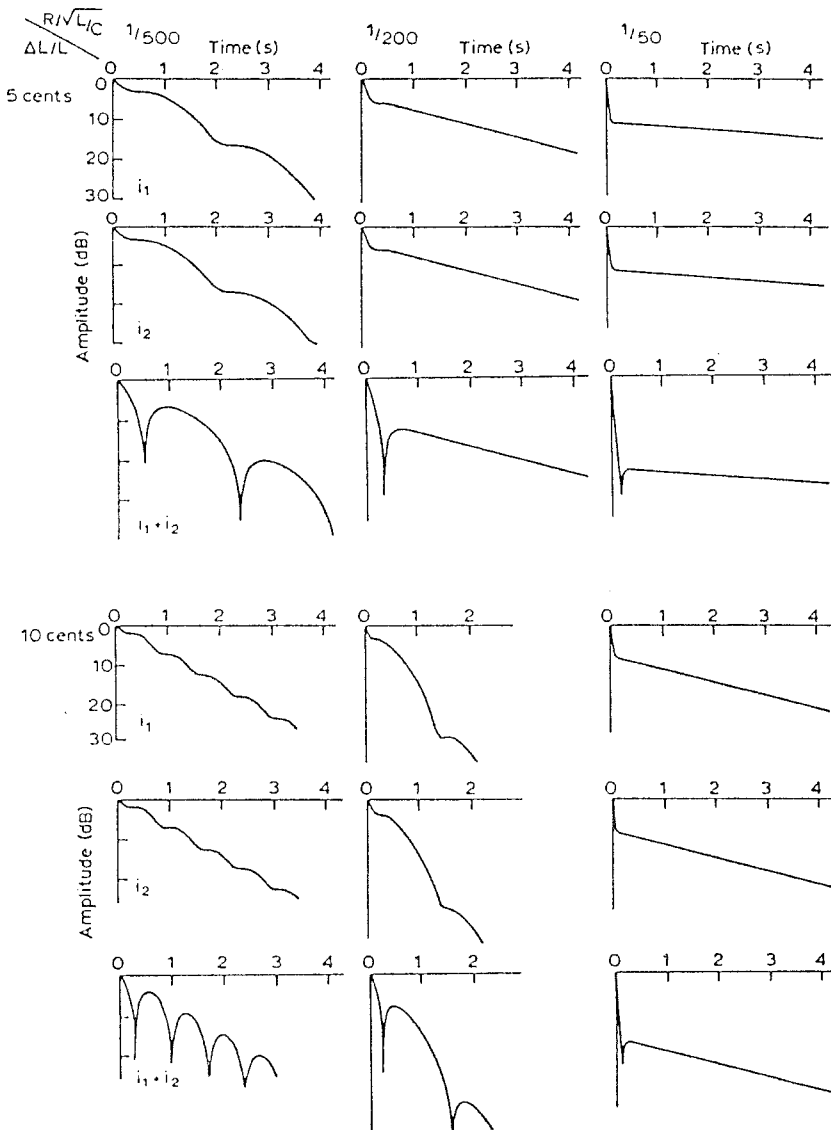


図-10 ミスチューニングとインピーダンス比に対する振幅エンベロップ減衰特性

ト
状
お
う。
打
い
こ
実
に
各
ま
か
出
い
御と

ピ
形状
分音
が作
木目
方
って
する
響板
ある
特性
複雑
強くな
更に
の音は
にもか
ら、そ
以上
密接に
更に
演奏
せを行
る。この

ピアノ
師・楽器
に自分
の好
えて、音
の複数
の弦
の硬さ
を交
り出し

トを生じている。また基音から3倍音においては、別な状態が起きている。これらはそれぞれの部分音周波数において、響板の入力インピーダンスが異なるためである。3本弦の場合は更に複雑で、図-6に示したように打音と余韻が生じた後、余韻においてもビートが生じている。これでピアノの音色の複雑さが分かるであろう。これらは響板を抵抗性として取り扱った場合であるが、実際の響板のインピーダンス特性を考慮すると更に複雑になる。

各部分音の時間的変化については、いかなる構成が望ましいのかという心理学上の問題があり、更にそれをいかにして実現するかという製造上の問題がある。現在は出来上がったピアノに対して調律師が感覚的に調整しているが、この問題一つを取り上げても、楽器の音色の制御ということは非常に難しい問題であることが分かる。

5. その他の発音機構と音色

ピアノは強音と弱音で音色が異なる。これはハンマの形状より、強音では硬い部分まで作用するので、高い部分音まで生ずるが、弱音ではハンマの柔らかい部分のみが作用するので、高い部分音は現れない。一方、響板は木目方向に10個程度の響棒が接着されていることによって、低音部では等方性となって、響板が全体的に振動するが、高音部では響棒間の響板のみが振動する。この響板の構造によって、広帯域の周波数特性が得られる。ある駆動点におけるピアノ音の伝達特性は、響板の共振特性によって、バントパスの特性になっている¹⁷⁾。また複雑な形状によって、ある高さの音が、ある方向だけに強くなるのが少なくなるようになっている。

更に最低音部付近、例えば第1鍵のラ (A_0 , 27.5 Hz)の音は、実際には響板から音響として発生していないにもかかわらず、人間の聴覚が高次の各部分音の構成から、それらしく感ずることを利用している。

以上述べたように、発音のメカニズムと音の特性とは密接に関係しており、複雑なピアノ音を形成している。更に演奏者は、打鍵によって響板の上で振動の重ね合わせを行い、それに各ペダルを制御して音色を作っている。このことは現在の電子ピアノでは不可能である。

6. むすび

ピアノの音の特性は演奏家はもちろんであるが、調律師・楽器製作者によって作り出される。演奏家は調律師に自分の好みの音色を作らせる。調律師は弦の張力を変えて、音の高さを調律するばかりではなく、1音における複数の弦の張力をわずかに変えたり、ハンマのフェルトの硬さを変えたりして、総合的に見て望ましい音色を作り出している。またピアノ製作者としては、弦、ハンマ、

響板等のいろいろ異なった特性のものを作り、組み合わせ、音色を作り出している。ピアノは発明されてから300年近くかかって、次第に改良されてきたもので、近代の工場生産になって、量産化、品質の均一化等製造面では大きく改良されたが、本質的な発音のメカニズムがすべて分かっているわけではない。

演奏家、調律師、製作者とも、ピアノの音については、それぞれ見識を持っていて、自分の立場の主張をしているが、発音のメカニズムについては、その物理を正確に理解しないで論じていると言えよう。それだけピアノの音の特性は複雑であり、発音のメカニズムとの関係は、最近になって明らかにされたことが以上に述べたほかにも数々あるが¹⁸⁾、まだまだ未知の点が多く、心理学的研究も含めて今後の研究に待たなければならない。

文 献

- 1) 中村 勲, “ピアノの音響学的研究の展望,” 音響学会誌 **35**, 447-455 (1979).
- 2) 中村 勲, 鈴木英男, “ピアノの音響学的研究の現状,” 音響学会誌 **44**, 963-971 (1988).
- 3) W. B. White, “Human element in piano tone production,” J. Acoust. Soc. Am. **1**, 357-367 (1930).
- 4) H. Hart, M. Fuller and W. Lusby, “A precision study of piano touch and tone,” J. Acoust. Soc. Am. **6**, 80-94 (1934).
- 5) R. Alba and A. T. Inoue, “Piano tone color and touch,” Piano Q. **107**, 36-39 (1979).
- 6) 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).
- 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).
- 8) H. Suzuki, “Vibration analysis of a hammer-shank system,” Interim Report of CBS Technology Center (1983).
- 9) H. Suzuki, “Vibration analysis of a hammer shank,” Proc. Int. Symp. Musical Acoustics, 107-110 (1992).
- 10) A. Reblitz, *Piano Servicing, Tuning and Rebuilding* (Vestal Press, Vestal, New York, 1976).
- 11) G. Weinreich, “Coupled piano strings,” J. Acoust. Soc. Am. **62**, 1474-1484 (1977).
- 12) G. Weinreich, “The coupled motions of piano strings,” Sci. Am. **240**(1), 94-102 (1979).
- 13) T. C. Hundley, H. Benioff and D. W. Martin, “Factors contributing to the multiple rate of piano tone,” J. Acoust. Soc. Am. **64**, 1474-1484 (1978).
- 14) 中村 勲, “発音機構のシミュレーション—ピアノの音響学的研究 第2報—,” 音響学会誌 **37**, 65-75 (1981).
- 15) 中村 勲, “計算機の音楽音響学への応用,” 情報処理 **29**, 549-556 (1988).
- 16) I. Nakamura, “Fundamental theory and computer simulation of the decay characteristics of piano sound,” J. Acoust. Soc. Jpn. (E) **10**, 289-297 (1989).
- 17) 中村 勲, “ピアノ音の特性—ピアノの音響学的研究 第4報—,” 音響学会誌 **38**, 454-460 (1982).
- 18) H. Suzuki and I. Nakamura, “Acoustics of Pianos,” in *Applied Acoustics* (Elsevier, England, 1990), Vol. 30 (2&3), pp. 147-205.