

第4章

ピアノ弦の振動

4.1 データの取得

今回我々が測定に用いたのは、YAMAHA 社製グランドピアノ（型番：C3）で、A0 から F#1 までは巻線の 1 本弦、G1 から A#2 までは巻線 2 本弦、B2 以上は裸線 3 本弦である (Fig.4-1)。また、Fig.4-1 を見てわかるように測定のためピアノ上部の反射板（ふた）は取り外してある。

ピアノの 1 本弦である E1（第 8 鍵、基本周波数：約 40Hz、弦長：1270mm）を主に測定した。測定点は打弦点より 300mm、測定する際の打鍵は指で行った。ま



Fig.4-1: 測定に用いたピアノ

た、データのサンプリング周波数は5kHzである。また、打弦されるとき他の弦はダンパーによって抑えられていてブリッジからの振動によっても動かない。

また、弦振動と比較するため同時に発生するピアノ音も計測取得した。マイクはSONY製コンデンサマイクロホンC-355を用い、設置位置は響板からの高さおよそ15mm、演奏者より向かって奥から約40mm、演奏者より向かって左端より200mmのところである。(Fig.4-2)

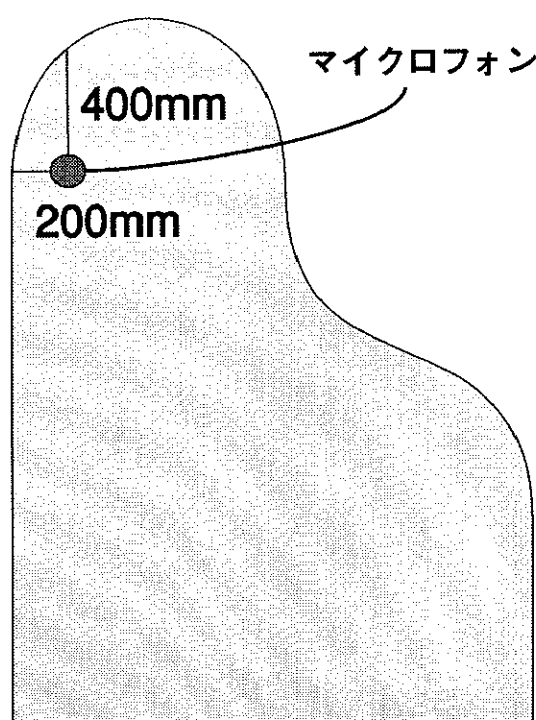


Fig.4-2: 測定に用いたマイクの設置位置

次に実際にピアノ音、ピアノ弦振動を測定したものを示す。Fig.4-3はピアノ音の時間－音圧波形、Fig.4-4は響板に垂直な弦振動の時間－振幅波形、Fig.4-5は響板に平行な弦振動の時間－振幅波形である。

Fig.4-3 のピアノ音は打鍵した後急激に減衰し余韻に到っているのがわかる。Fig.4-4 の響板に垂直な弦振動は形自体はピアノ音に似ているが、減衰の仕方がピアノ音よりも緩やかであることがわかる。Fig.4-5 の響板に平行な弦振動はこれまでの2つとはまったく違い、ほぼ一定の振幅でほとんど減衰せずに振動していることがわかる。

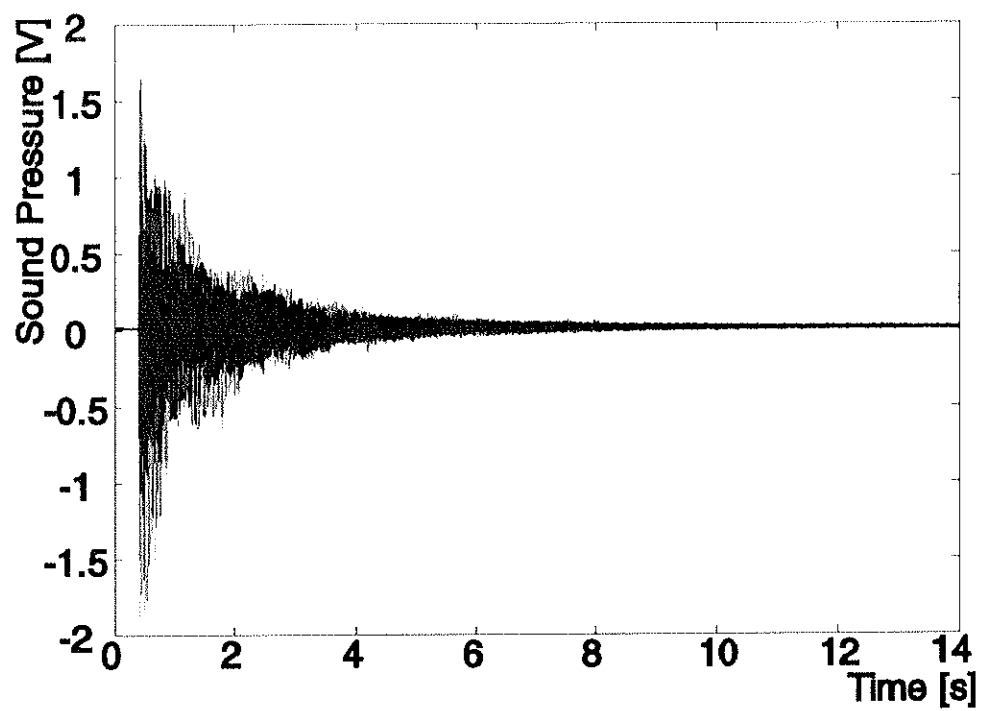


Fig.4-3: E1 のピアノ音

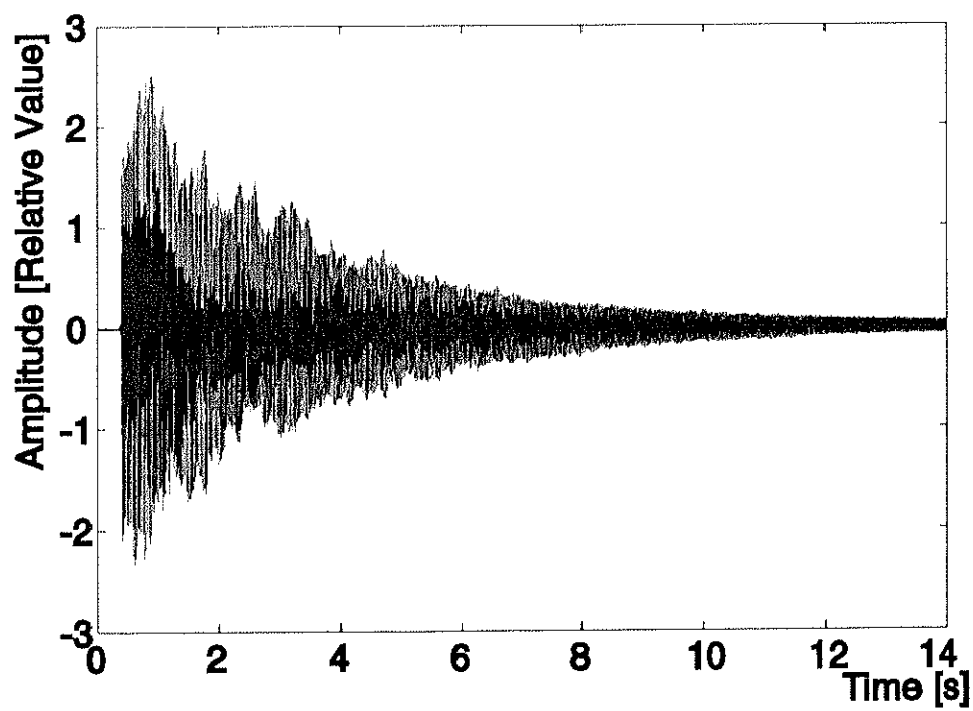


Fig.4-4: E1 の響板に垂直な弦振動

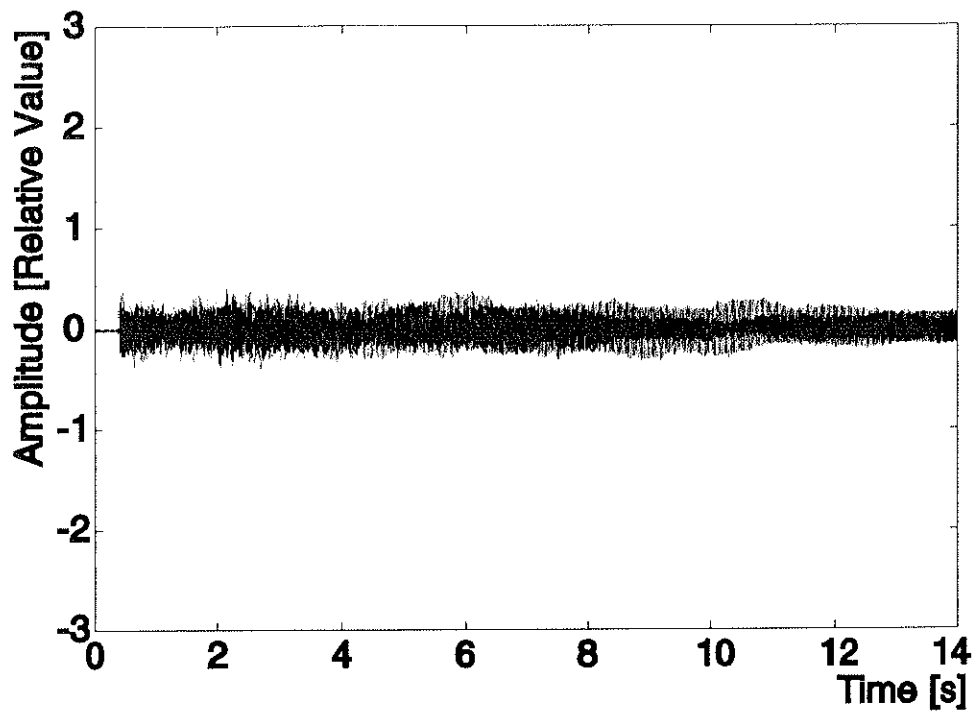


Fig.4-5: E1 の響板に平行な弦振動

次に測定されたピアノ弦振動を2s毎0.1s間隔で取りだしリサージュ図を描いた。
(Fig.4-6)

これを見ると、最初はほぼ響板に垂直な振動をするが、だんだん響板に平行な成分が大きくなり楕円運動を行う。しかし、5.0～5.1sと7.0～7.1sの間と11.0～11.1sと13.0～13.1sの間で回転方向が入れ替わっているのがわかった。

ハンマーにピアノ弦が響板に垂直な方向で叩かれるのにもかかわらず響板に水平な振動を起こす原因については4.2章、ピアノ弦振動が回転方向を替える原因については4.3章で詳しく述べる。

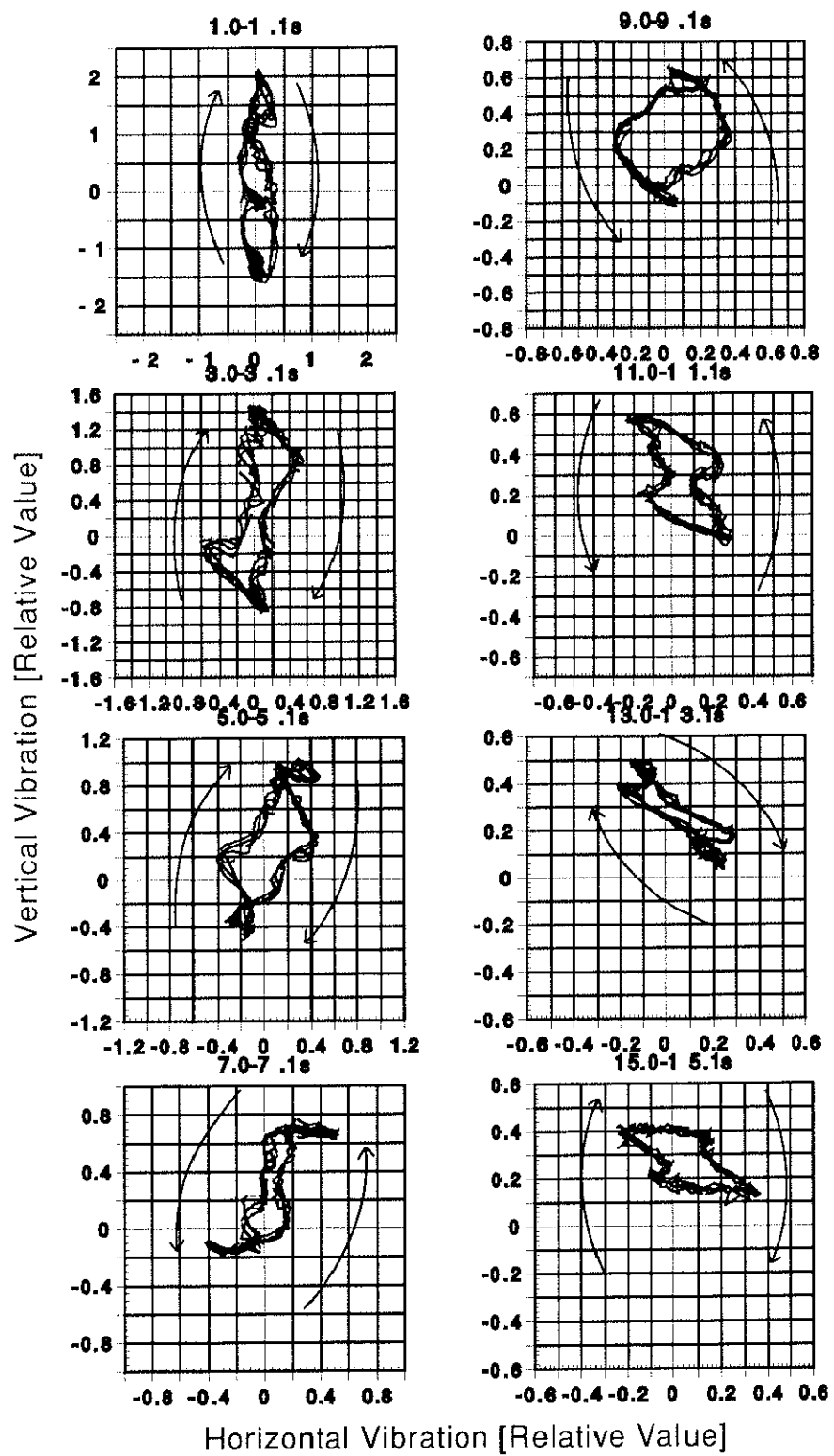


Fig.4-6: E1 のリサージュ図

4.2 ブリッジによって励起された振動について

ハンマーで叩かれた弦は振動を開始する。整備されたハンマーは響板に垂直に運動し、また、その表面に張られたフェルトも平らで凹凸はないと考えられる。その場合、弦はハンマーの移動方向すなわち、響板に垂直な方向に振動する。なぜ、弦が響板に平行な方向（水平方向）の振動成分を持つのかを知るために実験を行った。

実験方法はFig.4-7に示すようにある弦（今回はE2）を打弦する。その後その振動はピアノ弦からブリッジへと伝わる。そしてブリッジの振動は1オクターブ下の弦（今回はE1）を動かす。

そしてそのE1の振動をE1を打鍵した時の振動と見比べ響板に水平な方向の振動がどのようなになっているかを調べる。

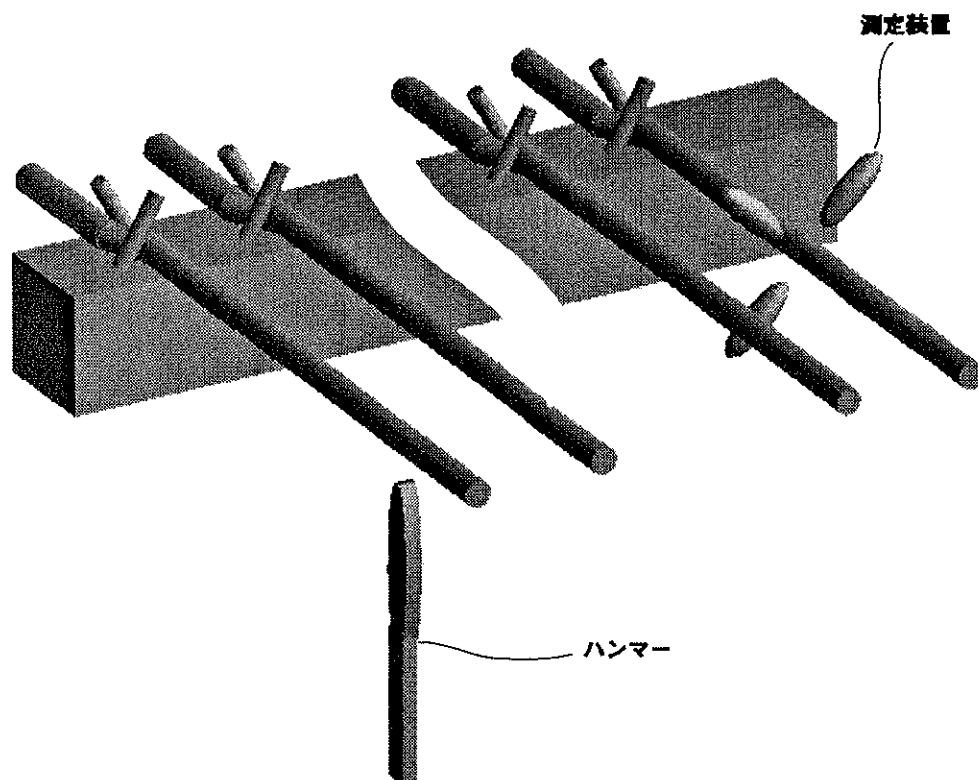
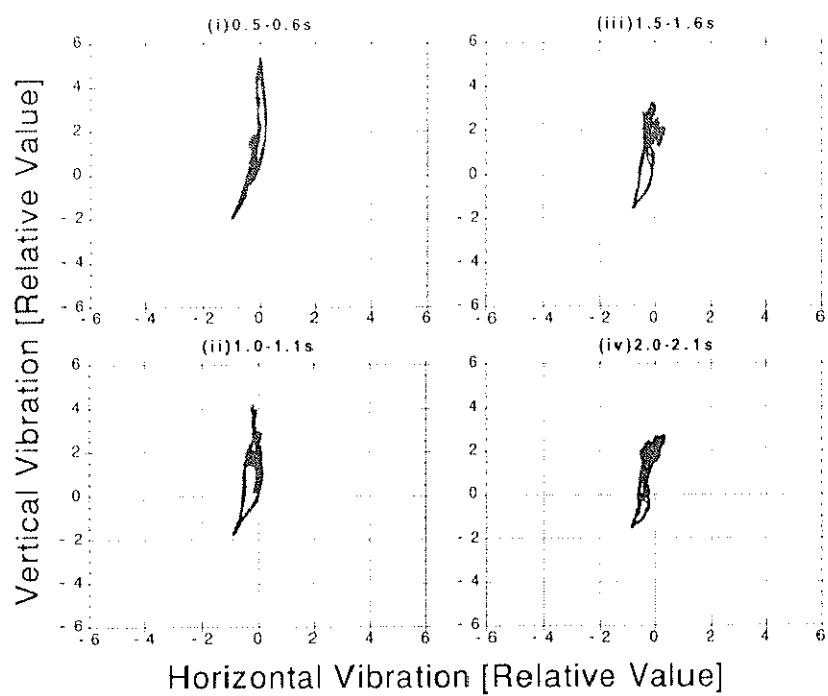
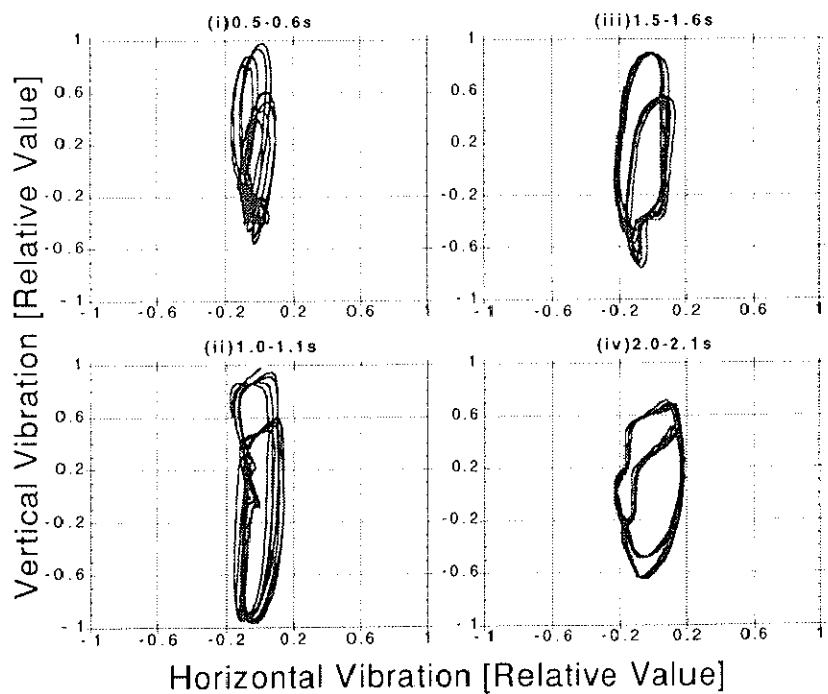


Fig.4-7: 実験方法

Fig.4-8(a),(b)にE1弦の振動のリサージュ図形を示す。(a)はE1弦そのものを打弦したとき、(b)はE1よりも1オクターブ高いE2を打弦したときのE1弦の振動を示している。(b)の振動は駒からのエネルギーのみによって励起されたものである。(a)と比べて振幅が非常に小さい。よって(b)では縦軸のスケールを拡大してある。同図(a)に示されるように、最初打弦された弦はその方向、すなわち、垂直方向に振動し、それから徐々に水平方向に振動を始める。つまり、ハンマーは弦に対し、主に振動の垂直成分のエネルギーしか与えていないことが分かる。これに対し、E2を打弦したときは、E1弦は振動エネルギーを響板上の駒から受け、2次モードが励起される。このとき、同図(b)に示されるように最初から、振動には水平方向成分が含まれている。すなわち、駒は垂直方向、水平方向に振動している。最初、E2がハンマーで叩かれたときには同図(a)と同様に弦は垂直方向のみに振動すると考えられる。しかしながら、弦E2の駒→響板→弦E1の駒と振動のエネルギーが伝わる過程で、一部の垂直方向の振動エネルギーが水平方向の振動エネルギーに変わっている。弦が接している駒はポアソン比を通して垂直、水平両振動の連成が考えられるがその値は小さい。岩岡らが指摘しているように¹¹⁾、弦は駒上で傾いたピンで押えられている (Fig.4-7)。このピンの傾きが振動エネルギーの垂直、水平両成分への変換を行っていると考えられる。



(a): E1 を直接打鍵したもの



(b): E2 を打鍵し、そのブリッジの振動でE1が振動したもの

Fig.4-8: 測定結果

4.3 振動周波数

4.3.1 回転方向の入れ替わりの原因について

4-1章のFig.4-6での弦振動の回転方向が入れ替わることの原因について考える。Fig.4-6の弦の回転方向が入れ替わる部分を抜きだしFig.4-9に示す。

まず、楕円軌道を描きながら振動している。しかしその後、楕円の直径が小さくなり始め、ほぼ一直線の振動をし、そして今までとは逆の回転をし始める。回転方向が入れ替わるのは打鍵後約6sであった。

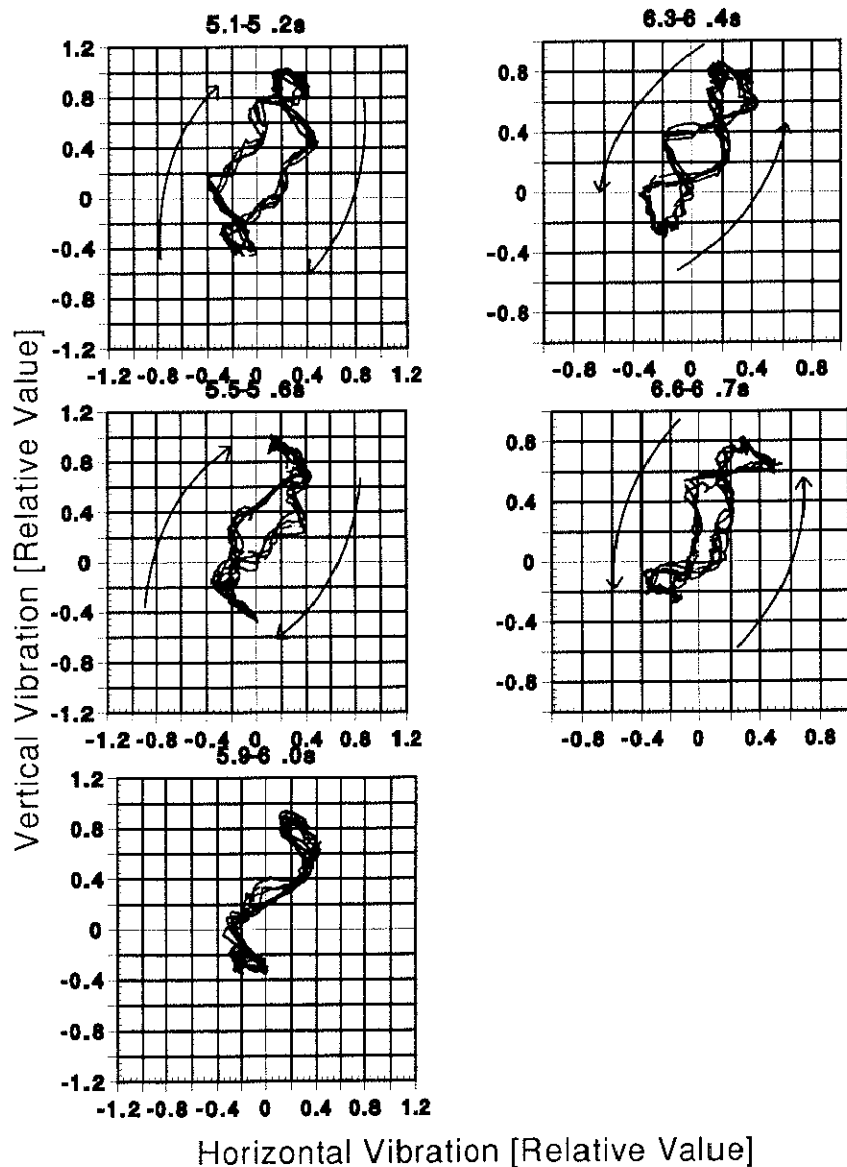


Fig.4-9: E1 のリサージュ図（回転方向が入れ替わる部分）

次に、Fig.4-6、Fig.4-9の図形では少し複雑すぎるので、その振動の基本波成分のみによるリサージュ図形を求め、Fig.4-10に示す。このときサンプリング周波数は前述したように、5kHzであり、基本波成分を切り出すローパスフィルタ処理は時間領域で行い100サンプルのFIRフィルタを用いた。

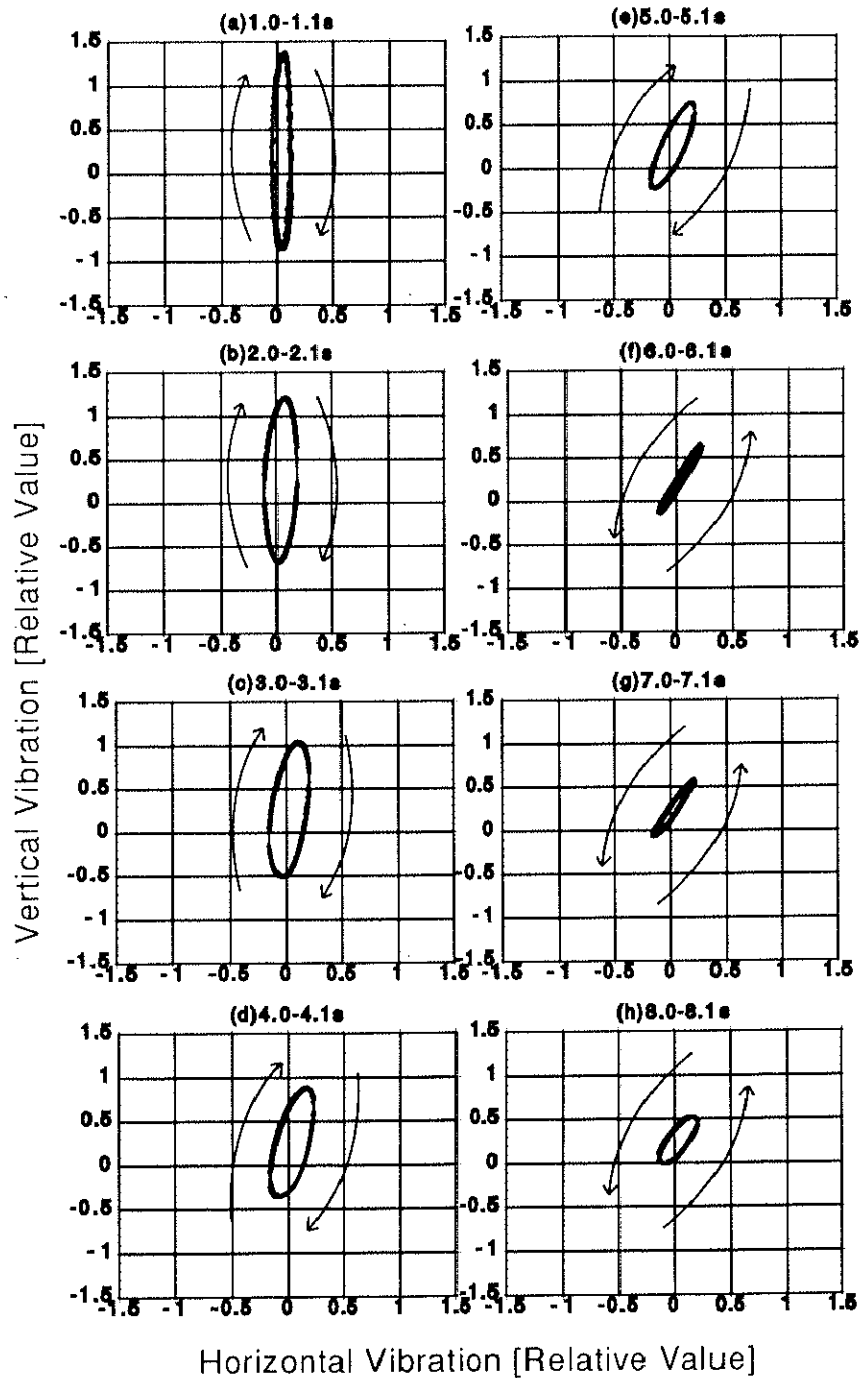


Fig.4-10: E1 のリサージュ図 (基本周波数)

Fig.4-10を見ると、まず前述のように、ほぼ響板に垂直な振動が起き、その後、長軸を右に傾けながら楕円の幅が広がって行く。このとき、楕円の回転方向はこの紙面で（以下同じ）右回りである。打弦後5s位から楕円の幅は逆に狭くなっていき、約6s後には、ほぼ直線の振動を行いそして、回転方向が入れ替わり左回りになる。その後、また楕円の幅が大きくなって行き・・・という振動を繰り返しながら、全体の振幅が減少していくことが分かる。

回転方向の入れ替わりの原因を探るため両方向の振動信号にFFTをかけ基音付近の周波数成分を調べた。このとき用いたFFTの仕様として、サンプリング周波数は、前述したように5kHz、データ点数は65536点である。したがって、周波数分解能はおおよそ0.076Hzになる。これでは、必要とする周波数分解能にやや不足なので、ピーク付近の3点を通る放物線で近似し、そのピークとなる周波数を求めた。これらの結果をFig.4-11に示す。響板に垂直な振動と水平な振動の周波数は明らかに異なっており、響板に垂直な振動は水平な振動より約0.07Hz低いことが分かる。

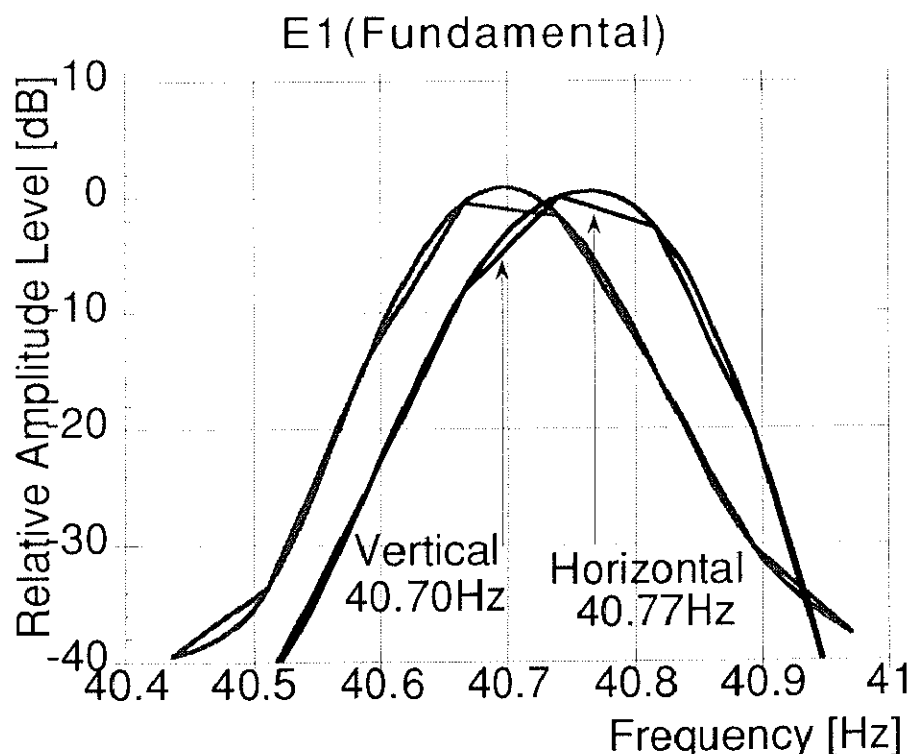


Fig.4-11: E1 の基音付近のスペクトル

したがって、回転方向の入れ替わりは次のようにして起こると推察される。まず、ハンマーで打鍵された際、弦は響板に垂直な直線運動を行う。しかしながら、垂直振動の周波数が低いので、垂直振動の位相がだんだん遅れてくる。また、響板に水平な振動の振幅が大きくなる。それに従って、弦は楕円運動を行う。回転の軌跡である楕円は、位相差が拡大するにつれてその幅を広げていき、位相差が90度のときに幅が最大になる。垂直振動の位相がさらに遅れると、楕円の幅は今度は逆に細くなって行く。位相差が180度になると再び直線運動になる。さらに、垂直振動の位相が遅れると、弦は再び楕円運動を始めるが、その回転方向はこれまでとは逆の右回りになる。いま、垂直振動の周波数が、水平振動の周波数より0.07Hz低いとき、両者の位相が合致する周期は14.3sである。180度の位相差で回転方向が入れ替わるのであるから、それは、この周期の半分の7.2 sで起こる。Fig.4-10では回転方向の入れ替わりが打弦後約6sで起こっているが、これは垂直方向と水平方向の振動の初期位相に差があるからで、2度目以降の回転方向の入れ替わり間隔はほぼ7sとなって、Fig.4-6でわかるように2度目の回転方向の入れ替わりは約13sとなりこの結果に一致する。

この考察を確かめるために、x軸は40Hzのsin波、y軸は40.07Hzのsin波を実際のピアノ弦に似た減衰特性を持たせ、初期の位相をFig.4-12で示すような実際の弦振動とほぼ同じにし、そのリサージュ図形を描いた。その結果をFig.4-13に示す。

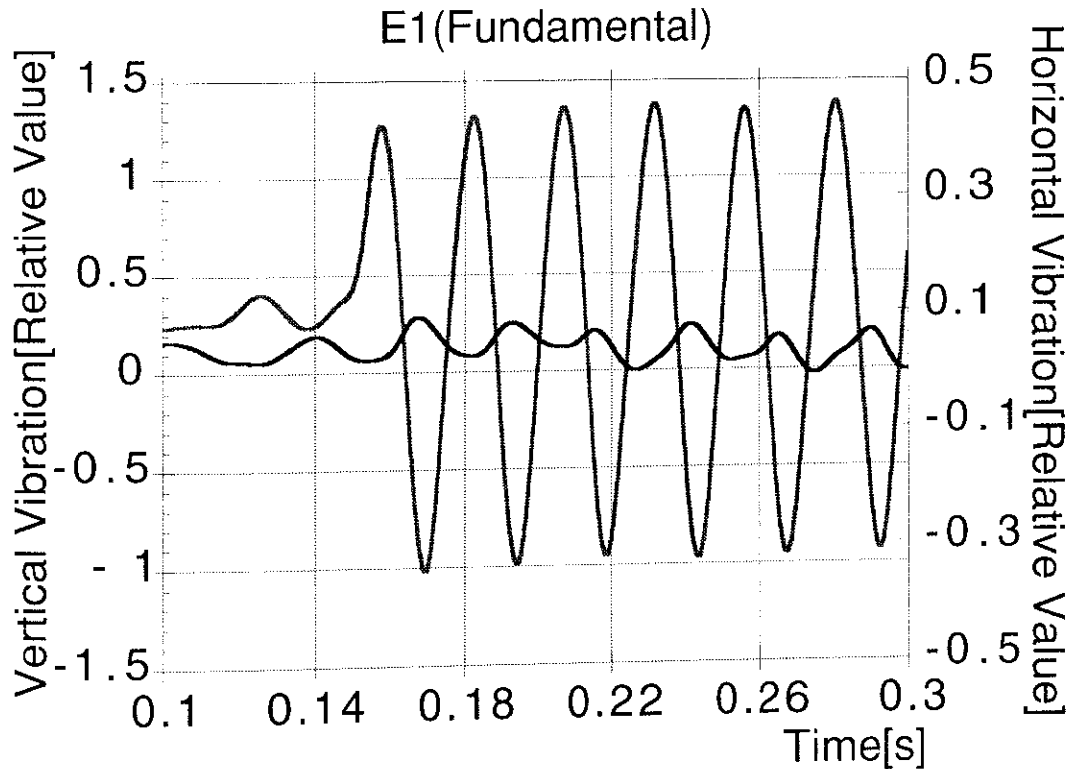


Fig.4-12: E1 の響板に垂直な振動と水平な振動の初期位相差

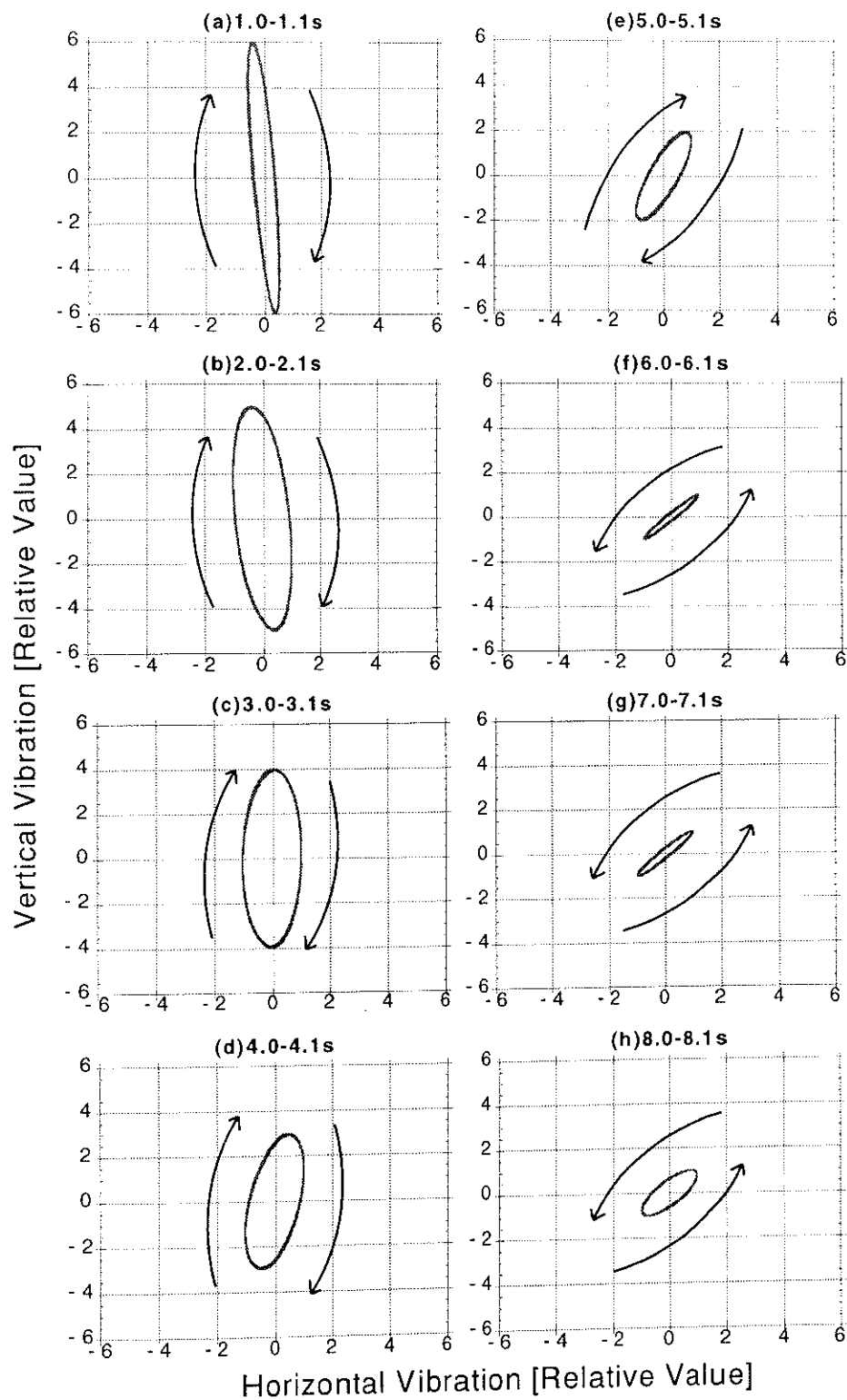


Fig.4-13: E1 のシミュレーションでのリサージュ図

この図はFig.4-10を再現しているように見える。よって、ピアノ弦が2次元振動を行う際このような軌跡を描くのは響板に垂直な振動と水平な振動の周期が約0.07Hz違うことが原因だといえる。

響板に垂直な振動の周波数が水平な振動の周波数よりも僅かに低くなることは、他の1本弦であるD#1（第7鍵、基本周波数：約39Hz、弦長：1285mm）を用いても確認した。このとき、垂直振動は水平振動より0.03Hz低かった（Fig.4-14）。Fig.4-15に実際に測定したD#1のリサージュ図、Fig.4-16にシミュレーションによるD#1のリサージュ図を示す。これらを見比べてもシミュレーションは良く実際の振動を再現しているように見える。よって垂直振動の周波数が水平振動の周波数よりも僅かに低くなっていることは1本弦では一般的に成り立つことのように思われる。

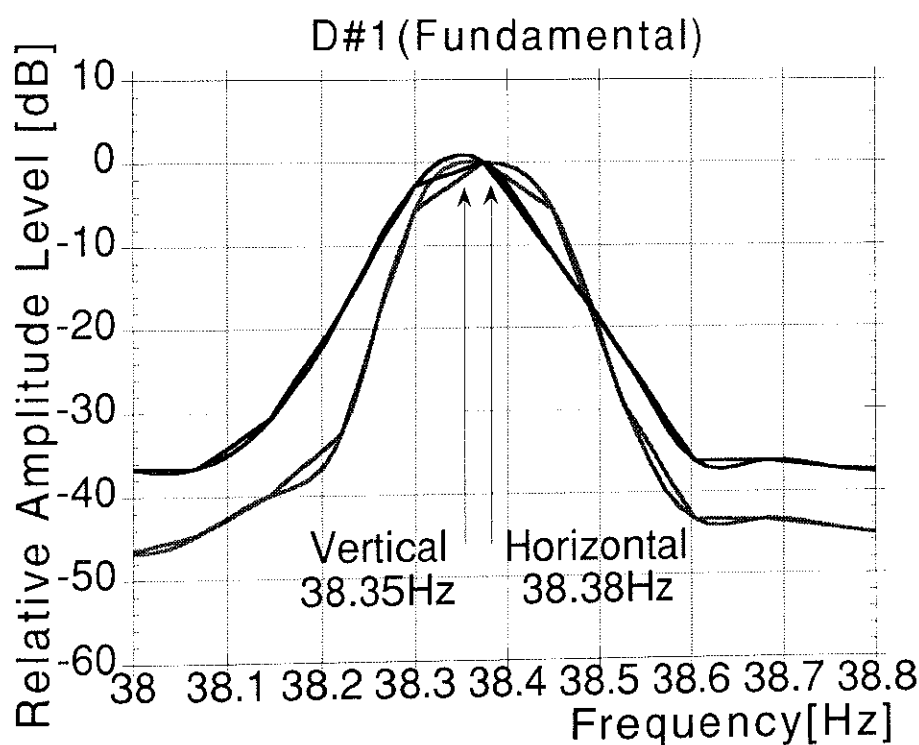


Fig.4-14: D#1 の基音付近のスペクトル

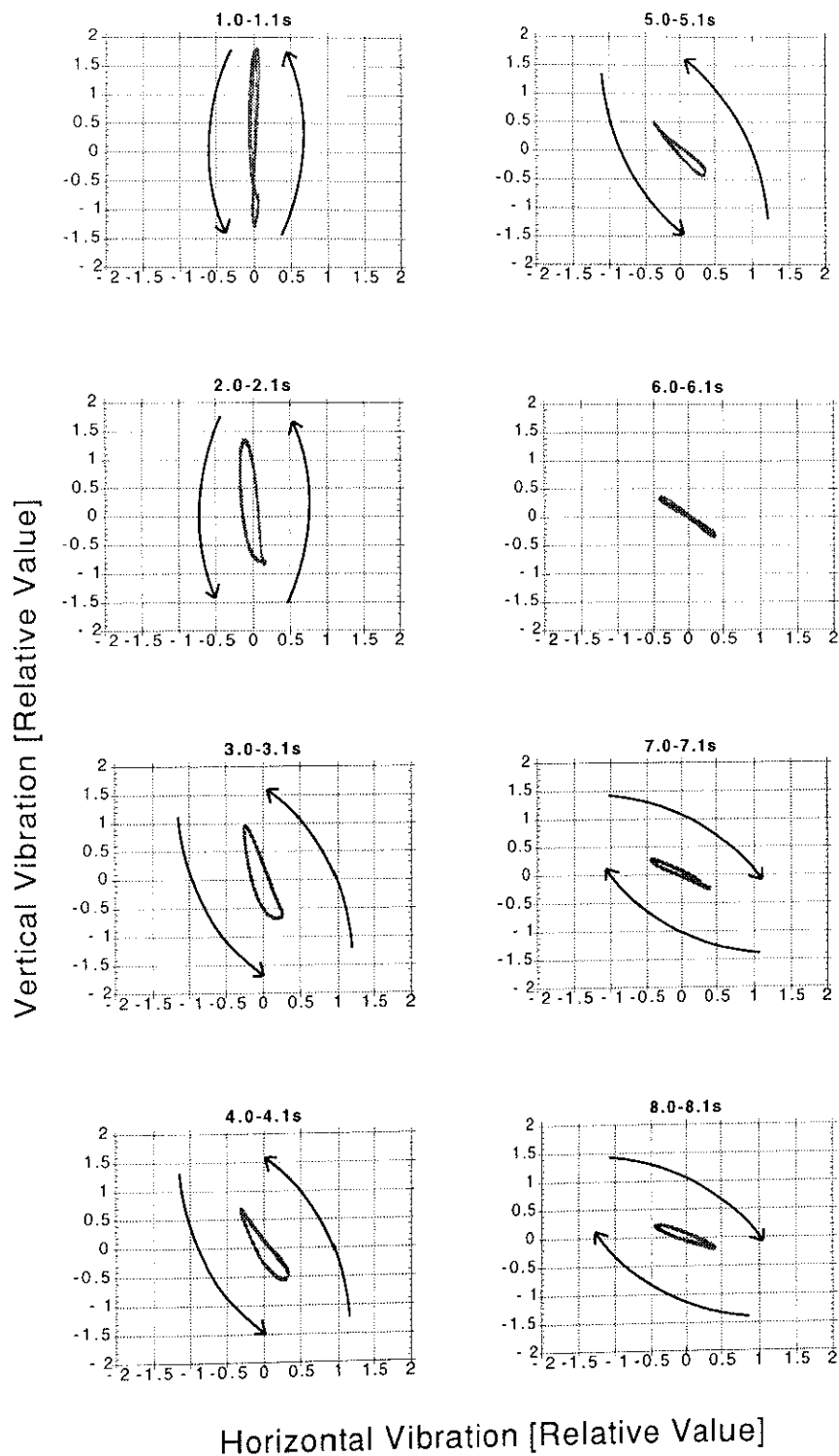


Fig.4-15: D#1 のリサーチ図（基本周波数）

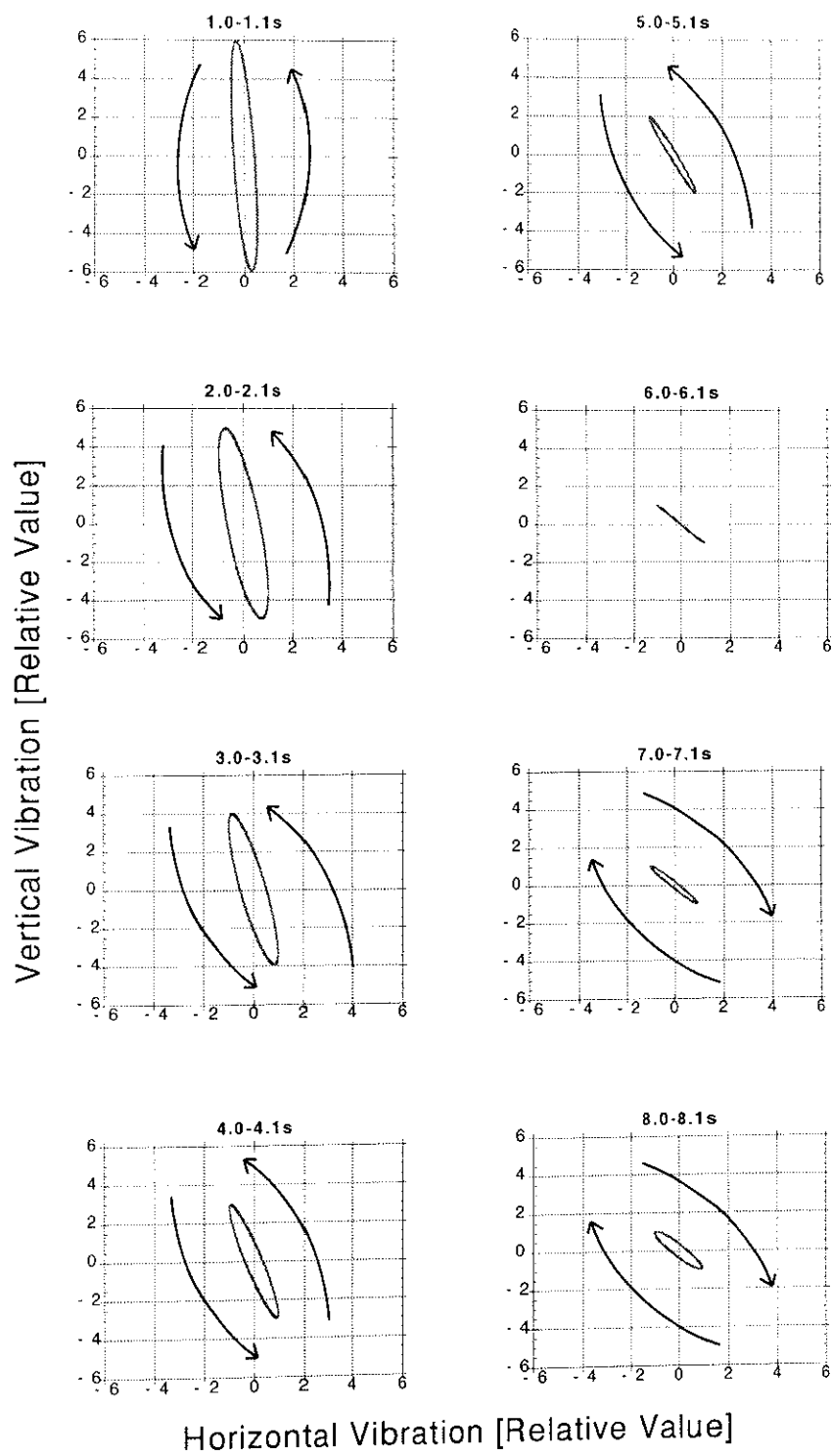


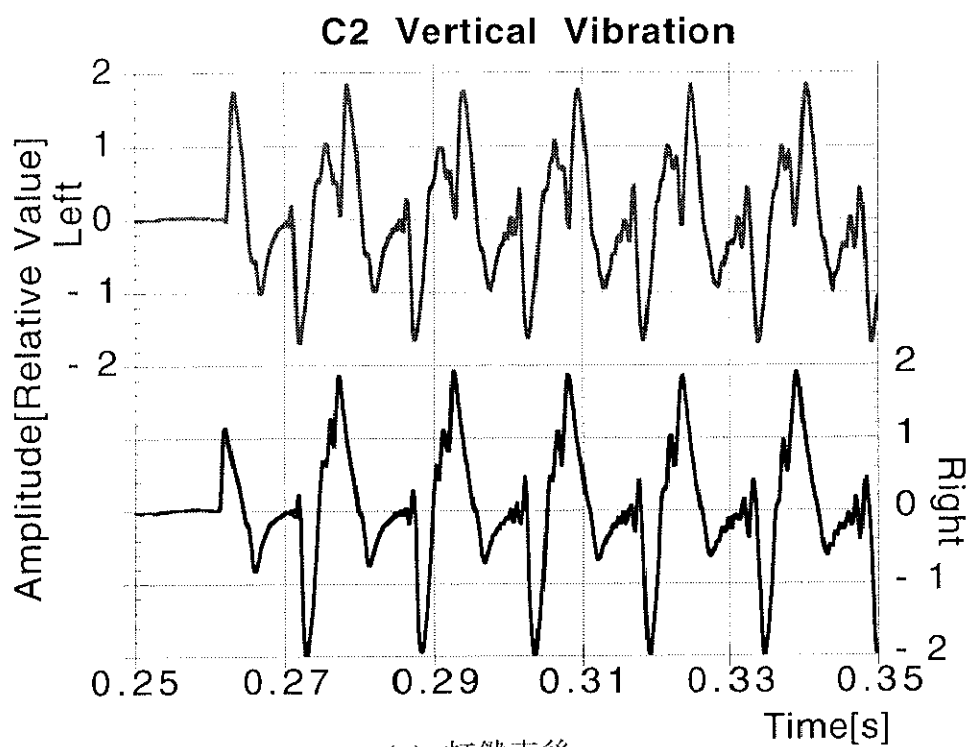
Fig.4-16: D#1 のシミュレーションでのリサージュ図

4.3.2 響板に垂直な振動の振動周波数が低くなる原因について

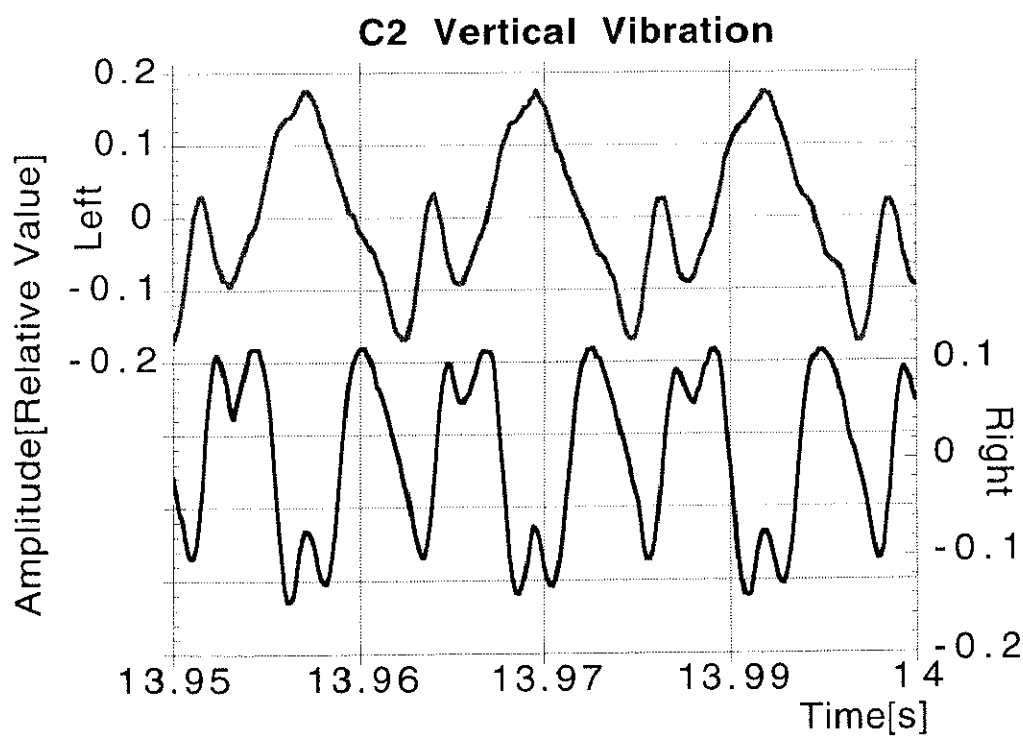
垂直、水平両方向の振動周波数の差異は駒における弦の境界条件の相違によると考えられる。ハンマーで叩かれた弦によって駒は垂直、水平の両方向に振動する。その大きさを正確に測定することは困難であるが、N.Giordanoらによれば、垂直振動の方が、水平振動よりもおよそ振幅で3倍ほど大きい¹⁷⁾。駒が揺れることによって、弦の等価的な固定端までの距離が伸び（等価的に弦の長さが長くなり）共振周波数が下がると考えられる。この効果は駒の揺れの大きい垂直振動の方に大きく現れ、水平振動よりも共振周波数が下がる原因になっている。

このことを確かめるため2本弦であるC2（第16鍵、基本周波数：約65Hz）を用いて次のような実験を行った。

ピアノの2本弦は打鍵直後は同時にハンマーによって弦が動き始めるので同相で動く。しかし、余韻の部分になると弦は逆相で動くことが知られている（Fig.4-17）。このことが2本弦での2段減衰の原因となっている¹⁸⁾。このことから、もし弦がブリッジを動かすことによって響板に垂直な振動の周波数が低くなると仮定すると、弦が打鍵直後同相で動いているときにはブリッジを大きく動かし響板に垂直な振動の周波数が低くなる。また、余韻での逆相で動いているときにはブリッジをほとんど動かさなくなり周波数は低くならないということが予想できる（Fig.4-18）。



(a): 打鍵直後



(b): 余韻

Fig.4-17: C2の響板に垂直な振動

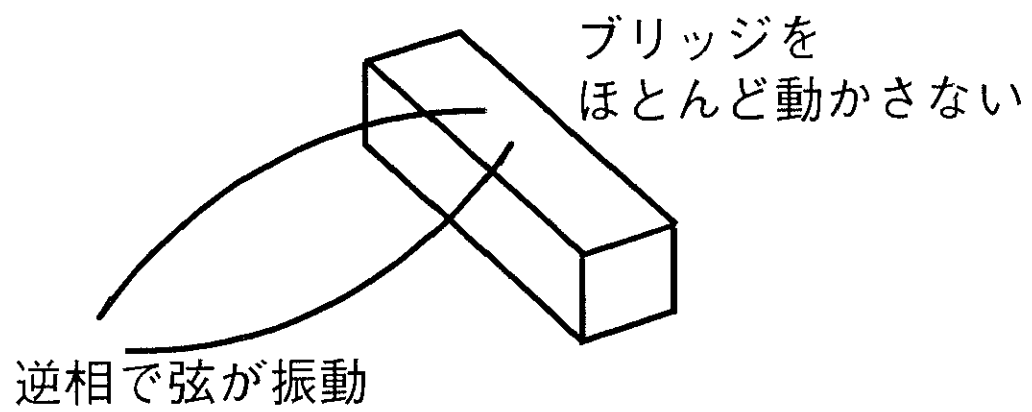
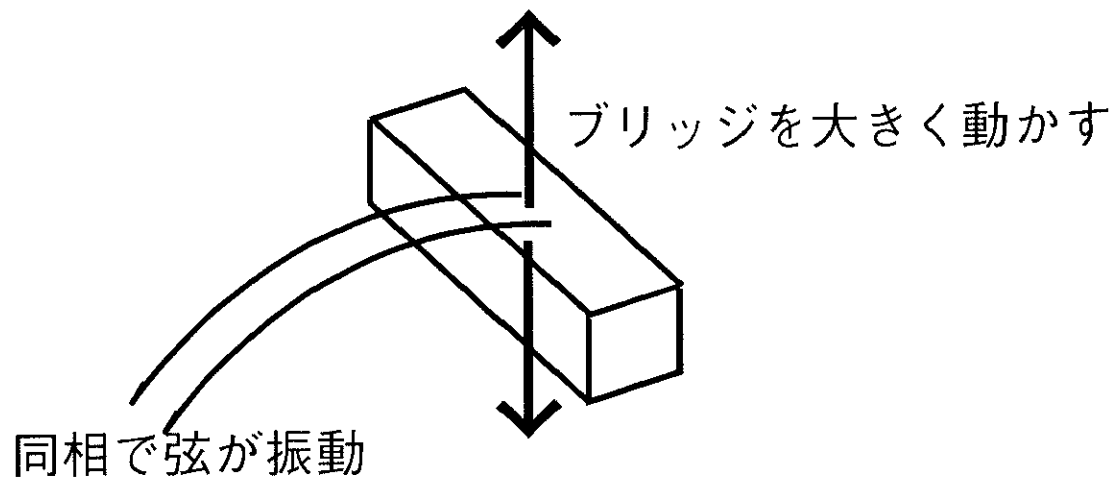


Fig.4-18: 実験の原理

始めに打鍵から余韻まで全体をFFTしたものを Fig.4-19 に示す。4.3.1 章と同じように、サンプリング周波数は5kHz、データ点数は 65536 点である。そしてピーク付近の3点を通る放物線で近似し、そのピークとなる周波数を求めた。

これを見ると右の弦も左の弦も両方とも基本周波数のあたりで山が2つあることがわかる。

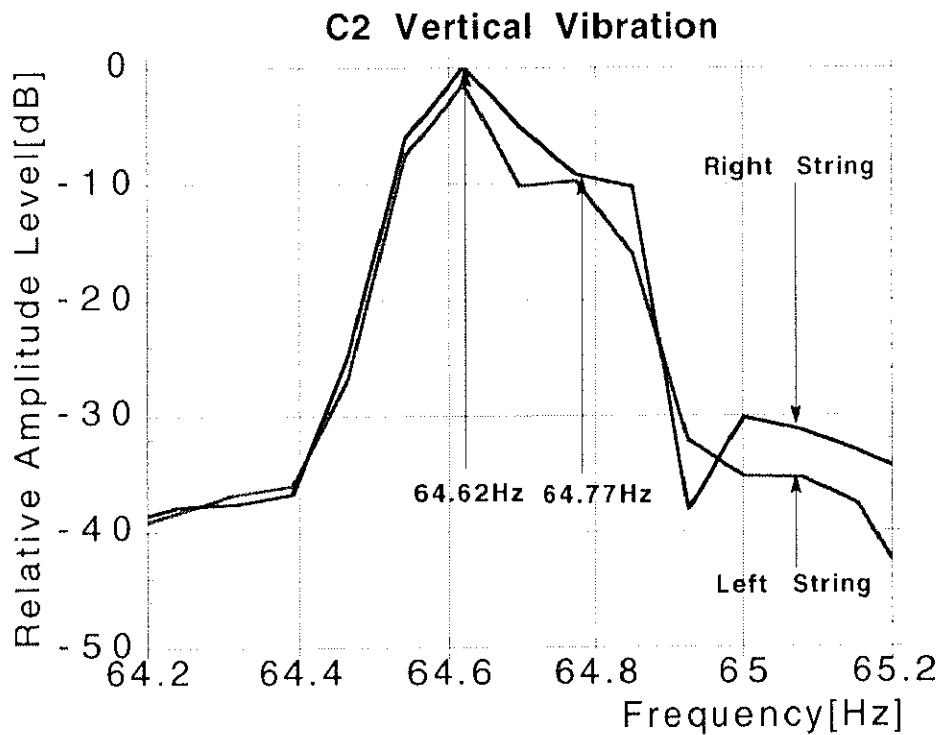


Fig.4-19: C2 の響板に垂直な振動の基本周波数付近のスペクトル
(余韻、打音すべてを含む)

次に、打音（前半32768点）と、余韻（後半32768点）を別々にFFTした。Fig.4-20に右弦のものを示す。

これを見ると打音の基本周波数は64.61Hzだが、余韻では64.66Hzと打音のほうが低くなっている。これは先にたてた予想にあっている。

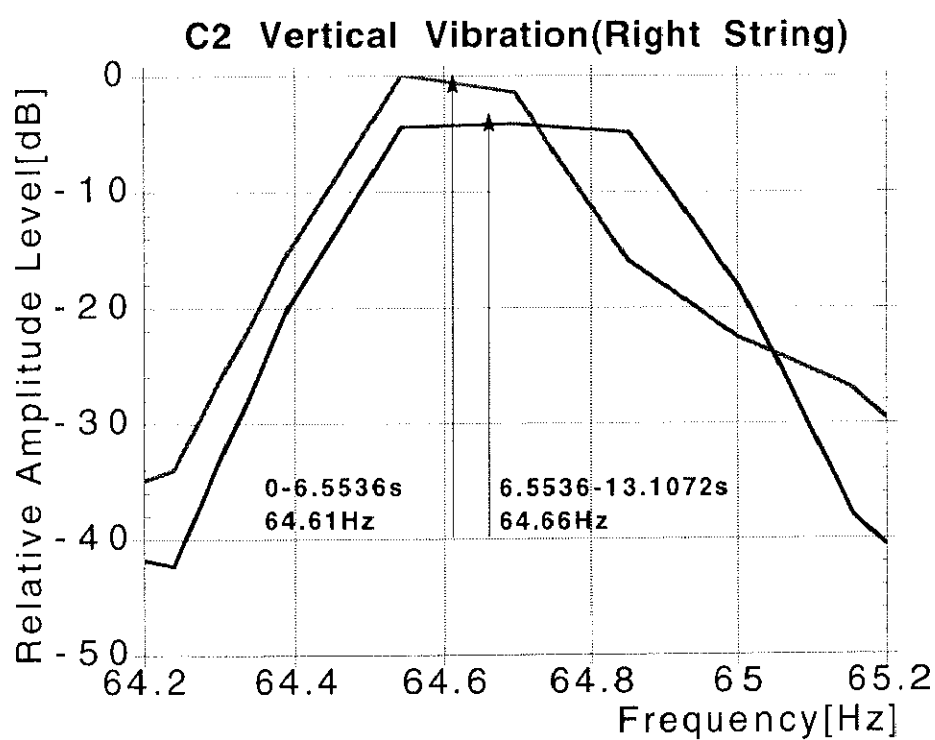


Fig.4-20: C2 の響板に垂直な振動の基本周波数付近のスペクトル
(右弦、余韻・打音別)

Fig.4-21 に左弦のものを示す。これを見ると打音の基本周波数は 64.64Hz だが、余韻では 64.69Hz と打音のほうが低くなっている。これも先にたてた予想にあっている。

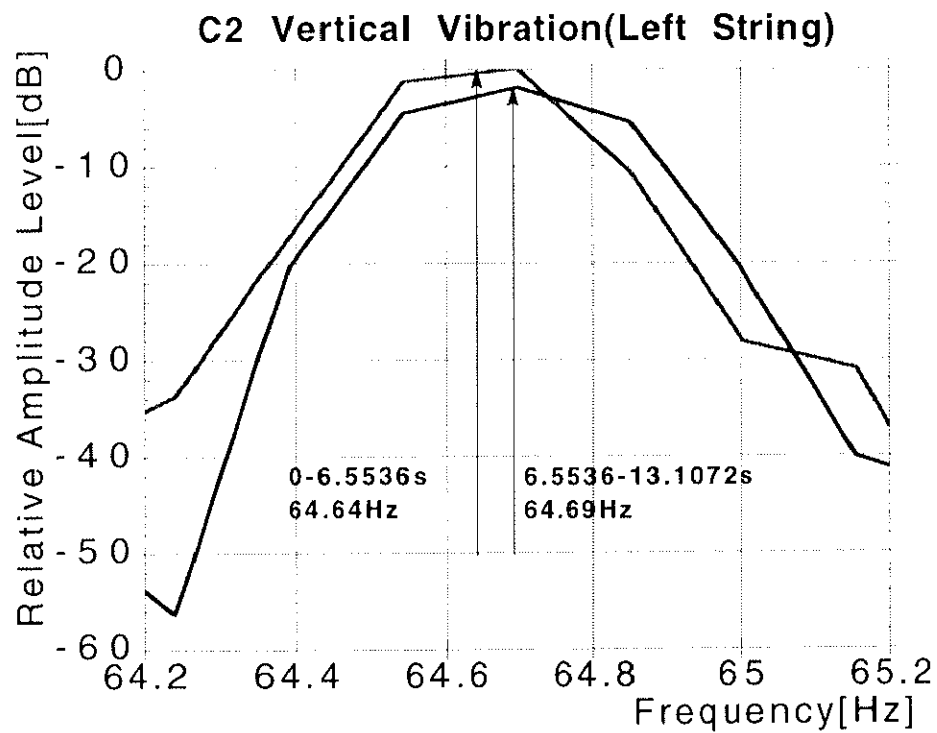


Fig.4-21: C2 の響板に垂直な振動の基本周波数付近のスペクトル
(左弦、余韻・打音別)

最後に響板に水平な振動を Fig.4-22 に示す。右弦、左弦の打音、余韻を一つのグラフに示してある。これを見ると、右弦、左弦の打音、余韻すべてがほぼ64.79Hzであり、周波数のずれは観測されない。これも先にたてた予想にあっている。

よってこの結果より響板に垂直な振動が響板に水平な振動より周波数が少し低くなる原因は響板に垂直な振動はブリッジを動かすため、弦の実効弦長が少し伸びるためといえる。

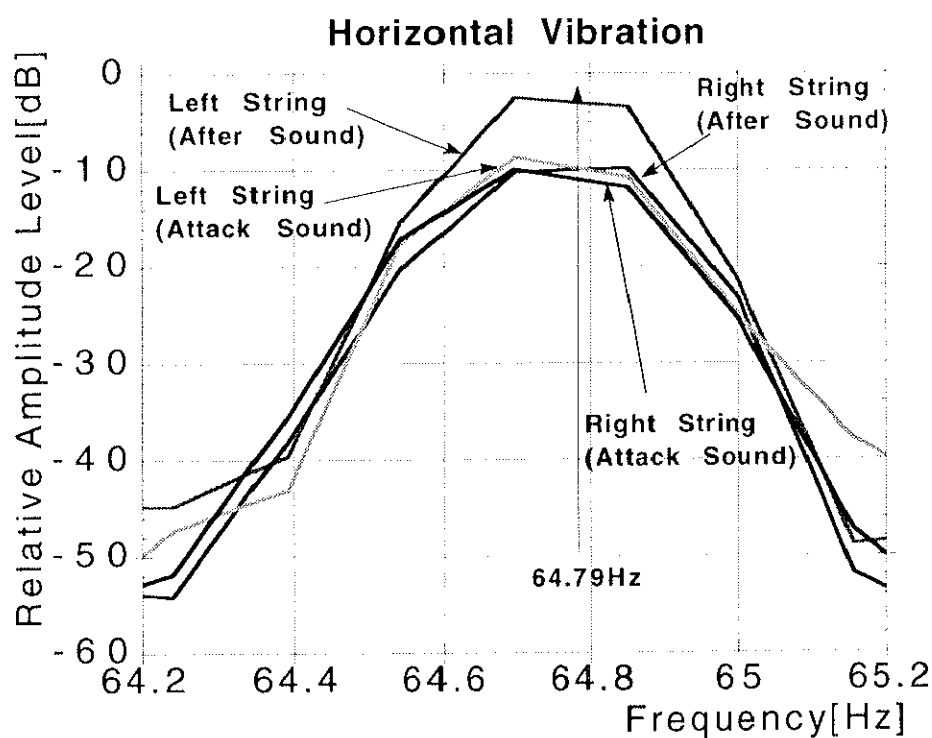


Fig.4-21: C2 の響板に水平な振動の基本周波数付近のスペクトル
(右弦・左弦、余韻・打音別)

4.3.3 弦振動の振幅とブリッジの動き

4.3.2章で響板に垂直な振動のブリッジでの境界条件が響板に平行な振動と異なるため垂直な振動の周波数が少し下がることがわかった。本章では、その境界条件の違いがブリッジを響板に垂直な振動が動かすために起こるというモデルを考え、実際に弦がどの位の振幅で振動し、実効弦長がどの位伸び、ブリッジがどの位動いているかを測定する。

本実験では、3.3.4章で示した測定方法を用い、弦振動の振幅を測定する。この方法によって得たE1の響板に垂直、水平な振動をFig.4-22、Fig.4-23に示す。

今回の実験では弦振動測定装置はピアノ弦のハンマー側の端点より530mmのところに設置した。これらを見ると響板に垂直な振動の最大変位は約0.9～1.0mmであることがわかった。

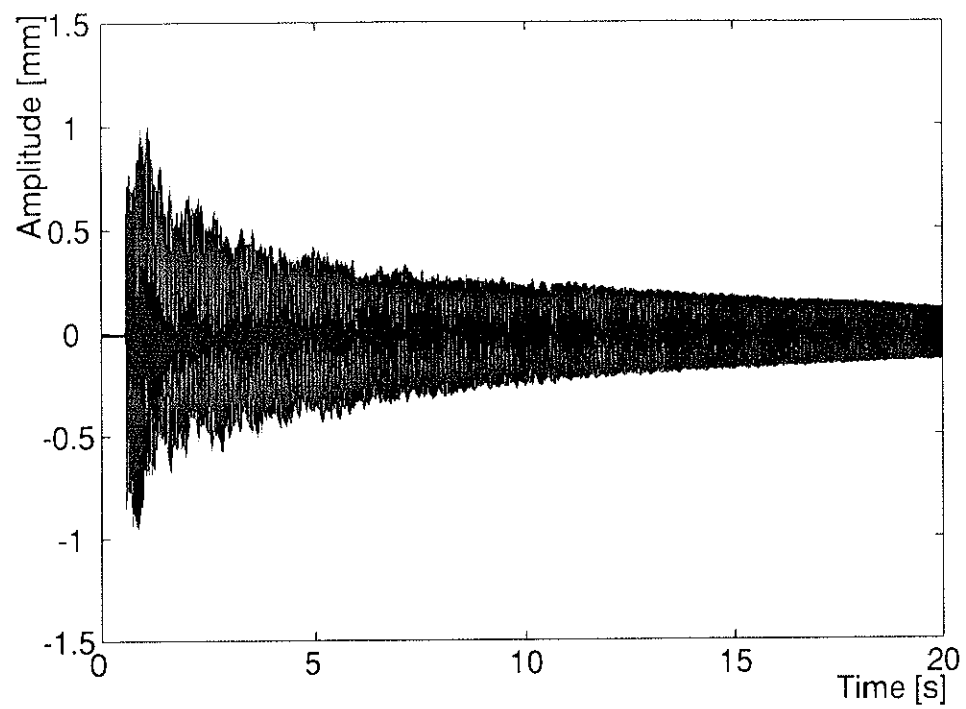


Fig.4-22: E1 の響板に垂直な振動（変位の単位は mm）

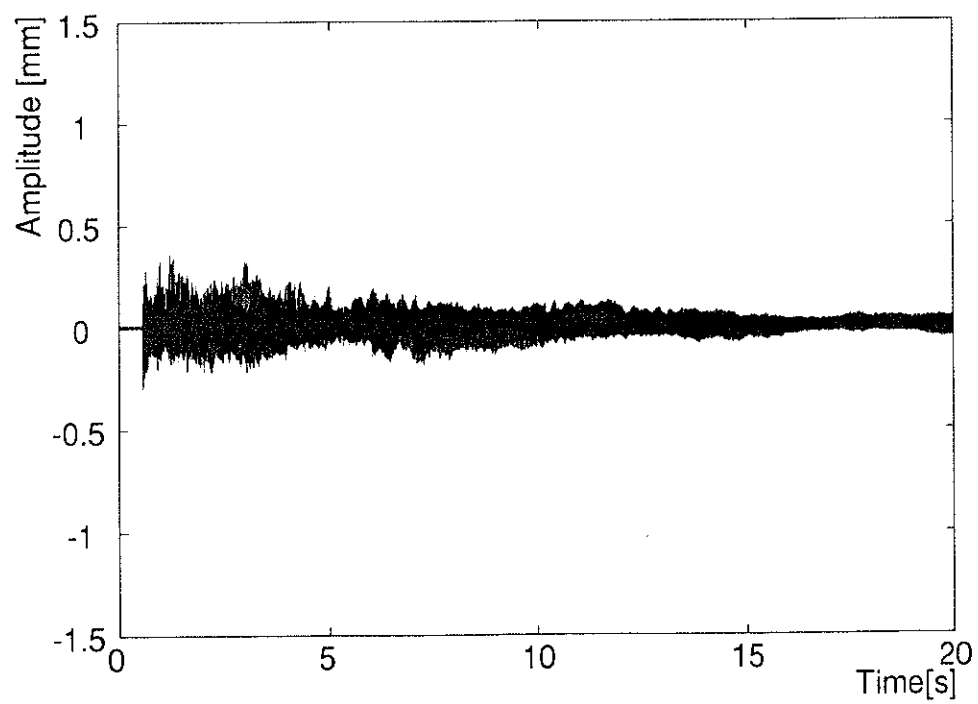


Fig.4-23: E1 の響板に水平な振動（変位の単位は mm）

次に実際の弦長と前説で求めた固有振動数を元に Fig.4-24 に示す値を求める。
(Appendix2 参照)

その結果、

実際の弦長 1270mm

実効弦長 1272mm

弦振動を測定した位置 弦端より 530mm

実際に測定した弦の振幅 0.9m

弦の最大振幅 0.93m

ブリッジの変位 $4.6 \times 10^{-3}\text{mm}=4.6 \mu\text{m}$

となった。

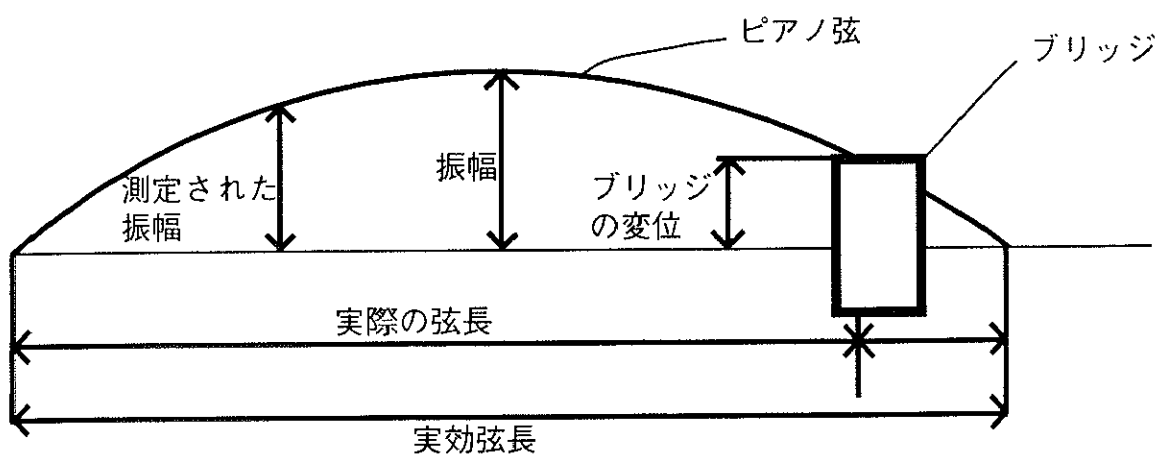
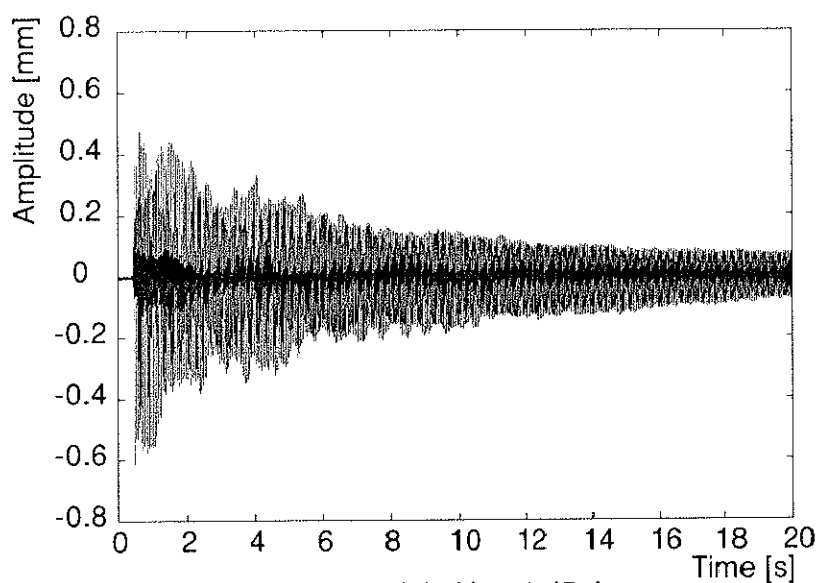


Fig.4-24: 実験で求める値

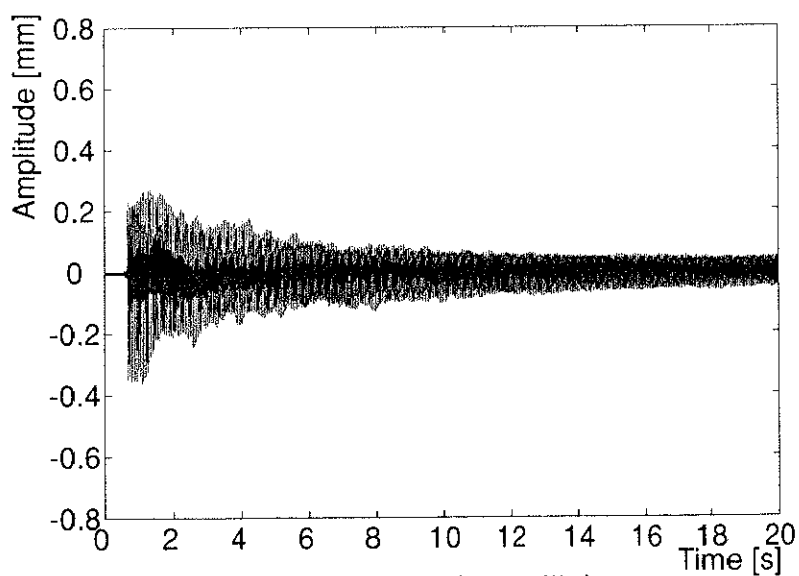
4.3.4 響板に垂直な弦振動における固有周波数変化の振幅依存性

これまで見てきたように、響板に垂直な振動はブリッジでの境界条件が響板に平行な振動と異なることにより、固有周波数変化を引き起こす。本節では、その周波数変化は響板に垂直な振動の大小により周波数変化の量も変わるのか、ということについて考察した。

実験はFig.4-25に示した強く打鍵したときの弦振動、弱く打鍵したときの弦振動の結果を用い、その固有周波数を比較することによって行った。



(a): 強く打鍵した場合

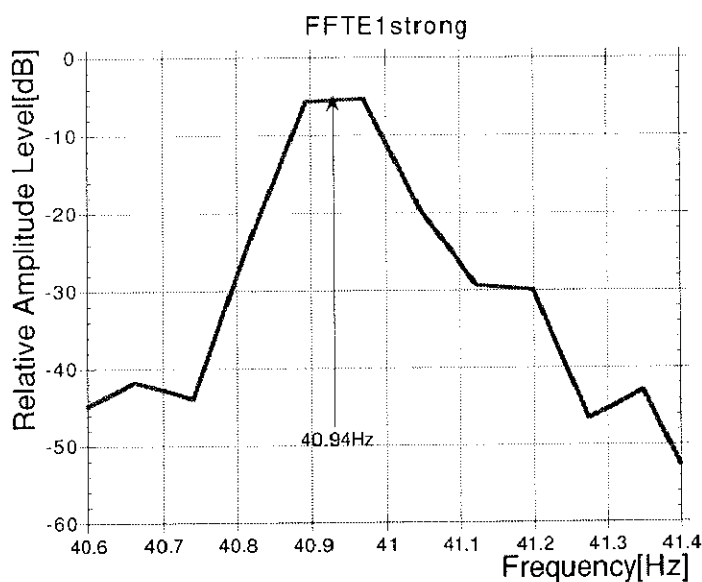


(b): 弱く打鍵した場合

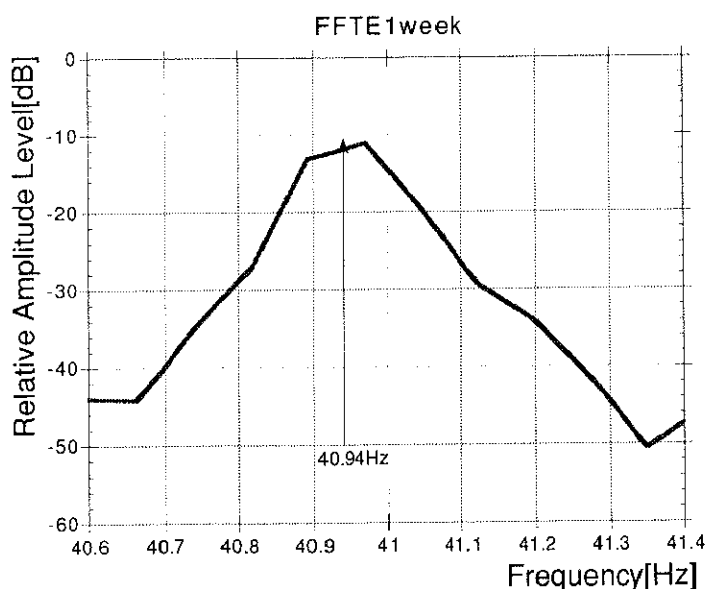
Fig.4-25: E1 の響板に垂直な振動

Fig.4-26は、それぞれをFFTしたもの固有周波数の部分を示したものである。

これを見ると、強く打鍵したもの、弱く打鍵したものの固有振動数はほとんど変化していないことがわかる。また、以前示したE1の固有振動数は40.77Hzであったが今回それとは異なっている。それは前回の実験と、今回の実験の間にピアノの調律を行っているのが原因だと思われる。よって、固有振動数の変化は振幅に依存しないものだと考えられる。



(a): 強く打鍵した場合



(b): 弱く打鍵した場合

Fig.4-26: E1の響板に垂直な振動のスペクトル
(基音付近)

4.4 弦振動とピアノ音の減衰特性について

Fig.4-3、Fig.4-4を見ると、ピアノ音や弦の垂直振動は打弦された後、指数関数的に減衰する。ピアノの減衰の仕方は2段減衰と言われている⁷⁹⁾。すなわち、打音と余韻とは異なる減衰定数をもつ。

2段減衰の理由として、2本弦、3本弦では弦間のカプリングと考えられている。I.Nakamuraは2本弦、3本弦の振動を等価回路を用いて解析し、弦のミスチューニングおよび弦と響板のインピーダンス比の関係について明らかにした。これによると、ミスチューニングの度合いがインピーダンス比よりも小さいと弦間のカプリングが強くなり、2段減衰が生じる。ミスチューニングの度合いがインピーダンス比よりも大きいと、ビートタイプの減衰になる¹¹⁾。

一方、1本弦に関しては垂直、水平の両方向振動のカプリングが原因と言われている⁷⁹⁾が、詳しいことは分かっていない。1本弦の2段減衰の内容を知るために、ピアノ音、弦の垂直振動および水平振動の振幅のレベルを対数表示して、それぞれ、Fig.4-27、Fig.4-28、Fig.4-29に示す。

ピアノ音の最大値を0dBとし対数表示したものをFig.4-27(a)に示す。また、それを調和分析し、基本波、2次、3次、4次、5次高調波をそれぞれ、同図(b)、(c)、(d)、(e)、(f)に示す。ここで、-50dB程度より低い部分で白く抜けているところがあるが、それは直流成分やノイズが混入していることが原因である。図(a)で、6.5s付近で、減衰の勾配が変わり2段減衰が認められる。各調和成分についていうと、基本波から4次高調波までは比較的直線的な減衰をしている。しかし、5次高調波はビートタイプの減衰と言える。

同様にFig.4-28に弦の垂直振動の対数表示を示す。同図(a)全体振動、(b)基本波、(c)2次高調波は直線的に減衰しているが、(d)3次高調波、(e)4次高調波、(f)5次高調波はどちらかと言えば、ビートタイプの減衰特性を示している。これらの調波成分による減衰の仕方の相違は減衰機構の周波数特性を反映させたものであり、響板の周波数特性¹⁸⁾が大きく寄与していると考えている。

Fig.4-29(a)に示した弦の水平振動は、これまでのFig.4-27(a)、Fig.4-28(a)とは全く様相を異にする。すなわち、この場合は観測時間内ではほとんど減衰しない。同図(b)の基本波についても同様である。同図(b)-(f)に示した2次以上の高調波の減衰特性は複雑である。ビートタイプであって、時々零点を生じるが、振幅はすぐに回復し、時間的にほとんど減衰していくようには見えない。駒（響板）との間でエネルギーの授受が行われるのが見て取れる。

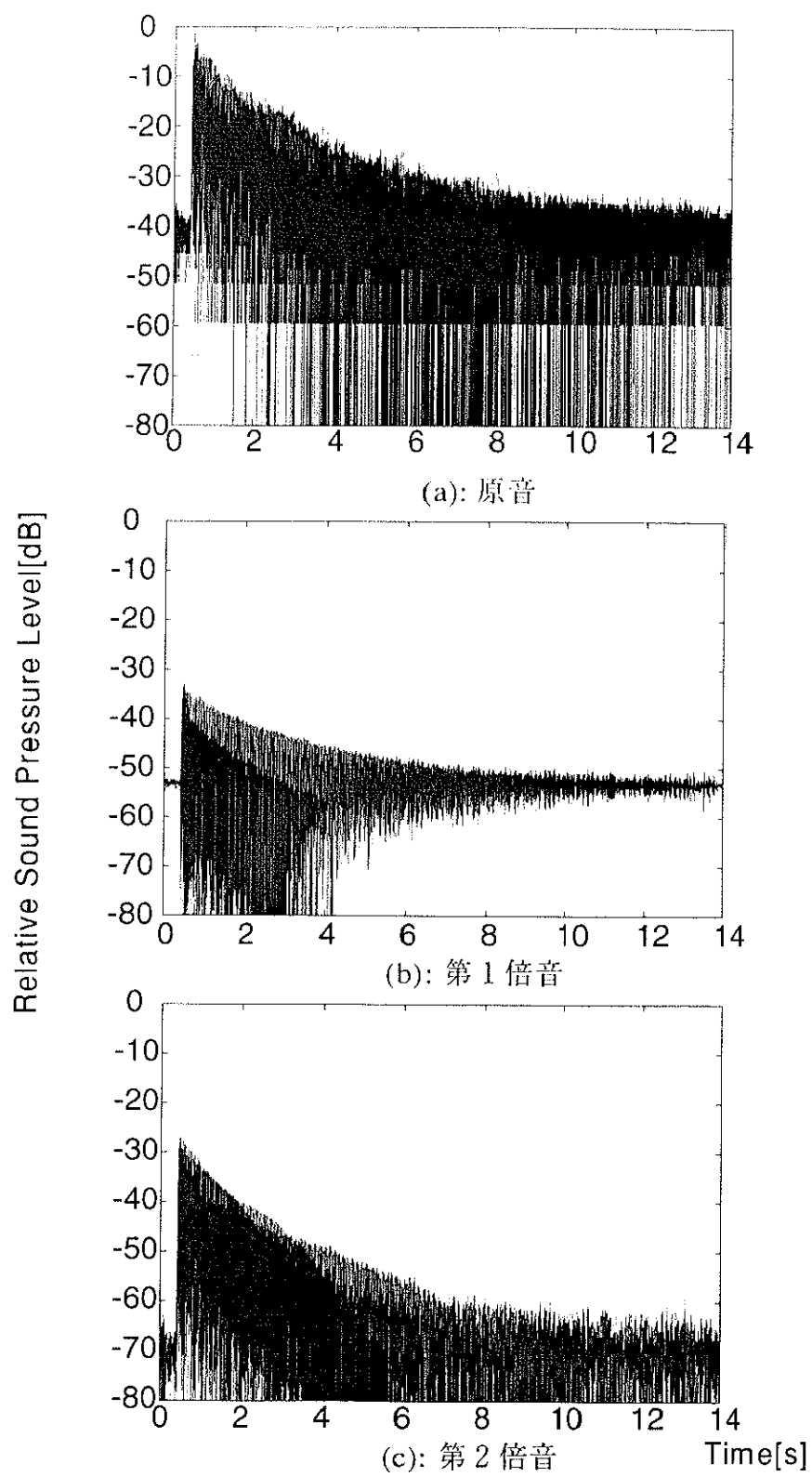


Fig.4-27: ピアノ音の対数振幅レベル

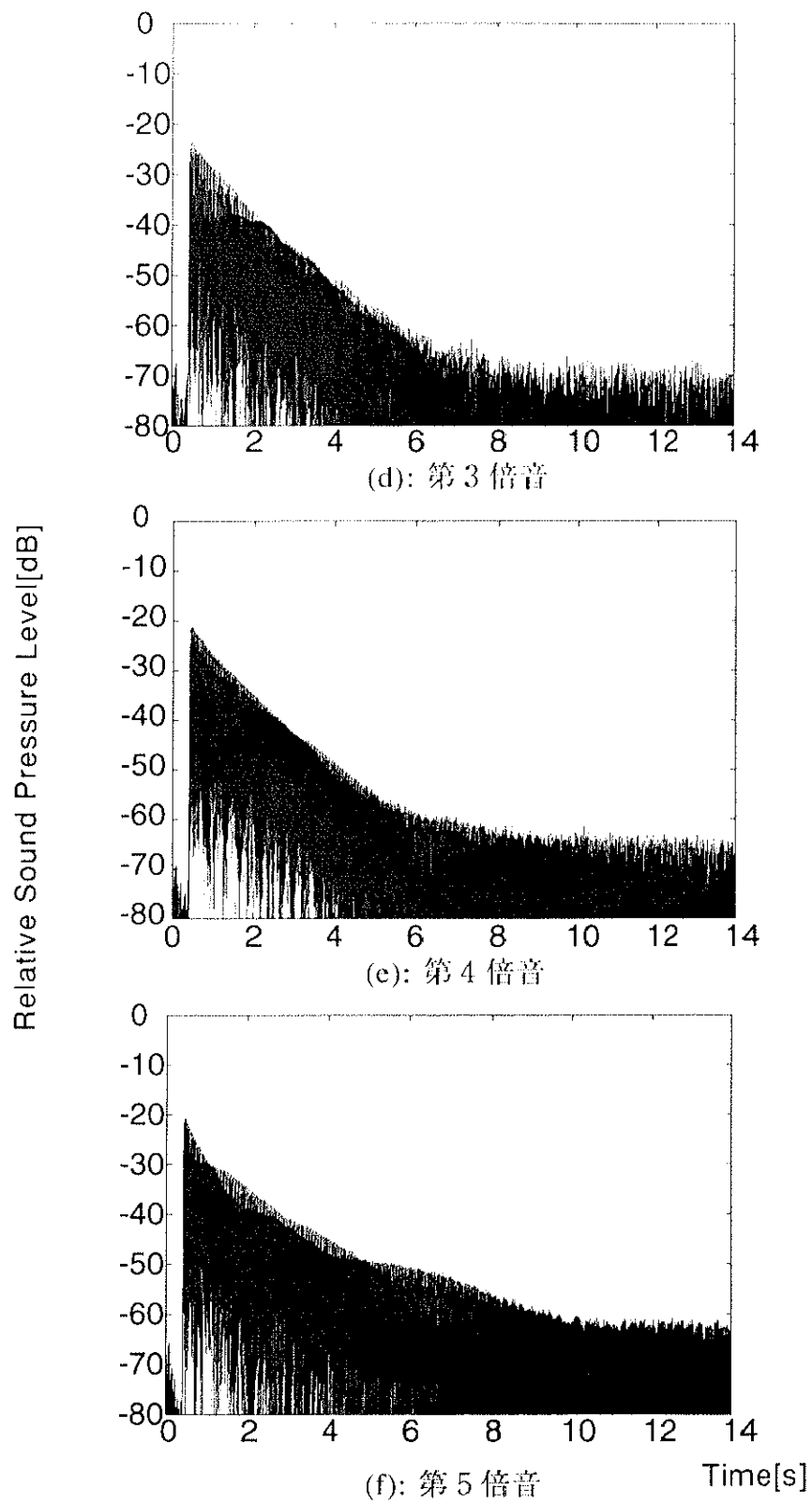
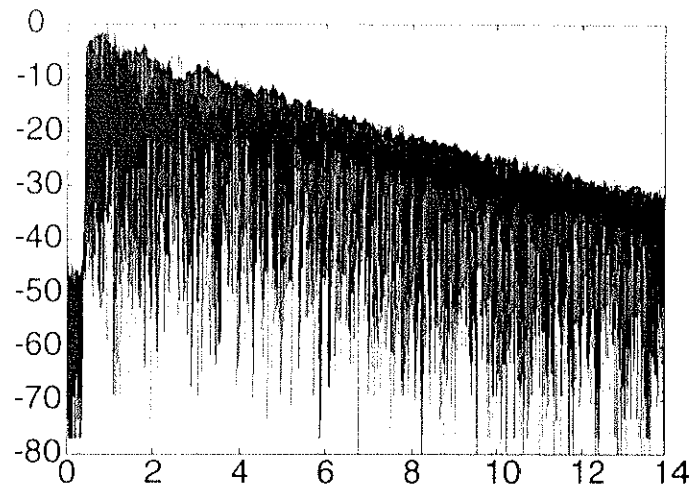


Fig.4-27: ピアノ音の対数振幅レベル（続き）



(a): 原音

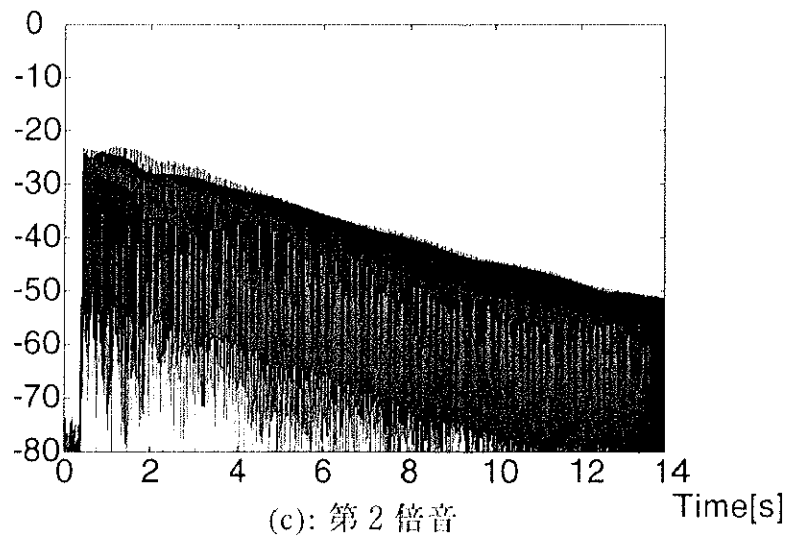
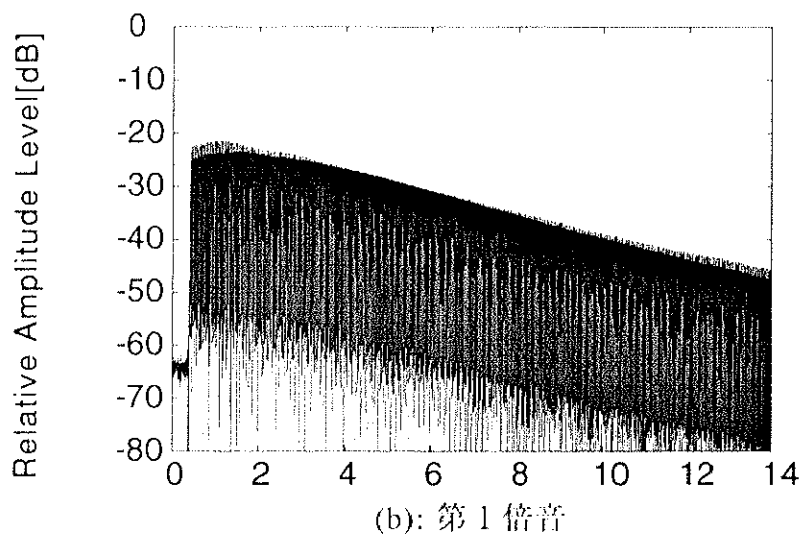


Fig.4-28: 響板に垂直な振動の対数振幅レベル

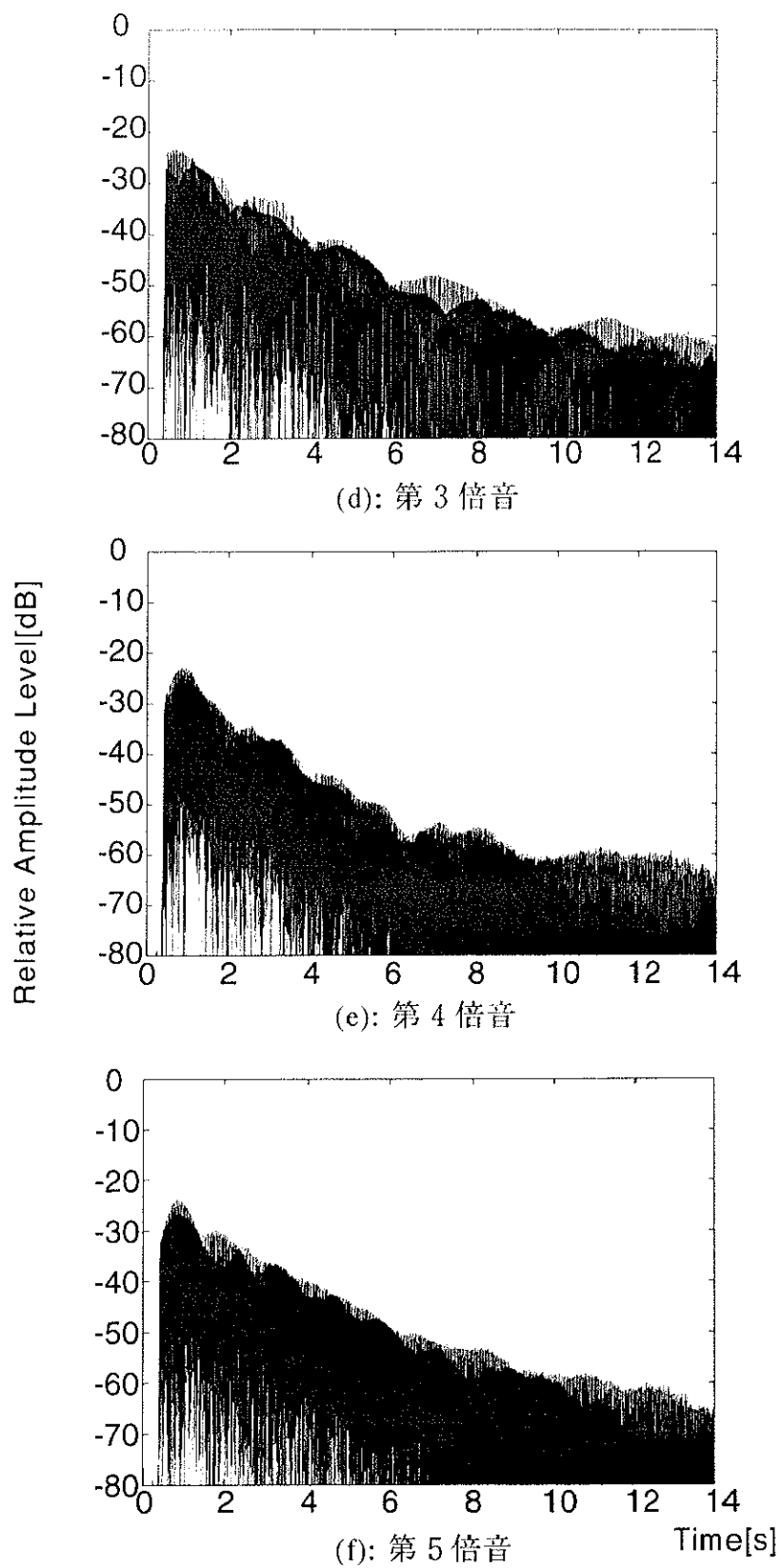
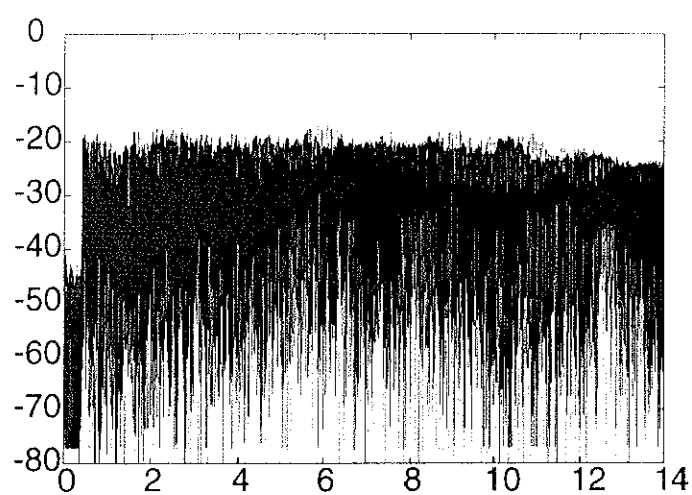
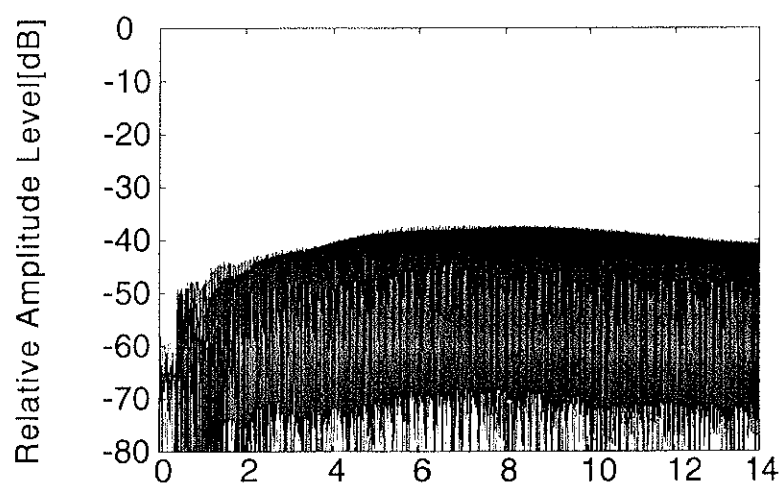


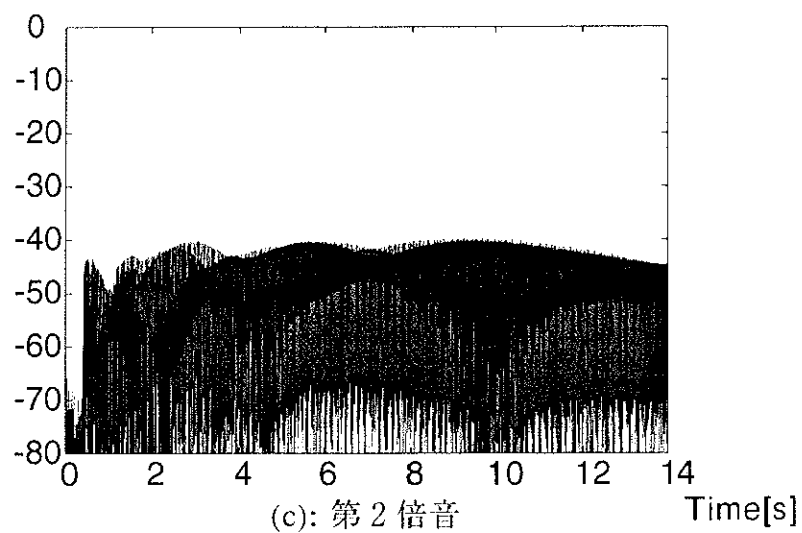
Fig.4-28: 響板に垂直な振動の対数振幅レベル (続き)



(a): 原音



(b): 第 1 倍音



(c): 第 2 倍音

Fig.4-29: 響板に水平な振動の対数振幅レベル

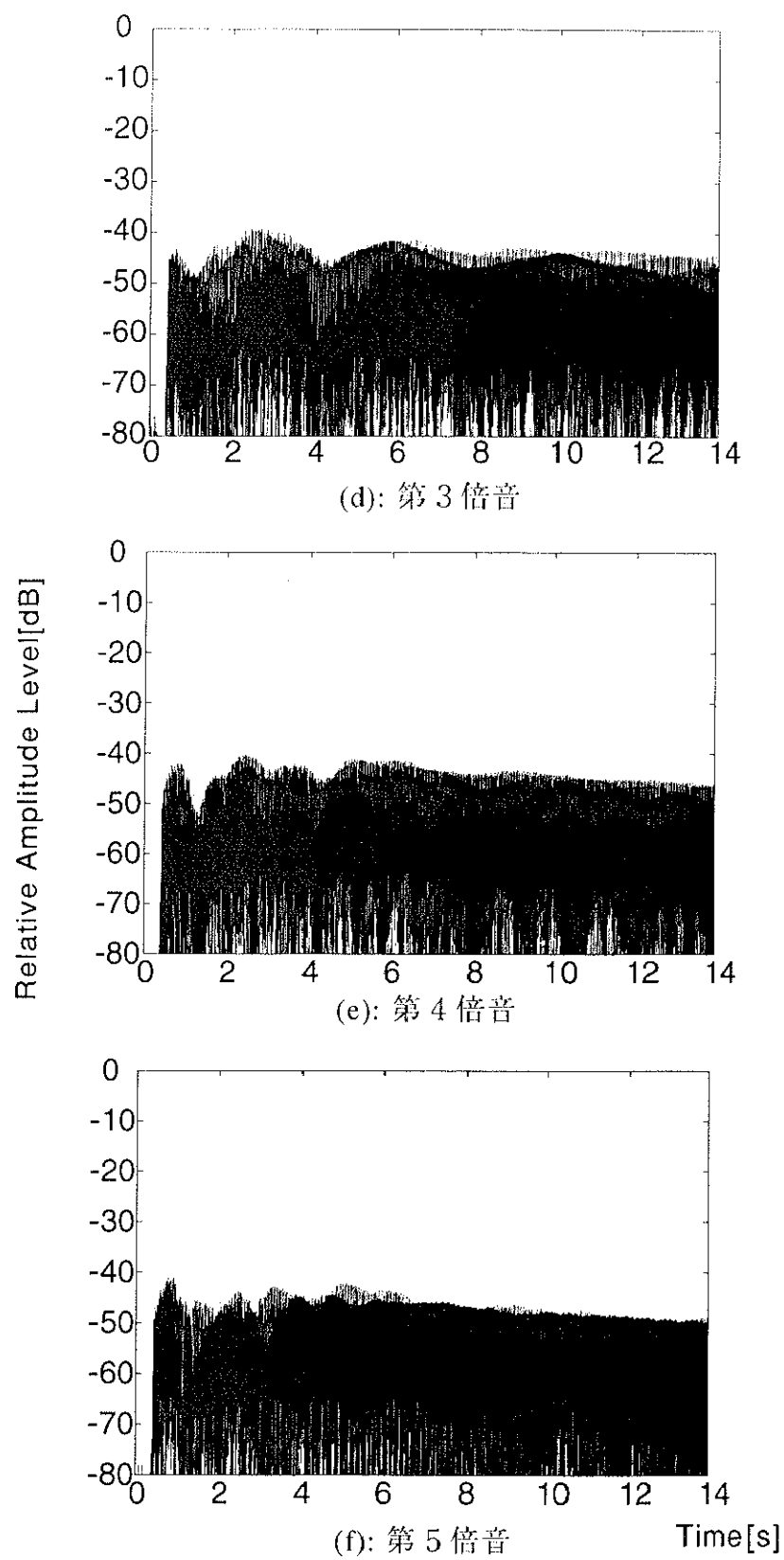


Fig.4-29: 響板に水平な振動の対数振幅レベルの対数振幅レベル（続き）

4.5 単弦と複弦の減衰特性について

4.4章の研究で、ピアノ音の減衰の様子とピアノ弦振動の減衰の様子が明らかに異なっているのがわかった。本章ではピアノ1本弦と2本弦の減衰の仕方に違いがあるのかを調べた。

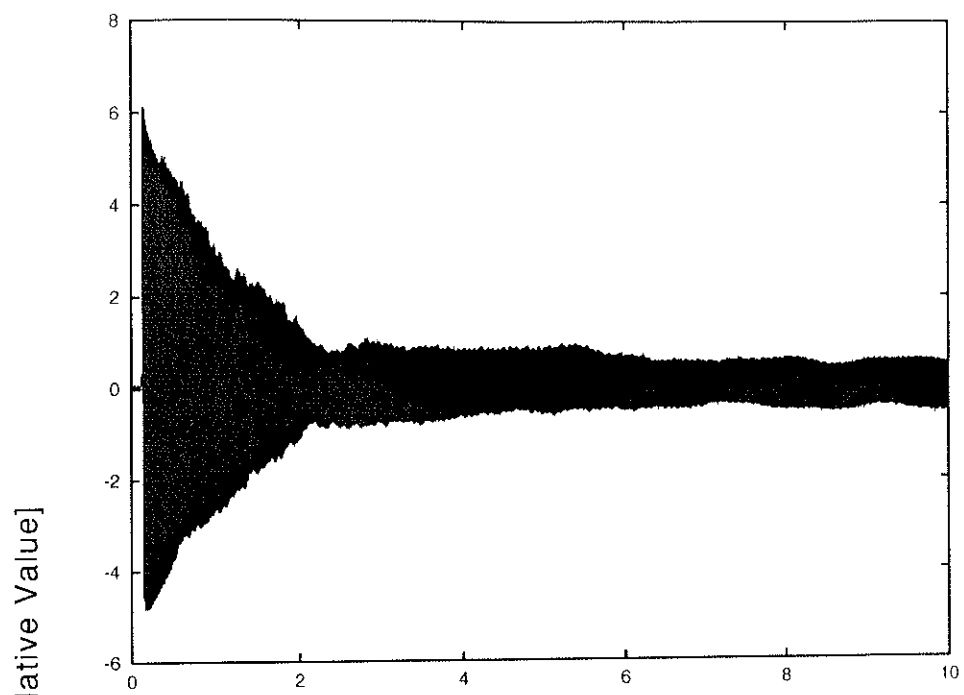
実験は、E2（2本弦）の響板に垂直、水平な振動を、弦2本とも振動させたとき、2本弦のうち右側だけを振動させたとき、の2種類測定した。そして、1本弦、2本弦で減衰がどのようになっているかを観察した。

Fig.4-30は、複弦であるE2のうち右側の弦における響板に垂直な振動と響板に水平な振動である。これを見ると、響板に垂直な振動は約2sまでに急激に減衰し余韻に移ることがわかった。また、響板に水平な振動は急激な減衰が終わる周辺で響板に垂直な振動と同じ位の振幅となり余韻を形成していることがわかった。

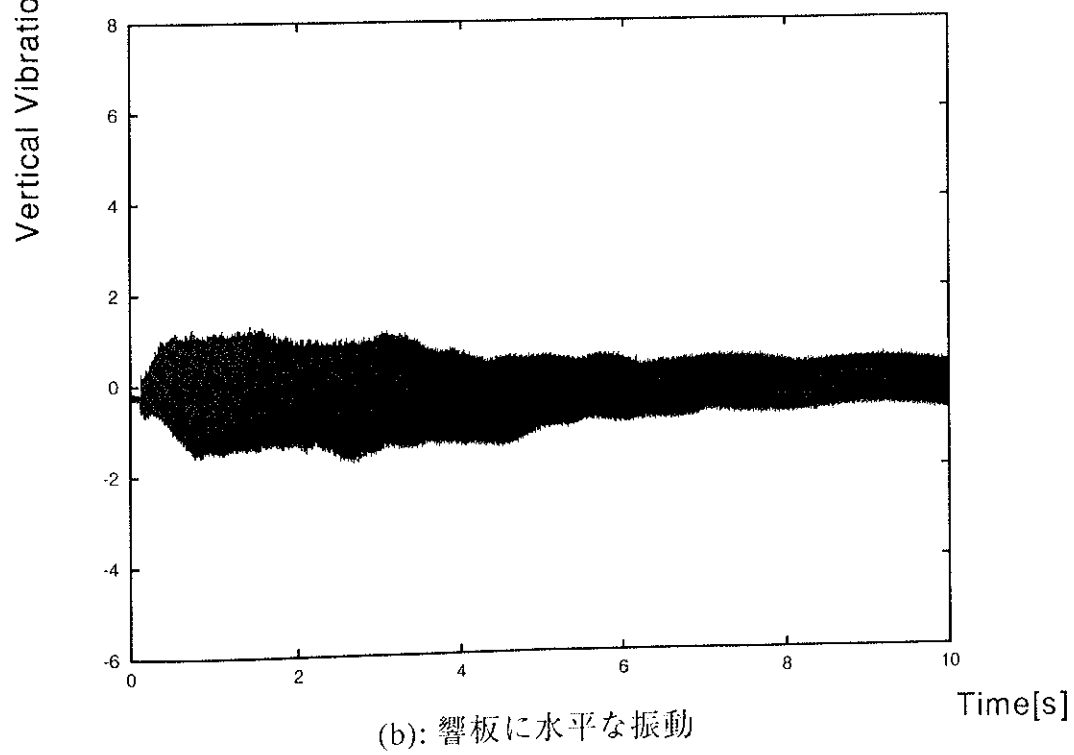
次は同じE2だが、複弦のうち左側の弦を振動しないように止めておき、右側の弦だけ振動させて測定した(Fig.4-31)。響板に垂直な振動だが、急激な減衰が終わるのが約3.5sになった。また、響板に水平な振動が先程と比べてたいへん大きく現われた。このことは、2本弦より1本弦の方が響板に水平な振動の影響を大きく受けることを表わしている。

複数弦の影響として2段減衰が起きるメカニズムは、初め個々の弦が同位相で加算されて作用するため減衰が大きく、時間がたつと、同音弦のミスチューニングによって弦の位相が乱れてくるので減衰が緩やかになる。ということである¹⁹⁾。

1本弦の場合も響板に垂直な振動と水平な振動が弦が2本存在しているかのよう
にふるまい、2段減衰を起こしている可能性があると思われる。

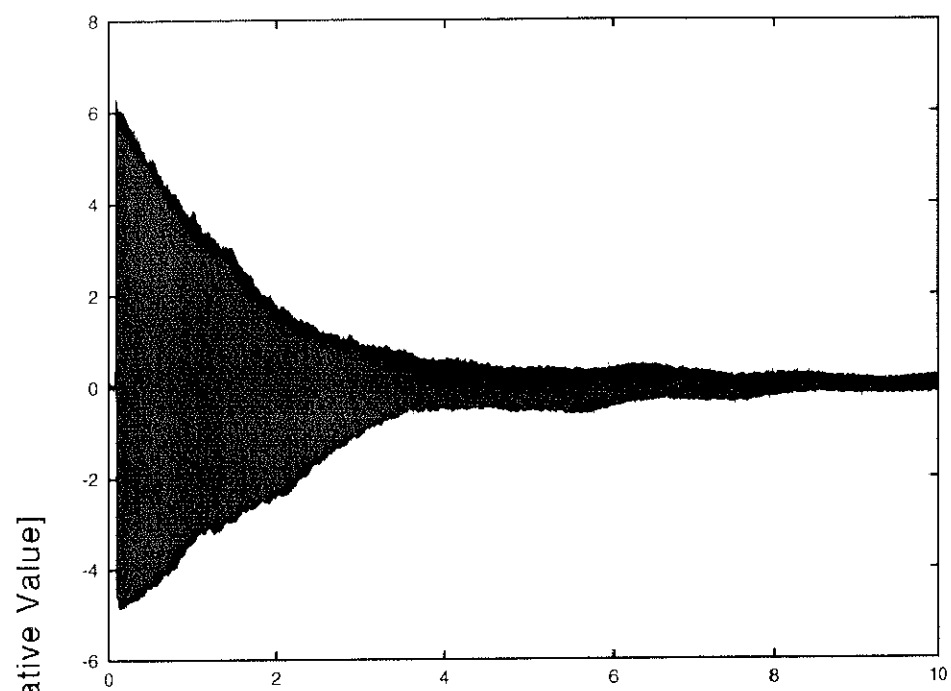


(a): 響板に垂直な振動

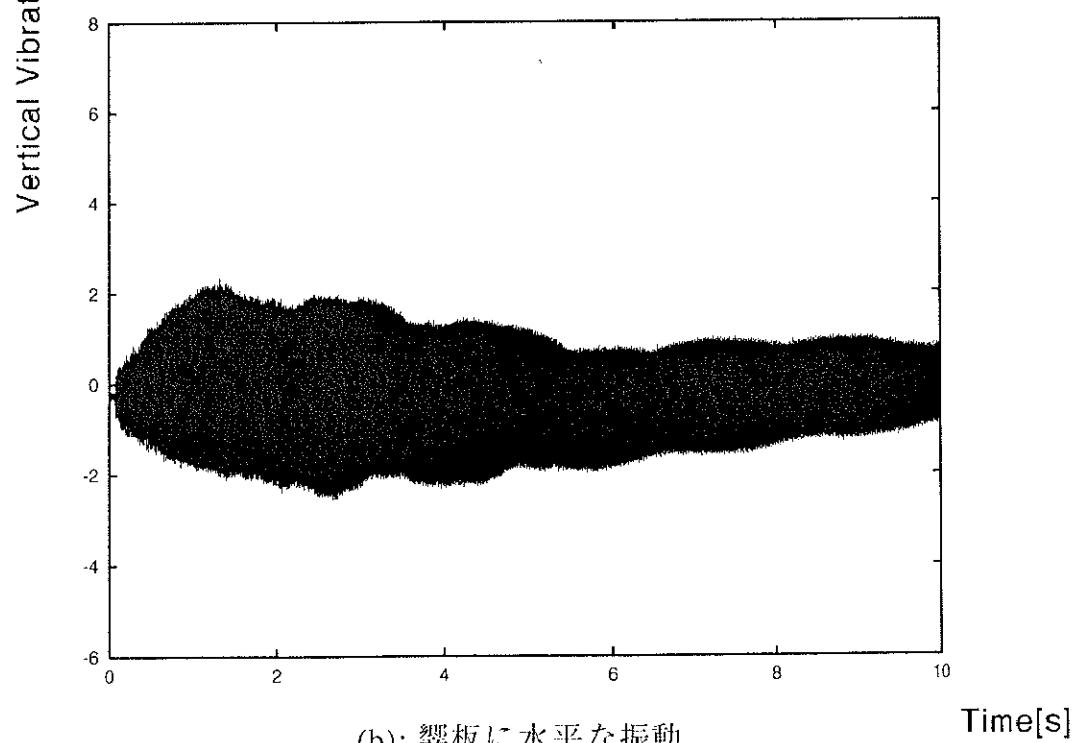


(b): 響板に水平な振動

Fig.4-30: E2 の振動（二本弦）



(a): 響板に垂直な振動



(b): 響板に水平な振動

Fig.4-31: E2 の振動（二本弦の一方を振動しないよう止めて一本弦にしたもの）

4.6 ピアノ弦振動とブリッジの振動について

今まで行ってきた研究でブリッジの振動がピアノ弦振動に非常に大きくかつ重要な影響を与えることがわかった。本章ではピアノ弦振動とブリッジの振動を同時に測定し、それを比較した。

実験方法はFig.4-32に示すようにブリッジにストレインゲージを貼りつける。それにより、ブリッジの振動を測定した。今回用いたストレインゲージはKYOWA製KSP-2-1K-E4であり、これは半導体ストレインゲージでゲージ率が157と普通のストレインゲージと比べ約80倍も高いのが特徴である。これによって、微細なブリッジの振動が測定できた。また、ブリッジに貼りつけるとき用いた接着剤はKYOWA製CC-35である。これは多孔質素材用の接着剤であり、粘度が高くブリッジそのものにはあまり染み込まないのでストレインゲージを貼りつけることによるブリッジの材質変化による振動の変化は少ない。

ストレインゲージはFig.4-32に示すように弦に対して垂直な方向に貼られている。ストレインゲージは自身の長方形の長辺方向の伸び縮みに対して抵抗値を変えるので、今回の実験の貼り方ではブリッジの響板と垂直方向の圧縮、膨張が測定できる。つまり、主に響板に垂直な弦振動によって起こされる振動について測定される。

ストレインゲージで測定された振動は抵抗の変化となって現われる。そしてその抵抗の変化をホイートストンブリッジを用い電圧の変動へ変換しアンプによって増幅してAD変換器によってコンピュータに取り込んだ。

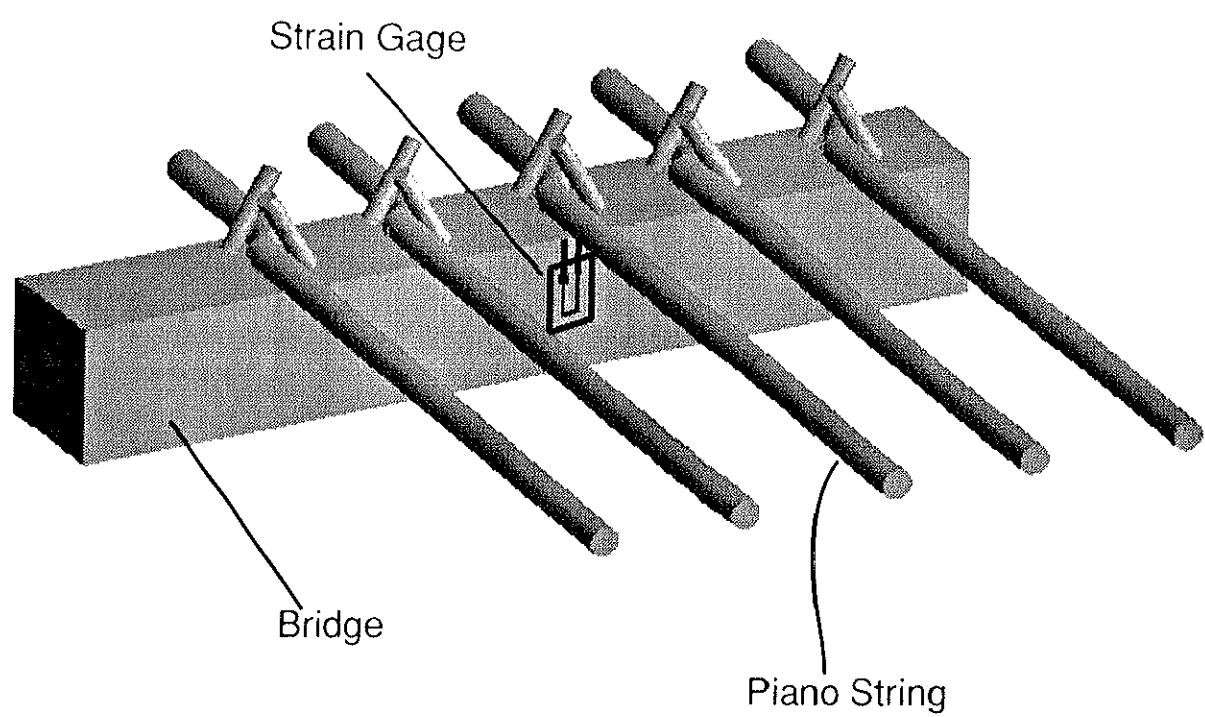
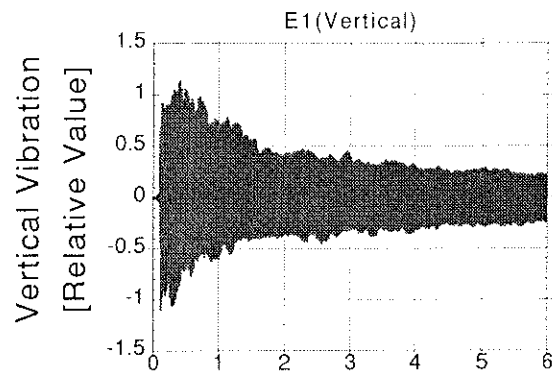


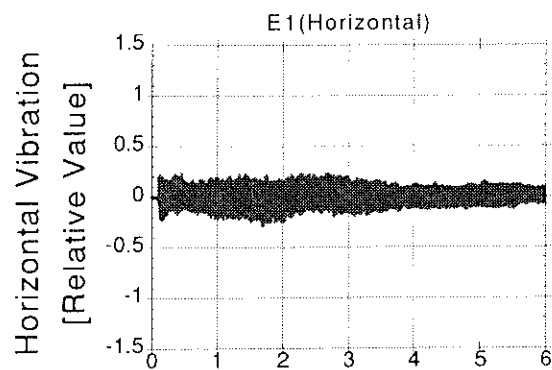
Fig.4-32: ストレインゲージを用いた実験方法

測定したデータの響板に垂直な振動とブリッジの振動を Fig.4-33 に示す。

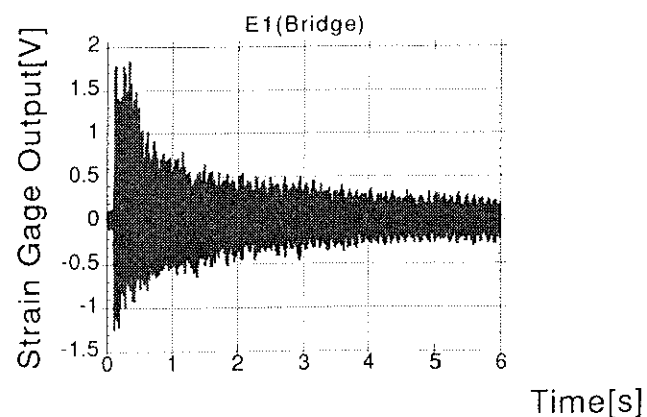
響板に垂直な振動とブリッジの振動を見比べるとブリッジの振動のほうが急激に減衰しているのがわかる。これは、ピアノ音と良く似た傾向を見せている。また、ブリッジの振動は響板に平行な振動とはほとんど似ていない。



(a): 響板に垂直な弦振動



(b): 響板に水平な弦振動

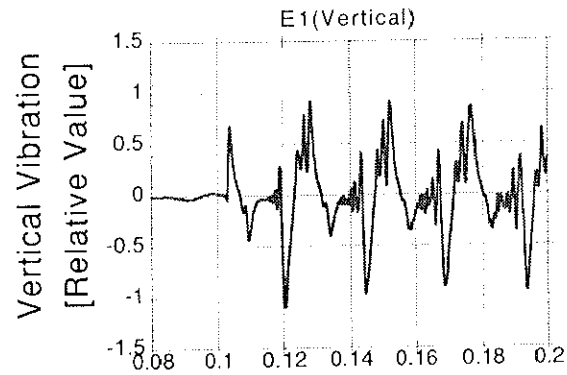


(c): ブリッジの振動

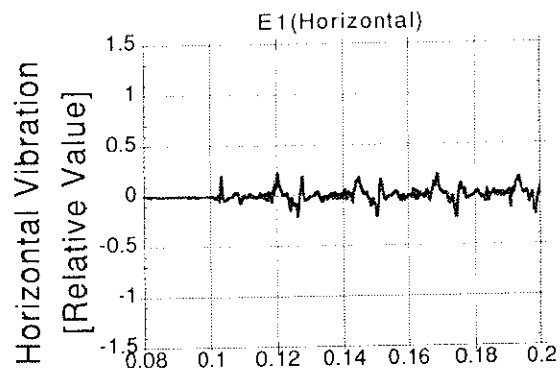
Fig.4-33: E1 の振動
(響板に垂直な弦振動、響板に水平な弦振動、ブリッジの振動)

次に Fig.4-33 を打鍵時のところを拡大したものを Fig.4-34 に示す。

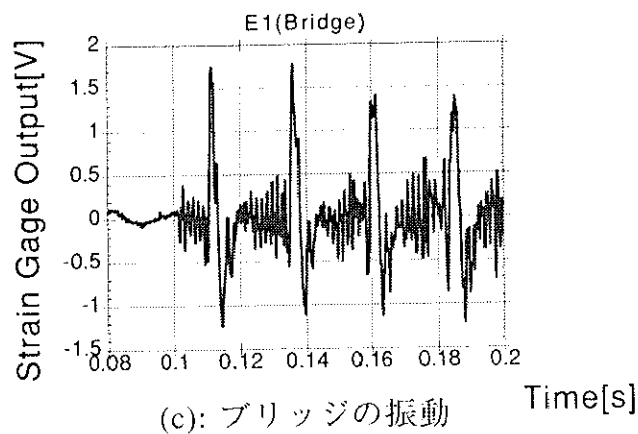
響板に垂直な振動は打鍵後すぐに大きな振動が起きているのがわかる。響板に水平な振動はあまり大きくないながらも打鍵後すぐに振動が起きている。しかしブリッジでは、大きな振動が起こる前に細かな振動が短い間起きている (0.1s ~ 0.11s)。これは先行波として知られているものと考えられる。



(a): 響板に垂直な弦振動



(b): 響板に水平な弦振動



(c): ブリッジの振動

Fig.4-34: E1 の振動 (打鍵直後)

先行波はハンマーが弦を打った際に起こる縦波が原因で起こる (Fig.4-35)。ピアノ弦の場合、縦波の速度は横波の速度に比べて10 数倍であるのでブリッジに横波が到達する前に縦波が先に到達し現われる。この縦波はピアノ音にも現われる (Fig.4-36)。この縦波はピアノの打音を形作る要素となっている。

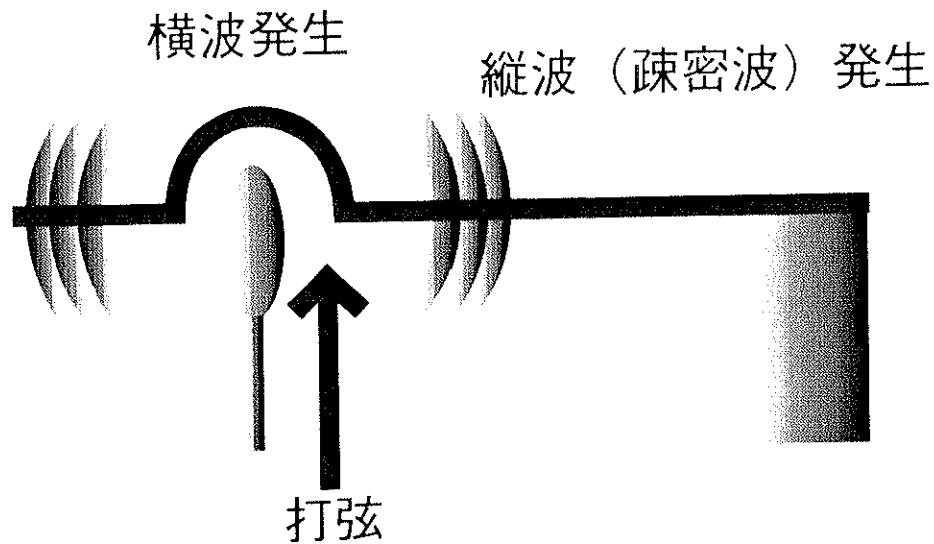


Fig.4-35: 先行波の説明

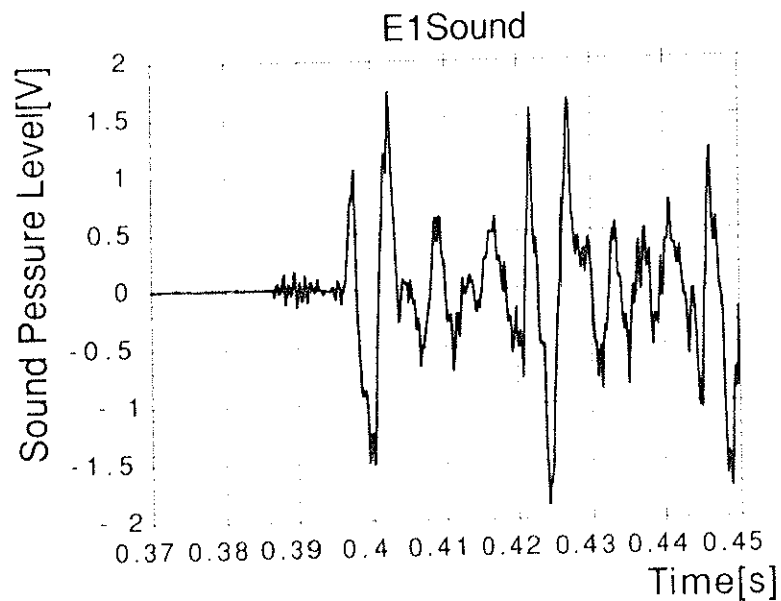


Fig.4-36: E1 のピアノ音
(打弦直後)

次に響板に垂直な弦振動とブリッジの振動の減衰率を調べる。Fig.4-37は響板に垂直な弦振動の時間－振幅グラフ、Fig.4-38はブリッジの時間－振幅グラフである。振幅は対数表示である。

響板に垂直な振動は4.4章で述べたようにほぼ直線的に減衰するが、ブリッジの振動は4.4章でのピアノ音の減衰と非常によく似た2段減衰をすることがわかる。N.Giordanoらは倍音の含まれ方から見て、ブリッジの振動はピアノ音と似ていると述べているが¹⁷⁾、弦振動とピアノ音各々の減衰率の点から見てもブリッジの振動はピアノ音のほうが弦振動より似ていることがわかった。

4.4章で見たようにピアノ弦振動はまだピアノ音とはあまり似ていない振動をしているが、先行波が含まれる、減衰の仕方の点から、ブリッジの振動時点でピアノ音の骨格が形作られるということが言えるだろう。

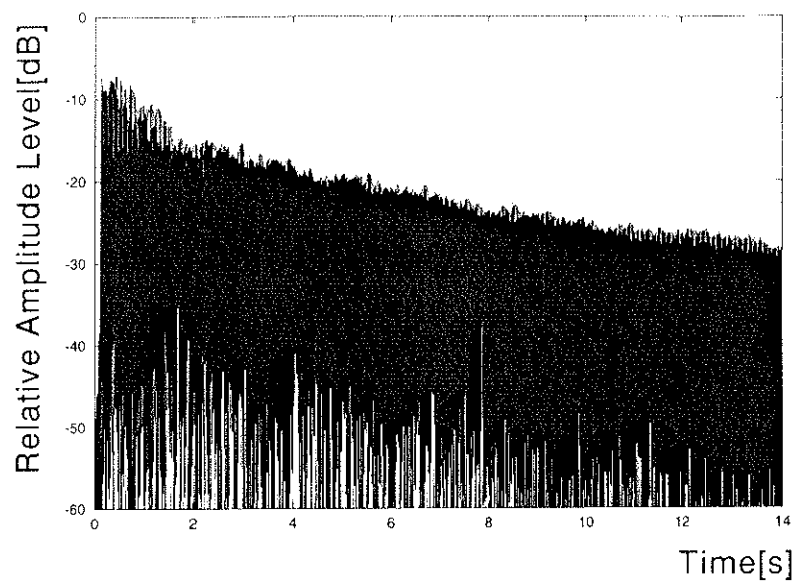


Fig.4-37: E1 の響板に垂直な振動（振幅：対数）

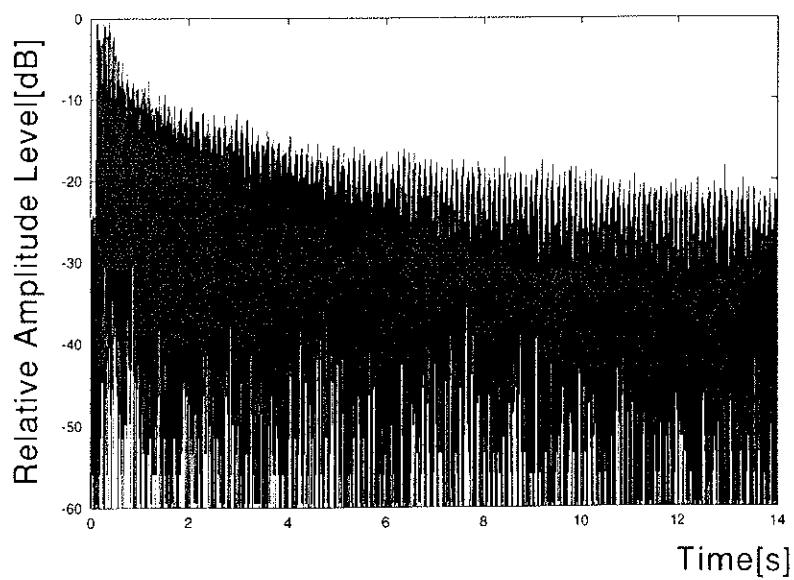


Fig.4-38: E1 のブリッジの振動（振幅：対数）