

左上一箇所でホチキス留め

附属中学 1

3895

筑波大学

朝永振一郎記念

第13回「科学の芽」賞 応募用紙

応募部門：中学生部門

応募区分：個人

題名：音響学と物理学から考えたアッソライトピアノに関する研究

学校名：筑波大学附属中学校

学年：2年

代表者名：寺井健太郎

科学の芽 2018

音響学と物理学から考えた
アップライトピアノに関する研究

筑波大学附属中学校 二年四組 寺井健太郎

1. 実験動機

僕は小学一年生の頃からピアノを習っており、とても好きだ。家はマンションでアップライトピアノを置いているのだが、ずっと前から気になっていたことがある。それは、“UP (アップライトピアノ) は GP (グランドピアノ) と比べて、小さい音 (p や pp) が出にくい”ということである。

弱いタッチ (弱い力を鍵盤に加えた時) だとかえって音が消えてしまうのである。

なぜなのか、インターネットで調べても明確な理由は載っておらず見当もつかなかったので、様々な視点から考えられる原因を自分なりに挙げ、一つ一つ検証してみることにした。

2. 二つのピアノの構造の違いから考えられる原因

(ピアノの構造はヤマハ・カワイ HP から)

i 弦及び響板の向きに関係しているのでは？

(音は、弦が振動したものを響板が音を放出して耳に届いているものであり、弦の向きに沿う形で響板が置かれている。)

特徴	GP	UP
弦及び響板の向き	横方向 (地面と平行)	縦方向 (地面と垂直)
音が耳に届くまで	音が鳴るとまず <u>は地面と垂直な上方向</u> に行き、 <u>蓋にぶつかり地面と平行に横方向</u> に行く。	音が鳴ると響板が縦長なことから、 <u>地面と平行に横方向</u> に行く。

仮説:UP は縦方向であるが為に、小さい力であると響板が空気に音を放出できないことで、小さい音が耳に届きにくい。

ii 響板の形に関係しているのでは？

特徴	GP	UP
経緯	音の高低を出す為に弦の長さを変えなければならず、それに伴い響板の形も曲線を描く形になった。	小さく作るのがコンセプトなので、鍵盤の下に埋め込められるような長方形になった。
形	カーブを描いた三角形	長方形

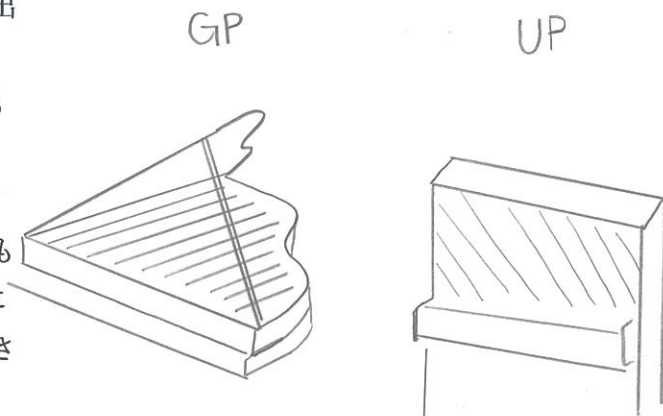
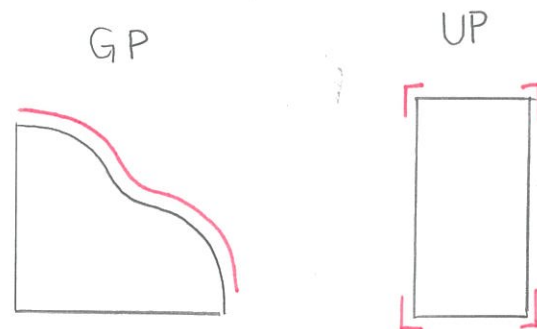
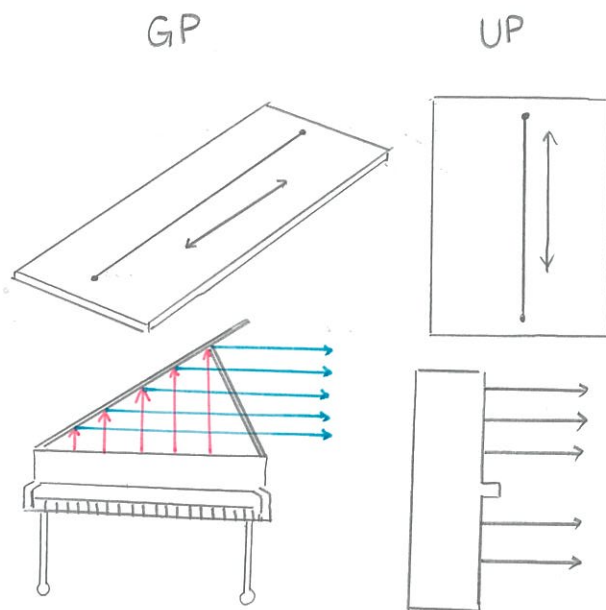
仮説:UP は響板の形が長方形であり、さらには GP と比べて面積も小さいので、放出される音域の幅も狭まり小さい音も放出されず耳に届かない。

※上記面積において、GP はピアノ教室のものを UP は家のものを参考とするが、凡その数値である為参考程度である。

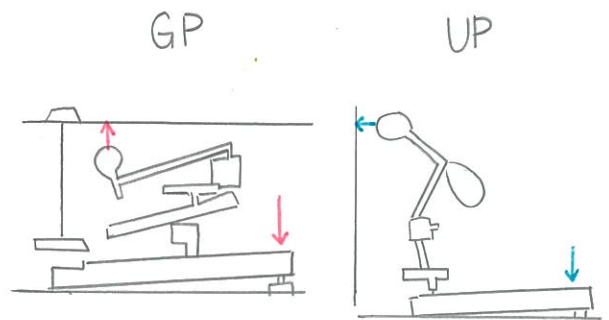
iii 響板が空気に触れているかどうか？

仮説:GP は空気に直接響板が触れていることで、小さい音でも空気中に放出することができるのに対し、UP は直接は空気に触れておらず箱に閉じ込められているようなものなので、小さい音を空気中に放出することができない。

iv ハンマーの向きに関係しているのでは？



特徴	GP	UP
ハンマーの向きと打ち方	ハンマーは上を向いている。 <u>鍵盤を押すとハンマーは下から上に動き、弦を打つ。</u>	ハンマーは横を向いている。 <u>鍵盤を押すとハンマーは横に動き、縦方向の弦を打つ。</u>



仮説:UPだとハンマーの向きが横向きなので、小さい力を鍵盤に加えても上手くハンマーに伝わらず、弦を叩くことができない。
v鍵盤の重さに関係しているのでは?

ピアノには様々な重さの鍵盤がある。ピアノ教室のGPの鍵盤は重くなるように調律されており、家のUPは軽いので、比べてみる。

仮説:UPは鍵盤は軽いので、小さい力でも押すことができる。よって小さい力でも大きな音が鳴る。なので小さい音を出したい場合は、非常に小さい力を加えなければならないので出にくい。

3.実験

(実験目的)

どの仮説が疑問に対しての適切な答えなのか。

実験 i ~ iii...それは音響学に関係があるのか

実験 iv ~ v...それは物理学に関係があるのか

(実験装置の説明、工夫)

i ~ iiiの実験では、図1のような実験装置を使用する。

ふりこをハンマーに見立て、弦に衝撃を与える。

・ふりこは糸の長さが同じであれば振りが一定になるので、どの場合でも同じ力を与えることができる。

・ふりこは図2のようなものを使用する。作り方は以下の通りである。但し糸の長さは刺繍糸で長さは一定としハンマーは木のブロックとする。本来なら、木に羊毛が巻いてあるが、今回フェルトを木のブロックに貼って実際弦に触れさせると、音が殆どならなかった為、何も付けないことにした)(図2)
 ~ふりこの作り方~

- ① 高さが同じ二つのペットボトル (1.5ℓ) に水を満タンまで入れる。
- ② それぞれのペットボトルキャップの端と端に2本をまとめた菜箸を渡し、しっかりとめる。(図3)
- ③ ハンマーに見立てた木のブロックに糸を通し菜箸に取り付ける。
- ④ 菜箸と90度になるように分度器を糸の真横に設置する。木の板を響板に見立て、弦の下に敷く。(図4)

・厚さ 10 mmの市販の木を使用する。

図1



図2



図3

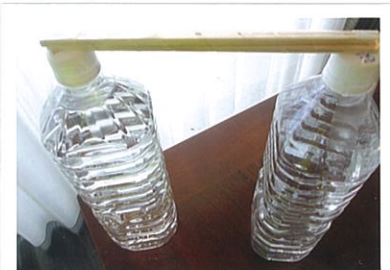


図4



・木の大きさは90 mm×150 mm (長方形) のものを使用する。(図5)
 但し GP の響板に見立てる際は長方形の対角線で切った三角形とする。また、木は東急ハンズさんでカットして貰う。(図6)
弦を二本の釘に張り、響板の上に置く。

- ・弦は本物と成るべく似せる為、スチールのワイヤーを使用する。また弦の長さは度の実験器具の場合でも 10 cm で一定とする。
 - ・弦の両端に付く駒ピンを釘に見立て、二本の釘に弦を巻き付ける。
 - ・釘はキリとドライバーを使って響板に見立てた木の板に差し込む。
- オシロスコープで音の波形を図り取る (図7,8,9,10)
- ・学校の授業で使用した携帯用のオシロスコープのアプリを使用する。(Freq Counter というアプリ)

iv・vの実験では、図11のような実験装置を使用する。

GP モデルについて

～GP モデルの作り方～

- ①鍵盤に見立てた厚さ 10 mm、15 mm×45 mm の木片の片方の端の下にばねを二個取り付け、支点を半円型の木片で見立てる。
 買った時は高さが L_6 だったが、その高さで実験すると、長すぎてばねがハの字に曲がってしまうため、支点の高さ L_3 の高さで統一した。(図12,13)
- ②木の板にハンマーに見立てた木のブロック (ここでも本来なら、木に羊毛が巻いてあるが、今回フェルトを木のブロックに貼ると音が殆どならなかった為、何も付けないことにした) を(図14) 90度 に曲げた針金の先端に付ける。針金は鍵盤に取り付ける。
- ③ハンマーの丁度真上に来るようにスチールのワイヤーを2本のペットボトルに地面と水平に張ったものを置く。(図15)

UP モデルについて

～UP モデルの作り方～

- ①この工程は GP モデルと同作業である。
- ②木の板に一本の針金の棒を乗せる。
 UP モデルは途中もう一つ支点がある。その為それを途中の構造に針金を通して作る。なので針金を通す途中構造にはストローを使用する。また針金は両端で固定しないといけないので、木の棒を二つ用意しそこに取り付ける。(図16)
- ③ハンマーの丁度真下に来るように弦を張る。
 本来なら UP の弦の向きは横方向ではなく縦方向だが、今実験の目的は同じ力で鍵盤を押したとき、どのように力がハンマーに伝わるか、というように構造を調査するだけであり、弦の向きは関係ないので、GP モデルと同様、横方向にする。

※また、vの実験において使用する鍵盤の重さが通常のピアノより重い装置を作成する時、鍵盤が重いということは大きな力かけないと下に沈まないということなので、通常のばねより弾性力

図5

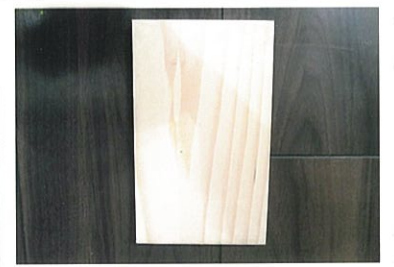


図6



図7

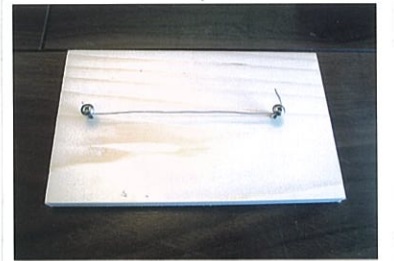


図8

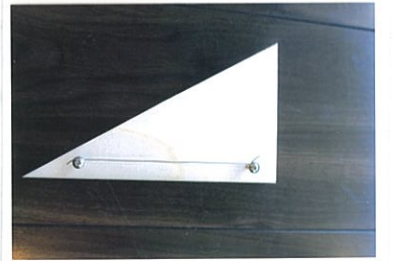


図9



図10



図11



の高いばねすなわち固いばねを使用し鍵盤の重さの違いを出すこととする。

軽い鍵盤…0.30 kgのばねを使用

重い鍵盤…0.47 kgのばねを使用

(実験方法)

i. 小さい音を出すと思われるふりこ 10 度、大きい音を出すと思われるふりこ 60 度、その真ん中くらいの 30 度の 3 パターンで弦が地面と水平の場合と垂直の場合の 2 つの場合を試す。(図 7 参照) また、1 度ずつであると正確性が欠けるので、それぞれの場合で 3 回ずつ試し計 18 回の音の波形を図り取る。但しどちらも響板の (図 17) 形は UP 形を敷き、空気中と直接接しているものとする。以下の表は結果のパターンと結果から言えることをまとめたものである。

結果のパターン	結果から言えること
波形の縦の長さが長く、振れが大きい。	人間の耳に大きな音として届いている。
波形の縦の長さが短く、振れが小さい。	人間の耳に小さな音として届いている。
波形が無音時の波形と変わらない。	人間の耳に音が届いてない。

ii. i と同じ 3 パターンの斜角で響板が GP 形の物と UP 形の物の 2 つを試す。(図 7 参照) さらに記録はそれぞれの場合で 3 回ずつ取る。但しどちらも弦及び響板の向きは地面と水平で、空気中と直接接しているものとする。結果のパターン及び言えることは i と同じである。

iii. i と同じ 3 パターンの斜角で弦及び響板が空気中と直接接しているものと弦及び響板が木箱に閉じ込められているものの 2 つを試す。(図 8 参照) そして記録はそれぞれの場合で 3 回ずつ取る。但しどちらも弦及び響板の向きは地面と水平で、響板の形は UP 形を敷く。結果のパターン及び言えることは i と同じである。

※ふりこを何回か振らせると角度は振りに関係なくなるが、今回は一発目で弦に当てるので角度を付けることでより大きな音が出ると考えた。

iv. iv・v の実験で使用する装置では、鍵盤におもりを同

図12



図13



図14



図15



図16



図17

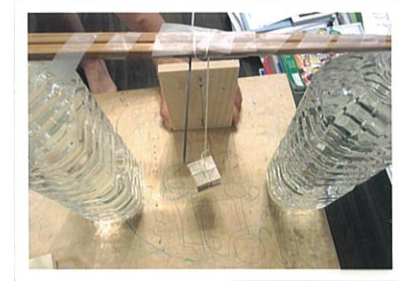
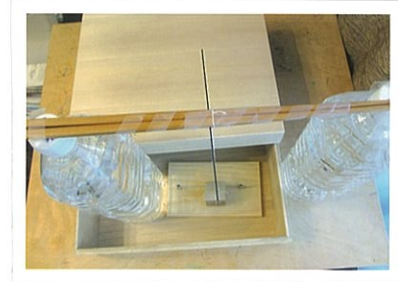


図18



じ高さ（机から 10 cm の高さとする）から落とし音を鳴らす。
おもりは袋に小麦粉を入れ、電子天秤で正確に重さ調整をしたものとする。

小さい音を出すと思われるおもり 5 g、大きい音をだすと思われるおもり 15 g、その真ん中くらいの 10 g の 3 パターンで GP モデルと UP モデルの 2 つの場合を試す。（図 19 参照）

また記録装置は各実験装置の横に置く。そして記録はそれぞれの場合で 3 回ずつ取る。結果のパターン及び言えることは i と同じである。

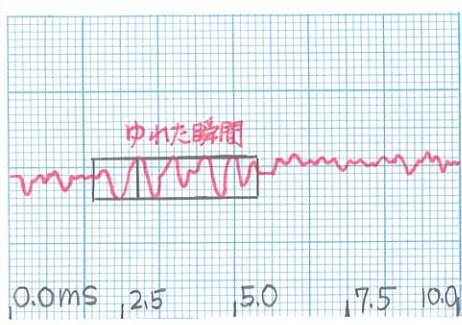
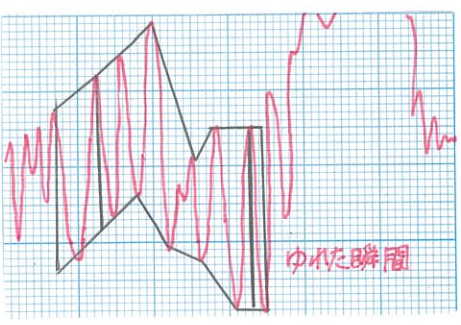
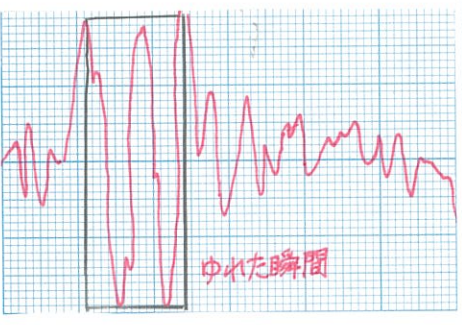
v. iv と同じ 3 パターンのおもりで鍵盤の重さが重いものと軽いものの 2 つを試す。（図 11 参照）そして記録はそれぞれの場合で 3 回ずつ取る。但しどちらも GP モデルを使用し響板の形は UP 型を置く。結果のパターン及び言えることは i と同じである。

4 実験結果

三回測ったうちの最も平均的だった記録を一つ選択する。（オシロスコープは小さい音でも感知して波形にすること、また音が鳴るのが一瞬で同時にオシロスコープが波形を表すのも一瞬であることから、波形はぶれやすく、3 回程度では上手くとることが出来ないこともある。ただその中でも 3 つ綺麗にとれているものを厳選し更にその中から最も真ん中だった波形を採用する。）

実験 i

パターン①：地面（机）と水平の場合

ふりこ 10 度	ふりこ 30 度	ふりこ 60 度
		
とても小さいが聞こえた	音が聞こえた	音が聞こえた
波形の高さ：1マス	波形の高さ：5マス	波形の高さ：8マス

パターン②：地面と垂直の場合

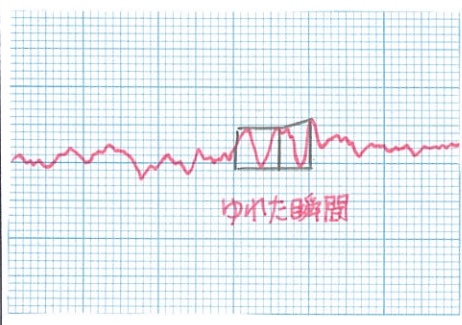
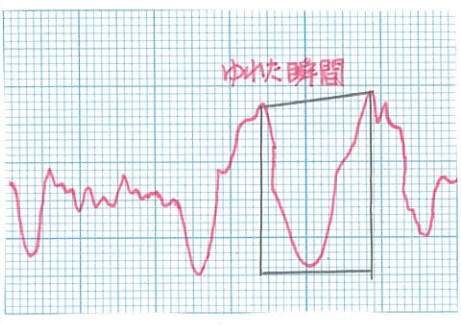
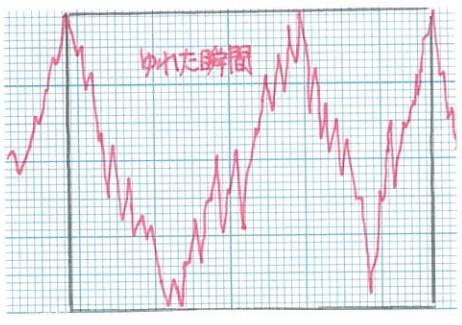
ふりこ 10 度	ふりこ 30 度	ふりこ 60 度
		

図 19

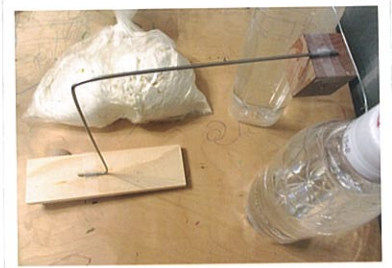


図 20



図 21



音は聞こえなかった・小さい音	音が聞こえた	音が聞こえた
波形の高さ： 1マス	波形の高さ： 5マス	波形の高さ： 8マス

実験 ii

パターン①：UP 型の響板を敷いた場合

→このパターンでは実験 i のパターン①と同様の実験器具（図 1）を使用するため、実験状況の変わらない今回の実験では実験 i のパターン①の結果を参考にし比較することとする。

パターン②：GP 型の響板を敷いた場合

ふりこ 10 度	ふりこ 30 度	ふりこ 60 度
音が聞こえた	音が聞こえた	音が聞こえた
波形の高さ： 2マス	波形の高さ： 6マス	波形の高さ： 約 12マス

実験 iii

パターン①：弦を直接空気に触れさせた場合

→この場合に至っても実験 i のパターン①と同様の実験器具を使用し実験状況は変わらないのでその結果を参考にし比較をすることとする。

パターン②：弦を木箱に入れ、直接は空気に触れさせないようにした場合

ふりこ 10 度	ふりこ 30 度	ふりこ 60 度
音が聞こえた・小さい音	音が聞こえた	音が聞こえた
波形の高さ： 1マス	波形の高さ： 5マス	波形の高さ： 7,8マス

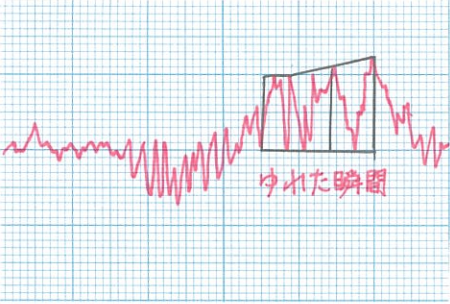
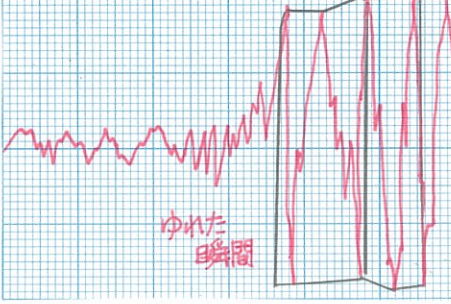
変更：実験 iv と v について

この実験では、最初重さを 5 g、10 g、15 g で考えていたが、実際袋に相当する小麦粉を入れ実験してみると、到底そのような重さではバネが下に沈まず、よって音も鳴らなかった。その為小麦粉を更に追加して試行錯誤して行った結果、袋の重さ込みで 300 g が小さい音、500 g が普通の音が出ることが分かった。しかし 500 g 以上の小麦粉を袋の中に入れるとなると、袋の大きさと同様に鍵盤に見立てた木の板の大きさのバランスで大きくなりすぎ

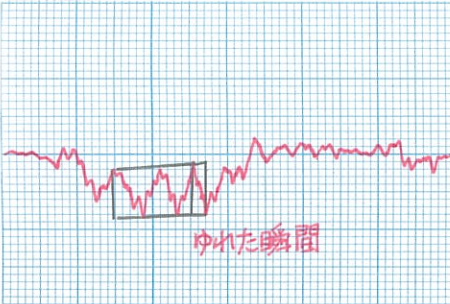
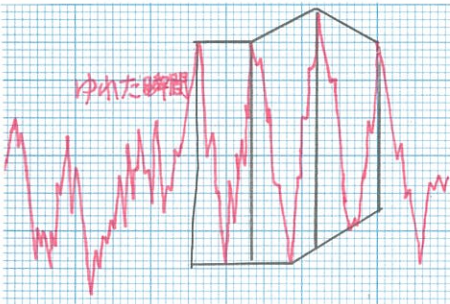
てしまうので、今回は実験は出来ないと判断した。(そうでなかったら、小麦粉で作るおもりでなく真鍮材のものも買って試してみたが、今度は弦の鳴る音以外におもりが木の板に落ちた時の音が出てしまい、音の波形も上手くとれなかった。)

実験 iv

パターン①：GP モデルの場合

重さ 300g	重さ 500 g
	
波形の高さ： 2マス	波形の高さ： 7.8マス
音が聞こえた	音が聞こえた

パターン②：UP モデルの場合

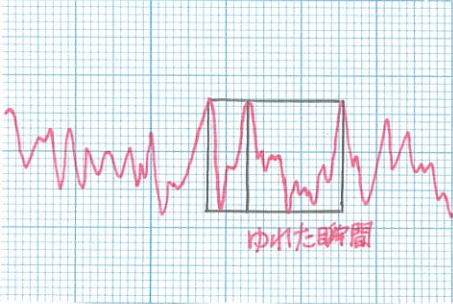
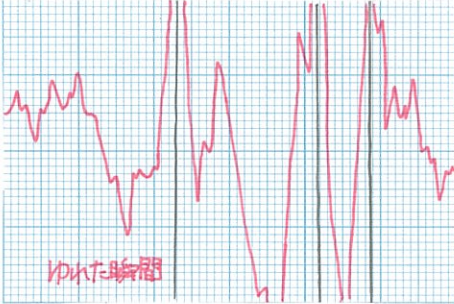
重さ 300g	重さ 500 g
	
波形の高さ： 1マス	波形の高さ： 6マス
音が聞こえた	音が聞こえた

実験 v

パターン①：鍵盤の重さが重い場合

→このパターンでは実験 iv のパターン①と同様の実験器具を使用するため、実験状況の変わらない今回の実験では実験 iv のパターン①の結果を参考にし比較することとする。

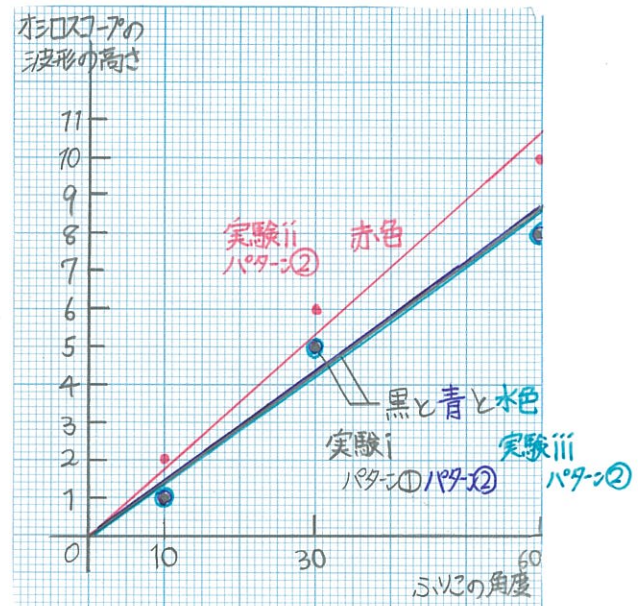
パターン②：鍵盤の重さが軽い場合

重さ 300g	重さ 500 g
	
波形の高さ： 3マス	波形の高さ： 約10マス

5 実験考察

実験を終えて、僕はふりこの角度と波形の高さ（音の大きさ）は比例しているのではないかと思い、各実験の数値をグラフに落とし結んで、検証してみた。（おもりの重さも比例しているのかもしれないが、データが二つしかなく中間をとる場合は更に信憑性が欠けるので今回はグラフにはしない。）

点ごとに少しばらつきはあるものの、中間を取って線を引いてみると綺麗な直線になり、これは比例しているといえる。実験考察はこのグラフを基にしていきたい。



実験 i

小さいタッチに見立てたふりこ 10 度のオシロスコープの波形を比較してみると、GP の、弦が横方向になっている場合と UP の、弦が縦方向になっている場合とでは音の大きさが殆ど同じになった。（波形の高さが殆ど同じだった。）すなわち、どちらも同じ力で同じだけの音量を出すということが分かった。また大きい音が出ると思われたふりこ 30 度、60 度も予想通り角度をつけて行く毎に波形の大きさは大きくなっていき、どの場合でもどちらも波形は殆ど同じであった。今回の疑問について弦及び響板の向きは関係ないことが分かった。

実験 ii

小さいタッチに見立てたふりこ 10 度のオシロスコープの波形を比較してみると、UP 型のの響板を敷いた場合は高さがおよそマス目 1 個分に対して、GP 型の響板を敷いた場合では高さがおよそマス目 2 個分というように高さが高い。すなわち、同じ小さい力を加えても、GP 型の響板を敷いた場合はより大きな音が出た。逆に UP 型の響板ではあまり大きな音が出ない、人間の耳には届きづらいということが分かった。この差は音が人間の耳に届いているか届いていないか明確になるくらい分かり易いものだった。つまり UP の長方形の響板よりも GP の三角形の響板の方がより響板の振動が大きいことになる。グラフを見ても分かるが、更に小さい角度にしていくと（さらに弱い力を加えると）UP の響板を敷いた場合は波形の高さも 1 より小さくなっていくため、弱い力では音は出ないことが分かる。

また、大きな音が出ると思われたふりこ 30 度、60 度も予想通り角度をつけて行く毎に波形の大きさは大きくなっていき、どの角度の場合でも GP の響板を敷いた方が大きい波形になった。

実験 iii

小さいタッチに見立てたふりこ 10 度のオシロスコープの波形を比較してみると、直接空気に触れさせているものと木箱に入れているものでは音の大きさが殆ど同じになった。（波形の高さがほとんど同じだった。）すなわち、どちらも同じ力で同じだけの音量を出すということが分かった。また大きい音が出ると思われたふりこ 30 度、60 度も予想通り角度をつけて行く毎に波形の大きさは大きくなっていき、どの角度の場合でもどちらも波形は殆ど同じであった。今回の疑問について空気中にあるかどうかは関係ないことが分かった。

実験 iv

小さいタッチに見立てた重さ 300 g のオシロスコープの波形を比較してみると、GP モデルの波形の高さはお

よそマス目2個分ほどに対し、UPモデルの波形の高さはおよそ1.5個分でとどまっている。すなわち、同じ小さい力を加えても、GPモデルの方がより大きな音が出た。逆にUPモデルの方はあまり大きい音が出ていない。つまり、GPの構造はUPの構造よりもはっきり力が伝わるということになる。グラフには出来なかったのですが、どのくらいの力から音が鳴らなくなるのか正確な数値は出ないが、小さい力を加えても、UPは構造上音が鳴らないことが分かった。

また、500gの場合でも波形の高さはUPモデルよりもGPモデルの方が短かった。300gから500gの波形の高さの上がり方はGPの方が大きかった。

実験v

小さいタッチに見立てた300gのオシロスコープの波形を比較してみると、予想は外れ、鍵盤が軽い方が鍵盤が重い方より波形の高さが高く、大きい音が出たのである。これは実験を行った後にこの疑問をもう一度考え直してみると、同じ力でも鍵盤が軽い方が鍵盤が重い方より勢いよく沈み込み、よってハンマーもより勢いよく弦に当たるため大きい音が出るはずなのである。また、500gの場合でも鍵盤が軽い方が波形の高さが高い、すなわち大きい音が出た。今回の疑問について鍵盤の重さには関係ないということが分かった。

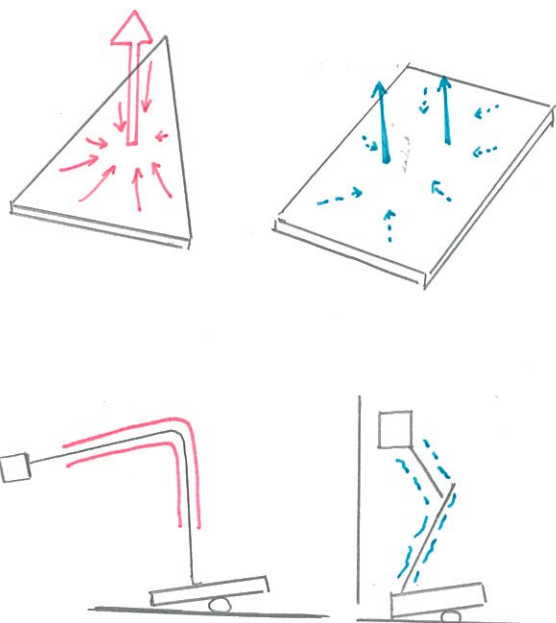
6 全体結論

実験結果より、アップライトピアノがグランドピアノに比べて小さい力を加えても音が消えてしまう原因は、実験iiの響板の形が三角形でなく長方形であること、また実験ivの鍵盤を押した力がグランドピアノに比べてハンマーに伝わりにくいということだということが分かった。ということは、アップライトピアノは音響面でも物理面でもグランドピアノに比べて劣っており、よって音域（音の大きさの幅）も狭くなってしまっているのである。

さらにこの結果から自分の考えを基に仮説を立てていくと、グランドピアノの響板はアップライトピアノの響板と比べて三角形型に削られているので音が集まって放出されるため大きな音が出て、反対にアップライトピアノは削られていないので全体に広がってから放出するため小さい音しか出ず、弱いタッチだと音が消えて行ってしまうのではないだろうか。

そしてこれは実験中にも感じていたが、グランドピアノの構造の方がアップライトピアノの構造よりも安定感があり、もう一つ支点を挟んで当てているアップライトピアノの構造よりは一本の棒で単純なグランドピアノの構造の方が、鍵盤を押した力をそのままの大きさと伝えるのではないだろうか。

これらを踏まえて最も音域が広く豊かになるピアノの構造というのは、弦との兼ね合いもあるがなるべく響板を削り音を集め、押した力をそのままハンマーに伝える安定感のあるようなものであることが分かった。最初の方に記載したが、アップライトピアノはもともとグランドピアノよりもなるべく小さくし沢山の場所を取らないようにするのが目的で製造されたのでそれに伴い様々なグランドピアノの長所を消さなければならなかったのだと納得した。



7 感想と実験問題点・反省

今回の疑問は最初、どのような実験をすればよいのか、またどのように疑問解消につなげていけばいいのか全く分からないところから始めたので、ピアノの構造の理解も難しく、実験も今まで蓄えた知識に置き換えて組み立てたり装置作成をしなければならなかったので一つ一つに時間が掛かった。装置が出来上がったとしてもいざ実験を行うと改善点ばかりが出てきて、試行錯誤しながら進んで行った。一つの疑問を解決に導くためにはどれだけ大変なことかを思い知った。

今回の実験では前述したように、ピアノの難しい構造を自分なりに身近なもので見立てて簡略化し実験を行ったので、簡略化する際に構造が変わってしまっている箇所が出てしまったかもしれない。特に実験iv・vの実験装置は実際のピアノにおいても特に複雑な箇所であり、ただでさえ簡略化することは難しかった。そこまで詳しいパーツの数値が分からなかったこともあるが、今実験では鍵盤からハンマーに繋がる棒の長さを考慮していない。棒の長さの比率を正確にすればより本物に近づいた装置が出来上がり結果も正確度が上がったと思う。また、支点の位置も音が鳴ることが第一優先だったので本物のピアノとは変わってしまっていたかもしれないし、毎実験ごとにしっかり低位置に戻してはいたものの、おもりを乗せた時などに多少のずれが生じてしまっていたなどということも考えられる。次の実験においては、本物を簡略化する場合は、より本物に近づけ実験結果に支障のないように資料調べや装置作りに工夫を施していきたい。

今回の実験で疑問に対する原因が明確になったことで、改めてグランドピアノが性能が良く、音域が広くてより豊かな音が出るかが分かり感心した。アップライトピアノでもコンパクトな形を保ったまま、響板の形、加えて鍵盤とハンマーの構造をグランドピアノになるべく近づけ性能の良く音域が広いのが、マンションに住む僕にとってはベストな形であり、それが開発されることを願う。

8 参考文献

ヤマハ株式会社 <https://www.yamaha.com>

音が出る仕組み、楽器解体全書... など

河合楽器 ピアノ アカデミー <https://www.2.kawai.co.jp>

日鉄住金SG7イヤ株式会社 sgw.nssmc.com

「ピアノ」 wikipedia