

ピアノ奏法における基本的タッチの生理学的研究・特に打鍵強度および間隔測定を中心とした分析装置の試作に関する研究

片 山 昭

概 要

打鍵強度の測定には、つぎの三種の方法が考えられる。第一は、打鍵による音波（ピアノ線の振動）をマイクロフォンで受け、それから得られる電気信号を波高値分析回路により分類する方法である。この方法は、音波を仲介とするため、被験者に異った音刺激を与えず、ピアノ奏者は音の強さを耳で検出して目標の強度に近づけるよう修正することができる。従ってピアノ奏者は、まったく通常の心理状態でテストを行なうことができるという長所をもっている。しかし、各鍵盤に対応する音波を一音一音分類して測定することが不可能であるため、所期の実験には適さない。第二の方法として、圧電素子、あるいはストレンゲージを用いて打鍵圧力、あるいは振幅を測定する方法が考えられる。しかし、現在使用できる素子ではダイナミックレンジが十分でないので、最弱音から最強音までを精度よく測定することが困難である。第三の方法としては、ハンマーの速度を測定して打鍵強度を知る方法が考えられる。あらかじめ、ハンマーの速度 v と音の強さの間の対応関係を求めておけば、ハンマー速度を検出することにより音の強さを決定することができる。この方法は、前二者がアナログ的な手法であったのに対し、純デジタル化することができる。近年エレクトロニクス分野におけるデジタル計測の進歩はめざましく、論理回路、計数回路、表示回路等は、容易にそれを応用できる状態にある。またデジタル手法は本質的に高い精度を得ることができるので、前二者に比して、広い範囲にわたってより精度よく測定を行うことができる。ハンマーの速度をフォトトランジスタとパルス発振器を用いてデジタル的に検出し、回路を全トランジスタ化（部分的にIC化）することにより、分析装置を小型化し取扱いを簡単にすることができる。あわせて、デジタル化を行なうことによって打鍵間隔の測定もきわめて容易になる。

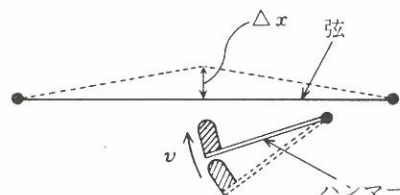
分析装置の原理と構造

ここで採用する打鍵強度測定法は、前述の第三の方法として述べたハンマーの速度を検出するものである。いま第1図に示すように、ある張力で張られた長さ L なるピアノ線に速度 v 、質量 m なるハンマーが衝突した場合を考える。ハンマーの持つ運動のエネルギー Ev は、

$$Ev = \frac{1}{2}mv^2$$

である。つぎに、ハンマーによって受けるピアノ線の最大変位を Δx 、変位のエネルギー Ed は、 $L \gg \Delta x$ であるとすると、

第1図 原理説明図



$$Ed = k\Delta x$$

となる。 k はピアノ線の持つばね定数である。ここで、エネルギー保存則から

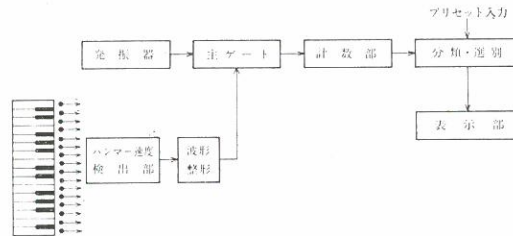
$$Ev = Ed$$

$$\therefore \Delta x = \frac{1}{2k} mv^2$$

すなわち、ピアノ線の初期変位はハンマーの速度 v の2乗に比例することがわかる。上式からハンマーの速度から音の強度を決定することができる。しかしながら、人間の知覚神経に訴える音の強度は、弦の振幅、振動数、波形（高調波成分の比率）により異なるものと思われる聴覚は、また、同一波形、単一周波数に関しても、対数特性の非線型要素を含むと考えられているので、初期振幅と音の強さを定量的に決定することはむずかしい。以上の理由から、ハンマーの速度 v によって音の強さを一義的に定義することは困難である。しかし個々のピアノ弦とハンマーに着目すると、音の強さはハンマーの速度 v の一価関数であり、それはまた一様増加関数となっていることは明らかである。そこで、あらかじめ速度 v と音の強さの対応関係を実験的に求めておくことにより、速度 v の測定から音の強さを決定することができる。異なった音程の——異なったピアノ弦の——音の強度に関しては、振動数が異なるので定量的に表現することは困難である。しかしながら、ピアノはその機能上、異なった音程のものでも、打鍵速度が同じ場合、聴覚に訴える音刺激は同じ強さになるような構造になっている。以上の考えに基づいて、打鍵強度を測定する分析装置を試作した。またこの装置は打鍵回路、打鍵間隔を記録する機能ももっている。

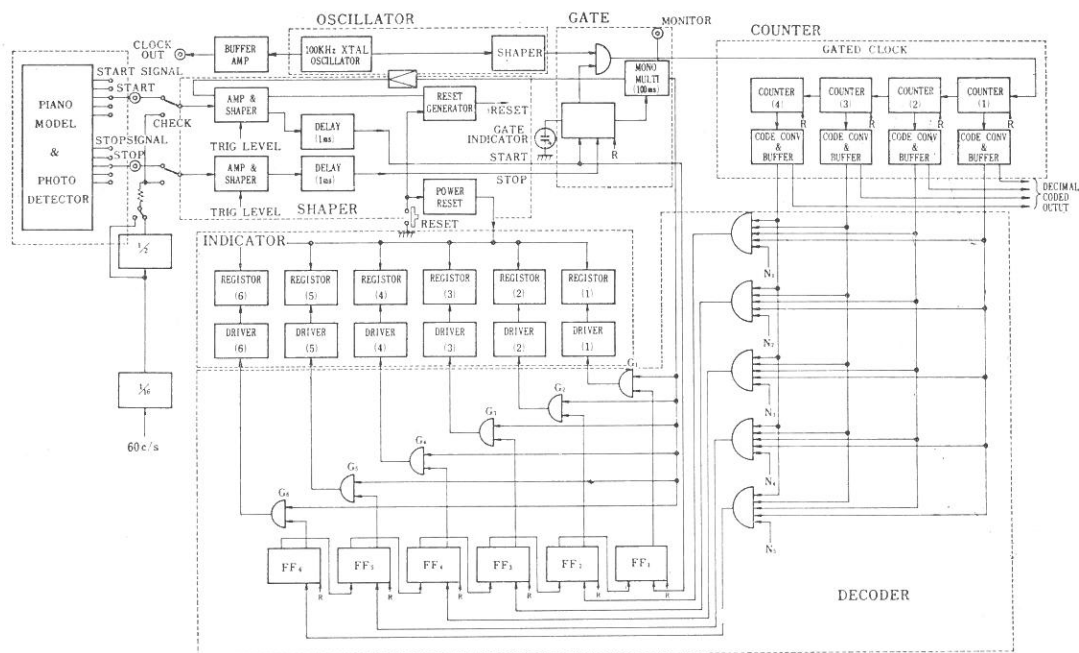
第2図に原理的な構成を示す。

第2図 測定器の構成



主ゲート (GATE) は、ハンマー速度検出部 (PHOTO DETECTOR) でピックアップされ波形整形 (SHAPER) を通ったパルスによって開かれる。発振器 (OSCILLATOR) の出力パルスのうちハンマー速度に対応する時間幅だけ主ゲートを通過し計数部 (COUNTER) により計数される。この計数値は分類選別部 (DECODER) により音の強さに変換され、表示部 (INDICATOR) に表示される。なお、分類選別の設定値は任意に変更することができる。測定器の動作を、第3図に示したブロックダイアグラムにより、全体の機能を述べたのち、各回路について説明する。

第3図



- 1) 速度検出のためにとりつけられた2つのピックアップ素子からのSTART, STOP信号は, AMP & SHAPERで増幅整形されて方形波に変換され, DELAYから幅1 msecのパルスになる。
 - 2) このDELAYからの出力パルスはCONTROLに送られGATEを開く。これによってGATEはスタート信号とストップ信号との時間間隔に相当する時間だけ開かれる。
 - 3) この間, 100KHz X-tal OSCILLATOR から水晶制御された100 KHzのクロックパルスがSHAPERで方形波にされ, GATEに送られる。
 - 4) GATEを通過した信号は, 4桁の2進化10進のCOUNTERで計数され, プリセット数値設定用スイッチで設定された数値に達したとき, 各段のプリセット数値比較(分類)出力が, FFへ送られる。
 - 5) 6個の電磁カウンタに対応した6個のFFは, プリセット数値比較(分類)出力が到来するたびにつぎつぎと反転して電磁カウンタ駆動用のゲートを開く。
 - 6) GATEが閉じられたとき, MONO MULTI 回路から出る幅100msecのパルスが電磁カウンタ駆動用のゲートに送られ, 開いているゲートを通して対応している電磁カウンタを1つ進める。
- (a) ピアノモデル及びハンマー速度検出のための光電変換部

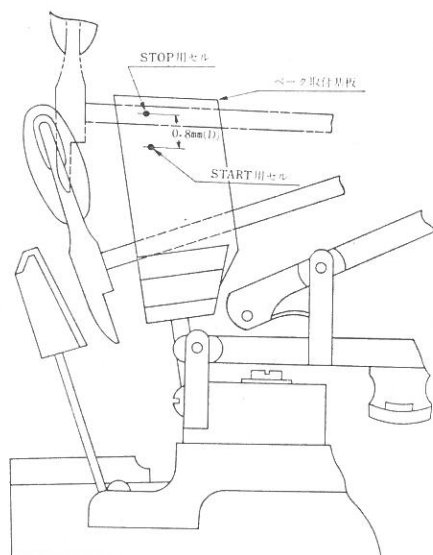
ピアノモデルは, 日本楽器製平型G3タイプを使用し, 速度検出のために2つのピックアップ素子(フォトトランジスタ, シヤープSPD-500)を第4図に示すように配置する。このフォトトランジスタと対向して光源とスリットを置き, スリット状の光線を作る。この光線をハンマーのアームがさえぎることにより, 2つのトランジスタからそれぞれスタート,

ストップ用の信号を得る。この2つのパルスの立ち上がり時刻の間の時間を $\Delta T(sec)$ とし、2つスリットの間隔を $D(cm)$ とすると、ハンマーの速度 v は次式で与えられる。

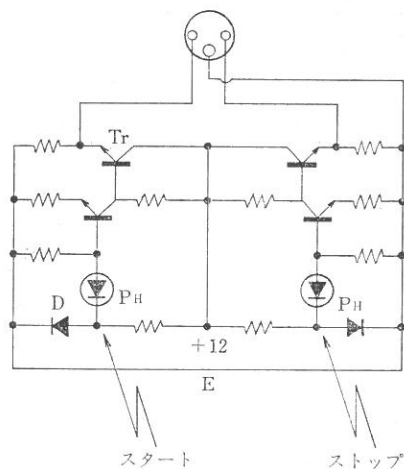
$$v = \frac{D}{\Delta T}$$

フォトトランジスタ出力信号のプリアンプ回路として第5図に示すようなピックアップ回路を採用する。ここでダイオードDは、温度補償のためのものである。ピックアップ素子の取付鍵は36鍵とし、No. 27 鍵のB音よりNo. 62鍵のA音までとする、打鍵強度分析装置との接続は、ケーブルとBNCコネクタにより行ない、36 鍵のうち任意のチャンネルを選択できる。

第4図



第5図

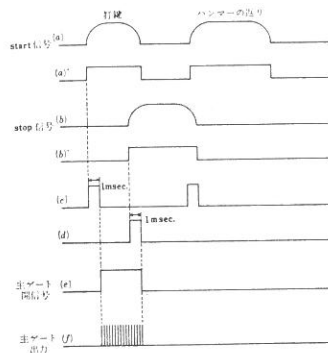


(b) ハンマー速度デジタル変換部

ハンマー速度をデジタル的に検出するためのタイムチャートを第6図に示す。第5図に示す光電ピックアップ回路からの出力波形は第6図(a), (b)に示すように、立ち上がり時間の長いパルスであり、かつハンマーの速度に応じてその波形も変化する。そこで差動アンプとシュミットトリガ回路を用いて波形整形を行なう。(第6図(a)', (b)') このトリガレベルを調整することによってノイズによる誤動作をふせぐ。打鍵強度測定では、打鍵前に度数計を除くすべての計数回路及びフリップフロップがリセットされていなければならない。そこで、start 信号の立ち上がりを利用して 1 msec のパルスを作り、それによって測定回路をリセット状態にする第6図(c)。実際の測定、すなわち主ゲートの開閉は、この 1 msec のパルスの

立ち下がりで開始される第6図(e)。stop 信号用チャンネルにも同一の回路をとりつけ、主ゲートが stop 信号から 1 msec 遅れて閉じられるように設計している。従って実際の主ゲートの開時間はフォトトランジスタの出力である start, stop 信号の時間間隔に等しくなる。

第6図 測定時のタイムチャート

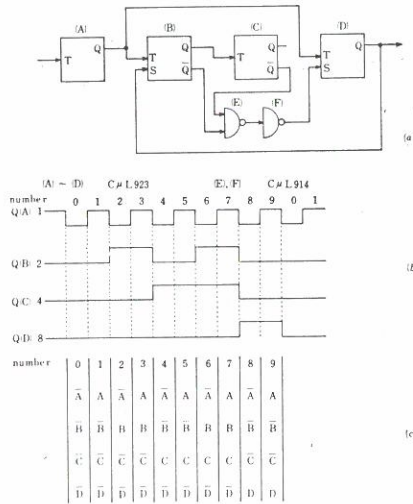


この幅を測定するためにクロックパルス発振器を用いる。精度よく分析するためには高い周波数を用いることになるため、計数用のカウンタの桁数を多く必要とする。ここでは 100 KHz とした。この時の分解能は $10\mu\text{sec}$ となる。ハンマーの速度は実験的に ff の時約 10m/sec となることが求められている。第4図における2つのフォトトランジスタのとりつけ間隔 D が 8mm であることを考えると、 ff の時のゲートパルスの幅は 0.8msec となる。従って分解能による速度分析の相対誤差は、 $10\mu\text{sec}/0.8\text{msec}=1.25\%$ である。打鍵強度が弱くなると計数値が大きくなるため相対誤差は小さくなる。クロックパルス発生回路は水晶制御されているので、その安定度は $\pm 1 \times 10^{-4}/\text{day}$ である。

(c) 主ゲート制御回路

これは、第6図(e)で示されるゲートパルスによって開かれ、クロックパルスを後続の計数部へ送る制御回路である。実際のピアノ打鍵時は、あやまって弱く鍵盤に触れることにより start 信号は発生するが、ハンマーが弦を打たないこともあり得る。すなわち、start 信号のあと stop 信号が到来しない場合がある。また、打鍵の直後ハンマーのバックアクションによって stop 信号が2つ続いて発生することもあり得る。そこで、第7図に示すような判別回路を用い、正規の start, stop 信号かを見分け、誤動作をさける。到来するすべての start 信号で回路のリセットを行ない、ゲートを開き計数を開始する。続けて start 信号が来た場合も同様に回路のリセットを行ない、計数を開始する。stop 信号は、それが正規のものすなわち、start 信号のすぐ後に到来したものによってゲートを閉じ、度数計駆動のための制御信号を発生させる。もし、stop 信号のあと続いて誤った stop 信号がきても FF 2 が閉じられているので度数計を駆動しない。この判別回路を用いることにより、1回の打鍵を2回打鍵と誤って計数したり、打鍵しないときに start 信号のみによって度数計が駆動するような誤動作をさけることができる。第8図に回路の詳細を示す。

第9図 計数回路



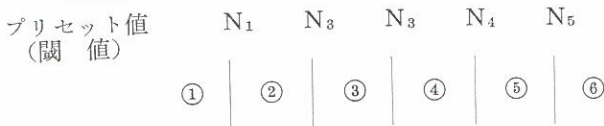
(e) プリセット値設定及び分類選別部

前節までに述べた回路によって打鍵強度をハンマーの速度を中間変数としてデジタル量に変換することができることを示した。ここではハンマーの速度に対応する計数値をいくつかのクラスに分類する強度分析用分類選別回路について述べる。

強度分類を6分割にすることを目的として閾値を5つ設定する。これを N_1, N_2, \dots, N_5 とし、下の不等式を満足しているものとする。

$$N_1 < N_2 < N_3 < N_4 < N_5$$

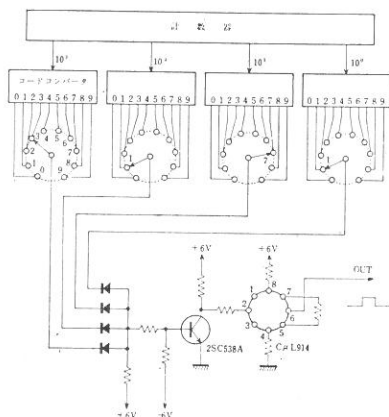
また、それぞれのNの値は、計数回路が4桁であることに对应して4桁の10進数とする。いま1つの閾値に対する分類選別回路を第10図に示す。ここでは $N=3171$ となっている。この閾値のプリセットは10接点の切換スイッチにより任意の4桁の数値に設定することができる。第10図において、計数器の計数値と10接点スイッチの表わすプリセット値が一致したとき、CμL914の出力にプラスパルスが現われる。このパルスは計数器の内容が設定された閾値に一致した時発生する。従って、閾値 N_i に対する一致パルスが発生した時は、それ以前に $N_{i-1}, N_{i-2}, \dots, N_1$ が発生している。ここでは、最後に発生する一致パルスのみを問題にしているのであるから、これを判定する論理回路を必要とする。例えば下図において、主ゲートを通過するパルス数が④に入るとき、



すなわち、 N_3 より大きく N_4 より小さい時、主ゲートが閉じられるまでに N_1, N_2, N_3 に対する一致パルスを発生する。しかし、ここでは領域④に対する度数計のみを駆動しなければならない。この判定のための論理回路は、第3図DECODER内に示されている。FF1, FF2, ..., FF6の6つのフリップフロップはそれぞれstart信号、 N_1 に対する一致パルス、 N_2 に対する一致パルス……、 N_5 に対する一致パルスによって順次反転し、最後の閾値に対するゲートのみを開く。前述の例を再び引用すると、start信号によってFF1が反転し、つぎに N_1 に対する一致パルスによってFF2が反転しFF1をもとにリセットす

る。順次 N_2 , N_3 に対しても同様の動作を起し、主ゲートが閉じられた時 $F F 4$ のみが反転し、ゲート G_4 のみを開いている。6つのゲートには stop 信号によって作られた $100msec$ の度数計駆動用のパルスが加えられていて、この時 G_4 のみがこのパルスを通して度数計駆動部へ信号を送る。

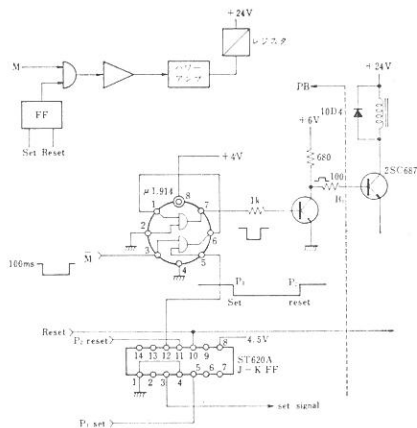
第10図



(f) 表示部

表示部は6つの度数計から成る。この度数計には、Hengstler社製電磁カウンタF形10進6桁用のものを用いた。(e)項の終わりに述べたごとく、6つのゲートの中で最終の閾値に対応する1つのゲートの出力に、度数計駆動用パルスが現われる。このパルスが第11図のパワーアンプによって電力増幅され度数計を駆動する。

第11図



以下、第2図の構成には表われていない補助回路及び制御回路について述べる。

(g) テスト信号発生回路 (第12図)

測定回路テストするために擬似の start 信号, stop 信号を発生する回路を持っている。これは電源周波数 $60Hz$ をフリップフロップで $1/16$ 分周, $1/32$ 分周して $62.5msec$, $125msec$ の2つの周期をもつパルスが発生するものである。これによって計数回路, 分類選別回路, 表示回路のチェックを行なうことができる。

Physiological researches regarding the fundamental touch in piano playing. With special reference concerning researches for trial manufacture of the equipment for analyzing and measuring the intensity of touch and the time interval of the swing-strokes.

Sho. katayama

This paper describes the instrumentation for measuring the tone-volume of the piano.

The tone-volume depends on the amount of kinetic energy which the player spends on striking the key. The kinetic energy is in direct proportion to the mass set in motion and is the square of the velocity.

The mass set is always constant and the energy depends only upon the velocity of the hammer. Thus it is possible to analyse the tone-volume by measuring the velocity of the hammer. Electronic digital device has generally great advantages over the analog in the field of physical measurement.

The velocity is converted to the time interval by photo-transistors and flip-flop.

This time the signal opens the gate, through which the clock pulse with 100KHz.

Then it is transmitted to electronic pulse counter with the consisting of 4 decimal counting units. The number of pulses counted by this counter, is proportional to the inverse of the velocity, and is compared with 5 preset values and activates one of 6 magnetic counters. Each magnetic counter indicates the number of the swing-stroke, whose velocity belongs to the corresponding class. This equipment makes it possible to measure the intensity of the tone precisely and to obtain its distribution.

In case $10m/sec.$ is velocity it corresponds to "ff" tone, and the precision is about 1.25%. The precision becomes better with the decrease of tone-volume.