

ピアノ奏法における基本的タッチの生理学的研究

第 2 編

特に打鍵強度分析装置に関する研究

岡山大学医学部第一生理学教室（主任：西田 勇教授）

片 山 昭

（昭和54年4月11日受稿）

Key words: ピアノ奏法の生理学的研究

1. はじめに

近時、学校教育における音楽は、その内容において戦前とは比較できないほど充実されてきた。中でも器楽における演奏活動は、FM ラジオ、テレビ、ステレオ再生装置などの普及によって一層盛んである。その結果、家庭でも器楽演奏が一般化してきた。ことにピアノ演奏の普及は著しく身近な楽器として浸透しているようである。ピアノという楽器は、1700年の初め頃できたもので楽器の歴史からいえば必ずしも古いとはいえない。この楽器に対する興味は、他の楽器とは異なり改良を重ねてきた歴史があること、そして、ピアノに関する作品や技法の面で歴史的にいろいろの変化がある点である。また、ピアノ演奏という形態を科学的立場から見ると非常に興味深いものがある。この点についてスイスの生理学者 W.R. Hess¹⁾ は、「演奏者は触覚的な固有経験をもととして、記憶にたよってピアノの鍵をたたき、一連の音の組み合わせを客観化するのである。その習いははじめには、彼は先生を模倣し、彼の優れた先生の指導によって音符の配列や、指や手の運動神経支配を修得したものにちがいない。しかし、すでに完成しつくした一芸術家として巣立ったときには、タッチの仕方、あるいはリズムその他の手段を通じて、演奏に自分の独自の感情をそえ、独特の主観的色彩をおこむことができるようになる。精神運動機能に関心をもつ生理学者が、この運動作用のすべてに、きれめなくつづく、複雑な脳の神経支配構造に関連づけようとしても、結局は力動的に表現された秩序を驚嘆してながめるだけに終わるであろう。特異な

しかもおおくの場合、遺伝によって獲得した天賦の才があらかじめ存在していたものと考えざるをえないのである。」と述べている。このようにピアノ演奏に適用される生理的機能は、複雑多岐にわたり音刺激によって引き起こされるさまざまな生理的变化の把握は容易ではない。しかしその反面、問題を奏者がピアノの鍵をたたくという打鍵だけに限っていうならば、基本的問題はただ一つ、奏者が鍵盤をたたく力の変化、つまりハンマーが打弦する瞬間の力にしばられる。この点に着目し、打鍵によって起こる力の変化をどのようにしてとらえるかが、本研究の目的である打鍵強度分析装置の製作である。ピアノ奏法の科学的研究は、打鍵によって生じるハンマーの打弦する瞬間の力の解明と、(すなわち打鍵の強度は音の強弱につながるという考え方から) 力の変化を起こさせる側、つまり奏者の演奏によって起こる身体運動機能および精神運動機能の生理的变化の究明によって成り立つ。

以上のような考え方から、打鍵強度分析装置により打鍵速度を測定し打鍵システムの応答特性を研究するために測定装置を開発したのでまとめてみた。

2. 研究方法

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言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るのに対し、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。

3. 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 Fig. 1. 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、

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

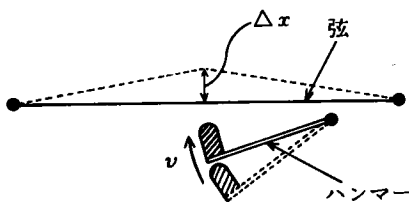


Fig. 1. Illustration of principle.

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、

$$Ed = k\Delta x$$

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たる音の強度は、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、打鍵強度を測定し、あわせて打鍵回数、打鍵間隔も記録できるように製作した。

Fig. 2. に原理的な構成を示す。

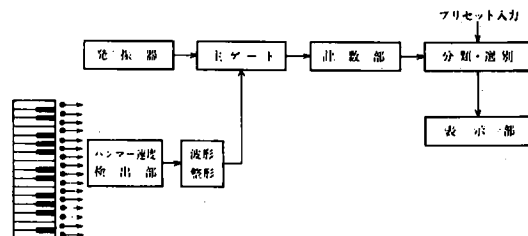


Fig. 2. Function diagram of hammer speed measurement.

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、Fig. 3. 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。

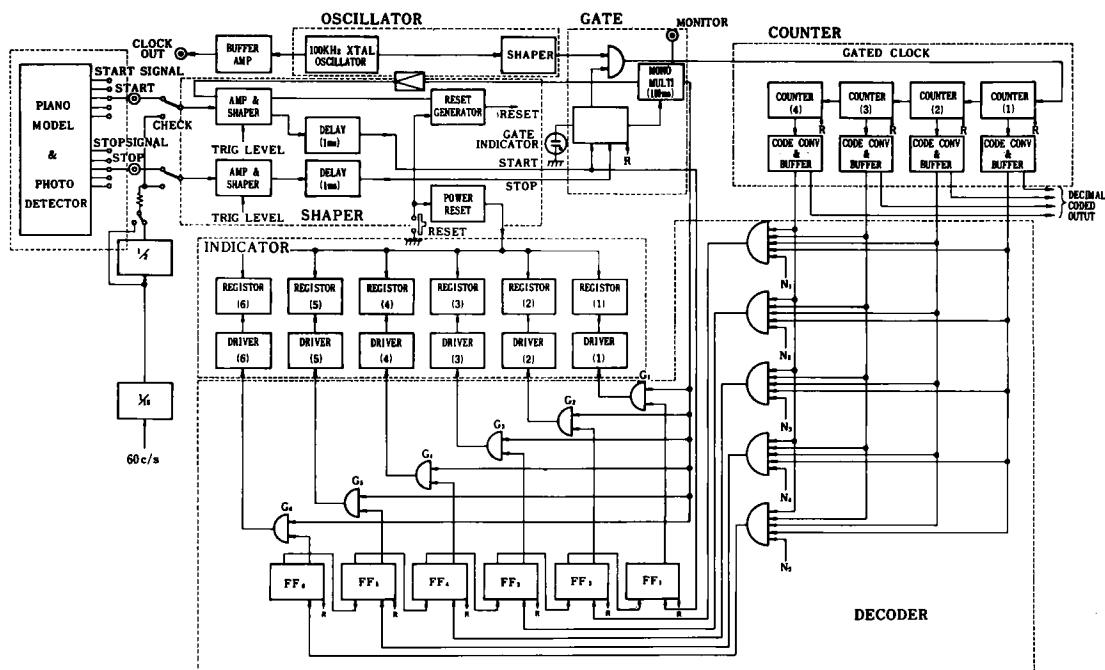


Fig. 3. Circuit configuration.

- 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、100 KHz 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 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 100 msec 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 G 3 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 (フォトランジスタ、シャープ SPD-500) を Fig. 4. に示すように配置する。このフォ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り時刻の間の時間を ΔT

(sec)とし、2つのスリットの間隔を $D(cm)$ とすると、ハンマーの速度 v は次式で与えられる。

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

フォトランジスタ出力信号のプリアンプ回路として Fig. 5. 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。打鍵強度分析装置の接続は、ケーブルと BNC コネクターにより行ない、36鍵のうち任意のチャンネルを選択できる。

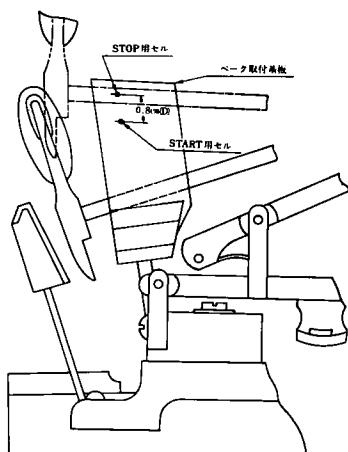


Fig. 4. Hammer mechanism and photo-cell detector.

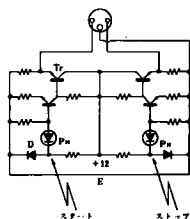


Fig. 5. Sensing circuit for photo detector.

(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 Fig. 6. に示す。Fig. 5. に示す光電ピックアップ回路からの出力波形は Fig. 6. (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。(Fig. 6. (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 Fig. 6. (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 Fig. 6. (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。従って実際的主ゲートの開時間はフォ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。

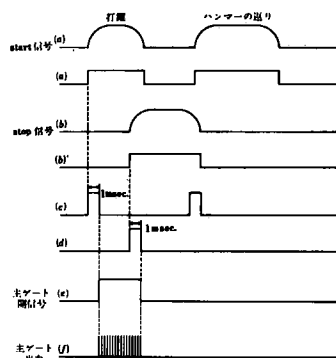


Fig. 6. Waveforms of signals in measuring circuit.

Fig. 6. (a), (c)および(f)の実測波形を Photo. 1.

Photo. 2. で示す。Photo. 1. は 2 msec/div で、上部パルス波形が Fig. 6. (c)に対応している。ピックアップ回路出力波形（下部波形、 2 V/div ）は最大値 8 V の振幅が得られているが、ハンマー速度によるパルス位置の変動を小さくする目的で、ここではトリガレベルを 2 V に設定している。Photo. 2. は 1 msec/div で上部にクロック波形（負パルス、 100 KHz ）、下部が Fig. 6. (c)である。この例では主ゲートが約 5 msec 開いて約 500 個のクロックをカウンタ回路に送出していることを示している。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 $10\text{ }\mu\text{sec}$ となる。ハンマーの速度は実験的に f 時約 10 m/sec となることが求められて

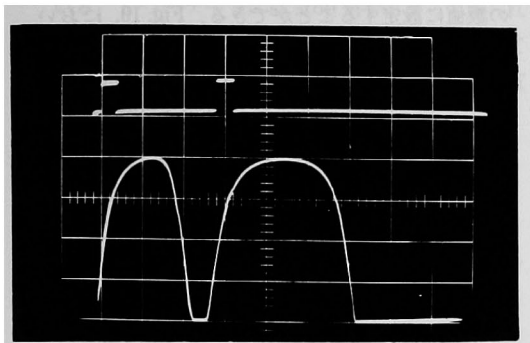


Photo. 1. Photo-cell output (lower wave) and start pulse (upper wave).

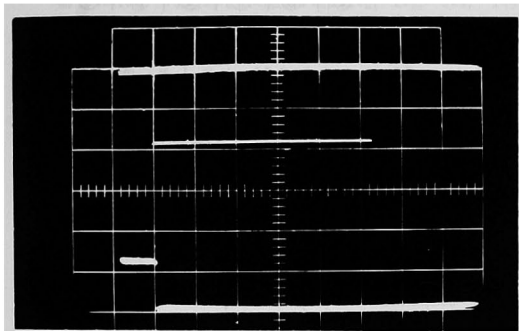


Photo. 2. Start pulse (lower wave) and clock pulse passed through main gate (upper wave).

いる。Fig. 4. における2つのフォトランジスタのとりつけ間隔Dが8 mmであることを考えると、 f の時のゲートパルスの幅は0.8 msec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、Fig. 6. (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、Fig. 7. に示す

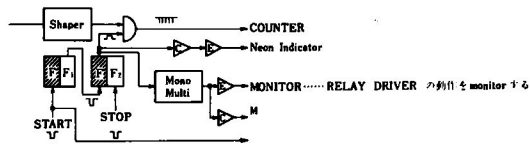


Fig. 7. Function diagram of main gate control circuit.

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FF2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。Fig. 8. に回路の詳細を示す。

なお、今一つの方法として、Fig. 4. の構造において、ハンマーが打鍵する瞬間（すなわち、ハンマーがもっとも高い位置にあるとき）、ちょうどstop信号用のスリット光線がさえぎられる位置に、フォトランジスタと光源を配置する方法が考えられる。これによれば、stop信号の数と打鍵の回数が一致するから、stop信号が主制御信号として度

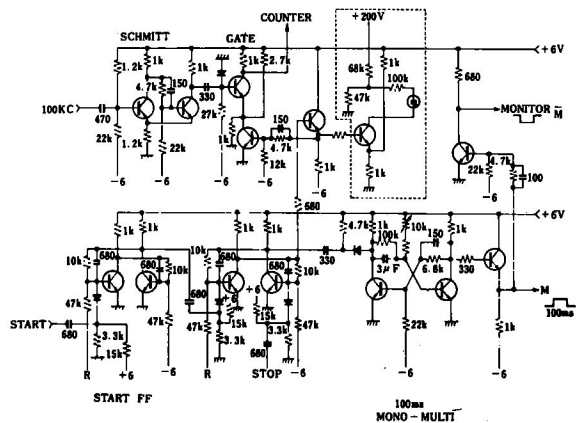


Fig. 8. Main gate control circuit.

数計を駆動するような回路を用いれば、Fig. 7. の判別回路と同様な効果をもたせることができる。

(d) 計数回路及びコードコンバータ

主ゲートを通過したクロックパルスを計数する計数回路は、Fairchild 社の集積回路(CμL 923, CμL 914)を用いている。10進1桁の回路構成をFig. 9. (a)に示す。2進10進コードは通常の1—2—4—8コード(同図(b))を用いた。計数値をあらかじめプリセットされた設定値と比較分類するために、計数回路の内容をコードコンバータによりFig. 9. (c)の真理値表に従って10進の信号に変換しなければならない。

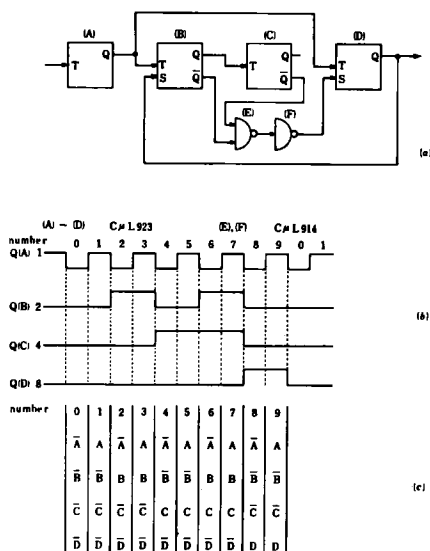


Fig. 9. Binary-coded-decimal counter.

(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Fig. 10. 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。Fig. 10. 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、CμL 914 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、

プリセット値 (閾値) $N_1 \quad N_2 \quad N_3 \quad N_4 \quad N_5$
① | ② | ③ | ④ | ⑤ | ⑥

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、Fig. 3. DECODER 内

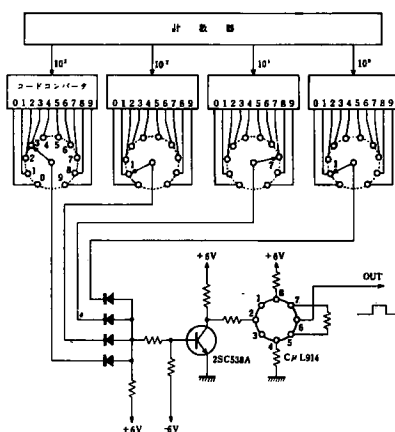


Fig. 10. Coincidence circuit of count number.

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 FF4 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 100 msec の度数計駆動用のパルスが加えられていて、この時 G₄ のみがこのパルスを通過させて度数計駆動部へ信号を送る。

ここで速度 v (cm/sec) は、計数值 N から

$$v = \frac{0.8}{\Delta T} = \frac{0.8}{N} \times 10^5$$

なる関係式によって求められる。これを図示すると Fig. 11. の実線のようになる。今後、被検者による実験を通して、音響強度 ff , f , mf , mp , p , pp とハンマー速度 v の関係を求め、それによって同図に示すようにプリセット値 N_1 , N_2 , N_3 , N_4 , N_5 を決定する。さらに強度分布の詳細を測定したい場合には、例えば、同図 N_1 , N_2 , N_3 , N_4 , N_5 のように mp の領域内を細かく分割することも可能である。

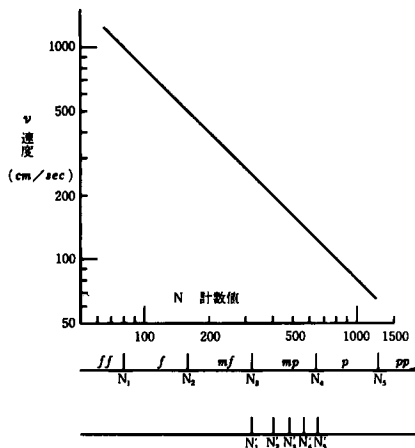


Fig. 11. Characteristics of hammer velocity vs. count number.

(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 Fig. 12. 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。

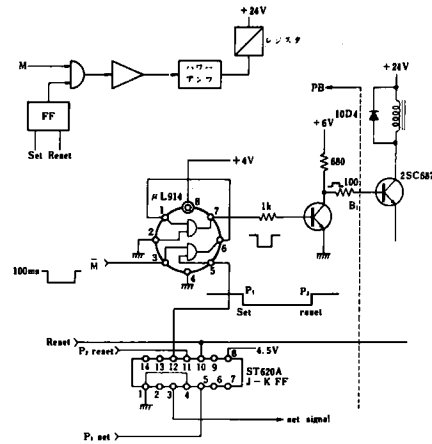


Fig. 12. Driving circuit of mechanical register.

以下、Fig. 2. 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 (Fig. 13.)

測定回路をテストするために擬似的 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 60 Hz をフリップフロップで 1/16 分周、1/32 分周して 62.5 msec, 125 msec の2つの周期をもつパルスを発生するものである。これによって

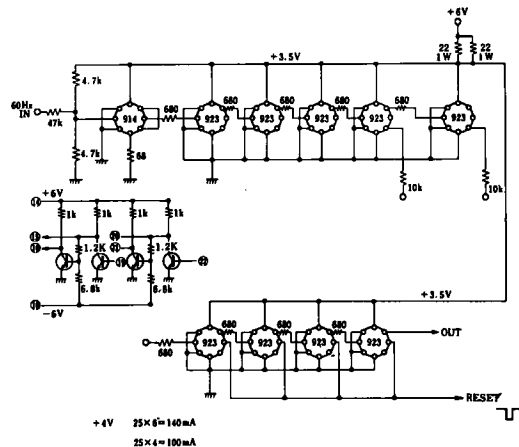


Fig. 13. Test signal generator.

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。

(h) リセット回路 (Fig. 14.)

1 回打鍵ごとにすべての計数回路 (度数計は除く) と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。ここでは (b) 項で述べたように、start 信

参 考 文 献

1. Hess, W.R. (平井富雄訳): 心理学の生物学的基礎, 19—20 文光堂, 東京, 1962.
2. 中谷孝男: ピアノの技術と歴史, 音楽之友社, 東京, 1965.
3. 安藤由典: 楽器の音響学, 151—164 音楽之友社, 東京, 1971.
4. Ortman, Otto: *The Physiological Mechanics of Piano Technique*. E.P. DUTTON & CO., INC. New York. 1962.
5. Fielden, Thomas: *The Science of Pianoforte Technique*. MACMILLAN & CO., LTD. London. 1961.
6. Gerig, R.R.: *Famous Pianists & Their Technique*. ROBERT B. LUCE, INC. Washington. 1974.
7. Schmid, Hermann: *Electronic Analog/Digital Conversions*, VAN NOSTRAND REINHOLD. London. pp. 10—12, pp. 230—413, 1971.
8. Richards, R.K.: *Electronic Digital Components and Circuits*. VAN NOSTRAND. New York. pp. 30—63, 1967.
9. 志村正道: 電子回路II (ディジタル編) 昭晃堂, 東京, pp. 51—106, 1976.
10. 井口征士, 鈴木 胖: データアキュイジションシステムのための IC 利用技術—III, IV. システムと制御. 第20巻, pp. 547—556, pp. 621—629. 1976.
11. 片山 昭: ピアノ奏法における基本的タッチの生理学的研究, 第1編, 打鍵強度および間隔の測定分析装置の開発. 岡山医誌, 91, 1979.

Physiological research into fundamental touch in piano playing
Part 2. Equipment for analyzing and measuring the intensity
of the swing-stroke

Sho KATAYAMA

Department of Physiology, Okayama University Medical School

(Director : Prof. Isamu Nisida)

This paper describes instruments designed to measure 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 analyze the tone-volume by measuring the velocity of the hammer. Electronic digital devices generally have great advantages over analog ones in the field of physical measurement.

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

The signal opens the gate, through which flows a clock pulse of 100KHz.

This is transmitted to an electronic pulse counter 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 to activate one of 6 magnetic counters. Each magnetic counter indicates the number of the swing-stroke, of which the velocity belongs to a previously classified group. This equipment makes it possible to measure the intensity of the tone and its distribution precisely.

A velocity of 10m/sec. corresponds to an "ff" tone, with a precision of about 1.25%. The precision increase with decrease of the tone-volume.