

「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研究」(第一報)

片 山 昭

音楽教育は近時きわめて盛んであるが音楽の分野における生理的機能はより広範囲、高度でありながら、その方面の生理学的研究は未開発のものが多い。特に音楽演奏上の技法の問題は、人間のもつ情緒的機能をいろいろな芸術表現形式によって、時間的、空間的に表現する方法手段として使われている。しかし、その大部分は、過去の優秀な奏者や偉大な教師が体験した奏法を中心に、経験や教育効果を技法理論として体系化したものが多い。ここにおいて、技法の進歩を考えるには、さらに科学的、客観的に究明、検討する必要性が痛感される。かかる見地から、ピアノ奏法における基本的タッチの生理学的研究の一環として、音刺激から起こる複雑な情緒的变化、生理的变化を究明する手がかりを、演奏技法の面で考えてみた。演奏技法のなかで比較的客観的に把握されると考えられる、ピアノの基本的奏法の面に着目し、ピアノの練習時における指の機能を知るために、打鍵強度および打鍵間隔を中心とした分析装置の試作を計画してみた。同時に、筋電図学的研究を併用して、手や指の機能を解析し、ピアノ演奏の際に起こるいろいろな生理的要因を、究明する手がかりを得たいと考えている。また、研究の進展状況によって、さらに広範囲な問題と取り組まなければならないことが予想され、分析装置の規模は、実験の進展段階に従って、拡大、拡充するように考慮されている。

概 要

打鍵強度と打鍵間隔を測定するためには、いろいろな方法が考えられる。打鍵強度の測定として、まず第一に考えられるものは、通常の打鍵による音波(ピアノ線の振動)をマイクロホンで受ける方法である。マイクロホンピックアップの電気信号を増幅した後、波高値分析回路によって、音の強弱を分類することである。この方法は、打鍵機構に変化を加えないという点から、被験者(ピアノ奏者)に異なった音刺激を与えず、まったく通常の状態、テストを行なうことができるという長所をもっているが、各鍵盤に対応する一音一音を分類して収録することが不可能であるため、所期実験には適さない。次に、圧電素子、あるいはストレンゲージを用いて、打鍵圧力あるいはピアノ線の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、最弱音から最強音までを忠実に測定することが困難であり、かつ、この方法においても、同様に複雑な波高値分析回路を必要とする。以上の2つのアナログ方式においては、回路全体が非常に複雑になるばかりでなく、十分な精度を期待することもできない。

これに対して、デジタル技術を採用することにして、音圧や振幅の代わりにピアノのハンマーの速度を、フォトトランジスタを用いてデジタル的に測定することが考えられる。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、計数回路、論理回路などは、容易にそれを応用することができる状態にある。また、全トランジスタ化することによって、分析装置の取扱いを簡単にし、応用面を拡大し、所期の目的を十分満足させることができると考えられる。あわせて、デジタル化を行なうことによって、打鍵間隔の測定がきわめて容易になる。

測定の方法は、ハンマーの動作時にそれに取付けられた小片（金属片）により、光源（理論的には点光源）とフォトトランジスタとの間をさえぎり、ハンマーの速度に対応したシャドウパルスをフォトトランジスタの出力としてとりだす。運動量と速度の関係式、

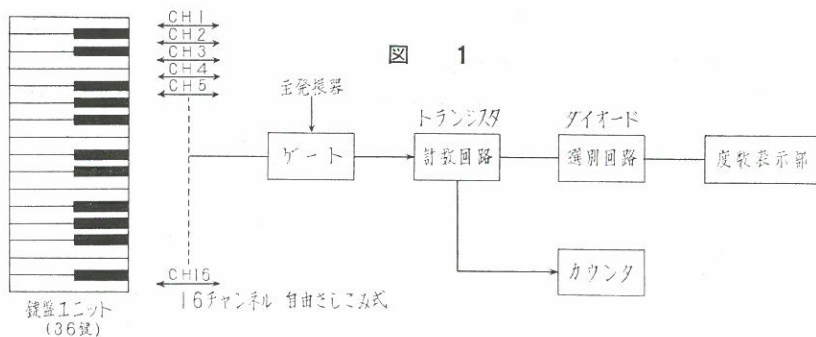
$$P = m \cdot v$$

から、ハンマーの質量 m を一定とすると、ハンマーの運動量 P は速度 v に比例する。各ピアノ線の固有振動数が異なることから、同じ運動量に対してもピアノ線の初期振幅は異なる。また、人間の知覚神経が線形でないことから考えて、人間に感じられる音の強さとハンマーの速度 v を一義的に定義することは困難である。しかし、速度 v と音の強さとの間に一対一の対応関係が存在することは明らかであるから、あらかじめ速度 v と音の強さの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。

分析装置の構造

分析装置は次の9つの主要部分からなりたっている。

1. 鍵盤装置（フォトトランジスタによるシャドウパルス検出機構を含む）
2. 整形回路
3. ゲート回路
4. 計数回路
5. 選別回路および度数表示部
6. 間隔測定のための計数回路
7. 選別回路および表示部
8. 制御信号発生回路（主発振回路、ハンマーリターンシャドウオフ装置）
9. 電源回路



1. 鍵盤装置

日本楽器製の平型ピアノの鍵盤とアクション（C～H36鍵）を使用する。第一段階の実験では、無音の装置とし、ハンマーが運動する速度を検出する方法として、ハンマーに金属片をとりつけ、光源とフォトトランジスタとの間を金属片がさえぎるようにする。使用するフォトトランジスタの数は、36個である。鍵盤数は36鍵であるが、いろいろな実験を

予想して、鍵盤が自由に16鍵まで選択できるような、差込み式とする。

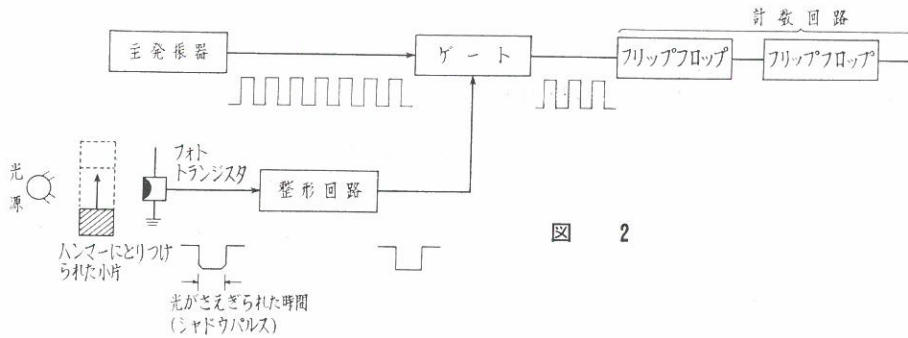


図 2

2. 整形回路

理想的には点光源に対して、フォトトランジスタの感応面積も点状と見なせることが望まれるが、実際にはともに有限の幅をもっている。従って、シャドウパルスの波形は、図2に示すように、立ち上がり時間、立ち下り時間ともに無視できない状態にある。ゲート回路の動作を確実にするため、シュミットトリガ回路を用いて完全な矩形波のパルスに再生する。これが整形回路である。

3. ゲート回路

上記の打鍵速度検出部において測定され、整形回路で完全な矩形波にされたシャドウパルスを、デジタル量（数値）に変換する回路である。すなわち、一方の入力として既知の発振周波数をもつクロックパルスを加えておき、シャドウパルスの期間だけゲートを開き、そのパルス幅すなわち、打鍵速度を表わすパルス群をとりだす。このゲート回路は、ダイオードあるいはトランジスタを用いた図3のようなAND回路で実現できる。

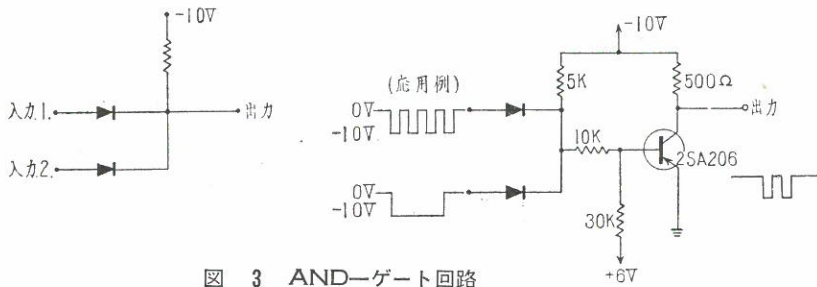


図 3 AND-ゲート回路

4. 計数回路

ゲート回路によって変換されたシャドウパルスに比例したパルス群を計数する回路である。これは2安定マルチバイブレータ（通常フリップフロップとよばれる）を、カスケードに接続した2進計数回路からなる。汎用計数回路としては、2進10進法（2進素子4段を用いて10進1段を構成する方法）が行なわれるが、ここでは、後段に選別のための論理回路が続くことを考えて、純2進計数方式を採用する。フリップフロップの所要段数は、クロックパルスの周波数とシャドウパルスの幅から決定される。ここで使用するフリップフロップの回路は、図4に示すごときものである。

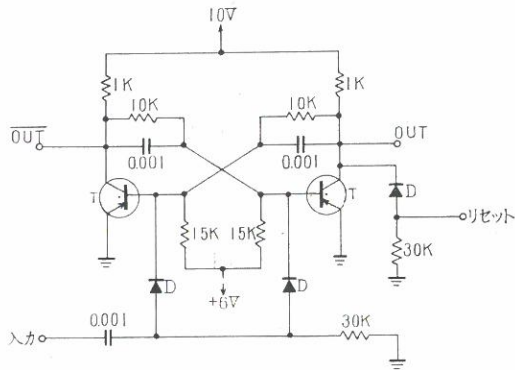
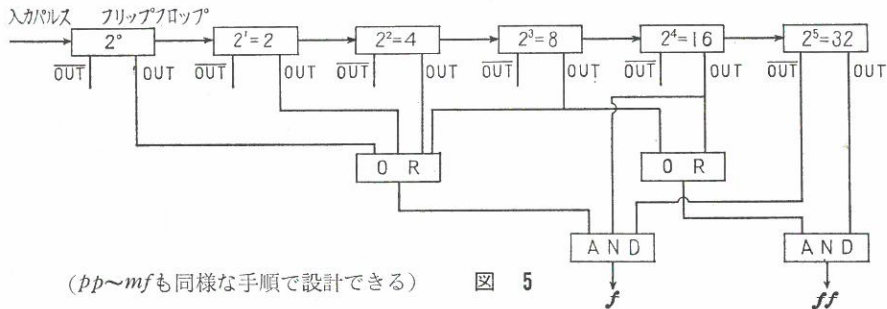


図4 フリップフロップ

5. 選別回路および度数表示部

計数回路で計数されたパルス数を音の強弱に応じて分類し、各強度の頻度（度数）を累計、表示する回路である。計数回路のパターン（計数値）を弁別するためには、ダイオードによるマトリックス状あるいはピラミッド状の論理回路を組む必要がある。これには前もって実験的に音の強度と計数パルスの数との関係をはっきりさせておかねばならない。ここでかりに、強度と計数値の間に、 ff 40以上、 f 32~39、 mf 24~31、 mp 16~32、 p 12~15、 pp 11以下、の関係が求まったとすると、強弱（ ff 、 f 、 mf 、…… pp ）の分類は、図5のような論理回路で実現できる。選別後の度数計としては(4)に述べた計数回路に比して周波数が低いので、機械的度数計（電磁カウンタ）を利用することができ、打鍵回数を求める。



(pp ~ mf も同様な手順で設計できる) 図5

6. タッチ間隔測定のための計数回路

打鍵の瞬間のパルスの立ち上がりから、次の打鍵の立ち上がりまでの時間を同じくクロックパルスを用いて計数する。リセット時間と選別のための時間を必要とするので、正確には2チャンネルの計数回路を用いて各打鍵ごとに交互に働かせる必要があるが、実際問題として、リセットと選別のためには、100 μ sec もあれば十分であり、それに対して、クロックパルスは500c/s、打鍵のくり返しは高々20c/sと考えられるのでリセット時間は無視できるものと考えて、1チャンネルのみで構成する。

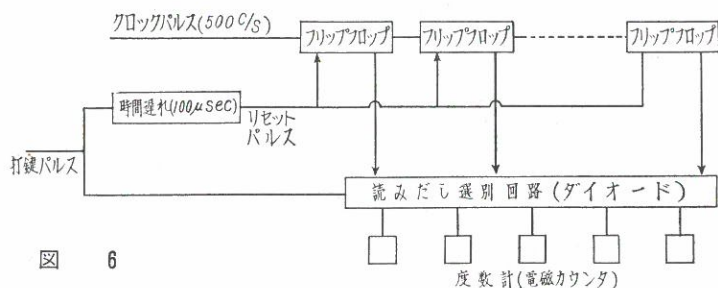


図 6

7. 選別回路および表示部

これは、打鍵パルスから、次の打鍵パルスまでの間隔を500c/sのクロックパルスで数えた結果を選別して表示する回路である。構造は、(5)の選別回路と度数表示部のものとほとんど共通である。タッチの間隔も、音の強弱の分類のごとく、例えば、

100 msec 以下

100 msec～200 msec

200 msec～300 msec

300 msec～400 msec

400 msec 以上

のごとく決められ、各間隔における頻度（度数）が現われる。

8. 制御信号発生回路

測定器を自動的に動作させるために必要な制御信号としては、

- ① リターンシャドウオフに対する制御信号
- ② シャドウパルス、デジタル化のためのクロックパルス (300KC)
- ③ 打鍵間隔測定のためのクロックパルス (500c/s)
- ④ 計数回路リセット信号 (計数開始直前に計数内容を“0”状態にもどしておく必要がある)
- ⑤ 選別回路動作信号 (計数中は選別回路の動作を止め、計数終了と同時に選別を行なうための制御信号)
- ⑥ 度数計リセット信号
- ⑦ 測定時間 (1・2・3・5分) 発生回路

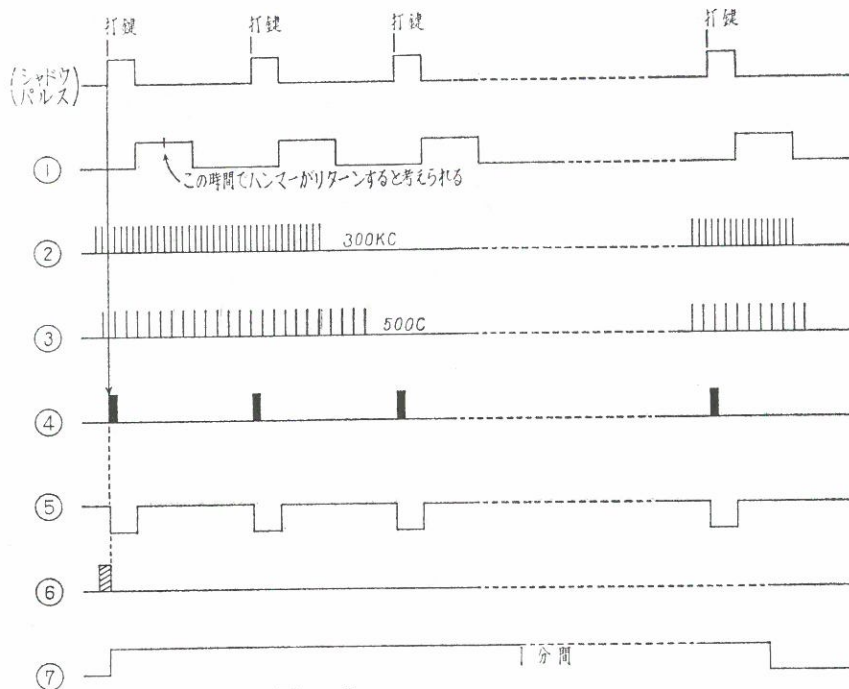


図 7

9. 電源回路

測定回路は、全トランジスタ化されているため、高圧電源は必要としない。しかし、計数回路が中心をなしているため、高い安定度をもつ電源を必要とする。その上、十分なデカップリングを行ない、スイッチングノイズや、内部干渉などにより動作が不確実になるのを防ぐ必要がある。

その他の設計上の留意点

打鍵強度の測定

フォトトランジスタを用いて、ハンマーが光束を横切る時間を測定することによって、打鍵強度を数値的に測定する方法については、上記の概要において基本的な考え方を述べた。また、この方法で得られる打鍵強度は、その強さに応じて、それぞれ、便宜上、音楽の相対的強弱表示法である、*ff*, *f*, *mf*, *mp*, *p*, *pp*の六段階に分類することについても、分析装置の構造の(5)選別回路および度数表示部の中で、その方法を示した。この場合、ハンマーの速度についての研究結果から次のことがいえる。すなわち、日本楽器ピアノ技術部の実験資料によると、ハンマーの速度は、*ff*の時、10.05 m/secであることから、最大値として15m/secとし、フォトトランジスタの前を横切るシャドウのための片は、工作上の精度とフォトトランジスタの分解能（感応面積）から考えて、5 mmとすればシャドウパルスの幅の最小値は、 $5 \times 10^3 = 0.0003 \text{ sec} = 0.3 \text{ msec}$ となる。*pp*の時のハンマー速度は、0.5~1 m/secであることから、シャドウパルスの幅の最大値は、 $5 \times 10^3 = 0.01 \text{ sec} = 10 \text{ msec}$ となり、最小値は、 $5 \times 10^3 = 0.005 \text{ sec} = 5 \text{ msec}$ となる。また、*ff*の時の0.3 msecを十分な精度で読み出すには、10倍の周波数が必要なので、主発振器の周波数は300KCとし、*pp*の時300KCをそのまま使用すると、電子カウンタは経費的にみて高くつくので、打鍵強度 (*ff*, *f*, *mf*, *mp*, *p*, *pp*)の六段階に応じて、主発振

器の周波数をきりかえるようにする。

ハンマーリターンシャドウオフ装置

ハンマーの一部が光束を横切る場合、ハンマーが上の方向に運動する時のシャドウパルスと、ハンマーが打弦してからもとの位置にかえるときのシャドウパルスが考えられる。その場合、ハンマーが打弦するときのシャドウパルスを検出し、打弦後のハンマーによって起こるシャドウパルスは、消さなくてはならないので、ハンマーリターンシャドウオフ装置を設ける必要がある。

この分析装置の研究にあたって、岡山大学医学部第一生理学教室教授西田勇先生、助教授安田浩士先生、日本楽器KKピアノ技術部長長谷重雄氏、大阪大学基礎工学部制御学科助手井口征士氏の諸先生方からいろいろと専門的な分野での資料や助言をいただき、指導を仰いだ。ここに感謝の意を表したいと思う。