

衝撃波速度の測定と高速データ収録系の製作

山下 雅道・佐野 芳徳・田中 通
小倉 啓男・倉谷 健治

Some devices serving the data acquisition of rapid processes

By

Masamichi YAMASHITA, Yoshinori SANO, Toru TANAKA,
Hiroo OGURA and Kenji KURATANI

Abstract : An electronic counter which can indicate the time intervals between successive pulses is applied to the measurement of the speed of incident shock wave by platinum film gauges, piezoelectric gauges and schlieren methods. A universal digital recorder is also assembled to compile such rapid transient phenomena as the pressure change in a shock tube and the variation of infrared spectra obtained by rapid scanning. That is, the intensities of the selected spectral region are digitalized at a definite interval and stored in predetermined number of addresses by a trigger which indicates the start of each scan. The cycle of this operation is repeated by the multiple trigger signals until all memories are filled with the spectral intensities. The universal digital recorder is also available to count and record the change in the number of discrete pulses produced by an ion detector during the scanning of a Q-pole mass filter.

概 要

衝撃波管法をはじめとする高速反応の研究に用いるエレクトロニクスについて報告する。入射衝撃波の速度測定を目的とする多点間の時間間隔を継続して測定できるカウンタと、それを使った測定例を示した。高速反応のデータ収録系としてオフラインでミニコンピュータに結合する汎用高速デジタルレコーダを製作した。これは繰返しトリガによる断続的なデータの多数回収録も可能である。

I Hop Step Jump Counter

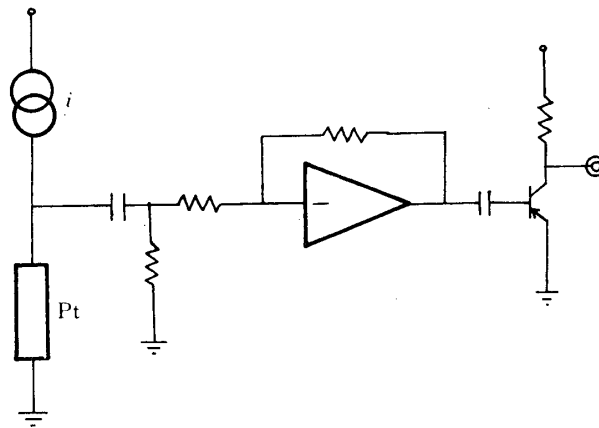
これまで入射衝撃波の速度測定は、各変換素子からの信号をオシロスコープ上にラスタ方式で表示し、各パルスの間隔を写真から読み取ることで行ってきた。これは、①複雑な操作が要求され、②トリガー信号用に測定点が1点余分に必要であり、③読み取り誤差が測定精度を支配する等の欠点がある。これらの点から、カウンタによる速度測定が望まれる。しかし、市販のカウンタは多様な機能を持つかわりに、①2測定点間の経過時間1つしか測定できず、多点間の測定には縦続した多くのカウンタが必要であり、②オシロスコープに比較すれば安価ではあるが価格対効用比が優れているとはいえない。

そこで我々は多点間の各経過時間を次々に測定し、表示するHSJカウンタを製作した。衝撃波の通過は、温度、圧力、密度の急激な変化として検知する。各々に、白金薄膜抵抗、圧電気変換素子、シュリーレン法が対応する。まずこれらの前置信号処理回路について述べる。

1. 白金薄膜抵抗

衝撃波の到達に伴って起こる急激な温度変化を検出すれば、逆に波面の通過を測定できる。金属抵抗の温度変化は大きいのでこの目的に適している。現在使用されている金属は、白金と金である。金抵抗のストリップを衝撃波管内面に貼り付ける方法は、ピックアップに曲率をつけてツラーにするような細工上の煩わしさはないので簡便であるが、リード線の処理に難点がある。白金薄膜抵抗の作り方は成書 [1] に述べられているペイント法、真空蒸着法の両方法によった。抵抗値の範囲は50~100 Ω である。薄膜抵抗に定電流を流しておき、両端の電圧の変化を微分してパルスとし、増幅しカウンタに導く。

この方法の利点として、抵抗体の巾を細くできる。欠点として、衝撃波が弱くなると抵抗値の変化が小さくなり、電気系の雑音に規定されてしまうことである。第1図に示す回路では、1000 K位までしか感じなかった。



第1図 白金薄膜抵抗信号処理回路

2. 圧電気変換素子

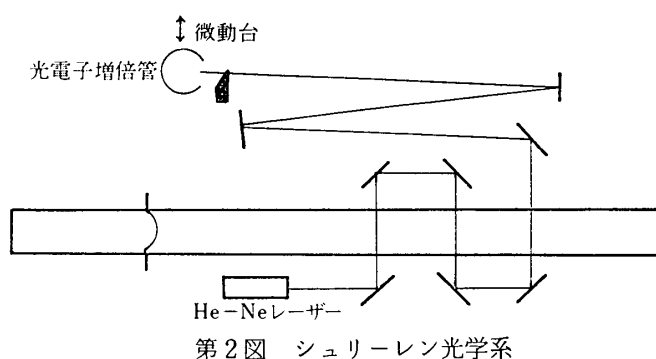
さらに弱い衝撃波では、圧電気変換素子による波面の検出が必要となる。チタン酸バリウム系素子を使い、FETのソースフォロワ回路を前置した増幅器によって波面の通過をTTLレベルのパルスに変換し、カウンタへ送った。

3. シュリーレン法

1, 2とも変換素子を衝撃波管内部に挿入しなければならず、ガラス管で衝撃波管を製作する場合これは容易でない。シュリーレン法で、ガラス管に光学窓を取り付けることなしに行い得るならば、この点有利である。

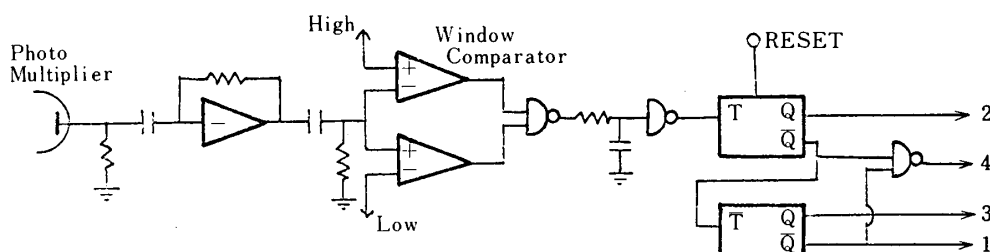
我々は、柴田化学製工業プラント用ガラス管を用い衝撃管(直径50mm, 肉厚5mm)を製作し、シュリーレン法による速度測定を行った。光学系はJ. A. Banderら [2] のものを採

用し、行路長を6.5 mとした。光源はメトロロジック製 ML 660 He-Ne レーザ(0.8mW)を用い、光電子増倍管 1 P 22 で検出した。これを第2図に示す。レーザ光をガラス管にそのまま入射したため、管軸と直角方向には大きく発散する。スリット、光電子増倍管をのせた微動台を調整し、スリット上の入射光量が最大値の1/2となるよう配置する。



第2図 シュリーレン光学系

各点での衝撃波の通過によって、光線は交互に逆方向に振られるので、これに従がい、光電子増倍管の出力には交互に逆極性のパルスが与えられる。電気系を第3図に示す。光電子増倍管の出力から低周波成分を除き、衝撃波管、光学台の機械的振動に起因する雑音を除去した。これにより、光学台を衝撃波管支持台上に据え付けることが可能となった。さらにウィンドコンパレータにより両極性のパルス列を同一極性のパルス列に整形する。このままでは信号が1つのライン上に乗っているので、T-FFを使い、各点での衝撃波通過に対応して立ち下がる4つの信号に変換し、HSJ カウンタへ送る。

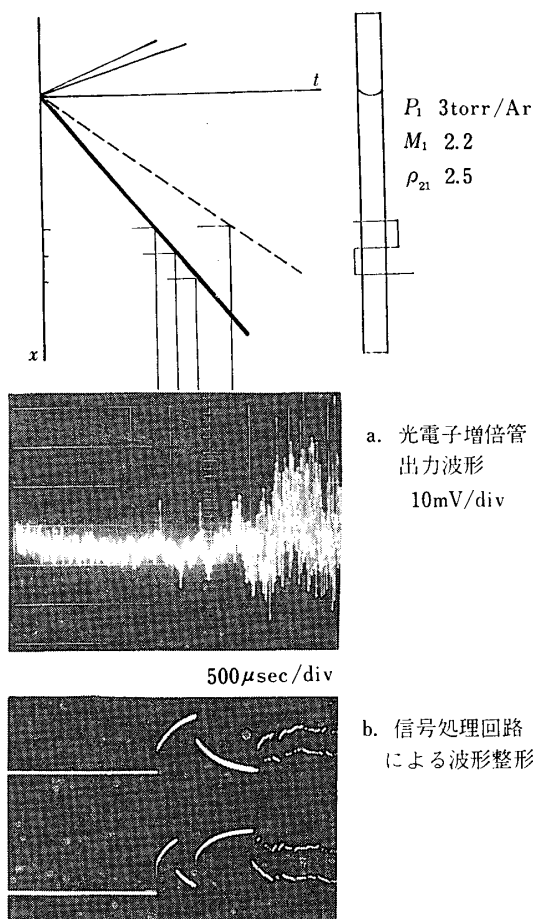


第3図 シュリーレン信号処理回路

測定例を第4図に示す。第4-a図は光電子増倍管の出力で、増倍管に起因するとみられる高周波成分と、機械的振動に由来する低周波雑音の中に第1点から第3点に対応する正負正のシュリーレン信号パルスが重畳している。これらのパルスにつづく複雑な波形は境界層の到達に関連するものであろうが、このようにS/N比が2程度の悪条件下でも、第3図に示した信号処理回路により、第4-b図に例示されている状態にまでS/N比は改善される。第4-b図はT-FFの出力のうち、2,3の波形であり、それぞれ第2,第3点での衝撃波の通過に対応して急降下している。第4図の例では、衝撃波管低圧部に3 torrのアルゴン、高圧部に

* 本文に記したように、工業プラント用硝子管を衝撃波管にそのまま採用し、シュリーレン用光学窓を取付けなかったため、高圧水銀灯程度の光では良好なシュリーレン像がえられなかった。レーザ光に取換える事によってはじめてシュリーレン信号が得られた。

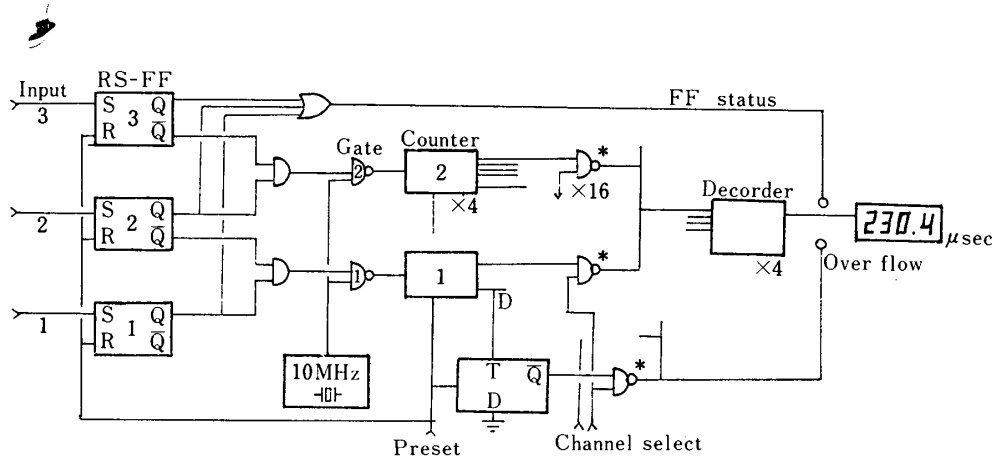
1 気圧のアルゴンを詰め、ルミラー隔膜をニードルによって破裂させて衝撃波を発生させており、HSJ カウンタにより $1-2 \tau_1 = 250.6$, $2-3 \tau_2 = 242.2 \mu\text{sec}$ がよみとられた。



第4図 シュリーレン法による速度測定

4. HSJ カウンタ

各測定点から順次送られる信号から隣接するパルスの時間間隔を測定する回路を第5図に示す。RS-FF1 にTTLレベルのパルスが入力すると、Gate 1 が開き 10 MHz のクロックパルスが4桁の10進カウンタ 1 に送られ計数を始める。次に RS-FF 2 にパルスが入力すると Gate 1 が閉ざされ、カウンタ 1 は計数を停止し、その計数値を保持する。同時に Gate 2 が開き、次に RS-FF 3 にパルスが入力するまでカウンタ 2 が計数する。測定点の数が3より多い場合は、RS-FF、カウンタを更にふやせばよい。カウンタの計数値は、2点間の時間間隔を 999.9 μsec を上限として、精度 0.1 μsec で表わしている。これを表示するには、各カウンタに保持されているデータを選択し表示回路に送ればよい。カウンタの最上位ビットをオーバーフロー表示回路に送り、計数が 1 msec を越えたかどうかを同時に表示した。再び測定にかかるときは、RS-FF をリセットし、カウンタを 0 にクリアする。RS-FF がリセットされ測定が可能であるか確かめる表示回路も付け加えた。



第5図 Hop Step Jump Counter

II. 汎用高速デジタルレコーダ(UDR)

高速過渡現象の記録においては、時間分解能、記憶容量、信号の分解能が主要な問題となる。従来多用されてきたオシロスコープは、高速性の点で優れるが他の2点については管面に対するビームスポットの相対的大きさで制約される。近年高速のデジタルメモリーを使用した記録計が市販されるようになった。メモリー素子としてシフトレジスタ(SR)、ランダムアクセスメモリー(RAM)があるが、市販機器の多くはダイナミックSRを用いている。ダイナミックSRは、常時データを円環状に循環させるため、高速単発現象の記録には適するものの、オシロスコープで得られる多様な機能を実現することは困難である。我々はメモリー素子としてRAMを選択し、単発過渡現象ばかりでなく、変化しながら繰り返す現象に適用できるデータ収録系を製作した。

1. UDR

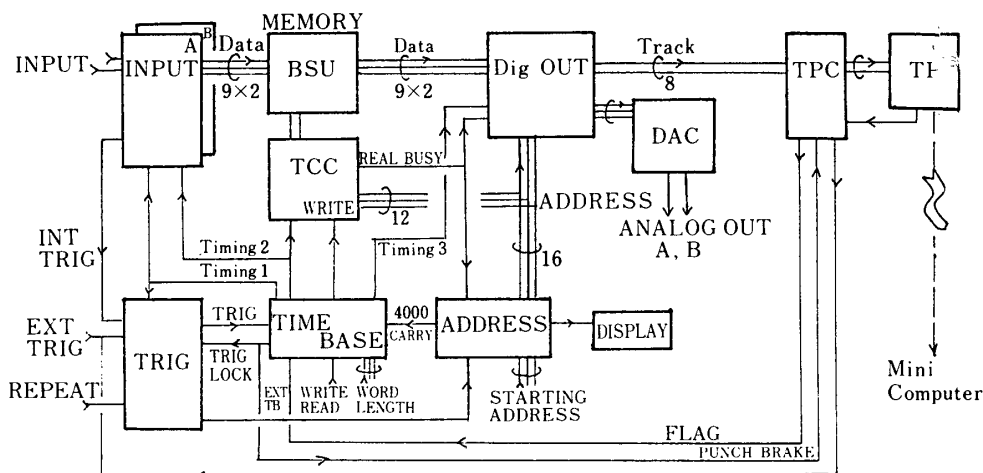
信号源として ①衝撃波管末端部の圧力波形、赤外分光器の出力、反作用質量分析計の電流出力などのアナログ量、②質量分析計チャンネルトロンのパルス出力などのデジタル量の両者を考え、プラグイン方式で選択できるようにした。必要とされる時間分解能はそれぞれ $1\mu\text{sec}$ である。また高速掃引赤外分光系のために、繰り返しトリガによりある波長範囲内の分光強度を多数回分割された異なる番地域に次々と収録できるようにした。それゆえスペクトルの時間変化は分割された番地に収録され最後にまとめて読み出される。メモリーの内容は番地とともに紙テープにさん孔し、ミニコンピュータへ送る。

第6図にUDR各部の関係を示し、以下それぞれについて述べていく。論理素子としてTTLを用いた。実装は各部ごとにプリント板を作製し、カードマガジン方式で相互に結線した。

i) Input

i-a) Analog Input

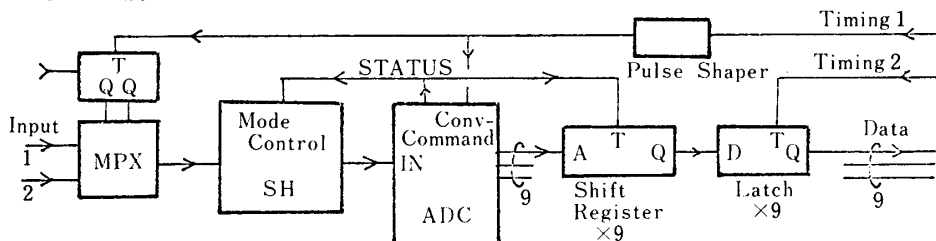
アナログ入力はA, B 2チャンネルとし、マルチプレクサ(MPX)により4チャンネル化が可能で、またA, B両チャンネルの位相をずらせて稼動し1チャンネルとすることで2倍



第6図 Universal Digital Recorder

の時間分解能 ($1\mu\text{sec}$) を得ることも可能である。使用したアナログ-デジタル変換器 (ADC) はアナログデバイスの ADC 1103-002 で、変換時間 $1.6\mu\text{sec}$ 分解能 10 ビットである。

第7図に回路を示す。ADC, MPX は Timing 1 で制御し、サンプルーホールド (SH), シフトレジスタ (SR) は ADC の変換実行を表わす STATUS 信号で制御する。Timing 2 によりラッチからメモリーへデータが送られ収録が開始する。この時 SR (8 ビット) からは、トリガより 8 語前のデータが出力されているので、トリガ以前のデータを収録できる。



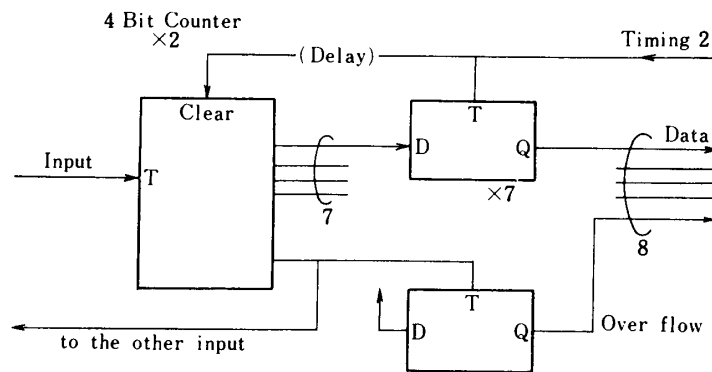
第7図 Analog Input

i-b) Digital Input

ある時間中のパルス入力を計数しメモリーへ送る回路を第8図に示す。パルス入力は、カスケード接続した 4 ビットカウンタ 2 個に導く。番地を進める際にカウンタの出力をラッチに読み込み、続いてカウンタをクリアする。1 番地あたり $2^7 - 1$ の計数が上限であるが、A チャンネルの最上位ビットを B チャンネルの入力とすることで $2^{15} - 1$ が可能となる。メモリーへはオーバーフロー、反応系の状態もデータとして送り得る。

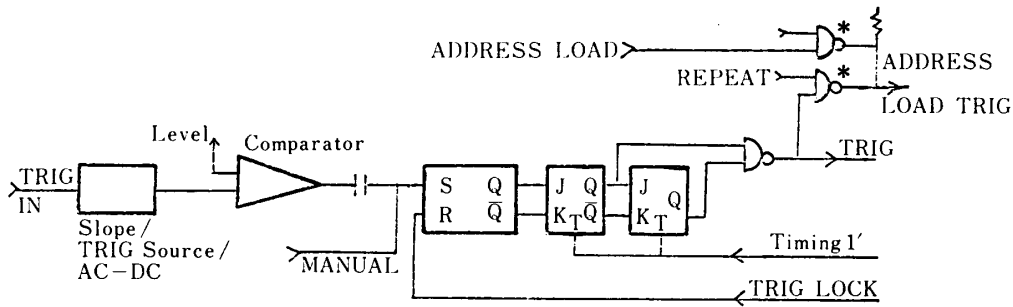
i-c) Trigger

Timing 1 に同期したトリガパルスに整形し、メモリーへの書き込み、読み出しを制御する Timing 2, 3 を開始させる。回路を第9図に示す。2 つの JK-フリップフロップにより同期したパルスが得られる。一定の動作が終了し再びトリガ待ち状態に復帰するとトリガロックが解除され、その立ち下がりでもトリガ回路がリセットされる。これにより動作中に二重にトリガがかかり誤動作するのを防ぐ。アドレスカウンタに出発番地を読み込ませるアドレスロ



第8図 Digital Input

ードトリガを, 先の Time Base へ送るトリガから得るならば, 再トリガ時にもとの出発番地に戻ることになる. 一方, 手動の番地指定を選び, 動作の開始前に一回だけアドレスロードトリガを送る場合には, 継続するトリガで番地は先へ進む. 前者はオシロスコープを使いメモリーの一部の内容を表示する際に用いる. 後者は, 一定数のデータ収録後休止し再び収録を開始する繰返し現象の記録のためである.



第9図 Trigger

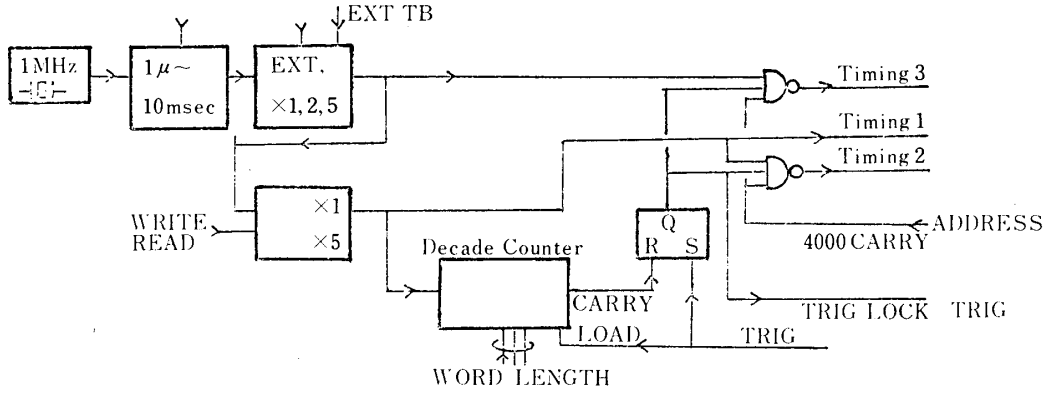
ii) Memory

メモリーシステムは東光のTM-350を用いた. BSUとそれを制御するTCCの2枚のボードからなり, メモリー素子にPチャンネルダイナミックRAM AMS 6002を用いたシステムで, アクセス時間は350nsecである. 記憶容量は4kW×18ビットで, これを2チャンネルに分割し4kW×9ビット×2, あるいは1チャンネルとして8kW×9ビット, 4kW×18ビットで使用した.

ii-a) Time Base

メモリーを中心として各部を制御する Timing 1, 2, 3を得るための回路を第10図に示す. 基本クロックパルスは1MHzで, 水晶発振器によった. 分周回路で1μsecから10msecとし, さらに×1, 2, 5の分周を行った. 書き込み(WRITE)にセットすると, Timing 1がInputに送られADCが動作する. トリガにより10進カウンタが所要の語長にプリセットされ, 同時に Timing 2が開始する. これでメモリーへの書き込みが実行され始める. プリセットされた数だけ動作が終了すると, カウンタのキャリー信号により Timing 2は停止し,

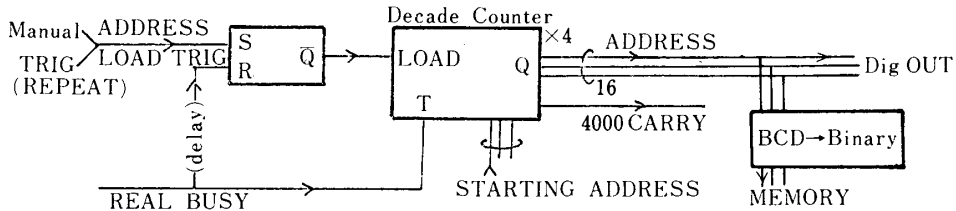
i-c) で述べたトリガロックも解除される。読み出し (READ) にセットすると、Timing 3 は Timing 2 に対し 5 倍のパルスで Output へ送られる。これは、番地を 1 つ進めるごとに 5 行のデータをテープにさん孔するためのものである。Address からは使用番地が 4000 を越えた時、無条件に書き込み動作を停止しメモリーの内容を保護する 4000 キャリーが送られる。



第10図 Time Base

ii- b) Address

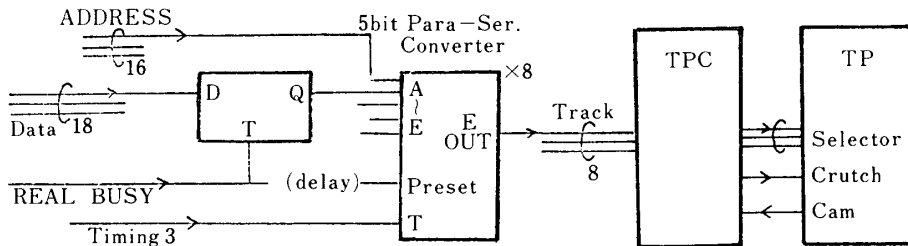
回路を第11図に示す。4桁のプリセット可能な10進カウンタで構成する。トリガにより出発番地をLOADし、Memoryより REAL BUSY 信号を受け番地を1つずつ進める。BCDを2進コードに変換してメモリーへ送る。またデータと共にさん孔され、パネル上にも表示される。



第11図 Address

iii) Digital Out

メモリーから出力されるデータは計18ビットであり、他に番地16ビットがある。紙テープのトラック数は8で内1つはラブアウト判定用として使えない。したがってデータ、番地を7行5列に分配してさん孔した。回路を第12図に示す。REAL BUSY 信号によりメモリー



第12図 Digital Out

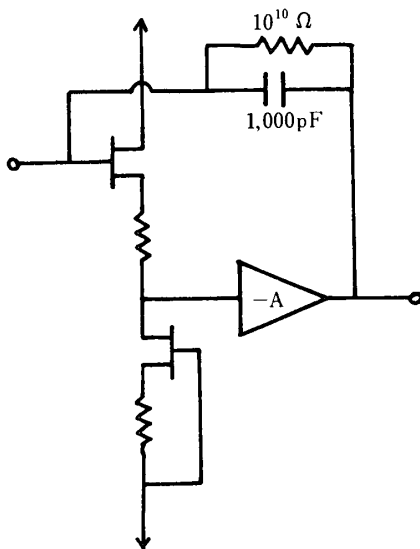
の出力をラッチし、5ビット-パラレル入力-シリアル出力シフトレジスタに番地とともにプリセットする。Timing 3はTiming 2で制御されているREAL BUSYに対し5倍の数のパルスであるので、シフトレジスタからデータをつぎつぎに5列で出力することができる。

テープバンチャー (TP) はリコーのTCP-70を用い、パンチ制御回路 (TPC) はリコーの推奨回路を参考として自作した。70語/secの速度でさん孔し、TPのカム信号をもとに全システムを制御した。

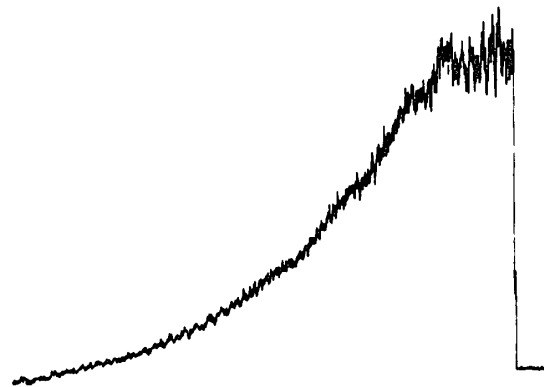
2. 単一パルス衝撃波管の圧力波形の記録

単一パルス衝撃波管を使う実験では圧力波形の精確な記録は重要であり、試料の温度履歴の計算、テイラードされているか否かの判定を左右する。オシロスコープでは分解能が1/100に限定されるうえ、電子光学的な像のゆがみによる誤差も発生する。そこでUDRによる圧力波形の記録を行った。

圧力変換素子はKistlerの601L1を使用した。前置増幅器として、FETを前置したOpアンプを容量帰還した電荷増幅器を製作した。これを第13図に示す。電荷増幅器の時定数は、帰還回路のCと並列に接続した高抵抗Rとの積などから規定される。この時定数は矩形波を容量を介して入力し、出力波形を測定することでわかる。UDRにより記録した圧力波形を第14図に示す。



第13図 電荷増幅器



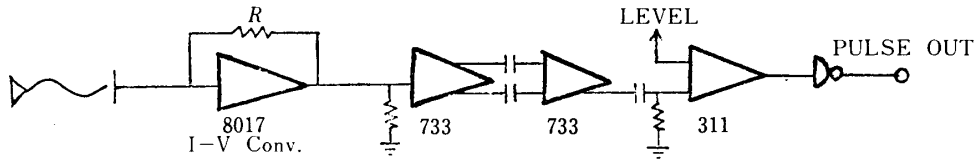
第14図 衝撃波管の圧力波形

測定間隔 $5\mu\text{sec}$, 測定点数 3000 点で, ミニコンピュータを用いアナログ変換し, ペン書き記録計に遅い速度で画いてある. データがデジタル量で, 紙テープの形で保存されているので, 当然衝撃波到達時の詳細の再現, 圧力曲線の平滑化を簡単に行いうる.

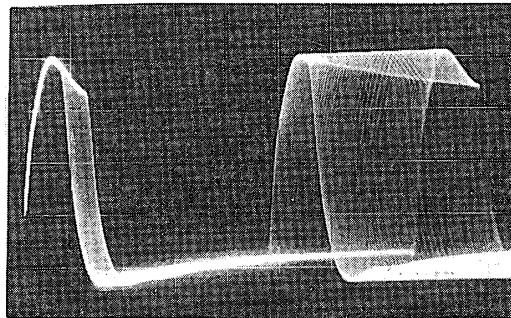
3. パルス計数法での適用

二次電子増倍管から 1 粒子入射に相応して得られるパルスを時間分解しながら計数し記録するデータ収録系としては, マルチチャンネルアナライザー (MCA) に付属する機能としてのマルチチャンネルスケーリング (MCS) がある. 市販されている MCS の時間軸のきざみの多くは $10\mu\text{sec}$ に過ぎない. これは二次電子増倍管の計数速度の上限が $10^6/\text{sec}$ とされてきたことから一面妥当であるが, MCA の主たる機能が波高分析とされ, 高速の ADC に重点の置かれた機器の設計から規定された時間軸のきざみと思われる. 我々は UDR で高速 MCS を実現した.

パルス計数用に試作した前置増幅器を第15図に示す. 高速 Op アンプにより電流-電圧変



第15図 パルス前置増幅器



a. 周波数変調したパルス列

平均間隔
 $30\mu\text{sec}$
変調波
10Hz 正弦波

0001 0173	0002 0150	0003 0145	0004 0126	0005 0126
0006 0117	0007 0127	0008 0127	0009 0147	0010 0154
0011 0176	0012 0143	0013 0203	0014 0203	0015 0214
0016 0207	0017 0207	0018 0150	0019 0144	0020 0141
0021 0155	0022 0130	0023 0131	0024 0114	0025 0125
0026 0121	0027 0132	0028 0123	0029 0144	0030 0122
0031 0194	0032 0127	0033 0212	0034 0204	0035 0212
0036 0194	0037 0194	0038 0172	0039 0145	0040 0143
0041 0129	0042 0121	0043 0125	0044 0114	0045 0131
0046 0132	0047 0155	0048 0151	0049 0144	0050 0150
0051 0207	0052 0204	0053 0214	0054 0204	0055 0202
0056 0143	0057 0172	0058 0152	0059 0147	0060 0122
0061 0124	0062 0116	0063 0127	0064 0126	0065 0144
0066 0151	0067 0173	0068 0140	0069 0200	0070 0202
0071 0214	0072 0207	0073 0209	0074 0192	0075 0187
0076 0144	0077 0157	0078 0135	0079 0124	0080 0114
0081 0125	0082 0114	0083 0127	0084 0139	0085 0143
0086 0167	0087 0171	0088 0145	0089 0211	0090 0207
0091 0213	0092 0200	0093 0147	0094 0125	0095 0129
0096 0145	0097 0141	0098 0122	0099 0126	0100 0116
0101 0120	0102 0121	0103 0129	0104 0124	0105 0121
0106 0147	0107 0205	0108 0205	0109 0215	0110 0204
0111 0205	0112 0144	0113 0170	0114 0157	0115 0150
0116 0129	0117 0129	0118 0117	0119 0126	0120 0123
0121 0143	0122 0147	0123 0170	0124 0177	0125 0144
0126 0200	0127 0213	0128 0207	0129 0211	0130 0144
0131 0190				

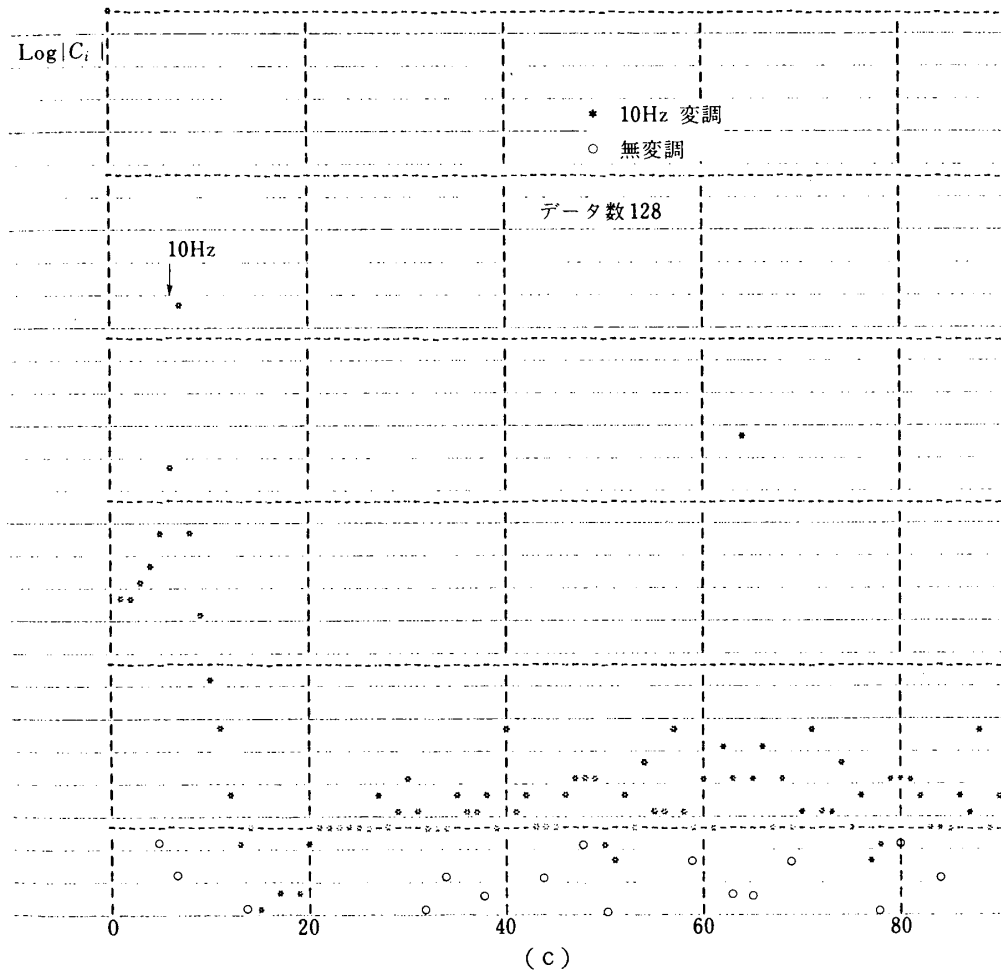
b. UDR による記録

5msec/番地

(a)

(b)

第16図 UDR によるパルスカウンティングの記録



第16図 フーリエ解析

換し、パルス増幅の後コンパレータで一定レベル以上の波高をもつパルスを TTL レベルのパルスに整形し UDR へ送る。

パルス周波数変調したパルス列を記録し解析した例を第16図に示す。

16-aに、平均間隔 $30\mu\text{sec}$ のパルス列の間隔を10Hzの正弦波で変調した波形をオシロスコープ上に多重掃引し示した。5m sec毎のパルス計数値をUDRに記録した例を16-bに示す。この計数値の時系列から変調信号を解析するため、FACOM 75を使い128点のデータについてフーリエ級数展開し、パワースペクトルを得た。これを16-cに示す。参照のため変調しないパルス列のスペクトルもプロットした。変調されたパルスについては、10Hzに相当するピークが見られる。

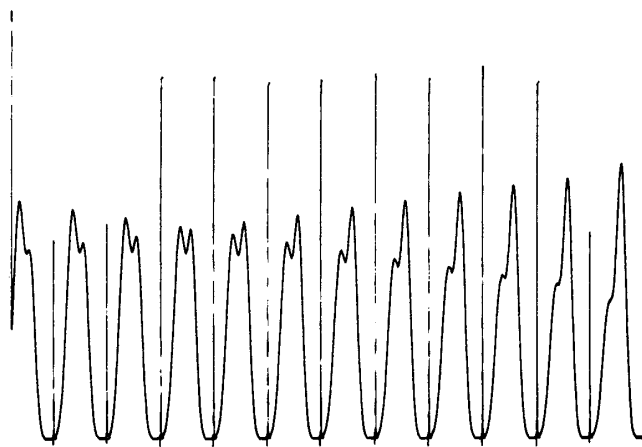
4. 高速走査赤外分光法におけるデータ収集

高速走査赤外分光法では一定の波長範囲をくり返し高速走査し、スペクトルの時間変化を追跡する[3]。走査用の回転鏡の位相を光学的に検出し、これをトリガとしてオシロスコープの画像を掃引し、流しカメラで従来は記録していた。この方法では多数コマの写真の1コマごとに、スペクトル線の強度を読み取るという非常に手数のかかるデータ処理が必要とな

る。そこで大量のデータ処理をUDRを使って行うことを試みた。分光器の検出系出力のうち、必要なデータを含む期間は短かく、トリガによって、ある一定時間域のみのデータを収録し、その後、次のトリガまで収録を停止し、待機することが、記憶容量の有効な利用のために必要となる。このくり返し再トリガ可能という機能は今回試作したUDRの大きな特色である。

はじめに1回のスペクトル走査(1回のトリガに対応する)当りの測定点数と測定間隔を設定し、出発番地を指定しておけば、連続するトリガより一定のスペクトル領域を次々と収録できる。

実例として2本のスペクトル線の相対強度が刻々変化する場合をミニコンピュータを使って相似させ、UDRで収録してみた。スペクトル走査開始に対応するトリガ信号も入れてあるので、UDRは、このトリガによって全スペクトルの中から必要と指定した、ある波長範囲のみのスペクトル強度を200コの番地に収録し、200コ収録後は休止して、次のトリガによって、再び同じ波長領域の、次の時刻でのスペクトル強度を、次の200コの番地に収録という操作をくり返す。第17図は得られたメモリー内容をミニコンピュータを使ってアナログ変換し、ペン書き記録計に遅い速度で描かせたものの一部で、トリガ信号も同時に記録されている。なお、本例ではそれ以上のデータ処理は行っていないが、UDR出力はデジタル量であるから、平滑化、対数変換等もミニコンピュータによりきわめて簡単に実施できる利点がある。



第17図 多重走査の再生図

結 び

回路技術に関する格別の訓練を前提とせずに以上の製作を可能としたのは、集積回路素子の発展であり、必要とされる論理の実現が集積回路をブラックボックスとして扱うことで容易になしうる点に多くを負っている。所要の機能が特殊でまたそれに限られる機器は、それが市販品の汎用性と対立する場合、自作することが必要でありまた有利である。機器の改良、機能の追加を行う場合、自作機器は優位性を示す。例えばUDRは若干の努力による演算回路の付加により、アナログ、デジタル入力可能のシグナルアベレージャへ拡張し得る。

HSJ カウンタは価格対効用比において極めてすぐれる。

本研究費の一部は文部省科研費（特定研究-I, 011002）によった。ここに謝意を表す。

1975年7月23日 原動機部

参 考 文 献

- [1] 倉谷健治, 土屋莊次, 衝撃波の化学物理 (昭和43年)
- [2] J. A. Bander, G. Sanzone, Rev. Sci. Instr., **45**, 949(1974)
- [3] 倉谷健治, 五味憲一, 第8回高速反応討論会予稿集 p. 21 (昭和48年10月)