

繰り返しの微弱過渡現象信号の測定器 (いわゆるボックス・カー・インテグレータ -)の自作

金野茂男、本澤上

1. 始めに

電子・電気現象のみならず、自然界の物理現象には、数多くの過渡現象が現れる。その現象は数秒以上続くこともあるし、数m秒、或は数 μ 秒以下の瞬時に終わる場合もある。このような過渡現象信号を測定しなければならないことが、研究・開発部門において良くある。

過渡現象信号を測定する場合に、一番使用される測定装置はオシロスコープである。CRT(最近ではLCD)画面に、その過渡現象波形をトレースさせて観察する。この画面から、肉眼で、直接に過渡現象の物理量を測定しても良いが、正確な測定データとする、又は、詳細な解析をするためには、この画面をカメラで接写し、紙に印刷することが必要である。

測定したい過渡現象波形に、雑音が多く含まれている場合には、オシロスコープ使用での測定で十分であろう。が、測定したい過渡現象信号に、雑音が多く混入している場合には、オシロスコープでの測定は全く不可能となってしまう。過渡現象波形の測定においては、信号成分がばらつき、更には、雑音が多く混入している場合が多い。このような場合の測定においては、データを平滑し、雑音を除去する能力のある測定装置が必要となる。このような機能を有している測定装置の1つに「ボックス・カー・インテグレータ(Box・Car・Integrator=BCI)」があり、何社かの特定メーカーから販売されている。非常に高性能であるが、価格が極めて高い。現在では、安くても、オプションまで入れれば、200万円~300万円以上するようである。因みに今回紹介するBCIの製作実費はザッと見積もって1万円程度である。2万円を超えることはない。本論文を参考とすれば、電子工作の初心者の読者でも、部品が準備できれば、2日~3日以内で複製製作することが出来る。性能及び仕様は本論文に記載するが、高性能とは言えないが、十分にBCIとして機能する。過去の装置では(信号/雑音)比が1/10000以下までの雑音除去性能を示しており、今回の装置もその程度以上の性能を有している。

本論文では、メーカーほどの高性能、高機能は持っていないが、十分にBCIとして機能する繰り返しの微弱信号測定装置を自作したことを報告する。以降で、BCIの概説、自前での設計・製作、使用方法、試験測定、デモ実験、仕様の順で解説を進めていく。実は、本研究室では、大分昔(凡そ20年も前)に、BCIを2種製作している⁽¹⁾⁽²⁾。その内の1台は、第5学年の学生実験の1テーマ「ボックス・カー・インテグレータを用いた過渡現象波形の測定」に使用し、現在でも現役である。もう1台は、周波数特性を向上させ、かつ測定チャンネル数を2つとしたものである。最近動かしてみたが、現役である。

本論文では主に今回製作した3種目のBCIを紹介するが、説明の都合上、過去のBCIの例も用いて、説明をすることが多い。完成した新BCIの外観を写真1に、写真2には、シャーシ内部の様子を示している。写真3,4で、2つの基板の詳細がわかってほしい。ケース内部はガラガラである。小さいシャーシに納めても良かったのであるが、BCIの使用においては、オシロスコープ、その他の機器の使用が必須である。これらの事情を考え、ラックに取り付けられるシャーシケースに収めることとした。



写真1 新BCIの外観

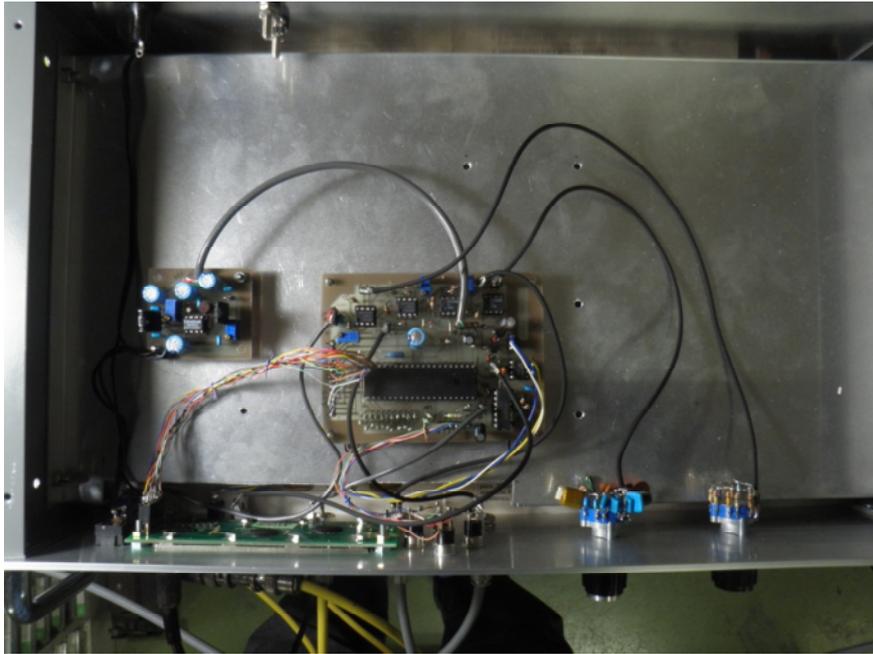


写真2 上部から見たシャーシ内部

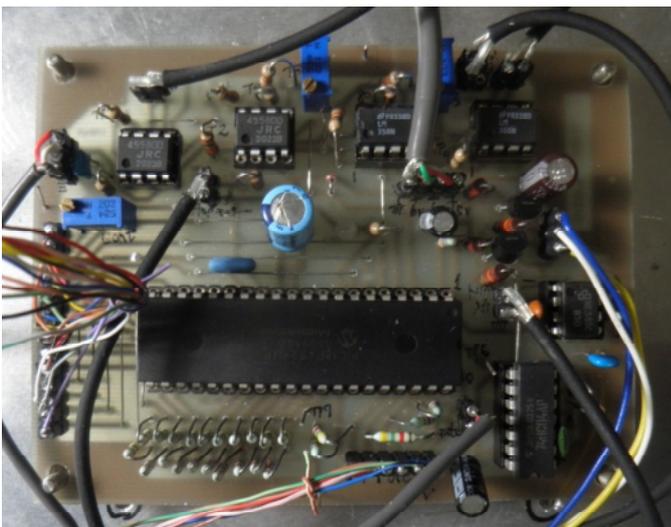


写真3 シャーシ内部の主回路基板



写真4 シャーシ内部の電源基板

2. ボックス・カー・インテグレータ - について

この奇妙な名前の由来は、BCIの動作、及び調整用のモニターとして必須のオシロスコープの画面中で、被測定信号のサンプリング位置を表示している矩形波(=箱状=ボックス)が、車(=カー)の様に、画面上を動くことから来ている。いわゆる愛称である。最後の単語のインテグレータは、サンプリングして得られた信号成分を時間平均し、ノイズによる信号のバラツキを除去するという意味での積分(=インテグラル)機能も備わった装置であることを意味している。

ただ、BCIの欠点の1つは、雑音の混入した単発の過渡現象波形は測定できない点である。過渡現象信号は周期的である必要はないが、繰り返しであることが必要である。BCIに入力した雑音を含んだ過渡現象信号を繰り返し、繰り返しサンプリングし、その過程で、雑音を除去し、信号成分だけを抽出する必要があるからである。

BCIは、過渡現象の信号波形に対して、サンプリング用ゲート信号を、時間軸で移動操作することで、信号電圧波形を時間軸を動かしながら、サンプリングして、ペンレコーダーなどの記録装置に出力する。図1に、BCIの基本ブロック図の1例を示している。なを、類似の図は、参考文献(1)に掲載している。ある現象を、何らかの基準トリガ信号で繰り返し発現させ、その発現現象の電圧信号をBCIの入力信号とする。この信号を適当に増幅(或は減衰)したのち、サンプル・アンド・ホールド(S&H)回路に入れる。このS&H回路で、信号は、基準トリガパルスによって形成されたゲート信号に従って、信号の特定時間遅れ位置の電圧成分が抽出(サンプリング)され、かつ、その

抽出した電圧値は保持（ホールド）される。ホールドされたデータは、次の積分回路に送られる。この積分回路により、抽出した信号成分は積分操作（インテグレータ）で、余分な雑音成分の除去が行われて、最終的に出力される。この積分回路の機能は、交流から直流を作るときの、リップルを除去する際の整流回路と等価なものとも見なしても良い。ゲート信号を、順次時間送りすれば、現象波形をゆっくりとサンプリングすることとなる。得られた出力電圧をチャート紙などに出力することが出来ることとなる。

BCIで、過渡現象を測定する場合には、一般的には、上述したように、その過渡現象を、ある特定のトリガ・パルスで制御する。つまりそのトリガ・パルスが加わった瞬間毎に過渡現象を発生させるなど。このトリガ・パルスは、BCIの重要なキー（基本）・トリガ・パルスともなる。入力したトリガ・パルスを用いて、BCI中のS & H回路用のゲート信号を制御する。図1のブロック図では、その制御の仕方として、キー・トリガ・パルスに対して、ゲート信号の時間遅延を自動で行う方法と、自動で行う方法の2通りの方法を採用している。自動遅延回路ではゲート信号は時間とともに自動で動いていく。

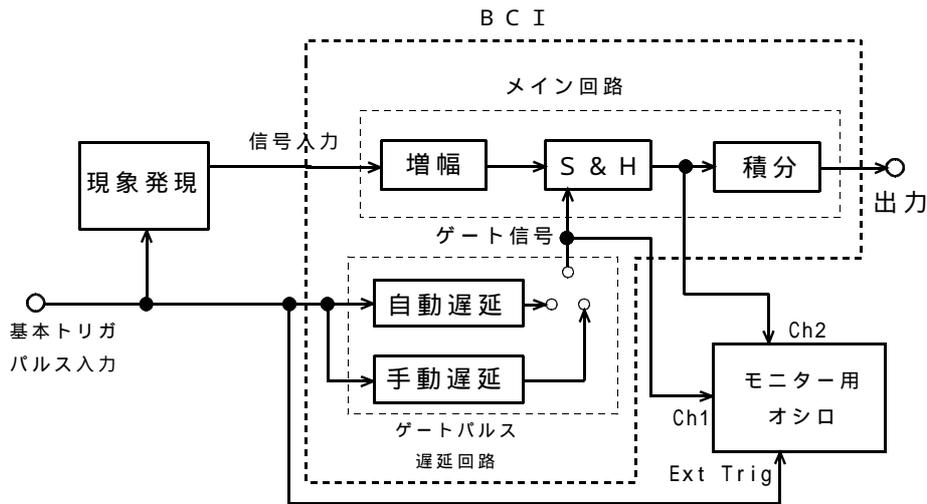


図1 BCIの基本ブロック図の1例

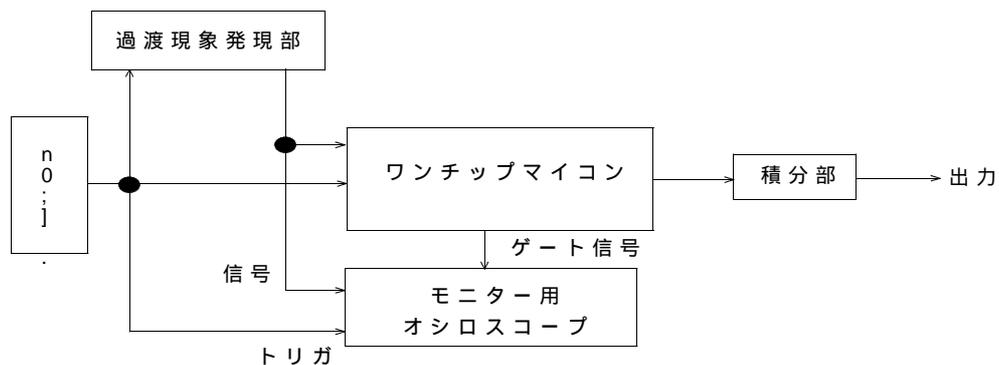


図2 ワンチップマイコンを使用する今回のBCIの基本ブロック図

3. ハード部の設計・製作

ワンチップマイコンを用いれば、BCIのハード回路は極めて単純化できるであろうことは、長年考えていたことである。が、使用中の自作BCIが全く故障することなく使用できていたこともあり、製作には至っていなかった。時間の余裕があった本年度の卒研生の1人に、「ワンチップマイコン使用のBCI」の製作を行ってもらった。が、3月11日の東日本大震災の影響で、製作は中断し、そのまま卒業となってしまった。これを引き継いで、製作を続けることとした。

図2に、今回のBCIの基本ブロック図を示している。BCIで複雑な回路部分はゲートパルス遅延回路部である。旧BCIではこの回路を、数十ものデジタルICを使用して組み上げていた。今回は、この部分を1個のICであるワンチップマイコンで置き換えることにした。使用するワンチップマイコンとして、マイクロチップ社のPICシリーズを使用する。

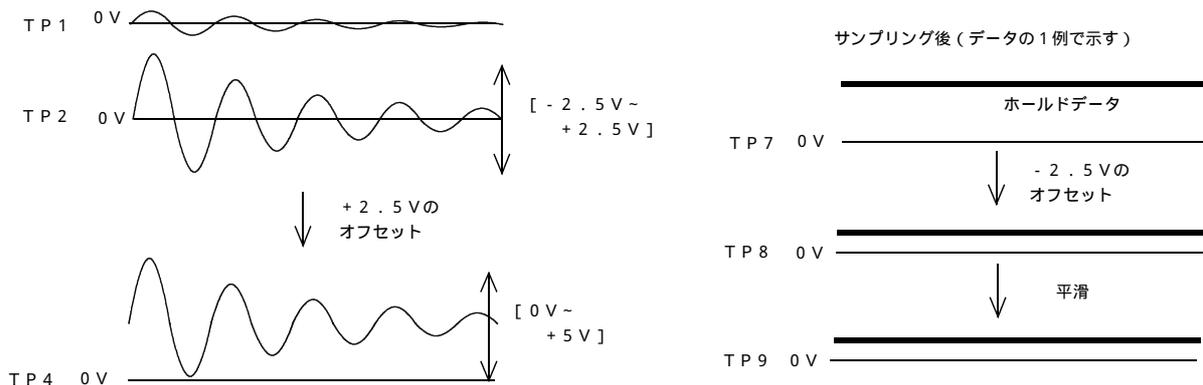
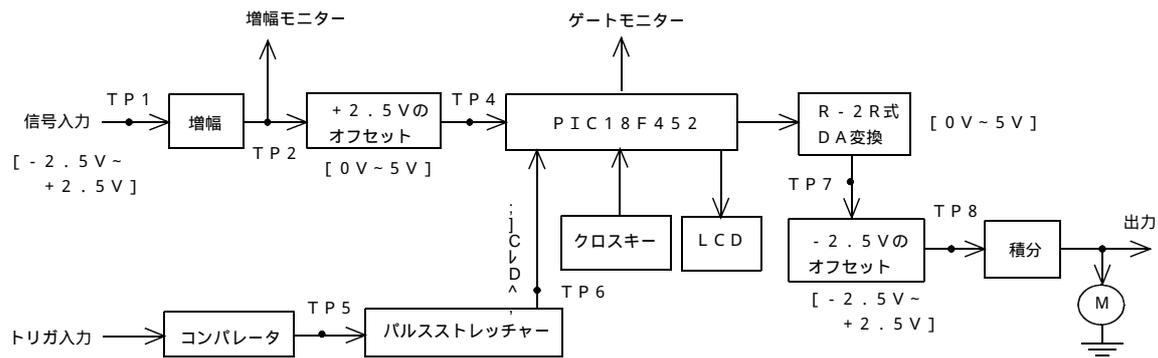


図3 今回のBCIのより詳細なブロック図

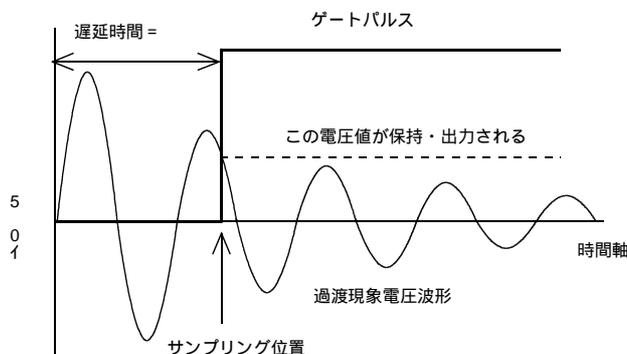


図4 信号のサンプリング

図3に、今回のBCIの、より詳細なブロック図を示している。使用するワンチップマイコンはPIC18F452である。このPICには10ビットのAD変換器が内蔵されている。前回では、専用のS&H素子が必要であったが、今回では不用となる。前回では、ゲートパルスの遅延のために、2つのタイマーを多数のロジック素子の組み合わせで作り上げていたが、今回は、PICに内蔵されている割り込み機能付きのタイマー機能を使用することとした。従って、タイマー関係のロジック素子は全く不用となった。極めて回路が単純化されることとなった。

図4に、今回のBCIに入力してくる被測定信号(例として、LC共振減衰過渡現象波形を描いている)を、基準トリガーパルスに同期させてサンプリングしている様子を図解している。回路が完成すれば、この様子はモニター用に接続したオシロスコープで観察できる。基準トリガー信号で発現した過渡現象電圧波形がBCIに入力し、PICのAD入力端子に入力する。同じく、基準トリガーパルスに同期して、BCI内のPICが実行しているプログラムで、時間遅延させたゲートパルスが生成され、予定した時間遅延でAD変換が行われ、電圧値はデジタルデータとして保持される。図

中のサンプリング位置と矢印で示している箇所の波形の電圧値が保持されることになる。保持されたデータは外付けのR - 2 R方式D A変換回路でアナログ電圧に変換される。

今回のB C Iではゲートパルスはボックス型とはなっていない。井戸型ポテンシャルの形をしている。ボックス型とするには、現回路及びP I Cの使い方では更なる工夫が必要である。パルスの形だけの違いなので、B C Iとしての性能には何らの劣りはない。当面この形でのゲートパルス波形としておくこととする。

P I CのA D変換器への許容入力電圧範囲は「0 . 0 V ~ + 5 . 0 V」。過渡現象に止まらず、多くの現象の電圧信号波形は、±に振れる。従って、本B C Iへの許容入力電圧信号を「- 2 . 5 V ~ + 2 . 5 V」とする。信号電圧が、P I CのA D変換器に入力する前に、+ 2 . 5 Vのオフセットを印加し、「0 . 0 V ~ + 5 . 0 V」としてから、P I CのA D変換器に入力させる。が、後掲の図6の回路図から読み取れるように、オフセット電圧を与える反転加算回路の前で、反転増幅回路で信号が反転されているので、現回路では、- 2 . 5 Vのオフセット電圧を設定するようになっていることに注意。信号のサンプリング結果は、デジタルデータとなっているので、R - 2 R方式のD A変換器で、再びアナログ電圧に変換する。この電圧範囲は「0 . 0 V ~ + 5 . 0 V」にあるので、入力信号電圧と一致させるために、今度は、このアナログ電圧に、- 2 . 5 Vのオフセットを加え、「- 2 . 5 V ~ + 2 . 5 V」の範囲の信号とする。これで入力信号電圧と出力信号電圧が合致することになる。

P I Cには、L C D、クロスキーを接続し、メニュー方式で測定条件などを設定できるようにもする。

B C Iを使用するにおいて、何らかの基準トリガー源が必要である。このトリガー源からのトリガーパルスで、現象発現部とB C Iを、同時に駆動する。基準トリガー源が出力する電圧波形は各種形態が考えられる。B C Iとしてのトリガーパルスは、タイミングパルスとして使用するので、幅の狭い矩形パルスが望まれる。基準トリガー源からのパルスを、コンパレータ回路とパルスストレッチャー回路で、波形整形をして、これを実現し、P I Cに入力させ、P I Cにおいてタイミングパルスとして使用する。

これらのブロック図に基づき、何回かの試作を経て完成した回路を図6に示している。先のB C Iではゲートパルスの手動遅延回路を付加したが、今回は、この回路は削除することとした。現回路ではP I Cはゲートパルスの自動遅延に威力を発揮するが、手動遅延での使用は少し苦手であること。実際の測定においては、前回のB C Iでもそうだが、自動遅延モードでゲートの遅延を行う。手動遅延では、ゲートパルスを、つまみを動かすことで自在に動かせるので、デモ用としては結構なモードであった。従って、今後、手動モードを付加するかも知れない。

トリガ入力段に、2段のスイッチング回路を用い、トリガを波形整形し、かつ、必要に応じて、パルスのアップ、ダウンを選択できるようにしている。7 4 H C 0 4を用いたパルスストストレッチャー回路で、パルス幅が約1 . 2 μ秒幅のパルスとしている。なを、余談になるかも知れないが、当初、入力段のO Pアンプとして、ナショナルセミコンダクタ社のL M 3 5 8を用いていた。が、エミッタフォロアからの出力電圧波形に寄生分が混入し、どうしても消せなかった。4 5 5 8に交換したら消えてくれた。L M 3 5 8はエミッタフォロアとしての使用には不向きなようである。A C / D C選択スイッチで入力モードの切替が出来るようにしている。また必要に応じて増幅も行える。積分回路では、多段のロータリスイッチで、時定数を切り替えることも出来る。

2 0文字× 4行のL C D (S C 2 0 0 4 C S * B)を使用し、クロスキーと併用し、メニュー方式で、処理を行えるようにしている。L C D画面の内容は「第5節 使用方法」で解説する。

図5に、本B C Iの電源部の回路を示している。ありふれたA C / D Cアダプタ (A C 1 0 0 V、D C 8 . 0 V、0 . 5 5 A)で、A C 1 0 0 V電源から、簡単に8 Vの直流を得ることが出来る。回路に必要な電圧は、ロジック用の+ 5 V、アナログ回路用の± 6 Vである。+ 5 Vと+ 6 Vは3端子レギュレータで供給する。- 6 VはD C / D C変換器のM A X 6 3 5を使用して供給する。消費電流は、+ 5 Vのロジック電源は0 . 0 8 A、O Pアンプ用の電源の消費電流は、± 6 V共に0 . 0 1 Aである。

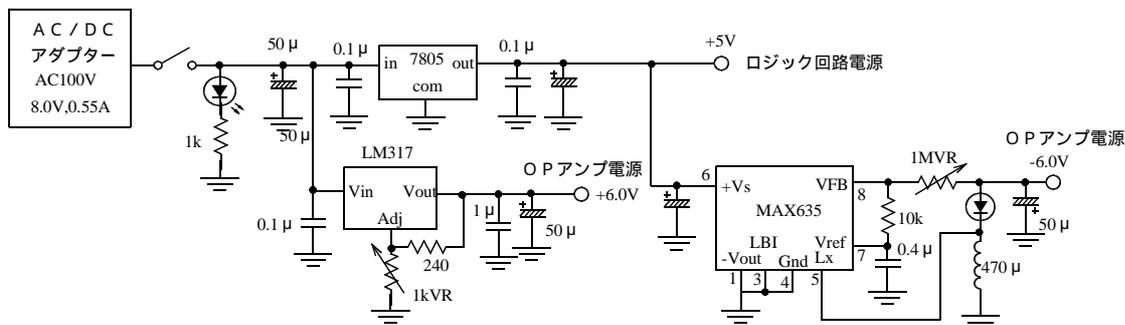


図5 電源部の回路図

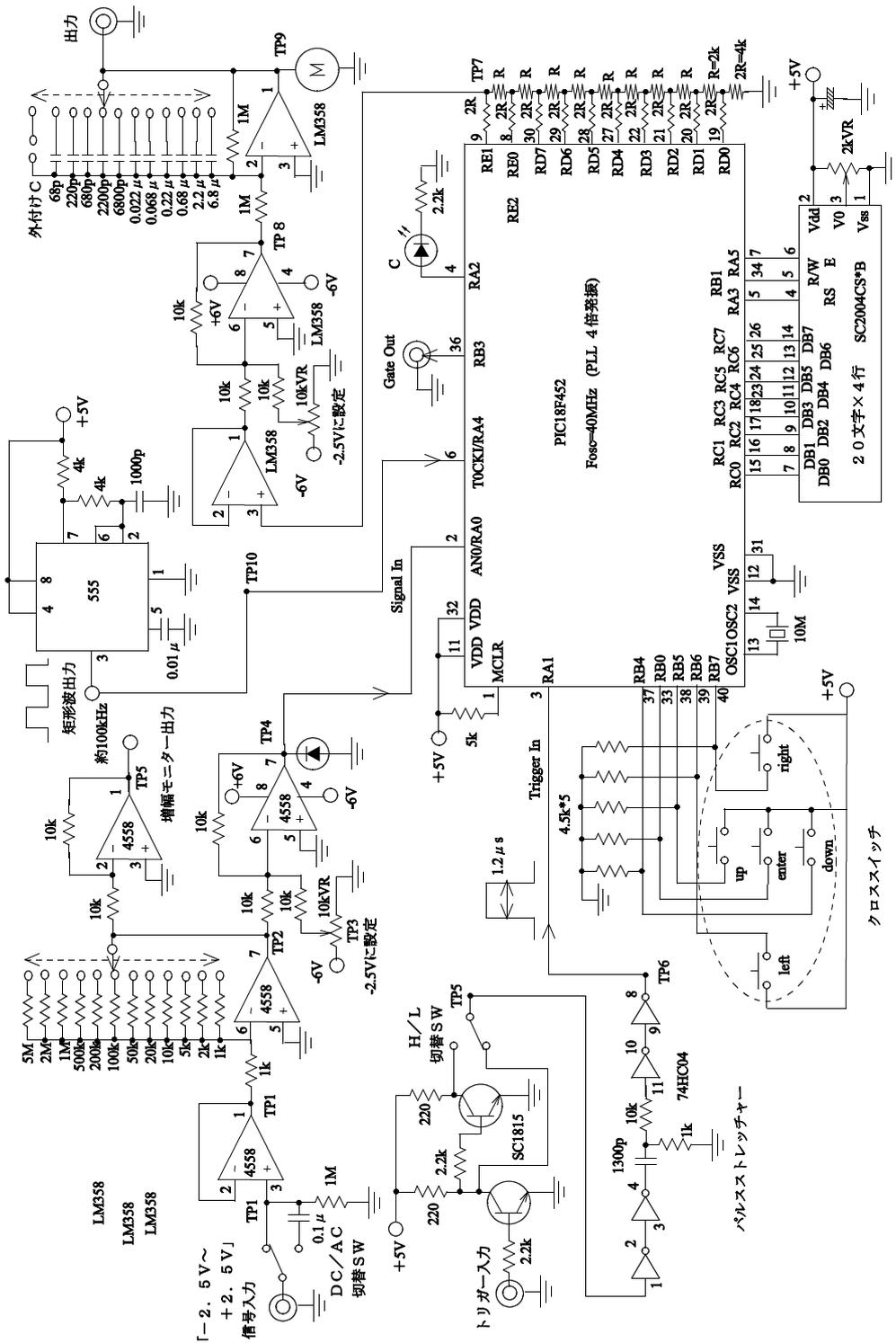


図6 今回製作したBCIの回路図

タイマー0のクロックパルスとして、PICの内部クロックを使用する場合（クロック周波数は40MHz/4=10MHz、時間幅0.1μs）と、外部発振器を使用する場合（NE555を使用し発振周波数は100kHz、時間幅10μs）を選択できる。BCIをオンとしたのち後、LCDの初期画面で選択ができる。内部クロックの場合はHighを、外部クロックの場合はLowを選択する。時間変化の速い信号を測定する場合にはHighを、遅い信号の場合にはLow選択すれば良いであろうが、場合によりけりである。何回か試して最良の法を選ぶことになる。

外部発振器は、現回路では100kHzで発信させている。変更が必要ならば、NE555の外付けのコンデンサか、抵抗を変えれば良いであろう。

5. 使用方法

本BCIを複製製作した後、BCIの正常動作及び使用方法を習得するためには、必ずしも過渡現象発現装置は必要としない。通常の発振器で代用できる。従って、図8で示している測定システムを構築することを勧める。普通の発振器1台で、トリガー源部と過渡現象発現部を併用させる。が、発振器からの出力波形は正弦波が無難である。発振周波数は1kHz当たり、出力電圧は±1V当たりで良いであろう。レコーダーがなければ、電圧計、或は、テスターなどで代用すればよい。

まず最初に、BCI単体だけで、オフセット電圧の調整を2箇所で行う必要があるBCIの電源をオンとする。図6の回路で、信号入力端子をアースに落とす。つまり入力電圧を0Vとする。オシロスコープ等でTP4をモニターし、+2.5Vとなるように、10k VRを調整する。次に、TP7端子をアースに落とす。TP8端子をモニターし、-2.5Vとなるように、10k VRを調整する。これら2つのVRの調整は1度行えばよい。

(1) 図8のシステムを組み上げた後、発振器、オシロスコープ、BCIの電源をオンすると、LCD画面上に、図9に示している初期画面が表示される。タイトル画面である。PICのプログラムは正常に実行されていることを示している。この画面で、時間分解能を選択できる。高分解能を選択するならばHighを、低分解能を選択するならばLowを選択する。今の練習の場合は、Highを選択する。

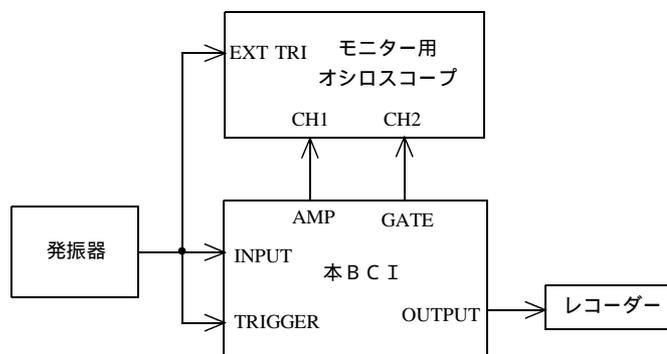


図8 本BCIの正常動作及び使用方法を理解するための簡易システム



図8 LCD画面

(2) クロスキーのセンターキーを押すと、遅延度選択画面が表示される。トリガーパルスが入力する毎に、A/D変換を行わせるタイミングパルスであるゲートパルスを、どの程度の速さで遅らせるかを設定する画面である。数値は倍々となっている。倍にする毎に、ゲートパルスの送りは倍だけ遅くなる。数値は相対数値と理解しておけばよい。当初のお勧めは、4k~16kのあたりである。クロスキーのアップ、ダウン、ライト、レフトキーを押して希望の数値の前にプリンクしているカーソルを移動させ、センターキーを押せば、その数値が選択され、LCD画面は測定決定画面となる。

(3) 希望するメニューに従って、キーを押せばよい。センターキーを押すと、LCD画面は実行中画面に切り替わると同時に、測定が開始される。

(4) 後は希望に添うメニューに従って、キーを押せばよい。センターキーを押すと、ゲートパルス送りが停止し、Pause状態となる。再度センターキーを押すと、ゲートパルス送りが再開され、Execute状態となる。アップキーを押すと遅延度選択画面に戻る。ダウンキーを押すと初期画面に戻る。測定などを終了したければ、BCIの電源スイッチをオフとすればよい。

練習用信号として、1kHzの正弦波を用い、分解能をHigh、遅延度を8kとしたときの、オシロスコプの画面を写真5に示している。サイン波形が入力信号のモニター波形、矩形波がゲート信号のモニター波形である。この矩形波形は時間と共に動いていく。図9が、ペンレコーダへの出力結果である。入力信号が赤色のサイン曲線として描かれている。

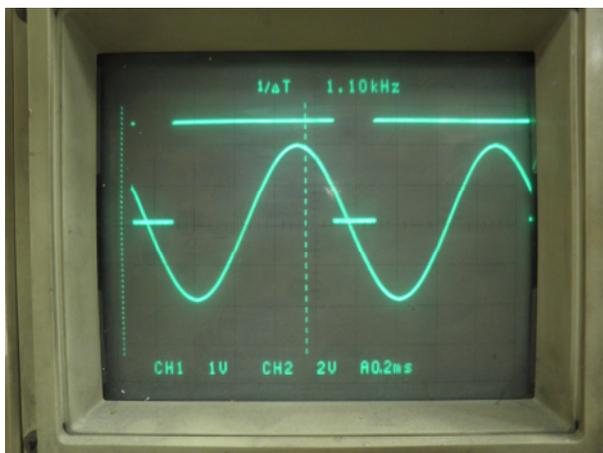


写真5 オシロの画面。約1kHzの正弦波をサンプリングしている

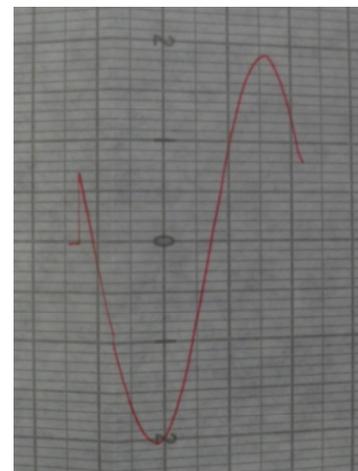


図9 ペンレコーダへの出力波形。横軸が時間軸、縦軸が電圧軸

図6の回路図の最終段に、多数のコンデンサが連結されている多段ロータリースイッチがある。このコンデンサは積分時定数設定用である。出力波形中に含まれるノイズの程度、ゲートパルスの送り速度、の双方を見ながら、適宜に設定すればよい。電圧計メーターは今の所付けていない。無くても良いので。

6. デモ実験 「LC回路の共振周波数の測定」

以下に、著者の学科で、5年工学実験の一テーマ「ボックス・カー・インテグレータを用いた過渡現象波形の測定」として行っている実験内容を簡潔に紹介しておく。その為に必要な、LC共振発生回路と、トリガーパルス発生回路については、参考資料として、10.付録に回路図と共に、ハード部の外様・内様の写真を掲載して置く。

電磁気学で、図10に示されているようなLC回路の共振現象特性を学習している。スイッチを左側にしてコンデンサーCを充電した後、スイッチを右側にすると、コンデンサーに蓄えられた電荷はコイルLを通じて放電される。が、コイルのインダクタンスのため逆電圧が発生し、共振現象を起こす。理論計算から得られるこのLC共振回路の共振周波数 f_0 を与える公式は

$$f_0 = 1 / (2 \pi \sqrt{L \cdot C})$$

である。実回路においては、抵抗分があるので、共振電圧波形は減衰型となる。BCIの適用例として、このLC回路の共振曲線を計測し、その曲線から共振周波数等を求めてみる。

図 1 1 に示している測定回路を組み立てる。LC 回路 (LC 共振回路) トリガパルスジェネレータがなければ、付録を参考にして製作すること。難しいことはない。

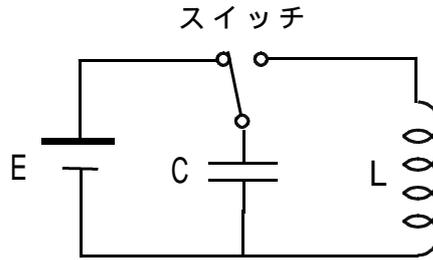


図 1 0 過渡現象を発生させる LC 共振回路

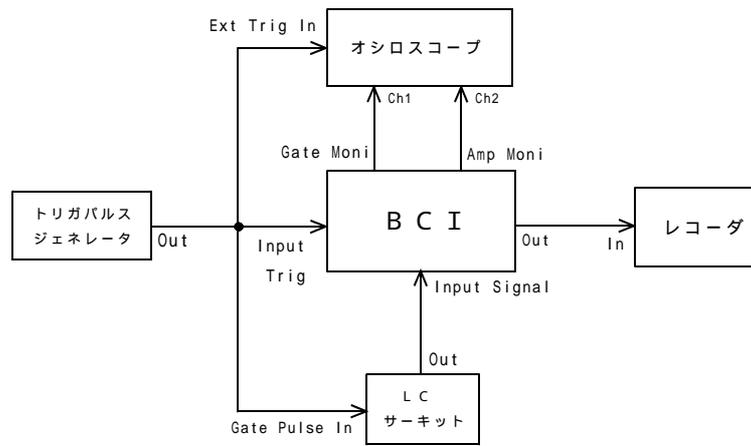


図 1 1 測定回路

以下に、本実験で見られるオシロスコープ画面と、ペンレコーダ上のグラフの写真を示しておく。なを、LC 共振回路で使用したコンデンサとコイルの値は $C = 0.15 \mu\text{F}$ 、 $L = 0.48 \text{mH}$ である。共振周波数 $f_0 = 20 \text{kHz}$ 。

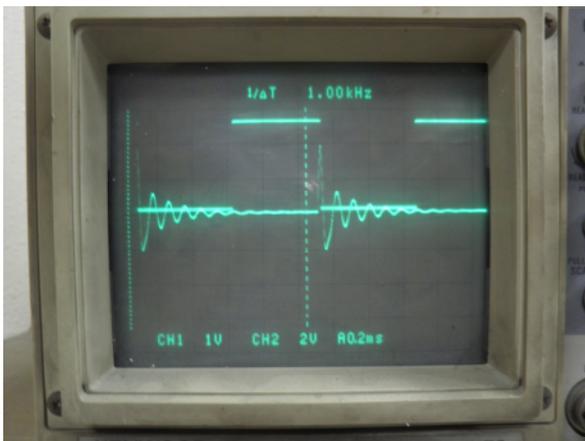


写真 6 オシロ画面。共振減衰波形とゲートパルス波形が表示されている。

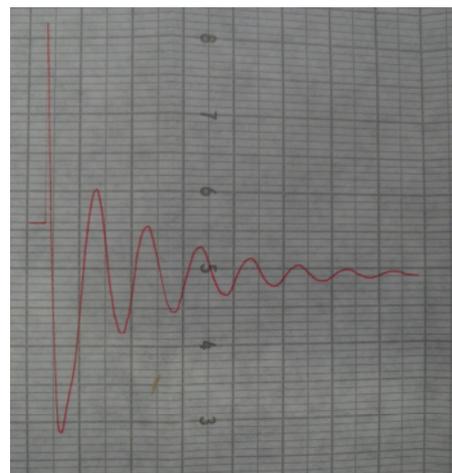


図 1 2 ペンレコーダへの出力波形
横軸が時間軸、縦軸が電圧軸

7. 性能仕様

以下に簡単に本BCIの仕様を列記しておく。

サンプリング時間幅	狭	0.1 μ s
	広	10 μ s
許容入力電圧振幅		-2.5V ~ +2.5V
トリガーパルス入力電圧		1.5V ~ 20V
出力信号		-2.5V ~ +2.5V
その他		省略

8. 終わりに

非常に簡単な回路でBCIを製作することができた。が、これは第1号としておこう。色々な不具合があるように思える。以下に思う点を列記しよう。

(1) 本装置の使用で、レコーダーに出力された波形の時間スケールを素直に決めることができない。レコーダーのチャートの送り速度、トリガーパルス周波数、遅延度の選択値の3つの依存しているからである。また、選択したこれらのパラメーターから、チャート紙上での時間軸のスケールを得るのは大変である。簡単な決定法を述べよう。雑音小さい測定信号ならば、オシロスコープの画面上で、横軸の時間幅を読み出し、チャート紙上に描かれる波形に、読み出した時間幅を転記、或はマーキングをする。これで簡単に時間軸スケールを確定できる。雑音大きい時には、この方法はできない。このような場合には、例えば、測定信号の代わりに、第6節で紹介しているLC共振回路を時間軸校正用として用いる。この回路からの出力信号を、雑音の大きい信号の測定条件と同じ条件下で測定すればよい。これでチャート紙上の時間スケールは確定できる。

(2) ゲートパルスの時間送り速度が、トリガーパルス周波数に依存している。つまり、入力してくりトリガーパルスの周波数が高くなると、ゲートパルスの送りが速くなり、周波数が低くなると、ゲートパルスの送りが遅くなる。これは、必ずしも悪い特性ではない。が、旧BCIのように、入力してくるトリガーパルスの周波数に依存しないで、ゲートパルスの時間送り速度が決定できれば、これはこれとして便利であると思う。今後そのようにするかどうかは未だわからない。

(3) 現BCIでは、電源基板と回路基板を別とした。基板の開発中には、DC可変多電源を使用していたので、そうってしまった。再構築するならば、2つの基板を1枚の基板として製作することを勧める。

(4) 現BCIを2チャンネル入力型とするのは、容易であろう。が、アナログ入力端子をAN0/R A 0以外にもう1つ準備する必要がある。その場合には、AN1/R A 1端子が良いであろう。しかし、現回路では、この端子はトリガ入力端子となっているので、この役目を他の空き端子、R B 2とすればよい。それに伴い、ハード回路、則ち、図6の回路図の部分変更、アセンブラプログラムの部分変更をする必要がある。が、それ程困難な仕事ではない。現1チャンネルBCIを、2チャンネルBCIに変更できる。

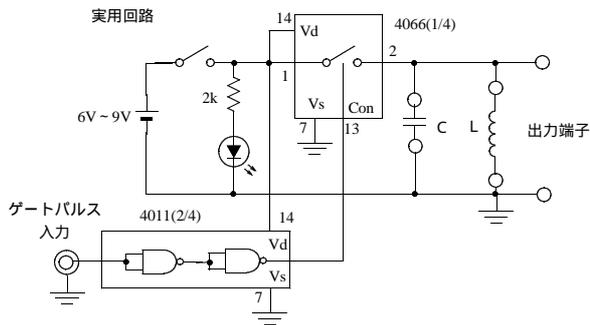
(5) 著者は以前に、PIC18Fシリーズのために、実数・関数演算ルーチンをMPASMアセンブラで書き上げ、公開している⁽³⁾。このアセンブラルーチンを、現BCIのために書き上げたアセンブラプログラムに、追加することで、AD変換器で取込んだデジタルデータを算術平均処理させ、最終的に平滑した電圧値として、出力させる方法が考えられる。最終段の積分回路は不用となる。が、この方法をやるかどうか今の時点では決めかねている。

(6) 旧BCIにはあった、手動遅延機能を、新BCIは持っていない。この機能を付加したものを作るかどうか決めていない。

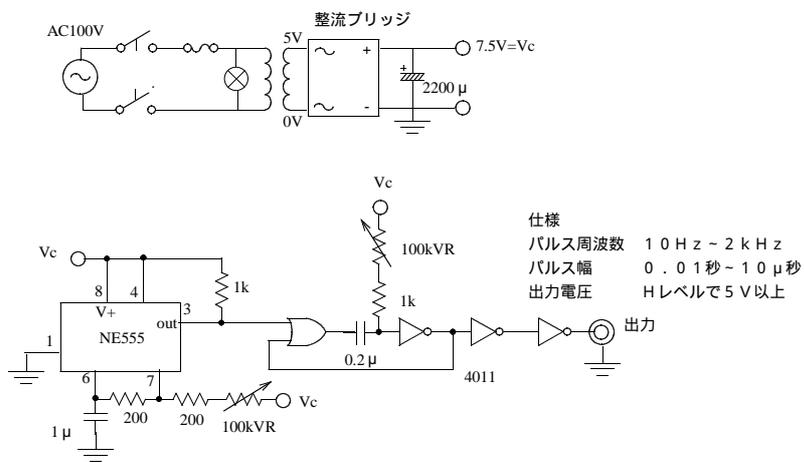
9. 参考文献

- (1) 「電子機器の製作(その3) - ボックス・カー・インテグレータの自作」金野茂男、大塚正紀、工業安全に関する研究集録(小山工業高等専門学校工業安全教育研究センター編) N0.12, 27頁~32頁、1991年。
- (2) 「ボックス・カー・インテグレータの改良」金野茂男、荻窪光慈、工業安全に関する研究集録(小山工業高等専門学校工業安全教育研究センター編) N0.14, 49頁~55頁、1993年。
- (3) 「PICと実数・関数演算 - その4 - 」金野茂男、小山高専電子制御工学科金野研究室、2004年9月ホームページで公開。

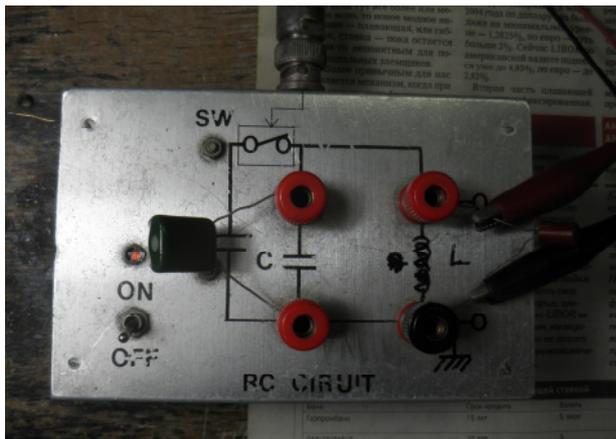
10 . 付録



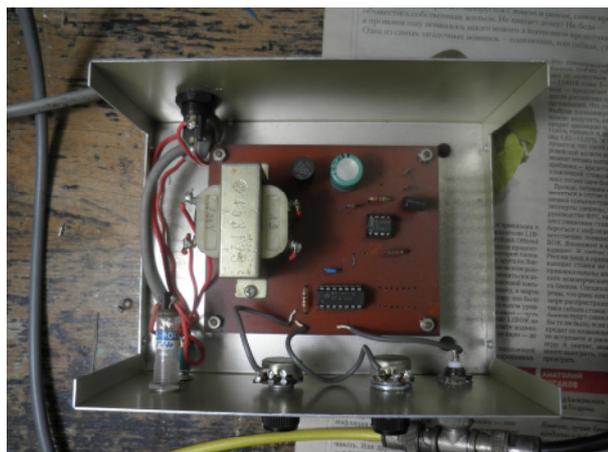
付録図1 LC共振発生回路



付録図2 トリガーパルス発生回路



付録写真1、2 LC共振発生回路の外様と内様



付録写真 3 , 4 トリガーパルス発生回路の外様と内様

2011年6月6日