

光電子増倍管 R329 用 Cockcroft-Walton 型電源の開発

物理学科 4 年 立川裕二

共同実験者 XXXXXXXXXX

平成 14 年 2 月 11 日

(一緒に実験をした友人の
なまえを消したのは彼が
名前を出したいかどうか
わからないからで、寄与
を否定するわけではあり
ませんので悪しからず)

概要

我々は光電子増倍管 R329 のための Cockcroft-Walton 型プリーダーを作成した。この電源は、入力が低電圧でよいということ、無駄な電力消費が少ないという特徴がある。このレポートでは回路の原理、作成した回路の特性と問題点を述べる。

1 目的

通常、光電子増倍管の各電極には電圧を別個の高電圧電源からの高電圧を抵抗で分割して与える。この方法には、

- 1.5kV ほどの高電圧を長い距離運ばねばならぬという点、
- また、常に分割用抵抗を流れる電流のために無駄な電力消費があるという点

のふたつの欠点がある。さて、Cockcroft-Walton 装置 (以下 CW と略す) は [1] 振動電圧をコンデンサとダイオードからなる梯子状の回路に食わせて、各コンデンサに振動電圧の V_{p-p} だけの電位差を設けるものである。通常、光電子増倍管の電極間には整数比の電圧を与えるため、自然に回路の途中の段を電極につなぐことができるが、この回路はその原理からして

- 増倍管直前のプリーダーまで最高電圧を持ってゆく必要はなく、
- また、この回路は一度コンデンサを充電してしまえば漏れや増倍管による電流の増幅による電圧の減少を補給するためだけの電流しか流れないので、無駄は少ないと考えられる。

実際、このような特性から CW 回路をプリーダーに使用しようという試みは [2] のころからあり、計画が中断された SSC のための開発 [3]、実際に使用された例としては HERA でのもの [4][5]、Indiana 大学でのもの [6] をあげることができる。我々は学部 4 年冬学期実験として、

- CW 回路と振動電圧のための発振器を別個に作成し挙動をテストし、
- 次に浜松ホトニクス社の光電子増倍管 R329 に繋げるための CW 型プリーダーを実際に作成し、プラスチックシンチレータにつなぎ宇宙線からのミュオンを確認した。

以下にその詳細を記す。

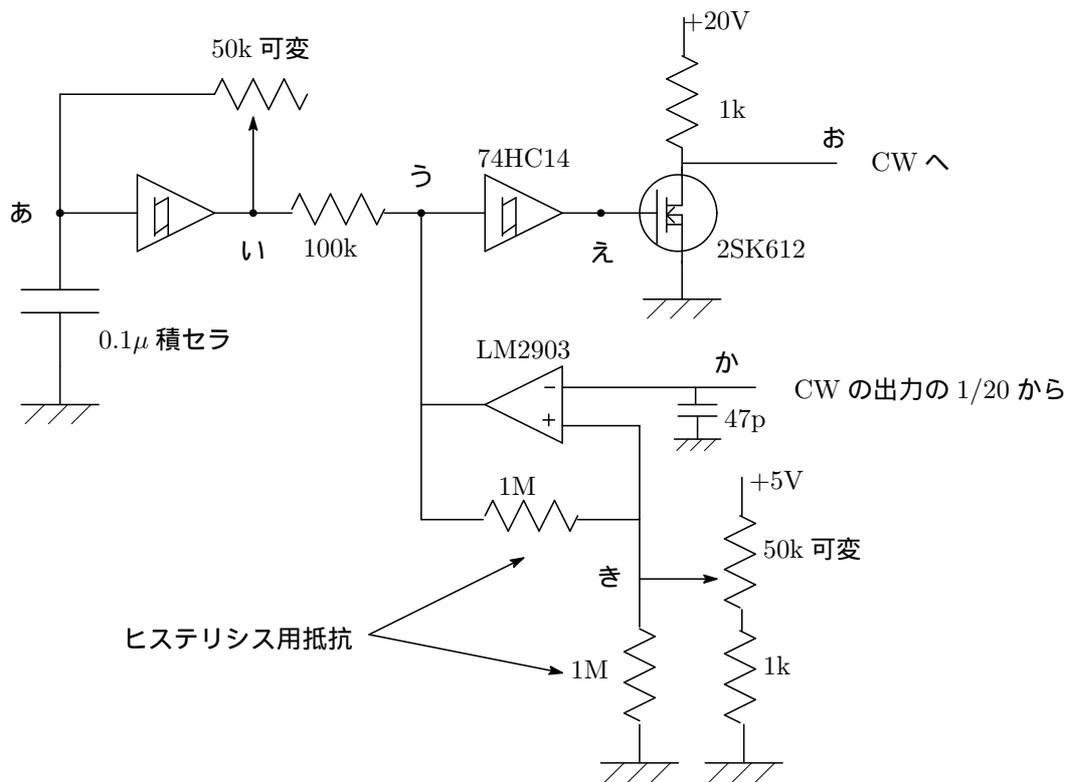


図 1: 発振器の回路

2 発振器

2.1 方針

まず、[6]に従って安直にシュミットトリガ IC に RC 積分回路でフィードバックをかけることでロジック電圧の方形波を生成し、MOS-FET を通じてそれを用いて 20V の電源をスイッチし、CW 回路への入力振動電圧とすることにした。

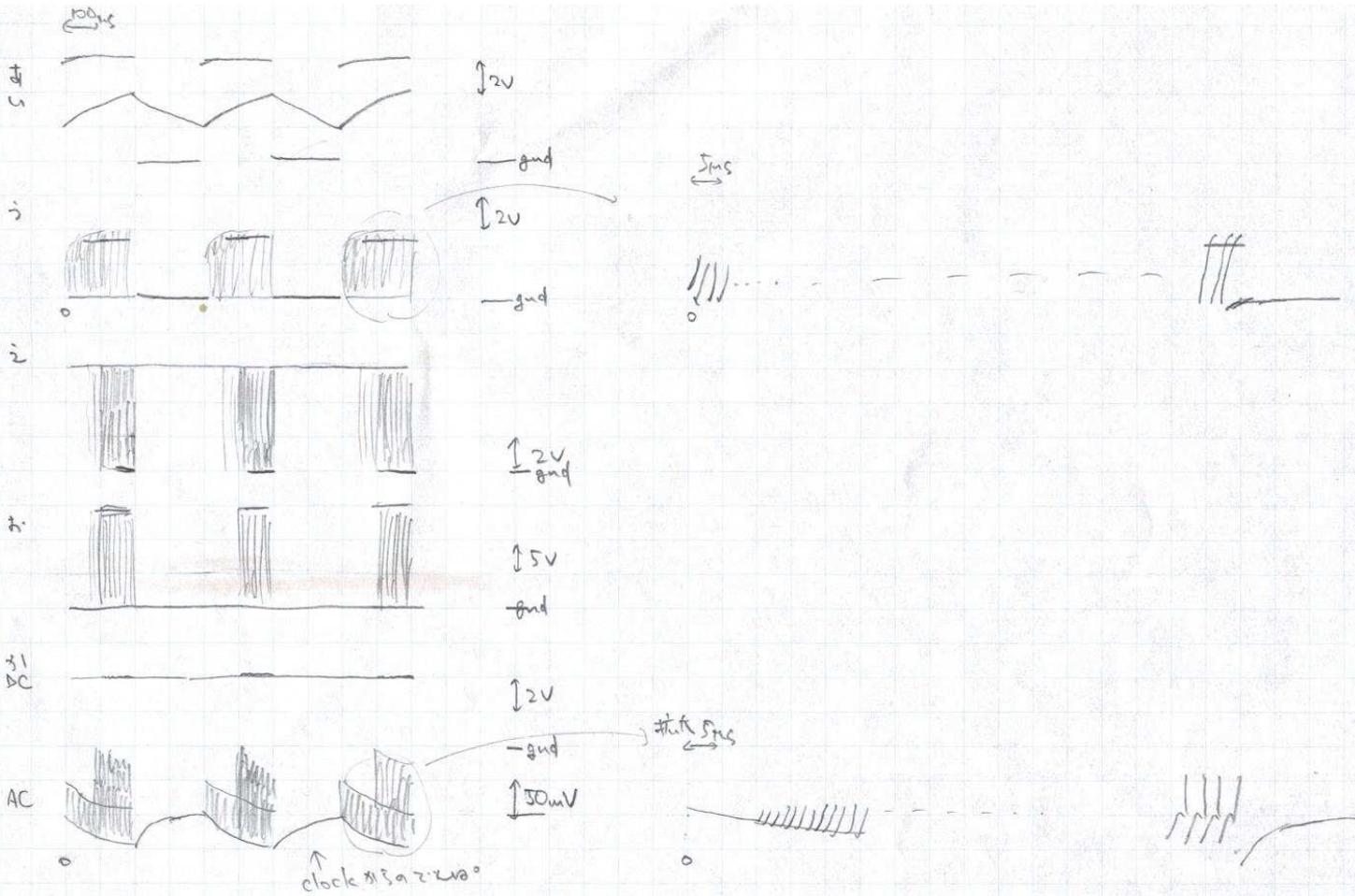
電圧の調整には、CW 回路が望みの電圧まで上がったかどうかをコンパレータで基準電圧と比較して、十分に電荷が溜まったら方形波を MOS-FET まで通さないようにすることにした。

そのための回路は図 1 を見よ。使用したコンパレータは LM2903 で、これの出力はオープンコレクタであるから、直接シュミットトリガの方形波の出力を抵抗を経由してコンパレータの出力につなげば AND を取ったことになり望みの動作が得られる。

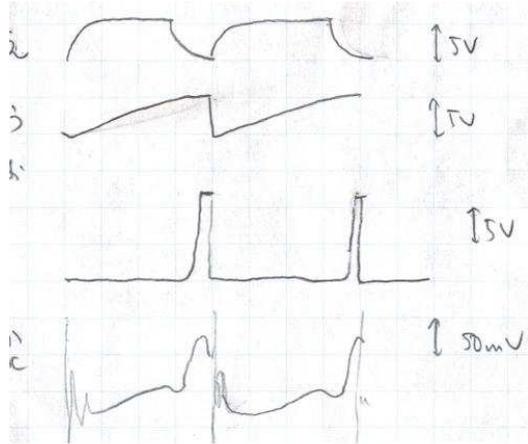
2.2 テスト回路の挙動

各点の電位のタイミングチャートは図 2 を見よ。

ここで、コンパレータをヒステリシス付きにしているのが重要である。実際、図 1 にコメントしてあるヒステリシス用抵抗を除いた発振器を使うと、タイミングチャート (図 3) を見ればわかるように細かく発振していることがわかる。これは、ロジックで生成した信号が high になっている間に、



500ns
 \longleftrightarrow



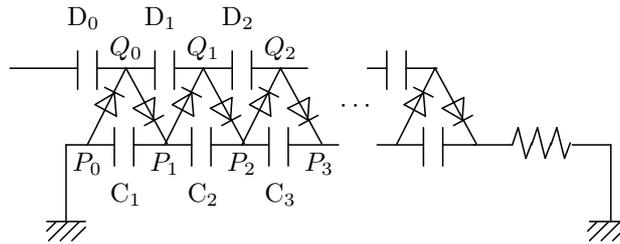


図 4: CW 回路の回路図

コンパレータの出力 — MOS-FET — CW 回路 — コンパレータの入力

という回路で発振が起ってしまうからである。

2.3 陥りがちなミス

コンパレータ LM2903 は、正負電源を供給しなくてよいオペアンプなので使いやすいのだが、電源電圧 $-5V$ 以上の電圧は正常に比較できない。そのため、電圧を帰還させる際に十分に割ってにおいて電源電圧より充分低いところで比較するようにしないとイケないが、これを忘れると、どうも予想したほど電圧が上がらないという事態に陥るので注意が必要だった。

3 CW 回路

3.1 CW 回路の原理

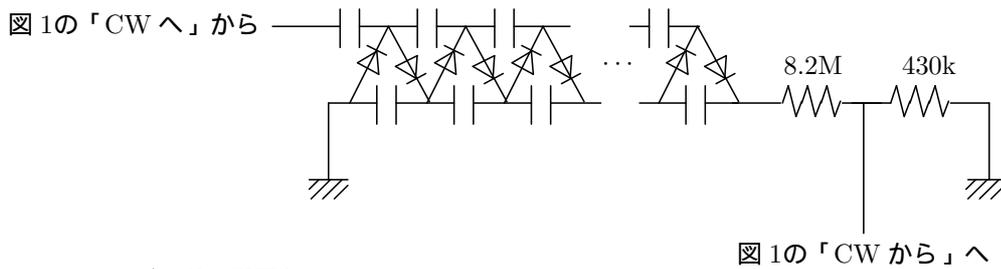
Cockcroft-Walton 回路はコンデンサとダイオードで電圧を積み重ねることで高電圧を発生させる回路である。回路図は図 4 を見よ。梯子状に積み重なっているコンデンサのうち、入力電圧の上のものを振動側、接地されているコンデンサの上のものを固定側と呼ぶことにしよう。

全く電荷が溜まっていない状況から徐々に電荷が溜まって定常状態に至る様子はかなり複雑である。実際にプリーダとして使用するのは、定常状態に達してからであるので、このレポートでは理想的な定常状態がどのようなものであるか、電流の漏れ、光電子の増倍への使用など何らかの理由で電荷が少量抜けた場合の回復の様子について記述することにする。定常状態への溜まり方については相方の小山君が記述することと思うのでそちらを参照していただきたい。

定常状態での動作 電流の漏れが無い理想的な状態では、各コンデンサはすべて V_{p-p} だけ充電され、結果、点 P_n の電位は nV_{p-p} で固定され、点 Q_n の電位は nV_{p-p} と $(n+1)V_{p-p}$ の間を入力電圧に追従して変動することになる¹。

定常状態への回復 まずコンデンサ C_n の保持する電位差が漏れによってすこし減った場合を考えよう。この場合は、点 P_n の電位 V_P が nV_{p-p} よりすこし下がることになるので、入力電圧の振動

¹ [5] の Fig. 5 にあがっている Schematic diagram of the CW type base ではフォトマルの電極に P_n だけでなく Q_n からも電圧を供給していることになっているが、これでは粒子の通過のタイミングによってフォトマル内部の電場の状況が異なるので増幅度の一定性に非常に悪い影響を与えらると思われる。しかし、同じ実験の一つ前の論文 [4] の Figure 1 では、きちんと固定側のコンデンサからのみフォトマルにつないであるように書いてあるので、おそらく、[5] では、よく考えずあまりに schematic に書きすぎしてしまっただけなのではないだろうか。兎も角、こういう間違いが出版されてしまうのは多少驚きでは在るし、言い換えれば CW 回路の動作が思ったより難しいことを意味しているのかもしれない。



コンデンサ: 積層セラ 470nF
 ダイオード: 1SS81

図 5: CW のテスト用回路

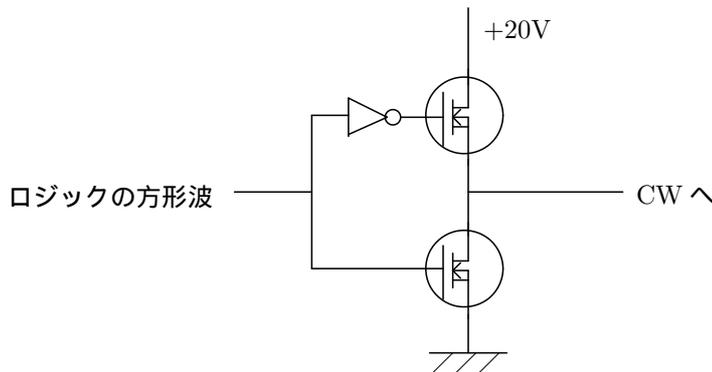


図 6: 2石つかったスイッチングの概念図

に伴って点 Q_{n-1} の電位が V_P より高くなったときに P_n と Q_{n-1} をつなぐダイオードが ON になり、コンデンサ C_n が充電され、電位差がすこし回復することになる。

また、 C_n の保持する電位差がさらに上段のコンデンサからの漏れ等によってすこし大きくなり、点 P_n の電位 V_P がすこし nV_{p-p} よりあがったとすると、入力電圧の振動に伴って点 Q_n の電位が nV_{p-p} まで下がるときに P_n と Q_n をつなぐダイオードが ON になり、コンデンサ C_n はすこし放電され、電位差は V_{p-p} へ近づくことになる。これらの場合は、上段へ電荷を持ち上げることによって状態を回復させているので、CW 回路の最上段のばあいは通用しないが、最上段を負荷を通して接地している場合は自然と放電するので問題は無い。

コンデンサ D_n の電位差がすこしずれた場合も、アースとの電位差こそ D_n のほうは振動しているといっても、動作は隣のコンデンサとの相対的な電位で決まっているので、 C_n の場合と全く同様である。

3.2 実際の CW 回路の挙動

2節で記述した発振器を用いて、CW 回路の段間の出力電圧や最高電圧部につける負荷と出力電圧の関係を測定した。テストに用いた回路図は図 5を見よ。

ロジックの方形波を用いて CW の入力電圧をスイッチングして $V_{p-p} \sim 20V$ の振動電圧をつくっているのだが、その際に抵抗を用いて電圧を下げているので、ここで無駄な電力が消費されてしまうし、直下の subsection で述べるような問題が生じる。本来は MOS-FET を 2石つかって両者を相補的に ON, OFF して抵抗を使わずスイッチングしたほうがよいのだろうが (図 6)、ON, OFF

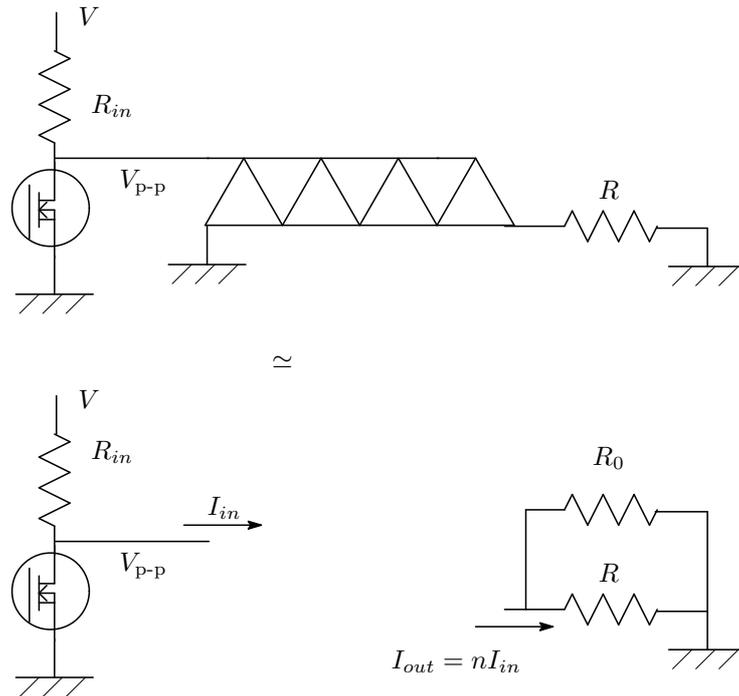


図 7: 等価回路

のタイミングなど回路がかなり難しくなってしまう現在の筆者の手には負えなかった。ここは改善の余地が大いにある。

負荷、入力抵抗と入力電圧 回路図から関係を予測してから測定にかかったが、実際はそううまくは行かない。結局は現象論的に、等価回路モデルを図 7 のように考えれば 入力にはいった電流 I_{in} と負荷を流れた電流 I_{out} の比

$$n \equiv I_{out}/I_{in}$$

および、抵抗による負荷に並列に、回路の基板が R_0 だけの負荷の働きをすると二つパラメタをいければ、スイッチングされる前の電圧 V と CW 回路に入力される振動電圧の V_{p-p} の比は

$$V_{p-p} = V \left(1 - \frac{1}{1 + x/n} \right) \text{ 但し } x = \frac{(R^{-1} + R_0^{-1})^{-1}}{R_{in}}$$

と書ける。測定データおよび、それをこの式を用いてフィットしたものを図 8 と図 9 に掲げる。CW 回路を構成するコンデンサは積層セラミックの 470nF のもの、ダイオードには 1SS81 を用い、 $V = 100V$ とした。

3.3 入力電圧と各段にたまった電圧

次に、入力振動電圧の V_{p-p} と、CW の各段にたまった電圧の関係を測定した。コンデンサはひきつづき 740nF の積層セラミック、ダイオードは 1SS81 を用い、 $R_{in} = 100k\Omega$ 、 $R = 24 \times 8.2M\Omega$ とした。

結果は図 10 を見よ。横軸は何段目か、縦軸はその段に溜まった電圧/ V_{p-p} をあらわす。

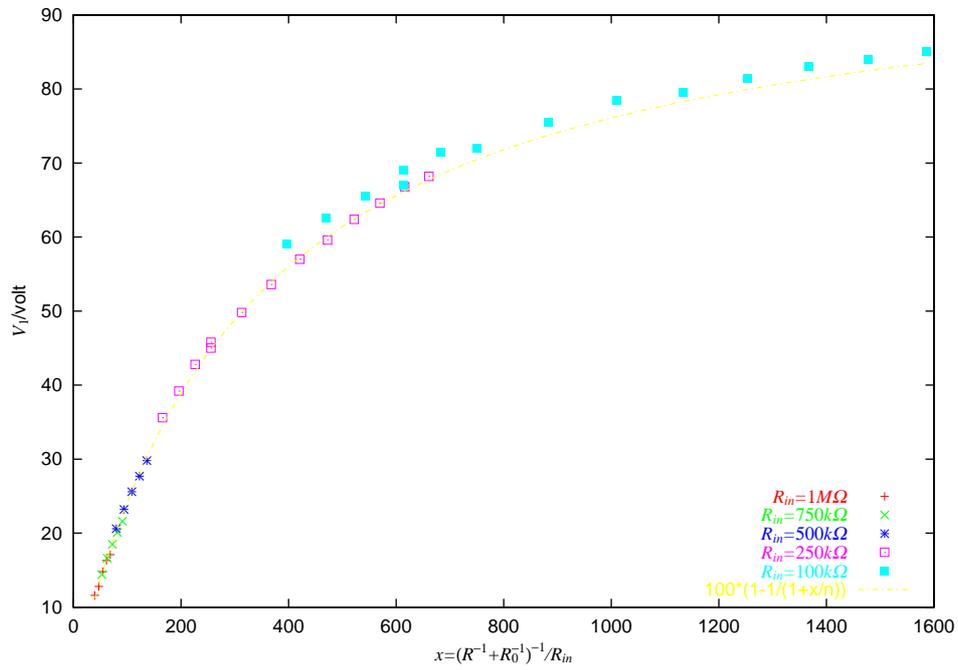


図 8: 負荷、入力抵抗と入力電圧の関係 – CW 12 段 ($R_0 = 800\text{M}\Omega$, $n = 310$)

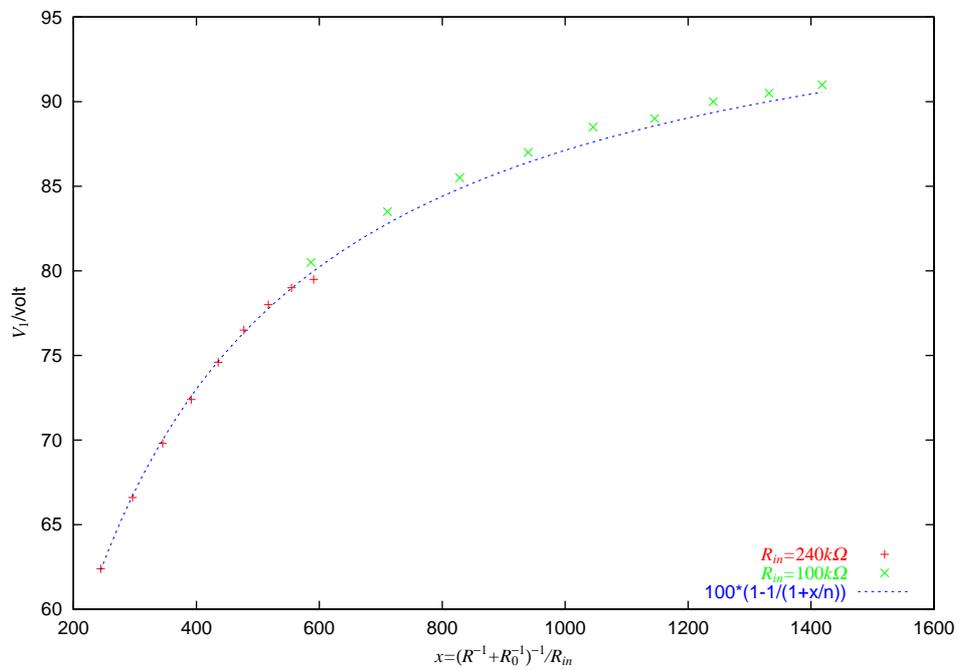


図 9: 負荷、入力抵抗と入力電圧の関係 – CW 8 段 ($R_0 = 502\text{M}\Omega$, $n = 147$)

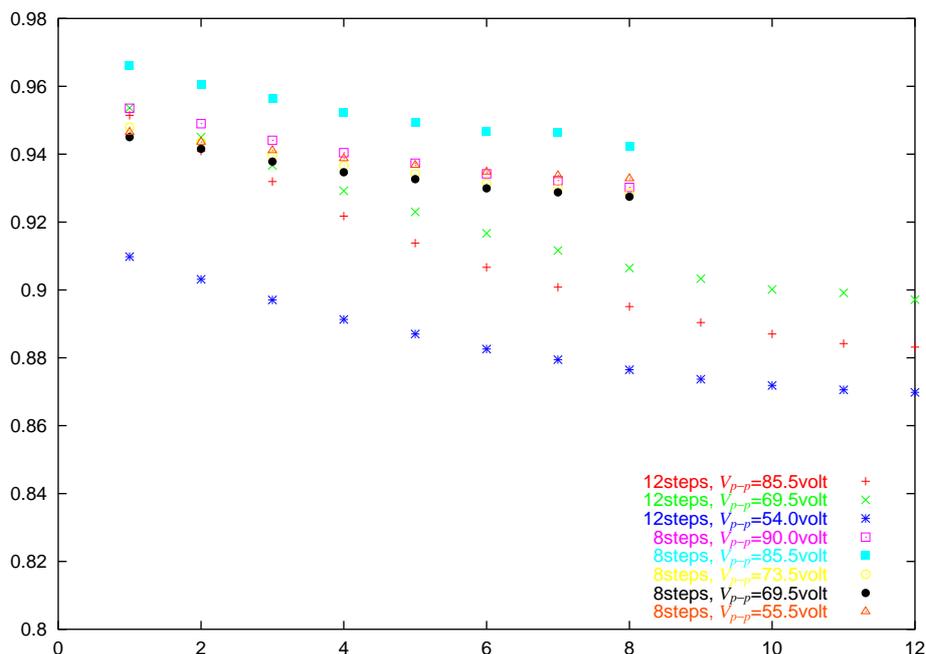


図 10: 各段にたまった電圧

4 R329 につなげるために

4.1 要求される性能

出力電圧の揺らぎ CW 回路はその特性として一度電圧が溜まってしまうと、空気や基盤等を通しての放電を除けば基本的に電圧は下がらない。そのため、増倍管に加える高電圧を調整しなければならないという観点からも、また一度繋いだブリーダーに修理を加える場合の安全性という観点からも、積極的に最高電圧部を高抵抗を通じて接地し、放電しなければならない。そのため、どうしても CW 回路の固定側の電圧といえども振動電圧に追従して揺らがざるを得ない。

さて増倍管の光電子の増幅率が掛ける高電圧の ~ 6 乗に比例するということから、増倍管の増幅率を許容できる程度に一定にするためには最終段の出力電圧のゆらぎを絶対値にして $.1\%$ に押さえない。

ゆらぎは当然使用するキャパシタの容量が大きければ小さくなるだろうと考えられるが、実際に回路を作る前にゆらぎを推測する方法はよくわからない。今のところは作ってみてから測定してみるしかない。

増倍中の電流損失による電圧低下 また、光電子の増幅中は固定側のコンデンサから電荷が抜けていくので、それに伴って各電極の電位もすこしは下がってしまう。よって、単位時間当たり何発のイベントを検出したいか、イベントあたりどれだけの光電子が光電面から出るか、を考慮してコンデンサの容量を選ばねばならない。

さて、今回は縦 $\sim 2\text{m}$ 横 $\sim 50\text{cm}$ のプラスチックシンチレータで宇宙線のミュオンをみるのが目的なので、ミュオンが典型的には GeV 程度のものが 1 個/ $1\text{cm}^2/1$ 分だから、一秒あたり 100 個のオーダーのイベントが入る。発振器の一周期が大体ミリ秒のオーダーなので、一周期あたり多

表 1: フォトマルと回路の接続

K	DY1	DY2	DY3	DY4	DY5	DY6	DY7	DY8	DY9	DY10	DY11	DY12
P_{17}	P_{13}	P_{12}	P_{10}	P_9	P_8	P_7	P_6	P_5	P_4	P_3	P_2	P_1

く見積もっても数イベントということになる。

さて、厚さ 1cm のプラスチックシンチレーターは最小電離の荷電粒子に対しておよそ 2×10^4 の光子を出す。その全部がフォトカソードにあたっただとして、量子効率がおおよそ 20%、増倍率 10^6 とすると素電荷が $e = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{C}$ だから 1 イベントあたりフォトマルは電荷を

$$2 \cdot 10^4 \times 0.2 \times 10^6 \times 1.6 \cdot 10^{-19} \text{C} \sim 6 \times 10^{-10} \text{C}$$

吐くことになる。各コンデンサにこれの 1000 倍程度溜まっておいて欲しいと思うと、 $\sim 10^{-6} \text{C}$ 欲しい。コンデンサにはダイノード間の電圧は 100V 程度とすると、容量にして $10^{-8} \text{F} \sim 10 \text{nF}$ 程度あればよい

負荷の選択 最後に、この節のはじめに書いたように、最高電圧部に負荷をつけなければならないが、その抵抗をあまり小さくすると流れすぎてそもそも CW 回路に電荷がたまらない。一方あまり負荷が大きすぎると放電が遅すぎて電圧の調整や回路の整備の上で問題が生ずる。よってどれくらいの負荷をつけるかも重要である。これは 3.2 節で測定したデータからほぼ予測がつくが、入力電圧の 9 割以上が CW の各段間に溜まってほしいなどと欲張ると $1 \text{G}\Omega$ ほどの抵抗が必要になって、そうなると放電が遅く多少危険だ。設計上出せる最高電圧をかなり余裕を持たせておいて、多少小さいな負荷をつけておくのが妥当と思われる。

4.2 入れるケース

CW 回路でつくった高電圧を長い距離をへてフォトマルまで持ってゆかないほうがよいであろう、という考慮と、発振回路でのスイッチングがノイズとして出力に乗るのは金属のケースで遮蔽してやれば多少は軽減されるだろうとの考えからケースを作成した。製作は CI 工業に依頼した。

4.3 作成した回路

回路図は図 11 を、写真は図 12 を見よ。フォトマルと回路の接続については表 1 を見よ。

まず 20V の入力を初段の CW で 100V から 200V 程度まであげる。この電圧が基本的にダイノード間電圧になる。この段階の出力を分割して発振器へのフィードバックへ使い、全体の出力電圧の設定に使う。

次に 2 段目の CW でそれをつみあげてダイノードに供給する。この CW は、最高電圧部を分割して電圧は監視するけれども、フィードバックでは返さない。フィードバックに最高電圧部を用いなかったのは、開発のごくごく後期になるまでは 2 段目の CW の出力を分割できる適切な抵抗がなかったからという歴史的な理由からであって、2 段目と 1 段目のどちらの CW の出力を用いて電圧を調整したほうがよりよい動作をするのかは確かめていない。

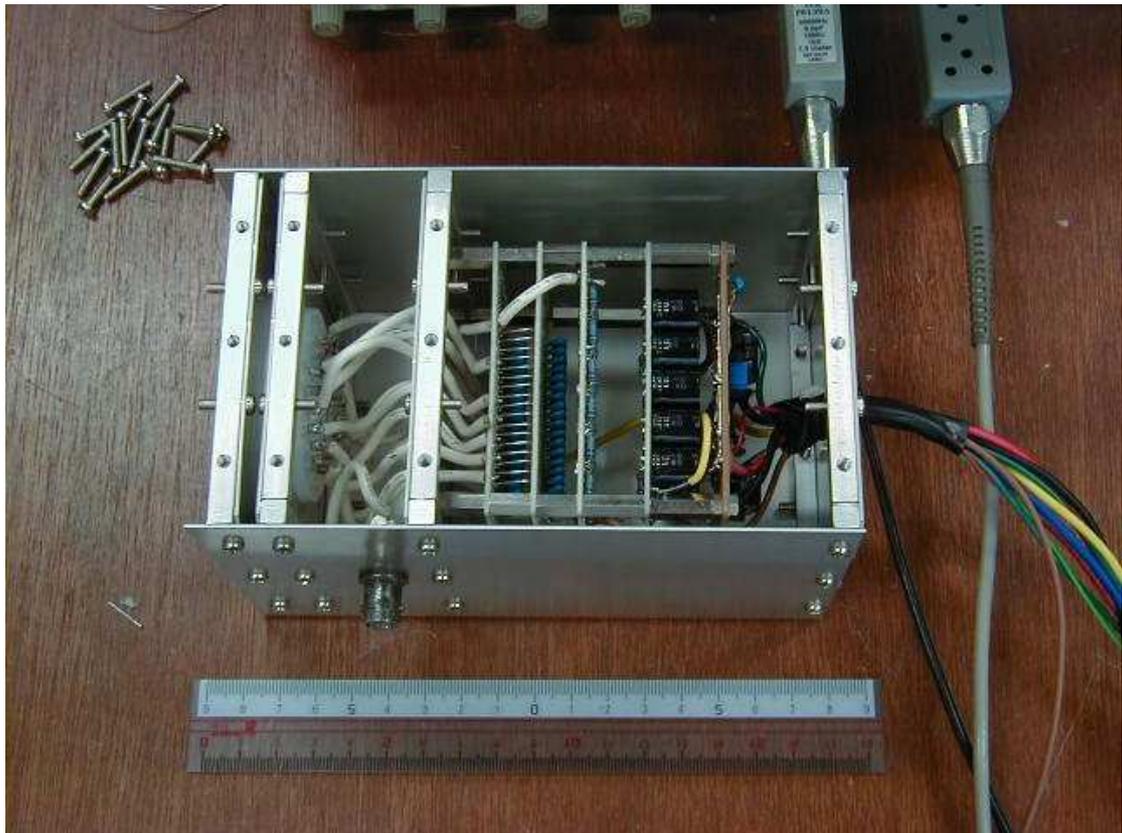


图 12: 写真

4.4 動作

はじめは2段目のCW回路に、耐圧200Vの2nFのコンデンサを用いてみたのだが、出力電圧のリップルが殆ど2段目のCW回路の入力振動電圧の V_{p-p} に等しく使い物にならなかった。そのためかなり問題ではあるが、耐圧50Vの積層セラミックコンデンサの470nFのもので急遽作り直したところ、とりあえず動作している。耐圧50Vのところ、150Vの電圧を掛けているのでほんとはやってはならないことであるが。

耐圧200Vで470nFのコンデンサとなるとかなり手に入れにくいと思われる。

出力高電圧のリップル 最高電圧部に耐圧2kVのnFのコンデンサをつないでオシロスコープのACで観察した。図13を見よ。振幅は全体の.1%で、とりあえず良からう。

ミュオンによるパルス アノードの電流を50Ωの抵抗で電圧に変えて同軸ケーブルでオシロスコープにつないで観察した。R329には1.5kVかけた。ひとつのパルス例を図14にあげた。

しかし、オシロスコープのトリガーをすこし下げると、図15のnoise (org.) なるノイズが見える。

このノイズは発振器のスイッチングと同期しているのが判っている。図16に時間軸を伸ばしてとったデータを載せた。規則的にノイズが出ているのと、ランダムに宇宙線によるパルスが出ているのがわかると思う。

おそらく発振をなまらせればいいのであろうと思い、回路図11に示してある所に抵抗を導入するとノイズは図の15 noise (mod.) のようになったが、これを改善というかは微妙である。

5 結論

我々は光電子増倍管 R329 のための CW 型ブリーダーを作成し、実際に宇宙線ミュオンによるシンチレータの発光を検出することができた。しかし、出力信号に発振器のスイッチングに伴うノイズが乗り、その波高はミュオンによるシグナルに匹敵するので、スイッチングのタイミングと粒子の通過が重なったときの判定が困難である。よって、実際の実験に使用するためには、さらなる雑音の低下が必要である。

参考文献

- [1] J. D. Cockcroft and E. T. S. Walton, “Experiments with High Velocity Positive Ions — (I) Further Developments in the method of obtaining High Velocity Positive Ions”, Proc. Roy. Soc. London, **A136** (1932) 619
- [2] L. Hubbeling, “A Low Power, High Frequency dc-dc Converter For Generating High Voltages”, CERN EP Internal Report 78-5, 1978
- [3] S. Kato *et. al.*, “R329用 Cockcroft-Walton 型光電子増倍管高電圧回路”, INS-T-536, 1995
- [4] B. Lu *et. al.*, “The Cockcroft-Walton Photomultiplier Tube Base and the Ethernet High Voltage Controller”, Nucl. Instr. Meth. **A313** (1992) 135

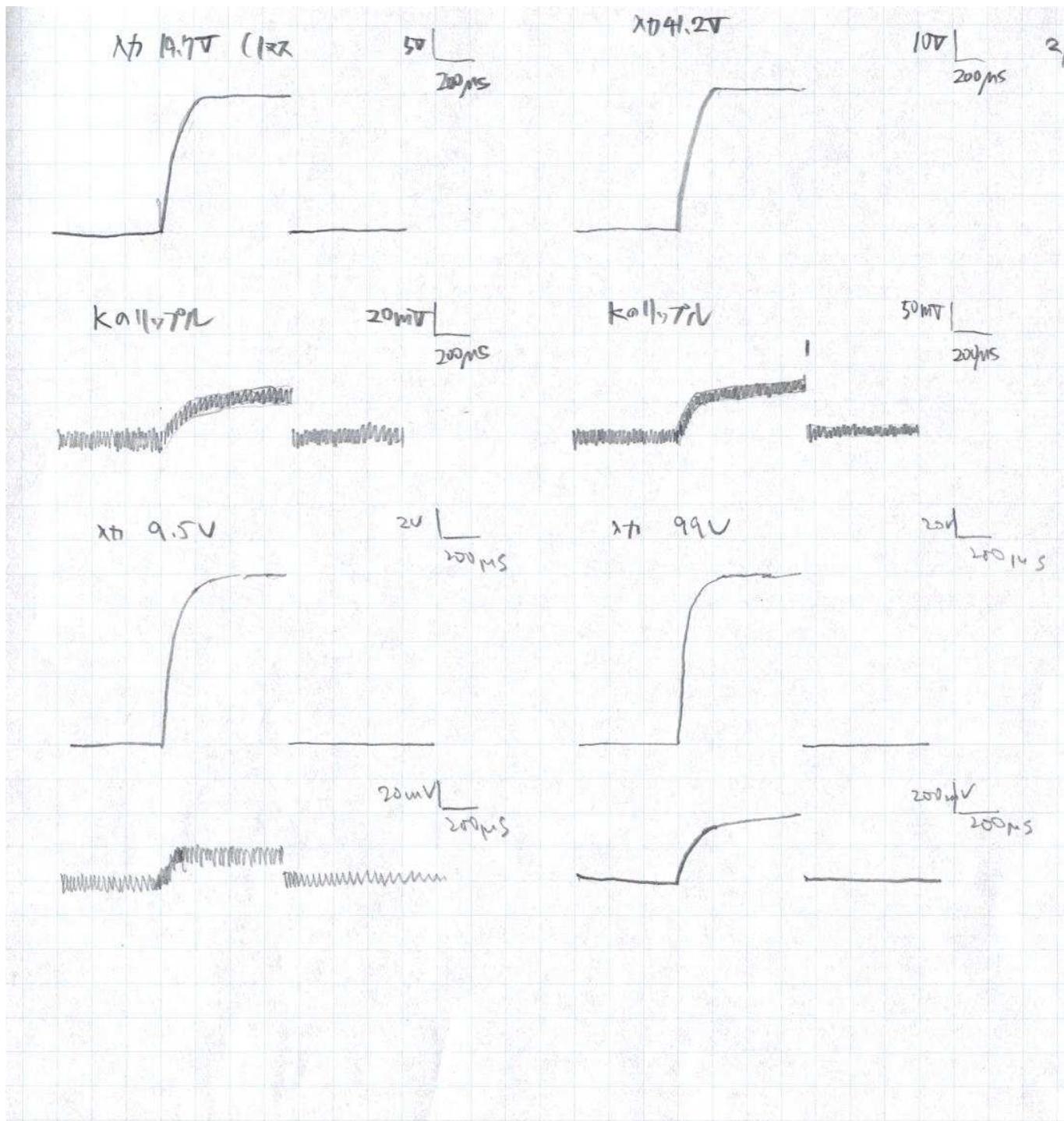


図 13: 出力のリップル

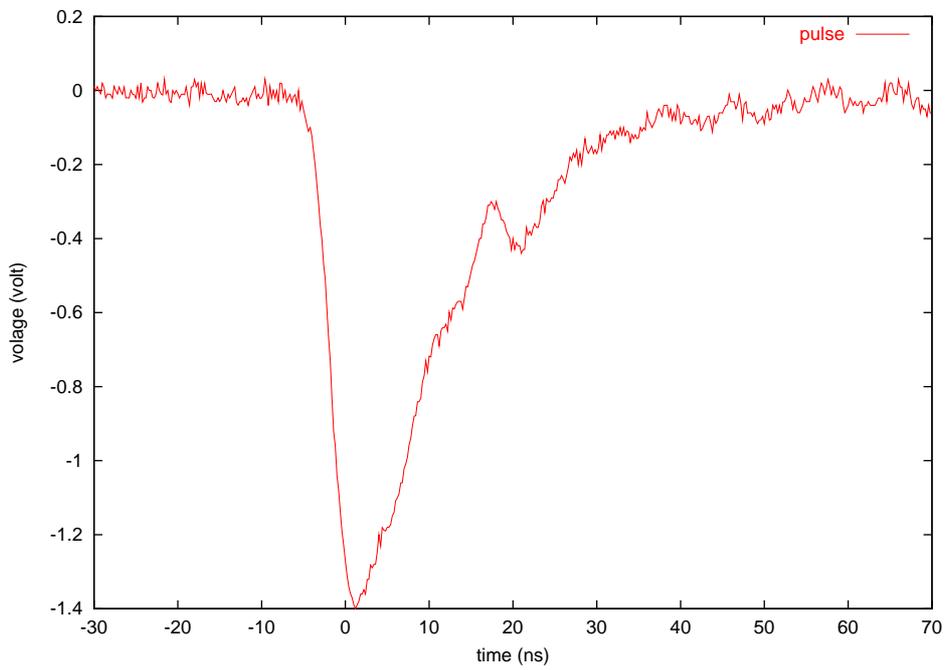


図 14: ミューオンによるパルス波形

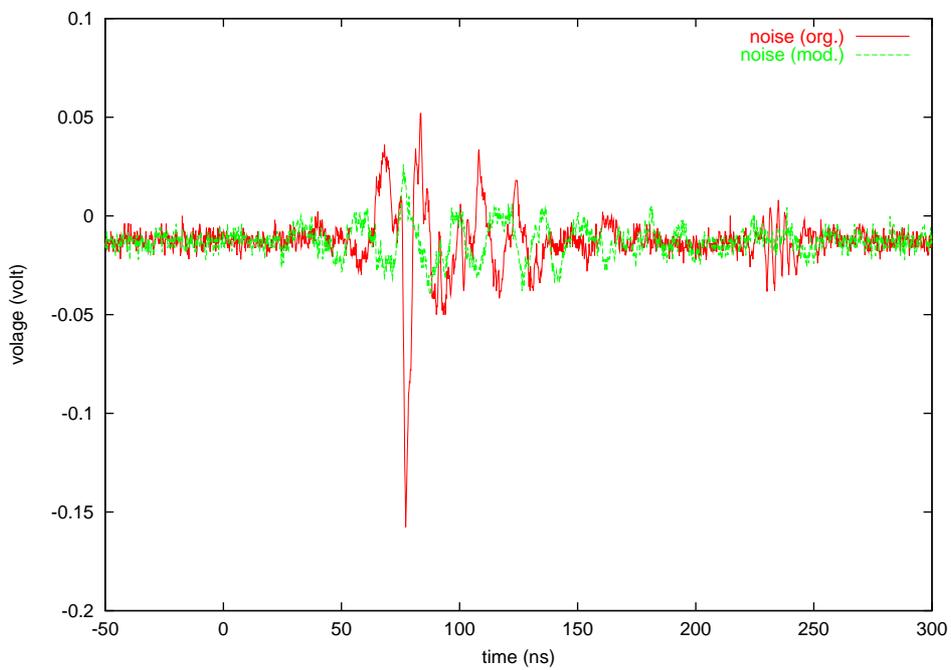


図 15: ノイズ波形

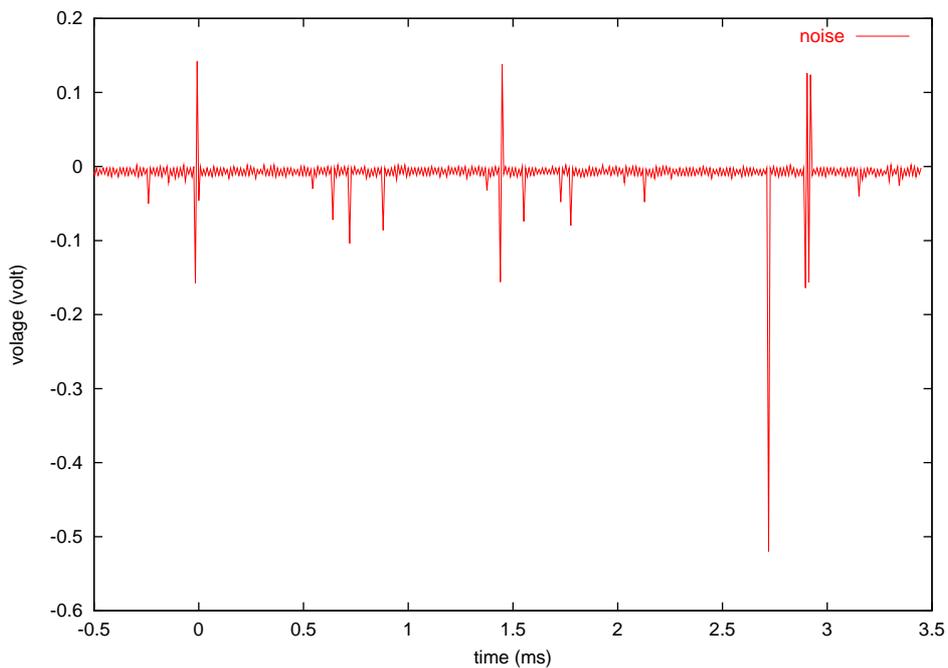


図 16: ノイズ波形

- [5] T. Ishii *et. al.*, “Automatic test of photomultiplier tubes for the ZEUS forward and rear calorimeters”, Nucl. Instr. Meth. **A320** (1992) 449
- [6] A. Brunner *et. al.*, “A Cockcroft-Walton Base For The FEU84-3 Photomultiplier Tube”, Nucl. Instr. Meth. **A414**(1998)466
- [7] “光電子増倍管 — その基礎と応用 — 第2版”, 浜松ホトニクス, 1994
- [8] “続 実用トランジスタ回路定本” CQ 出版、