

教育論文

基礎物理研究室 盛武翔

平成 27 年 1 月 7 日

概要

現行の学習指導要領(2012年度新一年生用)では、「新たに物理学が築く未来」として、物理の功績や「物理の発展と科学技術」について興味を持たせるような成果を取り上げることが加わった。現在の物理学は科学技術と密接に関わっており、本研究室が研究している放射線計測技術は医療、宇宙分野に密接に関わっている。過去の科学者たちが行ってきた放射線計測、原子変換実験技術を安全に、かつ興味を引くような実験としてフィードバックできないかと考え、最初の原子変換実験で用いられたウォルトン・コッククロフト回路を取り上げ、教材として実験や改良および実践を行った。具体的な内容は「ウォルトン・コッククロフト回路を使った昇圧実験(グループ活動)」と「カメラのフラッシュ回路を用いた気中放電実験(演示実験)」である。高電圧は取り扱いに注意が必要であり、人体への短絡(ショート)が起こらないように工夫をし、最終的には手軽で安価に高電圧発生回路を作成し、スパークチェンバーと組み合わせた宇宙線を観測できる教材の開発を目指した。宇宙線を観測できる教材はまだ工夫や改良が必要であり、完成には至らなかったが、「物理学の発展と科学技術」について電気分野に絡めながら、生徒に興味を持たせられるような実験が行えたと考える。

目次

1	はじめに	7
1.1	研究の背景	7
1.2	物理分野との関連について	8
1.2.1	物理 原子単位との関連	8
1.2.2	物理、物理基礎 電気と磁気、電気単位との関連	9
1.2.3	放射線を可視化する教材への応用	10
2	諸理論	11
2.1	宇宙線	11
2.2	スパークチェンバー	12
2.3	Cockcroft と Walton の功績	14
2.3.1	Cockcroft-Walton 加速器	14
2.3.2	ウォルトン・コッククロフト回路	15
2.4	使い捨てカメラの昇圧回路	16
2.4.1	使い捨てカメラ	16
2.4.2	ブロッキング発信回路	18
3	本論	19
3.1	高圧電源回路の製作	19
3.2	放電予備実験	22
3.3	教育実践	23
3.3.1	授業の流れ	23
3.3.2	準備物	24
3.3.3	授業実践の様子	28
3.3.4	アンケート結果	30
3.3.5	アンケート結果からの振り返り	30
4	考察	32
4.1	放電針実験の失敗の原因について	32
4.2	ウォルトン・コッククロフト回路でのコンデンサーの耐圧について	33
4.2.1	解析結果 (50Hz)	34
4.2.2	解析結果 (500Hz)	35
4.2.3	解析結果 (5000Hz)	36
4.3	実験回路の昇圧が底周波数で行えないことについて	37
4.3.1	解析結果 (寄生抵抗 1 オーム)	37
4.3.2	解析結果 (寄生抵抗 10 オーム)	39
4.3.3	解析結果 (寄生抵抗 100 オーム)	41
4.4	使い捨てカメラの昇圧回路の有効性	42

4.4.1	解析結果	44
5	結論	45
5.1	教材開発	45
5.2	授業実践	45
6	まとめ	45

目 次

1	霧箱実験の準備の様子	7
2	簡易放電針実験の原理図	10
3	ガイガー・ミュラー管 (GM 管) の原理図	12
4	スパークチェンバーが荷電粒子を計測する原理	12
5	スパークチェンバーの簡略化した回路図	13
6	耐高電圧高速スイッチング回路素子	13
7	作成したウォルトン・コッククロフト回路	14
8	ウォルトン・コッククロフト回路図	15
9	入力交流電源作成に使った使い捨てカメラ	16
10	入力交流電源作成に必要な部分	16
11	最も危険な部品	17
12	コンデンサーの放電のさせ方	17
13	ブロッキング発振回路	18
14	電池による高圧電源回路の概略	19
15	使い捨てカメラの昇圧回路の倍率を確認	19
16	アクリルのパーツケースに収まる様に基盤に移植	20
17	基盤の金属部分を伝い放電が起きた回路	20
18	基盤の金属部分を削り対策を施した	21
19	木製の台に針を向かい合わせに固定した放電針	22
20	KENWOOD 製 ファンクションジェネレーター	24
21	Tektronics 製 デジタルオシロスコープ	25
22	(ソルダーレス) プレッドボード	26
23	ダイオードとコンデンサー	27
24	過去の加速器実験の説明	28
25	演示実験での様子	28
26	気中放電の様子	29
27	電子機器を用いた実験の様子	29
28	アンケート結果	30
29	LTSpiceIV 上で構成した回路図	33
30	回路図下のコンデンサーの電圧測定 (50Hz)	34
31	回路図上のコンデンサーの電圧測定 (50Hz)	34
32	回路図下のコンデンサーの電圧測定 (500Hz)	35
33	回路図上のコンデンサーの電圧測定 (500Hz)	35
34	回路図下のコンデンサーの電圧測定 (5000Hz)	36
35	回路図上のコンデンサーの電圧測定 (5000Hz)	36
36	寄生抵抗が存在するコンデンサーによる回路	37
37	寄生抵抗 1 オーム、交流周波数 50Hz	37
38	寄生抵抗 1 オーム、交流周波数 5kHz	38

39	寄生抵抗 1 オーム、交流周波数 500kHz	38
40	寄生抵抗 10 オーム、交流周波数 50Hz	39
41	寄生抵抗 10 オーム、交流周波数 5kHz	39
42	寄生抵抗 10 オーム、交流周波数 500kHz	40
43	寄生抵抗 100 オーム、交流周波数 50Hz	41
44	寄生抵抗 100 オーム、交流周波数 5kHz	41
45	寄生抵抗 100 オーム、交流周波数 500kHz	42
46	昇圧回路専用部品	43
47	カメラに用いられているブロッキング発振回路図	43
48	ブロッキング発振回路の出力交流	44
49	時間スケールを拡大した図	44

1 はじめに

1.1 研究の背景

私は学部時代から本研究室で放射線の可視化について取り組んできた。そのなかで半導体検出器の性能評価やノイズ評価を研究してきた。その中で、電気回路に触れ、電気回路についての知識や技術をわずかではあるが身につけてきた。このことを生かして、放射線計測関連技術を教材としてフィードバックできないかと考えた。現行の学習指導要領では原子分野の内容が増え、原子や原子核、素粒子の取り扱いに加え、物理学が築く未来が追加されている。本研究室では例年、SPP(Science Partnership Project)で霧箱を用いた放射線の観測の授業を行っている。



図 1: 霧箱実験の準備の様子

霧箱などによる放射線の観測のみならず、過去の物理実験から現在の科学技術や未来を築く技術について理解し、身近なものを用いて生徒の興味を引くような実験に応用することが重要であると考え。空気中の放電実験は回路の製作や高電圧回路の取り扱いや製作に十分な配慮や工夫が必要であるが、ウォルトン・コッククロフト回路を用いた昇圧実験は入手性の良い、コンデンサーやダイオードを用いて手軽に実験できると考え、物理分野の「原子」単元のみならず、「電気と磁気」単元と関連させて学習することも可能であると考え。物理実験では、抵抗や電池やLED等の電球を扱うことは多いが、コンデンサーやダイオードは計算問題や原理や構造を学習するのみであり、実際に触る機会が少なく、どのような用途に使われたり応用されているのかがわかりにくいと考える。

以上から、昇圧回路について実験を行い、身近なものから高圧回路を作成し、放射線の観測できる教材の開発に繋がりたいと考えた。

1.2 物理分野との関連について

1.2.1 物理 原子単位との関連

学習指導要領の改訂により、物理分野において原子単位の必修化に伴い、以下の内容が取り扱われている。

物理 (4) 原子 ウ. 物理学が築く未来

物理学の成果が様々な分野で利用され、未来を築く新しい科学技術の基盤となっていることを理解すること。
物理学の発展と科学技術の進展に対する興味を喚起するような成果を取り上げること。

2012年、大型ハドロン衝突型加速器(LHC)によるヒッグス粒子の発見による、ピーター・ヒッグス、フランソワ・アングレール両氏のノーベル賞の受賞が行われた。それまでも様々な規模で粒子加速器による実験が行われ、高電圧により粒子を加速させることが加速器の原理であり、高電圧を作り出すことが加速器の黎明期の課題であった。

加速器は放射性同位体の製造に重要な役割を果たし、素粒子・原子核分野の研究のみならず、重粒子線治療やX線透過検査、遺伝子操作などに応用され、医療、産業、工業において重要な位置を占めている。加速器には様々な種類が存在するが、本研究に関連するのはCockcroft-Walton加速器(ウォルトン・コッククロフト型加速器)である。

物理 (4) 原子 イ. 原子と原子核

(イ) 原子核

原子核の構成、原子核の崩壊及び核反応について理解すること。
質量とエネルギーの等価性にも触れること。

ウォルトン・コッククロフト型加速器を用いた、ジョン・コッククロフトとアーネスト・ウォルトンによるリチウム原子核変遷の実験は、人工的に元素を別の元素に変換した最初の実験であり、この功績から1951年に両氏はノーベル物理学賞を受賞した。この実験は「原子の構造」や「原子核の構成、原子核の崩壊及び核反応について理解すること」などに関連すると考える。

また、ウォルトン・コッククロフト型加速器に用いられているウォルトン・コッククロフト回路(倍電圧整流回路)は高圧電源として、一昔前のテレビに用いられたブラウン管をはじめ、X線の生成装置、コピー機、オシロスコー

プなどに産業応用されており、物理学の成果が様々な分野で利用されている例である。また、高電圧は身近に広く利用されているが、実験で取り扱う機会は安全の観点から少ない。しかし、低い電圧を用いて実験することは可能であり、演習実験で教員が安全にコントロールすることで興味を喚起するような実験ができると考え、上述の原子分野における「物理学が築く未来」を満たすものであると考える。

1.2.2 物理、物理基礎 電気と磁気、電気単元との関連

ウォルトン・コッククロフト回路はコンデンサーとダイオードのみで構成される、比較的単純な電気回路である。現在でも高圧電源として広く用いられている。ウォルトン・コッククロフト回路の原理や特徴として、

- コンデンサーの充放電
- ダイオードの整流作用
- 交流の直流への変換

がある。詳細については次章で説明する。

これらの性質や特徴に関わる学習指導要領は以下の部分である。

物理基礎 (2) 様々な物理現象とエネルギーの利用

(ウ) 電気

(イ) 電気の利用

交流の直流への変換や電磁波の利用にも触れること。

ウォルトン・コッククロフト回路を用いて昇圧し高圧電源を作るには、交流電源が必要である。入力された交流は直流の高圧電源として出力されるため、「交流の直流への変換」の例として取り上げられる。

物理 (3) 電気と磁気

(ア) 電気と電流

(ウ) コンデンサー

コンデンサーの性質を理解すること。

コンデンサーの接続にも触れること。

ウォルトン・コッククロフト回路では、交流電源が用いられるが、昇圧にはコンデンサーの充放電が深く関連し、昇圧過程においてコンデンサー同士の接続の変化が重要であるため、コンデンサーの接続や充放電について深く考えさせる実験の例であると考えられる。

1.2.3 放射線を可視化する教材への応用

さらに、作成した高圧回路を用いて、簡単な放電針の実験を行った。放電針とは、気中放電が起こらない限界の間隔（本研究では3kV程の高圧回路を作成した為、3mm程度）をあけて針を向かい合わせに配置し、その隙間に放射線が通るとスパークが起こる装置であり、東京工業大学が多摩六都科学館で科学実験教室で実施していたものである。この装置の利点は、

- 電極として用いる針(2本)
- 放射線源

があれば簡単に実験できるものであり、スパークチェンバー作成の前段階として実験的に試した。放射線計測機器は非常に高価なものが多く、博物館や研究機関のような大規模な実験施設でのみ展示されている。この放電針実験が成功すれば、比較的簡単かつ安価に放射線の電離作用によるスパークの観察が行える。

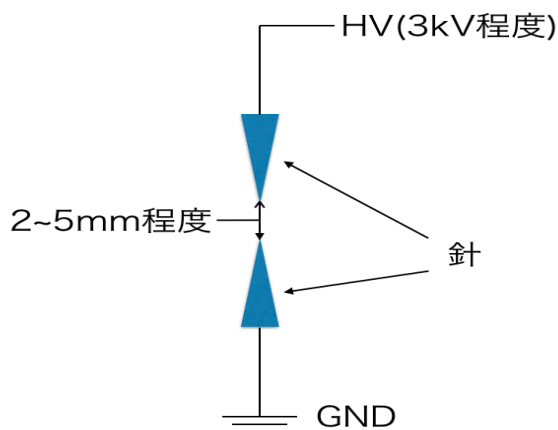


図 2: 簡易放電針実験の原理図

この先に、最終目標としてのスパークチェンバーの製作を設定した。

2 諸理論

2.1 宇宙線

1911年、オーストリアの物理学者V.F.Hess(ヘス)は気球によって5000mの高度で放射線による電離の強度を測定し、放射線強度が高度と共に増加することを発見した。これは、地球外から飛来する粒子があることを実証しており、宇宙線と名付けられた。

宇宙線は強度により、二つの成分に分類される。

- 鉛約10cmを透過する高エネルギー成分を硬成分
- 鉛約10cmを透過できない程エネルギー成分を軟成分

硬成分には、ミューオン、パイオン、陽子、中性子などの粒子があり、軟成分には、ミューオンや陽子などが存在する。宇宙線の強度 J は、天頂角分布で表される。

$$J(\theta) = J_0 \cos^n \theta \quad (1)$$

以上の式より、天頂角を90度の範囲で積分すると、日本上空では1平方cmあたり、軟成分と硬成分を合わせて1分間に1.3個飛んできていることになる。

また、宇宙線は生成された場所により、

- 地球の大気外から入射する一次宇宙線
- 大気内で一次宇宙線の核反応により発生する二次宇宙線

の2種類に分類される。一時宇宙線の起源については、恒星から数GeVの宇宙線が発生することが太陽のデータよりわかっている他、磁化された星の回転運動により生ずる誘導電場による加速による宇宙線の発生説がある。天体から飛来する一次宇宙線には陽子の他に様々な原子核、電子・光子がある。他にも、高エネルギーの γ 線や太陽ニュートリノや超新星爆発時のニュートリノなどがある。

2.2 スパークチェンバー

スパークチェンバーは、様々な加速器実験で用いられる検出器の中で、ガス検出器に分類される。ガス検出器は荷電粒子の電離作用を利用して、チェンバー（箱）内の気体分子を電離させ、電離により生じた電子やイオンを電気信号として取り出したり、スパーク（気中放電）を起こさせて飛跡を検出するものである。ガイガーカウンターもガイガー・ミュラー管 (GM 管) の中にガスを封入したガス検出器に分類される。スパークチェンバーは 1957 年

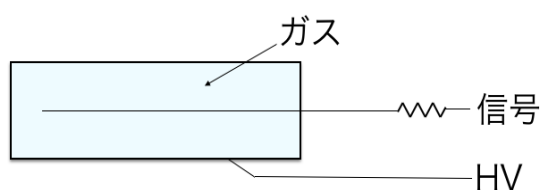


図 3: ガイガー・ミュラー管 (GM 管) の原理図

に福井崇時氏と宮本重徳氏の両氏によって開発されたガス検出器の一種である。正負の電極を向かい合わせ、その間に希ガス（アルゴンガス）を封入した層を何層にも重ねたものである。

- 1 この極板間層に荷電粒子が通過すると、ガス分子が電離される
- 2 電離されたイオンと電子が再結合する前に、両極版に電圧をかけて電極に引き寄せる
- 3 この後にスパークが生じる

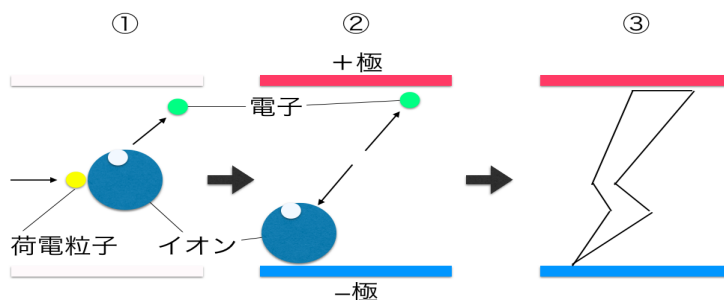


図 4: スパークチェンバーが荷電粒子を計測する原理

荷電粒子の通過直後に高電圧をかける必要があるため、高速に極板間に電圧をかける必要がある。このため、NaIシンチレータとNIM回路群を用いてタイミングを作成し、高速スイッチング回路素子を用いて、極板間電圧のON/OFFを行う。

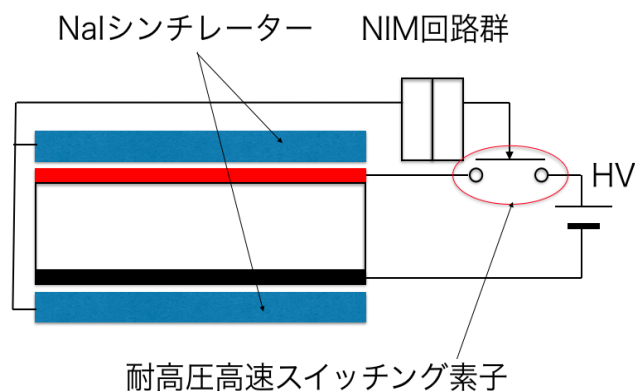


図 5: スパークチェンバーの簡略化した回路図

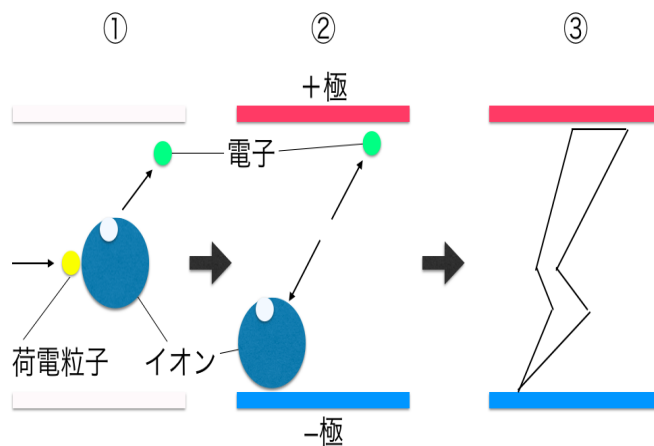


図 6: 耐高電圧高速スイッチング回路素子

2.3 Cockcroft と Walton の功績

2.3.1 Cockcroft-Walton 加速器

1930年、イギリスのキャベンディッシュ研究所において、J.D.Cockcroft(コッククロフト)と E.T.S.Walton(ウォルトン) は整流器 (ケノトロン) とコンデンサーを積み重ねて 500keV の高電圧の発生に成功した。彼らは 1932年、この加速器を用いて 300keV 陽子により、



の原子核変換に成功した。彼らは後の 1951 年にこの功績から、ノーベル物理学賞を受賞した。この加速器での加速エネルギーの限界はコロナ放電や絶縁破壊の問題から 1MeV 程度である。また、両氏が開発した加速器の回路は現在でも、高電圧電源に広く利用されている。

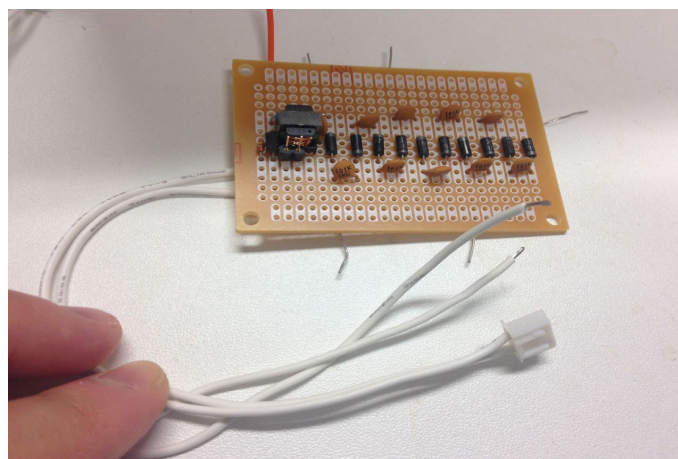


図 7: 作成したウォルトン・コッククロフト回路

2.3.2 ウォルトン・コッククロフト回路

どういう訳か、身の回りにある専門書やネットではウォルトン・コッククロフト回路と名前の順が逆になっている。先述にもあるが、ウォルトン・コッククロフト回路は入力電源が交流電源であり、出力電圧は直流電源である。このように1方向のみに電流を流す素子(半導体ダイオード、水銀整流器など)を用いて、交流を脈流(Pulsating current)に変換する回路を整流回路という。

脈流は交流とは異なり流れる電流の方向が一定で、大きさが周期的に変化あるいは不規則な変動を伴った電流のことである。こうして作り出された脈流には、不安定な電圧の大きさの変動(リップルノイズ)を含んだ直流がある。

ウォルトン・コッククロフト回路は入力交流電圧の整数倍(1, 2, 3, 4, ... 倍)になるような整流回路であり、倍電圧整流回路である。ウォルトン・コック

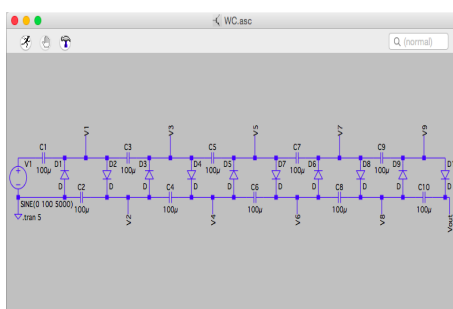


図 8: ウォルトン・コッククロフト回路図

クロフト回路の特徴は

- コンデンサーとダイオードのみを用い、回路の作成が簡単である
- トランスによる昇圧は交流電源の周波数への依存性が大きくなる

一つ目の回路の作成が簡単であることは、学生の実験の準備を容易にする上で重要であり、コンデンサーとダイオードのみで構成されわかりやすく、コンデンサーの充放電を繰り返した昇圧で、実際の生活への応用の例である。また、コンデンサーやダイオード自体の価格が安いことから、安価に高圧回路を作り出せるため、高価な高圧電源がないような学校現場でも導入しやすい。

また、二つ目の周波数の依存性とは、トランスによる昇圧は一次側と二次側コイルの巻き数巻き数の比の2乗の抵抗が生じ、電力のロスが大きい。ウォルトン・コッククロフト回路の原理については考察の部分で述べる。

2.4 使い捨てカメラの昇圧回路

2.4.1 使い捨てカメラ

本研究では、高圧電源がない現場でも実験できるように、高圧回路の入力交流電源を自作した。安全面から、コンセントなどの大電力を入力とするのではなく、電池で駆動できる程度の小電力を用いて実験を行った。コンパクトで安全にかつ安価に気中放電実験を行うために、使い捨てカメラを分解し、フラッシュ用の昇圧回路を使用した。



図 9: 入力交流電源作成に使った使い捨てカメラ

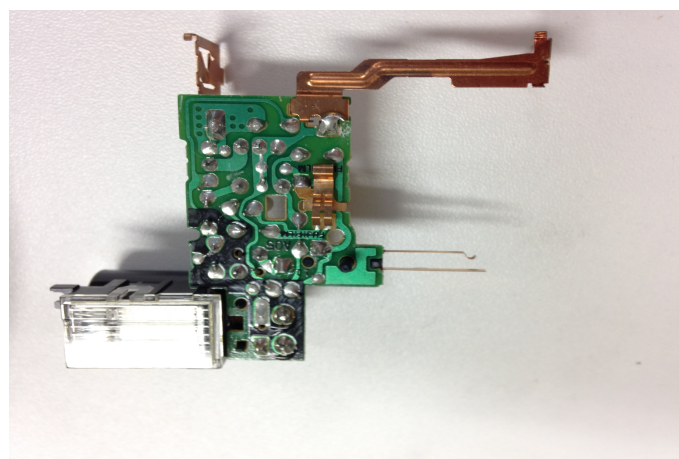


図 10: 入力交流電源作成に必要な部分

交流回路作成に用いるフラッシュ回路部分。これ以外は使わない。

使い捨てカメラの分解作業にあたって、特に注意すべきことを挙げておく。

- フラッシュは分解前に動作させないこと、裏面のコンデンサーに電気がたまり感電の危険がある
- プラスチック部品はカドが多く、怪我のないよう丁寧に分解作業を行うこと
- カメラ本体下の乾電池をまず取り外すこと（感電の恐れあり）
- 次に、絶縁されている（柄の部分がプラスチックなどの）ニッパーでコンデンサーを外すこと

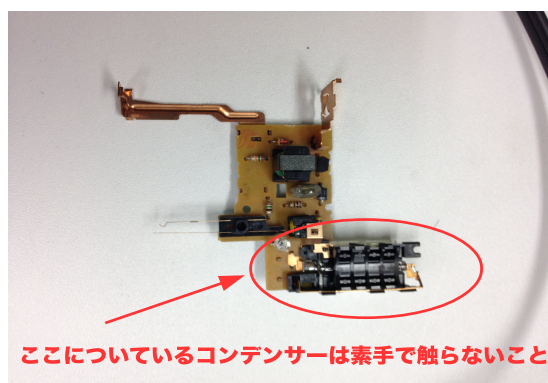


図 11: 最も危険な部品

万が一、フラッシュのスイッチを触ってしまったときは、コンデンサーのリード線をショートさせて電荷を放出させること



図 12: コンデンサーの放電のさせ方

2.4.2 ブロッキング発振回路

使い捨てカメラの昇圧回路はブロッキング発振回路である。発振回路とはトランジスタやFET(Field Effect Transistor)と抵抗、コイル、コンデンサーの受動素子を組み合わせた回路で、外部からの信号を加えることなく、交流を発生させることができ、ウォルトン・コッククロフト回路の入力電源として用いた。

発振回路は電流のON,OFFを用いて交流(サイン波やノコギリ波)を作り

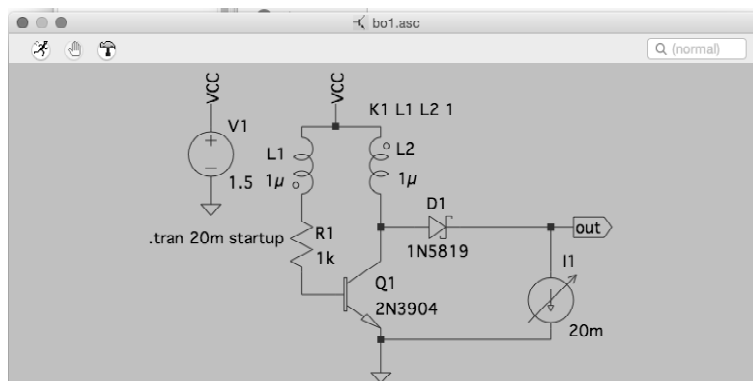


図 13: ブロッキング発振回路

出す回路である。トランスの一次コイルに電流が流れると、電磁誘導により二次コイルにも正の電流が流れ、トランジスタのベースのスイッチがONになる。すると、二次コイル側の電流は一定になる。すると、トランジスタはOFFになり、二次コイルもだんだん流れなくなる。このトランジスタがONになり、その反動でOFFになることをブロッキング動作という。このON,OFFのくりかえしにより、二次コイルは周期的に変化する交流を出力する。

- 出力側のコイル (L2) に電流が流れるには Q1 のトランジスタを ON にする
1. 回路の電源が ON になると入力側コイル (L1) に電流が流れて、Q1 のトランジスタが ON になる
 2. L2 の電流が増え始め、しばらくすると一定になる
 3. L2 の電流が一定になるとトランジスタが OFF になり、L2 の電流が減り始める
 4. L2 の電流が下げ止まると、L1 が ON になり、1. の状態に戻る。

以上を繰り返して、出力側には周期的に変化する電流が流れる。

3 本論

3.1 高圧電源回路の製作

使い捨てカメラの昇圧回路部分と 10 倍のウォルトン・コッククロフト回路を組み合わせて、高圧電源の性能をチェックした。カメラの昇圧回路部分を取り出し、必要な部分のみを残して、直接ウォルトン・コッククロフト回路に入力した。

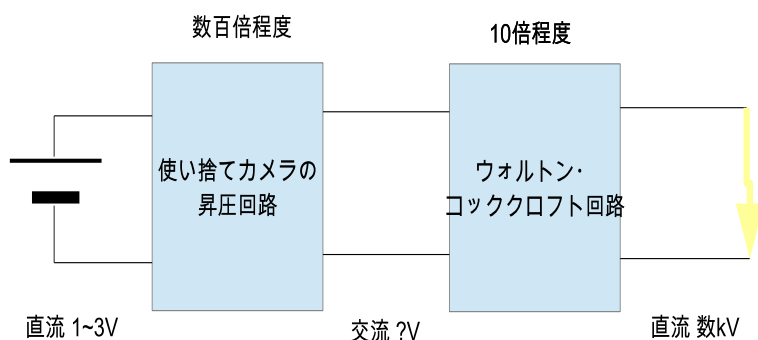


図 14: 電池による高圧電源回路の概略

1V 未満の電圧を昇圧回路に入力し、最終的に何 kV 出力できるかを試した。

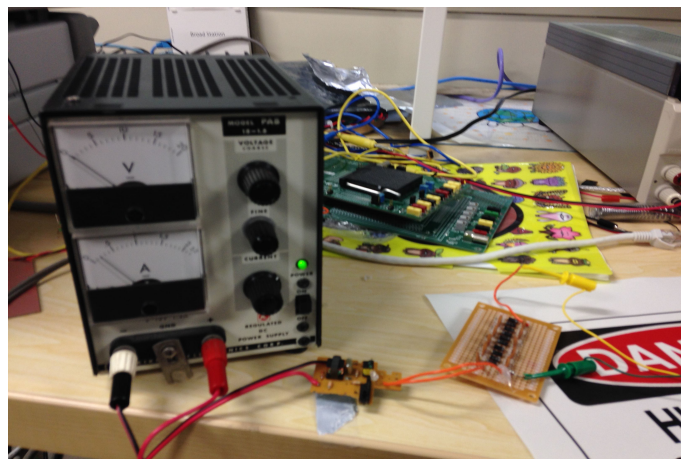


図 15: 使い捨てカメラの昇圧回路の倍率を確認

4個のカメラの回昇圧路を試した結果、3Vから500V~600Vの範囲まで使い捨てカメラは昇圧できることがわかった。ただし、このままでは数百Vの回路がむき出しで非常に危険であるため、アクリルケースに収まるように改良した。しかし、4kVを超えるであろう領域(ウォルトン・コッククロフト

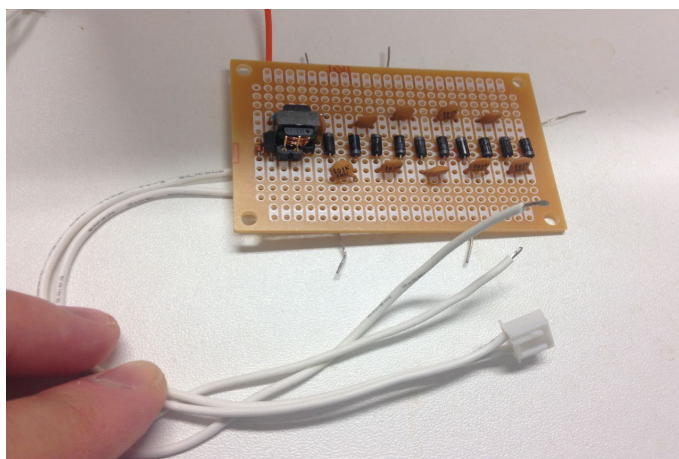


図 16: アクリルのパーツケースに収まる様に基盤に移植

回路の8段目以降)から基盤のランド(接点)を通じて放電が起こってしまうためホットボンドで絶縁したが、隙間から放電が起きてしまった。ユニバー

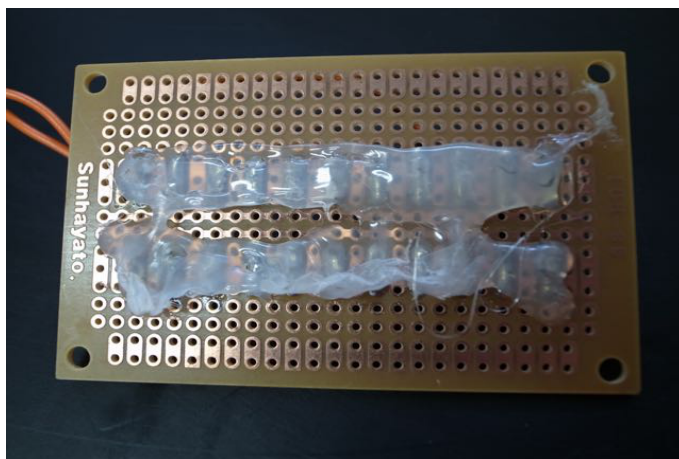


図 17: 基盤の金属部分を伝い放電が起きた回路

サル基盤は、自由に回路を構成できるよう、2.54mmピッチでランドが設けられている。ランドの幅はを含めると隣の穴との間隔は1mm程であり、放電が起きやすい条件になってしまっている。そこで、不要なランドを削り取

り、後段のコンデンサーとダイオードの間隔を広げたところ、放電は起きなくなりました。

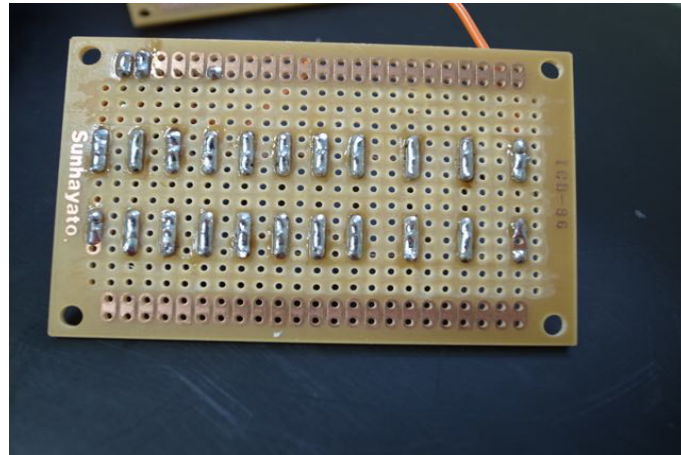


図 18: 基盤の金属部分を削り対策を施した

3.2 放電予備実験

作成した高圧回路を用いて、放電針の実験を行った。放電針についての先行実験は東京工業大学の柴田研究室が多摩六都科学館で行っている。

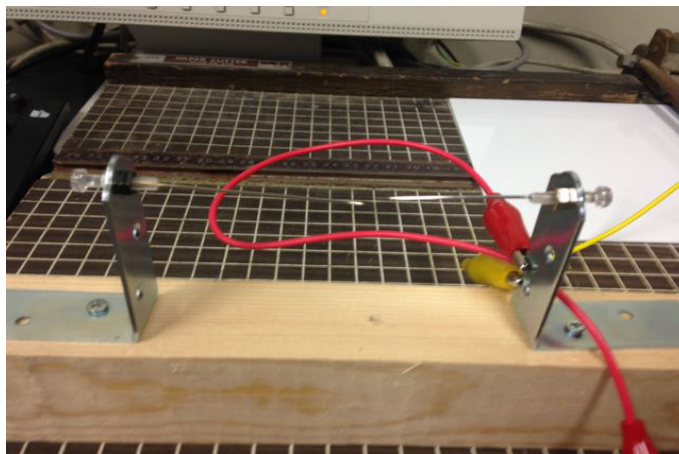


図 19: 木製の台に針を向かい合わせに固定した放電針

また、安全に針の間隔を微調整できるように、プラスチック製のネジの中心に穴を開けて針を刺して、工夫した。東京工業大学の実験と同様に、針（縫い針）を用いて木製の台に針を向かい合わせに固定して、上からランタンの芯をかざしてみたが、期待される結果は得られなかった。この原因の調査は現在も調査中である。

この後、電源に繋ぎ変えて電圧を上げて実験してみたが、最終段周りのコンデンサーの破壊をするに至った。また、何度か実験を繰り返しているうちに、使い捨てカメラの昇圧回路の破壊も起きてしまった。

ウォルトン・コッククロフト回路による昇圧実験であれば、ファンクションジェネレーターを用いて、低い電圧で実験することが可能であるため、低電圧 (1.5V 程度の交流をファンクションジェネレーターで作成) をブレッドボード上に組んだウォルトン・コッククロフト回路に入力して、オシロスコープで昇圧の様子を観察することにした。

気中放電実験は、空気の絶縁破壊が 30kV 毎 cm であるが、尖った電極を用いれば 10kV 毎 cm で起こせるので、いくらか高電圧の出力は落ちてしまったが、2.3mm の放電実験ができた。つまり、2.3kV 程の出力があることが予測される。

3.3 教育実践

3.3.1 授業の流れ

2014年12月19日(金曜日)3限目(13:00-13:30)物理教育実験の時間に、本大学において実践を行った。

- Cockcroft-Walton 加速器の高電圧作成回路が現在でも様々な分野されていること
- 気中放電を観察し、高電圧の危険性について理解すること
- コンデンサーやダイオードなどが実際にどのように昇圧するのか理解すること
- 電気分野の単元で電子機器に触れる事の有効性について
- 原子核の崩壊や核反応、エネルギーの等価性について理解すること

以上の点に重点を置き、授業を行った。授業の流れは、以下の通りである。

— 導入 —

ウォルトン・コッククロフト両氏の功績や現在の加速器実験に至るまでを紹介し、どのように原子核変遷や新粒子の発見を行っているかを紹介した

↓

— 実験1 空気中の放電の観察 —

素粒子実験に必要なエネルギースケールを小規模で実感するために、kVスケールの電圧で気中放電が起こること演示した

↓

— 実験2 ウォルトン・コッククロフト回路の説明 —

電気を貯めたり、放電する働きを持つコンデンサーをうまく使うと、電圧をあげる(昇圧することができる)ことを説明し、実験の方法や手順、電子機器の操作方法を説明した。

↓

— 実際に実験してもらい、昇圧を確認する —

コンデンサーの充放電を電子機器を用いて確認することで、コンデンサーの充電による昇圧を実験とともに理解する。その後、まとめとして、アンケートを記入してもらった。

3.3.2 準備物

ウォルトン・コッククロフト回路の昇圧回路の実験を行うために、以下の電子機器や器具を準備した。

ファンクションジェネレーター ファンクションジェネレーター (function generator) は1Hz~2MHzまでの様々な波形 (sin 波, 方形波, 鋸波) を作り出すことのできる機器である。主に機器のテスト信号を送り込むために用いられ、標準信号発生器と機能や使われ方が似ているが、より低周波の領域で使用できる。

あらかじめ、事前にファンクションジェネレーターの周波数を1MHzに設定していたが、自由に周期を変えて sin 波を入力した。今回は特に、ウォルトン・コッククロフト回路がブレッドボード上に組まれているため、隣のソケットとの間隔が狭く、100V を超えるような入力交流電圧は使用できないため、特に重宝した。



図 20: KENWOOD 製 ファンクションジェネレーター

今回は、ウォルトン・コッククロフト回路による昇圧を低い電圧で安全に行うために、放電実験のフラッシュ回路の代わりに用いた。これにより、最大でも6倍の9V程度の電圧しか発生しないので、安全に実験することができた。

デジタルオシロスコープ オシロスコープ (Oscilloscope) は、一つ、またはそれ以上の電位差を二次元のグラフとして画面上に表示する電気信号の波形を観測するための電子機器である。通常、画面表時の水平軸は時間を表し、分解能によっては ns(ナノセカンド: 10 億分の 1 秒) まで測定できるものもある。垂直軸は電圧や電流を表示させることができる。

現在のオシロスコープはデジタルオシロスコープが主流であり、アナログ信号をデジタル化して表示させているため、デジタルデータをメモリに保存し、波形をプリントしたり、メモリに保存したりすることができる。今回の



図 21: Tektronics 製 デジタルオシロスコープ

実験でのオシロスコープの使い方は以下の通りである。

- プロブを観測したい電圧の回路部分に挟み、プロブに付属するみの虫クリップは GND をとる
- 観測したいのは直流なので、観測電圧特性を DC カップリングにセットする
- "Vertical" ダイアルで電圧のスケールを調整する
- "Horizontal" ダイアルで時間軸のスケールを調整する

ブレッドボード ブレッドボード (breadboard, protoboard) とは、電子回路の試作・実験用の基盤のことである。一般的にブレッドボードというと、上

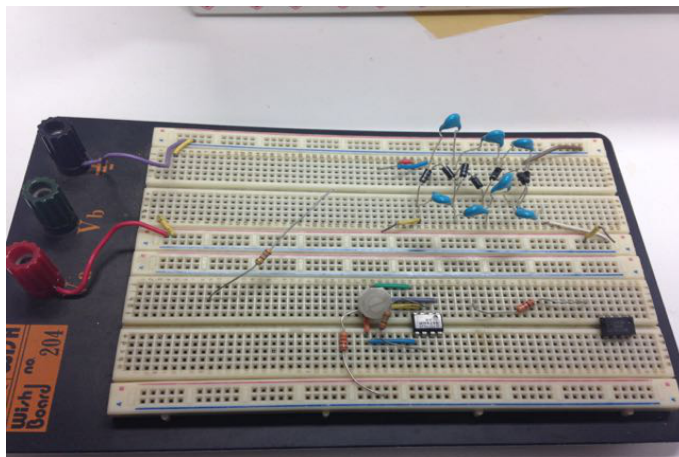


図 22: (ソルダーレス) ブレッドボード

図の様な、電子部品やジャンパ線を差し込むだけで電子回路を組むことのできる、半田づけ (solder) 不要 (less) な基盤。ソルダーレス・ブレッドボードのことを言う。

電子部品を穴に挿して使用するため、回路の変更が自由であり、修正も楽である。回路の試作・実験、また電子回路に関する学習・教育ようとして広く用いられている。穴の間隔は汎用 IC のピッチに対応している。

しかし、ブレッドボードは穴に差し込まれた電子部品のリード線を、二枚のバネ板で挟み込むようにして用いるため、二枚の金属製バネが向き合う構造になっていることから、コンデンサーのように振る舞ってしまう。これを寄生容量といい、高周波回路 (10MHz 以上) には向かない、また接点の接触抵抗のため大電流を流すような (およそ 500mA 以上) にも向かない。今回のウォルトン・コッククロフト回路では、最大でも 2MHz の周波数であるので、問題ない。また、電圧の増加に伴い電流が反比例して下がるので、最初の入力交流電圧の電流を絞れば問題ない。

ブレッドボードの使うにあたっての注意は以下の通りである。

- 両端の 2 列は電源用であり、内部で列方向に接続されている
- 中心の A から J 行に電子部品や IC を指し、A から E 行と F から J 行はそれぞれ内部で行方向に接続されている。

コンデンサー コンデンサーの重要な働きは電気を貯めたり放電できることである。しかし、電池のように一定の電流を長い時間流し続けることはできない。本研究でも、コンデンサーのこの働きは重要である。本研究に関連したコンデンサーの役割を以下に述べる。

- 電気を貯めて使う。電気二重コンデンサーは大容量で電池のように扱える
- 解放回路。電気をゆっくり貯めて、一気に放出する（ストロボ発光）
- 電気を貯める時間や放出する時間を利用したタイマー回路
- 固有振動数で、充放電を繰り返す
- 平滑回路（電気をたくさん貯めて、ゆっくり放電することで電圧を安定化させる）

ダイオード ダイオード (diode) は整流作用（一方向に電流を流さない作用）をもつ電子部品であり、Cockcroft-Walton 加速器ではケノトロンという真空管の一種が用いられていたが、現在のダイオードと同じ働きをする。

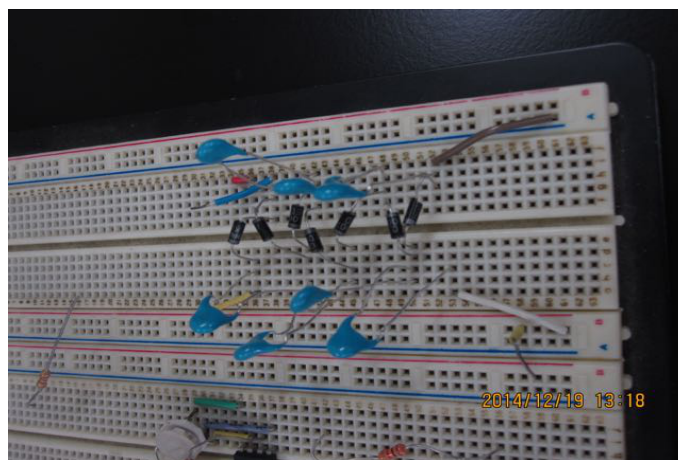


図 23: ダイオードとコンデンサー

3.3.3 授業実践の様子

13:00 から開始し、受講者は6名であった。3人ずつ2班に分けて、グループ実験を行った。受講者の実験材料の準備もあり、導入は班ごとに時間をずらして行った。

先日にフラッシュ回路を壊してしまったので、急遽ウォルトン・コッククロ



図 24: 過去の加速器実験の説明

フト回路に外部から、同様のインバーター回路から交流電流を割り込ませて、放電実験を行った。右手が勢い良く動いているが、音に驚いたためであり、感電したのではない。

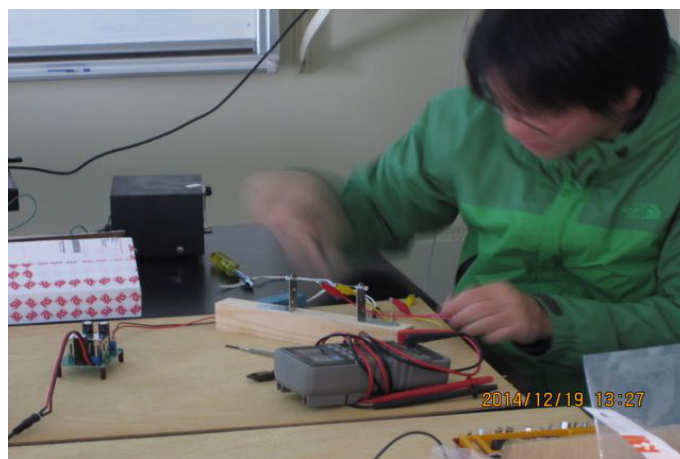


図 25: 演示実験での様子

うまくスパークが飛んだ様子、2mm ほどの間隔であることから、2,3kV 程出力がないと予測される。スパークの長さが短かったが、スパークが飛ぶと驚きの声が上がった。

受講者はなれない電子機器ながら、興味を持って取り組んでくれたと思われ

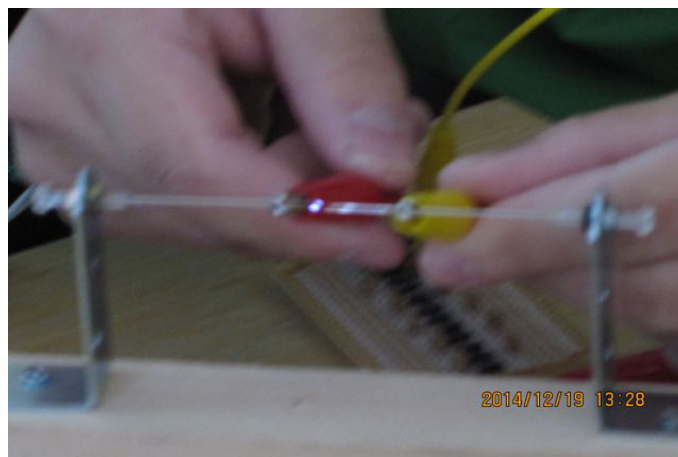


図 26: 気中放電の様子

る。ウォルトン・コッククロフト回路の出力段を変えて電圧の変化を観察している様子。ただし、入力した交流は数 MHz でないと、昇圧されなかった。

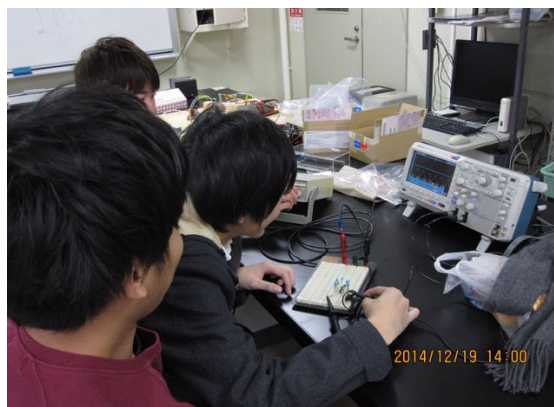


図 27: 電子機器を用いた実験の様子

3.3.4 アンケート結果

本授業実践の終了後、アンケート調査を受講者6名に行い、全員から回答を得ることができた。アンケート項目の要点は以下の通りである。

- 実験の操作性について（実験の結果を見ることができたか）
- 高電圧回路の危険性について
- 電気分野の学習における、電子機器を用いることの有効性
- 電子機器への興味

アンケート結果は以下の通りである。

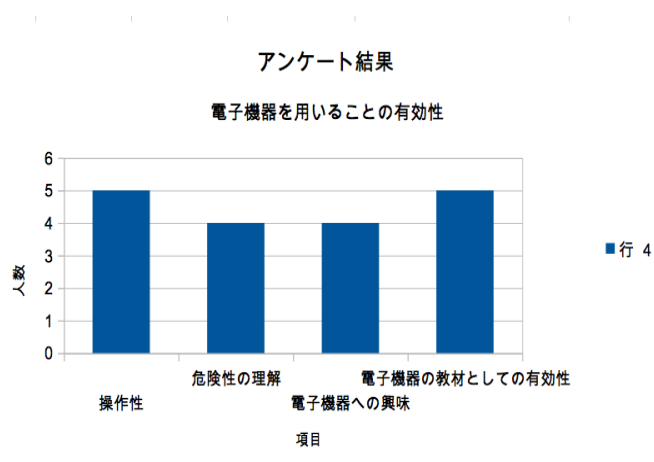


図 28: アンケート結果

3.3.5 アンケート結果からの振り返り

操作性について 実験にあたり、あらかじめブレッドボードにウォルトン・コッククロフト回路を作成しておいた。アンケートの記入に、

- 回路が組み込まれていたため、容易に実験が行えて良かった

という回答があり、受講者たちはブレッドボードをあまり使い慣れていないことがうかがえる。実際にブレッドボードを授業に取り入れるには何度かブレッドボードで回路を組む経験が必要になると考える。

他にも、オシロスコープについて

- オシロスコープに慣れていないので、少し分かりにくかったです。

という、回答があった。オシロスコープも机間巡視を行いながら、高嶋先生にも指導を手伝っていただいたことから、これらの電子機器には取り付き難い部分があるが、補助があれば、ある程度問題なく使えることがうかがえる。これらの問題は、継続的に回路を自分たちで組むような実験を取り入れれば、解決可能だと考える。

高圧回路の危険性の理解 高圧回路は危険であることを気中放電実験の演示し、危険性について考えさせた。

しかし、アンケートの中には、

- 無回答
- 危険性について、いまいち理解できなかった。

という回答があった。気中放電の実験はスパークが起これると、皆歓声をあげて興味を持った様子であった。演示実験中も「触ったら痛いのですか？」という声があがり、なかなか危険性の理解にはつながらなかったが、電気そのものへの興味は引き出せたと考える。

電子機器への興味 電子機器への興味についてはアンケート結果にあまり否定的な意見は見られなかった。楽しかったやインパクトがあったなどから、気中放電の効果が大きかったと考える。

電子機器の教材としての有効性 コンデンサーの充放電は計算や電池の代わりという形で、電源回路への応用は難しいように思われたが、回路上で、実際に学生がオシロスコープのプロブを差し替えて、電圧の昇圧を確認した。アンケート結果からも

- 内容が難しいだけに、視覚化していて良かった
- 話を聞くより回路を見る方が理解が深まった
- 視覚的に印象に残る実験でした

二つ目の回答のように、計算ではなく実際に測定して視覚的に確認することが理解に繋がったと考える。

4 考察

本研究における実践では、電子回路の不具合や期待した効果が得られなかった。本研究では高圧回路を開発とそれを用いてのスパークチェンバーによる宇宙線観察の教材開発であるため、原因を探る必要がある。考察するべき点を列挙する。

- 放電針実験で、うまくスパークが飛ばなかった原因について
- ウォルトン・コッククロフト回路でのコンデンサーの耐圧について
- グループ実験で何故、数 MHz の周波数でないと昇圧しなかった原因について

4.1 放電針実験の失敗の原因について

放電針実験では、ウォルトン・コッククロフト回路は正常に動作しており、3.4kV(スパークの長さから計算したおおよその値)の電圧がかかっていた。しかし、放射線の電離作用によるスパークは生じなかった。この原因について、以下のように考えた。

- 放電針の支持が不安定であったため、放電しないギリギリの間隔を保つことができなかった
- 電池による高電圧生成が電力的に限界だった。

放電針の支持が不安定である 放電針の支持が不安定となった原因は、プラスチック製ネジに垂直に針を差し込めてなかった場合、ネジを締めて向かい合わせてもずれが生じる。このため、十分に限界まで近づけなかった。

電池による高電圧生成の限界 トランスによる昇圧は巻線比の二乗の内部抵抗が生じる。フラッシュ回路は数 V を数百 V に昇圧しているためその内部抵抗は 100 の二乗の 1 万倍になり、かなりの内部抵抗が生じ、電流が弱く、放射線の電離に反応できなかった。

以上の二点を考えてみたが、現状、十分な検証が行えていない。以後、継続して原因を探る必要がある。

4.2 ウォルトン・コッククロフト回路でのコンデンサの耐圧について

SPICE Software 電子回路の振る舞いをソフトウェアでシミュレートする SPICE というソフトウェアがある。SPICE とは、Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis (スパイス) であり、電子部品のパラメータを設定すると、電子回路の挙動を解析することができる。解析には Linear Technology 社製の LTSPICE IV (無償版) を用いた。

トランジェント解析 トランジェント解析 (Transient Analysis: 過渡解析) は回路の動作を時間の経過を追ってシミュレーションする。オシロスコープ同様に、横軸が時間軸、縦軸が電圧や電流となる。

LTSpiceIV で理想的なウォルトンコッククロフト回路を構成し、電源として、50Hz, 500Hz, 5kHz の sin 波を入力し、トランジェント解析を行った。コンデンサは実際に使った容量にし、解析をおこなった。

各グラフのラベルは上図の各出力端子に対応している。

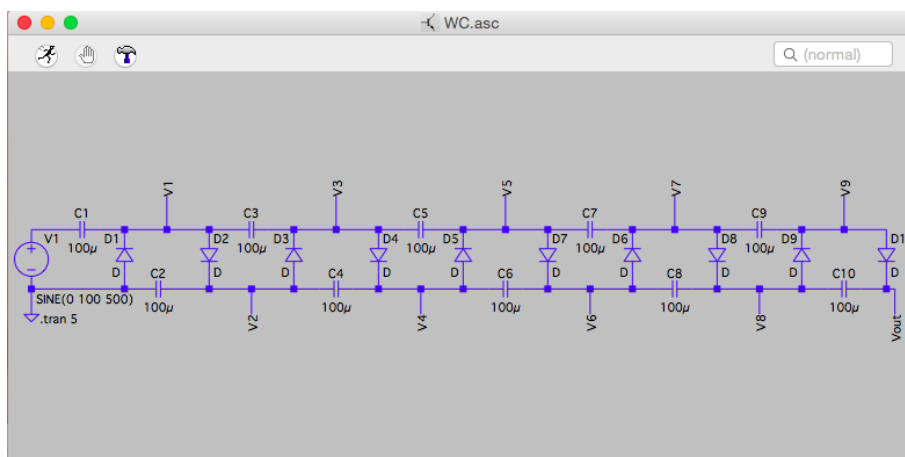


図 29: LTSpiceIV 上で構成した回路図

4.2.1 解析結果 (50Hz)

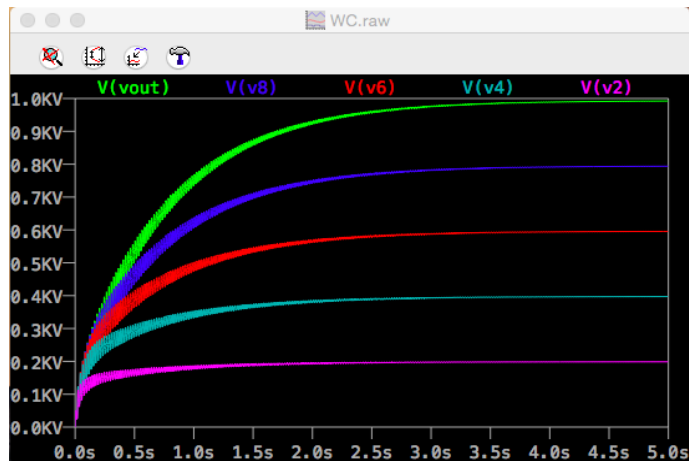


図 30: 回路図下のコンデンサーの電圧測定 (50Hz)

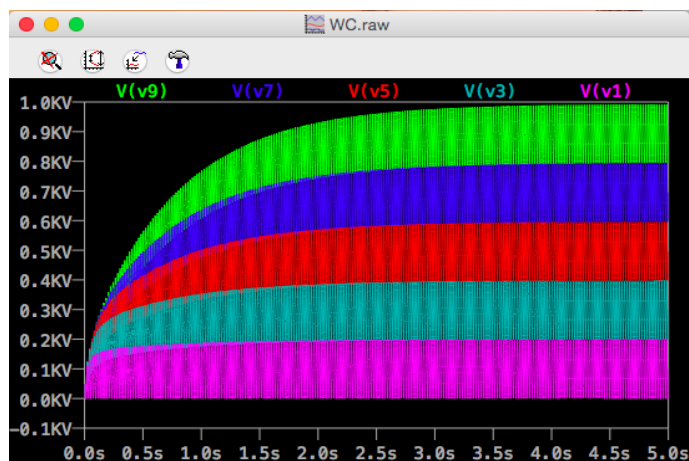


図 31: 回路図上のコンデンサーの電圧測定 (50Hz)

奇数段のコンデンサーは最終的に 200V の振幅で振動する電圧の変化となり、偶数段のコンデンサーはたり上がり時に振動しているが、十分時間が経過すると、200V の電圧がそれぞれにかかっている。また最終出力は 1kV となっている。

4.2.2 解析結果 (500Hz)

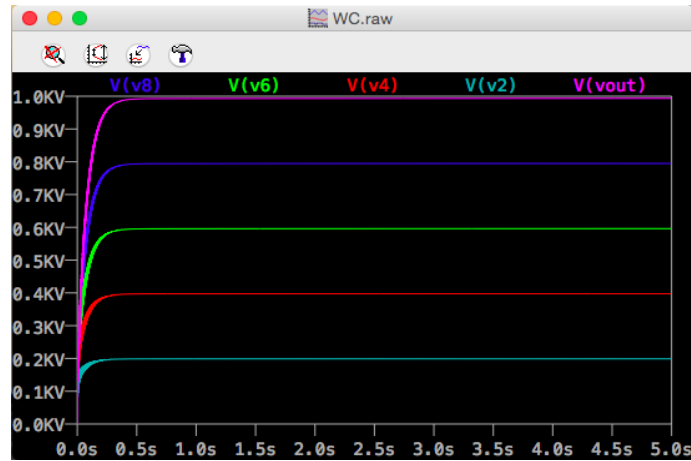


図 32: 回路図下のコンデンサの電圧測定 (500Hz)

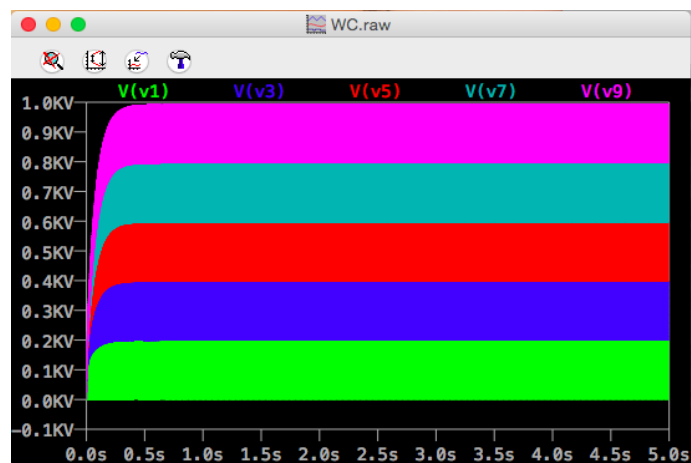


図 33: 回路図上のコンデンサの電圧測定 (500Hz)

50Hz の時と同様に電圧については、奇数段のコンデンサは 200V で振動し、偶数段のコンデンサは 200V の直流電圧がそれぞれにかかっている。500Hz の時に比べて、コンデンサの充電が早く、電圧の立ち上がりが早い。

4.2.3 解析結果 (5000Hz)



図 34: 回路図下のコンデンサーの電圧測定 (5000Hz)

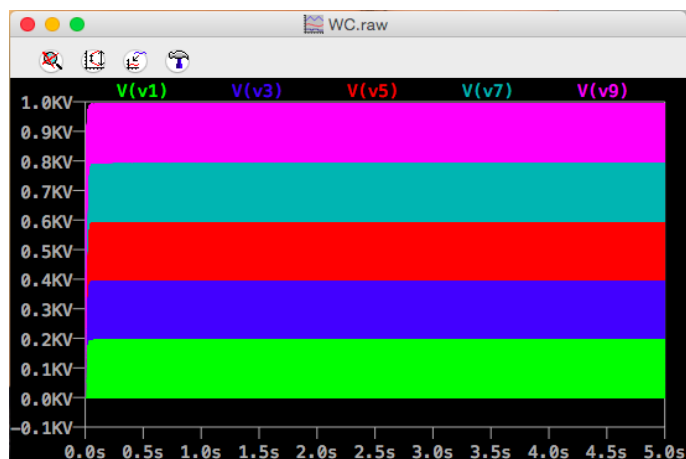


図 35: 回路図上のコンデンサーの電圧測定 (5000Hz)

5kHz についても、コンデンサーにかかる電圧は同様の結果が得られた。また、コンデンサーの充電はさらに早く、電圧の立ち上がりも早い。以上の解析結果から、コンデンサーは入力電圧に対し、2 倍の耐圧が必要であることがわかった。実際に用いたコンデンサーやダイオードの耐圧は 1kV であり、直流 3V を入力したカメラのフラッシュ回路の昇圧は交流 500V から 600V であったため、コンデンサーにかかる電圧は 1kV から 1.2kV の電圧がかかり、コンデンサーやダイオードの破壊に至ったと考えられる。

4.3 実験回路の昇圧が底周波数で行えないことについて

さて、上の解析結果からは 50Hz で十分にウォルトン・コッククロフト回路は昇圧ができるはずであるが、実際に実験すると、数 MHz の周波数が必要であった。この原因についてはコンデンサーの寄生抵抗 (理想的なコンデンサーは容量のみをもつが、実際には並列に接続された抵抗が存在してしまう) に原因があると考えた。より、コンデンサーに並列に抵抗を接続してウォルトン・コッククロフト回路の解析を行った。コンデンサーの寄生抵抗は 1,10,100 オームとし、交流電源を 50Hz,5kHz,500kHz で解析した。

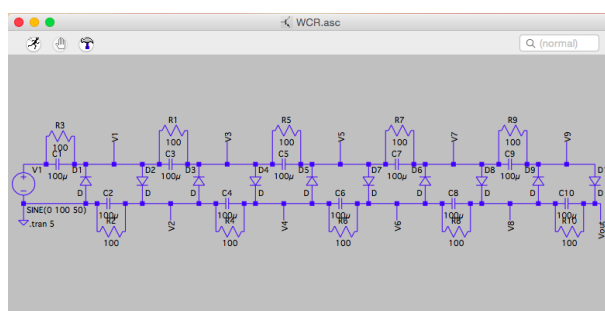


図 36: 寄生抵抗が存在するコンデンサーによる回路

4.3.1 解析結果 (寄生抵抗 1 オーム)

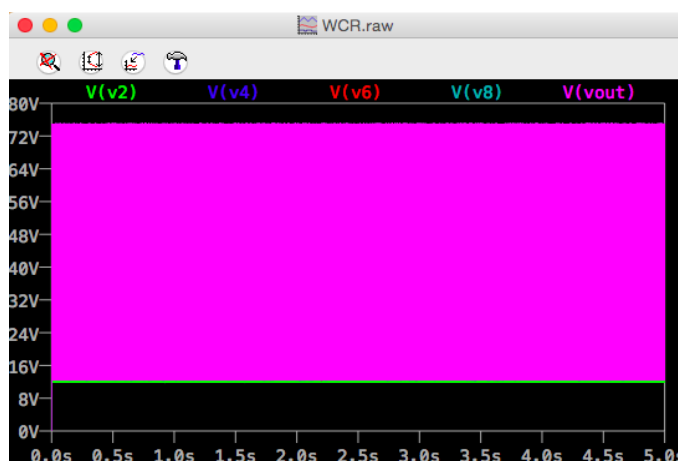


図 37: 寄生抵抗 1 オーム、交流周波数 50Hz

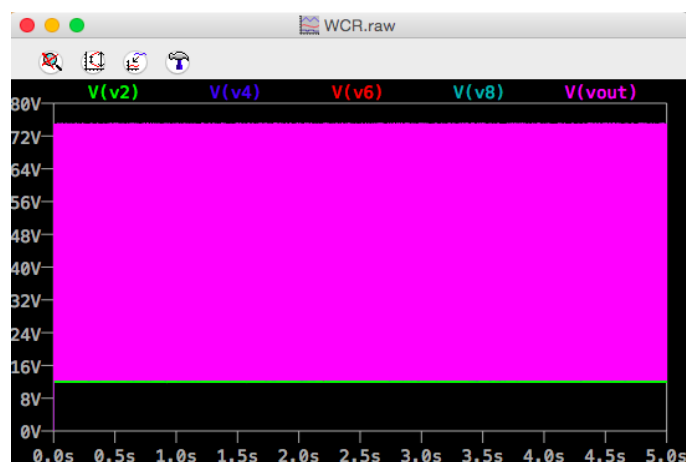


図 38: 寄生抵抗 1 オーム、交流周波数 5kHz

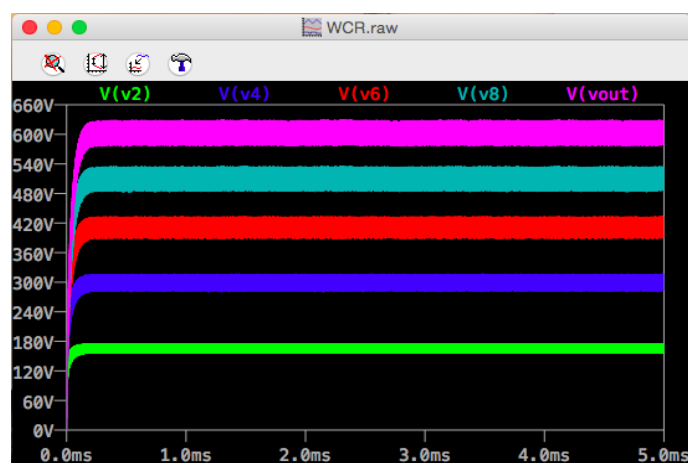


図 39: 寄生抵抗 1 オーム、交流周波数 500kHz

コンデンサーに寄生抵抗が存在するような実際の回路では、コンデンサーの充電された電荷が並列接続された抵抗に消費されてしまっていることがわかる。この為、高周波を用いてコンデンサーの充電高速に行わないと次のコンデンサーに充電することができず、十分に昇圧できないことがわかった。出力の電圧も振動してしまい、入力電圧に対して、期待された倍数(10倍)にならないことがわかる。

4.3.2 解析結果 (寄生抵抗 10 オーム)

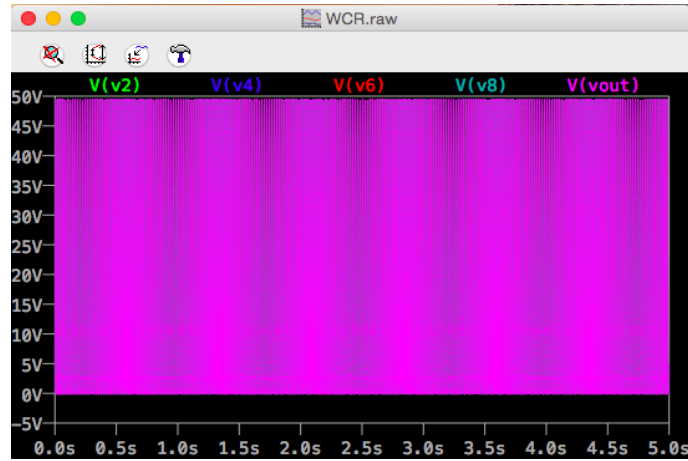


図 40: 寄生抵抗 10 オーム、交流周波数 50Hz

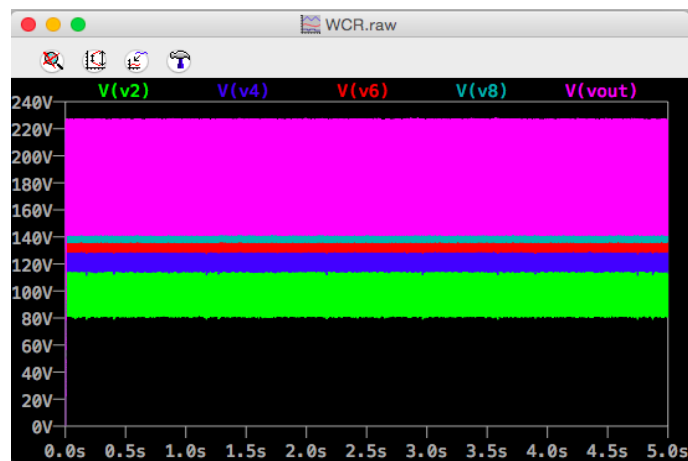


図 41: 寄生抵抗 10 オーム、交流周波数 5kHz

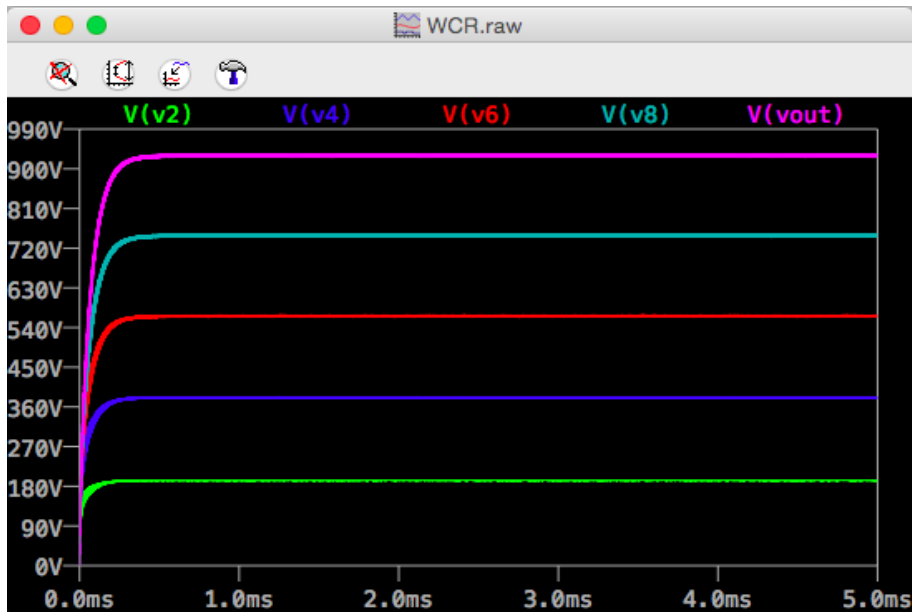


図 42: 寄生抵抗 10 オーム、交流周波数 500kHz

寄生抵抗が 10 オームの時も、1 オームの時と同様に 50Hz では全く昇圧できないことがわかる。5kHz では 2 倍程度には昇圧されているが、実際には 10 倍の昇圧回路であるからほとんど昇圧できていない。500kHz の周波数になると 900V まで昇圧できており、若干の出力電圧に幅ができるが期待値に近づいていることがわかる。

4.3.3 解析結果 (寄生抵抗 100 オーム)

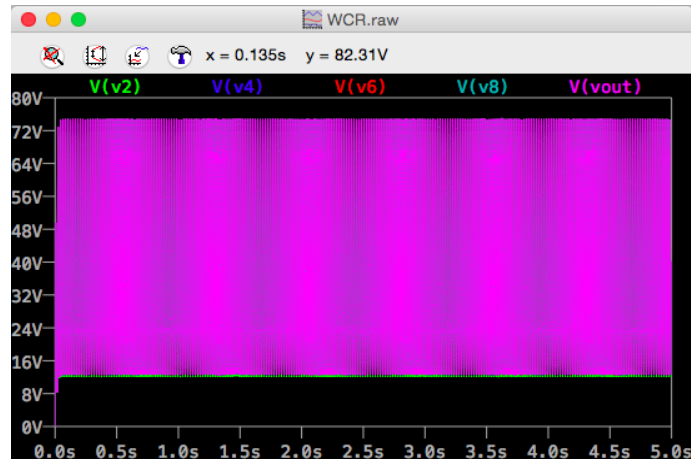


図 43: 寄生抵抗 100 オーム、交流周波数 50Hz

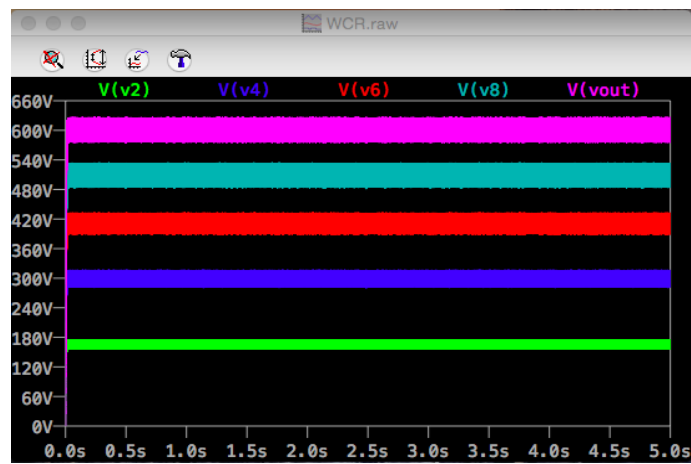


図 44: 寄生抵抗 100 オーム、交流周波数 5kHz

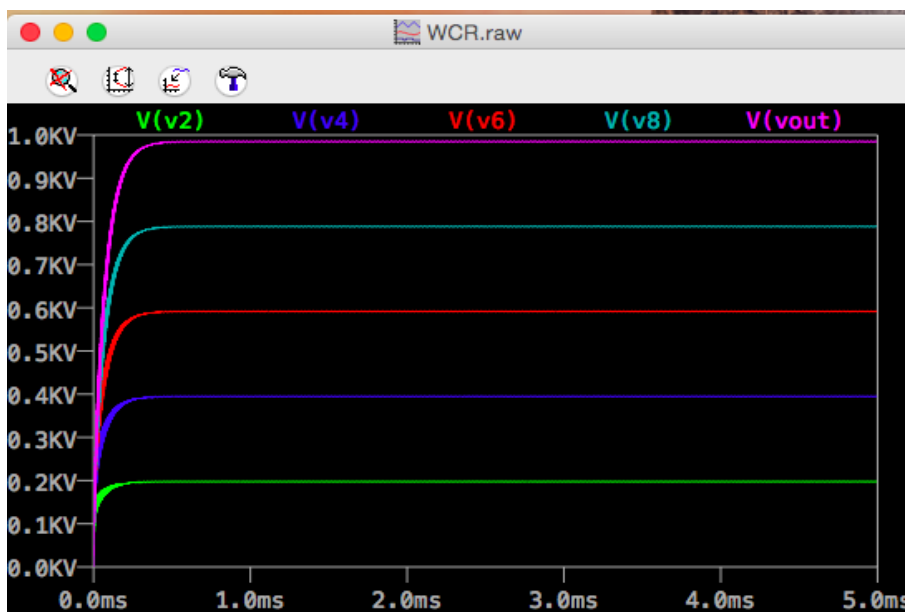


図 45: 寄生抵抗 100 オーム、交流周波数 500kHz

寄生抵抗が 100 オームの時も同様に、50Hz では全く昇圧できていない。しかし、5kHz,500kHz と周波数が上がるにつれて、倍率が回復していつてることがわかる。500kHz では、出力電圧もほぼ直流に近い直線になっている。

以上より、寄生抵抗が大きくなるにつれて抵抗に流れる電荷が減り、期待される倍率が得られる。コンデンサーの電荷が規制抵抗に流出すると抵抗での電荷の消費となってしまふ。実際の寄生容量の大きさはわからないが、コンデンサーの寄生抵抗による電荷の消費が高周波数が必要となった原因であると考えられる。

4.4 使い捨てカメラの昇圧回路の有効性

以上のことを踏まえ、ウォルトンコッククロフト回路に入力する交流電源として、使い捨てカメラの昇圧回路の有効性を検証する。

残念ながら、使い捨てカメラのトランスやトランジスタは入手性が悪く、使い捨てカメラを分解する以外、入手は困難である。トランジスタやダイオードも高速発振回路用の専用の部品である。トランスの巻き数などは一切不明である。

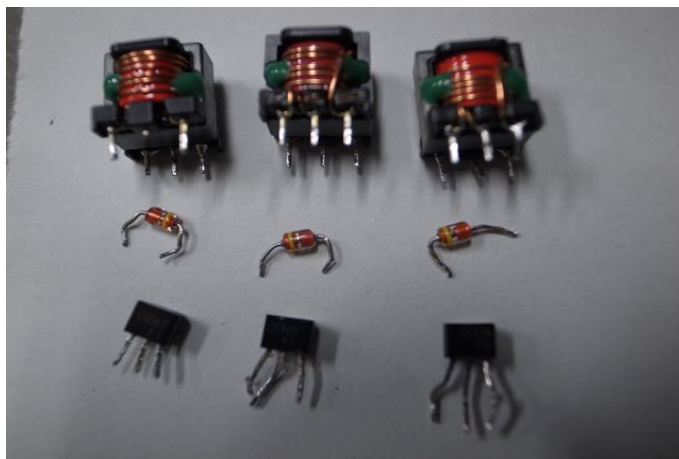


図 46: 昇圧回路専用部品

しかし、回路パターンはわかっているので、構成部品は異なるが同じ回路を SPICE で出力交流電圧のシュミレーションを行った。
1.5V の直流電圧を入力し、トランジェント解析を行った。

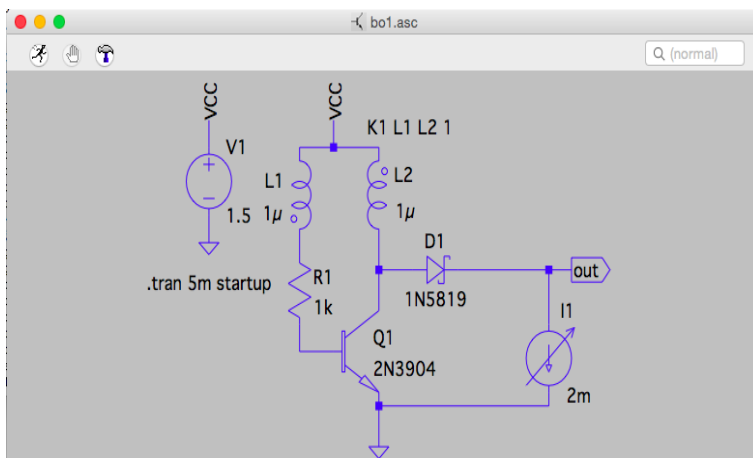


図 47: カメラに用いられているブロッキング発振回路図

4.4.1 解析結果

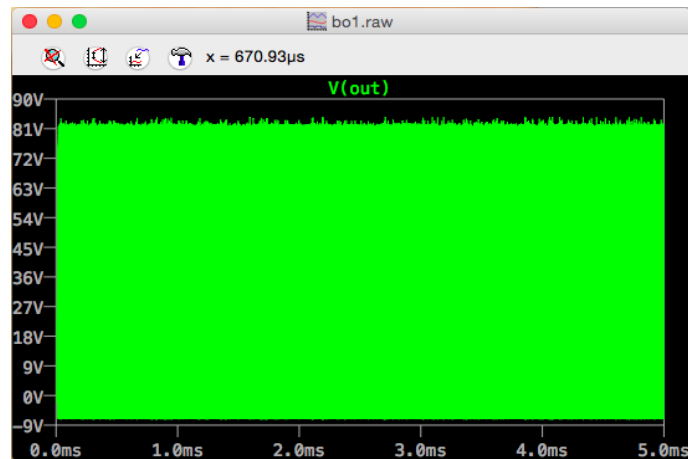


図 48: ブロッキング発振回路の出力交流

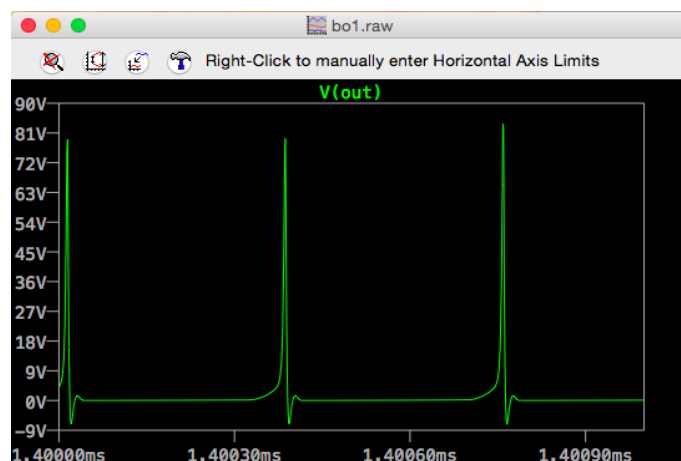


図 49: 時間スケールを拡大した図

デューティ比が大きく偏っているが、 $0.3(\mu s)$ 周期、およそ 3MHz の周波数を持った交流出力が得られることがわかった。こちらも理想的な回路によるシミュレーションであるが、十分にウォルトン・コッククロフト回路を用いて昇圧することができると考える。

5 結論

5.1 教材開発

教材開発は様々な困難や失敗があり、完成に程遠いものであったが、失敗から得られた技術も多く、これからの教員生活で活かすことができればと考える。SPICE シミュレーターなどは回路の電流の変化を視覚的に捉えるのに、大きく貢献すると考える。今後、これらの教材として応用できればと考える。

5.2 授業実践

電気回路は苦手意識を持っている生徒がアンケートの結果からわかり、そのむづかしさが電気回路の中の振る舞いがわかりづらいためであると考えた。電子機器やブレッドボードは取り扱いに慣れが必要であるが、継続的にあるいは十分に補助すれば、学生でも興味を持って取り組めることがわかった。電子機器は高価なものが多いが、最近では電気工作向けの安価で扱いやすいオシロスコープも販売されており、そういったものを教材として取り入れていきたい。

6 まとめ

教材開発という観点から、チェンバーの製作にあたり工作機械や加工の問題（ガスを封入する構造をどう作るか等）から、現時点でのチェンバーの製作まで至らなかったが、高圧回路の製作は電気回路の知識が大きく広がった。

しかし、過去の物理学の功績が現代の生活に応用される教材として、私たちが何気なく使っている電子機器で広く使われているコンデンサーの役割について大きく取り上げることができ、電気分野と関連した授業を行えたことや、オシロスコープやブレッドボードなどを電気分野の回路に取り入れ、理解につながったことは本教材の有効性を示すことができたと考える。高等学校から大学での実験機器の取り扱いが難しくなることの緩衝材になる教材になればと考える。

参考文献

- [1] C. グルーペン著, 宇宙素粒子物理学

- [2] 加藤貞幸, 放射線計測
- [3] 桜庭一郎, 熊耳忠共著, 電子回路
- [4] CQ 出版社, トランジスタ技術 2009 年 9 月号
- [5] CQ 出版社, トランジスタ技術 2014 年 5 月号別冊付録『トラ技 Jr』
- [6] 東京工業大学 2003.3.29 日本物理学会スライド, www.nucl.phys.titech.ac.jp/presen/data/JPS/2003-03/JPS-March29.ppt

謝辞

本研究を修士論文として形にできたのは、担当していただいた高嶋隆一先生の熱心な指導や自由に研究をさせていただいた寛容さのおかげでありました。学部から振り返り、本大学での半分以上の時間を先生の研究室で過ごし、時に生意気なことを言ったりしましたが、高嶋先生には非常にお世話になり、振り返るとあつという間に過ぎる楽しい時間を過ごさせて頂きました。アンケートに協力してくださった物理教育実験受講者の皆様や大学で出会った先生方や友人の皆様へも感謝の気持ちと御礼を申し上げたく、謝辞に変えさせていただきたいと思います。皆様、本当にありがとうございました。