中学クラブ活動

身の回りのものを利用したバンデグラフ起電機の製作



大谷中学校・高等学校　豊　田　將　章*

目　的

本校の科学部ではテーマ毎に活動班を組織して「画期的な実験装置を開発し、後輩のために授業で活用してもらおう！」を合言葉に、既存の概念にとらわれることなく利便性と動作精度に優れた装置の製作を目指して研究活動を行っている。本研究は、本校科学部の複数ある研究班の内の一つが行っているものである。高価な材料を使用せず、極力身の回りにあるものを利用するという基本ルールの下で、梅雨時から夏場にかけての多湿な時期であっても必要に応じて期待どおりの静電気を発生できるバンデグラフ起電機[1)]の実現を目的としたものである。

概　要

市販の装置の多くは改造が困難で、期待した結果を得るための有効なアイデアがあったとしても、それを反映させることは難しい。本研究は、IKEAのボウル、ホームセンターで販売されている炒め鍋と水道管の部品、スポーツ用品店で販売されているフィットネスバンドといった身近な素材を使用して、
「外部電源がないところでも使えること」
「演示目的に合わせて出力を調節できること」
「高温多湿の環境下でも髪の毛を逆立てられること」
という条件を満たすバンデグラフ起電機の完成を目指した取り組みである。8 年間にわたって後輩に受け継がれながら改良を重ね、延べ 15台の装置製作を経て、漸く条件を満足する装置の実現を見ることができた。

教材・教具の製作方法

装置の各部分を製作するポイント

1．球体電極と本体基部の素材と穴開けの方法

図 1 に示すように､球体電極には IKEA の BLANDA BLANK という商標名のボウルを用いている。サイズは 3 種類あるが、本体上部の球体電極には直径 28 cm または 20 cm、放電電極には直径 12 cm のものをそれぞれ 2 個ずつ使用する。一方、本体基部には直径28～30 cm のガス火専用の炒め鍋が適している。

上下をつなぐアクリルパイプを通す穴あけ作業は、図 2 のように、オートポンチでマークをつけた後、3 mm のドリルで多数の穴を開け、穴の間の隔壁をニッパーで切断して、やすり掛けで仕上げるというアナログな方法で行った。穴あけ作業はできるだけ間隔を密にして行うことがポイントである。



図 1　歴代の装置（左が初代。右下が最新の装置）

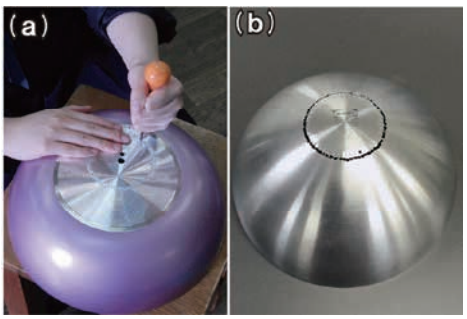


図 2　上下をつなぐパイプを通すための穴あけ加工：（a）炒め鍋（基部）、(b）ボウル（電極下部）

2．上下をつなぐパイプに関して

球体電極と基部をつなぐパイプは、身近な部材ではないが、ベルトの動きが見えるようにアクリルパイプを使用した。長さに比例して放電ギャップが大きくなる傾向があるが、利便性とのバランスを考慮すると、長さは 400 mm のものが適当である。パイプ径は、ベ

*とよだ　まさあき　大谷中学校・高等学校　教諭　〒545-0041　大阪府大阪市阿倍野区共立通 2-8-4
☎(06)6661-8400　E-mail toyoda@osk-ohtani.ed.jp

ルトの幅やローラーの径との兼ね合わせで、外径 85 mm、厚さ 4 mm が良い。複数個製作するのであれば、長さ 1000 mm の規格品を購入すると割安であるが、1 台だけの製作であれば、切断の手間と精度を考慮して、次の URL のリンク先でカット売りの購入をお勧めする。
https://www.hazaiya.co.jp/estimate/pipe.php

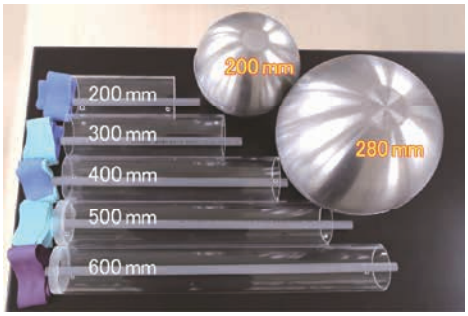


図 3　試したパイプ（長さ 400 mm が適当）

3．ローラーの素材と製作方法

様々な素材と形状を試した結果、ローラーの形状は樽型にすると動作の安定が得られることがわかった。当初はドリンク剤の瓶を加工して作ったガラス製のローラーを正極側に用いたが、やすりとグラインダーだけでガラス瓶を望みどおりの寸法に加工するのが難しく、歩留まり 4 %を上回ることができなかった。そこで、代わりに呼び径 25 の規格の塩ビ TS キャップを利用してローラーを作り、表面を加工するという方法をとることにした。塩ビ製のローラーの製作は次の手順で行う。

①長さ 100 mm の VP25 の塩ビ管の両端に TS キャップを軽くはめ込み、図 4 (a)のように、板に載せて電動のこぎりで切断する。
②M5 の長ねじを通すため、直径 5.0 mm の穴を開ける。
③図 4 (b)のように、幅 20 mm に切断した VP25 の塩ビ管を万力で圧入し、2 つの TS キャップを結合する。
④塩ビ製ローラーの表面に自動車のガラスコーティング剤を塗布して被膜を形成させ、ガラス製ローラーの代替物とする。

この方法でガラス製と同等の性能を得たが、使い込むうちにガラス被膜の剥離が避けられないことが判明した。そのため、現在は、塩ビ製ローラーの表面にアクリル樹脂をジクロロメタン(注)に溶かした溶液を塗布し、正極側に使用している。負極側は、塩ビの素材のままでもよいが、水道補修用のフッ素樹脂製シールテープを巻くと性能が格段に向上した。なお、コーナン商事オリジナルブランドのシールテープ以外では良い結果が得られない場合があることがわかっているので、入手できない場合は、幾つか試す必要がある。

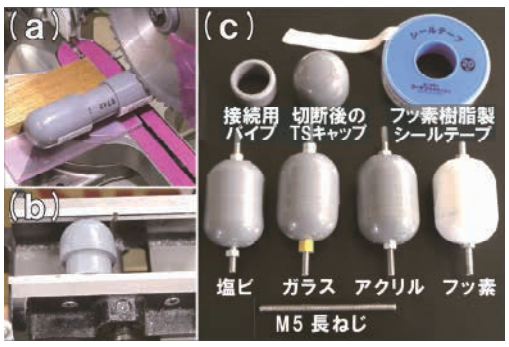


図 4　幅 60 mm のローラーの製作過程と種類：（a）TS キャップの切断、（b）圧入、（c）各種素材のローラー

4．球体電極部の構造と製作方法

図 5 (a)のように、上部電極内部にはパイプの固定を兼ねた厚さ 10 mm のアクリル製の基板を固定する。さらに、ローラー支持のための厚さ 3 mm、30 mm 等辺アルミアングル（長さ 100 mm の中央に U 字型の切り込みを入れる）と集電電極となる 1 mm 厚のアルミ板（80 mm×60 mm）を取り付け、発生した静電気が球体電極に伝わるように金属部品を導線で接続する。図 5 (a)では、手持ちの部材を利用する関係で長方形のアクリル基板を使っているが、円形にすればボウルとの当たり面の調整が不要になるのでお勧めである。パイプを通す穴は、図 5 (b)のように“自在錐”と呼ばれる工具をボール盤に取り付けて開けると精度良く加工できる。

アクリル部品の固定は接着剤を用いるのではなく溶剤で溶かして行う。“アクリサンデー”の商標名で販売されている溶剤が一般的であるが、ジクロロメタン(注)や 1,2-ジクロロエタン(注)でも代用できる。容量 1 mL 程度のシリンジを用いて接合部に溶剤を流し込むと数分程度で溶着する。また、ボウルの下部の固定は、図 5 (c)のように、外径 95 mm、内径 85 mm のアクリルパイプを使ってボウルを挟むようにして溶着固定させると良い。

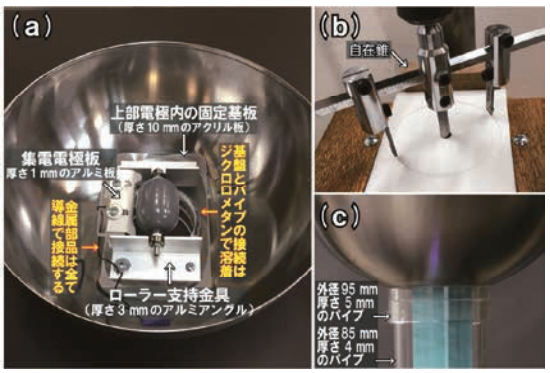


図 5　電極の構造と組み立て：(a) 球体電極内部の構造、(b) 自在錐を使った穴開け作業、(c) 球体電極下部の固定方法

(注) 特定化学物質に位置づけられている発がん性物質なので、十分に作業管理を行うこと。

5．本体基部の内部構造と製作方法

初代の装置では、外部直流電源を利用し、DC モーターにかける電圧の調節によって最適な静電気量を発生できるという特徴があった。しかし、条件によっては確実にアースを取れず、しばしば電源装置の故障を引き起こして実験に支障が生じた。また、本体の他に電源も一緒に運ばなければならないという不便さがあったため、科学部員からの強い要望により、2015 年から電源の内蔵化に取り組んだ。回路を限られたスペースに収めるには乾電池は不向きなため、18650 規格のリチウムイオン電池 3 本と“PWM ハイパワーDC モータースピードコントローラ”を組み合わせることにした。当時の装置は、予め充電した電池を利用するだけであったが、電池の個体差に起因する問題の回避と、電池の付け外しの手間を省くため、定電圧・定電流回路と充放電保護回路を追加した。これにより、12.6～20.0 V の AC アダプターで充電することが可能になった。図 6 は、2016 年に製作した装置の内部構造、図 7 はその実体配線図である。用いた電子部品の多くは国内では入手が困難か入手できても高額なため、部品のほとんどはアメリカの通販サイト eBay で調達した（表 1 参照）。

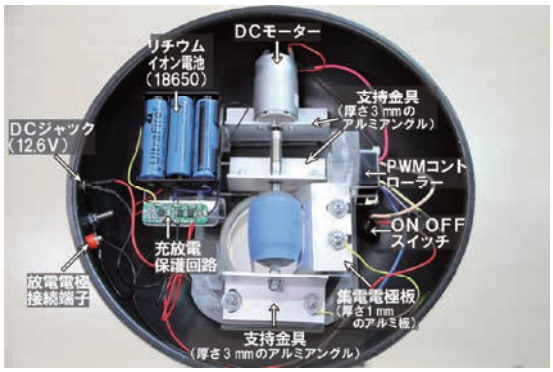


図 6　2016 年に製作した装置の内部構造

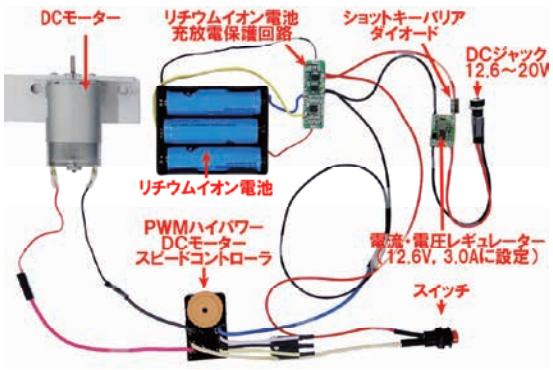


図 7　2016 年に製作した装置内の実態配線図

2016 年以降は、小型化の取り組みと同時に、利便性向上のため、電池残量計と回転計を追加した（図 8）。なお、図 6 の装置では内部に取り付けた厚さ 10 mm のアクリル基板でパイプを支えていたが、最新の装置では、図 8 (a)のように、上面に取り付けた厚さ 10 mm の円形のアクリル板でパイプを支えるように変更した。

表 1　装置製作に必要な材料の名称・購入先・数・参考価格（ねじ類を除く）

品　名	購入先	数	単価(円)
BLANDA BLANK 28 cm (BLANDA BLANK 20 cm)	IKEA	2	999 (699)
BLANDA BLANK 12 cm		2	399
炒め鍋 28 cm ガス火専用	スーパーなど	1	1,200～
アクリルパイプ（外径 85 mm 厚さ 4 mm、長さ 400 mm）	はざいや（フリーカット依頼）	1	3,154
アクリルパイプ（外径 95 mm 厚さ 5 mm、長さ 1000 mm）		1	411
底板用アクリル板　厚さ 5 mm 300×300 mm		1	934
基部アクリル板　厚さ 10 mm 300×300 mm		1	1884
上部電極内アクリル板 厚さ 10 mm 160×160 mm		1	730
光 アルミアングル 3×30×30×300 mm AAH3030	Amazon	2	391
フランジベアリング 内径 5 mm、外径 13 mm F685ZZ 5 個セット		1	777
La-VIE フィットネスバンド ﾊｰﾄﾞ		1	723
エキバン A 10 g		1	498
エーモン 配線コード AVS0.75sq 20 m 黒 E175		1	777
エーモン 配線コード AVS0.75sq 20 m 赤 E176		1	777
エスロン VPW パイプ 13 1.0 m	ホームセンター等	1	158
TS チーズ　呼び径 13		5	36
TS キャップ　呼び径 13		5	32
TS キャップ　呼び径 25		4	51
塩ビパイプ VP25　1 m		1	1610
ステンレス M 寸切 285 mm		1	233
コーナンシールテープ　20 m	ホームセンターコーナン	1	163
DC モーター(ジャンク品) マブチモーターRS-555SH	共立電子デジット営業所	1	611
ばね式ジョイント		1	840
ABS 18650 Power Bank Cases 1X 2X 3X 4X Battery Holder Storage Box With Leads	eBay	1	99
5PCS 3 A DC-DC Converter Adjustable Step down Power Supply MP1584 replace LM2596s		1	315
3S Lithium Battery Capacity Indicator LED Display Board Panel Power Tester		1	88
10Pcs 4 mm Banana Panel Socket Test Probe Binding Post Nut Plug Jack Connector		1	139
10pcs 4 mm lot Gold Plated Audio Speaker Wire Cable Banana Plug Adapter GOOD		1	150
10pcs 5.5 x 2.1 mm DC Power Supply Jack Socket Female Panel Mount Connector		1	121
1PCS 12 mm Red 2 Terminals Round Self Locking on/off Push Button Switch Latching		1	159
Li-ion Lithium Battery 3S 20 A 12.6 V 18650 Charger PCB BMS Protection Board Cell		1	176
New Blue LED Tachometer RPM Speed Meter + Hall Proximity Switch Sensor NPN		1	900
PWMハイパワーDCモータースピードコントローラ	秋月電子通商	1	250
パナソニック NCR18650B 3400 mAh リチウムイオン充電池	Yahoo shopping ビーエルデー	3	820

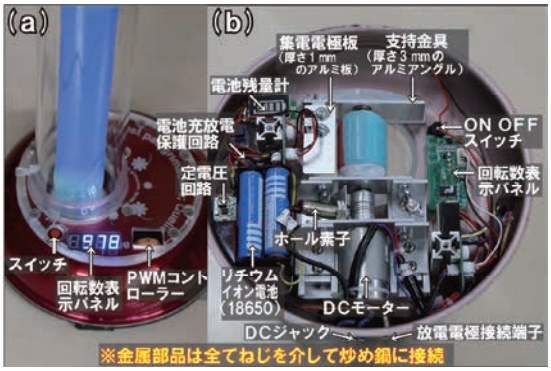


図８　電池残量計と回転計を備えた装置基板部の構造：（a）基板の表側、（b）裏側

６．ゴムベルトの製作方法

ゴムベルトの素材には“フィットネスバンド”を利用している。数種類試した結果、天然ゴム製で厚さが 1 mm 以下のものが適していることが分かった。製作手順は次の通りである。

①ベルト表面に残っている離型剤を、アセトンを含ませた布で丁寧に除去する。

②45～50 mm の幅にカットし、20 mm 程度ののりしろを見当に入れて、上下のローラーの間隔より 50 mm 程度短くなる長さに切断したものを用意する（張力が不足する場合は少しずつ様子を見て短くすると良い）。

③パンク修理に用いるゴムのりをのりしろ部分に塗り、数分乾かしてから張り合わせ、図９(a)のように、中温に設定したアイロンで 2 分程度加熱処理をする（強い力で押しつけるとゴムの一部が薄くなるので注意が必要）。

④アセトンやエチルアルコールで水絆創膏またはコロジオンを20 倍程度に希釈した溶液を作り、表面に塗布する（図９(b)(c)）。乾燥後にアセトンを含ませた布で成分を擦り込むようにして表面の状態を整える。

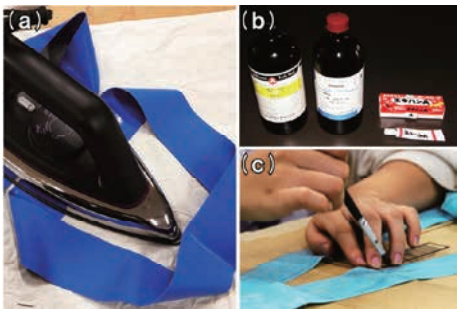


図９　ゴムベルトの製作：（a）加熱処理、（b）塗布材料、（c）塗布の様子

７．放電用電極の製作

放電用電極は、図 10(a)のような部品で構成した。塩ビ素材の接続は塩ビ専用の接着剤を塗布したパイプを挿して行い、２つのボウルの接合は、図 10(b)のように、幅10 mm に切ったゴム板をねじ止めすることで行った。また、本体基部との接続用として、図 10(c)のように、下側のボウルに金属製の DC ジャックをねじ止めした。

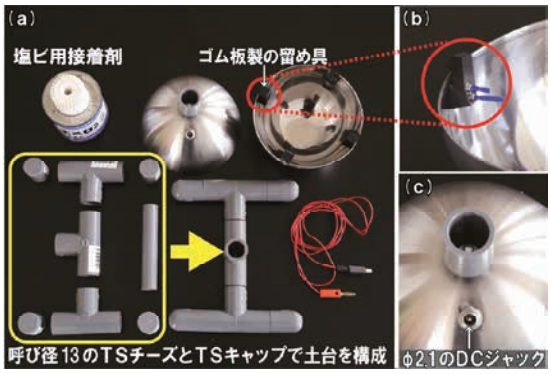


図 10　放電用電極用の部品：(a) 土台、(b) ゴムによるボウルの接合、(c) 基部との接続用ジャック

８．固定方法について

一部を除き、固定に用いるねじは長さ 30 mm の M5 の皿小ねじに統一し、尖端放電防止のため、図11 右下のように、取り付け穴を加工してねじ止めした。

また、頻繁に脱着する箇所には、通常のナットに代えて、工具を必要としない蝶ナットを使用している。一方、脱着しない部品の固定には、必要に応じてタップで直接部材にねじを切って固定するようにした。



図 11　用意するねじ

学習指導方法

本研究は、「青少年のための科学の祭典」などの科学イベントへの出展を軸に据え、会場に持ち込む装置の製作と、でき上がった装置を利用して行う実験演示の方法の開発を目指している。その中で科学部の部員に対して私が主に行ったことは、求めに応じて最小限のアドバイスをすることと、必要になる材料を準備する

ことで、それ以外は部員が主となって行った。そうした方法で部活動を運営していると、装置の完成に至るまでの間に、失敗をして廃棄する部品が数多く発生したが、全てを説明してしまう場合に比べて当事者意識が高い分、経験値の高まりが早いと感じている。

毎年参加する５～６の科学イベントの各会場には、幼児から大人まで幅広い年齢層の来場者があり、来場者に向き合う部員達は逃げ隠れできない状況の中で相手の理解の程度を推し量りながら演示と解説をせざるを得ない。そんな状況の中、生徒達は「次はもっとうまく説明したい」という思いに突き動かされ、短い期間で大きく成長する。生徒が壁を突破する瞬間に立ち会えることは、指導者にとって最上の喜びである。

実践効果

本研究で初めに中学生部員達を悩ませたのは、静電気が発生するメカニズムである。ローラーに密着したゴムベルトが剥離する際に電子の乗り移りが起きること、帯電列の理解、装置の各部分に電荷がどう分布するかなど、前提となる知識を持たない中学生にとっては、まさに 0 からの出発であった。

そんな彼女たちが、電源の内蔵化を達成した先輩の女子高校生から研究を受け継ぎ発展させる際のキーワードは「小型化」と「高性能化」であった。小型化については、本体基部の直径を 28 cm から 24 cm に変更するため、回路を面実装から立体実装に変更することに挑戦し、見事に成功した。また、小型化に伴う容量の減少は、ローラーの表面処理で対応し、動作の安定と性能向上を実現させた。製作に携わった中学３年の部員たちにとっては自然な理解の深まり方であるが、動作の原理と製作の過程の全てを身体化する程までに身に着けている点は特筆に値する。

その他補遺事項

本研究において、生徒の失敗を許容しながら開発を見守り、今日の成果を得ることができたのは、2016 年度に中谷医工計測技術振興財団、2019 年度に武田科学振興財団から頂いた助成金、日産財団リカジョ賞準グランプリ受賞で頂いた賞金に依るところが大きい。この場をお借りして感謝申し上げる。

科学イベントの会場で、バンデグラフ起電機を使った静電気実験は毎回大人気で、来場者に科学の楽しさを伝えるだけでなく、「手作りでここまでできるんだ」と、他校の中高生の関心を集めており、最近では、他校や他府県の理科教育研究会から装置製作に関する問い合わせが増えている。今後も研究活動を強く推し進め、微力ながらも次世代の科学技術を担う人材育成に貢献したい。

参考文献

1）P. G. Hewitt：Conceptual Physics, Tenth Edition, Pearson, 410-430 (2006). (ISBN 0-321-31532-4)