

小型落雷実験装置の開発と中学校における避雷教育への応用

松井孝夫*1・船井智貴*2・岩崎博之*3

要旨

落雷の基本的な特性を観察できる小型落雷実験装置を開発した。本装置は、ライターなどに利用される圧電素子を使い火花放電を発生させ、それを雷に伴う放電路（稲妻）と見立てている。中学2年生を対象に、この実験装置を用いた特別授業を行った。その結果、1) 背の高いものに落雷しやすいこと、2) その周りには、落雷しない保護範囲があることをすべての生徒が確認できた。また、側撃雷の危険性も説明することで、生徒は適切な避雷行動のための基礎知識を得られたと考えられた。更に、授業から14ヶ月が経過しても、授業を受けていない生徒よりも、授業を受けた生徒の方が適切な避雷行動を意識しており、これらは授業の効果と考えられた。

1. はじめに

警察白書によると1960-1973年は落雷による年間死数は20人を超えているが、1990-2003年には平均4.1人と大きく減少しており（北川 2001; 大橋 2008）、2010年以降は、落雷による死傷者数は警察白書の調査項目から外されている。しかし、新聞やテレビで報道されているように、近年でも、落雷による人的被害は毎年起きている。また、吉田（2002）によると、関東では、夏期の雷日数は1955年以降減少傾向にあったが、付録Aに示すように、1980年以降、雷日数は増加傾向に転じている（船井 2017）。北関東では、夕方から夜間に積乱雲活動が活発化しているという指摘もあり（Iwasaki 2012）、下校や部活動の時間に児童・生徒の落雷事故が増える可能性もある。

Anderson（2001）は、米国の落雷事故について調

査し、死亡事故の26%は「樹木の下」で起きており、広い野外（open field）の40%に次ぐ死亡原因であると報告している。大橋（2008）による日本の落雷事故の調査でも、同様の結果が得られている。近年、新聞やテレビで大きく報道された落雷事故でも（例えば、朝日新聞 2012; 読売新聞 2017）、被害者は樹木の下で雨宿りしているときや鉄柱の脇で避難しているときに落雷の被害にあっている。高い樹木や避雷針の近くには落雷しない領域があり、保護範囲と呼ばれているが、この保護範囲を含めた落雷の特性を理解していれば、これらの被害は防げた可能性がある。

本研究で実施した中学生を対象とした特別授業の冒頭で、避雷行動に関する質問を行っている。その回答や生徒の発言から、生徒の多くが各種報道、教員や保護者を通じて、「樹木の下」が危険であることを認識していたことが分かる。樹木に落雷した放電路（稲妻）が直ぐ側にいる人間に飛び移る側撃雷や落雷に伴う電気が地面を伝わって人間が感電する歩幅電圧による被害を知っていた。気象庁（2016）のリーフレットや日本大気電気学会（2001）の書籍では、後述する第7図と同じ主旨の図を用いて、電柱や樹木の直ぐ近くは、側撃雷が起きやすいため、危険であることが強調されている。これらの啓発活動が、側撃雷の危険性の周知に役立っていると思われる。

*1 (連絡責任著者) 群馬大学大学院教育学研究科/群馬県立中央中等教育学校。

群馬県前橋市荒牧町4-2/高崎市新保田中町184
e171e001@gunma-u.ac.jp

*2 群馬大学教育学部。(現: 館林市立美園小学校)

*3 群馬大学教育学部。

—2018年9月20日受領—

—2019年6月21日受理—

しかし、特別授業における生徒の発言から、落雷から身を守るには「できるだけ、樹木から遠くに離れる」と誤解している生徒も多いことが分かった。それは授業中に生徒が書いたワークシートの自由記述（例えば、第4表の8）からも読み取れる。つまり、樹木が作る保護範囲が十分に理解されていないようである。側撃雷の危険性を伝えることを重視した啓発活動だけで、保護範囲を理解させるのは難しいのであろう。

そこで、保護範囲を含む落雷の特性を観察できる小型落雷実験装置を開発し、中学2年生の特別授業で用いた。本研究の第1の目的は、この落雷実験装置を初めて使う生徒が、どの程度、落雷の特性を観察できるか確認することである。

本研究には、もう1つの目的がある。クラブ活動中の高校生が負傷した落雷事故の反省を踏まえて、近年、野外スポーツや教育現場では落雷事故を防止する意識が高まっている（例えば、日本サッカー協会2006；日本ラグビーフットボール協会2018）。夏期に雷が多発する群馬県においては、群馬県教育委員会（2014）が全国に先駆けて「学校災害対応マニュアル（落雷・竜巻等突風編）」を策定し、教科等の時間も使った防災教育の実施を求めている。文部科学省も「落雷事故の防止について（依頼）」を通知し、学校現場等に適切な措置を求めている（例えば、文部科学省2017）。また、気象庁（2013）は、小学校の理科や総合的な学習の時間で使える防災啓発ビデオと支援資料を、日本赤十字社（2015）は防災教材「防災教育プログラム」を制作している。このように、落雷事故の防止に関する防災教育の方向性と授業資料は用意されているが、実践例の報告はほとんど知られていない。

高木ほか（2004）は、子供向け科学イベントでの演示実験による避雷教育を想定して、高電圧装置を利用した落雷実験を紹介している。しかし、生徒が実験に用いるには電圧が高く、操作が複雑なため、より安全で手軽な実験装置が求められる。落雷実験を伴う教育実践として、赤熊ほか（1997）は、テレビ会議システムを利用して、電力会社の高電圧装置を用いた迫力のある落雷実験をリアルタイムで生徒に観察させている。しかし、生徒が主体的に実験に取り組みながら落雷の原理や特徴を理解することは難しいため、防災教育への応用には適さない。

これらは、避雷行動を考えさせるための防災教育には、落雷の基礎的な特徴を実感できる実験を組み込む余地が残されていることを意味している。そこで、過

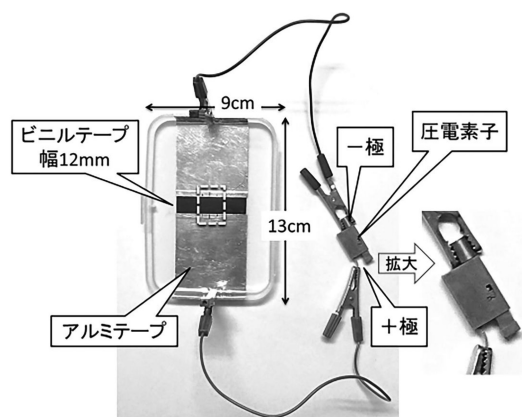
去の落雷事故を参考に、樹木の近くで落雷の危険性を感じた生徒が、落雷特性の知識を基に、適切な避雷行動を考えられることを目的とした特別授業を行った。つまり、本研究の第2の目的は、中学校の生徒が実験を通じて落雷の特徴を観察し、それを基に避雷行動を考えられる教育プログラムを提案し、その有効性を検討することである。

2. 落雷実験装置の放電路と自然落雷の放電路との比較

今回作成した小型落雷実験装置（第1図）は、ライター等の発火装置に利用される圧電素子を使って、高電圧を発生させ、火花放電を起こしている。この放電路と自然落雷に伴う放電路（稲妻）の類似点と相違点を確認する。

夏期に卓越する負極性落雷について考えれば、雷放電に伴う放電路は積乱雲に蓄積した負電荷と静電誘導により正に帯電した大地との間に生じる火花放電である。一般に、電界強度が閾値を超えると火花放電が発生し、その閾値を絶縁破壊電圧といい、標準状態の空気では300万V/mの値とされている（例えば、北川2001）。この絶縁破壊電圧は気圧や電極の形状などの条件によって変化する。しかし、落雷が起きたということは、雷活動に伴う地上付近の電界強度が空気の絶縁破壊電圧に達していたと考えてよい。

放電路は積乱雲から連続的に大地に伸びるのではなく、ステップリーダー（stepped leader）と呼ばれる放電路が枝分れを繰り返しながら、電子の流れやす



第1図 小型落雷実験装置。第2-5図は、図中の点線枠を拡大したものである。

い部分が段階的に20~50mずつ進展している (Schonland 1956)。ステップリーダーが地面に近づき、電界強度が絶縁破壊電圧を超えれば、結合リーダー (connecting leader) と呼ばれる放電路が地面からステップリーダーに向かって伸び (例えば, Cummins *et al.* 2018), これら2つの放電路が結合する。この過程は最終雷撃過程と呼ばれている。この過程を経て、ステップリーダーの放電路を満たしていた電子は地面に向かって急激に流れる。この電子の流れは、地面から積乱雲に向かって発光部が高速で移動するリターンストローク (return stroke) として観測され、人間の眼には「稲妻」として認識される。

JIS規格では、建築物の雷保護を第7章で述べる回転球体法で評価する際に、ステップリーダーの先端が対象物までの一定の距離に達すれば、対象物に落雷すると仮定されている (日本工業標準調査会 2003; 新藤 2005)。この距離は雷撃距離 (回転球体の半径) と呼ばれ、結合リーダーの長さも含まれている。

しかし、小型落雷実験装置で作られる火花放電に伴う放電路は、自然落雷に伴う放電路に比べて規模は極めて小さい。Walter は回転写真器を用いて長さ60mmの火花放電における段階的に進展しながら枝分れする放電路を発見した (中谷 1939)。地上気圧において電極間の距離が数cmを越える長ギャップ放電では、火花放電にステップリーダー、結合リーダーやリターンストロークに対応する現象が起き、この進展過程は自然落雷と共通している (鈴木 1980; 原 2011)。それに対して、本研究で扱う実験装置の電極間距離は1cm未満なので、自然雷のようなステップリーダーや結合リーダーは発生せず、ストリーマにより電極間が橋絡すると考えられる。しかし、実験で得られる火花放電は、大気の絶縁破壊電圧を超えて発生したことは明らかであるため、自然雷にみられるステップリーダーの先端が地面とつながる現象を模しているとは授業で説明しても問題はないであろう。

3. 小型落雷実験装置の概要

3.1 装置の構成

本装置では、圧電素子を使って高電圧を発生させ、火花放電を起こし、それを雷に伴う放電路に見立てている。この火花放電の観察により、雷放電の基本的な性質を机上で確認するわけである。材料は、身の回りにあるものを利用し、全てを購入しても制作費は約500円である (付録Bを参照)。

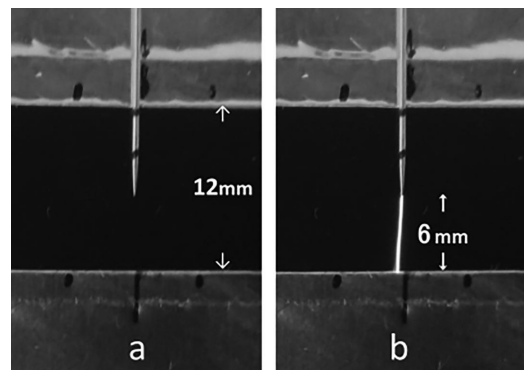
基本的な構造は、科学実験の啓発書 (例えば, 笠原 1988) やインターネットで紹介されている「カミナリ発生装置」と同じである。本研究では、その実験装置を初めて扱う中学生でも、安全かつ確実に、保護範囲などの落雷の特徴を観察しやすいように、以下に述べるような工夫を行った。

第1図に実験装置を示す。プラスチックケース (9×13cm) の底に12mmの間隔で平行に貼り付けた2枚のアルミテープに、リード線で圧電素子を接続する。上側のアルミテープには放電路の先端に見立てたマチ針を、下側のアルミテープには樹木に見立てたマチ針を配置する。圧電素子を押して高電圧を発生させると、針の先端から、もう一方の針の先端に向かって火花放電が進展する (第5章の第5図d)。これが樹木への落雷に対応する。下側の針を取り除けばアルミテープに落雷し、これは地面への落雷に対応する (第2図b)。

第1図の点線枠の拡大図を第2図に示す。ここでは、下のアルミテープから針の先端までが6mmになるように、針を配置している (第2図a)。そして、圧電素子を押して高電圧を掛けると地面への落雷を再現できる (第2図b)。アルミテープとアルミテープの間には黒いビニルテープを貼り、火花放電を観察しやすくした。また、生徒が針を配置しやすいように、針には先端から3mmと6mmの部分に、アルミテープの端には中央とそこから左右に5mmずつの部分に黒い目印を付けてある。

3.2 圧電素子の特性

6種類の圧電素子入手し、発生する火花放電の安定性、および、圧電素子の耐久性と操作性の観点か



第2図 火花放電 (落雷) の様子。

ら、第1図の圧電素子を選んだ。

この圧電素子を押ししたときに生じる電圧を1/200の分圧器を介して、オシロスコープで測定すると、押し方によっても変動するが、パルス幅10 μ sで10kVの電圧が測定された。

300万V/mの絶縁破壊電圧を仮定した場合、10kVの電圧では3.3mm(=10kV/300万V/m)の放電距離が期待される。しかし、先端が尖った電極では、絶縁破壊電圧が小さくなるため、火花放電が起きやすくなり、この落雷装置の放電距離は最大で9mmに達する。ルーペで見ながら、針の高さを1mmずつ変化させて、何度も放電を繰り返し、6mmの間隔であれば安定して火花放電が発生することを確認している。

第1図では、放電路の先端を模した針が負極になるように圧電素子を接続している。しかし、針を正極に変えても、実験結果に有意な差が生じないことを確認している。そのため、生徒が圧電素子の電極を間違えても、実験結果に影響しない。

4. 避難行動の理解度についての評価方法

授業では全員に実験1～3の模式図とまとめ欄が書かれたワークシートと自由記述用紙を配布した。生徒は、1)落雷実験の結果とまとめ、2)授業のまとめをワークシートに記入し、更に、自由記述用紙に感想を書ける。

授業の最後に、「あなたがとても広い公園にいるとき、雷が近づいてきました。公園に高さ15mの電柱が1本だけあります。今回の実験結果と側撃雷の説明をもとに、正しい避雷行動を書きなさい」とワークシートに書かれている課題を伝えた。避雷方法の説明では樹木を想定しているが、ここでは保護範囲の理解度に注目するので、樹木の枝の影響を考えなくても済む電柱を題材にした。

後述するように、落雷の特徴を全員が落雷実験で確認できたので、「避雷行動のまとめ」の記述を評価対象とする。評価基準は次の2つとした。

評価1) 定性的理解：安全な保護範囲の両端の位置が示されていないが、避難に適した領域を説明できる。例えば、保護範囲や側撃雷の用語を使わなくても、「電柱から4m離れた所に避難」「近すぎず、遠すぎない所に避難」も、この評価基準を満たしているとした。

評価2) 定量的理解：安全な保護範囲の両端の位置を具体的に示し、避難に適した領域を説明できる。

5. 教育プログラムの実践結果

5.1 対象

特別授業は、中等教育学校第2学年(中学2年)の4クラス120人(62グループ)を対象とし、2017年10月13日と27日に行った。授業時間は55分である。

5.2 教育プログラムの内容と実践結果

本研究で提案する落雷実験装置を活用した教育プログラムにおける時間配分を第1表に示す。以下、順に内容とその結果を述べる。

なお、実験2と実験3については、各実験が終了した後、2～3グループの代表発表と挙手により、全員で結果を共有した。

学習1：実験前の生徒への説明

中学2年生は、理科の授業で「電流とその利用」と「気象とその変化」を学習している。落雷実験に先立ち、これまでに学んでいる内容を基に、「雷は、発達した積乱雲の中で氷の結晶同士がぶつかり合うときに生じた静電気が、火花放電となって流れる現象である」と説明する。

実験1：地面への落雷実験

落雷実験装置の扱い方に慣れるために、第2図と同じ針の配置で落雷実験を自由に行わせる。ここで生徒は、6mmの放電距離が確保できていることを確認すると共に、圧電素子の押し方などのコツをつかむ。圧電素子などの金属部分に指が触れると感電することを伝え、実験2以降で感電する生徒はほとんどいなくなる。

実験2：高所への落雷実験

a) 実験手順

地表の電位は突起物の表面を含めて同じ値になるので、樹木などの先端は放電路の先端との距離が近い分、電界強度が高くなる。そのため、樹木などの高いものに落雷しやすくなる。

第1表 授業の展開。

学習1	雷のしくみの説明	10分
実験1	地面への落雷の確認	5分
実験2	高所への落雷	10分
実験3	保護範囲の確認	15分
学習2	側撃雷と安全な保護範囲	5分
まとめ	避雷行動のまとめ	5分
予備		5分

この落雷の特徴を確認するため、第3図に示す針の配置で実験を行う。各グループが10回の落雷を発生させ、どちらの針に落雷したか生徒が調べる。注意深く針の高さを設定すると、ほぼ100%の確率で、左側の高い針に落雷することを予備実験で確認している。

b) 実験結果

生徒にとっては、初めて使う装置で、しかも、作業時間が限られているので、指示通りに針を配置することは難しい。そのため、第2表に示すように、実験結果には、ばらつきが生じるが、全てのグループで高い針に落雷しやすいことが確認でき、74%のグループでは屈居通りに全てが高い針に落雷した。しかし、低い針に4回も落雷したグループがあったため、その実験装置を授業中に撮影した(第4図)。

針を正しく配置すると、放電路に見立てた針と樹木に見立てた2つの針の先端の距離は5.8mmと7.8mmとなり、高い針と低い針とでは2.0mmの差が生じる。この差があれば、殆どの場合、高い針の先端に落雷する。第4図では、一見、正しく配置されているように見えるが、上と下の針は傾き、また、下の針が目印から約0.3mm左側に離れ、針と針の先端の距離は6.7mmと7.1mmであった。その差が0.4mmと短いた

め、低い針に落雷する割合が高くなったと考えられる。

実験3：保護範囲を確認する実験

生徒が保護範囲を確認するための実験である。この実験結果が、第4章で示した課題を解くための基礎となる。

a) 実験手順

背の高い樹木に伴い保護範囲が作られる理由を考えさせるために、積乱雲が雷を落としながら樹木に近づいて来る様子を実験装置で再現する(第5図)。

手順1. 放電路の先端に見立てた針を下向きに6mm伸ばす。圧電素子を押しても地面に落雷しない場合は、安定して落雷が起きるまで針を下げる。

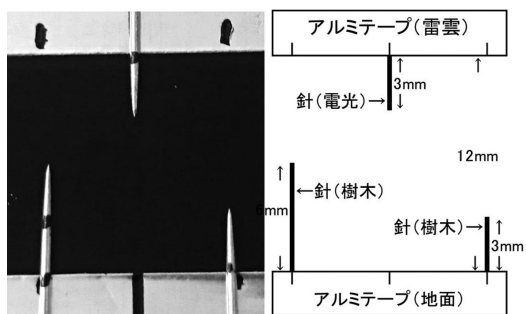
手順2. 樹木に見立てた針を上向きに3mm伸ばす。

手順3. 放電路の先端と針の水平方向の間隔を7mmに設定する(第5図a)。圧電素子を3回押し、放電路の経路と落雷地点を観察する。

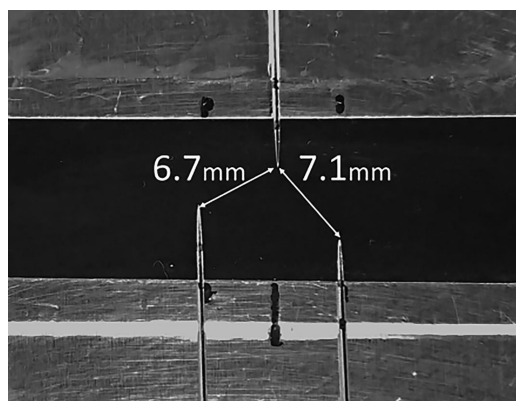
手順4. 放電路に見立てた針を、右方向に1mmずつ移動させ、それぞれの位置で圧電素子を3回押し、放電路の経路と落雷地点を観察する。

b) 実験結果

生徒の記録例を第6図に示す。この例では、放電路



第3図 実験2で用いる針の配置。右図は、ワークシートに載せた模式図である。



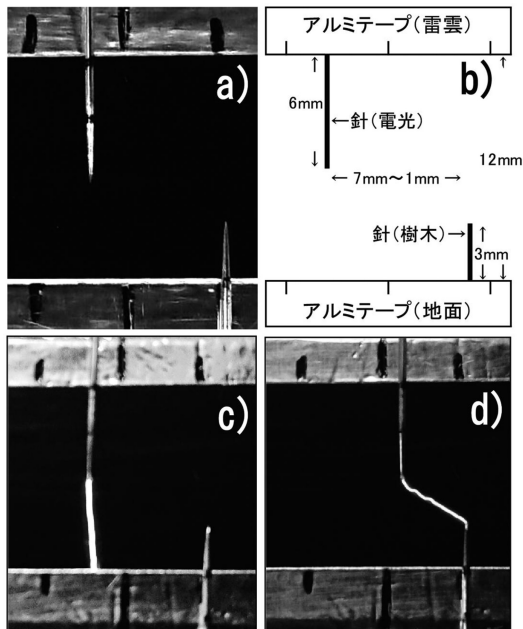
第4図 低い針に4回の稲妻が落ちた実験装置

第2表 実験2の結果 (n=62)

高い針への落雷：低い針への落雷	グループ数	割合
10：0	46	74%
9：1	10	16%
8：2	5	8%
7：3	0	0%
6：4	1	2%

の先端が針から水平方向に5-7mm離れていると、3回とも地面に落雷していた。距離が4mmのときには、1回は地面、2回は針の先端に落雷し、それよりも放電路の先端が針に近い場合には、全てが針の先端に落雷していた。つまり、針から水平方向に3mm離れた地点までは、放電路は地面まで到達しない「保護範囲（側撃雷の危険性は考慮していない）」が作られていることを、生徒は自分の目で確認できた。

62グループの実験で得られた保護範囲の長さを第3表にまとめる。保護範囲の長さはグループにより2-6mmと差があるが、全てのグループが保護範囲を確認できた。そして、74%のグループでは、針の高さよりも長い4mm以上の保護範囲が作られていた。

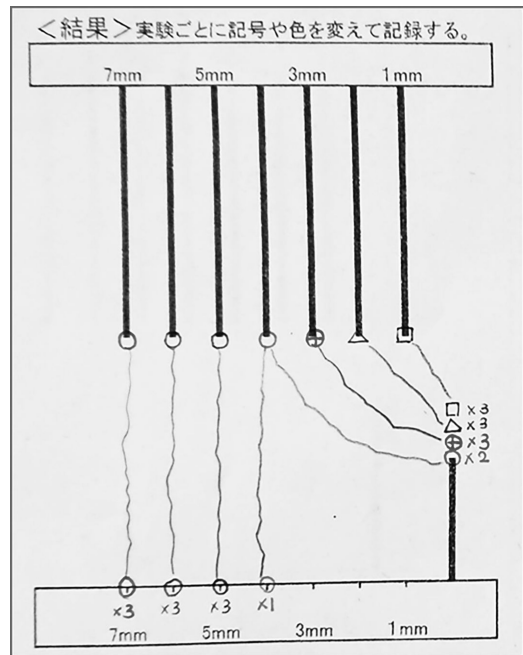


第5図 実験3で用いる針の配置 (a) とワークシートの模式図 (b)、下図は、針と針の水平距離を7mm (c) と4mm (d) にしたときの火花放電の様子である。それぞれ、地面への落雷と樹木への落雷に対応する。

学習2：側撃雷と安全な保護範囲の説明

落雷実験から保護範囲が作られる事実を生徒が確認した後、多くの啓発書で紹介されている樹木などを使った保護角法の考え方に基づく避雷方法について説明する（第7図）。樹木などの先端から俯角45°の領域は放電路の先端が到達し難い保護範囲であるが、その保護範囲であっても、幹や枝から4mの範囲、つまり、「樹木の下」は側撃雷の危険性があることを伝える（例えば、日本大気電気学会 2001）。電力中央研究所（2016）の研究紹介パンフレットに掲載されている側撃雷が人形に落ちた瞬間の写真を引用し、視覚情報からも側撃雷の危険性を強調する。

更に、落雷から身を守るためには、「樹木からでき



第6図 ワークシートに記載された保護範囲確認実験の記録例

第3表 樹木に伴う保護範囲の長さの頻度分布 (n=62)

保護範囲 (mm)	7	6	5	4	3	2	1
グループ数	0	1	10	35	13	3	0
割合 (%)	0	2	16	56	21	5	0

るだけ遠くに避難する」と誤解していた生徒を想定して、「樹木から離れ過ぎると、保護範囲を出してしまうので危険」であることを説明する。

これらの説明の後に、「近くに自動車や丈夫な建物があれば、その中へ避難しなさい。それが、より安全な避雷方法です」と説明し、「この樹木の保護範囲の利用は緊急時の避難行動である」ことを強調する。

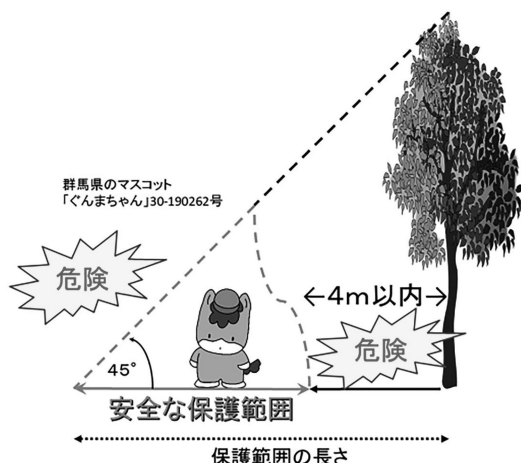
学習2で説明した保護角法の考え方では、保護範囲の長さは樹木の高さと同じ3mmになるはずであるが、今回の実験で得られた保護範囲の長さの最頻値は4mmであった。注意深い生徒ならば、この「矛盾」に気付くかも知れない。この解釈については、第7章で考察する。

まとめ：避雷行動のまとめ

第4章で示した課題を生徒に示し、これまでの落雷実験と説明をもとに、落雷の危険性が迫った状況における適切な避雷行動を考えさせ、ワークシートの避雷行動のまとめ欄に解答させる。

6. 評価の結果と教育プログラムの問題点

ワークシートに書かれた「避雷行動のまとめ」から、定性的理解に達したと認められた生徒は120人中の119人(99%)であった。この中には、「近すぎず、遠すぎない所に避難」のように安全な保護範囲の両端の位置が明記されていない回答や「10mの位置にしゃがむ」などと回答した生徒も含まれるが、第7図



第7図 保護角法に基づく樹木を使った避雷方法の模式図

の安全な保護範囲の存在を理解できたと言える。つまり、授業前には、雷から身を守るためには「(保護範囲を超えて)できるだけ樹木から遠くに離れる」と考えていた生徒もいたが、この授業により誤解が解けたと言える。

一方、安全な保護範囲の両端の位置(電柱から4mと15m)が読み取れる回答をした定量的理解に達した生徒は、66人(55%)と少なくなる。

この教育プログラムの大きな問題点は、時間的な余裕がないことである。55分間の授業の中で、「雷の仕組み」を確認してから3つの実験を行い、さらに「側撃雷」を扱うため、授業は非常に忙しい展開となる。そのため、放電距離によって「放電路(稲妻)の色や明るさが異なる(第5図cとd)」ことに気付いた生徒もいたが、その意見を拾い上げる余裕は全くなかった。また、観察と考察に時間を掛けたい生徒にとっては、55分間はとても短いと感じられたであろう。

授業の雰囲気と生徒の様子を伝えるために、自由記述欄に書かれた幾つかの感想を第4表に転載する。生徒が実験を楽しみ、その実験結果を基に考えたことが読み取れる。これは授業者や参観者の印象と一致する。

7. 考察

7.1 避雷意識への影響

防災教育において、効果の持続性を確認することは重要である。そこで、授業から14ヶ月を経過した時点での受講者の避雷意識を調べた。

中等教育学校の授業を受けた119名(実験群:新3年生)と授業を受けていない363名(対照群:新1, 2, 5年生)に、避雷意識の調査を行った。授業者が調査に立ち会うと実験群の生徒に影響を与えるため、科学クラブの生徒が別目的で行った雷についての調査に、第5表の質問1~3を加えた。また、特別授業において生徒が過去の落雷事故の報道をよく覚えていたので、調査は雷の季節を避け2019年1月9日(実験群)と2018年12月18日と20日(対照群)に行った。

質問1と2では、夏期に雷鳴や稲妻を体感した回数を聞いているが、実験群と対照群とに有意な差は認められないので、結果は省略する。

質問3の回答結果を第6表に示す。「すぐに帰宅」と回答した生徒は、実験群では42%となり、対照群よりも17ポイント低い。逆に、「安全になるまで待機」と回答した生徒の割合は、実験群では対照群よりも21

第4表 自由記述欄に書かれた感想

1. 身近なもので落雷の実験ができるとわかった。
2. 落雷の様子を実験できるなんて驚いた。
3. 落雷から身を守るということを実験結果から考察できた。
4. 実験結果をもとに、正しい避雷行動を考えることができた。
5. 雷に遭遇したら保護範囲内に入ってしゃがむ。
6. 保護範囲に入って姿勢を低くするのが安全であるという事実だけでなく、根拠を見出すために実際に見て確かめることが大切だと気づきました。
7. どのような場所にいれば安全かということパンフレットなどで見たことはあったが、科学的に考えることは初めてだったので、とても面白かった。
8. 実験では、樹木から離れすぎても当たるということが分かりやすくなっていた。
9. 保護範囲が詳しいところまではよく分からなかったもので、調べ直しておきたいと思いました。

第5表 避雷意識の質問項目

- 質問1：2018年の夏に、雷の音（雷鳴）を何回くらい聞きましたか？
 質問2：2018年の夏に、稲妻を何回くらい見ましたか？
 質問3：下校時に、雷を確認（雷鳴を聞いた、稲妻を見た）した場合、どのように行動しますか？
 ①そのまますぐに帰宅 ②弱まるまで待機 ③安全になるまで待機

第6表 質問3の回答結果

	①すぐに帰宅	②弱まるまで待機	③安全になるまで待機
実験群 (n=119)	50人 (42%)	30人 (25%)	39人 (33%)
対照群 (n=363)	214人 (59%)	104人 (29%)	45人 (12%)

ポイント高い。 χ^2 検定によると、2つの群の差は、0.5%の有意水準で、統計的に有意であると判定される。実験群の生徒が「待機」する場所として近くの樹木もしくは電柱の保護範囲内を想像したのか、それとも特別授業の教育プログラムの学習2で最後に強調した自動車や丈夫な建物への避難を想像したのかは不明である。いずれにしても14ヶ月後の追加調査において有意な差が表れたということは、小型落雷実験装置を使って落雷の特性を「実感」した生徒のほうが、授業を受けていない生徒よりも適切な避雷行動を意識していたと解釈でき、教育プログラムの有効性を示すものと考えられる。

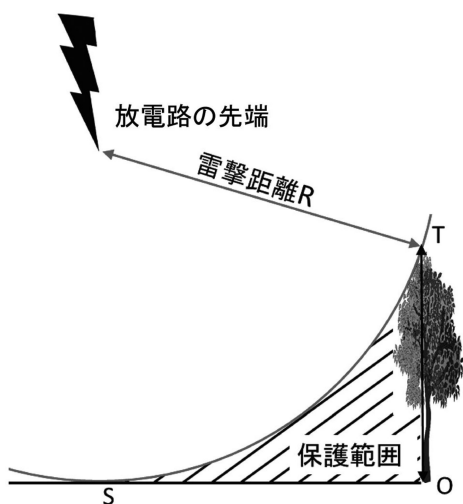
但し、雷鳴が聞こえたときには、雷雲は直ぐ近くに迫っているので、早めの避難と安全になるまでの待機が肝心である（例えば、日本大気電気学会 2001）。この特別授業では、この視点を重視できていないが、電力会社が提供している準リアルタイムの雷情報などを活用し、安全な場所への避難と待機の重要性を積極的に理解させることも必要である。

7.2 保護範囲の長さに関する考察

第3表に示したように、実験3で得られる保護範囲の長さの最頻値は4mmであり、第7図から想定される保護範囲の長さ3mm（＝針の高さ）よりも長い。著者は慎重に針を配置し、同じ事が起きることを事前・事後実験で確認している。

この差が生じる原因を考察する。まず、第7図に沿って考える。この図では、1981年に定められたJIS規格の保護角法の考え方にに基づき、樹木の先端から俯角45°の領域を保護範囲と定義している（側撃雷の危険性は考慮していない）。図から明らかなように保護範囲の長さは樹木の高さと同じになる。

次に、2003年にJIS規格に採用された回転球体法の考え方にに基づき（日本工業標準調査会 2003；新藤 2005）、電界強度が最大になる道筋に沿って放電路が進展すると考えると、別の保護範囲が定義される。簡単のために、第8図のように、放電路の先端からRの距離に樹木の先端があり、かつ、最終雷撃距離がRに等しいと仮定する。そうすると、半径Rの円が地上と接するSと樹木の先端Tとの電界強度は等しく



第8図 回転球体法による保護範囲の説明

なり、この2地点の落雷確率は同じになると期待される。図中の斜線域にある地上物と放電路の先端との電界強度は、T点とS点よりも小さくなるため、斜線域にある樹木の側面と地上には落雷し難くなる。ここが保護範囲になる。

この実験装置で期待される保護範囲の長さを回転球体法で計算する。最終雷撃距離を6.0mmと考えると、針の高さは3.0mmなので、保護範囲の長さは5.2mmとなり、針の高さ3.0mmよりも充分に長くなる。そのため、落雷実験で得られた保護範囲の長さが3mmを超えても問題はない。

つまり、この実験装置で得られた保護範囲の長さが3mmを超えることは回転球体法を用いると説明できる。しかし、特別授業の中で、回転球体法を使った説明を行うには、時間が絶対的に足りない。授業者が原因を理解した上で、第7図の保護角法を用いるのが改善の策と考える。

8. まとめ

落雷の特性を確認できる安価な小型落雷実験装置を開発した。この実験装置では圧電素子を使い火花放電を発生させ、それを雷に伴う放電路（稲妻）と見立てている。この落雷実験装置を用いた特別授業を中学校2年生に対して行った。本論文の目的は、初めて実験装置を使う生徒が、どの程度、保護範囲を含む落雷の特性を観察できるかを確認し、そして、その観察を基に緊急時の避雷行動を生徒に考えさせる教育プログラ

ムが有効性であったかを検討することである。

特別授業において、1) 背の高いものに落雷しやすいこと、2) 樹木などには、落雷しない保護範囲があることを、生徒は確認できた。これは落雷実験装置の有効性を示すものである。

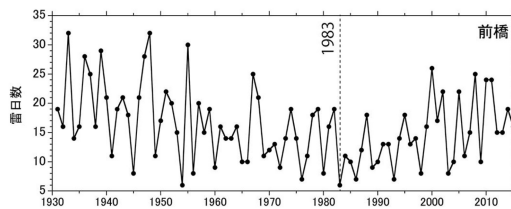
この落雷実験の体験と授業者による側撃雷の説明により、保護範囲を誤解していた生徒が、樹木を使った正しい避雷方法を理解できた。また、14ヶ月後であっても、授業を受けていない生徒よりも、授業を受けた生徒の方が適切な避雷行動を意識していた。これらは教育プログラムの有効性を示すものと考えられる。

付録 A

吉田（2002）は、1931年から1999年までの気象官署で観測された落雷日数のデータを用いて、前橋を含む関東地方では雷日数が減少傾向にあることを報告した。船井（2017）は、解析期間を2015年まで延長したが、その成果は未公開なので、概要を付録にまとめる。

解析に利用したデータは吉田（2002）と同じ気象官署で観測された雷日数であり、1931年から2015年の夏期（6～8月）を解析対象とした。データは気象庁のウェブサイトからダウンロードした。

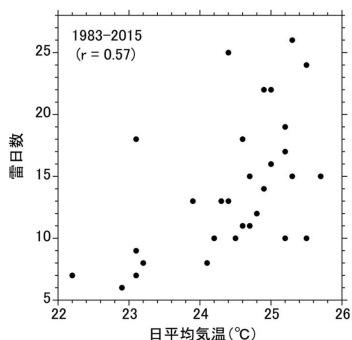
第A1図は、前橋における夏期の落雷日数の経年変化である。吉田（2002）の指摘通りに、1976年までは雷日数は1%の有意水準で減少傾向にある（相関係数=-0.39）。しかし、その後の雷日数は、1%の有意水準で増加傾向を示す（相関係数=0.51）。北関東周辺では、計7つの気象官署で、この特徴が認められた（前橋、宇都宮、水戸、軽井沢、熊谷、横浜、甲府）。東京では、1976年以降の雷日数のみに、1%の有意水準を満たす増加傾向が認められた。



第A1図 前橋における夏期（6～8月）の雷日数の経年変化。

雷日数は日平均気温との相関が高く（第A2図）、1983年以降については、相関係数は0.57（有意水準=0.1%）である。気温と雷活動度との正の相関につい

ては、Kitagawa (1989) と Williams (1992) の結果と整合的である。北関東の前橋の雷日数の増加には、近年の気温上昇が、重要な役割を担っているのかもしれない。



第 A2 図 1983 年以降の前橋における夏期（6～8 月）の雷日数と日平均気温の関係。

付録 B

小型落雷実験装置の材料の入手先や留意点などを示す。

1. 圧電素子 (100円/個)：インターネットの通信販売 (松本無線パーツ) から購入。種類によって放電距離や耐久性に大きな差があるため、数種類の圧電素子を購入し、使いやすいものを探すとよい。理科教材会社の着火装置は高価だが、最大の放電距離が 2 mm と短く、最も実験に適さなかった。
2. ケース (190円/個)：試料ケースを利用。100円ショップの商品でもよいが、底に小さな凸凹があると、針の位置を調節しにくい場合がある。
3. アルミテープ：100円ショップで購入。
4. ワニ口クリップ：大きなものを使うと生徒は実験しやすい。

謝 辞

特別授業の機会を与えて下さった中等教育学校の関係者と生徒に感謝いたします。また、圧電素子の発生電圧の測定法をご指導くださった群馬大学理工学府・本島邦行教授に深謝いたします。

参 考 文 献

赤熊俊二, 山下 統, 松下支夫, 山崎敏範, 1997: テレビ会議システムを利用する中学校理科落雷実験授業。電子情報通信学会技術研究報告, 96, 119-126。

Anderson, R. B., 2001: Lightning hazards to humans and animals. *Lightning: Physics and Effects*, V. A. Rakov and M. A. Uman ed., Cambridge University Press, 642-655.

朝日新聞, 2012: 各地で落雷。大阪で女性死亡 公園の10人を病院に搬送。社会面, 2012. 8. 19朝刊。

Cummins, K. L., E. P. Krider, M. Olbinski and R. L. Holle, 2018: A case study of lightning attachment to flat ground showing multiple unconnected upward leaders. *Atmos. Res.*, 202, 169-174.

電力中央研究所, 2016: 雷のふしぎ。https://criepi.denken.or.jp/research/pamphlet/light_201603.pdf (2018. 8. 9閲覧)。

船井智貴, 2017: 日本全国における雷日数と平均気温の経年変化。群馬大学教育学部卒業論文, 25pp。

群馬県教育委員会事務局, 2014: 学校災害対応マニュアル (落雷・竜巻等突風編)。http://www.pref.gunma.jp/03/x5000061.html (2018. 8. 1閲覧)。

原 雅則, 2011: 不平等電界ギャップの火花放電。気体放電論, 朝倉書店, 133-222。

Iwasaki, H., 2012: Recent positive trend in heavy rainfall in eastern Japan and its relation with variations in atmospheric moisture. *Int. J. Climatol.*, 32, 364-374.

笠原徹也, 1988: ラクに落雷—圧電素子で放電実験—。ハテナ?ナルホド実験室, Quark 編, 講談社, 198-204。

気象庁, 2013: 防災啓発ビデオ「急な大雨・雷・竜巻から身を守ろう!」。https://www.jma.go.jp/jma/kishou/books/cb_saigai_dvd/index.html (2018. 8. 1閲覧)。

気象庁, 2016: リーフレット「急な大雨・雷・竜巻から身を守ろう!」https://www.jma.go.jp/jma/kishou/books/ooame-kaminari-tatsumaki/ooame-kaminari-tatsumaki_ura.png (2018. 8. 1閲覧)。

Kitagawa, N., 1989: Long-term variation in thunderday frequencies in Japan. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 94, 13183-13189.

北川信一郎, 2001: 雷と雷雲の科学—雷から身を守るには—。森北出版, 4-7。

文部科学省, 2017: 落雷事故の防止について (依頼)。http://www.mext.go.jp/a_menu/kenko/anzen/1375858.htm (2018. 8. 1閲覧)。

中谷宇吉郎, 1939: 雷。岩波書店, 198pp. (1984年特装版)

日本工業標準調査会, 2003: JIS A4201建築物等の雷保護。http://www.jisc.go.jp/app/jis/general/GnrJIS Search.html から JIS A4201を検索 (2019. 2. 26閲覧)

日本ラグビーフットボール協会, 2018: 雷に関する注意。https://rugby.dweblink.jp/images/雷に関する注意.pdf (2019. 1. 16閲覧)。

日本赤十字社, 2015: 青少年赤十字防災教育プログラム

- 「まもるいのち ひろめるぼうさい」. <http://nisseki-jrc-bousai.com/> (2018.8.閲覧).
- 日本サッカー協会, 2006: サッカー活動中の落雷事故の防止対策についての指針. <https://www.jfa.or.jp/match/rules/pdf/rakurai.pdf> (2019.1.16閲覧)
- 日本大気電気学会, 2001: 雷から身を守るには—安全対策Q&A—改訂版. 日本大気電気学会, 19-20.
- 大橋正次郎, 2008: 雷撃傷. 本の泉社, 159pp.
- Schonland, B. F. J., 1956: The lightning discharge. *Handbuch der Physik*, 22, 576-628.
- 新藤孝敏, 2005: 避雷針と雷しゃへい. *電気学会誌*, 125, 356-359.
- 鈴木俊男, 1980: 長ギャップ放電からのアプローチ. *放電研究*, 83, 47-56.
- 高木浩一, 猪原 哲, 高橋 徹, 杉山敏樹, 2004: 雷番外編〜理科教育の駆け込み寺〜. *プラズマ・核融合学会誌*, 80, 669-677.
- Williams, E. R., 1992: The Schumann resonance: A global tropical thermometer. *Science*, 256, 1184-1187.
- 読売新聞, 2017: 世田谷落雷花火客9人搬送 関東各地大荒れ. 29面, 2017.8.20朝刊.
- 吉田 弘, 2002: 日本列島における雷日数の地理的分布とその長期的傾向. *天気*, 49, 279-285.

Development of Tabletop Artificial Lightning Generator and its Application to Education for Lightning Protection in Junior High School.

Takao MATSUI*¹, Tomoki FUNAI*² and Hiroyuki IWASAKI*³

*¹ (*Corresponding Author*) Graduate School of Education, Gunma University, 4-2 Aramaki, Maebashi, Gunma 371-8510, Japan / Gunma Prefectural Chuo Secondary School 184 Shinbotanaka, Takasaki, Gunma 370-0003, Japan.

*² Faculty of Education, Gunma University. (*Present affiliation: Misono Elementary School, Tatebayashi, Gunma*)

*³ Faculty of Education, Gunma University.

(Received 20 September 2018; Accepted 21 June 2019)
