

「感電実験」の安全指針 (私案)

山本明利

(1) 「感電実験」の意義と安全知識の必要性

五感にうったえる実験がすぐれた理科教育法の一つであることは議論を待たないところだが、対象物が直観的でない「電気」の單元においてはこうした教授法がとりわけ重要である。私たち教授者は、とかく抽象論とイメージのすり替えに陥りがちなこの單元において、直感しにくい不思議な「電気」を例えば以下のような方法で「体験」させ、その実在を理解させようとするのである。

- ・ 静電気で帯電した物体により、静電誘導を受けた物体の運動を観察する。
- ・ 同じく、体毛が分極して受ける静電気力を直接体感する。
- ・ 放電現象により空中を流れる電流を視認する。
- ・ 電球、発光ダイオードなどの発光素子により電流の作用を視覚する。
- ・ 電流により発生するジュール熱を体感または知覚する。
- ・ 電解質中を流れる電流による化学反応の進行を観察する。
- ・ 舌端に微電流を通じて味覚の変化を体験する。
- ・ 電流の磁気作用により発生する力を体感する、あるいは運動を観察する。
- ・ 電氣的な振動現象により二次的に発生する機械的振動や音波を捉える。
- ・ 各種の計測器により、電流や電位差を計測し、数値化して捉える。
- ・ 生体に電流が通過する際の生理反応（痛覚、熱感、筋運動）を体験する。

このうち最後に挙げたものがここで話題にするいわゆる「感電実験」であって、具体的な実験手法としては、

- ・ 百人おどし（高圧蓄電器からの直流電撃）
- ・ バンデグラーフ起電器による人体への電撃実験
- ・ チョークコイルによる誘導パルスの電撃実験
- ・ テスラーコイルによる高周波高電圧放電実験
- ・ 低周波治療器具等による筋肉の収縮実験

などがよく行われている。いずれも被教授者自身の感覚にうったえる実験であり、感覚が直接的である点が他の実験にない特徴である。

「感電」それ自体は日常生活の中でも体験するシーンがあり、時に不快感や恐怖感を伴いながら、不思議な現象として印象に残っている場合が多い。それが電気現象に伴う感覚であることはぜひ知らしめたいし、身近な電気現象としてその原理に気付かせたいと思う。さらにできれば、生命活動が細胞レベルの電気現象により営まれること、生物も無生物も等しく電氣的な力で構成された「物質」であることを理解する段階までを、理科教育としては目標に掲げるのである。

しかし、他の多くの実験と同様「感電実験」においても、刺激が度を過ぎれば不快感や苦痛を伴い、興味を引き出すどころか負の教育効果を及ぼすことになる。さらに極端には人体を損傷し生命を危険にさらす恐れもあるので、教授者はその安全限界について正しい知識を持ってこれを行わなければならない。

「どこまでが安全で、どこからが危険なのか。」

「それはなぜ、どういう場合に危険なのか。」

電気の單元に限らず、あらゆる理科実験において教授者はこうした問いに答えられなければならないが、同時にそれは被教授者が自らの生命を守るための実学として、ぜひ身に付けて欲しい知識でもある。

(2) 人権に対する配慮と実験のスタンス

あらためて言うまでもなく、基本的人権への配慮は教育活動のあらゆる場面でなされなければならない。無論、理科実験もその例外ではない。

「感電実験」に限らず、一般に被教授者の五感を活用する理科実験においては、その刺激の度合が苦痛に近づく可能性もあるため、対象となる者にはあらかじめその可能性を示唆し、本人の同意を得てこれを実施する必要がある。医療行為に伴う苦痛や、スポーツのトレーニングに伴う苦痛と同様、対象者が自らの意志でこれに参加する場合には、苦痛に近い刺激を人体に加える事そのものが排除されるものではない。しかし、望まない場合にはこれを免れる権利は被教授者に常に保証されなければならない。

嫌がる者に精神的・肉体的苦痛を与えてまで教授を行おうとすれば、マイナスのすりこみが行われ、教育としては失敗することになる。ましてやそれが強制的かつ体罰的な性格を帯びたものであれば、基本的人権を侵す行為となるので、いかなる手段であれ絶対にこれを行ってはならない。理科実験は興味の喚起、印象づけ、そして探求を目的として行われるものであるから、教授者は被教授者が納得した上で主体的に参加できるように教授条件を整えるべきであり、できれば感動と興味を後に残したいものである。

もうひとつ、教授者は非健常者への配慮を怠ってはならない。刺激に対する生理反応には個人差があるが、疾病を持つ者、負傷箇所のある者は特に敏感な反応を示すことが考えられるので、注意が必要である。一例をあげれば、心臓ペースメーカーの電極は心筋への低インピーダンス電流路となるので、「感電実験」では電撃が心臓を直撃する恐れがある。この場合、針電極で $200\mu\text{A}$ 、円盤電極で $75\mu\text{A}$ というわずかな電流でも心室細動を引き起こすことになるので、十分に注意しなければならない(文献1)。また、手などに傷口があって、体液が直接電極に触れれば、正常な皮膚を電流が通過する場合に比べ、人体の抵抗は極めて小さくなるので、予期せぬ結果を招く恐れもある。

以上の考え方を具体的に「感電実験」の場合に適用すれば、教授者はまず、「心臓に病気を持っている人、特にペースメーカーを使用している人は、危険なので参加しないように。」と呼びかけ、それ以外の者に対し、「安全な程度であるが若干の電気ショックがある」ことを予告した上で参加を促すのがよい。

【参考文献】

1. 「医用電子と安全技術」南任靖雄、江澤正共著(工学図書株式会社)
より「1.3.3生体組織への電流諸元の影響」

(3) 人体の感電特性と「感電実験」の安全指針

人体の電氣的物性と電撃に対する生理反応は、電圧、電流、周波数、通電時間そして通電経路のいずれによっても変化し、その特性は単純ではない。さらに、安全のための許容範囲は、性別、年齢によっても異なり、もとより個人差も大きい。理科実験として行われる感電の方法は多様であるが、教授者はそのそれぞれの場合に応じて上記の要素に十分配慮し、安全の範囲を見通して実験を行わなければならない。

電撃を引き起こす電流の閾値は、周波数50～60Hzの交流に対して最も低い(表1)。つまりこの周波数に対して人体は最も敏感で、直流および高周波ではこの閾値は上昇する。これはちょうど商用交流の周波数であるから、商用交流を電源とする「感電実験」は最も慎重に行われなければならない。言いかえれば、商用交流の周波数の電源を前提として安全基準を設ければ、直流や高周波交流に対しても安全性は確保されることになる。

50～60Hzの交流に対して、成人男子の生理反応は動物実験等からおおむね次のようになると予想される(表2)。最小感知電流以下では電流は直接知覚されない。離脱電流は自力で電極から遠ざかることができる可随意電流の限界である。心室細動とは心筋が痙攣して正常な血流を送り出せない状態で、死に直結する。女子ではこの表の2/3、小児では1/2の電流で同じ生理反応が起こると予想される。なお、ここでは電流が正常な皮膚を経由して人体に入り、同じく皮膚を経由して体外に出る場合(マクロショックという)を想定している。

【表1】(文献2)
電撃を引き起こす電流閾値の周波数依存性(被験者の50%が感知する電流)

周波数[Hz]	電流[mA]
50	1
100	1
500	1.5
1k	2
5k	7
10k	10
50k	70
100k	150

(Dalzielの実験より)

【表2】交流(50～60Hz)1秒間通電時の成人男子の生理反応(文献2)

電流	生理反応
1mA	最小感知電流。ピリピリ感じる電流。
5mA	がまんできる最大電流。手足に強く感じる電流。
1.0～2.0mA	離脱電流。自力で離脱できる限界。
50mA	痛み。気絶。心臓、呼吸系統の興奮。
100mA～3A	心室細動の発生。
5A以上	大電流による火傷。

電撃による生命への危険を考えると、最も配慮すべき臓器は心臓であって、電流が通過する経路が心臓を含む場合はより危険が大きい。両手間に電流を通じる場合、最低50mAでも心室細動の危険があるとされる(文献1)。「感電実験」では心臓近傍を電流が通過しないよう電極位置に配慮するのが望ましい。

以上から、商用交流の周波数では「感電実験」の電流は成人で5mAを越えない程度にとどめるべきだと判断できる。この範囲では、仮に電流が継続しても生命には別状がないとされる(文献3)。ただし、5mAでは痛みなどかなりの不快感を伴うので、教育効果を考えると電流はさらに低く2mA程度までにおさえるのがよいと思われる。被教授者が小児である場合にはさらにその半分程度を目安にする。人体の抵抗には個人差があり皮膚の湿りの程度によっても異なるが、

2 mAの電流に対する電圧はおよそ5～10 Vの程度である。通電時間は必要最小限にとどめる。

なお、商用交流では普通二本ある配電線のうち一方が接地されているので、床や壁との絶縁が不十分な状態で非接地側の配電線に触れば人体を通して短絡が起こる恐れがある。したがってコンセントから直接電源をとった感電実験は予想しない電流路を通して電流が流れる可能性があり危険である。接地線を持たない変圧器などを通して接地をはずす必要がある。

交流周波数が高くなると電流の閾値は上昇する。表1または表3に示すように10 kHzでは50～60 Hzのときの5～10倍の電流が許容される。

直流電流に対しても人体の生理反応は交流50～60 Hzの場合より鈍く、5倍程度の電流が許容されると見られる。

【表3】人体に対する電流の作用（※数字の単位はmA）（文献4）

電撃の影響	直流		交流60Hz		交流10kHz	
	男子	女子	男子	女子	男子	女子
最小感知電流、少しちくちくする。	5.2	3.5	1.1	0.7	12	8
苦痛を伴わないショック筋肉の自由がきく	9	6	1.8	1.2	17	11
苦痛を伴うショックただし筋肉の自由がきく	62	41	9	6	55	37
苦痛を伴うショック。離脱の限界。	74	50	16	10.5	75	50
苦痛を伴う激しいショック筋肉硬直呼吸困難	90	60	23	15	94	63
心室細動の電撃時間0.03秒	1300	1300	1000	1000	1100	1100
心室細動の可能性あり3.0秒	500	500	100	100	500	500
心室細動が確実に発生	上記の値を2.75倍する					

電流の継続時間については、人体の許容電流が電流継続時間の平方根におおむね反比例するとするDalzielの関係がある（文献5）。表2より、5 mA、1秒間を安全範囲と見てこの関係を適用すると、パルス電流に対する安全範囲はおよそ表4のように押さえられる。

なお、これまでの議論はあくまでも電流が正常な皮膚を経由する場合についてのものであり、電極が体液に直接接触する時には人体の抵抗は極端に低下するので、安全と判断される電圧であっても電極をなめたり、口にくわえたり、傷口に触れたりすることのないよう注意すべきである。

【表4】パルス電流に対する安全範囲

パルス幅	安全電流
0.01秒	50mA以下
0.02	35
0.05	22
0.1	16
0.2	11
0.5	7.1
1.0	5.0
2.0	3.5
5.0	2.2

【参考文献】

1. 「医用電子と安全技術」南任靖雄、江澤正共著（工学図書株式会社）
より「1.3.3生体組織への電流諸元の影響」
2. 「MEの基礎知識と安全管理」（南江堂）
より「第3章：MEの基礎となる生体物性」
3. 「自家用電気設備メンテナンス読本」大浜庄司、安藤治著（オーム社）
より「4. 電気設備の保守点検ガイドQ&A」
4. 「カラー版・電気百科事典」（オーム社）
より「9.1電気はどこまで安全か」
5. 「電気工学通論・第4版」大山松次郎著（オーム社）
よりP.195「感電について」

(4) 各種の「感電実験」の安全性に関する考察

最後に、理科教育の一環として行われる各種の「感電実験」について、個々に考察を加えてみる。以下では心疾患等のない健常な成人に対して行う実験を想定している。

【低周波治療器】

家庭用の電気マッサージ機として市販されている、いわゆる「低周波治療器」は、人体にパルス状の電撃を加えることで筋肉を周期的に収縮させ、マッサージ効果を生むものである。これらは医療用具として正式に認可されたものであるから、指定された範囲を逸脱しない使用であれば、安全性は保証されていると見ることができ、これを安全基準の一つのよりどころとすることができる。

市販の低周波治療器は電圧数十～百V、パルス幅0.2ms程度の単位パルスを適当な時間間隔(数十ms～数秒)で周期的に発生する。これにより、人体に流れるパルス電流のピーク値は数十mA～百数十mAの程度である。電気量にして十～数十 μ Cが人体内を移動することになる。安全であるとはいえ100mAに近いパルス電流は痛みを伴いはなはだ不快である。教育効果を考えるなら、可能な限りの小電流からはじめて、被験者が苦痛に感じない程度まで徐々に電流値を上げながら実験を行うことが望ましい。

なお、低周波治療器の使用説明書に明記してある禁止事項は遵守しなければならない。すなわち、ペースメーカー等の体内植込型医用電子機器、人工心肺等の生命維持用医用電子機器、心電計等の装着型医用電子機器を使用している者に使用しないことはもちろん、急性疾患、悪性腫瘍、感染症疾患、心臓障害、皮膚疾患、血圧異常のある者などに対して使用しないことなどに注意する。また、心臓の近傍、頭部、陰部にこれを用いてはならない。これらは他の「感電実験」にも共通する注意事項としたい。

【百人おどし】

スチロールカップで自作した蓄電器に摩擦電気を蓄え、これを人体を通じて放電し、その際の電撃を体感するのが現代版の「百人おどし」である。摩擦電気の起電力は約1万Vに達すると考えられるが、上記の自作蓄電器の規模では、電気容量は数十～百pFの程度であり、蓄えられる電気量はせいぜい1 μ Cのオーダーである。

人体抵抗を1k Ω 程度と考えると、放電初期の電流は最大10Aに達すると想定されるが、放電の時定数すなわち実質的な電流継続時間は0.1 μ s程度であり、生命への危険はないものと判断される。ただし、それでも相当の電撃を感じることは被験者にあらかじめ予告すべきであるし、蓄電器を多数並列に接続したり、起電機を用いてより高圧で充電したりすることは、いたずらに危険と不快を増すだけで教育効果は期待できないので、これを行ってはならない。

【バンデグラーフ】

教育用の小型バンデグラーフ起電機(静電高圧発生装置)では、数万～10万V程度の電圧を発生させることができる。装置頭部の集電球の直径を20cmとすると、その孤立導体球としての電気容量は10pF程度であるから、蓄えられる電気量はせいぜい1 μ Cのオーダーであることがわかる。帯電して高電位となった集電球に人体が直接接触した場合でも、電撃は人体の抵抗を1k Ω として計算した時定数10ns程度の短時間で終了するので、致命的な危険はないものと判断される。

人体の電気容量はかなり大きいですが、体表からの発汗などにより絶縁性が保たれないため電荷は周辺大気へ常時放出されるので、集電球に触れ続けた場合、ある

いは集電球に触れている人体を通じて他の者が間接的に電撃を受ける場合でも特に危険はないと考えてよい。

ただし、発生した電荷をライデン瓶などに導いて蓄電した場合はこの限りではない。ライデン瓶の電気容量は数千pFに達するので、電撃の強度は上記の数百倍に達すると考えられる。したがって、ライデン瓶にたまった電荷を人体を通じて放電するのは危険である。必ず放電叉などを用いて短絡するようにする。

一方、集電球と放電球の間を継続的に人体で結んだ場合は、回転ベルトにより運ばれる電荷が流れ続けるが、この場合の電流は数 μ Aの程度であるので危険はない。実際、この電流は被験者には全く感知されない。

【ウィムズハースト起電機】

静電誘導により電荷を導き高電圧を得るウィムズハースト誘導起電機も教育用の小型のもので数万～10万Vの起電力を発生することができる。単位時間に誘導される電荷、すなわち電流は、たかだか数 μ Aの程度と判断されるから、両電極を直接短絡した後、人体を電流路として継続的に電流を流すならば、感知できない程度の電流であり危険はない。

しかし、ウィムズハースト起電機には通常一對のライデン瓶が付属しており、これに蓄えた電荷を、両電極間の間隙で空中放電させるなどの実験を行うのが普通である。このようにライデン瓶に蓄電した場合は、バンデグラーフの項で考察したのと同じ理由で危険であると考えられる。

【誘導コイル】

誘導コイルでは電磁誘導を利用して高電圧を発生する。教育用として発売されている装置だけでもさまざまな規模のものがあるが、発生する電圧は最大数万V程度である。しかし、電圧は同程度であっても、毎秒数十回のパルスが発生し継続するので、パルスが単発で終了するバンデグラーフ起電機の場合に比べ危険性ははるかに高いと考えられる。誘導コイルの出力を直接導いての「感電実験」は行うべきではない。

【チョークコイル】

通常、チョークコイルの自己誘導を利用して高電圧を発生させる方式の「感電実験」では、回路にあらかじめ直流電流を通じておき、回路を切断する瞬間に発生する自己誘導電流が人体を通過するようにする。回路の切断を手動のスイッチで行う場合には電撃は一回で終了する。

コイルに発生する最大電圧はコイルのインダクタンスと電流の変化率の積になるので、汚H条件によりさまざまに変化するが、蛍光灯の安定器程度のコイル（約200mH）を用い、乾電池1、2本程度の電源を用いて初期電流を流し、普通のスイッチで回路を切断する場合には、経験上約100V程度となる。一方、インダクタンスを200mH、回路抵抗（人体抵抗）を1k Ω としたときの時定数は0.2msであるから、この規模の単発の電撃であれば生命への危険は特にないと考えてよい。

インダクタンスや初期電流を増すことで、電撃の程度を強めることは可能であるが、これもいたずらに危険と不快を増すのみで教育効果が期待できないので、上記の規模にとどめたい。

【変圧器】

変圧器による相互誘導の結果生じる電圧を人体に導く「感電実験」には、単一パルスを発生するタイプと、連続する振動電流（交流）を発生するタイプがある。

前者の原理は基本的には前述のチョークコイルの場合と同様であり、安全性についてもこれに準じて考えることができる。後者の場合は、交流周波数に応じて

安全電流の上限が異なるが、50Hzで5mA、10kHzで30mAを越えてはならない。通電時間は最小限にとどめる。

【テスラーコイル】

テスラーコイルを用いた高周波交流の発生は、原理的には前述の変圧器と同じである。一次コイル側の間隙放電によって生じる高周波の電気振動を相互誘導で昇圧する。

一般に高周波に対しては人体の感電閾値が高くなる。教育用として市販されている装置は運転中に触れても安全であるとされる。

【商用交流】

商用交流の周波数(50~60Hz)は人体にとって最も危険な帯域である。この帯域では人体に通じる電流は5mAを越えてはならない。教育的には大きな痛みや不快を伴わない2mA以内にとどめるのがよい。この際の、人体抵抗は皮膚の湿潤の程度により大きく異なり、個人差も大きい。およそのめやすとして、この周波数帯では人体に加える電圧は10Vを越えない程度と考えるのが妥当である。通電時間は最小限にとどめる。

商用交流電源を用いる際にぜひとも注意しなければならないことは、接地の問題である。大勢の被験者に手をつながせて直列抵抗とみなして通電する場合、被験者と床や壁との間の絶縁が不良であると、思わぬ短絡路が生じて、最悪一人の被験者に100Vの電圧が直接加わることも懸念される。これは極めて危険である。共通の接地線を持たない変圧器を通して接地を解除するなどの十分な対策を講じない限り、商用交流を100Vの電圧のまま用いることは避けたい。

なお、スライダックは入力側と出力側が共通の接地線で結ばれているので、接地解除の目的では使用できないので注意する。

(5) より本格的な指針作りに向けて

以上の考察は、1996年9月の朝日新聞の「感電実験」報道をきっかけに、理科教育においてより安全かつ効果的にこの種の実験を行なうための基盤作りを試みたものであるが、残念ながら現段階では文献検索や検証実験ははなはだ不十分と言わざるを得ない。したがって本論はあくまでも一個人としての見解であり、これによっていかなる束縛を生むものでもなく、また、何らの保証を与えるものでもないことをお断りしておく。今後、理科実験における安全性の確保にこれまで以上の関心が注がれ、安全指針策定に向けた努力がなされることを願うものである。本論がそのための一つのステップとなるならばこれにまさる喜びはない。

本論をまとめるにあたり、資料提供と貴重な助言をいただいたYPC(横浜物理サークル)の仲間たちと、パソコン通信を通じて支援してくださったNIFTY-Serverの【理科の部屋】の皆さんに心から御礼申し上げます。