

安全意識向上への取り組み

— 感電体験装置の開発 —

北海道職業能力開発大学校 木村 天津郎

1. はじめに

日本国内において、感電災害のために表1のように毎年死傷者が出ている。2019年では89人が感電し、うち3人が死亡した事故が発生している。主な原因として、漏電、絶縁不良などによる設備的な要因や、作業者の誤った操作、絶縁防護具の不備などによる人為的な要因が挙げられる。

そこで、本校の専門課程・電気エネルギー制御科における総合制作実習課題の一つとして、電気を扱う人の安全意識向上のために簡単な操作方法で安全な範囲内で感電を体験できるような装置の開発を行った。以下に許容電流ならびに通電時間の選定、および装置の概要について報告する。

2. 最大電流値の選定

人体に電流が流れたとき、本人が感電していることを感知する電流値、苦痛を伴いながらも自分の意

表1 感電災害の発生状況

	死傷者数 [人]	死亡者数 [人]
2019年	89	3
2018年	126	13
2017年	81	9
2016年	99	11
2015年	105	11
2014年	116	15

志で通電部分から離れることができる電流値、さらに心室細動で死亡事故に至る電流値に関して、国際電気標準会議（IEC）において図1のように報告されている。⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾

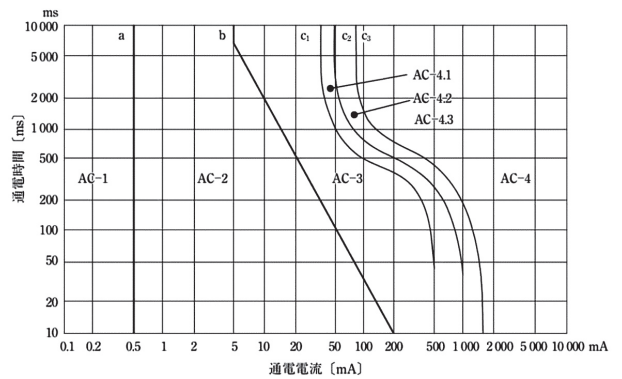


図1 IECによる感電と人体反応領域図 (15~100Hzの正弦波交流) (出典 IEC TS60479-1 : 2005, 第4版)

(イ) 感知電流 (AC-1領域)

本人が直接感知できる最小の電流を感知電流と言い、図1におけるAC-1の領域に対応している。通電時間に関係なく0.5mA (直線a) が境となっており、それ以下では感電を感じない領域となる。

(ロ) 離脱電流 (AC-2領域)

誤って通電部分をつかんでも、自分の意志で離すことができる最大の電流を離脱電流と言い、図1における折れ直線bが境界となっている。通電時間が長くなると離脱電流は減少し、5mA (成人男子では10mA) になると通電時間にかかわらず同様な感電感覚となる。

(ハ) 心室細動電流（AC-3以上の領域）

心室細動の発生する電流を心室細動電流といい、AC-3からAC-4の境界あたりが発生領域となる。いったん心室細動が発生すると、他人が充電部分を除去しても一般には心室細動は収まらず、死に至る電流値である。この値は通電経路が左手-両足の場合に、曲線c1に対応している。すなわち、通電時間が10msで通電電流が500mA、500msで100mA、1sで50mA、10sで40mA程度の値となっている。

図1によると、AC-3の範囲は人体への長期障害は生じないが、一時的な呼吸困難や心臓障害などが生じる可能性がある。また、AC-4の範囲は心停止や重度の熱傷などが加わり、大変危険である。そのため、安全に感電体験を行うには、AC-3領域は確実に避け、AC-2の範囲内で適当な条件を求めるのが適当といえる。

本総合制作実習では、数名に対してAC-2領域内における予備感電体験実験を行い、被験者のいずれもが許容の範囲内でピリッと感じる電流値として0.65mA程度が適当であることを確認した。これは図1において線aのごく近傍にあり、IECのデータともよく対応した安全側に位置していることがわかる。そこで、本感電体験装置の最大電流値を0.65mAとして、設計を行うことにした。

3. 印加最大電圧値の設定

感電現象は電流によって決定され、電圧の大きさは二次的な要素となる。しかし、装置の安全性を担保する上で、印加する最大電圧を理解しておくべきである。

人体に危険とならない電圧値を国によっては、安全電圧と称し、異なった値が提示されている。ドイツ、イギリスでは24V、オランダでは50Vになっている。また、大地に立っている人が充電部に触れて電撃を受けたとき、人体に加わる電圧を接触電圧という。(社)日本電気協会の低圧電路地絡保護指針によれば、表2のように人が接触する状況に応じて許容接触電圧が提示されている。⁽¹⁾⁽³⁾

本総合制作実習では、手が水で濡れていない状態で片方の手のひらのみによる感電体験装置の使用を想定しており、さらに上述した0.65mA以下となるように別途制限を回路的に講じるので、印加できる最大電圧を50Vとして本装置の開発を行うこととした。

表2 許容接触電圧

	接触状態	許容接触電圧
第1種	・人体の大部分が水中にある状態	2.5V以下
第2種	・人体が著しく濡れている状態 ・金属製の電気機械装置や構造物に人体の一部が常時触れている状態	25V以下
第3種	・第1種、第2種以外の場合で、通常の人体状態において接触伝達が行われると、危険性が高い状態	50V以下

4. 開発した装置の回路および全体構成

4.1 主要回路構成

感電体験装置の接触部に関して、図2のように右手の指2本を置く構造とした。これは通電領域が片手の手のひら内に収められ、心臓を通るような電流を生じさせないためである。この感電体験部に対して、最大AC50Vが印加される構造とする一方、通

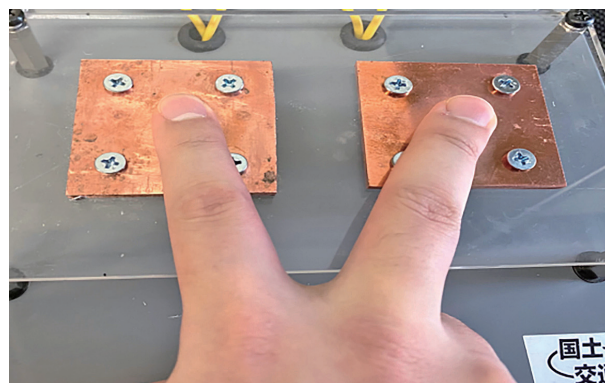


図2 感電体験部

電中の電流値を計測し、それが最大0.65mAで10秒を超えないように回路を設計した。人体との接触部は電気導電率が高く、加工が容易な銅板とした。また、接触部と本体装置の筐体とはアクリル板を介して絶縁した。

図3は、本装置の回路構成である。回路は100V電源が配線用遮断器および漏電遮断器を介してトランスおよび誘導電圧調整器（IR）に接続される構造となっている。二次側にはリレーおよび保護抵抗を介して感電体験部につながっているほか、電流および電圧を表示する計測器が接続されている。⁽⁴⁾⁽⁵⁾

トランスには100V電源を50Vに降圧するものを用いた。なお、トランスは一次と二次が絶縁されており、二次側に接触する人体が仮に地面にアース状態になったとしても、それによって危険な電流は流れない。

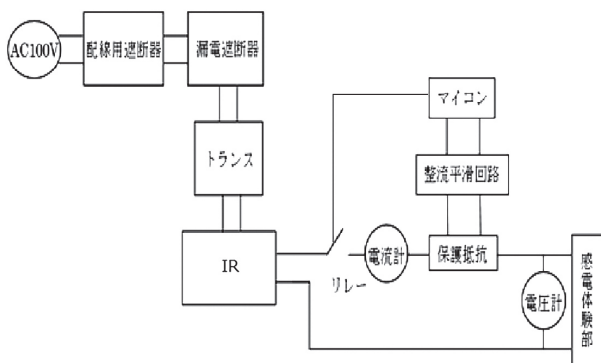


図3 感電体験装置の回路図

ここで、保護抵抗は最大通電電流値の制限を与えるほか、整流平滑回路を介してマイコンに送られる電圧・電流関係に関与する抵抗となる。本装置では4.3kΩの抵抗を選定した。これは50Vの印加電圧の状態、負荷側が短絡した場合におよそ11.6mAの電流が流れる抵抗である。この電流値はごく短い時間であれば図1のAC-2の範囲にあり、さらに人体の電気抵抗があることを考えると、問題のない設計になっていると言える。

なお、図4は電線や器具の劣化が発生した時の対策のために、配置した配線用遮断器と漏電遮断器の写真である。漏電遮断器には高速形、感度電流

15mA以内、動作速度0.1秒以内、感電防止対応機能付きのものを採用した。



図4 配線用遮断器と漏電遮断器

4.2 マイコンによるリレー制御部

2章における事前調査に基づき、感電体験部に流れる最大電流および時間を0.65mA、10秒に設定した。

これを図3に示すようなマイコンとそれによって制御されるリレーにより回路の開閉を行った。まず、整流平滑回路を介して4.3kΩの保護抵抗（電流を計測するためのシャント抵抗に相当）の両端にかかる電圧をマイコンに取り込み、保護抵抗に流れる電流を算出した。誘導電圧調整器を少しずつ回して徐々に電圧を上げていき、保護抵抗間の電圧が所定の電圧になったところで時間計測を開始する一方、電流値をモニタリングし、通電時間もしくは電流値が上記設定値を超えるまでリレーを通電状態とする。そして、時間もしくは電流値が設定値を超えたところでリレーがオフとなる構成となっている。被験者はこの間に感電を感じ、その際の電流値を確認できる構成となっている。

図5に作成したマイコンプログラムのフローチャートを示す。図中のA/DとはA/D変換された電圧値を意味している。初期状態でリレー接点は開いているが、感電体験装置の電源ボタンを押すとマイコンはそれを検知し、リレーをオン状態にする。この際、A/D変換電圧が0.4V以下であればLEDを点滅させる。この電圧検知を2MHz、0.5μs間隔で行い、0.4Vになったところで時間計測を開始すると同時にLEDを点灯状態にする。その後、電流計測を継続し、電圧が2.42Vを超えるか、もしくは経過時間が10秒になったところでリレーをオフとする

一方、LEDを消灯する構成となっている。この電圧値2.42Vは通電電流が0.65mAに対応するものである。なお、電源ボタンを押した際の電圧が最初から2.42Vを超えていた場合にはLEDが点灯しないまま、リレーがオフとなる。

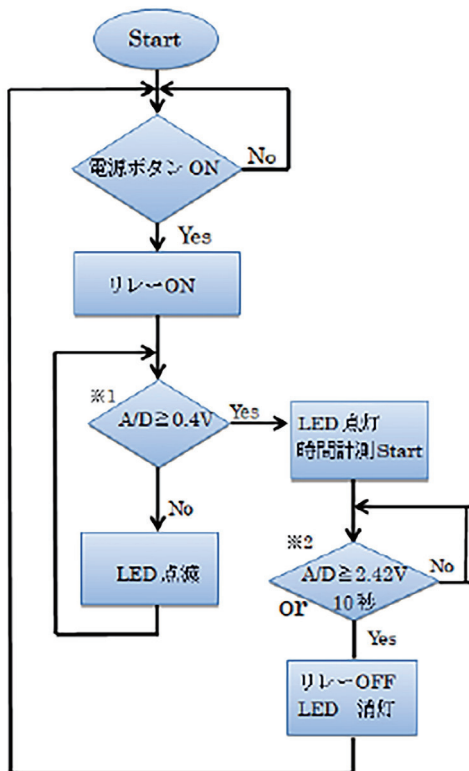


図5 フローチャート

図6はシャント抵抗の両端にかかっている電圧をマイコンに取り込むための整流回路である。今回は遮断電流に対応する電圧の値を概略検知できれば良いので、全波整流回路で整流を行った。回路はブリッジ状のダイオードとコンデンサーで構成されており、ダイオードの整流作用により、直流に変換されていることを確認した。

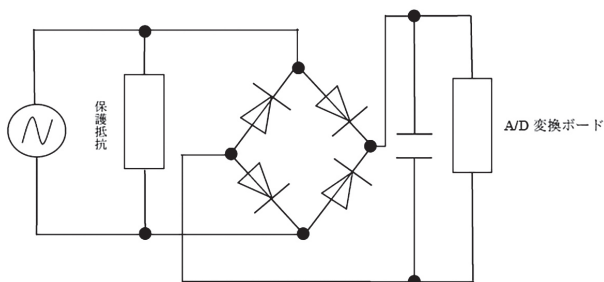


図6 全波整流回路

図7はリレーのトリップを行うマイコンELEGOO UNO R3 Controller Boardの写真である。このマイクロコントローラには14デジタルI/Oピン (6PWM出力)、6アナログ入力端子を有している。また、このマイクロコントローラは、電源電圧を5Vとした時、I/Oポートから500mAの出力が可能である。これを直接リレーに接続し、ON・OFF制御を行った。

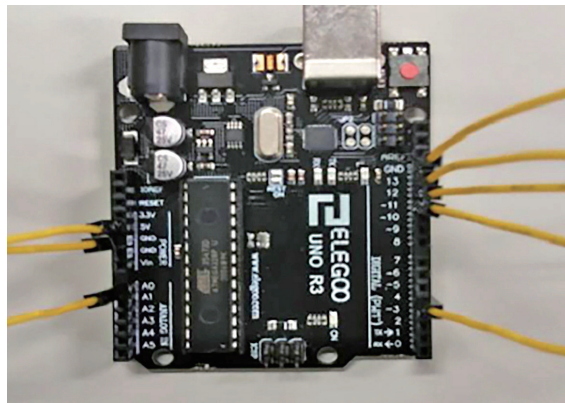


図7 今回使用したマイコンボード

4.3 装置全体写真および動作手順

図8は装置全体写真である。図中の左上は動作状態を示すLEDを内蔵したスタートボタン、その右下には電圧計、装置左は回路計である。



図8 装置全体写真

装置はブルボックスに収められている。筐体の左側に見えるのは二次側の電流計であり、これによって被験者は体感に対応した電流値を読み取ることができる。

動作に当たって、被験者はまず配線用遮断器および漏電遮断器のスイッチがオフであり、さらに誘導

電圧調整器が最小設定（0V）となっていることを確認した上で装置電源コードを商用電源（AC100V）に接続する。この状態で電圧計がゼロであることを確認する。

次に2つの遮断器のスイッチを「入り」にし、電圧計がゼロであることを確認の上、スタートボタンを押す。すると、スタートボタンに内蔵されたLEDが点滅し始める。ここで、感電体感部に右手を当て、徐々に誘導電圧調整器を回して電圧を上げていく。すると保護抵抗間の電圧が約0.4VになったところでLEDが点灯状態になり、そこから時間計測がスタートする。さらに誘導電圧調整器を回して電圧を上げていくと右手にはピリピリとした感電を感じ始める。その際の電流値はテスタに表示されており、電流と感電体感の関係を感じることができる。

誘導電圧調整器をさらに回し、通電電流が0.65mAを超えるとリレーが開放され、通電が遮断される。リレーが開放される前に被験者が右手を電極から離れた場合には、印加電圧が電圧計に表示されたまま電流は流れない状態となる。

一方、通電電流0.65mAに達する前に10秒が経過した場合にはリレーがオフとなり、通電が遮断される。ここでさらに電圧を上げて感電体感を継続したい場合には、この状態からスタートボタンを押し、誘導電圧調整器を回して電圧を上げていく。この場合、スタートボタンを押すと同時にLEDは点灯し、時間計測が開始される。

以上、本装置によって通電電流が0.65mAまでの感電体験をすることができる。

なお、ここで操作を誤って誘導電圧調整器を最大にした状態で右手を電極に当てスタートボタンを押した場合には、瞬間的に0.65mAを超えた電流が流れることになるが、すぐにリレーがオフになるほか、万が一回路が開放されなくても体感部には最大50Vまでの電圧が印加されることになり安全上問題となるような感電は生じない。

5. ポリテックビジョンでの評価

北海道職業能力開発大学校では、毎年2月に学内

外の人に対して大学校の活動を紹介するポリテックビジョンが行われている。この中のイベントの一つとして、専門課程（2年間の教育課程）の総合制作実習や応用課程（専門課程終了後の2年間の教育課程）の開発課題の成果物発表や展示が行われる。

本研究で開発した感電体験装置を、2021年2月20日に行われた第18回北海道ポリテックビジョンにおいて展示・体験コーナーに出展した。図9は感電体験装置の展示を行った際の様子を示した写真である。来場された多くの方に、図10のように実際に感電体験を経験してもらい、図11のように体験感想をお聞きした。

それらの多くは感電時の体感と電流の関係をリアルタイムで感じ取ることができ、目に見えない、また音もしない普段、意識しない電気の存在を確認できる勉強になったというもので、開発した学生にとって、嬉しい評価を多数いただいた。

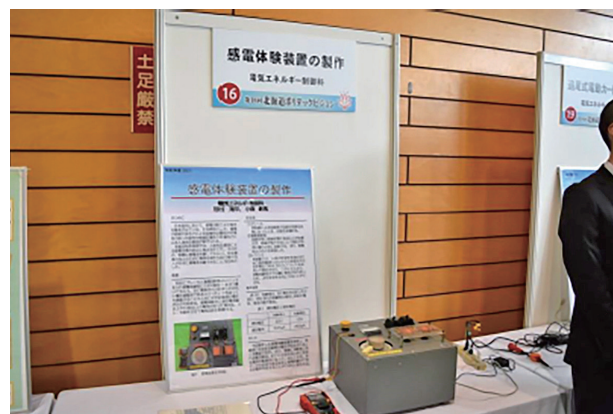


図9 感電体験装置の展示の様子



図10 感電体験装置を操作している様子



図11 体験装置使用後の感想を頂いている様子

また、学生にとっては感電という電気学科では重要なテーマに直接取り組み、電気回路の作成に加えてマイコンによる制御についても体験でき、大いに満足しているようであった。

6. まとめ

電気エネルギー制御科における総合制作実習の一つとして、一般市民が感電の危険性を体験できる装置の開発を行った。最大電流および電圧の設定において、IECによる感電と人体反応領域線図を参考にし、自分たちの体感予備実験に基づいてそれらの値を決定した。装置は商用100Vを電源とし、絶縁トランスによって一次・二次側を絶縁するほか、安全を確保できる電圧値まで降圧した電源をベースとした。これを誘導電圧調整器に接続し、被験者が徐々に電圧を上げる構造となっている。感電体感部は右手指で2カ所を触るようになっており、安全上、手のひら内で通電するように配慮した。通電電流と通電時間をマイコンで計測し、設定した値を超えるとマイコンによってリレーが開放される構造となっている。こうした構造によって、安全な範囲内で感電時のピリピリとした体感と、その際の電圧・電流値を確認しながら、誘導電圧調整器を操作する装置にできた。

学内外の人に対して大学の活動を紹介するポリティックビジョンにおいて本装置を出展したところ、感電時の体感と電圧・電流の関係をリアルタイムで感じ取ることができたことに対して、好評価を得る

ことができた。

また、本学科では所定の科目を習得した学生に対して労働安全衛生法で定められた低圧電気取扱特別教育の修了証を発行しており、その教育に関しても貢献することができた。

さらに、開発に取り組んだ学生にとっては電気回路の作製に加えてマイコンによる制御についても体験することができ、彼らの学習に対して大いに寄与することができた。

今後、本装置を低圧電気の特別教育用教材として活用するほか、一般市民に対する感電災害理解の増進に利用していきたいと考えている。なお、本装置ではマイコンに接続しているながら被験者が手を離す際の電流値や通電時間の記録がなされていない。

今後こうしたデータを記録する機能を付加し感電感覚に関する被験者によるばらつき分析を行うなど、さまざまな解析を試みたいと考えている。

謝 辞

本論文作成にあたり、北海道職業能力開発大学の近久武美校長にご助言をいただいた。ここに特記して感謝申し上げます。

併せて、1年間、積極的に令和2年度の総合制作実習に取り組んでくれた本校電気エネルギー制御科2年生の河村翔平君および小森鉄馬君に感謝いたします。

〈参考文献〉

- (1) 中央労働災害防止協会：低圧電気取扱安全必携 特別教育用テキスト
- (2) CRANE-CLUB：感電及び対策
<http://www.crane-club.com/study/crane/shock.html>
- (3) 安全衛生マネジメント協会
https://www.aemk.or.jp/text_teiatstu/text_teiatstu1-1c.html
- (4) 株式会社明電舎：明電時報 通巻327号 2010 Vol.327 危険体感教育への取り組み
- (5) 株式会社昭和電工：感電体験装置KENTAC 4250説明書

この記事は「北海道職業能力開発大学校紀要第37号（令和4年2月）」に掲載されたものです。