

産業安全研究所研究報告

RESEARCH REPORT OF
THE RESEARCH INSTITUTE OF INDUSTRIAL SAFETY

RR-30-1

水中において下肢強直を起こす電撃の強さと許容限界

—ウサギを水中の電場にさらす水槽実験—

山 野 英 記 本 山 建 雄 田 島 泰 幸

労働省産業安全研究所
MINISTRY OF LABOUR
THE RESEARCH INSTITUTE OF INDUSTRIAL SAFETY

水中において下肢強直を起こす電撃の強さと許容限界

—ウサギを水中の電場にさらす水槽実験—

山野英記 本山建雄 田島泰幸

Level of Electric Shock in the Water Causing the Stiffness of Hind legs to Rabbits

Eiki YAMANO, Tatsuo MOTOYAMA, Yasuyuki TABATA

Workings in the waters are increasing today and the applications of electric power to these workings are also increasing. These situations may prepare the chance of electric shock for the workers. This paper reports on an investigation of the electric shock hazard in the water.

The experiment was conducted in the rabbit to find the level of electric shock which causes the stiffness of hind legs in the water. The 3.5% saline water was filled in rectangular plexiglas tank which had parallel plate electrodes, and the rabbit was placed at the center of the water surface. The applied electric shock was 50 Hz sinusoidal wave and 10 s in duration.

The results of the investigation are as follows.

1) A useful parameter of underwater electric shock is the intensity of electric field in the water, which is found at the position that may be occupied by a living body, however the living body is not there yet.

2) The field intensity of about 8.5 V/m on the average gave rise to the stiffness of hind legs to rabbits in the water having a conductivity of about 5 S/m.

3) The current density of about 44 A/m² on the average gave rise to the stiffness of hind legs to rabbits in the water having a conductivity of about 5 S/m. (The current density affecting to the rabbit highly depends on the water conductivity.)

4) If the field intensity in the water is not greater than 2.5 V/m and the conductivity is not greater than 5 S/m, it will be able to neglect the probability that the stiffness of hind legs will occur.

The field intensity of 2.5 V/m (rms) may be considered as the limit under which no stiffness occurs, within the limits of conditions as follows, similar to the experimental conditions.

a) There is a large bypass of water for the current, greater than 10 times in cross-section area, in comparison with a living body.

b) A living body is apart from the energized part (casing, line, etc.).

c) Shock duration is less than about 10 s.

d) The domain where the field intensity may exceed the limit is not so small.

e) Shocks by the commercial AC power, or the sinusoidal field having a frequency within the range from 20 Hz to 100 Hz.

1. はしがき

海洋に資源・エネルギー・スペースを求める海洋開発は昭和40年代に国家プロジェクトに取り上げられた。すでに海洋は、水産業や海洋科学の調査・研究の対象であるにとどまらず、鉱・工業、建設業などの産業活動の場ないしは対象となりつつある。これに伴い、観測・照明・溶接・工作などに使用される電気機器・工具、また電力を動力とする土木機械などに見られるように、水域における電力の使用も拡大しつつある。

このような状況は、水中における電撃災害の可能性を増大させるものであり、何らかの対策が要求される。

電撃とは悪い影響を生じうる程度以上の電流が生体に流れる事象である。悪い影響としては、感知、筋のけいれん、窒息、失神、心拍停止、呼吸停止、生体組織の損傷などが挙げられ、電撃の強さその他の条件によって影響の程度や形態も異なる¹⁾。

水中の電撃と大気中の電撃とはかなり条件を異にしている。水域においては、漏電部に直接接触しなくても、漏電によってできる水中の電場のため電撃が発生する可能性がある。また水死の可能性があるので、電撃の二次的影響は陸上よりはるかに重大である。皮膚はぬれていて、生体の電気抵抗が減少していることが多い。一方、水中では水のバイパスのため漏れ電流の一部しか生体を通過しない場合が多い。生体を流れる電流は、大気中では電撃の有用なパラメータであるが、水中では測定困難であり実用的ではない。

水中において生体に危害を生ずる電撃の強さは電撃防止対策の基礎ともなる重要な問題であるが、これに関する研究発表は少ない。Smoot及びBentelは現場(水泳プール)に即した安全基準を求め防止対策の効果を調べた²⁾。しかしこの安全基準は、生体に実際に危害を生ずる電撃の実測値から得られたものではなく、人間に対する許容電流を5mAと仮定し、これに対応する電場や電圧を実験によって求めたものである。また、プールにおける動物実験について述べたDalzielの発表があるが³⁾、これも設備と安全装置に重点を置いたもので、生体の危害に対する電撃のしきいを求めようとする系統的な実験ではない。

本研究は、水中において生体に危害を生ずる電撃の強さを調べ、水中電撃の許容限界を求めようとするものである。そのためまず生体への危害として下肢の強直を取り上げ、ウサギを使用して水槽で電撃実験を行った。電撃は商用周波数で持続時間10秒である。下肢

強直が発生しない範囲では、ある程度でも体肢の自由が利き自力で危険水域を脱出できる可能性がある。したがって下肢強直に対する許容限界は実用上重要な指標となる。

2. 実験方法

2.1. 電撃の加え方

Fig. 1の実験方法の概要に示すように、通電装置により電極を通じて水に通電し、水中のウサギに電撃を加える。通電装置は、出力電圧の調整と通電時間の制御を行うもので、連続最大出力150V、114Aである。出力電圧(電撃)は50Hz正弦波で、大きさは通電前に設定する。1回の通電時間(電撃の持続時間)は10秒とした。ウサギの回復を待つため電撃と電撃との間には5分以上の休止時間を置き、電圧を順次増加させて下肢強直が発生するまで電撃を繰り返す。

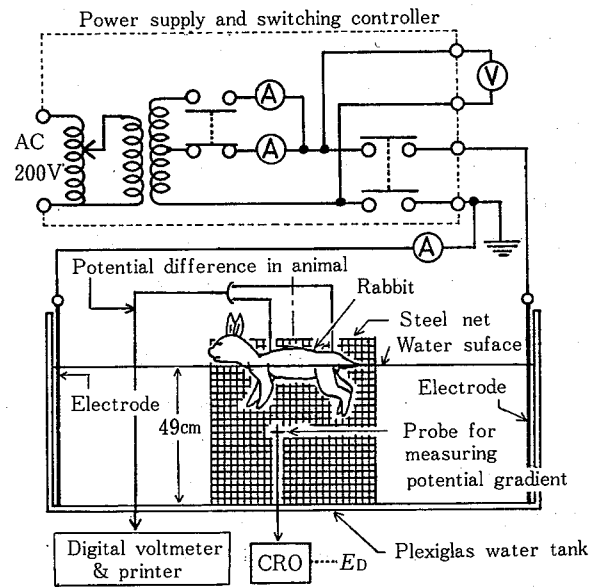


Fig.1 Schematic diagram of apparatus and configurations for experiment.

実験方法の概要

2.2 幾何学的配置と電気的条件

(1) 水槽と水 実験水槽は鉄製フレームで補強されたアクリルの直方体容器で、内側の長さ177cm、幅97.4cm、深さ67.7cmである。通電電極は厚さ1.5mmの銅板で、Fig. 1のように水槽の相対する2面に配置した(いわゆる平行平板型の電極である)。電極間距離は172cmであった。水深はウサギ投入前に48cm、投入後は約49cmとなる。

水は塩水、すなわち並塩*の3.5%溶液(ほぼ海水の

*日本専売公社、塩化ナトリウム95%以上。

濃度に相当)を使用, 1日使用したら取り替える。温度は約30℃とした。このとき水の導電率は約5 S/mとなる。生体の平均的な導電率はこれより1けた程度小さいと考えられる。*

(2)ウサギと金網の配置 ウサギは, 固定台に腹ばいにして体肢を下に降ろした姿勢とし, 水面の中央に位置するようにした。ウサギの胴体の下半分(胸・腹・体肢)は水面下において水に浸っており, 頭と胴体の上半分(背中)は水面上にある。ウサギの配置方向は, Fig. 1のように, ウサギの胴体と通電方向とが同じ(平行)になる方向である。胴体の水に浸っている部分の長さは, 33 cm前後であった。

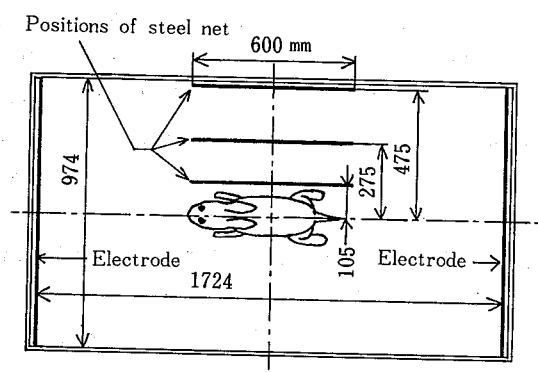


Fig. 2 Positions in which a steel net was located. Net was set vertically and parallel to rabbit.
金網の配置 (平面図)

金網の影響を見るため, 水槽中に金網を置いた場合がある。その配置は, Fig. 2に示すように, 鉛直かつ通電方向に平行とし, 位置は3通りとした。金網は直径2mmの垂鉛めつき鋼線を編んだもので, 1辺が約13 mm(0.5 inch)の正方形の網目をもち, 全体は1辺60 cmの正方形で, 厚さ約4 mmである。

2.3 使用したウサギと下肢強直の判定方法

実験動物は体重2 kg前後のイエウサギである。実験前にネブタール注射液で麻酔し胴体及び体肢の毛を刈っておく。これを固定台に乗せ包帯で縛って固定, 台とともに水槽に入れる。Fig. 3にウサギの固定状態を示す。固定台はプラスチック製である。

実験データはウサギの麻酔がさめてから取るようにした。

電撃の強さがある程度に達すると, ウサギの下肢が後方・斜め下に伸展し, 足の指が伸び開いた状態を呈

*およそ0.3 S/m前後。4)

する。本稿ではこの状態を下肢強直と称し, 発生の有無は肉眼観察によって判定した。下肢強直は電撃印加とほとんど同時に発生する。上肢の強直の様子は下肢ほど判然としなかった。

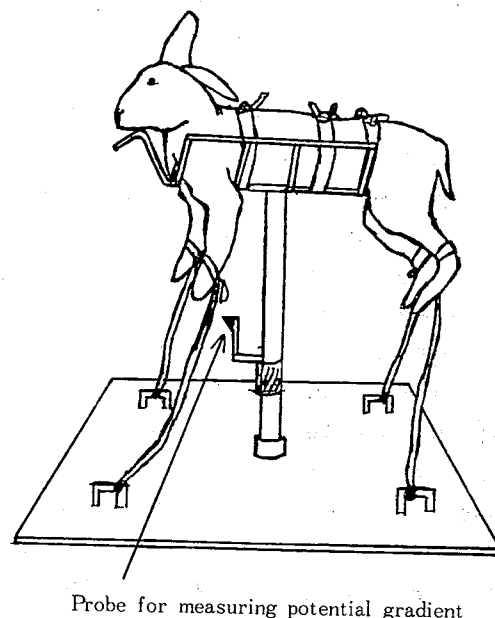


Fig. 3 Rabbit fixed on stand to put in water tank.
ウサギの固定状態

2.4 電撃の強さの測定

(1) 印加電圧 V_s Fig. 1に示した通電装置の出力電圧の負荷時の値が印加電圧 V_s である。測定はデジタル電圧計に通電中の値をホールドさせる方法によった。ケーブル・電流計のインピーダンスは小さいので, V_s は電極間電圧に等しいと考えてよい。(負荷インピーダンス約0.7Ωに対し電流計の内部インピーダンスは0.9 mΩ, または0.5 mΩであった。)

(2) 電流 I_s I_s は通電電極を通じて水に流れた全電流である。測定は可動鉄片型交流電流計(0.5級)によった。

(3) 生体の電位差 V_b 通電方向のウサギの両端に近い部位に検出電極を付け, この電位差をデジタル電圧計とプリンタによって測定, 記録した。電極は長さ23 mmの安全ピンで, 針部以外は体外の水に接している。電極の装着部位は右上肢付け根部の外側と右下肢付け根部の外側とした。また, 水槽にウサギを入れる前に電極間の距離を測定する。

(4) ウサギの真下の電場 E 。電場 E_b は, 4点プロ-

ブとオシロスコープとによって測定した電位差から算出する。4点プローブとは、線分 \overline{AD} , \overline{BD} , \overline{CD} が互いに直交しその長さが1cmとなるように、電極A, B, C, Dの相対位置を固定した検出電極である。電位差 V_{AD} , V_{BD} , V_{CD} から、 $E_x = -V_{AD}/\overline{AD}$ のようにして、電極Dの位置における電場の x, y, z 各成分が求められる。

実験条件から鉛直成分 $E_z \approx 0$ となることが期待される。また非通電時には各成分とも0となるべきである。しかし実測値は誤差のためこのような条件を満足しなかった。ただ、非通電時の各成分の誤差は共通の値を示し、また通電による E_z の変化も認められなかった。そこで、 E_z が各成分に共通な偏りを表わすものと考え、各成分からこの偏りを引いた。こうした後、 $E_D = \sqrt{E_x^2 + E_y^2}$ によって点D近傍の電場(絶対値)が求められる。

電極Dの位置は水槽幅の中心線下(ウサギの真下)で、水深の約半分の深さ(水槽底から26cmの高さ)、二つの通電電極の中点より6cmだけウサギの前方に寄った位置である。

電場 E_D の算出に必要な三つの電位差は、下肢強直が確認された電撃の後、そのままの条件で再度通電し順番に測定したものである。

3. 実験結果と検討

3.1 下肢強直を起こす水中電撃の強さ

3.1.1 実験結果

(1) 実験条件と結果の表 ウサギを使って水槽で行った電撃実験の結果をTab. 1に示す。設定した実験条件、あるいは条件となる因子の測定値を同表の上部(「ウサギの体重」まで)に示した。金網を置かない場合のことを金網の位置 $x = \infty$ と表すことにする。*

表の「印加電圧 V_s 」以下は電撃の強さのパラメータであって、印加電圧 V_s の段階的な増加に対し初めて下肢強直が観察されたときの各パラメータの値(平均)である。 $x = \infty$ の場合についてのみ標準偏差も示した。

印加電圧 V_s , 電流 I_s , 及び生体の電位差 V_b は実験において直接に測定された変数であるが、その他は二次的なパラメータである。

(2) 二次的パラメータとその意味 V_s/l は印加電圧 V_s と通電電極間距離 l との比で、電極間の平均的な電場である。 V_s はウサギの存否によってほとんど変化し

Tab.1 Results of experiment tried on electric shocks in the water. Values in the table show the averages of minimum values causing a reaction counted as stiffness of hindlegs in the rabbit.

下肢強直を起こす電撃の実験結果 (平均)

Position of steel net	x (cm)	∞ ¹⁾	47.5	27.5	10.5
Conductivity of water	κ (S/m)	5.16(0.16)	5.13	4.67	5.17
Depth of water	(cm)	49.3(0.3)	49.7	49.4	49.8
Temperature of water	(°C)	30.3(1.3)	31.2	30.3	31.0
Weight of rabbit	(kg)	2.13(0.28)	2.07	2.17	2.54
Applied voltage	V_s (V)	17.5(2.0)	19.1	25.9	30.7
Current	I_s (A)	24.0(3.1)	32.5	45.8	55.9
Potential difference in animal	V_b (V)	2.29(0.23)	2.41	2.81	1.81
Field intensity (V/m)	V_s/l	10.2(1.2)	11.0	14.9	17.7
	E_D	8.49(1.5)	9.64	10.3	8.78
	V_b/d	8.61(1.1)	9.07	11.3	6.60
Current density (A/m ²)	I_s/S_D	52.1(6.0)	70.1	98.9	121
	$\kappa \cdot E_D$	43.6(7.6)	49.7	47.3	45.5
Frequency of measurement	N	23 ²⁾	10	10	10

1) Value shown in () is standard deviation of each parameter at $x = \infty$.

2) Some parameters have 26 measured values. The parameters V_b and V_b/d have only 5 values.

$l = 1.72\text{m}$ (distance between electrodes), $d =$ distance between detecting electrodes, $S_D = 0.463\text{m}^2$ (cross-section area)

*金網の影響が無いという意味で等価だからである。

ない。したがって金網が無い場合の V_s/l は、電極界面のインピーダンスを無視すれば、ウサギなどを入れる前の水中の電場に等しい。この電場は場所によらず均一であるから、ウサギが位置する場所の、ウサギが存在しないときの電場と考えることができる。

ウサギの真下の水中の電場 E_D の算出についてはすでに述べた。 E_D は4点プローブの電極D近傍の電場であるが、この深さの電場はウサギの存在によってあまり変化しないこと、ウサギの居ないときの電場は鉛直方向にはだいたい均一（2次元の電場）と考えられることなどから、上記と同様に電場 E_D をウサギの場所のウサギが居ないときの電場と考えても大きい誤差は生じない。

V_b/d において、 V_b は（通電方向における）生体両端に近い2点の電位差、 d はその検出電極間距離である。 V_b/d は生体内の平均的な電場に対応する量と考える。^{*}

I_s/S_D において、 S_D は水の断面積 0.477m^2 から4点プローブを通る断面での絶縁物（固定台）の断面積を引いた値である。したがって、 I_s/S_D は4点プローブを通る断面での平均電流密度を意味する。

$\kappa \cdot E_D$ は4点プローブ近傍の電流密度である。

(3) 結果についての考察 Tab. 1の実験条件においては、金網の位置 x を変化させ、他の因子は一定に保つようにした。しかし若干の変動が見られる。

例えば、水の導電率について $\kappa = \infty$ の場合とその他の各場合との母平均が等しいという仮説は、 $\kappa = 27.5\text{ cm}$ のとき有意水準 0.05 （及び 0.01 ）で棄却される。ウサギの体重についても、 $\kappa = 10.5\text{ cm}$ のとき同様に棄却される。

ただ、体重のこの程度の変化は下肢強直を生ずる電撃にあまり影響しない。導電率の影響はパラメータによって異なり、導電率が 10% 減少すると、電場の強さは約 0.1% 増加、電流密度は約 9.9% 減少することが他の実験⁹⁾から推定される。

$\kappa = \infty$ のとき、電極間のコンダクタンス G は、 $G = I_s/V_s = 1.37\text{ S}$ となる。水中は均質とすれば、水の導電率 $\kappa = G/l = 4.95\text{ S/m}$ となり表の測定値に近い値が得られる。

また $\kappa = \infty$ （金網なし）の場合、 V_b/d を生体内の電場、 V_s/l を水中の電場（またはウサギを入れる前の水中の電場）と考え、生体の導電率は水の導電率より小さいので、 $V_b/d > V_s/l$ となることが予想され

^{*}電位差は電場の積分で定義され、その値は積分路に依存しない。しかし V_b/d は d に依存し、特定の条件が満足されねば平均電場とはならない。したがって、上記の対応はかなり大まかなものである。

る。しかし実験結果は反対で、 $V_b/d < V_s/l$ となっている。 V_b/d と E_D との大小関係は上の予想の通りである。

$\kappa = \infty$ のとき電流密度 I_s/S_D と $\kappa \cdot E_D$ の間にもかなりの差が見られる。^{**}前者が平均電流密度で後者が4点プローブ近傍の電流密度であることを考慮しても、これほどの差を生ずる理由は考えにくい。

このように各パラメータは必ずしも相互に整合のとれた関係にはない。これらの不整合は主に、測定誤差とパラメータの物理的意味付けの不正確さとの二つによって生じたものと思う。誤差が大きいと考えられるのは、電場 E_D 、検出電極間距離 d 、導電率 κ などである。また物理的意味の不正確さが特に問題となるのは V_b/d である。

3.1.2 境界条件(金網の位置)の影響

(1) 電撃の各パラメータと金網の位置との関係 下肢強直を起こした各パラメータの大きさと金網の位置 x （の逆数）との関係をFig. 4に示す。横軸の値 $1/x = 0, 2.11, 3.64$, 及び 9.52 m^{-1} が、それぞれ $\kappa = \infty, 47.5, 27.5$, 及び 10.5 cm に対応する。 $1/x$ の変化は一つの境界条件の変化である。縦軸の各パラメータの大きさは、 $1/x = 0$ （金網なし）のときの平均に対する相対値で表わした。図中に示したパラメータの区間は、[平均±標準偏差]の区間を示す。

Fig. 4 (a)において印加電圧 V_s 及び電流 I_s は、 $1/x$ が0から 9.52 m^{-1} まで変化したとき、それぞれ 1.75 倍、 2.33 倍に増加している。このような結果は定性的には容易に予想されたことで、 V_s や I_s のような総括的なパラメータが境界条件に依存することは改めて論ずるまでもない。

平均電場 V_s/l 及び平均電流密度 I_s/S_D も、それぞれFig. 4 (a)の V_s 及び I_s と全く同じ変化をする。 1.75 倍、 2.33 倍の変化は数値的には特に大きいものではない。

若干論旨を離れるが、電撃に対する金網の保護効果を表しているのは印加電圧 V_s の変化と考えられる。 $1/x$ が0から 9.52 m^{-1} まで変化したとき、電極間アドミタンスは 1.37 S から 1.82 S と 1.33 倍に増加している。仮にこのアドミタンス変化は水の導電率によるもので金網は存在しないと仮定すると、生体に影響する電圧 V_s は約 0.2% 減、電流 I_s は約 30% 増となることが、他の

^{**}両者の母平均が等しいという仮説は、有意水準 0.05 で棄却される。

実験⁵⁾から推定される。すなわち、生体に反応を起こす電圧 V_s はこの程度のアドミタンス変化にはほとんど無関係であるのに対し、電流 I_s はアドミタンスによって変化するからである。

$1/x=0\sim 2.11\text{ m}^{-1}$ の区間では、電圧 V_s は9%増加しただけであり、金網はウサギの位置の電場を弱めることにあまり寄与していない。電流 I_s は1.35倍とかなり増加しているが、これは電極間アドミタンスが1.37 Sから1.70 Sと1.24倍に増加したためである*。

金網の保護効果が大きく増加しているのは、 $1/x=2.11\sim 3.64\text{ m}^{-1}$ の区間である。この区間のアドミタンスの増加は4%であって、 V_s 、 I_s の増加はほとんど金網の保護効果によるものと考えてよい。金網の長さは0.6 mであるがその半分の逆数がこの区間にあり、本実験では金網の長さの約半分の距離まで金網の保護効果が及んだということができよう。

Fig. 4 (b) には、4点プローブの電極D近傍の電場 E_D 、及び V_b/d と $1/x$ との関係を示す。これらのパラメータについても、金網の位置によって若干異なる値が得られた。しかし、これらの変動は主に測定や判定に係る誤差であって、 E_D や V_b/d に対する $1/x$ の影響は小さいと考えられる。統計的検定によれば、ウサギの真下の電場 E_D の $1/x=0$ の場合の母平均とその他の各場合の母平均とが等しいという仮説は、有意水準

0.01で棄却されない。

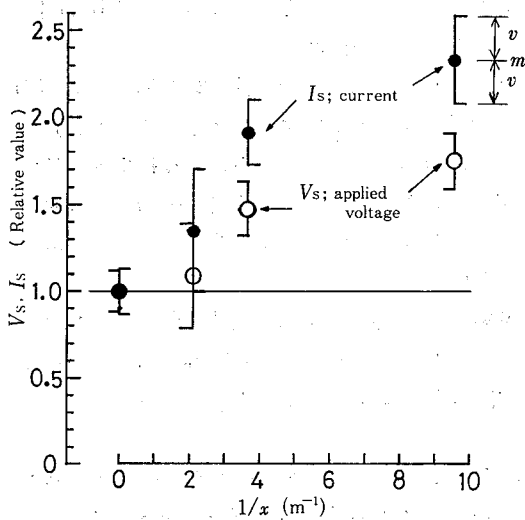
$x \cdot E_D$ も同様に $1/x$ とはほとんど無関係と考えられる。

(2) **本項の結論** 以上に述べたように、下肢強直を起こす水中の電場で、近似的にでもウサギの位置における値(ウサギは不在)とみなせる値は、金網の位置にあまり影響されない。

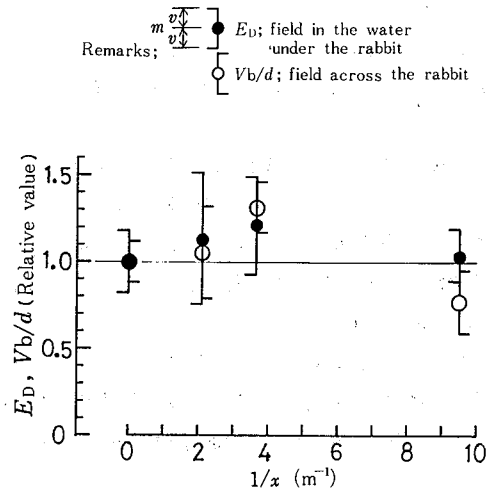
電撃に対する生体の反応は、その反応に関与する部位の生体内電流密度に依存すると考えられるが、この電流密度と上の電場とが強い相関関係にあることは当然予想される。

したがって、水中で生体が位置する(可能性のある)場所の、生体が存在しないときの電場は、水中電撃と生体との関係を論ずるに有用なパラメータと考えられる。この電場は、条件による変化が小さいだけではなく、生体内の電流密度などよりはるかに実用的でもある。

ただし、このパラメータも全く普遍的な尺度というわけではなく、水の導電率その他の条件によって変化する(このパラメータと生体内電流密度とがいつも一定の関係にないからである)。また電場の強さは、電圧や電流に比べると測定困難であり、場所の関数でもあるから、発生場所が一定しない漏電事故の検出などについては特に実用性が高いとも言えない。



(a) The applied voltage V_s and the current I_s , which cause the stiffness, increase with the approach of steel net to the rabbit. V_s/l and I_s/S_D increase the same.



(b) The field intensities E_D and V_b/d have little dependence on the approach of steel net to the rabbit.

Fig.4 Relations between shock parameters and the distance x from the center line to the steel net. Each variable on the ordinate axis is expressed as a relative value to the average of each parameter at $1/x=0$. The interval of a parameter shows that of $(m \pm v)$, where m and v are average and standard deviation, respectively.

金網の位置 x と電撃の各パラメータとの関係

*実海域のように広い場においては、金網の存否によるアドミタンスの変化はほとんどないと考えられる。

3.2 下肢強直に対する水中電撃の許容限界

3.2.1 許容限界の推定

本稿では、まず下肢強直発生の累積確率が小さくなるような電撃の強さを求め、これに安全係数を適用するという2段階の操作によって許容限界を定める。

許容限界は、ウサギが位置する場所のウサギが居ないときの電場を尺度として表すことにする。本実験では、パラメータ V_s/l の金網が無い場合 ($x=\infty$) の値がこれに当たると考えられる。

下肢強直が初めて起った V_s/l の累積頻度を正規確率紙にプロットすると、Fig. 5 のようにだいたい直線(右側の直線)となり*、これらのデータに正規分布が適合することを示している(図において、データ数 N とデータを示す点の数とが一致していないのは同じ値のデータがあるためである)。

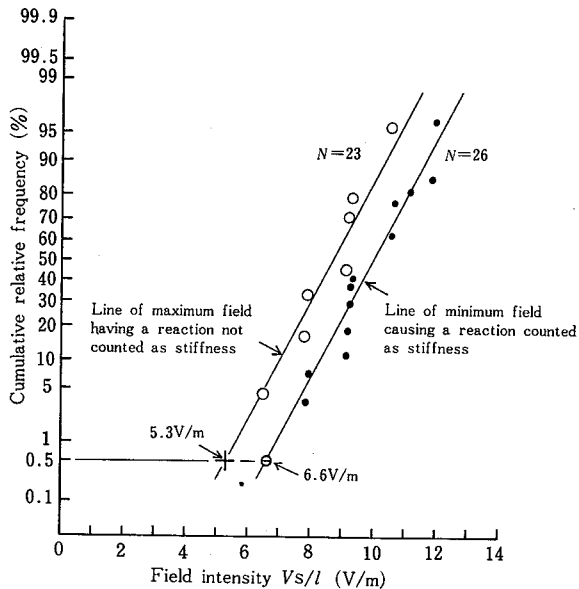


Fig. 5 Cumulative distributions of the field intensity causing the stiffness of hindlegs and the intensity at which the stiffness was not confirmed (in case of the absence of steel net). They are plotted on the normal probability graph paper. AC shocks (50 Hz, 10 s) were applied to the rabbit in the water. 金網を置かないときの電場 (V_s/l) の累積頻度。ただし、左側(○)は下肢強直が確認されなかった最大の電場、右側(●)は下肢強直が確認された最小の電場を示す。

*印加電圧を段階的に変化させたが、その影響がデータの分布に現れている。

Dalzielは、正規確率紙上の直線を左下に延長し、穏当と思われる安全限界として、累積頻度が0.5%となるような横軸の値(0.5%点という)を採用した⁹⁾。前記の直線によれば、 V_s/l の0.5%点は6.6 V/mである。

下肢強直が発生した電撃の1回前の電撃における V_s/l の値、すなわち下肢強直未発生と判定された最大の V_s/l をプロットすると、Fig. 5の左側の直線が得られる。これから、累積頻度0.5%を与える V_s/l の値を求めると、5.3 V/mとなる。

実際的には、下肢強直の発生・不発生よりも、下肢の自由が利くかどうかの方が重要な問題である。本研究では前者を実験対象としたが**、下肢強直発生と判定される前に、すでに十分な下肢の自由は失われていると考えられる。

また水中の真の電場は、電極の界面インピーダンスのため、 V_s/l より多少小さいことが予想される。

このような点を考慮し、Fig. 5の左側の直線から得られた0.5%点(5.3V/m)を安全係数2で割り、結果を切りよい数値にすると、2.5V/mという値が得られる。***

この2.5V/m(実効値、波高値では3.5V/m)を採れば、この値以下の電場においては下肢強直の発生確率は十分に小さいと考えられる。したがってこの値を下肢強直に対する水中電撃の許容限界とする。許容限界の範囲では下肢の自由が利く可能性も大きいと考えられる。

ちなみに、Fig. 5の左側の直線を左下に延長すると、2.5V/mに対応する累積頻度は 10^{-6} となる。

3.2.2 許容限界に関する検討

(1) 分布曲線を直線とすることについて 正規確率紙上のデータに直線を当てはめて0.5%点を求め、これを安全限界とするDalzielの方法については、批判的な意見もないわけではない***しかし、生体に関するデータが大きければつきを伴い、これに類する何らかの統計的推論が避けられない以上、上の方法は比較的妥当な方法と思われる。

第1の批判は、厳密には正規分布が全区間に適合しないのに正規分布とみなすことへの批判である。すなわち累積分布曲線は、部分的には直線のように見える

**動物の下肢の自由が利くかどうかを判定する実験は、より複雑な手順を要し、結果のあいまい性が増加すると考えた。

***結局、安全係数を2.12としたことになる。

****特に、Dalzielがこの方法から出発して推定し提示した心室細動に対する安全限界と通電時間との関係(大気中、人間)⁶⁾について異論が唱えられている。⁷⁾⁸⁾

が、頻度が小さくなると(約1,2%以下)急傾斜で落ち込み、頻度が大きい方では傾斜が緩やかとなるような曲線であることが指摘されている⁶⁾。特に心室細動の場合には、頻度が約50%以上になると緩やかな傾斜となってしまう⁶⁾。

しかしこの分布曲線は、累積頻度が小さい領域では、確率紙上で直線よりも右下にあるため、直線近似による0.5%点の推定は安全側に偏った小さい値を与えることになる。したがって、累積頻度が小さい領域で直線から離れるデータはごく少数であるのに、無理に他の分布関数を推定するよりも(本稿程度のデータではそれもできない)、直線近似の方が安全な方法なのである⁸⁾。

(感知や手の離脱に関するDalzielのデータ(それぞれ167個, 134個)は、心室細動の場合に比べ、頻度が大きい領域で直線に対する適合性が非常によくなっている⁹⁾。離脱と同じく筋のけいれんに基づく現象である下肢強直もFig. 5に示したように直線に適合する範囲が大きい。直線からずれるのは両端のごく一部のようなのである。)

(2) 0.5%点について 本稿の範囲で問題となるもう一つの批判は、安全限界として0.5%点は大きすぎはしないかというものである。これに対してはまず、累積頻度0.5%は直線近似によって得られた値であり、0.5%点の真の累積確率はさらに小さいことが挙げられる。前述のように、DalzielまたはBiegelmeierが示した累積頻度分布を見ると、頻度が約1,2%より小さくなると真の分布曲線は急傾斜で落ち込む傾向にあることが認められるからである。⁶⁾

また、電気刺激に対する神経・筋細胞の応答(興奮)は、刺激の強さがあるしきい値以上でなければ発生しないという生理学の基礎的事実^{**}から、下肢強直を起こす電撃の強さを確率変数 X とすると、ある正の値 x_0 に対し累積確率 $P\{X \leq x_0\} = 0$ となるような分布が予想される。すなわち、分布関数を $F(x)$ とすると、

$$\begin{cases} x = x_0 \text{ のとき } F(x_0) = P\{X \leq x_0\} = 0 \\ x > x_0 \text{ のとき } F(x) = P\{X \leq x\} > 0 \end{cases}$$

となる分布である。このような累積分布は、前記の傾向及び0.5%点の真の累積確率はかなり小さいという主張を支持するものである^{***}。

しかし、0.5%点を得られたとき、その値がどのようなサンプルについてどのような条件の下で得られたか

* 分布曲線の全体あるいは下半分を直線で近似する。

** 例えば、全か無かの法測¹⁰⁾。

*** Dalzielは、0.5%点のことを母集団における最小値とおぼしい値(離脱電流)とも言っている。

については十分な注意を要する。統計学の範囲では、サンプルが代表する母集団以外の集団にまで、同じ値を適用したりすることはできないからである。

0.5%点の妥当性については次のような説明も可能である。すなわち、水中の作業者の周辺で漏電が発生しこれによる電場が限界に達するまでにはいくつかの段階と条件があり、電撃災害として全体を見ると、例えば年間・1人当りの被災確率のようなものは相当に小さくなるという説明である。また、設備・機器の安全設計において不明確な問題はほかにもあり、それぞれに安全係数が適用されていると、全体としてはかなり大きい安全係数になるという説明¹¹⁾も上記に類似の発想である。この場合に注意すべきことは、一般に災害の因子は多く考えられても、災害の発生にはその一部で十分なこと(災害発生は因子すべての論理積ではないこと)である。

0.5%点に対する危惧を軽減するもう一つの方法は安全係数の適用である。これは、安全性を高めるために他の問題でもよく使用される工学的手法であり、上記の議論より単純でまた有用と言えるかも知れない。ここでの安全係数は、0.5%点を基準強度として、基準強度と許容限界との比で定義される。これによってより小さい値を許容限界としたとき、前記の検討から、真の累積確率は正規分布(直線)の場合より大きく減少することが期待される。

(3) 他のデータとの比較 ウサギの真下の電場 E_D のデータ(金網の位置によらず全部を一括したデータ)からは、Fig. 6のような累積頻度分布が得られる。これによれば E_D の0.5%点は4.1 V/mとなる(金網なしの場合のデータだけでもほとんど同じ値になる)。4.1V/mは前項で定めた許容限界2.5V/mの1.64倍である。

Smoot及びBentelによれば、導電率約4.5S/mの塩水中において成人男子(2人)が下肢の自由を失った電場の強さは6.96及び8.79 V/m^{***}であるという¹²⁾。これら2個のデータを正規確率紙にプロットして直線を引き、0.5%点を求めると2.5V/mとなる。したがって、前記の許容限界をそのまま人間に適用しても小さすぎる不都合はないと考えられる。

*** 原文では、2.12V/ft及び2.68V/ft。

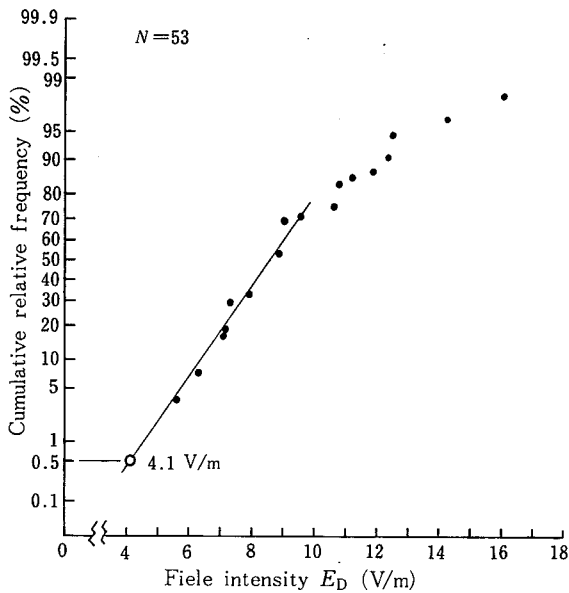


Fig. 6 Cumulative distribution of the field intensity under the rabbit giving rise to the stiffness. The intensity was obtained by a probe which was composed of four electrodes to detect the three components of the potential gradient.
下肢強直が確認されたときの、ウサギの真下の電場 E_D の累積頻度分布

3.2.3 許容限界の適用範囲

電場の強さ2.5V/mを下肢強直に対する許容限界とすることができるのは、実験条件その他から考えて、次のような条件の範囲内と考えられる。

- 1) 生体に対し10倍程度以上の断面積をもつ水のバイパスがある。
- 2) 生体は漏電部、または共通極に接続された導体に接触しない（水を介した電撃）。
- 3) 電場が限界を超過する領域（危険領域）はある程度以上の大きさをもつ。
- 4) 電撃の持続時間は10 s程度以下。
- 5) 導電率が5 S/m程度の塩水中。
- 6) 商用周波数、あるいは20~100Hz程度の正弦波の電場。

ただし生体については特に悪い状態にないとする。

許容限界、あるいは一般に生体の反応のしきい値は商用周波数でほぼ最小の値であり、¹⁾条件6)の範囲外の周波数では許容限界は大きくなる。水の導電率が条件5)より減少しても許容限界は増加し、水道水で約3倍となった²⁾。逆に導電率が増加しても許容限界はあまり減少しない³⁾。また使用した水の濃度3.5%（ほぼ海水

*他の実験結果⁵⁾から推定される。

に相当)を大きく上回る濃度の水は天然の水域にはあまり存在しない。

したがって、条件5)及び6)は最小値に近い許容限界を与える条件と考えられる。

また許容限界は、持続時間が 10^{-3} ~10秒程度の区間ではほとんど変化せず、10秒以上でも変化しない可能性が大きい^{**}。持続時間が相当に大きい場合には限界未達でも電撃の途中から下肢強直が発生するというようなことがあるかも知れない。

水のバイパスが小さいときには、しきいとなる電場の強さは異なるはずである。生体内電流密度と生体が存在しないときの電場との関係は、境界の影響によって変化すると予想されるからである。また水のバイパスが小さいときには、生体の存否によって漏電回路の抵抗が変化するため、しきい値は漏電電源の特性^{***}にまで依存することになる。

4. むすび

水槽実験によって、ウサギを水中の電場にさらした場合に下肢強直が発生する電撃の強さを調べ、これをもとに許容限界を求めた。水槽は両端に平行平板電極を配置したアクリルの直方体容器である。これに塩水（並塩の3.5%溶液でほぼ海水の濃度に相当）を満たし、水面の中央にウサギを配置した。電撃は50Hz正弦波、持続時間10秒である。

またウサギと平行に金網を配置して、電撃の各パラメータの変化を見た。

研究の結果を整理すると以下ようになる。

- 1) 水中で生体が位置する（可能性のある）場所の、生体が存在しないときの電場は、ある程度の普遍性と実用性とを兼ね備え、水中電撃と生体との関係を論ずるに有用なパラメータと考えられる。（印加電圧、電流、平均の電場、あるいは電流密度は、境界条件や水の導電率によって変化する。）

2) 水の導電率が約5 S/mのとき、ウサギの下肢強直を起こす電場は、（測定法により多少異なるが小さい方を挙げると、）平均約8.5V/mであった。

3) 水の導電率が約5 S/mのとき、ウサギの下肢強直を起こす電流密度は、平均約44 A/m²であった。

4) 結論；水の導電率が5 S/m程度以下であれば、2.5V/m（実効値）以下の電場において下肢強直が発生する確率は十分に小さい。したがってこれを下肢強直

**人間の骨格筋のクロナキシーやWeissの式などから¹⁾

***負荷抵抗（または電流）と電圧との関係など。

に対する許容限界とすることができる。またこの値を人間に対する許容限界とすることができる。

許容限界以下の電場においては、下肢のみではなく上肢・手などの自由が利き、自力で危険な領域を脱出できる可能性が大きい。

(昭56.9.10受付)

文 献

- 1) 田中隆二, 市川健二 ; 電撃危険性と危険限界, 産業安全研究所安全資料 (RIIS-SD-70-1), (1970)
- 2) Smoot, A.W., Bentel, C.A.; Electric Shock Hazard of Underwater Swimming Pool Lighting Fixtures, IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, **83**, 945-964, (1964)
- 3) Dalziel, C.F.; Electric Shock Hazards of Fresh Water Swimming Pools, IEEE Transactions, **IGA-2**, 4, 263-273, (1966)
- 4) Geddes, L. A., Baker, L. E.; The Specific Resistance of Biological Material—A Compendium of Data for The Biomedical Engineer and Physiologist, Med. & Biol. Engng., **5**, 271-293, (1967)
- 5) 山野英記 ; 水中のウサギに危害を生ずる電撃の強さ, 電気学会環境・安全研究会資料 (ES-81-3), (1981)
- 6) Dalziel, C.F., Lee, W.R.; Reevaluation of Lethal Electric Currents, IEEE Transactions, **IGA-4**, 5, 467-476, (1968)
- 7) Biegelmeier, G., Rotter, K.; Elektrische Widerstände und Ströme im menschlichen Körper, Elektrotech. Maschinenbau, **88**, 3, 104-114, (1971)
 または, 竹谷是幸 ; 感電電流の安全限界に関する研究の歴史と現状, オーム, **60**, 1, 108-116, (1973)
- 8) Koeppen, S., Tolazzi, H.; Elektrounfälle und ihre Einflußgrößen aus medizinischer Sicht, Elektrotech. Z.-B, **18**, 6, 168-173, (1966)
- 9) Dalziel, C.F.; Electric shock hazard, IEEE spectrum, **9**, 2, 41-50, (1972)
- 10) 内菌耕二 ; 生体の電気現象 [I], コロナ社, (1967)
- 11) French, R. X. による Discussion, [Dalziel, C.F.; Threshold 60-cycle Fibrillating Currents, AIEE Trans. on Power Apparatus and systems, **79**, 667-673, (1960)]

UDC 614.825:621.316:626.02

水中において下肢強直を起こす電撃の強さと許容限界

—ウサギを水中の電場にさらす水槽実験—

山野英記 本山建雄 田島泰幸

産業安全研究所研究報告 RIIS-RR-30-1 (1981)

水槽実験によって、ウサギを水中の電場にさらした場合に下肢強直が発生する電撃の強さを調べ、これをもとに許容限界を定めた。

水槽は相対する側壁内側に平行平板電極を備えたアクリルの直方体容器である。これに塩水(3.5%の並塩溶液で、ほぼ海水に相当する)を張り、水面の中央にウサギを配置した。電撃は50Hz正弦波、持続時間10 sである。

水の導電率が約5 S/mのとき、ウサギに下肢強直を起こす電場は平均約8.5V/mであった。ウサギ(及び人間)に対する許容限界(下肢強直を起こさない電場の上限)は2.5V/mと推定される。(図6, 表1, 文献11)



UDC 614.825:621.316:626.02

Level of Electric Shock in the Water Causing the Stiffness of Hind legs to Rabbits.

YAMANO E., MOTOYAMA T., TABATA Y.

Research Report of the Research Institute of Industrial Safety.

RIIS-RR-30-1 (1981)

An experiment was conducted in the rabbit to find the level of electric shock which causes the stiffness of hind legs in the water, and the allowable limit was determined.

The 3.5% saline water was filled in rectangular plexiglas water tank which had parallel plate electrodes, and the rabbit was placed at the center of the water surface. The applied electric shock was 50 Hz sinusoidal wave and 10 s in duration.

The electric field intensity of 8.5 V/m on the average gave rise to the stiffness of hind legs to rabbits in the water having a conductivity of 5 S/m. The field intensity of 2.5 V/m may be considered as the allowable limit.

(6 Figures, 1 Table, 11 References)