

UDC 614.825 : 621.316 : 626.02

水中のウサギが窒息を起こす電撃の強さ
—水及び生体配置による発生限界の変化*—

山 野 英 記** 本 山 建 雄**

Threshold for Electric Shocks under Water
Causing Suffocation of Rabbits

—Change of Threshold due to Conductivity of Water and Body Arrangements*—

by Eiki YAMANO** and Tatsuo MOTOYAMA**

Working in water such as the sea or a river and the use of electricity in such areas are increasing in recent years. These situations may lead to hazards of underwater electric shock for divers and other workers. This paper reports on an investigation of such hazards.

An experiment was conducted with rabbits, using plexiglass water tank to find the threshold of suffocation for underwater electric shock. The rabbit was submerged in water and placed between two parallel plate electrodes arranged in the tank. Then, electric shocks were applied to the subject by passing the current through the water between the electrodes. Shock currents were 50 Hz a.c. and 10 s in duration. The temperature of water was at 30°C throughout the tests.

Salt water of 3.5% or tap water was used in the tests, and the body of the rabbit was so arranged that it was parallel with or perpendicular to the direction of current. The threshold, in this study, was expressed in 6 parameters and the changes of the threshold in different parameters due to the test conditions were compared with each other.

The results of the investigation are summarized as follows;

(1) When the rabbit body was arranged in parallel with the direction of current in salt water, the mean threshold of suffocation was observed to be 22.1 V/m in underwater field intensity, or 127 A/m² in current density, or 6.0 V in potential difference on the subject.

(2) The thresholds for perpendicular body arrangement were greater than those for parallel by about twice in the field intensity and in the current density.

(3) When the conductivity of water was decreased from 6.0 S/m to 27 mS/m, the threshold field intensity increased by 3 ~ 4 times, and the threshold current density decreased to a 70th~60th.

(4) Change of threshold in potential difference on the subject, depending upon conductivity of water and body arrangement, was observed to be less than the changes in other parameters.

(5) The lower limit of threshold of suffocation for rabbits was estimated to be 10 V/m in the field intensity of 10 s shock duration.

The upper limit of field intensity which allows a certain degree of respiration is less than 10 V/m and assumed to be about 5 V/m. (Free respiration may be sustained at 2.5 V/m which will allow the subject for voluntary movements.)

Keywords: Industrial safety, Electric shock, Threshold, Underwater work, Diving operation, Offshore engineering

* 第12回安全工学研究発表会 (1979) において発表

** 電気研究部 Electrical Safety Research Division

1. はしがき

海域での調査、建設工事、敷設物の保守、あるいはサルベージなどにおける潜水作業では、照明、観測、アーク溶接、酸素アーク切断、その他の目的に電気が使用される。また、水中ブルドーザなどの土木機械、水中ポンプ、電気防食装置などにも電気が使用される。

このため、電気の使用法を誤ったり、故障が生じたりすれば、電撃その他の電気災害の生じるおそれがある。水中における電撃の危険性は、海域における作業に限らず、プール、池、河川、湖沼などの淡水域の作業においても問題である。

また、安全上の不安から現在は使用されていないくても、水域での電気使用の潜在的需要はかなり高いものと考えられ、この意味からも、水中で安全に電気を使用するための安全対策を確立することは重要と考えられる。

水中において生体に危害を及ぼす電撃の強さは、電撃の防止対策の基礎ともなる重要な問題であるが、これに関する実験的検証の報告は少ない。本研究は、水槽実験によって生体に対する水中電撃のしきいを調べ、水中の電撃危険性を解明しようとする一連の研究の一部である。

本研究では、水中の均一な電界にウサギを暴露した場合に窒息の生じる電撃の強さを測定した。実験は、水の種類（塩水と水道水）及び通電方向に対する身体の配置を変えて行った。また、水中の電撃による窒息の発生限界（しきい）を後述の2.4において示す6個のパラメータで表し、これらの限界の条件による変化を比較した。

なお、下肢強直を指標とした実験と、これによる可随限界の推定については、既に報告を行った通りである。

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、印加電圧の調整と通電時間の制御を行うもので、連続最大定格出力150V、114A、または600V、1.75Aである。出力電圧はAC50Hz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。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窒息（または心拍停止、呼吸停止）が発生するまで電撃を繰り返す。

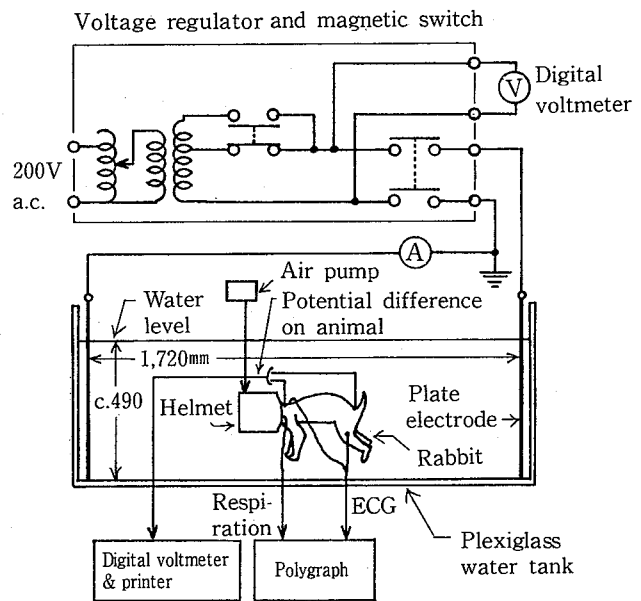


Fig.1 Schematic diagram of the experimental setup.
実験方法の概要

2.2 水槽内の条件とウサギの配置

2.2.1 水槽と水

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（いわゆる平行平板電極である）。電極間距離は172cmである。水深はウサギ投入前に48cm、投入後は約49cmとなった。

水には、塩水または水道水を使用、1日使用したら取り替えた。塩水は並塩（塩化ナトリウム95%以上）の3.5%溶液で、ほぼ海水の濃度に相当する。水温は30°Cとした。このとき、塩水の導電率は6 S/m、水道水の導電率は約27mS/mであった。

生体の平均的な導電率は0.2~0.8 S/mくらいと考えられ²⁾、塩水より小さく水道水より大きい。また、水道水の導電率には時期的な変動が見られた。

2.2.2 ウサギの準備

実験には体重の平均が2.26kgのイエウサギを使用した。体幹長（横に寝かせたときの鼻先から尾の付け根までの長さ）は平均42.5cmであった。

ウサギは実験前に、ネブタール注射液で麻酔し、寸法測定の後、バリカンで胴体及び四肢の毛を刈り取った。しかし実験には麻酔の覚めたものを使用し、覚めるのが遅い場合はウサギを取り替えた。また、実験において電

撃による窒息などが生じた場合も取り替える。

ウサギは、Fig. 2 に示すように、固定台に腹ばいにして体肢を下に降ろした姿勢とし、頭に潜水ヘルメットをかぶせ、包帯で台にしばりつけて固定した。固定台はプラスチックフレームの台にかご形のフレームを固定したもので、さらにこれを、おもり及び位置設定用のアクリル板に固定した。

潜水ヘルメットは、凸字形に突起（取っ手）の付いたふたをもつ円筒形のアクリル容器を改造したもので、ふたの突起の天井部（直径約 8 cm）をぬき、ここに、直径約 2.5cm のあなを開けたゴムシートをかぶせてゴムバンドで留めた。ゴムシートの穴にウサギの首を通す。ヘルメット内にはあごの乗る位置に水切り板を設け、その下の壁に数個の排気孔（約 1 mm ϕ ）を開けた。空気は、3 W の送気ポンプによりビニールチューブを通じて連続的に供給される。ヘルメット内の圧力は深さ約 27cm の排気孔の外圧にほぼ等しい程度と考えられる。

潜水ヘルメットを装着しても呼吸はあまり変化しない。しかし、水に沈めると、多くの場合呼吸数が 20% くらいも減少し、呼吸曲線の振幅にも減少が見られた。ただし、電撃がなければ、水中においても呼吸のリズムは安定しており、5 時間の潜水後でもすぐに歩きだすほど活動力があつたことから、ヘルメットと潜水の影響は特に考慮していない。

2.2.3 ウサギの配置

ウサギは固定台ごと水中に配置する。ウサギは水槽の中央に位置し、胴体中心が水深の約半分の深さになるようにした。ウサギの身体の方向は、Fig. 1 のような通電方

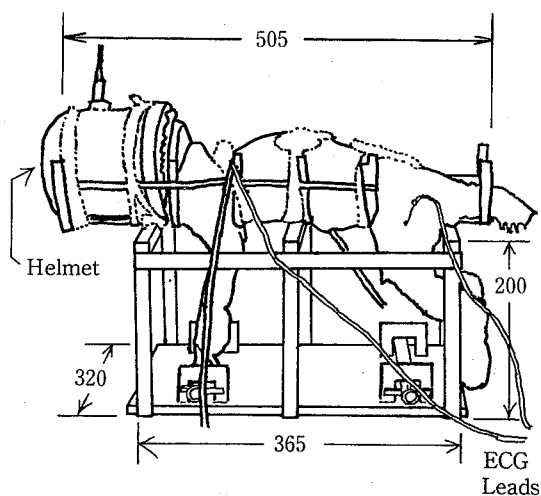


Fig. 2 Method of fixing a rabbit to set in water. A rabbit wearing helmet is bound on the plastic frame with bandage.
ウサギの固定状態（単位：mm）

向と胴体とが平行になる方向と、垂直になる方向（水槽の横方向）との 2 通りとした。

固定台上段のかご形フレームの長さは約 50cm であるが、水中に露出しているウサギの首から尾の付け根までの長さは 30cm 程度、胴体の幅は約 10cm であった。また、絶縁物であるヘルメットの外側の寸法は、直径 12.5 cm、ふたの突起を含む長さ 16cm である（突起部は長さ 1.5cm で 9.3 cm ϕ ）。

ウサギ投入時の水の断面積は約 0.477m² であるが、中央断面内には固定台やアクリル板（厚さ 1.5cm、長さ 97.1cm、幅 68.5cm）などの絶縁物がある。これらの断面積を差し引くと水槽中央での断面積は、平行な配置のとき 0.448m²、垂直な配置のとき 0.439m² となる。

2.3 窒息（または呼吸停止、心拍停止）発生の判定方法

2.3.1 電撃による呼吸・心拍の停止現象

印加電圧を段階的に増加させていくと、ウサギの体肢が強直けいれんを起こす。さらに呼吸困難が生じ、ついには呼吸が停止するようになる。

呼吸運動の停止には二つのタイプが観察される。第 1 は通電が終ると直ちに呼吸が回復するタイプで、これを窒息と呼ぶ。第 2 は電撃終了後も呼吸の停止が持続するタイプで、これを呼吸停止と称する。呼吸停止は呼吸中枢の異常によるものと考えられる³⁾。

印加電圧の増加に対し、平均的には窒息のほうが先に起こり、呼吸停止や心拍停止はさらに強い電撃によって生じる。しかし、実験においては、窒息の発生が認められる前に心拍停止の発生した例が 2 例あった。（これらのデータも実験結果に含めた。）

心拍停止は、心臓からの血液の拍出が無くなるかまたは極端に減少して、循環が停止する現象である。一般に心室細動、重症の徐脈、及び心静止（Cardiac standstill）に分類される⁴⁾⁵⁾。

2.3.2 窒息、呼吸停止、及び心拍停止発生の判定及び区分

本研究では、10秒間の電撃持続中に 1 度も呼吸せず電撃後回復したものを窒息とする。

呼吸の検出には Fig. 3 のような呼吸検出マスクを使用した。マスクは、ウサギの鼻と口の部分にかぶせ、ゴムひもで頭に固定するもので、先端上部のあなに合わせて鼻孔型呼吸ピックアップを取り付けた。鼻孔型呼吸ピックアップは、呼気と吸気の温度差をサーミスタにより電気信号として検出するものである。また、呼吸の記録を見なくても、ヘルメットから出るあわの断続（または増減）

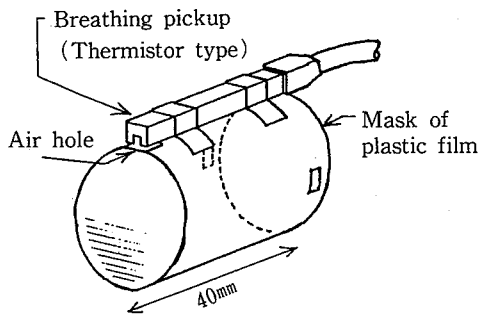


Fig.3 Mask fitted on rabbit nose for detection of respiration.
呼吸検出マスク

によって呼吸のあることが分かる場合も多い。

検出の方法上、得られる呼吸信号は呼吸気量を定量的に表わすものではない。また、窒息の発生は、突然の不連続な呼吸の変化というより、むしろ呼吸信号の振幅や呼吸数が印加電圧の増加に従ってだんだんと減少する連続的な変化に近い。したがって、呼吸有り無しとの判別には多少の偏差が伴う。実験では、原因が呼吸である可能性があっても、その振幅が電撃前の10分の1以下の場合には呼吸無しとみなした。

窒息と判定された例の、電撃前後の呼吸曲線と心電図を Fig. 4 に示す。通電中の小さい波は心拍性的変動である。

電撃後ある程度時間を経て呼吸が回復するものは軽度の呼吸停止と考えられるが、60秒未満で回復したものの(2例)は窒息に区分した。60秒以上たつて回復した例はない。呼吸が回復しなかったものは窒息と呼吸停止の

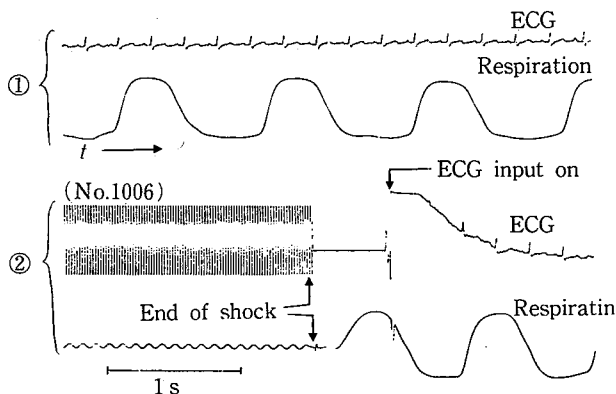


Fig.4 Samples of ECG and respiratory oscillograms before and after electric shock which caused suffocation

① : Before the shock ② : During and after the shock

電撃前後の心電図及び呼吸曲線の1例(窒息発生の場合)

併発とした。

心拍停止の内、心室細動の発生は心電図により判別される。その他、呼吸の記録と比較して、心拍の異常が即死の原因と見られたもの(2例)は心拍停止に区分した。

2.4 電撃の強さを表すパラメータ

実験における電撃の強さを表すために次の六つのパラメータを使用した。

(1) 印加電圧 V_s 。負荷時(水槽に通電中)の電源電圧がこれである。デジタル電圧計に値をホールドさせる方法によって測定した。ケーブル及び電流計のインピーダンスは小さかったので、この電圧を通電電極間の電圧としてよい。

(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, 100A以上は1.5級)で行った。

(3) 生体の電圧差 V_B 。通電方向のウサギの両端に近い部位に検出電極を着け、この間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。検出電極は全長23mmの安全ピンであり、装着部位は、平行な配置のとき首の背中側(潜水ヘルメットのすぐ外の位置)と尾の付け根の背中側との2部位、垂直な配置のとき両わき腹(肋骨の後端上で、背中と腹の midpoint 付近)とした。

また、水槽にウサギを入れる前に検出電極間の水平距離 d を測定した。電極位置の鉛直方向のずれは水平距離の約10分の1以下である。

(4) 水中の電界 E_w 。 E_w は印加電圧 V_s と通電電極間距離(1.72m)との比で、電極間の平均的な電界(の強さ)である。

水槽からウサギを出しても電極間の電圧 V_s はほとんど変化しない。したがって E_w は、電極界面での電圧降下を無視すれば、ウサギを入れる前の水中の電界とみなすことができる。言い換えれば、ウサギの占める位置の、ウサギが存在しないときの電界である。

(5) 水中の電流密度 J_w 。電流 I_s を水の断面積(0.477 m²)で割って算出した。既に述べたように水槽の中央付近では断面積はさらに小さくなるので、断面積を0.477 m²とすることは電流密度を小さめに評価することになる。すなわち、この値に対して水槽中央の平均の電流密度は、平行の場合7%、垂直の場合9%大きい値となる。

(6) 生体の(通電方向の)電位傾斜 V_B/d 。 V_B/d において、 V_B は通電方向の生体両端の電位差、 d はその検出電極間の水平距離である。通電方向に平行に y 軸をとれば、 V_B/d は y 軸方向の電位傾斜($\partial V/\partial y$: 電界の y

成分)の平均に近い量である。また、大局的には2個の電極を結ぶ線も電気力線もY軸に平行と考えれば、大まかではあるが、 V_B/d は生体内の平均的な電界となる。

3. 実験結果と検討

3.1 実験結果

Table 1に実験条件等のまとめを、Table 2に実験結果(窒息の発生限界)を示す。2.3で述べたように、表の

データには、窒息ではなく心拍停止の発生した2例も含まれている。また、呼吸停止あるいは心拍停止の併発した例もある。

Table 2において窒息の発生限界は六つのパラメータで表示されている。このうち・印加電圧 V_s 、電流 I_s 、及び生体両端の電位差 V_B は測定によって直接得られ、他の三つはこれらの測定値と幾何学的条件から算出された。

窒息を生ずる程度の電撃では、ウサギの上肢・下肢は強直し、胴体も伸びぎみの形となる。ウサギは全く身体

Table 1 Experimental conditions and observed effects other than suffocation.
実験の摘要

Kind of Water	Water conductivity (S/m)	Body arrangements in relation to current flow	Temperature of water (°C)	Weight of rabbits (kg)	Number of Samples N
Salt water of 3.5%	6.0	Parallel	30.5	2.16 ± 0.25	23 *1
		Perpendicular	29.7	2.33 ± 0.27	20
Tap water	0.027	Parallel	29.9	2.23 ± 0.24	20 *2
		Perpendicular	30.1	2.31 ± 0.33	20 *3

(Average, or average \pm s. d.)

- * 1 Cardiac arrest concurred in 1 example.
Respiratory inhibition concurred in other 1 example.
- * 2 Cardiac arrest concurred in 2 examples.
- * 3 Cardiac arrest only in 2 examples.
Respiratory inhibition concurred in other 1 example.

Table 2 Threshold of suffocation for rabbits for underwater electric shock. Threshold is expressed in terms of 6 parameters. Shock currents were 50 Hz a.c. and 10 s in duration.

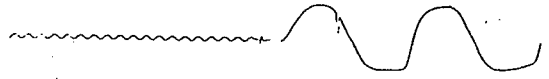
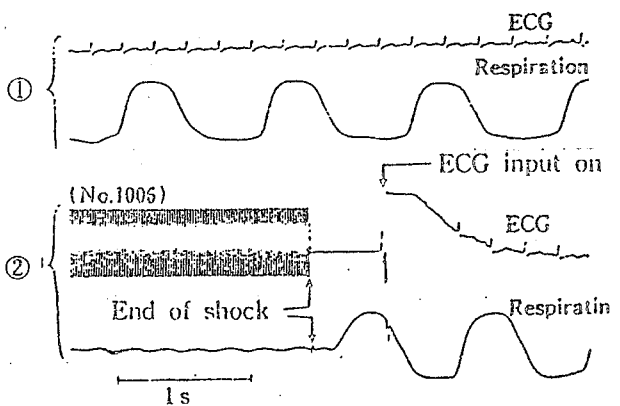
水中のウサギに窒息を起こす電撃の強さ
AC 50 Hz, 持続時間 10s の均一電界に暴露した場合

Conditions		Threshold of suffocation					
Kind of water	Body arrangement	Applied voltage V_s (V)	Current I_s (A)	Potential difference on rabbit V_B (V)	Field intensity in water E_w (V/m)	Current density J_w (A/m ²)	Potential gradient in rabbit V_B/d (V/m)
Salt water	Parallel	38.2 ± 4.9	60.7 ± 8.3	6.01 ± 0.93	22.1 ± 2.8	127 ± 17	20.6 ± 3.0
	Perpendicular	68.2 ± 10.2	110 ± 16	7.15 ± 1.23	39.4 ± 5.9	231 ± 33	70.6 ± 11.0
Tap water	Parallel	109 ± 13	0.821 ± 0.139	8.20 ± 1.31	62.7 ± 7.3	1.72 ± 0.29	27.7 ± 4.6
	Perpendicular	262 ± 30	1.78 ± 0.20	5.25 ± 0.70	151 ± 17	3.73 ± 0.41	53.7 ± 6.7

(Average \pm standard deviation)

— 正 誤 表 —

産業安全研究所研究報告 RIIS-RR-85-12,
 山野, 本山 「水中のウサギが窒息を起こす電撃の強さ」

<p>誤</p>	<p>(p.134, Fig.4 ②の respiration (呼吸) の波形)</p> 
<p>訂正後</p>	 <p>Fig.4 Samples of ECG and respiratory oscillograms before and after electric shock which caused suffocation ① : Before the shock ② : During and after the shock 電撃前後の心電図及び呼吸曲線の1例(窒息発生の場合)</p>

の自由を失い、上記のように呼吸停止などで即死した例もあった。

実験の範囲では、窒息の発生限界と体重との相関は認められなかった。他の確率的因子によるばらつきのほうが大きい。

3.2 検討

3.2.1 各パラメータで表した発生限界の条件による変化

Table 2の塩水及び水道水それぞれの場合について、パラメータごとに、身体の配置方向による窒息の発生限界の変化を、平行の場合の発生限界に対する垂直の場合の発生限界の比で表すと、Table 3の左側の2列(A列とB列)のようになる。また、Table 3の右側の2列(C列とD列)には、身体の配置方向が平行及び垂直の各場合についての、水の種類による発生限界の変化(比)を示す。変化(比)は塩水の場合の発生限界を1としたときの水道水の場合の値である。

また Fig. 5は、塩水・平行の場合の平均を1と置いてこれに対する比で各場合の発生限界(平均と最大・最小)を表したものである。パラメータごとに、左から順に塩

水・平行、塩水・垂直、水道水・平行、水道水・垂直の各場合の発生限界が示されている。

(1) 身体の配置方向の影響 Table 3のA列とB列においてはほとんどの値(発生限界の比)が1より大きい。すなわち、生体の電位差を除く各パラメータで表した発生限界は、塩水・水道水のいずれにおいても、ウサギの胴体が通電方向に対して垂直な場合のほうが平行な場合より大きい。言い換えれば、平行、すなわち胴体に対して縦方向の通電のほうが窒息を生じやすいということである。このことは心拍停止についても同様であり、また陸上の電撃でも類似の結果が得られている³⁾。

生体の電位差 V_B は、水道水(B列)において1.6分の1と小さくなっており、塩水の場合(A列)と変化の仕方が逆になっている。その理由は明らかではないが、電位差 V_B に何かの系統的な誤差のあったことも考えられる。

いずれにしても、垂直と平行とでは検出電極間の距離 d が約3倍も異なるにもかかわらず、生体の電位差 V_B の配置方向による変化は小さい。(そしてこのために、生体の電位傾斜 V_B/d の変化が大きくなっている。)このことは、前述のように窒息の起りやすさに方向依存性のあること、及びこれが物理的条件よりもむしろ生体の特性に起因していることを示している。

Table 3において各パラメータの値(発生限界の比)は、A列とB列とで異なっている。すなわち、定量的には、発生限界の配置方向による変化の仕方は水の種類によって異なっている。(またC列・D列の、水の種類による発生限界の変化も配置方向によって異なる。)しかし、これらの違いがすべて測定上の誤差によるものとは考えにくく、生体と水の導電率の大小関係の違い、絶縁物であるヘルメットや固定台の影響の違いなど他の要因の影響もあるものと考えられる。

(2) 水の種類(導電率)による変化 Table 3のC列・D列に水の種類による窒息の発生限界の変化(比)を示した。C列とD列(平行と垂直)とは数値的には多少異なるが、いずれにおいても電流と電流密度の変化が著しい。すなわち、水が塩水から水道水になったとき、印加電圧 V_s 及び水中の電界 E_w のしきい値はおよそ3~4倍に増加しているが、電流 I_s 及び電流密度 J_w のしきい値は70~60分の1に減少している。

また、このときの水の導電率 κ の変化が約220分の1であることから、水中電界及び電流密度で表した窒息の発生限界 E 及び J は、大まかに見れば、次の関係にあることが認められる。(電圧と電流についても同様。)

Table 3 Ratios of suffocation thresholds in 6 parameters showing changes due to body arrangement (A, B) or due to kind of water (C, D). 各パラメータで表した窒息の発生限界の、身体配置及び水の種類による変化(比)

Parameters	Ratio of thresholds			
	Perpendicular to parallel		Tap water to salt	
	—A— In salt water	—B— In tap water	—C— In parallel	—D— In perpendicular
Applied voltage V_s	1.8	2.4	2.9	3.8
Field intensity in water E_w	1.8	2.4	2.9	3.8
Current I_s	1.8	2.2	1/74	1/62
Current density J_w	1.8	2.2	1/74	1/62
Potential difference on rabbit V_B	1.2	1/1.6	1.4	1/1.4
Potential gradient in rabbit V_B/d	3.4	1.9	1.3	1/1.3

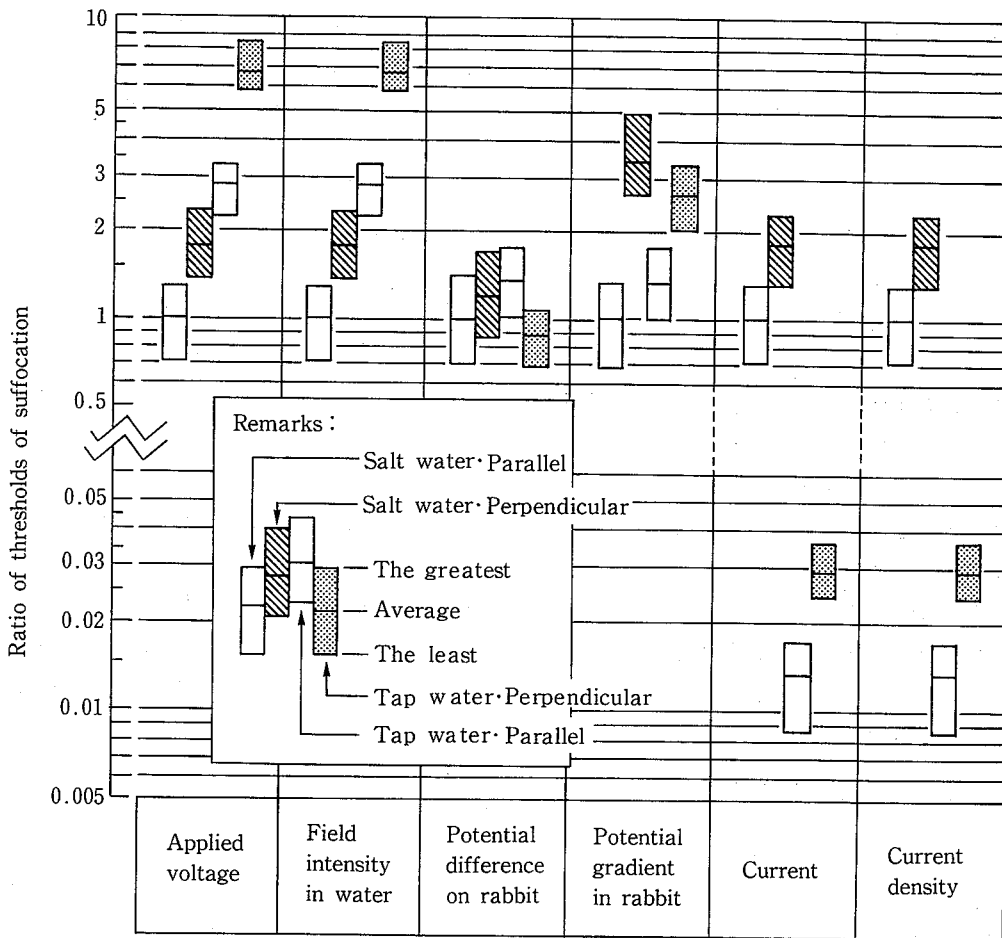


Fig.5 Changes of suffocation thresholds in 6 parameters for different test conditions. (Thresholds are expressed in ratios to the average in the case of salt water and of body arrangement in parallel with current.)
各パラメータの窒息の発生限界の条件による変化 (塩水・平行の場合の平均を1としたとき.)

$$\frac{J_2 \sim \kappa_2 E_2}{J_1 \sim \kappa_1 E_1}, \text{ または } \frac{J_2 \cdot E_1 \sim \kappa_2}{J_1 \cdot E_2 \sim \kappa_1}$$

ここで、添字1は塩水における値、添字2は水道水における値を示す。

上式は、この実験条件のように、生体に対して水の断面積が大きく、水のコンダクタンスが支配的な場合に成立するものと考えられる。

上の関係と Table 3 の結果は、窒息を生ずるといふ条件の下では、電圧や電界よりも電流や電流密度のほうが導電率の変化を大きく負担しているということもできる。

3.2.2 電撃の危険性を表すパラメータ

水中の電撃危険性を論ずるとき、電圧や電流で表した発生限界が普遍性をもたないことは明らかである。

水中の電界や電流密度で表した発生限界は、より普遍

性のある目安となりうるが、既に見たように電流密度で表した発生限界は水の導電率による変化が大きい。したがって、水中電界のほうがより好ましいパラメータ (または尺度) と言える。既に報告したように、ウサギと平行に金網を置いた場合でも、予想される通り、特定の影響を生ずるときのウサギの位置の電界はあまり変化しない。

漏電事故時の水中の電界 (生体が占める場所の、生体が存在しないときの電界) はある程度は予測も可能である。またこの電界から、手足を伸ばしたときの長さなどを想定することにより、生体の電位差を見積もることができる。

水中電界で表した発生限界は塩水・平行の場合に最小となるので、このときの値を生体に対する限界として採

用すれば、身体の配置が異なっても、また水の導電率が減少しても危険が増大することはない。

本実験のようにウサギの身体が水没しているほうが、水面にある場合よりも、電界で表した（心拍停止の）発生限界は小さくなるという実験結果も得られている⁶⁾。また、ウサギに対する発生限界（電界）を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¹⁾。

ただし、水中の電界もあらゆる状況で最も有利なパラメータというわけではない。水中電界による発生限界は、水の断面積（すなわち生体と並列の電流バイパス）が十分に大きい場合と小さい場合とで異なることが予想されるが、その変化の程度などは不明である。

また、漏電遮断器などの安全装置への応用を考えるとときには、電流あるいは電圧のほうが検出に便利である。ただ、電界で表した発生限界をもとに、ある接近限界距離に対する発生限界電流を推定することは可能な場合もある。

水のバイパスが小さい場合は、生体が存在するか否かによって経路のコンダクタンスが変化し、電流も変化する。また生体両端の電位差も、バイパスの大きい場合に比べ、変化が大きいと考えられる。生体の導電率が水より小さい場合（海水の場合）は、生体が来たとき、コンダクタンスと電流は減少し、生体の電位差は増加する。生体の導電率が大きい場合はこれと逆の変化が起こると考えられる。

バイパスのない場合は陸上の電撃と同じになり、電撃の強さは一般に電流で表される。

3.2.3 窒息を起こす電界の下限界

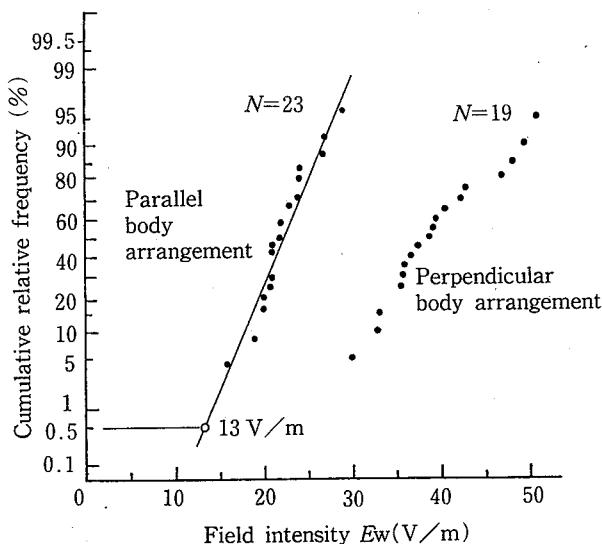
窒息発生が初めて確認された水中の電界 E_w の累積頻度を正規確率紙にプロットすると、Fig. 6 のようにだいたい直線となり、これらのデータに正規分布が適合することを示している。

窒息を起こす水中電界の下限界は、図の分布曲線を直線で近似したときの0.5%分位点の一つの目安となる¹⁾。Fig. 6(a)によれば、塩水・平行の場合、0.5%分位点は13 V/m である。

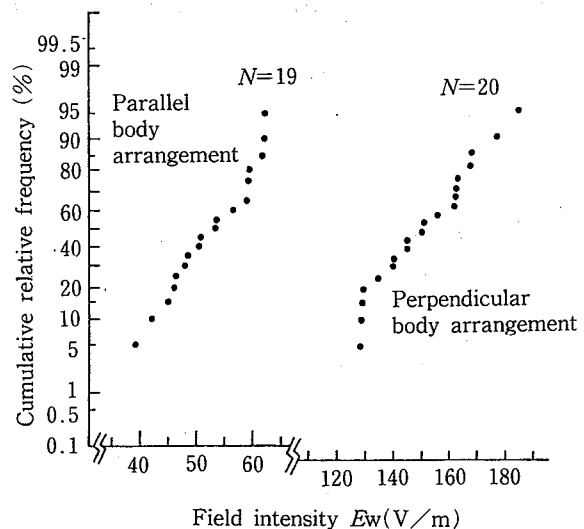
ただし、水中電界は電極インピーダンスを無視し、印加電圧と通電電極間距離から算出したので、水中の真の電界はこれより多少小さいことが予想される。例えば、通電電極と別にプラチナ線の検出電極を使用した場合は、印加電圧から求めた電界より8.5%小さい電界となった⁷⁾。また、4点プローブで求めた水中の電界は17%小さい値となった¹⁾。

したがって、窒息を起こす水中電界の下限界は10 V/m 程度と考えることができる。なお、実験データ中の最小値は15.8 V/m である。

本実験の窒息は10秒の通電中1度も呼吸しないことである。したがって、これが起こらないことと、自由に呼吸ができることは同じではなく、その間にはかなりの隔りがある。また10 V/m では身体の内も利かない。し



(a) 3.5% salt water (30°C)



(b) Tap water (30°C)

Fig. 6 Cumulative distributions of threshold field intensity in water for suffocation of rabbits. (50Hz a.c., 10s, uniform electric field)

ウサギに窒息を生じた水中の電界(発生限界)の累積頻度分布。(正規確率紙)

かし、漏電遮断器その他の安全装置により電撃の持続時間が短時間に制限される場合には、電界が上記の限界以下であれば即死は起こらないものと考えられる。

上記の半分、すなわち5 V/mの電界であれば、ほとんどの場合ある程度の呼吸が可能なのである。ただし、どの程度の時間この電界に耐えられるかは明らかではない。水中電界が可随限界(2.5V/m)以下であれば、長時間(100~200min)にわたり自由な呼吸が可能である。

実験条件では、生体の10倍程度以上の水の断面積があった。

4. むすび

水槽実験によって、水中の均一な電界にウサギを暴露した場合の窒息の発生限界を調べ、発生限界を表す各パラメータの条件による変化を比較した。条件には、水が塩水及び水道水の場合、また身体の配置が通電方向に対して平行及び垂直の場合がある。水温は30°Cとした。電撃はAC50 Hz、持続時間10 sである。

研究の結果を整理すると以下ようになる。

(1) 塩水で平行な配置の場合、潜水したウサギに窒息を起こす電撃の限界は、水中の電界で平均22.1V/m、電流密度で平均127A/m²、ウサギの胴体の電位差で平均6.0Vとなった。(水の導電率は6.0S/mである。)

(2) 窒息の発生限界は、ほとんどのパラメータにおいて、平行な配置のほうが垂直な配置の場合より小さい。

(3) 水の導電率が6.0S/m(塩水)から27mS/m程度(水道水)に減少したとき、水中の電界で表した窒息の発生限界は3~4倍に増加し、電流密度で表した発生限界は70~60分の1に減少した。

(4) この実験の範囲では、生体の電位差で表した発生限界は条件による変化が小さかった。

(5) 水中で生体が占める(可能性のある)場所の、生体が存在しないときの電界は、ある程度の普遍性と実用性とを兼ね備え、水中における電撃の危険性や影響の発生限界を表すのに比較的有利なパラメータと言える。

(6) 水中の電界が5 V/m以下であれば、ある程度の呼吸が可能と考えられる。(2.5V/mの可随限界以下であ

れば、長時間自由な呼吸が可能である。)

なお、十分な結果が得られなかったので本稿では省略したが、実海域実験においても実験室と大差のない電圧(通電電極間)でウサギに窒息が生じた⁸⁾。すなわち、水槽内の電撃危険は実海域のそれと掛け離れたものではない。

本研究は、科学技術庁海洋開発調査研究促進費によって実施されたものである。関係各位に深く感謝の意を表す。

(昭和61年2月4日受理)

参考文献

- 1) 山野英記, 本山建雄, 田島泰幸: "水中において下肢強直を起す電撃の強さと許容限界"(産業安全研究所 研究報告, RR-30-1), 労働省産業安全研究所, 1981
- 2) L.A. Geddes and L.E. Baker: "The Specific Resistance of Biological Material—A Compendium of Data for the Biomedical Engineer and Physiologist", Med. & Biol. Engng., 5, 271~293, 1967
- 3) 山野英記: "電撃危険とその影響の発生限界", 電気学会誌, 9, 6, 376~383, 1985
- 4) 大橋正次郎: "電撃傷", 安全工学, 16, 1, 36~43, 1977
- 5) 一色高明, 梅田徹, 町田潔: "心拍停止", 治療, 62, 4, 745~754, 1980
- 6) 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, 15~24, 1981
- 7) 山野英記, 本山建雄, 田中隆二: 第17回安全工学研究発表会講演予稿集, pp.57~60, 1984
- 8) 山野英記, 本山建雄, 田島泰幸: "海中における電撃危険性とその防止に関する研究(III)"(昭和54年度海洋開発調査研究促進費報告書), 労働省産業安全研究所, pp.37~77, 1980