

Research Reports of the Research Institute  
of Industrial Safety, RIIS-RR-91, 1991  
UDC 614.825:621.316:626.02

## 2.5 V/m の水中電界に暴露中のウサギの 随意運動可能性の観察

山野英記\*, 本山建雄\*

### Observations on Motility of Rabbit in Exposure to 2.5 V/m Electric Field in Water

by Eiki YAMANO\* and Tatsuo MOTOYAMA\*

*Abstract*; The electric shock accident is also possible for divers, since electricity is used in underwater work. In the accident, if a diver is motile (able to move voluntarily), he will be able to swim out of danger by himself.

This paper, which is supplementary to the last (1989), reports observations on the motility of rabbits and the degree of shock effects in the exposure for 100 min to the electric field of 2.5 V/m in water. The 2.5 V/m is a limit for no stiffness which was set in a previous investigation and we supposed that the limit might also allow voluntary motion. In this experiment, it was intended to prove that 2.5 V/m could be used as an allowable limit for motility.

In the 1st pattern of tests, a rabbit was bound on a stand to observe respiration and ECG (discretely). And in the 2nd pattern, a rabbit was free and able to walk on the bottom. The electric field was uniform and the commercial a.c. of 50 Hz. Water in test tank was 3.5% salt water, with a temperature of 30°C and a conductivity of 6 S/m.

From the observations, we found the following results.

(1) Relative frequency to be motile is considerably great in 2.5 V/m. However, convulsions (extensions) of forelegs were observed in 1 test out of 28 tests. The rabbit recovered motility after all convulsions in several minutes. The value of 2.5 V/m is not considered to be proper for motile limit.

(2) It is considered that the electric field of 2.5 V/m has no lethal effect, excluding the secondary effects of convulsion such as a drowning.

(3) Convulsion in hind legs occurs with high probability in the electric field of 5.3 V/m. The rabbits, however, bent legs again in many cases. The rabbits were not killed in the exposure because they were bound and protected from drowning.

(4) Low temperature water (e.g. 10°C) is harmful to not only motility but also respiration and heart beat.

*Keywords*; Electric Shock, Underwater Electric Shock, Motility, Voluntary Motion, Divers' Safety, Underwater Work, Industrial Safety

### 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伴う潜水作業では、照明、観測、アーク溶接、酸素アーク切断、その他の目的で電力が使用される。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、電気設備に故障が生じたり人間が接近したりすれば、水中で電撃災害の生じるおそれがある<sup>1)</sup>。

この時、水中の電界が小さく、随意運動が可能(可随)であれば、潜水作業者は自力で危険な場所から脱出したりすることができよう。従って、随意運動の可能な電界の限界(可随限界)は、安全対策上一つの重要な指標となる。

筆者らは、水中電界における随意運動の可能性に関連して、①下肢強直<sup>3)</sup>、②本研究(長時間暴露)、③可随限界<sup>4)</sup>、の順序で一連の研究を行った。本報告はその②に当たるものである。

①の報告において、下肢強直に対する許容限界として 2.5 V/m という値を推定し、これ以下の電界においては上肢・下肢などの自由の利く可能性が高いと述べた。実験条件に従い電界への暴露時間 10 秒という条件はそのままにしたが<sup>3)</sup>、上の値は、下肢強直の不発牛限界に安全係数を適用した値で、充分小さくなったように思われたことなどから、暴露時間が多少長くても可随限界とみなしうる可能性が高いと思われた。

本研究の目的は、その確認、すなわち 2.5 V/m の水中電界に長時間暴露した場合の随意運動の可能性を、実験的に、確認し評価することである。あわせて、長時間暴露した場合の電撃危険の程度を評価する。

研究の結果、2.5 V/m において随意運動が可能である頻度は相当に大きいこと、けいれんによる 2 次災害の外には致命的影響は生じないことが判明した。しかし、試験の一つにおいてけいれんが生じ、2.5 V/m を可随限界とすることは妥当ではないと判断された。

このため、可随限界は、③の研究において、軽微なけいれんを含めて発生限界を測定し、その累積頻度分布から推定するという方法によって求めた<sup>4)</sup>。

本報告は、③の結果に進展や修正を施すものではない。しかし、③の研究は、随意運動の可能性など、本研究②の結果を念頭に置いて行ったものであり、③で実験度数の少ないことから生じる信用性の低下も、

本研究によって補足される。このため、本研究の報告が欠けていることに不都合を感じてきた。また、③の実験方法も本実験の経験に負うところが大きい。

本実験は、実験動物であるウサギが固定されている場合と無拘束の場合とに大別される。

### 2. 固定されたウサギの暴露

#### 2.1 実験方法

##### 2.1.1 実験方法の概要

この実験では、Fig. 1 に示すように、ウサギを、固定台に縛り付けた状態で、水中の電界に暴露した。体肢のけいれんのほか、呼吸及び心電図も観測するためである。

暴露の時間は 100 分(一部 200 分)とした。水中の電界は 2.5 V/m としたほか、対照のため 0 及び 5.3 V/m についても実験した。印加電圧は、50 Hz の正弦波で、電界が設定値となるように交流安定化電源の出力(100V)をスライダックで調整した。暴露中も、印加電圧の再調整を行う。通電電極は厚さ 1.5 mm の銅板で、水槽の相対する 2 面に平行に配置した。通電電極間の距離は 1.73m である。

水中の電界は、平行に張った 2 本のプラチナ線を検出電極として、その間の電位差を測定し、これをその間の距離 1.694m で割って求めた。

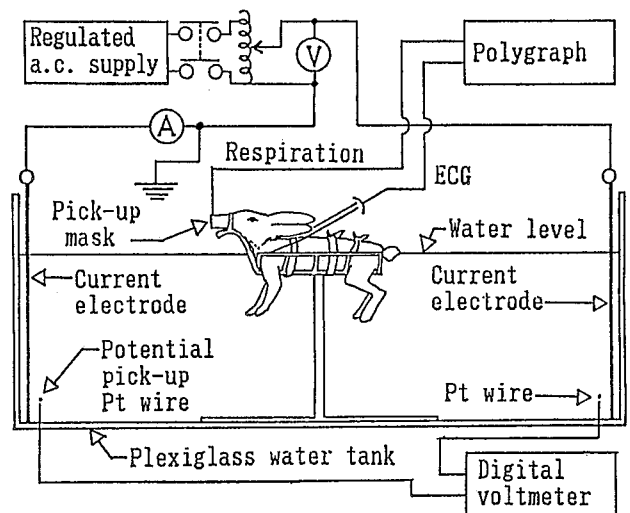


Fig. 1 Exposure of bound rabbit to electric field in water  
実験方法の概要(ウサギ固定の場合)



Table 2 Results of bound rabbit exposures to electric field in water  
固定されたウサギの暴露試験の結果

Field intensity $E_W$ (V/m)	Test No. presenting the reaction of			
	Struggle	Tremble of trunk	Convulsion of legs	Trouble in test
2.5	BA1 ~ 7	BA1 ~ 7	BA5*1	BA4*3
5.3	BB1 ~ 5	BB1 ~ 5	BB1 ~ 5*2	—
0	BN1 ~ 3	BN1 ~ 3	—	BN1, BN3*4

- \*1 Extensions of forelegs after struggle, recovered. A cut was on the chest skin.
- \*2 Extensions of hind legs, recovered.
- \*3 Decrease in breathing rate and heart rate, because of the water entered airway.
- \*4 Temporary decrease in breathing rate and heart rate, because of the water entered airway.

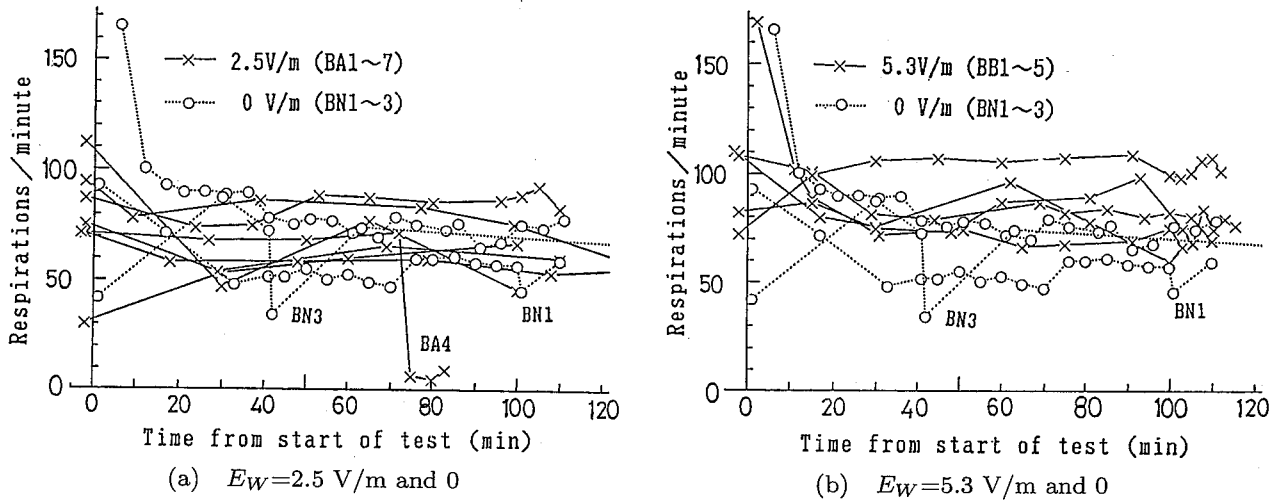


Fig. 2 Breathing rates of bound rabbits in different electric fields  
各種電界におけるウサギの呼吸数 (固定暴露の場合)

の発生が見られた。まず、BA5では、数回、左上肢または両上肢が後方斜め下に伸直した。その内1回は、鼻先が前方斜め上に向き、鼻先から上肢までが直線状に並んだこともあった。けいれんはすべて暴れたあとに起こり、1~5分くらい以内に自力で回復した。ただし、けいれんを生じない暴れも多かった。なお、このウサギには、胸の左寄りに、バリカンによる皮膚の破れがあった。

試験BB1~5においては、下肢の後方斜め下への伸直が見られた。多くの場合数分以内に戻ったが、戻りかたの小さいものや大きいもの、伸び・曲げの繰り返しなども見られた。伸直は、多くは暴れた拍子に

起ったが、ゆっくりと伸びたり、排尿と同時に生じたりする静かな発生もあった(特にBB2とBB5において)。

最初のけいれんは、試験BA5, BB2, BB5ではそれぞれ通電後17分, 60分, 11分に生じ、試験BB1, BB3, BB4では、ひとしきり暴れたあとの、通電後25秒ないし1分前後に生じた。

### 2.2.3 呼吸数・心拍数

電界ありと電界なしとの場合を比較するため、Fig. 2及びFig. 3に、それぞれ各試験の呼吸数及び心拍数を示した。ただし、時間軸の0は、電界なしの場合は水に入れ終えた時、電界ありの場合は通電開始時

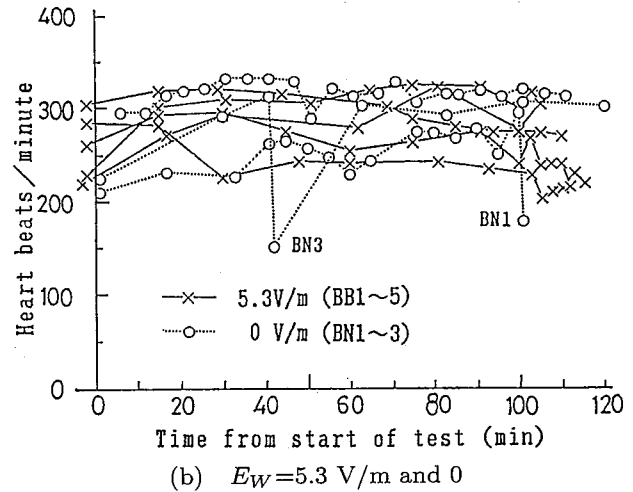
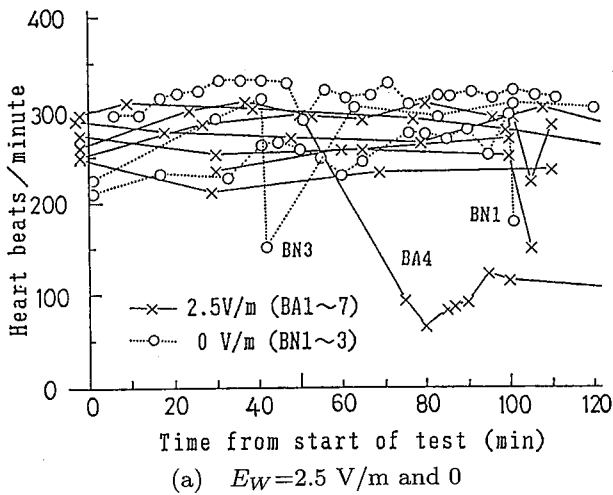


Fig. 3 Heart rates of bound rabbits in different electric fields  
各種電界におけるウサギの心拍数 (固定暴露の場合)

となっている (測定点を結ぶ直線は途中の推移ではなく同一試験であることを示す)。Fig. 2(b)によれば、5.3 V/m では、電界による呼吸数増加の傾向が認められる。その他においては、電界の影響は顕著ではない。

ただし、試験 BA4 及び BN1, BN3 において、各 1 回、呼吸数と心拍数の減少したことがあった。特に試験 BA4 においては、著しい減少が生じ、試験開始後 75 分に電源を切った。しかし、これらの減少は、電撃の影響ではなく、鼻先の水没により水がマスクと気道に侵入した結果と推測される。

すなわち、試験 BA4 では、呼吸数減少の少し前、ウサギは鼻先から下肢までを波打たせるようにして激しく暴れ、固定かごが破損した。このとき、鼻先が、2~3 回、合計すればある程度長い時間、水に浸った (自力で鼻先を上げることはできない)。この試験では、まだ水によるトラブルには思い至らず、呼吸等の観測を続けたので、マスクを外したのは通電停止から約 70 分後である。このとき、鼻・口がびしょりとぬれていて、初め鼻でズルズルという音が聞こえた。

試験 BN1, BN3 においても同様なウサギの動きがあったが、BN1 では軽く、BN3 ではすぐにマスク内の水を捨てた。

以上のほかには、重い影響は認められなかった。

### 3. 拘束のないウサギの暴露

#### 3.1 実験方法

##### 3.1.1 実験方法の概要

この実験では、Fig. 4 に示すように、ウサギは水槽底に足を着き、自由に歩き回ることができるようになっている。暴露時間は 100 分とし、水中の電界は 2.5 V/m または 0 とした。

通電の方法、水中電界の測定法、水槽、水の濃度や水温等は、前章の実験と同様である。水深は、ウ

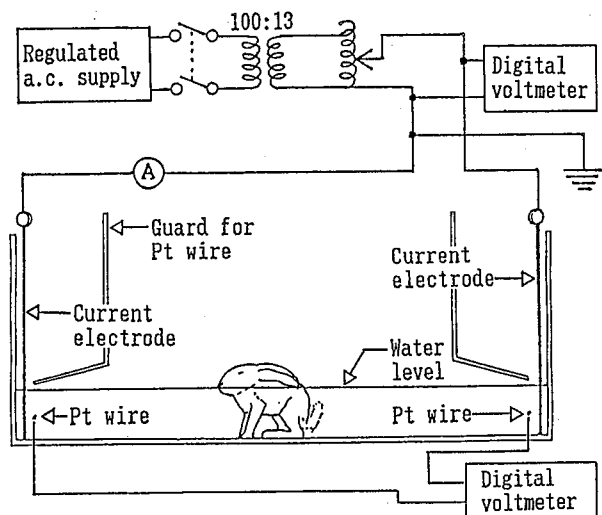


Fig. 4 Exposure of free rabbit to electric field in water  
実験方法の概要 (ウサギ無拘束の場合)

Table 3 Conditions on free rabbit exposures  
 暴露試験に関する条件 (ウサギ無拘束の場合)

Test No.	FA1 ~ FA21 (2.5 V/m, 100 min)		FN1 ~ FN15 (0 V/m, 100 min)	
	Average ± s.d. (Range)	N	Average ± s.d. (Range)	N
Temperature of water (°C)	30.8 ± 2.3 (26.2 ~ 35.3)	42	30.4 ± 2.6 (26.9 ~ 36.4)	30
Conductivity of water (S/m)	5.92 ± 0.31 (5.10 ~ 6.38)	42	5.81 ± 0.69 (3.58 ~ 7.40)	30
Depth (cm)	14.6 ± 0.5	21	14.3 ± 0.4	15
Weight of rabbit (kg)	3.50 ± 0.62	21	3.20 ~ 0.51	15
Observed field intensity (V/m)	2.51 ± 0.02	260	—	—

\*1 N: Number of measurements.

\*2 Number of animals: 9

サギが水槽底に足を着いたとき、胴体の厚さ(胸-背中)の半分~2/3が水面下になるように、排水して調節した(全試験の2/3は水深14.5 cm)。また、この実験では、ウサギからプラチナ線を保護するために防護板を水面上に設置した。

暴露中は、ウサギの挙動を監視し、メモ・録音するとともに、約10分に1回の割合で随意運動が可能か否かの確認を行った。また、約10分おきに水中電界の点検・再調整を行った。

### 3.1.2 可随性の確認方法

ウサギは静止している時間のほうが長いので、随意運動が可能か否かの確認が必要と考えた。

その確認には、おもに、引き伸ばしと称する次の方法を使用した。すなわち、左前足と右後足をつかみ、前足-胴体-後足がほぼまっすぐになるまで通電方向に引き伸ばして手を離すという方法である。ウサギが直ちに上肢・下肢を元に戻せば、随意運動は可能と判定する。特に後半の試験では、すべて、この方法により確認を行った(電界ありの試験FA2, FA10~21, 及び電界なしの試験FN10~15)。

前半の試験では確認方法は一定ではない。方法には、①引き伸ばし、②L字棒で両下肢を通電方向に引くようにして払う方法(足払い)、③背中に水をかけるなどして運動を促す方法(運動催促)があり、10回の試験で①と②を併用(FA1, FA4~9, FN1, FN8~9)、1回の試験で②と③を併用(FA3)、6回

の試験で②を使用した(FN2~7)。

引き伸ばしによる可随確認ではウサギが暴れて水を飲むなどのトラブルが生じやすい。しかし、より強い電界での試行によれば、引き伸ばしが最もけいれんを誘発しやすいように見えた。

## 3.2 実験結果と検討

### 3.2.1 実験条件の変化

Table 3に、無拘束暴露のおもな条件を示した。暴露試験は、水中の電界2.5 V/mについて21回、電界0について15回で、前章と別の9匹のウサギを使用した。

Table 3において、水温と水の導電率の測定値(測定は試験前と後)のばらつきは、Table 1に比べて大きい。これはおもに水量が小さいことによる水温の低下のためである。ただ、試験FN1~15の導電率の最小値・最大値はともに条件設定の失敗によるが、この場合は導電率は重要ではない。

試験前に対する試験後の水温は、電界2.5 V/m及び0の場合、それぞれ平均12%、14%低下し、導電率はそれぞれ平均5.9%、6.1%減少した。

そのほか、次のような条件も一様ではなかった。

まず、実験前に皮膚の損傷のあった試験が、電界あり・なしそれぞれに9例あった(おもにバリカンによる)。ただし、電界あり9例の内、3例は4または5日前の傷で治りかけていた。部位は上肢・下肢の付

Table 4 Results of free rabbit exposures to electric field in water  
拘束のないウサギの暴露試験の結果—各動作の観察された試験の頻度—

Field intensity $E_w$	Relative frequency of the tests presenting the reaction of							
	A) Turn around trunk	B) Beat on water surface	C) Stand on hind legs	D) Stand with forelegs on wall	E) Jump	F) Tremble of body	G) Noise in respiration	H) Convulsion of legs
2.5 V/m (FA1 ~ 21)	100 (%)	95	95	95	29	100	81	0
0 V/m (FN1 ~ 15)	100 (%)	87	87	80	27	100	93	0

A) 胴体を振り回す。B) 上肢で水面をたたく。C) 下肢で立ち上がる。D) 壁に上肢をかけて立ち上がる。E) 跳躍。  
F) 胴体の震え。G) 呼吸時の雑音。H) 体肢のけいれん。

け根が多い。

また、電界ありの試験において、麻酔は当日の朝が3例、前日の朝が5例、他は2日以上前に行ない、試験開始までの時間は平均2.7日以上であった。電界なしの場合は当日が多い。

### 3.2.2 ウサギの反応

#### a) 可随性

すべての試験において、外見的な下肢のけいれんは認められず、随意運動が可能と判定された。

#### b) その他

Table 4 に、暴露中にウサギのおもな動作や反応と、それら反応の観察された頻度を示す。ただし、この頻度は観察された試験の度数と全試験度数との比(百分率)である。A) から E) までの動作は、ウサギの自発的で随意的な運動で、E) ジャンプとは、水槽の外に向かっての跳躍である(脱出はできなかった)。G) 呼吸時の雑音とは、呼吸に伴っておもに鼻から発する音のことで、水が鼻から入ったために生じる。

Table 4 によれば、電界ありとなしとの場合で、同様の反応がほぼ同様の試験の頻度で生じている。B) ~ E) には一定の傾向があるように見えるが、実験メモを調べると、その差は電界よりもむしろ使用したウサギの条件に依存しているように思われる。

たとえば、試験 FN15 では動作 B) ~ E) のすべてが見られなかったが、このウサギは暴露の当初にかなり水を飲み、呼吸時雑音の源が深く、活動性が低かった。この試験を除けば、電界0の B), C) の頻度は、93%となる。また、跳躍したウサギ5匹だけについて、E) ジャンプの試験の頻度を求めると、電界ありで  $6/14=43\%$ 、なしで  $4/9=44\%$ となる。

試験では、鼻ないし頭までの水没が1回以上生じた例が多い。これは、可随確認の不手際(ウサギの暴れ)あるいは跳躍後の落下や水に入れた直後のウサギの泳ぎ(3例)によって生じた。静止時には、ほとんどの試験で、途中から、口は水面下となった。

5回以上の試験に使用した4匹の内、3匹のウサギ①~③に、それぞれ①5及び6回目、②6回目、③5回目の試験(いずれも電界あり)において、肩を中心に柔らかい腫れが生じた。その原因は明らかではないが、この3匹の共通項の一つは、引き伸ばしによる可随確認を多く経験していることである。それぞれ腫れの生じた試験より前に①36回、②48回、③38回経験しているのに対し、腫れの生じなかったウサギは18回(7回使用)である。また、所内での飼育期間が長いことも共通である。

## 4. 考 察

### 4.1 水中電界 2.5 V/m の危険性

#### 4.1.1 けいれんの発生

2.5 V/m に対する固定されたウサギの暴露(7回)では、1試験(BA5)において、数回上肢の伸直が見られたが、すべて数分以内に回復した。最初の発生は通電後17分であった。

この試験のような配置では、けいれんはまず下肢で生じ上肢の変化は目立たないのが普通であるが<sup>3)</sup>、上肢で生じたのは、胸の傷の影響かも知れない。また、固定されかたのわずかな違いも考えられる。

拘束のないウサギの暴露(21回)では、体肢のけいれんは起こらず、ウサギは随意運動の可能性を失

わなかった。

ただ、1 試験 (FA2) において、5 回くらい繰り返して「横腹がズズッとくぼむ」のが観察された。この動きは不自然に感じられたが、電流による筋の収縮か否かは明らかではない。このうさぎには左ひじに切り傷があり、また、鼻孔には水が入っていた。

2.5 V/m においても随意運動が可能である頻度はかなり大きい。しかし、試験 BA5 の結果を無視することは妥当ではなく、可随限界は 2.5 V/m より小さく設定せねばならないと考えられる。

#### 4.1.2 その他の影響

水中の 2.5 V/m の電界は、人間が素手を入れたときようやく感じる程度であった。計 6 回の内、2 回はまったく感じなかったが、その他では、爪の生え際あるいは手首で、かすかにまたは軽く、電流を感じた。また他の一人も 1 回の試行で感じた。(ウサギに比べ水没部分も暴露時間も小さい)。

ウサギも電流を感じているものと思われる。

固定暴露では、震えや呼吸運動の滑らかさに電界なしとの違いを感じた試験もあった。しかし、無拘束暴露の実験を終えた時は、電界ありとなしとの場合で、ウサギの様子はほとんど同じであるという印象が強かった。

繰り返し使用したウサギに腫れが生じたが、電界の寄与があったか否かは不明である。

以上のような影響は認められたが、瀕死の状態となったのは試験 BA4 のウサギだけであり、その直接原因は、自ら暴れたあとの水の気道への侵入と判断された。

従って、2.5 V/m の電界は、生体に対し多少の影響はあるものの、直接に即死をもたらすような致命的な影響はないと言える。ただし、頭を裸で水中の電界に長く暴露するような実験は行っていない。また、けいれんが生じると溺死が起こりうる<sup>4)</sup>。

#### 4.2 水中電界 5.3 V/m の危険性

5.3 V/m においては、高い頻度でけいれん(下肢の伸直)が発生した。従って、5.3 V/m の電界中では、随意運動はほとんど不可能である。ただし、まったく不随となるわけではなく、下肢を曲げることはできた。また、背中 of 震えがむしろ周期的なけいれんに見えたことも多い。

呼吸数が増加する傾向も認められたが、本実験の固定暴露のように、呼吸が確保され、けいれんの二

次災害がなければ、死亡の頻度は高くないように思われる。

5.3 V/m は、暴露時間が 10 秒以下であって、意図しない身体の動きが危険を生じない場合には、許容される値である<sup>2)3)</sup>。数十 ms 以下であれば、更に大きい電界でも即死の頻度は小さい<sup>5)</sup>。

#### 4.3 結果の適用条件について

以上に述べたような電撃危険性の評価は、次のような条件の場合に成り立つものと考えられる。すなわち、①電源は 50 または 60 Hz の正弦波、②水温約 30°C、③水の導電率約 6 S/m、④生体は電極からある程度離れていて、生体に対しおよそ 10 倍以上の断面積をもつ水のバイパスがあること(ほぼ均一な電界)である。

このような適用条件は一連の研究結果<sup>3)4)</sup>に共通の条件である。既に述べたことは要点のみを記し、②と④に新たな補足を加えたい。

本研究の電界の測定値は、ウサギを含む水中の平均電界であるが、ウサギがない時の水中の電界に等しい(このような尺度の選択については文献 2) 参照)。

##### 4.3.1 電源周波数

この種の条件の影響は陸上の電撃と同じと考えられる。従って、しきい電界は 50/60 Hz で最小で、他の周波数で危険が増加することはない。

##### 4.3.2 水温

本実験の前に行った予備的な実験の中に、水温 10 ~ 11°C で行った実験が 3 回あった。その 1 と 2 は、無拘束・2.5 V/m で冬に実施したが、その 1 では 20 分後にけいれんを起こして横転した(水深 17 cm)。その 2 では 15 分後に横転した(水深 13 cm)。体の自由が利かない様子なので鼻・口を水面上に保持したが、結局自力で立つことはなく、暴露を中止した。

その 3 は固定したウサギで、電圧の印加(2.5 V/m)は合計数分であったが、30 ~ 40 分以上水中に置き、試験方法を検討していたところ、呼吸が著しく弱まり、重い徐脈が生じた(このウサギは水ものではない)。その 3 のウサギは回復させることができた。

これらの影響は、主として冷水による体温の低下に起因するもので、電界は副次的な因子と考えられる。麻酔下のウサギの腋下体温は約 39°C であった。

##### 4.3.3 水の導電率

水の導電率が約 220 分 1 (水道水) に減少したとき窒息のしきい電界は 3 ~ 4 倍に高くなった。従っ



て、導電率が6 S/mより減少しても危険性が増加することはない<sup>2)</sup>。また、導電率が多少増加してもしきいの低下は小さいと推測される(付録①参照)。

なお、先の実験<sup>3)</sup>の水は本実験と同じであり、本報告のほうが導電率測定の変りが小さい。

#### 4.3.4 電流路の断面積等(境界条件)

本実験のように、生体の寸法に比べ水の領域が大きい場合には、電極間の抵抗はほぼ水によって決まるようになり、ウサギの存否による電流の変化も小さい。

無拘束の試験の場合、ウサギを含む全断面積は平均約1420 cm<sup>2</sup>であるのに対し、ウサギの断面積は、①胴体横断面でおよそ90～130 cm<sup>2</sup>程度、②縦断面は大きめに見て400～500 cm<sup>2</sup>程度であり、断面積比は①で11～16倍程度、②では2.8～3.6倍程度となる。

可随確認の場合は胴体は通電方向にあり、①の値が想定される。また、以前の実験で、電撃の影響(窒息)が生じやすかったのは、塩水・水道水ともに、胴体が電界方向に配置されている場合であった(生体組織の異方性のためと考えられる<sup>2)</sup>)。

本実験ではウサギの身体の一部は水面上に出ており、また無拘束暴露では足も水槽底に接していた。その影響は、大まかには、次のように考えられる。

まず、身体が水面上に出ない場合、断面積比は一定としても、上下の絶縁境界面(水面・水槽底)が生体に接近すると、生体内の電界・電流密度は増大すると考えられる(危険性も増大)。このときの結果を境界が離れている場合に適用しても危険性は増加しない。ただし、水の導電率が生体より大きい場合である。

次に、身体の一部が水面上に出る場合は、上の場合に比べ、生体内の電界・電流密度は減少すると考えられる。しかし、実験では上肢・下肢が水面上に出たことは少なく、その影響は小さいと思われる。

断面積比が10倍から増加すると危険性は減少するが、仮に無限大に増加してもその減少はさほど大きくない(付録③参照)。

断面積や電極間距離が条件より減少した場合、どの程度の変化が生じどのような補正が可能かなどの問題は重要と考えられるが、詳細な検討は行っていない。

#### 4.3.5 人間の場合

前報告でも述べたように<sup>4)</sup>、そこでのウサギのけいれんの発生限界は、人間の下肢不随の発生限界(2

個の実測値<sup>6)</sup>)にくらべ、少し小さいが、ほぼ同程度である。従って、けいれん等の発生限界は人間の場合もほぼ同程度とするのが妥当であろう。

ウサギと人間とでは身体の寸法に大きい違いがあるが、たとえば、均一な電界の作用している水中に球(生体)を置くというモデルでも、生体内の電界は生体の寸法に依存しない(付録②参照)。ただし、境界条件も寸法の絶対値ではなく比で与えられねばならない。

そのほかにも違いはあるが、ウサギのしきいを厳密に人間に換算することは不可能である。また、あいまいな安全係数等の導入はここでは避けたい。

## 5. むすび

100分(一部200分)間、水中の均一な電界にウサギを暴露し観察した結果、次のことが明らかになった。ただし、水温は約30°Cである。

- (1) 2.5 V/mにおいて、ウサギが随意運動可能である頻度はかなり大きい。しかし、28試験中1試験においてけいれんが生じた。従って、水中電撃の可随限界は2.5 V/mより小さい値に設定すべきである。
- (2) 2.5 V/mの電界では、即死を起こすような、電撃の一次的影響(心室細動や呼吸停止)は生じない(けいれんによる溺死は起こりうる)。
- (3) 5.3 V/mにおいては、高い頻度で下肢のけいれん(伸直)が生じる。しかし、多くの場合数分以内に自力で下肢を曲げるのが観察された。呼吸が確保され、けいれんの二次災害がなければ、死亡の頻度は高くない。

また、ウサギでは、水温が低い場合(たとえば10°C)、可随性あるいは活動力だけでなく、呼吸・心拍にも重い影響が生じる。

(平成3年9月30日受理)

## 参考文献

- 1) UK Department of Energy: "Code of Practice for the Safe Use of Electricity Under Water", Published by CIRIA (Construction Industry Research and Information Association), London, (1982).
- 2) 山野英記, 本山建雄: "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—", 産業安全研究所研究報告, RIIS-

RR-85 (1985), 131-139.

- 3) 山野英記, 本山建雄, 田島泰幸: “水中において下肢強直を起こす電撃の強さと許容限界”, 産業安全研究所研究報告, RIIS-RR-30-1 (1981).
- 4) 山野英記, 本山建雄: “水中電撃によるけいれんのしきいと可随限界”, 産業安全研究所研究報告, RIIS-RR-89 (1989), 103-111.
- 5) 山野英記, 本山建雄, 田中隆二: “水中電路用漏電遮断器の電撃死防止効果”, 産業安全研究所研究報告, RIIS-RR-87 (1987), 175-185.
- 6) Smoot, A.W. and Bentel, C.A.: “Electric Shock Hazard of Underwater Swimming Pool Lighting Fixtures”, IEEE Trans. Power Appar. & Syst., PAS-83, 945-964, (1964).

付 録

A1 均一電界の水中に球を置いたときの電界等

4.3 の考察の参考とした解析の要点を示す。電界等を得る過程は各種の電磁気学の教科書に示されている。

導電率 $\kappa_W$ の無限に広い水中に均一な電界  $E_0$  があるとし、この中に、導電率 $\kappa_B$ 、半径  $a$  の球 (生体とする) を置いた場合を考える。球の中心を原点とし、電界  $E_0$  と同じ方向の軸を  $z$  軸、これに垂直な面を  $x-y$  平面とする。電界等は軸対称となり、解はおもに極座標  $(r, \theta)$  で与えられる ( $\theta$  は  $z$  軸からの角度)。筆者らの研究ではしきい値は初期の電界  $E_0$  で表わされている。

球外の任意の点の電位  $V_W$  及び電界 (絶対値)  $E_W$  は、次のように与えられる。

$$V_W = -E_0[1 - K(a^3/r^3)]r \cdot \cos \theta \quad (A1)$$

$$E_W = E_0[1 + 2 \cdot K(a^3/r^3)(2 - 3 \cdot \sin^2 \theta) + K^2(a^3/r^3)^2(4 - 3 \cdot \sin^2 \theta)]^{1/2} \quad (A2)$$

$$\text{ただし, } \kappa_S = \kappa_B/\kappa_W \quad (A3)$$

$$\text{さらに, } K = (\kappa_S - 1)/(\kappa_S + 2) \quad (A4)$$

と置いた。

また、球内の電位及び電界は、次のようになる。

$$V_B = -E_0[3/(\kappa_S + 2)]z \quad (A5)$$

$$E_B = E_0[3/(\kappa_S + 2)] \quad (A6)$$

①生体の導電率 $\kappa_B \doteq 0.2 \sim 0.8$  S/m,  $\kappa_W = 6$  S/m とすると、 $\kappa_S = 0.033 \sim 0.133$  となり、既に 1 に比べて小さい。このため、 $E_B = E_{Bt}$  でけいれんが生じるとすると、 $\kappa_W$  が増加してもしきい値  $E_0$  の減少は小さい。

②生体の反応を生起するのはその反応に関与する部位の電界または電流密度と考えられるが、球内の電界は、導電率の比 $\kappa_S$ と  $E_0$  だけの関数であり、球の寸法には無関係である。球の替りに長軸回転楕円体を置いた場合も、内部の電界は、 $\kappa_S$  と  $\lambda$  と  $E_0$  だけの関数となる。 $\lambda$  は、長半径  $b$  と中心-焦点間距離  $c$  との比  $b/c$  で、楕円体の形状 (短径と長径の比) を決定するが、楕円体の寸法を表わすものではない (楕円体の長軸は  $z$  軸と一致)。球外の電界  $E_W$  も、半径との比  $r/a$  の関数で、半径の絶対値には無関係となっている。左辺が電界であるから右辺の  $E_0$  の係数はいつも無次元となるのである。

次に、 $x-y$  平面 ( $\theta = \pi/2$ ) における半径  $d (> a)$  の円内の全電流  $I_d$  の変化を調べる。電流  $I_d$  は、 $r = 0 \sim a$  (球断面内) の電流  $I_{0a}$  と  $r = a \sim d$  の電流  $I_{ad}$  との和で、それぞれの電流密度  $J_B, J_W$  を積分して得られる。電流密度は、 $J_B = \kappa_B E_B, J_W = \kappa_W E_W$  である。

$x-y$  平面の半径  $d$  内の全電流の、球がある場合とない場合との比  $I_d/I_{d0}$  は、次のように与えられる。

$$\frac{I_d}{I_{d0}} = 1 - 2 \cdot \frac{1 - \kappa_S}{2 + \kappa_S} \cdot \frac{a^3}{d^3} \quad (A7)$$

第 2 項が変化分であり、 $\kappa_S < 1$  の場合減少が生じる。ここで、 $\kappa_S = 1/15$  と仮定する。また、 $z$  軸を中心軸とする半径  $d$  の仮想の円筒を考え、断面積の比  $(d/a)^2 = 10$  とすると、 $x-y$  平面の半径  $d$  の円内の全電流は、球がない場合に比べ、2.9% だけ減少する (電界は、 $x-y$  平面の  $r = d$  において、その半分だけ増加)。

③この電流減少は、また、絶縁境界面が無限に離れたことの影響と考えることもできる。すなわち、想定した円筒が絶縁面の場合、例えば円筒は無限に長いという条件の下で、 $I_d/I_{d0} = 1$  となるからである。しかしこの程度の電流減少では、球内の電流密度や電界の減少も小さいと思われる。