SEP. 1982

RIIS-RR-30-2

UDC 621.3.014.6(204) : 614.825

産業安全研究所研究報告

RESEARCH REPORT OF
THE RESEARCH INSTITUTE OF INDUSTRIAL SAFETY

RR-30-2

水中漏電場の電界強度に関する検討

——漏電電極と電界強度の関係——

本山建雄　山野英記　田畠泰幸

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

水中漏電場の電界強度に関する検討

——漏電電極と電界強度の関係——

本山建雄，山野英記，田畠泰幸

Investigation into Electric Field Intensity Induced in Water by Leakage Electric Current

——Relation of Electrode to Electric Field Intensity——

Tatuo MOTOYAMA, Eiki YAMANO and Yasuyuki TABATA

When leakage electric current is orginated from electric apparatus in water, the electric field will be produced in the water, bringing about possible fatal accidents of workers engaging in underwater jobs.

The electric shock hazard in water corresponds closely with the electric field intensity, the stronger its intensity is, the bigger its hazard becomes. Therefore, investigation in this field is required to prevent such underwater electric shocks to workers.

In this report, study was carried out of the electric field intensity with reference to leakage electrode, and the fundamental data on the electric field intensity have been obtained in terms of various electrical and geometrical factors of leakage electrode.

Factors concerning the electric potential of leakage electrode are those of electric potential of power source (V_0), resistance of feeder (R_c), resistance between leakage electrodes in water (R_w), etc. Those concerning the geometrical character of leakage electrode, size of electrode (a), sharpness of figure of electrode (m), distance between leakage electrodes (d), etc.

Several models simulating electric field given below were made, and the influence of the above factors on the electric field intensity by the use of these models has been studied analitically, giving a numerical example.

——Condition of the electric field :

The frequency of leakage current was less then 60 Hz.

The leakage current was caused between two feeders, or between one feeder and a common pole such as a body of ship.

The potential drop on the surface of leakage electrode neglected.

The main result of the study are as follows :

1. In respect of electric factors ;

   By increasing (V_0) and (R_w) and decreasing (R_c), the maximum intensity of the electric field will be increased.

2. In respect of geometric factors ;

   Both by increasing (d) in case that leakage electrodes have the same polarity as well as (m) and by decreasing (d) in case that leakage electrodes have the different polarity each other as well as (a), the maximum intensity of the electric field will be increased.

1. まえがき

近年，海中資源，エネルギー，海面・海中空間の利用を目指した海洋開発が進められており，ここでは人間が潜水して調査・研究，土木工事等，各種の水中作業を行う機会が増えつつある[1]。また，これらの作業では，エネルギー源として，電気を利用することが多く，照明器具・水中溶接機をはじめとして，水中ブルドーザ等の土木機械まで，電気をエネルギー源とする機器が数多く使用されている。しかし，環境は，これらの電気機器に対して厳しい条件であり，事故，絶縁劣化を含めて，水中漏電の起こることが十分に予想される。

水中において漏電が発生すると，漏れ電流は漏電が発生した部分にとどまらず，広く水中に分布して流れ，そこには広範囲な電撃危険領域が形成される。したがって，水中電撃の防止方法について研究しなければならず，その基本は漏電自体の防止にあるが，万一漏電した場合の対策のため漏電場の電界強度を明らかにすることが重要である。

本研究は，以上のような背景から電撃防止の基礎資料を得ることが目的で，漏電場の電界強度に影響を及ぼす種々の要因について検討した。具体的には，漏電場の電界強度に影響を及ぼす要因を抽出し，それらの要因によって電界強度がどのように変化するかについて，漏電場の典型的なモデルについて解析するとともに，その数値例を示した。以下，ここではそれらの結果について報告する。

2. 漏電場の電界強度に影響を及ぼす要因

漏電場はラプラスの場であり，その電界強度は漏電が発生した部分（以下漏電電極という）の電位を始め，漏電場に介在している物体の導電率（ここでは物体の導電率と海水の導電率との比），漏電電極の形状等，種々の要因の影響を受ける。ここでは，このような漏電場の電界強度に影響を及ぼす要因を次のように分類する。

まず，電界に影響を及ぼす要因としては，漏電場形成の直接的根源となった漏電電極の電位及び漏電電極の形状等が考えられる。次に，漏電場形成の直接的根源ではないが，漏電場となった媒質の電気的特性（ここでは海水の導電率，誘電率をいう）ならびに漏電場に介在する物体の電気的特性等が考えられる。この内，漏電場となった媒質の電気的特性は漏電場の電界を問題にする場合不可欠な要因で，前者の要因による電界，後者の要因による電界を論ずるにしろ，いずれも無視できない要因である。したがって，ここでは漏電場の電気的特性をも含めて，前者を漏電場の電界強度に影響を及ぼす直接的要因，後者を間接的要因と分類する。

Table 1 Main factors affecting electric field intensity induced in water by the leakage current of electric apparutus and those symbols
漏電場の電界強度に及ぼす要因とその記号

Factors	Symbols
Electric factors	
• Electric potential of power source	V_0
• Impedance of feeder	R_c
• Impedance of load	$Z_l=R_l+jX_l$
Geometric factors of leakage electrode	
• Size	a
• Shape	m
• Distance between leakage electrodes	d
Electric/geometric factors of objects existing in water	
• Electric conductivity	k_2
• Size	a
• Shape	m
Other factors	
• Electric conductivity of water	k_1
• Electric resistance between leakage electrodes	R_w or R_{cw}

一方，前者の直接的要因についてはさらに細分類し，漏電電極の電位に関係する要因を電気的要因，漏電電極の形状に関係する要因を幾何学的要因と分類する。具体的には，電源電圧，ケーブル・負荷・漏電場の海水インピーダンス等が漏電電極の電位に関係する要因であり，漏電電極の形状，大きさ，漏電電極間の距離等が幾何学的要因である。また，漏電場に介在している物体の導電率，形状，大きさ等が間接的要因であり，これらの要因についての分類した結果を **Table 1** に示す。なお，Table 1 にはそれらの要因とともに，それらの記号も合せて示した。

3. 各種要因の電界強度に及ぼす影響

漏電場の電界強度は漏電場に存在する各種の要因に依

存する。ここではこれらの要因の内，先に分類した直接的要因が電界強度に及ぼす影響について，電気的要因と幾何学的要因に分けて検討する。なお，以下の検討においては，その条件として漏電場が周波数 60 Hz 以下の電流において生成されるということにした。

3.1 電気的要因の影響

3.1.1 モデルの解析

水中漏電場の電界強度は漏電電極間の電位差 V_w に比例する。したがって，電界強度については V_w で論ずればよく，ここでは電界強度の代りに V_w が 2. で述べた電気的要因によってどう変化するかについて検討する。すなわち，V_w が電源電圧 V_0，負荷インピーダンス Z_l，漏電の発生状態等によってどのような影響を受けるかについて検討する。

まず，水中漏電が発生した状態は，等価回路によって表わすと，**Fig. 1** のようになる。ここで，R_c は電源から漏電発生点までのケーブルのインピーダンス，R_{cw} は漏電発生点から負荷までのケーブルのインピーダンス（ケーブルの心線が水中に露出しただけで断線しない場合に相当），ないしは，これに漏電発生点からケーブルあるいは負荷までの水中における漏れ電流路のインピーダンスを含めたもの（ケーブルが断線した場合に相当），R_w は漏れ電流のみからなる漏電場のインピーダンスである。ただし，ここでは 60 Hz 以下という低周波を対象にしたため，ケーブル及び漏れ電流路のリアクタンス成分は省略し，抵抗成分のみで表わしている。また Fig. 1 に示した等価回路は単相給電方式で，電源の一端が船体等の共通導体に接続されていて，ケーブルの電圧側の一線から漏電が発生したとか，ケーブルの2心が露出あるいは断線して漏電が発生し，水中に電流が漏れた場合に相当する。なお，この等価回路は漏電電極と水との界面での電位降下を考慮していないが，これで論ずると漏電による電撃危険について，危険側の問題を取り扱っていることになる。以上のように，水中漏電を等価回路 Fig. 1 で表わすと，水中漏電場に発生する電位差 V_w は次のようになる。

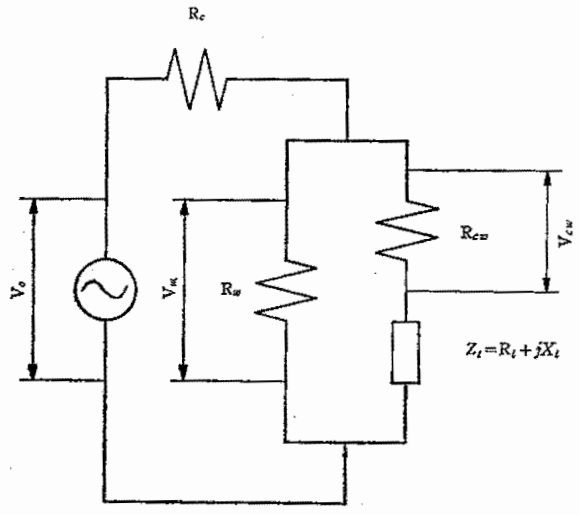


Fig. 1 The model of the electric leakage in water and its simplified equivalent circuit 漏電場のモデルとその等価回路

$$|V_w| = \frac{R_w \cdot \sqrt{(R_{cw}+R_l)^2+X_l^2} \cdot |V_0|}{\sqrt{\{R_c \cdot R_w+(R_c+R_w)(R_{cw}+R_l)\}^2+X_l^2(R_c+R_w)^2}} \quad (1)$$

一方，ケーブルが断線したような場合，Fig. 1 の R_{cw} も漏電場になる。この漏電場にできる電位差 V_{cw} はケーブルの抵抗が無視できる場合もあるため，最大電位差は次のようになる。

$$|V_{cw}| = \frac{R_w \cdot R_{cw} \cdot |V_0|}{\sqrt{\{R_c R_w+(R_c+R_w)(R_{cw}+R_l)\}^2+X_l^2(R_c+R_w)^2}} \quad (2)$$

（1），（2）式より明らかなように，$|V_w|$ 及び $|V_{cw}|$ は R_w が大きいと増加する傾向がある。したがって，単純に比較すると導電率の小さい淡水の方がそれの大きい海水よりも $|V_w|$，$|V_{cw}|$ が大きくなる。すなわち，電撃危険性は海水より淡水の方が高いということになるが，これについては後で検討する。また，電位差はともに負荷に関係しているが，$|V_w|$ は R_l が小さくても，大きくても大きくなり，次の R_l において最小となる。

$$R_l = \frac{-R_c R_w - 2R_{cw}(R_c+R_w) + \sqrt{R_c^2 R_w^2 + 4X_l^2(R_c+R_w)^2}}{2(R_c+R_w)} \quad (3)$$

しかし，$|V_{cw}|$ の方は R_l が大きくなると，電位が R_l と R_{cw} によって分割されるために小さくなる。

3.1.2 数値例

数値例として 1 kW の水中照明器具を 100 V で使用中，ケーブルの被覆が破損し，断線はしなかったがそこから漏電が発生した場合の電界強度を考えてみる。この条件は，水中の漏電場が負荷に対し並列となる場合で，

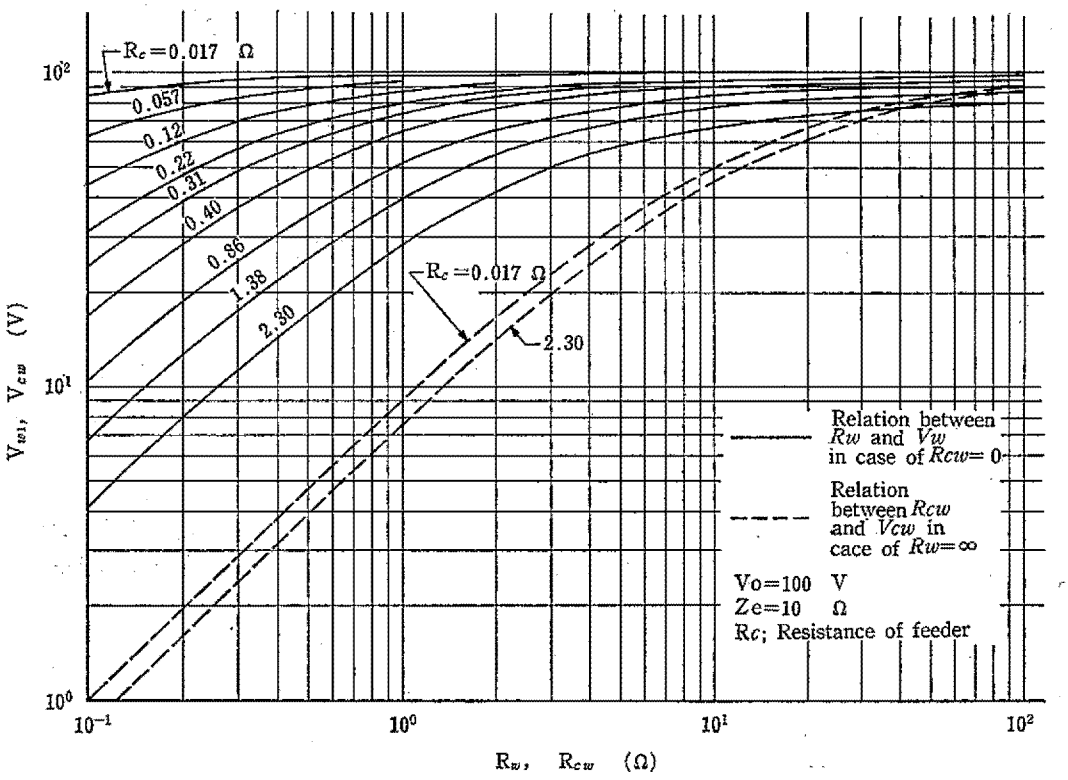


Fig. 2 Numerical examples of electric potentials V_w and V_{cw} at the leakage model
漏電路における電気抵抗 R_w, R_{cw} とその電位差 V_w, V_{cw} との関係を示す数値例

しかも V_w が最大となる条件でもある。

（1） 式に V_0=100 V, Z_l=10 Ω, R_{cw}=0 Ω を代入すると，V_w は R_w 及び R_c によって変化し，R_c をパラメータとした R_w と V_w との関係は **Fig. 2** の実線により表される。ただし，Fig. 2 の R_c の値としては，使用温度 20°C，長さ 100 m のケーブルで，その導体公称断面積から定まる抵抗値を採用した。

ここで，参考のために導電率の異なる海水と淡水において，電撃危険性にどのような差異があるか，Fig. 2 の数値例を基にして比較してみる。いま，海水の導電率を 6.0 S/m，淡水のそれを 0.03 S/m とする。また，海水での R_w を 0.1 Ω とすると，R_w は導電率に反比例するから他の条件が同じであると，淡水での R_w は 20 Ω となる。R_c が 0.49 Ω であれば，Fig. 2 より海水での V_w は約 17 V，淡水のそれは約 93 V となる。このように淡水での V_w は海水の約 6 倍となり，電界強度も淡水の方がより大きくなる．ウサギを用いた実験結果によると，心停止の発生する電界強度は淡水のそれが海水の約 2.4 倍であり[2]，これを尺度にすると，淡水の方がより危険な場合もあることを示している。

なお，Fig. 2 では参考までに，ケーブルが断線して漏電が起こり，漏電場が R_{cw} のみで生じた場合（R_w=∞）の V_{cw} も破線によって示した。

3.2 幾何学的要因の影響

3.2.1 モデルによる解析

漏電場の電界強度に影響を及ぼす幾何学的要因の主なものは漏電電極の大きさ，形状，漏電電極間の距離である。ここではこれらの幾何学的要因の電界に及ぼす影響について，それぞれ検討する。ただし，以下の検討では，その対象とする要因が効果的に調べられ，他の要因の影響ができるだけ少ないモデルを考え，このモデルにより行なった。

（1） 漏電電極の大きさ

大きさの影響については **Fig. 3** に示すように，漏電電極を形状の影響が小さい半径 a の球とし，これからの漏れ電流が水中において無限遠方に発散して行くモデルによって検討する。モデルをこのように設定すると，漏電場の電界強度 E_P は点 P(r_P) において，漏電電極の

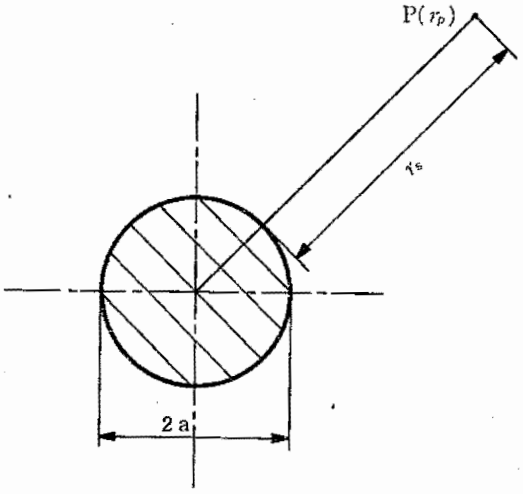


Fig. 3 The model for studying electric field intensity affected by the size of the leakage electrode
漏電電極の大きさの影響について調べるモデル

電位を V_w としたとき次式のようになる。

$$E_P=\frac{aV_w}{r_P{}^2}=\frac{aV_w}{(r_s+a)^2} \qquad (4)$$

ただし，V_s：球表面からP点までの距離 ($=r_P-a$)

これより，E_P は漏電電極に近い場所 (V_s の小さい) ほど大きく，漏電電極の表面において最大となる。また，その値は（3）式より得られ，次のようになる。

$$(E_P)_{r_s=0}=V_w/a \qquad (5)$$

（4），（5）式から明らかなように，漏れ電流が分散して行くような漏電の場合は，漏電電極の電位を一定としたとき，その表面が漏電場のいずれの電界より大きな電界強度となり，しかもその値は（5）式から明らかなように漏電電極の大きさが小さい（aが小さい）ほど大きくなる。したがって，（4），（5）式はaが小さくなると，いずれは電極表面のみならず，その近傍の電界強度まで電撃の危険限界を与える電界強度 E_T よりも大きくなることを示唆している。すなわち，電撃危険領域が発生するのであり，この電撃危険領域となる E_T を越える範囲は，（4）式から次の不等式の形で示される。

$$E_P=a\cdot V_w/(r_s+a)^2\geqq E_T \qquad (6)$$

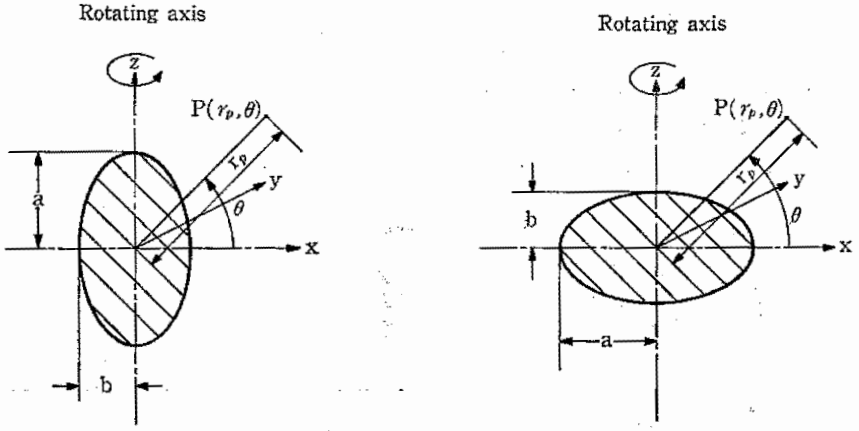
（6）式を r_s によって解くと，次のようになる。

$$a\leqq r_s\leqq\sqrt{(V_w/E_T)\cdot a}-a \qquad (7)$$

これより（5），（7）式に着眼すると，漏電電極の大きさaが小さいと電界強度は大きくなるが電撃危険領域となる範囲も小さく，aが大きいと電界強度が小さくなるとともに E_t を越える範囲も小さくなってくる。結果的には，（7）式より $a=V_w/(4E_T)$ のとき最も大きな危険領域 $r_s=a(=V_w/(4E_T))$ となり，aがこれ以下であると，電界強度の最大が E_T 以上になっても E_T を越える電撃危険領域の範囲は小さくなる。

（2） 漏電電極の形状

形状の影響は漏電電極を回転だ円体とし，これから漏れ電流が無限遠方に分散して行くモデルによって検討する。すなわち，**Fig. 4** に示すように漏電電極を長軸 $2a$ と短軸 $2b$ の回転だ円体とし，その比 $m(=a/b)$ を変



(a) Revolutionary ellipse in prolate axis　　(b) Revolutionary ellipse in oblate axis

Fig. 4 The model for studying electric field intensity affected by the shape of the leakage electrode
漏電電極形状の影響について調べるモデル

化させたときの電界強度を調べることによって，形状が電界強度に及ぼす影響を検討する。ただし，ここでは大きさの影響をできるだけ小さくするため，Fig. 4 に示す回転だ円体の x, y, z 軸それぞれの断面における長軸と短軸の和 ($2a+b$ または $a+2b$) は一定との条件で mを変えて調べることにする。このようにすると，mを変化させることにより形状は，球状から棒状，あるいは円板状に変化させることができ，形状の電界強度に及ぼす影響を概略把握することができるからである。

漏電場のモデルを上述のように設定すると，漏電場の電界強度 E_p はP点において，漏電電極の電位を V_w としたとき，球面座標 (r_P, θ, φ) で表わすと次のようになる[3]。回転軸が長軸の場合 (Fig. 4(a))，

$$E_P=\frac{1}{c}\cdot\frac{V_w}{Q_0(\lambda_0)}\cdot\frac{1}{\sqrt{(\lambda^2-1)(\lambda^2-\mu^2)}} \quad (8)$$

ただし，$c=\sqrt{a^2-b^2}$, $\lambda_0=a/c$

$\lambda=(\sqrt{r_P^2+2cr_P\sin\theta+c^2}+\sqrt{r_P^2-2cr_P\sin\theta+c^2})/(2c)$

, $\mu=(\sqrt{r_P^2+2cr_P\sin\theta+c^2}-\sqrt{r_P^2-2cr_P\sin\theta+c^2})/(2c)$

, $Q_0(\lambda_0)=1/2\cdot\ln\{(\lambda_0+1)/(\lambda_0-1)\}$

回転軸が短軸の場合 (Fig. 4 (b))，

$$E_P=\frac{1}{c}\cdot\frac{V_w}{\cot^{-1}(\lambda_0)}\cdot\frac{1}{\sqrt{(\lambda^2+1)(\lambda^2+\mu^2)}} \quad (9)$$

ただし，$c=\sqrt{a^2-b^2}$, $\lambda_0=b/c$

, $\lambda^2+1=(r_P^2+c^2+\sqrt{(r_P^2-c^2)^2+4c^2r_P^2\sin^2\theta})/(2c^2)$

, $\lambda^2+\mu^2=\sqrt{(r_P^2-c^2)^2+4c^2r_P^2\sin^2\theta}/c^2$

(8), (9) 式から明らかなように，E_P は漏電電極が回転だ円体であるため r_P, θ に依存し，φ には無関係となる。また，E_P は θ に対して $0\leqq\theta\leqq\pi/2$ の範囲について検討すれば良く，θ が一定とすると，E_P は漏電電極に近い場所ほど大きくなり，漏電電極の表面において最大となる。すなわち，表面の最大電界強度は，回転軸が長軸の場合 $r_P=a$, $\theta=\pi/2$ で，回転軸が短軸の場合 $r_P=a$, $\theta=0$ で，次式のようになる。

回転軸が長軸の場合，

$$E_{max}=\frac{(m+2)\cdot\sqrt{m^2-1}}{n_P\cdot\ln(m+\sqrt{m^2-1})}\cdot Vw \quad (10)$$

回転軸が短軸の場合，

$$E_{max}=\frac{(2m+1)\cdot\sqrt{m^2-1}}{n_0\cdot m\cdot\tan^{-1}\sqrt{m^2-1}}\cdot Vw \quad (11)$$

ただし，これらの式は形状との関係を明確にするため，m 及び大きさを表わす n_P, n_0 ($n_P=a+2b$, $n_0=2a+b$) を用いて示した。

(10), (11) 式より形状の変数として用いた m の E_{max} に与える影響を回転軸が長軸の場合と短軸の場合に分けて検討すると，以下のようになる。

回転軸が長軸の場合，m の E_{max} に与える影響は，数値を代入して検討した結果，mが大きくなるにしたがい E_{max} は大きくなる。一方，回転軸が短軸の場合についても同様に，m の E_{max} の影響を調べたところ，mが大きくなるにしたがい E_{max} は増加するという長軸の場合と同様の結果が得られた。

以上の検討から，いずれもmが大きくなるにしたがい言い換えれば，形状が鋭くなるにしたがい最大電界強度は大きくなり，最大の電界強度から評価した電撃危険性は増すことが示唆された。しかし，ここでも電撃危険領域は先の（1）と同様にある m において最大範囲となり，m が大きくなるにしたがい小さくなると類推される。

（3） 漏電電極間の距離

二つの漏電電極間の距離が電界強度に及ぼす影響は，漏電電極の極性を考慮しなければならない。したがって，ここでは極性が異なる場合と同じ場合について検討する。たとえば，前者は通常の線間で漏電が生じた場合であり，後者は，電源が同一で分岐回路が2回線の場合で同じ極性・電位をもつ線から漏電が生じたようなときである。

検討するモデルは，電極間の距離の影響を効果的に示すため，**Fig.** 5 に示すように漏電電極は両者とも半径 a の球とし　漏電電極間の距離は $2d$ とした。また，漏電電極の電位の絶対値を　無限遠方の電位を基準として V_w とした。このようなモデルでは，電極の極性にかかわらず，漏電場に形成される電界が2個の球電極の中心を通る線に対して対称である。また，球の中心から等距離にある平面において，漏電電極の極性が異なる場合

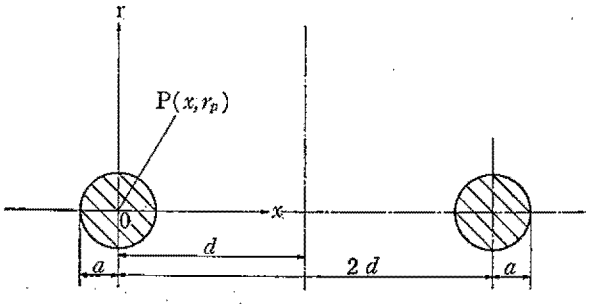


Fig. 5　The model for studying electric field intensity affected by the distance between the leakage electrodes
漏電電極間の距離の影響を調べるモデル

は，電界の接線成分が零となり，極性が同じ場合は，電界の法線成分が零となる。したがって，この漏電場の電界は，漏電電極の極性が異なる場合，球と導体平面，極性が同じ場合，球と絶縁平面とによって形成される電界と等価になり，影像法によって求まる[3]。

いま，座標を Fig. 5 に示すように定めると，点P(x, $r_P=\sqrt{y^2+z^2}$) での電界 E_P は次式となる。ただし，q_0, q_i, q_i' は電流源の強さを，x_i, x_i' は x 軸上の電流源の位置を表わす。

$$\vec{E}_P=\frac{1}{4\pi\kappa}\sum_{i=1}^{\infty}\left[\frac{q_i\{(x-x_i)\cdot\vec{x}+r_p\cdot\vec{r}\}}{\{(x-x_i)^2+r_p{}^2\}^{3/2}}+\frac{q_i'\{(x-x_i')\cdot\vec{x}+r_p\cdot\vec{r}\}}{\{(x-x_i')^2+r_p{}^2\}^{3/2}}\right] \quad (12)$$

ただし，$q_0=4\pi\kappa aV_w$, $q_i=-a\cdot q_{i-1}'/x_{i-1}'$, $q_i'=\mp q_i$(極性が異なる場合－，極性が同じ場合＋), $x_0=0$, $x_i=a^2/x_{i-1}'<d$, $x_i'=2d-x_i>d$, $\vec{x}$：x 方向の単位ベクトル，$\vec{r}$：r 方向の単位ベクトル

すなわち，E_P は (12) 式のように級数の形で表わされるが，この式から電極間の距離の電界強度に及ぼす影響を，漏電場全体にわたって一般的に論ずることは余り意味がない。このため，ここでは電撃危険性に最も影響がある最大電界強度，つまり，表面の最大電界強度について検討する。ただし，ここでは (12) 式の近似式として3項までを採用すると，極性が異なる場合は，$x=a, x_P=0$，極性が同じ場合は $x=-a$，$r_P=0$ で最大電界強度をとり，次のようになる。

漏電電極の極性の異なる場合，

$$E_{max}\fallingdotseq\left(\frac{1}{a}+\frac{2d}{(2d-a)^2}+\frac{a}{(2d-a)^2}\right)V_w \quad (13)$$

また，漏電電極の極性が同じ場合，

$$E_{max}\fallingdotseq\left(\frac{1}{a}-\frac{2d}{(2d+a)^2}+\frac{a}{(2d+a)^2}\right)V_w \quad (14)$$

これより，(13)，(14) 式に着眼して，電極間の距離が電界強度に及ぼす影響を調べると，次のようになる。

まず，漏電電極の極性が異なる場合，電極間距離が大きくなるにしたがい最大電界強度は減少し，当然のことながら，単一の球の漏電電極における最大の電界強度に近づく。次に，漏電電極の極性が同じ場合，逆に電極間の距離が大きくなるにしたがい最大電界強度は増加し，単一の漏電電極における最大の電界強度に近づく。

以上の検討から，電撃危険性について考察すると次のようになる。

漏電電極の極性が異なる場合，漏電電極間の距離が小さくなるほど電撃危険性は大きくなる。しかし，漏電電極の極性が同じ場合，電撃危険性は単一の漏電電極の場合よりも常に小さい。

3.2.2 数値例

幾何学的要因の電界強度に与える影響を数値例により以下に示す。なお，数値例のモデルは 3.2.1 で用いたモデルとする。

(1) 大きさ

半径 a の球から漏れ電流が無限遠方に発散していくモデル (Fig. 3) を用いて，電界強度 E_P と球の大きさ a との関係及び電撃危険領域（下肢強直）と a との関係を数値例により示す。

まず，**Fig. 6** は E_P と a との関係を，球表面からの距離 r_s をパラメータとして示した図である。この図において，$r_s=0$ の曲線は各 a における表面電界強度を表わしており，(3) 式からわかるように，それは a が2倍になると 1/2 倍となる。また，Fig. 6 より任意の r_s での E_P は漏電電極表面 ($r_s=0$) のそれより小さいものの，a の大きさの影響を大きく受ける。すなわち，Fig. 6 に示すように，r_s での E_P は $a=r_s$ のとき最大となり，a がこれより大きくなっても，小さくなっても，E_P は減少する。Fig. 6 に示す破線はそのことを示したもので，漏電電極表面からある距離 r_P における E_P は a が変化しても破線で示す値を越えないことを表わ

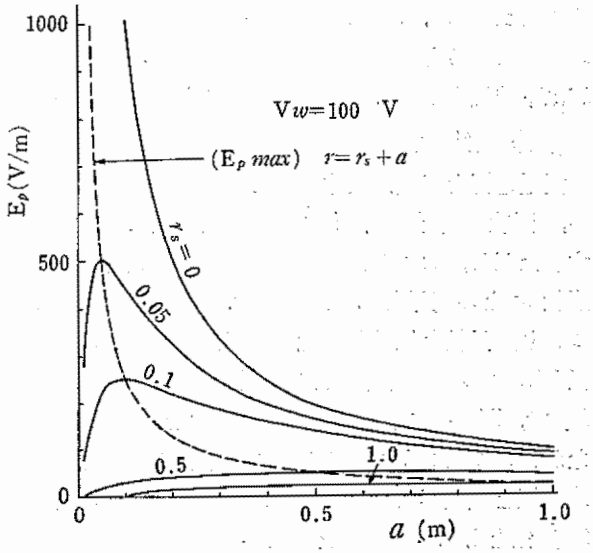


Fig. 6 Numerical example of electric field intensity E_p affected by the size of the leakage electrode
漏電電極の大きさ a と点 P での電界 E_p との関係を示す数値例

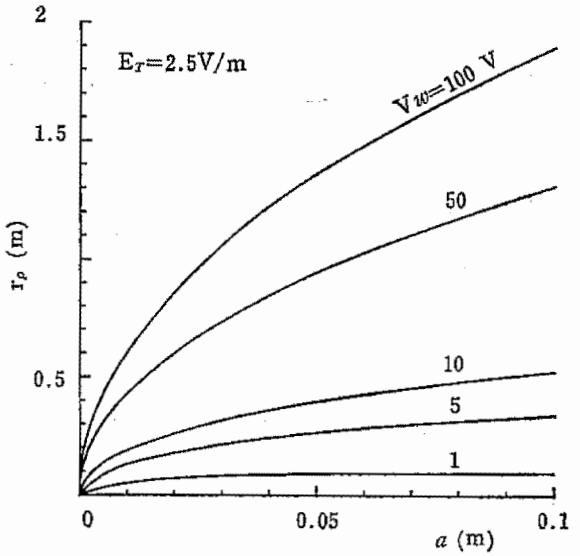


Fig. 7 Numerical example of electric shock area induced near the leakage electrode in water
漏電電極の大きさ a と下肢強直許容範囲 r_p との関係を示す数値例

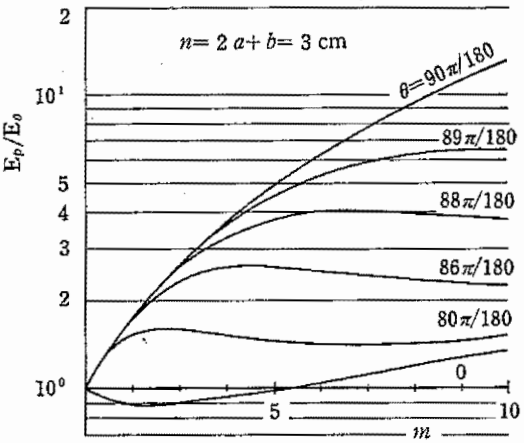
している。

次に，**Fig. 7** は（7）式の関係，すなわち漏電電極近傍にできる電撃危険となる範囲を示したもので，Fig. 7 ではその範囲 r_P が a とともにどう変化するか，漏電電極の電位 V_w をパラメータとして示してある。ただし，ここで用いた電撃危険の尺度 E_T は水中における下肢強直の許容電界強度で，2.5 V/m を採用している[4]。たとえば，Fig. 7 で漏電電極が半径 10 mm，電圧 100 V であると，漏電電極表面から約 0.62 m までの領域は下肢強直の起こる範囲であることを示している。

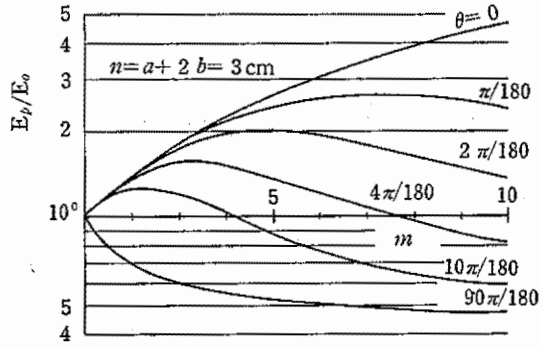
（2） 形　状

漏電電極を回転だ円体としてモデル解析した結果を用い，形状が電界に及ぼす影響を数値例で **Fig. 8** に示す。ただし，Fig. 8 は回転だ円体表面の電界強度 E_P と形状 m との関係を示したもので，Fig. 8 の横軸は m，つまり，長軸と短軸との比 a/b である。また，縦軸は半径 10 mm の球状漏電電極の表面電界強度 E_0 との比 E_P/E_0 で，Fig. 4 に示す θ をパラメータとして示してある。なお，Fig. 8 に示す回転だ円体の大きさは半径 10 mm の球電極と比較ができるように，$n_P(=2a+b)$，$n_0(=a+2b)$ はともに 30 mm としている。

Fig. 8（a）は回転軸が長軸における E_P と m との関係であり，漏電電極表面の電界強度は $\theta=\pi/2$ で，他の θ より常に大きく，m が大きくなるにしたがい増大する。すなわち，形状が棒状のように鋭くなると E_P も大きくなる。また，Fig. 8（b）は回転軸が短軸における E_P と m との関係であり，漏電電極表面の電界強度は $\theta=0$ で他のより常に大きく，（a）と同様に m が大きくなるにしたがい増大する。すなわち，形状が円板のように鋭くなると E_P も大きくなる。ただ，Fig. 8 で明らかなように，表面の電界強度 E_P は m が大きくなるといかなる θ についても大きくなるとは限らず，電極全表面での鋭さが m に比例しないため，ある表面の E_P は減少することもある。



(*a*) In case of revolutionary ellipse in prolate axis



(*b*) In case of revolutionary ellipse in oblate axis

Fig. 8 Numerical example of electric field intensity E_p/E_0 affected by the shape of the leakage electrode
漏電電極の形状 m と正規化した表面電界強度 E_p/E_0 との関係を示す数値例

（3） 漏電電極間の距離

Fig. 5 に示すモデルによって解析した結果を用い，漏電電極間の距離が電界強度に及ぼす影響の数値例を **Fig. 9** に示す。ここで，Fig. 9 の横軸は d で，漏電電極間の距離はこの2倍であるが，傾向が同じであるため d で示

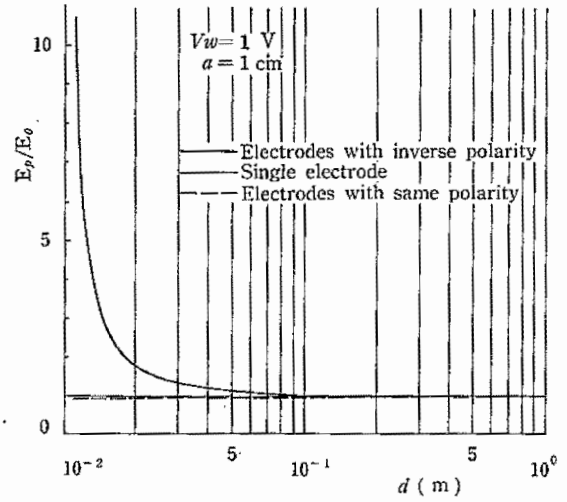


Fig. 9 Numerical example of electric field intensity E_p/E_0 affected by the distance between the leakage electrodes
漏電電極間の距離 d と正規化した表面電界強度 E_p/E_0 との関係を示す数値例

している。また，縦軸は電極表面の E_P を d が十分に大きい単一漏電電極の表面電界強度 E_0 で正規化した E_P/E_0 で示してある。

Fig. 9 から明らかなように，漏電電極の極性が異なると常に $E_P > E_0$ で，それが同じ場合は $E_P > E_0$ である。また d が大きくなるにつれ E_P/E_0 は1に近づき，d の影響は小さくなる。すなわち，d の影響は電極の大きさの約 10 倍程度までで，これより d が大きくなるとその影響は十分に小さくなる。

4. あとがき

本稿では水中漏電場の電界強度に影響を及ぼす要因を調べ，それについて検討した。方法は要因の電界強度に及ぼす影響をできるかぎり効果的に扱えるように，漏電場をモデル化する。そして，そのモデルを用いて各要因の電界強度に対する影響を解析し，その数値例を示す。ただし，実験では漏電電極表面で電位降下が観測される等，電極表面には特有な電界が生じていると予想される。しかし，これについては考慮していない．それはこの点を考慮しない方が危険性を評価する上では厳しい評価となり，電撃防止上，不都合はないと考えられるからである。

以上のような方法で検討した結果，2～3のことが解明され，その結果を以下に示す。

（1） 電気的要因

これは，電源電圧，ケーブル・漏電場の抵抗，負荷のインピーダンス等で，漏電電極の電位に関係する要因である。電源電圧・漏電場の抵抗の増加，ケーブル抵抗の減少は漏電場の電界強度を大きくする。

（2） 幾何学的要因

これは，漏電電極の大きさ・形状，漏電電極間の距離等の漏電電極の幾何学的特性に関係する要因である。

1） 大きさ

漏電電極が大きくなるほど最大の電界強度は小さくなる。また，半径 a の球から漏れ電流が無限遠方に拡散していくモデルにおいて，球表面からの距離 r_P における電界強度は a によって大きく変化し，$a=r_P$ のとき最も大きくなる。

2） 形　状

最大の電界強度は形状が鋭くなるほど大きい。

3） 漏電電極間の距離

漏電電極間の距離の電界強度に対する影響は，2個ある漏電電極の極性に関係する。すなわち，極性が異なる場合は，その同じである場合より最大電界強度が常に大きくなる。

以上が本稿の検討結果であるが，本稿で示さなかった要因，具体的には，水中に持ち込まれた工具・装置等のうち漏電電極となっていない物，つまり，水中に介在する物体が水中漏電場の電界強度に及ぼす影響については次稿で扱う予定である。

なお，本稿における数値例は当研究所の電子計算機システム FACOM MG 50 により求めたものである。

（昭 57.3.26 受付）

参考文献

1） “第7回海洋開発セミナー予稿集”，海洋科学技術センター，(1982)，他
2） “海中における電撃危険性とその防止に関する研究（IV）”，労働省産業安全研究所，(1981)
3） 清野　武，“現代電気工学講座・電気磁気学 I”，オーム社，(1964)，他
4） 山野英記・本山建雄・田畠泰幸，“水中において下肢強直を起こす電撃の強さと許容限界”，産業安全研究所報告（RR-30-1），(1981)

産業安全研究所研究報告 RIIS-RR-30-2

昭和 57 年 7 月 15 日 発 行

発行所 労働省産業安全研究所
〒 108 東京都港区芝5丁目35番1号
電 話 (03) 453—8441 (代)

印刷所 新日本印刷株式会社

UCD 621.3.014.6 (204) : 614.825

水中漏電場の電界強度に関する検討

——漏電電極と電界強度の関係——

本山建雄・山野英記・田畠泰幸

産業安全研究所報告 (RIIS-RR-30-2) 1982

水中電撃防止の基礎資料を得るため，漏電電極に伴う要因と水中漏電場の電界強度との関係を漏電場モデルを用いて解析的に検討し，その数値例を示した。

なお，要因は漏電電極の電位に関係する電気的要因と漏電電極の幾何学的特性に関係する幾何学的要因とに分けられ，前者は電源電圧 V_0 漏電電極間の抵抗 R_w 等であり，後者は漏電電極の大きさ a，形状の尖鋭さ m，漏電電極間の距離 d 等である。

これら要因の電界強度への影響を検討したところ，V_0 の増加，R_w の増加，a の減少，m の増加，二つの漏電電極が異極性のとき d の減少及び同極性のとき d の増加は，最大電界強度を増加させるという結果が得られ，最大電界強度から見た電撃危険性は，それらの場合において大きくなると考えられる。(表 1，図 9，参 4)

UDC 621.3.014.6(204) : 614.825

Investigation into Electric Field Intensity Induced in Water by Leakage Electric current

—Relation of Electrode to Electric Field Intensity—

T. MOTOYAMA, E. YAMANO, and Y. TABATA

Research Report of the Research Institute of Industrial Safety
RIIS-RR-30-2(1982)

The purpose of this study is to get fundamental data on the prevention of the electric shock in water, and the electric shock hazard in water corresponds closely with the electric field intensity.

In this report, the electric field intensity affected by factors of the leakage electrode was studied analytically with numerical examples.

Studied factors are electric potential of power source (V_o), resistance of feeder (R_c), resistance between leakage electrodes in water (R_w), size of elecctrode (a), sharpness of the figure of electrode (m), etc.

The main resurt of the study are as follows : By increasing(V_o), (R_w) and (m) and decreasing (R_c) and (a), the maximum intensity of electric field will be increased. (1 Table, 9 Fig., 4 Ref.)