

Research Report of Research Institute
of Industrial Safety, RIIS-RR-88, 1988
UDC 614.825,621.316,626.02

水中電撃防止方法の検討
— 接地した金網による漏電電流の遮へい効果* —

本山 建雄**, 山野 英記**

Consideration of Prevention Method against Electric Shock Underwater
— Shield Effect of Fault Current by Grounded Mesh Set Underwater —

by Tatsuo MOTOYAMA** and Eiki YAMANO**

Abstract; With a widespread of an ocean development, various electric appliances have widely been used in sea and river, but workers such as divers are exposed to electric shock hazards caused by fault current from the electric appliances at work on the spot underwater. A few fundamental studies have been carried out to prevent the electric shock hazards underwater.

One of them is to shield the fault current using a grounded mesh set underwater.

It has already become clear that the shield with grounded mesh is effective to reduce the fault current and that its effect depends on properties of mesh, electrical conductivity of water and objects existing in the vicinity of the mesh.

Furthermore, the shield effect of fault current underwater is generally known to depend on an interfacial impedance between the grounded mesh and water, especially in a case that conductivity of water is high. However, an influence of the interfacial impedance on the shield effect has hardly been investigated since it is impossible to be deduced theoretically and must be investigated experimentally according to the combination of the mesh and water.

From the background described above, the purpose of this study is to investigate the shield effect of the grounded mesh, including the interfacial impedance, for reducing the fault current underwater. The shield effect of square meshes made of a few kinds of material with various pitch and diameter was examined experimentally using a typical experimental setup, a water tank simulating the fault current underwater, which consists of two electrodes and grounded mesh set in water of various conductivities. On the other hand, the interfacial impedances between a few kinds of meshes and water also measured, and their influence on the shield effect were considered from an electrical circuit theory.

The results obtained from the above experiments and considerations are summarized as follows:

- (1) An interfacial impedance between the mesh and water depends primarily on a kind of materials, contact area with water and conductivity of water. For example, in the contact with water of conductivity 5.9 S/m and temperature 20 °C, a value of the interfacial impedance of metal plate per 1 cm² was 9 Ω in steel, 18 Ω in copper and 56 Ω in stainless steel, respectively.
- (2) An interfacial impedance affects directly the shield effect of the fault current underwater since it increases in inverse proportion to the contact area of the mesh with water and the contact area of mesh with water is small.
- (3) The shield effect of the grounded mesh depends on the shape and material of mesh,

* 第21回安全工学研究発表会において発表

** 電気研究部 Electrical reserch division

conductivity of water and interfacial impedance. For example, evaluating the shield effect as ratio decrease fraction of the fault current underwater suppressed with mesh to that unsuppressed without mesh, the shield effect of the grounded mesh, pitch 20 cm and diameter 2mm, hardly depends on the material of mesh and was approximately 80% in water of conductivity 0.1 S/m, but it depends on the material of mesh due to the interfacial impedance in water of conductivity 5.9 S/m. According to experiments the shield effect was 74% in steel, 67% in copper and 46% in stainless steel mesh, respectively.

(4) The grounded mesh is useful to relaxate the electrical shock underwater, but not perfect to prevent it. Consequently, in addition to the grounded mesh, other methods must be applied in order to prevent the electric shock hazards underwater.

keyword: industrial safety, electric shock, underwater work, interfacial impedance, shielding mesh, protection

1. まえがき

近年、港湾工事、沈没船の引き揚げ、海洋牧場等において、水面、水中等の水域で作業をする機会が増えている。また、海洋開発は実用化の段階を迎え、水都都市や余暇利用のための施設等、水域の利用計画も数多く提案されており¹⁾、今後、水中での作業が増加することが予測される。

水域での作業には照明器具をはじめ、水中電気溶接機、水中土木機械（ブルドーザ、トレンチャ等）等、電気を動力源とする機器が使用されている。また、海洋牧場においては電着魚礁、電気魚網等の使用も実用化されつつある。

水中で使用中の電気機器から漏電が発生すると漏電電流は広く分布して流れ、周辺の水域に漏電電流の場を形成する。この場合は、条件によって水中作業者が電撃を受ける危険性がある。しかし、水中での電撃の防止対策は確立されておらず、また、これに関する文献も少ないのが現状である²⁾³⁾⁴⁾。

水中での電撃の防止方法は、防止対策を施す対象によって、電源を対象にする方法、水中の作業者を対象にする方法、漏電の発生している場（以下、漏電場と記す）を対象にする方法に分けて考えることができる。

電源を対象にする方法は、漏電が発生しても電撃の危険領域が生じないように電源電圧、周波数等を制御するとか、漏電を検出して回路を遮断する等の方法⁵⁾が考えられる。作業者を対象にする方法としては、ドライスーツによって作業者を電氣的に絶縁したり、作業員自体に加わる電界を小さくするような導電性のスーツを着用する方法が考えられる。漏電場を対象にする方法としては、漏電部を接地した金網で囲み、作

業領域へ漏れ出す電流を遮へいするとか⁶⁾、漏電場中の特定の領域を金網で囲み、漏電電流の小さい安全な領域を作る等の方法が考えられる。これらの方法はそれぞれ長所があるが、水中という特殊な環境のため単独では不十分なことが多く、併用することが望ましいと考えられる。

本研究で検討した方法は、接地した金網を漏電場に置いたときに生じる電界の変化を利用するもので、作業領域の電界が小さくなるように金網を配置し、電撃危険のある領域の縮小や安全な領域の確保を目的とする方法である。ここでは、接地した金網を用いて電界を減少させる方法の基本的な特性を、水槽を使用したモデル実験から検討した⁷⁾。その結果、金網を用いて電界を小さくする効果、いわゆる遮へい効果は、単に金網の特性のみによって定まるのではなく、水と金網の境界面において生じる界面のインピーダンスの影響を受け、水の導電率、金網の形状、材質によっても大きく異なることが明らかとなった⁸⁾。

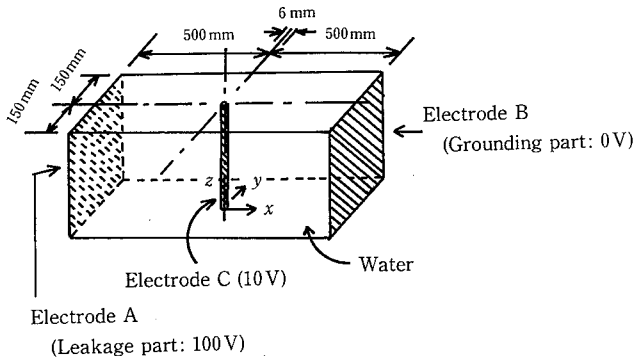
本報では、金網の遮へい効果と水の導電率及び金網の基本的な要素（網線の太さ、網目一辺の長さ、金網の材質等）との関係について報告する。

2. 金網の設置と漏電場の電位分布

金網による漏電場の電位分布の変化を Fig. 1 の漏電場モデルを例として検討すると、次のようになる⁷⁾。

この漏電場モデルは Fig. 1 (a) に示すように、平行平板電極 AB 間の中央に円柱の電極 C が電極と平行に配置されている場であり、周囲は絶縁物の箱（直方体）で囲まれている。電極 AB 間の距離は 1,000mm、電極 A 及び B の幅は 300mm、電極 C の直径は 6 mm である。また電極 A の電位は 100V、電極 B の電位は 0V、

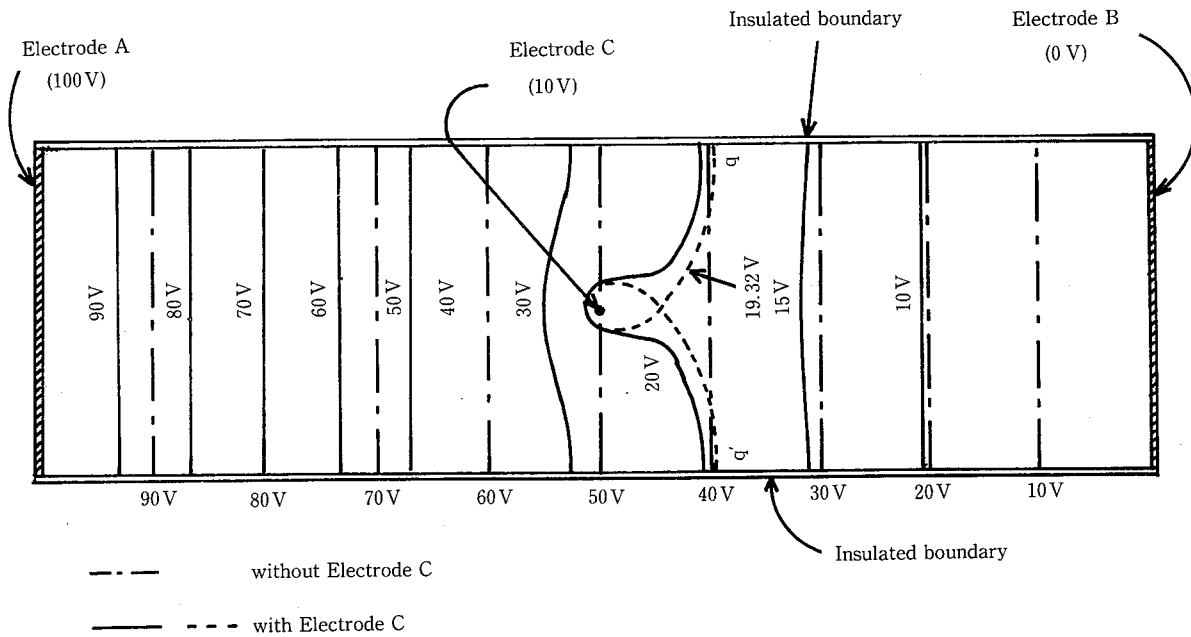
そして電極Cの電位は10Vである。電極Cは、接地された金網に対応することから電極Cの電位は電極Bと



(a) Model used for analyzing fault current underwater.
水中漏電場の解析モデル

同じ電位0Vになるはずである。しかし、実際には、接地した金網の、ケーブルの抵抗や金網と水との界面のインピーダンス等のため電位が高くなると考えられる。このことを考慮して、ここでは便宜上10Vとした。

Fig. 1 (a)の電位分布はZ方向に対して変化しないことから、二次元の場合(xy平面)として扱うことができる。この場合は等角写像法による近似解⁹⁾で表すことができ、数値計算の結果はFig. 1 (b)のようになる。Fig. 1 (b)より、等電位線は電極AC間において密になり、電極BC間において疎になっていることがわかる。いいかえれば、BC間においては電極Cを置く以前より電界は小さくなるが、AC間では逆に大きくなっていることがわかる。金網を使用した場合の電撃の防止には、BC間のように電界が小さくなる場所を利用する。なお、破線qq'は電極Cを囲み、電極AB間を分ける等電位線である。



(b) Example of equipotential lines obtained from analysis.
電位分布の計算例

Fig. 1 Variation of potential distribution in electric field due to Electrode C.
金網の設置による漏電場電位分布の変化

3. 実験

接地した金網の基本的な要素とそれによる電界の遮へい効果（以下、金網の効果と記す）との関係を基本的な漏電場を模擬した水槽を用いて求めた。なお、水の導電率が高いほど金網の効果が悪くなることから、水の導電率が高い条件での実験を中心に行った。これにより、金網の効果を安全側に評価することができる。

3.1 漏電場モデル

漏電場モデルを Fig. 2 (a), (b) に示す。これは、漏電電流が均一に流れている水中に正方形網目の接地した金網を、漏電電流に対して垂直に配置した場合の漏電場を模擬したものである。この場合、電界の小さくなる範囲は接地体と金網の間となる。このモデルは、金網を設置する前の電流が均一であること、また、境界条件によっては、金網を設置しても金網の周辺を除く場所での電流分布は均一になるものとして扱えるなど金網の設置による影響を明かにしやすい。

Fig. 2 (b) の漏電場モデルは金網を含む平面において Fig. 2 (c) のようになり、Fig. 2 (c) の斜線で示した三角形を断面とする三角柱を組み合わせたものとして考えることができる。

3.2 実験水槽と電極の配置

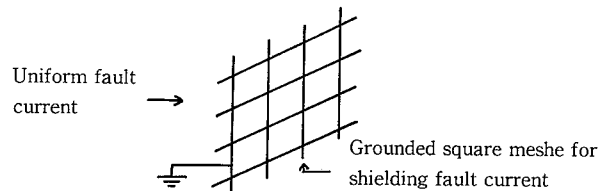
実験水槽は Fig. 3 に示すように直角二等辺三角形を断面とする三角柱を横にした形状で、これは Fig. 2 (c) の三角形（斜線部）を断面とする三角柱の部分の模擬したものである。電極 A は漏電部に、電極 B は接地体に、電極 C は金網に対応する。この場合、電極 AB 間は 1 m 離れており、電極 C を水槽の中央に設置しても、電流の分布は電極 C の周辺を除いて、ほぼ均一とみなせる。なお、電極 C の直径は網線の直径 d に、水中部分の長さは網目一辺の長さの半分 $W/2$ に対応する。

3.3 金網の効果

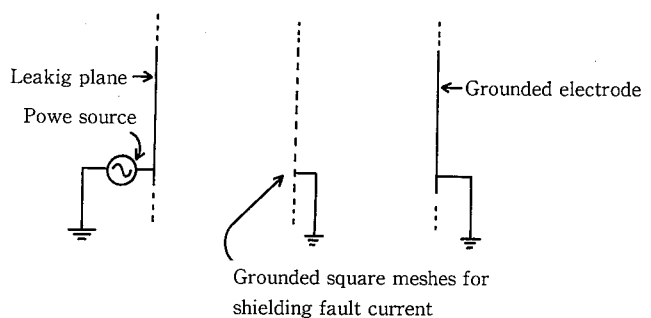
水中における電撃の許容限界は電界⁴⁾で表されている。このことから、金網の効果も電界を指標として表すことが望ましいが、ここでは電界の比、つまり、金網の効果も金網がないときの電界と金網を設置することによって減少した電界との比を用いて相対的に評価することにする。金網の効果をこのように表すと、上記の実験水槽の条件では、電界の比は電極 B に流れる電流の比にほぼ対応することになる。したがって、電

極 C が無い時の電極 B に流れる電流を I_{BO} 、有る時のそれを I_{BS} と置くと、金網の効果 α は次式のように表される。

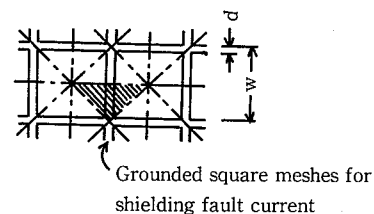
$$\alpha = \frac{I_{BS} - I_{BS}}{I_{BO}} = 1 - \frac{I_{BS}}{I_{BO}} \quad (1)$$



(a) Shield of fault current with grounded mesh.
金網による漏電電流の遮へい



(b) Electric field underwater in which mesh is set for shielding fault current (side view).
遮へいのために金網を設置した漏電場（側面図）



(c) symmetrical shield effect (oblique area) due to grounded mesh (w : pitch, d : diameter of mesh).
金網による遮へい効果の対称性（斜線部、 w : 網目一辺の長さ、 d : 網線の直径）

Fig. 2 Shielded of fault current underwater with grounded meshes and its typical model for experiments.

接地した金網による漏電電流の遮へいとそのモデル

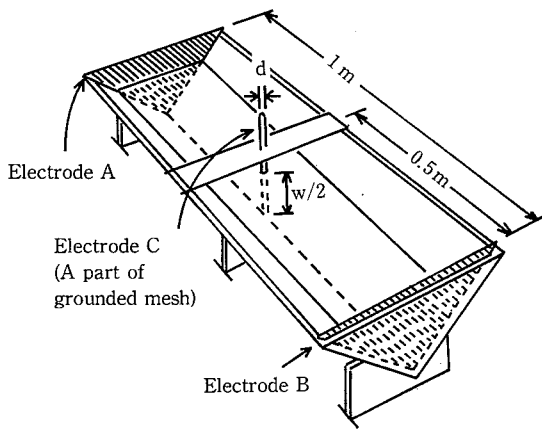


Fig. 3 Water tank for experiments deduced from typical model.
実験用水槽

3.4 測定条件

測定条件の主なものを Table 1 に示す。

作業水域として河川から海までを考え、水の導電率は約0.1~5.9S/mとした。なお、水は水道水に並塩を溶かしたものを使用し、その導電率は並塩の量によって調整した。

電極 AB 間の電位差を2.5V (電極 AB 間の距離は1 m) とした。これは、電撃防止対策を必要とする領域が2.5V/m 以上の領域⁴⁾であること、また、電極 C の表面での電流密度が小さいほど界面のインピーダンスが大きくなり、金網の効果が悪くなることなどから、2.5V/m の電界に相当する電圧において金網の効果を

調べておく必要があるためである¹⁰⁾¹¹⁾。

電極 C の材質は鉄 (鋼: Fe 約88%, その他 (主に Mm) 約12%), 銅, ステンレス鋼 (SUS 304) とした。一方、電極 A, B の材質は水との境界面で生じるインピーダンスが小さい鉄の板 (鋼: JIS G4331) とした。

3.5 電極 A, B, C の前処理

電極表面の状態が測定値のばらつきの原因となることから次のように前処理を行った。まず、電極表面の油汚れを石鹼で除去し、ナイロントワシで電極の表面を磨く。次に、これを測定に使用する水と同じ導電率の水に30分間放置し、いわゆる「水とのなじみ」をよくした。

3.6 測定方法

(a) 測定回路

測定回路を Fig. 4 に示す。電極 B に流れる電流は電流計でなく、変流器 (C.T.) を使って測定した。これは、電流計の内部抵抗が金網の効果に影響するのを避けるためである。

(b) 測定

通電直後は電極の表面の状態が電氣的に一定しておらず、電流の変化が大きいため、その変化が小さくなる約1分後から電流を測定した。実験の前後において、水の導電率、水温を測定し、水の導電率はほぼ同じであること、また、水温は20±1℃ (同一測定条件における測定前後の水温の差は0.5℃以内) にあることを確認した。なお、水槽の水は水深の条件を変えるときに交換した。

Table 1 Primary conditions for experiments
主な実験条件

Temperature of water (°C)	20±1
Conductivity of water σ (S/m)	0.1, 2.5, 5.9
Water depth $w/2$ (mm)	25, 50, 100, 150
Distance between electrode A and B (mm)	1000
Potential difference between electrode A and B (V)	2.5
Position of electrode C	500 (mm) from electrode B
Diameter of electrode C in water $w/2$ (mm)	25, 50, 100, 150
Materials of electrode C	Copper, Steel, Stainless steel

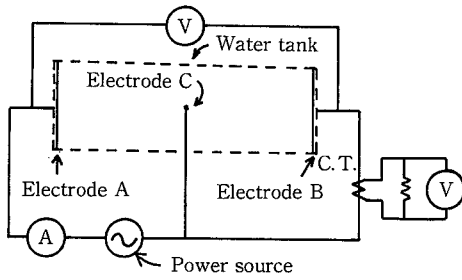


Fig. 4 Circuit for measuring shield effect of grounded mesh.

測定回路

4. 実験結果

4.1 導電率と金網の効果

Fig. 5 は、金網の効果と水の導電率との関係を金網の材質をパラメータとして表したものである。これは網線の直径を 2 mm、網目一辺の長さを 200 mm としたときの測定値である。縦軸は金網の効果を表しており、その値が 1 ということは $I_{BS} = 0$ 、すなわち、漏電電流が電極 C によって全て遮蔽されたことを意味する。Fig. 5 より、水の導電率が大きくなると金網の効果が悪くなるとともに材質間の差異も大きくなるのがわかる。

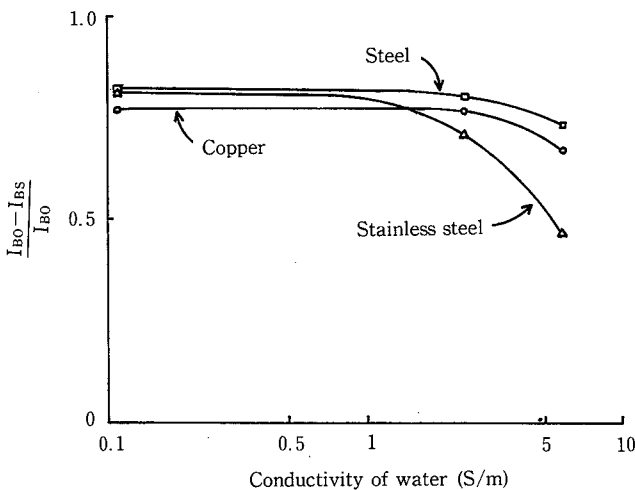


Fig. 5 Shield effect of grounded mesh vs. conductivity of water ($d=2\text{mm}, w/2=100\text{mm}$).
水の導電率と金網の遮へい効果 ($d=2\text{mm}, W/2=100\text{mm}$)

4.2 網目一辺の長さとお金網の効果

Fig. 6 は金網の材質をパラメータとして、金網の効果と網目一辺の長さとの関係を表したものである。これは水の導電率を約 5.9, 0.1 S/m、網線の直径を 2 mm としたときの測定値である。なお、導電率が 0.1 S/m においては、材質による差が小さいため材質を銅としたときの測定値が一点鎖線で示してある。Fig. 6 より、網目一辺の長さが長くなると金網の効果が悪くなること、また、材質による差異が大きくなるのがわかる。なお、網目一辺の長さが網線の直径に等しくなれば I_{BS} はほぼ零になることから、網目一辺の長さが 50 mm より小さい条件での金網の効果は横軸が 2 mm、縦軸が 1 となる点に向かって延長した曲線上にある。また、水の導電率が 5.9 S/m より小さくなると、Fig. 5 が示すように金網の材質による差は小さくなり、また、導電率が 0.1 S/m の場合の測定値から金網の効果は良くなると考えられる。

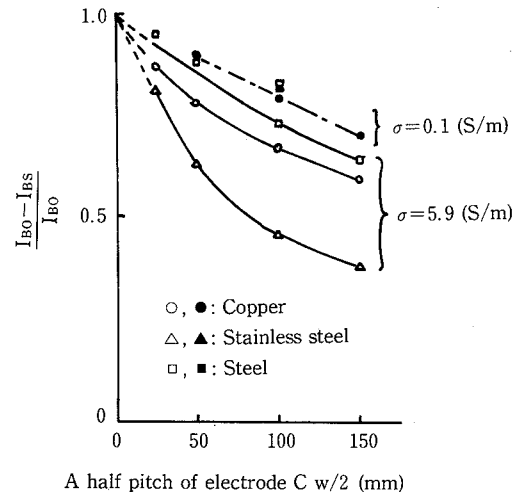


Fig. 6 Shield effect of grounded mesh vs. pitch of electrode C ($d=2\text{mm}$).
網目一辺の長さとお金網の遮へい効果 ($d=2\text{mm}$)

4.3 網線の直径とお金網の効果

Fig. 7 は金網の材質をパラメータとして、金網の効果を網線の直径との関係で表したものである。これは水の導電率を約 5.9, 0.1 S/m、網目一辺の長さを 200 mm (電極 C の水中部分の長さは 100 mm) としたときの測定値である。なお、導電率が 0.1 S/m において

は Fig. 6 と同様一点鎖線で示してある。Fig. 7 より、網線の直径が大きくなると金網の効果は大きくなり、材質による差が小さくなることからわかる。4.2で述べたように、網線の直径が網目一辺の長さに等しくなれば I_{BS} はほぼ零になることから、網線の直径が 6 mm より大きい条件での金網の効果は横軸 100mm、縦軸 1 の点に向かって延長した曲線上にある。また、水の導電率が 5.9S/m より小さくなると、網線の直径にかかわらず、金網の材質による差は小さくなり、導電率が 0.1S/m の場合の測定値が示すように金網の効果は良くなると考えられる。

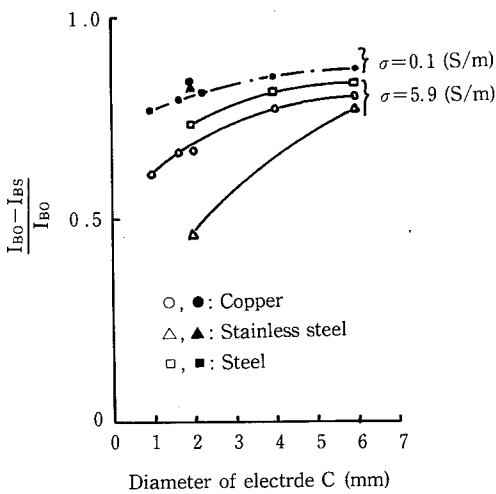


Fig. 7 Shield effect of grounded mesh vs. diameter of electrode C ($W/2=100\text{mm}$).
網線の太さと金網の遮へい効果 ($W/2=100\text{mm}$)

5. 検討及び考察

Fig. 5, 6, 7 の測定結果は、電極 C によって電極 BC 間の電流が変化したために生じたと考えられる。電流の変化は、実験水槽の各電極間を等価回路で表したときの各インピーダンスの変化に置き換えて扱うことができるので、ここでは主に、等価回路を利用して測定結果の考察を行なった。

5.1 等価回路

実験水槽の各電極間を等価回路で表すとき、Fig. 1 (b) の等電位線 qq' に着目すると、これは電極 C を囲む等電位線であるから、電極 A より流れ出した電流はこの等電位線を分岐線にして電極 B に流れる電流と、電極

C に流れる電流とに分かれることになる。これより実験水槽内を等価回路で表わすと Fig. 8 となる。Fig. 8 において A, B, C は電極 A, B, C に、また Q は Fig. 1 (b) における等電位線 qq' に対応する。

R_{WA} , R_{WB} , R_{WC} は電極 A, B, C と Q 間との水部分の抵抗であり、水の導電率と電極の形状・大きさなどの境界条件によって定まる。なお、水部分にはリアクタンス分も含まれるが抵抗分に比べ無視できるため、ここでは抵抗分だけとして扱った。 Z_{IA} , Z_{IB} , Z_{IC} は水と電極 A, B, C との境界面で発生するインピーダンス (以下、界面のインピーダンスと記す) である。

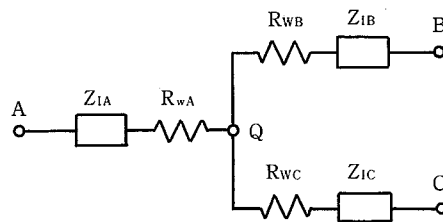


Fig. 8 Equivalent circuit of fault current underwater in water tank for experiment.
水中漏電の等価回路

5.2 金網の効果

Fig. 8 において、電極 C が無いときの電極 AB 間の水部分の抵抗を R_{WAB} とおき、電極 C の有無にかかわらず電極 A, B 間の電位差を一定 (V_0) とすると、 I_{Bo} , I_{Bs} は次式で表される。

$$I_{Bo} = \frac{V_0}{R_{WAB} + Z_{IA} + Z_{IB}} \tag{2}$$

$$I_{Bs} = \frac{V_0}{R_{WA} + Z_{IA} + \left(\frac{1}{R_{WB} + Z_{IB}} + \frac{1}{R_{WC} + Z_{IC}} \right)^{-1}} \times \frac{R_{WC} + Z_{IC}}{R_{WB} + Z_{IB} + R_{WC} + Z_{IC}} \tag{3}$$

実験では、電極 A, B と水との接触面が大きいことから

$$R_{WA}, R_{WB}, R_{WC} \text{ および } R_{WAB} \gg |Z_{IA}|, |Z_{IB}| \tag{4}$$

とおける。

(1)式に(2), (3)式及び(4)式の条件を代入すると, 金網の効果 α は次式で表される。

$$\alpha = 1 - \frac{1 + \frac{Z_{IC}}{R_{WC}}}{\frac{R_{WA}}{R_{AB}} \left(\frac{R_{WB}}{R_{WC}} + 1 + \frac{Z_{IC}}{R_{WC}} \right) + \frac{R_{WB}}{R_{AB}} \left(1 + \frac{Z_{IC}}{R_{WC}} \right)} \quad (5)$$

(5)式より, 金網の効果は各部分の抵抗またはインピーダンスの比により表されることがわかる。

5.3 界面のインピーダンス¹⁰⁾¹¹⁾

Fig. 5, 6, 7の測定結果を(5)式から検討すると, 電極 C の界面のインピーダンス Z_{IC} は水の抵抗分 R_{WA} , R_{WB} , R_{WC} に比べ, 無視できないと推定される。このことから, 界面のインピーダンスを次のような方法で測定した。

(実験方法) 直方体の水槽に, 同じ材質の長方形の電極板 A, B を Fig. 9 に示すように設置し, 電流 I, 電圧 V 及びその位相差 θ を測定した。

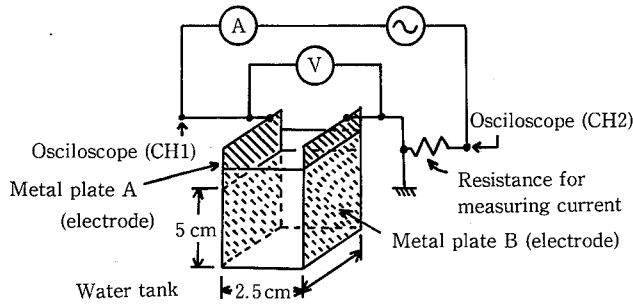


Fig. 9 Experimental setup for measuring interfacial impedance.

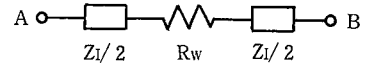
界面のインピーダンスを測定する実験の概要

電極 A, B が水と接している部分の面積は $5 \times 5 \text{ cm}^2$, 電極 AB 間の距離は 2.5 cm である。電極 A, B の材質としては, 銅, 鉄 (鋼: JIS G4331) 及びステンレス鋼 (SUS304) とした。水は塩水を使用し, 水温を $20 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$, 導電率を約 5.1 S/m とした*)。

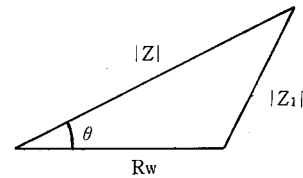
電極 A, B での電流密度は, 0.4, 2, 4, 8.2 mA/cm^2 とした。電極の前処理は 3.4 (b) と同様である。なお, 電源としては定電流源を使用し, その周波数を 50 Hz とした。界面のインピーダンスは, 通電時間によって変化するため, V, I, θ の測定は通電してか

ら, 1, 2, 3, 5 および 10 分後に行った。また, 測定回数は各条件ごとに 2 回とした。

(界面インピーダンスの算出) Fig. 9 の実験水槽において, 水と電極板 A, B との境界面で生じるインピーダンスを Z_1 (電極板 1 枚当りは, $Z_1/2$), 水部分の抵抗を R_w とおくと, 電極 AB 間の等価回路は Fig. 10 (a) のように表すことができる。



(a) Equivalent circuit between metal plate A and B.
金属板 A, B 間の等価回路



(b) Relation among $|Z|$, $|Z_1|$, R_w and θ
 $|Z|$, $|Z_1|$, R_w 及び θ の関係

Fig. 10 Relation between interfacial impedance $|Z_1|$ and others ($|Z|$, R_w , and θ) in water tank.

界面インピーダンス $|Z_1|$ と測定値の関係

電極 A, B 間のインピーダンスを Z とおき, Z , Z_1 , R_w および θ の関係を求めると, Fig. 10 (b) のようになる。なお, R_w は水部分のリアクタンス分を除くために, 10 kHz の周波数で測定した。このため, 厳密には, 水部分に存在するリアクタンス分の影響が界面のインピーダンス Z_1 に含まれることになる。

Fig. 10 (b) より界面のインピーダンスは余弦定理から次式で求められる。

$$|Z_1| = \sqrt{|Z|^2 + R_w^2 - 2|Z|R_w \cos \theta} \quad (6)$$

*) 海水の導電率は場所, 水温などによって大きく異なることから, 3.1 では安全側の評価をするため 5.9 S/m (約 6 S/m) としたが, ここでは界面インピーダンスの目安を得ることを目的としていることから 3% の塩水に相当する 5.1 S/m とした。なお, 水道水 (導電率約 0.01 S/m) でも同様の測定を行ったが, 水部分の抵抗が界面のインピーダンスに比べて大きく, 誤差が大きくなるため採用しなかった。

ここで、 $|Z| = \left| \frac{V}{I} \right|$

(測定結果) Fig. 11 は電流密度 4 mA/cm^2 における通電時間と界面のインピーダンスとの関係を表した図である。界面のインピーダンスは 25 cm^2 当りで求まるが、ここでは 1 cm^2 当りに換算して示してある。Fig. 11 より、鋼、銅において界面のインピーダンスの変化は少ないが、ステンレス鋼においては大きく変化することがわかる。

Fig.12 は電流密度と界面インピーダンスとの関係で、10分間の通電時間による変動範囲も含めて示してある。Fig. 12 より、電流密度が大きくなると通電時間による界面のインピーダンスの変化は小さくなり、その値も減少し、また、材質によって界面のインピーダンスが大きく異なることがわかる。例えば、電流密度 8.2 mA/cm^2 において、 1 cm^2 あたり界面のインピーダンスは鉄(鋼)では約 9Ω 、銅では約 18Ω 、ステンレス鋼では約 56Ω である。

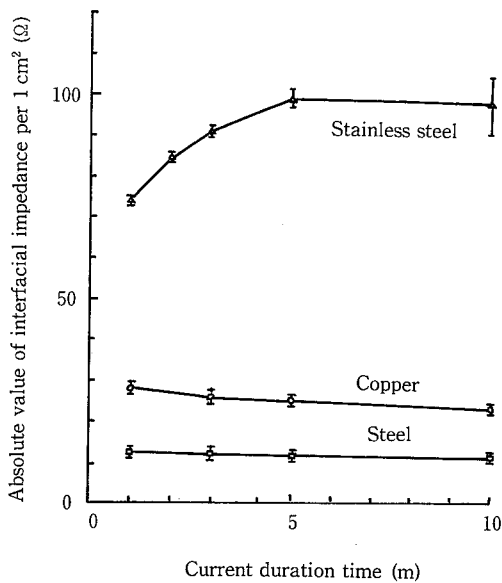


Fig. 11 Relation between interfacial impedance and current duration time (current density: 4 mA/cm^2 , $\sigma = 5.1 \text{ S/m}$, Temperature of water: $20 \pm 1^\circ \text{C}$)

界面のインピーダンスと通電時間 (電流密度: 4 mA/cm^2 , $\sigma = 5.1 \text{ S/m}$, 水温: $20 \pm 1^\circ \text{C}$)

5.4 水の導電率の影響

水の導電率が大きくなると、水部分の抵抗及び界面のインピーダンスは共に小さくなるが、界面のインピーダンスの減少する割合は水の抵抗分のそれに比べてかなり小さいことが知られている¹⁰⁾。このこと及び Fig. 5 の結果から、水の導電率が低いときには、界面のインピーダンスが水の抵抗に対して相対的に小さく、金網の効果に及ぼす影響も小さいのに対して、水の導電率が高くなると、逆に、相対的に大きくなって、その影響が大きいと推定され、Fig. 5, 6, 7 はそのことを裏付けている。

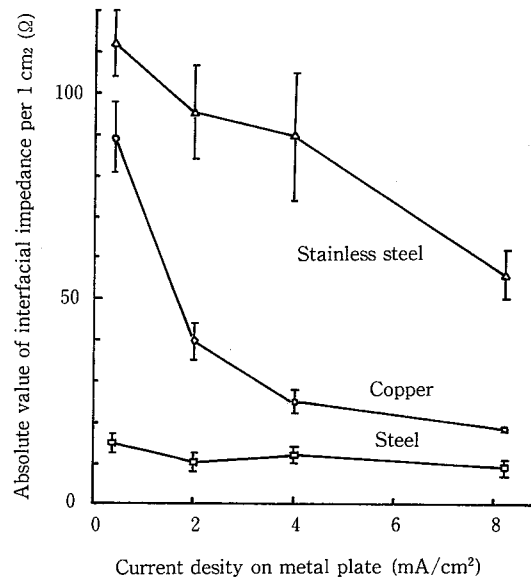


Fig. 12 Relation between current density and interfacial impedance ($\sigma = 5.1 \text{ S/m}$, Temperature of water: $20 \pm 1^\circ \text{C}$).

電流密度と海面のインピーダンス ($\sigma = 5.1 \text{ S/m}$, 水温: $20 \pm 1^\circ \text{C}$)

5.5 金網の網線の太さ、網目一辺の長さとお網の効果

金網の網線の太さが大きくなると、または、網目一辺の長さが短くなると、単位面積当りの網線の表面積が増え、 $R_{wc} + Z_{ic}$ が、 $R_{wb} + Z_{ib}$ に対して、相対的に小さくなる。このため、金網の効果は Fig. 6, 7 のように変化すると考えられる。

5.6 金網の材質と金網の効果

界面のインピーダンスは金属の種類、水の導電率によって異なることは5.3で示した通りである。特に導電率の高い水では、材質による界面のインピーダンスの影響が相対的に大きくなり、Fig. 5, 6, 7に示すような関係が得られたと考えられる。

5.7 金網の効果と電撃防止

水中での電撃を防止するには、作業領域における漏電電流が電撃を受ける危険性の無い漏電電流の最大値 I_T を越えないように金網を設置すれば良いことから、金網の効果 α と漏電が許容できる電流の大きさ I との間には次のような関係を満たせばよいことになる。

$$I < I_T / (1 - \alpha) \quad (7)$$

6. あとがき

漏電部と接地体との間に接地した金網を置くと、金網の付近を除いて一般に、金網を置く前より漏電部と金網との間の電界は大きくなり、金網と接地体との間の電界は小さくなる。本報ではこのような特性を利用した水中での電撃を防止する方法に着眼し、そのときに用いる金網の基本的な要素と漏電電流を減少させる効果（金網の効果）との関係を検討した。

得られた検討結果は次のとおりである。

(1) 金網の効果は漏電場の境界条件、水の抵抗の他に、水と金網の境界面において生じるインピーダンス（界面のインピーダンス）の影響を受ける。特に、導電率が大きい水中では界面のインピーダンスの影響が大きい。

(2) 界面のインピーダンスは金網の材質により異なる。例えば、水の導電率が約 5.1S/m 、水温 20°C 、周波数 50Hz 、電流密度 8.2mA/cm^2 において、 1cm^2 あたり平均のそれは鉄（鋼）では 9Ω 、銅では 18Ω 、ステンレス鋼では 56Ω であった。（Fig. 12 参照）

(3) 水の導電率が大きくなると、金網の効果は悪くなる。また、金網の材質による金網の効果の差異も広がる。例えば、金網の材質が鉄、銅、ステンレス鋼の場合、 0.1S/m において金網を通過する電流が金網をおく前より約 80% 減少したのに対して、 5S/m では鉄が約 72% 、銅が約 67% そしてステンレス鋼が約 46% の減少であった（Fig. 5 参照）。これは、水の導電率の

増加による界面のインピーダンスの減少する割合が、水部分の抵抗の減少する割合よりも、かなり小さいため、相対的に界面のインピーダンスが大きくなったことによる。

(4) 網目一辺の長さが小さいほど、また、網線の直径が大きいほど金網の効果は良くなる。しかし、金網の効果は網線の直径より網目一辺の長さに大きく関係し、網目一辺の長さを小さくするほうが金網の効果を高めることができる。

なお、金網の材質として、銅、鉄、ステンレス銅のうち、鉄が望ましいと考えられるが、腐食との関係について、十分に検討する必要がある。

（平成元年3月31日 受理）

参考文献

- 1) 例えば、テクノ・オーシャン'88, オフィシャル・カタログ, (株)ワールド・インポート・マート, (財)神戸国際交流協会 (1988)
- 2) Underwater electrical safety some guidance on protection against shock, Report UR14, CIRIA, Underwater Engineering Group (UK), May 1979
- 3) Code of practice for the Safe Use of Electricity Underwater, Department of energy (UK), Sep. 1982
- 4) 山野・本山・田島：“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, RR-30-1）労働省産業安全研究所, (1981)
- 5) 本山・山野：“対地抵抗監視による水中漏電の検出”（産業安全研究所研究報告, RIIS-RR-86）労働省産業安全研究所, (1986)
- 6) A. W. Smoot, C. A. Bentel: “Electric Shock Hazard of Underwater Swimming Pool Lighting Fixtures”, IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol.83, Sep., pp.945~964 (1964)
- 7) 本山・山野：“潜水作業に用いる電気機器の安全化に関する研究, (I), (II), (IV)” , (海洋開発調査研究促進費報告書), 労働省産業安全研究所, (1982, 1983, 1985)
- 8) 本山・山野：“接地された金網による水中の電撃危険領域の縮小——水の導電率と金網の効果——”（第21回安全工学研究発表会予稿集）, 安全工学協会, (1988)
- 9) 和田正信：真空管, 近代科学社, (1960)
- 10) 山本・美禰・山本・馬場：“電解質導電体のイン

ピーダンス測定の一方法” (45-130), 電気学会誌
vol. 90, No. 12 (P2569), 電気学会, (1970)

ピーダンス測定の一方法” (44-105), 電気学会誌
vol. 89, No. 973 (P1961), 電気学会, (1969)

11) 美禰・山本・山本・馬場：“電解質導電体のイン