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 apppliances 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 fundermental 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 twe electrodes and grounded mesh set in water of various condutivities. On the other hand, the interfacial impedances between a few kinds of meshes and water also measured, and thier 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 cm<sup>2</sup> was 9  $\Omega$  in steel, 18  $\Omega$  in copper and 56  $\Omega$  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

#### 產業安全研究所研究報告 RIIS-RR-88

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,水中 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<sup>11</sup>,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<sup>2334</sup>。

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,漏電を検出して電路を遮断する等の方法<sup>5)</sup> 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気的に絶縁したり,作 業者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<sup>6</sup>,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<sup>70</sup>。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かとなった<sup>80</sup>。

本報では,金網の遮へい効果と木の導電率及び金網 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<sup>7</sup>。

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 0 V,

-86-

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(xy平面)として扱うことができ る。この場は等角写像法による近似解<sup>9)</sup>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 equipotntial 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

-88-

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との間となる。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を模 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<sup>4</sup>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 網の効果を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 $\alpha$ は次式のように表 される。

$$\alpha = \frac{I_{BS} - I_{BS}}{I_{BO}} = 1 - \frac{I_{BS}}{I_{BO}} \tag{1}$$



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



shielding fault current





- (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 Shieled 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<sup>4)</sup>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<sup>10)11)</sup>。

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,ナイロンタワシで電極の表面 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気的に一定してお 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。

<u>.</u>	Temperature of water	(°C)	$20 \pm 1$			
	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 differance b	petween				
	electrode A and	B (V)	2.5			
	Position of electrode	С	500 (mm) from electrode B			
	Diameter of electrode	С				
	in water	w/2(mm)	25, 50, 100, 150			
	Materials of electrode	e C	Copper, Steel, Stainless steel			

Table	1	Primary	conditions	for	experiments
		十ち中時タル			



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2mm,網目一辺の長さを200mm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Iss=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ことがわ かる。



Fig. 5 Sield effect of grounded mesh vs. conductivity of water (d=2mm,w/2=100mm). 水の導電率と金網の遮へい効果(d=2mm, ₩/2=10 0mm)

# 4.2 網目一辺の長さと金網の効果

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, 0.1S/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こと 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 IBS はほぼ零になることから,網目一辺の長 さが50mm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5.9S/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0.1S/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。



A half pitch of electrode C w/2 (mm)

Fig. 6 Shield effect of grounded mesh vs. pitch of electrode C (d=mm).

網目一辺の長さと金網の遮へい効果(d=2mm)

#### 4.3 網線の直径と金網の効果

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5.9,0.1S/m,網目一辺の長さを200 mm(電極Cの水中部分の長さは100mm)としたとき の測定値である。なお、導電率が0.1S/mにおいて

-90-

は Fig. 6 と同様に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がわかる。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<sub>BS</sub> 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。



Shield effect of grounded mesh vs. diameter of

Fig. 7 Shield effect of grounded mesh vs. diameter of electrode C (W/2=100mm).

網線の太さと金網の遮へい効果(W/2=100mm)

#### 6. 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'に着眼すると,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。

RwA, RwB, Rwc 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<sub>IA</sub>,Z<sub>IB</sub>,Z<sub>IC</sub>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 RwAB 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(Vo)とすると, IBO, IBS は次式で表される。

$$I_{BO} = \frac{V_0}{R_{WAB} + Z_{IA} + Z_{IB}}$$

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

$$\times \frac{R_{WC} + Z_{IC}}{R_{WB} + Z_{IB} + R_{WC} + Z_{IC}}$$
(2)
(3)

実験では, 電極A, Bと水との接触面が大きいことから

Rwa, Rwb, Rwc および Rwab

$$\gg |Z_{IA}|, |Z_{IB}|$$
(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。

$$\alpha = 1 - \frac{1 + \frac{Z_{IC}}{R_{WC}}}{\frac{R_{WA}}{R_{WAB}} \left(\frac{R_{WB}}{R_{WC}} + 1 + \frac{Z_{IC}}{R_{WC}}\right) + \frac{R_{WB}}{R_{WAB}} \left(1 + \frac{Z_{IC}}{R_{WC}}\right)}$$
(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<sup>10)11)</sup>

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 × 5 cm<sup>2</sup>, 電極 AB間の距離は2.5cm 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±1℃, 導電率を約5.1S/mとした<sup>\*)</sup>。

電極 A,B での電流密度は、0.4,2,4,8.2 mA/cm<sup>2</sup>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50Hz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、 $\theta$ 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  $\theta$ |Z|,  $|Z_1|$ ,  $R_w$  及び $\theta$ の関係

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

界面インピーダンス | Z<sub>1</sub> | 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<sub>1</sub>, R<sub>w</sub> および $\theta$ の関係を求めると, Fig. 10 (b)のよう になる。なお, R<sub>w</sub>は水部分のリアクタンス分を除くた めに, 10kHz 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<sub>1</sub> 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。

$$|Z_{1}| = \sqrt{|Z|^{2} + R_{W}^{2} - 2|Z|R_{W}\cos\theta}$$
(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5.95/m(約65/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5.15/mとした。なお,水道水(導電率約0.015/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, 調差が大きくなるため採用しなかった。

-92-

(測定結果) Fig. 11 は電流密度 4 mA/cm<sup>2</sup>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25cm<sup>2</sup> 当りで求まる が,ここでは 1 cm<sup>2</sup> 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 8.2mA/cm<sup>2</sup>において、1 cm<sup>2</sup> あたり界面のインピー ダンスは鉄(鋼)では約9 $\Omega$ 、鋼では約18 $\Omega$ 、ステン レス鋼では約56 $\Omega$ である。



- Fig. 11 Relation between interfacial impedance and current duration time (current density:  $4mA/c-m^2$ ,  $\sigma = 5.1S/m$ , Temperature of water:  $20\pm 1^{\circ}$ )
  - 界面のインピーダンスと通電時間(電流密度: 4 mA/cm<sup>2</sup>, σ=5.1S/m,水温:20±1℃)

#### 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<sup>10)</sup>。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 (σ=5.1S/m, Temperature of water: 20±1℃). 電流密度と海面のインピーダンス (σ=5.1 S/m, 水温:20±1℃)

#### 5.5 金網の網線の太さ,網目一辺の長さと金網の効果

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、 $Rwc+Z_{Ic}$ が、 $Rw_B+Z_B$ 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。

-93-

-94-

# 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のには,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 Ir 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。

$$I < I_T / (1 - \alpha) \tag{7}$$

# 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℃,周 波数50Hz,電流密度8.2mA/cm<sup>2</sup>において,1cm<sup>2</sup>あ たり平均のそれは鉄(鋼)では9 $\Omega$ ,銅では18 $\Omega$ ,ス テンレス鋼では56 $\Omega$ 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, 木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、㈱ワールド・インポート・マート、㈱
   神戸国際交流協会(1988)
- Underwater electrical safety some guidance on protection against shock, Report UR14, CIRIA, Underwater Engineering Group (UK), May 1979
- Code of practice for the Safe Use of Electricity Underwater, Depertment of energy (UK), Sep. 1982
- 4) 山野・本山・田畠: "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)
- 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),(I),(N)",(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) 11)美禰・山本・山本・馬場:"電解質導電体のイン 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)