

Research Report of the Research Institute of  
Industrial Safety, RIIS-RR-86, 1986.  
UDC 614.825, 621.316, 626.02

## 対地抵抗監視による水中漏電の検出

本山建雄\* 山野英記\*

### Monitoring of Insulation of Power Supply Lines Underwater and Detection of Earth-leakage Current

by Tatsuo MOTOYAMA\* and Eiki YAMAMOTO\*

**Abstract** ; Working underwater such as in the sea or rivers and the use of electricity in such an environment are increasing in recent years. These situations may lead to the hazard of underwater electric shock to divers and other workers.

This paper reports on the underwater earth-leakage detection (i.e. a detecting method by monitoring the insulation level of lines and a detector on the basis of the method) for the prevention of underwater electric shock.

This detecting method have the following features :

- 1) Monitoring the insulation level of lines,
- 2) A certain degree of disturbance due to earth capacity of lines,
- 3) The possibility of detecting a leak between lines.

The results of the investigation are summarized as follows ;

- (1) A leak can't be detected by line insulation, but by d.c. earth-leakage current. Therefore, this method has somecases, where the leakage can't be detected between lines. In these cases, the area having the possibility of electric shock (i.e. an area more than 2.5 V/m) is not spacious. For example, in the condition where leaking points are two spheres, the potential of which are 50 V and -50 V respectively, the line insulation resistance ( $R_x$ ) is 20 k $\Omega$  and conductivity ( $\sigma$ ) of water is  $10^{-2}$ (S/m), this area is included in two spheres which radii are 0.12 m (see 3.4).
- (2) The detector is connected to the resistance grounded neutral system, the neutral resistance of which is 20 k $\Omega$ , earth capacity of which is less than 1  $\mu$ F, and the line voltage is 100 V. Then, d.c. 10 volts are superposed on the lines.
- (3) Where the threshold of line insulation resistance ( $R_x$ ) is set to 20 k $\Omega$ , the time for detection of leak is less than 78 ms at  $R_x=10$  k $\Omega$  and 90 ms at  $R_x=20$  k $\Omega$  respectively.
- (4) In a severe case of leak upper limit of  $R_x$  having possibility to detect the leak is greater than 50 k $\Omega$ .

**Keyword** ; Detector, Current Leak, Electric shock, Underwater.

### 1. まえがき

近年、海洋の調査・研究、資源の開発、港湾の整備などにおいて、人間が潜水し、作業をする機会が増えている。また、これに伴って電気をエネルギーとした電気機器の使用も増えており、最近では海洋牧場に用いる電気柵や電気魚礁など新しい電気の使用方法も、開発されつつある。

水中は電気機器にとって劣悪な環境であり、漏電が発生しやすい。漏電が発生すると、それによる電撃の危険領域が漏電発生箇所の周辺にまで及ぶことになる。また、溺死の危険性もあることから許容できる電撃の影響は陸上のそれよりも小さいと考えられる。

水中での電撃(以下、水中電撃と記す)の防止対策<sup>1),2),3)</sup>としては電気機器を対象にしたもの、水中の電路を対象にしたもの、水中の漏電場を対象にしたもの、潜水作業員を対象にしたもの等がある。本研究は電路を対象にしたものであり、その一つとして水中漏電の検出方法を検討した。この方法は電路に重畳した直流により電路の対地抵抗を監視し、それが電撃の許容値以下となったときに漏電として検出する方法である。

また、この方法は電路の絶縁劣化を監視できること、漏電の検出に及ぼす電路の浮遊キャパシタンスの影響が小さいこと、水を介する線間の漏電の検出が可能であること等の特徴を持っており、水中漏電の検出にとって有効な方法であると考えられる。

本報では、この検出方法の基本的な問題である対地抵抗と漏電電流との関係を検討し、この方法において検出できない漏電の電撃危険範囲を推定した。

本報ではまた、試作した検出器が感電防止用装置の漏電検出部として使用できることを、その検出特性から示した。

### 2. 検出器の概要

電路に重畳した直流により対地抵抗を監視する方式の漏電の検出器(以下、単に検出器と記す)は、中性点抵抗接地方式の低圧電路からの漏電を対象としたものであり、中性点接地のための抵抗と接地極との間に設置して使用される。

漏電の指標は電路の対地抵抗値である。このため、線間で生じる漏電の一部は安全に検出できないことになる<sup>4)</sup>。

検出器の基本構成は Fig. 1 に示すように、重畳用直流電源回路、フィルター回路及び比較回路から構成さ

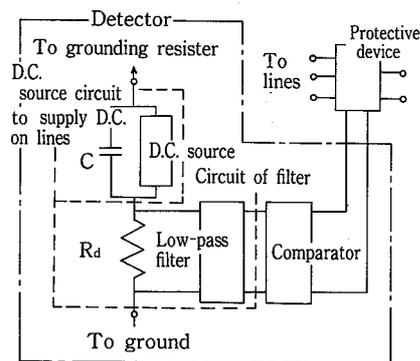


Fig. 1 Fundamental elements of detector.  
試作した検出器の基本構成

れる。

重畳用直流電源回路は直流電圧を電路に重畳する機能を持ち、直流電源及び地絡電流に含まれる交流分(以下、交流分と記す)をバイパスさせるためのコンデンサーCから構成される。

フィルター回路は地絡電流の検出及び地絡電流に含まれる直流分(以下、直流分と記す)を抽出する機能を持ち、地絡電流検出用抵抗  $R_d$  及び低域通過型のアクティブフィルターから構成される。

比較回路は、フィルターの出力が電撃危険に対応する基準値以上になったとき漏電と判定し、ステップ状の信号を出力する機能を持つ。なお、この出力はリセットするまで続く。

### 3. 検出器の設計

#### 3.1 設計目標

水中において漏電が発生すると付近にいる作業員は電撃を受けることがある。また、心室細動を発生させるほどの強い電撃でなくても溺れるなどの二次的な災害により死に至る可能性もある。したがって、これらの一次および二次の電撃災害を防ぐための安全装置の検出部を開発することを目標にした。

陸上において心室細動を発生しない限界として、Biegelmeier は 500 mA rms (持続時間  $T \leq 0.2$  s) を与えている<sup>5)</sup>。また、Koeppen らは 70 mA p-p/ $T$  ( $T \leq 1$  s) を与えている<sup>5)</sup>。しかし、水中における心室細動の限界は明らかではない。

一方、電源に触れたとき、これからの離脱の限界は、陸上では約 5 mA とされている。なお 10 mA 以下であれば電流が直接に有害な生理的影響を生じさせること

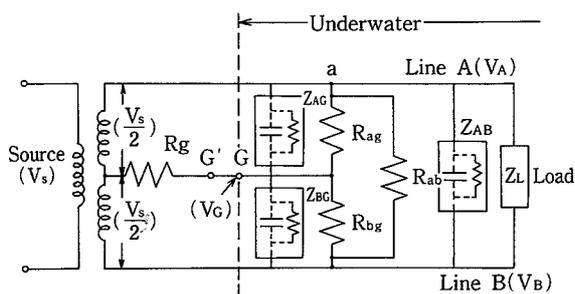


Fig. 2 Equivalent leak circuit of underwater a.c. single-phase line.

水中電路の等価回路 (単相電路の場合)

はないという報告もある<sup>6)</sup>。また、水中では均一電界中で許容できる電界として約 2.5 V/m という報告がある<sup>7)</sup>。

以上のように心室細動と離脱の許容限界が与えられているが、それらの値を水中での漏電電流により表わした報告はない。そこで、漏電電流の全部が生体を通過するとしたうえで、漏電電流によるこれらの許容値を陸上での許容値と同じものと仮定して、電撃死が発生しないように短時間で遮断するなどの処置をとるならば、かなりの電撃災害を防止することができると考えられる。

ここでは、一線地絡漏電においては電撃死が発生しないこと及び漏電電流が離脱の限界を越えたときには漏電として検出できることを目標にするとともに、併せて、二線以上の漏電においては漏電部が接近している場合を除き、一線地絡漏電の場合と同様のことを目標にして、検出器を設計することにした。

### 3.2 漏電の指標と漏電電流

一般に漏電電流の大きさは、人体への電撃の生理的影響と一対一に対応するが本検出方法において、漏電の指標 (対地抵抗) は漏電電流と一対一に対応しない場合がある。そこで両者の関係を明らかにした上で、検出器を設計する必要があることから、両者の関係を先ず詳しく検討する。

#### 3.2.1 単相電路からの漏電

##### a) 水中電路の等価回路

電源の中性点が接地抵抗  $R_g$  で接地された単相の電源から水中の負荷  $Z_L$  に電力を供給している電路 (A線, B線) を想定する。この電路において、水中のA線上の  $a$  点, B線上の  $b$  点から漏電が発生したとし、このときの等価回路を Fig. 2 のように表わす。なお、

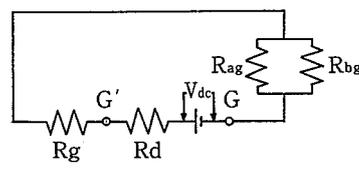


Fig. 3 Equivalent circuit of direct current superposed on a.c. lines.

電路に重畳した直流の等価回路

電路のインピーダンスは他のインピーダンスに比べ、十分に小さいことから省略した。

Fig. 2 において  $a, b$  は漏電の発生部分 (以下、漏電部と記す) を、 $G$  は接地極 (例えば、船体のように漏電部より十分に大きな物体) を表わす。 $R_{ag}, R_{bg}$ 、及び  $R_{ab}$  は、それぞれ  $a, b, G$  間の抵抗を  $\Delta$  結線で表わした抵抗である。また、 $Z_{AG}, Z_{BG}$  及び  $Z_{AB}$  は A線, B線,  $G$  間に分布するインピーダンスである。

##### b) 漏電電流

電撃に直接関係する電流は漏電部から漏れる交流の電流であり、これを漏電電流と定義する。また、漏電電流のうち接地抵抗を流れる電流を地絡電流と、残りを線間電流と定義する。

Fig. 2 において、接地極  $G$  の電位  $V_G$  を基準 ( $V_G = 0$  V) としたときの A線の電位を  $V_A$ , B線の電位を  $V_B$ , そして線間の電位差を  $V_s (= V_A - V_B)$  とする。

漏電部  $a, b$  からの漏電電流を  $I_a, I_b$  とおくと、 $I_a, I_b$  は次式のように表わされる。

$$I_a = V_A / R_{ag} + V_s / R_{ab} \quad (1)$$

$$I_b = V_B / R_{bg} - V_s / R_{ab} \quad (2)$$

なお、 $V_A, V_B$  は  $R_{ag}, R_{bg}, R_{ab}$  の他に分布インピーダンスの影響を受け、 $0 \leq V_A \leq V_s, -V_s \leq V_B \leq 0$  の範囲の値をとる。

##### c) 電路に重畳した直流の回路

検出器は Fig. 2 の  $GG'$  間に設置され、電路に直流電圧が重畳される。このときの直流の、定常状態での回路\*1 は Fig. 1, 2 から求まり、Fig. 3 のように表わされ

\*1 過渡的な状態を扱う場合には電源のインピーダンスをはじめ、各種のインピーダンス分は省略できない。

\*2 100 V 電路においては、0.1 M $\Omega$  以上、200 V 電路においては 0.2 M $\Omega$  以上 (電気設備技術基準での許容値以上) あるものとする。

る。なお、電路の分布インピーダンスに含まれる抵抗分<sup>\*2</sup>は十分に大きいことから省略した。

d) 対地抵抗  $R_x$

電路と対地間の抵抗を対地抵抗  $R_x$  (以下、主に  $R_x$  と記す) とする。Fig.3より  $R_x$  は次式のように表わされる。

$$R_x = R_{ag} \cdot R_{bg} / (R_{ag} + R_{bg}) \quad (3)$$

e) 対地抵抗と漏電電流

ここでは  $R_{ag} \leq R_{bg}$  を前提として以下の検討を行なった。なお、 $R_{ag} > R_{bg}$  を前提としても同様の検討ができ、同様の結果を得ることができる。

1) 一線地絡漏電

これは Fig.2, 3 において、 $R_{bg} = \infty$ ,  $R_{ab} = \infty$  と置いた場合に相当し、漏電電流は次式のように表わされる。

$$I_a = V_A / R_{ag} = V_A / R_x < V_s / R_x \quad (4)$$

$$I_b = 0 \quad (5)$$

ところで、一般の電路では、分布インピーダンス(抵抗分: 0.1 MΩ 以上, キャパシタンス分<sup>2)</sup>: 0.2 nF/m) は大きくかつ、各相と対地間において平衡していると考えられる(以下、この条件を満たす電路のことを一般の電路と記す)。このことから、 $V_A \leq V_s / 2$  となり、 $I_a$ ,  $I_b$  は次式のように表わされる。

$$\left. \begin{aligned} I_a &\leq V_s / (2 \cdot R_x) \\ I_b &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

2) 二線漏電

この場合は、 $R_{ab}$  が漏電部間の距離を変数にもつことから、漏電電流は以下のようにこの距離を変数として表わされることになる。

まず、漏電部間の距離が十分に大きく、 $R_{ab}$  を通る電流が  $I_a$ ,  $I_b$  に対して省略できるほど小さい条件では、 $I_a$ ,  $I_b$  は次式のように表わされる。

$$I_a \doteq V_A / R_{ag} < V_s / R_x \quad (7)$$

$$|I_b| \doteq |V_B| / R_{bg} < V_s / R_x \quad (8)$$

ただし、一般の電路では次式のように表わされる。

$$|I_b| \leq I_a \leq V_s / (2 \cdot R_x) \quad (9)$$

次に、漏電部間の距離が十分に大きくなく、 $R_{ag}$  を通る電流が  $I_a$ ,  $I_b$  に対して省略できない条件では、次のような二つの場合が考えられる。

$$i) \quad I_a \leq V_A / R_x, |I_b| \leq |V_B| / R_x \quad (10)$$

$$ii) \quad V_A / R_x < I_a < (\text{電路の短絡電流}), \\ |V_B| / R_x < |I_b| < (\text{電路の短絡電流}) \quad (11)$$

ii) の場合は、漏電電流の最大が対地抵抗によって表わせない場合であり、このような場合の漏電は対地抵抗を指標とする検出方法によって安全に検出できない<sup>\*3</sup>。

3.2.2 三相電路からの漏電

三相電路からの漏電については3.2.1と同様に検討することができ、漏電電流の最大も同程度になると推測される。また、線間を流れる電流が漏電電流に対して省略できない条件のときには(11)式のような場合が考えられ、単相電路の場合と同様に安全に検出できない。

3.3 主な設計仕様

1) 対象とする電路の電圧 ( $V_s$ )

水中で使用される電気器具としては、陸上での応用品が最も多いと予想される。このことから対象とする電路の電圧  $V_s$  を 100 V とする。

2) 対象とする電路の設置抵抗 ( $R_g$ )

電源を接地したことによって電撃死の危険性が大きくなるように接地抵抗を選定する必要がある。ここではその値を 20 kΩ とする。電源の中性点を 20 kΩ の抵抗で接地した場合、地絡電流は 5 mA 以下に、一般の電路では 2.5 mA 以下になる。

3) 電路に重畳する直流電源の電圧 ( $V_{dc}$ )

直流電源の電圧  $V_{dc}$  が大きいほど検出器の検出特性は向上する。しかし、それが電撃の原因とならないように、 $V_{dc}$  を定める必要がある。ここでは電源電圧  $V_s$  の 10%、すなわち 10 V とする。なお  $V_{dc}$  による漏電電流は最大 0.5 mA (= 10 V / 20 kΩ) となる。

4) 漏電判定のしきい値 ( $R_{x0}$ )

不検出時の地絡電流の最大が陸上での可随限界の 1/2 となるように、漏電と判定する対地抵抗のしきい値  $R_{x0}$  を定めることにする。すなわち、 $V_s$  を 100 V、可随限界を与える電流  $I_t$  を 5 mA、 $R_g$  を 20 kΩ とすると、漏電判定のしきい値  $R_{x0}$  は次式のように求められる。

$$R_{x0} = V_s / (I_t / 2) - R_g = 20 \text{ k}\Omega \quad (12)$$

\*3 一般に実用化されている漏電の検出方法では、本稿の方法以上に難しいと考えられる。なお、ii) の場合の電撃危険性は 3.4 において検討する。

Table 1 Design specifications of detector  
検出器の主な仕様

Item	Specification
Application	Line voltage (Vs) : 100V Neutral resistance (Rg): 20kΩ
D.C. voltage (Vdc) being superposed on lines	10V
Range of line insulation resistance (Rx) to detect the leak	$0 \leq R_x \leq 20k\Omega$
Time (Td) to detect the leak	Td ≤ 80ms (Rx ≤ 10kΩ) Td ≤ 100ms (10kΩ < Rx ≤ 20kΩ)
Upper limit of the resistance (Rx) having the possibility of detection of the leak	Rx < 60kΩ

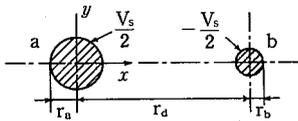


Fig. 4 Field model for analysis of current leak ( $r_a \geq r_b$ ).  
解析に用いた漏電用モデル ( $r_a \geq r_b$ )

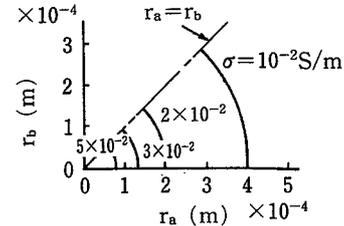


Fig. 5 Maximum radii ( $r_a, r_b$ ) of leaking conductors ( $a, b$ ) which fail to detect the leakage ( $R_x = 20 k\Omega$ ).  
不検出となる漏電部の最大半径  $r_a, r_b$  ( $R_x = 20 k\Omega$ )

$R_{x0}$  を  $20 k\Omega$  とすると、 $R_x = 20 k\Omega$  における漏電電流は (11) 式のような場合を除いて  $5 mA$  以下になる。

5) 検出時間 ( $T_d$ )

漏電の検出時間  $T_d$  を  $R_x \leq 10 k\Omega, 20 k\Omega$  の二段階において定める。

$R_x \leq 10 k\Omega$  における漏電電流は  $10 mA$  ( $100 V$  電路) を越えることもあることから、陸上の感電防止用漏電遮断器と同じ動作時間内 ( $100 ms$  以内) に何らかの処置をする必要があると考えられる。ここでは安全装置の処置時間を考慮して、 $R_x \leq 10 k\Omega$  における  $T_d$  を  $80 ms$  以内とする。

$10 k\Omega < R_x \leq 20 k\Omega$  における漏電電流は  $10 mA$  ( $100 V$  電路) 以下と考えられる。しかし、水中という特殊な環境ではより早い処置が必要であり、 $10 k\Omega < R_x \leq 20 k\Omega$  における  $T_d$  を  $100 ms$  以内とする。

b) 安全側に誤検出される  $R_x$  の上限 ( $R_{xm}$ )

時間的変化の大きな漏電において、漏電判定のしきい値  $R_{x0}$  以上の  $R_x$  でも漏電として検出される場合、すなわち安全側に誤検出される場合がある<sup>\*)4</sup>。この場合の上限  $R_{xm}$  を  $R_{x0}$  の 3 倍以内 ( $60 k\Omega$  以下) とする。

\* 4 4.2 及び 5. 参照。

\* 5 Fig. 2 の等価回路に対応する。分布インピーダンスの影響は小さいと考えられることから、省略した。

以上の検討から、検出器の主な設計仕様は Table 1 のようになる。

3.4 不検出時の電撃危険性

漏電の条件によっては、 $R_x > R_{x0}$  (不検出時) であるのに漏電電流が  $5 mA$  を越えることがある。この場合の電撃危険領域を漏電場モデルを用いて検討する。なお、ここで電撃危険領域とは電界が  $2.5 V/m$  以上の領域をいう。

1) 漏電場モデル

漏電場モデル<sup>\*5</sup> は Fig. 4 に示すように、十分に広い水中 (導電率  $\sigma$ ) に球状の漏電部  $a$  (半径  $r_a$ , 電位  $V_s/2$ ) 及び  $b$  (半径  $r_b \leq r_a$ , 電位  $-V_s/2$ ) が中心間距離  $r_d$  で配置されたモデルであり、接地極は十分に離れた位置にある。

2) 不検出時における漏電部の最大半径<sup>\*6</sup>

Fig. 4 において、不検出時における漏電部の半径は、 $r_d = r_a + r_b$ ,  $R_x = R_{x0}$  となる  $r_a, r_b$  を越えない。この

\* 6 電撃危険領域を漏電部の中心からの距離で表わすと、漏電部の半径が大きいくほどその領域は広がる<sup>9)</sup>。

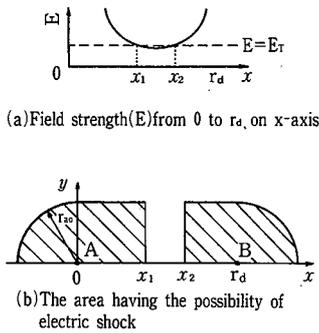


Fig. 6 Configuration of the area having the possibility of electric shock.  
不検出時に危険があるとみなす領域の形状

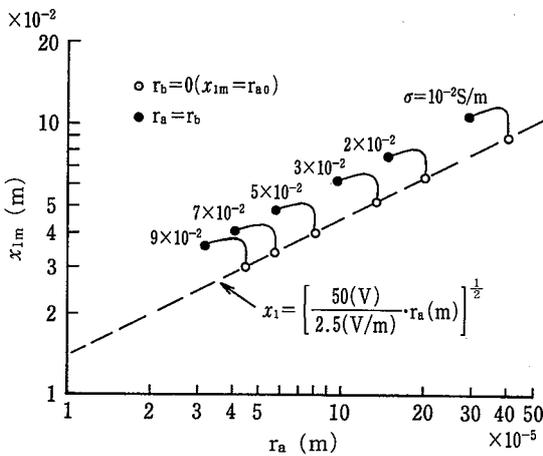


Fig. 7 Maximum distance  $x_{1m}$  from the center of a leaking conductor having the possibility of electric shock ( $R_x > R_{x0}$ ).  
電撃危険 ( $E \geq 2.5 \text{ V/m}$ ) の恐れのある漏電部からの最大距離  $x_{1m}$  ( $R_x > R_{x0}$ )

ことから、この条件での半径、 $r_a$ 、 $r_b$  は最大半径を表わすことになり、これを数値計算により求めた。

数値計算は映像法<sup>10)</sup>により行なった。計算上の漏電部の境界は、Fig. 4 のモデルでの境界に対して ( $\pm 10^{-6} \times$  漏電部の半径) の誤差範囲に含まれる。

数値解析の結果を Fig. 5 に示す。任意の  $\sigma$  における  $r_a$ 、 $r_b$  は Fig. 5 の  $r_a$ 、 $r_b$  を ( $10^{-2}/\sigma$ ) 倍した値になる。

Fig. 5 において、曲線より上側が漏電として検出できる  $r_a$ 、 $r_b$  を、曲線の下側は漏電として検出されないこともある  $r_a$ 、 $r_b$ <sup>\*7</sup> を表わしている。また、 $r_b=0$ 、 $R_x=R_{x0}$  となる  $r_a$  は次式で与えられる<sup>9)</sup>。

\*7  $r_d=r_a+r_b$  のとき曲線の下側は検出できない。しかし、 $r_d > r_a+r_b$  のとき検出されることもある。

$$r_a = 1 / (4 \cdot \pi \cdot \sigma \cdot R_{x0}) \quad (12)$$

3) 不検出時における危険領域

数値解析による検討の結果、Fig. 4 の漏電場における危険領域は次の形状の領域に含まれると考えられる。

i)  $r_b=0$  のとき漏電部  $a$  の周辺にできる危険領域 (電界の強さが  $E_T$  以上となる領域) は半径  $r_a$  の球の内側である。ここで、

$$r_{a0} = \{(r_a/E_T) \cdot (V_s/2)\}^{1/2} \quad (13)$$

ii)  $x \leq 0$ 、 $x \geq r_d$  における危険領域は漏電部を中心とした半径  $r_{a0}$  の球に含まれる。

iii)  $0 < x < r_d$  における危険領域は、 $x$  軸を中心とした半径  $r_{a0}$  の円筒に含まれる。しかし、 $x$  軸上の電界  $E$  が Fig. 6(a) のように  $E < E_T$  となる場合、 $x_1 < x < x_2$  の範囲は危険領域から除かれる。なお、 $x_1 \geq (r_d - x_2)$  である。

以上のことから、Fig. 4 の漏電場モデルにおける危険領域は、Fig. 6 (b) の斜線の領域を  $x$  軸を中心に回転させた回転体の中に含まれることになる。

ところで、 $R_x=R_{x0}$ 、 $r_d=r_a+r_b$  なる漏電部の大きさにより  $r_d > r_a+r_b$  での危険領域を推定すること、及び危険領域を Fig. 6 の  $r_{a0}$ 、 $x_1$  の最大<sup>\*8</sup> により表わすことは安全側の評価になる。ここでは、安全側の評価を行なう。

Fig. 5 のデータから得られた  $r_{a0}$ 、 $x_1$  の最大  $x_{1m}$  を Fig. 7 に示す。任意の導電率  $\sigma$  における  $r_{a0}$ 、 $x_{1m}$  は Fig. 7 の  $r_{a0}$ 、 $x_{1m}$  を ( $10^{-2}/\sigma$ )<sup>1/2</sup> 倍した値に、また、任意の漏電部の電圧  $V$  における  $r_{a0}$ 、 $x_{1m}$  は Fig. 7 の  $r_{a0}$ 、 $x_{1m}$  を ( $V/50$ )<sup>1/2</sup> 倍した値になる。

Fig. 7 によると、導電率が小さくなるほど  $r_{a0}$ 、 $x_{1m}$  は大きくなり、水道水に相当する導電率 ( $\sigma=10^{-2} \text{ S/m}$ ) では 0.12 m 以下である。

また、Fig. 7 の○印は  $x_1=r_{a0}$ 、すなわち  $r_b=0$  における  $x_{1m}$  を表わしており、このときの  $r_a$  以上の半径をもつ漏電部の場合には漏電として検出される。一方、●印は  $r_a=r_b$  にとのける  $x_{1m}$  を表わしており、このとき  $r_a$  以下での  $x_{1m}$  は単調に減少する。

以上のことから、漏電判定のしきい値  $R_{x0}$  を 20 k $\Omega$  に設定するならば、不検出時における電撃危険領域は小さいと考えられる。

\*8 漏電部の半径を  $r_a$ 、 $r_b$  とし、 $r_d (> r_a+r_b)$  を変化させたときに生じる  $x_1$  の最大。

Table 2 Specifications of the detector  
試作した検出器の仕様

Item	Specification
d.c. source	10V, 500mA
capacitor (C)	500 $\mu$ F (100V)
resistance (Rd) to detect earth-leakage current	300 $\Omega$
Characteristics of filter	
· damping characteristic	-35dB/oct
· cut-off frequency	12Hz
· step response time	40ms
· gain	10V/300mV
reference voltage of circuit of comparater (in case of Vdc=10V, Rx correspond with the reference voltage)	0.5V~10V (100k $\Omega$ ~ 0k $\Omega$ )

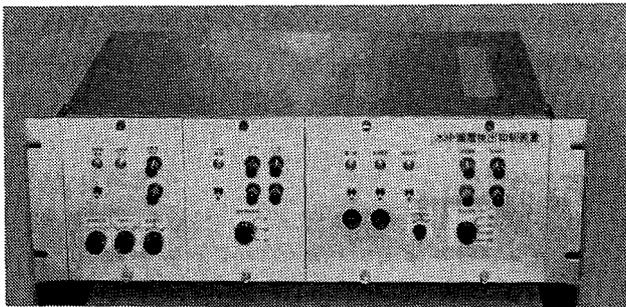


Fig.8 General view of a prototype detector.  
試作した検出器の概観

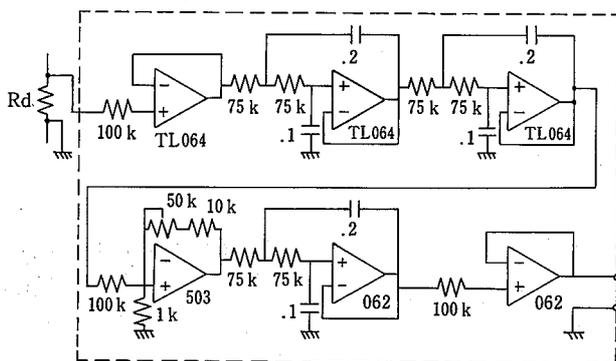


Fig.9 The prototype filter circuit.  
試作したフィルターの回路

\*9 試作した検出器は試験用であるため、検出器として必要でない回路も備えている。

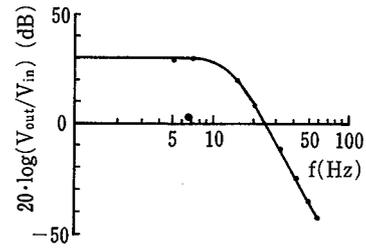


Fig.10 The frequency response characteristics of the filter.  
フィルターの周波数特性

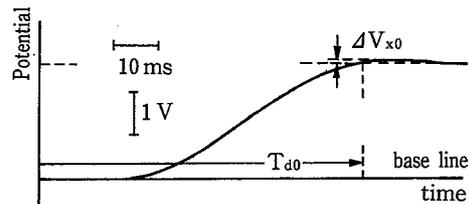


Fig.11 Step response wave of filter ( $\Delta V_0$ : overshoot,  $\Delta T_{d0}$ : time to reach the saturated value).  
フィルターのステップ応答波形 ( $\Delta V_0$ : 行きすぎ量,  $\Delta T_{d0}$ : 定常値に達するまでの時間)

#### 4. 試作した検出器

##### 4.1 概要

試作した検出器は Fig.1 に示すような回路構成からなり\*9, その概観及び検出器の心臓部であるフィルターの回路を Fig.8 及び 9 に示す; また, 各構成要素の主な仕様を Table 2 に示す。

##### 4.2 フィルターの特性

###### 4.2.1 定常的な特性

定常的な特性は周波数特性によって評価できることから, これを Fig.10 に示す。Fig.10 によると, 直流に対する利得が 30 dB であるの対し, 50 Hz の交流に対する利得は約 -35 dB である。したがって, 一般の電路からの定常的な漏電では, フィルター出力に含まれる交流分は直流分の約 0.4% 以下となる\*10。

###### 4.2.2 過渡的な特性

過渡的な特性はステップ応答波形及び地絡電流に対

\*10 フィルターの入力比 ( $= V_{aci} / V_{aci}$ ) が  $50\sqrt{2}/10$  のとき出力比 ( $= V_{aco} / V_{aco}$ ) は  $(50 \cdot \sqrt{2} \cdot 10^{(-35/20)}) / (10 \cdot 10^{(30/20)}) = 4 \times 10^{-3}$  となる。

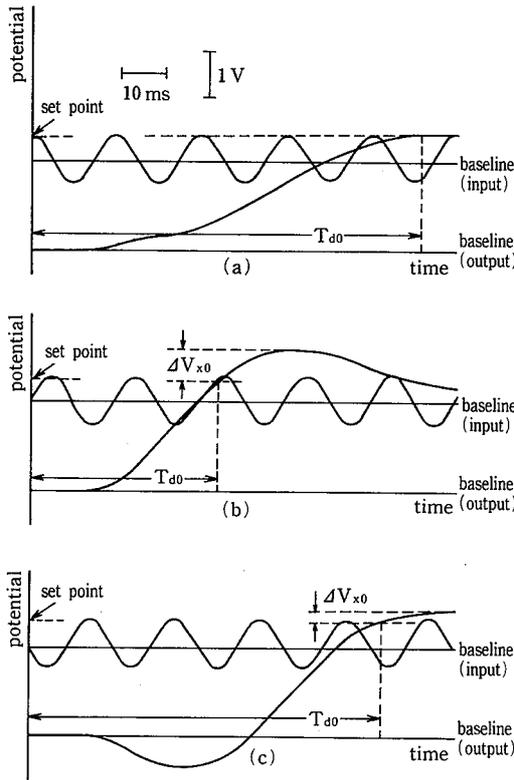


Fig. 12 Three typical examples of response wave of filter to earth-leakage current ( $\Delta V_{x0}$ : overshoot,  $\Delta T_{d0}$ : time to reach the saturated value)  
 地絡電流に対するフィルターの応答波形の代表的な例 ( $\Delta V_{x0}$ : 行きすぎ量、 $\Delta T_{d0}$ : 定常値に達するまでの時間)

する応答波形により評価できることから、これらの代表的な波形を Fig. 11 及び 12 に示す。これらの図において、 $T_{d0}$  は定常値に達するまでの時間を、 $\Delta V_{x0}$  は行きすぎ量を表わす。

Fig. 11 はステップ応答波形の一例であり、これは Fig. 13 において SW 1・SW 3 を OFF に、 $V_{ac}=0$  V、 $R_x=20$  k $\Omega$  とし、その後 SW 2 を ON にしたときのフィルターの出力波形である。Fig. 11 によると、 $\Delta V_{x0}$  の行きすぎ量 (Fig. 11 の条件において約 5 k $\Omega$  の  $R_x$  に対応する量) がある。

Fig. 12 は地絡電流に対する応答波形である。これは Fig. 13 において SW 1 を ON、SW 3 を OFF、 $R_x=20$  k $\Omega$ 、 $V_{ac}=50$  V、 $V_{ac}=10$  V とし、SW 2 を ON にしたときの出力波形である。この場合の出力波形は地絡電流に含まれる交流分の位相の影響を受けること<sup>\*11</sup> から、

\* 11 最も簡単な低減通過型フィルター (CR 直列回路) において確認できる。

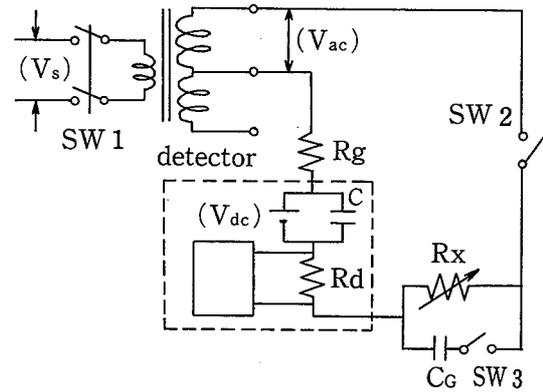


Fig. 13 Experimental circuit.  
 実験回路

その代表的な例をフィルターの入力波形 (直流分を含む正弦波) とあわせて、示した。

Fig. 12 によると、(a)、(b)、(c) における  $T_{d0}$ 、 $\Delta V_{x0}$  はそれぞれ大きく異なることがわかる。

試作したフィルターは以上のような過動的な特性を持つことから、漏電の条件が同じでも漏電の検出時間は一定とならないこと及び安全側に誤検出される範囲は広くなることが予想される。

### 4.3 検出器の特性

検出器にとって重要な特性は、 $R_x \leq R_{x0}$  における検出時間と  $R_x > R_{x0}$  において安全側に誤検出される範囲であり、これらを検出特性とする。試作した検出器の検出特性は一般の電路を対象にして、実験により求めた。なお、検出時間とは漏電が発生してから比較回路の出力が生じるまでの時間  $T_d$  (以下、主に  $T_d$  と記す) とする。

#### 4.3.1 実験回路

地絡電流に含まれる交流分が大きいほど  $T_d$  は変動し、安全側に誤検出される範囲は広がる。このことから、地絡電流に含まれる交流分が大きくなる条件のもとで、実験を行うことにした。これは、検出器を安全側に評価したことになる。

実験回路は Fig. 13 に示すように、中性点接地方式の電路において一線地絡漏電を模擬した回路である。電路の対地電圧  $V_{ac}$  を  $V_s/2 (=50$  V)、重畳する直流の電圧  $V_{dc}$  を 10 V とした。この回路の条件は、一般の電路において交流分が最も多い条件である。また、一般の電路では、分布インピーダンスの検出特性に対する影響<sup>\*12</sup> は十分に小さいと考えられることから、分布イン

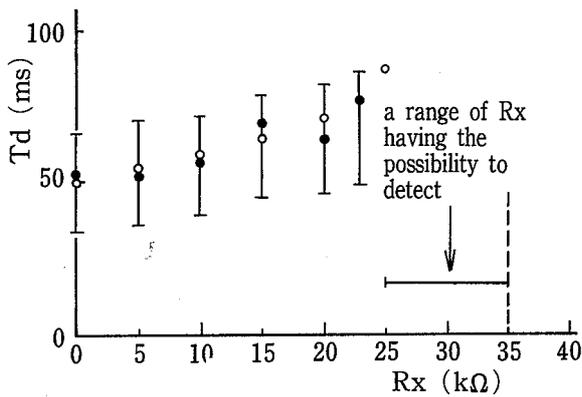


Fig. 14 Relation between line insulation resistance ( $R_x$ ) and time ( $T_d$ ) for detection of leak ( $V_{ac}=50$  V).  
対地抵抗  $R_x$  と検出時間 ( $V_{ac}=50$  V)

ピーダンスを省略した。

Fig.13 において、SW 1 は負荷に電力を供給する交流の電源スイッチである。SW 2 は模擬漏電スイッチであり、SW 2 が ON になった時、漏電が発生したことになる。また SW 3 は 5. に お いて 分 布 イ ン ピ ー ダ ンス に 含 ま れ る キ ャ パ シ タ ンス 分 の 影 響 を 検 討 す る た め の ス イ ッ チ で あり、この実験においては常に OFF とした。

$R_g$  は接地抵抗 (20 kΩ) である。 $R_x$  は電路の対地抵抗を模擬した抵抗であり、その大きさは可変 (0 kΩ~100 kΩ) である。

#### 4.3.2 実験方法

##### i) 比較回路の基準電圧の設定

漏電の条件にかかわらず  $R_x \leq 20$  kΩ において確実に漏電として検出できるように、比較回路の基準電圧を設定した。設定方法は、Fig.13 において SW 1 を OFF ( $V_{ac}=0$  V)、SW 2 を ON とした状態 ( $\Delta V_{z0} \neq 0$ ) のままで  $R_x$  を変化させるという方法である。この状態での安全側に誤検出される範囲は 1 kΩ 以下となる。

##### ii) 測定方法

Fig.13 において、SW 1 を ON にし、SW 2 を OFF にした状態で  $R_x$  を設定し、SW 2 を ON にしたときに漏電として検出されるか否かを、及び漏電として検出された場合には検出されるまでの時間をストレーヂオシロスコープにより測定した。

$R_x$  は 0 kΩ から、原則として 5 kΩ おきに設定した。SW 2 を ON にする試行回数 (10 回) の全てが漏電として検出される限界及び全てが検出されない限界を求めるときには、 $R_x$  を 1 kΩ おきに設定した。

Table 3 Relation between line voltage ( $V_{ac}$ ) and maximum time ( $T_{dm}$ ) for detection of leak and upper limit ( $R_{xm}$ ) of line insulation

電路の対地電位  $V_{ac}$  と検出時間  $T_d$  の最大  $T_{dm}$  及び安全側に誤検出する対地抵抗  $R_x$  の最大  $R_{xm}$

Vac	Tdm		Rxm
	$R_x \leq 10k\Omega$	$R_x \leq 20k\Omega$	
0 V	< 60ms	< 71ms	25 kΩ
50 V	< 71ms	< 81.5ms	34 kΩ
107 V	< 76ms	< 86ms	56 kΩ

#### 4.3.3 実験結果

対地抵抗  $R_x$  と検出時間  $T_d$  との関係を図 14 に示す。なお設定された  $R_x$  において、試行回数の全てが漏電として検出された場合には  $T_d$  の平均 (●) 及び範囲を、また全てではないが 1 回以上漏電として検出された場合には棒 (—) として記入した。また、参考までに交流分がない場合 (SW 1 : OFF) の  $T_d$  (ほぼ一定) を (○) により付け加えた。この場合、 $R_x=26$  kΩ のとき試行回数の全てが漏電として検出されなかった。

Fig.14 から、 $R_x \leq 10$  kΩ において  $T_d \leq 73$  ms、 $R_x \leq 20$  kΩ において  $T_d \leq 82$  ms となること、及び安全側に誤検出される範囲の上限は約 36 kΩ であることがわかる。

これらの結果は Table 1 の設計目標を満たすものであり、感電防止用の水中漏電の検出器として使用できることを示している。

## 5. 試作器の検討

### 5.1 検出特性の検討

検出特性は地絡電流に含まれる交流分の大きさ及び電路と対地間の分布キャパシタンス (以下、対地キャパシタンスと記す) の影響を受けると予想される。以下、これらについて 4.3 と同様の実験方法により検討した。

#### 5.1.1 交流分の影響

地絡電流に含まれる交流分を変化させる要因として、漏電が発生した電路の対地電位及び対地キャパシタンスが考えられる。対地キャパシタンスについては 5.1.2

\* 12 5.1.2 において検討する。

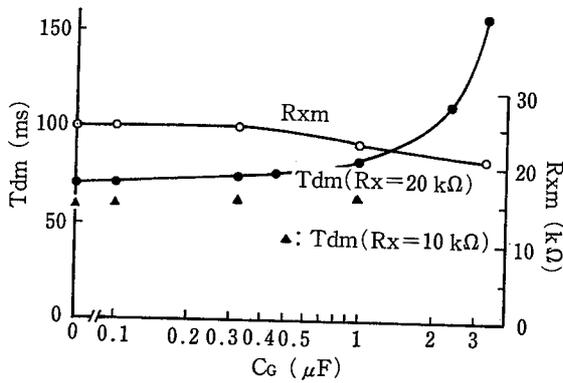


Fig. 15 Relation between earth capacity ( $C_G$ ) and maximum detection time ( $T_{dm}$ ) at  $R_x$ , and upper limit ( $R_{xm}$ ) of line insulation resistance having the possibility to detect the leak ( $V_e=0$  V).  
 対地キャパシタンス  $C_G$  と検出時間の最大  $T_{dm}$ 、検出されることもある対地抵抗の最大  $R_{xm}$  ( $V_{ac}=0$  V)

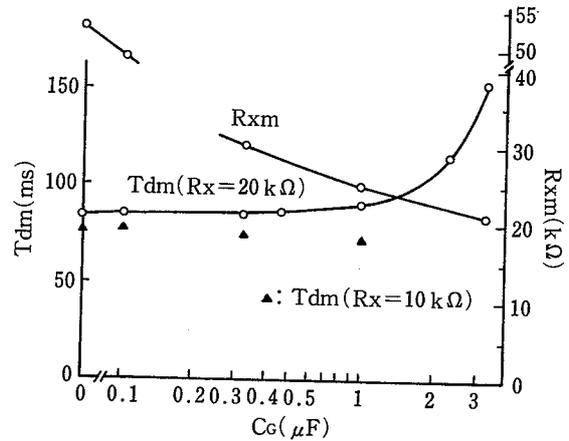


Fig. 17 Relation between earth capacity ( $C_G$ ) and maximum detection time ( $T_{dm}$ ) at  $R_x$ , and upper limit ( $R_{xm}$ ) of line insulation resistance having the possibility to detect the leak ( $V_{ac}=107$  V).  
 対地キャパシタンス  $C_G$  と検出時間の最大  $T_{dm}$ 、検出されることもある対地抵抗の最大  $R_{xm}$  ( $V_{ac}=107$  V)

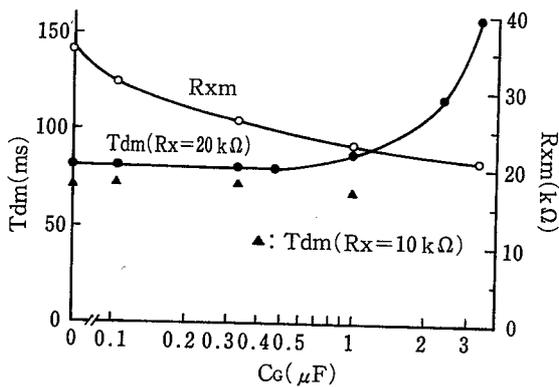


Fig. 16 Relation between earth capacity ( $C_G$ ) and maximum detection time ( $T_{dm}$ ) at  $R_x$ , and upper limit ( $R_{xm}$ ) of line insulation resistance having the possibility to detect the leak ( $V_{ac}=50$  V).  
 対地キャパシタンス  $C_G$  と検出時間の最大  $T_{dm}$ 、検出されることもある対地抵抗の最大  $R_{xm}$  ( $V_{ac}=50$  V)

において検討することにし、ここでは対地電位について検討する。

交流分は対地電圧に比例することから、Fig. 13において  $V_{ac}$  を 0 V, 50 V および 107 V の三段階に変え、対地電圧と検出特性との関係を実験により求めた。

ここで、 $V_{ac}=0$  (V) は地絡電流に交流分が含まれない場合の漏電に<sup>\*13</sup>、 $V_{ac}=50$  (V) は一般的な電路での漏電においてとり得る最大の対地電圧に、また  $V_{ac}=107$  (V) は 100 (V) 電路において許容される上限の電圧<sup>\*14</sup>

に相当する。

$V_{ac}$  と検出特性との関係を Table 3 にしめす。Table 3 によると、 $V_{ac}$  が大きくなるほど安全側に誤検出する範囲の上限  $R_{xm}$  は大きくなり、また検出時間の最大  $T_{dm}$  は長くなるのがわかる。しかし、 $V_{ac}=107$  (V) における  $T_{dm}$  と  $V_{ac}=0$  (V) におけるそれとの差は小さく、検出時間  $T_d$  に対する対地電圧の影響は少ないと考えられる。

### 5.1.2 電路の対地キャパシタンスの影響

対地キャパシタンスは地絡電流に含まれる直流分の過度現象及び地絡電流に含まれる交流分の大きさに影響を与える。以下、これらの影響がどの程度であるかについて、検出器の検出特性により示した。

#### 1) 直流分の過度現象に及ぼす影響

Fig. 13 の実験回路において  $V_{ac}=0$  V, すなわち SW 1 を OFF, SW 3 を ON にし、その後 SW 2 を ON としたときの直流分の過度特性を 4.2 と同様の実験から求めた。コンデンサー  $C_G$  は全電路の対地キャパシタンスを模擬したものである。例えば、単相の電路において一線当りの対地キャパシタンスは  $C_G/2$  となる。

実験結果として  $R_x=20$  kΩ における  $T_{dm}$ ,  $R_{xm}$  を Fig. 15 に示す。また、参考までに一部の  $C_G$  については  $R_x=10$  kΩ における  $T_{dm}$  も付け加えた。

\* 13 実験回路では模擬できないが、漏電電流の全てが線間の電流となる条件においても  $V_{ac}=0$  と等価になる。

\* 14 電気事業法

Fig. 15 によると、 $C_G$ が大きくなるほど、 $R_x=20\text{ k}\Omega$ での  $T_{dm}$  は大きくなるのに対して、 $R_{xm}$  は小さくなるのがわかる。これは、 $C_G$ が直流分の立ち上がりを緩やかにし、行きすぎ量を減らすように作用するためと考えられる。また、 $C_G \leq 0.9951\ \mu\text{F}$ における  $T_{dm}$ ,  $R_{xm}$  は Table 1 の仕様を満たす。

## 2) 交流分に対する影響

電路の各相において対地キャパシタンスが異なる値をとる場合、交流分は対地キャパシタンスがない場合と比べ、変わると考えられる。これについて、Fig. 13の実験回路により検討した。

Fig. 13の実験回路はFig. 2の等価回路において  $C_{AG}=C_G$ ,  $C_{BG}=0(\mu\text{F})$ とした状態と等価であり、この状態での交流分は  $|C_{AG}-C_{BG}| \leq C_G$ とした状態での交流分より大きい\*15。

実験は  $V_{ac}=50\text{ (V)}$ ,  $100\text{ (V)}$ とし、1)と同様の方法により行なった。また、実験結果を1)と同様に表わし、それをFig. 16及び17に示す。なお、漏電を検出するという実験の性質上、この結果には直流分に対する影響も含まれることになる。

Fig. 16及び17は対地キャパシタンスに対して1)と同じ傾向を示しており、 $C_G \leq 0.9951\ \mu\text{F}$ での  $T_{dm}$  は Table 1 の仕様を満たす。

1), 2)の検討からわかるように、対地キャパシタンスが  $0.99\ \mu\text{F}$ 以下において試作した検出器の検出特性は Table 1 の設計仕様を満たす。このことから、この範囲の対地キャパシタンスの影響は許容できるものと考えられる。なお、一般の電路の対地キャパシタンスはこの範囲に含まれる。

## 5.2 試作した検出器の適用

4.及び5.での検討から、試作した検出器の適用できる電路は Table 4 のようになる。なお、(11)式の場合

Table 4 Applied lines of detector  
試作した検出器の適用電路

Item	Specification
Power system	Resistance grounded neutral system
Grounding resistance	20k $\Omega$
Line voltage	100V
Earth capacity of line	<1 $\mu\text{F}$

\* 15 交流分が大きいほど検出特性に悪影響を及ぼすことから、この状態での評価は安全側の評価となる。

のように安全に検出できない場合もあることから、水中での作業者は水からみた人体の抵抗が  $500\ \Omega$ 以上となるように絶縁性のスーツなどを着用する必要があると考えられる。

## 6. あとがき

水中での漏電は発生状況、電撃の影響等において、陸上での漏電とは異なる。このため、漏電の検出には水中に適した方法の開発が必要である。

ここでは電路に重畳した直流の電圧により電路の対地抵抗を監視し、漏電を検出する方法を検討した。この方法は、電路の絶縁劣化を監視できること、漏電の検出に及ぼす電路の浮遊容量の影響が小さいこと、線間の漏電の検出が可能であることなどの特徴を持っており、水中漏電の検出にとって有効な方法である。

ここでは、またこの検出方式に基づいた検出器を試作し、その検出特性について模擬漏電回路を用いた実験により検討した。

検討結果の主なものは次のようになる。

- i) 漏電の指標は対地抵抗であるため、線間において生じる漏電の一部は安全に検出できない。
  - ii) 安全に検出できない場合の電撃危険領域 (2.5 V/m以上の領域) は小さく、一例として、漏電部を球とし、球一球の漏電場モデル (Fig. 4)における解析結果 (球の電位: 50 V 及び -50 V, 対地抵抗: 20 k $\Omega$ , 導電率:  $10^{-2}\text{ S/m}$ )を示すと、危険領域は漏電部を中心とした半径 0.12 m の球に含まれる。
  - iii) 試作した検出器の適用電路は中性点を 20 k $\Omega$ で接地した 100 V の電路であり、電路の対地キャパシタンスは約 1  $\mu\text{F}$ 以下とする。
  - iv) 試作した検出器の、電路に重畳する直流電圧は 10 V である。
  - v) 漏電として検出する対地抵抗のしきい値を 20 k $\Omega$ に設定すると、漏電の検出時間は対地抵抗が 10 k $\Omega$ において 78 ms 以下、20 k $\Omega$ において 90 ms 以下である。
  - vi) 安全側に誤検出される対地抵抗の上限は対地抵抗の変化が急な場合、50 k $\Omega$ を越えることがある。
- 以上のように安全側に誤検出する対地抵抗の上限については今後の検討課題となるが、試作した検出器は感電防止用の安全装置の漏電検出部として使用できるものと考えられる。

最後に、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り、関係各位に深く感

謝の意を表する。 (昭和 62 年 2 月 23 日受理)

### 参考文献

- 1) Underwater electrical safety some guidance on protection against shock, Report UR 14, CIRIA Underwater Engineering Group (UK), May 1979
- 2) Code of practice for the Safe Use of Electricity Underwater, Department of Energy (UK), Sep. 1982
- 3) 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 (III)”，(昭和 58 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，1984
- 4) 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 (IV)”，(昭和 59 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，1985
- 5) 山野英記：“電撃危険とその影響の発生限界”，静電気学会誌，9，6，376-383，1985
- 6) IEC Publication 479-1，1984
- 7) 山野・本山・田島：“水中において下肢強直を起す電撃の強さと許容限界”(産業安全研究所報告，RR-30-1) 労働省産業安全研究所，1981
- 8) 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 (V)”，(昭和 60 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，1986
- 9) 本山・山野・田島：“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——”(産業安全研究所報告，RR-30-2) 労働省産業安全研究所，1982
- 10) “電気磁気学 (改訂版)”，電気学会編，1968 他