

電撃危険性推定のための1回路モデル*

山野英記**

A Circuit Model to Estimate Electric Shock Hazard*

by Eiki YAMANO**

Abstract; The allowable current of electric shock accident depends on the body current properties (waveform, duration and frequency), contact locations and other factors of the human body. Until recent years, only “commercial AC or DC” was presumed as a body current in electric shock accidents. The use of electric power converters recently has increased in electric power systems, such as solar power generators, and may be a possible source of fault current (or body current) besides “commercial AC or DC.” Moreover, the allowable limit of current is often unknown except for “commercial AC or DC.” The limits for other currents must be made available in order for a circuit model to be used to estimate whether a particular body current is allowable. A trial of such an approach is reported herein. A circuit model was composed for the above use and was checked for the known data of the threshold current of ventricular fibrillation as follows.

- (1) Circuit constants were optimized to the IEC’s data of threshold current by the least squares method.
- (2) The DC threshold current was calculated from the model. The calculated values were compared with the data of the threshold DC current.
- (3) The maximum error of the calculated value to IEC’s data was 3.19% in the section of 10 ms ~ 10s.
- (4) As for frequency characteristics, the maximum error was 11.2% in the section of 1 ~ 1000 Hz. In conclusion, this type of approach has possibilities, though it is not applicable immediately.

Keywords; Electric shock, Threshold of ventricular fibrillation, Estimation of threshold, Circuit model for estimation

* 2001年11月28日, APSS (Asia Pacific Symposium on Safety) 2001にて, 一部, 口頭発表した。

** 物理工学安全研究グループ Physical Engineering Safety Research Division

1. はしがき

電撃の許容限界は一般に身体に流れる電流（身体電流body currentという）で与えられるが、その値は電流の属性（波形、持続時間、周波数等）に依存して変化し、また、各種のしきい電流は、通電部位等の条件や生体側の因子にも依存して変化する。すなわち許容限界は、定数ではなく、従属変数である。

近年までは電撃災害時の身体電流として想定されるのは、ほとんど商用交流又は直流の電流であった。これらの許容限界は、ほぼ解明されており、IECの報告書にまとめられている^{1),2)}。しかるに近年は、風力発電、太陽光発電、等々の分散型電源の普及につれて、インバータ等の電力変換機器が多く使用されるようになり、電流の波形や周波数が変換されるので、地絡故障が生じた時の地絡電流（又は、誤って人体が接触した時の身体電流）として、商用交流及び直流以外の波形や周波数の電流の想定される状況が増加しつつある。今後は、想定される地絡電流（又は身体電流）は多様化する傾向にある。商用交流及び直流以外の波形や周波数の電流の許容限界又はしきい電流は未知であることが多い。このような場合に、起こりうる身体電流に対し電撃危険性の推定に使用できるような回路モデルがあれば有用と考えられる。

これらは、同一地絡箇所であっても、機器の制御状況によって時間的に変化する。このように身体電流の基本的な属性が不明な場合は、その電撃危険性（又は許容限界）は明らかでなく、電撃に対する保護対策には、はなはだ都合が悪い。

電撃に対する保護対策を講じる場合、このように異なる身体電流に対し、いちいち実験的に許容限界を調べることは非常な手数であり、実際上不可能と言わざるを得ない。このような場合には推定によるのもやむを得ないと考えられる。

心室細動は、心室の部分部分が協調なく収縮を繰り返し血液の拍出が無くなる現象（心拍停止の一つ）で、電撃による即死の原因とされている¹⁾。

心室細動は、心室筋の興奮性（興奮の生じやすさ、刺激に対する感度）の不均一な時に、電流刺激が加わると生じやすい。心室細動電流と持続時間との関係において、心室細動電流は、電撃の持続時間 d が約 1 心周期（約 1 秒）以上になると大きく低下するが、これは、心臓の期外収縮（正規の拍動以外の収縮）により心室筋の興奮性の不均一性が高まるためとされている。

本研究は、このような病理・生理学的過程の表現や探求を意図するものではない。むしろ感電保護の一助として工学的アプローチを意図している。しかし、本

稿の目的は、前記のような状況において、考案した回路モデルが電撃危険性推定の一助となりうるかどうか、その可能性を点検することにある。モデル化の過程においては、モデルの解析可能なことは必須と考え、それが損なわれるようなモデルの修正は避けた。

既に筆者は、持続時間の関数である抵抗 $R(d)$ を用いれば心室細動電流の既知の持続時間特性及び周波数特性を表わすことができることを示した³⁾。その後、 $R(d)$ による 1 心周期前後の変化は指数関数の組合せで表わされることを確認し、その $R(d)$ を定数素子の回路で表わしてモデルに加えた。これにより得られた回路モデルの応答は既知の持続時間特性及び周波数特性とある程度一致した⁴⁾。

2. 回路モデル

2.1 回路モデルの概要

Fig. 1 に、心室細動電流（心室細動のしきい電流）に対する回路モデルを示す。

このモデルは主に、前段（入力段）、中段（オペアンプ・整流回路）、及び後段（並列CRの二層回路）に分けることができる。前段は、一種のフィルタであり、周波数特性の表現に寄与する。中段のオペアンプは電圧フォロワー（インピーダンスバッファ）である。整流回路は興奮性細胞（神経・筋）の細胞膜の整流作用を表す。（交流は直流パルス列の 2 倍の回数だけ電気

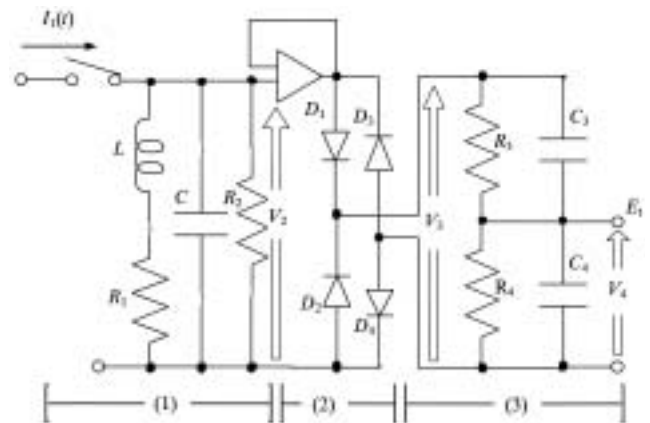


Fig. 1 A circuit model to estimate electric shock hazard.
 (1) Compo.1 (Filter) (2) Compo. 2 (Voltage follower and rectifier) (3) Compo.3 (Double layers model of parallel C and R)
 身体電流の電撃危険性（心室細動）を推定するための回路モデル
 (1) 前段（フィルタ回路）(2) 中段（電圧フォロワー及び整流回路）(3) 後段（CR二層モデル）

刺激を生ずる⁶⁾)

後段は主に神経や筋の直流持続時間特性(いわゆる Strength-duration curve)を表している。受動的な現象(心室細動が発生するまでのこと)のみを扱うことにし発生後のことは扱わないことにすれば、細胞膜の等価回路⁵⁾(Hodgkin and Huxley)から能動的な素子

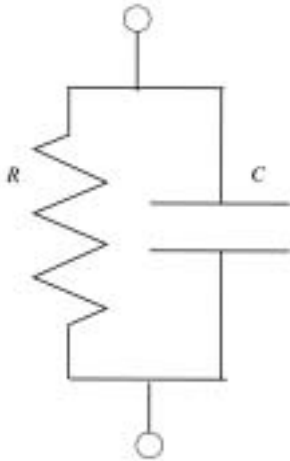


Fig. 2 The passive equivalent circuit which is obtained by simplification of the equivalent circuit of cell membrane⁵⁾(Hodgkin and Huxley's model)
細胞膜の等価回路⁵⁾(Hodgkin and Huxley)を単純化して得られる受動的等価回路

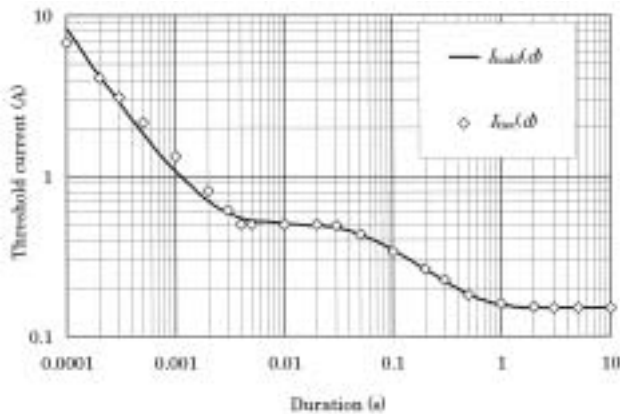


Fig. 3 Duration characteristics of threshold DC current.
 $I_{tcal}(d)$: Calculated DC threshold current (Constants have been optimized to IEC's data of duration characteristics by the method of least squares)
 $I_{tiec}(d)$: IEC's data of DC threshold of ventricular fibrillation.
心室細動の直流しきい電流の持続時間特性
 $I_{tcal}(d)$: 直流しきい電流の持続時間特性の計算値(最小2乗法によって持続時間特性データに対し、最適化した場合。)
 $I_{tiec}(d)$: IECによる直流しきい電流のデータ

を省略することができる。省略すると、一つの時定数(=CR)をもつCとRの並列回路(積分回路)となる(Fig. 2)。Fig. 1ではこの並列回路が二層(直列)になっている。

モデルにおいて、入力電流 $I_i(t)$ を入力した時の出力電圧 $V_i(t)$ の最大値 V_{4MAX} が $V_{4MAX} > E_i$ となる場合は、 $I_i(t)$ は危険であるから許容されないとする (E_i : 回路モデル内のしきい電圧)。

2.2 回路解析の概要

回路モデルで、ある身体電流 I_i の電撃危険性(心室細動を起すか否か)をよく判別するには、回路モデルの構成だけでなく回路定数が適切でなければならない。既知データによく適合するように回路定数を調整することを最適化という。

最適化は次のように行った。まずモデルの入力電流 $I_i(t)$ を仮定した時の、出力電圧 $V_i(t)$ を解析によって求める。次に $V_{4MAX} = E_i$ となるようなしきい電流 I_{tcal} を求める (V_{4MAX} : 出力 $V_i(t)$ の最大値又は波高値)。 I_{tcal} は、モデルから得られた計算値又は推定値であり、回路定数がパラメータとなる。また、入力電流 I_i の周波数 f や持続時間 d などもパラメータとなる。しきい電流の既知データを例えば I_{tiec} と置き、データと計算値との差を残差という。ここでは、次のように、最小2乗法を用いて回路定数の最適化を行った。

一般に、最小2乗法では、データと計算値との差の平方の総和(残差平方和) $x = \sum (I_{tiec} - I_{tcal})^2$ が最小になるようにパラメータ(回路定数)を定める。ここでは式(1)のような、データに対する相対残差の平方和 $y = \sum (I_{tcal} - I_{tiec})^2 / (I_{tiec})^2$ (1) を最小にする定数を求めた。(計算にはExcelのソルバーを使用した)

回路定数の最適化又は計算値の対比には次の3種の既知データを使用した。すなわち、IECの、直流しきい電流の持続時間特性データ $I_{tiec}(d)$ (IEC60479-1のFIG.15¹⁾ 及びIEC60479-2のFIG.22²⁾ から読み取り)、IECの正弦波しきい電流の周波数特性データ $I_{tiec}(f)$ (IEC60479-2のFIG.11²⁾ から読み取り)、Weirichらの正弦波しきい電流⁶⁾の周波数特性データ $I_{twe}(f)$ (文献6)のFig. 3(A)から読み取り)。周波数特性の場合にも回路定数の最適化には前記(持続時間特性)と同じ方法を使用した。

3. 回路解析

3.1 直流 (方形パルス) の持続時間特性

直流に対する持続時間特性を求めるには回路モデルの入力電流 $I(t)$ を $I(t) = I_1 \cdot u(t)$ と仮定すると ($u(t)$: 単位階段関数), $u(t)$ の極性は一定であり変化しないことから, 整流回路のダイオードのオンオフは交替しない。仮定から, ダイオードは, オンのダイオードを短絡, オフの素子を開放で置き換えることができる。そのようにして出力電圧 V_4 を解くことができ, $V_4(t)$ は下の式 (2) のように与えられる。方形パルスの持続時間 d とすると, $t = d$ のときに V_4 の最大値 $V_{4\text{MAX}}$ が得られる。

$$V_4(t) = K_s \cdot R_{dc} \cdot I_1$$

$$\cdot \left\{ 1 + \frac{\alpha_{01} \alpha_0 N_1}{\alpha_3} e^{-b_1 t} + \frac{\alpha_{01} \alpha_0 N_2}{\alpha_3} e^{-b_2 t} + \frac{\alpha_{01} \alpha_0 N_3}{\alpha_3} e^{-\alpha_0 t} \right\} \quad (2)$$

上式において各定数は以下のように回路定数等により与えられる。

$$K_s = \frac{R_4}{R_3 + R_4}, \quad R_{dc} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \quad (3)$$

$$\alpha_{01} = \frac{1}{C R_{dc}}, \quad \alpha_0 = \frac{G_3 + G_4}{C_3 + C_4}, \quad \alpha_3 = \frac{1}{C_3 R_3} \quad (4)$$

なお,

$$\begin{aligned} \tau_0 = \frac{1}{\alpha_0} &= \frac{C_3 + C_4}{G_3 + G_4} = \frac{C_3 + C_4}{\frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4}} \\ &= (C_3 + C_4) \cdot \frac{R_3 R_4}{R_3 + R_4} \end{aligned} \quad (5)$$

さらに,

$$N_1 = \frac{-(b_1 - \alpha_2)(b_1 - \alpha_3)}{b(b_1 - b_2)(b_1 - \alpha_0)}$$

$$N_2 = \frac{(b_2 - \alpha_2)(b_2 - \alpha_3)}{b(b_1 - b_2)(b_2 - \alpha_0)}$$

$$N_3 = \frac{-(\alpha_0 - \alpha_2)(\alpha_0 - \alpha_3)}{\alpha(\alpha_0 - \alpha_2)(\alpha_0 - \alpha_3)}$$

また $N_1 \sim N_3$ 内で使われている各パラメータは,

$$\alpha_2 = \frac{R_2}{L}$$

$$b_1, b_2 =$$

$$\frac{1}{2} \left(\alpha_1 + \alpha_2 \pm \sqrt{(\alpha_1 + \alpha_2)^2 - 4\alpha_1 \alpha_2 \left(\frac{R_1 + R_2}{R_2} \right)} \right) \quad (7)$$

また b_1, b_2 中で使われている α_1 は,

$$\alpha_1 = \frac{1}{C R_1}$$

である。

3.2 正弦波しきい電流の周波数特性

周波数特性は持続時間が大きい場合 ($d > \text{約 } 3 \text{ s}$) しか発表されていない。したがって, 解析は過渡状態ではなく定常状態で行えばよい。入力 $I(t)$ が正弦波の場合回路モデルの前段の出力 $V_4(t)$ の波高値を V_{2p} と書くと後段 (二層回路) の全体にかかる電圧 V_{3p} は,

$$V_{3p} = V_{2p} \quad (8)$$

となる。 V_4 の最大値 $V_{4\text{MAX}}$ は二層回路の上部 Z_3 と下部 Z_4 による電圧分圧比とで分割された電圧

$$V_{4p} = K_{4T} \cdot V_{3p} \quad (K_{4T}: \text{分圧比}) \quad (9)$$

で与えられる。入力電流を I_1 と書くと次の式のようになる。ただし V_{4p}, I_{1p} 等は波高値 (したがって最大値) を表す。

$$V_{4p} = K_{4T} \cdot |Z_T| \cdot I_{1p} \quad (10)$$

$$Z_T = Z_3 + Z_4, \quad K_{4T} = |Z_4| / |Z_T| \quad (11)$$

ただし, Z_T, Z_3, Z_4 はインピーダンスを表す。

4. 最適化と比較対照の実施

4.1 持続時間特性データによる最適化と比較

まず, 直流しきい電流の持続時間特性のデータ $I_{\text{tiec}}(d)$ を用いて回路定数の最適化を行った。

Fig. 3 はその結果から得られた計算値 $I_{\text{tical}}(d)$ とデータ $I_{\text{tiec}}(d)$ との対比である。

データは二つのグラフ (IEC60479-1 及び 60479-2) から読み取ったものを接ぎ合わせた。しばしば引用される 60479-1 のほうは横軸の区間が $0.01 \text{ s} \sim 10 \text{ s}$ の部分である。後者は区間 $0.0001 \text{ s} \sim 0.01 \text{ s}$ である。

Fig. 3 の全区間において相対残差 (誤差) の最大値は 0.0001 s において 22.3% , 平均 5.14% , 区間 $0.01 \text{ s} \sim 10 \text{ s}$ においては平均 1.31% , 最大 2.84% (0.03 s) であった。計算値とデータは, 特に 0.01 s 以上の区間においてかなりよく適合しているが, 対比の対象は最適化に用いたデータであるから当然とも言えよう。このことから, 持続時間については, 計算値にある程度の誤差を認めれば, 回路モデルの形 (構成) はほぼ妥当と考えることができる。

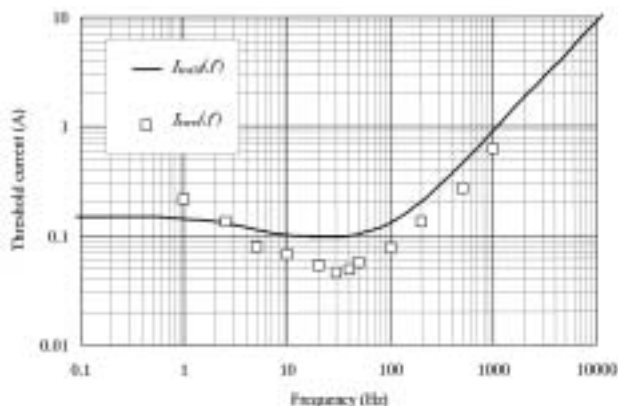


Fig. 4 Frequency characteristics of sinusoidal threshold current.
 $I_{tcalc}(f)$: Calculated sinusoidal threshold current (Constants have been optimized to the IEC's data of duration characteristics)
 $I_{twe}(f)$: Weirich's data of frequency characteristics of threshold current (1-1000 Hz)
 正弦波しきい電流の周波数特性。
 $I_{tcalc}(f)$: 正弦波しきい電流の計算値 (IECによる持続時間特性データに対し最適化した回路定数)
 $I_{twe}(f)$: Weirich による正弦波しきい電流の周波数特性のデータ

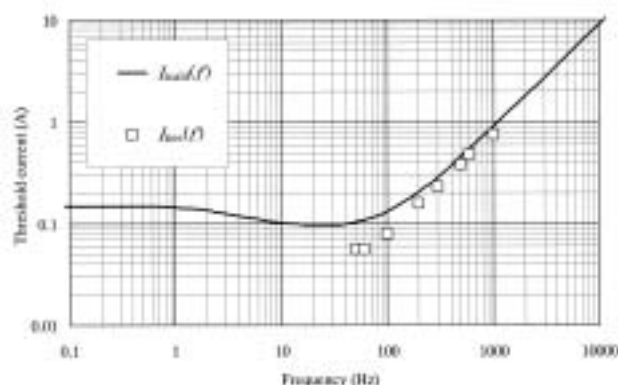


Fig. 5 Frequency characteristics of sinusoidal threshold current.
 $I_{tcalc}(f)$: calculated sinusoidal threshold current (Constants have been optimized to the IEC's data of duration characteristics)
 $I_{tiec}(f)$: IEC's data of frequency characteristics of threshold current (50-1000 Hz)
 正弦波しきい電流の周波数特性。
 $I_{tcalc}(f)$: 正弦波しきい電流の計算値 (IECによる持続時間特性データに対し最適化した回路定数)
 $I_{tiec}(f)$: IECによる正弦波しきい電流の周波数特性のデータ (50-1000 Hz)

4.2 周波数特性の計算値

次に上の適合化で得られた定数をそのまま使用して周波数特性を計算した。それをWeirichの周波数特性のデータ $I_{twe}(f)$ 及びIECの周波数特性データ $I_{tiec}(f)$ と比較した。Fig. 4 及びFig. 5 にその対比を示す。その結果、適合性はよくなかった。Fig. 5 で誤差 (データに対する相対残差) は、14.9% ~ 91.1% (50 ~ 1000 Hz) となった。

4.3 IECの持続時間特性データ $I_{tiec}(d)$ 及び周波数特性データ $I_{tiec}(f)$ による最適化

そのため、4.1の持続時間特性データに対して最適化した後、それに重ねてIECの周波数特性のデータに対して最適化を行った。その結果得られた定数を用いて周波数特性を計算した。この計算値 $I_{tcalc}(f)$ をIECの周波数特性データ $I_{tiec}(f)$ と対比したグラフをFig. 6 に示す。計算値記号の下付文字のdfは持続時間特性と周波数特性データにより最適化したことを示す。これはかなりよく適合している。最大の誤差は100 Hz で11.1% (区間1 ~ 1000 Hz) であった。

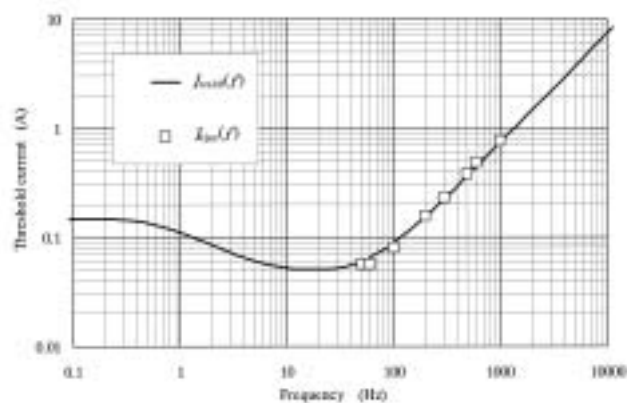


Fig. 6 Frequency characteristics of sinusoidal threshold current $I_{tcalc}(f)$: Calculated sinusoidal threshold current (Constants have been optimized to duration and frequency characteristics of the IEC's data by the method of least squares) $I_{tiec}(f)$: IEC's data of frequency characteristics of sinusoidal threshold current (50-1000 Hz)
 正弦波しきい電流の周波数特性。
 $I_{tcalc}(f)$: 正弦波しきい電流の計算値 (IECによる持続時間及び周波数特性データに対し最適化した回路定数)
 $I_{tiec}(f)$: IECによる正弦波しきい電流の周波数特性のデータ (50-1000 Hz)

この定数を用いて、持続時間特性を計算した。この計算値 $I_{\text{calc}}(d)$ をIECの持続時間特性データ $I_{\text{iec}}(d)$ と対比したのがFig. 7である。データに対する誤差(相対残差)は全区間で最大95.1%(0.0001 s)、平均17.35%

となり、区間0.01~10 sで最大15.4%(0.1s)で、平均7.58%となった。

4.4 最適化した後の回路定数

Table 1 に、回路定数の最適化した後の値を示す。同表において The 1stはIECの持続時間特性のデータを用いた最適化の結果、The 2ndがその最適化に重ねてIECの周波数特性データによる最適化を行った結果である。表にあるように、2回目の最適化によってすべてのパラメータが変化した訳ではない。

4.5 考察

本稿で提案した回路モデルはこれまでの検討によって大まかには既知データに適合することが分かった。しかし、同一モデル(同じ回路構成で同じ定数)が持続時間特性と周波数特性との両方のデータに適合するには少し困難があり、さらに検討を要するが、今回は電撃危険性推定のためのこの種のアプローチを報告した。

また、両方の既知データ(IECの持続時間特性データとWeirichの周波数特性データ)が、同じ条件で得られたとは考えにくい。両者とも換算や正規化の類が行われているが、IECは人間への適用を前提としており、Weirichはテングクネズミを使用した。データの得られた条件が同じではないことが一般的と考えられるので、回路モデルを改善するときどのように対処するのがよいか等については、今後の課題と考えられる。

5. むすび

本稿で提案した回路モデル(Fig. 1)は第4章の検討によって大まかには既知データに適合することが分かった。適合性は十分とはいえないので、本稿はこの種のアプローチの紹介という程度の意味しか持たないかも知れない。電撃の危険性は、多くの因子によって変化するので、総合的又は全体的に判断せねばならない。本稿で検討した範囲でも、提案した回路モデルは持続時間特性でも持続時間のより狭い区間でならばより高い精度でデータに適合するが、区間を広げると、精度は低下するということが観察された。これでは、当初に意図したような許容限界の未知な電撃の危険性を推測する時の精度は低下してしまうだろう。ただし許容限界の未知な身体電流でも、例えば周波数成分の区間が分かっていたら、推測が可能になることもあるだろう。はしがきに述べたように全く分からないよりも、この種のアプローチも、感電保護に関する対策を

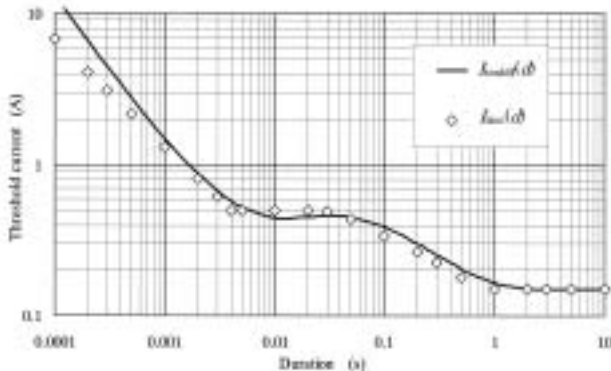


Fig. 7 Duration characteristics of DC threshold current. $I_{\text{calc}}(d)$: Calculated DC threshold current (Constants have been optimized to duration and frequency characteristics of IEC's data) $I_{\text{iec}}(d)$: IEC's data of duration characteristics of DC threshold current. 直流しきい電流の持続時間特性。
 $I_{\text{calc}}(d)$: 直流しきい電流の計算値(IECによる持続時間、及び周波数特性データに対し最適化した回路定数)
 $I_{\text{iec}}(d)$: 直流しきい電流の持続時間特性のIECデータ

Table 1 Optimized circuit constants. The 1st : Optimized to duration characteristics of IEC's DC threshold current, The 2nd : Optimized to frequency characteristics of IEC's sinusoidal threshold current after duration characteristics. 最適化後の回路定数。The 1st : IECの直流持続時間特性データに対する最適化。The 2nd : 上の後、IECの周波数特性データに対し最適化

Parameter	The 1st	The 2nd	Unit	Ratio (the 2nd / the 1st)
R_1	61.39	60.88	(Ω)	0.992
R_2	29.16	22.22		0.762
R_3	6167.27	8532.69		1.384
R_4	2.33E+09	2.33E+09		1.000
C	2.45E-05	4.81E-05	(F)	1.968
C_1	5.10E-06	5.1E-06		1.000
C_2	5.10E-05	5.1E-05		1.000
L	2.20	2.20	(H)	1.000
E	2.97	2.44	(V)	0.823

講じるとき，一助にはなる可能性があると考える。

参考文献

- 1) IEC 60479-1, Technical Report-Type2, Effects of Current on Human Beings and Livestock, General Aspects (1994)
- 2) IEC 60479-2, IEC Report, Effects of Current Passing through the Human Body, Special Aspects (1987)
- 3) 山野英記，電撃死の許容限界の周波数特性及び交流持続時間特性を表す回路モデル，平8年度電気設備学会全国大会講演論文集，pp.71-74 (1996)
- 4) 山野英記，電撃による心室細動のしきいを表わす1回路モデル，平11電気学会全国大会講演論文集 (第4分冊)，pp.248-249 (1999.3)
- 5) 鈴木泰三，田崎京二，中浜博 共著，生理学通論 I，共立出版，p.54 (1972)
- 6) Weirich, J., Holnloser, St., Antoni, H., Factors determining the susceptibility of the isolated guinea pig heart to ventricular fibrillation induced by sinusoidal alternating current at frequencies from 1 to 1000 Hz, Basic Res. Cardiol. 78, 6, pp.604-616 (1983)

(平成15年12月26日受理)