

# 人体内部インピーダンスに及ぼす被験者の BMI 及び腕の屈伸の影響

藤原 悠貴<sup>a)</sup>・北 尚平<sup>b)</sup>・林 則行<sup>c)</sup>・太良尾 浩生<sup>d)</sup>

## Influence of BMI and Arm Condition on the Internal Human Body Impedance

Yuki FUJIHARA, Shouhei KITA, Noriyuki HAYASHI, Hiroo TARAO

### Abstract

In this study, we investigated the change of the internal impedance of the human body with respect to the BMI and the change of the human body impedance during the bending and stretching of the arm. In addition, comparison with the numerical analysis values using the human body detailed model. It was confirmed that the internal human body impedance decreased with an increase in BMI. Even the calculated values using a double layer cylindrical model was able to confirm that a similar result was provided. Changes in the internal human body impedance during the bending and stretching of the arm during were measured. It is thought that this is due to the fact that the reduction rate of resistance decreases depending on the circumference of the arm. Comparison with numerical analysis values using human body detailed model was conducted. The value of the internal human body impedance became smaller than the actual measurement value. This is because the skin is not functioning in the human body detailed model.

**Keywords:** Electrical safety, Precise human model, Human body resistance, Contact current

### 1. はじめに

人類の英知の結晶とも言える電気が歴史上に登場し、我々がそれを生活に役立てるようになってから長い年月が経過した。現代社会では、電気の普及に伴いあらゆる技術が生み出され、便利で豊かな生活を送ることが可能となった。特に近年においては、太陽光発電システムや風力発電システムに代表される自家発電システム、オール電化の家庭普及率が急激に伸びており、電気はより我々の生活に密接に関わっている。しかしながら、世の中に電気が普及すればするほど、電気事故もそれに伴って目立つようになってきた<sup>1)</sup>。電気事故には感電死傷事故、電気火災事故、電気工作物破損事故、波及事故など様々あるが、その中でも人体に直接影響を及ぼす感電死傷事故については特に重要視されている。また近年、オール電化の家庭の普及により一般家庭でガス調理器に代わって IH 機器などの電磁調理器が急速に普及しており、低周波から中間周波の接触電流による感電なども問題として挙げられる。

感電事故の保護手段を検討する上で、人体インピーダン

a)電気電子工学専攻大学院生

b)電子システム工学科学部生

c)工学教育研究部教授

d)香川高等専門学校電気情報工学科准教授

ス<sup>2)</sup>は重要な情報である。しかし、人体インピーダンスのデータは古いものが多く、近年従来と異なる値が測定されており、最新のデータを集める必要がある。そこで我々は人体内部インピーダンスを測定し、電気の安全のための保護手段を評価することを目的としている。具体的には、55 Hz、100 kHz の周波数での人体内部インピーダンスの測定を行っている。本論文では、BMI と人体内部インピーダンスの間にはどのような関係があるのか、また、腕の屈伸角度を変化させることで、人体インピーダンスはどう変化するのか調査を行った。同時に人体詳細モデル<sup>3)</sup>を用いた数値解析値と実測の比較も行った。

### 2. 実験

#### 2.1 人体内部インピーダンス

IEC/TS60479-1 に掲載されている人体インピーダンスの構成を図 2.1 に示す。人体インピーダンスは、人体内部インピーダンス  $Z_i$  と皮膚インピーダンス  $Z_{s1}$ 、 $Z_{s2}$  の 2 つの要素から構成される。人体内部インピーダンスは、抵抗とキャパシタで構成されるが、低周波においてキャパシタは非常に小さくほぼ抵抗とみなされるため線形である。しかし、周波数が増加するとキャパシタの影響が大きくなり非線形となる。皮膚インピーダンスは、人体内部インピーダ

ンスと同様に抵抗とキャパシタで構成される。皮膚インピーダンスは、皮膚の水分含有率や体温など様々な影響で変化するため非線形である。

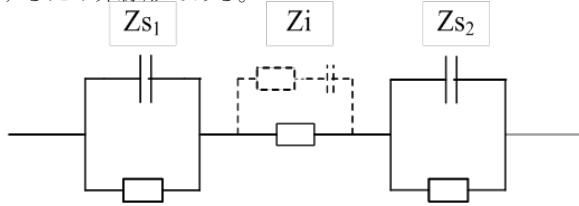


図 2.1 人体インピーダンスの構成

( $Z_{S1}$ ,  $Z_{S2}$  : 皮膚インピーダンス,  $Z_i$  : 人体内部インピーダンス)

IEC/TS60479-1に掲載されている皮膚インピーダンス値は、人体内部インピーダンス値よりも大きくかつ非線形であるため、正確な人体インピーダンス値を提供することができない。そのため、本研究で開発する人体内部インピーダンス測定装置では、人体インピーダンスの基本的な特性を把握するために皮膚インピーダンスを無視し、人体内部インピーダンスの測定を行う。皮膚インピーダンスを無視する測定方法として、我々は4端子法を用いている。

2.2 4端子法

LCRメータなどで試料のインピーダンスを測定する場合、基本的な測定接続方法に2端子法と4端子法がある。そこで、4端子法の原理を2端子法と比較して説明を行う。2端子法と4端子法の基本回路を図2.2と図2.3に示す。なお、 $\sim$  : 測定信号源、V : 電圧計、A : 電流計、Z : 人体内部インピーダンス、 $R_1$ ,  $R_2$  : 皮膚インピーダンスである。

図2.2の2端子法の場合、測定信号電流は $Z_{S1} \rightarrow Z \rightarrow Z_{S2}$ と流れ、電圧計Vで測定する電圧は $Z_{S1} + Z + Z_{S2}$ にかかる合計電圧となり、測定インピーダンスは $Z_{S1} + Z + Z_{S2}$ となる。すなわち、非線形である皮膚インピーダンス $Z_{S1}$ と $Z_{S2}$ が測定誤差となり、人体内部インピーダンスZを正確測定することができない。

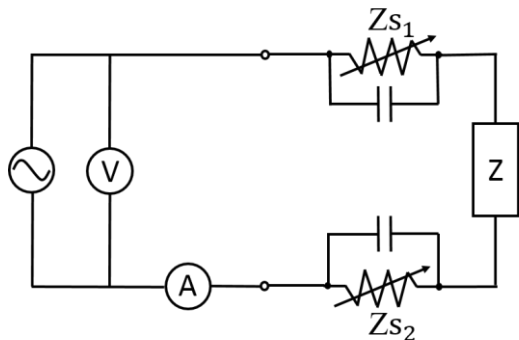


図 2.2 2端子法

図2.3の4端子法の場合、人体内部インピーダンスZに対して電圧計Vの入力インピーダンスが十分に大きけれ

ば皮膚インピーダンス $Z_{S3}$ と $Z_{S4}$ にほとんど電流が流れない。そのため、測定電流はすべて人体内部インピーダンスZに流れ、電圧計Vで測定する電圧は正確に人体内部インピーダンスZの両端電圧となる。したがって、皮膚インピーダンス $Z_{S1} \sim Z_{S4}$ の影響を無視して人体内部インピーダンスZを測定できる。

以上のような原理により、皮膚インピーダンスを無視でき人体内部インピーダンスの測定ができる。

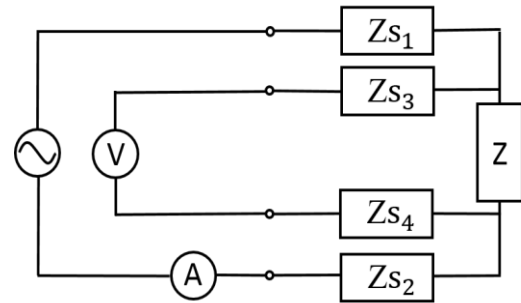


図 2.3 4端子法

( $Z_{S1} \sim Z_{S4}$  : 皮膚インピーダンス)

2.3 人体内部インピーダンス測定装置

測定装置の概要を図2.4に示す。本装置は、通電電流 $I_a$ を測定する電流計、低周波から中間周波数に渡って入力に加えられた電圧を $10 \mu A/V$ の比で電流に変換するV/Iコンバータと通電電流を制限する機能を持った定電流源装置、定電流源装置に電圧を印加する信号発生機、出力電圧を100倍に増幅する低雑音プリアンプ、定電流源装置から出力される電流波形及び人体にかかる電圧波形を観測するオシロスコープで構成されている。なお、定電流源からの出力電圧及び出力電流は同位相である。

本研究の人体内部インピーダンス測定の原理は人体へ微弱な電流 $I_a$ を流し、電極対間の電圧 $V_m$ を測定することで、接触電流値と、かかる電圧から通電経路に対する人体内部インピーダンス $Z = V_m / I_a$ を算出するというものである。なお、測定周波数<sup>[3]</sup>は55 Hz及び100 kHzとした。

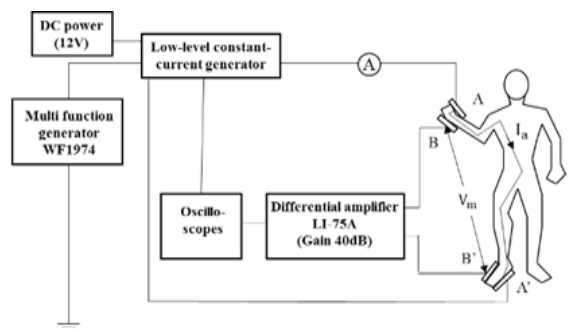


図 2.4 人体内部インピーダンス測定装置

2.4 測定姿勢

図2.5に本測定における基本姿勢を示す。腕を90°に曲げ、両手に握った棒電極間または左手に握った棒電極と左

足で踏んでいる平板電極間に 10 μA (55 Hz、100k Hz) の電流を流し、両手の甲または左手足の甲に張った医療用ディスク電極間の電圧を測定する。

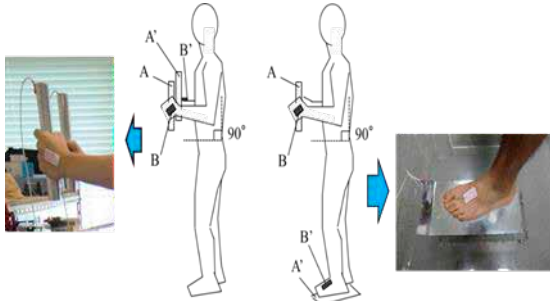


図 2.5 測定姿勢 (左: LH-RH 右: LH-LF)

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 BMI に対する人体内部インピーダンスの変化

##### 3.1.1 実験結果

電流経路を左手-右手間(LH-RH)とし、両手の甲に医療用ディスク電極を張り、腕を 90° 曲げた姿勢において、両手間に 10 μA の電流を通电し、55 Hz 及び 100 kHz 時の人体内部インピーダンスを測定した。

図 3.1 に BMI と人体内部インピーダンスの図を示す。図の横軸が BMI、縦軸が人体内部インピーダンスとなっている。図 3.1 より、LH-RH の電流経路において、55 Hz、100 kHz の両周波数で BMI が増加すると人体内部インピーダンスは減少する傾向にあることがわかる。100 kHz 時の人体内部インピーダンスが 55 Hz 時の人体内部インピーダンスに比べ小さいのは、人体内部インピーダンスが抵抗とキャパシタで構成されており、低周波ではほぼ抵抗とみなされるが、周波数が上昇するとキャパシタの影響を受けるためだと考えられる。

##### 3.1.2 簡易モデルを用いた考察

BMI が増加するにつれて人体内部インピーダンスが減少する要因について図 3.2 に示すような人体を円柱モデルで模擬したもので説明する。2つの円柱モデル A と B は、人体の高さ H、中心部の円柱が脂肪を除いた組織、外側の円筒を脂肪組織とした二層構造の円柱モデルとなっている。中心部の円柱の半径はモデル A とモデル B で等しく、円筒部の厚みは異なる。

円柱モデルで上面と下面間の抵抗を考えると、除脂肪組織の抵抗値  $R_i$ 、モデル A の脂肪組織の抵抗値  $R_{fA}$ 、モデル B の脂肪組織の抵抗値  $R_{fB}$  は次式 (1)、(2)、(3) で表される。

$$R_i = \frac{1}{\sigma_i} \times \frac{H}{D_i} \quad (1)$$

$$R_{fA} = \frac{1}{\sigma_f} \times \frac{H}{D_f} \quad (2)$$

$$R_{fB} = \frac{1}{\sigma_f} \times \frac{H}{\alpha D_f} \quad (3)$$

式中の  $\sigma$  は導電率、 $d$  は密度、 $D$  は断面積を表し、添字  $i$ 、 $f$  はそれぞれ除脂肪組織と脂肪組織を表している。 $\alpha$  はモデル A、とモデル B の脂肪組織の断面積の比である。また、モデル A とモデル B は図 3.3 に示す回路に置き換えることができる。

式(2)、(3)より、

$$R_{fB} = \frac{1}{\alpha} R_{fA} \quad (4)$$

が得られることから、モデル A の抵抗  $R_A$  及びモデル B の抵抗  $R_B$  の間には式(5)のような関係が成り立つ。

$$R_A = \frac{R_i R_{fA}}{R_i + R_{fA}} > R_B = \frac{R_i R_{fB}}{R_i + R_{fB}} \quad (5)$$

さらに、モデル A とモデル B の BMI の間には式(6)のような関係が成り立つ。

$$BMI_A = \frac{(D_i d_i + D_f d_f) H}{H^2} < BMI_B = \frac{(D_i d_i + \alpha D_f d_f) H}{H^2} \quad (6)$$

式(5)、式(6)より、BMI の大きいモデル B の抵抗値は、BMI の小さいモデル A の抵抗値よりも小さくなることがわかる。よって実測における BMI と人体内部インピーダンスの関係は円柱モデルを用いた計算結果と同様の傾向にあることがわかる。

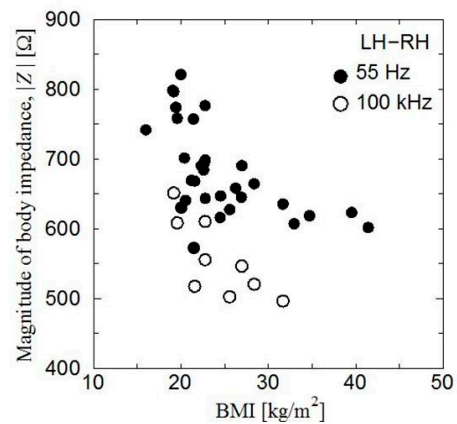


図3.1 BMIに対する人体内部インピーダンスの変化

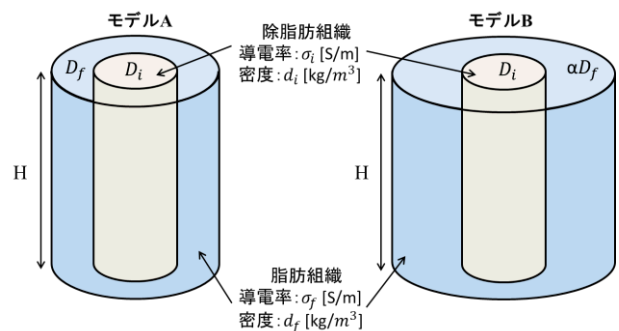


図3.2 二層円柱人体モデル

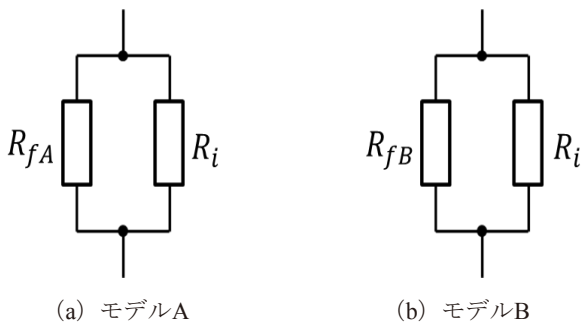


図3.3 二層円柱人体モデルの回路図

## 3.2 腕の屈伸による人体内部インピーダンスの変化

### 3.2.1 実験結果

電流経路を左手-左足(LH-LF)間とし、腕を伸ばした状態を $0^\circ$ とした時から $45^\circ$ 刻みで $135^\circ$ まで腕を曲げていった場合の人体内部インピーダンスの測定を行い数値解析値との比較を行った。

図3.4に腕の屈伸角度に対する人体内部抵抗の変化率を示す。横軸は腕の屈伸角度で縦軸は $0^\circ$ のときの人体内部インピーダンスで規格化した値を表している。実測値と計算値は共に腕を曲げる角度を大きくすると内部抵抗値は下がっていくという傾向がみられる。しかし、腕の屈伸角度 $135^\circ$ において、実測と数値解析値との間に大きな差が見られる。

### 3.2.2 考察

以下、腕の屈伸角度 $135^\circ$ で実測値と数値解析値が著しく異なる理由について考察する。図3.5に腕の屈伸角度 $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $135^\circ$ それぞれに対する人体詳細モデルの外観、図3.6に数値解析に用いられる人体詳細モデルで得られた左腕 $135^\circ$ における電流ベクトル図を示す。図中の色の変化は導電率を表しており、電流を通しやすい筋肉組織が赤く、電気を通さない骨が青く表示されている。また腕曲げ時における皮膚と皮膚の接触箇所(赤枠)の拡大図も同時に示している。

皮膚同士の接触箇所の拡大図を見ると、電流が皮膚を貫通して流れているように見える。しかし、ベクトル線の数が少ないため本当に皮膚同士の接触する境界面で電流が貫通して流れているのかこの図だけでは判断できなかったため人体詳細モデルの皮膚に着目した。

図3.7は、左腕の屈伸角度 $135^\circ$ 時において、数値解析に用いる人体詳細モデルの屈曲した腕部の拡大図で、皮膚のボクセルのみを赤色で表している。また皮膚同士の接触部分(黒枠)を拡大した図も同時に示した。拡大図をみると、皮膚同士が接触しているところに赤い線が2本見える。これは、矢印で示した線が三次元的に見えているためである。本来、皮膚が正常に存在しているならば図中の皮膚同士が接触する面も含めて赤く表示されるはずであるが、図3.7

からはそのような状態は認められない。つまり、人体詳細モデルでは皮膚同士が接触する面では皮膚が無くなっており、この部分にも電流が流れていると考えられる。よって、腕の屈伸角度 $135^\circ$ において数値解析の抵抗減少率が実測に比べて小さくなるのは、電流の流れる断面積が増加するためだと考えられる。

一方、実測で上述の数値解析結果と同じように皮膚同士の接触面を通して電流が流れるかどうかの確認を行った。具体的には次のような実験を行った。

- ①接触面の絶縁を確実にするため、接触面に絶縁物をはさみ、インピーダンスの変化を調査
  - ②接触面の導通を促すため、接触面にアルミ泊を挟んだり、接触面に塩水を塗布したりして、インピーダンスの変化を調査
  - ③接触面の皮膚を十分に湿潤状態にして、より接触面の導通を促した場合のインピーダンスの変化を調査
- 上記3つのケースいずれにおいても、実測値に変化は認められず、インピーダンスは接触面の影響を受けていないと結論できる。

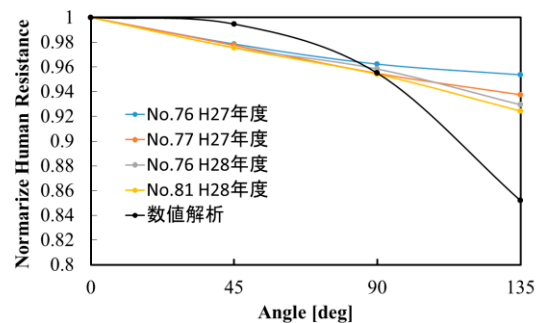


図3.4 腕の屈伸角度と人体内部インピーダンスの変化率

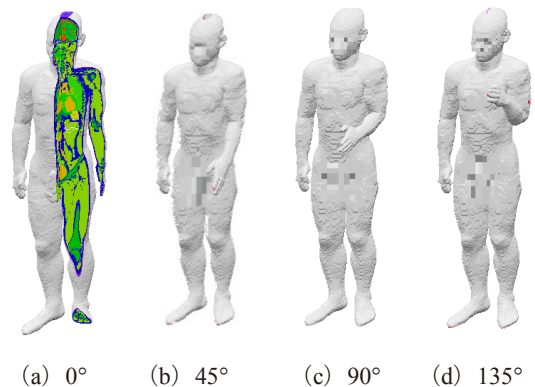


図3.5 人体詳細モデル



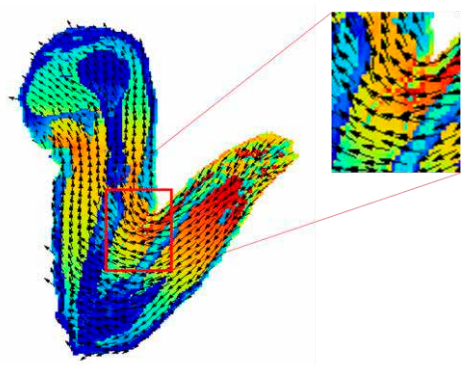


図 3.6 人体モデルの電流ベクトル図

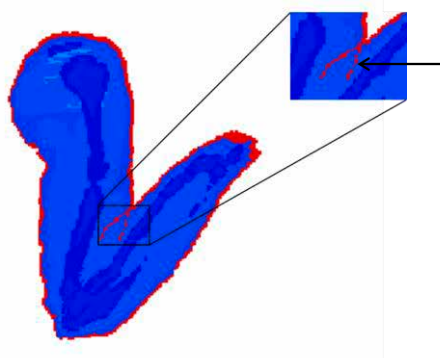


図 3.7 皮膚ボクセルのみを赤色でプロットした人体モデルの拡大図

#### 4. まとめ

周波数 55Hz 及び 100kHz において BMI に対する人体内部インピーダンスの測定を行った結果、BMI が増加すると人体内部インピーダンスは減少する傾向にあることが確認できた。二層円柱人体モデルを用いて計算した結果、BMI の大きなモデルの方が BMI の小さなモデルよりも抵抗値は小さくなるという結果が得られたことから、BMI が大きい人ほど人体内部インピーダンスは小さくなるという実測の結果と同様の傾向を示していることが分かった。

腕の屈伸による人体内部インピーダンスの変化に関して、実測と人体詳細モデルを用いた数値解析との比較を行った結果、腕の屈伸角度 135°において抵抗の変化率を比較すると、実測値と解析値との間に大きなズレがみられた。実測では被験者の腕の皮膚を電流が貫通して流れていないか確認を行ったが各条件でも電流は皮膚インピーダンスを無視して電流は流れていないことが確認できた。一方数値解析では、腕曲げ時にて人体詳細モデルの皮膚は皮膚同士の接触面において無くなっている。この部分において電流が流れていることから、電流の流れる断面積が実測よりも大きいため、抵抗の変化率に差が生じるという結論に至った。

#### 参考文献

- 1) 経済産業省ホームページ <http://www.meti.go.jp/>.
- 2) IEC Tech. Spec.: Effects of current on human beings and livestock – part1: General aspects IEC/TS60479-1, 2005-2007.
- 3) Nagaoka T, Watanabe S, Sakurai K, Kunieda E, Watanabe S, Taki M, Yamanaka Y. : “Development of realistic high-resolution whole-body voxel models of Japanese”,
- 4) ICNIRP, “Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1Hz -100 kHz),” Health physics 2010; 99:818-836.