

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 6月 6日現在

機関番号：56203

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2010～2012

課題番号：22760218

研究課題名（和文） 人体詳細モデルを用いた低周波領域における人体インピーダンスの基礎研究

研究課題名（英文） Human body impedance for low-frequency using numerical human models

研究代表者

太良尾 浩生（TARAO HIROO）

香川高等専門学校・電気情報工学科・准教授

研究者番号：00321498

研究成果の概要（和文）：人体詳細モデルを用いた人体インピーダンスを数値解析するシステム構築を完成させた。解析例として、代表的な電流経路である片手-片足間を想定し、取り付けた電極面積は十分大きく、これによる人体インピーダンスへの影響はほとんどないことを確認した。次に、皮膚を除いた人体内部抵抗の数値解析結果は、他機関から報告されている測定結果よりも2倍程度大きいことが、電流経路上の各部位における抵抗占有率はよく一致していることが分かった。

研究成果の概要（英文）：Numerical system including complex arithmetic for human body impedance using numerical human models was completed. As a result of calculation for the typical current path (hand-to-foot), it is confirmed that the enough large electrode areas considered in the study did not influence to the human body impedance. The calculated internal body impedance was about twice larger than measurement data reported by others. Meanwhile it is found that the percentage contribution of the segmental impedances of each part of the body to the total impedance for the calculated and the measured data coincides each other.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2011年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2012年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	3,000,000	900,000	3,900,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学，電力工学・電力変換・電気機器

キーワード：

1. 研究開始当初の背景

人体が電位の異なる物体に接触し、体内に電流の経路ができた時に接触電流が流れる。例えば、接地された人体が充電部に接触した時などが典型である。厚生労働省や経済産業省の統計によると、死傷災害の総件数のうち

感電等による労働災害は多くはないが、電気工学物における事故発生件数が最も多いのは感電死傷事故となっている。IEC60479-1には、このようなショック電流による人体や動物への影響に関して、いくつかの電流経路において心室細動を起こす場合の閾値電流が記載さ

れている。さらに、同じ電流経路における人体インピーダンスも掲載されている。これらの値は、1930年頃から収集された実測値である。しかし、1970年頃から倫理的な規制もあり、このような実測が行われなくなった。一部では、食文化の変化に伴う体型の変化によって50年以上前の実測データは現状には合っていないとの意見もある。

申請者は、例えば左手と両足に電極を取り付けてそれらの間に60Hz程度の電位差を与えた場合に、体内を流れる電流密度の分布を定量的・視覚的に把握できるように人体詳細モデルを用いた数値解析コードを確立してきた。この数値解析結果を用いて、与えた電位差と体内を流れる全電流量から、電極間のインピーダンス（人体インピーダンス）を算出することが可能である（いわゆる、2端子法）。しかし、この場合、低周波領域における人体インピーダンスは皮膚の電気的特性（導電率や誘電率）の状態によって大きく左右される。なぜなら皮膚インピーダンスは、電極の面積、印加電圧、吸湿状態などによって大きく変化するからである。従って、人体インピーダンスを実測する場合には、手首や足首に電位電極を装着した4端子法が有効であると言われている。実際に、上述した人体インピーダンスの実測値は、2端子法による実測値なのか4端子法による実測値なのか不明な部分もある。また、上述した、数値解析結果から得た人体インピーダンスや簡易的に4端子法として算出した人体インピーダンスと、上述の実測データを比較したところ大きな差が生じていることを申請者らは指摘している。

2. 研究の目的

本申請では、これまでに使用してきた数値解析システムを、周波数や様々な数値モデルに対応できるよう再構築する。その上で、代表的な電流経路に関して基礎的で詳細なインピーダンス特性を検討する。特に、皮膚の湿潤状態による電気的特性が皮膚インピーダンスに与える影響についても検討を行う。さらに、これらの解析結果を実測データと比較して人体インピーダンス特性を解明する。

以上の結果から、人体の代表的な2点間（例えば、両手間、片（両）手-片（両）足間など）の人体インピーダンスを一覧にして、与えられた電位差の大きさによってどの程度の接触電流が流れるのかが分かるようになる。さらに、現数値解析システムによって、その接触電流が体内をどのように流れているのかが分かるようになる。もちろん、稀に起こり得る電流経路についてもすぐに数値解析できる。

また、このようなシステムが確立すれば、感電や大電流による心室細動への危険を回避するような電気保全だけでなく、低周波電気治療などの医療分野においても活躍が期待できる。

3. 研究の方法

(1) 人体数値詳細モデルを用いた、数100kHzまでの周波数領域における人体インピーダンスの数値解析手法を確立するために、これまでに構築してきた数値解析システムを基に再構築する。大きな変更点（修正点）としては解析の複素数化である。上述の解析システムでは、人体数値モデルの電気的特性として導電率のみを扱っていた。これは、低周波領域における体内組織は電氣的に誘電性よりも導電性の方が支配的であるためである。しかし、上述したように、皮膚は条件（湿潤状態、周波数など）によって導電性と誘電性の両方を持つため、複素導電率として考慮する必要がある。

(2) 代表的な電流経路として、例えば手足間における人体インピーダンスを数値解析し、これまでに報告されている実測データと比較する。さらに、人体数値モデルと同体型のボランティアによる実測値を収集する。特に皮膚のインピーダンスについては様々な条件において収集する。

(3) 周波数、組織の電気的特性、数値モデルなどのパラメータを変えて、人体インピーダンスの数値解析を行い、基本的なインピーダンス特性を解明する。

4. 研究成果

(1) 数値解析では複素数解析技術を組み込むことで、体内組織の導電率だけでなく誘電率をも考慮した解析を可能にした。さらに、数値モデルのボクセルサイズを小さくした場合でも対応できるよう、数値計算機の大容量化を行った。これにより、5千万要素程度までのボクセルに対応することが可能になった。

次に、欧州人体型をもつ複数の数値人体モデルを入手し、掌や足裏への電極データを手作業で作成した。電極面積による内部抵抗へ影響を調べた結果、電極面積の影響はなく電極データは十分な広さを持っていることを確認した。

(2) 以上によって、人体数値モデルにおける人体インピーダンスの数値解析を行った結果、成人男性の内部抵抗は各電流経路において1000Ω～1500Ωの範囲にあった。この結果と他機関によって報告されている測定結果とを比較すると、相対的なインピーダンス分布

はよく一致していたが、絶対的な値には大きな差異があることが分かった。後者の原因の一つとして、人体数値モデルの筋肉における導電率の異方性が考慮されていなかったことが挙げられるため、これを考慮して再度解析を行った結果、両者の絶対値はある程度一致した。

(3) 年齢や体格の異なる、複数の人体数値モデルを用いて、人体インピーダンスの数値解析を行い、体格の違いによる人体インピーダンスの変化を検討した。体格により人体インピーダンスが異なることは容易に予想でき、低周波領域におけるその傾向を探ることは学術的に重要であり、十分な意義があると考えられる。数値解析の例として、手足間および両手間におけるインピーダンスに着目することとし、各人体モデルの手や足裏における電極データの作成を行った。この体格の違いを表すために、体重、身長、並びに体格指数であるBMIの3つをパラメータとした。

結果として、全てのパラメータが大きくなるに従って、全体的な人体インピーダンスは減少する傾向にあることが分かった。しかし、手首や足首では多種の組織によって複雑に構成されており、それを数値的に構築した各数値モデルによっては上のパラメータによらない差異が生じていた。一方、胴体と四肢を取り上げると、特にBMIとインピーダンスの間には強い負の相関性が見られた。さらには、腕のインピーダンスと脚部のインピーダンスの関係を検討した。これらの結果は、簡易な体格指数(BMI)から人体インピーダンスの推定が可能であることを示唆している。

(4) より現実的な人体インピーダンスの推定が行えるように、皮膚などの組織導電率を変化させた場合、筋肉導電率の異方性を考慮した場合や、電極面積による人体インピーダンスへの影響について検討を行った。その結果、皮膚の湿潤状態によって皮膚インピーダンスが大きく異なり、また、人体インピーダンスは実測されたデータよりも全体的に大きく見積もられることが分かった。電極面積に関しては、単に面積の大きさだけではなく、電極の取付け位置(足の裏面や手のひら)によってインピーダンス値へ与える影響が異なった。すなわち、足裏面では電極面積が人体インピーダンスへ直接関係してくるが、手のひらでは電極面積が大きく影響することはなかった。これは、電流経路と電極面積の位置関係に関係していると考えられる。

(5) 商用周波数帯だけではなく、40Hzから400kHzまでの周波数帯に拡張して人体インピーダンスの数値解析を行った。この場合、各

組織の誘電率を含む複素導電率として試みた。その結果、1kHz程度までの低周波領域では皮膚インピーダンスの影響が大きく、人体インピーダンスの中で大きな割合を占めた。しかし、数10kHzを超えると皮膚インピーダンスはほとんどゼロとなり、人体インピーダンスは内部インピーダンスとほぼ等しくなった。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計2件)

- ① H. Tarao, L. Korpinen, H. Kuisti, N. Hayashi, J. Elovaara, and K. Isaka: "Numerical evaluation of currents induced in a worker by ELF non-uniform electric fields in high voltage substations and comparison of them with experimental results", *Bioelectromagnetics*, Vol. 34, No. 1, pp. 61-73, 2013.
- ② H. Tarao, H. Kuisti, L. Korpinen, N. Hayashi, and K. Isaka: "Effects of tissue conductivity and electrode area on internal electric fields in a numerical human model for ELF contact current exposures", *Physics in Medicine and Biology*, Vol. 57, No. 10, pp. 2981-2996, 2012.
- ③ 太良尾・林・浜元・伊坂: 「商用周波数における人体内部抵抗の数値解析結果と実測結果との比較」, *電学論A*, Vol. 131, No. 3, pp. 178-184, 2011.

[学会発表] (計7件)

- ① 太良尾・林・浜元・伊坂: 「商用周波数における人体内部抵抗の数値解析結果と実測結果との比較」, 平成22年 電気学会 A部門大会, VI-10, 琉球大学, 2010.
- ② 篠原・中山・太良尾・浜元・林: 「複数の数値モデルを用いた低周波人体内部抵抗の推定 ～ BMI との関係 ～」, *信学技法*, EMCJ2011-75, pp. 21-26, 2011.
- ③ 中山・太良尾・林: 「低周波接触電流による人体数値モデルの体内電界計算」, *信学技法*, EMCJ2011-74, pp. 15-20, 2011.
- ④ H. Tarao, N. Hayashi, L. Korpinen, T. Matsumoto, and K. Isaka: "Calculation of induced electric fields in human models exposed to ELF magnetic and electric fields", *ISH2011*, No. A-005, 2011.

⑤ H. Tarao, N. Hayashi, L. Korpinen, T. Matsumoto, and K. Isaka: "Internal body resistance of various human models at power frequency", Proceedings of The Bioelectromagnetics Society 32nd Annual Meeting, PA-37, Halifax, 2011.

⑥ 太良尾・篠原・林：「低周波・中間周波領域における人体インピーダンスの数値解析」, 第5回医用生体電磁気学シンポジウム, pp. 75-76, 2013.

⑦ H. Tarao, N. Hayashi, L. Korpinen, J. Gonzalez, T. Matsumoto, and K. Isaka, "Effect of Tissue Conductivity on Internal Body Resistances of Numerical Human Model at Power Frequency", Proceedings of The Bioelectromagnetics Society 34th Annual Meeting, PB-34, 2012.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

太良尾 浩生 (TARAO HIROO)

香川高等専門学校・電気情報工学科・准教授

研究者番号 : 00321498