電界中に置かれた導電率の異なる内部および外部組織からなる円柱モデル内の電流分布

正員 千葉敦生 (米子高専)

正員 伊坂勝生 (徳島大学)

Current Distributions Inside the Cylindrical Model with the Internal and the External Tissues Having Different Conductivities in the Electric Fields

Atsuo Chiba, Member (Yonago National College of Technology),

Katsuo Isaka, Member (The University of Tokushima)

The health effect of the weak current induced in the human body as a result of the interaction between human body and power line electric fields has been investigated. A human model (cylinder+semi-sphere) filled with tissues having different conductivities was used to analyze the internal current densities. In this analysis, only the magnitudes of the induced current densities were analyzed.

In this paper, the finite element method is applied to the analysis of the distributions of the horizontal and vertical currents induced in the cylindrical model. The calculation method is verified by comparing the calculated results with the experimental ones obtained elsewhere. The basic characteristics of the induced current distributions in the cylindrical model with the two tissues having different conductivities have been made clear.

キーワード: 有限要素法、円柱モデル、誘導電流密度、電界

1. まえがき

人体に対する送電線からの静電誘導によって、送電線近傍にある金属物体に触れた際の接触電流、生体表面の電界および電界による直接誘導電流が引き起こされる。このうち、電界によって生体内に直接誘導される微小な電流の生体影響が、人間の健康問題と関連して、送電線電圧の超高圧化に伴い、ますます重要な研究課題になってきている⁽¹⁾。筆者らの研究は主として、電界により直接生体内に誘導される電流を計算機でシミュレートするものである。

電界により人体に誘導される電流密度の解析には、球および回転円体の人体モデルの電界厳密解法⁽²⁾に基づく解析、3次元ブロックモデルの積分方程式による解析^{(3),(4)}、表面電荷法による3次元モデルの解析⁽⁵⁾、円柱モデルの表面電荷法による解析⁽⁶⁾および軸対称モデルの有限要素法解析⁽⁷⁾がある。これらの解析はいずれの場合もモデル内が均一な組織で満たされていると仮定されている。しかしながら、血液と骨組織の導電率は100倍程度の差があるように、体内各組織の導電率は異なるので、解析結果を実際に近づけるためには不均質で構成された人体モデルを検討対象にする必要がある。そこで、筆者らは最近、有限要素法を用いて2種類の組織で構成された人体モデル(円柱と半球からなる)内部に誘導される電流密度の基礎的な検討を行っ

ている⁽⁸⁾。しかしながら、人体モデルの形状が実際の人体と同程度に複雑になると、体内誘導電流の水平方向成分は垂直方向成分より大きくなる部分も生じる⁽⁹⁾。また、不均質組織により構成されたモデル内部の組織には電流密度の集中が起こる⁽⁸⁾。このようなモデル内部の誘導電流の分布を考察するためには、電流の大きさのみでは不十分で水平および垂直方向の電流密度の分布および電流の流れる方向を詳細に検討する必要がある。その第一歩として、上述円柱と半球からなる人体モデルに代えて、水平および垂直方向の誘導電流密度分布が実験的に明らかにされているKaune等の垂直円柱モデルを用い、その内部誘導電流密度分布の解析を行った。すなわち、筆者らは垂直円柱モデルに有限要素法を適用し、計算値が実験値と一致するのを確かめた上で、同モデルが2種類の導電率を有する組織で構成された場合の水平および垂直方向の誘導電流密度分布を解析した。その結果、本論文において2種類の異なった組織で構成された円柱モデル内部に誘導される水平および垂直方向の誘導電流密度分布の基本的な特性を明らかにした。

2. 有限要素法による解析

2.1 基本式 その電気的特性が導電率 σ と誘電率 ϵ で記述できる媒質において、電界を E 、電流密度を J 、

空間電荷密度を q とすると、次式が成立する⁽¹⁰⁾。

$$\operatorname{div}(\varepsilon E) = q \quad (1)$$

$$\operatorname{div} J = \operatorname{div}(\sigma E) = -\frac{\partial q}{\partial t} \quad (2)$$

(1), (2)式から ε が時間的に一定であると、静電界問題に対して、次の基本方程式が成立する。

$$\operatorname{div}\left\{\sigma \cdot \operatorname{grad} \phi + \frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon \cdot \operatorname{grad} \phi)\right\} = 0 \quad (3)$$

ここで、 $E = \operatorname{grad} \phi$ (ϕ : 電位) である。

有限要素法はこの問題を、次の汎関数 χ を最小にする電位 ϕ を求める問題に置き換えて解く方法である。

$$\chi = \int_V \frac{\sigma}{2} (\operatorname{grad} \phi)^2 dv + \frac{\partial}{\partial t} \int_V \frac{\varepsilon}{2} (\operatorname{grad} \phi)^2 dv \quad (4)$$

なお、 V は解析対象領域を表す。

角周波数 ω の交流電圧を対象とする場合、複素電位として $\phi = \phi e^{j\omega t}$ を用いると(4)式は次のようになる。

$$\chi = \int_V \frac{1}{2} (\sigma + j\omega\varepsilon) (\operatorname{grad} \phi)^2 dv \quad (5)$$

ここで、 ω は $2\pi f$ で f は周波数である。3次元領域が z 軸について幾何学的対称性を有するとき(5)式を軸対称問題として取り扱うと次式が成立する。

$$\chi = 2\pi \iint \left\{ \frac{1}{2} (\sigma + j\omega\varepsilon) \left[\left(\frac{\partial \phi}{\partial r} \right)^2 + \left(\frac{\partial \phi}{\partial z} \right)^2 \right] r \right\} dr dz \quad (6)$$

ここで、 r は座標の水平方向、 z は垂直方向を表す。本論文では、問題とする領域の分割にアイソパラメトリック要素(軸対称2次四辺形要素)を用い、(6)式を最小にする複素節点電位を求めた。なお、この要素は複雑な境界の近似に適しており、かつわずかの要素数で解析対象領域内の電位が精度よく求められる利点を有している⁽¹¹⁾。

2.2 円柱モデルの形状および計算領域

Kaune等が行った実験と解析に基づき⁽⁶⁾、円柱モデルを最も簡単に2種類の異なった組織で構成し、その内部に誘導される電流密度の解析を行った。円柱モデル(高さ304mm、半径157mm)は導電率 σ_a の内部組織と導電率 σ_b の外部組織の2種類の組織から構成されている(図1参照)。体内各組織の導電率は周波数60Hzにおいて、血液の導電率0.7~1.0 S/m、筋肉、心臓、肝臓、肺の導電率は約0.1 S/m、脂肪および骨組織の導電率はそれぞれ0.03 S/mおよび0.01 S/mと推定されている⁽¹²⁾⁽¹³⁾。このため、解析に用いた導電率 σ_a および σ_b の範囲を0.01~1.0 S/mとした。なお、各組織の誘導率は $10^6 \varepsilon_0$ F/m (ε_0 : 真空の誘導率)で一定とした。図1に示す円柱モデルをKaune等の実験および解析条件に基づき、60Hz、1.0 kV/mの外部平等電界中の地表面上に直立させた。この外部平等電界の条件を作るため、高さ10m、半径15mの平行円板電極(印加電圧10 kV)内中心の接地電極面中央にモデルを直立させた。この計算モデルを用いて、モデル内部に誘導される電流密度の水平および垂直方向成分を求めた。上述計算モデルの計算領域を図2(a)に示す。同図で r は

水平方向、 z は垂直方向の座標を表す。計算領域は有限要素法のアイソパラメトリック要素で分割されている(要素数: 146、節点数481)。なお、分割にあたって、円柱モデルには42要素をあてた(図2(b)参照)。

図1 2種類の組織からなる円柱モデルの形状
Fig.1 Configuration of the cylindrical model.

図2(a) 全体の分割図
Fig. 2(a) Overall division pattern.

図2(b) 円柱モデルとその分割図
Fig. 2(b) Cylindrical model and its division pattern.

3. 解析方法の妥当性の検証

本解析では、Kaune等が実験に用いた円柱モデル⁽⁶⁾を用い、ポリ塩化ビニール(PVC、比誘導率3)容器(半径0.157m、高さ0.304m、厚さ4.5mm)内は導電率 $\sigma = 0.1$ S/m、誘導率 $\varepsilon_1 = 10^6 \varepsilon_0$ (ε_0 : 真空の誘導率)を有する溶液で満たされていると仮定した。この円柱モデルを5.65 kV/mの外部平等電界を発生させる平行円板電極(高さ10m、半径15m)の接地電極中央に直立させ、2.2節で述べた解析条件を用いて有限要素法により解析した。円柱モデル内垂直方向の誘導

電流密度のKaune等による実験結果と有限要素法によるPVC容器を考慮した解析結果の比較を図3に示す。同図にはモデル内の高さのファクタ $z/h=0.19, 0.44, 0.66$ および 0.9 をパラメタとして半径方向のファクタ r/R と垂直方向の誘導電流密度の関係を示す。図4に r/R と水平方向の誘導電流密度の実験結果の比較を示す。図3および図4から、

Kaune等による実験結果とPVC容器を考慮した有限要素法の解析結果はよく一致していることがわかる。表1に一例として $r/R=0.52$ 地点におけるモデル内に誘導される垂直方向の電流密度のPVC容器を考慮した場合およびPVC容器なしの場合の有限要素解析結果と Kaune等による解析および実験結果の比較を示す。同表からもわかるように、PVC容器を考慮した誘導電流密度の解析結果によると、モデル底面付近の電流密度は2.3%程度増加する。同様に、 $r/R=0.48$ 地点におけるモデル内に誘導される水平方向の電流密度の比較を表2に示す。表1および表2から、PVC容器を考慮した水平および垂直方向の誘導電流密度の有限要素法の解析結果はKaune等の実験結果の範囲内にありよく一致していることがわかる。表1に示されているように、Kaune等の解析結果はモデル底面付近 $z/h=0.19$ 地点の電流密度が実験結果と多少異なった小さい値で求められている。この計算値はPVC容器を考慮しないで解析した有限要素法の計算結果とほぼ等しくなっている。すなわち、同モデル内部に誘導される水平および垂直方向の電流密度を有限要素法により解析することの妥当性がKaune等の実験結果を用いて検証された。

図3 PVC容器の影響を考慮した円柱モデル内垂直方向電流密度の有限要素法解析結果と実験結果の比較 (外部電界5.65kV/m)

Fig. 3 Comparison between the calculated results of the vertical current densities induced inside the cylindrical model in consideration of the PVC shell using FEM and the experimental results. (External field 5.65 kV/m)

図4 PVC容器の影響を考慮した円柱モデル内水平方向電流密度の有限要素法解析結果と実験結果の比較 (外部電界5.65kV/m)

Fig. 4 Comparison between the calculated results of the horizontal current densities induced inside the cylindrical model in consideration of the PVC shell using FEM and the experimental results. (External field 5.65kV/m)

表1 モデル内垂直方向電流密度の有限要素法解析結果とKaune等の解析および実験結果との比較 ($r/R=0.52$ 地点)

Table 1 Comparison between the calculated results of the vertical current densities using FEM and the results analyzed or measured by Kaune et al. (at $r/R=0.52$ in the model)

z/h	PVC容器なし	PVC容器考慮	Kaune等の解析結果	Kaune等の実験結果
0.9	78.6	79.6	75.5	75.0--83.0
0.66	124.8	127.9	123.5	123.5--133.0
0.44	143.5	147	143.5	139.5--153.5
0.19	154.5	158.1	155	158.0--174.0

外部平等電界 5.65kV/m
単位: $\mu A/m^2$

表2 モデル内水平方向電流密度の有限要素法解析結果とKaune等の解析および実験結果との比較 ($r/R=0.48$ 地点)

Table 2 Comparison between the calculated results of the horizontal current densities using FEM and the results analyzed or measured by Kaune et al. (at $r/R=0.48$ in the model)

z/h	PVC容器なし	PVC容器考慮	Kaune等の解析結果	Kaune等の実験結果
0.91	33.9	35.8	35	30.5--39.5
0.65	18.5	17.1	16.5	14.5--28.5
0.45	9.3	9.5	9	0--14.5

外部平等電界 5.65kV/m
単位: $\mu A/m^2$

4. 解析結果

2.2節で述べた2種類の異なった組織で構成された円柱モデルを用い、生体組織の導電率をパラメータとして、モデル内の内外部組織に誘導される電流密度の解析を行った。解析結果の一例として、図5にモデルの高さのファクタ z/h を0.9, 0.8, 0.65, 0.45 および0.2として、モデルの半径方向のファクタ r/R と内部誘導電流密度の垂直方向成分 J_z の関係を示す。ここで、円柱モデル内部組織の導電率 σ_a および外部組織のそれ σ_b を、それぞれ0.1 S/mおよび0.01 S/mとした。同図から、導電率の大きい内部組織内では、モデルの上部から下部にゆくに従って、垂直方向の電流密度が大きくなっていることがわかる。また、外部組織内の組織層境界付近では同様に、モデルの下部にゆくに従って電流密度の垂直方向成分は大きくなるが、この逆に、外部組織の外側ではモデルの上部にゆくに従って垂直方向の誘導電流密度が大きくなっている。これは外部組織の外側で誘導されたモデル表面電界強度が、モデルの下部から上部にゆくに従って大きくなるためである。内部組織の垂直方向電流密度を J_{za} および外部組織のそれを J_{zb} とすると、モデルの同一高さの内外部組織境界面で、両組織の電流密度の垂直方向成分の比(J_{za}/J_{zb})はほぼそれらの組織の導電率の比(σ_a/σ_b)と等しくなっている。図6に z/h をパラメータとして、半径方向のファクタ r/R と内部誘導電流密度の水平方向成分 J_x の関係を示す。同図から、モデルの上部にゆくに従って、水平方向に誘導される電流密度は大きくなり、解析条件下で、内外部組織の境界面でこの値は最大になっていることがわかる。また、モデルの同一高さ

図5 モデル内半径方向の距離 r/R と垂直方向電流密度の関係($\sigma_a=0.1$ S/m, $\sigma_b=0.01$ S/mの場合、外部電界 1kV/m)

Fig. 5 Distributions of the vertical current densities inside the model along its r/R . ($\sigma_a=0.1$ S/m, $\sigma_b=0.01$ S/m, external field 1kV/m)

図6 モデル内半径方向の距離 r/R と水平方向電流密度の関係($\sigma_a=0.1$ S/m, $\sigma_b=0.01$ S/mの場合、外部電界 1kV/m)

Fig. 6 Distributions of the horizontal current densities inside the model along its r/R . ($\sigma_a=0.1$ S/m, $\sigma_b=0.01$ S/m, external field 1kV/m)

における電流密度の水平方向成分は、両組織の境界面でほぼ等しくなっていることがわかる。図7にモデル内に誘導される電流密度のベクトル図を示す。同図から、モデル上部において、導電率の小さい外部組織に誘導される電流が導電率の大きい内部組織に流れ込んでいる様子がよくわかる。また、電流密度の水平方向成分は上部で大きく、中部、下部にゆくに従って著しく減少する。モデルの底面における内外組織の電流密度の比はほぼ両組織の導電率の比になっていることも視察できる。内外部組織の導電率がそれぞれ0.1 S/mおよび0.01 S/mの場合、各組織内の電流密度の成分(J_{za} , J_{zb} , J_{xa} , J_{xb})とモデルの高さの関数 z/h の関係を図8に示す。ここで、内外部組織の垂直方向の電流密度をそれぞれ J_{za} および J_{zb} 、水平方向のそれをそれぞれ J_{xa} および J_{xb} とした。なお、水平および垂直方向の電流密度は、内外部組織の中央の位置($r/R=0.25$ および0.75)において計算された値を用いた。同図から、モデルに誘導される電流密度の垂直方向成分は、内外部組織で、上部から下部にゆくに従って増加していることがわかる。モデル底面において、両組織内の垂直方向電流密度の比(J_{za}/J_{zb})はそれらの導電率の比(σ_a/σ_b)とほぼ等しい。また、電流密度の水平方向成分は上部から下部にかけて著しく減少していくが、上部においてはその垂直方向成分より大きいことがわかる。同モデル内の内外部組織中央の頂面

図7 モデル内電流密度のベクトル図
Fig. 7 Vector diagram of the current density distribution in the model.

図8 モデル内垂直および水平方向電流密度と z/h の関係 (J_{xa} : 内部組織内水平方向電流密度、 J_{xb} : 外部組織内水平方向電流密度、 J_{za} : 内部組織内垂直方向電流密度、 J_{zb} : 外部組織内垂直方向電流密度、外部電界 1kV/m)
Fig. 8 Distributions of the vertical and horizontal current densities inside the model along its z/h . (J_{xa} : horizontal current density in the inside tissue, J_{xb} : horizontal current density in the outside tissue, J_{za} : vertical current density in the inside tissue, J_{zb} : vertical current density in the outside tissue, external field 1kV/m)

および底面における導電率の比 σ_b/σ_a ($\sigma_a=0.1\text{S/m}$, $\sigma_b=0.01\sim1.0\text{S/m}$) と垂直方向電流密度の比 ($J_{z\sigma_b/\sigma_a}/J_{z\sigma_b/\sigma_a=1}$) の関係を図9に示す。ここで、 $J_{z\sigma_b/\sigma_a=1}$ は均一な組織でモデル内が満たされている場合の

垂直方向電流密度、 $J_{z\sigma_b/\sigma_a}$ は導電率 σ_a および σ_b の組織からなる場合のそれである。同図より、外部組織の導電率が内部組織のそれと比較して小さくなると、内部組織の電流密度が増加することがわかる。 $\sigma_b/\sigma_a=0.1$ の場合、内部および外部組織の底面の電流密度は均一な場合のそれと比較してそれぞれ3倍および0.3倍になっている。次に、外部組織の導電率が内部組織のそれと比較して大きくなると、内部組織の電流密度が極端に小さくなっている。 $\sigma_b/\sigma_a=10$ のとき、内部および外部組織の底面では均一組織の場合と比較してそれぞれ0.14および1.4倍になっている。同図から、モデル底面では電流密度の比は導電率の比とほぼ等しいことがわかる。このことから、底面付近では内部および外部組織の電界強度はほぼ等しくなるように分布することが理解される。また、モデルの頂面においては、電流密度は内外組織の導電率の比にかかわらず、ほぼ一定であることがわかる。

図9 モデル頂面中央および底面中央における内外組織の導電率の比(σ_b/σ_a)と垂直方向電流密度の比($J_{z\sigma_b/\sigma_a}/J_{z\sigma_b/\sigma_a=1}$)の関係
Fig. 9 Relations between ratio of conductivities (σ_b/σ_a) and ratio of the vertical current densities ($J_{z\sigma_b/\sigma_a}/J_{z\sigma_b/\sigma_a=1}$) at the points of the model top and bottom.

5. 考察—筋肉組織が脂肪組織に囲まれた場合の解析例—

3節で内外組織の導電率の比がモデル内の電流密度に与える影響についての一般的な傾向を述べた。少し具体的な例として筋肉組織が脂肪組織(厚さ10mm)に囲まれている場合について検討する。このとき、筋肉組織の導電率を0.1S/m、脂肪組織のそれを0.03S/mとしており、導電率の比 $\sigma_b/\sigma_a=0.3$ である。図10にモデルの r/R と内外組織の垂直方向をもつ電流密度の関係を示す。同図から、筋肉組織内の電流密度は脂肪組織内のそれと比較して大きく、モデルの上部から下部にかけて大きくなっていることがわかる。また、脂肪組織層の先端部分($z/h=0.9$, $r/R=1$)で誘導電流密度の値がモデル中部、下部より大きく求められている。これはモデル頂面先端で電界強度の集中が起こり、このため、誘導電流密度の値が大きくなっているものと考えられ

る。図11に r/R と水平方向電流密度の関係を示す。同図から、内外組織の境界面で電流密度の水平方向成分は大きくなるが、モデルの中心付近ではこの値は著しく減少する。図12に筋肉組織と脂肪組織の導電率の比(σ_b/σ_a)がそれらの垂直方向の電流密度の比($J_{z\sigma_b/\sigma_a}/J_{z\sigma_b/\sigma_a=1}$)に与える影響を示す。本モデルの場合、 $\sigma_b/\sigma_a=0.3$ であるが、このとき脂肪組織内の垂直方向電流密度は底面で均一組織のそれと比較して約0.33倍、筋肉組織のそれは約1.1倍になってい

図10 モデル内半径方向の距離 r/R と垂直方向電流密度の関係(筋肉組織が脂肪組織に囲まれた場合、外部電界 1kV/m)

Fig. 10 Distributions of the vertical current densities inside the model along its r/R . (The case that muscle tissue is surrounded with fat tissue, external field 1kV/m)

図11 モデル内半径方向の距離 r/R と水平方向電流密度の関係(筋肉組織が脂肪組織に囲まれた場合、外部電界 1kV/m)

Fig. 11 Distributions of the horizontal current densities inside the model along its r/R . (The case that muscle tissue is surrounded with fat tissue, external field 1kV/m)

る。言い換えれば、脂肪組織が10mm程度の場合、筋肉組織内の電流はほぼ10%程度増加する。これらの値は円柱と半球からなる人体モデルで、筋肉組織が脂肪組織(厚さ10mm)に囲まれている場合とよく一致する⁽⁸⁾。すなわち、この程度の脂肪層の厚さでは筋肉組織内の電流密度はあまり大きな影響を受けないことが明らかになった。

図12 内外組織の導電率の比(σ_b/σ_a)と垂直方向電流密度の比($J_{z\sigma_b/\sigma_a}/J_{z\sigma_b/\sigma_a=1}$)の関係(外部組織の厚さ 10mm)

Fig. 12 Relations between ratio of conductivities (σ_b/σ_a) and ratio of the vertical current densities ($J_{z\sigma_b/\sigma_a}/J_{z\sigma_b/\sigma_a=1}$). (Thickness of the external tissue 10mm)

6. むすび

水平および垂直方向の誘導電流密度分布が実験的に明らかにされているKaune等の垂直円柱モデルを用いて、同モデルが導電率の異なる内部および外部組織で構成された場合について、その内部誘導電流密度の分布を有限要素法により解析した。以下にこれらの結果を述べる。

(1) PVC容器を考慮した円柱モデル内部に誘導される水平および垂直方向電流密度の有限要素法による解析結果はKaune等の実験結果の範囲内にありよく一致している。すなわち、同モデル内部に誘導される水平および垂直方向電流密度を有限要素法により解析することの妥当性がKaune等の実験結果を用いて検証された。

(2) PVC容器(厚さ4.5mm、比誘電率3)の影響により、モデル内に誘導される電流密度はその底面付近で2.3%程度増加する。

(3) 内部および外部組織からなる円柱モデル底面において、垂直方向電流密度の比は導電率の比とほぼ等しいことから、底面付近では内部および外部組織の電界強度はほぼ等しくなるように分布することがわかる。本モデル頂面における垂直方向電流密度は内外組織の導電率の比にかかわらずほぼ一定である。なお、モデルの同一高さの内外組織境界面で両組織の垂直方向電流密度の比はそれらの組織の導電率の比とほぼ等しくなっていることが確かめられた。

(4) 同モデル内部に誘導される電流密度の水平方向成分は上部で大きく、中部、下部にゆくに従って著しく減少する。なお、モデル同一高さにおける水平方向電流密度は両組織の境界面でほぼ等しくなっていることが確かめられた。

(5) 同モデルで、内部および外部組織内の導電率のちがいは各組織内の電流密度の集中度を明らかにした。

(6) 同モデルにおいて筋肉組織が脂肪組織（厚さ10mm）で囲まれている様な場合、筋肉組織の電流密度はほぼ1.1倍、脂肪組織のそれはほぼ0.33倍になる。言い換えれば、解析条件下で脂肪組織の厚さが10mm程度ある場合、筋肉組織内の電流密度は、ほぼ10%程度増加する。すなわち、この程度の脂肪層の厚さでは筋肉組織内の電流密度はあまり大きな影響をうけないことが明らかになった。

今後、筆者等は回転対称なものとしてモデル化した人体の頭部（頭皮、頭骨、脳脊髄液、脳からなる）に焦点をあて、本方法を応用して詳細に解析する予定である。

（平成8年4月23日受付、同年10月9日再受付）

文献

- (1) B. W. Wilson, R. G. Stevens and L. E. Anderson, "Extremely Low Frequency Electromagnetic Fields : The Question of Cancer", Battelle Press, Columbus, Richland, pp. 17-46 (1990)
- (2) Shiau Y. and Valentino A. : "ELF Electric Coupling to Dielectric Spheroidal Models of Biological Object", IEEE Trans. Biomedical Engineering, BME-28, 6, pp. 429-437 (1981).
- (3) Spiegel R. J. : "Numerical Determination of Induced Currents in Humans and Baboons Exposed to 60 Hz Electric Fields", IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility, EMC-23, 4, pp. 382-390 (1981).
- (4) 千葉、伊坂、大野木 : "交流電界中の人体モデルに誘導される電流密度の解析"、電子情報通信学会論文誌 B-II, Vol. J77-B-II, No. 2, pp. 93-100 (1994).
- (5) Chen K., Chuang C. and Lin C. : "Quantification of Interaction Between ELF-LF Electric Fields and Human Bodies", IEEE Trans. Biomedical Engineering, BME-33, 8, pp. 746-756 (1986).
- (6) W. T. Kaune and F. A. McCreary : "Numerical Calculation and Measurement of 60-Hz Current Densities Induced in an Upright Grounded Cylinder", Bioelectromagnetics 6, pp. 209-220 (1985).
- (7) Chiba A., Isaka K., Yokoi Y., Nagata M. and Kitagawa M. : "Application of Finite Element Method to Analysis of Induced Current Densities Inside Human Model Exposed to 60-Hz Electric Field", IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, PAS-103, 7, pp. 1895-1901 (1984).
- (8) 千葉、伊坂、横井、大野木 : "電力周波数電界内に置かれた導電率が異なる二種類の組織を有する人体モデル内部の電流分布"、電気学会論文誌B, Vol. 109-B, No. 6, pp. 258-264 (1989).
- (9) W. T. Kaune and W. C. Forsythe, "Current Densities Measured in Human Models Exposed to 60-Hz Electric Fields", Bioelectromagnetics Vol. 6, pp. 13-32 (1985)
- (10) 河野、宅間、"数値電界計算法"、コロナ社, pp. 160-162 (1980).
- (11) O. C. ツィエンキーヴィッツ著、吉識、山田監訳、三訂版、"マトリックス有限要素法"、培風館, pp. 205-206 (1984).
- (12) S. Rush, J. A. Abildshov and R. McFee, "Resistivity of Body Tissues at Low Frequencies", Circulation Research, 7, No. 40 (1963).
- (13) E. Carstensen, "Biological Effects of Transmission Line Fields", Elsevier Science Publishing Co., Inc., New York, pp. 40-44 (1987).

千葉 敦生 (正員) 1945年3月28日生まれ。45年3月

鳥取大学工学部電気工学科卒、同年米子高専電気工学科助手、現在、同教授。人体に対する静電誘導の電気的特性に関する研究に従事。工博。電子情報通信学会、日本シミュレーション学会、IEEE各会員。

伊坂 勝生 (正員) 1944年3月3日生まれ。66年3月

広島大学工学部電気工学科卒。68年東京大学工学系研究科修士課程了。71年同博士課程了。同年4月より徳島大学工学部電気工学科に勤務。88年7月より同教授、現在に至る。工博。75年5月電気学会論文賞受賞。静電気学会、環境科学学会、IEEE各会員。