

針電極と生体のインピーダンス

Needle Electrode and Bioimpedance

谷田尚子 Hisako TANIDA

(お茶の水女子大学ライフサイエンス)

1. はじめに

生体の電気的性質、特に生体インピーダンスを測定しようとする時最も問題になるのが、どのような電極をどこに用いるのかという事である。銀/塩化銀電極をゲルを介して体表に貼り付けることが最も一般的であるがこの場合は体表からしか情報を得ることが出来ない。体内に挿入する型の電極としては、針内に2本の導線を互いに絶縁して埋め込み針尖にてこれを露出するものなどがあるが、針体の可撓性に欠け被験者に大きな苦痛を与えている。そこで著者等は針灸治療に用いる毫針を電極として用いて生体の電気的性質測定の可能性を検討した。

2. 実験

(1) 測定試料

測定試料には、無生物として寒天(生理食塩水 $c=0.9\%$ で溶かし固めたもの)を、生体モデルのうち動物として豚肉(赤身, 脂身), 鶏肉(笹身)を、植物として大根を用いた。

(2) 電極

電極として針刺用の毫針(針身半径 $a=100-150\mu\text{m}$, 針身長 3cm)を用いた。電極として使用する前に一旦水で浸漬した後拭き処理を行い、針身表面の潤滑膜を除去した。毫針は各測定試料表面に対して垂直に進針し(直刺), 深度 d は $d=0.5-2.0\text{cm}$ とした。2本の毫針は距離 l だけ隔て、これを電極とした。

(3) インピーダンス測定装置

インピーダンス計測には Precision LCR Meter (4284A, Hewlett Packard, 20-1MHz) と周波数分析器 (5020, NF 回路設計ブロック, 1-20kHz) を用いた。前者は高周波数領域をカバーしており、後者は低周波数領域をカバーしている。測定正弦波電圧は 50mV (実効値) である。

階段電圧応答には Electrochemical system (HECS-321B, 扶桑製作所) を用い、応答電流を X-Y レコーダー (Model F-35C, RIKEN DENSHI CO. LTD.) で記録した。階段電圧の大きさは 500mV である。

3. 理論

(1) 針電極系のセル定数

電極間距離 l , 深度 d , 半径 a の針電極のセル定数 K は

$$K = [\ln(l/a)] / \pi d \quad (1)$$

である。従ってこの針電極によって測定される生体の電気伝導度 G , および電気容量 C はそれぞれ

$$G = (1/K)\sigma \quad (2)$$

$$C = (1/K)\epsilon$$

となる。ここで σ および ϵ はそれぞれ生体の導電率と誘電率である。

(2) 複素平面上でのインピーダンス

生体に挿入した2本の電極は測定対象の生体がイオン伝導体であるため、電極/生体界面には Helmholtz 層が形成される。その結果測定系の等価回路としては Helmholtz 層と生体バルクとの直列の回路が形成されたこととなる。

電極界面のインピーダンス Z_d は拡散層の容量 C_d と、Helmholtz 層の電荷移動抵抗 R_H と拡散インピーダンス Z_w との和との並列になっているが (Fig. 1), 極低周波部分を無視すれば C_d は Helmholtz 層容量 C_H に、拡散インピーダンス Z_w は無視できるので、結局 C_H と R_H との並列回路で表わしても大過ないことになる。するとその頂点周

波数 ω_H

$$\omega_H = 1/R_H C_H = \sigma_H / \epsilon_H$$

は、Helmholtz 層中に電荷が存在しないため(生体測定条件においては)導電率が十分小さくなり、界面に相当する複素平面上の半円の周波数 ω_H は小さな値をとることになる。電界電流 (Faraday 電流) がほとんど流れない条件においては R_H も十分に大きいので、円の径は大きなものになることが期待される。

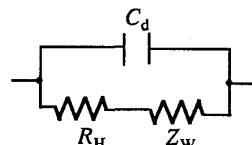


Fig. 1 Equivalent circuit for Helmholtz layer

これに対し生体バルクに相当する半円はその半径 R が

$$R = K / \sigma$$

であり、電極間距離 l の関数であるセル定数 K と共に大きくなる。また頂点周波数 ω は

$$\omega = \sigma / \epsilon$$

であり、生体試料物質のみに依存し、電極界面の距離 l には依存しない。

結局インピーダンス平面上において右側に低周波に対応する大円が生じ、これが電極界面に対応し、左側の原点に近い方に小円が生じてこれが生体バルクに対応する。大円の径および周波数は加えた電圧や電極表面の性質のみに依存し、測定試料や電極間隔には依存しないことが期待される。また小円の周波数は測定試料のみに依存し、電極間距離には依存しない。そして小円の径が電極間距離やセル定数と共に変化することが期待される。

(3) 階段電圧応答

インピーダンスの測定は微小正弦波電圧に対する電流応答を調べたもので、その正弦波の周波数 $\omega = 2\pi f$ をパラメータとして検討したものであった。これに対し階段電圧応答は階段関数形の電圧を $t=0$ において試料に加え、その応答電流 $I(t)$ を時間 t の関数として求め解析するものである。従ってこの2つの解析は時間 t の側面から見るか、時間の逆数である周波数 $\omega = 2\pi f$ で見るのかの違いであり、同じ電気的性質を別の面から見ているに過ぎない。

生体バルクに対応する高周波数小円は、階段電圧応答では時定数の短い大きな応答電流に対応し、電極界面に対応する低周波数大円は、時定数の長い小さな応答電流に対応する。従って階段電圧 V 印加直後に流れる初期電流 I_p に対応する $R = V/I_p$ が生体バルクの抵抗を表わし、定常電流 I_∞ に対応する $R_H = V/I_\infty$ が界面の電荷移動抵抗に対応するものと考えられ、それぞれの小円と大円との径と対比させることが期待される。

4. 結果と考察

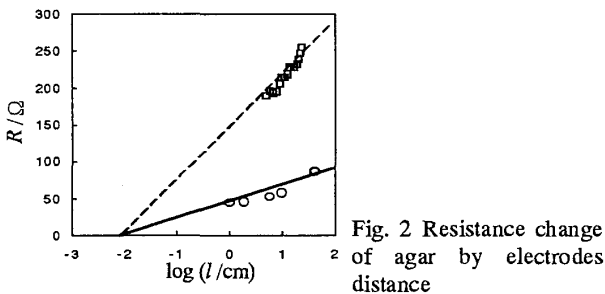
インピーダンス図の一般的な結果としては、低周波側(右側)に径が数 $\text{M}\Omega$ の大円があり、その高周波側(原点側)に径が 100Ω -数 $\text{k}\Omega$ の小円があり、この小円の左端は実軸上 $200-300\Omega$ にあった。大円(数 $\text{M}\Omega$) はその全貌を見ることはできなかったが、これは電極界面インピーダンスに対応している。次の小円 ($100\Omega-6\text{k}\Omega$) はその右端が電極間距離と共に変化することから生体バルクのインピーダンスに対応しているものと推定した。その左端から先の抵抗 ($200-300\Omega$) はおそらく細胞内液によるも

ので、Pauly-Schwan の β 分散によるものでないかと思われる。

以下各試料に関してその結果を述べる。

(1) 寒天

寒天の場合は大円の左端部分のみが見られ、本測定周波数範囲内では小円は観察されなかった。従って大円左端の実軸との交点 R を以て寒天パルクの抵抗とし、これを (1) 式に基づき $R = K / \sigma$ として横軸 $\log(l / \text{cm})$ に対してプロットした (Fig. 2)。図は比較的良好な直線性を示し、その切片より針電極径 $a = 96\mu\text{m}$ および、寒天導電率 $\sigma = 18\text{mS/cm}$ が得られた。同図には同じく階段電圧応答より求めた抵抗 $R = V / I_p$ も併せて破線で示した。



(2) 豚肉

豚肉は赤身と脂身両方を測定した。赤身は径約 $10\text{M}\Omega$ と見られる大円と、電極間距離 l に依存する径 R の小円 (100kHz) とが得られた。小円の左端は約 230Ω であった。この小円の R を電極間距離 l に対して図に示す (Fig. 3)。図はほぼ原点を通る直線となり $\Delta R / \Delta l = 17\Omega/\text{cm}$ が得られた。

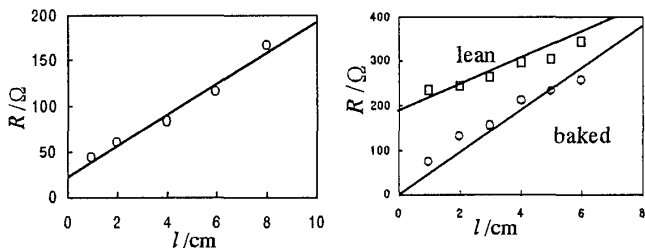


Fig. 3 Resistance change of pork by electrodes distance

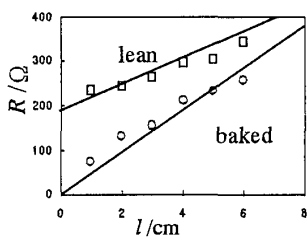


Fig. 4 Resistance change for pork before and after baking

この赤身を焼くとおそらく小円の左端 230Ω が縮小し、小円の右端に相当する点の値は小さくなる。この相当点は実際には更にその右の大円の左端から求めた。これを生の赤身の小円右端の値と共に Fig. 4 に示す。この傾き $\Delta R / \Delta l = 36\Omega/\text{cm}$ は生肉の場合よりやや大きくなっている。これは肉を焼いたことにより水分が蒸発したことに対応し、また小円左端 230Ω が約 50Ω に減少したことは細胞が熱破壊されたことによるものであろう。

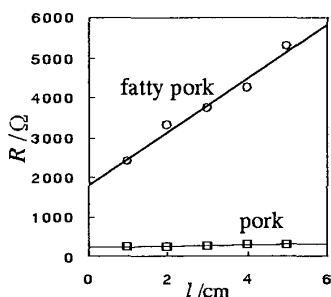


Fig. 5 Resistance for ordinal pork and fatty pork meat

脂身の場合はやはり大円の左端しか測れなかったが、この値 R を先程の赤身の場合を併せて Fig. 5 に示す。この場合は $\Delta R / \Delta l = 670\Omega/\text{cm}$ の直線となった。

(3) 鶏肉

鶏肉は笹身を用い、その筋線維方向 ($//$) と筋線維に垂直な方向 (\perp) とのインピーダンスを測定した。線維方向では、大円の左端と見られる部分、および、電極間距離 l に依存する径を持つ小円 (500kHz) とが得られた。ただしこの小円の左端は電極間距離によらず、約 300Ω 一定であった。小円の右端 R を Fig. 6 に示す。その傾きは $\Delta R / \Delta l = 30\Omega/\text{cm}$ であった。

線維に垂直方向では、 1MHz までおそらく測定したがおそらく大円の左端と思われる部分しか測定できなかった。従ってその左端部分と思われる点の抵抗 R を先程の Fig. 6 に併せて示した。これは $\Delta R / \Delta l = 140\Omega/\text{cm}$ の傾きを持ち、且つ $l = 0$ においては約 300Ω の抵抗を示すので、この 300Ω の筋線維の抵抗によらぬ定数であると思われる。いずれにせよ電極間距離に依存する抵抗部分は筋線維に垂直な方向が、平行な方向よりも 4.7 倍大きかった。すなわち笹身の導電率異方性は 4.7 である。

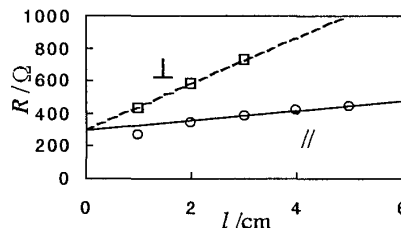


Fig. 6 Resistance of chicken meat parallel and perpendicular to meat fiber

(4) 大根

大根のインピーダンスは、おそらく大円の左端と径約 $6\text{--}7\text{k}\Omega$ の中円 (2kHz) とが観測された。中円の径 $R_{\#}$ (Fig. 7) および中円左端 R (Fig. 8) はいずれも電極間距離 l と共に大きくなった。中円径の傾きは $\Delta R_{\#} / \Delta l = 265\Omega/\text{cm}$ であり、その左端の傾きは $\Delta R / \Delta l = 9.3\Omega/\text{cm}$ であった。この2つの値は何を意味しているかは不明だが、細胞内液と細胞壁内液、細胞壁外液等に対応しているのであろう。

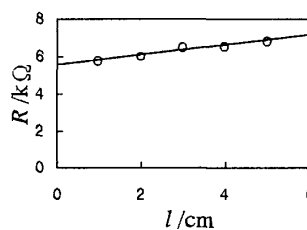


Fig. 7 Relation between l and $R_{\#}$ of Japanese radish

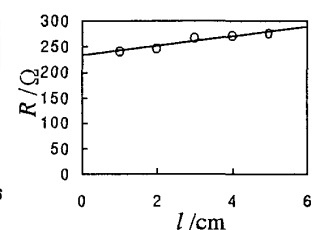


Fig. 8 Relation between l and R of Japanese radish

謝辞

本研究を御指導、御協力頂きました本学太田裕治助教授、並びに東京電機大学高井信治教授、東洋大学和田昇教授に厚く感謝致します。

発表状況

1. "Electrical properties of living body", The 2nd Joint Forum, March 2001, CB-8, Korea
2. 「心筋細胞膜活動電位と膜電位感受性色素」、第 20 回環境生理学研究会、2000 年 7 月、B4、長野
3. 「毫針電極と生体」、第 21 回環境生理学研究会、2001 年 8 月、A1、長野
4. 「針電極を用いる生体材料のインピーダンス測定」、第 16 回生体生理学シンポジウム、2001 年 8 月 1C1-4、神奈川
5. 「交流回路と Cole-Cole plot」、生活工学研究、2 (2)、112-115、(2000)
6. 「誘電率と生体」、生活工学研究、3 (2)、256-259、(2001)
7. 「針電極と生体のインピーダンス」生活工学研究、4 (1)、(2002)
8. 「生体電極とその形状」生活工学研究、4 (1)、(2002)