原著

容量結合型電気メス対極板の電気的特性に関する検討

酒井 順哉* 大山 満*

Electric Characteristic Research for Capacitive-coupling
Dispersive Electrode of Electro-surgical Unit

Junya SAKAI, Mitsuru OHYAMA
Department of Operation Center,
Kagoshima University Hospital,
Usuki-cho, Kagoshima-shi, Japan.

Abstracts

Recently it is surprising that some dispersive electrodes of an electro-surgical unit have come into wide use and make rapid progress for preventing of electro-surgical burn injuries. These dispersive electrodes can be divided into two types on electric characteristics. One is the conductive dispersive electrode which has been in existence for a long time, the other is the capacitive-coupling dispersive electrode which has improved lately.

We were investigating some electric characteristics of capacitive-coupling dispersive electrodes by lumped constant equivalent circuits. Consequently, this electrode takes safety measures for electro-surgical burn injuries and macro shock.

1. はじめに

今日、電気メス(電気手術器: electro-surgical unit)による熱傷事故の減少の陰には、電気メス本体の安全性の向上と共に、各種対極板(dispersive electrode)の開発・改良がある。約半世紀前、W. T. Bovie によって開発された電気メスの対極板は導電性の金属板が使われていたが、近年になり対極板のディスポーザブル化が主流を占めてきた。その背景には以前から使用されているステンレス対極板・鉛対極板などの金属対極板では材質的に硬いため、i) 生体との接触が不均一になりやすく過度な電流密度分布が熱傷の原因を作る。ii) 生体との接触

部位が圧迫による褥瘡を受けやすい。などの問題点に対する配慮があった。

ディスポーザブル対極板を、電気的特性から分類すると、今日まで対極板の主流をなしてきた導電型対極板(conductive dispersive electrode)と、今日注目されている容量結合型対極板(capacitive coupling dispersive electrode)に大別できる。

導電型として使用している対極板の中には、前述のステンレス対極板・鉛対極板を使用したものの他、このような金属対極板に生理食塩水を含んだガーゼ・導電ゲルで導電性を良くしたもの、現在ではアルミ箔対極板・銅箔対極板・導電ゲルをスポンジにしみ込ませた対極板・カーボンやカラヤゴムを使用した対極板などが含まれ、大部分の病院で使用されている対

* 鹿児島大学医学部附属病院中央手術部
(原稿受付: 昭和55年12月13日)

(2) 医学 Vol. 51, No. 5 (1981)

極板は、この導電型対極板である。しかし周知のごとく、導電型対極板は生体との接触部位において局所的電流密度増大による熱傷を起こしやすく、取り扱いを慎重にする他、種々の対極板安全装置による対策ぐらいであった^{1)~5)}。

一方、電気メスがソリッド・ステート化し、2次側の出力方式が対極板接地型(non-floating type)から、対極板フローティング型(floating type)に安全性から基本構造が変わるにつれて、脚光をあびてきたのが容量結合型対極板である。容量結合型対極板は導電体材質の上部を誘電体(dielectrics)によりコーティングしたもので、対極板と生体間がコンデンサ(condenser)の役割を果たし、電気メスの高周波電流だけを流すようにしたものである(図1)。

図1 容量結合型電気メス対極板

Fig. 1 Capacitive-coupling dispersive electrode of electro-surgical unit.

本稿は、容量結合型対極板が導電型対極板で生じていた熱傷の危険性を RF (radio frequency) キャパシタンス技術により一挙に解決したものであり、安全性・将来性の高い方式であることを理論と実験により証明するとともに、その特性から熱傷・マクロショック(macro shock)に対する長所・短所を検討した。そして最後に取り扱い上、起こり得る問題点とその対策について述べる。

2. 対極板の電気的特性の理論解析

一般に対極板と生体との電気的特性を把握する際、図2(a)の集中定数等価回路が用いられる⁶⁾。ここで r 、 C は対極板と生体間の接触抵抗(resistance)、等価接触容量(capacitance)で、 r' は対極板電極および対極板材質の抵抗損失、 R 、 C' は生体内部の等価抵抗、等価静電容

量である。ここで容量結合型と導電型対極板の電気的特性を考えるために、図2(a)の一般等価回路をそれぞれ図2(b)、(c)のモデルに理想化した⁶⁾。図2(b)の容量結合型対極板のモデルは、対極板電極の抵抗 $r=0$ で、対極板と生体間の接触抵抗が高周波電流の漏れのない絶縁状態($R_e=\infty$)で近似したものである。同様に導電型対極板(図2(c))のモデルは、 $r=0$ 、対極板と生体間の等価接触容量が R_e により大きく影響するため無視できるものと考えている。

(a) 対極板境界領域の一般等価回路

(a) Common equivalent circuits of human body and boundary region.

(b) 容量結合型対極板の理想化モデル

(b) An ideal model of the capacitive-coupling dispersive electrode.

(c) 導電型対極板の理想化モデル

(c) An ideal model of the conductive dispersive electrode.

図2 対極板と生体の等価回路

Fig. 2 Equivalent circuits and ideal models of human body and boundary region.

ここで容量結合型および導電型対極板と生体との合成インピーダンス Z_c および Z_r は、図2(b)、(c)より次のようになる。

$$Z_c = R + \frac{1}{j\omega C} \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$Z_r = R + r \quad \dots\dots\dots (2)$$

次に対極板実効面積 S の平行板対極板を生体組織の仮想電極と厚さ d の誘電体を介して装着した時の容量結合型対極板の静電容量 C は、

$$C = \frac{\epsilon S}{d} = \frac{\epsilon' \epsilon_0 S}{d} \quad \dots\dots\dots (3)$$

となる。ただし ϵ は誘電率、 ϵ_0 は真空中の誘電率 ($= \frac{1}{36\pi} \times 10^{-9}$)、 ϵ' は誘電体材質の比誘電率とする。

容量結合型対極板と生体との合成インピーダンスの絶対値を $|Z_c|$ とすると、式(1)(3)より、

$$\begin{aligned} |Z_c| &= \sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2} \\ &= \sqrt{R^2 + \left(\frac{d}{2fS}\right)^2} \\ &= \sqrt{R^2 + \left(\frac{18 \times 10^9 d}{\epsilon' f S}\right)^2} \dots\dots\dots(4) \end{aligned}$$

となる。一方、導電型対極板と生体との合成インピーダンスの絶対値を $|Z_r|$ とし、対極板の導電材質が良導体とすると、 $r \rightarrow 0$ となり、

$$|Z_r| = R + r \dots\dots\dots(5)$$

$$\simeq R \dots\dots\dots(6)$$

と近似できる。

次に電気メスの搬送波発振出力電圧の実効値を V とする時、容量結合型対極板と導電型対極板に流れる高周波電流の理論値 I_c , I_r は、

$$I_c = \frac{V}{|Z_c|} = \frac{V}{\sqrt{R^2 + \left(\frac{18 \times 10^9 d}{\epsilon' f S}\right)^2}} \dots\dots\dots(7)$$

$$I_r = \frac{V}{|Z_r|} = \frac{V}{R} \dots\dots\dots(8)$$

となる。したがって、対極板実効面積 S にともなう各々の電流密度 J_c , J_r は、式(7)(8)より、

$$J_c = \frac{I_c}{S} = \frac{V}{\sqrt{(RS)^2 + \left(\frac{18 \times 10^9 d}{\epsilon' f}\right)^2}} \dots\dots\dots(9)$$

$$J_r = \frac{I_r}{S} = \frac{V}{RS} \dots\dots\dots(10)$$

となる。

したがって、容量結合型対極板の電流値 I_c は、式(7)より対極板実効面積 S と電気メス搬送周波数 f ($=\frac{\omega}{2\pi}$) によって影響があるが、導電型対極板の電流値 I_r は、式(8)より対極板実効面積 S と電気メス搬送波周波数 f に何ら影響ないことがわかる。

3. 実験回路

第2章で得た容量結合型対極板と導電型対極板の高周波電流および電流密度の理論値と比較するため、図3の実験回路を作り、対極板実効面積 S と電気メス搬送波周波数 f の変化による対極板自体の電気的特性の変化を測定した。図3中の 500Ω は生体内部の負荷抵抗 R で、対極

板面積 S や周波数 f の影響を解析しやすいように無誘導抵抗で近似した。

図3 対極板電気的特性試験回路

Fig. 3 Circuits for testing electric characteristics of dispersive electrodes.

実験に使用した容量結合型対極板と導電型対極板の形状・材質等より次のような設定値として理論式(7)~(10)に代入した。

$$\begin{aligned} d &= 0.025 \text{ cm} \\ \epsilon' &= 3 \\ S &= 120 \text{ cm}^2 \\ f &= 500 \text{ kHz} \\ R &= 500 \Omega \\ V &= 3 \text{ V (RMS)} \end{aligned} \dots\dots\dots(11)$$

ただし対極板面積 S は、全体の面積が 120cm^2 の容量結合型対極板と導電型対極板を用い、接触面積を $0 \sim 120 \text{ cm}^2$ まで変化させることにした。また電気メス搬送波周波数 f を高周波正弦波発振器により $10 \sim 500 \text{ kHz}$ まで変化させることにした。

4. 対極板実効面積 S による特性変化

式(7)(8)に式(11)の諸定数を代入し、対極板実効面積 S を変数として、 $0 \sim 120 \text{ cm}^2$ まで変化させた時の容量結合型対極板および導電型対極板における電流値 I_c および I_r の変化は図4のようになる。また図3の実験回路の試験用対極板に容量結合型対極板および導電型対極板を使用し、金属プレートとの接触面積を $0 \sim 120 \text{ cm}^2$ まで変化させた時の電流値の変化を図4中 I_{co} および I_{ro} で示す。このときの設定値に理論計算と比較するため、式(11)の諸定数を用いた。

図4の I_c と I_{co} , I_r と I_{ro} の各々を比較すると理論値と実験値が同じ傾向にあり、式(7)(8)で

(4) 医 器 学 Vol. 51, No. 5 (1981)

図 4 容量結合型と導電型対極板の実効面積に対する回路電流の関係

Fig. 4 Current responses to effective area of capacitive-coupling and conductive dispersive electrode.

得た理論式の妥当性を測定により裏付けられた。図 4 の I_c と I_{co} の誤差は、実験回路に流れた高周波の分流や図 2 (b) の理想化によるものと考えられる。

図 4 より、容量結合型対極板では対極板の接触面積の減少により電流値も減少するため、過度の電流密度分布は生じないことになる。それに反して導電型対極板では、対極板面積と電流値が式(8)のように関係しないため、接触面積の減少が直接熱傷事故の原因となる危険性がある。

次に図 4 の I_{co} , I_{ro} を用いて、対極板実効面積 S にもなる容量結合型対極板と導電型対極板の電流密度 J_{co} と J_{ro} を図 5 に示した。ただし実際に生じる電流密度を検討するために、電気メスの搬送波発振出力電圧 V を 1 kV に換算した。図 5 の J_{co} , J_{ro} は式(9)(10)の J_c , J_r と同じ傾向になる。

図 5 より、対極板実効面積 S の減少による容量結合型対極板と導電型対極板の電流密度の変化が明らかとなった。ここで熱傷発生限界の電流密度を 65 mA/cm^2 と考えれば、導電型対極板の実効面積の限界は、 30 cm^2 (25%) であり、容量結合型対極板の実効面積の限界 12 cm^2 (10%) に比べ、安全限界が少ないことがわかる。

図 5 容量結合型と導電型対極板の実効面積に対する電流密度の関係

Fig. 5 Current density responses to effective area of capacitive-coupling and conductive dispersive electrode.

5. 電気メス搬送波周波数 f による特性変化

式(7)(8)に式(11)の諸定数を代入し、電気メス搬送波周波数 f を変数として、10~500 kHz まで f を変化させた時の容量結合型対極板および導電型対極板における電流値 I_c および I_r の変化は図 6 のようになる。ただし図 6 の縦軸は $f = 500 \text{ kHz}$ の時の電流値を 100% とした時の各周

図 6 容量結合型と導電型対極板の周波数特性
Fig. 6 Current ratio responses of capacitive-coupling and conductive dispersive electrode to carrier frequency.

波数の電流比で表わしている。また、図3の実験回路により得られた容量結合型対極板と導電型対極板の電流値 I_{co} , I_{ro} の変化も、図6上にプロットした。

図6より、容量結合型対極板は搬送波周波数付近の高周波電流をよく流すが、直流や低域周波数帯域の電流は流れない。したがって、容量結合型対極板は電気メス能動出力として必要な高周波帯域の電流に対して良導体として働き、不用で危険性のある周波数帯域の電流に対して絶縁体として働いていることがわかる。導電型対極板は、ほぼ全周波数帯域についてフラットな特性を示しているため、商用電源周波数も流れやすく、他の ME 機器と関連した漏れ電流 (leak current) の問題を生じることがある。

6. 容量結合型対極板の熱傷問題の考察

前述したように、容量結合型対極板の機能を発揮できる条件下では、導電型対極板に比べて安全性に優れている。しかし容量結合型対極板の使用が電気メス熱傷問題の解決を常に保証することにはつながらず、対極板の取り扱い方を誤れば導電型対極板同様の熱傷事故の危険があることを理解しておかなければならない。

まず第一に、対極板フローティング型電気メスに替えて対極板接地型電気メスに容量結合型対極板を使用した場合を考えてみる。元来、対極板接地型電気メスは導電型対極板を使用するよう設計され、二次側高周波出力を患者に作用した後、アースに帰路を取っている。このため容量結合型対極板を対極板接地型電気メスに使用する時、患者に装着された電極や手・足がベット金属部に接触していると、高周波分路が増加し、その部位に熱傷の危険がある。

第二に、容量結合型対極板に導電ゲルを塗ったり対極板装着部位に血液・生理食塩水等が流入した場合を考えてみる。このような時、対極板と生体の接触部分は安全性の高い容量結合型として動作せず、あたかも導電型対極板のごとく電気的特性が変化するため、接触インピーダンスの不均一により熱傷が起こりやすくなる。

このことを理論的に解析するために図7のよ

図7 容量結合型対極板により不均一接触状態時の電流分布

Fig. 7 Equivalent circuits of abnormal condition illustrating relations between human body and capacitive-coupling dispersive electrode.

うな容量結合型対極板の対極板実効面積を n 分割した場合の等価回路を考える。図7は図2(b)より得たモデルで、対極板が生体と接触が不均一で1ヵ所だけ(図7中の左から k 番目)で接触している状態を仮定すると、正常な使用状態においては図4の接触面積の減少により、わずかな電流 i_k だけが流れ、 k 番目に流れる電流密度は高くなり、安全限界を越えない(図7(a))。しかし対極板に導電ゲルを塗ったり、対極板装着部位に血液・生理食塩水が流入すると、図7(a)は図7(b)のように変化し、 k 番目に集中した安全限界を越える大きな電流 I が流れ熱傷を起こすことになる。

この対策として、当手術部では容量結合型対極板に導電ゲルの使用を禁止すると共に、開腹術などで生理食塩水を多量に使用するケースでは、対極板を術野直下に装着しないこと、またそれができない条件下では、導電型対極板を使用するなどの注意事項を取り扱い者に徹底している。

7. 結 論

容量結合型対極板の電気的特性を導電型対極板の電気的特性と比較しながら検討し、対極板実効面積 S と電気メス搬送波周波数 f から、前者が安全性に関して優れていることがわかった。しかし容量結合型対極板に従来の対極板接地型電気メスは使用できず、対極板フローティング型電気メスだけに限られることや、導電ゲル・血液・生理食塩水等の流入が、極めて熱傷の発生を引き起こしやすくなることを検討した結果、導電型対極板で生じる熱傷とは異なった状況で熱傷が発生することがわかった。

したがって今後容量結合型対極板の特徴および使用法が、導電型対極板と異なることを取り扱い者が理解するとともに、メーカーの対極板使用に関する注意事項の記載の徹底を要望したい。

参 考 文 献

- 1) Battig, C. G., Electrosurgical burn injuries and their prevention, JAMA, 204 : 12, 94, 1968.
- 2) Dobbie, A. K., The electrical aspects of surgical diathermy, Bio-Medical Engineering, Vol. 4, No. 5, 1969.
- 3) 大山満, 酒井順哉: 手術室と電気メス (電気メスとその防止), 医器学, 48 : 238, 1978.
- 4) 酒井順哉, 大山満: 電気メス対極板の検討 (等価回路による対極板周辺の交流特性), 医器学, 48 : 132, 1978.
- 5) 大山満, 酒井順哉: 電気メスの現状とその問題点 (ハードウェアからの現状分析), 医器学, 50, 75, 1980.
- 6) 酒井順哉, 大山満, 藤村剛: 容量結合型電気メス対極板による熱傷問題, 第2回手術部研究会, 42, 1980.