

生体細胞へのプラズマ照射における膜間電圧変化の等価回路解析 Equivalent Circuit Analysis of Intermembrane Voltage Change in Plasma Irradiation of Living Cells

都立大院 システムデザイン ○山内 翔太, 八木 一平, 内田 諭
Tokyo Metropolitan Univ. °Shota Yamauchi, Ippei Yagi, Satoshi Uchida
E-mail: yamauchi-shouta@ed.tmu.ac.jp

1. はじめに

近年、大気圧非平衡プラズマの安定生成技術が確立し、その医療応用は急速に発展している[1]。止血処置、皮膚治療、がん治療などのプラズマ医療は、主に放電由来の化学的活性種が外的因子となり、細胞を刺激して生じることが実験的に示唆されている[2]。活性種の効果として、癌細胞へのアポトーシス誘導や創傷治癒などが存在し、また、電気的な効果として、高電圧(高電界)により細胞に小さな孔を開ける電気穿孔などが知られている。しかし、電界については、表面帯電や膜電位変動を介して細胞膜の物質輸送へ直接的に影響を与えるが、その機構について明確には理解されていない。そこで本研究では活性種から離れて、電界と電荷の供給による細胞との相互作用に着目し、プラズマ医療の基本的なメカニズムの解明を行うことが本研究の目的である。本報では細胞に対しプラズマ照射した際に、細胞膜にかかる電圧を回路シミュレータにより解析した。

2. 解析手法

電極間隔2 mmに単一の細胞が配置された等価回路を作成した。白血病由来の浮遊癌細胞(Jurkat細胞)の細胞膜、細胞質について、それぞれ導電率および容量を文献から引用した[3]。また、プラズマ領域の抵抗について異なる論文から引用している[4]。以下に導出式を示す。

$$R_p = \rho \frac{L_{\text{gap}}}{S_{\text{gap}}} \quad (1) \quad \rho = \frac{1}{qn_e \mu_e} \quad (2)$$

ここで、 ρ はプラズマ抵抗の抵抗率、 q は電荷素量、 n_e は電子密度、 μ_e は電子の移動度。式(2)のように、プラズマ領域の抵抗値は電子密度に依存し、連続的に変化するが、今回の解析では4つの電子密度の値を仮定した。背景ガスには N_2 を用いた。解析条件は、印加電圧が30 kVのパルス波形(Duty比: 10%)、周波数が1 kHz、ガス温度及び圧力は300 Kおよび760 Torrとした。また、Fig. 1に回路を示す。回路シミュレータLTspice XVIIを用いて解析を行った。

3. 解析結果および考察

Fig. 2に細胞膜の電圧波形を示す。電子密度が高いとき、膜間電圧変化が大きくなることを確認した。細胞膜に0.01~1 V程度をかけると、電気穿孔のような現象が生じたり、膜電位変動により輸送特性に変化を生じさせたりする。従って、直接細胞にプラズマ照射を行うと、理論的には同様の現象を生じさせる可能性があるかと推察される。

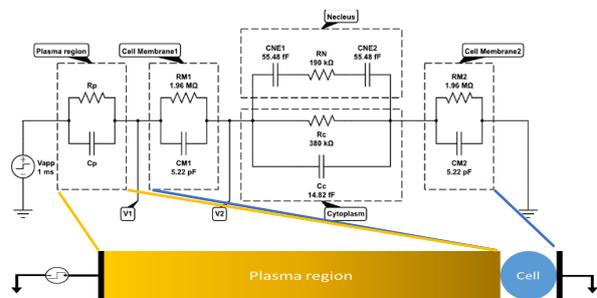


Fig. 1 Equivalent circuit of Jurkat cell and plasma region.

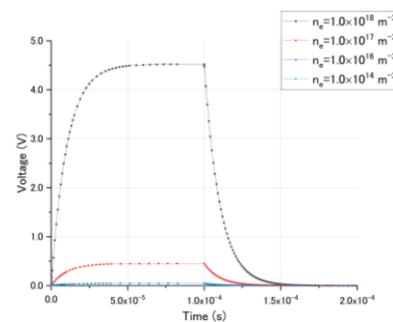


Fig. 2 Voltage applied to the cell membrane.

参考文献

- [1] M. G. Kong *et al.*, *New J. Phys.*, Vol. 11, No. 115012, (2009).
- [2] A. Kokubu, S. Uchida, T. Sato *et al.*, *ICPIG & ICRP-10*, Vol. XXXIV, (2019).
- [3] X. Du, X. Ma, H. Li *et al.*, *IEEE J. Electromagn. RF Microwaves Med. Biol.*, vol. 3, No. 2, (2019).
- [4] F. Bouanaka, A. Boudjadar, and S. Rebiai, *ICAEE 2019*, (2019).
- [5] N. Y. Babaeva and M. J. Kushner, *J. Phys. D. Appl. Phys.*, Vol. 43, No. 18, (2010).