

細胞への低温大気圧プラズマ照射における 印加電圧振幅と駆動周波数が細胞生存率に与える影響の数値解析 Numerical Analysis of the Effect of Applied Voltage Amplitude and Drive Frequency on Cell Viability in Irradiation of Cold Atmospheric Pressure Plasma to Cells

千葉工業大学¹, 東京都立大学², 大分大学³

°(M1)中島 大雅¹, (M2)石原 卓也¹, 八木 一平², 立花 孝介³, 内田 諭², 小田 昭紀¹

Chiba Inst. Technol.¹, Tokyo Metropolitan Univ.², Oita Univ.³

°T. Nakajima¹, T. Ishihara¹, I. Yagi², K. Tachibana³, S. Uchida², A. Oda¹

E-mail: s20a4119ap@s.chibakoudai.jp

1. はじめに

低温大気圧プラズマは、大気圧下でイオン種やラジカル種を効率的に生成可能である。プラズマ中の荷電粒子によって生じる電流や電圧は、細胞膜に対し穿孔を生じる。この穿孔により遺伝子導入の促進やがんの治療といった報告がされている。プラズマによって生じる電気的作用はプラズマの医療応用の重要な要素の1つであるが、細胞膜間電圧や流れる電流の直接的な計測が困難であるため、プラズマが細胞に対し与える電気的作用は未解明な現状である。

そこで、本研究では低温大気圧プラズマが細胞に与える電気的作用の解明を目的に低温大気圧プラズマモデルとプラズマ照射層の等価回路モデルの連成モデルを構築し解析を行ってきた^[1]。本報告では、プラズマ医療の低侵襲化に着目し、プラズマ生成の外部パラメータである電圧振幅と駆動周波数を変化させ、細胞膜にかかる電圧値から細胞の生存率の高い外部パラメータの範囲を推定したので報告する。

2. 解析手法

Fig. 1 に本研究の計算モデル図を示す。本モデルは、低温大気圧プラズマモデルと、プラズマ照射層の等価回路モデルから構成される。前者のモデルは、数密度連続の式とポアソンの式を支配方程式とした局所電界近似に基づく空間一次元流体モデルである。このモデルでは原料ガスを He (N₂:20 ppm) とした 7 種の粒子種(e⁻, He⁺, He₂⁺, N₂⁺, He^{*}, He₂^{*}, N) による 10 種の反応過程を考慮し解析を行っている。後者のモデルは、Kido らの報告^[2]を参考に緩衝液層、細胞層、培養プレート層の 3 層から構成される抵抗とコンデンサからなる電氣的等価回路モデルである。解析条件として駆動周波数を 10 ~ 100 kHz, 電圧振幅を 5 ~ 20 kV の範囲で変化させ細胞膜間電圧を計算した。

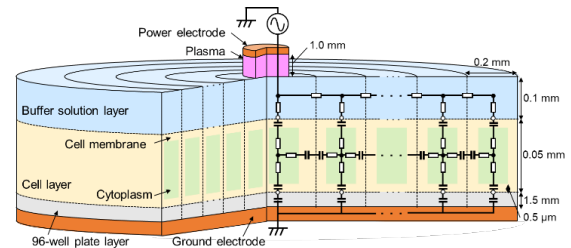


Fig. 1 Schematic Diagram of Simulation Models of Cold Atmospheric pressure Plasma and Plasma Irradiation Layer.

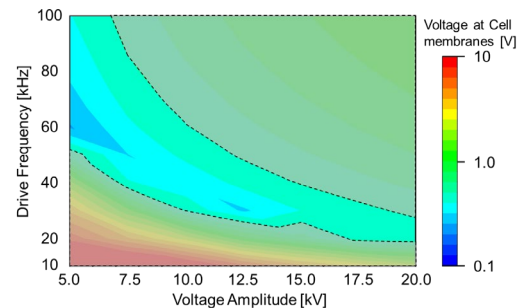


Fig. 2 Driving Frequency and Voltage Amplitude Dependences of Maximum Voltage at Cell Membrane.

3. 結果

Fig. 2 にそれぞれの駆動周波数および電圧振幅における細胞膜間電圧のマッピング図を示す。ここで、細胞生存率の評価指標として Zimmerman ら^[3]の細胞膜間電圧が 0.5 V 以上の場合に細胞生存率が低くなるという報告から 0.5 V 以上の電圧値を灰色で示す。本結果より、駆動周波数が 20 kHz 以下では細胞膜間電圧が高くなるため細胞生存率が低くなることが示唆される。その他結果の詳細は、講演当日に報告する。

4. 謝辞

本研究は、科学研究費補助金(24K00873, 代表: 内田諭)の助成を受けたものである。ここに謝意を表す。

文 献

- [1] 石原ら, 2024 年第 85 回応用物理学会秋季学術講演会, 20a-A33-8 (2024)
[2] Y. Kido et al, *PLOS ONE*, Vol. 16, No. 1, e0245654 (21pp) (2021)
[3] U. Zimmerman, *Biochim. Biophys. Acta.*, Vol. 697, No. 3, pp. 227-277 (1982)