高分子材料製マイクロニードルの形状最適化に向けた弾塑性変形解析

Elastoplastic finite element analysis for shape optimization of polymer microneedles

東大工[1], ナノ医療イノベーションセンター[2]

稲田瑞樹[1], 神田循大[1], 竹原宏明[1,2], 一木隆範[1,2]

The University of Tokyo[1], Innovation Center of NanoMedicine (iCONM)[2]

Mizuki Inada[1], Yukihiro Kanda[1], Hiroaki Takehara[1], Takanori Ichiki[1,2]

E-mail: inada@bionano.t.u-tokyo.ac.jp

【緒言】高分子材料製マイクロニードルは、安全性の観点から、医療分野における低侵襲な経皮薬剤送達技術として注目されている[1]。しかし高分子材料は金属などの他の材料に比べて強度が低いため、現在医療デバイスとして使用されているマイクロニードルは低アスペクト比のものが一般的であり[2]、血管への到達が可能な高アスペクト比マイクロニードルの作製に課題がある。ニードル設計においては、細く尖った先端部と応力集中で座屈を生じやすい根本部分の形状、寸法の最適化が重要となる。そこで本研究では、有限要素法シミュレーションを用いて、皮膚への刺入に最適なマイクロニードル形状について検討した。

【実験方法・結果】形状の最適化に向けて、形状の異なるマイクロニードルに、皮膚への刺入時にかかる荷重と同等の先端荷重を加えた際の応力分布を、有限要素法シミュレーション(COMSOL Multiphysics 5.5)により解析した。全長 2 mm のマイクロニードルの根元部分の直径を 150 ~ 500 µm で変化させてニードルの応力分布を解析した。材料には poly(L-lactide) (PLLA)を用い、ヤング率 : 2.4 GPa、密度 : 1.26 g/cm^3、ポアソン比 : 0.34、降伏応力 : 73.2 MPa と設定した[3]。Fig.1 に直径 150, 170, 200 µm のニードル先端に 200 mN を、マイクロニードルの軸方向から 5° 傾いた方向から加重した際の応力分布を示す。ニードル直径を大きくすると、根元部分の応力集中が軽減されることが分かる。Fig.2 には Fig.1 と同じ条件で加重した際の塑性ひずみ分布を示す。材料の降伏応力を超える応力がニードルにかかった場合には塑性ひずみが生じる。塑性ひずみ分布から、塑性ひずみが生じない直径の臨界値は約 180 µm と見積もられた。

以上の有限要素法シミュレーションによる解析結果はニードル直径の変化による根元部の応力分布、塑性ひずみ分布への影響を明らかにし、高分子材料製マイクロニードルの設計指針を与える重要な知見である。

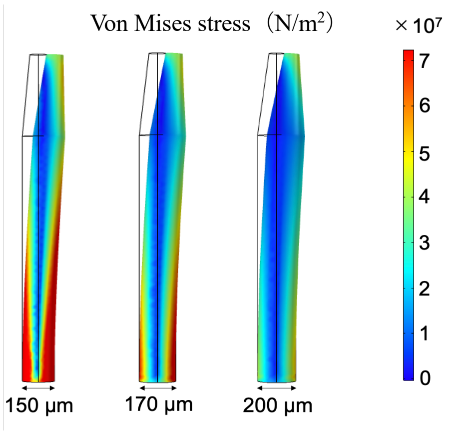

Figure 1 Stress distribution when 200 mN is applied to the tips of 150, 170, and 200 µm diameter needles from a direction inclined 5° from the axial direction of the needles.

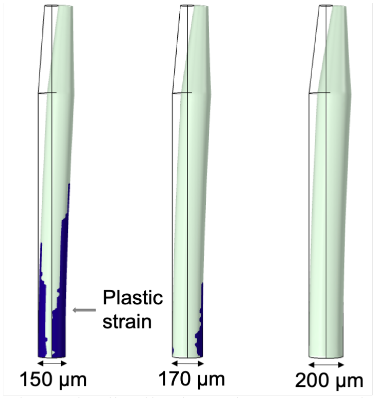

Figure 2 Plastic strain distribution when 200 mN is applied to the tips of 150, 170, and 200 µm diameter needles from a direction inclined 5° from the axial direction of the needles.

【参考文献】

[1] Azmana, M, *et al.*, J. Drag Deliv. Sci. Technol., **60**, 101877, 2020.
[2] E. Kim, *et al.*, EBioMedicine, 102743, 2020.
[3] Y. Kanda, *et al.* Jpn. J. Appl. Phys., **58**, SDDK05, 2019.