

日本生物物理学会学生発表賞を受賞して

物性理論研究部門 野口研究室 博士課程2年 山本 哲也

私は2025年9月に奈良県コンベンションセンターで開催された「第63回日本生物物理学会」にて日本生物物理学会学生発表賞を受賞しました。この賞は、応募書類と学会当日に実施された英語口頭発表を基に審査され、その中で優秀な発表を行った学生に授与されるものです。私はこのような栄誉ある賞を頂けたことを光栄に思っています。日頃よりご指導いただいている野口先生および共同研究者のDmitry Fedosov先生(ユーリッヒ研究センター)、また、様々な助言を頂いた野口研助教の中野さんに感謝申し上げます。

受賞対象となった発表は「Simulation of oxygen diffusion in blood flow (邦題: 血流中の酸素の拡散のシミュレーション)」です。肺で取り込まれた酸素は血液の主成分である赤血球によって体内の細胞組織に運搬されます。この際、赤血球内部に溶解していた酸素が拡散によって赤血球の外に移動し、血管壁に吸収されたのち細胞組織に至ります。本研究では、物性研スパコン・システムBを主に使い、一連の拡散現象をシミュレーションしました。

一般的に流体計算では空間を格子状に区切って連続の式を解いていきますが、血液のシミュレーションでは赤血球が大きく変形しながら動くため、そのような方法が難しくなります。共同研究者のFedosov先生の研究グループは、SDPD (smoothed dissipative particle dynamics)[1]という数値計算手法をもとに、多数の動く粒子で血液を構成するモデルを開発してきました。本研究ではそのモデルを用いて粒子の運動を追跡しつつ、粒子間で拡散方程式を並行して解くことで、移流および拡散によって酸素が赤血球内部から細胞組織に至るまでの過程を再現しました。

本研究は、まず、二次元系でシミュレーションを行い、計算コストを抑えつつ赤血球や酸素拡散の定性的な振る舞いを確認するところから始めました。その後、酸素の拡散係数と血流の速さの違いだけで赤血球内外の領域を分けるという大胆な近似を採用し、空間を格子状に区切った二次元系で移流拡散方程式を解くシミュレーションを行いました。これら粒子モデルと格子モデルで酸素の濃度分布を測定し、同様の分布が得られることが分かったため、これらのモデルをどちらも三次元の円柱座標系に拡張しました。

さらに、それまでは血管壁における境界条件を以て細胞組織での酸素消費を再現していましたが、この境界条件の妥当性を検証するため、細胞組織も含めたシミュレーションを行いました。これらの一連のモデルを用いて酸素の濃度分布を測定・比較したことで、最も複雑かつ計算コストの高い「細胞組織を含めた血液の粒子モデル」を、最も単純かつ計算コストの低い「細胞組織を境界条件で置換した血液の格子モデル」に簡略化しても、血液中における酸素の拡散現象が正しく再現されることを示しました。従来の理論・数値モデルは上記のものと同様な近似を伴うものが多いため、本研究の成果はそれらのモデルに一定の裏付けを与えるものでもあります。

今後は、血管の太さや流れの速さなどのパラメータを変えて様々な条件下でシミュレーションを実施することで、最も複雑なモデルでなければ酸素の拡散を再現できない条件を探索したいと考えています。粒子シミュレーション上で拡散方程式を解くなど本研究ならではの難しさがある中、研究を支えていただいた野口先生、Fedosov先生、中野助教には改めてお礼申し上げます。

参考文献:

- [1] K. Müller et al. *J. Comput. Phys.* **281**, 301-315 (2015).

