2A2-C1 血液ガス反応を組み込んだ数値流体解析手法による人工肺内ガス層濃度変化が血中酸素・二酸化炭素濃度分布に与える影響の検討

A study of concentration change's effects in the gas layer on O_2 and CO_2 concentration distributions in the blood layer in an oxygenator using CFD method with blood-gas reactions

○ 片桐伸将*, 舟久保昭夫**, 築谷朋典**,

巽 英介**, 妙中義之**, 本間章彦**, 福井康裕***,

*国立循環器病センター研究所人工臓器部(医療機器センター),

国立循環器病センター研究所人工臓器部, *東京電機大学理工学部電子情報工学科

Nobumasa KATAGIRI, Dept. of Artificial Organs, National Cardiovascular Center Research Institute (JAAME).

**Tomonori TSUKIYA, Eisuke TATSUMI, Yoshiyuki TAENAKA, Akihiko HOMMA, Dept. of Artificial Organs,

National Cardiovascular Center Research Institute,

***Akio FUNAKUBO, Yasuhiro FUKUI, Dept. of Electronic Computational Engineering, Tokyo Denki University

【はじめに】外部灌流中空系膜型人工肺では、中空系の充填体が複雑な血液流れ場を形成している。さらに血液層のガス移動が非線形なヘモグロビンとの化学反応を伴っている。このため、人工肺のガス交換性能予測が困難となり、開発は試行錯誤によるところも多い。この問題に対し、最近ではコンピュータによる数値流体解析手法を用いた血液層流れの解析結果から、間接的にガス交換性能を検討する試みも行われている。しかしながら、反応を伴う血液層のガス濃度分布や、ガス層濃度変化の影響も大きく受けると考えられる炭酸ガス移動を推定し得る数値流体解析手法は確立されていない。我々は、血液ガス反応を組み込み、ガス層と血液層を連立解析する数値流体解析手法を考案し、人工肺内のガス移動現象の数値計算を試みている。本検討では、ガス流路を含む中空系束をモデル化し、ガス層濃度変化が血液層濃度分布に与える影響について検討した。

【方法】参考人工肺は、内径165 μm 、外径225 μm 、長さ95 mmの中空系膜を、幅58 mmのシート状に並行配糸した後、シートを血流方向に対し直交する方向に積層配置することで厚み30 mmの長方状中空系束を形成している。本検討では、人工肺内の血流は一概と仮定し、参考人工肺の血液主

流方向長さ5.2 mm、ガス主流方向長さ10 mmの一部を模擬した。形状は千鳥配置された円筒状の中空系膜からなり、円筒内部をガス層、外部を血液層とした(Fig.1)。血液およびガスの流入条件は、参考人工肺で血流量(Q)=1 L/min、血液ガス流量比(V/Q)=1として使用した際の血液層およびガス層の初期流速条件を与えた。流入血液性状は人静脈血値を参考にした。解析には、市販ソフト Star-CD(Star-CD Japan)を用いた。本手法ではヘモグロビンと O_2 ・ CO_2 との反応成分と膜透過成分を O_2 ・ CO_2 の質量濃度の関数としてモデル化し、物質移動支配方程式の生成項として組み込むプログラムを作成することにより、数値解析を行った。

【結果】Fig.2に中空系膜軸方向に対する血液層流出部の濃度解析結果を示した。 O_2 ・ CO_2 濃度は、ガス層流入部側でそれぞれ582.8 mmHg、7.0 mmHg、ガス層流出部側でそれぞれ381.4 mmHg、45.0 mmHgであった。血液層流出部の O_2 ・ CO_2 濃度分布は、いずれもガス層流入部から流出部にかけて明らかに変化していた。特にガス層と血液層間の濃度較差の小さい CO_2 濃度分布は、ガス層流出側で平衡状態に近付いていた。

Fig.1 Referred oxygenator was consisted of a rectangular fiber bundle (Top). A Fiber bundle model was composed of a blood passage among staggered hollow fibers (Bottom).

Fig.2 Both of O_2 concentration (Left) and CO_2 concentration (Right) at the blood outlet of this model changed non-linearly in direction of primary gas flow.

【まとめ】本数値解析手法により、人工肺の部分的な解析結果から、ガス層濃度変化による血液層濃度分布への影響が推察できた。本手法にて濃度分布やガス層の影響を考慮することにより、今後の人工肺設計に寄与し得る可能性が示された。