

要約

論文題目

Measurement and Control of Plasma Skimming and its Application to the Bioengineering System

(プラズマスキミングの計測と制御および生体工学システムへの応用)

論文要約

本学位論文は、遠心血液ポンプのスパイラルグループ動圧軸受におけるプラズマスキミング現象を新たに考案したヘマトクリット値計測法によって定量評価することで、軸受隙間内で本現象が生じることを初めて明らかにした。また、プラズマスキミングをスパイラルグループ動圧軸受で起こすことで、血液ポンプの軸受隙間における赤血球破壊(溶血)を低減できる可能性を示したものである。本論文は、以下の5つの章より構成されている。

第1章の序論では、本研究の背景として生体内のプラズマスキミングを説明し、プラズマスキミングの応用例であるマイクロ流体デバイスおよび血液ポンプの説明をしている。生体内の微小血管では、赤血球の軸集中流れによって血管壁側に血漿層が形成される。この血管からさらに細い血管が分岐する際、分岐後の細い血管内ヘマトクリット値が分岐前の微小血管内ヘマトクリット値よりも減少する現象がプラズマスキミングである。この現象を血液ポンプの軸受隙間に応用することで、高剪断応力が生じる数十マイクロメートルの軸受隙間における溶血を低減できないかと提唱されてきた。しかし、軸受隙間を流れる血液のヘマトクリット値を求める方法がなく、血液ポンプの軸受隙間内でプラズマスキミングが生じるかは明らかではなかった。本研究では、遠心血液ポンプを用いてスパイラルグループ動圧軸受のプラズマスキミングを調査することを目的とした。本目的を達成するために、まず軸受隙間内を流れる血液のヘマトクリット値を算出する新たな手法を確立し、ハイスピードマイクロスコープとレーザ焦点変位計を用いたプラズマスキミング評価システムの構築を行った。次に、遠心血液ポンプのスパイラルグループ動圧軸受内におけるプラズマスキミングのパラメータ研究を行い、最後にプラズマスキミングと血液ポンプの溶血特性との関係評価を行っ

た.

第 2 章では、軸受隙間内の赤血球をマイクروسコープで観察する場合を想定し、軸受隙間内を平面で見た際の赤血球占有率、赤血球の平均赤血球容積、軸受隙間および赤血球断面積からヘマトクリット値を算出する手法を提案した。本手法の妥当性を評価するため、基礎実験装置を用いた評価試験を行った。試験血液にはヘマトクリット値を予め 0.2–1.0% に調整したウシ血液を用い、軸受隙間を 50 μm から 20 μm へ狭めた際の軸受隙間内の赤血球をマイクروسコープで撮影し、撮影画像より軸受隙間内のヘマトクリット値を算出した。その結果、赤血球占有率、平均赤血球容積、軸受隙間およびモデル化した赤血球の円形幾何断面積より、50 μm 以下の軸受隙間内の 1.0% 以下のヘマトクリット値を算出できることが分かった。

第 3 章では、軸受山側のヘマトクリット値が作動流体のヘマトクリット値よりも減少することを軸受隙間内のプラズマスキミングの定義とし、軸受隙間、平均赤血球容積、観察位置およびポンプ流量を評価パラメータとした。ハイスピードマイクروسコープとレーザ焦点変位計を用いて、本ポンプの下面側のスパイラルグループ軸受の溝側と山側を流れる赤血球観察およびポンプ下面隙間の計測を行った。作動流体には、ヘマトクリット値が 1.0% のヤギ、ヒツジ、ウシ、ブタおよびヒト血液をそれぞれ使用した。実験結果から、第 2 章で確立した算出法を用いて、軸受山側のヘマトクリット値を算出した。その結果、軸受隙間の減少に伴って軸受山側のヘマトクリット値が作動流体のヘマトクリット値(1.0%)よりも減少し、プラズマスキミングが生じることを初めて明らかにした。また、平均赤血球容積に相関して軸受隙間内のプラズマスキミングは生じやすくなることが分かった。さらに、軸受隙間が 40 μm 以下では軸受内側よりも軸受外側の方がプラズマスキミングは生じやすいことが分かり、約 3.4–5.4 L/min の範囲のポンプ流量には影響を受けないことが分かった。本結果より、スパイラルグループ動圧軸受のプラズマスキミングは、軸受隙間を平均赤血球容積の三乗根で規格化した相対隙間の減少によって起きるものと考えられた。

第 4 章では、プラズマスキミングが溶血特性に与える影響を評価するため、in vitro 溶血試験を行った。作動流体にはヘマトクリット値が 1.0% のウシ血液を使用し、回転数を 2,000 rpm から 3,000 rpm の範囲で変えることでプラズマスキミ

ング効率を約 0%から 100%まで変更した。試験時間は各回転数でそれぞれ 2 時間とした。溶血試験結果より、プラズマスキミングが生じていない回転数 2,000 rpm の結果で規格化した相対溶血比は、2,250 rpm で 2.1 倍、2,800 rpm で 6.0 倍、3,000 rpm で 8.9 倍となった。溶血量は剪断応力と暴露時間に相関することが報告されている。下面隙間を流れる赤血球の暴露時間は非常に短く無視できるものとし、観察位置における下面隙間の剪断応力から予測溶血比を推定した。その結果、実溶血比は予測溶血比よりも低く、プラズマスキミングによって溶血を低減できる可能性が示唆された。

最後に、第 5 章では本論文の結論および今後の展望について述べている。本論文ではスパイラルグループ軸受におけるプラズマスキミングを定量評価するために、ヘマトクリット値算出法を確立することで、遠心血液ポンプの軸受隙間内でプラズマスキミングが生じることを明らかにした。そして、プラズマスキミングを血液ポンプへ応用することで狭い隙間に起因した溶血を低減できる可能性が示唆された。これまで血液ポンプの研究はマクロ評価がほとんどであったが、本研究は血液ポンプにおけるマイクロ流体力学という新たな研究分野の可能性を示し、本学位論文はその先駆けと考えている。