

Spiral groove bearing design for improving plasma skimming in rotary blood pumps

東京科学大学工学院機械系

Jiang Ming, 土方 亘

Ming JIANG, Wataru HIJIKATA



1. 背景と目的

動圧浮上遠心血液ポンプは、血液そのものを潤滑剤として利用することでインペラを浮上支持する非接触型軸受を有している。この構造により、機械的接触に起因する摩耗や発熱を回避できる一方で、安定したインペラ浮上力を得るためには、軸受の隙間を数十マイクロン以下に設計する場合が多い。その結果、軸受隙間内では高せん断応力が発生し、溶血の発生が問題となる。

先行研究では、本来、生体内の微小血管分岐部において生じる赤血球・血漿分離(プラズマスキミング)現象が、動圧軸受の隙間内においても発生することが報告されている¹⁾。赤血球がより隙間の狭い動圧軸受の山部(ridge)から排除され、相対的に隙間の広い溝部(groove)へと誘導されることで、山部におけるヘマトクリットが減少する。その結果、高せん断応力領域における赤血球曝露が抑制され、溶血リスクを低減できる可能性が示唆されている²⁾。

しかしながら、従来の動圧軸受設計では、動圧浮上性能の向上を目的とする設計指針が主流であり、赤血球・血漿分離現象を溶血対策として積極的に活用し、その分離効率の向上を設計目標として形状最適化を行った研究は、これまで報告されていない。

このような背景から本研究では、まず動圧軸受内における赤血球・血漿分離効率を高めるための設計方針を明確化

し、その方針に基づいて、赤血球・血漿分離効率の向上と十分な動圧浮上力の両立を可能とする最適スパイラルグループ軸受(spiral groove bearing, SGB)設計手法を提案し、実験的にその有効性を検証することを目的とする。

2. 方法

著者らはこれまでに、SGBにおいて、軸受の山部とインペラ間の隙間内に流れる赤血球の流向と、スパイラル溝部形状の接線方向を一致させることで、赤血球・血漿分離効率が向上することを報告している³⁾。本研究では、これらの先行研究で得られた知見を設計指針として、SGB形状の最適化および実験的検証を行った。

まず、設計した実験用回転血液ポンプ装置を用い、軸受山部の隙間内における血流を高速度カメラにより可視化し、赤血球の流れる方向ベクトルを実測した。得られた血流情報に基づき、赤血球・血漿分離効率の向上を目的として、スパイラル溝部の形状を生成するための仮想粒子の目標ベクトル場を定義した。

次に、各半径位置において、前述した目標のベクトル場と生成されるベクトル場のなす角をSGB形状の設計パラメータと定義し、遺伝的アルゴリズムを用いた形状最適化を行った。最適化における目的関数は、赤血球・血漿分離効果を反映する項、軸受として必要な動圧浮上力を評価する項、および滑らかなスパイラルを生成するための項から構成されている。さらに、生成した各溝形状に対して、Reynolds方程式に基づく数値解析により浮上力を評価し、赤血球・血漿分離効率と動圧浮上性能の両立が可能な最適SGB形状を探索した。

その後、最適化により得られたSGB形状を製作し、実験用回転血液ポンプに実装した。図1に示す実験では、回転速度2,400~3,000 rpm、ヘマトクリット1~40%の条件下

本受賞レポートの対象論文はJ Artif Organs誌に掲載されています。Jiang M, Hijikata W. J Artif Organs **27**: 212-21, 2024

■ 著者連絡先

東京科学大学工学院機械系

(〒152-8550 東京都目黒区大岡山2-12-1)

E-mail. jiang.m.889e@m.isct.ac.jp

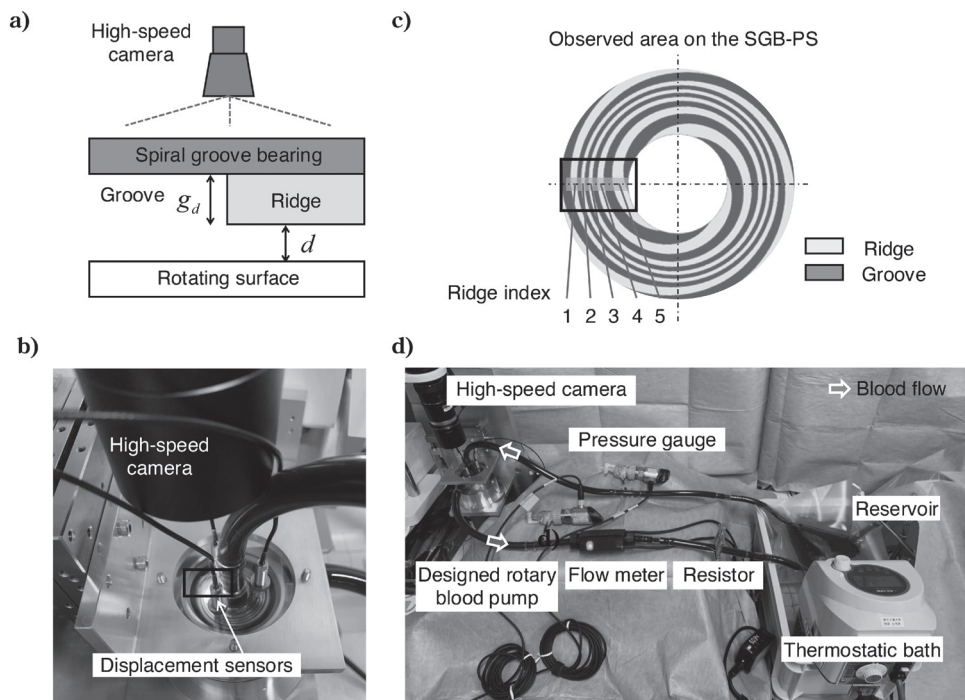


図1 赤血球・血漿分離現象の観察・測定システム

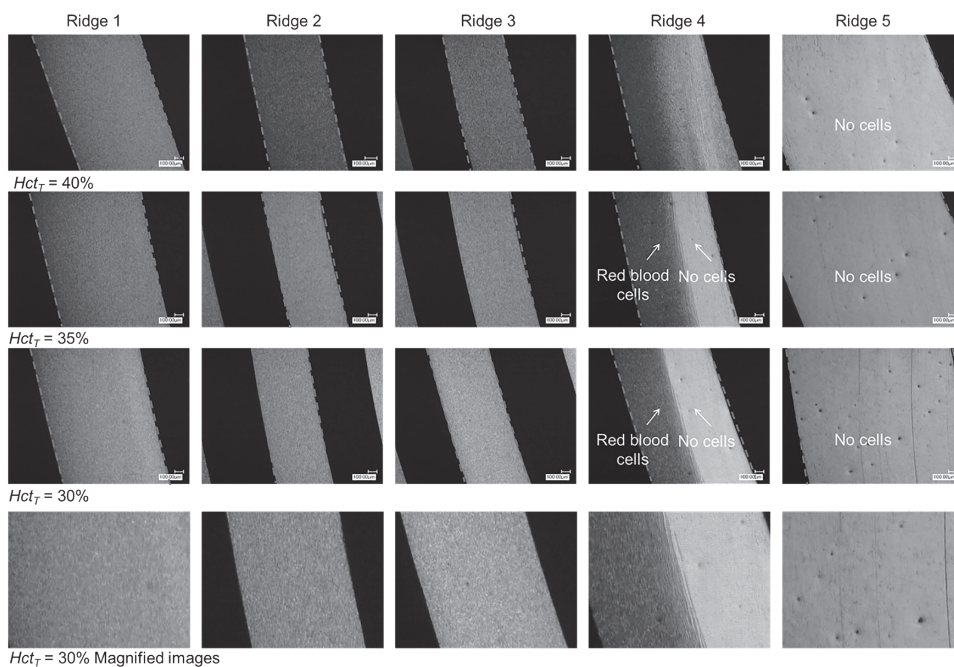


図2 赤血球・血漿分離効率の結果

で運転を行い、軸受内における赤血球・血漿分離現象を高速度撮影により可視化して分離効率を評価した。定量評価には、軸受山部の隙間におけるヘマトクリットと循環回路全体のヘマトクリットを比較する手法を用い、その比率から赤血球・血漿分離効率を算出した。

3. 結果

最適化したSGBでは、ヘマトクリット1%条件において全体で95%以上のプラズマスキミング効率が観測され、溝部および山部において赤血球が効果的に排除されていることが確認された。さらに、図2に示すように、高ヘマトク

リット条件(最大40%)においても, SGB内側の山部隙間では80%以上の赤血球・血漿分離効率が維持され, 改善された溝形状が幅広い血液条件下で有効であることが示された。加えて, 設計段階で評価したLCC(load carrying capacity)解析の結果から, 最適化したSGBはインペラを浮上させる動圧浮上力を満たしている。

4. まとめ

本研究は, 動圧浮上遠心血液ポンプにSGBの設計において, 赤血球・血漿分離を目的とした溝形状を, 山部に流れる赤血球の流向に基づいて設計するという新たな設計指針を提案し, 実験的にその有効性を実証した。従来は動圧浮上性能の向上を中心としていたSGBの設計アプローチに対し, 赤血球・血漿分離効率の向上を設計目標として導入することで, 溶血リスクが低減できる動圧浮上遠心血液ポンプの開発に寄与する。

5. 独創性

山部における赤血球の流向とSGB形状を一致させることで, 赤血球・血漿分離現象を意図的に制御する設計指針は, SGB設計分野において未報告のアプローチである。

本稿のすべての著者には規定されたCOIはない。

文献

- 1) Murashige T, Sakota D, Kosaka R, et al: Plasma Skimming in a Spiral Groove Bearing of a Centrifugal Blood Pump. *Artif Organs* **40**: 856-66, 2016
- 2) Sakota D, Kondo K, Kosaka R, et al: Plasma skimming efficiency of human blood in the spiral groove bearing of a centrifugal blood pump. *J Artif Organs* **24**: 126-34, 2021
- 3) Jiang M, Sakota D, Kosaka R, et al: Analysis of Plasma Skimming within a Hydrodynamic Bearing Gap for Designing Spiral Groove Bearings in Rotary Blood Pumps. *Annu Int Conf IEEE Eng Med Biol Soc* **2021**: 1213-7, 2021