

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 13 日現在

機関番号：32689

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420087

研究課題名(和文)血液密封用メカニカルシールのもれ量最少化を目指した設計

研究課題名(英文) Design aimed at minimizing the leakage amount of the mechanical seal for blood sealing

研究代表者

富岡 淳 (Tomioka, Jun)

早稲田大学・理工学術院・教授

研究者番号：40217526

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、血液シール下特有の潤滑特性を解明することで、人工心臓用メカニカルシールのしゅう動面からのもれ量を最少化する設計指針を得ることを目的とした、まず、新しいもれ量測定法を用いて、血球成分および血漿成分それぞれのもれ特性を明らかにした。さらに、平行なしゅう動面間における新しい平均流モデルを確立した。最後に、新しい平均流モデルを用いたメカニカルシールの潤滑特性解析手法を確立した。実験結果と理論解析を比較することによって、本解析手法の妥当性を検討した。

研究成果の概要(英文)：Design aimed at minimizing the leakage amount of the mechanical seal for the rotary blood pump is revealed in this study. Firstly, each leakage characteristics of blood cell components and plasma components are revealed with the new measurement method. Each leakage characteristics is found out in detail by changing the hematocrit of the sealed blood. Secondly, the average flow model in the parallel sealing faces to provide stochastically the design guide for the surface roughness distribution on the sealing faces is proposed. The effects of the statistical properties of the surface roughness distribution on the flow factors are also found out. Finally, the lubrication characteristics of the mechanical seal considering the surface roughness effects are shown with the new average flow model. In addition, the analytical results are compared to the experimental results.

研究分野：トライボロジー

キーワード：メカニカルシール 人工心臓 血液 もれ特性

1. 研究開始当初の背景

長期的な左心室機能補助を目的とした定常流型人工心臓は、拍動型と比較して、小型でポンプ効率が高く、また複雑化の要因となる弁が不要であるなど、多くの長所があるため、国内でいち早く実用化されている。しかしその一方で、回転軸の軸シール問題を解決することが不可欠である。著者らはこれまでに、軸シール問題の解決策として、軸シール部の潤滑・洗浄・冷却を目的としたクーリングウォータ循環機能を搭載したメカニカルシールを開発してきた。また、これを遠心型の人工心臓に適用し、その性能をメカニカルシール単体ではなく、動物実験をも行って評価してきた。

しかし、このメカニカルシールの性能評価において、軸シール性能を大きく左右すると思われるしゅう動面からのもれ量に関しては、十分な検討がなされず、純水シール下における経験値が採用されていた。近年、著者らは、純水シール下と血液シール下では潤滑状態が大きく異なることを見出した。具体的には、

)人工心臓用メカニカルシールは、純水シール下では流体潤滑で運転されていたが、血液シール下では混合潤滑状態で運転された。

)血液シール下では、純水シール下と比較して密封液(血液)のもれ量が大きく低下した。

このような結果は、血液の特性、特にしゅう動面での振舞いが潤滑特性に影響していることを示唆しており、人工心臓用メカニカルシールにおける血液シール下特有の潤滑特性を明らかにし、しゅう動面の設計に生かそうとする本研究の着想に大きく関与している。

血液は、赤血球や白血球などの数 μm オーダーの有形物のほか、たんぱく質成分や各種イオン成分など非常に多くの成分からなる

流体であり、非ニュートン性を示す。しかしながら、血液の非ニュートン性は、未だ正確には解明されておらず、人工心臓用メカニカルシールの潤滑特性を解明するためには、理論的、実験的にさらなる詳細な検討が不可欠である。現在、この非ニュートン性に起因して、低速運転中に回転不安定性が報告されており、軸シールの潤滑問題の解明は急務である。また、メカニカルシールのしゅう動面間は数 μm 程度と非常に狭いことから、しゅう動面に血液がどのように存在しているか、どのように血液のもれやクーリングウォータのもれが生じるのかなどは明らかになっていない。

このような背景のもと、人工心臓用メカニカルシールでは、しゅう動面間における血液の特性を考慮してその潤滑特性の解明を行い、しゅう動面の設計を行うことが求められている。この問題を解決することで、定常流型人工心臓のさらなる小型化、高効率化、超寿命化が期待でき、メカニカルシールのしゅう動面からのもれ量を最少化する設計指針を得ることが重要となってきた。

2. 研究の目的

本研究では、血液シール下特有の潤滑特性を解明することで、人工心臓用メカニカルシールのしゅう動面からのもれ量を最少化する設計指針を得ることを目的とする。具体的には、

(1) 新しいもれ量測定法を用いて、血球成分および血漿成分それぞれのもれ特性を明らかにする。新しいもれ量測定法は、血液が血球成分および血漿成分から構成されることを考慮する。

(2) 平行なしゅう動面間における新しい平均流モデルを確立する。平均流モデルは、しゅう動面における表面粗さの影響を流量係数に集約し、表面粗さ分布を考慮した潤滑特性解析を行うためのモデルである。

(3) 新しい平均流モデルを用いたメカニカルシールの潤滑特性解析手法を確立する。従来の平均流モデルを用いる場合と比較することによって、本解析手法の有効性を検討する。しゅう動面の表面粗さをパラメータとして、人工心臓用メカニカルシールのしゅう動面からのもれ量を最少化する設計について考察する。

3. 研究の方法

本研究では、以下の方法で研究を行う。

(1) 新しいもれ量測定法を用いて、血球成分および血漿成分それぞれのもれ特性を明らかにする。新しいもれ量測定法は、血液が血球成分および血漿成分から構成されることを考慮している。また、摩擦特性および密封血液の溶血特性を明らかにし、もれ特性との関係を検討することによって、血液のもれ現象のメカニズムについて考察する。

(2) 平行なしゅう動面間における新しい平均流モデルを確立する。平均流モデルは、しゅう動面における表面粗さの影響を流量係数に集約し、表面粗さ分布を考慮した潤滑特性解析を行うためのモデルである。しゅう動面における表面粗さ分布の設計指針を確率論的に得ることができるが、従来の平均流モデルは、しゅう動面が平行なメカニカルシールに適用しても表面粗さの影響を十分に評価することができなかった。本研究においては、新しい流量係数を定義することによってこの課題を解決する。また、表面粗さ分布における統計的性質が流量係数に及ぼす影響を示す。

(3) 新しい平均流モデルを用いたメカニカルシールの潤滑特性解析手法を確立する。従来の平均流モデルを用いる場合と比較することによって、本解析手法の有効性を検討する。また、表面粗さ分布の統計的性質がメカニカルシールの潤滑特性に及ぼす影響を示す。さらに、実験結果との比較を行う。

4. 研究成果

本研究では、以下の研究成果を得た。

(1) もれ特性測定実験において、血液が血球成分と血漿成分から構成されることを考慮した新しいもれ量測定法を確立した。新しいもれ量測定法を用いることによって、血球成分および血漿成分それぞれのもれ量を明らかにした。まず、実験は、定常流型補助人工心臓の運転条件に基づいて、回転数を変化させて行った。また、密封血液のヘマトクリット値を変化させることによって、血球成分および血漿成分それぞれのもれ特性を詳細に明らかにした。ヘマトクリット値がもれ特性、摩擦特性および密封血液の溶血特性に及ぼす影響を明らかにし、これらが相互に及ぼしあう影響を検討することによって、血球成分のもれと密封血液の溶血には密接な関係があることを示した。

(2) しゅう動面における表面粗さ分布の設計指針を確率論的に得るために、平行なしゅう動面間における平均流モデルを提案した。従来の平均流モデルにおける流量係数の定義は、メカニカルシールの運転条件に適していなかった。そこで、新しい平均流モデルにおいては、側方もれに関するせん断流量係数および粗面の相対運動によって付加的に生じる流体膜圧力の期待値を表す修正係数を新しく定義した。また、表面粗さ分布の統計的性質が流量係数に及ぼす影響を明らかにした。ここでは、表面粗さ分布における自乗平均粗さ、歪みおよび尖りの定義を示した。数値計算によって任意の統計的性質をもつ表面粗さ分布を作成し、統計的性質を表すそれぞれのパラメータが表面粗さ形状に及ぼす影響を明らかにした。また、流量係数、流体膜圧力の修正係数およびその他の係数の算出法を述べた。これらの係数は、等しい統計的性質をもつ表面粗さ分布をパラメータとした平均値として求められるが、側方もれ

に関するせん断流量係数および流体膜圧力の修正係数は平均値に対して係数のばらつきが無視できないほど大きいことが明らかにした。また、表面粗さ分布における自乗平均粗さ、歪みおよび尖りの値が流量係数および流体膜圧力の修正係数に及ぼす影響を検討し、表面粗さ形状とこれらの係数の関係について考察した。

(3) 上述で提案した平均流モデルを用いて、しゅう動面のすきまの大きさ、もれ量および摩擦係数を求めるメカニカルシールの潤滑特性解析手法を確立した。これらの潤滑特性の解析結果を従来の平均流モデルを用いる場合と比較し、本解析手法の有効性を検討した。また、側方もれに関するせん断流量係数および流体膜圧力の修正係数のばらつきがメカニカルシールの潤滑特性に及ぼす影響が検討した。さらに、実験結果との比較も行った。

以上より、定常流型人工心臓用メカニカルシールのしゅう動面からのもれ量を最小化する設計指針を得た。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計4件)

(1) Jun TOMIOKA, Mikiko OYABU, Norifumi MIYANAGA, Effects of Hematocrit of the Sealed Blood on the Leakage Characteristics of Blood Cell Component and Plasma Component in a Mechanical Seal, Tribology Online, 査読有, Vol.11(5), pp568-574, 2016-09

(2) Mikiko OYABU, Jun TOMIOKA, An Analysis of the Lubrication Characteristics of Mechanical Seals with Parallel Sealing Faces Using an Average Flow Model, Key Engineering Materials, 査読有, Vol.656-657, pp615-621, 2015-07

(3) 富岡淳, 大藪美貴子, 福井康平, 齋藤健斗, 宮永宜典, 血液密封下のメカニカルシ

ールにおける血漿成分および血球成分の漏れ量測定方法の提案, 設計工学, 査読有, Vol.50(4), pp194-199, 2015-04

(4) Jun TOMIOKA, Norifumi Miyanaga, Effect of Surface Roughness of Mechanical Seals for Rotary Blood Pumps under Blood Sealing, Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, 査読有, Vol.8(1), DOI: 10.1299/jamdsm.2014jamdsm0006, 2014-03

〔学会発表〕(計14件)

(1) 富岡淳, 大藪美貴子, 湯沢央恵, 星野元季, 宮永宜典, 密封血液のヘマトクリット値がメカニカルシールの潤滑特性に及ぼす影響, 日本設計工学会 2016 年度春季大会研究発表講演会講演論文集, 東京工業大学大岡山キャンパス, 東京都, pp171-174, 2016-05

(2) Jun Tomioka, Mikiko Oyabu, Norifumi Miyanaga, Effects of Hematocrit of the Sealed Blood on the Leakage Characteristics of Blood Cell Component and Plasma Component in a Mechanical Seal, International Tribology Conference, TOKYO 2015, 東京理科大学葛飾キャンパス, 東京都, pp817-818, 発表番号 20aG-08, 2015-09-16 ~ 20 (in USB memory)

(3) 富岡淳, 大藪美貴子, 福井康平, シール面内側と外側の圧力差および圧力和が人工心臓用メカニカルシールの潤滑特性に及ぼす影響, 日本設計工学会 2015 年度春季研究発表講演会講演論文集, 日本大学理工学部船橋キャンパス, 千葉県, pp71-74, 2015-05

(4) 富岡淳, 大藪美貴子, 荻島和也, 山口亮, 宮永宜典, 密封血液のヘマトクリット値がメカニカルシールにおける血球成分および血漿成分の漏れ特性に及ぼす影響, 日本設計工学会 2015 年度春季研究発表講演会講演論文集, 日本大学理工学部船橋キャンパス, 千葉県, pp129-132, 2015-05

(5) 大藪美貴子, 富岡淳, しゅう動面における表面粗さ分布の統計的性質がメカニカルシールの潤滑特性に及ぼす影響の理論的検討, 日本機械学会北陸信越支部第 52 期総会・講演会講演論文集(No.157-1), 新潟工科大学, 柏崎市, 1002, 2015-03 (in USB Memory)

(6) 富岡淳, 大藪美貴子, 宮永宜典, 血球成分が血液密封下におけるメカニカルシールの漏れ量に及ぼす影響, 日本機械学会北陸信越支部第 52 期総会・講演会講演論文集(No.157-1), 新潟工科大学, 柏崎市, 1003, 2015-03 (in USB Memory)

(7) 富岡淳, 大藪美貴子, 福井康平, 齋藤健斗, 宮永宜典, 血液密封下のメカニカルシールにおける血漿成分および血球成分の漏れ特性, トライボロジー会議 2014 秋盛岡予稿集, アイーナいわて県民情報交流センター, 盛岡市, pp200-201, 2014-11

(8) 大藪美貴子, 富岡淳, 平均流モデルを用いたメカニカルシールの潤滑特性解析(第 3 報, 表面粗さ分布における尖りの影響), 日本設計工学会 2014 年度秋季研究発表講演会講演論文集, 山形大学工学部, 山形市, pp151-154, 2014-10

(9) 富岡淳, 大藪美貴子, 福井康平, 齋藤健斗, 宮永宜典, 血液密封下のメカニカルシールにおける血漿成分および血球成分の漏れ量測定方法の提案, 日本設計工学会 2014 年度秋季研究発表講演会講演論文集, 山形大学工学部, 山形市, pp175-178, 2014-10

(10) Mikiko OYABU and Jun TOMIOKA, An Analysis of the Lubrication Characteristics of Mechanical Seals with Parallel Sealing Faces Using an Average Flow Model, 2014 Machining, Materials and Mechanical Technology (IC3MT), NTUH International Convention Center, Taipei, Taiwan, pp41, 講演番号 422, 2014-09 (31 August-5 September 2014)

(11) 大藪美貴子, 富岡淳, 平均流モデルを用

いたメカニカルシールの潤滑特性解析(第 2 報, 表面粗さ分布における歪みの影響), 日本設計工学会中国支部講演会論文集 No.31, 広島工業大学広島校舎, 広島, pp11-16, 2014-06

(12) 富岡淳, 大藪美貴子, 稲村健太, 宮永宜典, 赤血球の固定化が血液のレオロジー特性および溶血特性に及ぼす影響, 日本設計工学会 2014 年度春季研究発表講演会講演論文集, 明治大学中野キャンパス, 東京都, pp19-20, 2014-05

(13) 大藪美貴子, 富岡淳, 平均流モデルを用いたメカニカルシールの潤滑特性解析(第 1 報 解析方法の提案), 日本設計工学会 2014 年度春季研究発表講演会講演論文集, 明治大学中野キャンパス, 東京都, pp25-28, 2014-05

(14) 富岡淳, 大藪美貴子, 内田恒, 齋藤健斗, 菅野剛史, 宮永宜典, 電気伝導計とイオンクロマトグラフィを用いた血液密封用メカニカルシールの密封特性, 日本設計工学会 2014 年度春季研究発表講演会講演論文集, 明治大学中野キャンパス, 東京都, pp89-92, 2014-05

6. 研究組織

(1) 研究代表者

富岡 淳 (Jun Tomioka)

早稲田大学・理工学術院・教授

研究者番号: 40217526

(2) 研究分担者

宮永 宜典 (Norifumi Miyanaga)

関東学院大学・理工学部・准教授

研究者番号: 00547060