

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 6 月 15 日現在

機関番号：32689

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06127

研究課題名(和文) 新しい平均流モデルを用いた人工心臓用メカニカルシールの血液密封特性の解明

研究課題名(英文) Blood sealing characteristics of mechanical seals for rotary blood pumps using a new mean flow model

研究代表者

富岡 淳 (Tomioaka, 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) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：しゅう動面における表面粗さは、メカニカルシールの潤滑特性に大きな影響を及ぼす。表面粗さの影響を確率論的に考慮する平均流モデルは表面粗さの設計指針を得るのに適しているといえるが、平行なしゅう動面をもつメカニカルシールのように動圧の発生機構をもたない対象に適用しても表面粗さの影響を評価することはほとんどできない。そこで、しゅう動面が平行なメカニカルシールにおける平均流モデルを用いた潤滑特性の解析方法を提案した。次に、平均流モデルを用いて表面粗さ分布における二乗平均平方根粗さ、歪みおよび尖りがメカニカルシールの潤滑特性(液膜厚さ、流体膜の荷重分担割合、漏れ量、摩擦係数)に及ぼす影響を検討した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により得られる成果は、人工心臓という最先端技術の一端を担うことになるが、その一方で、未だその作動原理や評価法などが確立されていないメカニカルシール技術の底上げにも大きく貢献することが期待でき、その学術的意義は大きいといえる。

また、血液の漏れ特性を考慮したメカニカルシールしゅう動面の設計を行うことで、摩擦損失トルクや発熱、さらにはもれ量も最小限に抑え、人工心臓の更なる小型高性能化が可能となる。現在、大きさの制限から女性や子供への適用は難しいが、小型高性能化が進むことによって、適用範囲を広げることができる。これは社会的にも非常に意義のあることであるといえる。

研究成果の概要(英文)：In this study, lubrication performance of mechanical seals was analyzed by a modified average flow model. In this new model, considering variabilities of the shear flow factor for the side leak effects and the pressure correction factor enable to reveal the effects of surface roughness on flat parallel sliding surfaces. In addition, the influence of root mean square roughness, skewness and kurtosis in the surface roughness distribution on the lubrication characteristics (liquid film thickness, fluid film load sharing ratio, leak rate, friction coefficient) of mechanical seals were investigated using the new mean flow model.

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

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

申請者が開発中の定常流型補助人工心臓におけるメカニカルシールは、遠心ポンプの回転部と固定部のすきまから高圧側の血液がモータ側に漏れることを抑える役割をもつ。さらに、しゅう動面の外径側に血液を循環させる一方、しゅう動面の冷却・洗浄・潤滑を行うために、内径側にはクーリングウォータを循環させている。この機構によって、しゅう動面の摩擦による血液の溶血や凝固が抑えられ、定常流型補助人工心臓の安定運転が実現された。このように、定常流型補助人工心臓におけるシールしゅう動部の設計は、補助人工心臓自体の高性能化の鍵を握るといえる。

また申請者らは、しゅう動面における表面粗さが潤滑特性に影響を及ぼすことが実験的に明らかにしてきた。したがって、漏れ量および摩擦トルクをともに小さく抑えるために、表面粗さ分布の設計指針を明らかにすることが求められるが、表面粗さの影響を考慮した潤滑理論はいまだ確立されていない。さらに、表面粗さ分布における統計的性質(表面粗さ分布における「自乗平均粗さ」、「歪み」および「尖り」)が流量係数に及ぼす影響の検討を行った研究は見当たらない。

これまで、血液密封下のメカニカルシールの漏れ量および摩擦トルクが測定されてきたが、血液は物理的特性の異なる様々な成分によって構成されることが考慮されていなかった。このため、血液を単一の流体とみなした従来の漏れ量測定法を用いても、血液の漏れ現象のメカニズムを明らかにすることができなかった。

メカニカルシールのしゅう動面間にはサブミクロンオーダーの小さなすきまが存在し、すきまの大きさを適切にコントロールすることによって、血液の漏れおよびしゅう動面における摩擦をともに小さく抑えることが求められる。すきまの大きさは、多くの場合において未知であり、密封流体の特性や軸の回転数などの運転条件など様々な因子の影響を受ける。したがって、定常流型補助人工心臓におけるメカニカルシールの技術向上のためには、これらの因子の影響を考慮したメカニカルシールの潤滑理論を確立し、さらに、血液密封下特有のメカニカルシールの潤滑特性を明らかにする必要がある。

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ために、新しい平均流モデルを用いた人工心臓用メカニカルシールの血液密封特を明らかにし、シールしゅう動面の設計に関する設計指針を得ることを目的とする。

具体的には、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漏れ量測定法の確立を目指すとともに、表面粗さ分布における「自乗平均粗さ」、「歪み」および「尖り」を考慮した新しい平均流モデルを確立し、それに基づく流体潤滑特性解析手法を確立し、人工心臓用メカニカルシールの血液密封特性の解明を目指す。

また、理論解析と実験を比較検討することにより、提案した理論の妥当性を検証する。

3. 研究の方法

血液シール下における人工心臓用メカニカルシールのしゅう動面の潤滑特性を検討し、シールしゅう動面の設計指針を得るために、本研究では以下の方法で行う。

(1) 平行なしゅう動面間に対する新しい平均流モデルを確立する。

(2) 表面粗さ分布における統計的性質(表面粗さ分布における「自乗平均粗さ」、「歪み」および「尖り」)が流量係数に及ぼす影響を明らかにする。

(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。

4. 研究成果

本研究ではメカニカルシールに適用可能な修正平均流モデルを提案した。また、このモデルを用いてメカニカルシールの潤滑解析を行った。まず、表面粗さの確率密度関数が正規分布に従うと仮定して、表面粗さ分布の二乗平均平方根粗さ σ が、液膜厚さ h 、流体膜の荷重分担割合 Wh/F 、漏れ量 $Q/(ro^2)$ 、摩擦係数 μ に及ぼす影響を検討した結果、

二乗平均平方根粗さ σ が大きくなるにつれて、膜厚さ h は増加した。押付力 F が小さい方がこの傾向は顕著であった。

二乗平均平方根粗さ σ が大きくなるにつれて、流体膜の荷重分担割合 Wh/F は減少することがわかった。同じ σ で見ると、回転角速度 ω が大きい方が Wh/F は大きくなった。また、押付力 F が小さい方が Wh/F は大きくなった。

メカニカルシールの外径側に密封流体がある場合の漏れ量は、二乗平均平方根粗さ σ が大きくなるにつれて増加した。同じ σ で見ると、回転角速度 ω が小さい方が漏れ量 $Q/(ro^2)$ は多くなった。また、押付力 F が小さい方が漏れ量は多くなった。

摩擦係数 μ は、二乗平均平方根粗さ σ が大きくなるにつれて一定値 ($\mu=0.1$ 程度) に収束する傾向があった。一方、 σ が減少すると、一度摩擦係数は減少した後に増加に転じる傾向が見られた。回転角速度 ω によって、摩擦係数が最低値となる ω が異なることがわか

った。

次に、表面粗さ分布における歪みおよび尖りの値が異なる粗面をシミュレーションで数パターン作成し、これらの表面での流量係数を評価した。得られた流量係数を用いて、表面粗さ分布における歪みおよび尖りが、メカニカルシールの液膜厚さ、流体膜の荷重分担割合、漏れ量、および摩擦係数に及ぼす影響を検討した。

表面粗さ分布における歪み $Sk = -1.0, -1.5, -2.0$ について検討した結果、歪み Sk が小さくなるにつれて、膜厚さ h/l は減少し、流体膜力

の荷重分担割合 Wh/F は増加した。メカニカルシールの外径側に密封流体があると、漏れ量は $Sk = -1.5$ のときに最も小さくなった。また、摩擦係数 μ は、 Sk が小さくなるにつれて減少した。

表面粗さ分布における尖り $Ku = 5.0, 7.5, 10.0$ について検討した結果、尖り Ku が小さくなるにつれて膜厚さ h/l は減少し、流体膜力の荷重分担割合 Wh/F は増加した。漏れ量は $Ku = 5.0$ のときに最も大きくなった。また、摩擦係数 μ は Ku が小さくなるにつれて減少した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 富岡 淳、大藪 美貴子、湯澤 央恵、宮永 宜典	4. 巻 53
2. 論文標題 修正平均流モデルを用いたメカニカルシールの潤滑解析（第1報，二乗平均平方根粗さの影響）	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 設計工学	6. 最初と最後の頁 581～594
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.14953/jjsde.2017.2769	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 富岡 淳、大藪 美貴子、湯澤 央恵、宮永 宜典	4. 巻 53
2. 論文標題 修正平均流モデルを用いたメカニカルシールの潤滑解析（第2報，歪みと尖りの影響）	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 設計工学	6. 最初と最後の頁 595～604
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.14953/jjsde.2017.2770	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Tomioka Jun、Miyana Norifumi	4. 巻 113
2. 論文標題 Blood sealing properties of magnetic fluid seals	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Tribology International	6. 最初と最後の頁 338～343
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.triboint.2016.12.040	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Jun TOMIOKA, Mikiko OYABU, Kohei FUKUI, Kento SAITO, Norifumi MIYANAGA	4. 巻 53
2. 論文標題 A Proposal for the Measurement Method of Plasma Component Leakage and Blood Cell Component Leakage in Mechanical Seals under Blood Sealing	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 設計工学	6. 最初と最後の頁 251～260
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.14953/jjsde.2017.2754	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Jun Tomioka, Mikiko Oyabu, Nakae Yuzawa, Norifumi Miyanaga	4. 巻 22
2. 論文標題 Effects of Flow Factors Variabilities on Lubrication Characteristics of Mechanical Seals	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Jurnal Tribologi	6. 最初と最後の頁 49-60
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計7件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件)

1. 発表者名 富岡淳, 宮下和也, 畑中啓輔, 宮永宜典
2. 発表標題 血液密封用メカニカルシールにおけるクーリングウォータおよび密封溶液の漏れ特性とその潤滑特性
3. 学会等名 日本設計工学会2018年度春季大会研究発表講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Jun Tomioka, Mikiko Oyabu, Nakae Yuzawa, Norifumi Miyanaga
2. 発表標題 Influence of Variability of Flow Factors on Lubrication Characteristics of Mechanical Seals
3. 学会等名 the 6th Asia International Conference on Tribology (ASIATRIB 2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 富岡淳, 栗田悠平, 山本英美, 宮永宜典
2. 発表標題 密封血液中の血液抗凝固剤の存在の考慮とクーリングウォータ量を半減させた時のメカニカルシールの潤滑特性
3. 学会等名 日本設計工学会2017年度春季大会研究発表講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Norifumi MIYANAGA, Jun TOMIOKA
2. 発表標題 Calculations of Bearing Performance by using the Cavitation Algorithm
3. 学会等名 The 4th International Conference on Design Engineering and Science, ICDES 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 富岡淳, 大藪美貴子, 湯澤央恵, 宮永宜典
2. 発表標題 修正平均流モデルを用いたメカニカルシールの潤滑解析 (第1報, 二乗平均平方根粗さの影響)
3. 学会等名 日本設計工学会九州支部, 日本図学会九州支部2018年度研究発表講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 富岡淳, 大藪美貴子, 湯澤央恵, 宮永宜典
2. 発表標題 修正平均流モデルを用いたメカニカルシールの潤滑解析 (第2報, 歪みと尖りの影響)
3. 学会等名 日本設計工学会北陸支部平成30年度研究発表講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 富岡淳, 田邊絢子, 赤羽淳沙, 宮永宜典
2. 発表標題 軸方向水平加振が血液密封用メカニカルシールの潤滑特性に及ぼす影響
3. 学会等名 日本設計工学会2019年度春季大会研究発表講演会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担 者	宮永 宜典 (Miyanaga Norifumi) (00547060)	関東学院大学・理工学部・准教授 (32704)	