

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 17 日現在

機関番号：32689

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560171

研究課題名(和文)血液のレオロジー特性の同定と血液シール用メカニカルシールの表面粗さの設計

研究課題名(英文)Effect of the rheological properties of the blood and the surface roughness of the mechanical seals for rotary blood pumps

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) 4,200,000円、(間接経費) 1,260,000円

研究成果の概要(和文)：赤血球の変形能は血液のレオロジー特性に大きな影響を及ぼすとおもわれるので、赤血球を固定化することによってその変形能を奪い、血液のレオロジー特性および溶血特性を検討した。また、血液は有形成分と無形成分から構成され、血液密封用メカニカルシールにおける血液の漏れはいずれの成分か不明であるので、二通りの漏れ量測定を行い、血液密封用メカニカルシールの密封特性を検討した。メカニカルシールにも表面粗さを設計するために、二方向の流量を考慮した平均流モデルを提案する。また、しゅう動面が平行なメカニカルシールにも表面粗さによって圧力が生じることを示し、圧力の修正係数を定義した潤滑特性解析方法を示した。

研究成果の概要(英文)：The effect of the immobilization of red blood cells on rheological properties and hemolytic characteristics was clarified.

Sealing properties of a mechanical seal for blood using an electrical conduction meter and an ion chromatography were clarified.

An average flow model to predict the lubrication characteristics of mechanical seals with parallel sealing faces is proposed. The present model determines the flow factors considering the two-dimensional flow under the similar operating conditions of mechanical seals. The correction factor for the expected hydrodynamic pressure generated by the surface roughness is also defined. The results are compared with those based on the Patirs average flow model and show that the present model can be effective for the analysis of the lubrication characteristics of mechanical seals with parallel sealing faces.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・5003

キーワード：メカニカルシール レオロジー 表面粗さ

## 1. 研究開始当初の背景

(1) レオロジー特性 本研究で着目する赤血球の変形能は血液のレオロジー特性に大きく影響する因子の一つである。赤血球の変形能は、赤血球膜の固定化によって奪うことができる。申請者は、赤血球の加齢が血液のレオロジー特性に与える影響について研究してきた。しかし、血液のレオロジー特性に与える影響が赤血球の加齢による変形能の違いによるものなのかは不確かである。

(2) 溶血特性 赤血球の変形能の低下が溶血特性に及ぼす影響は明らかになっていない。

(3) 漏れ特性 申請者は、定常流型人工心臓における血液密封用メカニカルシールの密封特性の研究を行ってきた。ここで用いられている血液密封用メカニカルシールでは、しゅう動面の外側を血液が循環し、内側にはしゅう動面の潤滑、冷却および洗浄のためにクーリングウォータ(C.W.)を循環させている。密封特性の研究においては、血液から C.W. への漏れ量、また C.W. から血液への漏れ量を測定している。しかし、血液は赤血球や血漿などの様々な成分で構成されており、血液のいずれの成分がどのくらい漏れているのかについては確認できていない。

(4) メカニカルシールしゅう動面の表面粗さ設計 一方、しゅう動面の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ため、表面粗さの設計指針を得る必要がある。そのためには、表面粗さを確率論的に考慮する Patir らの平均流モデルを用いた潤滑特性解析が適していると考えられる。平均流モデルでは表面粗さの影響を流量係数に集約し、流量係数を用いた潤滑方程式を導出している。流量係数は、等しい統計学的性質をもつ表面粗さ分布をパラメータとした期待値として求められる。Patir の平均流モデルは表面粗さの影響を考慮するために有効なモデルであるが、Hu らは、解析対象によ

って適切な境界条件を与えて流量係数を求める必要があることを指摘している。また、Patir 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。そのため、Ruan は半径方向の熱変形を考慮し、動圧の発生機構を生じさせて潤滑特性解析を行った。

## 2. 研究の目的

(1) レオロジー特性 本研究では、赤血球の固定化を行い赤血球の変形能を奪うことによって、赤血球の固定化が血液のレオロジー特性に与える影響を明らかにすることを目的とする。

(2) 溶血特性 赤血球の固定化が溶血特性に与える影響を明らかにすることを目的とする。

(3) 漏れ特性 漏れ量に占める血漿成分と血球成分の割合を測定し、血液密封用メカニカルシールの密封特性を明らかにすることを目的とする。

(2) メカニカルシールしゅう動面の表面粗さ設計 平均流モデルを用いてしゅう動面が平行なメカニカルシールの潤滑特性解析を行い、表面粗さの設計指針を得ることを目的とする。

## 3. 研究の方法

(1) レオロジー特性 コーン・プレート型回転式レオメータを用いて、粘弾性レオロジー特性を測定する。

(2) 溶血特性 せん断負荷や時間の経過などにより赤血球膜が破壊され、赤血球内のヘモグロビンが溶出することである。本研究では溶血度の指標として、MFI(Mechanical Fragility Index)を用いる。

(3) 漏れ特性 電気伝導計とイオンクロマトグラフィを用いて血液の漏れ量の測定を

行い、二通りの測定結果から血漿成分と赤血球などの血球成分のそれぞれの漏れ量の算出方法を検討する。

(4) メカニカルシールしゅう動面の表面粗さ設計 新たな平均流モデルを提案して、しゅう動面が平行なメカニカルシールの潤滑特性解析を行い、表面粗さの設計指針を得る。

#### 4. 研究成果

(1) レオロジー特性 レオロジー特性実験から、固定化を行うことで定常粘度が増加することがわかる。血液では、せん断速度が上がるにつれ赤血球が流れに沿って薄く変形することによって流動抵抗が小さくなり、定常粘度が減少する。固定化血液は、固定化によって赤血球が変形しにくくなり流動抵抗が大きくなるため、粘度が増加したと考えられる。最大せん断応力と動的弾性率および動的粘性率に及ぼす影響を比較すると、動的粘性率は固定化血液の方が高い値を示したが、動的弾性率はほとんど変わらないことがわかった。また、最大せん断速度および最大せん断応力が上がると、動的弾性率は0Paに収束し、動的粘性率は定常粘度とほぼ同じ値に収束していく。周波数が動的弾性率および動的粘性率に及ぼす影響を検討すると、周波数が大きくなると、動的粘性率は固定化血液と普通血液であまり変わらなくなるが、動的弾性率は固定化血液のほうが急激に大きくなることがわかった。

(2) 溶血特性 溶血特性を比較すると、固定化血液の方が、溶血度が高いことがわかる。このため、固定化により赤血球膜が破壊されやすくなったといえる。

(3) 漏れ特性 漏れ量測定実験では、イオンクロマトグラフィと電気伝導計の二種類の装置を用いて、血液密封用メカニカルシールの密封特性の研究を行った。その結果、イオンクロマトグラフィと電気伝導計の両方を用いることで、血漿成分、血球成分の両方

の漏れ量をそれぞれ測定することができた。マグネシウムイオン水溶液の漏れ量は、 $1000 \text{ min}^{-1}$  のときよりも  $2000 \text{ min}^{-1}$  のときのほうが多かった。血液の漏れ量は回転数を変えてもあまり変化せず、 $2000 \text{ min}^{-1}$  ではマグネシウムイオン水溶液の漏れ量の約  $1/4$  程度だった。実験開始から1時間後の漏れ量においては血球成分の漏れはほとんどみられなかったが、時間の経過とともに漏れ量に占める血球成分の割合は増加した。しかし、3時間の計測では血漿成分の漏れのほうが血球成分の漏れよりも多かった。

(4) メカニカルシールしゅう動面の表面粗さ設計 表面粗さの設計においては、しゅう動面が平行なメカニカルシールの潤滑特性解析のための解析方法を提案し、しゅう動面が平行なメカニカルシールの潤滑特性解析を行うことができた。圧力の修正係数を用いることによって、しゅう動面が平行なメカニカルシールにおいて回転数の変化に伴う膜厚さの変化がみられるようになった。

#### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計2件)

(1) 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. 2014 jamdsm 0006, 2014-03

(2) Jun TOMIOKA, Mikiko Oyabu, Evaluating Blood Inflow to the Sealing Face of a Mechanical Seal for Rotary Blood Pumps, *Tribology Online*, 査読有, Vol.8(1), pp111-116, 2013-01

〔学会発表〕(計12件)

(1) 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

(2)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

(3)富岡淳, 大藪美貴子, 内田恒, 斉藤健斗,  
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

(4)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

(5) 大藪美貴子, 富岡淳, メカニカルシールに  
おける平均流モデルの提案, 日本設計工学会  
四国支部平成 24 年度研究発表講演会論文集,  
香川高等専門学校高松キャンパス, 高松,  
pp19-22, 2013-03

(6) 大藪美貴子, 富岡淳, メカニカルシールに  
おける新しい平均流モデルの検討, 日本設計  
工学会 2013 年度春季研究発表講演会講演論  
文集, 国土館大学世田谷キャンパス梅ヶ丘校  
舎, 東京都, pp115-118, 2013-05

(7) 大藪美貴子, 富岡淳, 表面粗さの統計学的  
性質が平均流モデルにおける修正係数に及  
ぼす影響(第1報, 自己相関関数の影響),  
日本機械学会北陸信越支部第 49 期総会・講  
演会講演論文集(No.127-1), 金沢工業大学,  
金沢市, S01\_1314, 2012-03(in USB  
Memory)

(8) 大藪美貴子, 富岡淳, 表面粗さの統計学的  
性質が平均流モデルにおける修正係数に及  
ぼす影響(第2報, 尖りの影響), 日本機械

学会東海支部第 61 期総会講演会講演論文集  
(No.123-1), 名古屋工業大学, 名古屋市, 723,  
2012-03(in CD-ROM)

(9) 大藪美貴子, 富岡淳, 平均流モデルにおけ  
る修正係数に表面粗さの統計学的性質が及  
ぼす影響, 日本設計工学会平成 24 年度春季  
研究発表講演会講演論文集, 慶応義塾大学日  
吉キャンパス来往舎, 横浜市, pp49-52,  
2012-05

(10) 大藪美貴子, 富岡淳, 表面粗さの統計学  
的性質が平均流モデルにおける修正係数に  
及ぼす影響(第3報, 歪みの影響), 日本機  
械学会第 20 回茨城講演会講演論文集  
(No.120-2), 茨城大学日立キャンパス, 日立  
市, pp121-123, 2012-08

(11) 富岡淳, 大藪美貴子, 定常流型人工心臓  
用メカニカルシールのしゅう動面間距離の  
計測, 日本設計工学会平成 23 年度春季研究  
発表講演会講演論文集, 日本大学津田沼キヤ  
ンパス, 習志野市, pp37-38, 2011-05

(12) Jun TOMIOKA, Mikiko Oyabu,  
"Evaluating Blood Inflow to the Sealing  
Face of a Mechanical Seal for Rotary Blood  
Pumps", Proceedings of the International  
Tribology Conference Hiroshima 2011,  
International Conference Center  
Hiroshima, Hiroshima, ppP07-06, 2011-11  
in USB Memory)

## 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・講師

研究者番号: 00547060