

タンパク膜制御に基づく血液中のしゅう動部における摩擦抑制

Friction Reduction at Sliding Part in Blood Based on Control of Protein Film

○ 神田航希（東北大） 宮越貴之（サンメディカル技術研究所）

金箱秀樹（サンメディカル技術研究所） 足立幸志（東北大）

Koki KANDA, Tohoku University  
Takayuki MIYAKOSHI, Sun Medical Technology Research Corporation  
Hideki KANEBAKO, Sun Medical Technology Research Corporation  
Koshi ADACHI, Tohoku University

**Abstract:** Friction reduction for sliding part of artificial organs is required to ensure stable behavior and designed function. Mechanical seal, which installed in ventricular assist device, also requires low and stable friction property under blood sealing condition. Therefore, this study aims to clarify the effect of diamond-like carbon coating on adsorption of protein aggregates as well as to reduce friction by controlling formation of protein film formed on sealing surface of mechanical. As a result, it was found that diamond-like carbon coating suppresses adsorption of protein aggregates and enables friction reduction by controlling quality of formed protein film.

**Key Words:** Friction Reduction, Protein Film, Ventricular Assist Device, Mechanical Seal, Surface Texture

1. 緒言

人工関節，人工弁や補助人工心臓などの人工臓器のしゅう動部における摩擦の抑制は機能を向上させるための重要な課題の一つである。またしゅう動部における焼き付きの抑制は外乱に対して安定した駆動を実現するために求められる。表面テクスチャやコーティングはそれらを実現する手段としてすでに実用化されており，人工臓器内しゅう動部への適用が期待されている。

本研究では補助人工心臓用メカニカルシールの血液シール時における摩擦特性に着目し，しゅう動面上に創成された表面テクスチャが摩擦係数に及ぼす影響を調査する。さらにコーティングによりタンパク膜の吸着を制御し，血液中における摩擦を抑制することを目的とする。

2. 実験装置

本研究では補助人工心臓実機の構造を模擬したメカニカルシール用摩擦試験機を設計・製作した。これにより補助人工心臓実機に用いられるメカニカルシールの摩擦特性を測定可能である。摩擦試験機の模式図を Fig. 1 に示す。摩擦試験機はモータおよびトルク計から成る回転系と直動ロボットおよび磁石対から成る荷重負荷系によって構成される。シートリングは試験機基部に固定される一方，対となるシールリングはマグネットカップリングおよびトルク計を介してサーボモータにより駆動される。これによりシールリング/シートリング間に発生する摩擦トルクをトルク計により計測し，摩擦係数を算出する。メカニカルシール内側には外部から精製水を循環し，回転軸を支持する滑り軸受けの潤滑を担う。チャンパー内には密封溶液としておよそ 100 ml の精製水および血液を封入し，各溶液封入時のメカニカルシールの摩擦係数を測定した。血液は雌ヤギ成体の頸静脈から採血し，抗凝固剤を含む血液バッグ中に冷蔵したものを用いた。そのため凝固系が血液中の摩擦係数に及ぼす影響は無視できる。

あらかじめ算術平均粗さを 5 nm 程度に研磨したシールリング（炭化ケイ素：SiC）にアルミナ微粒子を用いたウェットブラスト処理を施して表面テクスチャを創成した。摩

擦試験の相手材は研磨した SiC 製のシートリングとした。

3. 実験結果および考察

表面テクスチャを創成した 2 種類のメカニカルシールの摩擦係数を Fig. 2 に示す。摩擦係数はそれぞれ 0.38, 0.42 程度のベースラインを示し，さらに摩擦係数の急激な増加・現象（ピーク）が発現することがわかる。

メカニカルシールの材質を比較的粗な SiC および焼成カーボン (C) とし，さらにメカニカルシール内側に循環される溶液を精製水から界面活性剤（ホワイト 7-Y，ユーアイ化成）溶液へ置換した際の摩擦係数を Fig. 3 に示す。精製水を循環した際の摩擦係数は摩擦開始初期から増加し，ピ

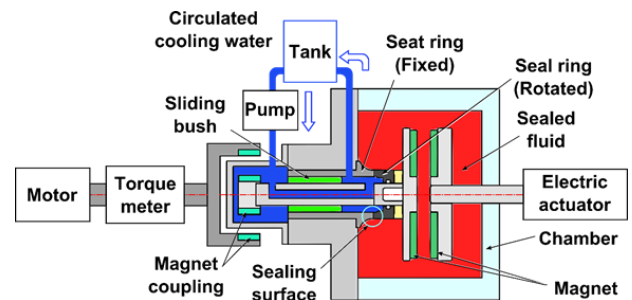


Fig. 1 Schematic of experimental setup

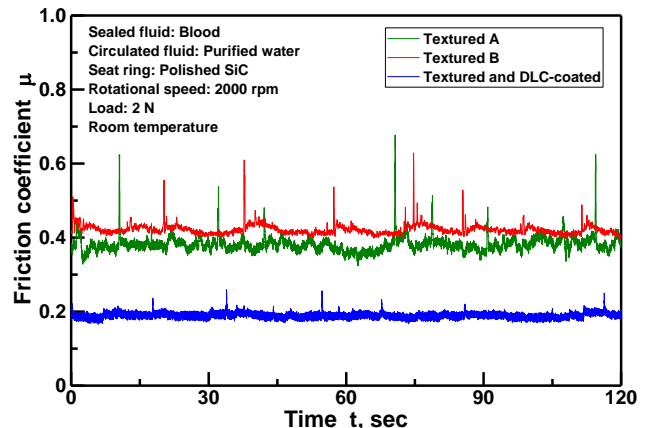


Fig. 2 Friction properties of textured mechanical seal.

ークが頻発する．界面活性剤溶液の導入により血液シール時の摩擦係数は低下・安定化するが，精製水を導入すると摩擦係数は再び増加しピークを示す．血漿環境下における摩擦対のしゅう動面上には変性したタンパク質が主構成物となる膜厚およそ 200 nm 程度のタンパク膜が形成されることが知られている<sup>[1]</sup>．また界面活性剤はタンパク質間の凝着を抑制する<sup>[2]</sup>ことから，Fig. 2 に示す高く不安定な摩擦係数はメカニカルシールの両しゅう動面上に形成されたタンパク膜間の凝着によって発現すると考えられる．

4. タンパク膜の制御による摩擦低減

ダイヤモンドライクカーボン（DLC）膜は血漿タンパク質の静的吸着を抑制する<sup>[3]</sup>．直径および深さがそれぞれ 10 μm，4 μm 程度の凹部をピコ秒レーザー加工装置によりシールリング（SiC）のしゅう動面上に上に創成し，さらに化学気相合成（CVD）法によって DLC 膜を形成し血液中の摩擦試験に供した．さらに免疫蛍光染色法にてしゅう動面上のタンパク質を染色し，蛍光顕微鏡にて観察した．凹部内におけるタンパク膜の吸着に DLC コーティングが及ぼす影響を Fig. 4 に示す．また凹部内におけるタンパク質の量を定性的に示す明度分布を Fig. 5 に併せて示す．SiC 上における最大値は明度 155 にて発現したのに対し，DLC 上においては明度 77 に減少していることから，DLC 膜上に吸着したタンパク質凝集物の量は SiC 基材上と比較して相対的に少ないといえる．

ウェットブラストにより表面テクスチャを形成し，さらに DLC 膜を成膜したメカニカルシールの血液における摩擦特性を Fig. 2 に併せて示す．摩擦係数のベースラインおよびピーク高さはそれぞれおよそ 0.20, 0.05 を示し，DLC 膜の形成により摩擦係数が低下・安定化していることがわかる．

しゅう動面上に吸着したタンパク質の分布を Fig. 6 に示す．Fig. 4 にて SiC 基材上に存在するタンパク質凝集物は Fig. 6 においてわずかしか観察されないが，球状の凹部内および平滑面上にわずかにタンパク質が吸着しており，タンパク膜がしゅう動面上に形成されていることが推定される．またタンパク膜の膜厚は凝集タンパク膜と比較して薄いと考えられる．これよりタンパク膜がしゅう動面上に形成される条件下においてもその膜形成を制御し，血液における摩擦を抑制可能であることが示唆された．

5. 結言

表面テクスチャおよびDLC膜の形成を施したメカニカルシール（SiC/SiC）を用いて血液シール時における摩擦試験を行い，以下の結論を得た．

- (1) しゅう動面上におけるタンパク質凝集物の吸着が DLC 膜により抑制されることを示した．
- (2) メカニカルシールのしゅう動面上に形成されるタンパク膜を制御し，血液シール時における摩擦係数を抑制可能であることを示した．

参考文献

[1] K. Kanda, H. Sato, T. Miyakoshi, T. Kitano, H. Kanebako, K. Adachi, Friction Control of Mechanical Seals in a Ventricular Assist Device, Biosurface and Biotribology, Vol. 1, No. 2, pp135–143, 2015.  
 [2] A.K. Bhuyan, On the Mechanism of SDS-Induced Protein Denaturation, Biopolymers, Vol. 93, No. 2, pp186–199, 2010.

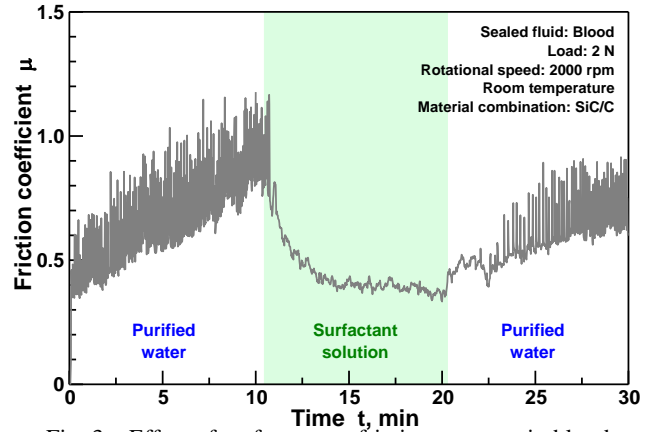


Fig. 3 Effect of surfactant on friction property in blood.

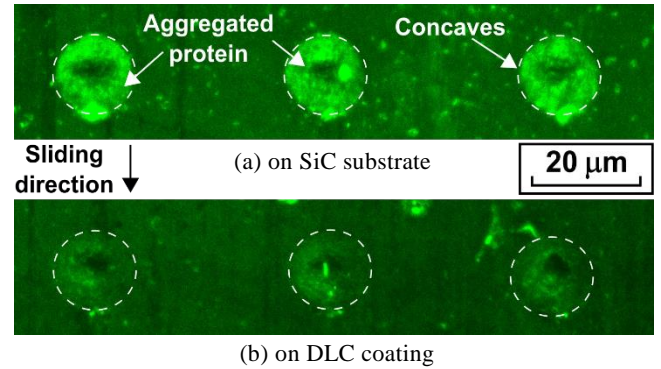


Fig. 4 Distribution of protein aggregates (a) on SiC substrate and (b) on DLC coating.

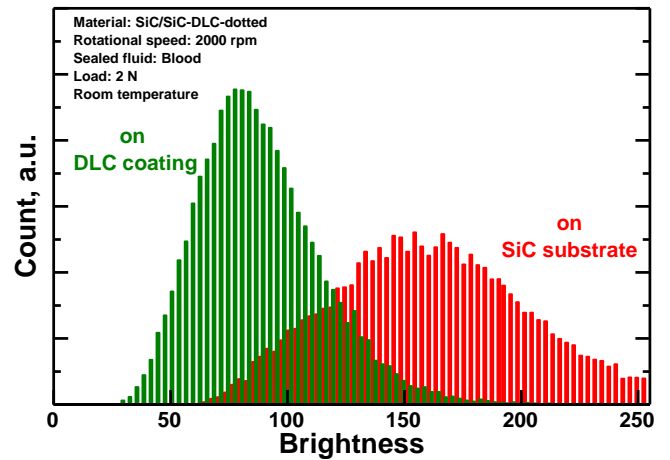


Fig. 5 Intensity ratio of adsorbed protein

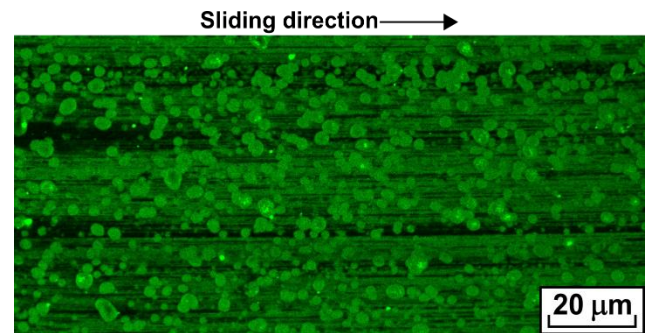


Fig. 6 Suppressed formation of protein film

[3] R. Hauert, K. Thorwarth, G. Thorwarth, An Overview on Diamond-like Carbon Coatings in Medical Applications, Surface and Coatings Technology, Vol. 233, pp119–130, 2013..