

炭化ケイ素製メカニカルシールの血液中摩擦特性の温度依存性

Temperature Dependency of Friction Properties of SiC Mechanical Seal in Blood

東北大・工（院）*加藤 里彩 ダイナックス（正）神田 航希 東北大・工（正）足立 幸志

Lisa Katoh*, Koki Kanda**, Koshi Adachi*

*Tohoku University, ** Dynax Corporation

1. 緒言

体内埋込型補助人工心臓の一つであるEVAHEART®は、インペラの回転により血液循環を補助する機構を有し、血液ポンプ室とインペラの回転駆動機構を高い清浄度を持って密封分離するため内部に水を循環したメカニカルシールが用いられている。このメカニカルシール部における血液由来のタンパク質の付着が、メカニカルシールの密封性と摩擦特性を支配することが明らかにされ、その制御が安定した補助人工心臓の鍵を握る。

当研究室では、シールリング側に一定のレーザーによる表面処理（表面テクスチャ）を施すことで、未変性のたんぱく質による膜の形成が促進され、安定した低摩擦が発現し得ることを報告している²⁾。レーザー加工を初期表面に施すことは、幾何学的・化学的な変化を与え、血液中の摩擦挙動の安定性に有効であると考えられる。

そこで本研究では、低摩擦発現界面を形成するための最適レーザー加工条件を実験的に明らかにするとともに、その摩擦特性に及ぼす血液温度の影響を明らかにし、レーザー表面処理を用いた体内埋込型補助人工心臓用メカニカルシールの実用可能性に言及する。

2. 実験方法

EVAHEART®の内部構造を模擬した摩擦試験機(Fig. 1)により、メカニカルシールの血液中における摩擦特性を測定した。共に炭化ケイ素(SiC)製のシールリングとシートリングを試験片として使用した。シートリングは試験機基部に固定され、シールリングはトルク計およびマグネットカップリングを介してサーボモータにより駆動される。メカニカルシール内部に精製水をローラーポンプにより循環させた。血液はヤギ成体より採血し、抗凝固剤を含む採血バッグに冷蔵保管しチャンバー内に封入した。摩擦試験時の荷重および回転速度はそれぞれ、実機と同条件である2 N, 2000 rpm一定とした。

ピコ秒レーザー加工装置を用いレーザー誘起周期表面構造(Laser Induced Periodic Surface Structure: LIPSS)をシールリング表面に同心円状に創製した。レーザーのパワーは800mW, 加工速度は2 mm/s一定とし、加工ピッチの異なる3種類の試験片を使用した。その典型的な表面形状をFig. 2に、それらを用いた本実験における摩擦組み合わせをTable 1に示す。

また、実機応用の可能性を検討するため、体温とたんぱく質の変性温度である60℃を考慮し、室温(24℃), 38℃, 50℃の3種類の血液温度により2時間の連続摩擦試験を行った。

3. 実験結果と考察

3.1 レーザー照射ピッチの影響

3種類の表面テクスチャを用いた室温環境での摩擦特性をFig. 3に示す。ピッチ30μmの場合(Combination II)において、摩擦初期になじみを発生し、血液環境にも関わらず摩擦係数0.01以下の低摩擦が発現することがわかる。

Table 1 Frictional combination of experiments.

Combination	Seat ring	Seal ring	
I	Polished SiC (Ra: 4nm)	Textured (LIPSS) SiC	Pitch: 10 μm
II			Pitch: 30 μm
III			Pitch: 60 μm
IV		Polished SiC (Ra: 4 nm)	

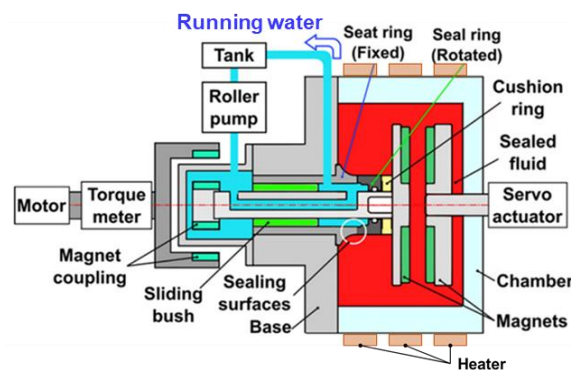


Fig. 1 Schematics of experimental apparatus.

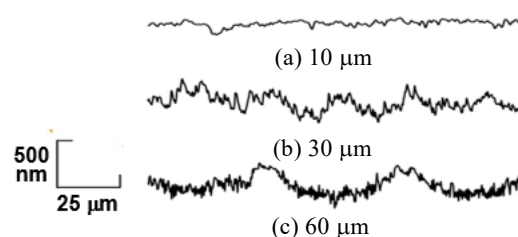


Fig. 2 Surface profiles of laser textured surface with pitch of (a) 10 μm, (b) 30 μm and (c) 60 μm.

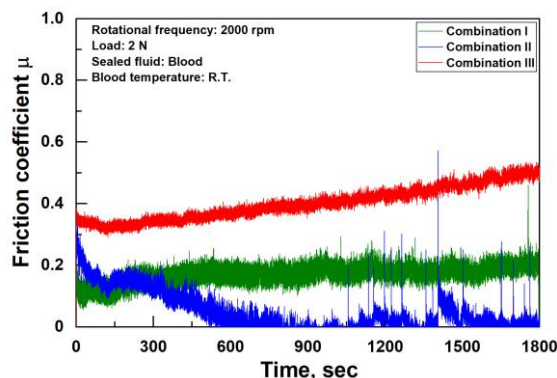


Fig. 3 Friction properties of frictional combination I, II and III at room temperature.

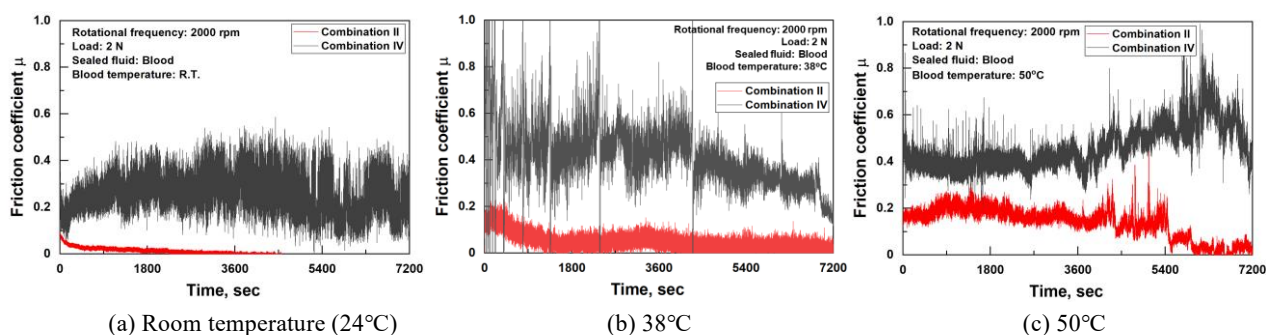


Fig. 4 Friction properties of frictional combination II and IV at (a) Room temperature (24°C), (b) 38°C and (c) 50°C.

本レーザー処理条件において、ピッチ $30\text{ }\mu\text{m}$ は、ちょうど全面にレーザー処理を施すことが可能なピッチであり、レーザー未照射部が存在する $60\text{ }\mu\text{m}$ や過度な照射が与えられる $10\text{ }\mu\text{m}$ ピッチの場合には、低摩擦が発現し得ないことから、照射ピッチに起因した凹凸と共に、レーザー照射による表面改質がたんぱく質の変性を防ぎ、低摩擦の発現のために重要な意味を持つと推察される。

3.2 摩擦に及ぼす血液温度の影響

最適なレーザー処理を施した試験片を用いた場合 (Combination II) の 3 種類の血液温度下での摩擦特性をレーザー処理を施していない平滑面同士 (Combination IV) の結果と共に Fig. 4 に示す。また Fig. 5 に、3 種類の血液温度における試験終了前 30 分間の摩擦係数の中央値を示す。ここで中央値は、突発的な摩擦係数の増加を除くベースラインを意味する値として導入した。レーザー加工を施していない試験片 (Combination IV) では、室温環境でも不安定な摩擦を示すのに対し、最適なレーザー表面処理を施すことにより、いずれの血液温度においても、摩擦が減少するなじみが発生し、摩擦係数 0.02 以下の低い値を示しており、実機への応用の可能性を明示する結果と言える。しかしながら、血液温度の増加に伴い、低摩擦界面の形成速度の低下及び低摩擦時の摩擦のわずかな増加が見られることは明らかである。次に室温 (24°C) と 38°C の血液温度下において低摩擦が発現している時の摩擦面の SEM 像を Fig. 6 に示す。シートリングの表面には、温度による違いは見受けられない。これに対し、レーザー加工を施したシールリング表面においては、室温では LIPSS 構造が明確に観察される一方で、38°C の場合には LIPSS 構造を部分的に覆うたんぱく質の存在が確認される。この相対的に厚いたんぱく質の存在が、血液温度による摩擦の差を示す要因と考えられる。この結果は、タンパク膜の吸着抑制に対するレーザー誘起周期表面構造に起因した幾何学的・化学的特性の有効性を明示するものであり、血液温度は、わずかなタンパク膜の吸着抑制効果に影響を及ぼすといえる。

4. 結言

炭化ケイ素 (SiC) 製のシールリングとシートリングからなる血液下のメカニカルシールにおいて、シートリングに最適なレーザー誘起周期表面構造 (ピッチ幅 $30\text{ }\mu\text{m}$) を施すことにより、体温に相当する 38°C の血液温度においても、摩擦係数 0.02 の低摩擦を発現することを実証した。

文献

- 1) K. Kanda, H. Sato, T. Miyakoshi, T. Kitano, H. Kanabako, K. Adachi, Friction control of mechanical seals in a ventricular assist device, *Biosurface and Biotribology*, 1 (2015) 135–143.
- 2) K. Kanda, S. Tazawa, T. Urano, S. Kobayashi, K. Adachi, The possibility of both low friction and low leakage by surface texture of mechanical seals in blood, *Tribology Letters*, (2020) 68:65.

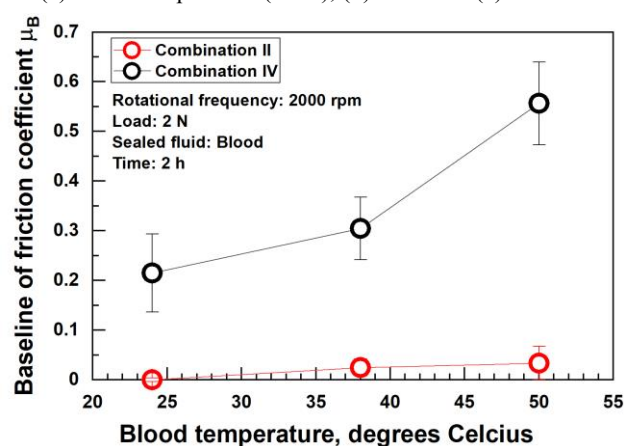


Fig. 5 Effect of blood temperature on baseline of friction coefficient observed last 30 min in Fig. 4.

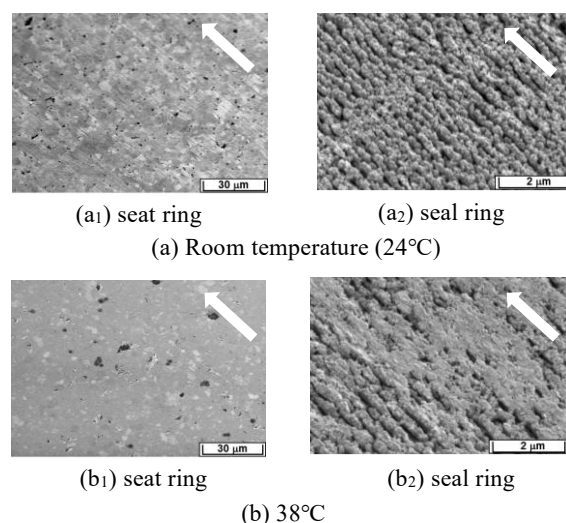


Fig. 6 SEM images of (a1), (b1) seat ring and (a2), (b2) seat ring surfaces observed after friction test of combination II at (a) R.T. and (b) 38°C.

The arrow shows the sliding direction of the object.