

血液中炭化ケイ素製メカニカルシールにおける高密封性・低摩擦のためのアルブミンとフィブリノーゲン由来のトライボフィルム形成制御

Control of Tribofilm Formation Derived from Albumin and Fibrinogen for Both Low Leakage and Low Friction using Silicon Carbide Mechanical Seals in blood

東北大・工（院）*小島 知 サンメディカル（非）小川 大祐 東北大・工（正）村島 基之

東北大・工（正）足立 幸志

Tomo Kojima*, Daisuke Ogawa**, Motoyuki Murashima*, Koshi Adachi*

*Tohoku University, **Sun Medical Technology Research Corp.

1. 緒言

EVAHEART®は、インペラの回転により血液循環を補助する体内植込型補助人工心臓の一つであり、スムーズな回転及び血液と冷却水を密封分離するためのメカニカルシールがその性能と耐久性の鍵を握る。これに対し著者らは、メカニカルシールの一面にレーザー表面処理を施すことで、未変性の血液由来のタンパク膜が形成され安定した低摩擦が発現し得ることを明らかにしている¹⁾。低摩擦界面形成のメカニズム解明に基づくレーザー表面処理の設計指針の構築が実装化のために強く求められている。

そこで本研究では、低摩擦と高密封性の両立を可能とするレーザー表面処理条件を実験的に明らかにするとともに低摩擦発現と高密封性を両立するための非変性タンパク膜の把握とその形成機構の解明を目的とする。

2. 実験方法

EVAHEART®の内部構造を模擬した摩擦試験機¹⁾を用いてヤギ成体から採血した血液中において、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メカニカルシールの摩擦力と密封性を評価した。密封性は、冷却水側に漏れた血液の量を電気伝導率計で算出し、定常状態時 20 分間の漏れ量から換算される漏れ速度によって評価した。

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、室温 (23°C) で試験を行った。

シールリング表面には、ピコ秒レーザー加工装置を用い、30 μm ピッチのうねり構造と、レーザー誘起周期表面構造(Laser Induced Periodic Surface Structure: LIPSS)を有したマルチテクスチャを同心円状に創製し、その際のレーザーパワーを最大 3000 mW の範囲で変化させた。

3. 実験結果と考察

3.1 密封性及び摩擦特性に及ぼすレーザー表面処理時のレーザーパワーの影響

3 種類のレーザーパワーで表面処理をしたシールリングを用いた場合の摩擦特性を未処理の結果とともに Fig. 1 に示す。350 mW でのレーザー表面処理は未処理に比べ低く安定した摩擦特性を示し、800mW, 3000mW でのレーザー表面処理は、初期に摩擦が減少するなじみの発生に伴いさらなる低摩擦が発現することがわかる。シールリング表面のレーザー処理時のレーザーパワーに対する本研究によって得られた定常時の摩擦および漏れ速度を各々 Fig. 2, 3 に示す。500mW 以上のレーザーパワーで表面処理をすることによりなじみが発生する一方で、600 mW 以上では漏れ量が増加することがわかる。ここで、本実験に使用したレーザー表面処理後の試験片の初期表面粗さを Fig. 4 に、初期表面粗さに対する漏れ速度を Fig. 5 に示す。600mW 以上のレーザー処理に

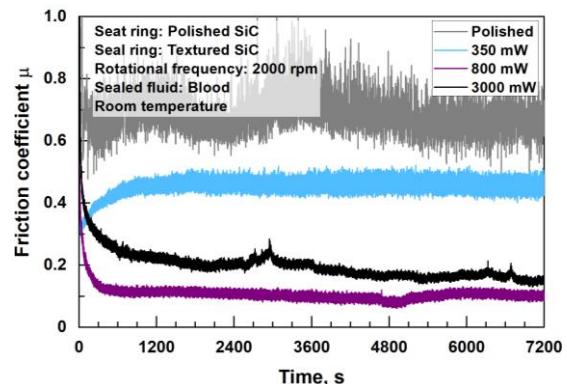


Fig. 1 Representative friction properties of mechanical seal of SiC treated with different laser powers.

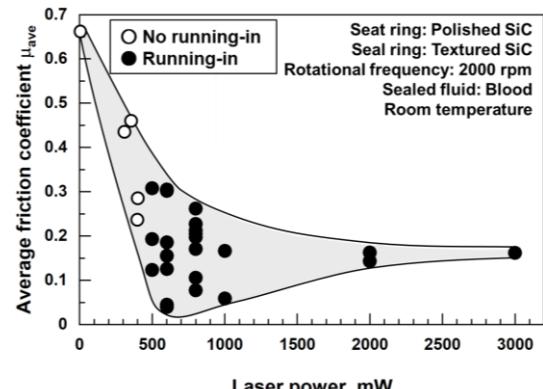


Fig. 2 Friction coefficient of mechanical seal of SiC treated with different laser powers.

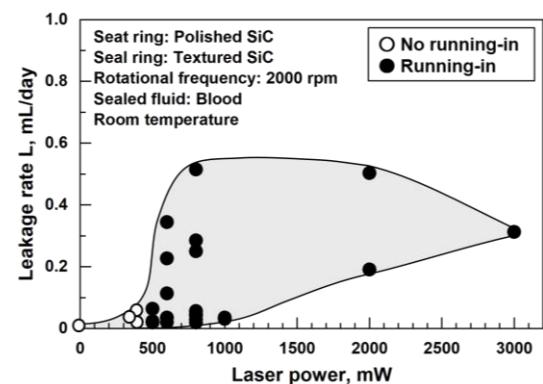


Fig. 3 Leakage rate of mechanical seal of SiC treated with different laser powers.

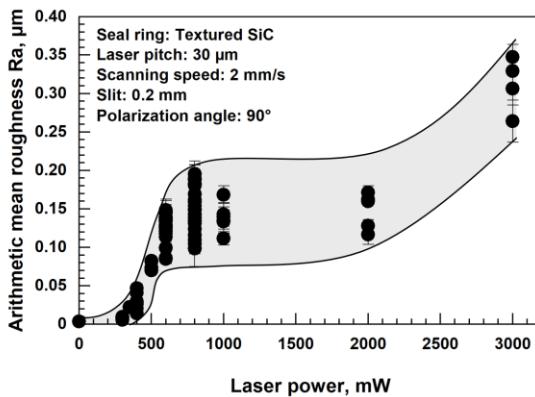


Fig. 4 Initial surface roughness of SiC treated with different laser powers.

より、算術平均粗さが約 100 nm 以上の初期表面となっており、これが血液の漏れの主因となると考えられる。しかし、その一方で、ほぼ同程度の粗さにもかかわらず、非常に低い漏れ速度を有する結果が存在しており、摩擦に伴う表面の変化の重要性を示唆している。

統いて、本研究によって得られた定常時の平均摩擦係数と漏れ速度の関係を Fig. 6 に示す。メカニカルシールの典型的な摩擦係数と漏れ量が相反関係にある Type I を示す場合と、摩擦係数に関わらず漏れ量が 0.1 mL/day 以下の高密封性を発現する Type II に大別されることが分かる。これは、低摩擦と高密封性の両立が可能なレーザー表面処理が存在することを明示する結果である。

3.2 高密封性・低摩擦発現時の摩擦表面の状態

なじみ挙動が観察された 600-3000 mW でのレーザー表面処理を施した場合、間接免疫蛍光染色法を用いた蛍光観察像から得られたシールリング上のフィブリノーゲンとアルブミンの蛍光強度の関係を Fig. 7 に示す。図中の数字は摩擦係数を示している。Type II の場合、Type I に比べアルブミンとフィブリノーゲンの膜がバランスよく形成していることが分かる。また、600 mW ではそれぞれの蛍光強度が小さいほど、800 mW では大きいほど摩擦係数が低い傾向にあることから、低摩擦を発現するためのアルブミンとフィブリノーゲンの最適な膜厚が存在すると考えられる。Type II で摩擦係数 0.2 以下を発現した時の試験前後のシールリング SEM 像をそれぞれ Fig. 8(a)(b) に示す。高密封性かつ低摩擦を発現する際の最適なタンパク質由来のトライボフィルムは SEM においては大きな違いを観察することができない程度であるといえる。

4. 結言

SiC 同士のメカニカルシールの摩擦と漏れに及ぼすレーザー表面処理時のレーザーパワーの影響に関し以下の結論を得た。

1. 500 mW 以上のレーザーパワーで表面処理をすることによりなじみ（初期の摩擦低下現象）が発生する。
2. 算術平均粗さが 0.1 μm 以上でもあっても漏れ量が 0.1 mL/day 以下になる時の摩擦面には、アルブミンとフィブリノーゲン由来のトライボ膜がバランス良く形成されている。
3. 低摩擦 ($\mu < 0.2$) と高密封性（漏れ速度 $< 0.1 \text{ mL/day}$ ）の両立が可能な最適なレーザーパワー値が存在し、本研究における最適なレーザーパワー域は 500-1000 mW であった。

文献

- 1) 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.

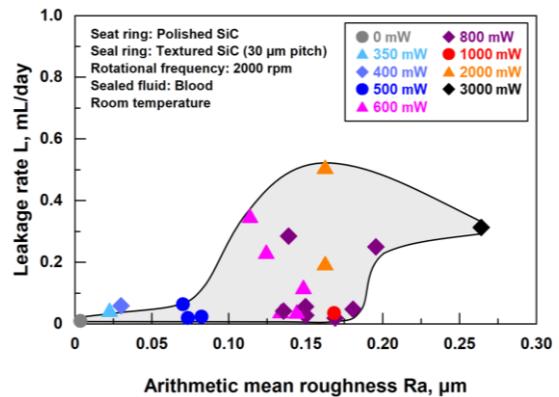


Fig. 5 Effect of initial surface roughness on leakage rate.

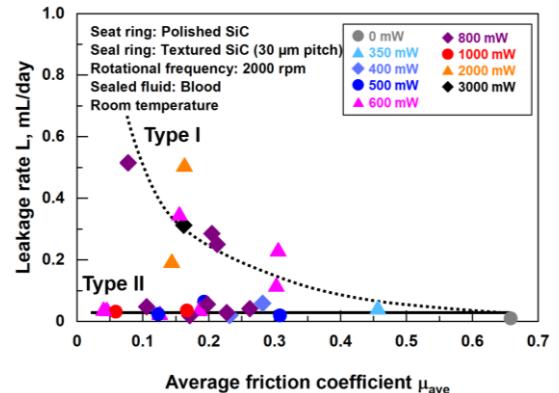


Fig. 6 Relationship between average friction coefficient and leakage rate.

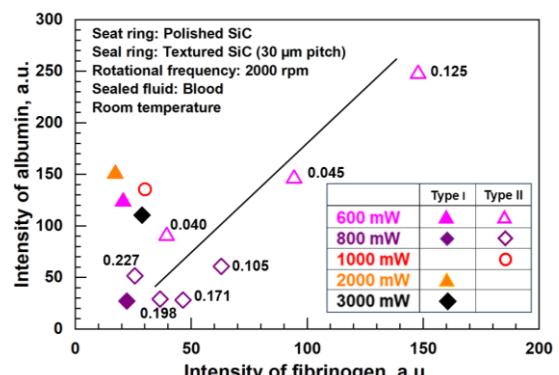


Fig. 7 Relationship between fluorescence intensity of fibrinogen adsorbed on seal ring and that of albumin.

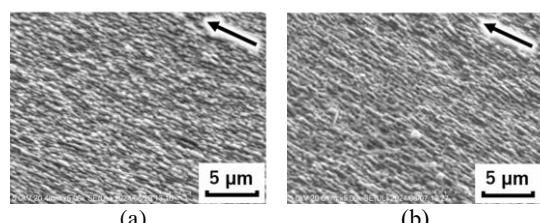


Fig. 8 SEM images of textured surface (a)before and (b)after friction test when achieving both low friction and low leakage rate.