

## 超純水潤滑すべり軸受の開発

杉山 憲一\*

### Development of a Sliding Bearing Lubricated in Ultra-pure Water

by Kenichi SUGIYAMA

SiC ceramics, which have excellent properties for frictional wear in water lubrication, are used for sliding bearings lubricated in water; however, abnormal wear may occur in ultra-pure water lubrication. In this study, we manufactured specimens with a diamond layer coated on the surface of SiC ceramics by vapor phase synthesis, and evaluated their tribology and erosion corrosion characteristics in water. For the tribology characteristics in tap water and ultra-pure water, no big difference was observed between the SiC ceramics and diamond layer. On the other hand, for the erosion corrosion characteristics in ultra-pure water, the SiC ceramics were significantly eroded while the diamond layer had little erosion, showing its excellent resistance property. Therefore, we conclude that the diamond layer is suitable for sliding bearings lubricated in ultra-pure water.

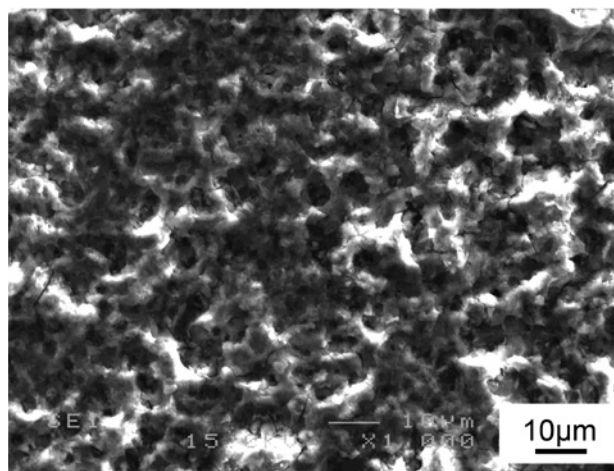
**Keywords:** SiC, Diamond layer, Ultra-pure water, Erosion corrosion, Sliding bearing, Tribology

#### 1. はじめに

水潤滑下で使用されるすべり軸受材料には、水中での摩擦摩耗特性に優れたセラミックスであるSiC（炭化ケイ素）<sup>1, 2)</sup>が多く使用されている。SiCは水中すべりにおいて、水とのトライボ化学反応によってすべり面に流体潤滑が得られるような非常に平滑なSiO<sub>2</sub>層を形成するため、低摩擦となるといわれている<sup>3)</sup>。一方、超純水（明確な定義はないが、一般的に電気抵抗率15 MΩcm以上で極めて不純物の少ない水）は、半導体製造装置や洗浄装置、光ファイバーや液晶ディスプレイの製造用水などに広く使用されている。しかし、超純水を扱うポンプで、超純水潤滑となるすべり軸受に異常摩耗が発生する場合がある。写真1に超純水潤滑下で運転したSiC軸受すべり面のSEM（走査型電子顕微鏡）写真を示す。白い付着物が確認され、特徴的な摩耗状態が観察される。このような現象は水道水のような市水を扱うポンプでは確認されない。

本報告では、超純水潤滑下で発生するSiC軸受の異常摩耗の原因を明らかにするとともに、超純水中での使用に適したすべり軸受材料について検討した結果を報告する。

\* 風水力機械カンパニー 技術生産統括 開発統括部 機械・材料技術室



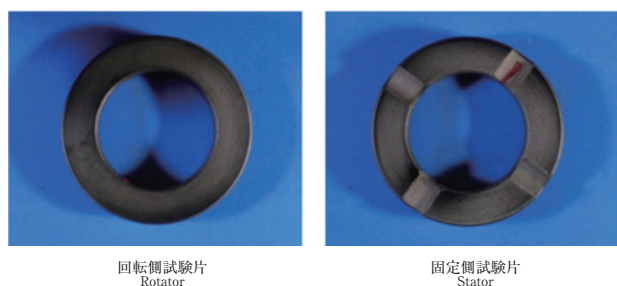
14-19 01/245

写真1 ポンプ運転後のSiC製軸受すべり面の白色付着物のSEM写真  
Photo 1 SE image of white matter on the SiC sliding bearing after pump operation

#### 2. 試験方法

##### 2-1 すべり試験

超純水中と水道水中でのすべり特性を調べるために、ディスクオンディスク試験を実施した。写真2に試験片外観写真を示す。固定側試験片には4本溝を施したものを使用した。



14-19 02/245

写真2 試験片外観写真  
Photo 2 View of Specimens

試験片は常に水中に没しており、水温はコントロールされておらず20～29℃であった。潤滑水は常に新しい水を供給し、オーバーフロー分を排水して、水温、水の電気抵抗率の変動を抑えた。この方式によって、超純水の電気抵抗率を17 MΩcm以上に維持した。

低速すべりと高速すべりの2種類の試験を実施した。低速すべり試験は超純水中と水道水中で行った。面圧2.0 MPa、周速度0.14 m/sで24時間のならし運転を行った後、面圧を2.0 MPa一定とし、周速度を0.05 m/sずつ0.64 m/sまで上げていった。その後、周速度を0.64 m/s一定とし、面圧を2.0 MPaから0.2 MPaずつ0.2 MPaまで下げていった。各条件における試験時間は10分間とした。高速すべり試験は超純水中で行った。周速度を10.2 m/s一定とし、面圧を0.2 MPaから0.2 MPaずつ1.6 MPaまで上げた後、0.2 MPaずつ0.2 MPaまで下げた。各条件における試験時間は1分間とした。

## 2-2 エロージョン・コロージョン試験

異なる電気抵抗率の水に対する材料のエロージョン・コロージョン特性を調べるために水ジェット試験を実施した。試験装置を図1に示す。市販の超純水製造装置で製造した超純水を送水ポンプで加圧し、出口に取り付けた内径1 mmのノズルから大気中に放出し、ノズル先端から25 mm離れた位置に設置した試験片表面に100時間衝突させた

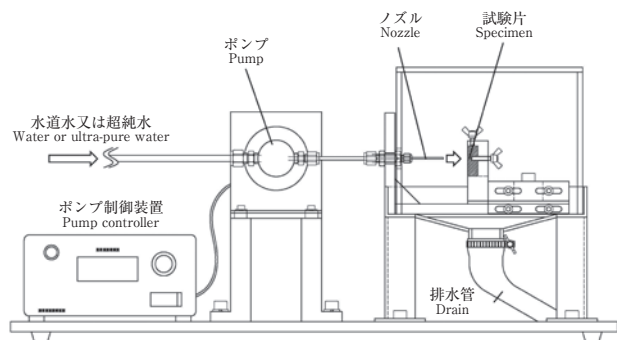
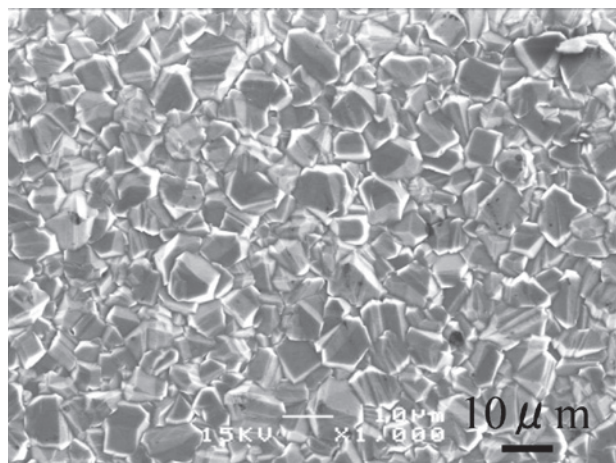


図1 水ジェット試験装置  
Fig. 1 Water jet test equipment

後、試験片表面の状態を観察した。ノズル出口の流速を10～26 m/s、水の電気抵抗率を0.007～180 MΩcmとした。水の電気抵抗率はノズルに到達する前の超純水に水道水を混入することによって調整した。

## 2-3 試験材料

試験材料はSiCとダイヤモンド皮膜の2種類を準備した。SiCは常圧焼結によって製造され、結晶構造はα-SiCであり、実機で使用されているものと同じである。ダイヤモンド皮膜は熱フィラメントCVD（化学蒸着）を用いて上記SiCのすべり面に皮膜厚さ約10 μmとなるようコーティングした<sup>4)</sup>。写真3にダイヤモンド皮膜表面のSEM写真を示す。皮膜は多結晶ダイヤモンドであり、結晶粒の大きさは約10 μmである。図2にダイヤモンド皮膜表面のラマン分光分析結果を示す。ダイヤモンドの鋭いピーク（Dバンド）が観察され、グラファイトのピーク（Gバンド）は観察されないため、形成された皮膜はダイアモン



14-19 03/245

写真3 ダイヤモンド皮膜表面のSEM写真  
Photo 3 SE image of diamond layer surface

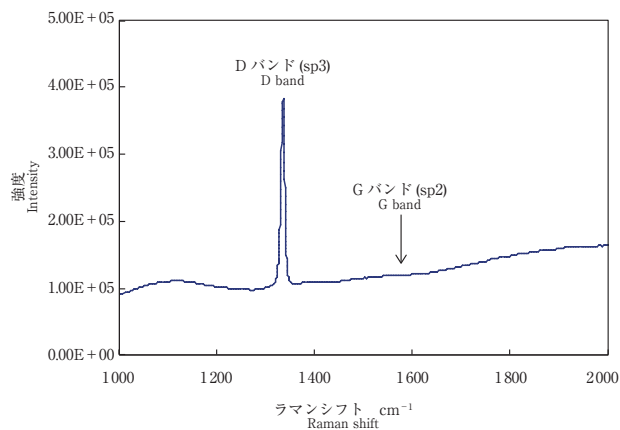


図2 ダイヤモンド皮膜表面のラマンスペクトル  
Fig. 2 Raman spectra of diamond layer surface

ドであると判断した。SiCのすべり面はラップ加工によって鏡面仕上げしたが、ダイヤモンド皮膜の研磨は困難であるので、皮膜形成後の表面状態のまま使用した。

### 3. 試験結果及び考察

#### 3-1 すべり試験結果

図3に低速すべり試験でのSiC vs SiCの組合せにおけるストライベック曲線を示す。短時間の試験では、水道水中と超純水中での摩擦係数はほぼ同等である。また、試験後のすべり面は、いずれの条件においても試験前よりなめらかになっておりほとんど摩耗していない。以上のことから、SiC vs SiCの超純水中での摩擦摩耗特性は、水道水中と比較して低下していないことから、実機ポンプで発生するSiCの異常摩耗は、超純水中での摩擦摩耗特性の低下によるものではないと言える。

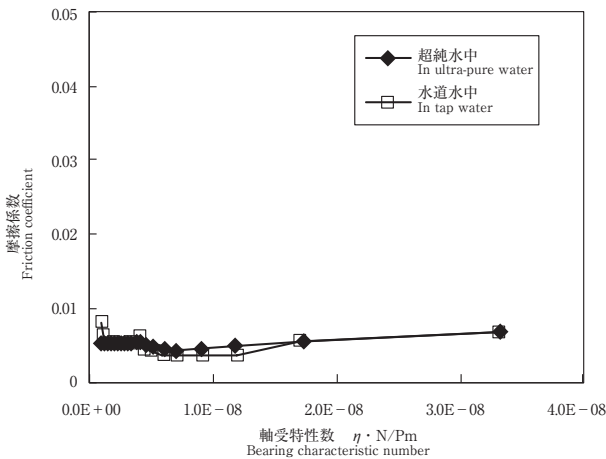


図3 ストライベック曲線 (SiC vs SiC)  
Fig. 3 Stribeck curve of SiC vs SiC

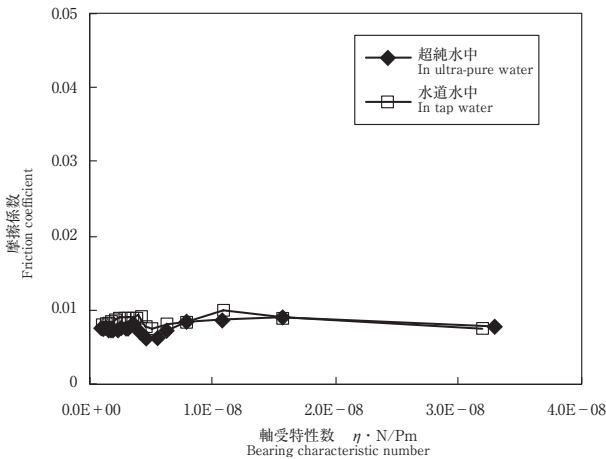
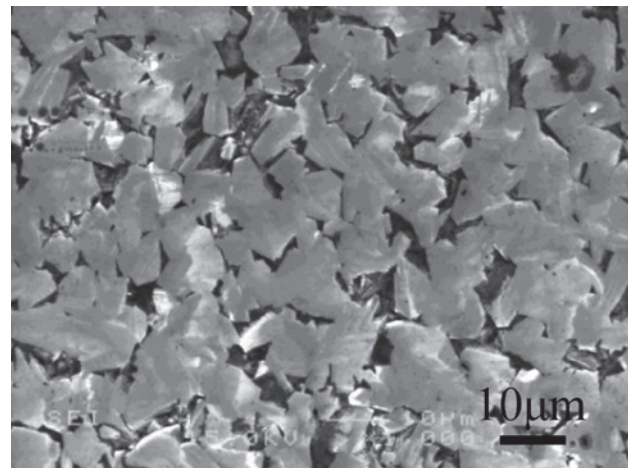


図4 ストライベック曲線 (ダイヤモンド皮膜 vs ダイヤモンド皮膜)  
Fig. 4 Stribeck curve of diamond layer vs diamond layer

図4に低速すべり試験でのダイヤモンド皮膜 vs ダイヤモンド皮膜の組合せにおけるストライベック曲線を示す。摩擦係数は図3のSiC vs SiCよりわずかに大きい。写真4にダイヤモンド皮膜の試験後すべり面のSEM写真を示す。試験後のすべり面は、粒子の突起部が摩耗してなめらかになっており、全体的にはほとんど摩耗していない。

図5に超純水潤滑下における高速すべり試験でのSiC vs SiCとダイヤモンド皮膜 vs ダイヤモンド皮膜のストライベック曲線を示す。摩擦係数は低速すべり試験と同様SiC vs SiCの方が低いが、いずれの組合せも摩擦係数は0.015以下であり良好な潤滑状態である。

以上の結果から、ダイヤモンド皮膜の摩擦特性はSiCより若干劣るが摩擦係数は低く、水中で良好な摩擦特性を示す。



14-19 04/245

写真4 すべり試験後のダイヤモンド皮膜表面のSEM写真  
Photo 4 SE image of diamond layer surface after sliding test

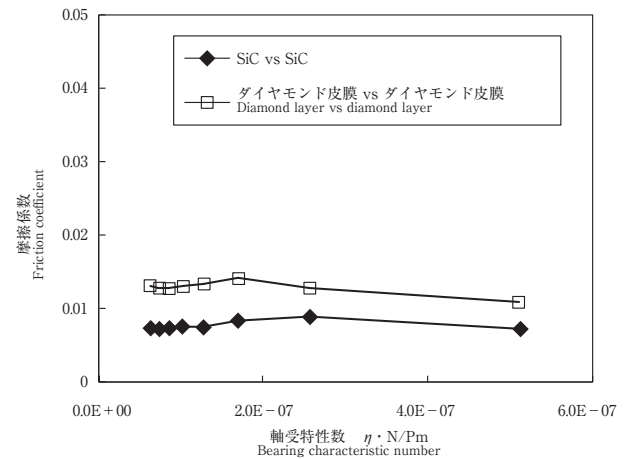


図5 ストライベック曲線 (超純水潤滑下)  
Fig. 5 Stribeck curve in ultra-pure water lubrication

### 3-2 エロージョン・コロージョン試験結果

図6に流速26 m/sにおけるSiCの水ジェット試験結果を示す。SiCは水道水では全く壊食しないが、超純水では壊食し、白い物質が水の衝突面に観察された。白い付着物はスポンジでこすることによって容易に除去することができた。この物質に対してEPMA（電子線マイクロアナライザ）による定性分析を実施したところ、SiとOが検出された。

図7に図6と同条件での超純水を用いた水ジェット試験後の表面SEM写真とEPMAによる元素マッピングの結果を示す。SiC粒子の形状に沿ってOが検出されたため、SiC粒子とH<sub>2</sub>Oの化学反応によってSiC表面にSiO<sub>2</sub>が生成し白い付着物として観察されたと考えられる。

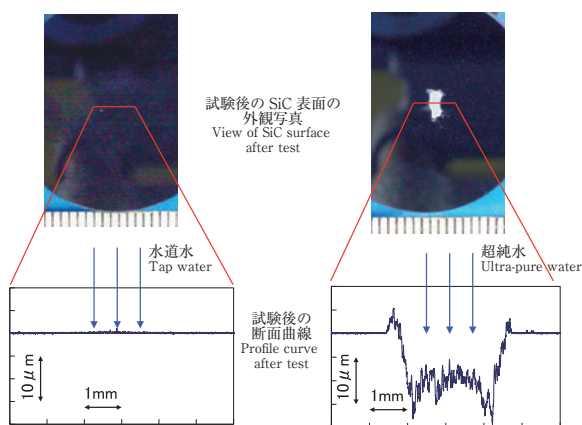


図6 SiCの水ジェット試験結果（流速:26 m/s, 試験時間:100時間）  
 Fig. 6 The results of water jet test of SiC (flow velocity: 26 m/s, exposure time: 100 hr)

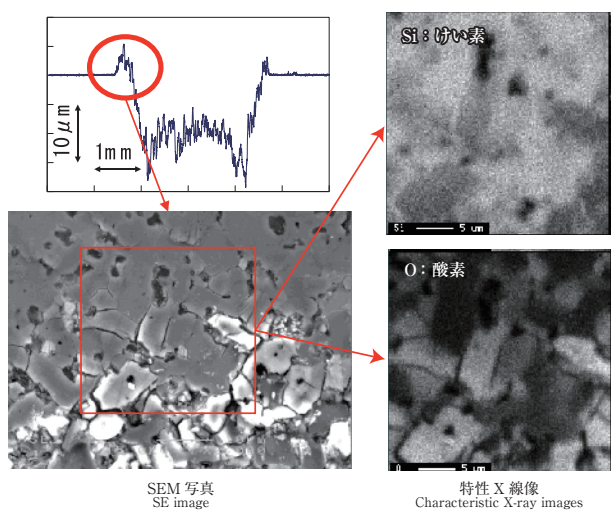
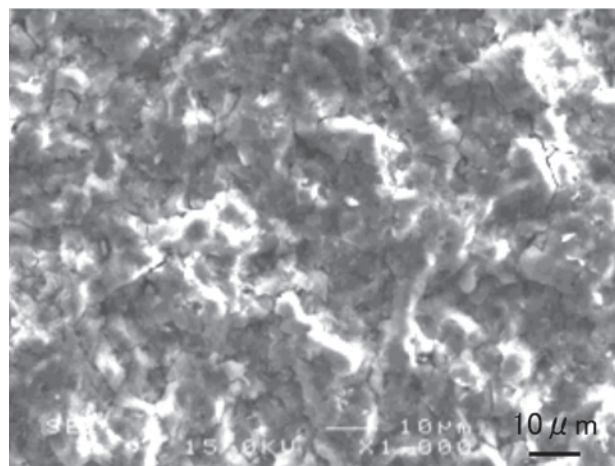


図7 SiCの壊食面におけるSiとOのSEM写真と特性X線像  
 Fig. 7 SE image and characteristic X-ray images of Si and O on the eroded surface of SiC

写真5に、超純水によるジェット試験後SiC表面の白い付着物のSEM写真を示す。白い付着物の析出形態は写真1の超純水潤滑下で運転した後のSiC軸受すべり面の状態に類似している。また、いずれの付着物からもSiとOが検出されていることから、異常摩耗は高流速の超純水によるエロージョン・コロージョンであると推定される。

図8に流速26 m/sにおけるダイヤモンド皮膜の超純水



14-19 05/245

写真5 超純水を用いた水ジェット試験後のSiC表面の白色付着物SEM写真  
 Photo 5 SE image of white matter on the SiC surface after ultra-pure water jet test

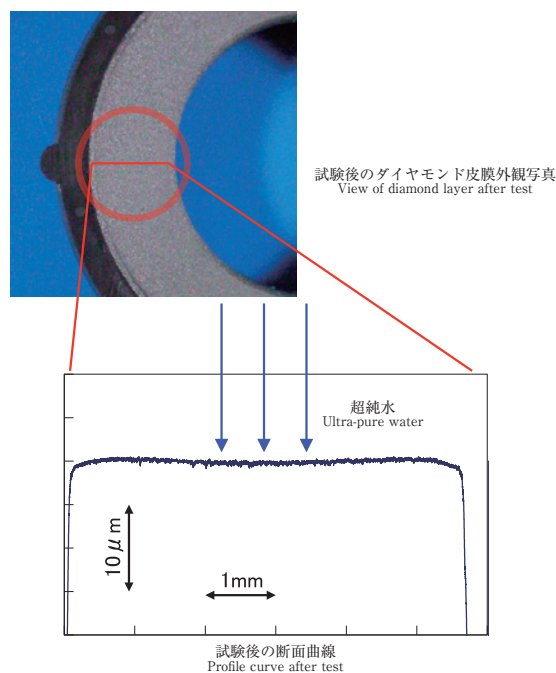


図8 ダイヤモンド皮膜の水ジェット試験結果（流速：26 m/s, 試験時間：100時間）

Fig. 8 The results of ultra-pure water jet test of diamond layer (flow velocity: 26 m/s, exposure time: 100 hr)

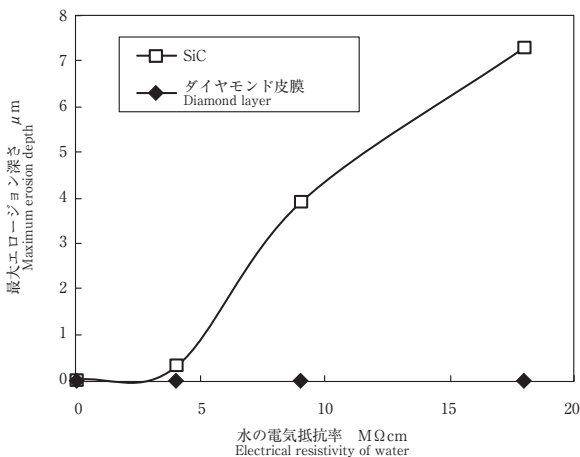


図9 水ジェット試験における水の電気抵抗率と最大エロージョン深さとの関係 (流速: 18.3 m/s, 試験時間: 100時間)

Fig. 9 Relationship between the electrical resistivity of water and the maximum erosion depth in water jet test (flow velocity: 18.3 m/s, exposure time: 100 hr)

による水ジェット試験結果を示す。SiCが壊食した条件であっても、ダイヤモンド皮膜は壊食しておらず、超純水に対して優れた耐エロージョン・コロージョン性を示した。また、水の電気抵抗率と最大壊食深さの関係を示した図9において、SiCは5 MΩcmを超えた辺りから壊食量が急激に増加するのに対し、ダイヤモンド皮膜はいずれの電気抵抗率においても壊食していない。

一般的にSiCは耐食性に優れ、耐薬品材料として用いられる比較的化学的に安定した材料である。しかし、超純水潤滑下において高いすべり速度で使用されるすべり軸受では、常温でも非常に大きな速度で化学反応が進行してSiO<sub>2</sub>を生成し壊食する。ここで生成したSiO<sub>2</sub>は、低

摩擦を発現するトライボ化学反応に寄与せず、軸受すべり面粗さの増大を招く。その結果、摩擦係数が増大することによって、水道水などのような一般水中と比較して軸受寿命が大幅に低下すると考えられる。

一方、ダイヤモンド皮膜は、水ジェット試験で確認したように超純水環境下でほとんどエロージョン・コロージョンが発生せず壊食しない。また、ダイヤモンド皮膜は摩擦摩耗特性も優れていることから超純水用途でのすべり材料として適していると言える。

#### 4. おわりに

超純水潤滑下において、従来の軸受材料であるSiCと、新たにダイヤモンド皮膜について評価した結果、以下の結論を得た。

(1) 超純水を扱うポンプで使用されるSiCすべり軸受に発生する異常摩耗は、超純水によるエロージョン・コロージョンが原因で発生すると考えられる。

(2) ダイヤモンド皮膜は超純水中で化学的に安定しているとともに、優れた摩擦摩耗特性を有する。したがって超純水潤滑下でのすべり軸受に適した材料であると言える。

#### 参考文献

- 1) H. Tomizawa and T. E. Fischer, ASLE Trans., 30, 1 (1987), 41.
- 2) S. Sasaki, The Effect of Water on Friction and Wear of Ceramics, J. of Japan Society of Lubrication Engineers 33 (1988) 620-628.
- 3) セラミックスのトライボロジー, 日本トライボロジー学会セラミックスのトライボロジー研究会編, P41, 養賢堂 (2003).
- 4) 杉山憲一, 長坂浩志, CVDダイヤモンド皮膜の水潤滑すべり軸受への適用に関する研究, 日本トライボロジー学会2007秋, (2007), 403-404.