

## 大粒子を用いた MSE 法による樹脂保持器の耐衝撃性評価 —損傷形態の明確化—

Evaluation of impact resistance of the resin cage by the MSE method using large particles  
- Clarification of damage form -

富山県立大・院（学）\*宮崎 心之介      富山県立大・工（正）宮島 敏郎

（株）テー・シー・富山（非）舟戸 保典      （株）テー・シー・富山（正）斎藤 重正

（株）牧野フライス製作所（正）梶川 真吾

Shinnosuke Miyazaki\*, Toshiro Miyajima\*, Yasunori Funato\*\*, Shigemasa Saito\*\*, Shingo Kajikawa\*\*\*

\*Toyama Prefectural University, \*\* T・C・Toyama Co., Ltd., \*\*\* Makino Milling Co., Ltd.

### 1. 緒言

近年、金型製作の効率向上を目的として、主軸スピンドルの高速化とともに、できる限り機械加工で最終仕上げ工程に近いところまで行われるようになってきた。そこで、主軸スピンドルの回転精度の一つである回転非同期振れ(Non repetitive run out)の低減<sup>①</sup>が求められている。この課題を解決するため、転がり軸受の保持器にエンジニアプラスチックなどを用いた樹脂保持器の開発が各社で進められている。樹脂保持器は、金属製保持器と異なり、保持器から摩耗粉が発生してもグリースの酸化劣化を促進させないため、高速回転での潤滑性を改善できると言われる<sup>②</sup>。その樹脂保持器は、通常、剛性などを確保するため、強化繊維を混合して作製される。強化繊維としては、コストに優れるガラス繊維が広く使われ、近年では炭素繊維も用いられるようになっている。炭素繊維は、ガラス繊維と比較して素材で十数倍、成形品で数倍高い価格になるが、引張強度や弾性率に優れる<sup>③</sup>ことから使用されている。

これらの樹脂保持器に対し、転がり軸受の高速回転への対応が求められている。高速回転での樹脂保持器の破壊現象として、転動体と保持器の繰り返し微小衝突や疲労の影響が考えられる。そこで、成形された樹脂保持器に対し、繰り返し衝撃性を評価することで、強化繊維の有無や各強化繊維を混合した場合の影響を調べる必要がある。

そこで本研究では、マイクロ・スラリージェット・エロージョン(MSE)試験<sup>④⑤</sup>により、射出成形された樹脂保持器の耐衝撃性評価を行った。MSE試験とは、微粒子と水を混合したスラリーを圧縮空気で加速噴射させて、試料表面に衝突させ、発生したエロージョン状態やそのエロージョン量から材料の表面強さを評価する試験である。これまで、研究室独自で進めてきている、大きな粒子を用いた方法<sup>⑥⑦</sup>を高度化し、投射粒子に平均粒子径100 μmを用いることで、転動体と保持器の繰り返し衝突を想定した、繰り返し衝撃力に対する保持器の耐衝撃性を評価できることを明らかにしてきた<sup>⑨⑩</sup>。本研究では、新たに樹脂保持器の損傷後の表面を電子顕微鏡で観察し、強化繊維の有無、ならびにガラス繊維や炭素繊維含有樹脂で射出成形した樹脂保持器の損傷形態について考察した結果を述べる。

### 2. 供試材料

試験片には、射出成形した3種類の樹脂保持器を切断したものを用いた。樹脂保持器全体写真をFig. 1に、保持器の切断箇所を示す写真をFig. 2に、切断後の各保持器の写真をFig. 3に示す。各保持器の大きさは、外径約80 mm、内径約75 mmである。この保持器を転動体ボールが挿入される穴部分の中央部で切断して試験片とした。今回の保持器は、射出成形時の樹脂の入口ゲートを1点にして成形された。そこで、繊維の有無や繊維の種類の違いを比較するため、入口ゲートに最も近い位置で保持器を切り出してMSE評価を行った。1つ目は、PEEKで射出成形された保持器(Fig. 3(a), 以下, PEEK NTと表記)を、2つ目は、PEEKにガラス繊維を重量比30%で充填して射出成形された保持器(Fig. 3(b), 以下, PEEK GF30と表記)を、3つ目は、PEEKに炭素繊維を重量比30%充填された保持器(Fig. 3(c), 以下, PEEK CF30と表記)を用いた。



Fig. 1 Photograph of the cage shape

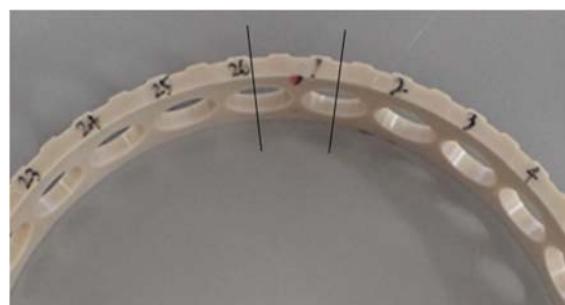


Fig. 2 Photograph of the cut part of cage



Fig. 3 Photographs of the cages after cutting

### 3. MSE 試験機および試験方法

試験機は、研究室独自仕様の大粒子投射型微粒子エロージョン試験機（パルメソ製：ノズル断面形状  $3 \times 3$  mm, 投射距離 10 mm）<sup>6)</sup>を使用した。投射粒子には、平均粒子径 100  $\mu\text{m}$  の球形アルミナ粒子を用いた。スラリー濃度は 3 mass% とし、スラリーフロー量は 700 mL/min, ノズルエア流量は 40 L/min になるように試験機のパラメータを調整後に試験を実施した。試験は、投射前と 5 g 投射ごとに投射量 20 g までレーザー顕微鏡で投射痕を繰り返し撮影することで、表層における耐衝撃性の影響を調べた。

## 4. 試験結果および考察

### 4.1 各試験片のエロージョン痕の断面形状曲線とレーザー顕微鏡観察結果

各試験片の 5 g 投射ごとのエロージョン痕の断面形状曲線と、投射前および投射粒子量 20 g 時のエロージョン痕をレーザー顕微鏡で観察したカラー画像を Fig. 4 に示す。エロージョン深さは、PEEK NT が最も浅くなり、PEEK GF30 が次に深く、PEEK NT が最も深くなつた。

PEEK NT は、断面形状曲線がほとんど変化せずに平滑性が保たれていることから、エロージョンの進行が抑制されることがわかる。

一方、PEEK GF30 と PEEK CF30 では、5 g 投射時点では、ほとんどエロージョンが進行しないが、10 g 投射後になるとエロージョンが進行する。この時点では、PEEK GF30 の方が、PEEK CF30 よりもエロージョンが進行している。しかし、20 g 投射後になると PEEK CF30 の方が PEEK GF30 よりもエロージョンが進行する。

レーザー顕微鏡の観察結果より、PEEK NT では、投射前に見られた金型から転写された筋が消えて平滑になつた。一方、PEEK GF30 と PEEK CF30 では、投射後に白い塊見られた。この白い塊は凸部となっているようにみられ、凹部の部分では強化纖維が露出していた。

### 4.2 各試験片の損傷後の表面の凹凸状態について

各試験片のエロージョン後の表面の凹凸状態を詳細に観察するため、SEM (TM-1000) で 20 g 投射後の投射痕を斜めに観察した。PEEK NT, PEEK GF30, PEEK CF30 の反射電子像を Fig. 5 に示す。

PEEK NT では、投射痕に一部損傷箇所がみられるが、レーザー顕微鏡での観察結果同様に、ほぼ滑らかな表面であった。

一方、PEEK GF30 と PEEK CF30 では、粒子の衝突痕が鮮明に見られる。両試験片ともに、衝突痕には表面から剥がれたような部分が多く見られた。これらのことから、強化纖維を含む樹脂保持器は、表面に衝撃が加わることで、強化纖維と樹脂との間で界面剥離が生じるため、凹凸が多くなっていると考えられる。また、PEEK GF30 よりも PEEK CF30 の方が剥離している部分が多く存在するように見える。このことから、PEEK CF30 の方が PEEK GF30 よりも粒子衝突による界面剥離が起きやすくなり、エロージョンの進行も早くなつたと考えられる。

次に、PEEK GF30 と PEEK CF30 の強化纖維の状態の違いを見るために、表層の纖維の状態を SEM (TM-4000) で観察した。20 g 投射後の投射痕の反射電子像を Fig. 6 に示す。

PEEK GF30 では、ガラス纖維（赤枠部）が露出している部分、PEEK CF30 では、炭素纖維（赤枠部）が露出している部分がみられる。

PEEK CF30 と PEEK CF30 で共通する点は、露出した強化纖維が割れています。このことから、ガラス纖維、炭素纖維とともに、割れや破損が起きて空隙が生まれ、樹脂が剥がれていくと推察される。

一方、PEEK GF30 と PEEK CF30 で違う点は、PEEK CF30 の投射痕には、PEEK GF30 に比べて大きな剥離が多くみられる点である。PEEK CF30 では、所々にみられる露出した炭素纖維は、同じ方向を向いて集まっているのに対し、PEEK GF30 では、ガラス纖維はある程度分散して配向している。これらのことから、PEEK CF30 の方が、PEEK GF30 よりも強化纖維同士の距離は近いため、強化纖維と樹脂の界面の剥離が繋がりやすく、大きい剥離となつたと考えられる。PEEK CF30 の強化纖維同士の距離が近く配向がそろつた要因として、同じ重量比混合でも炭素纖維の数がガラス纖維より多くなっているため、PEEK CF30 の強化纖維の数が PEEK GF30 よりも多いことが要因といえる。

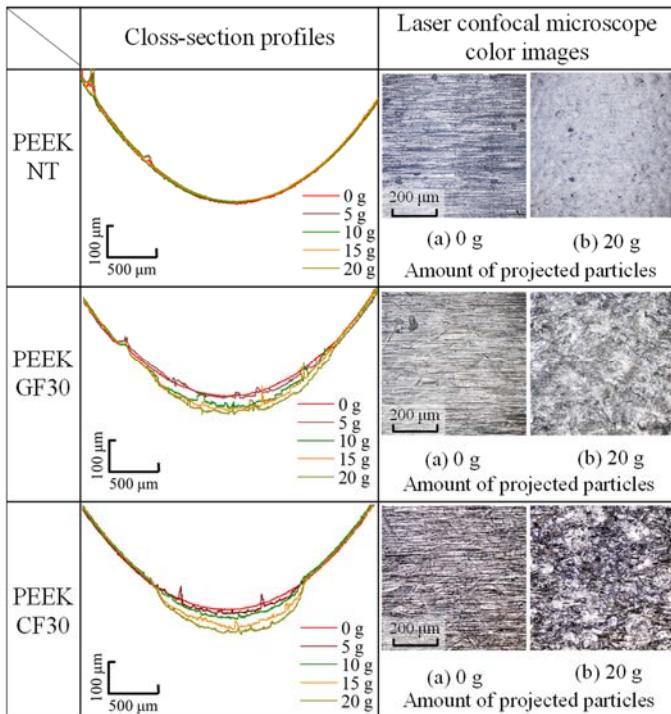


Fig. 4 Cross-section profiles and laser confocal microscope color images of the eroded surfaces

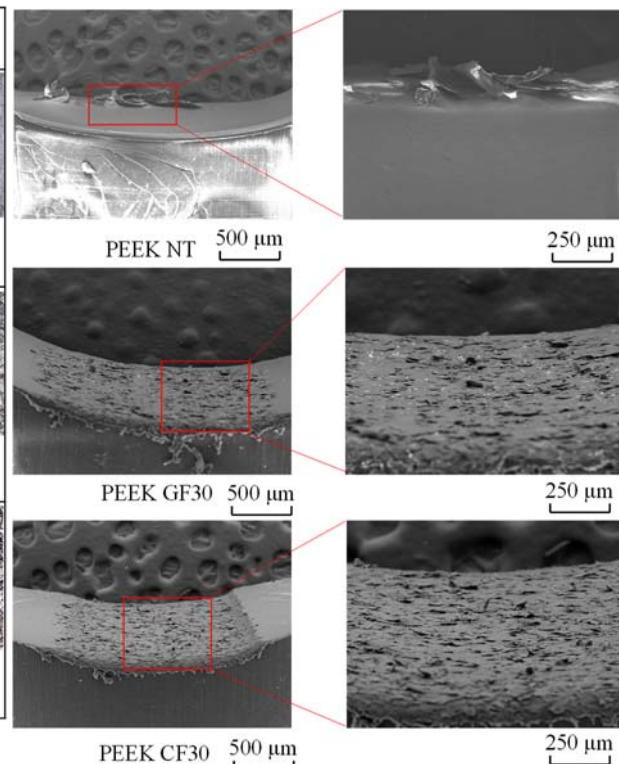


Fig. 5 SEM image of the eroded surface after 20 g projection surface

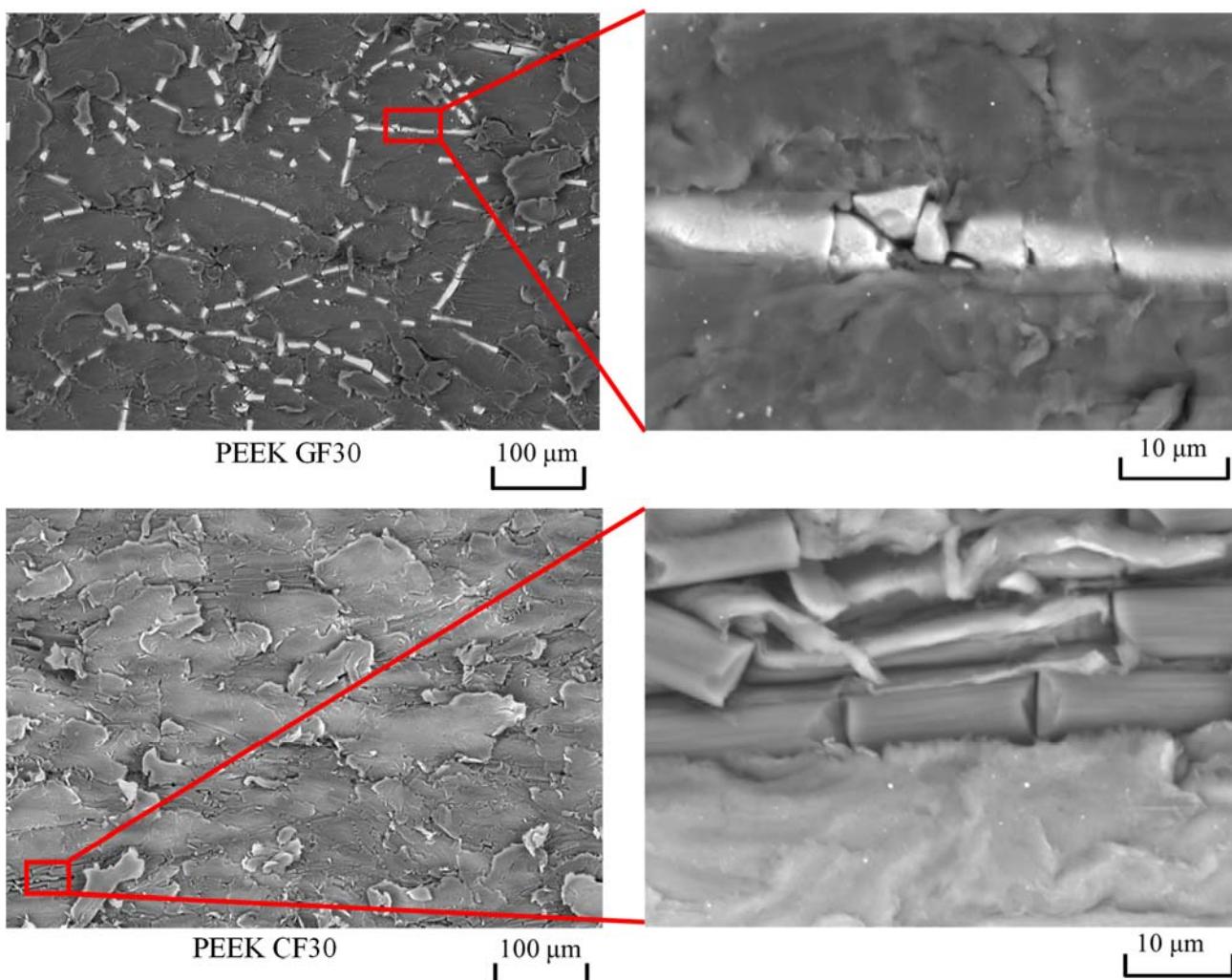


Fig. 6 SEM images of eroded surfaces after 20 g projection surface (Enlarged)

#### 4.3 強化繊維入り樹脂保持器の損傷形態

PEEK GF30 と PEEK CF30 の損傷形態を予測する。損傷形態の模式図を Fig. 7 に示す。最初、表面に繰り返し衝撃が加わることで、表層に存在する強化繊維に割れや破損が起き、その強化繊維の損傷部に空隙が発生する。次に、繰り返し衝撃が加わることで、空隙から樹脂と強化繊維の界面が剥離する。その後、樹脂が強化繊維の界面から剥離することで、強化繊維が露出する。さらに、強化繊維が露出することで、強化繊維の割れや破損がより進行しやすくなるため、剥離部分が多く現れ、エロージョンが進行しやすくなると考えられる。

今回の PEEK GF30 と PEEK CF30 のように強化繊維の数に違いがある場合、PEEK GF30 では、剥離がガラス繊維の大きさに合わせて発生するのに対し、PEEK CF30 では、炭素繊維が密集することで、剥離が繋がりやすくより大きな剥離となると考えられる。そのため、PEEK CF30 の方が PEEK GF30 よりも剥離しやすく、また剥離もつながりやすくなるため、損傷の進行も早くなつたと考えられる。

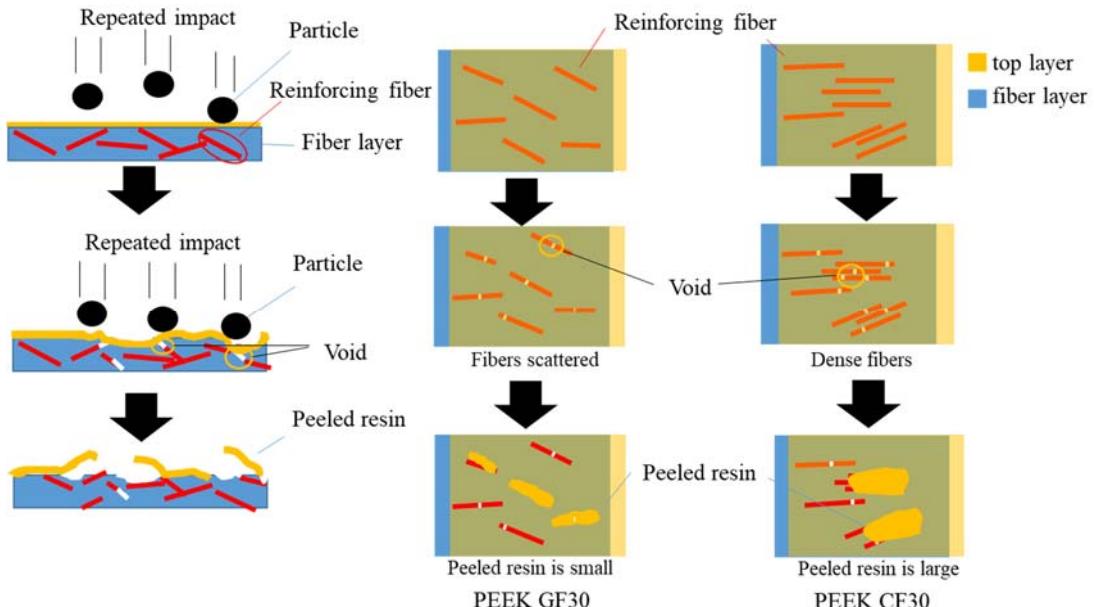


Fig. 7 Schematic diagram of damage morphology of PEEK GF30 and PEEK CF30

#### 5. 結言

- (1) PEEK NT は、PEEK GF30 および PEEK CF30 に比べてエロージョンが抑制されることから、強化繊維を含有しない方が耐衝撃性に優れるといえる。
- (2) 強化繊維の種類の違いによる PEEK GF30 と PEEK CF30 において、PEEK GF30 は、PEEK CF30 に比べて、エロージョンが抑制されることから、耐衝撃性に優れるといえる。
- (3) PEEK GF30 と PEEK CF30 において、表面に衝撃が加わることで、強化繊維に割れや破損が生じ、その空隙から強化繊維と樹脂で界面が剥離することを明らかにした。
- (4) PEEK GF30 と PEEK CF30 において、繊維の数が PEEK GF30 の方が PEEK CF30 よりも少ないため、PEEK GF30 の方が損傷後の表面が剥離しにくくと示唆された。

#### 文献

- 1) 前田：JIMTOF2018 における転がり軸受の技術動向と IoT 関連技術の活用、機械設計、63, 5 (2019) 66-68
- 2) 里田・中尾：EV/HEV 用グリース潤滑高速深溝玉軸受、TECHNICAL REVIEW, 83 (2015) 83
- 3) 松井：ガラス繊維・炭素繊維・複合材料の産業論による分析、富大経済論集、52, 2 (2006) 279-301
- 4) Yoshiro Iwai, Toshiro Miyajima, Tomomi Honda, Tohru Matsubara, Kanda Kazutaka, Hogmark Sture : Evaluation of erosive wear resistance of TiN coatings by a slurry jet impact test, Wear, 261, 1 (2006), 112-118.
- 5) 松原・岩井：トライボ材料の表面特性の評価と可視化、トライボロジスト、62, 12 (2017) 773-779
- 6) 宮崎・宮島：金型用硬質薄膜の微粒子エロージョンによる耐繰り返し衝撃・耐剥離性の評価、トライボロジー会議 2018 秋 伊勢 予稿集 (2018) B36
- 7) 山下・宮島：微粒子エロージョンによる CrN 系硬質薄膜の表面強度評価、日本機械学会 2019 年度年次大会講演論文集 (2019) J16408P
- 8) 奥井・宮島・鈴木・里見・河村：MSE 法による金型用硬質薄膜の表面強さ評価、トライボロジー会議 2020 秋 別府 予稿集 (2020) E5
- 9) 川野・宮島・舟戸・齋藤・會田・梶川：微粒子を用いた MSE 法による射出成形樹脂保持器の強さ評価、トライボロジー会議 2021 秋 松江 予稿集 (2021) D14
- 10) 宮崎・宮島・舟戸・齋藤・會田・梶川：大粒子を用いた MSE 法によるベアリング用樹脂保持器の耐衝撃性評価、トライボロジー会議 2021 秋 松江 予稿集 (2021) D11