

微粒子を用いた MSE 法による繊維強化樹脂保持器の強さ評価 —強化繊維の破碎・脱落の影響—

Strength evaluation of the fiber reinforced resin cage by the MSE method using fine particles
- Influence of crushing and dropping of fibers -

富山県立大・院（学）*川野 滉介 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）齋藤 重正

（株）牧野フライス製作所（正）梶川 真吾

Kosuke Kawano*, Toshiro Miyajima*, Yasunori Funato**, Shigemasa Saito**, Shingo Kajikawa***

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

1. 緒言

ベアリングの構成部品である樹脂製保持器は、金属製保持器に比べて軽量で自己潤滑性や耐薬品性に優れることから、様々なベアリングに使用されている。工作機械においても、主軸に樹脂保持器を用いたベアリングが使用されており、近年、工作機械の高精度化に伴い、さらなる高品質な樹脂保持器が求められている¹⁾。この樹脂保持器を考える際、様々なメーカーの樹脂材料があることや、それぞれの樹脂材料で射出成形時の成形温度や樹脂流動性の影響などにより、樹脂保持器の場所による強化材の充填状態や、表面性状に違いが生じる²⁾可能性がある。そのため、より高精度な樹脂保持器を製作するためには、各種材料で製作された樹脂保持器の表面状態や表面強さ等を評価し、成形条件にフィードバックすることが重要と考えられる。

そこで、表面状態や表面強さを評価する手法として、岩井と松原が提案したマイクロ・スラージェット・エロージョン（MSE）法³⁾⁴⁾を用いることを検討した。この MSE 法は、粒径 $1.2\ \mu\text{m}$ の不定形粒子や $3\ \mu\text{m}$ の球形粒子等と水を混合したスラリーを圧縮空気ですべて高速で投射し、数ナノから数マイクロの微小な単位でエロージョンを進行させて、物理エッチング的な手法による表面状態評価や、表面から深さ方向の強さ分布を評価する手法である。本研究室においても、この MSE 法を用いて、様々な材料評価に応用する研究を進めている⁵⁾⁶⁾⁷⁾。昨年度の著者らの研究では、チタン酸カリウム繊維充填 PA66（polyamide 66）系樹脂材料、およびガラス繊維充填 PEEK（Poly Ether Ether Ketone）樹脂で作製した樹脂保持器表面の MSE 評価を実施し、各保持器の表面強さを評価した⁸⁾。

本研究では、昨年度と同じチタン酸カリウム繊維充填 PA66 系樹脂および PEEK 樹脂の他に、それぞれに炭素繊維を含有した樹脂の計 4 種類の樹脂を用いて射出成形された樹脂保持器に対し、投射粒子に粒径 $3\ \mu\text{m}$ の球形アルミナ粒子を用いて MSE 評価を行うことで、各樹脂保持器の表面から内部方向の強さを評価した。特に、極表層を詳細に評価することに着目し、昨年度よりも投射力を低くした試験機を用いて投射量を増やすことで、炭素繊維の破碎・脱落の影響や、表層から内部の強さを詳細に評価した。

2. 供試材料

試験片には、4 種類の材料で射出成形した樹脂保持器を用いた。保持器の外観写真の一例を Fig. 1 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で切断して試験片とした。なお、この保持器は、樹脂の入口ゲートを 1 点にして製作した。そこで、MSE 試験では、樹脂充填のゲートからの距離を統一して評価するため、入口ゲートに近い位置で評価した。各保持器を切断した試験片の外観写真を Fig. 2 に示す。1 つ目は、PA66 系樹脂にチタン酸カリウム繊維を重量比 10% 充填された保持器（Fig. 2(a)，以下、PA66 F10 と表記）、2 つ目は、PEEK 樹脂から成形された保持器（Fig. 2(b)，以下、PEEK NT と表記）、3 つ目は、PA66 F10 に炭素繊維を重量比 10% 充填された保持器（Fig. 2(c)，以下、PA66 F10+CF10 と表記）、4 つ目は、PEEK NT に炭素繊維を重量比 30 % 充填された保持器（Fig. 2(d)，以下、PEEK CF30 と表記）である。なお、PA66 系と、PEEK 系の試験片の樹脂ペレットは、メーカーが異なる。



Fig. 1 Photograph of the cage

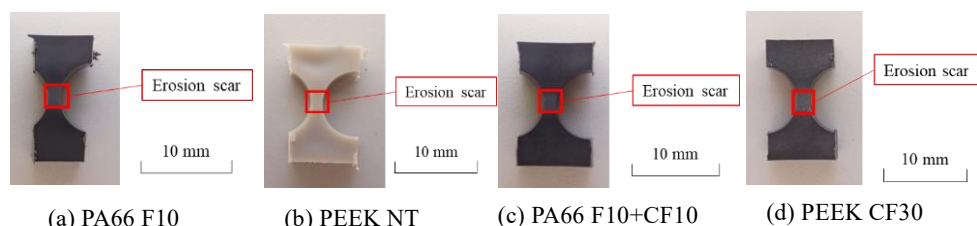


Fig. 2 Photographs of the specimen for MSE test

3. 試験機と試験方法

試験機には SBE-TS401（パルメソ製：ノズル断面形状 2×2 mm，投射距離 10 mm）⁹⁾を用いた．球形アルミナ粒子 BA3（平均粒子径 3 μm）を用いて，スラリー濃度が 3 mass%になるようにスラリーを作製した．スラリー流量は 500 mL/min，ノズルエア流量は 21 L/min になるようにノズルエア圧力とノズルスラリー圧力を調整した．

試験は，転動体ボールが入る穴と穴の間の中央箇所の表面に 1 g ずつ投射し，その後，投射量 6 g を超えてから 2 g ずつ投射を行い，投射量 30 g まで投射を行った．投射毎に，エロージョン痕をレーザー顕微鏡で観察するとともに，微細形状測定器（小坂研究所製：ET-200）で投射痕のエロージョン深さを測定した．

4. 試験結果と考察

4.1 投射量ごとの表面状態変化の観察

PA66 F10，PEEK NT，PA66 F10+CF10，PEEK CF30 試験片での投射前（0 g），および 1 g，5 g，30 g 投射後のエロージョン痕のレーザー顕微鏡輝度画像を Fig. 3 に示す．

PA66 F10 と PEEK NT の場合，1 g 投射後では，投射前に見られた金型の痕が消え，表面が平滑になった．5 g 投射後以降においても，表面が平滑になった．この結果から，PA66 F10 と PEEK NT の場合，表面が平滑にエロージョンしていくことがわかる．

PA66 F10+CF10 の場合，投射前から炭素繊維が露出し，細かい凹凸が多くみられた．5 g 投射後では，内部の炭素繊維が現れ，投射前表面にみられた細かい凹凸は消えた．30 g 投射後では，5 g 投射後の炭素繊維量よりも多くの炭素繊維がみられた．それらの炭素繊維は，様々な方向に配向していた．この結果から，PA66 F10+CF10 の場合，炭素繊維は，表面から内部に入ると多くなり，様々な方向に向いて成形されることがわかった．

PEEK CF30 の場合，1 g 投射後では，投射前でみられた金型の痕が消えて表面が平滑になり，表層でみえていなかった炭素繊維が露出し始めた．5 g 投射後では，炭素繊維は表層に多く露出し始め，30 g 投射後では，より多くみられた．それらの炭素繊維は，樹脂の流れ方向と同じ横向きに配向していた．この結果から，PEEK CF30 において，炭素繊維は表面に存在せず，内部に入ると量が多くなり，樹脂流れ方向である横向きに配向することがわかった．

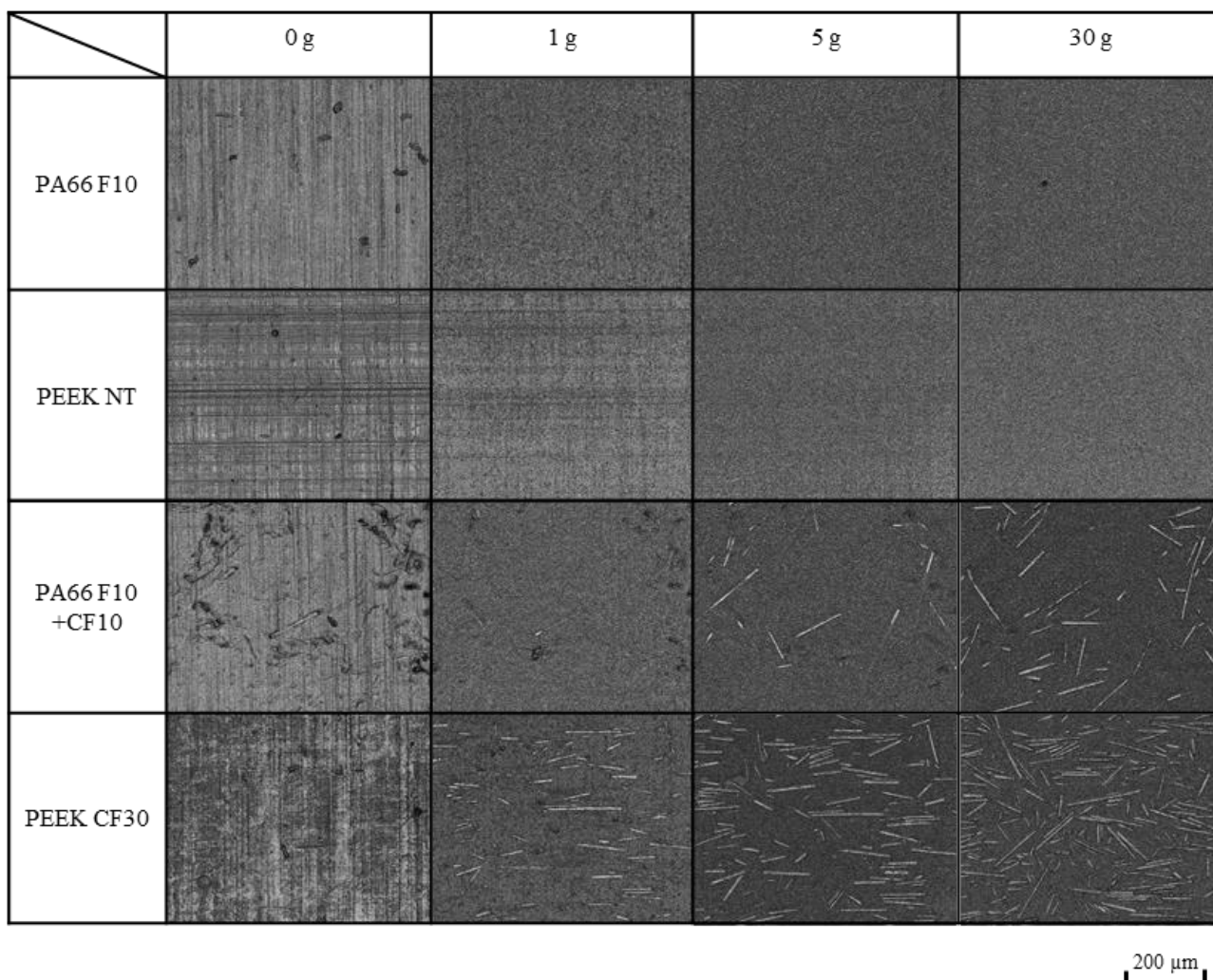


Fig. 3 Laser confocal microscopes luminance images of the eroded surfaces

4.2 炭素繊維の脱落状態の観察

炭素繊維の破壊形態を詳細に観察するため、炭素繊維強化の PA66 F10+CF10 と PEEK CF30 の投射量毎のエロージョン面をレーザー顕微鏡で拡大して観察した。そのカラー画像を Fig. 4 に示す。各保持器とも、20 g 投射後、炭素繊維が割れて脱落した。その脱落の仕方は材料によって異なる。PA66 F10+CF10 の場合、炭素繊維は、割れて細かく破碎された後、樹脂表面に残り、その後、細かく脱落する。一方、PEEK CF30 試験片の場合、炭素繊維は、割れて大きく脱落する。各保持器の炭素繊維の直径をエロージョン面から測定すると、PA66 F10+CF10 では約 $6.0\ \mu\text{m}$ 、PEEK CF30 では約 $7.0\ \mu\text{m}$ である。この結果より、炭素繊維の直径はほとんど変わらないことから、同じ炭素繊維であっても、メーカが異なることで、両者の炭素繊維の破壊形態は変わったと示唆される。

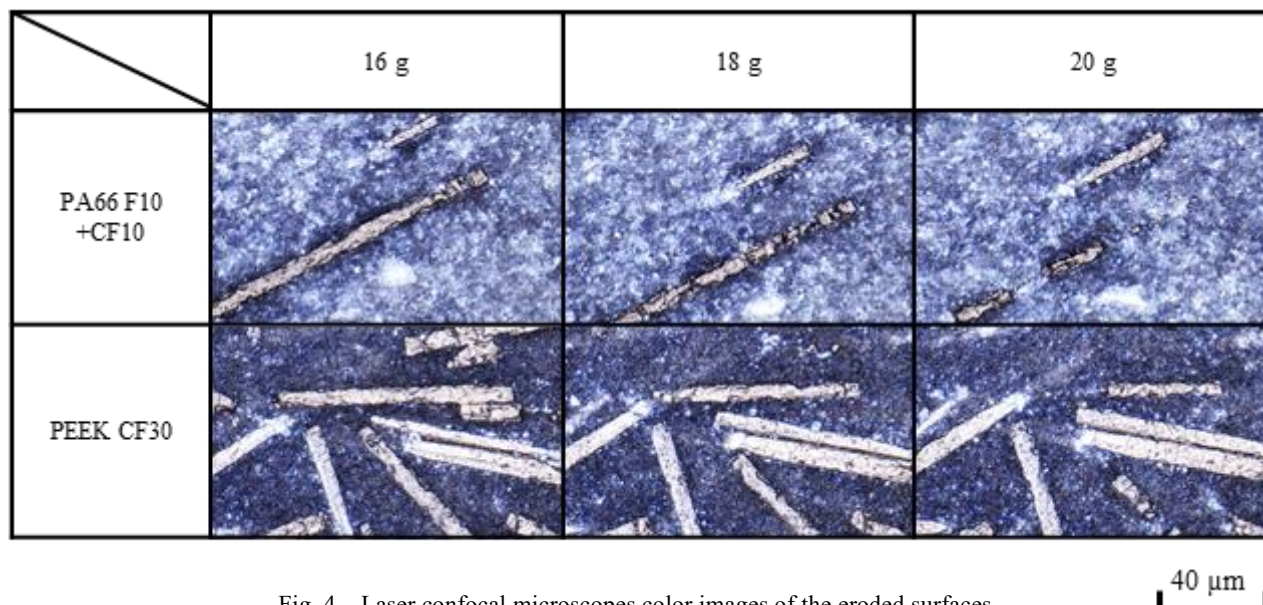


Fig. 4 Laser confocal microscopes color images of the eroded surfaces

4.3 各材料の表面強さ評価

各保持器のエロージョン進行曲線を Fig. 5 に示す。各保持器ともに、投射の最初の数グラムにおいては、エロージョンがほとんど進行しない潜伏期間を有する。つまり、極表面は微小な衝突摩耗に対して強いことが示唆される。その後、投射粒子量 3 g 以降では、ほぼ直線的にエロージョンが進行した。その進行状況は各保持器で異なる。

そこで、投射粒子量 3 g 以降のエロージョン進行曲線の直線の傾きを、最小二乗法によって求め、その値をエロージョン率として比較した。各試験片のエロージョン率を Fig. 6 に示す。

樹脂の違いで比較をすると、PA66 F10 と PEEK NT の場合、PA66 F10 は PEEK NT よりもエロージョン率が $0.11\ \mu\text{m/g}$ 低い。また、炭素繊維が含有された PA66 F10+CF10 と PEEK CF30 の場合も、PA66 F10+CF10 は PEEK CF30 よりもエロージョン率が $0.12\ \mu\text{m/g}$ 低い。

炭素繊維の有無で比較すると、PA66 F10 と PA66 F10+CF10 の場合、PA66 F10 は、PA66 F10+CF10 よりも $0.10\ \mu\text{m/g}$ 低い。また、PEEK NT と PEEK CF30 の場合、PEEK NT は、PEEK CF30 よりも $0.11\ \mu\text{m/g}$ 低い。

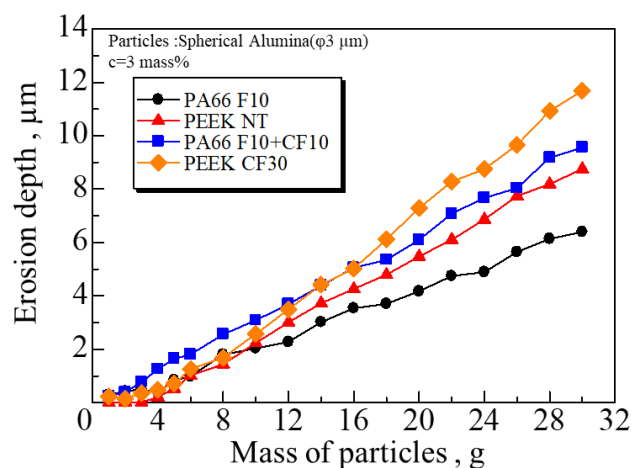


Fig. 5 Relationships between mass of particles and erosion depth

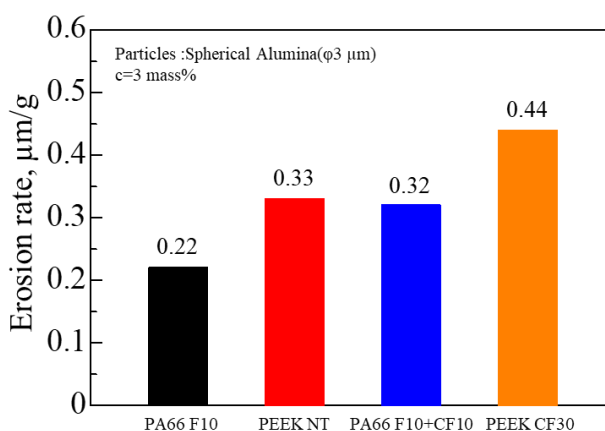


Fig. 6 Erosion rate of specimens

これらの結果から、PA66 F10 は PEEK NT よりも微小な繰り返し衝突・衝撃に対して強いこと、また、炭素繊維を含有させた場合においても、PA66 F10+CF10 は、PEEK CF30 よりも、微小な繰り返し衝突・衝撃に対して強くなることが示唆された。

4.4 まとめ

本研究では、射出成形した樹脂保持器の微粒子を用いた MSE 評価を行うことで、以下の点を明らかにした。

炭素繊維の配向状態について、PA66 F10+CF10 では、炭素繊維は様々な方向に配向したのに対し、PEEK CF30 では、樹脂の流れ方向と同じ方向に配向したことがわかった。

炭素繊維の破壊形態について、PA66 F10+CF10 では、炭素繊維は、割れて細かく破砕された後、樹脂表面に残り、その後、細かく脱落する。一方、PEEK CF30 では、炭素繊維は、大きく割れて脱落することがわかった。

表面から内部の表面強さについて、各保持器とも極表面では、表面強さが内部に比べて優れていること、また、炭素繊維を含有することでエロージョン率が高くなること、中でも、PA66 F10+CF10 は PEEK CF30 に比べてエロージョン率が低くて耐衝撃性に優れていることがわかった。

以上の結果から、微小な衝突摩耗を有する状況において、炭素繊維を含有させない場合 PA66 F10、炭素繊維を含有させる場合 PA66 F10+CF10 の表面強さが、強いといえる。

5. 結言

- (1) PA66 F10+CF10 では、炭素繊維は様々な方向に配向し、PEEK CF30 では、樹脂の流れ方向と同じ方向に配向している。
- (2) 炭素繊維含有の樹脂保持器では、炭素繊維量は表面から内部に入るほど多くなる。
- (3) 炭素繊維の破壊形態において、PA66 F10+CF10 では、炭素繊維は、割れて細かく破砕された後に樹脂表面に残り、その後、細かく脱落するのに対し、PEEK CF30 では、大きく割れて脱落する。
- (4) 各樹脂保持器において、エロージョンはほとんど進行しない潜伏期間がある強い表面層を有する。
- (5) 微小な粒子衝突による耐衝撃性は、炭素繊維を含有することで悪化すること、炭素繊維を含有する場合、PA66 F10+CF10 の方が PEEK CF30 に比べて良好である。

文献

- 1) 野口：工作機械のトライボロジー分野の最新動向，トライボロジスト，65, 1 (2020) 23-24
- 2) 有方：射出成型加工の不良対策，日刊工業新聞社 (2003)
- 3) 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
- 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) 宮崎・宮島・堀川・里見・川村：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
- 6) 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
- 7) 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
- 8) 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
- 9) 宮島・宮崎・鈴木・堀川・里見・河村：金型用硬質薄膜の MSE 法および微粒子エロージョン法による表面強度評価，トライボロジー会議 2019 春 東京 予稿集 (2019) D17