

## 食品機械用動力伝達系への微粒子投射処理の適用

熊谷 正夫\*

## Application of Fine Particle Bombarding to Power Transmission System for Food Machinery

Masao KUMAGAI\*

## Abstract

With the aim of providing long service life and noise reduction of drivetrain components such as gears, various materials have been developed and various type of heat treatment and surface modification has been applied. Fine Particle Bombarding, which is one of the surface modification methods, has been widely used due to excellent fatigue properties by introducing compressive residual stresses, and due to low friction properties by creating surface profile. As for automotive drivetrain components etc., besides material-related development, lubricants and additives have a huge effect on properties above, and therefore, it is becoming important to investigate regarding the combination of surface modification methods, lubricant and additive technology. On the other hand, concerning food machinery, there are many regulations that enable securing food safety. Above all, in Japan it was mandated for food-related business operator to introduce HACCP (Hazard Analysis and Critical Control Point) systems-compliant sanitary management system from June 2020. And powertrain components of the food machinery such as gears are made of stainless steel for rust prevention. Furthermore, as lubricants and additives for them, only the NSF H1-certified lubricants and the FDA (U.S. Food and Drug Administration)-approved additives are allowed to be use. This paper describes a new hybrid technique utilizing Fine Particle Bombardment process and DLC (Diamond-Like Carbon) coating process, which improves sliding properties and anti-seizing properties under the restricted conditions of food machinery noted above.

**Key Words** : fine particle bombarding, food machinery, surface morphology, surface modification, DLC, HACCP

## 1. はじめに

歯車をはじめとした動力伝達部品は、自動車部品をはじめとして各種機械に幅広く用いられている。歯車の故障要因は、主として摩耗と疲労破壊と考えられるが、現在では、材質や熱処理、コーティングなどの各種表面処理法の発展や添加剤を含む潤滑油などの開発により、大幅な寿命延長が実現されている。

食品機械では、一般産業機械と異なり、食の安全性の観点から様々な制限がある。例えば、使用される材質は防錆上からステンレス鋼が用いられ、使用される潤滑油や添加剤にも種々の観点からの安全性が求められる。とりわけ、今年（2020年6

月）、ハザップ（HACCP, Hazard Analysis and Critical Control Point）と呼ばれる食品の衛生管理手法が義務化され、そこでは潤滑油や添加剤の使用制限が明確化されている。

食品機械の国内販売額は5817億円（日本食品機械工業会 2018）で一般産業機械の52275億円（産業機械工業会 2018）の1割程度であるが、コロナ以降の産業構造の転換を考慮すれば、内需産業であり今後の伸長が期待される分野である。また、食の安全という市民生活に係る重要な分野である。にもかかわらず、車関係の動力伝達系と比較して、トライボロジ的な検討はあまりなされていない。

本稿では、食品機械を対象に微粒子投射処理に

(株)不二 WPC 技術部 (〒252-0331 神奈川県相模原市南区大野台 4 丁目 1-83)  
Engineering Div., Fuji WPC Co., Ltd. (1-83, Onodai 4-chome, Minami-ku, Sagamihara-shi, Kanagawa 252-0331)

\* Corresponding author : E-mail: kumagai@fujiwpc.co.jp

よる動力伝達部品の高機能化として、主として表面形状形成によるしゅう動特性の向上やダイヤモンドライクカーボン（DLC, Diamond-Like Carbon）被覆との複合処理に関して解説する。また、HACCP等も含めた食品機械に必要な条件についても紹介する。

## 2. 微粒子投射処理について

### 2.1 微粒子投射処理の効果

微粒子投射処理<sup>1)</sup>（FPB, Fine Particle Bombarding）はショット・ピーニングの一種で、投射粒子が微細な  $200\mu\text{m}$  以下（よく使用されるのは  $50\mu\text{m}$  程度）の硬質微粒子を投射し、材料表面の改質を行う手法である。投射粒子はエア・ノズルで投射されるため、投射粒子が細くなることにより、粒子速度（ $100\sim 200\text{m/s}$ ）も速くなる。ショット・ピーニングは表面層に圧縮残留応力を付与して疲労強度を向上させる手法であるが、投射する粒径が小さくなると、塑性変形が優先になり応力分布の最大ピークは表面層に移行し応力値も大きくなる。

現在では、材料の清浄化が進んでおり、疲労破壊は表面起因のものが主となっており、疲労強度向上に有効な手段となっている。

実際、歯車に微粒子投射処理による圧縮残留応力を付与することにより、歯面のピッチング摩耗や歯元の疲労破壊を大幅に低減することができる。また、微粒子投射処理による表面層の塑性変形は、金属組織のナノ結晶化<sup>2,3)</sup>や微細化をもたらす。金属組織の微細化も疲労強度の向上に有効に作用する。さらに、残留応力や金属組織の微細化は表面硬度の上昇をもたらす耐摩耗性の向上も得ることができる。

トライボロジーの観点からは、塑性変形に伴い、表面にはクレータ状のディンプルが不規則に形成される<sup>1,4)</sup>。クレータの凸部は、接触点の増加をもたらす。一接触点当たりの接触面積を減少することでしゅう動特性を向上させる。また、クレータ凹部は潤滑しゅう動では良好な油溜まりとなる。切削痕などの線状の形状と比較して変形による閉空間を作りやすく油保持性が高くなり、摩擦の低減や凝着防止に有効である。

摩擦の低減は負荷の低下によるピッチング摩耗や疲労破壊の対策にも有効であり、圧縮応力の付与と相まって歯車などの長寿命化に重畳的な効果を得ることができる。

### 2.2 微粒子投射処理によるスティックスリップと摩擦の減少

微粒子投射処理による表面形状形成は、摩擦やそれに伴うスティックスリップの低減に有効である。摩擦やスティックスリップの減少についてボールオンディスク往復しゅう動試験による結果を示す。試験は無潤滑状態で実施し、基板としてSUJ2基板（微粒子投射処理の有無）、SUJ2ボール（直径： $10\text{mm}$ ）を用いた。試験条件は負荷荷重（ $1\sim 3\text{N}$ ）、速度（ $1\text{mm/s}$ ）、しゅう動幅（ $10\text{mm}$ ）である。しゅう動初期の摩擦力の変化により摩擦とスティックスリップを評価した。

負荷荷重  $2\text{N}$  での摩擦力の時間変化を図1に示す。鏡面試料と比較して、微粒子投射処理を行った試料では摩擦力が低下すると同時に変動も小さくなっている。また、位置-摩擦プロットを図2に示す。鏡面試料では、摩擦力の大幅な変化が見て取れ、スティックスリップが発生していることがわかる。微粒子投射処理でも同様の現象が発生

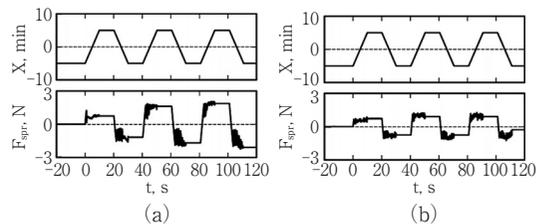


図1 未処理(a)、FPB処理(b)試料の摩擦力の時間変化

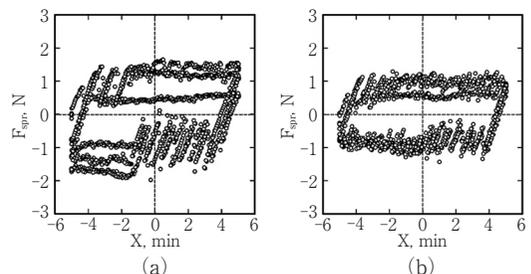


図2 未処理(a)、FPB処理(b)試料の位置ならびに摩擦力の時間変化

しているが、大幅に低減されている。また、位置-摩擦力プロットの矩形で囲まれた領域は逸散エネルギーで微粒子投射処理による形状形成により使用エネルギーの損失も大きく低減されている。

使用したボールのしゅう動面の観察結果を図 3 に示す。微粒子投射処理では均一に摩耗しているが、未処理（平滑面）では不均一かつ凝着物が観察される。

形状形成（ディンプル形成）による摩擦やスティックスリップの低減<sup>2)</sup>には、多点接触による一接触点当たりの面積の微小化が寄与している。接触面積の微小化は接触時間を減少し、しゅう動時に接触点が次々に移行する。

その結果、

①接触時間が短いため、金属表面の酸化膜摩擦が減少し、酸化膜接触が維持される

②接触時間が短いため、負荷による弾性変形や塑性変形の量が少なくなり、真実接触面の面積が減少する

③ディンプル形状による空気溜まりが形成しやすく、実効的な負荷が減少する

などの現象が起きる。

ボールしゅう動面に凝着物の付着が多いことから、本試験の条件では、酸化膜接触による、凝着の抑制が主たる要因と考えられる。

摩擦・摩耗やスティックスリップには様々な要因が考えられるが、歯車などの故障要因としては凝着摩耗や凝着摩耗を起因とした摩耗粉の存在、焼付きなどが多く、凝着の抑制は歯車などの長寿命化、低騒音化に有効な対応策であり、微粒子投射処理による微細ディンプルの形成は凝着や摩擦摩耗の抑制に有効な効果が得られる。

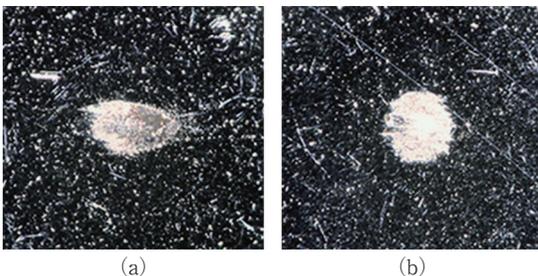


図 3 未処理(a)、FPB 処理(b)のボールのしゅう動面の観察

### 3. 食品機械への微粒子投射処理の適応

#### 3.1 HACCP の義務化と食品機械

2020 年の 6 月から 1 年間の猶予期間があるものの食品の衛生管理手法である HACCP<sup>5)</sup>が義務化される。HACCP とは食品等の事業者が危害要因を除去あるいは低減するための衛生管理の手法で、食品製造装置（食品機械）にも適応される。本稿に関係する項目として、食品機械への HACCP 対応としては、潤滑剤（潤滑油ならびに添加剤）の使用やコーティングなどがある。HACCP の指針によると、潤滑剤への考え方の優先順位は、

(1) 潤滑剤を使用しない

(2) 潤滑剤が漏れない・触れない対策

(3) 偶発的接触が許容される潤滑剤の使用

とされている。また、使用できる潤滑油も、アメリカ衛生基金（NSF, National Sanitation Foundation）H1 と呼ばれる米国食品医薬品局（FDA, Food and Drug Administration）に適合したベースオイルと添加剤となっている。さらに、食品への潤滑油の混入許容濃度は 10ppm を超えないこととされており、極力少量での使用が推奨されている。

ベースオイルに関してはポリ  $\alpha$  オレフィン（PAO, poly- $\alpha$ -olefin）等の合成油や流動パラフィン（ホワイトオイル）等も使用可能であるが、添加剤に関してはかなりの制限を受けることになる。

食品機械の歯車などの動力伝達系は防錆上から主としてステンレス鋼が使われる。ステンレス鋼は、熱伝導が高く、SUS304 などは熱膨張係数も高いため溶着しやすい、窒化や浸炭などの熱処理は耐食性が低下するなどの物性を有しており、歯車などの動力伝達系部品に使用するには難しい材料である。また、通常の歯車等に使用される機械構造用合金鋼（SCr, SNCM）と比較して軟らかいため、下地変形に追従しにくい DLC 被覆をはじめとした硬質薄膜ははく離しやすいといった問題もある。

ここでは、食品機械を想定したステンレス鋼を基材として、HACCP 対応潤滑油・添加剤使用時の微粒子投射処理の効果と DLC 被覆による無潤

滑しゅう動について検討した結果を紹介する。

### 3.2 微粒子投射処理による NSF H1 対応潤滑剤の効果

微粒子投射処理の食品機械への適用のため、ステンレス鋼を用いたボールオンディスク摩擦試験を実施した結果を紹介する。ディスクは平滑面(#700 磨き)、微粒子投射処理の2種類とした。各試料の表面形状のレーザ顕微鏡による計測結果(3D 画像)を図4に示す。図は形状確認をしやすくするために縦横比を10倍にしている。

試験には、基板は上述の SUS304 基材、ボールは SUS304 ボール(直径 6mm)を用いた。使用したオイルは NSF 規格 H1 グレードのスプレーを用いた。オイルは基板に少量スプレー後、基板を回転させ、遠心力で基板縁部に溜まったオイルを除去し試料とした。負荷荷重は予備的な検討により、焼付き性の評価が可能な 7N に設定した。同荷重は摩耗を考慮しない初期状態で、ヤング率(197 GPa)、ポアソン比(0.3)で計算するとヘルツ面圧は 761 MPa (7.8t/cm<sup>2</sup>)と計算される。自動車部品では、バルブリフタの面圧に近く、比較的デザインの自由度の高い食品機械では、十分高負荷と考えられる。

試験結果を図5に示す。未処理試料では 700 lap、処理試料では 7000lap 程度で摩擦係数が増大し、焼付きが発生しかかっている。微粒子投射処理により焼付き時間は一桁ほど延長されている。試験終了後の摩耗痕のレーザ顕微鏡による 3D 観察結果を図6に示す。微粒子投射処理のような形状形成では凹凸の影響で接触範囲が広がるため、単純な比較は難しいが、摩耗幅はほぼ同程度の 500 $\mu$ m 程度、摩耗深さは未処理で 10 $\mu$ m、処理試料で 5 $\mu$ m 程度である。処理試料では lap 数が一

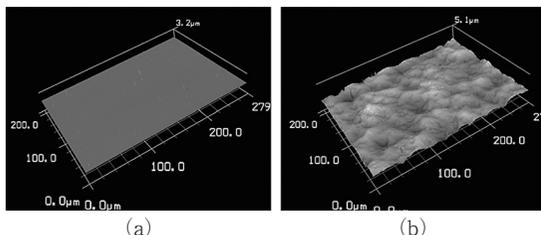


図4 未処理(a)、FPB処理(b)のレーザ顕微鏡による3D画像(縦横比10:1)

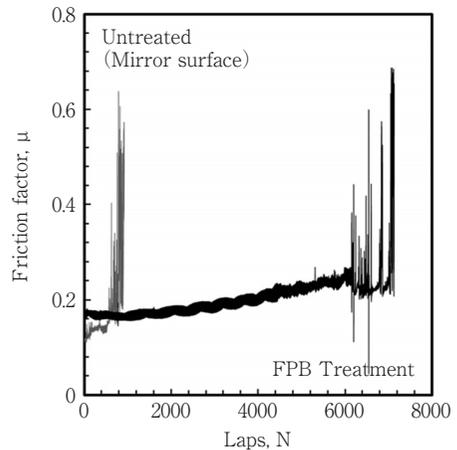


図5 NSF H1 規格の潤滑油を用いた摩擦試験結果、未処理(鏡面)と微粒子投射処理の比較

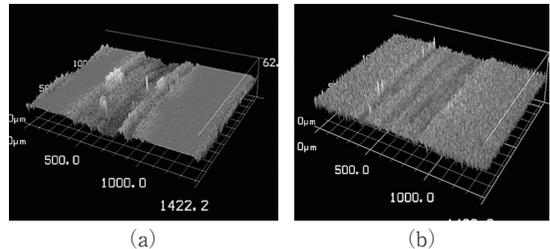


図6 摩耗試験後の未処理(a)、FPB処理(b)のレーザ顕微鏡による3D画像(縦横比5:1)

桁多いにもかかわらず、摩耗量も低減されており、耐焼付き性、耐摩耗性が向上している。これは、表面形状による油保持性の向上、スティックスリップの抑制、微粒子投射処理による表面硬度の上昇の複合効果による。

車関係をはじめとした一般産業機械では、潤滑油や添加剤の開発や材料そのものや熱処理法などの向上が進み、高面圧など過酷な条件での特性向上が可能となってきている。一方、本結果のように、食品機械という潤滑油や添加剤使用に制限のある系では、微粒子投射処理により形成される油溜まり(潤滑油保持性向上)など表面形状の効果が発現しやすい系と考えられる。食の安全性の観点からは、ますます規制は強くなると考えられ、形状形成によるしゅう動性の向上は食品機械に対する有力な手法となる。

### 3.3 DLC被覆による無潤滑しゅう動

食品機械のしゅう動部品の潤滑油の使用に關す

る HACCP 指針では, step1 では, 無潤滑が推奨されている。

DLC 被覆に関しては, 自動車用部品をはじめとして無潤滑使用が目指されているが, エンジン設計上の問題や安全性保障等の理由から, 将来性も含めて実現には多くの課題が存在する。一方, 食品機械では, 歯車等の要素技術が単独で使用される, 設計の自由度が大きいなど, 導入にあたってのハードルは低く, 食の安全性の観点からは, 課題解決が望まれている手法である。

そうした観点から, SUS・SUS しゅう動に DLC 被覆での無しゅう動試験を実施した。荷重は 7N, 10N で実施した。ここで用いた DLC 膜は, プラズマ CVD により作製したものであり, 膜厚 1 $\mu$ m, 膜硬度 22GPa 程度の特徴を有している。10N での DLC 被覆 (微粒子投射処理の有無) のボールオン試験の結果を図 7 に示す。また, 試験後の基材のレーザ顕微鏡による 3D 計測の結果を図 8 (縦横比 10 : 1) に, 走査電子顕微鏡による反射電子像を図 9 に示す。

処理, 未処理に係らず DLC 被覆を施すことにより 10 000 lap まで無潤滑で焼付きは発生していない。摩擦係数に関しては, 微粒子投射処理試料では変動も少なく摩擦係数も低くなっている。試験後の試料の観察結果から, 未処理試料では線状の膜損傷が観察され DLC 膜のはく離も観察される。反射電子像の結果と合わせて, 相手材である

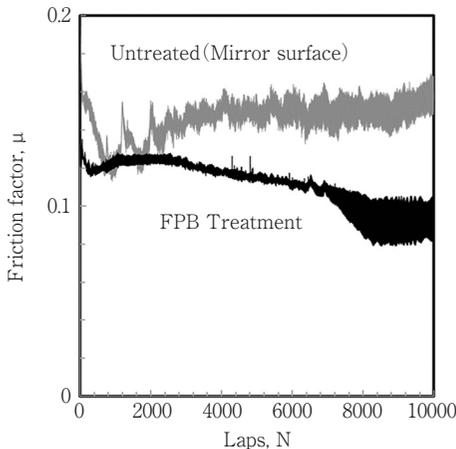


図 7 DLC 被覆試料の無潤滑摩擦試験結果, 未処理 (鏡面) と微粒子投射処理の比較

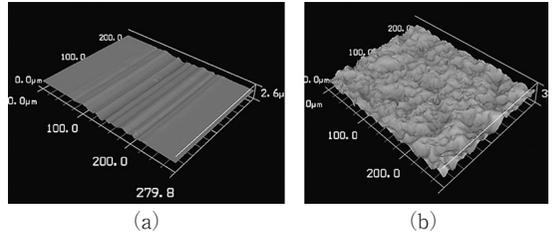


図 8 摩耗試験後の未処理 (a), FPB 処理 (b) のレーザ顕微鏡による 3D 画像 (縦横比 10 : 1)

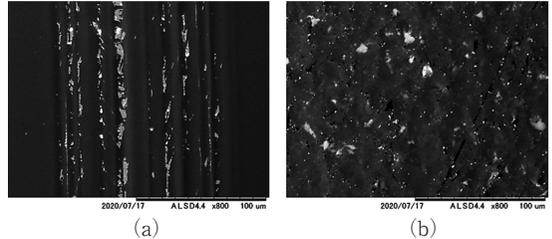


図 9 摩耗試験後の未処理 (a), FPB 処理 (b) の走査型電子顕微鏡による反射電子像

ボールの摩耗粉によるものと考えられる。微粒子投射処理によるデンプル形状の形成が, ステイックの低減や摩耗粉のトラップに有効に働いていることがわかる。微粒子投射処理の試験後では, 大きな損傷は見られないが, 反射電子像の結果では凸部に DLC 膜の摩耗あるいははく離も観察され, 7 000 lap 以降の摩擦係数の変動と関係づけられる。

DLC 被覆により, 潤滑状態の結果との比較で, 無潤滑で低摩擦が実現されていること, 10N の負荷というより過酷な条件で, より長時間の耐焼付き性を示している。食の安全性の観点から, 食品機械への DLC 膜の適用の優位性が確認される。

HACCP の観点からは, 異物混入対策として DLC 膜の適用にあたっては, DLC 膜の FDA 取得が必要となる。

### 3.4 食品機械に必要な特性と微粒子投射処理による形状形成の新たな展開

食品機械の歯車などの動力伝達系部材を対象としたしゅう動について示してきた。自動車部品をはじめとする一般機械部品と食品機械の相違についてまとめる。

材料的・機械構造的な違いとして,

- ① 機械構造用合金鋼 (SCr, SNCM など) が使用

