

鏡面ショット研磨加工による金属基板の表面粗さ変化と残留応力変化

森田 陽亮^{*1)}, 三木 靖浩^{*2)}, 杉山 友明^{*3)}, 杉原 雅彦^{*4)}

Changes in Surface Roughness and Residual Stress of Metal Substrates Using Mirror Shot-Polishing Process

MORITA Yosuke^{*1)}, MIKI Yasuhiro^{*2)}, SUGIYAMA Tomoaki^{*3)}, SUGIHARA Masahiko^{*4)}

装飾性、耐汚染性や耐久性などの観点から、機械金属部品の多くは鏡面状態にまで研磨加工されている。一般的にバフ研磨加工により金属等の鏡面研磨が行われているが、短時間で所定の表面粗さ状態や表面応力状態に調整することは困難である。本研究では、円弧状の曲面に切削加工した特殊ステンレス鋼基材 (15-5PH) を鏡面ショット研磨法により研磨加工した後の表面粗さについて検討することを目的として評価を進めた。さらに、クロムモリブデン鋼基板 (JIS-SCM435) および 15-5PH 基板に対して、それぞれ未研磨、鏡面ショット研磨加工後、バフ鏡面研磨加工後の基板試料を用意し、表面粗さおよび基板界面近傍の残留応力について検討した。また、これら平面基板上に成膜したダイヤモンドライクカーボン DLC (a-C:H) 膜についても検討を加えた。その結果、金属表面や DLC (a-C:H) 膜表面を鏡面ショット研磨加工することによって、短時間で表面の平均粗さを半減させることが可能であることがわかった。また、鏡面ショット研磨加工によって、金属表面に存在する圧縮の残留応力は、未研磨と比べて 1.1 倍～1.3 倍に増大することなどがわかった。

1. 緒言

金属材料等の表面を鏡面状態にまで仕上げる加工方法には、研磨布紙によるバフ研磨加工、ラップ盤によるラッピング研磨加工、ポリシング研磨加工、バレル研磨加工、電解研磨加工などがある。研磨布紙やラップ盤を用いた研磨加工は、加工物の表面を平滑な平面状に仕上げることを目的としている。ポリシング研磨加工は、フェルト等の軟質な素材に研磨剤を介して加工物を摺り合わせる方法である。バレル研磨加工は、容器内に研磨剤と加工物を投入して容器を振動や回転させて加工物を同時に研磨することができ、主として製品や部品のバリ取りとして広く用いられている。また、電解研磨加工は、液中での電気分解によって加工物の表面を溶解させる方法であり、研磨加工が困難な部分でも精度良く仕上げるができるが、適用可能な金属が限定されコスト高となっている。加工物の表面を鏡面状態にまで仕上げる方法として、主にバフ研磨加工やポリシング研磨加工が用いられている。しかし、複雑な三次元形状の加工物を鏡面状態にまで研磨するには非常に多くの手間と時間を要している。そこで、この 10 年間において、バフ研磨加工までの高い表面精度を必要としないが、所定の鏡面状態にまで金属表面を素早く仕上げる方法として、ゴム等の弾性体にダイヤモンド砥粒を練り込んだ研磨剤を、加工物表面に滑らせながら吹き付ける「鏡面ショット研磨加工」^{1)~3)} が広く用いられるようになってきた。

一方、DLC (Diamond-Like Carbon: a-C:H) 膜は、ダイヤモンドでは実現が困難とされている表面潤滑性に優れ、高硬度で優れた耐摩耗性を有することから、種々の機械構造部品および金型部品への適用がなされている^{4)~6)}。数 μm 厚の DLC (a-C:H) 膜表面の平滑性は基板表面の平滑性にほぼ追従するため、成膜前の基材表面の平滑性や成膜後の DLC (a-C:H) 膜表面の平滑性が摩擦摩耗特性 (トライボロジー特性) に影響を及ぼすと考えられる。しかし、鏡面ショット研磨加工による金属基板表面の平滑性の変化が DLC (a-C:H) 膜表面の平滑性、応力状態および摩擦しゅう動特性に与える影響についてはあまり知見が得られていない。

本研究では、曲面加工した特殊ステンレス鋼基材 (15-5PH 材) を鏡面ショット研磨加工し、研磨加工前後の 15-5PH 基材表面の平均粗さ (Ra) の変化について検討することを目的として研究を進めた。さらに、クロムモリブデン鋼基材 (JIS-SCM435) および 15-5PH 基材に対して、それぞれ未研磨、鏡面ショット研磨加工後、手動によるバフ鏡面研磨加工後の平面金属基板を用意し、それらに DLC (a-C:H) 膜を成膜した。成膜前後の基板表面の平均粗さおよび基板界面近傍の残留応力の変化について検討した。

2. 実験方法

2.1 特殊ステンレス鋼 (15-5PH) 基材の曲面加工および鏡面ショット研磨加工

*1) 機械・電気・材料グループ, *2) 元 産業技術研究部, *3) 株式会社カイバラ, *4) 株式会社栗田製作所

近年, 航空機産業において需要が拡大している析出硬化型のステンレス鋼 (15-5PH) 基材は, 耐腐食性能や耐疲労特性に優れている. この 15-5PH 基材は, 航空機産業以外ではなじみの少ない金属材料であるが, その加工特性および塑性加工した表面の調整について検討することは, 航空機部品の塑性加工を行う中小企業にとって有用な情報と成り得る. 本研究では, マシニングセンタを用いて, 直径 50 mm, 高さ 40 mm の円柱状の 15-5PH 基材を曲面に切削加工した. 半径 3 mm のボールエンドミルを用い, 切削速度 6.4 m/min, 送り速度 540 mm/rev, 切込量 0.5 mm, 稜線方向の工具パス間隔を 0.50 mm および 0.25 mm とし, 高低差 10 mm の円弧状の曲面に切削加工した.

その後, 日本スピードシヨア株式会社製 YT-100 型精密鏡面研磨機を用いて, コンベヤスピード 70%, 吐出時間 90 sec の条件で, 切削加工した 15-5PH 基材の加工面を鏡面ショット研磨加工した. 切削加工後および鏡面ショット研磨加工後の 15-5PH 基材表面の円弧方向および稜線方向における平均粗さ (Ra) を測定した. 平均粗さ (Ra) の測定には, Taylor Hobson 社製表面粗さ測定機を用いた.

2.2 平面金属基板の鏡面ショット研磨加工および

DLC (a-C:H) 膜の成膜処理

平面金属基板には, 直径 20 mm のクロムモリブデン鋼 (JIS-SCM435) 基板および 15-5PH 基板を用いた. 約 6 mm 厚に切断後, JIS-SCM435 基板に対しては平面研削盤を, 15-5PH 基板に対しては旋盤を用いて, 切断した各基板を 5.5 mm の厚さに加工したものを準備した. それぞれの試料に対して, 日本スピードシヨア株式会社製 YT-100 型精密鏡面研磨機を用いて, コンベヤスピード 70%, 吐出時間 90 sec の条件で, 各平面金属基板の端面を鏡面ショット研磨加工した. それとは別に, 準備した各平面金属基板を樹脂で包埋し, 番手#120~番手#1500 までの耐水研磨紙 (エメリー紙) で研磨加工した後, 酸化アルミニウム粉末を研磨剤としたバフ鏡面研磨加工を行った. その後, 埋込み樹脂からバフ研磨加工した JIS-SCM435 基板および 15-5PH 基板を取り出した.

このように, JIS-SCM435 基板および 15-5PH 基板に対してそれぞれ未研磨, 鏡面ショット研磨加工後, バフ鏡面研磨加工後の試料を用意し, 20 mm × 20 mm の大きさに切断した高純度シリコンウエハ (Si<100>) 基板とともに所定の成膜用治具に固定し, 各基板上に DLC (a-C:H) 膜を成膜した. DLC (a-C:H) 膜の成膜には, 株式会社栗田製作所製 PEKURIS-NA 型のプラズマイオン注入・成膜 (PBIID) 装置を使用した. 成膜する DLC (a-C:H) 膜の主原料にはトルエン (C₇H₈) およびアセチレン (C₂H₂) を用いた. また, DLC (a-C:H) 膜と基板との密着性の向上を目的としたシリコン系中間層の形成には, テトラメチルシラン (TMS: Si(CH₃)₄) を用いた. アルゴン (Ar) と水素 (H₂) との混合プラズマに

より基板表面のプラズマ洗浄を行った後, TMS / CH₄ / C₂H₂ プラズマによる Si 系中間層の形成を行い, C₇H₈ / C₂H₂ プラズマにより膜厚が約 2 μm になるように所定の成膜時間で DLC (a-C:H) 膜を成膜した. 主な成膜条件を, 表 1 に示す.

表 1 DLC (a-C:H) 膜の主な成膜条件

ガス種	プラズマ洗浄		中間層	DLC 膜
	Ar / H ₂	Ar	CH ₄ / C ₂ H ₂ / TMS	C ₂ H ₂ / C ₇ H ₈
ガス流量 /ccm	10 / 20	20	10 / 10 / 2	10 / 10
処理時間 /min	30	60	30	120
圧力 /Pa	0.5	0.5	0.5	1.1
パルス電圧 /kV	10	20	15	10
パルス幅 /μsec	5	5	3	5
繰返周波数 /kHz	3	2	2	4

2.3 平面金属基板の表面粗さ測定, X 線応力測定および

DLC (a-C:H) 膜のボールオンディスク試験

Taylor Hobson 社製表面粗さ測定機を用いて, 未研磨, 鏡面ショット研磨加工後, バフ鏡面研磨加工後の JIS-SCM435 平面基板および 15-5PH 平面基板に対し, 平均粗さ (Ra) を測定した. また, 株式会社リガク製 AUTO MATE II 型微小部 X 線応力測定装置を用いて, 未研磨, 鏡面ショット研磨加工後, バフ鏡面研磨加工後の JIS-SCM435 平面基板および 15-5PH 平面基板に対して, DLC (a-C:H) 膜の成膜前後における金属基板の表面近傍での残留応力がどのように変化するか検討した.

また, CSM 社製ボールオンディスク試験機を用いて, 研磨状態の異なる上記三種類の 15-5PH 基板上に成膜した DLC (a-C:H) 膜の摩擦しゅう動特性について調べた. 加えて, 成膜後にさらに膜表面を鏡面ショット研磨加工した試料を別途用意し, 同様に摩擦しゅう動特性を調べた. これらの結果を比較することで, 成膜後の鏡面ショット加工がどのような影響を及ぼすか検討した. 相手材には直径 1/4 インチのアルミナ真球ボールを使用し, 試験荷重 5 N, 回転半径 5 mm, 周速度 0.1 m/sec, しゅう動距離 1000 m の条件でボールオンディスク試験を行った. なお, 試験は, 温度 23 °C ± 1 °C, 湿度 50 % ± 10 % RH の環境のもとで行った.

3. 結果および考察

3.1 特殊ステンレス鋼基材 (15-5PH) の表面粗さ (Ra)

マシニングセンタを使用して特殊ステンレス鋼基材 (15-5PH) を円弧状の曲面に切削加工した試験片の外観を, 図 1 に示す. 図 1 上段の画像は異なる加工パス条件で円弧状の曲面に切削加工した後の加工面を外観を示し, 図 1 下段の画像は各加工パス条件で切削加工した加工面をさらに鏡面

ショット研磨加工した後の加工面の外観を示している。

いずれの加工パス条件においても、90 sec という短時間の鏡面ショット研磨加工により加工面の鏡面化が進行していることがわかる。鏡面ショット研磨加工前後の加工表面の円弧方向および稜線方向の平均粗さ (Ra) を、表 2 に示す。切削加工時の加工パスを 0.50 mm から 0.25 mm に小さくすることによって、加工表面の円弧方向の平均粗さ (Ra) は大きくなっているが、鏡面ショット研磨加工後では逆に加工パスを小さくすると円弧方向の平均粗さ (Ra) も小さくなっていることがわかる。一方、加工表面の稜線方向の平均粗さ (Ra) は、鏡面ショット研磨加工により、いずれの加工パス条件の場合も約 0.2 μm 小さくなっていることがわかる。このことから、15-5PH 基材を鏡面ショット研磨加工することによって鏡面化への進展を図ることが可能であり、その影響は加工パスが小さいときの方が大きいことがわかった。

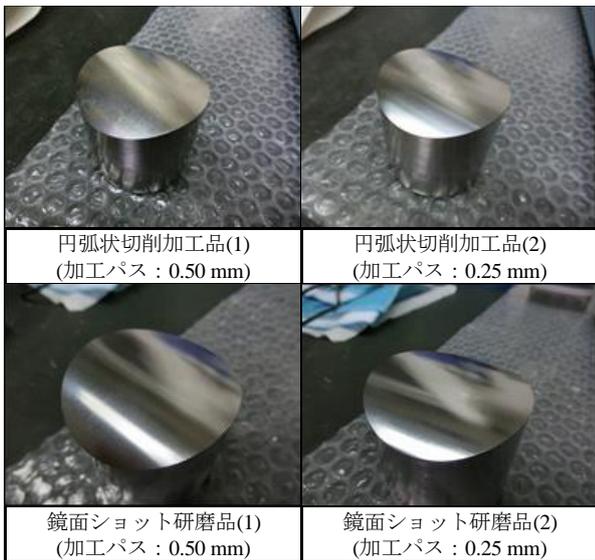


図 1 円弧状の曲面に切削加工した 15-5PH 鋼基材の外観

表 2 切削加工表面および鏡面ショット研磨加工後の表面の平均粗さ (Ra)

	単位: μm			
	加工パス: 0.5mm		加工パス: 0.25mm	
	円弧方向	稜線方向	円弧方向	稜線方向
円弧状切削加工	0.170	2.457	0.219	0.706
鏡面ショット研磨	0.130	2.294	0.109	0.494

3.2 研磨方法の異なる平面金属基板の平均粗さ (Ra)

JIS-SCM435 基板表面および 15-5PH 基板表面の平均粗さ (Ra) の測定結果を、それぞれ図 2 および図 3 に示す。いず

れの基板表面においても未研磨、鏡面ショット研磨加工後、バフ鏡面研磨加工後の順に平均粗さ (Ra) が大きく減少していくことがわかる。DLC (a-C:H) 膜を成膜する前に、金属基板表面を約 90 sec の時間で鏡面ショット研磨加工することによって、JIS-SCM435 基板表面および 15-5PH 基板表面の平均粗さ (Ra) は、それぞれ未研磨表面の平均粗さ (Ra) の約 57 % および約 50 % に減少している。この平均粗さ (Ra) の減少量の違いは、基板の硬さの違いが影響していると考えられる。なお、未研磨の JIS-SCM435 基板表面よりも 15-5PH 基板表面の平均粗さ (Ra) が大きくなっているのは、JIS-SCM435 基板が平面研削仕上げであるのに対して、15-5PH 基板は旋盤仕上げであることに起因する。一方、バフ鏡面研磨加工した JIS-SCM435 基板表面および 15-5PH 基板表面の平均粗さ (Ra) は、それぞれ 0.020 μm および 0.009 μm となっていた。

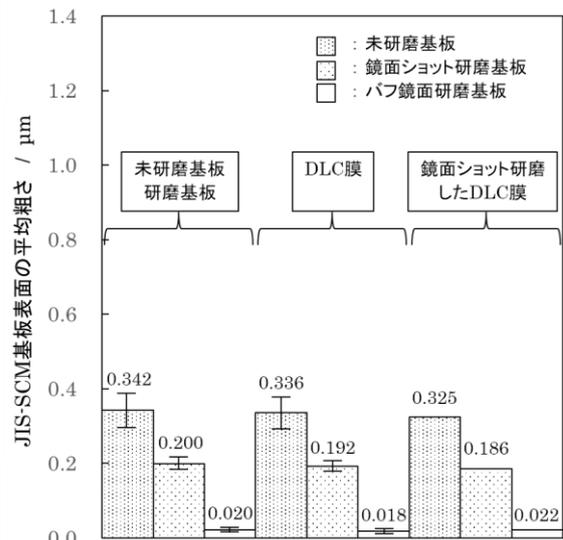


図 2 JIS-SCM435 鋼基板表面の平均粗さ

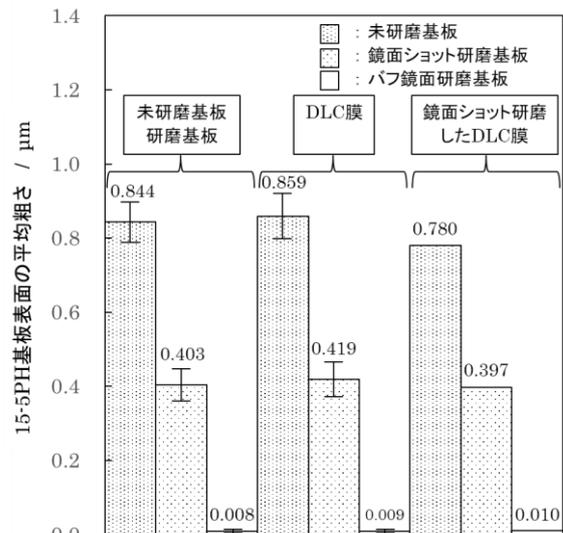


図 3 15-5PH 鋼基板表面の平均粗さ

各基板上に DLC (a-C:H) 膜を成膜した場合、いずれの平面金属基板においても DLC (a-C:H) 膜表面の平均粗さ(Ra)は、成膜前の値と比べて±4%程度の値を示しており、ほぼ成膜前の平均粗さを維持していることがわかる。2μm程度の成膜処理において膜面の形状はわずかに変化するが、成膜前の基板表面の形状をほぼ維持していると考えられる。

未研磨および鏡面ショット研磨加工基板上に成膜した DLC (a-C:H) 膜表面をさらに鏡面ショット研磨加工 (コンベヤスピード 50%, 研磨時間 90 sec) すると、膜表面が研磨されることによって、膜表面の平均粗さ (Ra) は JIS-SCM435 基板の場合約 3%, 15-5PH 基板の場合 5%~9% の範囲で小さくなっている。しかし、バフ鏡面研磨加工後の JIS-SCM435 基板および 15-5PH 基板上に成膜した DLC (a-C:H) 膜表面をさらに鏡面ショット研磨加工した場合では、DLC (a-C:H) 膜の平滑性はわずかに損なわれている。

3.3 研磨方法の異なる平面金属基板の X 線残留応力

JIS-SCM435 基板および 15-5PH 基板に対する基板表面近傍の X 線残留応力の測定結果を、それぞれ図 4 および図 5 に示す。JIS-SCM435 基板においては研削方向と垂直な方向に、15-5PH 基板においては旋盤加工の半径方向にそれぞれ圧縮の残留応力が存在している。

DLC (a-C:H) 膜を成膜する前に金属基板表面を鏡面ショット研磨加工することによって、JIS-SCM 基板および 15-5PH 基板の表面近傍に存在する圧縮残留応力は、それぞれ未研磨のときの圧縮残留応力の約 1.1 倍および 1.3 倍にまで増加している。この圧縮残留応力の増加は、鏡面ショット研磨加工に使用している研磨メディア (研磨剤) がゴム状の弾性体であることから、ピーニング効果の影響によるものではなく、基板の素材加工時において金属基板表面直下に生じる内部ひずみの大きな加工硬化層が鏡面ショット研磨加工によって顕在化したためであると考えられる。

また、JIS-SCM435 基板よりも 15-5PH 基板の方が、表面に存在する圧縮の残留応力が小さくなっているのは、熱処理履歴すなわち調質条件の違いによって生じる微細組織および硬さの違いだけでなく、表面層に形成された加工硬化層の影響が加味されていると推察できる。

一方、バフ鏡面研磨加工した JIS-SCM435 基板表面および 15-5PH 基板表面近傍に存在する圧縮の残留応力は、それぞれ約 -4 MPa および -148 MPa となっていた。バフ鏡面研磨加工することによって、JIS-SCM435 基板表面近傍をほぼ無応力な状態とすることができていることがわかる。しかし、バフ鏡面研磨加工しても 15-5PH 基板表面近傍には未研磨の場合の約 60% の圧縮の残留応力が存在している。これは、ステンレス系の鉄鋼材料を切削加工した場合には厚い加工硬化層が形成されやすく、バフ鏡面研磨加工しても加工硬化層が十分に取り除かれていないためであると考えられる。また、X 線残留応力測定に用いた Fe (211)

回折線の線幅が測定 ψ 角 0° において JIS-SCM435 基板よりも 15-5PH 基板の方が約 1.2 倍大きくなっており、このことから、15-5PH 基板の結晶粒子径の方がより小さく、かつ結晶粒子内のミクロひずみがより大きいと考えられる。つまり、加工硬化層の残存およびミクロひずみの蓄積によるマクロひずみの増加が、15-5PH 基板表面に存在する圧縮の残留応力の減少を抑制していると考えられる。

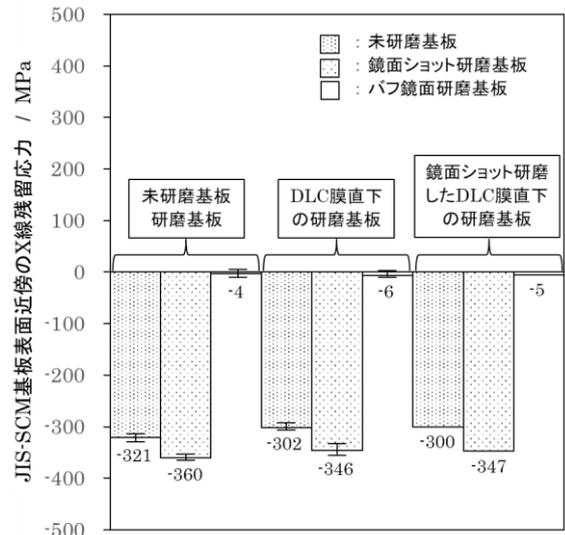


図 4 JIS-SCM435 鋼基板表面の残留応力

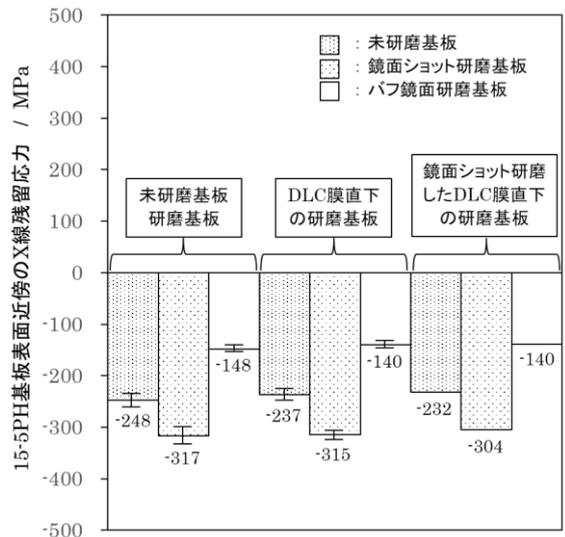


図 5 15-5PH 鋼基板表面の残留応力

未研磨基板、鏡面ショット研磨加工基板およびバフ鏡面研磨加工基板上に DLC (a-C:H) 膜を成膜した場合、未研磨基板および鏡面ショット研磨加工基板における

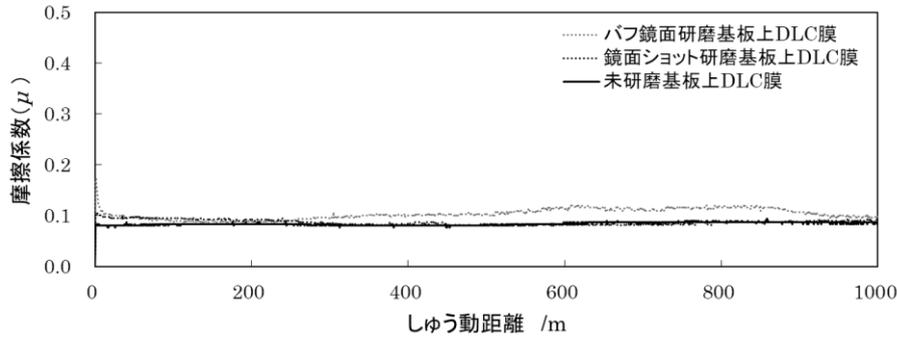


図 6 15-5PH 鋼基板表面上 DLC (a-C:H) 膜の摩擦しゅう動特性

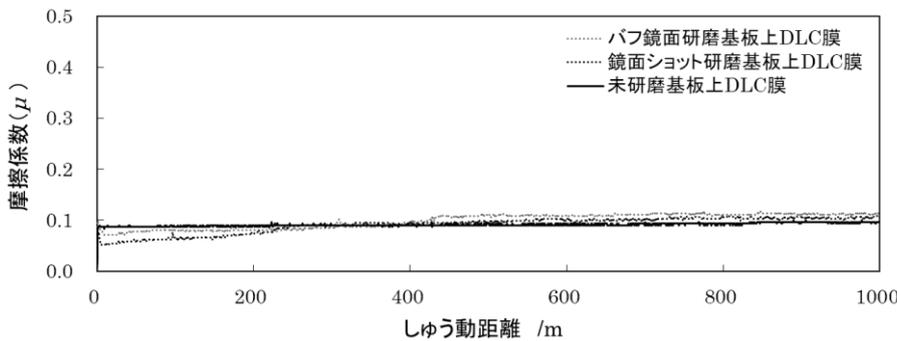


図 7 15-5PH 鋼基板表面上 DLC (a-C:H) 膜を鏡面ショット研磨加工した試験片の摩擦しゅう動特性

DLC (a-C:H)膜直下の基板表面近傍に存在する残留応力は、成膜前の値より 2%~6%程度小さな圧縮の残留応力の値を示していることがわかる。一方、バフ鏡面研磨加工後の基板における DLC (a-C:H) 膜直下の基板表面近傍に存在する残留応力は、成膜前の値をほぼ維持している。

表 1 に記載した条件での膜厚 2 μm 程度の成膜において、DLC (a-C:H) 膜には約 -1.4 GPa の大きな圧縮の残留応力が存在していることがわかっている⁷⁾。皮膜に存在する大きな圧縮の残留応力の影響によって、DLC (a-C:H) 膜表面の性状はわずかに変化するが、DLC (a-C:H) 膜直下の基板表面近傍に存在する応力状態に与える影響は数%程度であり、大きな影響を及ぼしていないと考えられる。

3.4 研磨方法の異なる平面金属基板上に成膜した DLC (a-C:H) 膜の摩擦しゅう動特性

未研磨、鏡面ショット研磨加工後およびバフ鏡面研磨加工後の 15-5PH 平面基板上に成膜した DLC (a-C:H) 膜のしゅう動距離に対する摩擦係数の変化を、図 6 に示す。DLC (a-C:H) 膜表面の平均粗さ (Ra) が小さくなるにつれてアルミナボールと皮膜面との接触面積が大きくなるため、摩擦係数も大きくなる傾向となっていると考えられる。

一方、未研磨、鏡面ショット研磨加工後、バフ鏡面研磨加工後の 15-5PH 平面基板上に DLC (a-C:H) 膜を成膜したも

のを別途用意し、その膜に対してさらに鏡面ショット研磨加工を行った。その後の各 DLC (a-C:H) 膜のしゅう動距離に対する摩擦係数の変化を、図 7 に示す。図 6 に示した結果と同様に、DLC (a-C:H) 膜表面の平均粗さ (Ra) の減少が摩擦係数の増大を引き起こしている傾向にある。また、初期の摩擦状態において、研磨方法の違いによる摩擦係数の変化にも違いが生じていることがわかる。

4. 結言

航空機分野において用いられている特殊ステンレス鋼基材 (15-5PH) を鏡面ショット研磨加工法により研磨加工し、加工表面の平均粗さ (Ra) の変化について検討した。また、クロムモリブデン鋼基材 (JIS-SCM435) および 15-5PH 基材に対して、それぞれ未研磨、鏡面ショット研磨加工後ならびにバフ鏡面研磨加工後の試料を準備し、加工表面の平均粗さ (Ra) および基板表面に存在する残留応力の変化について検討した。加えて、上記の各基板上にダイヤモンドライクカーボン DLC (a-C:H) 膜を成膜し、膜表面の平均粗さ (Ra) および基板界面近傍に存在する残留応力の変化、ならびにボールオンディスク試験による摩擦しゅう動特性の変化について検討した。その主な結果は、次のとおりである。

- (1) 特殊ステンレス鋼 (15-5PH) 基材を鏡面ショット研磨加工する場合には, 切削加工時の加工パスを小さくすることによって鏡面化への進展を図ることができた.
- (2) 未研磨基板を鏡面ショット研磨加工することによって, 短時間で表面の平均粗さ (Ra) を半減させることが可能であることがわかった.
- (3) 未研磨基板を鏡面ショット研磨加工することによって, 表面近傍に存在する圧縮の残留応力が, 10%~30% 程度増大することがわかった.
- (4) 未研磨基板および鏡面ショット研磨加工した基板に DLC (a-C:H) 膜を成膜した時の皮膜表面の平均粗さ (Ra) は, いずれの場合も成膜前の値より±4%程度の値を示しており, ほぼ成膜前の Ra 値を維持していた.
- (5) 未研磨基板および鏡面ショット研磨加工した基板に DLC (a-C:H) 膜を成膜した時の皮膜直下の基板界面近傍に存在する圧縮の残留応力は, 成膜前の値から4%以下の範囲で減少していた.
- (6) 未研磨基板および鏡面ショット研磨加工した基板に成膜した DLC (a-C:H) 膜面をさらに鏡面ショット研磨加工した場合, 膜表面の平均粗さ (Ra) は約9%以下の範囲で減少していたが, 皮膜直下の基板界面近傍に存在する圧縮の残留応力の減少は約2%の範囲内であった.
- (7) 未研磨基板および鏡面ショット研磨加工した基板に成膜した DLC (a-C:H) 膜のボールオンディスク試験を行った結果, 鏡面ショット研磨加工により基板表面および皮膜表面の平均粗さ (Ra) の減少にともない, 摩擦係数が大きくなる傾向となっていた.

謝辞

本研究の実施にあたり, ご協力を賜りました株式会社カイバラの貝原剛 代表取締役社長および株式会社栗田製作所の猪飼光章 代表取締役社長に感謝の意を表します.

本研究において鏡面ショット研磨加工に使用した精密鏡面研磨機は, 公益財団法人 JKA の平成 31 年度「公設工業試験研究所等における共同研究補助事業」により導入・設置したものである.



参考文献

- 1) 波田野英十, “鏡面ショット研磨法”, 機械技術, Vol.52, No.12, pp.39-43 (2004).
- 2) 山下健治, “鏡面ショット研磨「エアロラップ」によるバリ処理・エッジ仕上げ”, 機械技術, Vol.58, No.13, pp.34-36 (2010).
- 3) 高井一輝, Mohd Nizar, 上村 正雄, 福本 昌宏, “ブラスト研磨法による超硬合金の研磨機構に関する研究”, 砥粒加工学会誌, Vol.57, No.4, pp.253-258 (2013).
- 4) M.T.Laugier, “Adhesion of TiC and TiN coatings prepared by chemical vapour deposition on WC-Co-based cemented carbides”, Journal of Materials Science, Vol.21, No.7, pp.2269-2272 (1986).
- 5) 三宅庄二郎, “カーボン系薄膜への物質添加によるトライボロジー特性向上”, トライボロジスト, Vol.41, No.9, pp.754-759 (1996).
- 6) “ドライコーティング市場の全貌と将来展望”, 株式会社矢野経済研究所 (2012).
- 7) Y. Miki, A. Nishimoto, T. Sone, Y. Araki, “Residual stress measurement in DLC films deposited by PBIID method using Raman microprobe spectroscopy”, Surface & Coatings Technology, Vol.283, pp.274-280 (2015).