

平成 23 年 4 月 22 日現在

機関番号：12614

研究種目：基盤研究 (C)

研究期間：2008～2010

課題番号：20560125

研究課題名 (和文) 粉体の摩擦を利用した微細表面形状創生と摩擦面への応用に関する研究

研究課題名 (英文) A study on development of rubbing technique with fine particles to form surface micro-structure and its application to friction surface

研究代表者

志摩 政幸 (SHIMA MASAYUKI)

東京海洋大学・海洋工学部・教授

研究者番号：70092583

研究成果の概要 (和文)：固体表面に表面微細形状を形成するために、専用の装置を開発して、工具と固体表面の間に硬質微細粉末を介在させて摩擦した。取り上げた固体材料は、アルミニウム合金、クロムモリブデン鋼およびステンレス鋼、また用いた微細粉末は SiC、Si、Cr (すべて #300 メッシュ) およびキャリア粒子となるアルミナ粒子またはハイス粒子 (いずれも平均粒径  $50\mu\text{m}$ ) である。その結果、固体表面には精密ショットピーニング並みの微細形状が創生され、また微細粉末の層 (改質層) が形成された。改質層は潤滑下において優れたフレッチング特性を示すことを明らかにした。

研究成果の概要 (英文)：In order to form surface micro-asperities a new device was developed, which had the rubbing mechanism of hard and fine particles between the surface and a tool. Several materials such as Al alloy, stainless steel and Cr-Mo steel were tested to examine the performance of the device and to assess both the characteristics of the surface and the tribological properties. As fine particles SiC, Si and Cr were used with  $\text{Al}_2\text{O}_3$  particles or high speed steel particles which are both  $50\mu\text{m}$  in average diameter and function as carrier particles. The experiments show that the nearly same micro-asperities as ones formed by fine particles bombardment process are formed and that modified layers made of fine particles are also generated. It is found that the modified layers with the micro-asperities possess excellent fretting properties under the lubricated condition.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2009 年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2010 年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：トライボロジー

科研費の分科・細目：機械工学・設計工学・機械機能要素・トライボロジー

キーワード：表面改質、微細粉末、表面微細形状、摩擦摩耗特性

1. 研究開始当初の背景

(1) 表面微細形状は、トライボロジー特性に

大きな影響を及ぼし、特に、潤滑油剤の摩擦面への供給が困難なフレッチング条件下では微細形状が潤滑油剤のマイクロプールとなって損傷防止に有効となることが期待されている。

(2) 微細形状の創生には種々の方法があるが、高密度かつ方向性のない凹凸を創生することが重要であり、そのような微細形状の創生手法の開発が課題となっている。

## 2. 研究の目的

(1) 表面微細形状を創生する手法を開発する。予備試験の結果に基づき、外部から供給された微細粉末の摩擦を利用する。

(2) 得られた表面微細形状の評価（表面状態の観察・分析）、表層の硬さ・残留応力計測などを行い、改質面の特徴を調べる。

(3) どのようにして表面微細形状が創生されるか、また改質が行われるかのメカニズムを検討する。

(4) 創生された表面のフレッチング条件下、また往復動摩擦条件下で、しゅう動特性と摩擦特性に及ぼす影響を調べる。

## 3. 研究の方法

本研究では、摩擦改質装置を開発し、改質面の評価、摩擦摩耗特性の評価を次のようにして行った。

(1) 工具と固体表面間に外部から供給された微細粉末を局所的な高面圧下で摩擦することができる改質装置を製作した。

(2) 改質面の特徴（表面粗さ、元素分析、硬さ、残留応力等）を調べた。

(3) 改質のメカニズムを検討するために、処理前後の微細粉末の性状を調べるとともに、モデル試験を行った。

(4) 点接触形態での往復動およびフレッチング試験を実施し、摩擦係数の測定、摩耗痕の観察を行った。

## 4. 研究成果

本研究から得られた成果を項目ごとに示す。

### (1) 改質装置の製作

改質方法の基本は、図1に示すように、微細粉末を基材と工具の間に流入させて、局所的な高面圧下で摩擦することにある。その際、微細粉末を間断なく基材と工具の間にはさみこむことが重要であり、微細粉末が途切れて基材と工具の直接接触が生じると、基材表

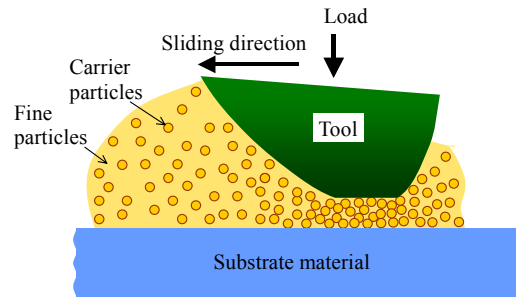


図1 改質方法

面を傷つけてしまうことになる。そのため、微細粉末の流動性が重要となるが、適用する微細粉末によっては流動性に欠けるものもあり、その改善のために微細粉末よりやや大きな球状粒子（以下キャリア粒子という）を微細粉末と混合して用いる。また、このキャリア粒子は、微細粉末を分散させて大規模な焼付きを防ぐ作用もする。これらに加え、微細粉末をさらに微細化させる作用、および基材面に微細粉末を圧着させる作用ももつ。一方、精密ショットピーニング（FPB、Fine Particle Bombardment）からも推察されるように、キャリア粒子は基材表面に微細な凹凸をつけると同時に、基材表面を摩滅させる作用もあわせもっている。そのため、微細粉末とキャリア粒子の適切な混合比を選ぶ必要がある。

以上の基本的方法を、平面、孔内面および丸軸表面へ適用するのは容易である。ここでは、丸軸表面への改質について述べる。

図2に示すように、回転する丸軸に回転する工具を一定荷重で押し付け、丸軸の軸方向に連続的にスライドさせる。外部から供給されたキャリア粒子を含む微細粉末は、工具の回転に伴って工具側面のらせん状溝に沿って丸軸と工具の接触部に流入する。このとき、接触部の周囲に存在する微細粉末間にある程度の加圧状態が生じ、その結果線接触状態にある接触部に微細粉末が引き込まれやすくなる。丸軸と工具の接触部に流入した微細粉末は、局所的な高面圧下で摩擦され、微細

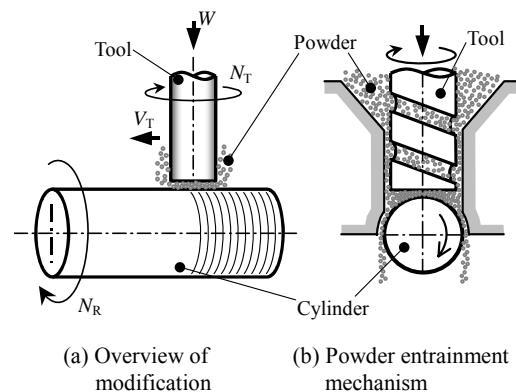


図2 丸軸表面への適用

形状が創生されるとともに粉末の一部が被覆される。摩擦を受けた後の微細粉末あるいは余分な微細粉末は、粉末供給装置と丸軸間の隙間より流出し、排出される。このように、一連の処理過程は粉末の“閉空間”を意図的には必要としない。

上述の方法で創生された被覆表面に対して、その粗さを改善し、また弱く付着した微細粉末を除去するため、必要に応じて潤滑油中でのバニシ仕上（以下、後処理という）を施す。すなわち、図3に示すように、工具を円錐形状をしたものに取り替え、同一運動機構を用いて、外部から粉末を供給せずに潤滑油塗布面を点接触状態で摩擦する。なお、工具には超硬材料を用い、その円錐形状部にはDLC膜を施して耐摩耗性等を上げている。

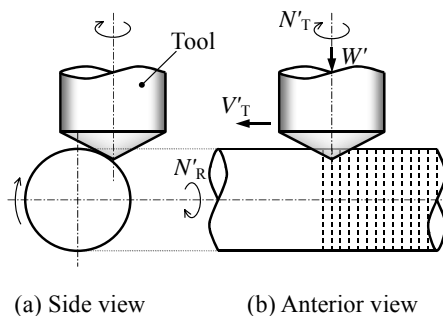


図3 後処理方法

## (2) 改質表面の特徴

SUS304 丸軸（直径 10 mm）に、Cr微細粉末（#300 メッシュ）と $Al_2O_3$ キャリア粒子（平均粒子径  $50 \mu m$ ）の混合粉末（かさ比 1 : 9）を用いて処理を施した例を、図4に示す。処理面（B部）は全体が黒ずんでいて、FPB処理を施した面と同様な方向性のない粗さをもつ面となっている。一方、処理面に後処理を施した面（A部）は、黒ずんだ光沢をもち、突起先端が除去された比較的滑らかな面となっている。このような特徴は、Al合金、Ti合金、SCM鋼への処理でも見られ、またAl合金平面へのSiやSiC微細粉末による処理でも確認されている。

図5は、上記B部のSEM観察結果である。電子線マイクロアナライザ（EPMA、Electron Probe Micro Analyzer）による面分析から、白く見える領域は基材の露出部と供給されたCrからなり、一方、黒灰色の領域は破碎・微細化された $Al_2O_3$ キャリア粒子を中心とする領域である。

摩擦を利用した本処理は、基材表面の硬さを増加させる。図6は、図5に示した処理面（ただし同一箇所ではない）を、マイクロビッカース硬度試験機で測定した結果である。基材の露出部とCr微細粉末接着部の硬さは、未処理の基材の硬さに比べて高いことが分かる。なお、 $Al_2O_3$ の微細化された粉末が接着

している領域でも硬さの増加が見られるものの、ばらつきがある。これは、 $Al_2O_3$ 粉末間の密着力が弱いためと考えられる。同様な硬化現象は、SCM鋼（SCM435）をCr微細粉末とHSSキャリア粒子で処理した場合にも確認されている。

本処理は、基材表面の硬さを増加させるとともに、FPB並みの残留圧縮応力を生じさせる。図7は、Al合金の平面をSiC微細粉末（#300 メッシュ）により改質したときに生じる表層の残留応力を、微小焦点X線応力測定装置により測定した結果である。これより、本処理は、FBP処理と同程度の残留圧縮応力を厚さ十数 $\mu m$ にわたって生じさせること、そのピーク位置はFBP処理のそれよりも表面に近いことが分かる。

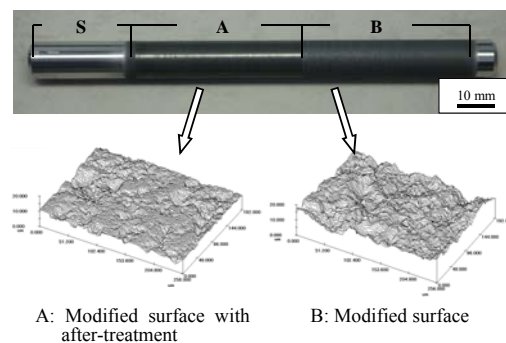


図4 改質表面の特徴

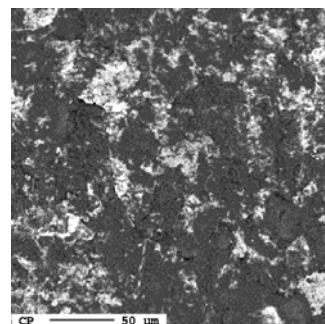


図5 改質表面のSEM観察状況

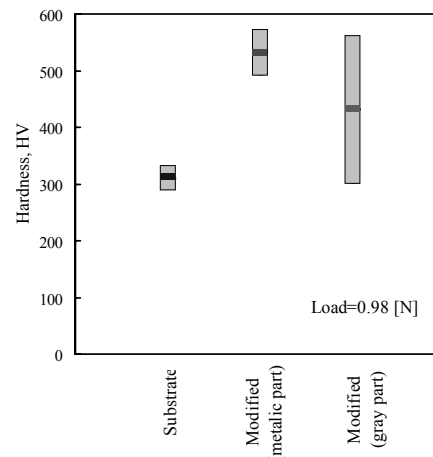


図6 改質処理による硬さの増加

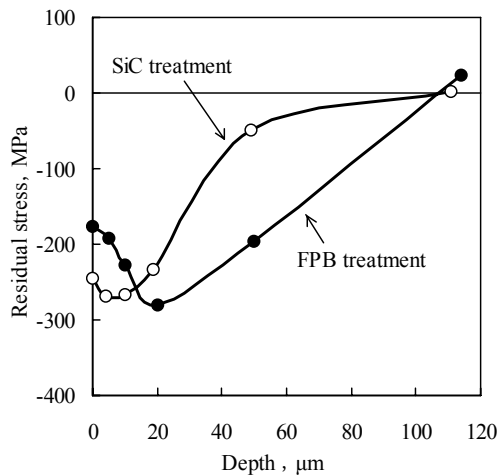


図7 表層の残留応力

### (3) 改質の機構

基材と工具の間に介在する微細粉末により、どのようにして基材表面が改質されるかを明確にすることは重要である。Al合金基材（平面）にSi微細粉末を置き、工具（回転方向に対して先細りするすきまをもつ円盤状工具）で押し付けた実験によると、基材表面には傷は付くものの、Si粉末の付着は全く生じない。これは、押し付けただけでは改質はなされないことを示している。一方、押し付けた状態で工具を1回転させると、工具の中心部付近である程度の密着力をもつ粉末の付着が認められる。なお、その他の領域には傷は付くものの、やはり粉末の付着は認められない。同様に、回転するAl合金丸棒に回転する工具を押し付けて工具を横方向に移動させずに保持すると（図2における $V_T=0$ の状態）、粉末の接着は工具の中心部付近にのみ認められる。これらの事実は、被膜を含む改質面の形成には必ず摩擦が必要であること、しかも粉末は一定期間“閉空間”に閉じ込められた状態で摩擦される必要があることを示している。

粉末の“閉空間”における局所的な高面圧下での摩擦により、供給された微細粉末のさらなる微細化、またキャリア粒子の破碎と微細化が進む。なお、キャリア粒子の破碎されやすさは、適用する粒子により異なり、例えばHSS粒子は破碎されにくく、一方 $Al_2O_3$ などのセラミック粒子は破碎されやすい。

改質表面にはしゅう動痕が生じないことから、基材表面と工具間に介在する微細粉末とキャリア粒子は、基材表面との間で相対すべりを生じることなく、基材表面に押し込まれ、また一部は転がるものと考えられる。その間にキャリア粒子の表面に付着した微細粉末は、局所的な高面圧下で埋め込まれ、また溶着する。被覆作業時の温度測定から、溶着

は基材が熔融状態となるような高温下で生じるものではなく、冷間溶着と考えられる。微細粉末は高い表面エネルギーをもち、これが冷間溶着の駆動力となる。基材が比較的軟らかい材料、例えばAl合金では、表層に激しい塑性流動が生じるため、冷間溶着した微細粉末には延性材料の摩擦過程で生じることが報告されている機械的混合も起こり得る。

被覆膜の厚さは、基材と微細粉末・キャリア粒子との関係だけでなく、微細粉末間の溶着しやすさやキャリア粒子による研削作用などにも影響される。適用する微細粉末が粉末間で溶着しやすい場合は厚い膜が期待できるが、そうでない場合には均一な厚い膜の創生は困難である。一方、キャリア粒子はFPBにおける粒子と同様、基材表面を研削する作用ももつ。そのため、基材表面また生じた被覆層の一部は除去される。従って、膜厚はこのような膜の形成と除去のバランスで決まってくる。被覆面に創生される微細凹凸形状は、キャリア粒子のこのような作用の過程で生じるものと考えられる。

被覆処理により、表層は硬化するとともに残留圧縮応力が生じる。硬化現象は、塑性流動に伴って生じる結晶粒の微細化による硬化に加え、被覆膜そのものの硬さによるものであり、また残留圧縮応力の発生には、硬質の微細粉末の埋め込みが大きく関与するものと考えられる。

### (4) 摩擦摩耗特性

本被覆処理は、硬質膜の被覆に加え、基材表層の硬化と密度の高い微細凹凸の形成が可能のため、基材と微細粉末の適切な組合せを選定することにより、耐摩耗性表面の創生が期待される。ここでは、耐摩耗性等の向上がみられた実験室的事例を示す。

Al合金表面（平面）を、SiC粉末（#300メッシュ）で処理すると、潤滑下での耐フレッチング摩耗特性の向上が認められる。図8は、ZnDTP（Zinc Dialkyldithiophosphate、ジアルキルジチオリン酸亜鉛）0.6 mass%添加鉱油（40℃における粘度43 mm<sup>2</sup>/s）中で、SUJ2球（直径9.525 mm、HV 760）を相手としてフレッチング試験（荷重9.8 N、設定ストローク20 μm）を行ったときの摩擦係数の経時変化である。SiC処理面は、未処理の鏡面仕上面に比べて摩擦係数は低く、またFPB処理面に比べても優れている。これは、微細凹凸の油溜りの効果に加え、基材表面に形成されたSiC層が摩擦低減効果をもつためである。このときの摩擦面には、図9に示すように、鏡面仕上面に比べてごく軽微な損傷が見られるのみであり、フレッチングに対する著しい耐摩耗性の向上が認められる。

Al合金のもう1つの耐摩耗性向上の事例と

して、Si 粉末（#300 メッシュ）をキャリア粒子として平均粒径  $50\mu\text{m}$  の HSS 粒子を用いて被覆した丸棒（直径 10 mm）を、SUJ2 丸棒（直径 10 mm）との組合せ（交叉円筒方式）で往復摩擦試験（荷重 4.9 N、ストローク 20 mm、往復回数 10800 回）を行ったときの結果を図 10 に示す。なお、潤滑油は上述の ZnDTP 添加鉱油である。この結果は、Al 合金への Si 被覆面は著しく耐摩耗性を向上させることを示している。同様な傾向は、SCM435 に施した Si 被覆面にも認められている。

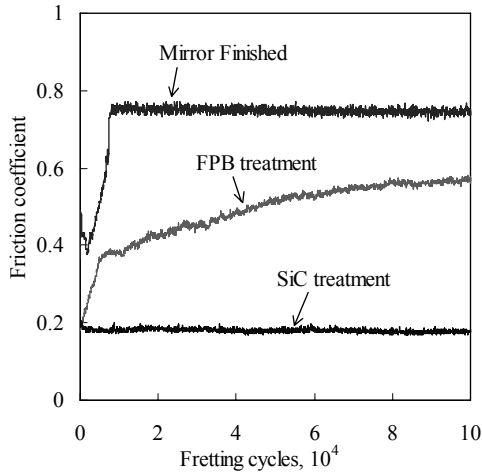


図 8 潤滑下のフレッチングにおける摩擦係数

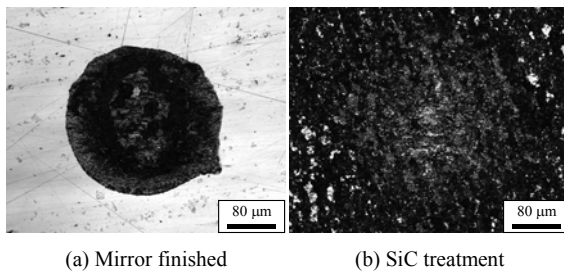


図 9 被覆処理による耐摩耗性の向上（フレッチング）

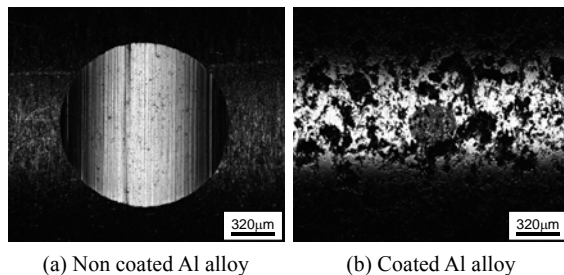


図 10 被覆処理による耐摩耗性の向上（往復摩擦）

#### (5) 新表面創生技術としての可能性と課題

この技術を工業的に応用できる技術に発展させていくためには、次に示す克服すべき課題がある。

まず重要な点は、基材と粉末および粉末間の密着性の改善である。密着性を上げるためには、基材と粉末との組合せや処理条件の最適化に加え、不活性ガス中での処理等も検討する必要がある。今ひとつ重要な点は、任意の曲面に対する改質処理の問題である。現状では平面、孔内面および丸軸表面に適用できるが、実用上重要な曲面、例えばカム表面等への適用を検討する必要がある。これには、装置および粉末の供給方法の工夫が必要であり、NC フライス盤に相当する自由度の高い運動機構を有する装置、およびそれに適合する粉末供給装置を開発する必要がある。

以上の課題が克服されれば、本技術は応用範囲の広い実用的な技術の 1 つとなり得る。この技術は、簡単な装置により機械加工の感覚で改質作業が行えること、また基材の熱変形や変質がほとんどないという特徴を有する。加えて、表層には FPB 処理並みの圧縮残留応力を生じるとともに、方向性のない微細な凹凸を残すという点にも魅力的なものがある。

#### 5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計 3 件）

- ① 伊藤聡史、志摩政幸、菅原隆志、地引達弘、他 3 名、海洋環境下における摩擦材の開発に関する基礎研究、日本マリンエンジニアリング学会誌、査読あり、第 45 巻第 2 号、2010 年、121～127 頁
- ② 志摩政幸、地引達弘、菅原隆志、他 2 名、摩擦による丸軸表面への硬質膜の創生とその摩擦摩耗特性、トライボロジスト、査読あり、第 54 巻第 5 号、2009 年、343～351 頁
- ③ 志摩政幸、菅原隆志、地引達弘、伊藤聡史、硬質粉末の摩擦を利用した微細表面形状の創生と摩擦面への応用、トライボロジスト、査読あり、第 54 巻第 2 号、2009 年、130～137 頁

〔学会発表〕（計 6 件）

- ① 秋田秀樹（代表者）、粉末による FCD 材表面改質の検討、トライボロジー会議 2010 秋福井、2010 年 9 月 15 日、福井大学（福井）
- ② 志摩政幸（代表者）、粉末の摩擦による耐摩耗性表面創生の試み、トライボロジー会議 2010 秋福井、2010 年 9 月 15 日、福井大学（福井）

- ③ 雨澤弘機（代表者）、海水中用摩擦材の開発に関する基礎研究、第 80 回マリンエンジニアリング学術講演会、2010 年 8 月 31 日、朱鷺メッセ（新潟）
- ④ 志摩政幸（代表者）、海洋環境下における摩擦材の開発に関する研究、第 79 回マリンエンジニアリング学術講演会、2009 年 9 月 16 日、メルパルク広島（広島）
- ⑤ 志摩政幸（代表者）、A New Coating Technique by Rubbing of Fine Particles、World Tribology Congress 2009、2009 年 9 月 9 日、京都国際会館（京都）
- ⑥ 志摩政幸（代表者）、Al合金のSiC粉末による摩擦改質と潤滑下のフレッチング特性、トライボロジー会議 2008 秋名古屋、2008 年 9 月 18 日、名城大学（名古屋）

- ・伊藤 聡史（博士後期課程学生、その後高専助教）
- ・秋田 秀樹（日立建機主任研究員）
- ・雨澤 弘機（博士前期課程学生）

〔産業財産権〕

○出願状況（計 1 件）

名称： 丸軸表面の改質方法及びこれに用いる改質装置

発明者： 志摩政幸・菅原隆志・地引達弘・伊藤聡史

権利者： 志摩政幸・菅原隆志（所属機関の判断により権利帰属）

種類： 特許

番号： 特願 2009-016838、特開 2010-172995

出願年月日：2009 年 1 月 28 日

国内外の別：国内

〔その他〕

ホームページ等

研究室 HP に改質方法を掲載するとともに、上記の論文名と学会発表を一覧表に載せている。

<http://www2.kaiyodai.ac.jp/~jibiki/ouriki/index.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

志摩 政幸 (SHIMA MASAYUKI)  
東京海洋大学・海洋工学部・教授  
研究者番号：70092583

### (2) 研究分担者

地引 達弘 (JIBIKI TATUHIRO)  
東京海洋大学・海洋工学部・准教授  
研究者番号：40322094  
菅原 隆志 (SUGAWARA TAKASHI)  
東京海洋大学・海洋工学部・助手  
研究者番号：90456319

### (3) 協力研究者