

研究種目：基盤研究（C）
 研究期間：2006～2008
 課題番号：18560135
 研究課題名（和文）
 巨視的および微視的視点からの超微細粒鋼製機械要素の表面疲労強度に関する研究
 研究課題名（英文）
 Study on Surface Fatigue Strength of Machine Elements with Ultra-Fine Crystal Structure
 by Observations on Macroscopic and Microscopic Scales
 研究代表者
 大上 祐司（ OHUE YUJI ）
 香川大学・工学部・准教授
 研究者番号：60203709

研究成果の概要：

結晶を微細化する熱処理とショットピーニングを組み合わせた材料強化加工法によって微細結晶化するメカニズムを調査し、しゅう動機械要素の表面強度向上を実現するための加工条件を明らかにすることを目的としている。提案加工法では長寿命化が可能で、加工時間の短縮に由来する製造コスト低減を達成できる。さらに、加工により創製されるディンプル形状は油膜厚さを向上させる。提案加工法は、材料表面特性と潤滑性能の観点から従来の方法よりも有利であった。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	2,200,000	0	2,200,000
2007年度	800,000	240,000	1,040,000
2008年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	3,600,000	420,000	4,020,000

研究分野：機械機能要素・造形工学

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：機械要素，トライボロジー，環境材料，長寿命化，超微細粒鋼

1. 研究開始当初の背景

自動車などに用いられている歯車・軸受などのしゅう動機械要素は、潤滑油の油膜（弾性流体潤滑：EHL）を介しながら2つの転動面が接触してエンジンの動力を車輪に伝えている。しゅう動機械要素には、高速・高トルク条件での運転が、ますます要求されている。歯車の損傷には、曲げ損傷(Tooth breakage)、表面損傷(Pitting, Spalling)、焼付き(Scoring)のほかに摩耗(Wear)などがある。高速・高トルクになる領域では、しゅう動面は高負荷(数GPa)・高温(百数十度)となる

ため表面損傷が問題となる。その問題解決の一つの方法は、しゅう動機械要素の素材である鋼を強化することである。

上記のような背景から、本研究では、結晶を微細化する熱処理と微粒子ショットピーニング(Fine Particle Bombarding:FPB)を組み合わせた材料強化加工法が表面強度と潤滑性能に及ぼす影響を調査することとした。

2. 研究の目的

しゅう動機械要素の素材の代表である鋼は、その結晶粒径を微細化することにより機

械的・物理的特性が飛躍的に向上することが知られている。本研究では、結晶を微細化する熱処理と FPB を組み合わせた材料強化加工法によって微細結晶化するメカニズムを調査し、しゅう動機械要素の表面強度向上を実現するための加工条件を明らかにすることを目的としている。

3. 研究の方法

(1) 表面強度評価 表面の転動疲労強度を調べるために用いた試験片は図1に示すように SCM420H 鋼に浸炭硬化を施して製作した。浸炭条件は、浸炭時間：3h, 浸炭温度：1193K, 焼入温度：1073K, 焼戻し：453K/3h である。FPBの投射は図2に示した粒子を直圧式の投射装置で、加圧：0.3MPa, 投射時間：20s, 投射量：13.5kg/min, 投射距離：100mm, 投射角度：90°, 被投射物回転速度：20rpm で行った。研削はホワイトアルミナ系の砥石を使用して、平面研削を表面から浸炭異常層を除去するために深さ 50μm まで施した。図2に試験前の試験面の初期粗さを示す。FPB 試験片の表面粗さは、研削試験片とほぼ同等であった。

表面の転動疲労強度を調べるために図3に示すスラスト軸受試験機を用いた。SUJ-2の鋼球を試験表面とベアリングレースで挟みこんでセットする。使用する鋼球の数は3個で、荷重 6.386kN (651kgf) を負荷した。疲労試験は、鋼球を 1700rpm で回転させて実施した。疲労試験中に試験表面がはく離して試験機の振動が大きくなると、それを振動センサが感知して試験機が自動停止するように設定されている。その試験機の停止を疲労寿命とした。また、潤滑油にはタービン油を用いた。

(2) 潤滑状態計算 対象とする試験機がスラスト軸受試験機であるので、図4に示すような計算モデルを作成し、潤滑状態の解析を行った。モデルは球の上部弾性体と平板の下部弾性体とで構成される。球と平板の間には潤滑油が満たされている。x, y, z 方向はそれぞれ、球の運動方向、その運動方向と垂直な方向、そして潤滑油の膜厚方向の座標を示す。u は球の速度、P は法線荷重、η は潤滑油の粘度である。球の速度、法線荷重、潤滑油膜粘度から接触中の油膜圧力と油膜厚さを式(1)に示すレイノルズ方程式利用して計算した。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{h^3}{12\eta} \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{h^3}{12\eta} \frac{\partial p}{\partial y} \right) - \frac{u}{2} \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{v}{2} \frac{\partial h}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

ここで、p は油膜圧力、h は油膜厚さである。解析条件は表1に示すとおりである。

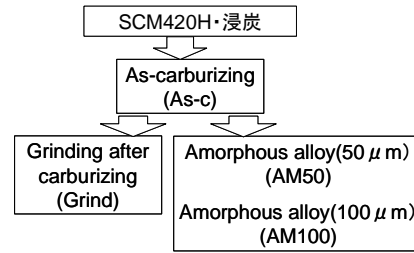


図1 試験片

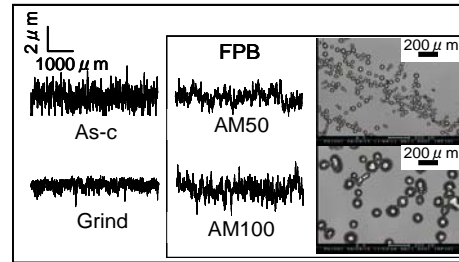


図2 試験片表面粗さと FPB 粒子

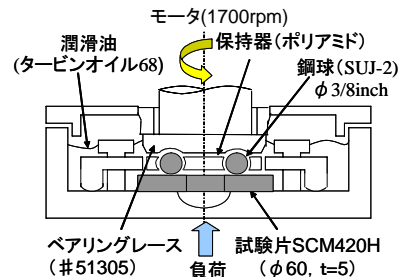


図3 スラスト軸受試験片

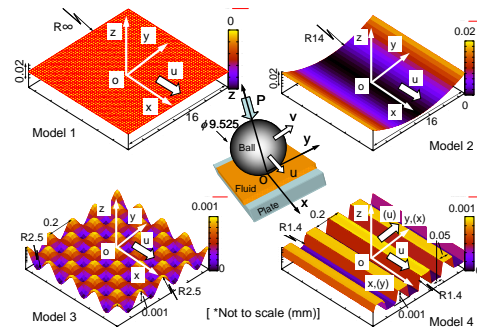


図4 潤滑計算表面モデル

表1 潤滑状態計算条件

Lubricant	Density	ρ	kg/m ³	881.1
	Viscosity*	η	Pa · s	5.884x10 ⁻²
	Kinematic viscosity*	ν	m ² /s	66.78x10 ⁻⁶
	Viscosity-pressure coefficient	α	1/Pa	1.0x10 ⁻⁸
Material	Young's modulus	E	GPa	206
	Poisson's ratio	ν		0.3
Contact condition	Velocity	u	m/s	1.0 - 6.0
	Normal load	P	N	532,1064, 2128,3192

* At 313K

表2 ウィルコクソン検定

検定対象	As-c	Grind	AM50	AM100
As-c		x U=0.640513	○ U=-2.08167	x U=-1.60128
Grind	x U=-0.64051		x U=-1.60128	x U=-1.4415
AM50	○ U=2.08167	x U=1.60128		x U=-0.64051
AM100	x U=1.60128	x U=1.4415	x U=0.640513	

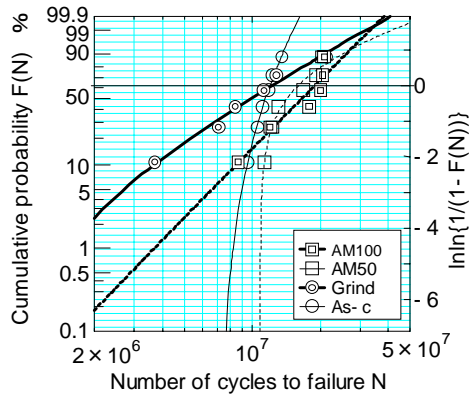


図5 ワイブル分布

4. 研究成果

(1) 表面強度評価 疲労破壊の標本は短時間で多数を回収することは困難である。そこで本研究では、小標本数による検定が可能なノンパラメトリック検定のうち代表的な検定方法であるウィルコクソン検定を利用して検討した。ウィルコクソン検定は2つの母集団分布の形が等しい場合に、「仮説：母集団の中央値は等しい」ことを検定する。すなわち分布位置に差があるかどうか検定するのに適している。検定方法は、仮説が真ならば検定量Uを標準正規分布に近似できることを利用し、正規分布の有意水準5%点において $U \geq 1.96$ ならば仮説を棄却する。表2にウィルコクソン検定結果を示す。As-cとAM50は有意水準5%において母集団の中央値に差があるといえた。他の組み合わせでは有意差は見られなかった。そこで、有意水準を11%にとると、As-cとAM100の間も母集団の中央値に差があるといえた。

疲労試験による破壊は時系列に対して負の値はとらない。そこで本研究では負の値をとらない変数分布の当てはめに適したワイブル分布を使用する。ワイブル分布の確率密度関数 $f(N)$ は

$$f(N) = \frac{\alpha}{\beta} (N - \gamma)^{\alpha-1} \exp\left(-\frac{(N - \gamma)^\alpha}{\beta}\right) \quad (2)$$

で表わせる。ここで α : 形状パラメータ, β : 尺度パラメータ, γ : 位置パラメータである。

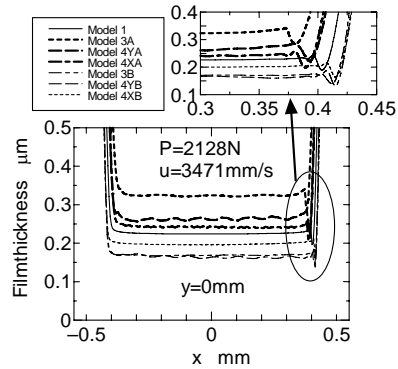


図6 油膜厚さ分布

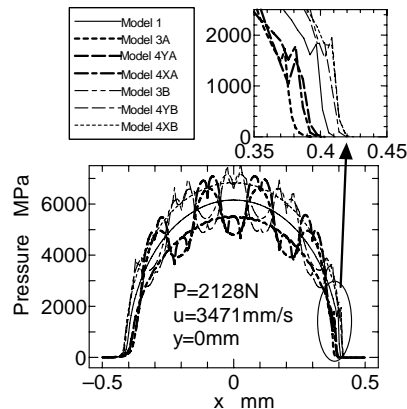


図7 油膜圧力分布

図5にワイブル分布による母集団推定結果を示す。ワイブル分布の分布からFPB処理試験片AM50, AM100ともに研削試験片Grindよりもばらつきが少ない。また、As-cと比較すると、累積確率が高くなるほど、AM50とAM100の疲労寿命は長くなった。

(2) 潤滑状態計算 図4において、モデル1は粗さを無視した平板のモデル、モデル2は平板のしゅう動面に球の転動痕がついたモデルである。モデル1とモデル2は、計算の妥当性を確かめるために、式(2)で与えられるHamrockらの最小油膜厚さと比較するために作成した。

$$h_{\min} = 3.63U^{0.68}G^{0.49}W^{-0.073}(1 - e^{-0.68k})R_x \quad (3)$$

ここで、 U , G , W はそれぞれ速度、材料、荷重のパラメータ、 R_x はx方向の等価曲率半径、 k は楕円パラメータである。モデル3およびモデル4は、それぞれ微粒子ピーニング仕上げと研削仕上げ面をモデル化したもので、表面凹凸差を1μmとした。モデル4においては、球の進行方向の違いによって分類した。モデル4では、球の進行方向が溝方向に垂直なものはY、並行なものはXをモデル名の後に付記した。また、モデル3, モデル4Y, モデル4Xをそれぞれ接

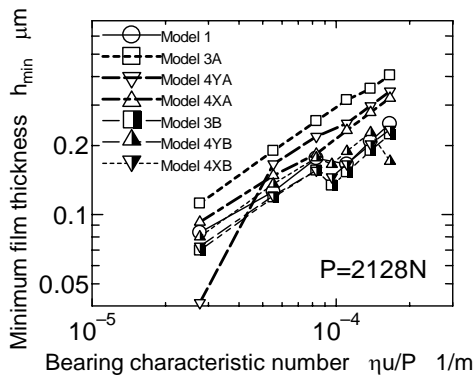


図8 軸受特性数と最小油膜厚さ

触位置の違いにより A, B の記号をモデル名の後に付記した. 球の接触点が平板表面の凹部にある場合を A, 凸部にある場合が B である. モデル 3A とモデル 3B は微粒子ピーニング仕上げ表面のモデルであり, 4つのモデル 4YA, 4YB, 4XA, 4XB は研削仕上げ表面である. これらモデルは, 仕上げ方法の違いによる表面形状の変化が, 潤滑状態に与える影響について考察するために作成した.

図6と図7にモデル1, 3, 4のx軸上の油膜厚さと油膜圧力の解析結果をそれぞれ示す. モデル1とモデル3を比較する. モデル3Aにおける油膜はモデル1に比較して十分に厚いが, モデル3Bにおける油膜はモデル1よりも薄くなった. 油膜圧力は, モデル3A, 3Bではディンプルの凹凸を有するため, モデル1の圧力分布を中心として変動していた. 圧力の最大値については, モデル3Bは3Aより高くなるが, いずれもモデル1の最大値と比較すると高い.

モデル1, 4YA, 4YB, 4XA, 4XBを比較する. モデル4YAと4XAにおける油膜はモデル1より厚いが, モデル4YBと4XBにおける油膜はモデル1より薄くなった. モデル4YAと4YBにおける油膜圧力はモデル1の分布を中心に溝の凹凸に伴って変動し, 最大値はモデル4YBのほうが高くなった. モデル4XAと4XBの油膜圧力分布はモデル1の分布に沿っており, モデル4XAではモデル1より低く, モデル4XBではモデル1より高くなった. x方向の油膜厚さや油膜圧力の分布から, モデル4XAと4XBの間の変動は, モデル4YAと4YBの間の変動に比較して小さい.

図8にモデル1, 3, 4の最小油膜厚さと軸受特性数との関係を示す. すべてのモデルで, 軸受特性数が増加すると h_{min} も大きくなり, 各モデル間の h_{min} の大小関係は軸受特性数が増加しても変化しないことがわかる. モデル1, 3, 4の潤滑状態について比較すると, モデル3および4において, モデル名にBを付記したモデル, すなわち, 球が相手凸部と接触している場合には, 最小油膜厚さはモデル

1の値とほぼ同等である. 一方, モデル名にAを付記したモデル, すなわち, 球が相手凹部と接触している場合には, 最小油膜厚さについては, ディンプル形状をモデル化したモデル3はモデル1に比較して大きな値を示した. 現在行っている疲労実験では, ボールオンディスク型を用いているので, 球は相手ディスク上を公転運動している. したがって, モデル3, 4において, 球がディスク表面上を一周する際, ディンプルまたは溝の凹部と凸部に交互にあるとすれば, その油膜厚さの変動は大きくなるため, モデル3, 4はモデル1に比較して h_{min} が厚くなっている確率が高い. よって加工表面は潤滑状態においては平板より有利であるといえる. しかし, 図7に示したように加工表面では圧力が平板に比べて高くなっていた. 大きな接触圧力は破損の原因となり得るため, 加工表面を採用する際には接触圧力の大きさを考慮し, 表面微細形状を選択する必要があるといえる.

(3) まとめ スラスト軸受試験機を用いて, 浸炭熱処理後に生成される浸炭異常層に対し直径数十 μm の粒子を100-200m/sの高速で数十秒衝突させた微粒子ショットピーニング加工試験片と, 浸炭異常層を数時間かけて研削により除去した研削加工試験片の両者の表面疲労寿命を統計学的観点から調査した結果, 両者の疲労寿命に差はないことが判明した. すなわち, 短時間で加工が終了する微粒子ショットピーニング加工の試験片が, それよりも時間を費やす研削加工と同等な寿命を有することは, 微粒子ショットピーニング加工では加工時間が短縮できるという理由による製造コストの低減を達成できるといえる. さらに, 加工によって創製されたディンプル形状がしゅう動機械要素の潤滑状態をレイノルズ方程式に基づいて解析を行った. 最小油膜厚さについては, ディンプル形状をモデル化したモデルは油膜が厚くなっている確率が高い. しかし, ショットピーニング加工の凸表面では接触圧力が平板に比べて高くなっていた. 大きな接触圧力は破損の原因となり得るため, 接触圧力の大きさを考慮し, 創製される表面微細形状設計を考慮する必要がある.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 8件)

- ① Yuji Ohue, Rolling Fatigue Strength and Surface Property of Fine Particle Bombarded Steel, Extended Abstracts, 2nd International Conference on Advanced Tribology 2008, なし, 168-170, 2008, 査読有.
- ② Yuji Ohue, Yuji Senno, Influence of Fine Particle Bombarding on Surface Strength of Carburized Steel under Rolling Contact Condition, Conference Proceedings, The

- 10th International Conference on Shot Peening, なし, 217-222, 2008, 査読有
- ③ Yuji Ohue, Yuji Senno, Effect of Fine Particle Bombarding on Rolling Fatigue Strength of Carburized Steel, Tribology Online, Japanese Society of Tribologists, Vol. 3, No. 2, 157-162, 2008, 査読有
 - ④ Yuji Ohue, Koji Matsumoto, Sliding-rolling Contact Fatigue and Wear of Maraging Steel Roller with Ion-nitriding and Fine Particle Shot-peening, Wear, 263, 782-789, 2007, 査読有
 - ⑤ 大崎浩志, 阿野亮介, 大上祐司, 藤井正浩, 吉田彰, SiおよびMoを添加した新軸受鋼の準高温下の転がり疲労特性, 日本トライボロジー学会, トライボロジスト, 52巻, 5号, 373-380, 2007, 査読有
 - ⑥ Yuji Ohue, Koji Matsumoto, Katsumi Yamano, A Study on Sliding-Rolling Contact Fatigue of a Maraging Steel Roller, Japanese Journal of Tribology, Vol. 51, No. 5, 577-589, 2007, 査読有
 - ⑦ Masanori Seki, Akira Yoshida, Yuji Ohue, Toshihiko Hongo, Takumi Kawamura, Ichiro Shimoyama, Influence of Shot Peening on Surface Durability of Case-Hardened Steel Gears (Influences of Shot Velocity and Shot Diameter), Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, Vol. 1, No. 4, 518-529, 2007, 査読有
 - ⑧ Yuji Ohue, Koji Matsumoto, Sliding-Rolling Contact Fatigue of Maraging Steel Roller with Ion-Nitriding and Fine Particle Shot-Peening, Proceedings of ASIATRIB 2006 KANAZAWA, なし, 645-646, 2006, 査読有

[学会発表] (計 14 件)

- ① 大上祐司, 間島崇仁, 金井淳, 微細表面凹凸形状が潤滑状態に及ぼす影響の検討, 日本設計工学会四国支部平成 20 年度研究発表講演会, 2009年3月16日, 香川県高松市.
- ② 大上祐司, 富田優記, 前田啓博, 接触に伴う内部応力計算のための有限要素解析モデルの検討, 日本設計工学会四国支部平成 20 年度研究発表講演会, 2009年3月16日, 香川県高松市.
- ③ Yuji Ohue, Rolling Fatigue Strength and Surface Property of Fine Particle Bombarded Steel, 2nd International Conference on Advanced Tribology 2008,

2008年12月5日, Singapore.

- ④ Yuji Ohue, Yuji Senno, Influence of Fine Particle Bombarding on Surface Strength of Carburized Steel under Rolling Contact Condition, The 10th International Conference on Shot Peening, 2008年9月16日, 東京都千代田区.
- ⑤ 大上祐司, 微粒子ピーニング加工表面形状が潤滑状態に及ぼす影響の数値解析的考察, 日本機械学会 2008 年度年次大会, 2008年8月4日, 神奈川県横浜市.
- ⑥ 大上祐司, 鶴飼拓哉, 数値解析による潤滑状態に及ぼす表面形状の影響の検討, 精密工学会 2008 年度春季大会学術講演会, 2008年3月19日, 神奈川県川崎市.
- ⑦ 大上祐司, 鶴飼拓哉, 微粒子ピーニング加工された表面形状が潤滑状態に及ぼす影響の数値解析的検討, 日本設計工学会四国支部 2008 年度研究発表講演会, 2008年3月14日, 高知県高知市.
- ⑧ 大上祐司, 鶴飼拓哉, 微粒子ピーニング加工が潤滑状態に及ぼす影響の数値解析的検討, 日本機械学会中国四国支部第 46 期総会・講演会, 2008年3月7日, 広島県呉市.
- ⑨ 大上祐司, 千野雄司, 浸炭硬化鋼の転がり表面強さに及ぼす微粒子ピーニングの影響, トライボロジー会議 2007 秋佐賀, 2007年9月26日, 佐賀県佐賀市.
- ⑩ 大上祐司, 千野雄司, 浸炭硬化鋼の面圧強さに及ぼす微粒子ショットピーニングの影響, 日本機械学会創立 110 周年記念 2007 年度年次大会, 2007年9月11日, 大阪府吹田市.
- ⑪ Yuji Ohue, Koji Matsumoto, Sliding-Rolling Contact Fatigue and Wear of Maraging Steel Roller with Ion-Nitriding and Fine Particle Shot-Peening, 16th International Conference on WEAR OF MATERIALS, 2007年4月8日, Montreal, Canada.
- ⑫ 大上祐司, 千野雄司, 山川拓哉, 微粒子ピーニングが浸炭硬化鋼の表面強さに及ぼす影響, 日本設計工学会四国支部平成 18 年度研究発表講演会, 2007年3月17日, 高知県香美市
- ⑬ Yuji Ohue, Koji Matsumoto, Sliding - Rolling Contact Fatigue of Maraging Steel Roller with Ion-nitriding and Fine Particle Shot-Peening, The 3rd Asia International Conference on Tribology, 2006年10月18日, 石川県金沢市.
- ⑭ 大上祐司, 松本幸士, 山野克己, 窒化および微粒子ショットピーニング処理し

たマルエージング鋼の転がり疲れ，トライボロジー会議 2006 春，2006 年 5 月 16 日，東京都渋谷区.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

大上 祐司 (OHUE YUJI)
香川大学・工学部・准教授
研究者番号：60203709