

微粒子ピーニングによってマイクロ・ナノ鍛造効果を 表面に付与したしゅう動機械要素の開発

香川大学 工学部 知能機械システム工学科
教授 大上祐司
(平成 20 年度一般研究開発助成 AF-2008006)

キーワード：微粒子ピーニング，浸炭鋼，しゅう動機械要素，表面疲労，はく離，潤滑状態，ワイブル分布

1. 研究の目的と背景

歯車や軸受などのしゅう動接触する機械要素には、しゅう動表面の疲労強度の向上が求められる。図 1 に示すように、高強度を必要とする歯車や軸受などのしゅう動機械要素の製造工程では、はだ焼き鋼に代表される構造用鋼を切削の後、表面強度向上のために浸炭が施される。その際に形成される浸炭異常層の除去と精度確保のために研削による仕上げ加工が行われている。しかし、研削加工では目的の寸法精度と表面粗さの精度等級が厳密になるにつれて工程に要する時間が飛躍的に増す。そこで、粒子径が 100 μm 以下の投射材を用いた微粒子ピーニング(Fine Particle Shot-Peening : FPP)による加工では短時間に加工することが可能であるので、仕上げ加工の FPP による代替運用が可能かどうかを表面疲労強さの観点から考察することは重要である。そのために、浸炭硬化鋼に微粒子ピーニングを施し、表面強さを統計的に評価した。さらに、FPP による微細表面形状をモデル化し、潤滑状態に及ぼす FPP の影響についても調べた。これらの結果を基に、高強度しゅう動機械要素開発のための設計指針を示す。

2. 試験片と実験方法

転がり疲労寿命を調べるために用いた試験片は、図 2 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。FPP の投射は、表 1 に示す大きさの微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。浸

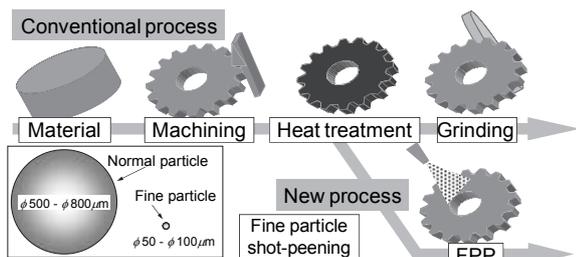
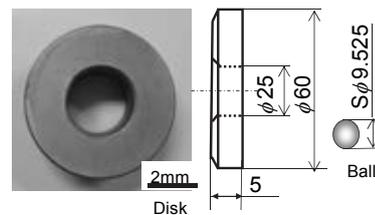


図 1 高強度しゅう動機械要素開発目的

炭したままの試験片 As-C に投射材粒子径 50 μm (AM50) と 100 μm (AM100)を利用して FPP 加工した。さらに、As-C については、ホワイトアルミナ系の砥石を使用して、表面の浸炭異常層を除去するために表面から深さ 50 μm まで平面研削を施した。図 3 に試験前の試験面の初期粗さと表面凹凸分布を示す。FPP 試験片の表面粗さは研削試験片とほぼ同等であったが、表面はディンプル状を呈していた。また、(b) の浸炭したままの試験片 As-C では、粒界酸化に起因する微細なき裂(矢印)も観察できた。しかし、FPP 試験片では、その微細なき裂は観察されなかった。

表面の転がり疲労寿命を調べるために、図 4 に示すラスト軸受転がり疲労試験機を用いた。試験片に接触させる SUJ2 の鋼球の数は 3 個で、荷重 6.39kN (651kgf)を負荷した。したがって、ヘルツの最大接触応力¹⁾ p_{max} は 6.15 GPa となる。疲労試験は、鋼球を 1700rpm で回転させ、室温で実施した。疲労試験中に試験表面がはく離して試験機の



Material	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	Fe
SCM420H	0.21	0.25	0.84	0.02	0.03	0.03	1.00	0.15	0.02	Bal.
SUJ2	1.00	0.25	0.30	0.02	0.01	1.40				Bal.

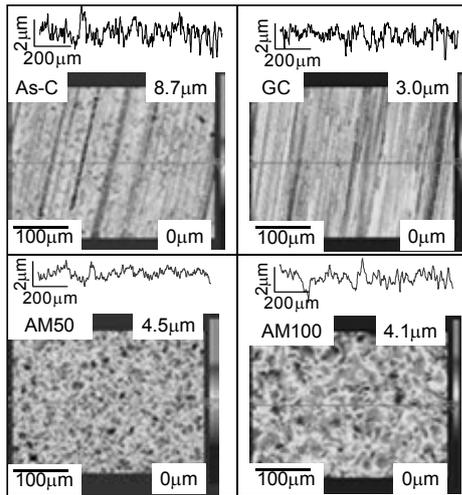
(wt%)

図 2 試験片形状と材料成分

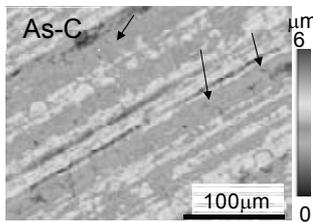
表 1 試験片の性状

Specimen	As-C	GC	AM50	AM100	
Material	SCM420H				
Pre-machining	Grinding				
Heat treatment	Carburizing				
Surface finishing	---	Grinding*	FPB		
FPB particle	Material	---	Amorphous alloy		
	Size μm	---	50	100	
	Hardness HV	---	900-950		
Surface hardness	HV	619	783	855	929
Surface roughness	Ry μm	5.8	2.5	2.6	3.8
	Ra μm	0.49	0.21	0.33	0.42

*Specimen GC was ground up to 50 μm from the surface after carburizing.



(a) 試験片の粗さと表面形状



(b) 浸炭したままの試験片表面 (矢印: 粒界酸化き裂)

図3 試験片表面粗さと表面凹凸分布

振動が大きくなると、試験機の振動センサが振動増加を感知して、試験機が自動停止するように設定されている。その試験機の停止時の総回転数を疲労寿命とした。また、潤滑油にはタービン油 #60 を用いた。疲労試験は室温で実施し、試験中の潤滑油温度は 333K – 343 K の範囲であった。

3. 試験片と実験方法転がり疲労試験

3・1 ワイブル分布とノンパラメトリック検定による寿命評価

図5にヘルツの最大接触応力¹⁾ $p_{max} = 6.15 \text{ GPa}$ での疲労寿命 N の3母数ワイブル分布を示す。ワイブル分布の確率密度関数 $f(N)$ は式(1)に示すとおりである。

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

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。研削試験片 GC の寿命は他の加工法よりも、ばらついている。原因としては、浸炭したままの試験片表面から 50 μm の深さまでの研削仕上げでは、浸炭異常層(粒界酸化層)の除去が完全に行えていない可能性が考えられる。FPP 試験片 AM50 と AM100 は、浸炭硬化したままの As-C 試験片よりも累積確率 $F(N)$ が高くなるほど疲労寿命は長くなり、平均寿命も長かった。また、AM50, AM100 とともに研削試験片 GC よりも寿命のばらつきが少なかった。

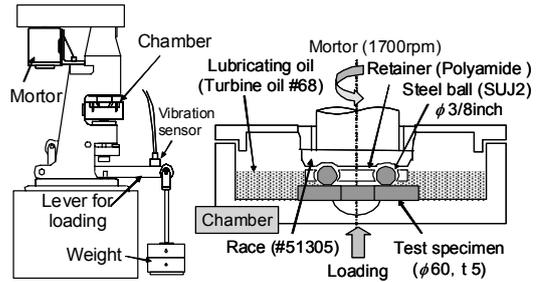


図4 スラスト軸受転がり試験機

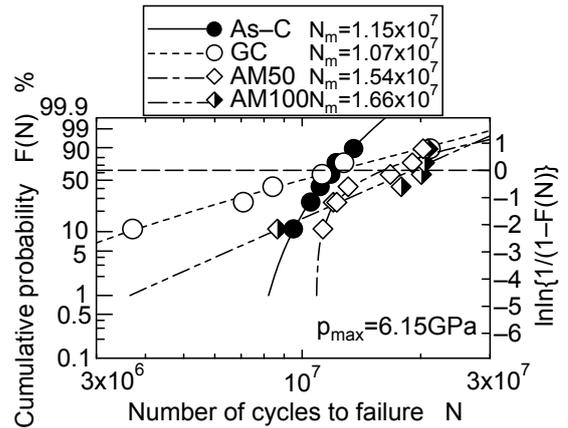


図5 疲労寿命のワイブル分布

表2 疲労寿命のノンパラメトリック検定結果

	As-C	GC	AM50	AM100
As-C	-	52.20%	3.80%	11.00%
GC	52.20%	-	11.00%	15.00%
AM50	3.80%	11.00%	-	52.20%
AM100	11.00%	15.00%	52.20%	-

疲労試験の標本は短時間で多数を得ることができなかったため、少標本数による検定が可能なノンパラメトリック検定の一つである ウィルコクソン検定²⁾を利用して疲労寿命を比較した。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」ことを検定できる。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%以下で母集団に差があるといえた。有意水準 11%になると、As-C と AM100 の間も母集団に差があるといえた。しかし、AM50 と AM100 および As-C と GC の間は母集団に差がなかった。すなわち、微粒子ピーニングでは、明らかに寿命が向上することが、統計的に判明した。

3・2 疲労試験後の表面性状

図6に試験後の試験表面の様相を示す。試験後の表面には、摩耗痕が観察できる。そこで摩耗痕の計測を触針式粗さ計で行って、図7に示すパラメータを求めた。試験片に関わらず圧痕幅 w_d と最大摩耗深さ w_z は、それぞれ 1.2mm と 10 μm 程度であることから、摩耗に及ぼす浸炭表面の仕

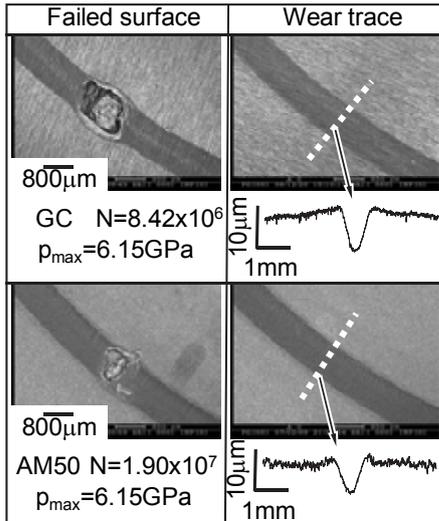


図6 疲労試験後の表面損傷と摩耗

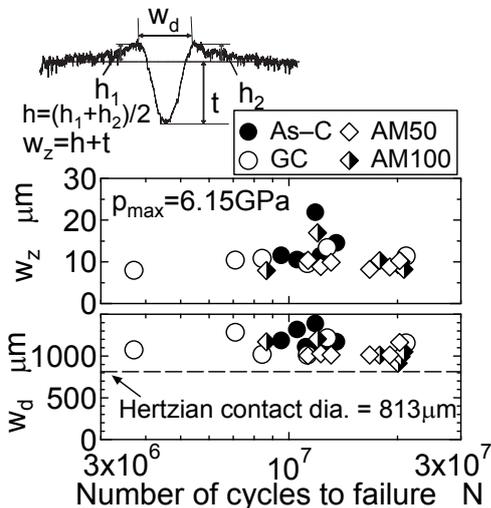


図7 疲労試験後の摩耗形状

上加工法の影響はなかったといえる。図8に試験前と摩耗痕の表面残留応力の変化を示す。試験前ではFPP試験片表面は高い圧縮残留応力であったが、試験後では圧縮残留応力が減少している。それとは対照的に、GCやAs-C試験片では、試験後の圧縮残留応力がFPP試験片AM50とAM100のそれと同等となっている。したがって、疲労試験中の圧縮残留応力変化の違い、すなわち繰り返し接触における材料の残留応力形成は試験荷重に依存し、疲労過程の違いを引き起こしている可能性があるといえる。

4. 微細凹凸表面が潤滑状態に及ぼす影響

潤滑されてしゅう動する機械要素の寿命に及ぼす重要因子の一つとして、潤滑油膜厚さが挙げられる。潤滑状態を解析するために、図9に示す4種類の計算モデルで表現した。モデル1から4は、それぞれ、平滑な面、疲労試験後の摩耗面、微粒子ピーニングや研削加工した試験片の微細凹凸形状である。モデルは、球の上部弾性体と平板の下

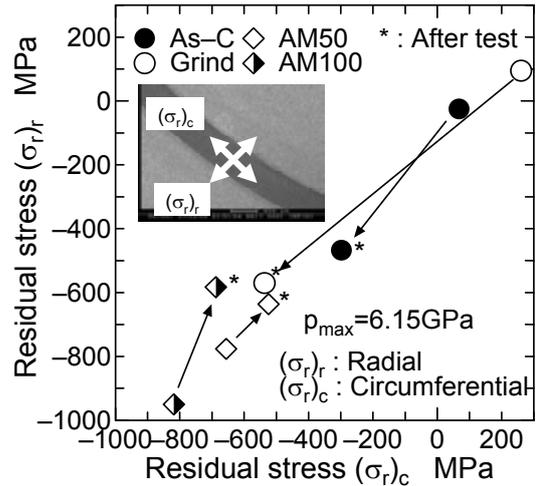


図8 疲労試験前後の残留応力変化

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。接触中の油膜圧力と油膜厚さを式(2)に示すレイノルズ方程式を利用して計算した。

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

ここで、pは油膜圧力、hは油膜厚さである。解析条件は表3に示すとおりである。疲労試験では、直径9.525mm(3/8 inch)を有するSUJ2鋼製球がSCM415鋼製平板上を公転しており、その際の球の公転回転速度は3.47 m/sであった。また、球1個あたりに負荷した法線荷重は2.13 kNであったので、運転条件はそれらの値の前後を含めて計算した。また、潤滑油温度には室温313Kを適用し、鋼球は粗さを無視した完全な球とした。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による摩耗痕がついたモデルである。数値計算の妥当性を確かめるために、モデル1とモデル2は、Hamrockらの最小油膜厚さ h_{min}^3 と比較するために作成した。Hamrockらの式と本解析での h_{min} の値は概ね同じであった。モデル3およびモデル4は、それぞれ図3に示す微粒子ピーニング仕上げ面(AM100)と研削仕上げ面(GC)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、球の進行方向に対して溝が形成されている方向の違いにより分類した。モデル4では、球の進行方向が溝方向に平行なモデルにはX、垂直なモデルにはYをそれぞれ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。球の中心が平板表面の凹部にある場合をA、凸部にある場合をBとして表記している。

図 10 は、 $P=2128\text{N}$, $u=3.47\text{ m/s}$ の条件における油膜圧力分布と油膜厚さ分布を示す。モデル 1 では、ほぼ同心円上に圧力が分布し、モデル 3A と 4YA では、平板表面の微細凹凸の位置に対応して圧力が変動している。油膜厚さと油膜圧力分布は、図に示す x 軸に沿って評価した。法線荷重 $P=2128\text{ N}$ 、球の公転速度 $u=3.47\text{ m/s}$ におけるモデル 1, 3, 4 の x 軸上の油膜厚さ分布と油膜圧力分布の解析結果をそれぞれ図 11(a)と(b)に示す。ディンプル形状が及ぼす影響を考察すると、球の中心が平板表面の凹部にあるモデル 3A における油膜厚さはモデル 1 に比較して厚いが、モデル 3B における油膜厚さはモデル 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。溝形状

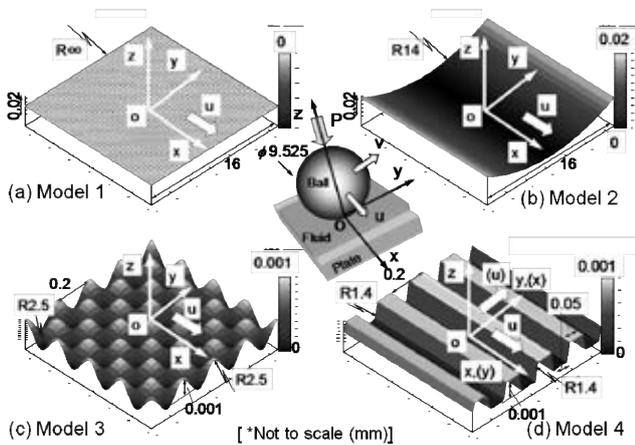
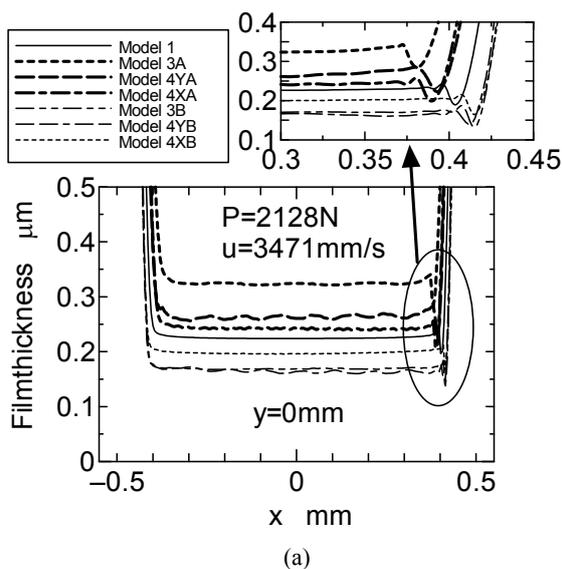


図 9 潤滑油膜計算のための表面モデル



が及ぼす影響を考察するために、モデル 1, 4YA, 4YB, 4XA, 4XB を比較する。球の中心が平板表面の凹部にあるモデル 4YA と 4XA における油膜厚さはモデル 1 より厚いが、モデル 4YB と 4XB における油膜厚さはモデル 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 の分布を中心として溝の凹凸に伴って変動し、最大値はモデル 4YB の方が高くなった。モデル 4XA と 4XB の油膜圧力分布はモデル 1 の分布に沿っていて、モデル 4XA で

表 3 潤滑油膜解析条件

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

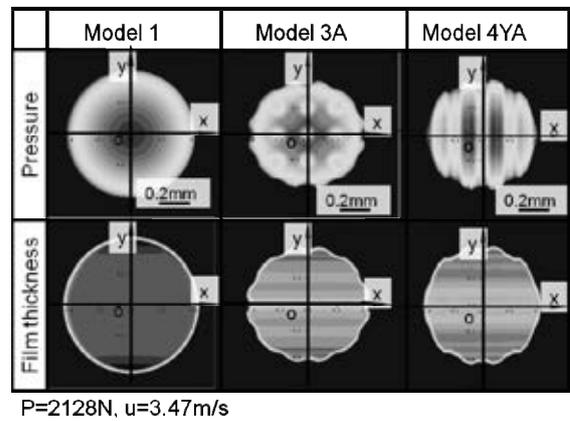


図 10 潤滑油膜厚さと圧力分布計算結果

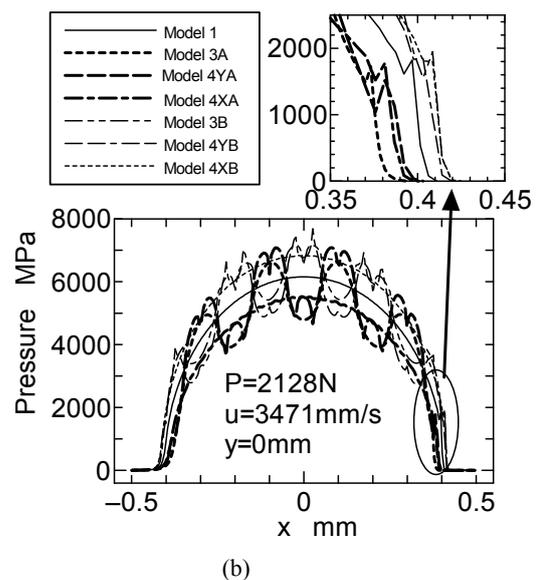


図 11 潤滑状態計算結果 (a) 油膜厚さ分布, (b) 油膜圧力分布

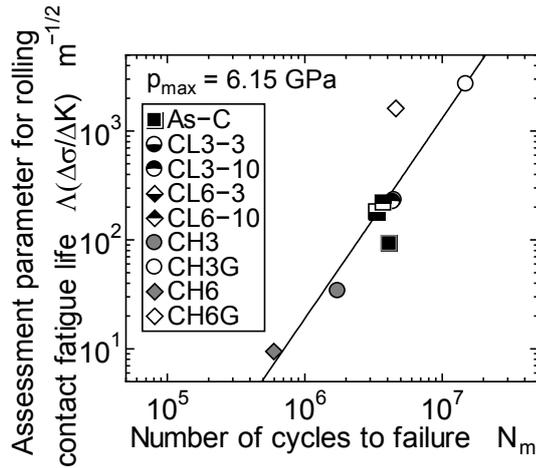


図 12 破壊力学パラメータと疲労寿命の関係

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。モデル 3 とモデル 4 を比較すると、油膜厚さが最も厚くなるのは球の中心が平板表面の凹部にあるモデル 3A で、最も油膜厚さが薄くなるのは、球の中心が平板表面の凸部にあるモデル 3B とモデル 4YB である。油膜圧力の最大値に関しては、モデル 3 とモデル 4 では大差がなかった。したがって、微粒子ピーニング加工表面のほうが研削加工表面よりも、潤滑油膜厚さを厚くする効果があるといえる。

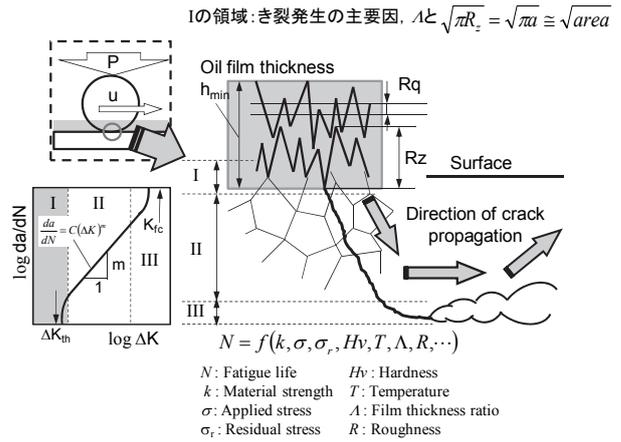
5. 高強度しゅう動機械要素開発設計指針

破壊力学の観点から、疲労寿命を考察するために、それぞれの試験片の粗さが応力拡大係数に比例するとして導いた応力拡大係数 $\Delta K / \Delta\sigma (= \pi R_s)^{1/2}$ の逆比と膜厚比 Λ の積を疲労寿命評価パラメータとして新しく提案した。図 12 は、粒子径 $600 \mu\text{m}$ の粒子径の投射材によりショットピーニングされた浸炭鋼の疲労試験結果を基に、そのパラメータと統計的に求めた平均疲労寿命 N_m の関係を示す⁴⁾。膜厚比 Λ は次式で与えられる。

$$\Lambda = \frac{h_{\min}}{\sqrt{R_{q1} + R_{q2}}} \quad (3)$$

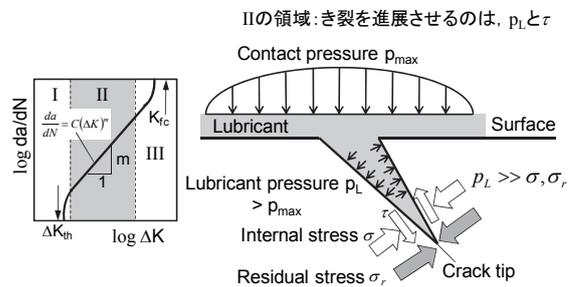
ここで、 R_s は最大高さ、 R_q は二乗平均平方根粗さ、添え字 1,2 は試験片を表す。 $\Lambda(\Delta\sigma / \Delta K)$ が大きくなるほど寿命が増していることがわかる。ショットした CH3 と CH6 試験片表面を表面粗さを小さくするために表面研磨(表面から $30\mu\text{m}$ と $70\mu\text{m}$ 研磨)した CH3G と CH6G では、格段に寿命が増加している。

そこで、しゅう動機械要素の表面疲労強度を増加させる設計指針を、破壊力学の観点から考察する。図 13 に疲労き裂の評価として用いられるき裂進展速度 da / dN と応力拡大係数範囲 ΔK の関係を示す。疲労き裂は、き裂が発生する第 I 領域、き裂が進展する第 II 領域、き裂がはく

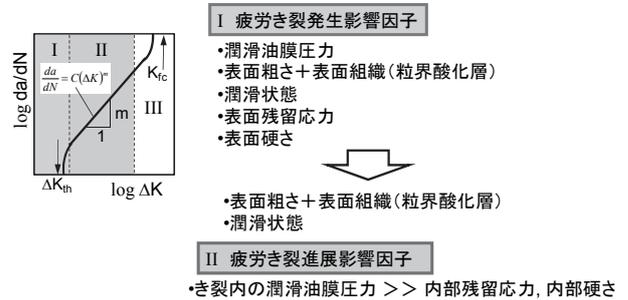


Lubricant pressure $p_L \approx$ Contact pressure $p_{\max} >$ Residual stress σ_r

(a) しゅう動疲労き裂の進展



(b) 第 2 領域におけるき裂近傍に作用する応力と油膜圧力



(c) しゅう動機械要素の疲労強度に及ぼす影響因子

図 13 高強度しゅう動機械要素開発設計指針

離などに至る第 III 領域に分けられる。また、しゅう動疲労寿命は(a)に示すように、材料自身の強度、硬さ、残留応力、粗さ、潤滑状態などの多くの因子によって決まる。今回の実験結果の図 5 と図 12 から、それら多くの影響因子の内、表面粗さ(初期き裂長さ)、膜厚比そして初期表面圧縮残留応力が重要因子であることがわかる。また、(b)に示す第 II 領域では、き裂近傍に作用する油膜圧力 p_L ($p_{\max}=6.15\text{GPa}$ に近い値) がショットにより生じた内部圧縮残留応力(最高で約 -2GPa) よりも高いために、き裂進展に対して内部残留応力は寿命にはあまり影響を及ぼさないと考えられる。したがって、ショットピーニングを利用した高強度しゅう動機械要素開発設計指針として、小さい粒子径の投射材を用いて表面粗さを小さくし、高い表面圧縮残留応力と表面硬度を付与するショットピーニング

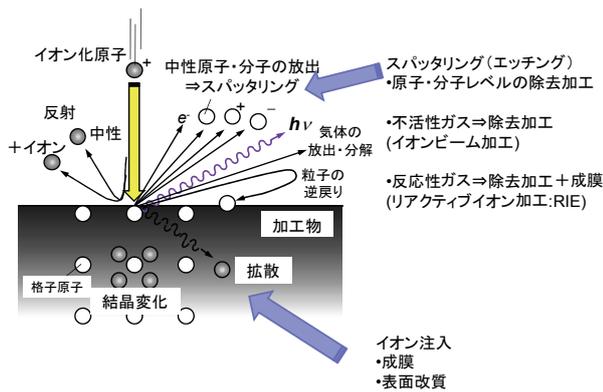


図 14 イオン加工の原理

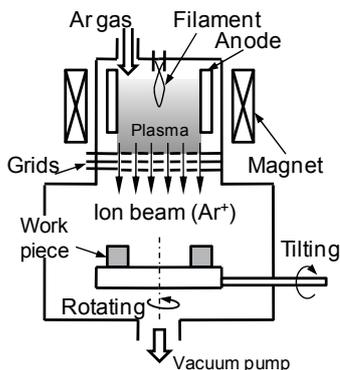
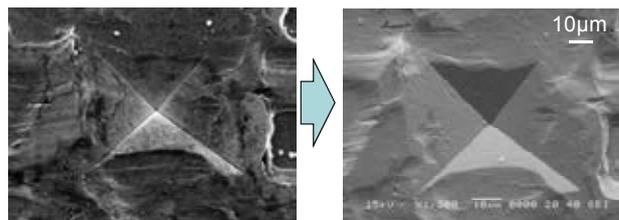


図 15 イオンシャワー加工機の概略
法が最適であるといえる。

6. イオンシャワー加工による微細表面形成の試み

ショットピーニング加工では、ディンプル状の微細凹凸面が形成されていた。そのディンプル微細表面は、潤滑性能の向上に有効であるという結論を得た。そこで、更なる微細表面形成方法を探求するために、イオン化された原子の衝突により、金属を加工できるイオンシャワー加工機を用いて、微細表面形成のための基礎実験を行った。図 14 はイオン加工の原理であり、加速したイオンを金属表面に衝突させることで、原子レベルの微細加工が可能である。図 15 は加工に用いた装置の概略である。不活性ガスの Ar を利用してイオン化した Ar^+ を照射できる。また、試験片取り付け部は、イオン入射に対して試験片の角度を調整でき、回転させることも可能である。対象とした材料は焼入れした SK5 鋼板で、イオン入射角を 60 度に固定し、加速電圧を 1000V としてイオン照射加工を 3 時間実施した。SEM による表面観察結果を図 16 に示す。加工前の鋼板表面にマイクロピッカー硬度計により初期の四角すい形状の圧痕を加工しているが、鋼板初期表面の粗さが大きいいため、いびつな形状である。しかし、加工後には圧痕の形状が鮮明になり、表面が非常に滑らかになっていることが観察できた。イオン加工は、初期形状を工夫すると鋼に対



Before test 3 hour
図 16 イオンシャワー加工結果 (加速電圧 1000V, Ar^+)

しても微細な加工に利用可能であるという結果を得ることができた。

7. 結言

本研究で得られた結果を要約すると以下のようになる。

- (1) ワイブル分布およびノンパラメトリック検定によって、転がり疲労寿命を統計的に解析した結果、FPP 試験片の疲労寿命は、浸炭したままの試験片 As-C あるいは研削試験片 GC よりも長寿命であることがわかった。
- (2) 疲労試験前後の試験片表面性状の観察から、FPP 試験片の寿命が、GC や As-C よりも長い理由として、FPP による浸炭異常層の除去、材料表面の硬さの増加、さらには圧縮残留応力の増加が影響したと考えられる。
- (3) 油膜厚さの形成に関しては、FPP によって創製されるディンプル形状の凹凸は有利であることがわかった。油膜圧力に関しては、ディンプル形状および研削形状のモデルでは、平板に比べ高くなっていた。
- (4) ショットピーニングを利用した高強度しゅう動機械要素開発設計指針として、小さい投射材を用いて表面粗さを小さくし、高い表面圧縮残留応力と表面硬度を付与するショットピーニング法が最適であるといえる。

最後に、微粒子ピーニング加工は新東工業 (株) のご厚意によるものである。また、本研究は天田金属加工機械技術振興財団の助成を受けて行った。ここに、記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 社団法人トライボロジー学会：トライボロジーハンドブック、養賢堂 (2001)。
- 2) 杉山高一、牛沢堅二：パソコンによる統計解析、朝日書店 (1984)。
- 3) B. J. Hamrock & D. Dowson, Ball Bearing Lubrication, (1981), John Wiley & Sons.
- 4) 大上祐司、松本拓也、前田啓博、小林祐次、後和大輔：ショットピーニング投射材硬度が浸炭硬化鋼の転がり疲労寿命に及ぼす統計的評価、日本機械学会 2011 年度年次大会、発表予定。