

## 2. 部品加工精度の工学的、技術的意味と評価

### [1] はじめに

すでに、I編1.2節において述べたように、部品加工精度としてとらえるべき内容は膨大である。しかし、設計者がはたしてこのような内容を十分念頭においているとは思われない。とくに、これまで述べた精度設計論の観点から詳細に検討しなければならないと思う、真に性能の優れた高品質の製品生産のために十分留意すべき問題であり、このような方向が回り道のようにも、設計や製造面の合理化にもつながるものと強調したい。

以下に、表面粗さ、Surface Integrity, エッジ品質についての工学的、技術的意味と評価の問題に触れたい。

### [2] 表面粗さの工学的意味

表面粗さの測定法は著しく進歩し、 $R_m$ ,  $R_a$ ,  $R_z$ , Abbottの負荷曲線、粗さ形状の周波数分析など、簡単にしかも迅速に求められるようになった。したがって、今後、表面粗さの工学的意味に関する解明は急速に進展するものと考えられる。

確かに、このテーマの解明は容易ではないが、あえて取り組むべき問題であることを強調したい。阿武<sup>1)</sup>は、部品の機(性)能に関連して次の点を指摘している。

- ① 2平面の接合における締付け力によって、表面の山がつぶれて取付け精度が狂う。
- ② 表面粗さが大きいと締りばめの効が悪い。その変形は、軟らかい材料では塑性的で、硬い材料では弾性的である。この現象は、理論的に証明されている。
- ③ 2面の接触部の水密、気密性は粗さに影響される。気密性については、築添<sup>2)</sup>の理論的、実験的研究がある。
- ④ 潤滑面では、粗さが大きいと潤滑特性が悪い。岡村<sup>3)</sup>は、平面しゅう動面の潤滑の研究において、境界潤滑まで潤滑が悪化するのに  $R_{max}0.8\mu\text{m}$  は  $7\mu\text{m}$

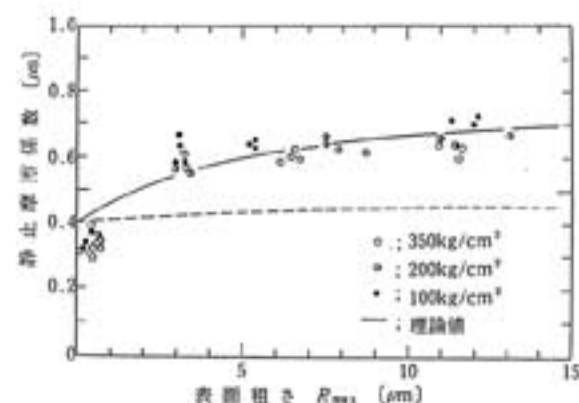


図1 表面粗さと静止摩擦係数の関係(築添)

の6倍の荷重に耐えるといった定量的議論を述べている。

- ⑤ 表面粗さは疲労強さに大きく関連する。疲労強さは粗さが  $1\mu\text{m}$  から  $10\mu\text{m}$  になると13%,  $100\mu\text{m}$  になると30%程度低下するという。2円筒によるピッチング試験では、ピッチング限界強さと粗さの関係が実験的に明らかにされている。
  - ⑥ 案内面では、精度、剛性、摩擦の点から、粗さの小さいことが要求される(しかし、工作機械の案内面などにおけるスティックスリップ現象などにどのように関連するか、きざげ面の模様とオイルポケットの役割については明らかにされていない)。
- さらに、築添<sup>2)</sup>は表面粗さとトライボロジーとの関連について、かなり理論的に解明している。
- ① 粗さと摩擦特性に関し、静止摩擦係数との関係を図1に示すように、理論的に実験的に明らかにしている。

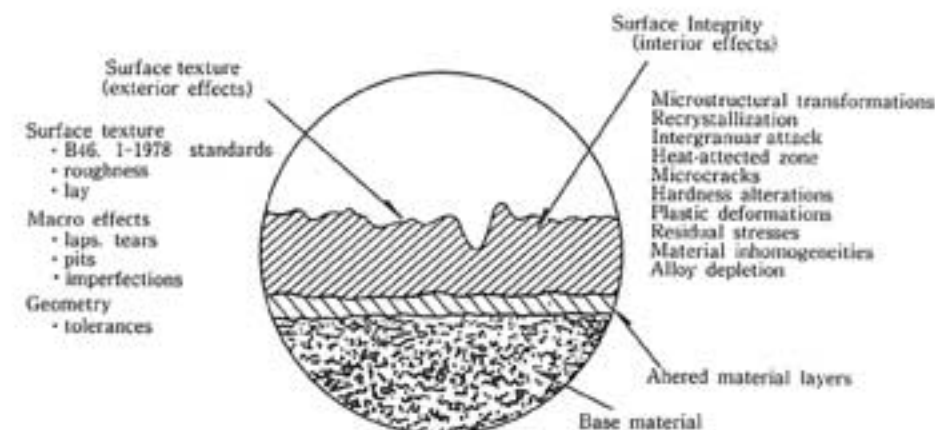


図2 加工面の表面層構造

- ② 粗さと摩擦特性に関し、次のようなことを定量的に明らかにしている。
- ④ 凝着摩擦とアプレシブ摩擦はともに、なめらかな面ほど、硬い材料ほど少なく、滑り速度の直接の影響はない。荷重に比例する。
- ⑤ 酸化摩擦は、粗さや材料の硬さや荷重にほとんど無関係であるが、滑り速度に反比例する。
- ③ 粗さと潤滑特性に関し、なめらかな面ほど真実接触点の受けもつ荷重が少なく、境界潤滑特性はよくなる。すなわち、摩擦係数が小さく、焼付きの危険性が少ない。また、流体潤滑に境界潤滑が混入する臨界点が、低速度、高荷重まで流体潤滑を保つ方向に移動する。

なお、石田<sup>4)</sup>によって表面粗さのめっき付着性、板金の絞り加工性、冷間鋼板の表面美観、放射温度計による測温に及ぼす影響などについて解説されている。

- ① めっきが表面の凹凸にそって均一な厚みで付着するか、凸部に多く付くか、凹部を埋めるように付くか、は興味ある問題である。めっきの目的は、表面の光沢、美観、耐食性、耐摩耗性など、各種の表面品質を向上することであるが、それぞれもっとも効果的な付着状態があるはずである。とくに、省資源を狙いとして薄めっき化をはかるうえで重要なことである。
- ② 絞り加工において、粗さの凸部は潤滑油を保持し、凹部はブレーキとなって不均一な伸びを防ぐ効果があるといわれている。絞り加工において、しごき力は板厚とクリアランスによって支配される。しごき面の仕上りとの関係で限界はあるが、粗さの大きいほどしごき力は小さく、粗さの小さいほどしごき力

は大きく、製缶数とともに増大する。

- ③ 放射温度計による測温において、表面の凸凹による乱反射が計測に大きな影響を与える。

以上が、筆者の調査した範囲での表面粗さの工学的、技術的意味である。先日、長野県にあるカメラ部品のメーカーを訪問したところ、ズーム鏡筒の仕上げの粗さの方向がしゅう動方向に一致していると、しゅう動時の音が低いという話を聞いた。筆者は、冷蔵庫のコンプレッサ部品について、気密性を要求される合せ面の仕上げ面の粗さの方向性が、著しく機能に影響することを経験した。気体の流出する方向に加工のきざが直交していると、粗さがかなり大きくてもその機能を満足させ、加工コストが少なくすむことが判明した。

メモリアディスクの粗さが記録密度や感度に影響するという問題もある。

このような事例は、このほかにも数多くあると思うが、企業のノウハウとして公表されていない。できれば、公表していただいて広く利用できる形にまとめたいものである。

### [3] Surface Integrityの工学的意味

Surface Integrityの内容については、1.2の図1において説明したように複雑である。その図の下に述べた定義によれば、「Surface Integrityとは、製造中に表面層に生成されるあらゆる可能性のあるできごとの記述と制御であり、それは製品としての動作中の材料の性質や表面性能に及ぼす影響を包含するものである」ということである。さらに、「Surface Integrityは、部品の意味のある工学的性質に及ぼす加工影響の選択と制御によって目的が達成される」と付言されている。Integrityという言葉は理解し難いが、辞書によれば、「完全性の品質と状態」

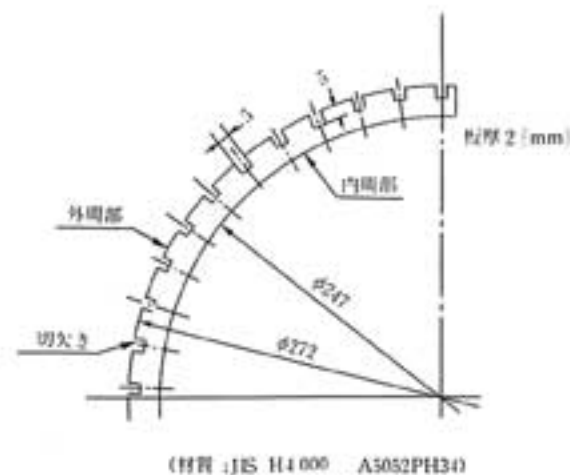


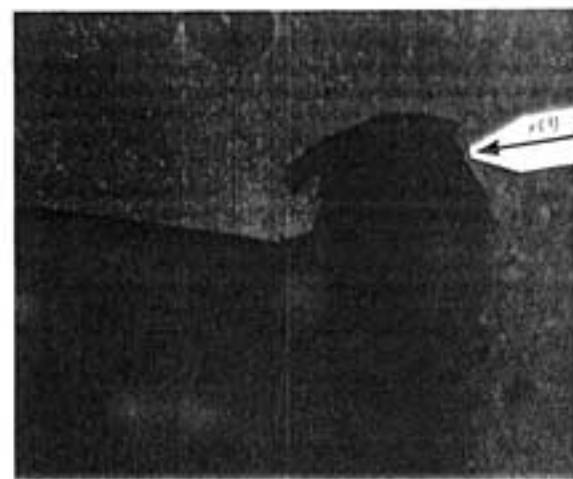
図7 スパーサ

して約5 $\mu$ mとした。この2次バリは、工具材質の摩耗率と密接な関係にあることを図6に示す。また、このときのカットの周速度は2.5m/minで、カットの面取りのはじめの切りくずを写真4に示す。この実験結果から、十分、装置の工具としてカットが使用できることを確認できた。

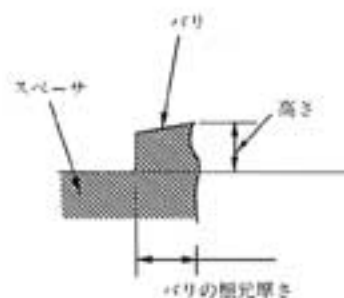
そこで、高速度移動・停止を繰り返す鋼板の面取り装置の設計に着手し、V形案内溝による鋼板のだ行防止、ローラによる鋼板のおどり防止の機構を加えた。開発した面取り装置を写真5に示す。また、カットは再研して使用できるので、バリ取りコストは約0.5円/mである。この変圧器のような大形部品は、受注生産であり、生産量は年度ごとで異なる。バリ取りによるCD効果は、生産量によって左右されるが、概略40000~50000千円/年程度である。

### [3] 遮断器用部品スパーサのバリ取り

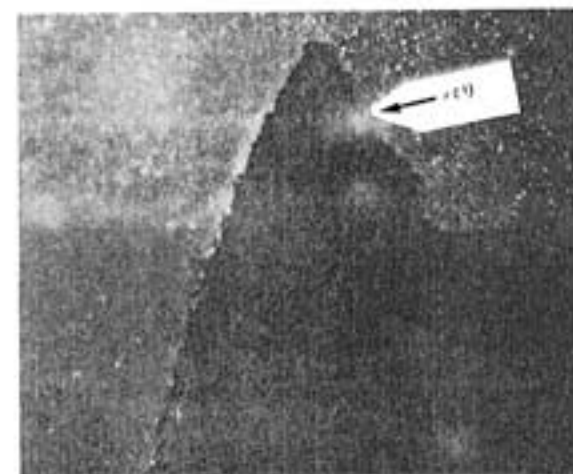
この事例は、工夫しだいで投資をそれほど必要としない。しかも、従来の半分の時間でバリ取りを可能にした例である。遮断器用部品スパーサ(以下、スパーサという)を図7に示す。図から、スパーサの板厚は2mmで、材質がアルミニウムであり、外周部に多数の切欠き部がある。このスパーサは、プレス打抜きによって板材から製作する。プレス打抜きの際、バリがプレス抜け側に発生する。とくに、切欠き部は外周部や内周部のバリより大きい。このバリを手作業によって除去していた。この作業場には、バレル、ドライホーニング、歯車面取り装置



(a)



(バリ高さ : Max 0.43mm)  
(バリの根元厚さ : Max 0.56mm)



(c)

写真6 スパーサのバリ発生状態

などが設置され、これらの設備を使用して各種部品のバリ取り、仕上げを行っていた。もちろん、設備に適合しない部品は手仕上げでバリ取り仕上げをしていた。

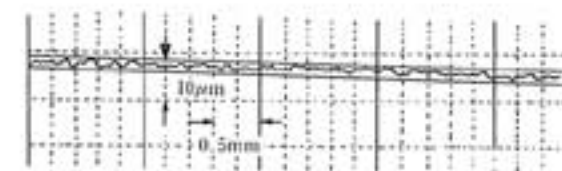
この手作業の機械化率向上のため各部品のバリ取り、仕上げ方法についていろいろと検討した。スパーサはその一例である。このバリの発生状態を写真6に示す。写真から、変圧器の鉄心のバリと比較すると、スパーサのバリはバリの根元の厚さが厚いことがわかる。写真は、バリをシリコンゴムに転写し、このシリコンゴムを切断し、顕微鏡で観察したときの顕微鏡写真である。図の黒い部分がバリである。調査の結果、バリの最大高さ、バリの根元の厚さは、それぞれ、0.45mm、0.56mmであった。バリの発生箇所、ワークの形状などから、市販の装置、工具を使用できると推定した。

そこで、このバリ取り方法について検討し、ドライホーニング(このバリ取りにあまり適さないと考えたが、既存設備であったので実験に加えた)、ブラッシング、オービタルサンダ(研磨布紙を取り付ける面が振動する工具)を選択し、実験した。ドライホーニングでガラスビーズ、A砥粒を使用すると、当然のことながら、切欠き部に盛り上がりだれが発生し、ガラスパウダ(GP105A)ではバリ取り時間が手作業よりかかる。また、ブラッシング装置に、合成不織布に研磨材を高分子接着材で結合させて成形したLDホイール、LDホイールと同じ製法であるが、研磨材の粒度を大きくしLDホイールより切れ味を増加させたCPホイールを取り付けて、スパーサのバリ取りした結果、両者とも良好であった。

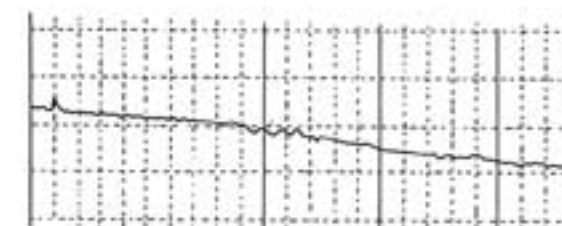
また、回転しているスチールブラシの上を、コンタクトホイールでスパーサを押しえながら通過させ、ブラシによってバリ取りするバリタックで、ブラシ線径0.15mm、周速度570m/minのとき、1パスではバリを完全に除去できず、ブラシ線径0.3mmでは1パスで切欠き部が大きくだれた。オービタルサンダに、研磨布#240、#400を取り付けて実験した結果、バリは完全に除去できたが、表面粗さはそれぞれ、6 $\mu$ m $R_{max}$ 、4 $\mu$ m $R_{max}$ であった。

バリ取り前のスパーサの表面粗さの記録を図8に示す。この図と、オービタルサンダのバリ取り後の表面粗さを比較すると、表面粗さが悪く、粉塵対策(現在では集塵器付きのものが市販されている)が必要である。なお、CPホイールによるバリ取り後の表面粗さの記録を図9に示し、これらの実験のまとめを表6に示す。

表より、バリ取り時間、表面粗さ、粉塵などを考慮して、CPホイールを選定した。そして、既存設備の歯車面



(a) プレス入り側



(b) プレス抜け側

図8 バリ取り前のスパーサの表面粗さ

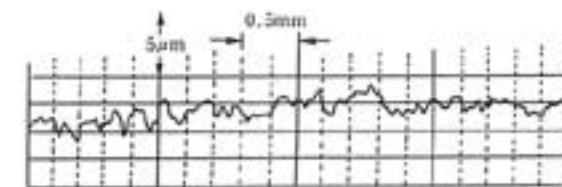


図9 CPホイールによるバリ取り後の表面粗さ

取り装置に、市販のエア工具を取り付けられるように工夫し、このエア工具にCPホイールを固定した。スパーサは切欠き部の大きさに合わせたピンによって固定した。この装置は、電氣的制御によって、バリ取りのはじめはある位置からスパーサに対して下降し、スパーサとCPホイールが接触する。このとき、円テーブルはすでに回転している。そして、スパーサのバリ取りはじめの位置で、CPホイールが上方に逃げる。装置を写真7に示す。このように工夫しだいで、低価格の投資でスパーサのバリ取りの機械化ができた。

### [4] モータフレームのバリ取り<sup>4)</sup>

モータフレーム(モータケースともいう)は、鋼板製と鋳物製の2種類がある。さらに、鋳物製は、冷却翼付きと冷却翼の付かないタイプに分かれる。このバリ取りの対象は、冷却翼の付かないモータフレームを対象とした。この容量は0.75~15kW(重量4.3~34kg)で、外径

表1 加工方法および結果(Burwell<sup>13)</sup>)

軸	軸加工法	表面粗さ		$D/C$	摩擦係数最小のときの $(D/C)^2 \mu N/P$ の値
		直角方向	平行方向		
A	鏡削	130 $\mu$ inch	50 $\mu$ inch	1150	0.38
B	研削	70 $\mu$ inch	70 $\mu$ inch	1200	0.25
C	研削	50 $\mu$ inch	50 $\mu$ inch	630	0.06
D	研削	14 $\mu$ inch	—	520	0.0017
E	研削	13 $\mu$ inch	—	540	0.0013
F	研削	7 $\mu$ inch	8 $\mu$ inch	500	0.0012
G	研削	6 $\mu$ inch	7 $\mu$ inch	480	—
H	研削	4 $\mu$ inch	6 $\mu$ inch	480	0.0010
I	超仕上げ	1 $\mu$ inch	—	500	0.0008 - 0.0011
J	超仕上げ	1 $\mu$ inch	—	870	—

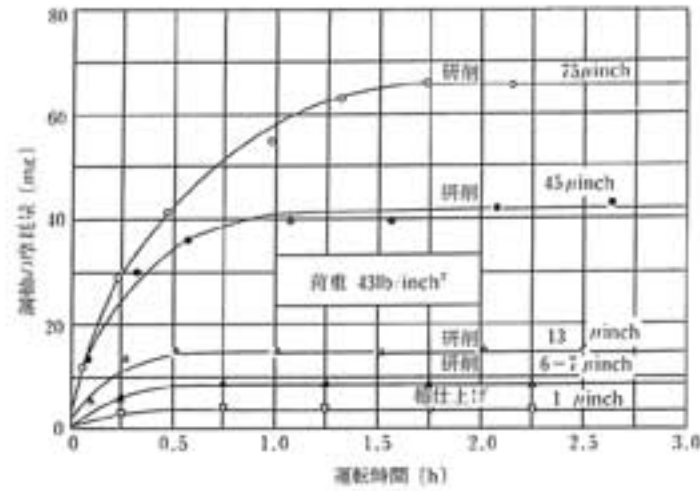


図3 ならし運転期間におけるバビット軸受内を回転する鋼軸の摩耗量(Burwell<sup>13)</sup>)

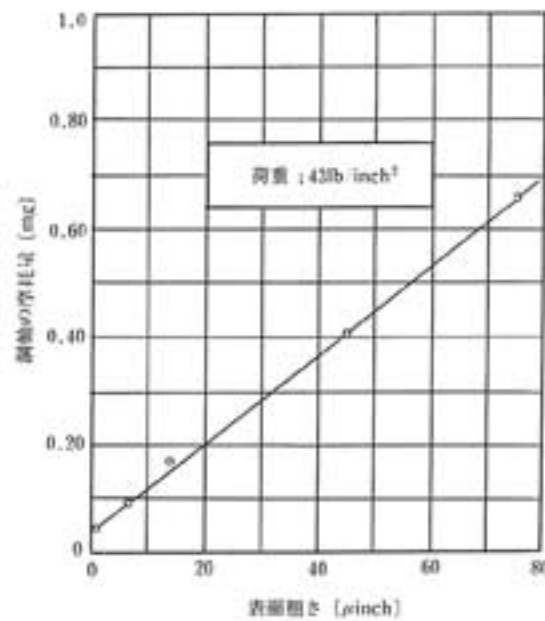


図4 図3に示す表面粗さを変化させたときの鋼軸の全摩耗量(Burwell<sup>13)</sup>)

1に示すように、この値は仕上げ程度の良いもののほど左側に寄っており、負荷荷重が大きいことを示している。図2は仕上げ程度の良い軸について高負荷側を拡大したものである。

この実験における摩耗進行曲線と全摩耗量は図3、4に示す。仕上げが良好なほど、摩耗量が小さいことは顕

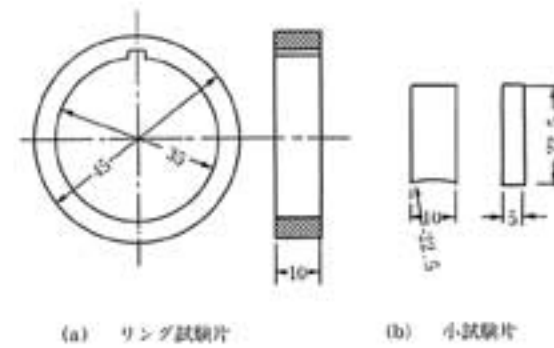


図5 使用した試験片の形状

著である。また、この図からわかることは、ならし運転期間をすぎると摩耗は減少し、ならし運転の重要性を示している。

この問題に対する筆者らの実験<sup>14)</sup>は、次のとおりである。試験片は、図5に示すようにリング試験片に対し小試験片を接触させ、リング試験片を回転させて摩耗試験を行った。リング材は含Ti-V高級パーライト鋳鉄(シリンダライナ材と同一)、小試験片は高級パーライト鋳鉄(ピストンリング材と同一)であり、シリンダライナとピストンリング間のしゅう動摩耗を想定した。

試験片の加工法は、表2に示すように、超仕上げ、グラインダ仕上げ、バイト仕上げであり、その表面粗さは表示のとおりである。また、摩耗試験中に接触電気抵抗を測定した。

試験は、表3に示す12組について、3回に分けて行った。図6、7は、摩耗量および表面粗さの推移であり、これは第3回実験結果を示してあるが、他の場合も傾向的にはまったく同様である。これよりいえることは、次のとおりである。

- ① 概念的には小坂の求めたように、初期摩耗・過渡期摩耗・定常摩耗が存在するが、定常摩耗は一定の摩耗量を与えるのではなく、 $10^7$ 回転くらい摩耗試験を行っても、単位回転数当りの摩耗量はまだ減少しており、厳密な意味の定常状態ではない。この現象は、初期表面粗さの粗いときはさらに著しい。
  - ② 初期表面粗さが粗いときは、初期摩耗および定常摩耗とも著しく大きく、表面粗さも長期にわたって粗く、なかなか安定しない。
- つぎに、摩耗試験に示される定常摩耗域(厳密には前述したように定常ではないのであるが、ここでは習慣に従

表2 試験片加工法と仕上げ面粗さ

記号	加工法	仕上げ面粗さ(μm)
S	超仕上げ	0.6~0.8
G	グラインダ仕上げ	1.5~2.5
B	バイト仕上げ	8~24

表3 試験片の初期粗さ

試験順序	リング試験片		小試験片	
	記号	初期粗さ(μm)	記号	初期粗さ(μm)
第1回	S-1	0.6	P-1	2.1
	G-1	2.2	P-2	2.5
	B-1	8.6	P-3	2.8
	B-2	10.4	P-4	2.1
第2回	B-3	8.75	P-5	2.2
	B-4	13.0	P-6	3.5
	S-2	0.8	P-7	2.8
	G-2	2.35	P-8	1.4
第3回	B-5	24.0	P-9	3.5
	S-3	0.8	P-10	2.3
	G-3	2.5	P-11	2.2
	B-6	16.25	P-12	3.5

ってこの言葉を使う)における摩耗量が粗さによって極端にちがう現象を、接触電気抵抗によってとらえてみよう。実験は、先の長時間試験の場合のG-2、B-4とほぼ同様の表面粗さをもった試験片を使用して行った。その結果を図8に示す。このグラフはメータに現れた平均値をとったのであるが、オシログラフに現れた瞬間的な変化状態は、図9に示すごとくである。すなわち、G仕上げでは50万回転程度ですでに一部流体潤滑がはじまり、300万回転程度では流体潤滑状態の生成頻度が増してくる。ところがB仕上げでは、300万回転程度ではいまだに境界潤滑域である。これによって、G仕上げにおける摩耗量のはるかに少ない理由が理解されるであろう。

(2) 表面塑性加工

ショットピーニング、バレル加工、ガラスビーズブラスト、ローラ加工などによって、表面に加工硬化層を形成させるとともに、欠陥部を埋めることにより、材料の疲れ強さとトライボロジー特性が向上することはよく知られている。例えば、バレル加工における疲れ強さの向上については、筆者のまとめた記事<sup>15)</sup>があり、この特性を利用してジェットエンジン部品の仕上げに使われている。最近では、ソ連で比較的新しい図書が出版され、訳が出されているので簡単に紹介しておく<sup>16)</sup>。

これに記載されている加工法は、振動バニシ加工、ロ