

# 鋼のピッチング疲労損傷に及ぼす表面あらさの影響

古 谷 吉 男

長崎大学教育学部工業技術教室  
(平成元年10月31日受理)

## Influence of Surface Roughness on Pitting Fatigue Failure of Steel

Yoshio FURUYA

Department of Technology, Faculty of Education,  
Nagasaki University, Nagasaki 852  
(Received Oct. 31, 1989)

### Abstract

In order to investigate the influence of the surface roughness on the pitting failure, the fatigue tests have been tried under a repetitive rolling contact with sliding component by using two cylindrical test pieces made of the annealed S45C steel (by JIS). In these tests, several kinds of surface roughness have been prepared at the range of  $R_{\max}$  value between  $25\mu\text{m}$  and  $2.5\mu\text{m}$  by turning, file- or sandpaper-grinding, or buffing.

The transcription of surface roughness between pairing test pieces and the transition of  $R_{\max}$  values and roughness profiles of both test piece surfaces during the fatigue test running have been discussed in detail.

As the result, it has been clarified that the effective roughness for the pitting failure arised only on the surfaces with lower rotational speed was that of the surfaces with higher rotational one, including the transcribing roughness. Moreover, by using  $a$  and  $b$  as the surface roughness factor, the following equation has been introduced as to explain successfully the relationship between the increasing rate of pitting failure ( $\Delta d$ ) and the repetitive rolling number ( $N$ ):  $\Delta d = aN^b$ . In this equation,  $a$  and  $b$  are seemed to be related to the quantity and the quality of the surface roughness, respectively.

## 1. 緒 言

歯車や軸受などの接触部に見られるように、すべりを伴うころがり接触を繰返す鋼製機械部品の表面には種々の損傷が発生する。その代表的なものとしては、スコアリング (scoring)、スポーリング (spalling)、フレーキング (flaking) およびピッチング (pitting) が挙げられる。これらの表面損傷は、潤滑油の焼付きに起因するスコアリングを除いて、いずれも鋼表面の疲労による損傷である<sup>1), 4)</sup>。

スポーリングおよびフレーキングは主に肌焼鋼における表面硬化層の疲労による剝離の結果として生じる損傷である。現在、それらの疲労によるき裂の発生を防止し、面圧強度の向上を図る対策としては、表面硬化層と母相との材質的な連続性の向上あるいは最適硬化深さの選定等の立場からの検討が進められており、効果を上げつつある。しかし、機械材料として汎用されている調質鋼において、表面の疲労の進行とともにしばしば発生するピッチング損傷については、そのき裂発生に寄与する因子の多様さとそれらの局所的な測定および評価の困難さの故に、既に多くの先行研究があるにもかかわらず、その対策も遅れている現状である<sup>2)~8)</sup>。

前報<sup>9)</sup>において、歯車のかみ合い接触等に見られる複雑な接触状態をより単純化した2円筒試験片を用いたころがりすべり耐久試験により、鋼の表面疲労に伴うピッチング発生の特徴について、影響を及ぼす諸因子と関連づけて検討するとともに、ピッチングクラックの発生およびその伝播について考察した。その中で、ピッチング発生に代表される鋼表面の疲労の進行には、相接触する円筒状試験片の表面あらさが大きく影響を及ぼしていることを指摘した。

本報ではピッチング損傷発生に及ぼす諸因子のうちの表面あらさの影響について、前報同様、2円筒試験片を用いたころがりすべり耐久試験により系統的に調べた結果について報告する。

## 2. 実 験 方 法

### 2-1. 試験装置および供試材料

使用した試験装置は前報<sup>9)</sup>と同じ西原式摩耗試験機 (島津製作所製) である。この装置は、原動軸から歯車列を介して相接触する2つの円筒状試験片 (高速側試験片, 低速側試験片,  $\phi 30 \times 8$  mm) に相対的な強制すべりを与えることができ、また、コイル状ばねにより任意の接触圧を与えることができる構造を有している。

試験に供した鋼材は S45C 焼なまし材 (840°C, 30分, 炉冷) で、その機械的性質を表1に示す。

表1 供試材料の機械的性質

材質	S45C (焼なまし)
降伏強度	34.4 kg/mm <sup>2</sup>
引張強度	64.9 kg/mm <sup>2</sup>
伸 び	27.2 %
絞 り	43.5 %
硬 度	216 Hv

### 2-2. 試験片の表面性状

表面疲労の進行に及ぼす表面あらさの影響を調べるために、種々の加工法により円筒状試験片の外周表面に意図的に与えた7種類の試験前の表面性状を表2に示す。試験前の表

面あらさの  $R_{max}$  値は  $25\mu\text{m}$  ~  $2.5\mu\text{m}$  である。表面あらさについて検討を加える場合、上記の  $R_{max}$  値で評価されるあらさの大小(量)と質の差異が問題とされる。そこで、表面に加工を施す際、旋削(A)、(B)および(C)以外の加工においては、あらさの凹凸の条痕が試験片の円周方向と平行になる(平行目)ように留意し旋削加工表面の場合(旋削目)と比較検討できるようにした。なお、旋削目表面のあらさの凹凸の条痕は試験片の円周方向に対して小角ながら傾きを有しており、その角度は旋削(A)が最も大きい。

表面あらさのプロファイルおよび  $R_{max}$  値の測定には触針式万能精密表面形状測定機(Perthen社(独)製、C5D型)を用いた。

### 2-3. 試験片の組合せおよび試験条件

鋼表面の疲労の進行に伴うピッチング損傷の発生は低速側試験片の表面においてのみ認められ、しかもその進行の度合は相手側(高速側)試験片の表面あらさに大きく影響される可能性があることを前報<sup>9)</sup>で指摘した。そこで、今回の試験においては、確認のための一部の試験を除いて、試験片の組合せはバフ研磨表面を有する試験片を低速側試験片とし、高速側試験片の表面あらさを種々に変える方法を採用した。

以上のような試験片の組合せの下で、各々の耐久試験中における両試験片の表面あらさ(プロファイルおよび  $R_{max}$  値)の推移を適宜追跡測定するとともに、表面疲労の進行とともに低速側試験片に発生するピッチング(ピッチングクラックも含む)を  $3 \times 10^4$  回の繰返し数毎に計数した。なお、ピッチングの計数に際しては肉眼的に確認可能なもの ( $800 \times 200\mu\text{m}$  程度の扇形状クラック、図10参照)に限ることに

表2 供試試験片の表面性状(試験前)

表面加工状態	$R_{max}$ ( $\mu\text{m}$ )	表面あらさプロファイル(軸方向)
旋削(A) (切込み0.5mm 送り0.5mm/rev.)	23.10	
旋削(B) (切込み0.5mm 送り0.25mm/rev.)	20.50	
ヤスリ研磨 (荒目18)	18.84	
研磨紙 (#60)	14.36	
旋削(C) (普通仕上)	12.55	
研磨紙 (#100)	7.82	
研磨(#1000)後 バフ研磨	2.57	

表3 耐久試験条件

試験片 回転数	高速側	935 rpm
	低速側	850 rpm
すべり率	高速側	9.1 %
	低速側	-10.0 %
接触荷重	175 Kgf	
ヘルツの最大 接触応力	$P_{H\max}$ 101.0 Kgf/mm <sup>2</sup>	
潤滑条件	1.0~1.5ml/min, 滴下	

表4 潤滑油の性状

潤滑油	共石ソニック・レータス 6150	
比重(15°C)	0.8679	
粘度	37.8°C	31.98 cst
	98.9°C	5.256 cst
粘度係数	106	

し、ピッチング発生総数が50個を超える時点で耐久試験を終了した。

その他の耐久試験条件および使用した潤滑油の性状を表3および表4にそれぞれ示す。

### 3. 実験結果および考察

#### 3-1. 表面あらさの変化

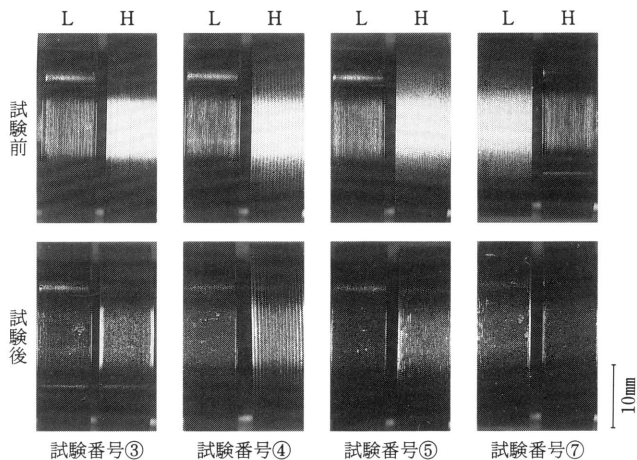
表5に今回試みた耐久試験の試験片の組合せ(試験番号①~⑧)と、各々の試験における高速側、低速側両試験片の試験前、累積繰返し数 $1 \times 10^4$ 回後および試験終了後に測定した表面あらさの $R_{max}$ 値を示す。試験終了までの累積繰返し数( $N$ )は最も小さい試験番号④の場合で $N = 17 \times 10^4$ 回、最も大きい試験番号⑧の場合で $N = 72 \times 10^4$ 回である。いずれの組合せにおいても、バフ研磨表面を有する試験片には試験開始と同時に $R_{max}$ 値の増加が認められ、繰返し数の増加につれて両試験片間のあらさ差は小さくなり、試験終了時には両試験片ともにほぼ $R_{max} = 8 \sim 2 \mu\text{m}$ の値に推移する。このことは、接触開始と同時に相手側試験片の表面あらさが転写されることによるとともに、接触の繰返しにつれて摩耗による表面のなじみが進行していることを示している。

表面疲労の進行に伴なうピッチングの発生は、いずれの組合せの試験においてもすべて、前報<sup>9)</sup>同様、低速側試験片表面にのみ認められた。図1に試験前および終了後の両試験片

表5 試験片の組合せと表面あらさの変化

試験番号	H,L*の別	表面状態	表面あらさ ( $R_{max}$ , $\mu\text{m}$ )			備考	
			試験前	$1 \times 10^4$ 回後	試験後		
①	H	ヤスリ	18.84	7.29	6.07	高速側研磨表面(平行目)	
	L	バフ	2.16	6.26	5.64		
②	H	研磨紙(#60)	14.36	5.25	3.90		
	L	バフ	2.77	4.69	5.07		
③	H	研磨紙(#100)	6.73	2.97	2.58		高速側旋削表面(旋削目)
	L	バフ	2.77	2.99	4.18		
④	H	旋削(A)	23.10	13.10	8.20		高速側旋削表面(旋削目)
	L	バフ	3.90	5.50	5.66		
⑤	H	旋削(B)	21.70	9.44	7.55		
	L	バフ	2.12	5.67	6.00		
⑥	H	旋削(C)	12.55	5.08	3.08		
	L	バフ	2.77	5.22	2.70		
⑦	H	バフ	2.36	6.98	6.97		
	L	旋削(B)	19.30	10.00	6.06		
⑧	H	バフ	2.55	1.69	2.12		
	L	バフ	1.78	1.72	2.30		

\* H: 高速側試験片, L: 低速側試験片



(L: 低速側試験片, H: 高速側試験片)

図1 試験前後の両試験片表面の接写写真の例

表面の接写写真の一例を示す。

図2は同一の試験片組合せ条件で高速側と低速側の組合せを入れ替えた耐久試験(試験番号⑤と⑦)において、両者の間のピッチング発生およびその進行の差異について比較したものである。本図に示される結果によれば、高速側試験片がバフ研磨表面であっても、あるいは試験前の  $R_{max}$  値の比較的大きい旋削表面であっても、低速側試験片表面に発生するピッチングについて、その発生に到るまでの累積回転数および増加の状況には有意な差が認められないことがわかる。

### 3-2. 有効表面あらさの検討

低速側試験片表面のピッチング損傷の発生と進行は高速側試験片表面のあらさに著しく影響されることを強調してきた。図2に示された結果は、表5にも示されているように、 $1 \times 10^4$ 回の繰返し数時点で試験番号⑦の高速側試験片表面に既に転写されているあらさが関与したためであり、ピッチングの発生とその増加の状況に差異がほとんど認められないことは、両耐久試験(試験番号⑤および⑦)において、試験終了後の  $R_{max}$  値が共に同程度の値にまで収束していることに起因していると考えられる。

図3および図4は、耐久試験中に相接触している両試験片間で起るこのような表面あらさの転写の状況について、軸方向表面あらさプロファイルの変化を測定した一例である。

図3は試験番号②の組合せの場合のプロファイルの変化を示す。バフ研磨表面である低速側試験片表面は、 $1 \times 10^4$ 回の繰返し数後には既に相手側の表面状態と同程度のプロファイルを示している。その後繰返し数の増加につれて、両表面共、摩擦により突起の先端部は減少するものの、 $35 \times 10^4$ 回の繰返し数を経た時点でも  $1 \times 10^4$ 回の繰返し数時点の表面性状と大差のない凹凸の状況を呈しており、試験

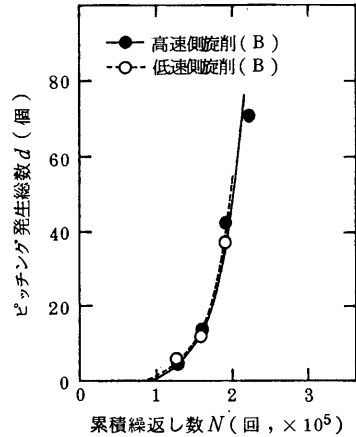


図2 ピッチング発生状況の比較(試験番号⑤と⑦)

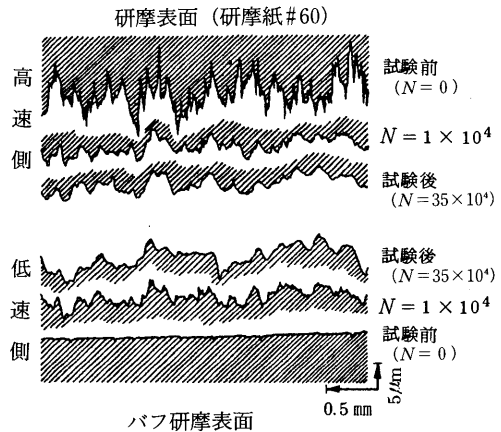


図3 試験中のプロファイルの変化の例(試験番号②)

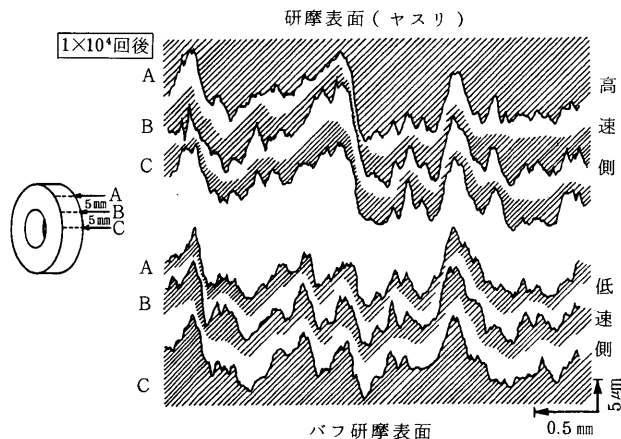


図4  $1 \times 10^4$ 回後の表面あらさの転写の例(試験番号①)

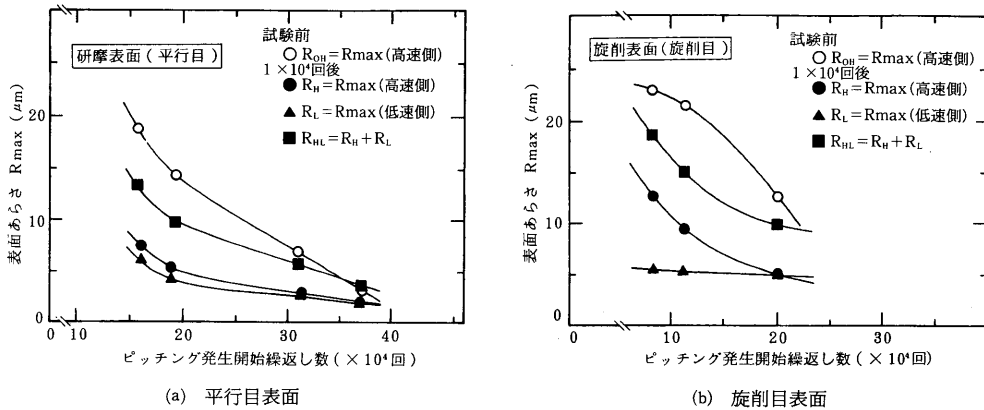


図5 ピッチング発生開始繰返し数と  $R_{max}$  値との関係

前の両表面性状とは全く異った状態で接触を繰返していることが伺える。

図4は顕著な平行目表面を有する組合せの場合(試験番号①)における表面あらさの転写の状況を示す両試験片表面の  $1 \times 10^4$  回繰返し数後のプロファイルの例である。低速側表面に円周方向に沿って完全に転写されることがわかる。

上述したように、相接触する両試験片の表面あらさは転写および摩耗等により耐久試験中にそのプロファイルも  $R_{max}$  値も初期の状態とは異ってくる。そこで、ピッチング損傷発生に及ぼす表面あらさの影響をより解析的に調べるためには、ピッチング損傷発生に直接的に寄与する表面あらさについて検討しておく必要がある。

ところで、表5および図3に例示した結果は、耐久試験中において表面あらさの  $R_{max}$  値もプロファイルも  $1 \times 10^4$  回の繰返し数以降は、今回行った試験条件の下では、大きく変化しないことを示唆している。そこで、ピッチング発生に寄与する表面あらさの評価基準として、 $1 \times 10^4$  回繰返し数時点での  $R_{max}$  値を採用し、それとピッチング発生開始繰返し数との関係を平行目表面の場合と旋削目表面の場合とについてそれぞれ整理したものが図5(a)および(b)である。本図より、平行目および旋削目の両表面状態に対して、 $R_H$  ( $1 \times 10^4$  回後の高速側試験片の  $R_{max}$  値) と  $R_{HL}$  ( $1 \times 10^4$  回後の高速・低速両試験片の  $R_{max}$  値の和) がピッチング発生開始繰返し数と  $R_{0H}$  (試験

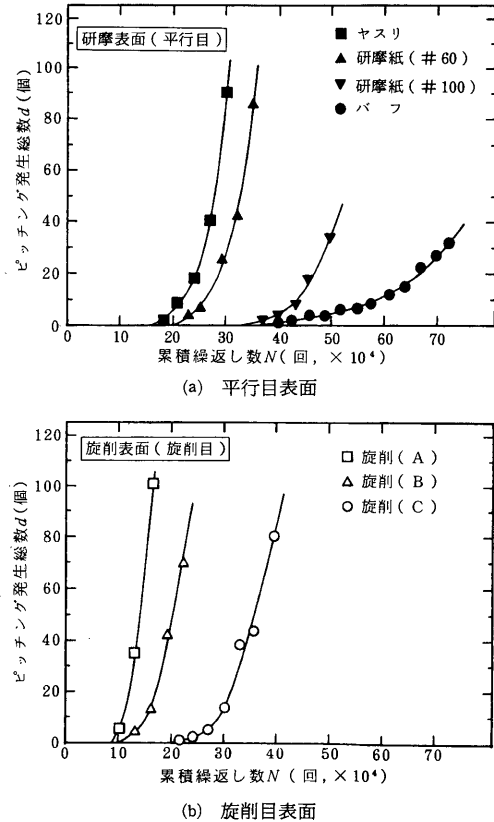


図6 ピッチング損傷の進行状況

前の高速側試験片の  $R_{max}$  値)よりは良好な相関を示していることが認められる。

3-3. 表面性状とピッチング損傷の進行

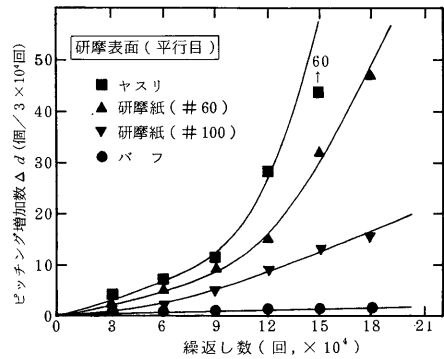
高速側試験片の表面性状が異なる組合せの下での各々の耐久試験において、バフ研磨表面を有する低速側試験片表面に発生するピッチング損傷の進行状況を累積回転数に対して示したものが図6(a)および(b)である。図6(a)は高速側試験片が平行目の表面あらさを有する場合であり、図6(b)は旋削目の場合である。両表面共に、ピッチングの発生開始の早いものはその後の増加も著しく、ほぼ試験前の表面あらさの  $R_{max}$  値に依存している。

図7(a)および(b)はピッチング発生開始後、一定の繰返し数 ( $3 \times 10^4$ 回) 毎にその増加数 ( $\Delta d$ ) を平行目および旋削目それぞれの表面に対して整理したものである。さらに、図8(a)および(b)は、それらを両対数軸上でそれぞれ再整理したものである。図8より、 $a$  および  $b$  を定数として、ピッチング増加数 ( $\Delta d$ ) と累積繰返し数 ( $N$ ) の関係として

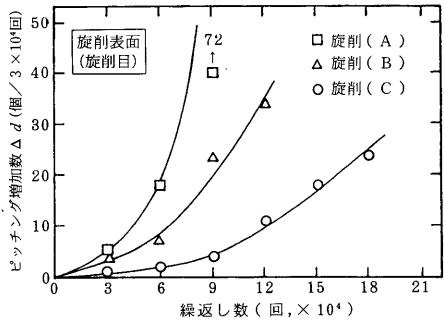
$$\Delta d = aN^b \quad (a, b \text{ は定数}) \dots\dots(1)$$

で与えられる形の整理式を得ることができる。

平行目表面においては、図8(a)からもわかるように、ヤスリ、研磨紙 (#60および#100) の3種の表面に対して、ほぼ平行な直線関係があり、その傾きを与える  $b$  は約4.5と得られ

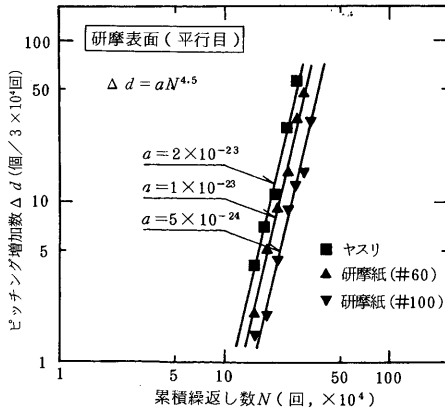


(a) 平行目表面

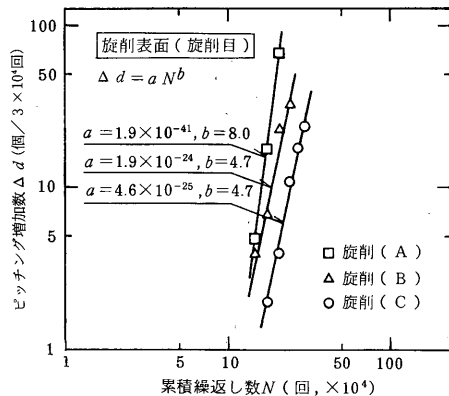


(b) 旋削目表面

図7 一定繰返し数毎のピッチングの増加数



(a) 平行目表面



(b) 旋削目表面

図8 ピッチング増加数と繰返し数の関係

る。また、 $a$ の値はこの3種の表面の $R_{max}$ 値に依存して変化していることが伺える。一方、図8(b)に示されている旋削目表面の場合には、 $a$ および $b$ 共にその値は変化するが、表面あらしの比較的小さい旋削(B)および(C)に対しては $b \approx 4.7$ が得られ、平行目表面における値に近い。またこの場合には、 $a$ の値も平行目表面の場合とほぼ同程度のオーダーである。しかし、旋削(A)においては $a$ および $b$ の値共に平行目の場合とはかなりの差を有している。このことは、旋削(A)においては、表2に示すプロファイル等を考慮すれば、ピッチング発生に及ぼす旋削目の効果が顕著に現われた結果として捉えることができる。以上のことから整理式(1)を考察してみると、係数 $a$ および指数 $b$ は共に表面あらし因子として評価することができ、 $a$ は $R_{max}$ 値の大小に関係し、 $b$ はあらしの質に関係しているものと考えられる。

図9は平行目表面における表面あらしの $R_{max}$ 値と係数 $a$ との関係を示したものである。この図によれば、 $1 \times 10^4$ 回繰返し数後の高速側試験片の $R_{max}$ 値である $R_H$ とほぼ直線関係にあることが認められる。このことは、表面あらしのピッチング損傷に及ぼす複雑な影響を評価する際の一つの有効な指針を与えるものと思われる。

平行目表面および旋削目表面に対して、ピッチングの発生する低速側バフ研磨表面のそれぞれの接触痕の状況を視覚的に捉えるために、耐久試験終了後、低速側試験片表面をノマルスキー型微分干渉顕微鏡(ユニオン光学製)を用いて観察した。その結果の一例を図10に示す。表面にはピッチングクラックも観察されているが、この図において黒くコントラストがついている箇所が接触により生じた圧痕である。旋削目表面に対する圧痕は短く不規則であり、微小な突起間の干渉の多さを示すが、一方、平行目表面に対する圧痕は長く規則的であることが認められる。これらの写真は平行目表面と旋削目表面とでは明らかに接触時の突起間干渉のあり方に差異があることを裏付けており、上記の整理式における係数 $a$ および指数 $b$ の取扱いの妥当性を支持しているものと思われる。

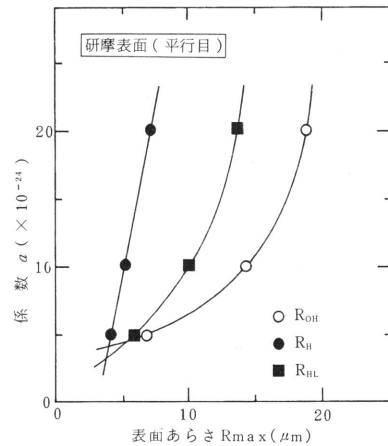


図9 表面あらしと係数 $a$ との関係



(a) 高速側が平行目表面の場合



(b) 高速側が旋削目表面の場合

図10 低速側試験片表面(試験後)の微分干渉顕微鏡写真の例



## 4. 結 言

調質鋼のピッチング疲労損傷に及ぼす表面あらさの影響について、2円筒試験片を用いたころがりすべり耐久試験を行い、種々に加工を施された表面あらさの下で系統的に調べた結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 表面あらさは高速側、低速側両試験片共に相互に転写され得る。その  $R_{\max}$  値は繰返し数の増加につれて両試験片共に同程度の値に収束する。
- (2) 低速側試験片表面にのみ発生するピッチング疲労損傷に直接的に関与する表面あらさは、耐久試験中に高速側試験片に転写された場合も含めて、高速側試験片の表面あらさである。
- (3) ピッチング疲労損傷に直接的に関与する表面あらさとして、 $1 \times 10^4$  回繰返し数後の高速側試験片の  $R_{\max}$  値が、平行目および旋削目の両表面状態に対して比較的良い相関を示した。
- (4) ピッチングの増加数 ( $\Delta d$ ) と繰返し数 ( $N$ ) の関係は、 $a$  および  $b$  を表面あらさ因子として

$$\Delta d = aN^b$$

の式で整理できる。この式において係数  $a$  は表面あらさの  $R_{\max}$  値の大小に、また指数  $b$  は表面あらさの質にそれぞれ関係するものと考えられる。

- (5) 本実験における平行目表面に対して、 $b \approx 4.5$  を得た。また、係数  $a$  は  $1 \times 10^4$  回繰返し数後の高速側試験片の  $R_{\max}$  値とほぼ直線関係にあることが明らかになった。

最後に、本研究を遂行するにあたり防衛大学校機械工学教室技官一柳三郎氏ならびに山之内三男氏の御協力を得ましたことを付記して謝意を表します。

## 参 考 文 献

- 1) 寺内喜男：日本機械学会誌，**81**，719（昭53—10）112.
- 2) 仙波正荘：歯車（第4巻），日刊工業新聞社，（昭33）.
- 3) 橋本誠也：日本機械学会論文集，**28**，190（昭37—6）700.
- 4) 平野富士夫，上野 拓：日本機械学会誌，**79**，696（昭51—11）49.
- 5) 藤田公明，吉田 彰，長尾幸男：日本機械学会論文集，**43**，365（昭52—1）303.
- 6) 三由 久：日本機械学会論文集，**45**，400（昭54—12）1382.
- 7) 古谷吉男，山田金雄：防衛大学校理工学研究報告，**18**，4（昭55—12）387.
- 8) 市丸和徳，平野富士夫，畠本道男：日本機械学会論文集，**41**，345（昭50—5）1587.
- 9) 古谷吉男：長崎大学教育学部自然科学研究報告，37（昭61—3）75.