

.....  
 論 文  
 .....

## 補強ロール材の材料特性とところがり疲れ強さについて\*

工 藤 浩 一\*\*

### On the Rolling Contact Fatigue Test of Back-Up Roll Materials

Koichi KUDO

Synopsis:

In order to know the spalling phenomena and to develop the material for back-up rolls, the rolling contact fatigue strength of the back-up roll materials is examined by using 3 high roll type rolling contact testing machine. The problems tested here are the effect of microstructure, of forging ratio, of direction of flow caused by hot working and of the surface defects on the resistance to spalling. The results obtained are as follows:

- (1) The specimen with martensitic structure shows better rolling contact fatigue resistance than those with bainitic and pearlitic structures.
- (2) The materials with high yield strength is good for back-up roll materials from the point of resistance to spalling.
- (3) The effect of forging ratio on the resistance to spalling is very small; i.e. the resistance to spalling slightly deteriorates with increase of forging ratio, but this tendency is indistinct.
- (4) On the surface where metal flows cross to this surface, resistance to spalling is brought lower than else where.
- (5) Ghost spots behave as ductile part as same to matrix on the rolling contact surface.
- (6) Surface layer of rolling contact is work hardened. Within this layer, matrix flows plastically in the direction of rotating direction.
- (7) Initial crack of spalling generates on the surface and grows obliquely along the plastic flows and finally spalls by radial brittle fracture.
- (8) Defects caused by casting workmanship, if they are located within the surface layer flown plastically, will become the source of crack initiation during rolling contact.
- (9) The defects near the surface layer of the specimens make the resistance to spalling low, but it depends on the size and location of the defects.
- (10) It is very difficult to apply the results of rotating bending fatigue test to those of rolling contact fatigue test.

From these results, it is suggested that the back-up rolls with high spalling resistance have martensitic microstructure, high yield strength and sound surface.

(Received Feb. 23, 1970)

## 1. 結 言

鉄鋼材料の圧延に使用される補強ロールは、作動ロールの曲がりを少なくし、被圧延材の寸法および形状を一樣ならしめるために用いられる。したがって、補強ロールは作動ロールと比して直径も大きく、重量も小さなもので 15 t から、最大級で 140 t にまで達するものもある。

補強ロールに要求される性能としては、剛性の強いこと、曲がりにくいこと、耐摩耗性のよいことさらに耐スポーリング性のよいことなどがあげられる。とくに最近にいたり、圧延機が高性能となり圧延条件が厳しくなるにしたがい、最も大きな問題となつていのはスポーリ

ングである。これは、使用中にロール表面が剝離する現象であり、ロール原単位を上げるばかりか被圧延材にも悪い影響をおよぼし、ひいては圧延能率を下げる原因となる。

著者は補強ロールの製造に関与する一人として耐スポーリング性を備えた補強ロールの開発が大切と考え、種々の研究を行なつてきた。

すでに前報<sup>1)</sup>でものべたことく、補強ロールのスポーリングに影響をおよぼす因子としては、大別して機械的

\* 昭和40年4月、41年10月、42年4月本会講演大会にて発表

昭和45年2月23日受付

\*\* (株)日本製鋼所室蘭製作所研究所

因子および材質的因子とがある。機械的因子としては、ロールの設計形状、摩耗、たわみによる変形、熱膨張による変形、圧延力および改削の方法とその時期などがあげられる。また材質的因子としては、原材料、製鋼条件、鍛造および鑄造条件、さらに熱処理条件などがあげられる。

本報では、以下に述べるような考え方にに基づき、材質的因子のうちで、とくに材料特性（鍛造、鑄造および熱処理）ところがり疲れ強さとの関係を、著者らの製作した3段ロール型転動試験機によつて種々研究した結果について述べる。

補強ロールを製造する際には、その質量が大きいため、種々の欠陥が発生しやすい。たとえば、鍛造あるいは鑄造時において表面欠陥（しわ疵、かぶり疵、ピンホールなど）が発生したり、熱処理において、質量効果のため均一な組織とならないことがある。とくに熱間連続圧延機および冷間連続圧延機に用いられる補強ロールは使用条件が過酷なため、スポーリングの発生が著しく、いかにして耐スポーリング性を与えるかが大きな問題となつている。

耐スポーリング性を向上させるために、高硬度材料が用いられているが、その組織もどこをねらうべきであるか、炭化物の分布はどうすべきかなど未解決な問題が多い。また鑄造にせよ鍛造にせよ、無欠陥のものを作ること、最大の目標であるにしても実現にはまだ十分とはいえないのが現状であろう。

従来から、ころがり疲れ強さに関する研究は、軸受および歯車にかざられていたため、材料の組織としては、マルテンサイトおよびパーライト+フェライトがおもなものであり、かたさも HRC 60 前後あるいは Hb 200~300 程度のものがその大部分であつた。この中間のかたさの材料については、ほとんど研究されていない。

異なつた組織の機械的性質については、HOLLOMON<sup>2)</sup>らのまとまつた実験結果があり、引張、衝撃および疲れについて試験を行なつている。それによれば、同一かたさで組織を、マルテンサイト、マルテンサイト+フェライト+パーライト、マルテンサイト+ベイナイトなどと変えた場合、引張強さはほぼ同一で、衝撃による差は大きく、疲れに関してはある程度の差があるとしている。質量効果それ自体については、数多くの研究がなされ、有益な報告が行なわれているのでここで改めて述べるまでもないので詳細は省くこととする。

欠陥を有する材料についての、各種の材料の強さの研究も、多くの研究者によつてなされている。たとえば、鑄造欠陥材の回転曲げ疲れ強さについては、千々岩、大

内田ら<sup>3)</sup>が研究しており、ある程度以上の大きさの欠陥を有する材料は、耐久限度が低下すると報告している。

ころがり疲れ強さにおよぼす欠陥の影響については、ベアリング鋼について介在物の挙動をとりあげているものもあるが<sup>4)</sup>、介在物より大きなマクロ欠陥についての影響を調べているものはほとんど見あたらない。そこで補強ロール材を主体にして、種々の材料特性ところがり疲れ強さについて実験を行なつた。

## 2. 材料の組織ところがり疲れ強さ

### 2.1 試料

前述したごとく、質量大なる補強ロールを熱処理する場合には、その組織を使用範囲だけでも均一にすることは大きな技術である。Fig. 1 に実体の補強ロールスリーブの表面からの硬度分布および各深さにおける顕微鏡組織の一例を示す。本スリーブロールは現在は使用されていないが、表面層では焼もどしマルテンサイトであり、40 mm程度の深さ位置ではかたさの上昇がみられ、この付近からベイナイトおよびパーライトが生じはじめている。このスリーブにおいては、スポーリングは使い込まれてからの発生頻度が高いことが経験的に知られており、このことは一般論としてあてはめることができる。そこで、これらの組織の差が耐ころがり疲れ強さにどのように影響をおよぼすかを、実体補強ロールスリーブの廃却材から粗材を採取し試験を行なつた。

スリーブ材をガス切断後、鍛造して 80 mm  $\phi$  の丸棒とし、これから転動試験片を採取し、種々の熱処理をほどこして試験に供した。転動試験片については前報<sup>1)</sup>で詳述したが、直径 70 mm  $\phi$ 、接触幅 15 mm のこま形を呈している。本材料の化学組成を Table 1 に示す。

組織を種々変えるため、あらかじめ本材料の恒温変態曲線を、GRENINGER TROIANO 法によつて求めた結果を Fig. 2 に示す。A<sub>c1</sub> 点は 750°C、M<sub>s</sub> 点は 175°C であつた。さらに恒温変態処理後に焼もどしを行ない、マルテンサイト、ベイナイトおよびパーライトの各組織についても焼もどし曲線を求めた。

試験片の組織は実体ロールの組織を考慮して、焼もどしマルテンサイト、ベイナイトおよびパーライトの3種類とした。試験片の各熱処理をまとめて Table 2 に示す。γ化温度は 850°C、1 hr 保持後油焼入あるいは鉛浴中へ冷却し、一定時間、一定温度保持し所定の組織とした。さらに組織によつてかたさが異なると、組織差の影響以外の要因が加わるので、これをさけるために、焼もどしによつて、試験片のかたさを一定とした。各試験片を a~e の5つのグループに分類した。

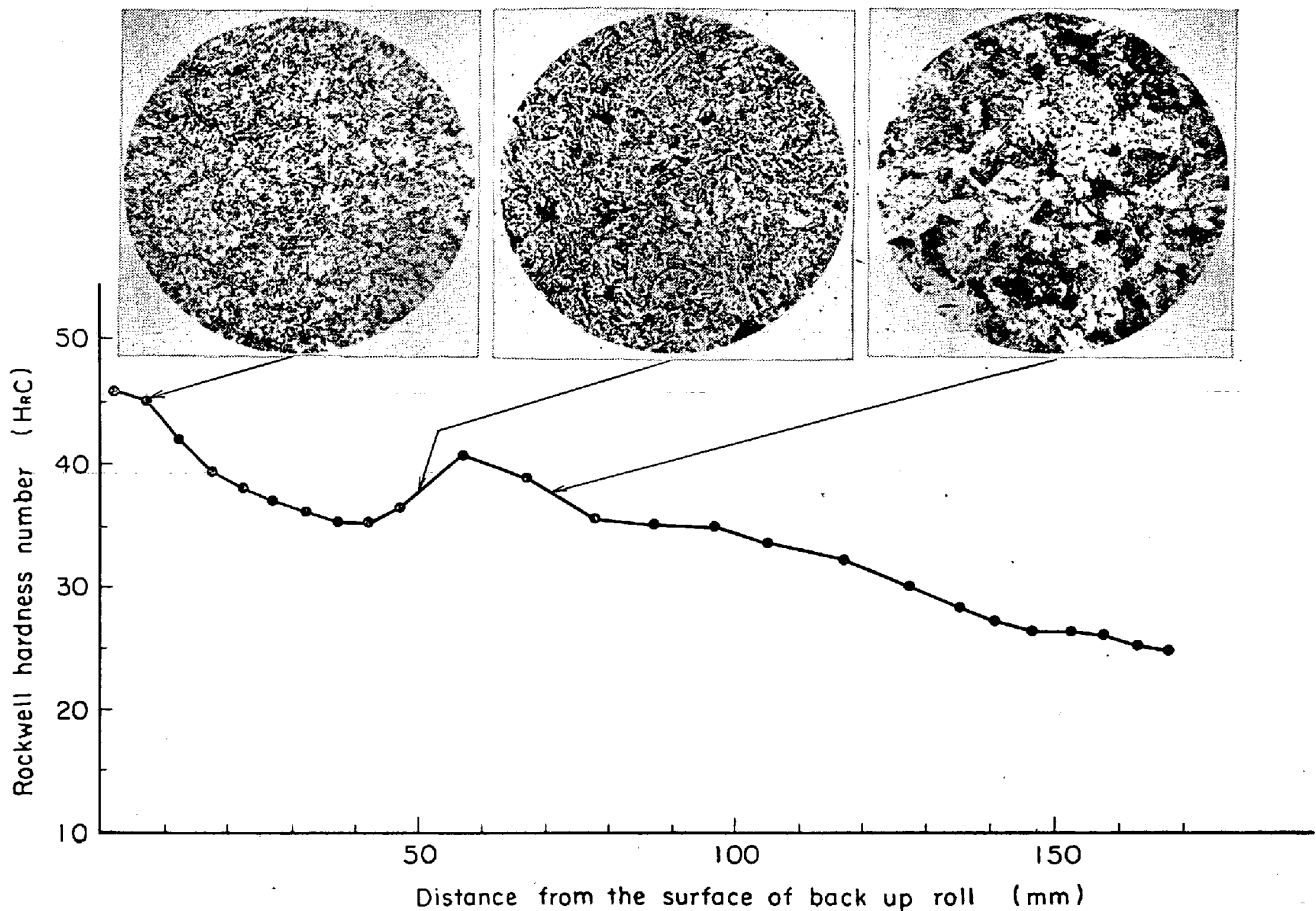


Fig. 1. An example of microstructures and hardness distribution of the cross section of back-up roll.

Table 1. Chemical composition of material.

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V
0.74	0.35	0.59	0.022	0.016	0.15	1.09	0.25	0.10

Table 2. Hardness and heat treatment of each group.

Group	Microstructure	Heat treatment	Hardness(Rc)
a	Tempered martensite	850°C×1 hr→OQ 620°C×2 hr→AC	38.0
b	Tempered martensite	850°C×1 hr→OQ 700°C×2 hr→AC	24.5
c	Bainite	850°C×1 hr→350°C Pb bath×2 hr→AC	38.0
d	Bainite	850°C×1 hr→350°C Pb bath×2 hr→AC680°C×2hr→AC	25.0
e	Pearlite	850°C×1 hr→650°C Pb bath×2 hr→AC500°C×2hr→AC	25.0

さらに a～e グループと同一の熱処理を行なった引張試験片を準備した。また HrC 25 のかたさレベルの回転曲げ疲れ試験片を、焼もどしマルテンサイト、ベイナイトおよびパーライトの3種類の組織としたものを準備した。回転曲げ疲れ試験片の熱処理は b, d および e グループと同一である。

## 2.2 試験方法

ところがり疲れ強さの試験は、3段ロール型転動試験機

を用い、応力条件はヘルツの最大接触応力 144 kg/mm<sup>2</sup> マシン油による潤滑を行ない、試験片回転数 1600 rpm で行なった。寿命の比較は被害指数 100 となったときの転動数<sup>1)</sup>で行なった。また表面疵の発生開始時の転動数についても、やや大まかではあるが求めて比較した。

引張試験は 30 t 万能試験機によって行ない、疲れ試験は小野式回転曲げ試験機 (10 kg m) を用いた。

Table 3. Mechanical properties of each group.

Group	Hardness (Rc)	0.2% offset (kg/mm <sup>2</sup> )	Tensile strength (kg/mm <sup>2</sup> )	Elongation(%)	Reduction of area (%)
a	38.6	134.5	139.5	13.6	35.0
b	27.2	92.2	96.2	22.3	54.2
c	38.1	103.0	134.0	10.7	25.0
d	24.2	68.2	92.1	24.0	55.4
e	26.7	56.2	99.1	21.4	54.6

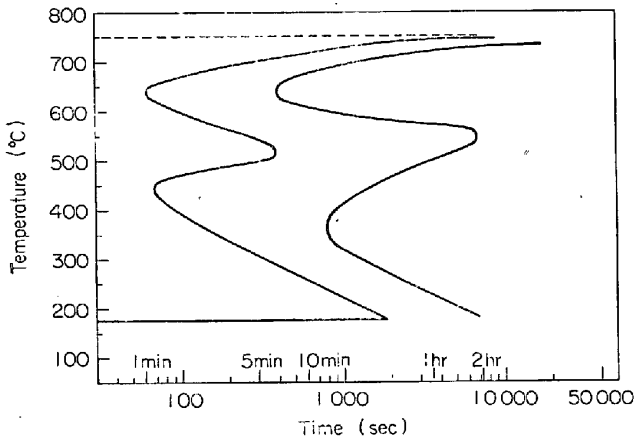


Fig. 2. Isothermal transformation diagram of Cr-Mo-V steel.

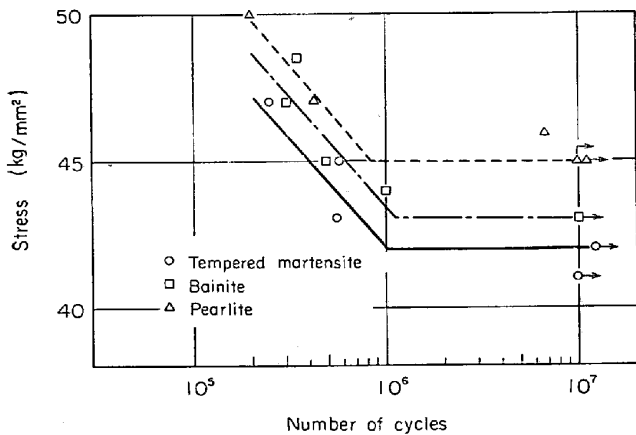


Fig. 3. S-N curves of the specimens with various microstructure.

2.3 試験結果

(1) 引張試験

引張試験の結果を Table 3 にとりまとめる。かたさレベル HRC 25~27 の範囲で各組織ともほぼ 100 kg/mm<sup>2</sup> の引張強さを示すが、降伏点 (0.2%耐力) は組織によつて著しく異なる。すなわち焼もどしマルテンサイトは 92 kg/mm<sup>2</sup> であるのに対し、ベイナイトは 68 kg/mm<sup>2</sup>、パーライトは 56 kg/mm<sup>2</sup> である。のびおよびしぼりについては大差がない。

(2) 回転曲げ疲れ試験

HRC 25 の 3 種類の試験片について S-N 曲線を求めた。その結果をまとめて Fig. 3 に示す。耐久限度は、焼戻しマルテンサイト組織のものが 42 kg/mm<sup>2</sup>、ベイナイト組織のものが 43 kg/mm<sup>2</sup>、パーライト組織のものが 45 kg/mm<sup>2</sup> であり、著しい差はなかった。

(3) ころがり疲れ強さ

ロックウェルかたさ HRC 25 の b, d および e グループについては試験片を 3 個ずつ、HRC 38 の a および c グループについては、試験片を 2 個ずつ用いた。Fig. 4 にその結果を示す。かたさ HRC 38 の a および c グループは、ころがり接触数 1.0 × 10<sup>7</sup> 回でも、本実験条件では表面疵は出現せず、良好なころがり疲れ強さを示している。また b, d および e グループの試験片では、焼もどしマルテンサイトの寿命が長く、かつクラック発生時期も遅い。ベイナイトおよびパーライト組織のものはともに焼もどしマルテンサイトのものにくらべ、寿命がかなり短い。とくにベイナイト組織のものは、変態温度および顕微鏡組織から、下部ベイナイトと判断され、微細なものにもかかわらず、パーライト組織のものと同

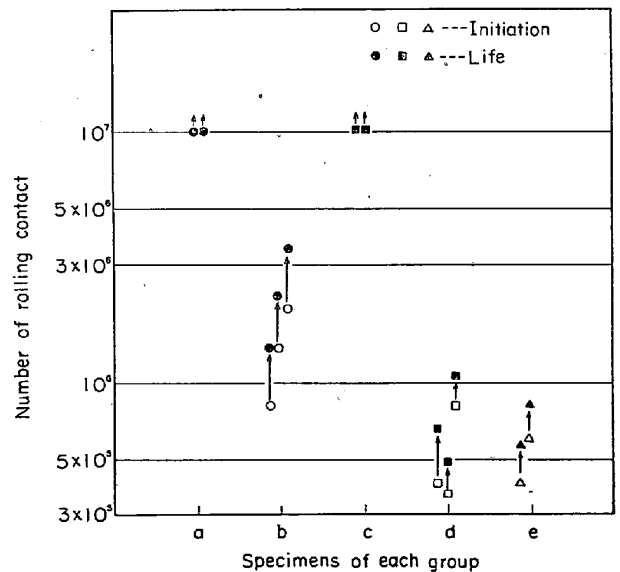


Fig. 4. Rolling contact results of each group (Influence of microstructure on the rolling contact strength).

Table 4. Chemical composition of specimens of each group (%).

Group	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
A	0.40	0.33	0.80	0.023	0.022	0.15	2.86	0.52
B	0.45	0.30	0.60	0.017	0.006	0.13	0.97	0.26

Table 5. Specimens with various forging ratio (Group A).

Specimen mark	Forging ratio	Hardness (Rc)
R1~R3	1.0 (as cast)	34.2
S1~S2	1.25	33.6
T1~T3	4.0	33.8
X1~X3	16.0	33.8
Y1~Y3	32.0 (with upsetting)	34.4

程度の寿命であることが注目されよう。

### 3. 材料の鍛造比とところがり疲れ強さ

#### 3.1 試料

圧延用補強ロールは、これを一体式と組立式とに大別され、さらにアーバーおよびスリーブの粗材として鑄鍛いずれを当てるかによって、いろいろな組み合わせのものに細分される。それぞれの形式によつて一長一短があり、いちがいに評価することはできないが、補強ロールが満足しなければならない性質は、転動面を含む外周部と内部とは多少異なっており、前者では耐摩耗性、耐スポーリング性が、後者では強じん性、耐折損性が要求されている。ここでは耐スポーリング性についてまとをしぼり、粗材が鑄造で調達される場合と、鍛造で調達される場合とで、その耐スポーリング性に相異があるかどうかを中心に実験を行なった結果についてのべる。

まず鍛造比の影響を知る目的で、Table 4 の A に示す Cr-Mo 鋼を直径 80, 85, 158 および 317 mm の丸棒にそれぞれ鑄込み、このうち 80 mm のもの以外は直径 80 mm の丸棒に鍛造した。この結果、鍛造比 1 (as cast) 1.25, 4, 16, 32 (据え込み比 2) の 5 種類の粗材が調達された。つぎにこれらの粗材をほぼ試験片形状に荒けずりしたのち、880°C で 1 hr 加熱保持して油焼入れしついで 610°C でそれぞれ 2 hr 加熱保持 (焼もどし) して空冷した。かたさ測定のもの、仕上げけずりを行なつて Table 5 に示す総計 15 個の試験片が準備された。これらの試験片をグループ A とよんでおくことにする。

また鍛造方向との関連を知る目的で、Table 4 の B に示す Cr-Mo 鋼を用いた。この材料は、大型インゴットの T 端側より、据込、孔明、荒延、仕上の過程をへて製作されたもので、鍛造比は 1.4U; 1.8M および 2.3E

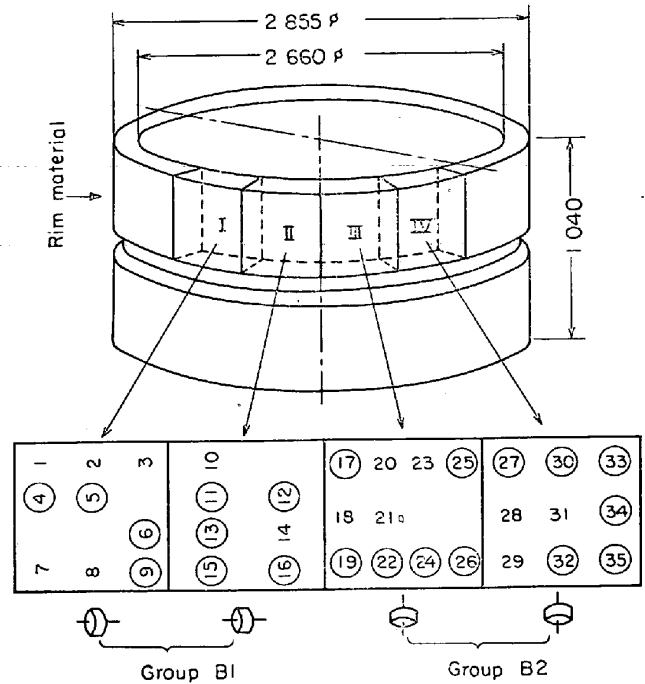


Fig. 5. Location and direction where the specimens are taken from rim material.

となつている。Fig. 5 は、供試材の採取方向および位置を示す概略図で、まず、リム材の T 端側から I, II, III および IV の 4 ブロックを切り出し、各ブロックから 7 ないし 10 個、合計 35 個の試験片を製作した。この場合 Fig. 5 に示すように、I および II ブロックからは試験片の軸方向とリム材の円周方向とが平行になるように 16 個 (グループ B1 と呼ぶことにする)、また III および IV ブロックからは、試験片の軸方向とリム材の軸方向とが平行になるように 19 個 (グループ B2) の試験片を製作した。これらの試験材のかたさは HRC 21 である。

鍛造フロー方向は実験終了後の試験片の横断面のマクロ腐食像より決定され、ゴーストの粗密の程度についても、実験に先だつて行なわれた試験片転動面のサルファープリントにもとづいて判定し、ゴースト部のところがり疲れ強さについても考察した。

#### 3.2 試験方法

上述の試験片に、前報<sup>1)</sup>において詳述した 3 段ロール型転動試験機を用いて、一定圧力下でところがり接触を与えた。試験荷重は動的な状態でヘルツの最大接触応力 ( $p_{max}$ ) の値が 120 kg/mm<sup>2</sup> となるようにし、試験中

には、ころがり接触部に前後からクリーナーを通したマシン油を噴射させた。グループAの試験片は被害指数が100に到達するか、あるいはころがり接触数が $10^7$ 回に達するまで試験を続行した。グループB1およびB2の試験片は、 $2 \times 10^5$ 、 $2.4 \times 10^5$  および  $2.8 \times 10^5$  回のころがり接触数が得られたところで試験機を停止し、それぞれの場合の被害指数の算定と転動面の観察とを行なった。

### 3.3 試験結果

#### (1) 鍛造比の影響

ころがり接触回数が増大にともない、グループAの試験片の被害指数が逐次増大していくが、被害指数100に到達するまでのころがり接触回数は、 $1.2 \times 10^6 \sim 3.5 \times 10^6$  の間にあり、この結果を鍛造比と寿命の関係で表わせば、Fig. 6 のようになり、鍛造比が寿命におよぼす影響は、さほど顕著ではないことがわかる。この図では、鍛造比の増大にともない、寿命が多少短くなるような傾向を示しているが、この中からたとえば、実際の補強ロールの鍛造比に近い鍛造比4の試験片と、鑄放しの試験片との両データ間の有意差検定を行なってみると、有意水準10%では有意差が認められず、有意水準30%ではじめて有意差が認められる程度にすぎないことがわかる。

#### (2) 鍛造方向の影響

グループB1およびB2の各試験片に $2.8 \times 10^6$ 回のころがり接触をあたえたのち、転動面の中央で試験片を輪切りにして、横断面のサルファープリントとマクロ腐食を行ない、鑄造により発生しているメタルフローの方向を知り、この方向とスポーリングの発生位置との関係を求めた。このメタルフローの方向を基準にして、転動

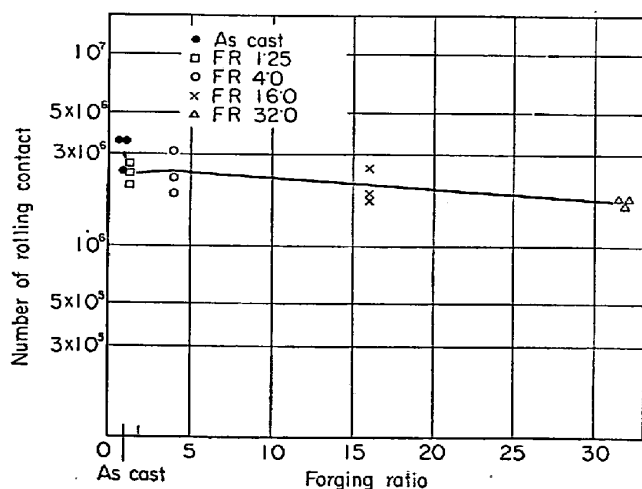


Fig. 6. Relationship between forging ratio and rolling contact strength.

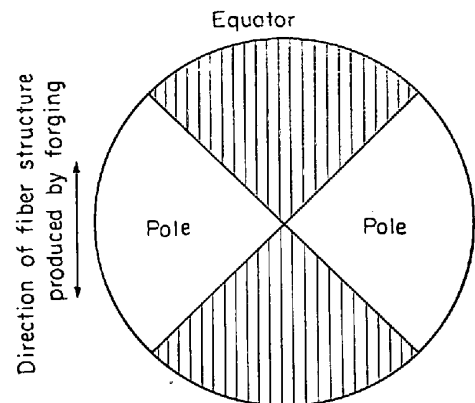


Fig. 7. Definition of "equator" and "pole".

面を Fig. 7 に示すように4象限に分ち、それぞれの象限ごとに発生したスポーリングについて被害指数の和を求め、さらに極部分の象限と赤道部分とについてそれぞれ和を求めた結果、Table 6 が得られた。B1 および B2 いずれのグループについても、転動面の被害指数は赤道部分が極部分に比較して、平均的に約4倍大きいことが示される。さらにこれらの関係を詳細に調べてみると、スポーリングの多発しているのは厳密には赤道そのものではなく、赤道からずれていることがわかる。このずれはすべての試験片についてほぼ一様であり、回転方向と逆方向に角度にして20~30度である。

#### (3) ゴーストの影響

実験に用いたグループBの試験片のうち、グループB1に属するものでゴースト密なものは9個、ゴースト粗なものは7個、またグループB2に属するものでゴースト密なものは13個、ゴースト粗なものは6個であった。(Fig. 5 中○印をつけたものはゴースト密の試験片) Table 7 にグループB1の各転動数における被害指数をゴーストの粗密に分けてまとめる。これらの結果から、転動面のサルファープリントに基づいてきめたゴースト密な試験片群とゴースト粗な試験片群の間には、表面疵発生傾向の差は認められないことがわかる。このことは個々のゴーストに注目してみても同様である。すなわち転動面のサルファープリントと表面疵発生位置との対比を全試験片について行なってみても、それらが、1対1に対応していないことがわかる。Fig. 8 は表面疵発生位置とサルファープリントの対比の一例である。

#### (4) 転動面の観察

試験片の横断面(グループB1)についてマクロ腐食した状況を Photo. 1 に示す。転動面に沿って黒ずんだ縁がみられ、あたかも試験片表面がかたい外殻でコーティングされた状態になっている。またさらに細かに観察すれば、この外殻組織は決して一様ではなく、回転方向

Table 6. Influence of fiber structure by forging on the distribution.

Group B1 No of specimens	Damage intensity			Group B2 No of Specimens	Damage intensity		
	Equator	Pole	Total		Equator	Pole	Total
1	2.6	10.5	13.1	17	108.9	4.4	113.3
2	2.6	0.7	3.3	18	41.8	1.2	43.0
3	5.9	0.9	6.8	19	5.5	3.3	8.8
4	36.8	4.5	41.3	20	4.2	11.1	15.3
5	25.9	7.4	33.3	21	24.2	3.5	27.7
6	14.3	5.2	19.5	22	13.7	11.9	25.6
7	6.0	1.9	7.9	23	13.7	0.2	13.9
8	44.8	0.7	45.5	24	8.4	9.3	17.7
9	22.7	2.7	25.4	25	26.9	9.9	36.8
10	48.2	38.8	87.0	26	2.9	6.6	9.5
11	8.5	8.4	16.9	27	7.3	3.2	10.5
12	9.9	0.4	10.3	28	44.1	5.5	49.6
13	39.2	1.0	40.2	29	99.4	25.7	125.1
14	111.7	16.6	128.3	30	10.3	3.4	13.7
15	5.7	0.0	5.7	31	3.6	3.5	7.1
16	15.4	0.4	15.8	32	6.1	23.4	29.5
				33	60.5	12.5	73.0
				34	40.6	2.2	42.8
				35	17.9	20.2	39.1
Mean	25.0	6.3	31.3	Mean	28.6	8.4	37.0

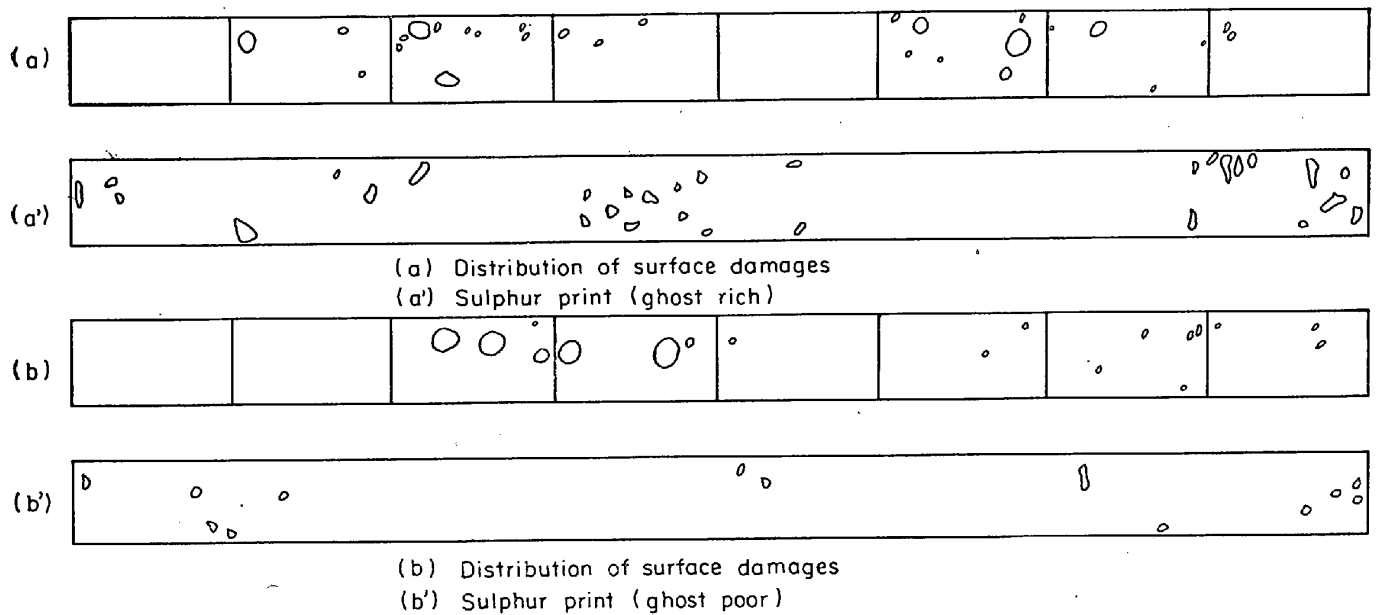


Fig. 8. Comparison of the locations where ghost spots are revealed and the positions where the surface damages are appeared.

に流動していることがわかる。この流動はゴースト部にも例外なく起きている。スポーリングは転動面の表面から発生し、塑性変形域における流動線に沿って斜めに成長し、最後にき裂の先端もしくは中途から、ぜい性破壊が生じ、はく離する場合が多い。この模様を図式的に示すと、Fig. 9 のようになる。また転動面について観察すると、Photo. 2 に示すように、回転方向に褶曲した部分が、主として転動面の幅の中央部付近にみられ、あたかもき裂の初期の状態と目されるしわきず状のみぞが存在

することがある。また鑄造材で、表面の近くに鑄造欠陥のあるものは、その欠陥が前述の流動域に含まれている場合には、Photo. 3 に示すように、その欠陥の周辺からき裂を生じている場合が多い。

#### 4. 欠陥材のろがり疲れ強さ

##### 4.1 試料

質量大なる補強ロールを製造する際に、それが鑄造による場合にせよ、鍛造による場合にせよ、製造時の欠陥

Table 7. Relation between "damage intensity" and number of rolling contact in group B1.

		R	$2.0 \times 10^5$	$2.4 \times 10^5$	$2.8 \times 10^5$
S					
Ghost-rich specimens	4		3.1	16.6	41.5
	5		2.4	11.8	33.3
	6		5.2	20.9	46.2
	9		2.2	9.0	19.4
	12		0.2	11.5	25.3
	15		6.1	18.0	16.8
	16		0	4.2	10.2
	17		23.6	21.7	40.2
	19		4.9	2.7	5.7
	20		0.2	3.4	15.7
Mean			4.8	11.9	25.4
Ghost-poor specimens	1		0.5	9.0	13.1
	2		1.9	1.4	3.3
	3		0.9	2.2	6.8
	7		0.9	18.4	25.7
	10		4.5	4.6	7.9
	11		9.3	29.1	45.5
	13		23.3	43.6	79.5
	18		18.5	39.7	128.2
Mean			7.5	18.5	38.8

T : Number of rolling contact  
S : Specimen number

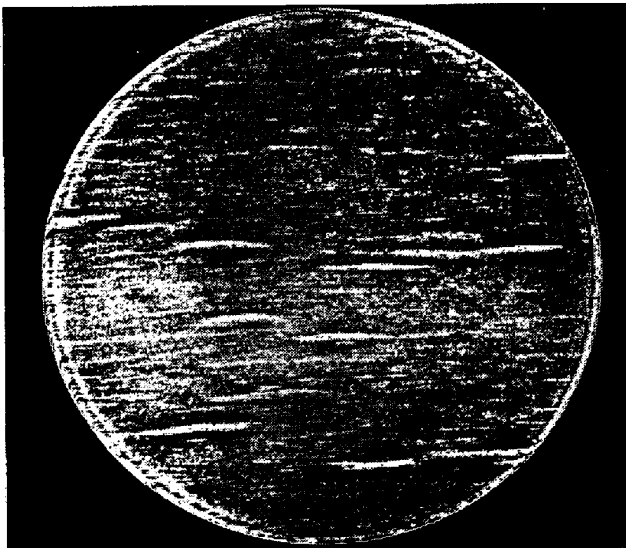


Photo. 1. Macro-etched pattern of cross-sectioned surface of tested specimen.  $\times 1.4 (2/3)$

を皆無とすることは高い技術と長い経験を有することはいうまでもない。またロール表面層は無欠陥になっても使用が進むにしたがいどうしても微小な欠陥が発生しやすくなる。そこでロールを製造する際に生じうるような欠陥について、それらがころがり疲れ強さにどのような影響をおよぼすかを研究した。

供試材は 0.4% C の炭素鋼で 80  $\phi$  の丸棒に鍛造後、

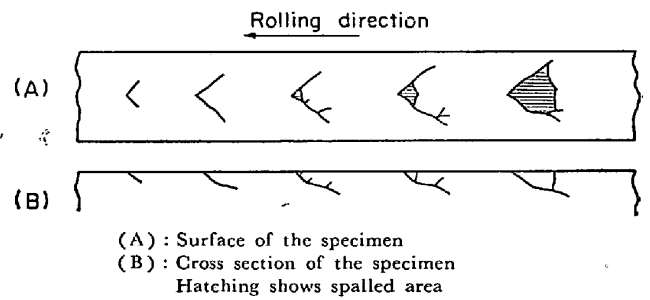


Fig. 9. Initiation and development of spalling on the specimen.

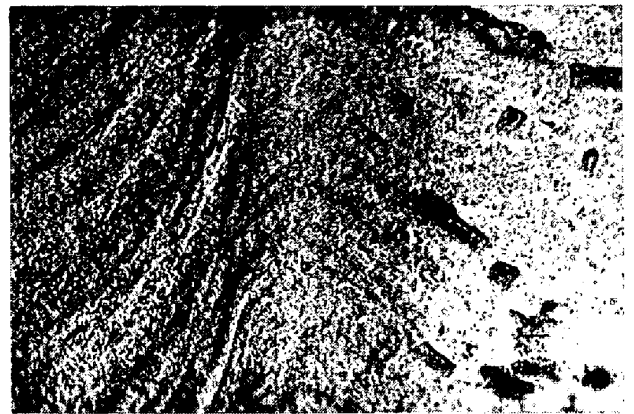


Photo. 2. Surface flow of the tested specimen.  $\times 25 (3/5)$



Photo. 3. Crack initiated from the blowhole.  $\times 100 (3/5)$

焼鈍を行なったものである。顕微鏡組織はフェライト+パーライトであり、硬さは Hb 180 である。

欠陥としては、ブローラ、ザク巣などの自然に生じた欠陥を有するものを用いるのがより实际的であるが、試験片の転動面上にそのような欠陥を作ることは非常にむずかしいので、人工的な欠陥を試験片表面に作った。

まず第一には試験片転動面に種々な大きさを持つドリル孔をあけた。ドリル孔は Fig.10 に示すごとき形状で直径 ( $\phi$ ) および深さ ( $d$ ) を変えた。すなわち直径



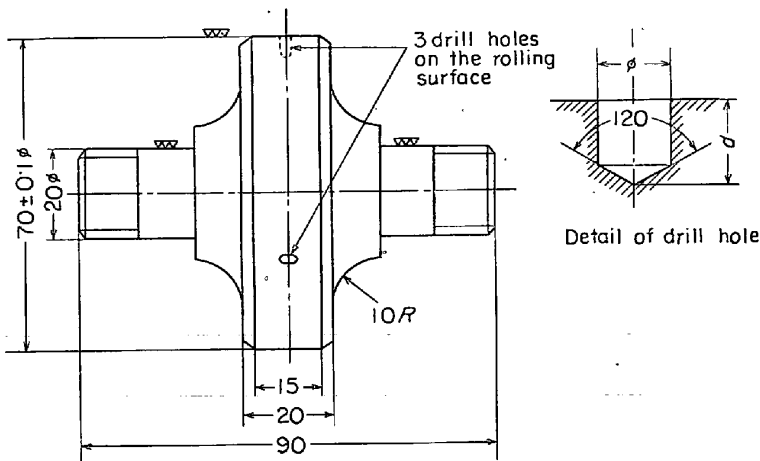


Fig. 10. Shapes and dimensions of specimen with drill holes.

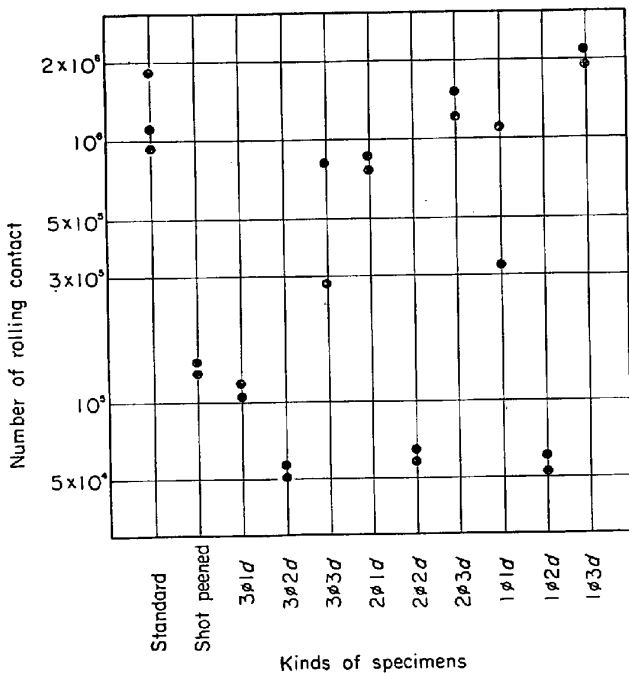


Fig. 11. Results of rolling contact test of the specimens with defects.

( $\phi$ )を、1 mm, 2 mm および 3 mm の 3 種類とし、それぞれの径について深さを 1 mm, 2 mm および 3 mm と変え計 9 種類の試験片を準備した。一つの試験片には同一大きさのドリル孔を 3 個、転動面 3 等配の位置にあけた。つぎに鍛造などによるシワ疵の代わりに、転動面にショットピーニングを行ない表面アラサを増加させ、同時に表面を硬化させた試験片を準備した。ショットピーニングによる表面のかたさの上昇は、ビッカースかたさで 60~70 程度、硬化層は表面より 0.5~0.6 mm の深さであつた。また表面アラサは  $H_{max}=50$  程度であり標準試験片の研削面の  $H_{max}=2$  とくらべると非常に

凹凸がはげしい。

#### 4.2 試験方法

3 段ロール型転動試験機により、ヘルツ応力で 144 kg/mm<sup>2</sup>、マシン油による潤滑を行ない試験片接触数で 3 200 回で転動した。寿命の比較は、被害指数が 100 となつたときの試験片のところがり接触数で行なつた。

#### 4.3 試験結果

各試験片の転動試験の結果を Fig. 11 に示す。縦軸は転動数(寿命)であり、横軸は試験片の種類である。また標準試験片として H<sub>v</sub> 180 のかたさで研削面をそのまま転動面として持つたものを用いた。標準試験片の寿命は 1.0~1.4 × 10<sup>6</sup> 程度である。Fig. 11 から明らかなように、ドリル孔およびショット面とも欠陥として寿命を

短くする傾向を示している。すなわちショットピーニングした試験片の寿命は転動数 1.2 × 10<sup>5</sup> 程度であり、標準試験片の寿命のほぼ 1/10 である。またドリル孔をあけた試験片では、深さ 2 mm のものは直径の大小によらず寿命が著しく短く、ほぼ 5.6~6.0 × 10<sup>4</sup> である。ドリル孔の深さが 3 mm のものは各試験片とも寿命があまり短くなっていない。全体的には孔径が大なるほど寿命が短くなる傾向を示している。これらについては考察において述べる。

なお、転動試験と比較するためにショットピーニングした試験片について回転曲げ疲れ試験を行なつた。Fig. 12 はその結果を示す S-N 曲線で、ショットを行なっていない標準試験片の結果もあわせて示しておく。回転曲げ疲れ試験では、ショットピーニングしたものの疲れ

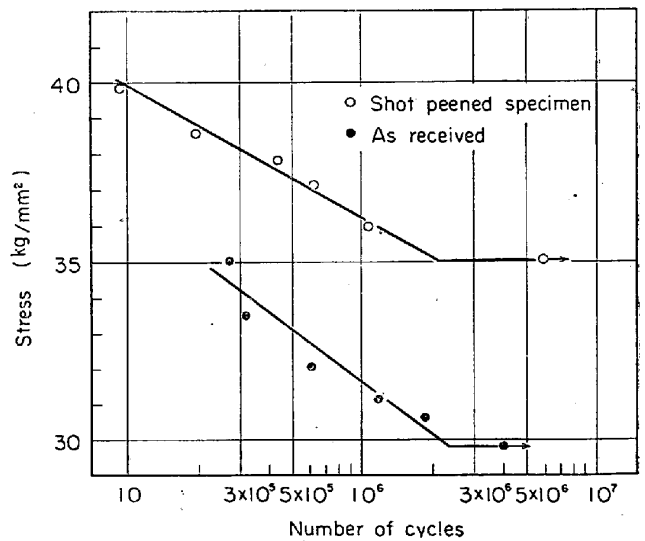


Fig. 12. S-N curves of shot peened specimen and as received specimen.

限度が、標準試験のそれより  $5 \text{ kg/mm}^2$  ほど高い。

## 5. 考 察

### 5.1 転動面近傍の塑性流動について

寿命に達した試験片を切断して断面を観察したところ、転動面からある深さまでは組織が著しく流動していた。Photo. 4 は焼もどしマルテンサイト組織の試験片 (2章グループ) の表面流動の一例である。この場合、表面から  $1.0 \sim 1.5 \text{ mm}$  程度まではかたさの上昇も求められる。またごく表面では、流動が著しくないが、これはころがり接触における接触応力の挙動と何らかの関係があるといえよう。

また、欠陥を持つ材料の転動試験において、ドリル孔をあけた試験片では孔の深さ  $2 \text{ mm}$  のものが、直径の大小にかかわらず寿命が短かつた。この理由はやはり表面の変形がころがり接触による疲れ強さに大きな影響をおよぼしていると考えられる。

そこで、表面の流動を詳細に調べるため、転動試験片



Photo. 4. Surface flow of specimen (martensitic structure B group).

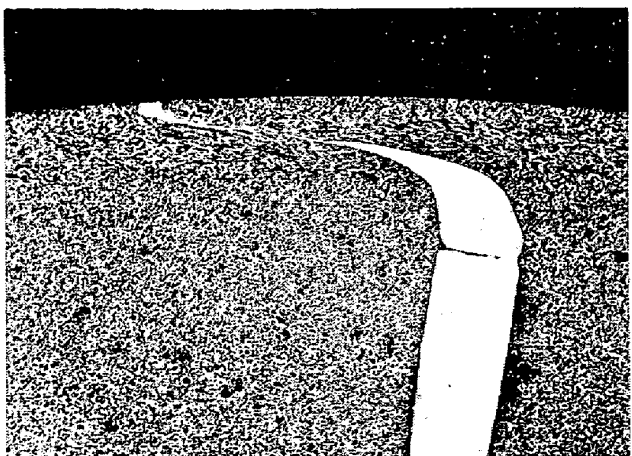


Photo. 5. Deformation of the surface of specimen with alumel wire.  $\times 20$  (3/7)

にドリル孔 ( $1.0 \text{ mm } \phi$ ) をあけ、その孔に  $1.0 \text{ mm } \phi$  のアルメル線をうめ込み、この試験片を  $2.0 \times 10^5$  回転した。アルメル線のうめ込みに当たっては、ドリル孔に大きな空隙を残さないように注意し、マクロ的な欠陥のない試験片とした。転動後、このアルメル線の中心を通り、転動面に垂直に軸方向の断面を観察できるように切断した。Photo. 5 はこの断面でのアルメル線の変形状態を示す。変形は深さ約  $1.2 \text{ mm}$ 、円周方向 (回転方向) に  $3.75 \text{ mm}$  にも達している。アルメル線が最も細くなっている部分、すなわち最も著しい変形を受けているのは、表面から深さ  $0.3 \sim 0.5 \text{ mm}$  の範囲であつた。この試験においては、計算による最大せん断応力位置は  $0.45 \text{ mm}$  であり、最大変形の位置とほぼ一致している。最表面は円周方向に著しく流動しているが、せん断力は受けていない。これは、Photo. 5 においてアルメル線が転動面に対して垂直となつており、著しく細くはなつていないことからいえる。これは  $\tau_{45^\circ}$  の応力分布<sup>9)</sup>と一致している。本試験におけるき裂発生位置は、表面もしくはごく表面に近い部分であり、このように流動の著しい場合についてはせん断応力より主応力がころがり疲れ強さに影響を及ぼしているものと考えられる。

さて深さ  $2 \text{ mm}$  のドリル孔欠陥を持つ試験片の寿命が著しく短かつたのは、S. Way<sup>10)</sup>などが唱えているごとく、この孔に入った潤滑油が、孔の変形に際して圧縮され大きな圧力を生じ、剝離を助長するものと考えられる。深さ  $3 \text{ mm}$  の孔を持つ試験片の場合は、寿命が標準試験片とほとんど変わらなかつたが、これは潤滑油の封じ込まれる体積が大きいため、剝離を助長するのに十分な圧力を生じなかつたものである。また、 $1 \text{ mm}$  深さの試験片の場合は、孔の変形時に封じ込まれる量が少なく、圧力が大きくならないものと考えられよう。

実際の補強ロールのように  $H_s 60 \sim 70$  のかたさの試験片については、このような著しい塑性流動は認められなかつたが、X線による塑性変域の観察ではかなり深くまで影響が認められており<sup>7)</sup>、さらに実体補強ロールの使用に際して、スポーリング疵を十分除去しないで再び使用した場合には、必ずその部分から大きなスポーリングへと進展する事実からも、本実験と同じ考え方がスポーリングの発生にもあてはめうるものと考えられる。

このように、ころがり疲れは、表面の疲れ現象であるので、回転曲げ疲れ試験によつて判定しようのではないかという考えに基づき、両者の比較を行なつた。この結果については、各試験結果でまとめてあるとおり、ころがり疲れ試験と一致していない。たとえば、組織を変えた試験片については、回転曲げによる耐久限度に差はな

かつたところがり疲れ強さには差がある。またショットピーニングした試験片と標準試験片と比較すると、回転曲げ耐久限度とところがり疲れ強さとは全く逆の結果である。これらの現象は、表面の塑性流動から説明することができる。すなわち、前者では、引張強さは各組織とも一定であるが、降伏点がことなり、焼もどしマルテンサイト組織のものが他の2種類とくらべて高い。すなわち塑性変形に対する抵抗力の大なるもののほうが、良好なところがり強さを示しているわけである。また後者、すなわちショットピーニングを行なつた場合、ショットによる表面かたさの上昇は0.5 mm までであり、塑性変形が転動試験においては1.2 mm におよんでいることから、ショットピーニングによるかたさ上昇はところがり疲れ強さには寄与していないと考えられる。逆にショットによる表面アラサの増加、表面の微少き裂の増加がところがり疲れ強さを低下せしめているものと考えべきである。

## 5.2 鍛造比とメタルフローについて

小形の材料について実験を行なつた結果では、鍛造比と耐スポーリング性との間には、明確な有意差を示すような関係が認められなかつた。しかし、これは鍛造の影響がなんら無いということの意味するものではない。鍛造比の影響を求める実験に用いた小形材は、丸棒形状に鋳込まれ、これからそのまま丸棒形状に鍛造されたものであつて、鍛造より発生するメタルフローの方向は、この場合試験材の長手方向に様にそろつている。したがつて転動面を横切るようなメタルフローがなく、しかも全周にわたつて比較的均一な状態であつたと考えられる。本実験結果は、このような状態では、丸棒の軸が転動面を形成する円筒の軸と一致するようにはけずり出された材料については、鍛造比がかなり大幅に変化しても耐スポーリング性には大きな影響がないことを示すものである。鍛造比についての試験片の表面疵を、大きさ別および鍛造比別に分けて、それぞれの深さの測定を行なつた。その結果を Fig. 13 にとりまとめる。この図から表面疵の大きさには関係なく、鍛造比を上げた試験片の表面疵の深さは浅くなる傾向にあるといえる。

これらのことは、実際の補強ロールの場合にあてはめてみると、たとえば一体式鍛鋼製補強ロールが、その胴長にわたつて均一な荷重を受けて転動する場合に当てはまるであろう。また組立式補強ロールの場合には、鍛造によるメタルフローが軸方向および円周方向の両成分を持つているが、この場合にもメタルフローが材料表面を切ることがないから、一体式補強ロールの場合と同様に考えられる。したがつて、耐ところがり疲れ強さに関するかぎりでは実体の補強ロール材としては、鋳鍛いずれの

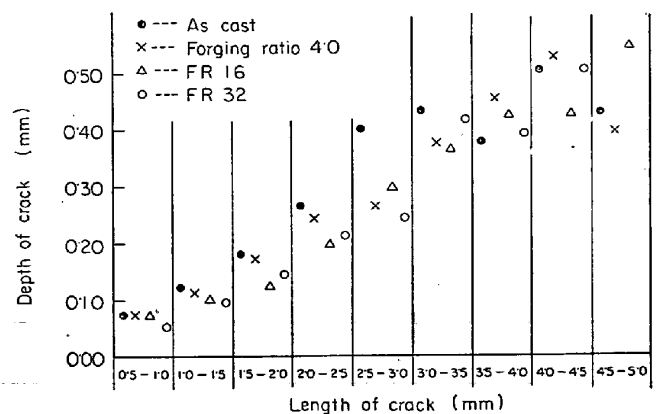


Fig. 13. Relationship between depth of crack and forging ratio.

材料を充当しても大差ないものと考えられる。しかし、鋳造材には、表面欠陥および中心部欠陥が残留しやすく前者は実験結果に示されたような、き裂の原因となり、早期スポーリングを助長するであろうし、後者については、軸部の折損の原因となりうるので、これらを勘案すれば鍛鋼がすぐれているといえよう。とくに、組立式ロールのアーバーとして数回反復して使用する場合には、軸部付根部における疲れ強さの点で、本質的に劣る鋳鋼では不満足であろう。

鍛造により発生するメタルフローが転動面を横切るような場合には、その部分の耐ところがり疲れ強さが低下することが、実験により明らかとされた。このような場合は、実際には歯車に起きているものと考えられる。実験に用いたグループ B1 とグループ B2 の試験片では、そのメタルフローはグループ B2 のほうが著しい。またグループ B2 の試験結果は、その被害指数がグループ B1 とくらべて若干大きくなつている。このことから、メタルフローがより強くなれば、それだけそのフローが転動面を横切る部分の耐ところがり疲れ強さが悪くなるものと判断される。すなわち、鍛造比の影響が、このような場合には比較的明りようにあらわれてくるものと思われる。これらのことは、歯車材を転造によつて強化できることのひとつの実験的根拠ともなる。

つぎに、大型鋼材でしばしば問題にされるゴーストスポットの影響は、それらがき裂や空洞を含むようなものでなければ、転動面にあらわれても実害はないと思われる。ゴーストスポット部は、通常、地のかたさよりも高いかたさを示し、たとえばこの実験に用いた材料についても、前者が Hv (荷重 100 g) 240 程度であるのに対し、後者は Hv (荷重 100 g) 260~280 であつた。しかし、ところがり接触に対してはじゆうぶんなダクティルな挙動を示し、Photo. 1 に示されているように地の塑性

流動に完全に追従して、ゴーストスポットの位置からスポーリングが選択的に発生するようなことはなかつた。しかし、ゴーストを低減すべきであることは、従来からの根本原則であり、この件に関しては、異なつた立場と問題点から機会があれば論じたい。

## 6. 結 言

圧延用補強ロール材のころがり疲れ強さについて、試作せる3段ロール型転動試験機によつて試験を行なつた。とくに、補強ロール材の材料特性ところがり疲れ強さにまとをしぼり、種々の試験を行なつた。それらの結果はつぎのように括約される。

(1) ころがり疲れ強さは、マルテンサイト組織のものが、ベイナイト・パーライト組織のものにくらべすぐれている。

(2) 降伏点を上げることが、ころがり疲れ強さの向上に結びつく。

(3) 鍛造比を著しく大きくすると、ころがり疲れ強さはごくわずかに低下する傾向にあるが、有意差はない。

(4) 鍛造によつて生ずるメタルフローが転動面を横切る場合は、ころがり疲れ強さは明らかに低下する。

(5) ゴーストスポットは、ころがり接触に対してダクタイルな挙動をし、スポーリングの発生には直接的影響をおよぼさない。

(6) ころがり接触により転動面は加工硬化するが、表面層の部分に回転方向に塑性流動が生ずる。

(7) スポーリングの初期のき裂は表面に生じ、表面に対して斜めに、塑性流動線に沿つて成長し、最終的には、縦方向の脆性破壊によつてはく離する。

(8) 鋳鋼にあつては、表面の塑性流動域に存在する鑄造欠陥は、ころがり接触により、き裂の発生源となりうる。

(9) 表面に欠陥のある場合、ころがり疲れ強さは低下するが、欠陥の位置、大きさによつて、低下の割合が異なる。

(10) 回転曲げ疲れ試験ところがり疲れ試験とでは、その本質が異なると考えられ、回転曲げ疲れ試験の結果をそのままころがり疲れ強さと比較することは危険である。

以上のことから、ころがり疲れ強さを持つ、すなわち耐スポーリング性の良好な補強ロール材としては、マルテンサイト組織を有し、降伏点の高いかつ表面層に欠陥を含まない健全なものであることが必要条件であるといえよう。

## 文 献

- 1) 下田, 荒木田, 堀, 工藤, 鉄と鋼, 52(1966), p.23~31
- 2) J. H. HOLLOMON, L. D. JAFFE, D. E. MCCARTHR, and M. R. NORTON: Trans. ASM, 38(1947), p. 807~847
- 3) 千々岩, 大内田, ほか: 日本機械学会誌, 69(1966) 572, p. 1134
- 4) たとえば R. F. JOHNSON and J. F. SEWELL: JISI, (1960), p. 414
- 5) E. RADIZIMOVSKY: "Stress distribution and streugth condition of two rolling cylinders pressed together" University of Illinois Engineering Experiment Station, Bulletin Series, No 408
- 6) S. WAY: J. Appl. Mech., 57 (1935) p. A49
- 7) 荒木田, 堀, 工藤: 鉄と鋼, 54, (第75回講演大会発表)