

# 軸受鋼における転がり接触下での白色組織発生過程

原田 久\*・小熊 規泰\*・山本 厚之\*<sup>2</sup>・椿野 晴繁\*<sup>2</sup>

Formation Process of White Etching Area under Rolling Contact in Bearing Steel

Hisashi HARADA, Noriyasu OGUMA, Atsushi YAMAMOTO and Harushige TSUBAKINO

**Synopsis :** The formation process of White Etching Area (WEA) under rolling contact was investigated to characterize the WEA formation mechanism using radial type rolling fatigue test machine. The examination was carried out under rapid acceleration and deceleration of rotating speed. From observation of test pieces by Scanning Ion Microscope (SIM) and Transmission Electron Microscope (TEM), it was found that acicular structures were formed before forming WEA. The length and width of acicular structures were about 20  $\mu\text{m}$  and about 2  $\mu\text{m}$  respectively. Acicular structures were formed separately from each other and fine granular structures formed from martensite. It was considered that acicular structures were formed by locally microstructural change of martensite due to rolling contact fatigue. The distance from surface to acicular structures were concerned with the location of maximum value of shear stress under rolling contact. An angle between rolling contact surface and acicular structures wasn't consistent with the analytical shear stress angle. It suggested that the stress to govern the forming the acicular structure was not only shear stress under rolling contact but also secondary dynamic stress.

**Key words :** rolling contact fatigue; WEA; transmission electron microscopy; scanning ion microscopy; bearing steel.

## 1. 緒言

転がり軸受の軌道輪は、転動体と点または線で接触するため、数GPaの高い接触圧力が繰返し作用する。近年、軸受の使用環境は、高温、高面圧、高速回転、振動条件下など過酷になってきている。そのため、繰返し疲労により転走痕直下に黒色組織<sup>1)</sup> (Dark Etching Constituent: DEC<sup>2)</sup>, Dark Etching Area: DEA<sup>3)</sup>, 以下DEAと呼ぶ)、ホワイトバンド<sup>1)</sup> (White Etching Constituent<sup>2)</sup>, バタフライ<sup>4)</sup>, 白色組織 (White Etching Area: WEA<sup>3)</sup>, White structure<sup>2,5)</sup>, 以下WEAと呼ぶ) など種々の組織変化が生じる場合がある。DEA, ホワイトバンド, バタフライは比較的長寿命域で認められるのに対し、WEAは短寿命域で認められる。そのため、近年、特にWEAが重要視されている。

WEA起因のはく離メカニズムについてはいくつかの説が提案されており、複雑な応力状態が影響するとした説<sup>2,3,6)</sup> と軸受中に侵入した水素が影響するとした説<sup>5)</sup> に大別される。前者は、転がり接触によって接触部内部に発生する静的な応力場に加えて、曲げ<sup>2)</sup>, 振動および衝撃<sup>3)</sup>, すべりによる接線力<sup>6)</sup>などが作用し、複雑な応力場が生じ、その影響でWEAが発生すると考えられている。一方、水素の影響による説の場合、転がり接触によって潤滑油や水が分解され、その時に発生した水素が軌道内部に拡散し、侵入水素の影響で水素脆化による微小き裂が発生し、そのき裂を起点としてWEAが発生すると考えられている。

組織学的見地から、WEAの構造解析が行われており、WEAはマルテンサイト組織が粒径数十nmの超微細フェライト粒の集合体に変化したものであることが明らかになっている<sup>3,6,7)</sup>。しかしながら、前述した過去の報告では、転がり接触状態とWEAが発生した後の組織観察結果からメカニズムを推定しているため、実際に組織変化を支配する応力状態や組織変化発生初期のメカニズムについては、十分には検討されていない。

ところで、メカニカルミリング<sup>8)</sup>や繰返し重ね接合圧延 (Accumulative Roll Bonding; ARB法)<sup>9)</sup>のような材料を強加工する手法でも超微細組織が形成されることが報告されている。転がり疲労とは別の負荷形態ではあるが、軸受におけるWEAの発生メカニズムを力学的に解明する上で一助となるものと考えられる。

そこで、本研究では、WEAの発生メカニズムを力学的および組織学的に解明することを目的とした。特に、WEAの先駆段階の組織変化に着目し、組織変化過程を明確にすることを試みた。具体的には、軸受の急加減速実験を行い、はく離寿命に至らない早期の段階における軸受の接触部内部の組織を光学顕微鏡、走査イオン顕微鏡 (SIM)、透過電子顕微鏡 (TEM) で観察した。

## 2. 実験方法および実験条件

本研究で用いた試験機はラジアル型転がり疲労試験機で

平成15年1月24日受付 平成15年4月8日受理 (Received on Jan. 24, 2003; Accepted on Apr. 8, 2003)

\* 光洋精工 (株) 総合技術研究所 (Research & Development Center, Koyo Seiko Co., Ltd., 24-1 Kokubu Higanjyo-cho Kashiwara 582-8588)

\* 2 姫路工業大学大学院工学研究科 (Graduate School of Engineering, Himeji Institute of Technology)

あり、その概要を Fig. 1 に示す。実験条件は Table 1 に示す。加速度  $300\text{ s}^{-2}$  の急加減速条件で行った。まず、予備試験として、転がり疲労試験を行った結果、試験時間 90 h で外輪軌道にはく離が発生した。はく離部について、転走面に垂直で、かつ転走方向に平行に切断し、その断面をナイタールエッチングして組織観察を行った結果を Fig. 2 に示す。同図において、はく離部に WEA (矢印) が認められる。このことから、本試験条件では試験時間 90 h 程度で試験軸受の外輪軌道に WEA 起因のはく離が発生することが確認された。そこで、はく離時間の約 50% と 80% で実験を打切った軸受の外輪を組織観察の対象とした。用いた軸受は、深溝玉軸受 6202 (材質 JIS-SUJ2) であり、その材質の化学成分を Table 2 に示す。

組織観察には、光学顕微鏡、走査イオン顕微鏡 SIM (日本電子製収束イオンビーム装置 JFIB-2300 に付属)、透過型電子顕微鏡 TEM (日本電子製 JEM-2010 および JEM-200CX) を使用した。

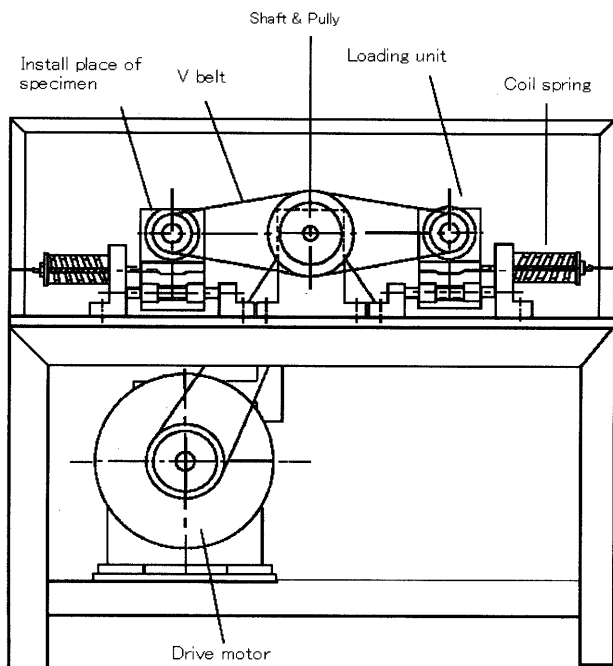


Fig. 1. Schematic diagram of the radial type rolling fatigue test equipment.

Table 1. Test conditions of radial type rolling fatigue test under rapid acceleration and deceleration of rotating speed.

Test Bearing	#6202
Contact pressure	2.6GPa
Rotating speed	$150 \sim 300\text{ s}^{-1}$
Acceleration	$300\text{ s}^{-2}$
Test time	40h and 71h

Table 2. Chemical compositions of specimen. (mass%)

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu	Ni	Mo	[O]
JIS-SUJ2	0.98	0.23	0.32	0.015	0.006	1.43	0.05	0.05	0.03	8ppm

### 3. 組織観察結果

#### 3.1 光学顕微鏡組織結果

上述した方法で軸受外輪から組織観察用試料を切り出し、その断面をナイタールによってエッチングした場合の光学顕微鏡組織観察例を Fig. 3 に示す。同図 (a) は試験時間 40 h (はく離時間の 50% ねらい) の試料であり、同図 (b) は 71 h (はく離時間の 80% ねらい) の試料である。また各図の上部が軌道表面であり、転動体の転がり方向は右から左である。試験時間 40 h の場合は、表層から約  $100 \sim 200\text{ }\mu\text{m}$  深さに、黒く腐食された組織 (矢印) が認められる。一方、71 h の場合、(a) の黒色組織に比べて更に深い範囲にまで WEA (矢印) が認められる。Fig. 4 は 40 h の試料に認められた黒色組織を拡大した図である。同図のように、黒色組織の中に小さな WEA が認められる部分もある。過去の報告<sup>2,5)</sup> では、転がり疲労によって WEA が発生する場合、黒色組織から WEA の順に組織変化が進むことが指摘されており、今回観察された組織変化がそれにほぼ対応している。そこで、WEA 発生初期の組織変化過程を明確にするために、黒色組織に着目して、詳細な観察を行った。

黒色組織の発生位置と旧オーステナイト粒界の関係を確認するために、旧オーステナイト粒界観察用エッチング液 (ピクリン酸 20 g, ドデシルベンゼンスルホン酸ナトリウム 50 g, 塩化ナトリウム 1.5 g, 硫酸ナトリウム 0.7 g, 蒸留水 1 l) を使用してエッチングを行った。その観察例を Fig. 5 に示す。同図の上側が軌道表面方向である。微細な粒状組織は球状炭化物であり、細い線は旧オーステナイト粒界を示している。その粒内に長さ約  $10\text{ }\mu\text{m}$  の黒い針状

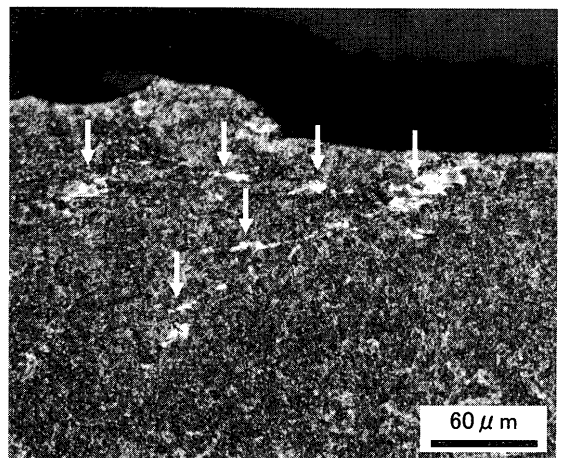


Fig. 2. Optical micrograph of a part of flaking in outer ring tested for 90 h. Arrows show WEA.

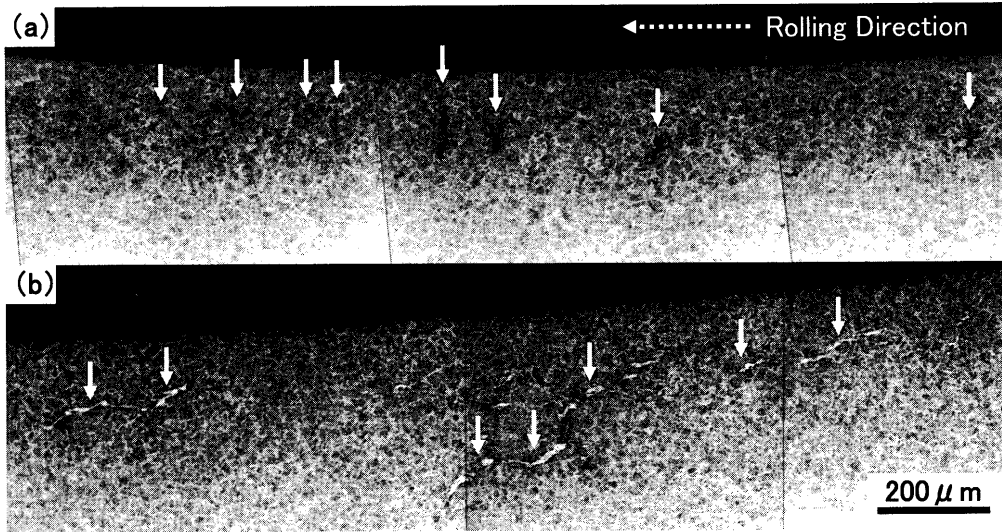


Fig. 3. Optical micrographs of specimens. Etchant is nital. (a) Test time is 40 h. Arrows show black structures. (b) Test time is 71 h. Arrows show WEA.

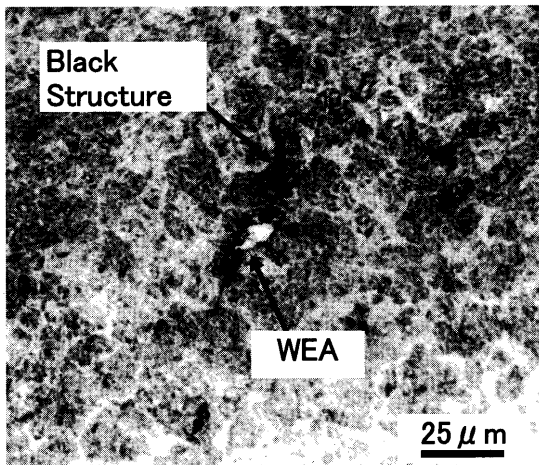


Fig. 4. Optical micrograph of WEA formed in black structure in the specimen tested for 40 h. This specimen was etched with nital.

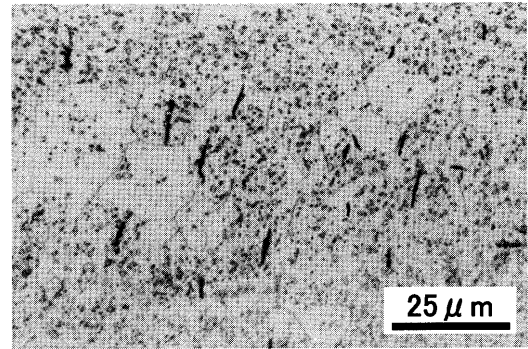


Fig. 5. Optical micrograph of acicular structures in the specimen tested for 40 h. This specimen was etched with etchant to observe prior-austenite grain boundaries. Granular structures are spheroidized carbides and thin line structures are prior-austenite grain boundaries. And needle like structures are acicular structures.

組織 (Acicular Structure) が認められる。このことから、Fig. 3 に認められた黒色組織は、針状の組織が集中して生じている領域が黒く腐食されたものであると考えられる。Fig. 5 から、旧オーステナイト粒界に沿って発生している針状組織よりも、粒内に発生しているものが多いことがわかる。以上の観察結果より、針状組織が旧オーステナイト粒界に沿うよりも、粒内のマルテンサイトに沿って進展しているものと考えられる。

### 3・2 SIM 観察結果

Fig. 5 に示した針状組織について、光学顕微鏡観察面とその断面の SIM 観察を行った。Fig. 6 は FIB による断面作製方法の模式図である。SIM 像から針状組織の断面観察位置を決定し、ガリウムイオンスパッタリングによって矩形の窪みを作製し、図中に矢印で示した壁面の組織観察を行った。

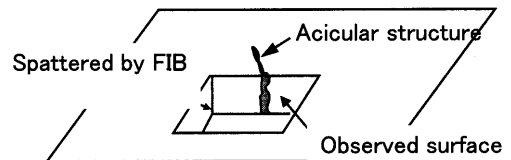


Fig. 6. Schematic diagram showing cross section of acicular structure in the specimen tested for 40 h. The cross section is made by FIB spattering and observed by SIM.

Fig. 7 に針状組織の SIM 観察結果を示す。同図 (a) は Fig. 5 に示した針状組織の部分を観察したものである。光学顕微鏡で針状に見えた部分は筋状の窪みであり、微小なき裂のようにも見える。Fig. 7(a) に示す破線部を FIB にて断面を作製し、その観察結果を Fig. 7(b) に示す。図中の A 部が筋状の窪みに相当する。これより Fig. 7(a) で認められた筋状の窪みは極表面に限られており、内部にはき裂や

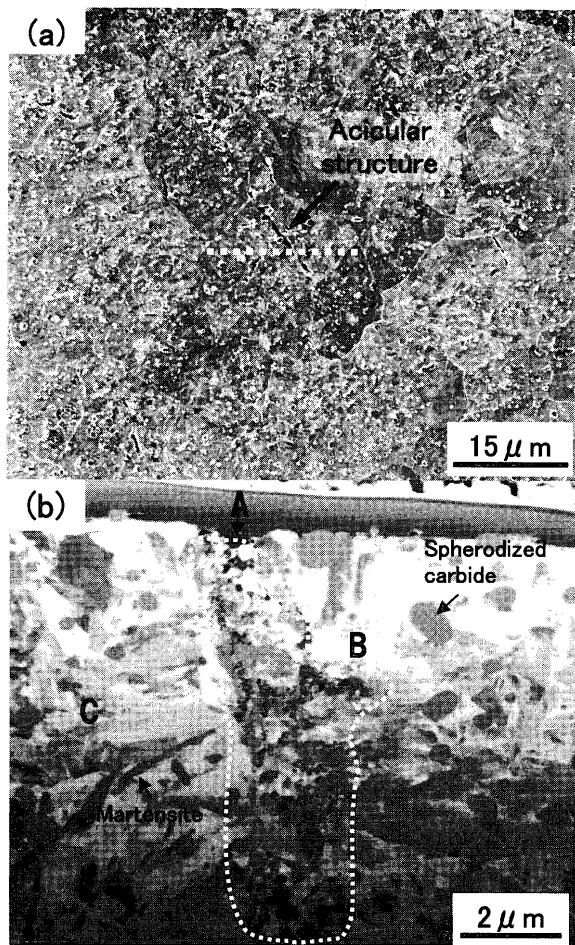


Fig. 7. SIM images of acicular structure in the specimen tested for 40 h. (a) Same surface of observed by optical microscopy. (b) Cross section. A is cross section of acicular structure in (a). B surrounded by dotted line shows structural change area. C is martensite.

空洞は認められない。Fig. 7(b) のC部にはマルテンサイトと球状化炭化物が認められる。それに対し、窪み直下の同図B部の組織はマルテンサイト組織と異なることがわかる。この結果より、光学顕微鏡で針状に見えた組織は、母相のマルテンサイト組織が局部的に変化したものであり、組織変化した部分が優先的にエッチングされたため、黒く見えたものと考えられる。

### 3.3 TEM 像

SIM観察により、針状組織はマルテンサイトが局部的に組織変化したものであることがわかった。そこで、針状組織の微細構造を確認するためにTEM観察を行った。TEM観察用試料はSIM観察を行った部分からFIBによって作製した。

針状組織のTEM観察結果の一例を Fig. 8 に示す。同図(a) は明視野像である。同図中のB部が Fig. 7(b) のB部で観察された組織変化部位に相当する。またC部は母相のマルテンサイトである。C部のマルテンサイトに比べて、B部の組織は微細な組織に変化している。Fig. 8(b) と (c) はそれぞれB部とC部の制限視野回折図形 (SADP) である。C部の SADP はマルテンサイトによる双晶の明瞭な回折斑点が現れているのに対し、微細組織に変化しているB部のSADPはマルテンサイトによるスポットは明瞭ではなく、リングを構成しているようである。このことは、B部には微細な結晶粒が多数存在していることを示唆している。またB部のSADPのリングはBCCのものに相当し、フェライトに近い構造になっているものと思われる。Fig. 9 は微細粒に変化した部分を更に拡大した写真である。微細な粒状組織には、干渉縞が認められる微細粒部分とセル状の転

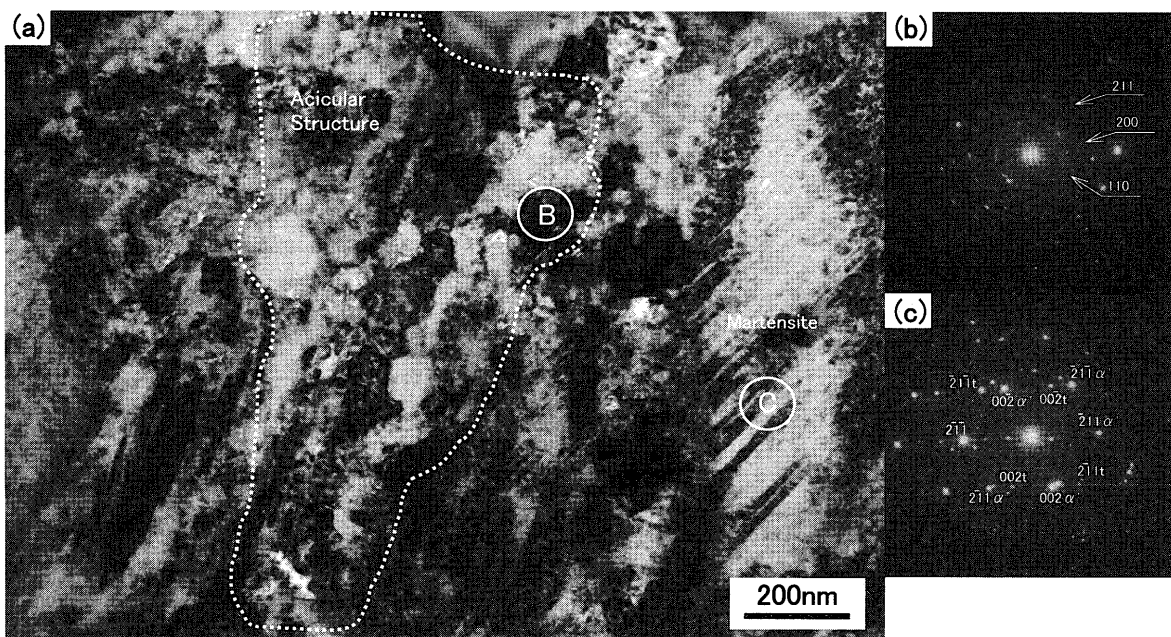


Fig. 8. TEM images of acicular structure in the specimen tested for 40 h: (a) Bright field image, (b) SADP of acicular structure and (c) SADP of martensite. B and C in (a) are same parts of B and C in Fig. 7(b) respectively. There are fine granular structures at B and martensites with twin at C.

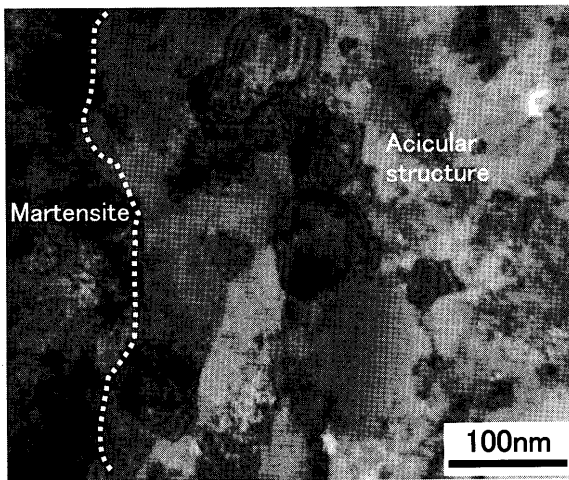


Fig. 9. TEM image of fine grain and dislocation cell like structure around acicular structure.

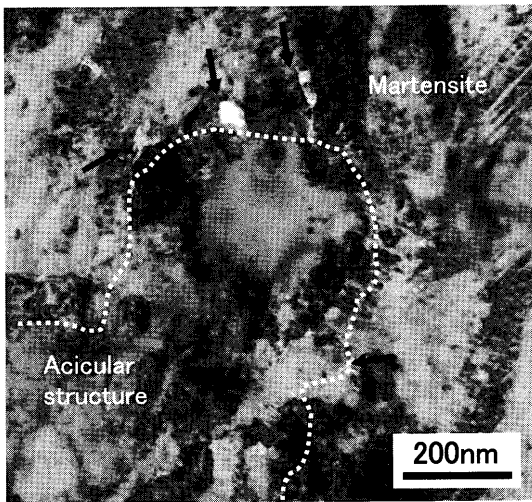


Fig. 10. TEM image of micro-voids around acicular structure. Arrows show micro-voids.

位網が認められる部分がある。また、微細粒に変化した領域の周囲には、Fig.10中の矢印で示したように多数の微小なポイドも認められるが、このようなポイドは微細粒組織が形成される過程で転位や原子空孔が、微細粒内から排出されたために発生したものと考えられる。

#### 4. 考察

H. Swahnら<sup>1)</sup>はDEAやホワイトバンドなどは、接触部内部に生じるせん断応力の影響で発生すると考えている。また、室賀ら<sup>9)</sup>は、WEAの発生形態とすべりによる接線力を考慮したせん断応力分布を結びつけている。そこで、針状組織の発生深さ、発生角度とせん断応力分布を比較した。Fig.11は軌道面と針状組織のなす角度の測定結果であり、Fig.12は針状組織発生の深さ方向の数を測定した結果である。ここで測定した針状組織発生深さは、軌道表面から針状組織の中央部までの深さである。大部分の針状組織

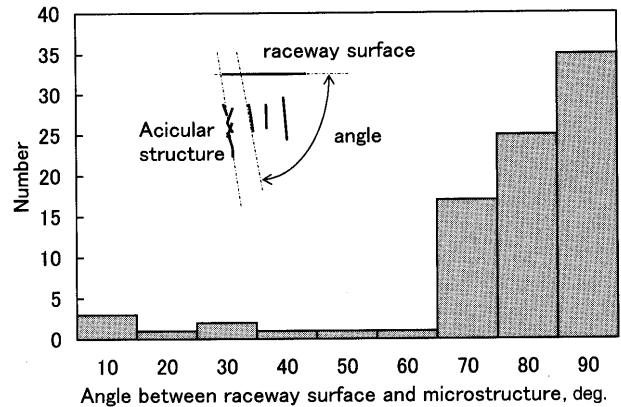


Fig. 11. Distribution of angle between raceway surface and acicular structures.

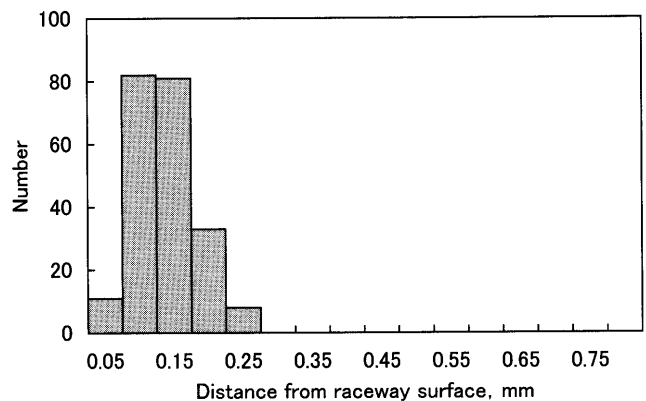


Fig. 12. Distribution of number of acicular structure.

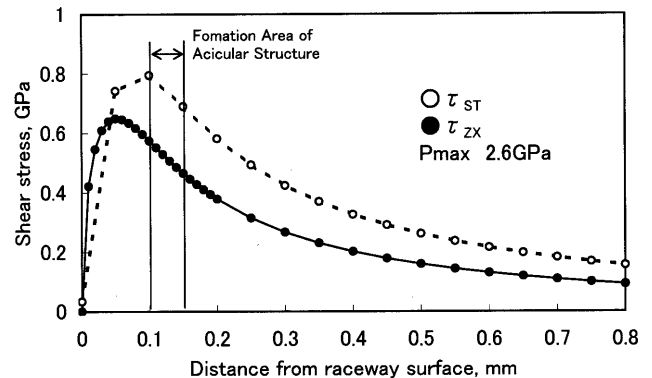


Fig. 13. Distribution of shear stress calculated by K. L. Johnson's equation. The dotted line is  $\tau_{ST}$ . The solid line is  $\tau_{ZX}$ .

は転走面と70~90°の角度で発生している。また、針状組織は表面からの深さ0.05~0.25 mmの位置に発生しており、特に深さ0.1~0.15 mmの領域に集中的に発生していた。K. L. Johnsonの解<sup>10)</sup>により、今回の実験条件における表面から内部方向へのせん断応力分布を計算した結果をFig.13に示す。図の応力分布は、垂直荷重だけを考慮した計算結果であり、接触部のすべりや振動による衝撃力などを考慮に入れてはいない。Fig.13より、せん断応力が最大になる深さは、直交せん断応力 $\tau_{ZX}$ が0.05 mmであり、最大主せん

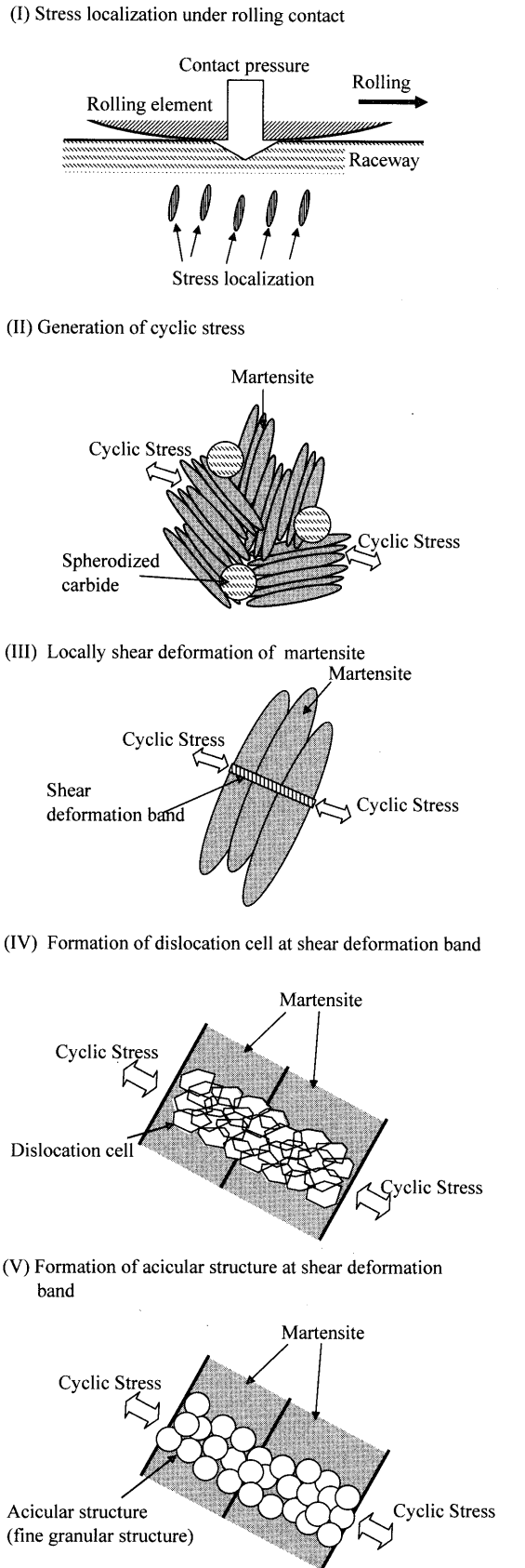


Fig. 14. Schematic diagram of formation of acicular structure and WEA.

断応力  $\tau_{ST}$  が 0.1 mm である。また各せん断応力が生じる方向は、 $\tau_{ZX}$  が軌道表面に平行であり、 $\tau_{ST}$  は軌道表面に対して 45° の方向である。このことから、針状組織の発生深さは転がり接触で生じる内部のせん断応力が最大になる深さとほぼ一致するが、針状組織の発生角度は、せん断応力の方向と異なっていることがわかる。ところで、針状組織のような超微細粒組織はメカニカルリングで超強加工を加えた粉末においても認められている。この場合、粉末があらゆる方向から繰返し塑性変形されるため、容易に超微細粒組織を形成することができる<sup>8)</sup>。このことは、材料内部に複雑な応力が生じることにより組織が超微細化されることを示唆しているものと思われる。これらの結果から、針状組織が発生する際の支配応力は転がり接触によって生じる接触部内部のせん断応力であるが、それに加えて、接触部でのすべりによる接線力や衝撃過重が時間とともに変化するような複雑な動的応力場が影響するものと考えられる。また、Fig.13 のような二次元の応力解析ではなく、三次元の応力解析が必要と考える。これらの点については、今後の研究で明らかにする予定である。

以上のようにして得られた結果から、WEA 発生初期の組織変化は Fig.14 のような過程で進むものと考えられる。

(I) 転がり接触による繰返し荷重により、応力の局在化が生じる。

(II) 局在化した応力がマルテンサイト組織に繰返し作用する。

(III) 局在化した繰返し応力の影響でマルテンサイト組織に微視的なせん断変形が生じる。

(IV) 微視的なせん断変形領域に繰返し応力が作用することにより、転位の再配列が生じ、転位セルが形成される。

(V) 更に繰返し応力が作用し、転位セルが微細粒組織に変化する。この時、微細粒組織の粒界部分に転位や空孔が排出され、微細なボイドが形成される。転位セル組織全体が微細粒組織に変化することにより、最終的に白色組織が形成される。

このような過程で形成される転位セルと微細粒が混在した組織が針状組織であり、それらが集合したものが腐食によって黒色組織として観察されるものと考えられる。

## 5. 結言

2水準の試験時間の急加減速転がり疲労試験機を行い、転走痕直下の組織変化について、詳細観察を行った結果、以下のことがわかった。

(1) WEA の先駆段階に針状組織が発生することが明らかになった。この組織は、マルテンサイト組織が局部的に微細な結晶粒に変化したものであり、マルテンサイトが局部的に大きなせん断変形を受けることにより、微細組織

に変化したものと考えられる。

(2) 針状組織はせん断応力が最大になる深さに集中して発生することが明らかになった。

(3) 針状組織は転走面に対して70~90°の角度を持って発生することが確認された。この発生角度は、せん断応力の角度と合わないことから、針状組織の発生にはせん断応力に加えて第2の応力が影響しているものと考えられる。

本稿をまとめるにあたり、九州大学大学院工学研究院高木節雄教授から貴重なコメントを頂いたことをここに付記し、謝意を表す。

## 文 献

- 1) H.Swahn, P.C.Becker and O.Vingsbo: *Metall. Trans. A*, **7A** (1976), 1099.
- 2) Y.Murakami, H.Takemura and M.Naka: *NSK Tech. J.*, **655** (1993), 1.
- 3) M.Shibata, M.Gotoh, N.Oguma and T.Mikami: Proc. Int. Tribology Conf., JAST, Tokyo, (1995), 1351.
- 4) J.L.O'Brien and A.H.King: *Trans. ASME*, **88** (1966), 568.
- 5) K.Tamada and H.Tanaka: *Wear*, **199** (1996), 245.
- 6) A.Muroga and H.Saka: *Tetsu-to-Hagané*, **84** (1998), 351.
- 7) S.Okita, H.Takemura and Y.Murakami: *CAMP-ISIJ*, **12** (1999), 351.
- 8) H.Hidaka and S.Takaki: *Sanyo Tech. Rep.*, **8** (2001), 9.
- 9) N.Tsuji: *Tetsu-to-Hagané*, **88** (2002), 359.
- 10) K.L.Johnson: *Contact Mechanics*, Cambridge Univ. Press, Cambridge, (1985), 84.