

© 1982 ISIJ

ころがり軌跡上の酸化物系介在物とはく離の関係

論 文

坪 田 一 *

Relation between Oxide Inclusion on the Rolling Track and Flaking

Kazuichi T'SUBOTA

Synopsis :

The results stated below have been revealed on the relationship between the plate-like carbides which form immediately under the rolling track and oxide inclusions present on the track for the specimens tested in the ball/washer thrust type rolling contact fatigue testing machine.

- 1) The plate-like carbides precipitate as carbon diffuses by rolling contact stress in an area of stress concentration between the oxide inclusions on the rolling track and those immediately under the track.
- 2) In the specimens made of vacuum degassed steel, the plate-like carbides begin to present themselves after approximately 10^6 stress repetition at P_{max} of 500 kgf/mm², although its rate depends on amount and size of the inclusions.
- 3) The oxide inclusions found in specimens of the thrust type tester for rolling fatigue do not have a direct influence on causing cracks as stress concentration source. Their stress concentration effects rather work as intermediary to produce the plate-like carbides.

1. 緒 言

鋼中の酸化物系介在物は熱膨張係数が基地のそれより小さいため焼入れにより酸化物系介在物周辺の基地に引張応力が生じ¹⁾, これところがり接触によつて生ずる内部応力とが重なつてころがり疲れ強さを著しく低下させる。溶鋼の真空脱ガス処理によつて鋼中の酸化物系介在物を減少させるところがり疲れ強さが著しく向上することはよく知られている^{2)~9)}。

軸受鋼, 浸炭鋼などの高硬度材の回転曲げ疲れ破面に生成する“Fish eye”の中心に酸化物系介在物がしばしば観察される¹⁰⁾¹¹⁾のもその応力集中作用を示す一つの例証であろう。

一方硫化物系介在物は鋼中で酸化物系介在物を包含していることが多い。このような場合硫化物系介在物は熱膨張係数が基地のそれより大きいため酸化物系介在物の周辺に生ずる引張応力を低下させる作用を有する¹²⁾。事実鋼中の酸化物系介在物を硫化物系介在物が包含するところがり疲れ強さが向上するという報告もある¹³⁾¹⁴⁾。

酸化物系介在物のころがり疲れ強さへの影響はその種類, 大きさによつても異なり, Al₂O₃ 系の介在物の影響は特に大きく⁴⁾¹⁵⁾, また 30 μ 以上の酸化物系介在物が悪影響を及ぼす³⁾。一方許容される介在物の大きさは接触面積と応力によつて定まる¹⁶⁾ともいわれている。

スラスト型ころがり疲れ試験機 (以下スラスト試験機, その試験片をスラスト試験片という) でころがり疲れ試験 (以下スラスト試験という) を行うとはく離総数の約 80% に板状の炭化物状組織 (前報と同様以下板状炭化物と記す) が生成し, これを起点としてはく離が発生することはすでに報告した¹⁷⁾。したがつて板状炭化物が生成しにくい場合はころがり疲れ強さが向上するはずである。

スラスト試験片のはく離の多くは前述のように板状炭化物を起点とするから, スラスト試験機によるころがり疲れ試験でも脱ガスによりころがり疲れ強さが向上する⁷⁾⁸⁾はそれにより鋼中の酸化物系介在物が減少し, それからのき裂の発生が減少したためではなく, 脱ガスによる鋼中の酸化物系介在物の減少によりころがり疲れ試験中に板状炭化物が生成しにくくなったためであると考えられる。すなわち脱ガス処理では鋼中の酸素含有量が低下して大型の酸化物系介在物と酸化物系介在物の総量は減少する¹⁸⁾が鋼の化学成分は目標とする規定された成分に調整して非脱ガス鋼のそれとほぼ同じにすることが可能であり, 結局脱ガス鋼と非脱ガス鋼の差異は鋼中の大型の酸化物系介在物と酸化物系介在物の総量の差のみであるから脱ガス鋼と非脱ガス鋼のスラスト試験片のはく離の大部分が板状炭化物を起点としていることと, 脱ガスによりころがり疲れ強さが向上することを考慮す

昭和 54 年 10 月本会講演大会にて発表 昭和 56 年 8 月 28 日受付 (Received Aug. 28, 1981)

* 山陽特殊製鋼(株)技術研究所 (Technical Research Laboratories, Sanyo Special Steel Co., Ltd., 3007 Nakazima Shikama-ku Himeji 672)

ると酸化物系介在物と板状炭化物の生成の間には何らかの関係があると推考される。

ころがり接触により鋼の内部にあつて外部からは見えない酸化物系介在物からき裂が生じはく離に至る過程を直接観察することは不可能であるがころがり軌跡上の酸化物系介在物は外部から直接観察することが可能であり、もし観察した酸化物系介在物からはく離が発生した場合はその関連が直接明らかとなるので、本実験ではころがり接触によるころがり軌跡上の酸化物系介在物自身の变化とその周辺のき裂発生状況およびき裂とはく離部の下部組織を調査した。

その結果ころがり軌跡上の酸化物系介在物の直下にくろがり方向ところがり軌跡に直角の板状炭化物が生成し、その後のころがり接触によつてはく離に至ることが明らかとなつた。

板状炭化物はころがり応力によつて拡散した炭素がころがり軌跡の直下で捕捉され析出したものと考えられることができるから、スラスト試験におけるはく離に対する酸化物系介在物の作用は単に応力集中によるき裂発生源としてではなく板状炭化物の生成媒体としてであることが判明した。

2. 実験方法

2.1 供試材

本実験に供した鋼は真空脱ガス処理をした 1.0% C-1.4% Cr 鋼、および 1.0% C-1.0% Mn-1.4% Cr 鋼である。これらを焼入れ焼もどしにより HRC 62~63 に調質してスラスト試験片とした。

2.2 ころがり疲れ試験機

本実験のころがり疲れ試験をすべて前報と同様スラスト試験機で行つた。スラスト試験片のころがり面は鋼材の圧延方向に直角の断面である。試験条件を以下に示す。

- ・最大ヘルツ応力 (P_{max}) ; 500 kgf/mm²
- ・潤滑油 ; 60 スピンドル油
- ・潤滑油温 ; 30~31°C
- ・応力くり返し速度 ; 1800 cpm
- ・試験片表面仕上げ ; パフ研磨 (鏡面)

2.3 ころがり軌跡上の介在物とき裂の観察

本実験でははく離発生以前のころがり軌跡上に生成するき裂をあらかじめ定めた応力くり返し数ごとに試験片を保持枠に固定したままスラスト試験機から取りはずし、光学顕微鏡で観察した。

また次の方法でころがり軌跡上の酸化物系介在物からのき裂の発生と、き裂とはく離の関係を調査した。

(イ) スラスト試験片を保持枠に固定し無潤滑状態で約 100 回くり返し応力を加えころがり軌跡を明瞭にする。

(ロ) 試験片を保持枠に固定したまま試験機から取り外し、ころがり軌跡上の酸化物系介在物を光学顕微鏡で観察し写真撮影する。

(ハ) その後潤滑状態でくり返し応力を加えはく離発生までの酸化物系介在物の周辺の変化を観察する。はく離までの途中の状況を観察するときは試験機と保持枠の着脱をくり返し、単にはく離ところがり軌跡上の酸化物系介在物の関係を求める場合には途中の着脱はしなかつた。

なお本実験ではころがり軌跡を光学顕微鏡で観察し、ふたたび試験機に設置したときもとの軌跡からずれることのないようにするため試験片を保持枠に固定したまま着脱を行つた。

2.4 介在物の種類の判別と介在物直径の計算方法

本実験では光学顕微鏡により 400 倍でころがり軌跡上の介在物を観察し、その色調によつて硫化物と酸化物とを判別した。約 4 μ 以下の介在物は硫化物と酸化物の判別が不可能なのでそれらは調査の対象としなかつた。なお本実験の場合調査対象としなかつた介在物からはくり返し応力を加えた後も何の変化も生じなかつた。

また本実験でははく離が発生する限界介在物寸法を知るため介在物の直径を介在物と等しい面積を有する円の直径に換算した。なおころがり軌跡下のマイクロ観察時の試片切断方法は前報と同様である。

3. 実験結果

3.1 ころがり軌跡上に生成するき裂と下部組織

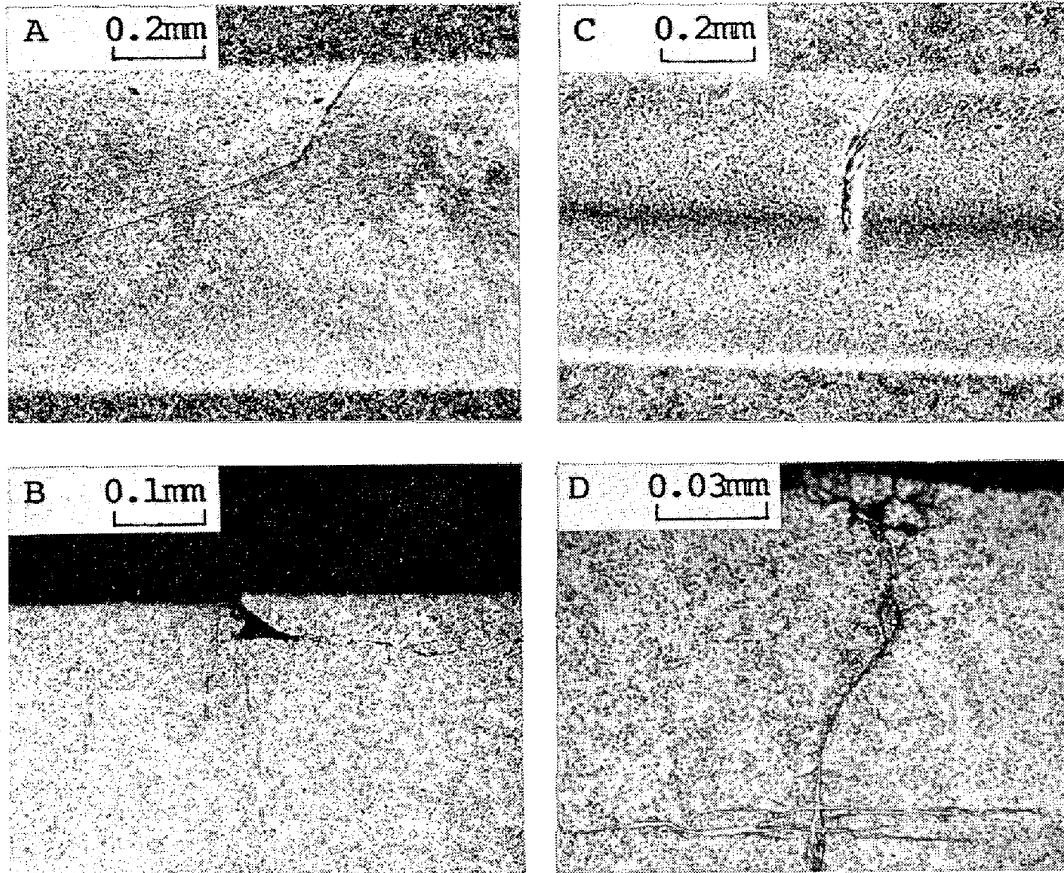
はく離はころがり軌跡上の微小き裂などを起点とする表面起点はく離と、非金属介在物などの内部欠陥を起点とする内部起点はく離とに分類されている¹⁹⁾。

しかしすべての表面起点はく離がころがり接触を受ける前から存在する表面き裂から発生するとは考えられずころがり接触を受けることによつてはく離の直前にくろがり軌跡上に生成したき裂から生ずることも考えられる。また内部起点はく離でもある時点ではく離が突然発生するのではなく、はく離が発生する前に板状炭化物を起点に内部に生成したき裂が拡大伝播してころがり軌跡面に達し、ころがり軌跡面上にも何らかのき裂が出現すると考えられる。

そこではじめにはく離が発生する前にころがり軌跡上に出現するき裂とはく離の関係を調査した。

HRC 62~63 に調質した SUJ-2 についてスラスト試

— Rolling direction



A : Surface crack-1. Stress cycles : 8.4×10^5 .
 B : Substructure of A., (Microcrack. Section is perpendicular to the rolling direction and rolling surface.)
 C : Surface crack-2. Stress cycles : 1.23×10^7 .
 D : Substructure of C. (Plate-like carbide. Section is tangential to the rolling track and perpendicular to the rolling surface.)
 Specimen : 1.0%C-1.4%Cr bearing steel. P_{max} : 500 kgf/mm².

Photo. 1. Surface crack found on rolling track.

試験片のころがり軌跡上に生成するき裂を観察した結果 Photo. 1 に示す 2 種類のき裂がはく離の発生以前に生成することが明らかとなった。

Photo. 1-A に示したき裂は応力くり返し数 8.4×10^5 で生成したものである。同一鋼番の試験片でもこのようなころがり軌跡上で途中で折れまがり、比較的鋭い表面き裂のように観察されるき裂を示す試験片群のころがり疲れ強さはかなり低い。そこでこの種のき裂を生じた試験片を調査したところころがり軌跡に研磨焼けが生じている場合にそれが生成することが判明した。このき裂の下部組織は Photo. 1-B に示すように単なるき裂であり、このようなき裂は研磨焼けによりころがり軌跡に生じた微小き裂が、研磨により生じた引張残留応力などにより表面にき裂が生成しやすくなった²⁰⁾ため生じたもので表面起点ははく離の原因になると考えられる。

ころがり軌跡に生成する他のき裂は Photo. 1-C に示すようなころがり方向に直角に生成するものである。

このようなき裂は 1 枚の試験片上に複数個生ずる場合もあるが、多くは 1 個でありこのようなき裂から生じたはく離を多く観察した結果はく離底の直下に板状炭化物が生成していることがわかった。

そこでこのようなき裂が生成した時点で応力くり返しを中止し、その直下のマイクロ組織を多数観察したところ Photo. 1-D に示したような板状炭化物が生成していることが判明した。

Photo. 1-C のようなき裂がころがり軌跡に生成するとその直下に板状炭化物が生成していることが判明したので、このようなき裂が生ずるころがり軌跡の、ころがり接触を受ける前の様相がわかれば板状炭化物の生成条件が判明する可能性がある。

なお前報でも述べたようにスラスト試験片のはく離の大部分はころがり軌跡下に生成する板状炭化物を起点とするからすでに古村ら²¹⁾も述べているようにこのはく離は内部起点はく離に属する。

3.2 ころがり軌跡上の 酸化物系介在物と 板状炭化物生成の関係

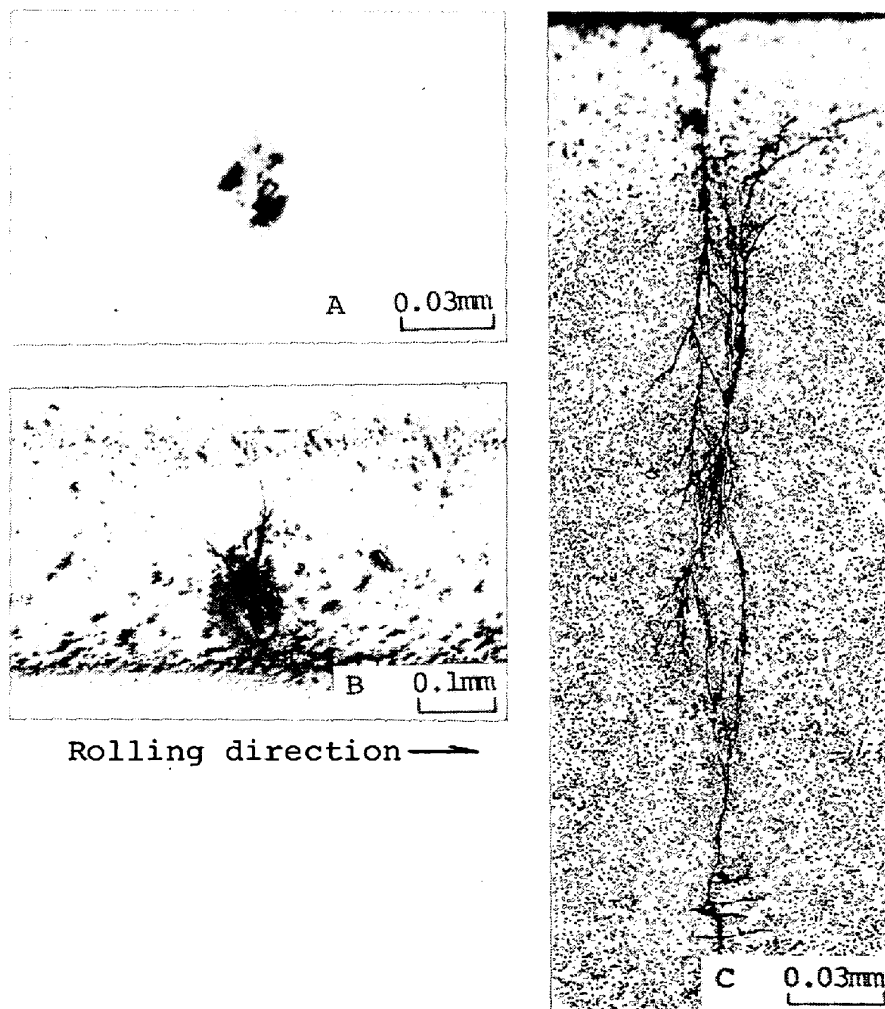
緒言で述べたようにスラスト試験の場合酸化物系介在物と板状炭化物の生成の間には何らかの関連があるはずである。スラスト試験機では試験片を保持枠に取りつけたまま試験機から取り外しころがり軌跡上の酸化物系介在物を観察することが可能であり、再び試験機に保持枠を設置してもころがり軌跡が元の軌跡からずれることはないので試験中にくろがり軌跡上の酸化物系介在物の変化を直接観察することができる。そこでころがり軌跡上の酸化物系介在物のころがり接触による変化を観察し板状炭化物生成との関連を調査した。

Photo. 2 は 7×10^6 回の応力くり返し後ころがり軌跡上の酸化物系介在物からころがり方向と直角のき裂が明瞭に発生したので試験を中断しその下部組織を観察した

結果である。Photo. 2 ではころがり軌跡上の酸化物系介在物の直下にころがり軌跡とほぼ直角に板状炭化物が生成している。

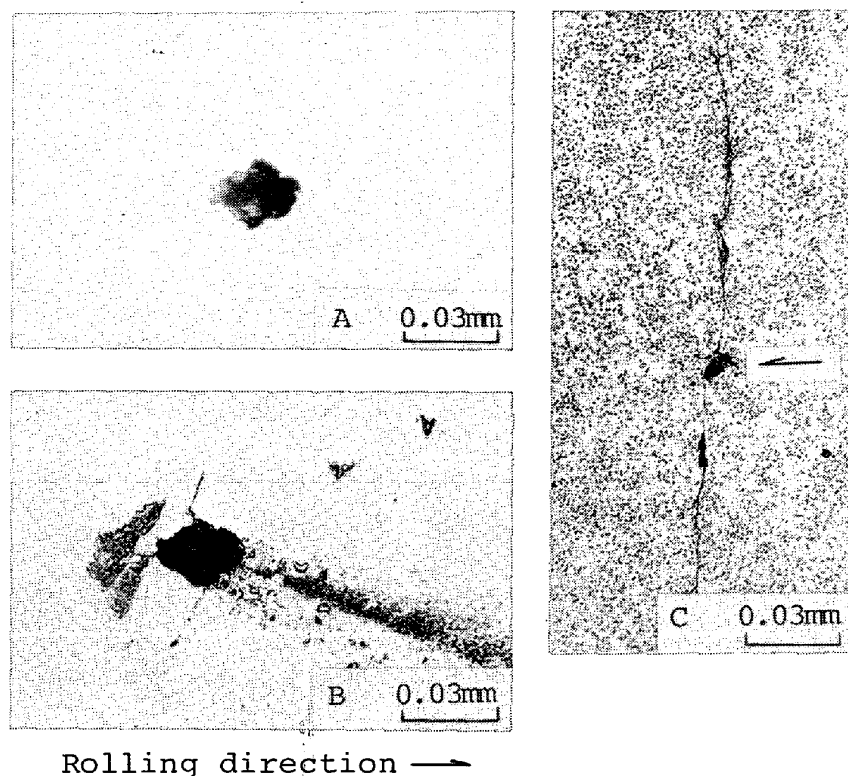
一方ころがり接触により酸化物系介在物が破碎されころがり軌跡にきず跡が生ずることがある。Photo. 3 はそのような例で酸化物系介在物が破碎されて潤滑油の流れに乗って流出し、ころがり軌跡にきずを付けた様子が表れている。この流出角度は軌跡幅(約 0.64 mm)の中央ではころがり軌跡の接線に対しほぼ 0° であり、中心から両端 0.25 mm では約 45° になり、その間ほぼ直線的に角度が増加した。

本実験ではこのような介在物の流出現象が 1.0×10^6 回以上の応力くり返しを受けたスラスト試験片 16 枚において合計 33 ヶ所認められ、そのうち 26 ヶ所の流出介在物の直下に Photo. 3-C のような板状炭化物が観察



A : Oxide inclusion.
 B : Surface crack generated from the inclusion.
 C : Plate-like carbide under the track. (Section is tangential to the rolling direction and perpendicular to the rolling surface.)
 P_{max} : 500 kgf/mm². Stress cycles : 7×10^6 . Specimen : 1.0%C-1.0%Mn-1.4%Cr bearing steel.

Photo. 2. Oxide inclusion on rolling track and plate-like carbide developed under the inclusion.



A : Oxide inclusion.
 B : Oxide inclusion destroyed by rolling contact.
 C : Plate-like carbide under the inclusion. (Arrow indicates oxide inclusion at 0.06 mm deep from surface.
 Section is parallel to the rolling surface.)
 P_{max} : 500 kgf/mm². Stress cycles : 5×10^6 . Specimen : 1.0%C-1.0%Mn-1.4%Cr bearing steel.

Photo. 3. Oxide inclusion on rolling track and plate-like carbide under the track.
 (Example of inclusion destroyed by rolling contact.)

された。したがってこのような介在物の流出現象ははく離発生前にかかなりの頻度で起こりその直下には板状炭化物が生成してはいずれははく離が発生すると考えられる。

Photo. 4 は 1.6×10^6 で酸化物系介在物の流出現象が認められその後き裂が生成したのではなく離発生まで試験し、その下部組織を観察した結果である。この場合表面から順次表面に平行に削り込んでマイクロ組織を観察した。その結果最初に発生した表面き裂の直下に当たる場所に板状炭化物が生成しており、さらに表面下約 0.18 mm に再び Al_2O_3 を主成分とする酸化物系介在物が存在していた。

なお本実験においてははく離部、Photo. 1-C のようにころがり方向にはほぼ直角に生成したき裂、および Photo. 3-B のように粉を吹き出した介在物の直下など種々の実験上の経験から板状炭化物が生成していると考えられるころがり軌跡上の場所を合計 51ヶ所切断しその下部組織を観察したところそのすべてに板状炭化物が観察され、さらにそのうち 29 例 (約 57%) にころがり軌跡直下の最大せん断応力作用域にも酸化物系介在物が

観察された。

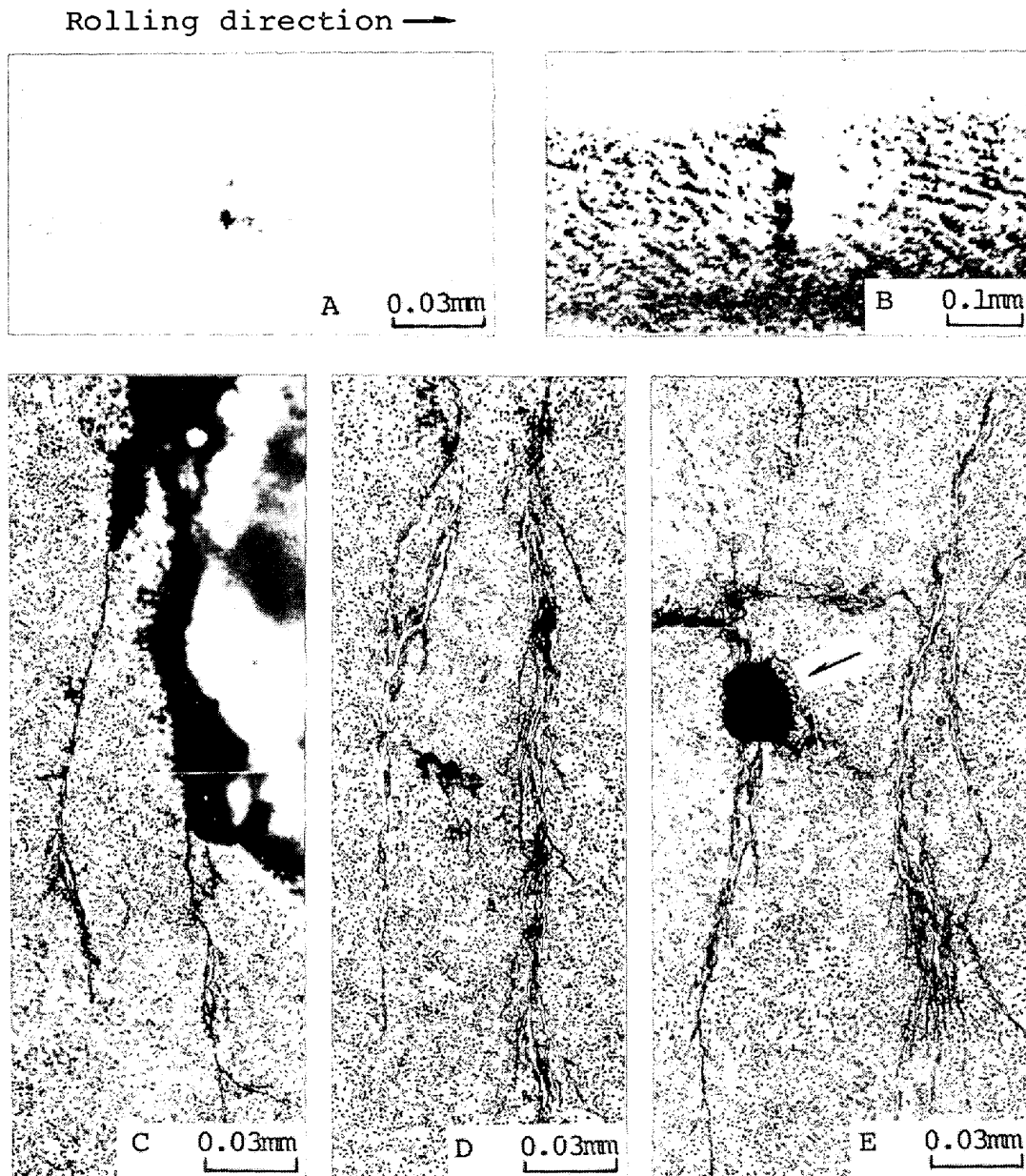
本実験の場合個々のころがり軌跡上には 4μ 以上の酸化物系介在物が 4~15ヶ観察されたが板状炭化物が生成したのはそのうちの 1ヶであり、他の大部分のものからは何の変化も生じなかつた。このことと上述の結果からスラスト試験の場合ころがり軌跡上に存在する単独の酸化物系介在物は、よほど大型の場合は別として、直接き裂の生成源にはならないことがわかる。

なお本実験でころがり方向と直角のき裂が生成しその直下に板状炭化物が観察された最小介在物直径は Photo. 4 の約 5μ であり、最大のものは約 40μ であつた。

3.3 板状炭化物の生成と応力くり返し数の関係

以上のようにころがり軌跡上に存在する酸化物系介在物の直下に板状炭化物が生成することが判明したのでつぎにその生成に要する応力くり返し数を調査した。

なおころがり軌跡上の酸化物系介在物の直下のマイクロ組織観察用の試験片は約 $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ の表面積でありころがり軌跡もほぼ同程度の長さにわたつて観察されるが、板状炭化物は酸化物系介在物の直下にしか観察さ



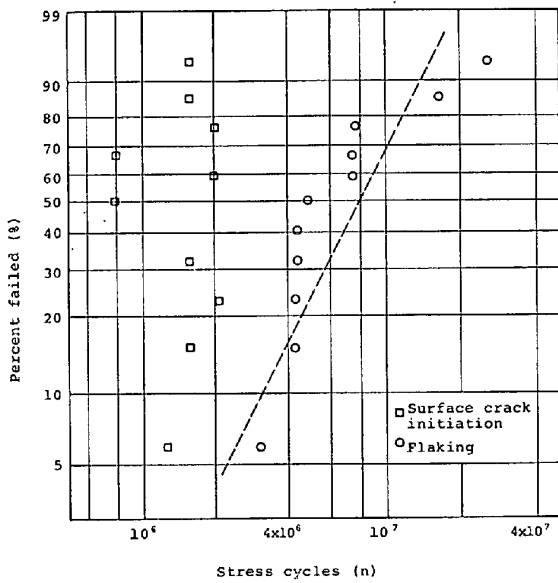
A : Oxide inclusion on rolling surface.
 B : Surface crack generated from the inclusion.
 C : Plate-like carbide near the flaking (0.07 mm deep from surface.).
 D : Plate-like carbide (0.12 mm deep from surface.).
 E : Plate-like carbide and inner oxide inclusion (Arrow indicates oxide inclusion at 0.18 mm deep from surface.). (Section of C D and E is parallel to the rolling surface.)
 P_{max} : 500 kgf/mm² Stress Cycles : 2.62×10^7 . Specimen : 1.0%C-1.0%Mn-1.4%Cr bearing steel.

Photo. 4. Plate-like carbide developed between oxide inclusion on rolling surface and inner inclusion.

れなかつた。したがって本実験の範囲では酸化物系介在物の存在しない場所に板状炭化物が生成するとは考えられない。

Fig. 1 は同一試料においてころがり面上に Photo. 1-C のようなころがり方向と直角のき裂が発生した応力くり返し数とはく離が発生したそれとを Weibull 確率紙にプロットしたものである。この結果によるところがり軌跡上にき裂が最初に発生するのは $8 \times 10^5 \sim 2 \times 10^6$

以前であり、このき裂が発生した時点では前述のように下部に板状炭化物がすでに発生しているから、ころがり軌跡を完全に連続的に観察することは不可能である点を考慮すると、板状炭化物はほぼ 10^6 回で生成しはじめると考えてよいであろう。この結果から板状炭化物の生成は寿命 (はく離発生までの総応力くり返し数) の比較的初期 (L_{10} 寿命 (90% 残存確率寿命) の約 1/3) であることがわかる。



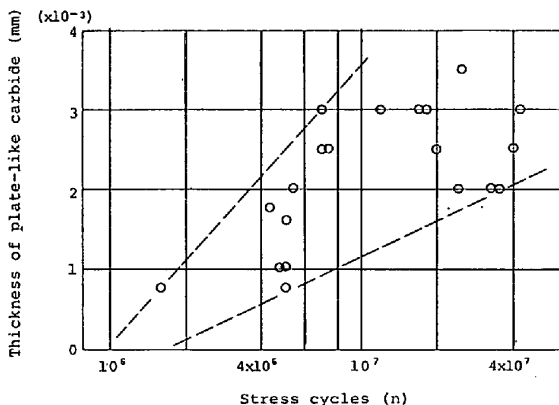
P_{max} : 500 kgf/mm².
Specimen : 1.0%C-1.0%Mn-1.4%Cr bearing steel.

Fig. 1. Relation of stress cycles between surface crack initiation and flaking.

Fig. 1 は実験途中で試験片と試験機の着脱をくり返した断続運転による結果であるが、この場合の L_{10} 寿命は別に行つた連続運転による L_{10} 寿命とほぼ同じであつた。

Fig. 1 の場合の各々のはく離は異なる応力くり返し数で発生しているが板状炭化物の生成時期はほぼ一定しており寿命の大部分は板状炭化物の成長速度の差によつて決まるようである。

また 1.0%C-1.4%Cr 鋼と 1.0%C-1.0%Mn-1.4%Cr 鋼についてははく離の直下に生成した板状炭化物のうちはく離ごとに最も厚肉のものを選びその厚さと応力くり返し数との関係を求めたものが Fig. 2 である。板状



P_{max} : 500kgf/mm²
Specimen : 1.0%C-1.4%Cr bearing steel and 1.0%C-1.0%Mn-1.4%Cr bearing steel.

Fig. 2. Relation of thickness of plate-like carbide and stress cycles.

炭化物は1つのはく離の直下に多数生成していることが多いのでその中の最も厚肉のものが最初に生成したものと仮定し、他の肉厚の薄いものはさらに後で生成したと考えると板状炭化物の生成に要する応力くり返し数を求めるには最も厚肉のものと応力くり返し数の関係を求めるのが妥当であろう。

Fig. 2 から板状炭化物はほぼ 10^6 回の応力くり返しで生成しはじめることになり Fig. 1 の結果とほぼ同様である。

以上の結果真空脱ガス鋼の場合板状炭化物はほぼ 10^6 回前後の応力くり返し数で生成しはじめることが明らかとなつた。

4. 考 察

4.1 板状炭化物の生成

本実験の結果板状炭化物の生成ところがり軌跡上の酸化物系介在物の間には密接な関係があることがわかつた。

従来から酸化物系介在物はその応力集中作用によりころがり疲れ強さを低下させるとされてきた。スラスト試験片のはく離も酸化物系介在物などを起点として直接発生するき裂から生ずる場合と、板状炭化物を起点として発生する場合が考えられるが、前報で述べたようにスラスト試験片のはく離の約 80% は後者を起点とするから板状炭化物が支配的なはく離発生原因であると考えられる。したがつてスラスト試験の場合酸化物系介在物は単に応力集中作用によつてき裂を発生させるのではなく、板状炭化物の生成媒体として作用することによりころがり疲れ強さに影響することがわかつた。

本実験は鋼材の圧延方向に直角の断面上で行つており介在物はころがり面に直角の断面上に分布している。したがつてころがり面上の酸化物系介在物の直下に別の酸化物系介在物が存在する確率は高いはずである。しかしころがり面上の大多数の酸化物系介在物の直下には板状炭化物は生成せず、3.2 に述べたように内部にも酸化物系介在物が存在した場合に生成する例が約 57% 見出されたことは注目し得る。

ころがり軌跡上の酸化物系介在物の直下に生成した板状炭化物をマイクロ観察したとき、内部の酸化物系介在物を見落とす可能性はかなり大きいと考えられるからころがり軌跡上に酸化物系介在物が存在し、その直下に板状炭化物が生成した場合でも内部の酸化物系介在物が見出せない可能性は十分ある。

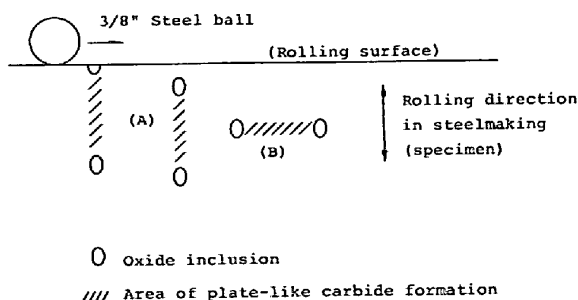
このような点を考慮すると板状炭化物は Photo. 3, 4 に示したようにころがり軌跡上の酸化物系介在物と、そ

の直下の最大せん断応力作用域附近に存在する酸化物系介在物との間の応力集中域にころがり接触応力によつて拡散した炭素が捕捉されて析出して生成すると考えてよいであろう。またころがり軌跡上の酸化物系介在物がころがり軌跡の直下に埋まっている場合も同様であろう。この生成機構によつてころがり軌跡に直角に板状炭化物が生成することが理解できる。

一方スラスト試験片にはころがり軌跡に平行な板状炭化物も生成する。また前報でも述べたように介在物の並び方がころがり軌跡に直角なスラスト試験用 3/8" 鋼球のポール部でもころがり軌跡に平行な板状炭化物が生成する。

これらの板状炭化物は前述のころがり軌跡に直角なそれの生成機構を参考にするところがり軌跡の下に偶然存在したころがり軌跡に平行な面上の酸化物系介在物間に生成すると考えてよいであろう。しかしこのような介在物の分布確率は本実験のごとく圧延方向に直角の断面上で試験する場合あまり高いとは考えられず、本実験でもころがり軌跡に直角の板状炭化物の方が平行なものより多く観察されている。以上をまとめると板状炭化物の主要な生成位置は Fig. 3 のようになり、Fig. 3-A をころがり面に平行な面でころがり面側から観察すると Photo. 3-C のようになり、Fig. 3-B をころがり面に直角でかつころがり軌跡に接する面で観察すると Photo. 1-D の下方のころがり面に平行な板状炭化物として観察される。

板状炭化物の主要な生成機構は以上のように考えられるが板状炭化物の大きさと介在物寸法の関係などについてはまだ明らかになつていない。また複雑な生成形態を有するすべての板状炭化物の生成を説明するには Fig. 3 のみでは若干無理もあると思われる。しかし Fig. 3 に示した機構が本実験から推考される板状炭化物の生成機構の主要なものであることは間違いないであろう。



A : Plate-like carbide perpendicular both to the rolling surface and rolling direction.
 B : Plate-like carbide parallel to the rolling surface.

Fig. 3. Area of plate-like carbide formation.

White etching constituent (WEC) は酸化物系介在物の周辺に生じたき裂がころがり接触でこすられ発熱してその周辺がオーステナイト化し、炭化物が溶解し、その後急冷されて炭素を過飽和に固溶して生成したマルテンサイトである²³⁾といわれている。

一方板状炭化物にはその周辺にき裂をとまなるものもあるが WEC のようにその厚さ方向の中心にき裂が見られるものはむしろ稀であり、WEC と比較すると WEC より薄肉のものが多く、その長さ(直径と同じ意)も板状炭化物の方がかなり大きいものが多い。もし板状炭化物が WEC のように先行き裂の部分へ炭素が拡散して生成すると考えると、むしろ板状炭化物が生成する前にその先行き裂からはく離が発生すると考えられ、板状炭化物が生成する前に先行き裂が存在したとは考えられない。このように板状炭化物は先行き裂が原因となつて生成するものではなく、この意味で WEC の生成機構とは異なると考えられる。

なおころがり軌跡の接線に直角に板状炭化物が生成する理由は現在不明である。ころがり中の接触域の形状が軽度の隋円状になりころがり方向の方が短径になると関係があるかもしれない。

4.2 板状炭化物の生成と応力くり返し数の関係

$P_{max} = 500 \text{ kgf/mm}^2$ の場合真空脱ガス鋼において板状炭化物の生成に要する応力くり返し数は Fig. 1 では最も少ない場合 8×10^5 回以下であり、多い場合でも 2×10^6 回である。また板状炭化物の厚さと応力くり返し数の関係から求めた最少生成応力くり返し数は約 10^6 回である。

一方非脱ガス鋼の P_{max} が 500 kgf/mm^2 でのスラスト試験における L_{10} 寿命は大体 $(5 \sim 9) \times 10^5$ であり、その鋼のはく離も板状炭化物を起点とすることはわかっている²³⁾ので、板状炭化物の生成は 5×10^5 以下の応力くり返し数でも可能であることがわかる。非脱ガス材は酸化物系介在物が多くしかも寸法も大きいから板状炭化物が生成しやすいと考えられる。

これらの結果から板状炭化物の生成速度は鋼中の酸化物系介在物の量と大きさによつてかなり変動することがわかる。

Fig. 1, 2 の結果は通常の脱ガス鋼における板状炭化物の生成限界応力くり返し数を示すものと考えられるがいずれにせよ鋼中の酸化物系介在物の量と大きさによつてはかなり早い時期に生成するといえる。

また本実験でマイクロ組織的観察により確認された板状炭化物の生成をもたらす限界酸化物系介在物の直径は約 5μ であつたが、マイクロ組織観察では真の介在物直径を

観察することはできないから、400倍程度で検鏡した時一応その組成が判別できる程度の酸化物系介在物は板状炭化物の生成に寄与すると考える方が妥当であろう。

前報にも述べたように板状炭化物は数%の炭素を含んでいるからそれが生成するためにはかなりの量の炭素の拡散が必要である。板状炭化物はころがり接触応力によつて拡散した炭素²⁴⁾が酸化物系介在物間の応力集中域で捕捉され、析出したものと考えられるから $P_{max}=500$ kgf/mm² の応力により常温でもかなり炭素が拡散することがわかる¹⁷⁾。

5. 結 論

鋼中の酸化物系介在物と板状炭化物の生成との関係を調査した結果次のことが判明した。

(1) 板状炭化物はころがり軌跡とその直下に存在する酸化物系介在物の間の応力集中域でころがり接触応力によつて拡散した炭素が捕捉され析出して生成する。

(2) 板状炭化物の生成は酸化物系介在物の量と大きさに依存するが、真空脱ガス鋼の場合 P_{max} が 500 kgf/mm² では約 10⁶ 回の応力くり返しで生成しはじめる。

(3) スラスト試験機によるころがり疲れ強さに対する酸化物系介在物の影響は単に応力集中作用によりき裂を発生させるのではなく、応力集中作用によつて板状炭化物の生成媒体として作用する。

最後に本研究に対し多大の御支援、御指導いただいた当社副社長上杉年一博士、専務取締役小柳 明博士、技術研究所前所長石原晟好氏、同所長多田 強氏、同次長坂上高志氏、および本研究の遂行に当たり御協力いただいた方々に厚く感謝いたします。

文 献

1) D. BROOKSBANK, K. W. ANDREWS: JISI, 207 (1969), p. 474

2) R. F. JOHNSON and J. F. SEWELL: JISI, 196 (1960), p. 414
 3) L. O. UHRUS: "Clean Steel", Iron Steel Inst. Spec. Rep., No. 77 (1963), p. 104
 4) J. D. HURRAY and R. F. JOHNSON: "Clean Steel", Iron Steel Inst. Spec. Rep. No. 77 (1963), p. 110
 5) D. ROUSSEAU, L. SERAPHIN, and R. TRICOT: "Bearing Steels", The rating of nonmetallic inclusion, ASTM, Special Publz, STP 575, p. 49
 6) M. KINOSHI and A. KOYANAGI: 同上, p. 138
 7) 結城 晋, 梶川和男, 山口 旻: 鉄と鋼, 51 (1965), p. 2071
 8) 太田隆美, 岡本一生, 仕幸三郎: 同上, 53 (1967), p. 876
 9) 高田浩年: 潤滑, 14 (1969), p. 485
 10) 喜多 清, 清重正典, 高瀬孝夫: 同上, 59 (1973), p. 1550
 11) 横堀武夫: 材料強度学, 第2版 (岩波全書) (1974), p. 283 [岩波書店]
 12) D. BROOKSBANK and K. W. ANDREWS: JISI, 208 (1970), p. 582
 13) C. M. LYNE, A. KASAK: Trans. ASM, 61 (1965), p. 10
 14) S. ENEKES: JISI, 210 (1972), p. 83
 15) 結城 晋, 梶川和男, 山口 旻: 鉄と鋼, 52 (1966), p. 747
 16) 曾田範宗: 軸受 (岩波全書) (1966), p. 159 [岩波書店]
 17) 坪田一一: 鉄と鋼, 68 (1982), p. 1046
 18) 荒谷清平: 鋼の真空溶解および真空脱ガス法の進歩 (日本鉄鋼協会共同研究会特殊鋼部会編) (1969), p. 117 [日本鉄鋼協会]
 19) W. E. LITTMANN: Trans. ASME, J. of Basic Engr, 89 (1967), p. 624
 20) 曾田範宗: 軸受 (岩波全書) (1966), p. 169 [岩波書店]
 21) 古村恭三郎, 平川 清: 電気製鋼, 46 (1975), p. 163
 22) H. SCHLICHT: HTM, 28 (1973), p. 112
 23) 未発表
 24) R. OSTERLUND, M. AUCOUTURIER, and O. VINGSBO: Scand. J. Met., 10 (1981), p. 67