レールダークスポットの再現*

兼田 楨 宏^{*1}, 松田 健 次^{*1}, 村 上 清 人^{*1}
西川 宏 志^{*1}, 杉 野 和 男^{*2}

Reproduction of Rail Dark-Spot Defects

Motohiro KANETA, Kenji MATSUDA, Kiyoto MURAKAMI,
Hiroshi NISHIKAWA and Kazuo SUGINO

A newly developed two-disk rolling-sliding contact machine has been used to investigate rail dark-spot defects or rail shelling occurring frequently on running surfaces of railway rails carrying high-speed traffic. Experiments have been carried out by changing the slide-to-roll ratio under various lubrication modes. As a result, it has been found that dark-spot defects, which are very similar to those appearing in actual rails, are produced only by frequent repetition of dry and water lubrications. That is, the surface of the rail containing the crack, which propagates at an acute angle to the surface not only in the direction of motion of the load but also in the opposite direction, sinks a little and becomes dark. Experiments have also confirmed that water that has entered the crack plays an important role in the crack growth.

Key Words: Tribology, Railway, Fatigue, Crack Propagation, Contact Problem, Lubrication, Shelling, Dark Spot

1. 緒 言

新幹線をはじめとする列車の高速化は、近年著しい進展を見せている。それに伴い、レール頭頂面が黒斑を呈して凹むダークスポット(あるいは頭頂面シェリング⁽¹⁾)と呼ばれる転動接触疲労損傷が増加する傾向にある。ダークスポット損傷部に存在するき裂は、転がり軸受、歯車、圧延ロールなどの転がり-滑り接触下で発生する通常の疲労き裂とはその形態が全く相違している。すなわち、ダークスポット部の縦断面には、図1に示すように、多くの副き裂を伴いながら列車の進行方向に進展する主き裂のほか、列車の進行方向とは逆方向に進展する後方き裂が存在している。副き裂の一部は、下方に伝ばし、最終的にレールを折損させる場合がある。そこで、このダークスポットの発生機構の解明ならびにその防止法の確立は緊急かつ重要な課題である。

ダークスポットの発生は、乾燥トンネル内では少なく、力行区間が多いと考えられる高速鉄道レールに多

く発生するという事実から、水分と接線力がその発生に関与していると考えられている⁽²⁾。しかし、いまだその発生をもたらす本質的要因については明らかにされていない。また、著者らの知るかぎり、実験室においてダークスポットを再現・観察した例も報告されていない。ダークスポットの実験室での再現は上記課題の早期解決のためには必要不可欠と考えられる。

本研究の目的は、上記事実を考慮し、二円筒転がり試験機を用いて、接線力および水分が転がり疲れき裂の発生と伝ばにどのような影響を及ぼすかを把握する

図1 実レールのダークスポットき裂

* 原稿受付 1994年12月14日。

^{*1} 正員, 九州工業大学工学部 (〒804 北九州市戸畑区仙水町1-1)。^{*2} 正員, (株)峰製作所 (〒804 福岡県粕屋郡古賀町駅東4-1-1)。

表 1 素材の化学成分および機械的性質

Chemical Composition (%)					Mechanical Properties				
C	Si	Mn	P	S	Tensile strength (MPa)	0.2% proof stress (MPa)	Elongation (%)	Reduction of area (%)	Vickers hardness
0.69	0.26	0.94	0.015	0.009	912	490	16.0	20.0	265

図 2 実験装置系統図

とともに、ダークスポットを再現することによって、ダークスポットの発生をもたらす主要因子を明確にしてその発生機構の解明に役立てることである。

2. 実験装置および方法

実験装置は二円筒転がり試験機である。図2に装置の系統図を示す。二円筒はそれぞれ独立駆動可能である。押付け力は2本のコイルばね L_1 、 L_2 で与え、接線力は軸A(高速軸)に取付けたひずみゲージによって測定した。

試験片材料は新品実レール(JIS 60 kg)の頭頂部から採取したパーライト組織をもつ炭素鋼である。表1に素材の化学成分および機械的性質、図3に試験片形状を示す。試験片接触時の片当りを避けるために軸B側(低速側)試験片は、軸方向に約670 mmの曲率半径をもつ樽形形状とした。軸方向の中心線平均粗さは円筒形、樽形ともに $0.2 \mu\text{m}$ 程度である。

接触荷重は 1471 N (150 kgf)、繰返し回転数は軸B側(低速側)で 10^7 回転とした。実験開始時における最大ヘルツ圧は $0.9 \sim 1.1 \text{ GPa}$ (接触だ円の長軸直径 $4.3 \sim 6.8 \text{ mm}$ 、短軸直径 $0.48 \sim 0.59 \text{ mm}$) であり、新幹線の新品実レールにおける最大ヘルツ圧にほぼ等しい。また、接線力零(純転がり)の場合における最大せん断応力は約 360 MPa (表面下約 $220 \mu\text{m}$ の位置)である。

実験は①乾燥(無潤滑)、②水潤滑、③総回転数の前半500万回転を乾燥、後半500万回転を水潤滑(以後、

図 3 試験片形状

乾燥+水潤滑と略す)、④乾燥(333万回転)+水潤滑(333万回転)+乾燥(333万回転)のもとで実施した。ここで、水潤滑とは試験片接触部に0.5秒に1滴(約 0.08 cc)の割合で蒸留水を滴下することを意味する。また、き裂内への水の浸入を確認するために、蛍光剤[ローダミン B ($\text{C}_{28}\text{H}_{31}\text{ClN}_2\text{O}_3$)]を溶解させた水を一部用いた。接線力は試験片非接触時の高速回転軸Aの回転数を 2006 rpm に設定し、低速回転軸Bの回転数を低く設定することによって与えた。以下、その差の大きい場合(約 116 rpm)を接線力・大、小さい場合(約 8 rpm)を接線力・小と呼ぶ。ただし、二円筒は独立駆動されているため、接線力が大きくなるに従い速度差は設定値よりも減少する。すなわち、高速回転軸Aの回転数は設定値より減少し、低速回転軸Bの回転数は増加することになる。

3. 実験結果および考察

通常の転動疲労損傷の発生傾向と同様に、き裂は低速側試験片に多く発生した。低速側試験片は車両が力行運転する際のレール側に相当するので、以下、低速側を主体に議論をすすめる。

表2に実験条件と低速側試験片の損傷観察結果などをまとめて示す。表中の平均接線力、接線力係数、平均すべり率の値は、運転初期なじみ過程を終えた後の平均的な値である。なお、平均すべり率 γ は、 $\gamma = 2(D_A N_A - D_B N_B) / (D_A N_A + D_B N_B)$ から算出した。ここで、 D は実験前後の試験片直径の平均値、 N は総回転数、添字 A は高速側試験片、添字 B は低速側試験片を示す。

3・1 接線力とすべり率 乾燥条件では接線力を

表 2 実験条件および実験結果一覧

Test No.	Test condition			Traction and slip ratio			Surface appearance *1		
	Environment	Difference in rev. speed under no loading (rpm)	Cycles ($\times 10^4$)	Average traction force (N)	Coefficient of traction	Average slip ratio (%)	Number of pit L : $>\phi 1\text{mm}$ M : $\phi 0.4\sim 1\text{mm}$ S : $\phi 0.1\sim 0.4\text{mm}$	Number of surface crack $>30\mu\text{m}$	No. of dark spot L : $>\phi 7\text{mm}$ M : $\phi 3\sim 7\text{mm}$ S : $\phi 1\sim 3\text{mm}$
A1	Dry	116	1000	114.7	0.078	0.081	0	0	0
A2	Water	116	1000	99.7	0.068	1.84	0	8×10^3	0
A3	Dry	116	500	145.0	0.099	0.074	M 30 S 3000	10^5	0
	Water		500	118.0	0.080	1.78			
A4	Dry	8	500	12.9	0.009	<0.001	0	0	0
	Water		500	12.6	0.009	0.003			
A5	Dry	116	500	153.3	0.104	0.097	S 400	many but no judgement	0
	Water	8	500	11.0	0.007	0.015			
A6	Dry	8	500	18.5	0.013	0.001	S 70	8×10^3	0
	Water	116	500	96.4	0.066	1.63			
A7	Dry	116	333	116.5	0.079	0.072	S 600	5×10^4	0
	Water		333	99.6	0.068	1.39			
	Dry		333	111.2	0.076	0.048			
A8*2	Dry	116	500	120.9	0.082	0.063	L 6 M 30 S 200	4×10^2	0
	Water		500	113.6	0.077	0.262			

*1) Numbers of pit and crack were estimated from observation by an optical microscope of 50 magnification; the average value of five different parts was converted into the values of the whole contact area.

*2) Distilled water dissolved rhodamine B was used as water.

(1) 乾燥状態

(2) 水潤滑状態

図 4 接線力の測定例

大きくしてもすべり率は小さく、摩耗はほとんど生じなかった。しかし、水潤滑条件において接線力を大きくするとすべり率が增大し、摩耗(実験前後の半径差で $10\mu\text{m}$ 程度)を生じた。また、高速軸と低速軸の無負荷時の回転速度差を同じ 116rpm に設定した場合には、水潤滑状態の平均接線力は乾燥状態のそれよりも 15% 程度低下した。図 4 に低速側試験片 5 回転間の接線力の変動状態の例を示す。乾燥状態の接線力の変動

図 5 表面近傍の組織写真(乾燥, 接線力・大)

は小さいが、水潤滑状態では接線力が上昇、下降を繰り返していることがわかる。高速軸 1 回転につき 2 回の割合で変動する図 4 (a) のような波形が比較的多かったが、図 4 (b) や (c) などの波形に変化する場合もあり不安定であった。なお、図 4 (a) のような波形の場合には、乾燥状態の 2 倍程度の接線力が瞬間的に作用している。

3.2 実験環境の影響 まず、大きい接線力を付与し、損傷状態を比較した。乾燥条件(実験 A 1)では、ピットは発生せず、き裂も観察されなかった。図 5 に円周方向断面における表面近傍の組織写真を示す。表面から深さ約 $15\mu\text{m}$ の範囲では組織が微細化しており、塑性流動も観察される。図 6 は深さ方向のマイクロビッカース硬さ(試験荷重 0.49N)の分布である。硬さは表面で最大値を示しており、接線力が加工硬化に大きく寄与していると考えられる。

水潤滑条件(実験 A 2)でもピットの発生は認められなかったが、しゅう動幅中央付近に図 7 に示すようなき裂が発生した。き裂はパーライト層や粒界に沿って

進展しているものが多く観察された。また、乾燥条件の場合と違い、顕著な組織の微細化やしゅう動面の硬さの増加は認められず、内部層の加工硬化の程度も乾燥条件よりやや低い [図 6 (b) 参照]。

次に、実レールの環境条件は乾燥状態と水潤滑状態を共有していることを考慮し、乾燥+水潤滑条件下 (実験 A 3) で実験を行った。その結果、しゅう動部に全周にわたって著しいはく離損傷 (ピット) が発生した。この結果は、佐藤らの実験結果⁽³⁾ と一致している。また、図 8 に示すように、発生したき裂は深さ 300 μm 以上も内部に及ぶ網目状であり、独立して 850 μm の深さまで進展するき裂も観察された。これらの結果から、乾燥状態での運転はその後の水潤滑状態でのき裂の発生・伝ば挙動に著しい影響を及ぼすことが明らかになった。

3.3 接線力の影響 乾燥+水潤滑の環境条件であっても、接線力が小さい場合 (実験 A 4) には、ピットは発生せず、き裂の進展深さも最大で 20 μm 程度であった。つまり、接線力はき裂の伝ばに大きな影響を与えていると考えられる。そこで、乾燥および水潤滑

のいずれの運転時に作用した接線力がき裂の発生・伝ばにより大きく寄与するかを明らかにするために、乾燥+水潤滑条件において乾燥時のみに接線力を高めた場合 (実験 A 5)、水潤滑時のみに接線力を高めた場合 (実験 A 6) を比較した。

乾燥時のみに接線力を高めた場合では、ピットはしゅう動幅中央のみしか発生しなかったが、き裂は図 9 の断面写真に示すように 400 μm 以上の深さまで進展した。よって、乾燥状態で大きな接線力が作用していれば、水潤滑状態では接線力が小さくてもき裂は内部に進展すると考えられる。水潤滑時のみに接線力を高めた場合でもき裂の発生が認められたが、その進展深さは乾燥時、水潤滑時ともに接線力を高めた場合よりかなり浅かった。これらの結果から、乾燥時の大きい接線力がしゅう動面下のダメージの蓄積を増大させ、その後の水潤滑によるき裂の伝ばを容易にするといえる。

3.4 き裂内への水の浸入 図 10 は、乾燥 (333 万回転) + 水潤滑 (333 万回転) + 乾燥 (333 万回転) の実験 (実験 A 7) におけるしゅう動面の変化状態を観察した例である。水潤滑条件下 [(a) $\rightarrow$ (b)] で著しい進展を示したき裂およびピットも、乾燥条件下 [(b) $\rightarrow$ (c)] ではほとんど進展しないことがわかる。すなわち、水の介在がき裂の伝ばには不可欠であると考えられる。そこで、蛍光剤を溶解させた水を潤滑剤として用い、き裂内への蛍光剤の浸入の有無を確認した。図 11 に発生したき裂の断面とその蛍光を示す。蛍

(a) 乾燥, 接線力・大

(b) 水潤滑, 接線力・大

図 6 深さ方向の硬さ分布

図 7 水潤滑環境下 (接線力・大) で発生したき裂例

図 8 乾燥+水潤滑環境下 (接線力・大) で発生したき裂例

図 9 乾燥 (接線力・大) + 水潤滑 (接線力・小) の条件下で発生したき裂例

光はほぼき裂先端まで確認でき、き裂内に水が浸入していることは明らかである。つまり、き裂伝ばはき裂内への水分浸入によって促進される可能性が高いと結論できる⁽⁴⁾⁽⁵⁾。

3・5 ダークスポットの再現 以上、二円筒転がり試験機を用いて、転動接触疲労損傷に及ぼす環境条件、接線力の影響、およびき裂内への水の浸入の可否について検討を行い、次のようなことを明らかにした。(1)乾燥、あるいは水潤滑状態のみではピットの発生しない場合でも、乾燥状態で転がり接触させた後に水潤滑を行うと著しいピットが発生する。(2)乾燥状態で大きい接線力が作用していれば、水潤滑状態では接線力が小さくてもき裂は進展する。(3)き裂の伝ばには水の存在が不可欠であり、水はき裂先端まで浸入する。

しかし、いずれの実験条件で得られたき裂も通常観察される転動接触疲労き裂と同様であり、実レールで観察されるダークスポットき裂とは形態が異なるものであった。この主な原因は、実レールにおける潤滑環境がまだ十分に再現されていないためだと考えられる。さて、雨で濡れているレール上を列車が通過すると、レール表面上の水分は車輪とレールとの接触のために次第に排除され、列車の通過後また雨で濡れる⁽⁶⁾。すなわち実レールにおいては水潤滑状態と乾燥状態を頻繁に繰返しているものと考えられる。そこで以下では、このような環境条件をモデル化した実験を行い、ダークスポットの再現を試みた。

水潤滑状態と乾燥状態の頻繁な繰返しを実現するために、蒸留水をポリタンクから試験部に導入する間に、サイホンの原理を用いて蒸留水を間欠的に排出できる装置を挿入した。乾燥状態 60 秒、水潤滑状態 60 秒の

繰返しを基準としたが、一部この割合を変化させた実験も行った。なお、水潤滑状態での試験部への蒸留水の滴下量は約 0.5 秒に 1 滴である。乾燥 60 秒・水潤滑 60 秒を 1 サイクルとすると、実験開始から終了まで約 2 500 サイクル繰返されることになる。また、無負荷状態での高・低速両試験片の回転速度差を、(a)116 rpm～124 rpm、(b)8 rpm、(c)約 0 rpm の 3 種類に変えた実験を行い、接線力の影響も調べた。さらに、圧延による方向性がダークスポット発生に及ぼす影響を検討するために、レール加工前の素材から採取した圧延による方向性のない試験片も用いた。

表 3 は、実験条件と低速側試験片の損傷観察結果をまとめたものである。表中の D および W は、それぞれ、乾燥状態時および水潤滑状態時の値を示す。

3・5・1 接線力とすべり率 水潤滑時の接線力は、連続的に水潤滑を行った場合に比較してやや低く、すべり率は若干大きかった。また、その接線力の変動状態は、図 4 (b)、(c) に似た波形が多く、図 4 (a) の波形はほとんど見られなかった。図 12 に、水潤滑開始時と水潤滑終了直後の接線力および二円筒試験片間の分離電圧信号の時間変化を示す。ここで、分離電圧は、接触状態で 0 V、分離状態で 1 V (試験片印加電圧 25 mV を 40 倍に増幅) 出力されるように設定したが、実験時間の経過するにつれ、水滴下の開始とともに一側に大きく変動した。これは、しゅう動面の腐食などによる起電力と考えられるが、金属接触が生じた場合には 0 V となるため、負電圧の発生はしゅう動面の分離を示すものとみなすことができる。実使用レールでは、水により空転した車輪がレールに再粘着する際に過大な接線力が発生するといわれている⁽⁷⁾が、本実験では、水潤滑状態から乾燥状態に移行する際に過大な接線力が発生する傾向は認められなかった。

← Load direction

(a) 乾燥(333 万回)+水潤滑(167 万回)
(b) (a)+水潤滑(167 万回)
(c) (b)+乾燥(333 万回)

図 10 乾燥+水潤滑+乾燥環境下(接線力・大)におけるしゅう動面のレプリカ写真

← Load direction

(a) 断面写真

(b) 断面写真蛍光像

図 11 き裂先端まで侵入した蛍光剤

表 3 実験条件および実験結果一覧

Test No.	Test condition			Traction and slip ratio			Surface appearance		
	Specimen	Environment (Repetition of dry and water lubrication)	Difference in rev. speed under no loading (rpm)	Average traction force (N)	Coefficient of traction	Average slip ratio (%)	Number of pit L : >φ1mm M : φ0.4~1mm S : φ0.1~0.4mm	Number of surface crack >30μm	No. of dark spot L : >φ7mm M : φ3~7mm S : φ1~3mm
B1	after rolling	Dry 60s Water 60s	124	102.0 D 115.9 W 87.0	0.069 D 0.079 W 0.059	1.34 D 0.04 W 2.62	S 4	20	S 1
B2	after rolling	Dry 90s Water 30s	116	109.9 D 112.2 W 88.4	0.075 D 0.076 W 0.060	1.03 D 0.08 W 2.80	M 10 S 600	15,000	0
B3	after rolling	Dry 40s Water 90s	116	78.1 D 126.1 W 74.1	0.053 D 0.086 W 0.050	2.22 D 0.03 W 3.10	S 110	600	M 5 S 8
B4	before rolling	Dry 60s Water 60s	124	107.3 D 124.7 W 68.0	0.073 D 0.085 W 0.046	1.68 D 0.08 W 3.80	S 2	20	S 2
B5	before rolling	Dry 60s Water 60s	8	11.1 D 11.9 W 10.5	0.008 D 0.008 W 0.007	0.035 D 0.02 W 0.10	S 10	100	M 4
B6	before rolling	Dry 60s Water 60s	0	2.4	0.002	0.006	0	0	0
B7*1	after rolling	Dry 60s Water 60s	116	85.4 D 126.0 W 38.0	0.058 D 0.086 W 0.026	2.49 D 0.09 W 5.30	S 20	40	0
B8*2	before rolling	Dry 60s Water 60s	8	11.4 D 12.5 W 9.8	0.008 D 0.009 W 0.007	0.036 D 0.02 W 0.08	M 5 S 30	300	L 3 M 3 S 2

*1) Distilled water dissolved rhodamine B was used as water.

Note : D=Dry, W=Water

*2) The surface of low speed specimen has artificial pits.

(a) 水潤滑開始時

(b) 水潤滑終了時

図 12 接線力および分離電圧の経時変化

(a) しゅう動面 (b) その断面

(c) 同一試験片上の他のき裂の軸方向断面

図 13 再現されたダークスポットき裂(実験番号 B 3)

図 14 ダークスポット表面の連続観察写真(実験番号 B 4)

3・5・2 ダークスポットき裂の再現 水潤滑状態と乾燥状態を頻繁に繰返した実験においては、一部の試験条件(実験 B 2)を除き、ピットおよびき裂の発生は離散的であり、3・5・1 項では観察されなかった特徴ある形態のき裂(特異き裂)が観察された。図 13 に、代表的な特異き裂部の表面ならびに円周方向および軸方向断面(同じ試験片上の他のき裂)を示す。この特異き裂の発生・伝ばならびにその形態に関して共通する特徴は以下のとおりである。

(1) 一部の試験(実験 B 2)を除き、特異き裂は離散的に発生する傾向がある。

(2) 発生したき裂のうち、特異き裂へ発達するものはその一部であり、後から発生したき裂が特異き裂へと進展することもある。

(3) ピットの程度が小さいのに対して、特異き裂の内部深さは全体的に深い。

(4) 特異き裂は、き裂起点部からみて荷重の移動方向のみならず、その逆方向にも内部進展する。ただし、これらの特異き裂は独立したものではなく、3 次元的にみると逆すり鉢状の形態をなしている。また、荷重の移動方向に伝ばしたき裂には多くの副き裂が存在するが、その逆方向に伝ばしたき裂には副き裂はほとんど見られない。

(5) 特異き裂の周辺はくぼんでおり、その部分は黒ずんで見える。

上記のような特徴は実レールにおけるダークスポットの発生状態とほぼ同じであり、その形態も、図 1 に示した実レールのダークスポットのそれと酷似してい

(a) A-A' 表面形状

(b) A-A' 断面

図 15 図 14 のダークスポット ($N=1.0 \times 10^7$) の表面形状およびき裂断面

る。すなわち、本実験は、ダークスポット損傷を再現したといえる。そこで以後、観察されたき裂のうち、上記の特徴をもつものをダークスポットと呼ぶ。

図 14 は、ダークスポットの発生過程を示すレプリカによる表面の連続観察写真である。500 万回転後の試験片表面には、軸方向に発生したき裂が観察され、き裂周辺はすでに黒ずんでいる。このようなものが、ダークスポットに発達しやすい傾向があった。新幹線では累積通過トン数が 1.5 億トンを超えるとダークスポットが急増すると言われているが、新幹線車輪一つの通過が本実験の 1 回転に相当すると仮定すると、ダークスポットの急増時期は 10^7 回の繰返し数に相当する。これは本実験終了時の繰返し数に対応しており、本実験結果はダークスポットへと成長するき裂は、この寿命よりかなり早い時期にすでに発生していることを示している。また、特異き裂起点部分の成分分析の結果、ダークスポット内の黒い部分と起点付近では酸

素の強度が高く、酸化が著しいことが示唆された。図15は、同一き裂の 10^7 回転後の表面形状である。表面で黒ずんでいるところがくぼみ、き裂発生部は逆に盛り上がっていることがわかる。

なお、乾燥時間と水潤滑時間の割合を変えた実験B2とB3では、特異き裂の発生頻度に著しい違いが生じたが、現時点ではダークスポットの発生と水潤滑・乾燥時間の割合並びに繰返し頻度の関係は明らかではない。また、レールから採取した試験片とレール加工前の素材から採取した試験片の結果には顕著な相違は認められなかった。すなわち、ダークスポットの発生は、圧延による組織の方向性には無関係であるといえる。

また、水は荷重の移動方向ならびにその逆向きに伝ばしたき裂内にも侵入していることが、蒸留水中に蛍光剤を溶解させた実験(実験B8)から確認された。

3・5・3 ダークスポット発生に及ぼす接線力の影響

3・3節において、通常なき裂の発生状態に関しては、無負荷状態での高・低速の両試験片の回転速度差が(a)約116 rpmと(b)8 rpmの場合で著しく相違する事実から、接線力がき裂の発生・伝ばに大きく寄与することが明らかにされた。一方、ダークスポットの再現実験においては、(b)の場合にも(実験B5)ダークスポットが発生し、発生した特異き裂も内部に深く進展した。しかし、無負荷状態の回転速度差を(c)約0 rpmとし、接線力を極力作用させないようにした場合(実験B6)には、いずれの円筒試験片にもダークスポットは発生しなかった。したがって、ダークスポットが発生するためには、多少なりとも接線力が作用する必要があるものと考えられる。

なお、接線力を小さくした(b)の場合には、高速側試験片にもき裂が発生した。特に、低速側試験片に後に述べるような人工欠陥を付与した実験(実験B8)では、高速側にも低速側と同程度の大きさのダークスポットが1箇所発生した。これらの結果は、実レールの減速区間にもダークスポットが発生する可能性のあることを示唆している。

3・5・4 表面欠陥からのダークスポット発生の可能性 ダークスポット成長過程の観察結果より、ダークスポットはき裂発生初期において既にくぼんで見える。そこで、潜在的な表面欠陥がダークスポットの発

生起点となるかどうかを検討するために、低速側試験片表面に腐食ピット(直径約300 μm 、深さ約50 μm)および加工くぼみ(直径約300 μm 、深さ約7 μm)を作成し、速度差(b)の条件で実験を行った。しかし、ダークスポットは人工欠陥以外のところから発生し、人工表面欠陥はダークスポットに成長しなかった。したがって、き裂の内部の進展状況とくぼみの形状との対応からも考えて、ダークスポットのくぼみは後天的に生じたものと予想される。

4. 結 言

二元筒転がり試験機を用いて、転動接触疲労損傷に及ぼす環境条件、接線力の影響を検討するとともに、実レールに出現するダークスポットの再現実験を試み、それに成功した。すなわち、ダークスポットは水潤滑と乾燥状態を交互に頻繁に繰返す条件下で発生し、ダークスポットき裂は、荷重の移動方向のみならず、その逆方向にも内部進展し、三次元的にみると逆すり鉢状の形態をなしている。また、ダークスポットは増速区間レールに多発するが、減速区間レールにも発生する可能性があること、実レールのダークスポット多発時期に相当するよりかなり早い時期にダークスポットへと成長するき裂が発生していることなどを予測するとともに、ダークスポットの発生には、多少なりとも接線力が作用する必要がある、ダークスポットき裂内には水が浸入していることを確認した。今後、これらの実験事実をもとに、ダークスポットの発生機構の解明ならびに耐ダークスポット損傷レールの開発を推し進める予定である。

最後に、ご討議いただいた佐賀大学理工学部の西田新一教授、新日鐵(株)の佐藤明史氏に感謝する。

文 献

- (1) 杉山・松山, 潤滑, **30**-6(1985), 393.
- (2) T102グループ研究班, 鉄道技術研究所速報, A-87-81(1987-3).
- (3) Sato, M., Anderson, P. M. and Rigney, D. A., *Wear*, **162**-164(1993), 159.
- (4) Way, S., *Trans. ASME, J. Appl. Mech.*, **2**(1935), A49.
- (5) Kaneta, M. and Murakami, Y., *Tribology Int.*, **20**-4(1987), 210.
- (6) 大山, 日経メカニカル, **375**(1992-5), 39.
- (7) 松山, *RRR*, **1**(1987), 28.