

# 円筒－鋼球接触試験による縞状電食に関する研究

野西利次\*

福本 豊\*\*

## A Study on Corrugated Electric Erosion with a Ball-Roller Testing Machine

Toshiji NONISHI Yutaka HUKUMOTO

### ABSTRACT

A study on the corrugated electric erosion, which is the damage generated on the surface of machine elements by the electric current, was carried out. Factors which induce the generation of the corrugated electric erosion were investigated in this study. A ball-roller testing machine was used in order to make an experiment with the condition of high electric flux density caused by the point contact between the ball and the roller.

One of the experimental results is that the generation of the corrugated electric erosion is influenced considerably by the material of the test piece and the current intensity.

キーワード：電食，縞状電食，歯車，軸受，機械要素

Keywords: Electric Erosion, Corrugated Electric Erosion, Gear, Bearing, Machine Elements

### 1. 緒言

電食〔1－5〕は，歯車や軸受など機械要素の接触面に電流が流れることで生じる表面損傷である．機械部品の接触面に電流が流れる原因としては，電動機の磁気回路不平衡，高周波電流による誘導電流，機械部品間で形成される一種のコンデンサーによる漏れ電流などが挙げられる〔3〕．電食が発生すると機械要素の寿命に著しい影響を及ぼすため，電食は機械工学において重要な研究課題であるが，その研究例は比較的少ない．電食は，接触面上に噴火口状のピットあるいは洗濯板状の規則的な縞模様が生じる損傷と言われており〔4〕，著者は，以前，円筒－鋼球接触試験により，噴火口状ピットの損傷につい

て研究を行った〔6〕．その際，条件によっては縞状の損傷が見られることがあり，縞状損傷の発生条件について，より詳細に調べる必要性を感じた．

そこで本研究では，前回と同じく円筒－鋼球接触試験を行い，どのような条件で縞状の損傷が発生するのか調べた．具体的には，材質の異なる2種類の円筒試験片を用い，荷重，回転数，電流値，表面粗さを変えて実験を行い，これらの諸因子が縞状損傷に及ぼす影響について調べた．

その結果，円筒材質により縞状損傷の発生状況は異なっており，陰極側に縞状損傷が発生する場合や陽極・陰極にかかわらず円筒試験片に発生する場合があることなどがわかった．

\* 機械システム工学科

\*\* JFE スチール西日本製鉄所

## 2. 実験装置および実験方法

図1に、本研究で使用した実験装置の概略図を示す。試験片には鋼球と円筒を使用し、鋼球及び円筒の直径は共に32mmである。鋼球はロッドエンド内輪(SUJ2)で、円筒の材質はSCM415とS45Cであり、SCM415の場合は浸炭焼入れ(硬さ:700HV)、S45Cの場合は調質(硬さ:250HV)をしている。鋼球の表面粗さは $0.1\mu\text{m}$ (Ra)で、円筒では $0.1\mu\text{m}$ (Ra)と $0.3\mu\text{m}$ (Ra)の2種類である。

実験では、ばね力により荷重を与えて、鋼球試験片と円筒試験片を接触させ、モータにより試験片を純転がり接触あるいは転がり-滑り接触で回転させる。潤滑油にはタービンオイル32を用い、油温を $20^{\circ}\text{C}$ として油浴潤滑した。潤滑油の性状を表1に示す。

鋼球試験片と円筒試験片は、接触点以外で電流が流れないように絶縁されており、直流電源を用いて、円筒試験片を陽極、鋼球試験片を陰極とした場合とその逆(円筒試験片を陰極、鋼球試験片を陽極)の2条件で通電した。その際、通電前に直流電源を設定し、回路が電気絶縁されている場合には20Vが印加され、回路が短絡している場合には既定値の電流(0A, 2A, 5A, 10A)が流れるようにした。通電時間は、一つの実験条件について累積して180分であり、3分, 15分, 30分, 60分, 90分, 120分, 180分経過時にCCDマイクロスコープにより損傷を観察した。試験終了時には、レーザー変位計により損傷部の凹凸を測定した。また、質量を測定し、試験前の測定値との差を計算して摩耗量を求めた。

なお、試験片に通電する際、試験片間の電圧変動及び電流変動をトランジエントレコーダにより記録

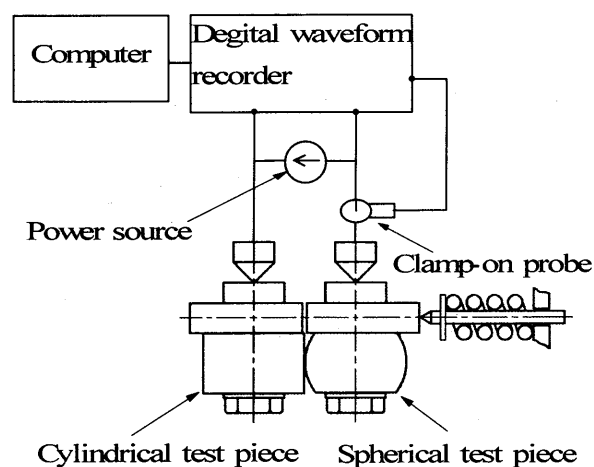


図1 実験装置

表1 潤滑油性状

潤滑油	密度 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	粘度( $\text{mm}^2/\text{s}$ )	
		40 $^{\circ}\text{C}$	100 $^{\circ}\text{C}$
タービンオイル32	0.87	31.9	5.9

表2 実験条件

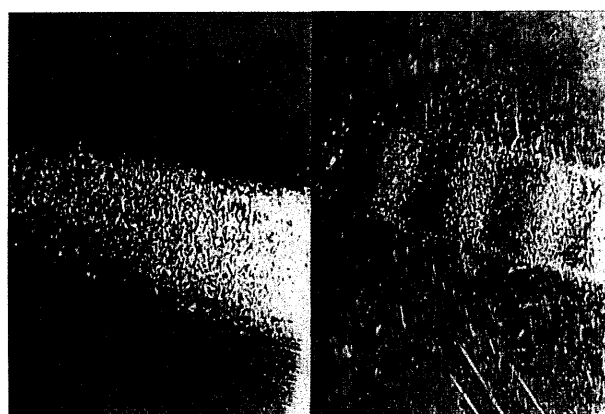
試験片	円筒	鋼球
材質	SCM415, S45C	S45C
表面粗さ(Ra)	0.1, 0.3	0.1
回転数(rpm)	800	800
	509	400
	1018	800
荷重(N)	9.8, 29.4	
電流(A)	0, 2, 5, 10	

し、コンピュータで解析した。電流の測定にはクランプ型電流計(最大電流レンジ:20A, 周波数特性:20kHz)を使用した。

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 縞状の損傷

図2および図3は実験で生じた電食の一例で、SCM415の円筒試験片を用いて、5Aで180分通電したときの写真である。図2の場合は円筒が陽極、鋼球が陰極で、図3では円筒が陰極、鋼球が陽極であり、その他の条件は同一である。図2、図3から分かるように、図2では鋼球に、図3では円筒に、陰極側で縞状の電食が生じている。

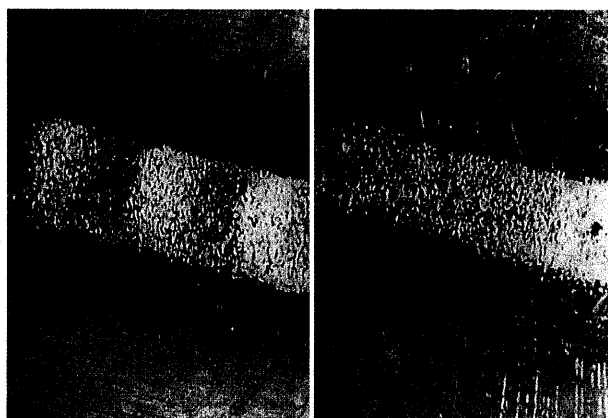


(円筒試験片:陽極)

(鋼球試験片:陰極)

図2 電食写真

(円筒材質:SCM415, 粗さ: $0.1\mu\text{m}$ , 回転数:1018rpm-800rpm, 荷重:9.8N, 電流:5A)



(円筒試験片：陰極) (鋼球試験片：陽極)

図3 電食写真

(円筒材質：SCM415，粗さ： $0.1\mu\text{m}$ ，回転数：1018rpm-800rpm，荷重：9.8N，電流：5A)

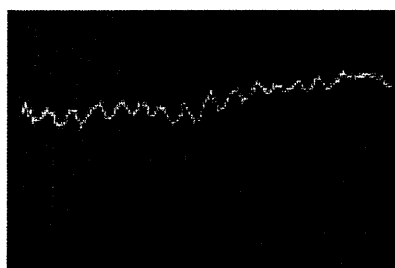


図4 縞状電食の断面形状

図4は，図3に示した円筒試験片の縞状電食の断面形状をレーザー変位計で測定したもので，図4の曲線上の一つの凹凸が縞状の損傷の頂部と底部を表す．この図では，頂部と底部の差は，約 $5\mu\text{m}$ である．

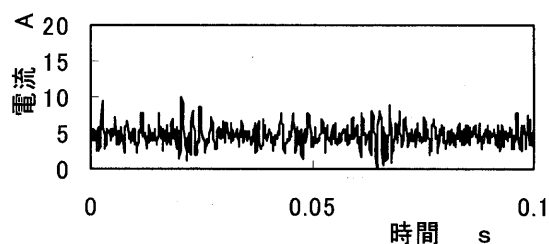


図5 実験開始時の電流

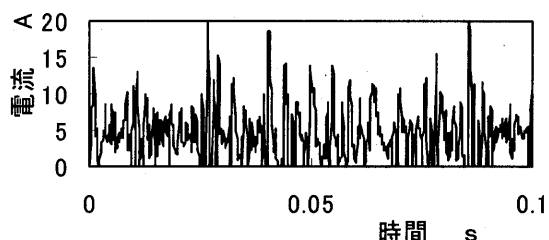


図6 実験終了時の電流

図5，図6は，図2に示す条件で実験を行なったとき，クランプ型電流計により測定した電流を示している．図5は実験開始時の電流で，図6は実験終了時(180分経過)の電流である．電流は，5Aを中心に変動しているが，実験開始時に比べて実験終了時の方が変動は大きくなっている．また，縞状損傷のピッチに応じた電流の変動は認められない．

### 3.2 陽極，陰極が縞状損傷に及ぼす影響

表3は，電流5A，荷重9.8N，回転数1018rpm-800rpmで実験を行ったときの縞状損傷の発生状況を時間経過と共に示したものである．表3によれば，円筒の材質によって対照的な結果となっており，円筒材質がSCM415の場合は，円筒，球の違いにかかわらず陰極側に縞状の損傷が生じている．表には載せ

表3 縞状損傷の発生状況

電流 (A)	荷重 (N)	回転数 (rpm)	円筒の 材質	円筒の粗さ ( $\mu\text{m}$ )	試験片	時間(分)						
						3	15	30	60	90	120	180
5	9.8	1018 (円筒)  800 (球)	SCM415	0.1	円筒(陽極)	×	×	×	×	×	×	×
					球(陰極)	×	○	○	○	○	○	○
				0.1	円筒(陰極)	×	○	○	○	○	○	○
					球(陽極)	×	×	×	×	×	×	×
			S45C	0.1	円筒(陽極)	×	×	○	○	○	○	○
					球(陰極)	×	×	×	×	×	×	×
				0.1	円筒(陰極)	×	○	○	○	○	○	○
					球(陽極)	×	○	×	×	×	×	×
				0.3	円筒(陽極)	×	○	○	○	○	○	○
					球(陰極)	×	×	×	×	×	×	×
				0.3	円筒(陰極)	×	○	○	○	○	○	○
					球(陽極)	×	×	×	×	×	×	×

○：縞状損傷発生 ×：縞状損傷無し

表 4 縞状損傷の発生状況

荷重 (N)	回転数 (rpm)	電極	円筒粗さ ( $\mu\text{m}$ )	円筒の 材質	電流 (A)	試験片	時間(分)						
							3	15	30	60	90	120	180
9.8	1018 (円筒)	円筒 (陽極)	0.1	SCM415	0	円筒	×	×	×	×	×	×	×
						球	×	×	×	×	×	×	×
					2	円筒	×	×	×	×	×	×	×
						球	×	○	○	○	○	○	○
					5	円筒	×	×	×	×	×	×	×
						球	×	○	○	○	○	○	○
					10	円筒	×	×	×	×	×	×	×
						球	○	○	○	○	○	○	○
	800 (球)	球 (陰極)	0.1	S45C	0	円筒	×	×	×	×	×	×	×
						球	×	×	×	×	×	×	×
					2	円筒	×	×	×	○	○	○	○
						球	×	×	×	×	×	×	×
					5	円筒	×	×	○	○	○	○	○
						球	×	×	×	×	×	×	×
					10	円筒	×	○	○	×	×	×	×
						球	×	○	○	○	○	○	○

○：縞状損傷発生    ×：縞状損傷無し

ていないが回転数が変わっても同じ傾向であった。一方、円筒材質が S45C の場合は、陽極、陰極にかかわらず円筒側に縞状損傷が発生している。また、表 3 の全ての条件において、約 15 分で縞状損傷が生じ始めるのがわかる。円筒材質によって実験結果が異なることに関して、一般に陽極では酸化、陰極では還元が生じると言われており [7]、円筒材質が SCM415 の場合は球および円筒ともに高硬度であるが、電流による発熱で軟化し、陽極側の硬い酸化膜と陰極側の還元部で硬さに差が生じ、それが影響して陰極側に縞状の損傷が生じた可能性が考えられる。一方、円筒材質が S45C の場合は軟質材であり、軟質の円筒と硬質の鋼球との組み合わせということが上記の影響よりも強く影響したと思われる。

### 3.3 電流の大きさが縞状損傷に及ぼす影響

表 4 は、電流の大きさが縞状の損傷に及ぼす影響を示したものである。当然ながら、電流を流さない場合、縞状損傷は生じていない。円筒材質が SCM415、S45C のどちらの場合でも、電流が大きくなるほど早い時期から縞状損傷が生じている。表 3 の結果と同様、SCM415 の場合は陰極の球に、S45C の場合は円筒に縞状損傷が発生している。ただし、10A のときは球にも発生しており、円筒に生じていた縞状損傷は 60 分後には確認できなかった。これは規則正しい

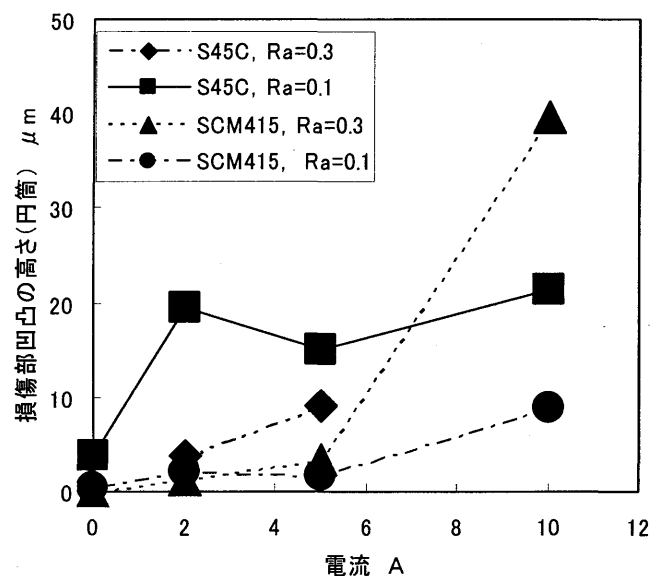


図 7 電流と円筒に生じた損傷の大きさ

形状の変化が見られなくなったもので、損傷自体は存在している。

図 7 は、電流の大きさが円筒に発生する損傷の凹凸の高さに及ぼす影響を示したもので、図 4 に示したレーザー変位計で測定した結果である。電流が大きくなれば損傷部の凹凸が大きくなる傾向にある。低電流では S45C の円筒の方が凹凸は大きくなって

る。SCM415の方は低電流での損傷は比較的小さいが10Aになると、急に損傷の大きさが増加している。

図8は、180分通電した後の円筒（粗さ：0.3μm）と球の摩耗量を示しており、低電流では摩耗量は比較的小さいが、10Aになると急激に摩耗量が増加している。円筒と球の摩耗量には、大きな差は見られない。

図9は、円筒側を陽極、球側を陰極とした条件で生じた縞状損傷のピッチと電流の大きさとの関係を示している。表3に示すように、この条件では、円筒材質がSCM415では球に、S45Cでは円筒に縞状損傷が発生する傾向にあるので、図9のピッチは、SCM415では球、S45Cでは円筒の損傷の測定値である。図9から、円筒に生じた損傷のピッチは球に生じたものより大きく、円筒では1～2.5mm、球では約0.5mmの値になっていることがわかる。また、電流の大きさによってピッチはあまり変化しないこと、円筒では、荷重が増すとピッチが減少する傾向にあることがわかる。

### 3.4 滑りの有無が縞状損傷に及ぼす影響

表5は、球側の回転数を800rpmに固定し、円筒側の回転数を800rpmあるいは1018rpmとして、純転がり条件及び転がり－滑り条件での実験結果を比較したものである。円筒材質がSCM415の場合は、純転がり、転がり－滑りの両条件とも表3と同様、陰極側の球に縞状の損傷が発生している。一方、円筒材質がS45Cの場合は、純転がりと転がり－滑りの条件で、逆の結果がでており、滑りが有ると円筒に、滑りが無いと球に縞状損傷が生じる傾向になっている。

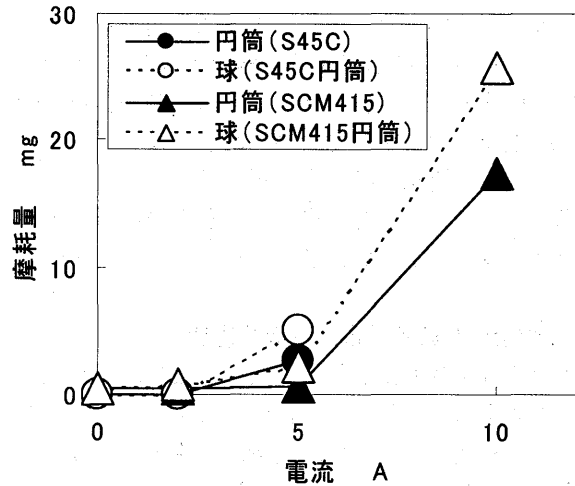


図8 電流と摩耗量

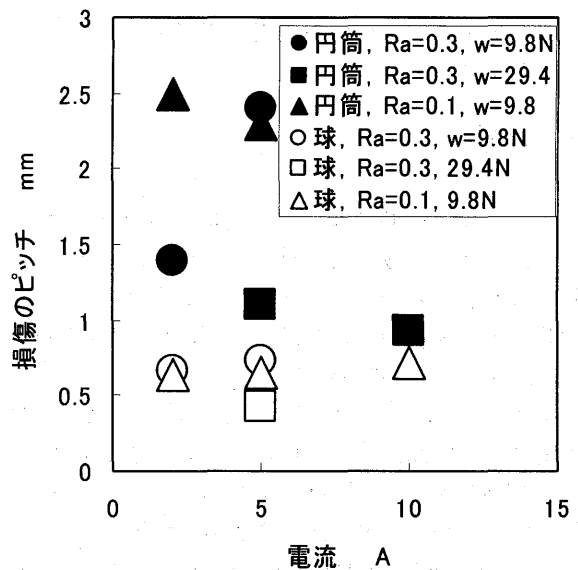


図9 電流と損傷のピッチの関係

表5 縞状損傷の発生状況

荷重 (N)	円筒粗さ (μm)	電極	電流 (A)	円筒の 材質	回転数 (rpm)	試験片	時間(分)						
							3	15	30	60	90	120	180
9.8	0.3	円筒 (陽極)	5	SCM415	球:800	円筒	×	×	×	×	×	×	×
					円筒:1018	球	×	×	○	○	○	○	○
					球:800	円筒	×	×	×	×	×	×	×
					円筒:800	球	×	○	○	○	○	○	○
			5	S45C	球:800	円筒	×	○	○	○	○	○	○
					円筒:1018	球	×	×	×	×	×	×	×
					球:800	円筒	×	×	×	×	×	×	○
					円筒:800	球	×	○	○	○	○	○	○
		球 (陰極)	2	S45C	球:800	円筒	×	×	×	×	○	○	○
					円筒:1018	球	×	○	○	○	○	○	○
					球:800	円筒	×	×	×	×	×	×	×
					円筒:800	球	×	×	○	○	○	○	○

○：縞状損傷発生    ×：縞状損傷無し

この理由については、今後、十分に検討することが必要であるが、滑りが有ると、軟質の S45C の円筒と硬質の鋼球との組み合わせでは、円筒側の軟質材の上に酸化膜が生成されても剥がれ易くなって、それが影響して円筒側に縞状損傷が生じたのではないかと思われる。滑りが無い場合は、酸化膜が円筒表面に残り、表 5 のような結果となったと考えられる。

### 3.5 潤滑油が縞状損傷に及ぼす影響

潤滑油は接触面に油膜を形成し、接触部の電気抵抗に影響する。これが縞状損傷になんらかの影響を及ぼす可能性があるので、潤滑油を使用した場合と無潤滑の場合と実験を行って比較した。その結果、両者とも、同様な傾向で縞状損傷が発生し、潤滑油の有無は縞状損傷にあまり影響を及ぼさないことがわかった。

### 4. 結言

円筒－鋼球接触試験により電食実験を行った。材質の異なる 2 種類の円筒試験片を用い、荷重、回転数、電流値、表面粗さを変えて実験を行い、これらの諸因子が縞状損傷に及ぼす影響について調べた。その結果、つぎの結論を得た。

(1) 転がり－滑り接触条件では、円筒材質が SCM415 の場合は、円筒、球の違いにかかわらず陰極側に縞状の損傷が生じ、円筒材質が S45C の場合は、陽極、陰極にかかわらず円筒側に縞状損傷が発生する。

(2) 円筒材質が SCM415, S45C のどちらの場合でも、電流が大きくなるほど早い時期から縞状損傷が生じる。また、電流が大きくなれば損傷部の凹凸が大きくなる傾向にあるが、ピッチはあまり変化しない。

(3) 円筒材質が SCM415 の場合は、純転がり、転がり－滑りの両条件とも、陰極側の球に縞状の損傷が発生する。一方、円筒材質が S45C の場合は、純転がりと転がり－滑りの条件で、逆の結果がでており、滑りが有ると円筒に、滑りが無いと球に縞状損傷が生じる傾向にある。

(4) 潤滑油の有無は縞状損傷にあまり影響を及ぼさない。

### 参考文献

- [1] 近藤正男, 永田 寛: 転がり軸受の腐食に関する研究 (1), 潤滑, 3, 4(1958), 19.
- [2] J. Boyd and H. N. Kaufman: The Causes and the Control of Electrical Currents in Bearings, Lubrication Engineering, 15(1959), 28.
- [3] 渡邊朝紀, 池田博志: 転がり軸受の電食, トライボロジスト, 41, 7(1996), 570.
- [4] 日本トライボロジー学会編: トライボロジーハンドブック, 養賢堂, (2001), 795.
- [5] 野西利次, 小田 哲: 二円筒接触試験による電食の基礎的研究, 設計工学, 38, 11(2003), 589.
- [6] 野西利次, 小田 哲: 電食におよぼす油膜厚さの影響, 設計工学, 41, 8(2006), 405.
- [7] 竹内彰敏: 通電によるなじみの制御, トライボロジスト, 41, 7(1996), 580.