

小型玉軸受の電食による表面損傷 Surface Damage by Electrolytic Corrosion of Small Ball Bearing

東理大・理工（正）野口 昭治

Shoji Noguchi

* Tokyo University of Science

1. はじめに

電食は、転がり軸受の損傷事例として知られており、リッジマーク (Fig.1) という特有の表面損傷が観察される。電食が他の損傷事例と異なるのは、応力や摩耗等の力学的要因が原因ではなく、電気的な要因が原因となっていることである。しかし、機械設計者としては、転がり軸受が組み込まれる軸とハウジングに電圧が加わるような設計をしていない（一部の用途を除く）ので、電食が起こることは想定外である。また、近年の研究によって小型玉軸受の電食発生条件は、電圧、電流ともかなり小さいことがわかっており¹⁾、人が触っても感知することが出来ないので、振動が大きくなった転がり軸受を分解して、リッジマークが観察されて初めて損傷の原因が電食であることに気づくことが多い。リッジマークは全周負荷圈の場合には、軌道輪の真円度を測定すると転動体数の整数倍のうねり山数の振幅が大きくなっていることが観察されている²⁾。しかし、微小な放電痕からどのような過程を経て、筋状のリッジマークが形成されるかについては不明であった。そこで、分解・再組立が容易なスラスト玉軸受を用いて、振動加速度の大きさをパラメータとしてリッジマーク形成状況を観察して、リッジマークの出来始めから凹凸が全周均等に近くなるまでの形成過程を明らかにした³⁾。

本シンポジウムは、摩耗研究会の主催であるので、表面摩耗（損傷）の観点からリッジマークの成長過程観察と振動上昇の関係に焦点を当てて紹介する。

2. 実験方法

2.1 実験装置

実験装置の概略を Fig.2 に示す。試験軸受はスラスト玉軸受 51105 とし、軸受の駆動には静圧エアスピンドルを用いた。試験軸受と静圧エアスピンドル、荷重負荷軸を電気的に絶縁するために、上下の軸受ハウジングを不導体である樹脂で挟んでおり、軸受ハウジングの側面にカーボンブラシを当てて直流電圧を印加して、軸受内部を通電させた。軸受の振動加速度は、負荷軸の上端に加速度ピックアップを取り付けて測定した。振動計からの出力を FFT アナライザに接続することによって、振動加速度の上昇と同時に振幅が上昇した周波数も測定した。アキシャル荷重はばねで負荷しており、ばね定数を変えることにより荷重を変化させることができる。

2.2 実験条件

本研究で用いたスラスト玉軸受 51105 は本来転動体数 15 であるが、転動体数を減らして 3 個として実験を行った。本研究では初期に形成された 1 つのリッジマークを振動加速度に応じて観察することが目的である。実験条件としては、電食によって振動加速度が上昇し続けることができればよいことから、既報と同じ条件とした。実験条件を Table 1 に示す。回転速度は 1800min^{-1} 、アキシャル荷重は 12N である。潤滑油は粘度の高い無添加基油（40℃で動粘度 460cSt）を用いたため、油膜パラメータ Λ は 10 以上であり、電食が発生する電圧・電流条件下では必ずリッジマークが形成される。試験時間については、同じ電気的条件であっても軸受個々によって振動加速度の上昇過程は異なるので、一定時間ではなく、振動加速度の大きさが所定の値まで上昇した時点で試験を中断して、最初にマーキングしたリッジマークについての観察を行った。今回の測定では振動加速度が 36m/s^2 になるまでの測定を行った（電

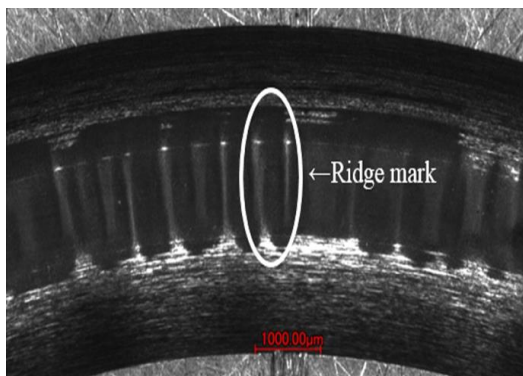


Fig. 1 Example photograph of ridge mark

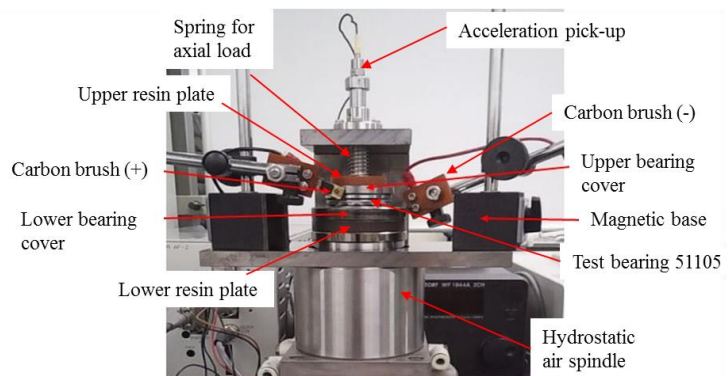


Fig. 2 Schematic view of experimental instrument

圧を印加していない状態の振動加速度は約 5.0m/s^2)。

2.3 リッジマーク観察方法

本研究では、初期に形成された1つのリッジマークに関して、大きさ（半径方向と円周方向の幅）と深さの変化を定量的に求めることが必要となる。そこで、リッジマークの観察には、3D マイクロスコープ⁴⁾を用いた。リッジマークの半径方向と円周方向の幅、深さの求め方を Fig.3 に示す。深さについては基準を明確にしないと進行を正確に把握できない。そこで 3D マイクロスコープで軌道面の溝幅全体を測定し、注目したリッジマークでの断面形状を求めて、軌道輪平面部分（転動体が通過しない部分）を基準面として、リッジマークが形成されていない状態の溝底までの深さとの差をリッジマークの深さとした。

3. 実験結果

リッジマークの観察を行った際の累積回転時間と振動加速度の関係を Fig.4 に示す。曲線が不連続となっている箇所は、所定の振動加速度になったので、観察のために回転を止めたことを意味している。本研究では、1つのリッジマークに着目して、その成長を継続的に観察するため、回転を停止させて軌道面を観察する振動加速度の上昇値を既報よりも細かく設定した。

電圧印加前の状態から振動加速度が 36m/s^2 になるまでの軌道面観察写真を Fig.5 に示す。振動加速度が 11m/s^2 までは、軌道面の走行跡が徐々に濃くなっているが、筋状のリッジマークは形成されていないことがわかる。振動加速度が 13m/s^2 になると軌道面に薄く筋状の痕跡が見られるようになり、 15m/s^2 になると円周方向に断続的に黒い領域が現れるようになったが、筋状のリッジマークはまだ観察されない。そして、振動加速度が 17m/s^2 になると筋状のリッジマークを確認することができた。それ以降、矢印のリッジマークに着目して、大きさ（半径方向の長さ l と円周方向の幅 w ）と深さ d の測定を継続的に行った。リッジマークが明確に観察される振動加速度 17m/s^2 以降は、写真からもリッジマークが大きくなっていくことが観察されるが、各振動加速度における半径方向の長さ l 、円周方向の幅 w 、深さ d の変化を Fig.6 から Fig.8 に示す。リッジマーク形成が確認された 17m/s^2 以降では、注目したリッジマークの長さ l 、幅 w 、深さ d とも振動加速度の上昇と共に比例して大きくなっていることがわかる。

さらに、Fig.7 を詳細に見ていくと振動加速度が 30m/s^2 を過ぎると、着目したリッジマーク付近で隣合った2つのリッジマークが繋がって、幅の広い1つのリッジマークになる現象やそこが再び2つに分かれるような現象が観察される。振動加速度が 32m/s^2 から 36m/s^2 において、このような現象が見られた部分の拡大写真と断面形状を Fig.9 に示す。リッジマークを上から観察した拡大図では、振動加速度が 32m/s^2 において3本確認できたリッジマークの畝が、 34m/s^2 では中央の畝が消えて、 36m/s^2 になると中央に畝ができて3本になっていることが確認できる。この様子は断面形状の変化からも確認することができる。連続して形成されたリッジマーク形成部の断面形状を求めて、上から見て畝として観察された部分（図中の矢印が同じ畝に対応）の間隔を見ると、振動加速度 34m/s^2 では2本の畝の間隔が広く、その部分は平坦になっている。そして 36m/s^2 になると平坦部に新たな畝が形成されている。電食の原因は油膜を突き破った放電であり、現象的には雷と同じである。隣のリッジマークが繋がった現象は、表面に凹凸が形成されると凸部先端部で電荷密度が高まるので、凸部で優先的に放電が起こり、溶解して畝が消失したと考えられる。

4. おわりに

本研究では、分解が容易なスラスト玉軸受を用いて、振動加速度上昇をパラメータとして1つのリッジマークに着目して成長過程をミクロ的に観察した。得られた結論をまとめると以下ようになる。

Table 1 Experimental conditions

Test bearing	Thrust ball bearing 51105
Number of balls	3
Rotational speed	1800 min^{-1}
Initial voltage	DC 5V
Maximum current	1.0 A
Lubricant	VG460 base oil ($\lambda > 10$)
Axial pre-load	12 N
Test time	Until vibrational acceleration more than 36 m/s^2

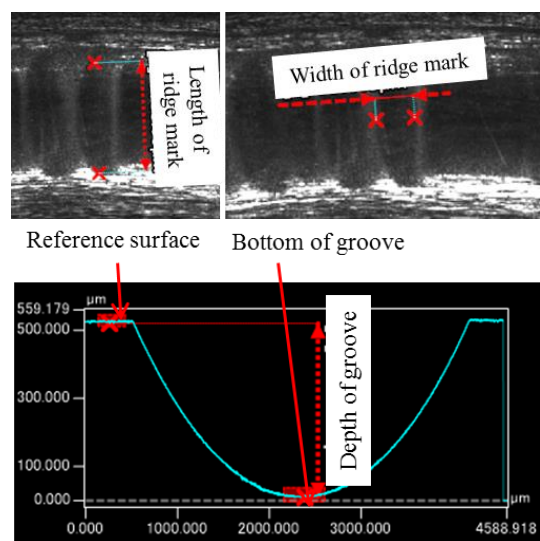


Fig.3 Measuring method of length, width and depth of ridge mark

- (1) スラスト玉軸受を用いた本実験によって、リッジマークの形成初期からの成長過程を直接観察することができた。
- (2) 軌道面に形成されたリッジマークの半径方向の長さ、円周方向の幅、深さの増加は、振動加速度の上昇と比例的な関係にあることを実験的に明らかにした。
- (3) リッジマークがある程度大きくなり、密集して形成されると隣のリッジマークが繋がってひとつの幅薄広いリッジマークになる現象や再び 2 つに分かれる現象を観察することができた。

文献

- 1) 野口・赤松・是永：小型玉軸受の電食に関する研究（第 1 報）－直流電圧印加時の玉軸受 608 の電食発生限界電流密度－, トライボロジスト, 52, 8 (2007) 622.
- 2) 安永：モータ用軸受の電食, NSK Technical Journal, 686(2013) 40.
- 3) 野口：スラスト玉軸受を用いた電食リッジマーク形成過程の観察, トライボロジスト, 61, 7 (2016) 467.
- 4) ワンショット 3D 測定マイクロスコープユーザーズマニュアル, KEYENCE (2014)

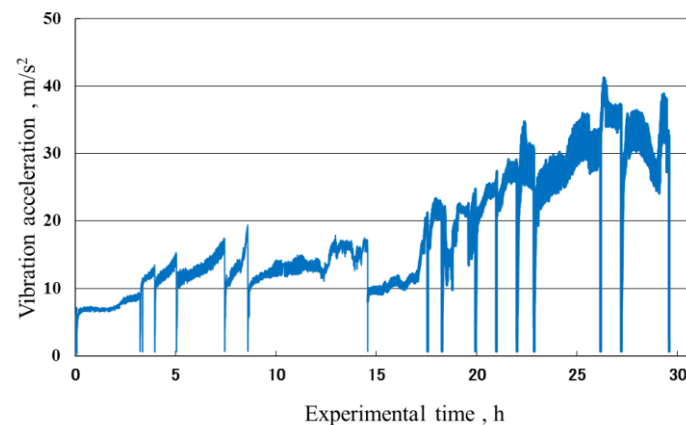


Fig.4 Relation between experimental time and vibration acceleration increment

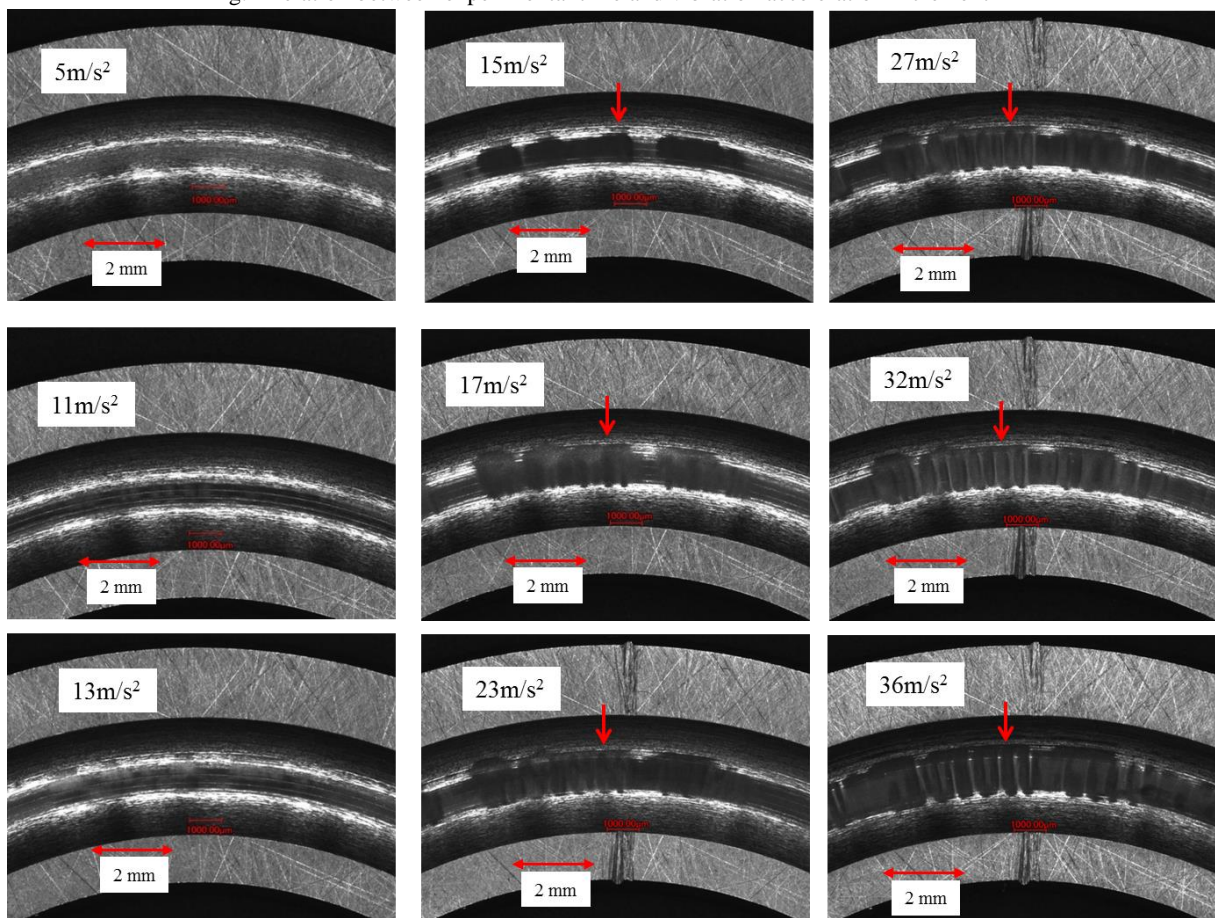


Fig.5 Observation results of grown-up of one of ridge mark

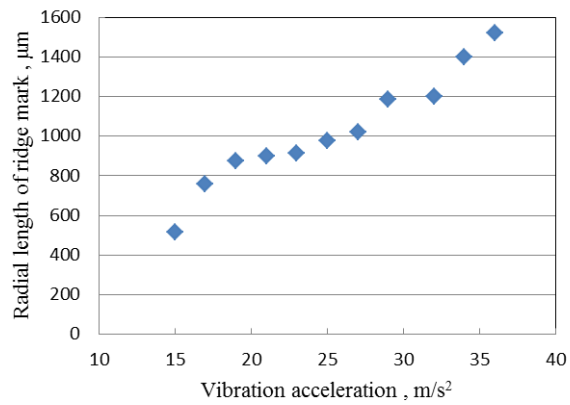


Fig.6 Relationship between length of one ridge mark and vibration acceleration

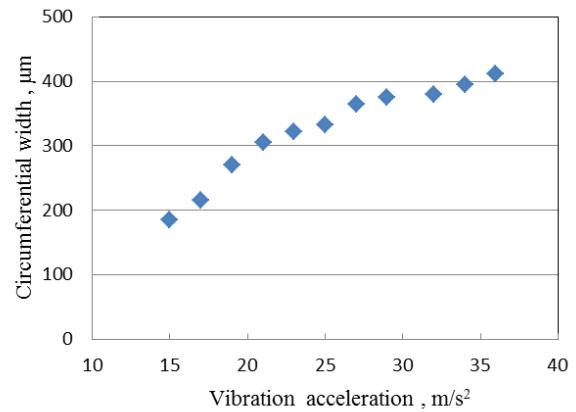


Fig.7 Relationship between width of one ridge mark and vibration acceleration

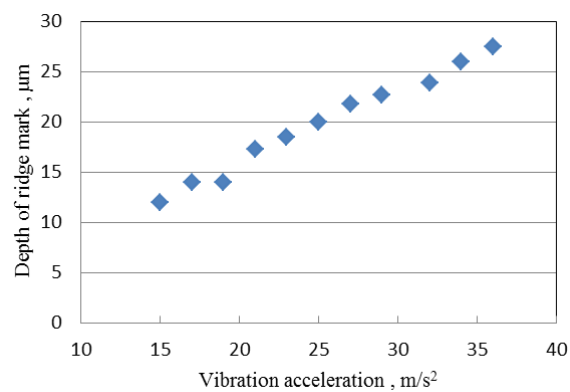


Fig.8 Relationship between depth of one ridge mark and vibration acceleration

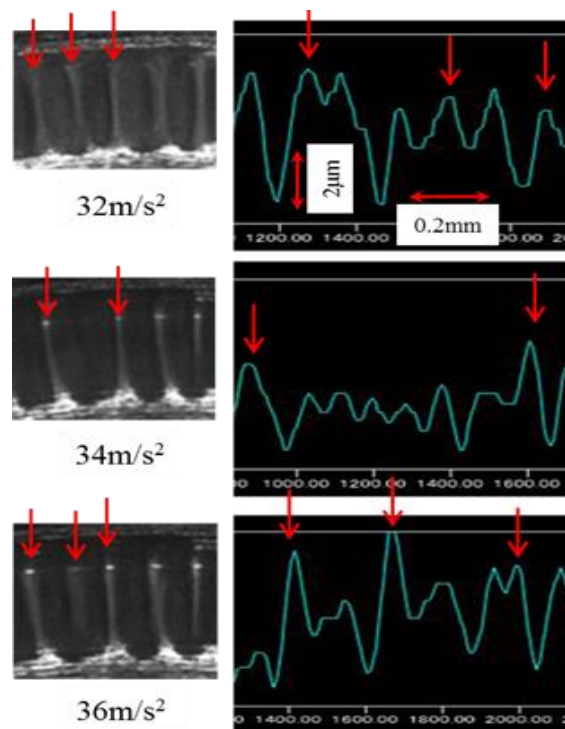


Fig.9 Microphotography and cross section of ridge mark formed into same area from 32m/s² to 34m/s²