

超音波エコー法を用いた転がり軸受の異常診断

Abnormality Diagnosis of Rolling Bearings by Ultrasonic Technique

香川大学

若林 利明

Toshiaki WAKABAYASHI

Failures of machines having rotating parts are mostly caused by damage to bearings and conventional diagnostic methods have found difficulties in performing the early detection of such damage, so that more advanced diagnosis is necessary. This study therefore applies an ultrasonic technique to bearing life tests. The experimental results of ultrasonic wave pulse (UWP) echoes have demonstrated that the time intervals between peaks of UWP echoes varied in accordance with the movement of rolling balls. The autocorrelation coefficient has further been used to analyze the UWP echoes. The values of the autocorrelation coefficient were in good connection with the time intervals between peaks of UWP echoes and were thought to provide the possibility of the early detection of abnormalities in ball bearings. Wavelet analysis was also employed to visualize the rolling behavior of balls in bearings.

Keywords: Ultrasonic Technique, Diagnosis, Rolling Bearings, Wavelet Analysis, Autocorrelation Coefficient

1. 緒言

回転機械の主要な故障原因の1つとして転がり軸受の異常が挙げられる。現在、軸受の異常診断は振動法を用いて行われることがほとんどであるが、この方法では異常の早期検出が難しいことが知られている。そこで著者らは、超音波エコー法に注目し、この方法で得られた超音波反射強度 (Ultrasonic Reflection Intensity、以下 URI) の時間変化にウェーブレット解析及び自己相関性による解析を適用して検討を行ってきた[1]。本研究では、その一環として URI の解析結果に運転条件が与える影響を調べたところ、興味深い知見が得られたので報告する。

2. 実験および解析方法

2.1 超音波反射強度の測定

玉軸受 (No.6210) を用いて、通常は垂直荷重 2.5ton、軸回転数 1000rpm、軸受温度 60°C の条件で連続疲労試験を行った。ただし、URI の解析結果に異常が現れ始めたところで、軸受の損傷の急な進行を避けるため、連続疲労試験の荷重条件を 2.0ton に変更することとした。URI の測定は、2 日目から所定の間隔で垂直荷重を 0.5~2.0ton、軸回転数を 500、1000rpm と変化させ、パルス繰り返し周波数 5kHz、測定間隔 200 μ s で、6 秒間行った。ここで、測定の頻度については実験開始当初は 1 週間に一度としたが、URI の解析結果に正常ではない何らかの変化が見

られた場合、その後は 3~4 日おきに行うこととした。さらに、いずれかの運転条件において 2.3 節で説明する ACC の代表値が 0.8 を下回った場合、2 日に一度の測定とした。一方で、運転時間が経過し、解析結果に異常の兆候が確認できたのち、垂直荷重 2.0ton についてのみ、軸回転数 250rpm の低速時における測定を行った。

なお、本文中で測定条件を引用する場合、条件名に [] を付して表示した。すなわち、[2.0-1000] は垂直荷重 2.0ton、軸回転数 1000rpm を意味している。

2.2 ウェーブレット解析

周期的な信号の解析に適するガボール関数をマザーウェーブレット関数とした連続ウェーブレット変換を URI の時間変化に適用し、URI の時間変化とガボール関数の間における周期性の相関度合いを周波数パラメータ a と時間パラメータ b の相関の強弱に置換えて解析した[2]。

2.3 自己相関性による解析

URI の時間変化において、ある時間 t とそこから k 時点後のデータ間の自己相関係数 (Autocorrelation coefficient、以下 ACC) を k の関数 $r(k)$ として求め、 $r(k)$ の極大値の最初から 10 個の平均を取り、この値を軸受の運転状態を表す ACC の代表値とした[2]。なお、これまでの検討結果では、異常のない円滑な運転状態の場合は ACC の代表値が 0.8 を下回ることはない。一方、この値が 0.6 程度まで低

下している場合は明らかに異常があると判断できる。また、0.6~0.8の間は異常の兆候あるいは損傷の進行に対応するものと思われる。

3. 結果および検討

3.1 URI の解析結果の時間に対する変化

運転開始2日目および30日目の[2.0-1000]におけるURIの解析結果を図1、図2に示す。図1より、運転開始2日目においては、ウェーブレット解析では時間に対して周波数が安定しており、自己相関性による解析でもACCの代表値が1に近く正常な状態だと判断できる。また、ミスアライメント等もなく、実験としては適切な状態で開始できたことが確認された。一方、図2の30日目では、ウェーブレット解析の時間的な安定性が失われており、周波数が2日目の68.2Hzから54.3Hzへと低下していた。また、自己相関性による解析でもACCの代表値が0.823まで下がっていることがわかる。さらに、同日の[1.5-1000]、[1.0-1000]でのURIの解析結果においても異常の兆候が現れ始めたことが確認された。ただし、軸回転数500rpmの場合のみ、どちらの解析結果においても異常の兆候は認められなかった。以上のように、いくつかの運転条件でURIの解析結果に異常が現れたため、前述の通り、連続疲労試験の垂直荷重を2.5tonから2.0tonに変更した。

連続疲労試験の垂直荷重を2.0tonに変更したのち、軸回転数500rpmの場合にいずれかの荷重条件で初めてACCの代表値が0.9を下回ったのは、運転開始から91日目で、垂直荷重2.0tonの場合であった。そのURIの解析結果を図3に示す。図の通り、ウェーブレット解析ではaとbとの相関に時間的な揺らぎが発生し、周波数が正常な場合の34.1Hzから33.0Hzへと低下したことが確認され、軸回転数500rpmにおいて、運転開始から91日目で玉の転がり挙動に遅れが生じるといった影響が出始めた。さらに、ウェーブレット解析結果の上部にあるURIの時間変化をしてみると、左から11番目の山頂部の一部に突発的なピーク状の低下が認められた。これは一時的に超音波反射が弱くなった、つまり面圧が上昇したことを意味するため、摩耗粉による噛み込みが生じたものと予想できる。また非常にはっきりしたピーク状の低下であるため、関与した摩耗粉は比較的大きいものだと推測される。一方、同じ91日目における[2.0-1000]でのURIの解析結果を図4に示す。運転開始から30日目に比べるとウェーブレット解析の周波数がさらに低下しており、ACCの代表値も0.8を下回っていることが確認された。

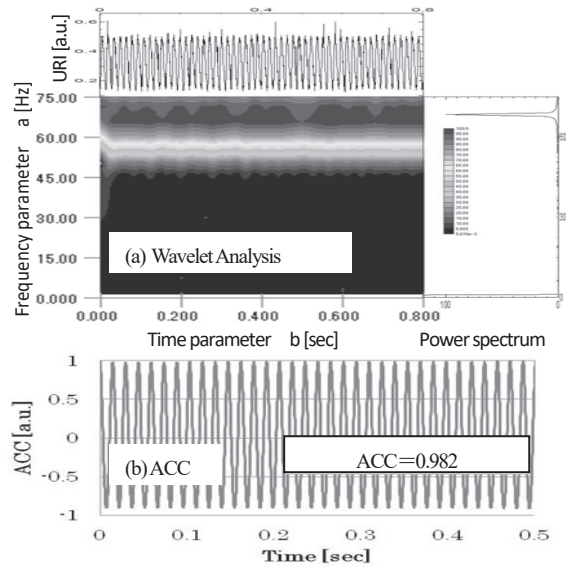


Fig.1 Analysis results of URI: [2.0-1000] 2days

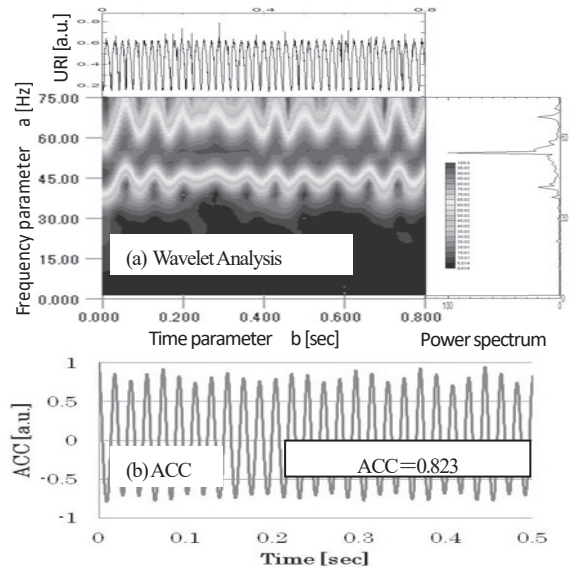


Fig.2 Analysis results of URI: [2.0-1000] 30days

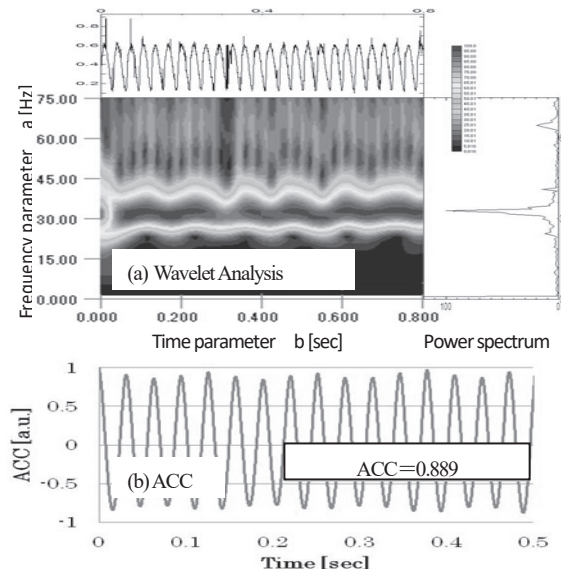


Fig.3 Analysis results of URI: [2.0-500] 91days

この軸受の場合、試験期間が想定した寿命の倍以上に達してしまったため、軸受の損傷をより早く進行させる目的で、連続疲労試験の垂直荷重を上昇させることとした。この際、軸受の推定寿命が 2.0ton と 2.5ton の場合のおよそ中間になるような荷重を計算し、2.3ton に決定した。垂直荷重を 2.3ton に変更して試験を継続したところ、運転開始から 159 日目には、軸回転数 500rpm の各荷重条件で ACC の代表値が 0.9 を下回った。そして、そこから約 20 日が経過した 181 日目にはすべての運転条件で URI の時間変化に玉の転がり挙動以外の突発的なピーク状の上昇や低下が顕著に確認できた。また、図 5 に示すように [2.0-1000]での URI の解析結果において、ACC の代表値が 0.6 程度の水準にまで低下していることが確認された。このような低い ACC の代表値は運転開始から 179 日目でも同様に認められ、連続した 2 回の測定で軸受に明らかな異常が発生していると判断できる値が得られたため、連続疲労試験を中止した。

3.2 URI の解析結果に対する軸回転数の影響

前述のように、同じ経過時間でも URI の解析結果への損傷状態の現れ方は運転条件によって異なる。そこで、軸回転数の影響に着目して以下のような検討を行った。

軸回転数 500rpm において初めて ACC の代表値が 0.9 を下回った運転開始から 91 日目における [2.0-250]での URI の解析結果を図 6 に示す。図 3 の [2.0-500]、図 4 の [2.0-1000]とは異なり、[2.0-250]ではウェーブレット解析及び自己相関性による解析のいずれにおいても、円滑な運転状態を示す結果となっている。次に試験を中止した 181 日目の [2.0-250]における URI の解析結果を図 7 に示すが、これも、ウェーブレット解析では円滑であり、ACC の代表値も 1 に近く正常な状態だと判断できる。一方、1000rpm については図 4 と図 5 より、運転開始 91 日目から 181 日にかけて軸受の損傷がさらに進んでおり、図 8 に示した 500rpm でも、軸受の損傷の進行が見てとれる。

上記の結果は、例え同じ経過時間でも本研究による解析を用いた異常の判断が、軸回転数によって分かれることを意味する。今回の試験では、30 日目の時点で軸回転数 1000rpm の結果から、軸受には何らかの損傷が発生していると推測されるが、その損傷による解析結果への影響は 500rpm で現れるまでには至っていなかった。それが、91 日目には 500rpm でも影響が認められるようになるのに対し、250rpm の場合、正常な状態に対応する解析結果になるという興味深い現象が確認できた。すなわち、軸

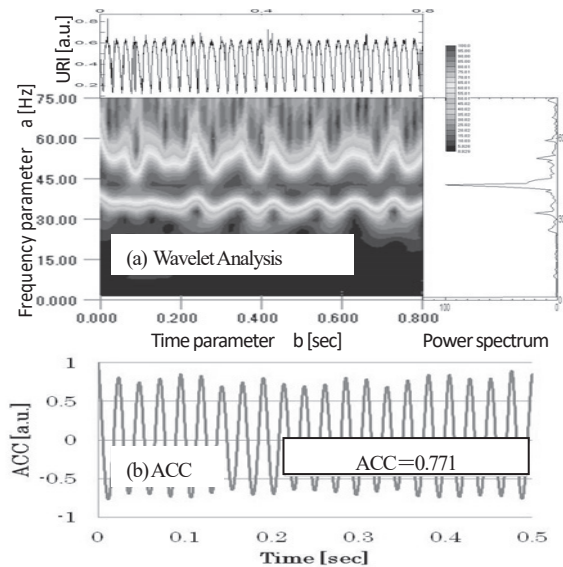


Fig.4 Analysis results of URI: [2.0-1000] 91days

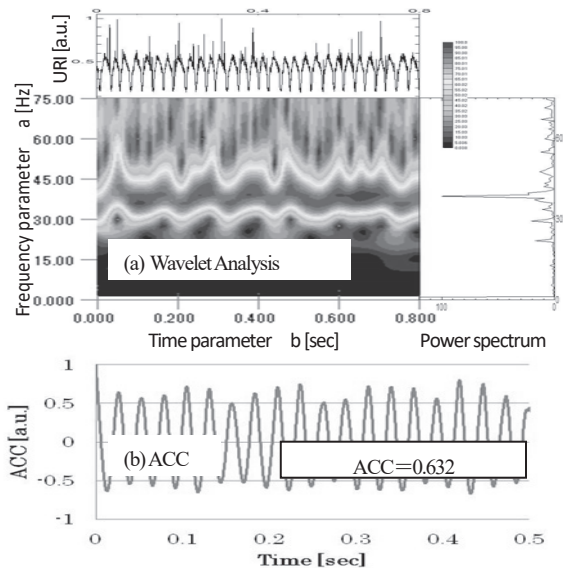


Fig.5 Analysis results of URI: [2.0-1000] 181days

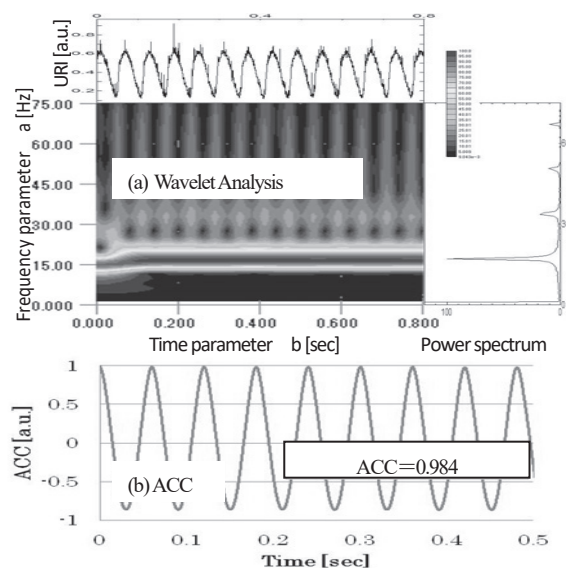


Fig.6 Analysis results of URI: [2.0-250] 91days

受に発生した損傷の影響は、運転条件の一つである軸回転数で異なるものと考えられる。

以上のことより、軸受の損傷が異常として URI の解析結果に現れ始めるのは高回転数側からであると推測される。ここで、軸受の転がり挙動については、運転初期には円滑な状態だが、時間の経過に伴って軌道面に軽微な損傷、例えば圧痕が発生し始め、それが影響を与えることが考えられる。このとき、圧痕が油を蓄える、いわゆるオイルポケットの役目を演じ、そこを転動体が通過すると、回転が速いほど転動体と軌道面との間に起こるすべり現象が顕著になると想定される。また、高回転数の方が圧痕の上を転動体が通過する単位時間あたりの回数が多くなるため、このすべりを受ける頻度が高くなると考えられる。一方、今回の試験では、こうした損傷状態が 250rpm の低速回転において転がり挙動に影響を与える程度までには至っておらず、URI の解析結果に異常が現れなかったものと思われる。

3.3 URI の解析結果に対する垂直荷重の影響

今回の連続疲労試験で得られた軸回転数 500rpm、1000rpm における ACC の代表値の時間に対する推移を図 9 に示す。図 9 の通り、いずれの軸回転数でも垂直荷重の値が大きくなるほど同じ経過時間における ACC の代表値が低くなっていることがわかる。また、500rpm より 1000rpm の方が運転の早い段階から ACC の代表値が大幅に低下している。一方、運転開始 2 日目から 181 日目にかけて、ウェーブレット解析の周波数を比較すると、軸回転数 500rpm では 2 日目の周波数が 34.1Hz であるのに対し、垂直荷重 1.0ton では変化しておらず、1.5ton では 31.7Hz に、2.0ton では 28.7Hz に低下している。次に、1000rpm では 2 日目の周波数が 68.2Hz であるのに対し、1.0ton では 56.7Hz に、1.5ton では 47.0Hz に、2.0ton では 38.5Hz に低下している。このような周波数の低下については、その低下の度合いが大きくなるほど転がり挙動が円滑でなくなることを意味している。

これらの結果から、軸回転数の違いばかりではなく、垂直荷重の値によっても URI の解析結果が異なり、軸受の損傷が異常として解析結果に現れ始めるのは高荷重側からであることが明らかになった。これに関しては、軸受にかかる負荷が大きいほど、損傷の影響を受けやすくなることに対応しているものと思われる。さらに、その垂直荷重の影響は高回転数側ほど大きいこともわかった。これについては、高回転数側ほど負荷を受ける頻度が高

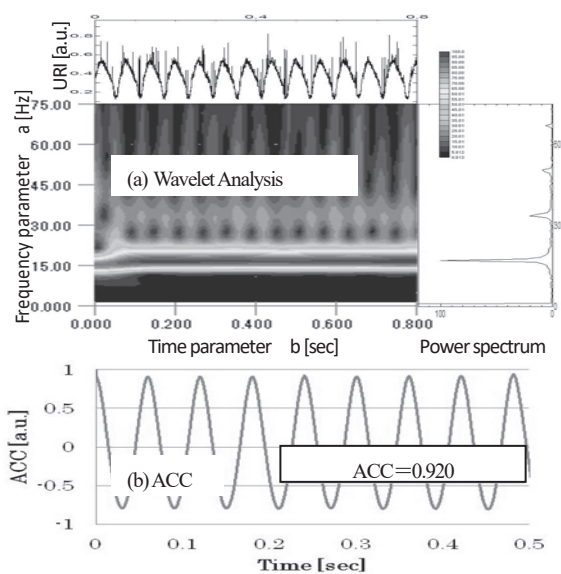


Fig.7 Analysis results of URI: [2.0-250] 181days

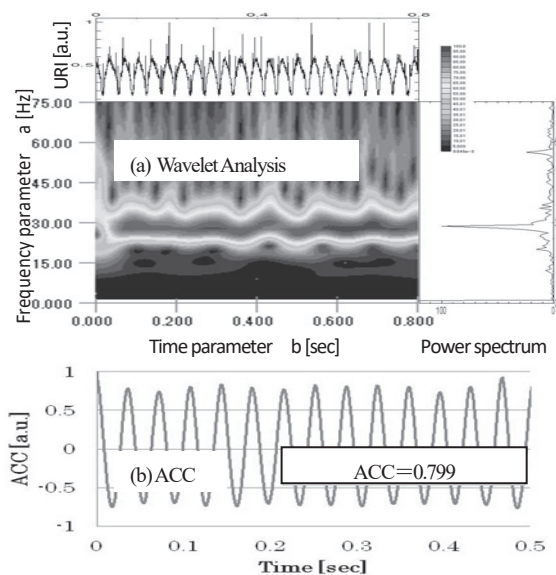


Fig.8 Analysis results of URI: [2.0-500] 181days

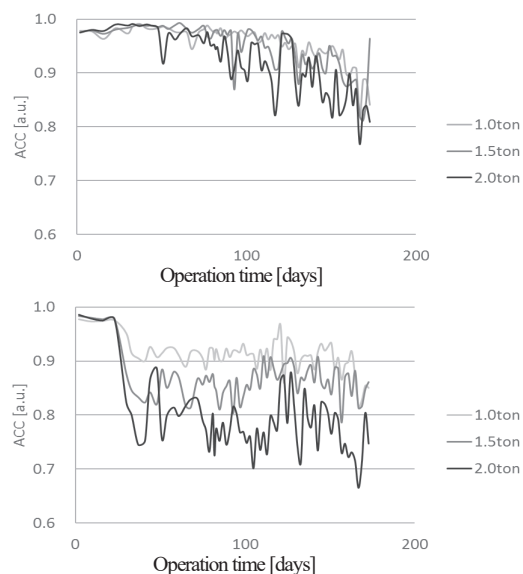


Fig.9 Changes of ACC with time

まり、転がり挙動に与える影響が強まるためであると推定される。

3.3 続疲労試験後の軸受の観察

本実験における連続疲労試験を終了したのち、そこに用いた軸受を分解し、内部観察を行った。まず、保持器の表面写真を図 10 に示す。この図に示したような傷が多数確認できたことから、保持器から多くの摩耗粉が発生したと想定でき、これが 3.1 節で示した URI のピーク状の低下をもたらした主因と考えられる。次に内輪および外輪軌道面の表面写真を図 11、図 12 に示す。なお、白い帯状のものは軌道面の損傷とは無関係の光の反射である。いずれの写真にも見られる白い点状の部分は圧痕と考えられ、特に図 11、図 12 において丸で囲んだ箇所には比較的大きな圧痕あるいは小さいはく離と思われる部分が確認できる。こうした圧痕がオイルポケットの役目を演じることで、すべり現象が生じやすくなり、URI の解析結果に影響を与えたと 3.2 節で推測したが、図 11 および図 12 の観察結果は、その推測を裏付ける証拠と考えている。

4. 結論

軸受の損傷が異常として URI の解析結果に現れ始めるのは高回転数側からであることがわかった。また、軸回転数の違いばかりでなく、垂直荷重の値によっても URI の解析結果は異なり、高荷重側から異常が現れ、その影響は高回転数側ほど大きいことを明らかにした。

これらの運転条件の影響は摩耗粉の噛み込み、軸受の内輪および外輪軌道面における圧痕や小さなはく離の発生と強く関連していることが明らかとなった。

参考文献

- [1] 若林利明ほか：10 回評価・診断に関するシンポジウム講演論文集、日本機械学会(2011), 91-94.
- [2] 須本賢太郎ほか：平成 26 年度日本設備管理学会秋季研究発表大会論文集、(2014), 41-44.

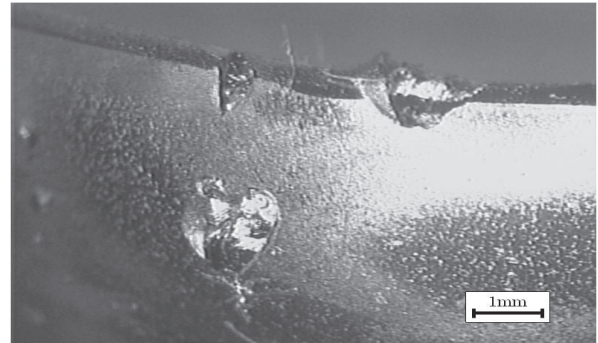


Fig.10 Photograph of damaged parts of retainer

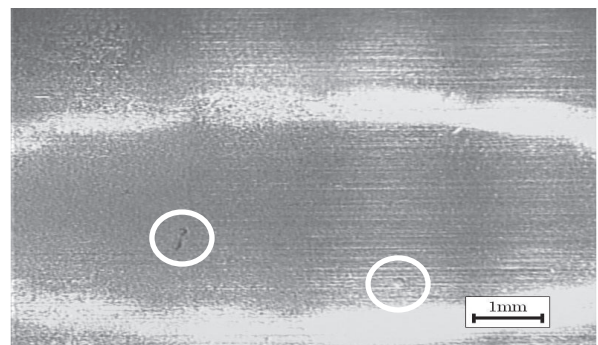


Fig.11 Photograph of inner ring raceway

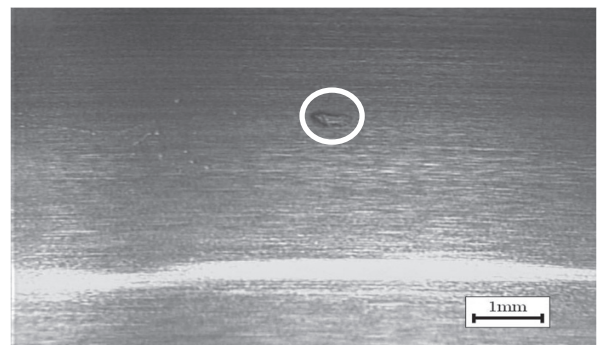


Fig.12 Photograph of outer ring raceway