

水素雰囲気下における転がり軸受への水素の侵入挙動

Hydrogen Penetration Behavior into Rolling Bearings under Hydrogen Atmosphere

(株) ジェイテクト (正) *金谷 康平 (非) 西坂 寿人

Kohei Kanetani, Hisato Nishisaka

JTEKT Corporation

1. はじめに

カーボンニュートラルを背景として、水素社会の実現に向けた取り組みが世界的に加速している。これに伴い、燃料電池や水素エンジンなどの水素利用機器の実用化が推進されているものの、これらに使用される金属材料の水素脆化への対応が課題になってきている。特に、大きな荷重を受けながら回転する転がり軸受は、転がり接触部での複雑な水素の発生・侵入挙動がその耐久性に大きく影響すると考えられる。これまでに、水素雰囲気で使用される軸受の運転条件が水素の発生に及ぼす影響について様々な調査が行われており、潤滑油の高温化やせん断、転がり接触部の新生面の触媒効果などによる水素の発生が確認されている^{1,2)}。一方、発生した水素の鋼中への侵入挙動については調査された例が少なく、理解が十分に進んでいない。そのため、軸受を水素雰囲気で使用する場合の耐久性を設計段階で予測することは難しいのが現状である。以上のことから、水素利用機器においては、十分な安全率を確保するために、一般的な水素環境での耐久性に優れるマルテンサイト系ステンレス製の軸受が広く用いられてきた。しかしながら、水素利用機器の本格的な普及が始まると、汎用性が高いSUJ2製の軸受への代替が求められると想定される。そこで本研究では、水素雰囲気で使用されるSUJ2製軸受への水素侵入挙動を明らかにすることを目的とした。

2. 実験方法

2.1 試料

転動疲労 (Rolling contact fatigue, RCF) 試験には鋼球を3個とした51305スラスト玉軸受を用い、軌道盤と鋼球はSUJ2の焼入れ焼戻しとした。軌道盤の一方を軌道溝がない平板（円板試料）としており、以降に示す水素量分析はこの円板試料を対象に実施した。

2.2 雰囲気制御転動疲労試験

転動疲労試験はスラスト型転動疲労試験機で実施した。軸受周辺の雰囲気は、密閉チャンバーを利用して水素雰囲気と窒素雰囲気（いずれも1atm）の2種類に制御した。試験条件は、ヘルツの接触面圧を4.4GPa、回転数を1200min⁻¹とし、潤滑剤には合成炭化水素油を基油の主成分としたウレアグリースを用い、円板試料の転動部が完全に浸漬する量を封入した。保持器は黄銅製保持器を使用した。

2.3 水素量分析

鋼中の水素量は四重極型質量分析計を用いた昇温脱離法 (Thermal desorption analysis, TDA) により測定した。転動疲労試験後の円板試料は、試験後にただちに液体窒素に浸漬させ中心角45°の範囲を切り出し、エタノールで洗浄後、再度液体窒素に浸漬したうえで-50°Cから600°Cまでの間を200°C/hの速度で昇温することで、試料から放出される水素量を分析した。なお、以降の結果には水素の放出が確認された0~500°Cの範囲の実験データを図示する。

3. 結果

3.1 水素雰囲気が鋼への水素侵入に及ぼす影響（転動あり）

水素雰囲気中で軸受を転動させた場合の水素侵入挙動を調査するため、80°C、100°C、120°Cに設定した水素雰囲気中で300hの転動疲労試験を実施し、試験前後の水素量を分析した。得られた結果をFig.1に示す。本結果より、80°Cと100°Cでは転動させても水素量がほとんど変化しないものの、120°Cで転動した場合は水素量が減少していることがわかる。このように、水素雰囲気であっても転動による鋼中の水素の増加が認められなかった。

3.2 水素雰囲気が鋼への水素侵入に及ぼす影響（転動なし）

次に、軸受を転動させない場合の水素侵入挙動に及ぼす水素雰囲気の影響を調査するため、大気中および水素雰囲気中で軸受を転動させずに300hだけ保持し、水素量を分析した。大気中の保持は80°C、100°C、120°Cに設定した恒温槽で行い、水素雰囲気中での保持は120°Cに設定した転動疲労試験機で、グリースに浸漬した状態で行った。得られた結果をFig.2に示す。本結果より、水素量は100°C以上の環境に保持することで減少するこ

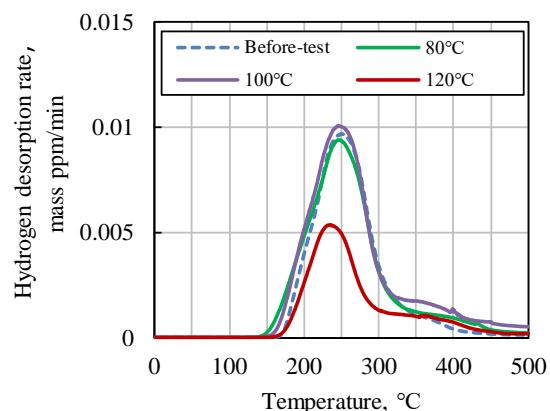


Fig.1 TDA profiles of hydrogen before and after the RCF test in H₂ gas.

と、および120°Cでの水素量は雰囲気によらずおおよそ同等であることが確認できる。すなわち、高温になるほど水素が放出されるものの、水素雰囲気からの顕著な水素の侵入は生じていないと判断できる。

ここで、Fig.1,2 の結果を全水素量に換算し、雰囲気温度との関係で整理した結果をFig.3に示す。本結果より、水素雰囲気中で転動させた場合は、見かけ上100°Cまでは水素量がほとんど変化せず、120°Cで放出されているように見えるが、転動なしの場合と比較すると、100°C以上で明確に水素量が多くなっていることがわかる。これは、温度に依存した水素の放出と並行して、転動による水素の侵入が生じていることを示唆している。

3.3 転動によって侵入する水素の起源

水素雰囲気中の転動によって侵入する水素の起源を特定するため、120°Cに設定した窒素雰囲気中で300hの転動疲労試験を実施した後、水素量を分析し、水素雰囲気中で行った結果(Fig.1の120°C)と比較した。結果をFig.4に示す。この結果より、雰囲気の違いによらずおおよそ同等の水素量となっており、水素雰囲気から直接侵入した可能性は低いと考えられる。すなわち、水素雰囲気中の転動によって侵入する水素は、グリース由来で発生した水素であると判断できる。

なお、大気中で転動させた場合は、水素雰囲気中で転動させた場合と比較して水素が侵入しにくいと考えられる。これは、大気の場合、転動面に形成された活性な新生面が酸化膜で保護されるため、グリース中の炭化水素基の分解による水素の発生や、発生した水素の鋼中への侵入を抑制するためであると推定される³⁾。すなわち、雰囲気圧力が1atm程度以下の低圧の場合は、水素雰囲気中の水素ガスは鋼中に侵入する水素の直接的な起源にはならないものの、活性な新生面を維持することで間接的に水素の発生と侵入を助長している可能性があるといえる。

3.4 転動によって侵入する水素のトラップサイト

これまでに示したように、転動疲労試験前には、昇温脱離法によって約250°Cで放出される水素が多く存在している。これは雰囲気炉での焼入れ時に残留オーステナイト(γ)にトラップされた水素である⁴⁾。この軸受を水素雰囲気で転動させると、水素が放出すると同時に水素が侵入するが、この侵入水素は同様に約250°Cの位置(残留γ)にトラップされる。ここで、水素に起因する特有の転動疲労組織として白色組織が知られているが、近年の研究によって、水素によって誘起される旧γ粒界き裂が白色組織の生成起点になると考えられている⁵⁾。本研究で明らかになった残留γにトラップされる水素が、旧γ粒界き裂を起点に発生する白色組織の生成にどう作用するかは明らかになっておらず、今後の課題である。

4. まとめ

水素雰囲気で使用されるSUJ2製軸受への水素侵入挙動を調査した。その結果、雰囲気の温度が高いほど水素の侵入が増加すること、および侵入する水素の起源は雰囲気中の水素ガスではなく、グリースが分解することで発生した水素であることを見出した。グリースの分解と水素の侵入は、水素雰囲気で転動することで形成された活性な新生面によって促進されることで、酸化膜で保護される大気中と比較して侵入する水素の量は多くなると推測した。一方、雰囲気の温度が高い場合には鋼からの水素の放出も同時に生じており、水素雰囲気で使用されたとしても、必ずしも軸受中の水素量が増加しないことがわかった。

文献

- 1) 江波 翔・山田紘樹・小俣弘樹：トライボロジスト, 68, 12 (2023) 868.
- 2) 伊藤元博：NTN TECHNICAL REVIEW, 82 (2014) 88.
- 3) 遠藤敏明・董 大明・今井 裕・山本雄二：トライボロジスト, 49, 10 (2004) 801.
- 4) 西坂寿人：CAMP-ISIJ, 33 (2020) 327.
- 5) 高崎大裕・祐谷将人・根石 豊・小坂 誠・崎山裕嗣・大村朋彦・河野佳織：鉄と鋼, 110, 14 (2024) 1150.

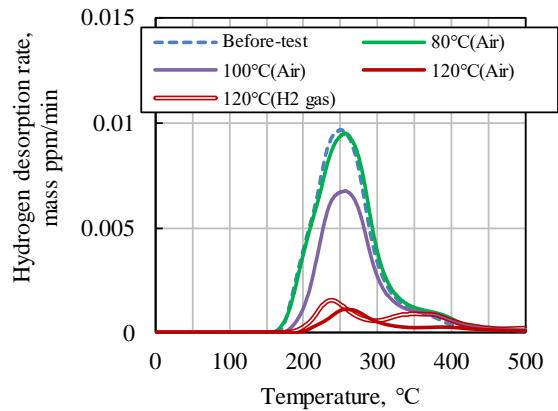


Fig.2 TDA profiles of hydrogen before and after the aging test.

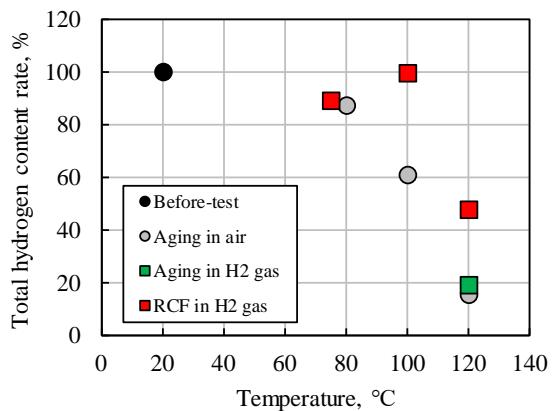


Fig.3 Total hydrogen content rate.

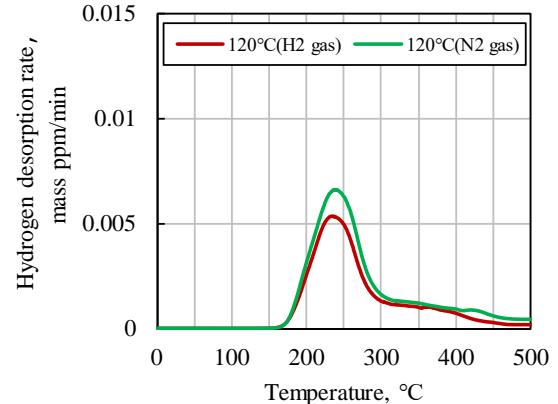


Fig.4 TDA profiles of hydrogen after RCF test in H₂ and N₂ gas at 120 degrees.