

## 技術資料

## Technical Data

## 水素脆性型の転動疲労強度に及ぼす侵入水素の影響

木南俊哉\*

## Effect of Hydrogen on Rolling Contact Fatigue Phenomena due to Hydrogen Embrittlement

Toshiya Kinami

## Synopsis

Rolling contact fatigue phenomena due to hydrogen embrittlement are serious problems in bearings for automotive alternators and automotive transmission parts such as gears and CVT. When hydrogen, which is decomposed from lubricant oil, enters into the surface of the parts in service, the rolling contact fatigue life decreases remarkably. The hydrogen embrittlement is an essential problem for the rolling contact fatigue strength as well as the nonmetallic inclusion.

However, the standard testing method of the rolling contact fatigue due to hydrogen embrittlement has not been established yet. In this study, the roller-pitting test was investigated. The hydrogen content during the test was measured by the hydrogen thermal desorption analysis (TDA).

In case of over slip ratio -40 % and lubricant A, the rolling contact fatigue phenomena due to hydrogen embrittlement occurred with white structure. In case of slip ratio -20 % or lubricant B, the hydrogen embrittlement did not occur and the rolling contact fatigue life elongated for less hydrogen content in the specimens. In spite of the increase of the rotating speed, the rolling contact fatigue life did not become short. Therefore, it was estimated that the hydrogen embrittlement phenomena was improved by the increase of lubricant film thickness. The diffusible hydrogen content of the testing specimens was tried to be measured using rapid cooling and a large furnace.

## 1. 緒言

自動車用エンジンの電装・補機に使用されている軸受<sup>1), 2)</sup>や特殊なトラクション潤滑油<sup>3)</sup>を用いた歯車やCVT (Continuously Variable Transmission 無段変速機)などの動力伝達部品や風力発電用のギヤボックス軸受<sup>4)</sup>で、水素脆性型の早期転動疲労剥離が問題となっている。この剥離ではき裂形態が粒界き裂であり、粒界き裂に沿った白色組織変化を伴うことが多い。

水素脆性型の早期転動疲労剥離の原因は、潤滑油から侵入する水素と考えられている。引張圧縮疲労では鋼中

に水素が侵入することにより、疲労強度が低下することが報告されており<sup>5), 6)</sup>、転動疲労でも水素によって強度低下が生じていると考えられる。

この水素脆性型の転動疲労剥離は介在物起因の剥離と同様に転動疲労の本質的破壊形態の一つと考えられる。また、水素脆性型の転動疲労は部品の高強度、高出力化と潤滑油の多様化から今後も増加が予想される。

水素脆性型の転動疲労強度の評価方法は水素添加材の転動疲労試験<sup>1), 7)</sup>や特殊潤滑油を用いた軸受での評価<sup>2), 3)</sup>が行われているが、未だ標準的試験方法は確立されていない。著者らは水素脆性型の転動疲労試験法と

2013年5月1日受付

\*大同特殊鋼(株)研究開発本部 (Daido Corporate Research &amp; Development Center, Daido Steel Co., Ltd.)

して水素添加材の転動疲労試験とすべりを伴うローラーピッチング試験を行ってきた<sup>8)・9)</sup>。後者は試験中に潤滑油から水素が侵入するため、より実部品に近い評価法と考えられる。

しかし、ローラーピッチング試験での水素脆性型の剥離発生条件は明らかではなく、同試験片の侵入水素量も未確認であった。

そこで、ローラーピッチング試験での試験条件（すべり率、面圧、潤滑油、回転数）と水素脆性剥離の発生有無の関係および試験後の侵入水素量を調査し、水素脆性型転動疲労強度に及ぼす侵入水素量の影響を検討した。また、水素脆性機構の解明には拡散性水素量の測定が必要と考えられるため、試験停止直後の急速冷却と水素分析装置の大径化による拡散性水素量の測定を試みた。

## 2. 試験方法

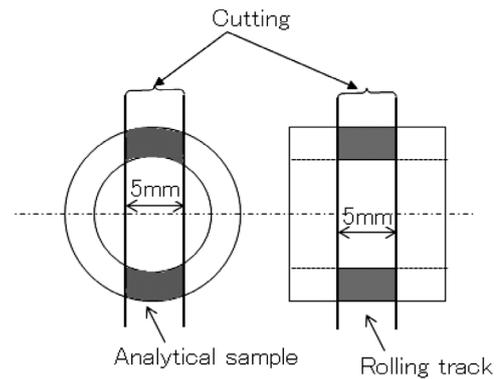
### 2. 1 水素脆性型ローラーピッチング

水素脆性型の転動疲労強度を評価するために、すべりを伴う2円筒転動疲労試験（ローラーピッチング試験）を行った。試験条件は面圧2～3.7 GPa、すべり率-20～-60%、油温90℃、回転数750～3000 rpmで行った。相手ローラーはSUJ2焼入れ焼戻し材で、軸方向に曲率半径150 mmのクラウニングを有する直径130 mmの円筒である。潤滑油は市販のオートマチックトランスミッション油A,B（以下潤滑油A,B）を用いた。

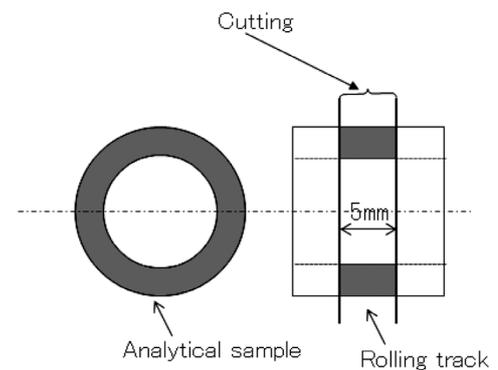
供試材はJIS SCr420鋼を用い、外径26 mm内径12 mmの中空円筒試験片を作製した後、温度930℃で浸炭処理を行い、850℃で焼入れ後、160℃で焼戻した。表面を深さ0.15 mm研削し、試験片を仕上げた。試験片の表面硬さは747 Hv、550 Hv深さは0.9 mm、表層C濃度は0.8%である。

### 2. 2 昇温脱離法による水素分析

ローラーピッチング試験中の侵入水素量を昇温脱離法による水素分析で測定した。面圧は2.5 GPa、油温90℃、回転数1500 rpmで約16時間試験を行った後、試験を中断し直ちに試験片を取り外し、Fig. 1 (a)に示したように切断により転走面下より幅5 mm長さ5 mm厚さ7 mmの分析試料を採取した。その後ガスクロマトグラフを用いて、昇温速度100℃/hで常温から600℃まで水素分析を行った。なお、試験機停止から水素分析開始までの時間は約40分である。



(a) a sample for a standard furnace



(b) a sample for a large furnace

Fig. 1. Analytical samples for measurement of hydrogen content using a standard furnace (a) and a large furnace (b).

## 3. 試験結果

### 3. 1 すべり率および潤滑油の影響

Fig. 2に水素脆性型のローラーピッチング試験結果を示す。潤滑油Aを用いた場合、すべり率-60%、-40%に比べてすべり率-20%では大幅に長寿命化する。

水素脆性剥離では転走面下に樹木状の白色組織を生成する特徴があるため、寿命試験後の転走面下の組織変化を全て調査した。Fig. 3 (a)に白色組織の観察例を示す。すべり率-60%、-40%では全ての試験片に水素脆性型の白色組織が生成する。一方、すべり率-20%はFig. 3 (b)に示したように白色組織の生成は一部を除いて認められず、水素脆性が抑制されている。なお、白色組織の走査型電子顕微鏡観察では網目状のき裂の合間に白色組織が観察されたことから、き裂が先行して発生していると考えられる。

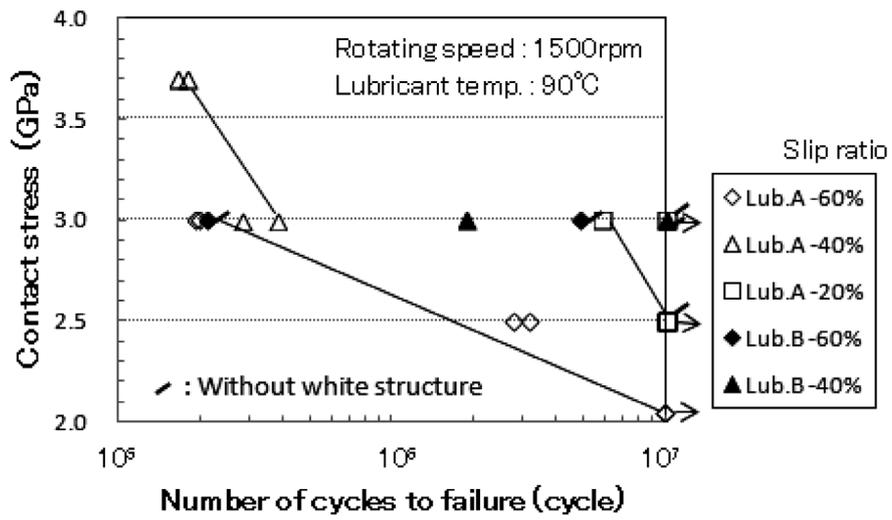


Fig. 2. Effect of contact stress, slip ratio and lubricant on roller-pitting failure life.

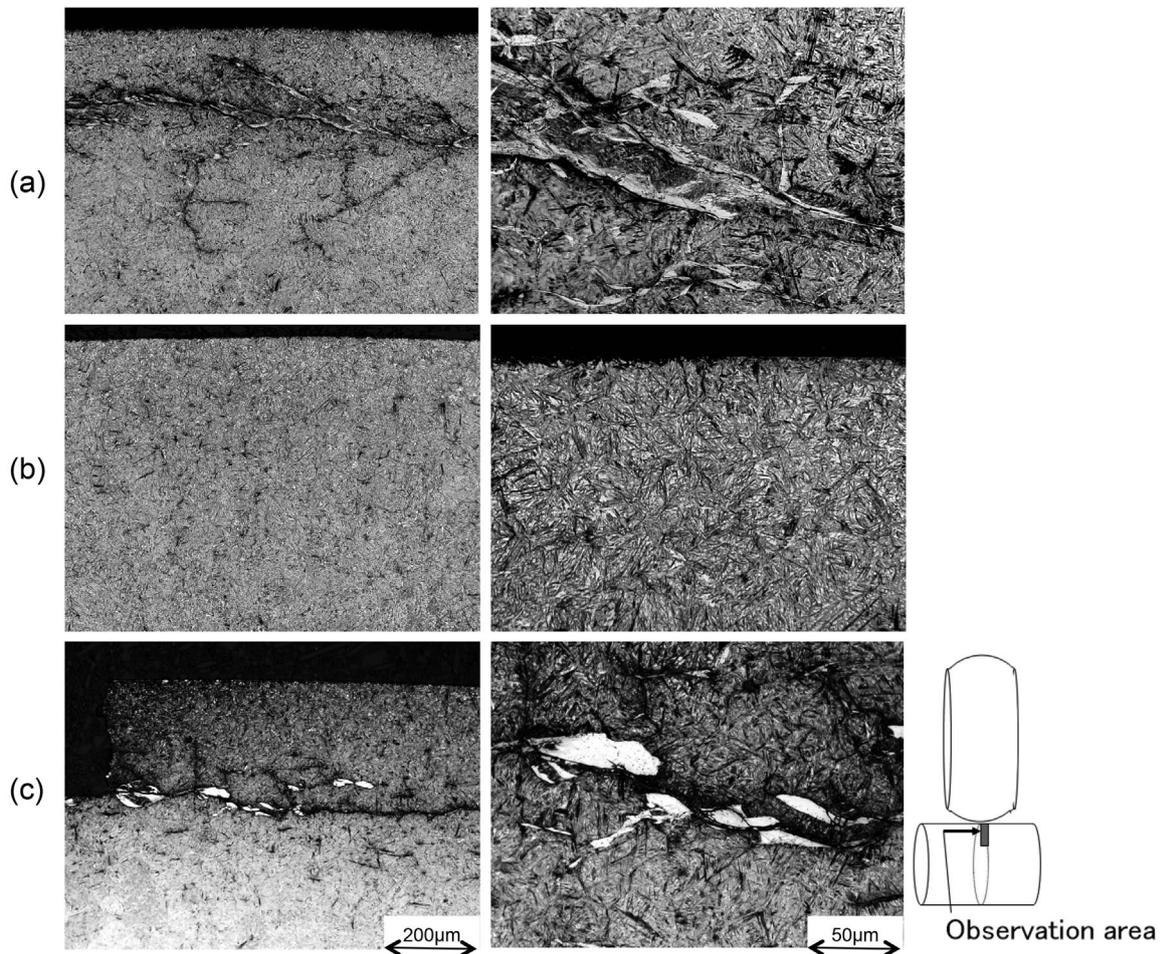


Fig. 3. Microstructure change under contact surface.

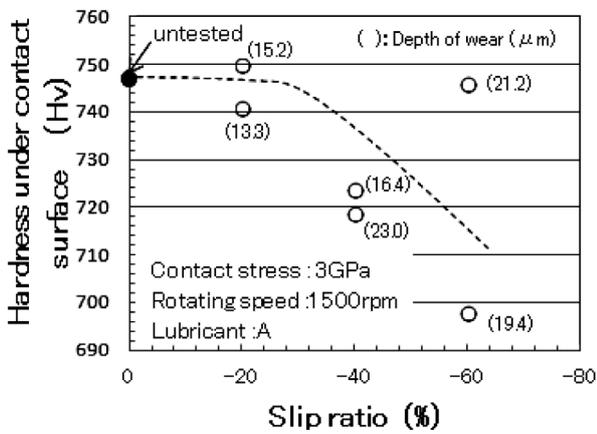
(a) lubricant A, slip ratio -60 %, contact stress 2.5 GPa,  $N_f=2.8 \times 10^6$

(b) lubricant A, slip ratio -20 %, contact stress 2.5 GPa,  $N=1.0 \times 10^7$

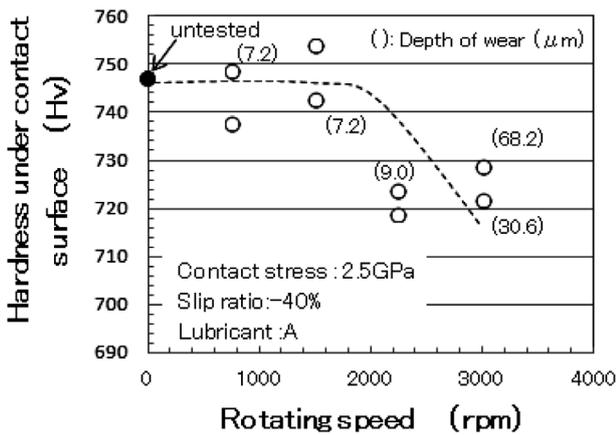
(c) lubricant B, slip ratio -40 %, contact stress 3.0 GPa,  $N_f=1.9 \times 10^6$

また、Fig. 4 (a) に示したように試験後の転走面硬さはすべり率 -20% が -40%、-60% に比べて高い。これは、低すべり率では摩擦発熱量が小さいためと考えられる。また、摩耗深さもすべり率 -20% がやや浅い傾向であった。

一方、潤滑油 B を用いた場合、潤滑油 A に比べてすべり率 -40%、-60% での寿命が大幅に向上する。潤滑油 B では Fig. 3 (c) に示したすべり率 -40% の 1 本のみ白色組織が生成し、すべり率 -60% においても白色組織は観察されず、水素脆性が抑制されている。



(a)



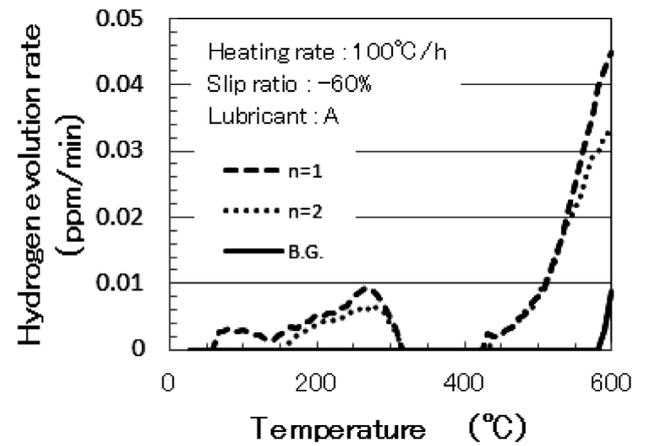
(b)

Fig. 4. Relationship between hardness under contact surface after roller-pitting test and slip ratio (a), rotating speed (b).

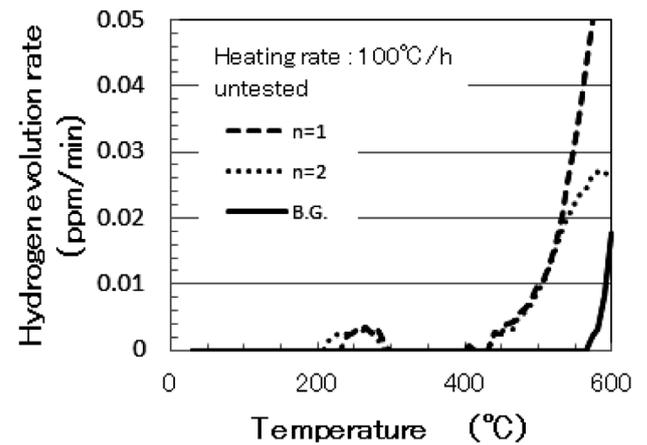
### 3. 2 侵入水素量の測定

Fig. 5 (a) は水素脆性が発生した条件（潤滑油 A，すべり率 -60%）での水素放出曲線，Fig. 5 (b) は未試験材での水素放出曲線である。

試験材では 260℃ 付近の 2 次ピークの水素放出量が未試験材の 2～3 倍に増加する。また、100℃ 付近の 1 次ピークでも一部水素放出が認められる。このことから試験中に水素が侵入していると考えられる。なお、試験は 2 本行い、比較のため分析後に再度昇温分析したバックグラウンドも示した。



(a)



(b)

Fig. 5. Hydrogen evolution rate profiles of specimens tested at slip ratio -60% and lubricant A (a), untested (b).

Fig. 6 に 300 °C までに放出された拡散性水素量を比較して示す。水素脆性が発生した条件の拡散性水素量は未試験材に比べて約 4 ~ 7 倍に増加している。一方、水素脆性が抑制された条件（潤滑油 B, すべり率 -60 % および潤滑油 A, すべり率 -20 %）でも未試験材に比べて約 3 倍に増加している。

即ち、水素脆性の抑制された条件でも水素侵入はあるが、侵入量が少ないことで水素脆性が抑制されたと考えられる。

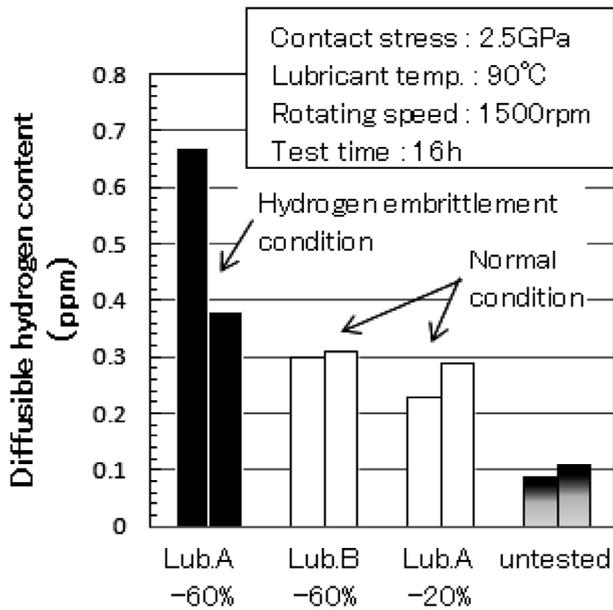


Fig. 6. Comparison of diffusible hydrogen content due to slip ratio, lubricant and untested.

### 3. 3 回転数の影響

Fig. 7 に面圧 2.5 GPa, すべり率 -40 %, 潤滑油 A での寿命に及ぼす回転数の影響を示す。回転数が 750 rpm から 3000 rpm まで増加してもほとんど寿命は低下しない。なお、転走面下には低回転数でも高回転数でも白色組織が生成しており、水素脆性剥離と考えられた。

Fig. 4 (b) に示したように試験後の転走面硬さは高回転数の 3000 rpm で低下する。これは、すべり速度の増加により摩擦発熱量が増加するためと考えられる。また、摩耗深さも回転数の増加により増加した。

摩擦発熱量は回転数とすべり率の積に比例する。すべり率および回転数の増加により表面温度は上昇するため、すべり率の増加は寿命を低下させる。一方、回転数が増加しても寿命は低下しなかった。これは回転数の増

加による油膜厚さの増加が（油膜厚さはころがり速度の約 0.7 乗に比例）寿命を向上させるためと考えられる。以上により、油膜厚さの増加が水素脆性寿命を向上していると考えられることから、水素脆性剥離が発生する因子はすべりによる摩擦発熱とともに金属接触が考えられる。

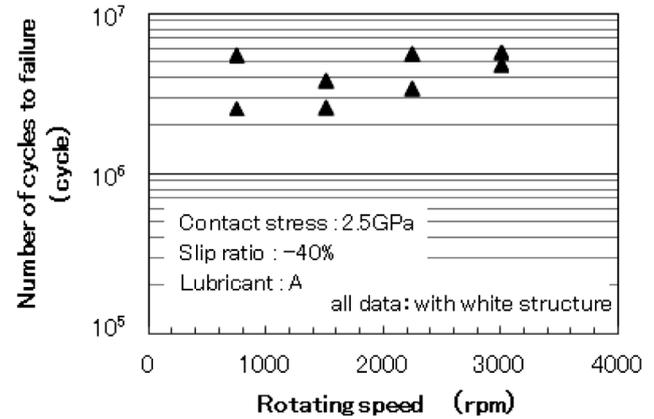


Fig. 7. Relationship between roller-pitting failure life and rotating speed.

## 4. 拡散性水素量の測定

### 4. 1 水素分析法の改善

Fig. 5 (a) での水素分析では陰極チャージした水素添加材で現れる 100 °C 付近の 1 次ピークが認められない。これは試験中に侵入した拡散性水素が測定時には抜けているためと考えられる。

ローラーピッチング試験では摩擦発熱があるため試験停止直後の温度が高く、拡散性水素が抜けてしまっていると考えられる。そこで、試験機停止直後に液体窒素冷却による急速冷却を行った。具体的には試験停止直後に噴射圧力 0.02 MPa で 90 秒間ノズルを用いて試験片表面に液体窒素を噴射冷却した。その後、ドライアイス粉末で試験片部を冷却した状態で試験片を取り外した。

また、試料切断数を減らして水素散逸を防止するため最大試料径を直径 26 mm とした大径用水素分析炉を作製した。試験片は Fig. 1 (b) に示したように転走面幅（約 5 mm）でリング状に切り出し、大径用水素分析装置を用いて測定した。

なお、試験は面圧 2.05 GPa, 潤滑油 A, すべり率 -60 %, 油温 90 °C, 試験時間 16 時間で行った。

## 4. 2 水素分析結果

試験停止直後の液体窒素冷却と大径用水素分析装置により改善したローラーピッチング試験後の水素分析結果を Fig. 8 に示す。100 °C 付近に高い1次ピークが測定できており、試験中に拡散性水素が侵入していることが明らかとなった。

但し、同一測定条件においても1次ピークに高低のバラツキが見られ、現時点では安定した測定結果が得られていないが、未試験材では100 °C 付近の水素放出はゼロであり、低い1次ピークでも試験中に水素侵入があることは明らかである。

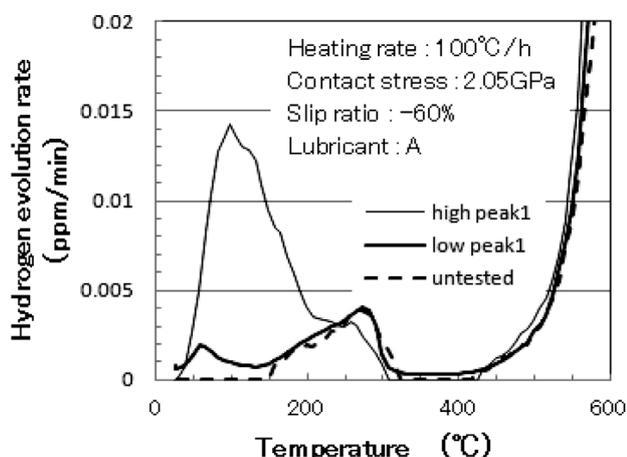


Fig. 8. Hydrogen evolution rate profiles measured using rapid cooling and a large furnace.

## 5. 結 論

水素脆性型の転動疲労強度に及ぼす侵入水素の影響を明らかにすることを目的にローラーピッチング試験での試験条件の影響を調査し、試験後の侵入水素量を測定することにより、以下の結論を得た。

- (1) 潤滑油 A, すべり率 -40 %以上では試験中に水素が侵入し、白色組織を伴う水素脆性剥離が発生する。一方、すべり率 -20 %および潤滑油 Bでは寿命が向上し、白色組織が抑制される。すべり率 -20 %および潤滑油 Bでは侵入水素量が少なく、水素脆性が抑制されたためと考えられる。
- (2) すべり率と回転数の増加は共に摩擦発熱量を増加するが、回転数が増加しても寿命低下は認められない。これは回転数の増加による油膜厚さの増加が水素脆性を抑制するためと考えられる。

- (3) 水素分析法を改善することで試験中に侵入した拡散性水素(水素放出曲線の100 °C 付近の1次ピーク)を測定することができた。

(文 献)

- 1) 玉田健治, 前田喜久男, 対馬全之: NTN TECHNICAL REVIEW No.61(1992), 29.
- 2) 村上保夫, 武村浩道, 中道治, 小川隆司, 桃野達信, 岩本章, 石原滋: NSK Technical Journal, No.656(1993), 1.
- 3) 木野伸郎, 山本建, 尾谷敬造, 内山典子: 日本機械学会論文集(A編), 70(2004), 1072.
- 4) M. H. Evans: Materials Science and Technology, 28(2012), 3.
- 5) 村上敬宜, 長田淳治: 日本機械学会論文集(A編), 70(2004), 1093.
- 6) 小畑達郎, 山崎真吾, 岡正春, 樽井敏三, 橋村雅之: CAMP-ISIJ, 13(2000), 1182.
- 7) 平岡和彦, 藤松威史, 常陰典正, 山本厚之: トライボロジスト, 52(2007), 888.
- 8) 木南俊哉: 電気製鋼, 79(2008), 77.
- 9) 木南俊哉, 木村和良: 電気製鋼, 81(2010), 89.