

トランスミッションユニットにおける ベアリング水素脆性剥離発生メカニズム

丸山 博之* 早川 和宏* 豊原 耕平*
征矢 啓* 金山 義輝* 佐々木 克明**

抄 録

ベアリング単品での水素脆性剥離については多くの研究報告がなされているが、実際の使用環境での研究報告はあまり見られない。本報ではContinuously variable transmissionユニットにおける組付け状態と運転状態を考慮し、プーリ支持ベアリングに水素脆性剥離が発生するメカニズムと影響因子を明らかにしたので紹介する。

1. ま え が き

近年、CO₂削減のためトランスミッションへの要求性能は年々高まり、さらなる低フリクション、小型軽量化が求められている。電動化車両に適用されるトランスミッション(e-Axle)においてはモータの小型化が進み将来的に高回転化が進む見込みである。またコンベンショナルな無段変速機(以下CVT)においても、さらなるレシオカバレッジの拡大や内部フリクションの低減が要求される。このようなトランスミッションに用いられるベアリングにおいて、苛酷な環境下でもその使われ方を考慮した信頼性保証をしていく必要がある。

ベアリングの様々な故障モードの一つに水素脆性剥離がある。ベアリングの水素脆性剥離が発生するメカニズムについて、ベアリング単品では多くの研究報告⁽²⁾がなされているが、実際のトランスミッション使用環境での研究報告はあまり見られない。

ベルトCVTではプーリを支持するためのベアリングが複数使われている(Fig. 1)。ベアリング単体試験やCVTユニットでの通常試験条件では設計通りの寿命を確保できているが、高油温条件で発進、停止、および高速走行を組み合わせた複合加速耐久試験(以後、複合加速耐久試験という)を実施したところ、該当条件で算出した寿命よりも早期に破損する現象が認められた。Fig. 2に示すようにベアリング外輪転走面の負荷圏側に剥離が発生しており、その内部に白層が認められた。

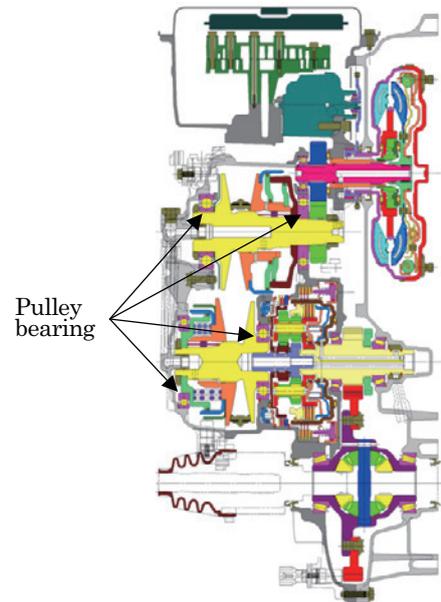


Fig. 1 Schematic structure of Jatco CVT 7

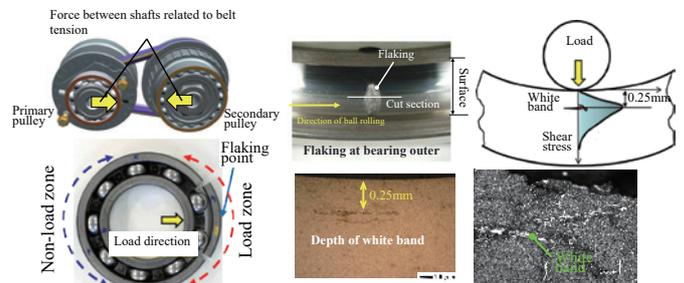


Fig. 2 Hydrogen embrittlement flaking

* 部品システム開発部

**NTN 株式会社 適用技術部

さらに詳細に分析した結果、通常より多くの水素侵入量が認められ、水素脆性剥離が発生していることがわかった。

本報ではCVTユニットにおける組付け状態と運転状態を考慮し、プーリ支持ベアリングに水素脆性剥離が発生するメカニズムを明らかにしたので紹介する。

2. 水素脆性剥離の発生メカニズム

摺動部の水素による金属脆性剥離現象は、一般的に以下のメカニズムで発生すると考えられている (Fig. 3)。

- (1)金属摺動部面の面圧，すべり速度および潤滑油温それぞれは炭化水素などから水素を分解する活性化エネルギーの影響因子である。それらは金属間の油膜切れに影響する因子でもある。つまり高面圧，高すべり，高油温で繰り返し摺動すると，水素が発生し，また油膜切れにより金属新生面を露出させやすくなる。
- (2)新生面の露出は触媒として作用するため水素原子に分解する活性化エネルギーは小さくなる。このため新生面が水素原子発生加速要因となり，多くの水素原子が発生する。
- (3)水素原子は油膜切れが発生した新生面に吸着する。
- (4)吸着した水素原子は，自身の持つ運動エネルギーで金属内部へ拡散する。
- (5)内部に拡散した水素原子は接触直下のせん断応力発生部位に集約される。
- (6)これが連続して繰り返されることで，白層となる。
- (7)白層部位は硬く脆い組織であり繰り返し内部応力が与えられるとその白層部位から内部破壊が進み亀裂が起こり，最終的に摺動部表面に進展し剥離現象に至る。
- (8)一方で金属内に侵入した水素は放出される特性がある。そのため，連続運転環境下で水素は侵入し続けるが，停止時などを含む断続運転の場合は水素が放出されるため水素脆性剥離が発生しにくい。

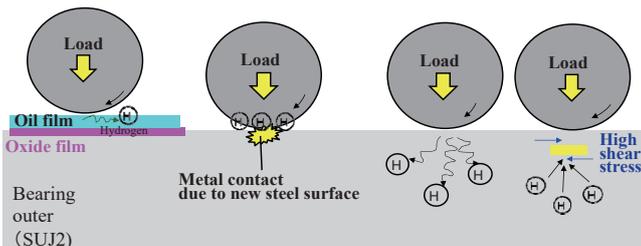


Fig. 3 Mechanism causing hydrogen embrittlement flaking

このメカニズムに従って，以下の検証試験を実施した。

- 水素侵入量に対する感度把握試験。
- CVTユニットを用いたベアリングの油膜厚さ測定試験。
- 車両停止時間中に放出される水素量確認試験。

3. 検証試験方法

3.1 水素侵入量に対する感度把握試験。

2章で述べたメカニズムを考慮し，ユニット環境での条件で水素侵入量がどのような感度を示すかを，ベアリング単体試験とユニット試験で確認した。

ベアリング単体試験機をFig. 4に示す。ラジアル荷重，油温，回転数を影響因子として感度試験を行い，試験終了後のベアリング内部への水素侵入量を調査した。

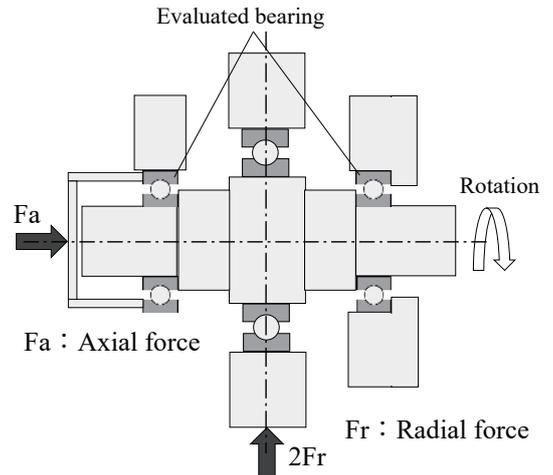


Fig. 4 Schematic of bearing unit test equipment

またトルクおよび回転数の入力変化に着目し，CVTユニットを用いて，発進停止パターンおよび入力を一定にしたコンスタント条件 (start-stop or constant loading) で入力の違いによる水素侵入量の調査を行った。

それらの具体的な条件をTable 1に示す。

Table 1 Test conditions

	Influential factor	Radial load	Oil temperature	Input speed	Start-stop or constant loading
1	Radial load	2 conditions (medium and large)	High	High	Constant
2	Temperature	Large	2 conditions (medium and high)	High	Constant
3	Temperature	Large	High	3 conditions (small, medium, high)	Constant
4	Start-stop or constant loading	Medium	High	-	2 conditions (start-stop test pattern of triangular wave form)

Lubricant: CVTF (NS-3)

3.2 CVT ユニットを用いたベアリングの油膜厚さ測定試験

油膜厚さ測定手法は光学的手法，電気的手法，超音波を
持った手法，物質を透過するX線や中性子線の性質を用い
た手法などの様々な手法がある．CVTユニットにて油膜
厚さ測定を行うためには，周辺部品の変更を最小限にする
こと，また耐久試験ができる試験設備内に計測設備が設置
できることが必要条件である．そのため今回はブリッジ回
路を用いた電気抵抗法を用いた，電気抵抗法の計測システ
ムをFig. 5に示す．ベアリング内外輪の転走面以外の部位
にセラミックコーティングを施し絶縁，ボールが転走面に
油膜を介して転がり運動している状態では，回路では抵
抗値無限大となり電流が流れない．反対にボールが転走面
と直接金属接触している場合は回路に電流が流れる．こ
のような計測システムをCVTユニットに組み込み電圧の
変化によってボールと転走面の接触状態を判別できるよ
うなシステムを開発した．

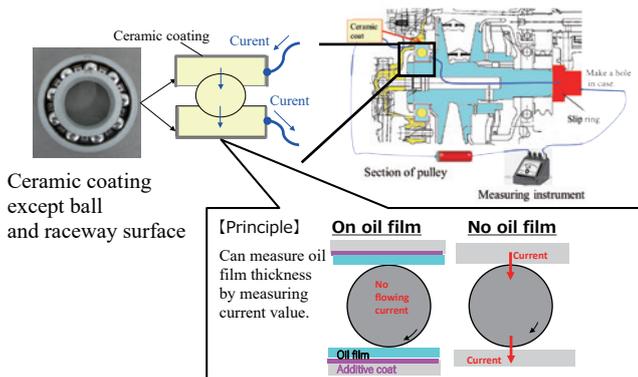


Fig. 5 Test method for measuring oil film

Fig. 6に電圧を読み取るブリッジ回路図を示す．この回
路の合成抵抗Rは

$$R=R1+(R2 \times Rx \div (R2+Rx)) \quad (1)$$

となる．この回路図の抵抗Rxはボールと外輪転走面間の
抵抗値である．ボールと外輪間の油膜が切れ，金属接触す
る場合， $Rx=0\Omega$ になる．すると回路の電圧計の電圧は式(1)
より， $V=I \times 0$ となり，電圧計の値は0Vを示す．

ボールと外輪間に油膜ができ金属同士の直接接触がなく
なると絶縁されるため，式(1)より合成抵抗 $R=\infty\Omega$ となる．
すると電圧計の値は， $V=I \times \infty$ となり式上では ∞ になるが，
回路の電源電圧が1Vであるため，電圧計の値は1Vを示す．

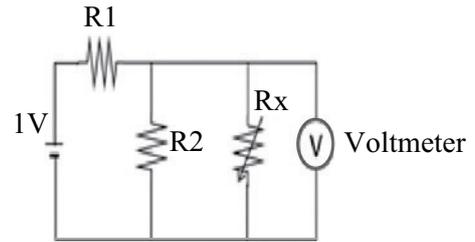


Fig. 6 Circuit for measuring oil film

なお測定条件は複合加速耐久試験の中から，全開発進条
件を抜き出して，油温2水準で実施した．以下のTable 2に
試験条件を示す．

Table 2 Test condition for measuring oil film thickness

	Oil temperature	Input torque	Input speed	Primary pressure	Secondary pressure
Combined durability test conditions (Full acceleration start)	2 conditions (medium and high)	High	~medium	~medium	~high

3.3 車両停止時間中に放出される水素量確認試験

陰極電解水素チャージ試験にて， $25\text{mA}/\text{cm}^2$ で120
分間チャージした．その後，車両停止時を模擬して，
ガスクロマトグラフィ分析を高油温等温保持条件で
水素放出速度と水素放出量を測定した (Fig. 7)．

Conditions

Solvent : 3%NaCl, 0.3%NH₄SCN

Time : 120min,

Input : $25\text{mA}/\text{cm}^2$

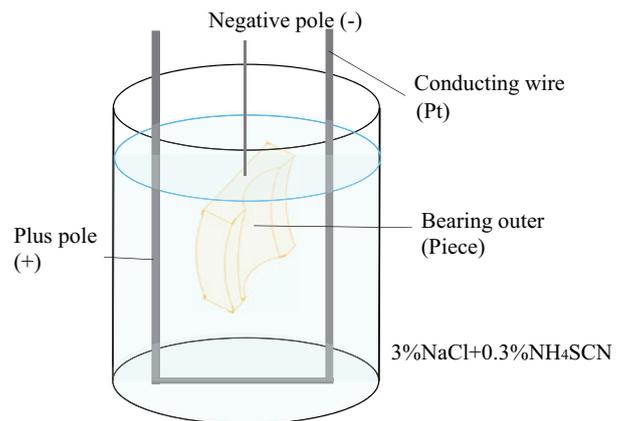


Fig. 7 Test for charging hydrogen

4. 試験結果

4.1 水素侵入量に対する感度把握試験結果

試験結果をFig. 8に示す。

- 水素侵入量と荷重，油温については正の相関，回転速度については負の相関が見られた。
- 異なる入力条件でのCVTユニットを用いた試験では，入力を一定にしたコンスタント条件よりも発進停止を繰り返す入力の方が水素侵入量は多くなった。

それぞれ感度がある中でも荷重，油温，発進停止パターンが水素侵入量の影響が大きい結果となった。

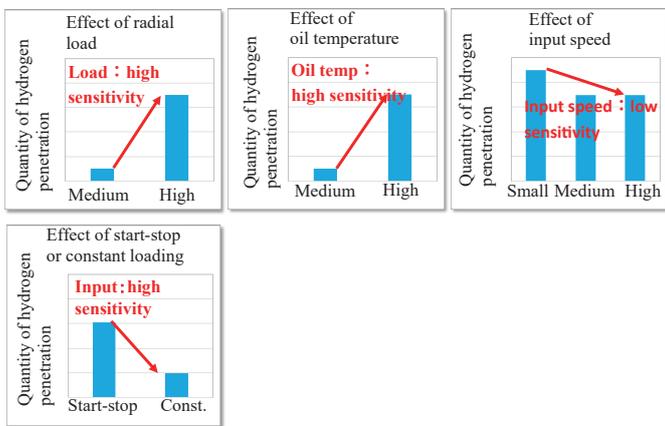


Fig. 8 Sensibility of hydrogen penetration for bearing

4.2 CVT ユニットを用いた油膜厚さ測定試験結果

CVTユニットを用いたベアリングの油膜厚さ測定試験の結果をFig. 9, 10に示す。ここで各影響因子であるプライマリ油圧，プライマリトルク，プライマリ回転数の入力上昇前をa区間，入力上昇中をb区間，入力上昇後の安定区間をc区間とする。

- 停止時であるa区間では，油温にかかわらず電圧が0Vを示しており，ボール～転走面間には油膜が形成されていない状態を示している。
- 通常油温の場合，b区間前半において，電圧値は0～0.6V付近を示しており，断続的に油膜形成がなされていることを示している。またc区間において電圧値が1V付近に計測され油膜が形成されていることがわかる。
- 高油温の場合，b区間前半において，0Vを示しており油膜形成はなされていないことを示している。その後のc区間で電圧値が1V付近を示しており，通常油温の場合と同様に油膜形成がなされている。

以上より，発進直前までのa区間では油温にかかわらず油膜形成がされていない。b区間では油温が高い条件では油膜が形成されないが，油温が低い通常条件では断続的に油膜形成がされている。c区間では油温にかかわらず油膜形成がされている結果となった。よって，油温の違いにより各影響因子の入力上昇中のb区間前半にて油膜形成の有意差が認められた。

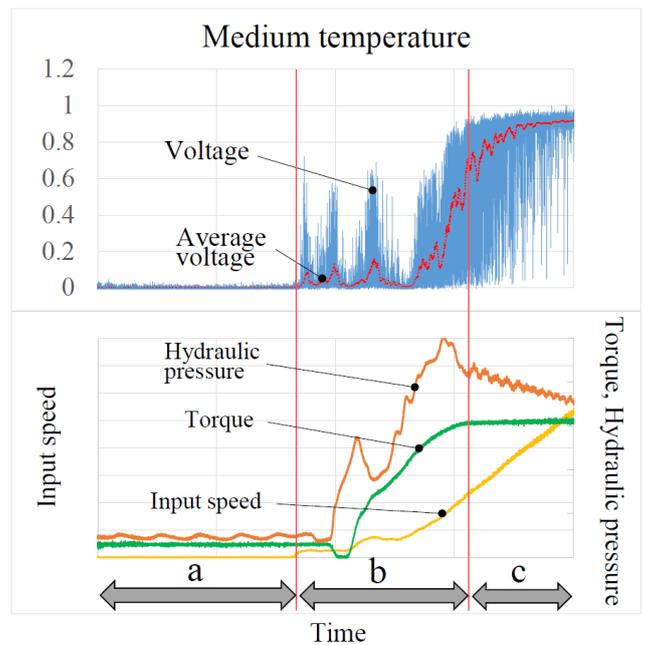


Fig. 9 Measured oil film thickness (medium temperature)

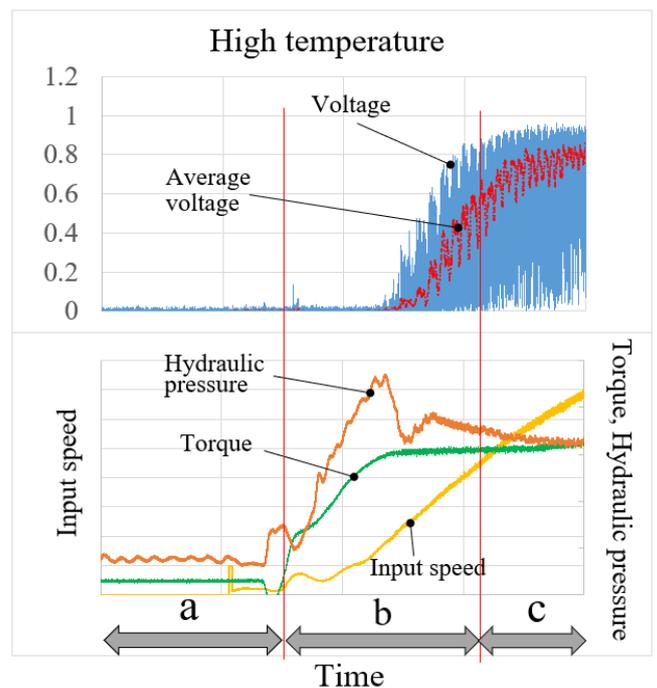


Fig. 10 Measured oil film thickness (high temperature)

4.3 車両停止時間中に放出される水素量確認試験結果

陰極電解チャージ試験にて水素をチャージし、その後車両停止時を模擬して時間を置き水素放出量を測定した。水素放出量を測定した結果をFig. 11に示す。停止時間の影響は大きく、特に60分までの間で急速に水素が放出されることがわかった。

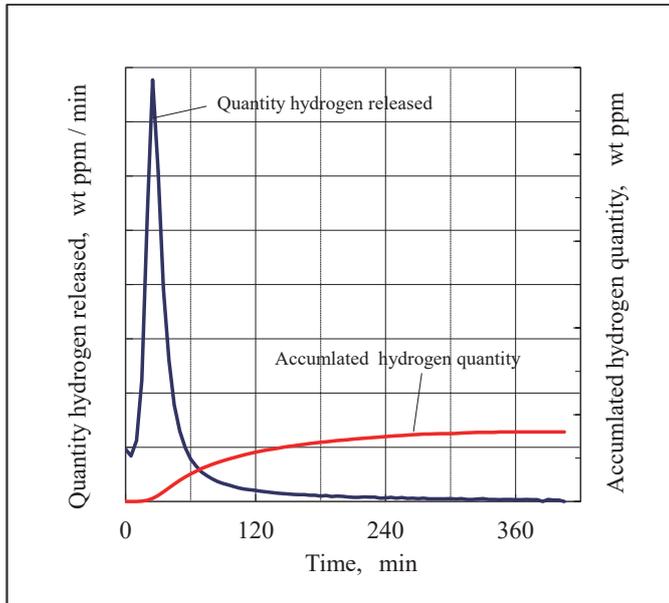


Fig. 11 Measured quantity of hydrogen released (high temperature)

5. CVT ユニットにおける水素脆性剥離メカニズム考察

CVTユニットを用いた油膜厚さ測定試験で有意差が認められたb区間前半部では、通常油温に対して高油温では油膜切れが発生している。この結果は、高油温のためオイル粘度も低くなり、発進時において油膜が切れた状態がより高い回転数まで継続したものと考えられる。水素侵入量に対する単体感度把握試験結果の油温感度大条件とも合致している。

また、CVTユニットでは、停止状態からベルトに張力がかけられているため、ベアリングにも高い荷重が入力されており、単体試験での感度から、水素が侵入しやすい状態であることがわかる。

これらのことからCVTユニットの高油温の複合加速耐久試験だけで水素脆性剥離が発生したメカニズムは、高油温のためオイル粘度も低くなり、発進時において高荷重かつ油膜が切れた状態がより高い回転数まで継続した結果、水素が侵入しやすい条件になっていたと推測される。

加えて複合加速耐久試験は、耐久時間短縮のためインターバルがなく、水素が抜けにくい状態であったことも要因と考えられ、市場の使用環境よりも水素脆性剥離が起きやすい条件がそろっていたと考えられる。

6. まとめ

ユニットの使用条件を考慮し、水素侵入に対する感度把握試験、油膜測定試験を実施した結果、ユニット環境での水素脆性剥離の発生メカニズムが明らかになり、高油温の複合加速耐久試験の連続運転でのみ発生する現象であることも説明できた。

7. 参考文献

- (1)南雲道彦：水素脆性の基礎—水素の振るまいと脆化機構，内田老鶴圃新社
- (2)田中進：ベルトCVTプーリ支持軸受，NSK Technical journal No.679 (2005)，pp.14 - 20.
- (3)藤田慎治：耐白色はく離長寿命材料，NSK Technical journal No.679 (2005)，pp.21 - 27.
- (4)磯賢一：耐白色はく離HABグリース NSK Technical journal No.679 (2005)，pp.28 - 35.
- (5)笹田直：摩耗，養賢堂
- (6)とことんやさしい水素の本，水素エネルギー協会，日刊工業新聞社
- (7)久保田浪之介：おもしろ話で理解する化学入門，日刊工業新聞社
- (8)福岡智人：忘れてしまった高校の化学を復習する本，中径出版
- (9)木野伸朗：水素脆性型早期剥離の要因解析，日本機械誌，2006,5 vol.109 No.1050.
- (10)七野勇人：歯車における白色組織を伴う歯面剥離について，KOMATSU TECHNICAL REPORT，2018 VOL.64 No.171.

- (11)日本精工 (株) 江波 翔：転がりすべり接触下における潤滑剤からの水素発生に及ぼすすべり速度と温度の影響，トライボロジー会議2022春 東京 予稿集, E20
- (12)日本精工 (株) 丸山泰石：EHD線接触における電気インピーダンス法の開発，トライボロジー会議 2022 秋 福井 予稿集, C7
- (13)丸山博之, 早川和弘, 豊原耕平, 征矢啓, 金山義輝, 佐々木克明：トランスミッションユニットにおけるベアリング水素脆性剥離発生メカニズム，2023年春季大会学術講演会講演予稿集，文献番号20235021

■ 著者 ■



丸山 博之



早川 和宏



豊原 耕平



征矢 啓



金山 義輝



佐々木 克明