

## 総 説 1

## 自動車用エンジン電装品・補機軸受のはく離について

中央技術研究所  
潤滑油研究所 工業用潤滑油グループ

ひがしね やすは  
東根 泰葉



## 1. はじめに

自動車のエンジン周辺には数多くの電装品や補機が配置されており、ベルトを介してエンジン動力が伝達され駆動される<sup>1)</sup>。電装品としては、オルタネータ、カーエアコン用電磁クラッチ、電動ファン、アイドラプリーがあり、補機としては冷却ファン用フルードカップリング、タイミングベルト用テンション、水ポンプ等がある。これらの部品に使用される軸受は全てグリス潤滑であるが、軸受の使用条件は高速化、高温化、高負荷化と過酷さを増す一方であり、さらにエンジンの振動を受ける、水がかかりやすいという悪条件も加わる。

1980年代中頃、駆動ベルトが従来のVベルトからポリVベルトに変更されベルト張力が増加したため、軸受にかかる荷重や振動も増大するなど運転条件がより苛酷になり、この頃からオルタネータ、電磁クラッチ、アイドラプリー等の軸受において計算寿命よりもはるかに短い時間ではく離が発生するというトラブルが散見されるようになった。オルタネータ軸受転送面に発生したはく離の外観を図1に、はく離発生箇所下部断面組織を図2に示す。本現象では図2に見られるように、はく離発生箇所の下部金属組織中に白色組織の生成が認められ、従来とは異なる金属組織変化を伴うという特徴がある。また、はく離が発生していない軸受においても白色組織の生成が認められることがある。

この内部組織変化を伴うはく離トラブルは使用グリスの選択によりほぼ解決されるようになったが、これまで本はく離の発生メカニズムについて様々な説が提唱されてきた。本稿ではこれまでに提唱された振動・曲げ応力説<sup>2)</sup>、振動衝撃負荷説<sup>3)</sup>、水素ぜい性説<sup>4, 5, 6)</sup>について述べるとともに、最も有力と考える水素ぜい性説に基づく当社の検討結果について紹介する。

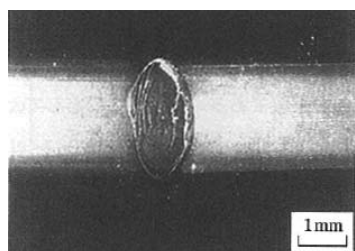


図1 軸受転送面のはく離外観写真

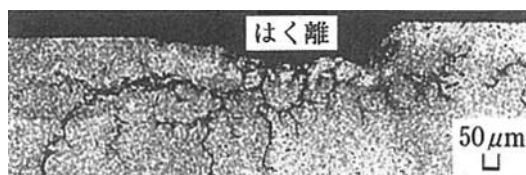


図2 はく離下部断面組織の写真

## 2. はく離発生メカニズム

2.1 振動・曲げ応力説<sup>2)</sup>

市場から回収されたオルタネータ軸受の調査結果、およびはく離寿命が長、短と異なる2種類のグリスを用いたオルタネータの急加減速試験結果をもとに振動・曲げ応力説が提唱されている。

振動・曲げ応力説とは、共振等による負荷の増加と外輪が変形することによって発生する曲げ応力との相乗作用により、本はく離が引き起こされているとする説である。疲労過程は応力の増加によって加速され、黒色組織、白色組織という組織変化を経て破損に至る内部起点型のはく離であると述べている。

本はく離において認められる黒色組織は、微細な炭化物が析出している組織であり、白色組織は炭素濃度が低下したフェライト状組織であると述べている。また両組織は通常の転がり疲労において生じるDEC (Dark Etching Constituent) やWEC (White Etching Constituent) と組成および成因は同一であるが形態は異なるとしており、形態が異なる理由は応力場の違いではないかと推定している。

またさらに本説<sup>2)</sup>では、Cirunaが唱えた「潤滑油中に水が侵入すると、軌道面の活性化した鉄そのものが触媒となって潤滑油の成分が分解され、この時に遊離するHが表面に侵入して水素ぜい性を生じるために、転がり疲れを加速する」とする点についても以下の矛盾点を指摘している。市場ではく離を発生したオルタネータ軸受や急加減速試験後のオルタネータ軸受を調査すると、内輪／転動体間の方が外輪／転動体間よりも油膜が形成されにくいにも関わらず市場ではく離発生は外輪に集中しており、この点で水素ぜい性説には矛盾があると述べている。

## 2.2 振動衝撃負荷説<sup>3)</sup>

組織変化が認められた軸受の白色組織部および周辺部について、詳細な形状観察、残留応力（外力の作用していない物体中に局部的に残留している応力）の測定、結晶格子定数の測定、炭素の濃度分布測定等を行うとともに、転がり疲労損傷の進行につれ低下する表面弾性波音速測定を行い、振動衝撃負荷説が提唱されている。

本説で推定されている発生メカニズムは以下の通りである。

高振動下での高速回転による転動体と軌道面間での衝撃的負荷によってせん断応力の局在化とそれに伴う塑性ひずみの局在化が起り、ひずみでまず転位（格子欠陥が線状に繋がったもの）の密度が増大する。次いで繰り返し負荷により転位が再配列し、セル構造（転位の網目構造）が形成され、転位の移動によって分断された炭化物は母相内へ溶け込み炭素はセル壁へ拡散していき、そこで微細炭化物として再析出する。このためセル内部では炭素濃度が低下していきフェライトに類似した構造に近づいていく。

さらに、せん断応力の繰り返し作用により動的再結晶が起こるが、微細炭化物によるピン止め効果が粒界移動が抑制され（微細炭化物がセルを囲み、粒界移動すなわち粒成長ができなくなる）、極微細な結晶粒となる。また、極微細結晶粒のため硬さは母相より高く、この硬度差のために境界部で亀裂が発生、進展する。

本説においても水素ぜい性説については、分析方法の難しさ、精度上の問題等を上げ疑問を呈している。

## 2.3 水素ぜい性説<sup>4, 5, 6)</sup>

焼入れ条件を変えた試片を作成し、転動疲労試験を行い鋼材の組織変化について調べた結果、RX ガス（一般に浸炭に用いられるガス、 $H_2$  : 20%、 $N_2$  : 40%、 $CO$  : 20%）中で加熱・焼入れ後直ちに転動疲労試験を行った場合に市場戻り品と同一の組織変化が観察され、この種の組織変化の原因としてRX ガス中加熱時に鋼に侵入した水素の影響を挙げ、さらに水の電気分解により水素を侵入させた試片を転動疲労試験し、その組織変化が再現できたことから水素ぜい性説が提唱されている。このぜい性のはく離発生メカニズムの推定を図3<sup>6)</sup>に示す。

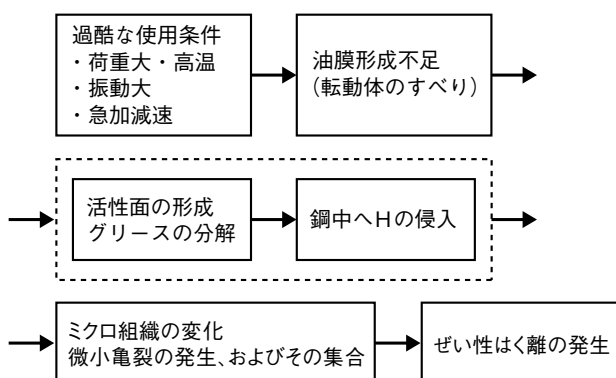


図3 ぜい性のはく離発生メカニズムの推定<sup>6)</sup>

すなわち、過大荷重、振動大、急加減速等の過酷な使用条件下では、転動面と転動体（ボール）間の滑りが多くなり、活性な新生面の生成によりトライボケミカルな反応が促進され、グリースの分解による水素の発生、水素の鋼中への侵入によるマイクロ組織の変化、亀裂の発生からぜい性のはく離に至ると推定している。

また本説<sup>5)</sup>ではぜい性のはく離の防止項目として、(1)グリースの変更、(2)軸受材料の変更、(3)負荷容量の増加が考えられるが、グリースの変更が一番効果的とも述べている。

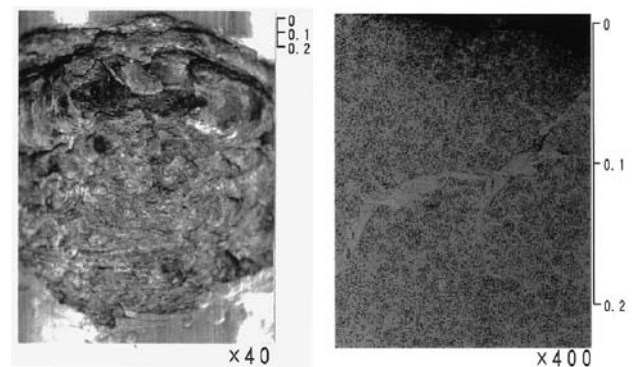
## 3. 当社の取り組み

### 3.1 はく離トラブルの再現

当社では本はく離トラブルが散見されるようになった頃、同現象の再現をエンジン台上試験により試みた。試験はエンジンに電装品や補機を搭載し急加減速運転を行うことにより実施した。図4に台上試験の外観写真を、図5にオルタネータ軸受で再現されたはく離、および下部断面組織の写真を示す。市場トラブルが再現できたことから、その後はエンジン台上試験を用いグリースの評価、開発を精力的に行ってきた。千回を超える台上試験を経て複数のはく離対策グリースが商品化され、いずれも市場トラブルなく使用されている。



図4 エンジン台上試験の外観写真



(a) はく離部分

(b) はく離下部断面組織

図5 オルタネータ軸受で再現されたはく離、および下部断面組織の写真

### 3.2 はく離トラブルに効果のある添加剤

はく離対策グリースの開発過程で明らかになったことの一つに、従来使用されていたスルホネート系のさび止め剤を亜硝酸塩系のさび止め剤に変更することにより、はく離寿命が飛躍的に伸びたという事実がある。表1<sup>7)</sup>にエンジン台上試験結果を示す。G1において、試験時間が500h経ってもはく離の発生および組織変化のいずれも無かった。一方、G2の試験2回目、G3の試験2回ともに、はく離の発生と組織変化の両方が認められた。G2の試験1回において、はく離の発生は無かったが、組織変化があった。

ここで、特開平5-263091によると、「亜硝酸塩は不動態化酸化剤として作用し、はく離寿命を延長する効果を有する」と記載されているが、同様の効果を有すると記載されているタングステン酸塩やモリブデン酸塩は亜硝酸塩、タングステン酸塩、モリブデン酸塩のいずれも不動態化酸化剤であるにも関わらずはく離寿命に大きな違いが出た。このことは、軸受転送面に不動態被膜を形成し、はく離寿命を延長するとする説に疑いが生じたことになる。そこで以下に述べる真空下での切削あるいは摺動試験を行い、なぜ亜硝酸塩がはく離寿命を延長するのか検討した。

### 3.3 真空下での切削試験または摺動試験

#### (1) 試験方法

真空下でグリースを塗布した銅の切削あるいは摺動を行って新生面を生成し、その新生面でのグリースの反応による水素の発生挙動を検討した<sup>8)</sup>。図6に摺動試験機の外観写真を、図7に切削および摺動実験に用いた装置の概略図を示す。実験容器内を $10^{-4}$ Pa程度まで真空にした後、さらに四重極型質量分析計を通して連続的に排気した。容器中央部に回転試験片と押付試験片(バイトまたはボール)を取り付け、グリースを塗布した回転試験片を所定速度で回転させ、切削および摺動実験を行った。このとき、容器内の水素と炭素数1~6の炭化水素の増減を質量分析計で検出した。なお、炭化水素については、グリースの分解により炭化水素のフラグメントも発生すると予想されるからである。実験条件を表2に示す。

供試グリースは、ジウレアを増ちょう剤に用いた合成油系ベースグリース(U0)に、亜硝酸塩の添加剤あるいはスルホン酸塩の添加剤を配合したもの(U1およびU2)である。組成を表3に示す。

表1 エンジン台上試験結果

試料名	G0		G1		G2		G3	
	No.1	No.2	No.1	No.2	No.1	No.2	No.1	No.2
試験回数								
添加剤	-		亜硝酸塩		タングステン酸塩		モリブデン酸塩	
運転時間, h	500h 打切	364h 中止	500h 打切	500h 打切	500h 打切	333h 中止	424h 中止	294h 中止
はく離発生	無し	有り	無し	無し	無し	有り	有り	有り
組織変化	有り	有り	無し	無し	有り	有り	有り	有り

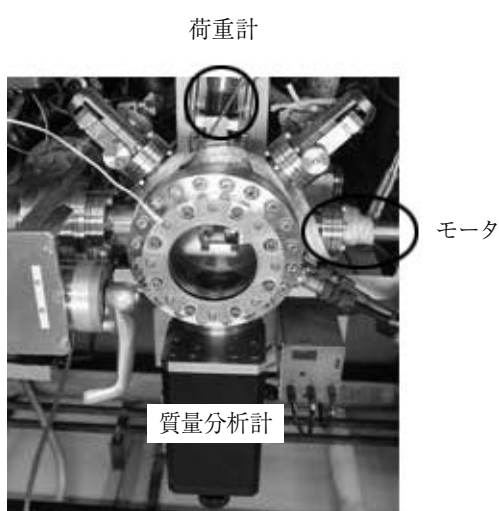


図6 摺動試験機の外観写真

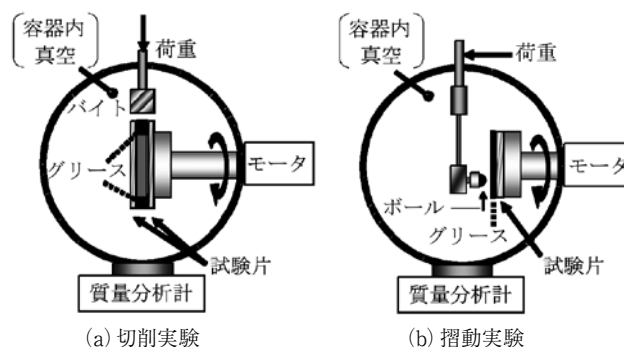


図7 実験装置の概略図

表2 実験条件

	切削	摺動
回転試験片	JIS* S45C	JIS* SUJ2
押付試験片	超硬合金 (バイト)	JIS* SUJ2 (ボール)
速度	8m/min	4m/min
押付条件	切削送り 0.01mm/rev	最大ヘルツ圧力 960MPa, 1200MPa

\* JIS: 日本工業規格

表 3 供試グリースの組成

試料名		U0	U1	U2
基油		ジアルキルジフェニルエーテル		
増ちょう剤		ジウレア		
添加剤	亜硝酸塩	-	有	-
	スルホン酸塩	-	-	有
ちょう度 (60W)		315	320	380

(2) 評価方法 (水素および炭化水素の発生量)

水素および炭化水素の発生量を以下の方法で求めた。新生面でグリースが反応し、水素が発生する場合、質量分析計で検出される水素イオン強度の変化は図 8 のようになる。そこで、水素発生開始直前および切削または摺動終了直前の水素イオン強度を、それぞれ  $H_0$  および  $H_2$  とし、 $H_2$  と  $H_0$  の差を水素発生量  $\Delta H$  と定義した。炭素数 1～6 の炭化水素についても同様の方法で発生量を求めた。

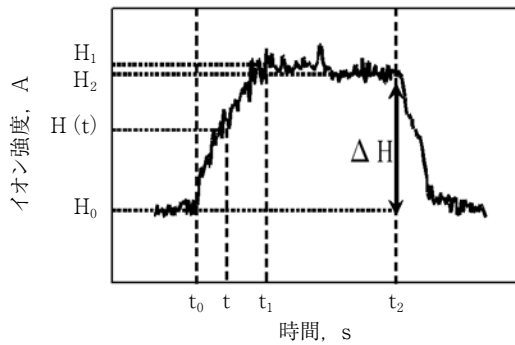


図 8 水素イオン強度の変化

(3) 結果および考察

(a) 切削実験による検討

切削実験では、切削の開始直後から水素および炭化水素の発生が認められた。それらの発生量を図 9<sup>8)</sup> に示す。水素の発生量は U0、U1、U2 にほとんど差がなかった。一方で、炭化水素の発生量については、U1 が最も小さかった。このことは、切削条件下では新生面を強制的に生成させるため、グリース成分の分解が組成に関わらず起きていることを意味する。

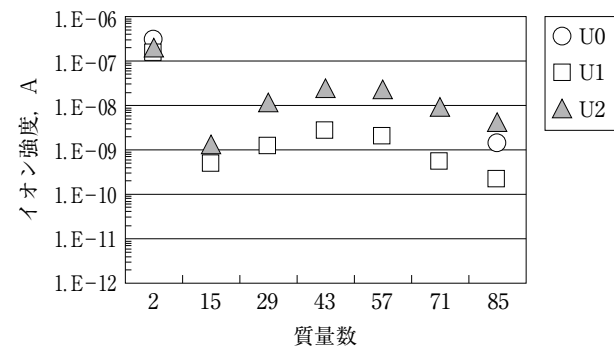


図 9 質量数における発生量 (切削実験)<sup>8)</sup>

(b) 摺動実験による検討

摺動実験の結果を図 10 に示す。最大ヘルツ圧力 960MPa の摺動実験では、U0 と U2 において水素および炭化水素の発生が認められたが、U1 では水素および炭化水素いずれも発生は認められなかった。最大ヘルツ圧力 1200MPa の摺動実験において、U0、U1、U2 ともに水素および炭化水素の発生が認められ、U1 の水素および炭化水素の発生量は U0 および U2 より少なかった。

また、切削実験での水素および炭化水素の発生量は摺動実験よりも多く、これは、切削実験の方が新生面の生成が多いためと考えられる。

亜硝酸塩を添加したグリースにおいて、摺動実験では水素および炭化水素いずれも発生量が少なかった。すなわち、亜硝酸塩はグリースの分解を抑えていることを意味する。このことから、亜硝酸塩が新生面の生成を抑制した、あるいは新生面の活性を抑制した可能性が高い。ここで、強制的に新生面が生成する切削実験においても、亜硝酸塩を添加したグリースにおける炭化水素の発生量が少なかったことから、新生面の活性を抑制した可能性がより高いと考えられる。

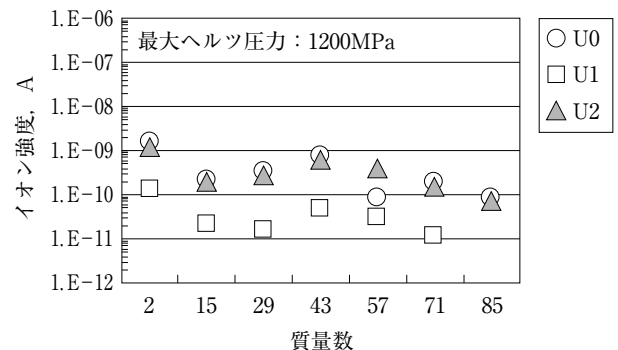
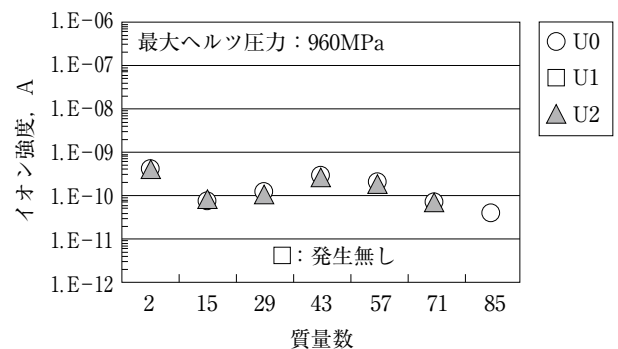


図 10 質量数における発生量 (摺動実験)

#### 4. おわりに

本稿では、自動車用エンジン電装品・補機軸受のはく離に関して総説するとともに、当社のはく離トラブルに対する再現実験、はく離対策グリースの開発、真空下での切削試験または摺動試験について言及した。

真空切削試験機の使用にあたり、ご助言とご指導を頂いた香川大学若林教授、ご協力を頂いた吉岡様、同研究室の皆様に謝意を表します。

#### － 引用文献 －

- 1) 潤滑グリースの基礎と応用, 日本トライボロジー学会グリース研究会, 2007年, p153-157
- 2) 村上保夫: NSK Technical Journal, 656, 1-14 (1993)
- 3) 柴田正道: Koyo Engineering Journal, 150, 16-21 (1996)
- 4) 玉田健治: NTN Technical Review, 61, 29-35 (1992)
- 5) 三上英信: トライボロジスト, 53, 4, 248-253 (2008)
- 6) 野崎誠一: NTN Technical Review, 61, 38 (1992)
- 7) 未公表データ
- 8) トライボロジー会議 2009 春 東京